การประชุมทางวิชาการ

มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 64

The 64th Kasetsart University Annual Conference

17-19 มีนาคม 2569 ณ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ บางเขน

"บูรณาการนวัตกรรมและสังคม: ก้าวสู่อนาคตที่ชาญฉลาดและยั่งยืน"

"Bridging Innovation and Society: Toward a Smart and Sustainable Future"

Proceedings NO. 2

SCIENCE TECHNOLOGY AND ENVIRONMENT

- สาขาวิทยาศาสตร์ (Science)
- สาขาวิทยาศาสตร์สุขภาพ (Health Sciences)
- สาขาวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ (Engineering and Architecture)
- สาขาอุตสาหกรรมเกษตร (Agro-Industry)
- สาขาทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม (Natural Resources and Environment)

เรื่องเต็มการประชุมทางวิชาการมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 64

The Proceedings of the 64th Kasetsart University Annual Conference

17-19 มีนาคม 2569 (March 17-19, 2026)

เล่มที่ 2

สาขาวิทยาศาสตร์

(Subject: Science)

สาขาวิทยาศาสตร์สุขภาพ

(Subject: Health Sciences)

สาขาวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์

(Subject: Engineering and Architecture)

สาขาอุตสาหกรรมเกษตร

(Subject: Agro-Industry)

สาขาทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม

(Subject: Natural Resources and Environment)

จัดโดย (Organized by)

มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ (Kasetsart University)

ร่วมกับ (in cooperation with)

กระทรวงการอุดมศึกษา วิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม

(Ministry of Education, Science, Research and Innovation)

กระทรวงเกษตรและสหกรณ์ (Ministry of Agriculture and Cooperatives)

กระทรวงศึกษาธิการ (Ministry of Education)

กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม (Ministry of Natural Resource and Environment)

กระทรวงดิจิทัลเพื่อเศรษฐกิจและสังคม (Ministry of Digital Economy and Society)

สำนักงานคณะกรรมการส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม

(Thailand Science Research and Innovation)

สำนักงานการวิจัยแห่งชาติ (National Research Council of Thailand)

เครือข่ายวิจัยประชาชื่น (Prachacheun Research Network)

เรื่องเต็มการประชุมทางวิชาการมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 64

The Proceedings of the 64th Kasetsart University Annual Conference

17-19 มีนาคม 2569 (March 17-19, 2026)

เล่ม 2

จัดโดย

มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

พิมพ์ครั้งที่ 1 **เดือน พฤษภาคม** 2569

จัดทำโดย

สถาบันวิจัยและพัฒนาแห่งมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ลิขสิทธิ์เป็นของ

สถาบันวิจัยและพัฒนาแห่งมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

50 ถนนงามวงศ์วาน แขวงลาดยาว เขตจตุจักร กรุงเทพฯ 10900

โทรศัพท์ 02-579-5548

คำนำ

มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ได้จัดการประชุมวิชาการอย่างต่อเนื่องเป็นประจำทุกปี โดยร่วมกับกระทรวงการอุดมศึกษา วิทยาศาสตร์ วิจัย และนวัตกรรม กระทรวงเกษตรและสหกรณ์ กระทรวงศึกษาธิการ กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม กระทรวงดิจิทัลเพื่อเศรษฐกิจและสังคม สำนักงานคณะกรรมการส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม สำนักงานการวิจัยแห่งชาติ และเครือข่ายวิจัย “ประชาชื่น” รวมถึงสมาคมวิชาชีพต่างๆ จัดให้มีการประชุมทางวิชาการ ครั้งที่ 64 ระหว่างวันที่ 17-19 มีนาคม พ.ศ. 2569 ภายใต้หัวข้อ “บูรณาการนวัตกรรมและสังคม: ก้าวสู่อนาคตที่ชาญฉลาดและยั่งยืน (Bridging Innovation and Society: Toward a Smart and Sustainable Future)” เพื่อมุ่งส่งเสริมให้นักวิชาการและคณาจารย์จากสาขาต่างๆ นำเสนอผลงานวิจัย แลกเปลี่ยนความคิดเห็น ประสบการณ์ และความชำนาญ ระหว่างนักวิชาการ คณาอาจารย์ของภาครัฐและภาคเอกชน ซึ่งจะนำไปสู่ความร่วมมือทางการวิจัยและยังเปิดโอกาสให้นิสิต นักศึกษา ได้แสดงผลงานทางวิชาการ โดยความรู้และวิทยาการใหม่ๆ ดังกล่าว ยังได้ถ่ายทอด เผยแพร่สู่สาธารณชน อันจะนำมาซึ่งความกินดี อยู่ดี และการพัฒนาประเทศอย่างยั่งยืน

การนำเสนอผลงานวิชาการประกอบด้วยภาคบรรยายจำนวน จำนวน 119 เรื่อง และภาคโปสเตอร์จำนวน 58 เรื่อง รวม 177 เรื่อง แบ่งออกเป็น 13 สาขา ได้แก่ สาขาพืช สาขาสัตว์ สาขาสัตวแพทยศาสตร์ สาขาประมง สาขาส่งเสริมการเกษตรและคหกรรมศาสตร์ สาขาวิทยาศาสตร์ สาขาวิทยาศาสตร์สุขภาพ สาขาวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ สาขาอุตสาหกรรมเกษตร สาขาทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม สาขาศึกษาศาสตร์ สาขาเศรษฐศาสตร์และบริหารธุรกิจ สาขามนุษยศาสตร์และสังคมศาสตร์ โดยได้รับการพิจารณาให้ตีพิมพ์ผลงานวิจัยเรื่องเต็มใน E-Proceedings จำนวน 158 เรื่อง

เอกสารฉบับนี้เป็นการรวบรวมผลงานวิจัยเรื่องเต็ม ภาษาไทยและภาษาอังกฤษ ทั้งภาคบรรยายและภาคโปสเตอร์ เล่มที่ 2 ประกอบด้วย **สาขาวิทยาศาสตร์** จำนวน 16 เรื่อง **สาขาวิทยาศาสตร์สุขภาพ** จำนวน 9 เรื่อง **สาขาวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์** จำนวน 43 เรื่อง **สาขาอุตสาหกรรมเกษตร** จำนวน 8 เรื่อง และ**สาขาทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม** จำนวน 13 เรื่อง ซึ่งได้ผ่านการคัดเลือกจากคณะกรรมการผู้ทรงคุณวุฒิประจำสาขา

ในนามของคณะกรรมการดำเนินงานจัดการประชุมทางวิชาการ ครั้งที่ 64 ขอขอบคุณ คณาจารย์นักวิจัย นักวิชาการ และนิสิต นักศึกษา ที่ได้ร่วมนำเสนอผลงานวิจัย และผู้ที่สนใจเข้าร่วมการประชุมทางวิชาการในครั้งนี้ ขอขอบคุณคณะกรรมการทุกฝ่ายที่สละเวลา แรงกาย แรงใจและความคิด ร่วมมือกันจัดเตรียมการประชุม จนทำให้การประชุมทางวิชาการครั้งนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

(ดร.ดำรงค์ ศรีพระราม)
รักษาการแทนอธิการบดีมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
ประธานคณะกรรมการอำนวยการจัดการประชุมทางวิชาการ
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 64

ความสมบูรณ์ของการเสนอผลงาน
ในการประชุมทางวิชาการ
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 64
ประกอบด้วย หนังสือรับรองการมาเสนอผลงาน
และการได้ตีพิมพ์ลงในเอกสารบทคัดย่อ

สถาบันวิจัยและพัฒนาแห่งมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

E-mail: kuannualconf@gmail.com

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

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

สารบัญ

สาขาวิทยาศาสตร์ (Oral Presentation)

ลำดับ	รหัสผลงาน	ชื่อผลงาน	หน้า
1	102	การดัดแปรสภาพอากาศเพื่อบรรเทาความรุนแรงการตกของฝนด้วยเทคนิคการโจมตีเมฆเย็น ฉันติ เดชโยธิน, ทักษยา ไรวตากุล, อริสรา นาคบุรี, พฤกษ์ ไพรพนาพงศ์, วิศรุต จิ้นสุริวงษ์, พุฒิพงศ์ สุชาติพงศ์	2

สาขาวิทยาศาสตร์สุขภาพ (Oral Presentation)

ลำดับ	รหัสผลงาน	ชื่อผลงาน	หน้า
1	39	Evaluation of the CarrierMax™ SMN1/SMN2 reagent kit for spinal muscular atrophy carrier screening Kunvara Orachon, Watcharapa Jaranasaksakul, Preyaporn Onsod, Teerapong Siriboonpiputtana, Budsaba Rerkamnuaychoke, Takol Chareonsirisuthigul	11
2	66	Machine–learning prediction of antimicrobial peptides active against *Klebsiella pneumoniae* using physicochemical descriptors and ensemble classification Sievlong Roeub, Sakawrat Kanthawong, Tarapong Srisongkram	17
3	84	Perceived benefits and risks of egg consumption across demographic groups Pavaree Krityakianrana	25
4	85	Embedded arrhythmia pattern detection using public ECG datasets Sirawish Akkawattananukul, Wasitpol Akkawattananukul, Nattawat Phisitthaweekul, Parnpavit Nilgianskul	38

ลำดับ	รหัสผลงาน	ชื่อผลงาน	หน้า
5	113	The effect of hemolysis level on clot-based assays using photo-optical detection Bunyathida Suwannalao, Karan Paisooksantivatana, Narin Khongjaroensakun, Pawadee Chinudomwong, Ekawat Pasomsub	46
6	149	How does the consumption of different types of sugar impact stress and acne in teenagers? Celila Sinacharoen, Pimpitcha Eungpakornkaew, Teerawat Nitichaikulvattana	53

สาขาวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ (Oral Presentation)

ลำดับ	รหัสผลงาน	ชื่อผลงาน	หน้า
1	193	การศึกษาเชิงทดลองพฤติกรรมการจุดติดไฟแบบ Auto-ignition ของสายไฟเมื่อใช้กับรถยนต์ไฟฟ้า วรเชษฐ์ ท่าหิน, เอกไท วิโรจน์สกุลชัย	62
2	218	การขึ้นรูปกล่องสี่เหลี่ยมเหล็กกล้าไร้สนิมโดยใช้แม่พิมพ์ลากขึ้นรูปลึกแบบสองขั้นตอน เชษฐ อุทธิยัง, วินัย อินทนนท์	71
3	51	การนำน้ำกลับมาใช้ใหม่ในกระบวนการแลกเปลี่ยนความร้อนกับระบบทำความเย็นที่ใช้แอมโมเนียในโรงงานผลิตไอศครีม อดิศักดิ์ คำพะทิก, จารุวรรณ เกษมทรัพย์	78
4	58	ปัจจัยที่ส่งเสริมพฤติกรรมการจัดการขยะผ่านการเรียนรู้จากกิจกรรมส่งเสริมสิ่งแวดล้อมด้วยการเพิ่มขอบเขตของทฤษฎีการวางแผนพฤติกรรมผ่านแบบสอบถามก่อน-หลังและการปล่อยก๊าซเรือนกระจก หนึ่งฟ้า ช้อนนาค, ทักษิณา โพธิ์ใหญ่, ณัฐพล ลื้อบาย	85
5	104	ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างออกซิเจนละลายน้ำกับปริมาณคลอโรฟิลล์-เอ ของอ่างเก็บน้ำบางพระ จังหวัดชลบุรี ชัชชนก พิมพ์สัมฤทธิ์, สรวิศ สุภาเวชย์, อนุเผ่า อบแพทย์	96

ลำดับ	รหัสผลงาน	ชื่อผลงาน	หน้า
6	156	มูลค่าผลกระทบทางการเกษตรที่เกิดจากการปนเปื้อนสารหนูในแม่น้ำกก กิตติพันธ์ ศิรโรจนานนท์, ศุภวุฒิ มาลัยกฤษณะชลี, อนุเผ่า อบแพทย์	105
7	164	การประยุกต์ใช้ข้อมูลพยากรณ์อากาศเชิงตัวเลขเพื่อการพยากรณ์ปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำห้วยแร้ง จังหวัดตราด เกวลี วัฒนรุ่งเรือง, ดนย์ปภพ มะณี	112
8	171	การเปลี่ยนแปลงแนวชายฝั่งบริเวณท้ายกำแพงกันคลื่นจากการวิเคราะห์ DSAS: กรณีศึกษาหาดทรายแก้ว-บ้านบ่ออิฐ จังหวัดสงขลา สตรีรัตน์ ปานเจริญ, สมปรารถนา ฤทธิ์พริ้ง	122
9	172	การบริหารจัดการน้ำโครงการพัฒนาลุ่มน้ำคลองวังโตนด จังหวัดจันทบุรี ณัฏฐนันท์ พูลสวัสดิ์, จิระวัฒน์ กณะสุต, ดนย์ปภพ มะณี	131
10	187	การศึกษาการเคลื่อนตัวน้ำหลากของแม่น้ำเลย อัจฉริยา ไชยชาติ, จิระวัฒน์ กณะสุต, นภาพร เปี่ยมสง่า	141
11	188	ความเสี่ยงต่อการเกิดน้ำท่วมตามเส้นทางหลวง:การผสมผสานระหว่างดัชนีความเสี่ยงน้ำท่วมและการถดถอยแบบป่าสุ่ม กมลทัต พิณธารทอง, อนุเผ่า อบแพทย์, สรวิศ ศุภเวชย์	148
12	96	การคาดการณ์การเปลี่ยนแปลงการใช้ที่ดินในลุ่มน้ำปิงตอนบนด้วยแบบจำลอง CA-Markov นพรัตน์ ธรรมรัตน์, วิษุวัฒก์ แต้สมบัติ	156
13	105	การวิเคราะห์ปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพการควบคุมคุณภาพงานปรับปรุงถนนในเขตพื้นที่ป่าอนุรักษ์ สิทธิกร จันทร์หนู, ชวเลข วณิชเวทิน, พิพัฒน์ สอนวงษ์	165
14	114	พฤติกรรมการรับแรงดัดของคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่เกิดสนิมภายใต้การเสริมกำลังด้วยวัสดุคอมโพสิตเสริมเส้นใยคาร์บอน CFRP โดยวิธีการบากร่อง โชพงศ์ สถาพร, ปิยะ โชติกไกร	173

ลำดับ	รหัสผลงาน	ชื่อผลงาน	หน้า
15	115	การประเมินความเหมาะสมของแบบจำลองดินในการวิเคราะห์การทรุดตัวของดินหลายประเภท เธียรธัช อินทร์พลอย, สุสิทธิ์ ฉายประกายแก้ว, ศุภกิจ นนทนานันท์, สุธาสินี อินตุ้ย	183
16	116	VR สำหรับการตรวจสอบงานก่อสร้างอาคารสำนักงาน กฤษกร วัฒนกุล, ชวเลข วณิชเวทิน, พิพัฒน์ สอนวงษ์, ฆนิศา รุ่งแจ้ง	191
17	131	การเพิ่มประสิทธิภาพการติดกาว CFRP บนคานคอนกรีตด้วย EBROG: ผลกระทบจากความแข็งแรงของคอนกรีตและพารามิเตอร์การเสริมกำลัง ภาวิต พูนทา, ปิยะ โชติกไกร	200
18	174	การเพิ่มความแม่นยำในการพยากรณ์ดินถล่มบนถนนหลวงในจังหวัดเชียงใหม่และยะลา ด้วยการบูรณาการข้อมูล PS-InSAR เข้ากับแบบจำลอง Random Forest อภิสิทธิ์ ผลชอบ, อนุเผ่า อบแพทย์, สรวิช สุภเวชย์	209
19	179	การศึกษาการทรุดตัวของแผ่นดนในกรุงเทพฯ ด้วยเทคนิค PSI และการเติมข้อมูลน้ำบาดาลผ่าน Machine Learning: การวิเคราะห์พลวัตการทรุดตัวและการจัดการน้ำบาดาล ศรุตา เมย์เยอร์, อนุเผ่า อบแพทย์, สรวิศ สุภเวชย์	219
20	182	หลักเกณฑ์การแบ่งงวดงานก่อสร้างงานเขื่อนป้องกันตลิ่งกรมโยธาธิการและผังเมือง วรปรัชญ์ เป็งวงศ์, วันชัย ยอดสุดใจ	227
21	206	แบบจำลองความเป็นจริงเสมือน (VR) สำหรับการอบรมผู้ตรวจสอบสภาพโครงสร้างประตูระบายน้ำ ตามมาตรฐานการตรวจสภาพเขื่อนระบายน้ำและประตูระบายน้ำ ณน่าน สอนพรหม, ฆนิศา รุ่งแจ้ง, พงษ์ศักดิ์ สุริยวนากุล	236
22	41	การหาอัตราการปลดปล่อยความร้อนของวัสดุพลาสติกด้วยเครื่องเธอร์โมไพล์โคนแคลอริมิเตอร์ เอกชัย วิทยาผล, ณัฐศักดิ์ บุญมี	244

ลำดับ	รหัสผลงาน	ชื่อผลงาน	หน้า
23	78	ผลของเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทนที่มีต่อสมบัติเชิงกลและสมบัติทางความร้อนของพอลิเมอร์ผสมเพทรีไซเคิล/ไนลอน 6 รีไซเคิล เขมพิชา พิขุนทด, อำนวย ลาภเกษมสุข	255
24	80	สมบัติเชิงกลและความร้อนของพอลิเมอร์คอมโพสิตพอลิแลกติกแอซิด/พอลิคีโตน/เบนโทไนต์ ธิดาวรรณ สิทธิมาตร, อำนวย ลาภเกษมสุข	264
25	94	การปรับปรุงพื้นผิวของพอลิเอทิลีนมวลโมเลกุลสูงพิเศษด้วยการเคลือบกราฟีนนาโนเพลตเลตร่วมกับการแช่กรดโครมิกและการฉายรังสีอิเล็กตรอนบีมเพื่อศึกษาสมบัติต้านทานการสึกหรอและสมบัติเชิงกล ธิติสรณ์ เอนกรัตน์มนตรี, ดุลยพงศ์ วงศ์แสวง, เกวลี นิลกำแหง	272
26	109	สมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตรีไซเคิลและพอลิคีโตน พิชญาภัทร สระพิมาย, อำนวย ลาภเกษมสุข	281
27	110	การศึกษาสมบัติทางกายภาพและสมบัติทางกลของการเติมพลวงต่อโลหะผสมบิสมัท-ดีบุก กรกนก ชัยมงคล, ธเนศ ณ วิเชียร, สุวิน สมภพศาสน์, วราฤทธิ์ เติมพรมราช, ภาสวร ศิลากร, นเร ผิวนิ่ม, ราชธีร์ เตชไพศาลเจริญกิจ	289
28	121	Comparative Thermal Analysis of Combinations of Drill Bit Material (ZrO_2 vs 316L Stainless Steel) and Irrigation Regime (Dry vs Irrigated) of Artificial Bone during Drilling Mathilde Soto, Pakanun Wattanasinbumrung, Phanindra Addepalli, Worapong Sawangsri	299
29	190	ผลกระทบขององค์ประกอบทางเคมีของโลหะผสมในช่วง Hypoeutectic, Eutectic และ Hypereutectic ของโลหะผสมบิสมัท-ดีบุก-พลวง ต่อสมบัติทางกายภาพและสมบัติทางกล อัญชลี จักรแสง, ธเนศ ณ วิเชียร, สุวิน สมภพศาสน์, วราฤทธิ์ เติมพรมราช, ภาสวร ศิลากร, นเร ผิวนิ่ม, ราชธีร์ เตชไพศาลเจริญกิจ	307

ลำดับ	รหัสผลงาน	ชื่อผลงาน	หน้า
30	191	การศึกษาผลของโลหะผสมไบนารี Bi–Sn ต่อสมบัติทางกายภาพและสมบัติเชิงกลของโลหะผสม ณัฐฐา จรหนู, ธเนศ ณ วิเชียร, สุวิน สมภพศาสน์, วราฤทธิ์ เติมพรมราช, ภาสวร ศิลากร, นเร ผิวนิ่ม, ราชธีร์ เตชไพศาลเจริญกิจ	318
31	38	การวิเคราะห์การสั่นสะเทือนของเครื่องจักรหมุนโดยกล้องขยายการเคลื่อนไหว กฤษณ์ พัวไพโรจน์, วิทิต ฉัตรรัตนกุลชัย, พัทธ์ธีรา พัวไพโรจน์, พัชร์พิชา พัวไพโรจน์	328
32	162	การศึกษาอนุภาคของน้ำมันไฮดรอลิก EO10W, ISO VG 46, ISO VG 68 ที่ใช้แล้ว ชนากรณ์ ลครทิพย์, ทรงศิลป์ พบบ่อเงิน, พยุงศักดิ์ บุตรตุ้ม, โชคชัย น้อยเจริญ, คมสันต์ งามขำ, จีรัฐติกุล กล้าหาญ	338
33	81	Optimizing Dielectric Liquid Viscosity for Enhanced Thermal Management of Vertical Components in Single-Phase Immersion Cooling Teerapat Thungthong, Sudarat Srichan, Weerachai Chaiworapuek	346
34	183	Impact of Flow Rate on Wall Shear Stress Distribution in an Idealized Arteriovenous Fistula Xiana Derguy, Jet-Tawee Pukrushpan, Vasit Sirilapanan	355
35	95	การพัฒนาหลักสูตรวิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาวิชาสถาปัตยกรรม (หลักสูตรปรับปรุง พ.ศ. 2569) คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ เพื่อส่งเสริมการสร้างสรรค์นวัตกรรมอาคารเขียว: การศึกษาผู้ใช้บัณฑิต นวลวรรณ ทวยเจริญ, ธนภณ พันธเสน, ปารเมศ กำแหงฤทธิรงค์, สุภาพร แก้วกอ เลี่ยวไพโรจน์, ชนิกานต์ ยิ้มประยูร, ศิรเดช สุริต, กันติทัต ทับสุวรรณ, ภัทรนันท์ ทักขนนท์	363

ลำดับ	รหัสผลงาน	ชื่อผลงาน	หน้า
36	97	การพัฒนาหลักสูตรวิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาวิชาสถาปัตยกรรม (หลักสูตรปรับปรุง พ.ศ. 2569) คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ เพื่อส่งเสริมการสร้างสรรค์นวัตกรรมอาคารเขียว: การศึกษานิสิตปัจจุบันและนักเรียนมัธยมตอนปลาย นวลวรรณ ทวยเจริญ, ธนภณ พันธเสน, ปารเมศ กำแหงฤทธิรงค์, สุภาพร แก้วกอ เลี่ยวไพโรจน์, ชนิกานต์ ยิ้มประยูร, ศิรเดช สุริต, กันติทัต ทับสุวรรณ, ภัทรนันท์ ทักขนนท์	371
37	223	ผลกระทบของระดับแรงดึงและรูปแบบช่วงเสาลอยต่อพฤติกรรมการรับน้ำหนักของคานไม้ขึงแบบซ่อนเคเบิลล่าง ชวาน พรรณดวงเนตร, ปัญกิจ แก้วเหล็ก	379

สาขาอุตสาหกรรมเกษตร (Oral Presentation)

ลำดับ	รหัสผลงาน	ชื่อผลงาน	หน้า
1	117	การศึกษาเปรียบเทียบเทคนิคการทำแห้งด้วยลมร้อนและการทำแห้งด้วยคลื่นวิทยุต่อคุณภาพและโครงสร้างจุลภาคของผงไข่ผำ ชนิตดา ปราบพาล, อรัญญา พรหมกูล, อาภัสสร ศิริจริยวัตร	386
2	160	Determination of flavor detection and recognition thresholds for tannic acid in water among young adult Thai assessors Achiraya Boonyakiat, Panwisa Roopkai, Pantitra Rattana, Yaowapa Lorjaroenphon	394
3	165	Development of pumpkin-enriched gluten-free vegan pasta Kitiya Yadav, Kittipong Suksawadi, Natthawan Kanisthakont, Yaowapa Lorjaroenphon	402
4	185	การศึกษาความต้องการนวัตกรรมการบริการเพื่อออกแบบธุรกิจรับส่งแก่ผู้สูงอายุ อิงครัต แจ้งชัด, อัจฉรา เกษสุวรรณ, อริสรา ทองเพ็ชร์	410

สาขาทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม (Oral Presentation)

ลำดับ	รหัสผลงาน	ชื่อผลงาน	หน้า
1	74	การพัฒนาระบบฐานข้อมูลรายงานการกระทำผิดในเขตพื้นที่อนุรักษ์ภายใต้สังกัดส่วนอนุรักษ์สัตว์ป่า สำนักบริหารพื้นที่อนุรักษ์ที่ 16 (เชียงใหม่) ชลภัส โตโสภณ, ชาคริต ณ ตะกั่วทุ่ง, ปิยวัตน์ ดิลกสัมพันธ์	419
2	208	แบบจำลองสามมิติตอไม้ตะเคียนทองด้วยเครื่องสแกนเลเซอร์ภาคพื้นดิน กรณีศึกษาตอไม้ตะเคียนทองที่มีความเอนเอียง พูพอน และโพรง บริเวณแยกรีคอฟ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ สรัล จันคำเรือง, ธีระพงษ์ ชุมแสงศรี, จิรวัฒน์ ยิ่งดี	431
3	72	การปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากการเดินทางท่องเที่ยว ณ อุทยานประวัติศาสตร์ศรีเทพ เมืองมรดกโลก จังหวัดเพชรบูรณ์ ประภัสสรา ศิลปชัย, กิ่งกนก เสาวภาวงศ์, ทิวาวรรณ ศิริเจริญ กันหา, ธนภัทร มงคลธนโชค, กมลวรรณ หงษ์ทอง, พงษ์เทพ หาญพัฒนากิจ	440
4	83	การประเมินคุณสมบัติของวัสดุคอมโพสิตใยเห็ดนางรมดำที่ผลิตจากพืชรุกรานและเปลือกส้มโอ เพื่อทดแทนบรรจุภัณฑ์โพลีสไตรีนแบบขยาย กรพร รุจิชิต, จักรพล พันธุวงศ์ภักดี, ปรียาพร เกิดฤทธิ์, นัฐวุฒิ บุญยืน	450
5	93	การพัฒนาวัสดุคอมโพสิตจากไมซีเลียมเห็ดนางรมดำ (Mycelium-Based Composite: MBC) เพื่อใช้เป็นวัสดุทางเลือกสำหรับอุตสาหกรรมบรรจุภัณฑ์ พิมนารา แซ่ชิ่น, จักรพล พันธุวงค์ภักดี, นัฐวุฒิ บุญยืน, มณฑิรา ยุติธรรม	457
6	118	ผลของปัจจัยทางอุตุนิยมวิทยาและมลพิษทางอากาศต่อ PM 2.5 ในฤดูหนาว จังหวัดสระบุรี ดวงพร รักร้อย, ปวีร์ คล่องเวสสะ, ธัญภัสสร์ ทองเย็น	466

สาขาวิทยาศาสตร์ (Poster Presentation)

ลำดับ	รหัสผลงาน	ชื่อผลงาน	หน้า
1	54	การตรวจสอบความใช้ได้ของวิธีวิเคราะห์สารป้องกันกำจัดแมลงไดคลอร์วอสในข้าวโพดหวาน น้ำ ดิน และแผ่นผ้า นพดล มะโนเย็น, จันทิมา ผลกอง, อำนาจ กะฐินเทศ, สิริพร เหลืองสุชนกุล	475
2	55	การพัฒนาและตรวจสอบความใช้ได้ของวิธีวิเคราะห์สารกำจัดวัชพืช 2, 4-ดี ในน้ำและดิน จันทิมา ผลกอง, อำนาจ กะฐินเทศ, นพดล มะโนเย็น, สิริพร เหลืองสุชนกุล	483
3	57	การส่งเสริมการเจริญเติบโตของ *Spirodela polyrhiza* ด้วยแอคติโนแบคทีเรียที่แยกจากแหนเป็ด พีรญา บุญชู, กรรณิการ์ ดวงมาลย์	493
4	65	การพัฒนาและตรวจสอบความใช้ได้ของวิธีทดสอบอะฟลาทอกซินในเมล็ดแมงลัก ฐิตาภรณ์ รัดริน, อดิศร เจตนะจิตร, รัชนี รักษ์สัตยานันท์, กนกวรรณ พลฉิม, รุจิเรข จรรโลงตระกูล	502
5	75	การพัฒนาและการทดสอบบรรจุภัณฑ์พลุวัสดุธรรมชาติที่ใช้ในการทำฝนเมฆเย็น ศิริเพ็ญ สมเรือน, ฉันติ เดชโยธิน, ศรีธรรม ดั่นประดิษฐ์, อริสรา นาคบุรี, จตุรภรณ์ ลีนานนท์	510
6	100	การศึกษาร่วมกันระหว่างห้องปฏิบัติการทดสอบของรายการทดสอบสิ่งแปลกปลอมในพริกแกงปรุงสำเร็จชนิดน้ำ สุดารัตน์ ขุนเมือง, ชาติชาย สุนทรธรรรม, ศจีรัตน์ กางกั้น	518
7	106	Natural language processing with WangchanBERTa for classifying causes of death among Thai people living with HIV Sudawadee Chitlekasakul, Sirinya Teeraananchai	525
8	107	Factors associated with advanced HIV stage among Thai people with HIV by using Random Forest Algorithm Chanya Srithawatpong, Sirinya Teeraananchai	532

ลำดับ	รหัสผลงาน	ชื่อผลงาน	หน้า
9	112	Genetic improvement of *Saccharomyces cerevisiae* and process optimization for enhanced squalene production Onanong Inthong, Sornsiri Pattanakittivorakul, Mamoru Yamada, Noppon Lertwattanasakul	479
10	122	การวิเคราะห์ดีเอ็นเอโบราณเพื่อทำให้เข้าใจต้นกำเนิดของคนไทย นันทนา ฮะไฮ้, สุพรรณนี แก้วสุทธิ, พัชรีย์ เลิศฤทธิ์, วรรณรดา สุราช	487
11	124	การศึกษาวิธีวิเคราะห์สารกำจัดแมลงไซเพอร์เมทริน ในน้ำ ดิน มะเขือเทศ และแผ่นผ้ารับสัมผัส สิริพร เหลืองสุชนกุล, สิริโชค วงศ์ศรีไพศาล, ลักษมี เดชานุรักษ์นุกูล	497
12	127	การผลิตและตรวจสอบคุณสมบัติของฟิล์มพลาสติกชีวภาพจากแป้งข้าวเจ้าที่เสริมความแข็งแรงด้วยเซลลูโลส ศิธิญาภรณ์ ลุนสำโรง, ประไพ บางเชย, ชัยยงค์ เตชะไพโรจน์, ศราวุธ ภู่ไพจิตร์กุล, ชัยวัฒน์ บรรใดเพ็ชร	506
13	157	Cloning and expression of African swine fever virus P32 and P72 recombinant proteins for diagnostic development Anna Humla, Sarthorn Porntrakulpipat, Atcha Oraintara	515
14	161	การพัฒนาและตรวจสอบความใช้ได้วิธีวิเคราะห์ไกลโฟเซตและอะมิโนเมทิลฟอสโฟนิก แอซิด (AMPA) ในน้ำและดินด้วยเทคนิคลิควิดโครมาโทกราฟี อำนาจ กะฐินเทศ, จันทิมา ผลกอง, นพดล มะโนเย็น, สิริพร เหลืองสุชนกุล, ทิตยา บุญทองโท	523
15	175	Geographical origin discrimination of Thai durian using multi-elemental profiles by ICP-MS Saowaluck Thong-in, Kiadtisak Saenboonruang, Paiboon Reunpatthanaphong, Wanwisa Sudprasert, Harinate Mungpayaban, Rewadee Meesat, Ridthee Meesat	532

สาขาวิทยาศาสตร์สุขภาพ (Poster Presentation)

ลำดับ	รหัสผลงาน	ชื่อผลงาน	หน้า
1	45	Comparative Analysis of sleep quality across skeletal Class I and Class II using the pittsburgh sleep quality index Chanistha Sirichan, Narissaporn Chaiprakit, Siripatra Patchanee	544
2	108	การประมาณและเปรียบเทียบอัตราการได้รับเข็มและกระบอกฉีดยาที่สะอาด ในกลุ่มผู้ใช้สารเสพติดด้วยวิธีฉีด มูลนิธิรักษ์ไทย ประเทศไทย ธันยพร จำปาเทศ, ปรารถนา สถิตย์วิภาวี, จุฑาธิป ศีลบุตร, พร้อมบุญ พานิชภักดิ์	554
3	152	Intracellular expression of B-Domain-Deleted factor VIII using circular mRNA in Chinese hamster ovary cells Pariyachat Wiangwiset, Pitchayapa Kaewchumpon, Patompon Wongtrakoongate, Suradej Hongeng, Pansakorn Tanratana	563

สาขาวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ (Poster Presentation)

ลำดับ	รหัสผลงาน	ชื่อผลงาน	หน้า
1	59	การพัฒนาแพลตฟอร์มระดมทุนแบบคราวด์ฟันดิงด้วยเทคโนโลยีบล็อกเชนกรณีศึกษาโครงการพลังงานสำหรับอาคารสูง สุปรีชา ทองสกุลพานิชย์, สุวรรณี อัศวกุลชัย	575
2	170	Aerodynamic optimization of a savonius wind turbine using multiple configurations of fixed deflectors Basile Blanchard, Weerachai Chaiworapuek, Jet-Tawee Pukrushpan	586
3	207	การประเมินประสิทธิภาพเชิงกลของรากแฝกและไผ่ต่อเสถียรภาพลาดดินภายใต้สภาวะน้ำใต้ดินต่างกันด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ รวีฟ้า สุภานันท์, อภินิติ โชติสังกาศ, กรกช ธัญญเจริญ, วชิรวัติ ประภัสสร	602

ลำดับ	รหัสผลงาน	ชื่อผลงาน	หน้า
4	214	การพัฒนาและประเมินสมรรถนะอุปกรณ์ให้ปุ๋ยและเคมีเกษตรพร้อมระบบน้ำขนาดเล็ก (MiniCHEM) สำหรับระบบชลประทานแรงดันต่ำ ธนวัฒน์ โชติวรรณ, ปิยะพงษ์ สอนแก้ว, วรภัทร วชิรยากรณ์	610
5	224	ผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศต่อการเจริญเติบโตและผลผลิตข้าวในลุ่มน้ำมูลตอนบนโดยใช้แบบจำลอง PyAEZ ลพรรณพลอย ชาวเรือ, กิตติพล บุญมา, กัณฐ์ฐณัฐ กรกรัณย์พล, ชัยยะ พึ่งโพธิ์สภ, นิติทัศน์ บัวผัน, ธมลวรรณ สายพิมพ์, ปิยธิดา โรจน์กิจวิมล	622
6	67	การศึกษารูปแบบการเสื่อมสภาพของอาคารสถาปัตยกรรมสมัยใหม่ในสถาบันการศึกษา ปรีลดา แก้วอุไร, ขวัญชัย กาแก้ว, ฐิติวุฒิ ชัยสวัสดิ์อารี, ปฏิพล ยอดสุรางค์	633

สาขาอุตสาหกรรมเกษตร (Poster Presentation)

ลำดับ	รหัสผลงาน	ชื่อผลงาน	หน้า
1	64	การเพิ่มประสิทธิภาพการต้านทานน้ำของฟิล์มเคซีนด้วยการเชื่อมขวางโดยกรดอินทรีย์ภายใต้สภาวะด่าง อรณิชา กำเหนิดแขก, ฐิติพร แก้วเพ็ชร, ธัญญารัตน์ จิญกาญจน์	643
2	178	Influence of UV-C irradiation dose on quality attributes of Thai jasmine milled and brown rice Aphisara Peawdumkam, Kanithaporn Vangnai, Kullanart Tongkhao, Wipada Siri-anusornsak	651
3	202	การพัฒนาผลิตภัณฑ์ขนมขบเคี้ยวปราศจากกลูเตนผสมผักโขมและเสริมใยอาหาร วาสนา นาราศรี, ทิพย์ธิดา แก้วตาทิพย์	659
4	217	Effect of peppermint oil nanoemulsion on surface wettability of vegetables Dalluchawan Kalantagaphan, Kanithaporn Vangnai, Pitirat Klintham, Sasitorn Tongchitpakdee	668

สาขาทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม (Poster Presentation)

ลำดับ	รหัสผลงาน	ชื่อผลงาน	หน้า
1	43	การลดปริมาณธาตุอาหารไนโตรเจนและฟอสฟอรัสในน้ำด้วยถ่านชีวภาพจากไมยราบยักษ์ (*Mimosa pigra* L.) ร่วมกับสารเสริมประสิทธิภาพ มัลลิกา พะย่ำ, นลินอร มงคลหัตถี	678
2	79	ประสิทธิภาพของการใช้แมกเนติกไฮดรอกซีอะพาไทต์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในกระบวนการโอโซเนชันเพื่อกำจัดเอนโรฟลอกซาซินในน้ำเสียสังเคราะห์ นิชดา เมฆ, ชลอ จารุสุทธิรักษ์, มณีกาญจน์ อยู่เอี่ยม	687
3	98	Effect of polyvinyl chloride microplastics (<125 µm) at 0 – 20 mg/kg on sweet corn seed germination and seedling growth Sasivimon Aimampiy, Alissara Reungsang, Sureewan Sittijunda	697
4	119	การบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์ไอบูโพรเฟนโดยกระบวนการโอโซเนชันร่วมกับถ่านชีวภาพแม่เหล็ก ชญานิน เหมวรรณานุกูล, ชลอ จารุสุทธิรักษ์	705
5	125	การวิเคราะห์ความสัมพันธ์เชิงพื้นที่และเวลาระหว่างปริมาณจราจร ดัชนีพืชพรรณ และอุณหภูมิพื้นผิว ในเขตกรุงเทพมหานครและปทุมธานี (พ.ศ. 2563-2567) พิชญุตม์ จอมใจเหล็ก, ตุลวิทย์ สถาปนจารุ	713
6	129	การศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับน้ำมันเครื่องยนต์และน้ำมันดีเซลจากวัสดุเส้นใยธรรมชาติและวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร พงศกร มณีสุต, ประไพ บางเชย, ธีรวัฒน์ รังกุพันธ์, ชัยวัฒน์ บรรใดเพ็ชร	720
7	130	สมบัติการดูดซับตะกั่วและแคดเมียมของไดอะทอไมต์ธรรมชาติและไดอะทอไมต์ที่ผ่านการดัดแปลงด้วยกรดและการเผา วันเพ็ญ บัวเมือง, ดาวจรัส เกตุโรจน์, เสาวนุช ถาวรพฤกษ์, ทิมทอง ดรุณสนธยา, วิทยา จินดาหลวง	728

ภาคผนวก	หน้า
รายชื่อผู้ทรงคุณวุฒิ	738
คณะกรรมการจัดการประชุมทางวิชาการ ครั้งที่ 64 ของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์	749
คณะทำงานฝ่ายผลิตสื่อวิชาการ การจัดประชุมทางวิชาการ ครั้งที่ 64 มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์	766

สาขาวิทยาศาสตร์

(Subject: Science)

ภาคบรรยาย

(Oral Presentation)

การดัดแปรสภาพอากาศเพื่อบรรเทาความรุนแรงการตกของฝนด้วยเทคนิคการโจมตีเมฆเย็น

Cold cloud weather modification for rain suppression in Northern Thailand

ฉันติ เดชโยธิน, ทักษยา ไรวตากุล, อริสรา นาคบุรี*, พฤกษ์ ไพรพนาพงศ์, วิศรุต จิ้นสุริวงษ์, พุฒิพงศ์ สุชาติพงศ์

Chanti Detyothin, Tasaya Raivatakul, Arisara Nakburee*, Pruek Pripanapongs, Wissarut Jinsuriwong, Puttipong Suchatpong

กรมฝนหลวงและการบินเกษตร กรุงเทพฯ 10900

Department of Royal Rainmaking and Agricultural Aviation, Bangkok 10900, Thailand

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

บทคัดย่อ

เหตุการณ์สุดขั้วจากการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศและความแปรปรวนของสภาพอากาศมีแนวโน้มความถี่ความรุนแรงและระยะเวลายาวนานขึ้นในอนาคต ภาคเหนือของประเทศไทยมักจะประสบปัญหาภัยพิบัติจากเหตุการณ์สุดขั้วอย่างต่อเนื่อง งานวิจัยนี้ได้ถูกดำเนินการระหว่างวันที่ 10–30 กรกฎาคม 2568 ในช่วงที่มีพายุโซนร้อนพัดผ่านภาคเหนือ คัดเลือกเมฆแบบจับคู่และปฏิบัติการแบบสุ่ม ด้วยพลุซิลเวอร์ไอโอไดด์ (AgI) เร่งกระบวนการเกิดฝนในเมฆคิวมูลัสขนาดเล็กที่ระดับยอดเมฆ อุณหภูมิต่ำกว่า -5 °C จาก 6 ตัวอย่าง พบว่ากลุ่มฝนที่ได้รับการดัดแปร (Seed: S) มีระยะเวลาการเจริญเติบโตจนถึงระยะเจริญเติบโตสูงสุดน้อยกว่ากลุ่มฝนควบคุม (Non-Seed: NS) และ มีขนาดเล็กกว่าทั้งในแง่ของเส้นผ่านศูนย์กลาง ความสูง และช่วงชีวิตของกลุ่มฝน โดยมีปริมาตรน้ำฝนน้อยกว่ากลุ่มฝนควบคุมด้วยอัตราส่วน S/NS อยู่ที่ 0.66 ซึ่งหมายถึงปริมาตรน้ำฝนที่ลดลง 34% การบรรเทาฝนตกหนักด้วยเทคนิคเมฆเย็นนี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในพื้นที่อื่นที่เข้าเงื่อนไขการปฏิบัติการได้

คำสำคัญ: การดัดแปรสภาพอากาศ,การบรรเทาความรุนแรงพายุฝน, การลดปริมาตรน้ำฝน, เทคนิคเมฆเย็น, พลุซิลเวอร์ไอโอไดด์

Abstract

Extreme events driven by climate change and weather variability are increasing in both frequency and intensity, Northern Thailand also experiencing severe disasters from such events. This study was conducted from 10 to 30 July 2025 during a tropical storm episode. Using a randomized experiment, silver iodide (AgI) flares were deployed to seed small cumulus clouds at cloud tops with temperatures near -5 °C. Six paired storm samples (seeded vs. non-seeded) were analyzed. Seeded storms (S) exhibited a shorter mature lead time and maximum mature lead time compared to non-seeded storms (NS), indicating faster development of the precipitation phase. Moreover, seeded storms displayed smaller diameters, lower echo tops, and shorter durations than non-seeded storms, resulting in reduced rainfall volumes. The ratio of rainfall volume from seeded to non-seeded storms was 0.66, corresponding to a 34% reduction. This cold cloud weather modification technique for rain suppression shows potential for operational application in other regions.

Keywords: Cold cloud technique, Rain suppression, Rain volume reduction, Silver Iodide flares, Weather modification

คำนำ

ภัยพิบัติจากเหตุการณ์สุดขั้ว (extreme events) เช่น ภาวะภัยแล้ง คลื่นความร้อน ฝนตกหนักและน้ำท่วมฉับพลัน พายุหมุนเขตร้อน มีแนวโน้มที่จะเพิ่มความถี่ ความรุนแรงและระยะเวลายาวนานขึ้น จากการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศและความแปรปรวนของสภาพอากาศ จากรายงานสังเคราะห์ฉบับที่ 6 (SIXTH ASSESSMENT REPORT: AR6) ในปีพ.ศ. 2566 ของคณะกรรมการระหว่างรัฐบาลว่าด้วยการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ หรือ Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) จำลองฉากทัศน์ของประเทศในแถบเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ พบว่า ค่าเฉลี่ยของฝนจะเพิ่มขึ้นในตอนบนของภูมิภาคและลดลงในประเทศภาคพื้นสมุทร (Maritime Southeast Asia) ซึ่งประเทศไทยก็ได้รับผลกระทบเช่นเดียวกัน

การดัดแปรสภาพอากาศ (Weather Modification) ถูกนำมาใช้ในการปรับตัว (Adaptation) ต่อการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศและเหตุการณ์สุดขั้วทั่วโลก เพื่อบรรเทาผลกระทบจากภัยพิบัติ เช่น การลดความรุนแรงของฝนในประเทศอินโดนีเซียด้วยการโปรยสารเพื่อขัดขวางการก่อตัวของเมฆทำให้เมฆบางลง (IPB University, n.d.) ศูนย์ดัดแปรสภาพอากาศของประเทศจีน ใช้จรวดซิลเวอร์ไอโอไดด์เพื่อบรรเทาความรุนแรงของฝน ในพิธีเปิดงานโอลิมปิคฤดูร้อนปีค.ศ.2008 ซึ่งพบว่าสามารถลดค่าการสะท้อนของเรดาร์ได้ 45-60 dBZ และลดฝนในพื้นที่ใกล้เคียงกับสถานีดัดแปรสภาพอากาศได้ (Li et al., 2017)

ภาคเหนือของประเทศไทยประสบปัญหาอุทกภัยเป็นประจำแทบทุกปี (มหาวิทยาลัยแม่ฟ้าหลวง, มปป.) ในช่วงปลายปี อิทธิพลจากมรสุมตะวันตกเฉียงใต้ ร่องมรสุมที่พาดผ่านภาคเหนือและภาคตะวันออกเฉียงเหนือ และพายุโซนร้อนที่เคลื่อนตัวผ่านประเทศไทยตอนบน ทำให้ประเทศไทยตอนบนมีฝนตกหนาแน่น โดยเฉพาะภาคเหนือมีฝนตกหนักถึงหนักมากเป็นระยะ ส่งผลให้เกิดน้ำท่วมฉับพลัน น้ำป่าไหลหลาก และน้ำท่วมขังในหลายพื้นที่สร้างความเสียหายทั้งด้านเศรษฐกิจ การท่องเที่ยว ภาคการเกษตร กรมฝนหลวงและการบินเกษตรจึงได้ทำการวิจัยการดัดแปรสภาพอากาศด้วยเทคนิคเมฆเย็นเพื่อลดความรุนแรงของฝนในภาคเหนือประเทศไทย โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาขั้นตอน วิธีการและประเมินผลการปฏิบัติการดัดแปรสภาพอากาศดังกล่าว เพื่อให้สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการปฏิบัติการเพื่อบรรเทาภัยพิบัติที่เกิดจากความรุนแรงของฝนตกหนักต่อไป

อุปกรณ์และวิธีการ

ลักษณะภูมิประเทศภาคเหนือของประเทศไทยประกอบไปด้วยเทือกเขาวางตัวในแนวเหนือ–ใต้ มีพื้นที่ราบตรงกลางทำให้มีลักษณะเหมือนแอ่งกระทะ เป็นแหล่งต้นน้ำที่สำคัญหลายสาย เช่น ปิง วัง ยม น่าน ทำให้เหมาะแก่การเกษตรกรรม มีภูมิอากาศแบบทุ่งหญ้าสะวันนา ร้อนชื้นสลับแห้ง ฤดูแล้งมีสองช่วง คือ พฤศจิกายน-กุมภาพันธ์ อากาศหนาวเย็น ฤดูร้อน ระหว่างเดือนมีนาคม-พฤษภาคม อากาศร้อนจัด และฤดูฝน ระหว่างเดือนมิถุนายน-ตุลาคมของทุกปี ปริมาณฝนตกเฉลี่ย 1,084 มิลลิเมตร อุณหภูมิเฉลี่ย 24–33 °C

การปฏิบัติการวิจัยดัดแปรสภาพอากาศด้วยเทคนิคเมฆเย็นนี้ดำเนินการ ระหว่างวันที่ 10–30 กรกฎาคม พ.ศ. 2568 โดยมีการตั้งหน่วยดัดแปรสภาพอากาศที่จังหวัดเชียงใหม่ พื้นที่ปฏิบัติการครอบคลุมจังหวัดเชียงใหม่ (จอมทอง, ดอยเต่า) พะเยา (เมือง) แพร่ (สอง) ลำปาง (วังเหนือ) และสุโขทัย (ศรีสัชนาลัย) และใช้ข้อมูลเรดาร์ตรวจอากาศจากสถานีเรดาร์ฝนหลวง อำเภอ อมก๋อย จังหวัดเชียงใหม่ และสถานีเรดาร์ฝนหลวง อำเภอร้องกวาง จังหวัดแพร่ ดังแสดงใน (Fig. 1)

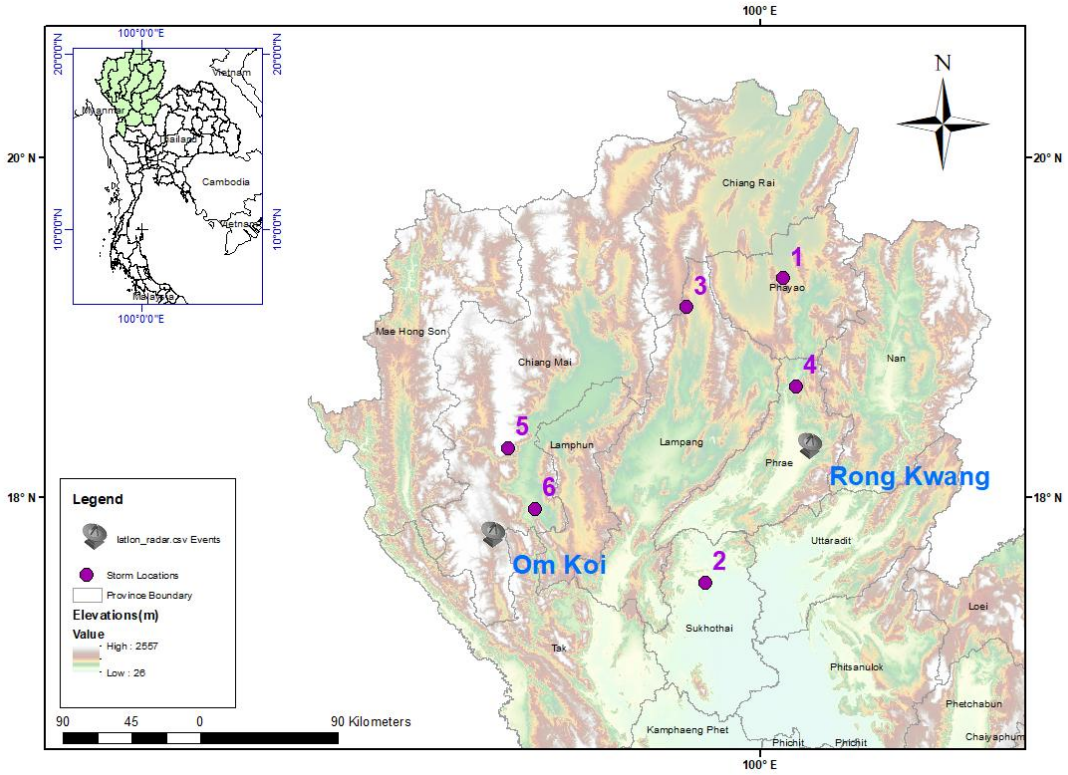


Fig. 1 Location of 6 paired storms in Northern part of Thailand from DRRAA's radars.

การดัดแปรสภาพอากาศเพื่อบรรเทาความรุนแรงจากฝนตกหนัก ด้วยเทคนิคเมฆเย็น ได้น้อมนำตำราฝนหลวงพระราชทานในขั้นตอนที่ 5 ซึ่งคือเทคนิคการโจมตีเมฆเย็นเพื่อเร่งขบวนการตกของฝนสู่พื้นที่เป้าหมาย เทคนิคนี้มุ่งเน้นการเร่งกระบวนการเกิดฝนในเมฆคิวมูลัส (Cumulus Stage) ขนาดเล็ก โดยใช้วิธีการยิงพลุซิลเวอร์ไอโอไดด์ ที่มีคุณสมบัติเป็นแกนน้ำแข็ง (Ice Nuclei) ระดับยอดเมฆซึ่งมีอุณหภูมิต่ำกว่า -5 °C พลุซิลเวอร์ไอโอไดด์จะช่วยให้หยดน้ำเย็นยิ่งยวด (Supercooled Water) เกาะตัวรอบแกนของซิลเวอร์ไอโอไดด์และกลายเป็นผลึกน้ำแข็ง จากนั้นผลึกน้ำแข็งเหล่านี้จะรวมตัวกันเป็น เม็ดฝนขนาดใหญ่ขึ้นและตกลงมาเป็นฝน ก่อนที่กลุ่มเมฆจะพัฒนาเป็นเมฆขนาดใหญ่ที่มีความรุนแรง

โครงการวิจัยคัดเลือกเมฆคิวมูลัสขนาดเล็กสองกลุ่มที่มีคุณลักษณะใกล้เคียงกัน มีค่าการสะท้อนของเรดาร์สูงกว่า 20 dBz และมีเส้นผ่านศูนย์กลางมากกว่า 5 กิโลเมตร กลุ่มเมฆจะถูกคัดเลือกในระยะก่อนเข้าสู่ระยะการเจริญเติบโตสูงสุด (Mature Stage) ทำการสุ่ม (Randomize) กลุ่มเมฆเพื่อปฏิบัติการยิงพลุซิลเวอร์ไอโอไดด์ (Seeded) โดยเมฆที่ไม่ปฏิบัติการ (non-seeded) จะถือว่าเป็นกลุ่มเมฆควบคุม และคุณสมบัติของกลุ่มฝนที่เกิดจากกลุ่มเมฆ (Storm property) ทั้งสองกลุ่มจะถูกนำมาเปรียบเทียบทางสถิติ ด้วยวิธีการ Single ratio การปฏิบัติการยิงพลุซิลเวอร์ไอโอไดด์ ใช้เครื่องบินวิจัย Super King Air ของกรมฝนหลวงและการบินเกษตร ยิงพลุซิลเวอร์ไอโอไดด์ ที่ระดับความสูงประมาณ 22,000 ฟุต และอุณหภูมิยอดเมฆอยู่ที่ประมาณ -7 °C ถึง -5 °C รายละเอียดแสดงใน (Figs. 2 – 4)

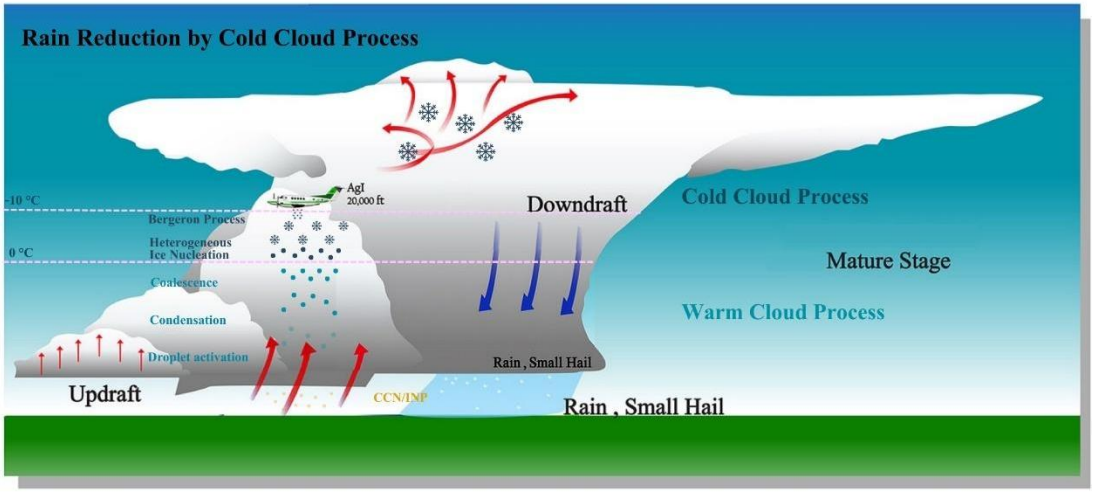


Fig. 2 Conceptual Diagram for Rain Suppression using Cold Cloud Technique.

Fig. 3 DRRAA's Research aircraft model Super King Air 350 equipped with Silver Iodide Flare Rack.

(A) (B)

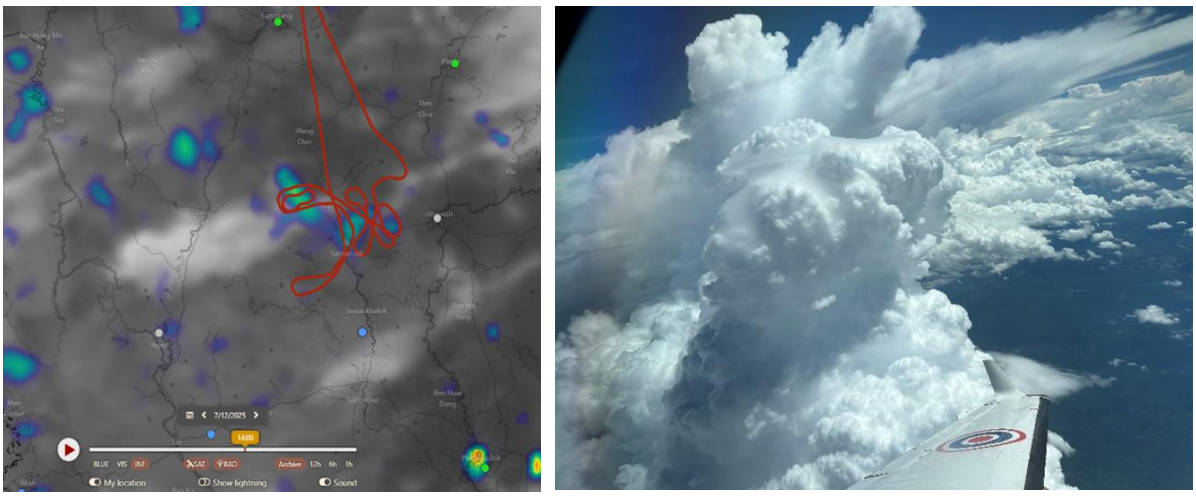


Fig. 4 Operation as of 12 July 2025 at Prae Province (A) SKA 2012 Flight Track Sample (B) Rainstorm sample

โครงการวิจัยสามารถเก็บตัวอย่างได้ทั้งสิ้น 6 คู่ตัวอย่าง ใช้พลุซิลเวอร์ไอโอไดด์ไปทั้งสิ้น 57 นัด การวิเคราะห์ผลเปรียบเทียบระหว่าง กลุ่มเมฆที่ทำการทดลอง (seeded) กับกลุ่มเมฆควบคุม (non-seeded) ใช้ข้อมูลเรดาร์ตรวจอากาศฝนหลวง และคำนวณตัวแปรคุณสมบัติกลุ่มฝนด้วยโปรแกรม Thunderstorm Identification Tracking Analysis and Now Casting: TITAN (Dixon and Wiener,1993) ซึ่งเป็น Open source software ในการเปรียบเทียบตัวแปรต่างๆ เช่น ช่วงชีวิตของกลุ่มฝน ยอดเมฆสูงสุด พื้นที่ขอบเขตของกลุ่มเมฆสูงสุด และปริมาณน้ำฝน

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

ผลการทดลองโดยรวมพบว่า กระบวนการยับยั้งการเจริญเติบโตของเมฆโดยการดัดแปรสภาพอากาศด้วยเทคนิคเมฆเย็น ทำให้กลุ่มฝนที่เกิดจากเมฆที่ทำการทดลองมีระยะเวลาที่ใช้ในการเจริญเติบโตจนถึงระยะเติบโตสูงสุด (Mature Stage) น้อยกว่ากลุ่มฝนควบคุม นอกจากนี้ ขนาดของกลุ่มฝนที่ทำการทดลองยังเล็กกว่าทั้งในแง่ของเส้นผ่านศูนย์กลาง ความสูง และช่วงชีวิตของกลุ่มฝน รายละเอียดตามแผนภูมิ (Figs. 5–7)

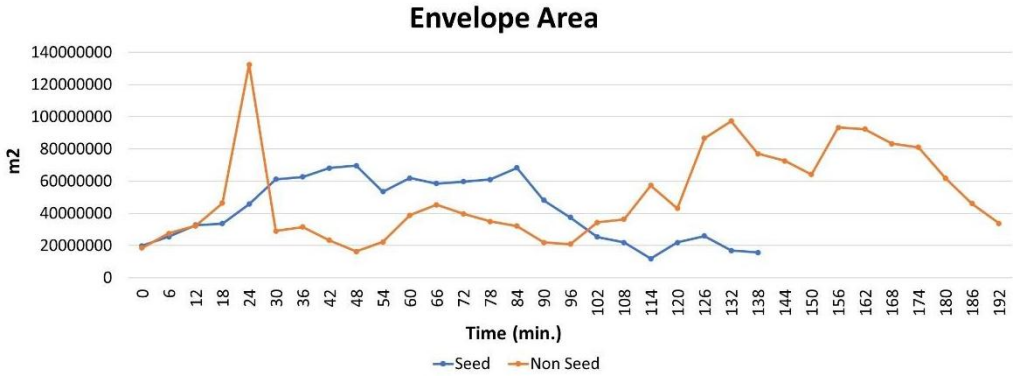


Fig. 5 Comparison of seeded and non-seeded samples' average Envelope Area (square meters) as a function of time (minutes).

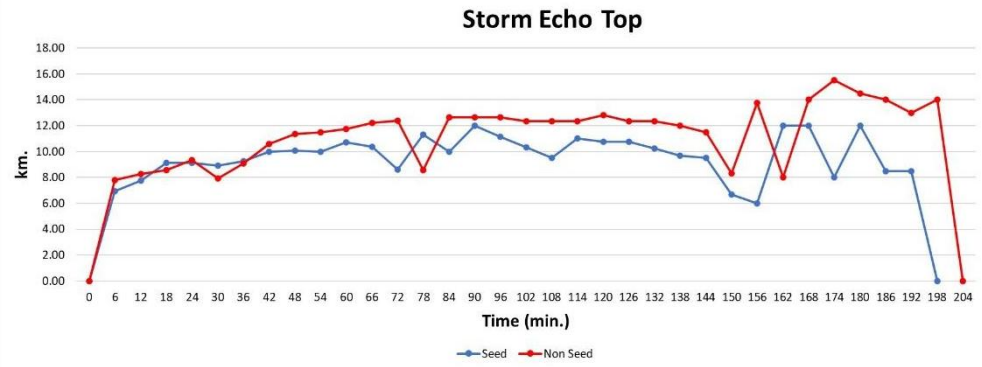


Fig. 6 Comparison of seeded and non-seeded samples' average Storm Echo Top (kilometers) as a function of time (minutes).

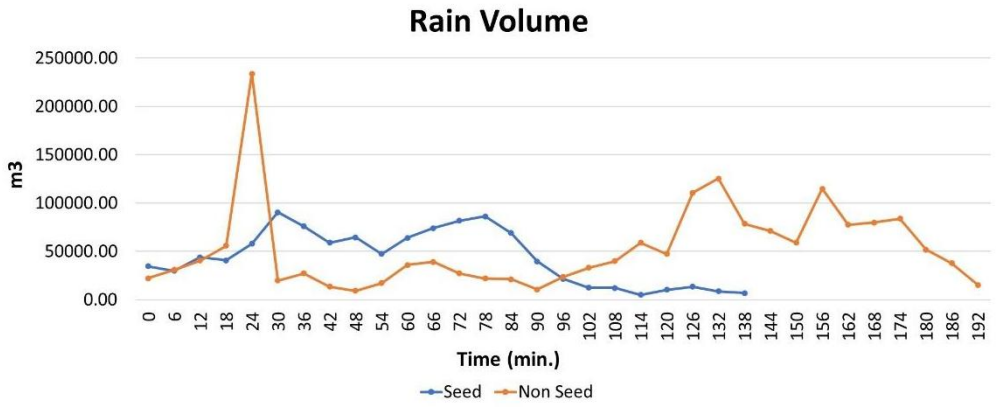


Fig. 7 Comparison of seeded and non-seeded samples' average Rain Volume (cubic meters) as a function of time (minutes),

ในด้านปริมาณน้ำฝน กลุ่มเมฆที่ทำการทดลองมีปริมาตรน้ำฝนน้อยกว่ากลุ่มเมฆควบคุม โดยค่าเฉลี่ยของอัตราส่วนปริมาตรน้ำฝนของกลุ่มเมฆที่ได้รับการดัดแปรต่อกลุ่มเมฆควบคุม (Rain Volume Sum, Seed/Non-Seed) อยู่ที่ 0.66 ซึ่งบ่งชี้ว่ากลุ่มเมฆควบคุมที่ได้รับการดัดแปรมีปริมาตรน้ำฝนคิดเป็น 66% ของกลุ่มเมฆที่ไม่ได้รับการดัดแปร หรือลดลงประมาณ 34% รายละเอียดดัง Table 1 แสดงอัตราส่วนระหว่างคุณสมบัติของกลุ่มฝนที่เกิดจากกลุ่มเมฆที่ทำการดัดแปรต่อกลุ่มฝนที่เกิดจากกลุ่มเมฆควบคุม

Table 1 Selected Seeded and non-seeded storm characteristics comparison

Sample no.	Test date	Duration (hrs)	Echo Top Max (km)	Envelope Area Max (km^2)	Rain Volume Sum (m^3)
1	11-July-2025	0.93	1.00	0.53	0.89
2	12-July-2025	1.19	1.00	1.29	1.31
3	14-July-2025	0.68	1.17	0.95	0.65
4	15-July-2025	0.81	0.58	0.23	0.80
5	29-July-2025	0.26	1.17	0.10	0.08
6	30-July-2025	0.57	1.08	0.67	0.20
Average		0.74	1.00	0.63	0.66

การดัดแปรสภาพอากาศแบบเมฆเย็นโดยการยิงพลุซิลเวอร์ไอโอไดด์ซึ่งมีคุณลักษณะเป็นแกนน้ำแข็ง (Ice Nuclei) เข้าสู่เมฆเย็นระยะพัฒนาตัว (Developing Stage) จะเร่งกระบวนการเกิดน้ำแข็งในบริเวณยอดเมฆที่มีความสูงประมาณ 22,000 ฟุต เส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 5 กิโลเมตร ทำให้เกิดฝนตกก่อนที่เมฆจะเข้าสู่ระยะเติบโตเต็มที่ (Mature Stage) ซึ่งอาจมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางได้ถึง 15 กิโลเมตร ดังนั้นการทำให้ฝนตกด้วยการดัดแปรสภาพอากาศก่อนที่กลุ่มเมฆจะเข้าสู่ระยะเติบโตเต็มที่จึงสามารถช่วยลดความรุนแรงการตกของฝนได้

จากผลการทดลองยืนยันว่าเทคนิคการดัดแปรสภาพอากาศแบบเมฆเย็นโดยใช้พลุซิลเวอร์ไอโอไดด์สามารถยับยั้งการเจริญเติบโตของกลุ่มเมฆได้ การเร่งกระบวนการเกิดฝนในระยะเมฆคิวมูลัสขนาดเล็ก ทำให้เมฆตกเป็นฝนและ

สลายตัวไปในที่สุด ซึ่งส่งผลให้เมฆมีขนาดโดยรวมเล็กกว่า (เส้นผ่านศูนย์กลาง ความสูง ช่วงชีวิต) และปริมาณน้ำฝนลดลงอย่างมีนัยสำคัญ โดยเฉลี่ยแล้วปริมาณน้ำฝนของกลุ่มเมฆที่ทำการทดลองลดลงประมาณ 34% เมื่อเทียบกับกลุ่มเมฆควบคุม เมื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยการลดปริมาณฝนในประเทศอินโดนีเซียของ Seto et al., (2011) ด้วยวิธีการดัดแปรสภาพอากาศด้วยเครื่องบินเมฆอุ่นและ Ground Base Generator พบว่าสามารถลดปริมาณฝนได้ 15–30% การศึกษาการลดปริมาณฝนด้วยเครื่องบินเมฆอุ่นในประเทศจีนของ Wang et al., (2011) พบว่า หลังจากปฏิบัติการ 12 นาที ค่าการสะท้อนของเรดาร์ลดลงจนน้อยกว่า 10 dBZ ความสูงยอดเมฆลดต่ำลงจนถึงประมาณ 3.5 กิโลเมตร และผลการทดลองของงานวิจัยนี้สอดคล้องกับ งานวิจัยของ Hiraga et al., (2025) ที่ศึกษาศักยภาพการลดฝนรุนแรงในประเทศญี่ปุ่นด้วยการจำลองการเพิ่มแกนน้ำแข็งโดยแบบจำลองเชิงตัวเลข พบว่าสามารถลดพื้นที่ฝนได้ 11.5% และลดปริมาณฝนสูงสุดได้ 32%

อย่างไรก็ตาม การศึกษาพบข้อจำกัดที่สำคัญคือ วิธีการนี้ สามารถลดความรุนแรงได้เฉพาะกลุ่มฝนบางกลุ่มเท่านั้น ข้อจำกัดนี้เกิดจากจำนวนเครื่องบินที่ใช้ในการทดลอง ซึ่งมีเพียงเครื่องบิน Super King Air จำนวน 1 ลำเท่านั้น การมีเครื่องบินเพียงลำเดียวจำกัดขอบเขตและความต่อเนื่องของการปฏิบัติการ ทำให้ไม่สามารถดัดแปรกลุ่มเมฆขนาดใหญ่หรือครอบคลุมพื้นที่กว้างได้อย่างมีประสิทธิภาพ ขนาดของเมฆในการดัดแปรสภาพอากาศโดยมากจะพิจารณาที่ความสูงของเมฆ (vertical extent) โดยเมฆที่มีลักษณะเป็นเมฆเย็นมักจะมีความสูงยอดเมฆที่ประมาณ 18,000 ฟุตเป็นต้นไป และมีอุณหภูมิประมาณ -5 องศาเซลเซียสเป็นต้นไป สำหรับเมฆเย็นที่มีความสูงยอดเมฆมากกว่า 25,000 ฟุต จะไม่ถูกเลือกสำหรับการดัดแปรสภาพอากาศโดยเครื่องบินเนื่องจากนิรภัยทางการบิน นอกจากนี้ ในบางวันไม่สามารถทำการปฏิบัติการได้ เนื่องจากสภาพอากาศไม่เอื้ออำนวย เช่น ท้องฟ้าปิด มีฝนตกบริเวณ ท่าอากาศยาน เรดาร์บนอากาศยานขัดข้อง หรืออุปกรณ์อากาศยานอื่น ๆ ชำรุด ซึ่งสะท้อนถึงความท้าทายในการปฏิบัติการจริง การดัดแปรสภาพอากาศเพื่อลดความรุนแรงของฝน นอกจากการใช้เครื่องบินแล้ว ยังมีการปฏิบัติการด้วยจรวดดัดแปรสภาพอากาศ ในพิธีปิดโอลิมปิกที่ประเทศจีน (Zhou et al., 2023) การปฏิบัติการดัดแปรสภาพอากาศเพื่อบรรเทาความรุนแรงของฝนตกหนักจำเป็นต้องศึกษาค้นคว้าเพิ่มเติม เช่น รูปแบบการปฏิบัติการ การปฏิบัติการสำหรับเมฆอุ่น ปริมาณการใช้สาร และเงื่อนไขการตัดสินใจปฏิบัติการ เป็นต้น

สรุป

การดัดแปรสภาพอากาศเพื่อบรรเทาความรุนแรงจากฝนตกหนักด้วยเทคนิคเมฆเย็น โดยการใช้พลุซิลเวอร์ไอโอไดด์ (AgI) เพื่อเร่งการเกิดฝนในเมฆคิวมูลัสขนาดเล็ก ได้แสดงให้เห็นถึงศักยภาพในการลดระยะเวลาการเจริญเติบโตของเมฆ ลดขนาดของกลุ่มฝน (เส้นผ่านศูนย์กลาง ความสูง ช่วงชีวิต) และลดปริมาณน้ำฝน โดยปริมาณน้ำฝนเฉลี่ยของกลุ่มเมฆที่ได้รับการดัดแปลงลดลงประมาณ 34%เมื่อเทียบกับกลุ่มควบคุม ผลลัพธ์นี้แสดงให้เห็นว่าเทคนิคนี้สามารถช่วยลดผลกระทบจากฝนตกหนัก ได้ในระดับหนึ่ง

จากข้อจำกัดที่พบในการทดลองการลดความรุนแรงของฝน โดยใช้เทคนิคโจมตีเมฆเย็น วิธีการนี้สามารถความรุนแรงของฝนได้ ประมาณ 1–3 กลุ่มต่อวัน เนื่องจากการปฏิบัติการถูกจำกัดด้วยเครื่องบินที่ใช้ในการทดลองซึ่งเป็นเครื่องบินชนิด Super King Air (SKA) จำนวน 1 เครื่อง แต่จากการสังเกตและตรวจวัดด้วยเรดาร์พบว่าบริเวณที่มีฝนตกหนักและน้ำหลากเกิดขึ้นทางภาคเหนือตอนบน เช่น จังหวัดเชียงราย จังหวัดน่าน ฯลฯ กลุ่มฝนที่เกิดขึ้นมีมากกว่า 3 กลุ่มขึ้นไป จึงต้องเพิ่มจำนวนเครื่องบิน และปรับกระบวนการทำงานให้รวดเร็วก่อนที่เมฆจะพัฒนาจนมีขนาดใหญ่ เพื่อขยายผลการทำงานและเพิ่มประสิทธิภาพการปฏิบัติการให้มากขึ้น การเพิ่มทรัพยากรจะช่วยให้การดำเนินงานมีประสิทธิภาพมากขึ้นในการบรรเทาความรุนแรงของฝนตกหนักในอนาคต

เอกสารอ้างอิง

กรมฝนหลวงและการบินเกษตร. 2568. รายงานสรุปการดัดแปรสภาพอากาศเพื่อบรรเทาความรุนแรงจากฝนตกหนัก (Rain Bomb) ตั้งแต่วันที่ 9 กรกฎาคม พ.ศ. 2568 ถึงวันที่ 31 กรกฎาคม พ.ศ. 2568. กรุงเทพฯ, (หน้า 1–8).

มหาวิทยาลัยแม่ฟ้าหลวง. มปป. ระบบข้อมูลการจัดการภัยพิบัติ. https://disaster.mfu.ac.th/flood/overview, 2 ธันวาคม 2568.

Dixon, M.J., Wiener, G. 1993. TITAN: Thunderstorm identification, tracking, analysis, and nowcasting—A radar-based methodology. J. Atmos. Ocean. Technol. 10: 785–797. doi.org/10.1175/1520-0426(1993)010<0785:TTITAA>2.0.CO;2

Hiraga, Y., Mbugua, J.M., Kotsuki, S., Suzuki, Y., Chen, S.H., Hamada, A., et al. 2025. Numerical experiments of cloud seeding for mitigating localization of heavy rainfall: A case study of mesoscale convective system in Japan. EGUsphere 2025: 1–29. doi.org/10.5194/egusphere-2025-3524

IPB University. n.d. Not just “spreading salt”: IPB University researcher explains variety of weather modification technology. IPB University, Indonesia.

IPCC. 2023. Summary for policymakers, pp. 1–34. In: Lee, H., Romero, J. (eds.). Climate change 2023: Synthesis report. Contribution of working groups I, II and III to the sixth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. IPCC, Geneva, Switzerland. doi.org/10.59327/IPCC/AR6-9789291691647.001

Li, H., Dai, Y., Wang, H., Cui, J. 2017. Artificial seeding effects of convective clouds on the opening day of Beijing 2008 summer Olympics. J. Geosci. Environ. Prot. 5: 118. doi.org/10.4236/gep.2017.51009

Seto, T.H. 2011. Weather modification for rain reduction: A conceptual design. In: Proc. 10th WMO Sci. Conf. Weather Modif. Bali, Indonesia.

Wang, F., Li, Z., Jiang, Q., Wang, G., Jia, S., Duan, J., Zhou, Y. 2019. Evaluation of hygroscopic cloud seeding in liquid-water clouds: A feasibility study. Atmos. Chem. Phys. 19: 14967–14977. doi.org/10.5194/acp-19-14967-2019

Zhou, Y., Liu, S., Cai, M., Long, J., Wang, J. 2023. Operational plan, effect verification, and key technical settings for a stadium-scale artificial rain reduction experiment. J. Meteorol. Res. 37: 643–665. doi.org/10.1007/s13351-023-2050-4

สาขาวิทยาศาสตร์สุขภาพ

(Subject: Health Sciences)

ภาคบรรยาย

(Oral Presentation)

Evaluation of the CarrierMax™ SMN1/SMN2 reagent kit for spinal muscular atrophy carrier screening

Kunvara Orachon[a,*], Watcharapa Jaranasaksakul[b], Preyaporn Onsod[b], Teerapong Siriboonpiputtana[b], Budsaba Rerkamnuaychoke[b], Takol Chareonsirisuthigul[b]

[a]Applied Clinical Pathology Program, Department of Pathology, Faculty of Medicine Ramathibodi Hospital, Mahidol University, Bangkok 10400, Thailand

[b]Department of Pathology, Faculty of Medicine Ramathibodi Hospital, Mahidol University, Bangkok 10400, Thailand

*Corresponding author. E-mail address: kunvaraorachon21@gmail.com

Abstract

Spinal muscular atrophy (SMA) is an autosomal recessive neurodegenerative disorder caused by the deletion of exon 7 in the *SMN1* gene, resulting in muscle weakness and atrophy. The American College of Obstetricians and Gynecologists (ACOG) recommends SMA carrier screening for all women, especially before pregnancy. In this study, 28 DNA specimens from the Human Genetics Laboratory at Ramathibodi Hospital were analyzed using the CarrierMax™ *SMN1*/*SMN2* kit, with prior confirmation by multiplex ligation–dependent probe amplification (MLPA). The 1:4 dilution was selected as the optimal screening condition for cost-effectiveness. The CarrierMax™ kit demonstrated 100% clinical concordance with MLPA among SMA carrier samples, with exact concordance in 8 of 12 cases (66.67%) and partial concordance in 4 cases (33.33%). For non–carrier samples, clinical concordance was also 100%, with exact concordance in 12 of 16 cases (75.0%) and partial concordance in 4 cases (25.0%). No discordant results were observed. These results indicate that the CarrierMax™ *SMN1*/*SMN2* kit is an accurate and rapid option for screening SMA carriers, suitable for routine use.

Keywords: Carrier screening, Multiplex PCR with fragment analysis, Spinal muscular atrophy

Introduction

Carrier screening is a genetic test performed on individuals with no clinical symptoms of a genetic disorder, but who may carry a pathogenic allele in a gene associated with that disorder. Providing information on carrier screening should be offered to all women who are planning pregnancy or are currently pregnant, to enable them to understand their genetic risks and consider family planning options. Carrier screening is optional and can be declined by the individual (ACOG committee No. 691, 2017). If one partner is identified as a carrier, it is recommended that the other partner also undergo carrier testing to assess the couple's genetic risk. In cases where both partners are carriers of the same genetic disorder, genetic counseling should be provided to discuss the risk of having affected offspring, preventive strategies, and available reproductive options, such as assisted reproductive technology (ART).

The American College of Obstetricians and Gynecologists (ACOG) recommends carrier screening for certain genetic disorders, including spinal muscular atrophy (SMA), cystic fibrosis, sickle cell anemia, and fragile X syndrome (FXS) (ACOG committee No. 691, 2017). This study focuses on SMA, an autosomal recessive neurodegenerative disorder characterized by the degeneration of motor neurons in the spinal cord, resulting in muscle weakness and atrophy. The incidence of SMA is estimated to be approximately 1 in 10,000 to 20,000 live births, and the carrier frequency is about 1 in 50, ranging from 1 in 40 to 1 in 60, with the highest prevalence observed in Asian populations (Pearn et al., 1978; Verhaart et al., 2017). SMA is caused by mutations in the survival motor neuron 1 (*SMN1*) gene, located on chromosome 5 (5q11.2–13.3), which plays an essential role in motor neuron function (Zeng et al., 2008; Prior et al., 2011). Approximately 95% of SMA patients have a homozygous deletion of exon 7 in *SMN1*, resulting in the absence of survival motor neuron (SMN) protein production. The lack of SMN protein leads to degeneration and loss of function of the anterior horn cells in the spinal cord and motor nuclei in the brainstem (ACOG committee No. 432, 2009). Mutations in the survival motor neuron 2 (*SMN2*) gene, a nearly identical copy of *SMN1*, differ at specific nucleotides in exon 7 (c.840C>T) and exon 8 (c.1155G>A). Although *SMN2* can produce SMN protein, it does so at significantly lower levels than *SMN1*. The *SMN2* copy number ranges from 0 to 5 in the general population, and the copy number is a prognostic indicator of SMA severity (Mailman et al., 2002; Mercuri et al., 2022).

For SMA carrier screening, real–time PCR and multiplex ligation-dependent probe amplification (MLPA) are standard diagnostic and screening methods, with reported specificity of 100% and sensitivity of 95–98% (Prior et al., 2008). Real–time PCR detects *SMN1* mutations for diagnosis and carrier screening; however, it does not assess *SMN2* copy number, which is clinically relevant for prognosis (Dejsuphong et al., 2019). MLPA, on the other hand, can simultaneously detect mutations in both *SMN1* and *SMN2* in a single reaction and is widely used in clinical laboratories, although its turnaround time remains a limitation.

The CarrierMax™ *SMN1*/*SMN2* reagent kit utilizes multiplex PCR with fragment analysis to amplify genomic DNA and separate products by capillary electrophoresis for the detection of *SMN1* exon 7 deletions, which result in incomplete SMN protein production. The kit also includes primers for determining copy numbers of both *SMN1* and *SMN2*, as well as for detecting variants associated with silent carriers (2+0), in which two copies of *SMN1* are located on the same chromosome. Moreover, the method offers a shorter turnaround time than conventional techniques, making it potentially advantageous for carrier screening.

Therefore, this study aims to validate the CarrierMax™ *SMN1*/*SMN2* reagent kit using multiplex PCR with fragment analysis, including silent carrier detection, as an alternative method for SMA carrier screening.

Material and Methods

Bio–specimen approval and ethical considerations

Leftover specimens were obtained with permission from the Human Genetics Laboratory, Department of Pathology, Ramathibodi Hospital (Approval No. HG.35/2568). Sample IDs were re-coded to protect patient confidentiality. The study protocol was approved by the Human Research Ethics Committee, Faculty of Medicine Ramathibodi Hospital, Mahidol University (COA No. MURA2025/567).

DNA sample preparation

Genomic DNA was extracted from leftover specimens using the PureLink™ genomic DNA mini kit and quantified with a NanoDrop™ 2000 spectrophotometer. DNA concentration was adjusted to the recommended 10 ng/μL, with an OD260/OD280 ratio of 1.7–1.9 to ensure purity. The DNA samples were subsequently processed using the CarrierMax™ *SMN1*/*SMN2* reagent kit according to the manufacturer's instructions.

Optimization of dilution conditions

To determine the most appropriate reaction setup, both genomic DNA and the CarrierMax™ reagent were tested under three dilution conditions: undiluted (1:1), 1:2, and 1:4. Each dilution condition was prepared according to the same PCR reaction setup (Table 1): and processed using capillary electrophoresis.

Validation of the CarrierMax™ SMN1/SMN2 reagent kit

The reagent kit utilizes multiplex PCR, followed by capillary electrophoresis, to analyze *SMN1*/*SMN2* fragments and detect exon 7 deletions associated with the production of truncated SMN protein. A total of 28 samples were included 12 known SMA-carriers for sensitivity assessment and 16 non–carriers for specificity assessment.

Table 1 CarrierMax™ PCR reaction setup under varying dilution conditions

Components	1:1 (μL)		1:2 (μL)		1:4 (μL)	
	CNV	SNP	CNV	SNP	CNV	SNP
CarrierMax™ *SMN1*/*SMN2* Reagent 2xPCR Reaction buffer	10	10	5	5	2.5	2.5
CarrierMax™ *SMN1*/*SMN2* Reagent CNV primers mix	0.5	-	0.25	-	0.125	-
CarrierMax™ *SMN1*/*SMN2* Reagent SNP primers mix	-	0.5	-	0.25	-	0.125
CarrierMax™ *SMN1*/*SMN2* Reagent Taq DNA polymerase	0.4	0.4	0.2	0.2	0.1	0.1
CarrierMax™ *SMN1*/*SMN2* Reagent Nuclease-free water	8.1	8.1	4.05	4.05	2.025	2.025
DNA	1	1	0.5	0.5	0.25	0.25
Total volume	20	20	10	10	5	5

Results and Discussion

Optimization of dilution conditions

All conditions (1:1, 1:2 and 1:4) produced results fully concordant with MLPA, indicating that the assay maintained robust analytical performance despite reduced DNA and reagent input. Because the 1:4 condition preserved accuracy while significantly increasing the number of samples that could be processed per kit, this dilution was selected as the optimal and most cost-effective condition for screening analyses.

Sensitivity and specificity assessment of the CarrierMax™ SMN1/SMN2 reagent kit

A total of 28 samples were evaluated to assess the clinical performance of the CarrierMax™ *SMN1*/*SMN2* reagent kit. Among the 12 confirmed SMA–carriers, the assay demonstrated 100% clinical concordance with MLPA. Exact concordance was observed in 8 cases (66.67%), while 4 cases (33.33%) showed partial concordance, all of which still aligned with the correct carrier classification. The partial concordance observed in some cases is likely attributable to variability in *SMN2* copy number (Table 2): which serves as a compensatory gene for *SMN1*. Because *SMN1* remains the clinically decisive gene for carrier determination, these variations in *SMN2* copy number did not affect the final clinical interpretation, resulting in correct carrier classification across all samples. For the 16 non–carrier samples, the assay similarly showed 100% clinical concordance, with exact concordance in 12 cases (75.0%) and partial concordance in 4 cases (25.0%). As with the carrier group, partial concordance patterns were attributable to *SMN2* variability and did not alter the clinical classification outcome. Importantly, no clinically discordant results were observed in either group, indicating that the CarrierMax™ reagent kit reliably identified both carrier and non–carrier statuses with high accuracy.

In addition, when comparing the CarrierMax™ reagent kit with MLPA, several methodological strengths and limitations become evident. CarrierMax™ offers a faster workflow, lower DNA input requirement, and more straightforward interpretation for routine carrier screening, making it particularly suitable for high–throughput laboratories or settings with limited resources. Its targeted design allows for the reliable detection of *SMN1* copy–number status, which is a critical determinant for SMA carrier identification. However, MLPA remains advantageous for complex or ambiguous cases due to its broader genomic resolution, though it requires longer processing time and more technical expertise. Overall, the findings of this study demonstrate that CarrierMax™ can serve as a robust and efficient alternative to MLPA for primary SMA carrier screening, with MLPA retained as a confirmatory or problem-solving method when extended genomic characterization is required.

Table 2 Summary of *SMN1*/*SMN2* copy number determination and clinical concordance between the CarrierMax™ *SMN1*/*SMN2* reagent kit and MLPA

Sample ID	Copy number by CarrierMax™		CarrierMax™ classified	Copy number by MLPA		MLPA classified	Concordance	Clinical concordance
	SMN1 (copy)	SMN2 (copy)		SMN1 (copy)	SMN2 (copy)			
SMN_sesp01	1	2	SMA-carrier	1	2	SMA-carrier	Exact	True
SMN_sesp02	1	1	SMA-carrier	1	1	SMA-carrier	Exact	True
SMN_sesp03	1	2	SMA-carrier	1	2	SMA-carrier	Exact	True
SMN_sesp04	4	1	Non-carrier	4	1	Non-carrier	Exact	True
SMN_sesp05	3	0	Non-carrier	3	2	Non-carrier	Partial	True
SMN_sesp06	2	2	Non-carrier	2	1	Non-carrier	Partial	True
SMN_sesp07	1	5	SMA-carrier	1	3	SMA-carrier	Partial	True
SMN_sesp08	2	2	Non-carrier	2	2	Non-carrier	Exact	True
SMN_sesp09	3	0	Non-carrier	3	0	Non-carrier	Exact	True
SMN_sesp10	2	2	Non-carrier	2	2	Non-carrier	Exact	True
SMN_sesp11	2	2	Non-carrier	2	2	Non-carrier	Exact	True
SMN_sesp12	1	4	SMA-carrier	1	3	SMA-carrier	Partial	True
SMN_sesp13	1	2	SMA-carrier	1	2	SMA-carrier	Exact	True
SMN_sesp14	1	3	SMA-carrier	1	2	SMA-carrier	Partial	True
SMN_sesp15	2	4	Non-carrier	2	3	Non-carrier	Partial	True
SMN_sesp16	2	2	Non-carrier	2	2	Non-carrier	Exact	True
SMN_sesp17	1	2	SMA-carrier	1	2	SMA-carrier	Exact	True
SMN_sesp18	1	1	SMA-carrier	1	1	SMA-carrier	Exact	True
SMN_sesp19	2	2	Non-carrier	2	2	Non-carrier	Exact	True
SMN_sesp20	2	2	Non-carrier	2	2	Non-carrier	Exact	True
SMN_sesp21	1	2	SMA-carrier	1	2	SMA-carrier	Exact	True
SMN_sesp22	3	1	Non-carrier	3	1	Non-carrier	Exact	True
SMN_sesp23	4	1	Non-carrier	4	1	Non-carrier	Exact	True
SMN_sesp24	4	1	Non-carrier	4	2	Non-carrier	Partial	True
SMN_sesp25	1	1	SMA-carrier	1	3	SMA-carrier	Partial	True
SMN_sesp26	3	2	Non-carrier	3	2	Non-carrier	Exact	True
SMN_sesp27	2	0	Non-carrier	2	0	Non-carrier	Exact	True
SMN_sesp28	1	1	SMA-carrier	1	1	SMA-carrier	Exact	True

Conflict of Interest

There is no conflict of interest.

Acknowledgment

My sincere gratitude to my major advisor, Assoc. Prof. Dr. Takol Chareonsirisuthigul, and I am also grateful to my co-advisor, Prof. Dr. Budsaba Rerkamnuaychoke, and Assoc. Prof. Teerapong Siriboonpiputtana for their guidance and supervision. My special thanks to all the staff at the laboratory for their advice and lab support provided to me for this study

Reference

ACOG committee opinion No. 432. 2009. Spinal muscular atrophy. Wolters Kluwer Health, Florida, FL, USA, pp. 1194–1196.

ACOG committee opinion No. 691. 2017. Carrier screening for genetic conditions. Wolters Kluwer Health, Florida, FL, USA, pp. 41–55.

Dejsuphong, D., Taweewongsounton, A., Khemthong, P., et al. 2019. Carrier frequency of spinal muscular atrophy in Thailand. Neurol. Sci. 40: 1729–1732. doi.org/10.1007/s10072-019-03885-5

Mailman, M.D., Heinz, J.W., Papp, A.C., et al. 2002. Molecular analysis of spinal muscular atrophy and modification of the phenotype by SMN2. Genet. Med. 4: 20–26. doi.org/10.1097/00125817-200201000-00004

Mercuri, E., Sumner, C.J., Muntoni, F., et al. 2022. Spinal muscular atrophy. Nat. Rev. Dis. Primers 8: 52. doi.org/10.1038/s41572-022-00380-8

Pearn, J. 1978. Incidence, prevalence, and gene frequency studies of chronic childhood spinal muscular atrophy. J. Med. Genet. 15: 409–413. doi.org/10.1136/jmg.15.6.409

Prior, T.W. 2008. Carrier screening for spinal muscular atrophy. Genet. Med. 10: 840–842. doi.org/10.1097/GIM.0b013e318188d069

Prior, T.W., Nagan, N., Sugarman, E.A., et al. 2011. Technical standards and guidelines for spinal muscular atrophy testing. Genet. Med. 13: 686–694. doi.org/10.1097/GIM.0b013e318220d523

Verhaart, I.E., Robertson, A., Wilson, I.J., et al. 2017. Prevalence, incidence and carrier frequency of 5q-linked spinal muscular atrophy. Orphanet J. Rare Dis. 12: 124. doi.org/10.1186/s13023-017-0671-8

Zeng, J., Lan, F., Deng, X., et al. 2008. Evaluation of an in-house protocol for prenatal molecular diagnosis of SMA in Chinese. Clin. Chim. Acta 398: 78–81. doi.org/10.1016/j.cca.2008.08.015

Machine–learning prediction of antimicrobial peptides active against *Klebsiella pneumoniae* using physicochemical descriptors and ensemble classification

Sievlong Roeub[a], Sakawrat Kanthawong[a], Tarapong Srisongkram[b,*]

[a]Department of Microbiology, Faculty of Medicine, Khon Kaen University, Khon Kaen 40002, Thailand

[b]Division of Pharmaceutical Chemistry, Faculty of Pharmaceutical Sciences, Khon Kaen University, Khon Kaen 40002, Thailand

*Corresponding author. E–mail address: tarasri@kku.ac.th

Abstract

The emergence of multidrug–resistant *Klebsiella pneumoniae* has heightened the need for alternative antimicrobial agents that can circumvent conventional resistance mechanisms. Antimicrobial peptides (AMPs) are attractive candidates, but identifying active sequences experimentally is slow and resource intensive. This study presents a machine learning (ML) framework employing physicochemical descriptors to predict AMP activity against *K. pneumoniae*. A curated dataset of 380 peptides was encoded using 31 descriptors representing charge, hydrophobicity, amino acid composition, structural propensity, flexibility, and peptide architecture. Five supervised algorithms were evaluated through five–fold cross–validation. Random Forest produced the most consistent performance (accuracy 94%, precision 98%, specificity 99%, MCC 0.86), while a probability–averaged ensemble improved metric stability across folds. To assess real–world applicability, the trained model was externally evaluated using 12 independent peptides and showed that the predicted probabilities matched all experimental activity labels, highlighting the potential of this model in real–world application. Feature interpretation revealed the dominant influence of isoelectric point, net charge, lysine composition, and hydrophobic residue attributes consistent with membrane–targeting activity. Collectively, our findings indicate that physicochemical descriptor-based modeling provides a reliable and interpretable computational strategy for early AMP prioritization against *K. pneumoniae*.

Keywords: Antimicrobial peptides, *Klebsiella pneumoniae,* Machine learning, Physicochemical features.

Introduction

Klebsiella pneumoniae is a major cause of severe nosocomial infections, including pneumonia, bloodstream infection, and complicated urinary tract infection. Its clinical relevance has increased due to the rapid emergence of carbapenem–resistant and ESBL–producing strains, which significantly limit therapeutic options and contribute to elevated morbidity and mortality (Navon–Venezia et al., 2017). The growing tolerance to last–line agents such as colistin further underscores the urgency of identifying new antimicrobial strategies (Jayol et al., 2017). Antimicrobial peptides (AMPs) have gained substantial attention as alternative agents because they exert rapid bactericidal activity through membrane disruption and are less susceptible to the classical mechanisms of antibiotic resistance (Hancock and Sahl, 2006). Nevertheless, AMP discovery remains constrained by low–throughput wet–lab screening and complex sequence–activity relationships that make rational design challenging. Computational approaches offer a practical solution by filtering peptide candidates before laboratory evaluation. Machine–learning frameworks, in particular, have shown considerable promise when peptide sequences are transformed into physicochemical descriptors that capture charge, hydrophobicity, amphipathicity, and structural propensity–key determinants of AMP function (Christopher D et al., 2012; Bhadra et al., 2018). However, most available AMP prediction tools are broad–spectrum and do not target specific priority pathogens. Many lack external validation, reducing translational confidence, and several deep-learning–based models provide limited interpretability, making it difficult to identify which physicochemical features influence predictions (Lertampaiporn et al., 2021; Yan et al., 2023).

This study aims to address these limitations by constructing an interpretable machine learning (ML) framework specifically designed to predict AMP activity against *K. pneumoniae*. The AMP activity against *K. pneumoniae* dataset was constructed from DBAASP (Database of Antimicrobial Activity and Structure of Peptides) and APD3 (Antimicrobial Peptide Database 3). By integrating curated physicochemical descriptors, multiple classification algorithms including Random Forest, Gradient Boosting, AdaBoost, XGBoost, and Support Vector Machine (SVM), dimensionality reduction, cross–validation, and SHAP–based interpretation, the framework delivers both robust predictive performance and mechanistic transparency.

Materials and Methods

Data Collection and Physicochemical Feature Extraction

Peptide sequences were sourced from the DBAASP and APD3 repositories, with active peptides defined by a stringent activity threshold of MIC $\leq$ 25 μg/mL against *Klebsiella pneumoniae*. The inactive class was constructed from UniProt peptide and protein fragments, excluding any entries annotated with antimicrobial, immune-related, cytotoxic, or membrane-active functions. All sequences were standardized to single-letter format and subjected to rigorous quality control to remove noncanonical residues and duplicates, yielding 380 curated peptides for descriptor computation and model training. External validation employed

experimentally confirmed anti–*K. pneumoniae* peptides–seven with published MIC values (Li et al., 2024) and BP76 (López–Siles et al., 2025) –together with a Swiss–Prot–derived negative set lacking any antimicrobial or membrane–active annotations. The physicochemical descriptors were generated using a custom Python pipeline to convert each peptide sequence into a standardized numerical format for machine-learning analysis. The feature set included amino acid composition, sequence length, net charge (from basic and acidic residues), hydrophobicity, molecular weight, cysteine count, and the estimated number of disulfide bridges. The isoelectric point was approximated using residue pKa values, and secondary–structure propensity was encoded by counting residues associated with helix, sheet, and turn formation.

Machine–Learning Algorithms and Model Evaluation

Five supervised machine–learning algorithms–Random Forest, Support Vector Machine (RBF kernel), AdaBoost, Gradient Boosting, and XGBoost–were implemented to construct classification models using the *scikit–learn* Python library. All models were trained using an 80/20 stratified split to preserve class proportions, and hyperparameters were tuned through internal grid–search procedures to optimize predictive performance while minimizing overfitting.

To assess the predictive performance of all ML models, we computed standard evaluation metrics commonly used in binary classification, including accuracy, precision, sensitivity, specificity, F1 score, the Matthews correlation coefficient (MCC), area under the ROC curve (ROC–AUC), and area under the precision and recall curve (PR–AUC). All metrics were calculated using the *scikit–learn* Python library, based on the counts of true positives (TP), true negatives (TN), false positives (FP), and false negatives (FN) generated during cross–validation. Using these four values, standard performance metrics were computed for each fold.

Results and Discussion

AMP Dataset Classes and Physicochemical Feature Distributions

We found that the AMP dataset against *K. pneumoniae* shows a largely imbalanced dataset comprised of 27% active AMP and 73% inactive AMP (Fig. 1A). Network–based statistical comparison of physicochemical descriptors revealed that only a subset of features showed meaningful differences between active and inactive peptides, as shown in Fig. 1B. Active peptides exhibited significantly higher charge, isoelectric point, and flexibility ($p < 0.05$), consistent with the cationic and conformational properties typically associated with antimicrobial activity. Molecular weight showed a small but statistically detectable difference favoring slightly shorter active peptides. In contrast, hydrophobicity, cysteine content, disulfide bridges, and secondary–structure propensities (helix, sheet, and turn) did not differ significantly between classes ($p > 0.05$) (Fig. 1B). These results indicate that charge–related and structural–adaptability descriptors are the primary differentiators between active and inactive sequences.

(A) (B)

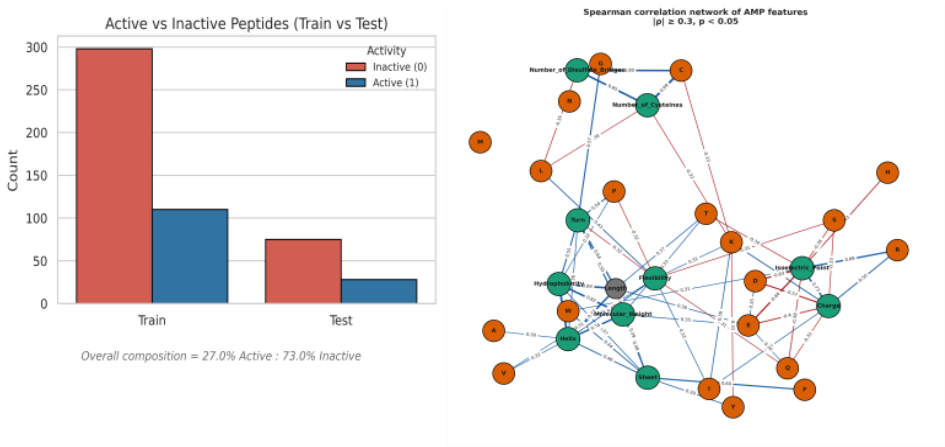


Fig. 1 Exploratory analysis of dataset composition and feature correlations: (A) Distribution of inactive (red) and active (blue) peptides; (B) Spearman correlation network of peptide descriptors ($p < 0.05$), illustrating clusters of positively (blue edges) and negatively (red edges) correlated physicochemical and amino acid features.

To examine physicochemical distribution between active and inactive AMPs, we compared the distributions of all descriptors and found that the active AMPs showed significantly higher charge, isoelectric point, and flexibility (all $p < 0.05$, Fig. 2). This result indicates that cationic and conformational properties are associated with antimicrobial function. A modest but significant difference was observed in molecular weight ($p < 0.05$), while hydrophobicity, cysteine, disulfide bridges, and secondary–structure propensities displayed no significant separation between classes ($p > 0.05$). These findings highlight that electrostatics and flexibility are the principal physicochemical descriptor distinguishing active from inactive AMPs.

ML performance

Beyond individual classifier performance, comparative visualization of ROC and precision–recall curves further illustrated the strong discriminative power of the models (Fig. 3). Random Forest consistently achieved the highest precision across the full recall spectrum, confirming its superior operating characteristics. XGBoost, AdaBoost, and Gradient Boosting showed similarly strong performance, whereas SVM demonstrated reduced sensitivity and lower PR–AUC. Importantly, the Random Forest model's robustness was further evident during external validation using an independent set of experimentally verified AMPs and curated non–AMP sequences. These findings demonstrate that the tree–based ensemble method–particularly Random Forest–is best suited for physicochemical descriptors, providing stable and high–confidence predictions of AMP activity.

Feature–Level Interpretation

We further interpreted the model using SHAP and Random Forest analyses. The results show that they consistently identified isoelectric point, net charge, and flexibility as the strongest positive contributors to AMP predictions (Fig. 4A and 4B). Peptides enriched in cationic residues (K, R) and exhibiting greater structural adaptability were more likely to be classified as active, reflecting the requirement for strong electrostatic attraction and membrane engagement in targeting *K. pneumoniae*. In contrast, higher molecular weight, acidic residues, and longer sequences contributed negatively. These results indicate that peptides with high

cationicity and sufficient flexibility represent the key physicochemical profile, most predictive of activity against *K. pneumoniae*.

Discussion and Conclusion

This study demonstrates that a physicochemical descriptor–based ML framework can accurately identify AMPs active against *K. pneumoniae*, consistent with prior studies emphasizing the importance of charge, pI, and structural adaptability in AMP function (Vishnepolsky and Pirtskhalava, 2014; Wang et al., 2022). Also, Random Forest was performed best, in agreement with earlier reports, highlighting the strength of ensemble approaches for peptide classification (Burdukiewicz et al., 2020; Xiao et al., 2013). Feature–interpretation analyses further supported established mechanisms, confirming that cationicity and flexibility are key contributors to activity against the highly anionic membrane of *K. pneumoniae* (Yeaman & Yount, 2003), while other properties such as cysteine content and secondary–structure bias showed limited predictive value, as reported previously (Burdukiewicz et al., 2020; Fjell et al., 2009). Nevertheless, this framework has limitations. The curated dataset remains relatively small, potentially limiting generalizability. The exclusive use of physicochemical descriptors omits structural or dynamic information, and experimental validation of newly predicted peptides was not performed and should be addressed in future work.

This work demonstrates that a descriptor–based ML framework can reliably identify AMPs active against *K. pneumoniae*. The model showed strong cross–validated and external performance, supported by interpretable feature contributions. Overall, the framework offers a transparent tool for AMP discovery, with opportunities for expansion through structural and experimental integration.

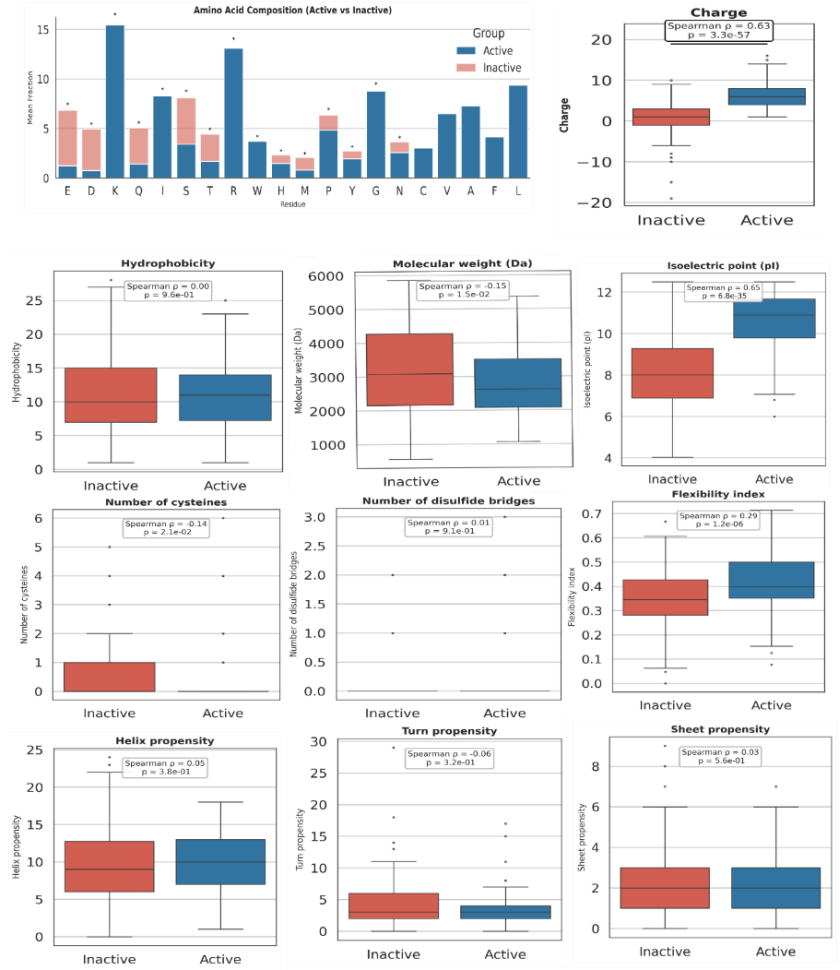


Fig. 2 Physicochemical feature distribution of active and inactive peptides.

(A) (B)

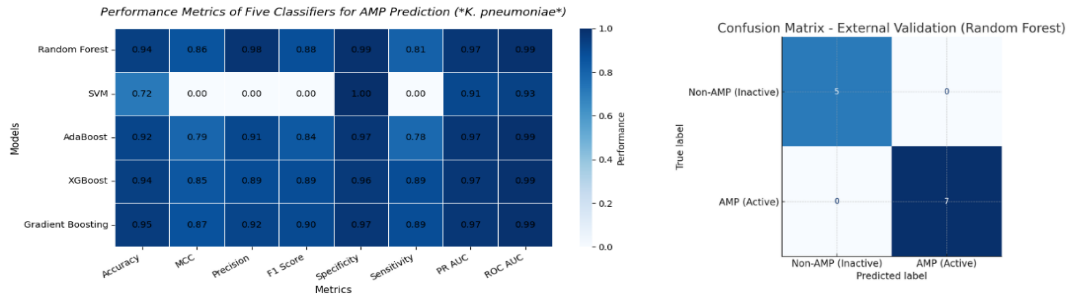


Fig. 3 Model evaluation and cross-validation performance of five machine-learning classifiers.

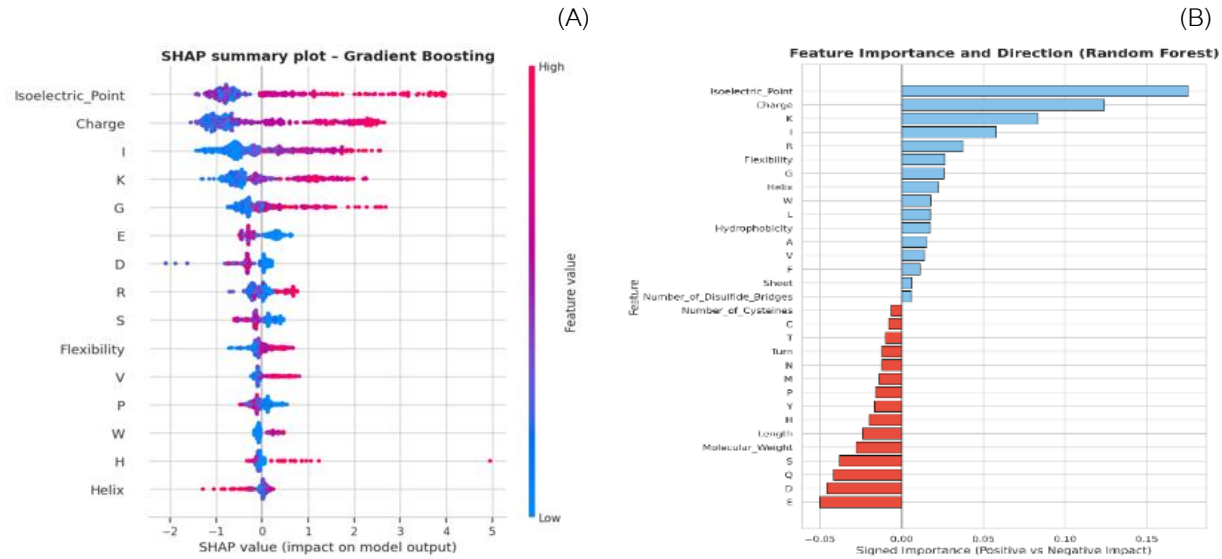


Fig. 4 (A) SHAP summary plot;(B) Permutation importance.

Conflict of Interest

The authors declare that there are no conflicts of interest.

Acknowledgement

We would like to express appreciation for the Khon Kaen University scholarship for ASEAN & GMS country students and Department of Microbiology, Faculty of Medicine, Khon Kaen University, for providing technical resources and a supportive research environment essential for completing this work.

Reference

Badosa, E., Ferre, R., Planas, M., Feliu, L., Besalú, E., Cabrefiga, J., Bardají, E., Montesinos, E. 2007. A library of linear undecapeptides with bactericidal activity against phytopathogenic bacteria. Peptides 28: 2276–2285. doi.org/10.1016/j.peptides.2007.09.010

Bhadra, P., Yan, J., Li, J., Fong, S., Siu, S.W.I. 2018. AmPEP: Sequence–based prediction of antimicrobial peptides using distribution patterns of amino acid properties and random forest. Sci. Rep. 8: 1697. doi.org/10.1038/s41598-018-19752-w

Burdukiewicz, M., Sidorczuk, K., Rafacz, D., Pietluch, F., Chilimoniuk, J., Rödiger, S., Gagat, P. 2020. Proteomic screening for prediction and design of antimicrobial peptides with AmpGram. Int. J. Mol. Sci. 21: 4310. doi.org/10.3390/ijms21124310

Centers for Disease Control and Prevention. 2019. Emerging infections program (EIP) network report healthcare–associated infections community interface activity multi–site gram–negative surveillance initiative extended–spectrum β–lactamase (ESBL) producing Enterobacterales (ESBL–E) surveillance, July 1–December 31, 2019. USA.

Christopher, D.F., Jan, A.H., Robert, E.W.H., Gisbert, S. 2012. Designing antimicrobial peptides: Form follows function. Nat. Rev. Drug Discov. 11: 37–51. doi.org/10.1038/nrd3591

Fjell, C.D., Jenssen, H., Hilpert, K., Cheung, W.A., Panté, N., Hancock, R.E.W., Cherkasov, A. 2009. Identification of novel antibacterial peptides by chemoinformatics and machine learning. J. Med. Chem. 52: 2006–2015. doi.org/10.1021/jm8015365

Hancock, R.E.W., Sahl, H.G. 2006. Antimicrobial and host–defense peptides as new anti–infective therapeutic strategies. Nat. Biotechnol. 24: 1551–1557. doi.org/10.1038/nbt1267

Jayol, A., Nordmann, P., Brink, A., Villegas, M.V., Dubois, V., Poirel, L. 2017. High–level resistance to colistin mediated by various mutations in the crrB gene among carbapenemase–producing Klebsiella pneumoniae. Antimicrob. Agents Chemother. 61: e01423–17. doi.org/10.1128/AAC.01423-17

Lertampaiporn, S., Vorapreeda, T., Hongsthong, A., Thammarongtham, C. 2021. Ensemble–AMPPred: Robust AMP prediction and recognition using the ensemble learning method with a new hybrid feature for differentiating AMPs. Genes 12: 137. doi.org/10.3390/genes12020137

Li, T., Ren, X., Luo, X., et al. 2024. A foundation model identifies broad–spectrum antimicrobial peptides against drug–resistant bacterial infection. Nat. Commun. 15: 7538. doi.org/10.1038/s41467-024-51933-2

López–Siles, M., Tajuelo, A., Caravaca–Fuentes, P., Planas, M., Feliu, L., McConnell, M.J. 2025. Identification and characterization of amphipathic antimicrobial peptides with broad spectrum activity against multi–drug resistant bacteria. Curr. Res. Microb. Sci. 8: 100363. doi.org/10.1016/j.crmicr.2025.100363

Navon–Venezia, S., Kondratyeva, K., Carattoli, A. 2017. Klebsiella pneumoniae: A major worldwide source and shuttle for antibiotic resistance. FEMS Microbiol. Rev. 41: 252–275. doi.org/10.1093/femsre/fux013

Vishnepolsky, B., Pirtskhalava, M. 2014. Prediction of linear cationic antimicrobial peptides based on characteristics responsible for their interaction with the membranes. J. Chem. Inf. Model. 54: 1512–1523. doi.org/10.1021/ci4007003

Wang, G., Vaisman, I.I., van Hoek, M.L. 2022. Machine learning prediction of antimicrobial peptides. Methods Mol. Biol. 2405: 1–37. doi.org/10.1007/978-1-0716-1855-4_1

Yan, M., Clarkson, T., Walker, J.C., Alam, T., Brock, P., Kirk, N., Wiggins, J.L., Jarcho, J.M. 2023. Neural correlates of peer evaluation in irritable adolescents: Linking anticipation to receipt of social feedback. Biol. Psychol. 179: 108564. doi.org/10.1016/j.biopsycho.2023.108564

Yeaman, M.R., Yount, N.Y. 2003. Mechanisms of antimicrobial peptide action and resistance. Pharmacol. Rev. 55: 27–55. doi.org/10.1124/pr.55.1.2

Perceived benefits and risks of egg consumption across demographic groups

Pavaree Krityakianrana
Shrewsbury International School Bangkok, Bangkok 10120, Thailand
E-mail address: borpit.pran@gmail.com

Abstract

Dietary protein is essential for muscle maintenance and overall health, and eggs are a widely accessible high-quality source. However, global consumption remains uneven, and public debate about cholesterol, diabetes risk, and food safety continues to influence dietary behaviour. This study surveyed 100 participants to examine perceptions across ten statements on digestibility, muscle health, chronic disease benefits, weight management, and risks related to diabetes, cardiovascular disease, Salmonella, and allergy. Overall perceptions were favourable, though teenagers showed significantly lower acceptance than young and older adults despite holding similar views on benefits and risks. Gender differences were minimal, and preference-based variation was modest, with egg-preferring individuals showing higher acceptance and nut-preferring participants demonstrating greater sensitivity to risks. These findings suggest that perceptual differences arise more from age-specific behaviours and dietary habits than from health beliefs. Understanding these patterns can guide targeted nutrition education, particularly for adolescents, and support strategies that promote adequate, high-quality protein intake.

Keywords: Consumer perception, Dietary protein, Egg consumption

Introduction

Dietary protein is essential for maintaining health across all ages. Adequate protein supports muscle repair, immune function, metabolic regulation, and tissue maintenance. Amino acids play roles in immunity and vascular function. Insufficient intake can impair wound healing, reduce immune response and cause tissue loss, while excessive intake may also strain digestion or kidney function (Wu, 2016). Higher quality protein improves satiety, supports weight management, improves metabolic efficiency and enhances muscle protein synthesis, especially benefiting older adults and athletes who have higher protein needs (Park et al., 2022).Meeting protein needs with balanced and high–quality sources is crucial for overall health and well–being.

To further illustrate the importance of dietary protein, research highlights the significant contribution of high–quality protein to physiological resilience and long–term health outcomes. Maintaining muscle health in older adults depends mainly on sufficient dietary protein. Animal proteins are generally more effective than plant proteins in stimulating muscle protein synthesis and consuming up to 1.2 g/kg/day of high-quality protein may help prevent sarcopenia (muscle loss), although older adults often face challenges such as reduced appetite and difficulty meeting protein requirements (Putra et al., 2021). Sarcopenia is linked to increased risk of obesity, diabetes and cardiovascular disease, and amino acids from dietary protein (Baum and Wolfe, 2015). This emphasis on muscle maintenance in later life provides an important foundation for understanding why protein–rich foods, including eggs, have become central to discussions surrounding health, accessibility, and dietary choices. Building on the broader importance of protein, global intake patterns show that eggs remain a significant yet unevenly distributed protein source. Global egg intake shows substantial regional differences, with higher consumption in developed countries and parts of Asia, and lower intake in many low–income regions. Eggs contribute to multiple health outcomes, including cardiovascular health, growth, and overall nutrient adequacy (Zhang et al., 2020). Despite being affordable and nutrient–dense, many populations, especially in low– and middle–income countries, lack access to eggs. In Sub–Saharan Africa, only 40 eggs per capita per year are available, while 265 eggs per year are available in high –income countries. Unfortunately, only 12.6% of young children in Africa and 14.7% in India had eaten an egg in a 24–hour period (a day). They suggest strategies such as improving production, distribution, and affordability to enhance universal availability and support maternal and child nutrition (Morris et al., 2018). These disparities highlight the importance of understanding not only consumption patterns but also the public perceptions that influence whether individuals choose eggs as a protein source. This shift from availability to perception becomes especially relevant when considering ongoing debates about egg–related health risks.

While eggs offer nutritional benefits, their consumption has been the subject of long–standing debate due to concerns about cholesterol, cardiovascular disease, and other health outcomes. Egg consumption and cardiovascular risk have been widely studied. Twenty–three studies (1.4 million participants) were analysed and found that eating more than one egg per day was not associated with higher overall cardiovascular disease risk (HR = 0.99, 95% CI 0.93–1.06), and higher intake was linked to a lower risk of coronary artery

disease (HR = 0.89, 95% CI 0.86–0.93) (Krittanawong et al., 2021). Reviewing RCTs noted that more eggs per day can raise LDL cholesterol and the LDL/HDL ratio, cautioning that long-term intake may increase cardiovascular risk, especially in susceptible individuals (Li et al., 2020). To support interpretation, key statistical terms are clarified here. HR stands for Hazard Ratio, which is a measure of risk for an event occurring in a specific period. CI stands for Confidence Interval, which is a range of values that is likely to contain the true value of a statistic, with a 95% CI being common. An RCT is a scientific method used to test the effectiveness of an intervention by randomly assigning participants into at least two groups: an experimental group that receives the intervention and a control group that receives a placebo or standard treatment. LDL cholesterol is low-density lipoprotein, often called “bad” cholesterol. The LDL/HDL ratio is a calculation of “bad” (LDL) and “good” (HDL) cholesterol to assess cardiovascular risk. Egg consumption and risk of type 2 diabetes have been investigated in several large studies. In 2016, a meta-analysis found that in the US population, consuming 3 eggs or more per week was associated with a significantly higher diabetes risk (CI 1.21–1.60), while no elevated risk was observed in non-US studies (Djousse et al., 2016). In 2020, it was reported that in over 200 000 US participants, each additional egg per day was linked to a 14% higher risk of type 2 diabetes after adjusting for diet and lifestyle factors (Drouin-Chartier et al., 2020). These mixed findings demonstrate that scientific views on egg-related risks are not uniform, which may contribute to uncertainty among consumers. Egg consumption can also lead to health concerns related to both Salmonella infection and egg allergy. Salmonella contamination in the US is reported to be very low (0.005%), but improper handling, cross-contamination and consumption of undercooked eggs at home significantly increase infection risk (Solis et al., 2023). Up to 9% of one-year-old children may have an egg allergy in some populations, though 60–75% of children allergic to raw egg can tolerate cooked egg later, highlighting the importance of careful dietary management (Dona and Suphioglu, 2020). As a result, public perception is shaped not only by scientific evidence but also by food safety concerns and personal experiences. Consumer perception plays a critical role in shaping actual dietary behaviour. Even when nutrient-dense foods such as eggs are widely available, individual beliefs, risk awareness, and misconceptions strongly influence whether people choose to include them in their daily meals. Public debates about cholesterol, diabetes, and allergies can amplify confusion, leading some consumers to avoid eggs despite scientific evidence supporting their nutritional benefits. Understanding these perceptions is therefore essential for improving dietary guidance, protein adequacy, and long-term population health. This behavioural dimension leads naturally to the recognition that scientific findings alone cannot fully explain consumption trends.

Although numerous studies have examined the clinical effects of egg consumption including cardiovascular outcomes, diabetes risk, and allergy prevalence, far fewer have investigated how different demographic groups perceive eggs as a beneficial or risky protein source. Most existing research focuses on physiological outcomes rather than psychological, behavioural, or demographic differences in food perception. This creates a gap in understanding how age, gender, and personal dietary preferences shape

attitudes toward eggs, despite these factors being key determinants of food choice. Recognising these gaps highlights the importance of exploring demographic patterns of perception. The literature suggests that food-related beliefs are influenced by nutritional knowledge, exposure to health information, socio-cultural norms, and personal dietary habits. Given that age groups differ in nutritional needs, health awareness, and media exposure, their perceptions of eggs may also differ. Similarly, gender-based differences in food attitudes have been documented in broader nutrition studies, suggesting a potential influence on protein source preferences. In addition, individuals who prefer certain protein sources such as meat, eggs, legumes, or nuts may hold different beliefs about the benefits and risks of alternative protein options. These theoretical links justify examining age, gender, and preferred protein sources as key variables in this study. These considerations collectively demonstrate the need for a perception-focused investigation. Taken together, current literature highlights the nutritional importance of eggs and documents ongoing debates regarding their health implications. However, much less is known about how different groups within the population interpret these benefits and risks. Understanding these perception patterns is essential for designing effective nutrition education interventions and promoting adequate protein intake. To address these gaps, the present study examines how age, gender, and preferred protein sources influence consumers' perceptions of eggs as both a beneficial and potentially risky protein option.

Materials and Methods

Having established the rationale for investigating consumer perceptions, this study is grounded in a cross-sectional quantitative survey design, specifically employed to examine diverse consumer perceptions of eggs. The study was structured to facilitate comprehensive analysis across key variables, including age groups, gender and individuals' preferred sources of dietary protein. Data was systematically collected from all participants through a structured, standardised questionnaire. A total of 100 individuals participated in the study through convenience sampling. The sample was categorised into three distinct age groups for comparative analysis: teenagers (under 20 years old), young adults (20–45 years old), and older adults (over 45 years old). The participant sample also included separate categories to account for gender differences in perception. These classifications allowed for meaningful subgroup comparisons aligned with the study's objectives. Data collection was done through an online questionnaire distributed via Google Forms. Participants provided informed consent prior to participation and confidentiality was assured throughout the data collection process. Statistical analyses were conducted using JASP. Descriptive statistics (means and standard deviations) were calculated to summarise key variables. ANOVAs were used to compare mean differences across age groups, gender and preferred protein sources, followed by Tukey post hoc tests for pairwise comparison. Pearson correlation analyses examined relationships between consumption frequency or amount and perception scores. Statistical significance was set at $p > 0.05$ (Guetterman, 2019).

Result and Discussion

Descriptive Statistics

According to Table 1, eggs as a Preferable Protein Source (Statements 1–3): Participants generally viewed eggs positively as a protein source. Statement 1 (digestibility) had a mean of 3.88, and Statement 2 (effectiveness for muscle health) had the highest mean at 3.92, indicating broad agreement that egg protein is high quality. Statement 3 (supporting muscle strength in older adults) showed slightly lower agreement (3.60), but still above neutral. Overall, respondents tended to favour eggs over other protein sources. Perceived Benefits (Statements 4–5): Perceptions of health benefits were moderately positive. Statement 4 (chronic disease protection) had a more neutral mean of 3.37, whereas Statement 5 (weight-loss success) showed stronger agreement at 3.67. These findings suggest that while participants recognise some benefits, certainty is stronger for weight-related benefits than for disease prevention. Perceived Risks (Statements 6–10): Risk perceptions were overall low. Statement 6 (diabetes risk) had the lowest mean at 2.32, indicating clear disagreement. Cardiovascular-related concerns (Statements 7–8) showed slightly higher but still low agreement (2.70–2.79). Food safety and allergy concerns were comparatively higher: Statement 9 (Salmonella) had a mean of 2.59, and Statement 10 (egg allergy prevalence) reached 3.11, the highest of the risk items. Overall, participants disagreed with most risks, with the exception of mild concern regarding allergies.

Table 1 Descriptive statistics for consumer perceptions of eggs

Questionnaire Statement	Mean	SD	Min	Max
1. I believe eggs are the most digestible source of protein compared to meat, dairy, or plant proteins.	3.880	0.913	1.000	5.000
2. I believe egg protein is more effective than plant protein for supporting muscle health.	3.920	1.002	1.000	5.000
3. I believe eggs are better than meat or dairy at helping older adults maintain muscle strength as they age.	3.600	0.985	1.000	5.000
4. I believe egg protein can help protect against chronic diseases such as high blood pressure and cancer.	3.370	0.971	1.000	5.000
5. I believe adding eggs to meal plans can make weight loss more successful.	3.670	1.074	1.000	5.000
6. I believe egg consumption increases the risk of diabetes.	2.320	1.0 81	1.000	5.000
7. I believe people at high risk of cardiovascular disease should avoid eating eggs.	2.700	0.927	1.000	4.000
8. I believe the cholesterol in eggs contributes to cardiovascular disease.	2.790	0.957	1.000	5.000
9. I believe eating eggs can put consumers at risk of Salmonella infection (a foodborne illness that causes diarrhoea).	2.590	1.026	1.000	5.000
10. I believe egg allergy is one of the most common food allergies in children.	3.110	1.180	1.000	5.000

Age-Based Differences in Perceptions of Eggs

According to Table 2, eggs as a Preferable Protein Source: Different age groups of consumers including teenagers, young adults, and adults, showed significant differences in their understanding and choices regarding eggs as a protein source ($p < 0.001$). Post hoc analysis indicated that teenagers (below 20) differed significantly from both young adults and adults ($p < 0.001$ for both comparisons). Young adults expressed the least strong agreement on Statements 1 and 2, with means of 3.41 and 3.46, respectively, compared to the other age groups, which showed means greater than 4.00. These results suggest that younger respondents are less convinced that eggs are superior to other protein options.

Perceived Benefits: There was no significant difference in perceived benefits across age groups ($p > 0.005$) for both statements about egg protein protecting against chronic diseases and aiding weight loss. Responses across all age groups were generally neutral, with means around 3.00, indicating comparable levels of uncertainty or moderate agreement about these health-related benefits. Perceived Risks: For risk-related perceptions, no significant differences were observed between the three age groups ($p > 0.005$). This indicates that concerns regarding diabetes, cardiovascular disease, Salmonella, and egg allergy are similar across all ages, with no group showing higher or lower perceived risk. Teenager's weak acceptance of eggs as a protein source, despite perceiving similar benefits and risks as adults, suggests the difference is caused by other factors. This low acceptance aligns with evidence that adolescent diets, particularly in Western countries, often have protein intakes significantly higher than recommendations (Xiong, 2023 and Garcia-Iborra, 2023), yet this protein is often sourced from less nutrient dense food. This weak acceptance further emphasizes the need for targeted nutrition education to increase positivity of perception into consistent dietary choices (Barrar, 2024). The specific lack of egg acceptance in this group may indicate a weak connection between awareness of general protein benefits. In contrast, one study in Accra found that younger adults consumed eggs more frequently than older adults who avoided them due to some beliefs associated with health concerns, suggesting that cultural or historical context can significantly change age-based consumption patterns and habits (Ayim-Akonor, 2014).

Gender-Based Differences in Perceptions

According to Table 3, eggs as a Preferable Protein Source: There was no significant difference between males and females in their choices and understanding of eggs as a protein source ($p > 0.005$). However, males tended to show slightly stronger agreement across all three statements. For example, Statement 2 had a male mean of 4.17, compared to 3.81 for females. Perceived Benefits: For the two benefit statements, there was again no significant difference between genders ($p > 0.005$). This suggests that both males and females hold similar views regarding eggs' potential protective effects or usefulness for weight management. Perceived Risks: Risk-related perceptions also did not differ significantly between genders. Nonetheless, both males and females showed higher agreement for Statement 10with mean scores above 3.0,

compared with means below 3.0 for the other risk statements. This indicates that allergy concerns are more salient than other risks for both genders.

Table 2 Mean perception scores for egg-related statements across three age groups.

Statement	Age group	No.	Mean	SD	Min	Max
1	Below 20	39	3.410	0.715	2.000	5.000
	20-45	32	4.250	0.803	2.000	5.000
	Above 45	29	4.103	1.012	1.000	5.000
2	Below 20	39	3.564	1.046	1.000	5.000
	20-45	32	4.094	0.893	2.000	5.000
	Above 45	29	4.207	0.940	2.000	5.000
3	Below 20	39	3.308	0.950	1.000	5.000
	20-45	32	3.813	0.896	2.000	5.000
	Above 45	29	3.759	1.057	1.000	5.000
4	Below 20	39	3.359	0.959	1.000	5.000
	20-45	32	3.219	0.832	1.000	5.000
	Above 45	29	3.552	1.121	1.000	5.000
5	Below 20	39	3.487	1.097	1.000	5.000
	20-45	32	3.781	0.941	2.000	5.000
	Above 45	29	3.793	1.177	1.000	5.000
6	Below 20	39	2.487	0.942	1.000	4.000
	20-45	32	2.281	0.924	1.000	4.000
	Above 45	29	2.138	1.382	1.000	5.000
7	Below 20	39	2.769	0.777	1.000	4.000
	20-45	32	3.000	0.762	1.000	4.000
	Above 45	29	2.276	1.131	1.000	4.000
8	Below 20	39	3.103	0.788	2.000	5.000
	20-45	32	2.906	0.818	1.000	4.000
	Above 45	29	2.241	1.091	1.000	4.000
9	Below 20	39	2.821	0.914	1.000	5.000
	20-45	32	2.563	0.840	1.000	4.000
	Above 45	29	2.310	1.285	1.000	5.000
10	Below 20	39	3.154	1.136	1.000	5.000
	20-45	32	3.094	0.963	1.000	5.000
	Above 45	29	3.069	1.462	1.000	5.000

The finding of no statistical difference in egg perception between genders in this survey is consistent with some consumption surveys where factors like sex had no marked difference in overall egg consumption frequency (Ayim-Akonor and Akonor, 2014). However, this contrasts with other research indicating significant gender differences in broader dietary preferences and consumption habits. A population-based survey found that men prefer red and processed meat and have significantly higher consumption rates, while women had healthier food choices like fruits and vegetables (Feraco et al., 2024). This suggests that while the perception of eggs (benefits and risks) may be similar, gender specific meal preferences such as male preference for high fat could lead to different consumption rates or roles for eggs in the diet (Aldaz et al., 2022; Feraco et al, 2024). Therefore, lack of perceptual knowledge does not account for differences in egg consumption behaviour.

Table 3 Mean perception scores for egg-related statements by gender

Statement	Age group	No.	Mean	SD	Min	Max
1	Male	30	4.000	1.050	1.000	5.000
	Female	70	3.829	0.851	2.000	5.000
2	Male	30	4.167	0.986	2.000	5.000
	Female	70	3.814	0.997	1.000	5.000
3	Male	30	3.800	0.997	1.000	5.000
	Female	70	3.514	0.974	1.000	5.000
4	Male	30	3.767	0.971	1.000	5.000
	Female	70	3.200	0.926	1.000	5.000
5	Male	30	3.733	1.081	1.000	5.000
	Female	70	3.643	1.077	1.000	5.000
6	Male	30	2.233	1.305	1.000	5.000
	Female	70	2.357	0.979	1.000	4.000
7	Male	30	2.500	1.137	1.000	4.000
	Female	70	2.786	0.815	1.000	4.000
8	Male	30	2.400	1.070	1.000	4.000
	Female	70	2.957	0.859	1.000	5.000
9	Male	30	2.400	1.248	1.000	5.000
	Female	70	2.671	0.912	1.000	5.000
10	Male	30	3.100	1.373	1.000	5.000
	Female	70	3.114	1.097	1.000	5.000

Differences Based on Preferred Protein Source

According to Table 4, eggs as a Preferable Protein Source: There was no significant difference in acceptance of eggs across different favourite protein groups. A low correlation emerged between individuals who favoured nuts and Statement 2. Notably, participants who preferred legumes or eggs showed a higher

mean score of 4.00 for Statement 3, compared with approximately 3.00 among other groups. Post hoc testing showed a significant difference between egg-preferring and meat-preferring groups ($p < 0.005$), indicating that protein preference modestly shapes acceptance. Perceived Benefits: Moderate correlations were found for participants who preferred nuts, particularly for Statements 4 and 5. Those who preferred nuts and legumes also showed higher agreement on Statement 5 (weight-loss benefits), whereas other groups displayed weaker correlations and lower means. Perceived Risks: There was no significant difference in risk perceptions across favourite protein groups ($p > 0.05$). However, moderate correlations were observed for nut-preferring participants with several risk items (Statements 6, 7, 8, and 9), suggesting that individuals who prefer nuts may be somewhat more sensitive to potential risks associated with eggs.

The comparison between egg preferred and meat preferred reflects self–selection based on preference and familiarity. When compared to broader population data, other sources are notably popular. For example, in the UK, while meat and meat products contribute the largest percentage of protein intake, cereal products (rice, pasta, bread) and dairy are also major contributors, with eggs contributing a smaller, though still important percentage (Lonnie et al., 2018). Plant–based sources like legumes, nuts and seeds are increasingly popular and are consumed at higher rates by low non-meat eaters (Papier et al., 2019). The finding of lower egg acceptance among teenagers highlights a critical area for public health intervention through targeted nutrition education. Campaigns should focus on communicating the superior nutritional value of eggs, particularly their contribution to micronutrients that are often deficient in adolescent diets, such as Vitamin D and iron (Cozma–Petruţ et al, 2021; Zhang et al., 2022). Eggs should be promoted as an affordable, high quality protein source that supports healthy weight management and satiety, especially when consumed at breakfast. Effective interventions should communicate with teenagers such as linking egg consumption to improved academic performance and energy levels (Sato et al., 2022). Although this study provides valuable insight into how age, gender, and preferred protein sources shape consumer perceptions of eggs, several limitations must be acknowledged. First, the sample size was relatively small (n = 100) and drawn through convenience sampling, which limits the generalisability of the findings beyond the surveyed population. The sample was also uneven across demographic categories, with certain groups such as dairy-preferring or legume-preferring participants being underrepresented, reducing statistical power for subgroup comparisons. Second, data collection relied on self-reported perceptions, which may be influenced by social desirability bias, recall bias, or limited nutritional knowledge. Third, because the study employed a cross-sectional design, it cannot determine causal relationships between demographic factors and perception patterns. Future research should therefore aim to use larger, more diverse, and more representative samples to validate these findings across different cultural and socioeconomic groups. Longitudinal studies could help track how perceptions evolve with age, education, and health experiences. Qualitative methods such as interviews or focus groups may also deepen understanding of why teenagers show weaker acceptance of eggs despite recognising similar benefits and risks as adults. Expanding future surveys to include knowledge-based questions, dietary habits, and media

influence would provide a more comprehensive picture of the behavioural and informational determinants of egg consumption. Together, these directions can support more effective, evidence–based nutrition education and public health strategies that promote informed, balanced protein choices across populations.

Table 4 Mean perception scores for egg-related statements based on participants' preferred protein source

Statement	Age group	No.	Mean	SD	Min	Max
1	Dairy Products	3	4.000	0.000	4.000	4.000
	Nuts	3	4.000	1.000	3.000	5.000
	Legumes	2	4.500	0.707	4.000	5.000
	Egg	27	4.185	0.786	3.000	5.000
	Meat	65	3.723	0.960	1.000	5.000
2	Dairy Products	3	3.333	0.577	3.000	4.000
	Nuts	3	3.667	1.155	3.000	5.000
	Legumes	2	3.500	0.707	3.000	4.000
	Egg	27	4.259	0.903	2.000	5.000
	Meat	65	3.831	1.039	1.000	5.000
3	Dairy Products	3	3.333	0.577	3.000	4.000
	Nuts	3	3.000	1.000	2.000	4.000
	Legumes	2	4.000	1.414	3.000	5.000
	Egg	27	4.000	0.920	2.000	5.000
	Meat	65	3.462	0.985	1.000	5.000
4	Dairy Products	3	3.333	0.577	3.000	4.000
	Nuts	3	3.333	1.528	2.000	5.000
	Legumes	2	3.500	0.707	3.000	4.000
	Egg	27	3.185	0.962	1.000	5.000
	Meat	65	3.446	0.985	1.000	5.000
5	Dairy Products	3	3.667	0.577	3.000	4.000
	Nuts	3	4.000	1.732	2.000	5.000
	Legumes	2	4.500	0.707	4.000	5.000
	Egg	27	3.889	1.086	1.000	5.000
	Meat	65	3.538	1.062	1.000	5.000
6	Dairy Products	3	2.667	1.528	1.000	4.000
	Nuts	3	3.000	1.732	2.000	5.000
	Legumes	2	2.500	0.707	2.000	3.000
	Egg	27	2.333	1.209	1.000	5.000
	Meat	65	2.262	1.004	1.000	4.000

Table 4 *continued*

Statement	Age group	No.	Mean	SD	Min	Max
7	Dairy Products	3	3.000	0.000	3.000	3.000
	Nuts	3	2.000	1.000	1.000	3.000
	Legumes	2	1.500	0.707	1.000	2.000
	Egg	27	2.852	0.864	1.000	4.000
	Meat	65	2.692	0.951	1.000	4.000
8	Dairy Products	3	3.333	0.577	3.000	4.000
	Nuts	3	2.000	1.000	1.000	3.000
	Legumes	2	2.000	0.000	2.000	2.000
	Egg	27	2.963	0.854	1.000	5.000
	Meat	65	2.754	1.000	1.000	5.000
9	Dairy Products	3	2.667	0.577	2.000	3.000
	Nuts	3	2.000	1.000	1.000	3.000
	Legumes	2	1.000	0.000	1.000	1.000
	Egg	27	2.778	0.892	1.000	4.000
	Meat	65	2.585	1.074	1.000	5.000
10	Dairy Products	3	3.000	0.000	3.000	3.000
	Nuts	3	2.667	0.577	2.000	3.000
	Legumes	2	2.000	0.000	2.000	2.000
	Egg	27	3.000	1.144	1.000	5.000
	Meat	65	3.215	1.244	1.000	5.000

Conclusion

This study examined how age, gender, and preferred protein sources shape consumer perceptions of eggs as a beneficial yet potentially risky protein option. While participants generally viewed eggs favourably, significant age-based differences emerged, with teenagers showing weaker acceptance despite perceiving similar benefits and risks as adults. Gender differences were minimal, and preferences for specific protein sources contributed only modest variation in perception. These findings suggest that demogra phic influences on egg perception are driven more by dietary habits, behavioural patterns, and familiarity than by health-related beliefs. Given the nutritional value and accessibility of eggs, particularly as a high-quality protein source, targeted nutrition education, especially for adolescents, may help strengthen informed food choices and promote adequate protein intake. The study highlights the importance of understanding consumer perception to support effective dietary guidance and public health strategies.

Conflict of Interest

The author declares that there are no conflicts of interest regarding the conduct of this research, the interpretation of the findings, or the preparation of this manuscript. The study was conducted independently without financial, commercial, or institutional influence.

References

Aldaz, K.J., Flores, S.O., Ortiz, R.M., Diaz Rios, L.K., Dhillon, J. 2022. A cross–sectional analysis of food perceptions, food preferences, diet quality, and health in a food desert campus. Nutrients 14: 5215.

Ayim-Akonor, M., Akonor, P.T. 2014. Egg consumption: patterns, preferences and perceptions among consumers in Accra metropolitan area.

Barrar, J. 2024. Protein intake and dietary sources in adolescents aged 14–19 years: insights from the Auckland, Waikato, and Bay of Plenty regions of New Zealand. Massey University.

Baum, J.I., Wolfe, R.R. 2015. The link between dietary protein intake, skeletal muscle function and health in older adults. Healthcare 3: 529–543.

Cozma-Petruţ, A., Filip, L., Banc, R., Mîrza, O., Gavrilaş, L., Ciobârcă, D., Badiu-Tişa, I., Hegheş, S.C., Popa, C.O., Miere, D. 2021. Breastfeeding practices and determinant factors of exclusive breastfeeding among mothers of children aged 0–23 months in Northwestern Romania. Nutrients 13: 3998.

Djoussé, L., Khawaja, O.A., Gaziano, J.M. 2016. Egg consumption and risk of type 2 diabetes: a meta–analysis of prospective studies. Am. J. Clin. Nutr. 103: 474–480.

Dona, D.W., Suphioglu, C. 2020. Egg allergy: diagnosis and immunotherapy. Int. J. Mol. Sci. 21: 5010.

Drouin–Chartier, J.P., Schwab, A.L., Chen, S., Li, Y., Sacks, F.M., Rosner, B., Manson, J.E., Willett, W.C., Stampfer, M.J., Hu, F.B., Bhupathiraju, S.N. 2020. Egg consumption and risk of type 2 diabetes: findings from 3 large US cohort studies of men and women and a systematic review and meta-analysis of prospective cohort studies. Am. J. Clin. Nutr. 112: 619–630.

Feraco, A., Armani, A., Amoah, I., et al. 2024. Assessing gender differences in food preferences and physical activity: a population-based survey. Front. Nutr. 11: 1348456.

Garcia–Iborra, M., Castanys–Munoz, E., Oliveros, E., Ramirez, M. 2023. Optimal protein intake in healthy children and adolescents: evaluating current evidence. Nutrients 15: 1683.

Guetterman, T.C. 2019. Basics of statistics for primary care research. Fam. Med. Community Health 7: e000067.

Krittanawong, C., Narasimhan, B., Wang, Z., Virk, H.U.H., Farrell, A.M., Zhang, H., Tang, W.H.W. 2021. Association between egg consumption and risk of cardiovascular outcomes: a systematic review and meta-analysis. Am. J. Med. 134: 76–83.

Li, M.Y., Chen, J.H., Chen, C., Kang, Y.N. 2020. Association between egg consumption and cholesterol concentration: a systematic review and meta–analysis of randomized controlled trials. Nutrients 12: 1995.

Lonnie, M., Hooker, E., Brunstrom, J.M., et al. 2018. Protein for life: review of optimal protein intake, sustainable dietary sources and the effect on appetite in ageing adults. Nutrients 10: 360.

Morris, S.S., Beesabathuni, K., Headey, D. 2018. An egg for everyone: pathways to universal access to one of nature's most nutritious foods. Matern. Child Nutr. 14: e12679.

Papier, K., Tong, T.Y., Appleby, P.N., et al. 2019. Comparison of major protein–source foods and other food groups in meat–eaters and non–meat–eaters in the EPIC-Oxford cohort. Nutrients 11: 824.

Park, Y.J., Chung, S., Hwang, J.T., Shon, J., Kim, E. 2022. A review of recent evidence of dietary protein intake and health. Nutr. Res. Pract. 16: S37–S46.

Putra, C., Konow, N., Gage, M., York, C.G., Mangano, K.M. 2021. Protein source and muscle health in older adults: a literature review. Nutrients 13: 743.

Sato, K., Suzuki, F., Tsujiguchi, H., et al. 2022. Relationship between vitamin intake and resilience based on sex in middle–aged and older Japanese adults: results of the Shika study. Nutrients 14: 5042.

Solís, D., Cordero, N., Quezada–Reyes, M., Escobar–Astete, C., Toro, M., Navarrete, P., Reyes–Jara, A. 2023. Prevalence of Salmonella in eggs from conventional and cage–free egg production systems and the role of consumers in reducing household contamination. Foods 12: 4300.

Wu, G. 2016. Dietary protein intake and human health. Food Funct. 7: 1251–1265.

Xiong, T., Wu, Y., Hu, J., et al. 2023. Associations between high protein intake, linear growth, and stunting in children and adolescents: a cross-sectional study. Nutrients 15: 4821.

Zhang, S., Jiang, S., Deng, N., Zheng, B., Li, T., Liu, R.H. 2022. Phytochemical profiles, antioxidant activity and antiproliferative mechanism of Rhodiola rosea L. phenolic extract. Nutrients 14: 3602.

Zhang, X., Lv, M., Luo, X., et al. 2020. Egg consumption and health outcomes: a global evidence mapping based on an overview of systematic reviews. Ann. Transl. Med. 8: 1343.

Embedded arrhythmia pattern detection using public ECG datasets

Sirawish Akkawattananukul*, Wasitpol Akkawattananukul, Nattawat Phisitthaweekul, Parnpavit Nilgianskul
Shrewsbury International School, Bangkok 10310, Thailand
*Corresponding author. Email address: sirawishmic@gmail.com

Abstract

This study presents the design, implementation, and validation of a fully integrated, embedded arrhythmia pattern detection system using electrocardiogram (ECG) signals for real time, portable ECG monitoring. While leveraging a clinically validated QRS detection methodology, the primary contribution of this work lies in its low power embedded implementation and holistic system integration. Arrhythmia detection algorithms are trained and validated using public benchmark ECG databases (MIT-BIH arrhythmia database), while the system performance is evaluated by analyzing ECG records from these datasets. Classification performance is evaluated using sensitivity, precision, F1-score, and confusion matrices, while system-level performance is measured in terms of detection latency and power consumption. The embedded system achieves high arrhythmia detection performance—with F1 scores of 93.78% for healthy sinus rhythm, 89.51% for premature ventricular contractions (PVC), 90.86% for ventricular tachycardia (VT), and 94.85% for atrial premature complexes (APC). The F1-score, which balances sensitivity and precision into a single metric, proves robust detection across both normal and abnormal rhythms. Critically, at the system level, the implemented system demonstrates low detection latency and minimal power consumption, key metrics for wearable deployment. This work therefore bridges the gap between algorithm validation and practical application, integrating clinically validated detection algorithms with portable, low-cost hardware into a functional cardiac monitoring pipeline.

Keywords: arrhythmia detection, detection algorithms, ECG monitoring, embedded system, F1-score

Introduction

Arrhythmia is a condition classified as an abnormal or irregular heart rhythm, caused by the electrical signal problem, leading to insufficient blood circulation and life-threatening diseases, such as, stroke, heart failure and cardiac arrest (National Heart, Lung, and Blood Institute, 2022). There is an overall decrease in the cardiovascular mortality rate from 681.8 per 100,000 in 1999 to 423.2 per 100,000 in 2023. Alternatively, there is a rise in arrhythmia-related mortality from 111.4 per 100,000 to 137.3 per 100,000 during the same period (Azeem et al., 2025). This divergent trend highlights the growing burden of arrhythmia as a critical public health concern. Electrocardiogram (ECG) is an initial step for suspected patients with arrhythmias to be diagnosed. However, it is often too late as patients perhaps have developed paroxysmal arrhythmia—temporary irregular heartbeat condition (Desai and Hajouli, 2023). This challenge is particularly often in low- and middle-income countries, where limited clinical expertise and healthcare infrastructure are barriers to healthcare access, contributing to higher mortality rates (Garg et al., 2024). Critically, 70% of delayed diagnosis can result in the harmful and irreversible consequences of cardiac dysfunction and elevated mortality risk. Therefore, an early diagnosis is essential to prevent progressive cardiac deterioration (Hoogendoorn et al., 2020).

Conventional ECG systems are largely confined to hospitals and specialized clinics, relying on expensive equipment and trained professionals, which limits continuous monitoring and prevents timely detection of intermittent arrhythmic events. As a result, many patients only receive a diagnosis after symptoms worsen or complications occur. To solve the disparity problem, low-cost and portable ECG devices with reliable algorithms are a solution by enabling continuous monitoring in daily life and improving accessibility. However, to ensure clinical relevance, such systems must be confirmed against clinically annotated ECG databases, which serve as the gold standard for evaluating arrhythmia detection accuracy and reliability. While many accurate arrhythmia detection algorithms have been established in software, their translation into reliable, low-power, and real-time embedded systems presents a distinct engineering challenge. The gap lies not in algorithmic design but in practical, optimized implementation for constrained hardware.

This study therefore aims to develop and validate a fully embedded arrhythmia detection system using clinically annotated ECG databases and real-time measurements to evaluate the critical system-level metrics.

Materials and Methods

Study Design

This experimental study focused on the development and evaluation of a custom QRS detection algorithm, capable of accurately identifying cardiac beats across both normal and pathological rhythms. The validation was conducted using two complementary ECG data sources: (1) normal sinus rhythm recordings obtained from a AD8232-based acquisition system, and (2) a selection of arrhythmia signals from the benchmark MIT-BIH Arrhythmia Database. This dual-source approach ensured the algorithm was tested under

both controlled conditions and clinically representative complex scenarios, with the primary goal of validating the integrated pipeline for monitoring applications.

Data Acquisition and Sources

For normal rhythm data, an AD8232 analog front-end ECG sensor module was employed. The system was configured in a standard Lead I setup, with signals continuously sampled at set frequency to align with clinical standards. A total of four recordings, approximately five minutes in duration, were collected from healthy subjects, providing a baseline dataset characterized by high signal quality and stable morphology for processing chain.

To comprehensively assess performance under arrhythmic conditions, 27 records were systematically selected from the MIT-BIH Arrhythmia Database. This database is gold standard in electrocardiography research, containing 48 half-hour, two-channel ambulatory ECG recordings, each annotated by cardiac experts. The selected records represented three key arrhythmia categories: Premature Ventricular Contractions (PVCs: records 102, 105, 106, 107, 109, 200, 208, 217), Ventricular Tachycardia (VT: records 106, 200, 203, 205, 207, 215, 217, 221), and Atrial Premature Complexes (APCs: records 100, 101, 118, 200, 209, 223, 232). All MIT-BIH signals were used at their frequency sampling rate to maintain consistency with the AD8232 data and preserve original signal fidelity. The quantitative performance metrics reported in this study are exclusively derived from this clinically annotated database.

Signal Characteristics and Processing Algorithm

A normal sinus rhythm ECG waveform, as processed by this system, consists of a repeating sequence of deflections corresponding to the electrical activity of the heart. Key features include the QRS complex (ventricular depolarization), and R-peak, which is used to calculate the heart rate and rhythm regularity. The implemented detection algorithm follows a three-stage pipeline First, processing raw ECG signals underwent an amplitude of normalization to standardize signal levels across different recordings. Subsequently, a bandpass filter with cutoff frequencies of 5 Hz and 15 Hz was applied to reduce baseline wander and high-frequency noise. Finally, a derivative filter was used to highlight the steep slopes of the QRS complexes, making them more distinct from other waveform components.

Adaptive Threshold Detection is a dynamic detection scheme, which was implemented to handle variations in signal amplitude and morphology. Within a moving 200-millisecond analysis window, an adaptive threshold was calculated based on the local signal statistics. This threshold was set as the sum of the window's mean amplitude and a proportion of its standard deviation, with the proportionality constant empirically set to 0.6. Potential QRS complexes were identified when the preprocessed signal exceeded this locally computed threshold. A mandatory 200-millisecond refractory period was enforced after each detection to prevent multiple triggers from a single heartbeat.

R-Peak Localization and Heart Rate Calculation: Each threshold-crossing event marked an approximate QRS region. To pinpoint the exact R-peak, a local maxima search was conducted within a narrow window centered on the initial detection. The sample with the highest amplitude within this search window was designated as the final R-peak. Consecutive R-peaks were used to compute R-R intervals, from which the instantaneous heart rate in beats per minute was derived (HR=60/R-R intervals).

Performance Evaluation

Algorithm performance was quantitatively assessed by comparing its automatically detected R-peaks against the expert reference annotations provided with the MIT-BIH database. For the AD8232 recordings, initial validation was performed via visual inspection to ensure rhythm consistency. Standard detection metrics were calculated based on counts of true positives (TP), false positives (FP), and false negatives (FN). Sensitivity, measuring the proportion of the true beats correctly identified was calculated using Equation 1; precision, measuring the proportion of detections that were true Beatles, was calculated using Equation 2: F1-score, providing a single balanced metric, was calculated using Equation 3:

$$\text{Sensitivity} = \frac{TP}{(TP+FN)} \quad (1)$$

$$\text{Precision} = \frac{TP}{(TP+FP)} \quad (2)$$

$$\text{F1-score} = 2 \times \frac{\text{Precision} \times \text{Sensitivity}}{\text{Precision} + \text{Sensitivity}} \quad (3)$$

Ethical considerations

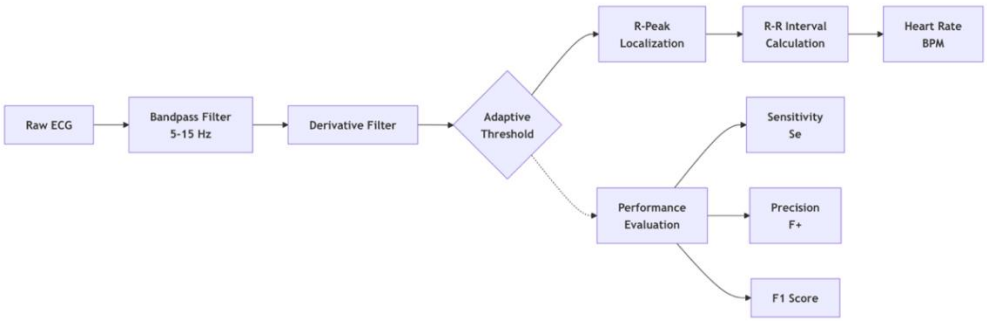


Fig. 1 ECG signal processing and R-peak detection workflow

This study exclusively anonymized and publicly available data. The AD8232 recordings contained no personal identifiers, and the MIT-BIH Arrhythmia Database is a de-identified resource explicitly approved for research use. No new human participants were recruited, ensuring full compliance with ethical standards for secondary data analysis in biomedical engineering research. There is no institutional review board approval that was required due to exclusive use of anonymized public data.

Statistical analysis

Descriptive statistics, expressed as mean ± standard deviation, were calculated for all performance metrics, including sensitivity, precision, F-1 scores and estimated heart rate across each cardiac rhythm group (Normal Sinus Rhythm, PVC, VT, and APC). This analysis allowed for a clear evaluation of the algorithm's consistency and robustness under varying physiological and pathological conditions.

Results and Discussion

Table 1 provides a quantitative comparison of the custom QRS detection algorithm's performance across healthy sinus rhythm and three simulated arrhythmia classes derived from the MIT-BIH Arrhythmia Database. For healthy sinus rhythm (n=4 records), the algorithm demonstrated robust detection with a sensitivity of 95.14% ± 5.34% and precision of 92.73% ± 9.62%, estimating heart rate at 80.58 ± 7.55 BPM. These results are competitive with established rule-based detectors such as Pan-Tompkins and Hamilton when applied to clean, normal ECG segments (Pan and Tompkins, 1985; Hamilton, 2002).

Table 1 Comparison of custom ECG algorithm performance on healthy people data versus simulated arrhythmia waveforms from the MIT-BIH database

Performance metrics	Healthy sinus rhythm (n=4 records)	Premature ventricular contractions (PVC) (n=8 records)	Ventricular tachycardia (n=8 records)	Atrial premature complexes (APCs) (n=7 records)
Estimated BPM	80.58±7.55	72.74±10.60	105.00±20.86	82.90±9.32
True Positive (TP)	10.25±1.71	25.75±11.81	36.88±17.88	34.43±13.24
False Positives (FP)	0.75±0.96	0±0	4.75±6.59	2.43±6.35
False Negatives (FN)	0.50±0.58	6.13±12.28	3.25±1.98	1.00±1.53
Sensitivity (%)	95.14±5.34	85.29±25.81	92.39±5.05	96.20±13.67
Precision (%)	92.73±9.62	100±0	90.33±12.61	94.83±13.67
F1-score (%)	93.78±6.57	89.51±21.11	90.86±7.65	94.85±7.91

*Mean±SD in the same column

Notably, precision remained strong across all arrhythmia classes: 94.26% ± 13.50% for premature ventricular contractions (PVC, n=8 records), 90.33% ± 12.61% for ventricular tachycardia (VT, n=8 records), and 94.83% ± 13.67% for atrial premature complexes (APC, n=7 records). Sensitivity showed class-dependent

variation: highest for APC (96.20% ± 5.21%), followed by normal rhythm, VT (92.39% ± 5.05%), and PVC (85.29% ± 25.81%). The substantial standard deviation in PVC sensitivity indicates greater detection variability for this arrhythmia type. Heart rate estimation was most consistent for normal rhythm and APC (82.90 ± 9.32 BPM), while VT showed the widest range (105.00 ± 20.86 BPM), reflecting the clinical spectrum of this tachyarrhythmia. These results should be interpreted as preliminary due to the limited sample sizes per class, and further validation on larger datasets is recommended to establish generalizability.

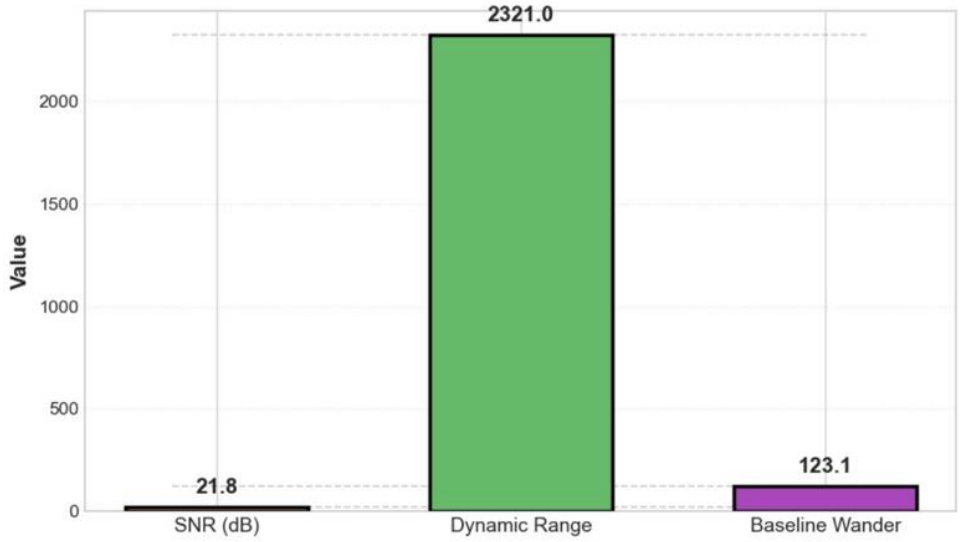


Fig. 2 Signal quality metrics

The signal quality assessment (Fig. 2) shows a high Signal-to-Noise Ratio (SNR) of 21.8 dB and a dynamic range of 2321.0 μV, confirming excellent signal fidelity in the test recordings, which contributes to the strong performance metrics observed (Satija et al. 2018).

Figure 3 shows one representative example of VT detection, where the algorithm correctly identified R-peaks within a ventricular tachycardia episode at a rate matching the target 118.5 BPM, despite the characteristically widened QRS morphology. This example visually validates the algorithm's ability to track rapid ventricular rhythms and illustrates its consistent detection behavior across multiple test case. The high performance in PVC detection is particularly noteworthy, given the widened QRS complexes and altered morphology typical of abnormal ventricular rhythms, which often challenge conventional amplitude-based detectors (Kohler et al., 2002).

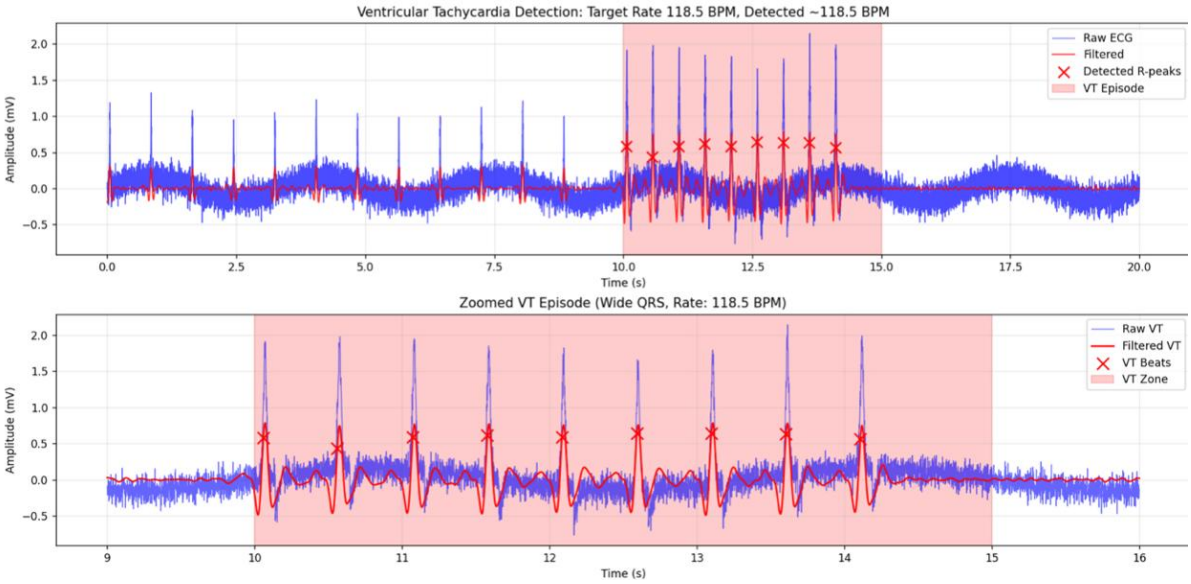


Fig. 3 Representative example of VT detection.

Limitations of the study

A key limitation of this validation approach is its reliance on a public dataset of simulated arrhythmias, which does not capture the demographic diversity or complex physiological variations of real-world patient populations.

Recommendation for future work

Future research should focus on a large-scale validation involving a diverse cohort, including individuals with known cardiovascular conditions, to rigorously test the system's diagnostic capability and robustness. The hardware should be developed into a wearable form factor for long-term, ambulatory monitoring outside laboratory settings. Finally, the algorithm must be expanded to incorporate multi-lead ECG recording and advanced machine learning models to improve the detection and classification of a wider range of cardiac arrhythmias.

Conclusion

This research validated a custom QRS detection algorithm that accurately identifies normal rhythm and three arrhythmia types, achieving perfect precision for PVC and APC detection and F1-scores approximately90% across all classes. The results demonstrate a reliable, accessible pipeline suitable for low-cost cardiac monitoring.

Conflict of Interest

The authors declare that there are no conflicts of interest.

Acknowledgements

We acknowledge the MIT-BIH for supplying the simulated ECG data used in our algorithm validation.

References

Azeem, B., Khurram, L., Sharaf, B., et al. 2025. Unmasking arrhythmia mortality: A 25-year analysis of trends and disparities in the United States (1999–2023). Clin. Cardiol. 48: e70109. doi.org/10.1002/clc.70109

Desai, D.S., Hajouli, S. 2023. Arrhythmias. USA. https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK558923/

Garg, K., Satti, D.I., Yadav, R., et al. 2024. Global health inequities in electrophysiology care: A state-of-the-art review. JACC Adv. 3: 101387. doi.org/10.1016/j.jacadv.2024.101387

Hamilton, P. 2002. Open source ECG analysis. Comput. Cardiol. 29: 101–104. doi.org/10.1109/CIC.2002.1166717

Hoogendoorn, J.C., Ninaber, M.K., Piers, S.R.D., de Riva, M., Grauss, R.W., Bogun, F.M., Zeppenfeld, K. 2020. The harm of delayed diagnosis of arrhythmogenic cardiac sarcoidosis: A case series. Europace 22: 1376–1383. doi.org/10.1093/europace/euaa115

Kohler, B.U., Hennig, C., Orglmeister, R. 2002. The principles of software QRS detection. IEEE Eng. Med. Biol. Mag. 21: 42–57. doi.org/10.1109/51.993193

Mehta, S.S., Lingayat, N.S. 2008. Detection of P and T-waves in electrocardiogram. In: Proceedings of the World Congress on Engineering and Computer Science. San Francisco, USA, pp. 225–231

National Heart, Lung, and Blood Institute. 2022. What is arrhythmia. USA. https://www.nhlbi.nih.gov/health/arrhythmias

Pan, J., Tompkins, W.J. 1985. A real-time QRS detection algorithm. IEEE Trans. Biomed. Eng. 32: 230–236. doi.org/10.1109/TBME.1985.325532

Satija, U., Ramkumar, B., Manikandan, M.S. 2018. A review of signal processing techniques for electrocardiogram signal quality assessment. IEEE Rev. Biomed. Eng. 11: 36–52. doi.org/10.1109/RBME.2018.2810957

The effect of hemolysis level on clot-based assays using photo-optical detection

Bunyathida Suwannalao[a,*], Karan Paisooksantivatana[b], Narin Khongjaroensakun[b], Pawadee Chinudomwong[b], Ekawat Pasomsub[b]

[a] Program in Applied Clinical Pathology, Faculty of Medicine Ramathibodi Hospital, Mahidol University, Bangkok 10400, Thailand

[b] Department of Pathology, Faculty of Medicine Ramathibodi Hospital, Mahidol University, Bangkok 10400, Thailand

*Corresponding author. E-mail address: bunyathida.suw@student.mahidol.edu

Abstract

Prothrombin time (PT) activated partial thromboplastin time (APTT), thrombin time (TT), and fibrinogen are initial investigations for secondary hemostasis assessment by evaluating fibrin clot formation. Thus, they can be collectively referred to as clot-based assays. Photo-optical detection is an analytical method deployed by most laboratories. It measures the changes in light transmission during clot formation. Despite its popularity, this method is susceptible to hemolysis as the release of hemoglobin gives plasma a red color. Additionally, hemolysis releases several substances that trigger premature clot formation, leading to inaccurate results. This study aims to investigate the impact of different levels of hemolysis on clot-based assay results and identify the concentration of free Hb that could interfere with clot–based assay results. Finally, the study intends to verify how the hemolysis levels specified by the manufacturer interfere with the clot-based assay results. The findings from this study are expected to reduce the specimen rejection rate, which, in turn, minimize complications and unnecessary costs associated with repeated blood collection.

Keywords: Analytical interference, Clot–Based Assays, Hemolysis, Photo–Optical Detection, Specimen rejection,

Introduction

Activated partial thromboplastin time (APTT) is a laboratory parameter for identifying and monitoring coagulation disorders (Ignjatovic, 2013). It can be measured using a photo–optical technique, which detects the changes in optical density or light transmission during clot formation (Lippi et al., 2008; Lippi and Favaloro, 2018). Thus, abnormal plasma colors, namely icterus, lipemia, and hemolysis, can affect the test accuracy (Agarwal et al., 2015).

Hemolysis is the most common cause of sample rejection in clinical laboratories, accounting for up to 60% of rejected specimens, and in most cases, it occurs in the pre–examination stage (Lippi et al., 2008; Simundic et al., 2010; Simundic et al., 2020). Hemolysis impacts test results through both mechanical and biological mechanisms (Lippi et al., 2013). Mechanically, the release of hemoglobin from ruptured red blood cells into the plasma alters its color, interfering with light absorption during photo–optical detection, particularly at wavelengths between 400–450 nm, as demonstrated in Fig.1 (Nougier et al., 2020).

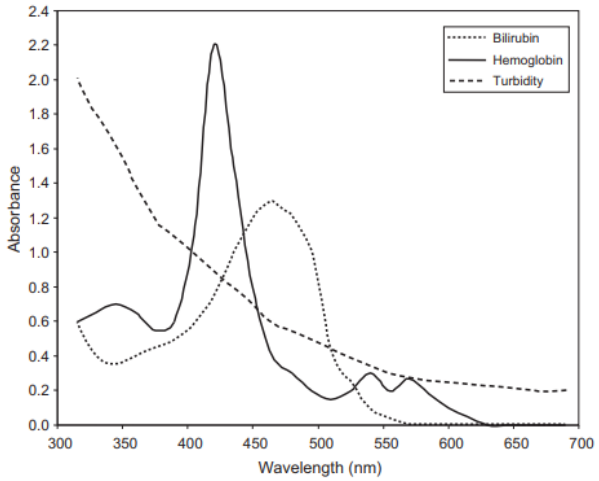


Fig. 1 The relationship between wavelength and light absorption of pigment that causes abnormal plasma color, including hemoglobin (solid line), causing interference in light absorption in the 400–450 nm wavelength range. Icterus (short dashed line) causes light absorption interference in the 400–500 nm wavelength range. Lipemia (long dashed line) interferes at shorter wavelengths, with reduced interference at longer wavelengths.

Biologically, substances released from red blood cells, such as tissue factors, phospholipids, and various enzymes, can prematurely activate the coagulation cascade, leading to inaccurate results (Lippi et al., 2013). Due to interference with light absorption, the detector used in the CN-3000™ Automated Blood Coagulation analyzer has a multi-wavelength detection system to minimize such impact. Wavelengths used to measure each test comprise primary and secondary wavelengths. The primary wavelength is the mainstay for measurement. However, when the hemolysis-icterus-lipemia (HIL) level exceeds its acceptable threshold, the analyzer will switch to the secondary wavelength, which is interfered less and renders a more accurate measurement.

This study aims to: 1) verify how the hemolysis levels specified by the manufacturer interfere with the APTT result, 2) investigate the effect of exposure time to free hemoglobin (Hb) on the APTT result, and 3) explore whether the multi-wavelength detection system reduces the erroneous result caused by hemolysis. The findings of this study are expected to reduce unnecessary sample rejections, minimize the need for repeated blood draws, and enhance the efficiency of laboratory testing. Moreover, the study will help ensure accurate diagnostic results, contributing to improved patient care and treatment outcomes.

Materials and Methods

This is an experimental design study. This study used ten pooled leftover platelet-poor plasma (PPP) samples collected in 3.2% sodium citrate tubes from routine clinical testing in the Hematology Laboratory. The inclusion and exclusion criteria are detailed below:

Inclusion criteria

- No history or symptoms of bleeding disorders, and
- No use of anticoagulant or antiplatelet drugs within 14 days prior to sample collection and
- Normal PT, APTT, TT, and fibrinogen test results

Exclusion criteria

- Clotted specimen, or
- Hemolysis, lipemic, and icteric specimen or
- Insufficient sample volume or
- Unable to separate and store plasma within 2 hours after sample collection

This study has been reviewed and approved by the Human Research Ethics Committee, Faculty of Medicine Ramathibodi Hospital, Mahidol University, complying to the Declaration of Helsinki, The Belmont Report, CIOMS Guidelines, International Conference on Harmonization in Good Clinical Practice (COA No. MURA2024/809).

Sample preparation

Each plasma sample was pooled from 3 leftover citrated PPP. Hemolysate plasma was prepared by pooling packed red cells from the same subjects and stored at -20°C for one hour. After that, it was thawed at 37°C for 5 minutes, centrifuged at 1,920 g for 10 minutes, the supernatant was then collected, and measure hemoglobin concentration on Mindray BC-6000 series hematology analyzers (Shenzhen Mindray, China). Hemolysate plasma was spiked into the PPP to create hemoglobin concentrations of 0 mg/dL, below 600 mg/dL, above 600 mg/dL, below 1,000 mg/dL, and above 1,000 mg/dL. The 600 mg/dL concentration represents the threshold where the manufacturer indicates interference with the APTT, and the 1,000 mg/dL concentration occurs in severe hemolysis. Then measure free Hb with HemoCue® Plasma/Low Hb System (HemoCue AB, Sweden). The preparation procedure was illustrated in Fig 2.

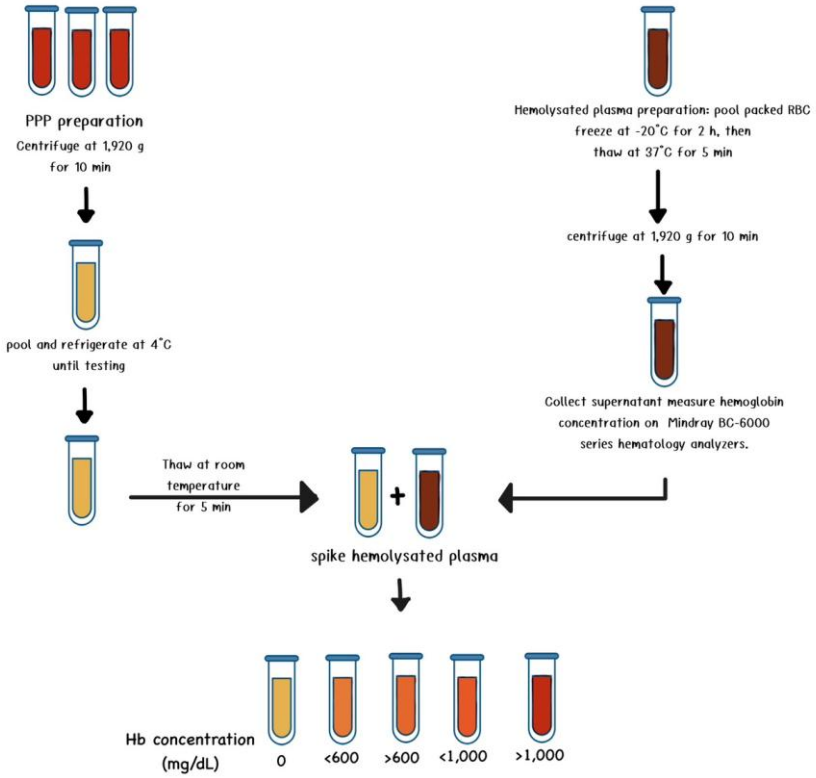


Fig. 2 The sample preparation procedure Abbreviations: PPP–platelet poor plasma, min–minutes, RBC–red blood cells, h-hour, Hb–hemoglobin

APTT was determined using the CN-3000™ Automated Blood Coagulation analyzer (Kobe, Japan) with Dade® Actin® FS Activated PTT Reagent (Siemens Healthineers, Germany). The primary and secondary wavelengths for APTT testing were set at 660 nm and 800 nm, respectively, as per the manufacturer's guidance. APTT measurement was performed at 0 minutes and 60 minutes after adding hemolysate plasma.

A comparison of values across Hb concentrations and time points to assess interference effects was analyzed. Acceptable criteria of APTT results were calculated according to the Fraser formula as stated in the CLSI guideline C56–A. So, an acceptable difference was within ± 6.86%.

Results and Discussion

Identification of the concentration of free Hb that interferes with clot-based assay results by using photo-optical detection as well as evaluation of the effect of exposure time to free hemoglobin (Hb) on clot-based assay results, was carried out

For the primary wavelength, at 0 minutes, the difference for the primary wavelength at a Hb concentration of less than 600 mg/dL ranged from –3.98% to –0.58%, while at greater than 600 mg/dL, the

difference was –4.87% to -0.38%. For the less than 1,000 mg/dL, the difference ranged from –6.18% to 0.20%, while at greater than 1,000 mg/dL the difference was –5.99% to 0.82%. When these differences were compared against the acceptable criteria, it was found that all values were within the acceptable range. On the other hand, at 60 minutes, the difference at a Hb concentration of less than 600 mg/dL ranged from 3.33% to 23.01%, while at greater than 600 mg/dL the difference was 4.70% to 21.59%. For the less than 1,000 mg/dL, the difference ranged from 4.50% to 24.03%, while at greater than 1,000 mg/dL, the difference was 9.20% to 27.90%, as shown in Table 1.

Table 1 The percentage difference of the APTT result compared with the baseline measured by primary wavelength. The result that exceeded the acceptable bias results was colored red.

Sample	Difference of APTT result (%)							
	Exposure time to free Hb: 0 min				Exposure time to free Hb: 60 min			
	Hb <600 mg/dL	Hb >600 mg/dL	Hb <1,000 mg/dL	Hb >1,000 mg/dL	Hb <600 mg/dL	Hb >600 mg/dL	Hb <1,000 mg/dL	Hb >1,000 mg/dL
1	-3.98	-4.36	-3.79	-3.60	3.33	4.70	4.50	9.20
2	-1.13	-1.32	-1.69	-2.26	12.17	15.17	14.42	15.73
3	-0.82	-0.61	-0.20	0.41	23.01	21.59	24.03	27.90
4	-1.23	-0.61	0.20	0.82	9.24	11.09	11.91	12.53
5	-0.58	-0.38	-0.38	0.00	11.24	11.05	10.67	12.95
6	-2.28	-1.90	-1.52	-0.95	14.67	9.14	14.29	16.19
7	-0.99	-0.79	-0.40	0.40	11.83	14.79	14.99	14.99
8	-3.93	-4.87	-6.18	-5.99	9.20	10.37	11.15	11.15
9	-1.88	-2.08	-2.08	-1.88	10.73	11.80	12.23	13.95
10	-2.45	-3.06	-3.67	-2.24	9.68	10.95	10.74	10.95
MAX	-0.58	-0.38	0.20	0.82	23.01	21.59	24.03	27.90

Regarding the secondary wavelength, at 0 minutes, the difference at a Hb concentration of less than 600 mg/dL ranged from –4.24% to –0.41%, while at greater than 600 mg/dL, the difference was –4.97% to –0.20%. For the less than 1,000 mg/dL the difference ranged from –6.63% to 0.41%, while at greater than 1,000 mg/dL the range was –6.46% to 0.81%. When these differences were compared against the acceptable criteria, it was found that nine out of ten values were within the acceptable range. Conversely, at 60 minutes, the percentage of difference at a Hb concentration of less than 600 mg/dL ranged from 3.68% to 22.98%,

while at greater than 600 mg/dL the range was 4.26% to 22.38%. For the less than 1,000 mg/dL, the difference ranged from 4.65% to 23.79%, while at greater than 1,000 mg/dL, the range was 9.69% to 28.63%, as shown in Table2.

Table 2 The percentage difference of the APTT result compared with the baseline measured by secondary wavelength. The result that exceeded the acceptable bias results was colored red.

Sample	Difference of APTT result (%)							
	Exposure time to free Hb: 0 min				Exposure time to free Hb: 60 min			
	Hb <600 mg/dL	Hb >600 mg/dL	Hb <1,000 mg/dL	Hb >1,000 mg/dL	Hb <600 mg/dL	Hb >600 mg/dL	Hb <1,000 mg/dL	Hb >1,000 mg/dL
1	-3.94	-3.94	-3.75	-3.38	3.68	4.26	4.65	9.69
2	-1.30	-1.49	-1.86	-2.05	12.80	15.21	14.84	16.33
3	-0.41	-0.41	0.00	0.41	22.98	22.38	23.79	28.63
4	-0.41	-0.20	0.41	0.81	9.39	11.02	12.04	13.06
5	-0.95	-0.57	-0.76	0.00	10.92	10.17	10.73	13.37
6	-2.26	-2.07	-1.50	-0.94	14.91	8.87	14.34	16.79
7	-0.98	-1.17	-0.78	0.39	11.91	15.04	15.43	15.63
8	-4.24	-4.97	-6.63	-6.45	9.28	10.25	11.61	11.22
9	-1.45	-2.07	-1.86	-1.86	11.73	11.73	13.01	14.71
10	-2.24	-2.85	-2.64	-2.24	9.38	10.42	11.67	11.04
MAX	-0.41	-0.20	0.41	0.81	22.98	22.38	23.79	28.63

Hence, this study demonstrated that the interference of free Hb is time–dependent. At 0 minutes, even samples with free Hb levels greater than 1,000 mg/dL did not produce a significant effect on APTT results. In contrast, at 60 minutes, even a hemolysis level less than the manufacturer-indicated threshold caused a significant prolongation of APTT, which could not be alleviated by the multi-wavelength detection system.

Conclusion

The duration for which a sample is exposed to hemolysis has a greater impact on APTT results than the degree of hemolysis itself. In addition, the erroneous result cannot be corrected by the multi-wavelength

detection system. Consequently, specimens with a significant level of free hemoglobin–especially those left standing for an extended period–may yield spurious results and should be rejected.

Conflict of Interest

The authors declare no conflicts of interest.

References

Agarwal, S., Vargas, G., Nordstrom, C., Tam, E., Buffone, G.J., Devaraj, S. 2015. Effect of interference from hemolysis, icterus and lipemia on routine pediatric clinical chemistry assays. Clin. Chim. Acta. 438: 241–245. doi.org/10.1016/j.cca.2014.08.008.

Ignjatovic, V. 2013. Activated partial thromboplastin time. Methods Mol Biol 992: 111–20. doi.org/10.1007/978-1-62703-339-8_8.

Lippi, G., Favaloro, E.J. 2018. Laboratory hemostasis: from biology to the bench. Clin. Chem. Lab. Med. 56: 1035–1045. doi.org/10.1515/cclm-2017-1205.

Lippi, G., Blanckaert, N., Bonini, P., Green, S., Kitchen, S., Palicka, V., Vassault, A.J., Plebani, M. 2008. Haemolysis: an overview of the leading cause of unsuitable specimens in clinical laboratories. Clin. Chem. Lab. Med. 46: 764–72. doi.org/10.1515/cclm.2008.170.

Lippi, G., Plebani, M., Favaloro, E.J. 2013. Interference in coagulation testing: focus on spurious hemolysis, icterus, and lipemia. Semin. Thromb. Hemost. 39: 258–266. doi.org/10.1055/s-0032-1328972.

Nougier, C., Jousselme, E. Sobas, F. Pousseur, V., Négrier, C. 2020. Effects of hemolysis, bilirubin, and lipemia interference on coagulation tests detected by two analytical systems. Int. J. Lab. Hematol. 42: 88–94. doi.org/10.1111/ijlh.13147.

Simundic, A.M., Topic, E., Nikolac, N., Lippi, G. 2010. Hemolysis detection and management of hemolyzed specimens. Biochem. Med. 20: 154–159. doi.org/10.11613/BM.2010.018

Simundic, A.M., Baird, G. Cadamuro, J. Costelloe, S.J., Lippi. G. 2020. Managing hemolyzed samples in clinical laboratories. Crit. Rev. Clin. Lab. Sci. 57: 1–21. doi.org/10.1080/10408363.2019.1664391.

How does the consumption of different types of sugar impact stress and acne in teenagers?

Celila Sinacharoen[a], Pimpitcha Eungpakornkaew[b], Teerawat Nitichaikulvattana[c,*]

[a]Saint Joseph Convent School (SJC), Bangkok 10500, Thailand

[b]The Essence School (ESS), Bangkok 10330, Thailand

[c]Concordian International School (CIS), Samut Prakan 10540, Thailand

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

Abstract

The rising consumption of sugar-sweetened beverages (SSBs) and sweets by Thai adolescents is alarming, often linked to obesity, metabolic syndrome, and emotional volatility that leads to stress and acne. Research has explored natural versus artificial sugar sources and their effects on stress and acne. Analyzing sugar intake against this rising prevalence is critical. The study objective was to assess the effect of different sugar types on stress levels and acne prevalence in Thai adolescents (13–19 years old) in Bangkok. A total of 305 respondents completed an online questionnaire detailing consumption, stress, and acne status. Data was analyzed by the Statistical Package for the Social Sciences. A one-way analysis of variance compared stress and acne impacts across sugar type, gender, and skin type. Pearson's correlation test analyzed the relationship between stress and acne. Results showed that different sugar types and consumption levels did not significantly affect stress or acne prevalence. This lack of significance suggests that stress and acne progression are multifactorial, involving genetics, hormones, and environmental factors. Future studies with larger, diverse samples are needed to better understand the overlapping factors of nutrition, stress, and acne. This research provides insight into dietary elements contributing to adolescent stress and skin conditions.

Keywords: Acne, Adolescents, Stress, Sugar consumption

Introduction

In this continuously changing world, teenagers face countless levels of stress from various factors, ranging from academic workload to family relationships and social norms. Stress can lead to many problems, including acne, a common skin condition that affects one's well-being and contributes to physical and mental issues, especially a lack of self-confidence. One factor that stands out is diet. The consumption of chocolates, white rice, and oily or fried food increases acne severity due to their high fat and glycemic load (GL). High-GL foods rapidly raise sugar levels, and a study states that a sugar-free diet can significantly decrease the chance of developing acne (Roengritthidet et al., 2021). Many Thai teenagers also frequently consume sugars in cariogenic snacks and sweetened drinks (Tuchinda, 2004), raising questions about sugar intake and its possible effects on stress and acne. There are two main types of sugar: natural sugars such as fructose, sucrose, lactose, and maltose, found in honey, fruits, sugarcane, and dairy (Ghanem et al., 2018), and artificial sugars like aspartame, sucralose, saccharin, and stevia (Chattopadhyay et al., 2011). Thai people have a

median sugar intake of 2–20 g per day for males and 2–17 g for females (Wantanee Kriengsinyos et al., 2018). There is concern about sugar addiction, stress, and acne, creating the perception that different sugar types may influence these outcomes.

Acne develops when oil and dead skin cells clog pores, forming pimples. A study of 2,467 Thai adolescents and adults showed that 52% had mild acne, 22% moderate, and 8% severe (Roengritthidet et al., 2021). Causes include androgen secretion, increased sebum production, bacterial colonisation, clogged follicles, genetics (Hedden et al., 2008), and hormonal changes such as testosterone, progesterone, estrogen, IGFs, insulin, and glucocorticoids (Arora et al., 2011). Acne can cause scarring, inflammation, hyperpigmentation (Kim and Kim, 2024), and infections requiring medical care. These symptoms worsen skin barrier function and may trigger immune responses (Magin et al., 2006). Acne also causes psychological burdens such as anxiety, depression (Rubinow et al., 1987), low confidence, social withdrawal, and reduced employment opportunities (Ayer and Burrows, 2006; Ritvo et al., 2011). Such effects can lead to increased stress.

Stress reactions, known as the “fight-or-flight” response, enable humans to respond to threats, but the body may overreact to non-dangerous stressful situations such as traffic, work, or relationships (LeWine, 2024). Major stressors among students include academics, relationships, and time management challenges (Bhargava and Trivedi, 2018). Stress varies by duration, domain, and severity. Psychological stress depends on perceived ability to cope. Acute stress alters neurological, immune, and endocrine systems, stimulating immune responses (Larzelere and Jones, 2008). Excessive norepinephrine (NE) secretion may contribute to stress-related disorders such as depression, PTSD, and anxiety (Morilak et al., 2005). Stress is also linked to gastric ulcers caused by mucosal injury and increased stomach acid (Fukudo and Tanaka, 2020), and psychological stress can increase the incidence of peptic ulcers (Levenstein et al., 2015).

Although research shows clear links between sugar intake and health, the role of sugar in reducing or increasing stress and acne remains controversial. Therefore, this survey research was conducted to examine how different forms of sugar consumption affect stress and acne in Thai teenagers. The aim is to raise awareness about adolescents’ dietary choices, particularly sugar intake, and to promote healthier behaviours by demonstrating potential links between diet, skin health, and mental well-being.

Materials and Methods

This survey research explored the effect of consuming various types of sugars on stress and acne in Thai teenagers aged 13 to 19 years old. The questionnaire consisted of three sections. Section 1 focused on general information, consisting of gender, age, average hours of sleep, hormone-related medications, frequency of applying makeup, skin type, sugar type intake, and sugar consumption. Section 2 measured participants’ stress levels, including difficulty managing stress, sudden anxiety during unexpected changes,

stress from social comparison, and reliance on stress-relieving activities such as sweets. Additional items asked whether stress decreased after consuming dairy products, fruits, artificial sweeteners, or stevia, as well as stress caused by studying–life balance, high expectations, public speaking, chaotic environments, urgent tasks, or physical symptoms. Items also examined decision-making stress, confusion during problem-solving, and stress when unexpected mistakes occur. Section 3 assessed acne frequency, hormonal causes, dietary influence, social impact, and acne-related stress. Participants rated associations between acne and sweets, hot weather, sleep or eating changes, dairy products, fruits, artificial sweeteners, or stevia. Additional statements measured acne severity, inflammation, spreading to multiple areas, and negative effects on daily activities.

General information items were multiple choice, while Parts 2 and 3 used a 5-point Likert scale (1 = strongly disagree to 5 = strongly agree). The questionnaire followed ethical guidelines through convenience sampling, voluntary participation, and anonymity. All items were reviewed by three specialists and achieved IOC scores ≥ 0.5. Cronbach's alpha, calculated from the first 30 responses, was 0.918, indicating strong reliability (Taber, 2017). The survey was distributed via Google Forms on Instagram, Facebook, and LINE in January 2025, resulting in 305 participants. Data were analysed using SPSS version 30.0.0.0 (172). Analysis of Variance (ANOVA) examined differences across groups, while Pearson's correlation (r-value) assessed relationships between variables.

Results and Discussion

General information

The general information from the 305 participants shows that most respondents were female (72.5%), followed by males (25.9%) and other genders (1.6%). The majority were between 15 and 17 years old (77.7%), with smaller proportions aged 13–14 (10.2%) and 18–19 years old (12.1%). Most adolescents reported sleeping 6-8 hours per night (63.3%), while 31.5% slept below 6 hours and only 5.2% slept more than 8 hours. A very small number (6.2%) reported taking hormone-related medications. In terms of makeup use, 43.9% never applied makeup, 25.2% used it occasionally, and 30.8% used it frequently or daily. Regarding skin type, the largest group had combination skin (38.4%), followed by oily (22.3%), normal (15.7%), sensitive (12.8%), and dry skin (10.8%). Most participants consumed both natural and artificial sugars (73.1%), while 20.7% consumed only natural sugars and 6.2% consumed only artificial sugars. As for frequency of sugar intake, 41.0% consumed sugar 1–3 times per day, 31.8% consumed it 3–5 times per day, and 22.0% consumed it more than 5 times a day, whereas only 5.2% reported not consuming sugar at all.

Based on Table 1, the mean effect of stress is 3.35 out of the maximum of 5.00, with a rounded standard deviation of 0.61, which accounts for a fair amount of people who have stress. On the other hand, acne presents a mean of 2.67 and a 0.77 for its standard deviation. This represents relatively low acne appearances in our sample group.

Table 1 Descriptive Statistics (Mean and Standard Deviation)

	n	Mean	Std. Deviation
Stress	305	3.35	0.61
Acne	305	2.67	0.77

Based on Table 2, the one-way ANOVA examining sugar type intake and stress produced a *p*-value of 0.833, indicating no significant difference in stress levels across participants who consumed natural sugars, artificial sugars, or both. Likewise, the ANOVA assessing sugar type intake and acne found a *p*-value of 0.954, showing that acne severity did not significantly differ across the three sugar-intake groups. In contrast, gender showed a significant effect on stress, with a *p*-value of 0.041, demonstrating that stress levels differed among males, females, and other genders. Finally, skin type had a highly significant effect on acne, as reflected by a *p*-value of 0.005, indicating that acne severity varied considerably across different skin types.

According to Table 3, Pearson's correlation analysis between sugar consumption and stress showed no significant relationship, as reflected by a *p*-value of 0.272. Similarly, sugar consumption and acne were not significantly correlated, supported by a *p*-value of 0.529. In contrast, the correlation between stress and acne was significant, with r = 0.288 and $p < 0.001$, indicating a low positive association between the two variables.

Nowadays, teenagers often experience high levels of stress due to academic pressure, hormone changes, and social changes, and the majority of adolescents also face acne problems. Both stress and acne affect their daily lives, while most teenagers also consume large amounts of sugar, including natural and artificial types. Understanding how consuming different sugars impacts stress and acne is necessary. The mean scores of stress and acne were 3.35 and 2.67 on a 5-point scale, indicating that stress is more prevalent than acne. Since stress exceeded the midpoint score of 3, this suggests that a larger proportion of teenage responders reported experiencing stress, which aligns with existing research on academic workload, social dynamics, and unprepared developmental changes. Although the mean for acne was lower, it still shows that acne is a concern for many participants, with stress appearing to be the more dominant experience.

The results reveal that different forms of sugar and artificial sweeteners do not significantly influence stress or acne. Stress levels were not affected by consuming natural or artificial sugars, likely because the majority of participants consumed both. Artificial sweeteners also did not affect stress, despite suggestions that they increase stress responses. There was likewise no notable impact on acne from sugar type, and changes in sugar intake did not affect acne development. Other components such as carbohydrate and fat intake or hormonal fluctuations may make individuals more susceptible to breakouts. Regarding stress, the findings suggest that sugar may have a comforting rather than antagonising effect.

Table 2 One-way ANOVA Results

Analysis Variable	Source	SS	df	MS	F	*p*-value	Significance
Sugar Type & Stress	Between Groups	0.137	2	0.069	0.183	0.833	Not significant
	Within Groups	113.045	301	0.376	-	-	-
	Total	113.183	303	-	-	-	-
Sugar Type & Acne	Between Groups	0.057	2	0.029	0.047	0.954	Not significant
	Within Groups	181.805	301	0.604	-	-	-
	Total	181.862	303	-	-	-	-
Gender & Stress	Between Groups	2.367	2	1.183	3.225	0.041	Significant at 0.05
	Within Groups	110.816	302	0.367	-	-	-
	Total	113.183	304	-	-	-	-
Skin Type & Acne	Between Groups	8.759	4	2.190	3.783	0.005	Significant at 0.01
	Within Groups	173.103	299	0.579	-	-	-
	Total	181.862	303	-	-	-	-

Gender differences had a significant impact on stress, potentially due to hormonal fluctuations, psychological factors, and coping strategies. Females may experience greater reactivity in the HPA axis, leading to heightened cortisol responses, and may also use different coping mechanisms such as seeking social support. These factors could contribute to the varying levels of stress reported. The tendency to use food, especially sugary foods, as a coping mechanism may also influence the relationship between stress, sugar consumption, and acne.

Skin type had a significant effect on acne, consistent with dermatological understanding. Different skin types vary in sebum production and barrier function, influencing proneness to acne. Combination and oily skin

produce more sebum, making them more prone to clogged pores. Hot and humid weather may further aggravate acne in these skin types. While sugar type did not show a significant relationship, high-glycemic foods can still worsen acne due to insulin spikes and hormonal effects.

Table 3 Pearson's Correlation Results (n = 305)

Correlation Pair	Pearson's r	p-value (2-tailed)	Significance	Interpretation
Sugar Consumption and Stress	-0.063	0.272	Not significant	No correlation
Sugar Consumption and Acne	0.036	0.529	Not significant	No correlation
Stress and Acne	0.288	< 0.001	Significant at 0.01	Low positive correlation

Sugar consumption showed no significant correlation with stress. Although sugary foods activate reward pathways that release dopamine and opioids, this study found no statistically significant relationship, possibly due to the weak correlation and other factors such as sleep or the exclusion of sugary drinks. Sugar consumption also had no significant correlation with acne. While high-glycemic foods can increase insulin and IGF-1, which may contribute to acne, the main dietary triggers are likely specific food categories such as dairy, chocolate, and soft drinks rather than the frequency of sugar intake.

Stress and acne showed a low positive correlation (r = 0.288), indicating that stress plays an important role in acne development. Increased cortisol during stress can stimulate sebum production, contributing to more severe acne. Psychological stress may also influence inflammation and hormonal changes. Although this study establishes a correlation, further research with larger samples and additional variables such as diet, sleep, and coping habits is needed. Managing stress through mindfulness or relaxation may benefit both skin health and mental well-being.

Conclusion

In conclusion, adolescents face numerous challenges in their daily lives, often resulting in considerable stress that can negatively affect both physical and mental health, including the development of acne. This study examined the relationship between different types of sugar consumption, stress levels, and acne severity through an online survey. The findings revealed no significant correlation between sugar consumption and

either stress or acne. However, stress levels differed significantly across genders, and skin type was shown to influence acne severity among teenagers. Understanding these linkages is important for raising awareness and encouraging healthier lifestyle choices that may help reduce the impact of stress and acne during adolescence.

References

Arora, M.K., Yadav, A., Saini, V. 2011. Role of hormones in acne vulgaris. Clin. Biochem. 44: 1035–1040. doi.org/10.1016/j.clinbiochem.2011.06.984

Ayer, J., Burrows, N. 2006. Acne: more than skin deep. Postgrad. Med. J. 82: 500–506. doi.org/10.1136/pgmj.2006.045377

Bhargava, D., Trivedi, H. 2018. A study of causes of stress and stress management among youth. IRA-Int. J. Manag. Soc. Sci. 11: 108. doi.org/10.21013/jmss.v11.n3.p1

Chattopadhyay, S., Raychaudhuri, U., Chakraborty, R. 2011. Artificial sweeteners – a review. J. Food Sci. Technol. 51: 611–621. doi.org/10.1007/s13197-011-0571-1

Fukudo, S., Tanaka, Y. 2020. Gastric ulcers and stress. Springer EBooks: 912–913. doi.org/10.1007/978-3-030 39903-0_404

Ghanem, M., Harphoush, S., Zaitoun, M. 2018. Sugars: Types and Their Functional Properties in Food and Human Health. Int. J. Public Health Res. 6: 93–99. https://portal.abuad.edu.ng/lecturer/documents/1588061639NTD_202-Sugars_in_food_industry.pdf, 19 December 2025.

Hedden, S.L., Sarbak, R.S., Szucs, A.L., Tolaymat, L. 2008. Cause and effect: the relationship between acne and self-esteem in the adolescent years. J. Nurse Pract. 4: 595–600. doi.org/10.1016/j.nurpra.2008.01.021

Kim, H.J., Kim, Y.H. 2024. Exploring acne treatments: from pathophysiological mechanisms to emerging therapies. Int. J. Mol. Sci. 25: 5302. doi.org/10.3390/ijms25105302

Larzelere, M.M., Jones, G.N. 2008. Stress and health. Prim. Care Clin. Off. Pract. 35: 839–856. doi.org/10.1016/j.pop.2008.07.011

Levenstein, S., Rosenstock, S., Jacobsen, R.K., Jorgensen, T. 2015. Psychological stress increases risk for peptic ulcer, regardless of Helicobacter pylori infection or use of nonsteroidal anti-inflammatory drugs. Clin. Gastroenterol. Hepatol. 13: 498–506. doi.org/10.1016/j.cgh.2014.07.052

LeWine, H.E. 2024. Understanding the Stress Response. Harvard Health. Boston, MA, USA. https://www.health.harvard.edu/staying-healthy/understanding-the-stress-response, 19 December 2025.

Morilak, D.A., Barrera, G., Echevarria, D.J., Garcia, A.S., Hernandez, A., Ma, S., Petre, C.O. 2005. Role of brain norepinephrine in the behavioral response to stress. Prog. Neuropsychopharmacol. Biol. Psychiatry 29: 1214–1224. doi.org/10.1016/j.pnpbp.2005.08.007

Ritvo, E., Del Rosso, J.Q., Stillman, M.A., La Riche, C. 2011. Psychosocial judgements and perceptions of adolescents with acne vulgaris: A blinded, controlled comparison of adult and peer evaluations. BioPsychoSocial Med. 5: 11. doi.org/10.1186/1751-0759-5-11

Roengritthidet, K., Kamanamool, N., Udompataikul, M., Rojhirunsakool, S., Khunket, S., Kanokrungsee, S. 2021. Association between diet and acne severity: A cross-sectional study in Thai adolescents and adults. Acta Derm. Venereol. 101: adv00611. doi.org/10.2340/actadv.v101.569

Rubinow, D.R., Peck, G.L., Squillace, K.M., Gantt, G.G. 1987. Reduced anxiety and depression in cystic acne patients after successful treatment with oral isotretinoin. J. Am. Acad. Dermatol. 17: 25–32. doi.org/10.1016/S0190-9622(87)70166-2

Taber, K.S. 2017. The use of Cronbach's alpha when developing and reporting research instruments in science education. Res. Sci. Educ. 48: 1273–1296. doi.org/10.1007/s11165-016-9602-2

Tuchinda, C. 2004. Nutritional Problem of Children and Youth from a Pediatrician's Perspective. J. Med. Assoc. Thai. 87: 996–999.

Wantanee, K., Chan, P., Sofia, M. 2018. Consumption and sources of added sugar in Thailand: A review. Asia Pac. J. Clin. Nutr. 27: 262–283. doi.org/10.6133/apjcn.042017.08

Youn, S.W., Na, J.I., Choi, S.Y., Huh, C.H., Park, K.C. 2005. Regional and seasonal variations in facial sebum secretions: a proposal for the definition of combination skin type. Skin Res. Technol. 11: 189–195. doi.org/10.1111/j.1600-0846.2005.00119.x

สาขาวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์

(Subject: Engineering and Architecture)

ภาคบรรยาย

(Oral Presentation)

การศึกษาเชิงทดลองพฤติกรรมการจุดติดไฟแบบ Auto-ignition ของสายไฟเมื่อใช้กับรถยนต์ไฟฟ้า

An Experimental Study of Auto-Ignition and Burning Behavior of Electrical Wiring When Used with EV Car

วรเชษฐ์ ท่าหิน, เอกไท วิโรจน์สกุลชัย*

Worrachest Thahin, Ekathai Wirojsakunchai*

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

Faculty of Engineering, Kasetsart University, Bangkok 10900, Thailand

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

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาพฤติกรรมการจุดติดไฟแบบ Auto-ignition ของสายไฟ 4 ชนิดที่ใช้ในการชาร์จรถยนต์ไฟฟ้า ได้แก่ สายอ่อน 60227 IEC 53 ขนาด 3×1.5 และ 3×2.5 sq.mm., สาย VAF ขนาด 2×2.5 sq.mm., และสาย THW ขนาด 1×4 sq.mm. โดยเริ่มทำการทดลองวัดอุณหภูมิสายไฟระหว่างการชาร์จรถยนต์ไฟฟ้าพบว่าสายอ่อน 60227 IEC 53 ขนาด 3×1.5 sq.mm. มีอุณหภูมิสูงสุดเนื่องจากตัวนำหลายเส้นมีความต้านทานสูง ขณะที่สาย THW ขนาด 1×4 sq.mm. มีอุณหภูมิต่ำที่สุด การทดสอบจุดติดไฟด้วย Cone Calorimeter พบว่าที่ฟลักซ์ความร้อน 10 kW/m² สายไฟทุกชนิดไม่ลุกติดไฟ แต่มีอัตราการสูญเสียมวลแตกต่างกัน โดยสายอ่อน 60227 IEC 53 ขนาด 3×1.5 sq.mm. สูญเสียมวลมากที่สุด เมื่อเพิ่มฟลักซ์ความร้อนเป็น 45 kW/m² พบว่าสาย THW ขนาด 1×4 sq.mm. เกิดการจุดติดไฟเพียงชนิดเดียว ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าความแตกต่างด้านโครงสร้างฉนวนและสารหน่วงไฟมีผลต่อความไวต่อการจุดติดไฟ

คำสำคัญ: การชาร์จรถยนต์ไฟฟ้า, การสูญเสียมวล, ฟลักซ์ความร้อน, สายไฟ

Abstract

This research studies the auto-ignition behavior of wires 4 types for during using portable chargers EV car charging: 60227 IEC 53 flexible wires 3×1.5 and 3×2.5 sq.mm., VAF wires 2×2.5 sq.mm., and THW wires 1×4 sq.mm. The experiment began by measuring the wires temperatures during EV car charging. It was found that the 60227 IEC 53 flexible wires 3×1.5 sq.mm. Exhibited the highest temperature due to high resistance from multi-stranded conductor, while the THW wires 1×4 sq.mm. had the lowest temperature. Behavior testing using a Cone Calorimeter showed that at a heat flux of 10 kW/m², all wires did not ignite, but differed in mass loss rates, with the 60227 IEC 53 flexible wires 3×1.5 sq.mm. Experiencing the greatest mass loss. When the heat flux was increased to 45 kW/m², only one type of ignition was observed in the THW wires 1×4 sq.mm. The study results demonstrate that differences in insulation structure and flame-retardant properties significantly affect ignition susceptibility.

Keywords: EV car charging, Heat flux, Mass loss, Wires

คำนำ

จากการสำรวจสถิติยานยนต์ไฟฟ้าของประเทศไทยในเดือนเมษายน พ.ศ. 2567 พบว่ามีรถยนต์ไฟฟ้าที่ใช้พลังงานจากแบตเตอรี่ 100% (Battery Electric Vehicle : BEV) มีสะสมรวมทั้งสิ้น 167,344 คัน โดยประเภทรถที่มีจำนวนมากที่สุดคือรถนั่งส่วนบุคคลไม่เกิน 7 คน (สำนักงานคณะกรรมการกำกับกิจการพลังงาน, 2567) ในบางครั้งการชาร์จรถไฟฟ้าโดย Portable charger ที่จำเป็นต้องเสียบต่อกับไฟบ้านอาจทำให้เกิดความร้อนสะสมในสายไฟและเกิดเป็นอัคคีภัยขึ้นมาได้ เมื่อสายไฟได้รับความร้อนสะสมเป็นเวลานานอาจทำให้เกิดการเปลี่ยนสถานะของสายไฟ ทำให้สายไฟเกิดกระบวนการไพโรไลซิส (Pyrolysis) และเมื่อความร้อนสะสมเพิ่มมากขึ้น จะส่งผลให้เกิดเพลิงไหม้ขณะทำการชาร์จรถยนต์ไฟฟ้า ดังนั้นการศึกษาเชิงทดลองพฤติกรรมการจุดติดไฟแบบ Auto-ignition จึงเป็นการทดลองที่จำเป็นในการให้ความรู้ในการเลือกใช้สายไฟและลดอัตราการเกิดเพลิงไหม้ขณะชาร์จรถ EV

พฤติกรรมการจุดติดไฟแบบ Auto-ignition สามารถศึกษาได้ด้วยเครื่อง Clone Calorimeter (Shahari, Fathullah et al. 2021) นักวิจัยหลายกลุ่มได้ทำการทดลองศึกษาพฤติกรรมการจุดติดไฟและการเผาไหม้วัสดุ โดยใช้เครื่อง cone calorimeter. Bai (2024). ศึกษาลักษณะการเผาไหม้ของสายไฟที่ ฟลักซ์ความร้อน 35 kW/m^2 และ 75 kW/m^2 โดยจำกัดความหนาของเปลือกหุ้มขนาด 3 mm. และ 5 mm. เพื่อศึกษาผลกระทบของอัตราการปลดปล่อยความร้อน (HRR), ประสิทธิภาพการ เผาไหม้ (EHC),เวลาจุดติดไฟ (TTI), อัตราการสูญเสียมวล (MLR) และอัตราการเกิดควัน (SPR)โดยใช้เครื่อง Cone calorimeter. Zhang et al. (2022). ทดสอบการจุดติดไฟของสายไฟ XLPE โดยใช้เครื่อง Cone calorimeter วิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงของเวลาการจุดติดไฟ และอัตราการปลดปล่อยความร้อน (HRR) ที่ฟลักซ์ความร้อน 20 kW/m^2 , 30 kW/m^2 และ40 kW/m^2 Meinier et al. (2021). ได้ทำการศึกษาระยะเวลาก่อนการจุดไฟของสายไฟปลอกหุ้มฉนวน PVC ที่มีโครงสร้างของลวดทองแดงต่างกัน 4 ชนิด ด้วยเครื่อง Cone calorimeter. Kaczorek-Chrobak et al. (2021). ทำการวิเคราะห์เชิงทฤษฎีของ James G. Quintiere ด้วยสมการคาดการณ์เวลาในการจุดติดไฟดัง Equation 1 โดยเทียบกับชุดข้อมูลในทดลองการจุดติดไฟจากเครื่อง Cone calorimeter

$$t_{ig} = \frac{\pi}{4} k\rho c_p \left(\frac{T_{ig} - T_0}{\dot{q}''_e}\right)^2 \qquad (1)$$

t_{ig}- Time-to-ignition (เวลาการจุดติดไฟ, s)

k- ความนำความร้อนของวัสดุ (W/(m·K))

L- ความหนาของวัสดุ (m)

ρ- ความหนาแน่น (kg/m^3)

c_p-ความจุความร้อนจำเพาะ (J/kg·K)

T_{ig}, T_0- อุณหภูมิการจุดติดไฟ (K) และอุณหภูมิเริ่มต้น (K)

$\dot{q}''_e$-ฟลักซ์ความร้อน (Heat Flux, W/m^2)

ในงานวิจัยของ Gong et al. (2021). ได้ศึกษา Auto-ignition ของ PMMA โดยกำหนดค่าฟลักซ์ความร้อนเริ่มต้น 30.5 และ 50.2 kW/m^2 ในการทดลอง ได้มีการนำชุดอุปกรณ์ทดลองที่สามารถสร้างรังสีความร้อนที่แปรผันตามเวลา ซึ่งมีโครงสร้างคล้ายกับเครื่อง Cone calorimeter คฑาวุธ (2564) ทำการศึกษาเชิงทดลองพฤติกรรมการจุดติดไฟแบบ Piloted

ของผลิตภัณฑ์สายไฟ 2 ชนิดคือสายไฟ THW FRC ขนาด 2.5 sq.mm., 4 sq.mm., 6 sq.mm. โดยใช้เครื่อง Cone Calorimeter ฟลักซ์ความร้อนที่ใช้ในการทดลองมีค่าตั้งแต่ 30 kW/m^2 ขึ้นไป จนทำให้วัสดุทดสอบจุดติดไฟ จากการศึกษาพบว่าสายไฟ THW และสายไฟ FRC เมื่อเพิ่มปริมาณจำนวนสายไฟจาก 1 เส้น ไปเป็นจำนวน 3 เส้น และ 5 เส้น ค่าฟลักซ์ความร้อนวิกฤตที่ใช้ในการจุดติดไฟก็จะมีค่าน้อยลง หรือจุดติดไฟได้ง่ายขึ้นและมีระยะเวลาเผาไหม้นานขึ้น

อุปกรณ์และวิธีการ

ศึกษาพฤติกรรมการจุดติดไฟแบบ Auto-ignition ของสายไฟ 4 ชนิดที่ใช้ในการชาร์จรถยนต์ไฟฟ้า ได้แก่

1. สายอ่อน 60227 IEC 53 ขนาด 3×1.5 และ 3×2.5 sq.mm. สายอ่อนมีเปลือกพอลิไวนิลคลอไรด์ธรรมดา รหัสชนิด 60227 IEC 53 แรงดันไฟฟ้าที่กำหนด 300/500 โวลต์ แสดงดัง Table 1 (กระทรวงอุตสาหกรรม, 2553)

Table 1 Information and images of flexible wires type 60227 IEC 53.

Specified number and cross-sectional area of the conductor (sq.mm.)	Insulation thickness	Shell thickness	Average overall dimensions of the wires		The minimum insulation resistance is at 70 °C (MΩ·km)
	Specified value (mm)	Specified value (mm)	Min (mm)	Max (mm)	
3×1.5	0.7	0.9	7.4	9.4	0.01
3×2.5	0.8	1.1	9.2	11.4	0.009
images of flexible wires type 60227 IEC 53 size 3×1.5 sq.mm.					
images of flexible wires type 60227 IEC 53 size 3×2.5 sq.mm.					

2. สาย VAF ขนาด 2×2.5 sq.mm. สายไฟฟ้าหุ้มด้วยฉนวนและเปลือก สายแบน 2 แกน และสายแบน 2 แกนมีสายดินรหัสชนิดกรณีไม่มีสายดิน : VAF กรณีมีสายดิน : VAF-G หรือ VAF/Gแรงดันไฟฟ้าที่กำหนด 300/500โวลต์ แสดงดัง Table 2 (กระทรวงอุตสาหกรรม, 2559)

Table 2 Information and images of VAF wires.

Specified number and cross-sectional area of the conductor. (sq.mm.)		Types of conductor according to TIS 2427.		Specified insulation thickness (mm)		Specified shell thickness (mm)		Average overall dimensions of the wires (mm)				The minimum insulation resistance is at 70 °C (MΩ·km)
wires	ground wires	wires	ground wires	wires	ground wires	2-core wires	2-core wires with ground wires	2-core wires		2-core wires with ground wires		
								Min	Max	Min	Max	
2.5	2.5	1	1	0.8	0.8	1.0	1.0	5.2×8.4	6.2×9.8	5.2×11.5	6.2×13.5	0.0110
images of VAF wires size 2×2.5 sq.mm.												

3. สาย THW ขนาด 1×4 sq.mm.สายไฟฟ้าแกนเดียวไม่มีเปลือก ชนิดตัวนำสายแข็ง สำหรับงานทั่วไป รหัสชนิด 60227 IEC 01 แรงดันไฟฟ้าที่กำหนด 450/750 โวลต์ แสดงดัง Table 3 (กระทรวงอุตสาหกรรม, 2553)

Table 3 Information and images of THW wires.

Specified cross-sectional area of a conductor. (sq.mm.)	Types of conductor according to TIS 2427.	Specified insulation thickness (mm)	Average overall dimensions of the wires		The minimum insulation resistance is at 70 °C (MΩ·km)
			Min (mm)	Max (mm)	
4	1	0.8	3.3	4.0	0.0100
images of THW wires size 1×4 sq.mm.					

โดยเริ่มทำการทดลองใช้กล้องวัดอุณหภูมิยี่ห้อ FLIR รุ่น E75 วัดไปที่อุณหภูมิสายไฟชนิดต่างๆขณะที่กำลังทำการชาร์จรถยนต์ไฟฟ้าแสดงดัง Fig. 1 หลังจากทำการศึกษาพฤติกรรมของสายไฟเรียบร้อยจากนั้นจึงนำสายไฟทั้ง 4 ชนิดตัดเพื่อเตรียมชิ้นงานสำหรับทดสอบขนาดความยาว 10 cm ในเครื่อง Cone calorimeter แสดงดัง Fig. 2 โดยอ้างอิงการทดลองให้ครอบคลุมกับการใช้งานจริงของสายไฟที่ไม่ได้ใช้แค่กับที่ชาร์จแบบพกพาที่ให้กำลังไฟแค่ 3.5 kW ยังรวมไปถึงที่ชาร์จที่ให้กำลังไฟขนาด 7 kW และ 11 kW จึงเริ่มตั้งค่าฟลักซ์ความร้อนไว้ที่ 10 kW/m^2 และ 45 kW/m^2 ตามลำดับ จากนั้นนำชิ้นงานทดสอบวางบนที่วางชิ้นงานขนาด 10×10 cm ดังแสดงใน Fig. 3 และนำที่วางชิ้นงานไปไว้บน Load cell ซึ่งต่อกับเครื่องคอมพิวเตอร์เพื่อบันทึกการเปลี่ยนแปลงมวลของชิ้นงานทดสอบตลอดช่วงเวลาในการทดลองโดยมีความถี่ในการบันทึกค่าทุกๆ 1 วินาที ตั้งกล้องตรวจจับความร้อนเพื่อวัดอุณหภูมิจุดติดไฟของชิ้นงานทดสอบ และเปิดแผ่นฉากกั้นซึ่งติดตั้งอยู่หน้าแผง cone heater ทำการบันทึกเวลาการจุดติดไฟโดยเป็นเวลาที่นับตั้งแต่ชิ้น ทดสอบเริ่มได้รับฟลักซ์ความร้อนจนกระทั่งชิ้นทดสอบจุดติดไฟและสามารถเผาไหม้ต่อไปได้เอง การทดลองถือเป็นอันสิ้นสุด ในการทดสอบการจุดติดไฟที่ 10 kW/m^2 ถ้าไม่เกิดการจุดติดไฟภายใน 30 นาที ให้ถือว่าชิ้นทดสอบไม่จุดติดไฟ ส่วนที่ 45 kW/m^2 ถ้าไม่เกิดการจุดติดไฟภายใน 8 นาที ให้ถือว่าชิ้นทดสอบไม่จุดติดไฟ นำชิ้นทดสอบออกจากเครื่องชั่งน้ำหนัก ทำการทดลองซ้ำที่ฟลักซ์ความร้อนเดิมซ้ำโดยทุกๆ ฟลักซ์ความร้อนจะทำการทดลองซ้ำอย่างน้อย 3 ครั้ง เพื่อตรวจสอบความถูกต้องของข้อมูล

Fig. 1 Shows an example of measuring the temperature of the wires during EV car charging.

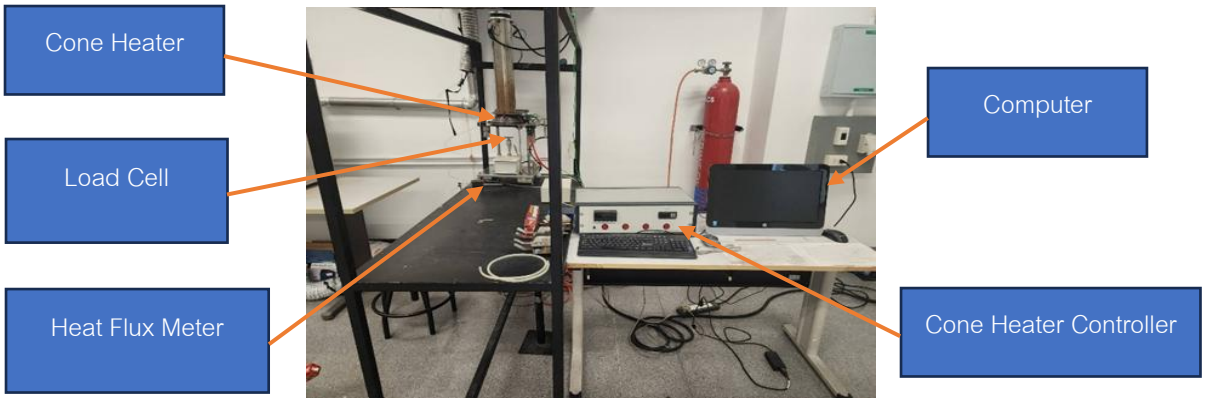


Fig. 2 Cone calorimeter

Fig. 3 Preparing the wires for testing.

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

การทดสอบวัดการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิสายไฟทั้ง 4 ชนิด โดยการนำรถยนต์ไฟฟ้ามาชาร์จด้วยที่ชาร์จแบบพกพา และใช้กล้องวัดอุณหภูมิ วัดอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นของสายไฟขณะชาร์จรถยนต์ไฟฟ้าแสดงดัง Fig. 4 จะเห็นได้ว่าสายอ่อนชนิด 60227 IEC 53 ขนาด 3×1.5 sq.mm. มีอุณหภูมิที่สูงที่สุด แต่ในทางกลับกัน สาย THW ขนาด 1×4 sq.mm. มีอุณหภูมิต่ำที่สุด เนื่องจากขนาดหน้าตัดของลวดทองแดงที่เล็กกว่าจะมีความต้านทานที่สูงกว่า และเมื่อเปรียบเทียบสายไฟที่มีขนาดหน้าตัดของลวดทองแดงที่เท่ากันได้แก่ สายอ่อนชนิด 60227 IEC 53 ขนาด 3×2.5 sq.mm. กับ สาย VAF ขนาด 2×2.5 sq.mm. สังเกตได้ว่าแม้สายไฟที่มีขนาดหน้าตัดของลวดทองแดงเท่ากันแต่สายไฟที่มีตัวนำแบบสายแกนฝอย มีความต้านทานที่สูงกว่าสายไฟที่มีตัวนำแบบสายแกนเดียว ดังนั้นจึงคาดคะเนการจุดติดไฟเมื่อสายไฟได้รับความร้อน ว่าสาย THW มีโอกาสการจุดติดไฟเมื่อได้รับความร้อนน้อยกว่าสายชนิดอื่นๆ จึงได้ทำการทดลองศึกษาพฤติกรรมการจุดติดไฟแบบ Auto-ignition ด้วยเครื่อง Clone Calorimeter โดยอ้างอิงการทดลองให้ครอบคลุมกับการใช้งานจริงของสายไฟที่ไม่ได้ใช้แค่กับที่ชาร์จแบบพกพาที่ให้กำลังไฟแค่ 3.5 kW ยังรวมไปถึงที่ชาร์จที่ให้กำลังไฟขนาด 7 kW และ 11 kW พบว่าที่ฟลักซ์ความร้อน 10 kW/m^2 สายไฟทั้ง 4 ชนิดไม่เกิดการจุดติดไฟเกิดแค่กระบวนการไพโรไลซิสแสดงดัง Table 4 สามารถเปรียบเทียบอัตราการสูญเสียมวลแสดงดัง Table 6 และ Fig. 5 ส่วนที่ฟลักซ์ความร้อน 45 kW/m^2 สาย THW ขนาด 1×4 sq.mm. เกิดการจุดติดไฟส่วนอีก 3 ชนิดไม่เกิดการจุดติดไฟแสดงดัง Table 5 ซึ่งคาดคะเนว่าสาย THW มีปริมาณสารหน่วงไฟน้อยกว่าสายไฟชนิดอื่นเนื่องจากโครงสร้างของสายไฟเป็นแบบฉนวนชั้นเดียว ส่งผลให้สาย THW มีแนวโน้มเกิดการจุดติดไฟได้ง่ายกว่าเมื่อได้รับฟลักซ์ความร้อนสูง สามารถเปรียบเทียบอัตราการสูญเสียมวลแสดงดัง Table 7 และ Fig. 6 เมื่อเปรียบเทียบสายไฟขนาดเดียวกันที่ 2.5 sq.mm พบว่าสายอ่อนชนิด 60227 IEC 53 มีอัตราการสูญเสียมวลสูงกว่าสาย VAF สะท้อนให้เห็นว่าการสูญเสียมวลขึ้นอยู่กับโครงสร้างและประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อน

มากกว่าขนาดหน้าตัดของสายไฟซึ่งสายอ่อนชนิด 60227 IEC 53 ขนาด 3×2.5 sq.mm. เป็นสายไฟที่มีตัวนำแบบสายแกนฝอยมีค่าความต้านทานสูงกว่า สาย VAF ขนาด 2×2.5 sq.mm. เป็นสายไฟที่มีตัวนำแบบสายแกนเดียวมีค่าความต้านทานต่ำกว่าเมื่อเปรียบเทียบผลการทดลองวัดการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิสายไฟกับการทดลองจุดติดไฟด้วยเครื่อง Cone calorimeter พบว่าสายไฟที่มีอุณหภูมิสูงระหว่างการชาร์จมีการสูญเสียมวลมากกว่า เนื่องจากมีความจุความร้อนต่ำ

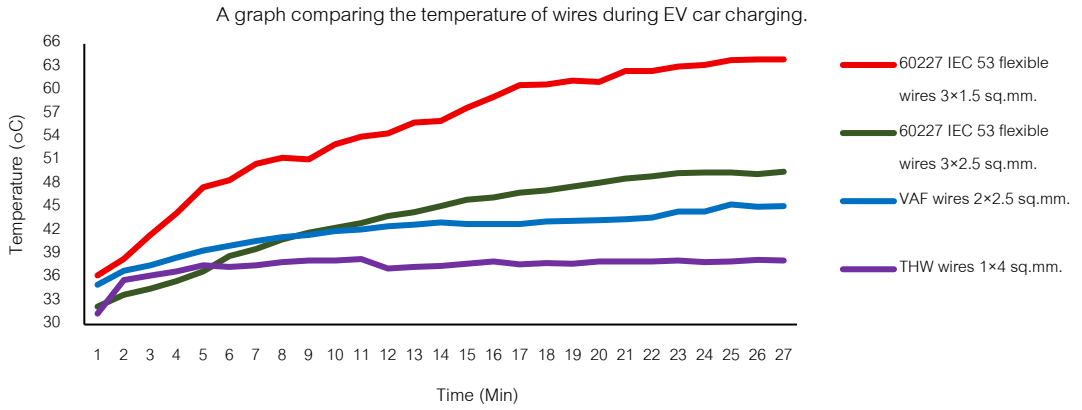


Fig. 4 A graph comparing the temperature of wires during EV car charging.

Table 4 Shows experimental results of auto-ignition behavior at a heat flux of 10 kW/m^2 for 30 minutes.

Wires	Temperature-ignition (°C)	Time-ignition (s)	Combustion period (s)	Pre-test mass (g)	Post-test mass (g)
60227 IEC 53 flexible wires 3×1.5 sq.mm.					
Experiment 1	-	-	-	117.2	115.76
Experiment 2	-	-	-	121.7	120.38
Experiment 3	-	-	-	119.1	117.7
60227 IEC 53 flexible wires 3×2.5 sq.mm.					
Experiment 1	-	-	-	169.3	168.32
Experiment 2	-	-	-	168.1	166.64
Experiment 3	-	-	-	170.4	168.85
VAF wires 2×2.5 sq.mm.					
Experiment 1	-	-	-	97.5	96.24
Experiment 2	-	-	-	94.6	93.27
Experiment 3	-	-	-	96.7	95.34
THW wires 1×4 sq.mm.					
Experiment 1	-	-	-	89.3	88.36
Experiment 2	-	-	-	93.1	91.76
Experiment 3	-	-	-	93	91.87

Table 5 Shows experimental results of auto-ignition behavior at a heat flux of 45 kW/m^2 for 8 minutes.

Wires	Temperature-ignition (°C)	Time-ignition (s)	Combustion period (s)	Pre-test mass (g)	Post-test mass (g)
60227 IEC 53 flexible wires 3×1.5 sq.mm.					
Experiment 1	-	-	-	114.80	82.53
Experiment 2	-	-	-	115.10	85.39
Experiment 3	-	-	-	114.70	94.38
60227 IEC 53 flexible wires 3×2.5 sq.mm.					
Experiment 1	-	-	-	180.00	154.35
Experiment 2	-	-	-	179.40	152.04
Experiment 3	-	-	-	180.00	157.46
VAF wires 2×2.5 sq.mm.					
Experiment 1	-	-	-	99.00	76.15
Experiment 2	-	-	-	101.20	76.40
Experiment 3	-	-	-	104.40	80.52
THW wires 1×4 sq.mm.					
Experiment 1	596	193	118	94.20	73.54
Experiment 2	609	178	123	93.40	73.19
Experiment 3	640	134	230	94.20	71.91

Note: The hyphen (-) indicates that it is not ignition.

Table 6 Comparison table of mass losses of four types of wires at a heat flux of 10 kW/m^2 for 30 minutes.

Wires	Average pre-test mass (g)	Average post-test mass (g)	Mass loss (g)
60227 IEC 53 flexible wires 3×1.5 sq.mm.	119.33	117.94	1.39
60227 IEC 53 flexible wires 3×2.5 sq.mm.	169.27	167.93	1.33
VAF wires 2×2.5 sq.mm.	96.27	94.95	1.32
THW wires 1×4 sq.mm.	91.80	90.66	1.14

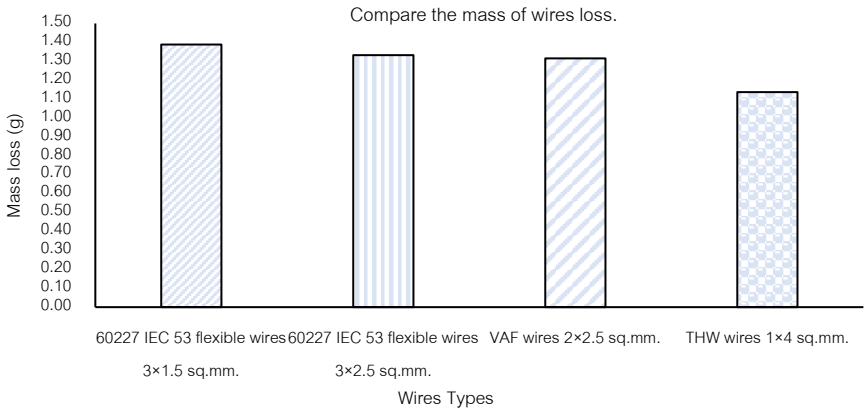


Fig. 5 Shows a comparison of mass losses of four types of wires at a heat flux of 10 kW/m^2 for 30 minutes.

Table 7 Comparison table of mass losses of four types of wires at a heat flux of 45 kW/m^2 for 8 minutes.

Wires	Average pre-test mass (g)	Average post-test mass (g)	Mass loss (g)
60227 IEC 53 flexible wires 3×1.5 sq.mm.	114.87	87.43	27.44
60227 IEC 53 flexible wires 3×2.5 sq.mm.	179.80	154.61	25.19
VAF wires 2×2.5 sq.mm.	101.53	77.69	23.85
THW wires 1×4 sq.mm.	93.93	72.88	21.05

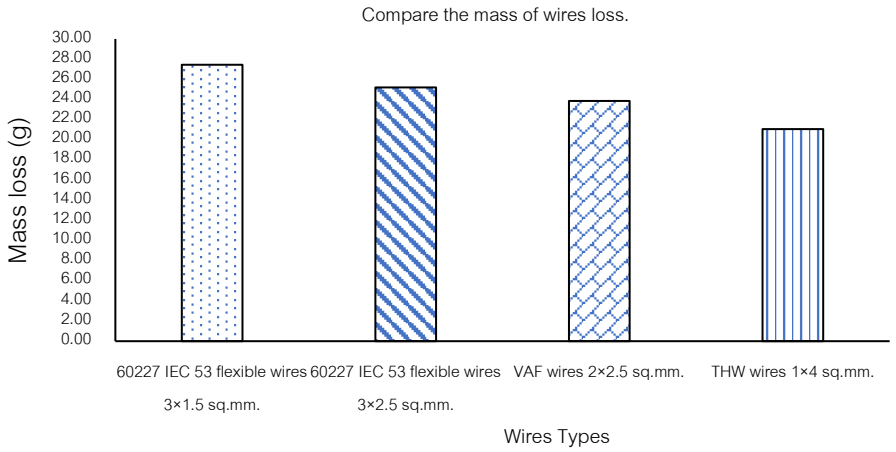


Fig. 6 shows a comparison of mass losses of four types of wires at a heat flux of 45 kW/m^2 for 8 minutes.

สรุป

งานวิจัยนี้ศึกษาพฤติกรรมการเพิ่มอุณหภูมิของสายไฟขณะชาร์จรถยนต์ไฟฟ้า และพฤติกรรมการจุดติดไฟแบบ Auto-ignition ภายใต้ฟลักซ์ความร้อน 10 kW/m² และ 45 kW/m² พบว่าสายอ่อนชนิด 60227 IEC 53 ขนาด 3×1.5 sq.mm. มีอุณหภูมิเพิ่มสูงสุด ในขณะที่สาย THW 1×4 sq.mm. เพิ่มต่ำที่สุด สายที่มีหน้าตัดของลวดทองแดงเล็กกว่าจะร้อนมากกว่า ด้านการจุดติดไฟสายไฟทุกชนิดไม่จุดติดไฟที่ 10 kW/m² แม้จะมีการสูญเสียมวลต่างกัน โดยสายอ่อนชนิด 60227 IEC 53 ขนาด 3×1.5 sq.mm. สูญเสียมวลมากที่สุด ที่ฟลักซ์ความร้อน 45 kW/m² พบว่าเฉพาะสาย THW 1×4 sq.mm. ที่เกิดการติดไฟ โดยมีอุณหภูมิเริ่มจุดติดไฟเฉลี่ยประมาณ 615 °C และใช้เวลาเฉลี่ยประมาณ 168 วินาทีตั้งแต่ได้รับความร้อนจนเกิดการจุดติดไฟ จากนั้นใช้เวลาประมาณ 157 วินาทีจนไฟดับสนิท ผลการทดลองชี้ให้เห็นว่าสายไฟที่มีอุณหภูมิสูงระหว่างการชาร์จมีการสูญเสียมวลมากกว่า แต่เมื่อสายไฟได้รับความร้อนสูงจะพบว่าโครงสร้างแบบฉนวนชั้นเดียวของสาย THW ทำให้มีปริมาณสารหน่วงไฟน้อยกว่าสายไฟชนิดอื่น ส่งผลให้สาย THW มีแนวโน้มเกิดการจุดติดไฟได้ง่ายกว่าเมื่อได้รับฟลักซ์ความร้อนสูง สอดคล้องกับการวิเคราะห์โครงสร้างและสมบัติวัสดุที่สัมพันธ์กับพฤติกรรมการลุกติดไฟ

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. ณัฐศักดิ์ บุญมี ที่ให้ความอนุเคราะห์การใช้เครื่องมือ cone calorimeter และให้คำแนะนำในการทดลอง

เอกสารอ้างอิง

กระทรวงอุตสาหกรรม. 2553. มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม สายไฟฟ้าหุ้มฉนวนพอลิไวนิลคลอไรด์แรงดันไฟฟ้าที่กำหนดไม่เกิน 450/750 โวลต์ เล่ม 3 สายไฟฟ้าไม่มีเปลือกสำหรับงานติดตั้งยึดกับที่ มอก. 11 เล่ม 3-2553. กระทรวงอุตสาหกรรม, กรุงเทพฯ.

กระทรวงอุตสาหกรรม. 2553. มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมสายไฟฟ้าหุ้มฉนวนพอลิไวนิลคลอไรด์แรงดันไฟฟ้าที่กำหนดไม่เกิน 450/750 โวลต์ เล่ม 5 สายอ่อน มอก. 11 เล่ม 5-2553. กระทรวงอุตสาหกรรม, กรุงเทพฯ.

กระทรวงอุตสาหกรรม. 2559. มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมสายไฟฟ้าหุ้มฉนวนพอลิไวนิลคลอไรด์แรงดันไฟฟ้าที่กำหนดไม่เกิน 450/750 โวลต์ เล่ม 101 สายไฟฟ้ามีเปลือกสำหรับงานทั่วไป มอก. 11 เล่ม 101-2559. กระทรวงอุตสาหกรรม, กรุงเทพฯ.

คฑาวุธ พิมพา. 2564. การศึกษาเชิงทดลองพฤติกรรมการจุดติดไฟแบบไพล็อตและการเผาไหม้ของสายไฟ. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

สำนักงานคณะกรรมการกำกับกิจการพลังงาน. 2567. อัพเดทสถานการณ์ตลาดยานยนต์ไฟฟ้าทั่วโลกและไทยในปี 2024. https://www.erc.or.th/th/energy-articles/3094, 7 เมษายน 2569.

Bai, Z. 2024. Burning characteristics of power cables with cone calorimeter. Heliyon 10: e25103.

Gong, J., et al. 2021. Composite auto-ignition criterion for PMMA (Poly methyl methacrylate) exposed to linearly declining thermal radiation. Appl. Therm. Eng. 195.

Kaczorek-Chrobak, K., et al. 2021. Calorimetric behaviour of electric cables. Energies 14.

Meinier, R., et al. 2021. Ignition and charring of PVC-based electric cables. Fire Technol. 58: 689–707.

Shahari, S., et al. 2021. Recent developments in fire retardant glass fibre reinforced epoxy composite and geopolymer as a potential fire-retardant material: A review. Constr. Build. Mater. 277.

Zhang, H., et al. 2022. Study on combustion characteristics of cable based on cone calorimeter. Energies 15.

การขึ้นรูปกล่องสี่เหลี่ยมเหล็กกล้าไร้สนิมโดยใช้แม่พิมพ์ลากขึ้นรูปลึกแบบสองขั้นตอน

Forming of a stainless steel rectangular box by a two-stage deep drawing die

เชษฐ อุทธิยัง*, **วินัย อินทนนท์**

Chet Uthiyoung*, Winai Intanon

สาขาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา เชียงใหม่ 50300

Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Lanna, Chaing Mai 50300, Thailand

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

บทคัดย่อ

วิจัยนี้เป็นการออกแบบและสร้างชุดแม่พิมพ์ลากขึ้นรูปลึกแบบสองขั้นตอน สำหรับการผลิตชิ้นงานกล่องสี่เหลี่ยมจากแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด SUS 304 ความหนา 0.5 มิลลิเมตร โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อลดปัญหาการฉีกขาดและรอยย่นของวัสดุที่เกิดขึ้นในกระบวนการขึ้นรูปแบบครั้งเดียว การออกแบบแม่พิมพ์แบ่งออกเป็นสองชุด ได้แก่ ชุดที่ 1 สำหรับการขึ้นรูปที่ความลึก 30 มิลลิเมตร และชุดที่ 2 สำหรับการขึ้นรูปขั้นสุดท้ายที่ความลึก 50 มิลลิเมตร ผลการทดลองพบว่าชุดแม่พิมพ์ที่ออกแบบสามารถทำการขึ้นรูปกล่องสี่เหลี่ยมได้ตามที่กำหนด โดยไม่เกิดการแตกร้าวหรือรอยย่นของผนังชิ้นงาน ทั้งนี้พบว่าความหนาของชิ้นงานมีการเปลี่ยนแปลงบริเวณรัศมีก้นกล่อง เนื่องจากเป็นจุดรับแรงดึงจากการดัดโค้งของรัศมีพันช์ ทำให้บริเวณดังกล่าวมีความหนาน้อยที่สุดเมื่อเทียบกับส่วนอื่นของชิ้นงาน

คำสำคัญ: แม่พิมพ์ลากขึ้นรูปลึก, ถ้วยกล่องสี่เหลี่ยม, เหล็กกล้าไร้สนิมเกรด SUS304

Abstract

This research involves the design and making of a two-step deep drawing die for producing rectangular cup-shaped workpieces from stainless steel sheet grade SUS 304 with a thickness of 0.5 millimeters. The main objective is to minimize material tearing and wrinkling problems that usually occur in a single-step deep drawing process. The die set was divided into two stages: the first die was used for preliminary forming at a depth of 30 millimeters, and the second die was used for final forming at a depth of 50 millimeters. The experimental results revealed that the designed die set successfully formed the stainless steel sheet into the desired rectangular cup shape without cracks or wrinkles. However, a slight reduction in thickness was observed at the bottom radius area due to tensile stress concentration during the bending of the punch radius, which resulted in the thinnest region of the workpiece.

Keywords: Deep drawing die, Rectangular box, Stainless steel SUS304

คำนำ

แม่พิมพ์ลากขึ้นรูปลึกเป็นส่วนสำคัญที่ใช้สำหรับขึ้นรูปแผ่นโลหะให้เป็นรูปทรง ซึ่งอาจจะเป็นถ้วยกลม เหลี่ยม หรือรูปทรงอื่นๆ ตามแบบงานโดยกระบวนการลากขึ้นรูปลึกมีการทำงานเป็นขั้นตอนของกระบวนการผลิตชิ้นงานที่ขึ้นรูปจากโลหะแผ่นที่ถูกแรงกระทำจากพันช์กดลงในดาย เป็นลักษณะโพรงลึกลงไป ให้เหมือนกับรูปทรงของชิ้นงานที่ต้องการ เพื่อชิ้นงานที่ได้จะต้องมีคุณภาพดี จึงต้องมีการควบคุมตัวแปรในกระบวนการผลิตที่เกี่ยวข้องหลายตัวแปรให้มีความเหมาะสมเช่น แรงกดของแผ่นงาน ขนาดและรูปร่างของแผ่นงาน สารหล่อลื่น นอกจากนั้นตัวแปรต่างๆ ของแม่พิมพ์ที่ใช้ในการขึ้นรูปมีส่วนช่วยในการผลิตชิ้นงานให้ได้คุณภาพเช่น รัศมีของพันช์ รัศมีของดาย ช่องว่างระหว่างพันช์กับดาย โดยทั้งนี้ความยุ่งยากของการเลือกใช้ตัวแปรการผลิตเหล่านี้โดยสำคัญนั้นขึ้นอยู่กับขนาดและรูปร่างของชิ้นงาน การลากขึ้นรูปลึกภาชนะรูปทรงกล่องสี่เหลี่ยมเป็นกระบวนการที่มีความยุ่งยาก ซับซ้อนมากกว่าการลากขึ้นรูปทรงกลม และการลากขึ้นรูปความลึกมากๆ หรือความซับซ้อนสูงอาจเกิดปัญหาการแตกหรือยับย่นได้หากใช้การลากขึ้นรูปเพียงครั้งเดียว การลากขึ้นรูปลึกครั้งที่สองนั้นจะช่วยแก้ปัญหาเหล่านี้ โดยแบ่งขั้นตอนการขึ้นรูปเป็นสองระยะเพื่อลดความเครียดที่เกิดขึ้นบนวัสดุในแต่ละครั้ง ทำให้สามารถผลิตชิ้นงานที่มีคุณภาพสูงและมีความซับซ้อนได้มากขึ้น โดยทั้งนี้ความยุ่งยากของการเลือกใช้ตัวแปรการผลิตเหล่านี้โดยสำคัญนั้นขึ้นอยู่กับขนาดและรูปร่างของชิ้นงาน (ไพศาล และคณะ 2554) งานวิจัยที่ใช้กระบวนการลากขึ้นรูปลึกแบบไฮโดรไดนามิก โดยเส้นทางการให้แรงดันภายในโพรง ถือเป็นหนึ่งในพารามิเตอร์สำคัญที่มีความสัมพันธ์โดยตรงกับคุณภาพของชิ้นงาน ทั้งนี้ได้มีการกำหนดช่วงกระบวนการที่เหมาะสมของความดันภายในโพรงผ่านการวิเคราะห์ความเค้นในบริเวณมุมและบริเวณผนังตรงของชิ้นงาน ศึกษาการกระจายความหนาของผนังชิ้นงานภายใต้พารามิเตอร์ที่แตกต่างกัน ได้แก่ ความดันก่อนการโป่งพอง ระยะชักแบบแบ่งช่วง และค่าความดันสูงสุด ผลการศึกษาพบว่า การควบคุมความดันภายในโพรงอย่างเหมาะสมสามารถช่วยเพิ่มความสามารถในการลากขึ้นรูป ของอะลูมิเนียมอัลลอยได้อย่างมีประสิทธิภาพ (Meng et al., 2013) งานวิจัยที่อธิบายถึงความจำเป็นในการใช้งานเหล็กกล้าทนแรงดึงสูงขั้นสูง (Advanced High Strength Steels: AHSS) โดยเฉพาะอย่างยิ่งเหล็กดูอัลเฟสในอุตสาหกรรมยานยนต์ งานวิจัยมุ่งเน้นไปที่กระบวนการลากขึ้นรูแบบสี่เหลี่ยม โดยศึกษาปัจจัยหลัก 3 ประการ ได้แก่ ความหนาแผ่นโลหะ (t_o) อัตราส่วนความยาวต่อความกว้างของพันช์ (L/D) และชนิดของเหล็กดูอัลเฟส โดยใช้แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ ซึ่งพิจารณาเหล็กดูอัลเฟสหลายเกรด ร่วมกับค่าความหนาแผ่นโลหะและค่าอัตราส่วนความยาวต่อความกว้างของพันช์ที่แตกต่างกัน นอกจากนี้ ยังได้จัดทำความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการลดลงของความหนาและพารามิเตอร์ ได้แก่ ความหนาแผ่นโลหะ อัตราส่วนความยาวต่อความกว้างของพันช์ และชนิดของเหล็กดูอัลเฟส ในรูปของชุดสมการเชิงประจักษ์ ซึ่งสามารถนำไปใช้ในการคาดการณ์ผลลัพธ์โดยประมาณได้อย่างมีประสิทธิภาพ (Gutiérrez Regueras and Camacho López,2014) งานวิจัยนี้มุ่งเน้นไปที่การศึกษาผลกระทบของพารามิเตอร์ต่าง ๆ ต่อความสามารถในการลากขึ้นรูปของถ้วยสี่เหลี่ยม เช่น ขนาดของแผ่นโลหะ ความเร็วในการลาก และรัศมีของพันช์ ตัวชี้วัดความสามารถในการขึ้นรูปที่ใช้ในการศึกษานี้ ได้แก่ การกระจายความหนา การลดความหนาสูงสุด และแรงในการลากขึ้นรูป (Mohammed, 2025) งานวิจัยที่การออกแบบที่เหมาะสมที่สุดของกระบวนการขึ้นรูปแบบดึงลึกหลายขั้นตอน โดยอาศัยฟังก์ชันประเมินคุณภาพการขึ้นรูปที่พัฒนาจากโครงข่ายประสาทเทียม เพื่อค้นหาแผนการขึ้นรูปที่ใกล้เคียงค่าที่เหมาะสมที่สุด ภายใต้เป้าหมายการลดจำนวนขั้นตอนการขึ้นรูปให้น้อยที่สุด พร้อมคำนึงถึงสมบัติวัสดุแผ่นโลหะ รูปร่างของชิ้นงาน คุณภาพของผลิตภัณฑ์ และความเสียหายระหว่างขั้นตอน ได้มีการพัฒนาแบบจำลองตัวแทนด้วยโครงข่ายประสาทเทียมสำหรับการจำแนกและถดถอย โดยฝึกจากข้อมูลการจำลองด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ที่พิจารณาพฤติกรรมการเปลี่ยนรูปแบบถาวร เพื่อทำนายความสามารถในการขึ้นรูป ความสูงต่ำสุด และความหนาต่ำสุดของชิ้นงานจากตัวแปรการออกแบบในแต่ละขั้นตอน (Han and Kim, 2025) ทั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อออกแบบและสร้างแม่พิมพ์ลากขึ้นรูปลึกผลิตถ้วยกล่องสี่เหลี่ยม

ที่สามารถขึ้นรูปชิ้นงานในแต่ละขั้นตอนซึ่งจะต้องไม่เกินค่าอัตราส่วนการลากขึ้นรูปของวัสดุชิ้นงาน โดยอัตราส่วนการลากขึ้นรูปหาค่าได้จากเส้นผ่านศูนย์กลางของแผ่นเปล่าต่อเส้นผ่านศูนย์กลางพันช์ โดยการแบ่งใช้ชุดแม่พิมพ์เป็น 2 ชุด ในการลากขึ้นรูปชิ้นงานครั้งที่ 1 และ ครั้งที่สอง โดยที่ชุดที่1จะทำการลากขึ้นรูปชิ้นงานกล่องสี่เหลี่ยมขนาด ความลึกอยู่ที่ 30 มิลลิเมตร และชุดที่ 2 ความลึกอยู่ที่ 50 มิลลิเมตร เพื่อวัดขนาดและความหนาของชิ้นงาน

อุปกรณ์และวิธีการ

ออกแบบและสร้างแม่พิมพ์ลากขึ้นรูปกล่องสี่เหลี่ยม (วารุณี และพงศ์พันธ์ 2552), (ชาญชัย และคณะ 2552) Fig.1 ลากขึ้นรูปครั้งแรกขนาดชิ้นงานภายในกล่องสี่เหลี่ยมความกว้าง 90 มิลลิเมตร ความยาว 110 มิลลิเมตร ความลึก 30 มิลลิเมตร ลากขึ้นรูปครั้งที่ 2 ภายในกล่องสี่เหลี่ยมความกว้าง 84 มิลลิเมตร ความยาว 104 มิลลิเมตร ความลึก 50 มิลลิเมตร รัศมีพันช์ 8 มิลลิเมตร รัศมีดาย 3 มิลลิเมตร ช่องว่างระหว่างพันช์กับดาย 0.65 มิลลิเมตร วัสดุที่นำมาทำแม่พิมพ์ส่วนของพันช์ (Punch) ดาย (Die) ใช้เหล็กกล้า SKD11ชุบแข็ง 59-61 HRC คำนวณหาแรงในการลากขึ้นรูปดังนี้

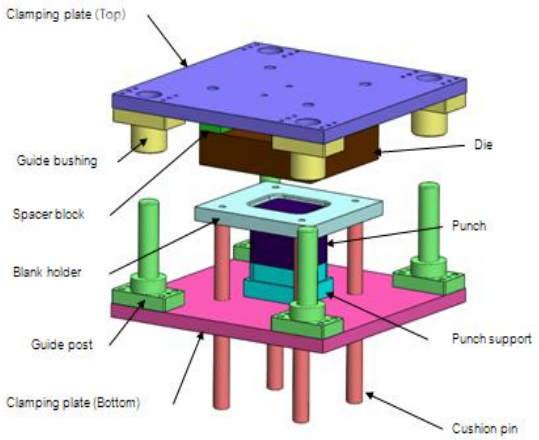


Fig.1 Deep Drawing Die

แรงในการลากขึ้นรูป (Equation 1):

$$P_{dr} = \sigma_u \times t_0 \times \left[\left(2\pi \times r_c \times C_1\right) + \left(l_{ax} \times C_2\right)\right] \quad (1)$$

P_{dr} = แรงที่ใช้ในการลากขึ้นรูป (นิวตัน)

σ_u = ความแข็งแรงต้านทานแรงดึงสูงสุดของวัสดุ (นิวตัน/ตารางมิลลิเมตร)

t_0 = ความหนาของแผ่นโลหะ (มิลลิเมตร)

r_c = รัศมีมุมโค้ง (มิลลิเมตร)

l_{ax} = ผลรวมความยาวส่วนขอบตรงกล่องสี่เหลี่ยม (มิลลิเมตร)

c_1 = ค่าคงที่เมื่อขึ้นรูปกล่องตื้นๆเท่ากับ 0.5 เมื่อขึ้นรูปกล่องที่ลึกมากกว่า 5-6 เท่าของรัศมีมุมโค้งเท่ากับ 2

c_2 = ค่าคงที่เมื่ออัตราส่วนการลากขึ้นรูปที่ต่ำๆและไม่ใช้แรงกดแผ่นยึดชิ้นงานเท่ากับ 0.2 เมื่อการลากขึ้นรูปที่ใช้แรงกดจับยึดชิ้นงานเท่ากับ F/3 เท่ากับ 0.3 สำหรับกรณีที่ใช้แรงกดจับยึดชิ้นงานที่สูง เท่ากับ 1

แรงกดจับยึดชิ้นงาน

ขณะทำการลากขึ้นรูปจะเกิดความเค้นอัดในแนวเส้นรอบวงที่บริเวณปีกของถ้วย การใช้แผ่นจับยึดชิ้นงานกดบริเวณนี้จะช่วยลดปัญหาการเกิดรอยย่น ถ้าแรงกดน้อยเกินไปจะส่งผลให้เกิดรอยย่นบนปีก ถ้าใช้แรงกดบนแผ่นจับชิ้นงานมากเกินไป จะทำให้เกิดการฉีกขาดบริเวณผนังถ้วยบริเวณเหนือรัศมีพันช์ขึ้นมาเล็กน้อย คำนวณหาแรงกดจับยึดชิ้นงานดัง (Equation 2):

$$F_{BH} = \frac{\text{Drawing Force}}{3} \quad (2)$$

F_{BH} = แรงกดของแผ่นจับยึดชิ้นงาน (นิวตัน)

Drawing Force = แรงในการลากขึ้นรูป (นิวตัน)

ช่องว่างระหว่างพันช์กับดาย (Equation 3):

$$CL = t_0 + 0.07\sqrt{10t_0} \quad (3)$$

CL = ช่องว่างระหว่างพันช์กับดาย (มิลลิเมตร)

t_0 = ความหนาของแผ่นโลหะ (มิลลิเมตร)

วัสดุชิ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิม เกรด SUS304 ความหนา 0.5 มิลลิเมตร ใช้สารหล่อลื่นแผ่นพลาสติกชนิด PE ความหนา 0.04 มิลลิเมตร วางประกบแผ่นเปล่าทั้งสองด้าน ใช้เครื่องเพรสขนาดแรงกด 800 กิโลนิวตัน เตรียมแผ่นเปล่าขนาด 190 × 210 มิลลิเมตร ด้วยเครื่องตัดซีเอ็นซีเลเซอร์ โดยนำชุดแม่พิมพ์ลากขึ้นรูปลึกไปติดตั้งบนเครื่องเพรส Fig. 2 เพื่อทดลองขึ้นรูปให้ได้ชิ้นงานกล่องสี่เหลี่ยมตามขนาดที่กำหนดไว้ จากการทดลองปรับค่าพารามิเตอร์ความเร็วในการขึ้นรูป 38 ครั้งต่อนาที ที่หน้าจอเครื่องเพรสทำให้สามารถขึ้นรูปชิ้นงานได้ไม่ฉีกขาด โดยทดลองขึ้นรูปชิ้นงานจำนวน 10 ครั้ง จากนั้นทำการวัดขนาดและความหนาของชิ้นงาน

Fig. 2 Die installation on a press machine

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

ผลความสามารถในการลากขึ้นรูปใช้แรงกดในการจับยึดชิ้นงาน 63 กิโลนิวตัน เป็นค่าที่ใกล้เคียงจากการคำนวณแรงกดจับยึดชิ้นงานเพื่อไม่ให้เกิดรอยย่นจะได้ชิ้นงานดัง Fig. 3

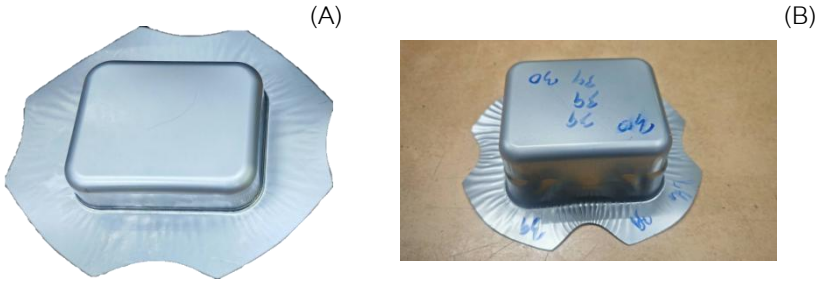


Fig. 3 workpiece: Initial deep drawing operation (A) Redrawing operation (B)

การตรวจสอบความกว้างและความยาวชิ้นงาน ใช้เวอร์เนียร์คาลิปเปอร์ความละเอียด 0.01 มิลลิเมตร จุดตรวจสอบดัง Fig. 4 ผลการตรวจสอบดัง Table 1

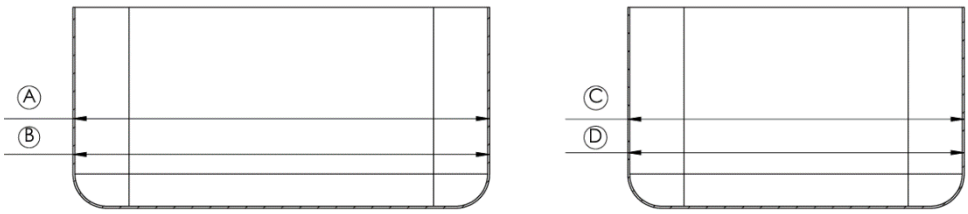


Fig. 4 Width and length measurement locations

Table 1 Dimensional inspection of width and length

NO	Width (mm) / Length (mm)			
	point A 104	point B 104	point C 84	point D 84
1	104.76	103.84	84.35	83.80
2	104.81	104.28	84.28	83.84
3	104.83	103.80	84.25	83.87
4	104.81	103.97	84.29	83.84
5	104.77	103.83	84.36	83.80
6	104.75	103.84	84.36	83.81
7	104.82	103.29	84.26	83.84
8	104.83	103.80	84.26	83.87
9	104.81	103.98	84.29	83.85
10	104.78	103.83	84.36	83.81
Average value	104.81	103.97	84.29	83.84
S.D.	0.029	0.244	0.046	0.027
Total		0.516		0.245

ผลการตรวจสอบความกว้างความยาวของชิ้นงาน จะได้ค่าเฉลี่ยความยาวต่ำสุด 103.97มิลลิเมตร ค่าเฉลี่ยสูงสุด 104.81 มิลลิเมตร ค่าเฉลี่ยความกว้างต่ำสุด 83.84 มิลลิเมตร ค่าเฉลี่ยสูงสุด 84.29 มิลลิเมตร

การตรวจสอบความหนาชิ้นงานใช้เวอร์เนียร์คาลิปเปอร์ความละเอียด 0.01 มิลลิเมตร จุดตรวจสอบดัง Fig. 5 ผลการตรวจสอบดัง Table 2

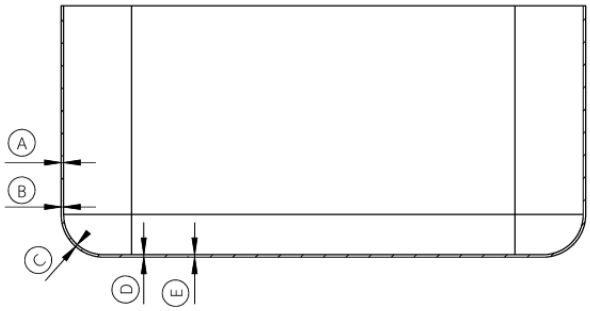


Fig. 5 Thickness measurement locations

Table 2 Thickness inspection results

NO	Part thickness inspection (mm)				
	point A	point B	point C	point D	point E
1	0.38	0.35	0.33	0.35	0.37
2	0.39	0.37	0.35	0.35	0.38
3	0.38	0.36	0.34	0.35	0.35
4	0.38	0.36	0.34	0.35	0.37
5	0.38	0.35	0.33	0.35	0.37
6	0.39	0.37	0.35	0.35	0.38
7	0.38	0.36	0.34	0.35	0.35
8	0.38	0.36	0.34	0.35	0.37
9	0.38	0.35	0.33	0.35	0.37
10	0.38	0.36	0.34	0.35	0.35
Average value	0.38	0.36	0.34	0.35	0.37
S.D.	0.004	0.007	0.007	0.000	0.012
		Total			0.016

ผลการตรวจสอบความหนาชิ้นงาน ได้ค่าเฉลี่ยต่ำสุด 0.34 มิลลิเมตร ค่าเฉลี่ยสูงสุด 0.38 มิลลิเมตร ที่จุด C บริเวณรัศมีก้นถ้วยจะมีความหนาลดลงมากกว่าบริเวณอื่นเนื่องจากพันช์กดดึงลากชิ้นงานมีการไหลตัว

สรุป

การออกแบบและสร้างแม่พิมพ์ลากขึ้นรูปสองครั้งเพื่อสร้างกล่องสี่เหลี่ยมที่มีความลึก 50 มิลลิเมตร ซึ่งชิ้นงานมีความยากในการขึ้นรูปไม่สามารถขึ้นรูปชิ้นงานได้เพียงครั้งเดียว จึงได้ออกแบบตัวอินเสิร์ตพันช์ และอินเสิร์ตดาย เป็น 2 ชุด เพื่อให้ขึ้นรูปชิ้นงานได้ตามรูปทรงที่ต้องการ ซึ่งแม่พิมพ์สามารถลากขึ้นรูปชิ้นงานได้ เมื่อทำการขึ้นรูปชิ้นงานกล่องสี่เหลี่ยมครั้งที่สองเสร็จแล้ว จึงนำชิ้นงานที่ได้เพื่อเปรียบเทียบขนาดที่ได้จากการออกแบบกับขนาดที่ได้ทำการทดลองลาก

ขึ้นรูปลึกนั้น พบว่าความกว้างของกล่องสี่เหลี่ยมค่าเฉลี่ยต่ำสุด 103.97 มิลลิเมตร ค่าเฉลี่ยสูงสุด104.81 มิลลิเมตร และความยาวค่าเฉลี่ยต่ำสุด 83.84 มิลลิเมตร ค่าเฉลี่ยสูงสุด 84.29 มิลลิเมตร เนื่องจากโก่งเข้าและการโก่งออกของผนังชิ้นงาน ซึ่งใกล้เคียงกับแบบที่มีขนาดความกว้างและความยาวมีขนาดเท่ากับ 104x84 มิลลิเมตร ส่วนความหนาของชิ้นงานต่ำสุด 0.34 มิลลิเมตร สูงสุด 0.38 มิลลิเมตร จากแบบมีขนาดความหนา 0.5 มิลลิเมตร เนื่องจากชิ้นงานมีขนาดลดลงเพราะเกิดจากการยืดของแผ่นวัสดุ การลากขึ้นรูปสองครั้งสามารถลดการฉีกขาดที่บริเวณขอบของก้นชิ้นงานและรอยย่นบริเวณผนังของชิ้นงานได้

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนาที่สนับสนุนเครื่องมือและอุปกรณ์ในการทดลอง และงบประมาณในการดำเนินงานวิจัย

เอกสารอ้างอิง

ชาญชัย ทรัพยากร, ประสิทธิ์ สวัสดิสรรพ์, วิรุฬ์ ประเสริฐวรนันท์. 2552. การออกแบบแม่พิมพ์. สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น), กรุงเทพฯ.

ธวัชชัย แก้วสีใส, กุลชาติ จุลเพ็ญ, บัญชา วงศ์ศรีทา, บุญเรือง เย็นศิริ, ไพศาล เอี่ยมมิ, ชวลา วรรณสิทธิ์. 2555. การศึกษาอิทธิพลของรัศมีบ่าดายในการลากขึ้นรูปถ้วยสี่เหลี่ยมจัตุรัสแบบมีปีกสำหรับเหล็กกล้าความแข็งแรงสูงด้วยวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์. ใน: การประชุมวิชาการข่ายงานวิศวกรรมอุตสาหการ ครั้งที่ 30. โรงแรมเมธาวลัย ชะอำ เพชรบุรี 17-19 ตุลาคม 2555.

ไพศาล เอี่ยมมิ, ธวัชชัย แก้วสีใส, บัญชา วงศ์ศรีทา, บุญเรือน เย็นศิริ, ชวลา วรรณสิทธิ์, กุลชาติ จุลเพ็ญ. 2554. อิทธิพลของรัศมีบ่าดายในการลากขึ้นรูปถ้วยสี่เหลี่ยมจัตุรัสแบบมีปีก. ใน: การประชุมวิชาการข่ายงานวิศวกรรมอุตสาหการ ครั้งที่ 29. โรงแรมแอมบาสเตอร์ซิตี้ จอมเทียน พัทยา ชลบุรี 20-21 ตุลาคม 2554.

วารุณี เปรมานนท์, พงศ์พันธ์ แก้วตาทิพย์. 2552. งานขึ้นรูปโลหะ. สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น), กรุงเทพฯ.

วิริยากร พานิชวงษ์. 2562. การศึกษาการประยุกต์ใช้ดรอบีดสำหรับกระบวนการลากขึ้นรูป. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์.

สัญญา คำจริง, ญาณพินิจ วชิรสุรงค์, ปพน สมประสงค์. 2556. การศึกษาความสามารถในการลากขึ้นรูปถ้วยสี่เหลี่ยมโดยใช้ไฟไนต์เอลิเมนต์. วารสารมหาวิทยาลัยทักษิณ 16: 92–101.

Gutiérrez Regueras, J.M., Camacho López, A.M. 2014. Investigations on the influence of blank thickness (t) and length/wide punch ratio (LD) in rectangular deep drawing of dual-phase steels. Int. Comput. Mater. Sci. 91: 134–145.

Han, S.S., Kim, H.K. 2025. Optimum multistage deep drawing process design using artificial neural network-based forming quality evaluation function. J. Mater. Process. Technol. 341: 118881. doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2025.118881

Meng, B., Wan, M., Yuan, S., Xu, X., Liu, J., Huang, Z. 2013. Influence of cavity pressure on hydrodynamic deep drawing of aluminum alloy rectangular box with wide flange. Int. J. Mech. Sci. 77: 217–226.

Mohammed, A.I. 2025. Characterizing the formability of mild steel in the production of square components by deep drawing process. Adv. Sci. Technol. Res. J. 19: 117–125. doi.org/10.12913/22998624/200440

การนำน้ำกลับมาใช้ใหม่ในกระบวนการแลกเปลี่ยนความร้อนกับระบบทำความเย็นที่ใช้แอมโมเนียในโรงงานผลิตไอศครีม

Reused water in heat exchanger with ammonia cooling system of ice cream production

อดิศักดิ์ คำพะทิก, จารุวรรณ เกษมทรัพย์*

Adisak Khumpatik, Charuvan Kasemsap*

สาขาวิชาการจัดการงานวิศวกรรม บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษมบัณฑิต กรุงเทพฯ 10250

Department of Engineering Management, Faculty of Graduate School, Kasem Bundit University, Bangkok 10250, Thailand

*Corresponding author. E-mail address: charuvan.kas@kbu.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาศักยภาพการนำน้ำกลับมาใช้ใหม่ในโรงงานผลิตไอศกรีม โดยมุ่งเน้นการใช้ประโยชน์จากน้ำเข้มข้นที่เหลือจากกระบวนการกรองแบบรีเวิร์สออสโมซิส และน้ำคอนเดนเสทจากไอน้ำ เพื่อลดการใช้น้ำประปาในระบบทำความเย็นด้วยแอมโมเนีย จากการศึกษาพบว่า การพัฒนาระบบการผสมน้ำเข้มข้นที่เหลือจากกระบวนการกรองแบบรีเวิร์สออสโมซิส และน้ำคอนเดนเสทจากไอน้ำ ในอัตราส่วน 50:50 ทำให้คุณภาพน้ำมีค่าความเข้มข้นของสารที่ละลายในน้ำได้ เฉลี่ย 765 ppm และพีเอช 8.5 ซึ่งเหมาะสมต่อการใช้งานในระบบหล่อเย็น สามารถทดแทนน้ำประปาได้ประมาณ 60 ลบ.ม./วัน หรือคิดเป็นร้อยละ 33 ของปริมาณน้ำที่ต้องใช้ทั้งหมด และลดการใช้น้ำประปา 19,800 ลบ.ม.ต่อปี หรือลดค่าน้ำประปา 594,000 บาทต่อปี และมีระยะเวลาคืนทุน 1.6 ปี

คำสำคัญ: การนำน้ำกลับมาใช้ใหม่, การแลกเปลี่ยนความร้อน, ระบบทำความเย็น, โรงงานผลิตไอศกรีม, แอมโมเนีย

Abstract

This study explores the potential for water reuse in an ice cream manufacturing facility, focusing on the utilization of reverse osmosis concentrate and condensate steam to reduce municipal water consumption in the ammonia evaporative condenser cooling system. The findings indicate that process of mixing RO concentrate and condensate steam in a 50:50 ratio yields water with an average total dissolved solids concentration of 765 ppm and a pH of 8.5, which is suitable for use in cooling systems. This approac h can replace approximately 60 cubic meters of municipal water per day, accounting for 33% of the total water demand. It results in an annual reduction of 19,800 cubic meters of municipal water usage, equivalent to a cost saving of 594,000 Baht per year, with a payback period of 1.6 years.

Keywords: Ammonia, Cooling system, Heat exchanger, Ice cream production, Water reuse

คำนำ

อุตสาหกรรมอาหารเป็นหนึ่งในกลุ่มอุตสาหกรรมที่มีบทบาทสำคัญต่อเศรษฐกิจของประเทศไทย โดยเฉพาะในกลุ่มอาหารแปรรูปและอาหารพร้อมรับประทาน ซึ่งรวมถึงอุตสาหกรรมไอศกรีม ที่มีแนวโน้มการเติบโตอย่างต่อเนื่อง มูลค่าตลาดไอศกรีมของประเทศไทยในปี พ.ศ. 2566 เท่ากับ 13. 2 พันล้านบาท เพิ่มขึ้นเป็น 15.5 พันล้านบาท ในปี พ.ศ. 2570 และจะยังคงเติบโตอย่างต่อเนื่องในอัตราการเติบโตเฉลี่ยร้อยละ 5.0 ต่อปี ตลาดมีแนวโน้มขยายตัวจากความนิยมของผู้บริโภค โดยเฉพาะในกลุ่มคนรุ่นใหม่และผู้บริโภคที่ต้องการสินค้าแบบพรีเมียม นอกจากนี้ ผู้ประกอบการไอศกรีมมีแนวคิดการออกแบบผลิตภัณฑ์ที่ดีต่อสุขภาพ เช่น การลดน้ำตาล ใช้วัตถุดิบจากพืช (Plant-based) เพื่อดึงดูดกลุ่มผู้บริโภคในสังคมสูงวัยให้เพิ่มมากขึ้น (สถาบันอาหาร, 2566) ในกระบวนการผลิตอาหารรวมถึงไอศกรีม มีการใช้น้ำเป็นส่วนหนึ่งในทรัพยากรหลักที่ใช้ในปริมาณมาก ทั้งในรูปแบบของน้ำที่ทำหน้าที่เป็นส่วนผสมหลักของผลิตภัณฑ์ (Water in Product) น้ำที่ใช้ในกระบวนการ (Water in Process) เช่น ใช้สำหรับการหล่อเย็นเครื่องจักร และน้ำสำหรับทำความสะอาด วัตถุดิบ เช่น ผลไม้ ถั่ว และทำความสะอาดสถานที่ (Clean out Place: COP) อุปกรณ์ต่างๆ (Clean-in-Place: CIP) (Tobin et al., 2020) ในขณะที่ระบบทำความเย็นในภาคอุตสาหกรรมจำเป็นต้องรักษาอุณหภูมิสภาพแวดล้อมให้คงที่ ส่งผลให้มีการใช้พลังงาน ร้อยละ 32 - 70 (Karacan et al., 2023; Wu Q. et al., 2024)

การเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ (Global warming) เป็นปัจจัยหลักที่นำไปสู่การขาดแคลนน้ำ (Nkiaka, E. 2022) นำไปสู่การนำน้ำกลับมาใช้ประโยชน์ใหม่ (Askari และ Eslamian, 2021) ดังนั้นการใช้ระบบหมุนเวียนน้ำแบบปิด (Closed-loop Systems) การปรับปรุงประสิทธิภาพของหอหล่อเย็น (Cooling Towers) และการใช้น้ำที่ผ่านระบบบำบัดจะลดต้นทุนการดำเนินงาน (Ghoddousi et al., 2021) โดยเฉพาะอย่างยิ่ง น้ำเสียจากกระบวนการผลิตน้ำประเภทการกรองรีเวอร์สออสโมซิส (Reverse Osmosis: RO) มีค่าปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมด (Total dissolved solid: TDS) ที่มีศักยภาพในการนำกลับมาใช้ประโยชน์ (Finnerty, 2024) นอกจากนี้การนำความร้อนนั้นกลับมาใช้ด้วยการติดตั้งอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน (Evaporative Condenser) เพื่อนำน้ำคอนเดนเสทกลับมาใช้ใหม่ จะช่วยลดการสูญเสียพลังงาน (โยธิน และ พงศ์, 2565) นั้นคือ หลักการของเศรษฐกิจหมุนเวียน (circular economy) ประกอบด้วย การลดการใช้ทรัพยากร (Reduce) การนำของเสียกลับมาใช้ใหม่ (Reuse) และการฟื้นฟู (Restore) (Carrard และคณะ, 2024) สามารถแก้ไขปัญหาการขาดแคลนน้ำได้ (Bailone et al., 2022)

อุปกรณ์และวิธีการ

บริษัทผลิตไอศกรีมแห่งหนึ่งในกรุงเทพมหานคร มีกำลังการผลิต 90,000 ตันต่อปี มีการส่งเสริมแนวคิดด้านความยั่งยืน โดยเฉพาะในด้านการจัดการน้ำ การจัดการพลังงาน และการลดของเสียจากกระบวนการผลิต โดยมีปริมาณการใช้ไอน้ำ (steam) จากโรงงานผลิตไฟฟ้าและไอน้ำของนิคมอุตสาหกรรม 1,200 ตันต่อปี และปริมาณการใช้น้ำประปาจากนิคมอุตสาหกรรม 1,100 ลูกบาศก์เมตรต่อวัน ได้แก่

1. น้ำที่ใช้เป็นส่วนผสมในผลิตภัณฑ์ในกระบวนการผสมวัตถุดิบ ซึ่งจำเป็นต้องมีคุณภาพสูงและปลอดเชื้อ โดยจะผ่านการกรองประเภทรีเวอร์สออสโมซิส โดยน้ำเข้มข้นที่เหลือจากกระบวนการกรองแบบรีเวิร์สออสโมซิส (RO Concentrate) ประมาณร้อยละ 20–30 ของปริมาณน้ำทั้งหมด มีค่าของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมด เฉลี่ย 1,000–2,000 ppm ค่า pH อยู่ในช่วง 8–9 ปริมาณ 90 ลูกบาศก์เมตรต่อวัน โดยระบายลงสู่ระบบบำบัดน้ำเสียในปริมาณ 60 ลูกบาศก์เมตรต่อวัน และเก็บรวบรวมในถังพักขนาด 10 ลูกบาศก์เมตร จำนวน 3 ใบ สำหรับใช้ในการเจือจางน้ำเสียที่ผ่านระบบบำบัดน้ำเสีย

2. น้ำที่ใช้ในกระบวนการ (Water in Process) จะผ่านการกรองเบื้องต้นและการฆ่าเชื้อด้วยคลอรีน ซึ่งน้ำในส่วนนี้สามารถนำไปใช้ได้ทั้งหมด โดยไม่มีน้ำทิ้งจากกระบวนการ

การเก็บข้อมูลปริมาณการใช้น้ำของโรงงาน ระหว่าง วันที่ 3 – 13 มีนาคม พ.ศ. 2568 และวิเคราะห์คุณภาพน้ำ ได้แก่ ค่าพีเอช โดยใช้เครื่องพีเอชมิเตอร์ แบบพกพา ยี่ห้อ HORIBA รุ่น LAQUA ACT-PH120 ค่าของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมด (Total Dissolved Solids: TDS) โดยใช้เครื่องวัดค่า TDS แบบพกพา ยี่ห้อ HORIBA รุ่น LAQUA ACT-DS72 โดยมีการสอบเทียบเครื่องมือก่อนการใช้งานทุกครั้งตามคู่มือ ตามแนวทางมาตรฐานการตรวจวิเคราะห์คุณภาพน้ำใน Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (APHA, AWWA, WEF) ซึ่งค่าพีเอช ค่าของแข็งที่ละลายน้ำได้ สีของน้ำ เป็นตัวแปรหลักในการเกิดตะกรัน (scale) ตะไคร่น้ำ ราเมือก (slime) และการกัดกร่อนในระบบทำความเย็น และลดประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนในระยะยาว และสีโดยใช้แถบสีมาตรฐานของโรงงาน

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

ในปัจจุบัน แผนผังสมดุลน้ำในโรงงานผลิตไอศกรีมที่มีปริมาณการใช้น้ำประปา 3.46 ลูกบาศก์เมตรต่อตัน แสดงดัง Fig. 1 โดยมีปริมาณน้ำเข้มข้นที่เหลือจากกระบวนการกรองแบบรีเวิร์สออสโมซิส 90 ลูกบาศก์เมตรต่อวันและน้ำคอนเดนเสทจากไอน้ำ (Condensate Steam) 30 ลูกบาศก์เมตรต่อวัน มีศักยภาพที่จะนำน้ำและความร้อนกลับมาใช้ด้วยการติดตั้งอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน (Plate Heat Exchanger: PHE) สำหรับใช้ในระบบทำความเย็นด้วยแอมโมเนีย (Ammonia Evaporative Condenser) ที่มีปริมาณการใช้น้ำ 200 ลูกบาศก์เมตรต่อวัน โดยการผสมน้ำเข้มข้นที่เหลือจากกระบวนการกรองแบบรีเวิร์สออสโมซิส และน้ำคอนเดนเสทจากไอน้ำ ในสัดส่วน 50:50 เพื่อให้ได้น้ำสำหรับเติมเข้าสู่ระบบทำความเย็น 60 ลูกบาศก์เมตรต่อวัน และมีค่าของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมด เฉลี่ย 765 ppm และ ค่าพีเอช 8.5 อยู่ในช่วงปลอดภัยต่อการเกิดตะกรันและการกัดกร่อนในระบบหล่อเย็น แบบ Evaporative Condenser สอดคล้องกับงานวิจัยของ Ghoddousi และคณะ (2021) พบว่า การควบคุมคุณภาพน้ำในระบบหล่อเย็นโดยอาศัยค่า TDS และ pH สามารถลดอัตราการเกิดตะกรัน การกัดกร่อนและช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนของระบบหล่อเย็น และการใช้พลังงานของโรงงานอุตสาหกรรม ได้อย่างมีนัยสำคัญ ขณะที่ Chen et al. (2024) ชี้ให้เห็นว่าการควบคุมของแข็งละลายน้ำและความเป็นกรด–ด่างของน้ำให้อยู่ในช่วงที่เหมาะสมจะรักษาเสถียรภาพของระบบหล่อเย็นแบบระเหย ทำให้ลดปริมาณการเติมน้ำชดเชย (Make-up Water) จากการระเหยของน้ำในขั้นตอนการแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างสารทำความเย็นกับบรรยากาศ ได้ ร้อยละ 44 ซึ่งระบบทำความเย็นด้วยแอมโมเนีย ทำงานโดยการระเหยของน้ำที่มีอุณหภูมิ 25–30°C พ่นลงบนผิวของคอยล์ที่บรรจุก๊าซแอมโมเนียมีอุณหภูมิ 70–80°C ทำให้แอมโมเนียสามารถควบแน่นกลับมาอยู่ในสถานะของเหลว ที่อุณหภูมิ 30–35°C ซึ่งสมดุลการใช้น้ำในรูปแบบหมุนเวียนของระบบทำความเย็น แสดงดัง Fig. 2 โดยทำการทดลอง สัดส่วนน้ำเข้มข้นที่เหลือจากกระบวนการกรองแบบรีเวิร์สออสโมซิส และน้ำคอนเดนเสทจากไอน้ำ แสดงดัง Table 1 พบว่า คุณภาพน้ำ ประเภท A มีค่าความเข้มข้นของสารที่ละลายในน้ำได้ เฉลี่ย 442 ppm และพีเอช 8.6 โดยมีคุณสมบัติเหมาะสมตามมาตรฐานน้ำหล่อเย็น อย่างไรก็ตาม โรงงานผลิตไอศกรีมดังกล่าว มีข้อจำกัดในปริมาณน้ำคอนเดนเสทจากไอน้ำ ส่งผลให้สามารถผลิตน้ำจากการนำกลับมาใช้ใหม่ได้ 30 ลบ.ม./วัน ในขณะที่ คุณภาพน้ำ ประเภท C มีค่าความเข้มข้นของสารที่ละลายในน้ำได้ เฉลี่ย 947 ppm และพีเอช 8.4 โดยมีคุณสมบัติเหมาะสมตามมาตรฐานน้ำหล่อเย็น อย่างไรก็ดี โรงงานจะต้องเพิ่มค่าใช้จ่ายในสารเคมีป้องกันตะกรัน และค่าบำรุงรักษาเชิงป้องกัน 432,000 บาทต่อปี และคุณภาพน้ำ ประเภท B สามารถผลิตน้ำจากการนำกลับมาใช้ใหม่ได้ 60 ลบ.ม./วัน และมีค่าความเข้มข้นของสารที่ละลายในน้ำได้ เฉลี่ย 765 ppm และพีเอช 8.5 โดยมีค่าการนำไฟฟ้า ไม่เกิน 1000 μS/cm (Chen และคณะ 2024) หรือ

1,562.50 ppm (Chemistry Calculators,) ตามมาตรฐานน้ำหล่อเย็น และสอดคล้องกับค่าความเข้มข้นของสารที่ละลายในน้ำประปาของระบบหล่อเย็นโดยใช้แอมโมเนีย เฉลี่ย 450 ± 24.4 ppm แสดงดัง Table 2

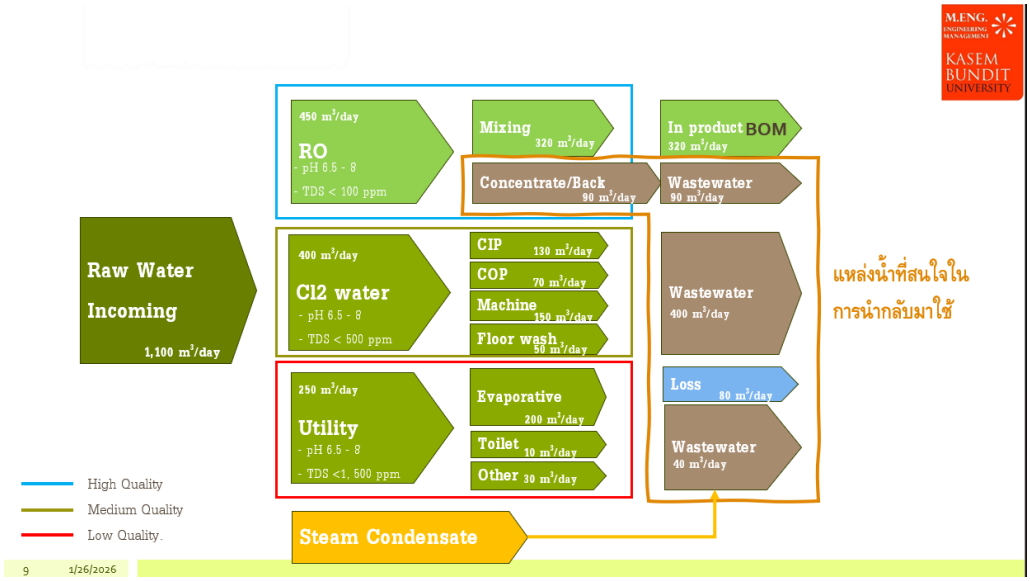


Fig. 1 Water balance diagram of an ice cream manufacturing plant

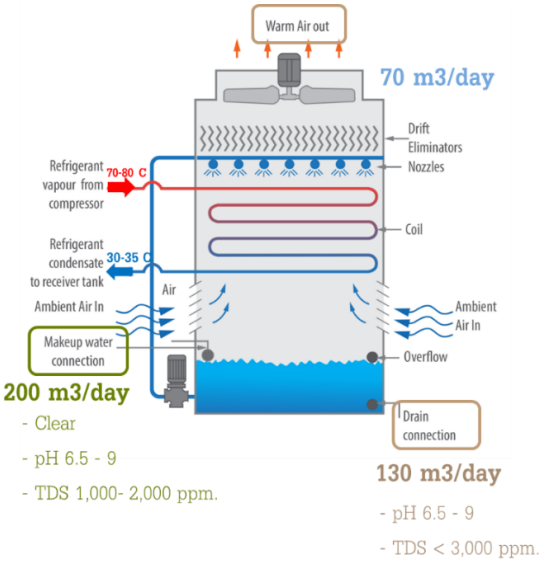


Fig. 2 Water balance of ammonia evaporative condenser

Table 1 Ratio of condensate steam RO concentrate on water quality of the reused water system

Type	RO Concentrate	Condensate steam	pH	TDS (ppm)	Color	Water flowrate, m^3/d
A	25	75	8.6	442	clear	30
B	50	50	8.5	765	clear	60
C	75	25	8.4	947	clear	100
D	Water supply for ammonia evaporative condenser		7.9	450 ± 24.4	clear	60

Table 2 Water quality of the reused water system

Water Monitoring Station	Quality				
	pH		TDS (ppm)		Color
	Ave±SD	Min-Max	Ave±SD	Min-Max	
1.Water supply for RO	7.8 ± 0.22	7.5 – 8.2	380 ± 32.7	342-450	Clear
2.Concentrate RO	8.3 ± 0.28	8.1 – 8.9	1,250 ± 135	345 – 1,320	Clear
3. Condensate steam	8.8 ± 0.26	8.3 – 9.2	40 ± 6.4	30 – 50	Clear
4. Water supply for ammonia evaporative condenser	7.9 ± 0.22	7.6 – 8.3	450 ± 24.4	398 – 458	Clear
5. Water drainage of ammonia evaporative condenser	8.9 ± 0.14	8.8-9.3	2,800 ± 102	2,705 – 2,990	Clear

นอกจากนี้ น้ำคอนเดนเสทจากไอน้ำ ที่มีค่าอุณหภูมิ 90–100 °C สามารถน้ำมาผ่านเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนกับน้ำประปาที่มีอุณหภูมิ 30 °C เพื่อให้อุณหภูมิของน้ำมีค่า 45 °C สำหรับใช้ในการทำความสะอาดเครื่องจักร สถานที่ อย่างไร นั้นคือ การลงทุนในระบบการนำน้ำกลับมาใช้ใหม่ แสดงดัง Fig. 3 โดยมีค่าลงทุน 500,000 บาท แสดงดัง Table 3 สามารถลดการใช้น้ำประปาได้ 19,800 ลูกบาศก์เมตรต่อปี (330 วันปฏิบัติงานต่อปี) หรือ ลดค่าน้ำประปา 594,000 บาท/ปี (ราคาน้ำประปารวมค่าบำบัดเท่ากับ 30 บาท/ลูกบาศก์เมตร) อย่างไรก็ดี ระบบดังกล่าวไม่มีผลต่อรอบความเข้มข้น (cycle of concentration) ของระบบหล่อเย็น เนื่องจากโรงงานมีค่าใช้จ่ายสารเคมีป้องกันตะกรัน และค่าบำรุงรักษาเชิงป้องกัน เพิ่มขึ้น 288,000 บาทต่อปี ส่งผลให้สามารถเพิ่มมูลค่าทางเศรษฐศาสตร์ได้ 306,000 บาท/ปี และมีระยะเวลาคืนทุน (Payback Period) 1.6 ปี

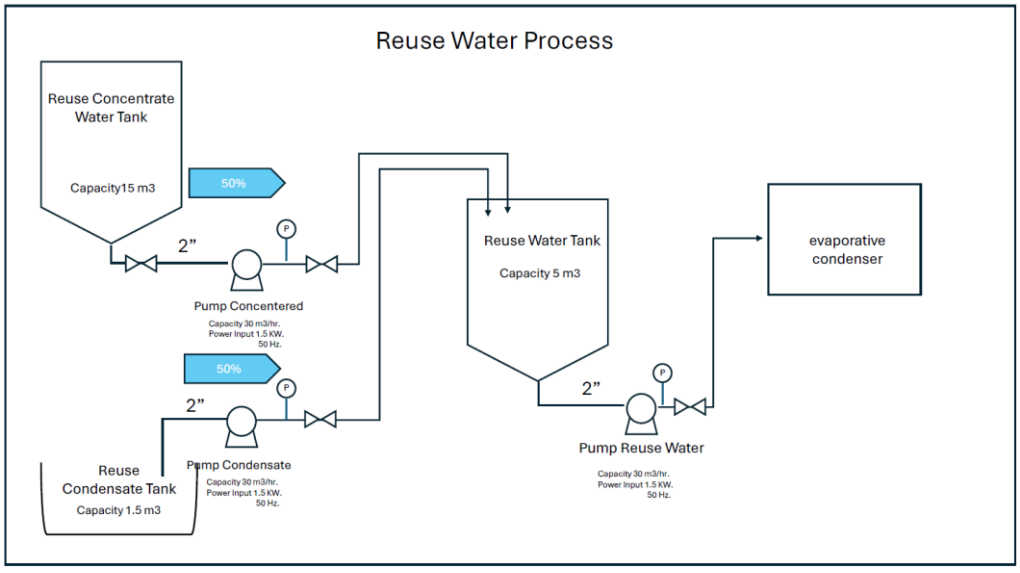


Fig. 3 Reused water system

Table 3 Investment in water reuse systems

List of equipment	Number	Cost (Baht)
RO concentrate pump	1	50,000
Condensate steam pump	1	50,000
5,000-liter mixing tank	1	200,000
Automatic water level control system	1	200,000
Total		500,000

สรุป

การพัฒนาระบบการผสมน้ำเข้มข้นที่เหลือจากกระบวนการกรองแบบรีเวิร์สออสโมซิส และน้ำคอนเดนเสทจากไอน้ำ ในอัตราส่วน 50:50 สามารถทดแทนน้ำประปาได้ประมาณ 60 ลบ.ม./วัน หรือคิดเป็นร้อยละ 33 ของปริมาณน้ำที่ต้องใช้ทั้งหมด โดยน้ำนำกลับมาใช้ใหม่มีค่าความเข้มข้นของสารที่ละลายในน้ำได้ เฉลี่ย 765 ppm และพีเอช 8.5 และอยู่ในเกณฑ์ที่รับได้สำหรับระบบหล่อเย็น (Cooling Tower) ทั่วไปที่กำหนดให้ค่าความเข้มข้นของสารที่ละลายในน้ำได้ ไม่ให้เกิน 1,562.50 ppm ซึ่งสามารถลดค่าน้ำประปา 594,000 บาท/ปี และมีระยะเวลาคืนทุน 1.6 ปี อย่างไรก็ดี ระบบดังกล่าวมีค่าใช้จ่ายสารเคมีป้องกันตะกรัน (Scale) จากแคลเซียมคาร์บอเนตและค่าบำรุงรักษาเชิงป้องกัน เพิ่มขึ้น 288,000 บาทต่อปี และน้ำที่นำกลับมาใช้ใหม่มีความร้อน อาจกระตุ้นการเติบโตของตะไคร่น้ำหรือแบคทีเรีย ในระบบทำความเย็นได้ง่ายกว่าน้ำประปา โดยเสนอแนะให้ใช้ระบบเซนเซอร์วัดค่าความเข้มข้นของสารที่ละลายในน้ำได้ และพีเอช Conductivity แบบเรียลไทม์ เพื่อควบคุมการผสมน้ำตามเป้าหมายโดยอัตโนมัติ และการนำน้ำที่ผ่านการบำบัดแล้วไปใช้ในส่วนงานอื่นที่ไม่สัมผัสผลิตภัณฑ์ เช่น การล้างพื้นภายนอก หรือการรดน้ำต้นไม้

เอกสารอ้างอิง

โยธิน พลประถม, พงศ์ หรดาล. 2565. การบริหารจัดการประสิทธิภาพสำหรับหม้อไอน้ำ. วารสารก้าวทันโลกวิทยาศาสตร์ 22: 1–14.

สถาบันอาหาร. 2566. ผลิตภัณฑ์ไอศกรีม รายงานตลาดอาหารในประเทศไทย. https://fic.nfi.or.th/market-intelligence-detail.php?smid=392#.pdf, มิถุนายน 2567.

Askari, K.O., Eslamian, S. 2021. Water reuse in industry: Necessities and possibilities. Am. J. Eng. Appl. Sci. 14: 94–102. doi.org/10.3844/ajeassp.2021.94.102

Bailone, R.L., Borra, R.C., Fukushima, H.C.S., Aguiar, L.K. 2022. Water reuse in the food industry. Discover Food 2: 5. doi.org/10.1007/s44187-021-00002-4

Carrard, N., Kumar, A., Dao, D.V., Kohlitz, J., Retamal, M., Taron, A., Neemia, N., Willetts, J. 2024. 8Rs for circular water and sanitation systems: Leveraging circular economy thinking for safe, resilient and inclusive services. Environ. Dev. 52: 101093.

Chemistry Calculators. 2025. TDS to conductivity calculator. https://chemistrycalculators.net/tds-to-conductivity-calculator.html, 25 November 2025.

Chen, Y.S., Hung, Y.H., Lee, M.Y.J., Chang, J.R., Lin, C.K., Wang, T.W. 2024. Advanced study: Improving the quality of cooling water towers' conductivity using a fuzzy PID control model. Mathematics 12: 3296. doi.org/10.3390/math12203296

Finnerty, C.T.K., Childress, A.E., Hardy, K.M., Hoek, E.M.V., Mauter, M.S., Plumlee, M.H., Rose, J.B., Sobsey, M.D., Westerhoff, P., Alvarez, P.J.J., Elimelech, M. 2024. The future of municipal wastewater reuse concentrate management: Drivers, challenges, and opportunities. Environ. Sci. Technol. 58: 3–16.

Ghoddousi, S., Anderson, A., Rezaie, B. 2021. Advancing water conservation in cooling towers through energy-water nexus. Eur. J. Sustain. Dev. Res. 5. doi.org/10.21601/ejosdr/10952

Karacan, M.A., Yilmaz, I.C., Yilmax, D. 2023. Key implications on food storage in cold chain by energy management perspectives. Front. Sustain. Food Syst. 7. doi.org/10.3389/fsufs.2023.1250646

Nkiaka, E. 2022. Water security assessment in ungauged regions using the water balance and water footprint concepts and satellite observations. Hydrol. Res. 53. doi.org/10.2166/nh.2022.124

Tobin, H.M., Lele, S.R., Cutter, C.N., Anantheswaran, R.C., LaBorde, L.F. 2020. Hot water sanitization of a commercial mushroom disk slicer to inactivate Listeria monocytogenes. Food Control 109: 106900.

Wu, Q., Zhang, X., Wu, H. 2024. Research progress on cold store technology in the context of dual carbon. J. Energy Storage 86. doi.org/10.1016/j.est.2024.111291

ปัจจัยที่ส่งเสริมพฤติกรรมการจัดการขยะผ่านการเรียนรู้จากกิจกรรมส่งเสริมสิ่งแวดล้อมด้วยการเพิ่มขอบเขตของทฤษฎีการวางแผนพฤติกรรมผ่านแบบสอบถามก่อน-หลังและการปล่อยก๊าซเรือนกระจก

Factors influencing waste management behavior via pro-environment initiative: An extended TPB model integrating pre–post questionnaires and greenhouse gas emission

หนึ่งฟ้า ช้อนนาค, ทักษิณา โพธิ์ไหญ่, ณัฐพล ลื้อบาย*

Nuengfa Chonnak, Thaksina Poyai, Nattapon Leeabai*

ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

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

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

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อวิเคราะห์ปัจจัยที่ส่งเสริมพฤติกรรมการจัดการขยะของผู้เข้าร่วมกิจกรรมส่งเสริมสิ่งแวดล้อม โดยประยุกต์ใช้ทฤษฎีการวางแผนพฤติกรรม (Theory of Planned Behavior: TPB) และขยายแบบจำลองด้วยปัจจัยความรู้เกี่ยวกับเป้าหมายการพัฒนาที่ยั่งยืน (SDGs knowledge) เป็นแบบจำลอง Extended Theory of Planned Behavior (ETPB) โดยใช้แบบสอบถามมาตร Likert 5 ระดับ ประเมินทัศนคติ บรรทัดฐานทางสังคม การรับรู้การควบคุมพฤติกรรม ความตั้งใจในการแสดงพฤติกรรมที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม และความรู้เกี่ยวกับ SDGs โดยเก็บข้อมูลก่อนกิจกรรมจำนวน 45 คน และหลังกิจกรรมจำนวน 37 คน ซึ่งวิเคราะห์ข้อมูลในลักษณะภาพรวมเพื่อสะท้อนการเปลี่ยนแปลงของกลุ่มตัวอย่าง รวมทั้งบันทึกปริมาณขยะที่คัดแยกจริงเพื่อเชื่อมโยงตัวแปรด้านความตั้งใจกับผลลัพธ์พฤติกรรมที่เกิดขึ้นจริง แบบสอบถามมีค่าความเชื่อมั่น Cronbach's alpha อยู่ระหว่าง 0.59–0.91 ผลการวิเคราะห์การถดถอยจากข้อมูลหลังการเข้าร่วมกิจกรรมพบว่า บรรทัดฐานทางสังคม การรับรู้การควบคุมพฤติกรรม และความรู้เกี่ยวกับ SDGs ส่งผลเชิงบวกอย่างมีนัยสำคัญต่อความตั้งใจในการแสดงพฤติกรรมที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม ขณะที่ทัศนคติไม่พบความสัมพันธ์อย่างมีนัยสำคัญ สำหรับผลลัพธ์เชิงพฤติกรรมของกิจกรรม นอกจากนี้ พบว่าผู้เข้าร่วมสามารถคัดแยกขยะรวม 64.78 กิโลกรัม ซึ่งนำไปสู่ การลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกคิดเป็นประมาณร้อยละ 51 จากภาพรวมของกิจกรรมการคัดแยกขยะ

คำสำคัญ: กิจกรรมส่งเสริมสิ่งแวดล้อม, การคัดแยกขยะ, การลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจก, ความรู้เกี่ยวกับเป้าหมายการพัฒนาที่ยั่งยืน, ทฤษฎีการวางแผนพฤติกรรม

Abstract

This study investigates factors influencing waste-management behavior in a Pro-environmental initiative using the Theory of Planned Behavior (TPB), extended with Sustainable Development Goals knowledge (SDGs knowledge) to form an Extended Theory of Planned Behavior (ETPB) model. A 5-point Likert scale questionnaire assessed attitude, subjective norms, perceived behavioral control, behavioral intention, and SDGs knowledge among participants (n = 45 before; n = 37 after). Actual waste-sorting performance during the activity was also recorded. Reliability was acceptable, with Cronbach's alpha ranging from 0.59 to 0.91. Post-activity regression analysis showed that subjective norms, perceived behavioral control, and SDGs knowledge significantly predicted environmental-friendly behavioral intention, while attitude did not. Participants collectively sorted 64.78 kilograms of waste, resulting in an estimated reduction of about 51% in greenhouse gas emissions.

Keywords: Greenhouse gas emission reduction, Pro-environmental initiative, SDGs knowledge, Theory of planned behavior, waste separation

คำนำ

การจัดการขยะถือเป็นหนึ่งในปัญหาสิ่งแวดล้อมที่สำคัญและท้าทายที่สุดในยุคปัจจุบัน เนื่องจากขยะที่ไม่ได้รับการจัดการอย่างเหมาะสมไม่เพียงส่งผลกระทบต่อคุณภาพชีวิตของมนุษย์เท่านั้น แต่ยังส่งผลต่อระบบนิเวศและความสมดุลของสิ่งแวดล้อมอย่างรุนแรง เช่น การเกิดมลพิษทางดิน น้ำ และอากาศ การเพิ่มขึ้นของก๊าซเรือนกระจก และความเสื่อมโทรมของทรัพยากรธรรมชาติ การส่งเสริมกิจกรรมที่สร้างความตระหนักรู้เกี่ยวกับปัญหาขยะและสนับสนุนพฤติกรรมที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมจึงเป็นแนวทางสำคัญในการลดผลกระทบเหล่านี้

การประยุกต์หลักพฤติกรรมศาสตร์และสังคมที่มีอิทธิพลต่อพฤติกรรมสามารถช่วยออกแบบมาตรการส่งเสริมพฤติกรรมที่ต้องการได้ โดยเฉพาะทฤษฎีการวางแผนพฤติกรรม (Theory of Planned Behavior: TPB) (Ajzen, 1991) ซึ่งเสนอว่าพฤติกรรมของบุคคลถูกกำหนดโดยความตั้งใจที่สะท้อนถึงทัศนคติ บรรทัดฐานทางสังคม และการรับรู้การควบคุมพฤติกรรม งานวิจัยล่าสุดยังได้เสนอการขยายกรอบแนวคิดนี้เพื่อเพิ่มความสามารถในการอธิบายพฤติกรรมที่ซับซ้อน (Li et al., 2018) ในบริบทของการจัดการขยะ การเพิ่มตัวแปรความรู้เกี่ยวกับเป้าหมายการพัฒนาที่ยั่งยืน (SDGs Knowledge) เข้ามาในแบบจำลอง TPB ช่วยให้สามารถอธิบายว่าผู้เข้าร่วมกิจกรรมที่มีความรู้เกี่ยวกับ SDGs จะมีความตั้งใจในการปฏิบัติตนในรูปแบบที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมมากขึ้น และความตั้งใจนี้สามารถแปรเป็นพฤติกรรมที่จับต้องได้ เช่น การคัดแยกขยะอย่างมีประสิทธิภาพ

นอกจากนี้ การประเมินผลลัพธ์เชิงพฤติกรรมควบคู่กับตัวชี้วัดทางสิ่งแวดล้อม เช่น การลดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากกิจกรรมจัดการขยะ ช่วยยืนยันว่าพฤติกรรมที่เกิดจากความตั้งใจตามกรอบแนวคิด TPB และ Extended TPB มีผลเชิงบวกต่อสิ่งแวดล้อมอย่างเป็นรูปธรรม การเชื่อมโยงระหว่างความตั้งใจ พฤติกรรม และผลลัพธ์เชิงสิ่งแวดล้อมนี้จึงเป็นหลักฐานสำคัญในการพัฒนากิจกรรมส่งเสริมการจัดการขยะและการออกแบบมาตรการที่ยั่งยืนในระดับชุมชนและสังคม

อุปกรณ์และวิธีการ

1. กำหนดกรอบแนวคิดการวิจัย

1.1 ปัจจัยที่ทำให้เกิดพฤติกรรมการจัดการขยะ

งานวิจัยนี้ศึกษาปัจจัยที่ช่วยส่งเสริมพฤติกรรมการจัดการขยะผ่านการเรียนรู้จากกิจกรรมส่งเสริมสิ่งแวดล้อมด้วยการเพิ่มขอบเขตของทฤษฎีการวางแผนพฤติกรรม (Extended Theory of Planned Behavior, ETPB) การศึกษาในครั้งนี้ผู้วิจัยได้ทำการศึกษา และสำรวจปัจจัยด้านทัศนคติ บรรทัดฐานจากสังคม และการควบคุมพฤติกรรมที่รับรู้ โดยเพิ่มปัจจัยที่ต้องการศึกษาเพิ่มอีกหนึ่งปัจจัย คือ การให้ความรู้ด้าน SDGs เพื่อที่จะสามารถอธิบายพฤติกรรมการจัดการขยะอย่างครอบคลุม ซึ่งได้โยง ETPB เข้ากับเป้าหมายการพัฒนาที่ยั่งยืน (SDGs) โดยเฉพาะ SDG 12 ผ่านพฤติกรรมการรีไซเคิล และ SDG 13 การรับมือการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศซึ่งเกี่ยวข้องกับการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากกิจกรรมส่งเสริมสิ่งแวดล้อม แนวคิด SDGs knowledge จะถูกนำมาใช้เป็นตัวแปรขยายในแบบจำลอง เพื่อสะท้อนว่าการมีความรู้และความเข้าใจด้าน SDGs อาจช่วยเพิ่มความตั้งใจในการทำพฤติกรรมที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม และทำให้เกิดพฤติกรรมจริงและมีส่วนช่วยในการบรรลุเป้าหมาย SDGs ได้มากยิ่งขึ้น โดยมีกรอบแนวคิด ดังแสดงใน Fig. 1

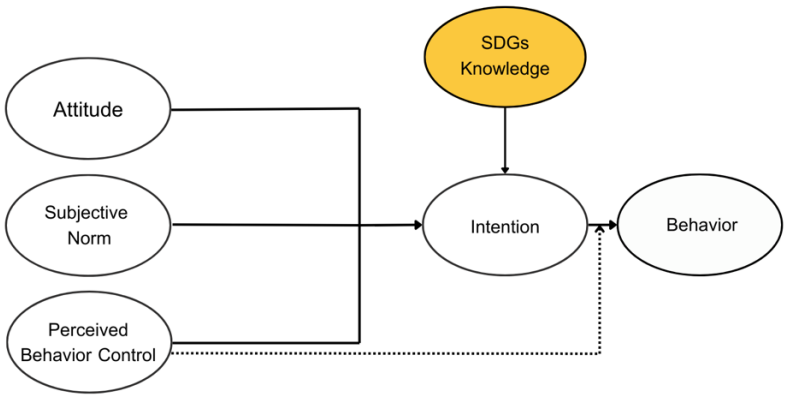


Fig. 1 Extended Theory of Planned Behavior

งานวิจัยแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ (1) แบบจำลองทฤษฎีการวางแผนพฤติกรรมขยายปัจจัยความรู้ด้าน SDGs และ (2) การศึกษาการลดลงของการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากพฤติกรรมการคัดแยกขยะในกิจกรรม โดยการวิจัยเริ่มต้นจากส่วนที่ (1) กิจกรรมส่งเสริมสิ่งแวดล้อม (Pro-environmental initiative) ที่มีวัตถุประสงค์เพื่อให้ความรู้และสร้างความตระหนักรู้แก่ผู้เข้าร่วมกิจกรรม ซึ่งส่งผลให้เกิดการคัดแยกขยะ (Waste Separetion) ได้อย่างมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น จากนั้นขยะที่ถูกคัดแยกอย่างถูกต้องนั้นจะถูกนำไปสู่กระบวนการนำขยะไปใช้ประโยชน์ (Utilization) ซึ่งได้แก่ การหมักทำปุ๋ย (Composting) และการรีไซเคิล Recycling) ซึ่งมีความสัมพันธ์กับการปล่อยก๊าซเรือนกระจก (GHGs emission) ในส่วนที่ (2) ที่ลดได้จากการคัดแยกขยะอย่างถูกต้อง และนำขยะเหล่านั้นไปใช้ให้เกิดประโยชน์สูงสุดแทนการทิ้งรวมกันเพื่อลดปริมาณก๊าซเรือนกระจกจากขยะที่ต้องนำไปที่หลุมฝังกลบ แสดงดังกรอบแนวคิดการวิจัย Fig. 2

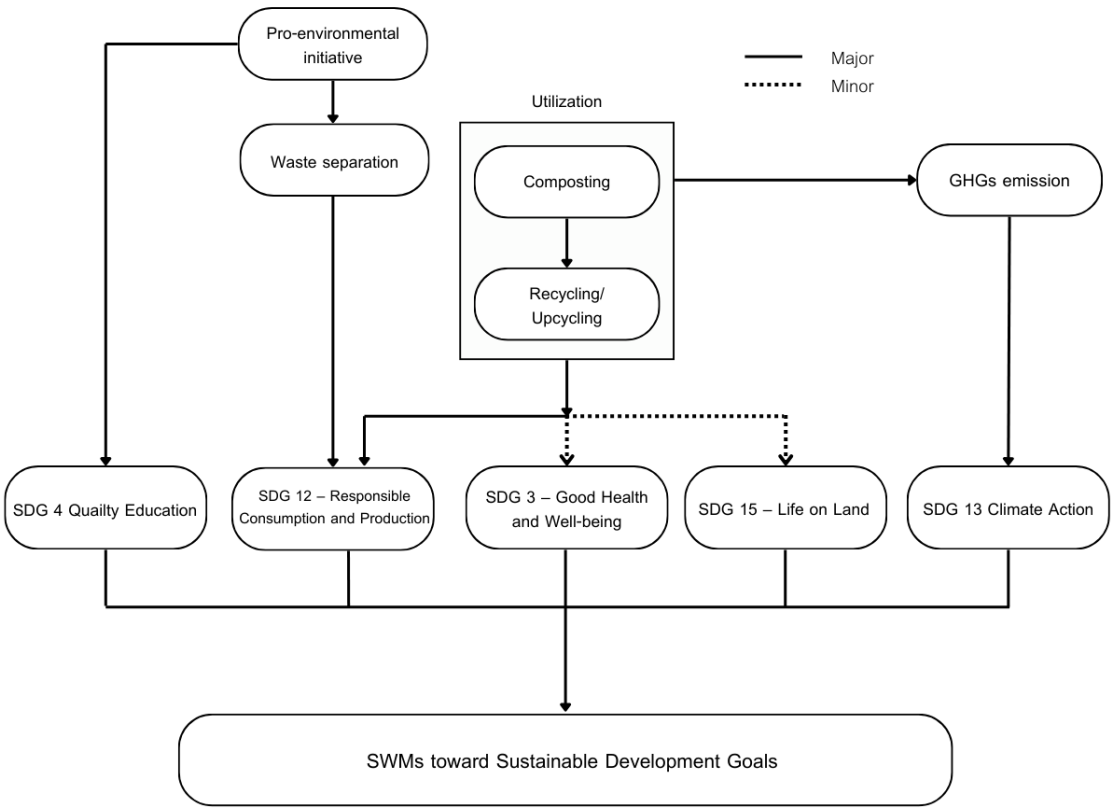


Fig. 2 Research famework

1.2 การประเมินการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากการจัดการขยะ

เพื่อเป็นการทดสอบพฤติกรรมการจัดการขยะเชิงบวกที่เกิดขึ้นจากการเข้าร่วมกิจกรรมที่เกี่ยวข้องกับการส่งเสริมสิ่งแวดล้อม ผู้วิจัยได้ทำการเก็บข้อมูลปริมาณขยะแต่ละประเภทที่เกิดขึ้นในกิจกรรม โดยการชั่งน้ำหนักถุงขยะต่างๆ ที่คัดแยกไว้ จากนั้นจึงนำข้อมูลดังกล่าวไปใช้ในการประเมินปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจกที่สามารถลดลงได้อันเป็นผลมาจากการคัดแยกขยะที่ถูกต้องภายในกิจกรรม

2. เครื่องมือวิจัย

ส่วนที่ 1 การศึกษาในครั้งนี้ผู้วิจัยใช้แบบสอบถามในการเก็บรวบรวมข้อมูลที่ได้ปฏิบัติตามแนวทางการออกแบบของ Kurisu (Kurisu, 2015) โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินความรู้ และสำรวจความคิดเห็นของผู้ตอบแบบสอบถามเกี่ยวกับพฤติกรรมการจัดการขยะ โดยวัดปัจจัยหลักตามทฤษฎีการวางแผนพฤติกรรม (Theory of Planned Behavior: TPB) ได้แก่ ทัศนคติ บรรทัดฐานทางสังคม และการควบคุมพฤติกรรมที่รับรู้ พร้อมทั้งเพิ่มตัวแปรด้านความรู้เกี่ยวกับเป้าหมายการพัฒนาที่ยั่งยืน (SDGs) เป็นปัจจัยขยายแบบจำลอง (Extended variable) (Li et al., 2018) เพื่อเพิ่มความครอบคลุมในการอธิบายพฤติกรรมด้านสิ่งแวดล้อมของกลุ่มตัวอย่าง ซึ่งผู้ตอบแบบสอบถามจะได้รับคำถามว่า “คุณเห็นด้วยกับข้อความดังต่อไปนี้มากน้อยเพียงใด” ตามมาตรส่วน Likert scale 5 คะแนน จาก “ไม่เห็นด้วยอย่างยิ่ง” ถึง “เห็นด้วยอย่างยิ่ง” โดยถ้อยคำที่ใช้ในการทำแบบสอบถามนี้มาจากการอ้างอิง ดัดแปลงจากการทบทวนวรรณกรรม (Karim Ghani et al., 2013; Soorani and Ahmadvand, 2019; Wan et al., 2017; Wang, 2021) และนำมาจากถ้อยคำของผู้วิจัยเองเพื่อให้บรรลุวัตถุประสงค์ของคำถามโดยแบ่งออกเป็นคำถามก่อนการเรียนรู้ (B) และหลังการเรียนรู้ (A) ดัง Fig. 3

(A) (B)

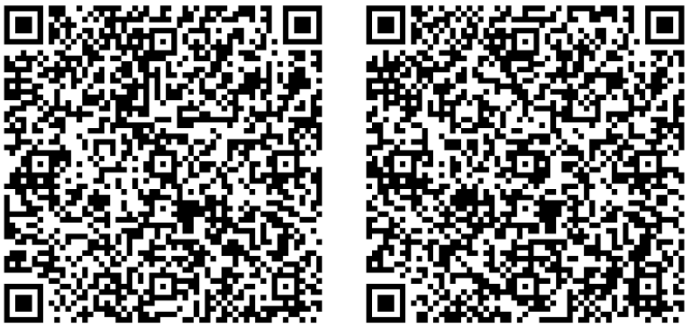


Fig. 3 Questions administered before (B) and after (A) the learning activity

โดยคำถามในแบบสอบถามทั้งสองชุดนี้ครอบคลุมปัจจัยอิสระ 4 ปัจจัย และความตั้งใจในการทำพฤติกรรมที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม รวมเป็น 5 ปัจจัย โดยแบ่งออกเป็นหมวดหมู่คำถาม ประกอบด้วย (1) ทัศนคติ (Attitude) เป็นคำถามที่มุ่งเน้นการทราบถึงแนวคิดและมุมมองเชิงบวกต่อพฤติกรรมที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม เช่น การลดของเสีย การใช้ทรัพยากรอย่างมีประสิทธิภาพ หรือการคัดแยกขยะ คำถามถูกออกแบบเพื่อสะท้อนว่าผู้ตอบมองว่าพฤติกรรมดังกล่าวเป็นสิ่งที่ มีประโยชน์ และควรปฏิบัติมากน้อยเพียงใด; (2) บรรทัดฐานทางสังคม (Subjective Norms) คำถามในหมวดนี้มุ่งวัดแรงกดดันทางสังคม หรือความคาดหวังจากบุคคลรอบข้าง ที่อาจมีผลต่อการตัดสินใจแสดงพฤติกรรมที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม เช่น การสนับสนุนของครอบครัว เพื่อนร่วมงาน หรือสังคมโดยรวม; (3) การควบคุมพฤติกรรมที่รับรู้

(Perceived Behavioral Control) หมวดนี้จะวัดระดับของ ความมั่นใจ ความสามารถ และทรัพยากรที่ผู้ตอบรู้สึกว่าตนมีเพียงพอ ในการปฏิบัติพฤติกรรมเพื่อสิ่งแวดล้อม เช่น ความสะดวกในการปฏิบัติ ความพร้อมด้านอุปกรณ์ การเข้าถึงข้อมูล หรือข้อจำกัดที่ทำให้พฤติกรรมทำยากหรือทำง่าย คำถามจึงสะท้อนความรู้สึก ทำได้ หรือ ทำไม่ได้ ของผู้ตอบแบบสอบถาม ซึ่งเป็นตัวทำนายสำคัญของพฤติกรรมจริงตาม TPB; (4) ความรู้เกี่ยวกับ SDGs (Knowledge of SDGs) คำถามหมวดนี้ออกแบบเพื่อวัดระดับ ความเข้าใจพื้นฐาน ของผู้ตอบเกี่ยวกับเป้าหมายการพัฒนาที่ยั่งยืน (Sustainable Development Goals: SDGs) โดยเฉพาะด้านสิ่งแวดล้อม เช่น SDG12 การผลิตและการบริโภคที่ยั่งยืน SDG13 การรับมือการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ คำถามหมวดนี้ช่วยประเมินว่าความรู้ของผู้ตอบมีผลต่อมุมมองและความตั้งใจในการแสดงพฤติกรรมเพื่อสิ่งแวดล้อมหรือไม่; (5) ความตั้งใจ (Intention) หมวดสุดท้ายมุ่งวัด แนวโน้ม ความพร้อม และความตั้งใจจริง ของผู้ตอบที่จะลงมือปฏิบัติพฤติกรรมที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมในชีวิตประจำวันหรือในที่ทำงาน เช่น การลดใช้พลาสติก การคัดแยกขยะ การใช้พลังงานอย่างประหยัด หรือการมีส่วนร่วมในกิจกรรมขององค์กร คำถามนี้เป็นตัว แปรตามหลักของงานวิจัย เพื่อใช้ทำนายความเป็นไปได้ของการแสดงพฤติกรรมจริงในอนาคต

ส่วนที่ 2 ผู้วิจัยได้ใช้เครื่องมือสำหรับเก็บข้อมูลปริมาณขยะที่เกิดขึ้นในกิจกรรมส่งเสริมสิ่งแวดล้อม ดังนี้ (1) ภาชนะสำหรับคัดแยกขยะแต่ละประเภท; (2) แบบบันทึกปริมาณขยะ; (3) เครื่องชั่งน้ำหนักแบบแขวน โดยผู้วิจัยได้ออกแบบป้ายการคัดแยกขยะตามแต่ละประเภทที่เกี่ยวข้องกับการคำนวณการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ 4 ประเภทด้วยกัน ได้แก่ ขยะอินทรีย์ ขยะรีไซเคิล ขวดน้ำพลาสติก และขยะทั่วไป พร้อมทั้งมีผู้ช่วยให้คำแนะนำในการคัดแยกขยะ แสดงดัง Fig. 4

Fig. 4 Waste-segregation activities conducted during the program

กิจกรรมส่งเสริมสิ่งแวดล้อมประกอบด้วย: (1) การให้ความรู้เกี่ยวกับการคัดแยกขยะ ผ่านกิจกรรมการเรียนรู้และชี้แจงตัวอย่างการคัดแยกขยะที่ถูกต้อง; (2) การให้ความรู้เกี่ยวกับ SDGs ที่เกี่ยวข้องกับการจัดการขยะ เช่น SDG 4 SDG 12 และ SDG 13; (3) การลงมือปฏิบัติจริงผ่านสถานีคัดแยกขยะ โดยมีผู้ช่วยให้คำแนะนำเพื่อให้การคัดแยกถูกต้องตามประเภท; (4) ทำการรวบรวมขยะที่คัดแยกตามประเภทต่าง ๆ มาชั่งน้ำหนัก เพื่อทำการประเมินการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจก แสดงดัง Fig.5

Fig. 5 Data collection for separated wastes

การเก็บรวบรวมข้อมูลและการวิเคราะห์ข้อมูล

1. วิธีการเก็บข้อมูลสำหรับแบบจำลอง

กลุ่มตัวอย่างเป็นผู้เข้าร่วมกิจกรรมส่งเสริมสิ่งแวดล้อม โดยเก็บข้อมูลก่อนการเข้าร่วมกิจกรรมจำนวน 45 คน (คิดเป็นร้อยละ 57.70 ของผู้เข้าร่วม) และหลังจบกิจกรรมจำนวน 37 คน (คิดเป็นร้อยละ 67.86 ของผู้เข้าร่วม) ซึ่งกลุ่มตัวอย่างส่วนใหญ่เป็นเพศหญิงที่อยู่ในช่วงอายุ 18 – 24 ปี (คิดเป็นร้อยละ 72) ดังแสดงใน Fig.6 เนื่องจากไม่ได้เก็บข้อมูลระบุตัวตนของผู้ตอบ ทำให้ไม่สามารถยืนยันได้ว่าผู้ตอบก่อนและหลังเป็นบุคคลเดียวกันทั้งหมด ดังนั้น การเปรียบเทียบผลก่อนและหลังจึงวิเคราะห์ในลักษณะภาพรวม ข้อมูลหลังการเข้าร่วมกิจกรรมถูกนำมาวิเคราะห์สมการถดถอย (Regression analysis) เพื่อศึกษาปัจจัยตามกรอบทฤษฎีการวางแผนพฤติกรรม (TPB) และความรู้เกี่ยวกับเป้าหมายการพัฒนาที่ยั่งยืน (SDGs) ที่ส่งผลต่อความตั้งใจและพฤติกรรมการจัดการขยะของผู้เข้าร่วม การทดสอบความน่าเชื่อถือของแบบสอบถามเป็นขั้นตอนสำคัญในการพัฒนาและตรวจสอบเครื่องมือวัด โดยใช้ค่า Cronbach's alpha เพื่อวัดความสอดคล้องภายในของชุดคำถาม ซึ่งเป็นวิธีที่นิยมใช้และช่วยยืนยันว่าผลการวิเคราะห์มีความน่าเชื่อถือและสามารถนำไปใช้ประโยชน์เชิงปฏิบัติได้อย่างถูกต้อง (Tavakol and Dennick, 2011)

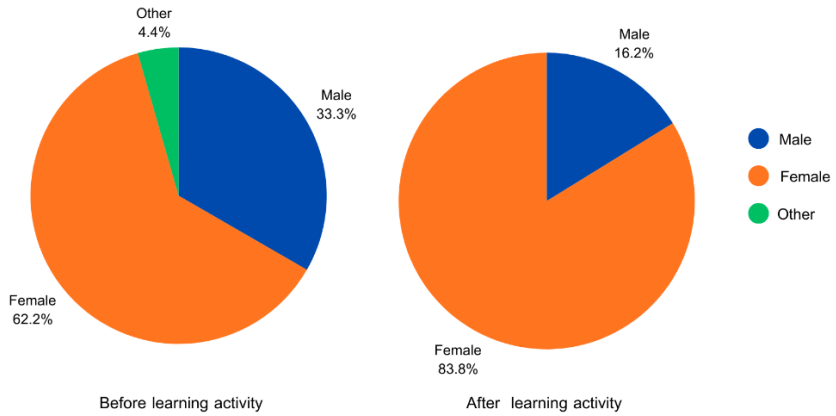


Fig. 6 Participant demographics by gender

2. *วิธีการวิเคราะห์ข้อมูล*

การวิเคราะห์ข้อมูลแบบจำลองทฤษฎีการวางแผนพฤติกรรมขยายปัจจัยความรู้ด้าน SDGs แบ่งออกเป็น 2 ส่วนหลัก ได้แก่ (1) การตรวจสอบความเชื่อมั่นของแบบสอบถามด้วยค่า Cronbach's alpha เพื่อประเมินความสอดคล้องภายในของข้อคำถามในแต่ละตัวแปร (Izah et al., 2023) โดยค่าที่สูงบ่งชี้ว่าชุดคำถามมีความเชื่อมั่นดี เมื่อค่าดังกล่าวอยู่ในช่วง 0.6 ถึง 0.7 ถือว่ามีความเชื่อมั่นในระดับที่ยอมรับได้ และค่าตั้งแต่ 0.8 ขึ้นไปบ่งชี้ถึงความเชื่อมั่นที่ดีมาก (Khanal & Chhetri, 2024) และ (2) การวิเคราะห์ Regression analysis เพื่อทดสอบความสัมพันธ์ของตัวแปรอิสระ (Attitude, Subjective norm, Perceived behavioral control และ SDGs knowledge) ต่อ ความตั้งใจ (Intention) ตามกรอบ TPB โดยรายงานผลในรูปค่าสัมประสิทธิ์ Beta coefficient (**β**) (Khuri, 2013) และค่า p-value เพื่อพิจารณานัยสำคัญทางสถิติ ค่า **β** บ่งชี้ถึงอิทธิพลของปัจจัยมากหรือน้อยต่อความตั้งใจในการคัดแยกขยะ หากค่า **β** ที่เป็นบวกแสดงถึงตัวแปรนั้นส่งผลกระทบเชิงบวกต่อความตั้งใจ และเมื่อ p-value < 0.05 จะถือว่ามีความสัมพันธ์อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ นอกจากนี้คำนวณค่าการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากขยะมูลฝอย โดยใช้ปริมาณขยะมูลฝอยจากกิจกรรมที่เกิดขึ้นมาคำนวณ โดยค่าการกำจัดด้วยวิธีฝังกลบแบบถูกหลักสุขาภิบาล และในกรณีคัดแยกขยะอินทรีย์เพื่อไปหมักทำปุ๋ยมีค่า EF (Emission factor) เท่ากับ 0.7933 kg CO_2e/kg และ 0.3328 kg CO_2e/kg ตามลำดับ ตามฐานข้อมูลปัจจัยการปล่อยขององค์การบริหารจัดการก๊าซเรือนกระจก (TGO, 2022) โดยมีวิธีการคำนวณตาม Equation 1 (Unegg et al., 2023)

$$CO_2e = Q \times EF \quad (1)$$

Where; CO_2e *is* kilograms of carbon dioxide equivalent (kgCO_2e), Q is the quantity of waste (kg), EF is the emission factor representing the greenhouse gas emissions per unit of waste (kgCO_2e/kg)

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

1. ปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อพฤติกรรมการจัดการขยะ

1.1 ค่าความน่าเชื่อถือของแบบสอบถาม

ผลการวิเคราะห์ความน่าเชื่อถือของแบบสอบถามพบว่า ค่า Cronbach's alpha ก่อนการเรียนรู้ส่วนใหญ่อยู่ในช่วง 0.6 – 0.7 ซึ่งถือว่าพอใช้ หลังการเรียนรู้ค่าอยู่ในช่วง 0.6 – 0.9 ถือว่ามีความน่าเชื่อถือดี โดยมีข้อยกเว้นเล็กน้อยสำหรับการควบคุมพฤติกรรมก่อนเรียนรู้และความตั้งใจหลังเรียนรู้ที่ต่ำกว่า 0.6 ดังแสดงใน Table 1

Table 1 Cronbach's alpha values for each factor in the questionnaire

Factor	Pre-test	Post-test
Attitude	0.697	0.708
Subjective Norm	0.759	0.914
Perceived Behavior Control	0.590	0.782
Intention	0.696	0.575
SDGs Knowledge	0.648	0.873

1.2 ผลการวิเคราะห์การถดถอย

ค่า Beta coefficient (β) อิทธิพลของตัวแปรอิสระต่อความตั้งใจในการคัดแยกขยะดังแสดงใน Fig. 7 โดยค่า β ประมาณ 0.10, 0.30 และ 0.50 บ่งชี้ถึงอิทธิพลระดับน้อย ปานกลาง และมากตามลำดับ (Cohen, 1988) ซึ่งค่า β ของทุกปัจจัยมีอิทธิผลต่อความตั้งใจในระดับปลานกลาง-มาก และมาก สำหรับผลก่อนเข้าร่วมกิจกรรม พบว่าตัวแปรที่มีอิทธิพลสูงสุดคือการควบคุมพฤติกรรมที่รับรู้ (β = 0.927, p = 9.37×10^{-10}) รองลงมาคือความรู้เกี่ยวกับ SDGs (β = 0.668, $p = 3.04\times10^{-6}$) และบรรทัดฐานทางสังคม (β = 0.503, p = 5.55×10^{-5}) ขณะที่ทัศนคติมีอิทธิพลต่ำสุด (β = 0.400) หลังเข้าร่วมกิจกรรม พบว่าตัวแปรที่มีอิทธิพลสูงสุดเปลี่ยนเป็นความรู้เกี่ยวกับ SDGs (β = 0.763, = 8.08×10^{-5}) รองลงมาคือการควบคุมพฤติกรรมที่รับรู้ (β = 0.684, p = 1.45×10^{-9}) บรรทัดฐานทางสังคม (β = 0.405, p 9.80×10^{-8}) และทัศนคติ (β = 0.463, $p = 0.002$) การเปลี่ยนแปลงดังกล่าวสะท้อนว่าความตั้งใจในการคัดแยกขยะของผู้เข้าร่วมได้รับอิทธิพลมากขึ้นจากความรู้เชิงสิ่งแวดล้อมหลังการเรียนรู้ (Cook et al., 1980) และสอดคล้องกับแนวคิดที่ว่าทัศนคติเป็นความเชื่อส่วนบุคคลที่อาจไม่แปรเป็นความตั้งใจโดยตรงเท่าตัวแปรเชิงสังคม (Clement et al., 2014) และความรู้ (Ma and Hipel, 2016)

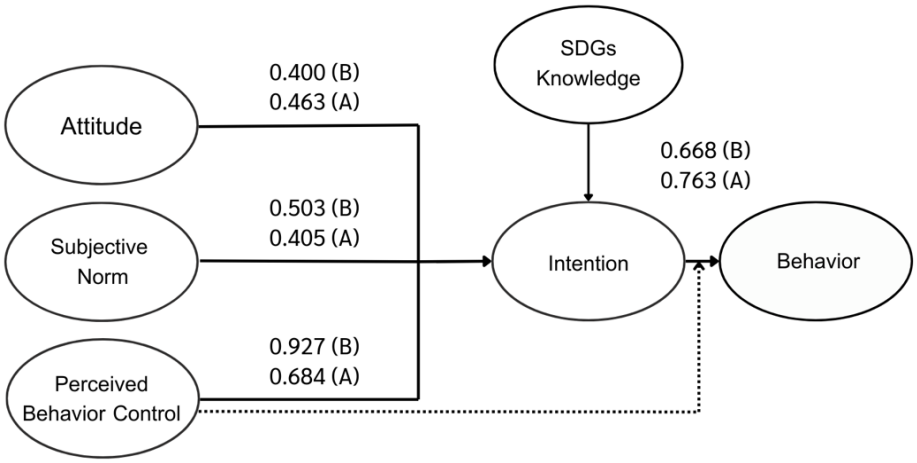


Fig. 7 Regression analysis results of the extended Theory of Planned Behavior

ผลการวิเคราะห์แบบสอบถามตามกรอบทฤษฎีการวางแผนพฤติกรรมชี้ให้เห็นว่าการควบคุมพฤติกรรมที่รับรู้ บรรทัดฐานทางสังคม และความรู้เกี่ยวกับเป้าหมายการพัฒนาที่ยั่งยืน SDGs ช่วยผลักดันให้ผู้เข้าร่วมกิจกรรมส่งเสริมสิ่งแวดล้อมมีการจัดการขยะได้ดีขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ดังนั้นในหัวข้อต่อไปจึงเป็นการนำพฤติกรรมการคัดแยกขยะจริงที่เกิดขึ้นหลังการอบรมมาคำนวณเป็นปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจก (CO_2e) เพื่อสะท้อนผลลัพธ์เชิงพฤติกรรมที่สิ่งแวดล้อมได้อย่างเป็นรูปธรรมมากยิ่งขึ้น

2. การลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจก

การคำนวณการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกแสดงใน Table 2 จากการคัดแยกขยะในกิจกรรม พบว่าผู้เข้าร่วมสามารถคัดแยกขยะรวม 64.78 กิโลกรัม แบ่งเป็นขวดน้ำพลาสติก 3.10 กิโลกรัม ขยะทั่วไป 24.39 กิโลกรัม ขยะรีไซเคิล 19.63 กิโลกรัม และขยะอินทรีย์ 17.66 กิโลกรัม เมื่อประเมินผลกระทบด้านสิ่งแวดล้อม พบว่าสามารถลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกรวมประมาณ 26.17 $kgCO_2e$ โดยขวดน้ำพลาสติก 3.10 กิโลกรัม และขยะรีไซเคิล 19.63 กิโลกรัมลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกได้ 2.46 $kgCO_2e$ และ 15.57 $kgCO_2e$ ตามลำดับ เนื่องจากสามารถส่งไปรีไซเคิลแทนการฝังกลบ (EF = 0.7933 $kgCO_2e$/kg) ส่วนขยะอินทรีย์ 17.66 กิโลกรัม เมื่อทำปุ๋ยหมักแบบใช้อากาศด้วยสารเร่ง (EF = 0.3326

$kgCO_2e/kg$) ช่วยลดการเกิดก๊าซมีเทนจากการย่อยสลายในสภาพไร้ออกซิเจน และได้ปุ๋ยคืนกลับไปปรับปรุงดิน ลดการพึ่งพาปุ๋ยเคมี (Nordahl et al., 2023) อย่างไรก็ตาม ขยะทั่วไป 24.39 กิโลกรัม ไม่สามารถลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกได้ เนื่องจากถูกฝังกลบตามปกติ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยที่ชี้ว่าการแยกขยะอย่างเป็นระบบลดการปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์ได้อย่างมีนัยสำคัญ (Mesquita et al., 2023)

Table 2 Greenhouse gas emission reductions under two scenarios (landfill and waste separation)

Waste Category	Waste amount (kg)	GHGs Emission ($kgCO_2e$)			Final destination of waste after separation
		Scenario 1: All to Landfill	Scenario 2: After Separation	GHGs Reduction	
Plastic bottles	3.10	2.46	0	2.46	Recycle
General waste	24.39	19.35	19.35	0	Landfill
Recycle waste	19.63	15.57	0	15.57	Recycle
Organic waste	17.66	14.01	5.87	8.14	Cpmpost
Total	64.78	51.39	25.22	26.17	

จากผลการคัดแยกขยะในกิจกรรม พบว่าสามารถคัดแยกขยะรวม 64.78 กิโลกรัม สามารถลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกได้ประมาณร้อยละ 50.92 ของภาพรวมกิจกรรม สามารถสรุปได้ว่า การลดการฝังกลบขยะด้วยการนำขยะไปใช้ประโยชน์ เช่น รีไซเคิล และการจัดการขยะอินทรีย์ด้วยการทำปุ๋ยหมัก มีศักยภาพช่วยลดก๊าซเรือนกระจกอย่างเป็นรูปธรรม โดยเฉพาะขยะอินทรีย์ที่หากถูกฝังกลบจะมีแนวโน้มเกิดก๊าซมีเทนจากการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจน ดังนั้น การออกแบบกิจกรรมในอนาคตควรเน้นการเพิ่มการแยกขยะ เพื่อลดก๊าซเรือนกระจก และบรรลุเป้าหมายการพัฒนาที่ยั่งยืนได้อย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งสามารถเปรียบเทียบเป็นกราฟแท่ง ดังแสดงใน Fig. 8

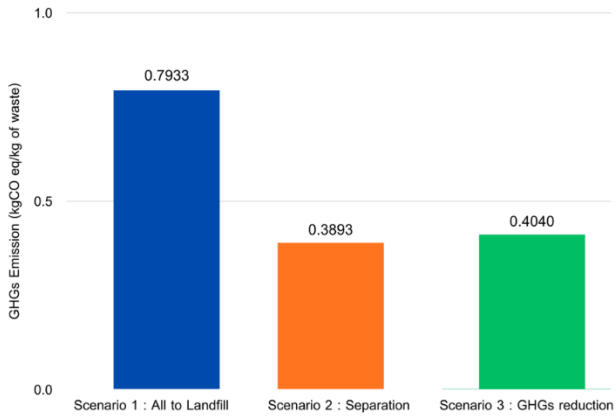


Fig. 8 GHG Emission by Waste Category

การปล่อยก๊าซเรือนกระจก (GHGs) ระหว่าง 2 สถานการณ์ ได้แก่ การทิ้งขยะรวมและนำไปฝังกลบ (Landfill) และ การคัดแยกขยะเพื่อนำไปรีไซเคิลและการจัดการขยะอินทรีย์ด้วยการทำปุ๋ยหมัก (Separation:

Recycle/Compost) พบว่าการคัดแยกขยะมีค่าการปล่อยก๊าซเรือนกระจกลดลงอย่างชัดเจน แสดงว่าแนวทางการคัดแยกขยะและนำไปใช้ประโยชน์สามารถช่วยลดผลกระทบด้านสิ่งแวดล้อมได้ โดยเฉพาะการลดปริมาณขยะอินทรีย์ที่เข้าสู่หลุมฝังกลบซึ่งเป็นแหล่งกำเนิดก๊าซเรือนกระจกในระยะยาว

สรุป

จากแบบจำลองทฤษฎีการวางแผนพฤติกรรมแบบขยาย (Extended TPB) พบว่าทุกปัจจัยอิสระส่งผลต่อความตั้งใจที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมของผู้เข้าร่วมกิจกรรมอย่างมีนัยสำคัญ นอกจากนี้ การคัดแยกขยะในกิจกรรมสามารถลดหรือหลีกเลี่ยงการปล่อยก๊าซเรือนกระจกได้ประมาณร้อยละ 51 สะท้อนว่าการเสริมสร้างการรับรู้ความสามารถตนเอง การสนับสนุนจากสังคม และความรู้ด้าน SDGs ไม่เพียงส่งผลต่อความตั้งใจ แต่ยังนำไปสู่พฤติกรรมการจัดการขยะที่สร้างผลลัพธ์เชิงสิ่งแวดล้อมอย่างเป็นรูปธรรม ข้อค้นพบนี้ชี้ให้เห็นความเป็นไปได้ในการพัฒนากิจกรรมส่งเสริมสิ่งแวดล้อมและโปรแกรมฝึกอบรมด้านการจัดการขยะในชุมชนหรือโรงเรียน อย่างไรก็ตามควรใช้ข้อค้นพบอย่างระมัดระวังในกรณีปัจจัยการควบคุมพฤติกรรมก่อนเรียนรู้และความตั้งใจหลังเรียนรู้ ซึ่งมีค่า Cronbach's alpha น้อยกว่า 0.6 เล็กน้อย และการศึกษาในอนาคตอาจขยายตัวอย่างหรือติดตามผลระยะยาวเพื่อยืนยันความสัมพันธ์ระหว่างความตั้งใจ และพฤติกรรม

เอกสารอ้างอิง

Ajzen, I. 1991. The theory of planned behavior. Organ. Behav. Hum. Decis. Process. 50: 179–211. doi.org/10.1016/0749-5978(91)90020-T

Clement, C.A., Henning, J.B., Osbaldiston, R. 2014. Integrating factors that predict energy conservation: The theory of planned behavior and beliefs about climate change. J. Sustain. Dev. 7. doi.org/10.5539/jsd.v7n6p46

Cohen, J. 1988. Statistical power analysis for the behavioral sciences. Lawrence Erlbaum Associates.

Cook, M.P., Lounsbury, J.W., Fontenelle, G.A. 1980. An application of Fishbein and Ajzen's attitudes-subjective norms model to the study of drug use. J. Soc. Psychol. 110: 193–201. doi.org/10.1080/00224545.1980.9924246

Izah, S.C., Sylva, L., Hait, M. 2023. Cronbach's alpha: A cornerstone in ensuring reliability and validity in environmental health assessment. ES Energy Environ. doi.org/10.30919/esee1057

Karim Ghani, W.A., Rusli, I.F., Biak, D.R., Idris, A. 2013. An application of the theory of planned behaviour to study the influencing factors of participation in source separation of food waste. Waste Manage. 33: 1276–1281. doi.org/10.1016/j.wasman.2012.09.019

Khanal, B., Chhetri, D.B. 2024. A pilot study approach to assessing the reliability and validity of relevancy and efficacy survey scale. Janabhawana Res. J. 3: 35–49. doi.org/10.3126/jrj.v3i1.68384

Khuri, A.I. 2013. Introduction to linear regression analysis, fifth edition by Douglas C. Montgomery, Elizabeth A. Peck, G. Geoffrey Vining. Int. Stat. Rev. 81: 318–319. doi.org/10.1111/insr.12020_10

Kurisu, K. 2015. Pro-environmental behaviors. Springer Japan. doi.org/10.1007/978-4-431-55834-7

Li, J., Zuo, J., Cai, H., Zillante, G. 2018. Construction waste reduction behavior of contractor employees: An extended theory of planned behavior model approach. J. Clean. Prod. 172: 1399–1408. doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.10.138

Ma, J., Hipel, K.W. 2016. Exploring social dimensions of municipal solid waste management around the globe - A systematic literature review. Waste Manage. 56: 3–12. doi.org/10.1016/j.wasman.2016.06.041

Mesquita, J.L.C., Gutberlet, J., de Araujo, K.P., Cruvinel, V.R.N., Duarte, F.H. 2023. Greenhouse gas emission reduction based on social recycling: A case study with waste picker cooperatives in Brasília, Brazil. Sustainability 15. doi.org/10.3390/su15129185

Nordahl, S.L., Preble, C.V., Kirchstetter, T.W., Scown, C.D. 2023. Greenhouse gas and air pollutant emissions from composting. Environ. Sci. Technol. 57: 2235–2247. doi.org/10.1021/acs.est.2c05846

Soorani, F., Ahmadvand, M. 2019. Determinants of consumers' food management behavior: Applying and extending the theory of planned behavior. Waste Manage. 98: 151–159. doi.org/10.1016/j.wasman.2019.08.025

Tavakol, M., Dennick, R. 2011. Making sense of Cronbach's alpha. Int. J. Med. Educ. 2: 53–55. doi.org/10.5116/ijme.4dfb.8dfd

TGO. 2022. Emission factor database for carbon footprint of products and organizations. T. G. G. M. Organization. https://thaicarbonlabel.tgo.or.th/

Unegg, M.C., Steininger, K.W., Ramsauer, C., Rivera-Aguilar, M. 2023. Assessing the environmental impact of waste management: A comparative study of CO2 emissions with a focus on recycling and incineration. J. Clean. Prod. 415. doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.137745

Wan, C., Shen, G.Q., Choi, S. 2017. Experiential and instrumental attitudes: Interaction effect of attitude and subjective norm on recycling intention. J. Environ. Psychol. 50: 69–79. doi.org/10.1016/j.jenvp.2017.02.006

Wang, X. 2021. Analysis of influencing mechanism on waste separation behavior in Shanghai. Sustain. Energy Technol. Assess. 47. doi.org/10.1016/j.seta.2021.101479

ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างออกซิเจนละลายน้ำกับปริมาณคลอโรฟิลล์-เอ ของอ่างเก็บน้ำบางพระ จังหวัดชลบุรี

Study of the relationship between dissolved oxygen and chlorophyll a in Bang Phra Reservoir at Chonburi Province

ชัชชนก พิมพ์สัมฤทธิ์*, สรวิศ สุภเวชย์, อนุเผ่า อบแพทย์

Chatchanok Pimsamrit*, Soravis Supacvetchb, Anuphao Aobpaet

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

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

*Corresponding author. E-mail address: chatchanok.pim@ku.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างออกซิเจนละลายน้ำกับปริมาณคลอโรฟิลล์-เอ บริเวณอ่างเก็บน้ำบางพระ จังหวัดชลบุรี ระหว่างปี พ.ศ. 2563 ถึงปี พ.ศ. 2567 โดยใช้ข้อมูลคุณภาพน้ำจากสถานีตรวจวัดคุณภาพน้ำ โครงการชลประทานชลบุรี ร่วมกับข้อมูลจากดาวเทียมแลนด์แซท 8 (Landsat 8) และดาวเทียมเซนทิเนล-2 (Sentinel-2) ผ่านกระบวนการวิเคราะห์บนแพลตฟอร์ม Google Earth Engine เพื่อนำไปสร้างแบบจำลองที่ไปใช้ในการตรวจวัดค่าปริมาณคลอโรฟิลล์-เอ ตามวิธีการที่เหมาะสม เพื่อให้ได้ข้อมูลที่ถูกต้องและแม่นยำ ซึ่งสามารถใช้เป็นแนวทางในการบริหารจัดการคุณภาพน้ำและสามารถนำผลที่ได้ไปวางแผนการบริหารจัดการน้ำในอ่างเก็บน้ำบางพระ พบว่าโมเดลการใช้ดัชนี NDCI มีความสัมพันธ์กับข้อมูลออกซิเจนละลายน้ำจากสถานีตรวดวัดคุณภาพน้ำ ในระดับน่าเชื่อถือ (โดยมีค่า R^2 เท่ากับ 0.74, ค่า Pearson Correlation เท่ากับ 0.86 และค่า RMSE เท่ากับ 0.23 ไมโครกรัมต่อลิตร) สะท้อนให้เห็นศักยภาพของ NDCI ในการติดตามค่าปริมาณคลอโรฟิลล์-เอ ผลการศึกษาชี้ว่าการใช้ดัชนีดังกล่าวสามารถนำมาประยุกต์ใช้แทนการตรวจวัดด้วยเครื่องมือได้ และเหมาะสมสำหรับการติดตามปรากฏการณ์ยูโทรฟิเคชั่นของคลอโรฟิลล์-เอ ในระยะยาวมากกว่าการใช้เพื่อแทนการตรวจวัดด้วยเครื่องมือในภาคสนามโดยตรง

คำสำคัญ: คลอโรฟิลล์-เอ, อ่างเก็บน้ำบางพระ, ออกซิเจนละลายน้ำ

Abstract

This research studied the relationship between dissolved oxygen and chlorophyll-a in the Bang Phra Reservoir, Chonburi Province, from 2020 to 2024. Water quality data from the water quality monitoring station of the Chonburi Irrigation Project, combined with data from the Landsat 8 and Sentinel-2 satellites, were analyzed on the Google Earth Engine platform to create a model for chlorophyll-a measurement using appropriate methods. This method ensures accurate and precise data, which can be used as a guideline for water quality management and to plan water management in the Bang Phra Reservoir. The NDCI model was found to be reliably correlated with dissolved oxygen data from the water quality monitoring station (R^2 = 0.74, Pearson Correlation = 0.86, and RMSE = 0.23 micrograms per liter), reflecting the potential of NDCI in monitoring chlorophyll-a. The study results indicate that the use of this index can be applied as an alternative to instrumental measurements and is more suitable for long-term monitoring of chlorophyll-a eutrophication than direct field instrumental measurements.

Keywords: Bang Phra Reservoir, Chlorophyll a, Dissolved Oxygen

คำนำ

อ่างเก็บน้ำบางพระ จังหวัดชลบุรี มีการสูบผันน้ำจากแหล่งอื่นๆ คือ (1) จากอ่างเก็บน้ำคลองหลวงรัชชโลทร จังหวัดชลบุรี; (2) รับน้ำจากการระบายน้ำจากอ่างเก็บน้ำนฤบดินทรจินดา จังหวัดปราจีนบุรี ลงแม่น้ำบางปะกงเพื่อสูบต่อไปที่อ่างเก็บน้ำบางพระ; และ (3) ผันน้ำจากคลองพระองค์ไชยานุชิตไปยังอ่างเก็บน้ำบางพระ เนื่องจากมีปริมาณน้ำจากแหล่งอื่นๆ มารวมกันในอ่างเก็บน้ำบางพระรวมทั้งมีความเกี่ยวข้องกับการจัดการน้ำในพื้นที่โครงการพัฒนาพิเศษภาคตะวันออก (EEC) มีเงื่อนไขพิเศษ เช่น การบริหารจัดการน้ำแบบอ่างพวง การสูบ ผันน้ำระหว่างอ่างเก็บน้ำ โครงข่ายน้ำผ่านระบบท่อ และการฝากน้ำในอ่างเก็บน้ำ เป็นต้น

การเฝ้าระวังและจัดการคุณภาพน้ำ อ่างเก็บน้ำบางพระซึ่งเป็นแหล่งน้ำสำคัญเพื่อการอุปโภคบริโภค การเปลี่ยนแปลงของปริมาณคลอโรฟิลล์-เอ (Chl-a) ซึ่งเป็นดัชนีชี้วัดปริมาณมวลชีวภาพแพลงก์ตอนพืช มีผลกระทบโดยตรงต่อค่าออกซิเจนละลายน้ำ (DO) หากมีปริมาณ Chl-a สูงเกินไปจะนำไปสู่ปรากฏการณ์ยูโทรฟิเคชั่น (Eutrophication) ซึ่งส่งผลเสียต่อระบบนิเวศทางน้ำและคุณภาพน้ำดิบ

ดังนั้นศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างออกซิเจนละลายน้ำกับปริมาณคลอโรฟิลล์-เอ ของอ่างเก็บน้ำบางพระ ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2563–พ.ศ. 2567 บริเวณพื้นที่อ่างเก็บน้ำบางพระ จังหวัดชลบุรี โดยการรวบรวมข้อมูลปัจจัยทางกายภาพ ชีวภาพ และการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีสารสนเทศทางภูมิศาสตร์ร่วมกับเทคนิคทางสถิติ เพื่อตรวจหาปริมาณคลอโรฟิลล์-เอ (Chlorophyll-a) โดยใช้ดาวเทียมแลนด์แซท 8 (Landsat 8) ,ดาวเทียมเซนทิเนล-2 (Sentinel-2) และใช้ข้อมูลออกซิเจนละลายน้ำที่ได้จากสถานีตรวจวัดคุณภาพน้ำ จากโครงการชลประทานชลบุรี และติดตามการเกิดปรากฏการณ์ยูโทรฟิเคชั่นของคลอโรฟิลล์-เอ บริเวณพื้นที่อ่างเก็บน้ำบางพระ เพื่อใช้เป็นแนวทางในการจัดการคุณภาพน้ำและรักษาสิ่งแวดล้อมในระยะยาว ซึ่งจะช่วยป้องกันปัญหาที่อาจเกิดขึ้นและสร้างความมั่นใจในความยั่งยืนของแหล่งน้ำนี้ต่อไป

อุปกรณ์และวิธีการ

พื้นที่ศึกษา

พื้นที่ศึกษา คือ ขอบเขตการศึกษาโครงการชลประทานชลบุรี อ่างเก็บน้ำบางพระ ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2563–พ.ศ. 2567 เป็นโครงการชลประทานขนาดใหญ่ พื้นที่อ่างเก็บน้ำ ตั้งอยู่ใน ตำบลบางพระ อำเภอศรีราชา จังหวัดชลบุรี มีพื้นที่ประมาณ 8,900 ไร่ แสดงดัง Fig. 1ได้มีการสร้างขยายเขื่อนเสร็จในปี พ.ศ. 2518 ได้กักเก็บน้ำเพื่อใช้ประโยชน์ด้านการอุตสาหกรรม และทำประปาเพื่อการบริโภค สามารถเก็บกักน้ำได้ถึง 110 ล้านลูกบาศก์เมตร ระบบนิเวศวิทยาจึงเปลี่ยนแปลงไปตามระดับน้ำที่เพิ่มขึ้น โดยน้ำที่กักเก็บได้จะนำไปใช้ประโยชน์ ด้านการเกษตร อุตสาหกรรม และผลิตน้ำประปาเพื่อการบริโภค อ่างเก็บน้ำบางพระมีต้นกำเนิดของแหล่งน้ำจากเทือกเขาเขียว โดยเป็นที่รวมของลำห้วยต่างๆ คือ ห้วยสุครีพ ห้วยวังหิน ห้วยกลุ่ม และห้วยปราบ บริเวณพื้นที่อ่างเก็บน้ำบางพระ มีความสูงจากระดับน้ำทะเล ระหว่าง 12–35 เมตร

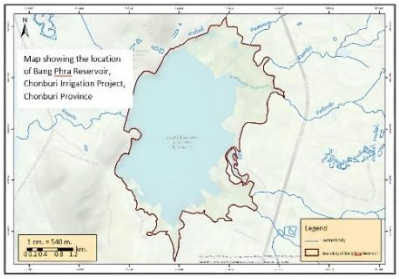


Fig. 1 Map showing the location of Bang Phra Reservoir, Chonburi Irrigation Project, Chonburi Province

รวบรวมข้อมูลค่าออกซิเจนละลายน้ำ และปริมาณของคลอโรฟิลล์-เอ

ใช้ข้อมูลออกซิเจนละลายน้ำที่ได้จากสถานีตรวจวัดคุณภาพน้ำ ตั้งแต่ พ.ศ. 2563–2567 จากโครงการชลประทานชลบุรี กรมชลประทาน จำนวน 3 สถานี แสดงดัง Table 1 และข้อมูลปริมาณของคลอโรฟิลล์-เอ เฉลี่ยรายเดือน ตั้งแต่ พ.ศ. 2563–2567 จากภาพถ่ายดาวเทียม Landsat 8 และภาพถ่ายจากดาวเทียม Sentinel-2

Table 1 Station of Water quality monitoring station

No.	Station Name	Latitude	Longitude
1	Eastern Water Resources Development and Management Public Company Limited	13.199728	100.975111
2	Thaioil Public Company Limited	13.216636	100.962126
3	Provincial Waterworks Authority, Chonburi Branch	13.197115	100.963445

โดยข้อมูลภาพถ่ายจากดาวเทียม Landsat 8 สามารถเข้าถึงข้อมูลได้ฟรีผ่าน Google Earth Engine , GEE Developer Site: developers.google.com/earth-engine/) และข้อมูลภาพถ่ายจากดาวเทียม Sentinel-2 สามารถเข้าถึงข้อมูลได้ฟรีผ่าน Copernicus Data Space หรือ Google Earth Engine (European Space Agency (ESA), Sentinel-2 Overview: sentinel.esa.int)

การวิเคราะห์ค่าคลอโรฟิลล์ในน้ำด้วยดาวเทียม Landsat 8

Chlorophyll Index (CI) เป็นตัวชี้วัดที่ใช้ในการประเมินและประมาณค่าปริมาณคลอโรฟิลล์ในพืช โดยทั่วไปแล้วค่าดัชนีนี้จะถูกคำนวณจากข้อมูลการสะท้อนแสงของพืชในช่วงต่าง ๆ ของสเปกตรัมแสงที่เก็บรวบรวมโดยเซ็นเซอร์ของดาวเทียม การวิเคราะห์ค่าคลอโรฟิลล์ในน้ำด้วยดาวเทียม มีการใช้สัดส่วนของการสะท้อนแสงในช่วงใกล้อินฟราเรด (NIR) และช่วงแสงสีเขียว แสดงดัง Fig. 2 โดยใช้ตาม Equation 1 และเก็บผลลัพธ์ในBandใหม่ ชื่อ Cig

สมการค่าคลอโรฟิลล์ (Chlorophyll Index)

$$CI = \frac{NIR}{Green} - 1 \qquad (1)$$

Where; G, green = band 3; NIR, near infrared = band 5

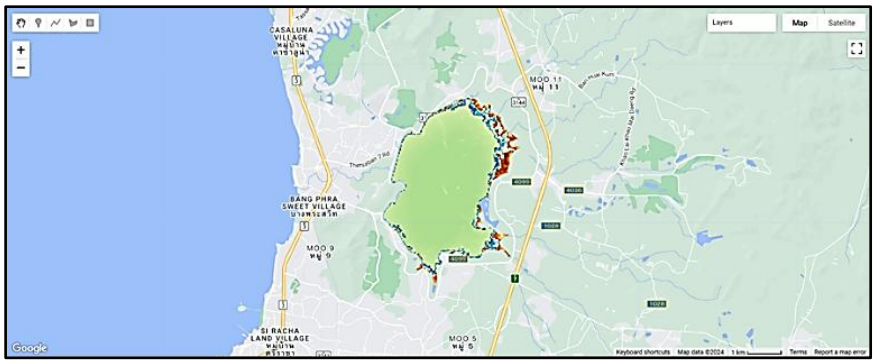


Fig. 2 Chlorophyll A values using Landsat-8 satellite data from the Bang Phra Reservoir study area

ศึกษาการแพร่กระจายของคลอโรฟิลล์-เอ (Chlorophyll A) โดยใช้ดัชนี Normalized Difference Chlorophyll Index (NDCI) และดัชนี Green Normalized Difference Vegetation Index (GNDVI) ร่วมกับภาพถ่ายดาวเทียม Sentinel-2

การใช้ดัชนี Normalized Difference Chlorophyll Index (NDCI) เพื่อทำนายความเข้มข้นของคลอโรฟิลล์-เอ (Chlorophyll A) ร่วมกับข้อมูลการสำรวจระยะไกลด้วยดาวเทียม Sentinel-2 ซึ่งมีขนาดความละเอียดเชิงพื้นที่ 10 เมตร และ 20 เมตร โดยใช้ช่วงคลื่น Red-edge Band (Band 5) มีความยาวช่วงคลื่นระหว่าง 698–713 นาโนเมตรและช่วงคลื่น Red Band (Band 4) มีความยาวช่วงคลื่นระหว่าง 650–680 นาโนเมตร ทั้งนี้ NDCI (Equation 2) มีประสิทธิภาพสูงในการตรวจวัดปริมาณคลอโรฟิลล์ในแหล่งน้ำ เนื่องจากความสามารถของช่วงคลื่น Red-edge ในการแยกแยะสัญญาณสะท้อนระหว่างความเข้มข้นของสาหร่ายและตะกอนดินได้อย่างแม่นยำ

$$NDCI = \frac{\text{Red Edge 1 - RED}}{\text{Red Edge 1+ RED}} \qquad (2)$$

การใช้ดัชนี Green Normalized Difference Vegetation Index (GNDVI) เพื่อทำนายความเข้มข้นของคลอโรฟิลล์ชนิดเอ (Chlorophyll-a) ร่วมกับข้อมูลการสำรวจระยะไกลด้วยดาวเทียม Sentinel-2 ซึ่งมีขนาดความละเอียดเชิงพื้นที่ 10 เมตร โดยใช้ช่วงคลื่น ใกล้อินฟราเรด (Near-Infrared: NIR) (Band 8) มีความยาวช่วงคลื่นระหว่าง 780 – 860 นาโนเมตรและช่วงคลื่น Green Band (Band 3) มีความยาวช่วงคลื่นระหว่าง 540 – 570 นาโนเมตร ทั้งนี้ GNDVI มีความไว ต่อการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของคลอโรฟิลล์สูง และมีความเหมาะสมสำหรับการตรวจวัดพื้นที่ที่มีปริมาณสาหร่ายหนาแน่นในแหล่งน้ำตาม Equation 3 ดังนี้

$$GNDVI = \frac{\text{NIR - Green}}{\text{NIR +Green}} \qquad (3)$$

กรองข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียม Landsat-8 และ Sentinel-2 ตามเวลาและขอบเขตที่ต้องการโดยเลือกช่วงที่ไม่มีเมฆปกคลุมและมีคลื่นครบ 11 และ 13 ช่วงคลื่น ในแต่ละเดือนของปี 2562, 2563, 2564, 2565, 2566 และปี 2567 รวมจำนวน 170 ภาพและนำมาเก็บใน Image Collection จากนั้นสร้างตัวแปรเพื่อปรับแต่งแผนที่ภาพดาวเทียมจากภาพสีผสมจริงและเพิ่มชั้นของภาพสีผสมแบบสีจริงจากภาพถ่ายดาวเทียม ที่ตัดขอบเขตการสกัดจุดภาพเฉพาะพื้นที่ศึกษาเฉพาะอ่างเก็บน้ำบางพระ

ปรากฏการณ์ยูโทรฟิเคชั่น

ยูโทรฟิเคชันในแหล่งน้ำ สามารถบ่งชี้ได้จากปริมาณแพลงก์ตอนพืชที่วัดได้ในรูปของคลอโรฟิลล์-เอ จากการศึกษาของ Environmental Carrying Capacity Study ได้สรุปสภาวะของแหล่งน้ำตามหลักการของกรมสิ่งแวดล้อมของรัฐมิชิแกน สหรัฐอเมริกา ออกเป็น 3 ระดับ คือ Oligotrophic, Mesotrophic และ Eutrophic ดังแสดงใน Table 2

Table 2 Water resources classification according to the Michigan Department of Environment, USA. (2006)

Lake classification criteria			
Lake Classification	Total Phosphorus (µg/L)	chlorophyll a (µg/L)	Secchi Transparency (feet)
Oligotrophic	Less than 10	Less than 2.2	Greater than 15.0
Lake classification criteria			
Lake Classification	Total Phosphorus (µg/L)	chlorophyll a (µg/L)	Secchi Transparency (feet)
Mesotrophic	10 to 20	2.2 to 6.0	7.5 to 15.0
Eutrophic	Greater than 20	Greater than 6.0	Less than 7.5

การประเมินประสิทธิภาพของผลลัพธ์

การประเมินประสิทธิภาพจากการคำนวณความเข้มข้นของคลอโรฟิลล์ชนิดเอ (Chlorophyll-a) ทั้ง 3 วิธี 1) Chlorophyll Index (CI) ,2) การใช้ดัชนี Normalized Difference Chlorophyll Index (NDCI) และ 3) การใช้ดัชนี Green Normalized Difference Vegetation Index (GNDVI) เทียบกับค่าออกซิเจนละลายน้ำ เพื่อหาความสัมพันธ์กันได้จากการใช้ค่าทางสถิติต่างๆ มาพิจารณาประกอบด้วย ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (Correlation of Determination, R^2) ต้องมีค่าเข้าใกล้ 1 ,การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ด้วยสหสัมพันธ์แบบเพียร์สัน (Pearson Correlative Coefficient) จะมีค่าระหว่าง -1 ถึง 1 และค่ารากที่สองของความผิดพลาดยกกำลังสองเฉลี่ย (Root Mean Square Error, RMSE) เพื่อเปรียบเทียบความแม่นยำของแบบจำลองในการประมาณค่าความเข้มข้นของคลอโรฟิลล์-เอ ตาม Equation 4–6 ตามลำดับ

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

Where; x_i is the dissolved oxygen value

y_i is the chlorophyll-a value obtained from the satellite

$\bar{x}$ is the mean of the dissolved oxygen value

$\bar{y}$ is the mean of the chlorophyll-a value obtained from the satellite

n is the total number of data

$$r_{xy} = \frac{n\sum xy-(\sum x)(\sum y)}{\sqrt{[n\sum x^2-(\sum x)^2][n\sum y^2-(\sum y)^2]}} \quad (5)$$

Where; r_{xy} is the Pearson correlation coefficient

$\sum x$ is the sum of dissolved oxygen value

$\sum y$ is the sum of chlorophyll-a value obtained from the satellite

$\sum xy$ is the sum of the dissolved oxygen and chlorophyll-a values

$\sum x^2$ is sum of the squares of the dissolved oxygen

$\sum y^2$ is sum of the squares of the chlorophyll-a values

n is the total number of data

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n} (x_i - y_i)^2}{n}} \quad (6)$$

Where; x_i is the chlorophyll-a value obtained from the satellite from 2020 to 2023, y_i is the chlorophyll-a value obtained from the satellite from in 2024, n is the total number of data

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

จากการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างออกซิเจนละลายน้ำกับปริมาณคลอโรฟิลล์-เอ การประเมินประสิทธิภาพจากการคำนวณความเข้มข้นของคลอโรฟิลล์ชนิดเอ (Chlorophyll-a) ทั้ง 3 วิธี (1) ดัชนี Chlorophyll Index (CI); (2) ดัชนี Normalized Difference Chlorophyll Index (NDCI); และ (3) ดัชนี Green Normalized Difference Vegetation Index (GNDVI) รายละเอียดสามารถพิจารณาได้จากข้อมูลแสดงดัง Table 3

Table 3 Calculation of chlorophyll a concentration

Calculation of chlorophyll a concentration	Equation	Correlation of Determination, R^2	Pearson correlation	Root Mean Square Error, RMSE
Chlorophyll Index (CI)	y = 0.2306x - 0.5587	0.57	0.76	0.89
Normalized Difference Chlorophyll Index (NDCI)	y = 0.075x + 0.0285	0.74	0.86	0.23
Green Normalized Difference Vegetation Index (GNDVI)	y = 0.0494x + 0.0154	0.69	0.83	0.15

การเปรียบเทียบระหว่างดัชนีพืชพรรณ Chlorophyll Index (CI) และ Green Normalized Difference Vegetation Index (GNDVI) แสดงให้เห็นว่าแบบจำลองของดัชนี GNDVI โดยมีค่า R^2 เท่ากับ 0.69, ค่าPearson Correlation เท่ากับ 0.83 และค่า RMSE เท่ากับ 0.15 ไมโครกรัมต่อลิตร แสดงดัง Fig. 5 และ Table 3 ในขณะที่ ดัชนี CI มีค่า R^2 เท่ากับ 0.57, ค่าPearson Correlation เท่ากับ 0.76 และค่า RMSE เท่ากับ 0.89 ไมโครกรัมต่อลิตร แสดงดัง Fig. 3 และ Table 3

การเปรียบเทียบระหว่างดัชนีพืชพรรณ Chlorophyll Index (CI) และ Green Normalized Difference Vegetation Index (GNDVI) แสดงให้เห็นว่าแบบจำลองของดัชนี GNDVI โดยมีค่า R^2 เท่ากับ 0.69, ค่าPearson Correlation เท่ากับ 0.83 และค่า RMSE เท่ากับ 0.15 ไมโครกรัมต่อลิตร แสดงดัง Fig. 5 และ Table 3 ในขณะที่ ดัชนี CI มีค่า R^2 เท่ากับ 0.57, ค่าPearson Correlation เท่ากับ 0.76 และค่า RMSE เท่ากับ 0.89 ไมโครกรัมต่อลิตร แสดงดัง Fig. 3 และ Table 3

การเปรียบเทียบระหว่างดัชนีพืชพรรณNormalized Difference Chlorophyll Index (NDCI) และGreen Normalized Difference Vegetation Index (GNDVI) แสดงให้เห็นว่าแบบจำลองของดัชนี NDCI แสดงประสิทธิภาพ

การทำนายที่ดีที่สุด และอธิบายความสัมพันธ์ของคลอโรฟิลล์ได้ดีที่สุดโดยมีค่า R^2 เท่ากับ 0.74, ค่า Pearson Correlation เท่ากับ 0.86 และค่า RMSE เท่ากับ 0.23 ไมโครกรัมต่อลิตร แสดงดัง Fig. 4 และ Table 3 มีความสอดคล้องกับงานวิจัยของ Mishra and Mishra (2012) ที่เสนอแบบจำลอง NDCI สำหรับการประมาณค่าคลอโรฟิลล์-เอในแหล่งน้ำที่มีความขุ่นสูงจากการสำรวจระยะไกล ซึ่งการทดสอบกับชุดข้อมูลจำลองและข้อมูลจากเซนเซอร์ MERIS พบค่า R^2 สูงถึง 0.90 และ RMSE เท่ากับ 1.96 มิลลิกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ยืนยันได้ว่าดัชนี NDCI เป็นเครื่องมือที่มีความแม่นยำสูงในการติดตามปริมาณคลอโรฟิลล์-เอ โดยความแตกต่างของค่าความคลาดเคลื่อนอาจเนื่องมาจากช่วงความเข้มข้นของคลอโรฟิลล์ในพื้นที่ศึกษาและคุณลักษณะของเซนเซอร์ดาวเทียมที่แตกต่างกัน

ภาพรวมของการศึกษาคุณภาพน้ำในอ่างเก็บน้ำบางพระ ซึ่งมีปริมาณออกซิเจนละลายน้ำ พบว่าส่วนมากมีค่าสูงกว่า 6 ไมโครกรัมต่อลิตร ซึ่งจัดอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานแหล่งน้ำผิวดิน ประเภทที่ 2 ตามประกาศของกรมควบคุมมลพิษ (2565) มีความสอดคล้องกับงานวิจัยของ ภัทราวุธ (2567) ในด้านปริมาณคลอโรฟิลล์-เอ เฉลี่ยรายเดือน ที่ประเมินผ่านดัชนีดัชนี NDCI อยู่ในช่วงระหว่าง 0.30±1.50 ไมโครกรัมต่อลิตร ซึ่งจัดอยู่ในสถานะ oligotrophic (< 2 ไมโครกรัมต่อลิตร) ตามเกณฑ์ของ The Michigan Department of Environment, USA. (2006) โดยระดับออกซิเจนที่สูงสอดคล้องกับปริมาณแพลงก์ตอนพืชที่มีน้อย

จากผลการศึกษาดังกล่าวชี้ให้เห็นว่า การใช้ดัชนี NDCI สามารถนำมาประยุกต์ใช้แทนการสำรวจได้ระดับหนึ่ง โดยมีข้อได้เปรียบคือความเร็วในการเก็บข้อมูลและความสามารถในการครอบคลุมพื้นที่ ระดับความแม่นยำอาจจะขึ้นอยู่กับคุณภาพของข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียม สภาพอุณหภูมิและสภาพอากาศในช่วงเวลาการเก็บข้อมูล บริเวณที่มีวัชพืชน้ำที่ปกคลุมหรือมวลชีวภาพ ค่าความขุ่นของน้ำในแต่ละช่วงเวลา รวมถึงปัจจัยในทางกายภาพโดยรอบพื้นที่ศึกษา

ดังนั้น การใช้ดัชนี NDCI ในการติดตามปรากฏการณ์ยูโทรฟิเคชั่นในระยะยาว มากกว่าการใช้เพื่อแทนที่การตรวจวัดโดยเครื่องมือภาคสนามโดยตรง

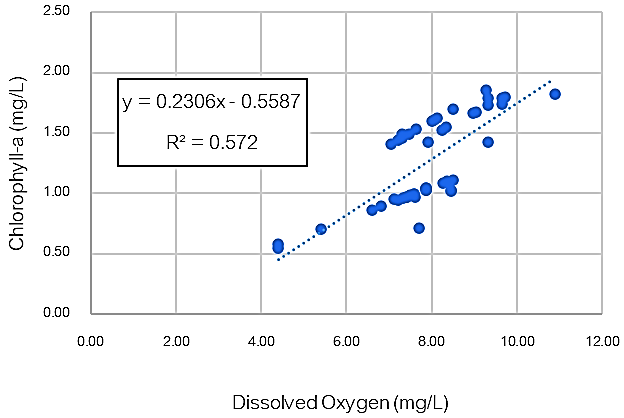


Fig. 3 Graph showing the relationship between dissolved oxygen values from water quality monitoring stations and chlorophyll index from Landsat-8 satellite images

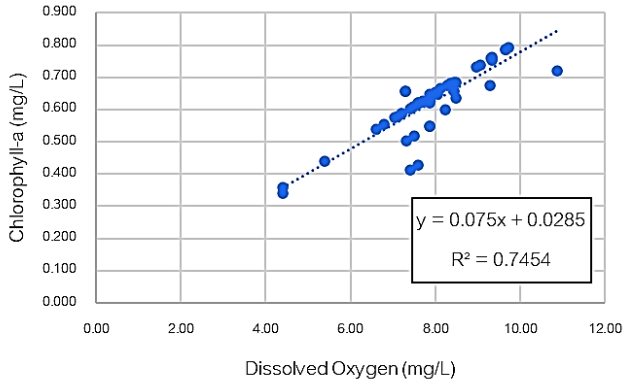


Fig. 4 Graph of the relationship between dissolved oxygen values from water quality measurement stations and the Normalized Difference Chlorophyll Index from Sentinel-2 satellite images

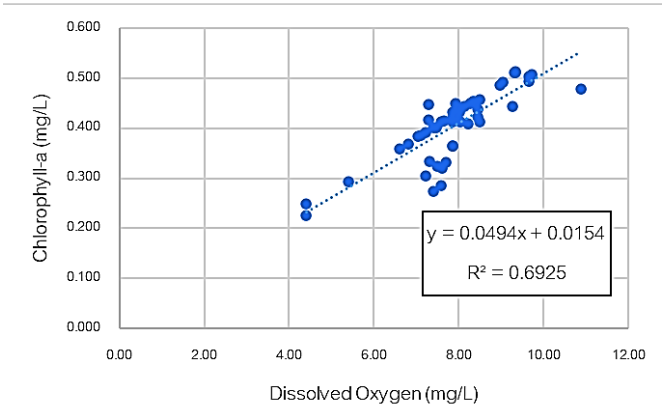


Fig. 5 Graph of the relationship between dissolved oxygen values from water quality measurement stations and Green Normalized Difference Vegetation Index from Sentinel-2 satellite images

สรุปผลและข้อเสนอแนะ

จากการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างออกซิเจนละลายน้ำกับปริมาณคลอโรฟิลล์-เอ การประเมินประสิทธิภาพจากการคำนวณความเข้มข้นของคลอโรฟิลล์-เอ (Chlorophyll-a) ทั้ง 3 วิธี 1) ดัชนี Chlorophyll Index (CI) 2) ดัชนี Normalized Difference Chlorophyll Index (NDCI) และ 3) ดัชนี Green Normalized Difference Vegetation Index (GNDVI) ผ่านกระบวนการวิเคราะห์บนแพลตฟอร์ม Google Earth Engine เพื่อประเมินความถูกต้องและศักยภาพของดัชนีดังกล่าวในการติดตามปริมาณคลอโรฟิลล์-เอ ผลการวิเคราะห์เชิงสถิติแสดงให้เห็นว่า ค่าปริมาณคลอโรฟิลล์-เอ จากการใช้ดัชนี NDCI มีความสัมพันธ์เชิงเส้นกับค่าออกซิเจนละลายน้ำ โดยมีค่า R^2 เท่ากับ 0.74, ค่าPearson Correlation เท่ากับ 0.86 และค่า RMSE เท่ากับ 0.23 ไมโครกรัมต่อลิตร ซึ่งสะท้อนความแม่นยำ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในพื้นที่ที่มีค่าปริมาณคลอโรฟิลล์-เอ สูง จากการวิเคราะห์กราฟการกระจาย มีจุดข้อมูลกระจุกตัวใกล้กับเส้นถดถอย แสดงถึงความถูกต้องของแบบจำลองที่สูงขึ้น ในทางตรงกันข้ามการใช้ดัชนี CI จากการวิเคราะห์กราฟการกระจาย มีความกระจายของจุดข้อมูลอาจจะได้รับอิทธิพลสภาพอุณหภูมิและสภาพอากาศในช่วงเวลาการเก็บข้อมูล บริเวณที่มีวัชพืชน้ำที่ปกคลุมหรือมวลชีวภาพ ค่าความขุ่นของน้ำในแต่ละช่วงเวลา หรือความแตกต่างสภาพแสงของขณะบันทึกภาพถ่ายดาวเทียม ค่า RMSE ที่ต่ำ 0.15 ไมโครกรัมต่อลิตร จากการใช้ดัชนี GNDVI บอกถึงความแม่นยำของแบบจำลองในระดับสูง ในขณะที่

ค่า RMSE ที่สูง 0.89 ไมโครกรัมต่อลิตร จากการใช้ดัชนี CI อยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ ซึ่งแตกต่างกันช่วงเวลาการเก็บข้อมูลของภาพถ่ายดาวเทียม จากผลการศึกษาพบว่าการใช้ดัชนี NDCI มีศักยภาพโดยรวมจากการประเมินและติดตามค่าปริมาณคลอโรฟิลล์-เอ ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณฝ่ายจัดสรรน้ำที่ 2 ส่วนบริหารจัดการน้ำ กรมชลประทาน ที่เอื้อเฟื้อข้อมูลอันเป็นประโยชน์ในการศึกษาวิจัยครั้งนี้

เอกสารอ้างอิง

กรมควบคุมมลพิษ. 2565. เกณฑ์มาตรฐานคุณภาพน้ำในแหล่งน้ำผิวดิน. https://www.pcd.go.th/information/water/water-quality-standards-surface-water/, 3 ตุลาคม 2568.

ภัทราวุธ ไทยพิชิตบูรพา, เบญจวรรณ คชเสนี. 2567. การเปลี่ยนแปลงคุณภาพน้ำตามฤดูกาลของอ่างเก็บน้ำบางพระ และลำคลองใกล้เคียง จังหวัดชลบุรี. วารสารวิทยาศาสตร์บูรพา 29: 353–373.

ศราวุธ เตียงกูล. 2563. การติดตามปรากฏการณ์ยูโทรฟิเคชั่นโดยการใช้ข้อมูลหลายช่วงคลื่นจากภาพถ่ายดาวเทียมบริเวณอ่าวไทยตอนบนของประเทศไทย. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยบูรพา.

Assar, W. 2024. Retrieval of chlorophyll-a and vegetation indices using Sentinel-2 MSI imagery in El-Burullus Lake, Egypt. SVU-Int. J. Eng. Sci. Appl. 5: 79–88. doi.org/10.21608/SVUSRC.2023.218492.1134

Michigan Department of Environmental Quality. 2006. Water quality standards for surface waters, part 4. https://www.michigan.gov/egle/, 3 October 2025.

Mishra, S., Mishra, D.R. 2012. Normalized difference chlorophyll index: A novel model for remote estimation of chlorophyll-a concentration in turbid productive waters. Remote Sens. Environ. 117: 394–406.

มูลค่าผลกระทบทางการเกษตรที่เกิดจากการปนเปื้อนสารหนูในแม่น้ำกก

economic valuation of agricultural impacts caused by arsenic contamination in the Kok River

กิตติพันธ์ ศิรโรจนานนท์*, ศุภวุฒิ มาลัยกฤษณะชลี, อนุเผ่า อบแพทย์
Kittipan Sirarojananon*, Suphawut Malaikrisanachalee, Anuphao Aobpaet
ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900
Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Kasetsart University, Bangkok 10900, Thailand
*Corresponding author. E-mail address: kittipan.sir@ku.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินมูลค่าผลกระทบทางการเกษตรเบื้องต้นที่อาจเกิดขึ้นจากการปนเปื้อนสารหนูในแม่น้ำกก ครอบคลุมพื้นที่ 18 ตำบลในจังหวัดเชียงรายและเชียงใหม่ซึ่งตั้งอยู่ติดกับแม่น้ำกก โดยใช้ข้อมูลการตรวจวัดคุณภาพน้ำผิวดินจากกรมควบคุมมลพิษ ข้อมูลพื้นที่เพาะปลูกจากกรมพัฒนาที่ดิน และข้อมูลผลผลิตรวมถึงราคาสินค้าเกษตรจากสำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร การวิเคราะห์อาศัยความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารหนูและอัตราการลดลงของผลผลิตข้าว ซึ่งพัฒนาเป็นแบบจำลองถดถอยเชิงลอการิทึมที่มีค่า R^2 เท่ากับ 0.9418 ผลการศึกษาพบว่าสารหนูในหลายช่วงของแม่น้ำกกมีค่าเกินมาตรฐานคุณภาพน้ำผิวดิน และอาจมีส่วนทำให้ผลผลิตทางการเกษตรลดลง การประเมินมูลค่าความเสียหายดำเนินการโดยจำกัดขอบเขตเฉพาะผลผลิตข้าวภายใต้สมมติฐานเชิงอนุรักษนิยม ผลการประเมินชี้ให้เห็นว่ามูลค่าความเสียหายจากการลดลงของผลผลิตข้าวอยู่ในระดับประมาณ 188.45 ล้านบาท ซึ่งสะท้อนถึงผลกระทบทางการเกษตรที่อาจเกิดขึ้นจากปัญหาการปนเปื้อนสารหนูในแม่น้ำกก

คำสำคัญ: สารหนู, แม่น้ำกก, ผลผลิตข้าว

Abstract

This research aims to preliminarily assess the economic impacts on agriculture resulting from arsenic contamination in the Kok River, covering 18 subdistricts in Chiang Rai and Chiang Mai provinces located along the river. The analysis utilizes surface water quality monitoring data reported by the Pollution Control Department, cultivated area data from the Land Development Department, and agricultural production and price data from the Office of Agricultural Economics. The assessment is based on the relationship between arsenic concentration and the rate of rice yield reduction, represented by a logarithmic regression model with a coefficient of determination (R^2) of 0.9418. The results indicate that arsenic concentrations in several sections of the Kok River exceed surface water quality standards and provide an initial and conservative indication of the potential agricultural impacts. Economic impacts were estimated through an assessment limited to rice production under conservative assumptions. The results suggest that the estimated economic loss associated with rice yield reduction is approximately 188.45 million baht. These findings provide an initial and conservative indication of the potential agricultural impacts of arsenic contamination in the Kok River.

Keywords: Arsenic, Kok River, Rice production

คำนำ

ในปัจจุบัน ปัญหาการปนเปื้อนสารโลหะหนักในแหล่งน้ำธรรมชาติได้กลายเป็นประเด็นด้านสิ่งแวดล้อมที่ส่งผลกระทบต่อความมั่นคงทางอาหาร และเศรษฐกิจของชุมชนท้องถิ่นอย่างกว้างขวาง โดยเฉพาะสารหนู ซึ่งเป็นโลหะหนักที่สามารถสะสมในดิน น้ำ และพืชผลทางการเกษตร และก่อให้เกิดผลกระทบต่อทั้งผลผลิต คุณภาพอาหาร และสุขภาพของประชาชนในระยะยาว แม่น้ำกกซึ่งเป็นหนึ่งในแหล่งน้ำสำคัญของจังหวัดเชียงรายและจังหวัดเชียงใหม่ มีบทบาทสำคัญในด้านการเกษตรและการดำรงชีวิตของชุมชนในลุ่มน้ำกก การเปลี่ยนแปลงคุณภาพน้ำในแม่น้ำสายนี้จึงอาจก่อให้เกิดผลกระทบเชิงลูกโซ่ต่อภาคการเกษตรและเศรษฐกิจในระดับพื้นที่ จากการติดตามตรวจวัดคุณภาพน้ำผิวดินโดย กรมควบคุมมลพิษในช่วงปี พ.ศ. 2568 พบว่าสารหนูในหลายช่วงของแม่น้ำกกมีค่าความเข้มข้นสูงเกินกว่ามาตรฐานคุณภาพน้ำผิวดิน ซึ่งสร้างความกังวลต่อความเสี่ยงที่อาจเกิดขึ้นต่อการเพาะปลูกพืชเศรษฐกิจ โดยเฉพาะข้าวซึ่งเป็นพืชที่มีความไวต่อการดูดซึมและสะสมสารหนู

งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินมูลค่าผลกระทบทางการเกษตรที่เกิดจากการปนเปื้อนสารหนูในแม่น้ำกก โดยอาศัยข้อมูลการตรวจวัดคุณภาพน้ำ (กรมควบคุมมลพิษ, 2568) ข้อมูลพื้นที่เพาะปลูก (กรมพัฒนาที่ดิน, 2560-2567) และข้อมูลผลผลิตรวมถึงราคาสินค้าเกษตร (สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร, 2567) เพื่อนำมาวิเคราะห์เชิงเศรษฐศาสตร์และสะท้อนมูลค่าความเสียหายที่เกิดขึ้นจริง ผลการศึกษาที่ได้สามารถนำไปใช้เป็นข้อมูลประกอบการกำหนดนโยบายการบริหารจัดการทรัพยากรน้ำ และการวางแผนป้องกันผลกระทบต่อภาคการเกษตรในแม่น้ำกกและพื้นที่อื่นที่มีลักษณะใกล้เคียงกันในอนาคต

อุปกรณ์และวิธีการ

ข้อมูลที่ใช้ในการวิจัย

1. พื้นที่การศึกษา

พื้นที่ 18 ตำบลในจังหวัดเชียงรายและเชียงใหม่ซึ่งตั้งอยู่ติดกับแม่น้ำกก ได้แก่ ตำบลดอยฮาง, ตำบลแม่ยาว, ตำบลห้วยชมภู, ตำบลริมกก, ตำบลรอบเวียง, ตำบลแม่ข้าวต้ม, ตำบลเวียงเหนือ, ตำบลท่าข้าวเปลือก, ตำบลแม่สลองนอก, ตำบลหนองป่าก่อ, ตำบลปงน้อย, ตำบลบ้านแซว, ตำบลโยนก, ตำบลเวียง, ตำบลทุ่งก่อ, ตำบลดงมหาวัน, ตำบลท่าตอน และตำบลแม่นาวาง แสดงใน Fig. 1

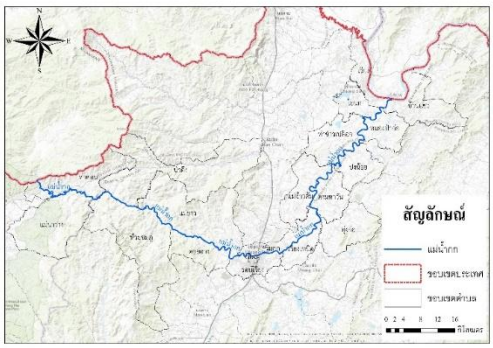


Fig. 1 The Map illustrating the boundaries of subdistricts in Chiang Rai and Chiang Mai provinces located along the Kok River

2. ปริมาณสารหนูในแม่น้ำกก

ผลการตรวจวัดคุณภาพน้ำผิวดินของสารหนูในแม่น้ำกก โดยจะมีทั้งหมด 15 จุดตลอดเส้นลำน้ำ กรมควบคุมมลพิษได้กำหนดแผนในการตรวจวัดคุณภาพสิ่งแวดล้อม ตั้งแต่เดือนมีนาคม 2568 โดยกำหนดความถี่ในการเก็บตัวอย่างน้ำ เดือนละ 2 ครั้ง และเก็บตัวอย่างตะกอนดิน เดือนละ 1 ครั้ง ตั้งแต่เดือนพฤษภาคมถึงเดือนกันยายน 2568 โดยงานวิจัยนี้จะใช้ค่าการตรวจที่มากที่สุดในแต่ละจุดตรวจวัดทั้งหมด 11 ครั้ง จากรายงานสถานการณ์คุณภาพสิ่งแวดล้อมในแม่น้ำกกและลำน้ำสาขา แม่น้ำสาย แม่น้ำรวก แม่น้ำโขง และผลกระทบกรณีปัญหาสารปนเปื้อนเกินค่ามาตรฐาน ข้อมูล ณ วันที่ 19 กันยายน พ.ศ. 2568 (กรมควบคุมมลพิษ, 2568) แสดงใน Table 1

ข้อมูลความเข้มข้นของสารหนูที่ใช้ในการศึกษานี้เป็นค่าของอาร์เซนิกทั้งหมด (total arsenic) จากรายงานการตรวจวัดคุณภาพน้ำผิวดิน ซึ่งดำเนินการตามมาตรฐานของกรมควบคุมมลพิษ โดยงานวิจัยนี้มิได้จำแนกรูปแบบของสารหนูที่ละลายน้ำ (dissolved arsenic) ซึ่งอาจทำให้ค่าที่ใช้ในการวิเคราะห์สูงกว่าค่าที่พืชสามารถดูดซึมได้จริง ซึ่งถือเป็นข้อจำกัดของการศึกษา

Table 1 Table presenting surface water quality monitoring results

Station	Sampling locations	Maximum arsenic concentration (mg/L)
Chiang Mai		
KK01	Thai–Myanmar border	0.038
KK02	Ban Sai Mun Mae Kok Bridge	0.029
KK03	Mae Hak River Bridge	0.024
Chiang Rai		
KK04	Ban Chakheu, Village No. 6	0.047
KK05	Mae Kok Bridge at Ban Doi Yao	0.036
KK06	Ban Pong Pak Nam	0.033
KK07	Tha Kham Bridge over the Kok River	0.021
KK08	Mae Khachan Bridge	0.028
KK09	Mae Lao Bridge	0.021
KK10	Chiang Rai Weir	0.022
KK11	Rim Kok Bridge – Wiang Chiang Rai Nai	0.020
KK12	Yonok Bridge at Ban Khon Nakhon	0.015
KK13	Tha Khao Plueak Subdistrict, Mae Chan District	0.016
KK14	Nong Pa Ko Subdistrict, Doi Luang District	0.018
KK15	Mae Hai Bridge, Chiang Saen District	0.013

3. ข้อมูลพื้นที่เพาะปลูก

ฐานข้อมูลพื้นที่เพาะปลูกพืชแต่ละชนิดของกรมพัฒนาที่ดินในพื้นที่ 18 ตำบลในจังหวัดเชียงรายและเชียงใหม่ซึ่งตั้งอยู่ติดกับแม่น้ำกก (กรมพัฒนาที่ดิน, 2560–2567)

4. ข้อมูลผลผลิตต่อไร่

ข้อมูลผลผลิตต่อไร่ในจังหวัดเชียงรายและเชียงใหม่ จากข้อมูลการผลิตสินค้าเกษตร สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร โดยใช้ข้อมูลปี พ.ศ. 2567–2568

5. ข้อมูลราคาสินค้าเกษตรต่อกิโลกรัม

ข้อมูลราคาสินค้าเกษตรที่เกษตรกรขายได้ ณ ไร่นา รายปี จากสำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร โดยใช้ข้อมูลปี พ.ศ. 2567

6. อัตราการลดลงของผลผลิตข้าว

จากการศึกษาของ Azad et al. (2012) พบว่าน้ำชลประทานที่มีการปนเปื้อนสารหนูส่งผลให้ผลผลิตข้าวพันธุ์ BR-11 ลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ โดยเมื่อความเข้มข้นของสารหนูในน้ำเพิ่มขึ้น ผลผลิตข้าวมีแนวโน้มลดลงอย่างต่อเนื่อง โดยข้อมูลอัตราการลดลงของผลผลิตข้าวจาก Table 2 ถูกนำมาใช้เป็นฐานข้อมูลในการพัฒนาแบบจำลองถดถอยเชิงลอการิทึม เพื่ออธิบายความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารหนู และอัตราการลดลงของผลผลิตข้าว

Table 2 Effect of arsenic amended irrigation water on yield of BR-11 rice

Arsenic concentration in irrigation water (mg/l)	Percentage of yield reduction (%)
0	0
0.1	34.64
0.5	57.91
1	52.69
2	58.04
4	69.03

วิธีการวิจัย

วิเคราะห์หาสมการความสัมพันธ์ของอัตราการลดลงของผลผลิตข้าว ด้วยแบบจำลองความสัมพันธ์เชิงลอการิทึม (Logarithmic regression) แสดงใน Fig. 2 เพื่ออธิบายความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรอิสระและตัวแปรตาม Equation 1:

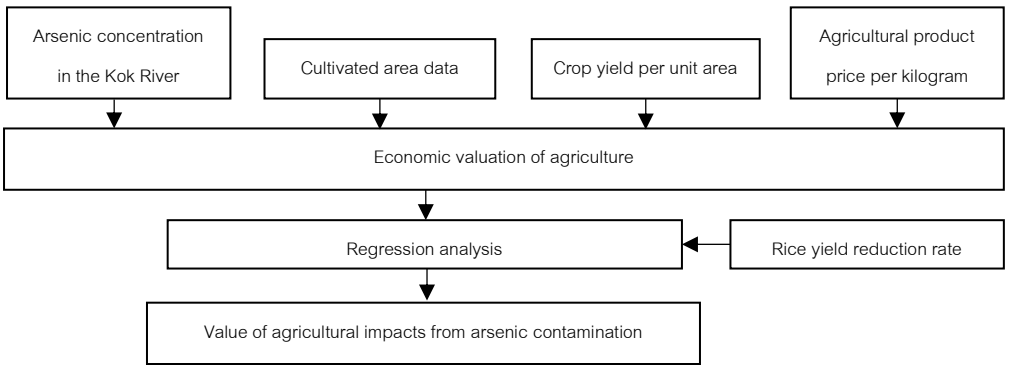


Fig. 2 Flowchart with the Sequence of steps in the Methodology

$$Y = a \ln(X) + b \quad (1)$$

Where: Y = Yield reduction rate.

X = Arsenic concentration in surface water.

a = Regression coefficient representing the sensitivity of y to changes in ln(x)

b = Intercept of the model.

สมมติฐาน

1. ผลกระทบของสารหนูต่อผลผลิตข้าวในประเทศไทยเทียบเท่ากับผลการศึกษาจากข้าวพันธุ์ BR-11
2. พื้นที่เพาะปลูกทั้งหมดใช้น้ำจากแม่น้ำกก

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

จากข้อมูลพื้นที่เพาะปลูก ข้อมูลผลผลิตต่อไร่ และข้อมูลราคาสินค้าเกษตรต่อกิโลกรัมจะพบว่า มูลค่าของผลผลิตของพืชเศรษฐกิจในพื้นที่ 18 ตำบลในจังหวัดเชียงรายและเชียงใหม่ซึ่งตั้งอยู่ติดกับแม่น้ำกกเท่ากับ 3,126,545,969.29 บาท โดยข้าวมีมูลค่าผลผลิตมากที่สุดเท่ากับ 1,412,341,345.38 บาท แสดงดัง Table 3–4

Table 3 The assessment of economic crop production values in 18 subdistricts in Chiang Rai and Chiang Mai provinces located along the Kok River

Crop type	Cultivated area (rai)	Yield per unit area (kg/rai)	Unit price (baht/kg)	Agricultural value (baht)
Rice	173,581.37	552.00	14.74	1,412,341,345.38
Rubber	47,746.46	226.00	69.87	753,946,206.21
Maize	69,455.96	744.00	8.65	446,990,776.18
Pineapple	11,529.63	2,501.00	11.88	342,566,983.00
Cassava	14,642.66	2,730.00	2.33	93,140,495.99
Longan	5,859.35	279.00	27.97	45,724,199.44
Oil palm	2,483.72	1,230.00	5.88	17,963,256.53
Rambutan	536.27	360.00	27.03	5,218,336.12
Arabica coffee	334.03	90.00	125.74	3,780,083.90
Coconut	87.14	1,800.00	16.00	2,509,632.00
Robusta coffee	144.49	90.00	125.74	1,635,135.53
Durian	13.70	238.00	110.20	359,318.12

Table 4 The assessment of economic crop production values in 18 subdistricts in Chiang Rai and Chiang Mai provinces located along the Kok River (Continued)

Crop type	Cultivated area (rai)	Yield per unit area (kg/rai)	Unit price (baht/kg)	Agricultural value (baht)
Mangosteen	41.43	181.00	31.03	232,688.69
Sugarcane	11.29	8,400.00	1.45	137,512.20
Total	326,467.50	19,421.00	578.51	3,126,545,969.29

ผลการวิเคราะห์สมการความสัมพันธ์ของอัตราการลดลงของผลผลิตข้าว โดยใช้แบบจำลองการถดถอยเชิงลอการิทึม (logarithmic regression) เพื่ออธิบายความสัมพันธ์ ซึ่งแสดงผลระหว่างตัวแปรอิสระและตัวแปรตาม เชิงกราฟดัง Fig. 3 พบว่าแบบจำลองดังกล่าวสามารถอธิบายความแปรผันของข้อมูลได้ในระดับหนึ่ง ($R^2 = 0.9418$) อย่างไรก็ตาม ค่า R^2 ไม่สามารถใช้ยืนยันความแม่นยำของผลการประเมินเชิงปริมาณได้โดยตรง

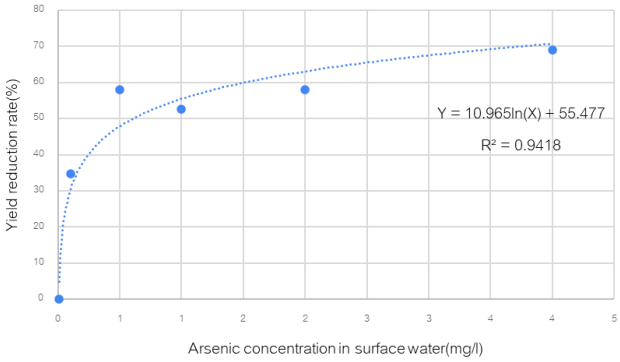


Fig. 3 The relationship between arsenic (As) concentration and yield reduction (%)

จากแบบจำลองที่ใช้เป็นแบบจำลองตัวแปรเดียว ซึ่งไม่สามารถสะท้อนกลไกทางพิษวิทยาเช่น การมีระดับความเข้มข้นขั้นต่ำที่ไม่ก่อให้เกิดผลกระทบ (threshold) รวมถึงความแตกต่างด้านสายพันธุ์ข้าว วิธีการเพาะปลูก การจัดการน้ำ ปุ๋ย และสภาพแวดล้อมของดินในพื้นที่จริงดังนั้น การประเมินในงานวิจัยนี้จึงอยู่ภายใต้สมมติฐานว่า ระบบการปลูกข้าวในพื้นที่ศึกษามีลักษณะใกล้เคียงกับการทดลองของ Azad et al. (2012) เนื่องจากอยู่ภายใต้บริบทการปลูกที่มีลักษณะร่วมสำคัญกับระบบนาข้าวในประเทศไทย โดยเฉพาะสภาวะนาน้ำขัง ซึ่งเอื้อต่อการเคลื่อนย้ายสารหนูในระบบดิน น้ำ และการดูดซึมโดยต้นข้าว อย่างไรก็ตาม ความไวต่อสารหนูอาจแตกต่างกันระหว่างพันธุ์และสภาพแวดล้อมการผลิต ดังนั้นผลการประเมินจึงควรถูกตีความเป็นการประเมินเบื้องต้นและเชิงอนุรักษนิยม ในบริบทของสมมติฐานดังกล่าว

ผลจากการนำข้อมูลปริมาณสารหนูที่มากที่สุดในช่วงการตรวจวัดใน Table 1 มาใช้วิเคราะห์หาอัตราการลดลงของผลผลิตในบริเวณตำบลใกล้เคียงกับจุดตรวจวัดคุณภาพน้ำผิวดินของสารหนูในแม่น้ำกก และประเมินมูลค่าผลผลิตที่ลดลงแสดงดัง Table 4

Table 4 The assessment of the reduced economic value of agricultural crop production in 18 subdistricts of Chiang Rai and Chiang Mai provinces located along the Kok River

Crop type	Agricultural value (Baht)	Reduced agricultural value (Baht)
Rice	1,412,341,345.38	188,452,911.88

สรุป

งานวิจัยนี้นำเสนอการประเมินมูลค่าผลกระทบทางการเกษตรที่เกิดจากการปนเปื้อนสารหนูในแม่น้ำกก โดยกรอบการประเมินในสองรูปแบบเพื่อสะท้อนสมมติฐานและระดับความรุนแรงของผลกระทบที่แตกต่างกัน การวิเคราะห์อาศัยแบบจำลองความสัมพันธ์เชิงลอการิทึม ซึ่งผ่านการทดสอบความสอดคล้องของข้อมูลและมีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2 = 0.9418) แสดงถึงความสามารถของแบบจำลองในการอธิบายอัตราการลดลงของผลผลิตได้อย่างมีประสิทธิภาพ และถูกนำมาใช้เป็นฐานในการคำนวณมูลค่าความเสียหายทางการเกษตร

การประเมินในรูปแบบแรกมุ่งพิจารณามูลค่าความเสียหายเฉพาะผลผลิตข้าว ภายใต้สมมติฐานว่าพืชเศรษฐกิจชนิดอื่นไม่ตอบสนองต่อการปนเปื้อนสารหนู หรือได้รับผลกระทบในระดับที่ไม่ก่อให้เกิดความเสียหายอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ดังนั้นการประเมินจึงจำกัดขอบเขตอยู่ที่ผลผลิตข้าวซึ่งเป็นพืช ที่ได้รับผลกระทบโดยตรงและมีความไวต่อสารหนู

มากที่สุด ผลการประเมินชี้ให้เห็นว่ามูลค่าความเสียหายจากการลดลงของผลผลิตข้าวอยู่ในระดับประมาณ 188,452,911.88 บาท

ในขณะที่การประเมินในรูปแบบที่สอง ได้ขยายขอบเขตการวิเคราะห์เพื่อสะท้อนผลกระทบในระดับระบบ (system-wide impact) โดยอ้างอิงผลกระทบของข้าวเป็นฐานในการประมาณความเสียหาย ของภาคการเกษตรทั้งหมด ภายใต้สมมติฐานว่าพืชเศรษฐกิจชนิดอื่นมีความไวต่อสารหนูเทียบเท่ากับข้าว ผลการประเมินในแนวทางนี้ชี้ให้เห็นว่ามูลค่าความเสียหายจากการลดลงของผลผลิตภาคการเกษตรอยู่ในระดับประมาณ 391,384,852.16 บาท ซึ่งสะท้อนให้เห็นถึงขนาดและความรุนแรงของผลกระทบทางเศรษฐกิจที่การปนเปื้อนสารหนูในแม่น้ำกก

นอกจากนี้ กรอบการประเมินและแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นจากการศึกษานี้ สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการประเมินผลกระทบทางเศรษฐกิจจากการปนเปื้อนสารมลพิษชนิดอื่นในแหล่งน้ำผิวดิน รวมถึงสามารถขยายผลไปสู่การประเมินความเสียหายในพื้นที่ลุ่มน้ำอื่น ที่มีลักษณะการใช้ประโยชน์ที่ดินและโครงสร้างการผลิตทางการเกษตรใกล้เคียงกันในอนาคต งานวิจัยสามารถต่อยอดโดยการบูรณาการข้อมูลทางด้านสุขภาพของประชาชน ด้านการท่องเที่ยว และด้านการประมง เพื่อสนับสนุนการกำหนดนโยบายและมาตรการบริหารจัดการทรัพยากรน้ำที่มีประสิทธิภาพและยั่งยืนยิ่งขึ้น

เอกสารอ้างอิง

กรมพัฒนาที่ดิน. 2561–2567. ระบบแผนที่เกษตรเพื่อการบริหารจัดการเชิงรุก (Agri-Map Online). https://agri-map-online.moac.go.th, 1 ธันวาคม 2568.

สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร. 2567. ราคาสินค้าเกษตรที่เกษตรกรขายได้ ณ ไร่นา. ดัชนีเศรษฐกิจการเกษตร เดือนตุลาคม 2568. https://oae.go.th/home/article/480, 14 พฤศจิกายน 2568.

สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร. 2567–2568. ข้อมูลการผลิตสินค้าเกษตร. https://oae.go.th/home/article/475, 10 พฤศจิกายน 2568.

สำนักงานสิ่งแวดล้อมและควบคุมมลพิษที่ 1. 2568. รายงานผลคุณภาพน้ำผิวดินและตะกอนดินในแหล่งน้ำ แม่น้ำกก แม่น้ำสาขาที่ไหลลงแม่น้ำกก แม่น้ำสาย แม่น้ำรวก และแม่น้ำโขง (รอบการเก็บตัวอย่างวันที่ 1–5 กันยายน 2568). https://epo01.pcd.go.th/th/information/more, 4 ตุลาคม 2568.

Azad, M.A.K., Mondal, A.H.M.F.K., et al. 2012. Effect of arsenic amended irrigation water on growth and yield of BR-11 rice (Oryza sativa L.) grown in open field Gangetic soil condition. J. Environ. Sci. Nat. Resour. 5: 55–59.

การประยุกต์ใช้ข้อมูลพยากรณ์อากาศเชิงตัวเลขเพื่อการพยากรณ์ปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำห้วยแร้ง จังหวัดตราด

Application of numerical weather prediction data to forecast inflow at Huai Rang Reservoir, Trat Province

เกวลี วัฒนรุ่งเรือง, ดนย์ปภพ มะณี*

Kaewalee Wattanarungreung, Donpapob Manee*

ภาควิชาวิศวกรรมทรัพยากรน้ำ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

Department of Water Resources Engineering, Faculty of Engineering, Kasetsart University, Bangkok 10900 Thailand

*Corresponding author. E-mail address: Donpapob.m@ku.th

บทคัดย่อ

การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินศักยภาพของการประยุกต์ใช้ข้อมูลพยากรณ์อากาศเชิงตัวเลข Numerical Weather Prediction (NWP) ของกรมอุตุนิยมวิทยาร่วมกับแบบจำลองน้ำฝน-น้ำท่า (HEC–HMS) ในการพยากรณ์ปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำห้วยแร้ง จังหวัดตราด โดยใช้ข้อมูลฝนพยากรณ์ขนาดกริด 3×3 กิโลเมตร ซึ่งสามารถพยากรณ์ล่วงหน้าได้ 72 ชั่วโมง ขั้นตอนการปรับเทียบแบบจำลองด้วยข้อมูลปริมาณฝนและน้ำไหลเข้าอ่างในปีพ.ศ. 2566 และการทวนสอบความถูกต้องด้วยชุดข้อมูลประเภทเดียวกันปีพ.ศ. 2564 จากนั้นนำไปประยุกต์ใช้กับข้อมูลฝนพยากรณ์รายวันล่วงหน้าในช่วงวันที่ 15–19 สิงหาคม พ.ศ.2568 ผลการวิเคราะห์พบว่า ความคลาดเคลื่อนของการพยากรณ์ปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาการพยากรณ์ โดยการพยากรณ์ล่วงหน้า 1 วันให้ค่าคลาดเคลื่อนเฉลี่ยที่ต่ำสุด การศึกษานี้แสดงให้เห็นว่าการประยุกต์ใช้ข้อมูลพยากรณ์อากาศเชิงตัวเลขร่วมกับแบบจำลองน้ำฝน-น้ำท่า สามารถช่วยเพิ่มศักยภาพในการประเมินปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างล่วงหน้าโดยเฉพาะอ่างเก็บน้ำขนาดเล็กและสนับสนุนการบริหารจัดการน้ำในช่วงฤดูฝนได้อย่างมีประสิทธิภาพ

คำสำคัญ: การบริหารจัดการน้ำ, การพยากรณ์ปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำ, แบบจำลองน้ำฝน–น้ำท่า, พยากรณ์อากาศเชิงตัวเลข, อ่างเก็บน้ำห้วยแร้ง

Abstract

The objective of this study is to evaluate the potential of applying Numerical Weather Prediction (NWP) data from the Thai Meteorological Department (TMD, 3×3 km resolution, 72-hour lead time) with the rainfall-runoff (HEC-HMS) model for inflow forecasting at Huai Rang Reservoir, Trat Province. Model setup involved calibration (2023 data) and validation (2021 data). When applied to the August 15–19, 2025 event, analysis showed that forecast error increased with the lead time, where the 1-day forecast yielded the lowest average error. This research demonstrates that integrating NWP with HEC-HMS significantly enhances advanced reservoir inflow assessment, particularly for small-scale reservoirs and supporting effective water management during the rainy season.

Keywords: HEC-HMS, Huai Rang Reservoir, Numerical Weather Prediction (NWP), Reservoir inflow forecasting, Water management

คำนำ

อ่างเก็บน้ำห้วยแร้งมีความจุ 36.8 ล้านลูกบาศก์เมตร ตั้งอยู่ในจังหวัดตราด ในลุ่มน้ำสาขาแม่น้ำเมืองตราดของลุ่มน้ำชายฝั่งทะเลตะวันออก มีบทบาทสำคัญต่อการใช้น้ำอุปโภค-บริโภค การเกษตร และการบรรเทาปัญหาอุทกภัยในช่วงฤดูฝนจากอิทธิพลของลมมรสุมตะวันตกเฉียงใต้ จากสถานการณ์น้ำของอ่างเก็บน้ำห้วยแร้งในช่วง ปีพ.ศ. 2564-2568 พบว่า ปริมาณน้ำในอ่างเก็บน้ำมักเกินความจุอยู่เสมอซึ่งอาจส่งผลกระทบต่อพื้นที่ด้านท้ายน้ำ การบริหารจัดการน้ำในอ่างเก็บน้ำจึงจำเป็นต้องอาศัยข้อมูลที่สามารถช่วยคาดการณ์สถานการณ์น้ำล่วงหน้าเพื่อรองรับการวางแผนระบายน้ำและควบคุมระดับเก็บกักให้เหมาะสมต่อสภาวะฝนที่กำลังจะเกิดขึ้น

ปัจจุบันการประเมินปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำห้วยแร้งยังคงดำเนินการด้วยข้อมูลตรวจวัดจริงในอดีตและปัจจุบัน ซึ่งไม่สามารถบ่งชี้การเปลี่ยนแปลงของน้ำท่าในอนาคตได้อย่างทันท่วงที การประยุกต์ใช้ข้อมูลพยากรณ์อากาศเชิงตัวเลข Numerical Weather Prediction (NWP) ของกรมอุตุนิยมวิทยาซึ่งพยากรณ์อากาศโดยแบบจำลอง Weather Research and Forecasting Model (WRF-Model) ประยุกต์ใช้ร่วมกับระบบการปรับข้อมูล (Data Assimilation) เพื่อพยากรณ์ปริมาณฝนสะสมได้ทั้งรายชั่วโมงและรายวัน ครอบคลุมประเทศไทยและภูมิภาคโดยรอบ ซึ่งในการศึกษานี้จะใช้ข้อมูลฝนพยากรณ์โดเมนที่ 2 ความละเอียด 3 x 3 กิโลเมตร สามารถพยากรณ์ล่วงหน้าได้ 3 วัน หรือ 72 ชั่วโมง (ไกรฤกษ์, 2567; ณพวัฒน์, 2567) จึงเป็นแนวทางสำคัญที่ช่วยเพิ่มความสามารถในการประเมินสถานการณ์ล่วงหน้าโดยเมื่อเชื่อมโยงร่วมกับแบบจำลองน้ำฝน-น้ำท่า (HEC–HMS) สามารถใช้ในการพยากรณ์ปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำในระยะสั้นได้

การศึกษานี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินศักยภาพของการประยุกต์ใช้ข้อมูลพยากรณ์อากาศเชิงตัวเลข Numerical Weather Prediction (NWP) ร่วมกับแบบจำลองน้ำฝน-น้ำท่า (HEC–HMS) เพื่อเป็นเครื่องมือสนับสนุนการบริหารจัดการน้ำของอ่างเก็บน้ำห้วยแร้งที่เป็นอ่างเก็บน้ำขนาดเล็กที่ตั้งอยู่ในพื้นที่ลุ่มน้ำตอนบนของจังหวัดตราด

อุปกรณ์และวิธีการ

พื้นที่ศึกษา

อ่างเก็บน้ำห้วยแร้ง ตั้งอยู่ในพื้นที่ตำบลด่านชุมพล อำเภอบ่อไร่ จังหวัดตราด ซึ่งอยู่ในลุ่มน้ำสาขาแม่น้ำเมืองตราด ลุ่มน้ำชายฝั่งทะเลตะวันออก มีความจุ 36.8 ล้านลูกบาศก์เมตร มีขนาดพื้นที่รับน้ำ 119 ตารางกิโลเมตร (สำนักงานทรัพยากรน้ำแห่งชาติ, 2566) แสดงดัง Fig. 1

ทฤษฎีและแบบจำลองที่ใช้

แบบจำลองน้ำฝน-น้ำทา HEC-HMS

แบบจำลองน้ำฝน - น้ำท่า Hydrologic Modeling System (HEC - HMS) พัฒนาขึ้นโดย Hydrologic Engineering Center of U.S. Army Corps of Engineering โดยจำลองกระบวนการของน้ำฝนและน้ำท่าออกมาในรูปแบบของกราฟน้ำท่า ซึ่งสามารถวิเคราะห์ความสัมพันธ์ปริมาณน้ำท่าที่มาจากน้ำฝนและการไหลในสภาพทั่วไปและสภาพที่มีการควบคุม โดยโปรแกรมแบบจำลองน้ำฝน-น้ำท่า (HEC-HMS) (กรมชลประทาน, 2561) สามารถจำลองกระบวนการเกิดน้ำท่าจากน้ำฝนที่ตกลงมาผ่านการดักเก็บของพืช ผิวดินและแหล่งน้ำซึ่งแบ่งส่วนที่สูญเสียโดยการระเหย

และการคายน้ำ บางส่วนจะไหลลงสู่ชั้นใต้ดินผ่านการซึมลงผิวดินหรือซึมลึกลงชั้นใต้ดิน ปริมาณน้ำที่ไม่ไหลซึมลงดินจะเกิดขึ้นเป็นน้ำหลากผิวดินไหลรวมสู่ลำน้ำ และออกจากแหล่งน้ำในรูปแบบของน้ำท่า แสดงใน Fig. 1

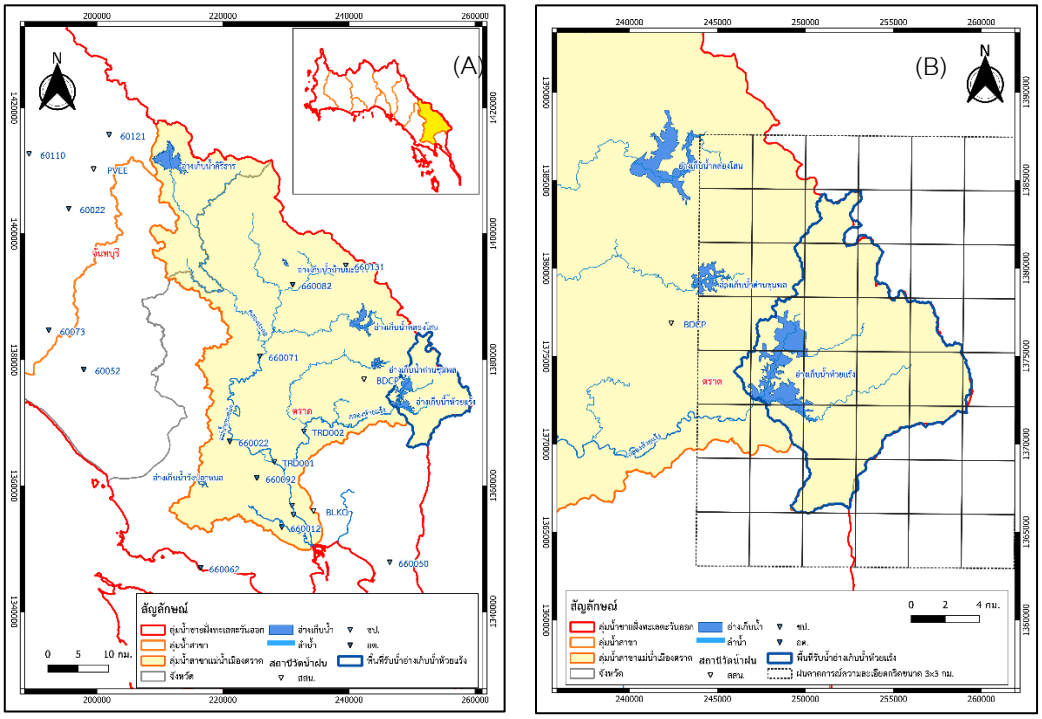


Fig. 1 Study Area: (A); Huai Rang Reservoir, Trat Province (B), Forecasted Rainfall Data with a Resolution of 3✕3 kilometers from the WRF-DA Model

หลักการทำงานของแบบจำลองน้ำฝน-น้ำท่า (HEC-HMS) เพื่อคำนวณหาปริมาณน้ำท่าจะมีส่วนประกอบต่างๆ ในการประเมินน้ำท่า ได้แก่ วิธีการสูญเสียน้ำฝน (Loss Method) ซึ่งในการศึกษานี้จะใช้วิธี SCS curve number loss และวิธีการเปลี่ยนแปลงของปริมาณน้ำฝนส่วนเกิน (Transform Method) เป็นกราฟน้ำท่า จะใช้วิธี SCS Unit Hydrograph โดยวิเคราะห์ตาม Equation 1 และ Equation 2 (U.S. Army Corps of Engineers, 2000) ตามลำดับ

$$Q = \frac{(P-I_a)^2}{P-I_a+S} \qquad (1)$$

where Q = accumulated precipitation excess at time (mm)

P = accumulated rainfall depth at time (mm)

I_a = the initial abstraction (initial loss) (mm)

S = potential maximum retention (mm)

$$T_c = 0.663\left(\frac{L}{S_s^{0.5}}\right)^2 \qquad (2)$$

where T_c = time of concentration (hours)

L = main channel length (km)

S_s = average channel slope (m/m)

ค่าดัชนีทางสถิติสำหรับประเมินประสิทธิภาพแบบจำลอง

สัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (Coefficient of Determination,R^2) เป็นดัชนีทางสถิติที่ใช้ในการประเมินประสิทธิภาพของแบบจำลองโดยวัดความสัมพันธ์ระหว่างค่าที่ตรวจวัดได้จริงและค่าที่ได้จากแบบจำลอง ซึ่งค่า R^2 จะมีค่าอยู่ระหว่าง 0 ถึง 1 โดยค่าที่เข้าใกล้ 1 แสดงว่าแบบจำลองมีความสามารถในการทำนายผลที่ตรวจวัดได้จริงสูง ในการสอบเทียบแบบจำลองนี้ เมื่อค่า R^2 อยู่ระหว่าง 0.75 ถึง 0.85 ถือว่าอยู่ในเกณฑ์ที่ดี และเมื่อ R^2 มากกว่า 0.85 ถือว่าอยู่ในเกณฑ์ที่ดีมากสามารถวิเคราะห์ตาม Equation 3:

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^{N}(Q_O-Q_{O,avg})(Q_S-Q_{S,avg})}{\sqrt{\sum_{i=1}^{N}(Q_O-Q_{O,avg})^2(Q_S-Q_{S,avg})^2}} \quad (3)$$

where Q_O = Observed Inflow (m^3/s)

Q_S = Simulated Inflow (m^3/s)

$Q_{O,avg}$ = Average observed Inflow (m^3/s)

$Q_{S,avg}$ = Average simulated Inflow (m^3/s)

N = Number of observations

RMSE-Observations Standard Deviation Ratio (RSR) ดัชนีทางสถิติในการวัดประสิทธิภาพของแบบจำลองที่ไม่มีหน่วย คำนวณจากอัตราส่วนระหว่างรากที่สองของค่าเฉลี่ยของความคลาดเคลื่อนกำลังสองและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าที่ตรวจวัดได้ โดยค่า RSR ที่เข้าใกล้ 0 จะแสดงว่าแบบจำลองมีประสิทธิภาพและมีความคลาดเคลื่อนต่ำเมื่อเทียบกับความผันผวนของข้อมูลจริงสามารถวิเคราะห์ตาม Equation 4:

$$RSR = \frac{\sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{N}(Q_O-Q_S)^2}}{\sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{N}(Q_O-Q_{O,avg})^2}} \quad (4)$$

where Q_O = Observed Inflow (m^3/s)

Q_S = Simulated Inflow (m^3/s)

$Q_{O,avg}$ = Average observed Inflow (m^3/s)

N = Number of observations

ร้อยละความคลาดเคลื่อนของการพยากรณ์ปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำ เป็นดัชนีแสดงถึงความแม่นยำในการพยากรณ์ในรูปแบบของความคลาดเคลื่อนระหว่างค่าตรวจวัดได้จริงกับค่าจากแบบจำลองโดยหากมีค่าร้อยละความคลาดเคลื่อนต่ำแสดงว่ามีความแม่นยำในการพยากรณ์ปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำสามารถวิเคราะห์ตาม Equation 5:

$$\%\ Error = \left|\frac{(Q_O-Q_S)}{Q_O}\right| \times 100 \quad (5)$$

where Q_O = Observed Inflow (m^3/s)

Q_S = Simulated Inflow (m^3/s)

แบบจำลองพยากรณ์อากาศเชิงตัวเลข Numerical Weather Prediction (NWP)

การพยากรณ์อากาศเชิงตัวเลข Numerical Weather Prediction (NWP) เป็นชื่อทางการของวิธีการพยากรณ์อากาศด้วยคอมพิวเตอร์โดยเป็นการพยากรณ์ภายใต้กฎเกณฑ์ทางฟิสิกส์ การเปลี่ยนแปลงของบรรยากาศจึงสามารถแสดงได้ในรูปของระบบสมการทางคณิตศาสตร์โดยคำนึงถึงองค์ประกอบของบรรยากาศ เช่น อุณหภูมิ ความเร็วและทิศทางลม ความชื้น ฯลฯ ที่แสดงถึงแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงไปจากสภาวะปัจจุบัน (กรมอุตุนิยมวิทยา, 2568)

กรมอุตุนิยมวิทยาพยากรณ์อากาศและลักษณะอากาศที่ครอบคลุมพื้นที่ทุกภาคทั่วประเทศโดยแบ่งเป็นการพยากรณ์ระยะสั้น ได้แก่ รายชั่วโมง ราย 3 ชั่วโมง และรายวัน และการคาดการณ์ระยะยาว ได้แก่ รายเดือน ราย 3 เดือนและรายฤดูกาล โดยแบบจำลอง Weather Research and Forecasting Model (WRF - Model) ประยุกต์ใช้ร่วมกับระบบการปรับข้อมูล (Data Assimilation) เพื่อพยากรณ์ปริมาณฝนสะสมได้ทั้งรายชั่วโมงและรายวัน ครอบคลุมประเทศไทย และภูมิภาคโดยรอบ แสดงผลเป็นแผนที่ขนาดความละเอียดกริด 2 โดเมน คือ โดเมนที่ 1 ขนาด 9 x 9 กิโลเมตร และโดเมนที่ 2 ขนาด 3 x 3 กิโลเมตร ซึ่งในการศึกษานี้จะใช้การพยากรณ์ระยะสั้น โดเมนที่ 2 ขนาดความละเอียด 3 x 3 กิโลเมตร (กนกศรี และคณะ, 2565; ไกรฤกษ์, 2567; ณพวัฒน์, 2567) แสดงดัง Fig. 2

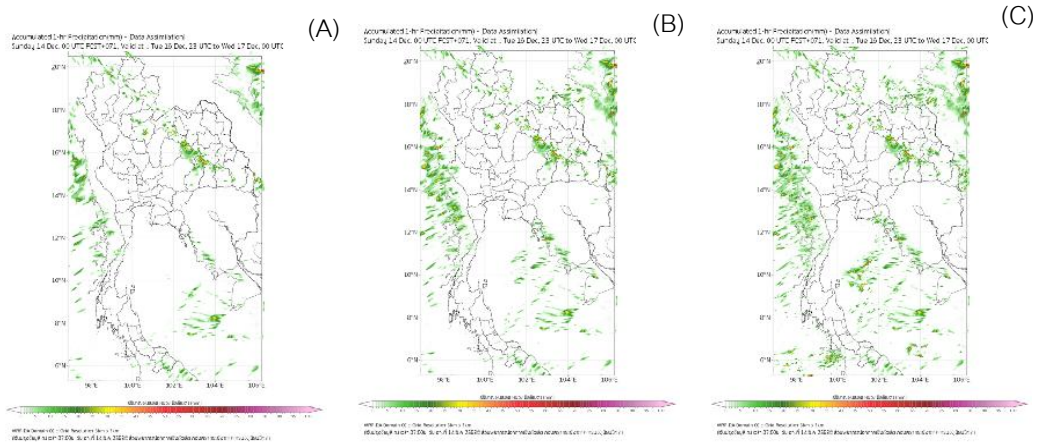


Fig. 2 Example of forecasted rainfall data with a resolution of 3 x 3 kilometers from the WRF-DA model: (A); 15 Aug 2025 (B); 17 Aug 2025 (C); 19 Aug 2025

วิธีการศึกษา

กระบวนการจำลองน้ำฝน-น้ำท่าเพื่อพยากรณ์ปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำ มีผังกระบวนการทำงาน แสดงดัง Fig. 3

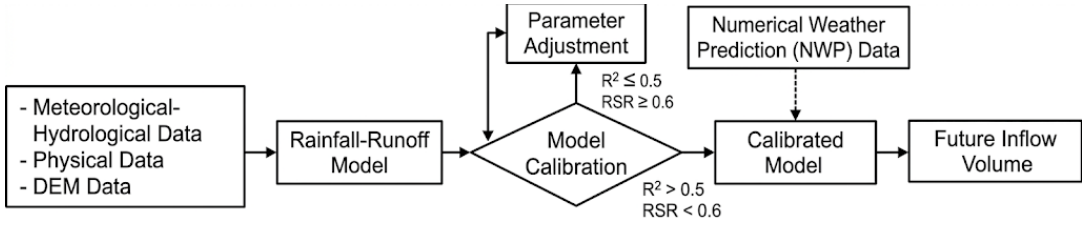


Fig. 3 Runoff Modeling Process for Inflow Forecasting

การปรับเทียบและสอบเทียบแบบจำลองน้ำฝน-น้ำท่า (HEC-HMS)

ในการดำเนินการปรับเทียบและสอบเทียบแบบจำลองเลือกใช้ข้อมูลในปี พ.ศ. 2564 และ พ.ศ. 2566 เนื่องจากเป็นปีที่เกิดสถานการณ์น้ำท่วมและข้อมูลมีความสมบูรณ์ โดยดำเนินการปรับเทียบแบบจำลองด้วยข้อมูลปริมาณฝนรายชั่วโมงและปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำห้วยแร้งปีพ.ศ. 2566 เนื่องจากข้อมูลพยากรณ์อากาศเชิงตัวเลข NWP ของกรมอุตุนิยมวิทยา เริ่มมีการเผยแพร่ในปี พ.ศ. 2565 เพื่อปรับค่าพารามิเตอร์ของลุ่มน้ำ ได้แก่ Curve Number (CN), เวลาเดินทางของน้ำท่า (Lag Time) ให้มีความสอดคล้องกับสภาพจริง จากนั้นดำเนินการสอบเทียบแบบจำลองโดยใช้ข้อมูลปริมาณฝนรายชั่วโมงและปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำปี พ.ศ. 2564 ด้วยค่าพารามิเตอร์ของลุ่มน้ำที่ได้จากการปรับเทียบแบบจำลอง ในการพิจารณาประสิทธิภาพของแบบจำลองให้มีความสอดคล้องกับสภาพจริงจะพิจารณาด้วยค่าดัชนีทางสถิติ ได้แก่ สัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) และ RMSE-observations standard deviation ratio (RSR) ซึ่งระบุว่าแบบจำลองที่มีความน่าเชื่อถือในระดับที่ยอมรับได้ (Satisfactory) จนถึงระดับดีมาก (Very Good) ควรมีค่า R^2 มากกว่า 0.50 และค่า RSR ไม่เกิน 0.60 (Moriasi et al., 2007) ทั้งในการปรับเทียบและสอบเทียบแบบจำลอง

การประยุกต์ใช้ข้อมูลพยากรณ์อากาศเชิงตัวเลขร่วมกับแบบจำลองน้ำฝน-น้ำท่า (HEC-HMS)

ขั้นตอนการดำเนินการจะนำข้อมูลพยากรณ์อากาศเชิงตัวเลข Numerical Weather Prediction (NWP) โดเมนที่ 2 ขนาด 3 × 3 กิโลเมตร ซึ่งพยากรณ์ล่วงหน้า 3 วัน หรือ 72 ชั่วโมง โดยกำหนดช่วงเวลาในการพยากรณ์ (Time of Forecast: TOF) ระหว่างวันที่ 15–19 สิงหาคม พ.ศ.2568 แสดงดัง Fig. 1 ครอบคลุมจำนวน 29 กริด ประยุกต์ใช้ร่วมกับแบบจำลองน้ำฝน-น้ำท่า (HEC-HMS) ที่ผ่านการปรับเทียบและสอบเทียบแบบจำลองแล้ว เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพและความคลาดเคลื่อนของการพยากรณ์ปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำ 1-3 วันล่วงหน้าระหว่างข้อมูลตรวจวัดและข้อมูลที่ได้จากพยากรณ์อากาศเชิงตัวเลข ณ วันและเวลาเดียวกัน

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

ผลการปรับเทียบและสอบเทียบแบบจำลองน้ำฝน-น้ำท่า (HEC-HMS)

ผลการปรับเทียบและสอบเทียบแบบจำลองน้ำฝน-น้ำท่า (HEC-HMS) ดำเนินการปรับเทียบโดยใช้ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ในรูปแบบของการลดความคลาดเคลื่อน (RSR) และเพิ่มค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) เพื่อให้ปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำจากแบบจำลองสอดคล้องกับค่าตรวจวัดจริง โดยการปรับเทียบค่าพารามิเตอร์อ้างอิงจากข้อแนะนำเบื้องต้นของมาตรฐาน NRCS ที่ระบุค่า CN สำหรับป่าสมบูรณ์ กลุ่มดิน A ที่มีศักยภาพในการเกิดน้ำท่าต่ำเนื่องจากอัตราการซึมน้ำสูง ไว้ที่ CN คือ 30 (U.S. Army Corps of Engineers, 2000) แต่เนื่องจากพื้นที่รับน้ำของอ่างเก็บน้ำห้วยแร้งมีลักษณะเป็นพื้นที่ลาดชันเชิงเขาและมีสภาพเป็นป่าพรุ ประกอบกับการปรับเทียบค่าพารามิเตอร์ จึงทำให้ค่าพารามิเตอร์ของลุ่มน้ำ Curve Number (CN) คือ 25 เวลาเดินทางของน้ำท่า (Lag Time) คือ 15 ชั่วโมง (900 นาที) และสามารถสรุปเป็นค่าดัชนีทางสถิติของการปรับเทียบแบบจำลองด้วยข้อมูลปีพ.ศ. 2566 มีค่า R^2 คือ 0.838 ซึ่งอยู่ในเกณฑ์ที่ดีมาก และค่า RSR คือ 0.553 ซึ่งอยู่ในเกณฑ์ที่ดี และจากการสอบเทียบแบบจำลองด้วยข้อมูลปีพ.ศ. 2564 มีค่า R^2 คือ 0.871 ซึ่งอยู่ในเกณฑ์ที่ดีมาก และค่า RSR คือ 0.681 ซึ่งอยู่ในเกณฑ์พอใช้ แสดงดัง Fig. 4 เนื่องจากพารามิเตอร์ที่ได้จากการปรับเทียบในปี พ.ศ. 2566 ซึ่งเป็นปีที่มีปริมาณน้ำมาก เมื่อนำไปใช้กับปีพ.ศ. 2564 จึงส่งผลให้แบบจำลองให้ค่าที่สูงกว่าข้อมูลตรวจวัดจริง ทั้งนี้อาจต้องมีการพิจารณาเพิ่มเติมที่กรณีต่างๆ เช่น ปีที่มีปริมาณน้ำปกติ หรือปีที่มีปริมาณน้ำน้อย เพื่อให้แบบจำลองครอบคลุมต่อสถานการณ์และมีความแม่นยำมากยิ่งขึ้น

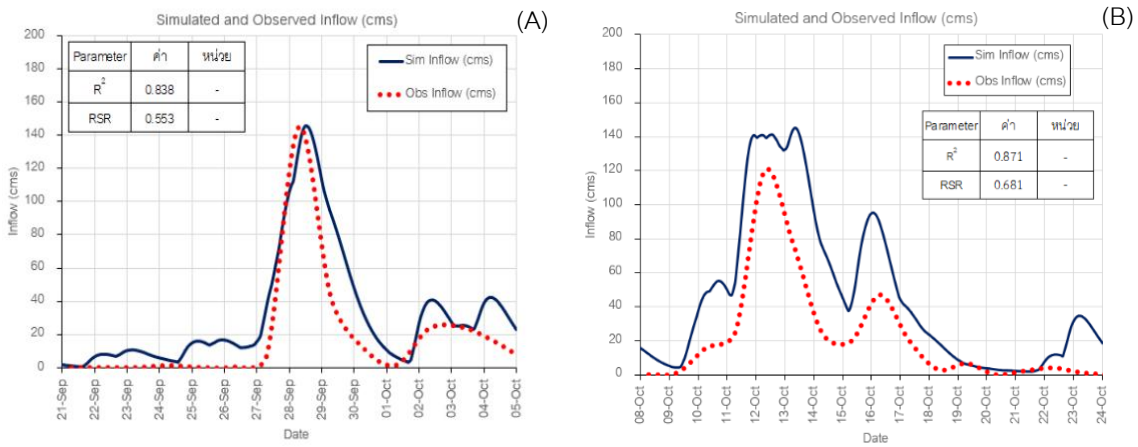


Fig. 4 Calibration and Validation of Rainfall–Runoff Model (HEC–HMS): (A); Year 2023 (B); Year 2021

ผลการประยุกต์ใช้ข้อมูลพยากรณ์อากาศเชิงตัวเลขร่วมกับแบบจำลองน้ำฝน-น้ำท่า (HEC-HMS)

จากการนำข้อมูลพยากรณ์อากาศเชิงตัวเลข Numerical Weather Prediction (NWP) ในช่วงเวลาในการพยากรณ์ (Time of Forecast: TOF) ระหว่างวันที่ 12–19 สิงหาคม พ.ศ. 2568 เพื่อเปรียบเทียบความแม่นยำของการพยากรณ์พบว่า ปริมาณฝนที่พยากรณ์ยังคงมีความคลาดเคลื่อนจากปริมาณฝนที่ตรวจวัดได้จริง แสดงดัง Table 1 และ Fig. 5 และเมื่อนำมาประยุกต์ใช้ร่วมกับแบบจำลองน้ำฝน-น้ำท่า (HEC-HMS) โดยกำหนดช่วงเวลาในการพยากรณ์ระหว่างวันที่ 15–19 สิงหาคม พ.ศ. 2568 เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพและความคลาดเคลื่อนของการพยากรณ์พบว่าในช่วงการพยากรณ์วันที่ 1 มีค่าความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุด คือ ร้อยละ 42.91 เมื่อเทียบกับการพยากรณ์ในวันที่ 2 มีค่าความคลาดเคลื่อน คือ ร้อยละ 61.55 และการพยากรณ์ในวันที่ 3 มีค่าความคลาดเคลื่อน คือ ร้อยละ 122.75 แสดงดัง Table 2 และ Fig. 6 ทั้งนี้เป็นผลมาจากการสอบเทียบและปรับเทียบแบบจำลองที่ให้ค่าการจำลองสูงกว่าค่าตรวจวัด เมื่อนำมาประยุกต์ใช้กับข้อมูลพยากรณ์อากาศเชิงตัวเลขที่มีความคลาดเคลื่อนในการพยากรณ์อยู่แล้ว จึงส่งผลให้ค่าการพยากรณ์จากแบบจำลองมีค่าความคลาดเคลื่อนสูงขึ้น โดยหากต้องการให้การประยุกต์ใช้ข้อมูลพยากรณ์อากาศเชิงตัวเลขร่วมกับแบบจำลองน้ำฝน-น้ำท่า (HEC-HMS) ให้มีความแม่นยำมากยิ่งขึ้น อาจต้องมีการพิจารณาการปรับเทียบและสอบเทียบแบบจำลองที่กรณีต่างๆ ร่วมกับการปรับแก้ข้อมูลฝนพยากรณ์ด้วย

Table 1 Observed Rainfall and Forecasted Rainfall (mm)

Date	Observed	TOF12	TOF13	TOF14	TOF15	TOF16	TOF17	TOF18	TOF19
12 Aug	18.00	9.52							
13 Aug	18.60	8.47	7.30						
14 Aug	13.20	20.49	16.13	12.25					
15 Aug	99.60		12.90	14.35	32.66				
16 Aug	68.80			39.97	23.20	85.99			
17 Aug	28.80				14.60	18.27	29.06		
18 Aug	15.00					21.74	16.53	6.44	
19 Aug	4.80						65.51	3.46	0.23
20 Aug	0.00							3.81	4.78
21 Aug	40.60								44.22

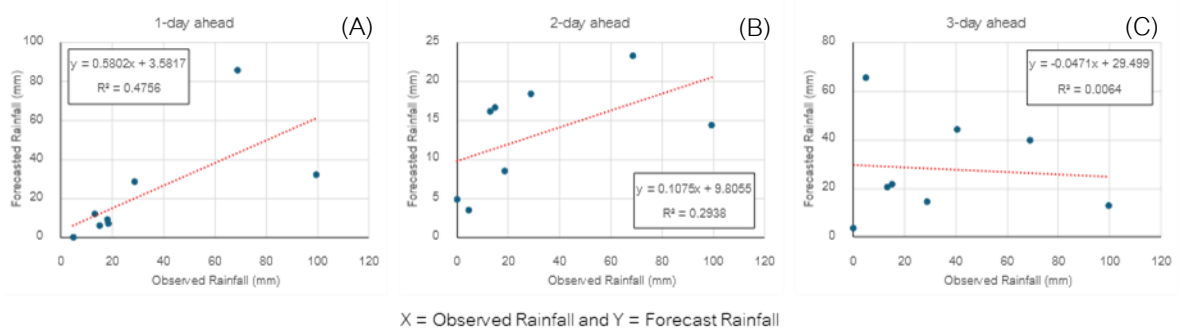


Fig. 5 Forecasted Rainfall: (A); 1-day ahead (B); 2-day ahead (C); 3-day ahead

Table 2 Percentage Error Between Observed and Forecasted Reservoir Inflow Values (%)

Time of Forecast	1-day ahead	2-day ahead	3-day ahead
15 Aug	69.88	67.55	67.28
16 Aug	4.92	30.47	133.18
17 Aug	8.89	116.52	168.38
18 Aug	95.70	44.13	57.35
19 Aug	35.15	49.10	187.57
Maximum Percentage error	95.70	116.52	187.57
Minimum Percentage error	4.92	30.47	57.35
Average Percentage error	42.91	61.55	122.75

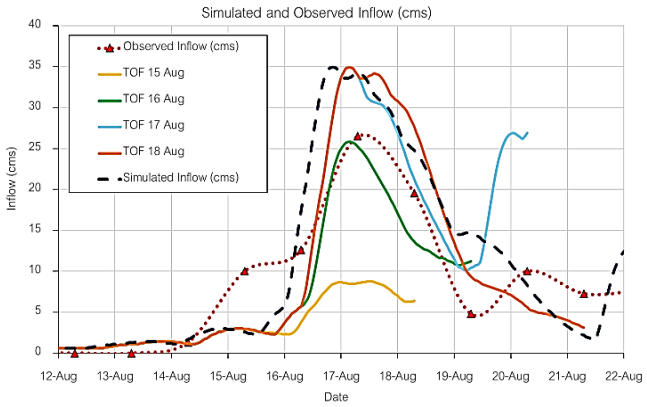


Fig. 6 Application of Numerical Weather Prediction Data at Huai Rang Reservoirwith Rainfall-Runoff Model (HEC–HMS)

สรุป

ในการศึกษานี้ได้ประยุกต์ใช้ข้อมูลพยากรณ์อากาศเชิงตัวเลข Numerical Weather Prediction (NWP) ของกรมอุตุนิยมวิทยาร่วมกับแบบจำลองน้ำฝน-น้ำท่า (HEC–HMS) เพื่อพยากรณ์ปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำห้วยแร้ง โดยทำการปรับเทียบแบบจำลองด้วยข้อมูลปีพ.ศ. 2566 และสอบเทียบด้วยข้อมูลปีพ.ศ. 2564 โดยให้ค่าพารามิเตอร์ของลุ่ม

น้ำ Curve Number (CN) คือ 25 เวลาเดินทางของน้ำท่า (Lag Time) คือ 15 ชั่วโมง (900 นาที)ผลการประเมินค่าดัชนีทางสถิติพบว่า การปรับเทียบแบบจำลองด้วยข้อมูลปีพ.ศ. 2566 มีค่า R^2 คือ 0.838 ซึ่งอยู่ในเกณฑ์ที่ดีมาก และค่า RSR คือ 0.553 ซึ่งอยู่ในเกณฑ์ที่ดี และจากการสอบเทียบแบบจำลองด้วยข้อมูลปีพ.ศ. 2564 มีค่า R^2 คือ 0.871 ซึ่งอยู่ในเกณฑ์ที่ดีมาก และค่า RSR คือ 0.681 ซึ่งอยู่ในเกณฑ์พอใช้ เนื่องจากพารามิเตอร์ที่ได้จากการปรับเทียบในปีพ.ศ. 2566 ซึ่งเป็นปีที่มีปริมาณน้ำมาก เมื่อนำไปใช้กับปีพ.ศ. 2564 จึงส่งผลให้แบบจำลองให้ค่าที่สูงกว่าข้อมูลตรวจวัดจริง เมื่อนำมาประยุกต์ใช้ข้อมูลฝนพยากรณ์ NWP ในช่วงวันที่ 15-19 สิงหาคม พ.ศ. 2568 พบว่า ความคลาดเคลื่อนของการพยากรณ์ปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาการพยากรณ์ โดยการพยากรณ์ล่วงหน้า 1 วันให้ค่าคลาดเคลื่อนเฉลี่ยต่ำที่สุด คือ ร้อยละ 42.91 ขณะที่การพยากรณ์ล่วงหน้า 2 วันและ 3 วัน มีความคลาดเคลื่อนเพิ่มสูงขึ้นตามลำดับ คือ ร้อยละ 61.55 และร้อยละ 122.75 ซึ่งหากนำไปเป็นเครื่องมือในการบริหารจัดการน้ำสำหรับอ่างเก็บน้ำขนาดเล็กและแจ้งเตือนการระบายน้ำของอ่างเก็บน้ำห้วยแร้งล่วงหน้าโดยการใช้ข้อมูลการพยากรณ์ล่วงหน้า 1 วันจะเหมาะสมมากกว่าเนื่องจากการพยากรณ์ล่วงหน้า 2 วันและ 3 วัน ยังคงมีความคลาดเคลื่อนสูง ทั้งนี้ ความแม่นยำของการพยากรณ์ปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำมีความสัมพันธ์โดยตรงกับคุณภาพของแบบจำลองที่จะนำมาประยุกต์ใช้โดยอาจต้องมีการจำลองเหตุการณ์ที่กรณีต่างๆ เพิ่มเติม เช่น ปีที่มีปริมาณน้ำปกติ หรือปีที่มีปริมาณน้ำน้อย เพื่อให้ครอบคลุมสถานการณ์มากยิ่งขึ้น และปรับแก้คุณภาพของข้อมูลฝนพยากรณ์ NWP ก่อนใช้เป็นข้อมูลนำเข้าแบบจำลอง หากแบบจำลองน้ำฝน-น้ำท่ามีความเหมาะสมและข้อมูลฝนพยากรณ์มีความแม่นยำก็ย่อมส่งผลให้ผลการคาดการณ์ปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำมีความน่าเชื่อถือและถูกต้องยิ่งขึ้น

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณสำนักงานทรัพยากรน้ำแห่งชาติ กรมชลประทาน กรมอุตุนิยมวิทยา สถาบันสารสนเทศทรัพยากรน้ำ (องค์การมหาชน) ที่ให้ความอนุเคราะห์ข้อมูลที่เกี่ยวข้องในการศึกษานี้

เอกสารอ้างอิง

กนกศรี ศรินนภากร, ชลัมภ์ อุ่นอารีย์, จรูญ เลาหเลิศชัย, ปิยธิดา เรืองรัศมี, พีรพล เวทีกูล, นครินทรา สิงหรัตน์, วินัย เชาว์วิวัฒน์, กฤตนัย ต่อศรี, นิธิวัชร์ สินพัฒน์ฐากูล. 2565. การวิจัยและพัฒนาระบบคาดการณ์ฝนเพื่อสนับสนุนการบริหารจัดการน้ำในลุ่มน้ำเจ้าพระยา. สถาบันสารสนเทศทรัพยากรน้ำ (องค์การมหาชน), กรุงเทพมหานคร.

กรมชลประทาน. 2561. คู่มือการปฏิบัติงาน (Work Manual) การใช้แบบจำลอง HEC-HMS. ส่วนอุทกวิทยา สำนักบริหารจัดการน้ำและอุทกวิทยา กรมชลประทาน, กรุงเทพมหานคร.

กรมอุตุนิยมวิทยา. 2568. การพยากรณ์อากาศด้วยคอมพิวเตอร์. https://www.tmd.go.th/info/การพยากรณ์อากาศด้วยคอมพิวเตอร์, 21 พฤศจิกายน 2568.

ไกรฤกษ์ พึ่งสาระ. 2567. การประยุกต์ใช้และผสานข้อมูลดาวเทียมเข้าสู่แบบจำลอง Weather Research and Forecasting model Data Assimilation (WRFDA). ส่วนพยากรณ์อากาศเชิงตัวเลข กองพยากรณ์อากาศ กรมอุตุนิยมวิทยา.

ณพวัฒน์ ศรีโชติ. 2567. การประยุกต์ใช้ข้อมูลฝนพยากรณ์จากแบบจำลองพยากรณ์อากาศเชิงตัวเลข Numerical Weather Prediction (NWP) เพื่อพยากรณ์สถานการณ์น้ำท่วมในลุ่มน้ำเพชรบุรี. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

สำนักงานทรัพยากรน้ำแห่งชาติ. 2566. โครงการจัดทำผังน้ำลุ่มน้ำชายฝั่งทะเลตะวันออก. สำนักงานทรัพยากรน้ำแห่งชาติ, กรุงเทพมหานคร.

Moriasi, D.N., Arnold, J.G., Van Liew, M.W., Bingner, R.L., Harmel, R.D., Veith, T.L. 2007. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. Trans. ASABE 50: 885–900. doi.org/10.13031/2013.23153

U.S. Army Corps of Engineers. 2000. Hydrologic modeling system HEC-HMS: Technical reference manual. Hydrologic Engineering Center, California.

การเปลี่ยนแปลงแนวชายฝั่งบริเวณท้ายกำแพงกันคลื่นจากการวิเคราะห์ DSAS: กรณีศึกษาหาดทรายแก้ว-บ้านบ่ออิฐ จังหวัดสงขลา

Shoreline change downdrift of a seawall using DSAS analysis: A case study of Sai Kaew Beach–Ban Bo It Beach, Songkhla Province

สตรีรัตน์ ปานเจริญ*,สมปรารถนา ฤทธิ์พริ้ง

Satrirat Panjaroen*, Sompratana Ritphring

ภาควิชาวิศวกรรมทรัพยากรน้ำ คณะวิศวกรรมศาสตร์. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

Department of Water Resources Engineering, Kasetsart University, Bangkok 10900, Thailand

*Corresponding author. E-mail address: Satrirat.pa@ku.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ประเมินการเปลี่ยนแปลงแนวชายฝั่งบริเวณท้ายน้ำ ของกำแพงกันคลื่นที่หาดทรายแก้วและหาดบ้านบ่ออิฐ จ.สงขลา โดยระบุแนวชายฝั่งรายปีจากภาพถ่ายดาวเทียม ทำการตรึงพิกัดแล้วลากเส้นตามนิยามเส้นระดับน้ำ และปรับแก้ให้อ้างอิงระดับทะเลปานกลาง จากนั้นใช้ DSAS คำนวณอัตราการเปลี่ยนแปลงด้วยวิธี End Point Rate (EPR) ผลการวิเคราะห์พบว่าโครงสร้างช่วยลดการกัดเซาะบริเวณหน้ากำแพง แต่เพิ่มการกัดเซาะเด่นชัดบริเวณท้ายน้ำ โดยมีอัตราการกัดเซาะสูงสุด -3.52 เมตร/ปี ที่หาดทรายแก้ว และ -2.94 เมตร/ปี ที่หาดบ้านบ่ออิฐ การวิเคราะห์เชิงเวลาชี้ว่าหลังเริ่มมีโครงสร้าง แนวชายฝั่งเปลี่ยนเป็นแนวโน้มกัดเซาะในทิศทางเดียวกัน โดยแนวชายฝั่งด้านท้ายน้ำร่นเข้าฝั่งสูงถึงราว 9–25 เมตร/ปี และ 10–20 เมตร/ปี ตามลำดับ ทั้งนี้กำแพงกันคลื่นแบบลาดเอียงทึบน้ำที่ยื่นออกทะเลมากกว่า ก่อผลกระทบรุนแรงกว่ากำแพงแบบหินเรียง ผลการศึกษาย้ำความจำเป็นของการวางแผน/ออกแบบที่คำนึงถึงผลกระทบด้านท้ายน้ำควบคู่กับการป้องกันเฉพาะจุด

คำสำคัญ: กำแพงกันคลื่น; การเปลี่ยนแปลงแนวชายฝั่ง; ท้ายน้ำ; ระบบการวิเคราะห์เส้นชายฝั่งดิจิตอล

Abstract

This study assesses downdrift shoreline change associated with seawalls at Sai Kaew Beach and Ban Bo It Beach, Songkhla Province. Annual shorelines were delineated from satellite imagery, georeferenced, digitized using the waterline proxy, and adjusted to mean sea level. Shoreline change rates were then calculated in the Digital Shoreline Analysis System (DSAS) using the End Point Rate (EPR) method. The results show that while the seawalls reduced erosion immediately in front of the structures, they significantly increased erosion in the downdrift zone. Maximum erosion rates reached -3.52 m/yr at Sai Kaew Beach and -2.94 m/yr at Ban Bo It Beach. Temporal analysis indicates that after the structures were introduced, shoreline behavior shifted to a consistent erosional trend, with downdrift retreat of approximately 9-25 m/yr and 10-20 m/yr, respectively. The sloping, impermeable seawall that extends farther seaward generated more severe downdrift impacts than the rubble mound seawall. These findings highlight the need for coastal protection planning and design to explicitly consider downdrift impacts alongside localized protection.

Keywords: Downdrift erosion, DSAS (Digital Shoreline Analysis System), Seawall, Shoreline change;

คำนำ

การกัดเซาะชายฝั่งเป็นปัญหากายภาพที่พบในพื้นที่ชายฝั่งของประเทศไทย โดยมีสาเหตุสำคัญจากอิทธิพลของคลื่นลมมรสุม การเปลี่ยนแปลงสมดุลตะกอนตามฤดูกาล และกระบวนการเคลื่อนที่ของตะกอนตามแนวชายฝั่งในระยะยาว ส่งผลให้หลายพื้นที่สูญเสียพื้นที่หน้าหาดและเพิ่มความเสี่ยงต่อการใช้ประโยชน์พื้นที่ชายฝั่งทั้งด้านเศรษฐกิจ สังคม และสิ่งแวดล้อม เพื่อลดความเสียหาย หน่วยงานที่เกี่ยวข้องจึงนิยมใช้ “กำแพงกันคลื่น” เป็นมาตรการหลัก เพราะสามารถลดการกัดเซาะบริเวณด้านหลังกำแพงได้ อย่างไรก็ตาม โครงสร้างดังกล่าวอาจรบกวนการเคลื่อนที่ของตะกอนตามแนวชายฝั่ง ทำให้บริเวณท้ายน้ำ เผชิญการกัดเซาะที่รุนแรงขึ้น และอาจกระทบต่อเสถียรภาพของระบบชายฝั่งในระยะยาว

จังหวัดสงขลาเป็นหนึ่งในพื้นที่ที่ประสบปัญหาการกัดเซาะชายฝั่งอย่างต่อเนื่อง โดยบางบริเวณมีอัตราการกัดเซาะระดับหลายเมตรต่อปี (Chusrinuan et al., 2009) งานวิจัยนี้เลือกพื้นที่ชายฝั่งบริเวณหาดทรายแก้ว ตำบลชิงโค อำเภอสิงหนคร และหาดบ้านบ่ออิฐ ตำบลเกาะแต้ว อำเภอเมือง จังหวัดสงขลา เป็นพื้นที่ศึกษา เนื่องจากมีการก่อสร้างกำแพงกันคลื่นที่มีรูปแบบโครงสร้างแตกต่างกัน ซึ่งอาจทำให้การตอบสนองของชายฝั่งแตกต่างกัน ทั้งด้านการเปลี่ยนแปลงแนวชายฝั่ง อัตราการกัดเซาะ และการทับถมของตะกอน โดยเฉพาะบริเวณด้านท้ายน้ำที่มักพบการกัดเซาะรุนแรงและสูญเสียพื้นที่ชายหาด สอดคล้องกับงานศึกษาที่ชี้ว่าโครงสร้างกำแพงกันคลื่นสามารถเพิ่มการสะท้อนพลังงานคลื่นและเร่งการกัดเซาะบริเวณหน้าหาดและท้ายโครงสร้าง (Pilkey and Wright, 1988; Fletcher et al., 1997) รวมถึงจำกัดความสามารถของชายหาดในการปรับตัวต่อการเปลี่ยนแปลงของคลื่นและตะกอน (Fletcher et al., 1997) ส่งผลต่อระบบนิเวศชายหาดโดยลดพื้นที่เขตน้ำขึ้นน้ำลงและลดศักยภาพการฟื้นฟูตามธรรมชาติ (Dugan et al., 2011) อีกทั้งยังมีแนวโน้มรบกวนการเคลื่อนที่ของตะกอนและทำให้พื้นที่ชายหาดลดลงอย่างต่อเนื่องในระยะยาว (Griggs, 2005; Nordstrom, 2014)

อย่างไรก็ตาม งานวิจัยที่ผ่านมาส่วนใหญ่มักศึกษาผลกระทบของกำแพงกันคลื่นในเชิงพื้นที่เฉพาะตำแหน่งหรือพิจารณาโครงสร้างเพียงรูปแบบเดียว ยังขาดการศึกษาเชิงเปรียบเทียบผลกระทบของกำแพงกันคลื่นที่มีรูปแบบแตกต่างกัน รวมถึงการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงแนวชายฝั่งในเชิงเวลาก่อนและหลังการก่อสร้าง ดังนั้น การศึกษาผลกระทบของกำแพงกันคลื่นต่อพลวัตชายฝั่งในพื้นที่หาดทรายแก้วและหาดบ้านบ่ออิฐจึงมีความสำคัญ เพื่อทำความเข้าใจรูปแบบการเปลี่ยนแปลงแนวชายฝั่งภายใต้กำแพงกันคลื่นที่มีรูปแบบแตกต่างกัน ผ่านการวิเคราะห์เชิงเปรียบเทียบในเชิงรูปแบบและเวลา โดยผลการศึกษานี้สามารถใช้เป็นข้อมูลสนับสนุนแนวทางจัดการชายฝั่งที่เหมาะสม ลดผลกระทบสะสมในระยะยาว และส่งเสริมการใช้ประโยชน์พื้นที่ชายฝั่งอย่างยั่งยืน

อุปกรณ์และวิธีการ

ในการศึกษาผลกระทบของกำแพงกันคลื่นใช้วิธีวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงชายฝั่งบริเวณพื้นที่ใกล้เคียงกับกำแพงกันคลื่น โดยมีอุปกรณ์และวิธีการ ได้แก่ 1. พื้นที่ศึกษา; 2.ข้อมูลที่ใช้; 3.การระบุแนวชายฝั่ง; และ 4.การวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงชายฝั่ง ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

พื้นที่ศึกษา

พื้นที่ศึกษาประกอบด้วยชายฝั่งสองแห่งในจังหวัดสงขลา (Fig. 1) ได้แก่ หาดทรายแก้ว ตำบลชิงโค อำเภอสิงหนคร และหาดบ้านบ่ออิฐ ตำบลเกาะแต้ว อำเภอเมือง ทั้งสองพื้นที่เป็นชายหาดทรายที่ชุมชนเข้าถึงได้ง่าย ใช้ประโยชน์เพื่อการพักผ่อนและประมงพื้นบ้าน และมีลักษณะเป็นชายหาดเปิดรับคลื่นจากอ่าวไทยตลอดปี จึงมีความไวต่อการเปลี่ยนแปลงชายฝั่งและประสบปัญหาการกัดเซาะอย่างต่อเนื่อง

หาดทรายแก้ว พื้นที่ศึกษาครอบคลุมแนวชายฝั่งตั้งแต่บริเวณหน้ากำแพงกันคลื่นแบบลาดเอียง ไปถึงด้านท้ายน้ำทางทิศเหนือระยะทางประมาณ 550 เมตร ชายหาดมีความกว้างเฉลี่ย 10–15 เมตร จากการสำรวจภาคสนามพบการกัดเซาะรุนแรงเด่นชัดบริเวณท้ายน้ำทางทิศเหนือของโครงสร้างกำแพงกันคลื่น ส่งผลต่อโครงสร้างพื้นฐานริมทะเล โดยเฉพาะถนนเลียบชายหาดที่เกิดการทรุดตัว แตกร้าว และพังทลาย รวมถึงพบเศษหินและคอนกรีตกระจัดกระจายตามแนวชายฝั่ง

หาดบ้านบ่ออิฐ ชายหาดมีความกว้างเฉลี่ย 20–28 เมตร พื้นที่ศึกษาครอบคลุมตั้งแต่หน้ากำแพงกันคลื่นแบบหินเรียง ไปถึงด้านท้ายน้ำทางทิศเหนือระยะทางประมาณ 510 เมตร พื้นที่ริมฝั่งมีแนวสนและพืชพรรณชายฝั่งกระจายเป็นช่วง ๆ จากการสำรวจภาคสนามพบการกัดเซาะต่อเนื่อง โดยเฉพาะบริเวณท้ายน้ำทางทิศเหนือของโครงสร้างกำแพงกันคลื่น พบต้นสนถูกกัดเซาะจนรากโผล่และล้มหลายต้น พบท่อขนาดใหญ่โผล่เหนือผิวทราย และมีกองหินทิ้งกระจัดกระจาย สะท้อนถึงความรุนแรงของการกัดเซาะในพื้นที่อย่างชัดเจน

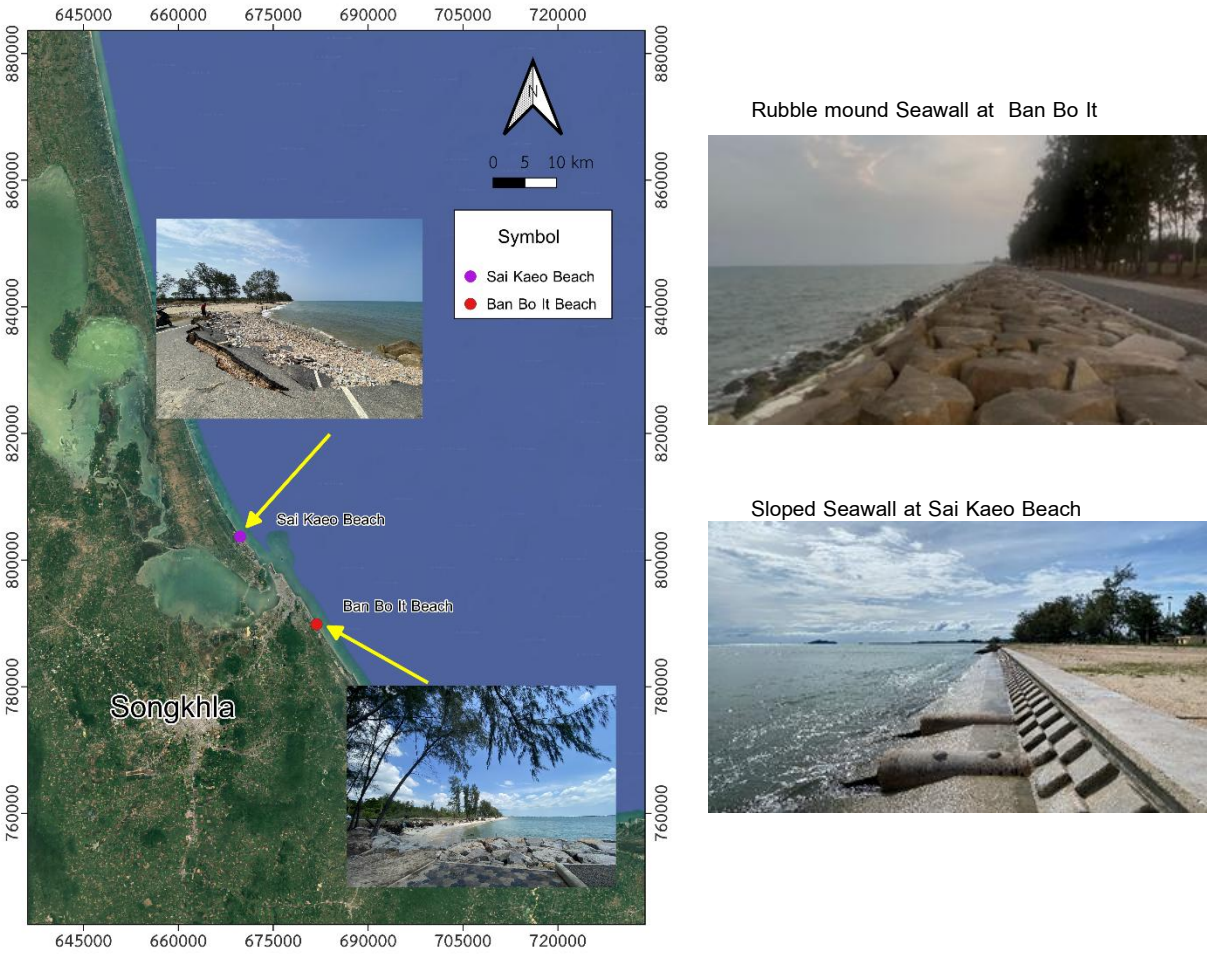


Fig. 1 Study area

ข้อมูลที่ใช้

ข้อมูลที่ใช้นี้อาศัยข้อมูลปฐมภูมิจากการสำรวจภาคสนาม ร่วมกับข้อมูลทุติยภูมิที่ได้จากหลายแหล่งข้อมูล ดัง Table 1 โดยมีรายละเอียดดังนี้

Table 1 Data

Data Used	Detail	Data Source
Satellite Imagery	Sai Kaeo Beach: 2004 – 2024 Ban Bo It Beach: 2006 – 2024 See more in Table 2	Google Earth
Coordinates and Elevation	Real-Time Kinematic (RTK)	Field Survey
Beach Slope	Angle Meter	Field Survey
Water Level	Automatic water level gauge at Songkhla, Pak Phanang, and Pattani station	Marine Department

Table 2 Satellite Image Data

Sai Kaeo Beach		Ban Bo It Beach	
Year	Month	Year	Month
2004	DEC	2006	MAR
2007	OCT	2007	OCT
2013	MAR	2011	JUL
2014	APR	2013	MAR
2015	JAN,MAR	2014	DEC
2015	APR	2015	JAN,MAR,APR,DEC
2017	MAR,DEC	2017	FEB,MAR,JUL
2018	APR	2018	JAN,MAR,APR,DEC
2019	JUL	2019	FEB,MAR,APR,NOV
2020	FEB	2020	APR,MAY,JUL,OCT
2022	APR	2021	APR,SEP,OCT,NOV
2022	AUG	2022	OCT
2023	JUN	2023	MAR
2024	FEB	2024	MAR

วิธีการ

วิธีการ ที่ใช้ในการศึกษาประกอบด้วย 1. การระบุแนวชายฝั่ง 2. การวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงชายฝั่ง โดยมีรายละเอียดดังนี้

การระบุแนวชายฝั่ง

การระบุแนวชายฝั่งเป็นขั้นตอนสำคัญในการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงชายฝั่งและประเมินผลกระทบจากโครงสร้างป้องกันชายฝั่ง การเปรียบเทียบแนวชายฝั่งในช่วงเวลาต่าง ๆ ทำให้สามารถมองเห็นรูปแบบของการเปลี่ยนแปลงได้อย่างเป็นระบบ ในการศึกษานี้ ได้ระบุแนวชายฝั่งของแต่ละปีจากภาพถ่ายดาวเทียมของ Google Earth โดยทำการตรึงพิกัดภาพในโปรแกรม ArcGIS เวอร์ชั่น 10.5 ภายใต้ระบบพิกัด WGS84 (UTM Zone 47N) เพื่อให้ได้พิกัดเชิงภูมิศาสตร์ที่แม่นยำ จากนั้นจึงลากเส้นแนวชายฝั่งตามนิยามเส้นระดับน้ำ (Waterline) ซึ่งเป็นแนวที่สามารถสังเกตได้ชัดเจนในภาพถ่ายดาวเทียมและมีความสอดคล้องกับการเปลี่ยนแปลงเชิงกายภาพของพื้นที่ชายฝั่ง อย่างไรก็ตาม การใช้ภาพถ่ายดาวเทียมจาก Google Earth มีข้อจำกัดด้านข้อมูล เนื่องจากไม่สามารถทราบระดับน้ำขึ้น–น้ำลงในช่วงเวลาที่

บันทึกภาพได้โดยตรง และข้อมูลภาพถ่ายในแต่ละพื้นที่และช่วงเวลามีความไม่สม่ำเสมอ ซึ่งอาจส่งผลต่อความแม่นยำในการกำหนดตำแหน่งแนวชายฝั่ง จากนั้นจึงปรับแก้ให้สอดคล้องกับระดับทะเลปานกลาง (Mean Sea Level: MSL) (ภัทรกร และสมปรารถนา, 2562) เพื่อให้การเปรียบเทียบระหว่างปีมีความถูกต้อง

การวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงชายฝั่ง

การวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงชายฝั่งในการศึกษานี้ดำเนินการโดยใช้โปรแกรม Digital Shoreline Analysis System (DSAS) ซึ่งเป็นส่วนขยายของ ArcGIS ที่พัฒนาโดย U.S. Geological Survey (USGS) สำหรับประเมินการเปลี่ยนแปลงแนวชายฝั่งเชิงปริมาณ โปรแกรมดังกล่าวทำงานโดยสร้างแนว Transect ที่ตั้งฉากกับเส้นอ้างอิง (baseline) เพื่อใช้วัดตำแหน่งแนวชายฝั่งในแต่ละปีอย่างเป็นระบบและเชื่อถือได้ จากนั้นกำหนดระยะห่าง Transect เป็น 15 เมตร สำหรับทั้งสองพื้นที่ โดยแนวชายฝั่งที่ใช้เพื่อการวิเคราะห์ คือแนวชายฝั่งที่ถูกปรับแก้ให้เป็นนิยามเดียวกันที่อ้างอิงจากระดับทะเลปานกลางมาแล้ว จากขั้นตอน 3.1 การวิเคราะห์ในงานนี้ประกอบด้วยสองส่วนหลัก (1) อัตราการเปลี่ยนแปลงแนวชายฝั่ง ซึ่งได้จากค่า End Point Rate (EPR) ซึ่งคำนวณจากการเคลื่อนที่สุทธิของแนวชายฝั่งระหว่างปีแรกและปีสุดท้าย หารด้วยช่วงเวลาที่ศึกษา วิธีการนี้เหมาะสมเนื่องจากต้องการประเมินแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงจากอดีตถึงปัจจุบันและเพื่อแสดงอัตราการกัดเซาะหรือการทับถมของชายฝั่งได้อย่างชัดเจน (2) การวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงชายฝั่งเชิงเวลา ใช้เพื่อวิเคราะห์ตำแหน่งแนวชายฝั่งในแต่ละช่วงเวลาบนแนว transect ที่เป็นตัวแทนของพื้นที่ศึกษาเพื่อดูการเปลี่ยนแปลงเส้นแนวชายฝั่งในช่วงเวลาต่าง ๆ

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

ผลการวิเคราะห์ประกอบด้วยสองส่วนหลัก ได้แก่ 1. อัตราการเปลี่ยนแปลงชายฝั่ง 2. การเปลี่ยนแปลงตำแหน่งชายฝั่งเชิงเวลา ผลการวิเคราะห์ทั้งสองส่วนช่วยให้เข้าใจพลวัตชายฝั่งโดยรวม และชี้ให้เห็นผลกระทบของกำแพงกันคลื่นที่ส่งผลต่อพื้นที่ชายฝั่งบริเวณข้างเคียงได้อย่างชัดเจน

1.อัตราการเปลี่ยนแปลงชายฝั่ง

ผลการวิเคราะห์อัตราการเปลี่ยนแปลงแนวชายฝั่งของชายหาดทรายแก้ว (Fig. 2) พบว่า แนวชายฝั่งบริเวณท้ายน้ำทางด้านทิศเหนือของกำแพงกันคลื่นในช่วงประมาณ 0–550 เมตร เกิดการกัดเซาะต่อเนื่อง โดยเฉพาะช่วง 465–580 เมตร ซึ่งเป็นพื้นที่ที่มีการกัดเซาะรุนแรงที่สุด มีอัตราการกัดเซาะสูงถึง -3.52 เมตรต่อปี หรือ 83 เมตร ในช่วงปี 2017-2025 ความรุนแรงดังกล่าวส่งผลให้ พื้นที่ใช้ประโยชน์บริเวณชายฝั่งได้รับความเสียหาย ถนนริมชายหาดเกิดการทรุดตัว ผิวคอนกรีตแตกร้าว และไหล่ทางถูกกัดเซาะเสียหาย ขณะที่ช่วงด้านเหนือน้ำของกำแพงกันคลื่นตั้งแต่ระยะประมาณ 615 เมตร มีอัตราการกัดเซาะลดลงอย่างชัดเจน เนื่องจากพื้นที่ดังกล่าวอยู่ในตำแหน่งหน้ากำแพงกันคลื่น โดยบริเวณระยะประมาณ 685 เมตร ซึ่งสอดคล้องกับตำแหน่งหน้ากำแพงกันคลื่นเป็นจุดที่มีอัตราการกัดเซาะต่ำที่สุด มีค่าเพียง -0.02 เมตรต่อปี โดยช่วงด้านท้ายน้ำทางด้านทิศเหนือของกำแพงอัตราการกัดเซาะเฉลี่ยเท่ากับ -2.08 เมตรต่อปี สะท้อนให้เห็นถึงการสูญเสียพื้นที่ชายฝั่งที่เกิดจากกำแพงกันคลื่นอย่างชัดเจน

ผลการวิเคราะห์อัตราการเปลี่ยนแปลงแนวชายฝั่งของพื้นที่หาดบ้านบ่ออิฐ (Fig. 3) แสดงให้เห็นรูปแบบการเปลี่ยนแปลงที่สอดคล้องกับชายหาดทรายแก้ว ในช่วงระยะประมาณ 0–300 เมตร พบการกัดเซาะในระดับปานกลาง ประมาณ -1.0 ถึง -2.0 เมตรต่อปี ก่อนจะพบการกัดเซาะเพิ่มขึ้นอย่างเด่นชัดในช่วงระยะประมาณ 300–520 เมตร ซึ่งเป็นบริเวณท้ายน้ำทางด้านทิศเหนือของกำแพงกันคลื่นแบบหินเรียง และเป็นช่วงที่เกิดการกัดเซาะรุนแรงที่สุด โดยมีอัตราการ

สูญเสียชายฝั่งสูงสุดที่ -2.94 เมตรต่อปี ที่ระยะ 465 เมตร หรือ 69 เมตร ในช่วงปี 2011–2025 สะท้อนถึงผลกระทบของกำแพงกันคลื่นที่รบกวนสมดุลการเคลื่อนที่ของตะกอนและก่อให้เกิดการสูญเสียพื้นที่ชายฝั่งด้านท้ายน้ำทางด้านทิศเหนือของกำแพงกันคลื่น ในทางตรงกันข้าม พบค่าการกัดเซาะต่ำสุดเพียง –0.12 เมตรต่อปี ที่ระยะประมาณ 675 เมตร เนื่องจากเป็นบริเวณหน้ากำแพงกันคลื่น จึงส่งผลให้การกัดเซาะเกิดขึ้นในระดับต่ำกว่าบริเวณอื่นอย่างชัดเจน เมื่อพิจารณาบริเวณท้ายน้ำด้านทิศเหนือของกำแพง พบว่าอัตราการกัดเซาะเฉลี่ยอยู่ที่ –1.96 เมตรต่อปี ส่งผลให้เกิดการสูญเสียพื้นที่ชายฝั่งอย่างชัดเจน โดยเฉพาะในบริเวณท้ายน้ำด้านทิศเหนือของกำแพงกันคลื่น ซึ่งยังคงเผชิญกับการกัดเซาะอย่างมีนัยสำคัญ

เมื่อเปรียบเทียบลักษณะการเปลี่ยนแปลงแนวชายฝั่งของทั้งหาดทรายแก้วและหาดบ้านบ่ออิฐ พบว่าโครงสร้างป้องกันคลื่นทั้งแบบลาดเอียงและแบบหินเรียงต่างให้ผลกระทบในทิศทางเดียวกัน กล่าวคือ แม้โครงสร้างจะช่วยเสริมเสถียรภาพของแนวชายฝั่งบริเวณหน้ากำแพงได้อย่างมีประสิทธิภาพ แต่การมีอยู่ของกำแพงได้ส่งผลให้กระบวนการเคลื่อนที่ของตะกอนตามธรรมชาติถูกรบกวน ทำให้การเคลื่อนย้ายและการสะสมตัวของตะกอนเปลี่ยนแปลงไปจากสภาพเดิม และก่อให้เกิดการกัดเซาะรุนแรงบริเวณด้านท้ายน้ำทางด้านทิศเหนือของกำแพงกันคลื่นอย่างเด่นชัด นอกจากนี้ ความแตกต่างของรูปแบบกำแพงกันคลื่นและระยะการยื่นออกสู่ทะเลของกำแพงกันคลื่นอาจเป็นปัจจัยที่สำคัญต่อระดับผลกระทบ โดยกำแพงกันคลื่นแบบลาดเอียงซึ่งเป็นโครงสร้างผิวเรียบเทคอนกรีตทึบน้ำ ที่มีระยะฐานโครงสร้างยื่นออกสู่ทะเลมากกว่าประมาณ 28 เมตร จึงทำให้บริเวณท้ายน้ำเกิดการกัดเซาะรุนแรงที่สุด มีค่าการกัดเซาะสูงถึง –3.52 เมตรต่อปี ขณะที่กำแพงกันคลื่นแบบหินเรียงมีระยะของฐานโครงสร้างยื่นออกสู่ทะเลเพียง 14 เมตร รวมถึงมีพื้นผิวขรุขระและไม่ทึบน้ำช่วยลดทอนพลังงานคลื่นได้ดีกว่า ส่งผลให้ค่าการกัดเซาะสูงสุดอยู่ที่ –2.94 เมตรต่อปี ซึ่งมีความรุนแรงน้อยกว่ากำแพงกันคลื่นแบบลาดเอียง

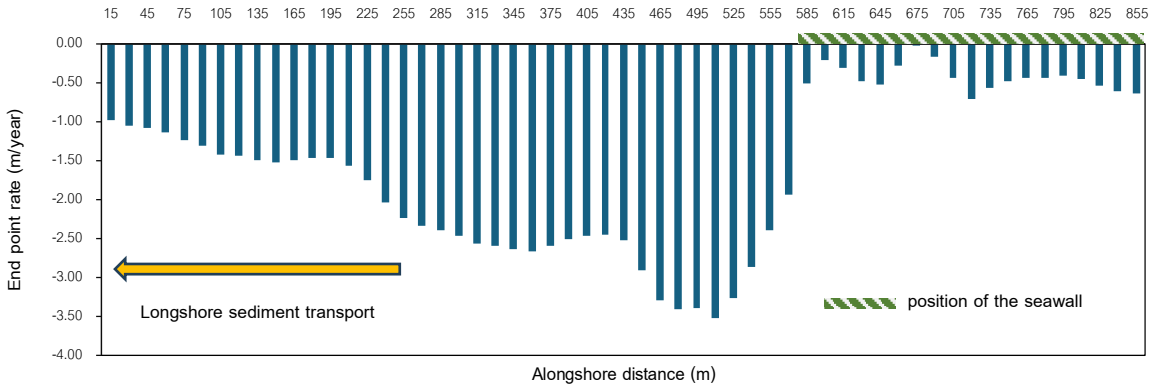


Fig. 2 Relationship between end point rate and alongshore distance at Sai Kaeo Beach

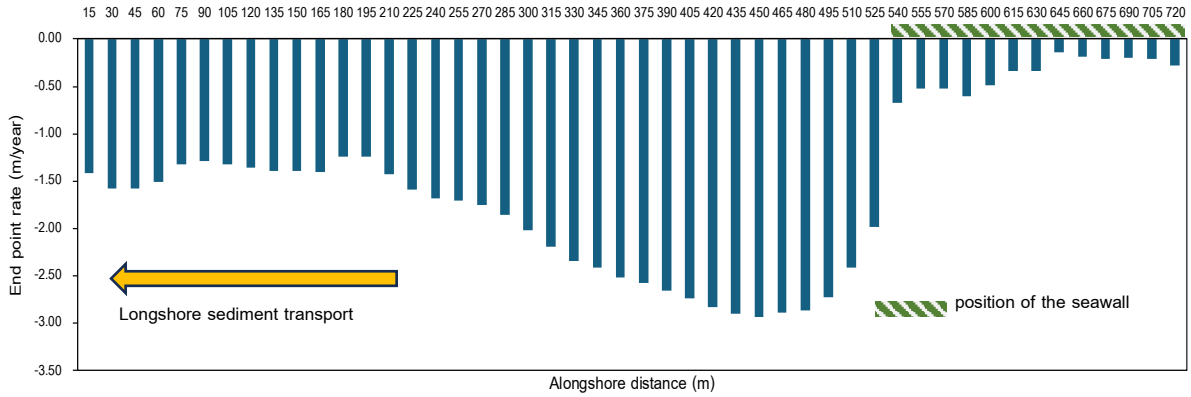


Fig. 3 Relationship between end point rate and alongshore distance at Ban Bo-It Beach

2.การเปลี่ยนแปลงตำแหน่งชายฝั่งเชิงเวลา

ผลการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงตำแหน่งชายฝั่งเชิงเวลา (Temporal Change) ในช่วงปี 2004–2025 ของชายหาดทรายแก้ว (Fig. 4) แสดงให้เห็นว่า แนวชายฝั่งในทุก transect มีการแปรผันสลับระหว่างการทับถมและการกัดเซาะตามฤดูกาลอย่างต่อเนื่อง จนกระทั่งปี 2022 ซึ่งเป็นช่วงที่เริ่มพบกำแพงกันคลื่นแบบลาดเอียงจากภาพถ่ายดาวเทียมได้กลายเป็นจุดเปลี่ยนสำคัญของพลวัตชายฝั่ง โดยค่าตำแหน่งชายฝั่งในทุก transect ทุกแนวประชิดเข้าหาฝั่งในทิศทางเดียวกันซึ่งสะท้อนถึงการกัดเซาะที่ทำให้แนวชายฝั่งกัดเซาะและเคลื่อนเข้าใกล้ชายฝั่งมากขึ้นในลักษณะต่อเนื่อง จาก (Fig. 4) พบว่าแนวชายฝั่งมีการกัดเซาะพร้อมกันในทุก transect ตั้งแต่ปี 2022–2023 โดยเฉพาะ transect ที่ตั้งอยู่บริเวณท้ายน้ำทางด้านทิศเหนือของกำแพงกันคลื่นมีการกัดเซาะเด่นชัดที่สุด หลายจุดมีการร่นเข้าฝั่งราว 9–25 เมตรภายในหนึ่งปี ซึ่งเป็นการเปลี่ยนแปลงที่มากที่สุดตลอดระยะเวลาการศึกษา ทั้งแนวโน้มกัดเซาะตัวยังดำเนินต่อเนื่องไปจนถึงปี 2025 สะท้อนลักษณะที่แตกต่างจากช่วงก่อนมีการก่อสร้างกำแพงกันคลื่นอย่างชัดเจน

พื้นที่บ้านบ่ออิฐในช่วงปี 2006–2025 (Fig. 5) มีรูปแบบการเปลี่ยนแปลงของแนวชายฝั่งที่สลับระหว่างการทับถมและการกัดเซาะตามฤดูกาลในช่วงก่อนปี 2020 โดยตำแหน่งชายฝั่งค่อย ๆ ลดลงแบบต่อเนื่อง แต่ยังไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงฉับพลัน อย่างไรก็ตาม ในช่วงปี 2020–2021 แนวชายฝั่งของทุก transect มีการกัดเซาะอย่างชัดเจน โดยหลายตำแหน่งสูญเสียระยะชายฝั่งประมาณ 10–20 เมตรภายในหนึ่งปี ซึ่งสอดคล้องกับช่วงเวลาที่เริ่มพบกำแพงกันคลื่นแบบหินเรียงในปี 2021 จากภาพถ่ายดาวเทียม แสดงให้เห็นว่าการก่อสร้างกำแพงกันคลื่นเริ่มรบกวนการเคลื่อนที่ของตะกอนและส่งผลให้เกิดการกัดเซาะรุนแรงขึ้นทันทีในบริเวณท้ายน้ำของโครงสร้าง เนื่องจากกำแพงกันคลื่นทำหน้าที่กีดขวางการเคลื่อนที่ของตะกอนตามแนวชายฝั่ง ส่งผลให้พื้นที่ด้านท้ายน้ำทางทิศเหนือน้ำเกิดภาวะขาดตะกอนและถูกคลื่นกัดเซาะรวดเร็วกว่าพื้นที่อื่น หลังจากนั้นในปี 2022 แนวชายฝั่งของหลาย transect มีค่าตำแหน่งเพิ่มขึ้นประมาณ 5–10 เมตร เมื่อเทียบกับปี 2021 สอดคล้องกับรายงานของโครงการฟื้นฟูโดยเทคโนโลยี Derosion Lattice ที่ช่วยลดพลังงานคลื่นและส่งเสริมการตกตะกอน ส่งผลให้พื้นที่บางส่วนฟื้นตัวจากการกัดเซาะรุนแรงในปีก่อน (ReShore Technologies, 2022) อย่างไรก็ตาม แม้จะมีแนวโน้มฟื้นตัวบางช่วง แต่ค่าตำแหน่งชายฝั่งในปี 2023–2025 ยังไม่กลับคืนสภาพเหมือนก่อนการก่อสร้างกำแพง ซึ่งแสดงให้เห็นว่าผลของกำแพงกันคลื่นยังคงมีอิทธิพลมากกว่าผลการฟื้นฟูในระยะยาว

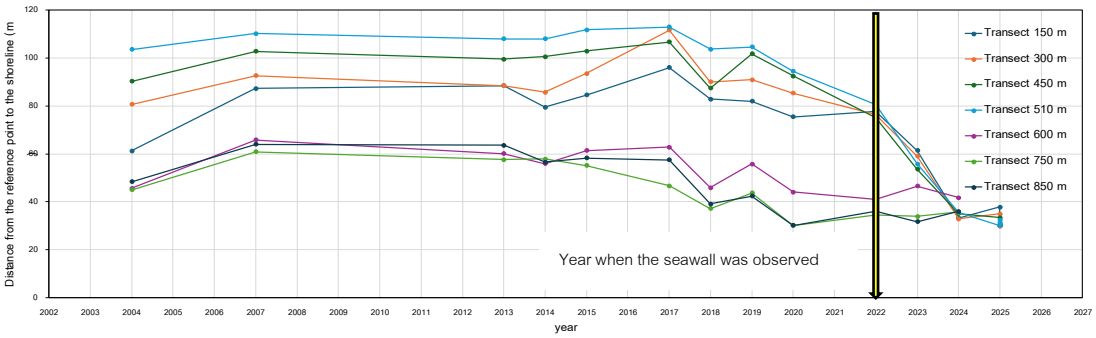


Fig. 4 Temporal Change at Sai Kaeo Beach

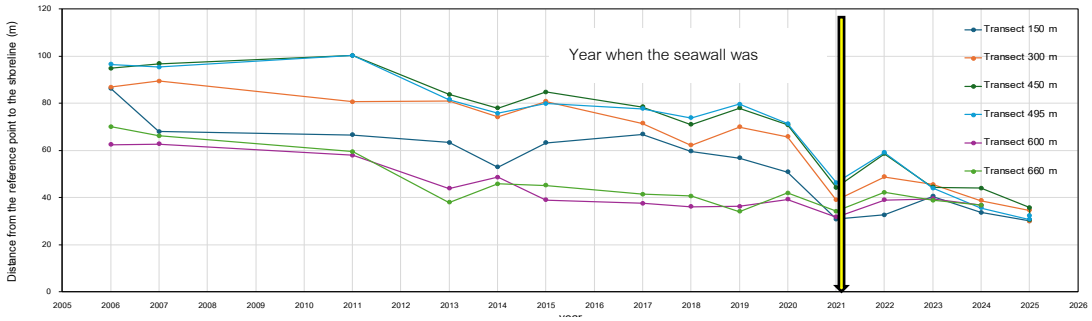


Fig. 5 Temporal Change at Ban Bo-It Beach

สรุป

การศึกษานี้วิเคราะห์ผลกระทบของกำแพงกันคลื่นโดยพิจารณา (1) อัตราการเปลี่ยนแปลงแนวชายฝั่ง และ (2) การเปลี่ยนแปลงตำแหน่งแนวชายฝั่งเชิงเวลา เพื่อประเมินผลกระทบต่อพื้นที่ข้างเคียง โดยใช้หาดทรายแก้วและหาดบ้านบ่ออิฐ จังหวัดสงขลา เป็นกรณีศึกษา

ผลการวิเคราะห์ชี้ว่า แม้กำแพงกันคลื่นช่วยลดการกัดเซาะบริเวณหน้ากำแพงได้ แต่กลับเพิ่มการกัดเซาะอย่างชัดเจนในบริเวณท้ายน้ำทางทิศเหนือของโครงสร้างทั้งสองพื้นที่ โดยหาดทรายแก้วมีอัตราการกัดเซาะสูงสุด –3.52 เมตร/ปี และหาดบ้านบ่ออิฐ –2.94 เมตร/ปี สะท้อนว่ากำแพงกันคลื่นมีอิทธิพลต่อการเคลื่อนที่ของตะกอนตามแนวชายฝั่ง ทำให้ท้ายน้ำสูญเสียพื้นที่ชายฝั่งเด่นชัด และเมื่อเปรียบเทียบลักษณะโครงสร้าง พบว่ากำแพงกันคลื่นแบบลาดเอียงที่มีผิวเรียบลักษณะทึบน้ำ และยื่นออกสู่ทะเลมากกว่า มีแนวโน้มสะท้อนพลังงานคลื่นกลับสู่ทะเลในระดับสูง ส่งผลให้การกัดเซาะท้ายน้ำมีความรุนแรงมากกว่ากำแพงกันคลื่นแบบหินเรียงอย่างชัดเจน

ส่วนกำแพงกันคลื่นแบบหินเรียงซึ่งมีผิวขรุขระและโครงสร้างไม่ทึบน้ำนั้นสลายพลังงานคลื่นได้ดีกว่า จึงส่งผลกระทบต่อพื้นที่ข้างเคียงน้อยกว่าทั้งยังเป็นโครงสร้างที่มีต้นทุนการก่อสร้างต่ำกว่า และมีความสอดคล้องกับกระบวนการธรรมชาติของชายฝั่งมากกว่าโครงสร้างคอนกรีตทึบน้ำ

ผลการวิเคราะห์เชิงเวลายืนยันแนวโน้มดังกล่าว โดยก่อนก่อสร้างแนวชายฝั่งมีการสลับทับถมกัดเซาะตามฤดูกาล แต่หลังเริ่มปรากฏโครงสร้างจากภาพถ่ายดาวเทียม แนวชายฝั่งในทุกแนวตัดมีแนวโน้มกัดเซาะไปในทิศทางเดียวกัน โดยเฉพาะท้ายน้ำทางทิศเหนือซึ่งกัดเซาะต่อเนื่องและรุนแรงที่สุด แม้หาดบ้านบ่ออิฐมีสัญญาณฟื้นตัวบางช่วงหลังการฟื้นฟูชายฝั่ง แต่โดยรวมยังไม่กลับสู่สภาพก่อนก่อสร้างได้

โดยสรุปแล้ว กำแพงกันคลื่นนั้นมีผลสองด้าน คือเพิ่มเสถียรภาพเฉพาะบริเวณด้านหลังกำแพง แต่เร่งการกัดเซาะในพื้นที่ข้างเคียง โดยเฉพาะท้ายน้ำ การวางแผนและออกแบบในอนาคตจึงควรพิจารณาลักษณะโครงสร้างควบคู่กันไปกับการวางแผนในระดับพื้นที่ชายฝั่งโดยคำนึงถึงการเคลื่อนที่ของตะกอน และผลกระทบต่อพื้นที่ใกล้เคียง เพื่อลดปัญหาการแก้ไขเฉพาะตำแหน่งที่อาจก่อให้เกิดผลกระทบต่อพื้นที่ข้างเคียงในระยะยาว

เอกสารอ้างอิง

ภัทรกร นิธินรางกูร, สมปรารถนา ฤทธิ์พริ้ง. 2562. การศึกษาเปรียบเทียบวิธีการระบุแนวชายฝั่งทะเล. ในการประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 24. คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. 2106–2113.

Chusrinuan, N., Tanavud, C., Yongchalermchai, C. 2009. Impacts of shoreline erosion on coastal ecosystems in Songkhla Province, Thailand. Songklanakarin J. Sci. Technol. 31: 237–245.

Dugan, J.E., Airoldi, L., Chapman, M.G., Walker, S.J., Schlacher, T. 2011. Estuarine and coastal structures: Environmental effects. In E. Wolanski, D. McLusky (Eds.), Treatise on estuarine and coastal science (Vol. 8). Elsevier. 17–41. doi.org/10.1016/B978-0-12-374711-2.00802-0

Fletcher, C.H., Mullane, R.A., Richmond, B.M. 1997. Beach loss along armored shorelines on Oahu, Hawaiian Islands. J. Coast. Res. 13: 209–215.

Griggs, G. 2005. The impacts of coastal armoring. Shore Beach 73: 13–22.

Nordstrom, K.F. 2014. Living with shore protection structures: A review. Estuar. Coast. Shelf Sci. 150: 11–23. doi.org/10.1016/j.ecss.2013.11.003

Pilkey, O.H., Wright, H.L. 1988. Seawalls versus beaches. J. Coast. Res. Spec. Issue 4: 41–64.

ReShore Technologies. 2022. Derosion Lattice™ coastal restoration project report. ReShore Technologies Inc.

การบริหารจัดการน้ำโครงการพัฒนาลุ่มน้ำคลองวังโตนด จังหวัดจันทบุรี

Water management of the Khlong Wang Tanode Basin development project, Chanthaburi Province.

ณัฏฐนันท์ พูลสวัสดิ์*, จิระวัฒน์ กณะสุต, ดนย์ปภพ มะณี

Nattanan Poolsawat*, Jirawat Kanasut, Donpapob Manee

ภาควิชาวิศวกรรมทรัพยากรน้ำ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ10900

Department Water Resources Engineering, Faculty of Engineering, Kasetsart University, Bangkok 10900, Thailand

*Corresponding author. E-mail address: nattanan.poo@ku.th

บทคัดย่อ

โครงการพัฒนาลุ่มน้ำคลองวังโตนด จังหวัดจันทบุรี มีพื้นที่ชลประทานทั้งหมด 249,700 ไร่ มักจะประสบปัญหาภัยแล้งเป็นประจำ เนื่องจากแหล่งกักเก็บน้ำในพื้นที่ไม่เพียงพอต่อความต้องการใช้น้ำเพื่อการเกษตร และการใช้น้ำเพื่อการอุปโภค บริโภค การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อการจัดสรรน้ำของโครงการพัฒนาลุ่มน้ำคลองวังโตนด โดยประยุกต์ใช้แบบจำลอง WUSMO ในการวิเคราะห์ความต้องการใช้น้ำด้านการเพาะปลูกของพืช ได้แก่ ข้าว ทุเรียน และมันสำปะหลัง และแบบจำลอง MIKE Hydro Basin ในการจำลองสมดุลน้ำของลุ่มน้ำคลองวังโตนด ช่วงปี พ.ศ. 2537–2566 พบว่าอ่างเก็บน้ำคลองประแกด อ่างเก็บน้ำคลองพะวาใหญ่ อ่างเก็บน้ำคลองหางแมว และอ่างเก็บน้ำคลองวังโตนด มีปริมาณน้ำต้นทุนเพียงพอในการจัดสรรน้ำ อุปโภค - บริโภค ชลประทาน และรักษาระบบนิเวศท้ายน้ำ โดยไม่เกิดการขาดแคลนน้ำตามเกณฑ์การจัดสรรน้ำของกรมชลประทาน

คำสำคัญ: การบริหารจัดการน้ำ, คลองวังโตนด, จังหวัดจันทบุรี, สมดุลน้ำ

Abstract

The Khlong Wang Tanode Basin Development Project in Chanthaburi Province covers 249,700 rai of irrigated. The area frequently experiences drought due to insufficient water storage capacity relative to agricultural water demand as well as domestic consumption needs. This study aims to allocate water resources within the Khlong Wang Tanode Basin Development Project. By applying the WUSMO model to analyze agricultural water demand for rice, durian, and cassava, and the MIKE Hydro Basin model to simulate the water balance of the Wang Tanode Basin during the period 1994–2023, it was found that Khlong Prakaed Reservoir, Khlong Phawa Yai Reservoir, Khlong Hang Maeo Reservoir, and Khlong Wang Tanode Reservoir have sufficient available water resources to meet domestic, irrigation, and downstream environmental flow requirements without causing water shortages, in accordance with the water allocation criteria of the Royal Irrigation Department.

Keywords: Chanthaburi Province, MIKE Hydro Basin, Water balance

คำนำ

ลุ่มน้ำคลองวังโตนด เป็นลุ่มน้ำย่อยในลุ่มน้ำชายฝั่งทะเลตะวันออก โดยมักจะประสบปัญหาภัยแล้งเป็นประจำ เกษตรกรในจังหวัดจันทบุรีจึงร้องขอให้มีการพัฒนาแหล่งเก็บกักน้ำต้นทุนขนาดใหญ่สำหรับใช้ในการเกษตร และบรรเทาปัญหาการเกิดอุทกภัย กรมชลประทานจึงดำเนินการศึกษาวางแผนหลักการพัฒนาแหล่งน้ำในลุ่มน้ำคลองวังโตนดแล้วเสร็จ เมื่อปี พ.ศ.2538 ผลการศึกษาเสนอแนะให้ก่อสร้างอ่างเก็บน้ำขนาดกลาง 4 แห่ง ประกอบด้วย อ่างเก็บน้ำคลองประแกด อ่างเก็บน้ำคลองพะวาใหญ่ อ่างเก็บน้ำคลองหางแมว และอ่างเก็บน้ำคลองวังโตนด มีพื้นที่ชลประทาน 46,000, 54,000 62,000 และ 87,000 ไร่ ตามลำดับ โดยการศึกษานี้ใช้แบบจำลอง WUSMO สำหรับการวิเคราะห์ปริมาณความต้องการใช้น้ำชลประทาน และแบบจำลอง MIKE Hydro Basin สำหรับวิเคราะห์สมดุลน้ำในโครงการพัฒนาลุ่มน้ำคลองวังโตนด ต่อมามีการจัดตั้งเขตเศรษฐกิจภาคตะวันออก (Eastern Economic Corridor : EEC) โดยครอบคลุม 3 จังหวัด ได้แก่ จังหวัดชลบุรี จังหวัดฉะเชิงเทรา และจังหวัดระยอง โดยทางกรมชลประทานได้จัดทำ MOU แบ่งปันน้ำจากลุ่มน้ำคลองวังโตนดช่วยแก้ปัญหาภัยแล้งในพื้นที่ EEC แต่ยังไม่ได้ทำการศึกษาการจัดสรรน้ำของพื้นที่ชลประทานของอ่างเก็บน้ำคลองประแกด อ่างเก็บน้ำคลองพะวาใหญ่ อ่างเก็บน้ำคลองหางแมว และอ่างเก็บน้ำคลองวังโตนด ให้เพียงพอก่อนที่จะส่งน้ำไปช่วยเขตเศรษฐกิจภาคตะวันออก (EEC)

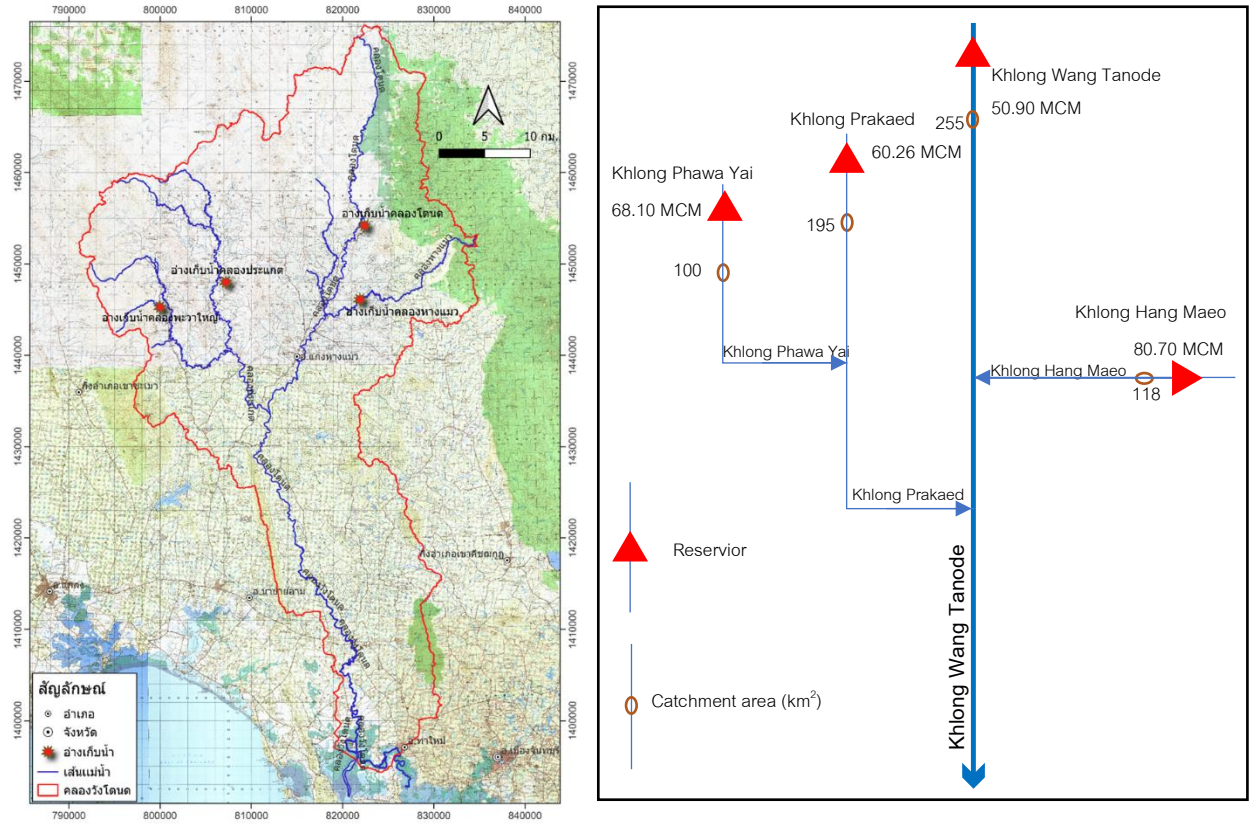


Fig. 1 Khlong Wang Tanode Basin and river system of the Khlong Wang Tanode Basin

อุปกรณ์และวิธีการ

แบบจำลองที่ใช้

แบบจำลอง WUSMO

แบบจำลอง MIKE Hydro Basin

วิธีการ

1. การรวมข้อมูล

ในการศึกษานี้ได้ทำการรวบรวมข้อมูลเพื่อใช้ในการจัดทำแบบจำลอง จะต้องทำการรวบรวมข้อมูลจากหน่วยงานที่เกี่ยวข้อง ได้แก่ กรมชลประทาน กรมอุตุนิยมวิทยา กรมพัฒนาที่ดิน กรมแผนที่ทหาร และหน่วยงานอื่นๆ หลังจากนั้นได้ทำการตรวจสอบความน่าเชื่อถือของข้อมูลก่อน เพื่อให้แบบจำลองที่จะจัดทำขึ้นมีความถูกต้องและสามารถนำไปใช้งานได้ ข้อมูลที่จำเป็นในการจัดทำแบบจำลองมีรายละเอียดดังนี้

1.1 แผนที่มาตราส่วน 1: 50,000 ของกรมแผนที่ทหาร ครอบคลุมพื้นที่ลุ่มน้ำคลองวังโตนด เพื่อใช้ประกอบการพิจารณา

1.2 ข้อมูลฝนรายวันจากสถานีวัดน้ำฝน จำนวน 5 สถานี ซึ่งทำการรวบรวมจากกรมชลประทาน

1.3 ข้อมูลการระเหยจากถาดสถานีตรวจอากาศจังหวัดจันทบุรีของกรมอุตุนิยมวิทยา ช่วงปี พ.ศ. 2535–2564

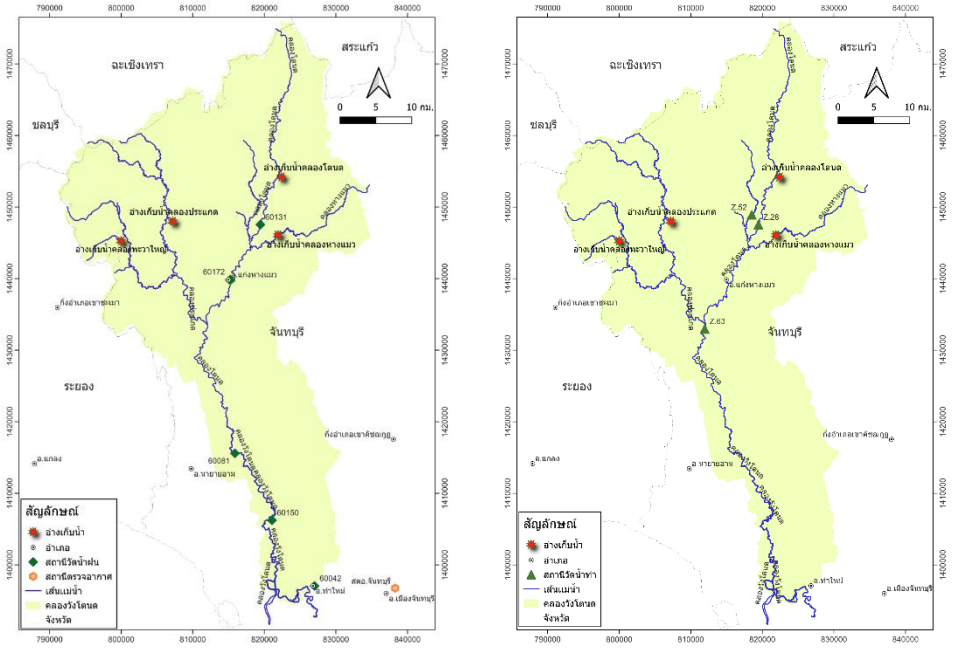


Fig. 2 Runoff stations and Streamflow stations of the Khlong Wang Tanode Basin

2. ปริมาณน้ำท่าไหลลงอ่างฯ

ปริมาณน้ำไหลลงอ่างฯคำนวณด้วยวิธี Regional Method จากสถานีวัดน้ำท่าในพื้นที่ศึกษาและบริเวณข้างเคียงจำนวน 12 สถานี โดยเลือกสถานีวัดน้ำท่า Z.28 ช่วงปี พ.ศ.2537 - 2565 เป็นสถานีดัชนี

3. ความต้องการน้ำด้านต่างๆ

3.1 ความต้องการใช้น้ำเพื่อการอุปโภค บริโภค คำนวณจากจำนวนประชากร ซึ่งขึ้นอยู่กับปัจจัยหลักๆ 2 ประการ คือ พฤติกรรมการใช้น้ำ (อัตราการใช้น้ำต่อคนต่อวัน) และจำนวนประชากร โดยใช้เกณฑ์การใช้น้ำตามคู่มือการประเมินการใช้น้ำในกิจกรรมต่างๆ ของกรมชลประทาน ดังนี้

- เทศบาลนคร	กำหนดอัตราการใช้น้ำเท่ากับ	250	ลิตรต่อคนต่อวัน
- เทศบาลเมือง	กำหนดอัตราการใช้น้ำเท่ากับ	200	ลิตรต่อคนต่อวัน
- เทศบาลตำบล	กำหนดอัตราการใช้น้ำเท่ากับ	120	ลิตรต่อคนต่อวัน
- นอกเขตเทศบาล	กำหนดอัตราการใช้น้ำเท่ากับ	50	ลิตรต่อคนต่อวัน

3.2 ความต้องการใช้น้ำเพื่อการชลประทาน คำนวณด้วยแบบจำลอง WUSMO มีรายละเอียดดังนี้

(1) ประเมินการใช้น้ำของพืชอ้างอิง (ETO) คำนวณจากข้อมูลภูมิอากาศที่สถานีตรวจอากาศจังหวัดจันทบุรี ในรอบ 30 ปี (พ.ศ. 2535 – 2564) ด้วยวิธี Penman-Monteith

(2) การคำนวณฝนใช้การ พื้นที่เพาะปลูกของอ่างฯคลองวังโตนดใช้ข้อมูลปริมาณฝนรายวันที่สถานีวัดน้ำฝนคลองโตนด (60131) ในขณะที่พื้นที่เพาะปลูกของอ่างฯคลองประแกด อ่างฯคลองพะวาใหญ่ และอ่างฯคลองหางแมว ใช้ข้อมูลปริมาณฝนรายวันที่สถานีวัดน้ำฝนแก่งหางแมว (60172) ในช่วงปี พ.ศ.2537-2565

(3) ค่าสัมประสิทธิ์การใช้น้ำของพืช (Kc) ด้วยวิธี Penman-Monteith จากการศึกษาปริมาณความต้องการน้ำและวิธีการให้น้ำที่เหมาะสมสำหรับทุเรียนพันธุ์หมอนทอง มหาวิทยาลัยบูรพา (สุมิตร 2561)

(4) ฝนใช้การสำหรับการเพาะปลูกข้าว ในการศึกษากำหนดค่าระดับน้ำในแปลงต่างๆ ดังนี้

ระดับน้ำในแปลงที่ความจุต่ำสุด (STMIN)	=	45	มม.
ระดับน้ำในแปลงนาที่ความจุหลังการให้น้ำ (STO)	=	90	มม.
ระดับน้ำในแปลงนาที่ความจุสูงสุด (STMAX)	=	120	มม.

(5) ปริมาณน้ำเตรียมแปลง มีค่าเท่ากับ 200 มม. ระยะเวลาในการเตรียมแปลงสำหรับนาข้าวใช้เวลา 4 สัปดาห์ เริ่มต้นเดือนมิถุนายน (สัปดาห์ที่ 9 นับจากเดือนเมษายน) พื้นที่ตกกล้า 1 ไร่ สามารถนำไปปักดำได้ 15 ไร่

(6) ปริมาณน้ำที่ซึมลงในดินเท่ากับ 1.5 มม./วัน

(7) ประสิทธิภาพการชลประทานในฤดูแล้ง (พฤศจิกายน – เมษายน) เท่ากับ 60% และประสิทธิภาพการชลประทานในฤดูฝน (พฤษภาคม – ตุลาคม) เท่ากับ 55%

(8) รูปแบบการปลูกพืช (Cropping Pattern) ดังแสดงใน Table 1

Table 1 The agricultural cropping calendar in the study area

Season / Crop production	Rainy season						Dry season					
	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec	Jan	Feb	Mar	Apr
Rice field (KDML105 variety)		field preparation		main-season rice								
Field crops	Cassava											
Fruit tree crops	Durian											

3.3 ความต้องการน้ำรักษาระบบนิเวศ

การใช้น้ำบริเวณพื้นที่ต้นน้ำ มีผลทำให้น้ำในพื้นที่ปลายน้ำลดลง จึงต้องมีการวางแผนการใช้น้ำให้เกิดความเหมาะสม โดยพิจารณาปริมาณน้ำต่ำสุดจาก Flow Duration Curve ของปริมาณน้ำท่าไหลลงอ่างเก็บน้ำรายวัน โดยพิจารณาปริมาณน้ำท่าที่โอกาสการเกิด (Exceedance Probability) ร้อยละ 80 ณ ที่ตั้งอ่างเก็บน้ำ ตามคู่มือปฏิบัติงานการประเมินการใช้น้ำกิจกรรมต่างๆ ของกรมชลประทาน

4. การวิเคราะห์สมดุลน้ำ

การวิเคราะห์สมดุลน้ำ ด้วยแบบจำลอง MIKE Hydro Basin โดยมีข้อมูลนำเข้าแบบจำลองประกอบด้วย

4.1 ข้อมูลปริมาณน้ำท่าไหลลงอ่างฯรายวัน

4.2 ข้อมูลอ่างเก็บน้ำ ประกอบด้วย ความสัมพันธ์ระหว่างระดับน้ำกับปริมาตรน้ำและพื้นที่ผิวอ่างเก็บน้ำ ระดับน้ำเก็บกักต่ำสุด ระดับเก็บกักปกติ ระดับสันเขื่อน อัตราการระบายน้ำจากอ่างเก็บน้ำสูงสุด และ เกณฑ์ปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำ

4.3 ข้อมูลฝนและข้อมูลการระเหยจากถาดวัดที่สถานีตรวจวัดอากาศจังหวัดจันทบุรี

4.4 ข้อมูลความต้องการใช้น้ำในกิจกรรมต่าง ๆ ได้แก่ ความต้องการน้ำอุปโภคบริโภค ความต้องการน้ำเพื่อการรักษาระบบนิเวศ และความต้องการน้ำชลประทาน

4.5 ปริมาณน้ำเหลือใช้ (Return Flow) เท่ากับ 20 % ของปริมาณน้ำที่ส่งให้พื้นที่ชลประทาน จากคู่มือปฏิบัติงานด้านการจัดสรรน้ำ ของกรมชลประทาน

ผลและการวิจารณ์ผลการทดลอง

คำนวณปริมาณน้ำท่าไหลลงอ่างเก็บน้ำ

1. วิเคราะห์ปริมาณน้ำท่า ทำการรวบรวมข้อมูลปริมาณน้ำท่ารายเดือน ที่สถานีวัดน้ำท่าในลุ่มน้ำคลองวังโตนดและบริเวณใกล้เคียง จำนวน 12 สถานี และได้จัดทำการรวบรวมกราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำท่าเฉลี่ยรายปีกับพื้นที่รับน้ำฝนใน Fig. 3 โดยมีสมการความสัมพันธ์ดัง Equation 1:

$$Q_m = 0.7813A^{0.4743} \quad (R^2 = 0.82) \qquad (1)$$

Where Q_m is Average annual runoff (MCM)

A is Catchment area (km^2)

R^2 is Correlation coefficient

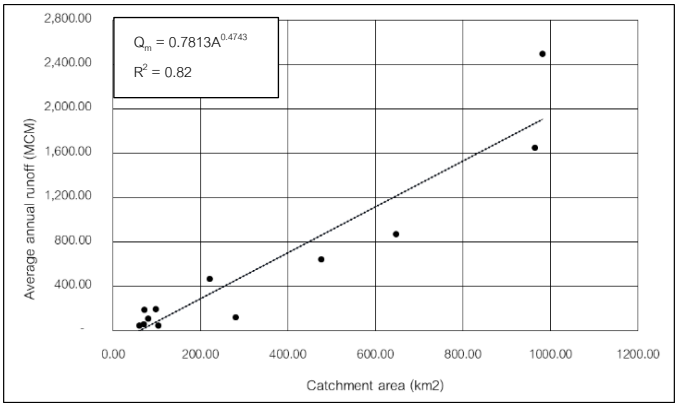


Fig. 3 Relationship between average annual runoff and rainfall catchment area in the Khlong Wang Tanode Basin.

1.2 ในการศึกษานี้ได้พิจารณาใช้ปริมาณน้ำท่าของสถานีดัชนี Z.28 พื้นที่รับน้ำเท่ากับ 280.55 ตร.กม. คำนวณปริมาณน้ำท่าไหลลงอ่างฯ ตาม Equation 2 แสดงใน Table 2 และ Fig. 4

$$Q_{\text{อ่าง}} = \left(\frac{A_{\text{อ่าง}}}{A_{Z.28}}\right)^{0.4743} \times Q_{Z.28} \qquad (2)$$

Table 2 Average annual inflow into Reservoir

Reservior	Reservoir catchment area (km^2)	Average annual inflow (MCM)
Khlong Prakaed	195	1,181.7
Khlong Phawa Yai	100	861.0
Khlong Hang Maeo	118	931.2
Khlong Wang Tanode	255	1,342.1

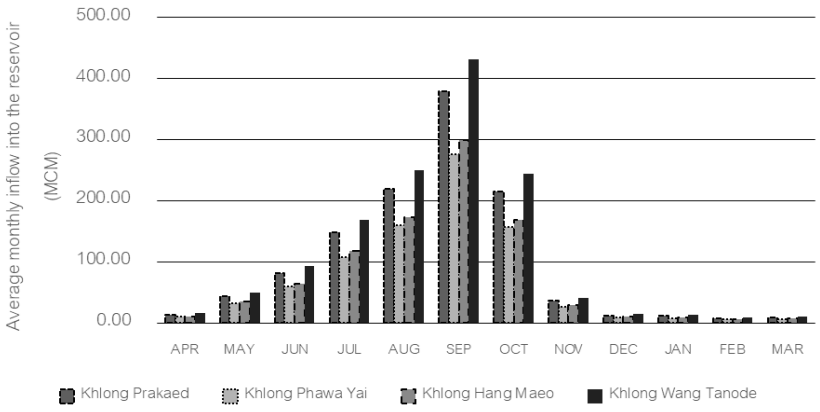


Fig. 4 Average monthly reservoir inflow

ความต้องการน้ำอุปโภค – บริโภค

ความต้องการน้ำอุปโภค–บริโภค คำนวณจากจำนวนประชากรในพื้นที่ลุ่มน้ำคลองวังโตนด ดังแสดงใน Table 3

Table 3 Domestic water demand of the population within the Khlong Wang Tanode Basin

Reservior	Area	Population (people)	Water use rate (L/person/day)	Domestic water demand (L/day)	Domestic water demand (m^3/s)
Khlong Prakaed	Sam Pee Nong SAO	6,185	50	309,250	0.0358
	Wang Tanode SAO	3,728	50	186,400	0.0216
Khlong Phawa Yai	Phawa Subdistrict Municipality	10,656	120	1,278,720	0.1480
Khlong Hang Maeo	Kaeng Hang Maeo SAO	9,538	50	476,900	0.0552
	Tung Ben Ja SAO	7,595	50	379,750	0.0440
Khlong Wang Tanode	Khunsong SAO	12,289	50	614,450	0.0711

ความต้องการน้ำชลประทาน

ความต้องการน้ำชลประทาน (Irrigation Water Requirement) ของอ่างฯ คลองวังโตนด คำนวณจากข้อมูลปริมาณฝนรายวัน ที่สถานีวัดน้ำฝนคลองโตนด (60131) ดังแสดงใน Table 4 ในขณะที่ความต้องการน้ำชลประทานของอ่างฯคลองประแกด อ่างฯ คลองพะวาใหญ่ และอ่างฯ คลองหางแมว คำนวณจากข้อมูลปริมาณฝนรายวัน ที่สถานีวัดน้ำฝนแก่งหางแมว (60172) ดังแสดงใน Table 5

Table 4 Irrigation Water Requirement of Khlong Wang Tanode Reservior (1994 - 2022)

Item	Avg. Irrigation Water Requirement (mm.)												Annual
	APR	MAY	JUN	JUL	AUG	SEP	OCT	NOV	DEC	JAN	FEB	MAR	
rice	0.0	65.0	133.8	52.5	62.5	19.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	333.1
Durian	67.5	21.3	9.4	5.0	3.8	4.4	31.9	85.0	153.8	114.4	130.6	120.0	746.9
Cassava	17.5	6.9	3.8	3.8	5.6	66.9	130.0	151.3	163.1	106.9	61.9	31.9	749.4

Table 5 Irrigation Water Requirement of Khlong Prakaed Reservoir Khlong Phawa Yai Reservoir and Khlong Hang Maeo Reservoir (1994 - 2022)

Item	Avg. Irrigation Water Requirement (mm.)												Annual
	APR	MAY	JUN	JUL	AUG	SEP	OCT	NOV	DEC	JAN	FEB	MAR	
rice	0.0	62.5	158.1	52.5	69.4	21.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	363.8
Durian	73.8	22.5	18.8	6.3	5.6	4.4	33.8	100.0	157.5	110.0	146.3	130.6	809.4
Cassava	22.5	8.8	5.0	5.0	8.1	35.0	131.3	171.9	167.5	102.5	65.6	37.5	760.6

ความต้องการน้ำรักษานิเวศ

ความต้องการน้ำรักษานิเวศท้ายอ่างเก็บน้ำ ได้ทำการวิเคราะห์เส้นโค้งสภาพการไหลของน้ำ (Flow Duration) ของปริมาณน้ำท่ารายวันของอ่างเก็บน้ำคลองประแกด อ่างเก็บน้ำคลองพะวาใหญ่ อ่างเก็บน้ำคลองหางแมว และอ่างเก็บน้ำคลองวังโตนด ที่โอกาสการเกิด 80 % (Prob. = 80%) ดังแสดงความต้องการใช้น้ำเพื่อรักษาระบบนิเวศใน Table 6

Table 6 Environmental flow requirements

Reservior	Environmental flow requirements at 80% Exceedance Prob. of flow duration (m^3/s)
Khlong Prakaed	0.080
Khlong Phawa Yai	0.060
Khlong Hang Maeo	0.060
Khlong Wang Tanode	0.094

ผลการศึกษาสมดุลน้ำ

การวิเคราะห์สมดุลน้ำด้วยแบบจำลอง MIKE Hydro Basin ในช่วง 29 ปี (พ.ศ. 2537–2566) โดยแสดงพื้นที่ชลประทานใน Table 7 ซึ่งอ่างเก็บน้ำคลองประแกดมีปริมาณน้ำไหลลงอ่างฯ 102.10 ล้าน ลบ.ม. มีความต้องการใช้น้ำอุปโภค - บริโภค 0.31 ล้าน ลบ.ม. ไม่มีการขาดแคลนน้ำอุปโภค - บริโภค มีความต้องการใช้น้ำชลประทาน 37.08 ล้าน ลบ.ม. มีการขาดแคลนน้ำชลประทาน 0.08 ล้าน ลบ.ม. ซึ่งอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้เนื่องจากขาดน้ำไม่เกินร้อยละ 20 ของช่วงเวลาที่ศึกษา(เกิดการขาดน้ำในช่วงปี พ.ศ. 2548) อ่างเก็บน้ำคลองพะวาใหญ่มีปริมาณน้ำไหลลงอ่างฯ 74.39 ล้าน ลบ.ม. มีความต้องการใช้น้ำอุปโภค - บริโภค 0.32 ล้าน ลบ.ม. ไม่มีการขาดแคลนน้ำอุปโภค - บริโภค มีความต้องการใช้น้ำชลประทาน 20.10 ล้าน ลบ.ม. และไม่มีการขาดแคลนน้ำชลประทาน อ่างเก็บน้ำคลองหางแมวมีปริมาณน้ำไหลลงอ่างฯ 74.39 ล้าน ลบ.ม. มีความต้องการใช้น้ำอุปโภค - บริโภค 0.32 ล้าน ลบ.ม. ไม่มีการขาดแคลนน้ำอุปโภค - บริโภค มีความต้องการใช้น้ำชลประทาน 20.10 ล้าน ลบ.ม.และ ไม่มีการขาดแคลนน้ำชลประทาน และอ่างเก็บน้ำคลองวังโตนดมีปริมาณน้ำไหลลงอ่างฯ 121.33 ล้าน ลบ.ม. มีความต้องการใช้น้ำ อุปโภค - บริโภค 0.32 ล้าน ลบ.ม. ไม่มีการขาดแคลนน้ำอุปโภค - บริโภค มีความต้องการใช้น้ำชลประทาน 23.24 ล้าน ลบ.ม. และไม่มีการขาดแคลนน้ำชลประทาน ดังแสดงใน Table 8 และแสดงระดับน้ำในอ่างฯและการขาดแคลนน้ำชลประทานของอ่างเก็บน้ำต่างๆในลุ่มน้ำคลองวังโตนดใน Fig. 5

Table 7 Irrigation area

Reservoir	Irrigation Area (rai)	
	Rainy Season	Dry Season
Khlong Prakaed	29,705	29,705
Khlong Phawa Yai	16,128	15,965
Khlong Hang Maeo	31,990	31,990
Khlong Wang Tanode	19,497	19,334

Table 8 Summary of Water balance Simulation in Wang Tanode Basin

No.	Items	Reservoir (MCM)			
		Khlong Prakaed	Khlong Phawa Yai	Khlong Hang Maeo	Khlong Wang Tanode
1	Inflow	102.10	74.39	80.46	121.33
2	Water level (m.MSL.)	64.01	112.91	50.69	63.45
3	Stored volume	32.39	44.59	44.27	67.81
4	Downstream spill	54.01	46.33	28.36	79.84
5	Total Downstream Release	93.92	68.63	70.63	106.37
6	Domestic Water Release	0.31	0.32	0.32	0.32
7	Domestic Water demand deficit	0.00	0.00	0.00	0.00
8	Irrigation Water Release	37.08	20.10	40.06	23.24
9	Irrigation Water demand deficit	0.08	0.00	0.00	0.00

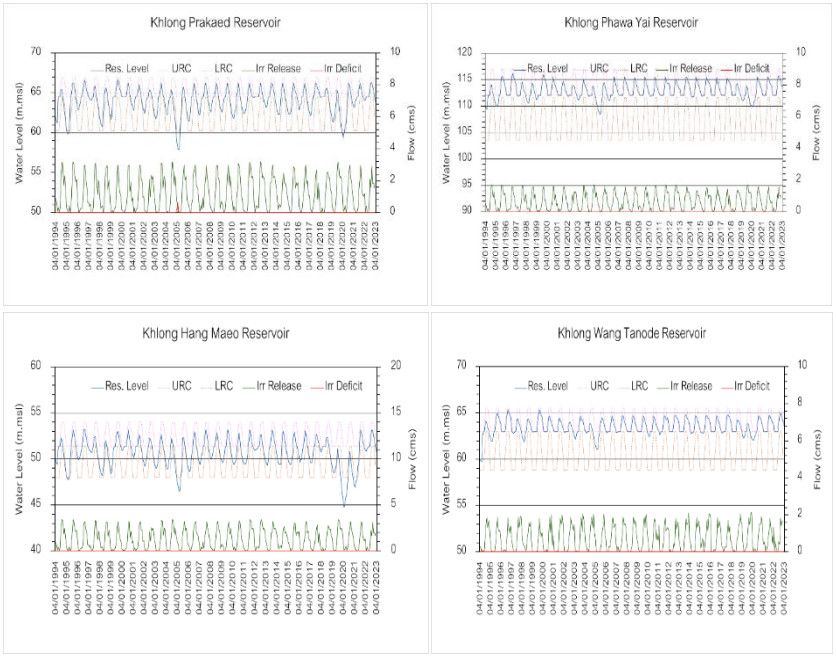


Fig. 5 A relationship graph between Water Level of Reservoir (Res. Level), Upper Rule Curve (URC), Lower Rule Curve (LRC), Irrigation Release (Irr Release) and Irrigation Deficit (Irr Deficit) of Reservoir in Khlong Wang Tanode Basin

สรุป

ในการศึกษาศักยภาพของอ่างฯในลุ่มน้ำคลองวังโตนด พบว่า อ่างเก็บน้ำคลองประแกด มีปริมาณน้ำไหลลงอ่างฯ 102.10 ล้าน ลบ.ม. มีความต้องการใช้น้ำอุปโภค - บริโภค 0.31 ล้าน ลบ.ม. ไม่มีการขาดแคลนน้ำอุปโภค - บริโภค มีความต้องการใช้น้ำชลประทาน 37.08 ล้าน ลบ.ม. มีการขาดแคลนน้ำชลประทาน 0.08 ล้าน ลบ.ม. อ่างเก็บน้ำคลองพะวาใหญ่มีปริมาณน้ำไหลลงอ่างฯ 74.39 ล้าน ลบ.ม. มีความต้องการใช้น้ำอุปโภค - บริโภค 0.32 ล้าน ลบ.ม. ไม่มีการขาดแคลนน้ำอุปโภค - บริโภค มีความต้องการใช้น้ำชลประทาน 20.10 ล้าน ลบ.ม. และไม่มีการขาดแคลนน้ำชลประทาน อ่างเก็บน้ำคลองหางแมวมีปริมาณน้ำไหลลงอ่างฯ 74.39 ล้าน ลบ.ม. มีความต้องการใช้น้ำอุปโภค - บริโภค 0.32 ล้าน ลบ.ม. ไม่มีการขาดแคลนน้ำอุปโภค - บริโภค มีความต้องการใช้น้ำชลประทาน 20.10 ล้าน ลบ.ม. และไม่มีการขาดแคลน

น้ำชลประทาน และอ่างเก็บน้ำคลองวังโตนดมีปริมาณน้ำไหลลงอ่างฯ 121.33 ล้าน ลบ.ม. มีความต้องการใช้น้ำอุปโภค - บริโภค 0.32 ล้าน ลบ.ม. ไม่มีการขาดแคลนน้ำอุปโภค - บริโภค มีความต้องการใช้น้ำชลประทาน 23.24 ล้าน ลบ.ม. และไม่มีการขาดแคลนน้ำชลประทาน จากการศึกษาลุ่มน้ำคลองวังโตนดมีปริมาณน้ำเพียงพอ จึงควรดำเนินการศึกษาแนวทางในการบริหารจัดการน้ำเพื่อส่งน้ำไปช่วยเขตเศรษฐกิจภาคตะวันออก (EEC) ต่อไป

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ กรมชลประทาน กรมอุตุนิยมวิทยา กรมพัฒนาที่ดิน และกรมแผนที่ทหาร ที่กรุณาอนุเคราะห์ข้อมูลประกอบการทำวิจัยนี้เป็นอย่างดี

เอกสารอ้างอิง

กรมชลประทาน. 2554ก. คู่มือด้านบริหารจัดการน้ำ เล่มที่ 1/16 คู่มือการเก็บรวบรวมข้อมูลพื้นฐานด้านการจัดสรรน้ำของโครงการชลประทาน. กรมชลประทาน, กรุงเทพมหานคร.

กรมชลประทาน. 2554ข. คู่มือด้านบริหารจัดการน้ำ เล่มที่ 8/16 คู่มือการประเมินการใช้น้ำในกิจกรรมต่างๆ. กรมชลประทาน, กรุงเทพมหานคร.

ฉลอง. 2538. การจัดการลุ่มน้ำในประเทศไทย. บริษัทโอเชี่ยน บูลพริ้นท์ จำกัด, กรุงเทพมหานคร. https://kukr.lib.ku.ac.th/kukr_es/kukr/search_detail/result/190453

ธนัยนันท์. 2564. การปรับปรุงเกณฑ์การปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำลำฉมวก. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

มนัส. 2538. คู่มือการใช้แบบจำลอง WUSMO (Water Users Study Model). กรมชลประทาน, กรุงเทพมหานคร.

สุภัสสร. 2564. การศึกษาเกณฑ์การปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำของเขื่อนลำตะคอง หลังจากการปรับปรุงอาคารระบายน้ำล้น. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

สุมิตร. 2561. การศึกษาปริมาณความต้องการน้ำและวิธีการให้น้ำที่เหมาะสมสำหรับทุเรียนพันธุ์หมอนทอง. มหาวิทยาลัยบูรพา.

การศึกษาการเคลื่อนตัวน้ำหลากของแม่น้ำเลย

The study of flood characteristic in Loei River

อัจฉริยา ไชยชาติ*, **จิระวัฒน์ กณะสุต**, **นภาพร เปี่ยมสง่า**

Utchariya Chaichart*, Jirawat Kanasut, Napaporn Piamsanga

ภาควิชาวิศวกรรมทรัพยากรน้ำ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

Department of Water Resources Engineering, Faculty of Engineering, Kasetsart University, Bangkok 10900, Thailand

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

บทคัดย่อ

พื้นที่จังหวัดเลยได้รับผลกระทบจากน้ำป่าไหลหลากและน้ำท่วมบ่อยครั้ง โดยเฉพาะในพื้นที่เขตเศรษฐกิจเมืองเลย ซึ่งได้รับผลกระทบจากอิทธิพลของพายุโซนร้อนประกอบกับลักษณะภูมิประเทศเป็นแอ่ง ทำให้พื้นที่ดังกล่าวเกิดน้ำท่วมฉับพลัน ปริมาณน้ำเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วส่งผลให้เกิดความเสียหายต่อพื้นที่ชุมชนและเศรษฐกิจซึ่งไม่สามารถเฝ้าระวังได้ทัน การศึกษาครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาพฤติกรรมน้ำหลากของลุ่มน้ำเลยจากข้อมูลปริมาณฝนตรวจวัดที่ทำให้เกิดน้ำท่วมด้วยแบบจำลองน้ำฝน-น้ำท่า (MIKE 11-RR) และแบบจำลองด้านชลศาสตร์แบบหนึ่งมิติ (1D-Hydrodynamic model) จากการสอบเทียบและปรับแก้อัตราการไหลจากการตรวจวัดและอัตราการไหลจากการคำนวณที่สถานี Kh.58A พบว่าแบบจำลอง MIKE 11-HD มีค่า R^2 อยู่ระหว่าง 0.86 ถึง 0.92 มีค่า WBL ระหว่าง 4.71–13.75 % และแม่น้ำเลยมีการไหลหลากในรูปแบบน้ำล้นตลิ่งจากแม่น้ำเมื่อมีปริมาณฝนตกหนักในพื้นที่ทำให้เกิดอัตราการไหลสูงสุดที่ 24–72 ชม.

คำสำคัญ: เขตเศรษฐกิจเมืองเลย, น้ำท่วมฉับพลัน, แบบจำลองชลศาสตร์ 1 มิติ

Abstract

The area of Loei Province is frequently affected by flash floods and inundation, especially within the Loei urban economic zone. The combined influence of tropical storms and the basin-like topography cause flooding and damage to both community areas and the local economy. The objective of this study is to investigate the flood behavior of the Loei River Basin using observed rainfall data that caused flooding, through a rainfall–runoff model (MIKE 11-RR) and a one-dimensional hydrodynamic model (1D hydrodynamic model). From the calibration and adjustment of discharge between observed data and calculated discharge at Station Kh.58A. The results indicate that the MIKE 11-HD model achieved coefficients of determination (R^2) ranging from 0.65 to 0.91, with water balance losses (WBL) between 4.71% and 13.75%. The analysis further reveals that the Loei River exhibits fluvial flood characteristics during periods of intense rainfall, with peak discharges occurring within 24–72 hours after rainfall events.

Keywords: Flash flood, Loei City Economic Area, 1D-Hydrodynamic model

คำนำ

ประเทศไทยได้รับผลกระทบจากน้ำท่วมบ่อยครั้ง ทั้งการเกิดน้ำท่วมฉับพลันจากปริมาณฝนที่ตกลงมาหนักในระยะเวลาที่รวดเร็ว หรือจากปริมาณฝนที่ตกต่อเนื่องเป็นระยะเวลานาน และการเกิดน้ำท่วมล้นตลิ่งซึ่งส่งผลกระทบและเกิดความเสียหายต่อประชาชนและเศรษฐกิจในหลายพื้นที่ โดยพื้นที่เศรษฐกิจเมืองเลยเป็นหนึ่งพื้นที่ที่ได้รับผลกระทบเนื่องจากอยู่ในพื้นที่กึ่งแอ่งที่ล้อมด้วยเนินและภูเขา มีแม่น้ำเลยเป็นลำน้ำหลักไหลผ่านเมืองเลยและลงสู่แม่น้ำโขง อีกทั้งได้รับอิทธิพลจากพายุโซนร้อนและร่องความกดอากาศต่ำพาดผ่านในช่วงเดือนกันยายนถึงตุลาคม ทำให้เกิดฝนตกบริเวณต้นน้ำและบริเวณกลางน้ำของลุ่มน้ำเลย ส่งผลให้ระดับน้ำในแม่น้ำเลยเพิ่มสูงขึ้นและเอ่อล้นตลิ่งอย่างรวดเร็ว เกิดน้ำท่วมฉับพลันเข้าพื้นที่บริเวณอำเภอเมืองเลย ประกอบกับช่วงที่ระดับน้ำในแม่น้ำโขงสูงจะส่งผลต่อการระบายน้ำท่วมในพื้นที่อีกด้วย ซึ่งในการศึกษานี้ได้จำลองปริมาณน้ำท่าในแม่น้ำเลยจากข้อมูลปริมาณฝนด้วยแบบจำลองน้ำฝน-น้ำท่า (MIKE 11 RR) และจำลองพฤติกรรมการไหลของน้ำด้วยแบบจำลองอุทกพลศาสตร์ (MIKE 11-HD) ของแม่น้ำเลยตั้งแต่สถานีวัดน้ำท่าบ้านนาหลัก (Kh.28A) ถึงสถานีโทรมาตรบ้านโป่ง (TKL.126) เพื่อประเมินและวิเคราะห์พฤติกรรมการเกิดน้ำท่วมและลักษณะการไหลของน้ำท่วมที่ส่งผลกระทบต่อพื้นที่เศรษฐกิจเมืองเลยในช่วงเหตุการณ์อุทกภัยได้

อุปกรณ์และวิธีการ

พื้นที่ศึกษา

การศึกษานี้พิจารณาพื้นที่ครอบคลุมเขตชุมชนเทศบาลเมืองเลย อำเภอเมืองเลย จังหวัดเลย ซึ่งอยู่ในลุ่มน้ำสาขาแม่น้ำเลยตอนล่างส่วนที่ 2 มีแม่น้ำเลยเป็นแม่น้ำสายหลักไหลจากทิศตะวันตกผ่านเทศบาลเมืองเลยไปทางทิศตะวันออกเฉียงเหนือและรับน้ำจากแม่น้ำสาขา ได้แก่ คลองน้ำฮวยทางฝั่งซ้ายของแม่น้ำเลยไหลจากทิศตะวันตกไปยังทิศตะวันออกลงสู่แม่น้ำเลย และคลองน้ำลายทางฝั่งขวาของแม่น้ำเลยไหลจากทิศตะวันออกไปยังทิศตะวันตกลงแม่น้ำเลยและไหลรวมจากทิศใต้ไปยังทิศเหนือผ่านพื้นที่ศึกษาและไหลแม่น้ำโขงที่อำเภอเชียงคาน ดังแสดงใน Fig. 1

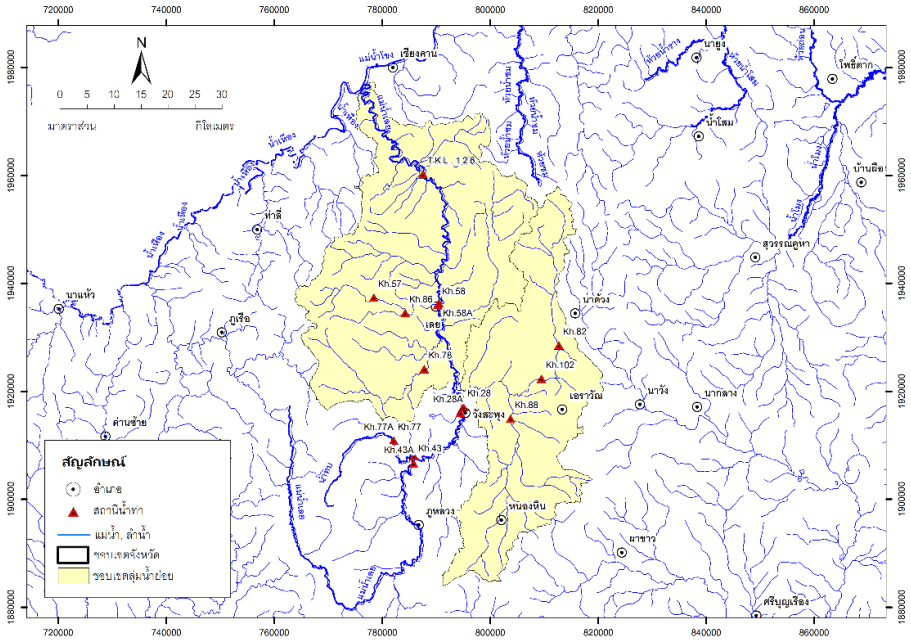


Fig. 1 Study area (Loei river basin)

ทฤษฎีและแบบจำลองที่ใช้

แบบจำลองน้ำฝน-น้ำท่า (MIKE 11 RR)

แบบจำลองน้ำฝน-น้ำท่า หรือ NAM Model ใช้สำหรับคำนวณปริมาณน้ำท่าจากข้อมูลการระเหยและปริมาณฝน โดยคำนวณฝนรายสถานีเป็นฝนเฉลี่ยของลุ่มน้ำด้วยแฟคเตอร์ถ่วงน้ำหนัก ปริมาณการระเหย และจำลองปริมาณฝนเฉลี่ยลุ่มน้ำเป็นปริมาณน้ำท่าของลุ่มน้ำจากการปรับเทียบแบบจำลองด้วยพารามิเตอร์ที่พิจารณาจากลักษณะทางกายภาพของพื้นที่ศึกษา โดยในแบบจำลอง NAM จะแบ่งชั้นดินออกเป็น 4 ชั้น ได้แก่ ชั้นที่ปกคลุมด้วยหิมะ (Snow Storage) ชั้นผิวดิน (Surface Storage) ชั้นรากพืช (Root Zone) และชั้นน้ำใต้ดิน (Groundwater Storage) (Danish Hydraulic Institute, 1992)

แบบจำลองอุทกพลศาสตร์ MIKE 11-HD

แบบจำลองที่ใช้ในการวิเคราะห์พฤติกรรมการไหลของน้ำในแม่น้ำและพื้นที่ราบริมฝั่งแม่น้ำ โดยใช้สมการคำนวณการไหลในทิศทางเดียวของ Saint Venant Equation คำนวณอัตราการไหลและระดับน้ำตามลำน้ำ และคำนวณน้ำหลากเพื่อวิเคราะห์ปริมาณน้ำและประเมินช่วงเวลาการเดินทางของน้ำหลาก สามารถคำนวณจากสมการต่อเนื่อง (Continuity Equation) และสมการโมเมนตัม (Momentum Equation) ดังแสดงใน Equation 1 และ Equation 2 ตามลำดับ

$$\frac{\partial Q}{\partial x}+\frac{\partial A}{\partial t}=q \quad (1)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t}+\frac{2Q}{A}\frac{\partial Q}{\partial x}-\frac{Q^2}{A^2}\frac{\partial A}{\partial x}+gA\frac{\partial H}{\partial x}+\frac{gn^2Q|Q|}{AR^{\frac{4}{3}}}=0 \quad (2)$$

Where, Q represents Discharge (m^3/s), A represents flow area (m^2), q represents flow area (m^2/s), R represents hydraulic or resistance radius (m), n represents Manning's roughness coefficient, H represents Water surface elevation (m), g represents Gravitational acceleration (m/s^2).

ในแบบจำลองจะใช้ข้อมูลรูปตัดลำน้ำที่ได้จากการสำรวจและมีการปรับเทียบกับข้อมูลที่ได้จากการตรวจวัด เพื่อปรับค่าสัมประสิทธิ์ความขรุขระของแมนนิ่งในแบบจำลองให้เหมาะสมกับสภาพลำน้ำ และมีการควบคุมอัตราการไหลระดับน้ำในลำน้ำ ตามข้อกำหนดตรงจุดที่กำหนด ซึ่งอาจเป็นโครงสร้างอาคารชลศาสตร์ ได้แก่ ประตูระบายน้ำ ฝายน้ำล้น และอาคารชลศาสตร์อื่นๆ โดยให้แบบจำลองคำนวณอัตโนมัติ เมื่อกำหนดขนาดและระดับของอาคารชลศาสตร์หรือใส่ข้อกำหนดในการควบคุม เช่น ให้ระบายน้ำในอัตราที่กำหนดเมื่อระดับน้ำอยู่ที่ระดับที่กำหนด

วิธีการศึกษา

การรวบรวมข้อมูล

ข้อมูลที่ใช้ในการศึกษาประกอบด้วยข้อมูลสถิติอากาศในคาบ 30 ปี ตั้งแต่พ.ศ.2535 – 2564 กรมอุตุนิยมวิทยา ข้อมูลตรวจวัดทางอุตุ-อุทกวิทยา ได้แก่ ข้อมูลปริมาณน้ำฝนรายวัน จำนวน 7 สถานี ได้แก่ สถานีวัดน้ำฝน 180013 180062 180591 180550 180641 180521 และ 180541 และตรวจสอบความน่าเชื่อถือของข้อมูลน้ำฝน ด้วยวิธี Double Mass Curve และปรับแก้ข้อมูลปริมาณฝนที่เป็นข้อมูลขาดหาย (Missing Data) ข้อมูลระดับน้ำ จำนวน 4 สถานี ได้แก่ สถานีวัดน้ำท่าบ้านนาหลัก (Kh.28A) สถานีวัดน้ำท่าบ้านฟากนา (Kh.58A) สถานีวัดน้ำท่าบ้านน้ำฮวย (Kh.78) และสถานีโทรมาตรบ้านโป่ง (TKL.126) กรมชลประทาน ซึ่งตรวจสอบข้อมูลระดับน้ำและอัตราการไหลด้วยการพล็อตข้อมูลแบบอนุกรมเวลา (Time Series) ในแบบจำลองน้ำฝน-น้ำท่า ข้อมูลทางกายภาพ ได้แก่ ข้อมูลรูปตัดขวางลำน้ำของแม่น้ำเลย สำรวจปีพ.ศ.2556 กรมชลประทาน และข้อมูลรายงานการเกิดน้ำท่วมในอดีต

การประเมินน้ำท่าด้วยแบบจำลอง

จัดทำแบบจำลองน้ำฝน-น้ำท่า ครอบคลุมลุ่มน้ำเลยตั้งแต่สถานีวัดน้ำท่าบ้านนาหลัก (Kh.28A) ถึงสถานีโทรมาตรบ้านโป่ง (TKL.126) คำนวณปริมาณฝนเชิงพื้นที่ของสถานีฝนในลุ่มน้ำและคำนวณค่าถ่วงน้ำหนักของสถานีตรวจวัดน้ำฝน (Thiessen factor) จากการเฉลี่ยปริมาณน้ำฝนด้วยวิธีของธีเอสเซน (Thiessen Polygon Method) ข้อมูลการระเหยเฉลี่ยในคาบ 30 ปี ตั้งแต่พ.ศ. 2535 – 2564 ที่สถานีตรวจอากาศเลยด้วยค่าสัมประสิทธิ์ของถาดวัดการระเหยเท่ากับ 0.7 และสอบเทียบแบบจำลองน้ำฝน-น้ำท่าของลุ่มน้ำย่อยที่สถานีวัดน้ำท่าบ้านน้ำฮวย (Kh.78)

จัดทำแบบจำลองสภาพการไหลเชื่อมกับแบบจำลองน้ำฝน-น้ำท่าโดยกำหนดขอบเขตด้านเหนือน้ำ (Upstream Boundary) ที่สถานีวัดน้ำท่าบ้านนาหลัก (Kh.28A) ขอบเขตด้านท้ายน้ำ (Downstream Boundary) ที่สถานีโทรมาตรบ้านโป่ง (TKL.126) และทำการสอบเทียบอัตราการไหลและระดับน้ำที่สถานีวัดน้ำท่าบ้านฟากนา (Kh.58A) ด้วยการปรับค่าสัมประสิทธิ์ขรุขระการไหลของลำน้ำ (Manning's N)

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

ผลการสอบเทียบและทวนสอบแบบจำลองน้ำฝน-น้ำท่า

จากการสอบเทียบอัตราการไหลของแบบจำลองน้ำฝน-น้ำท่าที่สถานีน้ำท่าบ้านน้ำฮวย (Kh.78) ซึ่งเป็นสถานีที่อยู่ในลุ่มน้ำย่อยของพื้นที่ศึกษา และปรับใช้พารามิเตอร์ในการจำลองการไหลของแม่น้ำเลยเพื่อสอบเทียบและทวนสอบที่สถานีบ้านฟากนา (Kh.58A) ตำบลกุดป่อง อำเภอเมืองเลย จังหวัดเลย ซึ่งเป็นสถานีตั้งอยู่ที่เทศบาลเมืองเลยและปรับใช้พารามิเตอร์ให้สอดคล้องกับสภาพจริงเพื่อวิเคราะห์พฤติกรรมการไหลของแม่น้ำเลยในพื้นที่ศึกษา โดยเลือกช่วงเหตุการณ์ปีน้ำมาก พ.ศ. 2560 สำหรับการสอบเทียบ แสดงดัง Fig. 2 และช่วงเหตุการณ์ปีน้ำมาก พ.ศ. 2565 สำหรับการทวนสอบในแบบจำลองน้ำฝน-น้ำท่า แสดงดัง Fig. 3 ค่าสถิติในการสอบเทียบและทวนสอบแบบจำลองลอง NAM ที่สถานีวัดได้แสดงดัง Table 1

Table 1 Calibration and Validation Performance of the Rainfall–Runoff Model at Station Kh.58A

Station	Calibrate		Validate	
	R^2	WBL (%)	R^2	WBL (%)
Kh.58A	0.86	13.75	0.92	4.71

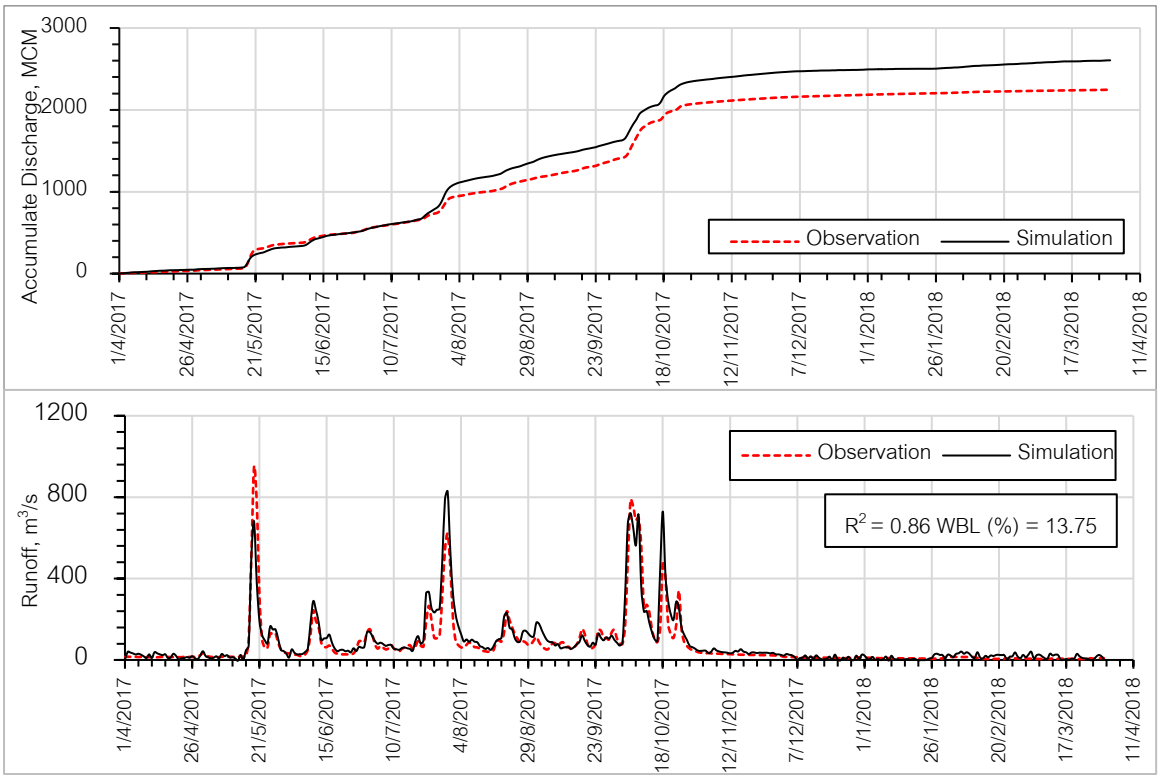


Fig. 2 Result and accumulated discharge of calibration of rainfall-runoff model at station Kh.58A

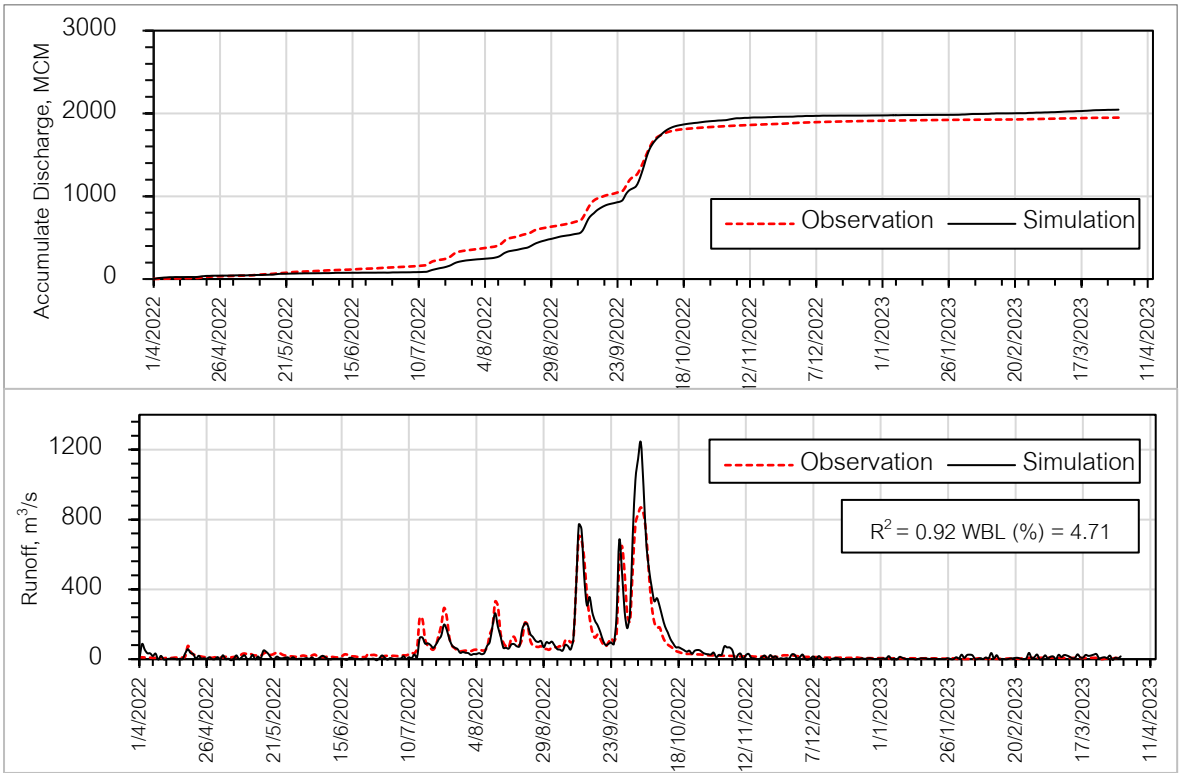


Fig. 3 Result and accumulated discharges of validation of rainfall-runoff model at station Kh.58A

ผลการจำลองสภาพการไหล

จากการสอบเทียบและทวนสอบแบบจำลองสภาพการไหล (MIKE11 HD) ได้ปรับค่าพารามิเตอร์ทางอุทกพลศาสตร์ที่มีผลต่อพฤติกรรมการไหลของลำน้ำเพื่อให้สอดคล้องกับข้อมูลการตรวจวัดจริงมากที่สุด โดยแบ่งการไหลของหน้าตัดลำน้ำเป็นแบบ 3 โซน ได้แก่ พื้นที่น้ำท่วมฝั่งซ้าย ร่องน้ำหลัก และพื้นที่น้ำท่วมฝั่งขวา (DHI A/S., 2020) และปรับแก้ค่าความต้านทานการไหลของท้องน้ำซึ่งกำหนดในรูปของค่าความขรุขระตามสมการของ Manning อยู่ในช่วง 0.03-0.06 และจำลองเหตุการณ์น้ำหลากในเดือนกันยายน พ.ศ. 2568 แสดงค่าระดับตามยาวของแม่น้ำเลยตั้งแต่สถานีต้นน้ำที่สถานี Kh.28A ถึงสถานีท้ายน้ำที่สถานี TKL.126 น้ำล้นตลิ่งที่สถานี Kh.58A ดัง Fig. 4 และประเมินระยะการเกิดน้ำท่วม (Lag time) จากเหตุการณ์ฝนตกหนักบริเวณพื้นที่ต้นน้ำและกลางน้ำของแม่น้ำเลยที่ทำให้เกิดน้ำล้นตลิ่งในเขตเทศบาลเมืองและเกิดอัตราการไหลสูงสุดที่ 24–72 ชม. แสดงดัง Fig. 5

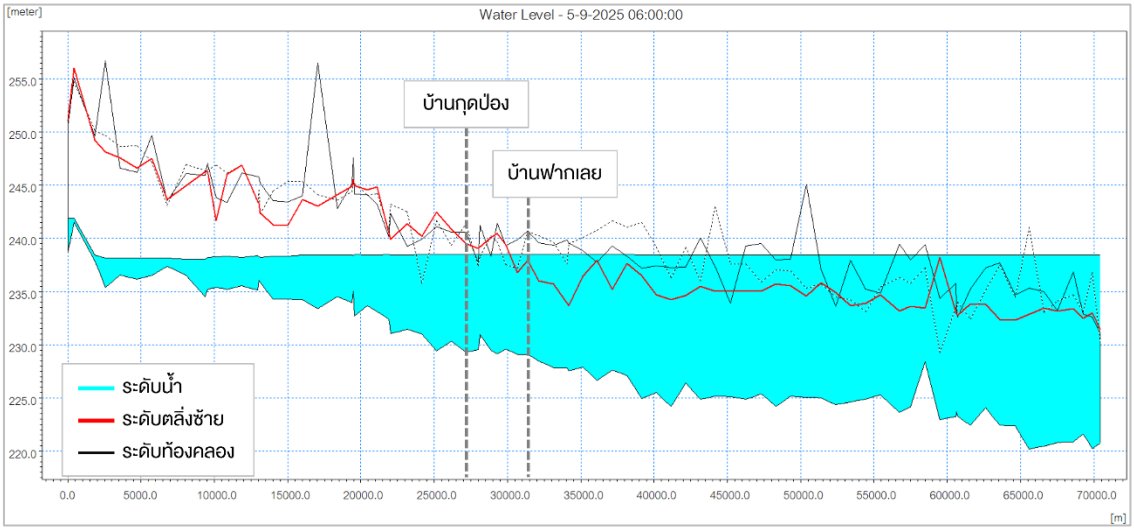


Fig. 4 Profile plot at Loei River from upstream station (Kh.28A) to downstream station (TKL.126) during the 2025 flood event.

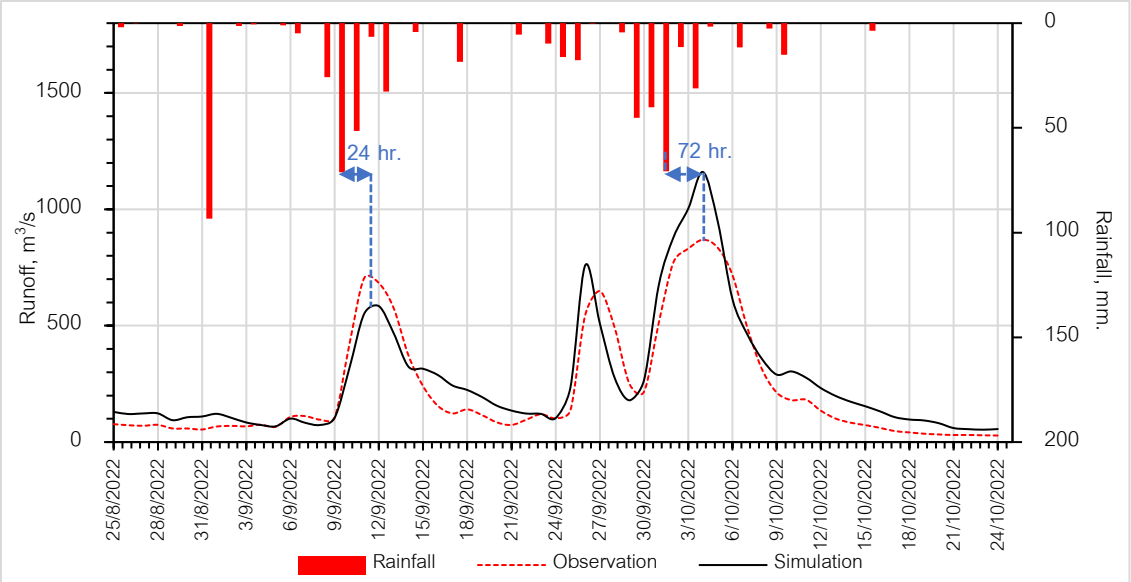


Fig. 5 Lag time between rainfall and peak discharge

สรุป

การศึกษานี้ได้ศึกษาลักษณะพฤติกรรมการหลากท่วมพื้นที่เศรษฐกิจเมืองเลย โดยการประเมินน้ำท่าจากแบบจำลองน้ำฝน-น้ำท่า และจำลองสภาพการไหลของแม่น้ำเลย พบว่า ค่าสถิติในการปรับเทียบและสอบทานที่สถานีบ้านฟากนา Kh.58A ในแบบจำลอง MIKE 11-HD มีค่า R^2 อยู่ระหว่าง 0.65 ถึง 0.91 และมีค่า WBL ระหว่าง 9.79–14.15 % ซึ่งอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ (Moriasi et al., 2015) สำหรับการพิจารณาการจำลองน้ำท่วม และประเมินระยะการเกิดน้ำท่วม (Lag time) ตามแนวคิดมาตรฐานด้านอุทกวิทยา (Chow et al., 1988; Linsley et al., 1982) โดยการเปรียบเทียบปริมาณฝนที่ตกในลุ่มน้ำจากสถานีตรวจวัดฝน และระดับน้ำที่สถานีตรวจวัด Kh.58A พบว่า ระยะการเกิดน้ำท่วมอยู่ในช่วง 24-72 ชั่วโมงขึ้นอยู่กับการกระจายตัวของฝนที่ตก ซึ่งการจำลองการไหลของแม่น้ำเลยร่วมกับการประเมินระยะเวลาในการเกิดน้ำท่วมจะสามารถพิจารณาลักษณะการไหลหลากของแม่น้ำเลยในเหตุการณ์น้ำท่วมฉับพลัน (อุเทน และคณะ, 2563) ต่อไปได้ โดยการวิเคราะห์การเคลื่อนตัวของน้ำหลากสามารถใช้วิเคราะห์พฤติกรรมและประเมินเวลาในการไหลของน้ำในลุ่มน้ำเลยเพื่อใช้ในการวางแผนและเตรียมการเบื้องต้นสำหรับเหตุการณ์น้ำท่วมในพื้นที่เทศบาลเมืองเลย

ในการศึกษาต่อไป จำเป็นต้องมีการรวบรวมเหตุการณ์ ข้อมูลตรวจวัดในพื้นที่ และปรับแก้แบบจำลองสภาพการไหลเพิ่มเติมเพื่อให้การจำลองมีความถูกต้องมากยิ่งขึ้น เพื่อเป็นข้อมูลประกอบในการจำลองการไหลแบบ 2 มิติและจัดทำแผนที่น้ำท่วมของพื้นที่เศรษฐกิจเมืองเลย เพื่อเป็นประโยชน์และประกอบการตัดสินใจเชิงนโยบายที่ต้องการแผนที่น้ำท่วมเชิงพื้นที่ละเอียด (floodplain zoning) ต่อไปได้

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณกรมชลประทาน กรมอุตุนิยมวิทยา และหน่วยงานอื่นๆ ที่สนับสนุนข้อมูลทางอุตุ-อุทกวิทยา และขอขอบคุณอาจารย์ที่ปรึกษาและอาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมทรัพยากรน้ำ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ที่ให้คำปรึกษาสำหรับการศึกษาค้นคว้าวิจัยครั้งนี้

เอกสารอ้างอิง

อุเทน เกตุแก้ว, จิระวัฒน์ กณะสุต, ดนย์ปภพ มะณี. 2566. การศึกษาพื้นที่เสี่ยงภัยน้ำป่าไหลหลาก น้ำท่วมฉับพลัน ในพื้นที่ลุ่มน้ำหมัน. การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 28. WRE08–1. https://conference.thaince.org/index.php/ncce28/article/view/2031

Chow, V.T., Maidment, D.R., Mays, L.W. 1988. Applied hydrology. McGraw-Hill, New York.

Danish Hydraulic Institute. 1992. MIKE 11 reference manual. Danish Hydraulic Institute, Hørsholm.

DHI A/S. 2020. MIKE 11 hydrodynamic module – Reference manual. Danish Hydraulic Institute, Hørsholm.

Linsley, R.K., Kohler, M.A., Paulhus, J.L.H., Wallace, J.S. 1982. Hydrology for engineers. McGraw-Hill, New York.

Moriasi, D.N., et al. 2015. Hydrologic and water quality models: Performance measures and evaluation criteria. Trans. ASABE 58: 1763–1785.

ความเสี่ยงต่อการเกิดน้ำท่วมตามเส้นทางหลวง: การผสมผสานระหว่างดัชนีความเสี่ยงน้ำท่วมและการถดถอยแบบป่าสุ่ม

Flood susceptibility along highway routes: A combination of flood risk index and random forest regression

กมลทัต พิณธารทอง*, อนุเผ่า อบแพทย์, สรวิศ สุภเวชย์
Kamoltatt Pintharnthong*, Anuphao Aobpaet, Soravis Supavetch
ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900
Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Kasetsart University, Bangkok10900, Thailand
*Corresponding author. E-mail address: kamoltatt.pi@ku.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้นำเสนอกรอบแนวทางแบบอิงเหตุการณ์ (event-based) สำหรับทำแผนที่ความไวต่อการเกิดน้ำท่วมและการประมาณความลึกน้ำท่วมตามแนวทางหลวงในประเทศไทย โดยใช้ Flood Risk Index (RI) เป็นดัชนีความไวเชิงภัยเพื่อคัดกรองช่วงถนนที่เสี่ยงน้ำท่วม และใช้ Random Forest Regression (RFR) ประมาณความลึกน้ำท่วมจากชุดปัจจัยทางกายภาพ/สิ่งแวดล้อมเดียวกัน เช่น ปริมาณฝน การใช้ประโยชน์ที่ดิน (LULC) ระดับความสูง ความลาดชัน DTWA TWI และ NDVI เมื่อประเมินด้วยเหตุการณ์น้ำท่วมที่สังเกตได้จริง RI ให้ผล Accuracy = 0.69, Precision = 0.63, Recall = 0.97 และ F1-score = 0.76 สะท้อนว่า “ตรวจจับได้สูง” แต่มี false positives ค่อนข้างมาก ส่วน RFR ให้ผล R^2 = 0.73 และ RMSE = 0.35 เมตร ในการประมาณความลึกน้ำท่วมแบบอิงเหตุการณ์ กระบวนงานที่เสนอช่วยสนับสนุนการจัดลำดับความสำคัญและการวางแผนปฏิบัติการเพื่อบริหารจัดการน้ำท่วมบนทางหลวง โดยเน้นความไวเชิงพื้นที่และการประมาณความลึกแบบอิงเหตุการณ์ มากกว่าการพยากรณ์เชิงเวลาที่ต้องมีระยะนำ
คำสำคัญ: การจัดการน้ำท่วมบนทางหลวง, การถดถอยแบบป่าแบบสุ่ม, ดัชนีความไวต่อการเกิดน้ำท่วม (RI)

Abstract

This study presents an event-based framework for flood susceptibility mapping and flood-depth estimation along highways in Thailand. The Flood Risk Index (RI) is used as a hazard-oriented susceptibility index to screen flood-prone road sections, while Random Forest Regression (RFR) estimates flood depth using the same set of physical/environmental factors, such as rainfall, land use/land cover (LULC), elevation, slope, DTWA, TWI, and NDVI. Using observed flood events for evaluation, RI achieved an Accuracy of 0.69, Precision of 0.63, Recall of 0.97, and an F1-score of 0.76, indicating a high detection rate but with relatively more false positives. RFR achieved an R^2 of 0.73 and an RMSE of 0.35 m for event-based flood-depth estimation. The proposed workflow supports prioritization and operational planning for highway flood management by emphasizing spatial susceptibility and event-based depth estimation rather than temporal forecasting with lead time.
Keywords: Flood management, Flood Susceptibility Index (RI), Random Forest Regression (RFR)

คำนำ

อุทกภัยเป็นภัยธรรมชาติที่ส่งผลกระทบต่อโครงสร้างพื้นฐานสำคัญโดยเฉพาะโครงข่ายคมนาคมที่ใช้ในการเดินทางและการขนส่งสินค้าเมื่อเกิดน้ำท่วมผลกระทบมักลุกลามไปถึงเศรษฐกิจและความปลอดภัยของผู้ใช้ทางสำหรับประเทศไทย ทางหลวงมีบทบาทสำคัญในการพัฒนาเศรษฐกิจแต่หลายช่วงถนนพาดผ่านพื้นที่ ลุ่มต่ำและเขตเมือง ซึ่งมีความเสี่ยงสูงจากน้ำท่วมโดยเฉพาะในช่วงที่มีฝนตกหนักที่เกิดขึ้นบ่อยขึ้นจากการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ (Douglas et al., 2008) การประเมินความเสี่ยงน้ำท่วมด้วยวิธีการแบบดั้งเดิมเช่นการใช้แบบจำลองเชิงอุทกวิทยา (Hydrological Models) มักขาดความละเอียดเชิงเวลาที่เพียงพอในการประเมินความไวน้ำท่วมใกล้เวลาจริง (Pradhan, 2010) (Youssef et al., 2016) วิธีเหล่านี้ไม่สามารถรองรับการทำนายที่รวดเร็วและแม่นยำในกรณีที่เกิดน้ำท่วมฉับพลัน

การใช้ Geographic Information System (GIS) เช่น frequency ratio weights-of-evidence และ ensemble methods ช่วยเพิ่มความแม่นยำในการประเมินความเสี่ยงน้ำท่วม (Rahmati et al., 2016) (Tehrany et al., 2014) โดยการใช้ข้อมูลจาก Remote Sensing เช่น NDVI และ NDWI ช่วยบูรณาการข้อมูลสิ่งแวดล้อมและแหล่งน้ำ (Xu, 2006) รวมถึงตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับการไหลของน้ำ เช่น variable contributing area การใช้ Machine Learning โดยเฉพาะ Random Forest ช่วยเพิ่มความแม่นยำในการประเมินความไวน้ำท่วมและการตีความปัจจัยต่าง ๆ ที่ส่งผลต่อการเกิดน้ำท่วม (Kaya and Derin, 2023) ทำให้สามารถประเมินความเสี่ยงน้ำท่วมได้อย่างแม่นยำและเหมาะสมกับการใช้งานจริง

ด้วยเหตุนี้งานวิจัยนี้จึงนำเสนอการใช้ Flood Risk Index (RI) เพื่อลำดับพื้นที่เสี่ยงน้ำท่วมและ Random Forest Regression (RFR) เพื่อทำนายความลึกน้ำท่วมซึ่งจะช่วยสนับสนุนการตัดสินใจเชิงปฏิบัติการในด้านการจัดการน้ำท่วม การวางแผนการบรรเทาผลกระทบและการเพิ่มความยืดหยุ่นของโครงสร้างพื้นฐานทางหลวงในพื้นที่เสี่ยงน้ำท่วม

วิธีการ

งานวิจัยนี้พัฒนากรอบการวิเคราะห์น้ำท่วมตามแนวทางหลวงโดยใช้แนวคิดสองวิธีการ เริ่มต้นจากการทำให้ตัวแปรทำนายทั้งหมด เช่น ภูมิประเทศ การใช้ที่ดินและฝน ผ่านการควบคุมคุณภาพและปรับให้เหมาะสมทั้งในด้านพื้นที่และเวลา จากนั้นใช้ Risk Index (RI) เพื่อแปลงปัจจัยแต่ละตัวให้อยู่ในหน่วยเดียวกันและปรับทิศทางให้ค่าสูงเท่ากับเสี่ยงสูง หลังจากนั้นรวมปัจจัยต่าง ๆ ด้วยน้ำหนักที่โปร่งใสเพื่อสร้างดัชนีความเสี่ยงต่อเนื่องและจัดกลุ่มพื้นที่ที่มีความเสี่ยงน้ำท่วม ขนานกับการใช้ Random Forest Regression (RFR) เพื่อทำนายความลึกน้ำท่วมแบบต่อเนื่องโดยใช้ชุดตัวแปรเดียวกัน (ที่ตรวจสอบกับข้อมูลจริง) จากนั้นฝึกและทดสอบด้วย spatially blocked cross-validation (CV) (Roberts et al., 2017; Valavi et al., 2019) เพื่อลดปัญหาการฟิตข้อมูลเกิน (overfitting) และเพิ่มความสามารถในการใช้โมเดลในพื้นที่ต่าง ๆ โดยใช้ตัวชี้วัดที่ช่วยอธิบายการตัดสินใจของโมเดล โดย RI ใช้เพื่อคัดกรองและจัดลำดับช่วงถนนที่ไวต่อการเกิดน้ำท่วม (susceptibility screening) ก่อนนำไปประมาณความลึกน้ำท่วมด้วย RFR เพื่อสนับสนุนการจัดสรรทรัพยากรในภาคสนาม.

1.การตรวจสอบและเตรียมข้อมูล

ตัวแปรทำนายทั้งหมดถูกทำให้สอดคล้องกันในด้าน CRS ความละเอียดเชิงพื้นที่และกรอบเวลา เพื่อให้ซ้อนทับกันได้อย่างถูกต้องโดยชั้นข้อมูลเชิงหมวดหมู่(เช่น LULC และชนิดดิน) ถูกปรับสัญลักษณ์ให้เป็นมาตรฐานเดียวกัน และใช้การระบุคลาส “ท่วม/ไม่ท่วม” จากข้อมูลเหตุการณ์ พื้นที่ศึกษาครอบคลุมโครงข่ายทางหลวงแผ่นดินภายใต้การดูแลของกรมทางหลวงทั่วประเทศ (รวมระยะทางกว่า 50,000 กิโลเมตร) และใช้เหตุการณ์น้ำท่วมจริงช่วงเดือนกันยายน พ.ศ. 2565 ถึงเดือนกุมภาพันธ์ พ.ศ. 2568 เป็นข้อมูลอ้างอิงโดยข้อมูลเหตุการณ์และจุดเกิดเหตุถูกรวบรวมจากระบบรายงาน

ผ่านแอปพลิเคชัน LINE ของกรมทางหลวงเพื่อเชื่อมโยงกับปัจจัยเชิงพื้นที่และสร้างผลลัพธ์เชิงแผนที่สำหรับการใช้งานบนโครงข่ายทางหลวง ข้อมูลฝนรายวันและฝนสะสม 3 วันจัดเตรียมจากสถาบันสารสนเทศทรัพยากรน้ำ ข้อมูลภูมิประเทศใช้ SRTM DEM เพื่อคำนวณ Elevation Slope และ TWI ข้อมูลการใช้ประโยชน์ที่ดิน (LULC) และดิน (Soil) ใช้เป็นตัวแทนลักษณะพื้นผิว/การซึมผ่าน และข้อมูลจากดาวเทียม Landsat และ Sentinel ใช้คำนวณ NDVI และ NDWI เพื่อสะท้อนสภาพพืชพรรณและน้ำผิวดินในช่วงเวลาศึกษา

2.แบบจำลองดัชนีความเสี่ยงน้ำท่วม (Flood Risk Index: RI)

ดัชนีความเสี่ยงน้ำท่วม (RI) เป็นผลรวมเชิงเส้นแบบถ่วงน้ำหนักของปัจจัยที่ผ่านการปรับมาตรฐานและปรับทิศทางแล้ว ดัง Equation 1 โดยให้ x_n แทนค่าปัจจัยลำดับที่ n หลังการทำ Min–Max normalization ให้อยู่ในช่วง 0–100 และให้ a_n แทนน้ำหนักของปัจจัยแต่ละตัว ทั้งนี้โครงสร้างข้อมูลป้อนเข้าและลักษณะการกระจายของตัวแปรสำคัญที่ใช้ในการคำนวณ RI แสดงในรูปที่ 1 ซึ่งประกอบด้วย (a) การกระจายปริมาณฝนรายวันพร้อมค่าร้อยเปอร์เซ็นไทล์ที่ใช้เป็นเกณฑ์อ้างอิง (b) การกระจายความถี่ของค่า RI บนโครงข่ายทางหลวงและ (c) สัดส่วนและน้ำหนักของปัจจัยที่ใช้ในแบบจำลองเพื่อสะท้อนบทบาทเชิงสัมพัทธ์ของตัวแปรต่อความไวต่อการเกิดน้ำท่วมก่อนทำการจัดชั้นความไวเป็น 5 ระดับ โดยเลือกค่า threshold ด้วย Youden index (Youden, 1950) เพื่อให้เกิดสมดุลระหว่าง sensitivity และ specificity และประเมินสมรรถนะการจำแนกด้วย Precision, Recall, F1-score และ Accuracy ตาม Equation 2–5:

$$RI_{Flood} = a_0 RF_{a0} + a_1 RF_{a1} + \ldots + a_n RF_{a0n} \quad (1)$$

$$F1\text{-}Score = 2 \times \frac{(Precision \times Recall)}{(Precision + Recall)} \quad (2)$$

$$Precision = \frac{TruePositives}{TruePositives + FalsePositives} \quad (3)$$

$$Recall = \frac{TruePositives}{TruePositives + FalseNegatives} \quad (4)$$

$$Accuracy = \frac{TruePositives + TrueNegatives}{TotalPopulation} \quad (5)$$

a_0, a_1, ..., a_n are the weights assigned to each RF factor

Variables:

- TP (True Positive): Correct positive predictions
- FP (False Positive): Incorrect positive predictions
- FN (False Negative): Incorrect negative predictions
- TN (True Negative): Correct negative predictions

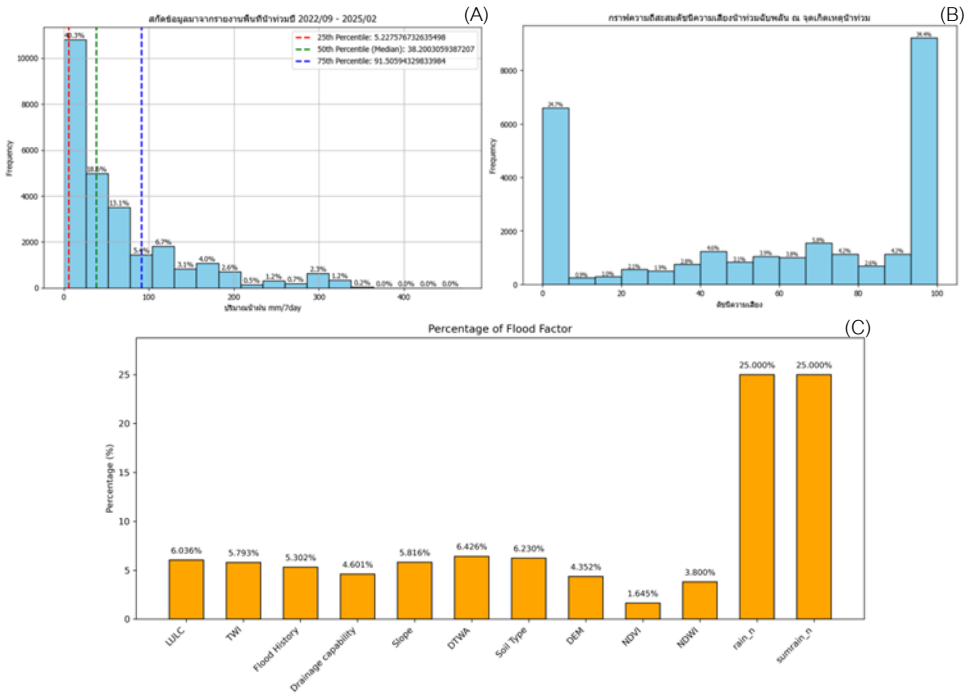


Fig. 1 Summary of key inputs and distributions used in the study: (A) daily rainfall distribution with percentile thresholds (25th, 50th/median, and 75th percentiles), (B) frequency distribution of the Flood Susceptibility Index (RI) along the highway network, and (C) percentage contribution (weights) of flood-related factors used in RI and Random Forest Regression (RFR)

3.แบบจำลอง Random Forest Regression (RFR) สำหรับประมาณความลึกน้ำท่วมเชิงเหตุการณ์

สำหรับการประมาณความลึกน้ำท่วมใช้ Random Forest Regression (Breiman, 2001) โดยมีตัวแปรเป้าหมายเป็นค่าความลึกน้ำท่วมจากรายงานเหตุการณ์ของกรมทางหลวงในจุดเกิดเหตุ (ลักษณะเป็นจุดและช่วงถนนตามรายงาน) ซึ่งมีความไม่แน่นอนจากการรายงานภาคสนามจึงระบุเป็นข้อจำกัดของงาน ทำการตรวจสอบแบบ spatially blocked k-fold cross-validation เพื่อลดการรั่วไหลเชิงพื้นที่และทำ hyperparameter search ภายใต้ CV รายงานสมรรถนะด้วย R^2 และ RMSE ตาม Equation 6–7:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum(y_{true} - y_{pred})^2}{\sum(y_{true} - \bar{y})^2} \quad (6)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n}\sum(y_{true} - y_{pred})^2} \quad (7)$$

R^2 (Equation 6):

- y_true: Actual values
- y_pred: Predicted values
- $\bar{y}$: Mean of the actual values

RMSE (Equation 7):

- y_true: Actual values
- y_pred: Predicted values
- n: Number of data points

เพื่อให้ข้อมูลเป้าหมาย (Flood Depth; m) สอดคล้องเชิงพื้นที่กับตัวแปรอธิบาย ข้อมูลความลึกน้ำท่วมถูกผูกกับตำแหน่งจุด/ช่วงถนนตามวันเกิดเหตุ (event-based) แล้วสกัดค่าปัจจัยเชิงพื้นที่จากราสเตอร์/ฐานข้อมูลในตำแหน่งเดียวกันก่อนฝึกแบบจำลอง. การตรวจสอบใช้แนวคิด spatial blocking โดยจัดกลุ่มข้อมูลตามหน่วยพื้นที่ที่มีความสัมพันธ์เชิงอุทกวิทยา/การบริหาร (เช่น ลุ่มน้ำหรือจังหวัด) แล้วทำ k-fold CV (ราว 5–10 กลุ่ม) เพื่อลดการรั่วไหลเชิงพื้นที่และสะท้อนความสามารถในการถ่ายโอนเชิงพื้นที่ได้ดีกว่า random CV

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

ผลลัพธ์ดัชนีความเสี่ยงน้ำท่วม (Flood Risk Index: RI)

ผลการประเมิน RI ดัง Table 1 พบว่า Precision = 0.63 Recall = 0.97 และ F1-score = 0.76 โดย Accuracy = 0.69 ซึ่งสะท้อนว่าโมเดลสามารถจับพื้นที่ท่วมจริงได้ดี (Recall สูง) แต่มีการทำนายเกินบางส่วน (Precision ต่ำ) ผลการตรวจสอบเชิงพื้นที่แสดงว่า RI มีการกระจายแบบลู่ไปทางขวา โดยค่ามัธยฐานอยู่ในช่วง Low–Moderate และ Flood Susceptibility Map Fig. 2 รายงานว่าโมเดลสามารถชี้พื้นที่ท่วมได้เด่นในโซน High และ Very High อย่างไรก็ตาม Precision ที่ต่ำกว่า Recall สะท้อนว่าเกิด false positive สูง ซึ่งในบริบททางหลวงอาจทำให้การแจ้งเตือนหรือการจัดสรรงบประมาณกระจายเกินจำเป็น จึงควรปรับ threshold ให้เหมาะกับเป้าหมายการใช้งาน

Table 1 Result of Performance Risk Index Model

	Precision	Recall	F1-score	Support
0	0.92	0.42	0.58	2196
1	0.63	0.97	0.76	2196
Accuracy	0.69			
Macro avg	0.77	0.69	0.67	4392
Weighted avg	0.77	0.69	0.67	4392

Note: summarizes classification performance: class 1 shows Precision = 0.63, Recall = 0.97, and F1 = 0.76 (Accuracy = 0.69). Class 0 yields Precision = 0.92, Recall = 0.42, and F1 = 0.58, with 2,196 samples per class; macro/weighted averages are also reported.

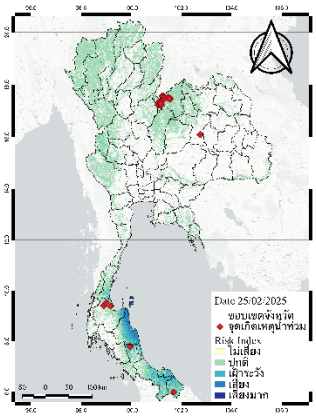


Fig. 2 Flood Susceptibility map (Feb 5, 2025)

ผลลัพธ์แบบจำลองประมาณความลึกน้ำท่วม (Random Forest Regression: RFR)

Flood Level Map (Fig. 3) แสดงผลการประมาณความลึกน้ำท่วมเชิงเหตุการณ์จาก RFR บนโครงข่ายทางหลวง เมื่อเปรียบเทียบกับข้อมูลเหตุการณ์น้ำท่วมจริง RI มี Accuracy = 0.69 และ F1-score = 0.76 (Precision = 0.63, Recall = 0.97) ขณะที่ RFR จากการตรวจสอบแบบ spatially blocked cross-validation อธิบายความแปรปรวนของความลึกน้ำท่วมได้ (R^2 = 0.73) และมี RMSE 0.35 เมตร (โดยทั่วไปการแบ่งแบบ random CV มักให้ค่าสมรรถนะสูงกว่าการรายงานแบบ spatial CV จึงมีความอนุรักษ์นิยมและสะท้อนการ generalize เชิงพื้นที่ได้ดีกว่า) ทั้งนี้การวิเคราะห์ residual distribution การประเมินสมรรถนะตามช่วงความลึก และการรายงานความไม่แน่นอนของการทำนาย ควรถูกรายงานเพิ่มในงานต่อไปเพื่อเพิ่มความน่าเชื่อถือเชิงปฏิบัติการ นอกจากการแสดงผลเชิงแผนที่ ได้พิจารณาความสำคัญของตัวแปรจาก RFR เพื่ออธิบายปัจจัยเชิงกายภาพที่กำกับความลึกน้ำท่วม โดยปริมาณฝนสะสม (Accumulated rainfall) และ DTWA เป็นตัวแปรที่มีอิทธิพลสูง

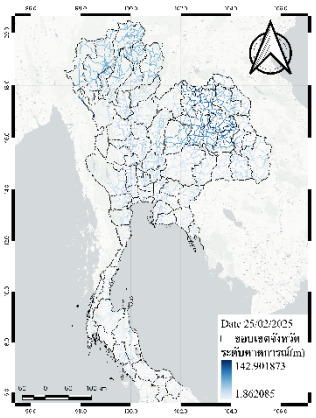


Fig. 3 Flood Level Map

ผลที่ฝนสะสมและ DTWA มีความสำคัญสูงสอดคล้องกับกลไกน้ำท่วมบนทางหลวงกล่าวคือฝนสะสมทำหน้าที่เป็นตัวแทนสภาพความชื้นก่อนเกิดเหตุเมื่อฝนตกต่อเนื่องหลายวันจะเพิ่มความอิ่มตัวของดินลดความสามารถในการซึมผ่านและทำให้ปริมาณน้ำไหลบ่า (runoff) เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วส่งผลให้เกิดน้ำท่วมขังบนผิวทางได้ง่ายขึ้นขณะที่ DTWA สะท้อนความใกล้ชิดกับทางน้ำและศักยภาพการระบายออกของพื้นที่โดยพื้นที่ที่อยู่ใกล้ทางน้ำหรืออยู่ในแนวที่น้ำหลาก

สามารถเข้าถึงได้เร็วมักมีโอกาสเกิดน้ำท่วมจากการเอ่อล้นหรือไหลหลากและระบายลงสู่ทางน้ำหลักได้จำกัดเมื่อเกิดฝนสูงร่วมกับค่า DTWA ที่บ่งชี้การระบายต่ำจึงมีแนวโน้มเกิดน้ำท่วมขังบนผิวทางมากขึ้นในทางกลับกันตัวแปรอื่นเช่น Elevation และ Slope มีบทบาทเป็นเงื่อนไขภูมิประเทศพื้นฐานที่ค่อนข้างคงที่และอาจแยกความแตกต่างได้ไม่ชัดในสเกลการวิเคราะห์ตามแนวถนนโดยเฉพาะในพื้นที่ราบหรือเมืองที่ค่าความลาดชันเปลี่ยนแปลงน้อยทำให้พลังในการอธิบายความต่างของเหตุการณ์ลดลงส่วนขณะที่ NDVI หรือ NDWI สะท้อนสภาพพืชพรรณและน้ำผิวดินซึ่งมีความแปรผันตามฤดูกาลหรือเมฆบังและอาจไม่สอดคล้องกับน้ำท่วมขังบนถนนแบบเฉียบพลันเสมอไปโดยเฉพาะเมื่อข้อมูลดาวเทียมไม่ตรงวันเกิดเหตุหรือมีข้อจำกัดเชิงเวลาสำหรับ LULC และ Soil เป็นตัวแทนการซึมผ่านและพื้นผิวเมืองซึ่งช่วยอธิบายแนวโน้มเชิงพื้นที่ได้แต่เมื่อเทียบกับแรงขับเคลื่อนโดยตรงอย่างปริมาณฝนและเงื่อนไขการระบาย (เช่น DTWA/TWI) อิทธิพลเชิงสถิติอาจรองลงมาทั้งนี้ TWI มักมีความสำคัญรองที่สอดคล้องกับการสะสมความชื้นตามลักษณะภูมิประเทศแต่ความสัมพันธ์อาจถูกกลบด้วยผลของฝนสะสมและตัวแปรด้านทางน้ำในช่วงเหตุการณ์รุนแรง

สรุป

ผลการศึกษายืนยันว่าแนวทาง RI–RFR สามารถใช้ร่วมกันเป็นกรอบเดียวเพื่อ (1) จำแนกความไวต่อการเกิดน้ำท่วมตามแนวทางหลวงเชิงพื้นที่ (flood susceptibility) และ (2) ประมาณความลึกน้ำท่วมเชิงเหตุการณ์แบบต่อเนื่อง (event-based depth) โดยไม่ใช่การพยากรณ์เชิงเวลา (temporal forecasting) ที่มี lead time และ forecast horizon สำหรับ RI เมื่อประเมินกับเหตุการณ์น้ำท่วมจริง (จำนวนตัวอย่างรวม 4,392 ตัวอย่าง; class 0 = 2,196 และ class 1 = 2,196) พบว่าโมเดลให้ Accuracy = 0.69 โดยคลาสท่วม (class 1) มี Precision = 0.63, Recall = 0.97, F1 = 0.76 สะท้อนความสามารถในการจับเหตุการณ์ท่วมจริงได้สูง (Recall สูง) แต่มีแนวโน้ม false positives มากขึ้น (Precision ต่ำ) ซึ่งมีนัยต่อการแจ้งเตือนและการจัดสรรทรัพยากรบนทางหลวง จึงควรกำหนด thresholdหรือระดับเตือนให้เหมาะสมกับเป้าหมายการใช้งานจริงสำหรับ RFR การประเมินสมรรถนะใช้ spatially blocked k-fold cross-validation เพื่อหลีกเลี่ยงการรั่วไหลเชิงพื้นที่และรายงานผลเป็นค่าเฉลี่ยรวมของแต่ละ fold โดยแบบจำลองให้สมรรถนะ $R^2 = 0.73$ และ RMSE = 0.35 เมตรในการประมาณความลึกน้ำท่วมเชิงเหตุการณ์ทั้งนี้การตีความความสำคัญของตัวแปรชี้ว่าฝนสะสม 3 วัน ฝนรายวัน และ DTWA เป็นตัวแปรหลักตามด้วย TWI และ LULC โดยแผนที่ความลึกน้ำท่วมชี้ค่าความลึกสูงเด่นในเขตเมืองและพื้นที่ลุ่มต่ำและโดยรวมสอดคล้องกับข้อมูลจริงแม้ยังมีความคลาดเคลื่อนในบางเหตุการณ์รุนแรงซึ่งสะท้อนข้อจำกัดของข้อมูลอ้างอิงและความแปรผันของเหตุการณ์

กิตติกรรมประกาศ

ข้าพเจ้าขอขอบคุณกรมทางหลวงสำหรับการสนับสนุนข้อมูลเหตุการณ์น้ำท่วมและความร่วมมือด้านการดำเนินงาน รวมถึงหน่วยงานที่เกี่ยวข้องที่เอื้อเฟื้อข้อมูลด้านอุตุนิยมวิทยาและข้อมูลเชิงพื้นที่ที่ใช้ในการศึกษา ข้าพเจ้าขอขอบคุณอาจารย์ที่ปรึกษาและผู้เชี่ยวชาญที่ให้คำแนะนำเชิงวิชาการอันเป็นประโยชน์ตลอดกระบวนการวิจัย ตลอดจนผู้ทรงคุณวุฒิ (Reviewers) ที่กรุณาให้ข้อเสนอแนะเพื่อปรับปรุงบทความให้มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น ความช่วยเหลือและความร่วมมือจากทุกท่านเป็นสิ่งที่ข้าพเจ้าซาบซึ้งใจและขอขอบคุณมา ณ โอกาสนี้ ทั้งนี้ หากมีความคลาดเคลื่อนหรือข้อบกพร่องประการใด ข้าพเจ้าขอรับผิดชอบแต่เพียงผู้เดียว

เอกสารอ้างอิง

Breiman, L. 2001. Random forests. Mach. Learn. 45: 5–32.

Douglas, I., Alam, K., Maghenda, M., McDonnell, Y., McLean, L., Campbell, J. 2008. Unjust waters: Climate change, flooding and the urban poor in Africa. Environ. Urban.

Kaya, C.M., Derin, L. 2023. Parameters and methods used in flood susceptibility mapping: A review. J. Water Clim. Change 14: 1935–1960.

Pradhan, B. 2010. Flood susceptible mapping and risk area delineation using logistic regression, GIS, and remote sensing. J. Spat. Hydrol.

Rahmati, O., Pourghasemi, H.R., Zeinivand, H. 2016. Flood susceptibility mapping using frequency ratio and weights-of-evidence models in the Golestan Province, Iran. Geocarto Int. 31: 42–70.

Roberts, D.R., Bahn, V., Ciuti, S., et al. 2017. Cross-validation strategies for data with temporal, spatial, hierarchical, or phylogenetic structure. Methods Ecol. Evol. 8: 913–929.

Tehrany, M.S., Pradhan, B., Jebur, M.N. 2014. Flood susceptibility mapping using a novel ensemble weights-of-evidence and support vector machine models in GIS. J. Hydrol. 512: 332–343.

Valavi, R., Elith, J., Lahoz-Monfort, J.J., Guillera-Arroita, G. 2019. blockCV: An R package for generating spatially or environmentally separated folds for k-fold cross-validation of species distribution models. Methods Ecol. Evol. 10: 225–232.

Xu, H. 2006. Modification of normalized difference water index (NDWI) to enhance open water features in remotely sensed imagery. Int. J. Remote Sens. 27: 3025–3033.

Youden, W.J. 1950. Index for rating diagnostic tests. Cancer 3: 32–35.

Youssef, A.M., Pradhan, B., Sefry, S.A. 2016. Flash flood susceptibility assessment in Jeddah city (Kingdom of Saudi Arabia) using bivariate and multivariate statistical models. Environ. Earth Sci. 75: 12.

การคาดการณ์การเปลี่ยนแปลงการใช้ที่ดินในลุ่มน้ำปิงตอนบนด้วยแบบจำลอง CA-Markov

Land use change forecasting in the Upper Ping River Basin using CA–Markov model

นพรัตน์ ธรรมรัตน์*, **วิษุวัฒก์ แต้สมบัติ**

Noppharat Thammarat*, Wisuwat Taesombat

ภาควิชาวิศวกรรมชลประทาน คณะวิศวกรรมศาสตร์ กำแพงแสน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ นครปฐม 73140

Department of Irrigation Engineering, Faculty of Engineering at Kamphaeng Sean, Kasetsart University, Nakhon Pathom 73140, Thailand.

*Corresponding author: E-mail address: noppharat.tham@ku.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้วิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงการใช้ที่ดินของลุ่มน้ำปิงตอนบนในปี พ.ศ. 2553–2563 และคาดการณ์การใช้ที่ดินในปี พ.ศ. 2568 และ 2572 โดยใช้แบบจำลองเชิงพื้นที่ CA–Markov ผ่านส่วนเสริม Modules for Land Use Change Simulation บน QGIS 3.22.7 ข้อมูลจากกรมพัฒนาที่ดินถูกจำแนกเป็น 5 ประเภท ได้แก่ พื้นที่เกษตรกรรม ป่าไม้ ชุมชนและสิ่งปลูกสร้าง แหล่งน้ำ และอื่น ๆ ร่วมกับปัจจัยขับเคลื่อนเชิงพื้นที่ เช่น DEM ความลาดชัน ระยะห่างจากหมู่บ้าน ถนน และแหล่งน้ำ พื้นที่คุ้มครอง และความหนาแน่นประชากร การประเมินความแม่นยำด้วยวิธี ANN, MCE และ Logistic Regression พบว่า ANN ให้ค่าความถูกต้องสูงสุด (Accuracy 96.70%, Kappa 0.926) ผลการศึกษาพบว่าป่าไม้ลดลงจาก 74% เป็น 70% ในขณะที่พื้นที่เกษตรกรรมและเมืองเพิ่มขึ้น คาดการณ์อนาคตชี้ว่าลักษณะการใช้ที่ดินจะคงที่ ป่าไม้ยังเป็นสัดส่วนสูงสุด 70% และพื้นที่เกษตรกรรมและเมืองเพิ่มเล็กน้อย แบบจำลอง CA–Markov ให้ข้อมูลเชิงพื้นที่สนับสนุนการวางแผนและจัดการทรัพยากรอย่างยั่งยืน

คำสำคัญ: การเปลี่ยนแปลงการใช้ที่ดิน, การใช้ประโยชน์ที่ดิน, ลุ่มน้ำปิงตอนบน, ภาคเหนือของประเทศไทย

Abstract

This study analyzes land use changes in the Upper Ping River Basin during 2010–2020 and forecasts land use patterns for 2025 and 2029 using the CA–Markov model approach implemented through the Modules for Land Use Change Simulation plugin in QGIS 3.22.7. Land use data obtained from the Land Development Department were reclassified into five categories and integrated with key spatial driving factors, including DEM, slope, distance from villages, protected areas, and population density. Three transition potential modelling techniques Artificial Neural Network (ANN), Multi-Criteria Evaluation (MCE) and Logistic Regression were evaluated, with ANN providing the best performance (accuracy 96.70%, Kappa 0.926) and was therefore selected for land-use simulation. The results indicate forest cover decreased from about 74% to 70% during 2010–2020, while agricultural and urban areas expanded. Future projections suggest relatively stable land use patterns, with forest remaining the dominant land use category. The CA–Markov model offers valuable spatial insights to support land-use planning and sustainable resource management in the basin.

Keywords: Land use, Land use change, Northern Thailand, Upper Ping River Basin

คำนำ

การเปลี่ยนแปลงการใช้ประโยชน์ที่ดินเป็นปัญหาสำคัญที่ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและสังคม ทั้งการสูญเสียป่าไม้ การชะล้างพังทลายของดิน ความหลากหลายทางชีวภาพที่ลดลง และความเสี่ยงอุทกภัยที่เพิ่มขึ้น (Chotchaiwong and Wijitkosum, 2019) แม้ว่าอัตราการตัดไม้ทำลายป่าของประเทศจะลดลงหลังปี พ.ศ. 2543 จากโครงสร้างเศรษฐกิจที่เปลี่ยนแปลง (Trisurat et al., 2019) แต่หลายพื้นที่ยังคงสูญเสียป่าเนื่องจากการขยายตัวของพื้นที่เกษตรและชุมชนเมือง

ลุ่มน้ำปิงตอนบนเป็นหนึ่งในพื้นที่ที่เผชิญปัญหานี้อย่างชัดเจน โดยมีแนวโน้มพื้นที่ป่าไม้ลดลงต่อเนื่องจากแรงกดดันด้านเศรษฐกิจ การขยายพื้นที่เพาะปลูก และการขยายตัวของเมืองเชียงใหม่ ซึ่งสัมพันธ์กับความเสี่ยงอุทกภัยที่เพิ่มขึ้น (Taesombat and Sriwongsitanon, 2011) อดีตลุ่มน้ำเคยปกคลุมด้วยป่าไม้หนาแน่น แต่ลดลงเหลือเพียงประมาณ 72% ในปี พ.ศ. 2549 (Sriwongsitanon and Taesombat, 2011)

จากปัญหาข้างต้น งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงการใช้ที่ดินของลุ่มน้ำปิงตอนบนช่วงปี พ.ศ. 2553–2563 และใช้แบบจำลอง CA-Markov เพื่อคาดการณ์แนวโน้มในปี พ.ศ. 2568 และ 2572 พร้อมประเมินความแม่นยำด้วย ANN, MCE และ Logistic Regression โดยผสมผสานปัจจัยขับเคลื่อนเชิงพื้นที่ ผลลัพธ์ที่ได้สามารถสนับสนุนการวางแผนใช้ที่ดินและการจัดการลุ่มน้ำอย่างยั่งยืนในอนาคต

อุปกรณ์และวิธีการ

พื้นที่ศึกษา

พื้นที่ศึกษา คือ ลุ่มน้ำปิงตอนบน ซึ่งเป็นส่วนต้นน้ำของลุ่มน้ำเจ้าพระยา ซึ่งตั้งอยู่ระหว่างละติจูดประมาณ 16°54′–19°51′ เหนือ และลองจิจูด 97°48′–99°36′ ตะวันออก ครอบคลุมจังหวัดเชียงใหม่ ลำพูน และบางส่วนของแม่ฮ่องสอน ตาก (Sriwongsitanon and Taesombat, 2011) ลักษณะภูมิประเทศโดยทั่วไปเป็นภูเขาสูงสลับซับซ้อน มีความลาดชันเฉลี่ยร้อยละ 30–40 และเป็นพื้นที่ต้นน้ำที่สำคัญของเขื่อนภูมิพล ซึ่งมีบทบาทสำคัญในการจัดการทรัพยากรน้ำของภาคเหนือและภาคกลาง

ลุ่มน้ำปิงตอนบนประกอบด้วยลุ่มน้ำสาขาหลัก ได้แก่ แม่แตง แม่งัด แม่กวง แม่แจ่ม แม่ลี้ และแม่กลาง ซึ่งเป็นแหล่งน้ำสำคัญต่อภาคเกษตร โดยเฉพาะพืชเศรษฐกิจ เช่น ข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ ลำไย และไม้ผลยืนต้นที่มีแนวโน้มขยายตัวต่อเนื่องตามภาวะเศรษฐกิจและความต้องการตลาด (Office of Agricultural Economics, 2022; Trisurat et al., 2019).

การเลือกพื้นที่นี้ในการศึกษาเนื่องจากตลอดหลายทศวรรษที่ผ่านมา พื้นที่ดังกล่าวเผชิญกับการเปลี่ยนแปลงการใช้ที่ดินอย่างมีนัยสำคัญ ทั้งการลดลงของพื้นที่ป่าไม้และการเพิ่มขึ้นของพื้นที่เกษตรกรรมและเขตเมือง ซึ่งคาดว่าจะส่งผลต่อปัญหาน้ำท่วมและการเสื่อมโทรมของทรัพยากรธรรมชาติของลุ่มน้ำ แสดงใน Fig. 1 (สง่าวงศ์, 2552; Sriwongsitanon and Taesombat, 2011)

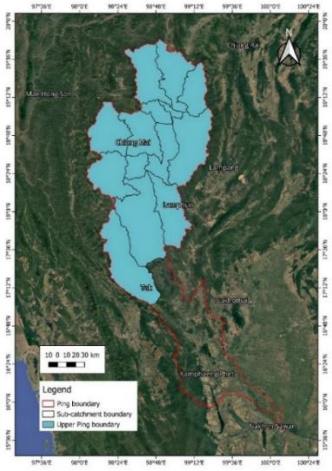


Fig. 1 Study area in the Upper Ping River Basin

การเก็บรวบรวมข้อมูล

ข้อมูลการใช้ประโยชน์ที่ดินที่ใช้ในการศึกษานี้มาจากกรมพัฒนาที่ดิน ครอบคลุมพื้นที่ลุ่มน้ำปิงตอนบนในสามช่วงเวลา ได้แก่ ปี พ.ศ. 2553, 2558 และ 2563 โดยข้อมูลถูกจัดทำขึ้นจากการตีความภาพถ่ายดาวเทียมร่วมกับการสำรวจภาคสนามของกรมพัฒนาที่ดิน ซึ่งมีความละเอียดเชิงพื้นที่ประมาณ 30 เมตร (Land Development Department, 2020).ข้อมูลแผนที่การใช้ที่ดินแต่ละปีถูกนำมาแปลงเป็นข้อมูลเชิงแรสเตอร์ ปรับให้อยู่ในระบบพิกัดและความละเอียดเดียวกัน ก่อนนำไปใช้ในการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงและสร้างแบบจำลองคาดการณ์ต่อไป

นอกจากนี้ ยังมีการใช้ข้อมูลภูมิประเทศและขอบเขตลุ่มน้ำจาก สถาบันสารสนเทศทรัพยากรน้ำ (องค์การมหาชน) หรือ HII เพื่อใช้กำหนดขอบเขตพื้นที่ลุ่มน้ำปิงตอนบนอย่างถูกต้องตามระบบชั้นลุ่มน้ำของประเทศไทย และข้อมูลปัจจัยขับเคลื่อนการเปลี่ยนแปลงการใช้ที่ดิน เพื่อใช้ในแบบจำลองการพยากรณ์ ประกอบด้วย ข้อมูลระดับความสูงเชิงพื้นที่ (DEM), ความชันของพื้นที่, ระยะห่างจากชุมชนหรือหมู่บ้าน, เขตพื้นที่คุ้มครอง และความหนาแน่นของประชากร ข้อมูลปัจจัยเหล่านี้จัดเตรียมในรูปแบบแผนที่แรสเตอร์ที่ครอบคลุมพื้นที่ศึกษา และถูกนำไปประมวลผลร่วมกับข้อมูลการใช้ที่ดินในแบบจำลอง

การจำแนกประเภทการใช้ประโยชน์ที่ดิน

การจำแนกประเภทการใช้ประโยชน์ที่ดินแบ่งออกเป็น 5 ประเภทหลัก ตามระบบของกรมพัฒนาที่ดิน ดังนี้

1. พื้นที่เกษตรกรรม (Agricultural Land): พื้นที่นาข้าว พืชไร่ พืชสวน ไม้ผล พืชยืนต้น ทุ่งหญ้าเลี้ยงสัตว์ โรงเรือนเลี้ยงสัตว์ และพื้นที่เพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ
2. พื้นที่ป่าไม้ (Forest Land): ป่าดิบชื้น ป่าเบญจพรรณ ป่าเต็งรัง ป่าพรุ ป่าชายเลน และป่าปลูก
3. พื้นที่ชุมชนและสิ่งปลูกสร้าง (Urban and Built-up Land): ครอบคลุมตัวเมือง หมู่บ้าน เขตพาณิชย์ สถานที่ราชการ สถาบันต่าง ๆ โรงงานอุตสาหกรรม สนามกีฬา และสิ่งปลูกสร้างอื่น ๆ
4. พื้นที่แหล่งน้ำ (Water Bodies): แหล่งน้ำธรรมชาติ เช่น แม่น้ำ ลำห้วย บึง ทะเลสาบ รวมถึงแหล่งน้ำที่มนุษย์สร้างขึ้น เช่น เขื่อน อ่างเก็บน้ำ และบ่อเลี้ยงปลา
5. พื้นที่อื่น ๆ (Other Land): ครอบคลุมพื้นที่หญ้าและไม้พุ่ม พื้นที่ลุ่มต่ำ เหมืองแร่ บ่อขุดดิน ที่ทิ้งขยะ หาดทราย และพื้นที่ที่ไม่เข้าข่ายประเภทอื่น

การคาดการณ์การใช้ที่ดิน

งานวิจัยนี้ใช้แบบจำลอง Markov-Chain และ Cellular Automata (CA) เพื่อคาดการณ์การเปลี่ยนแปลงการใช้ที่ดิน ซึ่งเป็นวิธีที่ได้รับการยอมรับว่าสามารถทำนายการเปลี่ยนแปลงในพื้นที่เมืองและภูมิทัศน์ซับซ้อนได้อย่างมีประสิทธิภาพ (Chotchaiwong and Wijitkosum, 2019) โดย Markov-Chain ใช้คำนวณความน่าจะเป็นของการเปลี่ยนผ่านระหว่างประเภทการใช้ที่ดิน ส่วน CA ใช้กระจายความน่าจะเป็นนั้นลงสู่พื้นที่จริงโดยอาศัยความสัมพันธ์ของเซลล์ข้างเคียง ทำให้ผลลัพธ์มีความสอดคล้องกับรูปแบบเชิงพื้นที่

ในการปรับเทียบแบบจำลอง ได้เลือกใช้ข้อมูลการใช้ที่ดินปี พ.ศ. 2553 และ 2558 เป็นข้อมูลช่วงเวลาเริ่มต้นเพื่อทำการจำลองการใช้ที่ดินของปี พ.ศ. 2563 จากนั้นจึงปรับเทียบแบบจำลองก่อนนำไปพยากรณ์อนาคต โดยในขั้นตอนการเทรนแบบจำลอง CA-Markov เพื่อสร้างแผนที่ศักยภาพการเปลี่ยนแปลงการใช้ที่ดิน ได้พิจารณา 3 วิธีการเรียนรู้ เพื่อหาแนวทางที่ให้ผลดีที่สุด ได้แก่

1. โครงข่ายประสาทเทียม (Artificial Neural Network: ANN) เป็นวิธี machine learning ที่สามารถจับความสัมพันธ์ ที่ซับซ้อนและไม่เป็นเชิงเส้นระหว่างปัจจัยขับเคลื่อนและการเปลี่ยนแปลงที่ดินได้ดี ANN จะเรียนรู้จากชุดข้อมูลการเปลี่ยนแปลงจริงในอดีต เพื่อสร้างแบบจำลองที่ทำนายความน่าจะเป็นที่พื้นที่ใดจะเปลี่ยนประเภทการใช้ประโยชน์ ในอนาคต วิธีนี้เหมาะสำหรับข้อมูลที่ซับซ้อน (Chotchaiwong and Wijitkosum, 2019; Wang et al., 2022) ในการศึกษานี้ ได้กำหนดค่า Neighbourhood เท่ากับ 3 pixels ซึ่งมีบทบาทสำคัญต่อการกระจายตัวของการเปลี่ยนแปลงการใช้ที่ดินในเชิงพื้นที่ Hidden layer จำนวน 10 โหนด เพื่อให้แบบจำลองสามารถเรียนรู้ความสัมพันธ์ที่ไม่เป็นเชิงเส้นและจำนวนรอบการเรียนรู้ (Iterations) 800 รอบ เพื่อให้แบบจำลองสามารถเรียนรู้ได้อย่างเพียงพอจนค่าความคลาดเคลื่อนลดลงสู่ระดับที่ยอมรับได้ และช่วยลดความเสี่ยงของปัญหา overfitting

2. การประเมินเชิงเกณฑ์หลายแบบ (Multi-Criteria Evaluation: MCE) การประเมินเชิงเกณฑ์หลายแบบเป็นวิธีที่ใช้การกำหนดน้ำหนักความสำคัญของปัจจัยขับเคลื่อนแต่ละตัว เพื่อประเมินความเหมาะสมของพื้นที่ต่อการเปลี่ยนแปลงการใช้ที่ดิน โดยในการศึกษานี้ ผู้วิจัยได้กำหนดน้ำหนักของปัจจัยด้วยการเปรียบเทียบความสำคัญของปัจจัยเป็นคู่ตามหลักเหตุผลเชิงพื้นที่ จากนั้นนำปัจจัยทั้งหมดมาซ้อนทับกันเพื่อสร้างแผนที่ความเหมาะสม ดังTable 1

Table 1 Weights of Driving Factors

Factor	DEM	Population Density	Protected Areas	Villages	Slope
DEM	1	0.333333333	3	0.2	0.333333333
Population Density	3	1	5	0.333333333	3
Protected Areas	0.333333333	0.2	1	0.142857143	0.2
Villages	5	3	7	1	5
Slope	3	0.333333333	5	0.2	1

3. การถดถอยโลจิสติก (Logistic Regression) ซึ่งเป็นแบบจำลองทางสถิติที่ใช้วิเคราะห์ความน่าจะเป็นของการเกิดการเปลี่ยนแปลงโดยอิงข้อมูลในอดีต โดยพิจารณาจากอิทธิพลของปัจจัยชิงพื้นที่แต่ละตัว ในการศึกษานี้ได้ใช้วิธีกำหนดค่า Maximum iterations เท่ากับ 100 รอบ และ Neighbourhood เท่ากับ 1 pixel เพื่อพิจารณาอิทธิพลของพิกเซลข้างเคียงในระดับพื้นที่ใกล้เคียงที่สุด แบบจำลองจะประเมินอิทธิพลของปัจจัยขับเคลื่อนเชิงพื้นที่แต่ละตัวผ่านค่าสัมประสิทธิ์ของสมการ และประเมินประสิทธิภาพของโมเดลด้วยค่า Pseudo R-squared ซึ่งเป็นตัวชี้วัดที่ใช้กันทั่วไปในแบบจำลองโลจิสติกสำหรับงานเชิงพื้นที่

ทั้งสามวิธีนี้ถูกนำมาเปรียบเทียบประสิทธิภาพผ่านค่าเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องและค่า Kappa จากผลการจำลองปี 2563

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

จากผลการจำแนกประเภทการใช้ประโยชน์ที่ดินดังแสดงใน Table 2 พบว่าแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงการใช้ที่ดินในลุ่มน้ำปิงตอนบนช่วงปี พ.ศ. 2553–2563 พื้นที่ป่าไม้ยังคงเป็นประเภทการใช้ที่ดินที่ใหญ่ที่สุด แต่มีแนวโน้มลดลงอย่างต่อเนื่องโดยส่วนหนึ่งของพื้นที่ถูกเปลี่ยนสภาพไปเป็นพื้นที่เกษตรกรรม และพื้นที่ชุมชนเมือง แนวโน้มดังกล่าวสอดคล้องกับงานวิจัยอื่น ซึ่งระบุว่าภาคเหนือของประเทศไทยมีการขยายพื้นที่เพาะปลูกเชิงพาณิชย์ โดยเฉพาะพืชเศรษฐกิจอย่างข้าวโพดเลี้ยงสัตว์และไม้ผล (Trisurat et al., 2019) นอกจากนี้ อธิบายว่าการขยายตัวของเกษตรกรรมและชุมชนในช่วงทศวรรษ 2010เป็นผลจากการเปลี่ยนแปลงทางเศรษฐกิจและสังคมในระดับท้องถิ่นแสดงดัง Fig. 2 และ Fig. 3 (Wang et al., 2022)

Table 2 Land use classification results in the Upper Ping River Basin (B.E. 2553–2563)

Land use type	2553		2558		2563	
	Area (rai)	%	Area (rai)	%	Area (rai)	%
Agricultural land	3,040,810.19	19.25	3,303,370.56	20.92	3,568,199.26	22.60
Forest land	11,677,868.90	73.94	11,365,488.51	71.99	11,090,137.20	70.26
Urban land	546,799.52	3.46	614,188.07	3.89	661,926.86	4.19
Water body	187,047.91	1.18	182,135.90	1.15	190,840.60	1.21
Other	342,065.01	2.17	321,754.26	2.04	274,373.41	1.74
Total	15,794,591.53	100	15,786,937.29	100.00	15,785,477.33	100.00

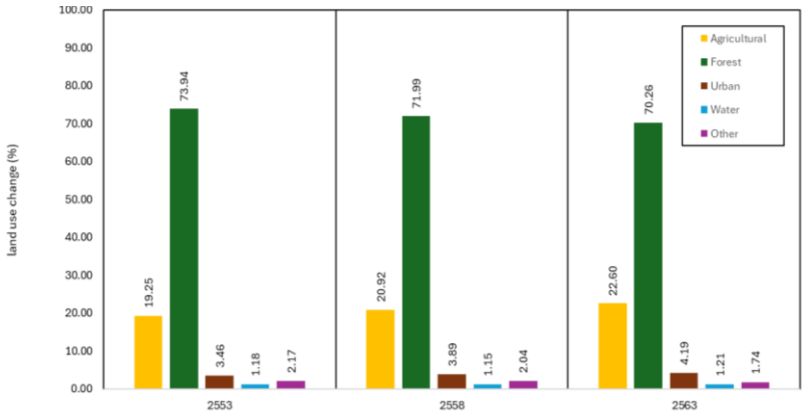


Fig. 2 Histogram of Land use classification results in the Upper Ping River Basin (2553-2563)

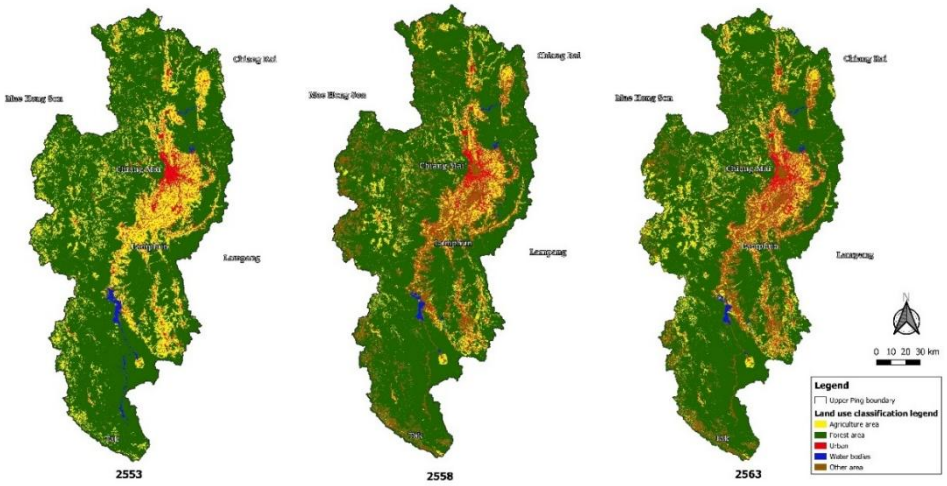


Fig. 3 Land use change in the Upper Ping River Basin (2553–2563)

ในการจำลองการใช้ที่ดินปี พ.ศ. 2563 จากข้อมูลปี 2553 และ2558 ผลการปรับเทียบแบบจำลองพบว่า ANN มีประสิทธิภาพดีกว่าวิธีอื่นในการจำลองการเปลี่ยนแปลงการใช้ที่ดินได้ใกล้เคียงกับสภาพจริงมากที่สุด ให้ค่าสถิติความถูกต้องดังแสดงใน Table 3 จึงเลือกแบบจำลอง CA-Markov ที่ใช้วิธีANN เพื่อนำไปใช้ในการคากการณ์การใช้ที่ดินในอนาคตสำหรับพื้นที่ลุ่มน้ำปิงตอนบนต่อไป

Table 3 Calibration Results of the CA–Markov Model: Accuracy Statistics for Land Use Simulation in 2563 Using Different Training Methods

How to train a model	%Overall Accuracy	Kappa (overall)	Kappa (histogram)	Kappa (location)
Artificial Neural Network (ANN)	96.70%	0.926	0.963	0.962
Multi-Criteria Evaluation (MCE)	94.10%	0.872	0.959	0.909
Logistic Regression	94.73%	0.882	0.976	0.904

ผลการจำลองการใช้ที่ดินในอนาคต (พ.ศ. 2568 และ 2572) ด้วยแบบจำลอง CA–Markov จาก Table 4 พบว่าการเปลี่ยนแปลงในลุ่มน้ำปิงตอนบนมีแนวโน้มคงที่ โดยพื้นที่ป่าไม้ยังคงครอบคลุมประมาณ 70% ใกล้เคียงกับปี 2563 สะท้อนว่าอัตราการสูญเสียป่าชะลอลงมากเมื่อเทียบกับอดีต สอดคล้องกับภาพรวมทั้งประเทศที่การสูญเสียป่าลดลงหลังปี 2543 จากโครงสร้างเศรษฐกิจที่เปลี่ยนจากภาคเกษตรป่าไม้ไปสู่อุตสาหกรรมและบริการ (Trisurat et al., 2019) เมื่อเทียบกับพื้นที่ศึกษาภาคเหนืออื่น ๆ ลุ่มน้ำปิงตอนบนยังคงสูญเสียป่าในอัตราสูงกว่า ตัวอย่างเช่น จังหวัดเชียงใหม่-ลำพูน ในช่วงปี 2551–2561 มีอัตราการลดลงของป่าต่ำมากเพียง 0.1% ต่อปี (Arunsurat et al., 2023) ขณะที่ลุ่มน้ำปิงตอนบนช่วงใกล้เคียง (2553–2563) ลด 0.37% ต่อปี สาเหตุหนึ่งอาจมาจากพื้นที่ศึกษาของลุ่มน้ำปิงตอนบนมีป่าเขาขนาดใหญ่จึงมีโอกาสถูกบุกรุกมากกว่า โดยเฉพาะเมื่อราคาพืชผลทางการเกษตรสูงขึ้น ขณะเดียวกัน นโยบายรัฐ เช่น การทวงคืนผืนป่าและการปลูกป่า ช่วยลดการบุกรุกใหม่หลังปี 2557 แสดงใน Table 5

สำหรับพื้นที่เมืองและชุมชน พบการขยายตัวเพียงเล็กน้อยประมาณ 0.7% ในรอบ 10 ปี และแบบจำลองคาดว่าจะไม่เพิ่มมากนัก ซึ่งอาจต่ำกว่าความเป็นจริง เนื่องจากแบบจำลองไม่ได้รวมปัจจัยเศรษฐกิจใหม่ เช่น การท่องเที่ยวหรือโครงสร้างพื้นฐาน เช่น งานวิจัยของ Arunsurat et al. (2023) ชี้ว่าหากไม่มีมาตรการด้านสิ่งแวดล้อม พื้นที่เมืองอาจเพิ่มขึ้นถึง 5.6% ภายในปี 2050 แสดงดัง Fig. 4

Table 4 Land use classification results in the Upper Ping River Basin (B.E. 2568–2572)

Land use type	2568		2572	
	Area (rai)	%	Area (rai)	%
Agricultural land	3,581,131.44	22.69	3,583,527.32	22.70
Forest land	11,085,537.85	70.227	11,084,476.71	70.220
Urban land	661,729.62	4.192	661,313.04	4.189
Water body	188,620.27	1.195	188,493.61	1.194
Other	268,385.32	1.700	267,593.82	1.695
Total	15,785,404.50	100.00	15,785,404.50	100.00

Table 5 Land use change in the Upper Ping River Basin (B.E. 2533–2568 and B.E. 2568 - 2572)

Land use type	2563 and 2568		2568 and 2572	
	Land use change (rai)	% Change in total area	Land use change (rai)	% Change in total area
Agricultural land	+12,932.17	49.86	+2,395.88	50.00
Forest land	-4,599.35	-17.73	-1,061.14	-22.15
Urban land	-197.24	-0.76	-416.58	-8.69
Water body	-2,220.32	-8.56	-126.66	-2.64
Other	-5,988.09	-23.09	-791.50	-16.52
Total	25,937.17	100.00	4,791.76	100.00

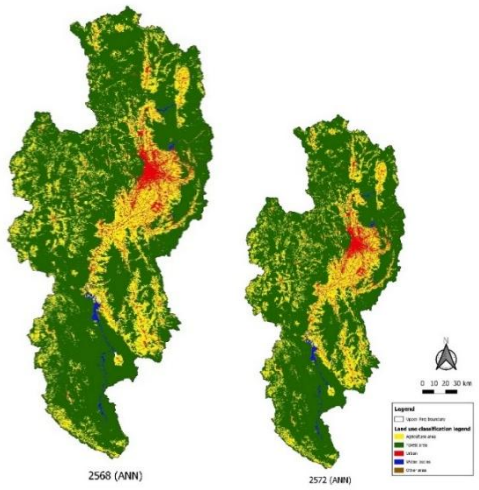


Fig. 4 Land use forecasting in 2568 and 2572 using ANN

จากผลการคาดการณ์การใช้ที่ดินในอนาคตด้วยแบบจำลอง CA–Markov พบว่าปัจจัยขับเคลื่อนเชิงพื้นที่มีอิทธิพลต่อรูปแบบและทิศทางการเปลี่ยนแปลงการใช้ที่ดินในลุ่มน้ำปิงตอนบนแตกต่างกัน โดยปัจจัยด้านโครงสร้างพื้นฐานและชุมชน เช่น ระยะห่างจากถนนและหมู่บ้าน มีอิทธิพลสูงต่อการขยายตัวของพื้นที่ชุมชนและเกษตรกรรม ส่งผลให้พื้นที่ใกล้กิจกรรมของมนุษย์มีแนวโน้มเปลี่ยนจากป่าไม้ไปเป็นการใช้ที่ดินประเภทอื่น (Chotchaiwong and Wijitkosum, 2019; Wang et al., 2022) ขณะที่ปัจจัยด้านกายภาพ ได้แก่ ระดับความสูงและความลาดชัน ทำหน้าที่เป็นข้อจำกัดต่อการขยายตัวของเมือง แต่ยังสัมพันธ์กับการทำเกษตรในพื้นที่สูง ซึ่งสะท้อนการปรับตัวของกิจกรรมเกษตรกรรมต่อสภาพภูมิประเทศในลุ่มน้ำตอนบน(Sriwongsitanon and Taesombat, 2011; Trisurat et al., 2019)

นอกจากนี้ ปัจจัยด้านนโยบายและประชากร เช่น พื้นที่คุ้มครองและความหนาแน่นประชากร มีบทบาทในการควบคุมทิศทางการใช้ที่ดิน โดยพื้นที่คุ้มครองช่วยลดโอกาสการเปลี่ยนแปลงพื้นที่ป่า ส่วนความหนาแน่นประชากรสัมพันธ์กับการเพิ่มขึ้นของพื้นที่ชุมชนและสิ่งปลูกสร้าง (Arunsurat et al., 2023; Chotchaiwong and Wijitkosum, 2019)

สรุป

งานศึกษาครั้งนี้ได้ศึกษาการเปลี่ยนแปลงการใช้ที่ดินในลุ่มน้ำปิงตอนบนตลอดช่วงปี พ.ศ. 2553–2563 และคาดการณ์แนวโน้มจนถึงปี พ.ศ. 2572 โดยใช้แบบจำลอง CA–Markov ที่ปรับเทียบด้วยโครงข่ายประสาทเทียม (ANN) ผลการศึกษาพบว่าพื้นที่ป่าไม้ลดลงจาก 74% เหลือ 70% ขณะที่พื้นที่เกษตรกรรมเพิ่มขึ้นจาก 19% เป็น 22% และพื้นที่ชุมชนเพิ่มขึ้นจาก 3.5% เป็น 4.2% การเปลี่ยนแปลงส่วนใหญ่เกิดจากการแปรสภาพป่าเป็นพื้นที่เกษตรและชุมชน การคาดการณ์ปี 2568 และ 2572 พบว่าการใช้ที่ดินมีแนวโน้มทรงตัว หรือเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อย พื้นที่การใช้ที่ดินประเภทต่างๆ ในอนาคตจะใกล้เคียงกับปี 2563 โดยพื้นที่ป่าไม้คงอยู่ราว 70% พื้นที่เกษตร 22–23% และพื้นที่ชุมชน/เมือง 4% ของพื้นที่ลุ่มน้ำ

สำหรับงานวิจัยในอนาคต ควรพัฒนาแบบจำลองภายใต้สถานการณ์สมมุติที่หลากหลาย เช่น นโยบายส่การขยายตัวของเศรษฐกิจ เพื่อประเมินผลกระทบที่อาจเกิดขึ้นต่อการใช้ที่ดิน นอกจากนี้ ควรพิจารณาใช้แบบจำลองอื่นเพิ่มเติมที่สามารถจำลองการเปลี่ยนแปลงที่ซับซ้อนได้มากขึ้น เช่น Dyna-CLUE หรือ SLEUTH และรวมปัจจัยขับเคลื่อนทางเศรษฐกิจ–สังคมเข้ากับแบบจำลอง เพื่อเพิ่มความแม่นยำในการคาดการณ์ รวมถึงปรับปรุงคุณภาพข้อมูลด้วยเทคนิคภูมิสารสนเทศสมัยใหม่ เพื่อเพิ่มความถูกต้องในการจำแนกที่ดิน ซึ่งจะช่วยสนับสนุนการวางแผนเชิงนโยบายที่แม่นยำและยั่งยืนมากยิ่งขึ้น

เอกสารอ้างอิง

กรมพัฒนาที่ดิน. 2563. แผนที่การใช้ประโยชน์ที่ดินแห่งประเทศไทย พ.ศ. 2563 (Land use map of Thailand 2020). กองวิเคราะห์ดิน กรมพัฒนาที่ดิน กระทรวงเกษตรและสหกรณ์.

Arunsurat, N., Meraj, G., Farooq, M., Singh, S.K. 2023. Multi-scenario simulations of future forest cover changes influenced by socio-economic development: A case study in the Chiang Mai–Lamphun Basin. Sustainability 15: 4212.

Chotchaiwong, N., Wijitkosum, S. 2019. Driving factors of land use change and future predictions using CA–Markov model in Chiang Rai Province, Thailand. Environ. Sci. Pollut. Res. 26: 26327–26340.

Department of Water Resources. 2023. Hydrological division: Ping River Basin information. Ministry of Natural Resources and Environment.

Eastman, J.R. 2016. TerrSet geospatial monitoring and modeling system: Manual. Clark University.

Hydro–Informatics Institute (HII). 2012. Hydro–informatics atlas of Thailand. Ministry of Science and Technology, Bangkok.

Land Development Department. 2020. Land use map of Thailand (2010, 2015, 2020). Ministry of Agriculture and Cooperatives.

Office of Agricultural Economics (OAE). 2022. Agricultural statistics of Northern Thailand. Ministry of Agriculture and Cooperatives, Bangkok.

Royal Forest Department (RFD). 2020. Forest resource situation of Thailand 2020. Ministry of Natural Resources and Environment, Bangkok.

Sriwongsitanon, N., Taesombat, W. 2011. Effects of land cover on hydrological responses at the catchment scale in northern Thailand. Hydrol. Earth Syst. Sci. 15: 755–767.

Taesombat, W., Sriwongsitanon, N. 2011. Hydrological assessment of land use change in the upper Ping River Basin using SWAT. Environ. Earth Sci. 63: 525–536.

Thai Meteorological Department. 2023. Climatological data of Northern Thailand. Ministry of Digital Economy and Society.

Trisurat, Y., Shirakawa, H., Johnston, J.M. 2019. Land-use/land-cover change from socio-economic drivers and their impact on biodiversity in Nan Province, Thailand. Sustainability 11: 649.

Wang, Y., Lu, X., Chen, J., Chen, D., Qian, Y., Chen, W. 2022. Land use/cover change and its driving mechanism in Thailand from 2000 to 2020. Land 11: 2253.

Wiriyanuwatkul, P., Thitimakorn, T., Taweekarn, T. 2013. Quantifying land use changes for greenhouse gas inventory purposes in Thailand between 2000 and 2007. J. Sustain. Energy Environ. 4: 81–88.

การวิเคราะห์ปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพการควบคุมคุณภาพงานปรับปรุงถนนในเขตพื้นที่ป่าอนุรักษ์

A study of factors affecting the effectiveness of quality control in the improvement of roads in protected forest areas

สิทธิกร จันทร์หนู, ชวเลข วณิชเวทิน*, พิพัฒน์ สอนวงษ์
Sittikorn Junnu, Chavalek Vanichavetin*, Pipat Sornwong
ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900
Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Kasetsart University, Bangkok 10900, Thailand
*Corresponding author. E-mail address: Sittikorn.ju@ku.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อวิเคราะห์และจัดลำดับความสำคัญของปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพการควบคุมคุณภาพงานปรับปรุงถนนในเขตป่าอนุรักษ์ด้วยกระบวนการลำดับชั้นเชิงวิเคราะห์ในการหาค่าน้ำหนักปัจจัยและเทคนิคการเรียงลำดับตามอุดมคติในการประเมินทางเลือก ข้อมูลได้จากการสอบถามผู้บริหารและผู้เชี่ยวชาญที่เกี่ยวข้องกับการบริหารโครงการปรับปรุงถนน จำนวน 15 คน จากกรมอุทยานแห่งชาติ สัตว์ป่า และพันธุ์พืช ผลการวิเคราะห์ค่าน้ำหนักปัจจัยพบว่า ผู้เชี่ยวชาญทุกคนให้ความสำคัญกับปัจจัยด้านกายภาพของทางมากที่สุด ผลการวิเคราะห์ทางเลือกพบว่าถนนลาดยางเป็นรูปแบบที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการควบคุมคุณภาพงานปรับปรุงถนน งานวิจัยนี้สามารถใช้เป็นข้อมูลประกอบการตัดสินใจในการดำเนินโครงการปรับปรุงถนน เพื่อให้การปฏิบัติภารกิจของกรมอุทยานแห่งชาติ สัตว์ป่า และพันธุ์พืช มีประสิทธิภาพยิ่งขึ้น

คำสำคัญ: กระบวนการลำดับชั้นเชิงวิเคราะห์, การควบคุมคุณภาพงาน, การปรับปรุงถนน, พื้นที่ป่าอนุรักษ์

Abstract

This study analyzes and ranks factors influencing the effectiveness of quality control in road improvement works in protected forest areas. Analytic Hierarchy Process (AHP) was used to derive factor weights and the Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution (TOPSIS) to evaluate alternatives. Data were collected from 15 managers and experts responsible for road projects under the Department of National Parks, Wildlife and Plant Conservation. Results show that experts give the greatest weight to the physical characteristics of the road, and that asphalt-paved roads are the preferred alternative for effective quality control in protected forest areas. The findings provide decision support for planning and implementing road improvement projects and can help improve the operational efficiency of the Department.

Keywords: Analytical Hierarchy Process, Protected forest areas, Quality control, Road improvement

คำนำ

การปรับปรุงถนนในเขตป่าอนุรักษ์ของกรมอุทยานแห่งชาติ สัตว์ป่า และพันธุ์พืช มีบทบาทสำคัญต่อการอนุรักษ์ทรัพยากรธรรมชาติและการปฏิบัติภารกิจของเจ้าหน้าที่ เนื่องจากถนนดังกล่าวเป็นเส้นทางหลักในการลาดตระเวนป้องกันและควบคุมไฟป่า ตลอดจนการเข้าถึงพื้นที่อนุรักษ์ได้อย่างทันท่วงที อีกทั้งยังเป็นโครงสร้างพื้นฐานรองรับการฟื้นฟูระบบนิเวศในระยะยาว จึงจำเป็นต้องมีระบบควบคุมคุณภาพงานปรับปรุงถนนที่มีประสิทธิภาพ เพื่อให้ถนนมีความมั่นคงปลอดภัย เป็นไปตามมาตรฐาน และลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมโดยรอบให้มากที่สุด อย่างไรก็ตาม การดำเนินโครงการปรับปรุงถนนในเขตป่าอนุรักษ์มักเผชิญกับข้อจำกัดหลายด้าน ซึ่งอาจส่งผลให้การควบคุมคุณภาพดำเนินไปได้ไม่เต็มประสิทธิภาพ และกระทบต่อการปฏิบัติงานของเจ้าหน้าที่ การสัญจรของชุมชนในพื้นที่ รวมถึงความปลอดภัยของนักท่องเที่ยวที่เข้ามาใช้ประโยชน์ในพื้นที่อนุรักษ์ งานวิจัยนี้มุ่งวิเคราะห์และจัดลำดับความสำคัญของปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพการควบคุมคุณภาพงานปรับปรุงถนนในเขตป่าอนุรักษ์และประเมินรูปแบบถนนที่เหมาะสมต่อการควบคุมคุณภาพ โดยประยุกต์ใช้วิธีการตัดสินใจแบบพหุหลักเกณฑ์ ได้แก่ กระบวนการลำดับชั้นเชิงวิเคราะห์ (Analytic Hierarchy Process: AHP) เพื่อหาค่าน้ำหนักและจัดลำดับความสำคัญของปัจจัยและเทคนิคการเรียงลำดับตามอุดมคติ (Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution: TOPSIS) เพื่อประเมินและจัดลำดับทางเลือกของรูปแบบถนน งานวิจัยนี้สามารถใช้เป็นแนวทางในการวางแผนและบริหารจัดการโครงการปรับปรุงถนนในเขตป่าอนุรักษ์ให้มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น สอดคล้องทั้งด้านการอนุรักษ์ ความปลอดภัย และการใช้ประโยชน์พื้นที่อย่างยั่งยืน

อุปกรณ์และวิธีการ

งานวิจัยนี้ประยุกต์ใช้เทคนิคการตัดสินใจแบบพหุเกณฑ์ (Multi-Criteria Decision Making: MCDM) ประกอบด้วย กระบวนการลำดับชั้นเชิงวิเคราะห์ (Analytic Hierarchy Process: AHP) เพื่อวิเคราะห์และจัดลำดับความสำคัญของปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพการควบคุมคุณภาพงานปรับปรุงถนนในเขตพื้นที่ป่าอนุรักษ์ และเทคนิคการเรียงลำดับตามอุดมคติ (Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution: TOPSIS) เพื่อประเมินความเหมาะสมของรูปแบบถนนภายใต้ปัจจัยดังกล่าว

การคัดเลือกกลุ่มตัวอย่างและผู้เชี่ยวชาญ

ประชากรและกลุ่มตัวอย่าง คือ บุคลากรที่มีส่วนเกี่ยวข้องในการบริหารโครงการปรับปรุงถนน จำนวน 15 คน จากกรมอุทยานแห่งชาติ สัตว์ป่า และพันธุ์พืช ซึ่งเป็นผู้บริหารและผู้เชี่ยวชาญที่มีส่วนเกี่ยวข้องในการบริหารโครงการปรับปรุงถนน งานวิจัยนี้จำแนกตามกลุ่มความรับผิดชอบ 3 กลุ่ม ได้แก่ กลุ่มผู้บริหารส่วนกลาง กลุ่มผู้บริหารส่วนภูมิภาค และกลุ่มผู้ควบคุมงาน ซึ่งเป็นผู้มีประสบการณ์ระดับสูงขององค์กร

การวิเคราะห์ปัจจัยด้วยกระบวนการลำดับชั้นเชิงวิเคราะห์ (Analytic Hierarchy Process: AHP) มีขั้นตอนหลัก 3 ขั้นตอน ได้แก่ 1. การกำหนดโครงสร้างการตัดสินใจตามกระบวนการ AHP 2. การสำรวจข้อมูลจากผู้เชี่ยวชาญด้วยแบบสอบถาม และ 3. การวิเคราะห์ค่าความสอดคล้องและค่าน้ำหนักของปัจจัยและทางเลือกของ การตัดสินใจ โครงสร้างการตัดสินใจตามกระบวนการ AHP เป็นโครงสร้างการตัดสินใจเป็นลำดับขั้น (Hierarchy) มี 3 ระดับ ได้แก่ ระดับชั้นที่ 1 คือชั้นเป้าหมายซึ่งเป็นวัตถุประสงค์ในการตัดสินใจโดยมีเป้าหมายเดียว ระดับชั้นที่ 2 คือชั้นปัจจัยหลัก และระดับชั้นที่ 3 ระดับชั้นล่างสุดเป็นชั้นของทางเลือกหรือหนทางแก้ปัญหาที่เหมาะสมที่สุดภายใต้เป้าหมายหรือวัตถุประสงค์ที่กำหนดไว้ในระดับชั้นที่ 1 แสดงดัง Fig. 1

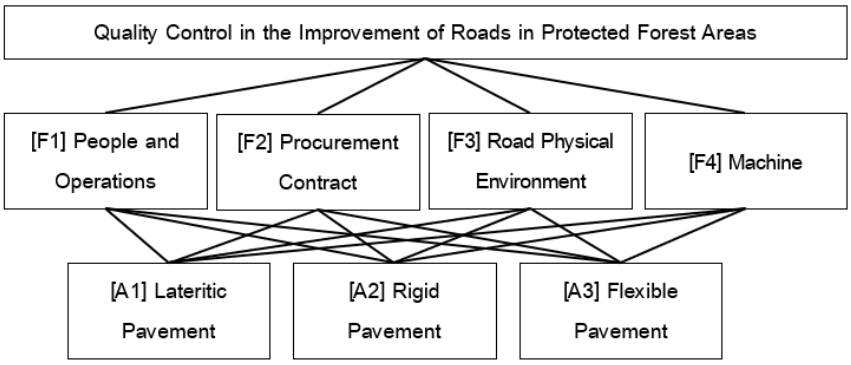


Fig. 1 Hierarchy Structure of Quality Control in the Improvement of Roads in Protected Forest Areas

Source: Researcher (B.E. 2568)

การเปรียบเทียบเพื่อกำหนดค่าน้ำหนักความสำคัญระหว่างเกณฑ์เป็นคู่โดยใช้ตัวเลขแทนค่าเพื่อหาความสำคัญของส่วนย่อย มาตราส่วนที่ใช้ในการเปรียบเทียบคือมาตรฐานของระดับความสำคัญออกเป็นค่าระหว่าง 1 ถึง 9 ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัย ดังแสดง Table 1

Table 1 Fundamental Scale of Absolute Numbers

Intensity of importance	Definition	Explanation
1	Equal importance	Two activities contribute equally to the objective
3	Moderate importance	Experience and judgment slightly favour one over another
5	Strong importance	Experience and judgment strongly favour one factor over another
7	Very strong importance	One factor is favoured very strongly over another
9	Absolute importance	Importance of one over another affirmed on the highest possible order
2, 4, 6, 8	Intermediate values	Used to represent compromise between the priorities listed above

Source: Saaty (1990)

การคำนวณอัตราส่วนความสอดคล้อง (Consistency Ratio, C.R.)

การวิเคราะห์ความสอดคล้องขั้นตอนแรกจะต้องเปรียบเทียบหลักเกณฑ์ที่กำหนดไว้ ซึ่งในขั้นตอนสุดท้ายจะได้ผลรวมของค่าวินิจฉัยจากผลรวมของค่าวินิจฉัยของแต่ละหลักเกณฑ์ในแต่ละคอลัมน์มาคูณกับผลรวมของค่าเฉลี่ยในแต่ละแถวนี้เรียกว่า Eigenvalues (λ_{max}) ดังแสดง Equation 1:

$$\lambda_{max} = \sum_{i=1}^{n} \left[\sum_{j=1}^{n} a_{ij} W_j \right] \quad (1)$$

เมื่อ aij คือ ค่าวินิจฉัยของแต่ละหลักเกณฑ์ในแถวตั้งแต่ละแถว

Wj คือ ค่าเฉลี่ยในแถวนอนแต่ละแถว

ค่าดัชนีความสอดคล้อง (C.I.) สามารถคำนวณได้โดยนำค่าน้ำหนักความสำคัญของปัจจัย คูณกับค่าความสำคัญในแถวแนวตั้งเดียวกันแล้วหาค่าเฉลี่ยในแถวแนวนอนจะได้ตารางผลคูณเพื่อหาความสอดคล้องกันของเหตุผล ดังแสดง Equation 2 และอัตราส่วนความสอดคล้อง (C.R.) สามารถคำนวนจากอัตราส่วนระหว่างค่าดัชนีความสอดคล้อง (Consistency Index, C.I.) กับค่าดัชนีความสอดคล้องเชิงสุ่ม (Random Consistency Index, R.I.) ดังแสดง Equation 3:

$$C.I. = \frac{(\lambda_{max} - n)}{(n-1)} \quad (2)$$

เมื่อ n คือ จำนวนปัจจัย

$$C.R. = \frac{C.I.}{R.I.} \quad (3)$$

เมื่อ C.R. คือ อัตราส่วนความสอดคล้อง (Consistency Ratio)

C.I. คือ ค่าดัชนีความสอดคล้อง (Consistency Index)

R.I. คือ ค่าดัชนีเชิงสุ่ม (Random Ratio)

งานวิจัยนี้พิจารณาอัตราค่าความสอดคล้องที่ยอมรับได้เท่ากับ 0.08 สำหรับตารางเมทริกซ์ขนาด 4 x 4

ทฤษฎีเทคนิคการเรียงลำดับตามอุดมคติ (Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution, TOPSIS) เป็นการจัดลำดับทางเลือกของแบบจำลองภายใต้ปัจจัยที่มีอิทธิพลดังที่กล่าวมาข้างต้นเพื่อให้ได้ผลลัพธ์ใกล้เคียงกับหลักการตัดสินใจของมนุษย์และเป็นอุดมคติมากที่สุด ทางเลือกที่ถูกค้นหามีความใกล้เคียงกับผลลัพธ์ที่ดีที่สุดและห่างไกลจากผลลัพธ์ที่แย่ที่สุดในแต่ละปัจจัย (Hwang and Yoon, 1981) หลักการของ TOPSIS ได้รับการออกแบบให้เหมาะสมกับสถานการณ์ที่มีการตัดสินใจภายใต้เกณฑ์การพิจารณาหลายมิติ ซึ่งแต่ละเกณฑ์อาจมีความสำคัญหรือมีน้ำหนักที่แตกต่างกัน โดยวิธีการนี้ได้ถูกพิสูจน์ว่ามีความยืดหยุ่นและประสิทธิภาพสูง เนื่องจากสามารถประยุกต์ใช้ได้ทั้งกับข้อมูลเชิงปริมาณและเชิงคุณภาพ อีกทั้งยังสามารถใช้ในการตัดสินใจที่ต้องเผชิญกับปัญหาที่มีข้อจำกัดและข้อพิจารณาหลากหลาย (Benitez, Martín, & Román, 2007) ดังนั้น ค่าความใกล้เคียงต่อคำตอบอุดมคติที่ได้ถูกนำมาใช้จัดลำดับความเหมาะสมของรูปแบบถนนแต่ละประเภท เพื่อระบุรูปแบบถนนที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการควบคุมคุณภาพงานปรับปรุงถนนในเขตพื้นที่ป่าอนุรักษ์

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

การนำแบบจำลอง AHP และ TOPSIS ไปใช้ในการประเมินปัจจัยและรูปแบบถนนสำหรับการควบคุมคุณภาพงานปรับปรุงถนนในเขตพื้นที่ป่าอนุรักษ์ กระทำบนพื้นฐานข้อมูลจากผู้เชี่ยวชาญที่เกี่ยวข้องกับงานก่อสร้าง ปรับปรุง และซ่อมแซมระบบสาธารณูปโภคและสิ่งก่อสร้างในแนวเขตป่าอนุรักษ์ โดยในบรรดาผู้เชี่ยวชาญทั้งหมด 23 คน งานวิจัยนี้คัดเลือกผู้เชี่ยวชาญที่มีบทบาทโดยตรงต่อการบริหารและควบคุมงานปรับปรุงถนนจำนวน 15 คน แบ่งเป็น 3 กลุ่ม ได้แก่ กลุ่มผู้บริหารส่วนกลาง กลุ่มผู้บริหารส่วนภูมิภาค และวิศวกรควบคุมหน้างาน เพื่อนำข้อมูลไปใช้ในการวิเคราะห์ค่าน้ำหนักของปัจจัยและจัดลำดับความเหมาะสมของรูปแบบถนนด้วยวิธี AHP และ TOPSIS ตามลำดับ ผลการวิเคราะห์ค่าความสอดคล้องการตัดสินใจ (C.R.) พบว่าค่า C.R. อยู่ระหว่าง 0.010 ถึง 0.080 ซึ่งข้อมูลการตัดสินใจที่รวบรวมได้มีความสอดคล้องอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ มีค่าไม่เกิน 0.080 แสดงให้เห็นว่าข้อมูลการตัดสินใจมีความสอดคล้องในเกณฑ์ที่ยอมรับได้

สำหรับผลการวิเคราะห์ค่าน้ำหนักปัจจัยหลักในการควบคุมคุณภาพงานปรับปรุงถนนในเขตพื้นที่ป่าอนุรักษ์ โดยรวมด้วยวิธี AHP พบว่า ผู้เชี่ยวชาญให้ความสำคัญกับปัจจัยด้านกายภาพของทางมากที่สุด (น้ำหนัก 0.365) รองลงมาคือปัจจัยด้านสัญญาจัดซื้อจัดจ้าง (0.270) ปัจจัยด้านบุคคลและการปฏิบัติงาน (0.209) และปัจจัยด้านเครื่องจักร (0.156) ตามลำดับ (รูปที่ 2) สะท้อนให้เห็นว่าลักษณะภูมิประเทศและสภาพทางจริงในพื้นที่ป่าอนุรักษ์เป็นตัวกำหนดข้อจำกัดและความเสี่ยงต่อคุณภาพงานมากที่สุด ขณะที่เงื่อนไขสัญญา บุคลากร และเครื่องจักรเป็นปัจจัยสนับสนุนที่มีความสำคัญรองลงมา แสดงดัง Fig. 2

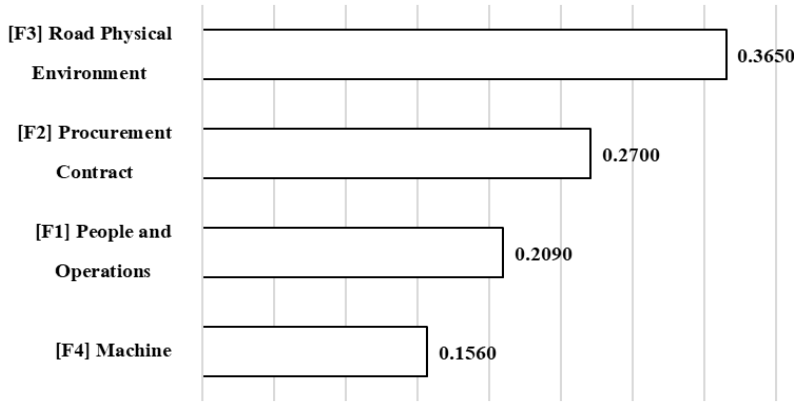


Fig. 2 Weight of Influencing Factors of Overall Decision Makers

เมื่อจำแนกค่าน้ำหนักตามกลุ่มผู้ตัดสินใจ พบว่า กลุ่มผู้บริหารส่วนกลางให้ความสำคัญสูงสุดกับปัจจัยด้านสัญญาจัดซื้อจัดจ้าง (น้ำหนัก 0.485) รองลงมาคือบุคคลและการปฏิบัติงาน กายภาพของทาง และเครื่องจักร (Fig. 3) สอดคล้องกับบทบาทหน้าที่ที่มุ่งกำกับนโยบาย กรอบกฎหมาย และการบริหารงบประมาณ ซึ่งเงื่อนไขในสัญญามีผลต่อความโปร่งใสและมาตรฐานงานก่อสร้างโดยตรง ในทางตรงกันข้าม กลุ่มผู้บริหารส่วนภูมิภาคและวิศวกรควบคุมหน้างานให้ความสำคัญสูงสุดกับปัจจัยด้านกายภาพของทาง (น้ำหนัก 0.450 และ 0.425 ตามลำดับ) รองลงมาคือปัจจัยด้านสัญญาจัดซื้อจัดจ้าง บุคคลและการปฏิบัติงาน และเครื่องจักร (Fig. 4) ผลดังกล่าวสะท้อนมุมมองของผู้ปฏิบัติงานภาคสนามที่ต้องเผชิญกับข้อจำกัดด้านภูมิประเทศ ความลาดชัน สภาพดิน และสภาพแวดล้อมจริง ซึ่งมีผลโดยตรงต่อคุณภาพงานและความปลอดภัยในการใช้งานถนน

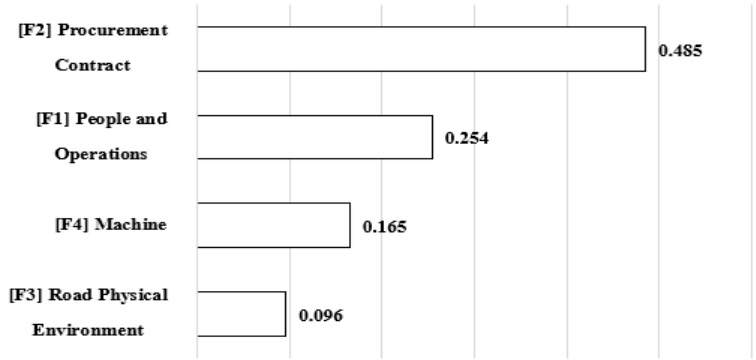


Fig. 3 Weight of Influencing Factors of Policy Makers

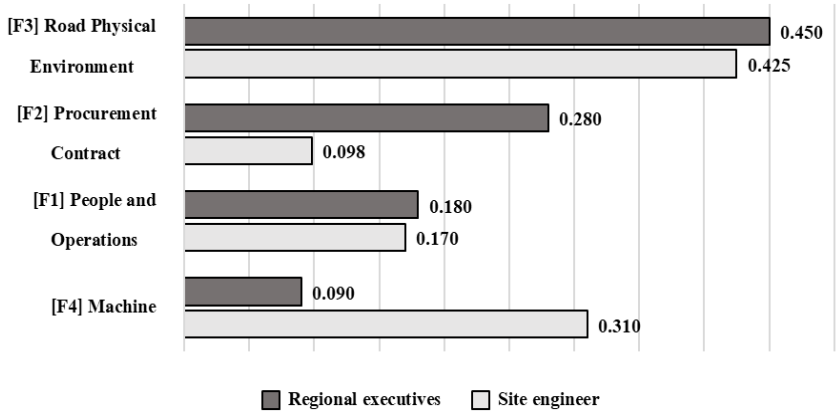


Fig. 4 Weight of Influencing Factors of Provincial Administrator and Contractors

ผลการจัดลำดับรูปแบบถนนด้วยเทคนิค TOPSIS จากมุมมองของผู้เชี่ยวชาญโดยรวม พบว่า รูปแบบถนนลาดยาง (Flexible Pavement) เป็นทางเลือกที่เหมาะสมที่สุดในการปรับปรุงถนนในเขตพื้นที่ป่าอนุรักษ์ มีค่าความใกล้เคียงต่อคำตอบอุดมคติ (Closeness Coefficient) สูงสุดเท่ากับ 0.898 รองลงมาคือถนนคอนกรีต (Rigid Pavement) มีค่า 0.797 และถนนลูกรัง (Lateritic Pavement) มีค่า 0.354 แสดงดัง Fig. 5 โดยที่ถนนลูกรังถูกจัดลำดับเป็นทางเลือกสุดท้าย เนื่องจากสภาพถนนเดิมภายในพื้นที่ส่วนใหญ่เป็นลูกรังอยู่แล้ว การปรับปรุงซ้ำในรูปแบบเดิมจึงไม่ตอบโจทย์ทั้งด้านความทนทานและการลดค่าใช้จ่ายด้านบำรุงรักษาในระยะยาว ในขณะที่ถนนลาดยางสามารถยกระดับสภาพผิวทางให้สัญจรไปมาสะดวก และความปลอดภัยเพิ่มขึ้น

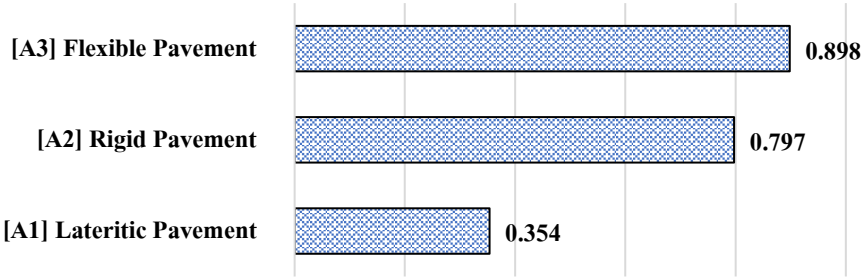


Fig. 5 Prioritization of Design Technique of Overall Decision Makers

เมื่อพิจารณาจำแนกตามกลุ่มผู้ตัดสินใจ พบว่า ทั้งผู้บริหารส่วนกลาง ผู้บริหารส่วนภูมิภาค และวิศวกรควบคุมหน้างานล้วนจัดลำดับให้ถนนลาดยางเป็นทางเลือกอันดับหนึ่งเช่นเดียวกัน โดยค่าความใกล้เคียงต่อคำตอบอุดมคติของถนนลาดยางอยู่ระหว่าง 0.823–0.898 ส่วนถนนคอนกรีตอยู่ระหว่าง 0.697–0.797 และถนนลูกรังมีค่าเพียง 0.354–0.523 แสดงดัง Fig. 6 แนวโน้มดังกล่าวสะท้อนว่าทุกกลุ่มผู้ตัดสินใจมีมุมมองสอดคล้องกันว่าถนนลาดยางให้ความสมดุลระหว่างความทนทาน การใช้งานในระยะยาวในพื้นที่ป่าอนุรักษ์มากกว่าทางเลือกอื่น ทั้งนี้แม้ถนนคอนกรีตจะมีความทนทานสูง แต่มีข้อจำกัดด้านค่าใช้จ่ายเริ่มต้น การก่อสร้างในพื้นที่ภูมิประเทศที่ทุรกันดาร และผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม ขณะที่ถนนลูกรังแม้จะก่อสร้างง่ายและต้นทุนต่ำ แต่มีข้อเสียด้านความเสถียร ความสะดวกสบายในการสัญจร และค่าบำรุงรักษาที่เกิดขึ้นซ้ำในระยะยาว

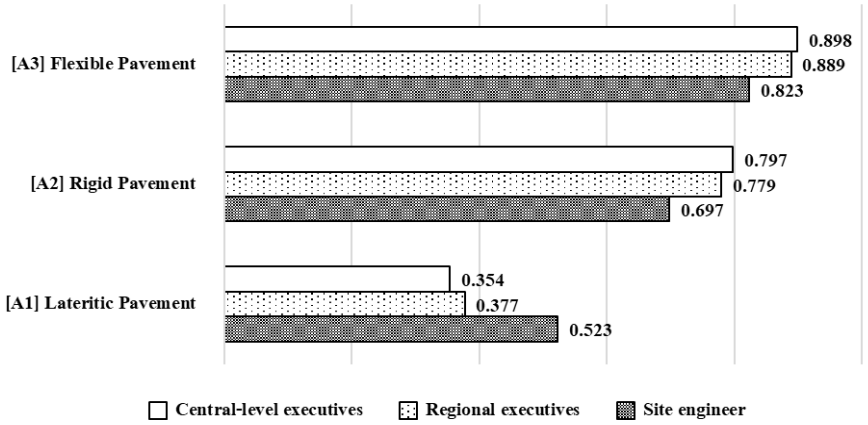


Fig. 6 Prioritization of Design Technique of Professional Groups

สรุป

งานวิจัยนี้นำเสนอผลการวิเคราะห์และจัดลำดับความสำคัญของปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพการควบคุมคุณภาพงานปรับปรุงถนนในเขตพื้นที่ป่าอนุรักษ์ และใช้ผลดังกล่าวในการประเมินรูปแบบถนนที่เหมาะสม โดยประยุกต์ใช้กรอบการตัดสินใจแบบพหุเกณฑ์ ร่วมกัน 2 วิธี ได้แก่ กระบวนการลำดับชั้นเชิงวิเคราะห์ (AHP) เพื่อหาค่าน้ำหนักของปัจจัย และเทคนิคการเรียงลำดับตามอุดมคติ (TOPSIS) เพื่อจัดลำดับความเหมาะสมของรูปแบบถนน โดยอาศัยข้อมูลจากผู้เชี่ยวชาญ 15 คนของกรมอุทยานแห่งชาติ สัตว์ป่า และพันธุ์พืช ครอบคลุมผู้บริหารส่วนกลาง ผู้บริหารส่วนภูมิภาค และวิศวกรควบคุมหน้างาน ผลการวิเคราะห์ AHP พบว่าเมทริกซ์การตัดสินใจมีค่า Consistency Ratio อยู่ระหว่าง 0.010–0.080 ซึ่งอยู่ในเกณฑ์ยอมรับได้ และเมื่อพิจารณาค่าน้ำหนักรวมของปัจจัยหลักพบว่า ปัจจัยด้านกายภาพของทางมีความสำคัญสูงที่สุด (0.365) รองลงมาคือปัจจัยด้านสัญญาจัดซื้อจัดจ้าง (0.270) ปัจจัยด้านบุคคลและการปฏิบัติงาน (0.209) และปัจจัยด้านเครื่องจักร (0.156) สะท้อนว่าลักษณะภูมิประเทศ สภาพดิน และสภาพทางจริงเป็นตัวกำหนดความเสี่ยงและคุณภาพงานมากที่สุด โดยผู้บริหารส่วนกลางให้ความสำคัญกับปัจจัยด้านสัญญาจัดซื้อจัดจ้างสูงสุด ขณะที่ผู้บริหารส่วนภูมิภาคและวิศวกรภาคสนามให้ความสำคัญกับปัจจัยด้านกายภาพของทางสูงสุด แสดงถึงมุมมองที่แตกต่างกันระหว่างผู้กำหนดนโยบายและผู้ปฏิบัติในพื้นที่ สำหรับผลการจัดลำดับรูปแบบถนนด้วย TOPSIS พบว่าถนนลาดยาง เป็นทางเลือกที่เหมาะสมที่สุดในการปรับปรุงถนนในเขตพื้นที่ป่าอนุรักษ์ โดยมีค่าความใกล้เคียงต่อคำตอบอุดมคติ เท่ากับ 0.898 รองลงมาคือถนนคอนกรีต (0.797) ส่วนถนนลูกรังมีค่าเพียง 0.354 และเมื่อแยกตามกลุ่มผู้ตัดสินใจทุกกลุ่มล้วนจัดลำดับให้ถนนลาดยางเป็นทางเลือกอันดับหนึ่งเช่นเดียวกัน แสดงให้เห็นว่าถนนลาดยางให้ความสมดุลที่เหมาะสมระหว่างความทนทาน การใช้งานระยะยาวมากกว่าทางเลือกอื่น ๆ โดยข้อค้นพบเหล่านี้สามารถใช้เป็นฐานข้อมูลเชิงประจักษ์เพื่อสนับสนุนการกำหนดนโยบาย มาตรฐานงาน และการตัดสินใจเลือกแนวทางปรับปรุงถนนของกรมอุทยานแห่งชาติ สัตว์ป่า และพันธุ์พืชให้สอดคล้องกับเป้าหมายด้านการอนุรักษ์ ความปลอดภัย และการใช้ประโยชน์พื้นที่อย่างยั่งยืนต่อไป

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจากสาขาวิชาวิศวกรรมโครงสร้างพื้นฐานและการบริหาร คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ และขอขอบคุณเจ้าหน้าที่หน่วยงานต่างๆ จากกรมอุทยานแห่งชาติ สัตว์ป่า และพันธุ์พืช ที่ให้ความช่วยเหลือในด้านข้อมูลที่ใช้ประกอบการทำการศึกษาค้นคว้าอิสระเล่มนี้

เอกสารอ้างอิง

เดชา ผลรุ่งเรือง, สันติ ชินานุวัติวงศ์. 2561. การศึกษาปัจจัยที่สำคัญต่อการควบคุมคุณภาพของงานก่อสร้างโรงไฟฟ้าพระนครเหนือ ชุดที่ 2. วิศวกรรมสาร มก.

นรินทร์ เอื้อศิริวรรณ, วิกรม พนิชการ, ดำรงค์ รังสรรค์, อุบลรัตน์ วาริชวัฒนะ. 2560. การกำหนดหลักเกณฑ์คัดเลือกตำแหน่งที่เหมาะสมสำหรับการจัดตั้งสถานีตรวจสอบน้ำหนักโดยการใช้ทฤษฎีกระบวนการลำดับชั้นเชิงวิเคราะห์ (AHP). วารสารวิศวกรรมสารเกษมบัณฑิต 7.

นวพรรษ์ ขันติสิทธิ์, วรรณวิทย์ แต้มทอง. 2564. ปัญหาของการควบคุมคุณภาพของงานถนนคอนกรีตเสริมเหล็กของโครงการบ้านจัดสรร. ในการประชุมวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 26. 26.

ปรีชา วิลัยวงค์. 2560. การศึกษาปัจจัยที่มีผลกระทบต่อประสิทธิภาพการควบคุมคุณภาพงานก่อสร้างถนนโดยประยุกต์ใช้กระบวนการลำดับชั้นเชิงวิเคราะห์ กรณีศึกษาการก่อสร้างถนนโครงการกังหันลม ตำบลวะตะแบก อำเภอเทพสถิต จังหวัดชัยภูมิ. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.

รัฐพงษ์ รัตนโคตร. ม.ป.ป. ปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพการควบคุมงานก่อสร้างถนนคอนกรีตเสริมเหล็กในเขตเทศบาลนครแหลมฉบัง อำเภอศรีราชา จังหวัดชลบุรี.

Benitez, J.M., Martín, J.C., Román, C.J. 2007. Using fuzzy number for measuring quality of service in the hotel industry. Tour. Manage. 28: 544–555.

Hwang, C.L., Yoon, K. 1981. Methods for multiple attribute decision making. In Multiple attribute decision making: Methods and applications – a state-of-the-art survey. Springer-Verlag, Berlin. 58–191.

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 The analytic hierarchy process in natural resource and environmental decision making. Springer, Dordrecht. 15–35.

Saaty, T.L., Vargas, L.G. 2012. The seven pillars of the analytic hierarchy process. In Models, methods, concepts and applications of the analytic hierarchy process. Springer, Boston. 23–40.

พฤติกรรมการรับแรงดัดของคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่เกิดสนิมภายใต้การเสริมกำลังด้วยวัสดุคอมโพสิตเสริมเส้นใยคาร์บอน CFRP โดยวิธีการบากร่อง

Flexural behavior of corroded concrete beams strengthened with CFRP using Externally Bonded Reinforcement on Groove Method

โชพงศ์ สถาพร*, **ปิยะ โชติกไกร**

Chopong Sathaporn*, Piya Chotickai

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

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

*Corresponding author: e-mail address: Chopong.sa@ku.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาพฤติกรรมการรับแรงดัดของคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่เกิดสนิมภายใต้การเสริมกำลังด้วยวัสดุคอมโพสิตเสริมเส้นใยคาร์บอน(CFRP)ด้วยวิธีการติดตั้งแบบบากร่อง โดยใช้ตัวอย่างคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีกำลังอัดคอนกรีต 24 MPa จำนวนรวม 11 ตัวอย่าง ซึ่งได้รับการเร่งให้เกิดสนิมในเหล็กเสริมด้วยปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีทำให้มีการสูญเสียมวลเหล็กเสริมจากสนิมระดับ 5% ถึง 10% จากนั้นทำการเสริมกำลังภายนอกด้วย CFRP (EBR) และเสริมกำลังด้วยวิธีการบางร่อง (EBROG) โดยมีระยะบากแตกต่างกัน ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าคานที่เสียหายจากสนิมเมื่อเสริมกำลังแล้วมีความสามารถรับแรงได้มากกว่าเดิม อย่างไรก็ดีการเสริมกำลังโดยวิธีการบากร่อง (EBROG) สามารถเพิ่มกำลังรับแรงของคานที่มีความเสียหาย ได้อย่างมีประสิทธิภาพตามระยะร่องบากที่เหมาะสม การเสริมกำลังทำให้เปลี่ยนรูปแบบการวิบัติจากบริเวณส่วนผิวคอนกรีตและแผ่น CFRP ไปเป็นรูปแบบเป็นการวิบัติในเนื้อคอนกรีต

คำสำคัญ: การติดตั้งแบบบากร่อง, การเสริมกำลังรับแรงดัด, การเสื่อมสภาพ

Abstract

This paper presents the flexural behavior of corroded reinforced concrete beams strengthened with carbon fiber reinforced composite (CFRP) materials using the externally bonded reinforcement on groove (EBROG) method. Eleven beams with concrete compressive strengths of 24 MPa were subjected to an electrochemical treatment, causing 5% - 10% mass losses in the reinforcement. The beams were strengthened using two methods, e.g., EBR method and the EBROG method with various groove spacings. The experimental results indicated that the beams with corrosion damage after strengthened have a higher load capacity, while the EBROG method significantly improved the bending moment capacity. Notching also changed the failure pattern at the interface between the CFRP and the concrete by reducing the failure area at an interface between CFRP and concrete substrate.

Keywords: Corroded beam, External bonded reinforcement on groove, Flexural strengthening

คำนำ

โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กเมื่อผ่านการใช้งานมาอย่างยาวนานย่อมมีการเสื่อมสภาพตามกาลเวลาส่งผลให้ความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกลดลง สนิมในเหล็กเสริมเป็นหนึ่งในสาเหตุหลักของการเสื่อมสภาพที่มีอิทธิพลโดยตรงต่อกำลังของโครงสร้าง โดยสนิมสามารถเกิดขึ้นได้จากหลากหลายปัจจัย ได้แก่ การแทรกซึมผ่านของคลอไรด์ ปฏิกิริยาคาร์บอเนชั่น รวมไปถึงการที่เหล็กเสริมสัมผัสกับความชื้นและออกซิเจนตลอดเวลา ปัจจัยการเสื่อมสภาพเหล่านี้จะมีความแตกต่างกันตามสภาวะแวดล้อมของแต่ละพื้นที่

การเสริมกำลังโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่เสื่อมสภาพให้สามารถกลับมารับน้ำหนักบรรทุกได้อย่างปลอดภัยดังเดิมปัจจุบันสามารถทำได้หลายวิธี การเสริมกำลังโครงสร้างด้วยวัสดุคอมโพสิตเสริมเส้นใยคาร์บอน (CFRP) เป็นวิธีที่นิยมกันแพร่หลาย เนื่องจากเป็นวัสดุที่มีคุณสมบัติเชิงกลสูงรับแรงดึงได้ดีกว่าเหล็กและมีน้ำหนักเบา อีกทั้งสามารถติดตั้งแผ่นคอมโพสิตเสริมเส้นใยคาร์บอนบริเวณผิวโครงสร้างได้อย่างสะดวกรวดเร็วไม่สูญเสียพื้นที่ใช้สอยมีประสิทธิภาพสูงเมื่อเทียบกับวิธีการเสริมกำลังในรูปแบบอื่นๆ แต่ระบบการเสริมกำลังข้างต้นยังมีข้อจำกัดเรื่องการยึดเกาะระหว่างผิวโครงสร้างคอนกรีตเดิมและวัสดุคอมโพสิตเสริมเส้นใยคาร์บอน (CFRP) จุดนี้เป็นปัจจัยหลักในการพิจารณาออกแบบเสริมกำลังโครงสร้าง หากโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่จะทำการเสริมกำลังนั้นพบว่าเหล็กเสริมเป็นสนิมหรือคอนกรีตมีรอยร้าวแล้ว อาจส่งผลให้แรงยึดเกาะระหว่างผิวคอนกรีตและวัสดุคอมโพสิตเสริมเส้นใยคาร์บอน (CFRP) ลดน้อยลง ซึ่งจะส่งผลต่อประสิทธิภาพของระบบการเสริมกำลังและทำให้ความสามารถในการรับน้ำหนักของโครงสร้างภายหลังได้รับการเสริมกำลังอาจไม่สอดคล้องกับหลักทฤษฎีการคำนวณออกแบบเสริมกำลังได้

ในประเทศไทยนิยมใช้มาตรฐาน ACI440.2R ในการอ้างอิงการออกแบบเสริมกำลังโครงสร้างคอนกรีตด้วยวัสดุคอมโพสิตเสริมเส้นใย โดยในมาตรฐานดังกล่าวได้ให้ความสำคัญกับประสิทธิภาพแรงยึดเหนี่ยวระหว่างผิวคอนกรีตเดิมและวัสดุคอมโพสิตเสริมเส้นใยเป็นหลักในการออกแบบเพื่อเสริมกำลังการรับแรงดัด

ด้วยเหตุนี้เนื้อหาของงานวิจัยจึงมุ่งเน้นศึกษาและปรับปรุงประสิทธิภาพของการเสริมกำลังด้วยวัสดุคอมโพสิตเสริมเส้นใยคาร์บอน (CFRP) โดยวิธีการบากร่อง เพื่อเป็นแนวทางเลือกในการเพิ่มประสิทธิภาพของการเสริมกำลังโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่เสื่อมสภาพจากสนิมในเหล็กเสริมให้มีประสิทธิภาพมากขึ้นกว่าการเสริมกำลังในรูปแบบที่มีอยู่เดิมต่อไป

อุปกรณ์และวิธีการ

ในการศึกษานี้ ได้เลือกใช้วัสดุหลักที่เกี่ยวข้องกับการทดสอบพฤติกรรมของคานคอนกรีตเสริมเหล็กและการเสริมกำลังด้วยวัสดุคอมโพสิตเสริมเส้นใยคาร์บอน ประกอบด้วย คานคอนกรีตเสริมเหล็กขนาด 150 × 150 มิลลิเมตร ยาว 1,200 มิลลิเมตร กำลังรับแรงอัด 24 MPa เหล็กเสริมเป็นเหล็กเส้นกลมชั้นคุณภาพ SR24 มีขนาดเส้นขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 มิลลิเมตร และ 9 มิลลิเมตร เพื่อจำลองสภาพแวดล้อมที่มีความเสี่ยงต่อการกัดกร่อนของเหล็กเสริม ได้ใช้สารละลายโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) ที่ความเข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก

วัสดุที่ใช้ในการเสริมกำลังตัวอย่างคานประกอบด้วยวัสดุคอมโพสิตเสริมเส้นใยคาร์บอนชนิดแผ่นเรียบ (Carbon Fiber Reinforced Polymer Plate: CFRP Plate) ที่มีความกว้าง 100 มิลลิเมตร และความหนา 1.20 มิลลิเมตร โดยต้องใช้อีพ็อกซี่สำหรับติดตั้ง CFRP กับผิวคอนกรีตบริเวณท้องคาน

อุปกรณ์ที่ใช้ในกระบวนการเร่งการเสื่อมสภาพ การเสริมกำลังและทดสอบพฤติกรรมการรับแรงดัด

1. แผ่นสเตนเลส ขนาดกว้าง 150 มิลลิเมตร สูง 150 มิลลิเมตร ยาว 1,200 มิลลิเมตร พับเป็นราง
2. เครื่องจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง (DC Power Supply) ขนาดไม่น้อยกว่า 5 แอมแปร์ พร้อมสายไฟ
3. เครื่องตรวจวัดความชื้นบริเวณผิวคอนกรีต (ตามมาตรฐาน ASTM F2659)
4. เครื่องเซาะร่องคอนกรีต
5. เกรียงสำหรับปาดอีพ็อกซี่
6. อุปกรณ์ตรวจวัดการเคลื่อนตัวแบบเชิงเส้น (LVDT)
7. อุปกรณ์ตรวจวัดการยืด-หดตัว (Strain Guage)
8. เครื่องแปลผลสัญญาณจากอุปกรณ์ตรวจวัด (Data Logger)

วิธีการดำเนินการศึกษา

1. การเตรียมตัวอย่างทดสอบ

เตรียมชิ้นส่วนตัวอย่างคานคอนกรีตขนาด 150 x 150 x 1,200 มิลลิเมตร ดังแสดงใน Fig. 1 ซึ่งประกอบด้วยเหล็กเสริมชั้นคุณภาพ SR24 มีคุณสมบัติตาม Table 1 แบ่งออกเป็นเหล็กเสริมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 มิลลิเมตร จำนวน 2 เส้นเป็นเหล็กเสริมบน และเหล็กเสริมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 9 มิลลิเมตร จำนวน 2 เส้นเป็นเหล็กเสริมท้องคานพร้อมดัดงอ 90 องศาสำหรับการเร่งปฏิกิริยาสนิมเหล็กด้วยกระบวนการไฟฟ้าเคมี โดยเหล็กเสริมทั้ง 2 ตำแหน่ง มีระยะคอนกรีตหุ้ม 30 มิลลิเมตร พร้อมทั้งเหล็กปลอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 9 มิลลิเมตรติดตั้งห่างกันทุกๆ 35 มิลลิเมตร ตลอดความยาวคานดังแสดงใน Fig. 2

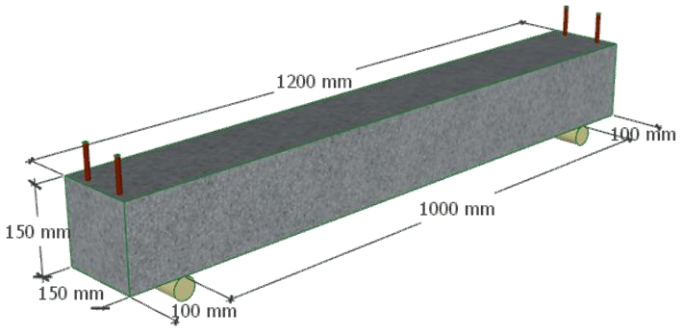


Fig. 1 Specimen size

Table 1 Material property of Concrete Specimen

Rebar	Diameter (mm.)	Property			
		Grade	Yield Strength (MPa)	Ultimate Strength (MPa)	Modulus of Elasticity (MPa)
Compression Steel	6	SR24	240	390	204,000
Tension Steel	9	SR24	240	390	204,000
Stirrup	6	SR24	240	390	204,000

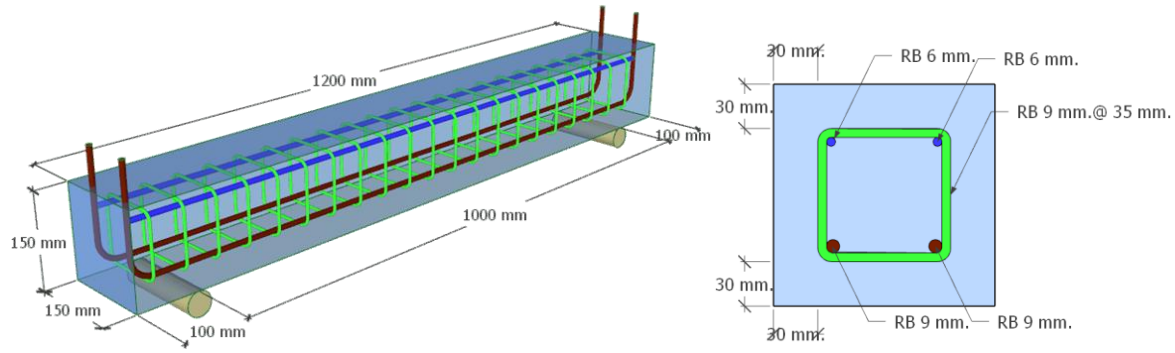


Fig. 2 Steel Reinforcement in Concrete Specimen

2. การเร่งปฏิกิริยาการเกิดสนิมในเหล็กเสริม

การเร่งปฏิกิริยาการเกิดสนิมในเหล็กเสริมสามารถทำได้โดยการนำชิ้นตัวอย่างคอนกรีตเสริมเหล็กที่ทำการบ่มแล้วมาวางไว้ในแผ่นรางสเตนเลสและนำลงไปวางในอ่าง ทำการเติมสารละลายโซเดียมคลอไรด์ที่มีความเข้มข้น 5% โดยน้ำหนัก ให้ความสูงของสารละลายอยู่ที่ความสูง 80 มิลลิเมตรจากท้องคาน จากนั้นนำเครื่องจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง (DC Power Supply) ทำการต่อขั้วบวกเข้ากับเหล็กเสริมของชิ้นตัวอย่างและขั้วลบเข้ากับแผ่นสเตนเลส ดังแสดงใน Fig. 2 ทั้งนี้จะต้องทำการควบคุมกระแสไฟฟ้าให้อยู่ในช่วง 5 ± 0.10 แอมแปร์ ตลอดเวลาที่เร่งสนิมและทำการบันทึกข้อมูลกระแสไฟฟ้าทุกๆ 1 ชั่วโมง

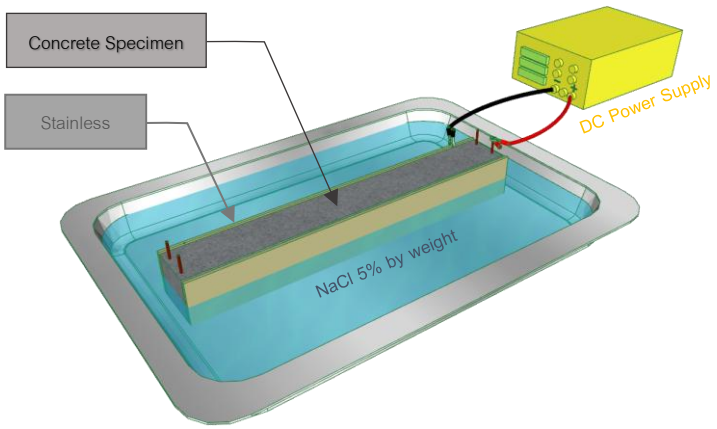


Fig. 3 Electrochemical Treatment of Steel Reinforcement

วัตถุประสงค์หลักของการเร่งปฏิกิริยาการเกิดสนิมในเหล็กเสริม คือ ต้องการให้เหล็กเสริมล่าง (2-RB9 มิลลิเมตร) มีการเสื่อมสภาพและเกิดสนิม โดยแบ่งเป็น 2 ระดับคือ ระดับที่มีสนิม 5% และ 10% โดยน้ำหนัก ระยะเวลาในการเร่งสนิมสามารถคำนวณได้จากกฎของฟาราเดย์ (Faraday's Law) ดัง Equation 1 (K.M.A. Hossain et al, 2020)

$$\text{Mass loss} = \frac{t \times i \times M}{z \times F} \quad (1)$$

Where ;

I = Current in Ampere

t = time in second

M = Atomic weight (for steel 55.847 g/mol)

F = Faraday constant *(96,487)*

Z = Ion charge *(2* mol of electron*)*

เมื่อครบกำหนดระยะเวลาการเร่งปฏิกิริยาสนิมในเหล็กเสริมแล้ว ทำการเสริมกำลังตัวอย่างด้วยวัสดุคอมโพสิตเสริมเส้นใยคาร์บอน CFRP โดยวิธีการบากร่องและทดสอบความสามารถในการรับแรงดัดด้วยการใช้แรงกดบริเวณกลางคาน จากนั้นนำชิ้นตัวอย่างคานไปทำการสกัดคอนกรีตเพื่อนำเหล็กเสริมมาทำความสะอาด โดยแช่ในสารละลายไฮโดรคลอลิก (HCl) ที่มีความเข้มข้นร้อยละ 12 โดยปริมาตร เป็นเวลา 30 นาที แล้วแช่ในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) มีความเข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก ที่ระยะเวลา 5 นาที ขั้นตอนสุดท้ายนำเหล็กมาทำความสะอาดด้วยน้ำและชั่งน้ำหนักเพื่อคำนวณหาอัตราการกัดกร่อนของเหล็กเสริมดัง Equation 2 (Lijun Hou et al, 2019)

$$\rho_c = \frac{\Delta m}{m_0} \quad (2)$$

Where ;

ρ_c = Steel Corrosion Rate in Concrete

Δm = Weight of steel (g.)

M_c = Weight of steel after corroded(g.)

3. การติดตั้งระบบเสริมกำลัง

การเสริมกำลังด้วยวัสดุคอมโพสิตเสริมเส้นใยคาร์บอน CFRP โดยวิธีการบากร่อง ได้เลือกวัสดุเสริมกำลังชนิดแผ่นเรียบ (CFRP Plate) และอีพ็อกซี่เรซิ่นที่สามารถจัดหาได้ภายในประเทศไทยโดยมีคุณสมบัติของวัสดุตาม Table *2* และ Table 3 มาใช้ในงานวิจัยนี้

Table 2 Material Property of Carbon Fiber Plate

Brand	Product	Width (mm.)	Thickness (mm.)	Density (g/sq.cm.)	Property		
					Tensile Strength *(MPa)*	Modulus of Elasticity *(MPa)*	Elongation (%)
STRONGTHAI CORP	CLS1012	*100*	*1.20*	1.50	2,800	165,000	1.70

Table 3 Material Property of Epoxy Resin

Brand	Product	Property					
		Adhesive (MPa)	Tensile Strength (MPa)	Flexural Strength (MPa)	Shear Strength (MPa)	Modulus of Elasticity (MPa)	Pot Life (Minutes)
STRONGTHAI CORP	Strongchem-CPA *10*	*3.50*	*30.00*	N.A.	N.A.	12,000	30

ก่อนดำเนินการติดตั้งระบบเสริมกำลังจะต้องทำความสะอาดและขัดผิวคอนกรีต กำจัดฝุ่นเศษผงออกให้หมดไปก่อน พร้อมทั้งตรวจวัดความชื้นบริเวณผิวคอนกรีตบริเวณที่จะติดตั้งแผ่นเส้นใยเสริมกำลังคาร์บอน ซึ่งจะต้องได้ค่าอยู่ในระดับที่สามารถทาอีพ็อกซี่ได้ จากนั้นทำการบากร่องตามที่กำหนดด้วยเครื่องเซาะร่องคอนกรีตโดยแต่ละร่องบากมีความกว้าง 5 มิลลิเมตร ความลึก 5 มิลลิเมตรและมีความยาว 130 มิลลิเมตร ตาม Table 4 ซึ่งมีระยะห่างระหว่างร่องบากได้แก่ 15, 30, 45 มิลลิเมตร ดังแสดงใน Fig. 4

Table 4 Specimen and Transverse Groove

Example	Compressive Strength (MPa)	Steel Corrode (%)	Transverse Grooves				End Wrap by CFRP SHEET
			Width (mm.)	Depth (mm.)	Length (mm.)	Spacing (mm.)	
Control Beam	*24*	*0*	-	-	-	-	✗
CTB0524	*24*	*5*	-	-	-	-	✗
CTB0524W	*24*	*5*	-	-	-	-	✓
B0524G15	*24*	*5*	*5*	*5*	*130*	*15*	✓
B0524G30	*24*	*5*	*5*	*5*	*130*	*30*	✓
B0524G45	*24*	*5*	*5*	*5*	*130*	*45*	✗
CTB1024	*24*	*10*	-	-	-	-	✓
CTB1024W	*24*	*10*	-	-	-	-	✓
B1024G15	*24*	*10*	*5*	*5*	*130*	*15*	✓
B1024G30	*24*	*10*	*5*	*5*	*130*	*30*	
B1024G45	*24*	*10*	*5*	*5*	*130*	*45*	

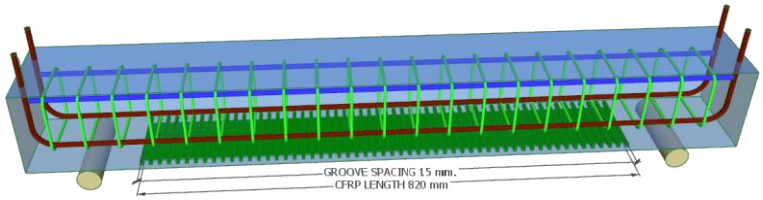


Fig. 4 Specimen and Groove Spacing

4. การทดสอบหาความสามารถในการรับแรงดัดของชิ้นตัวอย่าง

การทดสอบรับแรงดัดของงานวิจัยนี้ได้กำหนดให้ใช้รูปแบบแรงกดจากไฮดรอลิกบริเวณกึ่งกลางคาน (Three - point bending test) พร้อมติดตั้งเครื่องมือตรวจวัดพฤติกรรมของวัสดุและชิ้นส่วนโครงสร้างดังแสดงใน Fig. 5 ซึ่งมีรายละเอียดต่อไปนี้

4.1 เครื่องมือตรวจวัดการเคลื่อนตัวแบบเชิงเส้น (LVDT) จำนวน 5 ตำแหน่ง ได้แก่

- บริเวณฐานรองรับ (Support) ฝั่งละ 1 รวมเป็น 2 ตำแหน่ง
- บริเวณหนึ่งในสี่ของช่วงฐานรองรับ (Quarter span) ฝั่งละ 1 รวมเป็น 2 ตำแหน่ง
- บริเวณกึ่งกลางคาน (Mid span) จำนวน 1 ตำแหน่ง

4.2 เครื่องมือตรวจวัดการยืด-หดตัว (Strain Gauge) บริเวณผิวคอนกรีตด้านข้างคานซึ่งตรงกับตำแหน่งเหล็กเสริมรับแรงอัด จำนวน 1 ตำแหน่ง

4.3 เครื่องมือตรวจวัดการยืด-หดตัว (Strain Gauge) ใต้ท้องคานบริเวณผิววัสดุเสริมกำลังชนิดแผ่นเรียบ (CFRP Plate) จำนวน 7 ตำแหน่ง ได้แก่

- บริเวณปลายแผ่น (End) ฝั่งละ 1 รวมเป็น 2 ตำแหน่ง
- บริเวณหนึ่งในหก (One sixth) ของช่วงฐานรองรับ ฝั่งละ 1 รวมเป็น 2 ตำแหน่ง
- บริเวณหนึ่งในสาม (One third) ของช่วงฐานรองรับ ฝั่งละ 1 รวมเป็น 2 ตำแหน่ง
- บริเวณกึ่งกลางคาน (Mid span) จำนวน 1 ตำแหน่ง

โดยเครื่องมือตรวจวัดพฤติกรรมเหล่านี้ต้องทำการต่อพ่วงเข้ากับเครื่องแปลผลสัญญาณ (Data Logger) และทำการควบคุมแรงกดจากเครื่อง UTM ด้วยอัตราความเร็วที่ 1 มิลลิเมตรต่อนาทีไปจนคานเกิดการวิบัติ

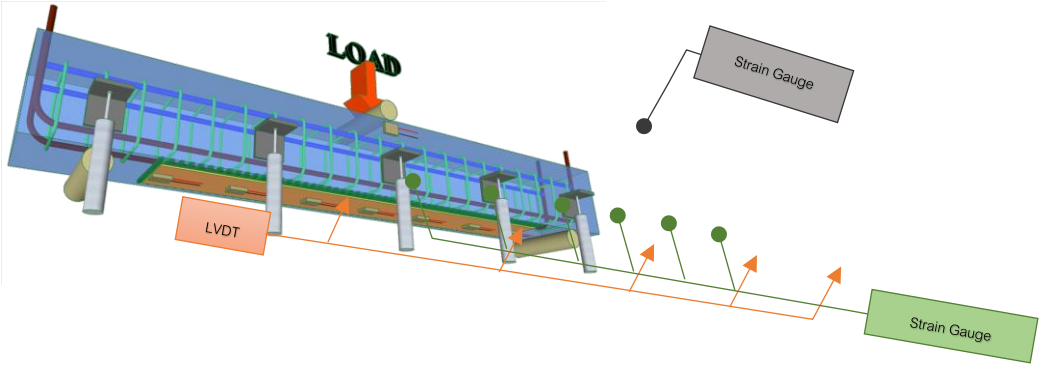


Fig. 5 Instrumentation setup for the flexural test

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

ผลการทดสอบกำลังการรับแรงของชิ้นส่วนตัวอย่างทั้ง 11 คาน พบว่า คานทุกตัวที่เสริมกำลังด้วย CFRP ทำให้คานมีความสามารถในการรับแรงกระทำได้ดีกว่าคานที่ไม่ได้เสริมกำลังดังแสดง Table 5 โดยที่แรงกระทำสูงสุดทำให้คานที่เสริมกำลังด้วยการบากร่องเกิดการวิบัติแบบคอนกรีตส่วนหุ้มเหล็กเสริมแตกร้าว (Concrete Cover Delaminate)

Table 5 Test result

Specimen	Initial Stiffness (kg./mm.)	Ultimate Load (kg.)	Failure Mode	Corrosion (%)
Control Beam	3,266.30	3,266.68	Flexural Crack	0.00%
CTB0524	3,128.39	6,442.73	End Peeling	6.79%
CTB0524W	4099.83	7,765.28	CCD	6.62%
B0524G15	2,524.45	7367	CCD	6.66%
B0524G30	4,513.29	8,238.93	CCD	7.13%
B0524G45	3086.8	6,974.69	CCD	6.81%
CTB1024	3,726.42	6,522.06	End Peeling	8.93%
CTB1024W	3477.59	7765.28	CCD	7.71%
B1024G15	2,798.42	7,093.96	CCD	8.20%
B1024G30	2,617.26	6,133.56	CCD	9.60%
B1024G45	3507.33	6875.14	CCD	10.95%

Note: *CCD = Concrete Cover Delaminate

อย่างไรก็ตามคานที่ทำการพันรัดรอบด้วย CFRP ชนิด Sheet บริเวณปลายคาน สามารถรับแรงกระทำได้ดีกว่าตัวอย่างคานที่ไม่ได้พันรัดรอบดังแสดงใน Fig. 6

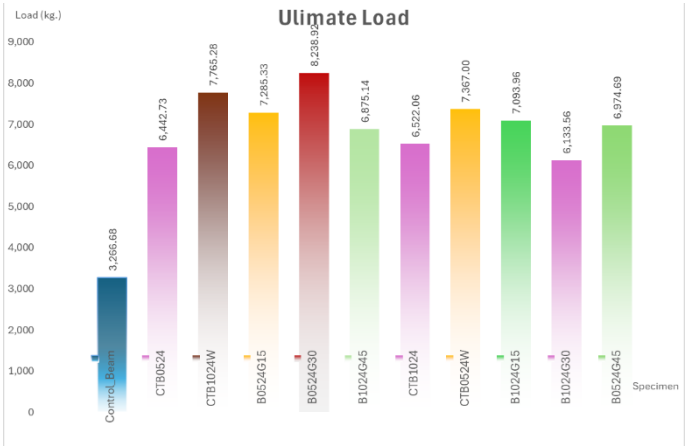


Fig. 6 Ultimate Load

คานที่มีการเสริมกำลังจะแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำ (Load) และการแอ่นตัว (Deflection) เป็นลักษณะเส้นตรงในช่วงแรกและมีความลาดชันมากกว่าคานที่ไม่ได้รับการเสริมกำลัง เพียงแต่ภายหลังจากสภาวะการรับแรงกระทำสูงสุดจะไม่สามารถรับแรงต่อไปได้อีกเหมือนกับคานที่ไม่ได้รับการเสริมกำลังดังแสดงใน Fig. 7

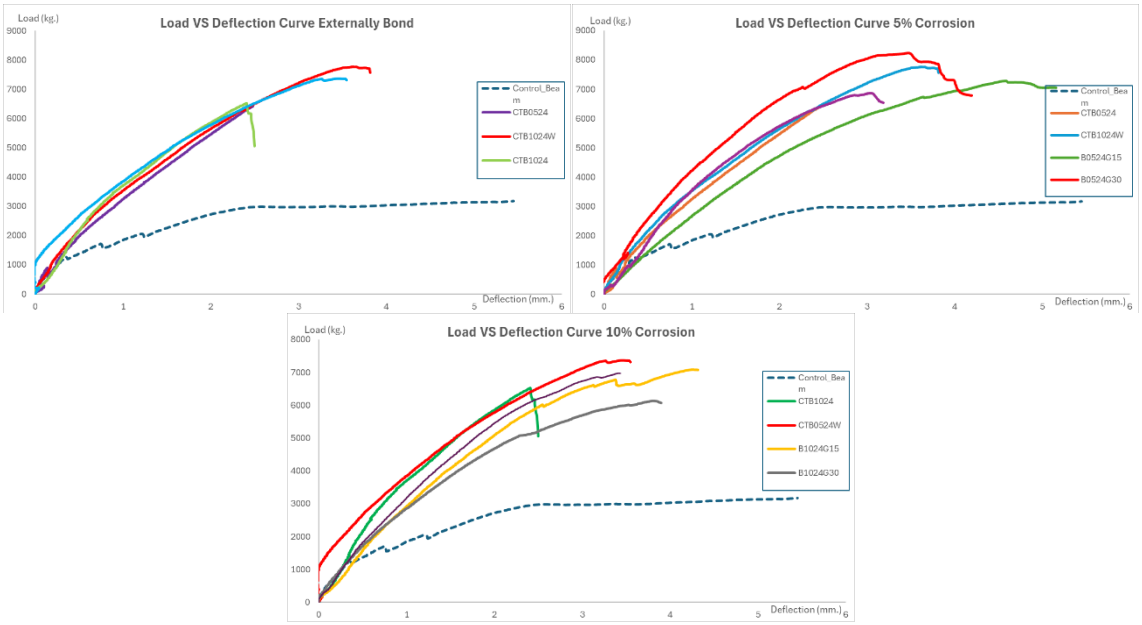


Fig. 7 Load vs Deflection Curve

สรุป

1. เมื่อพิจารณาความสามารถในการรับแรงดัดของคานที่เสื่อมสภาพ 6–7% พบว่า การเสริมกำลังด้วยวิธี EBROG มีประสิทธิภาพในการรับแรงดัดเพิ่มขึ้น 8–13% อย่างไรก็ตามคานที่เสื่อมสภาพเกินกว่า 8% การเสริมกำลังด้วยวิธี EBROG จะมีประสิทธิภาพต่ำกว่าการเสริมกำลังด้วยระบบ EBR

2. คานที่ไม่ได้รับการเสริมกำลังจะมีพฤติกรรมการวิบัติแบบเกิดรอยร้าวตรงกลางคาน (Flexural Crack) คานที่เสริมกำลังด้วยการติดตั้งวัสดุเสริมกำลังภายนอกจะมีการวิบัติแบบปลาย CFRP หลุดลอก(End Peeling) ส่วนคานที่ทำการบากร่องจะมีพฤติกรรมการวิบัติแบบคอนกรีตส่วนหุ้มเหล็กเสริมแตกร้าว (Concrete Cover Delaminate)

3. การเสริมกำลังด้วยการบากร่องที่ระยะห่าง 30 มิลลิเมตร เป็นระบบการเสริมกำลังที่มีประสิทธิภาพมากที่สุดเมื่อเทียบกับระยะบากร่องอื่นสำหรับคานที่มีสภาวะการเสื่อมสภาพที่แตกต่างกันออกไป

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้แต่งขอขอบคุณบริษัท สตรองไทย คอร์ป จำกัด ผู้ให้การสนับสนุนวัสดุ อุปกรณ์ และสถานที่ในการเตรียมตัวอย่างทดสอบ และขอขอบคุณกลุ่มงานวิเคราะห์และวิจัย 2 กองวิเคราะห์และวิจัย สำนักการโยธา กรุงเทพมหานครที่เอื้อเฟื้อสถานที่สำหรับการทำงานวิจัย

เอกสารอ้างอิง

Chen, C., et al. 2019. Effect of transverse groove on bond behavior of FRP-concrete interface: Experimental study, image analysis and design. Compos. Part B Eng. 161: 205–219.

Chotickai, P., Somana, S. 2018. Performance of CFRP-strengthened concrete beams after exposure to wet/dry cycles. J. Compos. Constr. 22.

Mohammadi Ghahsareh, F., Mostofinejad, D. 2021. Groove classification in EBROG FRP-to-concrete joints. Constr. Build. Mater. 275.

Mostofinejad, D., Khozaei, K. 2015. Effect of GM patterns on ductility and debonding control of FRP sheets in RC strengthened beams. Constr. Build. Mater. 93: 110–120.

Mostofinejad, D., Moghaddas, A. 2014. Bond efficiency of EBR and EBROG methods in different flexural failure mechanisms of FRP strengthened RC beams. Constr. Build. Mater. 54: 605–614.

Sabzi, J., et al. 2020. Effect of concrete strength and longitudinal reinforcement arrangement on the performance of reinforced concrete beams strengthened using EBR and EBROG methods. Eng. Struct. 205.

การประเมินความเหมาะสมของแบบจำลองดินในการวิเคราะห์การทรุดตัวของดินหลายประเภท

Suitability evaluation of soil models for soil settlement analysis of various soils

เธียรธัช อินทร์พลอย[a], **สุสิทธิ์ ฉายประกายแก้ว**[a,*], **ศุภกิจ นนทนานันท์**[a], **สุธาสินี อินตุ้ย**[b]
Tieantach Inploy[a], Susit Chaiprakaikeow[a,*], Supakij Nontananandh[a], Sutasinee Intui[b]
[a]ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900
[b]ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ ศรีราชา มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ชลบุรี 20230
[a]Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Kasetsart University, Bangkok 10900, Thailand
[b]Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering at Sriracha, Kasetsart University, Chonburi 20230, Thailand
*Corresponding author. E-mail address: fengssck@ku.ac.th

บทคัดย่อ

การเลือกแบบจำลองดินในการวิเคราะห์มีความสำคัญอย่างมากทางวิศวกรรมปฐพี เพราะมีผลต่อพฤติกรรมการทรุดตัวของดินและความปลอดภัยต่อสิ่งก่อสร้าง งานวิจัยนี้จึงประเมินความแม่นยำของแบบจำลองดิน Mohr-Coulomb (MC) และ Hardening Soil model (HS) ในการจำลองการอัดตัวคายน้ำของดินผสมระหว่างดินเม็ดละเอียดและดินเม็ดหยาบ โดยใช้โปรแกรม PLAXIS 3D เปรียบเทียบกับผลการทดสอบ Oedometer ของดินหลายประเภท โดยผลการทดลองพบว่าแบบจำลอง HS ให้ค่าการทรุดตัวสอดคล้องกับผลการทดสอบ Oedometer มากกว่าแบบจำลอง MC สำหรับดินเหนียวที่มีความเป็นพลาสติกสูง (CH) ดินเหนียวที่มีความเป็นพลาสติกต่ำ (CL) และดินทรายผสมดินเหนียว (SC) อย่างไรก็ตามแบบจำลอง HS ต้องการข้อมูลนำเข้าที่มากกว่าทำให้การใช้งานซับซ้อนกว่า ในขณะที่แบบจำลอง MC มีความสอดคล้องกับผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการมากกว่าแบบจำลอง HS เล็กน้อย สำหรับดินทรายผสมทรายแป้ง (SM)

คำสำคัญ: การทรุดตัว, แบบจำลองดิน, ไฟไนต์อีลิเมนต์

Abstract

The selection of soil models for analysis is of great importance in geotechnical engineering as it affects soil settlement behavior and the safety of structures. This research therefore evaluates the accuracy of Mohr-Coulomb (MC) and Hardening Soil Model (HS) in simulating the consolidation settlement of fine-grained and coarse-grained soil mixtures using PLAXIS 3D, compared with the Oedometer test results of several soil types. The analysis results showed that the HS model provided settlement values that were more consistent with the Oedometer test results than the MC model for high-plasticity clay (CH), low-plasticity clay (CL), and clayey sand (SC). However, the HS model requires more input data, making its use more complex, while the MC model is slightly more consistent with laboratory test results than the HS model for silty sand (SM).

Keywords: Finite element, Settlement, Soil Models

คำนำ

องค์ประกอบของดินผสมที่มีทั้งเม็ดดินละเอียดและเม็ดหยาบอยู่ร่วมกันนั้น มีพฤติกรรมเชิงกลแตกต่างจากดินบริสุทธิ์อย่างมีนัยสำคัญ โดยแนวปฏิบัติเดิมในการวิเคราะห์การทรุดตัวมักอาศัยการจำแนกชั้นดินและตีความว่าเป็นดินเหนียวล้วนหรือทรายล้วนซึ่งไม่สามารถสะท้อนความเป็นจริงของคุณสมบัติดินได้อย่างเพียงพอ และอาจนำไปสู่การประเมินพฤติกรรมการทรุดตัวที่คลาดเคลื่อน เช่น ในกรณีดินทรายที่มีส่วนของเม็ดละเอียดมากพอให้เกิดการยุบตัวแบบอัดตัวคายน้ำ ตัวอย่างเช่นในงานของดินถมทะเล เป็นต้น ซึ่งส่งผลต่อการคาดการณ์การทรุดตัวและเพิ่มความเสี่ยงด้านเสถียรภาพของโครงสร้างในระยะยาว (Janbu, 1963; Mesri and Godlewski, 1977) แม้ว่าวิธีการวิเคราะห์เชิงประจักษ์หรือการคำนวณด้วยมือยังมีบทบาทในงานออกแบบเบื้องต้น แต่ไม่สามารถรองรับพฤติกรรมดินที่มีความไม่เชิงเส้นและแปรผันตามระดับความเค้นได้อย่างครบถ้วน การวิเคราะห์เชิงตัวเลขด้วยวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์จึงเป็นทางเลือกสำคัญ เนื่องจากสามารถจำลองพฤติกรรมดินในสภาวะต่าง ๆ โดยแบบจำลองที่ใช้ในการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์ ได้แก่ แบบจำลอง Mohr–Coulomb (MC) ซึ่งมีพื้นฐานจากทฤษฎีความเป็นพลาสติกของ Hill (1950) และ Drucker and Prager (1952) เป็นแบบจำลองที่ใช้อย่างแพร่หลายเนื่องจากมีความเรียบง่ายและเหมาะสมกับการวิเคราะห์ทั่วไป ขณะที่แบบจำลอง Hardening Soil (HS) พัฒนาต่อจากแนวคิดความไม่เชิงเส้นของดินและการเพิ่มค่าโมดูลัสตามระดับความเค้น (Muir Wood, 1990; Schanz et al., 1999; Schanz and Vermeer, 1996) อย่างไรก็ตาม ความเหมาะสมของแบบจำลองทั้งสองเมื่อใช้กับดินประเภทต่าง ๆ โดยเฉพาะประเภทดินที่ทั้งส่วนผสมของดินเหนียวและดินทรายที่มีอัตราส่วนผสมที่ต่าง ๆ ยังไม่มีการศึกษาเชิงระบบ งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินสมรรถนะของแบบจำลอง MC และ HS ในการจำลองพฤติกรรมการอัดตัวคายน้ำของดิน โดยเปรียบเทียบกับผลการทดสอบ Oedometer เพื่อประเมินความสอดคล้อง ความคลาดเคลื่อน และแนวทางการเลือกใช้แบบจำลองที่เหมาะสมสำหรับดินเม็ดละเอียดและดินผสม ซึ่งจะช่วยเพิ่มความเชื่อมั่นในการประเมินค่าการทรุดตัวสำหรับงานวิศวกรรมปฐพี

อุปกรณ์และวิธีการ

ตัวอย่างดินที่ใช้และการทดสอบในห้องปฏิบัติการ

ตัวอย่างดินที่นำมาใช้เป็นตัวอย่างดินแบบไม่ถูกรบกวนที่เก็บจากพื้นที่ จ.นครศรีธรรมราช จ.สระบุรี จ.อยุธยา จ.ระยอง และ จ.จันทบุรี ด้วยวิธีการเจาะสำรวจ จากนั้นนำมาทดสอบในห้องปฏิบัติการเพื่อหาคุณสมบัติพื้นฐาน และคุณสมบัติทางวิศวกรรมเพื่อใช้เป็นพารามิเตอร์สำหรับแบบจำลองดิน ได้แก่ การหาค่าขีดจำกัดของ Atterberg ตามมาตรฐาน ASTM D4318 (2017) การวิเคราะห์การกระจายตัวของเม็ดดินตามมาตรฐาน ASTM D422 (2007) เพื่อหาสัดส่วนของอนุภาคดิน การหาความชื้นของดิน ตามมาตรฐาน ASTM D2216 (2016) สำหรับการทดสอบคุณสมบัติทางวิศวกรรมได้ทำการทดสอบ Oedometer ตามมาตรฐาน ASTM D2435 (2020) เพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์ที่เกี่ยวข้องกับการอัดตัวคายน้ำ รวมถึงการทดสอบ Triaxial Compression เพื่อประเมินค่ากำลังรับแรงเฉือน ตามมาตรฐาน ASTM D4767 (2011) โดยผลทดสอบที่นำมาใช้เป็นพารามิเตอร์สำหรับแบบจำลองนั้น นำมาจากตัวอย่างดินที่อยู่ในตำแหน่งหลุมเจาะเดียวกันหรือใกล้เคียงกัน ที่ความลึกเท่าหรือใกล้เคียงกัน และมีคุณสมบัติใกล้เคียงกัน

การจำแนกตัวอย่างดิน

ตัวอย่างดินของการศึกษาครั้งนี้ดำเนินการจำแนกประเภทดินตามระบบ Unified Soil Classification System (USCS) โดยนำผลการทดสอบดัชนีของดินมาใช้เป็นเกณฑ์ในการจัดประเภทดิน เพื่อให้การวิเคราะห์พฤติกรรมการอัดตัวสะท้อนความแตกต่างของโครงสร้างดินในแต่ละประเภทได้อย่างเหมาะสม โดยจากจำนวนตัวอย่างทั้งหมด จำแนกเป็นดินเหนียวที่มีความเป็นพลาสติกสูง (High Plasticity Clay, CH) จำนวน 10 ตัวอย่าง ดินเหนียวที่มีความเป็นพลาสติกต่ำ (Low Plasticity Clay, CL) จำนวน 10 ตัวอย่าง ดินทรายผสมดินเหนียว (Clayey Sand, SC) จำนวน 10 ตัวอย่าง และดินทรายผสมทรายแป้ง (Silty Sand, SM) จำนวน 5 ตัวอย่าง เพื่อให้ครอบคลุมถึงประเภทของดินที่นำมาใช้ในการก่อสร้างส่วนใหญ่

การวิเคราะห์ไฟไนต์อีลิเมนต์ (Finite Element Model)

แบบจำลองวัสดุดินที่ใช้ในการศึกษาประกอบด้วยแบบจำลอง MC และแบบจำลอง HS เนื่องจากแบบจำลองทั้งสองนี้เป็นแบบจำลองที่นิยมในการใช้วิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์ โดยแต่ละแบบจำลองใช้พารามิเตอร์ที่ได้จากการทดสอบในห้องปฏิบัติการและค่าที่คำนวณจากดัชนีคุณสมบัติของดิน ทั้งนี้พารามิเตอร์ของแบบจำลอง MC ได้มาจากพฤติกรรมแรงเฉือนและคุณสมบัติยืดหยุ่นของดิน ซึ่งสะท้อนพฤติกรรมยืดหยุ่น–พลาสติกสมบูรณ์ตามสมมติฐานพื้นฐานของแบบจำลอง ส่วนแบบจำลอง HS ใช้พารามิเตอร์จากผลทดสอบ Oedometer และ Triaxial เช่นเดียวกัน แต่มีการประเมินค่าความแข็งที่เปลี่ยนแปลงตามระดับความเค้น ทั้งนี้พารามิเตอร์ทั้งหมดที่ใช้ในแบบจำลองทั้ง 2 ชุด ถูกจัดกลุ่มและสรุปไว้เพื่อการนำไปวิเคราะห์เชิงตัวเลข โดยรายละเอียดแสดงใน Table 1

การสร้างแบบจำลองสามมิติ โดยใช้โปรแกรม PLAXIS 3D

การสร้างแบบจำลองพฤติกรรมจากการทดสอบ Oedometer ในงานวิจัยนี้ดำเนินการโดยใช้โปรแกรม PLAXIS 3D ซึ่งเป็นซอฟต์แวร์ไฟไนต์อีลิเมนต์ที่ออกแบบเฉพาะสำหรับงานวิศวกรรมปฐพี เพื่อประเมินความถูกต้องของแบบจำลองดินผ่านการเปรียบเทียบกับผลการทดสอบจริง โดยสร้างแบบจำลองสามมิติของตัวอย่างดินให้มีขนาดใกล้เคียงกับอุปกรณ์ทดลองจริง คือ ความสูงตัวอย่าง (H) เท่ากับ 0.025 เมตร และเส้นผ่านศูนย์กลาง (D) เท่ากับ 0.05 เมตร พร้อมกำหนดให้ฐานด้านล่างยึดแน่นเพื่อกำหนดการเคลื่อนตัวของแบบจำลอง โดยใช้การตั้งค่า Surface Displacement ในแนวระนาบให้ถูกจำกัด และให้มีการเคลื่อนที่อิสระในแนวดิ่งตามสภาวะของตัวอย่างในการทดสอบ Oedometer และกำหนดให้สามารถระบายน้ำได้ทั้งด้านบนและด้านล่าง (Double Drainages) เพื่อจำลองสภาวะการอัดตัวคายน้ำของดินอย่างถูกต้อง แบบจำลองใช้ชิ้นส่วน Tetrahedral 10 จุด โดยกำหนดระดับความละเอียดของตาข่ายให้มีความละเอียดสูง (Very Fine) สำหรับดินทุกชนิด เพื่อสะท้อนการเปลี่ยนรูปขนาดเล็กดังแสดงใน Fig. 1A จากนั้นกำหนดแรงกระทำในแนวดิ่งผ่านแผ่นกระจายน้ำหนัก เพื่อให้แรงถูกถ่ายลงบนตัวอย่างดินอย่างสม่ำเสมอ แล้วทำการวิเคราะห์ด้วยโหมด Consolidation โดยตั้งค่าการคำนวณความดันน้ำเป็นการไหลของน้ำแบบสภาวะคงตัว เพื่อให้สอดคล้องกับกลไกการระบายน้ำในการทดสอบ Oedometer และกำหนดลำดับการถ่ายแรงให้สอดคล้องกับขั้นการทดสอบในห้องปฏิบัติการ โดยจะพิจารณาเฉพาะขั้นตอนการเพิ่มน้ำหนักกดเท่านั้น และไม่พิจารณาขั้นตอนการถอนน้ำหนักเพื่อประเมินการทรุดตัวที่เกิดขึ้น ผลการแสดงรูปแบบการเปลี่ยนรูปของตัวอย่างจากแบบจำลองแสดงดัง Fig. 1B

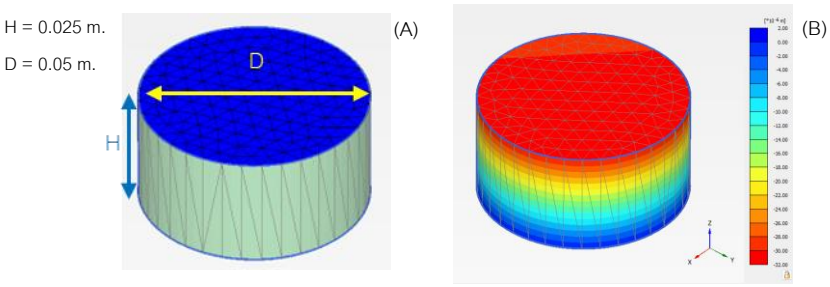


Fig. 1 Finite Element Model Developed Using PLAXIS 3D: Creation of The Finite Element Model and Mesh Generation (A); Three-Dimensional Analysis of Soil Deformation (B)

Table 1 Parameters for Hardening Soil Model (HS) and Mohr–Coulomb Model (MC)

Parameter	Values Used in This Study							
	HS Model				MC Model			
	CH	CL	SC	SM	CH	CL	SC	SM
1. C' (Cohesion), kN/m^2	17.0 - 34.0	6.0 - 50.0	12.3 - 42.3	4.6 - 42.6	17.0 - 34.0	6.0 - 50.0	12.3 - 42.3	4.6 - 42.6
2. f' (Angle of Internal Friction), degree	1.9 - 21.4	7.00 - 28.40	27.4 - 39.7	5.5 - 30.1	1.9 - 21.4	7.00 - 28.40	27.4 - 39.7	5.5 - 30.1
3. ψ (Angle of Dilatancy)*, degree	0	0	0 - 9.7	0 - 0.1	0	0	0 - 9.7	0 - 0.1
4. g (Density), kN/m^3	15.2 - 20.8	18.1 - 22.1	18.9 - 20.8	19.4 - 24.7	15.2 - 20.8	18.1 - 22.1	18.9 - 20.8	19.4 - 24.7
5. E_{ref} (Young's modulus), kN/m^2	-	-	-	-	709.9 - 7592.0	2734.0 - 14980.0	4419.0 - 14970.0	3690.0 - 11570.0
5. E_{50}^{ref} (Secant Modulus), kN/m^2	709.9 - 7592.0	2734.0 - 14980.0	4419.0 - 14970.0	3690.0 - 11570.0	-	-	-	-
6. E_{oed}^{ref} (Tangent Modulus), kN/m^2	567.9 - 6074.0	2187.0 - 11990.0	3535.0 - 11970.0	4215.0 - 12640.0	-	-	-	-
7. E_{ur}^{ref} (Unloading-Reloading Modulus), kN/m^2	8048.0 - 1.5E+05	30090.0 - 1.8E+05	19400.0- 1.8E+05	9940.0 - 1.6E+05	-	-	-	-
8. m (Power for Stress-Level Dependency of Stiffness)	1	1	1	1	-	-	-	-
9. POP (Pre-Overburden Pressure), kN/m^2	0.0 - 249.9	0.0 - 81.1	0.0 - 92.0	0.0 - 455.7	-	-	-	-
10. ν (Poisson Ratio)	0.2	0.2	0.2	0.2	0.3	0.3	0.3	0.3
11. e (Void Ratio)	0.5 - 2.4	0.3 - 0.8	0.4 - 0.6	0.1 - 0.6	0.5 - 2.4	0.3 - 0.8	0.4 - 0.6	0.1 - 0.6
12. Kx, Ky, Kz (Permeability), m/day	1.7E-06 - 5.7E-05	6.0E-07 - 5.1E-02	7.1E-06 - 7.4E-02	2.0E-04 - 6.2E-02	1.7E-06 - 5.7E-05	6.0E-07 - 5.1E-02	7.1E-06 - 7.4E-02	2.0E-04 - 6.2E-02
13. C_c (Compression Index)	0.06 - 1.40	0.03 - 0.19	0.03 - 0.10	0.03 - 0.13	-	-	-	-
14. C_s (Swelling Index or Reloading Index)	0.01 - 0.20	0.01 - 0.02	0.01 - 0.03	0.01 - 0.05	-	-	-	-

Note: * ψ = f' - 30° for sand, ψ = 0 for clay (Brinkgreve et al., 2018)

การพิจารณาความเหมาะสมของแบบจำลอง

การพิจารณาความเหมาะสมของแบบจำลองในการศึกษานี้ จะนำค่าการทรุดตัวในขั้นตอนการกดน้ำหนัก (Loading) ที่ได้จากการวิเคราะห์เชิงตัวเลขจากอัตราส่วนระหว่างค่าความเค้น (Stress) กับมอดุลัสแบบจำกัด (Constrained Modulus) เนื่องจากพฤติกรรมของดินในการทดสอบ Oeodometer นั้นตัวอย่างดินจะถูกจำกัดให้ไม่เกิดการเปลี่ยนรูปทางข้าง มาเปรียบเทียบค่าทรุดตัวที่ตรวจวัดได้จริงจากการทดสอบ Oedometer ในห้องปฏิบัติการ โดย Fig. 2 แสดงตัวอย่างของผลการทดสอบการทรุดตัวของดินตัวอย่างประเภท CH จากจังหวัดจันทบุรีภายใต้ความเค้นกระทำตั้งแต่ 1.40 t/m^2 – 40.9 t/m^2 และมีค่าการทรุดตัวตั้งแต่ 0.10 % – 4.10 % เทียบกับผลการวิเคราะห์จากแบบจำลอง MC และ HS ซึ่งมีค่าการทรุดตัวตั้งแต่ 0.10 % – 3.78% และ 0.19 % – 4.55 % ที่ความเค้นกระทำเดียวกันตามลำดับ โดยพิจารณาตัวชี้วัดหลัก ได้แก่ ความชันของเส้นความสัมพันธ์ระหว่างค่าจากการวิเคราะห์เชิงตัวเลขและค่าทดสอบจริง เพื่อประเมินความสอดคล้องของข้อมูล และใช้ค่า Root Mean Square Error (RMSE) เพื่อเป็นเครื่องมือวัดผลความคลาดเคลื่อนเชิงปริมาณระหว่างผลพยากรณ์กับผลทดลองจริง ซึ่งคำนวณได้จาก Equation 1

$$RSME=\sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(\varepsilon_{model}-\varepsilon_{oed})^2} \qquad (1)$$

Where; ε_{model} is Vertical Strain from Model Calculation By FEM (%), ε_{oed} is Vertical Strain from Oedometer Tests (%), n is Number of measurements

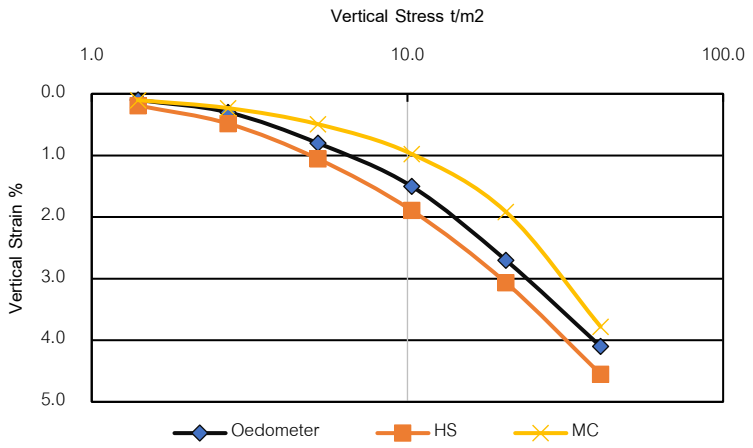


Fig. 2 An Example of a comparison of compressibility curves obtained from oedometer tests and numerical analyses using HS and MC models

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

การเปรียบเทียบผลการทรุดตัวที่วิเคราะห์ได้จากแบบจำลอง MC และ HS เทียบกับผลการทรุดตัวจากการทดสอบ Oedometer ของตัวอย่างดินที่จำแนกไว้ แสดงไว้ดัง Fig. 3 ซึ่งแสดงให้เห็นว่า ในดินประเภท CH CL และ SM นั้น แบบจำลอง HS มีความสอดคล้องกับผลการทรุดตัวจริงมากกว่า (ความชันเข้าใกล้หนึ่งมากกว่า) ในขณะที่ดินประเภท SC แบบจำลอง MC มีความสอดคล้องมากกว่าเล็กน้อย ซึ่งผลการวิเคราะห์ดังกล่าว เป็นไปในทิศทางเดียวกันกับการวิเคราะห์

ค่า RMSE กล่าวคือ สำหรับดิน CH แบบจำลอง HS และ MC มีค่า RMSE เท่ากับ 3.10 และ 6.60 ตามลำดับ, ดิน CL แบบจำลอง HS และ MC มีค่า RMSE เท่ากับ 0.96 และ 2.14 ตามลำดับ, ดิน SC แบบจำลอง HS และ MC มีค่า RMSE เท่ากับ 0.59 และ 0.40 ตามลำดับ, ดิน SM แบบจำลอง HS และ MC มีค่า RMSE เท่ากับ 2.55 และ 12.80 ตามลำดับ รายละเอียดแสดงดัง Table 2

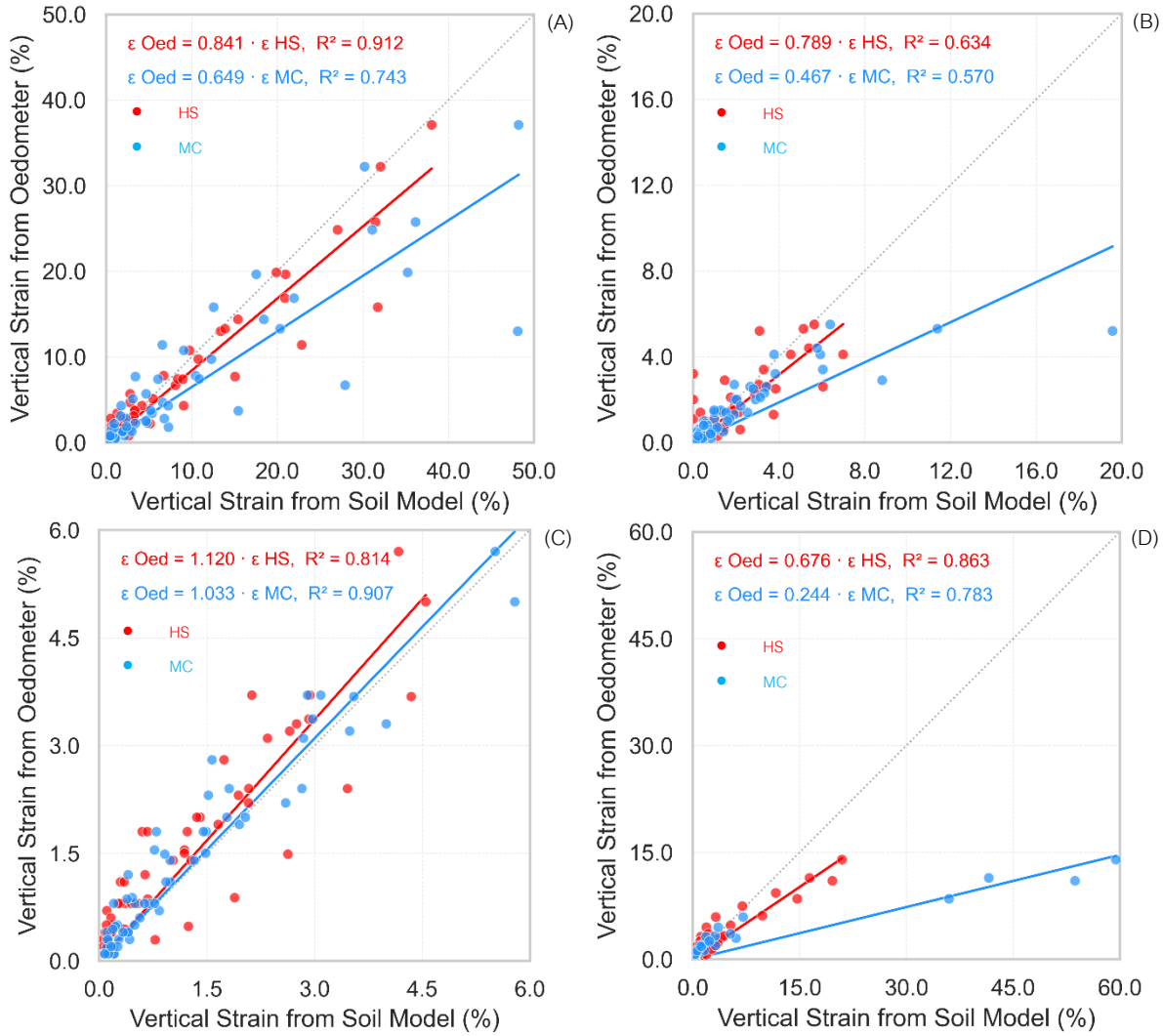


Fig. 3 Comparison of vertical strains obtained from Oedometer Tests and Soil Models for: CH (A); CL (B); SC (C); SM (D)

Table 2 RMSE of HS and MC models

Soil Model	Root Mean Square Error (RMSE)			
	CH	CL	SC	SM
HS	3.10	0.96	0.59	2.55
Mohr–Coulomb	6.60	2.14	0.40	12.80

สรุปและข้อเสนอแนะ

การศึกษานี้ประเมินความเหมาะสมของแบบจำลองพฤติกรรมดินในการทำนายการทรุดตัวของดินประเภท CH CL SC และ SM โดยเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ความเครียดแนวดิ่งจากการทดสอบ oedometer ในห้องปฏิบัติการกับผลการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม PLAXIS 3D โดยใช้แบบจำลอง MC และ HS ผลการศึกษาพบว่าแบบจำลอง HS ให้ผลการทำนายการทรุดตัวและความเครียดแนวดิ่งของดินประเภท CH และ CL สอดคล้องกับผลการทดสอบมากกว่าแบบจำลอง MC เนื่องจากดินทั้งสองประเภทมีพฤติกรรมแบบ nonlinear elastoplastic ซึ่งแบบจำลอง HS สามารถสะท้อนการเปลี่ยนแปลงความแข็งของดินตามระดับความเค้นได้อย่างเหมาะสม สำหรับดินประเภท SC พบว่าทั้งสองแบบจำลองให้ค่าความคลาดเคลื่อนและค่า RMSE ใกล้เคียงกัน แสดงให้เห็นว่าสามารถใช้วิเคราะห์พฤติกรรมการทรุดตัวได้ทั้งแบบจำลอง MC และ HS ขณะที่ดินประเภท SM พบว่าทั้งสองแบบจำลองมีแนวโน้มประเมินการทรุดตัวต่ำ โดยเฉพาะแบบจำลอง MC ซึ่งมีค่า RMSE สูง แม้ว่าแบบจำลอง HS จะให้ผลดีกว่า แต่ยังไม่สามารถสะท้อนพฤติกรรมของดินได้อย่างเหมาะสม ดังนั้นผลการศึกษาครั้งนี้จึงสามารถใช้เป็นแนวทางเบื้องต้นในการเลือกใช้แบบจำลองดินให้เหมาะสมกับชนิดดินแต่ละประเภท แต่อย่างไรก็ตามหากต้องการเพิ่มความแม่นยำและการเลือกใช้แบบจำลองให้เหมาะสมควรเพิ่มข้อมูลของการทดสอบในห้องปฏิบัติการซึ่งจะช่วยให้การเลือกใช้แบบจำลองมีความเหมาะสมและน่าเชื่อถือมากยิ่งขึ้น

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับสนับสนุนจากคณาจารย์สาขาวิชาวิศวกรรมโครงสร้างพื้นฐานและการบริหาร ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ รวมถึงผู้ที่เกี่ยวข้องที่ให้ข้อมูลอันเป็นประโยชน์ต่องานวิจัยชิ้นนี้

เอกสารอ้างอิง

ASTM International. 2016. ASTM D2216-16: Standard test methods for laboratory determination of water (moisture) content of soil and rock by mass. ASTM International.

ASTM International. 2020. ASTM D2435/D2435M-20: Standard test methods for one-dimensional consolidation properties of soils using incremental loading. ASTM International.

ASTM International. 2007. ASTM D422-63: Standard test method for particle-size analysis of soils. ASTM International.

ASTM International. 2017. ASTM D4318-17: Standard test methods for liquid limit, plastic limit, and plasticity index of soils. ASTM International.

ASTM International. 2011. ASTM D4767-11: Standard test method for consolidated undrained triaxial compression test for cohesive soils. ASTM International.

Brinkgreve, R.B.J., Kumarswamy, S., Swolfs, W.M. 2018. PLAXIS 3D 2018: Material models manual. Bentley Systems, Delft.

Drucker, D.C., Prager, W. 1952. Soil mechanics and plastic analysis or limit design. Q. Appl. Math. 10: 157–165.

Hill, R. 1950. The mathematical theory of plasticity. Oxford University Press.

Janbu, N. 1963. Soil compressibility as determined by oedometer and triaxial tests. In Proceedings of the European Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. 19–25.

Mesri, G., Godlewski, P.M. 1977. Time and stress-compressibility inter-relationship. J. Geotech. Eng. Div. 103: 417–430.

Muir Wood, D. 1990. Soil behaviour and critical state soil mechanics. Cambridge University Press.

Schanz, T., Vermeer, P.A. 1996. Angles of friction and dilatancy of sand. Géotechnique 46: 145–151.

Schanz, T., Vermeer, P.A., Bonnier, P.G. 1999. The hardening-soil model: Formulation and verification. In Beyond 2000 in computational geotechnics. Balkema. 281–290.

VR สำหรับการตรวจสอบงานก่อสร้างอาคารสำนักงาน

VR for Inspection of office building construction

กฤษกร วัฒนกุล[a], **ชวเลข วณิชเวทิน**[b,*], **พิพัฒน์ สอนวงษ์**[b], **ฆนิศา รุ่งแจ้ง**[b]

Krissakorn Wattanakul[a], Chavalek Vanichavetin[b,*], Piphat Sornwong[b], Kanisa Rungjang[b]

[a]สาขาวิชาวิศวกรรมโครงสร้างพื้นฐานและการบริหาร ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

[b]ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

[a]Infrastructure Engineering and Management, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Kasetsart University, Bangkok 10900, Thailand

[b]Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Kasetsart University, Bangkok 10900, Thailand

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

บทคัดย่อ

การตรวจสอบงานก่อสร้างอาคารสำนักงานเป็นขั้นตอนสำคัญเพื่อควบคุมคุณภาพและความปลอดภัยตามหลักวิศวกรรม งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาระบบความเป็นจริงเสมือน (Virtual Reality, VR) สำหรับการตรวจสอบงานก่อสร้างอาคารสำนักงานและประเมินผลอิทธิพลต่อการเลือกใช้ระบบ VR ระบบที่พัฒนาขึ้นทำงานผ่านแพลตฟอร์ม Unity ที่แสดงผลผ่านอุปกรณ์สวมศีรษะ (Head-Mounted Displays, HMD) ร่วมกับซอฟต์แวร์ออกแบบ 2 มิติและ 3 มิติ ได้แก่ AutoCAD, Revit และ SketchUp สามารถแสดงผลและเชื่อมโยงข้อมูลในสภาพแวดล้อมเสมือน ผลงานวิจัยนี้นำเสนอระบบ VR สำหรับการตรวจสอบงานก่อสร้างอาคารสำนักงานและประเมินผลอิทธิพลต่อการเลือกใช้พบว่าปัจจัยที่มีค่าความสำคัญคือความปลอดภัยในการปฏิบัติงาน งานวิจัยนี้เป็นประโยชน์ต่อผู้ควบคุมงานก่อสร้างอาคารสำนักงาน ซึ่งสามารถควบคุมการก่อสร้างให้เป็นไปตามมาตรฐานของวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ในพระบรมราชูปถัมภ์ (วสท.)

คำสำคัญ: การตรวจสอบงานก่อสร้าง, ความจริงเสมือน, งานก่อสร้างอาคารสำนักงาน

Abstract

Inspection of office building construction is is essential for quality and safety control. This study aims to develop a virtual reality (VR) system for office building construction inspection and to evaluate the influential factors affecting its adoption. The VR system was developed using the Unity platform and operated through a head-mounted display (HMD), integrated with 2D and 3D design software. The results indicate that operational safety is the most significant factor influencing the adoption of the VR system. The proposed system can support construction inspection and assist supervisors in complying with engineering standards.

Keywords: Construction inspection, Office building construction, Virtual reality

คำนำ

การตรวจสอบงานก่อสร้างเป็นกระบวนการสำคัญในการประเมินคุณภาพงานและการปฏิบัติตามข้อกำหนดด้านความปลอดภัย (Wang et al., 2020) การตรวจสอบที่มีประสิทธิภาพช่วยให้สามารถตรวจพบข้อผิดพลาดได้ตั้งแต่ระยะเริ่มต้น เพิ่มความปลอดภัย และช่วยให้งานก่อสร้างเป็นไปตามข้อกำหนดด้านการออกแบบและคุณภาพตลอดกระบวนการก่อสร้าง (Bosché et al., 2015; Halder & Afsari, 2023) อาคารสำนักงานเป็นอาคารที่อยู่ภายใต้การควบคุมตามพระราชบัญญัติควบคุมอาคาร พ.ศ. 2522 และที่แก้ไขเพิ่มเติม กำหนดให้อาคารต้องมีความมั่นคงแข็งแรงและมีความปลอดภัยต่อการใช้งาน (พระราชบัญญัติควบคุมอาคาร พ.ศ. 2522, 2522) งานก่อสร้างอาคารสำนักงานจำเป็นต้องมีการควบคุมคุณภาพงานก่อสร้างเพื่อให้เป็นไปตามหลักเกณฑ์และแนวทางการปฏิบัติของหน่วยงานที่เกี่ยวข้อง เช่น กรมโยธาธิการและผังเมือง (มยผ.) วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ในพระบรมราชูปถัมภ์ (วสท.) การตรวจสอบด้วยสายตา (Visual Inspection) เป็นวิธีการดั้งเดิมที่นิยมใช้ ยังมีข้อจำกัด เช่น การตรวจพบความผิดปกติได้ไม่ครบถ้วน การตีความผลที่ขึ้นกับประสบการณ์ของผู้ตรวจ ความยากในการเข้าพื้นที่ระหว่างการก่อสร้าง และการใช้ข้อมูลเชิงพื้นที่แบบสองมิติ ซึ่งอาจทำให้การประเมินในโครงการที่มีความซับซ้อนขาดความแม่นยำ (Attard et al., 2018; Snyder et al., 2018; Omer et al., 2019; Halder and Afsari, 2022) ข้อจำกัดดังกล่าวทำให้ความเป็นจริงเสมือน (Virtual Reality, VR) ได้รับความสนใจในการตรวจสอบงานก่อสร้าง เนื่องจากสามารถลดข้อจำกัดการตรวจสอบด้วยสายตา มองเห็นและโต้ตอบกับสภาพแวดล้อมงานก่อสร้างสามมิติแบบเรียลไทม์ เพิ่มความแม่นยำในการตรวจสอบ และติดตามความก้าวหน้าของงานก่อสร้างได้โดยไม่จำเป็นต้องเข้าพื้นที่หน้างานจริง (Omer et al., 2019; Li et al., 2020; Sun et al., 2021) ความก้าวหน้าด้านฮาร์ดแวร์ทำให้ต้นทุนอุปกรณ์ลดลงและมีประสิทธิภาพสูงขึ้นส่งผลให้จอแสดงผลสวมศีรษะสำหรับ VR (Head-Mounted Displays, HMDs) เป็นอุปกรณ์ที่เข้าถึงได้ง่ายมากขึ้น (Sidani et al., 2021) VR ถูกนำมาใช้ในการตรวจสอบงานก่อสร้างเพื่อเพิ่มความแม่นยำ ลดข้อผิดพลาดจากการประเมินด้วยสายตา และติดตามความก้าวหน้าของงานโดยไม่ต้องเข้าพื้นที่หน้างานจริง (Omer et al., 2019; Li et al., 2020; Sun et al., 2021)

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาระบบความเป็นจริงเสมือน (Virtual Reality, VR) สำหรับการตรวจสอบงานก่อสร้างอาคารสำนักงานและประเมินผลอิทธิพลต่อการเลือกใช้ระบบ VR

อุปกรณ์และวิธีการ

วิธีการวิจัยแบ่งเป็น 4 ขั้นตอน ได้แก่ 1. การรวบรวมข้อมูล 2. การพัฒนาระบบ VR 3. การตรวจสอบงานก่อสร้างอาคารสำนักงานตามแนวทางตามแนวทาง วสท. 4. การประเมินปัจจัยที่มีอิทธิพลและทางเลือกที่เหมาะสมต่อการใช้ระบบ VR สำหรับการตรวจสอบงานก่อสร้างอาคารสำนักงาน แสดงดัง Fig. 1

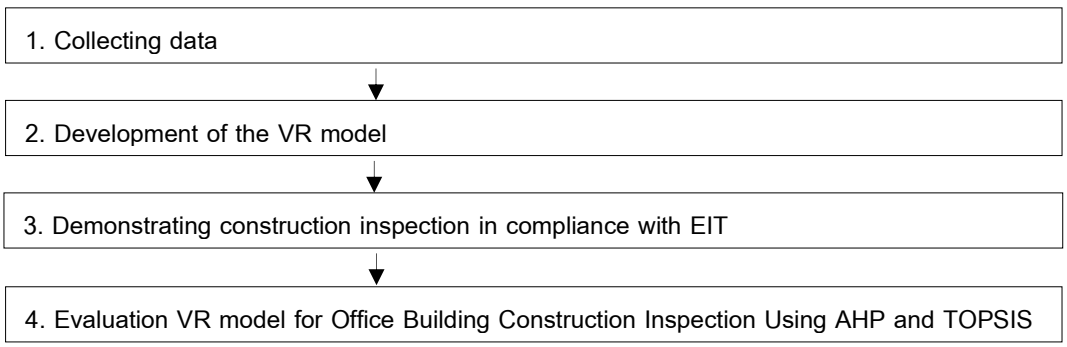


Fig. 1 Research Methodology

1. การรวบรวมข้อมูล งานวิจัยนี้รวบรวมข้อมูล 2 มิติ จากหน่วยงานกรมชลประทาน ข้อมูลที่รวบรวมได้อยู่ในรูปแบบ 2 มิติ ได้แก่ AutoCAD และสร้างแบบจำลอง 3 มิติ

2. การพัฒนาระบบ VR พัฒนาจาก 2 โปรแกรม แบบที่ 1 พัฒนาโดยโปรแกรม Revit ซึ่งแสดงผลผ่าน Enscape แบบที่ 2 พัฒนาโดยโปรแกรม Unity 3D แสดงผลผ่านอุปกรณ์ HMD และโต้ตอบผ่านอุปกรณ์ควบคุม แสดงดัง Fig. 2

Fig. 2 The VR system was developed using Unity 3D and operated using HMD and controllers

3. การตรวจสอบงานก่อสร้างอาคารสำนักงานตามแนวทางวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยในพระบรมราชูปถัมภ์ Engineering Institute of Thailand, EIT) กระบวนการตรวจสอบนี้ครอบคลุมหลายด้าน เช่น การตรวจสอบโครงสร้างอาคาร งานสถาปัตยกรรม งานโครงสร้างเหล็กและทาสี

4. การประเมินปัจจัยที่มีอิทธิพลและทางเลือกที่เหมาะสมต่อการใช้ระบบ VR สำหรับการตรวจสอบงานก่อสร้างอาคารสำนักงาน โดยเก็บรวบรวมข้อมูลจากแบบสอบถามเกี่ยวกับความสำคัญของปัจจัยและทางเลือก โดยออกแบบชุดคำถามตามหลักการของกระบวนการลำดับชั้นเชิงวิเคราะห์ (Analytic Hierarchy Process, AHP) และทฤษฎี TOPSIS จากผู้เชี่ยวชาญผู้มีส่วนเกี่ยวข้องในการตรวจสอบงานก่อสร้างอาคารสำนักงาน จำนวน 30 คน มีประสบการณ์เฉลี่ยมากกว่า 3 ปี ขั้นตอนการวิเคราะห์แบบ AHP ผู้ตอบแบบสอบถามทำการเปรียบเทียบความสำคัญของปัจจัยหรือทางเลือกแบบจับคู่ (i และ j) โดยใช้ค่าสเกล 1–9 เพื่อสะท้อนระดับความสำคัญเชิงเปรียบเทียบภายใต้ปัจจัยในระดับชั้นที่สูงกว่า การตรวจสอบความสอดคล้องของเหตุผลในการให้คะแนนพิจารณาจากค่าอัตราส่วนความสอดคล้อง (Consistency Ratio: C.R.) ซึ่งคำนวณจากอัตราส่วนระหว่างค่าดัชนีความสอดคล้อง (Consistency Index: C.I.) และดัชนีความสอดคล้องเชิงสุ่ม (Random Index: R.I.) ตามเกณฑ์ของ Saaty ค่าความสอดคล้องยอมรับได้ต้องมี C.R. ต่ำกว่า 0.10 ทั้งนี้ C.I. คำนวณจากสูตร (λmax – n) / (n – 1) โดย λmax คือค่า Eigenvalue สูงสุดของเมทริกซ์ และค่า R.I. ขึ้นกับจำนวนปัจจัย n งานวิจัยนี้ประกอบด้วย 4 ปัจจัย เมื่อผ่านการตรวจสอบความสอดคล้องจะนำค่าน้ำหนักที่ได้จาก AHP มาจัดลำดับความสำคัญของทางเลือก โครงสร้างแบบลำดับชั้นช่วยให้สามารถประเมินปัจจัยย่อยและเปรียบเทียบทางเลือกอย่างเป็นระบบ การวิเคราะห์ด้วยทฤษฎี TOPSIS ใช้เพื่อจัดลำดับทางเลือกที่ดีที่สุด โดยพิจารณาตำแหน่งของแต่ละทางเลือกเมื่อเทียบกับผลลัพธ์ที่พึงประสงค์ที่สุด (ideal solution) และผลลัพธ์ที่ไม่พึงประสงค์ที่สุด (negative-ideal solution) ในแต่ละปัจจัย วิธีการนี้ช่วยระบุทางเลือกที่มีความใกล้เคียงกับสภาวะที่ดีที่สุดมากที่สุด และมีความห่างจากสภาวะที่แย่ที่สุดมากที่สุด ทำให้สามารถสรุปตัวเลือกที่เหมาะสมที่สุดภายใต้ปัจจัยที่มีผลต่อการตัดสินใจได้อย่างชัดเจน แสดงดัง Fig. 3

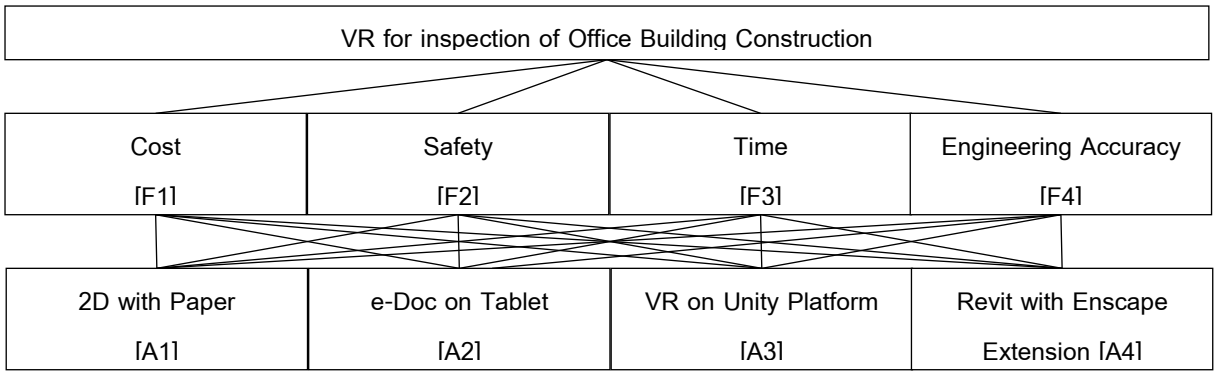


Fig.3 Hierarchy structure

Source: Modified from Saatty (2012)

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

ผลการวิจัย มี 2 ส่วน คือ 1. ผลการพัฒนาระบบ VR สำหรับการตรวจสอบงานก่อสร้างอาคารสำนักงาน 2. ผลการวิเคราะห์ค่าน้ำหนักปัจจัยที่มีอิทธิพลสำหรับการตรวจสอบงานก่อสร้างอาคารสำนักงาน

1. ผลการพัฒนา VR สำหรับการตรวจสอบงานก่อสร้างอาคารสำนักงาน

งานวิจัยนี้พัฒนาระบบ VR สำหรับงานก่อสร้างอาคารสำนักงานโดยอ้างอิงให้สอดคล้องกับแนวทางวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยในพระบรมราชูปถัมภ์ (Engineering Institute of Thailand, EIT) แบบจำลองที่พัฒนาขึ้นนำเสนอขั้นตอนการตรวจสอบงานก่อสร้างอาคารสำนักงาน แสดงดัง Fig. 4–7

Fig. 4 Comparison of Ceiling Inspection Using Enscape Visualization and Virtual Reality (VR)

Fig. 5 Comparison of Structural Steel Inspection Using Enscape Visualization and Virtual Reality (VR)

Fig. 6 Comparison of Glass Works Inspection Using Enscape Visualization and Virtual Reality (VR)

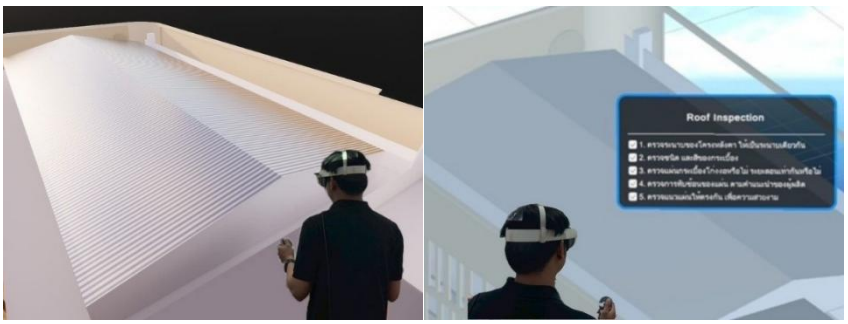


Fig. 7 Comparison of Roof Inspection Using Enscape Visualization and Virtual Reality (VR)

การตรวจสอบตามมาตรฐานทางวิศวกรรมสามารถนำระบบ VR ที่พัฒนาขึ้นมาประยุกต์ใช้ในการปฏิบัติงานของผู้ควบคุมงานเพื่อเพิ่มศักยภาพของการปฏิบัติงาน ลดข้อจำกัดด้านสภาพแวดล้อมและการเข้าถึงพื้นที่จริง

2. ผลการวิเคราะห์ค่าน้ำหนักปัจจัยที่มีอิทธิพลสำหรับการตรวจสอบงานก่อสร้างอาคารสำนักงาน

รวบรวมข้อมูลได้จากแบบสอบถามและการสัมภาษณ์ผู้เชี่ยวชาญผู้ที่ความเกี่ยวข้องกับการตรวจสอบงานก่อสร้างอาคารสำนักงาน จำนวน 30 ท่าน ประสบการณ์เฉลี่ย 3 ปี ผลการวิเคราะห์ค่าความสอดคล้องการตัดสินใจ (C.R.) พบว่าค่า C.R. อยู่ระหว่าง 0.066 ถึง 0.070 ซึ่งหมายความว่าข้อมูลการตัดสินใจที่รวบรวมได้มีความสอดคล้องอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ (มีค่า C.R. น้อยกว่า 0.08) ผลการวิเคราะห์ประกอบด้วย ค่าน้ำหนักความสำคัญของปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการตรวจสอบงานก่อสร้างอาคารสำนักงานจำแนกตามกลุ่มผู้ตัดสินใจ และค่าน้ำหนักทางเลือกในการคัดเลือกรูปแบบตรวจสอบงานก่อสร้างอาคารสำนักงาน

ค่าน้ำหนักความสำคัญ (weight of importance) แสดงระดับความสำคัญเชิงเปรียบเทียบของแต่ละปัจจัยและทางเลือกที่มีอิทธิพลต่อการตัดสินใจโดยค่าน้ำหนักที่มีค่าสูงกว่าหมายถึงปัจจัยหรือทางเลือกนั้นมีบทบาทต่อการตัดสินใจมากกว่า ผลที่ได้สามารถนำมาใช้ในการตีความและเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์

2.1 ผลการวิเคราะห์ค่าน้ำหนักปัจจัยจากวิธี AHP การจัดลำดับทางเลือกวิธีการทำงานที่เหมาะสมด้วยวิธี TOPSIS

ผลการวิเคราะห์ค่าน้ำหนักความสำคัญของปัจจัยในอิทธิพลต่อการนำไปใช้เป็นนวัตกรรมสำหรับการตรวจสอบงานก่อสร้างอาคารสำนักงาน แสดงดัง Fig. 8 จากผลการวิเคราะห์แสดงให้เห็นว่าผู้เชี่ยวชาญให้ความสำคัญปัจจัยความ

ปลอดภัยในการปฏิบัติงาน (0.383) ความถูกต้องตามหลักวิศวกรรม (0.288) ต้นทุน (0.199) และระยะเวลาการทำงาน (0.130) ตามลำดับ

ผลการวิเคราะห์การจัดลำดับทางเลือกวิธีการทำงานที่เหมาะสมแสดงให้เห็นว่าค่าน้ำหนักของอิทธิพลต่อการนำไปใช้เป็นนวัตกรรมสำหรับการตรวจสอบงานก่อสร้างอาคารสำนักงาน แสดงดัง Fig. 9 จากผลการวิเคราะห์ผู้เชี่ยวชาญตัดสินใจเลือกใช้ระบบ VR (Unity) (0.704) แบบ 3D (Enscape) (0.642) แบบ 2D (On Tablet) (0.437) และแบบ 2D (0.311) ตามลำดับ

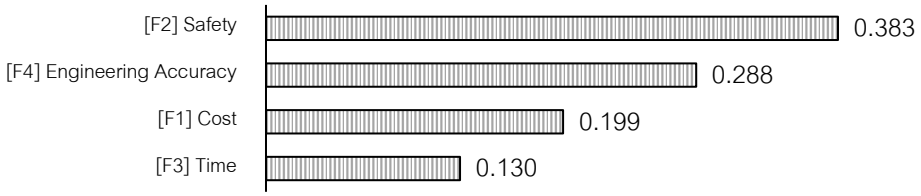


Fig. 8 The weight of importance of factors influencing the inspection of office building construction

Fig. 9 Evaluation of the most suitable work methods for office building construction inspection

2.2 ผลการวิเคราะห์ค่าน้ำหนักปัจจัยจากวิธี AHP การวิเคราะห์การจัดลำดับทางเลือกวิธีการทำงานที่เหมาะสมด้วยวิธี TOPSIS โดยจำแนกกลุ่มตามใบอนุญาตผู้ประกอบวิชาชีพวิศวกรรม

ผลการวิเคราะห์ค่าน้ำหนักความสำคัญของปัจจัยในอิทธิพลต่อการนำไปใช้เป็นนวัตกรรมสำหรับการตรวจสอบงานก่อสร้างอาคารสำนักงาน โดยจำแนกกลุ่มตามใบอนุญาตผู้ประกอบวิชาชีพวิศวกรรม แสดงดัง Fig. 10 จากผลการวิเคราะห์แสดงให้เห็นว่าผู้ถือใบประกอบวิชาชีพระดับสามัญวิศวกรและวุฒิวิศวกร เป็นผู้ที่มีประสบการณ์ทางวิศวกรรมควบคุมและอยู่ในตำแหน่งระดับบริหาร จะให้ความสำคัญปัจจัยความปลอดภัยในการปฏิบัติงานเป็นอันดับแรก สะท้อนให้เห็นถึงหลักจรรยาบรรณถือความปลอดภัยของสาธารณชนสำคัญที่สุด ความถูกต้องตามหลักวิศวกรรมเป็นปัจจัยที่สำคัญลำดับที่สอง แสดงให้เห็นถึงการยึดถือหลักความถูกต้อง โดยระดับสามัญวิศวกรและวุฒิวิศวกร ให้น้ำหนักเท่ากัน (0.285) ต้นทุน รวมถึงระยะเวลาการทำงานเป็นปัจจัยที่สำคัญรองลงมาแต่ยังคงมีความสำคัญเนื่องจากเป็นปัจจัยสำคัญต่อการควบคุมและบริหารงานก่อสร้าง ส่วนผู้ถือใบประกอบวิชาชีพระดับภาคีวิศวกร เป็นผู้ประกอบวิชาชีพวิศวกรรมควบคุมระดับเริ่มต้น จะให้ความสำคัญความถูกต้องตามหลักวิศวกรรมเป็นอันดับแรก สะท้อนถึงการนำความรู้พื้นฐานที่ได้ศึกษามาใช้ให้เกิดประโยชน์สูงสุด ปัจจัยความปลอดภัยในการปฏิบัติงานเป็นปัจจัยที่สำคัญรองลงมา แม้จะเป็นระดับเริ่มต้น แต่ภาคีวิศวกรต้องรับผิดชอบโดยตรงต่อการปฏิบัติงานให้เป็นไปตามมาตรฐานความปลอดภัยอย่างเคร่งครัด ลดระยะเวลาการทำงานรวมถึงต้นทุนเป็นปัจจัยที่สำคัญรองลงมา แต่ยังคงมีความสำคัญต่อการพัฒนาจากระดับปฏิบัติการไปสู่ระดับบริหาร

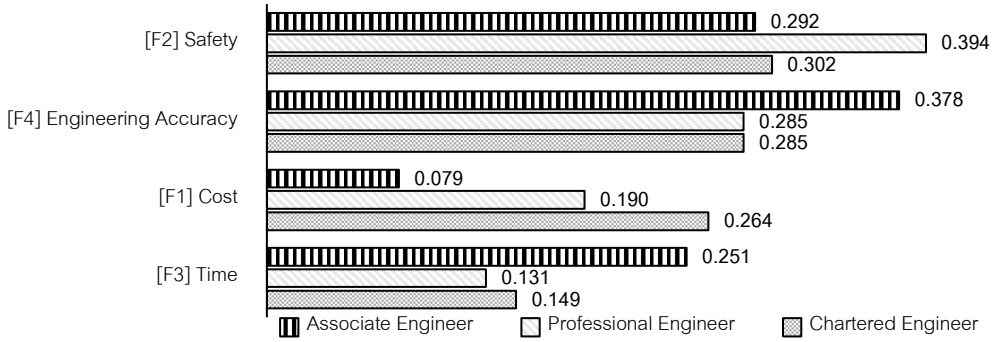


Fig. 10 The weight of importance of factors influencing the inspection of office building construction, classified by engineering professional licensure

ผลการวิเคราะห์การจัดลำดับทางเลือกวิธีการทำงานที่เหมาะสม โดยจำแนกกลุ่มตามใบอนุญาตผู้ประกอบวิชาชีพวิศวกรรม แสดงให้เห็นว่าค่าน้ำหนักของอิทธิพลต่อการนำไปใช้เป็นนวัตกรรมสำหรับการตรวจสอบงานก่อสร้างอาคารสำนักงาน แสดงดัง Fig. 11 จากผลการวิเคราะห์ผู้ถือใบประกอบวิชาชีพทุกระดับให้ความสำคัญกับการใช้ระบบ VR (Unity) สูงสุด ซึ่งสะท้อนถึงการให้ความสำคัญและเห็นถึงศักยภาพของการใช้เทคโนโลยีเพื่อควบคุมคุณภาพของงานก่อสร้างให้มีประสิทธิภาพ สร้างความปลอดภัยขณะปฏิบัติงาน ลดต้นทุนและลดระยะเวลาการทำงาน

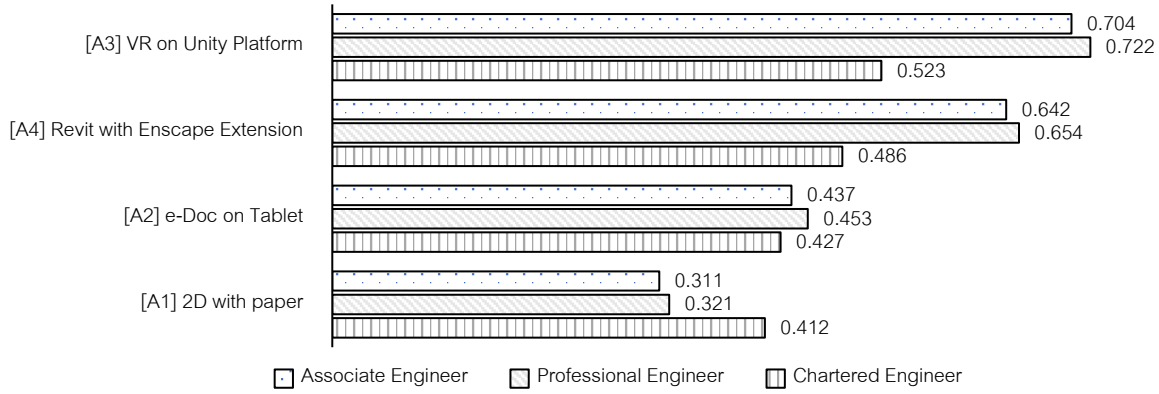


Fig. 11 Evaluation of the most suitable work methods for office building construction inspection, classified by engineering professional licensure

สรุป

งานวิจัยนี้ได้พัฒนาระบบ VR สำหรับการตรวจสอบงานก่อสร้างอาคารสำนักงาน ผู้ใช้งานสามารถเชื่อมโยงข้อมูลในสภาพแวดล้อมเสมือนจริงโดยใช้อุปกรณ์ HMD และแพลตฟอร์ม Unity ร่วมกับข้อมูลจากแบบจำลอง 2 มิติและ 3 มิติ เช่น AutoCAD, Revit และSketchUp และอินเตอร์เฟซกราฟิก (GUI) สำหรับแสดงรายการตรวจสอบและรองรับการป้อนข้อมูลและบันทึกผลการตรวจสอบในฟอร์มออนไลน์ ผลจากการนำระบบ VR ไปทดลองใช้ เพิ่มประโยชน์ต่อผู้ควบคุมงานก่อสร้างอาคารสำนักงานโดยสามารถควบคุมการก่อสร้างให้เป็นไปตามมาตรฐาน ติดตามความคืบหน้าและตรวจสอบความถูกต้องของการก่อสร้างโดยไม่จำเป็นต้องเข้าไปในพื้นที่หน้างานจริง ซึ่งช่วยเพิ่มประสิทธิภาพและความ

ปลอดภัยในการทำงาน การประเมินผลวิเคราะห์โดยใช้ วิธี AHP และ TOPSIS แสดงให้เห็นว่าความปลอดภัยในการปฏิบัติงานเป็นปัจจัยที่สำคัญที่สุดในการตัดสินใจเลือกใช้ รองลงมาคือความถูกต้องตามหลักวิศวกรรม ต้นทุน และระยะเวลาการทำงาน ตามลำดับ และทางเลือกที่มีความเหมาะสมที่สุด คือ VR บนแพลตฟอร์ม Unity

การพัฒนาระบบ VR ยังเป็นความท้าทายในการปรับปรุงให้สอดคล้องกับข้อกำหนดทางวิศวกรรมที่เกี่ยวข้อง เพื่อให้สามารถทำงานร่วมกับกระบวนการตรวจสอบในสภาพแวดล้อมจริง การฝึกอบรมและการเสริมสร้างทักษะให้กับผู้ใช้งานเป็นปัจจัยสำคัญในการเพิ่มการยอมรับเทคโนโลยีใหม่ การผสมผสานระบบ VR เข้ากับ ระบบการตรวจสอบดั้งเดิมจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพและลดข้อผิดพลาดในการตรวจสอบ ระบบ VR จะเป็นเครื่องมือที่มีศักยภาพในการช่วยปรับปรุงกระบวนการตรวจสอบงานก่อสร้างให้มีความแม่นยำและปลอดภัยยิ่งขึ้น

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจากสาขาวิชาวิศวกรรมโครงสร้างพื้นฐานและการบริหาร คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ความอนุเคราะห์จากผู้ที่เชี่ยวชาญในการตรวจสอบการก่อสร้างอาคารสำนักงาน

เอกสารอ้างอิง

พระราชบัญญัติควบคุมอาคาร พ.ศ. 2522. 2522. ราชกิจจานุเบกษา.

วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ในพระบรมราชูปถัมภ์. 2565. รายการตรวจสอบงานก่อสร้าง (พิมพ์ครั้งที่ 5). วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ในพระบรมราชูปถัมภ์, กรุงเทพมหานคร.

Attard, L., Rashed, A., Reza, B. 2018. Application of digital inspection technologies in construction: Benefits and limitations. Autom. Constr. 96: 130–140.

Bosché, F., Ahmed, M., Turkan, Y., Haas, C.T., Haas, R. 2015. The value of integrating scan-to-BIM and scan-vs-BIM techniques for construction monitoring and inspection. Autom. Constr. 49: 201–213.

Halder, S., Afsari, K. 2022. A systematic review of digital technologies for construction inspection and monitoring. Autom. Constr. 134: 104122.

Halder, S., Afsari, K. 2023. Digital workflows for performance-based construction quality assessment. J. Constr. Eng. Manage. 149: 04023015.

Li, X., Yi, W., Chi, S., Wang, Y., Chan, A.P.C. 2020. Virtual reality for monitoring construction progress: A review and future directions. J. Constr. Eng. Manage. 146: 04020070.

Omer, M., Rivard, H., Hamilton, M. 2019. Virtual reality for building inspection: Enhancing defect detection performance. Autom. Constr. 103: 234–246.

Saaty, T.L., Vargas, L.G. 2012. Models, methods, concepts and applications of the analytic hierarchy process. Springer Science and Business Media.

Sidani, A., Tachmazidis, I., Papadopoulos, T., Henderson, A. 2021. Factors enabling the adoption of virtual reality head-mounted displays: A technology maturity perspective. Int. J. Hum. Comput. Stud. 145: 102548.

Snyder, G., Schock, A., Mahalingam, A. 2018. Visual inspection challenges in complex construction environments. J. Perform. Constr. Facil. 32: 04018004.

Sun, C., Fang, Y., Cho, Y.K., Seo, J. 2021. Virtual reality for construction safety inspection: Development and evaluation. Autom. Constr. 128: 103736.

Wang, X., Truijens, M., Hou, L., Wang, Y., Zhou, Y. 2020. Integrating augmented reality with building information modeling for construction management. Autom. Constr. 118: 103268.

การเพิ่มประสิทธิภาพการติดกาว CFRP บนคานคอนกรีตด้วย EBROG: ผลกระทบจากความแข็งแรงของคอนกรีตและพารามิเตอร์การเสริมกำลัง

Improvement of CFRP External Bonding on Concrete Beams Using EBROG: Effects of Concrete Strength and Strengthening Parameters

ภาวิต พูนทา*, **ปิยะ โชติกไกร**

Pawit Puntha*, Piya Chotickai

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

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

*Corresponding author. E-mail address: pawit.pu@ku.th

บทคัดย่อ

การเสริมกำลังคานคอนกรีตด้วยแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอน (CFRP) เป็นวิธีที่ได้รับความนิยมในปัจจุบัน การวิบัติของระบบเสริมกำลังวิธีเสริมกำลังภายนอก (EB) มักเกิดในชั้นคอนกรีตบริเวณใกล้ CFRP ทำให้จำกัดประสิทธิภาพของการเสริมกำลัง การศึกษานี้จึงมุ่งเน้นวิเคราะห์การเพิ่มประสิทธิภาพของการเสริมกำลังด้วยวิธีการบากร่องคอนกรีตก่อน (EBROG) การวิเคราะห์ได้เปรียบเทียบประสิทธิภาพของวิธี EBROG กับวิธี EB สำหรับคานคอนกรีตที่มีกำลังอัดในช่วง 24 – 35 เมกะปาสคาล และเสริมกำลังด้วยแผ่น CFRP ชนิดผืน โดยมีจำนวนชั้นตั้งแต่ 1 ถึง 4 ชั้น ใช้แบบจำลองการวิเคราะห์ที่เสนอโดย Chen และคณะ (2019) ในการคำนวณกำลังรับดึงของแผ่น CFRP ในคานคอนกรีต ผลการวิเคราะห์แสดงให้เห็นว่าประสิทธิภาพของวิธี EBROG ขึ้นอยู่กับกำลังอัดคอนกรีตและพารามิเตอร์ของร่องบาก โดยวิธี EBROG ให้กำลังรับน้ำหนักสูงกว่าวิธี EB เมื่อใช้ร่องบากที่เหมาะสมและมีระยะห่างถี่ ขณะที่กรณีร่องบากขนาดเล็กและมีระยะห่างมาก ประสิทธิภาพอาจใกล้เคียงกับวิธี EB

คำสำคัญ: การบากร่อง, คอนกรีต, พอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอน, เสริมกำลัง

Abstract

Strengthening concrete beams with carbon fiber reinforced polymer (CFRP) has become a popular method, but failures of externally bonded (EB) strengthening systems often occur in the concrete substrate, limiting overall effectiveness. This study therefore investigated the performance enhancement of strengthening systems using the externally bonded reinforcement on grooves (EBROG) technique. The performance of EBROG was compared with EB for concrete beams with compressive strengths ranging from 24 to 35 MPa, strengthened with 1 to 4 layers of fabric-type CFRP sheets. A model proposed by Chen et al. (2019) was used to calculate the tensile capacity of the CFRP strengthening systems. The results indicate that the effectiveness of the EBROG method depends on concrete compressive strength and groove parameters. EBROG provides higher load-carrying capacity than the EB method when appropriate groove dimensions and close spacing are adopted, whereas for small groove widths with large spacing, its performance may be comparable to that of the EB method.

Keywords: Carbon fiber reinforced polymer, Concrete, Groove, Strengthening

คำนำ

ระบบการเสริมกำลังภายนอกด้วยวัสดุพอลิเมอร์เสริมเส้นใย (externally bonded reinforcement with FRP) มีการใช้เพิ่มขึ้นอย่างแพร่หลายในการเสริมกำลังโครงสร้างคอนกรีตที่เสื่อมสภาพหรือต้องรับน้ำหนักบรรทุกที่เพิ่มมากขึ้น เนื่องจากคุณสมบัติของพอลิเมอร์เสริมเส้นใยที่มีน้ำหนักเบาและมีกำลังรับแรงดึงที่สูง ระบบการเสริมกำลังภายนอกด้วยพอลิเมอร์เสริมเส้นใยมีการใช้งานในหลายรูปแบบ เช่น การเสริมกำลังรับแรงดัดในคาน การเสริมกำลังรับแรงเฉือน และการเสริมกำลังในเสาด้วยวิธีการโอบรัด (confinement) การเสริมกำลังรับแรงดัดของคานคอนกรีตเสริมเหล็กโดยการเสริมกำลังภายนอกด้วยแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ (CFRP) สามารถเพิ่มกำลังรับแรงดัดของคานคอนกรีตเสริมเหล็กได้อย่างมาก คาร์บอนไฟเบอร์เหมาะกับการใช้งานจากคุณสมบัติของวัสดุที่มีกำลังสูงและน้ำหนักเบา แต่ปัญหาอย่างหนึ่งของระบบการเสริมกำลังภายนอกด้วยแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์คือ การหลุดร่อนจากการวิบัติของรอยต่อระหว่างระบบเสริมกำลังและคานคอนกรีต ซึ่งทำให้โครงสร้างที่เสริมกำลังนั้นไม่สามารถใช้งานได้อย่างเต็มประสิทธิภาพ

ในปัจจุบันได้มีการศึกษาเกี่ยวกับวิธีการเสริมกำลังภายนอกด้วยแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยโดยวิธี EBROG (externally bonded reinforcement on grooves หรือ EBROG) ซึ่งวิธีนี้ใช้การเตรียมผิวด้วยวิธีการบากร่องและเป็นวิธีการเตรียมผิวที่ได้รับการพัฒนาขึ้นมาแทนที่วิธีการเตรียมผิวแบบเดิม เพื่อแก้ไขปัญหาการหลุดร่อนซึ่งทำให้โครงสร้างไม่สามารถใช้งานได้อย่างเต็มประสิทธิภาพ และจากผลการศึกษาที่ผ่านมา (Dawood and Ehsan, 2010) แสดงให้เห็นว่าวิธีนี้สามารถเพิ่มกำลังการหลุดร่อนได้ ซึ่งส่งผลให้โครงสร้างสามารถใช้งานได้อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้นอีกทั้งยังให้กำลังรับน้ำหนักบรรทุกสูงสุดที่สูงกว่าวิธีการเตรียมผิวด้วยวิธีเดิม ในส่วนรูปแบบการทำร่องที่เหมาะสมเพื่อให้โครงสร้างใช้งานได้อย่างเต็มประสิทธิภาพนั้นได้รับการศึกษาและพัฒนามาอย่างต่อเนื่อง จากผลการศึกษาที่ผ่านมา (Chen et al., 2019) ได้ทำการศึกษาผลของร่องตามขวางต่อพฤติกรรมการยึดเหนี่ยวระหว่าง FRP และคอนกรีต โดยได้ทำการทดสอบภายใต้แรงเฉือนทิศทางเดียว เพื่อประเมินผลของลักษณะร่อง ได้แก่ ระยะห่างร่อง ความกว้างร่อง และความลึกร่อง ต่อพฤติกรรมการยึดเหนี่ยว ผลการทดสอบพบว่า กำลังรับน้ำหนักบรรทุกสูงสุดเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราส่วนของร่องมีค่ามากขึ้น (เช่น ร่องกว้างขึ้นและระยะห่างร่องแคบลง) เมื่อความลึกร่องเพิ่มขึ้น พบว่า กำลังรับน้ำหนักบรรทุกสูงสุดเพิ่มขึ้นก่อน แล้วจึงลดลงเมื่อความลึกมากเกินไป Mohammadi Ghahsareh และ Mostofinejad (2021) รายงานว่า เมื่อคงขนาดร่องให้เท่ากัน พบว่า กำลังรับน้ำหนักบรรทุกสูงสุดเพิ่มขึ้นเมื่อระยะห่างระหว่างร่องลดลง ตัวอย่างเช่น สำหรับร่องตามขวางขนาด 2.5 × 2.5 มม. การลดระยะห่างร่องจาก 80 เหลือ 12 มม. ทำให้กำลังรับแรงเพิ่มขึ้นประมาณ 75% นอกจากนี้ ค่าความต้านทานแรงยึดเหนี่ยวของรอยต่อ EBROG เพิ่มขึ้นสูงสุดถึง 141% เมื่อเทียบกับรอยต่อแบบ EB ปกติ เมื่อใช้ร่องบากขนาด 5 × 5 มม. ที่ระยะห่างร่อง 15 มม. ในทิศทางตามขวาง

งานวิจัยนี้จัดทำขึ้นเพื่อศึกษาความสัมพันธ์และผลกระทบของตัวแปรต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับระบบการเสริมกำลังภายนอกโดยวิธี EBROG โดยอาศัยกรอบแนวคิดและสมการเชิงทฤษฎีที่ได้รับการยอมรับจากงานวิจัยก่อนหน้า เพื่อนำผลที่ได้จากการวิเคราะห์มาปรับใช้ในการออกแบบและเป็นข้อมูลพื้นฐานสำหรับการใช้งานระบบการเสริมกำลังภายนอกด้วยแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์โดยวิธี EBROG

พารามิเตอร์ในการศึกษาวิเคราะห์

คุณสมบัติวัสดุและมิติตัวอย่างในการศึกษาวิเคราะห์

การศึกษาวิจัยได้วิเคราะห์ได้เปรียบเทียบประสิทธิภาพของวิธี EBROG กับวิธี EB สำหรับคานคอนกรีตที่มีกำลังอัดในช่วง 24-35 เมกะปาสกาล และเสริมกำลังด้วยแผ่น CFRP ชนิดผืน โดยมีจำนวนชั้นตั้งแต่ 1 ถึง 4 ชั้น Table 1 แสดง

คุณสมบัติวัสดุที่ใช้ในการวิเคราะห์ ใช้สมมติฐานโดยอ้างอิงคุณสมบัติวัสดุจากงานวิจัยก่อนหน้า (Chotickai and Somana, 2018) ซึ่งใช้วัสดุ แผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ (CFRP sheet) Sikawrap-230 C/45 ความหนา 0.131 มิลลิเมตร มีกำลังรับแรงดึง 4,300 เมกะปาสคาล และมอดูลัสยืดหยุ่น 234 จิกะปาสคาล และมิติของตัวอย่างคานคอนกรีตขนาด 125 x 125 x 500 มิลลิเมตร เสริมกำลังด้วยแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ขนาด 50 x 400 มิลลิเมตร ดังแสดงใน Fig. 1

Table 1 Mechanical properties of concrete and CFRP

	Concrete				CFRP sheet
Property	Type 1	Type 2	Type 3	Type 4	(0.131 mm)
Modulus of elasticity (Gpa)	23	24.9	26.6	27.8	234
Compressive strength (Mpa)	24	28	32	35	N/A
Tesile strength (Mpa)	2.4	2.8	3.2	3.5	4,300

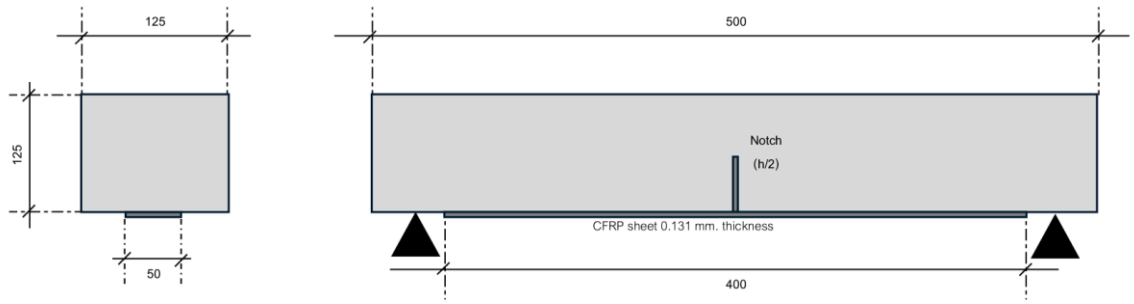


Fig. 1 Dimensions of small-beam specimens

ในงานวิจัยนี้ทำการศึกษาผลกระทบของตัวแปร ได้แก่ กำลังอัดคอนกรีต ความกว้างร่องบาก ระยะห่างร่องบาก และความหนาของ CFRP โดยทำการแบ่งกำลังอัดคอนกรีตออกเป็น 24, 28, 32 และ 35 เมกะปาสคาล ความกว้างของร่อง แบ่งเป็น 2.5 และ 5 มิลลิเมตร ระยะห่างของร่องแบ่งเป็น 12.5, 25, 50 และ 75 มิลลิเมตร ความหนาของ CFRP แบ่งเป็น 1, 2, 3 และ 4 ชั้น ดังแสดงใน Fig. 2 โดยกำหนดให้ความลึกของร่องคงที่ เท่ากับ 5 มิลลิเมตร ซึ่งจะได้จำนวนกรณีศึกษาทั้งหมด 128 กรณี

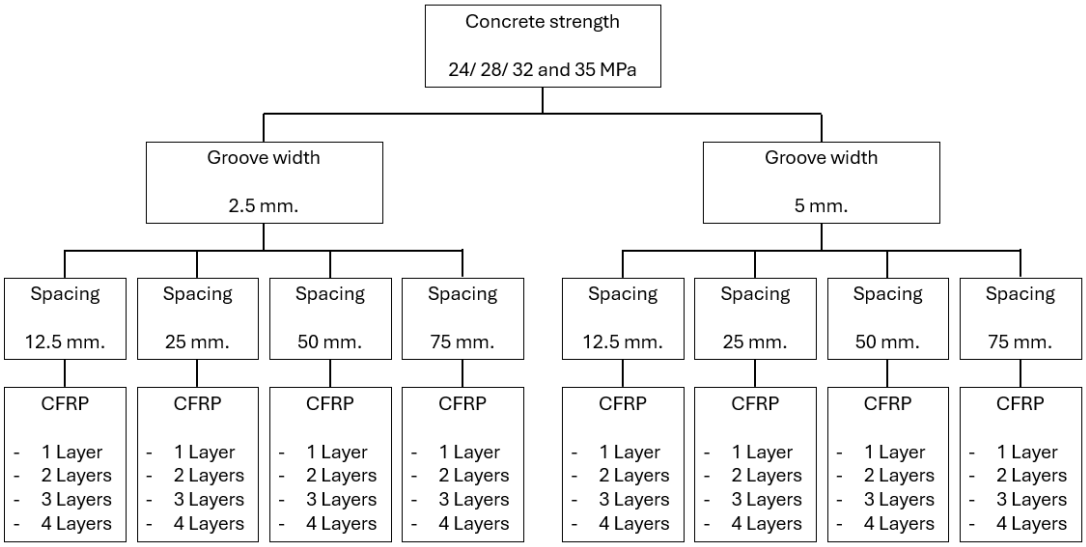


Fig. 2 Summary of parameter combinations for analytical cases

สมการที่ใช้ในการวิเคราะห์

แบบจำลองน้ำหนักบรรทุกสูงสุด (Chen, Li *et al.*, 2019)

อาศัยหลักการความยืดหยุ่นเชิงเส้น (linear elasticity) ของพอลิเมอร์เสริมเส้นใยในสภาวะรับแรงดึงและคอนกรีตในสภาวะรับแรงอัด เพื่อประมาณกำลังรับน้ำหนักบรรทุกสูงสุด (P_{max}) สำหรับรอยต่อระหว่างพอลิเมอร์เสริมเส้นใยและคอนกรีต โดยสามารถคำนวณได้จาก Equation 1:

$$P_{max} = \frac{b_2 \tau_m [1 - \exp(-\lambda_1 L)]}{\lambda_1} \approx \frac{b_2 \tau_m}{\lambda_1} \qquad (1)$$

Where $\lambda_1 = \sqrt{\left(\frac{1}{E_1 A_1} + \frac{1}{E_2 A_2}\right) \frac{b_2 \tau_m}{\delta_m}}$; L = the bonded length; b_2 = the width of FRP laminate; E_1 = Young's modulus of concrete; E_2 = Young's modulus of FRP; A_1 = the sectional area of concrete; A_2 = the sectional area of FRP laminate; and δ_m = the interfacial slip when the bond strength is reached.

การเสริมกำลังภายนอกของโครงสร้างคอนกรีตด้วยวิธีการทำร่องตามขวาง คอนกรีตและพอลิเมอร์เสริมเส้นใยใช้สมมติฐานของความยืดหยุ่นเชิงเส้น (linear elasticity) โดย Equation 1 สามารถนำมาปรับเพื่อใช้สำหรับประมาณน้ำหนักบรรทุกสูงสุดในการศึกษานี้ได้ เนื่องจากการทำร่องตามขวางส่งผลให้ที่รอยต่อมีการวิบัติหลายรูปแบบ ดังนั้นเพื่อพิจารณาผลของรูปแบบการวิบัติที่แตกต่างกันจึงแทนค่ากำลังยึดเกาะ (τ_m) ใน Equation 1 ด้วยกำลังยึดเกาะประสาน (τ_{com})

$$\tau_{com} = \sum_{i=1}^{4} p_i \tau_{mi} \qquad (2)$$

Where τ_{com} = the composite bond strength; p_i = the percentage of the i th fracture interface; and τ_{mi} = the bond strength of the i th fracture interface.

การวิบัติที่รอยต่อทั้งสี่แบบสามารถแบ่งออกได้เป็น การวิบัติระหว่างคอนกรีตและอีพอกซี่ (i=1) การวิบัติที่ อีพอกซี่ (i=2) การวิบัติระหว่างพอลิเมอร์เสริมเส้นใยและอีพอกซี่ (i=3) และการวิบัติที่รอยต่อสองด้าน (i=4) สำหรับกำลังยึดเกาะของรอยต่อระหว่างคอนกรีตและอีพอกซี่ (τ_{m1}) สามารถคำนวณได้จาก Equation 3 ได้โดยตรง ส่วนกำลังยึดเกาะของรอยต่ออีพอกซี่ (τ_{m2}) มีค่าเท่ากับ *35* เมกะปาสคาล ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับผู้ผลิต

$$\tau_m = \alpha\beta_w f_t \quad (3)$$

Where α = the empirical coefficient equal to 1.5; β_w = the coefficient for FRP width equal to $\sqrt{\frac{2.25-b_f/b_c}{1.25+b_f/b_c}}$; *and* f_t = the tensile strength of concrete, which is assumed to be 10% of the concrete compressive strength.

กำลังยึดเกาะของรอยต่อสองด้าน (τ_{m4}) รวมกับกำลังยึดเกาะรอยต่อพอลิเมอร์เสริมเส้นใยและอีพอกซี่ (τ_{m3}) ผลการทดสอบ Wang และคณะ (2015) รายงานค่ากำลังยึดเกาะเท่ากับ 57.4, 61.2 และ 52.7 เมกะปาสคาล ดังนั้นจึงเลือกใช้ค่ากำลังยึดเกาะเฉลี่ยของพอลิเมอร์เสริมเส้นใยและอีพอกซี่เท่ากับ 57.1 เมกะปาสคาล

สำหรับร่องที่มีความลึกในช่วง *0* ถึง *10* มิลลิเมตร ค่าสัมประสิทธิ์เชิงประจักษ์สองค่า (α_1 และ α_2) ถูกใช้เป็นค่าอัตราส่วนระหว่างเปอร์เซ็นต์การวิบัติสำหรับตัวอย่างที่มีการทำร่องที่ความลึกต่าง ๆ (p_1, p_2 และ p_3) ความสัมพันธ์สามารถเขียนได้ ดังนี้

$$\alpha_1 = 17.02\exp[-2.834\left(\frac{d_g}{5}\right)] \quad (4)$$

$$\alpha_2 = -0.642\left(\frac{d_g}{5}\right)^2 + 1.642\left(\frac{d_g}{5}\right) \quad (5)$$

where α_1 = the empirical groove depth coefficient for concrete-epoxy failure.

α_2 = the empirical groove depth coefficient for FRP-epoxy failure.

สำหรับกำลังรับน้ำหนักบรรทุกสูงสุดของตัวอย่างคอนกรีตที่เสริมกำลังภายนอกด้วยพอลิเมอร์เสริมเส้นใยโดยวิธี EBROG สามารถคำนวณได้จาก

$$P_{max} = \frac{b_2}{\lambda_1}\sum_{i=1}^{4} p_i\tau_{mi} \quad (6)$$

$$p_3 + p_4 = \alpha_2(-4.415\rho_g^2 + 4.136\rho_g) \quad (7)$$

$$p_1 = 0.954\alpha_1\exp(-7.549\rho_g) \quad (8)$$

$$p_2 = 1 - p_1 - p_3 - p_4 \quad (9)$$

Where $\rho_g = b_g/s_g$; ρ_g = the area ratio of the groove; b_g = the groove width ; and s_g = the groove clearance; p_1, p_2,p_3 และ p_4 = the percentage of failure mode for specimens with any groove depth;

ผลและวิจารณ์ผลการวิเคราะห์

การศึกษานี้เป็นงานวิจัยเชิงวิเคราะห์ที่อาศัยกรอบแนวคิดและแบบจำลองเชิงทฤษฎีจากงานวิจัยก่อนหน้าในการประเมินประสิทธิภาพการเสริมกำลังคานคอนกรีตด้วย EBROG โดยมิได้เป็นการทดสอบเชิงทดลองในห้องปฏิบัติการ ทั้งนี้ การวิเคราะห์ได้เปรียบเทียบผลลัพธ์ของวิธี EBROG กับวิธี EB สำหรับคานคอนกรีตที่มีกำลังอัดในช่วง 24–35 เมกะปาสคาล และเสริมกำลังด้วยแผ่น CFRP ชนิดผืนจำนวน 1 ถึง 4 ชั้น

การคำนวณกำลังรับแรงของแผ่น CFRP อาศัยแบบจำลองเชิงวิเคราะห์ที่เสนอโดย Chen et al. (2019) ซึ่งพัฒนาขึ้นบนพื้นฐานของพฤติกรรมการยึดเหนี่ยวระหว่าง CFRP และคอนกรีต ผลการวิเคราะห์ที่นำเสนอในส่วนนี้จึงเป็นการสะท้อนแนวโน้มและความสัมพันธ์ของตัวแปรที่มีผลต่อประสิทธิภาพการเสริมกำลังภายใต้กรอบสมมติฐานของแบบจำลองเชิงทฤษฎีดังกล่าว

ผลกระทบของกำลังอัดคอนกรีตต่อการเสริมกำลังโครงสร้างด้วยวิธีการ EBROG

จาก Fig. 3 แสดงให้เห็นว่าแนวโน้มของกำลังรับน้ำหนักบรรทุกสูงสุดของโครงสร้างที่เสริมกำลังด้วยวิธี EBROG มีพฤติกรรมที่สอดคล้องกันสำหรับคอนกรีตที่มีกำลังอัดต่างกัน โดยกำลังรับน้ำหนักบรรทุกสูงสุดมีแนวโน้มลดลงอย่างต่อเนื่องเมื่อระยะห่างของร่องบากเพิ่มขึ้น ทั้งในกรณีของร่องบากขนาด 2.5 มิลลิเมตร และ 5 มิลลิเมตร

สำหรับร่องบากขนาด 2.5 มิลลิเมตร เมื่อระยะห่างเพิ่มจาก 12.5 มิลลิเมตร เป็น 75 มิลลิเมตร พบว่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกสูงสุดลดลงประมาณ 36–39 เปอร์เซ็นต์ ขณะที่ร่องบากขนาด 5 มิลลิเมตร ลดลงประมาณ 32–34 เปอร์เซ็นต์ โดยคอนกรีตที่มีกำลังสูงให้ค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกสูงสุดมากกว่าคอนกรีตกำลังอัดต่ำในทุกระยะห่างของร่องบาก

เมื่อพิจารณาผลของขนาดร่องบาก พบว่าร่องบากขนาด 5 มิลลิเมตร ให้กำลังรับน้ำหนักบรรทุกสูงสุดมากกว่าร่องบากขนาด 2.5 มิลลิเมตร ประมาณ 12–22 เปอร์เซ็นต์ โดยเฉพาะในช่วงระยะห่างร่องบากตั้งแต่ 25 มิลลิเมตร ถึง 75 มิลลิเมตร ซึ่งสะท้อนให้เห็นว่าขนาดร่องบากที่กว้างขึ้นช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการถ่ายแรงระหว่าง CFRP และคอนกรีต ส่งผลให้ระบบเสริมกำลังพัฒนากำลังรับน้ำหนักบรรทุกได้สูงขึ้น

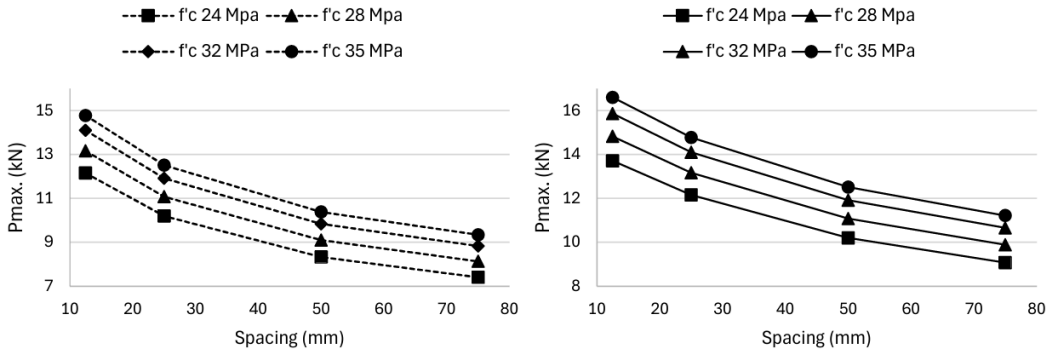
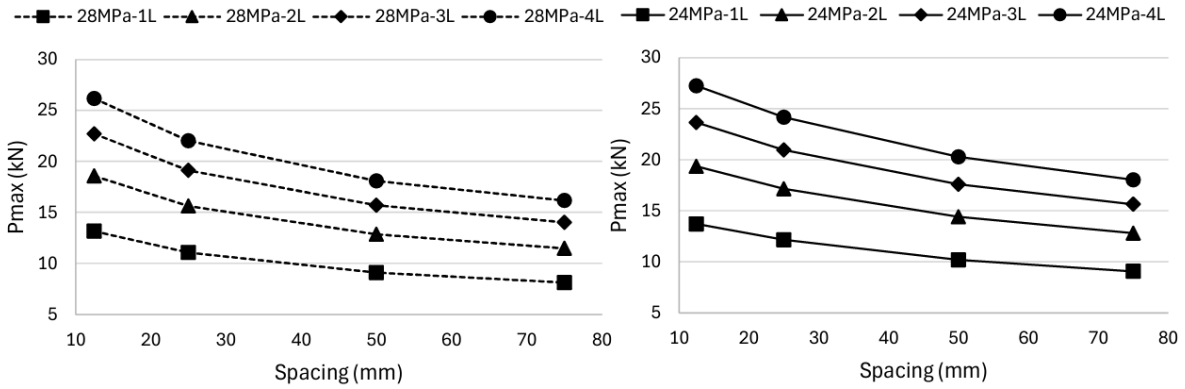


Fig. 3 Effect of concrete compressive strength on EBROG strengthening

ผลกระทบของความหนาแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ต่อการเสริมกำลังโครงสร้างด้วยวิธีการ EBROG

จาก Fig. 4 แสดงให้เห็นการเปรียบเทียบผลของจำนวนชั้น CFRP ระหว่างร่องบากขนาด 2.5 มิลลิเมตร และ 5 มิลลิเมตร สำหรับคอนกรีตที่มีกำลังอัดต่างกัน จากผลการวิเคราะห์พบว่าการเพิ่มจำนวนชั้น CFRP ส่งผลให้กำลังรับน้ำหนักบรรทุกสูงสุดเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัด โดยมีอัตราการเพิ่มอยู่ในช่วงประมาณ 40–100 เปอร์เซ็นต์ ขึ้นอยู่กับจำนวน

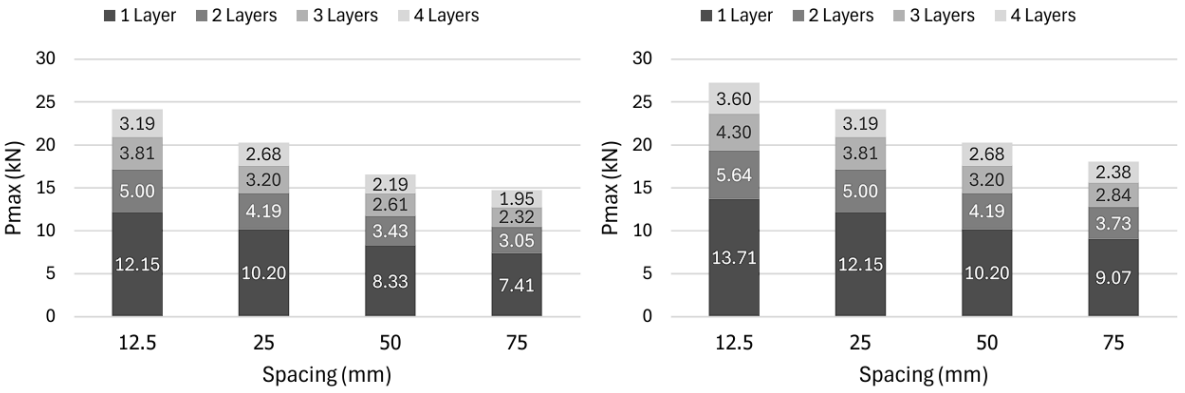
ชั้นและระยะห่างของร่องบาก นอกจากนี้พบว่าร่องบากขนาด 5 มิลลิเมตร ให้กำลังรับน้ำหนักบรรทุกสูงสุดมากกว่าร่องบากขนาด 2.5 มิลลิเมตร ในทุกกรณีของจำนวนชั้น CFRP และระยะห่างของร่องบาก ทั้งนี้เนื่องจากร่องบากที่มีขนาดใหญ่ช่วยเพิ่มพื้นที่และประสิทธิภาพในการถ่ายแรงระหว่าง CFRP กับคอนกรีต



(a) Groove width 2.5 mm (b) Groove width 5 mm

Fig. 4 Effect of CFRP layer on EBROG strengthening

เมื่อพิจารณาร่วมกับ Fig. 5 ซึ่งแสดงสัดส่วนของกำลังรับน้ำหนักบรรทุกที่เพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มจำนวนชั้นของ CFRP พบว่าการเพิ่มจำนวนชั้น CFRP ให้ประสิทธิภาพสูงสุดเมื่อใช้ระยะห่างร่องบากที่มีความถี่ (12.5–25 มิลลิเมตร) ขณะที่เมื่อระยะห่างเพิ่มขึ้นเป็น 50–75 มิลลิเมตร ผลของการเพิ่มจำนวนชั้นต่อกำลังรับน้ำหนักบรรทุกจะลดลงอย่างเห็นได้ชัด แสดงให้เห็นว่าระยะห่างของร่องบากเป็นปัจจัยควบคุมสำคัญต่อประสิทธิภาพการเสริมกำลังด้วยวิธี EBROG



(a) f'c 24 MPa, groove width 2.5 mm (b) f'c 24 MPa, groove width 5 mm

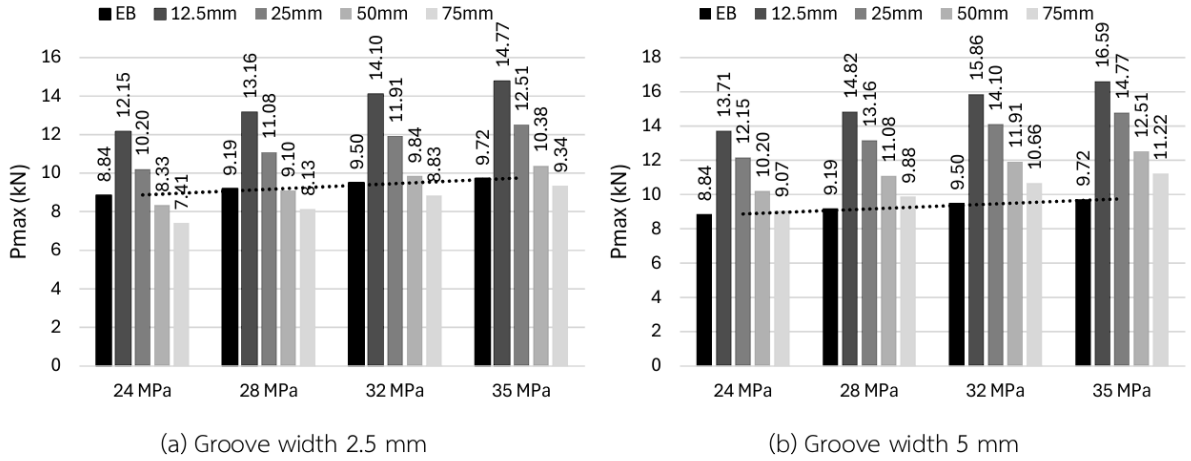
Fig. 5 Effect of groove spacing on the contribution of CFRP layers to the maximum load capacity

เปรียบเทียบประสิทธิภาพการเสริมกำลังระหว่างวิธี EBR และ วิธี EBROG

จาก Fig. 6 แสดงการเปรียบเทียบกำลังรับน้ำหนักบรรทุกสูงสุดระหว่างการเสริมกำลังด้วยวิธี EBROG และวิธี EB โดยใช้ CFRP เพียงชั้นเดียว พบว่ากรณีร่องบากขนาด 2.5 มิลลิเมตร และระยะห่างร่องบาก 12.5–25 มิลลิเมตร ให้กำลังรับน้ำหนักบรรทุกสูงสุดมากกว่าวิธี EB ประมาณ 15–52 เปอร์เซ็นต์ อย่างไรก็ตาม เมื่อระยะห่างร่องบากเพิ่มขึ้นเป็น

50–75 มิลลิเมตร กำลังรับน้ำหนักของวิธี EBROG มีแนวโน้มลดลงจนมีค่าใกล้เคียงหรือบางกรณีต่ำกว่าวิธี EB ในทางตรงกันข้าม สำหรับร่องบากขนาด 5 มิลลิเมตร พบว่าวิธี EBROG ให้กำลังรับน้ำหนักบรรทุกสูงสุดมากกว่าวิธี EB ในทุกกรณี โดยมีอัตราการเพิ่มอยู่ประมาณ 55–71 เปอร์เซ็นต์ โดยเฉพาะในกรณีที่ใช้ระยะห่างของร่องบากถี่ ซึ่งสะท้อนให้เห็นว่าร่องบากที่มีขนาดใหญ่ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการถ่ายแรงและลดข้อจำกัดของการยึดเหนี่ยวแบบผิวเรียบของวิธี EB

ผลการวิเคราะห์ดังกล่าวชี้ให้เห็นว่าประสิทธิภาพของวิธี EBROG ขึ้นอยู่กับขนาดและระยะห่างของร่องบากอย่างมีนัยสำคัญ โดยร่องบากที่มีขนาดเล็กเกินไปหรือมีระยะห่างมากอาจทำให้ประสิทธิภาพน้อยกว่าวิธี EB ได้



(a) Groove width 2.5 mm (b) Groove width 5 mm

Fig. 6 Comparison between EBR and EBROG method

สรุป

จากผลการวิเคราะห์พบว่า กำลังรับน้ำหนักสูงสุดของโครงสร้างที่เสริมกำลังด้วยวิธี EBROG มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามกำลังอัดคอนกรีต และลดลงอย่างต่อเนื่องเมื่อระยะห่างของร่องบากเพิ่มขึ้น แสดงให้เห็นบทบาทสำคัญของกำลังอัดคอนกรีตและระยะห่างร่องบากต่อพฤติกรรมการยึดเหนี่ยว รวมถึงการเพิ่มจำนวนชั้นของ CFRP ช่วยเพิ่มกำลังรับน้ำหนักสูงสุดอย่างมีนัยสำคัญ โดยมีอัตราการเพิ่มอยู่ในช่วงประมาณ 40–100% อย่างไรก็ตาม ประสิทธิภาพของการเพิ่มจำนวนชั้นมีแนวโน้มลดลงเมื่อใช้ระยะห่างร่องบากที่มากขึ้น เนื่องจากผลการวิเคราะห์ชี้ให้เห็นว่าระยะห่างของร่องบากเป็นตัวแปรควบคุมหลักที่กำหนดประสิทธิภาพของระบบ EBROG โดยร่องบากที่มีความถี่ (12.5–25 มิลลิเมตร) ให้ประสิทธิภาพการถ่ายแรงและกำลังรับน้ำหนักบรรทุกที่ดีที่สุด

นอกจากนี้ร่องบากขนาด 5 มิลลิเมตร ให้กำลังรับน้ำหนักสูงสุดมากกว่าร่องบากขนาด 2.5 มม. อย่างสม่ำเสมอในทุกระดับกำลังอัดคอนกรีตและทุกระยะห่างของร่องบาก สะท้อนให้เห็นถึงความสำคัญของขนาดร่องบากต่อประสิทธิภาพการยึดเหนี่ยว โดยเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการเสริมกำลังแบบ EB พบว่าวิธี EBROG ให้ประสิทธิภาพสูงกว่าในหลายกรณี โดยเฉพาะในกรณีร่องบากขนาด 5 มม. ซึ่งให้กำลังรับน้ำหนักบรรทุกสูงกว่าวิธี EB ประมาณ 55–71% ในขณะที่กรณีร่องบากขนาด 2.5 มม. ร่วมกับระยะห่างร่องที่กว้าง (50–75 มิลลิเมตร) พบว่าประสิทธิภาพของวิธี EBROG มีค่าใกล้เคียงหรือบางกรณีต่ำกว่าวิธี EB แสดงให้เห็นว่าการออกแบบร่องบากที่ไม่เหมาะสมอาจจำกัดประสิทธิภาพของการเสริมกำลังด้วยวิธี EBROG

เอกสารอ้างอิง

Chen, C., et al. 2019. Effect of transverse groove on bond behavior of FRP-concrete interface: Experimental study, image analysis and design. Compos. Part B Eng. 161: 205–219.

Chen, J.F., Teng, J.G. 2001. Anchorage strength models for FRP and steel plates bonded to concrete. J. Struct. Eng. 127: 784–791.

Chotickai, P., Somana, S. 2018. Performance of CFRP-strengthened concrete beams after exposure to wet/dry cycles. J. Compos. Constr. 22.

Mohammadi Ghahsareh, F., Mostofinejad, D. 2021. Groove classification in EBROG FRP-to-concrete joints. Constr. Build. Mater. 275.

Mostofinejad, D., Mahmoudabadi, E. 2010. Grooving as alternative method of surface preparation to postpone debonding of FRP laminates in concrete beams. J. Compos. Constr.

Wang, Z., et al. 2015. Effects of surface treatment of carbon fiber: Tensile property, surface characteristics, and bonding to epoxy. Polym. Compos. 58: 241–272.

การเพิ่มความแม่นยำในการพยากรณ์ดินถล่มบนถนนหลวงในจังหวัดเชียงใหม่และยะลา ด้วยการบูรณาการข้อมูล PS-InSAR เข้ากับแบบจำลอง Random Forest

Enhancing landslide prediction accuracy on highways in Chiang Mai and Yala Provinces through integration of PS-InSAR data with random forest model

อภิสิทธิ์ ผลชอบ*, **อนุเผ่า อบแพทย์**, **สรวิศ สุภเวชย์**

Aphisit Phonchob*, Anuphao Aobpaet, Soravis Supavetch

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

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

*Corresponding author, Email address: Aphisit.phon@ku.th

บทคัดย่อ

ประเทศไทยประสบปัญหาดินถล่มที่ส่งผลกระทบต่อความปลอดภัยบนทางหลวง โดยเฉพาะในจังหวัดเชียงใหม่และยะลา การปกป้องและบำรุงรักษาเครือข่ายทางหลวงในพื้นที่เสี่ยงเป็นสิ่งสำคัญ งานวิจัยนี้ใช้เทคนิค Persistent Scatterer Interferometric Synthetic Aperture Radar (PS-InSAR) ร่วมกับแบบจำลอง Random Forest (RF) เพื่อพัฒนาแผนที่ความอ่อนไหวต่อการเกิดดินถล่มในพื้นที่ทางหลวงทั้งสองจังหวัด โดยใช้ข้อมูลการเปลี่ยนแปลงพื้นผิวดินจาก Interferometric Synthetic Aperture Radar (InSAR) ในกระบวนการฝึกร่วม (joint training) ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าแบบจำลอง RF ที่บูรณาการข้อมูล InSAR สามารถเพิ่มความแม่นยำในการทำนายพื้นที่เสี่ยง โดยผลการประเมินประสิทธิภาพแบบจำลอง RF ที่ฝึกด้วยข้อมูล InSAR มีค่า accuracy 0.980 recall 0.982 precision 0.980 และ F1 score 0.9480 การบูรณาการนี้ช่วยลดการจำแนกผิดและเพิ่มความแม่นยำในการระบุพื้นที่เสี่ยงดินถล่มในพื้นที่ทางหลวงของจังหวัดเชียงใหม่และยะลา

คำสำคัญ: การทำแผนที่ความอ่อนไหวต่อการเกิดดินถล่มแบบพลวัต, ถนนหลวง, แบบจำลองเชื่อมโยง, แรนดอมฟอเรสต์, PS-InSAR

Abstract

Thailand faces frequent landslide events that impact road safety, particularly on highways in Chiang Mai and Yala. Protecting and maintaining these high-risk road networks is crucial. This study integrates Persistent Scatterer Interferometric Synthetic Aperture Radar (PS-InSAR) with the Random Forest (RF) model to develop landslide susceptibility maps for highways in these two provinces, using ground deformation data through Interferometric Synthetic Aperture Radar (InSAR) in a joint training process. The results show that the RF model, when integrated with InSAR data, significantly improves prediction accuracy. The performance evaluation of the RF model trained with InSAR data yields accuracy of 0.980, recall of 0.982, precision of 0.980, and an F1 score of 0.9480. The integration reduces false positives and enhances the accuracy of landslide risk assessment on highways in Chiang Mai and Yala.

Keywords: Dynamic susceptibility mapping, Highway, landslide susceptibility, PS-InSAR, Random Forest

คำนำ

ดินถล่มเป็นภัยพิบัติทางธรณีวิทยาที่เกิดขึ้นบ่อยและสร้างความเสียหายต่อชีวิต ทรัพย์สิน และโครงสร้างพื้นฐาน โดยเฉพาะทางหลวง (Dechkamfoo et al., 2022) ในพื้นที่ภูเขาและลาดชันสูง เช่น จังหวัดเชียงใหม่และยะลา จึงจำเป็นต้องมีการประเมินความอ่อนไหวต่อการเกิดดินถล่มเพื่อรองรับการวางแผนป้องกันและบริหารจัดการอย่างเป็นระบบโดยทั่วไปการประเมินมักใช้ตัวแปรเชิงภูมิศาสตร์คงที่ เช่น ความสูง ความลาดชัน และการใช้ประโยชน์ที่ดิน อย่างไรก็ตามปัจจัยเชิงพลวัตอย่างการเคลื่อนตัวของพื้นดินไม่สามารถสะท้อนจากข้อมูลเหล่านี้เพียงอย่างเดียวจึงนำเทคโนโลยี PS-InSAR ที่ใช้ตรวจวัดการเคลื่อนไหวของพื้นดินระดับมิลลิเมตรจากภาพเรดาร์ Sentinel-1 แบบอนุกรมเวลา และบูรณาการร่วมกับข้อมูลภูมิประเทศและอุทกวิทยาในพื้นที่ทางหลวงของจังหวัดเชียงใหม่และยะลาเพื่อสร้างแผนที่ความอ่อนไหวต่อการเกิดดินถล่มแบบพลวัต (LDSM) (Miao et al., 2023)

การศึกษานี้ใช้แบบจำลองแรนดอมฟอเรสต์ (RF) เป็นแกนหลัก โดยผสานข้อมูล PS-InSAR กับตัวแปรเชิงภูมิประเทศและอุทกวิทยา เพื่อให้แบบจำลองเรียนรู้ความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยก่อให้เกิดดินถล่มกับสัญญาณการเคลื่อนตัวของพื้นดินอย่างมีประสิทธิภาพ (Ghaderpour et al., 2024) ผลที่ได้ช่วยเพิ่มความแม่นยำและความน่าเชื่อถือของการประเมินความเสี่ยงดินถล่มตามแนวทางหลวง อีกทั้งสามารถใช้เป็นข้อมูลสนับสนุนการวางแผนป้องกันและลดผลกระทบจากดินถล่มในพื้นที่เสี่ยงได้อย่างเหมาะสม

วัตถุประสงค์

วัตถุประสงค์หลักของงานวิจัยนี้ คือ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการพยากรณ์ของแบบจำลอง RF สำหรับการประเมินความอ่อนไหวต่อการเกิดดินถล่มในพื้นที่ทางหลวงของจังหวัดเชียงใหม่และยะลา โดยการบูรณาการข้อมูล PS-InSAR เข้ากับปัจจัยทางภูมิประเทศและอุทกวิทยา เพื่อสร้างแผนที่ความอ่อนไหวต่อการเกิดดินถล่มแบบพลวัตหรือ Landslide Dynamic Susceptibility Mapping (LDSM) ที่สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการวางแผนและจัดการความเสี่ยงในพื้นที่ทางหลวงของจังหวัดเชียงใหม่และยะลาได้อย่างมีประสิทธิผล อีกทั้งยังสามารถนำไปต่อยอดในการประเมินความเสี่ยงในพื้นที่ที่มีลักษณะภูมิประเทศคล้ายคลึงกันเพื่อสนับสนุนการป้องกันภัยพิบัติและการจัดการความเสี่ยงในระดับประเทศ

พื้นที่ศึกษา

พื้นที่ศึกษาครอบคลุมแนวทางหลวงสายหลักในจังหวัดเชียงใหม่และยะลา โดยกำหนดขอบเขตการวิเคราะห์เป็น “ตามแนวถนน” ด้วยการสร้างพื้นที่กันชน (buffer) ระยะ 0.5 กิโลเมตรทั้งสองด้านของแนวถนน เพื่อครอบคลุมบริเวณลาดเชิงเขาและพื้นที่ข้างทางที่มีโอกาสเกิดดินถล่ม ซึ่งสอดคล้องกับหลักฐานจากการวิเคราะห์ buffer ที่รายงานว่าประมาณ 83.73% ของหน่วยดินถล่มอยู่ภายในระยะ 450 m จากทางหลวง (Fang et al., 2023) ทำให้การเลือก 0.5 km เหมาะสมต่อการครอบคลุมพื้นที่ที่เกี่ยวข้องโดยรวม ดัง Fig. 1 พื้นที่ศึกษาครอบคลุมแนวทางหลวงสายหลักในจังหวัดเชียงใหม่และยะลา ภายในขอบเขตลองจิจูด 98.8333 – 101.1667 และละติจูด 5.8333 – 19.3333 ซึ่งมีภูมิประเทศภูเขาสลับหุบเขาและที่ราบลุ่มบางส่วน และอยู่ภายใต้อิทธิพลของลมมรสุมตะวันตกเฉียงใต้และตะวันออกเฉียงเหนือที่เอื้อต่อการเกิดดินถล่มตามแนวทางหลวง

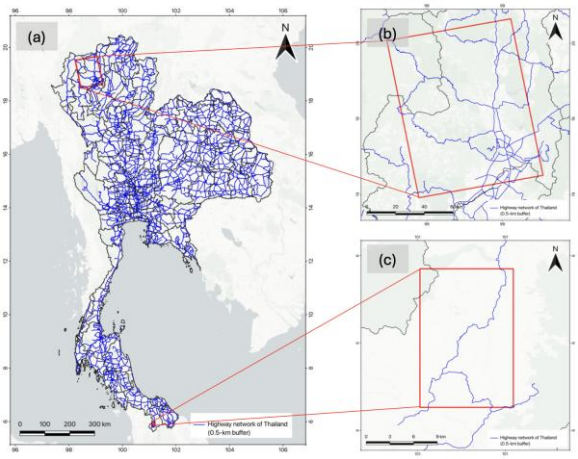


Fig.1 Thailand's highway network and study areas using a 0.5 km buffer. (A) National highway network with the buffer applied; (B) study area in Chiang Mai Province; (C) study area in Yala Province

อุปกรณ์และวิธีการวิจัย

อุปกรณ์ที่ใช้

อุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย

อุปกรณ์และซอฟต์แวร์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ ได้แก่ SNAP Toolbox สำหรับการเตรียมและประมวลผลเบื้องต้นของข้อมูล SAR Stanford Method for Persistent Scatterers (StaMPS) และ MATLAB สำหรับการประมวลผล PS-InSAR บนระบบ Linux ซอฟต์แวร์จำลองระบบปฏิบัติการ (เช่น VMware) สำหรับสร้างสภาพแวดล้อม Linux บนเครื่อง Windows และ Python สำหรับการสร้างแบบจำลอง RF การคำนวณเชิงสถิติ และการจัดทำข้อมูลสำหรับการวิเคราะห์ร่วมกับข้อมูลเชิงพื้นที่

ข้อมูลที่ใช้ในการวิจัย

ข้อมูลเรดาร์ Sentinel-1 SAR แบนด์ C จากองค์การอวกาศยุโรป ถูกนำมาใช้ทั้งหมด 30 ฉาก ครอบคลุมพื้นที่ศึกษาในสองจังหวัด ได้แก่ จังหวัดเชียงใหม่แต่ละฉากครอบคลุมพื้นที่ประมาณ 109 × 131 ตร.กม. รวมพื้นที่ศึกษา 14,279 ตร.กม. ช่วงเวลาข้อมูลระหว่าง 1 กันยายน 2022 – 28 กุมภาพันธ์ 2025 และจังหวัดยะลาแต่ละฉากมีขอบเขตประมาณ 11.82 × 17.54 ตร.กม. ครอบคลุมแนวทางหลวงของจังหวัด พื้นที่ศึกษา 207.32 ตร.กม. ช่วงเวลาข้อมูลระหว่าง 1 กันยายน 2022 – 1 กุมภาพันธ์ 2025

ปัจจัยที่ใช้ในการวิเคราะห์ดินถล่ม การศึกษานี้มุ่งประเมินความอ่อนไหวต่อการเกิดดินถล่มตลอดแนวทางหลวงในจังหวัดเชียงใหม่และยะลา โดยรวบรวมทั้งองค์ความรู้จากงานวิจัยด้านดินถล่มและฐานข้อมูลเชิงพื้นที่ที่มีอยู่ในพื้นที่ศึกษาแล้วจัดเป็นตัวแปรรวม 12 ปัจจัย ได้แก่ ความสูงจากระดับน้ำทะเล ความลาดชัน ทิศทางลาดความหนาแน่นของลำน้ำ ความขรุขระภูมิประเทศ ความโค้งในแนวระนาบ ความโค้งในแนวดิ่ง ดัชนี Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) ดัชนี Normalized Difference Water Index (NDWI) ดัชนี Topographic Wetness Index (TWI) ประเภทของดิน และการใช้ประโยชน์ที่ดิน (Feby et al., 2022)

ฐานข้อมูลเหตุการณ์ดินถล่มทางหลวงของประเทศไทยระหว่างวันที่ 1 กันยายน 2022 ถึง 20 พฤษภาคม 2025 รวม 1,193 เหตุการณ์ ถูกนำมาใช้เป็นข้อมูลอ้างอิงตำแหน่ง ขนาด และลักษณะดินถล่ม เพื่อสร้างชั้นข้อมูล “จุดเกิดเหตุจริง” สำหรับใช้เป็นตัวอย่างเชิงบวก โดยเน้นการวิเคราะห์ในช่วงแนวทางหลวงของจังหวัดเชียงใหม่และยะลาเป็นหลัก

เพื่อให้ข้อมูลทุกชุดอยู่ในมาตราส่วนเชิงพื้นที่เดียวกัน ข้อมูลถูกตัดตามขอบเขตแนวทางหลวงของทั้งสองจังหวัด และรีแซมเปิลเป็นกริดขนาด 30 × 30 เมตร ทำให้ได้แรสเตอร์ขนาดสม่ำเสมอ ครอบคลุมพื้นที่ศึกษาอย่างต่อเนื่อง ข้อมูลทั้งหมดถูกแบ่งเป็น 70% สำหรับฝึกแบบจำลอง และ 30% สำหรับตรวจสอบผลการพยากรณ์ เพื่อใช้สร้างแบบจำลองความอ่อนไหวต่อการเกิดดินถล่มอย่างเป็นระบบ (Miao et al., 2023)

วิธีการวิจัย

PS-InSAR

เทคนิค PS-InSAR ถูกใช้ในการติดตามการเปลี่ยนรูปผิวดินความละเอียดสูงตลอดแนวทางหลวงในจังหวัดเชียงใหม่และยะลา โดยอาศัยการวิเคราะห์อินเตอร์เฟอโรเมตรีของสัญญาณเรดาร์สังเคราะห์ร่วมกับจุดกระจายสัญญาณถาวร Persistent Scatterer (PS) จากข้อมูล InSAR แบบอนุกรมเวลา กระบวนการหลักประกอบด้วยการสร้างอินเตอร์เฟอโรแกรมแบบ single-master การตัดขอบพื้นที่ และการลดสัญญาณรบกวนในกลุ่มจุด PS (Hakim et al., 2023) อัตราการเคลื่อนที่ของจุด PS ถูกแปลงเป็นข้อมูลเชิงพื้นที่และทำอินเตอร์โพเลชันเพื่อสร้างแผนที่การเปลี่ยนรูปของพื้นดิน ground deformation map (GDM) แสดงการทรุดตัวและยกตัวตามแนวทางหลวงของสองจังหวัด ซึ่งเป็นข้อมูลสำคัญในการระบุบริเวณที่มีการเคลื่อนตัวผิดปกติและเชื่อมโยงกับความเสี่ยงดินถล่ม

การวิเคราะห์ภาวะพหุสหสัมพันธ์

เพื่อหลีกเลี่ยงความซ้ำซ้อนของตัวแปรและผลกระทบจากพหุสหสัมพันธ์ในการจำแนกพื้นที่เสี่ยงดินถล่มตามแนวทางหลวงในจังหวัดเชียงใหม่และยะลา (Achu et al., 2023) การศึกษานี้ใช้ค่าสัมประสิทธิ์การพองตัวของความแปรปรวน Variance Inflation Factor (VIF) เป็นเกณฑ์หลักในการตรวจสอบความสัมพันธ์เชิงเส้นระหว่างปัจจัย ตาม Equation 1:

$$VIF_j = \frac{1}{1-R^2} = \frac{1}{TOL} \quad (1)$$

Where R^2 is the coefficient of determination, and TOL = 1 – R^2 is the tolerance. A VIF value greater than 5 is used as a threshold indicating multicollinearity that requires correction.

แบบจำลอง Random Forest

Random Forest (RF) เป็นเทคนิคการเรียนรู้ของเครื่องแบบเอ็นเซมเบิลที่ใช้ต้นไม้ตัดสินใจหลายต้นทำการพยากรณ์ แล้วรวมผลด้วยการโหวตแบบเสียงข้างมาก โดยใช้การสุ่มตัวอย่างข้อมูลแบบ bootstrap และการสุ่มเลือกชุดย่อยของตัวแปรในแต่ละโหนด ช่วยลดความเอนเอียง ลดความแปรปรวนของแบบจำลอง และเพิ่มความทนทานต่อสัญญาณรบกวน อีกทั้งรองรับข้อมูลมิติสูงและใช้ประเมินความสำคัญของตัวแปรได้

ในการศึกษานี้ RF ถูกใช้เป็นแบบจำลองหลักในการพยากรณ์ความอ่อนไหวต่อการเกิดดินถล่มตามแนวทางหลวงในจังหวัดเชียงใหม่และยะลา และเป็นกรอบสำหรับบูรณาการข้อมูล PS-InSAR ผ่านกระบวนการฝึกร่วม (joint training) เพื่อเพิ่มความแม่นยำและความน่าเชื่อถือของการประเมินความเสี่ยง (Zhou et al., 2021)

การประเมินความอ่อนไหวต่อการเกิดดินถล่มเชิงพลวัต

เพื่อสะท้อนลักษณะการเปลี่ยนรูปของพื้นดินในเชิงเวลา การศึกษาได้นำข้อมูล InSAR มาบูรณาการกับแบบจำลอง RF เพื่อสร้างแบบจำลองความอ่อนไหวต่อการเกิดดินถล่มเชิงพลวัต (LDSM) ตามแนวทางหลวงของจังหวัดเชียงใหม่และยะลา โดยเลือกใช้แนวทางฝึกร่วม (joint training) ซึ่งผสานข้อมูลการเปลี่ยนรูปจาก PS-InSAR เข้ากับตัวแปรเชิงภูมิประเทศและสิ่งแวดล้อมในขั้นตอนการฝึกแบบจำลอง (Miao et al., 2023)

ข้อมูลการเปลี่ยนรูปถูกปรับสเกลให้อยู่ในช่วงเดียวกับตัวแปรอื่นแล้วรวมเป็นตัวแปรอินพุตของ RF ทำให้แบบจำลองสามารถเรียนรู้ความสัมพันธ์ไม่เชิงเส้นระหว่างการเคลื่อนตัวของพื้นดินกับการเกิดดินถล่ม ส่งผลให้ LDSM ที่ได้มีความละเอียด ครอบคลุม และแม่นยำกว่าการใช้เฉพาะปัจจัยคงที่

วิธีการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง

ประสิทธิภาพของแบบจำลองถูกประเมินด้วยกราฟ Receiver Operating Characteristic (ROC) เมทริกซ์ความสับสน และค่า Frequency Ratio (FR) เพื่อวัดความแม่นยำเชิงปริมาณของการจำแนกพื้นที่เสี่ยงดินถล่มตามแนวทางหลวงในจังหวัดเชียงใหม่และยะลา (Abdelkader et al., 2025) กราฟ ROC ใช้คู่ค่า sensitivity–specificity และประเมินผลด้วยพื้นที่ใต้กราฟ (Area Under the Curve (AUC); ช่วง 0.5–1.0) โดยค่า AUC เข้าใกล้ 1 แสดงถึงแบบจำลองที่มีประสิทธิภาพสูง ตาม Equations 2–5:

สมการตัวชี้วัดจากเมทริกซ์ความสับสนมีดังนี้

$$\text{Accuracy} = \frac{TP+TN}{TP+FP+TN+FN} \quad (2)$$

$$\text{Recall} = \frac{TP}{TP+FN} \quad (3)$$

$$\text{Precision} = \frac{TP}{TP+FP} \quad (4)$$

$$\text{F1 Score} = 2\times \frac{\text{Precision}\cdot \text{Recall}}{\text{Precision}+\text{Recall}} \quad (5)$$

Where TP (true positives) are cells predicted as susceptible where landslides occurred; TN (true negatives) are cells predicted as not susceptible where no landslides occurred; FP (false positives) are cells predicted as susceptible where no landslides occurred; and FN (false negatives) are cells predicted as not susceptible where landslides occurred.

สำหรับการประเมินผลด้วย FR ใช้ Equation 6:

$$FR = \frac{N_i/N}{S_i/S} \quad (6)$$

Where N_i is the number of landslide cells within factor class i, N is the total number of landslide cells, S_i is the area of class i, and S is the total area of the study region. An FR value greater than 1 indicates that class i is more prone to landslides than average, whereas an FR value less than 1 indicates a lower-than-average landslide susceptibility. (Abdelkader et al., 2025)

ผังขั้นตอนการดำเนินงานวิจัยแสดงไว้ใน Fig. 2

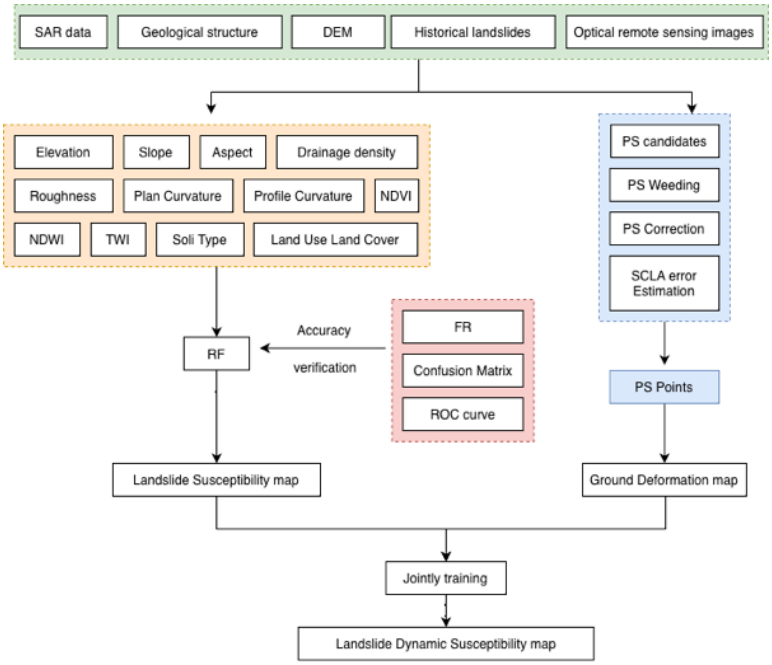


Fig. 2 Flowchart of the landslide susceptibility assessment methodology proposed in this study

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

การวิเคราะห์พหุสหสัมพันธ์ของปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการเกิดดินถล่ม

Table 1 แสดงผลการประเมินภาวะพหุสหสัมพันธ์ของปัจจัยจำนวน 12 ตัวที่เกี่ยวข้องกับการเกิดดินถล่มในพื้นที่ทางหลวงของจังหวัดเชียงใหม่และยะลา จากผลการวิเคราะห์พบว่าปัจจัยประเภทการใช้ประโยชน์ที่ดินมีค่า VIF สูงที่สุด (3.707) ในขณะที่ปัจจัยความหนาแน่นของลำน้ำมีค่า VIF ต่ำที่สุด (0.312) โดยค่า VIF ของทุกปัจจัยมีค่าต่ำกว่าค่าขีดวิกฤตที่ใช้พิจารณาภาวะพหุสหสัมพันธ์ (VIF > 5) แสดงว่าไม่พบภาวะพหุสหสัมพันธ์ในระดับที่มีนัยสำคัญระหว่างปัจจัยต่าง ๆ ดังนั้นปัจจัยทั้ง 12 ตัวจึงมีความเป็นอิสระเพียงพอและสามารถนำไปใช้เป็นตัวแปรนำเข้าในการฝึกแบบจำลอง RF

Table 1 Results of multicollinearity assessment using the Variance Inflation Factor (VIF)

Impact Factors	VIF	Impact Factors	VIF
Elevation	2.557	Profile curvature	1.195
Slope	1.212	NDVI	0.916
Aspect	1.106	NDWI	1.386
Drainage Density	0.312	TWI	0.868
Roughness	1.142	Soli Type	0.969
Plan curvature	1.001	Land Use Land Cover	3.707

การจัดทำแผนที่ความอ่อนไหวต่อการเกิดดินถล่ม

จากชุดข้อมูลที่จัดเตรียมอย่างเป็นระบบ ได้ประเมินความอ่อนไหวต่อการเกิดดินถล่มตลอดแนวทางหลวงในจังหวัดเชียงใหม่และยะลา โดยจัดระดับความอ่อนไหวเป็น 4 ระดับ คือ สูง ปานกลาง ต่ำ และต่ำมาก และแสดงผลเป็นแผนที่ Landslide Susceptibility Mapping (LSM) ด้วยโปรแกรม QGIS โดย Fig. 3A แสดงผลสำหรับจังหวัดเชียงใหม่ และ Fig. 3B สำหรับจังหวัดยะลา พบว่าพื้นที่ที่มีระดับความอ่อนไหวสูงมักกระจุกตัวตามแนวเทือกเขาและช่วงทางหลวงที่ตัดผ่านพื้นที่ลาดชัน โดยสัมพันธ์กับบริเวณที่มีการสูญเสียพืชพรรณหรือถูกรบกวนจากกิจกรรมมนุษย์ เช่น การเกษตร การตัดไม้ และการก่อสร้างโครงสร้างพื้นฐาน หลายพื้นที่ยังทับซ้อนกับเขตชุมชนและพื้นที่ใช้ประโยชน์ทางเศรษฐกิจ ทำให้ความเสี่ยงดินถล่มตามแนวทางหลวงของทั้งสองจังหวัดเพิ่มสูงขึ้น

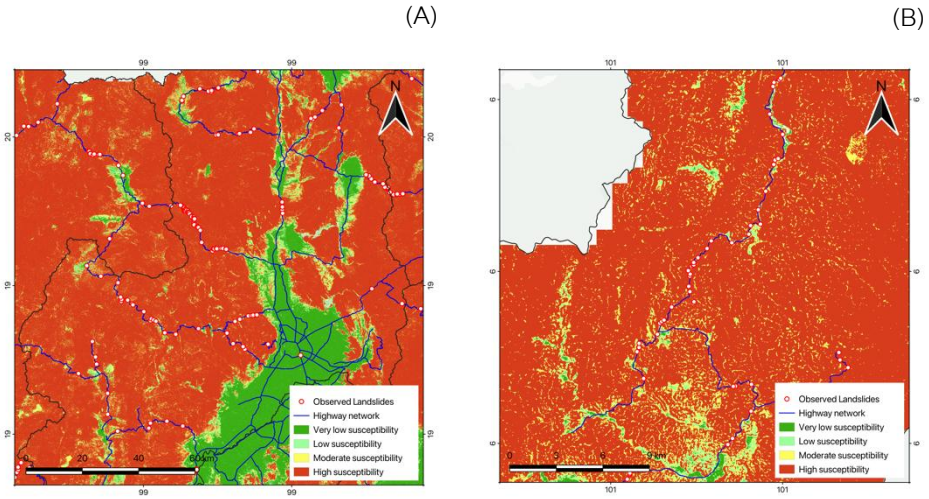


Fig. 3 Random Forest landslide susceptibility maps: Chiang Mai (A) and Yala (B)

ผลการประเมินแบบจำลองพบว่าพื้นที่ที่ถูกจัดอยู่ในระดับความอ่อนไหวสูงตามแนวทางหลวงของจังหวัดเชียงใหม่และยะลา สอดคล้องกับตำแหน่งการเกิดดินถล่มจริงในภาพรวม โดยพิจารณาจากการซ้อนทับจุดดินถล่มจริงบนแผนที่ LSM และสัดส่วนจุดดินถล่มที่ตกอยู่ในแต่ละระดับความอ่อนไหว ซึ่งพบว่าของจุดดินถล่มจริงอยู่ในระดับ “สูง” และอยู่ในระดับ “ปานกลาง” สำหรับการปรับจูนแบบจำลอง RF พบว่าให้ผลดีที่สุดเมื่อใช้พารามิเตอร์ max_depth = 20 min_samples_leaf = 1 min_samples_split = 6 และ n_estimators = 46 เนื่องจากชุดค่านี้สร้างสมดุลระหว่างการเรียนรู้ความสัมพันธ์เชิงซ้อนของปัจจัยหลายตัวกับการลดการ overfitting โดย max_depth คือความลึกสูงสุดของต้นไม้ (จำกัดความซับซ้อน) min_samples_split คือจำนวนตัวอย่างขั้นต่ำก่อนแตกกิ่ง (ลดการแตกกิ่งจาก noise) min_samples_leaf

คือจำนวนตัวอย่างขั้นต่ำที่ใบไม้ (ทำให้แบบจำลองยังคงละเอียดในพื้นที่ที่เปลี่ยนแปลงเร็วตามแนวถนน) และ n_estimators คือจำนวนต้นไม้ในป่าที่ช่วยลดความแปรปรวนและทำให้ผลเสถียรขึ้น นอกจากนี้การวิเคราะห์ความสำคัญของตัวแปร (feature importance) พบว่าความลาดชัน และความขรุขระภูมิประเทศ เป็นปัจจัยสำคัญสูงสุด (0.222 และ 0.170) ขณะที่ ประเภทดินมีความสำคัญต่ำสุด (0.011) โดยค่าดังกล่าวสะท้อน “สัดส่วนอิทธิพลสัมพัทธ์” ของตัวแปรต่อการตัดสินใจของแบบจำลอง ซึ่งชี้ว่าปัจจัยเชิงภูมิประเทศเป็นตัวกำหนดหลักของรูปแบบความเสี่ยงดินถล่ม

ผลการประมวลผล PS-InSAR

จากผลการวิเคราะห์ (Fig. 4) พบว่าพื้นที่ชุมชนตามแนวทางหลวงในจังหวัดเชียงใหม่และยะลามีแนวโน้มเกิดการยกตัว ซึ่งอาจสัมพันธ์กับการฟื้นตัวของระดับน้ำใต้ดินหรือการถม–ปรับปรุงโครงสร้างพื้นฐานใกล้แนวถนนที่ทำให้ระดับผิวดินเพิ่มขึ้น ขณะที่บริเวณเนินเขาและสันเขามีแนวโน้มทรุดตัวเด่นชัด โดยอัตราการยกตัวสูงสุดเฉลี่ยต่อปีอยู่ที่ 8.02 มม. /ปี ในจังหวัดเชียงใหม่ (Fig. 4A) และ 4.36 มม. /ปี ในจังหวัดยะลา ส่วนอัตราการทรุดตัวสูงสุดอยู่ที่ 13.3 มม./ปี และ 5.33 มม./ปี ตามลำดับ (Fig. 4B) โดยกระจุกตัวบริเวณเชิงเขาและสันเขาตามแนวทางหลวงของทั้งสองจังหวัด

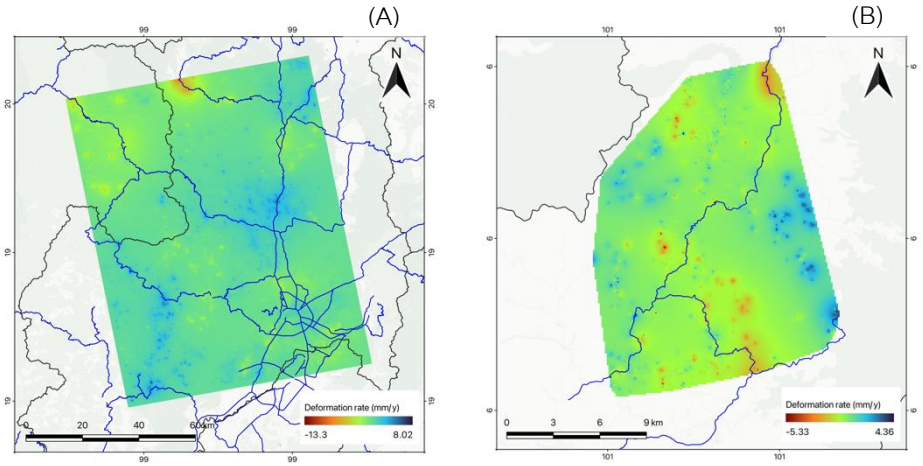


Fig. 4 ROC curves and AUC values of the landslide susceptibility model for Chiang Mai (A) and Yala (B) provinces

การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของแบบจำลองความอ่อนไหวต่อการเกิดดินถล่มเชิงพลวัต

ได้ประเมินประสิทธิภาพของแบบจำลองทั้งแบบดั้งเดิมและแบบเชิงพลวัต โดยใช้กราฟ ROC และค่า AUC (Fig. 5A) พบว่าแบบจำลอง RF เดิมมีค่า AUC เท่ากับ 0.965 ขณะที่ RF ที่บูรณาการข้อมูล InSAR มีค่า AUC สูงถึง 0.998 เพิ่มขึ้นราว 3.3% สะท้อนว่าการฝึกร่วมกับข้อมูล InSAR ช่วยยกระดับความแม่นยำในการพยากรณ์พื้นที่เสี่ยงดินถล่มตามแนวทางหลวงของจังหวัดเชียงใหม่และยะลาอย่างชัดเจน

เมทริกซ์ความสับสนจากแบบจำลองเชิงพลวัต (Fig. 5B) แสดงว่าแบบจำลองมีค่า accuracy มากกว่า 0.9 ทุกกรณี และในกรณี RF ที่บูรณาการ InSAR ให้ค่า accuracy = 0.980 recall = 0.982 precision = 0.980 และ F1 score = 0.980 ซึ่งสูงกว่าแบบจำลอง RF พื้นฐานยืนยันว่าการผสานข้อมูล PS-InSAR ช่วยเพิ่มทั้งความแม่นยำและความสมดุลของตัวชี้วัดการจำแนกสำหรับพื้นที่ทางหลวงของทั้งสองจังหวัด

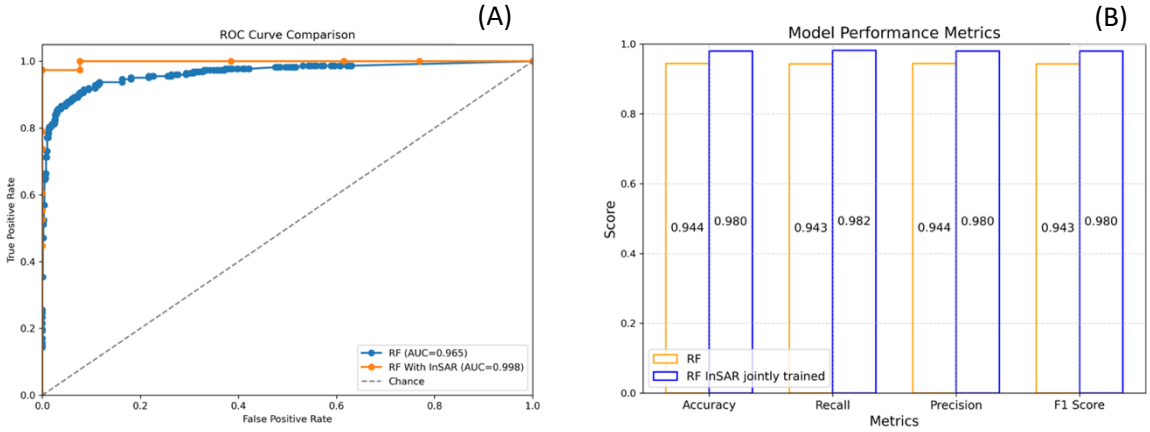


Fig. 5 (A) ROC curves and AUC values for the Random Forest (RF) model and the dynamic landslide susceptibility model; (B) comparison between the landslide susceptibility map (LSM) and the dynamic landslide susceptibility map (LDSM) for the highway corridors in Chiang Mai and Yala provinces

การวิเคราะห์ผลกระทบของข้อมูลการเปลี่ยนรูปจาก InSAR

การวิเคราะห์จากแบบจำลอง พบว่าความลาดชันและความขรุขระภูมิประเทศเป็นปัจจัยสำคัญที่สุด รองลงมาคือการใช้ประโยชน์ที่ดิน เมื่อผสานข้อมูลการเปลี่ยนรูปจาก InSAR เข้ากับแบบจำลอง น้ำหนักของปัจจัยเดิมลดลงเล็กน้อย เนื่องจากแบบจำลองใช้ข้อมูลการเคลื่อนตัวของพื้นดินมากขึ้น ส่งผลให้จำแนกพื้นที่เสี่ยงได้ชัดเจนและเพิ่มความแม่นยำ

บทสรุป

การศึกษานี้ชี้ให้เห็นว่าการผสานข้อมูลการเปลี่ยนรูปเชิงอนุกรมเวลาจากเทคนิค InSAR เข้ากับแบบจำลอง Random Forest ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของแผนที่ความอ่อนไหวต่อการเกิดดินถล่มตามแนวทางหลวงในจังหวัดเชียงใหม่และยะลาอย่างชัดเจน แม้การใช้ข้อมูล InSAR ยังไม่แพร่หลายนอกเขตเมือง แต่ผลการประเมินยืนยันว่าข้อมูลเชิงพลวัตดังกล่าวมีคุณค่าอย่างมากต่อการประเมินความเสี่ยง โดยพื้นที่เสี่ยงสูงมักกระจุกตัวบริเวณเชิงเขาและสันเขา สอดคล้องกับรูปแบบการเปลี่ยนรูปของพื้นดินที่ตรวจวัดได้จาก InSAR ซึ่งในพื้นที่ทางหลวงของจังหวัดเชียงใหม่มีค่าการเคลื่อนตัวระหว่าง -13.3 ถึง 8.02 มม./ปี และในจังหวัดยะลาระหว่าง -5.33 ถึง 4.36 มม./ปี

การบูรณาการข้อมูล InSAR ลงในแบบจำลอง RF ช่วยลดจำนวนการจำแนกผิด ปรับขอบเขตพื้นที่เสี่ยงให้แม่นยำขึ้น และระบุพื้นที่เสี่ยงต่ำได้เหมาะสมยิ่งขึ้น การวิเคราะห์ความสำคัญของตัวแปรยังยืนยันว่าข้อมูลการเปลี่ยนรูปของพื้นดินจาก InSAR เป็นปัจจัยสำคัญในกระบวนการตัดสินใจของแบบจำลอง โดยสรุปการผสานข้อมูล InSAR กับ RF ช่วยเพิ่มทั้งความแม่นยำและความน่าเชื่อถือของการประเมินความอ่อนไหวต่อการเกิดดินถล่มตามแนวทางหลวงในจังหวัดเชียงใหม่และยะลา และสามารถนำไปใช้สนับสนุนการวางแผนป้องกัน การเกิดดินถล่มได้อย่างมีประสิทธิภาพ

เอกสารอ้างอิง

Abdelkader, M.M., Csámer, Á. 2025. Comparative assessment of machine learning models for landslide susceptibility mapping: A focus on validation and accuracy. Nat. Hazards: 1–23.

Achu, A.L., Aju, C.D., Di Napoli, M., Prakash, P., Gopinath, G., Shaji, E., Chandra, V. 2023. Machine-learning based landslide susceptibility modelling with emphasis on uncertainty analysis. Geosci. Front. 14: 101657.

Dechkamfoo, C., Sitthikankun, S., Kridakorn Na Ayutthaya, T., Manokeaw, S., Timprae, W., Tepweerakun, S., et al. 2022. Impact of rainfall-induced landslide susceptibility risk on mountain roadside in Northern Thailand. Infrastructures 7: 17.

Fang, L., Wang, Q., Yue, J., Xing, Y. 2023. Analysis of optimal buffer distance for linear hazard factors in landslide susceptibility prediction. Sustainability 15: 10180.

Feby, B., Achu, A.L., Jimnisha, K., Ayisha, V.A., Reghunath, R. 2020. Landslide susceptibility modelling using integrated evidential belief function based logistic regression method: A study from Southern Western Ghats, India. Remote Sens. Appl. Soc. Environ. 20: 100411.

Ghaderpour, E., Mazzanti, P., Bozzano, F., Mugnozza, G.S. 2024. Ground deformation monitoring via PS-InSAR time series: An industrial zone in Sacco River Valley, central Italy. Remote Sens. Appl. Soc. Environ. 34: 101191.

Hakim, W.L., Fadhillah, M.F., Park, S., Pradhan, B., Won, J.S., Lee, C.W. 2023. InSAR time-series analysis and susceptibility mapping for land subsidence in Semarang, Indonesia using convolutional neural network and support vector regression. Remote Sens. Environ. 287: 113453.

Miao, F., Ruan, Q., Wu, Y., Qian, Z., Kong, Z., Qin, Z. 2023. Landslide dynamic susceptibility mapping base on machine learning and the PS-InSAR coupling model. Remote Sens. 15: 5427.

Zhou, X., Wen, H., Zhang, Y., Xu, J., Zhang, W. 2021. Landslide susceptibility mapping using hybrid random forest with GeoDetector and RFE for factor optimization. Geosci. Front. 12: 101211.

การศึกษาการทรุดตัวของแผ่นดินในกรุงเทพฯ ด้วยเทคนิค PSI และการเติมข้อมูลน้ำบาดาลผ่าน Machine Learning: การวิเคราะห์พลวัตการทรุดตัวและการจัดการน้ำบาดาล

Land subsidence study in Bangkok using PSI technique and groundwater data imputation via machine learning: Analyzing subsidence dynamics and groundwater management

ศรุตา เมย์เยอร์*, **อนุเผ่า อบแพทย์**, **สรวิศ สุภเวชย์**

Saruta Meyer*, Anuphao Aobpaet, Soravis Supavetch

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

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

*Corresponding author. E-mail address: saruta.mey@ku.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ประเมินการทรุดตัวของแผ่นดินในกรุงเทพฯ (2018–2025) ด้วยเทคนิค Persistent Scatterer InSAR (PSI) พบว่าการเคลื่อนตัวในแนวดิ่งมีค่าตั้งแต่ -31.61 ถึง +18.51 มม./ปี โดยกระจุกตัวในเขตอุตสาหกรรมตะวันออก ความแปลกใหม่คือการบูรณาการ PSI เข้ากับแมชชีนเลิร์นนิง (ML) เพื่อเติมข้อมูลน้ำบาดาลที่ขาดหายไป ซึ่ง Ordinary Least Squares (OLS) เป็นตัวถดถอยที่ดีที่สุด (RMSE = 0.005174 ม.) และใช้ Permutation Entropy (PE) เพื่อวิเคราะห์พลวัตที่ไม่เป็นเชิงเส้น ผลการตรวจสอบความถูกต้องด้วย CORS และการรังวัดระดับพบว่ามีความสอดคล้องสูง การวิเคราะห์ PE แสดงให้เห็นการทรุดตัวและยกตัวสลับกัน ซึ่งสะท้อนวัฏจักรการสูบและเติมน้ำ กรอบงาน PSI–ML–PE นี้ให้หลักฐานสำคัญสำหรับการกำกับดูแลน้ำบาดาลและการป้องกันโครงสร้างพื้นฐาน

คำสำคัญ: การใช้เทคนิค Persistent Scatterer InSAR (PSI), การเติมข้อมูลระดับน้ำบาดาล, การทรุดตัวของแผ่นดิน, การเรียนรู้ของเครื่อง (Machine Learning, ML), Permutation Entropy (PE)

Abstract

This study evaluates land subsidence in Bangkok (2018–2025) using the Persistent Scatterer InSAR (PSI) technique, revealing vertical displacements ranging from -31.61 to +18.51 mm/year, with a concentration in the eastern industrial area. The novelty of this study lies in the integration of PSI with machine learning (ML) to fill missing groundwater data, where Ordinary Least Squares (OLS) regression proved to be the best model (RMSE = 0.005174 m). Permutation Entropy (PE) was also employed to analyze the non-linear dynamics. The validation with CORS and leveling measurements showed a high degree of consistency. The PE analysis revealed alternating subsidence and uplift, reflecting the recharge and pumping cycles of groundwater. This PSI–ML–PE framework provides crucial evidence for groundwater management and infrastructure protection.

Keywords: Groundwater Data Imputation, Land Subsidence, Machine Learning (ML), Permutation Entropy (PE), Persistent Scatterer InSAR (PSI)

คำนำ

การทรุดตัวของแผ่นดินในกรุงเทพมหานครมีผลกระทบต่อโครงสร้างพื้นฐาน น้ำบาดาลและความเสี่ยงจากน้ำท่วม พื้นที่นี้มีดินเหนียวที่อ่อนและสามารถยุบตัวได้เมื่อใช้น้ำบาดาลมากเกินไป การตรวจวัดการทรุดตัวเริ่มตั้งแต่ปี 1978 (Kirinart et al., 2020) แต่ข้อจำกัดของวิธีการตรวจสอบทำให้ไม่สามารถตรวจจับการเปลี่ยนแปลงในพื้นที่ขนาดใหญ่ได้ การขยายตัวของกรุงเทพฯและปริมณฑลจึงทำให้ต้องการเทคนิคใหม่ที่มีต้นทุนต่ำและครอบคลุมพื้นที่ได้มากขึ้น (Zhang et al., 2022)

เทคนิค InSAR ได้รับการยอมรับในการตรวจจับการเปลี่ยนแปลงของพื้นผิวดินที่มีความละเอียดสูงในระดับมิลลิเมตรและต้นทุนต่ำ (Bamler and Hartl, 1998) โดยใช้ข้อมูลจากดาวเทียม Sentinel-1 ที่ช่วงคลื่น C-band เพื่อช่วยตรวจจับการทรุดตัวในกรุงเทพฯ และปริมณฑลซึ่งสามารถทำได้ในทุกสภาพอากาศและมีความละเอียดสูง การใช้ PS-InSAR ซึ่งเป็นเทคนิคที่สามารถเลือกจุดสะท้อนที่มั่นคงตลอดเวลาได้ ทำให้การตรวจจับการทรุดตัวในพื้นที่เมืองมีความแม่นยำมากขึ้น (Hooper, 2021; Guo et al., 2024)

การศึกษาในครั้งนี้นำเทคนิค PS-InSAR มาผสมผสานกับข้อมูลน้ำบาดาลเพื่อตรวจสอบความสอดคล้องระหว่างระดับน้ำบาดาลกับค่าการทรุดตัว แต่เนื่องจากข้อมูลจากแหล่งข้อมูลน้ำบาดาลมีการขาดหายไม่ต่อเนื่อง จึงได้มีการนำ machine learning (OLS) เข้ามาประสาน การเติมเต็มข้อมูลน้ำบาดาลที่ขาดหายไปมีความสำคัญในการทำให้ชุดข้อมูลอนุกรมเวลาของน้ำบาดาลสมบูรณ์ และการใช้ Permutation Entropy (PE) เพื่อศึกษาลักษณะการเปลี่ยนแปลงทางเวลาช่วยในการจับแนวโน้มไม่เป็นเชิงเส้นของการเปลี่ยนแปลงตามฤดูกาล ผลการศึกษาใหม่นี้จะช่วยพัฒนาการจัดการน้ำบาดาลและความยืดหยุ่นของโครงสร้างพื้นฐานในกรุงเทพมหานคร (Hasan et al., 2023)

อุปกรณ์และวิธีการ

ข้อมูล InSAR และการเตรียมการประมวลผล

ข้อมูลการทรุดตัวที่ใช้ในการศึกษานี้ได้รับจาก Sentinel-1 Interferometric Synthetic Aperture Radar (InSAR) ในช่วงระหว่างปี 2018 ถึง 2025 ข้อมูล InSAR ถูกประมวลผลโดยใช้ SNAP และ StaMPS frameworks โดยตั้งค่า multilooking factor เป็น 2×2 เพื่อเพิ่มคุณภาพสัญญาณและลดสัญญาณรบกวนในข้อมูล ค่า coherence threshold ถูกตั้งไว้ที่ 0.4 เพื่อให้แน่ใจว่าใช้เฉพาะพิกเซลที่มีคุณภาพสูงในการวิเคราะห์ นอกจากนี้ การตั้งค่าของ StaMPS ใช้ค่าพารามิเตอร์เริ่มต้นทั้งหมด ยกเว้น threshold สำหรับการเลือก persistent scatterer (PS) ที่ได้มีการปรับตามการสังเกตภาคสนามก่อนหน้านี้

การวิเคราะห์ Permutation Entropy (PE) ถูกดำเนินการโดยใช้พารามิเตอร์จากงานวิจัยของ Morabito et al. (2012) โดยตั้ง embedding dimension = 4 และ delay = 1 ใช้ในการประเมินความซับซ้อนทางไม่เชิงเส้นของแนวโน้มการทรุดตัวในเชิงเวลา การตั้งค่าดังกล่าวช่วยในการประเมินความซับซ้อนของการเปลี่ยนแปลงเชิงพื้นที่และเวลาของการทรุดตัวในพื้นที่ศึกษานี้

การเตรียมข้อมูลน้ำบาดาล

ข้อมูลน้ำบาดาลได้รับจากสถานีสังเกตการณ์ในกรุงเทพฯ ภายใต้การดูแลของกรมทรัพยากรน้ำบาดาล ผ่านเว็บไซต์ http://tgms.dgr.go.th/#/home โดยมีบ่อน้ำทั้งหมด 54 แห่งที่มีข้อมูลรายวัน แม้ข้อมูลที่มีอยู่จะครบถ้วนเพียงจนถึงปี 2023 แต่ข้อมูลล่าสุดสามารถแสดงความสัมพันธ์ที่ชัดเจนระหว่างการทรุดตัวและการใช้น้ำบาดาลได้ ก่อนการ

ประมวลผล ข้อมูลถูกตรวจสอบความสมบูรณ์และเตรียมเพื่อให้มั่นใจในความถูกต้องของโมเดล โดยเฉพาะการตรวจจับค่าผิดปกติทางสถิติด้วยวิธี interquartile range (IQR) ดัง Equation 1–2

$$Q_r = \frac{r}{4}(N+1) \quad (1)$$

Where Q_r is any quartile, r is the quartile number (1 for Q1, 2 for Q2, and 3 for Q3), N is the total number of data points.

$$IQR = Q_3 - Q_1 \quad (2)$$

Where Q_3 is the 3rd quartile, Q_1 is the 1st quartile.

ในแบบจำลอง, ค่าความสัมพันธ์มีความสำคัญในการระบุความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรเพื่อสนับสนุนการทำนายหรือการคาดการณ์ ค่าสัมประสิทธิ์ความสัมพันธ์ ดัง Equation 3 ที่วัดความแรงและทิศทางของความสัมพันธ์ระหว่างสองตัวแปรมีค่าระหว่าง –1 ถึง +1 ค่าที่ใกล้ –1 หรือ +1 แสดงถึงความสัมพันธ์ที่แข็งแกร่ง

$$r = \frac{\Sigma(x_i-\bar{x})(y_i-\bar{y})}{\sqrt{\Sigma(x_i-\bar{x})^2\Sigma(y_i-\bar{y})^2}} \quad (3)$$

Where r is the correlation coefficient, x_i is the value of the variable x for the i-th observation, y_i is the value of the y variable for the i-th observation, $\bar{x}$ is the mean of the variable x, $\bar{y}$ is the mean of the variable y

PS-InSAR

การประเมินเฟสทำได้โดยใช้เครื่องมือ StaMPS ใน MATLAB รุ่น R2025b สำหรับพิกเซลที่มีความสอดคล้องสูงและเสถียร หลังจากนั้นคำนวณความหนาแน่นของพิกเซลที่ไม่ใช่ PS ต่อพื้นที่ 1 ตารางกิโลเมตรเพื่อให้ข้อมูลเกี่ยวกับการกระจายตัวของตัวสะท้อนที่เสถียร การลบ PS weed ถูกนำมาใช้เพื่อกำจัดค่าช่วงเฟสที่ผิดปกติ (Kaur et al., 2024) จากนั้นทำการแก้ไขเฟสเพื่อรองรับการเปิดเฟสที่พันกัน (Burbey and Zhang, 2015) การเปิดเฟสและการแยกเฟสที่มีทัศนียภาพออกจากกันช่วยให้สามารถคำนวณอัตราการทรุดตัวในช่วงเวลาต่าง ๆ ได้อย่างแม่นยำ ดัง Equation 4 (Chen et al., 2013)

$$D\phi_x^k = W\left(-\frac{4\pi}{\lambda \cdot R_x^m \cdot \sin\theta_x^m} \cdot B_{\perp x}^k \cdot \Delta h(x) - \frac{4\pi}{\lambda} T_x^k \cdot v(x) + \phi_{x,noise}^k\right) \quad (4)$$

Where; W denotes the wrapping operator, λ denote the radar wavelength, R denote the range from the master pixel to the sensor, θ_m denote the local incidence angle, $B_\perp$ represent the perpendicular baseline, T represent

the temporal baseline, $\Delta h(x)$ is the height correction of point target x relative to the reference point, $v(x)$ is the linear deformation rate of point target x relative to the reference point, φ_{noise} represents the combination of white noise and unmodeled errors, including baseline-related errors, atmospheric phase contributions, and non-linear deformation.

การวิเคราะห์ข้อมูล

ความแม่นยำของการประมาณการการทรุดตัวจาก PSI ได้รับการตรวจสอบโดยการเปรียบเทียบผลลัพธ์กับข้อมูล CORS และการตรวจระดับพื้นดิน การทดสอบ t-test (Chen et al., 2013) ถูกนำมาใช้เพื่อหาความมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% โดยเปรียบเทียบอัตราการทรุดตัวที่ได้จาก PSI กับการรังวัดภาคสนามดัง Equation 5:

$$t = \frac{\bar{X} - \mu}{s/\sqrt{n}} \quad (5)$$

where $\bar{X}$ is the sample mean, s is the sample variance, n is the total number of observations, μ is the Population Mean

Machine Learning

เพื่อแก้ไขปัญหาข้อมูลน้ำบาดาลที่หายไปใช้การเรียนรู้ของเครื่อง (ML) เพื่อเติมข้อมูลที่ขาดหายไป โดยเริ่มจากการเลือกอัลกอริธึม Random Forest แต่หลังจากการประเมินพบว่า การถดถอย Ordinary Least Squares (OLS) มีประสิทธิภาพดีกว่าแสดงดัง Table 1 โดยมีค่า RMSE ≈ 0.005 และใช้ค่า R^2 ในการเลือกโมเดล

Table 1 Model Validation Model RMSE (Units: meters)

Model	RMSE
Ordinary Least Square	0.005174 m.
Ridge	0.007563 m.
Lasso	0.016498 m.

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

ค่าการทรุดตัว

การวัดการเคลื่อนที่ที่ได้จาก PSI แสดงการเปลี่ยนแปลงของพื้นดินในกรุงเทพฯ และปริมณฑลพบว่ามีค่าการทรุดตัวตั้งแต่ -31.61 มม. ถึง +18.51 มม. ต่อปี ดัง Fig. 1 ความไม่แน่นอนโดยรวมในข้อมูลนี้คือ ±0.03 มม. ซึ่งอยู่ในช่วงความแม่นยำปกติของ InSAR อย่างไรก็ตาม ค่า ±0.03 มม. อยู่ใกล้กับขีดจำกัดความไวของ InSAR ซึ่งมักจะต่ำกว่า 1 มม. แม้ว่าการทรุดตัวเล็กน้อยนี้อาจดูเหมือนไม่สำคัญ แต่ควรพิจารณาว่าความไม่แน่นอนนี้สามารถเกิดจากหลายปัจจัย เช่น ความล่าช้าของเฟสในบรรยากาศ การบิดเบือนทางเรขาคณิตและการสูญเสียสัญญาณ ความละเอียดทางพื้นที่และครอบคลุมทางเวลาของ PSI ช่วยในการตรวจจับแนวโน้มการทรุดตัวที่ไม่สามารถตรวจจับได้ด้วยวิธีการรังวัดภาคสนาม

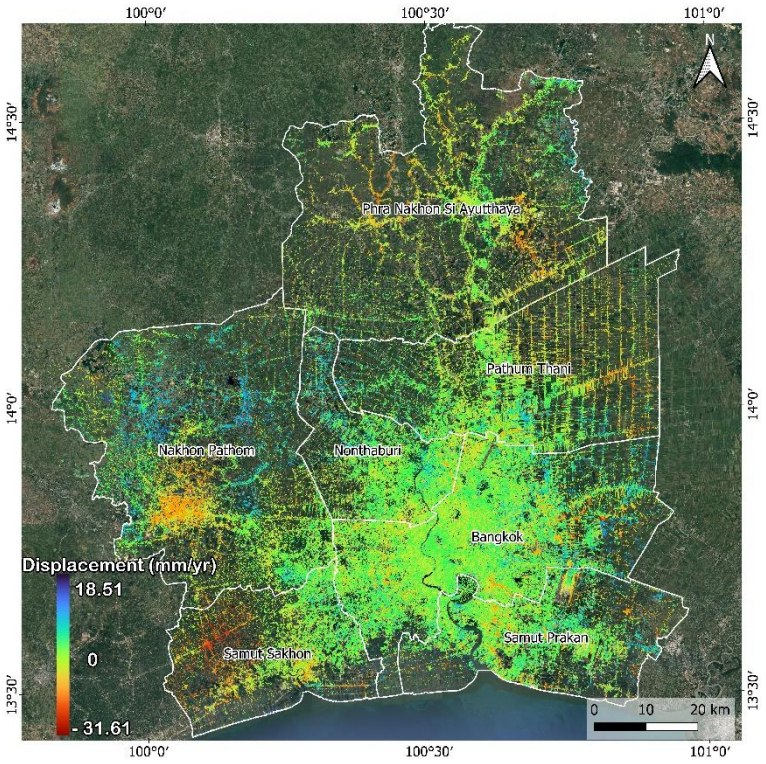


Fig. 1 Vertical subsidence map of Bangkok and its surrounding areas.

การเปรียบเทียบ

การเปรียบเทียบทางสถิติได้ดำเนินการโดยใช้การทดสอบ t-test แบบคู่เพื่อประเมินความแตกต่างในอัตราการเคลื่อนที่ระหว่าง InSAR และชุดข้อมูลอ้างอิง โดยรวมแล้ว ค่าสถิติ t ยังคงอยู่ภายในเกณฑ์ที่สำคัญ ซึ่งบ่งชี้ถึงความสอดคล้องที่ดีว่าค่าอัตราการทรุดตัวในแนวตั้งที่ได้จากเทคนิค InSAR ตรงกับข้อมูลจาก CORS และการตรวจระดับพื้นดิน Table 2, 3 แสดงถึงความสอดคล้องระหว่างค่า InSAR กับ CORS และการวัดระดับตามลำดับ

Table 2 Show the consistency between CORS and InSAR using T-test.

N	Sta.	t-statistic	t-threshold	Significant
1	DPT9	0.48	2.032	Significant
2	SBKK	-0.69	1.992	Significant
3	PKKT	-1.88	1.982	Significant
4	KTBN	0.29	1.997	Significant
5	BPLE	-1.38	2.110	Significant
6	CCSO	-9.01	12.706	Significant
7	NKPT	-7.48	2.040	Not significant

Table 3 Show the consistency between levelling measurements (Field) and InSAR using T-test.

Station	t-statistic	t-threshold	Significant
1	-0.5283	1.9996	Significant
2	-0.1125	2.0117	Significant
3	-0.3424	2.0345	Significant
4	0.2302	1.9944	Significant
5	0.4023	2.0086	Significant
6	0.0427	1.9840	Significant
7	5.2644	1.9921	Not significant
8	-0.4571	2.0739	Significant
9	-2.4371	2.0687	Not significant
10	2.5556	3.1824	Significant

ค่าช่วง t เป็นค่าทางสถิติที่ได้จากตารางการแจกแจง t ซึ่งกำหนดโดยระดับนัยสำคัญ (α) และอิสระของข้อมูล (df) ใช้เป็นเกณฑ์ในการตัดสินใจว่า ข้อมูลที่สังเกตมีหลักฐานเพียงพอที่จะปฏิเสธสมมติฐานศูนย์หรือไม่ หากค่า t-statistic มีค่าสัมบูรณ์มากกว่าค่าช่วง t, ผลลัพธ์จะถือว่าเป็นนัยสำคัญทางสถิติ และจะปฏิเสธสมมติฐานศูนย์ (Fisher, 1925; Moore et al., 2014). กระบวนการตรวจสอบความถูกต้องพบว่าค่าสัมประสิทธิ์การสหสัมพันธ์ระหว่าง PSI กับข้อมูล GNSS เท่ากับ 0.89 ขณะที่การสหสัมพันธ์กับข้อมูลการวัดระดับเท่ากับ 0.84 ค่าการสหสัมพันธ์ที่สูงนี้ยืนยันว่าเทคนิค PSI ให้การวัดที่แม่นยำและเชื่อถือได้เกี่ยวกับการทรุดตัวของแผ่นดิน อย่างไรก็ตาม สถานีบางแห่ง เช่น NKPT BM7 และ BM9 ไม่ตรงกันระหว่างการวัดจาก PSI และการรังวัดภาคสนาม ความแตกต่างเหล่านี้อาจเกิดจากฐานข้อมูลทางพื้นที่และเวลา, การตกตะกอนจากพืชพรรณ, ความล่าช้าของเฟสทางอากาศ, หรือความไม่สอดคล้องกันทางพื้นที่ระหว่างจุด PS และจุดการวัดระดับ หรือจากลักษณะการถ่ายภาพของ SAR (Zhang et al., 2024)

Permutation Entropy (PE)

การวิเคราะห์ Permutation Entropy (PE) ช่วยให้เราเข้าใจความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนรูปที่ได้จาก InSAR กับพฤติกรรมของน้ำบาดาลโดยการวัดความซับซ้อนตามเวลาและพลศาสตร์ที่ไม่เป็นเชิงเส้นของการเคลื่อนไหวของพื้นผิวในช่วงระยะเวลาการศึกษา พบค่าต่ำของ PE (เช่น PE = 0.08) ในพื้นที่ที่มีแนวโน้มการทรุดตัวที่ค่อนข้างคงที่ดัง Fig. 2 ซึ่งบ่งชี้ถึงพฤติกรรมการทรุดตัวที่สามารถคาดเดาได้และเชื่อมโยงกับกระบวนการดึงน้ำบาดาลที่ค่อยเป็นค่อยไป ในขณะที่ค่าที่สูงกว่า (เช่น PE = 0.42) พบในพื้นที่ที่มีการทรุดตัวที่ไม่เป็นเส้นตรงและผิดปกติ นอกจากนี้ การวิเคราะห์ PE ยังเผยให้เห็นวงจรการฟื้นตัวที่เกิดจากการลดการสูบน้ำหรือการฟื้นตัวทางยืดหยุ่นจากการเติมน้ำบาดาล (Fig. 2) การแยกแยะกระบวนการต่างๆ ที่มีค่า PE ต่ำและสูงยังช่วยให้เห็นความแตกต่างระหว่างการทรุดตัวที่คงที่และสามารถทำนายได้จากการสูบน้ำค่อยๆ เพิ่มขึ้น (Ikuemonisan, 2025)

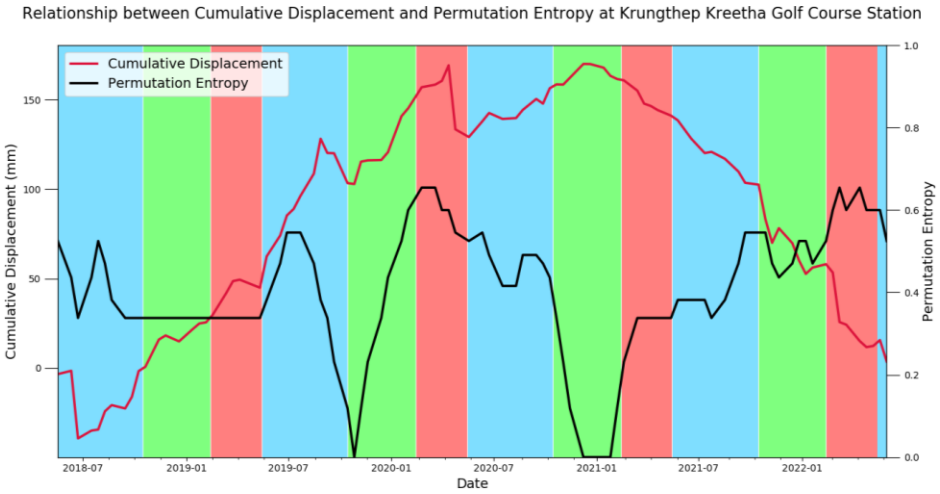


Fig. 2 Relationship between cumulative settlement at the groundwater observation station at the golf course. Bangkok Kritha, Bang Kapi district, and permutation entropy.

สรุป

ในการศึกษาการทรุดตัวของแผ่นดินในกรุงเทพฯ โดยใช้เทคนิค Persistent Scatterer InSAR (PSI) ร่วมกับการเติมข้อมูลน้ำบาดาลผ่านเครื่องมือ Machine Learning (OLS) และการวิเคราะห์ Permutation Entropy (PE) พบว่าการทรุดตัวในแนวดิ่งมีค่าตั้งแต่ -31.61 มม. ถึง +18.51 มม. ต่อปี โดยมีความแม่นยำในข้อมูลที่ ±0.03 มม. ซึ่งถือว่าอยู่ในช่วงความแม่นยำปกติของ InSAR ที่ต่ำกว่า 1 มม. การศึกษาแสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ที่ชัดเจนระหว่างการทรุดตัวและระดับน้ำบาดาล โดยค่าความสัมพันธ์ระหว่างข้อมูล PSI และน้ำบาดาลมีค่า 0.89 สำหรับข้อมูล GNSS และ 0.84 สำหรับการวัดระดับพื้นดิน ซึ่งยืนยันว่า การทรุดตัวในพื้นที่ที่มีการสูบน้ำบาดาลสูงสามารถทำนายได้จากการเปลี่ยนแปลงระดับน้ำบาดาลในพื้นที่นั้นๆ ได้อย่างแม่นยำ

การวิเคราะห์ Permutation Entropy (PE) ยังช่วยให้เข้าใจพลวัตของการทรุดตัว โดยพบว่าพื้นที่ที่มีการทรุดตัวที่ค่อนข้างคงที่ (PE = 0.08) เกิดจากการสูบน้ำบาดาลที่ค่อยๆ เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง ในขณะที่พื้นที่ที่มีการทรุดตัวที่ไม่เป็นเชิงเส้น (PE = 0.42) มีการฟื้นตัวจากการเติมน้ำบาดาลหรือการลดการสูบน้ำแสดงให้เห็นถึงกระบวนการที่มีความซับซ้อนตามฤดูกาล การใช้เทคนิค PSI ร่วมกับ PE และการเติมข้อมูลน้ำบาดาลด้วย OLS ช่วยให้สามารถคาดการณ์และติดตามการทรุดตัวได้อย่างมีประสิทธิภาพ

ผลการศึกษาแสดงถึงความสำคัญของการจัดการน้ำบาดาลในการป้องกันและลดความเสี่ยงจากการทรุดตัวของแผ่นดิน โดยเทคนิคที่ใช้ในงานวิจัยนี้สามารถช่วยพัฒนาแนวทางการจัดการน้ำบาดาลในพื้นที่ที่มีการทรุดตัวสูง โดยเฉพาะในพื้นที่อุตสาหกรรมตะวันออกของกรุงเทพฯ ซึ่งเป็นพื้นที่ที่มีการสูบน้ำบาดาลมาก การนำผลการศึกษานี้ไปใช้ในการวางแผนและพัฒนาการจัดการน้ำบาดาลจะช่วยป้องกันไม่ให้เกิดการทรุดตัวมากขึ้นและช่วยคุ้มครองโครงสร้างพื้นฐานในระยะยาว

เอกสารอ้างอิง

Bamler, R., Hartl, P. 1998. Synthetic aperture radar interferometry. Inverse Probl. 14: R1–R54.

Burbey, T.J., Zhang, M. 2015. Inverse modeling using PS-InSAR for improved calibration of hydraulic parameters and prediction of future subsidence for Las Vegas Valley, USA. Proc. Int. Assoc. Hydrol. Sci. 372: 411–416.

Chen, J., Wu, J., Zhang, L., Zou, J., Liu, G., Zhang, R., Yu, B. 2013. Deformation trend extraction based on multi-temporal InSAR in Shanghai. Remote Sens. 5: 1774–1786.

Department of Groundwater Resources. n.d. Thailand Groundwater Monitoring System (TGMS). Accessed January 30, 2026. http://tgms.dgr.go.th/#/home.

Fisher, R.A. 1925. Statistical methods for research workers. Oliver and Boyd.

Guo, H., Martínez-Graña, A.M., González-Delgado, J.A. 2024. Monitoring the subsidence in Wan'an town of Deyang based on PS-InSAR technology (Sichuan, China). Sustainability 16: 10010.

Hasan, M.F., Smith, R., Vajedian, S., Pommerenke, R., Majumdar, S. 2023. Global land subsidence mapping reveals widespread loss of aquifer storage capacity. Nat. Commun. 14: 6180.

Hooper, A. 2021. Improving high-resolution maps of large-scale interseismic strain from Sentinel-1. In American Geophysical Union Fall Meeting 2021. G42A-08.

Ikuemonisan, F.E. 2025. An integrative review of land subsidence dynamics and monitoring in Nigeria. Discov. Environ. 3: 148.

Kaur, R., Gupta, V., Malik, K., Chaudhary, B.S. 2024. Geotechnical characterization and PS-InSAR for risk analysis of Solang landslide in Beas Valley, NW Himalaya: A wake-up call! J. Indian Soc. Remote Sens. 52: 1045–1059.

Kirinart, C., Pumpuang, A., Ladawadee, A., Supavetch, S., Aobpaet, A. 2020. Subsidence rate analysis of Bangkok soil profile with InSAR data. In Proceedings of the 25th National Convention on Civil Engineering. Chonburi, Thailand.

Moore, D.S., McCabe, G.P., Craig, B.A. 2014. Introduction to the practice of statistics. W.H. Freeman and Company.

Morabito, F.C., Labate, D., La Foresta, F., Bramanti, A., Morabito, G., Palamara, I. 2012. Multivariate multi-scale permutation entropy for complexity analysis of Alzheimer's disease EEG. Entropy 14: 1186–1202.

Zhang, L., Zhang, X., Zhang, Z., Yang, H. 2024. Land subsidence in urban environments: A global perspective on challenges and solutions. Environ. Earth Sci. 83: 1–12.

Zhang, P., Guo, Z., Guo, S., Xia, J. 2022. Land subsidence monitoring method in regions of variable radar reflection characteristics by integrating PS-InSAR and SBAS-InSAR techniques. Remote Sens. 14: 3265.

หลักเกณฑ์การแบ่งงวดงานก่อสร้างงานเขื่อนป้องกันตลิ่ง กรมโยธาธิการและผังเมือง

Construction payment division criteria for Riverbank Protection Dam Projects under the Department of Public Works and Town & Country Planning

วรปรัชญ์ เป็งวงศ์, วันชัย ยอดสุดใจ*

Woraprat Peangwong, Wanchai Yodsudjai*

[a]ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

[a]Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Kasetsart University, Bangkok 10900, Thailand

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

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาหลักเกณฑ์และแนวทางที่เหมาะสมในการแบ่งงวดงานของโครงการก่อสร้างเขื่อน ป้องกันตลิ่งภายใต้กรมโยธาธิการและผังเมือง โดยพิจารณาการแบ่งงวดงานในฐานะกลไกสำคัญในการบริหารสัญญา การควบคุมความก้าวหน้าของงาน และการบริหารงบประมาณ งานวิจัยใช้ระเบียบวิธีวิจัยเชิงคุณภาพ โดยวิเคราะห์เอกสารขอบเขตงาน (TOR) และเอกสารบริหารสัญญาของโครงการเขื่อนป้องกันตลิ่งจำนวน 20 โครงการ ร่วมกับการสัมภาษณ์เชิงลึกเจ้าหน้าที่และผู้ควบคุมงานที่เกี่ยวข้องจำนวน 15 ราย ผลการศึกษาพบว่ายังขาดแนวทางมาตรฐานกลางในการกำหนดจำนวนงวดงานและสัดส่วนการเบิกจ่าย ส่งผลให้เกิดความแตกต่างในการปฏิบัติและความล่าช้าในการเบิกจ่ายงบประมาณ ทั้งนี้ การแบ่งงวดงานแบบผสม (Hybrid Method) เป็นแนวทางที่มีประสิทธิภาพสูงสุด เนื่องจากสามารถสะท้อนความก้าวหน้าของงานได้อย่างเหมาะสม ลดความคลาดเคลื่อนในการประเมิน และเพิ่มความโปร่งใสในการบริหารงบประมาณ ผลการวิจัยสามารถใช้เป็นแนวทางในการจัดทำคู่มือมาตรฐานการแบ่งงวดงานในอนาคต

คำสำคัญ: การแบ่งงวดงาน, งานเขื่อนป้องกันตลิ่ง, กรมโยธาธิการและผังเมือง

Abstract

This study investigates appropriate criteria and approaches for construction payment division in riverbank protection dam projects under the Department of Public Works and Town & Country Planning (DPT). A qualitative research approach was adopted through the analysis of Terms of Reference (TOR) and contract administration documents from 20 projects, along with in-depth interviews with 15 relevant government officials and site supervisors. The findings reveal a lack of standardized guidelines for determining payment stages and disbursement proportions, resulting in inconsistencies and delays in budget disbursement. The Hybrid Method, combining milestone-based payment division with percentage-based progress evaluation, was identified as the most effective approach, as it accurately reflects actual construction progress and enhances transparency in contract and budget management.

Keywords: Construction payment division, Department of Public Works and Town & Country Planning, Riverbank protection dam project

คำนำ

กรมโยธาธิการและผังเมืองเป็นหน่วยงานหลักที่มีภารกิจในการพัฒนาและปรับปรุงโครงสร้างเขื่อนป้องกันตลิ่งเพื่อยกระดับคุณภาพชีวิตของประชาชนและสนับสนุนการพัฒนาเศรษฐกิจ สังคม และสิ่งแวดล้อมของประเทศอย่างยั่งยืน อย่างไรก็ตาม การดำเนินโครงการก่อสร้างภาครัฐภายใต้การกำกับของกรมโยธาธิการและผังเมืองยังประสบปัญหาโดยเฉพาะด้านการบริหารสัญญาและการแบ่งงวดงานก่อสร้าง ซึ่งมีผลโดยตรงต่อการควบคุมความก้าวหน้าของงาน การเบิกจ่ายงบประมาณ และการตรวจรับงานให้เป็นไปตามกรอบเวลาอย่างมีประสิทธิภาพ (Kaka and Price, 1993)

ในทางปฏิบัติ การกำหนดจำนวนงวดงานและสัดส่วนการเบิกจ่ายในแต่ละโครงการมักแตกต่างกันตามดุลยพินิจหรือประสบการณ์ของผู้ควบคุมงาน ส่งผลให้เกิดความไม่สม่ำเสมอ ขาดความโปร่งใสในการบริหารสัญญา และอาจกระทบต่อสภาพคล่องของผู้รับจ้าง (Hatush and Skitmore, 1997) ดังนั้น การจัดทำแนวทางมาตรฐานสำหรับการแบ่งงวดงานก่อสร้างจึงมีความจำเป็น เพื่อให้การบริหารสัญญาโครงการเขื่อนป้องกันตลิ่งเป็นไปอย่างชัดเจน ตรวจสอบได้ และสอดคล้องกับสภาพความก้าวหน้าของงานจริง

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษา วิเคราะห์ และประเมินรูปแบบ แนวปฏิบัติ และปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการแบ่งงวดงานก่อสร้างในโครงการเขื่อนป้องกันตลิ่งของกรมโยธาธิการและผังเมือง โดยใช้ข้อมูลจากเอกสาร TOR และสัญญาจ้าง จำนวน 20 โครงการ ร่วมกับการสัมภาษณ์เชิงลึกผู้เกี่ยวข้องจำนวน 15 ราย เพื่อสังเคราะห์แนวทางการแบ่งงวดงานที่เหมาะสมที่สุด ซึ่งสามารถสะท้อนความก้าวหน้าของงานจริง เพิ่มความโปร่งใสในการบริหารสัญญา และนำไปพัฒนาเป็นมาตรฐานกลางหรือข้อเสนอเชิงนโยบายสำหรับการบริหารงบประมาณและการดำเนินโครงการเขื่อนป้องกันตลิ่งในอนาคตได้อย่างมีประสิทธิภาพ

อุปกรณ์และวิธีการ

การศึกษาข้อมูลเบื้องต้นและเอกสารที่เกี่ยวข้องงานวิจัยทำการศึกษา

ผู้วิจัยได้ศึกษารวบรวมข้อมูลจากเอกสารร่างขอบเขตงาน (Term of Reference: TOR) และสัญญาจ้างก่อสร้างของหน่วยงานภาครัฐ งานวิจัยและบทความทางวิชาการที่เกี่ยวข้องเพื่อใช้เป็นฐานข้อมูลหลักในการวิเคราะห์ลักษณะการแบ่งงวดงาน ประชากรและกลุ่มตัวอย่าง แบ่งเป็น 2 กลุ่มหลัก

1. กลุ่มข้อมูลโครงการก่อสร้าง (Project Data Set) TOR และสัญญาจ้างของโครงการภาครัฐจำนวน 20 โครงการ ซึ่งคัดเลือกโดยวิธีการเจาะจง (Purposive Sampling) เพื่อให้ครอบคลุมประเภทงานพัฒนาเมืองและลักษณะงานที่หลากหลาย

2. กลุ่มผู้ให้ข้อมูล (Key Informants) เจ้าหน้าที่ผู้เกี่ยวข้องกับการจัดทำ TOR และการควบคุมงาน จำนวน 15 ราย ประกอบด้วยเจ้าหน้าที่ฝ่ายพัสดุ วิศวกรควบคุมงาน และผู้บริหารโครงการจากหน่วยงานรัฐ 4 หน่วยงาน

ขั้นตอนการดำเนินวิจัย

แบ่งออกเป็น 4 ขั้นตอนหลักตามลำดับ ดังนี้

1. การรวบรวมข้อมูลเอกสาร TOR และสัญญาจ้างก่อสร้าง ทำการเก็บรวบรวม TOR และสัญญาจ้างจากหน่วยงานภาครัฐ 20 โครงการ (แสดงดังตารางที่ 1) เพื่อใช้เป็นฐานข้อมูลหลักสำหรับการวิเคราะห์รูปแบบการแบ่งงวดงานโดยคัดเลือกโครงการงานก่อสร้างงานเขื่อนป้องกันตลิ่ง

2. การสัมภาษณ์เชิงลึก (In-depth Interview) ดำเนินการสัมภาษณ์ผู้ให้ข้อมูลสำคัญจำนวน 15 ราย โดยใช้แบบสัมภาษณ์กึ่งโครงสร้าง (Semi-structured Interview) ครอบคลุมประเด็นเกี่ยวกับกระบวนการกำหนดงวดงาน ปัญหาในการตรวจรับและการเบิกจ่าย เหตุผลในการเลือกใช้รูปแบบการแบ่งงวดงาน และข้อเสนอแนะในการปรับปรุงระบบ ข้อมูลจากการสัมภาษณ์ถูกบันทึกเสียง ถอดความเป็นลายลักษณ์อักษร และวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม Taguette ซึ่งเป็นซอฟต์แวร์สำหรับการวิเคราะห์ข้อมูลเชิงคุณภาพ เพื่อช่วยในการจัดการข้อมูล การกำหนดรหัส (Coding) และการติดป้ายกำกับประเด็นสำคัญจากบทสัมภาษณ์อย่างเป็นระบบ ก่อนนำไปสังเคราะห์ร่วมกับข้อมูลจากเอกสาร TOR และสัญญาจ้าง ทั้งนี้มีการตรวจสอบความถูกต้องของข้อมูลโดยผู้ให้ข้อมูล (Member Check) เพื่อเพิ่มความน่าเชื่อถือของผลการวิจัย

3. การวิเคราะห์และจัดกลุ่มข้อมูล โดยใช้ข้อมูลจากเอกสารร่างขอบเขตงาน (TOR) และสัญญาจ้างก่อสร้างของโครงการภาครัฐจำนวน 20 โครงการซึ่งประกอบด้วยเขื่อนป้องกันตลิ่งหลากหลายพื้นที่ในประเทศรวมถึงการสัมภาษณ์เชิงลึกเจ้าหน้าที่ที่เกี่ยวข้อง 15 ราย เช่น เจ้าหน้าที่ฝ่ายพัสดุ วิศวกรควบคุมงาน และผู้บริหารโครงการข้อมูลทั้งหมดถูกนำมาวิเคราะห์ด้วยวิธี วิเคราะห์เชิงเนื้อหา (Content Analysis) เพื่อหาความเหมือนและความแตกต่างของรูปแบบการแบ่งงวดงานในแต่ละหน่วยงาน จากนั้นจัดหมวดหมู่รูปแบบการแบ่งงวดงาน ซึ่งโครงการของภาครัฐส่วนใหญ่ใช้รูปแบบการแบ่งงวดงานออกเป็น 3 กลุ่มหลัก ได้แก่

- กลุ่มที่1. การแบ่งงวดงานตามลำดับขั้นตอนของงานก่อสร้าง (Milestone Method)
- กลุ่มที่2. การแบ่งงวดงานตามเปอร์เซ็นต์ความก้าวหน้า (Percentage Method)
- กลุ่มที่3. การแบ่งงวดงานแบบผสม (Hybrid Method)

การวิเคราะห์ในขั้นตอนนี้ใช้ทั้งข้อมูลเอกสาร (TOR และสัญญา) และข้อมูลภาคสนาม (สัมภาษณ์) โดยข้อมูลจากการสัมภาษณ์ถูกนำมาสังเคราะห์ผ่านการวิเคราะห์เชิงเนื้อหา และจัดอันดับเชิงเปรียบเทียบโดยอาศัยความสอดคล้องของประเด็นที่ปรากฏซ้ำ ความเห็นของผู้เชี่ยวชาญที่มีประสบการณ์ด้านการบริหารสัญญาและการตรวจสอบความสอดคล้องกับข้อมูลจากเอกสาร TOR ทั้งนี้ การจัดอันดับดังกล่าวเป็นการประเมินเชิงคุณภาพในลักษณะสัมพัทธ์ไม่ใช่การถ่วงน้ำหนักเชิงปริมาณ

4. การตรวจสอบและสังเคราะห์ข้อมูล ข้อมูลที่ได้จากการวิเคราะห์เอกสาร TOR สัญญาจ้าง และการสัมภาษณ์เชิงลึก ถูกนำมาตรวจสอบความถูกต้องของข้อมูล (Data Validation) โดยใช้วิธีการเปรียบเทียบข้ามแหล่งข้อมูล (Triangulation) ระหว่างเอกสารและคำให้สัมภาษณ์ เพื่อให้มั่นใจว่าข้อมูลมีความสอดคล้องและครบถ้วน ในกรณีที่ข้อมูลบางส่วนไม่ชัดเจน ได้มีการตรวจสอบเพิ่มเติมกับแหล่งข้อมูลเดิมหรือหน่วยงานเจ้าของโครงการ จากนั้นทำการสังเคราะห์ข้อมูล (Data Synthesis) โดยผสานผลการวิเคราะห์เชิงปริมาณจาก TOR และข้อมูลเชิงคุณภาพจากการสัมภาษณ์ เพื่อสรุปแนวโน้ม รูปแบบ และปัจจัยที่มีผลต่อการแบ่งงวดงานของโครงการก่อสร้างภาครัฐ พร้อมทั้งตรวจสอบความสมเหตุสมผลของผลการวิเคราะห์กับผู้เชี่ยวชาญ เพื่อยืนยันความถูกต้องและความเป็นไปได้ของแนวทางที่พัฒนา ซึ่งนำไปสู่การเสนอรูปแบบการแบ่งงวดงานที่มีความยืดหยุ่น โปร่งใส และสามารถสะท้อนความก้าวหน้าของงานจริงได้อย่างมีประสิทธิภาพ รวมถึงใช้เป็นพื้นฐานในการจัดทำแนวทางหรือมาตรฐานกลางในการบริหารสัญญาก่อสร้างภาครัฐในอนาคต

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

ความแตกต่างของรูปแบบการแบ่งงวดงานในโครงการเขื่อนป้องกันตลิ่ง ซึ่งสะท้อนถึงการขาดแนวทางมาตรฐานกลางในการกำหนดงวดงาน และเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพในการบริหารสัญญาและการเบิกจ่ายงบประมาณของโครงการดังแสดงใน Table1

Table1 Details of the Terms of Reference (TOR)

Project No	Dam Length (m)	Construction Budget	Construction Period (days)	Number of Payment Stages	Payment Division Method
Project 1	1,018	118,759,000.00	750	171	Hybrid Method
Project 2	523	39,576,000.00	650	57	Milestone Method
Project 3	1,301	103,900,000.00	750	150	Hybrid Method
Project 4	695	128,600,000.00	750	185	Hybrid Method
Project 5	412	39,525,000.00	650	57	Milestone Method
Project 6	444	59,280,000.00	700	85	Hybrid Method
Project 7	967	108,840,000.00	750	157	Hybrid Method
Project 8	2,090	79,178,000.00	700	114	Hybrid Method
Project 9	871	69,232,000.00	700	100	Hybrid Method
Project 10	144	34,060,900.00	650	50	Milestone Method
Project 11	473	39,560,000.00	650	57	Milestone Method
Project 12	855	84,112,000.00	700	121	Hybrid Method
Project 13	380	49,446,000.00	650	71	Percentage Method
Project 14	1,340	108,850,000.00	750	157	Hybrid Method
Project 15	343	39,565,000.00	650	57	Milestone Method
Project 16	425	49,423,000.00	650	71	Hybrid Method
Project 17	907	39,580,000.00	650	57	Milestone Method
Project 18	325	44,500,000.00	650	64	Percentage Method
Project 19	1,080	103,890,000.00	750	150	Hybrid Method
Project 20	841	49,450,000.00	650	71	Hybrid Method

เมื่อพิจารณารูปแบบการแบ่งงวดงานก่อสร้างของโครงการเขื่อนป้องกันตลิ่ง สามารถสรุปรูปแบบการแบ่งงวดงานออกเป็น 3 กลุ่มหลัก ซึ่งมีทั้งความเหมือนและความแตกต่างกัน ดังนี้

1. Milestone Method เป็นรูปแบบการเบิกจ่ายเงินงวดที่อ้างอิงกับจุดสำคัญของงาน (Milestones) ซึ่งกำหนดไว้ล่วงหน้าในสัญญา เช่น งานฐานรากแล้วเสร็จ หรืองานโครงสร้างแล้วเสร็จ (Knowify, 2023)

2. Percentage Method เป็นรูปแบบการเบิกจ่ายเงินงวดตามเปอร์เซ็นต์ความก้าวหน้าของงานที่ดำเนินการแล้วจริง โดยพิจารณาจากปริมาณงานที่ทำเสร็จเมื่อเทียบกับปริมาณงานทั้งหมดของโครงการ เช่น การเบิกจ่ายเมื่อดำเนินงานแล้วเสร็จร้อยละ 20, 40 หรือ 60 ของโครงการ (Knowify, 2023)

3. Hybrid Method เป็นรูปแบบการแบ่งงวดงานแบบผสมผสานระหว่างการกำหนดจุด Milestone และการประเมินความก้าวหน้าของงานตามเปอร์เซ็นต์ เพื่อเพิ่มความยืดหยุ่นและให้สอดคล้องกับสภาพการดำเนินงานจริง

จากผลการวิเคราะห์ข้อมูล TOR พบว่ารูปแบบการแบ่งงวดงานที่ใช้มีความแตกต่างกันในแต่ละโครงการ โดยสัดส่วนการเลือกใช้รูปแบบการแบ่งงวดงานแต่ละประเภทสรุปแสดงไว้ใน Fig. 1

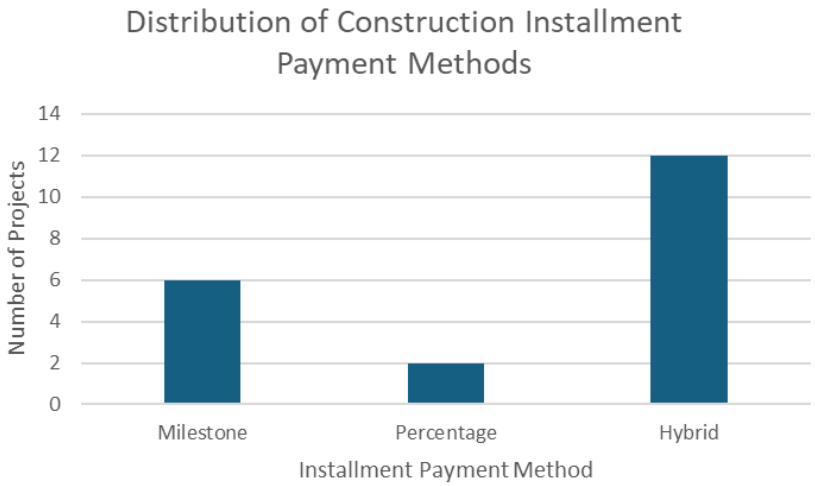


Fig. 1 shows the distribution of construction installment payment methods.

ลักษณะการแบ่งงวดงานในแต่ละประเภทโครงการ

1. โครงการที่มีจำนวนงวดงานมากกว่า 100 งวด มักเป็นโครงการที่มีความซับซ้อนสูง ลักษณะดังกล่าวสะท้อนให้เห็นว่าโครงการที่มีงวดงานจำนวนมากจำเป็นต้องใช้วิธีการแบ่งงวดงานที่มีความยืดหยุ่น เพื่อให้สามารถเบิกจ่ายและตรวจรับงานได้สอดคล้องกับความก้าวหน้าที่เกิดขึ้นจริงในแต่ละช่วงของการก่อสร้างโครงการในกลุ่มนี้จึงนิยมใช้การแบ่งงวดงานแบบผสม (Hybrid Method) เพื่อให้สามารถสะท้อนความก้าวหน้าของงานได้เหมาะสมและมีความยืดหยุ่นในการบริหารสัญญา

2. โครงการที่มีจำนวนงวดงานมากกว่า 60 งวดขึ้นไป ส่วนใหญ่มักเลือกใช้การแบ่งงวดงานแบบผสม (Hybrid Method) เนื่องจากสามารถรองรับความหลากหลายของกิจกรรมก่อสร้าง และสอดคล้องกับลักษณะการดำเนินงานจริงที่มีความต่อเนื่องและเปลี่ยนแปลงตามสภาพพื้นที่ อย่างไรก็ตาม โครงการบางส่วนที่มีลักษณะงานซ้ำ ๆ ต่อเนื่องกันและสามารถประเมินความก้าวหน้าโดยรวมได้ง่าย อาจเลือกใช้การแบ่งงวดงานตามเปอร์เซ็นต์ความก้าวหน้า (Percentage Method) ได้ แต่ในทางปฏิบัติวิธีดังกล่าวยังไม่นิยมใช้มากนัก เนื่องจากต้องอาศัยผู้ควบคุมงานที่มีความชำนาญและจรรยาบรรณสูงในการประเมินความก้าวหน้า

3. โครงการที่มีจำนวนงวดงานประมาณ 50–60 งวด และมีความยาวเชื่อนน้อย การเลือกใช้ (Milestone Method) ในโครงการที่มีจำนวนงวดงานไม่มากสะท้อนถึงความต้องการลดภาระการประเมินความก้าวหน้าและความซับซ้อนในการตรวจรับ ซึ่งเหมาะสมกับโครงการที่ขอบเขตงานชัดและลำดับก่อสร้างไม่ซับซ้อน

ลักษณะการเลือกใช้รูปแบบการแบ่งงวดงานดังกล่าวมีความสัมพันธ์โดยตรงกับจำนวนงวดงานและระดับความซับซ้อนของโครงการ ดังแสดงใน Fig. 2 โดยพบว่าโครงการที่มีจำนวนงวดงานมากมีแนวโน้มเลือกใช้การแบ่งงวดงานแบบผสม (Hybrid Method) ขณะที่โครงการที่มีจำนวนงวดงานน้อยและมีลักษณะงานไม่ซับซ้อนมักเลือกใช้การแบ่งงวดงานตามลำดับขั้นตอนของงาน (Milestone Method)

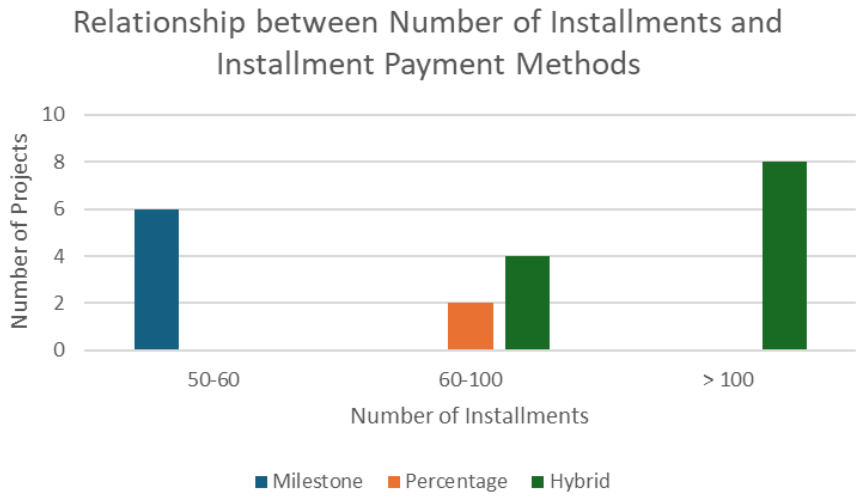


Fig. 2 Relationship between Number of Installments and Installment Payment Methods

ปัญหาที่พบในการบริหารงวดงาน

ผลจากการวิเคราะห์ข้อมูลการสัมภาษณ์สะท้อนให้เห็นปัญหาหลักในการบริหารงวดงานก่อสร้างที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพของโครงการ พบว่าปัญหาในการบริหารงวดงานสามารถสรุปเป็น 4 ประเด็นหลัก ดังนี้

1. การประเมินความก้าวหน้าไม่สอดคล้องกับสภาพงาน ปัญหานี้เกิดจากการใช้วิธีการเบิกจ่ายเงินงวดตามเปอร์เซ็นต์ความก้าวหน้า งานวิจัยของ Al-Jibouri (2003) ชี้ให้เห็นว่าการประเมินความก้าวเปอร์เซ็นต์สะสมอาจก่อให้เกิดความคลาดเคลื่อนจากสภาพงานจริง เนื่องจากไม่สามารถสะท้อนความก้าวหน้าทางกายภาพของงานได้อย่างถูกต้อง ส่งผลให้ประสิทธิภาพในการควบคุมต้นทุนและการบริหารงวดงานลดลง

2. ผู้รับจ้างไม่สามารถเบิกจ่ายเงินงวดได้เมื่อไม่สามารถดำเนินงานได้ครบตามที่กำหนด ปัญหานี้พบได้บ่อยในการใช้การแบ่งงวดงานแบบ Milestone ซึ่งกำหนดให้การเบิกจ่ายเงินงวดขึ้นอยู่กับความสำเร็จของกิจกรรมที่ระบุไว้ในสัญญา หากไม่สามารถดำเนินงานให้แล้วเสร็จครบถ้วน ผู้รับจ้างจะไม่สามารถเบิกจ่ายเงินงวดนั้นได้ ส่งผลให้เกิดความล่าช้าและกระทบต่อสภาพคล่องของโครงการ ซึ่งสอดคล้องกับแนวคิดด้านการบริหารโครงการก่อสร้างที่ระบุว่าการผูกการจ่ายเงินกับกิจกรรมที่ต้องแล้วเสร็จสมบูรณ์อาจเพิ่มความเสี่ยงด้านกระแสเงินสดของผู้รับจ้าง (Hendrickson, 1998; Arditi & Pattanakitchamroon, 2006)

3. การเบิกจ่ายล่าช้าเนื่องจากเอกสารประกอบการเบิกไม่ครบถ้วน ปัญหานี้มักพบในการใช้การแบ่งงวดงานแบบผสม (Hybrid Method) ซึ่งมีความซับซ้อนในการจัดเตรียมเอกสารและกระบวนการตรวจสอบ ส่งผลให้การอนุมัติการเบิกจ่ายใช้เวลานาน ทั้งนี้สอดคล้องกับงานวิจัยของ Love et al. (2010) ที่ระบุว่าความซับซ้อนของระบบเอกสารและกระบวนการบริหารจัดการเป็นปัจจัยสำคัญที่ก่อให้เกิดความล่าช้าในโครงการก่อสร้าง

4. การกำหนดงวดงานไม่สัมพันธ์กับมูลค่างานที่แท้จริง ปัญหานี้พบในการใช้การแบ่งงวดงานแบบ Milestone ในบางโครงการที่กำหนดงวดงานไม่สอดคล้องกับมูลค่างานหรือทรัพยากรที่ใช้จริง ส่งผลให้สัดส่วนการเบิกจ่ายไม่

เหมาะสมและกระทบต่อการบริหารงบประมาณ ซึ่งสอดคล้องกับ Kaka และ Price (1993) ที่ระบุว่าการกำหนดงวดงานที่ไม่สอดคล้องกับรูปแบบการใช้ต้นทุนของโครงการอาจทำให้การเบิกจ่ายไม่สะท้อนมูลค่างานที่แท้จริง

เมื่อพิจารณาความถี่ของการกล่าวถึงปัญหาจากข้อมูลการสัมภาษณ์ พบว่าปัญหาการประเมินความก้าวหน้าไม่สอดคล้องกับสภาพงานจริงถูกกล่าวถึงมากที่สุด รองลงมาคือปัญหาการกำหนดงวดงานไม่สัมพันธ์กับมูลค่างาน และปัญหาความล่าช้าในการเบิกจ่าย โดยการกระจายของปัญหาแต่ละประเภทสรุปแสดงไว้ใน Fig. 3

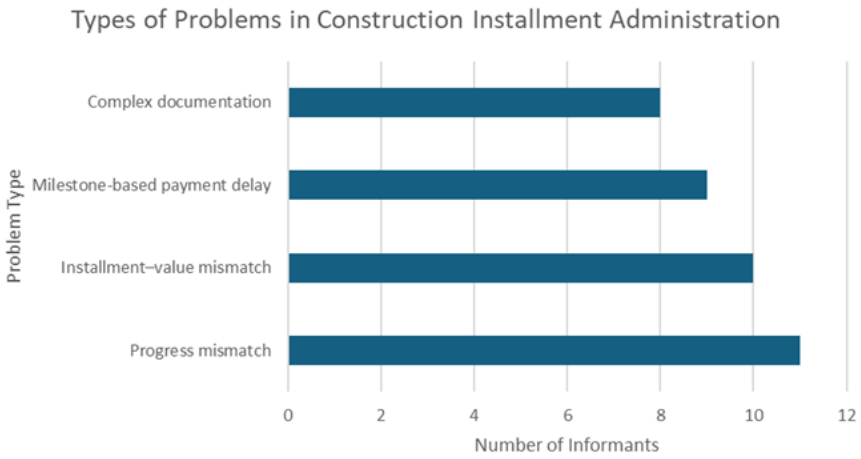


Fig. 3 shows the types of problems in construction installment administration.

ตามเกณฑ์ด้านการสะท้อนความก้าวหน้าของงานจริง ความยืดหยุ่น ความง่ายในการตรวจรับ และความเสี่ยงต่อจากผลการวิเคราะห์รูปแบบการแบ่งงวดงานทั้งในด้านลักษณะโครงการ ความสัมพันธ์กับจำนวนงวดงาน และปัญหาในการบริหารงวดงาน เมื่อนำมาสังเคราะห์เปรียบเทียบความล่าช้า พบว่าการแบ่งงวดงานแบบผสม (Hybrid Method) มีความเหมาะสมโดยรวมสูงที่สุด ดังแสดงใน Fig. 4

ทั้งนี้ ค่าคะแนนที่ใช้ในการวิเคราะห์เชิงเปรียบเทียบในรูปที่ 4 มิได้เป็นผลจากการคำนวณเชิงปริมาณโดยตรง แต่เป็นผลจากการสังเคราะห์ข้อมูลเชิงคุณภาพจากการสัมภาษณ์เชิงลึกเจ้าหน้าที่ผู้เชี่ยวชาญและผู้ควบคุมงานที่เกี่ยวข้องกับการก่อสร้างจำนวน 15 ราย โดยผู้วิจัยได้นำความคิดเห็นเกี่ยวกับข้อดี ข้อจำกัด และปัญหาที่พบในการใช้รูปแบบการแบ่งงวดงานแต่ละประเภท มาจัดกลุ่มตามเกณฑ์หลักทั้ง 4 ด้าน จากนั้นจึงให้คะแนนเชิงสัมพัทธ์เพื่อสะท้อนแนวโน้มโดยรวมของแต่ละรูปแบบ ทั้งนี้ คะแนนดังกล่าวมีวัตถุประสงค์เพื่อใช้ในการเปรียบเทียบเชิงสังเคราะห์เท่านั้น มิได้มุ่งหมายเป็นการวัดเชิงตัวเลขอย่างเป็นทางการ

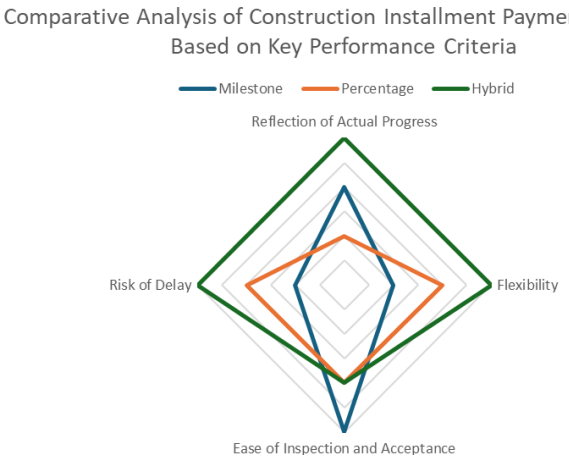


Fig. 4 shows a comparative analysis of construction installment payment methods based on key performance criteria.

จากผลการวิเคราะห์และสังเคราะห์ข้อมูล สามารถเสนอหลักการแบ่งงวดงานก่อสร้างเขื่อนป้องกันตลิ่งได้ดังนี้

• ควรใช้รูปแบบการแบ่งงวดงานแบบผสมผสานระหว่าง Milestone และร้อยละความก้าวหน้า เพื่อสะท้อนความก้าวหน้าของงานอย่างเหมาะสม

• ควรกำหนดจำนวนงวดงานให้สอดคล้องกับขนาดและความซับซ้อนของโครงการ เพื่อลดความล่าช้าในการเบิกจ่าย

• ควรกำหนดเกณฑ์การตรวจรับงานที่ชัดเจน และสนับสนุนการใช้ระบบติดตามความก้าวหน้าแบบดิจิทัล เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพและความโปร่งใสในการบริหารสัญญา

สรุป

จากผลการศึกษา พบว่ารูปแบบการแบ่งงวดงานก่อสร้างโครงการเขื่อนป้องกันตลิ่งของภาครัฐสามารถจำแนกออกเป็น 3 รูปแบบหลัก ได้แก่ Milestone Method, Percentage Method และ Hybrid Method โดยการเลือกใช้รูปแบบมีความสัมพันธ์กับจำนวนงวดงานและระดับความซับซ้อนของโครงการอย่างชัดเจน โครงการที่มีจำนวนงวดงานมากและมีลักษณะงานซับซ้อนมักเลือกใช้การแบ่งงวดงานแบบผสม เนื่องจากมีความยืดหยุ่นและสามารถสะท้อนความก้าวหน้าของงานจริงได้ดีกว่า ขณะที่โครงการที่มีจำนวนงวดงานน้อยและมีความซับซ้อนไม่สูงมักใช้ Milestone Method เพื่อความชัดเจนในการควบคุมและตรวจรับงาน

อย่างไรก็ตาม ผลการสัมภาษณ์สะท้อนว่ารูปแบบการแบ่งงวดงานแต่ละประเภทมีข้อจำกัด โดยเฉพาะการแบ่งงวดงานตามเปอร์เซ็นต์ความก้าวหน้าที่อาจก่อให้เกิดความคลาดเคลื่อนในการประเมินสภาพงานจริง และการใช้ Milestone Method ที่อาจส่งผลต่อสภาพคล่องของผู้รับจ้างเมื่อไม่สามารถดำเนินงานได้ครบตามเงื่อนไข

ในภาพรวม การแบ่งงวดงานแบบผสม (Hybrid Method) จึงเป็นแนวทางที่เหมาะสมที่สุดสำหรับโครงการเขื่อนป้องกันตลิ่งของภาครัฐ เนื่องจากสามารถลดความคลาดเคลื่อนในการประเมิน เพิ่มความโปร่งใสในการเบิกจ่าย และรองรับลักษณะงานที่หลากหลายได้อย่างมีประสิทธิภาพ ทั้งนี้ ผลการวิจัยชี้ให้เห็นถึงความจำเป็นในการจัดทำแนวทางหรือมาตรฐานกลางสำหรับการแบ่งงวดงาน เพื่อยกระดับประสิทธิภาพการบริหารสัญญาและลดปัญหาความล่าช้าในการเบิกจ่ายงบประมาณในโครงการภาครัฐ

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้สำเร็จได้ด้วยการสนับสนุนจากผู้อำนวยการกองมาตรฐานราคากลาง (กมร.) กรมโยธาธิการและผังเมือง ที่ให้ความร่วมมือในการจัดหาผู้เชี่ยวชาญมาให้สัมภาษณ์ ตอบแบบสอบถาม และให้ข้อเสนอแนะซึ่งเป็นประโยชน์ต่องานวิจัยอย่างยิ่ง

เอกสารอ้างอิง

กรมบัญชีกลาง. 2563. คู่มือการบริหารสัญญาและการตรวจรับงานก่อสร้างของหน่วยงานภาครัฐ. กระทรวงการคลัง, กรุงเทพฯ. สืบค้นจาก https://www.cgd.go.th (เข้าถึงเมื่อ 10 ตุลาคม 2568).

กรมโยธาธิการและผังเมือง. 2564. แนวทางการดำเนินโครงการก่อสร้างเขื่อนป้องกันตลิ่ง. กรมโยธาธิการและผังเมือง, กรุงเทพฯ. สืบค้นจาก https://www.dpt.go.th/th (เข้าถึงเมื่อ 1 พฤศจิกายน 2568).

กระทรวงมหาดไทย. 2564. แนวทางการกำหนดงวดงานและการเบิกจ่ายงบประมาณโครงการก่อสร้างภาครัฐ. กระทรวงมหาดไทย, กรุงเทพฯ. สืบค้นจาก https://moi.go.th/moi/ (เข้าถึงเมื่อ 10 ตุลาคม 2568).

Al-Jibouri, S. 2003. Monitoring systems and their effectiveness for project cost control in construction. Int. J. Proj. Manag. 21: 145–154.

Arditi, D., Pattanakitchamroon, T. 2006. Progress measurement in construction projects. J. Constr. Eng. Manage. 132: 139–150.

Hatush, Z., Skitmore, M. 1997. Evaluating contractor prequalification data. Constr. Manage. Econ. 15: 129–147.

Hendrickson, C. 1998. Project management for construction: Fundamental concepts for owners, engineers, architects and builders. Prentice Hall.

Kaka, A.P., Price, A.D.F. 1993. Modelling standard cost commitment curves for construction projects. Constr. Manage. Econ. 11: 133–143.

Knowify. 2023. Milestone billing vs. progress billing: What's the difference? Retrieved November 11, 2025, from https://knowify.com/resources/milestone-vs-progress-billing/

Love, P.E.D., Irani, Z., Edwards, D.J. 2010. Delay, disruption and claims in construction projects. Int. J. Proj. Manag. 28: 229–241.

แบบจำลองความเป็นจริงเสมือน (VR) สำหรับการอบรมผู้ตรวจสอบสภาพโครงสร้างประตูระบายน้ำ ตามมาตรฐานการตรวจสภาพเขื่อนระบายน้ำและประตูระบายน้ำ

Virtual Reality (VR) model for inspector training in structural condition inspection of sluice gates in accordance with the standards for barrage dam and head regulator inspection

ณน่าน สอนพรหม, ฆนิศา รุ่งแจ้ง*, พงษ์ศักดิ์ สุริยวนากุล

Nanan Sornprom, Kanisa Rungjang*, Pongsak Suriyavanagul

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

การตรวจสอบสภาพโครงสร้างประตูระบายน้ำส่งเสริมความปลอดภัยของประชาชนก่อนเกิดความสูญเสียจากอันตรายและหลีกเลี่ยงค่าซ่อมแซมที่มีมูลค่าสูงขึ้น แบบจำลองความเป็นจริงเสมือน (Virtual Reality, VR) สร้างสภาพแวดล้อมสามมิติและผู้ใช้งานโต้ตอบกับแบบจำลองได้อย่างเป็นธรรมชาติ งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาแบบจำลองความเป็นจริงเสมือน (VR) สำหรับการอบรมผู้ตรวจสอบสภาพโครงสร้างประตูระบายน้ำตามมาตรฐานของกรมชลประทานที่เรียกว่า แนวทางการตรวจสภาพเขื่อนระบายน้ำและประตูระบายน้ำ แบบจำลองที่พัฒนาขึ้นสามารถแสดงขั้นตอนการตรวจสอบสภาพประตูระบายน้ำด้วยวิธีทางสายตา ได้แก่ การกัดเซาะ การทรุดตัว การแตกร้าว สิ่งกีดขวางทางน้ำ รูโพรง การรั่ว การเคลื่อนตัว การระบายน้ำ ต้นไม้หรือวัชพืช และสภาพการใช้งาน แบบจำลอง VR นี้สามารถใช้ร่วมกับมาตรฐานของกรมชลประทานเพื่อเป็นประโยชน์ในการสร้างความเข้าใจในการอบรมผู้ตรวจสอบได้

คำสำคัญ: การตรวจสอบสภาพโครงสร้าง, แบบจำลองความเป็นจริงเสมือน, ประตูระบายน้ำ

Abstract

The inspection of sluice gate structures enhances public safety by preventing losses caused by potential hazards and by avoiding costly repair and rehabilitation works. Virtual Reality (VR) technology enables the creation of immersive three-dimensional environments in which users can naturally interact with virtual models. This research aims to develop a Virtual Reality (VR)–based model for training inspectors in the structural condition inspection of sluice gates in accordance with the inspection standards of the Royal Irrigation Department, namely the Standards for Inspection of Barrage Dams and Sluice Gates. The developed model demonstrates the procedures for visual inspection of sluice gates, including erosion, settlement, cracking, flow obstructions, cavities, leakage, displacement, drainage conditions, trees or weeds, and operational conditions. This VR model can be integrated with the standards of the Royal Irrigation Department to enhance the understanding of the training of inspectors.

Keywords: Virtual Reality, Sluice Gates, Structural Condition Inspection

คำนำ

การตรวจสอบสภาพโครงสร้างของประตูระบายน้ำเป็นภารกิจสำคัญที่ใช้ในการประเมินความมั่นคงของโครงสร้างชลประทาน เพื่อป้องกันความเสียหายที่อาจเกิดขึ้นกับชุมชนและพื้นที่เกษตรกรรม การชำรุดขององค์อาคาร เช่น การรั่วการทรุดตัว สามารถนำไปสู่ความล้มเหลวของระบบระบายน้ำ ซึ่งอาจสร้างความเสี่ยงสูงต่อชีวิตและทรัพย์สิน(กรมชลประทาน, 2561) งานศึกษาพฤติกรรมประตูระบายน้ำในโครงการชลประทานของไทยยังระบุว่าโครงสร้างประเภทนี้ มีรูปแบบการเสื่อมสภาพที่เกิดจากแรงดันน้ำ วัสดุเสื่อมสภาพและการใช้งานต่อเนื่อง ทำให้ต้องมีการตรวจสอบเชิงรุกเพื่อลดความเสี่ยงและต้นทุนการซ่อมแซมในระยะยาว (การศึกษาและวิเคราะห์ประตูระบายน้ำบ้านโปร่งตาเพชร, 2025) แนวทางตรวจสอบอย่างเป็นทางการของกรมชลประทานย้ำให้มีการตรวจด้วยสายตาในประเด็นการกัดเซาะ การแตกร้าวรูโพรง และการรั่วซึม ซึ่งเป็นดัชนีสำคัญของความปลอดภัยของประตูระบายน้ำ (กรมชลประทาน, 2561)

วิธีตรวจสอบด้วยสายตาแบบดั้งเดิมมีข้อจำกัดด้านความปลอดภัย ความยากในการเข้าถึงพื้นที่ และความแปรผันตามประสบการณ์ของผู้ตรวจสอบภาคสนาม (Extended Reality for Condition Assessment, 2022) แม้เทคโนโลยี UAV และวิธี Photogrammetry จะช่วยเสริมการเก็บข้อมูลภาพของโครงสร้าง แต่ข้อมูลภาพสองมิติมักไม่เพียงพอต่อการประเมินความเสียหายที่ซับซ้อน เช่น ความผิดรูปของบาน ความบิดงอของเหล็ก ความลึกของรอยแตกร้าว หรือการเสื่อมของผิวป้องกันสนิม (Virtual Reality Crack Detection from UAV Photogrammetry, 2025) นอกจากนี้โครงสร้างด้านชลประทาน เช่น เขื่อนทดน้ำ ประตูระบายน้ำ และอาคารประกอบ ยังมีลักษณะพฤติกรรมทางวิศวกรรมเฉพาะตัว เช่น การสูญเสียการรองรับของฐานราก ทำให้ต้องมีระบบสนับสนุนการตรวจสอบที่มีความแม่นยำสูงกว่าเครื่องมือแบบดั้งเดิม (DamVR, 2024)

ข้อจำกัดของวิธีการตรวจแบบเดิม เทคโนโลยีความเป็นจริงเสมือน (Virtual Reality, VR) จึงถูกนำมาประยุกต์ใช้ในงานตรวจสอบโครงสร้างอย่างแพร่หลาย เพราะสามารถสร้างสภาพแวดล้อมสามมิติที่ผู้ใช้สามารถสำรวจโครงสร้างราวกับเข้าไปอยู่ในสถานที่จริง โดยมีพื้นฐานแนวคิดจากงานคลาสสิกของ Milgram and Kishino (1994) และงานด้านอัตโนมัติทางวิศวกรรมของ Nof (2009) ที่อธิบายว่าแบบจำลอง VR สามารถสร้างประสบการณ์ที่ทำให้ผู้ใช้รับรู้บริบทของพื้นที่ได้อย่างสมจริง (Milgram and Kishino, 1994; Nof, 2009) งานวิจัยยังชี้ว่าแบบจำลอง VR ช่วยเพิ่มความแม่นยำของการตรวจสอบความเสียหาย เนื่องจากผู้ตรวจสามารถมองเห็นรายละเอียดเชิงลึกของพื้นผิวและโครงสร้างได้จากหลายมุมมอง (Wu et al., 2011) เทคโนโลยีด้านซอฟต์แวร์ เช่น Unity, Revit และ SketchUp ได้ทำให้การสร้างโมเดลโครงสร้างและสภาพความเสียหายในรูปแบบสามมิติทำได้สะดวกขึ้น ส่งผลให้แบบจำลอง VR กลายเป็นเครื่องมือสำคัญในงานออกแบบ งานก่อสร้าง และงานตรวจสอบ (Wolfartsberger, 2019) นอกจากนี้งานวิจัยด้านแบบจำลอง VR สำหรับงานสถาปัตยกรรมและวิศวกรรมยืนยันว่าแบบจำลอง VR สามารถลดเวลาและต้นทุนในการตรวจสอบโครงสร้างลงได้จริง และเพิ่มความสามารถในการเรียนรู้สำหรับผู้ตรวจสอบรุ่นใหม่ (Piroozfar et al., 2018; Omer et al., 2019)

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาแบบจำลองความเป็นจริงเสมือน (VR) สำหรับการอบรมผู้ตรวจสอบสภาพโครงสร้างประตูระบายน้ำตามมาตรฐานของกรมชลประทานที่เรียกว่า แนวทางการตรวจสภาพเขื่อนระบายน้ำและประตูระบายน้ำ ฉบับพกพา (Barrage/Diversion Dam and Head Regulator Inspection Guidelines: Pocket Manual) (2560)

อุปกรณ์และวิธีการ

การสร้างแบบจำลองความเป็นจริงเสมือน (VR) สำหรับการตรวจสอบสภาพโครงสร้างประตูระบายน้ำ กรมชลประทาน กระทรวงเกษตรและสหกรณ์ วิธีการวิจัยมีขั้นตอน 4 ขั้นตอน ดังนี้

ขั้นตอน 4 ขั้นตอน ได้แก่ (1) การจัดเก็บและรวบรวมข้อมูลแบบจำลอง 3 มิติของประตูระบายน้ำและหลักเกณฑ์การตรวจสอบ; (2) การศึกษาหลักเกณฑ์การตรวจสอบสภาพ; (3) การสร้างแบบจำลอง VR สำหรับคู่มือตรวจสภาพประตูระบายน้ำ; (4) การวิเคราะห์และสรุปผลดัง Fig. 1

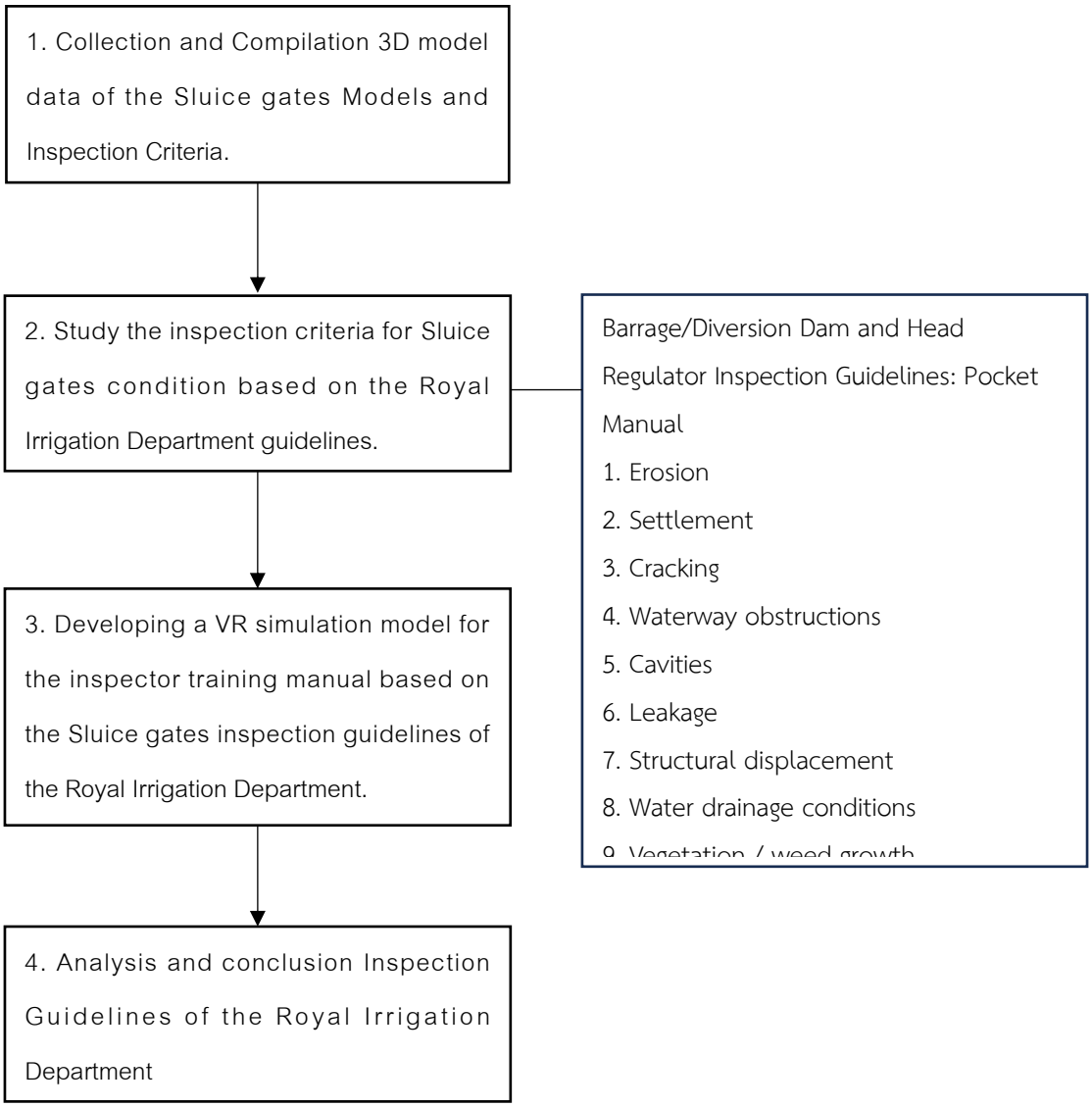


Fig. 1 Research Procedures

1. ผลการจัดเก็บและรวบรวมข้อมูลแบบจำลอง 3 มิติของประตูระบายน้ำและหลักเกณฑ์การตรวจสอบ

1.1 รวบรวมข้อมูลแบบจำลอง 3 มิติ ของประตูระบายน้ำในรูปแบบไฟล์ SketchUp เพื่อตรวจสอบความครบถ้วนและความถูกต้องขององค์ประกอบโครงสร้าง

1.2 รวบรวมมาตรฐานเกี่ยวกับแนวทางการตรวจสอบสภาพโครงสร้างประตูระบายน้ำตามมาตรฐานของกรมชลประทาน ที่เรียกว่า แนวทางการตรวจสภาพเขื่อนระบายน้ำและประตูระบายน้ำ ฉบับพกพา (Barrage/Diversion Dam and Head Regulator Inspection Guidelines: Pocket Manual) (2560) จัดทำโดยฝ่ายบำรุงรักษาหัวงาน ส่วนปรับปรุงบำรุงรักษา สำนักบริหารจัดการน้ำและอุทกวิทยา กรมชลประทาน กระทรวงเกษตรและสหกรณ์

2. ผลการศึกษาหลักเกณฑ์การตรวจสอบสภาพประตูระบายน้ำของกรมชลประทาน

ผู้วิจัยได้ศึกษาแนวทางการตรวจสภาพเขื่อนระบายน้ำและประตูระบายน้ำ ฉบับพกพา (Barrage/Diversion Dam and Head Regulator Inspection Guidelines : Pocket Manual) จัดทำโดยฝ่ายบำรุงรักษาหัวงาน ส่วนปรับปรุงบำรุงรักษา สำนักบริหารจัดการน้ำและอุทกวิทยา กรมชลประทาน กระทรวงเกษตรและสหกรณ์ การตรวจสอบสภาพประตูระบายน้ำ สามารถทำได้โดยการตรวจด้วยวิธีทางสายตา (Visual Inspection) จุดประสงค์หลักเพื่อตรวจสอบหาความบกพร่องต่างๆ ที่อาจมีผลทำให้เกิดความเสียหายหรือเป็นอันตรายต่อความมั่นคงของประตูระบายน้ำ ในส่วนของเกณฑ์ได้กำหนดคะแนนตั้งแต่ 1 ถึง 4 โดยคะแนนระดับ 1 ถือว่าอาคารชลประทานอยู่ในสภาพปกติ จนถึงคะแนนระดับ 4 ถือว่าสภาพแย่ที่สุด รายละเอียดสภาพที่ต้องทำการตรวจ ประกอบด้วย 10 สภาพ ดังนี้ 1. การกัดเซาะ 2. การทรุดตัว 3. การแตกร้าว 4. สิ่งกีดขวางทางน้ำ 5. รูโพรง 6. การรั่ว 7. การเคลื่อนตัว 8. การระบายน้ำ 9. ต้นไม้หรือวัชพืช 10. สภาพการใช้งาน ซึ่งองค์ประกอบแต่ละองค์ประกอบหรือประตูระบายน้ำแต่ละแห่งจะมีสภาพที่ต้องทำการตรวจแตกต่างกันออกไป อาจไม่สามารถตรวจสอบได้ครบทั้ง 10 สภาพ

3. ผลการสร้างแบบจำลอง VR สำหรับคู่มือตรวจสภาพประตูระบายน้ำของกรมชลประทาน

ผู้วิจัยได้พัฒนาแบบจำลอง 3 มิติ โดยการนำเข้าข้อมูลประตูระบายน้ำรูปแบบไฟล์ SketchUp ไปยังแพลตฟอร์ม Unity 3D ที่สามารถแสดงภาพความเป็นจริงเสมือนที่มีประสิทธิภาพ และเพื่อช่วยตรวจสอบสภาพประตูระบายน้ำโดยการพัฒนาหน้าจอแสดงเกณฑ์การให้คะแนนสภาพความเสี่ยงแบบออกเป็น 4 ระดับผ่านการใช้อุปกรณ์ Meta Quest 3 (Fig. 2)

Fig. 2 Virtual reality (VR) Simulation Desting for Sluice Gates Condition Inspection

สำหรับการอบรมผู้ตรวจสอบสภาพโครงสร้างประตูระบายน้ำ ตามคู่มือแนวทางการตรวจสภาพเขื่อนระบายน้ำและประตูระบายน้ำ ฉบับพกพา ออกเป็นแต่ละด้านซึ่งประกอบด้วย 1.การกัดเซาะ (Fig. 3) 2.การทรุดตัว (Fig. 4) 3.การแตกร้าว (Fig. 5) 4.สิ่งกีดขวางทางน้ำ (Fig. 6) 5.การรั่ว (Fig. 7) 6.การเคลื่อนตัว (Fig. 8) 7.ต้นไม้หรือวัชพืช (Fig. 9)

Fig. 3 The Erosion Near the Sluice Gates (A); VR Simulation Model Displays the Inspection Criteria (B)

Fig. 4 The Settlement Around the Sluice Gates (A); VR Simulation Model Displays the Inspection Criteria (B)

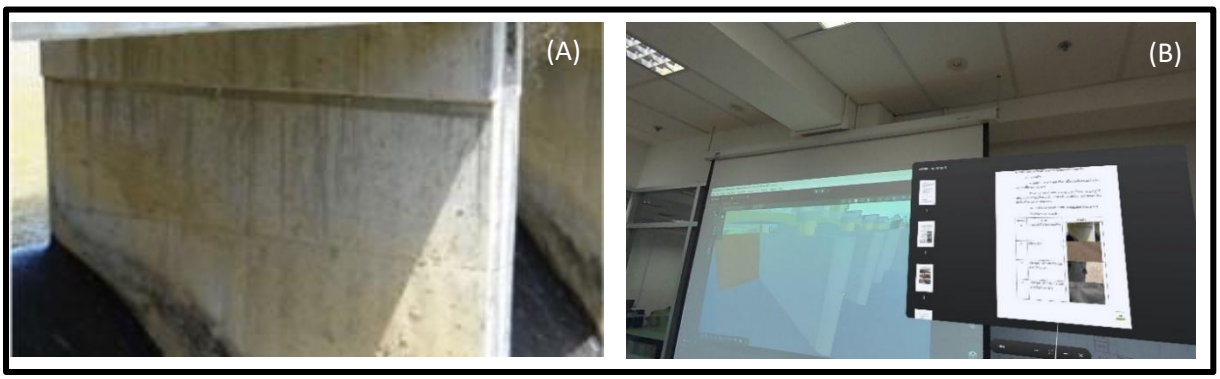


Fig. 5 The Cracking Around the Sluice Gates (A); VR Simulation Model Displays the Inspection Criteria (B)

Fig. 6 The Obstruction Within the Waterway (A); VR Simulation Model Displays the Inspection Criteria (B)

Fig. 7 The Leakage Occurring Around the Sluice Gates (A); VR Simulation Model Displays the Inspection Criteria (B)

Fig. 8 The Displacement of the Sluice Gates Structure (A); VR Simulation Model Displays the Inspection Criteria (B)

Fig. 9 The Vegetation or Weed Growth Around the Sluice Gates (A); VR Simulation Model Displays the Inspection Criteria (B)

งานวิจัยนี้ได้นำไปใช้งานกับบุคลากรจากหน่วยงานภาครัฐจำนวน 6 คน ประกอบด้วยวิศวกรจากสำนักออกแบบวิศวกรรมและสถาปัตยกรรม กรมชลประทาน จำนวน 3 คน และวิศวกรจากกรมทางหลวงจำนวน 3 คน ผลการทดลองพบว่า บุคลากรกรมชลประทานมีความเห็นว่างานวิจัยดังกล่าวมีประโยชน์ สามารถช่วยให้เกิดความเข้าใจเห็นภาพได้ชัดเจนและสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานได้จริง ขณะที่บุคลากรจากกรมทางหลวงซึ่งไม่ได้มีหน้าที่รับผิดชอบโดยตรงในงานด้านการตรวจสอบสภาพประตูระบายน้ำยังสามารถรับรู้และเข้าใจองค์ประกอบของประตูระบายน้ำได้อย่างชัดเจนจากการใช้งานแบบจำลอง VR ที่พัฒนาขึ้น

การวิเคราะห์และสรุปผล

ผลการดำเนินงานวิจัยพบว่า การพัฒนาแบบจำลองความเป็นจริงเสมือน (VR) สำหรับการอบรมผู้ตรวจสอบสภาพโครงสร้างประตูระบายน้ำตามมาตรฐานของกรมชลประทาน สามารถยกระดับประสิทธิภาพการเรียนรู้และความเข้าใจในกระบวนการตรวจสอบด้วยวิธีทางสายตา (Visual Inspection) ได้อย่างเป็นระบบ แบบจำลอง VR ทำหน้าที่เป็นสื่อการเรียนรู้เชิงอัจฉริยะที่ถ่ายทอดองค์ความรู้ด้านการตรวจสอบสภาพโครงสร้างจากคู่มือมาตรฐานไปสู่สภาพแวดล้อมสามมิติที่ผู้ใช้งานสามารถมีปฏิสัมพันธ์และเรียนรู้ผ่านประสบการณ์เสมือนได้โดยตรง โดยเฉพาะในประเด็นการกัดเซาะ

การทรุดตัว การแตกร้าว สิ่งกีดขวางทางน้ำ รูโพรง การรั่ว การเคลื่อนตัว การระบายน้ำ ต้นไม้หรือวัชพืช และสภาพการใช้งานของประตูระบายน้ำ

แบบจำลอง VR ที่พัฒนาขึ้นสามารถจำลองสภาพการตรวจสอบประตูระบายน้ำได้จำนวน 7 จาก 10 สภาพตามแนวทางการตรวจสอบที่กำหนด โดยข้อจำกัดที่พบเกิดจากความยากในการเข้าถึงองค์ประกอบบางส่วนของโครงสร้าง เช่น ระบบไฟฟ้า ระบบเครื่องกล และบานระบาย รวมถึงข้อจำกัดด้านความละเอียดของภาพและความสบายในการใช้อุปกรณ์

งานวิจัยนี้แสดงให้เห็นว่าผู้ใช้งานแบบจำลอง VR สามารถเข้าใจลำดับขั้นตอนการตรวจสอบตามมาตรฐานของกรมชลประทานได้อย่างชัดเจนยิ่งขึ้น โดยสามารถมองเห็นความสัมพันธ์ระหว่างองค์ประกอบของโครงสร้างและพฤติกรรมความเสียหายต่าง ๆ ภายใต้สภาพแวดล้อมจำลองที่มีความปลอดภัยและควบคุมได้ แบบจำลอง VR ช่วยลดความคลาดเคลื่อนที่อาจเกิดจากการตีความคู่มือในรูปแบบเอกสาร เพิ่มความแม่นยำในการรับรู้ตำแหน่ง ลักษณะ และขอบเขตของความเสียหาย ซึ่งส่งผลให้กระบวนการเรียนรู้มีประสิทธิภาพมากขึ้น ทั้งนี้ ผลการวิจัยยังสะท้อนให้เห็นว่าแบบจำลอง VR มีศักยภาพสูงในการนำไปประยุกต์ใช้เป็นเครื่องมือฝึกอบรมผู้ตรวจสอบสภาพโครงสร้างประตูระบายน้ำ เพื่อจำลองสถานการณ์จริงก่อนการตรวจสอบภาคสนาม เสริมสร้างความมั่นใจในการปฏิบัติงาน และสนับสนุนให้การตรวจสอบเป็นไปอย่างถูกต้องและสอดคล้องกับมาตรฐานของกรมชลประทาน ผลการใช้แบบจำลอง VR โดยวิศวกรของสำนักออกแบบวิศวกรรมและสถาปัตยกรรม กรมชลประทานและวิศวกร จากหน่วยงานภาครัฐอื่น ทั้งที่มีและไม่มีหน้าที่รับผิดชอบโดยตรงในงานด้านการตรวจสอบสภาพประตูระบายน้ำ แสดงให้เห็นว่าแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการถ่ายทอดองค์ความรู้และเสริมสร้างความเข้าใจเกี่ยวกับองค์ประกอบของประตูระบายน้ำได้อย่างมีประสิทธิภาพ รวมทั้งสามารถใช้งานอุปกรณ์ตามขั้นตอนได้ และนำไปใช้จริงในการพัฒนาศักยภาพบุคลากรภายในหน่วยงาน

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจากสาขาวิชาวิศวกรรมโครงสร้างพื้นฐานและการบริหาร คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์และได้รับความอนุเคราะห์จากผู้ที่เกี่ยวข้องกับการตรวจสอบสภาพประตูระบายน้ำที่ให้ข้อมูลอันเป็นประโยชน์ต่องานวิจัยชิ้นนี้เป็นอย่างยิ่ง

เอกสารอ้างอิง

กรมชลประทาน. 2560. แนวทางการตรวจสอบสภาพเขื่อนระบายน้ำ/ทดน้ำ และประตูระบายน้ำ ฉบับพกพา (Pocket Manual). กรมชลประทาน, กรุงเทพมหานคร.

กรมชลประทาน. 2561. คู่มือบำรุงรักษาโครงสร้างชลประทาน: แนวทางการตรวจสภาพอาคารชลประทาน. สำนักบริหารจัดการน้ำและอุทกวิทยา กรมชลประทาน กระทรวงเกษตรและสหกรณ์, กรุงเทพมหานคร.

การศึกษาและวิเคราะห์ประตูระบายน้ำบ้านโปร่งตาเพชร จังหวัดเพชรบุรี. 2568. ใน การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 30.

DamVR: Situatedness in immersive dam visualization. 2024. Computers 13: 35.

Extended reality for condition assessment of civil engineering structures. 2022. Sensors 22: 9560.

Kang, D., Kim, J., Park, K. 2021. Structural safety assessment of Sluice gates using reliability-based methods. KSCE J. Civ. Eng. 25: 3934–3946.

Milgram, P., Kishino, F. 1994. A taxonomy of mixed reality visual displays. IEICE Trans. Inf. Syst. 77: 1321–1329.

Nof, S. 2009. Springer handbook of automation. Springer.

Omer, S., Nahangi, M., McCabe, B. 2019. Virtual reality for construction inspection workflows. Adv. Eng. Informatics 40: 1–13.

Piroozfar, P., et al. 2018. VR for collaborative design coordination. Autom. Constr. 96: 1–10.

Virtual reality visualization of automatic crack detection from UAV digital twin. 2025. Measurement 242: 115931.

Wolfartsberger, J. 2019. Potential of VR for engineering design review. J. Comput. Des. Eng. 6: 528–542.

Wu, H., He, Z., Gong, J. 2011. VR-based GIS analysis system. Comput. Geosci. 37: 25–33.

การหาอัตราการปลดปล่อยความร้อนของวัสดุพลาสติกด้วยเครื่องเธอร์โมไพล์โคนแคลอริมิเตอร์

Determination of heat release rate from plastic material via a Thermolpile Cone Calorimeter

เอกชัย วิทยาผล*, **ณัฐศักดิ์ บุญมี**

Akachai Vitayapon *, Nathasak Boonmee

สาขาวิชาวิศวกรรมป้องกันอัคคีภัย คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

Fire Protection Engineering, Faculty of Engineering, Kasetsart University, Bangkok 10900, Thailand

*Corresponding author. E-mail address: akachai.v@ku.th

บทคัดย่อ

อัตราการปลดปล่อยความร้อน (Heat Release Rate, HRR) เป็นตัวแปรที่สำคัญที่สุดในการประเมินอันตรายจากอัคคีภัยของวัสดุ งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาและเปรียบเทียบพฤติกรรมการเผาไหม้ของวัสดุพอลิเมอร์เทอร์โมพลาสติกสองชนิดที่นิยมใช้ในการพิมพ์สามมิติ ได้แก่ พอลิแลกติกแอซิด (PLA) และพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตไกลคอล (PETG) โดยใช้เครื่องเธอร์โมไพล์โคนแคลอริมิเตอร์ตามมาตรฐาน ASTM E2102-04a ทำการทดสอบที่ระดับฟลักซ์ความร้อนเชิงการแผ่รังสีตั้งแต่ 15 ถึง 50 kW/m² ผลการทดลองพบว่าฟลักซ์ความร้อนมีอิทธิพลโดยตรงต่อพลวัตการเผาไหม้ โดยที่ระดับฟลักซ์ความร้อนสูง PLA มีค่าอัตราการปล่อยความร้อนสูงสุด (HRR_{Peak}) ที่ประมาณ 3.4 kW ในขณะที่ PETG มีค่าสูงถึงประมาณ 3.9 kW อย่างไรก็ตาม พบว่า PLA มีเวลาในการจุดติดไฟ (t_{ig}) ที่สั้นกว่าและแสดงพฤติกรรมการเผาไหม้ที่พื้นผิวอย่างรวดเร็ว ในขณะที่ PETG มีเสถียรภาพทางความร้อนสูงกว่าและแสดงกลไกการเผาไหม้ที่ซับซ้อนกว่า โดยเฉพาะที่ฟลักซ์ความร้อนต่ำซึ่งเกิดการหลอมเหลวและสะสมตัวเป็นบ่อเชื้อเพลิงเหลวก่อนจะลุกไหม้อย่างรุนแรงในช่วงท้าย ข้อมูล HRR ที่ได้จากงานวิจัยนี้มีความสำคัญต่อการทำความเข้าใจและประเมินความเสี่ยงด้านอัคคีภัยของวัสดุเหล่านี้เพื่อนำไปสู่การใช้งานที่ปลอดภัยยิ่งขึ้น

คำสำคัญ: อัตราการปลดปล่อยความร้อน, โคนแคลอริมิเตอร์, PLA, PETG, การพิมพ์สามมิติ

Abstract

The Heat Release Rate (HRR) is the single most important variable for assessing the fire hazard of materials. This research aims to investigate and compare the combustion behavior of two common thermoplastic polymers used in 3D printing: Polylactic Acid (PLA) and Polyethylene Terephthalate Glycol (PETG). The experiments were conducted using a thermopile cone calorimeter in accordance with ASTM E2102-04a, under incident heat fluxes ranging from 15 to 50 kW/m². The results revealed that heat flux directly influences the combustion dynamics. At high heat flux levels, PLA exhibited a peak heat release rate (HRR_{Peak}) of approximately 3.4 kW, while PETG reached up to approximately 3.9 kW. However, PLA exhibited a shorter time to ignition (t_{ig}) and a rapid surface burning behavior. In contrast, PETG showed higher thermal stability and a more complex combustion mechanism, particularly at low heat fluxes, where it underwent melting and fuel pooling before a delayed, intense burning phase. The HRR data obtained from this study are crucial for understanding and evaluating the fire risk associated with these materials, contributing to their safer application.

Keywords: 3D Printing, Cone calorimeter, Heat release rate, PLA, PETG

คำนำ

ในองค์ความรู้ด้านวิศวกรรมป้องกันอัคคีภัย (Fire Protection Engineering) อัตราการปลดปล่อยความร้อน (Heat Release Rate, HRR) ถือเป็นตัวแปรพื้นฐานสำหรับใช้ประเมินอันตรายจากอัคคีภัย (Fire Hazard) เนื่องจากค่า HRR แสดงถึงปริมาณพลังงานที่คายออกมาจากการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงต่อหน่วยเวลา ซึ่งเป็นการบ่งชี้ถึง "ขนาดของไฟ" โดยตรง ด้วยเหตุนี้ HRR จึงได้รับการยอมรับว่าเป็น “ตัวแปรเดี่ยวที่สำคัญที่สุด” (the single most important variable) ในการจำแนกลักษณะพลวัตของไฟและระดับความเป็นอันตรายของวัสดุในสถานการณ์เพลิงไหม้จริง ข้อมูล HRR ที่แม่นยำจึงมีความสำคัญอย่างยิ่งต่อการประยุกต์ใช้ในงานวิศวกรรมหลายแขนง อาทิ การสร้างแบบจำลองเพื่อทำนายการเกิดและการลุกลามของไฟ การออกแบบระบบระงับอัคคีภัยให้มีประสิทธิภาพ ตลอดจนการคัดเลือกวัสดุที่มีความปลอดภัยสูงเพื่อลดความเสี่ยงโดยรวม (Babrauskas and Peacock, 1992)

วัสดุพอลิแลกติกแอซิด (Polylactic Acid, PLA) และพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตไกลคอล (Polyethylene Terephthalate Glycol, PETG) เป็นวัสดุพอลิเมอร์เทอร์โมพลาสติกที่ถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลายในภาคอุตสาหกรรม โดยเฉพาะอย่างยิ่งในกระบวนการผลิตชิ้นงานต้นแบบด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์สามมิติ (3D Printing) เนื่องจากมีคุณสมบัติเชิงกลที่ดีและมีความสะดวกในการขึ้นรูป อย่างไรก็ตาม การนำวัสดุเหล่านี้ไปใช้งานในสภาพแวดล้อมที่อาจมีความเสี่ยงต่อการสัมผัสแหล่งกำเนิดความร้อนหรือเปลวไฟ จำเป็นต้องมีความเข้าใจอย่างลึกซึ้งถึงพฤติกรรมการเผาไหม้ โดยเฉพาะค่า HRR เนื่องจากวัสดุทั้งสองชนิดมีคุณสมบัติไวไฟ (Flammability) โดยมีการวิเคราะห์เสถียรภาพทางความร้อน (Thermal Stability) ของ PETG ซึ่งพบว่ากระบวนการสลายตัวเชิงความร้อน (Thermal Degradation) จนทำให้มวลลดลงจะเริ่มต้นที่อุณหภูมิประมาณ 330 °C และเกิดการสลายตัวอย่างรุนแรงถึงร้อยละ 90 ในช่วงอุณหภูมิ 330–504 °C ซึ่งบ่งชี้ถึงศักยภาพในการปลดปล่อยพลังงานและเป็นเชื้อเพลิงในช่วงอุณหภูมิดังกล่าว (Naze et al., 2020; Bernatikova et al., 2021;)

ด้วยเหตุนี้ การศึกษานี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อหาค่าและวิเคราะห์ลักษณะอัตราการปลดปล่อยความร้อนของวัสดุ PLA และ PETG โดยใช้เครื่องมือทดสอบเธอร์โมไพล์โคนแคลอริมิเตอร์ (Thermopile Cone Calorimeter) ผลลัพธ์ที่ได้จะนำไปสู่ความเข้าใจในพลวัตการเผาไหม้ที่สำคัญ เช่น อัตราเร็วในการคายพลังงาน และค่าการปลดปล่อยความร้อนสูงสุด เพื่อใช้เป็นข้อมูลพื้นฐานในการประเมินความเสี่ยงด้านอัคคีภัยของวัสดุสำหรับการใช้งานในสภาพแวดล้อมต่างๆ ต่อไป

อุปกรณ์และวิธีการ

1. วัสดุที่ใช้ในการทดสอบ (Materials)

วัสดุที่ใช้ในการศึกษานี้คือพอลิเมอร์เทอร์โมพลาสติกจำนวน 2 ชนิด ได้แก่ พอลิแลกติกแอซิด (Polylactic Acid, PLA) และ พอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตไกลคอล (Polyethylene Terephthalate Glycol, PETG) ซึ่งเป็นวัสดุที่ได้รับความนิยมอย่างสูงในกระบวนการขึ้นรูปชิ้นงานด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์สามมิติ (3D Printing) เนื่องจากมีคุณสมบัติเชิงกลที่ดี น้ำหนักเบา และมีความสะดวกในการขึ้นรูป การเลือกวัสดุทั้งสองชนิดนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อเปรียบเทียบพลวัตการเผาไหม้ระหว่างพอลิเมอร์ชีวภาพ (PLA) และพอลิเมอร์ในกลุ่มพอลิเอสเทอร์ดัดแปลง (PETG)

2. การเตรียมชิ้นงานทดสอบ (Specimen Preparation)

ชิ้นงานทดสอบถูกจัดทำขึ้นโดยใช้เครื่องพิมพ์สามมิติรุ่น Ender 3S1 Pro เพื่อให้สามารถควบคุมตัวแปรด้านขนาด ความหนาแน่น และมวลของชิ้นงานได้อย่างสม่ำเสมอ ชิ้นงานแต่ละชิ้นถูกกำหนดให้มีขนาดมาตรฐาน 100 mm × 100 mm และมีความหนา 3 mm ซึ่งเป็นขนาดที่เหมาะสมตามระเบียบวิธีการทดสอบด้วยเธอร์โมไพล์โคนแคลอริมิเตอร์ (ASTM E2102-04a) กระบวนการขึ้นรูปชิ้นงานทั้งหมดดำเนินการภายใต้เงื่อนไขเดียวกัน โดยใช้รูปแบบเส้นทางการเคลื่อนที่ของหัวพิมพ์ (Toolpath Pattern) และรูปแบบการเติมเนื้อวัสดุภายใน (Infill Pattern) ที่เหมือนกัน เพื่อลดความแปรผันของคุณสมบัติทางกายภาพที่อาจส่งผลกระทบต่อพฤติกรรมการเผาไหม้

3. เครื่องมือทดสอบและหลักการทำงาน (Apparatus and Principles)

การทดสอบอัตราการปลดปล่อยความร้อน (HRR) ในงานวิจัยนี้ดำเนินการโดยใช้เครื่องเธอร์โมไพล์โคนแคลอริมิเตอร์ (Thermopile Cone Calorimeter) หรือที่เรียกว่า Mass Loss Calorimeter (MLC) ซึ่งเป็นเครื่องมือสำหรับประเมินคุณสมบัติการลุกไหม้ของวัสดุในระดับห้องปฏิบัติการ อุปกรณ์ทำงานโดยใช้หลักการวัดพลังงานความร้อนที่เกิดจากการเผาไหม้ของชิ้นงานภายใต้สภาวะฟลักซ์ความร้อนเชิงการแผ่รังสี (Incident Heat Flux) ที่ควบคุมได้อย่างแม่นยำจากแหล่งกำเนิดความร้อนรูปทรงกรวย (Conical Radiant Heater)

หลักการวัด HRR ของเครื่องมือชนิดนี้อาศัยเซ็นเซอร์เธอร์โมไพล์ (Thermopile Sensor) ที่ติดตั้งอยู่ภายในปล่องระบายไอเสีย (Exhaust Duct) เพื่อตรวจจับความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างก๊าซร้อนที่เกิดจากการเผาไหม้และอากาศแวดล้อม ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า (mV) ที่เกิดจากความแตกต่างของอุณหภูมินี้ จะมีความสัมพันธ์เชิงเส้นโดยตรงกับอัตราการปลดปล่อยความร้อน ซึ่งแตกต่างจากเครื่องโคนแคลอริมิเตอร์แบบดั้งเดิมที่ใช้หลักการพร่องออกซิเจน (Oxygen Consumption Principle) ดังนั้น เครื่อง MLC จึงสามารถใช้วัดตัวแปรที่สำคัญต่อการประเมินอันตรายจากอัคคีภัยได้อย่างแม่นยำ เช่น เวลาในการจุดติดไฟ (Time to Ignition, t_{ig}) อัตราการสูญเสียมวล (Mass Loss Rate, MLR) และอัตราการปล่อยความร้อนสูงสุด (HRR_{Peak}) โดยไม่จำเป็นต้องใช้ระบบวิเคราะห์ก๊าซออกซิเจน แสดงดัง Fig. 1

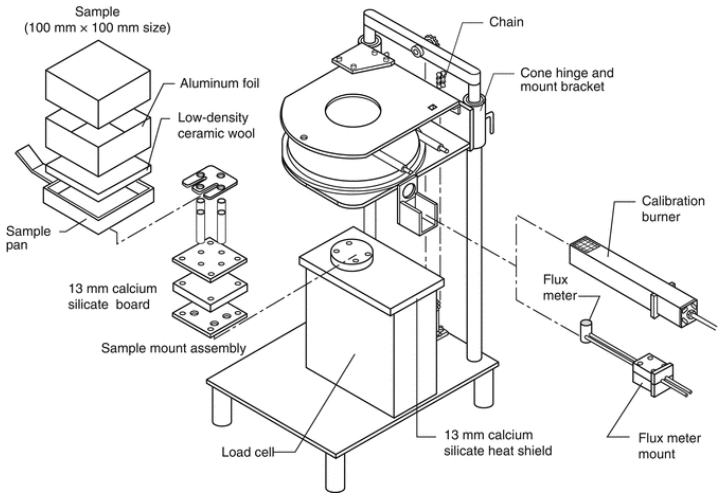


Fig. 1 Diagram of the thermopile cone calorimeter apparatus, featuring an exploded view of the sample mount assembly and calibration devices.

4. กระบวนการสอบเทียบเครื่องมือ (Calibration Procedure)

เพื่อให้มั่นใจในความเที่ยงตรง (Precision) และความถูกต้อง (Accuracy) ของผลการวัด ก่อนเริ่มการทดสอบชิ้นงานจริงจึงจำเป็นต้องดำเนินการสอบเทียบ (Calibration) ระบบตรวจวัดของเธอร์โมไพล์เสียก่อน กระบวนการนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อสร้างความสัมพันธ์เชิงปริมาณที่น่าเชื่อถือระหว่างสัญญาณความต่างศักย์ไฟฟ้า (mV) ที่ได้จากเซ็นเซอร์กับอัตราการปลดปล่อยความร้อน (kW) ที่เกิดขึ้นจริง

การสอบเทียบอาศัยการเผาไหม้เชื้อเพลิงมาตรฐานซึ่งทราบคุณสมบัติทางความร้อนเป็นอย่างดี ในที่นี้คือก๊าซมีเทน (Methane, CH_4) ที่มีความบริสุทธิ์ 99.5% ซึ่งมีค่าความร้อนของการเผาไหม้สุทธิ (Net Heat of Combustion) ที่แน่นอน (ประมาณ 50.0 MJ/kg) โดยก๊าซมีเทนจะถูกควบคุมอัตราการไหลเชิงมวล (Mass Flow Rate) อย่างแม่นยำด้วย Mass Flow Controller เพื่อป้อนเข้าสู่หัวเผาที่ติดตั้งอยู่ ณ ตำแหน่งเดียวกับชิ้นงานทดสอบ อัตราการปลดปล่อยความร้อนทางทฤษฎี $\dot{Q}_{theoretical}$ สามารถคำนวณได้โดยตรงจากผลคูณระหว่างอัตราการไหลเชิงมวลของก๊าซ $\dot{m}_{CH_4}$ และค่าความร้อนของการเผาไหม้สุทธิ ในการทดลองนี้ การสอบเทียบจะดำเนินการที่อัตราการปลดปล่อยความร้อน 8 ระดับ ตั้งแต่ 0 kW (ไม่มีการไหลของก๊าซ) ไปจนถึง 4 kW

แต่ละระดับความร้อนที่กำหนด ก๊าซร้อนที่เกิดจากการเผาไหม้จะไหลผ่านปล่องระบายไอเสียและทำให้เกิดสัญญาณตอบสนองจากเธอร์โมไพล์ เมื่อสัญญาณดังกล่าวเข้าสู่สภาวะคงตัว (Steady State) แล้ว จะทำการบันทึกค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าเฉลี่ยเป็นระยะเวลา 60 วินาที จากนั้นนำข้อมูลคู่ลำดับระหว่างอัตราการปลดปล่อยความร้อนทางทฤษฎี (kW) และความต่างศักย์ไฟฟ้าที่วัดได้ (mV) มาทำการวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้น (Linear Regression Analysis) เพื่อสร้างสมการเส้นตรง หรือที่เรียกว่า "Calibration Curve" ในรูปของ HRR=m×V โดยที่ m คือค่าความชัน (Gradient, kW/mV) ซึ่งทำหน้าที่เป็นค่าคงที่ของเครื่องมือ สมการนี้จะถูกใช้เป็นสมการอ้างอิงในการแปลงสัญญาณดิบ (mV) ที่ได้จากการทดสอบชิ้นงานจริงให้เป็นค่า HRR ที่มีความถูกต้องต่อไป ทั้งนี้ ขั้นตอนการสอบเทียบทั้งหมดจะต้องดำเนินการซ้ำสำหรับทุกค่าฟลักซ์ความร้อนเชิงการแผ่รังสีที่จะใช้ในการทดสอบ เนื่องจากระดับฟลักซ์ความร้อนที่แตกต่างกันอาจส่งผลต่อสภาวะอุณหภูมิพื้นฐานของเครื่องมือและอัตราการตอบสนองของระบบที่เปลี่ยนแปลงไป

ถึงแม้กระบวนการสอบเทียบจะดำเนินการครอบคลุมทุกระดับฟลักซ์ความร้อนที่ใช้ในการทดสอบเพื่อให้ได้ค่าคงที่ที่แม่นยำที่สุดสำหรับแต่ละสภาวะตามมาตรฐาน แต่ในที่นี้ขอยกตัวอย่างผลการวิเคราะห์ที่ระดับฟลักซ์ความร้อน 40 kW/m^2 เพื่อแสดงลักษณะความสัมพันธ์ของระบบวัด โดยการใช้ก๊าซมีเทนมาตรฐานที่อัตราการปลดปล่อยความร้อนอ้างอิงตั้งแต่ 0 ถึง 4 kW ผลการทดสอบแสดงความสัมพันธ์เชิงเส้นระหว่างสัญญาณตอบสนองจากเธอร์โมไพล์ (V) และอัตราการปลดปล่อยความร้อน (HRR) ดังแสดงใน Fig. 2 จากการวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้น (Linear Regression Analysis) ได้สมการสอบเทียบคือ HRR=4.5176V โดยค่าความชัน (m) เท่ากับ 4.5176 kW/mV ซึ่งถือเป็นค่าสัมประสิทธิ์การสอบเทียบ (C_{factor}) ของระบบ โดยการใช้สมการแบบผ่านจุดกำเนิด (Zero Intercept) นี้เป็นการปรับเพื่อให้สอดคล้องกับเงื่อนไขอุดมคติทางอุณหพลศาสตร์ภายหลังกระบวนการจัดการสัญญาณพื้นฐาน ทั้งนี้ ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) ที่ระดับ 0.9928 ยืนยันถึงความเป็นเส้นตรง (Linearity) ที่เชื่อถือได้ ซึ่งเป็นตัวแทนที่แสดงให้เห็นถึงความแม่นยำของระบบวัดในทุกช่วงการทดสอบ

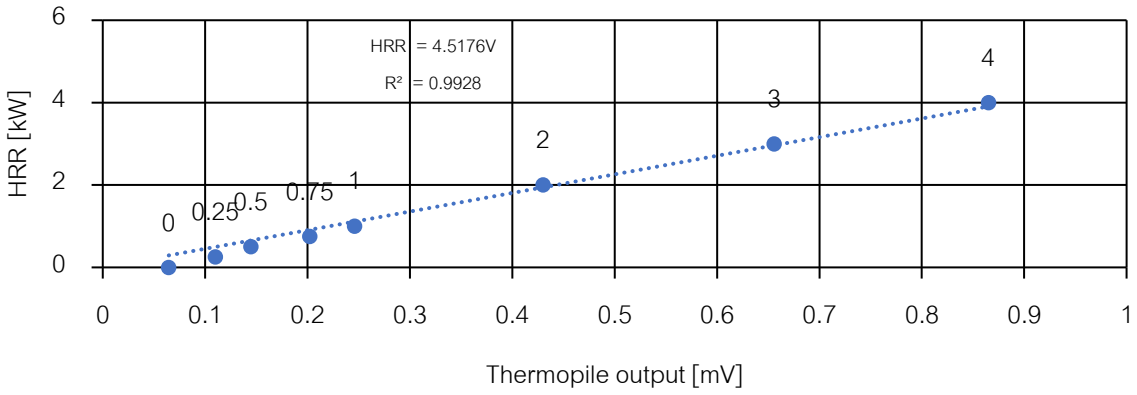


Fig. 2 Linear relationship between thermopile output (mV) and heat release rate (kW) derived from methane calibration under an incident heat flux of 40 kW/m².

5. ระเบียบวิธีการทดสอบ (Test Procedure)

การทดสอบชิ้นงานดำเนินการตามระเบียบวิธีที่ระบุในมาตรฐาน ASTM E2102-04a โดยเริ่มต้นจากการตั้งค่าฟลักซ์ความร้อนเชิงการแผ่รังสี ณ ตำแหน่งผิวบนของชิ้นงานให้ได้ตามที่กำหนด (เช่น 15, 20, ..., 50 kW/m²) โดยใช้เครื่องวัดฟลักซ์ความร้อน (Heat-flux Meter) และปรับกำลังไฟฟ้าของแหล่งกำเนิดความร้อนรูปกรวยจนกระทั่งค่าฟลักซ์ที่วัดได้มีความเสถียร ณ ระยะห่างมาตรฐาน 25 mm หลังจากนั้นจึงทำการติดตั้งชิ้นงานทดสอบซึ่งถูกห่อด้วยแผ่นอลูมิเนียมฟอยล์ยกเว้นผิวหน้าด้านบน ลงในถาดใส่ชิ้นงานที่มีแผ่นรองเซรามิกหนุนอยู่ เพื่อให้ผิวบนของชิ้นงานอยู่ในระดับความสูงที่ถูกต้อง และนำไปวางบนเครื่องชั่งมวล (Load Cell) เมื่อติดตั้งเรียบร้อยแล้ว ระบบเก็บข้อมูลจะเริ่มบันทึกสภาวะพื้นฐาน (Baseline) เป็นเวลาอย่างน้อย 30 วินาที ก่อนจะเคลื่อนหัวจุดประกายไฟ (Spark Igniter) มาไว้เหนือชิ้นงานและเปิดแผ่นกั้นรังสี (Shutter) ออกเพื่อให้ชิ้นงานได้รับความร้อนทันที ซึ่งถือเป็นจุดเริ่มต้นของการจับเวลาทดลอง ระบบจะบันทึกข้อมูลสำคัญอย่างต่อเนื่อง ได้แก่ สัญญาณจากเธอร์โมไพล์ (mV) และมวลของชิ้นงาน (g) โดยเวลาที่เกิดเปลวไฟลุกไหม้ต่อเนื่องบนผิวชิ้นงานเป็นครั้งแรกจะถูกบันทึกเป็นค่าเวลาในการจุดติดไฟ (t_{ig}) การทดลองจะดำเนินต่อไปจนกระทั่งเปลวไฟดับลงอย่างสมบูรณ์ และจะสิ้นสุดลงเมื่อไม่มีการลุกไหม้ซ้ำเกิดขึ้นอีกเป็นเวลา 2 นาที เพื่อยืนยันว่ากระบวนการเผาไหม้ได้ยุติลงโดยสิ้นเชิง

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

ผลการทดลองโดยอธิบายเชิงพฤติกรรมของกราฟ HRR–เวลา (แกนตั้ง HRR หน่วย kW; แกนนอน เวลา หน่วย วินาที) จะเห็นได้ว่ากราฟจะแสดงพฤติกรรม แบ่งออกเป็น 3 ส่วนหลัก ได้แก่ 1) ช่วงก่อนการจุดติดไฟ (Pre-ignition) จะสะสมความร้อน HRR ใกล้ศูนย์ โดยระยะเวลาจุดติดไฟ (t_{ig}) จะสั้นลงเมื่อเพิ่มฟลักซ์ความร้อน 2) ช่วง HRR สูงสุด (HRR_{Peak}) HRR จะเพิ่มอย่างรวดเร็ว ซึ่งแปรผันตามค่าฟลักซ์ความร้อน 3) ช่วงการเผาไหม้ที่ลดลงอย่างต่อเนื่อง (Decay Period) HRR จะลดลงจนดับ (Extinction) เนื่องจากการหมดไปของเชื้อเพลิงและการก่อตัวของชั้นถ่าน (Char Layer) ซึ่งได้แสดงดังผลการทดลองต่อไปนี้ (Hull et al., 2011; Schartel and Hull, 2007)

ผลการทดลองพฤติกรรมการเผาไหม้ของวัสดุ Polylactic Acid (PLA) ที่ระดับฟลักซ์ความร้อนเชิงการแผ่รังสี (Incident Heat Flux) ตั้งแต่ 50 ถึง 15 kW/m² ซึ่งเป็นค่าสุดท้ายที่จุดติดไฟ พบว่าฟลักซ์ความร้อนมีอิทธิพลโดยตรง

และอย่างมีนัยสำคัญต่อพลวัตการเผาไหม้ในทุกขั้นตอน ดังที่ได้แสดงพฤติกรรมตาม Fig. 3 ซึ่งสามารถวิจารณ์ผลได้โดยละเอียดตามตัวแปรที่สำคัญได้ ดังนี้

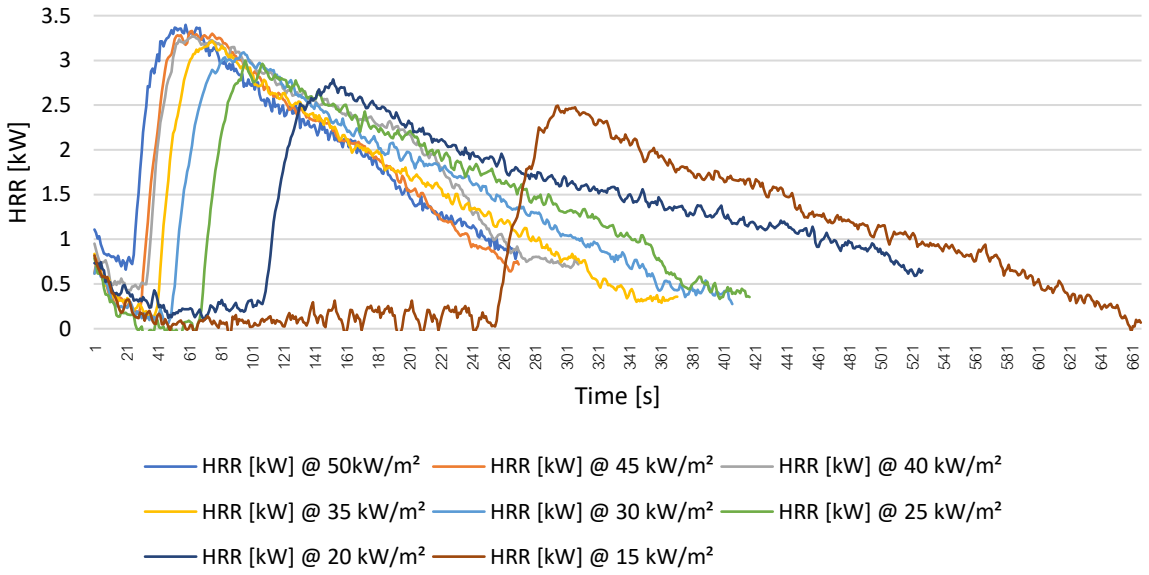


Fig. 3 Heat Release Rate (HRR) as a function of time for PLA at various incident heat fluxes.

เวลาที่ใช้ในการจุดติดไฟ (Time to Ignition, t_{ig}) ซึ่งผลการทดลองแสดงให้เห็นความสัมพันธ์แบบแปรผกผันที่ชัดเจน กล่าวคือ เมื่อค่าฟลักซ์ความร้อนเพิ่มสูงขึ้น t_{ig} จะลดลงอย่างเป็นเอกซ์โพเนนเชียล จากกราฟจะเห็นได้ว่าที่ฟลักซ์ความร้อนต่ำสุด (15 kW/m²) วัสดุใช้เวลา 256 วินาทีในการเริ่มลุกไหม้ ในขณะที่ฟลักซ์ความร้อนสูงสุด (50 kW/m²) สามารถลด t_{ig} ลงเหลือเพียงประมาณ 24 วินาที เท่านั้น ปรากฏการณ์นี้สอดคล้องกับหลักการถ่ายเทความร้อน เนื่องจากการเพิ่มฟลักซ์ความร้อนเป็นการเพิ่มอัตราการป้อนพลังงานต่อหน่วยพื้นที่ผิว ทำให้พื้นผิวของ PLA มีอุณหภูมิสูงขึ้นถึงจุดสลายตัว (Pyrolysis Temperature) และปลดปล่อยไอเชื้อเพลิงในปริมาณที่เข้มข้นพอสำหรับการจุดติดไฟได้ในระยะเวลาที่สั้นลง ดังที่แสดงใน Fig. 4

อัตราการปล่อยความร้อน (Heat Release Rate, HRR) พบว่าฟลักซ์ความร้อนเป็นตัวแปรสำคัญที่กำหนดทั้งอัตราการเติบโตของไฟและค่าสูงสุดของ HRR (HRR_{Peak}) ภายหลังการจุดติดไฟ กราฟ HRR มีความชันเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ซึ่งสะท้อนถึงอัตราการลามของเปลวไฟบนพื้นผิว และที่สำคัญคือ ค่า HRR_{Peak} มีค่าสูงขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของฟลักซ์ความร้อน ที่ฟลักซ์ความร้อน 50 kW/m² วัสดุแสดงค่า HRR_{Peak} สูงที่สุดที่ประมาณ 3.4 kW ในขณะที่ฟลักซ์ความร้อน 20 kW/m² ให้ค่า HRR_{Peak} เพียงประมาณ 2.8 kW สาเหตุหลักมาจากพลังงานความร้อนสุทธิที่พื้นผิววัสดุได้รับไม่ได้มาจากแหล่งกำเนิดรังสีภายนอกเพียงอย่างเดียว แต่ยังรวมถึงฟลักซ์ความร้อนที่แผ่กลับมาจากเปลวไฟ (Flame Heat Feedback) ด้วย ดังนั้น เมื่อฟลักซ์ความร้อนภายนอกสูงขึ้น จึงเป็นการเร่งกระบวนการสลายตัวทางเคมีหรือการปลดปล่อยไอเชื้อเพลิง (Pyrolysis Rate) และอัตราการสูญเสียมวล (Mass Loss Rate, MLR) ให้สูงขึ้นอย่างทวีคูณ ส่งผลให้มีการปลดปล่อยไอเชื้อเพลิงเข้าสู่เปลวไฟในปริมาณที่มากขึ้นต่อหน่วยเวลา นำไปสู่การเผาไหม้ที่รุนแรงและมีอัตราการปล่อยความร้อนที่สูงขึ้น

พฤติกรรมการเผาไหม้ในช่วงลดลง (Decay Period) ภายหลังจากที่ HRR ขึ้นถึงจุดสูงสุด กราฟทุกเส้นจะแสดงแนวโน้มการลดลงอย่างต่อเนื่องจนกระทั่งไฟดับ ซึ่งเป็นผลมาจากการพร่องของเชื้อเพลิงในชั้นผิวบนและการก่อตัว

ของชั้นถ่าน (Char Layer) ที่ทำหน้าที่เป็นฉนวนป้องกันการถ่ายเทความร้อนสู่เนื้อวัสดุชั้นล่าง ส่งผลให้อัตราการเกิดการปลดปล่อยไอเชื้อเพลิง (Pyrolysis Rate) ชะลอตัวลง อย่างไรก็ตาม รูปทรงโดยรวมของกราฟยังคงขึ้นอยู่กับฟลักซ์ความร้อนที่ได้รับ ที่ฟลักซ์ความร้อนสูง รูปทรงของกราฟจะมีลักษณะเป็นยอดแหลมสูงและแคบ ซึ่งบ่งชี้ถึงการเผาไหม้ที่รุนแรงและรวดเร็ว ในทางตรงกันข้าม ที่ฟลักซ์ความร้อนต่ำ กราฟจะมีลักษณะเป็นยอดที่กว้างและเตี้ยกว่า แสดงถึงกระบวนการเผาไหม้ที่ช้าและต่อเนื่องยาวนานกว่า โดยสรุป ผลการทดลองนี้ยืนยันอย่างชัดเจนว่าฟลักซ์ความร้อนเชิงการแผ่รังสีเป็นปัจจัยควบคุมหลักที่กำหนดพฤติกรรมและอันตรายจากอัคคีภัยของวัสดุ PLA โดยการเพิ่มระดับฟลักซ์ความร้อนจะนำไปสู่การจุดติดไฟที่เร็วขึ้น การเติบโตของไฟที่รวดเร็วยิ่งขึ้น และความรุนแรงของการเผาไหม้ที่สูงขึ้น ซึ่งเป็นข้อมูลสำคัญสำหรับการประเมินความเสี่ยงด้านอัคคีภัยและการออกแบบวัสดุให้มีความปลอดภัยต่อไป

ผลการทดลองพฤติกรรมการเผาไหม้ของวัสดุ Polyethylene Terephthalate Glycol (PETG) ที่ระดับฟลักซ์ความร้อนเชิงการแผ่รังสี (Incident Heat Flux) ตั้งแต่ 50 ถึง 25 kW/m² ซึ่งเป็นค่าสุดท้ายที่จุดติดไฟพบว่าฟลักซ์ความร้อนเป็นปัจจัยกำหนดที่สำคัญและส่งผลต่อพลวัตการเผาไหม้ (Combustion Dynamics) ที่ซับซ้อนกว่าวัสดุ PLA อย่างเห็นได้ชัด ซึ่งแสดงพฤติกรรมการเผาไหม้ได้ตาม Fig. 4 โดยสามารถวิจารณ์ผลกระทบในแต่ละช่วงได้ ดังนี้

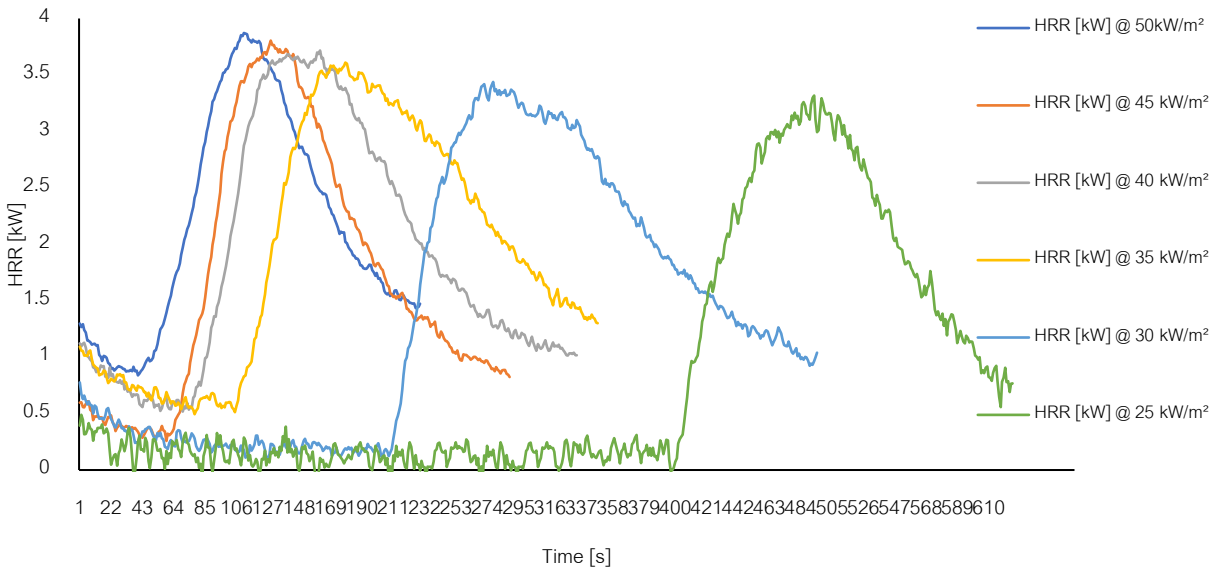


Fig. 4 Heat Release Rate (HRR) as a function of time for PETG at various incident heat fluxes.

ประการแรก เวลาที่ใช้ในการจุดติดไฟ (Time to Ignition, t_{ig}) ยังคงแสดงความสัมพันธ์แบบแปรผกผันกับฟลักซ์ความร้อนอย่างชัดเจน ที่ฟลักซ์ความร้อนสูง (50 kW/m²) วัสดุ PETG เริ่มจุดติดไฟในเวลา 41 วินาที ในขณะที่การลดฟลักซ์ความร้อนลงมาที่ 30 kW/m² จะยืดเวลาในการจุดติดไฟออกไปนานถึง 203 วินาที และที่ฟลักซ์ความร้อนต่ำสุดที่ทำการทดลอง (25 kW/m²) การจุดติดไฟเกิดขึ้นช้ามากที่ประมาณ 398 วินาที ซึ่งยืนยันตามหลักการว่าอัตราการให้ความร้อนที่สูงขึ้นจะทำให้พื้นผิววัสดุมีอุณหภูมิถึงจุดไพโรไลซิสและปลดปล่อยไอเชื้อเพลิงได้รวดเร็วยิ่งขึ้น ดังที่แสดงใน Fig. 5

อัตราการปล่อยความร้อน (Heat Release Rate, HRR) วัสดุ PETG แสดงพฤติกรรมที่น่าสนใจและแตกต่างออกไปตามระดับของฟลักซ์ความร้อน ในกลุ่มที่ได้รับฟลักซ์ความร้อนสูง (40–-50 kW/m²) กราฟ HRR มีลักษณะการเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วจนถึงค่าสูงสุด (HRR_{Peak}) ที่มีค่าใกล้เคียงกันอยู่ในช่วง 3.9 kW ซึ่งบ่งชี้ถึงการเผาไหม้ที่รุนแรง

และเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว อย่างไรก็ตาม พฤติกรรมที่โดดเด่นอย่างยิ่งเกิดขึ้นที่ระดับฟลักซ์ความร้อนต่ำกว่า โดยฟลักซ์ความร้อน 25 kW/m² การเผาไหม้เกิดขึ้นช้ามากแต่กลับมีค่า HRR_{Peak} สูงถึงประมาณ 3.3 kW ในช่วงท้ายของการทดลอง ปรากฏการณ์นี้อาจอธิบายได้ว่าที่ระดับฟลักซ์ความร้อนต่ำ ทำให้อุณหภูมิของ วัสดุ PETG สูงขึ้นจนถึงจุดหลอมเหลว (Melting Point) วัสดุจึงเริ่มเปลี่ยนสถานะจากของแข็งเป็นของเหลวหนืดและยุบตัวลง ซึ่งเป็นการสะสมเชื้อเพลิงเหลว (Molten fuel) และเมื่อสภาวะเหมาะสมจึงเกิดการลุกไหม้ของเชื้อเพลิงที่สะสมไว้อย่างรวดเร็วและรุนแรงในภายหลัง แตกต่างจากที่ฟลักซ์ความร้อนสูงซึ่งการสลายตัวและการเผาไหม้เกิดขึ้นที่ผิวบนอย่างรวดเร็วจนไม่มีเวลาให้เกิดการสะสมเชื้อเพลิงเหลวในปริมาณมาก (Xu et al., 2017)

รูปทรงโดยรวมของกราฟและพฤติกรรมในช่วงท้าย ซึ่งสะท้อนความซับซ้อนของกลไกการเผาไหม้ของ PETG ที่ฟลักซ์ความร้อนสูง เส้นกราฟมีลักษณะเป็นยอดแหลมและมีช่วงเวลาการเผาไหม้ที่สั้น บ่งชี้ถึงการพร่องของเชื้อเพลิงที่ผิวบนอย่างรวดเร็ว ในขณะที่ฟลักซ์ความร้อนต่ำ เส้นกราฟจะแผ่กว้างออกและมีระยะเวลาการเผาไหม้ที่ยาวนานกว่ามาก ซึ่งสอดคล้องกับทฤษฎีการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงเหลวที่สะสมตัว แม้ว่า PETG จะมีแนวโน้มพื้นฐานที่ t_{ig} ลดลงและ HRR_{Peak} สูงขึ้นตามฟลักซ์ความร้อนเช่นเดียวกับพอลิเมอร์ทั่วไป แต่กลไกการเผาไหม้มีความซับซ้อนกว่าอย่างมีนัยสำคัญ โดยเฉพาะพฤติกรรมการหลอมเหลวที่ฟลักซ์ความร้อนต่ำซึ่งนำไปสู่การเผาไหม้แบบการเผาไหม้ที่รุนแรงในช่วงท้าย ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญที่ต้องพิจารณาในการประเมินอันตรายจากอัคคีภัยของวัสดุชนิดนี้

เปรียบเทียบพฤติกรรมการเผาไหม้ระหว่างวัสดุ Polylactic Acid (PLA) และ Polyethylene Terephthalate Glycol (PETG) ภายใต้สภาวะการแผ่รังสีที่ฟลักซ์ความร้อนเดียวกัน พบความแตกต่างที่สำคัญซึ่งสะท้อนถึงคุณสมบัติทางเคมีและกายภาพที่แตกต่างกันของพอลิเมอร์ทั้งสองชนิดนี้

ความแตกต่างที่เด่นชัดที่สุดประการแรก คือ ความสามารถในการทนต่อการจุดติดไฟ จากกราฟเปรียบเทียบในทุกระดับฟลักซ์ความร้อน จะเห็นได้อย่างสม่ำเสมอว่า PLA มีเวลาในการจุดติดไฟ (Time to Ignition, t_{ig}) ที่สั้นกว่า PETG อย่างมีนัยสำคัญ ตัวอย่างเช่น ที่ฟลักซ์ความร้อน 50 kW/m² PLA เริ่มลุกไหม้ที่เวลาประมาณ 24 วินาที ในขณะที่ PETG ใช้เวลานานกว่าถึงประมาณ 41 วินาที ความแตกต่างนี้บ่งชี้ว่า PETG มีเสถียรภาพทางความร้อน (Thermal Stability) ที่สูงกว่า PLA และต้องการพลังงานความร้อนสะสมในปริมาณที่มากกว่าเพื่อเริ่มกระบวนการสลายตัวและปลดปล่อยไอเชื้อเพลิง ดังที่แสดงในรูป Fig. 5

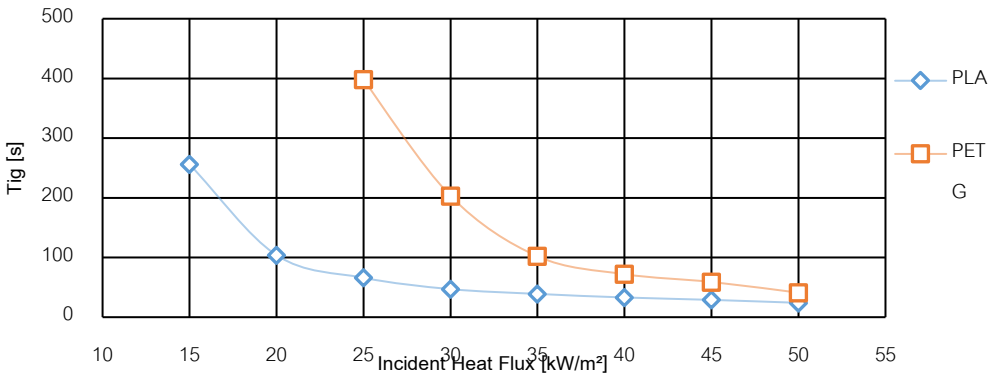


Fig. 5 Comparison of Ignition time (tig) for PLA and PETG at incident heat flux.

ลักษณะและอัตราการปล่อยความร้อน (HRR) ที่ระดับฟลักซ์ความร้อนสูง (50 kW/m²) พบว่าค่าอัตราการปล่อยความร้อนสูงสุด (HRR_{Peak}) ของ PETG อยู่ที่ประมาณ 3.9 kW ซึ่งสูงกว่า PLA อย่างชัดเจนที่มีค่าประมาณ 3.4 kW

นอกจากนี้ รูปทรงของกราฟยังแสดงพฤติกรรมที่แตกต่างกันอย่างสิ้นเชิง PLA แสดงลักษณะกราฟแบบ "พุ่งขึ้นสู่ยอดแล้วลดลง" (Peak-and-decay) ที่ชัดเจน โดยมีอัตราการเพิ่มขึ้นของ HRR ที่สูงชันมากหลังการจุดติดไฟ ทำให้เกิดเป็นยอดแหลมสูงและแคบ ซึ่งบ่งชี้ถึงการเผาไหม้ที่พื้นผิวซึ่งเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วและรุนแรง ก่อนจะลดลงอย่างต่อเนื่องตามการพร่องลงของเชื้อเพลิง ในทางตรงกันข้าม PETG แสดงรูปทรงกราฟที่แผ่กว้างกว่ามาก โดยมีอัตราการเพิ่มขึ้นของ HRR ที่ช้ากว่าและใช้เวลานานกว่าในการไปถึงจุดสูงสุด ลักษณะกราฟที่กว้างนี้สะท้อนถึงกลไกการเผาไหม้ที่ซับซ้อนกว่า ซึ่งเกี่ยวข้องกับ การหลอมเหลวและการสะสมตัวเป็นบ่อเชื้อเพลิงเหลว (Melt-pooling) ก่อนที่การเผาไหม้ที่รุนแรงจะเกิดขึ้น ทำให้กระบวนการเผาไหม้โดยรวมมีความต่อเนื่องและยาวนานกว่า PLA โดยแสดงพฤติกรรมได้อย่างชัดเจนในการให้ค่าฟลักซ์ความร้อนเดียวกัน ซึ่งได้ยกการเปรียบเทียบมาบางส่วนดังแสดงในภาพ Fig. 6 และ Fig. 7

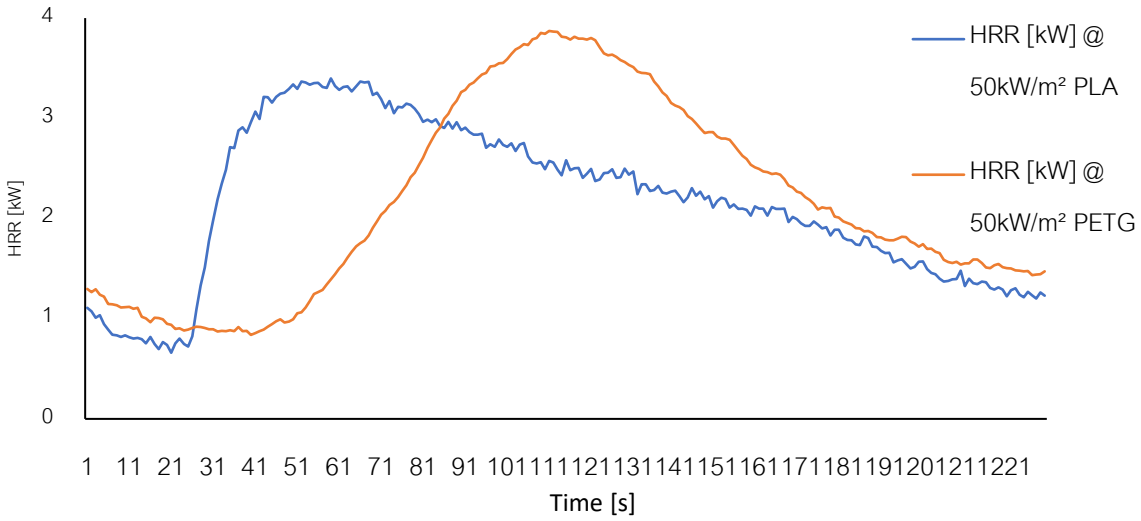


Fig. 6 Comparison of HRR curves for PLA and PETG at 50 kW/m² incident heat flux.

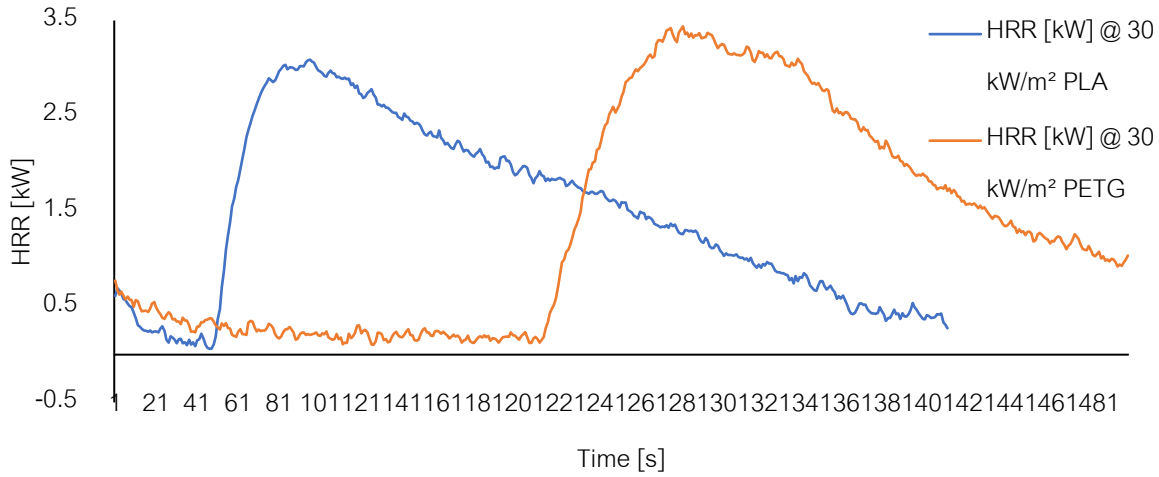


Fig. 7 Comparison of HRR curves for PLA and PETG at 30 kW/m² incident heat flux.

ความแตกต่างในพฤติกรรมการหลอมเหลวนี้เป็นปัจจัยสำคัญที่อธิบายความแตกต่างของกราฟทั้งหมดที่ฟลักซ์ความร้อนต่ำ (30 kW/m²) ตามรูป Fig. 7 ความแตกต่างนี้ยิ่งเด่นชัดขึ้น โดย PLA ยังคงแสดงพฤติกรรมการเผาไหม้ที่ผิวอย่างรวดเร็ว (แม้จะมี HRR_{Peak} ที่ต่ำลง) ในขณะที่ PETG แสดงพฤติกรรมการเผาไหม้ที่ล่าช้าออกไปมาก ซึ่งเกิดจาก

การสะสมพลังงานในบ่อเชื้อเพลิงเหลวเป็นเวลานานก่อนจะเกิดการลุกไหม้อย่างรุนแรงในช่วงท้าย โดยสรุป แม้วัสดุทั้งสองจะเป็นเทอร์โมพลาสติกที่ใช้ในการพิมพ์สามมิติเหมือนกัน แต่ PETG แสดงให้เห็นถึงความปลอดภัยด้านอัคคีภัยในเบื้องต้นที่ดีกว่า PLA เนื่องจากความสามารถในการต้านทานการจุดติดไฟที่สูงกว่า อย่างไรก็ตาม พฤติกรรมการหลอมเหลวและเผาไหม้เป็นเวลานานของ PETG ก็เป็นปัจจัยเสี่ยงที่ต้องพิจารณาในการประเมินอันตรายจากอัคคีภัย

Table 1 สรุปข้อมูลเชิงปริมาณของตัวแปรหลักด้านการเผาไหม้ของวัสดุ PLA และ PETG ภายใต้ฟลักซ์ความร้อนเชิงการแผ่รังสี (Incident Heat Flux) ที่แตกต่างกัน โดยประกอบด้วย อัตราการปล่อยความร้อนสูงสุด (HRR_{Peak} [kW]), อัตราการปล่อยความร้อนเฉลี่ยสูงสุดในช่วง 30 วินาที ($HRR_{Peak,avg30s}$ [kW]) และเวลาในการจุดติดไฟ (t_{ig} [s]) ผลการทดลองในตารางยืนยันความสัมพันธ์แบบแปรผกผันระหว่างฟลักซ์ความร้อนและเวลาในการจุดติดไฟของวัสดุทั้งสองชนิดอย่างชัดเจน อย่างไรก็ตาม พบว่า PETG มีเสถียรภาพทางความร้อนที่สูงกว่าอย่างมีนัยสำคัญ โดยมีค่า t_{ig} ที่ยาวนานกว่า PLA ในทุกระดับฟลักซ์ความร้อนที่ทดสอบ (เช่น ที่ 50 kW/m² t_{ig} ของ PETG คือ 41 วินาที เทียบกับ PLA ที่ 24 วินาที) ในด้านอัตราการปล่อยความร้อน PETG แสดงค่า HRR_{Peak} ที่สูงกว่า PLA ในทุกระดับฟลักซ์ความร้อนที่ทำการเปรียบเทียบ (25-50 kW/m²) โดยที่ฟลักซ์ความร้อน 50 kW/m² PETG มีค่า HRR_{Peak} สูงถึง 3.872 kW ในขณะที่ PLA มีค่า 3.398 kW ซึ่งแนวโน้มดังกล่าวสอดคล้องกับค่า $HRR_{Peak,avg30s}$ ข้อมูลเชิงปริมาณนี้สนับสนุนการวิจารณ์ผลที่ว่า แม้ PLA จะจุดติดไฟได้เร็วกว่า แต่ PETG มีศักยภาพในการปลดปล่อยพลังงานสูงสุดที่รุนแรงกว่าภายใต้สภาวะเดียวกัน

Table 1 Summary of key combustion parameters for PLA and PETG under different Incident Heat Flux.

Incident Heat Flux [kW/m²]	Experiment plastics					
	PLA			PETG		
	HRR_{Peak} [kW]	$HRR_{Peak,avg30s}$ [kW]	t_{ig} [s]	HRR_{Peak} [kW]	$HRR_{Peak,avg30s}$ [kW]	t_{ig} [s]
50	3.398	3.289	24	3.872	3.725	41
45	3.328	3.238	29	3.804	3.683	59
40	3.269	3.168	33	3.717	3.579	72
35	3.219	3.108	39	3.610	3.522	102
30	3.089	2.993	47	3.438	3.330	203
25	2.999	2.742	66	3.317	3.146	398
20	2.788	2.648	104	-	-	-
15	2.494	2.350	256	-	-	-

สรุป

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาและเปรียบเทียบพฤติกรรมการเผาไหม้ของวัสดุพอลิแลกติกแอซิด (Polylactic Acid, PLA) และ พอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตไกลคอล (Polyethylene Terephthalate Glycol, PETG) โดยใช้วิธีทดสอบด้วยเธอร์โมไพล์โคนแคลอริมิเตอร์ (Thermalpile cone calorimeter) ผลการทดลองยืนยันอย่างชัดเจนว่าฟลักซ์ความร้อนเชิงการแผ่รังสีเป็นปัจจัยควบคุมหลักต่อพลวัตการเผาไหม้ของวัสดุทั้งสองชนิด โดยการเพิ่มระดับฟลักซ์ความร้อนส่งผลให้เวลาในการจุดติดไฟ (t_{ig}) สั้นลง และอัตราการปล่อยความร้อนสูงสุด (HRR_{Peak}) มีค่าสูงขึ้น อย่างไรก็ตาม พบความแตกต่างเชิงพฤติกรรมที่สำคัญระหว่างวัสดุทั้งสอง โดย PLA แสดงคุณสมบัติการจุดติดไฟที่เร็วกว่าและมีลักษณะการเผาไหม้ที่พื้นผิวอย่างรวดเร็วและรุนแรง ในขณะที่ PETG มีเสถียรภาพทางความร้อนที่สูงกว่า แต่แสดงกลไกการเผาไหม้ที่ซับซ้อนกว่าอันเนื่องมาจากการหลอมเหลวและการสะสมตัวเป็นบ่อเชื้อเพลิงเหลว ซึ่งนำไปสู่กระบวนการเผาไหม้ที่ต่อเนื่อง

และยาวนานกว่า ดังนั้น แม้ PETG จะมีความปลอดภัยในเบื้องต้นที่ดีกว่าเนื่องจากความสามารถในการต้านทานการจุดติดไฟ แต่พฤติกรรมการเผาไหม้ที่นานกว่าก็ถือเป็นปัจจัยเสี่ยงที่ต้องพิจารณา ในทางกลับกัน PLA แม้จะติดไฟง่ายกว่าแต่มีระยะเวลาการเผาไหม้ที่สั้นกว่า ข้อมูลที่ได้จากการศึกษานี้จึงมีความสำคัญอย่างยิ่งต่อการประเมินอันตรายจากอัคคีภัยของวัสดุที่ใช้ในการพิมพ์สามมิติได้อย่างถูกต้องและรอบด้าน

เอกสารอ้างอิง

Babrauskas, V., Peacock, R.D. 1992. Heat release rate: The single most important variable in fire hazard. Fire Saf. J. 18: 255–272.

Bedi, S.S., Mallesha, V., Mahesh, V., Mahesh, V., Mukunda, S., Negi, S., Ponnusami, S.A. 2023. Thermal characterization of 3D printable multifunctional graphene-reinforced polyethylene terephthalate glycol (PETG) composite filaments enabled for smart structural applications. Polym. Eng. Sci. 63: 2841–2856. doi.org/10.1002/pen.26409

Bernatikova, S., Dudacek, A., Prichystalova, R., Klecka, V., Kocurkova, L. 2021. Characterization of ultrafine particles and VOCs emitted from a 3D printer. Int. J. Environ. Res. Public Health 18: 1–15. doi.org/10.3390/ijerph18030929

DiNenno, P.J., Drysdale, D., Beyler, C.L., Walton, W.D., Custer, R.L.P., Hall, J.R., Watts, J.M. 2002. SFPE handbook of fire protection engineering. National Fire Protection Association, Quincy.

Hansen, R. 2023. Varying heat release rates per unit area – the impact in underground mines. Min. Rev. 29: 1–28. doi.org/10.2478/minrv-2023-0028

Hull, T.R., Witkowski, A., Hollingbery, L. 2011. Fire retardant action of mineral fillers. Polym. Degrad. Stab. 96: 1462–1469. doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2011.05.006

Latko-Durałek, P., Dydek, K., Boczkowska, A. 2019. Thermal, rheological and mechanical properties of PETG/rPETG blends. J. Polym. Environ. 27: 2600–2606. doi.org/10.1007/s10924-019-01544-6

Naze, T., Poutch, F., Jimenez, M., Bonnet, F., Bourbigot, S. 2020. Low reaction-to-fire polymer filament: Formulation, 3D printability modeling and fire testing. Eur. J. Appl. Eng. Sci. Res. 5: 1–13.

Schartel, B., Hull, T.R. 2007. Development of fire-retarded materials - interpretation of cone calorimeter data. Fire Mater. 31: 327–354. doi.org/10.1002/fam.949

Xu, Q., Jin, C., Hristov, J., Griffin, G., Jiang, Y. 2017. The melt/shrink effect of low density thermoplastics insulates cone calorimeter tests. Therm. Sci. 21: 2177–2187. doi.org/10.2298/TSCI150304058X

ผลของเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทนที่มีต่อสมบัติเชิงกลและสมบัติทางความร้อนของพอลิเมอร์ผสมเพทรีไซเคิล/ไนลอน 6 รีไซเคิล

Effects of thermoplastic polyurethane on the mechanical and thermal properties of recycled polyethylene terephthalate/recycled nylon 6 blends

เขมพิชา พิขุนทด, อำนวย ลาภเกษมสุข*
Khempicha Pikhunthod, Amnouy Larpkasemsuk*
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ปทุมธานี 12110
Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Thanyaburi, Pathum Thani 12110, Thailand
*Corresponding author. E-mail address: amnouy.l@en.rmutt.ac.th

บทคัดย่อ

การศึกษานี้เป็นการนำพลาสติก พอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตรีไซเคิล (RPET) ที่ได้จากการนำขวดน้ำดื่มมาหลอมผสมกับไนลอน 6 ที่เป็นของเสียจากอุตสาหกรรม (RNylon 6) โดยเตรียมพอลิเมอร์ผสม RPET/RNylon 6 ที่อัตราส่วน 70/30 wt.% และจากนั้นนำพอลิเมอร์ผสมที่เตรียมได้มาเติม TPU ที่อัตราส่วน 10 และ 20 wt% ทำการผสม ด้วยเครื่องอัดรีดสกรูคู่ และขึ้นรูปชิ้นทดสอบด้วยเครื่องฉีด ผลการทดสอบสมบัติเชิงกล พบว่า พอลิเมอร์ผสม RPET/RNylon 6 ที่เติม TPU 20 wt.% มีค่าความทนแรงกระแทกเพิ่มขึ้นเป็น 120.0% ค่าความทนแรงดึงมีค่าเพิ่มขึ้นเป็น 15.3% ร้อยละการยืดตัว ณ จุดขาดเพิ่มขึ้น แต่ค่ามอดูลัสและความแข็งแรงต่อการดัดงอมีค่าลดลง เมื่อเทียบกับพอลิเมอร์ผสม RPET/RNylon 6 ที่เติม TPU 10 wt.% จากการวิเคราะห์ DSC พบว่าการใส่ TPU 20 wt.% ส่งผลให้ระดับความเป็นผลึกของเฟส RPET ลดลง 25.12 % และอุณหภูมิการเสียรูปภายใต้ความร้อนและแรงกด (HDT) มีแนวโน้มลดลงตามปริมาณ TPU ที่เพิ่มขึ้น
คำสำคัญ: , เทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทน, ไนลอน 6, พอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต, พอลิเมอร์ผสม

Abstract

This study focuses on the utilization of recycled polyethylene terephthalate (RPET), obtained from post-consumer beverage bottles, and recycled Nylon 6 (RNylon 6), sourced from industrial waste, to produce polymer blends with enhanced performance. An RPET/RNylon 6 blend was first prepared at a ratio of 70/30 wt%, after which thermoplastic polyurethane (TPU) was incorporated at 10 and 20 wt%. The materials were compounded using a twin-screw extruder and subsequently molded into test specimens via injection molding. Mechanical testing revealed that the addition of 20 wt% TPU significantly improved the impact strength of the RPET/RNylon 6 blend to 120.0% and increased the tensile strength to 15.3%, while elongation at break also increased. In contrast, the modulus and flexural strength decreased when compared with the RPET/RNylon 6 blend containing 10 wt% TPU. Differential scanning calorimetry (DSC) analysis showed that incorporating 20 wt% TPU reduced the crystallinity of the RPET phase by 25.12%. Furthermore, the heat deflection temperature (HDT) exhibited a decreasing trend with increasing TPU content.
Keywords: Nylon 6, Polyethylene terephthalate, Polymer blend, Thermoplastic polyurethane

คำนำ

พอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต หรือ เพท (Polyethylene terephthalate, PET) เป็นพอลิเมอร์ในกลุ่มพอลิเอสเทอร์ที่มีการใช้งานในรูปแบบของขวดบรรจุภัณฑ์ประเภท น้ำดื่ม น้ำอัดลม ในปริมาณมากจนเป็นความคุ้นชินในชีวิตประจำวัน ผลิตภัณฑ์เหล่านี้หลังการใช้งานมักพบเป็นขยะในธรรมชาติ PET เป็นพลาสติกที่มีความเหมาะสมในการใช้งานด้านบรรจุภัณฑ์ เนื่องจากมีสมบัติ ความโปร่งใส น้ำหนักเบา มีความทนต่อแรงกระแทก และทนต่อการซึมผ่านของก๊าซได้ดี (Benyathiar et al., 2022) แต่เมื่อนำ PET มาผ่านกระบวนการรีไซเคิลมักพบว่ามีสมบัติที่เปลี่ยนไป เนื่องจากความร้อนและแรงเฉือนในกระบวนการทำให้ ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีความเปราะสูงและความสามารถในการทนแรงกระแทกลดลง

พอลิเอไมด์ 6 หรือไนลอน 6 (Polyamide 6 หรือ Nylon 6) จัดเป็นพลาสติกวิศวกรรม ที่มีสมบัติโดดเด่นด้านความแข็งแรงเชิงกล ความเหนียว และเสถียรภาพทางความร้อน (Nuretdinov, 2017) เป็นพลาสติกทางเลือกที่น่าสนใจอย่างยิ่ง สำหรับการนำมาเตรียมเป็นพอลิเมอร์ผสมร่วมกับ PET อย่างไรตาม คู่พอลิเมอร์ผสมระหว่าง PET และ Nylon 6 มีความเป็นไปได้สูงที่จะมีพฤติกรรมการผสมแบบไม่เข้ากันทางโครงสร้าง (Immiscibility) จึงอาจส่งผลให้เกิดการแยกเฟส (Lin et al., 2014) ดังนั้น จึงมีแนวความคิดที่จะผสมพอลิเมอร์องค์ประกอบที่ 3 คือเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทน (TPU) ซึ่งเป็นอีลาสโตเมอร์ที่มีความยืดหยุ่นสูง และคาดว่าสามารถสร้างพันธะทุติยภูมิ (Secondary Bond) ได้ทั้งกับ PET และ Nylon 6 เพื่อทำหน้าที่เป็นตัวเชื่อมคู่พอลิเมอร์ผสมให้มีความเข้ากันได้มากขึ้น โดยหมู่ยูรีเทน (-NH-CO-O-) ในโครงสร้างของ TPU สามารถสร้างแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลกับหมู่คาร์บอนิล (-C=O) ของ RPET และหมู่เอไมด์ (-NH-CO-) ของ Nylon 6 ได้ ซึ่งจะช่วยลดความตึงผิวระหว่างเฟส (Interfacial tension) และเพิ่มความแข็งแรงในการยึดเกาะระหว่างเฟส ส่งผลให้การถ่ายโอนแรงกระจายตัวได้ดีขึ้น อีกทั้งสามารถทำหน้าที่เป็นสารปรับปรุงสมบัติความทนแรงกระแทกในระบบพอลิเมอร์ผสมได้

ดังนั้น ในงานวิจัยนี้ จึงมีเป้าหมายหลักคือการเตรียมและศึกษาสมบัติของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PET ที่ได้จากกระบวนการรีไซเคิลขวดน้ำดื่ม (RPET) และ Nylon 6 รีไซเคิลที่ได้จากกระบวนการผลิตอวน (RNylon 6) โดยมีการใส่ TPU ในมีปริมาณการเติมที่เหมาะสม เพื่อปรับปรุงสมบัติของความทนแรงกระแทก เนื่องจาก TPU ทำหน้าที่เป็นสารปรับปรุงความทนทานต่อแรงกระแทก (Impact modifier) และยังทำหน้าที่เป็นสารช่วยเพิ่มความเข้ากันได้ (Compatibilizer) โดยคาดว่าจะได้พอลิเมอร์ผสม RPET/RNylon 6/TPU ที่มีประสิทธิภาพที่สูงขึ้น มีสมบัติแตกต่าง จาก RPET สามารถนำไปใช้งานในระดับอุตสาหกรรมได้ และยังช่วยลดปัญหาสิ่งแวดล้อม ปริมาณขยะพลาสติก และปริมาณการปล่อยก๊าซคาร์บอน อีกทั้งยังสามารถลดการใช้ทรัพยากรทางธรรมชาติได้อีกด้วย

อุปกรณ์และวิธีการ

วัตถุดิบ

วัตถุดิบที่ใช้ในการทดลองคือขวดน้ำดื่มพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตรีไซเคิล รีไซเคิล (Recycled polyethylene terephthalate, RPET) เส้นใยไนลอน 6 รีไซเคิล (Recycled Nylon 6, RNylon 6) ที่เป็นของเสียจากกระบวนการผลิตอวน และเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทน (TPU) ชื่อทางการ ค้า ESTANE® S160D-2 บริษัท Lubrizol Specialty Chemical Manufacturing จำกัด จากประเทศจีน

การเตรียมชิ้นงานพอลิเมอร์ผสม RPET/RNylon 6/TPU

การเตรียมพอลิเมอร์ผสม RPET/RNylon 6/TPU ทำได้โดยการนำขวดน้ำดื่มเพท มาบดให้มีขนาดประมาณ 10 mm ล้างทำความสะอาด และนำเส้นใยไนลอน 6 (RNylon 6) ที่ได้จากของเสียในกระบวนการผลิตอวนที่ผ่านการหลอมและตัดเป็นเม็ด นำ RPET และ RNylon 6 มาอบที่อุณหภูมิ 80 ºC เป็นเวลา 24 hr เพื่อไล่ความชื้น จากนั้นนำมาผสมกับ TPU ที่ผ่านการอบที่อุณหภูมิ 80 ºC เป็นเวลา 4 hr มาผสมกันโดยมีอัตราส่วนการระหว่าง RPET/RNylon 6/TPU เท่ากับ 100/0/0, 0/100/0, 70/30/0, 70/30/10 และ 70/30/20 wt.% นำมาผสมด้วยเครื่องอัดรีดสกรูคู่โดยใช้อุณหภูมิในช่วง 220-270 ºC ความเร็วรอบสกรู 100 rpm และนำไปตัดเม็ดโดยการดึงผ่านน้ำ จากนั้นนำไปอบ ที่อุณหภูมิ 80 ºC เป็นเวลา 48 hr แล้วจึงขึ้นรูปชิ้นทดสอบด้วยกระบวนการฉีด ที่อุณหภูมิ 230-270 ºC

การทดสอบ

ทดสอบสมบัติด้านความทนแรงดึง (Tensile properties) ตามมาตรฐาน ASTM D638 (type I) ด้วยเครื่องทดสอบยูนิเวอร์แซล (Hounsfield, H 50 KS) โดยใช้ชิ้นทดสอบขนาด 165×19×3 (ยาว×กว้าง×หนา) ชิ้นงานในรูปดัมเบลล์ ทดสอบที่อุณหภูมิ 25 ºC มีระยะดึง 50 mm อัตราเร็วในการดึง 50 mm/min และใช้โหลดเซลล์ 25 kN

ทดสอบความทนแรงกระแทกแบบไอซอดที่มีรอยบาก (Notched izod impact strength) ตามมาตรฐาน ASTM D256 ด้วยเครื่องทดสอบความทนแรงกระแทก (CEST 6542 Serial 8331) โดยใช้ชิ้นงานทดสอบ ขนาด 63.5×12.7×3 mm (ยาว×กว้าง×หนา) ที่มีรอยบากกลางชิ้นทดสอบความลึก 2.54 mm ใช้ค้อนขนาด 2 J

ทดสอบความแข็งแรงต่อการดัดงอ (Flexural strength) แบบสามจุด (Three point bending) ด้วยเครื่องทดสอบยูนิเวอร์แซล (Hounsfield, H 50 KS) ตามมาตรฐาน ASTM D790 เตรียมชิ้นทดสอบ ขนาด 12.7×127.0×3.0 mm (กว้าง×ยาว×หนา) โดยทำการทดสอบที่อุณหภูมิห้องปฏิบัติการ ใช้โหลดขนาด 2,500 N อัตราเร็วในการกด 1.37 mm/min ระยะห่างระหว่างหัวกด 50 mm

การตรวจสอบสมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิคดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิงแคลอริเมตรี (Differential scanning calorimetry, DSC) (Mettler Toledo, DSC 3+ Star System) ทดสอบโดยนำชิ้นทดสอบประมาณ 7-8 mg บนจานอะลูมิเนียมปิดผนึก ทำการทดสอบในช่วงอุณหภูมิ 50-300 ºC ภายใต้บรรยากาศก๊าซไนโตรเจน อัตราการเพิ่มอุณหภูมิ 10 ºC/min ผลการทดสอบที่ได้จากการวิเคราะห์พฤติกรรมทางความร้อน จะแสดงอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (T_g), อุณหภูมิการหลอมเหลว (T_m), อุณหภูมิการเกิดผลึก (T_c), เอนทัลปีของการหลอมเหลว (ΔH_m), เอนทัลปีของการเกิดผลึก (ΔH_c) และคำนวณระดับความเป็นผลึก (χ_c) ได้จาก Equation 1 (Kunchimon et al., 2019):

$$\chi_c(\%) = \frac{\Delta H_m}{\Delta H_m^0 \times w_{RPET}} \times 100 \qquad (1)$$

When; ΔH_m is melting enthalpy, w_{RPET} is the weight percentage of RPET in the polymer blend and ΔH^0_m is the theoretical enthalpy of melting for a 100% crystalline polymer (REPT = 120 J/g and RNylon 6 = 230.1 J/g) (Srithep et al., 2011; Korkees et al., 2021)

การวิเคราะห์อุณหภูมิการเสียรูปภายใต้ความร้อนและแรงกด (Heat distortion temperature, HDT) ด้วยเครื่องทดสอบอุณหภูมิการเสียรูป (Ceast, HDT Vicat 6911) ตามมาตราฐาน ASTM D648 โดยเตรียมชิ้นงานขนาด

12.7×125.0×3.0 mm (กว้าง×ยาว×หนา) ใช้ความร้อนในการทดสอบจากอ่างน้ำมันซิลิโคน อุณหภูมิเริ่มต้นในการทดสอบ 25 °C อุณหภูมิสูงสุดในการทดสอบ 200 °C อัตราการเพิ่มอุณหภูมิ เท่ากับ 120±2 °C น้ำหนักต่อพื้นที่ที่ใช้กดชิ้นงาน 1.82 MPa ความยาว span 100 mm และบันทึกค่าอุณหภูมิที่เกิดการเปลี่ยนแปลง

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

ความทนแรงกระแทก

Table 1 และ Fig. 1 (A) พบว่า RPET มีค่าความทนแรงกระแทกเท่ากับ 19.0 J/m ขณะที่ RNylon 6 มีค่าความทนแรงกระแทกสูงถึง 77.3 J/m หรือมากกว่า RPET ประมาณ 306.8% เนื่องจาก RNylon 6 มีพันธะเอไมด์ ในโครงสร้างที่สามารถดูดซับพลังงานได้ดีกว่า RPET และพอลิเมอร์ผสม RPET/RNylon 6 (70/30 wt.%) พบว่า ค่าความทนแรงกระแทกเท่ากับ 20.0 J/m ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับ RPET แต่ต่ำกว่า RNylon 6 ซึ่งเป็นผลมาจากทั้ง RPET และ RNylon 6 ในระบบพอลิเมอร์เกิดการแยกเฟส และมีแรงยึดเหนี่ยวของอินเตอร์เฟสต่ำ ดังนั้นเมื่อได้รับแรงกระแทกรอยแตกจึงเกิดและขยายตัวตามขอบเฟสได้ง่าย ส่งผลให้สมบัติของพอลิเมอร์ผสมไม่ได้รับการปรับปรุงจาก RNylon 6 ที่มีสมบัติความทนแรงกระแทกที่สูงกว่า และเมื่อเติม TPU 10 wt.% ในพอลิเมอร์ผสม พบว่าค่าความทนแรงมีค่า 14.0 J/m ซึ่งต่ำกว่า RPET, RNylon 6 และพอลิเมอร์ผสม ทั้งนี้เป็นผลมาจาก TPU ที่อัตราส่วนนี้อาจมีปริมาณน้อยเกินไป ไม่เพียงพอในการปรับปรุงความทนแรงกระแทก และมีการกระจายตัวที่ไม่สม่ำเสมอในเมทริกซ์ ส่งผลให้ค่าความทนแรงกระแทกลดลง แต่เมื่อเพิ่มปริมาณของ TPU เป็น 20 wt.% พบว่าค่าความทนแรงกระแทกเพิ่มขึ้นเป็น 30.8 J/m ซึ่งสูงกว่าพอลิเมอร์ผสม เนื่องจากปริมาณ TPU ที่มากขึ้นทำให้สามารถกระจายตัวในเมทริกซ์ได้อย่างต่อเนื่องมากกว่า ส่งผลให้ TPU ทำหน้าที่เป็นเฟสอีลาสโตเมอร์ที่ช่วยดูดซับพลังงานจากแรงกระแทกได้ อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น จึงทำให้ค่าความทนแรงกระแทกโดยรวมเพิ่มขึ้น

Table 1 Mechanical properties of RPET, RNylon 6, the RPET/RNylon 6 blend at a 70/30 mixing ratio, and the polymer blends incorporating 10 and 20 wt.% TPU.

RPET/RNylon 6/TPU (wt.%)	Impact strength (J/m)	Tensile strength (MPa)	Elongation at break (%)	Young's modulus (MPa)	Flexural strength (MPa)
100/0/0	19.0±4.8	65.6±0.6	4.6±0.4	2350.0±54.4	84.1±2.2
0/100/0	77.3±10.3	68.3±1.0	34.9±4.1	2595.7±61.9	59.9±1.5
70/30/0	20.0±2.8	57.0±1.9	2.8±0.2	2515.0±32.1	70.3±1.2
70/30/10	14.0±5.3	42.6±5.2	2.1±0.3	2375.7±48.6	74.0±3.9
70/30/20	30.8±7.8	49.1±2.4	3.2±0.3	2167.1±33.0	67.5±2.2

ความทนแรงดึง การยืดตัว ณ จุดขาด และยังส์มอดุลัส

จาก Table 1 และ Fig. 1(B), (C) และ (D) พบว่าค่าความทนแรงดึงของ RPET เท่ากับ 65.6 MPa และมีร้อยละการยืดตัว ณ จุดขาดเท่ากับ 4.6% ซึ่งแสดงถึงการเป็นวัสดุที่ค่อนข้างเปราะ กล่าวคือมีร้อยละการยืดตัวที่ต่ำ ในขณะที่ RNylon 6 มีค่าความทนแรงดึงเท่ากับ 68.3 MPa และมีร้อยละการยืดตัว ณ จุดขาดเท่ากับ 34.9% ซึ่งแสดงว่า RNylon 6 มีความสามารถในการรับแรงดึงก่อนแตกหักได้ดีกว่า RPET พอลิเมอร์ผสม (70/30 wt.%) ที่ไม่มีการเติม TPU มีค่าความทนแรงดึงเท่ากับ 57.0 MPa และร้อยละการยืดตัว เท่ากับ 2.8% ซึ่งต่ำกว่า RPET และ RNylon 6 ทั้งนี้เป็นผล มาจากการที่ RPET และ RNylon 6 ไม่สามารถผสมเข้ากันได้ดี ทำให้เกิดการแยกเฟส และมีแรงยึดเหนี่ยวบริเวณอินเตอร์เฟสค่อนข้างต่ำ และเมื่อเติม TPU 10 wt.% ในพอลิมอร์ผสม พบว่าค่าความทนแรงดึงมีค่าเท่ากับ 42.6 MPa และร้อยละการยืดตัว ณ จุดขาดมีค่าเท่ากับ 2.1% ซึ่งต่ำกว่าพอลิเมอร์ผสม ที่ไม่มีการเติม TPU แสดงให้เห็นว่าที่อัตราส่วนนี้มีปริมาณ TPU น้อยจึงไม่สามารถเพิ่มความทนแรงดึงได้ดังที่ได้กล่าวมาแล้ว อีกทั้งคาดว่าการกระจายตัวของ TPU มีแนวโน้มไม่สม่ำเสมอ และมีแรงยึดเหนี่ยวกับเมทริกซ์ต่ำ ทั้งยังสอดคล้องกับการลดลงของยังส์มอดุลัส ซึ่งค่าเท่ากับ 2375.7 MPa ซึ่งแสดงถึงความสามารถในการคงรูปที่ลดลง อย่างไรก็ตาม เมื่อเพิ่มปริมาณ TPU เป็น 20 wt.% พบว่าค่าความทนแรงดึงมีค่าเพิ่มขึ้นเป็น 49.1 MPa และร้อยละการยืดตัว ณ จุดขาดเพิ่มขึ้นเป็น 3.2% แม้ว่าค่ามอดูลัส มีค่าลดลงเป็น 2167 MPa แต่การลดลงนี้สอดคล้องกับพฤติกรรมของ TPU ที่เมื่อแทรกตัวอยู่ในระบบ จะทำให้เมทริกซ์บางส่วนเปลี่ยนแปลงรูปร่างได้ง่ายขึ้น อีกทั้งปริมาณ TPU ที่สูงขึ้นทำให้เฟสอีลาสโตเมอร์สามารถกระจายตัวได้ต่อเนื่องมากขึ้น และสามารถดูดซับพลังงานจากแรงดึงได้มากขึ้น ส่งผลให้ความทนแรงดึงและการยืดตัวของ TPU 20 wt.% มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับกรณีที่เติม TPU เพียง 10 wt.%

ความแข็งแรงต่อการดัดงอ

จาก Table 1 และ Fig. 1(E) พบว่า RPET มีค่าความแข็งแรงต่อการดัดงอเท่ากับ 84.1 MPa ซึ่งเป็น ค่าที่ค่อนข้างสูง แสดงถึงวัสดุที่มีความแข็งและความสามารถในการต้านทานการโค้งงอที่ดี ในขณะที่ RNylon 6 มีค่าเท่ากับ 59.9 MPa ซึ่งต่ำกว่า RPET ทั้งนี้เป็นผลมาจากการมีหมู่เอไมด์ที่มีสมบัติยืดหยุ่นในโครงสร้างสายโซ่พอลิเมอร์ของ RNylon 6 และเมื่อตรวจสอบสมบัติความแข็งแรงต่อการดัดงอของพอลิเมอร์ผสม RPET/RNylon 6 (70/30 wt.%) พบว่ามีค่าเท่ากับ 70.3 MPa ซึ่งอยู่ระหว่างค่าของ RPET และ RNylon 6 เมื่อเติม TPU 10 wt.% ลงใน พอลิเมอร์ผสม พบว่ามีค่าเพิ่มขึ้นเป็น 74.0 MPa ซึ่งสูงกว่าสูตร 70/30/0 เล็กน้อย ซึ่งอาจเกิดจากเฟสของ TPU ที่สามารถกระจายตัวได้ในระดับหนึ่งและทำหน้าที่ช่วยกระจายความเค้นบริเวณอินเตอร์เฟสของ RPET และ RNylon 6 ส่งผลให้ เมทริกซ์สามารถรับแรงดัดงอได้ดีขึ้น และเมื่อเพิ่มปริมาณ TPU เป็น 20 wt.% ค่าความแข็งแรงต่อการดัดงอแสดงแนวโน้มลดลงคือมีค่าเท่ากับ 67.5 MPa คาดว่าเป็นผลมาจากปริมาณ TPU ที่มากเกินไปทำให้เฟสอีลาสโตเมอร์เข้ามาแทนที่เฟสแข็งของ RPET/RNylon 6 ในสัดส่วนที่สูงขึ้น ส่งผลให้ความแข็ง (Stiffness) และความสามารถในการรับแรงดัดงอลดลง

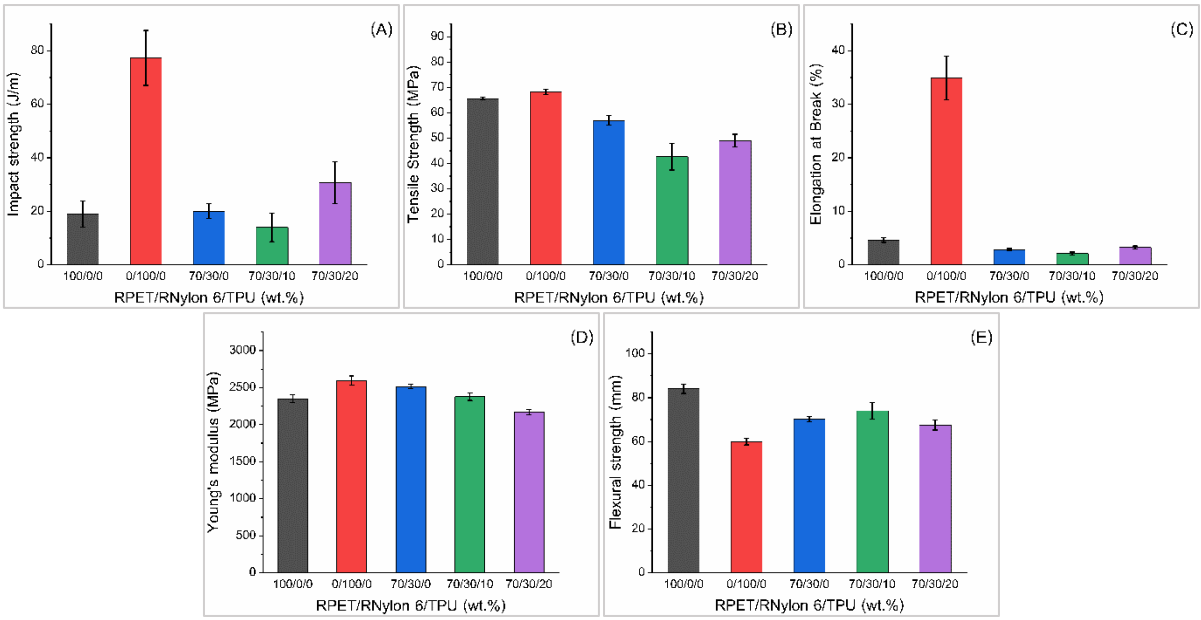


Fig. 1 Mechanical properties test graph for RPET, RNylon 6, the RPET/RNylon 6 blend at a 70/30 mixing ratio, and the polymer blends incorporating 10 and 20 wt.% TPU, where (A) Impact strength, (B) Tensile strength, (C) Elongation at break, (D) Young's modulus and (E) Flexural strength.

สมบัติทางความร้อนและพฤติกรรมการเกิดผลึก

Table 2 และ Fig. 2 (A) แสดงผลที่ได้จาก DSC เทอร์โมแกรมในขั้นตอนการให้ความร้อนครั้งที่ 2 พบว่า RPET มีค่าอุณหภูมิหลอมเหลว (T_m) เท่ากับ 250.50 °C ขณะที่ RNylon 6 มีค่า T_m เท่ากับ 219.25 °C และ พอลิเมอร์ผสม RPET/RNylon 6 (70/30 wt.%) ค่า T_m เท่ากับ 248.29 °C โดยมีอุณหภูมิหลอมต่ำกว่า RPET ประมาณ 2.21 °C ทั้งนี้เนื่องจากสายโซ่โมเลกุลของ RNylon 6 สามารถรบกวนการจัดเรียงตัวเป็นผลึกของโมเลกุล RPET ทำให้ผลึกที่เกิดขึ้นมีความสมบูรณ์ลดลง และเมื่อเติม TPU ในปริมาณ 10 และ 20 wt.% ในพอลิเมอร์ผสม พบว่าค่า $T_{m,}$ ของพอลิเมอร์ 3 องค์ประกอบมีค่าเท่ากับ 242.34 °C และ 228.18 °C ตามลำดับ ทั้งนี้เนื่องจาก TPU ซึ่งเป็นเฟสอีลาสโตเมอร์ ที่มีความอ่อนตัวและผสมไม่เข้ากันกับ RPET ไปขัดขวางเคลื่อนที่ของสายโซ่โมเลกุล RPET ระหว่างกระบวนการเกิดผลึก อีกทั้งการเติม TPU ยังเป็นการเพิ่มการแยกเฟสภายในระบบ ทำ RPET มีผลึกบางส่วนที่เกิดได้ไม่สมบูรณ์หรือมีจุดบกพร่องของผลึก RPET ส่งผลให้อุณหภูมิหลอมเหลวต่ำลง (Sun et al., 2021)

จาก Table 2 พบว่า RPET อุณหภูมิเกิดผลึก (T_c)เท่ากับ 174.56 °C และมีร้อยละการเกิดผลึก (χ_c) เท่ากับ 37.08% ในขณะที่ RNylon 6 มีค่า T_c สูงกว่า (192.29 °C) แต่มี χ_c เท่ากับ 29.60% แสดงว่า RNylon 6 สามารถเกิดผลึกได้รวดเร็วที่อุณหภูมิสูง แต่มีระดับการเกิดผลึกต่ำ เนื่องจากหมู่อะลิฟาติก-เอไมด์ ในโครงสร้างที่มีความยืดหยุ่นสูงสามารถจำกัดความสมบูรณ์ของผลึกที่เกิดขึ้นได้ และพอลิเมอร์ผสม RPET/RNylon 6 (70/30 wt%) พบอุณหภูมิ T_c ของเฟส RPET เพิ่มขึ้นเป็น 186.43 °C แต่ χ_c ลดลงเหลือ 17.40 % การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิ T_c แสดงว่าเฟส RNylon 6 ทำหน้าที่ช่วยเหนี่ยวนำให้ RPET มีการเกิดผลึกที่เร็วขึ้น ขณะที่ปริมาณของผลึก RPET (17.40 %) มีปริมาณที่ลดลง ทั้งนี้เป็นผลจากการแยกเฟสระหว่าง RPET และ RNylon 6 ทำให้เฟสของ RNylon 6 ขัดขวางการจัดเรียงตัวของโมเลกุล RPET ทำให้ผลึกมีความสมบูรณ์ลดลง และเมื่อเติม TPU 10 wt.% พบอุณหภูมิ T_c ของ RPET เพิ่มขึ้น เป็น 196.44 °C และ χ_c เพิ่มเป็น 28.17% แสดงว่า TPU ที่ปริมาณนี้อาจทำหน้าที่เป็นนิวเคลียสร่วมช่วยเหนี่ยวนำให้ RPET เกิดผลึกได้สมบูณ์ขึ้น

อย่างไรก็ตาม เมื่อเพิ่ม TPU เป็น 20 wt.% พบค่า χ_c ลดลงอีกครั้ง เหลือ 25.12% แม้อุณหภูมิ T_c ยังอยู่ในระดับสูง ทั้งนี้คาดว่าความเป็นผลึกของเฟส RPET ที่ลดลงนั้น เกิดจากโมเลกุลของ TPU เข้าไปขัดขวางการจัดเรียงตัวของสายโซ่พอลิเมอร์ ซึ่งการลดลงของผลึกส่งผลให้ความแข็งเกร็ง (Stiffness) ของพอลิเมอร์ผสมมีแนวโน้มลดลง

Table 2 Parameters obtained from the DSC thermograms during the first cooling scan and the second heating scan for RPET, RNylon 6, the RPET/RNylon 6 blend at a 70/30 wt.% mixing ratio, and the polymer blends incorporating 10 and 20 wt.% TPU

RPET/RNylon 6/TPU (wt.%)	T_m (°C)	T_c (°C)	ΔH_m (J/g)	ΔH_c (J/g)	$\chi_{c\ RPET}$ (%)	$\chi_{c\ RNylon\ 6}$ (%)
100/0/0	250.50	174.56	44.5	44.03	37.08	-
0/100/0	219.25	192.29	68.1	61.17	-	29.60
70/30/0	248.29	186.43	20.88	9.85	17.40	-
70/30/10	242.34	196.44	21.3	23.85	28.17	-
70/30/20	228.18	190.76	16.88	18.28	25.12	-

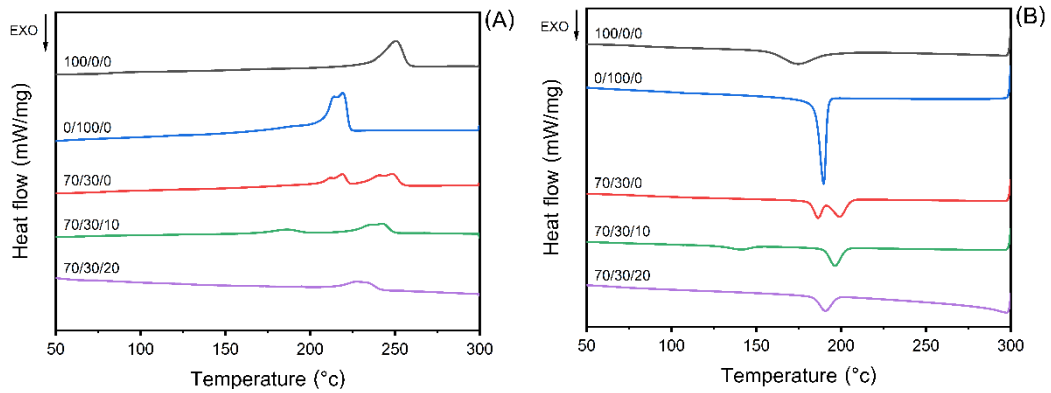


Fig. 2 DSC thermograms of RPET, RNylon 6, the RPET/RNylon 6 blend at a 70/30 mixing ratio, and the polymer blends incorporating 10 and 20 wt.% TPU, obtained from (A) the second heating scan and (B) the first cooling scan.

อุณหภูมิการเสียรูปภายใต้ความร้อนและแรงกด

Table 3 พบว่าอุณหภูมิการเสียรูปภายใต้ความร้อนและแรงกด (HDT) ของ RPET มีค่าเท่ากับ 64.50 °C และ RNylon 6 มีค่า HDT เท่ากับ 50.57 °C ซึ่งต่ำกว่า RPET ทั้งนี้เนื่องจาก RPET เป็นพอลิเมอร์ ในกลุ่มพอลิเอสเทอร์ที่มีโครงสร้างแข็ง (Rigid backbone) และมีวงแหวนเบนซีนในโครงสร้างโมเลกุลจึงทำให้สามารถทนต่อการงอตัวภายใต้โหลดเมื่อได้รับความร้อน ได้สูงกว่า RNylon 6 ที่มีหมู่เอไมด์ที่มีความยืดหยุ่นกว่าในโครงสร้างพอลิเมอร์ผสม RPET/RNylon 6 (70/30 wt.%) พบว่ามีค่า HDT เท่ากับ 62.77 °C ซึ่งแตกต่างจาก RPET เท่ากับ 1.73 °C ทั้งนี้เนื่องจาก

RPET ซึ่งยังคงเป็นเฟสหลักในพอลิเมอร์ผสม ทำให้สมบัติด้านการต้านทานความร้อนยังคงแสดงแนวโน้มตาม RPET และเมื่อเติม TPU 10 wt.% และ 20 wt.% พบว่าค่า HDT มีค่าเท่ากับ 61.87 และ 55.83 °C ตามลำดับ ซึ่งเป็นค่าอุณหภูมิที่ต่ำกว่าพอลิเมอร์ผสม และแสดงแนวโน้มลดลงตามปริมาณของ TPU ที่เพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องจาก เมื่อเติม TPU เป็นผลโดยตรงจากการที่ TPU มีความเป็นอีลาสโตเมอร์สูง ทำให้ค่ามอดุลัส รวมของวัสดุลดลง วัสดุจึงเสียรูปได้ง่ายขึ้นเมื่อได้รับความร้อนภายใต้แรงกด

Table 3 Heat distortion temperature (HDT) of RPET, RNylon 6, the RPET/RNylon 6 blend at a 70/30 mixing ratio, and the polymer blends incorporating 10 and 20 wt.% TPU.

RPET/Nylon 6/TPU (wt.%)	HDT(°C)
100/0/0	64.50±1.08
0/100/0	50.57±0.55
70/30/0	62.77±4.14
70/30/10	61.87±3.96
70/30/20	55.83±1.97

สรุป

การเติม TPU ในพอลิเมอร์ผสม RPET/RNylon 6 (70/30 wt%) พบว่าการเติม TPU ในช่วง 10–20 wt.% ส่งผลโดยตรงต่อสมบัติด้านความทนแรงกระแทก ซึ่งเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญโดยเฉพาะที่อัตราส่วน 20 wt% ที่ให้มีค่าความทนแรงกระแทกสูงสุด ขณะที่ค่าความทนแรงดึงและร้อยละการยืดตัว ณ จุดขาดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น แต่ค่ามอดูลัสและความแข็งแรงต่อการดัดงอกลับลดลง ซึ่งสอดคล้องกับสมบัติของ TPU ที่เป็นเฟสอ่อนและเพิ่มความสามารถในการดูดซับพลังงานของพอลิเมอร์ผสม RPET/RNylon 6 (70/30 wt.%) ในส่วนผลการวิเคราะห์ DSC พบว่าการเติม TPU 20 wt.% ส่งผลให้ระดับความเป็นผลึกของเฟส RPET ลดลง 25.12% และอุณหภูมิการเสียรูปภายใต้ความร้อนและแรงกด (HDT) มีแนวโน้มลดลงตามการเพิ่มขึ้นของปริมาณ TPU ลดลงต่ำสุดที่ 55.83 °C (20 wt.%) เป็นผลจากความยืดหยุ่นและ มอดูลัสต่ำของ TPU การเตรียมและศึกษาสมบัติของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง RPET/RNylon 6/TPU นั้นพบว่า การเติม TPU ที่ปริมาณ 20 wt.% เป็นสัดส่วนที่เหมาะสมที่สุดสำหรับพอลิเมอร์ผสม RPET/RNylon 6 เนื่องจากสามารถปรับปรุงความทนทานต่อแรงกระแทกให้เพิ่มขึ้นได้อย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งสอดคล้องกับวัตถุประสงค์ของงานวิจัยในการปรับปรุงความทนแรงกระแทกให้กับพลาสติกรีไซเคิลเพื่อให้มีความพร้อมสำหรับการใช้งานในระดับอุตสาหกรรม

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมวัสดุและโลหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ที่สนับสนุนสถานที่ดำเนินงานวิจัย และขอขอบคุณ ดร.พศวรรธน์ ชัยวุฒินันท์ สังกัดสำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ (สวทช.) เอื้อเฟื้อเครื่องมือการทดสอบ

เอกสารอ้างอิง

Backes, E.H., Harb, S.V., Pinto, L.A., de Moura, N.K., de Melo Morgado, G.F., Marini, J., et al. 2024. Thermoplastic polyurethanes: Synthesis, fabrication techniques, blends, composites, and applications. J. Mater. Sci. 59: 1123–1152.

Benyathiar, P., Kumar, P., Carpenter, G., Brace, J., Mishra, D.K. 2022. Polyethylene terephthalate (PET) bottle-to-bottle recycling for the beverage industry: A review. Polymers 14: 2366. doi.org/10.3390/polym14122366

Korkees, F., Aldrees, A., Barsoum, I., Alshammari, D. 2021. Functionalised graphene effect on the mechanical and thermal properties of recycled PA6/PA6, 6 blends. J. Compos. Mater. 55: 2211–2224. doi.org/10.1177/0021998321996418

Kunchimon, S.Z., Tausif, M., Goswami, P., Cheung, V. 2019. Polyamide 6 and thermoplastic polyurethane recycled hybrid fibres via twin-screw melt extrusion. J. Polym. Res. 26: 162. doi.org/10.1007/s10965-019-1823-y

Lin, X., Qian, Q., Xiao, L., Chen, Q., Huang, Q., Zhang, H. 2014. Influence of reactive compatibilizer on the morphology, rheological, and mechanical properties of recycled poly (ethylene terephthalate)/polyamide 6 blends. J. Macromol. Sci. B 53: 1543–1552. doi.org/10.1080/00222348.2014.935824

Nuretdinov, R. 2017. Lifecycle of nylon.

Srithep, Y., Javadi, A., Pilla, S., Turng, L.S., Gong, S., Clemons, C., Peng, J. 2011. Processing and characterization of recycled poly (ethylene terephthalate) blends with chain extenders, thermoplastic elastomer, and/or poly (butylene adipate-co-terephthalate). Polym. Eng. Sci. 51: 1023–1032. doi.org/10.1002/pen.21856

Sun, M., Huang, S., Yu, M., Han, K. 2021. Toughening modification of polylactic acid by thermoplastic silicone polyurethane elastomer. Polymers 13: 1953. doi.org/10.3390/polym13121953

สมบัติเชิงกลและความร้อนของพอลิเมอร์คอมโพสิต พอลิแลกติกแอซิด/พอลิคีโตน/เบนโทไนต์

Mechanical and thermal properties of polylactic acid/polyketone/bentonite composite

ธิดาวรรณ สิทธิมาตร, อำนวย ลาภเกษมสุข*

Thidawan Sittimad, Amnouy Larpkasemsuk*

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี, ปทุมธานี 12110 ประเทศไทย

Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Thanyaburi, Pathum Thani 12110, Thailand

*Corresponding author. E-mail address: amnouy.l@en.rmutt.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาสมบัติเชิงกลและสมบัติทางความร้อนของพอลิเมอร์คอมโพสิตพอลิแลกติกแอซิด/พอลิคีโตน/เบนโทไนต์ (PLA/PK/BN) เพื่อแก้ไขข้อจำกัดด้านความเปราะและความทนความร้อนต่ำของ PLA โดยเตรียมพอลิเมอร์ผสม PLA/PK ที่อัตราส่วน 80/20 (wt.%) และเติม BN ปริมาณ 1 และ 5 phr ผ่านกระบวนการอัดรีดสกรูคู่และขึ้นรูปด้วยเครื่องฉีด ผลการทดลองพบว่า ความไม่เข้ากันระหว่างเฟสของ PLA และ PK ส่งผลให้ค่าความทนแรงดึงและร้อยละการยืดตัว ณ จุดขาดลดลง อย่างไรก็ตาม การเติม PK ช่วยให้ค่าความทนแรงกระแทกเพิ่มขึ้นเป็น 24.89 J/m การเติม BN ปริมาณ 1 phr ส่งผลให้ระดับความเป็นผลึก (χ_c) เพิ่มขึ้นจากร้อยละ 10.97 เป็นร้อยละ 15.88 ขณะที่การเติม BN ปริมาณ 5 phr ส่งผลให้ยังส์มอดูลัสเพิ่มขึ้นประมาณร้อยละ 1.57 เมื่อเทียบกับ PLA/PK และทำให้อุณหภูมิอ่อนตัวไวแคตเพิ่มขึ้นจนมีค่าสูงสุดที่ 57.89 °C เมื่อเทียบกับ PLA บริสุทธิ์ แสดงให้เห็นว่าการเติม BN สามารถปรับปรุงสมบัติทางความร้อนและพฤติกรรมการเกิดผลึกของระบบ PLA/PK ได้ อย่างไรก็ตาม การปรับปรุงสมบัติเชิงกลยังอยู่ในระดับจำกัด ซึ่งสอดคล้องกับวัตถุประสงค์ของงานวิจัยที่มุ่งศึกษาบทบาทของ BN ต่อสมบัติของพอลิเมอร์ผสม

คำสำคัญ: พอลิเมอร์คอมโพสิต, เบนโทไนต์, พอลิคีโตน, พอลิแลกติกแอซิด

Abstract

This study investigates the mechanical and thermal properties of polylactic acid/polyketone/bentonite (PLA/PK/BN) polymer composites to address the inherent brittleness and low heat resistance of PLA. PLA/PK blends were prepared at a ratio of 80/20 (wt.%), and bentonite (BN) was incorporated at loadings of 1 and 5 phr using a twin-screw extrusion process followed by injection molding. The results showed that immiscibility between the PLA and PK phases led to a reduction in tensile strength and elongation at break. However, the incorporation of PK increased the impact strength to 24.89 J/m. The addition of BN at 1 phr increased the degree of crystallinity (χ_c) from 10.97% to 15.88%, while the incorporation of BN at 5 phr resulted in an approximately 1.57% increase in Young's modulus compared to the PLA/PK blend. In addition, the Vicat softening temperature reached a maximum value of 57.89°C compared to neat PLA. These results demonstrate that the incorporation of bentonite can effectively improve the thermal properties and crystallization behavior of the PLA/PK system. Nevertheless, the improvement in mechanical properties remains limited, which is consistent with the objective of this study to evaluate the role of bentonite on the properties of polymer blends.

Keywords: Bentonite, Polyketone, Polylactic acid, Polymer composites

คำนำ

ปัจจุบันปริมาณการใช้พลาสติกเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วตามการเติบโตของภาคอุตสาหกรรมและการบริโภคของประชากรโลก โดยพลาสติกส่วนใหญ่ที่ใช้งานยังคงผลิตจากปิโตรเลียม ซึ่งย่อยสลายได้ยากในธรรมชาติ ส่งผลให้เกิดปัญหาขยะพลาสติกสะสมในสิ่งแวดล้อมจำนวนมาก แนวทางการลดปัญหานี้ จึงมีการมุ่งพัฒนาพลาสติกที่ย่อยสลายได้ทางชีวภาพ (Biodegradable plastics) เน้นให้สามารถย่อยสลายได้ในธรรมชาติ

พอลิแลกติกแอซิด (Polylactic acid, PLA) เป็นพลาสติกชีวภาพที่ได้รับความสนใจอย่างกว้างขวาง เนื่องจากผลิตจากทรัพยากรหมุนเวียน เช่น แป้งข้าวโพด อ้อย และมันสำปะหลัง และสามารถย่อยสลายได้ภายใต้เงื่อนไขที่เหมาะสม อย่างไรก็ตาม PLA มีข้อจำกัดด้านสมบัติ ได้แก่ ความเปราะ การยืดตัวต่ำ และความทนความร้อนต่ำ เมื่อเปรียบเทียบกับเทอร์โมพลาสติกจากปิโตรเลียม (Li et al., 2023) ส่งผลให้ PLA ไม่สามารถตอบสนองการใช้งานด้านวิศวกรรมบางประเภทได้ จึงมีความจำเป็นต้องปรับปรุงสมบัติของ PLA ผ่านแนวทางต่าง ๆ เช่น การเติมพลาสติไซเซอร์ การเติมสารปรับสมบัติ การทำพอลิเมอร์ผสม หรือการเตรียมเป็นพอลิเมอร์คอมโพสิตและนาโนคอมโพสิต

พอลิคีโตน (Polyketone, PK) เป็นเทอร์โมพลาสติกวิศวกรรมที่มีหมู่คาร์บอนิล (–CO–) เป็นหน่วยซ้ำในโซ่พอลิเมอร์ มีสมบัติเชิงกล เช่น ความทนแรงดึง ความแข็ง และความทนแรงกระแทกสูง อีกทั้งยังผลิตจากก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) และโอเลฟิน ซึ่งช่วยลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกและส่งเสริมความยั่งยืนทางอุตสาหกรรม (Xiao et al., 2024) การผสม PLA กับ PK จึงเป็นวัสดุทางเลือกที่ดีในการเสริมสมบัติของ PLA อย่างไรก็ตาม ความแตกต่างของโครงสร้างโมเลกุลและความมีขั้วของ PLA และ PK อาจทำให้เกิดการแยกเฟสและการกระจายตัวของเฟสไม่สม่ำเสมอ ซึ่งส่งผลให้สมบัติเชิงกล เช่น ความทนแรงดึง และการยืดตัว ณ จุดขาด ของพอลิเมอร์ผสมลดลงได้ (Yang et al., 2018)

งานวิจัยนี้มุ่งปรับปรุงสมบัติของ PLA โดยการผสมกับ PK ทั้งนี้จากการทดลองที่ผ่านมา (Sittimat and Larpkasemsuk, 2025) พบว่าที่อัตราส่วน 80/20 wt.% เนื่องจากสามารถเพิ่มความเหนียวและความทนแรงกระแทกของ PLA ได้ โดย PLA ยังคงแสดงพฤติกรรมเป็นเฟสหลัก โดยไม่ใช้สารเพิ่มความเข้ากัน แต่เลือกใช้เบนโทไนต์ (BN) เป็นฟิลเลอร์อนินทรีย์ เนื่องจากใส่ในปริมาณน้อยแต่มีประสิทธิภาพสูงในการเสริมแรง และเหมาะสมต่อการประยุกต์ใช้ในวัสดุพอลิเมอร์ โดยเลือกเติม BN ในปริมาณต่ำ 1 phr และปริมาณสูง 5 phr เพื่อใช้เป็นแนวทางในการศึกษาเบื้องต้น นอกจากนี้ BN ยังสามารถทำหน้าที่เป็นสารก่อผลึกในระบบพอลิเมอร์ชีวภาพ เช่น PLA ซึ่งมีแนวโน้มส่งผลต่อพฤติกรรมการตกผลึกและสมบัติทางความร้อน ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงศึกษาผลของการเติม BN ต่อสมบัติเชิงกลและสมบัติทางความร้อนของระบบพอลิเมอร์ผสม PLA/PK เพื่อกำหนดอัตราส่วนผสมที่เหมาะสม และปรับปรุงสมรรถนะการใช้งาน PLA ให้สูงขึ้น

อุปกรณ์และวิธีการ

วัตถุดิบ

วัตถุดิบที่ใช้ในการทดลองประกอบไปด้วย PLA เกรด 4043D จากบริษัท NatureWorks LLC จำกัด ประเทศสหรัฐอเมริก, PK เกรด M330F จากบริษัท Hyosung Chemical ประเทศเกาหลีใต้, เบนโทไนต์ (Bentonite, BN) ชื่อทางการค้าคือ BENTOLITE H จากบริษัท BYK-Chemie GmbH ประเทศเยอรมัน

การเตรียมพอลิเมอร์คอมโพสิต

การเตรียมพอลิเมอร์คอมโพสิต PLA/PK/BN เตรียมโดยนำ PLA ที่ผ่านการอบที่อุณหภูมิ 80°C เป็นเวลา 24 hr PK และ เบนโทไนต์ (BN) อบที่อุณหภูมิ 80°C/4 hr มาผสมในสัดส่วน PLA/PK/BN เท่ากับ 100/0/0, 0/100/0, 80/20/1 และ 80/20/5 (wt.% with phr BN) จากนั้นนำมาหลอมผสมด้วยเครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่ (Twin screw-extruder LabTech LTE-20-32) โดยใช้อุณหภูมิการหลอม 210 ถึง 230°C ความเร็วรอบของสกรูให้คงที่ 50 rpm เส้นพอลิเมอร์ที่ได้จะถูกดึงผ่านอ่างน้ำเพื่อทำให้เย็นตัว จากนั้นจึงตัดให้เป็นเม็ดและนำไปขึ้นรูปเป็นชิ้นทดสอบด้วยเครื่องฉีด (FANUC ROBOSHOT S-2000) โดยใช้อุณหภูมิการฉีดอยู่ในช่วง 190 ถึง 230°C ความเร็วรอบสกรู 70 rpm และแรงดันฉีด 700 bar

การทดสอบสมบัติเชิงกล

ทดสอบความทนแรงกระแทกแบบไอซอดที่มีรอยบาก (Notched Izod impact strength) ตามมาตรฐาน ASTM D256 ด้วยเครื่องทดสอบความทนแรงกระแทก (ceast 6542-8331) ขนาดชิ้นทดสอบ 63.5 × 12.7 × 3 mm (ยาว x กว้าง x หนา) แบบมีรอยบากตรงกลางชิ้นทดสอบทำมุม 45º ความลึกรอยบาก 2.54 mm ทดสอบด้วยค้อนขนาด 2 J

ทดสอบสมบัติด้านความทนแรงดึง (Tensile properties) ตามมาตรฐาน ASTM D638 (type I) ด้วยเครื่องทดสอบยูนิเวอร์แซล (Hounsfield H 50 KS) ชิ้นทดสอบรูปดัมเบลล์มีระยะดึง (Gauge length) 50 mm อัตราการดึงยืดคงที่ 50 mm/min และโหลดเซลล์ (Load cell) 25 kN

การทดสอบสมบัติทางความร้อน

ทดสอบหาอุณหภูมิอ่อนตัวไวแคต (Vicat softening temperature, VST) ตามมาตรฐาน ASTM D1525 (type A) ด้วยเครื่องทดสอบอุณหภูมิอ่อนตัวไวแคต (Ceast, HDT Vicat 6911) โดยเตรียมชิ้นทดสอบขนาด (12×12×3) mm (ยาว×กว้าง×หนา) อัตราการเพิ่มอุณหภูมิเท่ากับ 50.0±0.2°C/hr ใช้น้ำมันซิลิโคนเป็นตัวกลางในการถ่ายเทความร้อน อุณหภูมิเริ่มต้นทดสอบเท่ากับ 25°C ถึง 200°C น้ำหนักกด 50 N บันทึกอุณหภูมิที่หัวกดทดสอบกดลงบนผิวชิ้นงานลึกลงไปเป็นระยะ 1 mm

ทดสอบสมบัติทางความร้อนด้วยเครื่องดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิงแคลอริมิเตอร์ (Differential scanning calorimeter, DSC) (DSC 3+ STAR System) โดยนำชิ้นทดสอบประมาณ 8 mg วางบนจานอะลูมิเนียมแล้วปิดผนึก ทำการทดสอบภายใต้บรรยากาศก๊าซไนโตรเจน ในช่วงอุณหภูมิ 25 ถึง 250°C โดยเริ่มให้ความร้อนด้วยอัตราการเพิ่มอุณหภูมิ 10°C/min และอุณหภูมิทดสอบสูงสุด 250°C ด้วยอัตราเร็ว 10°C/min จนถึง 250°C คงอุณหภูมิที่ภาวะนี้นาน 5 min จากนั้นเริ่มการทดสอบซ้ำเป็นครั้งที่ 2 โดยใช้สภาวะเดิม ผลการทดสอบแสดงอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (T_g), อุณหภูมิการหลอมเหลว (T_m), อุณหภูมิการเกิดผลึก (T_c), เอนทัลปีของการหลอมเหลว (ΔH_m) เอนทัลปีของการเกิดผลึกที่อุณหภูมิต่ำ (ΔH_{cc}), เอนทัลปีของการเกิดผลึก (ΔH_c) และคำนวณระดับความเป็นผลึก (χ_c) ได้จาก Equation (1):

$$\chi_c\,(\%) = (\Delta H_m / (\Delta H_{f100} \times Wp)) \times 100 \qquad (1)$$

Where χ_c (%) (Equation 2) is the degree of crystallinity of PLA, ΔH_m is the melting enthalpy of the sample (J/g), and ΔH_{f100} is the enthalpy of 100% crystalline PLA, taken as 93 J/g, and W_f is the weight fraction of the filler in the polymer blend. (Farias et al., 2024)

$$\chi_c\,(\%) = (\Delta H_m \times 100) / (\Delta H_{f100} \times (1 - W_f)) \quad (2)$$

Where ΔH_{f100} is the enthalpy of 100% crystalline PLA, taken as 93 J/g, and W_f is the weight fraction of the filler in the polymer blend (Phetwarotai et al., 2016)

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

ความทนแรงกระแทก

จาก Table 1 และ Fig.1A ผลการทดสอบพบว่าค่าความทนแรงกระแทกของ PLA, PK และพอลิเมอร์ผสม PLA/PK ที่ไม่ได้ใส่ BN พบว่า PLA มีค่าความทนแรงกระแทกเท่ากับ 22.52 J/m ซึ่งสอดคล้องกับลักษณะของ PLA ที่มีพฤติกรรมเปราะและดูดซับพลังงานจากแรงกระแทกได้น้อย (Tang and Jeong, 2022) การใส่ PK ในเมทริกซ์ของ PLA ที่ปริมาณ 20 wt.% ส่งผลทำให้ค่าความทนแรงกระแทกเพิ่มขึ้นสูงกว่า PLA บริสุทธิ์เล็กน้อย คือเพิ่มขึ้นเท่ากับ 24.89 J/m ทั้งนี้คาดว่าเป็นผลมาจาก PK ที่ไม่สามารถกระจายตัวได้อย่างสม่ำเสมอในเมทริกซ์ของ PLA และกลายเป็นความบกพร่องที่เกิดขึ้นภายในชิ้นทดสอบประกอบกับ PLA และ PK มีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างเฟสต่ำ (incompatible blend) จึงส่งผลให้ความสามารถในการส่งผ่านความเค้น (stress transfer) จาก PLA ไปยัง PK เกิดได้น้อย ดังนั้นจึงทำให้ความสามารถในการดูดซับพลังงานของการกระแทกได้น้อยลง อย่างไรก็ตามการที่พอลิเมอร์ผสมมีค่าความทนแรงกระแทกสูงกว่า PLA เล็กน้อย อาจเป็นผลมาจากเฟสของ PK ในพอลิเมอร์ผสมที่มีค่าความทนแรงกระแทกสูงกว่า PLA มากและเมื่อเติม BN ปริมาณ 1 และ 5 phr ตามลำดับ พบว่าค่าความทนแรงกระแทกของพอลิเมอร์คอมโพสิต มีค่าลดลงเท่ากับ 15.11 (J/m) และ 12.44 (J/m) ตามลำดับ คาดว่าเป็นผลมาจากอนุภาคของ BN มีการกระจายตัวในเมทริกซ์ได้ไม่ดี และเกิดการเกาะกลุ่ม (Agglomerates) (Mapossa et al., 2023) นอกจากนี้ทั้งเมทริกซ์ PLA/PK และ อนุภาค BN ยังมีความไม่เข้ากัน ส่งผลให้อินเตอร์เฟสระหว่างเมทริกซ์และอนุภาคมีความอ่อนแอ ทำให้เกิดการแตกหักแบบเปราะง่ายขึ้น เมื่อเทียบกับ PLA และ PK บริสุทธิ์

ความทนแรงดึง ยังส์มอดูลัส และร้อยละการยืดตัว ณ จุดขาด

Table 1 และ Fig. 1B–1D พบว่า PLA และ PK มีค่าทนแรงดึง (TS) ใกล้เคียงกัน คือ 66.31 และ 66.30 MPa ตามลำดับ อย่างไรก็ตามเมื่อผสม PLA กับ PK ที่อัตราส่วน 80/20 wt.% พบว่าค่าความทนแรงดึงลดลง โดยมีค่าเท่ากับ 55.37 MPa ซึ่งเป็นผลมาจากความไม่เข้ากันของ PLA และ PK ทำให้เกิดการแยกเฟส โดยเฟส PK กระจายตัวในเมทริกซ์ PLA และมีแรงยึดเหนี่ยวที่บริเวณอินเตอร์เฟสต่ำ ส่งผลให้ประสิทธิภาพในการถ่ายโอนความเค้นจากเมทริกซ์ PLA ไปยังเฟส PK ลดลง ดังนั้นเมื่อได้รับแรงดึงจึงเกิดการแยกเฟสที่บริเวณอินเตอร์เฟสได้ง่าย (Oksiuta et al., 2020) ค่ายังส์มอดูลัสของพอลิเมอร์ผสม PLA/PK เท่ากับ 2920 MPa ซึ่งต่ำกว่า PLA บริสุทธิ์ (3260 MPa) เล็กน้อยแต่ยังสูงกว่า PK บริสุทธิ์ (1740 MPa) คาดว่าเป็นผลมาจากการเติม PK ทำให้เมทริกซ์ PLA มีความยืดหยุ่นเพิ่มขึ้นบางส่วน เนื่องจากโครงสร้างสายโซ่ของ PK สามารถแทรกตัวและรบกวนทำให้เกิดระยะห่างระหว่างโซ่โมเลกุล PLA ทำให้ความแข็ง (stiffness) ลดลง อีกทั้งเฟสของ PLA และ PK อาจเกิดการพันกันของสายโซ่ในระดับหนึ่ง พบว่า PLA/PK มีค่าการยืดตัวเท่ากับ 2.68% ซึ่งต่ำกว่า PLA บริสุทธิ์มาก ทั้งนี้เป็นผลมาจากความไม่เข้ากันของคู่พอลิเมอร์ผสมทำให้โครงสร้างมีการแยกเฟส

เมื่อเติม BN ปริมาณ 1 phr ใน PLA/PK พบว่าค่าความทนแรงดึงมีค่า 55.37 MPa ขณะที่ยังส์มอดูลัสลดลงเล็กน้อยเหลือ 2817.14 MPa และ ค่าการยืดตัวเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเป็น 2.65% ทั้งนี้เนื่องจาก BN ที่ปริมาณต่ำยังไม่เพียงพอในการเสริมแรงให้เมทริกซ์ เพราะอนุภาค BN อาจไม่สามารถกระจายตัวได้อย่างสมบูรณ์แต่เมื่อเพิ่มปริมาณ BN เป็น 5 phr พบว่าค่าความทนแรงดึงมีค่าลดลง คือมีค่าเท่ากับ 52.53 MPa ขณะที่ยังส์มอดูลัสเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเป็น 2965.71 MPa และค่าการยืดตัวมีค่าลดลงเท่ากับ 2.62% ซึ่งคาดว่าเป็นผลมาจากปริมาณ BN ที่สูงขึ้น ส่งผลให้วัสดุจะมีสัดส่วนของเฟสแข็งในระบบมากขึ้น และยังไปขัดขวางการเคลื่อนไหวของโมเลกุลเมื่อได้รับแรงกระทำ

Table 1 Mechanical properties of PLA, PK, PLA/PK (80/20 wt.%), and PLA/PK/BN containing 1 and 5 phr of BN.

PLA/PK/BN (wt.%) with phr BN)	Impact strength (J/m)	Tensile strength (MPa)	Young's modulus (MPa)	Elongation at break (%)
100/0/0	22.52±1.40	66.31±0.65	3260.00±43.97	7.23±1.85
80/20/0	24.89±1.37	55.37±0.72	2920.00±87.56	2.68±0.13
80/20/1	15.11±4.30	55.37±1.24	2817.14±67.51	2.65±0.71
80/20/5	12.44±2.36	52.53±0.49	2965.71±61.06	2.62±0.31
0/100/0	81.78±4.96	66.30±0.56	1740.00±17.32	288.00±1.73

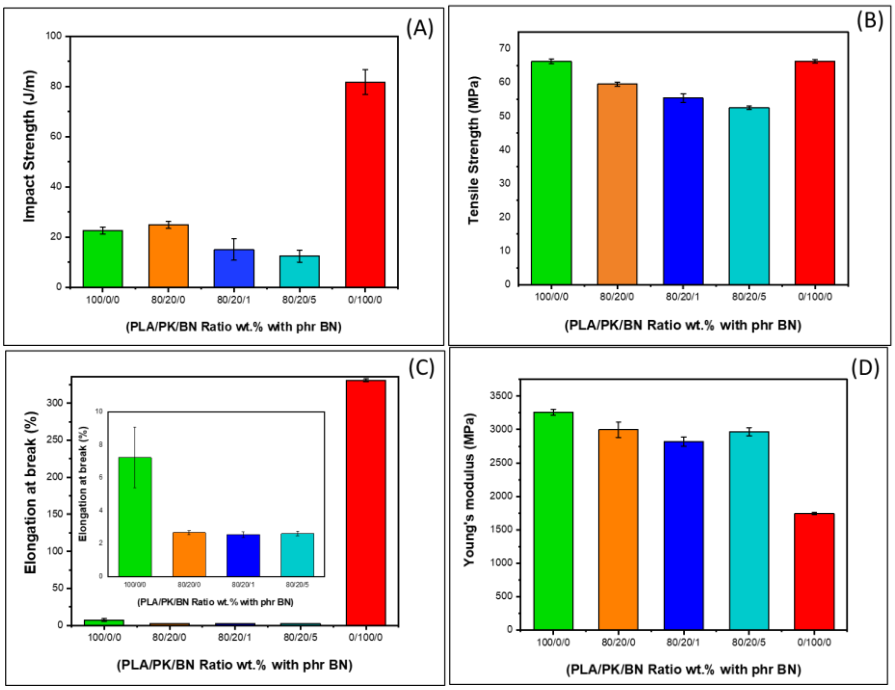


Fig. 1 Mechanical properties of PLA, PK, PLA/PK (80/20 wt.%), and PLA/PK/BN wt.% with 1 and 5 phr BN in terms of (A) Impact strength, (B) Tensile strength, (C) Elongation at break, and (D) Young's modulus.

สมบัติทางความร้อน

Table 2 และ Fig. 2 ซึ่งแสดง DSC เทอร์โมแกรมของ PLA, PK และพอลิเมอร์ผสม PLA/PK ที่อัตราส่วน 80/20 wt.% และพอลิเมอร์คอมโพสิต PLA/PK/BN ที่มีการเติม BN ในปริมาณ 1 และ 5 phr ในขั้นตอนการเย็นตัวครั้งที่ 1 (first cooling scan) พบว่า PLA ไม่ปรากฏพีคอุณหภูมิการเกิดผลึก (T_c) อย่างชัดเจน ซึ่งเป็นไปได้ว่า PLA ไม่สามารถจัดเรียงตัวกลับเป็นผลึกได้ภายในช่วงอุณหภูมิที่ทำการศึกษา (PLA มีพฤติกรรมการเกิดผลึกที่ช้า) หรืออาจมีการเกิดผลึกบางส่วนในขั้นตอนก่อนหน้านี้ไปแล้ว ทำให้ไม่เกิดพีค T_c ที่เด่นชัด (Oksiuta et al., 2020) และมีเปอร์เซ็นต์การเกิดผลึก (χ_c) เท่ากับ 32.08% ในขณะที่ PK บริสุทธิ์แสดงพีค T_c ที่อุณหภูมิ 176.24°C แสดงให้เห็นว่า PK มีความสามารถในการจัดเรียงตัวเป็นผลึกได้ที่อุณหภูมิสูง และมีเปอร์เซ็นต์การเกิดผลึก 31.87% เมื่อพิจารณาพอลิเมอร์ผสม PLA/PK พบพีค T_c ที่อุณหภูมิ 109.14°C ซึ่งต่ำกว่า T_c ของ PK บริสุทธิ์ ค่า T_c ดังกล่าวคาดว่าเป็นอุณหภูมิการเกิดผลึกของเฟส PLA ที่ได้รับอิทธิพลจากการมีอยู่ของเฟส PK ในระบบพอลิเมอร์ผสมที่มีความไม่เข้ากันทางเทอร์โมไดนามิก (Immiscibility) ทำให้ PLA และ PK เกิดการแยกเฟส (Phase separation) โดยเฟส PK กระจายตัวอยู่ภายในเมทริกซ์ PLA ซึ่งจะทำหน้าที่เป็นสารเหนี่ยวนำการเกิดผลึกของ PLA เกิดผลึกได้ที่อุณหภูมิสูงขึ้นแต่ปริมาณของผลึก PLA ลดลงเท่ากับ 10.97% (Arash et al., 2023) และเมื่อเตรียมเป็นพอลิเมอร์คอมโพสิต PLA/PK/BN ที่มีการเติม BN ในปริมาณ 1 และ 5 phr พบอุณหภูมิ T_c เท่ากับ 168.29 และ 148.32°C ตามลำดับ ซึ่งสูงกว่า T_c ของพอลิเมอร์ผสม PLA/PK อย่างชัดเจน การเพิ่มขึ้นของ T_c เมื่อเติม BN 1 phr นี้ แสดงให้เห็นว่า BN สามารถทำหน้าที่เป็นสารก่อผลึก (nucleating agent) ใน PLA ได้ ส่งผลให้การเกิดผลึกเริ่มต้นที่อุณหภูมิสูงขึ้น และมีปริมาณการเกิดผลึกเพิ่มขึ้น (15.88%) แต่เมื่อเพิ่มปริมาณ BN เป็น 5 phr พบว่าอุณหภูมิ T_c ลดลงมาอยู่ที่ 148.32°C ซึ่งต่ำกว่าการเติม BN ที่ 1 phr คาดว่าเป็นผลมาจากปริมาณ BN ที่สูงขึ้น ทำให้เกิดการเกาะกลุ่มของอนุภาคและมีการกระจายตัวต่ำ จึงสามารถขัดขวางการเคลื่อนที่ของสายโซ่โมเลกุลของพอลิเมอร์ในการจัดเรียงโมเลกุลเป็นผลึก

เมื่อพิจารณาอุณหภูมิหลอมผลึก (T_m) ที่ได้จากขั้นตอนการเย็นตัวครั้งที่ 2 พบว่าอุณหภูมิการหลอมตัวของ PLA เท่ากับ 148.08°C PK มีอุณหภูมิหลอมตัวเท่ากับ 217.13°C และ PLA/PK/BN ทุกอัตราส่วนมีอุณหภูมิหลอมตัวอยู่ระหว่าง 148.27-148.50°C ซึ่งไม่แตกต่างจากอุณหภูมิการหลอมตัวของ PLA อย่างมีนัยสำคัญ

Table 2 Thermal properties determined by Differential Scanning Calorimetry (DSC) of PLA/PK blends, PLA/PK (80/20 wt.%), and PLA/PK/BN composites with BN contents of 1 and 5 phr.

PLA/PK/BN (wt.%) with phr BN)	T_{cPLA} (°C)	T_{gPLA} (°C)	T_{ccPLA} (°C)	T_{mPLA} (°C)	$\chi_{c,\ PLA}$ (%)
100/0/0	-	59.46	-	148.08	32.08
80/20/0	109.14	59.89	124.10	148.50	10.97
80/20/1	168.29	58.79	123.46	148.32	15.88
80/20/5	148.32	58.39	123.47	148.27	17.70
0/100/0	176.24	-	-	217.13	31.87

Note: T_c is the crystallization temperature, T_g is the glass transition temperature, T_{cc} is the cold crystallization temperature, T_m is the melting temperature, and χ_c,PLA represents the degree of crystallinity of PLA, calculated from DSC data.

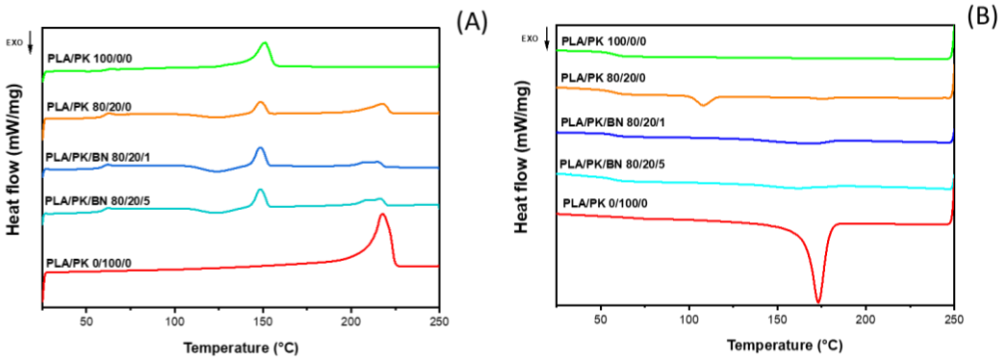


Fig. 2 Representative DSC thermograms of PLA/PK, PLA/PK 80/20, and PLA/PK/BNH containing 1 and 5 phr of bentonite, obtained from (A) the second heating scan and (B) the first cooling scan.

อุณหภูมิอ่อนตัวไวแคต

จาก Table 3 พบว่าอุณหภูมิอ่อนตัวไวแคต (VST) ของ PLA มีค่าเท่ากับ 55.33°C และ PK มีค่าเท่ากับ 189.27 °C ส่วนของพอลิเมอร์คอมโพสิตทุกอัตราส่วน มีอุณหภูมิอ่อนตัวไวแคตอยู่ในช่วง 57.27–57.89°C ซึ่งสูงกว่า PLA ประมาณ 1.95–2.56°C ทั้งนี้เนื่องจาก PK มีอุณหภูมิอ่อนตัวไวแคตสูงกว่า PLA มาก ดังนั้นการเติม PK จึงส่งผลให้อุณหภูมิอ่อนตัวไวแคตของพอลิเมอร์ผสมมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น

Table 3 Vicat softening temperatures of PLA/PK, PLA/PK 80/20(wt.%), and PLA/PK/BN (wt.% with phr BN).

PLA/PK/BN (wt.%) with phr BN)	VST (°C)
100/0/0	55.33 ±1.78
80/20/0	57.27 ± 1.66
80/20/1	57.60 ±0.35
80/20/5	57.89±0.63
0/100/0	189.27±1.42

สรุป

จากผลการทดลองพบว่า การผสม PLA กับ PK ที่อัตราส่วน 80/20 wt.% ช่วยเพิ่มความทนความร้อนของวัสดุได้เล็กน้อย แต่ยังเกิดการแยกเฟส ทำให้ค่าความทนแรงดึงและการยืดตัวลดลง แต่ความทนแรงกระแทกจะเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยเป็น 24.89 J/m การเติม BN ในปริมาณต่ำ 1 phr ช่วยเพิ่มการเกิดผลึกของ PLA ได้อย่างมีประสิทธิภาพ ทำให้อุณหภูมิการเกิดผลึกและระดับความเป็นผลึกสูงขึ้นเป็น 15.88% ในทางกลับกัน การเติม BN ปริมาณสูง 5 phr ทำให้อนุภาคเกิดการเกาะกลุ่ม ส่งผลให้ยังส์มอดูลัสของพอลิเมอร์คอมโพสิต PLA/PK/BN เพิ่มขึ้นประมาณ 1.57% สะท้อนถึงความสามารถในการต้านการเปลี่ยนแปลงรูปร่างแข็งของวัสดุที่เพิ่มขึ้นเล็กน้อย ขณะเดียวกันอุณหภูมิอ่อนตัวไวแคตเพิ่มขึ้นเป็น 57.89°C ซึ่งมีค่าสูงกว่า PLA บริสุทธิ์ แสดงให้เห็นถึงการปรับปรุงสมบัติการทนความร้อนของวัสดุ

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมวัสดุและโลหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรีที่สนับสนุนสถานที่ดำเนินงานวิจัย และขอขอบคุณ ดร.พศวรรธน์ ชัยวุฒินันท์ สังกัดสำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ (สวทช.) ที่เอื้อเฟื้อวัตถุดิบและเครื่องมือในการผสมและแปรรูป

เอกสารอ้างอิง

Arash, S., Akbari, B., Ghaleb, S., Kaffashi, B., Marouf, B.T. 2023. Preparation of PLA–TPU–nanoclay composites and characterization of their morphological, mechanical, and shape memory properties. J. Mech. Behav. Biomed. Mater. 139: 105642. doi.org/10.1016/j.jmbbm.2023.105642

Farias, N.C., Coudert, L., Devine, D., Abdeali, G., Pezzoli, R. 2024. Repeated mechanical recycling of biodegradable polymers: PLA exhibits less deterioration than PBAT/PLA blend. Curr. Res. Green Sustain. Chem. 9: 100430. doi.org/10.1016/j.crgsc.2023.100430

Li, X., Lin, Y., Liu, M., Meng, L., Li, C. 2023. A review of research and application of polylactic acid composites. J. Appl. Polym. Sci. 140: e53477. doi.org/10.1002/app.53477

Mapossa, A.B., da Silva Júnior, A.H., de Oliveira, C.R.S., Mhike, W. 2023. Thermal, morphological and mechanical properties of multifunctional composites based on biodegradable polymers/bentonite clay: A review. Polymers 15: 3443. doi.org/10.3390/polym15163443

Oksiuta, Z., Jalbrzykowski, M., Mystkowska, J., Romanczuk, E., Osiecki, T. 2020. Mechanical and thermal properties of polylactide (PLA) composites modified with Mg, Fe, and polyethylene (PE) additives. Polymers 12: 2939. doi.org/10.3390/polym12122939

Phetwarotai, W., Tanrattanakul, V., Phusunti, N. 2016. Synergistic effect of nucleation and compatibilization on the polylactide and poly(butylene adipate-co-terephthalate) blend films. Chin. J. Polym. Sci. 34: 1129–1140. doi.org/10.1007/s10118-016-1830-4

Sittimad, T., Larpkasemsuk, A. 2025. Mechanical and thermal properties of polylactic acid/polyketone polymer blends. In Proceedings of the 17th National Academic Conference of Nakhon Pathom Rajabhat University. Nakhon Pathom Rajabhat University: 299–309.

Tang, F., Jeong, Y.G. 2022. Improvement in thermal stability, elastic modulus, and impact strength of poly(lactic acid) blends with modified polyketone. Polymer 257: 125281. doi.org/10.1016/j.polymer.2022.125281

Xiao, X., Zheng, H., Gao, H., Cheng, Z., Feng, C., Yang, J., Gao, H. 2024. Recent advances in synthesis of non-alternating polyketone generated by copolymerization of carbon monoxide and ethylene. Int. J. Mol. Sci. 25: 1348. doi.org/10.3390/ijms25021348

Yang, Y., Li, S.Y., Bao, R.Y., Liu, Z.Y., Yang, M.B., Tan, C.B., Yang, W. 2018. Progress in polyketone materials: Blends and composites. Polym. Int. 67: 1478–1487. doi.org/10.1002/pi.5663

การปรับปรุงพื้นผิวของพอลิเอทิลีนมวลโมเลกุลสูงพิเศษด้วยการเคลือบกราฟีนนาโนเพลตเลตร่วมกับการแช่กรดโครมิกและการฉายรังสีอิเล็กตรอนบีมเพื่อศึกษาสมบัติต้านทานการสึกหรอและสมบัติเชิงกล

Surface modification of ultra-high molecular weight polyethylene by graphene nanoplatelet coating combined with chromic acid etching and electron beam irradiation for investigation of wear resistance and mechanical properties

ธิติสรณ์ เอนกรัตน์มนตรี[a], **ดุลยพงศ์ วงศ์แสวง**[a,*], **เกวลี นิลกำแหง**[b]

Thitisorn Anekratmontre[a], Doonyapong Wongsawaeng[a,*], Kewalee Nilgumhang[b]

[a]ภาควิชาวิศวกรรมนิวเคลียร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย กรุงเทพฯ 10330

[b]สถาบันเทคโนโลยีนิวเคลียร์แห่งชาติ (องค์การมหาชน) นครนายก 26120

[a]Department of Nuclear Engineering, Faculty of Engineering, Chulalongkorn University, Bangkok 10330, Thailand

[b]Thailand Institute of Nuclear Technology (Public Organization), Nakhon Nayok 26120, Thailand

*Corresponding author. E-mail address: doonyapong.w@chula.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาผลของการแช่กรดโครมิก การเคลือบกราฟีนนาโนเพลตเลต (GNPs) และการฉายรังสีอิเล็กตรอนบีมต่อสมบัติพื้นผิว สมบัติการต้านทานต่อการสึกหรอ และสมบัติเชิงกลของพอลิเอทิลีนมวลโมเลกุลสูงพิเศษ (UHMWPE) ตัวอย่างถูกแช่กรดเป็นเวลา 5, 10 และ 15 นาที ก่อนการเคลือบ GNPs และการฉายรังสีที่ระดับ 50, 100 และ 150 kGy ผลการวิเคราะห์ภาพ SEM พบว่าความหยาบผิวเพิ่มขึ้นตามเวลาแช่กรด โดยสภาวะ 5 นาทีให้โครงสร้างผิวที่เอื้อต่อการยึดเกาะของ GNPs มากที่สุด การทดสอบการสึกหรอพบว่าการฉายรังสี 100 kGy ให้ค่าความเสียดทานต่ำที่สุด โดยเฉพาะเมื่อใช้ร่วมกับการแช่กรด 5 นาที ซึ่งแสดงถึงระดับ Cross-linking ที่เหมาะสม ขณะที่ระดับรังสีต่ำ (50 kGy) หรือสูงเกินไป (150 kGy) ทำให้สมบัติการสึกหรอลดลง นอกจากนี้ Tensile strength และ Tensile modulus มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณรังสี สรุปได้ว่าการแช่กรดโครมิก 5 นาทีร่วมกับการฉายรังสี 100 kGy เป็นสภาวะที่เหมาะสมที่สุดในการเพิ่มสมบัติทาง Tribology และสมบัติเชิงกลของ UHMWPE

คำสำคัญ: การแช่กรดโครมิก, การฉายรังสีอิเล็กตรอนบีม, กราฟีนนาโนเพลตเลต, ความต้านทานการสึกหรอ, พอลิเอทิลีนมวลโมเลกุลสูงพิเศษ

Abstract

This study investigates the effects of chromic acid etching, graphene nanoplatelet (GNP) coating, and electron beam irradiation on the surface characteristics, wear resistance, and mechanical properties of ultra-high molecular weight polyethylene (UHMWPE). Samples were etched for 5, 10, and 15 min prior to GNP coating and subsequently irradiated at 50, 100, and 150 kGy. SEM analysis revealed a progressive increase in surface roughness with longer etching times, with the 5-min condition providing the most favorable morphology for GNP adhesion. Wear testing demonstrated that irradiation at 100 kGy yielded the lowest coefficient of friction, particularly when combined with the 5-min etching condition, indicating an optimal balance of cross-linking and surface stability. In contrast, insufficient (50 kGy) or excessive irradiation (150 kGy) resulted in increased friction. Mechanical testing further showed that tensile strength and tensile modulus generally increased with rising irradiation dose. Overall, chromic acid etching for 5 min combined with 100 kGy irradiation was identified as the optimal condition for enhancing the tribological and mechanical performance of UHMWPE.

Keywords: Chromic acid etching, Electron beam irradiation, Graphene nanoplatelets, UHMWPE, Wear resistance

คำนำ

พอลิเอทิลีนมวลโมเลกุลสูงพิเศษ (Ultra-High Molecular Weight Polyethylene: UHMWPE) เป็นพอลิเมอร์วิศวกรรมที่ได้รับการยอมรับอย่างกว้างขวางในด้านความทนทานต่อการสึกหรอ ความทนต่อแรงกระแทก และเสถียรภาพทางเคมีที่ยอดเยี่ยม คุณสมบัติเหล่านี้ทำให้วัสดุชนิดนี้ถูกนำไปใช้อย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมหนัก เช่น ชิ้นส่วนระบบลำเลียงและอุปกรณ์ที่เผชิญแรงเสียดทานสูง รวมถึงด้านการแพทย์ เช่น ในการผลิตข้อเทียมและอุปกรณ์ฝังในร่างกาย (Mateos-Timoneda, 2009) อย่างไรก็ตาม พื้นผิวของพอลิเอทิลีนมวลโมเลกุลสูงพิเศษยังคงมีพลังงานผิวต่ำและมีความเฉื่อยทางเคมี ทำให้เกิดข้อจำกัดด้านการยึดติด การเข้ากันได้ทางชีวภาพ และสมบัติการเสียดสีในบางสภาวะการใช้งาน (Liu et al., 2024) โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อใช้งานในอุตสาหกรรมหนักที่มีแรงกระแทกและแรงเสียดทานสูงร่วมกับสภาพแวดล้อมที่รุนแรง ซึ่งสามารถเร่งให้เกิดการเสื่อมสภาพที่พื้นผิวได้เร็วยิ่งขึ้น ส่งผลให้อายุการใช้งานและประสิทธิภาพโดยรวมของวัสดุลดลงอย่างมีนัยสำคัญ

เพื่อแก้ไขข้อจำกัดดังกล่าว การพัฒนากระบวนการปรับปรุงพื้นผิวของพอลิเอทิลีนมวลโมเลกุลสูงพิเศษจึงได้รับความสนใจอย่างต่อเนื่อง โดยแนวทางการปรับปรุงพื้นผิวสามารถแบ่งได้เป็นการปรับปรุงเชิงเคมีและการปรับปรุงเชิงฟิสิกส์ ในด้านการปรับปรุงเชิงเคมี หนึ่งในสารเคลือบที่ได้รับความสนใจอย่างมาก ได้แก่ กราฟีนนาโนเพลตเลต (Graphene Nanoplatelets: GNPs) ซึ่งมีโครงสร้างระดับนาโนแบบแผ่นบาง ให้ความแข็งแรงสูง และมีสมบัติหล่อลื่นเชิงของแข็ง การเคลือบ GNPs บนพื้นผิว UHMWPE มีศักยภาพในการลดแรงเสียดทาน เพิ่มความทนทานต่อการสึกหรอ และเสริมความเสถียรของวัสดุภายใต้การใช้งานที่รุนแรง อย่างไรก็ตาม ประสิทธิภาพการยึดติดของ GNPs มักขึ้นอยู่กับสภาพพื้นผิวเดิม ซึ่งมีความเรียบและพลังงานผิวต่ำตามธรรมชาติของพอลิเอทิลีน (Liu et al., 2024).

เพื่อปรับปรุงการยึดติดดังกล่าว การแช่กรดโครมิก (chromic acid etching) จึงถูกนำมาศึกษาเป็นวิธีการเตรียมพื้นผิวที่ให้ผลอย่างเด่นชัดในการเพิ่มความหยาบระดับจุลภาค งานวิจัยพบว่าสารละลายกรดโครมิกที่ใช้ดัดแปรพื้นผิว UHMWPE มักมีองค์ประกอบในอัตราส่วน $K_2Cr_2O_7$: H_2SO_4 : H_2O ประมาณ 7 : 150 : 12 โดยน้ำหนัก ซึ่งช่วยเร่งปฏิกิริยาออกซิเดชันบนพื้นผิววัสดุ ทำให้เกิดหมู่ฟังก์ชันที่สำคัญหลายชนิด ได้แก่ หมู่ไฮดรอกซิล (-OH), หมู่คาร์บอนิล (C=O) และ หมู่คาร์บอกซิล (-COOH) การเกิดหมู่ฟังก์ชันเหล่านี้ส่งผลให้พลังงานผิวเพิ่มขึ้น พร้อมทั้งช่วยสร้างความมีขั้ว (polarity) ที่เหมาะสมต่อการยึดเกาะของสารเคลือบ (Li W. et al 2016) นอกจากนี้ โครงสร้างพื้นผิวที่ถูกกัดผิวยังมีความหยาบมากขึ้น ทำให้พื้นที่ผิวเพิ่มขึ้นและเอื้อต่อการเกาะติดของแผ่น GNPs อย่างมีประสิทธิภาพ ส่งผลให้ความทนทานของสารเคลือบภายใต้สภาวะที่มีแรงเสียดทานสูงดีขึ้นตามไปด้วย

ขณะเดียวกัน การปรับปรุงเชิงฟิสิกส์ เช่น การฉายรังสีอิเล็กตรอน (Electron beam irradiation) หรือการฉายรังสีประเภทอื่น มีบทบาทสำคัญในการเพิ่มพลังงานผิวและสร้างหมู่ฟังก์ชันเพิ่มเติมบนพื้นผิว UHMWPE ซึ่งช่วยส่งเสริมการเกิดพันธะหรือแรงยึดเหนี่ยวกับสารเคลือบเชิงนาโนอย่าง GNPs การผสานวิธีการเชิงเคมี เช่น การเคลือบ GNPs และการดัดแปรพื้นผิวด้วยกรดโครมิก เข้ากับวิธีการเชิงฟิสิกส์ (Turos et al., 2009) จึงเป็นแนวทางที่ช่วยเสริมประสิทธิภาพการยึดติด ความทนทานต่อการสึกหรอ และความเสถียรของ UHMWPE ในการใช้งานระดับอุตสาหกรรมและการแพทย์ได้อย่างเด่นชัด

งานวิจัยฉบับนี้จึงมุ่งเน้นศึกษากระบวนการปรับปรุงพื้นผิวของพอลิเอทิลีนมวลโมเลกุลสูงพิเศษผ่านการเตรียมผิวด้วยกรดโครมิกที่มีระยะเวลาแช่ 5, 10 และ 15 นาที ตามด้วยการเคลือบกราฟีนนาโนเพลตเลตบนพื้นผิวที่ผ่านการดัดแปร และเสริมด้วยการปรับสภาพเชิงฟิสิกส์ผ่านการฉายรังสีอิเล็กตรอนในปริมาณ 50, 100 และ 150 kGy เพื่อประเมินผลต่อความทนทานและประสิทธิภาพของวัสดุสำหรับการใช้งานทั้งในอุตสาหกรรมหนักและด้านการแพทย์

อุปกรณ์และวิธีการ

การแช่กรดโครมิก

ตัวอย่างพอลิเอทิลีนมวลโมเลกุลสูงพิเศษ (UHMWPE) ถูกนำมาปรับสภาพพื้นผิวด้วยการแช่ในสารละลายกรดโครมิกซึ่งประกอบด้วยโพแทสเซียมไดโครเมต ($K_2Cr_2O_7$) กรดซัลฟิวริก (H_2SO_4) และน้ำในอัตราส่วน 7 : 150 : 12 โดยน้ำหนัก ณ อุณหภูมิห้อง เป็นระยะเวลา 5, 10 และ 15 นาที ตามลำดับ เพื่อศึกษาผลของระยะเวลาในการกัดผิวต่อการเกิดหมู่ฟังก์ชันออกซิเจนและการเพิ่มความหยาบระดับจุลภาคบนพื้นผิว UHMWPE หลังจากครบเวลาที่กำหนด ตัวอย่างทั้งหมดถูกล้างด้วยน้ำกลั่นหลายครั้งเพื่อลดการตกค้างของสารออกซิไดซ์และทำให้พื้นผิวมีความเสถียรพร้อมต่อการเข้าสู่ขั้นตอนการปรับปรุงพื้นผิวในลำดับถัดไป

การเคลือบพื้นผิวด้วยกราฟีนนาโนเพลตเลต (GNPs)

GNPs ที่ใช้ในการทดลองเป็นชนิดเชิงพาณิชย์เกรด AO-2 (Graphene Nanopowder: AO-2: 8 nm Flakes) โดยมีความบริสุทธิ์ 99.9% มีความหนาเฉลี่ยของแผ่นประมาณ 8 nm (20–30 monolayers) และมีขนาดด้านข้างเฉลี่ยประมาณ 5 μm มีค่า specific surface area ไม่น้อยกว่า 15 m^2/g ตัวอย่างสารเคลือบ GNPs ถูกเตรียมในสภาวะที่ควบคุมอย่างเหมาะสม โดยผสม GNPs ที่ความเข้มข้นประมาณ 1% โดยน้ำหนักเข้ากับเอทานอลปริมาตร 100 mL ก่อนนำไปกระจายตัวด้วยคลื่นอัลตราโซนิกเป็นเวลา 30 นาที ทั้งนี้มีการควบคุมอุณหภูมิของระบบไม่ให้สูงเกิน 30 °C เพื่อป้องกันการเสื่อมสภาพของสารและคงเสถียรภาพของการกระจายตัวระดับนาโน หลังจากได้สารละลายที่มีความสม่ำเสมอแล้ว ตัวอย่าง UHMWPE ที่ผ่านการแช่กรดโครมิกตามเวลาที่กำหนดจะถูกนำไปจุ่มในสารละลาย GNPs ดังกล่าวเป็นเวลาประมาณ 5 นาที เพื่อให้แผ่นนาโนกราฟีนสามารถยึดเกาะบนพื้นผิวที่ถูกปรับสภาพแล้วได้อย่างมีประสิทธิภาพ และพร้อมสำหรับนำไปศึกษาผลด้านสมบัติพื้นผิวในขั้นตอนถัดไป

การปรับสภาพพื้นผิวด้วยรังสีอิเล็กตรอนบีม (Electron Beam Irradiation)

ตัวอย่าง UHMWPE ผ่านการแช่กรดโครมิกและการเคลือบด้วยกราฟีนนาโนเพลตเลตจะถูกนำไปปรับสภาพเชิงฟิสิกส์เพิ่มเติมด้วยการฉายรังสีอิเล็กตรอนบีม ยี่ห้อ Mevex corporation LTD. รุ่น MB10-50 ประเทศแคนนาดา ณ สถาบันเทคโนโลยีนิวเคลียร์แห่งชาติ องค์การมหาชน ที่อุณหภูมิห้อง ในปริมาณรังสี 50, 100 และ 150 kGy เพื่อศึกษาผลของพลังงานรังสีต่อการเปลี่ยนแปลงสมบัติพื้นผิวและปฏิสัมพันธ์ระหว่างชั้นเคลือบ GNPs กับพื้นผิวของพอลิเมอร์ ทั้งในแง่โครงสร้างพื้นผิว คุณสมบัติการยึดติด ความทนทานต่อการสึกหรอ และสมบัติเชิงกล เพื่อประเมินประสิทธิภาพของการดัดแปรผิวในแต่ละขั้นตอนอย่างเป็นระบบ

การวิเคราะห์สัณฐานวิทยา ความหยาบพื้นผิว

นำแผ่นวัสดุไปทดสอบลักษณะทางสัณฐานทางวิทยา เพื่อดูความหยาบพื้นผิว ด้วยเครื่องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope; SEM) ยี่ห้อ Hitachi รุ่น SU3900 ประเทศญี่ปุ่น โดยใช้ความต่างศักย์เท่ากับ 5 kV

การทดสอบสมบัติการต้านทานต่อการสึกหรอของวัสดุ

การทดสอบสมบัติการต้านทานต่อการสึกหรอของวัสดุถูกดำเนินการโดยวัดอัตราการสึกหรอ (Wear rate) ด้วยเทคนิค Pin-on-Disk ตามมาตรฐาน ASTM G99-95a ภายใต้สภาวะแบบแห้ง โดยใช้อุปกรณ์ทดสอบชนิดลูกบอลเหล็กกล้าที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 มิลลิเมตร เป็นตัวกดลงบนผิวชิ้นงานด้วยน้ำหนักกดคงที่ 5 นิวตัน ขณะที่ลูกบอลเคลื่อนที่บนพื้นผิวของชิ้นงานด้วยความเร็ว 0.3 เมตรต่อวินาที รวมระยะทางการทดสอบ 1000 เมตร การทดสอบแต่ละชุดทำซ้ำจำนวน 3 ครั้งเพื่อเพิ่มความน่าเชื่อถือของข้อมูลที่ได้

การทดสอบสมบัติเชิงกลของวัสดุ

เตรียมตัวอย่างทดสอบเป็นรูปดรัมเบลล์ที่มีความหนา 3 มม. เพื่อทดสอบสมบัติเชิงกลของวัสดุนั้น ถูกดำเนินการโดยการวัดค่าความต้านทานแรงดึง (Tensile strength), โมดูลัสความยืดหยุ่นแรงดึง (Tensile modulus), และการยืดตัวที่จุดขาด (Elongation at break) ตามมาตรฐาน ASTM D638

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

การวิเคราะห์สัณฐานวิทยา ความหยาบพื้นผิว

Fig. 1 แสดงให้เห็นว่าพื้นผิวของ UHMWPE มีความหยาบเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องตามระยะเวลาแช่กรดโครมิกที่มากขึ้น (Rezaei et al., 2005) โดยพื้นผิวดั้งเดิมมีลักษณะเรียบสม่ำเสมอและปราศจากร่องรอยการกัดผิว (A) สะท้อนถึงพลังงานผิวต่ำและความเฉื่อยทางเคมีของวัสดุ เมื่อผ่านการแช่กรดเป็นเวลา 5 นาที (B) เริ่มปรากฏร่องผิวและโครงสร้างแบบ micro-etching ขนาดเล็ก ซึ่งช่วยเพิ่มพื้นที่ผิวและหมู่ฟังก์ชันออกซิเดชันในระดับพอเหมาะ ทำให้พื้นผิวมีความสามารถในการยึดเกาะของสารเคลือบดีขึ้น และสอดคล้องกับผลการทดสอบการสึกหรอที่ให้ค่าเสียดทานต่ำที่สุดใน Table 1 เมื่อระยะเวลาแช่กรดเพิ่มเป็น 10 นาที (C) พบว่าพื้นผิวมีความหยาบมากขึ้นอย่างชัดเจน พร้อมการเกิดรอยกัดผิวที่ลึกและแพร่กระจายมากขึ้น แม้จะเพิ่มพลังงานผิวแต่เริ่มมีความรุนแรงเกินระดับที่เหมาะสม และเมื่อแช่กรดเป็นเวลา 15 นาที (D) พื้นผิวมีลักษณะขรุขระอย่างมากและเกิด micro-defects จำนวนมาก ทำให้ความสม่ำเสมอของผิวลดลง ส่งผลต่อประสิทธิภาพในการยึดเกาะและการต้านทานการสึกหรอของวัสดุลดลงอย่างมีนัยสำคัญ

ผลการสังเกตสัณฐานวิทยาพื้นผิวแสดงให้เห็นว่าระยะเวลาแช่กรดมีผลโดยตรงต่อความหยาบผิวและความสมบูรณ์ของพื้นผิว ซึ่งสัมพันธ์กับการยึดเกาะของชั้นเคลือบ GNPs โดยพื้นผิวที่มีความหยาบระดับไมโครในช่วงที่เหมาะสมจะเพิ่มพื้นที่ผิวและสร้างจุดยึดเกาะเชิงกล ดังแสดงใน Fig. 2 ทำให้การยึดติดและการคงอยู่ของชั้นเคลือบ GNPs มีเสถียรภาพมากขึ้นภายใต้แรงเฉือนระหว่างการเสียดสี ขณะที่การแช่กรดเป็นเวลานานทำให้เกิดร่องลึกและ micro-defects ส่งผลให้ชั้นเคลือบมีความไม่ต่อเนื่องและมีแนวโน้มเกิดการหลุดลอก (delamination) ได้ง่าย ซึ่งลดความสามารถของ GNPs ในการทำหน้าที่เป็นชั้นหล่อลื่นเชิงของแข็ง และเป็นสาเหตุให้ค่าความเสียดทานและแนวโน้มการสึกหรอเพิ่มสูงขึ้น

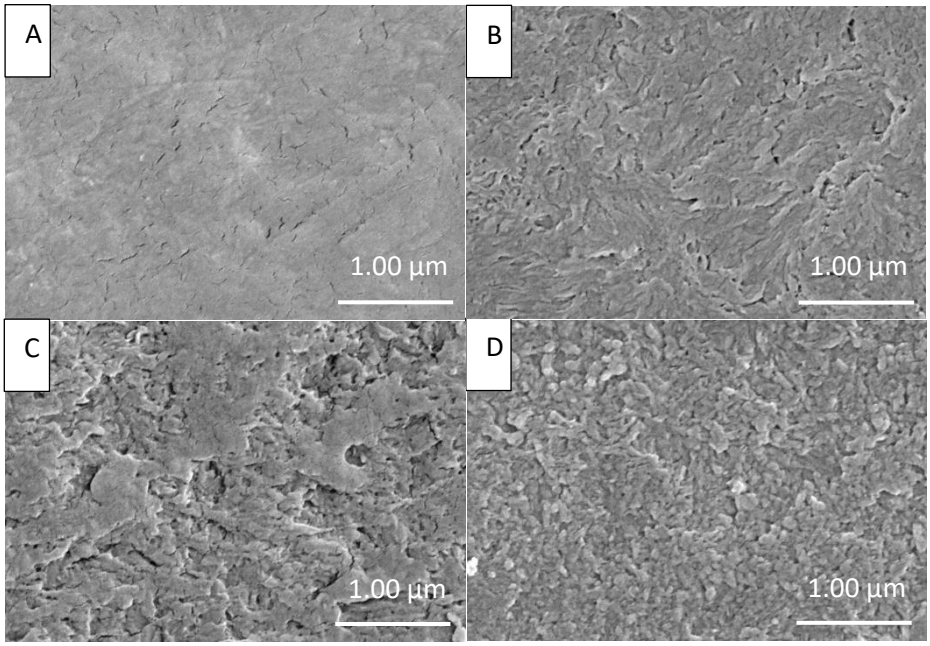


Fig. 1 Morphological images of UHMWPE surfaces after chromic acid etching at different immersion times (A–D correspond to 0, 5, 10, and 15 min, respectively)

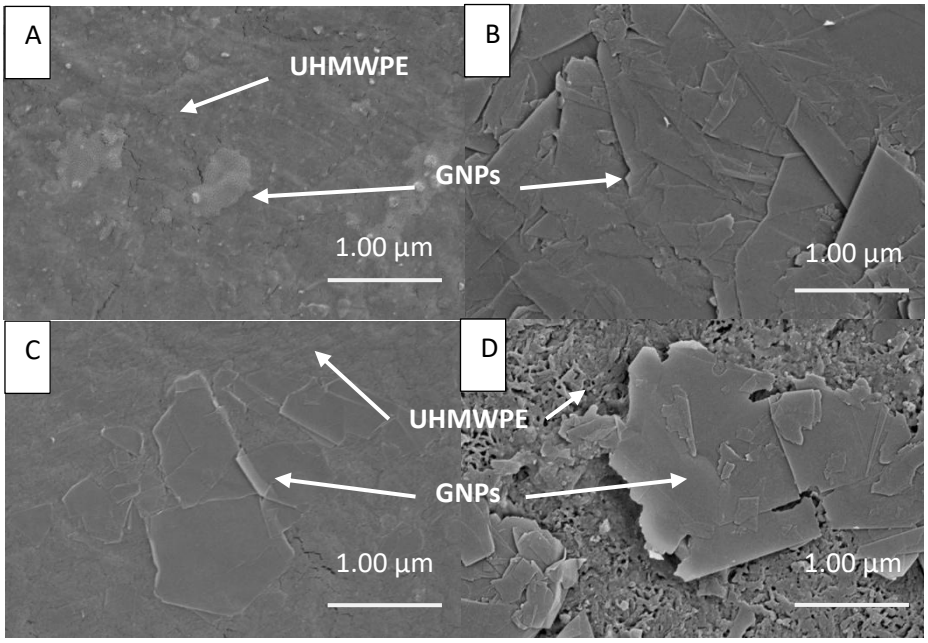


Fig. 2 Morphological images of UHMWPE surfaces after GNP coating at different chromic acid immersion times (A–D correspond to 0, 5, 10, and 15 min, respectively).

ผลทดสอบสมบัติการต้านทานต่อการสึกหรอของวัสดุ UHMWPE

ผลการทดสอบสมบัติการต้านทานต่อการสึกหรอที่ประเมินผ่านค่าค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน (Table 1) พบว่า ทั้งปริมาณรังสีอิเล็กตรอนบีมและระยะเวลาแช่กรดโครมิกล้วนมีผลกระทบต่อพฤติกรรมการเสียดสีของพื้นผิว UHMWPE อย่างมีนัยสำคัญ โดยการฉายรังสีระดับ 100 kGy แสดงประสิทธิภาพสูงสุดในการลดแรงเสียดทานในหลายชุด

การทดลอง (Anekratmontre et al., 2025) โดยเฉพาะตัวอย่างที่ผ่านการแช่กรด 5 นาที ซึ่งให้ค่า friction ต่ำที่สุดที่ 0.142 ± 0.029 สะท้อนถึงระดับของ cross-linking ที่สมดุล ทำให้พื้นผิวเกิดความแข็งแรงและเสถียรภาพที่เอื้อต่อการลดการสึกหรอ ตรงกันข้าม การฉายรังสีเพียง 50 kGy ให้ค่า friction สูงกว่าในทุกสภาวะ โดยเฉพาะในตัวอย่างที่ไม่ผ่านการแช่กรด ซึ่งมีค่า friction สูงถึง 0.621 ± 0.008 แสดงให้เห็นว่าพลังงานรังสีระดับต่ำยังไม่เพียงพอต่อการปรับปรุงโครงสร้างผิว ส่วนการเพิ่มปริมาณรังสีเป็น 150 kGy ส่งผลให้ค่า friction เพิ่มสูงขึ้นในหลายชุด โดยเฉพาะในกรณีที่ไม่มีการแช่กรดและแช่กรดเป็นเวลานาน ซึ่งสะท้อนถึงผลกระทบจากการเกิด chain scission อันเป็นผลจากพลังงานรังสีที่มากเกินไป ทำให้โครงสร้างผิวมีความเปราะและมีแนวโน้มสึกหรอสูงขึ้น (Zaharescu et al., 2023).

เมื่อพิจารณาผลของระยะเวลาแช่กรดโครมิกพบว่า ตัวอย่างที่แช่กรด 5 นาที ให้ค่า friction ต่ำที่สุดในภาพรวม โดยค่า friction ลดลงอย่างชัดเจนในทุกช่วงของปริมาณรังสี แสดงถึงระดับความหยาบผิวและหมู่ฟังก์ชันออกซิเดชันที่เหมาะสมต่อการยึดเกาะของชั้นเคลือบ GNPs ซึ่งส่งผลดีต่อการลดการสึกหรอ ในทางตรงกันข้าม การแช่กรด 10 นาที ให้ค่า friction ที่คงตัวมากขึ้นแต่ไม่มีค่าใดต่ำกว่าสภาวะแช่ 5 นาที บ่งชี้ว่าการกัดผิวที่มากขึ้นเริ่มส่งผลเชิงลบต่อเสถียรภาพของชั้นเคลือบ ส่วนการแช่กรด 15 นาที ให้ค่า friction สูงที่สุดในเกือบทุกระดับของปริมาณรังสี โดยค่า friction ที่ใช้ร่วมกับ 50 kGy สูงถึง 0.333 ± 0.087 ซึ่งเป็นค่าที่สูงกว่าสภาวะอื่นอย่างเด่นชัด แสดงให้เห็นว่าการกัดผิวที่รุนแรงเกินไปก่อให้เกิด micro-defects และความไม่สม่ำเสมอของพื้นผิว ส่งผลให้สมบัติการต้านทานต่อการสึกหรอเสื่อมลงอย่างมีนัยสำคัญ

การลดลงของค่า coefficient of friction ในสภาวะที่ให้ผลดีที่สุดมีความสัมพันธ์กับบทบาทของชั้นเคลือบ GNPs ซึ่งทำหน้าที่เป็นชั้นหล่อลื่นเชิงของแข็ง (solid lubrication film) โดยโครงสร้างแบบ lamellar ของ GNPs สนับสนุนการเลื่อนไถลระหว่างชั้น (interlayer sliding) ทำให้ความเค้นเฉือนบริเวณผิวสัมผัสลดลงและลดการสัมผัสโดยตรงระหว่างคู่เสียดสี ส่งผลให้แนวโน้มการเกิดการสึกหรอแบบ adhesive wear ลดลง ทั้งนี้ ประสิทธิภาพของชั้นเคลือบขึ้นกับความสมบูรณ์ของฟิล์มและความสามารถในการคงอยู่บนพื้นผิวภายใต้แรงเฉือนระหว่างการทดสอบ ซึ่งจะเกิดได้ดีเมื่อพื้นผิวผ่านการแช่กรดในระดับที่เหมาะสม ทำให้เกิดความหยาบและจุดยึดเกาะที่เอื้อต่อการยึดติดและการกระจายตัวของ GNPs อย่างสม่ำเสมอ

Table 1 Coefficient of friction of UHMWPE coated with GNPs after chromic acid etching and electron beam irradiation.

	50 kGy	100 kGy	150 kGy
No Chromic acid	0.621 ± 0.008	0.183 ± 0.007	0.234 ± 0.008
5 min	0.179 ± 0.050	0.142 ± 0.029	0.220 ± 0.059
10 min	0.276 ± 0.026	0.254 ± 0.057	0.299 ± 0.047
15 min	0.333 ± 0.087	0.298 ± 0.065	0.312 ± 0.022

โดยสภาวะการแช่กรดโครมิก 5 นาทีร่วมกับการฉายรังสี 100 kGy สามารถให้ผลด้าน tribology ที่ดีที่สุด เนื่องจากระดับความหยาบผิวที่เกิดขึ้นเอื้อต่อการยึดติดและการคงอยู่ของชั้นเคลือบ GNPs ภายใต้แรงเฉือนระหว่างการทดสอบ ขณะเดียวกันการฉายรังสีในระดับดังกล่าวช่วยเพิ่มเสถียรภาพของพื้นผิวจากการเกิด cross-linking ในระดับเหมาะสม ส่งผลให้ชั้นเคลือบทำงานได้อย่างต่อเนื่องและลดการเสียดสีได้อย่างมีประสิทธิภาพ

ผลทดสอบสมบัติเชิงกลของวัสดุ UHMWPE

Table 2 แสดงผลสมบัติเชิงกลของชิ้นงาน UHMWPE ที่ผ่านการแช่กรดโครมิกเป็นเวลา 5, 10 และ 15 นาที ร่วมกับการฉายรังสีอิเล็กตรอนบีม (EB) ปริมาณ 50, 100 และ 150 kGy โดยจัดข้อมูลตามเวลาแช่กรดเพื่อให้สามารถสังเกตความแตกต่างของผลลัพธ์ภายใต้แต่ละเงื่อนไขได้อย่างเป็นระบบ จากผลการทดสอบพบว่า ค่า tensile strength ของตัวอย่าง UHMWPE ภายใต้สภาวะการฉายรังสีและเวลาแช่กรดที่แตกต่างกันมีการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยและไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ โดยชุดแช่ 5 นาทีมีค่าเพิ่มจากประมาณ 26.55 MPa (50 kGy) เป็น 26.67 MPa (150 kGy) ขณะที่ชุดแช่ 10 นาทีมีค่าปรับเพิ่มจาก 26.28 MPa (50 kGy) เป็น 26.55 MPa (150 kGy) และชุดแช่ 15 นาทีแม้มีความแปรปรวนเล็กน้อย แต่ยังคงแสดงแนวโน้มการเพิ่มขึ้นของความแข็งแรงดึงตามปริมาณรังสีเช่นกัน ซึ่งสะท้อนว่าการฉายรังสีทำให้เกิดการเชื่อมโยงโครงสร้าง (cross-linking) ภายในวัสดุมากขึ้น ส่งผลให้แรงที่วัสดุสามารถรับได้ก่อนขาดเพิ่มขึ้น

สำหรับค่า Tensile Modulus พบการเปลี่ยนแปลงที่สัมพันธ์กับระดับรังสีและสภาพผิวหลังแช่กรดเพียงเล็กน้อยและไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ โดยชุดแช่ 5 นาทีมีค่าเฉลี่ย 453.67 MPa, ชุดแช่ 10 นาทีมีค่าเฉลี่ยมีแนวโน้มสูงขึ้นเป็น 462.38 MPa, และชุดแช่ 15 นาทีอยู่ที่ 457.70 MPa ซึ่งชี้ให้เห็นว่าทั้งเวลาแช่กรดและปริมาณรังสีต่างมีบทบาทร่วมกันต่อความแข็งของวัสดุ ในขณะที่ Elongation at Break เปลี่ยนแปลงอย่างชัดเจนที่สุด โดยค่าเฉลี่ยของชุดแช่ 5 นาที, 10 นาที และ 15 นาทีอยู่ที่ 42.46%, 46.57%, และ 39.64% ตามลำดับ ซึ่งสะท้อนถึงความไวของสมบัตินี้ต่อการเปลี่ยนแปลงสภาพผิวและระดับการ cross-linking โดยชุดแช่ 10 นาทีให้ค่าการยืดตัวมากที่สุด อาจเนื่องมาจากการเกิด cross-linking ในระดับเหมาะสม ทำให้วัสดุยังคงความเหนียวอยู่

ในการทดสอบสมบัติเชิงกลของ UHMWPE เช่น tensile strength และ tensile modulus ค่าที่วัดได้สะท้อนพฤติกรรมของเนื้อวัสดุในระดับ bulk เป็นหลัก ดังนั้นการเปลี่ยนแปลงของสมบัติเชิงกลจึงมีความสัมพันธ์กับการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างพอลิเมอร์ที่เกิดจาก electron beam irradiation โดยการฉายรังสีสามารถเหนี่ยวนำให้เกิด cross-linking ซึ่งช่วยเพิ่มเสถียรภาพเชิงโครงสร้างและความแข็งแรงของวัสดุ ขณะที่การฉายรังสีในระดับสูงอาจก่อให้เกิด chain scission ส่งผลให้สมบัติเชิงกลลดลงได้ ในทางกลับกัน GNP coating เป็นการปรับสภาพเฉพาะบริเวณผิวที่มีความหนาจำกัด จึงคาดว่ามีผลโดยตรงต่อสมบัติเชิงกลแบบ bulk เพียงเล็กน้อย โดยบทบาทของ GNP จะเด่นชัดในด้าน tribological performance มากกว่า อย่างไรก็ตาม การ chromic acid etching เป็นเวลานานอาจก่อให้เกิด surface defects หรือ microcracks ซึ่งสามารถทำหน้าที่เป็นจุดเริ่มต้นของการแตกหักภายใต้แรงดึง และส่งผลต่อค่า tensile strength ได้ในบางสภาวะ

Table 2 Mechanical properties of UHMWPE after chromic acid etching and electron beam irradiation.

Sample	Tensile Strength (MPa)	Tensile Modulus (MPa)	Elongation at break (%)
5-min acid etching & Irradiated at 50 kGy	26.1 ± 0.12	464.4 ± 05.61	61.30 ± 09.71
5-min acid etching & Irradiated at 10 kGy	26.3 ± 0.16	460.5 ± 07.58	49.68 ± 12.26
5-min acid etching & Irradiated at 150 kGy	26.6 ± 0.06	453.7 ± 15.69	42.46 ± 02.58
10-min acid etching & Irradiated at 50 kGy	26.0 ± 0.13	467.4 ± 14.86	49.66 ± 01.92
10-min acid etching & Irradiated at 100 kGy	26.4 ± 0.27	454.9 ± 18.93	54.97 ± 10.81
10-min acid etching & Irradiated at 150 kGy	26.4 ± 0.13	462.4 ± 04.20	46.57 ± 02.98
15-min acid etching & Irradiated at 50 kGy	25.9 ± 0.17	453.3 ± 08.42	78.36 ± 08.40
15-min acid etching & Irradiated at 100 kGy	26.0 ± 0.07	447.7 ± 18.08	44.38 ± 07.68
15-min acid etching & Irradiated at 150 kGy	26.5 ± 0.26	457.7 ± 09.38	39.64 ± 02.89

สรุปผลการทดลอง

การศึกษาครั้งนี้มุ่งประเมินผลของการแช่กรดโครมิก การเคลือบกราฟีนนาโนเพลตเลต (GNPs) และการฉายรังสีอิเล็กตรอนบีมต่อสมบัติพื้นผิว สมบัติการต้านทานต่อการสึกหรอ และสมบัติเชิงกลของ UHMWPE โดยผลการวิเคราะห์สัณฐานวิทยาจากภาพ SEM แสดงให้เห็นว่าการแช่กรดโครมิกทำให้พื้นผิวเกิดการกัดผิวเพิ่มขึ้นตามเวลาแช่ ส่งผลให้ความหยาบผิวเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ โดยระยะเวลาแช่ 5 นาทีให้สัณฐานวิทยาที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการยึดเกาะของชั้นเคลือบ GNPs ขณะที่การแช่เป็นเวลานานเกินไปนำไปสู่การเกิดตำหนิระดับไมโคร (micro-defects) และความไม่สม่ำเสมอของพื้นผิวมากขึ้น ผลการทดสอบสมบัติการต้านทานต่อการสึกหรอพบว่า การฉายรังสีระดับปานกลางที่ 100 kGy ให้ค่าความเสียดทานต่ำที่สุด โดยเฉพาะในตัวอย่างที่แช่กรด 5 นาที ซึ่งสอดคล้องกับระดับของ cross-linking ที่เหมาะสมและเสถียรภาพของพื้นผิวที่ได้รับการปรับปรุง ในขณะที่ระดับรังสีต่ำเกินไปหรือสูงเกินไป (50 และ 150 kGy) ส่งผลให้ค่าความเสียดทานเพิ่มขึ้นเนื่องจากการเกิด cross-linking ไม่เพียงพอหรือการเกิด chain scission ตามลำดับ นอกจากนี้ ผลทดสอบสมบัติเชิงกลชี้ให้เห็นว่า Tensile strength และ Tensile modulus เพิ่มสูงขึ้นเมื่อปริมาณรังสีเพิ่มขึ้น ในขณะที่ Elongation at break ลดลงเมื่อพื้นผิวถูกกัดรุนแรงหรือประสบการด้อยคุณภาพจากการฉายรังสีมากเกินไป โดยสรุป สภาวะที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการปรับปรุงสมบัติการสึกหรอและความเสถียรทางกลของ UHMWPE คือการแช่กรดโครมิก 5 นาทีร่วมกับการฉายรังสีอิเล็กตรอนบีมในระดับ 100 kGy ซึ่งให้ความสมดุลระหว่างการปรับปรุงพื้นผิวระดับจุลภาค การยึดเกาะของชั้นเคลือบ และการเสริมสร้างโครงสร้างของพอลิเมอร์อย่างมีประสิทธิภาพ

กิตติกรรมประกาศ

คณะวิจัยขอขอบพระคุณ ทุนส่งเสริมการวิจัยคณะวิศวกรรมศาสตร์ หรือ Chula Engineering's promoting research ที่สนับสนุนโครงการวิจัย และคณะวิจัยขอขอบพระคุณภาควิชาวิศวกรรมนิวเคลียร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และสถาบันเทคโนโลยีนิวเคลียร์แห่งชาติ (องค์การมหาชน) ที่ให้ความอนุเคราะห์เครื่องมือทดสอบและอุปกรณ์วิจัย

เอกสารอ้างอิง

Anekratmontre, T., Wongsawaeng, D., Kongprawes, G., Toyen, D. 2025. Enhancement of surface tribology, mechanical, and electrical properties of UHMWPE via graphene nanoplatelets coating and electron beam irradiation. RSC Adv. 15: 26756–26765.

Li, W., Meng, L., Wang, L., Mu, J., Pan, Q. 2016. Surface modification of ultra-high molecular weight polyethylene fibers by chromic acid. Surf. Interface Anal. 48: 1316–1319.

Liu, R., Yan, Z., Ruan, C., Yan, H., Xu, M., Zhao, S., Zhao, H., Wang, H. 2024. Surface modification of ultra-high molecular weight polyethylene fibers by an eco-friendly impregnation solution to enhance interfacial adhesion with rubber. Mater. Des. 238: 112707. doi.org/10.1016/j.matdes.2024.112707

Mateos-Timoneda, M.A. 2009. Polymers for bone repair. In Bone repair biomaterials. Woodhead Publishing, United Kingdom.

Rezaei, M., Yunus, R., Ibrahim, N.A., Ariffin, A. 2005. Surface modification of ultra-high-molecular-weight polyethylene: I. Characterization and sintering studies. J. Appl. Polym. Sci. 98: 1397–1403.

Turos, A., Abdul-Kader, A.M., Ratajczak, R., Stonert, A. 2009. Modification of UHMWPE by ion, electron and γ-ray irradiation. Vacuum 83: S54–S56. doi.org/10.1016/j.vacuum.2009.01.025

Zajarescu, T., Nicula, N., Rapa, M., Iordoc, M., Tsakiris, V., Marinescu, V.E. 2023. Structural insights into LDPE/UHMWPE blends processed by γ-irradiation. Polymers 15: 696. doi.org/10.3390/polym15030696

สมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตรีไซเคิลและพอลิคีโตน

Mechanical properties of recycled poly(ethylene terephthalate)/polyketone polymer blends

พิชญาภัทร สระพิมาย, อำนวย ลาภเกษมสุข*

Pitchayapat Sapimai, Amnouy Larpkasemsuk*

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี, ปทุมธานี 12110

Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Thanyaburi, Pathum Thani 12110, Thailand

*Corresponding author. E-mail address: amnouy.l@en.rmutt.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาผลของการผสมพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตรีไซเคิล (RPET) กับพอลิคีโตน (PK) ต่อสมบัติเชิงกลและอุณหภูมิการเสียรูปภายใต้ความร้อนและแรงกด ผลการทดลองพบว่า RPET มีสมบัติคือ มีความแข็งสูง และเปราะ ขณะที่ PK ให้ความเหนียวและการยืดตัวสูง พอลิเมอร์ผสมที่มีสัดส่วน PKต่ำ (10–20 wt.%) แสดงค่าความทนแรงกระแทกและค่าความทนแรงดึงลดลง เนื่องจากความไม่เข้ากันของเฟสและมีอินเตอร์เฟสที่แข็งแรงต่ำ อย่างไรก็ตาม เมื่อเพิ่ม PK เป็น 30–40 wt.% ค่าความทนแรงกระแทก การยืดตัว และค่ามอดูลัส พบว่ามีค่าสูงขึ้น ด้านความอ่อนตัวภายใต้ความร้อน (HDT) พบว่าพอลิเมอร์ผสมมีอุณหภูมิ HDT อยู่ในช่วงใกล้เคียงกับ RPET แสดงว่า RPET ยังคงเป็นเฟสที่ควบคุมพฤติกรรมการเสียรูปภายใต้ความร้อนของพอลิเมอร์ผสมและการผสม PK โดยเฉพาะในช่วง 30–40 wt.% สามารถปรับสมบัติความแข็งแรงและความทนแรงกระแทกของ RPET ได้

คำสำคัญ: พอลิคีโตน, พอลิเมอร์ผสม, พอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตรีไซเคิล, สมบัติเชิงกล

Abstract

This study examines the effects of blending recycled polyethylene terephthalate (RPET) with polyketone (PK) on the mechanical properties and heat distortion behavior of the resulting polymer blends. The results show that RPET exhibits high stiffness but inherent brittleness, whereas PK demonstrates superior ductility and high elongation at break. Blends containing low PK contents (10–20 wt.%) display reductions in impact strength and tensile strength due to the immiscibility of the two polymers and weak interfacial adhesion between phases. However, when the PK content is increased to 30–40 wt.%, the impact strength, elongation at break, and Young's modulus improve noticeably. In terms of thermal performance, the heat distortion temperature (HDT) of the blends remains close to that of neat RPET, indicating that RPET continues to govern the thermo-mechanical behavior of the blends. Overall, blending PK at 30–40 wt.% can improve the mechanical performance and impact resistance of RPET.

Keywords: Mechanical properties, Polyketone, Polymer blend, Recycle Polyethylene Terephthalate

บทนำ

ขยะพลาสติก โดยเฉพาะจากขวดพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต (Polyethylene terephthalate, PET) กำลังเป็นปัญหาสำคัญด้านสิ่งแวดล้อม เนื่องจากมีปริมาณการใช้สูงและใช้เวลาย่อยสลายนาน ส่งผลให้เกิดการสะสมของขยะพลาสติกในระบบนิเวศอย่างต่อเนื่อง (Suhaimi et al., 2022) แม้การรีไซเคิล PET จะได้รับการส่งเสริมอย่างแพร่หลาย แต่ PET ที่ผ่านการรีไซเคิล (RPET) มักมีสมบัติเชิงกลและสมบัติทางความร้อนลดลง เมื่อเทียบกับ PET บริสุทธิ์ ซึ่งเป็นผลจากการเสื่อมสภาพของสายโซ่โมเลกุลระหว่างกระบวนการหลอมซ้ำหลายครั้ง ทำให้ RPET ไม่สามารถนำกลับไปใช้งานในผลิตภัณฑ์ที่ต้องการสมบัติสูงได้อย่างมีประสิทธิภาพ (Jiang et al., 2019) แนวทางสำคัญที่ใช้ในการปรับปรุงสมบัติของ RPET คือการเตรียมเป็นพอลิเมอร์ผสม (Polymer blend) โดยนำพอลิเมอร์วิศวกรรมที่มีสมบัติเด่นมาผสมเพื่อปรับปรุงสมบัติของ RPET

พอลิคีโตน (Polyketone, PK) เป็นพอลิเมอร์วิศวกรรมที่มีคุณสมบัติเด่นด้านความเหนียว การทนแรงกระแทก ความต้านทานสารเคมี และความเสถียรต่อสภาวะการใช้งาน (Zuiderduin et al., 2003) เป็นพอลิเมอร์ที่มีศักยภาพสูงในการนำมาผสมกับ RPET เพื่อปรับปรุงสมบัติและเพิ่มสมรรถนะการใช้งาน ซึ่งเป็นสมบัติที่ RPET สูญเสียไปหลังการรีไซเคิล อย่างไรก็ตาม สภาพความเข้ากันได้ที่ต่ำ (immiscibility) (Ajitha & Thomas, 2020) ระหว่าง RPET และ PK ซึ่งมีความแตกต่างด้านพลังงานพื้นผิวและโครงสร้างโมเลกุล อาจทำให้เกิดสัณฐานวิทยาแบบแยกเฟสและอินเตอร์เฟสที่มีแรงยึดเหนี่ยวต่ำ ซึ่งส่งผลต่อสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสม ดังนั้น การทำความเข้าใจปัจจัยที่มีผลต่อสัณฐานวิทยาและสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสม RPET/PK จึงเป็นเรื่องสำคัญในการพัฒนาคู่พอลิเมอร์ผสมนี้

ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงมุ่งศึกษาระบบพอลิเมอร์ผสม RPET/PK โดยในเบื้องต้นจะเน้นการศึกษาด้านสมบัติเชิงกลเป็นหลัก และมีการต่อยอดศึกษาสมบัติด้านอื่นๆ ต่อไป ทั้งนี้มีจุดมุ่งหมายหลักคือเพื่อพัฒนาวัสดุที่มีสมบัติสูงกว่า RPET และหากประสบผลสำเร็จจะสามารถเพิ่มศักยภาพการใช้งานของ RPET ลดการใช้พอลิเมอร์ใหม่ เพิ่มวัสดุทางเลือกสำหรับอุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้อง เนื่องจาก RPET/PK เป็นพอลิเมอร์ผสมที่ไม่เข้ากัน การปรับปรุงแรงยึดเหนี่ยวที่บริเวณอินเตอร์เฟสระหว่างสองเฟสจึงมีความสำคัญ ในงานวิจัยในอนาคต การประยุกต์ใช้สารประสาน (compatibilizer) หรือสารตัวเติมที่เหมาะสมอาจช่วยให้พอลิเมอร์ผสมมีความเข้ากันได้ดียิ่งขึ้น ซึ่งคาดว่าจะส่งผลให้สมบัติเชิงกลและสมบัติเชิงความร้อนของวัสดุดีขึ้น นอกจากนี้ การพัฒนาไปสู่ระบบคอมโพสิตยังสามารถขยายขอบเขตการใช้งานเชิงวิศวกรรมของวัสดุ RPET/PK ได้ในอนาคต

อุปกรณ์และวิธีการ

วัตถุดิบหลักที่ใช้ในงานวิจัยนี้คือพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตรีไซเคิล (RPET) ที่ได้จากการนำขวดน้ำดื่มที่เป็นของเหลือทิ้งมาบดเป็นเกล็ด และเม็ดพลาสติกพอลิคีโตน (PK) เกรด M630A บริษัท Hyosung Poketone ประเทศเกาหลี

การเตรียมพอลิเมอร์ผสมระหว่าง RPET กับ PK ทำโดยการผสม RPET/PK ในอัตราส่วน 100/0, 90/10, 80/20, 70/30, 60/40, และ 0/100 wt.% ทำการหลอมผสมด้วยเครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่ (Brabender CTE D02L800) โดยใช้อุณหภูมิหลอมอยู่ในช่วง 210–250 ºC ความเร็วรอบสกรู 60 rpm เส้นพอลิเมอร์ที่ได้จากกระบวนการอัดรีดนำมาดึงผ่านน้ำเพื่อทำให้เย็นตัว ตัดเป็นเม็ดและขึ้นรูปชิ้นงานด้วยกระบวนการฉีด (Arburg Allrounder 470C) โดยมีสภาวะการฉีดคือ อุณหภูมิฉีด 240–260 ºC ความเร็วฉีด 15 cm^3/s และ แรงดันฉีด 1000 bar

การทดสอบและวิเคราะห์ผล

การทดสอบสมบัติด้านแรงดึงประกอบด้วย ความทนแรงดึง (Tensile strength), ยังส์มอดูลัส (Young's modulus) และเปอร์เซ็นต์การยืดตัว ณ จุดขาด (Elongation at break) ด้วยเครื่องทดสอบยูนิเวอร์แซล (Hounsfield H 50KS) ตามมาตรฐาน ASTM D638 กับชิ้นทดสอบรูปดัมเบลล์ โดยทดสอบที่อุณหภูมิห้องด้วยระยะดึง (Gauge length) 115 mm อัตราเร็วในการดึง 50 mm/min โดยใช้ Load cell ขนาด 10 kN

การทดสอบสมบัติด้านการทนแรงกระแทกแบบไอซอท เตรียมตัวอย่างชิ้นงานขนาด 12.7×63.5×3 mm (กว้าง×ยาว×หนา) จากนั้นนำไปบากด้วยเครื่องบากชิ้นงานให้ได้ขนาดรอยบากทำมุม 45° ความลึกรอยบาก 2.54 mm ตามมาตรฐาน ASTM D256 แบบไอซอด วางชิ้นงานที่สภาวะการทดสอบ 24 h เพื่อลดความเครียดภายในชิ้นงาน แล้วจึงทดสอบด้วยเครื่องทดสอบความทนแรงกระแทก (Ceast) โดยใช้ลูกตุ้มน้ำหนักขนาด 4 J ปล่อยกระแทกบนชิ้นทดสอบที่เตรียมไว้ (แบบไอซอด) จากนั้นคำนวณค่าความทนแรงกระแทกจาก Equation 1:

$$\text{Impact strength (J/m)} = \frac{E\ (J)}{t\ (m)} \qquad (1)$$

Where; E = Energy absorbed by the specimen before fracture (J)

t = Specimen thickness (m)

การทดสอบอุณหภูมิการเสียรูปภายใต้ความร้อนและแรงกด (HDT)

ทดสอบด้วยเครื่องทดสอบอุณหภูมิการเสียรูปภายใต้ความร้อนและแรงกด (CEAST 6911) โดยเตรียมชิ้นทดสอบ ขนาด 13x127x3 mm จำนวน 3 ชิ้น ตามมาตรฐาน ASTM D648 method A ใช้ความร้อนในการทดสอบจากอ่างน้ำมันซิลิโคน บันทึกค่าอุณหภูมิที่ทำให้ชิ้นงานทดสอบดัดโค้งลงไปที่ตำแหน่ง 0.25 mm จากตำแหน่งเดิม โดยใช้อัตราการเพิ่มความร้อน 2 °C/min ความยาว span 100 mm น้ำหนักต่อพื้นที่ที่ใช้กดชิ้นงาน 1.82 MPa

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

ลักษณะชิ้นงาน

Fig. 1 แสดงลักษณะชิ้นงานรูปดัมเบลล์ของ RPET, PK และพอลิเมอร์ผสม RPET/ PK ที่อัตราส่วนโดยน้ำหนักต่างๆ ที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการฉีด พบว่า ชิ้นงาน RPET มีสีขาวขุ่น ขณะที่ชิ้นงาน PK มีสีเหลืองนวลทึบแสง และเมื่อผสม PK ใน RPET พบว่า ชิ้นงานพอลิเมอร์ผสมมีสีเข้มขึ้นตามปริมาณของ PK ที่เพิ่มขึ้น

Fig. 1 RPET, PK and RPET/PK Blend Specimens

สมบัติเชิงกล (Mechanical properties) ความทนแรงกระแทก (Impact strength)

Table 1 และ Fig. 2 พบว่า RPET เป็นวัสดุที่เปราะ เนื่องจากมีค่าความทนแรงกระแทกเท่ากับ 22.20 J/m ทั้งนี้เป็นเพราะโครงสร้างทางโมเลกุลของ RPET ซึ่งเป็นพอลิเมอร์กลุ่มพอลิเอสเทอร์ มีความแข็งตึง (Stiffness) สูง (Pires et al., 2025) ขณะที่ PK ซึ่งเป็นวัสดุที่มีความทนแรงกระแทกสูง มีค่าความทนแรงกระแทกเท่ากับ 703.3 J/m ภายใต้สภาวะการทดสอบเดียวกัน เป็นผลมาจากโครงสร้างที่มีความเหนียวสูง เพราะมีการจัดเรียงตัวของโซ่โมเลกุลที่ยืดหยุ่นสามารถเกิดการเปลี่ยนรูปแบบพลาสติกและดูดซับพลังงานก่อนแตกหักได้ดี และเมื่อใส่ PK ใน RPET ในปริมาณ 10 และ 20 wt.% ค่าความทนแรงกระแทกของพอลิเมอร์ผสมมีค่าเท่ากับ 11.1 และ 10.1 J/m ตามลำดับ ซึ่งต่ำกว่าค่าความทนแรงกระแทกของ RPET ซึ่งเป็นพฤติกรรมที่มักพบในคู่พอลิเมอร์ผสมที่ผสมแบบไม่เข้ากัน จึงอนุมานได้ว่า RPET และ PK มีรูปแบบการผสมแบบไม่เข้ากัน (immiscible blend) มีการแยกเฟสระหว่างกัน และอินเตอร์เฟสที่เกิดระหว่างเฟสของ RPET และ PK มีความแข็งแรงต่ำ ดังนั้นจึงไม่สามารถรับและกระจายแรงได้ดี แต่เมื่อเพิ่มปริมาณของ PK เป็น 30 และ 40 wt.% พบว่าพอลิเมอร์ผสมมีแนวโน้มของค่าความทนแรงกระแทกเพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นผลจากปริมาณ PK ต่ำ อาจเกิดโครงสร้างแบบเกาะกลุ่ม ที่กระจายตัวไม่ดีและทำหน้าที่เป็นจุดรวมความเครียด (Stress Concentration) แต่เมื่อเพิ่มปริมาณถึงจุดหนึ่ง อาจเกิดโครงสร้างแบบ "เฟสต่อเนื่องร่วม" (Co-continuous phase) ที่ช่วยในการรับแรงได้ดีขึ้น

Table 1 Mechanical properties of RPET, PK and RPET/PK blends

RPET/PK (wt.%)	Impact strength (J/m)	Tensile strength (MPa)	Elongation at break (%)	Young's modulus (MPa)
100/0	22.2 ±5.5	62.5±4.6	3.5±0.3	2474.3±114.4
0/100	703.3±58.1	55.4±0.6	113.4±14.2	1503.3±61.2
90/10	11.1±1.5	47.8±3.2	2.6±0.4	2520.0±55.4
80/20	10.1±0.3	34.9±1.6	1.8±0.1	2475.0±84.0
70/30	13.3±2.8	43.3±4.2	2.6±0.3	2280.0±73.9
60/40	29.8±4.2	51.2±2.0	3.8±0.3	2187.5±46.5

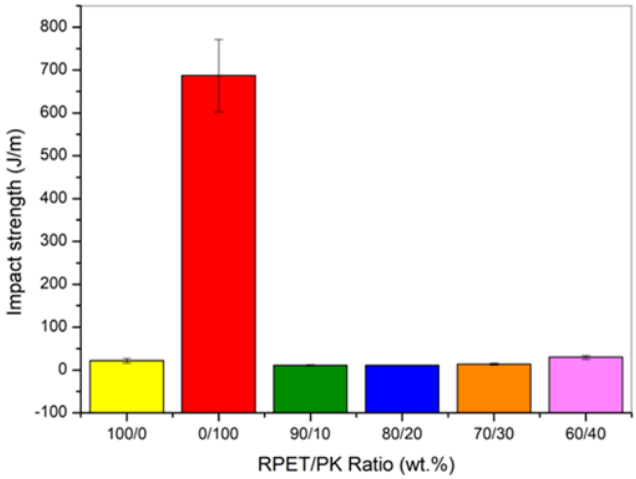


Fig. 2 Impact strength of RPET, PK and polymer blend RPET/PK

ความทนแรงดึง และ การยืดตัว ณ จุดขาด (Tensile strength and Elongation at break)

จาก Table 1 และ Fig. 3 พบว่า RPET มีค่าความทนแรงดึงเท่ากับ 62.5 MPa และมีร้อยละการยืดตัว ณ จุดขาดเท่ากับ 3.5% และ PK มีค่าความทนแรงดึงเท่ากับ 55.4 MPa แต่มีค่าการยืดตัว ณ จุดขาดสูงมาก (113.4%) ซึ่งเป็นพฤติกรรมของวัสดุเหนียว (ductile) เมื่อใส่ PK ใน RPET ปริมาณ 10 และ 20 wt.% พบว่าพอลิเมอร์ผสม มีค่าความทนแรงดึง 47.8 และ 34.9 MPa และมีค่าการยืดตัว ณ จุดขาด เท่ากับ 2.6 และ 1.8% ตามลำดับ ซึ่งมีค่าต่ำกว่า RPET ซึ่งเป็นเฟสหลัก สอดคล้องกับพฤติกรรมการผสมแบบไม่เข้ากันของพอลิเมอร์ผสม โดยมีการแยกเฟสระหว่าง RPET และ PK เมื่อได้รับแรงดึง การถ่ายโอนความเค้นจากเฟส RPET ไปยังเฟสของ PK เกิดขึ้นแบบไม่ต่อเนื่อง ดังนั้นการดูดซับและกระจายพลังงานที่ได้รับจึงเกิดได้ยาก แต่เมื่อใส่ PK ในพอลิเมอร์ผสม เพิ่มเป็น 30 และ 40 wt.% พบว่าความทนแรงดึงเพิ่มขึ้นเป็น 43.3 และ 51.2 MPa และการยืดตัวเพิ่มเป็น 2.6 และ 3.8% ตามลำดับ เนื่องจากปริมาณ PK ที่เพิ่มขึ้นเกิดการเกาะกลุ่ม (Agglomerate) เกิดเป็นเฟสที่ต่อเนื่องช่วยให้การรับและถ่ายโอนความเค้นมีความต่อเนื่องมากขึ้น

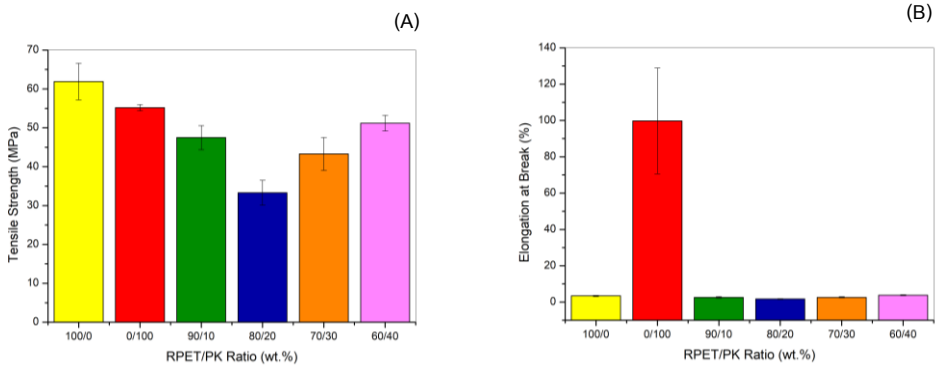


Fig. 3 Mechanical properties of RPET, PK and RPET/PK blend (a) Tensile strength and (b) Elongation at break

ยังส์มอดูลัส (Young's modulus)

Table 1 และ Fig.4 พบว่า RPET มีค่ามอดูลัสเท่ากับ 2474.3 MPa เนื่องจากโครงสร้างมีความแข็งตึงสูง ทำให้สายโซ่โมเลกุลมีอิสระในการเคลื่อนที่ต่ำ ขณะที่ PK มีมอดูลัสเพียง 1503.3 MPa เนื่องจากมีโครงสร้างโมเลกุลที่ยืดหยุ่นกว่า เมื่อผสม RPET กับ PK ที่สัดส่วน 90/10 wt.% ค่ามอดูลัสเพิ่มขึ้นเป็น 2520.0 MPa ซึ่งสูงกว่า RPET เล็กน้อย แสดงว่าปริมาณ PK ที่เป็นเฟสอีลาสโตเมอร์ในปริมาณน้อย (10 wt.%) ไม่สามารถปรับปรุงความสามารถในการเปลี่ยนรูป ของพอลิเมอร์ผสมที่มี RPET เป็นเฟสหลักได้ อีกทั้งยังอาจแสดงพฤติกรรมขัดขวางการเคลื่อนไหวของสายโซ่โมเลกุลของ RPET ส่งผลให้มอดูลัสเพิ่มขึ้นเล็กน้อย และเมื่อเพิ่มปริมาณของ PK ในพอลิเมอร์ผสมเป็น 20 wt.% พบว่าค่ามอดูลัส มีค่าเท่ากับ 2475.0 MPa เมื่อเพิ่มปริมาณ PK เป็น 30 wt.% และ 40 wt.% พบว่าค่ามอดูลัสอยู่ที่ 2280.0 และ 2187.5 MPa ตามลำดับ เป็นผลมาจากโครงสร้างภายในของพอลิเมอร์ผสมอาจเป็นแบบกึ่งต่อเนื่อง (semi–co-continuous) (Jagtap et al., 2019) กล่าวคือ เฟสของ RPET และ PK มีการกระจายตัวเชื่อมต่อกันบางส่วน โดยมี RPET เป็นเฟสที่รับแรงหลัก และเฟส PK ที่มีความสามารถในการยืดตัวสูง ช่วยรับและกระจายความเค้นขณะเดียวกันอาจขัดขวางการเคลื่อนไหวของโมเลกุล RPET บางส่วน ส่งผลให้ระบบพอลิเมอร์ผสมมีค่ามอดูลัสสูงขึ้นได้

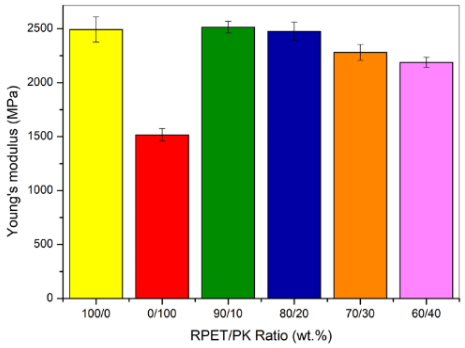


Fig. 4 Modulus of RPET, PK and RPET/PK blend

อุณหภูมิการเสียรูปภายใต้ความร้อนและแรงกด (Heat Distortion Temperature, HDT)

Table 2 และ Fig. 5 พบว่า RPET มีค่า HDT เท่ากับ 67.4 ºC และ PK มีค่า HDT เท่ากับ 83.5 ºC พอลิเมอร์ผสมที่มีการใส่ PK 10–40 wt.% มีค่า HDT อยู่ระหว่าง 66.2–66.6 ºC ซึ่งใกล้เคียงกับค่า HDT ของ RPET แสดงว่าการเพิ่มปริมาณของ PK ในระบบพอลิเมอร์ผสม 10-40 wt.% ไม่สามารถปรับปรุงการทนความร้อนภายใต้แรงกดของพอลิเมอร์ผสม คาดว่าเกิดจาก การเติม PK ในเมทริกซ์ของ RPET อาจทำหน้าที่ขัดขวางการเคลื่อนไหวของโมเลกุลเมทริกซ์

Table 2 Heat distortion temperature of RPET, PK and RPET/ PK blend

RPET/PK (wt.%)	HDT (ºC)
100/0	67.4±1.2
0/100	83.5±1.9
90/10	66.3±0.7
80/20	66.5±0.8
70/30	66.2±0.7
60/40	66.6±0.8

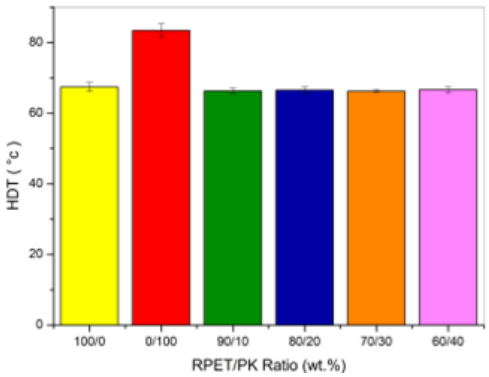


Fig. 5 Heat Distortion Temperature of RPET, PK and RPET/ PK blend

สรุป

ผลการศึกษาสมบัติเชิงกลและสมบัติการเสียรูปภายใต้ความร้อนของพอลิเมอร์ผสม RPET/PK แสดงให้เห็นว่าพฤติกรรมของวัสดุขึ้นกับองค์ประกอบและสัณฐานวิทยาของระบบอย่างมีนัยสำคัญ โดย RPET มีลักษณะเด่นด้านความแข็งตึงสูงแต่มีความเปราะ ขณะที่ PK แสดงพฤติกรรมเหนียวและสามารถดูดซับพลังงานได้ดี การผสม PK ในปริมาณต่ำ (10–20 wt.%) ส่งผลให้ค่าความทนแรงกระแทก ความทนแรงดึง และการยืดตัว ณ จุดขาดลดลง ซึ่งสอดคล้องกับพฤติกรรมของพอลิเมอร์ผสมที่ไม่เข้ากันและมีอินเตอร์เฟสที่ไม่แข็งแรง ทำให้การถ่ายโอนความเค้นระหว่างเฟสเกิดได้อย่างไม่ต่อเนื่อง อย่างไรก็ตาม เมื่อเพิ่มปริมาณ PK เป็น 30–40 wt.% พบว่าสมบัติเชิงกลหลายด้านปรับตัวดีขึ้นอย่างชัดเจน ทั้งค่าความทนแรงกระแทก ค่าการยืดตัว และค่ามอดูลัส ในด้านสมบัติการเสียรูปภายใต้ความร้อน พบว่าค่า HDT ของพอลิเมอร์ผสมอยู่ใกล้เคียงกับ RPET บริสุทธิ์ในทุกองค์ประกอบ แสดงว่าเฟส RPET ยังคงเป็นตัวกำหนดพฤติกรรมการเสียรูปภายใต้ความร้อนของระบบจากการทดลองนี้พบว่าการใส่ PK ในปริมาณ 30–40 wt.% มีแนวโน้มปรับปรุงสมบัติของพอลิเมอร์ผสมได้ แม้ยังไม่สามารถปรับปรุงความทนความร้อนภายใต้แรงกดได้อย่างมีนัยสำคัญก็ตาม

จากการศึกษาพอลิเมอร์ผสม RPET/PK ในช่วงปริมาณการเติม PK 10–40 wt.% พบว่าสูตรที่ 60/40 wt.% ให้สมบัติเชิงกลโดยรวมดีที่สุด โดยเฉพาะค่าความทนแรงกระแทก การยืดตัว ณ จุดขาด และค่ามอดูลัส ถึงแม้ว่าตัวของระบบนั้นจะเป็นพอลิเมอร์ผสมที่ไม่เข้ากันก็ตาม แต่การเพิ่มปริมาณ PK ในช่วง 30–40 wt.% ช่วยให้การถ่ายโอนความเค้นและการดูดซับพลังงานมีประสิทธิภาพมากขึ้น ดังนั้นผลการศึกษานี้แสดงให้เห็นว่าการผสม PK ในสัดส่วนที่เหมาะสมสามารถปรับปรุงสมบัติเชิงกลของ RPET ได้ เป็นไปตามวัตถุประสงค์ของงานวิจัยแม้ว่าสมบัติด้านความทนความร้อนภายใต้แรงกดยังไม่เปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญ

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมวัสดุและโลหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ที่สนับสนุนสถานที่ดำเนินงานวิจัย และขอขอบคุณ ดร.พศวรรธน์ ชัยวุฒินันท์ สังกัดสำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ (สวทช.) ที่เอื้อเฟื้อวัตถุดิบและเครื่องมือในการผสมและแปรรูป

เอกสารอ้างอิง

Ajitha, A., Thomas, S. 2020. Introduction: Polymer blends, thermodynamics, miscibility, phase separation, and compatibilization. In Compatibilization of polymer blends. Elsevier: 1–29.

Jagtap, R.N., Wadgaonkar, K.K., Mehta, L.B. 2019. Influence of ethylene-methacrylic acid copolymer on thermo-mechanical, morphological and rheological properties of recycled PET/SEBS blend. Fibers Polym. 20: 1323–1332.

Jiang, Z., Guo, Z., Zhang, Z., Qi, Y., Pu, C., Wang, Q., Jia, Z., Xiao, C. 2019. Preparation and properties of bottle-recycled polyethylene terephthalate (PET) filaments. Text. Res. J. 89: 1207–1214.

Pires, P., Aguiar, M.L.d., Vieira, A.C. 2025. Mechanical performance of RPET filament obtained by thermal drawing for FFF additive manufacturing. J. Manuf. Mater. Process. 9: 26.

Suhaimi, N.A.S., Muhamad, F., Abd Razak, N.A., Zeimaran, E. 2022. Recycling of polyethylene terephthalate wastes: A review of technologies, routes, and applications. Polym. Eng. Sci. 62: 2355–2375.

Zuiderduin, W.C., Homminga, D.S., Huétink, H.J., Gaymans, R.J. 2003. Influence of molecular weight on the fracture properties of aliphatic polyketone terpolymers. Polymer. 44: 6361–6370.

การศึกษาสมบัติทางกายภาพและสมบัติทางกลของการเติมพลวงต่อโลหะผสมบิสมัท-ดีบุก

Effects of antimony addition on the physical and mechanical properties of eutectic Bi–Sn alloy

กรกนก ชัยมงคล[a], **ธเนศ ณ วิเชียร**[a], **สุวิน สมภพศาสน์**[b], **วราฤทธิ์ เติมพรมราช**[b],
ภาสวร ศิลากร[b], **นเร ผิวนิ่ม**[a], **ราชธีร์ เตชไพศาลเจริญกิจ**[a,*]

Konkanok Chaimongkol[a], Thanet Na Wichean[a], Suwin Sompopsart[b], Wararit Toempromaraj[b],
Passaworn Silakorn[b], Naray Pewnim[a], Ratchatee Techapiesancharoenkij[a,*]

[a]ภาควิชาวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

[b]บริษัท ปตท. สำรวจและผลิตปิโตรเลียม จำกัด (มหาชน) กรุงเทพฯ 10900

[a]Department of Materials Engineering, Faculty of Engineering, Kasetsart University, Bangkok 10900, Thailand

[b]PTT Exploration and Production Public Company Limited, Bangkok 10900, Thailand

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

บทคัดย่อ

บิสมัทเป็นโลหะที่มีคุณสมบัติทางกายภาพโดดเด่นจากการขยายตัวขณะแข็งตัว ซึ่งแตกต่างจากโลหะส่วนใหญ่ โดยโลหะผสมยูเทคติกบิสมัทดีบุกได้รับความสนใจจากจุดหลอมเหลวต่ำ การไหลตัวของโลหะหลอมที่ดี และความเสถียรระหว่างการเปลี่ยนเฟส อย่างไรก็ตามความต้องการในการปรับปรุงสมบัติเชิงกลเช่นความแข็ง ความต้านทานแรงดึง และพฤติกรรมการเสียรูปภายใต้อุณหภูมิที่แตกต่างกันเป็นประเด็นสำคัญในการพัฒนาโลหะผสมระบบนี้ พลวงเป็นธาตุเสริมที่ช่วยปรับโครงสร้างจุลภาคเพิ่มความแข็งแรงในโลหะผสม งานวิจัยนี้มุ่งศึกษาผลของการเติมพลวงในปริมาณร้อยละ 2, 4, 6 และ 8 โดยน้ำหนักต่อสมบัติทางกายภาพ ได้แก่ พฤติกรรมการหลอมเหลว โครงสร้างจุลภาค รวมถึงสมบัติเชิงกลเช่น แรงดึง เพื่อวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างองค์ประกอบโลหะผสมและสมบัติที่ได้ในเชิงการประยุกต์ใช้ โลหะผสมบิสมัท-ดีบุกและบิสมัท-ดีบุก-พลวงถูกใช้อย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ เช่น ด้านอุตสาหกรรมปิโตรเลียมและอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ งานนี้จึงมุ่งเน้นการทำความเข้าใจสมบัติวัสดุเพื่อการพัฒนาต่อในอนาคต

คำสำคัญ: ดีบุก, บิสมัท, พลวง, สมบัติทางกายภาพ, สมบัติทางกล

Abstract

Bismuth (Bi) is distinguished by its unique physical characteristic of volumetric expansion upon solidification, a property uncommon among metals. The eutectic Bi–Sn alloy is renowned for its low melting point, excellent molten fluidity, and phase stability. However, enhancing mechanical properties specifically hardness, tensile strength, and deformation behavior under varying temperatures and remains a critical challenge for this system. Antimony (Sb) is identified as an alloying element capable of refining microstructure, increasing strength. This study investigates the effects of Sb additions (2, 4, 6, and 8 wt%) on physical properties, including melting behavior and microstructural evolution, as well as mechanical properties such as tensile strength. The aim is to elucidate the correlation between alloy composition and the resultant material properties. Bi–Sn and Bi–Sn–Sb alloys are widely utilized in the electronics industry and various industrial sectors. Consequently, this research provides fundamental data to support the future development and optimization of these alloys.

Keywords: Antimony, Bismuth, Mechanical properties, Physical properties, Tin

คำนำ

บิสมัท (Bismuth) จัดเป็นโลหะหลังทรานซิชัน (Post-transition metal) ที่มีโครงสร้างผลึกแบบรอมโบฮีดรัล (Rhombohedral) โดยมีสมบัติเชิงฟิสิกส์ที่โดดเด่นและหาได้ยากในโลหะทั่วไปคือความสามารถในการขยายตัวเมื่อเปลี่ยนสถานะจากของเหลวเป็นของแข็ง (Expansion upon solidification) ประมาณร้อยละ 3.3 (Hmadeh et al., 2024) เพื่อให้เหมาะสมกับการประยุกต์ใช้งานทางวิศวกรรม โลหะบิสมัทบริสุทธิ์มีความเปราะจึงนิยมนำมาผสมกับดีบุก (Tin) ซึ่งเป็นโลหะที่มีความเหนียวและช่วยส่งเสริมสมบัติการเปียกติด (Wettability) โดยเฉพาะอย่างยิ่งที่อัตราส่วนยูเทคติก (58Bi-42Sn หรือ 57Bi-43Sn) โลหะผสมนี้จะมีจุดหลอมเหลวต่ำเพียงประมาณ 183 องศาเซลเซียส ดังแสดงในเฟสไดอะแกรม Fig. 1A มีความสามารถในการไหลตัวที่ดีเยี่ยมและยังคงรักษาเอกลักษณ์การขยายตัวเชิงปริมาตรหลังการแข็งตัวได้ประมาณร้อยละ 1 (Vianco and Rejent, 1999) ทำให้เป็นวัสดุที่น่าสนใจสำหรับการใช้งานที่ต้องการการปิดผนึกหรือเติมเต็มช่องว่าง

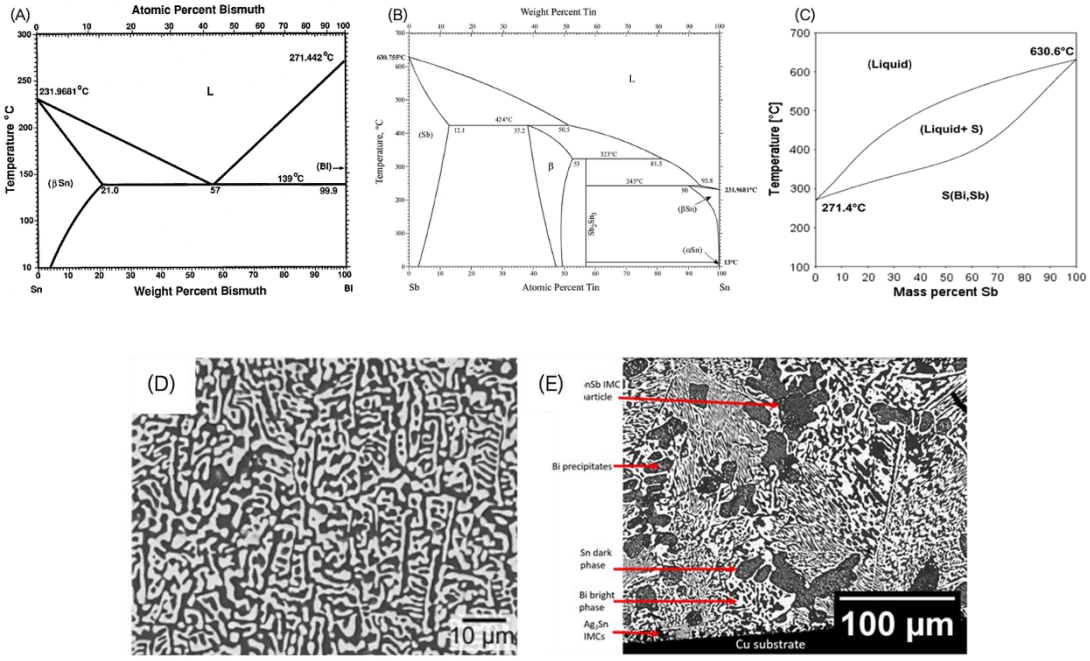


Fig. 1 (A) Phase Diagram of Eutectic Bismuth-Tin (Bi-Sn) alloy (Vianco and Rejent, 1999), (B) Phase Diagram of Tin-Antimony (Sn-Sb) Alloy (Okamoto, 2012), (C) Phase Diagram of Bismuth-Antimony (Bi-Sb) (Ishida, 1994) (D) BSE-SEM image of typical eutectic Bi-Sn (58Bi-42Sn) microstructure (Shen et al., 2025) and (E) BSE-SEM image of 42Sn-Bi-1Sb-1Ag Microstructure (Fowler et al., 2023)

อย่างไรก็ตามโลหะผสมบิสมัทดีบุกแม้จะมีสมบัติทางกายภาพที่โดดเด่น แต่สมบัติทางกลนั้นยังมีข้อจำกัด จากการศึกษาพบว่าสมบัติในด้านของความแข็งแรงยังไม่เพียงพอสำหรับสภาวะการใช้งานจริงที่หลากหลาย ยังคงพบจุดด้อยหรือข้อจำกัดบางอย่างสำหรับโลหะผสมบิสมัทดีบุกยูเทคติกเช่น เฟสที่อุดมด้วยบิสมัท (Bi-rich phase) ดัง Fig. 1D มีความเปราะสูง ส่งผลให้วัสดุมีความเหนียว (Ductility) ต่ำ ความต้านทานต่อแรงกระแทกน้อย หรืออาจกล่าวว่ามีความเสี่ยงที่จะเกิดปรากฏการณ์การเปราะเนื่องจากโลหะเหลว (Liquid metal embrittlement) เมื่อหลอมเหลวจนถึงจุดหนึ่งจะเกิดการแข็งตัวทันทีอันเนื่องมาจากพฤติกรรมของโลหะยูเทคติก อีกทั้งมีการรายงานปัญหาที่อาจพบได้การเกิดการคืบ (Creep) ของโลหะยูเทคติกบิสมัทดีบุกและการแตกร้าวเนื่องจากความเค้นร่วมกับการกัดกร่อน (Stress corrosion cracking) (Hmadeh

et al., 2024; Hmadeh et al., 2025) ซึ่งพฤติกรรมการคืบของยูเทคติกบิสมัทดีบุกนั้นมีความไวต่อความเค้น (Shen et al., 2013) ส่งผลให้เป็นจุดด้อยของการนำไปประยุกต์ใช้ในงานจริง ดังนั้น การปรับปรุงสมบัติเชิงกลให้มีความแข็งแรงทนทานมากขึ้น โดยที่ยังคงรักษาคุณสมบัติการขยายตัวที่ดีไว้ จึงเป็นโจทย์วิจัยที่ท้าทาย ดังนั้น เพื่อยกระดับสมบัติทางกลให้ดียิ่งขึ้น การเติมธาตุผสมที่สามจึงเป็นแนวทางที่ได้รับความสนใจ จากการศึกษาพบว่า พลวง (Antimony) เป็นธาตุกึ่งโลหะ จุดหลอมเหลว 630.63 องศาเซลเซียส มีพฤติกรรมการขยายตัวเมื่อเย็นตัวคล้ายกับบิสมัท ในเชิงโลหะวิทยา อีกทั้งพลวงมีความสามารถในการละลายในดีบุกได้จำกัดและเกิดปฏิกิริยาแบบเพอริเทกติก (Peritectic reaction) ดัง Fig. 1B และนำไปสู่การตกตะกอนของสารประกอบระหว่างโลหะ (Intermetallic compounds) ดัง Fig. 1D ซึ่งช่วยเสริมความแข็งแรง (Torres et al., 2012; Zaimi et al., 2023) ในขณะเดียวกันบิสมัท-พลวง (Bi-Sb) ดัง Fig. 1C เป็นระบบไอโซมอร์ฟัส (Isomorphous) สามารถละลายเป็นเนื้อเดียวกันได้สมบูรณ์ทั้งในสถานะของเหลวและของแข็ง เนื่องจากความคล้ายคลึงกันของโครงสร้างผลึกและขนาดอะตอม (Ishida, 1994) งานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นศึกษาผลของการเติมพลวงที่มีผลต่อโครงสร้างจุลภาคและสมบัติทางกลของโลหะผสมบิสมัทดีบุกให้มีประสิทธิภาพเหมาะสมสำหรับการใช้งาน

อุปกรณ์และวิธีการ

วัสดุและอุปกรณ์

1. สารประกอบการผลิตโลหะผสมประกอบไปด้วย บิสมัทบริสุทธิ์ (Purified Bismuth, Bi) ดีบุกบริสุทธิ์ (Purified Tin, Sn) พลวงบริสุทธิ์ (Purified Antimony, Sb
2. การเตรียมโลหะผสม (Master alloy preparation) : เตาหลอมโลหะ, เครื่องชั่ง ตะแกรงลวด ถังน้ำและน้ำ
3. ขึ้นรูปชิ้นงานตามการทดสอบ: เส้นพลาสติกโพลิเอทิลีน (PLA), เครื่องพิมพ์ 3 มิติ, เครื่องกัดสำหรับการผลิตแม่พิมพ์ขึ้นรูปชิ้นงานสำหรับการทดสอบแรงดึงตามมาตรฐาน ASTM E8, เรซิ่นและสายไฟสำหรับการขึ้นรูปชิ้นงานของการทดสอบการกัดกร่อน, น้ำเกลือ 3.5wt%NaCl
4. เครื่องมือสำหรับการทดสอบวิเคราะห์ประกอบไปด้วย เครื่องมือถ่ายภาพ (Optical Microscope) กล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope) เครื่องทดสอบแรงดึง(Universal Test Machine) เครื่องทดสอบการต้านทานการกัดกร่อน (Potentiostat) และเครื่องวิเคราะห์ความร้อนแบบกวาดเชิงผลต่าง (Differential Scanning Calorimeter)

การเตรียมโลหะผสม

โลหะผสมฐานบิสมัท-ดีบุก (Bi-Sn) ที่จุดยูเทกติก (Eutectic composition) โดยมีการเติมธาตุพลวง (Antimony, Sb) เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติ โดยกำหนดอัตราส่วนผสมทั้งหมด 5 สูตร ซึ่งคงปริมาณดีบุกให้คงที่ไว้ที่ร้อยละ 42 โดยน้ำหนัก และลดปริมาณจากบิสมัทร้อยละ 58 โดยน้ำหนักแปรผันตามปริมาณพลวงที่เพิ่มขึ้นร้อยละ 2, 4, 6 และ 8 โดยน้ำหนักตามลำดับ กระบวนการเตรียมโลหะผสมเริ่มต้นจากการชั่งน้ำหนักโลหะตามอัตราส่วน จากนั้นนำไปหลอมในเตาหลอมไฟฟ้า (Electrical furnace) ที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส จนกระทั่งส่วนผสมละลายเป็นเนื้อเดียวกันอย่างสมบูรณ์ จากนั้นนำไปขึ้นเป็นเม็ดโลหะขนาดเล็กตามแต่ละสูตร

การเตรียมชิ้นงานทดสอบ

1. การทดสอบการต้านทานแรงดึง การเตรียมชิ้นงานทดสอบแรงดึงดำเนินการโดยยสร้างต้นแบบ PLA ด้วยการพิมพ์ 3 มิติสำหรับทำแม่พิมพ์ซิลิโคน จากนั้นชิ้นงานจะถูกปรับแต่งขนาดด้วยเครื่องกัดตามมาตรฐาน ASTM E8 สูตรละ 3 ชิ้นต่อหนึ่งการทดสอบ

2. การทดสอบการต้านทานการกัดกร่อน ชิ้นงานแต่ละสูตรถูกตัดให้มีพื้นที่สัมผัส 1×1 cm^2 และเชื่อมต่อสายไฟก่อนนำไปฝังในเรซิ่น (Mounting) โดยเปิดผิวหน้าทดสอบไว้ จากนั้นขัดเตรียมผิวด้วยกระดาษทรายเบอร์ 180 ถึง 1200 ตามลำดับ

วิเคราะห์สมบัติทางกายภาพและทางกล

การตรวจสอบองค์ประกอบทางเคมีของโลหะผสมที่ได้ด้วยเครื่องวิเคราะห์สารด้วยเทคนิคเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์ (X-ray Fluorescence Spectrometer) เพื่อยืนยันความถูกต้องของส่วนผสมจากนั้นนำมาการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค (Microstructural Characterization) ชิ้นงานทดสอบจะถูกนำมาเตรียมผิวหน้าตามมาตรฐานทางโลหะวิทยาซึ่งประกอบด้วยการขัดหยาบและการขัดละเอียดเพื่อศึกษาลักษณะโครงสร้างจุลภาคและการกระจายตัวของเฟสต่างๆ โดยใช้กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (Optical Microscope) จากนั้นการวิเคราะห์สมบัติทางความร้อน (Thermal Analysis) สมบัติทางความร้อนของโลหะผสมโดยใช้เครื่องดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิงแคลอริมิ เตอร์ (Differential Scanning Calorimetry) เพื่อประเมินผลกระทบของการเติมธาตุพลวงต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิทางความร้อนของวัสดุการทดสอบสมบัติทางกล (Mechanical Testing) การทดสอบความแข็งแรงดึง (Tensile Strength Test) ดำเนินการโดยใช้เครื่องทดสอบวัสดุอเนกประสงค์ (Universal Testing Machine) เพื่อศึกษาพฤติกรรมทางกลของโลหะผสมและการทดสอบความต้านทานการกัดกร่อน (Electrochemical Corrosion Testing) การประเมินความต้านทานการกัดกร่อนทางเคมีไฟฟ้าดำเนินการโดยใช้เครื่อง Potentiostat ทดสอบในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) ความเข้มข้นร้อยละ 3.5 โดยน้ำหนักเพื่อจำลองสภาวะแวดล้อมที่มีความเค็ม และทำการบันทึกผลเพื่อวิเคราะห์ค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนและความหนาแน่นกระแสการกัดกร่อน

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

ผลการทดสอบอัตราส่วนของโลหะผสมนี้ใช้เทคนิค X-ray Fluorescence (XRF) เพื่อยืนยันสัดส่วนของโลหะผสมยูเทคติกบิสมัทดีบุกและโลหะผสมที่เติมธาตุพลวงเข้าไปในอัตราส่วนร้อยละ 2, 4, 6 และ 8 โดยน้ำหนัก

จาก Table 1 พบว่าแนวโน้มของปริมาณพลวงโดยน้ำหนักค่อนข้างเป็นไปตามอัตราส่วนที่ออกแบบไว้ ซึ่งเพียงพอที่จะใช้ในการศึกษาผลกระทบของปริมาณพลวงมีต่อสมบัติของวัสดุในลำดับต่อไป เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบระหว่างค่าที่คำนวณไว้ กับค่าที่วัดได้จริง พบว่าปริมาณพลวงที่วัดได้จริงมีค่าต่ำกว่าเกณฑ์ที่กำหนดไว้เล็กน้อยในทุกเงื่อนไข โดยเฉพาะที่ระดับความเข้มข้นสูง (เช่น ที่ระดับ ร้อยละ 8 โดยน้ำหนักแต่วัดได้จริงร้อยละ 6.85 โดยน้ำหนัก) ปรากฏการณ์นี้อาจเกิดจากการสูญเสียจากการเผาไหม้ (Burn-off loss) หรือการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของพลวงระหว่างกระบวนการหลอม เนื่องจากพลวงสามารถทำปฏิกิริยากับออกซิเจนเกิดเป็นขี้ตะกรัน (Dross/Slag) ลอยอยู่ที่ผิวหน้าของน้ำโลหะและถูกตักออกไปก่อนการขึ้นรูปหรืออาจเกิดจากการแยกตัวของธาตุ (Segregation) ในขณะแข็งตัว ในขณะที่ปริมาณบิสมัท (Bi) มีสัดส่วนลดลงแปรผกผันกับการเพิ่มขึ้นของพลวง แสดงให้เห็นว่าการเติมพลวงเป็นการเข้าไปแทนที่ในส่วนของบิสมัท (Bi-substitution) ตามการคำนวณ

Table 1 Composition of eutectic Bi-Sn alloy and adding antimony to binary system at 2, 4, 6, 8wt%Sb

Formula	Measured Content		
	wt%Bi	wt%Sn	wt%Sb
Eutectic 58Bi-42Sn	58.95±0.78	40.61±0.71	-
56Bi-42Sn-2Sb	53.81±0.13	44.12±0.09	2.07±0.05
54Bi-42Sn-4Sb	56.22±0.42	40.35±0.23	3.40±0.25
52Bi-42Sn-6Sb	51.37±1.17	43.72±0.69	4.91±0.51
50Bi-42Sn-8Sb	48.73±0.96	44.42±0.63	6.85±0.53

โครงสร้างจุลภาค (Microstructures)

จากการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของโลหะผสมยูเทคติกบิสมัทดีบุกและส่วนที่มีการเติมธาตุพลวง (Antimony, Sb) ในปริมาณต่างๆ ที่ร้อยละ 2, 4, 6 และ 8 โดยน้ำหนัก) ผ่านกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (Optical Microscope) ดังแสดงใน Fig. 2

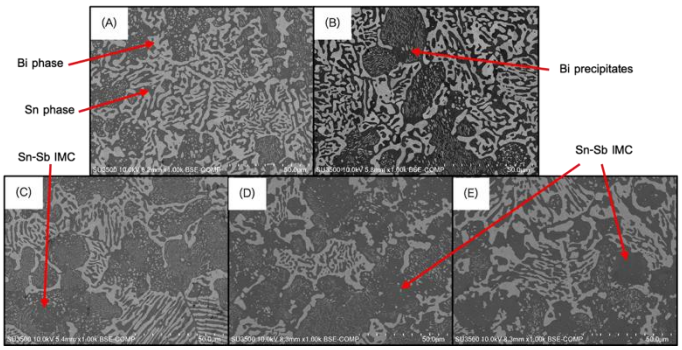


Fig. 2 BSE-SEM microstructure image of (A) eutectic bismuth-tin(58Bi-42Sn), (B) Bi42Sn-2Sb, (C) Bi42Sn-4Sb, (D)Bi42Sn-6Sb, (E)Bi42Sn-8Sb

พบการเปลี่ยนแปลงทางสัณฐานวิทยาที่ชัดเจนเมื่อปริมาณของธาตุพลวงเพิ่มขึ้น สำหรับโลหะผสมพื้นฐานยูเทกติกบิสมัทดีบุก (58Bi-42Sn) จากภาพแสดงโครงสร้างแบบยูเทกติกประกอบด้วยเฟส Bi (สว่าง) และ Sn (มืด) กระจายตัวแทรกสลับกันในเนื้อพื้น (Matrix) เมื่อเติมพลวงร้อยละ 2 เริ่มเห็นการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยโดย Sb ละลายเข้ากับ Sn (Solid solution strengthening) แต่ยังไม่พบเฟส SnSb แยกตัวอย่างชัดเจน ที่การเติมพลวงร้อยละ 4 โดยน้ำหนัก โครงสร้างจุลภาคเริ่มแสดงการเปลี่ยนแปลงเริ่มปรากฏการก่อตัวของเฟสของแข็งปฐมภูมิ (Primary solid phase) ที่มีลักษณะเป็นอนุภาคสีขาวสว่างกระจายตัวแทรกอยู่ในเนื้อพื้นยูเทกติก นอกจากนี้พลวง (Sb) ยังเข้าไปละลายและเริ่มเกิดการแยกเฟสเป็นสารประกอบเชิงโลหะ (Intermetallic compounds) ชนิดดีบุกพลวง (Sn-Sb) มีลักษณะรูปทรงเหลี่ยมคล้ายลูกบาศก์ (Cuboid-like shapes) ดังที่เคยมีรายงานไว้ในงานวิจัยของ (Fowler et al., 2023) การกระจายตัวของอนุภาคเหล่านี้มีส่วนสำคัญในการขัดขวางการเคลื่อนที่ของดิสโลเคชัน (Dislocation movement) ซึ่งสัมพันธ์กับกลไกการเพิ่มความแข็งแรง ในกรณีของโลหะผสมที่มีปริมาณ Sb สูงขึ้นที่ร้อยละ 6 และ 8 โดยน้ำหนัก ภาพโครงสร้างจุลภาคแสดงให้เห็นการเพิ่มขนาดอนุภาคของเฟส SnSb อย่างเห็นได้ชัดขึ้นเรื่อยๆ การเกิดเฟส SnSb ขนาดใหญ่ดัง Fig. 2D และ 2E อาจส่งผลให้วัสดุมีความเปราะได้ แม้ว่าความแข็งแรง (Strength) อาจจะเพิ่มขึ้น แต่จะเป็นจุดกำเนิดมาซึ่งรอยร้าว (Crack initiation sites) ได้เมื่อรับแรงกระแทก

การวิเคราะห์สมบัติทางความร้อน (Thermal Property Analysis)

จากการวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิค Differential Scanning Calorimeter (DSC) ของโลหะผสมยูเทคติกบิสมัทดีบุก และที่มีการเติมธาตุ Sb ในปริมาณร้อยละ 2, 4, 6 และ 8 ตามลำดับดัง Fig. 3 กราฟความร้อนแสดงลักษณะพีกดูดความร้อน (Endothermic peak) ซึ่งบ่งชี้ถึงกระบวนการหลอมเหลวของโลหะผสมยูเทคติกบิสมัทดีบุกและโลหะผสมยูเทคติกบิสมัทดีบุกที่เติมธาตุพลวงที่ร้อยละ 2, 4, 6 และ 8 โดยน้ำหนักตามลำดับ

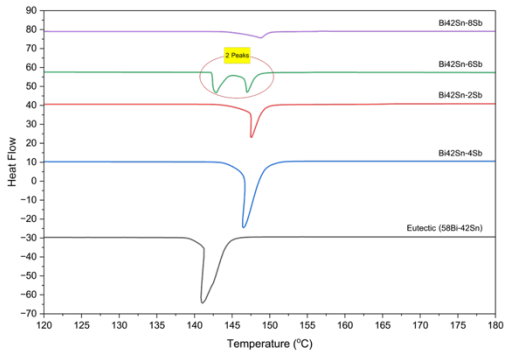


Fig. 3 Thermal Curves of Eutectic Bismuth-Tin and adding Antimony by differential scanning calorimeter

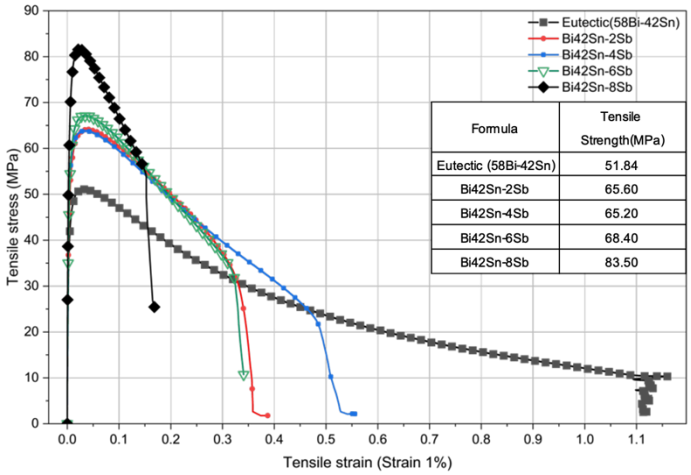
โดยผลการทดลองสรุปใน Table 2 ระบุค่าอุณหภูมิเริ่มการหลอมเหลว (T_{Onset}), อุณหภูมิที่จุดยอด (T_{Peak}), และอุณหภูมิสิ้นสุดการหลอมเหลว (T_{Endset}) ไว้อย่างชัดเจน พบว่าโลหะผสมยูเทคติกบิสมัทดีบุก แสดงพฤติกรรมการหลอมเหลวที่อุณหภูมิต่ำที่สุดในกลุ่มการทดลอง โดยมีค่า อยู่ที่ 141.28°C และ ที่ 142.5°C ซึ่งสอดคล้องกับลักษณะเฉพาะของโลหะผสมยูเทกติกที่มีจุดหลอมเหลวต่ำและมีช่วงการหลอมตัวที่แคบ เมื่อพิจารณาอิทธิพลของการเติมธาตุพลวง (Antimony, Sb)พบว่าการเติมที่ระดับร้อยละ 2 และ 4 โดยน้ำหนักส่งผลให้จุดหลอมเหลวของโลหะผสมปรับตัวสูงขึ้นอย่างชัดเจน โดยค่า ขยับขึ้นไปอยู่ที่ 147.24°C และ 146.79°C ตามลำดับ อย่างไรก็ตามมีจุดที่น่าสังเกตว่าเมื่อปริมาณพลวงเพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 6 โดยน้ำหนัก (Bi42Sn-6Sb) ปรากฏลักษณะการหลอมเหลวแบบ Two-stage melting behavior และอุณหภูมิลดต่ำลงเหลือ 142.32°C ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับโลหะผสมพื้นฐานก่อนที่อุณหภูมิจะกลับมาเพิ่มสูงขึ้นอีกครั้งเมื่อปริมาณพลวงเพิ่มเป็นร้อยละ 8 โดยน้ำหนักซึ่งมีค่าอยู่ที่ 145.38°C อย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งอาจสันนิษฐานได้ว่าในช่วงพีคแรกมีการหลอมเหลวของโครงสร้างยูเทคติกก่อน ($T_{Solidus}$)แล้วต่อมาจึงมีการละลายตัวของเฟสรองหรือ Sb-rich phase จนกลายเป็นของเหลวโดยสมบูรณ์ ($T_{liquidus}$) แสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ที่ไม่เป็นเชิงเส้นระหว่างปริมาณพลวงที่เพิ่มขึ้นและอุณหภูมิการหลอมเหลวของโลหะผสม

Table 2 Temperature at Endothermal Peak of Eutectic Bismuth-Tin and adding Antimony by Differential Scanning Calorimeter (DSC)

Formula	Temperature of Endothermal Peak		
	T_{Onset}(°C)	T_{Peak}(°C)	T_{Endset} (°C)
Eutectic(58Bi-42Sn)	141.28	142.5	144.62
Bi42Sn-2Sb	147.24	148.33	149.46
Bi42Sn-4Sb	146.79	148	149.36
Bi42Sn-6Sb	142.32	143.5	144.93
Bi42Sn-8Sb	145.38	149	150.18

ความต้านทานแรงดึง (Tensile Property)

จากผลการทดสอบสมบัติทางกลภายใต้แรงดึงโดยเครื่องทดสอบวัสดุอเนกประสงค์ (Universal Testing Machine: UTM) แสดงให้เห็นถึงอิทธิพลของธาตุผสมต่อพฤติความเค้นและความเครียด (Stress-Strain behavior) อย่างมีนัยสำคัญดัง Fig. 4



Formula	Tensile Strength(MPa)
Eutectic (58Bi-42Sn)	51.84
Bi42Sn-2Sb	65.60
Bi42Sn-4Sb	65.20
Bi42Sn-6Sb	68.40
Bi42Sn-8Sb	83.50

Fig. 4 Stress-Strain Curve of Eutectic Bismuth-Tin and adding Antimony

โลหะผสมยูเทกติกบิสมัท-ดีบุก (58Bi-42Sn) แสดงค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุด (Ultimate Tensile Strength, UTS) ต่ำที่สุดในกลุ่มอยู่ในช่วงประมาณ 51.84 MPa มีพฤติกรรมการยืดตัวที่สม่ำเสมอสอดคล้องกับ Fig. 2A ที่มีเฟสยูเทคติกอย่างสม่ำเสมอ เมื่อมีเติมพลวงเข้าไปในระบบพบว่าค่าความต้านทานแรงดึงเพิ่มขึ้นตามปริมาณพลวงในช่วงร้อยละ 2 ถึง 6 โดยน้ำหนัก ค่าความต้านทานแรงดึงเพิ่มขึ้นมาอยู่ในช่วง 65.00–68.40 MPa ตามลำดับ การเพิ่มขึ้นนี้มีผลหลักมาจากการเสริมแรงสารละลายของแข็ง อะตอมของพลวงเข้าไปแทนที่ในโครงสร้างผลึกบิสมัส-ดีบุก ส่งผลให้โครงสร้างมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามการเปลี่ยนแปลงที่โดดเด่นปรากฏในโลหะผสมเติมพลวงปริมาณร้อยละ 8 โดยน้ำหนัก ค่าความต้านทานแรงดึงประมาณ 83.50 MPa แสดงให้เห็นว่ามีความแข็งแรงสูงสุดในกลุ่มซึ่งสอดคล้องกับ Fig. 2E ที่มีขนาดของ Sn-Sb IMC ขนาดใหญ่ซึ่งส่งผลให้สามารถรับแรงและขัดขวางการเคลื่อนที่ของดิสโลเคชั่นได้ดี แต่เมื่อพิจารณากราฟพบว่าความเค้นลดลงอย่างรวดเร็วบ่งชี้ถึงพฤติกรรมความเปราะ (Brittleness) ปรากฏการณ์นี้อธิบายได้ว่าบริเวณขอบมุมของ Sn-Sb IMC ทำหน้าที่เป็นจุดรวมความเค้น เมื่อรับแรงกระทำเกินขีดจำกัด อนุภาคที่แข็งแต่เปราะเป็นจุดกำเนิดรอยร้าว ทำให้ชิ้นงานเกิดการแตกหักได้ง่ายและความยืดหยุ่น (Ductility) ลดลงอย่างมีนัยสำคัญเมื่อเทียบกับโลหะผสมที่มีปริมาณพลวง (Sb) ที่ต่ำกว่า(ร้อยละ 2, 4 และ 6 โดยน้ำหนัก) ดังนั้นแม้ว่าปริมาณพลวง (Sb) จะสูงถึงร้อยละ 8 โดยน้ำหนักจะให้ความแข็งแรง (Strength)สูงสุด แต่อาจยังมีข้อจำกัดด้านความเหนียว (Ductility) ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญสำหรับการใช้งานที่ต้องการความยืดหยุ่น

สมบัติการต้านทานการกัดกร่อน (Corrosion Resistance)

Fig. 5 แสดงการทดสอบความต้านทานการกัดกร่อนทางเคมีไฟฟ้าแบบโพเทนชิโอไดนามิกโพลาไรเซชัน เพื่อศึกษาพฤติกรรมการกัดกร่อนของโลหะผสมยูเทคติกบิสมัทดีบุกและโลหะผสมยูเทคติกบิสมัทดีบุกที่มีการเติมพลวง (Sb) ในปริมาณร้อยละ 2, 4, 6 และ 8 โดยน้ำหนักในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ที่ร้อยละ 3.5 โดยน้ำหนัก (NaCl 3.5 wt%)

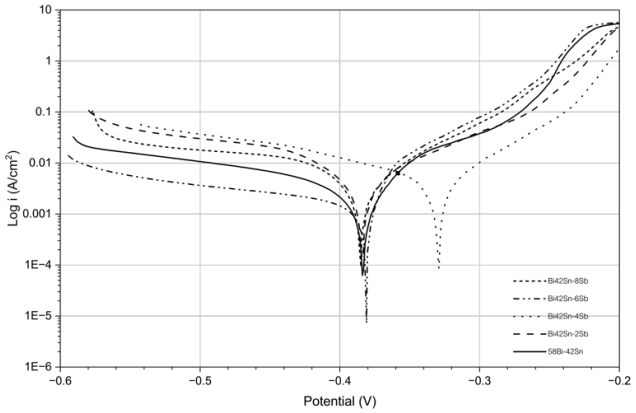


Fig. 5 Effect of Sb content on the corrosion behavior of Bi-Sn alloys in 3.5 wt% NaCl solution as characterized by potentiodynamic polarization curves

ผลการทดสอบแสดงค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อน (Corrosion Potential : Ecorr หรือ Vcorr) และความหนาแน่นกระแสการกัดกร่อน (Corrosion Current Density: Icorr) ดัง Fig. 5 และ Table 3 ชี้ให้เห็นว่าการเติมพลวง(Sb) ส่งผลต่อความต้านทานการกัดกร่อนอย่างมีนัยสำคัญ โลหะผสมบิสมัทดีบุกเติมพลวงที่ร้อยละ 6 โดยน้ำหนัก แสดงค่า I_{corr} ต่ำที่สุดที่ 1.74×10^{-6} A/cm^2 ซึ่งลดลงประมาณ 2.4 เท่าเมื่อเทียบกับโลหะผสมยูเทคติกบิสมัทดีบุก (58Bi-42Sn, Icorr = 4.21×10^{-6}A/cm^2) แสดงถึงอัตราการกัดกร่อนที่ต่ำที่สุดในกลุ่มตัวอย่างในทางตรงกันข้าม การเติมพลวง Sb ที่ระดับร้อยละ 2 โดยน้ำหนัก ส่งผลให้ค่า I_{corr} เพิ่มขึ้นสูงสุดเป็น 1.20×10^{-5} A/cm^2 บ่งชี้ให้เห็นถึงความสามารถในการต้านทานการกัดกร่อนที่ลดลง อย่างไรก็ตาม เมื่อปริมาณพลวง(Sb) เพิ่มขึ้นถึงร้อยละ 4 และ 6 โดยน้ำหนัก ปรากฏว่าค่า I_{corr} กลับมีแนวโน้มลดลงอย่างต่อเนื่องก่อนที่จะกลับมาเพิ่มขึ้นเล็กน้อยที่การเติมพลวง (Sb) ร้อยละ 8 โดยน้ำหนัก (5.95×10^{-6}A/cm^2) ในส่วนของค่าศักย์ไฟฟ้า (V_{corr}) พบว่าโลหะผสมบิสมัทดีบุกที่เติมพลวงที่ร้อยละ 4 โดยน้ำหนักแสดงถึงความเป็นโลหะมีสกุล (Nobility) มากที่สุดที่ -0.329 V ในขณะที่โลหะผสมอื่นๆ มีค่าใกล้เคียงกันในช่วง -0.382 ถึง -0.387 V

Table 3 Corrosion potential (V_{corr}) and corrosion current density (I_{corr}) of Bi-Sn-xSb alloys obtained from polarization tests.

Formula	Vcorr(V)	Icorr(A)
Eutectic (Bi58-42Sn)	-0.3845	4.21×10^{-6}
Bi42Sn-2Sb	-0.3852	1.20×10^{-5}
Bi42Sn-4Sb	-0.3293	5.20×10^{-6}
Bi42Sn-6Sb	-0.3821	1.74×10^{-6}
Bi42Sn-8Sb	-0.3873	5.95×10^{-6}

สรุปผลการทดลอง

ผลการทดลองของงานวิจัยนี้มีแนวโน้มที่ดีสำหรับ เพื่อปรับปรุงสมบัติทางกลของโลหะผสมยูเทคติกบิสมัท-ดีบุกด้วยการเติมธาตุพลวง (Sb) สามารถสรุปประเด็นสำคัญได้ดังนี้ ผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRF ยืนยันองค์ประกอบสอดคล้องกับสัดส่วนการคำนวน แม้จะมีการสูญเสียพลวงเล็กน้อยจากกระบวนการหลอมอันเนื่องมาจากความไวต่อ

ปฏิกิริยาและความดันไอสูงของพลวง ดังนั้นในทางปฏิบัติควรมีการเผื่อส่วนผสมเพื่อรักษาเสถียรภาพขององค์ประกอบทางเคมี ในด้านโครงสร้างจุลภาค การเพิ่มปริมาณพลวงส่งผลให้เกิดเฟสผลึกใหม่รูปทรงเหลี่ยม (Cuboid-like phase) แทรกตัวอยู่ในโครงสร้างยูเทคติก ซึ่งระบุว่าเป็นสารประกอบเชิงโลหะ Sn-Sb โดยพบการกระจายตัวที่สมบูรณ์ที่สุดในสูตรเติมพลวงร้อยละ 6 โดยน้ำหนัก แต่เมื่อปริมาณเพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 8 พบว่าโครงสร้างเกิดการหยาบตัว (Coarsening) อย่างชัดเจน สำหรับสมบัติทางความร้อนและทางกล โลหะผสมสูตรเติมพลวงร้อยละ 6 มีจุดหลอมเหลวลดต่ำลงเหลือประมาณ 142°C ซึ่งใกล้เคียงกับโลหะพื้นฐาน ในส่วนของสมบัติทางกล พบว่าความแข็งแรงดึงเพิ่มขึ้นตามปริมาณพลวง แต่ความเหนียวลดลงอย่างมีนัยสำคัญที่ปริมาณพลวงสูง ผลการทดสอบชี้ให้เห็นว่า สูตรที่เติมพลวงร้อยละ 4 โดยน้ำหนัก คือจุดสมดุลที่ดีที่สุด (Optimal balance) โดยให้ความแข็งแรงสูงกว่าโลหะพื้นฐานอย่างมีนัยสำคัญโดยยังคงรักษาความเหนียวไว้ได้ ไม่เกิดความเปราะมากจนเกินไป ท้ายที่สุดในด้านความทนทานต่อสภาพแวดล้อม โลหะผสมสูตรเติมพลวงร้อยละ 6 แสดงสมรรถนะความต้านทานการกัดกร่อนสูงสุดในสารละลาย NaCl 3.5 wt% โดยมีอัตราการกัดกร่อนต่ำที่สุดในกลุ่มการทดลอง จึงสรุปได้ว่าการเติมพลวงในสัดส่วนที่เหมาะสมสามารถยกระดับสมบัติของโลหะผสม Sn-Bi ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณบริษัท ปตท.สำรวจและผลิตปิโตรเลียม จำกัด (มหาชน) (ปตท.สผ) และภาควิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ สำหรับความอนุเคราะห์ อุปกรณ์ สถานที่และเงินทุนสนับสนุนในการทำวิจัย

ขอขอบคุณคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ สำหรับทุนสนับสนุนจากโครงการส่งเสริมการศึกษาระดับปริญญาโท แผนการเรียนแบบ ก คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ปีการศึกษา 2567

เอกสารอ้างอิง

Fowler, H.N., Tay, S.X., Blendell, J., Handwerker, C.A. 2023. Microalloying effects of Sb and Ag on the microstructural evolution of eutectic Sn–Bi alloys. MRS Adv. 8: 763–767. doi.org/10.1557/s43580-022-00472-3

Hmadeh, L., Anunciação Jaculli, M., Elahifar, B., Sangesland, S. 2024. Development of bismuth-based solutions for well plugging and abandonment: A review. Pet. Res. 9: 250–264. doi.org/10.1016/j.ptlrs.2024.01.003

Hmadeh, L., Elahifar, B., Sangesland, S. 2025. Evaluating the performance of a cost-effective creep testing setup on bismuth-tin alloy specimens: Challenges and future directions. In SPE/IADC International Drilling Conference and Exhibition.

Ishida, H.O.a.K. 1994. A thermodynamic study of the phase equilibria in the Bi-Sn-Sb system. Electron. Mater. 23.

Okamoto, H. 2012. Sb-Sn (antimony-tin). J. Phase Equilib. Diffus. 33: 347. doi.org/10.1007/s11669-012-0054-8

Shen, L., Lu, P., Wang, S., Chen, Z. 2013. Creep behaviour of eutectic SnBi alloy and its constituent phases using nanoindentation technique. J. Alloys Compd. 574: 98–103. doi.org/10.1016/j.jallcom.2013.04.057

Shen, X., Zois, A., Douglas, J.O., Gourlay, C.M. 2025. Eutectic orientation relationships in Sn-Bi solder. J. Alloys Compd. 1035. doi.org/10.1016/j.jallcom.2025.181339

Torres, A., Hernández, L., Domínguez, O. 2012. Effect of antimony additions on corrosion and mechanical properties of Sn-Bi eutectic lead-free solder alloy. Mater. Sci. Appl. 3: 355–362. doi.org/10.4236/msa.2012.36051

Vianco, P.T., Rejent, J.A. 1999. Properties of ternary Sn-Ag-Bi solder alloys: Part I—Thermal properties and microstructural analysis. J. Electron. Mater. 28: 1127–1137. doi.org/10.1007/s11664-999-0250-4

Zaimi, N.S.M., Salleh, M.A.A.M., Al Bakri Abdullah, M.M., Ramli, M.I.I. 2023. A short review on the influence of antimony addition to the microstructure and thermal properties of lead-free solder alloy. Arch. Metall. Mater.: 981–986. doi.org/10.24425/amm.2023.145463

Comparative thermal analysis of combinations of drill bit material (ZrO_2 vs 316L Stainless Steel) and irrigation regime (dry vs irrigated) of artificial bone during drilling

Mathilde Soto, Pakanun Wattanasinbumrung, Phanindra Addepalli, Worapong Sawangsri*
Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Kasetsart University, Bangkok 10900, Thailand
*Corresponding author. E-mail address: fengwps@ku.ac.th

Abstract

Bone drilling is a common surgical procedure. Controlling the temperature variations at the cutting point is crucial to avoid damaging the bone tissue and subsequent osteonecrosis. This study compares the individual and combined effects of drill bit material (Zirconia vs 316L stainless steel) and irrigation regime (dry vs irrigated) on heat generation during artificial bone drilling. The goal is to identify the configuration minimising temperature increase. A bicortical polyurethane block was drilled using four different combinations of material and irrigation. It was drilled at 1000rpm and 30mm/min using 3-mm drill bits of identical geometry. Each drilling was repeated 5 times. The temperature increase (ΔT) was measured using a thermocouple placed between the two layers of the block. The dry 316L Stainless Steel (SS316L) had the highest averaged temperature increase (ΔT_{max} = 13.75 °C). Dry zirconia (ΔT_{max} = 6.2 °C) and irrigated SS316L (ΔT_{max} = 5.6 °C) showed a lower temperature increase. Irrigated zirconia had the lowest (ΔT_{max} = 2.45 °C). The experiment shows that irrigation reduces temperature increase and initial thermal peak. Zirconia shows better results than SS316L under the same conditions. These results highlight the importance of tool material and irrigation regime for thermal management during bone drilling.

Keywords: Bone drilling, Irrigation, Polyurethane artificial bone, Thermal management, Zirconia

Introduction

Bone drilling is a common surgical procedure in orthopaedics, dentistry and neurosurgery (Gehrke et al., 2020; Li et al., 2021). Controlling the temperature variations at the cutting point is essential to avoid damaging the bone tissue and preventing osteonecrosis (Li et al., 2021; Islam et al., 2023). Limiting temperature increase during drilling is therefore necessary to preserve the quality of the bone tissue. Given the direct impact of material on heat generation, there has been a growing interest in innovative biocompatible materials as improved alternatives to conventional stainless steels (Tur et al., 2021; Addepalli, et al., 2025). This has led to increased research into ceramics, recognised for their hardness, chemical inertness, and high biocompatibility, such as zirconia (ZrO_2) (Tur et al., 2021). Recent studies on ZrO_2 tools found it to be a very promising material to limit thermal damage (Tur et al., 2021; Addepalli et al., 2025). Existing studies often compare different tool materials under a single lubrication regime or different lubrication regimes with a single tool material, neglecting their combined effect. In the medical field, the relevant term for lubrication regime is irrigation regime. There is no comprehensive study investigating the combined effect of tool material and irrigation regime (Perçin et al., 2016; Niketh and Samuel, 2018; Jamil et al., 2020). Additionally, results from studies on milling cannot be directly applied to drilling as it is a distinct machining process which requires its dedicated protocol (Perçin et al., 2016; Niketh and Samuel, 2018). Addressing this gap is relevant because better understanding of how tool material and irrigation affect temperature during drilling operations is essential to reducing it. This study aims to identify the configurations of tool material and irrigation regime that led to the lowest temperatures increase during the drilling of artificial bone. The goal is to obtain a comparative dataset on the thermal behaviour of zirconia and SS316L under dry and irrigated conditions.

Materials and Methods

Artificial Bone

A block of bicortical polyurethane (BPU) was used to substitute real bone in this experiment. The block is 95×45×32 mm. It consists of a top layer 2 mm thick with a density of 40 Pounds per Cubic Foot (PCF), which represents the exterior compact layer of human bone, and a bottom part 30 mm thick with a density of 20 PCF, which represents the interior cancellous bone. It is produced by Nacional Ossos (product code 20PCF-CP2). BPU is often used in experiments concerning bone because it accurately mimics the structure of bone (Addepalli et al., 2025) and has similar mechanical and thermal properties. However, it lacks the vascularisation and biological response of a living bone. It remains an accessible, safe, ethical, and standardised material suitable for experiments

Drill Bits

Two new drill bits, identical in geometry, and of 3 mm diameter were used in this experiment:

- One Zirconia (ZrO_2), studied for its thermal behaviour and biocompatibility. The drill bit was custom manufactured by M.G. Machine tools.
- One 316L stainless steel, used in surgery and widely studied in bone machining (Tur et al., 2021). This drill bit was custom manufactured by Vast Ortho (reference number 1044257)

Each drill bit was used for the ten drillings corresponding to their material. This helped prevent the introduction of random error. The tool wear for ten 15-mm deep holes is considered negligible for the purpose of comparing two tools.

Experimental Parameters

The drilling was performed with a rotational speed of 1000rpm, with an advance rate of 30mm/min. These parameters are within the usual range found in the literature (Addepalli et al., 2025; Li et al., 2021). The CNC program (M-code) fixed the tool-material contact time to 30 s. They are also compatible with simulated clinical conditions. Four combinations were tested following a factorial plan, SS316L – dry, SS316L – irrigated, zirconia – dry, and zirconia – irrigated. Each condition was repeated five times to increase statistical reliability.

Experimental Setup

The experiments were performed on a HY6040 5-axis CNC. The artificial bone block was fixed using a vice. It was drilled perpendicularly to its surface. The drill points were separated by three times their diameter to limit residual heat transfer impacting results. This can be observed in Fig. 1. Irrigation was applied manually with no active control of flow rate or temperature. The fluid used was water. The irrigation regime is considered qualitative (irrigated or dry).

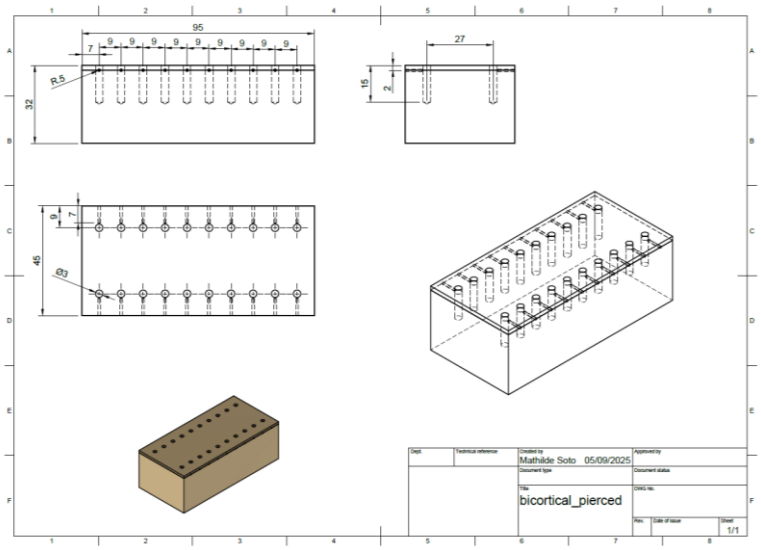


Fig. 1 Front, top, and left view technical drawing of bicortical artificial bone block (in mm)

Temperature Measurement

The temperature was measured with a type K thermocouple (Islam et al. 2021). It was placed with thermal paste in a 1 mm hole drilled at the interface of the two layers which ended 0.5 mm from the drilling. Temperature measurement started prior to initial contact between the tool and material for each drilling. It ended when the temperature approximately returned to the average temperature before machining. As a result, the total duration of measurement varies between experiments. The temperature increase was defined relative to this average temperature before machining. The baseline temperature was therefore not fixed and varied slightly from one trial to another

Data Treatment

For each combination, five trials were performed to obtain a reliable thermal profile. The raw data extracted was time and temperature. From this was extracted the temperature increase as a function of time $\Delta T(t)$, the maximum temperature increase ΔT_{max} and the standard deviation. The raw data included pre-drilling baseline values which were cut off. The baseline temperature (the first of the drilling) was defined as the average temperature before drilling + 3 × standard deviation (σ). To keep a time marker, the ten iterations before the baseline value were also kept. This process ensured the $\Delta T(t)$ figures had a short pre-contact segment and helped make the trials comparable and reduce pre-drilling noise.

Results and Discussion

Maximum Temperature

In Table 1 dry drilling with the SS316L drill bit causes the highest maximum temperature increase ($\Delta T_{max,}$ = 13.75 °C). Dry drilling with the zirconia drill bit has a maximum temperature increase that is twice as low (ΔT_{max} = 6.2 °C). Under irrigation, the maximum temperature reached by the SS316L drill bit is only slightly lower (ΔT_{max} = 5.6 °C). Irrigated zirconia drill bit drilling presents the lowest maximum temperature increase by far (ΔT_{max} =2.45 °C). In Fig. 2, the plotted temperature corresponds to the average of the five trials, expressed as the difference ΔT relative to the baseline temperature. The dry configurations reach higher temperatures than irrigated ones. Zirconia consistently produces lower temperatures than SS316L in both irrigation regimes. In Fig. 2 the SS316L configurations have a fast initial temperature increase, spiking at the ΔT_{max} and then immediately cooling. Zirconia has a more gradual initial heating, staying around ΔT_{max} a bit longer. This progressive temperature increase illustrates the material's thermal properties. Zirconia has a low thermal conductivity. This limits heat diffusion to surrounding materials, explaining the more gradual heating of the BPU block. This can be described as a thermal buffering effect. In contrast, SS316L has a higher thermal conductivity, facilitating quicker heat transfer and thus faster temperature increase. Clinically, this phenomenon can be an advantage as it provides more time for intervention before critical thresholds are reached. Fig. 3, shows the boxplot with value distribution. The ΔT_{max} of dry SS316L drilling has a wider spread than the other configurations but they all have low variability.

A two-factor analysis of variance (ANOVA) was completed. It revealed the significant effect of both tool material ($p<0.001$) and irrigation regime ($p<0.001$) on heat generation. It also revealed a strong interaction between

Table 1 Averaged ΔT_{max} and σ in each configuration

	Averaged ΔT_{max} [°C]	σ	Trials
SS316L – Dry	13.75	3.71	5
SS316L – Irrigated	5.6	0.91	5
Zirconia – Dry	6.2	1.44	5
Zirconia - Irrigated	2.45	0.33	5

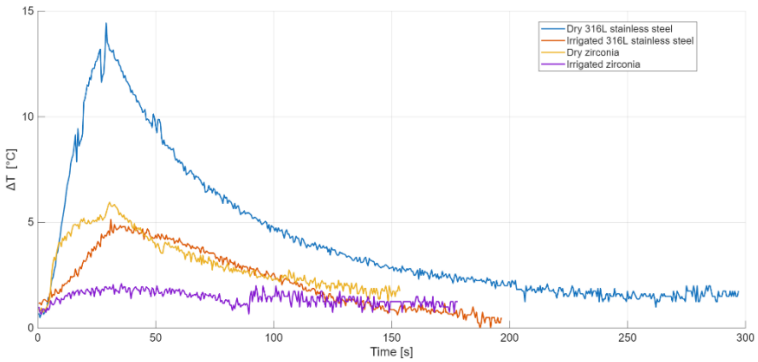


Fig. 2 Averaged $\Delta T(t)$ in each configuration during drilling

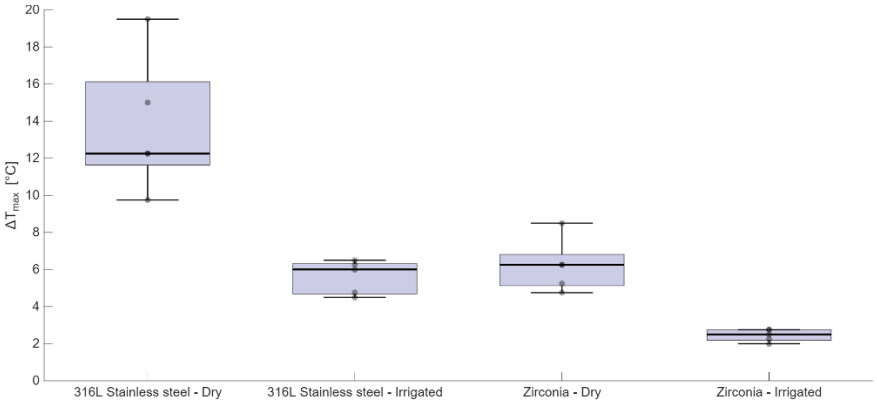


Fig. 3 Distribution of ΔT_{max} in each configuration

Irrigation impact on $\Delta T(t)$ thermal profiles

Fig. 4 shows the average of irrigated and dry drilling. Irrigation not only lowers ΔT_{max} by over 50%, but it also changes the heating profile. Dry drilling has a steep increase in temperature, shortly peaking at a high ΔT_{max}, and then rapid initial cooling. Irrigation clearly reduces the ΔT_{max} but also lessens the time it takes to be reached. A more gradual heating can be observed, with a slower initial cooling. Overall, the irrigation limits the maximum value of $\Delta T(t)$, the time needed to reach it, and the time the temperature stays high. It also improves chip evacuation.

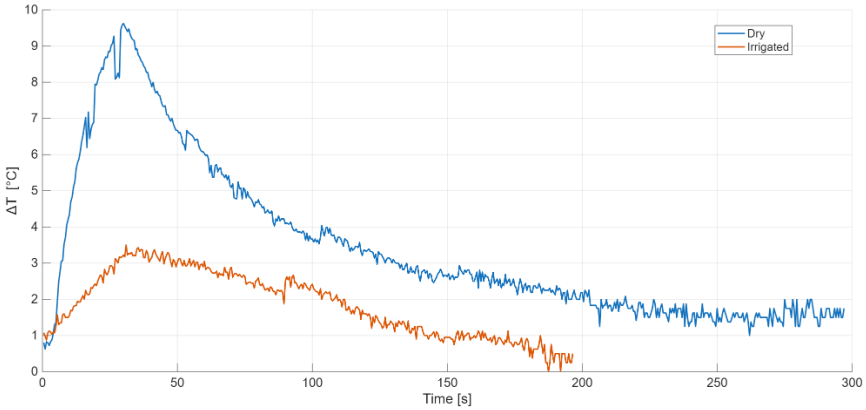


Fig. 4 Averaged ΔT(t) for dry and irrigated drilling

Drill bit material impact on ΔT(t) thermal profiles

Fig. 5 explicitly shows how much the drill bit material impacts the results. ΔT_{max} of zirconia is less than half that of SS316L. This is consistent with zirconia's thermal properties: low thermal conductivity, high hardness, and low friction coefficient. The results suggest differences in the distribution of heat generated during drilling depending on the material-irrigation combination. Zirconia has a lower thermal conductivity and friction coefficient, which limit heat transfer between the tool and BPU block. Consequently, a larger fraction of the thermal energy is transferred to the chips and the irrigation fluid, when used. Irrigation also helps chip evacuation, explaining the more favourable thermal profile observed for this combination.

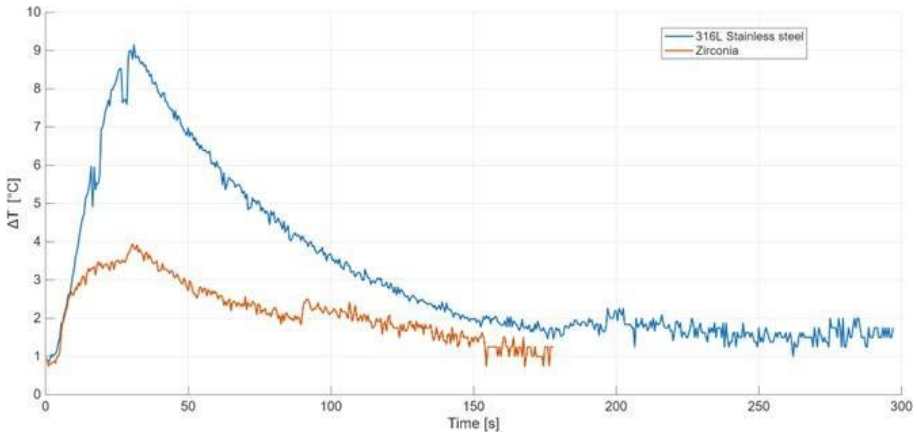


Fig. 5 Averaged ΔT(t) for SS316L and Zirconia during drilling

Combined effect

The configuration of zirconia drill bit and irrigation gives the lowest temperature increase with ΔT_{max} = 2.45 °C. This association is rarely documented in literature, as the effects are often studied separately.

These findings indicate that zirconia could represent a relevant alternative to SS316L in contexts where thermal management is critical. While this study mainly focuses on the temperature increase ΔT, the results can also be discussed in relation to biological thresholds reported in the literature. It is widely accepted that bone

tissue damage will occur when the temperature passes 47 °C for one minute (A.R. Eriksson 1983-07-01). Assuming a physiological reference temperature of 37 °C, the dry SS316L configuration could lead to absolute temperatures exceeding the common safety threshold. Based on the highest temperature increase measured (ΔT_{max} =13.75 °C), the temperature could reach 50.75 °C. Considering the temperature is measured 0.5 mm from the actual cutting site, we can assume a temperature gradient, and so that the temperature at tool-material interface is higher. The actual temperatures reached under these conditions could be considered critical.

Limits

The experiment was performed on artificial bone, which lacks vascularisation and biological response of a living tissue. The drill bits used were of only one geometry and diameter. The drilling was done with only one set of parameters. The thermocouple was placed in a single position. Only the thermal effect of drilling is observed, the mechanical effect is not considered. These limits do not bias our results, but they limit the direct application of the findings in a clinical context.

Perspectives

Future works could be based on these results but include various geometries, a range of drilling parameters, different cooling techniques, tool wear analysis. Eventually this study could be complemented by a software equivalent performed on Ansys or Abaqus.

Conflict of Interest

The authors declare that there are no conflicts of interest.

Acknowledgements

The authors would like to thank the Department of Mechanical Engineering at Kasetsart University for providing access to the laboratory equipment used in this study. The authors also acknowledge the support and guidance of Professor Worapong Sawangsri throughout the development of this work.

References

Addepalli, P., Sawangsri, W., Ghani, S.A.C. 2025. Thermal management and biocompatibility in dry machining: An experimental study of ZrO2-based cutting tool for bone machining. Int. J. Thermofluids 25: 101001.

Eriksson, A.R., Albrektsson, T. 1983. Temperature threshold levels for heat-induced bone tissue injury: A vital-microscopic study in the rabbit. J. Prosthet. Dent. 50: 101–107. doi.org/10.1016/0022-3913(83)90174-9

Gehrke, S.A., Treichel, T.L.E., Aramburu Junior, J., de Aza, P.N., Prados-Frutos, J.C. 2020. Effects of the technique and drill design used during the osteotomy on the thermal and histological stimulation. Sci. Rep. 10: 20737.

Islam, M.A., Kamarrudin, N.S., Daud, R., Ibrahim, I., Rahman, A., Mat, F. 2021. Temperature measurement methods in an experimental setup during bone drilling: A brief review on the comparison of thermocouple and infrared thermography. J. Phys. Conf. Ser.

Islam, M.A., Kamarrudin, N.S., Suhaimi, M.F.F., Daud, R., Ibrahim, I., Mat, F. 2023. Parametric investigation on different bone densities to avoid thermal necrosis during bone drilling process. arXiv preprint arXiv:2308.12603.

Jamil, M., Khan, A.M., Hegab, H., Mia, M., Gupta, M.K. 2020. Modeling, multi-objective optimization and cost estimation of bone drilling under micro-cooling spray technique: An integrated analysis. Int. J. Interact. Des. Manuf. 14: 435–450.

Li, S., Shu, L., Kizaki, T., Bai, W., Terashima, M., Sugita, N. 2021. Cortical bone drilling: A time series experimental analysis of thermal characteristics. J. Manuf. Process. 64: 606–619.

Niketh, S., Samuel, G.L. 2018. Drilling performance of micro textured tools under dry, wet and MQL condition. J. Manuf. Process. 32: 254–268.

Perçin, M., Aslantas, K., Ucun, I., Kaynak, Y., Cicek, A. 2016. Micro-drilling of Ti–6Al–4V alloy: The effects of cooling/lubricating. Precis. Eng. 45: 450–462.

Tur, D., Giannis, K., Unger, E., Mittlböck, M., Rausch-Fan, X., Strbac, G.D. 2021. Thermal effects of various drill materials during implant site preparation—ceramic vs. stainless steel drills: A comparative in vitro study in a standardised bovine bone model. Clin. Oral Implants Res. 32: 154–166.

ผลกระทบขององค์ประกอบทางเคมีของโลหะผสมในช่วง Hypoeutectic, Eutectic และ Hypereutectic ของโลหะผสมบิสมัท-ดีบุก-พลวง ต่อสมบัติทางกายภาพและสมบัติทางกล

Compositional effects across hypoeutectic, eutectic, and hypereutectic Bi-Sn-Sb ternary alloys on their physical and mechanical properties

อัญชลี จักรแสง[a], **ธเนศ ณ วิเชียร**[a], **สุวิน สมภพศาสน์**[b], **วราฤทธิ์ เติมพรมราช**[b], **ภาสวร ศิลากร**[b], **นเร ผิวนิ่ม**[a], **ราชธีร์ เตชไพศาลเจริญกิจ**[a,*]

Unchalee Jaksang[a], Thanate Na Wichean[a], Suwin Sompopsart[b], Wararit Toempromaraj[b], Passaworn Silakorn[b], Naray Pewnim[a], Ratchatee Techapiesancharoenkij[a,*]

[a]ภาควิชาวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

[b]บริษัท ปตท. สำรวจและผลิตปิโตรเลียม จำกัด (มหาชน) กรุงเทพฯ 10900

[a]Department of Materials Engineering, Faculty of Engineering, Kasetsart University, Bangkok 10900, Thailand

[b]PTT Exploration and Production Public Company Limited, Bangkok 10900, Thailand

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

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาผลขององค์ประกอบในช่วง Hypoeutectic, Eutectic และ Hypereutectic ร่วมกับปริมาณพลวง (Sb) 4 และ 6 wt% ต่อสมบัติทางกายภาพและสมบัติทางกลของโลหะผสม Bi-Sn-Sb พบว่า การเปลี่ยนจาก Hypoeutectic ไปยัง Eutectic และ Hypereutectic ทำให้เฟส Sn-rich ลดลงและเพิ่มปริมาณเฟส Bi-rich โดยโครงสร้าง Eutectic จะเด่นชัดขึ้น ทำให้ในช่วง Hypereutectic มีค่า Elongation ลดลง ส่วนความแข็งแรงทางกลไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญระหว่างช่วงองค์ประกอบ โลหะผสมในช่วง Eutectic มีจุดหลอมเหลวต่ำที่สุด ขณะที่โลหะผสมในช่วง Hypoeutectic แสดงความต้านทานการกัดกร่อนได้ดีที่สุด การเพิ่มปริมาณ Sb จาก 4 เป็น 6 wt% ทำให้เกิดการสร้างเฟส Sn-rich และ SnSb IMC มากขึ้น ซึ่งเพิ่มความแข็งแรงทางกลแต่ลดค่า Elongation นอกจากนี้การเติม Sb ยังช่วยลดจุดหลอมเหลวและปรับปรุงความต้านทานการกัดกร่อนโดยการลดค่า i_{corr}

คำสำคัญ: โลหะผสมบิสมัท-ดีบุก-พลวง, สมบัติทางกายภาพ, สมบัติทางกล

Abstract

This study investigates the impact of hypoeutectic, eutectic, and hypereutectic compositions combined with 4 and 6 wt% Sb on the physical and mechanical properties of Bi-Sn-Sb alloys. The results demonstrate that transitioning from hypoeutectic to eutectic and hypereutectic compositions reduces the Sn-rich phase and increases the Bi-rich phase, making the eutectic structure more prominent. This change results in decreased elongation in hypereutectic alloys. Mechanical strength showed no significant variation between phase regions. The eutectic alloys exhibited the lowest melting points, while the hypoeutectic alloys displayed the highest corrosion resistance. Increasing Sb content from 4 to 6 wt% led to the formation of more Sn-rich phases and SnSb IMC, which enhanced mechanical strength but reduced elongation. Additionally, Sb addition helped lower the melting point and improved corrosion resistance by reducing the i_{corr} value.

Keywords: Bi-Sn-Sb alloys, Mechanical properties, Physical properties

คำนำ

โลหะผสมบิสมัท-ดีบุก (Bi-Sn) ได้รับความสนใจเพิ่มมากขึ้นเนื่องจากสามารถประยุกต์ใช้ได้อย่างหลากหลาย ทั้งในอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ ซึ่งมีการนำมาใช้ทำลวดบัดกรีไร้สารตะกั่ว (Lead-free solder) รวมถึงการนำมาใช้งานในอุตสาหกรรมปิโตรเคมี (Hmadeh et al., 2024) เป็นต้น โดยโลหะผสม Bi-Sn มีสมบัติที่โดดเด่น เช่น ความเป็นพิษต่ำ, อุณหภูมิหลอมเหลวต่ำ, ความสามารถในการเปียกผิว (Wettability) ที่ดี, มีการขยายตัวเมื่อมีการแข็งตัว และมีความหนาแน่นสูง (Chen et al., 2013; Knutsen, 2019) ทำให้โลหะผสมชนิดนี้เป็นทางเลือกที่เหมาะสมในการใช้งานดังกล่าว อย่างไรก็ตาม สมบัติของโลหะผสม Bi-Sn ขึ้นอยู่กับโครงสร้างจุลภาค และธาตุผสมเสริม (Alloying element) ที่สามารถเปลี่ยนแปลงสมบัติทางกลและสมบัติทางกายภาพได้อย่างมีนัยสำคัญ

ระบบ Binary Bi-Sn มีจุด Eutectic ที่ 58Bi-42Sn โดยองค์ประกอบในช่วงที่มีปริมาณบิสมัทต่ำกว่า Eutectic (Hypoeutectic) และในช่วงที่มีปริมาณบิสมัทสูงกว่า Eutectic (Hypereutectic) ดังใน Fig. 1 จะแสดงลักษณะโครงสร้างจุลภาคที่แตกต่างกันอย่างชัดเจน คือ หากส่วนผสมทางเคมีอยู่ในช่วง Hypoeutectic จะมีเฟสปฐมภูมิ (Primary phase) เป็นเฟส Sn primary แต่หากอยู่ในช่วง Hypereutectic จะมีเฟส Bi primary เกิดขึ้นก่อน การปรับสัดส่วน Bi-Sn ในทั้งสามช่วงนี้จึงสามารถก่อให้เกิดความแตกต่างในสมบัติทางกายภาพและสมบัติทางกลได้ นอกจากนี้ พลวง (Sb) เป็นหนึ่งในธาตุผสมที่มีประสิทธิภาพในการเสริมความแข็งแรงให้โลหะผสม Bi-Sn และปรับเปลี่ยนโครงสร้างเฟส (Sakuyama et al., 2009) ผลการทดลองเบื้องต้นจากโลหะผสม Eutectic Bi-Sn พบว่า การเติม Sb ในช่วง 4 และ 6 wt% ส่งผลให้โลหะผสมมีสมบัติที่น่าสนใจ จึงแสดงให้เห็นว่าการควบคุมปริมาณ Sb สามารถใช้ในการปรับปรุงสมบัติของโลหะผสมกลุ่มนี้ได้

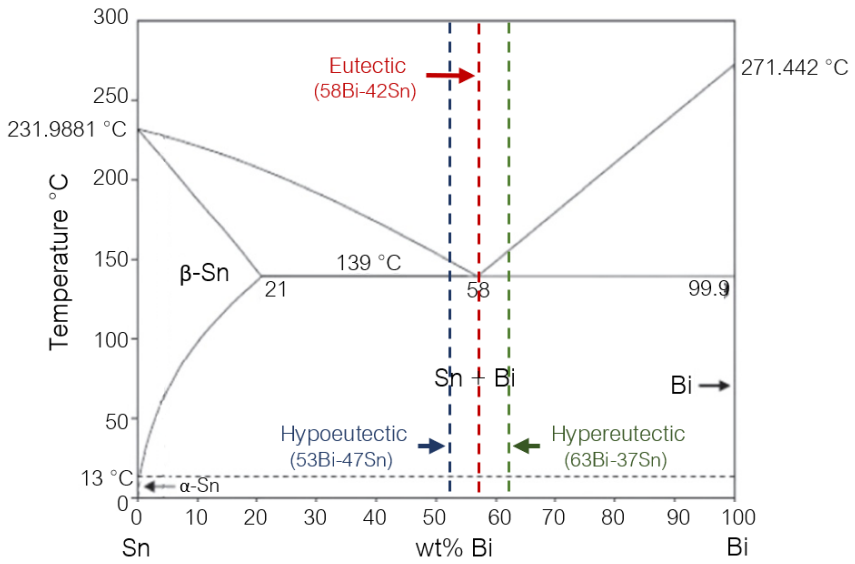


Fig. 1 Bi-Sn phase diagram with studied compositions (Abdelaziz et al., 2023)

จากเหตุผลดังกล่าว งานวิจัยนี้จึงมุ่งศึกษาผลขององค์ประกอบในช่วง Hypoeutectic (53Bi-47Sn), Eutectic (58Bi-42Sn) และ Hypereutectic (63Bi-37Sn) ของโลหะผสม Bi-Sn ร่วมกับการเติม Sb ในปริมาณ 4 และ 6 wt% ทำให้ได้โลหะผสม Bi-Sn-Sb 6 ส่วนผสมทางเคมี ได้แก่ 49Bi-47Sn-4Sb, 54Bi-42Sn-4Sb, 59Bi-37Sn-4Sb, 47Bi-47Sn-6Sb, 52Bi-42Sn-6Sb และ 57Bi-37Sn-6Sb ซึ่งช่วยให้สามารถเปรียบเทียบผลกระทบจากทั้งสัดส่วน Bi-Sn และปริมาณ Sb

ต่อโครงสร้างจุลภาค รวมถึงสมบัติทางกายภาพและสมบัติทางกลที่เกิดขึ้นได้อย่างเป็นระบบ และมีการทดสอบความต้านทานการกัดกร่อนเพื่อให้เข้าใจถึงความทนทานต่อสภาพแวดล้อมของโลหะผสมในแต่ละส่วนผสมทางเคมี

อุปกรณ์และวิธีการ

การเตรียมชิ้นงานทดสอบ

การเตรียมเม็ดโลหะผสม (Masterbatch alloys) สำหรับนำไปขึ้นรูปเป็นชิ้นงานทดสอบ

ชั่งแร่โลหะ 3 ชนิด ได้แก่ Bi, Sn และ Sb ให้ได้อัตราส่วนตามกำหนด แล้วนำไปหลอมในเตาหลอมไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 700 °C (อุณหภูมิที่สูงกว่าจุดหลอมเหลวของโลหะทั้งสามชนิด) จนโลหะผสมหลอมเหลวอย่างสมบูรณ์ โดยใช้ระยะเวลาในการหลอมเท่ากันในแต่ละสูตร จากนั้นคนตลอดเวลา 30 วินาที เพื่อลดการแยกตัวของโลหะที่มีความหนาแน่นต่างกัน แล้วเทโลหะหลอมเหลวผ่านตะแกรงละเอียดลงในถังเหล็กที่มีน้ำรองรับเพื่อให้โลหะผสมเย็นตัวอย่างรวดเร็วและแข็งตัวเป็น Masterbatch alloys ช่วยลดความคลาดเคลื่อนขององค์ประกอบทางเคมี จากนั้นผึ่งเม็ดโลหะให้แห้งสนิท แล้วตรวจสอบองค์ประกอบทางเคมีด้วยเครื่อง X-Ray Fluorescence (XRF) ยี่ห้อ HORIBA รุ่น XGT-5200 เพื่อยืนยันความถูกต้องก่อนนำไปใช้ในขั้นตอนถัดไป

การเตรียมแม่พิมพ์สำหรับขึ้นรูปชิ้นงานทดสอบ

พิมพ์แม่แบบชิ้นงานที่ใช้ในการหล่อชิ้นงานทดสอบตามมาตรฐานและขนาดที่อ้างอิงด้วยเครื่องพิมพ์สามมิติ จากนั้นนำแม่แบบไปทำการขึ้นรูปเป็นแม่พิมพ์ซิลิโคนเพื่อใช้สำหรับหล่อชิ้นงานทดสอบ

การหล่อขึ้นรูปชิ้นงานทดสอบ

นำเม็ดโลหะผสมของแต่ละส่วนผสมทางเคมีที่เตรียมไว้ไปหลอมในเตาหลอมไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 300 °C จนโลหะผสมหลอมเหลวอย่างสมบูรณ์พร้อมคนตลอดเวลาเพื่อลดการแยกตัวของโลหะ จากนั้นเทโลหะหลอมเหลวลงในแม่พิมพ์ซิลิโคน และปล่อยให้แข็งตัวจนสมบูรณ์ แกะออกจากแม่พิมพ์และนำไปกัดแต่ง (Milling) ให้ได้ขนาดตามที่อ้างอิง

การทดสอบแรงดึง (Tensile testing) ที่อุณหภูมิห้อง

ติดตั้งหัวทดสอบแรงดึงบนเครื่อง Universal Testing Machine จากนั้นนำชิ้นงานทดสอบที่ผ่านการเตรียมให้มีขนาดและรูปร่างตามมาตรฐาน ASTM E8-Subsize specimen (ความกว้าง 6 mm) จำนวน 3 ชิ้นสำหรับแต่ละส่วนผสมทางเคมีมาวัดขนาดก่อนการทดสอบ แล้วทำการทดสอบแรงดึงที่อุณหภูมิห้องโดยใช้ Strain rate เท่ากับ 0.015 mm/mm/min จากนั้นสร้างกราฟความเค้น-ความเครียด (Stress-strain curve) ที่ได้จากการทดสอบเพื่อหาค่าสมบัติทางกล โดยทำการทดสอบซ้ำจนครบ 3 ชิ้นงานของแต่ละส่วนผสมแล้วนำค่าที่ได้มาคำนวณหาค่าเฉลี่ย

การวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาค

นำชิ้นงานทดสอบแรงดึงที่ผ่านการทดสอบเรียบร้อยแล้วมาตัดตามขวางด้วย High-speed cutter จากนั้น ขึ้นเรือนเย็น (Cold mounting) ด้วยอีพอกซีเรซินให้จับได้ถนัดมือ แล้วทำการขัดหยาบ (Grinding) โดยใช้กระดาษทรายตั้งแต่เบอร์ 600 ถึง 1,200 (เริ่มต้นที่เบอร์ 600 เพราะโลหะผสมมีความแข็งต่ำทำให้สามารถลบรอยตัดได้ง่าย) จากนั้น ขัดเงา

(Polishing) ด้วยผงอะลูมินาขนาด 1 ไมครอน จนลบรอยขัดออกหมดและสามารถมองเห็นโครงสร้างจุลภาคได้โดยไม่ต้องกัดกรด แล้วใช้กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (Optical Microscope, OM) ยี่ห้อ Lica รุ่น DM2700M และ Scanning Electron Microscope (SEM) ยี่ห้อ Hitachi รุ่น SU3500 ถ่ายภาพโครงสร้างจุลภาคและวิเคราะห์เฟสที่เกิดขึ้น

การวิเคราะห์จุดหลอมเหลว

นำเม็ดโลหะผสมของแต่ละส่วนผสมทางเคมีมาบรรจุในถ้วยใส่ตัวอย่างอะลูมิเนียม โดยใช้ถ้วยเปล่าเป็นสารอ้างอิง จากนั้นใส่ทั้งตัวอย่างและสารอ้างอิงลงในเครื่อง Differential Scanning Calorimeter (DSC) ยี่ห้อ METTLER TOLEDO รุ่น DSC 1 เพื่อทำการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงความร้อน เริ่มวัดตั้งแต่อุณหภูมิ 25 ถึง 300 °C แล้วทำการวิเคราะห์ย้อนกลับ โดยใช้อัตราการให้ความร้อนคงที่ 10 °C/min และมีการป้อนแก๊สไนโตรเจนเพื่อควบคุมบรรยากาศภายในเซลล์ เมื่อได้กราฟความสัมพันธ์ระหว่างการไหลของความร้อน (Heat flow curve) กับอุณหภูมิแล้วทำการวิเคราะห์ตำแหน่งพีคที่มีการดูดความร้อนเพื่อตรวจสอบอุณหภูมิหลอมเหลว

การทดสอบความต้านทานการกัดกร่อนด้วยเทคนิคทางไฟฟ้าเคมี

เตรียมสารละลายอิเล็กโตรไลต์โซเดียมคลอไรด์ (NaCl) 3.5% จากนั้นนำชิ้นงานทดสอบแรงดึงที่ผ่านการทดสอบเรียบร้อยแล้วในแต่ละส่วนผสมทางเคมีมาตัดให้ได้พื้นที่หน้าตัดขนาด 1×1 cm^2 ด้วย High-speed cutter นำมาบัดกรีต่อเข้ากับสายไฟ แล้ว Cold mounting เพื่อป้องกันส่วนที่ไม่ต้องการให้สัมผัสสารละลาย นำชิ้นงานที่เตรียมไว้มาทดสอบด้วยเทคนิคทางไฟฟ้าเคมี โดยเชื่อมต่อขั้วไฟฟ้าทั้งสาม ได้แก่ ขั้วไฟฟ้าทำงาน (Working electrode) คือ ชิ้นงานโลหะผสมที่ทำการทดสอบ, ขั้วไฟฟ้าช่วย (Counter electrode) คือ ลวดแพลตตินัม (Pt) และขั้วไฟฟ้าอ้างอิง (Reference electrode) คือ Ag/AgCl เข้ากับเครื่อง Potentiostat ยี่ห้อ Autolab รุ่น PGSTAT302N แล้วเติมสารละลายอิเล็กโตรไลต์ลงในเซลล์ทดสอบ เครื่องจะควบคุมและเปลี่ยนแปลงศักย์ไฟฟ้าของโลหะผสม พร้อมบันทึกค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นตลอดการทดสอบ จากนั้นนำข้อมูลที่วัดได้มาสร้างกราฟ Linear polarization เพื่อหาค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อน (V_{corr}) และความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อน (i_{corr}) โดยใช้การวิเคราะห์แบบ Tafel plot

การวิเคราะห์ผลด้วย Tukey's test

เพื่อยืนยันความแตกต่างของค่าสมบัติทางกลระหว่างแต่ละส่วนผสมทางเคมี หลังจากทำ ANOVA แล้วได้ใช้การวิเคราะห์แบบ Tukey's test ซึ่งเป็นวิธีเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยเพื่อดูว่ากลุ่มใดมีค่าต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ตัวอักษรที่กำกับ เช่น "a", "b", "c" ใช้เพื่อแสดงความแตกต่างของผลการทดสอบ โดยหากเป็น ตัวอักษรเดียวกัน หมายความว่า ไม่ต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ แต่หากเป็นตัวอักษรต่างกัน แปลว่า แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ และ "a" คือกลุ่มที่มีค่าเฉลี่ยสูงที่สุด รองลงมาคือ "b" และ "c" ตามลำดับ

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของ Masterbatch alloys

จากการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของ *Masterbatch alloys* ทั้ง 6 ส่วนผสมทางเคมีด้วยเครื่อง XRF พบว่าส่วนผสมทางเคมีที่วิเคราะห์ได้มีค่าใกล้เคียงกับสูตรที่กำหนด แสดงดัง Table 1 จึงสามารถนำ Masterbatch alloys ที่เตรียมไว้ไปใช้สำหรับขึ้นรูปชิ้นงานทดสอบได้อย่างเหมาะสม เพื่อศึกษาผลขององค์ประกอบได้ตามสูตรที่ออกแบบไว้

ความคลาดเคลื่อนเล็กน้อยที่พบมีสาเหตุหลักมาจากความแตกต่างของความหนาแน่นระหว่างองค์ประกอบ (Bi = 9.78 g/cm³, Sn = 7.31 g/cm³, Sb = 6.69 g/cm³) ซึ่งทำให้เกิดการแยกตัวระหว่างการหลอม เนื่องจากโลหะที่มีความหนาแน่นสูงกว่า เช่น Bi จะตกไปอยู่ด้านล่าง ขณะที่ Sn และ Sb มีแนวโน้มลอยตัวมากกว่า และปริมาณ Sb มีค่าต่ำกว่าสูตรที่กำหนดไว้ อาจเกิดจากการระเหยหรือการเผาไหม้ในระหว่างการหลอม รวมถึงการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันเมื่อ Sb สัมผัสกับออกซิเจนเกิดเป็นของเสียในรูปขี้ตะกรันที่ลอยอยู่บนผิวโลหะหลอมเหลวและถูกกำจัดออกก่อนเทหรือเกิดจากการแยกตัวของธาตุในขณะแข็งตัว ทำให้โลหะผสมบางสูตร เช่น 57Bi-37Sn-6Sb มีค่า SD ค่อนข้างสูง

Table 1 Chemical composition analysis of masterbatch alloys

Chemical composition		wt% Bi	wt% Sn	wt% Sb
4 wt% Sb	49Bi-47Sn-4Sb	49.69±0.80	46.50±0.69	3.80±0.11
	54Bi-42Sn-4Sb	56.22±0.13	40.38±0.16	3.40±0.05
	59Bi-37Sn-4Sb	57.71±0.45	38.74±0.34	3.55±0.11
6 wt% Sb	47Bi-47Sn-6Sb	45.29±0.48	48.92±0.45	5.79±0.06
	52Bi-42Sn-6Sb	51.37±1.43	43.72±0.85	4.91±0.62
	57Bi-37Sn-6Sb	55.97±1.31	39.16±1.35	4.87±2.13

การวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาค

จากภาพโครงสร้างจุลภาคที่ถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงใน Fig. 2 พบว่า โครงสร้างโดยรวมของทุกส่วนผสมทางเคมีเป็นโครงสร้าง Eutectic ของ Bi-Sn ในลักษณะ Lamellar เรียงสลับเป็นชั้นระหว่าง Bi-rich กับ Sn-rich แต่ไม่เป็นตาม Phase diagram ของ Bi-Sn แบบสมบูรณ์ เนื่องจากมี Sb เข้ามามีส่วนร่วม นอกจากโครงสร้าง Eutectic ยังพบเฟสลักษณะเป็นก้อนกระจายอยู่ทั่วโครงสร้าง โดยเมื่อพิจารณาการกระจายตัวของธาตุจาก Scanning Electron Microscope-Backscattered electron (SEM-BSE) ดัง Fig. 3 เฟสที่มีลักษณะเป็นก้อน พบธาตุ Sn เป็นองค์ประกอบหลัก (Sn-rich phase) และมี SnSb intermetallic compound (SnSb IMC) กระจายอยู่ภายในเฟส Sn-rich เช่นเดียวกับงานวิจัยของ Fowler et al. (2023) โดยเมื่อเป็นภาพจาก SEM-BSE เฟสที่มีสีสว่างเป็นเฟสที่มี Bi เป็นองค์ประกอบหลัก (Bi-rich phase) เนื่องจาก Bi มีเลขอะตอมที่สูงกว่าหรือหนักกว่าธาตุอื่น จึงมีอิเล็กตรอนกระเจิงกลับมากกว่า (Sn = 50, Sb = 51, Bi = 83) อย่างไรก็ตาม SnSb IMC มีคอนทราสต์ที่เข้มกว่าเฟส Sn-rich เล็กน้อย (ในการวิเคราะห์สัดส่วนของเฟสไม่สามารถแยกความแตกต่างของเฟส Sn-rich กับ SnSb IMC ได้) นอกจากนี้ยังพบ Bi precipitates ที่มีลักษณะเป็นอนุภาคขนาดเล็กกระจายอยู่ภายในเฟส Sn-rich

โดยเมื่อเปลี่ยนช่วงองค์ประกอบจาก Hypoeutectic ไป Eutectic และ Hypereutectic หรือเมื่อปริมาณ Sn ลดลง พบว่า เฟสที่เป็นก้อนลดลงตาม และมีปริมาณโครงสร้าง Eutectic มากขึ้น ดังแสดงใน Table 2 แต่ที่ Hypereutectic ไม่เป็นไปตาม Phase diagram ของ Bi-Sn คือ ไม่เกิดเฟส Bi primary ดังนั้น เมื่อเติม Sb ในปริมาณ 4–6% Sb จะเข้าไปก่อตัวเป็น SnSb IMC ในเฟส Sn-rich ช่วยลดการแยกตัวเป็นเฟส Bi primary เมื่อมีการเปลี่ยนช่วงองค์ประกอบ และส่งผลให้โครงสร้างจุลภาคมีเสถียรภาพมากขึ้น จึงช่วยปรับปรุงสมบัติของโลหะผสมได้

เมื่อเพิ่มปริมาณ Sb จาก 4 เป็น 6 wt% พบว่าเฟสที่เป็นก้อน หรือ เฟส Sn-rich และ SnSb IMC มีปริมาณเพิ่มขึ้น ซึ่งอาจเกิดจากการที่ Sb เข้าไปแย่งจับกับ Sn แทน Bi ในโครงสร้าง Eutectic ทำให้เฟส Sn-rich มีเสถียรภาพมากขึ้นและเกิด SnSb IMC มากขึ้น ส่งผลให้สัดส่วนของโครงสร้าง Eutectic ลดลง ในขณะเดียวกันเฟส Sn-rich และ SnSb IMC มีจำนวนมากขึ้น

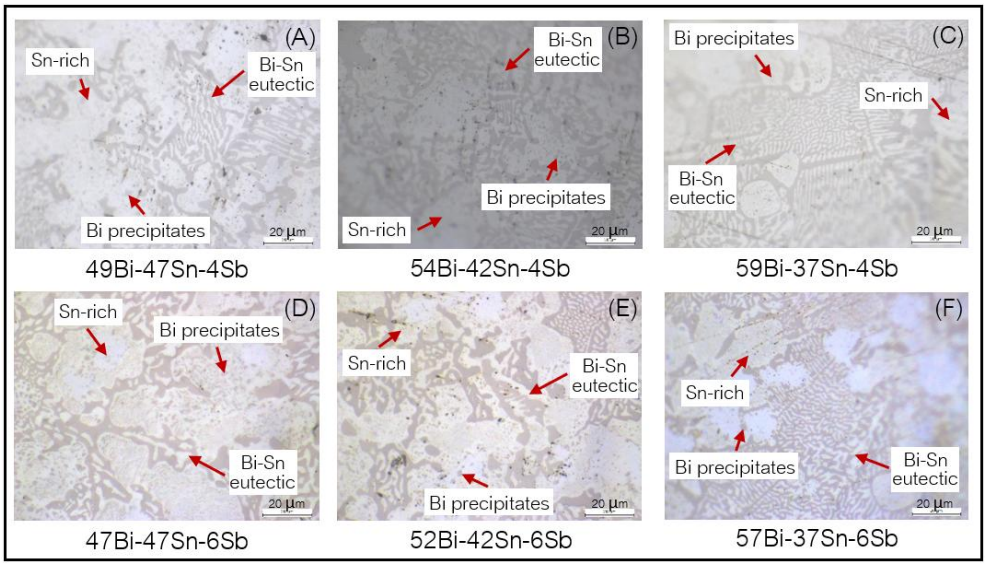


Fig. 2 Optical Microscope (OM) images at 100X magnification of (A) 49Bi-47Sn-4Sb, (B) 54Bi-42Sn-4Sb, (C) 59Bi-37Sn-4Sb, (D) 47Bi-47Sn-6Sb, (E) 52Bi-42Sn-6Sb, and (F) 57Bi-37Sn-6Sb

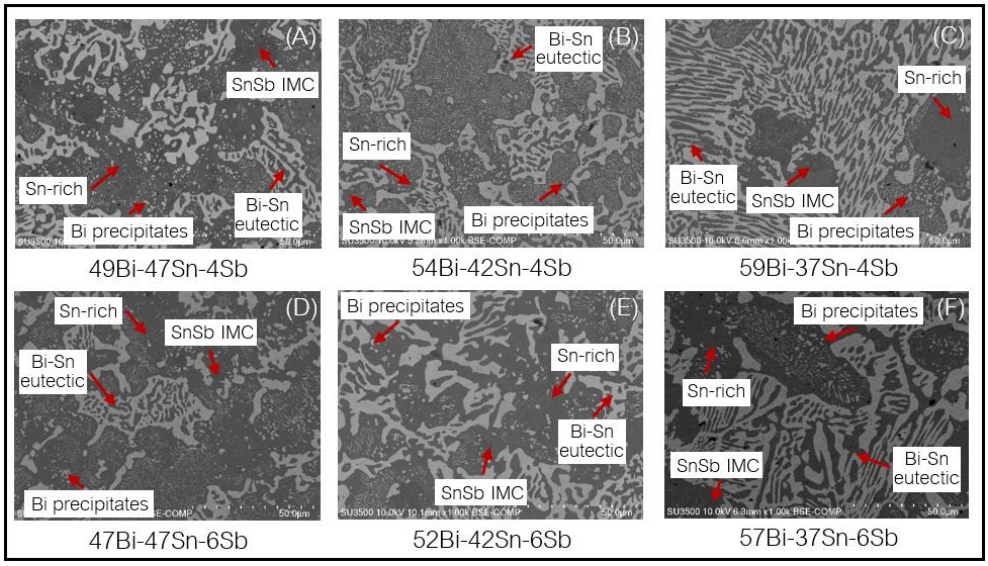


Fig. 3 SEM-BSE images at 1000X magnification of (A) 49Bi-47Sn-4Sb, (B) 54Bi-42Sn-4Sb, (C) 59Bi-37Sn-4Sb, (D) 47Bi-47Sn-6Sb, (E) 52Bi-42Sn-6Sb, and (F) 57Bi-37Sn-6Sb

Table 2 Phase ratios of each chemical composition from the SEM-BSE images

Chemical composition		Bi-rich (%)	Sn-rich/SnSb IMC (%)
4 wt% Sb	49Bi-47Sn-4Sb	30.20	69.80
	54Bi-42Sn-4Sb	36.90	63.10
	59Bi-37Sn-4Sb	42.34	57.66
6 wt% Sb	47Bi-47Sn-6Sb	27.43	72.57
	52Bi-42Sn-6Sb	33.16	66.84
	57Bi-37Sn-6Sb	40.79	59.21

การทดสอบแรงดึงที่อุณหภูมิห้อง

ผลการทดสอบแรงดึงใน Fig. 4 และ Table 3 พบว่า การเปลี่ยนช่วงองค์ประกอบจาก Hypoeutectic, Eutectic และ Hypereutectic ในระบบ Bi-Sn-Sb ไม่ส่งผลต่อค่า Yield strength, Tensile strength และ Modulus of elasticity อย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95% จากการวิเคราะห์ ANOVA ผลดังกล่าวสะท้อนว่าแม้สัดส่วน Bi/Sn จะเปลี่ยนไปตามช่วงเฟส แต่ปริมาณ Sb ที่เติม (4–6 wt%) ยังไม่มากพอที่จะทำให้เกิดความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญของสัดส่วนเฟสหลัก และโครงสร้างจุลภาคโดยรวมยังคงประกอบด้วยเฟส Bi-rich และเฟส Sn-rich ที่มีความใกล้เคียงกัน จึงทำให้สมบัติความแข็งแรงโดยรวมของโลหะผสมยังอยู่ในช่วงเดียวกัน

อย่างไรก็ตาม ช่วงองค์ประกอบมีผลต่อค่า Elongation อย่างมีนัยสำคัญ โดยเฉพาะในกลุ่ม 4 wt% Sb การเปลี่ยนจาก Hypoeutectic ไปสู่ Eutectic และ Hypereutectic ทำให้ปริมาณ Bi เพิ่มขึ้นและ Sn ลดลง ส่งผลให้เฟส Sn-rich ซึ่งมีความเหนียวมีสัดส่วนลดลง จึงลดความสามารถในการยืดตัว ทำให้ค่า Elongation ลดลงตามลำดับของช่วงเฟส ในขณะที่กลุ่ม 6 wt% Sb ไม่พบความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญและมีค่า SD สูง ซึ่งความแปรปรวนอาจเกิดจากข้อบกพร่องภายในชิ้นงานจากกระบวนการหล่อ (Casting defects) รวมไปถึงรูพรุน (Porosity) ที่ส่งผลต่อค่าการยืดตัวมากกว่าผลของช่วงองค์ประกอบ ทำให้ไม่สามารถสรุปผลของช่วงเฟสต่อค่า Elongation ได้ในกรณีนี้ และอาจเกิดข้อบกพร่องเหล่านี้ในสูตรอื่น ๆ ที่มีค่า SD ของ Elongation สูง ส่งผลให้เกิดความจำกัดของข้อมูล

เมื่อพิจารณาผลของการเพิ่มปริมาณ Sb พบว่า การเพิ่มปริมาณ Sb จาก 4 เป็น 6 wt% ส่งผลให้ค่า Yield strength, Tensile strength และ Modulus of elasticity เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ พร้อมกับค่า Elongation ที่ลดลง กลไกที่เกิดขึ้นเกี่ยวข้องกับการเพิ่มความแข็งแรงจากการเกิด SnSb Intermetallic compound (IMC) ลักษณะเป็นอนุภาคละเอียดที่มีความเสถียรทางเคมีและมีความแข็งแรงแต่มีความเปราะ ทำให้เกิด Lattice distortion ส่งผลให้การเคลื่อนที่ของ Dislocation ยากขึ้น วัสดุจึงมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้นแต่มีความเหนียวหรือ Elongation ลดลง

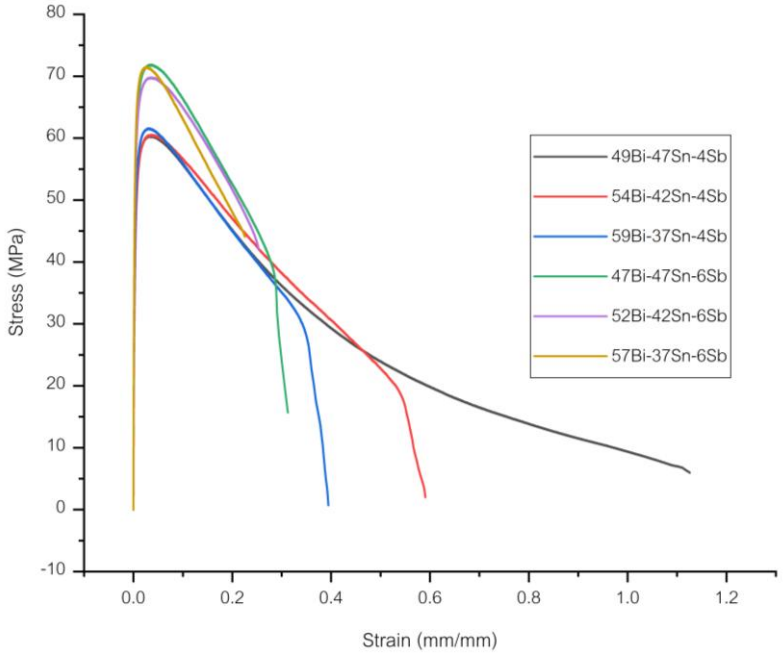


Fig. 4 Stress-strain curve of each chemical composition obtained from the tensile test at room temperature

Table 3 Tensile test results at room temperature

Chemical composition		Yield strength (0.2% offset) (MPa)	Tensile strength (MPa)	Modulus of elasticity (GPa)	Elongation at break (%)
4 wt% Sb	49Bi-47Sn-4Sb	48.48±1.58[b]	58.57±2.25[b]	14.58±2.21[b]	92.16±18.31[a]
	54Bi-42Sn-4Sb	50.51±2.43[b]	60.76±3.09[b]	13.54±3.02[b]	55.97±3.19[b]
	59Bi-37Sn-4Sb	49.60±1.48[b]	61.59±1.79[b]	15.54±1.02[b]	40.38±2.59[b]
6 wt% Sb	47Bi-47Sn-6Sb	58.21±0.87[a]	71.50±0.64[a]	16.98±1.74[a]	33.41±10.80[c]
	52Bi-42Sn-6Sb	55.37±0.28[a]	71.30±1.79[a]	22.38±5.40[a]	17.08±8.80[c]
	57Bi-37Sn-6Sb	58.51±2.34[a]	70.94±0.55[a]	19.41±0.41[a]	22.47±6.73[c]

การวิเคราะห์จุดหลอมเหลว

จากผลการวิเคราะห์จุดหลอมเหลวด้วย DSC ดังแสดงใน Fig. 5 และ Table 4 พบว่า โลหะผสมมีทั้งอุณหภูมิหลอมเหลวเริ่มต้น คือ อุณหภูมิที่เฟสที่มีจุดหลอมเหลวต่ำเริ่มหลอมเหลวก่อน และอุณหภูมิหลอมเหลวสมบูรณ์โดยในช่วง Eutectic มีอุณหภูมิหลอมเหลวต่ำกว่าช่วง Hypoeutectic และ Hypereutectic แนวโน้มดังกล่าวสอดคล้องกับลักษณะจากแผนภาพเฟสของ Bi-Sn ซึ่งมีจุด Eutectic ที่เป็นส่วนผสมที่มีสัดส่วนเฟสที่ให้จุดหลอมเหลวต่ำที่สุดเมื่อองค์ประกอบเบี่ยงเบนออกจากช่วง Eutectic จะทำให้อุณหภูมิหลอมเหลวโดยรวมของระบบสูงขึ้นเล็กน้อย

การเพิ่มปริมาณ Sb จาก 4 เป็น 6 wt% มีแนวโน้มโดยรวมคือ จุดหลอมเหลวมีค่าลดลงเล็กน้อย เนื่องจากการเพิ่ม Sb ใน Bi-Sn ทำให้โครงสร้างภายในโลหะผสมไม่เป็นระเบียบมากขึ้น ส่งผลให้เอนโทรปี (Entropy) ของระบบเพิ่มขึ้น จึงมีความเสถียรน้อยลงในสถานะของแข็ง และต้องการพลังงานน้อยลงในการเปลี่ยนแปลงเป็นของเหลว และอาจทำให้แรงดึงดูดระหว่างอะตอมในโครงสร้างผลึก Bi-Sn ลดลง ซึ่งลดพลังงานเอนทาลปี (Enthalpy) ทำให้การหลอมเหลวเกิดขึ้นที่อุณหภูมิที่ต่ำกว่า เนื่องจากระบบต้องการพลังงานน้อยลงในการทำลายพันธะระหว่างอะตอม ผลรวมจากการเพิ่ม Sb คือ การลดลงของพลังงานอิสระกิบส์ (Gibbs free energy) ซึ่งทำให้มีความเสถียรที่อุณหภูมิต่ำกว่า ส่งผลให้จุดหลอมเหลวลดลง และที่สูตร 52Bi-42Sn-6Sb มี 2 พีคดูดความร้อน โดยช่วงพีคแรกอาจเกิดจากการหลอมโครงสร้าง Eutectic เนื่องจากมีค่าใกล้กับอุณหภูมิ Eutectic ของระบบ Bi-Sn (139 °C) และพีคถัดมาเกิดการหลอมของเฟสอื่นในโลหะผสมซึ่งอาจมีสัดส่วนใกล้เคียงกันมาก จึงมีความเด่นทั้งสองพีค

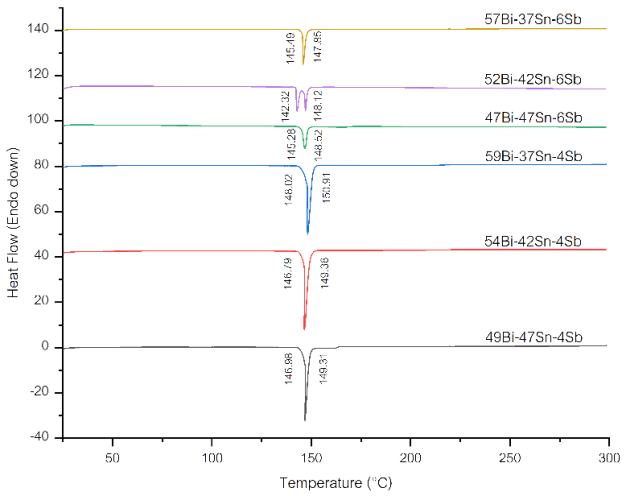


Fig. 5 DSC thermograms of each chemical composition measured from 25 °C to 300 °C

Table 4 Initial melting point and complete melting point analysis results of each chemical composition

Chemical composition		Initial melting point (°C)	Complete melting point (°C)
4 wt% Sb	49Bi-47Sn-4Sb	146.98	149.31
	54Bi-42Sn-4Sb	146.79	149.36
	59Bi-37Sn-4Sb	148.02	150.91
6 wt% Sb	47Bi-47Sn-6Sb	145.28	148.52
	52Bi-42Sn-6Sb	142.32	148.12
	57Bi-37Sn-6Sb	145.49	147.85

การทดสอบความต้านทานการกัดกร่อน

จากกราฟ Linear polarization แสดงใน Fig. 6 และผลที่วิเคราะห์ได้ใน Table 5 พบว่า โลหะผสมช่วง Hypoeutectic มีค่า i_{corr} ต่ำที่สุด รองลงมาคือช่วง Hypereutectic และสูงที่สุดในช่วง Eutectic แสดงว่าช่วง Hypoeutectic มีความต้านทานการกัดกร่อนดีที่สุด ขณะที่ Hypereutectic กัดกร่อนมากที่สุด อาจเนื่องมาจากช่วง Hypereutectic มี Bi ปริมาณมาก ทำให้ Sn ถูกดึงเข้าสู่โครงสร้าง Eutectic มากขึ้น เกิด Eutectic lamellar ที่ละเอียดและสลับถี่ระหว่าง Bi-rich และ Sn-rich ทำให้ระยะ Galvanic สั้นและเกิด Galvanic effect รุนแรง จึงมีค่า i_{corr} สูง ตรงข้ามกับช่วง Hypoeutectic ซึ่งมีเฟส Sn-rich มากกว่า ทำให้สัดส่วนโครงสร้าง Eutectic ลดลง การสับหว่างของเฟสน้อยกว่า และเกิด Micro-galvanic coupling ต่ำกว่า ส่งผลให้ i_{corr} ต่ำที่สุด สำหรับช่วง Eutectic โครงสร้าง Eutectic ประกอบด้วยชั้นสลับ Bi-rich และ Sn-rich ที่อยู่ในสภาวะสมดุลที่จุด Eutectic จึงมีค่า i_{corr} สูงที่สุด

การเติม Sb จาก 4 เป็น 6 wt% มีแนวโน้มช่วยลด i_{corr} โดยเฉพาะในสูตร 47Bi-47Sn-6Sb และ 57Bi-37Sn-6Sb เนื่องจาก SnSb IMC อาจทำให้ Sn กัดกร่อนน้อยลง อย่างไรก็ตาม สูตร 52Bi-42Sn-6Sb มี i_{corr} สูงที่สุด เพราะอยู่ในสภาวะสมดุลที่จุด Eutectic ทำให้มี Micro-galvanic cell มาก

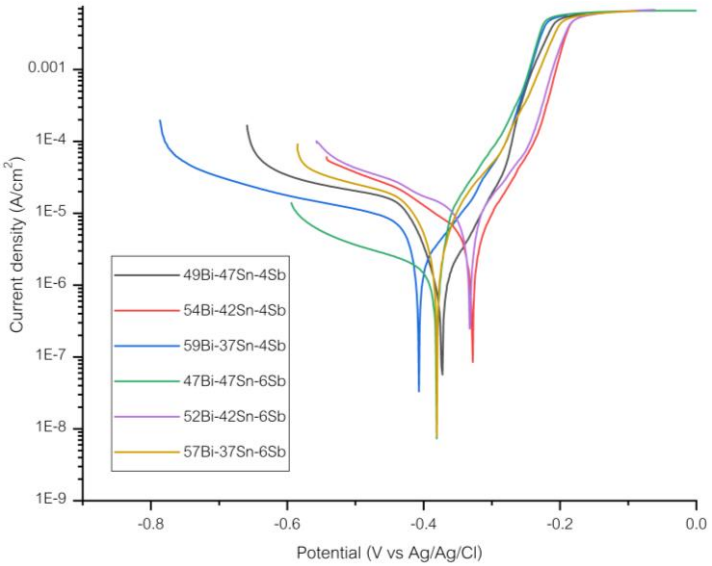


Fig. 6 Linear polarization curves of each chemical composition in 3.5% NaCl

Table 5 Corrosion potential (V_{corr}) and corrosion current density (i_{corr}) of each chemical composition

Chemical composition		V_{corr} (V)	i_{corr} (μA/cm^2)
4 wt% Sb	49Bi-47Sn-4Sb	-0.374	1.59
	54Bi-42Sn-4Sb	-0.329	6.75
	59Bi-37Sn-4Sb	-0.408	5.42
6 wt% Sb	47Bi-47Sn-6Sb	-0.382	1.40
	52Bi-42Sn-6Sb	-0.333	7.63
	57Bi-37Sn-6Sb	-0.382	2.96

สรุป

จากการศึกษาสมบัติทางกายภาพและสมบัติทางกลของโลหะผสม Bi-Sn-Sb พบว่า การเปลี่ยนช่วงองค์ประกอบจาก Hypoeutectic ไปยัง Eutectic และ Hypereutectic ส่งผลให้ปริมาณ Sn-rich phase ลดลงแต่ปริมาณเฟส Bi-rich เพิ่มขึ้น และโครงสร้าง Eutectic เด่นชัดขึ้น ทำให้ช่วง Hypereutectic มีความเปราะสูงกว่า จึงมีค่า Elongation ต่ำ และมีอัตราการกัดกร่อนมากขึ้น ส่วนความแข็งแรงทางกล เช่น Yield strength, Tensile strength และ Modulus of elasticity ไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญระหว่างช่วงเฟส ขณะที่ช่วง Eutectic ให้จุดหลอมเหลวต่ำที่สุด และการเพิ่ม Sb จาก 4 เป็น 6 wt% ทำให้เฟส Sn-rich และ SnSb IMC เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ความแข็งแรงทางกลเพิ่มขึ้น แต่ Elongation ลดลงหรือมีความเปราะเพิ่มมากขึ้น นอกจากนี้ยังช่วยลดจุดหลอมเหลว ในด้านการกัดกร่อน การเติม Sb จาก 4 เป็น 6 wt% มีแนวโน้มช่วยลดค่า i_{corr} ได้

ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่า ความแข็งแรงทางกลไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญระหว่างช่วงเฟส ซึ่งอาจสะท้อนว่า Sb ที่เติมไปและช่วงเฟสนั้นยังไม่มากพอที่จะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญในเชิงความแข็งแรง แม้บางผลไม่แสดงความแตกต่างทางสถิติอย่างมีนัยสำคัญ แต่ผลที่ได้จากการศึกษาเชื่อมโยงกับกลไกทางโครงสร้างจุลภาคอย่างชัดเจน ดังนั้น การศึกษานี้แสดงให้เห็นถึงความสำคัญของการควบคุมองค์ประกอบทางเคมีและการเติม Sb เพื่อปรับปรุงสมบัติทางกลและความต้านทานการกัดกร่อนของโลหะผสม Bi-Sn-Sb ซึ่งมีศักยภาพในการนำไปใช้ในอุตสาหกรรมต่าง ๆ เช่น อุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ที่ต้องการโลหะผสมบัดกรีไร้สารตะกั่ว เนื่องจากมีจุดหลอมเหลวต่ำและความสามารถในการทนต่อการกัดกร่อนได้ดี ซึ่งสามารถนำไปใช้ในอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์และการผลิตชิ้นส่วนที่ต้องการความเสถียรในสภาวะที่มีการกัดกร่อน และอุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้องกับการใช้งานในสภาวะแวดล้อมที่มีการกัดกร่อน เช่น ในอุตสาหกรรมปิโตรเคมี

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณบริษัท ปตท. สำรวจและผลิตปิโตรเลียม จำกัด (มหาชน) สำหรับทุนสนับสนุนในการทำวิจัย

ขอขอบคุณคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ สำหรับเงินทุนสนับสนุนค่าธรรมเนียมการศึกษาและบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ สำหรับเงินทุนสนับสนุนในโครงการเรียนล่วงหน้าระดับบัณฑิตศึกษา

เอกสารอ้างอิง

Abdelaziz, S.M., Lebda, H.I., El-Rehim, A.F.A., Habashy, D.M. 2023. Modeling and experimental investigation of indentation creep behavior of hypoeutectic Sn-Bi and Sn-Bi-Sb2O3 alloys using genetic programming approach. Phys. Scr. 98: 065912.

Chen, X., Xue, F., Zhou, J., Liu, S., Qian, G. 2013. Microstructure, thermal and wetting properties of Sn-Bi-Zn lead-free solder. J. Electron. Mater. 42: 2708–2715.

Fowler, H.N., Tay, S.X., Blendell, J., Handwerker, C.A. 2023. Microalloying effects of Sb and Ag on the microstructural evolution of eutectic Sn–Bi alloys. MRS Adv. 8: 763–767. doi.org/10.1557/s43580-022-00472-3

Hmadeh, L., Anunciação Jaculli, M., Elahifar, B., Sangesland, S. 2024. Development of bismuth-based solutions for well plugging and abandonment: A review. Pet. Res. 9: 250–264. doi.org/10.1016/j.ptlrs.2024.01.003

Knutsen, T. 2019. A novel approach to qualifying bismuth as a barrier material. M.Sc. thesis. University of Stavanger. Stavanger, Norway.

Sakuyama, S., Akamatsu, T., Uenishi, K., Sato, T. 2009. Effects of a third element on microstructure and mechanical properties of eutectic Sn–Bi solder. Trans. Jpn. Inst. Electron. Packag. 2: 98–103.

การศึกษาผลของโลหะผสมไบนารี Bi–Sn ต่อสมบัติทางกายภาพและสมบัติเชิงกลของโลหะผสม

Influence of Bi–Sn Binary Alloy on the physical and mechanical properties of metallic materials

ณัฐฐา จรหนู[a], ธเนศ ณ วิเชียร[a], สุวิน สมภพศาสน์[b], วราฤทธิ์ เติมพรมราช[b], ภาสวร ศิลากร[b], นเร ผิวนิ่ม[a], ราชธีร์ เตชไพศาลเจริญกิจ[a,*]

Nattha Jornnoo[a], Thanate Na Wichean[a], Suwin Sompopsart[b], Wararit Toempromaraj[b], Passaworn Silakorn[b], Naray Pewnim[a], Ratchatee Techapiesancharoenkij[a,*]

[a]ภาควิชาวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

[b]บริษัท ปตท. สำรวจและผลิตปิโตรเลียม จำกัด (มหาชน) กรุงเทพฯ 10900

[a]Department of Materials Engineering, Faculty of Engineering, Kasetsart University, Bangkok 10900, Thailand

[b]PTT Exploration and Production Public Company Limited, Bangkok 10900, Thailand

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

บทคัดย่อ

โลหะผสม Bi–Sn เป็นโลหะผสมที่ได้รับความสนใจเนื่องมีสมบัติทางกลที่เหมาะสม โดยให้ความแข็งแรงในระดับที่ดีและมีความเปราะไม่สูงจนเกินไป และมีสมบัติสำคัญคือสามารถขยายตัวเมื่อแข็งตัว ต่างจากโลหะอื่นๆ ที่จะหดตัวเมื่อแข็งตัวหรือเมื่อเปลี่ยนสถานะจากหลอมเหลวเป็นของแข็ง ซึ่งสมบัตินี้อาจช่วยเพิ่มสมรรถนะในงานวัสดุปิโตรเลียม งานวิจัยนี้จึงสนใจที่จะศึกษาข้อมูลเกี่ยวกับสมบัติเชิงกล โครงสร้างจุลภาค และการวิเคราะห์จุดหลอมเหลวของ Bi–Sn 5 สัดส่วน (60Bi, 70Bi, 80Bi, 90Bi และ 100Bi) เพื่อเลือกใช้ให้เหมาะกับสภาวะแวดล้อมของการใช้ในงานปิโตรเลียม โดยมีการตรวจสอบส่วนผสมด้วยเครื่อง XRF ทดสอบสมบัติทางกลได้แก่ แรงดึง ความแข็ง และแรงกระแทก การวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาค รวมถึงการวิเคราะห์จุดหลอมเหลวด้วยเครื่อง DSC ผลการศึกษาพบว่าเมื่อมีปริมาณของ Sn มากขึ้นทำให้สมบัติโดยรวมทั้งทางกลและกายภาพดีขึ้น เนื่องจากการเกิดโครงสร้างยูเท็กติกที่ช่วยเพิ่มความแข็งแรง

คำสำคัญ: สมบัติทางกล; โครงสร้างยูเท็กติก; โลหะผสม บิสมัท-ดีบุก

Abstract

Bi–Sn alloys have attracted significant interest due to their favorable mechanical properties, offering good strength with moderate brittleness. A key characteristic of these alloys is their ability to expand upon solidification, in contrast to most metals that shrink during the liquid-to-solid phase transformation. This property provides potential benefits for applications in the petroleum industry. Therefore, this study focuses on investigating the mechanical properties, microstructure, and melting behavior of five Bi–Sn compositions (60Bi, 70Bi, 80Bi, 90Bi, and 100Bi) to support material selection under various operating environments. Chemical compositions were verified using X-ray fluorescence (XRF). Mechanical characterization included tensile, hardness, and impact testing, along with microstructural examination and melting-point analysis using a Differential Scanning Calorimeter (DSC). The results indicate that increasing Sn content enhances the overall mechanical and physical properties due to the formation of a eutectic structure, which contributes to improved strength.

Keywords: Bismuth-Tin alloy, Eutectic structure, Mechanical properties

คำนำ

โลหะผสมบิสมัท–ดีบุก (Bi–Sn) เป็นวัสดุที่ได้รับความสนใจอย่างมาก เนื่องจากมีสมบัติทางกลที่เหมาะสม โดยให้ความแข็งแรงในระดับที่ดีและมีความเปราะไม่สูงจนเกินไป จึงสามารถตอบสนองต่อการใช้งานที่ต้องการความสมดุลระหว่างความแข็งแรงและความเหนียวได้อย่างมีประสิทธิภาพ รวมถึงเป็นระบบโลหะผสมจุดหลอมเหลวต่ำ และได้รับความสนใจในหลายอุตสาหกรรม เนื่องจากมีคุณสมบัติเด่น เช่น จุดหลอมเหลวต่ำ การเปียกติดได้ดี (good wettability) และพฤติกรรมการขยายตัวเล็กน้อยเมื่อแข็งตัว (solidification expansion) สมบัติเหล่านี้ส่งผลให้โลหะผสมกลุ่มนี้ถูกนำไปใช้งานอย่างแพร่หลาย ในงานบัดกรีอุณหภูมิต่ำในอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ งานผลิตชิ้นส่วนความแม่นยำ (precision component manufacturing) งานทำแม่พิมพ์ที่ต้องการปลดชิ้นงานง่าย และงานเป็นโลหะผสมถ่วงน้ำหนักหรือลดการสั่นสะเทือน (counterweight and vibration-damping alloys) (Xu et al., 2020)

นอกจากการใช้งานเชิงอุตสาหกรรมทั่วไปแล้ว การมี Good wettability ช่วยให้โลหะหลอมสามารถกระจายตัวและยึดติดบนผิวซีเมนต์หรือพื้นผิวได้อย่างมีประสิทธิภาพ ทำให้สามารถไหลเข้าไปเติมเต็มรอยแตกและโพรงต่างๆ ได้ดีขึ้น ลดช่องว่างที่และเสริมความสมบูรณ์ของระบบปิดผนึก โดยเฉพาะเมื่อทำงานร่วมกับพฤติกรรมการขยายตัวเมื่อแข็งตัวของโลหะผสม (Zhou, 2018) ด้วยเหตุนี้ โลหะผสม Bi–Sn จึงได้รับความสนใจในการประยุกต์ใช้เป็นวัสดุทางเลือกในงานปิโตรเลียมร่วมกับซีเมนต์ ซึ่งมักพบปัญหาการหดตัวของซีเมนต์เมื่อแข็งตัว ทำให้เกิดช่องว่างลดประสิทธิภาพในงานปิโตรเลียม ส่งผลให้ก๊าซหรือของเหลวรั่วไหลออกสู่ภายนอกและสร้างความเสียหายได้ (Knutsen, 2019; Yousuf et al., 2021)

ในงานวิจัยนี้ จึงเกิดแนวคิดในการศึกษาโลหะผสม Bi-Sn ที่ 5 ส่วนผสมทางเคมี ได้แก่ 60Bi-40Sn, 70Bi-30Sn, 80Bi-20Sn, 90Bi-10Sn, และ 100Bi โดยมี Bi เป็นองค์ประกอบหลัก และใช้ Sn ในการปรับปรุงสมบัติทางกล เพื่อเป็นแนวทางการเลือกใช้วัสดุทางเลือกในงานปิโตรเลียม จากเดิมให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น คือ มีสมบัติทางกลที่ดี, มีความสามารถในการปิดผนึก, และลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม อีกทั้งยังเป็นแนวทางในการเลือกส่วนผสมของวัสดุทางเลือก Bi-Sn ให้เหมาะกับแต่ละสภาพแวดล้อมของงานปิโตรเลียม อย่างไรก็ตามในปัจจุบันยังไม่มีมาตรฐานด้านสมบัติเชิงกลที่กำหนดไว้อย่างเฉพาะเจาะจงสำหรับโลหะผสม Bi–Sn ที่ใช้ในงานปิโตรเลียม การพิจารณาเลือกใช้วัสดุในงานประเภทนี้จึงมักอ้างอิงจากสมรรถนะเชิงหน้าที่ (functional performance) ภายใต้สภาวะการใช้งานจริง เช่น อุณหภูมิ แรงกระทำ และความสามารถในการปิดผนึก มากกว่าการเปรียบเทียบกับค่ามาตรฐานตายตัว ดังนั้น การศึกษาสมบัติเชิงกลของโลหะผสม Bi–Sn ในงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อให้ข้อมูลเชิงเปรียบเทียบและเป็นข้อมูลพื้นฐานสำหรับการประเมินความเหมาะสมของวัสดุทางเลือกสำหรับการประยุกต์ใช้งานในอุตสาหกรรมปิโตรเลียม

อุปกรณ์และวิธีการ

การเตรียมชิ้นงานทดสอบ

การเตรียมเม็ดโลหะผสม (Masterbatch alloy) สำหรับนำไปขึ้นรูปเป็นชิ้นงานทดสอบ

ชั่งโลหะ 2 ชนิด ได้แก่ บิสมัทและดีบุกให้ได้ 5 อัตราส่วน ได้แก่ 60Bi-40Sn, 70Bi-30Sn, 80Bi-20Sn, 90Bi-10Sn และ 100Bi จากนั้นนำไปหลอมในเตาหลอมไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส (อุณหภูมิที่อยู่เหนือจุดหลอมเหลวตามแผนภาพเฟสของโลหะผสมบิสมัท-ดีบุก) จนโลหะผสมหลอมเหลวทั้งหมดและคนเป็นระยะเพื่อลดการแยกตัวของโลหะที่มีความหนาแน่นต่างกัน จากนั้นนำน้ำโลหะหลอมเหลวเทใส่ตะแกรงละเอียด ที่รองรับด้วยภาชนะบรรจุน้ำภายใน

เพื่อให้โลหะผสมเย็นตัวลงเป็นเม็ดอย่างรวดเร็ว ช่วยลดความคลาดเคลื่อนของส่วนผสมทางเคมี ต่อมาเมื่อเย็นตัวแล้ว นำเม็ดโลหะผสมที่เตรียมได้ไปผึ่งให้แห้ง จากนั้นตรวจสอบความถูกต้องของส่วนผสมด้วยเครื่อง X-Ray Fluorescence (XRF, ยี่ห้อ HORIBA รุ่น XGT-5200)

การเตรียมแม่พิมพ์สำหรับขึ้นรูปชิ้นงานทดสอบ

พิมพ์แม่แบบที่ใช้ในการหล่อชิ้นงานทดสอบให้ตรงตามมาตรฐานที่อ้างอิง ด้วยเครื่องพิมพ์สามมิติ QIDI 3D Wholesale X-MAX ขนาดใหญ่ 300x250x300 มิลลิเมตร จากนั้นนำแม่แบบมาทำการขึ้นรูปเป็นแม่พิมพ์ซิลิโคน

การหล่อชิ้นงานทดสอบ

นำเม็ดโลหะผสมที่เตรียมไว้สำหรับการขึ้นรูปชิ้นงานในแต่ละส่วนผสมมาหลอมในเตาหลอมไฟฟ้า ที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส จนโลหะผสมหลอมเหลวทั้งหมดและคนเป็นระยะเพื่อลดการแยกตัว เทน้ำโลหะหลอมเหลวลงในแม่พิมพ์ซิลิโคนที่ใช้ในการหล่อ จากนั้นรอให้เกิดการแข็งตัวอย่างสมบูรณ์ แล้วแกะชิ้นงานทดสอบออกจากแม่พิมพ์ นำไปกัดแต่ง (Milling) ให้มีขนาดตามมาตรฐานที่อ้างอิง และตรวจสอบความถูกต้องของส่วนผสมทางเคมีด้วยเครื่อง XRF

การวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคของโลหะผสม Bi-Sn

นำโลหะผสมบิสมัท-ดีบุก ในแต่ละส่วนผสมทางเคมีมาตัดตามขวางให้ได้ขนาดที่เหมาะสม และสามารถจับได้ถนัดมือ โดยใช้ High Speed Cutter จากนั้นนำไปขัดหยาบ (Grinding) โดยเริ่มต้นจากกระดาษทรายเบอร์ 600 ถึงเบอร์ 1,200 (เริ่มต้นที่เบอร์ 600 เนื่องจากโลหะผสมบิสมัท-ดีบุกมีความแข็งต่ำ สามารถลบรอยตัดได้ง่าย) จากนั้นนำชิ้นงานมาขัดเงา (Polishing) ด้วยผงอะลูมินาขนาด 1 ไมครอน จนลบรอยขัดออกหมดและสามารถมองเห็นโครงสร้างจุลภาคได้โดยไม่ต้องทำการกัดกรด แล้วล้างชิ้นงานผ่านน้ำ ตามด้วยเมทิลแอลกอฮอล์ให้สะอาด เป่าชิ้นงานให้แห้งด้วยไดร์เป่าลมร้อน แล้วใช้กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงถ่ายภาพโครงสร้างจุลภาคที่กำลังขยาย 2 เท่า, 10 เท่า, 20 เท่า, 50 เท่า และ 100 เท่า แล้ววิเคราะห์เฟสที่เกิดขึ้นในแต่ละส่วนผสมทางเคมี

การทดสอบสมบัติทางกลของโลหะผสม Bi-Sn

การทดสอบแรงดึง (Tensile testing)

ติดตั้งหัวทดสอบที่ใช้ในการทดสอบแรงดึง สำหรับเครื่อง Universal Testing Machine จากนั้นนำชิ้นงานทดสอบที่มีขนาดและรูปร่างเป็นไปตามมาตรฐาน ASTM E8 ชนิด Subsize Specimen กว้าง 6 mm [0.250 in.] จำนวน 3 ชิ้น ในแต่ละส่วนผสมทางเคมีมาวัดขนาด แล้วทดสอบแรงดึงที่อุณหภูมิห้องด้วย Strain rate เท่ากับ 0.015 มิลลิเมตร/มิลลิเมตร/นาที จากนั้นสร้างกราฟความเค้น-ความเครียดที่ได้จากการทดสอบเพื่อหาค่า Yield strength, Tensile strength, Modulus of elasticity และ Elongation โดยทำการทดสอบซ้ำจนครบทั้ง 3 ชิ้นงานสำหรับแต่ละส่วนผสมแล้วหาค่าเฉลี่ย

การทดสอบความแข็ง (Hardness testing)

นำชิ้นงานที่ผ่านการขัดเงา (Polishing) สำหรับนำไปวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคมาทำการกดหาความแข็งด้วยเครื่องทดสอบความแข็ง Micro Vickers ที่โหลดเท่ากับ 50 gf บันทึกค่าความแข็งในหน่วย HV ที่ได้จากเครื่อง ทำการวัดซ้ำ

จนครบ 7 จุดต่อ 1 ชิ้นงาน โดยกดวัดความแข็งให้กระจายทั่วผิวหน้าที่ถูกขัดเงาของชิ้นงาน แล้วหาค่าเฉลี่ยของความแข็งที่วัดได้ในแต่ละส่วนผสมทางเคมี

การทดสอบแรงกระแทก (Impact testing)

นำชิ้นงานทดสอบที่มีการหล่อให้เกิดรอยบากจากแม่พิมพ์ซิลิโคน มาติดตั้งบนเครื่องทดสอบแรงกระแทกแบบ Izod แล้วทำการทดสอบซ้ำจนครบทั้ง 3 ชิ้นงานสำหรับแต่ละส่วนผสมทางเคมี จากนั้นนำมุมที่ได้จากการทดสอบไปคำนวณหาค่าพลังงานต่อพื้นที่ หรือ Impact toughness เฉลี่ย

การศึกษาจุดหลอมเหลวของโลหะผสม Bi-Sn

นำเม็ดโลหะผสมมาทำการวิเคราะห์ โดยบรรจุลงในถ้วยใส่ตัวอย่าง นำตัวอย่างและสารอ้างอิงลงในเครื่อง Differential Scanning Calorimeter (DSC) จากนั้นวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงความร้อน โดยเริ่มต้นจากอุณหภูมิ 25 ถึง 300 °C แล้วย้อนกลับ ใช้อัตราการให้ความร้อนเท่ากับ 10 °C/นาที เมื่อได้กราฟความสัมพันธ์ระหว่างการไหลของความร้อน (Heat flow) กับอุณหภูมิ จะทำการวิเคราะห์อุณหภูมิของพีคที่มีการดูดความร้อนที่เป็นจุดหลอมเหลว

การแปรผลและวิเคราะห์ผลทางสถิติ

การวิเคราะห์ ANOVA ใช้เพื่อตรวจสอบว่าค่าเฉลี่ยของแต่ละส่วนผสมมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญหรือไม่ โดยพิจารณาจากค่า F-statistic เมื่อค่า F มากกว่า F-critical แสดงว่ากลุ่มมีความแตกต่างกัน จากนั้นใช้ Tukey's Test เพื่อระบุว่าคู่ของกลุ่มใดแตกต่างกัน โดยคู่ที่มีตัวอักษรเดียวกันถือว่าไม่แตกต่าง และตัวอักษรต่างกันแสดงว่ามีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

จากการวิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมีด้วย XRF ของเม็ดโลหะทั้ง 5 ส่วนผสม ดัง Table 1 พบว่าส่วนผสมทางเคมีที่วิเคราะห์ได้นั้นมีค่าใกล้เคียงกับค่าที่กำหนดไว้ แต่ที่ 60Bi-40Sn และ 80Bi-20Sn มีความคลาดเคลื่อนของส่วนผสมมากเมื่อเทียบกับส่วนผสมที่กำหนดไว้ เนื่องจากเป็นเม็ดโลหะที่มีการนำโลหะเดิมกลับมาหลอมเพื่อใช้งานใหม่ รวมทั้งความแตกต่างของความหนาแน่นระหว่างองค์ประกอบ (Bi มีความหนาแน่น 9.75 กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร, Sn มีความหนาแน่น 7.31 กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร) นำไปสู่การแยกตัวขณะหลอมเหลวที่เกิดจากแรงโน้ม-ถ่วง Bi ที่มีความหนาแน่นมากจะตกตะกอนที่ก้นของของเหลว ในขณะที่ Sn จะลอยขึ้นมาที่ด้านบน โดยถ้ามีสัดส่วนของ Sn มาก จะยิ่งมีโอกาสเกิดการแยกตัวมากขึ้น และการระเหยของ Bi ที่มีความดันไอสูงกว่า Sn ในขณะหลอมเหลวและอยู่ในสภาพแวดล้อมเปิดทำให้มีความคลาดเคลื่อนจากสูตรที่กำหนดไว้

Table 1 Chemical composition of Bi–Sn alloy masterbatch determined by XRF

Nominal composition	Average weight percentage (wt%)		Deviation (%)
	Bi	Sn	
60Bi-40Sn	65.09	34.91	5.09
70Bi-30Sn	72.35	27.65	2.35
80Bi-20Sn	77.62	22.38	2.38
90Bi-10Sn	90.79	9.21	0.79
100Bi	99.95	-	0.05

จากการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง ที่กำลังขยาย 50 เท่า เมื่อปริมาณ Bi มากขึ้น จะพบเฟส Bi-rich ซึ่งเป็นเฟสหลัก (Primary phase) ลักษณะผลึกหลายเหลี่ยมกระจายอยู่ทั่ว โดยจะมีขนาดใหญ่ และเกรนมีความต่อเนื่องกันตามปริมาณ Bi ที่มากขึ้น และในแต่ละส่วนผสมทางเคมีที่มีปริมาณ Bi มากขึ้นจะพบเฟส Bi-rich มากขึ้น ในขณะที่โครงสร้างยูเทคติก (Eutectic structure) มากขึ้นตามปริมาณ Sn ดัง Fig.1

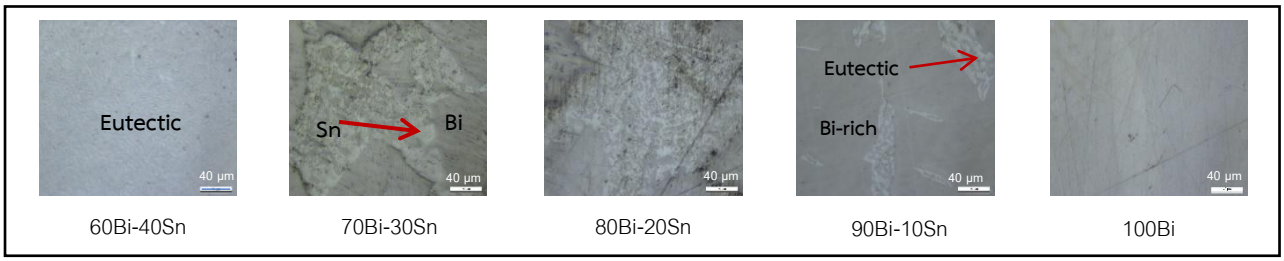


Fig. 1 Microstructural photographs of each Bi–Sn alloy composition at 50× magnification.

จากกราฟความเค้น-ความเครียดของการทดสอบแรงดึงทั้ง 5 ส่วนผสมทางเคมีดัง Fig. 2 พบว่า เมื่อมีการเติมดีบุก ซึ่งมีความเหนียวลงไปในปริมาณที่มากขึ้นทำให้ค่า Elongation ที่สูงขึ้น เนื่องจากการเติมดีบุกเข้าไปจะไปช่วยเพิ่มโครงสร้างยูเทคติกที่มีเกรนละเอียด และลดปริมาณเฟส Bi-rich ซึ่งมีเกรนขนาดใหญ่ทำให้มีขอบเกรนน้อยและเกรนมีลักษณะผลึกหลายเหลี่ยมทำให้เกิด Stress concentration ดังนั้นการเพิ่มปริมาณดีบุกจะทำให้โครงสร้างโดยรวมมีเกรนที่ละเอียดมากขึ้นและมี Stress concentration ลดลง จึงช่วยลดความเปราะ และจากพื้นที่ใต้กราฟของแต่ละส่วนผสม พบว่า 60Bi-40Sn ที่พื้นที่ใต้กราฟสูงสุด รองลงมาจะเป็น 70Bi, 80Bi, 90Bi และ 100Bi ตามลำดับ ซึ่งแสดงถึงค่า Toughness คือความสามารถของวัสดุในการดูดซับพลังงานและเปลี่ยนรูปก่อนจะแตกหัก ดังนั้นเมื่อเพิ่มปริมาณดีบุกจะทำให้มีค่า Toughness เพิ่มขึ้น เนื่องจากมีการเพิ่มขึ้นของโครงสร้างยูเทคติกที่มีเกรนละเอียด และลดปริมาณเฟส Bi-rich ส่งผลให้ทั้งความแข็งแรงของวัสดุเพิ่มขึ้น จึงมี Toughness ที่เพิ่มขึ้น

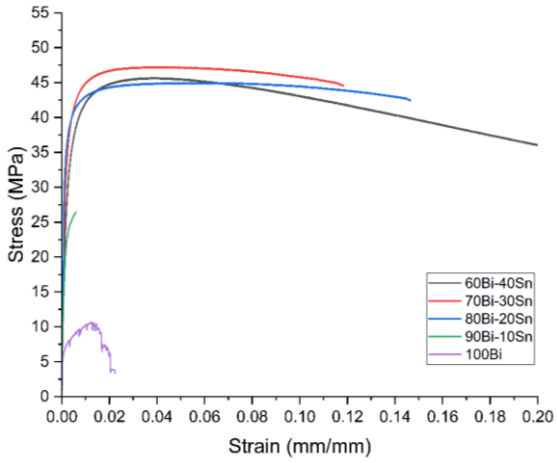


Fig. 2 The stress–strain behavior of each chemical composition obtained from the tensile test

Table 2 และ Tukey's Test Fig. 3 พบว่า ที่ส่วนผสม 60Bi-40Sn, 70Bi-30Sn, และ 80Bi-20Sn มีค่า Yield strength และ Tensile strength ที่ไม่แตกต่างกันที่ความเชื่อมั่น 95% นอกจากนี้ที่ 90Bi-10Sn และ 100Bi มีค่า Yield

strength และ Tensile strength ลดลงตามลำดับ ดังนั้นการเติมดีบุกส่งผลให้มี Yield strength และ Tensile strength ที่สูงขึ้นเนื่องจากการมีโครงสร้างยูเท็กติกที่มีเกรนละเอียด หรือกลไกการเพิ่มความแข็งแรงแบบ Grain boundary แต่เมื่อเติมดีบุกถึงจุดหนึ่ง ค่าความแข็งแรงดึงจะไม่มีการเปลี่ยนแปลง และปริมาณบิสมัทที่เพิ่มขึ้นยังทำให้ความแข็งแรงดึงลดลง

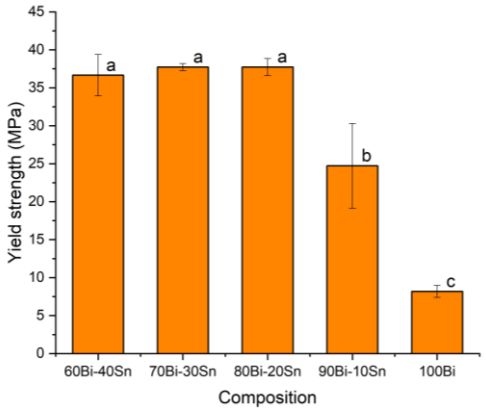


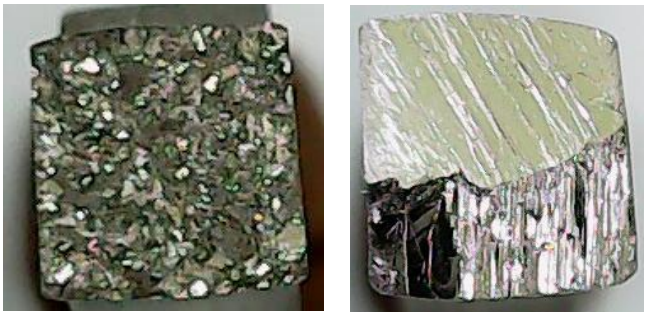
Fig. 3 The relationship between yield strength and various chemical compositions based on Tukey's test analysis of the tensile test results

Table 2 Mechanical properties obtained from tensile testing of Bi–Sn alloy

Nominal composition	Yield strength (0.2% offset) (MPa)	Tensile stress (Maximum Load) (MPa)	Modulus of elasticity (GPa)	Elongation (%)
60Bi-40Sn	36.67 ± 2.23	47.34 ± 1.84	24.26 ± 1.95	47.68 ± 5.82
70Bi-30Sn	37.73 ± 0.38	46.88 ± 0.39	24.91 ± 0.20	12.72 ± 2.64
80Bi-20Sn	37.74 ± 0.90	43.90 ± 1.03	28.8 ± 0.61	13.53 ± 1.93
90Bi-10Sn	24.73 ± 4.57	27.98 ± 8.78	20.71 ± 0.45	1.21 ± 1.00
100Bi	8.19 ± 0.63	9.63 ± 1.05	14.93 ± 0.79	1.67 ± 0.65

จาก Table 2 ส่วนผสมทางเคมี 60Bi-40Sn, 70Bi-30Sn และ80Bi-20Sn มีค่า %Elongation มากกว่า 5% แสดงว่าทั้งสามส่วนผสมนี้เป็นโลหะผสมที่มีความเหนียว (Ductile Material) แต่ 90Bi-10Sn และ 100Bi จะมีความเปราะ เนื่องจากมีค่า %Elongation น้อยกว่า 5% ซึ่งจะเห็นได้ว่าเมื่อมีปริมาณดีบุกเพิ่มมากขึ้น จะทำให้ค่า Elongation ที่บอกถึงความสามารถในการยืดตัวของวัสดุก่อนเกิดการขาด มีค่ามากตามเช่นกัน หมายความว่าส่วนผสมทางเคมีที่มีปริมาณดีบุกมากขึ้น จะมีความเหนียวที่มากขึ้นตามไปด้วย ดัง Fig. 4 ส่วนผสม 80Bi-20Sn มีลักษณะรอบแตกแบบขรุขระไม่มันวาว (Dull Surface) และหน้าตัดรอยแตกไม่สม่ำเสมอกัน ในขณะที่ 100Bi มีลักษณะรอยแตกที่ผิวเรียบ (Flat) เสมอกันตามระนาบ อีกทั้งยังมีความมันวาว (Shiny) ซึ่งเป็นลักษณะการแตกแบบเปราะ แต่ที่ 100Bi มีค่า %Elongation มากกว่า 90Bi-10Sn เนื่องจากค่า Elongation ที่ทำการคำนวณจะคิดจากจุดที่โหลดเริ่มมีการลดลง จาก Fig. 2 กราฟของ 100Bi มีลักษณะของโหลดที่ขึ้นลง ไม่มีจุดที่โหลดลดลงชัดเจนทำให้การคำนวณค่า Elongation มีความคลาดเคลื่อน ซึ่งลักษณะของโหลดที่มีการขึ้นลงนี้เนื่องจาก 100Bi มีโครงสร้างแบบ Bilayer และแต่ละชั้นจะยึดกันด้วยแรงแวนเดอวาลส์ที่มีความอ่อนแอ ทำให้บริเวณแนวระหว่างชั้นมีความเปราะแตกหักง่าย 100Bi จึงแตกตามระนาบ (Cleavage Fracture) ดัง

Fig. 4 ทำให้เมื่อมีการแตกหักที่ระนาบโหลดจึงลดลง เมื่อผ่านไปถึงอีกระนาบโหลดจึงเพิ่มขึ้นและลดลงอีกครั้งเมื่ออีกระนาบนั้น ๆ แตกหัก



80Bi-20Sn 100Bi

Fig. 4 Fracture surfaces of the tensile test specimens for the 100Bi and 80Bi–20Sn compositions.

จาก Table 3 และ Tukey's Test และ Fig. 5 พบว่า 60Bi-40Sn มีความแข็งไม่แตกต่างกันที่ความเชื่อมั่น 95% กับ 80Bi-20Sn และ 70Bi-30Sn แต่ที่ 100Bi มีความแข็งต่ำสุด และต่างจากส่วนผสมทางเคมีอื่น ๆ อย่างมีนัยสำคัญที่ความเชื่อมั่น 95% และที่ 60Bi-40Sn มีความแข็งมากที่สุดเนื่องจากมีโครงสร้างยูเท็กติก

Table 3 Hardness test results for each chemical composition

Nominal composition	Hardness test (HV)
60Bi-40Sn	18.23±0.60
70Bi-30Sn	15.97±0.91
80Bi-20Sn	17.09±1.10
90Bi-10Sn	15.71±0.20
100Bi	10.07±0.27

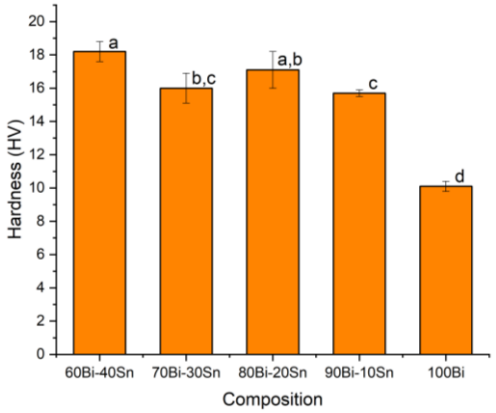


Fig. 5 The relationship between hardness values and different chemical compositions from Tukey's test analysis of the hardness test

เมื่อทำการวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) ของผลการทดสอบใน Table 4 พบว่าการเปลี่ยนแปลงส่วนผสมทางเคมีไม่มีผลกับการทนต่อแรงกระแทกที่ความเชื่อมั่น 95% เกิดจากส่วนผสมทางเคมีที่แตกต่างกันภายในชิ้นงานเดียวกัน สังเกตได้จากรอยแตก Fig. 6 จะพบว่ามีทั้งโซนที่มีความด้านกับมันวาวภายในชิ้นงานเดียวกัน ทำให้มีพฤติกรรมการแตกหักที่หลากหลายในชิ้นงานเดียว หรือเกิดจากการที่รอยบากของชิ้นงานไม่คม (Sharp) และมีรูปร่างที่ไม่เท่ากัน จึงส่งผลให้ค่า Impact toughness ที่ทดสอบได้ไม่ถูกต้อง และไม่สามารถนำมาเปรียบเทียบกันได้

Table 4 The impact test results for each chemical composition

Nominal composition	Impact toughness (kJ/m^2)
60Bi-40Sn	8.33±0.48
70Bi-30Sn	7.02±1.20
80Bi-20Sn	7.56±0.13
90Bi-10Sn	7.85±0.38
100Bi	7.27±0.37

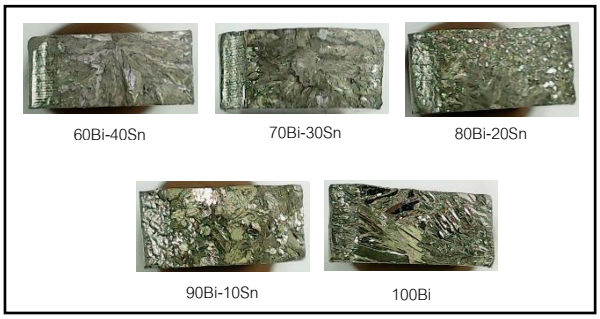


Fig. 6 Fracture surfaces of the impact test specimens

จากผลการวิเคราะห์จุดหลอมเหลว (Table 5) พบว่าโลหะผสม Bi–Sn ให้โครงสร้างยูเท็กติกที่มีช่วงหลอมเหลวเริ่มต้นประมาณ 140 °C และเมื่อปริมาณบิสมัทเพิ่มขึ้น จุดหลอมเหลวสมบูรณ์ (Liquidus) จะสูงขึ้นตามลำดับ โดยที่ 100Bi มีจุดหลอมเหลวสูงที่สุดที่ 275.67 °C ตามลักษณะของโลหะบริสุทธิ์ที่ไม่มีโครงสร้างยูเท็กติก จาก Fig. 7 โลหะผสมทุกกลุ่ม (ยกเว้น 100Bi) แสดงช่วงอุณหภูมิหลอมเหลวสองช่วง ได้แก่ Solidus ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่ยูเท็กติกเริ่มหลอมเหลว และ Liquidus ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่โลหะผสมหลอมเหลวสมบูรณ์

Table 5 Melting point of Bi–Sn alloys determined by DSC

Nominal composition	Initial melting temperature (°C)	Complete melting temperature (°C)
60Bi-40Sn	144.17	151.99
70Bi-30Sn	146.67	166.18
80Bi-20Sn	146.33	178.71
90Bi-10Sn	143.67	233.83
100Bi	-	275.67

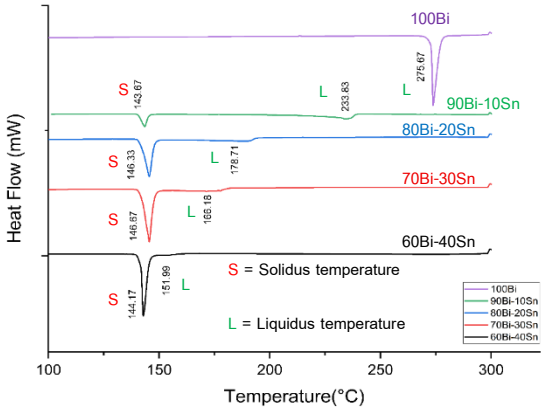


Fig. 7 Melting point analysis results of the Bi–Sn alloys

จากการเปรียบเทียบผลการทดสอบสมบัติทางกล จุดหลอมเหลว และโครงสร้างจุลภาคของโลหะผสม Bi–Sn ในงานวิจัยนี้กับงานวิจัยก่อนหน้า พบว่าแนวโน้มของสมบัติต่าง ๆ มีความสอดคล้องกับรายงานในวรรณกรรม โดยงานของ Xu et al. (2020) และ Zhou et al. (2018) รายงานว่าเมื่อเพิ่มปริมาณ Bi จะทำให้ความแข็งแรงและโมดูลัสยืดหยุ่นเพิ่มขึ้น ในขณะที่ความยืดตัวลดลง ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองในงานวิจัยนี้ สำหรับโลหะผสมที่มีส่วนผสมใกล้ eutectic พบว่าสมบัติทางกลมีความสมดุลระหว่างความแข็งแรงและความเหนียว อันเป็นผลจากโครงสร้าง eutectic ที่มีการกระจายตัวของเฟสอย่างสม่ำเสมอ ซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษาของ Yousuf et al. (2021) ที่รายงานว่าโครงสร้างจุลภาคมีบทบาทสำคัญต่อพฤติกรรมการเปลี่ยนรูปของโลหะผสม Bi–Sn อย่างไรก็ตาม หากเปรียบเทียบค่าตัวเลขเชิงปริมาณ พบว่ามีความแตกต่างเล็กน้อยจากบางงานวิจัย ซึ่งอาจเกิดจากความแตกต่างของกระบวนการผลิต อัตราการเย็นตัว ขนาดเกรน และวิธีการทดสอบสมบัติทางกล ซึ่งเป็นปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อโครงสร้างจุลภาคและสมบัติของโลหะผสม

สรุป

จากการศึกษาสมบัติทางกลและสมบัติทางกายภาพของโลหะผสม Bi-Sn พบว่า การเลือกสัดส่วนของ Bi และ Sn มีผลต่อสมบัติทางกลและกายภาพอย่างมีนัยสำคัญที่ความเชื่อมั่น 95% โดยการเพิ่ม Sn สามารถเพิ่มความแข็งแรงโดยรวมได้และการมี Bi มากจะมีจุดหลอมเหลวสูงขึ้น แต่อาจทำให้ความแข็งแรงลดลงและเปราะมากขึ้น เมื่อพิจารณาผลที่ได้จากข้อมูลข้างต้นสัดส่วนที่มีปริมาณ Sn มากขึ้นเป็นตัวเลือกที่น่าสนใจในการเป็นวัสดุทางเลือกในงานปิโตรเลียม เนื่องจากมีสมดุลระหว่างสมบัติทางกล ทางกายภาพที่สุด ซึ่งข้อมูลเหล่าเป็นข้อมูลเบื้องต้นในการเริ่มศึกษาวัสดุทางเลือกใหม่ ที่จะช่วยให้วิศวกรและนักวิจัยสามารถศึกษาข้อมูลเกี่ยวกับสมบัติของ Mechanical Plug ของวัสดุได้ง่ายมากยิ่งขึ้น รวมไปถึงการพัฒนาวัสดุทางเลือกที่เป็นโลหะผสมให้มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้นต่อไปในอนาคต

ข้อเสนอแนะ

1. การหล่อชิ้นงานทดสอบจากโลหะผสม Bi-Sn โดยอาจนำแม่พิมพ์ในการขึ้นรูปวางในระบบอัลตราโซนิกช่วยในการสั่นเพื่อลดการแยกตัว (Segregation) ของส่วนผสมทางเคมีภายในชิ้นงาน หรือการทำแม่พิมพ์แบบเปิดที่ด้านหนึ่งปิดด้วยแผ่นโลหะแทนซิลิโคนทั้งหมด ทำให้ถ่ายเทความร้อนได้ดีขึ้นลดการเย็นตัวช้า และปัญหาในการระเหยของโลหะผสมขณะหลอม สามารถปรับปรุงได้โดยการหลอมในระบบปิด โดยอาจใช้เตา Tube Furnace ที่ใช้ร่วมกับระบบสุญญากาศ

2. การสร้างรอยบาก (V-Notch) สำหรับชิ้นงานการทดสอบ Impact test จากเดิมที่รอยบากไม่คมตามมาตรฐาน และมีรอยผิวไม่เรียบจากการขึ้นรูปด้วยแม่พิมพ์ซิลิโคนที่มีแบบจากการขึ้นรูปสามมิติ สามารถปรับการขึ้นรูปโดยใช้การกัด (Milling) ใช้น้ำยาหล่อเย็นและอัตราป้อนที่เหมาะสม เพื่อไม่ให้โลหะบริเวณปลายรอยบากเกิดการเปลี่ยนแปลงสมบัติเนื่องจากความร้อน (Heat Affected Zone)

3. สมบัติที่น่าสนใจของโลหะผสม Bi-Sn คือการขยายตัวเมื่อเปลี่ยนสถานะเป็นของแข็ง เพื่อให้เข้าใจพฤติกรรมและบ่งชี้ถึงงาน mechanical plug อย่างแท้จริง งานวิจัยในอนาคตควรมีการทดสอบสมบัตินี้ ซึ่งอาจมีการทดสอบวัดการขยายตัวของโลหะผสมโดยใช้เซ็นเซอร์ ที่วัดการเปลี่ยนแปลงระยะหรือปริมาตรในสถานะต่างๆของโลหะผสม หรือการเปรียบเทียบความหนาแน่นระหว่างสถานะของเหลว (Theoretical) กับสถานะของแข็งที่อุณหภูมิต่างๆ ในด้านงาน mechanical plug ควรมีการทอสอบตามมาตรฐานงานปิโตรเลียมไม่ว่าจะเป็น การทดสอบแรงกดที่ผิวสัมผัส (Interfacial Sealing Pressure) ในการทดลองในอนาคต ควรหล่อโลหะลงในท่อจำลองที่ติด Strain gauge ไว้ที่ผิวนอก เพื่อวัดว่าแรงดันจากการขยายตัว (Expansion pressure) ที่กระทำต่อผนังท่อมีค่ากี่ปอนด์ต่อตารางนิ้ว (PSI) รวมไปถึงการทดสอบแรงที่ต้องใช้ในการดัน Plug ให้หลุดออกจากท่อหลังจากแข็งตัวแล้ว เพื่อประเมินประสิทธิภาพของ Mechanical Interlocking ที่เกิดจากการขยายตัว

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณทุนวิจัยสนันสนุนจากบริษัท ปตท.สำรวจและผลิตปิโตรเลียม จำกัด (มหาชน) และ ทุนสนับสนุนโครงการเรียนล่วงหน้าระดับบัณฑิตศึกษาจากคณะวิศวกรรมศาสตร์และบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เอกสารอ้างอิง

Knutsen, T. 2019. A novel approach to qualifying bismuth as a barrier material. M.Sc. thesis. University of Stavanger. Stavanger, Norway.

Xu, K.-K., Zhang, L., Gao, L.-L., Jiang, N., Zhang, L., Zhong, S.-J. 2020. Review of microstructure and properties of low temperature lead-free solder in electronic packaging. Sci. Technol. Adv. Mater. 21: 689–711. doi.org/10.1080/14686996.2020.1824255

Yousuf, N., Olayiwola, O., Guo, B., Liu, N. 2021. A comprehensive review on the loss of wellbore integrity due to cement failure and available remedial methods. J. Pet. Sci. Eng. 207: 109123. doi.org/10.1016/j.petrol.2021.109123

Zhou, Y., Wang, S., Chen, X. 2018. Solidification behavior and volume change of Bi–Sn alloys for sealing applications. Metall. Mater. Trans. A 49: 6231–6240.

การวิเคราะห์การสั่นสะเทือนของเครื่องจักรหมุนโดยกล้องขยายภาพการเคลื่อนไหว

Vibration analysis in rotating machine by motion amplification camera

กฤษณ์ พัวไพโรจน์*, วิทิต ฉัตรรัตนกุลชัย, พัทธ์ธีรา พัวไพโรจน์, พัชร์พิชา พัวไพโรจน์
Krit Puapairoj*, Withit Chatlatanagulchai, Pattheera Puapairoj, Patpicha Puapairoj
ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900
Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Kasetsart University, Bangkok 10900 Thailand
*Corresponding author. E-mail address: kritssgt@gmail.com

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ประเมินประสิทธิภาพของเทคนิค การขยายภาพเคลื่อนไหว ในการวิเคราะห์การสั่นสะเทือนของเครื่องจักรหมุน จากความผิดปกติเชิงกลขั้นรุนแรงแบบหลายสาเหตุ ซึ่งเกิดจากการสึกหรอของก้านสูบและลูกเบี้ยว ผลทดสอบยืนยันว่า การขยายภาพเคลื่อนไหว เป็นเครื่องมือที่มีประสิทธิภาพ สามารถจำแนกการสั่นสะเทือนทางกายภาพที่แตกต่างกันได้ ทั้งการสั่นความถี่ต่ำจากปัญหาโครงสร้างและการหลวมตัว และการสั่นความถี่สูงจากการกระแทกที่ผิวชิ้นส่วนของเครื่องจักร โดยความสำเร็จของการวิเคราะห์ต้องอาศัยการควบคุมตัวแปรอย่างละเอียด ได้แก่ การเลือกระดับการขยายที่เหมาะสม เพื่อรักษาสมดุลระหว่างการมองเห็นกับการหลีกเลี่ยงความผิดเพี้ยนของภาพ การกรองเชิงเวลาที่แม่นยำ และการเพิ่มความละเอียดเชิงพื้นที่ ในการประมวลผล เพื่อแยกสัญญาณการเคลื่อนไหวจริงออกจากสัญญาณรบกวน รวมถึงการลดความเร็วในการเล่นวิดีโอ เพื่อช่วยในการตีความข้อมูลอย่างถูกต้อง

คำสำคัญ: การขยายภาพเคลื่อนไหว, การวิเคราะห์การสั่นสะเทือน, ความผิดปกติเชิงกล, ปั๊มลูกสูบ

Abstract

This Research evaluates the efficacy of Video Acceleration Magnification technique in diagnosing complex, severe mechanical faults in Rotating Machine, resulting from catastrophic wear to the Cam and Connecting Rod. Motion Amplification Camera is confirmed as a diagnostic tool, successfully distinguishing and characterizing distinct physical vibration patterns: low-frequency vibrations indicating structural issues like looseness and misalignment, and high-frequency vibrations arising from component impacting and wear. The success of Vibration Analysis is highly contingent on controlled parameters, including selecting an Optimal Amplification Factor to prevent image distortion, and utilizing accurate temporal filtering and enhanced spatial fidelity to isolate the true motion signal from noise. Slow-motion playback is also essential for accurate human interpretation.

Keywords: Motion Amplification, Plunger Pump, Vibration Analysis, Video Acceleration Magnification

คำนำ

ในระบบการผลิตอุตสาหกรรม ปัญหาของเครื่องจักรประเภทหมุนมักแสดงออกผ่านการสั่นสะเทือนที่สูงกว่าปกติ ซึ่งการตรวจจับในอดีตพึ่งพาเซ็นเซอร์วัดความเร่งแบบติดสัมผัส (Accelerometer) ที่มีข้อจำกัดในการวัดเฉพาะจุด และไม่ได้มีติดตั้งมาในเครื่องจักรเก่าหรือเครื่องจักรทั่วไป ส่งผลให้เกิดความเสียหายของเครื่องจักรโดยไม่ได้มีการวางแผนล่วงหน้า ปัจจุบันมีการนำเทคโนโลยีกล้องวิดีโอความเร็วสูง มาประยุกต์ใช้ร่วมกับเทคนิค Video Motion Magnification (Roque และ Sobral, 2018) ทำให้สามารถขยายการเคลื่อนไหวของการสั่นสะเทือนให้เห็นได้ด้วยตาเปล่า ช่วยให้สามารถวิเคราะห์ปัญหา เช่น เพลาควง หรือแบริ่งลูกปืนแตก ในส่วนต่างๆ ของเครื่องจักรได้อย่างครอบคลุมมากขึ้น และสามารถทราบถึงความผิดปกติที่กำลังจะเกิดขึ้น ทำให้วางแผนการบำรุงรักษาเชิงคาดการณ์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

เพื่อสะท้อนการเคลื่อนที่แบบ 3 มิติ ของวัตถุ บนพื้น 2 มิติของ Camera Sensor ภาพที่อยู่ติดกันจะถูกนำมาเปรียบเทียบกัน จากนั้นแปลงความแตกต่างให้เป็นทิศทางและความเร็วของการ เคลื่อนที่ เรียกว่า Optical Flow โดยมีพื้นฐานการสร้าง Optical Flow บน 2 Methods คือ Lagrangian Method ใช้การติดตามการเคลื่อนที่ของ Points บนแกนเวลา เพื่อประมาณการเปลี่ยนแปลงของวัตถุ (Point Tracking) ในขณะที่ Eulerian Method จะใช้การวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงของภาพบนแกนเวลา ณ ตำแหน่งเดิมของภาพ (Fixed Location) โดย Lagrangian Method มีลักษณะการมองที่คล้ายกับการมองตามธรรมชาติของมนุษย์ ทำให้ดูเป็นวิธีที่ทำความเข้าใจและใช้งานได้ง่ายกว่า แต่การพัฒนาบน Eulerian Method กลับได้รับความนิยมมากขึ้นเรื่อยๆ เนื่องจาก Lagrangian Method ต้องใช้การคำนวนที่ซับซ้อน ใช้เวลาและทรัพยากรในการคำนวนมากกว่า Eulerian Method (Smieja et al., 2021)

การเคลื่อนไหวขนาดใหญ่มักจะทำให้วิธีการขยายวิดีโอที่ขยายการเปลี่ยนแปลงเชิงเส้นมีความผิดเพี้ยนได้อย่างรุนแรง งานวิจัยของ Zhang และคณะ, 2017 เสนอวิธีการขยายวิดีโอที่สามารถจัดการกับการรบกวนจากเคลื่อนไหวขนาดใหญ่ขณะที่ยังขยายการเปลี่ยนแปลงขนาดเล็กได้ โดยทำการขยายการเร่งความเร็ว (Acceleration) แทนการขยายการเคลื่อนไหวเชิงเส้น วิธีการนี้เป็นการขยายการเคลื่อนไหวแบบ Eulerian ที่ไม่ต้องการการติดตามวัตถุ (Optical Flow) การจัดแนวเชิงเวลา หรือการระบุขอบเขตของพื้นที่

งานวิจัยนี้มุ่งเน้นการวิเคราะห์ความผิดปกติของ ปั๊มลูกสูบ (Plunger Pump) ซึ่งเป็นเครื่องจักรที่มีกลไกซับซ้อนและมักเผชิญกับความเสียหายเชิงกลขั้นรุนแรงแบบหลายสาเหตุ เช่น ความเสียหายที่ชุดลูกเบี้ยวและก้านสูบ วัตถุประสงค์หลักคือ การตรวจสอบประสิทธิภาพในการแยกแยะรูปแบบการสั่นสะเทือนที่ซับซ้อน เช่น การสั่นความถี่ต่ำจากการเยื้องศูนย์ และการสั่นความถี่สูงจากการกระแทก เพื่อให้ได้ผลลัพธ์ที่แม่นยำที่สุดสำหรับการวินิจฉัยด้วยตาเปล่า (Visual Analysis) โดยมุ่งเน้นที่จะนำเสนอแนวทางปฏิบัติที่เป็นรูปธรรม เพื่อเสริมสร้างประสิทธิภาพในการบำรุงรักษาเชิงคาดการณ์ในสภาพแวดล้อมอุตสาหกรรมจริง

อุปกรณ์และวิธีการ

ในงานวิจัยนี้ได้ใช้กระบวนการ Video Acceleration Magnification เพื่อขยายการเคลื่อนไหวขนาดเล็กในวิดีโอที่มองไม่เห็นด้วยตาเปล่า โดยกระบวนการทั้งหมดถูกพัฒนาบน MATLAB และแบ่งการทำงานออกเป็นลำดับขั้นตอนที่ชัดเจน เริ่มต้นจากการป้อนข้อมูลวิดีโอที่ได้จากการบันทึกด้วยกล้องความเร็วสูงมาแยกข้อมูลพื้นฐาน ได้แก่ ความสูงและความกว้างของภาพ จำนวนช่องสี และจำนวนเฟรมทั้งหมด ก่อนเข้าสู่ขั้นตอนการประมวลผล อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองแสดงดัง Fig. 1

Fig. 1 Experimental setup for Video Acceleration Magnification Analysis

Source-Code MATLAB สำหรับงานวิจัยเรื่อง Video Acceleration Magnification ได้รับการเรียบเรียงใหม่โดย Dr. Seyran Khadem โดยใช้รหัสต้นฉบับเดิมของ Yichao Zhang (Zhang et al., 2017)

ในขั้นตอนการประมวลผล มีการใช้สคริปต์หลักของ MATLAB หลายไฟล์ โดย make.m ทำหน้าที่คอมไพล์และเตรียมไลบรารี่จำเป็นสำหรับการประมวลผลภาพ จากนั้น main.m จะเป็นตัวควบคุมการทำงานหลัก และเรียกใช้งานไฟล์ย่อยที่เกี่ยวข้อง ข้อมูลของวิดีโอและพารามิเตอร์เบื้องต้นถูกกำหนดใน setparameter.m ซึ่งระบุรายละเอียด เช่น ขนาดภาพ อัตราเฟรม และค่าพารามิเตอร์ที่ผู้ใช้ป้อน ส่วน motionamp.m จะเป็นแกนหลักในการขยายการเคลื่อนไหวโดยอาศัย kernel ที่สร้างขึ้นจาก tempkernel.m เพื่อทำการกรองเชิงเวลาและขยายการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณการเคลื่อนไหว ผลลัพธ์ที่ได้จะเป็นวิดีโอที่สามารถมองเห็นการสั่นสะเทือนหรือการเคลื่อนไหวเล็กๆ ได้อย่างชัดเจนขึ้น ลำดับการทำงานของสคริปต์แสดงดัง Fig. 2

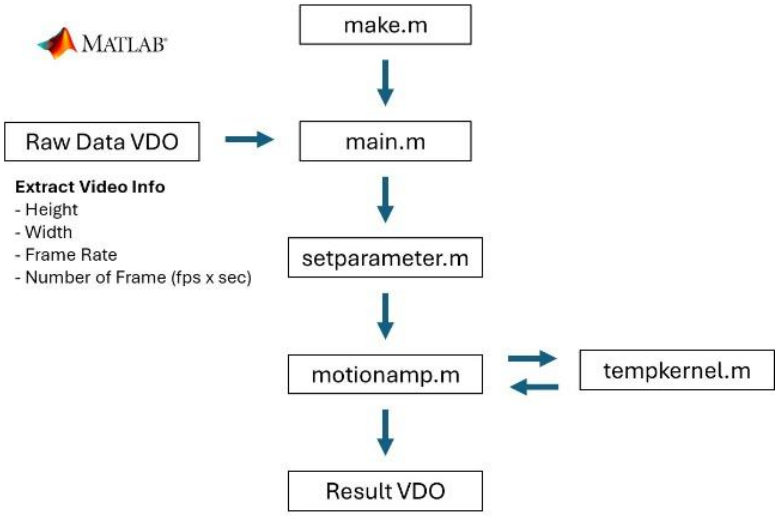


Fig. 2 MATLAB Program Flowchart for Video Acceleration Magnification

Video Acceleration Magnification คือชุดขั้นตอนที่ใช้ในการเปิดเผยการเคลื่อนไหวที่ละเอียดอ่อนโดยการเน้นความเร่ง (Acceleration) ของการสั่นสะเทือน เริ่มต้นด้วยการนำเข้าวิดีโอต้นฉบับ จากนั้นจะเข้าสู่ การแยกส่วนเชิงพื้นที่ (Spatial Decomposition) โดยใช้เทคนิค เช่น Complex Steerable Pyramid เพื่อแยกเฟรมวิดีโอออกเป็นหลายระดับความละเอียดและหลายแนวทิศทาง (Number of Orientations) ซึ่งช่วยในการสกัดเฟส (Phase) ของสัญญาณ

การเคลื่อนไหว ขั้นตอนที่สำคัญที่สุดคือการ Temporal Filtering ซึ่งดำเนินการผ่าน Kernel Generation และ Convolution โดยใช้ Temporal Filter Kernel ที่ออกแบบมาเฉพาะเพื่อแยกความเร่งของการสั่นสะเทือนที่ความถี่ที่ต้องการเท่านั้น จากนั้นสัญญาณเฟสที่ถูกกรองจะถูกแก้ไขความคลาดเคลื่อน (Phase Correction) และเข้าสู่ขั้นตอน Phase Amplification โดยการคูณด้วยปัจจัยการขยาย (α) และถูกนำไปประกอบเป็น วิดีโอผลลัพธ์ (Result VDO) ซึ่งแสดงเฉพาะการสั่นสะเทือนที่มีความเร่งสูงที่ถูกขยายจนมองเห็นได้ชัดเจน ลำดับขั้นตอนการประมวลผลแสดงดัง Fig. 3

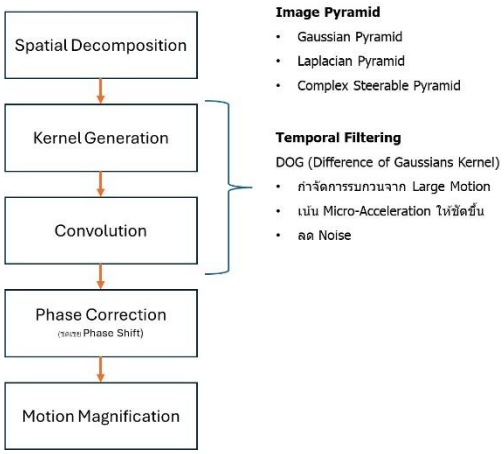


Fig. 3 Video Acceleration Magnification Processing Pipeline

ขั้นตอนการทดลอง

งานวิจัยนี้มีขั้นตอนการทดลองที่มุ่งเน้นการประเมินประสิทธิภาพของเทคนิค Video Acceleration Magnification และการกรองความเร่งเชิงเวลาในการตรวจจับการสั่นสะเทือนของเครื่องจักรหมุน โดยกระบวนการเริ่มต้นจากการเตรียมพื้นที่และจัดเตรียมเครื่องจักร (Plunger Pump) พร้อมทั้งติดตั้งกล้องความเร็วสูงในระยะห่างและมุมมองที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการบันทึกการเคลื่อนไหวของชิ้นส่วนที่ต้องการวิเคราะห์ การติดตั้งอุปกรณ์แสดงดัง Fig. 4

Fig. 4 Preparation and System Setup

การทดลองถูกแบ่งออกเป็น 5 ขั้นตอนหลัก เพื่อตรวจสอบอิทธิพลของตัวแปรสำคัญต่าง ๆ ดังนี้

1. การทดสอบการรับรู้ของมนุษย์ต่อความเร็วในการเล่นวิดีโอ (Playback Speed) ที่ถูกขยาย
2. การทดสอบอิทธิพลของระยะห่างระหว่างกล้องกับวัตถุ

3. การประเมินอิทธิพลของจำนวนแนวทิศทาง (Number of Orientations) ในการประมวลผลเพื่อเพิ่มความแม่นยำเชิงพื้นที่ และลดความผิดเพี้ยนของภาพ

4. การกำหนดระดับการขยายสูงสุด (Critical Amplification Level) เพื่อป้องกันการเกิดความผิดเพี้ยนของภาพที่รุนแรง

5. การค้นหาสาเหตุของการสั่นสะเทือนด้วยความถี่ โดยการเปลี่ยน Temporal Filter Bandwidth ให้ตรงกับความถี่ของแหล่งกำเนิดที่เฉพาะเจาะจง เพื่อแยกตำแหน่งและยืนยันความเสียหายของชิ้นส่วน

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

ผลการวิเคราะห์ได้ดำเนินการทั้งในเชิงคุณภาพจากการสังเกตด้วยตาเปล่า และเชิงปริมาณจากการวิเคราะห์ความถี่ด้วยการแปลงฟูเรียร์ สรุปผลการทดลองของแต่ละขั้นตอนได้ดังนี้

การทดสอบการรับรู้ของมนุษย์ต่อความเร็วในการเล่นวิดีโอ

ผลการทดลองยืนยันว่า อัตราความเร็วในการเล่นวิดีโอ (Playback Speed) ที่ถูกขยายในระดับ 0.1X ให้ผลลัพธ์การรับรู้ด้วยสายตาที่ดีที่สุดแก่ผู้สังเกตการณ์ การลดความเร็วลง 10 เท่าจากปกติช่วยให้ การเคลื่อนที่ที่ละเอียดอ่อนและรวดเร็ว เช่น การสั่นหรือการกระตุกของเพลา ถูกยืดจังหวะออกไป ทำให้ความถี่ของการเคลื่อนที่นั้นอยู่ในช่วงที่สายตาของมนุษย์สามารถรับรู้ถึงความต่อเนื่องและรายละเอียดของการเคลื่อนไหวได้อย่างชัดเจน และมีประสิทธิภาพสูงสุดในการวินิจฉัยปัญหา ผลการลดความเร็วในการเล่นวิดีโอแสดงดัง Fig. 5

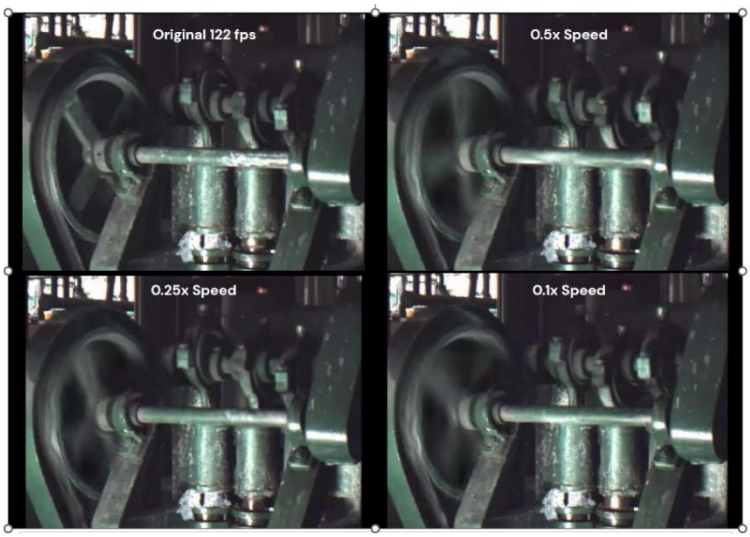


Fig. 5 Result of Playback Speed Testing

การทดสอบอิทธิพลของระยะห่างระหว่างกล้องกับวัตถุ

การประเมินความสำคัญของตำแหน่งการติดตั้งกล้อง สรุปผลได้ว่า ระยะห่างระหว่างกล้องกับวัตถุที่ทำการวิเคราะห์เป็นปัจจัยจำกัดที่สำคัญอย่างยิ่งต่อคุณภาพ และประสิทธิภาพของการขยายภาพการเคลื่อนไหว (Motion Amplification) โดยค่าการวัดที่ดีที่สุดในการทดสอบเกิดขึ้นที่ระยะ 100 cm เนื่องจากเมื่อกล้องอยู่ห่างจากวัตถุ

มากขึ้น การสั่นสะเทือนจริงจะถูกแทนที่ด้วยจำนวนพิกเซลที่น้อยลงในเฟรมวิดีโอ (Sub-Pixel Displacement) เมื่อขนาดเริ่มต้นเล็กลง ผลลัพธ์ที่ขยายแล้วก็จะมีความชัดเจนน้อยลงตามไปด้วย แสดงดัง Fig. 6

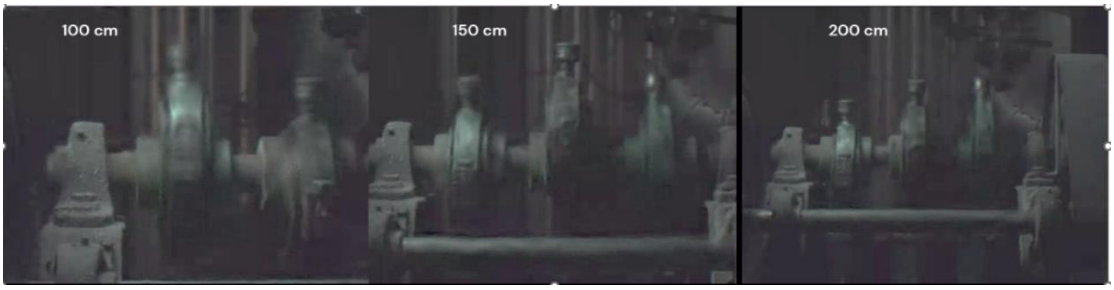


Fig. 6 Result of Distance from Camera to Object Testing

การประเมินอิทธิพลของจำนวนแนวทิศทาง (Number of Orientations)

การทดสอบนี้มุ่งเน้นการปรับปรุงคุณภาพเชิงเทคนิคของอัลกอริทึมของ Video Acceleration Magnification โดยพบว่า การเพิ่มจำนวนแนวทิศทางในการแยกเฟสของภาพ เช่น N=8 ส่งผลโดยตรงต่อการปรับปรุงความแม่นยำเชิงพื้นที่ (Spatial Accuracy) และคุณภาพโดยรวมของวิดีโอที่ถูกขยาย การแยกภาพตามแนวทิศทางที่ละเอียดขึ้นช่วยให้สามารถจำแนกสัญญาณการเคลื่อนที่จริงที่มีขนาดเล็กออกจากสัญญาณรบกวนในพื้นหลังได้อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น และลดการเกิดความผิดเพี้ยนบริเวณขอบ (Edge Artifacts) ได้อย่างเห็นได้ชัด แสดงดัง Fig. 7

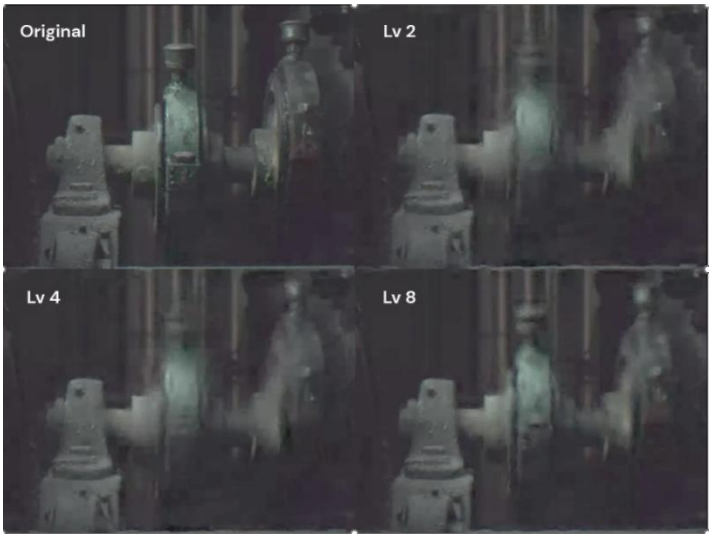


Fig. 7 Result of Number of Orientations Testing

การกำหนดระดับการขยายสูงสุด (Critical Amplification Level)

การทดลองนี้ชี้ให้เห็นถึงความจำเป็นในการกำหนดระดับการขยาย (α) ที่มีขีดจำกัด เพื่อรักษาความสมดุลระหว่างการทำให้การเคลื่อนไหวที่มองไม่เห็นปรากฏขึ้น กับการหลีกเลี่ยงความผิดเพี้ยน การเพิ่มระดับการขยายที่มากเกินไปจะนำไปสู่ความผิดเพี้ยนทางภาพแบบไม่เชิงเส้น (Non-Linear Distortion) ที่รุนแรง เช่น ปรากฏการณ์ Saturation และ Ringing Artifacts ซึ่งจะบดบังรายละเอียดการเคลื่อนที่จริง และทำให้ข้อมูลที่ได้ไม่มีประโยชน์

ในการวินิจฉัย ดังนั้น การระบุระดับการขยายที่เหมาะสมที่สุด จึงเป็นสิ่งสำคัญในการรักษาความน่าเชื่อถือของผลลัพธ์ แสดงดัง Fig. 8

Fig. 8 Result of Critical Amplification Level Testing

การค้นหาสาเหตุของการสั่นสะเทือนด้วยความถี่ (Temporal Filter Bandwidth)

ขั้นตอนสุดท้ายในการทดสอบ คือ การประยุกต์ใช้การกรองความถี่เชิงเวลา (Temporal Filtering) เพื่อจำแนกประเภทของปัญหาทางกล เครื่องจักรที่ใช้ในการทดสอบเป็น Plunger Pump แบบ 3 สูบ ความเร็วมอเตอร์ 930 rpm ต่อกับ Drive Pulley ขนาด 2.5 นิ้ว Tail Pulley ขนาด 16 นิ้ว ต่อกับ Drive Gear ขนาด 22 ซี่ ส่งกำลังขับไปยัง Tail Gear ขนาด 82 ซี่ สามารถคำนวณความเร็วรอบของเพลากลาง และความถี่ของเพลาสุดท้ายได้ดังนี้

$$N_{\text{ตาม (Pulley)}} = N_{\text{ขับ (Motor)}} \times \frac{D_{\text{ขับ (Drive-Pulley)}}}{D_{\text{ตาม(Tail-Pulley)}}} = 145.3125 \text{ rpm}$$

$$N_{\text{ตาม (Tail Gear)}} = N_{\text{ขับ (Dtive Gear)}} \times \frac{T_{\text{ขับ (Drive Gear)}}}{T_{\text{ตาม(Tail Gear)}}} = 0.65 \text{ Hz}$$

ผลลัพธ์ของ Video Acceleration Magnification โดยการกรองที่ ความถี่เชิงเวลา (Temporal Frequency) ตั้งแต่ 4 Hz ถึง 400 Hz แสดงดัง Fig. 9 สามารถวิเคราะห์ลักษณะการเคลื่อนที่ที่ถูกขยาย Visual Observation และสาเหตุของการสั่นสะเทือน (Vibration Source Identification) ได้ดังนี้

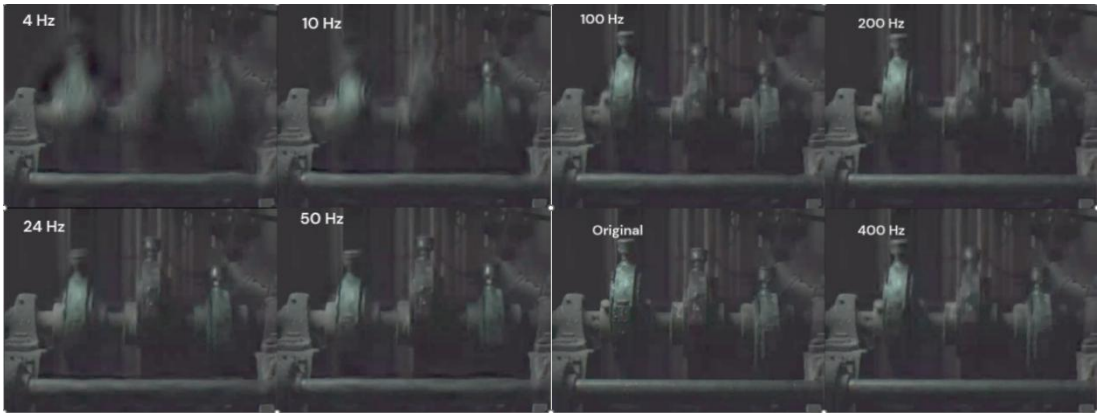


Fig. 9 Result of Temporal Filter Bandwidth Testing from 4 Hz to 400 Hz

- 4 Hz พบลักษณะการสั่นสะเทือนแบบ โยกคลอน (Wobbling) หรือการเคลื่อนที่ตามแนวแกน (Axial) ของเพลาข้อเหวี่ยง และกระบอกสูบ คาดว่า เกิดจากการสั่นสะเทือนหลักจากการทำงานของปั๊ม (Pumping Frequency) หรือการเยื้องศูนย์ (Misalignment) หรือ ความไม่สมดุลของมวลรวมของเพลาข้อเหวี่ยง โดยความถี่ 4 Hz ใกล้เคียงกับ ความถี่ 6X ของเพลาสุดท้าย (0.65 × 6 = 3.9 Hz) ซึ่งเป็นความถี่ที่เกิดจากการทำงานของวาล์วทั้ง 6 ตัว (3 Suction + 3 Discharge) ของ Plunger Pump แบบ 3 สูบ
- 10 Hz และ 20 Hz การสั่นสะเทือนลดความชัดเจนลงอย่างมาก แต่ยังคงมีการเคลื่อนไหวบางส่วนที่ถูกขยาย คาดว่า เกิดจาก Harmonics ของความถี่หลัก หรือการสั่นสะเทือนตามธรรมชาติของโครงสร้าง (Natural Frequency)
- 50 Hz และ 100 Hz การสั่นสะเทือนที่ถูกขยาย แทบมองไม่เห็น หรือ เห็นเพียงสัญญาณรบกวนเล็กน้อย (Noise) เนื่องจากความถี่ย่านนี้ไม่ได้เป็นความถี่หลักของความผิดปกติเชิงกลในส่วนของปั๊มลูกสูบ
- 200 Hz และ 400 Hz ภาพที่ขยายมีความชัดเจนของความผิดปกติ โดยแสดงการสั่นสะเทือนที่รวดเร็ว และดูคล้ายแรงกระแทก (Impact) หรือการสั่นสะเทือนเฉพาะจุด (Localized Vibration) คาดว่า อาจเกิดจากการสัมผัส หรือการกระแทกที่มีความถี่สูง โดยความถี่ 200 Hz มีความสัมพันธ์กับความถี่ขบกันของฟันเกียร์ และความเร็วรอบของเพลาขับ (145.3125 rpm × 22 teeth = 53.24 Hz) ซึ่งการสั่นสะเทือนที่ 4X และ 8X บ่งบอกถึงฟันเกียร์ขบกันไม่เต็มหน้า (Misalignment) หรือ ระยะห่างฟันเฟืองไม่ถูกต้อง ทำให้เกิดการกระแทกถี่ๆ (Gear Backlash/Looseness)

จากการตรวจสอบเครื่องจักร Plunger Pump ที่ใช้ในการทดสอบ พบปัญหาที่มีความสัมพันธ์อย่างยิ่งกับผลการวิเคราะห์ โดยการสั่นสะเทือนที่ความถี่ต่ำ 4 Hz ซึ่งใกล้เคียงกับความถี่ 6X ของปั๊มลูกสูบ เป็นผลจากการหลวมตัวของก้านสูบ และการเยื้องศูนย์ของลูกเบี้ยว (หมู่เมือง และหรรษสุข, 2550) ทำให้เกิดแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง และแรงกระแทกที่ไม่สม่ำเสมอ และการสั่นสะเทือนที่ความถี่สูง (200–400 Hz) เป็นผลจากการสึกหรอของผิวหน้าฟัน (Severe Tooth Wear Scuffing) ทำให้เกิดแรงเสียดทานและแรงสั่นสะเทือนที่ความถี่สูง และรูปทรงของฟันเฟืองที่สึกหรอเกิดระยะห่าง (Backlash) ทำให้เกิดการกระแทกอย่างรุนแรง ความเสียหายของเครื่องจักรที่ตรวจพบแสดงดัง Fig. 10

Fig. 10 Found Damages at Cam, Connecting Rod, Drive Gear and Tail Gear of Plunger Pump

การทดลองนี้ยืนยันว่า เทคนิคการขยายภาพเคลื่อนไหวสามารถทำหน้าที่เป็นเครื่องมือในการระบุตำแหน่งและจำแนกต้นตอของความผิดปกติเชิงกล โดยผลลัพธ์ที่ได้สอดคล้องกับความเสียหายจริงที่พบในเครื่องจักร

สรุป

เทคนิคการขยายภาพเคลื่อนไหว เป็นวิธีการวินิจฉัยที่มีประสิทธิภาพในการเผยให้เห็นความผิดปกติเชิงกลขั้นรุนแรงแบบหลายสาเหตุ (Multi-Source Fault) ในเครื่องจักรหมุน ซึ่งผลการขยายภาพยืนยันการมีอยู่ของการสั่นสะเทือนทางกายภาพจริงที่ประกอบด้วย การสั่นสะเทือนความถี่ต่ำ (4 Hz) ซึ่งบ่งชี้ถึงปัญหาโครงสร้างหลัก เช่น การหลวมตัวและการเยื้องศูนย์ของชุดก้านสูบและลูกเบี้ยว และการสั่นสะเทือนความถี่สูง (200 Hz และ 400 Hz) ซึ่งเกิดจากการกระแทกอย่างรวดเร็ว อันเป็นผลจากการสึกหรอของเฟืองขับ การที่เทคนิคการขยายภาพเคลื่อนไหวสามารถระบุรูปแบบการสั่นสะเทือนที่ซับซ้อนเหล่านี้ได้ พิสูจน์ความสามารถในการทำหน้าที่เป็นเครื่องมือวิเคราะห์สเปกตรัมในรูปแบบวิดีโอ เหมาะสำหรับการบำรุงรักษาเชิงคาดการณ์ โดยเฉพาะในสภาพแวดล้อมที่ไม่สะดวกต่อการติดตั้งเซนเซอร์

ความสำเร็จในการแปลผลขึ้นอยู่กับการควบคุมตัวแปรทางเทคนิคหลายประการ ได้แก่ การควบคุมความเร็วในการเล่นวิดีโอ ให้อยู่ในระดับที่สายตามนุษย์ประมวลผลได้ การจำกัดระดับการขยาย (Amplification Level) ไม่ให้มากเกินไปจนเกิดความผิดเพี้ยนทางภาพ (Artifacts) ที่เกินขีดจำกัดเชิงเส้นตรงของแบบจำลอง การใช้การกรองเชิงเวลาที่แม่นยำเพื่อแยกสัญญาณการสั่นสะเทือนออกจากสัญญาณรบกวน และการใช้จำนวนทิศทางที่มากขึ้นในการประมวลผลเพื่อเพิ่มความแม่นยำเชิงพื้นที่ โดยมีข้อจำกัดทางฟิสิกส์ที่เมื่อระยะทางเพิ่มขึ้น สัญญาณการเคลื่อนที่ระดับย่อยพิกเซลจะอ่อนแอลงเมื่อเทียบกับสัญญาณรบกวนของกล้อง

กิตติกรรมประกาศ

การวิจัยเรื่อง การวิเคราะห์การสั่นสะเทือนของเครื่องจักรหมุนโดยกล้องขยายภาพการเคลื่อนไหว สามารถดำเนินการจนประสบความสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี เนื่องจากได้รับการสนับสนุนจาก บริษัท ไทยคาสเตอร์แว็กซ จำกัด ที่ช่วยอนุเคราะห์สถานที่และเครื่องจักรในการทดสอบ รวมทั้งได้ความอนุเคราะห์และสนับสนุนจาก รองศาสตรจารย์ ดร. วิทิต ฉัตรรัตนกุลชัย อาจารย์ประจำคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ บางเขน ที่ให้คำปรึกษาและกรุณาช่วยเหลือจัดหาอุปกรณ์ในการทำวิจัยครั้งนี้ และขอขอบคุณบุคลากรและหน่วยงานที่เกี่ยวข้องที่ไม่ได้กล่าวไว้ที่ให้การสนับสนุนจนกระทั่งการวิจัยครั้งนี้สำเร็จเรียบร้อยด้วยดี ผู้วิจัยขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ ที่นี้

เอกสารอ้างอิง

ประดิษฐ์ หมู่เมืองทอง, สุชญาณ หรรษสุข. 2550. การวิเคราะห์การสั่นสะเทือนของเครื่องจักร Vibration Analysis. ซีเอ็ดยูเคชั่น, กรุงเทพฯ.

Roque, A., Sobral, J. 2018. Motion amplification technology as a tool to support maintenance decisions. In Maintenance Performance Measurement and Management 2018. Coimbra, Portugal: 58–64.

Smieja, M., Mamala, J., Praż nowski, K., Cieplińs ki, T., Szumilas, Ł. 2021. Motion magnification of vibration image in estimation of technical object condition-review. Sensors 21: 6572. doi.org/10.3390/s21196572

Zhang, Y., Pintea, S.L., van Gemert, J.C. 2017. Video acceleration magnification. In 2017 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR): 502–510. doi.org/10.1109/cvpr.2017.61

การศึกษาอนุภาคของน้ำมันไฮดรอลิก EO10W, ISO VG 46, ISO VG 68 ที่ใช้แล้ว

Study of the particles in used hydraulic oils EO10W, ISO VG 46, and ISO VG 68

ชนากรณ์ ลครทิพย์, ทรงศิลป์ พบบ่อเงิน, พยุงศักดิ์ บุตรตุ้ม, โชคชัย น้อยเจริญ, คมสันต์ งามขำ, จีรัฐติกุล กล้าหาญ*

Chanakorn Lakhonthip, Songsin Pobbongen, Payungsak Bouttum, Chokchai Noijaroen, Komsan Ngamkham, Jeerattikul Kaharn*

คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ สุพรรณบุรี 72130

Faculty of Industrial Education, Rajamangala University of Technology Suvarnabhumi, Suphanburi 72130, Thailand

*Corresponding author. E-mail address: jeerattikul.k@rmutsb.ac.th

บทคัดย่อ

การปนเปื้อนของอนุภาคในน้ำมันไฮดรอลิกเป็นสาเหตุหลักของความผิดปกติในระบบเครื่องจักรกลหนักกว่า 85% งานวิจัยนี้จึงวิเคราะห์การปนเปื้อนตามมาตรฐาน ISO 4406 ในน้ำมันใช้แล้ว 3 เกรด (EO10W, ISO VG 46 และ ISO VG 68) ด้วยเครื่อง FCU 8000 Series ผลการวิเคราะห์พบว่า น้ำมัน EO10W แสดงการปนเปื้อนรุนแรงที่สุดที่รหัส 25/23/21 (แทนปริมาณอนุภาคขนาด ≥ 4, ≥ 6, และ ≥ 14 ไมครอน ตามลำดับ) ซึ่งมีระดับความสะอาดเริ่มต้นน้อยกว่าน้ำมันใหม่มาก ส่วนน้ำมัน ISO VG 46 มีการปนเปื้อนระดับปานกลางที่รหัส 18/15/11 ถือเป็นระดับที่ยอมรับได้ และน้ำมัน ISO VG 68 มีการปนเปื้อนสูงที่รหัส 22/20/13 โดยพบความชื้นปนเปื้อนสูงสุด 1.12 ± 0.29% การทำความเข้าใจลักษณะการปนเปื้อนนี้เป็นกุญแจสำคัญสู่การจัดการทรัพยากรอย่างยั่งยืน

คำสำคัญ: การกำจัดน้ำด้วยความร้อน, กรองแบบสุญญากาศ, น้ำมันไฮดรอลิก (EO10W, ISO VG 46, ISO VG 68), ความชื้น, อนุภาค

Abstract

Particle contamination in hydraulic oil is the primary cause of over 85% of malfunctions in heavy machinery systems. This research analyzes contamination levels according to the ISO 4406 standard across three grades of used oil comprising EO10W, ISO VG 46, and ISO VG 68 using the FCU 8000 Series monitoring unit. The analysis revealed that EO10W oil showed the most severe contamination with an ISO code of 25/23/21, representing particle count levels at sizes ≥ 4, ≥ 6, and ≥14 microns respectively. Furthermore, its baseline cleanliness was significantly lower than that of new oil. In contrast, ISO VG 46 exhibited moderate contamination at a code of 18/15/11, which is considered an acceptable level. Additionally, ISO VG 68 demonstrated high contamination at a code of 22/20/13 and recorded the highest moisture content at 1.12 ± 0.29%. Understanding these contamination characteristics is a key factor in achieving sustainable resource management.

Keywords: Hydraulic oil (EO10W, ISO VG 46, ISO VG 68), Moisture contamination, Particle contamination, Thermal dehydration, Vacuum filtration

คำนำ

น้ำมันไฮดรอลิกถือเป็นองค์ประกอบสำคัญและเป็นสื่อกลางในการส่งถ่ายแรงและพลังงานในระบบการทำงานของเครื่องจักรกลหนัก เช่น รถขุดและรถบรรทุกติดเครน นอกเหนือจากหน้าที่หลักในการส่งผ่านพลังงานแล้ว น้ำมันยังทำหน้าที่สำคัญในการหล่อลื่นชิ้นส่วนที่เคลื่อนที่ การระบายความร้อน และการกำจัดสิ่งสกปรกออกจากระบบไปยังไส้กรอง อย่างไรก็ตาม เมื่อมีการใช้งาน คุณสมบัติของน้ำมันจะเสื่อมสภาพลงอย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้ โดยมีสาเหตุหลักมาจากการปนเปื้อนของสิ่งสกปรก ฝุ่นละออง และน้ำ

ความสกปรกหรือการปนเปื้อนเป็นปัจจัยสำคัญที่นำไปสู่ความล้มเหลวของระบบไฮดรอลิก โดยผู้เชี่ยวชาญระบุว่า มากกว่า 85% ของความผิดปกติทั้งหมด ในระบบไฮดรอลิกเป็นผลโดยตรงมาจากการปนเปื้อน (Stollmann, 2010; Krilek and Dobrotová, 2016) การปนเปื้อนอนุภาคของแข็งที่มากเกินไปจะลดความสามารถในการสร้างฟิล์มน้ำมัน ทำให้เกิดการสึกหรอและแรงเสียดทานเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว หากยังคงใช้น้ำมันที่เสื่อมสภาพเหล่านี้ต่อไป จะก่อให้เกิดความเสียหายร้ายแรงต่อระบบ เพิ่มต้นทุนการซ่อมบำรุง และลดอายุการใช้งานของเครื่องจักร

การประเมินสถานะของน้ำมันไฮดรอลิกที่ใช้แล้วจึงมีความจำเป็นอย่างยิ่ง โดยเฉพาะอย่างยิ่งการตรวจสอบระดับความสะอาดด้วยการนับอนุภาคตามมาตรฐาน ISO 4406 ซึ่งเป็นมาตรฐานที่รายงานจำนวนอนุภาคปนเปื้อนต่อมิลลิลิตรที่ขนาด ≥ 4 µm, ≥ 6 µm, และ ≥ 14 µm ตามลำดับ การวิเคราะห์นี้แสดงให้เห็นว่าน้ำมันไฮดรอลิกที่ใช้แล้วมีความเสื่อมสภาพในระดับวิกฤตที่แตกต่างกันไปตามประเภทและการใช้งาน น้ำมัน EO10W จากรถขุด (ใช้งาน 2,000 ชั่วโมง) แสดงระดับการปนเปื้อนที่รุนแรงที่สุด โดยมีรหัส ISO 4406 อยู่ที่ 25/23/21 (FocusLab Ltd, 2024) ซึ่งอยู่ในสถานะเตือนภัย (Warning) น้ำมัน ISO VG 46 จากรถขุด (ใช้งาน 2,000 ชั่วโมง) มีการปนเปื้อนอยู่ในระดับปานกลาง โดยมีรหัส 18/15/11ซึ่งถือว่ายอมรับได้ในระดับหนึ่ง น้ำมัน ISO VG 68 จากรถบรรทุกติดเครน (ใช้งาน 1,000 ชั่วโมง) มีการปนเปื้อนที่สูงมากเช่นกัน โดยมีรหัส 22/20/13 และสภาพน้ำมันพื้นฐานเริ่มเสื่อมสภาพ

เนื่องจากน้ำมันไฮดรอลิกใช้แล้วส่วนใหญ่ถูกนำไปทิ้งหรือเผาทำลาย ซึ่งสร้างมลพิษร้ายแรงต่อสิ่งแวดล้อมและเป็นการสูญเสียทรัพยากร การทำความเข้าใจอย่างลึกซึ้งถึงลักษณะการปนเปื้อนและขนาดของอนุภาคในน้ำมันแต่ละเกรดจึงมีความสำคัญอย่างยิ่งต่อการพัฒนากลยุทธ์การจัดการและการฟื้นฟูสภาพน้ำมันที่ใช้แล้วอย่างยั่งยืน การศึกษานี้จึงมุ่งเน้นการวิเคราะห์และเปรียบเทียบระดับการปนเปื้อนอนุภาคของแข็งในน้ำมันไฮดรอลิก EO10W, ISO VG 46, และ ISO VG 68 ที่ผ่านการใช้งานอย่างละเอียด เพื่อเป็นพื้นฐานในการออกแบบมาตรการควบคุมความสะอาดของน้ำมันให้ได้มาตรฐาน

อุปกรณ์และวิธีการ

งานวิจัยนี้มุ่งเน้นการลดอนุภาคปนเปื้อนในน้ำมันไฮดรอลิกที่ใช้แล้ว 3 เกรด ได้แก่ EO10W, ISO VG 46, และ ISO VG 68 โดยใช้กระบวนการรีไซเคิลแบบหลายขั้นตอน และมีการวิเคราะห์คุณภาพทั้งก่อนและหลังการดำเนินการ

ตัวอย่างน้ำมันไฮดรลิกเกรด EO10W, ISO VG 46, and ISO VG 68

ตัวอย่างน้ำมันไฮดรลิก EO10W แหล่งที่มา รถขุด KOMATSU จากศูนย์เครื่องจักร อบจ.กาญจนบุรี อายุการใช้งาน 2,000 ชั่วโมง การทำงาน มีการเสื่อมสภาพรุนแรงที่สุด โดยมีความสะอาดเริ่มต้น รหัส 25/23/21 ISO VG 46 แหล่งที่มา รถขุด HITACHI จากศูนย์เครื่องจักร อบจ.กาญจนบุรี อายุการใช้งาน 2,000 ชั่วโมง การทำงาน มีระดับความสะอาดเริ่มต้น รหัส 18/15/11 และ ISO VG 68 แหล่งที่มา รถบรรทุกติดเครน 5 ตัน TADANO จากอู่ซ่อมรถบรรทุกและรถเครน ในพื้นที่ จังหวัดกาญจนบุรี อายุการใช้งาน 1,000 ชั่วโมงการทำงาน มีระดับความสะอาดเริ่มต้น รหัส 22/20/13

Fig. 1 Used hydraulic oil samples: EO10W, ISO VG 46, and ISO VG 68

เครื่องมือวิเคราะห์อนุภาค (FCU 8000 Series Hydac)

HYDAC Fluid Control Unit (FCU) 8000 Series เป็นเครื่องมือวัดอนุภาคแบบเลเซอร์ที่ถูกออกแบบมาเพื่อวัดการปนเปื้อนของอนุภาคของแข็ง ในระบบไฮดรอลิกและระบบหล่อลื่น ช่วงความหนืดที่อนุญาตรองรับความหนืดของของเหลวได้กว้าง ตั้งแต่ 5 ถึง 800 mm^2 ถึง 1000 mm^2 อุณหภูมิของไหลสามารถใช้งานในช่วงอุณหภูมิ 0 ถึง 70°C ช่วงการวัดความสะอาด สามารถวัดและประเมินระดับความสะอาดตามมาตรฐานสากล ได้แก่ ISO 4406 และ SAE AS 4059 NAS 1638 ช่องขนาดอนุภาคสามารถวัดได้ถึง 6 ช่องขนาดอนุภาค เช่น ≥ 4 µm, ≥ 6 µm, และ ≥ 14 µm เป็นต้น ดังแสดงใน Fig. 2

Fig. 2 Particle analysis instrument (HYDAC FCU 8000 series)

กระดาษกรอง (Membrane Filter)

กระดาษกรองเมมเบรน หรือ ฟิลเตอร์เมมเบรน (Membrane Filter) เป็นเครื่องมือสำคัญที่ใช้ในห้องปฏิบัติการและในงานอุตสาหกรรม โดยเฉพาะอย่างยิ่งในการวิเคราะห์ความสะอาดของของเหลว เช่น การตรวจสอบการปนเปื้อนของอนุภาคในน้ำมันไฮดรอลิก ในการวิเคราะห์ความสะอาดของน้ำมันหรือของเหลวอื่น ๆ โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อใช้ร่วมกับเครื่องนับอนุภาคเลเซอร์ (เช่น FCU 8000 Series ที่กล่าวถึงก่อนหน้านี้) เมมเบรนฟิลเตอร์มีบทบาทสำคัญในการเตรียมตัวอย่าง อนุภาคปนเปื้อนในน้ำมันจะถูกดักจับและสะสมอยู่บนพื้นผิวของแผ่นกรองดังแสดงใน Fig. 3

Fig. 3 Membrane filter used for hydraulic oil filtration

กระบวนการรีไซเคิล

กระบวนการฟื้นฟูคุณภาพน้ำมันประกอบด้วย 3 ขั้นตอนหลัก ขั้นตอนแรกการตกตะกอน (Sedimentation) ปล่อยน้ำมันทิ้งไว้ในภาชนะเป็นเวลา 1 สัปดาห์ เพื่อให้อนุภาค ของแข็งและน้ำแยกตัวออกด้วยแรงโน้มถ่วง ขั้นตอนที่สองการกรองแบบ สุญญากาศ (Vacuum Filtration) ใช้ชุดกรองสุญญากาศพร้อมตัวกรองแบบเมมเบรน ขนาด 0.80 และ 0.45 ไมโครเมตร โดยทำการกรองทั้งหมด 4 ครั้ง และขั้นตอนที่สามการกำจัดน้ำ (Thermal Dehydration) ใช้วิธีต้มให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 105°C (221°F) เป็นเวลา 30 นาที ต่อครั้ง (ปริมาตร 50 ml) เพื่อระเหยน้ำออกจากน้ำมัน

การวิเคราะห์และสูตรคำนวณ

การวิเคราะห์ผลในขั้นตอนการกำจัดน้ำนั้น พิจารณาจากปริมาณน้ำที่ระเหยไป โดยใช้วิธีการชั่งน้ำหนักก่อนและหลังการให้ความร้อน ซึ่งสามารถคำนวณ เปอร์เซ็นต์การสูญเสียน้ำหนัก (%Weight Loss) ได้ตามมาตรฐาน ASTM D972 (ASTM D972-20,W2020) ตาม Equation 1:

$$\%\text{Weight Loss} = \left(\frac{\text{Initial Weight - Final Weight}}{\text{Initial Weight}}\right) \times 100 \quad (1)$$

Where; %Weight Loss is the percentage of weight loss

Initial Weight is the initial weight before moisture reduction (g)

Final Weight is the final weight after moisture reduction (g)

การวิเคราะห์การลดอนุภาคปนเปื้อนในน้ำมันไฮดรอลิกเป็นการประเมินประสิทธิภาพของกระบวนการรีไซเคิลโดยใช้วิธีการเปรียบเทียบจำนวนอนุภาคก่อนและหลังการรีไซเคิล และเปอร์เซ็นต์การลดอนุภาค (%Particle Reduction) ซึ่งสามารถคำนวณได้ตามมาตรฐาน ISO 4406:1999 (ISO,1999) ตาม Equation 2:

$$\%\text{Particle Reduction} = \left(\frac{\text{Initial Particle Count - Final ParticleCount}}{\text{Initial Particle Count}}\right) \times 100 \quad (2)$$

Where; %Particle Reduction is the percentage reduction in particle count

Initial Particle Count is the number of particles before recycling (particles/mL)

Final Particle Count is the number of particles after recycling (particles/mL)

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

การวิจัยครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาอนุภาคของน้ำมันไฮดรอลิก EO10W, ISO VG 46, ISO VG 68 ที่ใช้แล้ว โดยทำการทดสอบคุณภาพของน้ำมันไฮดรอลิกเกรด EO10W, ISO VG 46 และ ISO VG 68 ก่อนและหลังกระบวนการรีไซเคิล ผลการทดลองที่ได้สามารถนำเสนอได้ดังนี้

กราฟผลการตรวจนับจำนวนอนุภาคปนเปื้อนตามมาตรฐาน ISO 4406

EO10W แสดงประสิทธิภาพสูงสุด สามารถฟื้นฟูคุณภาพจาก 25/23/21(แทนปริมาณอนุภาคขนาด ≥ 4, ≥ 6, และ ≥ 14 ไมครอน ตามลำดับ) เสื่อมมาก เป็น 21/17/10(เทียบเท่าน้ำมันใหม่) ลดอนุภาคได้ 87.5-99.95% ในทุกขนาด แสดงว่าน้ำมันความหนืดต่ำเหมาะสำหรับการรีไซเคิลมากที่สุด ISO VG 46 มีคุณภาพดีอยู่แล้วก่อนรีไซเคิล (18/15/11) ใกล้เคียงน้ำมันใหม่ (16/14/11) หลังรีไซเคิลปรับปรุงได้เฉพาะอนุภาคขนาดใหญ่ (≥ 14 µm) ลดลง 75% ส่วนอนุภาคขนาดเล็กคงที่ ISO VG 68 ปรับปรุงได้จาก 22/20/13 เป็น 21/17/10 แต่ยังไม่ถึงมาตรฐานน้ำมันใหม่ (17/14/10) เนื่องจากความหนืดสูง (68 cSt) ทำให้การกรองยากและมีความชื้นสูง (1.11%) ต้องปรับปรุงกระบวนการเพิ่มเติม ข้อสรุป กระบวนการรีไซเคิลมีประสิทธิภาพสูงสำหรับน้ำมันที่มีความหนืดต่ำ สามารถลดต้นทุนและผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม แต่ต้องปรับกระบวนการให้เหมาะสมกับแต่ละเกรดน้ำมัน โดยเฉพาะน้ำมันความหนืดสูงต้องใช้อุณหภูมิและเวลามากกว่า

จาก Fig. 4 แสดงการเปรียบเทียบคุณภาพน้ำมันโดยวัดจากการนับจำนวนอนุภาคปนเปื้อนต่อ มิลลิลิตร ตามมาตรฐาน ISO 4406 ของน้ำมันไฮดรอลิกเกรด EO10W, ISO VG 46, และ ISO VG 68 การเปรียบเทียบกรณีศึกษาดังนี้ น้ำมันใหม่ น้ำมันที่ใช้งานแล้ว และน้ำมันที่ผ่านกระบวนการงานรีไซเคิล ด้วยเครื่องวิเคราะห์ Laser particle counter (FCU 8000 Series Hydac) พบว่าเกรดน้ำมันใหม่จำนวนอนุภาค ≥ 4 µm โดยที่ 20,000, 500, และ500 ส่วนน้ำมันที่ใช้แล้ว 1,000,000, 1,500 และ2,000 - 3,000 หลังจากที่นำตัวอย่างน้ำมันไฮดรลิกทั้ง 3 เกรดไปผ่านจากกระบวนการรีไซเคิล พบว่า EO10W มีค่าอยู่ที่ 10,000 - 20,000 ISO VG 46 ที่ 500 และISO VG 68 ที่ 500 ซึ่งเท่ากับเกรดน้ำมันใหม่ น้ำมันใหม่ของน้ำมันไฮดรอลิกเกรด VG 46 และ VG 68 มีความสะอาดเริ่มต้นที่สูงกว่ามาก โดยมีจำนวนอนุภาค ≥ 4 µm ต่ำกว่าน้ำมัน EO10W ถึงประมาณ 40 เท่า ซึ่งบ่งชี้ว่าน้ำมันไฮดรอลิกทั้งสองเกรดถูกควบคุมความสะอาดมาตั้งแต่กระบวนการบรรจุภัณฑ์ ส่วนการนำน้ำมันไฮดรลิกทั้ง 3 เกรดไปใช้งานพบว่า น้ำมัน EO10W มีระดับการปนเปื้อนหลังการใช้งานที่สูงที่สุด โดยพุ่งสูงเกิน 1,000,000 อนุภาค/มล. ในขณะที่น้ำมันไฮดรอลิก (VG 46, VG 68) มีการปนเปื้อนเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย ระบบรีไซเคิลมีประสิทธิภาพสูงมาก กับน้ำมันไฮดรอลิกเกรด VG 46 และ VG 68 โดยสามารถลดจำนวนอนุภาคลงจนกลับมามีระดับความสะอาดที่ใกล้เคียงกับน้ำมันใหม่ได้อย่างสมบูรณ์ สำหรับน้ำมัน EO10W แม้ว่าการรีไซเคิลจะลดการปนเปื้อนจากระดับล้านหน่วยลงได้อย่างมาก แต่ระดับความสะอาดสุดท้ายยังคงอยู่ในช่วง 10,000-20,000 อนุภาค/มล. ซึ่งยังคงสูงกว่าน้ำมันไฮดรอลิกที่ผ่านการรีไซเคิลแล้วหลายสิบเท่า

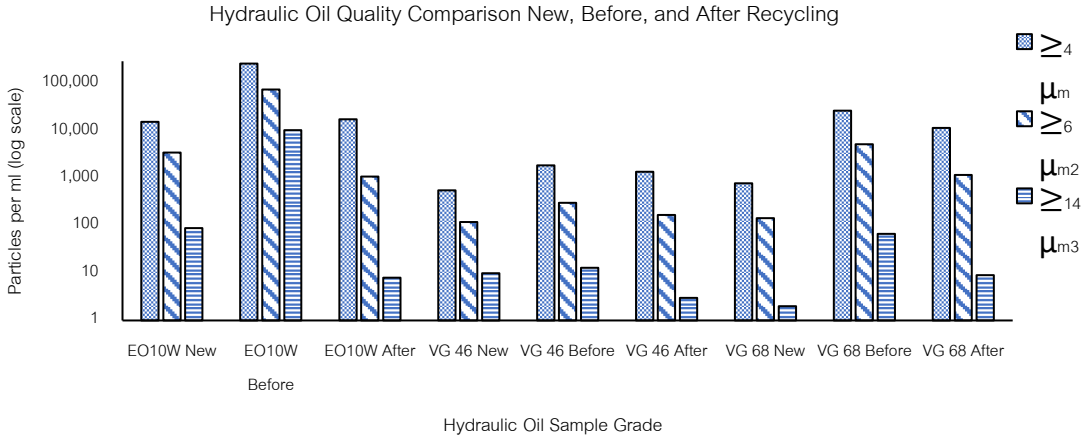


Fig. 4 Hydraulic Oil Quality Comparison New, Before, and After Recycling

กราฟผลการลดความชื้นโดยการให้ความร้อนต้มน้ำมัน

Fig. 5 แสดงผลการวิเคราะห์การลดความชื้นด้วยการระเหยด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 105°C เป็นเวลา 30 นาที โดยทำการทดลองซ้ำ 20 ครั้ง (n=20) พบว่าเปอร์เซ็นต์การสูญเสียน้ำหนักของน้ำมันแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญตามเกรดและความหนืดของน้ำมัน โดยน้ำมัน EO10W แสดงการสูญเสียน้ำหนักต่ำสุดที่ 0.24± 0.09% ซึ่งบ่งชี้ว่ามีปริมาณความชื้นปนเปื้อนน้อยที่สุดและมีความเสถียรต่อการระเหยและการสลายตัวจากความร้อนสูงสุด แม้ว่าจะมีการปนเปื้อนอนุภาคของแข็งสูงมาก (ISO Code 25/ 23/ 21) แต่กลับมีความชื้นต่ำ ซึ่งแสดงว่าการปนเปื้อนหลักมาจากอนุภาคของแข็งไม่ใช่น้ำ ในขณะที่น้ำมัน ISO VG 46 ที่มีความหนืดปานกลาง (46 cSt ที่ 40°C) แสดงการสูญเสียน้ำหนักเพิ่มขึ้นเป็น 0.72 ± 0.21% ซึ่งสูงกว่า EO10W ประมาณ 2.97 เท่า และมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานที่สูงขึ้นบ่งชี้ว่าความชื้นกระจายตัวไม่สม่ำเสมอในตัวอย่าง ส่วนน้ำมัน ISO VG 68 ที่มีความหนืดสูงสุด (68 cSt ที่ 40°C) แสดงการสูญเสียน้ำหนักสูงสุดที่ 1.11 ± 0.29% ซึ่งสูงกว่า EO10W ประมาณ 4.6 เท่า และสูงกว่า ISO VG 46 ประมาณ 1.55 เท่า พร้อมทั้งมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานสูงสุด แม้โดยทั่วไปน้ำมันหนืดสูงจะระเหยยาก แต่เนื่องจากผ่านการใช้งานหนัก ความร้อนสะสมในระบบทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน ซึ่งทำให้โมเลกุลของน้ำมันเกิดการสลายตัวและเปลี่ยนสภาพเป็นสารประกอบที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำลงและระเหยได้ง่ายขึ้น สอดคล้องกับงานของ (Štollmann, 2010) ผลการทดลองนี้ชี้ให้เห็นว่าน้ำมันหนืดสูงต้องการเงื่อนไขการกำจัดความชื้นที่เข้มข้นกว่า เช่น การใช้อุณหภูมิสูงขึ้น (110–120°C) เวลานานขึ้น (45–60 นาที) หรือใช้เทคนิคพิเศษเช่น Vacuum Dehydration เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการกำจัดความชื้น ซึ่งเป็นข้อมูลสำคัญสำหรับการออกแบบและปรับปรุงกระบวนการรีไซเคิลให้เหมาะสมกับน้ำมันแต่ละเกรดเพื่อบรรลุเป้าหมายการจัดการทรัพยากรอย่างยั่งยืน

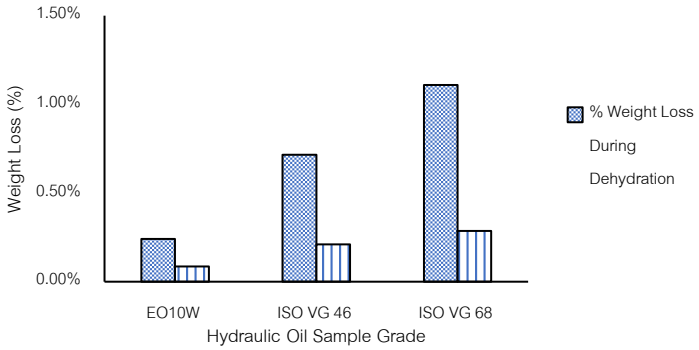


Fig. 5 Moisture reduction analysis via thermal evaporation for 30 minutes (based on 20 replicates). Error bars represent the standard deviation (SD)

สรุป

การศึกษาอนุภาคของน้ำมันไฮดรอลิกที่ใช้แล้ว 3 เกรด (EO10W, ISO VG 46, และ ISO VG 68) ด้วยกระบวนการตกตะกอน การกรองเมมเบรน และการกำจัดความชื้น แสดงให้เห็นว่าน้ำมัน EO10W ให้ผลดีเยี่ยมที่สุดด้วยการลดอนุภาค 87.5–99.9% และมีคุณภาพเทียบเท่ากับน้ำมันใหม่ (ISO code จาก 25/23/21 เป็น 21/17/10) น้ำมัน ISO VG 46 ที่เสื่อมสภาพน้อยสามารถลดอนุภาคขนาดใหญ่ได้ดี 50–75% แต่อนุภาคเล็กคงที่ (ISO code จาก 18/15/11 เป็น ISO code 18/15/09) ส่วนน้ำมัน ISO VG 68 แม้จะปรับปรุงได้ดี 50–93.6% แต่ยังไม่ถึงมาตรฐานน้ำมันใหม่เนื่องจากความหนืดสูงทำให้ดูดซับความชื้นมากกว่า (1.11 ± 0.29%) และยากต่อการกรอง (ISO code จาก 22/20/13 เป็น ISO code 21/17/10 งานวิจัยนี้พิสูจน์ว่าการรีไซเคิลน้ำมันไฮดรอลิกเป็นทางเลือกที่เป็นไปได้ในการลดต้นทุน ลดของเสียอันตราย และส่งเสริมการใช้ทรัพยากรอย่างยั่งยืน โดยควรปรับพารามิเตอร์กระบวนการตามลักษณะเฉพาะของน้ำมันแต่ละเกรดเพื่อประสิทธิภาพสูงสุด

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยต้องขอขอบคุณทาง สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล (กำลังงานและของไหล) คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ ศูนย์สุพรรณบุรี ในการใช้พื้นที่ในการทำการทดลอง

เอกสารอ้างอิง

ASTM International. 2020. Standard test method for evaporation loss of lubricating greases and oils (ASTM D972-20). doi.org/10.1520/D0972-20

FocusLab Ltd. 2024. Oil analysis report - hydraulic system. Backhoe KOMATSU SN 018440004 Hyd-25023218. FocusLab Ltd., Bangkok, Thailand.

ISO. 1999. ISO 4406:1999 hydraulic fluid power—fluids—method for coding the level of contamination by solid particles. International Organization for Standardization.

Krilek, J., Kováč, J., Kučera, M., Dobrotová, L. 2016. The hydraulic oil analysis of for determination of the number of mechanical dirt and water content in hydraulic cranes. In Hidro-ta pnev-mopryvody mašyn sučasni dosiahnenňa ta zastosuvanňa: II Mižna-rodna naukovo-technična konferencija. T.P. Baranovska: 86–89.

Štollmann, H. 2010. Monitoring of hydraulic fluids: Understanding the degradation process. In Lubrication Excellence Conference Proceedings.

Štollmann, V. 2010. Nezabúdajme na hydraulické systémy. TriboTechnika 3: 24–26.

Udonne, J.D. 2011. A comparative study of recycling of used lubrication oils using distillation, acid and activated charcoal with clay methods. J. Pet. Gas Eng. 2: 1–9.

Optimizing dielectric liquid viscosity for enhanced thermal management of vertical components in single-phase immersion cooling

Teerapat Thungthong[a], **Sudarat Srichan**[b], **Weerachai Chaiworapuek**[a,*]

[a]Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Kasetsart University, Bangkok 10900, Thailand

[b]Department of Railway System Engineering, Faculty of Engineering, Rangsit University, Bangkok 12000, Thailand

*Corresponding author. E-mail address: teerapat.thung@ku.th

Abstract

This research examines heat transfer enhancement and fluid circulation within a single-phase immersion system utilizing silicone fluid by varying the kinematic viscosity from 1 mm^2/s to 50 mm^2/s. The results establish a clear inverse relationship between kinematic viscosity and convective heat transfer, quantified by the Nusselt number. The underlying fluid dynamics were simultaneously characterized using Particle Image Velocimetry (PIV). The lowest viscosity fluid provided the highest heat removal efficiency, yielding the highest Nusselt numbers up to 145 and the lowest surface temperatures. PIV analysis confirmed this was due to the formation of a vigorous circulation loop and a high-velocity buoyant plume. Conversely, the highest viscosity caused a severe viscous damping effect, resulting in near-stagnant flow and the lowest heat transfer performance. These findings provide fundamental insights for optimizing fluid selection, emphasizing that low kinematic viscosity is crucial for developing efficient and scalable cooling solutions for high-power density applications.

Keywords: Natural convective heat transfer, Particle Image Velocimetry (PIV), Single-phase immersion cooling

Introduction and Literature review

In modern high-power electronics, from data centers to electric vehicles, managing heat has become increasingly challenging as air cooling reaches its limits (Ellsworth and Iyengar, 2009; Zhou et al., 2024). Single-phase immersion cooling offers a promising alternative by fully submerging components in electrically non-conductive dielectric fluids, enabling efficient heat removal without air-gap resistance (Suthar et al., 2024). The effectiveness of this method strongly depends on the fluid's properties—particularly viscosity, which governs natural convection, circulation behavior, and thermal boundary layer development (Soares et al., 2024).

This research investigates heat transfer in single-phase immersion cooling using silicone fluids under natural convection. By varying dynamic viscosity from 1 mm^2/s to 50 mm^2/s, the study aims to characterize and optimize heat transfer performance. Particle Image Velocimetry (PIV) will be used to capture velocity fields and analyze buoyancy-driven flow near heated surfaces. The results are expected to offer insights into improving immersion-cooling efficiency and scalability.

As electronic and power systems shrink while demanding higher heat-flux handling, immersion cooling has become increasingly relevant (Mudawar, 2001; Garimella et al., 2008). By directly contacting components with dielectric liquids, the method achieves higher heat-transfer coefficients and more uniform temperatures compared to air or indirect liquid cooling (Tuma, 2015; Birbarah et al., 2020). Studies show immersion systems can dissipate 10–100× more heat than air cooling (Ebrahimi et al., 2014; Chi et al., 2020). Single-phase immersion avoids boiling complexities, offering stable thermal performance (Kunkel, 2016; Alfonso and Giulio, 2021). Silicone fluids are increasingly favored due to thermal stability and cost-effectiveness (Moghaieb et al., 2023), while viscosity remains a key factor governing buoyancy-driven convection (Jaluria and Gebhart, 1988; Incropera et al., 2007), as highlighted in studies such as Kheirabadi and Groulx (2016).

Therefore, this research aims to investigate heat transfer in a single-phase immersion cooling system utilizing silicone fluid under natural convection conditions. By systematically varying the dynamic viscosity of the silicone fluid from 1 mm^2/s to 50 mm^2/s, this study seeks to characterize and optimize heat transfer performance across the resulting flow regimes. To quantitatively analyze fluid dynamics and their role in convective heat transfer, Particle Image Velocimetry (PIV) will be employed to capture high-resolution velocity fields within the enclosure. The study places special emphasis on quantifying buoyancy-induced flow structures near heated surfaces, as these are critical to understanding convective transport mechanisms. The findings are expected to provide fundamental insights into the optimization of single-phase immersion cooling systems using silicone fluid, contributing to the development of more efficient, reliable, and scalable cooling solutions.

Normally, the heat transfer rate per unit area, q (W/m^2) can be calculated from the electrical power input to the heat generating device, Q (W), divided by the heat transfer surface area, A (m^2), using the following Equation 1:

$$q = Q / A = IV / A \quad (1)$$

where I and V are the current (A) and voltage (V), respectively. The convection heat transfer coefficient, h (W/m^2·°C), between the battery surface and the fluid within the test section can be calculated from the Equation 2:

$$h = q / (T_s - T\infty) \quad (2)$$

where T_s is the surface temperature of the heat generating device (°C) and $T\infty$ is the bulk fluid temperature within the test section (°C). The convection heat transfer coefficient is then used to calculate the Nusselt number, Nu, as follow Equation 3:

$$Nu = hL_c / k \quad (3)$$

where L_c is the characteristic length of the heat generating device (m) and k is the thermal conductivity (W/m·°C). To determine whether the flow is laminar or turbulent, the Rayleigh number, Ra, is defined as Equation 4:

$$Ra = [g\beta (T_s - T\infty) PrL_c^3] / v^2 \quad (4)$$

where g is the gravitational acceleration, β is the thermal expansion coefficient, v is kinematic fluid viscosity and Pr represents the Prandtl number, defined as the ratio of momentum diffusivity to thermal diffusivity. In this study, the Ra for silicone fluids with viscosities ranging from 1 mm^2/s to 50 mm^2/s was calculated to vary between 6.43×10^8 and 9.31×10^9. The 50 mm^2/s viscosity fluids correspond to the lower Ra than 10^9, indicating laminar, whereas the 1 mm^2/s viscosity fluids exceed the critical threshold, characterizing the flow as fully turbulent. To validate the experimental results, Nusselt numbers obtained from Equation 3 were compared with calculated Nusselt numbers derived from the Churchill and Chu correlation (Equation 5) (Churchill and Chu, 1975):

$$Nu = 0.59Ra^{0.25} \quad (5)$$

The fluid properties used in the above equations can be evaluated at the film temperature, T_f (°C), which is calculated as Equation 6:

$$T_f = (T_s + T\infty) / 2 \quad (6)$$

The properties of the 1 – 50 mm^2/s silicone fluids, as determined from performance tests (Shin-Etsu Chemical Co., Ltd.), are crucial for assessing heat transfer performance and are summarized in Table 1.

Table 1 Silicone fluid properties

Viscosity (mm^2/s)	ρ (kg/m^3)	k (W/(m·K))	C_p (kJ/(kg·K))
1	815	0.10	1.97
10	932	0.14	1.7
50	957	0.15	1.5

Experimental setup

To investigate heat transfer in a single-phase silicone immersion cooling system, an experimental setup was utilized, as depicted in Fig. 1(a). The experimental enclosure measured 9 cm in width and 20 cm in height. For this study, silicone fluid with viscosities of 1 mm^2/s, 10 mm^2/s, and 50 mm^2/s was used as the working fluid, maintained at a liquid level height of 15.0 cm. Four Type-T thermocouples, each with an 80 μm sensor diameter and an uncertainty of ±0.1 °C, were immersed in the silicone fluid to measure temperatures at base heights ranging from 3.0 cm to 12.0 cm. Additionally, three thermocouples were mounted on the heating surface (4.0 cm × 7.0 cm with a thickness of 0.6 cm): one at the center, one 1.00 cm above, and one 1.00 cm below. The heater, positioned at middle of the enclosure, was controlled by a dimmer (with 1% uncertainty) to provide a constant heat flux ranging from 4360 W/m^2 to 13700 W/m^2. Thermocouples were also used to measure the inlet water temperature in the cooling coil, which maintained an inlet temperature of 14.8 °C, supplied by a 3510 W chiller. Both the cooling coil outside the enclosure and the test section itself were well-insulated with high-performance thermal insulation to minimize heat loss to the environment throughout all experimental trials. Experiments and were conducted in triplicate, acquiring temperature signals under steady-state conditions for 10 minutes. Reported values represent the average of these three measurements from all thermocouples positioned on the heater surface and surrounding temperature.

Natural fluid circulation was investigated using Particle Image Velocimetry (PIV) to visualize flow fields, as illustrated in Fig. 1(b). A 532-nm laser beam from a continuous laser generator (LASEVER LSR532H-2W) was directed toward the center of the test section. A Powell lens with a 90° spreading angle transformed the beam into a 1-mm thick light sheet covering the fluid domain. A Chronos 1.4 high-speed camera, equipped with a Computar 12.5–75 mm f/1.2 zoom lens, was positioned perpendicular to the laser plane at the mid-level

of the test section as shown in Fig. 1(b). This setup captured images of the illuminated particles within a region of interest (ROI) measuring 10.0 cm × 15.0 cm, with a spatial resolution of 1600 × 2400 pixels. Polyamide seeding particles with a mean diameter of 20 μm and a density of 1.03 g/cm^3 were suspended in silicone fluid at a constant concentration of 23 mg/L. Image processing was performed using PIVlab software, employing an algorithm to minimize bias and root-mean-square (RMS) error in displacement estimation (Thielicke and Sonntag, 2021). The time separation between consecutive frames was set to 0.8 ms. Under each operating condition, 3000 instantaneous velocity vector fields were recorded and averaged to produce a single mean velocity field.

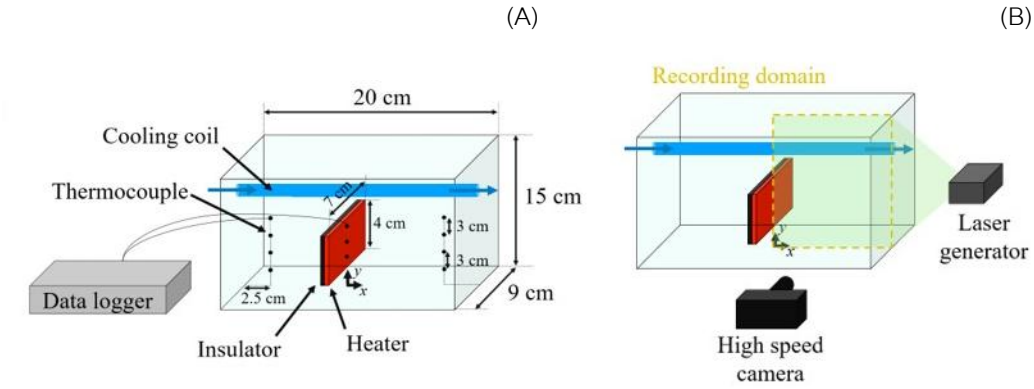


Fig. 1 Schematic diagram of (A) the test section and (B) PIV measurement.

Results

Thermocouples were used to measure the surface and surrounding temperatures of a vertical heating surface immersed in silicone fluids of 1, 10, and 50 mm²/s. As shown in Fig. 2, both temperatures rise with increasing heat flux, and a clear temperature gap between the surface and fluid grows with higher heat input, reflecting stronger thermal driving potential.

Surface temperature data further confirm this trend. At 50 mm²/s, the surface reaches the highest temperatures (≈42–80 °C), indicating poor heat removal. The 10 mm²/s fluid performs moderately (≈37–70 °C), while 1 mm²/s consistently yields the lowest temperatures (≈33–59 °C), showing the most effective cooling. Surrounding fluid temperature also increases with viscosity, though less dramatically. The largest surface–fluid temperature difference occurs at 50 mm²/s and decreases as viscosity decreases, reinforcing that higher viscosity suppresses natural convection and reduces heat-transfer efficiency.

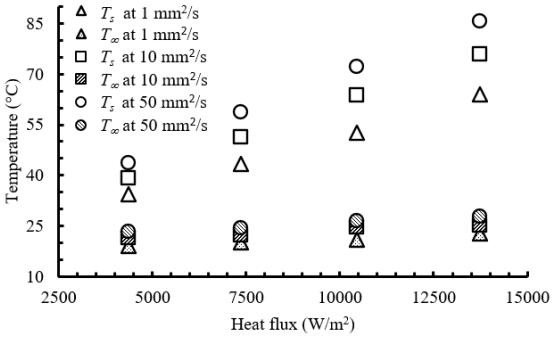


Fig. 2 Average temperature at 1 mm^2/s - 50 mm^2/s.

Using these temperatures, Nusselt numbers were calculated (Fig. 3). Each experimental data presented in Fig. 3 represents the average value obtained from three independent repetitions. An uncertainty analysis indicates that the maximum deviation for the Nusselt number is within 7.8%. The results show a clear inverse relationship between viscosity and heat-transfer performance: the lowest-viscosity fluid (1 mm²/s) yields the highest Nusselt numbers (≈115–135), followed by 10 mm²/s (≈69–75), and 50 mm²/s (≈55–61).

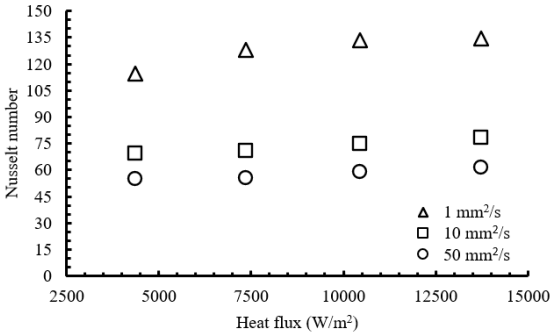


Fig. 3 Nusselt number at 1 mm^2/s - 50 mm^2/s.

Discussion

The velocity vector fields show that fluid viscosity strongly governs natural convection. At 1 mm²/s (Fig. 4A), low viscosity allows buoyancy forces to dominate, producing a strong circulation loop with fast upward flow near the heater and downward return flow after cooling. When viscosity increases to 10 mm²/s (Fig. 4B), this circulation weakens considerably. At 50 mm²/s (Fig. 4C), viscous damping nearly eliminates coherent flow, resulting in slow, stagnant motion that limits convective heat transfer.

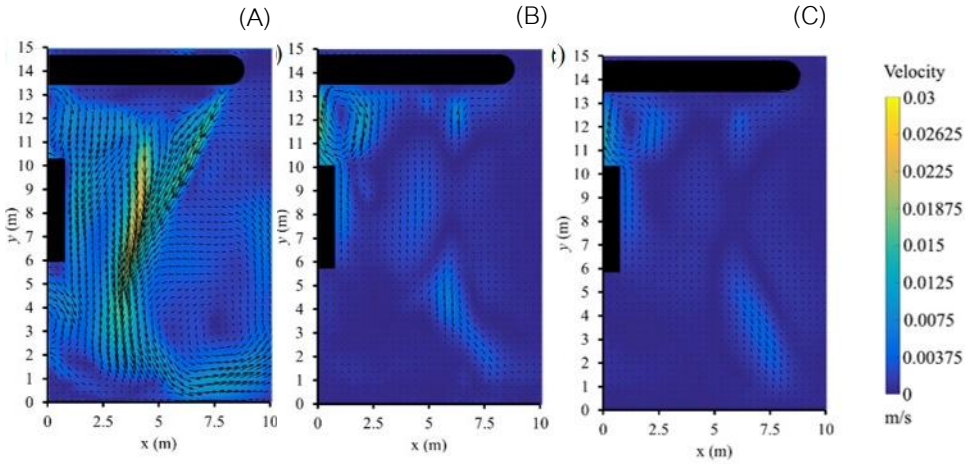


Fig. 4 Velocity field on x-y plane at (A) 1 mm^2/s, (B) 10 mm^2/s, and (C) 50 mm^2/s.

Near-wall velocities extracted from Fig. 4(A–C) and plotted in Fig. 5 confirm this inverse relationship. The 1 mm²/s fluid shows the highest average velocity (0.59 cm/s) and a peak of 0.71 cm/s, indicating a strong thermal plume and effective momentum transport. At 10 mm²/s, velocities decline to an average of 0.54 cm/s, while at 50 mm²/s they drop to 0.36 cm/s. This progressive reduction demonstrates that increasing viscosity suppresses circulation and forces the system to rely more on conduction, reducing overall heat-transfer performance.

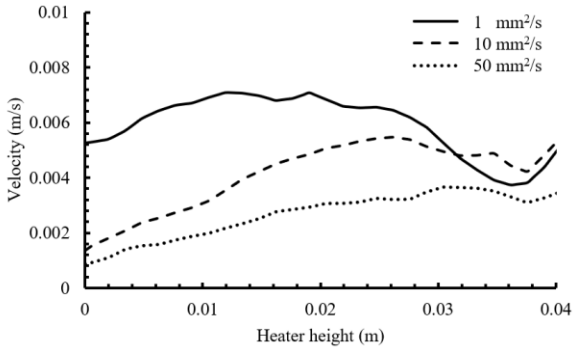


Fig. 5 Near-wall velocity profile for heating surface submerged within 1 mm^2/s - 50 mm^2/s.

Conclusion

This study examined the effect of silicone fluid viscosity (1–50 mm²/s) on thermal performance in single-phase immersion cooling using a vertical heater and top cooling coil, with flow behavior measured via PIV. Results show a clear inverse relationship between viscosity and convective heat transfer. The lowest-viscosity fluid achieved the highest Nusselt numbers (up to 145) due to strong circulation and a high-velocity buoyant plume. As viscosity increased, viscous damping suppressed fluid motion, reducing Nusselt numbers to 55–61 at 50 mm²/s and shifting heat transfer toward conduction. These findings highlight the importance of selecting low-viscosity dielectric fluids to enhance cooling efficiency in high-power systems such as data centers and EV battery packs.

Acknowledgments

This research was financially supported by a grant from the Faculty of Engineering, Kasetsart University.

Reference

Alfonso, C., Giulio, P. 2021. Cooling systems in data centers: State of art and emerging technologies. Energy Procedia 83: 484–493.

Birbarah, P., et al. 2020. Advanced cooling technologies for high-performance processors and data centers. Appl. Therm. Eng. 178: 115541.

Chi, P., et al. 2005. Heat transfer in high heat flux cooling applications: A review. Exp. Therm. Fluid Sci. 29: 267–278.

Churchill, S.W., Chu, H.H.S. 1975. Correlating equations for laminar and turbulent free convection from a vertical plate. Int. J. Heat Mass Transfer 18: 1323–1329.

Ebrahimi, K., Jones, G.F., Fleischer, A.S. 2014. A review of data center cooling technology, operating conditions and the corresponding low-grade waste heat recovery opportunities. Renew. Sust. Energy Rev. 31: 622–638.

Ellsworth, M.J., Iyengar, M.K. 2009. Energy efficiency analyses and comparison of air and water cooled high performance servers. In Proc. ASME InterPACK Conf.

Garimella, S.V., et al. 2008. Thermal challenges in next-generation electronic systems. IEEE Trans. Compon. Packag. Technol. 31: 801–815.

Incropera, F.P., David, P.D., Theodore, L.B., Adrienne, S.L. 2007. Fundamentals of heat and mass transfer. 6th ed. John Wiley & Sons.

Jaluria, Y., Gebhart, B., et al. 1988. Buoyancy-induced flows and transport. Hemisphere Publishing.

Kheirabadi, A.C., Groulx, D. 2016. Cooling of server electronics: A design review of existing technology. Appl. Therm. Eng. 105: 622–638.

Kunkel, G. 2016. Single-phase immersion cooling for data centers. White paper. Green Revolution Cooling.

Moghaieb, H.S., Amendola, V., Khalil, S., Chakrabarti, S., Maguire, P., Mariotti, D. 2023. Nanofluids for direct-absorption solar collectors—DASCs: A review on recent progress and future perspectives. Nanomaterials 13: 1232.

Mudawar, I. 2001. Assessment of high-heat-flux thermal management schemes. IEEE Trans. Compon. Packag. Technol. 24: 122–141.

Soares, A.A., Ferreira, J.M., Caramelo, L., Anacleto, J., Chhabra, R.P. 2010. Effect of temperature-dependent viscosity on forced convection heat transfer from a cylinder in crossflow of power-law fluids. Int. J. Heat Mass Transfer 53: 4728–4740.

Suthar, R., Bansode, P., Venkatachalam, V.V.T., Ede, N.T., Lakshminarayana, A., Bhandari, R., Sivakumar, A., Agonafer, D. 2024. Investigating the effect of single-phase liquid immersion cooling on TG-400 substrate core's thermomechanical characteristics. In Proc. ASME Int. Mech. Eng. Congr. Expo.

Thielicke, W., Sonntag, R. 2021. Particle image velocimetry for MATLAB: Accuracy and enhanced algorithms in PIVlab. J. Open Res. Softw. 9: 12.

Tuma, P.E. 2015. The merits of open bath immersion cooling of datacom equipment. In Proc. 31st Thermal Meas. Model. Manage. Symp. (SEMI-THERM): 123–131.

Zhou, H., Li, W., Yang, W., Guo, X., Cui, L., Liu, T. 2024. A hybrid battery thermal management strategy that couples internal PCM with external air-jet cooling. J. Energy Storage 98: 113127.

Impact of Flow Rate on Wall Shear Stress Distribution in an Idealized Arteriovenous Fistula

Xiana Derguy, Jay-Tawee Pukrushpan*, Vasit Sirilapanan
Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Kasetsart University, Bangkok 10900, Thailand
*Corresponding author. E-mail address: fengjwp@ku.ac.th

Abstract

Arteriovenous Fistulas (AVFs) are the preferred access for patients diagnosed with end-stage renal disease requiring haemodialysis. However, a significant proportion of AVFs fail to mature due to the complex behaviour of blood flow at the anastomosis. AVF maturation strongly depends on local haemodynamics, especially Wall Shear Stress (WSS). This study compares the effect of varying steady inlet blood flow rates (300-600 mL/min) in an idealized AVF, using Computational Fluid Dynamics (CFD). The blood is considered to be Newtonian, the geometry is composed of rigid walls, and the solution is mesh independent. The different metrics observed are the mean and maximum WSS, the high-WSS area fraction, and the pressure drop. The results show that the mean WSS increased from 1.2 to 3.0 Pa with the raise of the inlet flow rate. The results also highlight that the high-WSS (>4 Pa) area escalated significantly from 2% for low flow rate (300 mL/min) to more than 30% for high flow rate (600 mL/min). These findings are consistent with the research work done previously, which obtained values of comparable order under similar flow conditions. The outcomes confirm that increasing blood flow rates in AVFs considerably enlarges wall exposure to supraphysiological shear.

Keywords: Arteriovenous fistula, Computational fluid dynamics, Flow rate, Haemodynamic, Wall shear stress

Introduction

AVFs are commonly used for patients with end-stage renal disease as they provide a durable access point for haemodialysis, and they exhibit a low infection rate compared to other forms of vascular access, such as catheters or grafts. The End-To-Side (ETS) anastomosis is widely recognized as the optimal configuration for haemodialysis access. Both clinical and computational analyses (Ene-Iordache and Remuzzi, 2012) demonstrated that this configuration produces uniform and unidirectional blood flow with reduced WSS. Despite ETS AVFs having the best outcomes, an average of 16.87% of them still fail to mature regardless of advanced surgical skills (Nguyen et al., 2023). This failure rate is linked to the complex blood flow behaviour at the anastomosis, which combines flow structure and low WSS, contributing to Neointimal Hyperplasia (NIH) and stenosis. Over the last decade, researchers have focused on optimizing the geometry of ETS AVFto control the WSS that causes maturation failure (Grechy et al., 2017; Li et al., 2025; Murzyn n.d.). The physiological WSS on blood vessel walls is estimated to be 1–2 Pa. WSS outside of this range is associated with maladaptive remodelling of the blood vessel walls in the literature (Jia et al., 2015; Remuzzi et al., 2017). Therefore, the abnormally high and heterogeneous WSS at the anastomosis region can explain maturation failure. Global WSS exposure as a function of flow rates remains insufficiently quantified in idealized AVFs.

The objective of this study is to quantify how increasing steady inlet flow rate affects global WSS levels, WSS distribution and high-shear wall exposure in an idealized AVF. While previous CFD studies mainly focused on geometry optimization or local WSS patterns, this article contributes to the quantifying global WSS metrics as a function of realistic steady flow rates (mean WSS, max WSS, high-WSS area fraction)

Materials and Methods

Geometry

The idealized ETS AVF geometry used in this study is taken from studies that aimed to optimize the shape of the vein connected to the anastomosis (Grechy et al., 2017; Murzyn n.d.). The STL file from the study was imported into ANSYS Space Claim, repaired, patched and converted into a solid (Fig. 1). The geometry features a constant vein and artery diameter of 5 mm. The curvatures and dimensions of the vein and artery can be retrieved using the CAD file. The walls are rigid.

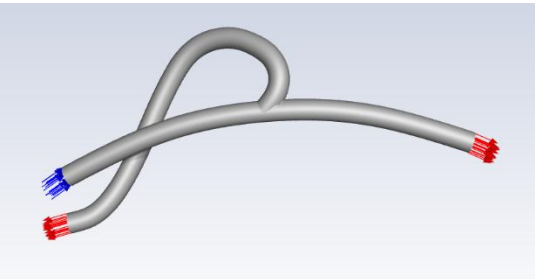


Fig. 1 Optimal configuration of ETS AVF in ANSYS Space Claim

Governing Equations and Assumptions

The flow is steady and incompressible, thus follows the steady incompressible Navier-Stokes Equation 1:

$$\rho \ (u \cdot \nabla)u = -\nabla p + \mu \Delta u + \quad (1)$$

Where ρ is the density in kg/m^3, u the velocity in m/s, p the pressure in Pa, μ the dynamic viscosity in Pa.s, and f the external body force in N/m^3.

The blood is assumed to be Newtonian with a density of ρ = 1060 kg/m^3 and a viscosity of μ = 0.0035 Pa.s. No-Slip condition at the walls.

Boundary Conditions

The velocity at the proximal artery inlet correspond to 300, 400 and 600 mL/min for Case 1, 2 and 3, respectively. Zero-gauge pressure was prescribed at both distal outlets.

Mesh and numerical setup

Using the ANSYS Meshing tool, the mesh was defined to be unstructured using the tetrahedral method with a boundary layer refinement (10 layers) and a sizing that captures curvature and proximity. After demonstrating the mesh independence, we chose a medium mesh with an element size of 0.25 mm.

In the simulator of ANSYS Fluent with double precision enabled, we set the solving method to be pressure based. The transitional model k-omega was used as it ensures a robust near-wall treatment where the velocity profile can be disturbed at the anastomosis, it also ensures numerical stability in regions with strong curvature and flow acceleration at the anastomosis. The gradient to Green-Gauss node-based method was chosen in the spatial discretization solution method as it is the suggested method with tetrahedral meshes.

The calculations were set to 300 iterations but were considered converged when residuals dropped below 10^{-4} and monitored quantities (Δp, mean WSS) stabilized.

Post-processing metrics

The metrics extracted from the post-processing of the experiments:

- Mean WSS (area-weighted)
- Maximum WSS
- High-WSS area fraction (WSS > 4 Pa)
- Pressure drop (between the proximal artery inlet and distal vein outlet)

  WSS distribution bar plot

Results and Discussion

Mesh Independence

The mesh independence was evaluated to ensure that the refinement of the mesh chosen did not impact the results. This test resulted in a change between medium and fine mesh below 2%, confirming mesh independence (Table 1).

Table 1 Mesh independence table comparing the different mesh refinements

Mesh level	Elements ($x10^{-6}$)	Mean WSS (Pa)	Δp (Pa)	Relative change mean WSS (%)
Coarse	0.826	1.735	201.196	-
Medium	2.506	1.768	202.360	+ 1.866
Fine	6.197	1.783	203.260	+ 0.841

Global Haemodynamic Response to Flow Rate

Following its formula (Equation 2), the Reynolds number increase responding to the rise of the flow rate was coherent as they are dependent.

$$Re = \frac{\rho u D}{\mu} \quad (2)$$

With *Re* the Reynolds number, ρ the density in kg/ m^3, *u* the velocity of the fluid in m/s, *D* the diameter of the vein and artery in meter, and μ the dynamic viscosity in Pa.s. In the same expected way, the pressure drop between the proximal artery inlet and the distal vein outlet increased monotonically with the inlet flow rate (Table 2). The pressure drop values (133–320 Pa) are comparable to other numerical experimental values (135–370 Pa) for comparable ETS geometry and flow rate, providing qualitative validation of the present model (Grechy et al. 2017).

Table 2 Reynolds number at the inlet and pressure drop depending on the inlet flow rate

Inlet flow rate	Case 1 300 mL/min	Case 2 400 mL/min	Case 3 600 mL/min
Re at the inlet	393.04	524.68	786.36
Δp (Pa)	133.52	192.05	320.53

For all cases (*Re* ≈ 400–800), the flow remains within the laminar flow range; no fully turbulent behaviour is expected, and high WSS values arise from geometric acceleration at the anastomosis rather than turbulence.

Mean and Maximum WSS

While the mean WSS increased moderately with the flow, the maximum WSS escalated strongly, reaching ~80 Pa in Case 3 at 600 mL/min (Table 3). This phenomenon is explained by the arterial flow, which is forced through the sharp curvature and junction angle at the ETS anastomosis, thus creating a locally accelerated jet flow at the venous wall downstream of the anastomosis toe. This jet produces high velocity gradients near the walls, resulting in highly elevated and localized WSS at the anastomosis. The peak WSS values at the anastomosis toe (33–81 Pa) fall within the range reported in previous experimental studies for similar ETS geometries and flow rates (30–90 Pa) (Grechy et al. 2017).

Table 3 Mean and maximum WSS in relation to increasing flow rates

Inlet flow rate	Case 1	Case 2	Case 3
	300 mL/min	400 mL/min	600 mL/min
Mean WSS (Pa)	1.232	1.787	3.025
Max WSS (Pa)	33.173	47.961	81.113

High WSS Area Fraction

The high-WSS area fraction is the area proportion of the vein and artery walls where the WSS > 4 Pa, which corresponds to the upper bound of physiological venous WSS, and is associated with maladaptive remodelling of the blood vessel walls in the literature. We noticed that the high-WSS wall exposure expands dramatically with the rise of the inlet flow rate, attaining 31% in Case 3, which is exponentially higher than the 1.75% rate obtained in Case 1 (Fig. 2).

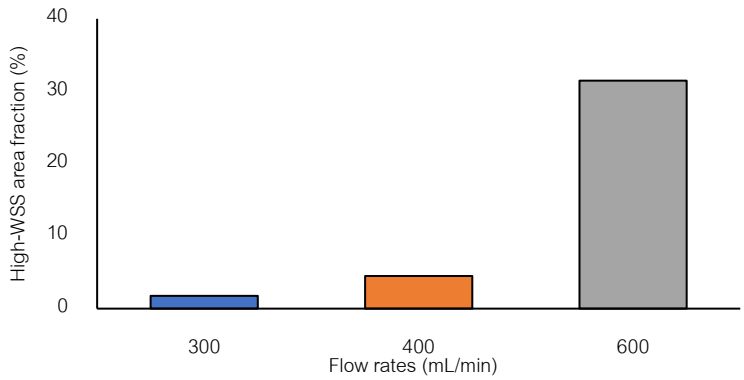


Fig. 2 Bar plot of the high-WSS area fraction (%) as a function of the increasing inlet flow rates (mL/min)

In the WSS contour plot of ANSYS Fluent (Fig. 3, Fig. 4 and Fig. 5), we observe that, regardless of the inlet flow rate, the highest WSS is always localized at the anastomosis toe, where the vein and artery walls separate. This phenomenon is consistent with the velocity profiles found in previous numerical studies (Grechy et al. 2017), which showed this high velocity jet toward the same region at the anastomosis.

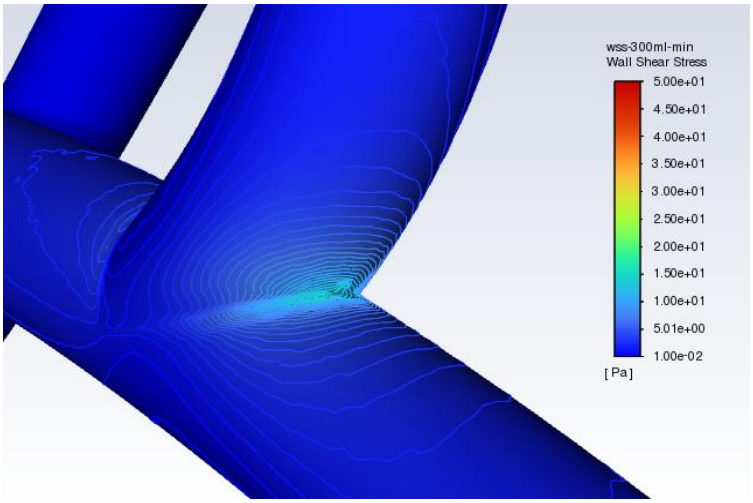


Fig. 3 Contour plot of the WSS at inlet flow rate 300 mL/min in ANSYS Fluent

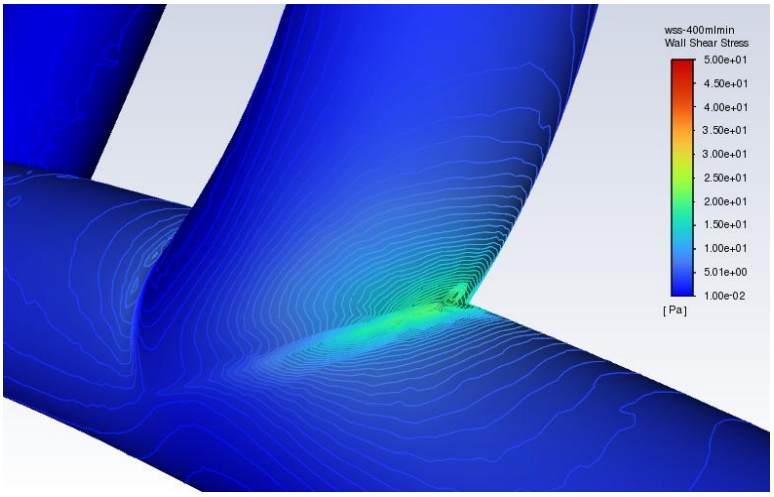


Fig. 4 Contour plot of the WSS at inlet flow rate 400 mL/min in ANSYS Fluent

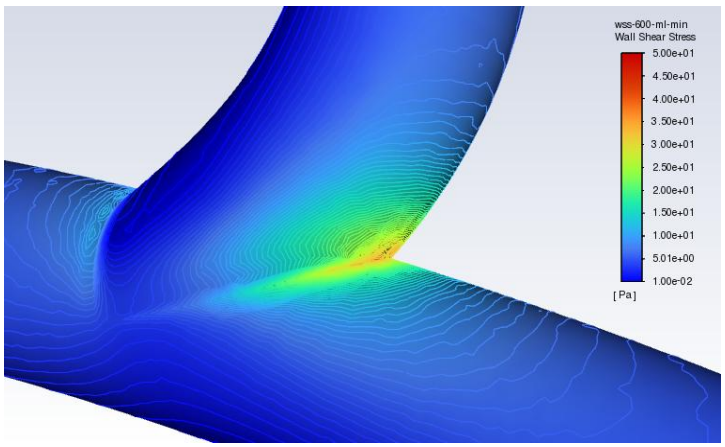


Fig. 5 Contour plot of the WSS at inlet flow rate 600 mL/min in ANSYS Fluent

WSS Distribution Bar Plot

The wall area fraction was divided into different WSS bin ranges: 0 to 0.5 Pa, 0.5 to 1 Pa, 1 to 2 Pa, 2 to 4 Pa, 4 to 8 Pa, and >8 Pa (Fig. 6).

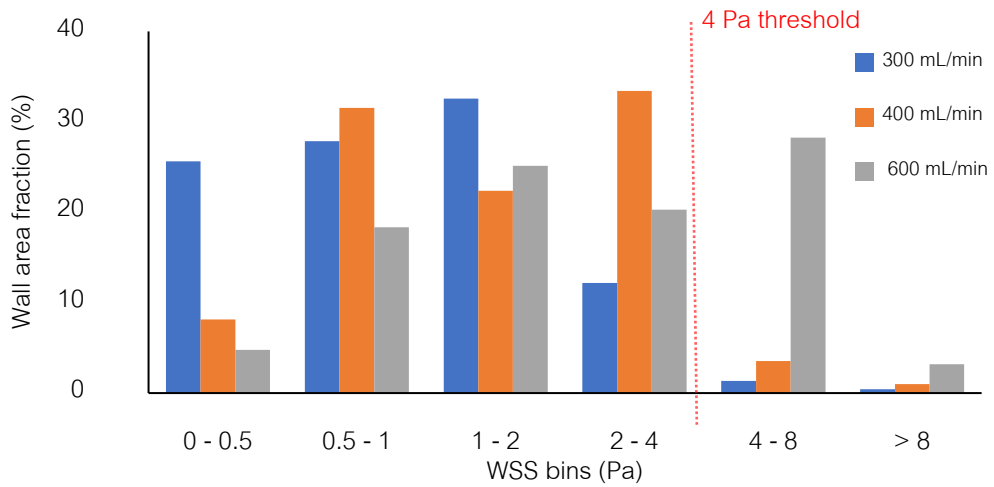


Fig. 6 Binned bar plot of the wall area fraction (%) distributed across different WSS ranges (Pa) for different inlet flow rates (mL/min)

We observe in Fig. 6 that the distribution of the wall area fraction shifts towards higher WSS values with the rise of the flow rates. The red dotted line representing the 4 Pa threshold indicates the transition to supraphysiological shear reported in the literature. At 600 mL/min, a substantial wall area fraction lies within the 4 to 8 Pa range, indicating a pronounced expansion of regions exposed to high WSS.

Limitations

This study is limited by the choice of focusing on steady flow, thus it does not capture pulsatile effects, oscillatory shear index, or flow reversal that may occur under physiological conditions. The use of idealized AVF geometry excludes patient variability including patient-specific geometry. The fluid structure interactions, non-Newtonian blood rheology are not considered and should be addressed in future work to extend the clinical relevance of the present steady-flow baseline... These simplifications allow isolation of the effect of inlet flow rate on WSS metrics. Using these assumptions likely affects absolute WSS values; however, relative trends with flow rate are expected to remain robust.

Conflict of Interest

The authors declare no conflict of interest.

Acknowledgements

The authors would like to thank the Department of Mechanical Engineering at Kasetsart University for allowing equipped laboratory and software installations used in this study. The authors also acknowledge the advice and support of Professor Jaytawee Pukrushpan and Professor Vasit Sirilapanan throughout the development of this work.

References

Ene-Iordache, B., Remuzzi, A. 2012. Disturbed flow in radial-cephalic arteriovenous fistulae for haemodialysis: Low and oscillating shear stress locates the sites of stenosis. Nephrol. Dial. Transplant. 27: 358–368. doi.org/10.1093/ndt/gfr342

Grechy, L., Iori, F., Corbett, R.W., Shurey, S., Gedroyc, W., Duncan, N., Caro, C.G., Vincent, P.E. 2017. Suppressing unsteady flow in arterio-venous fistulae. Phys. Fluids 29: 101901. doi.org/10.1063/1.5004190

Jia, L., Wang, L., Wei, F., Yu, H., Dong, H., Wang, B., Lu, Z., Sun, G., Chen, H., Meng, J., Li, B., Zhang, R., Bi, X., Wang, Z., Pang, H., Jiang, A. 2015. Effects of wall shear stress in venous neointimal hyperplasia of arteriovenous fistulae. Nephrology 20: 335–342. doi.org/10.1111/nep.12394

Li, X., Liu, C., Hu, H. 2025. Prevailing insights into anastomotic angles of surgically created arteriovenous fistulas: A literature review. BMC Nephrol. 26: 252. doi.org/10.1186/s12882-025-04182-4

Murzyn, M. n.d. Numerical analysis and optimization of an arteriovenous fistula using Pareto and adjoint surface methods.

Nguyen, B., Duong, M.C., Tran, H.N.D., Do, K.Q., Nguyen, K.T.T. 2023. Arteriovenous fistula creation by nephrologist and its outcomes: A prospective cohort study from Vietnam. BMC Nephrol. 24: 88. doi.org/10.1186/s12882-023-03123-3

Remuzzi, A., Bozzetto, M., Brambilla, P. 2017. Is shear stress the key factor for AVF maturation? J. Vasc. Access 18: S10–S14. doi.org/10.5301/jva.5000686

การพัฒนาหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาสถาปัตยกรรม (หลักสูตรปรับปรุง พ.ศ. 2569) คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ เพื่อส่งเสริมการสร้างสรรค์นวัตกรรมอาคารเขียว: การศึกษาผู้ใช้บัณฑิต

The Development of Bachelor of Science in Architecture Curriculum (Revised Program B.E. 2569), Faculty of Architecture, Kasetsart University, To Promote Green Building Innovation: A Study of Graduate Employer

นวลวรรณ ทวยเจริญ*, ธนภณ พันธเสน, ปารเมศ กำแหงฤทธิรงค์, สุภาพร แก้วกอ เลี่ยวไพโรจน์, ชนิกานต์ ยิ้มประยูร, ศิรเดช สุริต, กันติทัต ทับสุวรรณ, ภัทรนันท์ ทักขนนท์

Nuanwan Tuaycharoen*, Tanapon Panthasen, Parames Kamhangrittirong, Supaporn Kaewko Leopairojna, Chanikarn Yimprayoon, Siradech Surit, Kantitut Tubsuwan, Pattaranan Takkanon

ภาควิชานวัตกรรมอาคาร คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

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

*Corresponding author. E-mail address: nuanwan.t@ku.th

บทคัดย่อ

การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาแนวทางการปรับปรุงหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาสถาปัตยกรรม หลักสูตรปรับปรุง 2569 ในกลุ่มผู้ใช้บัณฑิต การศึกษาประกอบด้วย 2 ส่วน ได้แก่ 1) การสนทนากลุ่มย่อย (focus group) และ 2) การสำรวจโดยแบบสอบถาม ผลการศึกษาการสนทนากลุ่มย่อย (focus group) แสดงให้เห็นว่าว่า ปรัชญาของหลักสูตร คือ “เพื่อผลิตบัณฑิตที่เน้นด้านการออกแบบและพัฒนานวัตกรรมอาคารเพื่อสิ่งแวดล้อม” และสรุปผลลัพธ์การเรียนรู้ของหลักสูตร (Program learning outcome, PLOs) ของหลักสูตรทั้งหมด 6 ข้อ นอกจากนี้ผลการสำรวจโดยแบบสอบถามยังพบว่าโดยภาพรวมหลักสูตรยังเป็นที่ต้องการและน่าสนใจเป็นอย่างมาก

คำสำคัญ: การประเมินหลักสูตร, สถาปัตยกรรม, หลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาสถาปัตยกรรม, อาคารเขียว

Abstract

The objective was to assess the curriculum of the Bachelor of Science in Architecture, revised 2026, in graduate employers. The study was composed of two main studies: 1) a focus group, 2) a questionnaire study. The results from focus group showed that the philosophy of curriculum is “to produce graduates who focus on designing and developing innovative buildings for the environment.” There are six Program learning outcome (PLOs). In addition, the results of the questionnaire survey also found that the over all curriculum is still in demand and is very interesting in the viewpoint of the graduate employers.

Keywords: Architecture, Bachelor of Science in Architecture curriculum, Curriculum evaluation, Green building

บทนำ

หลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาสถาปัตยกรรม มุ่งเน้นการผลิต “บัณฑิตที่มีองค์ความรู้ของผู้ประกอบวิชาชีพที่เกี่ยวข้องกับสถาปัตยกรรมให้มีความเท่าทันกับนวัตกรรมและความเปลี่ยนแปลงของกระแสโลกในการสงวนรักษาสิ่งแวดล้อมที่ยั่งยืน” ได้เปิดการเรียนการสอนมาตั้งแต่ปีการศึกษา 2559 ปัจจุบันตามมาตรฐานคุณวุฒิการศึกษาระดับปริญญาตรีถึงงบรอบ 5 ปีในการปรับปรุงหลักสูตร การหาสิ่งกำหนดหลักสูตรนั้นสามารถมีหลายด้าน เช่น สิ่งกำหนดทางวิชาการ สิ่งกำหนดทางสังคม วัฒนธรรม และเศรษฐกิจ และสิ่งกำหนดทางการเมือง รวมถึงกฎเกณฑ์ต่างๆ เช่น ข้อกำหนดของสภาสถาปนิกฯ ข้อบังคับของกระทรวงมหาวิทยาลัย และข้อบังคับของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ เป็นต้น ซึ่งข้อเท็จจริงเหล่านี้ควรมาจากสถานการณ์ความต้องการในปัจจุบันร่วมกับการฟังเสียงของลูกค้า (Voice of customer) ซึ่งในการศึกษานี้ได้ประกอบด้วยการศึกษา 2 ส่วนหลัก ได้แก่ 1) การสนทนากลุ่มย่อย (focus group) โดยกำหนดเป็นกลุ่มผู้ใช้บัณฑิตที่เป็นนายจ้างในองค์กรที่เกี่ยวข้องกับสถาปัตยกรรมเพื่อสิ่งแวดล้อมซึ่งเป็นองค์กรชั้นนำ ซึ่งเป็นกลุ่มผู้มีส่วนได้ส่วนเสียหลัก (key stakeholder) และ 2) การสำรวจโดยใช้แบบสอบถาม (questionnaire) ซึ่งได้แก่ ผู้ใช้บัณฑิตที่เป็นนายจ้างในองค์กรที่เกี่ยวข้องกับสถาปัตยกรรมเพื่อสิ่งแวดล้อมเช่นกัน โดยการรศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาแนวทางการปรับปรุงหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาสถาปัตยกรรม หลักสูตรปรับปรุง 2569 ในกลุ่มผู้ใช้บัณฑิต

วิธีดำเนินการวิจัย

การศึกษาครั้งนี้ประกอบไปด้วยการดำเนินงาน 2 ส่วน ได้แก่ 1) การสนทนากลุ่มย่อย (focus group) และ 2) การสำรวจโดยแบบสอบถาม

1. การสนทนากลุ่มย่อย (focus group) โดยกำหนดเป็นกลุ่มผู้ใช้บัณฑิตที่เป็นนายจ้างในองค์กรที่เกี่ยวข้องกับสถาปัตยกรรมเพื่อสิ่งแวดล้อมซึ่งเป็นองค์กรชั้นนำ ซึ่งเป็นกลุ่มผู้มีส่วนได้ส่วนเสียหลัก (key stakeholder) จำนวน 4 คน โดยคณะผู้วิจัยดำเนินการสนทนากลุ่มย่อยในลักษณะออนไลน์ ผ่านระบบ google meet โดยทำการบันทึกเสียงการสนทนากลุ่มนำมาถอดความวิเคราะห์ผลการสนทนากลุ่มต่อไป โดยคำถามใน focus group ได้สอบถามถึงประเด็นหลักในเรื่องผลลัพธ์การเรียนรู้ของหลักสูตร (Program Learning Outcome) และความคิดเห็นและข้อเสนอแนะต่อหลักสูตรฯ เพื่อการปรับปรุงหลักสูตร ผู้ตอบได้ให้ข้อคิดเห็นเพิ่มเติมที่เป็นภาพรวมของหลักสูตรฯมากกว่าการปรับปรุงนิสิต ในการวิเคราะห์โดยวิธีการวิเคราะห์เนื้อหา (Content analysis)

2. การสำรวจโดยแบบสอบถาม โดยกำหนดเป็น 1 กลุ่ม ได้แก่ ผู้ใช้บัณฑิตที่เป็นนายจ้างในองค์กรที่เกี่ยวข้องกับสถาปัตยกรรมเพื่อสิ่งแวดล้อม การศึกษาครั้งนี้ได้ทำการสำรวจความคิดเห็นจากกลุ่มตัวอย่างผู้ใช้บัณฑิตจำนวน 31 คน เนื่องจากจำนวนตัวอย่างดังกล่าวเป็นจำนวนตัวอย่างที่ได้ใช้ในหลายงานวิจัยทางด้านการศึกษาในอดีต (ขณิษฑา, บุญศรี และทิพย์อนงค์ , 2560; มาเรียม, อรพิน, วิสาข์, วิสูตร, และอธิกมาส, 2560) ได้ตัวอย่างมาจากการสุ่มแบบบังเอิญ (Accidental sampling) เนื่องจากมีข้อจำกัดในความร่วมมือในการศึกษาจากผู้ใช้บัณฑิต โดยผู้ใช้บัณฑิตส่วนใหญ่เป็นสถาปนิก แบบสอบถามที่ใช้เป็นแบบสอบถามปลายปิดที่วัดความคาดหวัง ความพึงพอใจ ความเห็นด้วย และความเหมาะสม เช่น ในการวัดความคาดหวังจะมีตัวเลือกให้ตอบ 5 ตัวเลือก ได้แก่ ไม่คาดหวัง-คาดหวังน้อย-คาดหวังปานกลาง-คาดหวังมาก-คาดหวังมากที่สุด ผู้วิจัยได้ให้คณะผู้วิจัยร่วมจำนวน 2 คนซึ่งถือเป็นผู้ทรงคุณวุฒิของหลักสูตรตรวจสอบความตรงของเนื้อหา นอกจากจากนั้น ยังได้กำหนดให้มีส่วนที่เป็นแบบสอบถามแบบปลายเปิด เพื่อให้ผู้ตอบได้แสดงความคิดเห็นอย่างอิสระต่อหลักสูตร การวิเคราะห์ข้อมูลใช้ค่าร้อยละ (%) และค่าเฉลี่ย (Mean) ซึ่งมีเกณฑ์การวิเคราะห์ค่าเฉลี่ยเป็นระดับคะแนน 5 ช่วง ได้แก่ 3.51-4.00, 2.51-3.50, 1.51-2.50, 0.51-1.50 และ 0-0.50 โดยจะมีความหมาย หมายถึง ค่าคะแนนในระดับมากที่สุด มาก ปานกลาง น้อย และน้อยที่สุดตามลำดับ โดยการแบ่งช่วงคะแนน

ดังกล่าวได้เป็นเกณฑ์ในการแปลความหมายของคะแนนเฉลี่ยที่ใช้โดยแพร่หลายในการวิจัยทางด้านการศึกษาในอดีต (ขณิษฟา, บุญศรี และทิพย์อนงค์ , 2560; นวลวรรณ, วนารัตน์, และชลิฎา, 2564; มาเรียม, อรพิน, วิสาข์, วิสูตร, และอธิกมาส, 2560) ส่วนการวิเคราะห์ผลจากข้อคำถามปลายเปิดได้ใช้การวิเคราะห์เนื้อหา (Content analysis) นำคำตอบมาจัดหมวดหมู่และลำดับคำตอบ แล้วนำเสนอผลในลักษณะความเรียงต่อไป

ผลการวิจัย

1. ผลการสนทนากลุ่มย่อย (focus group)

ผลการสนทนากลุ่มย่อย (focus group) สามารถสรุปดังนี้

1). ปรัชญาของหลักสูตร

ปรัชญาของหลักสูตรที่ว่า “เพื่อผลิตบัณฑิตที่เน้นด้านการออกแบบและพัฒนานวัตกรรมอาคารเพื่อสิ่งแวดล้อม”

2.) ผลลัพธ์การเรียนรู้ของหลักสูตร (Program learning outcome, PLO)

PLO 1 สามารถออกแบบสร้างสรรค์สถาปัตยกรรมยั่งยืนโดยบูรณาการองค์ความรู้ด้านการออกแบบสถาปัตยกรรมและวิทยาศาสตร์อาคารภายใต้บริบทแวดล้อม

PLO 2 สามารถอภิปรายพัฒนาการทางสถาปัตยกรรมและศาสตร์ที่มีความสัมพันธ์กับบริบทแวดล้อมและการออกแบบ

PLO 3 สามารถคิดวิเคราะห์อย่างมีเหตุผลและตัดสินทางเลือก เพื่อการวางแผนและออกแบบสถาปัตยกรรมและประเมินอาคารเขียว

PLO 4 สามารถใช้เทคโนโลยีและซอฟต์แวร์ในการค้นคว้าข้อมูล คำนวณ ออกแบบ และนำเสนอผลงานที่เกี่ยวข้องกับสถาปัตยกรรม

PLO 5 สามารถออกแบบและเขียนแบบสถาปัตยกรรมยั่งยืนโดยคำนึงถึงมาตรฐานวิชาชีพและความรับผิดชอบต่อสภาพแวดล้อม

PLO 6 สามารถนำเสนอวิธีการแก้ปัญหาทางสถาปัตยกรรมด้วยการสร้างสรรค์นวัตกรรมอาคาร

2. การสำรวจโดยแบบสอบถาม

2.1 บริบท

2.1.1 ความน่าสนใจของหลักสูตร ผลการวิเคราะห์เนื้อหาพบว่า ความเห็นของผู้ใช้บัณฑิตที่ระบุว่า หลักสูตรน่าสนใจเป็นอย่างมากและจำเป็นเนื่องจากนวัตกรรมและการออกแบบอาคารเขียวเป็นสิ่งที่สำคัญ และหลักสูตรดังกล่าวเป็นการมองถึงอนาคตของสายงานสถาปัตยกรรม และเน้นศึกษาเรื่องสิ่งแวดล้อม เกณฑ์อาคารเขียว เทคโนโลยีและยังพัฒนาทักษะการใช้โปรแกรมจำลอง

2.1.2 ความต้องการบัณฑิตของหลักสูตรในการประกอบวิชาชีพสถาปัตยกรรม Table 1 แสดงให้เห็นว่าโดยภาพรวมผู้ใช้บัณฑิตมีความต้องการบัณฑิตของหลักสูตรในการประกอบวิชาชีพสถาปัตยกรรมเป็นอย่างมาก (ค่าเฉลี่ย = 3.18) โดยจุดเด่นของบัณฑิตที่ต้องการมากที่สุดคือการออกแบบเพื่อสิ่งแวดล้อม (ค่าเฉลี่ย = 3.48) รองลงมาคือการเรียนการสอนเป็นภาษาอังกฤษ (ค่าเฉลี่ย = 3.16) และการเรียนรู้ระบบนิเวศและชีววิทยา (ค่าเฉลี่ย = 3.06) ตามลำดับ

2.1.3 ความคาดหวังในความรู้ความสามารถทางวิชาการและการสร้างสรรค์นวัตกรรมอาคารเพื่อรักษาสิ่งแวดล้อม Table 2 แสดงให้เห็นว่าสิ่งที่ผู้ใช้บัณฑิตคาดหวังมากที่สุดคือความสามารถในการสร้างสรรค์งานใหม่/องค์

ความรู้ใหม่ โดยมีความคาดหวังระดับมากที่สุด (ค่าเฉลี่ย = 3.19) รองลงมาคือความสามารถในการออกแบบเพื่อตอบรับกับสถานการณ์ climate change (ค่าเฉลี่ย = 3.18) ความรู้ความเข้าใจสำหรับการออกแบบและพัฒนานวัตกรรมอาคารเพื่อรักษาสิ่งแวดล้อมและความสามารถในการใช้เครื่องมือและเทคโนโลยีเฉพาะสาขา (ค่าเฉลี่ย = 3.10) ตามลำดับ

2.1.4 จุดอ่อนของบัณฑิตที่รับเข้าทำงานในความเห็นของผู้ใช้บัณฑิต ผลการวิเคราะห์เนื้อหาจากความเห็นของผู้ใช้บัณฑิต พบว่า บัณฑิตที่จบจากหลักสูตรทางสถาปัตยกรรมหลักสูตรอื่น ๆ ในช่วงที่ผ่านมา โดยทั่วไปนั้นมีจุดอ่อนด้านภาษาอังกฤษ ด้านโครงสร้าง และวิจัยและจริยธรรม

Table 1 Graduate requirements of the curriculum for practicing architecture.

Section	Average	Level
1. Architectural design requires graduates with a strong knowledge of innovation.	3.03	Strongly agree.
2. Environmental design is very important to the field of architecture.	3.48	Strongly agree.
3. Environmental design should continuously learn about ecology and biology.	3.06	Strongly agree.
4. Teaching in English is important for practicing architecture.	3.16	Strongly agree.
Total Average	**3.18**	**Strongly agree.**

Table 2 Knowledge in the spiritual and innovative abilities of environmental buildings.

Section	Average	Level
1. Academic ability in the field required for the work.	2.94	Highly expected.
2. Ability to use specialized tools and technologies such as computer simulation.	3.10	Highly expected.
3. Knowledge of appropriate science/technology in the field required for the work.	3.00	Highly expected.
4. Ability to create new work/new knowledge.	3.19	Highly expected.
5. Knowledge and understanding for designing and developing innovative	3.10	Highly expected.
6. Have initiative, creativity, and invention.	2.77	Highly expected.
7. Green building design capabilities	2.90	Highly expected.
8. Ability in green building criteria and assessment (TREES criteria).	2.74	Highly expected.
9. Ability in green building criteria and assessment (LEEDS criteria).	2.90	Highly expected.
10. Ability in green building criteria and assessment (WELL criteria).	2.97	Highly expected.
11. The ability to design to respond to changing world situations (AI and Internet	2.87	Highly expected.
12. Design capabilities to respond to the situation of an aging society.	2.94	Highly expected.
13. Design capability to respond to earthquake and flood situations.	2.68	Highly expected.
14. Design capability to respond to climate change situations.	3.18	Highly expected.
Total Average	**2.95**	**Highly expected.**

2.2 ปัจจัยนำเข้า

2.2.1 ความเหมาะสมของรายวิชา Table 3 แสดงให้เห็นว่ารายวิชาที่ผู้ใช้บัณฑิตเห็นว่าคาดหวังมากที่สุดคือ สถาปัตยกรรมยั่งยืนเบื้องต้น โดยมีความคาดหวังในระดับมากที่สุด (ค่าเฉลี่ย = 3.39) รองลงมาคือการออกแบบและการจำลองแสง และปฏิบัติการออกแบบสถาปัตยกรรมยั่งยืน I,II (ค่าเฉลี่ย = 3. 29) ตามลำดับ โดยมมีเพียงรายวิชาเดียวที่มีความคาดหวังระดับปานกลางคือ ประวัติศาสตร์การตั้งถิ่นฐานมนุษย์และงานสถาปัตยกรรม (ค่าเฉลี่ย = 2.19)

2.2.2 ค่าใช้จ่ายในการเรียน Table 4 แสดงให้เห็นว่าผู้ใช้บัณฑิตเห็นว่าค่าใช้จ่ายที่เหมาะสมที่สุดคือ 20,001–25,000 บาท/ภาคการศึกษา

2.3 กระบวนการ

2.3.1 ระยะเวลาเรียน Table 5 แสดงให้เห็นว่าคนส่วนใหญ่ของผู้ใช้บัณฑิต ต่างเห็นว่าระยะเวลาเรียน 4 ปี โดยได้วุฒิ วท.บ.มีความเหมาะสม (ร้อยละ 51.6 ตามลำดับ) ขณะที่คนส่วนน้อยเห็นว่าระยะเวลาเรียน 6 ปี วุฒิสถาปัตยกรรมศาสตรมหาบัณฑิตมีความเหมาะสม (ร้อยละ 9.7 ตามลำดับ)

2.3.2 ข้อเสนอแนะเพื่อการพัฒนาหลักสูตร ผลจากการวิเคราะห์เนื้อหาพบว่า โดยภาพรวมเนื้อหาของหลักสูตรตอบสนองสถานการณ์ของโลกและสิ่งแวดล้อมทั้งในในปัจจุบันและอนาคต โดยผู้ใช้บัณฑิตอยากให้เน้นจุดอ่อนของบัณฑิตทางด้านการเขียนแบบก่อสร้างในงานสถาปัตยกรรมและกฎหมายอาคาร และการใช้ภาษาอังกฤษในการเรียนมากยิ่งขึ้น

Table 3 Course suitability

course	Graduate User	
	Average	Level
1. Eco Design Studio I	2.74	Highly expected
2. Eco Design Studio II	2.74	Highly expected
3. Physic of Structure and Strength of Materials	2.68	Highly expected
4. Eco Design Fundamental	2.77	Highly expected
5. Green Biology for Architectural Design	2.84	Highly expected
6. Mathematics in Building Structural Systems	2.52	Highly expected
7. Materials Science for Architectural Design	3.13	Highly expected
8. Lighting Design and Simulation	3.29	Highly expected
9. Thermal and Acoustic Design	3.06	Highly expected
10. Architectural Drawing and Presentation	3.19	Highly expected
11. Architectural Presentation	3.19	Highly expected
12. History of Human Settlement and Architecture	2.19	Moderate expected
13. Fundamental of Building Technology	2.77	Highly expected
14. Building Technology for Small-Scale Building	3.10	Highly expected
15. Introduction to Sustainable Architecture	3.39	Most expected
16. Sustainable Architecture Design Studio I	3.29	Highly expected
17. Sustainable Architecture Design Studio II	3.29	Highly expected
18. Architectural Design Criteria	3.13	Highly expected
19. Introduction to Interior Architecture	3.00	Highly expected
20. Building Technology for Small-Scale Public Building	3.10	Highly expected
21. Building Technology for Medium-Scale Public Building	3.10	Highly expected
22. Computer Application in Architecture for presentation	3.26	Highly expected
23. Environmentally Responsive Design	3.21	Highly expected
24. Sustainable Architecture Design Studio III	3.26	Highly expected
25. Sustainable Architecture Design Studio IV	3.23	Highly expected
26. Introduction to Landscape Architecture	2.74	Highly expected

Table 3 Course suitability (Continue)

Course	Graduate User	
	Average	Level
27. Building Innovation and Technology for Large-Scale Public Building	2.97	Highly expected
28. Building Innovation and Technology for Extra-Large-Scale Public Building	2.94	Highly expected
29. Cost Estimation	2.81	Highly expected
30. Zero Energy Building Design	2.87	Highly expected
31. Green Building Assessment	3.10	Highly expected
32. Sustainable Architectural Design Studio V	3.26	Highly expected
33. Building Innovation and Technology for High-Rise Building	3.06	Highly expected
34. Sustainable Urban Planning	2.94	Highly expected
35. Green Real Estate Development	2.65	Highly expected
36. Professional Practice in Sustainable Architecture	3.16	Highly expected
37. Sustainable Architecture Project Preparation	2.87	Highly expected
38. Seminar in Sustainable Architecture	2.77	Highly expected
39. Sustainable Architecture Project	3.06	Highly expected
40. Environmental Design and Human Behaviour	2.90	Highly expected
41. Building Greenery	2.26	Moderate expected
Total average	2.97	Highly expected

Table 4 Tuition fees.

Tuition fees	Graduate User
15,000–20,000 baht/term	41.9
20,000–25,000 baht/term	45.2
25,001–30,000 baht/term	6.5
more than 30,000 baht/term	6.5

Table 5 Duration of study.

Duration of study	Graduate User
4 years Bachelor of Science	51.6
5 years Bachelor of Architecture	38.7
6 years Master of Architecture	9.7

สรุปและวิจารณ์ผลการวิจัย

จากผลการศึกษาข้างต้น ผู้วิจัยสามารถสามารถสรุปและอภิปรายผลด้านการประเมินหลักสูตรหลักสูตรด้านบริบท ด้านปัจจัยนำเข้า และด้านกระบวนการ ดังนี้

1. ด้านบริบท จากข้อค้นพบของผู้ใช้บัณฑิตจะเห็นได้ว่าจุดเด่นของหลักสูตรมีความเหมาะสมแล้ว สอดคล้องกับยุทธศาสตร์ของแผนพัฒนาเศรษฐกิจและสังคมแห่งชาติ ฉบับที่ 13 พ.ศ. 2565-2570 (สำนักงานสภาพัฒนาการเศรษฐกิจและสังคมแห่งชาติ, 2565) ข้อกำหนดของกฎหมายอาคารอนุรักษ์พลังงาน BEC (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์

พลังงาน, 2561) รวมถึงสอดคล้องกับการออกแบบอาคารเขียวตามมาตรฐาน TREES LEEDs และ WELL (สถาบันอาคารเขียวไทย, 2567; U.S. Green Building Council, 2565: International WELL Building Institute, 2563)

2. ด้านปัจจัยนำเข้า การศึกษาความเหมาะสมของรายวิชา พบว่ารายวิชาที่ผู้ใช้บัณฑิตเห็นว่าคาดหวังมากที่สุด คือสถาปัตยกรรมยั่งยืนเบื้องต้น รองลงมาคือการออกแบบและการจำลองแสง และปฏิบัติการออกแบบสถาปัตยกรรมยั่งยืน I,II ตามลำดับ ซึ่งผลดังกล่าวเป็นการยืนยันถึงความสอดคล้องกันในความต้องการรายวิชาที่ส่งเสริมการสร้างสรรค์นวัตกรรมอาคารเขียวโดยเฉพาะ ซึ่งสอดคล้องกับความคาดหวังของผู้ใช้บัณฑิตที่ต้องการบัณฑิตที่มีความสามารถในการสร้างสรรค์งานใหม่/องค์ความรู้ใหม่ ความสามารถในการออกแบบเพื่อตอบรับกับสถานการณ์ climate change ตามที่กล่าวไปแล้วข้างต้น สำหรับการศึกษาค่าใช้จ่ายในการเรียน พบว่าผู้ใช้บัณฑิตเห็นว่าค่าใช้จ่ายที่เหมาะสมที่สุดคือ 20,001–25,000 บาท/ภาคการศึกษา ในปัจจุบันค่าเทอมของหลักสูตรฯ คือ 23,800 บาท/ภาคการศึกษา ซึ่งยังถือว่าใกล้เคียงกับคณะสถาปัตยกรรมศาสตร์ในมหาวิทยาลัยอื่นๆ (จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, ม.ป.ป., มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, 2556; มหาวิทยาลัยศิลปากร, 2559)

3. ด้านกระบวนการ ผลการศึกษาระยะเวลาในการเรียน ที่พบว่าคนส่วนใหญ่ของผู้ใช้บัณฑิตเห็นว่าระยะเวลาเรียน 4 ปี โดยได้วุฒิ วท.บ. ซึ่งผลดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าคนส่วนใหญ่เริ่มมั่นใจกับระยะเวลาและหลักสูตร วท.บ. ในสาขาสถาปัตยกรรม 4 ปี นอกจากนี้ถึงแม้ว่าโดยภาพรวมเนื้อหาของหลักสูตรตอบสนองสถานการณ์ของโลกและสิ่งแวดล้อมทั้งในในปัจจุบันและอนาคต อย่างไรก็ตามจากความคิดเห็นของส่วนผู้ใช้บัณฑิตอยากให้ส่งเสริมในเรื่องของการเขียนแบบก่อสร้างในงานสถาปัตยกรรมและกฎหมายอาคาร และการใช้ภาษาอังกฤษในการเรียนมากยิ่งขึ้น

นอกจากนี้การศึกษาครั้งนี้สามารถเสนอแนวทางการพัฒนาหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาสถาปัตยกรรม หลักสูตรปรับปรุง พศ 2569 ทั้งในเรื่องของปรัชญาของหลักสูตร วัตถุประสงค์ของหลักสูตร และผลลัพธ์การเรียนรู้ของหลักสูตร (Program learning outcome, PLO) 6 ข้อ รวมถึงได้แสดงให้เห็นว่าควรมีการปรับปรุงเนื้อหาและเน้นทางด้านการประเมินอาคารเขียว เนื่องจากเป็นความคาดหวังหลักของผู้ใช้บัณฑิตต่อหลักสูตร และทางด้านโครงสร้างและภาษาอังกฤษในรายวิชาต่าง ๆ เพิ่มขึ้น โดยระยะเวลาเรียนควรเป็น 4 ปี โดยได้วุฒิ วท.บ. และการจัดรายวิชาและเนื้อหารายวิชาควรมีการปรับปรุงเพื่อให้ทันต่อสถานการณ์ในปัจจุบันและอนาคตที่เปลี่ยนแปลงไปมากขึ้น และควรคำนึงถึงการนำนักวิจัยหรือผู้เชี่ยวชาญทางด้านอาคารเขียวต่างๆ เข้ามาเป็นผู้สอนในรายวิชาเพื่อสร้างความร่วมมือและส่งเสริมองค์ความรู้ทางวิชาชีพ นอกจากนี้ผลการศึกษาแสดงว่าค่าเทอมของหลักสูตรฯ เหมาะสม แต่ควรสร้างความร่วมมือกับองค์กรภายนอกเพื่อจัดหาอุปกรณ์ ทุน และบุคลากร มาช่วยหลักสูตรฯ และยังช่วยสร้างการรับรู้หลักสูตรฯ ต่อภาคอุตสาหกรรม

เนื่องจากข้อจำกัดทางด้านระยะเวลา การศึกษาครั้งนี้ได้ผลการศึกษาจากผู้มีส่วนได้ส่วนเสียแค่บางกลุ่มและบางหน่วยงาน ดังนั้นในการศึกษาครั้งต่อไปควรมีการสำรวจความคิดเห็นของผู้ใช้บัณฑิตหลากหลายกลุ่มมากขึ้น เช่น กลุ่มผู้เชี่ยวชาญอาคารเขียวในหน่วยงานอื่นๆ กลุ่มภาคอุตสาหกรรม และกลุ่มภาคธุรกิจ และกลุ่มสมาคมวิชาชีพ เช่น สภาสถาปนิก รวมถึงสมาคมสถาปนิกสยามฯ เพื่อให้ผลการปรับปรุงหลักสูตรฯ คลอบคลุมมากยิ่งขึ้น

กิตติกรรมประกาศ

การศึกษาครั้งนี้เป็นส่วนหนึ่งของการวิจัยในโครงการวิจัยเพื่อพัฒนาหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาสถาปัตยกรรม (หลักสูตรปรับปรุง พ.ศ. 2569) คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ซึ่งได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากคณะสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เอกสารอ้างอิง

กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน. 2561. เกณฑ์การออกแบบอาคารเพื่อการอนุรักษ์พลังงาน (Building Energy Code). https://bec.dede.go.th/download/140D017S0000000002100.pdf, 22 เมษายน 2568.

ขณิษฟา พันธุ์พาณิชย์, บุญศรี พรหมมาพันธุ์, ทิพย์อนงค์ เลื่อนพุควัฒน์. 2560. การประเมินหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาการบริหารงานก่อสร้างและสาธารณูปโภค (หลักสูตรปรับปรุง พ.ศ. 2555) สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี. วารสารสุรนารีวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี 11: 75–88.

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. ม.ป.ป. อัตราค่าเล่าเรียน. https://www.chula.ac.th/admissions/tuition-and-fees/, 22 เมษายน 2568.

นวลวรรณ ทวยเจริญ, วนารัตน์ กรนิศรนุกูล, ชลิฎา จันทร์ศิริวรวัฒนา. 2564. การพัฒนาหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาสถาปัตยกรรม คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ เพื่อส่งเสริมด้านนวัตกรรมอาคารเขียว. วารสารการศึกษาเชิงอุตสาหกรรม 19: 99–110.

มหาวิทยาลัยเชียงใหม่. 2556. ระเบียบมหาวิทยาลัยเชียงใหม่ ว่าด้วยค่าธรรมเนียมการศึกษาสำหรับนักศึกษาปริญญาตรี พ.ศ. 2556. https://www.reg.cmu.ac.th/webreg/reg-files/u/cmu-reg-u-3-1.pdf, 22 เมษายน 2568.

มหาวิทยาลัยศิลปากร. 2559. ประกาศมหาวิทยาลัยศิลปากร เรื่อง หลักเกณฑ์และวิธีการลงทะเบียนเรียนสำหรับนักศึกษาใหม่ระดับปริญญาตรี พ.ศ. 2559. http://www.president.su.ac.th/legal/images/law/7/1.pdf, 22 เมษายน 2568.

มาเรียม นิลพันธุ์, อรพิน สิริสัมพันธ์, วิสาข์ จัติวัตร์, วิสูตร โพธิ์เงิน, อธิกมาส มากจุ้ย. 2560. การประเมินหลักสูตรปรัชญาดุษฎีบัณฑิต สาขาวิชาหลักสูตรและการสอน คณะศึกษาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร. วารสารอิเล็กทรอนิกส์ Veridian มหาวิทยาลัยศิลปากร (มนุษยศาสตร์ สังคมศาสตร์ และศิลปะ) 10: 1998–1216.

สถาบันอาคารเขียวไทย. 2567. เกณฑ์การประเมินความยั่งยืนทางพลังงานและสิ่งแวดล้อมไทยสำหรับอาคารสร้างใหม่และปรับปรุงใหม่ (TREES-PRE-NC). https://tgbi.or.th/wp-content/uploads/2024/12/141001_TREES-PRE-NC.pdf, 22 เมษายน 2568.

International WELL Building Institute. 2020. WELL Building Standard. https://v2.wellcertified.com/en

U.S. Green Building Council. 2022. Leadership in Energy and Environmental Design (LEED). https://leadinggreen.com/, 22 April 2025.

การพัฒนาหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาสถาปัตยกรรม (หลักสูตรปรับปรุง พ.ศ. 2569) คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ เพื่อส่งเสริมการสร้างสรรค์นวัตกรรมอาคารเขียว: การศึกษานิสิตปัจจุบันและนักเรียนมัธยมตอนปลาย

The Development of Bachelor of Science in Architecture Curriculum (Revised Program B.E. 2569), Faculty of Architecture, Kasetsart University, to Promote Green Building Innovation: The Study of Present Undergraduate Student and Upper Secondary School Student

นวลวรรณ ทวยเจริญ*, ธนภณ พันธเสน, ปารเมศ กำแหงฤทธิรงค์, สุภาพร แก้วกอ เลี่ยวไพโรจน์, ชนิกานต์ ยิ้มประยูร, ศิรเดช สุริต, กันติทัต ทับสุวรรณ, ภัทรนันท์ ทักขนนท์

Nuanwan Tuaycharoen*, Tanapon Panthasen, Parames Kamhangrittirong, Supaporn Kaewko Leopairojna, Chanikarn Yimprayoon, Siradech Surit, Kantitut Tubsuwan, Pattaranan Takkanon

ภาควิชานวัตกรรมอาคาร คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

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

*Corresponding author. E-mail address: nuanwan.t@ku.th

บทคัดย่อ

การศึกษาครั้งนี้มีวัตถุประสงค์หลัก คือ เพื่อศึกษาแนวทางการปรับปรุงหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาสถาปัตยกรรม หลักสูตรปรับปรุง 2569 ในกลุ่มนิสิตปัจจุบันและนักเรียนมัธยมปลาย การศึกษาความคิดเห็นเป็นการสำรวจโดยแบบสอบถาม โดยกำหนดเป็น 2 กลุ่ม ได้แก่ นิสิตปัจจุบัน และนักเรียนที่สนใจจะเข้าศึกษาต่อระดับอุดมศึกษาด้านสถาปัตยกรรม โดยมีการวิเคราะห์ข้อมูลโดยวิธีการวิเคราะห์ข้อมูลโดยใช้ค่าร้อยละ และค่าเฉลี่ย ผลการศึกษาพบว่าโดยภาพรวมหลักสูตรยังเป็นที่ต้องการและหลักสูตรน่าสนใจเป็นอย่างมาก และพบว่านิสิตปัจจุบันมีความเห็นว่ารายวิชาในหลักสูตร ทรัพยากรประกอบการเรียนการสอน รวมไปถึงการสนับสนุนและแนะนำมีความเหมาะสมมากเช่นกัน

คำสำคัญ: การประเมินหลักสูตร, สถาปัตยกรรม, หลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาสถาปัตยกรรม, อาคารเขียว

Abstract

This study's main objective was to explore an approach in revising the Bachelor of Science in Architecture (2026 Curriculum) in current university students and high school students. The study was a questionnaire study. There were two groups: the current university students and the high school students. The percentage and mean value were used to analyze the results. The results of the questionnaire survey found that overall the curriculum is still in demand and is very interesting. It was also found that cur rent students agreed that the subjects in the curriculum, teaching resources, and support and advice were also very appropriate.

Keywords: Curriculum evaluation, Architecture, Bachelor of Science in Architecture curriculum, Green building

บทนำ

หลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาสถาปัตยกรรม เปิดการเรียนการสอนมาตั้งแต่ปีการศึกษา 2559 โดยเป็นหลักสูตรในภาควิชานวัตกรรมอาคาร ที่มีวิสัยทัศน์ที่ว่า “ภาควิชานวัตกรรมอาคาร เป็น Destination ของคนไทยด้านการออกแบบและพัฒนานวัตกรรมอาคารเพื่อความยั่งยืน” โดยถึงรอบของการปรับปรุงหลักสูตรในปีการศึกษา 2569 โดยก่อนที่จะปรับปรุงหลักสูตรดังกล่าวนั้นจำเป็นจะต้องทำวิจัยเพื่อทราบข้อเท็จจริงของสิ่งกำหนดหลักสูตรต่างๆ เพื่อให้สามารถพัฒนารูปแบบของหลักสูตรที่สามารถรองรับการนำไปใช้ ซึ่งประกอบด้วยสถานการณ์ความต้องการในปัจจุบันร่วมกับการฟังเสียงของลูกค้า (Voice of customer) ที่เป็นตัวแปรสำคัญอย่างหนึ่งในการพัฒนาหลักสูตรปรับปรุงดังกล่าว โดยเฉพาะอย่างยิ่งในกลุ่มนิสิตปัจจุบัน และนักเรียนมัธยมปลายที่สนใจจะเข้าศึกษาต่อระดับอุดมศึกษาด้านสถาปัตยกรรม จากการรวบรวมเอกสารงานวิจัยที่เกี่ยวข้องพบว่า ในปัจจุบันนโยบายทั้งทั้งในแผนพัฒนาเศรษฐกิจและสังคมแห่งชาติ ฉบับที่ 13 พ.ศ. 2565-2570 และแผนวิทยาศาสตร์เทคโนโลยีและนวัตกรรมแห่งชาติ พ.ศ. 2566-2570 เน้นโมเดลเศรษฐกิจแบบ BCG (สำนักงานสภาพัฒนาการเศรษฐกิจและสังคมแห่งชาติ, 2565; สำนักงานคณะกรรมการส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม, 2566) โดยจากแนวโน้มการออกแบบอาคารเพื่อประหยัดพลังงานและคำนึงถึงสิ่งแวดล้อม ไม่ว่าจะเป็นข้อกำหนดของกฎหมายอาคารอนุรักษ์พลังงาน BEC ที่ถูกบังคับใช้ และเกณฑ์มาตรฐานอาคารเขียวต่างๆ เช่น TREEs LEEDs และ WELL ที่กำลังเป็นที่นิยมในวงการสถาปัตยกรรมและการก่อสร้าง (สถาบันอาคารเขียวไทย, 2567; U.S. Green Building Council, 2022; International WELL Building Institute, 2020) ทำให้หลักสูตรควรต้องเน้นย้ำการนำเอาแนวทางการออกแบบอาคารเขียวและการสร้างสรรค์นวัตกรรมเพื่อสิ่งแวดล้อมมาใช้ ในการเรียนการสอนให้ชัดเจนยิ่งขึ้น โดยการศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาแนวทางการปรับปรุงหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาสถาปัตยกรรม หลักสูตรปรับปรุง 2569 ในกลุ่มนิสิตปัจจุบันและนักเรียนมัธยมปลาย

วิธีดำเนินการวิจัย

การศึกษาครั้งนี้ได้ทำการสำรวจความคิดเห็นจากกลุ่มตัวอย่างจำนวน 47 คน เนื่องจากจำนวนตัวอย่างดังกล่าวเป็นจำนวนตัวอย่างที่ได้ใช้ในหลายงานวิจัยทางด้านการศึกษาในอดีต (มาเรียม, อรพิน, วิสาข์, วิสูตร, และอธิกมาส, 2560) โดยประกอบด้วย 2 กลุ่ม ได้แก่ นักเรียนมัธยมปลายที่สนใจจะเข้าศึกษาต่อระดับอุดมศึกษาด้านสถาปัตยกรรม จำนวน 13 คน (กลุ่มแผนวิทย์-คณิต และแผนศิลป์-คำนวณ) นิสิตปัจจุบันจำนวน 34 คน ได้ตัวอย่างมาจากการสุ่มแบบบังเอิญ (Accidental sampling) แบบสอบถามที่ใช้เป็นแบบสอบถามปลายปิดที่วัดความคาดหวัง ความพึงพอใจ ความเห็นด้วย และความเหมาะสม การวิเคราะห์ข้อมูลใช้ค่าร้อยละ (%) และค่าเฉลี่ย (Mean) ซึ่งมีเกณฑ์การวิเคราะห์ค่าเฉลี่ยเป็นระดับคะแนนระหว่าง 3.51-4.00, 2.51-3.50, 1.51-2.50, 0.51-1.50 และ 0-0.50 หมายถึง ค่าคะแนนในระดับมากที่สุด มาก ปานกลาง น้อย และน้อยที่สุดตามลำดับ (มาเรียม, อรพิน, วิสาข์, วิสูตร, และอธิกมาส, 2560) ในการวิเคราะห์ผลการศึกษาจะทำการวิเคราะห์ในด้านบริบท ด้านปัจจัยนำเข้า และด้านกระบวนการ (นวลวรรณ, วนารัตน์, และชลิฎา, 2564)

ผลการวิจัย

1. บริบท

1.1 ความต้องการเรียนในหลักสูตรตามความเห็นของนักเรียนมัธยมปลาย ผลการวิเคราะห์พบว่า นักเรียนมัธยมปลายส่วนใหญ่ต้องการเรียนในหลักสูตร โดยมีความเห็นว่าหลักสูตรเป็นความต้องการของตลาด สอดคล้องกับแนวโน้มสถานการณ์ปัจจุบันและอนาคต จึงสามารถนำความรู้ไปประกอบอาชีพได้หลายด้าน

1.2 ความน่าสนใจของหลักสูตร ผลการวิเคราะห์พบว่า นิสิตปัจจุบันส่วนใหญ่มีความสนใจหลักสูตร เนื่องจากเป็นหลักสูตรที่ออกแบบมาเพื่อเน้นในเรื่องอาคารเขียวเพื่อตอบโจทย์สถานการณ์ในปัจจุบันที่ และสามารถนำไปประกอบอาชีพได้หลากหลาย ซึ่งสอดคล้องกับความเห็นในส่วนนักเรียนมัธยมปลายมีความเห็นว่าหลักสูตรน่าสนใจเช่นเดียวกัน เนื่องจากอัตลักษณ์ชัดเจนและสามารถทำงานได้หลากหลาย และเรียนแค่ 4 ปี

2. ปัจจัยนำเข้า

2.1 ความเหมาะสมของรายวิชา Table 1 แสดงให้เห็นว่ารายวิชาที่นิสิตปัจจุบันเห็นว่าเหมาะสมมากที่สุดคือ ชีววิทยาสีเขียวเพื่อการออกแบบสถาปัตยกรรม โดยมีความเหมาะสมในระดับมาก (ค่าเฉลี่ย = 3.20)รองลงมาคือการออกแบบและการจำลองแสง(ค่าเฉลี่ย = 3.21) ส่วนรายวิชาที่มีความเหมาะสมระดับปานกลางมีเพียง 4 รายวิชา ได้แก่ การวางผังเมืองอย่างยั่งยืน ปฏิบัติวิชาชีพทางสถาปัตยกรรมยั่งยืน การเตรียมโครงงานสถาปัตยกรรมยั่งยืน (ค่าเฉลี่ย = 2.47) และการพัฒนาอสังหาริมทรัพย์สีเขียว (ค่าเฉลี่ย = 2.44)

2.2 ทรัพยากรประกอบการเรียนการสอน Table 2 แสดงให้เห็นว่านิสิตปัจจุบันเห็นว่าทรัพยากรประกอบการเรียนการสอนโดยภาพรวมนั้นมีความเหมาะสมในระดับมาก (ค่าเฉลี่ย = 3.26) โดยห้องทดลองและปฏิบัติการทดสอบมีคะแนนความเหมาะสมสูงที่สุด (ค่าเฉลี่ย = 3.41) และห้องสมุดมีคะแนนความเหมาะสมต่ำที่สุด (ค่าเฉลี่ย = 3.06)

2.3 การสนับสนุนและแนะนำผู้เรียน Table 3 แสดงให้เห็นว่านิสิตปัจจุบันเห็นว่าการสนับสนุนและแนะนำผู้เรียนโดยภาพรวมนั้นมีความเหมาะสมในระดับมาก (ค่าเฉลี่ย = 3.39) โดยระบบสนับสนุนการเรียนการสอนในแง่ของข่าวสารภายนอกคณะฯ มีคะแนนความเหมาะสมสูงที่สุด (ค่าเฉลี่ย = 3.62) และกิจกรรม/ทุนวิจัย/อื่นๆ มีคะแนนความเหมาะสมต่ำที่สุด (ค่าเฉลี่ย = 3.00)

2.4 ค่าใช้จ่ายในการเรียน Table 4 แสดงให้เห็นว่านักเรียนมัธยมและนิสิตปัจจุบันเห็นว่าค่าใช้จ่ายที่เหมาะสมที่สุดคือ 15,000–20,000 บาท/เทอม ในขณะผู้ใช้บัณฑิตเห็นว่าค่าใช้จ่ายที่เหมาะสมที่สุดคือ 20,001–25,000 บาท/ภาคการศึกษา

3. กระบวนการ

3.1 ระยะเวลาเรียน Table 5 แสดงให้เห็นว่าคนส่วนใหญ่ของทั้งนักเรียนมัธยม นิสิตปัจจุบัน ต่างเห็นว่าระยะเวลาเรียน 4 ปี โดยได้วุฒิ วท.บ.มีความเหมาะสม (ร้อยละ 76.9 และ 64.7 ตามลำดับ) ขณะที่คนส่วนน้อยเห็นว่าระยะเวลาเรียน 6 ปี วุฒิสถาปัตยกรรมศาสตรมหาบัณฑิตมีความเหมาะสม (ร้อยละ 0.0 และ 2.9 ตามลำดับ) ดังแสดง Table 5

3.2 ปัญหาและอุปสรรคในการเรียน Table 6 แสดงให้เห็นว่านิสิตปัจจุบันส่วนใหญ่มีปัญหาและอุปสรรคในการเรียนในเรื่องการแบ่งเวลา (ร้อยละ 85.3) รองลงมาคือความเครียดและกังวลใจมากที่สุด (ร้อยละ 61.8) รองลงมาคือ

การเงิน (ร้อยละ 35.3) ตามลำดับ ซึ่งเมื่อพิจารณาผลจากการวิเคราะห์เนื้อหาก็พบว่าระยะเวลาเรียนที่มีจำกัด ในขณะที่กิจกรรมการเรียนการสอนซึ่งรวมถึงการผลิตผลงานมีมาก ทำให้เกิดปัญหาการแบ่งเวลาที่เกิดขึ้น ดังแสดง Table 6

3.3 ข้อเสนอแนะเพื่อการพัฒนาหลักสูตร ผลจากการวิเคราะห์เนื้อหาพบว่า โดยภาพรวมเนื้อหาของหลักสูตรตอบสนองสถานการณ์ของโลกและสิ่งแวดล้อมทั้งในในปัจจุบันและอนาคต โดยมีความเห็นของนิสิตปัจจุบันโดยส่วนใหญ่ระบุว่าควรลดเนื้อหาบางรายวิชาและลดปริมาณงานที่ต้องส่ง รวมถึงอยากให้ขยายเวลาระยะเวลาของหลักสูตรเป็น 5 ปี

Table 1 Suitability of Courses for Current Students

Topic	Current University Students	
	Average	Level
1. Ecological Design Studio	2.71	Very Satisfied
2. Ecological Design Studio II	2.85	Very Satisfied
3. Physics of Structure and Material Strength	3.00	Very Satisfied
4. Fundamentals of Ecological Design	2.71	Very Satisfied
5. Green Biology for Architectural Design	3.26	Very Satisfied
6. Mathematics in Building Structural Systems	2.85	Very Satisfied
7. Materials Science for Architectural Design	2.85	Very Satisfied
8. Design and Simulation of Light	3.21	Very Satisfied
9. Thermal and Acoustic Design	3.12	Very Satisfied
10. Architectural Drawing and Presentation	2.97	Very Satisfied
11. Architectural Presentation	2.85	Very Satisfied
12. History of Human Settlements and Architecture	2.76	Very Satisfied
13. Fundamentals of Building Technology	2.82	Very Satisfied
14. Building Technology for Small Buildings	2.76	Very Satisfied
15. Introduction to Sustainable Architecture	3.00	Very Satisfied
16. Sustainable Architecture Studio	2.91	Very Satisfied
17. Sustainable Architecture Studio II	2.91	Very Satisfied
18. Criteria in Architectural Design	2.88	Very Satisfied
19. Introduction to Interior Architecture	2.88	Very Satisfied
20. Building Technology for Small Public Buildings	2.88	Very Satisfied
21. Building Technology for Medium Public Buildings	2.82	Very Satisfied
22. Application of Computers in Architecture for Presentation	3.09	Very Satisfied
23. Design to Respond to the Environment	3.18	Very Satisfied
24. Sustainable Architecture Studio	2.85	Very Satisfied
25. Sustainable Architecture Studio IV	2.88	Very Satisfied
26. Introduction to Landscape Architecture	2.85	Very Satisfied
27. Innovation and Building Technology for Large Public Buildings	2.74	Very Satisfied
28. Innovation and Building Technology for Extra Large Public Buildings	2.82	Very Satisfied
29. Cost Estimation	3.09	Very Satisfied
30. Zero Energy Building Design	3.12	Very Satisfied
31. Green Building Assessment	3.18	Very Satisfied
32. Sustainable Architecture Studio V	2.62	Very Satisfied
33. Innovation and Building Technology for High-Rise Buildings	2.76	Very Satisfied
34. Sustainable Urban Planning	2.47	Moderately Satisfied
35. Green Real Estate Development	2.44	Moderately Satisfied
36. Professional Practice in Sustainable Architecture	2.47	Moderately Satisfied
37. Preparation for Sustainable Architecture Project	2.47	Moderately Satisfied

Table 1 Suitability of Courses for Current Students (Continue)

Topic	Current University Students	
	Average	Level
38. Seminar in Sustainable Architecture	2.59	Very Satisfied
39. Sustainable Architecture Project	2.62	Very Satisfied
40. Design from Waste Materials	2.53	Very Satisfied
41. Building Plants	2.88	Very Satisfied
Overall Average	3.26	Very Satisfied

Table 2 Instructional Resources

Topic	Average	Level
1. Classroom	3.32	Very Appropriate
2. Laboratory and Testing Practice Rooms	3.41	Very Appropriate
3. Computer Room	3.15	Very Appropriate
4. Library	3.06	Very Appropriate
5. Measuring and Testing Equipment	3.35	Very Appropriate
Overall Average	**3.26**	**Very Appropriate**

Table 3 Student Support and Advice

Topic	Average	Level
1. Advisor System (Providing advice on study planning/morality and ethics)	3.35	Very Appropriate
2. Registrar Unit (Facilitating learning, teaching, and various administrative tasks)	3.32	Very Appropriate
3. Learning and Teaching Support System		Very Appropriate
• Restaurants, beverages	3.21	Very Appropriate
• Photocopy shop	3.26	Very Appropriate
• Stationery shop	3.32	Very Appropriate
• Student accommodation	3.26	Very Appropriate
• Recreation and leisure areas	3.44	Very Appropriate
• Working/studying areas outside the classroom	3.26	Very Appropriate
• Security system	3.56	Most Appropriate
• Faculty research grants	3.59	Very Appropriate
• External research grants	3.50	Very Appropriate
• Project support	3.53	Most Appropriate
• Budgetary support	3.47	Very Appropriate
• Information and public relations support	3.50	Very Appropriate
• Learning and teaching	3.38	Very Appropriate
• External news from the faculty	3.62	Most Appropriate
• Activities/grants/other	3.00	Very Appropriate
Overall Average	**3.39**	**Very Appropriate**

Table 4 Learning Expenses

Topic	Percentage (%)	
	High School Students	Current University Students
15,000–20,000 Baht/term	84.6	82.4
20,000–25,000 Baht/term	7.7	8.8
25,001–30,000 Baht/term	0	5.9
More than 30,000 Baht/term	7.7	2.9

Table 5 Duration of Study

Topic	Percentage (%)	
	High School Students	Current University Students
4 years, Bachelor of Science degree	76.9	64.7
5 years, Bachelor of Architecture degree	23.1	32.4
6 years, Master of Architecture degree	0	2.9

Table 6 Problems and Obstacles in Learning

Topic	Percentage (%)
	Current University Students
No problems	5.9
Stress and worry	61.8
Time management	85.3
Commuting/Travel	17.6
Finances	35.3

สรุปและวิจารณ์ผลการวิจัย

จากผลการศึกษาข้างต้น ผู้วิจัยสามารถสามารถสรุปและอภิปรายผลในด้านการประเมินหลักสูตรหลักสูตรด้านบริบท ด้านปัจจัยนำเข้า และด้านกระบวนการ

1. ด้านบริบท การศึกษาความต้องการเรียนในหลักสูตรตามความเห็นของนักเรียนมัธยมปลาย พบว่านักเรียนมัธยมปลายส่วนใหญ่ต้องการเรียนในหลักสูตร โดยมีความเห็นว่าหลักสูตรเป็นความต้องการของตลาด สอดคล้องกับแนวโน้มสถานการณ์ปัจจุบันและอนาคต จึงสามารถนำความรู้ไปประกอบอาชีพได้หลายด้าน ซึ่งตรงกับที่นิสิตปัจจุบันระบุในผลการศึกษาความน่าสนใจของหลักสูตรว่าหลักสูตรน่าสนใจมาก เนื่องจากเป็นหลักสูตรที่ออกแบบมาเพื่อเน้นในเรื่องอาคารเขียวเพื่อตอบโจทย์สถานการณ์ในปัจจุบัน และสามารถนำไปประกอบอาชีพได้หลากหลาย ส่วนในความเห็นของนักเรียนมัธยมปลายหลักสูตรน่าสนใจเช่นเดียวกัน เนื่องจากอัตลักษณ์ชัดเจนและสามารถทำงานได้หลากหลาย และเรียนแค่ 4 ปี จากข้อค้นพบจะเห็นได้ว่าจุดเด่นของหลักสูตรมีความเหมาะสมแล้ว สอดคล้องกับยุทธศาสตร์ของแผนพัฒนาเศรษฐกิจและสังคมแห่งชาติ ฉบับที่ 13 พ.ศ. 2565-2570 โดยหลักสูตรฯ สอดคล้องโดยตรงกับมิติความยั่งยืนของทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม ซึ่งประกอบด้วย 2 หมุดหมาย ได้แก่ หมุดหมายที่ 10 ไทยมีเศรษฐกิจหมุนเวียนและสังคมคาร์บอนต่ำและหมุดหมายที่ 11 ไทยสามารถลดความเสี่ยงและผลกระทบจากภัยธรรมชาติและการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ (สำนักงานสภาพัฒนาการเศรษฐกิจและสังคมแห่งชาติ, 2565) นอกจากนี้ทั้งปรัชญาและรายละเอียดหลักสูตรฯ ยังสอดคล้องกับแผนวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม พ.ศ. 2566-2570 โดย สกสว. ในส่วนที่เกี่ยวข้องกับการ

พัฒนานวัตกรรม ซึ่งอยู่ในส่วนยุทธศาสตร์ที่ 1-4 ซึ่งเน้นในเรื่องของเศรษฐกิจสร้างคุณค่าและเศรษฐกิจสร้างสรรค์ การพัฒนาอย่างยั่งยืน การพัฒนาวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยี การวิจัยและนวัตกรรมระดับขั้นแนวหน้า และการพัฒนากำลังคนและสถาบันด้านวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม (สำนักงานคณะกรรมการส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม, 2566) นอกจากนี้หลักสูตรฯ ยังตอบรับกับนโยบายมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ในแผนการขับเคลื่อนการพัฒนาพัฒนาหลักสูตรเศรษฐกิจแนวใหม่ตาม BCG Economy Model ของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ในยุทธศาสตร์ที่ 1-5 (สำนักทะเบียน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, 2565) รวมไปถึงหลักสูตรฯ ยังสอดคล้องกับแนวโน้มการออกแบบอาคารเพื่อประหยัดพลังงานและคำนึงถึงสิ่งแวดล้อมทั้งในส่วนข้อกำหนดของกฎหมายอาคารอนุรักษ์พลังงาน BEC ซึ่งกรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงานได้ออกกฎกระทรวงกำหนดประเภทหรือขนาดของอาคาร และมาตรฐานหลักเกณฑ์และวิธีการในการออกแบบอาคารเพื่อการอนุรักษ์พลังงาน พ.ศ. 2563 [7] รวมปถึงสอดคล้องกับการออกแบบอาคารเขียวตามมาตรฐาน TREES LEEDs และ WELL (สถาบันอาคารเขียวไทย, 2567; U.S. Green Building Council, 2022; International WELL Building Institute, 2020)

2. ด้านปัจจัยนำเข้า การศึกษาความเหมาะสมของรายวิชา พบว่าชีววิทยาสีเขียวเพื่อการออกแบบสถาปัตยกรรมการออกแบบและการจำลองแสงได้รับค่าเฉลี่ยในระดับมากจากความเห็นของทั้งนิสิตปัจจุบัน ซึ่งผลดังกล่าวเป็นการยืนยันถึงความสอดคล้องกันในความต้องการรายวิชาที่ส่งเสริมการสร้างสรรค์นวัตกรรมอาคารเขียว โดยเฉพาะ สำหรับการศึกษาค่าใช้จ่ายในการเรียน พบว่านักเรียนมัธยมและนิสิตปัจจุบันเห็นว่าค่าใช้จ่ายที่เหมาะสมที่สุด คือ 15,000–20,000 บาท/ภาคการศึกษา ในปัจจุบันค่าเทอมของหลักสูตรฯ คือ 23,800 บาท/ภาคการศึกษา ซึ่งยังถือว่าใกล้เคียงกับคณะสถาปัตยกรรมศาสตร์ในมหาวิทยาลัยอื่นๆ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ (29,000 บาท) (มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, 2556) มหาวิทยาลัยศิลปากร (22,000 บาท) (มหาวิทยาลัยศิลปากร, 2559) และจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย (21,000 บาท) (จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, ม.ป.ป.)

3. ด้านกระบวนการ ผลการศึกษาระยะเวลาในการเรียน ที่พบว่าคนส่วนใหญ่ของทุกกลุ่มตัวอย่างต่างเห็นว่าระยะเวลาเรียน 4 ปี โดยได้วุฒิ วท.บ. มีความเหมาะสมมากกว่าระยะเวลาเรียน 5 ปี โดยได้วุฒิ สถ.บ. ซึ่งแตกต่างจากผลการศึกษาวิจัยสถาบันในการปรับปรุงหลักสูตรดังกล่าวในอดีตที่แสดงให้เห็นว่าระยะเวลาเรียน 5 ปี โดยได้วุฒิ สถ.บ. มีความเหมาะสมมากกว่าระยะเวลา4 ปี โดยได้วุฒิ วท.บ. (นวลวรรณ ทวยเจริญ, วนารัตน์ กรนิศรนุกูล, และชลิฎา จันทร์ศิริวรวัฒนา, 2564) ซึ่งผลดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าคนส่วนใหญ่เริ่มมั่นใจกับระยะเวลาและหลักสูตร วท.บ. ในสาขาสถาปัตยกรรม 4 ปี และแนวโน้มของนักเรียนมัธยมปลายในปัจจุบัน ดังที่แสดงในความเห็นของนักเรียนมัธยมปลายที่ว่าหลักสูตรน่าสนใจ เนื่องจากอัตลักษณ์ชัดเจนและสามารถทำงานได้หลากหลาย และเรียนแค่ 4 ปี ทั้งนี้หากพิจาณาผลการศึกษาด้านปัญหาและอุปสรรคในการเรียนมากที่สุดในความคิดเห็นของนิสิตปัจจุบันคือการแบ่งเวลา รวมถึงส่วนข้อเสนอแนะเพื่อการพัฒนาหลักสูตรจากนิสิตปัจจุบันนั้นคือ ต้องการให้ควรลดเนื้อหาบางรายวิชาและลดปริมาณงาน

ข้อเสนอแนะในการทำวิจัยในอนาคต

เนื่องจากข้อจำกัดทางด้านระยะเวลา การศึกษาครั้งนี้ได้ผลการศึกษาจากผู้มีส่วนได้ส่วนเสียแค่บางกลุ่มและบางหน่วยงาน ดังนั้นในการศึกษาครั้งต่อไปควรมีการสำรวจความคิดเห็นของผู้ปกครอง และนักเรียนกลุ่มอื่นๆ เพื่อให้ผลการปรับปรุงหลักสูตรฯ คลอบคลุมมากยิ่งขึ้น

กิตติกรรมประกาศ

การศึกษาครั้งนี้เป็นส่วนหนึ่งของการวิจัยในโครงการวิจัยเพื่อพัฒนาหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาสถาปัตยกรรม (หลักสูตรปรับปรุง พ.ศ. 2569) คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ซึ่งได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากคณะสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เอกสารอ้างอิง

กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน. 2561. ข้อกำหนดเกณฑ์มาตรฐานประสิทธิภาพพลังงานในอาคาร (Building Energy Code - BEC). https://bec.dede.go.th/download/140D017S0000000002100.pdf, 22 เมษายน 2568.

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. ม.ป.ป. ค่าเล่าเรียน. https://www.chula.ac.th/admissions/tuition-and-fees, 22 เมษายน 2568.

นวลวรรณ ทวยเจริญ, วนารัตน์ กรนิศรนุกูล, ชลิฎา จันทร์ศิริวรวัฒนา. 2564. การพัฒนาหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาสถาปัตยกรรม คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ เพื่อส่งเสริมด้านนวัตกรรมอาคารเขียว. วารสารการศึกษาเชิงอุตสาหกรรม 19: 99–110.

มหาวิทยาลัยเชียงใหม่. 2556. ระเบียบมหาวิทยาลัยเชียงใหม่ ว่าด้วยค่าธรรมเนียมการศึกษาสำหรับนักศึกษาปริญญาตรี พ.ศ. 2556. https://www.reg.cmu.ac.th/webreg/reg-files/u/cmu-reg-u-3-1.pdf, 22 เมษายน 2568.

มหาวิทยาลัยศิลปากร. 2559. ประกาศมหาวิทยาลัยศิลปากร เรื่อง หลักเกณฑ์และวิธีการลงทะเบียนเรียนสำหรับนักศึกษาใหม่ระดับปริญญาตรี พ.ศ. 2559. http://www.president.su.ac.th/legal/images/law/7/1.pdf, 22 เมษายน 2568.

มาเรียม นิลพันธุ์, อรพิน สิริสัมพันธ์, วิสาข์ จัติวัตร์, วิสูตร โพธิ์เงิน, อธิกมาส มากจุ้ย. 2560. การประเมินหลักสูตรปรัชญาดุษฎีบัณฑิต สาขาวิชาหลักสูตรและการสอน คณะศึกษาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร. วารสารอิเล็กทรอนิกส์ Veridian มหาวิทยาลัยศิลปากร (มนุษยศาสตร์ สังคมศาสตร์ และศิลปะ) 10: 1998–1216.

สถาบันอาคารเขียวไทย. 2567. เกณฑ์การประเมินความยั่งยืนทางพลังงานและสิ่งแวดล้อมไทยสำหรับอาคารสร้างใหม่และปรับปรุงใหม่ (TREES-PRE-NC). https://tgbi.or.th/wp-content/uploads/2024/12/141001_TREES-PRE-NC.pdf, 22 เมษายน 2568.

สำนักงานคณะกรรมการส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม. 2566. แผนด้านวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม พ.ศ. 2566-2570. https://d.tsri.or.th/806Qg59GPY/the-national-sri-plan-of-thailand-2023-2027, 22 เมษายน 2568.

สำนักงานสภาพัฒนาการเศรษฐกิจและสังคมแห่งชาติ. 2565. แผนพัฒนาเศรษฐกิจและสังคมแห่งชาติ ฉบับที่ 13 (พ.ศ. 2566–2570). https://www.nesdc.go.th/the-national-economic-and-social-development-plan/the-thirteenth-plan-2023-2027, 22 เมษายน 2568.

สำนักทะเบียน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. 2565. แผนการพัฒนาหลักสูตรใหม่ตามรูปแบบเศรษฐกิจ BCG มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. https://registrar.ku.ac.th/64bcg, 22 เมษายน 2568.

International WELL Building Institute. 2020. WELL Building Standard. https://v2.wellcertified.com/en, 22 April 2025.

U.S. Green Building Council. 2022. Leadership in Energy and Environmental Design (LEED). https://leadinggreen.com, 22 April 2025.

ผลกระทบของระดับแรงดึงและรูปแบบช่วงเสาลอยต่อพฤติกรรมการรับน้ำหนักของคานไม้ขึงแบบซ่อนเคเบิลล่าง

Effects of Tension Levels and Strut Spans on Load Bearing Behavior of Timber Beam String Structures with Hidden Bottom Cables

ชวาน พรรณดวงเนตร[a,*], **ปัญกิจ แก้วเหล็ก**[b]

Schwan Pundoangnetr[a,*], Panyakit Kaewlex[b]

[a]สาขาเทคโนโลยีสถาปัตยกรรม คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ปทุมธานี 12120

[b]ภาควิชาคณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ปทุมธานี 12110

[a]Division of Architectural Technology, Faculty of Architecture, Rajamangala University of Technology Thanyaburi, Pathum Thani 12110, Thailand

[b]Department of Technical Education, Faculty of Technical Education, Rajamangala University of Tec hnology Thanyaburi, Pathum Thani 12110, Thailand

*Corresponding author. E-mail address: schwan.p@ku.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาประสิทธิภาพการรับน้ำหนักของโครงสร้างคานขึง (Beam String Structure: BSS) แบบซ่อนเคเบิลล่าง โดยทดสอบกับหุ่นจำลองคานไม้ขนาด 5x15x400 มิลลิเมตร กำหนดตัวแปร 2 ส่วน ได้แก่ 1) รูปแบบเสาลอย 3 แบบ คือ 2 ช่วง (B2), 3 ช่วง (B3) และ 4 ช่วง (B4) และ 2) ระดับแรงดึงเริ่มต้น 4 ระดับ คือ 25%, 50%, 75% และ 100% ผลการทดสอบรับน้ำหนักแบบจุดเดียวพบว่าระดับแรงดึง 75% เป็นจุดที่เหมาะสมที่สุดในทุกรูปแบบคาน โดยคานแบบ 2 ช่วง (B2) ที่แรงดึง 75% ให้ประสิทธิภาพสูงสุด รับน้ำหนักเฉลี่ย 868 กรัม (3.536 เท่าของคานปกติ) อย่างไรก็ตาม การใช้แรงดึง 100% ส่งผลให้ประสิทธิภาพลดลง โดยในคานแบบ B2 รับน้ำหนักเฉลี่ย 696 กรัม เนื่องจากการเกิดการโก่งเดาะด้านข้าง

คำสำคัญ โครงสร้างคานขึง เคเบิลซ่อน แรงดึงอัดล่วงหน้า

Abstract

This research investigates the load-bearing efficiency of Beam String Structures (BSS) with hidden bottom cables using timber models (5x15x400 mm). The study focused on two variables: 1) Strut patterns including 2-span (B2), 3-span (B3), and 4-span (B4), and 2) Initial pre-tension levels at 25%, 50%, 75%, and 100%. Under mid-span point loading, results indicated that 75% pre-tension was optimal across all configurations. Specifically, the 2-span beam (B2) at 75% tension achieved the highest performance, bearing 868 g (3.536 times that of unreinforced beams). However, applying 100% tensile strength results in reduced performance, with the B2 beam supporting an average load of 696 grams due to lateral buckling.

Keywords Beam string structure, Hidden cable, Pre-tension

คำนำ

ในงานสถาปัตยกรรมมีความจำเป็นต้องอาศัยโครงสร้างในการสร้างที่ว่างรูปแบบต่าง ๆ โครงสร้างช่วงพาดเป็นรูปแบบโครงสร้างหนึ่งที่พบได้ เช่น คาน ที่ทำหน้ารับภาระน้ำหนักถ่ายเทไปยังฐานรองรับทั้งสองข้างทำให้เกิดแรงดัดในรูปแบบโมเมนต์บวก พฤติกรรมของคานเมื่อรับน้ำหนักบรรทุกจะเกิดการแอ่นตัว โดยผิวบนของคานจะรับแรงอัด และผิวล่างจะรับแรงดึง การเพิ่มประสิทธิภาพของคานสามารถทำโดยการเพิ่มความลึกหน้าตัดของคาน เพิ่มปริมาณเนื้อวัสดุที่ผิวบนและล่างของหน้าตัดคาน หรือการทำคานแอ่นตัวยกขึ้นล่วงหน้า (Cambering) เพื่อชดเชยระยะแอ่นตัว ที่เกิดจากน้ำหนักบรรทุกกดทับ เมื่อโครงสร้างรับน้ำหนักใช้งานจริง คานจะคืนตัวกลับมาอยู่ในแนวระนาบเดิม ซึ่งช่วยลดปัญหาการแอ่นตัวที่มากเกินเกณฑ์มาตรฐานได้ โครงสร้างคานขึง (Beam String Structure) เป็นโครงสร้างช่วงพาดอีกแบบหนึ่งที่ใช้การหิ้วเสาลอย (Strut) ด้วยเคเบิลล่าง (String) เพื่อให้เสาลอยดันยกส่วนกลางของคานทำให้เกิดโมเมนต์ลบในคาน เมื่อคานมีน้ำหนักบรรทุกจะเกิดโมเมนต์บวกทำให้โมเมนต์ดัดในคานเกิดสมดุล คานจึงมีประสิทธิภาพน้ำหนักได้มากขึ้นโดยไม่ต้องเปลี่ยนแปลงหน้าตัดคาน ดังจะเห็นได้จากกรณีศึกษาอาคารที่มีช่วงพาดกว้างต่างๆ ที่มีการใช้เทคนิคการดึงลวดสลิงเข้ามาช่วยรับแรง เช่น บ้านน้ำตก (Fallingwater) ออกแบบโดยสถาปนิก Frank Lloyd Wright ได้ออกแบบส่วนยื่นด้วยคานขึงกลับหัว มีเคเบิลในลักษณะคว่ำ เพื่อหักล้างกับโมเมนต์ลบที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติของคานยื่น (Feldmann 2005) อาคารผู้โดยสารท่าอากาศยานนานาชาติเซี่ยงไฮ้ผู่ตง เป็นอาคารช่วงพาดกว้างใช้ระบบโครงสร้างคานขึงที่คานเหล็กโค้งรับแรงอัด (Compression Arch) ด้านบน และสายเคเบิลล่าง โดยมีการถ่ายแรงผ่านเสาลอยหลายต้นที่มีความสูงไม่เท่ากัน ทำให้แนวเคเบิลล่างเปลี่ยนองศาในแต่ละช่วงภาพรวมของแนวเคเบิลล่างจึงดูคล้ายคล้ายแนวโค้ง (Zhao 2015)

อย่างไรก็ตามแรงที่เคเบิลล่างยกหิ้วเสาลอยจะถูกถ่ายเทไปเป็นแรงดึงรั้งที่ปลายคานทั้งสองข้าง ทำให้เกิดแรงอัดในคานซึ่งทำให้พฤติกรรมของคานเมื่อรับน้ำหนักบรรทุกจะแตกต่างจากคานที่รับแรงดัดเพียงอย่างเดียว จากการศึกษาของ Liu และคณะ (2024) ซึ่งได้ทำการทดสอบสมรรถนะของโครงสร้างคานเชือกอลูมิเนียม พบว่ารูปแบบการติดตั้งจุดยึดมีผลต่อกำลังรับน้ำหนักสูงสุด โดยการยึดที่ปีกคาน (Flange-connected) ช่วยเพิ่มกำลังรับน้ำหนักได้ประมาณ 6.12 เท่า เมื่อเทียบกับคานปกติ ซึ่งสูงกว่าแบบยึดที่เอวคาน (Web-connected) ที่เพิ่มขึ้นประมาณ 5.49 เท่า สาเหตุหลักเกิดจากรูปแบบการยึดที่เอวคานจำเป็นต้องมีการเจาะช่องเปิด ซึ่งส่งผลให้หน้าตัดคานอ่อนแอลงและเกิดการโก่งเดาะเฉพาะที่ (Local buckling) ก่อนถึงจุดวิบัติของวัสดุ นอกจากอลูมิเนียมแล้ว Hua และคณะ (2025) ได้ศึกษาพฤติกรรมการดัดของคานไม้ไผ่อัดประสานที่เสริมแรงด้วยระบบคานขึง โดยเปรียบเทียบผลของทิศทางการอัดประสาน จำนวนค้ำยัน และแรงดึงเริ่มต้น พบว่าระบบคานขึงช่วยเพิ่มกำลังรับน้ำหนักสูงสุดได้ 22.57% – 53.83% เมื่อเทียบกับคานปกติ โดยเฉพาะอย่างยิ่งการใส่แรงดึงเริ่มต้น สามารถเพิ่มกำลังรับน้ำหนักสูงสุดได้อีก 7.6% – 14.2% เมื่อเทียบกับแบบไม่อัดแรง ทั้งนี้ การใช้ไม้ไผ่อัดประสานแบบวางตั้งร่วมกับค้ำยันคู่ จะให้ประสิทธิภาพสูงสุด เนื่องจากการวางแนวตั้งมีความแข็งแกร่งสูงกว่าและค้ำยันคู่ช่วยลดโมเมนต์ดัดในคานได้ดีกว่า ประเด็นด้านขนาดของเคเบิล Zhao และคณะ (2023) ได้ศึกษาพฤติกรรมทางกลของโครงสร้างคานเชือกไม้กลูแลม เพื่อประเมินผลกระทบของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเคเบิลที่มีต่อสมรรถนะของโครงสร้าง ผลการศึกษาพบว่าขนาดของเคเบิลส่งผลโดยตรงต่อรูปแบบการวิบัติ ซึ่งแบ่งได้เป็น 2 ลักษณะ คือ การขาดของเคเบิล (String breakage) ในกรณีที่เคเบิลมีขนาดเล็ก และการวิบัติของคานไม้ ในกรณีที่เคเบิลมีขนาดใหญ่ โดยการเพิ่มขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเคเบิลสามารถเพิ่มกำลังรับน้ำหนักสูงสุดได้ประมาณ 20.1% – 35.92% ทั้งนี้ ผู้วิจัยได้เสนอแนะเกณฑ์การออกแบบโดยให้พื้นที่หน้าตัดของเคเบิลอยู่ระหว่าง 1% – 1.5% ของพื้นที่หน้าตัดคานไม้ เพื่อให้โครงสร้างมีความปลอดภัย อย่างไรก็ตามในทางสถาปัตยกรรมการนั้นเสาลอยอาจเป็นองค์ประกอบที่ทำให้เกิดปัญหากับการปิดฝ้าเพดาน การซ่อนเสาลอยจึงทำให้มีที่ว่างใต้คานมากกว่าการยื่นเสาลอยลงมา หรือในพื้นยื่นที่มีโมเมนต์ลบไม่สามรถใช้คานขึงกลับหัวที่มีเสาลอยยื่นทะลุพื้นขึ้นมาได้ แต่องศาของเคเบิลล่างหรือความสูงของเสาลอยมีผลต่อสัดส่วน

ระหว่างแรงที่หิ้วเสาลอยและแรงดึงรั้งที่ปลายคาน หากแนวเคเบิลล่างเข้าใกล้แนวขนานกับคานจะเกิดแรงอัดตามยาวในคานมากขึ้น นอกจากนี้จำนวนเสาลอยยังทำให้เกิดความแตกต่างในการถ่ายแรงจากเคเบิลล่างที่หิ้วผ่านเสาลอยขึ้นไปค้ำพยุงคาน งานวิจัยนี้จึงทดลองหาประสิทธิภาพการรับน้ำหนักของคานขึงที่มีเสาลอยซ่อนอยู่ในคาน ที่มีแรงดึงในเคเบิลล่างก่อนบรรทุกน้ำหนักที่แตกต่างกัน และมีจำนวนเสาลอยที่แตกต่างกัน

อุปกรณ์และวิธีการ

งานวิจัยนี้ทดลองโดยการใช้หุ่นจำลองคานไม้ ยาว 400 มิลลิเมตร กว้าง 5 มิลลิเมตร ลึก 15 มิลลิเมตร มีรูปแบบคานที่ไม่เสริมเคเบิลล่าง และแบ่งตำแหน่งแทนเสาลอย 3 รูปแบบคือ แบบแบ่งเป็น 2 ช่วง 3 ช่วง และ 4 ช่วง โดยใช้ชื่อคานว่า B2 B3 และ B4 ตามลำดับด้วยการเสริมเคเบิลข้างละ 1 เส้น แสดงดัง Fig. 1

Fig. 1 Model of a timber beam, 400 millimeters long

โดยนำคานที่ไม่เสริมเคเบิลล่างมาทดลองหาน้ำหนักบรรทุกที่ทำให้เกิดการแอ่นตัว 1 ใน 360 ของช่วงพาด ซึ่งเป็นสัดส่วนการแอ่นตัวสูงสุดที่ยอมรับได้ ซึ่งมีระยะแอ่นตัวประมาณ 1 มิลลิเมตร โดยการให้น้ำหนักเป็นจุดที่กึ่งกลางคาน โดยได้ค่าเฉลี่ยน้ำหนักบรรทุกที่ 245.48 กรัม โดยใช้เป็นค่าน้ำหนักบรรทุกสูงสุดของคานแบบไม่ขึงเสริมการรับน้ำหนักด้วย และได้นำนี้มาคำนวณหาแรงดึงในเคเบิลล่างสูงสุดที่ทำให้คานโก่งตัวล่วงหน้าไม่เกิน 1 ใน 360 ของช่วงพาด โดยใช้องศาของช่วงพาดแบบแบ่งสองช่วง ซึ่งมีมุมเคเบิลล่าง 88 องศากับแนวดิ่ง ข้างละ 1 เส้น รวมเคเบิลล่างที่ต้องหิ้วจุดกึ่งกลางคาน 4 เส้น สามารถคำนวณแรงดึงเชือกได้จากแยกเวคเตอร์ แสดงดัง Fig. 2–4

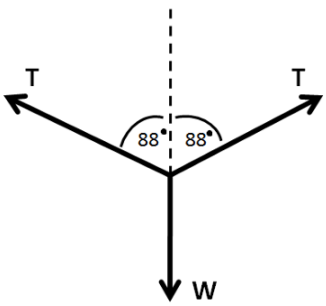


Fig. 2 Illustrating the decomposition of a vertical force vector into a tensile force.

$$4T \cos 88 = 245.48$$

$$4T\ 0.0349 = 245.48$$

$$4T = 7033.81\ g$$

$$T = 1{,}758.45\ g$$

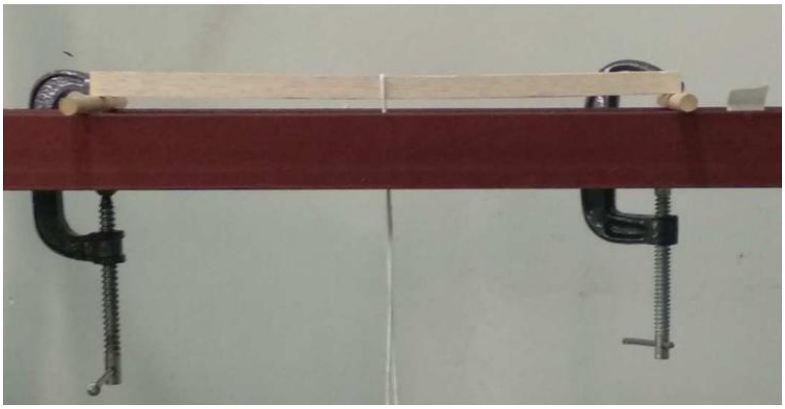


Fig. 3 Experiments on the load bearing and deformation of beam

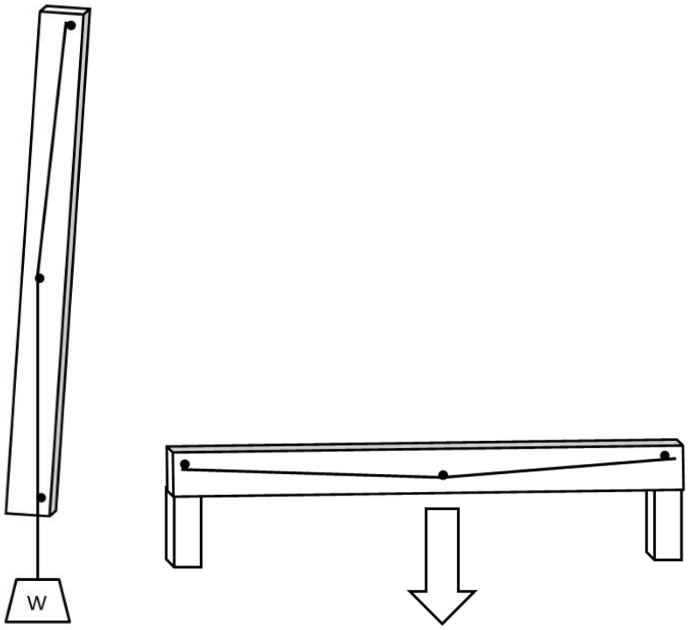


Fig. 4 Illustrating the control of rope's tension in and the loading of a beam

จึงกำหนดค่าแรงดึงสูงสุดในการทดลองเท่ากับ 1,758.45 กรัม ใช้แรงดึง 75% เท่ากับ 1,318.84 กรัม ใช้แรงดึง 50% เท่ากับ 879.23 กรัม ใช้แรงดึง 25% เท่ากับ 439.61 กรัม โดยยึดปลายเชือกด้านหนึ่งของคาน แขวนน้ำหนักตามขนาดดังกล่าวกับหุ่นจำลองคานและยึดปลายอีกด้าน ซึ่งแรงดึงที่มีความแตกต่างกันนี้กับที่มีการแบ่งช่วงเสริมเสาลอยทั้ง 3 รูปแบบ 4 ค่าแรงดึง แบบละ 5 ชุด เพื่อในการทดสอบเพื่อหาน้ำหนักบรรทุกสูงสุดก่อนการแอ่นตัว1 ใน 360 ของช่วงพาด

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

จากการทดสอบตาม Table 1–2 การรับน้ำหนักของคานขึง (Beam String Structure) ทั้ง 3 รูปแบบ โดยแปรผันค่าแรงดึง 4 ระดับ (ทดสอบระดับละ 5 ตัวอย่าง รวมทั้งหมด 60 ตัวอย่าง) พบว่า คานขึงแบบ 2 ช่วง (B2) ที่ใช้แรงดึงเคเบิล 75% ให้ค่าการรับน้ำหนักสูงที่สุดเฉลี่ย 868 กรัม คิดเป็นประสิทธิภาพ 3.536 เท่า ของคานที่ไม่ขึง ในขณะที่การใช้แรงดึง 100% ซึ่งมีการเสริมแรงมากที่สุด กลับส่งผลให้คาน B2 รับน้ำหนักได้ลดลงเหลือเพียง 696 กรัม (2.835 เท่า) ซึ่งมีสาเหตุจากการวิบัติในลักษณะการโก่งเดาะด้านข้าง (Lateral Buckling) และการพลิกตัว แตกต่างจากคานที่ใช้แรงดึงค่าอื่นๆ ที่มีลักษณะการวิบัติจากแรงดัด

เมื่อพิจารณาภาพรวมของแรงดึงในทุกรูปแบบคาน พบว่าแรงดึงที่ 75% มีประสิทธิภาพสูงสุด รองลงมาคือ 100%, 50% และ 25% ตามลำดับ และเมื่อเปรียบเทียบรูปแบบการแบ่งช่วงคาน พบว่า แบบ 2 ช่วง (B2) มีประสิทธิภาพสูงสุดโดยมีค่าเฉลี่ย 3.06 เท่า รองลงมาคือแบบ 3 ช่วง (B3) เฉลี่ย 2.62 เท่า และแบบ 4 ช่วง (B4) เฉลี่ย 2.57 เท่า ตามลำดับ แสดงดัง Fig. 5

Table. 1 Load testing results for three types of beams with different tensile strength

25%

	1	2	3	4	5	Average
B2	660	640	760	720	730	702
B3	420	540	610	550	540	532
B4	630	480	620	560	530	564

50%

	1	2	3	4	5	Average
B2	810	670	720	740	770	742
B3	700	620	600	550	530	600
B4	580	630	610	650	640	622

75%

	1	2	3	4	5	Average
B2	890	910	780	890	870	868
B3	750	760	740	800	760	762
B4	720	650	720	710	710	702

100%

	1	2	3	4	5	Average
B2	670	680	670	720	740	696
B3	670	680	720	700	640	682
B4	660	630	620	580	670	632

Table. 2 Load-bearing efficiency compared to unreinforced beams

25%

	1	2	3	4	5	Average
B2	2.69	2.61	3.10	2.93	2.97	2.86
B3	1.71	2.20	2.48	2.24	2.20	2.17
B4	2.57	1.96	2.53	2.28	2.16	2.30

50%

	1	2	3	4	5	Average
B2	3.30	2.73	2.93	3.01	3.14	3.02
B3	2.85	2.53	2.44	2.24	2.16	2.44
B4	2.36	2.57	2.48	2.65	2.61	2.53

75%

	1	2	3	4	5	Average
B2	3.63	3.71	3.18	3.63	3.54	3.54
B3	3.06	3.10	3.01	3.26	3.10	3.10
B4	2.93	2.65	2.93	2.89	2.89	2.86

100%

	1	2	3	4	5	Average
B2	2.73	2.77	2.73	2.93	3.01	2.84
B3	2.73	2.77	2.93	2.85	2.61	2.78
B4	2.69	2.57	2.53	2.36	2.73	2.57

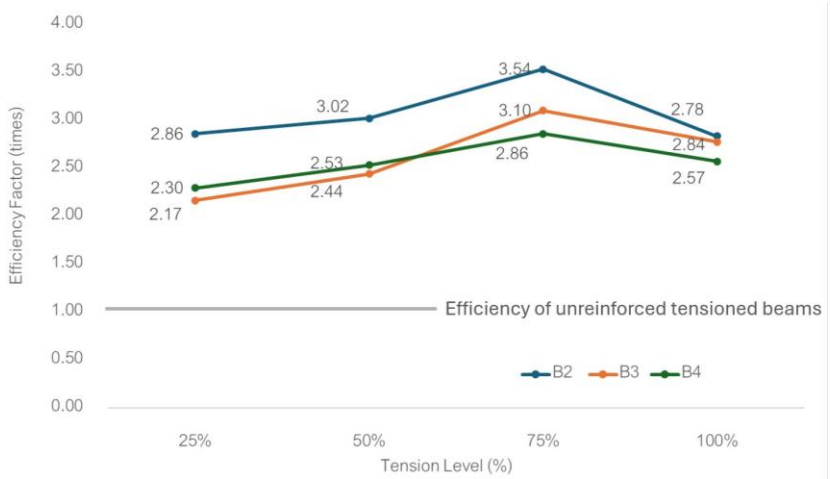


Fig. 5 A comparison of the load-bearing performance of different types of suspension beams (BSS) at varying tensile strengths.

สรุป

จากการทดสอบพบว่าประสิทธิภาพการรับน้ำหนักของคาน แปรผันตามแรงดึงในเคเบิล โดยประสิทธิภาพจะค่อยๆ เพิ่มสูงขึ้นตามลำดับจนถึงจุดสูงสุดที่ระดับ 75% ซึ่งถือเป็นจุดที่เหมาะสมที่สุด (Optimal Point) สำหรับการรับแรงในทุกรูปแบบคานอย่างไรก็ตาม เมื่อเพิ่มแรงดึงต่อไปจนถึงระดับ 100% ประสิทธิภาพกลับลดต่ำลงอย่างมีนัยสำคัญ โดยเฉพาะในคานแบบ 2 ช่วง (B2) สาเหตุเกิดจากมุมของเคเบิลที่เข้าใกล้แนวราบ ทำให้แรงอัดตามยาว สู่คานส่งผลเกิดการวิบัติแบบ โก่งเดาะด้านข้าง (Lateral Buckling) และพลิกตัวก่อนที่จะรับน้ำหนักได้เต็มที่ ปัญหาดังกล่าวอาจแก้ไขด้วยการออกแบบรูปร่าง หรือเสริมคานช่วงกลาง หรือพัฒนาเสาลอยคู่แบบเอียงกางออกด้านข้าง เพื่อให้เคเบิลช่วยสร้างแรงต้านทานการโก่งเดาะด้านข้างและเพิ่มเสถียรภาพให้กับคาน นอกจากนี้ รูปแบบการแบ่งช่วงกับลักษณะโหลด การที่คานแบบ 2 ช่วง (B2) มีประสิทธิภาพสูงสุด สอดคล้องกับการทดสอบแบบ โหลดจุดเดียวที่กึ่งกลาง (Point Load) ซึ่งตรงกับตำแหน่งการค้ำของเสาลอยพอดี ทำให้ถ่ายแรงได้เต็มที่ หากเป็นการใช้งานจริงที่รับแรงแบบแผ่กระจาย (Uniform Load) คานที่แบ่งช่วงถี่ขึ้น (3 หรือ 4 ช่วง) อาจมีประสิทธิภาพสูงกว่าการทดลอง เช่นเดียวกับการทด Hua และคณะ (2025) ที่ใช้เสาลอยสองต้นตรงตามตำแหน่งการโหลดน้ำหนัด 2 จุด จึงเป็นประเด็นที่ควรเปรียบเทียบในการศึกษาต่อไป

เอกสารอ้างอิง

Feldmann, G.C. 2005. Fallingwater is no longer falling. Struct. Mag.: 46–50.

Hua, Z., Ding, M., Lin, Y., Wei, Y. 2025. Experimental analysis and theoretical study on the short-term bending performance of prestressed glued laminated bamboo string beams. Structures 82: 110556.

Liu, H., Ma, C., Ying, J., Guo, L., Chen, Z. 2024. Mechanical performance and design of aluminium alloy beam string structures. Thin-Walled Struct. 199: 111798.

Zhao, J., Liu, H., Chen, Z., Zhao, S., Yang, S., He, F. 2023. Investigation on the mechanical behavior of glulam beam string. Structures 52: 582–597.

Zhao, X., Yan, S., Xu, Z., Wu, A. 2015. Research and application of beam string structures. Struct. Eng. Int. 25: 26–32.

สาขาอุตสาหกรรมเกษตร

(Subject: Agro-Industry)

ภาคบรรยาย

(Oral Presentation)

การศึกษาเปรียบเทียบเทคนิคการทำแห้งด้วยลมร้อนและการทำแห้งด้วยคลื่นวิทยุต่อคุณภาพและโครงสร้างจุลภาคของผงไข่ผำ

Comparative study of hot air and radio frequency drying techniques on the quality and microstructure of Wolffia (*Wolffia arrhiza L.*) powder

ชนิตดา ปราบพาล, อรัญญา พรหมกูล, อาภัสสร ศิริจริยวัตร*

Chanitda Prabpal, Arunya Prommakool, Arpassorn Sirijariyawat*

ภาควิชาเทคโนโลยีการอาหารและโภชนาการ คณะทรัพยากรธรรมชาติและอุตสาหกรรมเกษตร
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตเฉลิมพระเกียรติจังหวัดสกลนคร สกลนคร 47000

Department of Food Technology and Nutrition, Faculty of Natural Resources and Agro-Industry, Kasetsart University, Chalermphrakiat Sakon Nakhon Province Campus, Sakon Nakhon 47000, Thailand

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

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อเปรียบเทียบผลของการทำแห้งแบบลมร้อน (HD) ที่อุณหภูมิ 60 °C และการทำแห้งด้วยคลื่นวิทยุ (RF) ที่ความถี่ 27.12 MHz ต่อสมบัติทางเคมีกายภาพและโครงสร้างจุลภาคของผงไข่ผำ ผลการศึกษาพบว่าผงไข่ผำจากวิธี RF มีปริมาณโปรตีนสูงกว่าวิธี HD อย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) ที่ร้อยละ 24.73 และ 23.64 ตามลำดับ อย่างไรก็ตามวิธี HD สามารถรักษาสีและปริมาณคลอโรฟิลล์ทั้งหมดได้ดีกว่าอย่างมีนัยสำคัญ (6.70 mg/g) เมื่อเทียบกับวิธี RF (5.79 mg/g) การวิเคราะห์ด้วย SEM พบว่าผงไข่ผำจากวิธี HD มีลักษณะยุบตัวสูงและเนื้อสัมผัสแน่นทึบ ส่วนวิธี RF เกิดการพองตัว โครงสร้างโปร่งและมีรูพรุน โดยทั้งสองวิธีให้วอเตอร์แอ็กทิวิตี (a_w) ต่ำกว่า 0.3 และปริมาณความชื้นต่ำกว่า 10 % วิธี RF ใช้เวลาในทำแห้งน้อยกว่าวิธี HD อย่างมาก (60 นาทีและ 8 ชั่วโมงตามลำดับ) สรุปได้ว่าการทำแห้งวิธี RF เป็นทางเลือกที่มีศักยภาพในการผลิตผงไข่ผำโปรตีนสูงที่มีโครงสร้างโปร่ง ซึ่งอาจส่งผลดีต่อสมบัติการคืนตัวและการละลายที่ดีกว่า

คำสำคัญ: การทำแห้ง, ไข่ผำ, คลื่นวิทยุ, คุณภาพ, ลมร้อน

Abstract

This research aims to compare the effects of hot air drying (HD) at 60 °C and radio frequency (RF) drying at 27.12 MHz on the physicochemical and microstructural properties of Wolffia powder. The study found that Wolffia powder produced by the RF method had significantly higher protein content ($p < 0.05$) than the HD method, with 24.73% and 23.64%, respectively. However, the HD method was significantly better at retaining total chlorophyll content (6.70 mg/g) compared to the RF method (5.79 mg/g). SEM analysis revealed that Wolffia powder from the HD method had a high degree of collapse and a dense, solid texture, while the RF method resulted in swelling and a porous, open structure. Both methods yielded water activity (aw) values below 0.3 and moisture content below 10%. The RF method required significantly less drying time than the HD method (60 minutes and 8 hours, respectively). In conclusion, the RF drying method is a potential alternative for producing high-protein Wolffia powder with an open structure, which may result in better rehydration and solubility properties.

Keywords: Drying, Hot air, Quality, Radio frequency, *Wolffia arrhiza L.*

คำนำ

ปัจจุบันโปรตีนจากพืช (Plant-based Protein) กำลังเป็นที่นิยมอย่างมากในฐานะทางเลือกแทนโปรตีนจากสัตว์ เนื่องจากโปรตีนจากพืชมีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมน้อยกว่าและมีประสิทธิภาพการใช้ทรัพยากรที่สูงกว่าในด้านการใช้น้ำและพื้นที่เพาะปลูก จึงเป็นส่วนสำคัญในการแก้ปัญหาการขาดแคลนอาหารในอนาคต นอกจากนี้การศึกษาโปรตีนจากพืชน้ำ เช่น ไข่ผำ ยังคาดว่าจะให้ประโยชน์ต่อสุขภาพในหลายด้านทั้งปริมาณโปรตีน ฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระจากสารกลุ่มฟีนอลิกและฟลาโวนอยด์ (On-Nom et al., 2023)

ไข่ผำ (*Wolffia arrhiza L.*) มีชื่อเรียกแตกต่างกันไปตามภูมิภาค เช่น ไข่ผำ ไข่น้ำ ไข่แหน หรือลูกผำ ไข่ผำจัดเป็นพืชดอกมีลักษณะเป็นเม็ดกลมรี ขนาดของดอกเล็กที่สุดในโลก ไม่มีใบและไม่มีราก ขนาดประมาณ 0.1–0.2 มิลลิเมตร และมีฟองอากาศแทรกอยู่ตรงกลาง จึงลอยอยู่บนผิวน้ำ โดยมีปริมาณโปรตีนสูงถึงร้อยละ 40 ของน้ำหนักแห้ง ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับสภาพแวดล้อมของแหล่งเพาะปลูก (กุลพร และ วริศชนม์, 2564) คุณค่าทางโภชนาการในไข่ผำสด 100 กรัม ให้พลังงาน 9 กิโลแคลอรี โปรตีน 0.6 กรัม ไขมัน 0.1 กรัม เส้นใย 0.3 กรัม คาร์โบไฮเดรต 1.5 กรัม ฟอสฟอรัส 25 มิลลิกรัม แคลเซียม 59 มิลลิกรัม เหล็ก 6.6 มิลลิกรัม ไอโอดีน 9 ไมโครกรัม วิตามินเอ 535 มิลลิกรัม และวิตามินซี 11 มิลลิกรัม (กรมอนามัย, 2544) โปรตีนจากไข่ผำจัดเป็นโปรตีนคุณภาพสูงที่มีกรดแอมิโนครบถ้วน ซึ่งถือเป็นคุณสมบัติที่โดดเด่นเมื่อเทียบกับโปรตีนจากพืชทั่วไป (Appenroth et al., 2017) ไข่ผำสดมีข้อจำกัดในด้านการขนส่งและการเก็บรักษา เนื่องจากมีปริมาณน้ำสูงและเน่าเสียง่าย ดังนั้น เทคโนโลยีการทำแห้งจึงเข้ามามีบทบาทสำคัญในการยืดอายุการเก็บรักษา เพื่อยับยั้งการเติบโตของจุลินทรีย์และการทำงานของเอนไซม์ (Nowak and Jakubczyk, 2020)

ในปัจจุบันการทำแห้งด้วยลมร้อนเป็นวิธีที่นิยมเนื่องจากมีต้นทุนต่ำและสามารถนำไปใช้กับผลิตภัณฑ์ได้หลากหลายชนิด โดยอาศัยหลักการถ่ายเทความร้อนแบบการพาความร้อนไปยังผิวหน้าผลิตภัณฑ์เพื่อระเหยน้ำ (Huang et al., 2024) แม้จะมีข้อดีด้านต้นทุนต่ำ ขั้นตอนการทำงานที่ง่ายและไม่ซับซ้อน แต่มีข้อจำกัดสำคัญ คือ อัตราการทำแห้งที่ช้า ส่งผลต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์ลดลง เช่น สี กลิ่น รสชาติ และเนื้อสัมผัส (Zhang et al., 2023) ในขณะที่การให้ความร้อนด้วยคลื่นวิทยุ ให้ความร้อนอย่างรวดเร็วและสม่ำเสมอ โดยคลื่นวิทยุถูกส่งไปยังผลิตภัณฑ์ทำให้โมเลกุลของน้ำหมุนกลับไปกลับมาและประจุในผลิตภัณฑ์เคลื่อนที่ไปกลับอย่างรวดเร็ว เสียดสีกันส่งผลให้เกิดความร้อนอย่างรวดเร็วทำให้น้ำในผลิตภัณฑ์ระเหยกลายเป็นไออย่างรวดเร็ว (Zhou and Wang, 2019; Luo, et al., 2024) ซึ่งช่วยแก้ปัญหาเรื่องระยะเวลาการทำแห้งที่ยาวนานได้ แต่อาจมีข้อจำกัดด้านต้นทุนและการควบคุมอุณหภูมิที่แม่นยำเพื่อป้องกันการไหม้ของผลิตภัณฑ์

ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นเพื่อศึกษาการทำแห้งไข่ผำด้วยการทำแห้งด้วยลมร้อนเปรียบเทียบกับวิธีการให้ความร้อนด้วยคลื่นวิทยุ โดยเปรียบเทียบสมบัติทางเคมีและกายภาพของไข่ผำในแต่ละกระบวนการทำแห้ง

อุปกรณ์และวิธีการ

วัตถุดิบ

ไข่ผำสด ซึ่งมีปริมาณความชื้นเริ่มต้นร้อยละ 94 จากฟาร์มเกษตรกร อำเภอสมเด็จ จังหวัดกาฬสินธุ์ แสดงใน Fig. 1

Fig. 1 Preparing fresh Wolffia.

วิธีการ

นำไข่ผำสดล้างด้วยน้ำสะอาดแล้วทำการชั่งน้ำหนักเริ่มต้นก่อนนำไปทำแห้ง โดยออกแบบการทดลองการทำแห้งไข่ผำออกเป็น 2 แบบ คือ การทำแห้งด้วยลมร้อนที่อุณหภูมิ 60 °C เกลี่ยไข่ผำลงบนถาดสแตนเลสควบคุมความหนาของไข่ผำที่ 1 ซม.ในปริมาณไข่ผำ 800 กรัมต่อครั้ง และการทำแห้งด้วยคลื่นวิทยุ กำลังไฟฟ้า 6 kW ความถี่ 27.12 MHz ที่ช่องว่างอิเล็กโทรด 8 cm. เกลี่ยไข่ผำวางบนถาดไม่มีการเคลื่อนที่ควบคุมความหนาของไข่ผำที่ 1 ซม.ปริมาณไข่ผำ 200 กรัมต่อครั้ง อุณหภูมิของไข่ผำอยู่ระหว่าง 68–72 °C โดยสภาวะการทำแห้งอ้างอิงจากงานวิจัยของ Jiao et al., 2025 ดังแสดงใน Fig. 2 จนกระทั่งตัวอย่างมีความชื้นต่ำกว่า 10% w.b. จากนั้นนำตัวอย่างมาบด และร่อนผ่านตะแกรงขนาด 100 เมซ ได้เป็นผงไข่ผำ เก็บในถุงอลูมิเนียมฟอยส์ที่อุณหภูมิ -20 °C เพื่อป้องกันการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบทางเคมีและชะลอการเสื่อมสลายของสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพ ทำการทดลอง 2 ซ้ำ

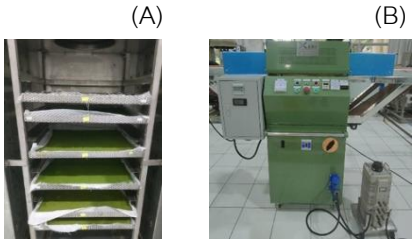


Fig. 2 Experimental setup for (A) hot air drying and (B) radio frequency drying

การวิเคราะห์คุณภาพทางกายภาพและเคมี

การวิเคราะห์ค่าสีด้วยเครื่อง Hunter Lab (รุ่น Color Flex EZ, Color Global, สหรัฐอเมริกา) รายงานค่าสีในระบบ CIE L* a* b* ทำโดยการเตรียมตัวอย่างที่เป็นผง นำมาใส่ในภาชนะ และทำการวัดค่า L*, a* และ b* บันทึกค่าที่ได้

การวิเคราะห์หาปริมาณโปรตีนรวม โดยวิธี Kjeldahl Method (A.O.A.C., 2000) โดยชั่งตัวอย่าง 2 กรัม ลงในหลอดเคลดาห์ล เติมสารเร่งปฏิกิริยา 8 กรัม และกรดซัลฟูริกเข้มข้น 25 มิลลิลิตร นำเข้าชุดย่อยโปรตีนจนกระทั่งสารละลายใสและปล่อยให้สารละลายเย็นลงที่อุณหภูมิห้อง จากนั้นนำไปต่อกับชุดกลั่นโปรตีน โดยนำขวดแก้วรูปชมพู่ที่มีกรดบอริก 50 มิลลิลิตร หยดอินดิเคเตอร์ลงไป 3–5 หยด ทำการกลั่นตัวอย่าง นำสารละลายที่กลั่นได้ไปไตเตรทกับกรดซัลฟูริกความเข้มข้น 0.1 นอร์มอล จนสังเกตเห็นสีชมพูปรากฏขึ้นและคำนวณหาปริมาณโปรตีนดังนี้ (Equation 1–2):

$$(\%)Nitrogen = \frac{(V_1 - V_2) \times 0.1 \times 14.007}{W \times 10} \quad (1)$$

$$(\%)Crude\ Protein = \%Nitrogen \times 6.25 \quad (2)$$

Where: V_1 = Volume of sulfuric acid used to titrate the sample (milliliters); V_2 = Volume of sulfuric acid used to titrate the blank (milliliters); W = Sample weight (grams); 6.25 = Conversion factor

การวิเคราะห์หาปริมาณความชื้น โดยวิธี Hot Air Oven Method (A.O.A.C., 2000) โดยอบ Moisture Can และฝาด้วยตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 105 °C เป็นเวลา 3 ชั่วโมง แล้วปล่อยให้เย็นในโถดูดความชื้น แล้วชั่ง Moisture Can และฝาชั่งตัวอย่างประมาณ 3 กรัม ใส่ Moisture Can ที่เตรียมไว้แล้วเกลี่ยตัวอย่างให้กระจายอย่างสม่ำเสมอนำไปอบในเตาที่อุณหภูมิ 105 °C จนแห้ง หลังจากอบแห้งแล้ว ให้นำ Moisture Can และฝาไปพักให้เย็นในโถดูดความชื้นเป็นเวลา 30 นาที จากนั้นชั่งน้ำหนักและบันทึกน้ำหนักของตัวอย่าง แล้วอบซ้ำครั้งละ 30 นาที จนน้ำหนักตัวอย่างคงที่ คำนวณปริมาณความชื้นตามสูตร (Equation 3):

$$Moisture\ content(\%) = \frac{(W_1 - W_2) \times 100}{W_1} \quad (3)$$

Where: W_1 = Weight of the sample before drying (grams); W_2 = Weight of the sample after drying (grams)

การวิเคราะห์ปริมาณคลอโรฟิลล์ทั้งหมด (Total Chlorophyll Content: TCC) ในตัวอย่างไข่ผำแห้ง ดัดแปลงจากงานวิจัยของ Prosridee et al. (2023) โดยใช้เทคนิคการวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ นำตัวอย่างไข่ผำแห้งที่ผ่านการบดและร่อนผ่านตะแกรงขนาด 100 เมชจำนวน 0.05 กรัม ใส่ลงในหลอดปั่นเหวี่ยงขนาด 50 มิลลิลิตร เติมสารละลายอะซีโตน 85% จำนวน 10 มิลลิลิตร และแมกนีเซียมคาร์บอเนต 0.1 กรัม จากนั้นปั่นเหวี่ยงส่วนผสมที่ความเร็ว 10,000 ×g เป็นเวลา 10 นาที ที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียสหลังการปั่นเหวี่ยง ปรับปริมาตรของสารละลายที่ได้ให้เท่ากับ 25 มิลลิลิตร โดยใช้อะซีโตน 85% แล้วนำสารสกัดไปวิเคราะห์ด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ เพื่อวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 645 และ 663 นาโนเมตร คำนวณปริมาณคลอโรฟิลล์ทั้งหมดคำนวณจากสมการต่อไปนี้ (Equation 4–6)การรายงานผลการวิเคราะห์ในรูปของปริมาณคลอโรฟิลล์ทั้งหมด หน่วยเป็นมิลลิกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้งของตัวอย่าง (mg/g dry weight)

$$Chlorophyll\ a\ (mg\ /\ g) = \frac{[12.7 \times A663 - 2.69 \times A645] \times V}{1000 \times W} \quad (4)$$

$$Chlorophyll\ b\ (mg\ /\ g) = \frac{[22.9 \times A645 - 4.68 \times A663] \times V}{1000 \times W} \quad (5)$$

$$Total\ Chlorophyll\ \ (mg\ /\ g) = Chlorophyll\ a + Chlorophyll\ b \quad (6)$$

Where: $A645$ = Absorbance measured at a wavelength of 645 nanometers; $A663$ = Absorbance measured at a wavelength of 663 nanometers; V = Total extract volume (25 milliliters); W = Weight of dry sample used (0.05 grams)

การวิเคราะห์ปริมาณฟลาโวนอยด์ Total Flavonoid Content (TFC) การวัดค่าความเข้มข้นของสารฟลาโวนอยด์สกัดได้จากไข่ผำอบแห้ง จะเป็นการวัดค่าความเข้มข้นของสารฟลาโวนอยด์ทั้งหมด ดัดแปลงวิธีการจาก ภาชณุมาศ (2562) สารสกัดไข่ผำ 2.5 มิลลิลิตรผสมกับ 150 ไมโครลิตร ของสารละลายโซเดียมไนไตรความเข้มข้นร้อยละ 5 (%w/v) ตั้งทิ้งไว้ 5 นาที เติมสารละลายอลูมิเนียมคลอไรด์ ($AlCl_3$) ความเข้มข้นร้อยละ 10 (%w/v) ปริมาตร 150 ไมโครลิตร ตั้งทิ้งไว้เพื่อทำปฏิกิริยา 1 นาที เติม 1 มิลลิลิตรของ 1 *M* NaOH วัดการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 510 นาโนเมตร โดย UV-vis spectrophotometer บันทึกผลและเปรียบเทียบผลกับสารละลายมาตรฐาน Quercertin

การวัดค่าวอเตอร์แอ็กทิวิตี(Water activity; a_w) ของตัวอย่างโดยใช้ Water activity meter (รุ่น Aw SPRINT TH-500, Novasina, สวิสเซอร์แลนด์) บันทึกค่าที่ได้

การศึกษาโครงสร้างของตัวอย่างไข่ผำอบแห้งด้วยกล้อง Scanning electron microscope (SEM)

นำตัวอย่างไข่ผำอบแห้ง วิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) (JEOL รุ่น JSM-IT500 InTouchScope, ญี่ปุ่น) ติดตัวอย่างบนแท่นอลูมิเนียม (stub) จากนั้นเคลือบด้วยทองคำแล้วนำเข้าเครื่อง SEM ถ่ายภาพด้วยที่แรงดันไฟฟ้า 5 กิโลโวลต์ ที่กำลังขยาย 1,000 เท่า (Özbek, 2021)

การวิเคราะห์ทางสถิติ

ทำการทดลอง 2 ซ้ำ ผลลัพธ์แสดงเป็นค่าเฉลี่ย ± ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (SD) โดยใช้โปรแกรม SPSS ในการวิเคราะห์ความแตกต่างทางสถิติ โดยใช้ t-test ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

สมบัติทางกายภาพและเคมีของไข่ผำอบแห้ง Table 1 แสดงค่าสี จากการทดลองแสดงให้เห็นความสัมพันธ์โดยตรงระหว่างค่าสีและปริมาณคลอโรฟิลล์ (Table 2) โดยพบว่าการทำแห้งด้วยลมร้อน มีประสิทธิภาพในการรักษาความเป็นสีเขียว (-a*) และความสว่าง (L*) ที่สูงกว่าการทำแห้งด้วยคลื่นวิทยุ อย่างมีนัยสำคัญ (Fig. 3) สอดคล้องกับผลวิเคราะห์ปริมาณคลอโรฟิลล์รวมที่พบว่าการทำแห้งด้วยลมร้อน สามารถคงปริมาณคลอโรฟิลล์ได้สูงถึง 6.70 mg/g ในขณะที่การทำแห้งด้วยคลื่นวิทยุมีปริมาณคลอโรฟิลล์ลดลงเหลือ 5.79 mg/g ซึ่งต่ำกว่าอย่างมีนัยสำคัญ (Table 2) ซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษาของ Thamkaew et al. (2021) ที่พบว่าการอบแห้งด้วยคลื่นวิทยุมีอัตราการอบแห้งที่รวดเร็วกว่าการอบแห้งด้วยลมร้อนที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส อย่างไรก็ตามผักชีลาวที่อบแห้งด้วยคลื่นวิทยุมีปริมาณคลอโรฟิลล์ต่ำกว่าการอบแห้งด้วยลมร้อน คลอโรฟิลล์หลักที่พบในพืช คือ คลอโรฟิลล์ เอ ซึ่งให้สีน้ำเงิน-เขียว และคลอโรฟิลล์ บี ซึ่งให้สีเหลือง-เขียว โดยมีอัตราส่วนคลอโรฟิลล์เอ:คลอโรฟิลล์บี 3:1 คลอโรฟิลล์ เอ มีความคงตัวต่ำในระหว่างการทำแห้ง ความร้อนจะเร่งปฏิกิริยาการแทนที่แมกนีเซียมไอออน (Mg^{2+}) ที่วงแหวนพอร์ไฟรินของคลอโรฟิลล์ด้วยไฮโดรเจน ทำให้คลอโรฟิลล์ที่มีสีเขียวสดเปลี่ยนรูปไปเป็นฟีโอไฟตินซึ่งมีสีเขียวมะกอกหรือสีน้ำตาล โดยคลอโรฟิลล์ เอ มีความคงตัวน้อยกว่าคลอโรฟิลล์ บี ดังนั้นจึงเกิดการสูญเสียในระหว่างการทำแห้งมากกว่าคลอโรฟิลล์ บี (Sledz and Witrowa-Rajchert, 2012) Sledz and Witrowa-Rajchert (2012) ศึกษาการทำแห้งผักหลายชนิดด้วยคลื่นไมโครเวฟ และได้รายงานว่าปริมาณคลอโรฟิลล์ เอ ในผักแห้งมีสัมพันธ์อย่างมากในทิศทางตรงข้ามกับค่าสี a*

ระยะเวลาการทำแห้งด้วยคลื่นวิทยุ สามารถลดระยะเวลาการทำแห้งลงได้อย่างมีนัยสำคัญ โดยใช้เวลาเพียง 60 นาที ในการลดปริมาณความชื้นของไข่ผำลงสู่เป้าหมายที่ต่ำกว่า 10% (w.b.) ซึ่งเร็วกว่าการทำแห้งด้วยลมร้อนที่ต้องใช้เวลาถึง 8 ชั่วโมง (480 นาที) ถึง 8 เท่า สอดคล้องกับงานวิจัยของ Huang et al. (2024) ที่รายงานการลดเวลาลงได้ถึง 10 เท่า ในการทำแห้งกากถั่วดำหมัก การทำแห้งด้วยคลื่นวิทยุมีประสิทธิภาพมากกว่าการทำแห้งด้วยลมร้อน และสามารถลดระยะเวลาการทำแห้งได้ถึง 90% เนื่องจากกลไกการให้ความร้อนที่มีอัตราสูงและกระจายตัวสม่ำเสมอทั่วทั้งชิ้นอาหาร

Table 1 The color and drying time of the Wolffia powder dried by hot air drying and radio frequency drying methods.

Property	Drying method	
	Hot Air Drying (HD)	Radio Frequency Drying (RF)
L*	54.84±0.50[a]	50.19±1.25[b]
a*	-10.05±0.40[a]	-8.51±0.37[b]
b*	36.46±0.45[a]	35.35±0.95[b]
Drying Time	8 hours	60 minutes

Values are expressed as mean ± standard deviation (n = 2). Means indicated by different letters are significantly different ($p < 0.05$)

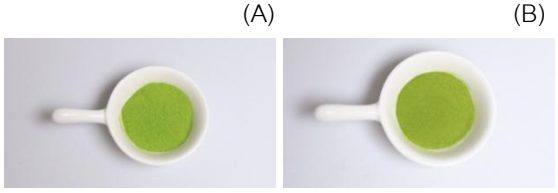


Fig. 3 Color of (A) hot air dried Wolffia powder and (B) radio frequency dried Wolffia powder.

จากผลการทดลอง Table 2 พบว่าปริมาณโปรตีนผงไข่ผำที่ผ่านการทำแห้งด้วยคลื่นวิทยุมีปริมาณโปรตีนร้อยละ 24.73 ซึ่งสูงกว่าการทำแห้งด้วยลมร้อน (ร้อยละ 23.64) อย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) Prosridee et al. (2023) รายงานว่าการทำแห้งไข่ผำที่สภาวะเหมาะสมช่วยรักษาปริมาณโปรตีนในไข่ผำได้ การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิและเวลาส่งผลให้ปริมาณโปรตีนลดลง กัญญาวีย์ และคณะ (2564) ศึกษาการทำแห้งโปรตีนผงจากถั่วเหลืองด้วยตู้อบลมร้อนและเครื่องทำแห้งแบบพ่นฝอย รายงานว่าตัวอย่างที่ผ่านการทำแห้งแบบพ่นฝอยมีปริมาณโปรตีนมากกว่าการทำแห้งด้วยลมร้อน เนื่องจากการทำแห้งด้วยลมร้อนใช้เวลานานกว่าจึงเกิดการสูญเสียโปรตีนมากกว่า โดยในระหว่างการทำแห้งนั้นอาจทำให้เกิดการเสียสภาพของโปรตีนและเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชั่นของกรดแอมิโนบางชนิด โดยมีความร้อนและแสงเป็นสารเร่งปฏิกิริยา (วิชมณี และคณะ, 2560) การเสียสภาพของโปรตีนทำให้การละลายของโปรตีนลดลงส่งผลให้ปริมาณโปรตีนที่สกัดได้มีค่าลดลง (Xu et al., 2017) ดังนั้นหากตัวอย่างอยู่ในสภาวะการทำแห้งที่มีอุณภูมิสูงเป็นระยะเวลานาน จะส่งผลให้ปริมาณโปรตีนในตัวอย่างลดลงมากกว่าสภาวะการทำแห้งที่อุณหภูมิสูงแต่เวลาสั้นกว่า ซึ่งการศึกษาในครั้งนี้อุณหภูมิในการทำแห้งด้วยคลื่นวิทยุอยู่ระหว่าง 68–72 °C แม้ว่าจะมีอุณหภูมิสูงกว่าการทำแห้งด้วยลมร้อนที่อุณหภูมิ 60 °C แต่พบว่ามีระยะเวลาในการทำแห้งที่แตกต่างกันอย่างมาก โดยมีระยะเวลาการทำแห้งลดลงจาก 480 นาที เหลือเพียง 60 นาที

สำหรับค่าวอเตอร์แอ็กทิวิตีและปริมาณความชื้น พบว่า การทำแห้งทั้งสองวิธีสามารถลดปริมาณความชื้นและค่าวอเตอร์แอ็กทิวิตี (a_w) ให้อยู่ในเกณฑ์มาตรฐานผลิตภัณฑ์อาหารแห้ง โดยการทำแห้งด้วยลมร้อนให้ค่า a_w ที่ 0.27 และการทำแห้งด้วยคลื่นวิทยุให้ค่า a_w ที่ 0.28 ซึ่งต่ำกว่า 0.60 แสดงถึงความปลอดภัยในการยับยั้งการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ก่อโรคและรา แม้ว่าการทำแห้งด้วยคลื่นวิทยุจะใช้เวลาสั้นกว่ามากแต่สามารถลดค่า a_w ได้ใกล้เคียงกับการทำแห้งด้วยลมร้อน เนื่องจากกลไกการให้ความร้อนของคลื่นวิทยุทำให้โมเลกุลน้ำภายในอาหารเกิดการสั่นสะเทือนและระเหยออกมาได้อย่างรวดเร็ว ในขณะที่การทำแห้งด้วยลมร้อนอาศัยการนำความร้อนจากผิวสู่แกนกลางซึ่งต้องใช้เวลานานกว่าในการดึงน้ำออกจากโครงสร้างภายใน

Table 2 The chemical quality of the Wolffia powder dried by hot air drying and radio frequency heating methods.

Property	Drying method	
	Hot Air Drying (HD)	Radio Frequency Drying (RF)
Water activity (a_w)	0.27±0.00[b]	0.28±0.02[a]
Moisture Content (%)	5.82±0.32[b]	6.06±0.53[a]
Protein (g/ 100 g dw)	23.64±0.95[b]	24.73±0.00[a]
Total flavonoid content (mg Quercetin/100 g dw)	24.98±3.60[a]	18.71±0.18[b]
Chlorophyll Content (mg/g dw)		
Chlorophyll a	4.78±0.73[a]	4.12±0.19[b]
Chlorophyll b	1.93±0.27[a]	1.67±0.07[b]
Total chlorophyll	6.70±0.99 [a]	5.79±0.26[b]

Values are expressed as mean ± standard deviation ($n = 2$). Means indicated by different letters are significantly different ($p < 0.05$)

จากการเปรียบเทียบผลของวิธีการทำแห้งต่อปริมาณสารฟลาโวนอยด์ทั้งหมดในไข่ผำ พบว่าการทำแห้งด้วยลมร้อนให้ปริมาณฟลาโวนอยด์เท่ากับ 24.98 mg QE/g ในขณะที่การทำแห้งด้วยคลื่นวิทยุมีปริมาณฟลาโวนอยด์ ลดลงอย่างมีนัยสำคัญ โดยมีค่าเท่ากับ 18.71 mg QE/g ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าปริมาณสารสำคัญลดลงในการทำแห้งคลื่นวิทยุนี้ สอดคล้องกับการศึกษาผลของการทำแห้งแบบคลื่นวิทยุในกากถั่วดำหมักของ Huang et al. (2024) ซึ่งพบว่าการทำแห้งด้วยคลื่นวิทยุส่งผลให้ฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระลดลง โดยอาจเกิดจากการเสื่อมสลายของสารประกอบทางชีวภาพเนื่องจากความร้อนที่เกิดขึ้นระหว่างกระบวนการ ส่งผลให้สารต้านอนุมูลอิสระที่ไม่ทนต่อความร้อนเกิดการสลายตัว ในการศึกษาการทำแห้งไข่ผำความร้อนจากการทำแห้งด้วยคลื่นวิทยุอาจส่งผลกระทบต่อความคงตัวของสารกลุ่มฟลาโวนอยด์มากกว่าการทำแห้งด้วยลมร้อน ส่งผลให้ปริมาณสารที่วิเคราะห์ได้มีค่าลดลง

จากการศึกษาโครงสร้างจุลภาคของผงไข่ผำที่ทำแห้งด้วยลมร้อนและทำแห้งด้วยคลื่นวิทยุด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ที่กำลังขยาย 1,000 เท่า ดังแสดงใน Fig. 4 การทำแห้งด้วยลมร้อน โครงสร้างของผงไข่ผำมีการอัดแน่น และมีโครงสร้างเซลล์ที่ยุบตัว เนื่องจากการกำจัดน้ำทำให้แรงดันภายในเซลล์ลดลง ส่งผลให้ผนังเซลล์ยุบตัว (Fig. 4A) ลักษณะโครงสร้างที่แน่นทึบนี้มักส่งผลให้การคืนตัวหรือการละลายน้ำทำได้ยากขึ้น อาจเนื่องมาจากการกำจัดความชื้นที่ช้ากว่าและอัตราการกำจัดน้ำออกที่ต่ำกว่าซึ่งเกิดจากการยุบตัว (Özbek, 2021) และการทำแห้งด้วยคลื่นวิทยุแสดงลักษณะโครงสร้างที่โปร่งและพบการยุบตัวน้อยกว่า (Fig. 4B)

(A) (B)

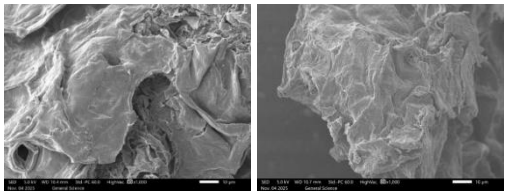


Fig. 4 SEM image of Wolffia powders obtained by HD (A) and RF (B) 1,000 times magnification

สรุป

การศึกษาเปรียบเทียบผลของการทำแห้งด้วยลมร้อนและการทำแห้งด้วยคลื่นวิทยุที่มีต่อคุณภาพของผงไข่ผำ พบว่าการทำแห้งทั้งสองวิธีส่งผลต่อสมบัติทางเคมีกายภาพและโครงสร้างจุลภาคที่แตกต่างกัน การทำแห้งด้วยลมร้อนมีประสิทธิภาพสูงสุดในการรักษาคุณภาพสี ปริมาณฟลาโวนอยด์และปริมาณคลอโรฟิลล์ เนื่องจากความร้อนจากการพาความร้อนช่วยชะลอการสลายตัวของสารสีได้ดี แต่ส่งผลให้โครงสร้างจุลภาคเกิดการยุบตัว ในขณะที่การทำแห้งด้วยคลื่นวิทยุมีศักยภาพในด้านการรักษาปริมาณโปรตีนและโครงสร้าง โดยพบปริมาณโปรตีนสูงกว่าอย่างมีนัยสำคัญ (ร้อยละ 24.73) ซึ่งเป็นผลมาจากกลไกการให้ความร้อนเชิงปริมาตรรวดเร็ว ช่วยลดระยะเวลาที่โปรตีนสัมผัสความร้อน นอกจากนี้ยังทำให้เกิดการพองตัว มีโครงสร้างที่โปร่ง และสามารถลดระยะเวลาการทำแห้งลงได้ถึง 8 เท่า (จาก 480 เหลือ 60 นาที) ดังนั้น การเลือกใช้วิธีการทำแห้งขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์การใช้งาน การทำแห้งด้วยลมร้อนเหมาะสำหรับผลิตภัณฑ์ เบเกอรีที่เน้นสีเขียวธรรมชาติ ในขณะที่การทำแห้งด้วยคลื่นวิทยุมีประสิทธิภาพสูงสุดสำหรับเครื่องดื่มที่ต้องการโปรตีนสูง

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัย ขอขอบคุณคณะทรัพยากรธรรมชาติและอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตเฉลิมพระเกียรติจังหวัดสกลนคร ที่ให้ทุนสนับสนุนการวิจัยในครั้งนี้

เอกสารอ้างอิง

กรมอนามัย. 2544. ตารางแสดงคุณค่าทางโภชนาการของอาหารไทย. โรงพิมพ์องค์การทหารผ่านศึก. กรุงเทพฯ.

กัญญาวีย์ คันทะมูล, ธีระพล เสนพันธ์, กาญจนา นาคประสม, หยาดฝน ทนงการกิจ. 2022. ผลของวิธีการสกัดและทำแห้งต่อสมบัติของโปรตีนผงจากถั่วเหลือง. วารสารวิทยาศาสตร์บูรพา 27: 1746–1764.

กุลพร พุทธมี, วริศชนม นิลนนท์. 2564. การพัฒนาผลิตภัณฑ์บะหมี่เสริมผำอบแห้ง. วารสารวิจัยและพัฒนาวไลยอลงกรณ์ ในพระบรมราชูปถัมภ์ (สาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี) 16: 57–69.

ภาชนุมาส ทองคำ. 2562. ผลของอุณหภูมิต่อฤทธิ์ด้านอนุมูลอิสระในไข่ผำแห้งและการประยุกต์ใช้ในผลิตภัณฑ์อาหาร วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี.

วิชมณี ยืนยงพุทธกาล, กุลยา ลิ้มรุ่งเรืองรัตน์, ปณิดา ชัยปัน, ต่อลาภ ศรีเมือง. 2560. ผลของอุณหภูมิและเวลาทำแห้งด้วยลมร้อนต่อคุณภาพของเห็ดเข็มทองผงที่ผลิตจากส่วนที่ไม่นิยมบริโภค. วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ 25: 1001–1014.

Appenroth, K. J., Sree, K. S., Böhm, V., Hammann, S., Vetter, W., Leiterer, M., Jahreis, G. 2017. Nutritional value of duckweeds (Lemnaceae) as human food. Food Chemistry 217: 357–373. doi.org/10.1016/j.foodchem.2016.08.116

Association of Official Analytical Chemists. 2000. Official methods of analysis of AOAC International (17th ed.). AOAC International.

Huang, C., Kuo, M.-I., Chen, B.-Y., Lu, C.-P., Yeh, C.-C., Jao, C.-H., Lai, Y.-C., Hsieh, J.-F. 2024. Effect of radio-frequency drying on the physicochemical properties and isoflavone contents of fermented black bean dregs. Processes 12: 1294. doi.org/10.3390/pr12071294

Jiao, Q., Lin, B., Mao, Y., Jiang, H., Guan, X., Li, R., Wang, S. 2025. Effects of combined radio frequency heating with oven baking on product quality of sweet potato. Food Control 139: 109097. doi.org/10.1016/j.foodcont.2022.109097

Luo, X., Zhou, D., Yang, G., Xu, J., Luo, Y., Li, R., Wang, S. 2024. Development of radio frequency drying protocols for preserving the color and fragrance of lotus bee pollen. Food Control 166: 110696. doi.org/10.1016/j.foodcont.2024.110696

Nowak, D., Jakubczyk, E. 2020. The freeze-drying of foods-the characteristic of the process course and the effect of its parameters on the physical properties of food materials. Foods 9: 1488. doi.org/10.3390/foods9101488

Özbek, H. N. 2021. Radio frequency-assisted hot air drying of carrots for the production of carrot powder: Kinetics and product quality. Lebensmittel-Wissenschaft Und Technologie (Food Science and Technology) 152: 112332. doi.org/10.1016/j.lwt.2021.112332

On-Nom, N., Promdang, P., Inthachat, W., Kanoongon, P., Sahasakul, Y., Chupeerach, C., Suttisansanee, U., Temviriyanukul, P. 2023. Wolffia globosa-based nutritious snack formulation with high protein and dietary fiber contents. Foods 12: 2647. doi.org/10.3390/foods12142647

Prosridee, K., Oonsivilai, R., Tira-Aumphon, A., Singthong, J., Oonmetta-Aree, J., Oonsivilai, A. 2023. Optimum aquaculture and drying conditions for *Wolffia arrhiza* (L.) Wimn. Heliyon 9: e19730. doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e19730

Sledz, M., Witrowa-Rajchert, D. 2012. Influence of microwave-convective drying of chlorophyll content and colour of herbs. Acta Agrophysica 19: 865–876.

Thamkaew, G., Sjöholm, I., Galindo, F. G. 2021. A review of drying methods for improving the quality of dried herbs. Critical Reviews in Food Science and Nutrition 61: 1763–1786. doi.org/10.1080/10408398.2020.1765309

Xu, Y., Obielodan, M., Sismour, E., Arnett, A., Alzahrani, S., Zhang, B. 2017. Physicochemical, functional, thermal and structural properties of isolated Kabuli chickpea proteins as affected by processing approaches. International Journal of Food Science and Technology 52: 1147–1154. doi.org/10.1111/ijfs.13400

Zhang, J., Ding, C., Lu, J., et al. 2023. Influence of electrohydrodynamics on the drying characteristics and volatile components of iron stick yam. Food Chemistry: X 20: 101026. doi.org/10.1016/j.fochx.2023.101026

Zhang, W.-P., Yang, X.-H., Mujumdar, A. S., Ju, H.-Y., Xiao, H.-W. 2022. The influence mechanism and control strategy of relative humidity on hot air drying of fruits and vegetables: a review. Drying Technology 40: 2217–2234. doi.org/10.1080/07373937.2021.1943669

Zhou, X., Wang, S. 2019. Recent developments in radio frequency drying of food and agricultural products: A review. Drying Technology 37: 271–286. doi.org/10.1080/07373937.2018.1452255

Determination of flavor detection and recognition thresholds for tannic acid in water among young adult Thai assessors

Achiraya Boonyakiat, Panwisa Roopkai, Pantitra Rattana, Yaowapa Lorjaroenphon*
Department of Food Science and Technology, Faculty of Agro-Industry, Kasetsart University, Bangkok 10900, Thailand
*Corresponding author. E-mail address: fagiypl@ku.ac.th

Abstract

Tannic acid, a polyphenol, is commonly used as a flavor enhancer, natural preservative, and clarifying agent. In food applications, its concentration must be carefully considered due to its astringent flavor. An excessive amount may affect the overall acceptability of the final product. This study aimed to determine the detection and recognition thresholds of tannic acid in water using the three-alternative forced-choice (3-AFC) test as outlined in ASTM E679-19. Six concentration levels (0.00444, 0.0133, 0.0400, 0.120, 0.360, and 1.08 g/L), prepared by a 1/3 serial dilution, were evaluated in ascending order by young adult Thai assessors (20–23 years). The group threshold was calculated as the geometric mean of the individual Best Estimate Threshold (BET). The detection and recognition thresholds of tannic acid in water were 0.0856 g/L (n = 50) and 0.142 g/L (n = 32), respectively. The results also demonstrated that female thresholds were lower than male thresholds, and tannic acid concentration had a clear effect on the flavor characteristics. Tannic acid at recognition threshold was described as astringent, while it was perceived as bitter at 0.325 g/L. This finding is significant to the food industry in maintaining tannic acid levels below threshold values to ensure high flavor acceptability.

Keywords: Astringency, Flavor, Tannic acid, Thai assessor, Threshold

Introduction

Tannic acid is a plant-derived polyphenolic compound naturally present in many foods and is widely used in the food and beverage industry as a multifunctional ingredient. Beyond its sensory contributions, tannic acid provides significant technological and preservation benefits. It improves clarity in wine, beer, and fruit juices by promoting protein precipitation (Formanek and Bonte, 2017) and functions as an antioxidant and antimicrobial agent that delays lipid and protein oxidation in meat and dairy products (Wu and Zhou, 2021). Its ability to suppress microbial growth makes it a valuable clean-label preservative that aligns with current consumer expectations. Reflecting this trend, the global food-grade tannic acid market is projected to grow from USD 727.35 million in 2023 to USD 1.27 billion by 2033 (Spherical Insights, 2025).

Tannic acid is commonly incorporated during processing, particularly in wine, tea, and coffee, where it contributes to characteristic flavor attributes, supports flavor development, and enhances sensory complexity by adding umami-like characteristics and improving mouthfeel (Cosme et al., 2025). Despite its multifunctionality, tannic acid presents notable sensory limitations. Its distinct astringency is commonly described as a dry and puckering sensation caused by the binding of tannic acid to salivary proteins, forming protein-tannin complexes that reduce oral lubrication (Pires et al., 2020). At excessive concentrations, tannic acid can also impart bitterness and strong astringency, which negatively affect consumer acceptance. Therefore, controlling tannic acid concentration is essential to maintaining desirable flavor characteristics.

According to the Food and Drug Administration advisory limits, tannin content in wine must not exceed 3 g/L, and total tannin levels in finished beverages should remain below 0.15 g/L (Department of the Treasury, Alcohol and Tobacco Tax and Trade Bureau, 2016). However, sensory perception often occurs at much lower concentrations and varies among populations due to individual sensory thresholds. Previous studies have demonstrated population-dependent differences in taste sensitivity. Martin et al. (2025) reported a tannic acid detection threshold of 0.12 g/L in a French panel, whereas Nuvoli et al. (2023) reported a lower threshold of 0.086 g/L in a Swiss panel.

Despite its widespread use, sensory threshold data for tannic acid remain limited in certain populations. To our knowledge, no studies have investigated the detection threshold of tannic acid in Thai consumers, and the recognition threshold has not been previously reported. Therefore, this study aimed to determine both the detection and recognition thresholds of tannic acid in Thai assessors using standardized ASTM methods, providing new insights into population-specific sensory perception. This study focused on a young adult panel for two primary reasons. First, consumer insight reports highlight that young adults are critical drivers for product category expansion and represent high customer lifetime value (Nielsen Consumer LLC, 2024), leading to significant long-term purchasing potential. Second, it is well-established that sensory thresholds tend to increase with age. Elderly individuals generally exhibit diminished sensitivity to flavor substances. Therefore, determining the lower thresholds inherent in young adults in this study ensures broader applicability across all age groups.

Materials and Methods

Sample preparation

Drinking water purified by reverse osmosis (RO) filtration was used for sample preparation and as a palate cleanser throughout the experiment. Tannic acid (96% purity; food grade obtained from gallnut extract (Chanjao Longevity Co., Ltd.; Thailand)) was initially prepared at a concentration of 1.08 g/L in drinking water, and then serially diluted at a 1:3 ratio to obtain six concentration levels: 0.00444, 0.0133, 0.0400, 0.120, 0.360, and 1.08 g/L.

Detection threshold measurement

The sensory test was conducted as outlined in ASTM E679-19 (ASTM, 2019) using the three-alternative forced-choice (3-AFC) method with 50 participants (21 males and 29 females), aged 20–23 years. All participants were free from food allergies and illnesses and were non-smokers. They had been trained to become familiar with sensory testing procedures, sensory terminology, and flavor concepts (aroma, basic tastes, and chemesthesis). Five milliliters of the aqueous tannic acid solutions and drinking water (as a blank sample) were presented in clear plastic cups, labeled with random three-digit codes, at room temperature under natural light. Six sets were served individually in ascending order of concentration. Each set consisted of one aqueous tannic acid sample and two blank samples (Fig. 1), and the serving order within each set was determined using a balanced randomized order. Participants were instructed to rinse their mouths with room temperature drinking water before and between each sample and then taste the samples from left to right. For each set, participants were asked to identify the sample they perceived as having the strongest flavor among the others.

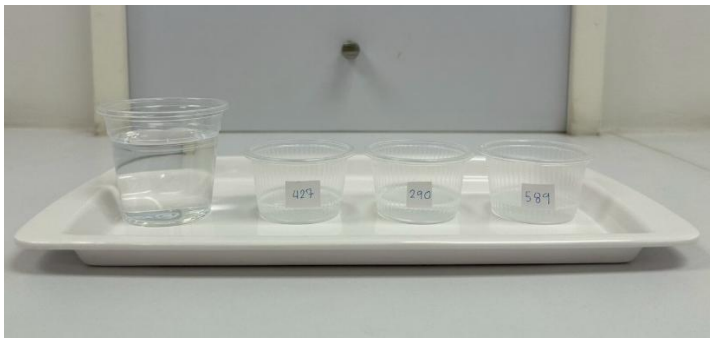


Fig. 1 Configuration of a sample set used in the three-alternative forced-choice (3-AFC) test

The responses were collected to determine the individual Best Estimate Threshold (BET). For each participant, the analysis involved recording whether the response at each concentration level was correct or incorrect. The individual BET was calculated as the geometric mean of the last incorrect concentration and the next higher concentration at which the participant responded correctly in two consecutive trials.

The individual BET values of all participants were then log-transformed, and the mean of the log-transformed BETs was calculated. The group detection threshold of tannic acid in water was subsequently obtained by converting this mean log value back to the original scale. The distribution of log-concentration values (individual BET) was illustrated as a box plot created with SPSS (version 22, IBM Co.; Armonk, NY, USA).

Recognition threshold measurement

For the recognition threshold, the same group of assessors and the testing protocol used for the detection threshold were applied. The participants were requested to identify and describe the flavor attribute of the strongest sample. Only correct responses identifying astringency (n = 32; 12 males and 20 females, 20–23 years) were subsequently used to calculate the individual BETs and the group BET following the same analytical approach as previously described. A box plot of the log-concentration for recognition threshold was created in the same manner.

Results and Discussion

The six concentration levels utilized for assessing the detection and recognition thresholds in this study were established following an internal preliminary screening. This screening employed a total of nine concentrations ranging from 0.000165 g/L to 1.08 g/L. The highest concentration was prepared with consideration of the legal limits, thereby ensuring panel safety. Specifically, the residual tannin, quantified as Gallic Acid Equivalents (GAE), must not surpass 6.4 GAE per 1,000 gallons (800 mg/L) in white wine or 24 pounds per 1,000 gallons (3 g/L) in red wine (Department of the Treasury, TTB, 2016). Furthermore, only colorless tannin is permissible for juice or wine treatment, and the addition of tannic acid (poly-galloylglucose) must not increase the total tannin content by more than 150 ppm (0.150 g/L) (Department of the Treasury, TTB, 2016). Based on the internal test, the six concentrations, including 0.00444, 0.0133, 0.0400, 0.120, 0.360 and 1.08 g/L, were selected for conducting the sensory evaluation following ASTM E679-19.

The detection threshold of tannic acid in water, assessed by 50 young adult Thai panelists, was 0.0856 g/L (Table 1) with log-individual BET distributions shown in Fig. 2A. This group BET represents the lowest concentration of tannic acid in water at which the young adult Thai panel was able to detect a difference from the blank sample (drinking water). This value was consistent with that reported for the Swiss panel but lower than the French's threshold. Nuvoli et al. (2023) reported a detection threshold of 0.086 g/L for tannic acid in a Swiss panel, while Martin et al. (2025) reported a higher detection threshold of 0.12 g/L in a French panel. This suggests that population-specific factors, such as nationality and dietary habits, may contribute to differences in the tannic acid detection threshold. It is hypothesized that these variations could be explained by a greater familiarity with polyphenol-rich foods and beverages, particularly wine, among French consumers. Regular exposure to wine may lead to sensory adaptation to astringency, potentially resulting in reduced sensitivity and a higher detection threshold. This observation is consistent with the study by Nuvoli et al. (2023), who reported variability

within populations, noting that vegans exhibited higher astringency thresholds than omnivores. Collectively, these findings suggest that habitual dietary exposure to polyphenol-rich foods may influence sensitivity to tannic acid.

Table 1 Group best estimate detection threshold of tannic acid in water as assessed by young adult Thai panelists

Thai panelist	n	Detection threshold (g/L)
Total	50	0.0856
Male	21	0.123
Female	29	0.0660

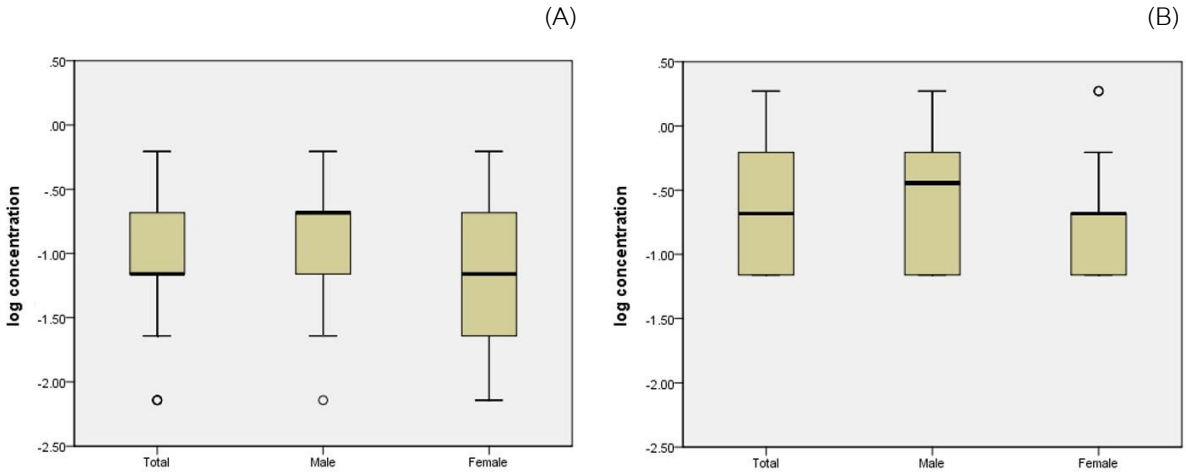


Fig. 2 Distribution of log-concentration values for detection threshold (A) and recognition threshold (B)

The recognition threshold of tannic acid in water for the Thai panel was 0.142 g/L (Table 2), with the distribution of log-individual BETs presented in Fig. 2B. This value is notably higher than the detection threshold of 0.0856 g/L reported in Table 1. This difference is consistent with fundamental principles of sensory perception. The detection threshold represents the minimum concentration at which participants can perceive a difference between samples, without necessarily identifying the sensory attribute. In contrast, the recognition threshold represents the minimum concentration at which participants can accurately describe the specific sensory characteristic. Therefore, recognition thresholds are generally higher than detection thresholds. This trend is consistent with the findings of de Loryn et al. (2014), who reported that the median recognition threshold of NaCl in water (0.80 g/L) was higher than its detection threshold (0.31 g/L).

Table 2 Group best estimate recognition threshold of tannic acid in water as assessed by young adult Thai panelists

Thai panelist	n	Recognition threshold (g/L)
Total	32	0.142
Male	12	0.317
Female	20	0.0817

It should be noted that, the recognition threshold test was initially conducted with the same group of 50 young adult Thai participants used for the detection threshold. However, the final analysis included only 32 participants to ensure clear and reliable results. The analysis focused only on participants who consistently reported perceiving astringency. Astringency is not a basic taste but is classified as a cutaneous chemosensation, or chemesthesis, mediated by the trigeminal nerve (Viana, 2011; Schöbel et al., 2014).

Tannic acid has astringency as its native sensory characteristic. At higher concentrations, bitterness, a basic taste familiar to panelists, may also be perceived, leading some participants to report bitterness instead of astringency. A similar phenomenon has been reported for sodium chloride, which can be perceived as sweet at low concentrations but is not considered the recognition threshold of salt (Valentová and Panovská, 2003). Therefore, the recognition threshold should reflect identification of the native sensory characteristic.

During the experiment, most participants reported astringency at low concentrations (0.142 g/L), whereas bitterness was more frequently reported at higher concentrations (0.325 g/L). Some participants also reported sourness at low concentrations. This may be due to confusion, as tannic acid is an astringent compound that also possesses acidic properties capable of stimulating sour taste mechanisms (Pulkkinen et al., 2024). Accordingly, responses identifying bitterness or sourness were excluded from the recognition threshold analysis.

An additional consideration relates to the purity of the tannic acid used in this study. The tannic acid was a hydrolyzable tannin extracted from gallnuts with a purity of 96%, while the composition of the remaining 4% is unknown. Previous studies using Quantitative Descriptive Analysis have shown that tannins from different sources can exhibit bitterness and sourness in addition to astringency (Troszyńska et al., 2007). However, there is currently no evidence indicating whether gallnut-derived tannins possess additional sensory attributes beyond astringency. Therefore, to minimize experimental uncertainty and ensure accurate determination of the recognition threshold, only participants who identified astringency at low concentrations were included in the final analysis.

The results also showed that both detection and recognition thresholds of tannic acid were lower in young adult Thai female participants than in young adult Thai male participants (Tables 1 and 2). This indicates that female participants were able to detect differences and describe sensory attributes at lower concentrations, suggesting greater sensory sensitivity. Similar observations have been reported by da Silva et al. (2014), who found higher sensory accuracy in women. Flavor perception involves aroma, basic taste, and chemesthesis. Although there is no direct evidence that the trigeminal nerve is more sensitive in females, sex-related differences in sensory-related biological structures have been reported. Oliveira-Pinto et al. (2014) demonstrated that women can have approximately 40 to 50% more olfactory bulb cells than men. In addition, Bartoshuk et al. (1994) reported that women are more likely to be classified as supertasters and tend to have a higher density of fungiform papillae and taste buds. These factors may potentially contribute to the lower sensory threshold values observed in female participants.

In conclusion, the detection threshold of tannic acid for the 50 young adult Thai panelists was 0.0856 g/L, and the recognition threshold determined from the 32 selected panelists was 0.142 g/L. Furthermore, female participants demonstrated greater sensitivity in both detecting and describing the flavor attribute of tannic acid at lower concentrations than males. This finding provides a critical baseline for the food and beverage industry, particularly in the Thai market. For instance, tannic acid could be utilized to enhance flavor complexity and improve mouthfeel in products such as Thai tea, especially low-fat formulations. Additionally, the identified sex-related differences suggest opportunities for developing personalized beverages tailored to the specific sensory preferences of female or male consumer.

Acknowledgements

The authors gratefully acknowledge the Faculty of Agro-Industry, Kasetsart University for providing presentation scholarship of this research.

References

ASTM. 2019. Standard practice E679-19. Standard practice for determination of odor and taste threshold by a forced-choice ascending concentration series method of limits. West Conshohocken, PA: ASTM International.

Bartoshuk, L.M., Duffy, V.B., Miller, I.J. 1994. PTC/PROP tasting: Anatomy, psychophysics, and sex effects. Physiology & Behavior 56: 1165–1171. doi.org/10.1016/0031-9384(94)90361-1

Cosme, F., Aires, A., Pinto, T., Oliveira, I., Vilela, A., Gonçalves, B. 2025. A comprehensive review of bioactive tannins in foods and beverages: Functional properties, health benefits, and sensory qualities. Molecules 30: 800. doi.org/10.3390/molecules30040800

Da Silva, L.A., Lin, S.M., Teixeira, M.J., de Siqueira, J.T.T., Jacob Filho, W., De Siqueira, S.R.D.T. 2014. Sensorial differences according to sex and ages. Oral Diseases 20: e103–e110. doi.org/10.1111/odi.12145

De Loryn, L.C., Petrie, P.R., Hasted, A.M., Johnson, T.E., Collins, C., Bastian, S.E.P. 2014. Evaluation of sensory thresholds and perception of sodium chloride in grape juice and wine. American Journal of Enology and Viticulture 65: 124–133. doi.org/10.5344/ajev.2013.13088

Department of the Treasury, Alcohol and Tobacco Tax and Trade Bureau (TTB). 2016. Standards of fill for wine and distilled spirits (Proposed rule, Docket no. TTB-2016-0010; Notice no. 164). Federal Register 81: 83752–83771.

Formanek, J.A., Bonte, P. 2017. Use of tannic acid in the brewing industry for colloidal and organoleptic stability. MBAA TQ. 54: 11–16. doi.org/10.1094/TQ-54-1-0112-01

Martin, C., Rollinat, A., Tournier, C., Peltier, C. 2025. A simple procedure to assess the reliability of the best estimate thresholds (BETs): A case study on the detection threshold of tannic acid astringency. Food Quality and Preference 127: 105473. doi.org/10.1016/j.foodqual.2025.105437

Nielsen Consumer LLC. 2024. Spend Z. Illinois, United States. https://nielseniq.com/global/en/insights/report/2024/spend-z/, 8 December 2025.

Nuvoli, C., Fillion, L., Lacoste Gregorutti, C., Labbe, D. 2023. Comparison of sensitivity to taste and astringency stimuli among vegans and omnivores. Physiology & Behavior 262: 114092. doi.org/10.1016/j.physbeh.2023.114092

Oliveira-Pinto, A.V., Santos, R.M., Coutinho, R.A., et al. 2014. Sexual dimorphism in the human olfactory bulb: Females have more neurons and glial cells than males. PLOS One 9: e111733. doi.org/10.1371/journal.pone.0111733

Pires, M.A., Pastrana, L.M., Fuciños, P., Abreu, C.S., Oliveira, S.M. 2020. Sensorial perception of astringency: Oral mechanisms and current analysis methods. Foods 9: 1124. doi.org/10.3390/foods9081124

Pulkkinen, E., Fischer, I., Laska, M. 2024. Sour, but acceptable: Taste responsiveness to five food-associated acids in zoo-housed white-faced sakis, Pithecia pithecia. Physiology & Behavior 286: 114679. doi.org/10.1016/j.physbeh.2024.114679

Schöbel, N., Radtke, D., Kyereme, J., et al. 2014. Astringency is a trigeminal sensation that involves the activation of G protein-coupled signaling by phenolic compounds. Chemical senses 39: 471–487. doi.org/10.1093/chemse/bju014

Spherical Insights & Consulting. 2025. Global food grade tannic acid market size to worth USD 1,269.17 million by 2033. New York, USA. https://www.sphericalinsights.com/press-release/food-grade-tannic-acid-market, 10 December 2025.

Troszyńska, A., Narolewska, O., Wołejszo, A. 2007. Extracts from selected tannin-rich foods – A relation between tannins content and sensory astringency. Polish Journal of Food and Nutrition Sciences 57: 329–334.

Viana F. 2011. Chemosensory properties of the trigeminal system. ACS chemical neuroscience 2: 38–50. doi.org/10.1021/cn100102c

Wu, Q., Zhou, J. 2021. The application of polyphenols in food preservation. In: Granato, D. (Ed). Advances in Food and Nutrition Research (vol 98.). Elsevier Inc. pp. 35–99.

Development of pumpkin-enriched gluten-free vegan pasta

Kitiya Yadav, Kittipong Suksawadi, Natthawan Kanisthakont, Yaowapa Lorjaroenphon*

Department of Food Science and Technology, Faculty of Agro-Industry, Kasetsart University, Bangkok 10900, Thailand

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

Abstract

Pasta is widely consumed and typically made from wheat flour, egg, and water. However, wheat gluten causes celiac disease, and egg is unsuitable for vegans. This research aimed to develop a nutritionally enhanced gluten-free vegan pasta. The combination of rice flour and tapioca starch at a ratio of 3:2 was pre-gelatinized to modify starch structure and improve the texture. The pre-gel mixture was fortified with steamed pumpkin at 0%, 30%, 40%, and 50% w/w, based on flour weight before rolling into fettuccine. The physical properties indicated that cooking time, water absorption, and cooking loss were not significantly different ($p > 0.05$). The cooked pasta exhibited more intense yellow color with a higher level of pumpkin enrichment corresponding to the higher a* and b* values and a decrease in L* value ($p \leq 0.05$). Furthermore, the consumer test ($n = 50$) highlighted texture as the most critical attribute affecting overall acceptability. The 50% treatment had the lowest acceptability scores ($p \leq 0.05$), with 48% of panelists rating it as too soft and much too soft. In contrast, the 30% treatment achieved the highest liking scores for overall and appearance, and 72% of panelists expressed an intention to purchase this product.

Keywords: Gluten, Pasta, Pre-gelatinization, Pumpkin, Vegan

Introduction

Pasta is globally consumed as a carbohydrate-based food, traditionally made from wheat flour, egg, and water. In 2023, global pasta production nearly reached 17 million tons, while Italy remains the world's largest pasta consumer, with more than 23 kg per person consumed annually (International Pasta Organization, 2025). However, traditional wheat pasta contains gluten, a protein that can induce celiac disease. To produce gluten-free alternatives, various raw materials such as rice, sorghum, corn, buckwheat, and chestnut have been utilized (Giménez-Bastida et al., 2015). Nevertheless, these gluten-free formulations often result in a fragile and crumbly dough, which makes processing difficult. To address this issue, hydrocolloids are commonly used to improve the texture and usability of the final products (Cai et al., 2016). However, consumer concern regarding the use of artificial additives or colorants has driven a notable shift toward a preference for clean label products.

Pumpkin (*Cucurbita* spp.) is rich in pectin, fiber, and hemicellulose, which can improve product texture by enhancing water-binding capacity and rigidity during cooking (Özgören and Yapar, 2022). It is also an excellent source of various beneficial compounds, including carotenoids (such as beta- and alpha-carotenes), vitamin A, vitamin C, vitamin E, zinc, selenium, peptides, phenolic acids, and polysaccharides (Hussain et al., 2022), which enhance nutritional properties of food products. Consequently, this research aimed to investigate the effect of varying pumpkin concentrations on the cooking properties, color, and consumer acceptance of gluten-free vegan fettuccine.

Materials and Methods

Pasta preparation

The pasta was prepared by modifying the procedure of Fitriati et al. (2025). Forty-five grams of rice flour (Five Stars Fish Brand; Thailand), 30 g of tapioca starch (Five Stars Fish Brand; Thailand), 83 g of water, and 11.25 g of palm oil (Morakot; Thailand) were thoroughly mixed using an egg whisk until a homogeneous mixture was obtained. The mixture was gently heated for 1.5 min and subsequently cooled at room temperature for 10 min to allow for pre-gelatinization. Steamed pumpkin was added to the dough at different concentrations: 0% (as the control), 30%, 40%, and 50% by weight of the flour base. The dough was kneaded until smooth, lightly dusted with tapioca starch, and passed through a pasta machine (Marcato; Campodarsego, Italy). Subsequently, the dough was rolled through progressively narrower settings until a uniform thickness of approximately 2-mm was reached and then cut into fettuccine strips. Afterward, the excess flour was brushed off. The samples were then subjected to the determination of cooking and physical properties, followed by sensory evaluation.

Cooking and color properties

The optimum cooking time (OCT), cooking loss, and water absorption were determined following the standard method (AACC, 2000). Twenty-five grams of uncooked pasta was boiled in 300 mL of deionized

water. Samples were removed sequentially every 30 s and pressed between two glass plates. The cooking time was recorded as OCT when the white core of the fettuccine strip was no longer visible. For the determination of cooking loss and water absorption, 10 g (W_1) of uncooked pasta was boiled in 300 mL of deionized water for the OCT previously determined. After draining, the cooked pasta was weighed (W_2). The collected cooking water was evaporated in a hot air oven (ULE 400, Memmert; Murnau, Germany) at 105°C until a constant weight (W_3) was achieved. Cooking loss and water absorption were calculated using the following Equations 1–2:

$$\text{Cooking loss (\%)} = \frac{\text{Weight of dried matter } (W_3)}{\text{Weight of uncooked pasta } (W_1)} \times 100 \quad (1)$$

$$\text{Water absorption (\%)} = \frac{\text{weight of cooked pasta } (W_2) - \text{weight of uncooked pasta } (W_1)}{\text{weight of uncooked pasta } (W_1)} \times 100 \quad (2)$$

Color analysis was performed on both uncooked and cooked pasta using a colorimeter (CIE Illuminants D_{65}, 10° standard observer; MSEZ 2652 Model 4500L, HunterLab; Virginia, USA). Ten individual pasta strands were placed on a white background and arranged in a two-layer stack. Each sample was measured in three different random positions, and three repeated measurements were recorded per position, resulting in a total of nine measurements per sample. The color value was expressed in terms of the CIELAB system: L* (lightness), a* (greenness to redness), and b* (blueness to yellowness).

Sensory evaluation

Control sample (0% pumpkin) was cooked for 3 min, and pumpkin-enriched pasta samples were cooked for 2.30 min according to OCT. After that, 10 g of sample was prepared in plastic cup labelled with 3-digit code. All samples were balanced random monadic served with a cup of hot tomato spaghetti sauce. The panel was asked to clean their mouth before and between testing samples. This consumer test was carried out with 50 untrained panelists (35 females and 15 males; aged 20–39 years) assessed each sample for overall, appearance, flavor, texture, and afterfeel (mouthfeel after swallowed or expectorated) using 9-point hedonic scales where 9=extremely like and 1=extremely dislike. Color, chewiness, and softness were evaluated using just about right (JAR) test with 5-point scale and the purchase intent was evaluated using 5-point scale.

Statistical analysis

All experiments concerning color measurement and cooking properties, except for the OCT, were conducted with two independent replications. The data were analyzed using a Completely Randomized Design (CRD). One-way Analysis of Variance (ANOVA) was employed to determine the significant difference among the treatments. Duncan's Multiple Range Test (DMRT) was subsequently used for mean separation ($\alpha = 0.05$). The data from the sensory evaluation were analyzed using a Randomized Complete Block Design (RCBD), with the panelists designated as the blocking factor. All data were analyzed using SPSS (version 22, IBM Co.; Armonk, NY, USA).

Results and Discussions

The gluten-free vegan pasta in this study was initially formulated using rice flour and tapioca starch, a principal raw material in Thailand. The higher amylopectin content inherent in tapioca starch is known to enhance elasticity and delay the retrogradation of the final product (Noosuk, 2003). However, preliminary results showed that the initial dough preparation exhibited excessive hardness, dryness, and inherent brittleness, resulting in fragmentation precluded successful sheet formation or pasta processing. Therefore, starch structural modification was required through the implementation of partial pre-gelatinization. This physical modification technique, which involved the controlled application of heating followed by rapid cooling, helped induce the uptake of water by starch granules, leading to swelling and partial collapse (Cai et al., 2016). This process ultimately formed a stabilized honeycomb structure (Fitriati et al., 2024). The outcome of gentle heating for a limited duration and rapid cooling ensured that some crystalline regions were retained, which allowed the dough to be successfully sheeted and cut into fettuccine strands.

Furthermore, pumpkin was incorporated to enhance the nutritional profile, as it is high in fiber, vitamin A, zinc, and selenium (Hussain et al., 2022). Pumpkin is also abundant in endogenous hydrocolloids such as pectin and hemicellulose, which contributed to improved textural properties of the gluten-free pasta (Özgören and Yapa, 2022). Consequently, the inclusion of artificial additives was rendered unnecessary, supporting the development of a clean-label product. Preliminary data indicated that pumpkin supplementation exceeding 50% negatively impacted the structural integrity required for successful dough sheeting and subsequent pasta formulation. To find the optimal level, this experiment, therefore, focused on supplementing the formulation with pumpkin at concentrations of 30%, 40%, and 50%, relative to the control sample (0% pumpkin). Levels were selected to maximize pumpkin fortification for its bioactive benefits and preliminary trials showed that below 30% pumpkin caused insufficient change, while above 50% caused loss of structural integrity, thereby making the dough difficult to roll.

Cooking and color properties

Analysis of the cooking properties indicated a reduction in OCT with increasing levels of pumpkin supplementation (Table 1). This reduction is primarily attributed to the pre-steamed nature of the pumpkin, which introduces moisture and already partially gelatinized starch components, thereby accelerating the overall hydration and cooking process of the final product. Cooking loss, a key indicator of solids diffusion during cooking, demonstrated no significant difference among all samples (Table 1). Nonetheless, pumpkin-incorporated samples showed a tendency toward greater loss than the control. These results are consistent with findings from the study of Lerdluksamee et al. (2025), which similarly reported that cooking loss increased proportionally with higher levels of pumpkin inclusion. This phenomenon is often attributed to the high soluble fiber and pectin content contributed by the pumpkin, which can leach into the cooking water.

Table 1 Cooking and color characteristics of pumpkin-enriched gluten-free pasta

Characteristics		0% pumpkin	30% pumpkin	40% pumpkin	50% pumpkin
Optimum cooking time (OCT) (min)		3.00	2.30	2.30	2.30
Cooking loss (%)^{ns}		2.17±0.28	3.02±0.48	2.33±0.91	3.32±0.20
Water absorption (%)		43.27±1.26^{c}	51.76±0.53^{b}	51.02±0.81^{b}	54.73±1.16^{a}
Uncooked pasta color:	L*	86.36±0.51^{a}	81.17±2.00^{b}	81.22±0.77^{b}	78.71±1.19^{c}
	a*	-0.41±0.36^{d}	2.82±0.31^{c}	2.99±0.15^{b}	4.16±0.22^{a}
	b*	5.51±1.89^{d}	25.39±14.49^{c}	35.00±2.46^{b}	41.58±1.17^{a}
Cooked pasta color:	L*	72.73±0.32^{a}	69.81±0.41^{b}	68.36±1.04^{d}	69.16±0.60^{c}
	a*	-1.19±0.27^{c}	-0.14±0.16^{b}	0.89±0.24^{a}	0.92±0.18^{a}
	b*	1.61±0.81^{d}	35.13±1.15^{c}	39.61±0.73^{b}	42.26±1.42^{a}

Superscript letters within the same row indicate significant differences among treatments and the notation ^{ns} refers to a non-significant difference (α = 0.05).

Water absorption increased significantly with higher pumpkin inclusion, as shown in Table 1, and the 50% treatment exhibited the highest value. This enhancement is primarily attributed to the high fiber, pectin, and hemicellulose content of pumpkin, all of which possess high water-holding capacity (WHC). These components readily swell during cooking and effectively retain moisture. The high WHC of the enriched flour is specifically linked to its soluble pectin and cell-wall polysaccharides (Aziah and Komathi, 2021). Comparable swelling behavior and increased water absorption have also been reported in noodles enriched with other root vegetables, such as carrot and sweet potato (Sule et al., 2019).

Visual assessment of both uncooked and cooked pasta strands revealed an intensified yellow coloration that increased proportionally with the pumpkin ratio. Correspondingly, an increase in the a* and b* values, as well as a decrease in L* value, was observed with higher levels of pumpkin incorporation (Table 1). This shift in chromaticity indicates a move toward the red–orange spectrum, a characteristic feature of carotenoids. The natural pigmentation of pumpkin is known to be rich in carotenoids such as provitamin A, beta-carotene (orange), and lutein (bright yellow) (Grassino et al., 2023). Comparison between uncooked and cooked samples demonstrated notable color shifts. Pumpkin-enriched pasta exhibited decreased L* and a* values, but increased b* value after boiling (Table 1). This post-cooking color change may be attributed to several factors, including the hydration and swelling of cooked starch, water absorption, and the thermally unstable behavior of carotenoids. Pathare et al. (2023) reported that high drying temperature and oxidative reactions reduce the stability of all geometric isomers of beta-carotene, including 9-*cis* and all-*trans* isomers. In contrast, lutein has demonstrated comparatively greater thermal stability in an oil model system (Henrya et al., 1998).

Sensory evaluation test

According to Table 2, the 30% pumpkin sample received a significantly higher overall liking score than all other treatments ($p \leq 0.05$). Furthermore, it achieved an overall acceptability score of 6.96±1.56, which corresponds to a moderately-liked level. This score significantly reached the commercial acceptance benchmark, which was established at a minimum score of 6.5 (Stone et al., 2021). The 30% treatment also exhibited superior texture liking (Table 2) and a higher percentage of panelists rating its chewiness and softness as just about right (Table 3). Conversely, the 40% and 50% samples were increasingly rated as too soft (Table 3), a finding consistent with their increased water absorption as shown in Table 1. This correlation strongly indicates that texture is the key factor influencing the overall liking of the pasta.

Table 2 Hedonic scores of cooked pumpkin-enriched gluten-free pasta (n = 50)

Sensory attribute	0% pumpkin	30% pumpkin	40% pumpkin	50% pumpkin
Overall acceptability	6.58±1.67^{ab}	6.96±1.56^{a}	6.16±2.11^{b}	6.16±1.89^{b}
Appearance	6.60±1.84^{a}	6.70±1.92^{a}	6.26±2.03^{a}	5.62±2.14^{b}
Flavor^{ns}	6.02±1.89	6.32±1.56	6.26±1.92	6.24±1.74
Texture	7.00±1.28^{a}	6.68±1.81^{a}	5.82±2.36^{b}	5.92±2.36^{b}
Afterfeel	6.78±1.31^{a}	6.64±1.65^{b}	6.14±1.96^{ab}	6.08±1.92^{b}

Superscript letters within the same row indicate significant differences among treatments and the notation ^{ns} refers to a non-significant difference (α = 0.05)

The 50% pumpkin treatment received the lowest acceptability scores for both appearance and after feel, despite achieving the highest percentage of panelists rating its color as just about right (Table 3). This suggests that color is not the critical attribute driving overall liking in this pasta formulation. However, the color of the 30% pumpkin pasta was perceived as too light by 38% of the panelists. This specific color attribute could be improved by selecting a pumpkin cultivar with a darker hue and higher carotenoid content. Research has shown significant variation in carotenoid content among pumpkin cultivars, ranging from 10.09 to 3797.2 µg/g, with *Cucurbita moschata* (Muscade de Provence Llena de) exhibiting the highest concentration (Grassino et al., 2023). Similarly, Nawirska et al. (2009) reported that *Cucurbita maxima* cultivars contained eight times more carotenoids than *Cucurbita pepo* cultivars. Furthermore, 72% of the consumers expressed a clear intention to purchase the product (data not shown), highlighting its strong commercial potential.

In conclusion, the incorporation of pumpkin significantly impacted the cooking properties and color of the gluten-free vegan pasta. An increasing incorporation rate of pumpkin reduced the OCT and significantly increased water absorption, with no significant difference observed in cooking loss. Furthermore, a higher pumpkin ratio significantly decreased the L* value while increasing the a* and b* values, resulting in a more intense orange coloration. The sensory evaluation demonstrated that the 30% pumpkin treatment showed

the highest consumer acceptance, confirming that texture is the key influential attribute driving consumer liking. This study confirms the potential of using 30% pumpkin as a functional ingredient to develop a highly acceptable, clean-label, and gluten-free fettuccine product.

Table 3 Just about right percentage of cooked pumpkin-enriched gluten-free pasta (*n* = 50)

Sensory attribute		0% pumpkin	30% pumpkin	40% pumpkin	50% pumpkin
Color:	Much too light	48	8	2	2
	Too light	8	30	22	24
	Just about right	44	58	58	68
	Too dark	0	4	16	6
	Much too dark	0	0	2	0
Chewiness:	Much too little	2	4	10	2
	Too little	16	16	32	10
	Just about right	64	56	46	52
	Too chewy	16	22	12	22
	Much too chewy	2	2	0	14
Softness:	Much too hard	0	0	0	0
	Too hard	12	6	2	6
	Just about right	78	64	44	46
	Too soft	6	24	36	36
	Much too soft	4	6	18	12

Conflicts of Interest

The authors declare that there are no conflicts of interest.

Acknowledgements

The authors are grateful to the Faculty of Agro-Industry, Kasetsart University, for the presentation scholarship received for this present study.

References

AACC. 2000. Approved methods of analysis, 11th ed. AACC Inc. Minnesota, USA.

Cai, J., Chiang, J.H., Tan, M.P., Saw, L.K., Xu, Y., Ngan-Loong, M.N. 2016. Physicochemical properties of hydrothermally treated glutinous rice flour and xanthan gum mixture and its application in gluten-free noodles. J. Food Eng. 186: 1–9. doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2016.03.033

Fitriati, A., Detchewa, P., Moongngarm, A. 2025. Replacing rice flour with starch-lipid complex reduced estimated glycemic index and enhanced slow digestible starch and resistant starch content in gluten-free fettuccine. J. Cereal Sci. 121: 1–9. doi.org/10.1016/j.jcs.2025.104328

Giménez-Bastida, J.A., Piskuła, M., Zieliński, H. 2015. Recent advances in development of gluten-free buckwheat products. Trends Food Sci. Technol. 44: 58–65. doi.org/10.1016/j.tifs.2015.02.013

Grassino, N.A., Brnčić R.S., Sabolović, B.M., Žlabur, S.J., Marović, R., Brnčić, M. 2023. Carotenoid content and profiles of pumpkin products and by-products. Molecules. 28: 1–11. doi.org/10.3390/molecules28020858

Henrya, LK., Catignania, G.L., Schwartzb, S.J. 1998. Oxidative degradation kinetics of lycopene, lutein, and 9-*cis* and all-*trans* β-carotene. JAOCS. 75: 823–829. doi.org/10.1007/s11746-998-0232-3

Hussain, A., Kausar, T., Sehar, S., et al. 2022. A comprehensive review of functional ingredients, especially bioactive compounds present in pumpkin peel, flesh and seeds, and their health benefits. Food Chem. Adv. 1: 1–10. doi.org/10.1016/j.focha.2022.100067

International Pasta Organization. 2025. Italian pasta conquers the world: Record global consumption and export growth. https://internationalpasta.org/news/italian-pasta-conquers-the-world-record-global-consumption-and-export-growth/., 28 November 2025.

Lerdluksamee, C., Thanaboonrongkom, S., Dajanta, K., Pongjanta, J., Chaikham, P., Jirasatid, S. 2025. Techno-functional, nutritional, and sensory properties of pumpkin flour-enriched dried egg noodles. Appl. Food Res. 5: 1–11. doi.org/10.1016/j.afres.2025.101399

Nawirska A., Figiel A., Kucharska A.Z., Sokół-Łetowska A., Biesiada A. 2009. Drying kinetics and quality parameters of pumpkin slices dehydrated using different methods. J. Food Eng. 94: 14–20. doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2009.02.025

Noor Aziah, A.A., Komathi, C.A. 2009. Physicochemical and functional properties of peeled and unpeeled pumpkin flour. J. Food Sci. 74: 328–333. doi.org/10.1111/j.1750-3841.2009.01298.x

Noosuk, P. 2003. The assessment of the relationship between structure and functional property of rice starch. Ph.D. thesis, Faculty of Science, Chulalongkorn. Bangkok, Thailand. [in Thai]

Özgören, C.E., Yapar, A. 2022. Physicochemical, microstructure and sensory properties of noodle enriched with pumpkin (*Cucurbita moschata*) powder. Lat. Am. Appl. Res. 52: 313–320. doi.org/10.52292/j.laar.2022.847

Pathare, P.B., Al-Dairi, M., Al-Yahyai, R., Al-Mahdouri, A. 2023. Physiological response of stored pomegranate fruit affected by simulated impact. Foods 12: 1–20. doi.org/10.3390/foods12061122

Stone, H., Bleibaum, N.R., Thomas, A.H. 2020. Sensory Evaluation Practices, 5th ed. Elsevier. Amsterdam, Netherlands.

Sule, S., Abu, J. 2019. Effect of carrot powder incorporation on the quality of pasta. MOJFPT. 7: 99–103. doi.10.15406/mojfpt.2019.07.00227

การศึกษาความต้องการนวัตกรรมการบริการเพื่อออกแบบธุรกิจรับส่งแก่ผู้สูงอายุ

A study of service innovation needs for the design of elderly transportation

อิงครัต แจ้งชัด*, **อัจฉรา เกษสุวรรณ**, **อริสรา ทองเพ็ชร์**

Ingkharat Jangchad*, Ajchara Kessuvan, Arisara Thongpech

ภาควิชาเทคโนโลยีอุตสาหกรรมเกษตร คณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

Department of Agro-Industrial Technology, Faculty of Agro-Industry, Kasetsart University, Bangkok 10900, Thailand

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

บทคัดย่อ

งานวิจัยมีวัตถุประสงค์เพื่อสำรวจความต้องการนวัตกรรมการบริการสำหรับการออกแบบธุรกิจรับส่งผู้สูงอายุ โดยบูรณาการกรอบแนวคิด 3 มิติ มิติพฤติกรรมผู้บริโภค (6W1H) มิติคุณภาพการบริการ (SERVEQUAL) และมิติการใช้บริการด้านสุขภาพ (Andersen's Behavioral Model) โดยวิจัยเชิงคุณภาพด้วยการสัมภาษณ์เชิงลึกผู้สูงอายุ 60 ปีขึ้นไปและผู้ดูแลผู้สูงอายุ ทั้งหมด 20 คน อาศัยอยู่ในเขตกรุงเทพมหานครและปริมณฑล พบว่า ผู้สูงอายุมีวัตถุประสงค์หลักในการเดินทางเพื่อเข้ารับบริการทางการแพทย์และทำกิจกรรมนอกบ้าน มีแนวโน้มตัดสินใจเดินทางด้วยตนเอง และไม่แสดงความจงรักภักดีต่อผู้ให้บริการรายใดเป็นพิเศษ โดยให้ความสำคัญกับราคา ความสะดวก และคุณภาพการบริการเป็นปัจจัยหลัก ความต้องการของผู้สูงอายุประกอบด้วยยานพาหนะและสภาพแวดล้อมที่ปลอดภัย ผู้ให้บริการที่มีความเข้าใจด้านสุขภาพ และการมีผู้ดูแลร่วมเดินทางที่สร้างความไว้วางใจได้ในระดับค่าใช้จ่ายที่เหมาะสม ผลการศึกษานี้นำไปสู่การพัฒนากรอบแนวคิดสำหรับการออกแบบศูนย์บริการรับส่งผู้สูงอายุที่เข้าถึงได้ผ่านช่องทางโทรศัพท์ ให้บริการอย่างปลอดภัย สะดวก และครบวงจร โดยมีผู้ดูแลร่วมเดินทาง ทั้งนี้แนวคิดนวัตกรรมการบริการในงานวิจัยจะนำไปทดสอบเชิงประจักษ์ต่อไป

คำสำคัญ: การบริการรับส่ง, คุณภาพการบริการ, นวัตกรรม, ผู้สูงอายุ, พฤติกรรมผู้บริโภค

Abstract

This study aims to explore service innovation needs for the design of elderly transportation businesses by integrating three conceptual dimensions, Consumer Behavior (6W1H), Service Quality (SERVEQUAL) and Health Service Utilization (Andersen's Behavioral Model). A qualitative research approach was employed through in-depth interviews with 20 elderly individuals aged 60 and above and their caregivers residing in Bangkok and the metropolitan area. The findings indicate that elderly primarily travel for medical appointments and outdoor activities, tend to make travel decisions independently, and exhibit low brand loyalty. Instead, price, convenience, and service quality are identified as the key determinants in service selection. Elderly users expect safe vehicles and service environments, service providers with an understanding of health-related conditions, and the presence of trusted companions at reasonable service fees. Based on these findings, a conceptual framework is proposed for designing an elderly transportation service center accessible via telephone, providing safe, convenient, and comprehensive services with companions. The proposed service innovation concept will be further empirically tested in subsequent research stages.

Keywords: Elderly, Consumer behavior, Innovation, Service quality, Transportation services

คำนำ

ประเทศไทยกำลังเผชิญการเปลี่ยนแปลงเชิงโครงสร้างประชากรครั้งสำคัญจากการก้าวเข้าสู่สังคมผู้สูงอายุอย่างสมบูรณ์ โดยประเทศไทยเริ่มมีสัดส่วนประชากรอายุ 60 ปีขึ้นไปมากกว่าร้อยละ 10.5 ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2548 และจากการประมาณการประชากรช่วง พ.ศ. 2543–2573 คาดว่าประเทศไทยจะเป็นสังคมผู้สูงอายุเต็มรูปแบบในปี พ.ศ. 2567 เมื่อจำนวนผู้สูงอายุเพิ่มขึ้นเป็นประมาณ 13.1 ล้านคน หรือคิดเป็นร้อยละ 20 ของประชากรทั้งหมด (สำนักงานสถิติแห่งชาติ, 2567) ข้อมูลจากสำนักงานสภาพัฒนาการเศรษฐกิจและสังคมแห่งชาติยังยืนยันว่า ณ เดือนมกราคม พ.ศ. 2567 ประเทศไทยมีสัดส่วนผู้สูงอายุร้อยละ 20 ซึ่งตรงตามเกณฑ์ขององค์การอนามัยโลก (WHO) ที่กำหนดว่าหากประเทศมีประชากรผู้สูงอายุมากกว่าร้อยละ 20 ถือว่าเข้าสู่ “Aged Society” แล้ว (ไทยพีบีเอส, 2568) ปรากฏการณ์นี้มีสาเหตุหลักจากอัตราการเจริญพันธุ์รวมของไทยที่ลดลงต่อเนื่องจนเหลือเพียง 1.21 ในปี 2566 ซึ่งต่ำกว่าระดับทดแทนประชากรอย่างมาก (The Global Economy, 2024) และอายุคาดเฉลี่ยของประชากรไทยที่เพิ่มขึ้นเป็นประมาณ 76.4 ปี ในช่วงปี 2566–2567 (Macrotrends, 2024) โครงสร้างประชากรที่เปลี่ยนแปลงส่งผลกระทบต่อวิถีชีวิต ครอบครัว ระบบแรงงาน รวมถึงการพัฒนาประเทศในมิติต่าง ๆ เช่น เศรษฐกิจ สังคม สุขภาพ การศึกษา และสวัสดิการสังคม (Nation Thailand, 2024) โดยเฉพาะในระดับครอบครัวที่คนวัยทำงานต้องรับหน้าที่ดูแลผู้สูงอายุ ซึ่งอาจกระทบต่อศักยภาพการทำงานและภาระทางเศรษฐกิจ ความเปลี่ยนแปลงนี้ส่งผลให้ “คุณภาพชีวิตของผู้สูงอายุ” กลายเป็นประเด็นเร่งด่วนที่ทุกภาคส่วนให้ความสำคัญมากขึ้น หนึ่งในปัจจัยสำคัญที่กำหนดคุณภาพชีวิตของผู้สูงอายุคือ ความสามารถในการเดินทางและการเข้าถึงบริการสาธารณะ โดยเฉพาะบริการด้านสุขภาพ ผู้สูงอายุจำนวนมากประสบข้อจำกัดทางกาย เช่น การเคลื่อนไหวที่ช้าลง การทรงตัวไม่มั่นคง การมองเห็นและการได้ยินที่ลดลง รวมถึงโรคประจำตัว ซึ่งทำให้การเดินทางระยะไกลหรือการใช้ระบบขนส่งสาธารณะที่ไม่สอดคล้องกับสภาพร่างกายซึ่งเป็นเรื่องยากลำบาก และเสี่ยงต่อการหกล้ม (มหาวิทยาลัยสุโขทัยธรรมาธิราช, 2560) แม้ว่าประเทศไทยจะมีการพัฒนาระบบขนส่งสาธารณะหลายรูปแบบ แต่โครงสร้างและสภาพแวดล้อมโดยรอบ เช่น ป้ายรถเมล์ ฟุตบาท ทางขึ้นลงยานพาหนะ ยังไม่เหมาะสมกับการใช้งานของผู้สูงอายุมากนัก (สำนักงานกองทุนสนับสนุนการสร้างเสริมสุขภาพ, 2565)

ยิ่งไปกว่านั้น บริการขนส่งสาธารณะในบางพื้นที่ โดยเฉพาะเขตชานเมืองและปริมณฑล มีความถี่ไม่เพียงพอและมีตารางเดินรถที่ไม่แน่นอน ทำให้ผู้สูงอายุจำนวนหนึ่งหลีกเลี่ยงการใช้บริการเหล่านี้ (มหาวิทยาลัยสุโขทัยธรรมาธิราช, 2560; Srinakharinwirot University, 2019) แม้ว่าจะมีนโยบายด้าน Universal Design แต่การดำเนินการจริงยังมีข้อจำกัดและผู้สูงอายุจำนวนมากที่ไม่สามารถเข้าถึงสิทธิหรือบริการที่มีอยู่ได้อย่างเต็มที่ (มูลนิธิเพื่อผู้บริโภค, 2564) ปัญหาเหล่านี้ส่งผลให้ผู้สูงอายุจำนวนหนึ่งลดความถี่ในการเดินทางออกนอกบ้าน ซึ่งกระทบต่อการเข้าร่วมกิจกรรมทางสังคม การดูแลสุขภาพ และอาจก่อให้เกิดภาวะโดดเดี่ยวในระยะยาว ข้อมูลสถิติล่าสุดยังชี้ให้เห็นลักษณะชีวิตที่เปลี่ยนแปลงของผู้สูงอายุ โดยร้อยละ 12.9 ของผู้สูงอายุในปี 2567 อาศัยอยู่ลำพัง เทียบกับในปี 2537 ผู้สูงอายุอาศัยลำพังร้อยละ 3.6 สะท้อนแนวโน้มการขยายตัวของครัวเรือนผู้สูงอายุที่แยกอาศัยลำพัง (สำนักงานสถิติแห่งชาติ, 2567) นอกจากนี้ ผู้สูงอายุร้อยละ 34.0 ยังคงทำงาน โดยมีแหล่งรายได้หลักมาจากบุตร (ร้อยละ 35.7) และจากการทำงานของตนเอง (ร้อยละ 33.9) ขณะเดียวกันสัดส่วนผู้สูงอายุที่มีผู้ดูแลเพิ่มขึ้นตามช่วงวัย โดยเฉพาะกลุ่มสูงอายุช่วงปลายที่มีผู้ดูแลถึงร้อยละ 32.8 สะท้อนความจำเป็นของระบบบริการที่ช่วยแบ่งเบาภาระและสนับสนุนการดำรงชีวิตของผู้สูงอายุอย่างยั่งยืน เมื่อพิจารณาเชิงโครงสร้าง พบอุปสรรคด้านการเดินทางของผู้สูงอายุอย่างน้อย 5 ประเด็น ได้แก่ (1) ข้อจำกัดทางร่างกายและความเสี่ยงในการเดินทาง (มหาวิทยาลัยสุโขทัยธรรมาธิราช, 2560) (2) คุณภาพระบบขนส่งและสภาพแวดล้อมที่ไม่เอื้อต่อผู้สูงอายุ (สำนักงานกองทุนสนับสนุนการสร้างเสริมสุขภาพ, 2565) (3) ความไม่เพียงพอของบริการในบางพื้นที่ (Srinakharinwirot University, 2019) (4) ช่องว่างของนโยบาย Universal Design (มูลนิธิเพื่อผู้บริโภค, 2021) และ (5) ผลกระทบต่อคุณภาพชีวิตและการเข้าถึงบริการสุขภาพ ปัจจัยเหล่านี้ยืนยันความจำเป็นของบริการรับส่งที่ออกแบบมาเฉพาะสำหรับผู้สูงอายุ

การทำความเข้าใจพฤติกรรมและความต้องการของผู้สูงอายุในการเดินทางจำเป็นต้องอาศัยกรอบทฤษฎีที่หลากหลาย ได้แก่ ทฤษฎีพฤติกรรมผู้บริโภค 6Ws1H ช่วยวิเคราะห์ผู้บริโภคในมิติต่าง ๆ ไม่ว่าจะเป็นใครคือผู้ใช้บริการ ใช้บริการใด ใช้ทำไม ใช้เมื่อไร ที่ไหน และอย่างไร (รวิสรา และนันทวัน, 2564) ซึ่งมีประโยชน์อย่างยิ่งต่อการวิเคราะห์ Pain point และ Gain ของผู้สูงอายุในกระบวนการเดินทาง นอกจากนี้ แบบจำลอง SERVQUAL ของ Parasuraman et al. (1985; 1988) ช่วยอธิบายมิติของคุณภาพการบริการ 5 ด้าน ได้แก่ Reliability (ความเชื่อถือได้), Responsiveness (การตอบสนอง), Assurance (ความมั่นใจ), Empathy (ความเอาใจใส่) และ Tangibles (สิ่งที่จับต้องได้) ซึ่งสะท้อนเกณฑ์สำคัญที่ผู้สูงอายุใช้ประเมินบริการรับส่ง เช่น ความปลอดภัย ความพร้อมของบุคลากร และอุปกรณ์ช่วยเหลือบนยานพาหนะ ขณะเดียวกัน แบบจำลองพฤติกรรมการใช้บริการด้านสุขภาพของ Andersen (1968) อธิบายว่าการใช้บริการสุขภาพขึ้นอยู่กับสามปัจจัย ได้แก่ ปัจจัยกำหนดเบื้องต้น (Predisposing Factors) ปัจจัยเอื้ออำนวย (Enabling Factors) และปัจจัยความจำเป็น (Need Factors) ซึ่งสามารถประยุกต์ใช้กับบริบทการเดินทางของผู้สูงอายุในปัจจุบัน เนื่องจากการเดินทางจำนวนมากของผู้สูงอายุมีเป้าหมายเพื่อรับบริการด้านสุขภาพโดยตรง เช่น การเข้ารับการตรวจรักษาทางการแพทย์ สำหรับงานวิจัยที่สนับสนุนความสำคัญของการออกแบบบริการเดินทางที่ตอบสนองต่อผู้สูงอายุ เช่น Mendoza-Núñez et al. (2024) พบว่าปัจจัยด้านสภาพแวดล้อม คุณภาพระบบขนส่ง และความรู้สึกปลอดภัยส่งผลโดยตรงต่อการยอมรับการเดินทางของผู้สูงอายุในเม็กซิโก ขณะที่ Tanaka and Saito (2025) มีการศึกษาปัจจัยนวัตกรรมด้าน Smart Mobility ในญี่ปุ่น เช่น Demand-Responsive Transport (DRT) และ Mobility as a Service (MaaS) พบว่าการออกแบบบริการสำหรับผู้สูงอายุจำเป็นต้องคำนึงถึงเทคโนโลยีและบริบทชุมชน และ Zhou et al. (2024) เน้นว่าความปลอดภัย ความสบายใจ และความเข้าใจในเทคโนโลยีเป็นปัจจัยสำคัญต่อการยอมรับวิธีการเดินทางรูปแบบใหม่ของผู้สูงอายุช่วงปลายในประเทศสหรัฐอเมริกาและจีน เพื่อให้การใช้กรอบแนวคิดทั้งทฤษฎีมีความชัดเจนและสอดคล้องกัน งานวิจัยนี้กำหนดบทบาทของกรอบทฤษฎีอย่างชัดเจน โดยทฤษฎีพฤติกรรมผู้บริโภค (6Ws1H) ใช้เป็นกรอบในการทำความเข้าใจบริบทและประสบการณ์การเดินทางของผู้สูงอายุเพื่ออธิบายว่าใครเป็นผู้ใช้บริการ เดินทางไปที่ใด เมื่อใด และด้วยเหตุผลใด ขณะที่ทฤษฎีคุณภาพการบริการ (SERVQUAL) ใช้เป็นโครงสร้างในการสังเคราะห์ความคาดหวังด้านคุณภาพการบริการจากมุมมองของผู้สูงอายุและผู้ดูแล ส่วนแบบจำลองพฤติกรรมการใช้บริการด้านสุขภาพ (Andersen's Behavioral Model) ใช้เป็นกรอบในการตีความแรงจูงใจ ความจำเป็น และเงื่อนไขด้านสุขภาพที่มีผลต่อการตัดสินใจเดินทาง การบูรณาการกรอบแนวคิดทั้งสามทฤษฎีนี้ช่วยให้การวิเคราะห์ความต้องการนวัตกรรมการบริการรับส่งผู้สูงอายุมีความลึกเชิงทฤษฎีและสะท้อนบริบทการใช้บริการจริงมากยิ่งขึ้น

จากข้อมูลทั้งหมดนี้สะท้อนให้เห็นว่า ถึงแม้ว่าจะมีการพัฒนาระบบขนส่งสาธารณะและนโยบายที่เกี่ยวข้อง แต่ผู้สูงอายุยังคงประสบอุปสรรคในหลายด้าน งานวิจัยนี้จึงมีความจำเป็นในการศึกษาเชิงลึก (Insight) ของผู้สูงอายุเกี่ยวกับบริบทด้านการเดินทาง การวิเคราะห์ปัญหาในการใช้บริการ (Pain point) และประโยชน์ที่ผู้ใช้ต้องการได้รับ (Gain) ในการใช้บริการรับส่ง ตลอดจนวิเคราะห์ปัจจัยด้านมิติของความคาดหวังคุณภาพบริการและมิติของการเข้าถึงบริการสุขภาพ เพื่อสร้างองค์ความรู้ใหม่ที่สามารถนำไปสู่การออกแบบ Solution การบริการรับส่งเชิงนวัตกรรมที่ตอบสนองความต้องการเฉพาะของผู้สูงอายุอย่างแท้จริงและรองรับสังคมผู้สูงอายุในประเทศไทยอย่างยั่งยืนต่อไป

วัตถุประสงค์การวิจัย

1. เพื่อศึกษาข้อมูลด้านพฤติกรรมและประสบการณ์การเดินทางของผู้สูงอายุ
2. เพื่อสังเคราะห์ประเด็นความคาดหวังด้านคุณภาพการบริการและการใช้บริการด้านสุขภาพเพื่อนำไปใช้เป็นแนวทางในการออกแบบ Solution นวัตกรรมการบริการรับส่งผู้สูงอายุ

กรอบแนวคิดการวิจัย

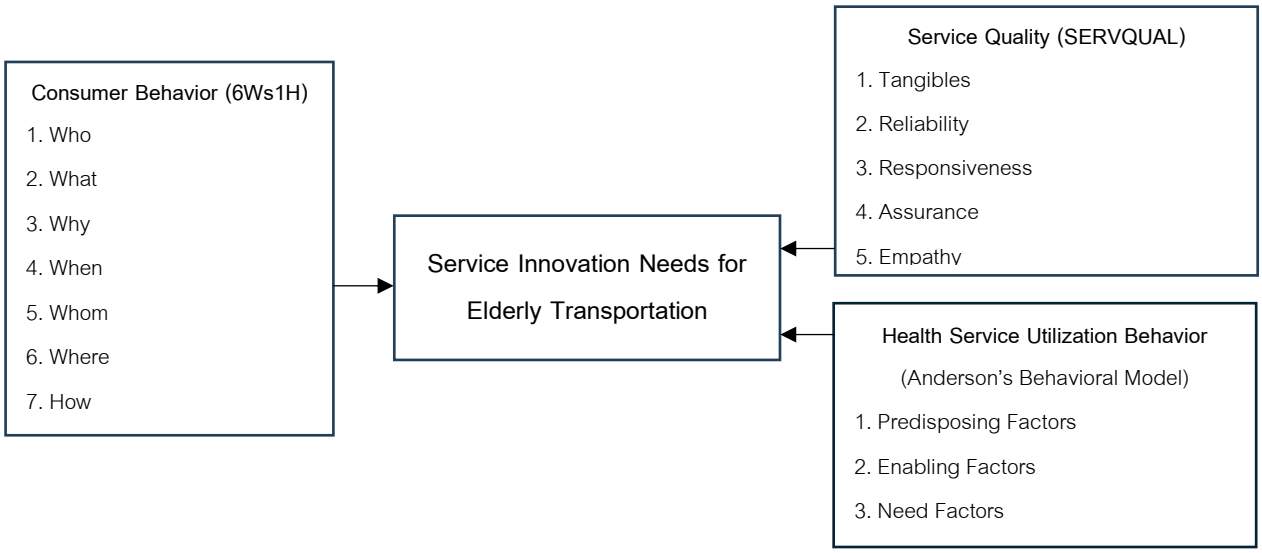


Fig. 1 Conceptual framework

อุปกรณ์และวิธีการ

งานวิจัยนี้เป็นการวิจัยเชิงคุณภาพ โดยใช้แบบสอบถามกึ่งโครงสร้าง (Semi-structured questionnaire) เป็นเครื่องมือในการวิจัย งานวิจัยประกอบด้วย 2 ขั้นตอน โดยเริ่มจากการศึกษาข้อมูลทุติยภูมิจากเอกสาร หนังสือ งานวิจัย และฐานข้อมูลออนไลน์ เพื่อศึกษาทฤษฎีพื้นฐานในการวิจัย จากนั้นดำเนินการรวบรวมข้อมูลปฐมภูมิผ่านการสัมภาษณ์เชิงลึกกับผู้สูงอายุ ที่มีอายุ 60 ปีขึ้นไป ทั้งอาศัยอยู่เพียงลำพังและอาศัยอยู่กับครอบครัว ในเขตกรุงเทพมหานครและปริมณฑล และผู้ดูแลผู้สูงอายุ จำนวนทั้งหมด 20 คน อ้างอิงจากงานวิจัยของ Nastasi and Schensul (2005) ที่แนะนำจำนวนตัวอย่างที่เหมาะสมสำหรับการสัมภาษณ์เชิงลึกควรอยู่ระหว่าง 10–30 ตัวอย่าง โดยคัดเลือกกลุ่มตัวอย่างด้วยวิธีการสุ่มแบบเจาะจง (Purposive sampling) ร่วมกับการอ้างอิงด้วยบุคคล (Snowball sampling) ผู้ให้ข้อมูลต้องสามารถสื่อสารได้ชัดเจนและมีประสบการณ์เดินทางหรือมีแนวโน้มใช้บริการรับส่ง ลักษณะการสัมภาษณ์เป็นแบบตัวต่อตัวหรือออนไลน์ ใช้เวลาประมาณ 45–60 นาที มีการขอความยินยอมในการสัมภาษณ์ การรวบรวมข้อมูลจากการสัมภาษณ์ผู้สูงอายุและผู้ดูแลผู้สูงอายุ เพื่อสำรวจพฤติกรรมการเดินทาง ปัญหาอุปสรรค (Pain point) และความต้องการ (Gain) สำหรับพัฒนาแนวคิดเบื้องต้นของ Solution นวัตกรรมการบริการรับส่ง เครื่องมือสัมภาษณ์แบ่งเป็น 4 ส่วนคือ ข้อมูลประชากรศาสตร์ พฤติกรรมการเดินทางตามมิติของ 6Ws1H ความคาดหวังต่อคุณภาพบริการตามมิติของ SERVQUAL และพฤติกรรมการใช้บริการสุขภาพตามมิติของแบบจำลอง Andersen's Behavioral Model โดยคำถามเป็นลักษณะคำถามปลายเปิดและคำถามเจาะลึกเพื่อให้ผู้สูงอายุสามารถเล่าประสบการณ์ได้อย่างอิสระ ข้อมูลที่ได้ถูกนำมาวิเคราะห์ด้วยวิธีการวิเคราะห์เนื้อหา (Content Analysis) เพื่อตีความและสังเคราะห์ปัจจัยที่มีผลต่อความต้องการนวัตกรรมการบริการรับส่งผู้สูงอายุในประเทศไทย

การวิเคราะห์ข้อมูลเชิงคุณภาพดำเนินการโดยเริ่มจากการถอดความการสัมภาษณ์เชิงลึกทั้งหมด จากนั้นผู้วิจัยทำการพัฒนาประเด็นจากข้อมูลเชิงประจักษ์ที่สะท้อนประสบการณ์ ปัญหา และความต้องการในการเดินทางของผู้สูงอายุและผู้ดูแล ประเด็นที่ได้ถูกจัดกลุ่มและสังเคราะห์เป็นประเด็นหลักและประเด็นย่อยตามกรอบแนวคิดที่ใช้ในการศึกษา

ได้แก่ พฤติกรรมการเดินทาง (6Ws1H) ความคาดหวังด้านคุณภาพการบริการ (SERVQUAL) และพฤติกรรมการใช้บริการด้านสุขภาพ (Andersen's Behavioral Model)

ผลการวิจัย

ผลจากการสัมภาษณ์เชิงลึกกับกลุ่มผู้สูงอายุ 60 ปีขึ้นไป และผู้ดูแลผู้สูงอายุ ที่อาศัยในเขตกรุงเทพมหานครและปริมณฑลที่เคยมีประสบการณ์หรือมีแนวโน้มในการใช้บริการรับส่งผู้สูงอายุ จำนวน 20 คน พบว่า กลุ่มเป้าหมายทั้งหมดเป็นผู้ชาย จำนวน 12 คน และผู้หญิง จำนวน 8 คน โดยผู้สูงอายุมีอายุระหว่าง 60–70 ปี ทั้งอาศัยอยู่ลำพังและอาศัยอยู่กับครอบครัว ส่วนใหญ่มีรายได้ต่อเดือนตั้งแต่ 15,000 บาทขึ้นไป ทั้งที่เป็นบำนาญและรายได้จากครอบครัวด้านผู้ดูแลผู้สูงอายุ ส่วนใหญ่มีอาชีพเป็นพนักงานบริษัท และบางส่วนมีธุรกิจส่วนตัว

จากการวิเคราะห์ข้อมูลการสัมภาษณ์เชิงลึก สามารถสังเคราะห์ผลการวิจัยออกเป็น 3 ประเด็นหลัก ได้แก่ (1) บริบทและรูปแบบการเดินทางของผู้สูงอายุ (2) ความคาดหวังด้านคุณภาพการบริการรับส่ง และ (3) แรงขับด้านสุขภาพและการเข้าถึงบริการ โดยประเด็นด้านบริบทและรูปแบบการเดินทางประกอบด้วยประเด็นย่อย ได้แก่ วัตถุประสงค์ของการเดินทาง วิธีการเดินทางที่ใช้ในปัจจุบัน การตัดสินใจเดินทางด้วยตนเอง และช่วงเวลาที่นิยมเดินทาง ขณะที่ประเด็นด้านความคาดหวังคุณภาพการบริการสะท้อนประเด็นย่อยเกี่ยวกับความปลอดภัยและความน่าเชื่อถือของผู้ให้บริการ ความสะดวกของกระบวนการใช้บริการ และความเข้าใจเอาใจใส่ผู้สูงอายุ ส่วนประเด็นด้านแรงขับด้านสุขภาพและการเข้าถึงบริการประกอบด้วยประเด็นย่อย ได้แก่ ความจำเป็นด้านสุขภาพ ข้อจำกัดในการเข้าถึงระบบขนส่ง และความพร้อมด้านค่าใช้จ่ายและการสนับสนุนจากผู้ดูแล ซึ่งประเด็นหลักและประเด็นย่อยดังกล่าวถูกนำมาใช้เป็นกรอบในการนำเสนอผลการวิเคราะห์เชิงคุณภาพ โดยเมื่อพิจารณาผลจากการสัมภาษณ์สำหรับมิติด้านพฤติกรรมผู้บริโภค (6W1H) สามารถสรุปได้คือ ผู้สูงอายุทั้งหมดมีกิจกรรมหลักที่ต้องเดินทาง อันดับแรกได้แก่ การไปพบแพทย์ที่สถานพยาบาล รองลงมาคือ การออกกำลังกาย ซื้อของ กิจกรรมและพบปะเพื่อนฝูง และบางรายมีการเดินทางไปทำงาน ซึ่งวิธีการเดินทางที่ใช้ในปัจจุบันประกอบด้วย รถจักรยานยนต์ รถยนต์ส่วนตัว ขับรถด้วยตนเอง รวมถึงใช้บริการขนส่งสาธารณะ เช่น รถมอเตอร์ไซค์รับจ้าง รถประจำทาง และรถไฟฟ้าบีทีเอส เหตุผลหลักของการเดินทางคือการไปโรงพยาบาลตามนัดหมายของแพทย์ ออกกำลังกาย ซื้อของ และร่วมกิจกรรมต่างๆ โดยกลุ่มผู้สูงอายุที่อาศัยอยู่เพียงลำพังมีแนวโน้มให้ความสนใจในการใช้บริการรับส่งมากกว่ากลุ่มผู้สูงอายุที่อาศัยอยู่กับครอบครัวเนื่องจากไม่มีผู้ดูแลที่จะช่วยในเรื่องของการเดินทาง ปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อการเลือกวิธีการเดินทางของผู้สูงอายุ ได้แก่ ความรวดเร็ว และความสะดวกสบาย ผู้สูงอายุที่ใช้บริการวินรถมอเตอร์ไซด์ จะเน้นความรวดเร็วเป็นหลัก สำหรับช่วงเวลาที่นิยมออกจากบ้านคือช่วงเช้าและช่วงเย็น กลุ่มเป้าหมายส่วนใหญ่จะตัดสินใจเรื่องการเดินทางด้วยตนเอง ไม่มีบุคคลอื่นเกี่ยวข้องในการตัดสินใจ เกณฑ์สำคัญในการเลือกใช้บริการ ได้แก่ ราคา รองลงมาคือความสะดวกสบาย และไม่ได้มีความจงรักภักดีกับแบรนด์บริการใดเป็นพิเศษในการตัดสินใจเลือกผู้ให้บริการ ซึ่งสามารถวิเคราะห์ผลจากการสัมภาษณ์ตามมิติของความคาดหวังคุณภาพการบริการ และมิติของพฤติกรรมการใช้บริการสุขภาพ ดังรายละเอียดต่อไปนี้

Table 1 Results of the analysis of service quality (SERVQUAL)

Factors	In-depth interview results
1. Tangibility	- Most elderly users and caregivers do not require special vehicles or equipment. They prefer vehicles that are clean, not overly old, and provide a sense of safety. - The most preferred contact channels are: having an assistant help request to the service, phone calls, and application-based booking, respectively. - Service personnel should be polite, physically capable, and convey a sense of safety. - The service environment should be clean and safe.
2. Reliability	- Elderly users prefer service providers who are familiar, personally known, or who display polite, clean, flexible, and trustworthy characteristics. - The service brand should be reliable, deliver accurate and punctual services, and provide all services as promised.
3. Responsiveness	- Telephone communication is the primary channel. The preferred contact process is “call and be picked up,” with no cancellations. - The desired service process is “call – pick up – drop off,” which is simple and convenient.
4. Assurance	- Service providers should possess appropriate knowledge, competence, and skills related to elderly care, such as assisting for medical facility coordination, which enhances trust and confidence.
5. Empathy	- Elderly users prefer service providers who are patient and understanding of their physical conditions or illnesses. - Service providers should care for elderly users with compassion and provide assistance which is appropriate to their specific health conditions.

Table 2 Results of the analysis of health service utilization behavior based on Andersen’s behavioral model

Factors	In-depth interview results
1. Predisposing Factors	- The respondents include elderly people aged 60 years and above and their caregivers, both male and female, including those receiving pensions and those having income from other sources. Most have a monthly income of at least THB15,000 and reside in Bangkok Metropolitan Area. - They generally hold positive attitudes toward elderly transportation services, particularly health-related transportation services. Levels of interest vary from high to low, with emphasis on the quality of passenger care.
2. Enabling Factors	- Most service destinations are selected based on distance to their home. Some elderly have the assistance for traveling from their children or relatives. - Affordable service fees range between THB 400–3,000, and most respondents are willing to pay approximately THB1,000. - Some elderly are able to use ride-hailing applications, while others are not. Most elderly prefer not to request services themselves but rely on assistants or caregivers to do so.
3. Need Factors	- Health conditions are the most important factor influencing the need to travel to medical facilities or consult physicians, with traveling frequency averaging 1–2 times per month. - Major pain points related to public transportation services include overcrowding, old and unclean vehicles or equipment, inconvenience, safety concerns, and being refused service by public transport providers. - The key service gains desired by elderly include a sense of safety, trust, convenience in accessing services near their homes, and high-quality service providing.

บทสรุป

ผลการศึกษานี้สอดคล้องกับงานวิจัยด้านการเดินทางของผู้สูงอายุในต่างประเทศที่ชี้ให้เห็นว่าความปลอดภัย ความสะดวก และความไว้วางใจต่อผู้ให้บริการเป็นปัจจัยสำคัญต่อการยอมรับการเดินทาง อย่างไรก็ตาม งานวิจัยนี้ช่วยขยายองค์ความรู้ในบริบทประเทศไทย โดยพบว่าผู้สูงอายุให้ความสำคัญกับช่องทางการติดต่อแบบโทรศัพท์และการมีผู้ดูแลร่วมเดินทางมากกว่าการพึ่งพาเทคโนโลยีดิจิทัลขั้นสูง ผลการศึกษาจึงชี้ให้เห็นว่านวัตกรรมการบริการรับส่งผู้สูงอายุควรถูกออกแบบเป็นบริการเชิงประสบการณ์ที่ผสานทั้งความปลอดภัย การดูแล และความเหมาะสมกับบริบทการใช้บริการจริง

จากผลการศึกษาเบื้องต้นเกี่ยวกับความต้องการนวัตกรรมการบริการเพื่อออกแบบธุรกิจบริการรับส่งแก่ผู้สูงอายุด้วยการสัมภาษณ์เชิงลึกกับกลุ่มผู้สูงอายุ และผู้ดูแลผู้สูงอายุ จำนวน 20 คน พบว่ามีความเชื่อมโยงกับทฤษฎีพฤติกรรมผู้บริโภค (รวิสรา และนันทวัน, 2564) กล่าวคือ ผู้สูงอายุที่เป็นกลุ่มเป้าหมายสำหรับการออกแบบบริการรับส่งผู้สูงอายุเป็นผู้ที่มีอายุ 60 ปีขึ้นไปอาศัยในเขตกรุงเทพมหานครและปริมณฑล มีรายได้มากกว่า 15,000 บาทต่อเดือน โดยกลุ่มเป้าหมายหลักที่มีแนวโน้มความต้องการบริการการรับส่งมากคือ ผู้สูงอายุที่อยู่โดยลำพัง ไม่มีผู้ดูแล นอกจากนี้ การออกแบบนวัตกรรมการบริการรับส่งแก่ผู้สูงอายุจะต้องใช้ข้อมูลเบื้องต้นจากการทำความเข้าใจ (Empathize) กลุ่มเป้าหมายตามหลักการของ กระบวนการคิดเชิงออกแบบ (Design thinking) โดยความคิดเห็นของกลุ่มเป้าหมายที่ได้สัมภาษณ์นั้น สามารถเชื่อมโยงกับมิติของความคาดหวังด้านคุณภาพการบริการ (Parasuraman et al., 1988) และมิติของพฤติกรรมการใช้บริการสุขภาพตามแบบจำลอง Andersen's Behavioral Model สรุปได้ว่าการออกแบบนวัตกรรมการบริการธุรกิจรับส่งแก่ผู้สูงอายุควรพิจารณาปัจจัยดังต่อไปนี้

1. กลุ่มเป้าหมายหลักคือผู้สูงอายุ 60 ปีขึ้นไป ในเขตกรุงเทพมหานครและปริมณฑล มีรายได้ต่อเดือนมากกว่า 15,000 บาท ที่อยู่อาศัยเพียงลำพัง เนื่องจากมีแนวโน้มในการใช้บริการมาก กลุ่มเป้าหมายรองคือผู้สูงอายุที่อยู่อาศัยกับครอบครัวหรือมีผู้ดูแล

2. ออกแบบศูนย์บริการรับส่งผู้สูงอายุที่ติดต่อสะดวกทาง Call Center และตั้งอยู่ในบริเวณแหล่งชุมชนของที่พักอาศัยในเขตกรุงเทพมหานคร พร้อมทั้งช่องทางติดต่ออื่น ๆ สำหรับผู้ดูแลผู้สูงอายุ เช่น แอปพลิเคชั่น และกำหนดนโยบายไม่ปฏิเสธการรับผู้โดยสาร รวมทั้งการออกแบบบริการรับส่งผู้สูงอายุควรคำนึงถึงช่วงเวลาการเดินทางที่นิยม ได้แก่ ช่วงเช้าและช่วงเย็น ซึ่งสัมพันธ์กับการไปพบแพทย์และการทำกิจกรรมนอกบ้าน

3. ออกแบบคุณค่าด้านประสบการณ์ (Experienced Value) ให้กับผู้สูงอายุ โดยเฉพาะผู้ให้บริการที่ไว้วางใจได้ปลอดภัย มีการขึ้นทะเบียนผู้ให้บริการ มีระบบการ Tracking การเดินทางเพื่อสามารถรับประกันความปลอดภัยให้แก่ผู้สูงอายุและผู้ดูแลผู้สูงอายุได้

4. ให้ความสำคัญกับพนักงานผู้ให้บริการ ที่ต้องมีความเข้าใจผู้สูงอายุ ฝึกอบรมความรู้ความเข้าใจพื้นฐานในการดูแลผู้สูงอายุ และมีการรับประกัน (Certification) คุณภาพการบริการและทักษะวิชาชีพ หรือร่วมมือกับนิสิตนักศึกษามหาวิทยาลัยที่เกี่ยวข้อง ด้านการพยาบาล และเชื่อมโยงกับโรงพยาบาลในเขตกรุงเทพมหานคร

ทั้งนี้ สำหรับงานวิจัยนี้มีข้อจำกัดด้านขนาดกลุ่มตัวอย่างและขอบเขตพื้นที่ศึกษา ซึ่งมุ่งเน้นเฉพาะผู้สูงอายุในเขตกรุงเทพมหานครและปริมณฑล ดังนั้นการศึกษาในอนาคตจะมีการขยายขอบเขตกลุ่มตัวอย่างไปยังพื้นที่ภูมิภาคอื่นและนำผลการศึกษานี้ไปใช้ในการพัฒนาและทดสอบแนวคิดนวัตกรรมการบริการรับส่งผู้สูงอายุในเชิงปฏิบัติ เพื่อประเมินความเหมาะสมและความเป็นไปได้ในการใช้งานจริงในอนาคต

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณคณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ที่ให้การสนับสนุนทุนนำเสนอผลงานวิจัยในงานประชุมวิชาการมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 64 และขอบคุณผู้ตอบแบบสอบถามทุกท่านที่ให้ความร่วมมือในการให้สัมภาษณ์เชิงลึกในงานวิจัยนี้ สำหรับการเสียสละเวลาและให้ข้อมูลที่เป็นประโยชน์กับงานวิจัย

เอกสารอ้างอิง

ไทยพีบีเอส. 2568. ประเทศไทยก้าวสู่สังคมผู้สูงอายุสมบูรณ์ ตามเกณฑ์องค์การอนามัยโลก (WHO). https://policywatch.thaipbs.or.th/article/life-100, 28 พฤษภาคม 2568.

มหาวิทยาลัยสุโขทัยธรรมาธิราช. 2560. รายงานวิจัยสภาพแวดล้อมและปัญหาการเดินทางของผู้สูงอายุ. วารสารสุโขทัยธรรมาธิราช. 11: 3032–3047.

มูลนิธิเพื่อผู้บริโภค. 2564. ระบบขนส่งมวลชนกับการเข้าถึงของผู้สูงอายุและผู้พิการ. https://www.consumerthai.org, 28 พฤษภาคม 2567.

รวิสรา ศรีบรรจง, นันทวัน เหลี่ยมปรีชา. 2564. พฤติกรรมการซื้อสินค้าออนไลน์ของผู้บริโภคภาตใต้วิถีความปกติใหม่ (New Normal) ในเขตอำเภอเมือง จังหวัดพิษณุโลก ที่มีผลต่อส่วนประสมการตลาดออนไลน์. ใน: โครงการนำเสนอผลงานวิชาการระดับชาติ คณะบริหารธุรกิจ เศรษฐศาสตร์ และการสื่อสาร ประจำปี พ.ศ. 2564. มหาวิทยาลัยนเรศวร. พิษณุโลก, หน้า 40–52.

สำนักงานกองทุนสนับสนุนการสร้างเสริมสุขภาพ. 2565. รายงาน สสส. ชี้ ระบบขนส่งสาธารณะไทยยังไม่เอื้อต่อผู้สูงอายุและผู้พิการ. https://www.thaihealth.or.th, 28 พฤษภาคม 2567.

สำนักงานสถิติแห่งชาติ. 2567. รายงานสถานการณ์ประชากรสูงอายุของประเทศไทย พ.ศ. 2567. https://www.nso.go.th, 28 พฤศจิกายน 2567.

Andersen, R. 1968. A behavioral model of families' use of health services, 25th ed. Center for Health Administration Studies, University of Chicago.

Macrotrends. 2024. Thailand life expectancy 1950–2024. https://www.macrotrends.net, 20 May 2024.

Mendoza-Núñez, V.M., Pérez-Hernández, C.A., García-Trujillo, L. 2024. Transportation usage and perceptions among older adults in Mexico City: A qualitative study. Ageing & Society 10: 1947–1969.

Nastasi, B. K., Schensul, S.L. 2005. Contributions of qualitative research to the validity of intervention research. Journal of School Psychology 43: 177–195. doi.org/10.1016/j.jsp.2005.04.003

Nation Thailand. 2024. Thailand's ageing society report. https://www.nationthailand.com, 28 May 2024.

Parasuraman, A., Zeithaml, V.A., Berry, L.L. 1985. A conceptual model of service quality and its implication s for future research. Journal of Marketing 49: 41–50.

Parasuraman, A., Zeithaml, V.A., Berry, L.L. 1988. SERVQUAL: A multiple-item scale for measuring consumer perceptions of service quality. Journal of Retailing 64: 12–40.

Srinakharinwirot University. 2019. Public transport, service quality, and the Elderly's travel frequency in Bangkok metropolitan region. SWU Journal. 7: 129–142.

Tanaka, H., Saito, K. 2025. Smart mobility innovations in regional transport services: A systemic view of triggers, approaches and outcomes in Japan. Front. Sustain. Cities. 7: 1–20. doi.org/10.3389/frsc.2025.1574300

The Global Economy. 2024. Thailand: Fertility rate. https://www.theglobaleconomy.com/Thailand/Fertility_rate, 20 May 2024.

Zhou, Y., Li, X., Smith, J. 2024. Oldest old's travel mode choice and new mobility technology acceptance: Case in America and China. Front. Public Health. 24: 1–13.

สาขาทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม

(Subject: Natural Resources And Environment)

ภาคบรรยาย

(Oral Presentation)

การพัฒนาระบบฐานข้อมูลรายงานการกระทำผิดในเขตพื้นที่อนุรักษ์ภายใต้สังกัดส่วนอนุรักษ์สัตว์ป่า สำนักบริหารพื้นที่อนุรักษ์ที่ 16 (เชียงใหม่)

Development of a violation reports database system within conservation areas under the wildlife conservation division, protected areas regional office 16 (Chiang Mai)

ชลภัส โตโสภณ[a], **ชาคริต ณ ตะกั่วทุ่ง**[b], **ปิยวัตน์ ดิลกสัมพันธ์**[c]

Chonlaphat Tosophon[a], Chakrit Na Takuathung[b], Piyawat Diloksumpun[c]

[a]กรมอุทยานแห่งชาติ สัตว์ป่า และพันธุ์พืช กรุงเทพฯ 10900

[b]ภาควิชาวิศวกรรมป่าไม้ คณะวนศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

[a]Department of National Parks, Wildlife and Plant Conservation, Bangkok 10900, Thailand

[b]Department of Forest Engineering, Faculty of Forestry, Kasetsart University, Bangkok 10900, Thailand

*Corresponding author. E-mail address: chonlaphat.to@ku.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้พัฒนาและออกแบบระบบจัดการฐานข้อมูลเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการติดตามความคืบหน้าการรายงานการกระทำผิดและแสดงผลข้อมูลด้วยภาษา PHP, SQL และ JavaScript ร่วมกับระบบจัดการฐานข้อมูล MySQL ซึ่งได้ทดสอบฟังก์ชันและประสิทธิภาพการทำงาน 3 ระดับ ได้แก่ ระดับหน่วย ด้วย Black-box Testing 21 เหตุการณ์ ระดับรวมหน่วย ด้วย Function-Oriented Testing 25 เหตุการณ์ และระดับระบบ ด้วย Locust โดยจำลองผู้ใช้ 30 ราย เป็นเวลา 8 ชั่วโมง และมีการประเมินความพึงพอใจของผู้ใช้ 3 ด้าน ได้แก่ ด้านการอำนวยความสะดวก ด้านการตอบสนองผู้บริหาร และด้านคุณภาพและการใช้งานระบบ พบว่าระบบฐานข้อมูลซึ่งประกอบด้วย 10 เอนทิตี และส่วนต่อประสานผู้ใช้ 7 หน้า สามารถรองรับการบันทึก ปรับปรุง สืบค้น และติดตามสถานะคดีและของกลาง ได้อย่างมีประสิทธิภาพและเสถียรภาพ ผ่านการทดสอบครบทุกเหตุการณ์โดยไม่พบความล้มเหลวจาก 431,206 คำขอ มีอัตราการประมวลผลเฉลี่ย 14.555 คำขอต่อวินาที และค่าเฉลี่ยเวลาตอบสนอง 53.934 มิลลิวินาที ซึ่งอยู่ในระดับที่ผู้ใช้รับรู้ว่าระบบตอบสนองได้ทันที และในการประเมินความพึงพอใจ พบว่าระบบได้รับการประเมินในระดับพึงพอใจมากทั้ง 3 ด้าน

คำสำคัญ: การทดสอบประสิทธิภาพ, ระบบจัดการฐานข้อมูล MySQL, รายงานการกระทำผิด

Abstract

This study presents the development and design of a database management system (DBMS) to improve the efficiency of monitoring violation reports and visualizing related data, implemented using PHP, SQL, JavaScript, and MySQL. The system includes 10 entities and 7 user interfaces. Its functionalities and performance were tested through unit testing with 21 events, integration testing with 25 events, and system testing using Locust, simulating 30 concurrent users over an eight-hour period. Results indicate that the system reliably supports the recording, updating, retrieval, and monitoring of case statuses and exhibits. It achieved zero failures across 431,206 requests, with an average processing rate of 14.555 requests per second and an average response time of 53.934 milliseconds, which users perceive as effectively instantaneous. A user satisfaction survey further confirmed a highly satisfied rating for convenience, administrator responsiveness, and overall system quality and usability.

Keywords: MySQL Database Management System, Violation Reporting, Performance Testing

คำนำ

ในปัจจุบัน ส่วนอนุรักษ์สัตว์ป่า สำนักบริหารพื้นที่อนุรักษ์ที่ 16 (เชียงใหม่) มีพื้นที่รับผิดชอบจังหวัดเชียงใหม่และจังหวัดลำพูน 24,676 ตารางกิโลเมตร เป็นพื้นที่อนุรักษ์สัตว์ป่า (เขตรักษาพันธุ์สัตว์ป่า, เขตห้ามล่าสัตว์ป่า และพื้นที่เตรียมการ) 4,489 ตารางกิโลเมตร โดยมีหน้าที่และภารกิจหลายด้าน ทั้งด้านการอนุรักษ์ การป้องกัน และการดูแลพื้นที่ป่าอนุรักษ์และสัตว์ป่า ซึ่งครอบคลุมงานคดีและงานป้องกันปราบปรามการกระทำผิดกฎหมายด้านป่าไม้และสัตว์ป่า (ส่วนอนุรักษ์สัตว์ป่า สำนักบริหารพื้นที่อนุรักษ์ที่ 16 (เชียงใหม่), 2567) อย่างไรก็ตาม วิธีการจัดการข้อมูลรายงานการกระทำผิดที่พึ่งพาไฟล์ Excel และ Google Sheets เป็นหลัก ส่งผลให้เกิดข้อจำกัดหลายประการ ทั้งความไม่ต่อเนื่องในการติดตามสถานะคดี ความยากลำบากในการปรับปรุงข้อมูล รวมถึงข้อจำกัดในการประมวลผลข้อมูลเชิงสถิติที่จำเป็นต่อการสนับสนุนการตัดสินใจของผู้บริหาร เพื่อยกระดับประสิทธิภาพและความน่าเชื่อถือของการจัดการข้อมูลรายงานคดี งานวิจัยนี้มุ่งพัฒนาระบบที่เปลี่ยนผ่านจากการใช้ระบบแฟ้มข้อมูล (File-based System) ไปสู่ระบบจัดการฐานข้อมูล (Database Management System, DBMS) โดยใช้กระบวนการออกแบบฐานข้อมูล 5 ขั้นตอน ได้แก่ การสร้างแผนภาพ E–R Diagram การกำหนดหน่วยย่อยข้อมูลให้กับเอนทิตี การลดความซ้ำซ้อนด้วยการทำนอร์มัลไลซ์ถึงระดับ 3NF การกำหนดคุณสมบัติของข้อมูลและตรวจทานพจนานุกรมข้อมูล และการกำหนดความสัมพันธ์ระหว่างตาราง (ลาภลอย, 2552; โอภาส, 2558; สุจิตราและวรัฐา, 2560) ระบบจะถูกพัฒนาออกมาในรูปแบบเว็บแอปพลิเคชัน เพื่อเพิ่มความสะดวกในการเข้าถึงและจัดการข้อมูล โดยใช้ MySQL เป็นระบบจัดการฐานข้อมูลหลัก ซึ่งเหมาะสมกับลักษณะการทำงานของเว็บแอปพลิเคชัน นอกจากนี้ยังบูรณาการเครื่องมือสำหรับการวิเคราะห์และนำเสนอข้อมูล ได้แก่ Chart.js สำหรับสร้างแผนภูมิและกราฟเชิงสถิติ (Chart.js, 2024) และ Leaflet สำหรับแสดงข้อมูลเชิงพื้นที่บนแผนที่แบบโต้ตอบ (Leaflet, 2023) ทั้งนี้ การพัฒนาจะดำเนินการตามกระบวนของวงจรพัฒนาซอฟต์แวร์ (Software Development Life Cycle, SDLC) เพื่อให้ระบบที่ได้สามารถตอบสนองความต้องการของผู้ใช้งานได้อย่างมีประสิทธิภาพ (Iamkhajornchai, 2564)

อุปกรณ์และวิธีการ

อุปกรณ์

ในการพัฒนาระบบฐานข้อมูลนี้ประกอบไปด้วย 1) เครื่องคอมพิวเตอร์โน๊ตบุ๊กระบบปฏิบัติการ Microsoft Windows 2) เว็บเบราว์เซอร์ Google Chrome 3) แอปพลิเคชัน Figma 4) โปรแกรมจำลอง Web server (Xampp) 5) โปรแกรม Visual studio code 6) โปรแกรมจัดการฐานข้อมูล MySQL (phpMyAdmin) และ 7) ข้อมูลรายงานคดีและไฟล์เอกสารที่เกี่ยวข้องของส่วนอนุรักษ์สัตว์ป่า สำนักบริหารพื้นที่อนุรักษ์ที่ 16 (เชียงใหม่)

วิธีการ

การพัฒนาระบบฐานข้อมูลได้ดำเนินการตาม 6 ขั้นตอน ของวงจรพัฒนาซอฟต์แวร์ ดังนี้

1. การวางแผน โดยรวบรวมความต้องการผ่านการสอบถามโดยตรงจากผู้ใช้งานระบบและผู้มีส่วนเกี่ยวข้อง ได้แก่ ผู้อำนวยการและเจ้าหน้าที่ส่วนอนุรักษสัตว์ป่า สำนักบริหารพื้นที่อนุรักษ์ที่ 16 (เชียงใหม่) เพื่อระบุปัญหาและกำหนดเป้าหมายในการพัฒนา

2. การวิเคราะห์ ผู้พัฒนาได้นำความต้องการที่รวบรวมมาวิเคราะห์และสังเคราะห์เพื่อกำหนดข้อกำหนดของระบบ (System Requirements)

3. การออกแบบ การออกแบบระบบประกอบด้วย 2 ด้าน คือ 1) ด้านการออกแบบส่วนต่อประสานและประสบการณ์ผู้ใช้ (UI/UX Design) ด้วยโปรแกรม Figma และ 2) ด้านการออกแบบฐานข้อมูล (Database Design)

4. การเขียนโปรแกรม (Implementation) ดำเนินการโดยใช้โปรแกรม Visual Studio Code เพื่อพัฒนาระบบออกมาตามที่ออกแบบไว้ ทั้งในด้านหน้าตาและฟังก์ชันของระบบ และด้านการเชื่อมต่อฐานข้อมูลและประมวลผล

5. การทดสอบ (Testing and Integration) ใน 3 ระดับ ได้แก่ 1) การทดสอบระดับหน่วย (Unit Testing) ด้วยวิธีแบบกล่องดำ 2) การทดสอบระดับรวมหน่วย (Integration Testing) ด้วยการทดสอบเชิงฟังก์ชัน และ 3) การทดสอบระดับระบบ (System Testing) โดยการทดสอบในรูปแบบไม่เป็นฟังก์ชัน (Non function testing) ในด้านประสิทธิภาพหรือการปฏิบัติงานของระบบ (Performance Testing)

6. การบำรุงรักษา (Maintenance) โดยจัดทำเอกสารเพื่ออธิบายให้ผู้ใช้งานและผู้พัฒนาอื่นเข้าใจถึงฟังก์ชันการทำงานและโครงสร้างของระบบที่ใช้อยู่ได้

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

การวางแผน

จากการรวบรวมความต้องการผ่านการสอบถามโดยตรงจากผู้ใช้งานระบบและผู้มีส่วนเกี่ยวข้อง Fig. 1 พบว่าเป้าหมายหลัก คือ เพื่อติดตามสถานะคดี ช่วยในการบริหารจัดการของกลาง และสนับสนุนการตัดสินใจของผู้บริหารผ่านรายงานเชิงสถิติ โดยมุ่งแก้ไขปัญหาสภาวะคอขวดจากกระบวนการทำงานเดิม ซึ่งจากการวิเคราะห์ได้กำหนดสถาปัตยกรรมการเข้าถึงของผู้ใช้เป็น 2 ระดับ คือ ผู้ดูแลระบบและผู้ใช้งานทั่วไป ทั้งนี้ ได้มีการระบุข้อจำกัดที่ชัดเจน คือ การทำงานบนสภาพแวดล้อมฮาร์ดแวร์เดิมขององค์กร Windows 11 Pro 8GB RAM i7 9th Gen การทำงานผ่านเครือข่ายภายใน (LAN) การย้ายข้อมูลจากไฟล์ Excel เดิม และการมีข้อกำหนดด้านความปลอดภัยสูงสุด โดยระบบจะต้องถูกติดตั้งบนเซิร์ฟเวอร์ที่อยู่ภายใต้การดูแลขององค์กรเท่านั้น

Fig. 1 Requirements Gathering Meeting

การวิเคราะห์

จากการวิเคราะห์และสังเคราะห์สามารถกำหนดข้อกำหนดของระบบได้ 4 ด้านหลัก ได้แก่ ด้านการสนับสนุนการปฏิบัติงาน คือ ระบบต้องมีฟังก์ชันสนับสนุนการสรุปผลเชิงสถิติ การแสดงผลข้อมูล (Data Visualization) และการสืบค้นข้อมูลที่มีประสิทธิภาพ ด้านการสนับสนุนการตัดสินใจของผู้บริหาร คือ มุ่งเน้นความถูกต้องแม่นยำ และความรวดเร็วของข้อมูล ด้านความง่ายในการใช้งาน คือ ต้องมีกระบวนการใช้งานและส่วนต่อประสานผู้ใช้ที่ไม่ซับซ้อนและไม่ก่อให้เกิดภาระงานที่ซ้ำซ้อน ด้านความปลอดภัยและการควบคุมการเข้าถึง (Security and Access Control) คือ ต้องมีกลไก

การบริหารจัดการสิทธิ์ผู้ใช้งาน (Role-Based Access Control) ที่ชัดเจน โดยระบบจะต้องถูกติดตั้งและจัดเก็บข้อมูลไว้ที่เซิร์ฟเวอร์ขององค์กรเท่านั้น

การออกแบบ

โดยผู้พัฒนาได้ออกแบบส่วนต่อประสานผู้ใช้หลัก จำนวน 7 หน้า และออกแบบฐานข้อมูล ซึ่งได้จำลองโครงสร้างฐานข้อมูลทั้งหมดด้วยแผนภาพ E–R Diagram ประกอบด้วย 10 เอนทิตี ได้แก่ Cases เป็นตารางหลักที่เก็บข้อมูลเกี่ยวกับรายงานคดี เช่นเดียวกับตาราง Monitor Evidence ที่เก็บข้อมูลรายละเอียดของของกลาง ขณะที่ตาราง Animals, Trees, Locations และ Deposits นั้น จะเก็บข้อมูลพื้นฐานที่ผู้ใช้เรียกใช้งานเป็นประจำ เช่น ชนิดพันธุ์สัตว์ป่า ชนิดพันธุ์ไม้ ชื่อหน่วยงาน และชื่อหน่วยงานที่รับฝากของกลาง และเพื่อความปลอดภัย ระบบจึงให้มีการลงทะเบียนผู้ใช้งานและเก็บข้อมูลรายละเอียดไว้ในตาราง Users สำหรับผู้ใช้งานทั่วไป โดยข้อมูลการเคลื่อนไหวจะถูกติดตามผ่านตาราง change_history ในส่วนของผู้ดูแลระบบ ข้อมูลจะถูกจัดเก็บในตาราง users_director นอกจากนี้ ยังมีตาราง user_sessions ที่บันทึกเวลาเข้าสู่ระบบและออกจากระบบของผู้ใช้งานทุกระดับ เพื่อใช้ในการติดตามกิจกรรมของระบบ Fig. 2

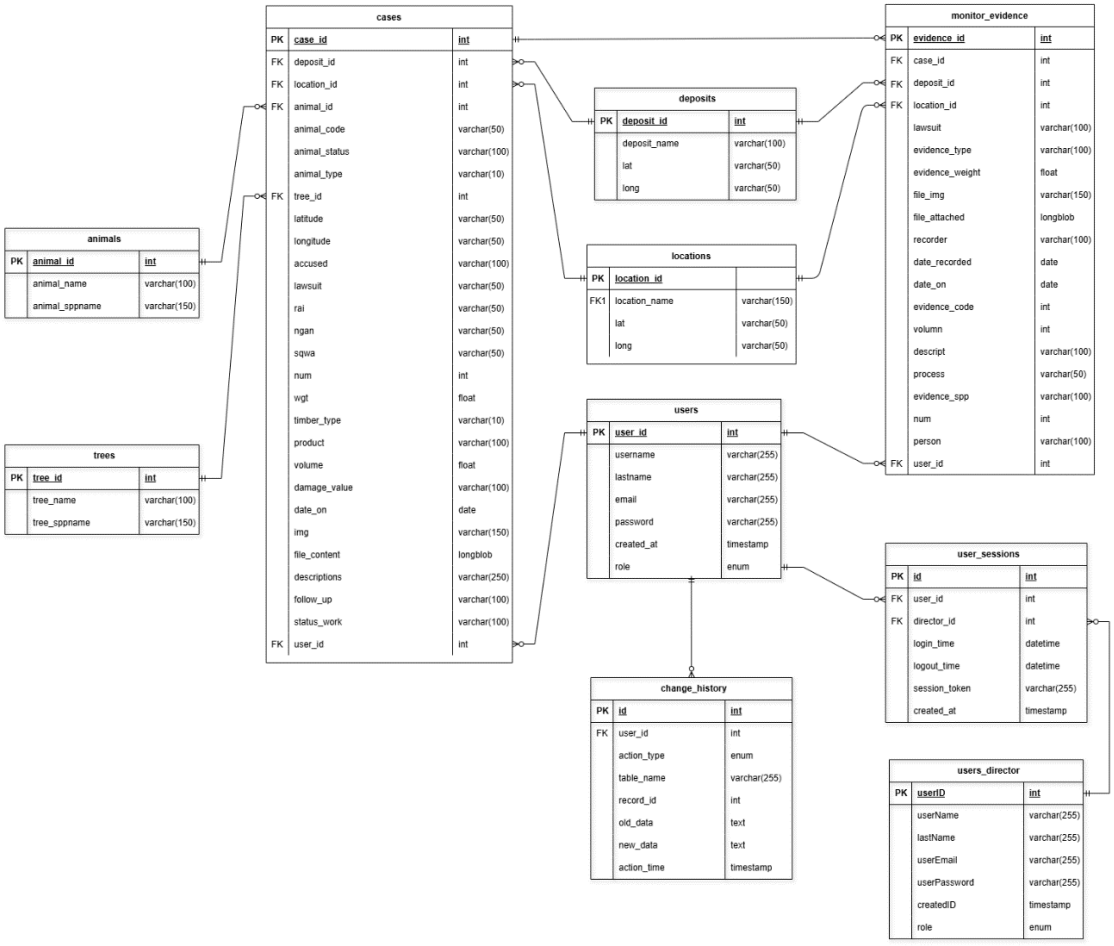


Fig. 2 Entity-Relationship Diagram

การเขียนโปรแกรม

ซึ่งดำเนินการโดยใช้ Visual Studio Code ตามที่ได้ออกแบบดังข้างต้น ดังนี้

1) หน้าต่างแสดงผลรวมที่มีส่วนต่อประสานผู้ใช้ต่างกันไปตามสิทธิ์ของผู้ใช้ซึ่งประกอบด้วย 3 ส่วน ได้แก่ 1. แถบเมนูที่ใช้เชื่อมโยงไปยังหน้าต่างต่าง ๆ ภายในระบบ 2. ส่วนแสดงผลข้อมูลสถิติ ซึ่งประกอบด้วยกล่องสรุปจำนวนคดีรายหน่วยงาน แผนภูมิจำแนกประเภทคดี แผนภูมิแท่งแบบซ้อน เพื่อเปรียบเทียบจำนวนคดีตามประเภทในทุกหน่วยงาน กราฟแสดงแนวโน้มคดีในช่วง 12 เดือน ของ 3 ปีล่าสุด รวมถึงตารางแสดงรายละเอียดคดีที่จำเป็น และ 3. ปุ่มแจ้งเตือนการเปลี่ยนแปลงข้อมูลสำหรับผู้ใช้งานในระดับผู้ดูแลระบบ Fig. 3

Fig. 3 Home Page

2) หน้าต่างดำเนินการติดตามของกลาง ประกอบด้วย 4 ส่วนย่อย ได้แก่ 2.1) การอัปเดตสถานะเอกสาร ซึ่งสามารถค้นหาจากข้อมูลที่เกี่ยวข้อง แก้ไข และอัปเดรตสถานะจัดส่งรายงานได้ 2.2) การนำเข้าข้อมูลของกลาง โดยเชื่อมโยงจากผลการค้นหาคดีในส่วนก่อนหน้า สำหรับคดีประเภทลักลอบทำไม้หรือล่าสัตว์ป่าที่มีของกลาง ระบบสามารถเพิ่มข้อมูลของกลางได้ตามแบบฟอร์มที่กำหนด ซึ่งแบ่งเป็น 3 ขั้นตอน คือ 1. ระบุชนิดพันธุ์ สถานะ และวิธีการดำเนินการกับของกลาง 2. นำเข้าเอกสารและรายละเอียดที่เกี่ยวข้องกับของกลาง และ 3. บันทึกรายละเอียดของผู้บันทึกข้อมูล 2.3) การแสดงพิกัดจัดเก็บของกลาง โดยผู้ใช้สามารถค้นหาตำแหน่งจัดเก็บได้จากรหัสของกลาง และ 2.4) การแสดงสถิติเฉพาะของกลาง ซึ่งสามารถนำเสนอข้อมูลในสองรูปแบบที่สลับใช้งานได้ ได้แก่ 1. แผนภูมิวงกลมสำหรับจำแนกประเภทคดีของกลาง 2. แผนภูมิแท่งสำหรับแสดงจำนวนของกลางรวมตามหน่วยงาน Fig. 4

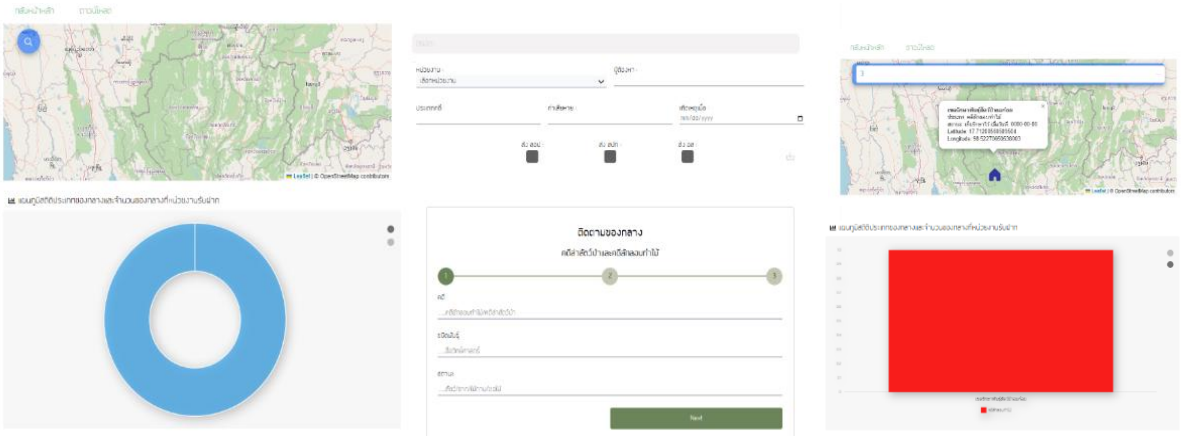


Fig. 4 Evidence Management Page

3) หน้าต่างจัดแสดงข้อมูลเชิงพื้นที่ โดยใช้ค่าพิกัด Latitude Longitude พร้อมฟังก์ชันกรองข้อมูลที่ช่วยให้ผู้ใช้สามารถตรวจสอบและวิเคราะห์ข้อมูลได้อย่างมีประสิทธิภาพ ได้แก่ แถบเลือกหน่วยงาน กล่องเช็คบ็อกสำหรับกำหนดประเภทคดี การแสดงเส้นขอบเขตพื้นที่ป่าอนุรักษ์ และป้ายชื่อหน่วยงานบนแผนที่ นอกจากนี้ ระบบยังนำเสนอข้อมูลความหนาแน่นของจำนวนคดีในรูปแบบสัญลักษณ์วงกลม การเลือกปีเพื่อปรับช่วงข้อมูลที่ต้องการวิเคราะห์ รวมถึงฟังก์ชันคำนวณเส้นทางจากพิกัดคดีที่เลือกไปยังจุดหมายปลายทางที่ผู้ใช้ระบุ Latitude Longitude ทั้งนี้ ผู้ใช้สามารถดาวน์โหลดข้อมูลพิกัดที่แสดงเป็นไฟล์ CSV เพื่อนำไปวิเคราะห์เพิ่มเติมได้ต่อไป Fig. 5

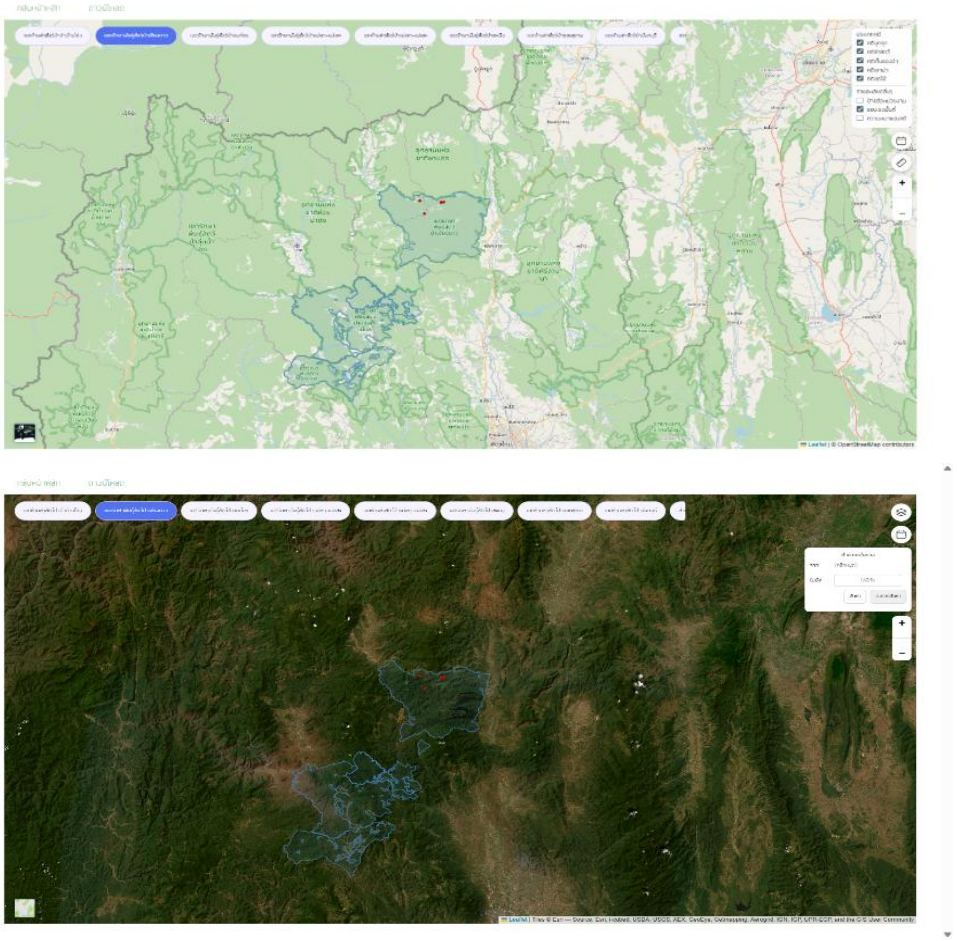


Fig. 5 Geospatial Visualization Page

4) หน้าต่างสืบค้นข้อมูล โดยสามารถสืบค้นด้วยข้อมูลที่เกี่ยวข้อง อีกทั้งเมื่อคลิกแก้ไขระบบจะทำการเชื่อมโยงต่อไปยังหน้าแบบฟอร์มเพิ่มข้อมูลดังในข้อถัดไป Fig. 6

Fig. 6 View and Edit Data Page

5) หน้าต่างแบบฟอร์มเพิ่มข้อมูลแบบไดนามิก ที่จะแบ่งขั้นตอนดำเนินการออกเป็น 3 ขั้นตอน คือ ขั้นตอนกรอกรายละเอียดทั่วไป ขั้นตอนเลือกประเภทคดี และขั้นตอนกรอกรายละเอียดเกี่ยวกับคดี โดยการออกแบบส่วนต่อประสานผู้ใช้ในขั้นตอนนี้จะต่างกันไปตามประเภทคดีที่เลือก Fig. 7

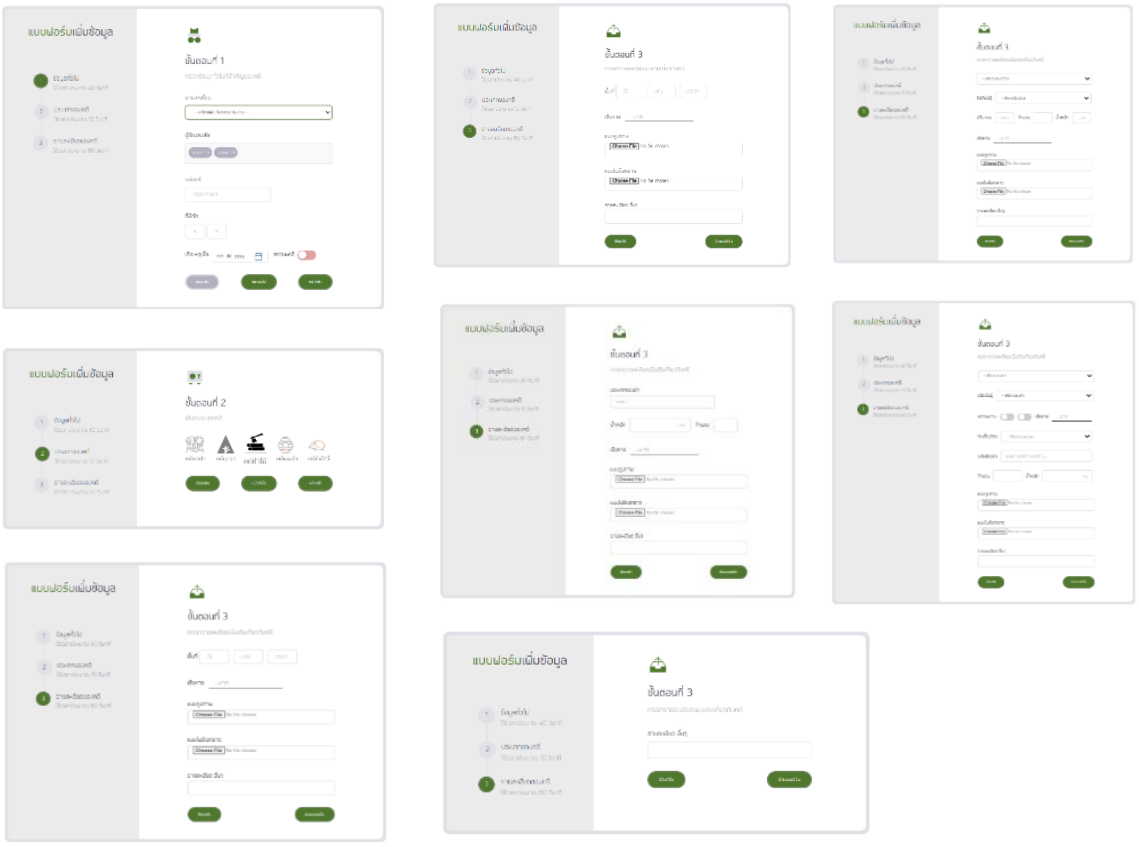


Fig. 7 Case Details Entry Page

6) หน้าต่างจัดการระบบ สำหรับผู้ดูแลระบบ เช่น หน้าต่างการจัดการบัญชีผู้ใช้รองรับการตรวจสอบข้อมูลพื้นฐานของผู้ใช้งาน ได้แก่ ชื่อ – นามสกุล และไปรษณีย์อิเล็กทรอนิกส์ พร้อมทั้งมีฟังก์ชันสำหรับลบบัญชีผู้ใช้ที่ไม่ต้องการออกจากระบบได้โดยตรง นอกจากนี้ ยังมีหน้าต่างสำหรับตรวจสอบบันทึกการทำงานของผู้ใช้ ซึ่งผู้ดูแลระบบสามารถระบุชื่อผู้ใช้งานและช่วงวัน – เวลา เพื่อกรองและเรียกดูประวัติการดำเนินการที่ต้องการได้เบื้องต้น รวมถึงหน้าต่างสำหรับการนำเข้าข้อมูลแบบตารางที่ช่วยอำนวยความสะดวกในการเพิ่มหรือปรับปรุงข้อมูลจำนวนมาก Fig. 8

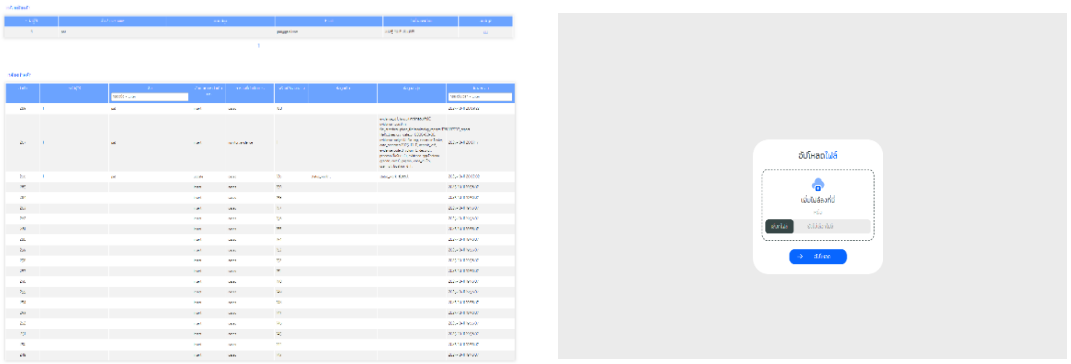


Fig. 8 Administrator Management Pages

7) ส่วนยืนยันตัวตน สำหรับลงทะเบียนและเข้าใช้งานระบบ ทั้งนี้ หากต้องการลงทะเบียนบัญชีผู้ดูแลระบบต้องกรอกรหัสผ่านก่อน จึงจะสามารถเข้าสู่หน้าต่างลงทะเบียนที่ถูกต้องได้ Fig. 9

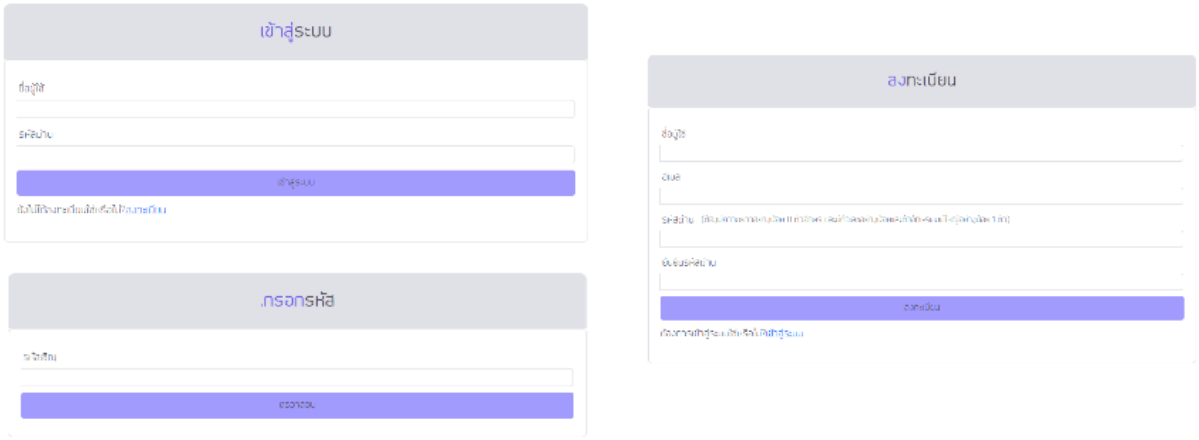


Fig. 9 Authentication Pages

การทดสอบ

ดำเนินการทดสอบใน 3 ระดับ คือ 1) การทดสอบระดับหน่วย ด้วยวิธีแบบกล่องดำ จำนวน 21 เหตุการณ์ 2) การทดสอบระดับรวมหน่วย ด้วยการทดสอบเชิงฟังก์ชัน จำนวน 25 เหตุการณ์ พบว่าผ่านการทดสอบทุกเหตุการณ์ และ 3) การทดสอบระดับระบบ โดยการทดสอบแบบไม่เป็นฟังก์ชันในด้านประสิทธิภาพ ซึ่งได้ดำเนินการทดสอบแบบคงที่ (Constant Load Test) ด้วยเครื่องมือ Locust ที่เหมาะกับการทดสอบเว็บแอปพลิเคชันและการทดสอบที่เน้นวัดประสิทธิภาพของระบบ เนื่องจากเป็นเครื่องมือที่มีอัตราการประมวลผลที่สูง (Throughput) และเวลาตอบสนอง (Response Time) ที่ต่ำ (Shrivastava and Prapulla, 2020) ซึ่งได้จำลองผู้ใช้งาน จำนวน 30 ราย Fig. 10 เป็นระยะเวลา 8 ชั่วโมง กำหนดตามกฎหมายคุ้มครองแรงงานที่กำหนดให้เวลาทำงานปกติไม่เกิน 8 ชั่วโมงต่อวัน (สำนักคุ้มครองแรงงาน

กรมสวัสดิการและคุ้มครองแรงงาน, 2568) โดยใช้ Server และ Client ที่มีสเปกฮาร์ดแวร์เดียวกับคอมพิวเตอร์มาตรฐานขององค์กรในการทดสอบภายใต้สภาวะการทำงานผ่านเครือข่ายภายใน ผลการทดสอบยืนยันว่า ระบบมีความเสถียรสูง โดยไม่ปรากฏความล้มเหลวในการร้องขอ (Failures/s = 0) จากจำนวนคำขอสะสมทั้งหมด 431,206 คำขอ อัตราการประมวลผลเฉลี่ย 14.555 คำขอต่อวินาที และมีค่าเฉลี่ยเวลาตอบสนองที่ 53.934 มิลลิวินาที ซึ่งอยู่ในระดับที่ผู้ใช้งานรับรู้ว่าเป็นการตอบสนองทันที (Nielsen, 1993) ทั้งนี้ จากการประเมินประสิทธิภาพการประมวลผลในหน้า home.php พบว่ามีค่าเวลาตอบสนองที่ 95th Percentile 183 มิลลิวินาที และสูงสุดที่ 555.593 มิลลิวินาที Table. 1 ถึงแม้ผู้ใช้จะยังรู้สึกถึงการตอบสนองที่ราบรื่นของระบบ แต่อาจสังเกตได้ถึงความล่าช้า จากการติดตามทรัพยากร พบว่า CPU ของ Server ทำงานได้ปกติ ขณะที่ CPU ของ Client ทำงานผิดปกติในช่วงเวลาที่ระบบบันทึกเวลาตอบสนองที่สูงที่สุด Fig. 11 ซึ่งสาเหตุของปัญหาดังกล่าวอาจเกิดจากที่ในหน้า home.php มีการแสดงผลแผนภูมิถึง 10 แผนภูมิ ด้วยไลบรารี Chart.js ทำให้เกิดสภาวะการประมวลผล JavaScript สะสม และต้องใช้ CPU เพิ่มมากขึ้น โดยอ้างอิงผลการทดสอบของ (TimeChart, 2020) พบว่าเวลาในการประมวลผลสคริปต์ของ Chart.js คิดเป็นร้อยละ 70 ของเวลาทั้งหมดในการแสดงผลแผนภูมิ และในส่วนของการวาดแผนภูมิ Chart.js เป็นไลบรารีที่วาดบน Canvas (Xin Zhao et al, 2025) ได้อธิบายลักษณะการทำงานของ Canvas ว่าเป็นการวาดโดยตรงด้วยความละเอียดพิกเซลที่คงที่และไม่พึ่งพาโครงสร้าง DOM ส่งผลให้เวลาในการวาดแผนภูมิอยู่ในระดับปานกลาง และลดภาระในการจัดการโครงสร้างของเบราว์เซอร์ ดังนั้น การเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานของ Client สามารถดำเนินการได้ 2 แนวทาง คือ 1) ลดความซับซ้อนของโค้ด JavaScript เพื่อช่วยลดภาระในการวิเคราะห์และประมวลผลของ JavaScript engine บนเบราว์เซอร์ ส่งผลให้การใช้ทรัพยากร CPU ลดลง และเพิ่มประสิทธิภาพในการตอบสนองของระบบ 2) ลดจำนวนแผนภูมิ จะช่วยลดจำนวนออบเจกต์และภาระในการวาดกราฟิกบน Canvas ซึ่งส่งผลให้ระยะเวลาในการประมวลผลเพื่อสร้างและแสดงผลแผนภูมิลดลง ทั้งนี้ แม้พบข้อจำกัดด้านการใช้ทรัพยากรในบางช่วงเวลา แต่ผลการทดสอบโดยรวมแสดงให้เห็นว่าอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบภายใต้ข้อจำกัดที่กำหนดสามารถรองรับภาระงานได้ตลอดระยะเวลาการทดสอบโดยไม่เกิดความล้มเหลว นอกจากนี้ ได้ทำการประเมินความพึงพอใจของผู้ใช้ตามเป้าหมายการพัฒนา โดยผู้ใช้งานระดับทั่วไป 4 ราย และระดับผู้ดูแล 2 ราย ซึ่งแบ่งออกเป็น 3 ด้าน ได้แก่ 1) ด้านการอำนวยความสะดวก ประกอบด้วย 1.1) ความสามารถในการสรุปสถิติ มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 4.50 ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 0.76 อยู่ในระดับพอใจมาก 1.2) รูปแบบและความชัดเจนในการแสดงผลข้อมูล ค่าเฉลี่ยเท่ากับ 4.17 ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 0.90 อยู่ในระดับพอใจมาก 1.3) การติดตามความคืบหน้าของงานคดี ค่าเฉลี่ยเท่ากับ 4.33 ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 0.94 อยู่ในระดับพอใจมาก 1.4) ความง่ายในการสืบค้นข้อมูล ค่าเฉลี่ยเท่ากับ 4.50 ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 0.76 อยู่ในระดับพอใจมาก 2) ด้านการตอบสนองผู้บริหาร ประกอบด้วย 2.1) ความเร็วในการตอบสนอง ค่าเฉลี่ยเท่ากับ 4.83 ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 0.37 อยู่ในระดับพอใจมาก 2.2) ความถูกต้องของข้อมูล ค่าเฉลี่ยเท่ากับ 4.67 ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 0.47 อยู่ในระดับพอใจมาก และ 3) ด้านคุณภาพและการใช้งานระบบ ประกอบด้วย 3.1) ระดับความง่ายต่อการใช้งานระบบ ค่าเฉลี่ยเท่ากับ 3.67 ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 0.94 อยู่ในระดับพอใจปานกลาง 3.2) ความเสถียรของระบบ ค่าเฉลี่ยเท่ากับ 4.67 ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 0.47 อยู่ในระดับพอใจมาก และ 3.3) ความมีประโยชน์ของระบบต่อการปฏิบัติการ ค่าเฉลี่ยเท่ากับ 4.67 ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 0.47 อยู่ในระดับพอใจมาก Fig. 12 แสดงให้เห็นว่าข้อมูลส่วนใหญ่มีลักษณะการกระจายตัวแบบเบ้ซ้าย โดยค่าเฉลี่ย และค่ามัธยฐานเกาะกลุ่มกันอยู่ในช่วงค่าคะแนนความพึงพอใจมากกว่า 4 โดยเฉพาะในข้อ 1.1, 1.4, 2.1, 2.2, 3.1, 3.2 และ 3.3 ซึ่งมีลักษณะกล่องแคบ แสดงให้เห็นว่าผู้ใช้มีความพึงพอใจไปในทิศทางเดียวกัน ต่างจากข้อ 1.2 และ 1.3 ที่มีการกระจายตัวของความพึงพอใจมากกว่า ส่งผลให้ลักษณะกล่องกว้าง และเมื่อพิจารณาในภาพรวมของด้านที่ 1) ด้านการอำนวยความสะดวก พบว่าผู้ใช้มีความพึงพอใจที่แตกต่างกันในประเด็นรูปแบบและความ

ชัดเจนในการแสดงผลข้อมูล และการติดตามความคืบหน้าของงานคดี ขณะที่ด้านที่ผู้ใช้มีความพึงพอใจสอดคล้องกันและอยู่ในระดับค่าคะแนนที่สูง ได้แก่ ด้านที่ 2) ด้านการตอบสนองผู้บริหาร โดยเฉพาะในข้อ 2.1) ความเร็วในการตอบสนอง ที่มีค่ามัธยฐานอยู่ที่ระดับความพึงพอใจ 5 อย่างไรก็ตาม เมื่อพิจารณาในด้านที่ 3) ด้านคุณภาพและการใช้งานระบบ พบว่าในข้อ 3.1) ระดับความง่ายต่อการใช้งานระบบ ปรากฏค่าผิดปกติที่ระดับคะแนน 2 สะท้อนให้เห็นว่ายังมีผู้ใช้บางรายที่ได้รับประสบการณ์การใช้งานแตกต่างจากผู้ใช้ส่วนใหญ่ ซึ่งอาจเกิดจากข้อจำกัดบางประการของระบบที่ส่งผลต่อการใช้งานของผู้ใช้โดยตรง หรือจากตัวผู้ใช้งานเอง

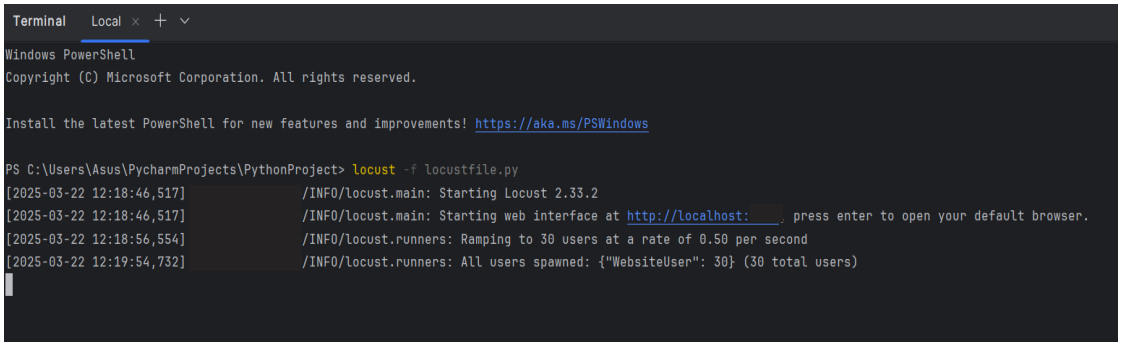


Fig. 10 A Constant Load Test conducted with Locust

Table 1 Test results for client requests sent to the Server via a LAN internet connection

Name	Request Count	Average Response Time (ms)	Max Response Time (ms)	Requests/s	Failures/s	95%
/project2025/home.php	72101	159.3548	555.9538	2.433828	0	180
/project2025/maps.php	71655	11.16352	446.3663	2.418773	0	17
/project2025/monitoring.php	72112	53.38409	527.4508	2.4342	0	65
/project2025/insert.php	71863	36.36211	529.2923	2.425794	0	46
/project2025/search_table.php	71566	30.84992	515.9266	2.415769	0	40
/project2025/update_form.php	71909	31.93985	441.7526	2.427347	0	41
Aggregated	431206	53.93443	555.9538	14.55571	0	170

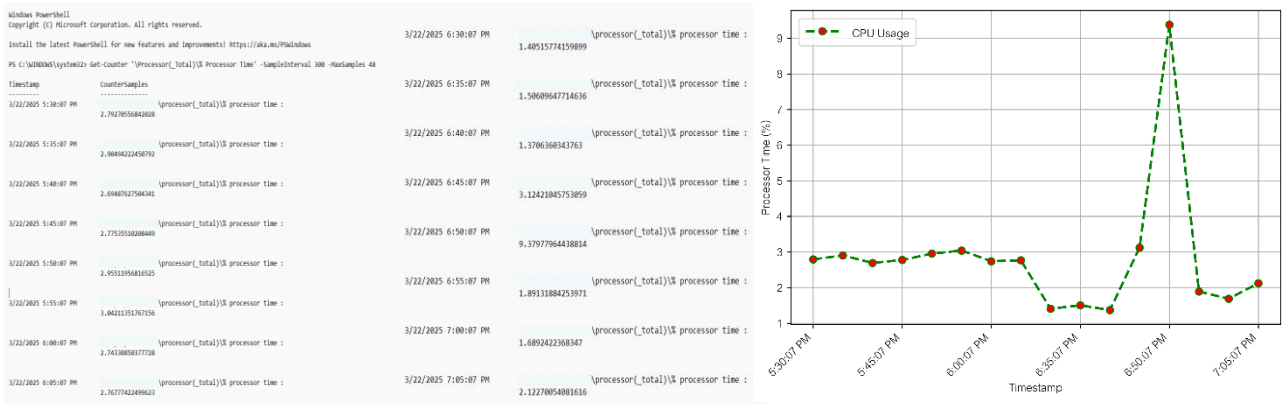


Fig. 11 Client CPU Monitoring Results During Testing and Graph of Client CPU Usage Percentage over Time

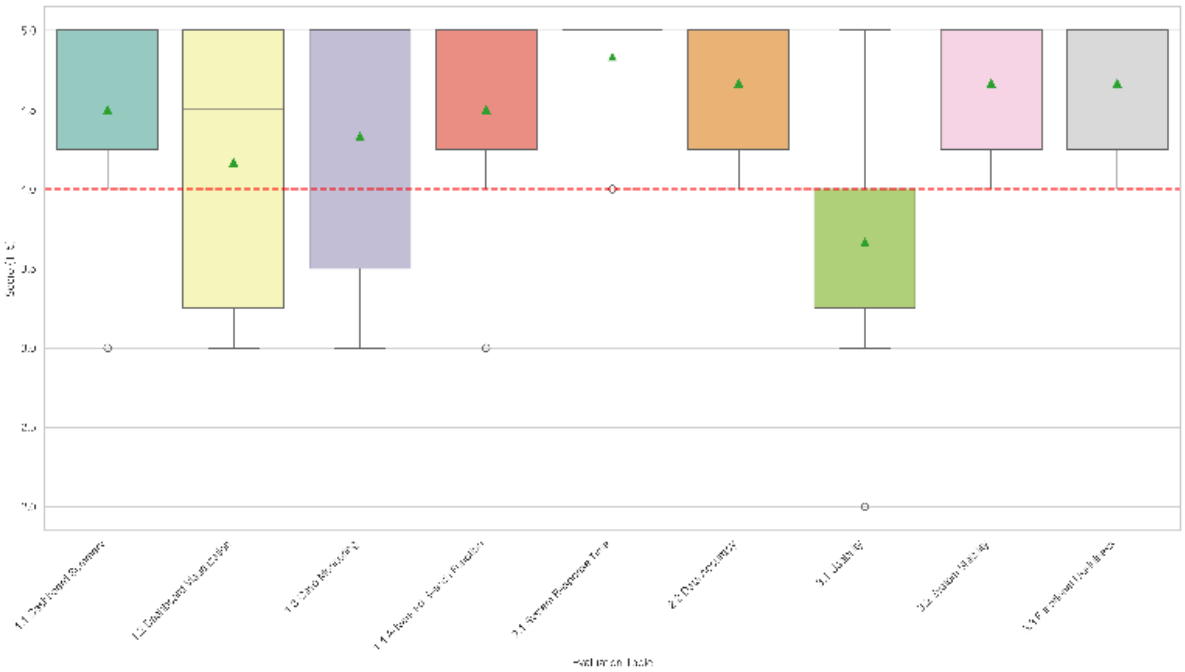


Fig. 12 Box Plot of Satisfaction Scores by Evaluation Topic

การบำรุงรักษา (Maintenance)

โดยผู้พัฒนาได้จัดเตรียมเอกสารสำคัญได้แก่ ไฟล์ README.md Fig. 13 และ Code Diagram ในแฟ้มโปรเจกต์ เพื่อให้นักพัฒนาในอนาคตสามารถทำความเข้าใจโครงสร้างโค้ดได้โดยง่าย

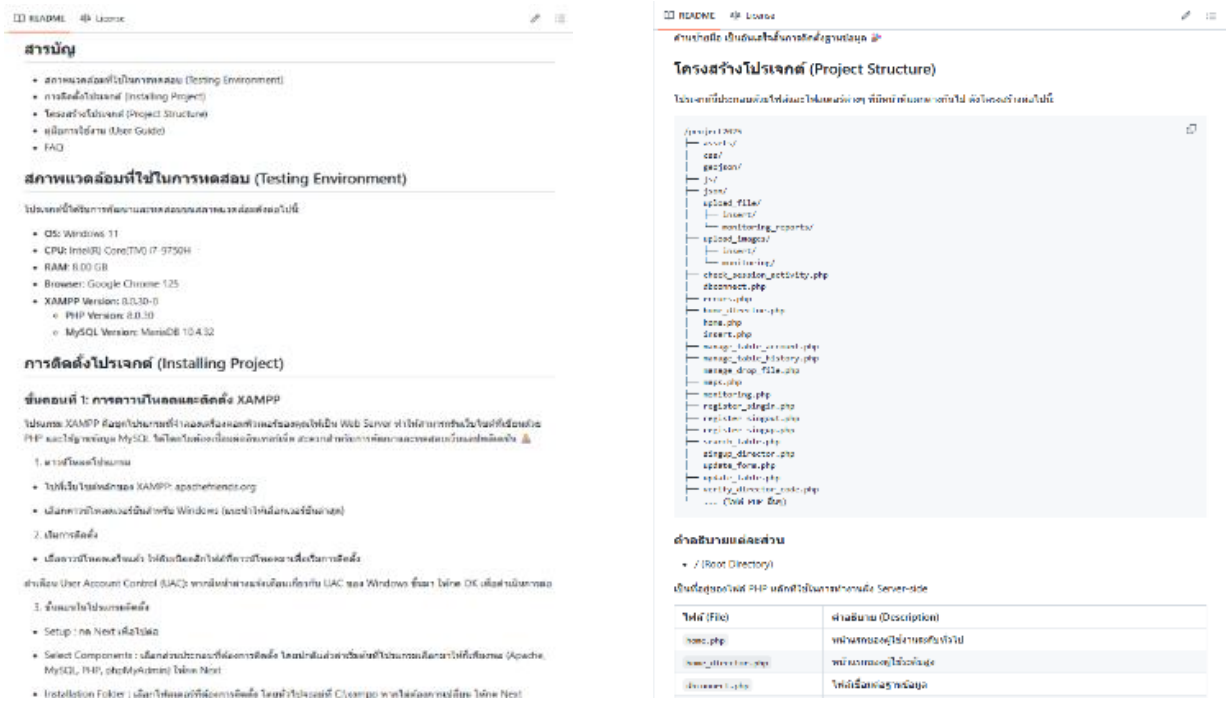


Fig. 13 README.md

สรุป

จากการพัฒนาระบบฐานข้อมูลรายงานการกระทำผิดในเขตพื้นที่อนุรักษ์ภายใต้สังกัดส่วนอนุรักษ์สัตว์ป่า สำนักบริหารพื้นที่อนุรักษ์ที่ 16 (เชียงใหม่) ได้ดำเนินตามกรอบวงจรพัฒนาซอฟต์แวร์ โดยในการวางแผนได้มีการสัมภาษณ์ผู้มีส่วนได้ส่วนเสีย ซึ่งสะท้อนให้เห็นถึงปัญหาและข้อจำกัดด้านประสิทธิภาพจากกระบวนการจัดการข้อมูล แบบเดิม และนำไปสู่ความต้องการพัฒนาระบบใหม่ขึ้นมาเพื่อแก้ไขปัญหา โดยมีข้อกำหนดสำคัญ คือ ต้องใช้ฮาร์ดแวร์เดิม และติดตั้งบนเซิร์ฟเวอร์ที่อยู่ภายใต้การดูแลขององค์กรเท่านั้น จากนั้นในการวิเคราะห์ ผู้พัฒนาได้สังเคราะห์ข้อกำหนดของระบบออกเป็น 4 ด้านหลัก ได้แก่ การสนับสนุนการปฏิบัติงาน การสนับสนุนผู้บริหาร ความง่ายในการใช้งาน และความปลอดภัย เมื่อได้ข้อกำหนดที่ชัดเจนแล้ว จึงนำไปสู่การออกแบบ โดยได้ออกแบบส่วนต่อประสาน 7 หน้าหลัก คือ หน้าแสดงผลรวม หน้าการติดตามของกลาง หน้าสืบค้นข้อมูล หน้าแบบฟอร์มเพิ่มข้อมูล หน้าจัดการระบบ สำหรับผู้ดูแล และส่วนยืนยันตัวตน และฐานข้อมูล 10 เอนทิตี เพื่อเป็นต้นแบบในการเขียนโปรแกรม เมื่อพัฒนาเสร็จสิ้น ระบบได้ถูกทดสอบใน 3 ระดับ และสามารถผ่านการทดสอบระดับหน่วย 21 เหตุการณ์ และระดับรวมหน่วย 25 เหตุการณ์ ได้ทั้งหมด ส่วนในระดับระบบจากการจำลองผู้ใช้ 30 คน เป็นเวลา 8 ชั่วโมง ปรากฏว่า ระบบมีเสถียรภาพสูง ไม่พบความล้มเหลวในการร้องขอจากจำนวนคำขอสะสมทั้งหมด (Failures/s = 0 จาก 431,206 คำขอ) มีเวลาตอบสนองเฉลี่ย 53.934 มิลลิวินาที และอัตราการประมวลผลเฉลี่ย 14.555 คำขอต่อวินาที และนอกจากนี้ ระบบยังได้รับการประเมินความพึงพอใจจากผู้ใช้จริงในระดับพึงพอใจมาก โดยด้านที่ได้รับคะแนนประเมินสูงที่สุด คือ ด้านการตอบสนองผู้บริหาร รองลงมาเป็นด้านการอำนวยความสะดวก และด้านคุณภาพและการใช้งานระบบ ตามลำดับ ทั้งนี้ การบำรุงรักษาระบบในอนาคต ผู้พัฒนาได้มีการจัดเตรียมเอกสาร README.md และ Code Diagram เพื่อสนับสนุนการบำรุงรักษาในอนาคต

กิตติกรรมประกาศ

ขอกราบขอบพระคุณ นายกฤตภาส ขันทะธงสกุลดี เจ้าพนักงานป่าไม้อาวุโส ที่ได้กรุณาให้ข้อคิดเห็นและความรู้อันเป็นประโยชน์อย่างยิ่งต่อการพัฒนาระบบฐานข้อมูลในครั้งนี้

ขอกราบขอบพระคุณ ผู้อำนวยการส่วนอนุรักษ์สัตว์ป่า และเจ้าหน้าที่ทุกท่าน สำนักบริหารพื้นที่อนุรักษ์ที่ 16 (เชียงใหม่) ที่ได้อนุเคราะห์ข้อมูล ให้ความเห็น และข้อเสนอแนะ อันเป็นประโยชน์อย่างยิ่งต่อการพัฒนา

สุดท้ายนี้ ขอกราบขอบพระคุณ ครอบครัว ที่คอยให้ความช่วยเหลือและเป็นกำลังใจที่สำคัญยิ่งเสมอมา จนกระทั่งวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เสร็จสมบูรณ์

เอกสารอ้างอิง

ลาภลอย วานิชอังกูร. 2552. เรียนรู้ด้วยตัวเอง DataBase. ซีเอ็ดยูเคชั่น, กรุงเทพมหานคร.

ส่วนอนุรักษ์สัตว์ป่า สำนักบริหารพื้นที่อนุรักษ์ที่ 16 (เชียงใหม่). 2567. รายงานผลการดำเนินงานประจำปี *2567*.

สำนักคุ้มครองแรงงาน กรมสวัสดิการและคุ้มครองแรงงาน. 2025. การคุ้มครองแรงงาน. e-Labour บริการประชาชน. แหล่งที่มา: https://lb.mol.go.th/, 30 ตุลาคม 2568.

สุจิตรา อดุลย์เกษม และ วรัฐา นพพรเจริญกุล. 2560. ระบบฐานข้อมูล (Database Systems). ท้อป, กรุงเทพมหานคร.

โอภาส เอี่ยมสิริวงศ์. 2558. ระบบฐานข้อมูล (Database Systems). ซีเอ็ดยูเคชั่น, กรุงเทพมหานคร.

Chart.js. 2024. Data visualization with Chart.js.

Iamkhajornchai, C. 2023. What should be tested in a software system. BorntoDev Co., Ltd. Leaflet. 2023. Using GeoJSON with Leaflet.

Nielsen, J. 1993. Usability engineering. Academic Press.

Shrivastava, S., Prapulla, P.S.B. 2020. Comprehensive review of load testing tools. Int. Res. J. Eng. Technol. 7: 3392–3395. TimeChart. 2020. Performance tests.

Zhao, X., et al. 2025. Graph visualization efficiency of popular web-based libraries. Vis. Comput. Ind. Biomed. Art 8: 1–17. doi.org/10.1186/s42492-025-00193-y

แบบจำลองสามมิติตอไม้ตะเคียนทองด้วยเครื่องสแกนเลเซอร์ภาคพื้นดิน กรณีศึกษาตอไม้ตะเคียนทองที่มีความเอนเอียง พูพอน และโพรง บริเวณแยกรีคอฟ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

3D modeling of *Hopea odorata* Roxb. stumps using terrestrial laser scanning: A case study of an inclined, buttressed, and hollow stump at the RECOFTC intersection, Kasetsart University

สรัล จันคำเรือง, ธีระพงษ์ ชุมแสงศรี*, จิรวัฒน์ ยิ่งดี

Saran Chankhamrueng, Theerapong Chumsangsri*, Jirawat Yingdee

ภาควิชาวิศวกรรมป่าไม้ คณะวนศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

Department of Forest Engineering, Faculty of Forestry, Kasetsart University, Bangkok 10900, Thailand

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

บทคัดย่อ

ตอไม้ตะเคียนทองบริเวณแยกรีคอฟ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ เป็นสัญลักษณ์ของความอุดมสมบูรณ์ในอดีตที่กำลังเสื่อมสภาพจากสภาพอากาศ การศึกษานี้ใช้เครื่องสแกนเลเซอร์ภาคพื้นดิน (Terrestrial laser scanning; TLS) เพื่อสร้างแบบจำลองสามมิติสำหรับจัดเก็บเป็นฐานข้อมูลในรูปแบบดิจิทัล การวิเคราะห์โครงสร้าง สภาพปัจจุบัน และประเมินปริมาตรของตอไม้ที่มีความเอนเอียง พูพอน และโพรงภายใน โดยเปรียบเทียบการตั้งค่าความละเอียด 4 รูปแบบ วิธีคำนวณด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป สมการมาตรฐาน (Smalian, Huber และ Newton) และวิธีวัดแบบดั้งเดิม ผลการศึกษาปรากฏว่าข้อมูลแบบจำลองสามมิติ (3D) ของตอไม้มีลักษณะใกล้เคียงทรงกระบอก และมีพูพอนไม่สม่ำเสมอ การคำนวณปริมาตรด้วยการวิเคราะห์พื้นที่หน้าตัดอย่างละเอียดให้ค่าค่อนข้างใกล้เคียงกันระหว่าง 8.091–9.314 ลูกบาศก์เมตร และเมื่อพิจารณาร่วมกันกับปริมาตรโพรงไม้ พบว่าตอไม้เหลือปริมาตรสุทธิ 7.753 ลูกบาศก์เมตร ผลลัพธ์นี้แสดงให้เห็นถึงศักยภาพของ TLS ในการคำนวนปริมาตรไม้ที่มีรูปทรงซับซ้อนให้ค่าที่มีความแม่นยำ ดังนั้นเทคโนโลยี TLS ยังสามารถนำไปประยุกต์เพื่อติดตามการเปลี่ยนแปลงของตอไม้ตะเคียนที่อาจจะมีการผุพังไปตามกาลเวลา

คำสำคัญ: กลุ่มข้อมูลจุด, เครื่องสแกนเลเซอร์ภาคพื้นดิน, ตอไม้ตะเคียนทอง, แบบจำลองสามมิติ,

Abstract

The *Hopea odorata* Roxb. stump at RECOFTC Intersection, Kasetsart University, symbolizes past richness deteriorating from weathering. This study used Terrestrial Laser Scanning (TLS) to generate a 3D digital archive for analyzing the structure, condition, and volume of this inclined, buttressed stump with internal cavities. Comparing four resolutions against standard equations (Smalian, Huber, Newton) and traditional methods showed the 3D model resembles a cylinder with irregular buttresses. Detailed analysis yielded gross volumes of 8.091–9.314 m^3 and a net volume of 7.753 m^3 after cavity deduction. These findings demonstrate TLS accuracy for complex geometries, indicating potential for monitoring the stump's changes and decay over time.

Keywords: 3D model, buttress root, *Hopea odorata* Roxb. stump, point cloud, terrestrial laser scanner

คำนำ

ไม้ตะเคียนทองมีถิ่นกำเนิดอยู่ในป่าสัมปทานท้องที่ อ.ไทรโยค จ.กาญจนบุรี ถูกลักลอบตัดเป็น 3 ท่อนใหญ่โดยเจ้าหน้าที่ฝ่ายป้องกันและบรรเทาสาธารณภัยของป่าไม้เขตบ้านโป่ง โดยนายลือ ช้อนสวัสดิ์ เป็นหัวหน้าฝ่ายฯ ไปตรวจยึดดำเนินคดีพร้อมทั้งแจ้งให้องค์การอุตสาหกรรมป่าไม้ (อ.อ.ป.) ทำการชักลากมาเก็บไว้เพื่อเป็นของกลางสำหรับดำเนินคดี และหลังเสร็จจากการดำเนินคดีแล้วในปี พ.ศ. 2526 ไม้ของกลางดังกล่าวได้ขายเป็นไม้ให้องค์การอุตสาหกรรมป่าไม้ ต่อมาองค์การอุตสาหกรรมป่าไม้ มีความเห็นว่าควรนำไม้ตะเคียนทองนี้ไปให้คณะวนศาสตร์จะมีประโยชน์ดีกว่าแปรรูปขายซึ่ง นายพงศ์สุระ ตันมณี ได้ทำหนังสือขอไม้ตะเคียนทองนี้กับ ผู้อำนวยการองค์การอุตสาหกรรมป่าไม้ ให้คณะวนศาสตร์เพื่อเป็นประโยชน์ในการศึกษา และเป็นสัญลักษณ์อย่างหนึ่งของคณะวนศาสตร์ปัจจุบันตอไม้ตั้งอยู่บริเวณแยกรีคอฟมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ และกำลังเสื่อมสภาพจากสภาพอากาศและกาลเวลา การบันทึกข้อมูลด้วยเทคโนโลยีสมัยใหม่จึงจำเป็นเพื่อเป็นฐานข้อมูลในการติดตามในอนาคต (พงศ์สุระ, 2553)

การวัดขนาดต้นไม้เป็นพื้นฐานสำคัญในการประเมินการเจริญเติบโต โดยมีตัวแปรหลักคือ เส้นผ่านศูนย์กลางที่ระดับอก (DBH) และ ความสูง (Height) (ชิงชัย, 2563) เครื่องมือดั้งเดิมที่นิยมใช้ ได้แก่ คาลิปเปอร์ (Caliper) เทปวัดเส้นผ่านศูนย์กลาง (Diameter tape) และเครื่องมือวัดความสูง เช่น ไฮพโซมิเตอร์ (Hypsometer) และคลีโนมิเตอร์ (Clinometer) ซึ่งข้อมูลที่ได้จะถูกนำไปคำนวณปริมาตรไม้ผ่านสมการมาตรฐาน เช่น Smalian, Huber และ Newton (ปัสสี และขวัญชัย, 2548) ในปัจจุบัน เทคโนโลยี LiDAR (Light Detection and Ranging) หรือไลดาร์ได้เข้ามามีบทบาทในการช่วยลดข้อจำกัดและเพิ่มประสิทธิภาพการสำรวจทรัพยากรป่าไม้ให้มีความถูกต้องแม่นยำยิ่งขึ้น โดยเฉพาะเทคโนโลยีเครื่องสแกนเลเซอร์ภาคพื้นดิน (TLS) ซึ่งเป็นเครื่องมือที่มีศักยภาพสูง เนื่องจากสามารถเก็บข้อมูลในรูปแบบ "กลุ่มข้อมูลจุด" (Point clouds) สามมิติที่มีความละเอียดและแม่นยำสูงกว่าวิธีการสำรวจทรัพยาการป่าไม้แบบดั้งเดิม (Liang et al., 2016; Calders et al., 2020)

การศึกษาครั้งนี้ผู้วิจัยได้นำเทคโนโลยีการสร้างแบบจำลองสามมิติด้วยเครื่องสแกนเลเซอร์ภาคพื้นดิน (TLS) มาใช้เก็บข้อมูลตอไม้ตะเคียนทอง บริเวณแยกรีคอฟ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ เพื่อสร้างแบบจำลองที่สามารถวัดขนาดและนำไปคำนวณปริมาตรที่มีความละเอียดแม่นยำ พร้อมทั้งศึกษาเปรียบเทียบผลของการตั้งค่าความละเอียด (Resolution) และคุณภาพ (Quality) สำหรับการสแกนซึ่งจะให้ค่าความละเอียดของข้อมูลที่ต่างกัน และเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ปริมาตรที่ได้กับวิธีการสำรวจทรัพยากรป่าไม้แบบดั้งเดิม เพื่อจัดทำเป็นข้อมูลฐานสำหรับการติดตามการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพและการผุพังเสื่อมโทรมของตอไม้ตะเคียนทองตามกาลเวลา อันเนื่องมาจากอิทธิพลของสภาพอากาศในอนาคต

อุปกรณ์และวิธีการ

อุปกรณ์ที่ใช้

การศึกษาครั้งนี้อุปกรณ์ที่ใช้ประกอบด้วยเครื่องสแกนเลเซอร์ภาคพื้นดิน (TLS) รุ่น Faro S150 (Range accuracy +/- 1 มม., 3D position accuracy 2 mm @ 10 m. และ 3.5 mm @ 25 m.) พร้อมขาตั้งและเป้าทรงกลม (Sphere Targets) 6 ลูก ร่วมกับสมาร์ทโฟนที่ติดตั้งกล้อง LiDAR กล้องวัดระยะและวัดความสูงเลเซอร์รุ่น Forestry Pro และเทปวัดระยะ โดยประมวลผลด้วยซอฟต์แวร์ FARO Scene ของบริษัท Faro Technologies และ CloudCompare (พัฒนาโดย Daniel Girardeau-Montaut ร่วมกับ Telecom ParisTech และ EDF R&D)

วิธีการ

การดำเนินงานแบ่งเป็นการเก็บข้อมูลภาคสนามและการประมวลผลข้อมูลแสดงดัง Fig. 1 มีรายละเอียดดังนี้

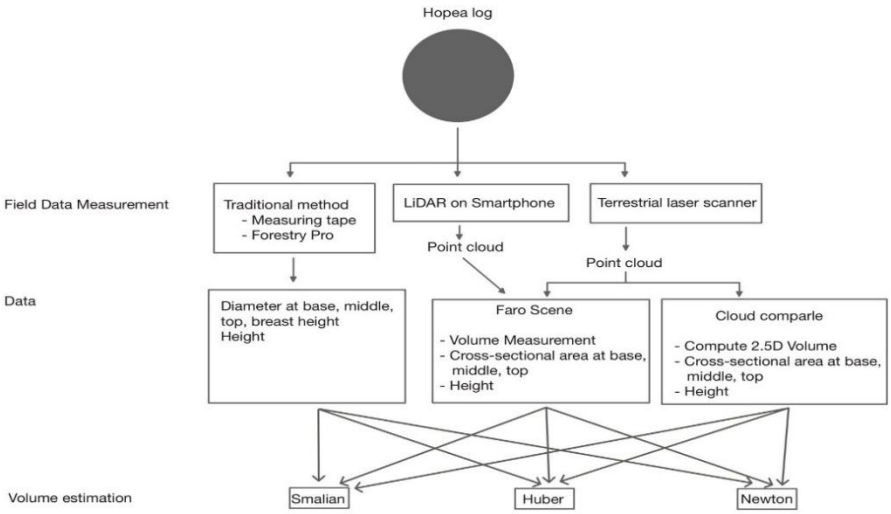


Fig. 1 Research methodology workflow

การเก็บข้อมูลภาคสนาม

1. การเก็บรวบรวมข้อมูลดำเนินการโดยใช้เครื่องสแกนเลเซอร์ภาคพื้นดิน (TLS) กำหนดจุดตั้งเครื่อง 5 ตำแหน่งรอบต้อไม้ตะเคียนทองตามหลัก Central Object of Interest และติดตั้งเป้าอ้างอิงทรงกลม (Sphere targets) จำนวน 6 ตำแหน่งกระจายรอบวัตถุเพื่อใช้เป็นจุดควบคุมในการเชื่อมต่อข้อมูล (Registration) โดยแต่ละจุดสแกนต้องมองเห็นเป้าอ้างอิงอย่างน้อย 3 ตำแหน่ง เพื่อให้สามารถประมวลผลรวมข้อมูลจากทุกสถานีได้สมบูรณ์ (FARO Technologies, 2025) (Fig. 2)

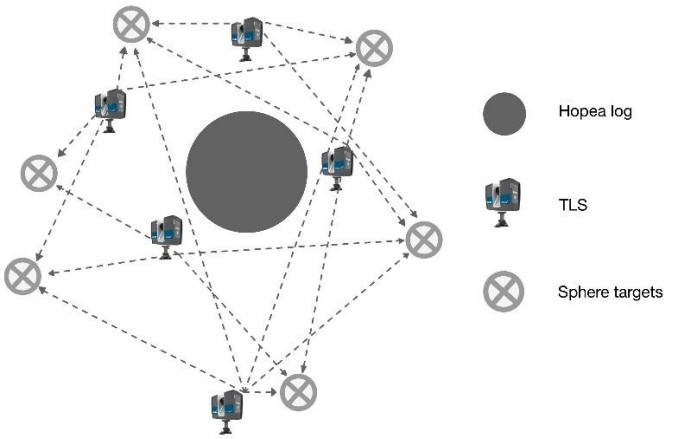


Fig. 2 Terrestrial Laser Scanner and sphere target location

2. การกำหนดค่าพารามิเตอร์ของเครื่องสแกนเลเซอร์ภาคพื้นดินแบ่งออกเป็น 4 รูปแบบการตั้งค่า (Settings) เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพ โดยทุกรูปแบบใช้ Scan with color และวิธีวัดแสงแบบ Horizon Weighted Metering ที่ระยะ 10 เมตร ประกอบด้วย การตั้งค่าที่ 1 กำหนด Resolution 1/4 และ Quality 3x (Point spacing = 6 mm), การตั้งค่าที่ 2 กำหนด Resolution 1/4 และ Quality 1x (Point spacing = 6 mm), การตั้งค่าที่ 3 กำหนด Resolution 1/8 และ Quality 2x (Point spacing = 12 mm) และการตั้งค่าที่ 4 กำหนด Resolution 1/16 และ Quality 3x (Point spacing = 16 mm)

3. สำหรับการหาปริมาตรส่วนที่เป็นโพรงตอไม้ตะเคียน ซึ่งมีลักษณะเป็นโพรงลึกลงไป ดำเนินการเก็บข้อมูลโดยใช้สมาร์ทโฟนที่รองรับเทคโนโลยี LiDAR ร่วมกับแอปพลิเคชัน Polycam โดยทำการสแกนจากมุมมองด้านบน (Top-down View) และวนรอบปากโพรงเพื่อให้ได้ข้อมูลจุดภาพที่ครอบคลุมพื้นผิวภายในโพรงทั้งหมด จากนั้นนำข้อมูลจุด (Point cloud) ที่ได้ไปคำนวณหาปริมาตรของโพรงดังกล่าว

4. การวัดขนาดเส้นรอบวงของตอไม้ตะเคียนด้วยเทปวัดระยะทาง และเก็บข้อมูลความสูงด้วย กล้องวัดระยะและวัดความสูงเลเซอร์รุ่น Forestry Pro ให้เป็นวิธีการวัดแบบดั้งเดิมหรือการวัดแบบทั่วไป

การประมวลผลข้อมูล

1. ข้อมูลจากเครื่องสแกนเลเซอร์ถูกประมวลผลในโปรแกรม FARO Scene เพื่อสร้างแบบจำลองสามมิติ (Point cloud) ของตอไม้ตะเคียน จากนั้นใช้เครื่องมือ Volume Measurement วัดปริมาตรและ Area Measurement วัดพื้นที่หน้าตัดที่โคนท่อน กลางท่อน ปลายท่อน และความสูง โดยสร้างกล่องตัดกลุ่มข้อมูลจุดมาเฉพาะตอไม้ตะเคียนเพื่อนำไปวิเคราะห์ในลำดับถัดไป (FARO Technologies, 2025)

2. ใช้โปรแกรม CloudCompare ซึ่งเป็นซอฟต์แวร์รหัสเปิด (Open Source) ที่พัฒนาโดย Daniel Girardeau-Montaut ภายใต้ความร่วมมือระหว่าง Telecom ParisTech และ EDF R&D สำหรับจัดการและเปรียบเทียบข้อมูลสามมิติความละเอียดสูง (Girardeau-Montaut, 2006) ในการศึกษานี้ใช้โปรแกรมดังกล่าวเพื่อคำนวณปริมาตรแบบประมาณค่า 2.5 มิติ และวัดพื้นที่หน้าตัดที่โคนท่อน กลางท่อน ปลายท่อน และความสูงจากแบบจำลองสามมิติตอไม้ตะเคียน

3. คำนวณปริมาตรส่วนโพรง (Hollow) ที่เป็นพื้นที่อับสายตาซึ่งเครื่องสแกนเลเซอร์ภาคพื้นดินไม่สามารถเก็บข้อมูลได้ โดยใช้ข้อมูลจากการสแกนด้วยสมาร์ทโฟนผ่านแอปพลิเคชัน Polycam ในมุมมอง Top-down view จากนั้นนำเข้าโปรแกรม FARO Scene เพื่อคำนวณปริมาตรความจุของโพรงด้วยพารามิเตอร์ Volume Measurement เช่นเดียวกับขั้นตอนที่ 1

4. คำนวณจากรูปร่างที่ใกล้เคียงทรงกระบอก โดยวัดขนาดตอไม้ตะเคียนเหนือพื้นดินจากโปรแกรม FARO Scene, CloudCompare และข้อมูลจากการวัดแบบดั้งเดิม (Traditional method) จากนั้นประเมินปริมาตรตามสมการ Smalian (Equation 1), Huber (Equation 2) และ Newton (Equation 3) (ปัสสี และ ขวัญชัย, 2548)

การประมาณปริมาตรจาก Point cloud ดำเนินการผ่านโปรแกรม FARO Scene (แบบ Mesh) และ CloudCompare (แบบ Grid-based) โดยใช้ Digitize คำนวณค่าเพื่อนำไปประเมินตามสูตร Equation 1–3:

Smalia

$$V = \frac{h}{2} \times (A_b + A_u) \quad (1)$$

Huber

$$V = h \times A_m \quad (2)$$

Newton

$$V = \frac{h}{6} \times (A_u + 4A_m + A_b) \quad (3)$$

Cross-Sectional Area

$$BA = \frac{\pi dbh^2}{4} \quad (4)$$

เมื่อ	V	คือ	ปริมาตรของไม้ (ลูกบาศก์เมตร, m^3)
	A_b	คือ	พื้นที่หน้าตัดด้านโคนของท่อน (ตารางเมตร, m^2)
	A_m	คือ	พื้นที่หน้าตัดด้านกลางของท่อน (ตารางเมตร, m^2)
	A_u	คือ	พื้นที่หน้าตัดด้านปลายของท่อน (ตารางเมตร, m^2)
	h	คือ	ความยาวของท่อนไม้ (เมตร, m)
	BA	คือ	พื้นที่หน้าตัด
	dbh	คือ	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเพียงอก

การวิเคราะห์ข้อมูล

การวิเคราะห์ข้อมูลจากแบบจำลองสามมิติของตอไม้ตะเคียนทองที่ได้จากโปรแกรมและการวัดด้วยวิธีการแบบดั้งเดิมโดยใช้เทปวัดระยะทาง และกล้องวัดระยะวัดความสูงด้วยเลเซอร์รุ่น Forestry Pro เพื่อคำนวณหาปริมาตร โดยนำข้อมูลพื้นที่หน้าตัด ความสูง และปริมาตรมาเปรียบเทียบ และสรุปผล

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

แบบจำลองสามมิติของตอไม้ตะเคียน และการหาปริมาตรจากโปรแกรม

แบบจำลองสามมิติของตอไม้ตะเคียนทองและการวิเคราะห์ปริมาตรแสดงใน (Fig. 3) โดย (A) แสดงแบบจำลองสามมิติที่ได้จากการประมวลผลข้อมูลกลุ่มของข้อมูลจุด (B) แสดงการวัดปริมาตรด้วยโปรแกรม FARO Scene โดยใช้พารามิเตอร์ Volume Measurement และ (C) แสดงผลการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม CloudCompare โดยใช้พารามิเตอร์ Compute 2.5D Volume และผลปริมาตรจากโปรแกรม FARO Scene และ CloudCompare (Table 1)

(A) (B) (C)

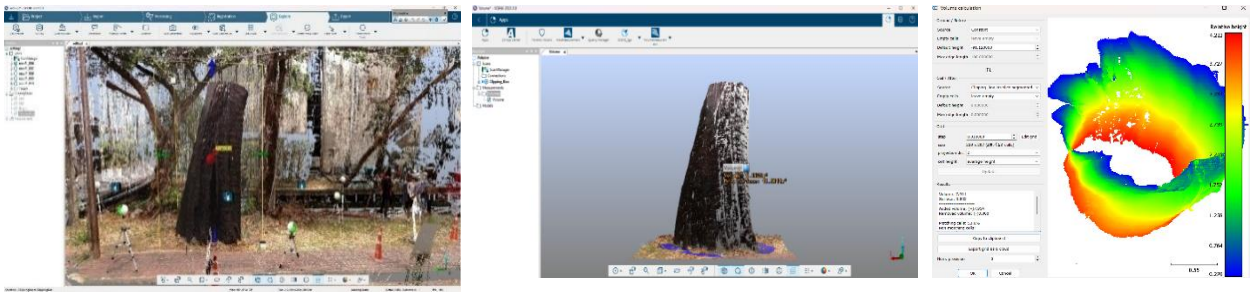


Fig. 3 (A) 3D model Hopea odorata of a stump, (B) Volume Measurement parameters and (D) Compute 2.5D Volume Parameters

Table 1 Volume obtained from FARO Scene and Could compare programs

Parameters	FARO Scene				CloudCompare			
	Setting 1	Setting 2	Setting 3	Setting 4	Setting 1	Setting 2	Setting 3	Setting 4
Volume Measurement	8.062	8.067	8.100	8.151	NA	NA	NA	NA
Compute 2.5D Volume	NA	NA	NA	NA	7.904	8.143	8.160	8.436

การประเมินปริมาตรด้วยโปรแกรม FARO Scene ให้ค่าที่คงที่และเกาะกลุ่มมากกว่าในช่วง 8.062–8.151 ลูกบาศก์เมตร เมื่อเทียบกับ CloudCompare ที่มีความแปรปรวนสูงกว่าในช่วง 7.904–8.436 ลูกบาศก์เมตร ความแตกต่างนี้สะท้อนถึงอิทธิพลของอัลกอริทึมและการตั้งค่าพารามิเตอร์ที่แตกต่างกันในแต่ละซอฟต์แวร์ Liang et al. (2016) โดยค่าปริมาตรที่คำนวณได้ทั้งหมดต้องหักลบส่วนที่เป็นโพรง 0.313 ลูกบาศก์เมตร เพื่อให้ได้ค่าปริมาตรสุทธิที่แม่นยำ

เปรียบเทียบประสิทธิภาพจากการสแกนที่แตกต่างกัน และปัจจัยที่มีผลต่อการคำนวณ

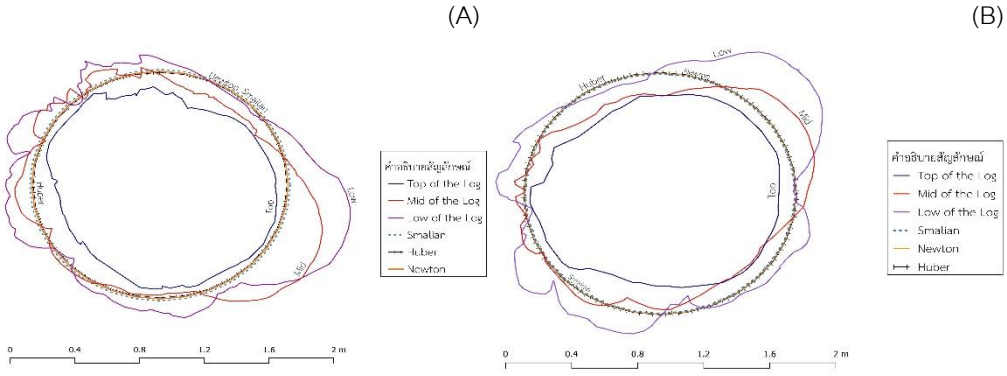


Fig. 4 (A) High-resolution point cloud and (B) Low-resolution point cloud

จากการประมวลผลข้อมูลจุด Point cloud (Fig. 4) พบว่า (A) ผลการศึกษาข้อมูลจุด Point Cloud ที่ตั้งค่าด้วย (Setting 1) จะให้ความหนาแน่นของจุด Point Cloud สูง ดังนั้นจึงสามารถเก็บรายละเอียดรูปทรง และพื้นผิวของตอไม้ได้ดีซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Liu et al. (2023) ในขณะที่การตั้งค่าการสแกนที่มีค่าความละเอียดต่ำ (B) ข้อมูล Point Cloud ที่ได้เมื่อนำไปสร้างแบบจำลองสามมิติจะให้ผลลัพธ์ของพื้นผิวและรูปทรงของตอไม้สูญเสียรายละเอียดไป ดังนั้นการพิจารณาการตั้งค่าของเครื่อง TLS ให้เหมาะสมกับงานจึงเป็นสิ่งสำคัญซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Sharma et al. (2021)

ความเอนเอียงของตอไม้ทำให้ค่าความสูงจาก Point Cloud (วัดแนวดิ่งแกน Z) ต่ำกว่าการวัดภาคสนาม (วัดตามแนวลำต้นจริง) และมุมเอนทำให้เกิดช่องว่างข้อมูล (Data gap) ในด้านที่ห่างจากเครื่องสแกน (Liang et al., 2016) ส่งผลให้ความแม่นยำของแบบจำลองลดลง (Fig. 5)

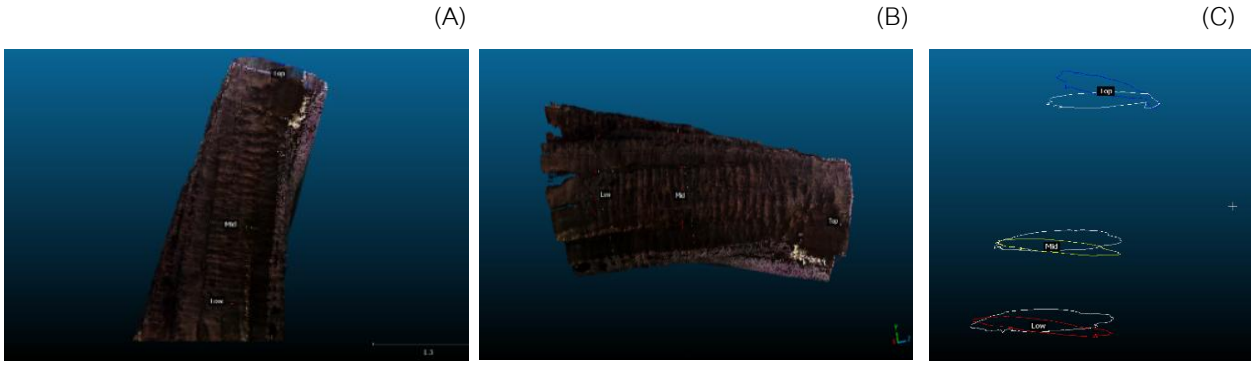


Fig. 5 (A) Inclined stump model, (B) Horizontal view showing measurement point consistency and (C) Measurement points along the vertical axis and stem axis

การศึกษาปริมาตรโพรงภายในซึ่งเป็นจุดที่ไม่สามารถสแกนได้จากเครื่องสแกนเลเซอร์ภาคพื้นดิน ใช้วิธีเก็บข้อมูลเพิ่มเติมด้วย LiDAR บนสมาร์ทโฟนผ่านแอปพลิเคชัน Polycam ในมุมมอง Top-down แล้วนำมาสร้างแบบจำลองสามมิติด้วยโปรแกรม FARO Scene เพื่อให้ได้รูปทรงที่สมบูรณ์ โดยผลการคำนวณจากโปรแกรมสำเร็จรูป พบว่าโพรงมีปริมาตรสุทธิ 0.3134 ลูกบาศก์เมตร ซึ่งเป็นค่าที่ต้องนำไปหักลบออกจากปริมาตรตอไม้รวมเพื่อให้ได้ผลลัพธ์ที่ถูกต้องแม่นยำ (Fig. 6)

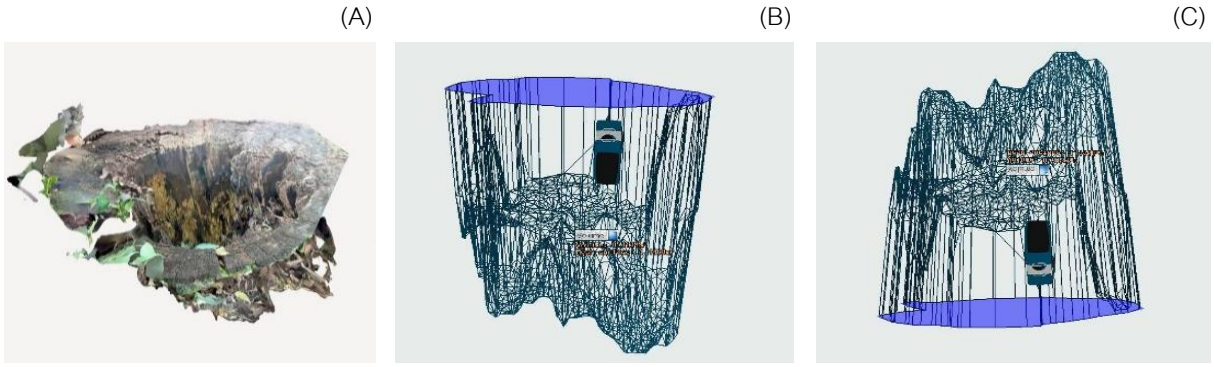


Fig. 6 Internal cavity visualization: (A) LiDAR scan with RGB imagery, (B) 3D geometry, and (C) Volumetric model for deduction.

การวัดพื้นที่หน้าตัด และผลการคำนวณปริมาตรของตอไม้ตะเคียนทองจากพื้นที่หน้าตัด

การวัดด้วยเทปและ Forestry Pro ให้ค่าพื้นที่หน้าตัดสูงกว่าแบบจำลองสามมิติ (FARO Scene และ CloudCompare) ในทุกตำแหน่งเนื่องจากการการวัดด้วยวิธีการแบบดั้งเดิม มีข้อจำกัดในเรื่องของพูพอน โดยโคนท่อนวัดได้ 3.132 ตร.ม. ขณะที่ความสูงทุกวิธีเท่ากันที่ 3.386 เนื่องจากวัดมาจากจุดอ้างอิงเดียวกัน (Table 2) ส่งผลให้ค่าปริมาตรที่ได้จากการวัดด้วยเทป และ Forestry Pro มีค่าที่มากกว่าปริมาตรที่ได้จาก Faro Scene และ CloudCompare ในทุกตำแหน่ง (Table 3) อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (Table 4)

Table 2 Comparison of cross-sectional areas and height of *Hopea odorata* stump measured by different methods

Parameters	Tools								
	Setting 1		Setting 2		Setting 3		Setting 4		Tape and Forestry Pro
	FARO Scene	Cloud Compare	FARO Scene	Cloud Compare	FARO Scene	Cloud Compare	FARO Scene	Cloud Compare	
Cross-sectional area at base, m^2	2.723	2.627	2.805	2.905	2.817	2.907	2.748	2.938	3.132
Cross-sectional area at middle, m^2	1.942	2.180	2.178	2.048	2.152	2.131	2.159	2.142	2.093
Cross-sectional area at Top, m^2	1.368	1.366	1.364	1.437	1.427	1.577	1.489	1.584	1.478
Height, m	3.386		3.386		3.386		3.386		3.386

ปริมาตรตอไม้ตะเคียนทองจาก Point Cloud มีค่าระหว่าง 8.091–9.067 ลบ.ม. โดยพบว่าสูตร Huber ให้ผลใกล้เคียงค่าความจริงมากที่สุด สอดคล้องกับ Husch et al. (2003) ที่ระบุว่าสูตร Huber มีความคลาดเคลื่อนน้อยกว่าสูตร Smalian ซึ่งมักประเมินค่าสูงเกินจริงในไม้ท่อนที่มีลักษณะไม่สม่ำเสมอ

Table 3 Volume of *Hopea odorata* Roxb. stump from cross-sectional area

Stump volume formula	Tools								
	Setting 1		Setting 2		Setting 3		Setting 4		Tape and Forestry Pro
	Faro scene	Cloud Compare	Faro scene	Cloud Compare	Faro scene	Cloud Compare	Faro scene	Cloud Compare	
Smalian, m^3	8.443	8.267	8.598	8.892	9.067	9.314	8.699	9.120	9.606
Huber, m^3	8.091	8.897	8.915	8.475	8.830	8.758	8.836	8.778	8.881
Newton, m^3	8.208	8.408	8.881	8.614	8.909	8.883	8.791	8.892	9.118

* Add the volume of the Buttressed: Setting1 +1.516, Setting2 +1.541, Setting3 +1.543, and Setting4 +1.526

Table 4 ANOVA analysis

ANOVA					
	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	2.570	7	0.367	3.518	0.008
Within Groups	2.817	27	0.104		
Total	5.386	34			

จากการวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) ดังแสดงใน Table 4 พบว่าค่าสถิติ F = 3.518 และค่าความน่าจะเป็น Sig. = 0.008 ซึ่งมีค่าน้อยกว่าระดับนัยสำคัญที่กำหนดไว้ ($p < 0.05$) ผลลัพธ์นี้บ่งบอกว่า วิธีการประเมินปริมาตรทั้ง 8 วิธีให้ค่าที่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ซึ่งหมายความว่ารูปแบบของเครื่องมือและสูตรคำนวณที่เลือกใช้ส่งผลต่อค่าปริมาตรไม้ที่ได้อย่างชัดเจน

สรุป

การศึกษาแบบจำลองสามมิติตอไม้ตะเคียนทองด้วยเทคโนโลยีเครื่องสแกนเลเซอร์ภาคพื้นดิน (TLS) พบว่า การตั้งค่ารูปแบบที่ 2 (Setting 2) ซึ่งมีความละเอียดจุดภาพ 6 มิลลิเมตร ที่ระยะ 10 เมตร เป็นวิธีการที่เหมาะสม โดยคำนวณค่าปริมาตรสุทธิได้ 7.753 ลูกบาศก์เมตร (หลังหักลบปริมาตรโพรง 0.313 ลูกบาศก์เมตร) ซึ่งให้ผลลัพธ์ที่แม่นยำและสามารถเก็บรายละเอียดส่วนเว้าโค้งของพูพอนได้อย่างครบถ้วนสมบูรณ์ ไม่แตกต่างจากการตั้งค่าความละเอียดสูงสุด (Setting 1) เมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการวัดแบบดั้งเดิม (เทปวัดและ Forestry Pro) พบว่าวิธีดั้งเดิมมีข้อจำกัดในการวัดรูปทรงที่มีความเอนเอียงโดยเฉพาะส่วนพูพอนที่ไม่สม่ำเสมอ ส่งผลให้เกิดความคลาดเคลื่อนโดยประเมินค่าสูงเกิน ดังนั้น การใช้ Setting 2 จึงเป็นแนวทางมาตรฐานที่ช่วยลดความคลาดเคลื่อน เหมาะสำหรับการสร้างฐานข้อมูลดิจิทัลเพื่อติดตามการเปลี่ยนแปลงและการเสื่อมสภาพของตอไม้ตะเคียนทองจากสภาพอากาศในระยะยาว ผลการศึกษานี้ยืนยันศักยภาพของเทคโนโลยี TLS ในการวัดปริมาตรไม้ที่มีรูปทรงซับซ้อนได้อย่างแม่นยำและครอบคลุม โดยมีข้อได้เปรียบเชิงเทคนิคเหนือวิธีการวัดแบบดั้งเดิมทุกมิติ

เอกสารอ้างอิง

ชิงชัย วิริยะบัญชา. 2563. คู่มือการวางแปลงตัวอย่างถาวรและการเก็บข้อมูลภาคสนาม. สำนักวิจัยการอนุรักษ์ป่าไม้และพันธุ์พืช กรมอุทยานแห่งชาติ สัตว์ป่า และพันธุ์พืช. กรุงเทพฯ.

ปัสสี ประสมสินธ์, ขวัญชัย ดวงสถาพร. 2548. คู่มือการศึกษาและฝึกปฏิบัติงานภาคสนามการคณิตป่าไม้ I. ภาควิชาการจัดการป่าไม้ คณะวนศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. กรุงเทพฯ.

พงศ์สุระ ตันมณี. 2553. จดหมายถึง ดร. วันชัย อรุณประภารัตน์ เรื่องประวัติตอไม้ตะเคียนท่อนใหญ่ที่ตั้งอยู่ริมปากทางเข้าคณะวนศาสตร์. สำเนาเอกสารจากส่วนตัว.

Calders, K., Adams, J., Armston, J., Bartholomeus, H., Bauwens, S., Bentley, L.P., Chave, J., Danson, F.M., Demol, M., Disney, M. 2020. Terrestrial laser scanning in forest ecology: Expanding the horizon. Remote Sensing of Environment 251: 112102.

FARO Technologies. 2025. FARO SCENE User Manual, FARO Technologies Inc., Lake Mary, FL.

Girardeau-Montaut, D. 2006. Détection de changement sur des données géométriques tridimensionnelles. Ph.D. dissertation, Telecom ParisTech. Paris, France.

Husch, B., Beers, T.W., Kershaw, J.A. 2003. Forest Mensuration, 4th ed. John Wiley & Sons. Hoboken, NJ, USA.

Liang, X., Kankare, V., Hyyppä, J., Wang, Y., Kukko, A., Haggrén, H., Yu, X., Kaartinen, H., Jaakkola, A., Guan, F. 2016. Terrestrial laser scanning in forest surveys. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing 115: 63-77.

Liu, Q., Xu, S., Xiao, J., Wang, Y. 2023. Sharp feature-preserving 3D mesh reconstruction from point clouds based on primitive detection. Remote Sens. 15: 3155.

Sharma, R., Schwandt, T., Kunert, C., Urban, S., Broll, W. 2021. Point cloud upsampling and normal estimation using deep learning for robust surface reconstruction. arXiv preprint arXiv:2102.13391.

การปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากการเดินทางท่องเที่ยว ณ อุทยานประวัติศาสตร์ศรีเทพ เมืองมรดกโลก จังหวัดเพชรบูรณ์

Greenhouse gases emission from trouist transportation at ancient town of sithep, a world heritage city, phetchabun provience

ประภัสสรา ศิลปชัย[a], **กิ่งกนก เสาวภาวงศ์**[b], **ทิวาวรรณ ศิริเจริญ กันหา**[c], **ธนภัทร มงคลธนโชค**[a], **กมลวรรณ หงษ์ทอง**[a], **พงษ์เทพ หาญพัฒนากิจ**[a,*]

Praphatsara Sinlapachai[a], Kingkanok Saowapawong[b], Tiwawan Siricharoen Kanha[c], Thanapat Mongkolthanachok[a], Kamolwan Hongthong[a], Phongthep Hanpattanakit[a,*]

[a]ภาควิชาเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อมและทรัพยากร คณะวัฒนธรรมสิ่งแวดล้อมและการท่องเที่ยวเชิงนิเวศ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ กรุงเทพ 10110

[b]ภาควิชาการท่องเที่ยว คณะวัฒนธรรมสิ่งแวดล้อมและการท่องเที่ยวเชิงนิเวศ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ กรุงเทพ 10110

[c]ภาควิชาการท่องเที่ยวและการโรงแรม คณะวิทยาการจัดการ มหาวิทยาลัยราชภัฏเพชรบูรณ์ เพชรบูรณ์ 67000

[a]Department of Environment and Resources, Faculty of Environment Culture and Ecotourism, Srinakharinwirot University, Bangkok 10110, Thailand

[b]Department of Tourism, Faculty of Environment Culture and Ecotourism, Srinakharinwirot University, Bangkok 10110, Thailand

[c]Department of Tourism and Hotel, Faculty of Management and Science, Phetchabun Rajabhat University, Phetchabun 67000, Thailand

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

บทคัดย่อ

การปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากการเดินทางของนักท่องเที่ยวถือเป็นหนึ่งในกระบวนการจัดการการท่องเที่ยวในพื้นที่อุทยานประวัติศาสตร์ศรีเทพ เพื่อช่วยขับเคลื่อนพื้นที่ท่องเที่ยวเชิงประวัติศาสตร์และวัฒนธรรมที่กำลังได้รับความนิยมจากนักท่องเที่ยวตลอดจนส่งเสริมให้เป็นแหล่งท่องเที่ยวคาร์บอนต่ำในอนาคต งานวิจัยมุ่งประเมินการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากการเดินทางของนักท่องเที่ยวที่เข้ามาเยี่ยมชมแหล่งท่องเที่ยวอุทยานประวัติศาสตร์โดยเก็บข้อมูลผ่านแบบสอบถามจากนักท่องเที่ยว จำนวน 400 ชุด ระหว่างวันที่ 21 ธันวาคม พ.ศ. 2567–28 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2568 และการคำนวณปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจกดำเนินการตามแนวทางของ IPCC (2006) โดยอ้างอิงคู่มือ IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories ผลการศึกษาพบว่า ข้อมูลของนักท่องเที่ยวมีอัตราส่วนนักท่องเที่ยวเป็นเพศหญิงมากกว่าเพศชาย ร้อยละ 61 และ 39 ตามลำดับ นักท่องเที่ยวส่วนใหญ่มีอายุระหว่าง 20 – 30 และ 51 – 60 ปี ปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากการเดินทางของนักท่องเที่ยวรวมเท่ากับ 45,091.78 kg CO_2eq โดยรถยนต์ส่วนบุคคลเป็นพาหนะที่มีการปล่อยก๊าซเรือนกระจกสูงที่สุด 16,584.90 kg CO_2eq รองลงมาเป็นรถรถตู้และรถกะบะ เท่ากับ 15,061.48 และ 7,682.97 kg CO_2eq ตามลำดับ โดยการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากการเดินทางรายบุคคล เท่ากับ 13.24 kgCO_2eq/คน และระยะทางการเดินทางเฉลี่ยของนักท่องเที่ยวเท่ากับ 593.71 ± 432.87 กิโลเมตรต่อคน ผลการศึกษาชี้ให้เห็นว่า ค่าการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากการเดินทางรถยนต์ส่วนบุคคลที่ค่อนข้างสูงสะท้อนถึงข้อจำกัดของระบบขนส่งสาธารณะในพื้นที่และบริบทการเดินทางของนักท่องเที่ยวที่ยังพึ่งพาพาหนะส่วนบุคคลเป็นหลัก ซึ่งอาจทำให้การลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกทำได้ยากในระยะสั้น นอกจากนี้ ผลการศึกษายังชี้ให้เห็นว่าการพัฒนาระบบขนส่งทางเลือกและมาตรการจูงใจด้านพฤติกรรมการเดินทางของนักท่องเที่ยวจะเป็นปัจจัยสำคัญต่อความสำเร็จของการขับเคลื่อนการท่องเที่ยวคาร์บอนต่ำในพื้นที่อุทยานประวัติศาสตร์ศรีเทพในระยะยาว

คำสำคัญ: การปล่อยก๊าซเรือนกระจก, การท่องเที่ยวเชิงวัฒนธรรม, อุทยานประวัติศาสตร์ศรีเทพ

Abstract

Greenhouse gas emissions from tourist transportation constitute an important component of tourism management in the Sri Thep Historical Park, contributing to the promotion of historical and cultural tourism while supporting the development of low-carbon tourism in the future. This study aimed to assess greenhouse gas emissions resulting from tourist travel to the Sri Thep Historical Park. Data were collected through questionnaires administered to 400 tourists during the period from 21 December 2024 to 28 February 2025. Greenhouse gas emissions were calculated based on the IPCC (2006), IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. The results indicated that female tourists accounted for a higher proportion of visitors than males, at 61% and 39%, respectively. Most tourists were between the ages of 20–30 and 51–60 years. The total greenhouse gas emissions from tourist transportation amounted to 45,091.78 kg CO_2eq. Passenger cars were identified as the largest source of emissions, accounting for 16,584.90 kg CO_2eq, followed by vans (15,061.48 kg CO_2eq) and pickup trucks (7,682.97 kg CO_2eq). The average greenhouse gas emissions from tourist transportation were estimated at 13.24 kg CO_2eq per person. The mean travel distance of tourists was 593.71 ± 432.87 km per person. The findings indicate that the relatively high level of greenhouse gas emissions from private car travel reflects limitations in the local public transportation system, as well as travel patterns in which tourists continue to rely predominantly on private vehicles. This reliance may make short-term reductions in greenhouse gas emissions difficult to achieve. Furthermore, the results suggest that the development of alternative transportation systems and the implementation of behavioral incentive measures for tourists will be key factors in the successful promotion of low-carbon tourism in the Sri Thep Historical Park area over the long term.

Keywords Greenhouse gas emissions, Cultural tourism, Si Thep Historical Park

คำนำ

การเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ (Climate Change) เป็นหนึ่งในประเด็นท้าทายทางด้านสิ่งแวดล้อมที่สำคัญที่สุดของโลก เนื่องจากส่งผลกระทบต่อทั้งมนุษย์และระบบนิเวศอย่างมาก อันเป็นผลจากการสะสมของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ส่วนมากเกิดจากการใช้พลังงานฟอสซิล โดยเมื่อเปรียบเทียบอุณหภูมิเฉลี่ยช่วงปี พ.ศ.2393–2443 กับ พ.ศ.2554–2563 พบว่าอุณหภูมิเพิ่มขึ้นเฉลี่ย 1.1 องศาเซลเซียส (IPCC, 2023) ความร้อนที่เพิ่มสูงขึ้นนี้ทำให้เกิดปรากฏการณ์โลกร้อน การเปลี่ยนแปลงภูมิอากาศ และเหตุการณ์สภาพอากาศสุดขั้ว ทั้งพายุรุนแรง น้ำท่วม ภัยแล้ง และการละลายของน้ำแข็งขั้วโลก ซึ่งล้วนเชื่อมโยงกับกิจกรรมของมนุษย์ ก๊าซเรือนกระจกที่มีคุณสมบัติสำคัญในการดูดซับความร้อนในชั้นบรรยากาศประกอบด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) มีเทน (CH_4) ไนตรัสออกไซด์ (N_2O) ซัลเฟอร์เฮกซะฟลูออไรด์ (SF_6) ไนโตรเจนไตรฟลูออไรด์ (NF_3) รวมถึงกลุ่มสาร HFCs และ PFCs (ศูนย์องค์ความรู้ด้านทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม, 2566)

รายงานปี พ.ศ. 2566 ระบุว่าการปล่อยก๊าซเรือนกระจกทั่วโลกอยู่ที่ 39,023.94 MtonCO_2 โดยจีนยังคงเป็นประเทศที่ปล่อยก๊าซมากที่สุด (13,259.64 MtonCO_2) รองลงมาคือสหรัฐอเมริกา (4,682.04 MtonCO_2) และอินเดีย (2,955.18 MtonCO_2) (The European Commission, 2024) ตัวเลขเหล่านี้สะท้อนถึงการขยายตัวทางเศรษฐกิจ การผลิตพลังงาน และการขนส่งที่เพิ่มขึ้น สถานการณ์การปล่อยก๊าซเรือนกระจกของประเทศไทยยังคงเป็นเรื่องที่สำคัญของหลายภาคส่วน โดยข้อมูลปี พ.ศ. 2567 ระบุว่าภาคพลังงานปล่อยก๊าซสูงที่สุดที่ 121.9 MtonCO_2 ตามด้วยภาคการขนส่งที่ 41.5 MtonCO_2 (กระทรวงพลังงาน, 2567) ชี้ให้เห็นความจำเป็นของการปรับเปลี่ยนระบบพลังงานและการคมนาคมขนส่งสู่รูปแบบที่มีคาร์บอนต่ำลง อุตสาหกรรมท่องเที่ยวก็เป็นอีกหนึ่งภาคส่วนที่มีความสำคัญต่อเศรษฐกิจ สังคม และวัฒนธรรม (ชิตาวีร์ สุขคร, 2562) แต่ในขณะเดียวกันก็เป็นแหล่งปล่อยก๊าซเรือนกระจกในปริมาณมาก โดยเฉพาะจากกิจกรรมการเดินทางของนักท่องเที่ยว การเติบโตของการท่องเที่ยวโลกทำให้การใช้เชื้อเพลิงในภาคขนส่งเพิ่มสูงขึ้น ส่งผลโดยตรงต่อสภาวะโลกร้อนและการเกิดมลพิษทางอากาศ ด้วยเหตุนี้ การท่องเที่ยวคาร์บอนต่ำ (Low Carbon Tourism) จึงได้รับความสนใจเพิ่มขึ้นในหลายประเทศทั่วโลก ซึ่งแนวทางนี้มุ่งเน้นการลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมผ่านกิจกรรมที่เป็นมิตรต่อธรรมชาติ เช่น การท่องเที่ยวเชิงนิเวศ การท่องเที่ยวเชิงอนุรักษ์ และการท่องเที่ยวเชิงสร้างสรรค์ (สำนักงานนโยบายและแผนทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม, 2566) แนวคิดดังกล่าวยังสนับสนุนให้แหล่งท่องเที่ยวมีบทบาทในการสร้างความรับรู้แก่ผู้มาเยือนเกี่ยวกับการลดคาร์บอน การจัดกิจกรรมที่มีการปล่อยคาร์บอนต่ำ และการพัฒนาโครงสร้างพื้นฐานที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม (Alexandrakis, 2018) ขณะเดียวกันการชดเชยคาร์บอนผ่านการปลูกต้นไม้และฟื้นฟูพื้นที่ป่ายังเป็นกลไกสำคัญที่ช่วยดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์จากชั้นบรรยากาศ ทำให้เกิดสมดุลในระบบนิเวศและช่วยบรรเทาผลกระทบจากการท่องเที่ยว ประเทศไทยมีการผลักดันการท่องเที่ยวคาร์บอนต่ำอย่างเป็นรูปธรรม เช่น โครงการ 20 Meaningful Routes READY-SET-ZERO ที่เริ่มโดยการท่องเที่ยวแห่งประเทศไทย (ททท.) ซึ่งได้คัดเลือกเส้นทางท่องเที่ยว 20 แห่งทั่วประเทศเพื่อพัฒนาเป็นเส้นทางคาร์บอนต่ำ โดยมีการคำนวณปริมาณการปล่อยคาร์บอนของกิจกรรมแต่ละประเภท รวมถึงการดำเนินการชดเชยคาร์บอนสำหรับการรับรองตนเอง ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2564 เป็นต้นมา แนวทางนี้สะท้อนถึงความพยายามของภาครัฐในการผลักดันการท่องเที่ยวไทยสู่ความยั่งยืนและลดผลกระทบด้านสิ่งแวดล้อมในระยะยาว ทั้งนี้อุทยานประวัติศาสตร์ศรีเทพ จังหวัดเพชรบูรณ์ ซึ่งได้รับการขึ้นทะเบียนเป็นมรดกโลกในปี พ.ศ. 2566 เป็นแหล่งท่องเที่ยวที่มีคุณค่าทางวัฒนธรรมและประวัติศาสตร์ สถิติจำนวนนักท่องเที่ยวในปี พ.ศ.2566 พบว่าจำนวนนักท่องที่ยวเพิ่มขึ้นกว่า 156,000 คน (กรมศิลปากร, 2566) การเติบโตอย่างรวดเร็วของนักท่องเที่ยวโบราณสถาน เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบกับแหล่งท่องเที่ยวเชิงนิเวศในพื้นที่คุ้งบางกระเจ้า อำเภอพระประแดง จังหวัดสมุทรปราการ ซึ่งกำลังได้รับความนิยมจากนักท่องเที่ยวในปัจจุบัน พบว่าการเดินทางของนักท่องเที่ยว มีค่าการปล่อยก๊าซเรือนกระจกรวมจากการเดินทางของ

นักท่องเที่ยว เท่ากับ 27,709.92 $kgCO_2$โดยคิดเป็นการเดินทางรายบุคคล เท่ากับ 31.29 $kgCO_2$ per person (วีรพจน์ ,2564)ในทั้งสองพื้นที่มีบทบาทสำคัญต่อการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากภาคการขนส่งเช่นเดียวกัน อย่างไรก็ตาม ลักษณะเชิงพื้นที่และบริบทการเดินทางมีความแตกต่างกันอย่างชัดเจน โดยคุ้งบางกระเจ้าตั้งอยู่ใกล้เขตเมือง ทำให้นักท่องเที่ยวมีระยะทางการเดินทางเฉลี่ยสั้นกว่า และมีทางเลือกในการใช้ระบบขนส่งหรือรูปแบบการเดินทางที่หลากหลายมากกว่า และความแตกต่างของสภาพแวดล้อมของพื้นที่ โดยเฉพาะในด้านของการเดินทางที่มีส่วนสำคัญต่อการปล่อยก๊าซเรือนกระจก ด้วยเหตุนี้ การพัฒนาแนวทางการจัดการการท่องเที่ยวคาร์บอนต่ำในพื้นที่อุทยานประวัติศาสตร์ศรีเทพจึงมีความจำเป็นอย่างยิ่ง งานวิจัยมีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากการเดินทางของนักท่องเที่ยว และใช้เป็นข้อมูลพื้นฐานในการกำหนดแนวทางลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากภาคการเดินทาง เช่น การปรับปรุงการบริหารจัดการระบบขนส่งภายในพื้นที่ และการวางนโยบายการพัฒนาแหล่งท่องเที่ยวคาร์บอนต่ำต่อไปในอนาคต

อุปกรณ์และวิธีการ

พื้นที่ศึกษา

พื้นที่อุทยานประวัติศาสตร์ศรีเทพ เมืองมรดกโลก จังหวัดเพชรบูรณ์ มีพื้นที่ประมาณ 4.7 ตารางกิโลเมตร หรือ 2,889 ไร่ ตั้งอยู่ที่พิกัดละติจูด 15.4716°N และลองจิจูด 101.1469°E อุทยานแห่งนี้เป็นแหล่งโบราณคดีสำคัญที่มีการขุดค้นพบหลักฐานทางประวัติศาสตร์จำนวนมาก ทั้งวัด โบราณสถาน และโบราณวัตถุหลากหลายประเภท ซึ่งสะท้อนถึงความเจริญรุ่งเรืองของพื้นที่ในอดีต และเป็นฐานข้อมูลสำคัญสำหรับการศึกษาวิเคราะห์ด้านสิ่งแวดล้อมและการปล่อยก๊าซเรือนกระจกในปัจจุบัน

พื้นที่โดยรอบอุทยานส่วนใหญ่เป็นพื้นที่เกษตรกรรมของชุมชนซึ่งดำรงชีพด้วยการปลูกอ้อยและมันสำปะหลังมาตั้งแต่อดีตถึงปัจจุบัน การได้รับการขึ้นทะเบียนเป็นมรดกโลกยิ่งช่วยเพิ่มความสำคัญของอุทยานประวัติศาสตร์ศรีเทพในฐานะแหล่งท่องเที่ยวทางวัฒนธรรมและประวัติศาสตร์ที่โดดเด่น โดยมีนักท่องเที่ยวเดินทางเข้ามาเยี่ยมชมจำนวนมาก ทั้งเพื่อศึกษาโบราณสถาน ชื่นชมธรรมชาติ และซื้อสินค้าพื้นถิ่น เนื่องจากตั้งอยู่ไม่ไกลจากกรุงเทพมหานคร จึงเป็นแหล่งท่องเที่ยวที่เดินทางสะดวกและได้รับความนิยมเพิ่มขึ้น

จากสถิติการท่องเที่ยวในช่วงปี พ.ศ. 2564–2567 พบว่าอุทยานประวัติศาสตร์ศรีเทพมีจำนวนนักท่องเที่ยวเพิ่มขึ้น โดยในปี พ.ศ. 2567 มีนักท่องเที่ยวสูงถึง 669,702 คน เพิ่มขึ้นร้อยละ 66 เมื่อเทียบกับปีก่อนหน้า หากเทียบกับปี พ.ศ. 2564 ซึ่งเป็นช่วงเริ่มฟื้นตัวหลังสถานการณ์โควิด-19 จะพบว่าจำนวนนักท่องเที่ยวเพิ่มขึ้นถึง 11.38 เท่า หรือมากกว่าเดิมถึง 610,863 คน สะท้อนถึงความนิยมในแหล่งท่องเที่ยวมรดกโลกแห่งนี้ที่เพิ่มสูงขึ้น และการท่องเที่ยวเชิงวัฒนธรรมมีแนวโน้มเติบโตมากขึ้นในอนาคต

กำหนดกลุ่มประชากร

ประชากรที่ใช้ในการวิจัยครั้งนี้ ได้แก่ นักท่องเที่ยวที่เดินทางมาเยี่ยมชมอุทยานประวัติศาสตร์ศรีเทพ จังหวัดเพชรบูรณ์ โดยใช้วิธีการสุ่มตัวอย่างแบบง่าย (Simple Random Sampling) เพื่อให้ได้กลุ่มตัวอย่างที่เป็นตัวแทนของประชากรนักท่องเที่ยวอย่างเหมาะสม การเก็บรวบรวมข้อมูลภาคสนามดำเนินการในช่วงวันที่ 21 ธันวาคม พ.ศ. 2567 ถึง 28 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2568 โดยสุ่มเก็บแบบสอบถามจากนักท่องเที่ยวที่เข้ามาเยี่ยมชมภายในพื้นที่อุทยานประวัติศาสตร์ศรีเทพในแต่ละวัน ครอบคลุมทั้งวันธรรมดา วันหยุดสุดสัปดาห์ และวันหยุดนักขัตฤกษ์ เพื่อสะท้อนความแตกต่างของรูปแบบการท่องเที่ยวและปริมาณนักท่องเที่ยวที่อาจแปรผันตามช่วงเวลาและกิจกรรมการท่องเที่ยว การเลือกช่วงเวลาดังกล่าวเนื่องจากเป็นช่วงฤดูกาลท่องเที่ยวและเป็นช่วงที่มีสภาพอากาศเอื้อต่อการเดินทาง ส่งผลให้มีนักท่องเที่ยวหลากหลาย

กลุ่มและหลากหลายรูปแบบการเดินทางเข้ามาเยี่ยมชมอย่างต่อเนื่อง ทั้งนี้ เพื่อเพิ่มความเป็นตัวแทนของนักท่องเที่ยวภาพรวมของพื้นที่ การเก็บข้อมูลได้มีการกระจายช่วงเวลาในการเก็บข้อมูลในแต่ละวัน รวมถึงกระจายจุดเก็บข้อมูลบริเวณทางเข้าและจุดบริการนักท่องเที่ยวภายในอุทยานประวัติศาสตร์ศรีเทพ

ขนาดกลุ่มตัวอย่างถูกกำหนดเพื่อใช้ในการประเมินการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากการเดินทางของนักท่องเที่ยว โดยคำนวณจากสูตรของทาโร ยามาเน่ (Taro Yamane, 1967) ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 และค่าความคลาดเคลื่อนร้อยละ 5 จากข้อมูลจำนวนนักท่องเที่ยวที่เข้าเยี่ยมชมอุทยานประวัติศาสตร์ศรีเทพในปี พ.ศ. 2566 จำนวน 685,716 คน ผลการคำนวณได้ขนาดกลุ่มตัวอย่างจำนวน 400 ตัวอย่าง ซึ่งถือว่ามีความเพียงพอและเหมาะสมสำหรับการวิเคราะห์เชิงสถิติในงานวิจัยนี้

การคำนวนการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากภาคการขนส่ง

การประเมินการปล่อยก๊าซเรือนกระจก โดยการคำนวณการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากภาคขนส่งและใช้ค่าสัมประสิทธิ์การปล่อยก๊าซเรือนกระจก จากคู่มือการจัดทำบัญชีการปล่อยก๊าซเรือนกระจก IPCC 2006 ดังแสดงใน Equation 1 และ 2:

วิธีที่ 1 กรณีทราบปริมาณเชื้อเพลิงที่ใช้

$$E_{GHG} = \sum (FC \times EF_{GHG}) \quad (1)$$

E_{GHG} = ปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจกต่อปี ($kgCO_2e/year$)

FC = ปริมาณเชื้อเพลิงที่ใช้ในการเดินทาง (L หรือ kg)

EF_{GHG} = Emission Factor รวมก๊าซเรือนกระจกทั้ง 3 ชนิด

วิธีที่ 2 กรณีทราบระยะทางและชนิดยานพาหนะ เช่น รถยนต์ และจักรยานยนต์

$$E_{GHG} = \sum \left(D \times \frac{1}{FE} \times EF_{GHG} \right) \quad (2)$$

E_{GHG} = ปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจกต่อปี ($kgCO_2eq/year$)

D = ระยะทางที่ใช้ในการเดินทาง (km)

FE = อัตราการสิ้นเปลืองของยานพาหนะ (km/L)

EF_{GHG} = Emission Factor รวมก๊าซเรือนกระจกทั้ง 3 ชนิด

โดยเอกสารคู่มือวิธีการคำนวณปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากการประกอบปิโตรเลียม พ.ศ. 2565 มีการกำหนดค่า Emission Factor รวมก๊าซเรือนกระจก (Table 1) และอัตราการสิ้นเปลืองของยานพาหนะ (Table 2)

Table 1. Emission factor including all three types of GHG.

Fuel Type	Unit	EF GHG ($KgCO_2e$/ Unit)	Reference
Diesel	L	2.7446	IPCC
Natural Gas (CNG)	Kg	2.2472	IPCC
Liquefied Petroleum Gas (LPG)	L	1.5362	IPCC
Liquefied Petroleum Gas (LPG)	Kg	2.8400	IPCC
Gasoline	L	2.189	IPCC
Biodiesel	L	2.6265	U.S. Energy Information Administration

Source: Thailand Greenhouse Gas Management Organization (Public Organization, 2011).

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

ข้อมูลประชากร

นักท่องเที่ยวในพื้นที่อุทยานประวัติศาสตร์ศรีเทพ มีสัดส่วนเพศชาย ร้อยละ 39 (156 คน) และเพศหญิง ร้อยละ 61 (244 คน) โดยช่วงอายุที่พบมากที่สุดคือช่วงอายุ 20–30 ปี ร้อยละ 27.3 (109 คน) รองลงมาคือช่วงอายุ 51–60 ปี ร้อยละ 19.3 (77 คน) และช่วงอายุเกิน 60 ปี ร้อยละ 24.5 (98 คน)

ด้านระดับการศึกษาพบว่า กลุ่มปริญญาตรีมีจำนวนมากที่สุด คิดเป็น ร้อยละ 54.3 (217 คน) รองลงมาคือระดับต่ำกว่าปริญญาตรี ร้อยละ 29.8 (199 คน) ในส่วนของอาชีพ นักท่องเที่ยวส่วนใหญ่ประกอบอาชีพธุรกิจค้าขาย/ธุรกิจส่วนตัว ร้อยละ 29 (116 คน) รองลงมาคือพนักงานภาครัฐ ร้อยละ 20.5 (82 คน) และพนักงานบริษัทเอกชน ร้อยละ 16.8 (67 คน) ดังแสดงใน Table 3

Table 2 Vehicle Fuel Consumption

Vehicle Type	Fuel Type	Unit	FE (Fuel Consumption Rate)	Reference
Small Car (1500 CC)	Gasoline	km/L	17.77	Department of Pollution Control, 2008
Medium Car (1600 CC)	Gasoline	km/L	15.238	Department of Pollution Control, 2008
Medium Car (1800 CC)	Gasoline	km/L	13.796	Department of Pollution Control, 2008
Large Car (2000 CC)	Gasoline	km/L	12.248	Department of Pollution Control, 2008
Average Car (All Sizes)	Gasoline	km/L	14.763	Department of Pollution Control, 2008
Average Pickup Truck	Diesel	km/L	6.369	American Petroleum Institute, 2004
1-Ton Pickup Truck	Diesel	km/L	11.111	American Petroleum Institute, 2004
NGV Vehicle	CNG	km/kg	11.905	American Petroleum Institute, 2004
LPG Vehicle	LPG	km/L	8.929	American Petroleum Institute, 2004
Passenger Van	Diesel	km/L	10.204	American Petroleum Institute, 2004
Public Bus	Diesel	km/L	2.85	American Petroleum Institute, 2004
Motorcycle (4-stroke, <125 CC)	Gasoline	km/L	36.625	Department of Pollution Control, 2008
Motorcycle (4-stroke, 125 CC)	Gasoline	km/L	38.655	Department of Pollution Control, 2008
Motorcycle (2-stroke, 120 CC)	Gasoline	km/L	37.245	Department of Pollution Control, 2008
Motorcycle (2-stroke, 150 CC)	Gasoline	km/L	27.625	Department of Pollution Control, 2008
Average Motorcycle (4-stroke)	Gasoline	km/L	37.64	Department of Pollution Control, 2008
Average Motorcycle (2-stroke)	Gasoline	km/L	32.435	Department of Pollution Control, 2008

Source: Thailand Greenhouse Gas Management Organization (Public Organization, 2011).

การปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากภาคการขนส่ง

ปริมาณการใช้เชื้อเพลิงจากยานพาหนะทุกประเภทที่เดินทางมาท่องเที่ยวในพื้นที่อุทยานประวัติศาสตร์ศรีเทพ คำนวณโดยแยกปริมาณการใช้ขนาดเครื่องยนต์ตามประเภทยานพาหนะ พบว่า รถยนต์ส่วนบุคคลมีการปล่อยก๊าซเรือนกระจกมากที่สุดถึง 16,584.90 kg CO_2eq เนื่องจากเพราะรถยนต์ส่วนบุคคลส่วนใหญ่ใช้เชื้อเพลิงเป็นแก๊สโซฮอล์ 91 และแก๊สโซฮอล์ 95ซึ่งมีค่าการปล่อยที่ 2.2703 kg นอกจากนั้นยังมีระยะทางและจำนวนคน ซึ่งมีผลต่อการปล่อยก๊าซเรือนกระจก รองลงมาเป็นรถรถตู้โดยสาร 15,061.48 และ รถกระบะ 7,682.97 kg CO_2eq ตามลำดับ โดยมีอัตราการปล่อยก๊าซเรือนกระจกเฉลี่ยจากการเดินทางของนักท่องเที่ยว เท่ากับ 13.24 kg CO_2eq/คน ซึ่งประเภทของพาหนะที่มีการปล่อยก๊าซเรือนกระจกต่อคนน้อยที่สุด คือ รถยนต์ EV และมากที่สุด คือ รถยนต์ไฮบริด 38.96 CO_2eq/คน ตามลำดับ ซึ่งรถยนต์ไฮบริดมีค่าการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกต่อคน เท่ากับ 38.96 kg CO2eq/คน ซึ่งสวนทางการเทคโนโลยีประหยัดพลังงานไฮบริด เป็นเพราะระยะทางการเดินทาง และจำนวนนักท่องเที่ยวในการเดินทางมายังอุทยานประวัติศาสตร์ศรีเทพมีจำนวนน้อย ดังนั้นเมื่อนำมาเข้าสูตรการคำนวณ จึงทำให้ค่ากาปล่อยก๊าซเรือนกระจะเฉลี่ยต่อคนเยอะขึ้น และระยะทางการเดินทางเฉลี่ยของนักท่องเที่ยวเท่ากับ 593.71 ± 432.87 กิโลเมตรต่อคน ดังแสดงใน Table 4

Table 3 Shows the frequency and percentage of visitor's personal information.

Personal Information of visitor	Frequency N = 400	Percentage (%)	Personal information of sample	Frequency N = 400	Percentage (%)
Gender: Male	156	39	Occupation:		
Female	244	61	Public Sector/State	20	5
Age: Below 20 years	17	4.3	Enterprise		
20–30 years	109	27.3	Government office/	82	20.5
31–40 years	54	13.5	Government employee		
41–50 years	45	11.3	Private Sector		
51–60 years	77	19.3	Merchant/Own Business	67	16.8
More than 60	98	24.5	Student		
			Others	116	29
				91	22.8
Education:				24	6
Below bachelor's degree	199	29.8			
Bachelor's degree					
Higher bachelor's	217	54.3			
degree	64	16			

Table 4 Greenhouse gas emissions classified by vehicle type

Vehicle type	Number of vehicles		Number of tourists	Total greenhouse gas emissions ($kgCO_2eq$)	Greenhouse gas emissions per person ($kgCO_2eq$/person)
	Number	Percentage (%)			
SUV	1	0.25	2	67.23	33.61
Motorcycle	5	1.25	17	63.17	3.72
Pickup	66	16.5	242	8,187.92	33.83
Car	181	45.25	905	17,588.82	19.44
Van	104	26	1041	16,100.9	15.47
Bus	27	6.75	1146	4,503.65	3.93
EV	3	0.75	7	--	--
Hybrid	13	3.25	45	1,962.43	43.61
Total	400	100	3405	48,474.12	14.24

การรับรู้ของนักท่องเที่ยวเกี่ยวกับการท่องเที่ยวเชิงนิเวศในพื้นที่อุทยานประวัติศาสตร์ศรีเทพ

จากผลการสำรวจการรับรู้ของนักท่องเที่ยวเกี่ยวกับการท่องเที่ยวคาร์บอนต่ำในพื้นที่อุทยานประวัติศาสตร์ศรีเทพ พบว่านักท่องเที่ยวมีระดับการรับรู้ที่แตกต่างกัน โดยกลุ่มที่ “รู้จักและทราบรายละเอียด” เกี่ยวกับการท่องเที่ยวคาร์บอนต่ำมีจำนวน 116 คน คิดเป็นร้อยละ 29 ขณะที่นักท่องเที่ยวจำนวน 151 คน หรือร้อยละ 37.8 ระบุว่า “เคยได้ยินแต่ไม่รู้จักรายละเอียด” และกลุ่มที่ “ไม่รู้จักและไม่ทราบรายละเอียด” มีจำนวน 133 คน คิดเป็นร้อยละ 33.3 ผลการศึกษานี้สะท้อนให้เห็นว่า แม้นักท่องเที่ยวจำนวนหนึ่งจะมีความคุ้นเคยกับแนวคิดการท่องเที่ยวที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม แต่ยังมีนักท่องเที่ยวอีกกลุ่มใหญ่ที่ขาดความเข้าใจในหลักการและแนวปฏิบัติของการท่องเที่ยวคาร์บอนต่ำอย่างชัดเจน ซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษาของ (Becken, 2007) และ (Higham et al., 2016) ที่ระบุว่านักท่องเที่ยวมักมีการรับรู้ด้านสิ่งแวดล้อมในระดับแนวคิดทั่วไป แต่ยังขาดความเข้าใจเชิงลึกเกี่ยวกับผลกระทบด้านการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากการเดินทางท่องเที่ยว ทั้งนี้ ระดับการรับรู้เกี่ยวกับการท่องเที่ยวคาร์บอนต่ำมีแนวโน้มสัมพันธ์กับปัจจัยส่วนบุคคลของนักท่องเที่ยว เช่น ระดับการศึกษา เพศ และอาชีพ โดยนักท่องเที่ยวที่มีระดับการศึกษาสูง หรือประกอบอาชีพที่เกี่ยวข้องกับสิ่งแวดล้อม การศึกษา หรือภาคบริการ มีแนวโน้มที่จะมีความรู้และความเข้าใจเกี่ยวกับการท่องเที่ยวคาร์บอนต่ำมากกว่ากลุ่มอื่น ขณะที่นักท่องเที่ยวบางกลุ่มอาจรับรู้เพียงในเชิงนโยบายหรือภาพลักษณ์ของการท่องเที่ยว แต่ยังไม่สามารถเชื่อมโยงไปสู่การท่องเที่ยวคาร์บอนต่ำได้

อย่างไรก็ตาม นักท่องเที่ยวส่วนใหญ่ยังคงมีทัศนคติเชิงบวกต่อการพัฒนาอุทยานประวัติศาสตร์ศรีเทพให้เป็นแหล่งท่องเที่ยวคาร์บอนต่ำ โดยให้เหตุผลว่าสภาพแวดล้อมภายในอุทยานธรรมชาติยังคงสมบูรณ์ และมีการจัดการท่องเที่ยวที่สอดคล้องกับบริบทของแหล่งมรดกโลก ผลการศึกษานี้จึงสามารถนำไปใช้เป็นฐานข้อมูลสำคัญในการกำหนดข้อเสนอแนะเชิงนโยบาย โดยหน่วยงานที่เกี่ยวข้องควรพัฒนากลยุทธ์การสื่อสารและกิจกรรมรณรงค์ที่ชัดเจนและเข้าถึงนักท่องเที่ยวได้อย่างมีประสิทธิภาพ

ในเชิงปฏิบัติ ควรเพิ่มป้ายสื่อความหมายเกี่ยวกับแนวคิดและประโยชน์ของการท่องเที่ยวคาร์บอนต่ำในจุดสำคัญภายในอุทยาน เพื่อเสริมสร้างความรู้และความเข้าใจแก่กลุ่มนักท่องเที่ยวทั่วไป ควบคู่กับการส่งเสริมกิจกรรมท่องเที่ยวคาร์บอนต่ำที่เหมาะสมกับบริบทของพื้นที่ เช่น กิจกรรมการปั่นจักรยานชมโบราณสถาน ซึ่งเป็นรูปแบบการเดินทางที่นักท่องเที่ยวเริ่มให้ความสนใจและสามารถช่วยลดการใช้รถยนต์ส่วนบุคคลภายในพื้นที่ได้อย่างเป็นรูปธรรม มาตรการดังกล่าวไม่เพียงช่วยลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากภาคการเดินทางเท่านั้น แต่ยังสอดคล้องกับแนวทางการ

ท่องเที่ยวอย่างยั่งยืนของ (UNWTO, 2018) และการลดก๊าซเรือนกระจกตามแนวทาง IPCC (2006) ซึ่งจะช่วยสนับสนุนการพัฒนาอุทยานประวัติศาสตร์ศรีเทพให้เป็นแหล่งท่องเที่ยวคาร์บอนต่ำอย่างยั่งยืนในระยะยาว

การประเมินการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากการเดินทางของนักท่องเที่ยวที่เดินทางมายังอุทยานประวัติศาสตร์ศรีเทพ จังหวัดเพชรบูรณ์ พบว่า มีปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากการเดินทางท่องเที่ยวทั้งหมดจากกลุ่มตัวอย่างเท่ากับ 45,091.78 kg CO_2eq คิดเป็นการปล่อยก๊าซเรือนกระจกเฉลี่ยรายบุคคล เท่ากับ 13.24 kg CO_2eq/คน โดยการเดินทางของนักท่องเที่ยวส่วนใหญ่เดินทางด้วยรถยนต์ส่วนบุคคล สามารถคำนวนการปล่อยก๊าซเรือนกระจกแยกตามประเภทของยานพาหนะ ทั้งนี้ อัตราการปล่อยก๊าซเรือนกระจกรายบุคคลจากการเดินทางของนักท่องเที่ยวในอุทยานประวัติศาสตร์ศรีเทพ มีค่าน้อยกว่าการเดินทางของนักท่องเที่ยวในกิจกรรมการแข่งเรือพายชิงแชมป์แห่งประเทศไทย ณ เขื่อนภูมิพล จังหวัดตาก มีค่าเท่ากับ 15.10 kgCO_2eq/คน (วณิชชา, 2564) และ ในกรณีศึกษาของหมู่บ้านชนบทในกวางตง ประเทศจีน งานวิจัยพบว่า carbon footprint ต่อคนจากกิจกรรมท่องเที่ยวอยู่ที่ 38.66 kgCO_2eq/คน (Wan et al., 2025) การเดินทางของนักท่องเที่ยวในอำเภอสวนผึ้ง จังหวัดราชบุรี มีค่าเท่ากับ 21.20 kgCO_2eq/คน (Jammongchob et al., 2017) การปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากการเดินทางของนักท่องเที่ยวขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายด้าน ทั้งระยะทางระหว่างต้นทางและจุดหมาย ประเภทและขนาดของยานพาหนะชนิดของเชื้อเพลิงที่ใช้ รวมถึงจำนวนผู้โดยสารที่เดินทางร่วมกันในรถคันเดียวกัน สำหรับกรณีของอุทยานประวัติศาสตร์ศรีเทพ ซึ่งเป็นแหล่งท่องเที่ยวเชิงวัฒนธรรมและโบราณคดีที่ตั้งอยู่ไม่ไกลจากกรุงเทพมหานคร พบว่านักท่องเที่ยวส่วนใหญ่เดินทางมาท่องเที่ยวในช่วงวันหยุดสั้น ๆ โดยมากเดินทางเป็นกลุ่ม เช่น ครอบครัวหรือกลุ่มเพื่อน ส่งผลให้การเดินทางจำนวนหนึ่งมีผู้โดยสารหลายคนต่อหนึ่งคัน ช่วยลด อัตราการปล่อยคาร์บอนเฉลี่ยต่อคนได้ในระดับหนึ่ง นอกจากนี้ ภายในพื้นที่ยังมีการท่องเที่ยวกิจกรรมเบา เช่น การปั่นจักรยานชมโบราณสถาน ซึ่งนักท่องเที่ยวสามารถนำจักรยานส่วนตัวมาใช้หรือเช่าจากผู้ให้บริการในพื้นที่ ซึ่งช่วยลดการใช้พลังงานจากรถยนต์และสอดคล้องกับแนวคิดการท่องเที่ยวที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม สะท้อนให้เห็นว่าพฤติกรรมการเดินทางและประเภทพาหนะที่เลือกใช้มีผลต่อระดับการปล่อยคาร์บอนในอัตราที่แตกต่างกันอย่างชัดเจน โดยนักท่องเที่ยวที่ใช้รถยนต์ส่วนบุคคลหรือเดินทางเป็นระยะทางไกลมีส่วนทำให้เกิดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกในสัดส่วนที่สูงกว่า ผลการศึกษานี้จึงชี้ให้เห็นถึงความสำคัญของการกำหนดมาตรการจัดการคาร์บอนจากภาคการขนส่งในพื้นที่แห่งนี้ ควรส่งเสริมให้ใช้ระบบขนส่งสาธารณะ การออกแบบเส้นทางท่องเที่ยวให้กระชับเพื่อลดการเดินทางซ้ำ การพัฒนาโครงสร้างพื้นฐานด้านยานยนต์ไฟฟ้า รวมทั้งการสร้างความตระหนักรู้ให้แก่นักท่องเที่ยวเกี่ยวกับผลกระทบจากการปล่อยก๊าซเรือนกระจก

ผลการสำรวจเกี่ยวกับความเข้าใจด้านการท่องเที่ยวคาร์บอนต่ำของนักท่องเที่ยวที่มาเยือนอุทยานประวัติศาสตร์ศรีเทพ พบว่า นักท่องเที่ยวจำนวนมากมีความคุ้นเคยกับแนวคิดการท่องเที่ยวที่สอดคล้องกับการอนุรักษ์สิ่งแวดล้อม และมีสัดส่วนของผู้ที่รู้จักหรือเคยได้ยินเกี่ยวกับการท่องเที่ยวคาร์บอนต่ำค่อนข้างสูง แม้ยังมีบางส่วนที่ยังขาดความเข้าใจเชิงลึก แต่ภาพรวมสะท้อนให้เห็นว่านักท่องเที่ยวมีทัศนคติเชิงบวกต่อการพัฒนาพื้นที่ศรีเทพให้เป็นแหล่งท่องเที่ยวที่ลดผลกระทบด้านสิ่งแวดล้อม จากผลการประเมินการปล่อยก๊าซเรือนกระจกของการเดินทางมายังอุทยานประวัติศาสตร์ศรีเทพ สามารถเห็นได้ว่าแหล่งท่องเที่ยวแห่งนี้มีศักยภาพในการพัฒนาสู่การเป็นจุดหมายเชิงวัฒนธรรมที่ให้ความสำคัญกับความยั่งยืน ทั้งด้วยสภาพแวดล้อมของพื้นที่ซึ่งรายล้อมด้วยโบราณสถานสำคัญ ตลอดจนวิถีชุมชนโดยรอบที่ยังคงเอกลักษณ์ในด้านภูมิปัญญาท้องถิ่นและทรัพยากรธรรมชาติ ปัจจัยเหล่านี้ช่วยสนับสนุนให้พื้นที่เหมาะสมต่อการขับเคลื่อนแนวคิดการท่องเที่ยวคาร์บอนต่ำ

สรุป

การประเมินการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากการเดินทางของนักท่องเที่ยวที่เดินทางเยี่ยมชมอุทยานประวัติศาสตร์ศรีเทพ ซึ่งเป็นแหล่งท่องเที่ยวทางประวัติศาสตร์และวัฒนธรรมที่ได้รับความนิยมเพิ่มขึ้น โดยการจัดการคาร์บอนจากการเดินทางของนักท่องเที่ยวถือเป็นองค์ประกอบสำคัญในแนวทางการพัฒนาสู่การท่องเที่ยวคาร์บอนต่ำในอนาคต ผลการวิจัยพบว่า กลุ่มอายุนักท่องเที่ยวเดินทางมามากที่สุด ช่วงอายุ 20–30 ปี สะท้อนให้เห็นถึงกลุ่มคนรุ่นใหม่และกลุ่มวัยทำงานที่มีศักยภาพในการเดินทางท่องเที่ยวที่ชอบท่องเที่ยวเชิงประวัติศาสตร์ โดยผลการคำนวณปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจกทั้งหมดจากการเดินทางของนักท่องเที่ยว พบว่า รถยนต์ส่วนบุคคลเป็นยานพาหนะที่ก่อให้เกิดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกมากที่สุด รองลงมาคือรถตู้ และรถกระบะ ตามลำดับ โดยปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากการเดินทางของนักท่องเที่ยวรวม เท่ากับ 45,091.78 $kgCO_2eq$ เมื่อวิเคราะห์ในระดับรายบุคคล พบว่า นักท่องเที่ยวปล่อยก๊าซเรือนกระจกเฉลี่ยรายบุคคลเท่ากับ 13.24 $kgCO_2eq$ /คน ผลการศึกษาสามารถการนำข้อมูลมาวิเคราะห์เชิงลึกเพื่อใช้สำหรับการวางแผนการบริหารจัดการเดินทางท่องเที่ยว และสามารถขับเคลื่อนอุทยานประวัติศาสตร์ศรีเทพสู่ต้นแบบการจัดการพื้นที่ท่องเที่ยวคาร์บอนต่ำได้ในอนาคต

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยฉบับนี้ได้รับความอนุเคราะห์อำนวยความสะดวกในการเก็บข้อมูลวิจัยจากหัวหน้าอุทยานประวัติศาสตร์ศรีเทพและคุณธนัชญา เทียนดี นักโบราณคดีปฏิบัติการของอุทยานประวัติศาสตร์ศรีเทพ จังหวัดเพชรบูรณ์ ตลอดจนทุนสนับสนุนการวิจัยจากคณะวัฒนธรรมสิ่งแวดล้อมและการท่องเที่ยวเชิงนิเวศ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

เอกสารอ้างอิง

กรมเชื้อเพลิงธรรมชาติ. 2565. ประกาศกรมเชื้อเพลิงธรรมชาติ เรื่อง หลักเกณฑ์การรายงานและวิธีการคำนวณปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากการประกอบกิจการปิโตรเลียม พ.ศ. 2565. http://www.ratchakitcha.soc.go.th, 14 มกราคม 2569.

กรมศิลปากร. 2566. เมืองโบราณศรีเทพ. https://www.finearts.go.th, 15 พฤศจิกายน 2568.

กระทรวงพลังงาน. 2567. สถานการณ์การปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO2) จากการใช้พลังงาน 6 เดือนแรก ของปี 2567. https://www.energy.go.th, 10 พฤศจิกายน 2568.

การท่องเที่ยวแห่งประเทศไทย. 2564. CARBON NEUTRAL TOURISM: คู่มือแนวทางการออกแบบและพัฒนาธุรกิจท่องเที่ยวที่ปล่อยคาร์บอนสุทธิเป็นศูนย์. https://www.tourismthailand.org, 16 พฤศจิกายน 2568.

ชิตาวีร์ สุขคร. 2562. การท่องเที่ยวเชิงวัฒนธรรมในประเทศไทย. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต, มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์.

วณิชชา แก้วสุวรรณ์. 2564. การเดินทางของนักท่องเที่ยวในกิจกรรมการแข่งเรือพายชิงแชมป์แห่งประเทศไทย ณ เขื่อนภูมิพล จังหวัดตาก. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต, มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ.

วีรพจน์ สรรพากิจวัฒนา. 2564. การปลดปล่อยและมาตรการลดก๊าซเรือนกระจกจากการท่องเที่ยวเชิงนิเวศคุ้งบางกระเจ้า จังหวัดสมุทรปราการ. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ.

สำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน กระทรวงพลังงาน. 2566. การปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO2) จากการใช้พลังงาน ปี 2566. https://www.eppo.go.th, 16 พฤศจิกายน 2568.

องค์การบริหารจัดการก๊าซเรือนกระจก (องค์การมหาชน). 2569. ข้อมูล/รายงานการปล่อยก๊าซเรือนกระจก (ปรับปรุงข้อมูลเดือนมกราคม 2569). https://www.tgo.or.th, 14 มกราคม 2569.

Alexandrakis, G. 2018. Economic and societal impacts on cultural heritage sites, resulting from natural effects and climate change. Heritage: Article. https://doi.org/10.3390/heritage1010068.

Becken, S. 2007. Tourists' perception of international air travel's impact on the global climate. J. Sustain. Tour. 15: 351–368.

European Commission. 2024. GHG emissions of all world countries: 2024 report. https://edgar.jrc.ec.europa.eu, 10 November 2025.

Higham, J., Cohen, S.A., Cavaliere, C.T. 2016. Climate change, tourist air travel and radical emissions reduction. J. Clean. Prod. 111: 336–347.

Intergovernmental Panel on Climate Change. 2006. IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories. https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl, 10 November 2025.

Jamnongchob, A., Duangphakdee, O., Hanpattanakit, P. 2017. CO2 emission of tourist transportation in Suan Phueng mountain, Thailand. Energy Procedia: 438–443. https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.10.437.

U.S. Energy Information Administration. n.d. U.S. Energy Information Administration (EIA). https://www.eia.gov, 17 November 2025.

United Nations World Tourism Organization (UNWTO). 2018. Tourism and climate change. https://www.unwto.org/sustainable-development/climate-change, 14 January 2026.

Wan, J., Wang, P., Wang, M., Huang, Y., Luo, J. 2025. Research on the carbon footprint of rural tourism based on life cycle assessment: A case study of a village in Guangdong, China. Sustainability 17: 6495. https://doi.org/10.3390/su17146495.

Yamane, T. 1957. Statistics, an introductory analysis, 2nd ed. Harper and Row, New York, USA.

การประเมินคุณสมบัติของวัสดุคอมโพสิตใยเห็ดนางรมดำที่ผลิตจากพืชรุกรานและเปลือกส้มโอเพื่อทดแทนบรรจุภัณฑ์โพลีสไตรีนแบบขยาย

Evaluation of properties of mycelium-based composites made from *pleurotus ostreatus* with invasive plants and pomelo peel as a substitute for expanded polystyrene packaging

กรพร รุจิชิต[a], **จักรพล พันธุวงศ์ภักดี**[a,*], **ปรียาพร เกิดฤทธิ์**[b], **นัฐวุฒิ บุญยืน**[c]
Koraporn Rujichit[a], Jakkapon Phanthuwongpakdee[a,*], Preeyaporn Koedrith[b], Natthawut Boonyuen[c]
[a]ภาควิชาเทคโนโลยีการจัดการสิ่งแวดล้อม คณะสิ่งแวดล้อมและทรัพยากรศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล นครปฐม 73170
[c]ภาควิชาการจัดการทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม คณะสิ่งแวดล้อมและทรัพยากรศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล นครปฐม 73170
[d]ศูนย์พันธุวิศวกรรมและเทคโนโลยีชีวภาพแห่งชาติ (BIOTEC) ปทุมธานี 12120
[a]Environmental Management and Technology, Faculty of Environment and Resource Studies, Mahidol University, Nakhon Pathom 73170, Thailand
[b]Natural Resources and Environmental Management, Faculty of Environment and Resource Studies, Mahidol University, Nakhon Pathom 73170, Thailand
[c]National Center for Genetic Engineering and Biotechnology (BIOTEC), Pathum Thani 12120, Thailand
*Corresponding author. E-mail address: Jakkapon.pha@mahidol.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาผลของการเสริมเปลือกส้มโอที่มีต่อคุณสมบัติของวัสดุผสมชีวภาพเส้นใยเห็ด (mycelium-based composite; MBC) จากเห็ดนางรมดำ (*Pleurotus ostreatus*) ที่ใช้ผักตบชวา (*Eichhornia crassipes*) และจอกหูหนูยักษ์ (*Salvinia molesta*) เป็นแหล่งเซลลูโลส เพื่อใช้เป็นบรรจุภัณฑ์ทดแทนโฟมพอลิสไตรีน (expanded polystyrene; EPS) โดยใส่เปลือกส้มโอในอัตราส่วนต่างกัน 4 สูตร คือ P0 P10 P30 และ P50 ตัวอย่างถูกเตรียมโดยการนึ่งฆ่าเชื้อ ขึ้นรูป และบ่มเชื้อภายใต้สภาวะควบคุม เมื่อนำไปทดสอบคุณสมบัติความทนแรงอัด และคุณสมบัติเสริมอื่น ๆ ประกอบ ตามมาตรฐาน ASTM พบว่าสูตร P10 ให้ความทนแรงอัดสูงสุด มีค่า 1.20 MPa ซึ่งมากกว่า EPS (0.065–0.110 MPa) ขณะที่สูตร P30 มีอัตราการเจริญของไมซีเลียมสูงสุด อย่างไรก็ตาม ทุกสูตรยังมีข้อจำกัดด้านการกันน้ำในระยะยาว
คำสำคัญ: ความยั่งยืน,วัชพืชน้ำรุกราน, วัสดุผสมชีวภาพเส้นใยเห็ด, บรรจุภัณฑ์, ส้มโอ

Abstract

This study investigates the effect of pomelo peel incorporation on the properties of mycelium-based composites (MBC) produced from *Pleurotus ostreatus*, using water hyacinth (*Eichhornia crassipes*) and giant salvinia (*Salvinia molesta*) as cellulose sources, with the aim of developing alternative packaging materials of expanded polystyrene (EPS). Pomelo peel was added at four different proportions: P0, P10, P30, and P50. The samples were prepared through sterilization, molding, and incubation under controlled conditions. Compressive strength and additional material properties were evaluated in accordance with ASTM standards. The results showed that formulation P10 exhibited the highest compressive strength, reaching 1.20 MPa, which is higher than EPS (0.065–0.110 MPa), while formulation P30 demonstrated the highest mycelial growth rate. However, all formulations showed limitations in long-term water resistance.
Keywords: Invasive aquatic plants, Mycelium-based composite, Packaging, Pomelo, Sustainability

คำนำ

ตั้งแต่ช่วง COVID-19 อุตสาหกรรมบรรจุภัณฑ์มีแนวโน้มเติบโตขึ้นอย่างต่อเนื่อง โดยเฉพาะส่วนของบรรจุภัณฑ์ชั้นที่ 2 (secondary packaging) ที่ทำหน้าที่กันกระแทก และอำนวยความสะดวกในการขนส่ง (Thiumsak, 2023) โดยวัสดุที่นิยมใช้จะเป็นโฟมพอลิสไตรีน (expanded polystyrene; EPS) ซึ่งเป็นหนึ่งในแหล่งปล่อยก๊าซเรือนกระจกที่สำคัญ เนื่องจากการผลิตและกำจัดบรรจุภัณฑ์ชนิดนี้ยังต้องใช้ทรัพยากรฟอสซิล การพัฒนาวัสดุทดแทนที่ยั่งยืนจึงมีบทบาทสำคัญต่อการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจก วัสดุผสมชีวภาพเส้นใยเห็ด (mycelium-based composite; MBC) เป็นหนึ่งในทางเลือกที่โดดเด่น เนื่องจากผลิตจากชีวมวล ย่อยสลายได้ตามธรรมชาติ สร้างโอกาสเพิ่มเติมในการใช้ประโยชน์จากขยะชีวภาพที่มีอยู่มากในประเทศ ขับเคลื่อนเศรษฐกิจหมุนเวียนผ่านการสร้างมูลค่าเพิ่ม และลดภาระการกำจัดขยะ วัสดุที่นิยมใช้เป็นสารตั้งต้นของ MBC เช่น ขี้เลื่อย ฟางข้าว กากมะพร้าว มีปริมาณเซลลูโลสสูง ทำให้ได้ MBC ที่มีความแข็งแรง ทนต่อแรงอัด กันความร้อน และกันน้ำได้ดี เหมาะสมต่อการใช้งานเป็นวัสดุก่อสร้างหรือบรรจุภัณฑ์ทดแทน EPS (Aiduang et al., 2024; Alaneme et al., 2023; Rajendran, 2022) แต่เนื่องจากวัสดุเหล่านั้นมีมูลค่าทางเศรษฐกิจสูงอยู่แล้ว จึงนำไปสู่การค้นหาสารตั้งต้นชนิดใหม่ในการเพาะเลี้ยงไมซีเลียม โดยงานวิจัยนี้จะใช้แหล่งเซลลูโลสหลักเป็นพืชรุกรานอย่างผักตบชวาและจอกหูหนูยักษ์ที่สร้างปัญหาให้แก่แหล่งน้ำในหลาย ๆ พื้นที่ในประเทศไทย และเสริมด้วยเปลือกส้มโอเหลือทิ้งที่มีปริมาณเพคตินอยู่มาก (Chaudhary et al., 2023)เนื่องจากโครงสร้างที่มีรูพรุนมากของเพคตินอาจช่วยเสริมคุณสมบัติด้านความยืดหยุ่น (Yang et al., 2022) ให้แก่ MBC แต่ก็อาจทำให้กันน้ำได้น้อยลง โดยในปัจจุบันยังไม่มีการศึกษาผลของเพคตินต่อคุณสมบัติของ MBC งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของปริมาณเปลือกส้มโอ ซึ่งเป็นแหล่งของสารเพคติน ต่อคุณสมบัติของ MBC ได้แก่ ความทนแรงอัด และคุณสมบัติการกันน้ำ เพื่อประเมินศักยภาพในการนำไปใช้เป็นบรรจุภัณฑ์ทดแทน EPS

อุปกรณ์และวิธีการ

การเตรียมสารตั้งต้น

สารตั้งต้นสำหรับเพาะเลี้ยงไมซีเลียมจะประกอบด้วย 2 ส่วน คือ ส่วนเปลือกส้มโอ 0–50% ในน้ำหนักสารตั้งต้นทั้งหมด (รวม 4 สูตร 0% P0, 10% P10, 30% P30 และ 50% P50) และส่วนอาหารผสมคือผักตบชวา จอกหูหนูยักษ์ และซังข้าวโพด ผสมกันในอัตราส่วน 2:2:1 โดยน้ำหนัก หลังจากนำสารตั้งต้นไปนึ่งฆ่าเชื้อด้วยเครื่อง autoclave (TOMY SX-700 lab autoclave, Japan) และปรับความชื้นด้วยน้ำกลั่นแล้ว ผสมเชื้อ *P. ostreatus* ในเมล็ดข้าวฟ่างกับสารตั้งต้นลงไปในแม่พิมพ์อะคริลิคเพื่อขึ้นรูป และนำไปบ่มในตู้บ่มเชื้อ (Termaks B8420 incubator, Norway) ที่อุณหภูมิ 27 °C ความชื้นสัมพัทธ์ 90% เป็นเวลา 14–21 วัน ก่อนนำมาอบให้แห้งด้วยตู้อบลมร้อน (Memmert model 30-1060 hot air oven, Germany) ที่อุณหภูมิ 40 °C เป็นเวลา 48 ชม. แล้วจึงนำไปทดสอบคุณสมบัติด้านต่าง ๆ ของวัสดุตามมาตรฐานต่อไป

การวัดอัตราการเจริญเติบโตของไมซีเลียม

ประเมินโดยวัดเส้นผ่านศูนย์กลางของโคโลนีไมซีเลียมที่เพาะเลี้ยงในจานเพาะเชื้อ ด้วยอาหารเลี้ยงเชื้อ potato dextrose agar (PDA) และ PDA ผสมสารตั้งต้นแต่ละสูตรในอัตราส่วน 1:1 โดยน้ำหนัก ซึ่งจะวัดในช่วงเวลาใกล้เคียงเดิมเป็นเวลา 7 วัน โดยเพาะเลี้ยงทุกสูตร 3 ซ้ำไปพร้อม ๆ กัน ในสภาวะควบคุมเดียวกันกับที่ใช้บ่มตัวอย่างตอนขึ้นรูป เพื่อนำมาหาค่าอัตราการเจริญเติบโตเฉลี่ยของแต่ละสูตร

การประเมินความสามารถในการกันน้ำและการรักษารูปทรง

ทดสอบอัตราการดูดซับน้ำตามมาตรฐาน ASTM D579-98 สำหรับวัสดุที่มีรูพรุนมาก โดยนำตัวอย่าง 1 ชิ้นจากแต่ละสูตรมาแช่ในน้ำทั้งชิ้น จากนั้นนำออกมาวัดน้ำหนักและขนาดทุก ๆ 2 ชม. ส่วนการวัดมุมสัมผัสหยดน้ำบนพื้นผิววัสดุจะวัดทั้งหมด 3 จุดที่แตกต่างกันบนตัวอย่าง 1 ชิ้น ต่อ 1 สูตรแล้วนำมาหาค่าเฉลี่ยมุมสัมผัส ดำเนินการตามมาตรฐาน ASTM D7334-08 ด้วย optical contact angle instrument ใช้ปริมาตรน้ำ 5 µl

ความทนต่อแรงกดอัด

ทดสอบด้วย compression machine (STS, Thailand) ประกอบกับ data logger (TDS-530, Japan) ใช้วิธีการตามมาตรฐาน ASTM D695-15 จากนั้นนำค่าแรงอัดที่ได้มาคำนวณเป็น compressive strength ด้วยสูตร $\sigma = \frac{F}{A}$ โดยจะทดสอบทั้งหมด 3 ซ้ำต่อสูตร แล้วนำมาหาค่าเฉลี่ย

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

การเจริญเติบโตของไมซีเลียม

พบว่าเส้นผ่านศูนย์กลางเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องในทุกสูตร โดยอัตราการเจริญเติบโตสูงสุดของไมซีเลียมมีค่าแตกต่างกันตามชนิดของสารตั้งต้น การเพาะเลี้ยงบนอาหาร PDA ให้ค่าอัตราการเจริญสูงสุด 1.70 ซม./วัน มีแนวโน้มการเจริญคงที่ตั้งแต่วันที่ 3 ถึงวันที่ 7 ของการเพาะเลี้ยง สำหรับสูตรที่มีสารตั้งต้นผสม พบว่าสูตร P0 P10 และ P50 มีค่าอัตราการเจริญสูงสุดในช่วงวันที่ 5–6 เท่ากับ 2.10, 1.90 และ 2.20 ซม./วัน ตามลำดับ ขณะที่สูตร P30 แสดงอัตราการเจริญสูงสุดคงที่เท่ากับ 1.80 ซม./วัน ตั้งแต่วันที่ 3 ถึงวันที่ 7 (Fig.1C) เมื่อพิจารณาอัตราการเจริญเฉลี่ยตลอดช่วงการทดลอง พบว่าสูตรที่มีสารตั้งต้นผสมทั้งหมดมีค่าอัตราการเจริญเฉลี่ยสูงกว่า PDA โดยสูตร P30 มีอัตราการเจริญเติบโตเฉลี่ยสูงสุด (1.38 ซม./วัน) รองลงมาคือ P0 (1.34 ซม./วัน), P50 (1.33 ซม./วัน), P10 (1.28 ซม./วัน), และ PDA (1.13 ซม./วัน)

นอกจากนี้ยังพบว่าเส้นใยไมซีเลียมบางลงในสูตรที่มีส้มโอสูง ซึ่งอาจเกี่ยวข้องกับองค์ประกอบของวัสดุตั้งต้น เนื่องจากเพคตินมีแนวโน้มส่งเสริมการย่อยสลายด้วยเอนไซม์และการดูดซึมสารอาหารของไมซีเลียม รวมถึงฟลาโวนอยด์ในเปลือกส้มโออาจมีฤทธิ์ยับยั้งการเจริญของเชื้อราได้บางส่วน (Chen et al., 2023). จึงส่งผลให้ไมซีเลียมยังคงเจริญเติบโตต่อไปได้ แต่มีโครงสร้างของเส้นใยบางลง และถึงแม้จะพบการปนเปื้อนเชื้อราในจานเพาะของ P30 ในวันที่ 3 แต่ไมซีเลียมก็สามารถเจริญปกคลุมเหนือราได้ในวันที่ 5 ดังแสดงใน Fig. 1A.

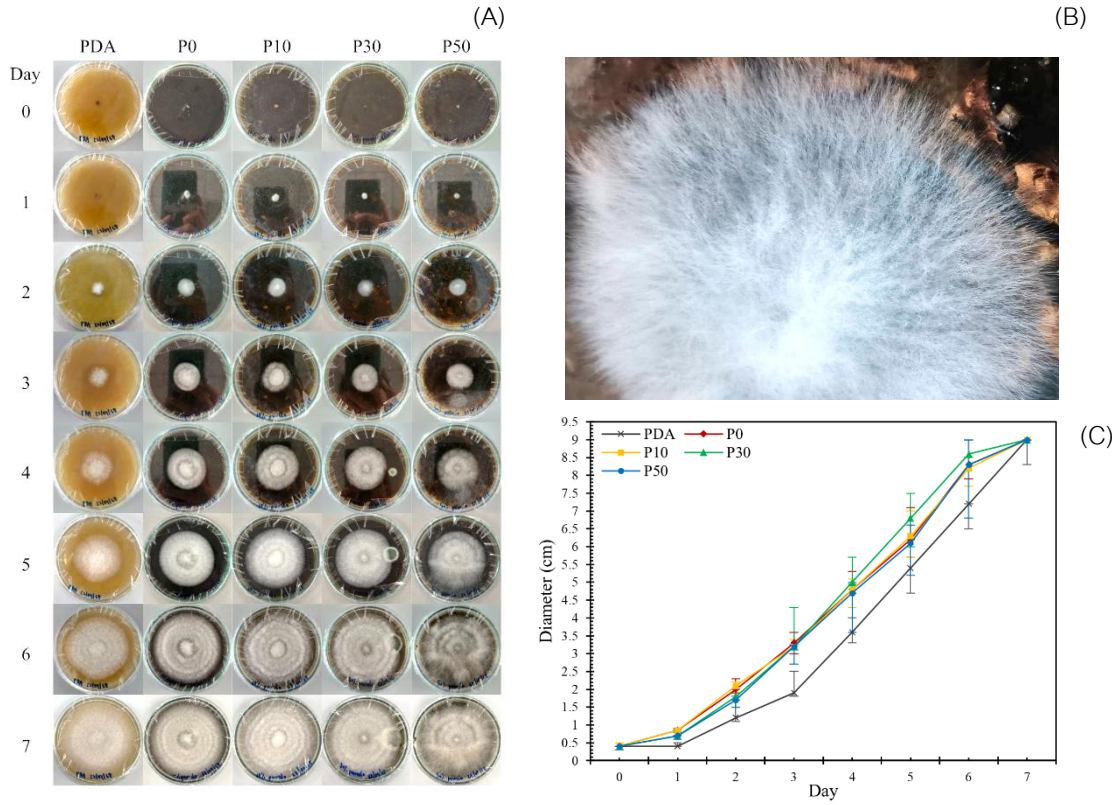


Fig. 1 (A) photographs of the samples taken daily (B) the close-up photo of P50 mycelium (C) the graph of radial mycelial growth (cm) over a 7-day incubation period for PDA and PDA–substrate mixtures with different ratios of pomelo peel (P0, P10, P30 and P50)

ความสามารถในการกันน้ำและการขยายตัวเชิงปริมาตร

ผลทดสอบสมบัติการดูดซับน้ำแสดงให้เห็นว่า ตัวอย่างของทุกสูตรมีการดูดซับน้ำอย่างรวดเร็วใน 2 ชม.แรก และเข้าสู่สภาวะอิ่มตัวภายใน 12 ชม.หลังจากถูกนำไปแช่น้ำดัง Fig. 2A โดย P50 มีค่าการดูดซับน้ำต่ำที่สุด (173.78%) ตามด้วย P0 (196.51%), P30 (204.35%), และ P10 (309.63%) ส่วนการขยายตัวเชิงปริมาตรเป็นค่าเสถียรภาพเชิงโครงสร้างของวัสดุ พบว่า P10 มีการคงรูปดีที่สุด โดยขยายตัวเพียง 120.54% ในขณะที่ P50 ขยายตัว 130.89%, P0 139.17%, และ P30 139.97% ถึงแม้เพกตินจะเพิ่มความพรุนและเอื้อต่อการดูดซับน้ำ (Boanares et al., 2017) แต่สูตร P10 กลับมีค่าการดูดซับน้ำสูงสุด ในขณะที่มีการขยายตัวเชิงปริมาตรต่ำสุด ซึ่งอาจสะท้อนถึงปัจจัยด้านการจัดเรียงโครงสร้างเส้นใยไมซีเลียมและช่องว่างภายในวัสดุ อย่างไรก็ตาม ประเด็นดังกล่าวจำเป็นต้องมีการศึกษาทางโครงสร้างเพิ่มเติมเพื่อยืนยันกลไกที่เกี่ยวข้อง

สำหรับการทดสอบการกันน้ำด้วยการวัดมุมสัมผัสของหยดน้ำบนพื้นผิววัสดุ ค่ามุมสัมผัสที่มากกว่า 90° ถือเป็นลักษณะของพื้นผิวแบบ hydrophobic พบว่าทุกสูตรมีมุมสัมผัสมากกว่า 120° เป็นเวลาประมาณ 1 นาทีก่อนค่ามุมจะค่อย ๆ ลดลง โดย P30 มีค่ามุมสูงสุดที่ 138° รองลงมาคือ P50 131° P10 129° และ P0 123° แต่เนื่องจากไมซีเลียมขึ้นปกคลุมไม่เต็มพื้นผิวของชิ้นงานตัวอย่าง จึงอาจทำให้ผลทดสอบความสามารถในการกันน้ำที่วัดได้ต่ำกว่าศักยภาพที่แท้จริงของวัสดุ โดยเมื่อทำการทดสอบเพิ่มเติมในภายหลังพบว่าพื้นที่ที่ปกคลุมด้วยเส้นใยหนาแน่นจะมีความเสถียรของมุมสัมผัสสูงกว่า ทำให้กันน้ำได้ดีกว่า

เมื่อพิจารณาถึงการนำไปใช้งานเป็นบรรจุภัณฑ์ ซึ่งปัจจัยด้านการกันน้ำถือเป็นสิ่งสำคัญในการรักษาความแข็งแรง โดยรวมสูตร P50 จึงมีความเหมาะสมมากที่สุด เนื่องจากมีค่าการดูดซับน้ำต่ำที่สุด การขยายตัวเชิงปริมาตรอยู่ในระดับต่ำ และค่ามุมสัมผัสสูง

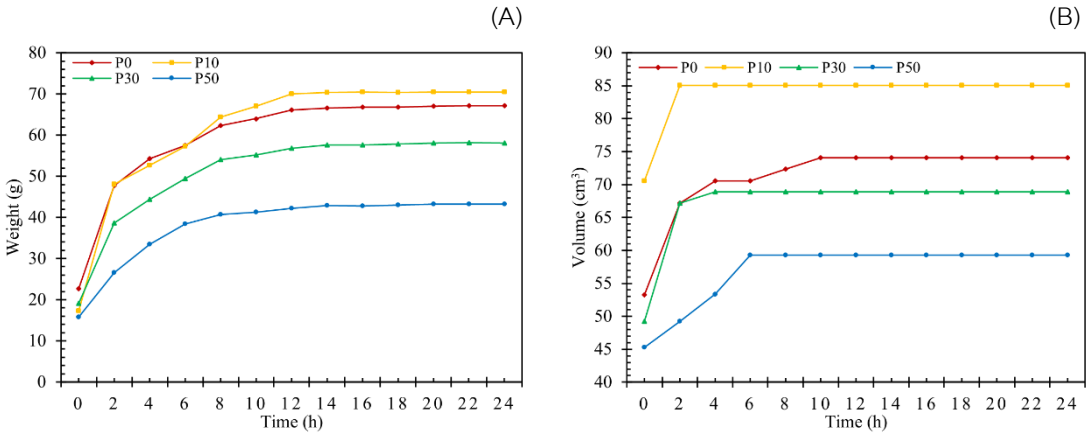


Fig. 2 (A) samples water absorption rate (B) samples volumetric expansion over 24h

ความต้านทานแรงกดอัด

จาก Table 1 พบว่า P0 และ P10 เสียรูปอย่างรวดเร็วเมื่อถูกกด แต่ทนแรงอัดได้สูงก่อนปรากฏรอยแตกร้าว ซึ่งบ่งชี้ถึงพฤติกรรมของวัสดุที่มีความเหนียวและมีการยึดเกาะของโครงสร้างเส้นใยที่ดี โดยสูตร P10 ให้ค่าความทนต่อแรงอัดสูงสุดเท่ากับ 1.20 MPa ซึ่งอยู่ในช่วงเดียวกันกับ MBC จากขี้เลื่อยซึ่งเป็นสารตั้งต้นมาตรฐานที่นิยมใช้ในการผลิต MBC (Aiduang et al., 2022) และมากกว่าโฟม EPS ที่เป็นวัสดุอ้างอิงสำหรับงานบรรจุภัณฑ์กันกระแทก (IXL Co., Ltd., n.d.) ในทางตรงกันข้าม P30 และ P50 แสดงลักษณะความแข็งเกร็งมากกว่า โดยมีการเปลี่ยนแปลงรูปทรงเพียงเล็กน้อยภายใต้แรงกด แต่จะเกิดรอยแตกในแนวตั้งเมื่อถึงจุดคราก ซึ่งสะท้อนถึงพฤติกรรมการแตกแบบเปราะ

พฤติกรรมของชิ้นงานตัวอย่างข้างต้นอาจอธิบายได้จากบทบาทของเพคตินในเปลือกส้มโอ ซึ่งมีคุณสมบัติในการดูดซับแรงและถ่ายโอนแรงภายในโครงสร้างวัสดุ (Yang et al., 2022) และเนื่องจากตัวอย่างถูกอบจนแห้งสนิทก่อนนำมาทดสอบ จึงสอดคล้องกับพฤติกรรมเชิงโครงสร้างของเพคตินแห้งที่จะจัดเรียงตัวชิดกันมากขึ้น ส่งผลให้วัสดุมีความแข็งเปราะเพิ่มขึ้น และความยืดหยุ่นลดลง (Wang et al., 2021)

Table 1 Comparison of compressive strength between the tested samples, sawdust-based MBC, and EPS.

Sample	Compressive strength (MPa)
P0	0.608
P10	1.20
P30	0.475
P50	0.181
MBC sawdust	0.40-1.32
EPS	0.065-0.110

สรุป

วัสดุชีวภาพผสมเส้นใยเห็ด (MBC) ที่ผลิตจากผักตบชวา จอกหูหนูยักษ์ และเปลือกส้มโอ มีคุณสมบัติแตกต่างกันไปตามสัดส่วนของเปลือกส้มโอ ในด้านการเจริญเติบโตของไมซีเลียม พบว่าสูตร P30 มีอัตราการเจริญเติบโตสูงสุด แม้เส้นใยจะบางลงเนื่องจากปริมาณเพคตินและฟลาโวนอยด์ที่มากขึ้น สำหรับคุณสมบัติการกันน้ำ ทุกสูตรมีอัตราการดูดซับน้ำสูงและอิ่มตัวภายใน 12 ชั่วโมง โดยสูตร P50 มีความสามารถในการกันน้ำและคงรูปโดยรวมดีที่สุด แต่ความสามารถในการกันน้ำระยะยาวยังคงมีข้อจำกัด เนื่องจากไมซีเลียมยังปกคลุมพื้นผิวไม่สมบูรณ์ดี ส่วนความต้านทานแรงอัด P10 มีค่าสูงสุดที่ 1.20 MPa เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับโฟม EPS ซึ่งมีค่าความทนแรงอัดเพียง 0.065–0.110 MPa จะเห็นว่า P10 มีความแข็งแรงเชิงกลสูงกว่ามาก ทั้งยังมีความสมดุลระหว่างความแข็งกับยืดหยุ่นที่ได้จากเพคติน

เมื่อพิจารณาจากวัตถุประสงค์การใช้งานเป็นบรรจุภัณฑ์กันกระแทก ที่ควรมีความยืดหยุ่น กระจายแรงภายในโครงสร้างได้ดี ทำให้ P10 มีศักยภาพในการพัฒนาเป็นวัสดุบรรจุภัณฑ์ชีวภาพทดแทน EPS มากที่สุด แม้ในด้านการกันน้ำยังต้องมีการศึกษากลไกที่เกี่ยวข้องและพัฒนาเพิ่มเติมเพื่อให้ใช้งานได้ในสภาพแวดล้อมจริง เช่น การปรับสภาวะที่ใช้บ่มหรือเติมอาหารเสริมเพื่อให้เส้นใยไมซีเลียมหนาแน่นขึ้น หรือการพัฒนาสารเคลือบช่วยเสริมการกันน้ำ

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจากโครงการ TGIST Internship และขอขอบคุณห้องปฏิบัติการคณะสิ่งแวดล้อมและ MU-FRF มหาวิทยาลัยมหิดล สำหรับคำแนะนำและความช่วยเหลือทางเทคนิค

เอกสารอ้างอิง

Aiduang, W., Chanthaluck, A., Kumla, J., et al. 2022. Amazing fungi for eco-friendly composite materials: A comprehensive review. J. Fungi 8: 842. doi.org/10.3390/jof8080842

Aiduang, W., Jatuwong, K., Jinanukul, P., et al. 2024. Sustainable innovation: Fabrication and characterization of mycelium-based green composites for modern interior materials using agro-industrial wastes and different species of fungi. Polymers 16: 550. doi.org/10.3390/polym16040550

Alaneme, K.K., Anaele, J.U., Oke, T.M., Kareem, S.A., Adediran, M., Ajibuwa, O.A., Anabaranze, Y.O. 2023. Mycelium-based composites: A review of their bio-fabrication procedures, material properties and potential for green building and construction applications. Alex. Eng. J. 83: 234–250. doi.org/10.1016/j.aej.2023.09.012

Boanares, D., Ferreira, B.G., Kozovits, A.R., Sousa, H.C., Isaias, R.M.S., França, M.G.C. 2018. Pectin and cellulose cell wall composition enables different strategies to leaf water uptake in plants from tropical fog mountain. Plant Physiol. Biochem. 122: 57–64. doi.org/10.1016/j.plaphy.2017.11.006

Chaudhary, S., Dora, T., Porwal, S. 2023. Silicon-free PSMA-modified aerogel derived from waste fruit peels for efficient oil recovery. Biomass Convers. Biorefin. 14: 29659–29671. doi.org/10.1007/s13399-023-04720-w

Chen, S., Wang, X., Cheng, Y., Gao, H., Chen, X. 2023. A review of classification, biosynthesis, biological activities and potential applications of flavonoids. Molecules 28: 4982. doi.org/10.3390/molecules28134982

IXL Co., Ltd. n.d. EPS (expanded polystyrene).

Rajendran, C.R. 2022. Packaging applications of fungal mycelium-based biodegradable composites. Fungal Biopolym. Biocompos. 6: 189–193.

Thiumsak, T. 2023. Industry outlook 2024–2026: Plastics industry.

Wang, Z., Meng, H., Zhang, T., Guo, X. 2021. Investigation into the polymerization and changes of physicochemical properties of sugar beet pectin through controlled dry-heating. Food Hydrocoll. 110: 106212. doi.org/10.1016/j.foodhyd.2020.106212

Yang, X., Liu, Y., Zhang, H., Wang, Q., Li, J. 2022. Pomelo peel-inspired 3D-printed porous structure for efficient absorption of compressive strain energy. J. Bionic Eng. 19: 1–12. doi.org/10.1007/s42235-021-00145-1

การพัฒนาวัสดุคอมโพสิตจากไมซีเลียมเห็ดนางรมดำ (Mycelium-Based Composite: MBC) เพื่อใช้เป็นวัสดุทางเลือกสำหรับอุตสาหกรรมบรรจุภัณฑ์

Development of composite materials from Oyster mycelium (Mycelium-Based Composite: MBC) to be used as an alternative material for the packaging industry

พิมนารา แซ่ชิ่น[a], **จักรพล พันธุวงค์ภักดี**[a], **นัฐวุฒิ บุญยืน**[b], **มณฑิรา ยุติธรรม**[a,*]
Pimnara Saesin[a], Jakkapon Phanthuwonpakdee[a], Nattawut Boonyuen[b], Monthira Yuttitham[a,*]
[a]คณะสิ่งแวดล้อมและทรัพยากรศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล นครปฐม 10170
[b]ศูนย์พันธุวิศวกรรมและเทคโนโลยีชีวภาพแห่งชาติ (BIOTEC) สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ (สวทช.) ปทุมธานี 12120
[a]Faculty of Environmental and Resource Studies, Mahidol University, Nakhon Pathom 10170, Thailand
[b]National Center for Genetic Engineering and Biotechnology (BIOTEC), National Science and Technology Development Agency (NSTDA), Pathum Thani 12120, Thailand
*Corresponding author. E-mail address: monthira.yut@mahidol.ac.th

บทคัดย่อ

ปัญหาการเพิ่มขึ้นของก๊าซเรือนกระจกและผลกระทบด้านสิ่งแวดล้อมจากการใช้บรรจุภัณฑ์ชนิดโพลีสไตรีน ขยายตัว (EPS) กระตุ้นให้เกิดความต้องการวัสดุทดแทนเพื่อลดการพึ่งพาวัตถุดิบจากปิโตรเลียม ซึ่งวัสดุคอมโพสิตจากไมซีเลียม (Mycelium-Based Composite: MBCs) ได้รับความสนใจ แต่ข้อมูลด้านสมบัติเชิงกลและการปล่อยก๊าซเรือนกระจกระหว่างกระบวนการบ่มเพาะยังมีจำกัด งานวิจัยนี้จึงมุ่งพัฒนา MBC จากไมลีเซียมเห็ดนางรมดำ (*Pleurotus ostreatus*) ร่วมกับการใช้วัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร ได้แก่ ขี้เลื่อยไม้ยางพารา (SD) ซังข้าวโพด (CC) และกากข้าวมอลต์ (BSC) การศึกษาเริ่มจากการเตรียมวัสดุเพาะเลี้ยง จากนั้นบ่มเพาะไมซีเลียมในแม่พิมพ์เป็นเวลา 14 วัน พร้อมเก็บตัวอย่างและวิเคราะห์การปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) มีเทน (CH_4) และ ไนตรัสออกไซด์ (N_2O) จากนั้นนำตัวอย่าง MBC อบเพื่อหยุดการเจริญเติบโตของไมซีเลียม และนำไปการทดสอบสมบัติเชิงกลด้านแรงกด พบว่า MBC มีค่าความเค้นสูงสุดประมาณ 0.34 MPa ซึ่งสูงกว่าโฟม EPS เกรดบรรจุภัณฑ์ทั่วไป (0.07–0.25 MPa) ชี้ให้เห็นว่า MBC มีศักยภาพเป็นวัสดุดูดซับแรงกระแทก ด้านการเจริญเติบโต (Growth Rate) พบว่าไมซีเลียมเจริญได้ดีบนวัสดุเพาะขี้เลื่อยไม้ยางพาราผสมซังข้าวโพดและกากข้าวมอลต์ (1.17 cm/วัน) และในระหว่างการบ่มเพาะมีการปล่อย CO_2 สูงสุดในช่วง 3 วันแรก ส่วน CH_4 และ N_2O พบในปริมาณต่ำมาก โดยสรุป MBC เป็นทางเลือกที่ยั่งยืน มีสมบัติเชิงกลที่เหนือกว่า EPS เกรดบรรจุภัณฑ์ และสอดคล้องกับแนวคิดเศรษฐกิจหมุนเวียน

คำสำคัญ: ก๊าซเรือนกระจก, โพลีสไตรีนขยายตัว, วัสดุคอมโพสิตจากไมซีเลียม, วัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร

Abstract

The increasing concentration of greenhouse gases and the environmental impacts associated with the use of expanded polystyrene (EPS) packaging have driven the demand for alternative materials to reduce reliance on petroleum-based resources. Mycelium-based composites (MBCs) have gained increasing attention; however, information on their mechanical properties and greenhouse gas emissions during the cultivation process remains limited. Therefore, this study aimed to develop MBCs from the mycelium of the oyster mushroom (*Pleurotus ostreatus*) in combination with agricultural residues, namely rubberwood sawdust (SD), corn cobs (CC), and brewer's spent grain (BSC). The study began with the preparation of cultivation substrates, followed by mycelial cultivation in molds for 14 days, during which samples were collected and the emissions of carbon dioxide (CO_2), methane (CH_4), and nitrous oxide (N_2O) were analyzed. Subsequently, the MBC samples were oven-dried to terminate mycelial growth and then subjected to compressive strength testing. The results showed that the MBC exhibited a maximum compressive stress of approximately 0.34 MPa, which is higher than that of conventional EPS packaging foam (0.07–0.25 MPa), indicating that MBC has potential as a cushioning material. In terms of growth rate, the mycelium grew well on the substrate composed of rubberwood sawdust mixed with corn cobs and brewer's spent grain (1.17 cm/day). During cultivation, CO_2 emissions were highest within the first three days, while CH_4 and N_2O emissions were detected at very low levels. In conclusion, MBC represents a sustainable alternative material with mechanical properties superior to those of EPS packaging grades and is consistent with the concept of a circular economy.

Keywords: Agricultural waste, Expanded polystyrene, Greenhouse gas, Mycelium-based composite

คำนำ

ปัญหาการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศและการสะสมของก๊าซเรือนกระจก (Greenhouse Gases: GHGs) ถือเป็นความท้าทายสำคัญระดับโลก ส่งผลกระทบต่อระบบเศรษฐกิจ ทรัพยากรธรรมชาติ และคุณภาพชีวิตของประชากรในหลายประเทศ ความจำเป็นในการพัฒนานวัตกรรมที่ช่วยลดการปล่อย GHGs ในทุกภาคส่วนจึงมีความสำคัญอย่างยิ่ง โดยเฉพาะอย่างยิ่งในภาคอุตสาหกรรมซึ่งเป็นแหล่งกำเนิดก๊าซเรือนกระจกในปริมาณสูง หนึ่งในกลุ่มอุตสาหกรรมที่ถูกจับตามองคืออุตสาหกรรมบรรจุภัณฑ์ เนื่องจากมีการใช้พลาสติกเป็นวัตถุดิบปริมาณมากและมีแนวโน้มเติบโตต่อเนื่อง โดยคาดว่าความต้องการใช้บรรจุภัณฑ์พลาสติกชนิดอ่อนจะขยายตัวเฉลี่ย 4.2% ต่อปี ในระหว่างปี 2567–2569 (เธียร ธีรนิวุฒิ, 2566) โดยผลิตภัณฑ์กล่องอาหารที่ทำจากโพลีสไตรีนขยายตัว (Expanded Polystyrene; EPS) ยังคงเป็นวัสดุที่ถูกใช้อย่างแพร่หลายเนื่องจากมีน้ำหนักเบาและคุณสมบัติเหมาะกับการบรรจุอาหาร อย่างไรก็ตาม EPS มีจุดอ่อนสำคัญหลายประการ ได้แก่ การสลายตัวตามธรรมชาติที่ใช้เวลานานมาก มีแหล่งกำเนิดจากปิโตรเลียม รวมถึงมีความเสี่ยงต่อสุขภาพจากสารประกอบของ polystyrene ซึ่งอาจปนเปื้อนลงสู่อาหารและมีรายงานว่าอาจรบกวนระบบฮอร์โมนหรือเพิ่มโอกาสเกิดมะเร็งเมื่อสะสมในร่างกาย (กรมควบคุมมลพิษ, 2561) ทำให้มีความจำเป็นต้องมองหาวัสดุทดแทนที่ปลอดภัยและเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมมากขึ้น

ในช่วงไม่กี่ปีที่ผ่านมา วัสดุคอมโพสิตจากไมซีเลียมของเห็ด (Mycelium-Based Composites: MBCs) ได้รับความสนใจเพิ่มขึ้นอย่างมาก เนื่องจากมีศักยภาพในการทดแทน EPS ทั้งในด้านสมบัติเชิงวัสดุและผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม MBC ผลิตจากการเจริญเติบโตของไมซีเลียมซึ่งสามารถยึดเกาะกับวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรประเภทลิกโนเซลลูโลส (Lignocellulosic Waste: LCW) ทำให้สามารถพัฒนาวัสดุแบบยั่งยืนในแนวคิดเศรษฐกิจหมุนเวียน (Pohan et al., 2023) องค์ประกอบของ LCW เช่น เซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสเป็นแหล่งคาร์บอนที่มีบทบาทสำคัญต่อการเจริญเติบโตของไมซีเลียม ในขณะที่ลิกนินอาจจำกัดการย่อยสลายเนื่องจากมีโครงสร้างที่ซับซ้อน (Andlar et al., 2018; Rigobello and Ayres, 2022) ส่วนกากเบียร์ (Brewers' Spent Grain: BSG) เป็นแหล่งไนโตรเจนซึ่งสามารถช่วยกระตุ้นการสร้างเอนไซม์ที่เกี่ยวข้องกับการย่อยลิกนินและเสริมการเจริญของไมซีเลียม (Dedousi et al., 2023) นอกจากนี้ หลายการศึกษายังระบุว่าเห็ดนางรมดำ (*Pleurotus ostreatus*) เป็นเห็ดสายพันธุ์ที่เหมาะสมต่อการผลิต MBC เนื่องจากสามารถเจริญเติบโตได้ดีบนวัสดุเพาะหลายชนิด ทนต่อสภาพแวดล้อมที่หลากหลาย และมีโครงสร้างไมซีเลียมที่มีความแข็งแรง (Haneef et al., 2017) โดยในกระบวนการผลิต MBC จะมีการใช้ไม่สารเคมีอันตราย จึงถือเป็นวัสดุชีวภาพที่มีศักยภาพในการพัฒนาสู่ผลิตภัณฑ์ทดแทนพลาสติก แม้จะมีการศึกษาคุณสมบัติของ MBC ในหลายด้าน เช่น ความแข็งแรงเชิงกลหรือการย่อยสลาย แต่ยังมีข้อจำกัดด้านข้อมูลเกี่ยวกับการปล่อยก๊าซเรือนกระจกที่เกิดขึ้นในกระบวนการบ่มเพาะ ซึ่งข้อมูลส่วนนี้มีความสำคัญต่อการประเมินประสิทธิภาพด้านสิ่งแวดล้อมและการประยุกต์ใช้วัสดุดังกล่าวในภาคอุตสาหกรรมในอนาคต

ด้วยเหตุนี้ งานวิจัยนี้จึงมุ่งวิเคราะห์การปล่อยก๊าซเรือนกระจก ได้แก่ ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2), ก๊าซมีเทน (CH_4) และก๊าซไนตรัสออกไซด์ (N_2O) จากการเจริญเติบโตของเห็ดนางรมดำในระหว่างการบ่มเพาะ โดยผลที่ได้คาดว่าจะเป็นประโยชน์ต่อการพัฒนาวัสดุทางเลือกที่ช่วยลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม เสริมสร้างการใช้ทรัพยากรอย่างมีประสิทธิภาพ และสนับสนุนการลดการปล่อย GHGs ในอุตสาหกรรมบรรจุภัณฑ์อย่างยั่งยืน

วัตถุประสงค์

1. เพื่อพัฒนาวัสดุคอมโพสิตจากไมซีเลียมเห็ดนางรมดำโดยใช้วัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรเป็นวัสดุเพาะเลี้ยง
2. เพื่อประเมินสมบัติเชิงกลของวัสดุคอมโพสิตจากไมซีเลียมเห็ดนางรมดำโดยทดสอบความแข็งแรงด้านแรงกด

3. เพื่อวิเคราะห์การปล่อยก๊าซเรือนกระจกที่เกิดจากกระบวนการผลิตวัสดุคอมโพสิตจากไมซีเลียมเห็ดนางรมดำ

อุปกรณ์และวิธีการ

การศึกษานี้ได้ดำเนินการเตรียมวัสดุเพาะเลี้ยงเชื้อเห็ดนางรมดำเพื่อผลิตวัสดุคอมโพสิตชีวภาพ (Mycelium-Based Composite; MBC) โดยใช้วัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร 3 ชนิด ได้แก่ ขี้เลื่อยไม้ยางพารา (Rubber wood sawdust: SD) ซังข้าวโพด (Corncob: CC) ซึ่งได้รับมาจากเกษตรกรในพื้นที่ และกากข้าวมอลต์ (Brewers' Spent Grain: BSG) ที่ได้รับมาจากโรงผลิตเบียร์แห่งหนึ่ง ส่วนเชื้อเห็ดนางรมดำในเมล็ดข้าวฟ่างจัดหาจากร้านค้าท้องถิ่น วัสดุเพาะทั้งหมดได้รับการเตรียมให้มีขนาดอนุภาคที่ใกล้เคียงกัน โดยขี้เลื่อยไม้ยางพาราถูกคัดแยกเศษไม้ขนาดใหญ่ออก ซังข้าวโพดและกากข้าวมอลต์ได้รับการบดโดยใช้เครื่องปั่น (Mixer, JGY-800B, Jing Gong Yi, China) ให้มีขนาดเหมาะสม และกากข้าวมอลต์นำมาอบไล่ความชื้นด้วยตู้อบลมร้อน (Hot Air Oven, UF1060, Memmert GmbH & Co. KG, Germany) ที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลาอย่างน้อย 24 hr จนแห้งสนิทก่อนบด จากนั้นผสมขี้เลื่อนไม้ยางพารา ซังข้าวโพด และกากข้าวมอลต์ในอัตราส่วน 9:9:2 ตามลำดับ จากนั้นนำไปนึ่งฆ่าเชื้อด้วยเครื่องนึ่งฆ่าเชื้อ (Autoclave, SX-700, Amuza Inc., USA) พร้อมน้ำกลั่นที่อุณหภูมิ 121 °C เป็นเวลา 20 นาที เมื่อวัสดุเพาะและน้ำกลั่นเย็นตัว จึงนำมาผสมในแม่พิมพ์ขนาด 10×10×20 cm และเติมเชื้อเห็ดนางรมดำในเมล็ดข้าวฟ่างร้อยละ 20 ของน้ำหนักเปียก ตัวอย่างถูกบ่มในพื้นที่แห้งที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 14 วัน เมื่อครบระยะเวลาบ่ม วัสดุ MBC จึงถูกนำออกจากแม่พิมพ์และเข้าอบที่อุณหภูมิ 70 °C เป็นเวลา 10 hr เพื่อยุติการเจริญเติบโตของไมซีเลียมและทำให้วัสดุมีความคงตัว

การเจริญเติบโต (Growth rate) ของไมซีเลียมเห็ดนางรมดำ แบ่งอาหารเลี้ยงเชื้อออกเป็น 2 ชนิด ได้แก่ (1) Potato Dextrose Agar (PDA) ในอัตราส่วน PDA 1 g ต่อน้ำกลั่น 30 ml และ Potato Dextrose Agar (PDA) ผสมวัสดุเพาะ คือ ขี้เลื่อยไม้ยางพาราผสมซังข้าวโพดและกากข้าวมอลต์ (SD+CC+BSC) ในอัตราส่วน PDA 1 g วัสดุเพาะ 1 g และน้ำกลั่น 30 ml จากนั้นบ่มในพื้นที่แห้งที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 7 วัน โดยมีการวัดขนาดโคโลนีในทุก ๆ วัน

การทดสอบแรงกด (Compress strengths) ดำเนินการตามมาตรฐาน ASTM C109 โดยนำตัวอย่าง MBC ที่ผ่านการอบแห้งแล้ววางบนแท่นรองรับของเครื่องทดสอบแรงอัด (Compression machine (STS, Thailand) equipped with a data logger (TDS-530, Japan)) และทำการกดด้วยอัตราการให้แรงคงที่จนกระทั่งตัวอย่างแตก บันทึกค่าแรงสูงสุดที่ตัวอย่างสามารถรับได้ และคำนวณค่าความต้านทานแรงอัดโดยหารค่าแรงสูงสุดด้วยพื้นที่หน้าตัดของตัวอย่าง

ระหว่างกระบวนการบ่มเพาะได้มีการเก็บตัวอย่างก๊าซเรือนกระจก ได้แก่ คาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) มีเทน (CH_4) และไนตรัสออกไซด์ (N_2O) ในขวดแก้วขนาด 20 ml เพื่อนำไปวิเคราะห์ด้วยเทคนิคแก๊สโครมาโทกราฟี (Agilent 8890 Gas Chromatograph)

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

การเจริญเติบโต (Growth rate) ของไมซีเลียมเห็ดนางรมดำ

การเจริญเติบโตของไมซีเลียมเห็ดนางรมดำ (*Pleurotus ostreatus*) บนอาหารเลี้ยงเชื้อ 2 ชนิด ได้แก่ Potato Dextrose Agar (PDA) และ PDA ผสมวัสดุเพาะ (SD+CC+BSC) แสดงใน Fig. 1(A) และ (B) พบว่าเส้นผ่านศูนย์กลางของโคโลนีมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องตามระยะเวลา โดยเฉพาะในช่วงวันที่ 4 ถึง 6 ซึ่งมีการขยายตัวแบบทวีคูณ (Exponential phase) เมื่อเปรียบเทียบกับผลการศึกษาของ Hoa et al. (2015) และ Girmay et al. (2016) ซึ่งรายงานว่าอัตราการเจริญเติบโตตามปกติของไมซีเลียมเห็ดนางรมดำจะอยู่ในช่วงประมาณ 0.80-1.30 cm/วัน ขึ้นอยู่กับชนิดของแหล่งคาร์บอนและไนโตรเจน พบว่าผลการทดลองในงานวิจัยนี้มีความสอดคล้องกับช่วงดังกล่าว โดยเห็ดนางรมดำที่เลี้ยงบนอาหารเลี้ยงสูตร SD+CC+BSC มีอัตราการเจริญเติบโตที่ดีกว่าการเลี้ยงบน PDA ซึ่งมีอัตราการเจริญเติบโต 1.17 และ

1.01 cm/วัน ตามลำดับ ความแตกต่างของอัตราการเจริญเติบโตสามารถอธิบายได้จากแหล่งสารอาหารและอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน (C/N ratio) ที่เหมาะสม โดย Bellettini et al. (2019) อธิบายว่าเห็ดนางรมดำเป็นเห็ดที่สามารถสร้างเอนไซม์ย่อยสลายลิกโนเซลลูโลสได้ดี (Lignocellulolytic enzymes) การใช้วัสดุเพาะที่มีองค์ประกอบของขี้เลื่อยไม้ยางพาราและซังข้าวโพดซึ่งเป็นแหล่งคาร์บอนซับซ้อน จึงอาจกระตุ้นการสร้างเอนไซม์และส่งเสริมให้ไมซีเลียมมีความแข็งแรงได้ดีกว่าแหล่งคาร์บอนเดี่ยวใน PDA

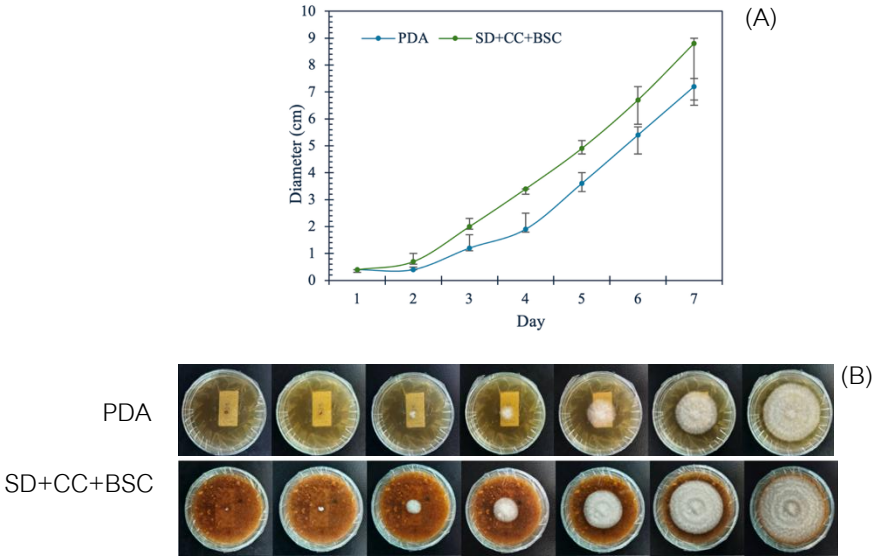


Fig. 1 Mycelial growth rate (A); Growth morphology (B) of *Pleurotus ostreatus* on PDA and SD+CC+BSC media.

การทดสอบแรงกด (Compress strengths)

กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดเชิงเส้นของวัสดุคอมโพสิตจากไมซีเลียมเห็ดนางรมดำ (*Pleurotus ostreatus*) ถูกแสดงอยู่ใน Fig. 2A ผลลัพธ์แสดงให้เห็นว่าวัสดุสามารถรองรับแรงกดได้ เมื่อแรงกดเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง ค่าความชันของกราฟมีแนวโน้มลดลงในช่วงประมาณ 0.5–0.6 cm สอดคล้องกับการศึกษาของ Appels et al. (2019) พบว่าโครงสร้างของไมซีเลียมที่มีเส้นใยเชื่อมต่อกันและมีช่องว่างของอากาศทำให้เมื่อได้รับแรงกดจึงมีความยืดหยุ่น ส่งผลให้กราฟในช่วงแรกมีลักษณะเป็นเส้นตรงก่อนเข้าสู่ระยะที่มีการยุบตัว โดยในการศึกษานี้พบว่าค่าความเค้นสูงสุดของ MBC อยู่ที่ประมาณ 0.34 MPa (Fig. 2A) ซึ่งสอดคล้องกับค่ามาตรฐานของวัสดุคอมโพสิตจากไมซีเลียมที่รายงานในการศึกษาของ Islam et al. (2017) และ Jones et al. (2017) ซึ่งระบุว่า MBC จากเห็ดสกุลนางรม (*Pleurotus spp.*) ที่เพาะเลี้ยงบนวัสดุประเภทลิกโนเซลลูโลส จะมีค่าความเค้นในช่วงประมาณ 0.20–0.80 MPa ขึ้นอยู่กับความหนาแน่นของชิ้นงานและชนิดของวัสดุเพาะ และจากกราฟความเค้น-ความเครียดแสดงให้เห็นว่า เมื่อความเครียดเพิ่มขึ้นค่าความชันของกราฟจะค่อย ๆ ลดลง บ่งบอกถึงวัสดุเริ่มการสูญเสียความแข็งแรงเชิงกล ซึ่งเกิดจากการยุบตัวของโครงสร้างรูพรุนภายในวัสดุเพาะ และเมื่อความเครียดเชิงเส้นเพิ่มขึ้นจนถึงประมาณ 0.7 cm กราฟเริ่มมีลักษณะคงที่แสดงให้เห็นว่าโครงสร้างของไมซีเลียมที่ยึดเกาะระหว่างวัสดุเพาะเกิดการเสียหายและเสียรูปอย่างถาวร ทำให้ไม่สามารถคืนรูปกลับสู่สภาพเดิมได้ เมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุโฟมโพลีสไตรีน (EPS) ซึ่งเป็นวัสดุกันกระแทกมาตรฐานในท้องตลาด ข้อมูลจากมาตรฐาน ASTM C578 (2022) และการศึกษาของ Gnip et al. (2008) ระบุว่า EPS เกรดบรรจุภัณฑ์ทั่วไป มีค่าความเค้น อยู่ในช่วงประมาณ 0.07–0.25 MPa ชี้ให้เห็นว่า MBC ในการศึกษานี้ที่ มีความแข็งแรงเชิงกลมากกว่า สอดคล้องกับ

การศึกษาของ Yang et al. (2021) ที่พบว่าแม้ MBC อาจมีน้ำหนักมากกว่า EPS เล็กน้อย แต่มีศักยภาพในการใช้งานเป็นวัสดุกันกระแทกและบรรจุภัณฑ์ เนื่องจากมีความสามารถในการรับแรงกดได้ดีและมีการยุบตัวที่สม่ำเสมอ เหมาะสมกับการใช้งานด้านบรรจุภัณฑ์และวัสดุดูดซับแรงกระแทก อีกทั้งยังมีจุดเด่นด้านความยั่งยืนและการย่อยสลายทางชีวภาพที่ EPS ไม่สามารถทดแทนได้

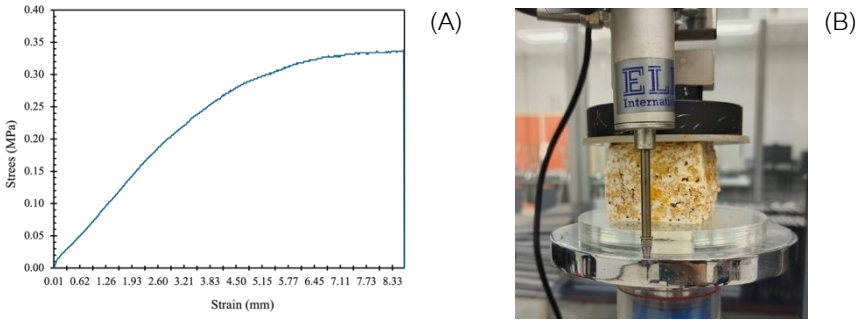


Fig 2. Linear stress-strain relationship of mycelium-based composites (A); Compress strengths from *Pleurotus ostreatus* cultivated on SD+CC+BSC substrate. (B)

การปล่อยก๊าซเรือนกระจกในระหว่างกระบวนการบ่มเพาะเห็ดนางรมดำ

Fig. 3(A) พบว่า ค่าการปล่อย CO_2 มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วจากวันแรกไปวันที่ 2–3 โดยมีค่าสูงสุดที่ประมาณ 89,000 ppm จากนั้นระหว่างวันที่ 3–7 ค่าการปล่อย CO_2 มีแนวโน้มลดลงอย่างต่อเนื่อง ก่อนจะเพิ่มขึ้นเล็กน้อยในวันที่ 8 และลดลงอีกครั้งจนถึงวันที่ 10 จากนั้นจึงค่อย ๆ เพิ่มขึ้นต่อเนื่องจนถึงวันที่ 14 สำหรับ Fig. 3B พบว่า ค่าการปล่อย CH_4 อยู่ในช่วง 5–8 ppm โดยมีค่าที่สูงสุด ประมาณ 7.90 ppm ในวันที่ 4 ก่อนจะลดลงและเพิ่มขึ้นอีกครั้งในระหว่างวันที่ 6–10 และลดลงจนถึงค่าต่ำสุดประมาณ 4.90 ppm ในวันที่ 12 และ Fig. 3C ค่าการปล่อย N_2O มีค่าอยู่ในช่วง 0.367–0.395 ppm ตลอดระยะเวลา 14 วัน โดยมีค่าสูงสุดในวันที่ 4 และลดลงระหว่างวันที่ 5–8 ก่อนจะมีการขึ้นลงเล็กน้อยในช่วงวันที่ 8-14 ซึ่งมีค่าอยู่ระหว่าง 0.367–0.376 ppm โดยรวมแล้วก๊าซทั้ง 3 ชนิด ปล่อยก๊าซเรือนกระจกประมาณ 3.156×10^{-7} กิโลกรัมคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่า ($kgCO_2eq$) ต่อ MBC 100 g (น้ำหนักเปียก) โดยการคำนวณก๊าซเรือนกระจกนี้คิดเพียงระหว่างกระบวนการบ่มเพาะเห็ดนางรมดำ ไม่รวมการอบเพื่อหยุดการเจริญเติบโตของไมซีเลียม

การเปลี่ยนแปลงของการปล่อยก๊าซเรือนกระจกทั้งสามชนิดตลอดระยะเวลา 14 วัน สะท้อนถึงการเมแทบอลิซึมของเห็ดนางรมดำ ซึ่งเป็นผลจากการย่อยสลายสารอินทรีย์ในวัสดุเพาะ โดยจาก Fig. 3A การปล่อย CO_2 ที่เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วและมีค่าสูงสุดประมาณ 89,000 ppm ในช่วงวันที่ 1-3 สอดคล้องกับการศึกษาของ Rahardjo et al. (2005) ที่ระบุว่าในช่วงแรกของการเจริญเติบโต ไมซีเลียมจะมีอัตราการหายใจสูงจากการเผาผลาญคาร์โบไฮเดรตโมเลกุลเดี่ยวที่มีอยู่ในวัสดุเพาะเพื่อใช้เป็นพลังงานหลักในการสร้างมวลชีวภาพ การลดลงของ CO_2 ในช่วงวันที่ 3–7 สะท้อนถึงการลดลงของแหล่งคาร์บอนที่ย่อยสลายง่าย ก่อนที่จะมีการเพิ่มขึ้นอีกครั้งในช่วงวันที่ 8-14 ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Elisashvili et al. (2008) และ Bellettini et al. (2019) ที่อธิบายว่าเมื่อแหล่งน้ำตาลหมดลง เห็ดนางรมดำจะผลิตเอนไซม์ย่อยสลายลิกโนเซลลูโลส (Lignocellulolytic enzymes) เพื่อย่อยสลายโครงสร้างที่ซับซ้อน เช่น ลิกนินและเฮมิเซลลูโลส กระบวนการนี้ส่งผลให้เกิดการปลดปล่อย CO_2 ในระดับปานกลาง สำหรับค่าการปล่อย CH_4 ใน Fig. 3B แม้ว่าเห็ดจะเป็นสิ่งมีชีวิตที่ต้องการออกซิเจน (Aerobic organism) แต่การตรวจพบ CH_4 ในช่วง 5–8 ppm โดยมีค่าสูงสุดในวันที่ 4 สามารถอธิบายได้จากการเกิดสภาวะที่มีออกซิเจนต่ำเฉพาะจุด ภายใน MBC มีความชื้นสะสม ซึ่งการศึกษาของ Herman et al.

(2020) และ Maheshwari (2013) ระบุว่าในกระบวนการเพาะเลี้ยง หากภายในวัสดุมีการระบายอากาศไม่ทั่วถึงอาจส่งผลให้แบคทีเรียกลุ่ม Methanogen เจริญเติบโตและผลิตก๊าซมีเทนได้ในระดับต่ำ การลดลงของ CH_4 ในระยะต่อมาอาจสัมพันธ์กับการที่ไมซีเลียมเจริญเติบโตแทรกในวัสดุเพาะจนเต็ม ทำให้โครงสร้างของวัสดุเพาะมีการไหลเวียนของอากาศได้ดีขึ้น ในส่วนของการปล่อย N_2O ดังแสดงใน Fig. 3C ซึ่งมีค่าค่อนข้างคงที่ในช่วง 0.367–0.395 ppm สอดคล้องกับการศึกษาของ Maeda et al. (2015) ที่พบว่าเชื้อรามีศักยภาพในการผลิต N_2O ผ่านกระบวนการ Fungal Denitrification ซึ่งอาจปล่อย N_2O ออกมาในปริมาณเล็กน้อยภายใต้สภาวะที่มีออกซิเจนต่ำ

เมื่อเปรียบเทียบกับ EPS พบว่าการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากการผลิต EPS สูงกว่าอย่างมีนัยสำคัญทั้งในเชิงปริมาณและศักยภาพการก่อภาวะโลกร้อน ข้อมูลจากการศึกษาของ PlasticsEurope (2015) และ Hottle et al. (2017) ซึ่งวิเคราะห์วัฏจักรชีวิตของพลาสติกชีวภาพเปรียบเทียบกับพลาสติกทั่วไป ระบุว่ากระบวนการผลิต EPS ตั้งแต่การสังเคราะห์สไตรีนมอนอเมอร์ การเกิดพอลิเมอร์ ไปจนถึงการขึ้นรูป ส่งผลให้เกิดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกสุทธิ (Global Warming Potential) ประมาณ 2.5–7.0 $kgCO_2eq$ ต่อการผลิต EPS 1 kg ซึ่งสูงกว่าปริมาณการปล่อยคาร์บอนจากการเจริญเติบโตของไมซีเลียม อีกทั้งกระบวนการผลิต EPS ยังเกี่ยวข้องกับการปล่อยสารอินทรีย์ระเหยง่าย (VOCs) ที่มีผลกระทบต่อความเป็นพิษในมนุษย์และการเกิดโอโซนในชั้นโทรโพสเฟียร์ (Dornburg et al., 2003) สำหรับก๊าซมีเทน (CH_4) แม้กระบวนการผลิต EPS จะไม่มีการปล่อย CH_4 โดยตรงจากกิจกรรมทางชีวภาพเหมือนการผลิต MBC แต่กิจกรรมต้นน้ำ (Upstream activities) ได้แก่ การขุดเจาะน้ำมันดิบ การกลั่นแยกก๊าซธรรมชาติ และการขนส่งปิโตรเลียม ล้วนเป็นแหล่งปล่อย CH_4 ที่สำคัญ สอดคล้องกับการศึกษาวัฏจักรชีวิตพลาสติกในประเทศไทยของ Papong et al. (2014) ที่ระบุว่าขั้นตอนการได้มาซึ่งวัตถุดิบและการผลิตเม็ดพลาสติกเป็นขั้นตอนที่ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมสูงสุด โดยเฉพาะในด้านศักยภาพ GWP ซึ่งเป็นผลมาจากการใช้ทรัพยากรปิโตรเลียมและก๊าซธรรมชาติ ซึ่งเป็นหนึ่งในแหล่งกำเนิดของการปล่อยก๊าซเรือนกระจกในกลุ่มไฮโดรคาร์บอน รวมถึงก๊าซมีเทนจากการขุดเจาะและกระบวนการผลิต ในส่วนของไนตรัสออกไซด์ (N_2O) แม้จะพบในระดับต่ำในระหว่างการเจริญเติบโตของไมซีเลียม แต่ในอุตสาหกรรม EPS ที่จำเป็นต้องใช้ความร้อนและไฟฟ้าจำนวนมากในกระบวนการผลิต ข้อมูลจากการศึกษาของ Hischier (2007) ระบุว่าการเผาไหม้เชื้อเพลิงฟอสซิลเพื่อผลิตพลังงานในอุตสาหกรรมปิโตรเคมีเป็นแหล่งกำเนิดของ N_2O ซึ่งเป็นผลกระทบทางอ้อม (Indirect impact) ที่มีความรุนแรงกว่าการปล่อยก๊าซเรือนกระจกโดยตรงจากกระบวนการทางชีวภาพของไมซีเลียมอย่างชัดเจน

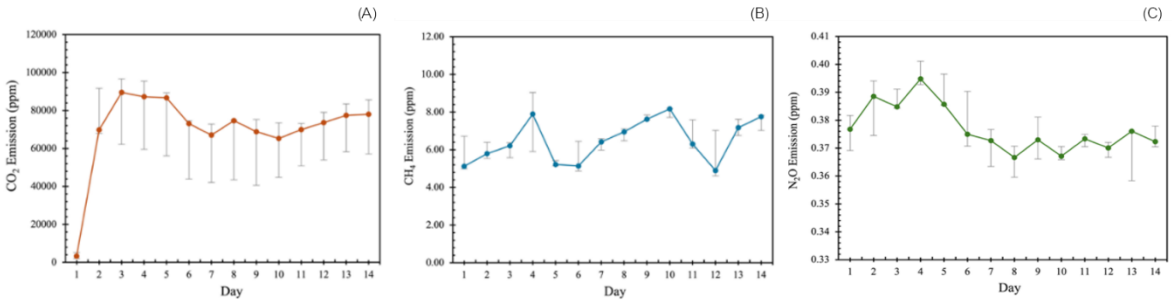


Fig. 3 Relationship between carbon dioxide emissions (A), methane emissions (B), and nitrous oxide emissions (C) over a 14-day period during the cultivation of *Pleurotus ostreatus* on SD+CC+BSC substrate.

สรุป

การเจริญเติบโตของไมซีเลียมเห็ดนางรมดำบนอาหารเลี้ยงสูตร SD+CC+BSC ชี้ให้เห็นว่าส่วนประกอบของสารอาหารในวัสดุเพาะมีผลโดยตรงต่อความเร็วในการขยายตัวและความหนาแน่นของไมซีเลียม โดย มีการเจริญเติบโตที่ 1.17 cm/วัน ซึ่งคาดว่าเกิดจากองค์ประกอบลิกโนเซลลูโลสในขี้เลื่อยที่กระตุ้นการสร้างเอนไซม์เพื่อย่อยสลายสารอาหารในวัสดุเพาะ ทำให้ไมซีเลียมดูดซึมสารอาหารได้ดีขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับแหล่งคาร์บอนที่มีโครงสร้างไม่ซับซ้อน ด้านสมบัติเชิงกล MBC สามารถรับแรงกดสูงสุดได้ประมาณ 0.34 MPa เมื่อเปรียบเทียบกับ EPS เกรดบรรจุภัณฑ์ตามมาตรฐาน ASTM C578 ที่มีค่าความแข็งแรงระหว่าง 0.07-0.25 MPa จะเห็นได้ว่า MBC สูตรที่พัฒนาขึ้นมีสามารถทนต่อแรงกดได้มากกว่า เหมาะแก่การเป็นวัสดุดูดซับแรงกระแทก ก่อนจะเกิดการเสียหายถาวรที่ระดับความเครียดราว 0.7 cm ซึ่งคุณสมบัติเหล่านี้ชี้ให้เห็นว่า MBC มีศักยภาพในการนำไปใช้เป็นวัสดุบรรจุภัณฑ์กันกระแทกทดแทนโฟม EPS อีกทั้งยังเพิ่มข้อได้เปรียบในด้านความปลอดภัยต่อสิ่งแวดล้อมและการย่อยสลายทางชีวภาพ สำหรับการปล่อยก๊าซเรือนกระจกในระหว่างกระบวนการบ่มเพาะ พบว่า CO_2 ปล่อยออกมามากในช่วงสามวันแรก ซึ่งสอดคล้องกับช่วงที่ไมซีเลียมกำลังเริ่มเจริญเติบโตเข้าสู่วัสดุเพาะ จากนั้นปริมาณ CO_2 จะลดลงก่อนเพิ่มขึ้นอีกครั้งในช่วงท้าย เนื่องจากการย่อยสลายโครงสร้างของวัสดุเพาะ CH_4 และ N_2O พบในปริมาณต่ำมาก โดย CH_4 เกิดจากบางจุดของวัสดุเพาะที่อากาศเข้าไม่ถึง ทำให้เกิดภาวะที่มีปริมาณออกซิเจนต่ำเฉพาะที่ ส่วน N_2O เกิดจากกระบวนการที่เกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนรูปไนโตรเจน ซึ่งเกิดขึ้นในสภาวะออกซิเจนต่ำ

โดยสรุป วัสดุไมซีเลียมคอมโพสิตที่ผลิตจากวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรมีศักยภาพสูงในการเป็นวัสดุชีวภาพทดแทนโฟมสังเคราะห์ ทั้งในด้านสมบัติเชิงกล ความปลอดภัยต่อสิ่งแวดล้อม และการสอดคล้องกับแนวคิดเศรษฐกิจหมุนเวียน (Circular Economy) ที่มีการนำวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรวนกลับมาใช้ใหม่ให้เกิดประโยชน์

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบพระคุณ สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ (สวทช.) สำหรับทุนสนับสนุนการวิจัยในโครงการ TGIST ที่ทำให้งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีสุดท้ายนี้ ขอขอบพระคุณทุกภาคส่วนที่มีส่วนเกี่ยวข้องและให้ความช่วยเหลือในการดำเนินงานวิจัยครั้งนี้มา ณ โอกาสนี้

เอกสารอ้างอิง

กรมควบคุมมลพิษ. 2561. อันตรายจากกล่องโฟม. กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม, กรุงเทพฯ.

เธียร ธีรนิวุฒิ. 2566. แนวโน้มธุรกิจ/อุตสาหกรรม ปี 2567–2569: อุตสาหกรรมพลาสติก. วิจัยกรุงศรี, กรุงเทพฯ.

Andlar, M., Rezić, T., Marđetko, N., Kracher, D., Ludwig, R., Šantek, B. 2018. Lignocellulose degradation: An overview of fungi and fungal enzymes involved in lignocellulose degradation. Eng. Life Sci. 18: 768–778.

Appels, F.V.W., Camere, S., Montalti, M., Karana, E., Jansen, K.M.B., Dijksterhuis, J., Krijgsheld, P., Wösten, H.A.B. 2019. Fabrication factors influencing mechanical, moisture- and water-related properties of mycelium-based composites. Mater. Des. 161: 64–71.

ASTM International. 2022. Standard specification for rigid, cellular polystyrene thermal insulation (ASTM C578-22). ASTM International, West Conshohocken, PA, USA.

Bellettini, M.B., Fiorda, F.A., Maieves, H.A., Teixeira, G.L., Ávila, S., Hornung, P.S., Júnior, A.M., Ribani, R.H. 2019. Factors affecting mushroom Pleurotus spp. cultivation: A review. Food Chem. 272: 428–463.

Dedousi, M., Melanouri, E.M., Diamantopoulou, P. 2023. Carposome productivity of Pleurotus ostreatus and Pleurotus eryngii growing on agro-industrial residues enriched with nitrogen, calcium salts and oils. Carbon Resour. Convers. 6: 150–165.

Dornburg, V., Lewandowski, I., Patel, M. 2003. Comparing the land requirements, energy savings, and greenhouse gas emissions reduction of biobased polymers and bioenergy. J. Ind. Ecol. 7: 83–98.

Elisashvili, V., Penninckx, M., Kachlishvili, E., Tsiklauri, N., Metreveli, E., Kharziani, T., Kvesitadze, G. 2008. Lentinus edodes and Pleurotus species lignocellulolytic enzymes activity in submerged and solid-state fermentation of lignocellulosic wastes of different composition. Bioresour. Technol. 99: 457–462.

Girmay, Z., Gotsi, W., Guya, T., Kalayi, S. 2016. Growth and yield performance of Pleurotus ostreatus (Jacq. Fr.) Kumm (oyster mushroom) on different substrates. AMB Express 6: 87.

Gnip, I.J., Vėjelis, S., Keršulis, V. 2008. Strength properties of expanded polystyrene (EPS) at short-term loading. Mechanika 74: 15–23.

Herman, L., Smets, K., Ghysels, S., Vanlangendonck, T. 2020. Heat production and respiration of Pleurotus ostreatus during mycelium colonization of straw substrates. J. Therm. Biol. 94: 102764.

Hischier, R. 2007. Life cycle inventories of packaging materials aiming at GWP reduction. Swiss Centre for Life Cycle Inventories, St. Gallen, Switzerland.

Hoa, H.T., Wang, C.-L., Wang, C.-H. 2015. The effects of different substrates on the growth, yield, and nutritional composition of Pleurotus ostreatus mushrooms. Mycobiology 43: 14–25.

Hottle, T.A., Bilec, M.M., Landis, A.E. 2017. Sustainability assessments of bio-based polymers. Polym. Degrad. Stab. 145: 24–29.

Islam, M.R., Tudryn, G., Bucinell, R., Schadler, L., Picu, R.C. 2017. Morphology and mechanics of fungal mycelium. Sci. Rep. 7: 13070.

Jones, M., Mautner, A., Luenco, S., Bismarck, A., John, S. 2020. Engineered mycelium composite construction materials from fungal biorefineries: A critical review. Mater. Des. 187: 108397.

Maheshwari, D.K. (Ed.). 2013. Bacteria in agrobiology: Crop productivity. Springer, Berlin, Heidelberg, Germany.

Papong, S., Malakul, P., Trungkavashirakun, R., Wenunun, P., Chom-in, T., Nithitanakul, M., Sarobol, E. 2014. Comparative assessment of the environmental profile of PLA and PET drinking water bottles from a life cycle perspective. J. Clean. Prod. 65: 539–550.

PlasticsEurope. 2015. Eco-profiles: Expanded polystyrene (EPS). PlasticsEurope, Brussels, Belgium.

Pohan, J.N., Kusumawati, Y.A., Radhitanti, A. 2023. Mushroom mycelium-based biodegradable packaging material: A promising sustainable solution for food industry. E3S Web Conf. 426: 01058.

Rahardjo, Y.S., Tramper, J., Rinzema, A. 2005. Modeling conversion and transport phenomena in solid-state fermentation: A review and perspectives. Biotechnol. Adv. 24: 161–179.

Rigobello, A., Ayres, P. 2022. Compressive behaviour of anisotropic mycelium-based composites. Sci. Rep. 12: 5925.

Yang, Z., Zhang, F., Still, B., White, M., Amstislavski, P. 2021. Physical and mechanical properties of fungal mycelium-based bio-foam. J. Mater. Civ. Eng. 33: 04021240.

ผลของปัจจัยทางอุตุนิยมวิทยาและมลพิษทางอากาศต่อ $PM_{2.5}$ ในฤดูหนาว จังหวัดสระบุรี

Influence of meteorological factors and air pollutants on $PM_{2.5}$ concentration in winter, Saraburi Province

ดวงพร รักร้อย, ปวีร์ คล่องเวสสะ*, ธัญภัสสร์ ทองเย็น

Duangporn Rakroy, Pawee Klongvessa*, Thunyapat Thongyen

ภาควิชาเทคโนโลยีและการจัดการสิ่งแวดล้อม คณะสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

Department of Environmental Technology and Management, Faculty of Environmental, Kasetsart University, Bangkok 10900, Thailand

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

บทคัดย่อ

การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาเวลาเหลื่อมของปัจจัยทางอุตุนิยมวิทยาและมลพิษทางอากาศที่ส่งผลต่อ $PM_{2.5}$ ในฤดูหนาว ที่จังหวัดสระบุรี โดยใช้ข้อมูลปัจจัยอุตุนิยมวิทยาผิวดินราย 3 ชั่วโมง และความสูงของชั้นผสมอากาศ (Planetary Boundary Layer Height; PBLH) $PM_{2.5}$ และ PM_{10} รายชั่วโมง ในช่วงปี 2020–2025 เพื่อวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของเพียร์สันระหว่าง $PM_{2.5}$ กับปัจจัยต่าง ๆ ที่เวลาเหลื่อม 0–168 ชั่วโมง ผลการศึกษาพบว่าปัจจัยที่มีเวลาเหลื่อมสั้น (≤ 8 ชั่วโมง) ได้แก่ความเร็วลม PBLH ดัชนีการระบายอากาศ (Ventilation Index; VI) และ PM_{10} โดยปัจจัยที่สัมพันธ์กับ $PM_{2.5}$ มากที่สุดคือ PM_{10} ซึ่งสอดคล้องกับการมีแหล่งกำเนิดร่วมกัน ส่วนปัจจัยที่มีเวลาเหลื่อมยาว (≥ 48 ชั่วโมง) ได้แก่ ความชื้นสัมพัทธ์ อุณหภูมิ ความกดอากาศ PBLH VI และความเร็วลม ซึ่งบ่งชี้อิทธิพลของการพัดพามวลอากาศ และการที่สภาพอากาศแห้งและเย็นส่งผลให้ $PM_{2.5}$ แขวนลอยได้เป็นเวลานาน นอกจากนี้ ที่สถานีตำรวจภูธรหน้าพระลาน (24T) ยังพบว่า $PM_{2.5}$ มีความสัมพันธ์กับความกดอากาศ ความชื้นสัมพัทธ์ และอุณหภูมิในเวลาเหลื่อมที่สั้น ซึ่งสะท้อนถึงอิทธิพลของปัจจัยท้องถิ่นในพื้นที่อุตสาหกรรม

คำสำคัญ: จังหวัดสระบุรี, ปัจจัยอุตุนิยมวิทยา, มลพิษทางอากาศ, เวลาเหลื่อม, $PM_{2.5}$

Abstract

This study investigated lag times of meteorological factors and air pollutants with respect to $PM_{2.5}$ during winter in Saraburi Province. Three-hourly meteorological variables and hourly planetary boundary layer height (PBLH) $PM_{2.5}$ and PM_{10} during 2020–2025 were used to calculate and compare Pearson correlation coefficients between $PM_{2.5}$ and other variables across 0–168-hour lags. The result show that factors with short lag times (≤ 8 hours) were wind speed, PBLH, and the ventilation index (VI). The factor most related to $PM_{2.5}$ was PM_{10}, which reflects shared emission sources. Factors with long lag times (≥ 48 hours) were relative humidity, temperature, atmospheric pressure, PBLH, VI, and wind speed. These findings suggest regional transport and accumulation of $PM_{2.5}$ due to cold and dry conditions. Moreover, at Na Phra Lan Police Station (24T), $PM_{2.5}$ also showed short lag times with respect to pressure, humidity and temperature, which indicate effects of local factors in the industrial zone.

Keywords: Air pollutants, Lag time, Meteorological factors, $PM_{2.5}$, Saraburi province

คำนำ

มลพิษทางอากาศส่งผลต่อสุขภาพของประชาชนและสิ่งแวดล้อม โดยเฉพาะฝุ่นละอองขนาดไม่เกิน 2.5 ไมครอน ($PM_{2.5}$) ซึ่งสามารถเข้าสู่ระบบทางเดินหายใจ ก่อให้เกิดโรคระบบทางเดินหายใจ โรคหัวใจ และเพิ่มความเสี่ยงต่อการเสียชีวิตก่อนวัยอันควร (Nakapan and Choopun, 2018) แหล่งกำเนิดหลักของ $PM_{2.5}$ ส่วนใหญ่มาจากกิจกรรมของมนุษย์ เช่น การคมนาคมขนส่ง การเผาไหม้เชื้อเพลิง การทำโรงงานอุตสาหกรรม (ภัคพงศ์, 2555) นอกจากนี้ มลพิษทางอากาศ เช่น ไนโตรเจนไดออกไซด์ ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ฝุ่นละอองขนาดไม่เกิน 10 ไมครอน เป็นสารตั้งต้นที่ก่อให้เกิด $PM_{2.5}$ ผ่านกระบวนการเคมีในบรรยากาศอีกด้วย (Zhang et al., 2015)

ความเข้มข้นของ $PM_{2.5}$ และมลพิษทางอากาศอื่น ๆ ได้รับอิทธิพลจากปัจจัยทางอุตุนิยมวิทยาได้แก่ อุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ ความเร็วลม ความกดอากาศ และปริมาณน้ำฝน ซึ่งส่งผลต่อการกระจาย การชะล้าง และการสะสมของมลพิษในบรรยากาศ (Li et al., 2017) โดยทั่วไป ความเร็วลมและปริมาณน้ำฝนมีความสัมพันธ์เชิงลบกับ $PM_{2.5}$ เนื่องจากปัจจัยเหล่านี้ช่วยระบายและชะล้างมลพิษ ตรงข้ามกับความกดอากาศที่สูง และอุณหภูมิที่ต่ำ ซึ่งมักเอื้อต่อการสะสมของมลพิษ นอกจากนี้ความสูงของชั้นผสมอากาศ (Planetary Boundary Layer Height; PBLH) และดัชนีการระบายอากาศ (Ventilation Index; VI) ที่ต่ำ มักเอื้อต่อการสะสมตัวของฝุ่นละอองใกล้ผิวดินอีกด้วย (Vongruang et al., 2024)

การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยอุตุนิยมวิทยาและมลพิษทางอากาศกับ $PM_{2.5}$ มีจำนวนมากในหลายพื้นที่ แต่งานวิจัยหลายงานมุ่งเน้นการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ในช่วงเวลาเดียวกัน (Li et al., 2017) ขณะที่ปฏิกิริยาเคมีและกระบวนการทางอุตุนิยมวิทยาที่ส่งผลต่อมลพิษในอากาศมักเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องและใช้เวลาหลายชั่วโมงถึงหลายวันจึงแสดงผลที่ชัดเจน (Prévôt et al., 2011) ทำให้อาจเกิดเวลาเหลื่อมระหว่างปัจจัยต่าง ๆ กับมลพิษในอากาศ ซึ่งหากไม่พิจารณาเวลาเหลื่อมอาจทำให้การประเมินอิทธิพลของปัจจัยต่าง ๆ ต่อ $PM_{2.5}$ คาดเคลื่อน ดังนั้นการศึกษาเวลาเหลื่อมจึงเป็นแนวทางที่ช่วยเสริมความเข้าใจเกี่ยวกับกลไกการเกิด การสะสม และกระจายตัวของ $PM_{2.5}$ อย่างครบถ้วนและแม่นยำยิ่งขึ้น โดยเฉพาะในพื้นที่อุตสาหกรรมที่มีการปลดปล่อยมลพิษอย่างต่อเนื่อง (Huang et al., 2015; Gao et al., 2020)

จังหวัดสระบุรีเป็นพื้นที่อุตสาหกรรมที่มีโรงงานปูนซีเมนต์ โรงโม่หิน เหมืองแร่ และการเผาตอซังข้าว ซึ่งเป็นแหล่งกำเนิดมลพิษที่สำคัญ (สำนักงานสิ่งแวดล้อม, 2567) ปัญหามลพิษมีความรุนแรงในฤดูหนาว มักเกิดภาวะลมสงบ อุณหภูมิต่ำ มีการผกผันของอุณหภูมิ และ PBLH ลดระดับส่งผลให้มลพิษสะสมใกล้ผิวดินได้ง่าย (กรมควบคุมมลพิษ, 2567) การศึกษานี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาเวลาเหลื่อมระหว่างปัจจัยทางอุตุนิยมวิทยาและมลพิษทางอากาศที่มีผลต่อ $PM_{2.5}$ ในฤดูหนาวของจังหวัดสระบุรี เพื่อใช้เป็นข้อมูลพื้นฐานสำหรับการคาดการณ์มลพิษทางอากาศในพื้นที่อุตสาหกรรม

วิธีการศึกษา

รวบรวมและคัดกรองข้อมูล

รวบรวมข้อมูลปัจจัยทางอุตุนิยมวิทยาในจังหวัดสระบุรีอันได้แก่ อุณหภูมิ ความกดอากาศ ความชื้นสัมพัทธ์ ความเร็วลม และปริมาณน้ำฝน ราย 3 ชั่วโมง จากกรมอุตุนิยมวิทยาที่สถานีอุตุนิยมวิทยาอยุธยา(415301) นครนายก (417201) และลพบุรี(426201) และความเข้มข้นของ $PM_{2.5}$ PM_{10} SO_2 และ NO_2 รายชั่วโมงจากกรมควบคุมมลพิษที่สถานีตำรวจภูธรหน้าพระลาน (24T) และสถานีดับเพลิงพระลักษณ์ (25T) ในจังหวัดสระบุรี ตำแหน่งสถานีต่าง ๆ แสดงใน Fig. 1 ส่วนค่า PBLH รายชั่วโมง ใช้ข้อมูล ERA5 Reanalysis จากศูนย์ European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF) ความละเอียดเชิงพื้นที่ 0.25 องศา ช่วงเวลาของข้อมูลที่ใช้คือตั้งแต่เดือนพฤศจิกายน ปี 2020 ถึง

เดือนกุมภาพันธ์ ปี 2025 หลังจากรวบรวมข้อมูลแล้ว มีการคัดกรองข้อมูลโดยเลือกเฉพาะข้อมูลที่มีอย่างน้อย 75% และตัดค่าที่ผิดปกติออกก่อนนำไปใช้วิเคราะห์

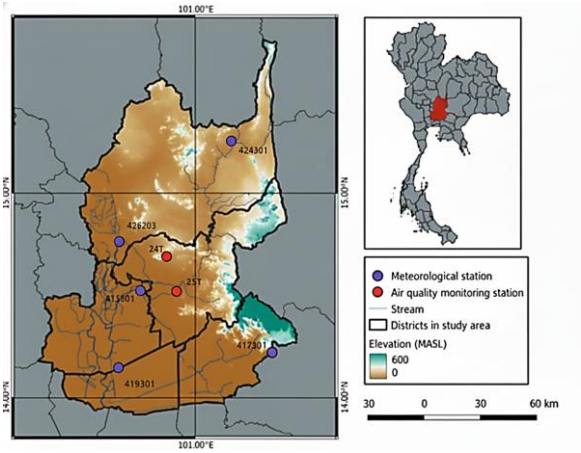


Fig. 1 Air quality monitoring stations and locations of meteorological stations.

วิเคราะห์ข้อมูล

การวิเคราะห์ข้อมูลเริ่มจากประมาณค่าทางปัจจัยทางอุตุนิยมวิทยาที่สถานีตรวจวัดคุณภาพอากาศ ด้วยวิธี Inverse Distance Weighting ตาม Equation 1 (Lu and Wong, 2008):

$$P_x = \frac{\sum W_i P_i}{\sum W_i} \quad \text{where} \quad W_i = \left(\frac{1}{d_i}\right)^2 \tag{1}$$

where: P_x was the estimated value, P_i was the data from meteorological station i, and d_i was the distance between the air quality monitoring station and meteorological station i.

นอกจากนี้ ยังมีการคำนวณดัชนีการระบายอากาศ (Ventilation Index; VI) เพื่อประเมินศักยภาพในการกระจายตัวของมลพิษทางอากาศทั้งในแนวราบและแนวดิ่ง ตาม Equation 2 (Jeong et al., 2024):

$$VI = WS \times PBLH \tag{2}$$

where: VI was ventilation Index (m^2/s), WS was wind speed (m/s), and PBLH was planetary boundary layer height (m).

จากนั้นคำนวณค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของเพียร์สัน (Pearson correlation coefficient) ระหว่างปัจจัยทางอุตุนิยมวิทยา และมลพิษทางอากาศกับ $PM_{2.5}$ ที่เวลาเหลื่อม 0–168 ชั่วโมง ตาม Equation 3 (Gao et al., 2020):

$$r_t = \frac{\sum(x_i - \bar{x})(y_{i-t} - \bar{y})}{\sqrt{\sum(x_i - \bar{x})^2 \sum(y_{i-t} - \bar{y})^2}} \tag{3}$$

where: r_t was the Pearson correlation coefficient, x_i was the $PM_{2.5}$ concentration at time i, and y_{i-t} was the value of a meteorological factor or air pollutant at time i-t (a lag of t hours), $\bar{x}$ and $\bar{y}$ were average values of $PM_{2.5}$ and meteorological factor or air pollutant, respectively.

หลังจากนั้น พิจารณาเวลาเหลื่อมที่ทำให้ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์สูงที่สุดของแต่ละปัจจัยแล้วเลือกปัจจัยที่มีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ > 0.1 และทดสอบนัยสำคัญของค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ด้วยการทดสอบ t-test ที่ระดับนัยสำคัญ 0.01 (Schober et al., 2018)

ผลและวิจารณ์ผล

ข้อมูลปัจจัยทางอุตุนิยมวิทยาและมลพิษทางอากาศในฤดูหนาว จังหวัดสระบุรี

ผลการคัดกรองข้อมูลพบว่าข้อมูล $PM_{2.5}$ และ PM_{10} จากทั้งสองสถานีมีความครบถ้วน 90.70–98.79% ขณะที่ข้อมูล NO_2 และ SO_2 มีเพียง 15.39–74.58 % จึงไม่นำ NO_2 และ SO_2 มาศึกษาผลการวิเคราะห์ค่าสถิติพื้นฐานแสดงดัง Table 1 จะเห็นได้ว่าค่าความเข้มข้นเฉลี่ยของ $PM_{2.5}$ ที่สถานี 24T มีค่า 42.0 ± 25.4 µg/m³ ซึ่งสูงกว่าเกณฑ์มาตรฐาน (37.5 µg/m³) (กรมควบคุมมลพิษ, 2566) สำหรับสถานี 25T ความเข้มข้นเฉลี่ยของ $PM_{2.5}$ มีค่า 30.4 ± 18.4 µg/m³ ถึงแม้ $PM_{2.5}$ เฉลี่ยต่ำกว่าเกณฑ์มาตรฐาน แต่ยังพบค่าที่สูงเกินระดับที่ปลอดภัยในบางช่วงเวลา PM_{10} มีค่าความเข้มข้นเฉลี่ยที่สถานี 24T 124 µg/m³ และที่สถานี 25T 65 µg/m³ อุณหภูมิมีค่าเฉลี่ย 26 °C ความกดอากาศมีค่าเฉลี่ย 998.01-1003.37 เฮกโตปาสคาล ปริมาณน้ำฝนมีค่าเฉลี่ย 0.1 มิลลิเมตร ความชื้นสัมพัทธ์มีค่าเฉลี่ย 69–70% ความเร็วลมมีค่าเฉลี่ย 3 น็อต PBLH มีค่าเฉลี่ย 523.26 เมตร และ VI มีค่าเฉลี่ย 1305–1370 m²/s ซึ่งแสดงถึงศักยภาพการระบายอากาศในแนวตั้งที่จำกัด ทำให้มลพิษสะสมได้มากในช่วงฤดูหนาว โดยเฉพาะในพื้นที่อุตสาหกรรมที่มีแหล่งกำเนิดของฝุ่นเป็นจำนวนมาก (Amnuaylojaroen et al., 2023; Su et al., 2018)

Table 1 Descriptive statistics of meteorological factors and air pollutants in Saraburi Province during the winter season (2020–2025)

Station	Variable	Mean ± SD	Maximum	Minimum
24T	$PM_{2.5}$ (µg/m³)	42.0 ± 25.4	220.7	0.2
	PM_{10} (µg/m³)	124 ± 83	826	9
	Temperature (°C)	26.8 ± 3.8	36.2	14.0
	Atmospheric Pressure (hPa)	1003.37 ± 2.47	1012.62	993.56
	Relative Humidity (%)	69 ± 15	98	22
	Wind Speed (knots)	3 ± 3	18	0
	Rainfall (mm)	0.1 ± 1.2	32.7	0.0
	Ventilation Index (m²/s)	1305.87 ± 1521.31	9862.97	0.53
25T	$PM_{2.5}$ (µg/m³)	30.4 ± 18.4	174.0	1.3
	PM_{10} (µg/m³)	65 ± 30	285	7
	Temperature (°C)	26.4 ± 3.8	35.8	13.7
	Atmospheric Pressure (hPa)	998.01 ± 2.42	1007.16	988.57
	Relative Humidity (%)	70 ± 15	97	24
	Wind Speed (knots)	3 ± 3	20	0
	Rainfall (mm)	0.1 ± 1.3	37.2	0.0
	Ventilation Index (m²/s)	1370.08 ± 1606.27	9950.82	0.94
	PBLH (m)	523.26 ± 524.36	2384.91	13.89

Note: * The PBLH values were identical for both monitoring stations.

เวลาเหลื่อมระหว่างปัจจัยทางอุตุนิยมวิทยาและมลพิษทางอากาศกับ $PM_{2.5}$ ในฤดูหนาว ที่จังหวัดสระบุรี

Fig. 2 แสดงค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของเพียร์สันระหว่าง $PM_{2.5}$ กับปัจจัยต่าง ๆ ในช่วงเวลาเหลื่อม 0–168 ชั่วโมงที่สถานี 24T และ 25T ผลที่ได้แสดงรูปแบบการเปลี่ยนแปลงตามรอบวันอย่างชัดเจน ซึ่งเกิดจากการเปลี่ยนแปลงของสภาพบรรยากาศในแต่ละช่วงเวลา (Su et al., 2018) ความสัมพันธ์ระหว่าง $PM_{2.5}$ กับปัจจัยต่าง ๆ มีรูปแบบที่แตกต่างกัน PM_{10} มีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ในเวลาเดียวกันกับ $PM_{2.5}$ สูงและลดลงตามระยะเวลาเหลื่อม การลดลงนี้สอดคล้องกับการมีแหล่งกำเนิดร่วมและการสะสมตัวของอนุภาค (Meng et al., 2019) ส่วนความเร็วลม อุณหภูมิ ความชื้น ความกดอากาศ PBLH และ VI มีการเพิ่มขึ้นและลดลงของค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์รอบวัน ซึ่งเป็นผลมาจากกระบวนการทางอุตุนิยมวิทยา เช่น การยกตัวของอากาศ รูปแบบการไหลเวียนของลม (Vongruang et al., 2024) การเปรียบเทียบระหว่างสองสถานีพบรูปแบบโดยรวมที่ใกล้เคียงกัน แต่สถานี 24T มีความผันผวนของค่าสัมประสิทธิ์สัมพันธ์ในหลายตัวแปรสูงกว่า ซึ่งสะท้อนผลของปัจจัยเฉพาะพื้นที่ที่เด่นชัด ขณะที่สถานี 25T มีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ที่ผันผวนน้อยกว่า ซึ่งแสดงถึงการควบคุมโดยปัจจัยทางอุตุนิยมวิทยาระดับภูมิภาคเป็นหลัก (Su et al., 2018; Yang et al., 2017)

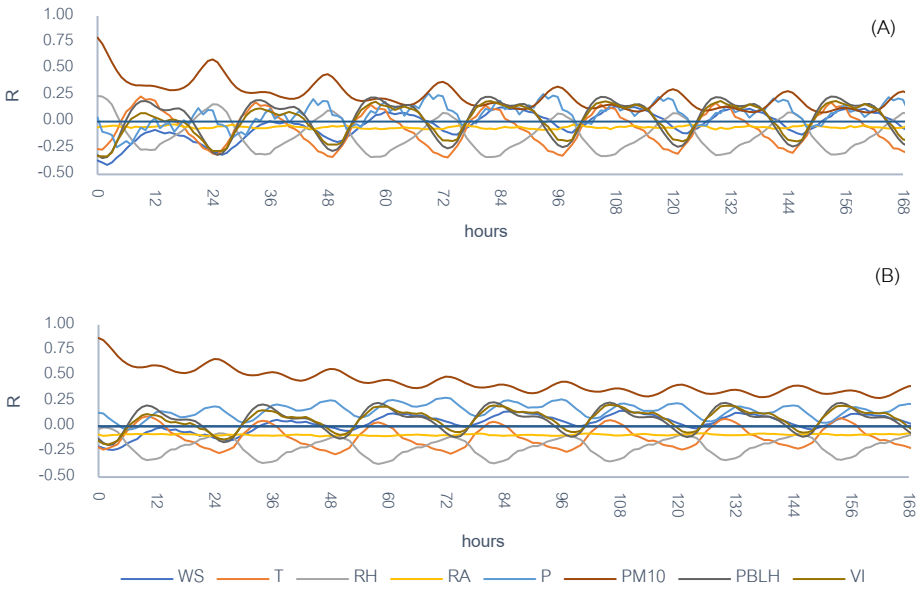


Fig. 2 Pearson correlation coefficients (R) between $PM_{2.5}$ and other factors at lag times of 0–168 hours at station 24T (A) and station 25T (B) during winter. WS is wind speed, T is temperature, RH is relative humidity, RA is rainfall, P is atmospheric pressure, PM10 is particulate matter less than 10 μm, PBLH is planetary boundary layer height, VI is ventilation index.

Table 2 แสดงเวลาเหลื่อมที่ทำให้ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่าง $PM_{2.5}$ กับปัจจัยต่าง ๆสูงที่สุดจะเห็นได้ว่าปัจจัยที่มีเวลาเหลื่อมสั้น (ไม่เกิน 8 ชั่วโมง) ได้แก่ PM_{10} ความเร็วลม PBLH และ VI โดย PM_{10} สัมพันธ์เชิงบวกกับ $PM_{2.5}$ มากที่สุด ผลที่ได้นี้สะท้อนถึงการมีแหล่งกำเนิดอนุภาคขนาดเล็กและขนาดใหญ่ร่วมกัน อันได้แก่ การเผาในที่โล่ง การคมนาคม และกิจกรรมอุตสาหกรรม (Meng and Sun, 2022) ส่วนความเร็วลม PBLH และ VI สัมพันธ์เชิงลบกับ $PM_{2.5}$ ในระยะสั้น ผลที่ได้นี้สอดคล้องกับสภาวะลมอ่อน PBLH ต่ำ และ VI จำกัดในฤดูหนาว ซึ่งส่งผลให้เกิดสภาวะอากาศนิ่ง $PM_{2.5}$ จึงสะสมบริเวณพื้นผิวอย่างรวดเร็ว (Gao et al., 2020; Su et al., 2018) ปัจจัยที่มีเวลาเหลื่อมยาว (48 ชั่วโมงขึ้นไป) ได้แก่ ความชื้นสัมพัทธ์ อุณหภูมิ ความกดอากาศ PBLH VI และความเร็วลม โดยความชื้นสัมพัทธ์และอุณหภูมิมี

ความสัมพันธ์เชิงลบกับ $PM_{2.5}$ ในระยะยาว ผลที่ได้นี้สะท้อนถึงสภาพอากาศที่แห้งและอุณหภูมิที่ต่ำในฤดูหนาว ซึ่งเอื้อต่อการแขวนลอยของอนุภาคทำให้อนุภาคอยู่ในอากาศได้นานขึ้น (Gao et al., 2020; Li et al., 2017) การที่ความกดอากาศ PBLH VI และความเร็วลมมีความสัมพันธ์เชิงบวกกับ $PM_{2.5}$ ในระยะยาว สะท้อนถึงผลกระทบที่ไม่ได้เกิดขึ้นทันที แต่เป็นผลของกระบวนการระดับภูมิภาคที่เปลี่ยนแปลงอย่างค่อยเป็นค่อยไป ในช่วง 2–3 วันแรก ความกดอากาศสูงที่ปกคลุมต่อเนื่องทำให้อากาศนิ่ง ลมอ่อน และการเคลื่อนตัวของมวลอากาศช้าลง ส่งผลให้ $PM_{2.5}$ จากแหล่งกำเนิดในพื้นที่หรือจากบริเวณใกล้เคียงสะสมตัวอย่างต่อเนื่อง (Gao et al., 2020; Nakyai et al., 2025) หลังจากนั้น เมื่อเกิดการเปลี่ยนผ่านของโครงสร้างบรรยากาศ PBLH และ VI จะสูงขึ้น ทำให้มวลอากาศระดับบนถูกพัดลงสู่พื้นดิน อากาศระดับบนซึ่งอาจมีการสะสมของ $PM_{2.5}$ จากแหล่งกำเนิดระยะไกลจึงเข้ามาสู่พื้นที่ ส่งผลให้ $PM_{2.5}$ สูงขึ้นในเวลา 3–6 วัน (Su et al., 2018) นอกจากนี้ ที่สถานี 24T $PM_{2.5}$ มีความสัมพันธ์เชิงลบกับความกดอากาศและมีความสัมพันธ์เชิงบวกกับความชื้นสัมพัทธ์และอุณหภูมิในช่วงเวลาเหลื่อมที่สั้น ซึ่งแสดงถึงอิทธิพลของสภาวะอากาศใกล้ผิวดินที่เปลี่ยนแปลงรวดเร็วในบริเวณรอบแหล่งอุตสาหกรรม เช่น การเพิ่มขึ้นของความชื้นเฉพาะช่วงเวลาในบางพื้นที่ ซึ่งทำให้เกิดการก่อตัวของอนุภาคทุติยภูมิในระยะแรก (Amnuaylojaroen et al., 2023) การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิใกล้ผิวดินในบางช่วงเวลา (Su et al., 2018) บทบาทของสภาวะลมอ่อนที่ทำให้การกระจายตัวของมลพิษลดลงในระดับพื้นที่ (Gao et al., 2020) ปัจจัยเหล่านี้สามารถทำให้เกิดการคั่งค้างของมวลอากาศเฉพาะบริเวณ ส่งผลให้ $PM_{2.5}$ สะสมในพื้นที่ได้ในระยะเวลาสั้น ๆ ซึ่งแตกต่างจากกระบวนการระดับภูมิภาคที่มักเกิดในช่วงเวลาหลายวัน (Zhou et al., 2023)

Table 2 Lag times which yield highest correlations between $PM_{2.5}$ and variables in the winter season.

Station	Variable	Lag time (hours)	R-value	*P-value*
24T	Wind Speed	2	-0.4107	$p < 0.01$
		108	0.1311	$p < 0.01$
		146	-0.1122	$p < 0.01$
	Temperature	8	0.1945	$p < 0.01$
		74	-0.2861	$p < 0.01$
	Relative Humidity	2	0.2081	$p < 0.01$
		80	-0.3084	$p < 0.01$
	Atmospheric Pressure	5	-0.2143	$p < 0.01$
		68	0.2108	$p < 0.01$
	PM_{10}	0	0.7953	$p < 0.01$
	PBLH	1	-0.3458	$p < 0.01$
		81	0.2352	$p < 0.01$
		153	0.2354	$p < 0.01$
	VI	2	-0.3290	$p < 0.01$
		83	0.1800	$p < 0.01$
		122	0.1755	$p < 0.01$
25T	Wind Speed	3	-0.2325	$p < 0.01$
		108	0.1518	$p < 0.01$
	Temperature	48	-0.2572	$p < 0.01$
	Relative Humidity	57	-0.3572	$p < 0.01$
	Atmospheric Pressure	72	0.2815	$p < 0.01$
	PM_{10}	0	0.8704	$p < 0.01$
	PBLH	2	-0.1850	$p < 0.01$
		82	0.2377	$p < 0.01$
	VI	3	-0.1634	$p < 0.01$
		105	0.2022	$p < 0.01$

อย่างไรก็ตาม การศึกษาสัมพันธ์ระหว่าง PM2.5 กับปัจจัยต่าง ๆ โดยใช้ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของเพียร์สันอย่างเดียวไม่สามารถแยกความสัมพันธ์ระหว่าง PM2.5 กับแต่ละปัจจัยได้อย่างชัดเจน เนื่องจากปัจจัยต่างๆ มีความสัมพันธ์ระหว่างกันและกัน (Schober et al., 2018) ความสัมพันธ์ที่ได้จึงไม่ได้เกิดจากปัจจัยใดปัจจัยหนึ่ง แต่เกิดจากอิทธิพลของหลาย ๆ ปัจจัยร่วมกัน นอกจากนี้ การศึกษานี้ใช้ข้อมูลความเข้มข้นของ PM2.5 และ PM10 จากสถานีตรวจวัดคุณภาพอากาศโดยไม่มีข้อมูลองค์ประกอบทางเคมีของฝุ่น จึงไม่สามารถอธิบายกลไกการก่อตัวของฝุ่นทุติยภูมิได้อย่างชัดเจน (Zhang et al., 2015)

สรุป

ผลการวิเคราะห์เวลาเหลื่อมระหว่างปัจจัยทางอุตุนิยมวิทยาและมลพิษทางอากาศกับ $PM_{2.5}$ ในฤดูหนาวที่จังหวัดสระบุรีพบว่าในระยะสั้น PM_{10} สัมพันธ์กับ $PM_{2.5}$ ซึ่งสะท้อนถึงลักษณะของแหล่งกำเนิดร่วมจากกิจกรรมอุตสาหกรรม การคมนาคม และการเผาไหม้ ขณะที่ความเร็วลม PBLH และ VI มีบทบาทต่อการลดการสะสมของ $PM_{2.5}$ อย่างไรก็ตาม ในฤดูหนาว ปัจจัยดังกล่าวมีค่าต่ำ ซึ่งสะท้อนถึงอากาศที่นิ่ง จึงเอื้อต่อการสะสมตัวของ $PM_{2.5}$ สำหรับช่วงเวลาเหลื่อมยาว (48 ชั่วโมงขึ้นไป) ความชื้นสัมพัทธ์ อุณหภูมิ และความกดอากาศส่งผลต่อ $PM_{2.5}$ โดยลักษณะอากาศที่เย็นและแห้งส่งผลให้อนุภาคแขวนลอยได้ยาวนาน ขณะที่ความกดอากาศสูงและการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างบรรยากาศในระดับภูมิภาคเอื้อต่อการพัดพามวลอากาศ ที่มี $PM_{2.5}$ จากบริเวณอื่นเข้ามายังพื้นที่จึงเกิดการสะสมของ $PM_{2.5}$ ในช่วงเวลาหลายวัน นอกจากนี้ยังพบความแตกต่างระหว่างสองสถานี โดยที่สถานี 24T ซึ่งตั้งอยู่ในพื้นที่อุตสาหกรรม $PM_{2.5}$ มีความไวต่อปัจจัยใกล้ผิวดินมากกว่า ขณะที่สถานี 25T ซึ่งตั้งอยู่ในพื้นที่เมือง $PM_{2.5}$ มีความไวต่อปัจจัยใกล้ผิวดินน้อยกว่าและสอดคล้องกับกระบวนการระดับภูมิภาค ผลการศึกษานี้แสดงให้เห็นว่าการบริหารจัดการคุณภาพอากาศในพื้นที่อุตสาหกรรมจำเป็นต้องพิจารณาทั้งอิทธิพลระยะสั้นจากแหล่งกำเนิดในพื้นที่และอิทธิพลระยะยาวจากสภาพทางอุตุนิยมวิทยาเพื่อสนับสนุนการคาดการณ์และการจัดการมลพิษในฤดูหนาวอย่างมีประสิทธิภาพ

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณภาควิชาเทคโนโลยีและการจัดการสิ่งแวดล้อม คณะสิ่งแวดล้อม ที่ให้ทุนสนับสนุนการวิจัย รวมทั้งกรมอุตุนิยมวิทยาและกรมควบคุมมลพิษ ที่ให้ความอนุเคราะห์ข้อมูลปัจจัยทางอุตุนิยมวิทยาและข้อมูลมลพิษทางอากาศ สุดท้ายนี้ผู้วิจัยหวังเป็นอย่างยิ่งว่างานวิจัยฉบับนี้จะเกิดประโยชน์ต่อหน่วยงานที่เกี่ยวข้องและผู้ที่สนใจ

เอกสารอ้างอิง

กรมควบคุมมลพิษ. 2566. ดัชนีคุณภาพอากาศของประเทศไทย พ.ศ. 2566. กรมควบคุมมลพิษ, กรุงเทพฯ.

กรมควบคุมมลพิษ. 2567. รายงานสถานการณ์มลพิษของประเทศไทย ปี 2566. https://www.pcd.go.th/wp-content/uploads/2024/06/pcdnew-2024-06-21_06-42-54_474054.pdf, 12 กรกฎาคม 2568.

ภัคพงศ์ พจนารถ. 2555. มลพิษทางอากาศในระดับภูมิภาคและการแพร่กระจายในระยะทางไกล: (1) ภูมิภาคเอเชียตะวันออก. วารสารการจัดการสิ่งแวดล้อม 1: 57–77.

สำนักงานสิ่งแวดล้อม. 2567. รายงานสถานการณ์คุณภาพอากาศจังหวัดสระบุรีปีงบประมาณ พ.ศ. 2567. https://epo07.pcd.go.th/th/information/more/329, 12 กรกฎาคม 2568.

Amnuaylojaroen, T., Kaewkanchanawong, P., Panpeng, P. 2023. Distribution and meteorological control of PM2.5 and its effect on visibility in northern Thailand. Atmosphere 14: 538.

Gao, Y.-Q., Chen, Y., Liu, G.-D., Zhang, J.-M. 2020. Investigating the influence of meteorological factors on particulate matters: A case study based on path analysis. Energy Environ. 31: 479–491.

Huang, F., Li, X., Wang, C., et al. 2015. PM2.5 spatiotemporal variations and the relationship with meteorological factors during 2013-2014 in Beijing, China. PLoS ONE 10: e0141642.

Jeong, S., Kang, Y.-H., Kim, E., Kim, S. 2024. Role of air stagnation in determining daily average PM2.5 concentrations in areas with significant impact of long-range transport. Atmos. Pollut. Res. 15: 100000.

Li, X., Ma, Y., Wang, Y., Liu, N., Hong, Y. 2017. Temporal and spatial analyses of particulate matter (PM10 and PM2.5) and its relationship with meteorological parameters over an urban city in northeast China. Atmos. Res. 198: 185–193.

Lu, G.Y., Wong, D.W. 2008. An adaptive inverse-distance weighting spatial interpolation technique. Comput. Geosci. 34: 1044–1055.

Meng, C., Cheng, T., Gu, X., Shi, S., Wang, W., Wu, Y., Bao, F. 2019. Contribution of meteorological factors to particulate pollution during winters in Beijing. Sci. Total Environ. 656: 977–985.

Meng, Y., Sun, W. 2022. Reduced air pollution during the prevailing of COVID-19 pandemic: Five years observation and path analysis in the Fenwei plain, northwest China. Adv. Meteorol. 2022: 1–11.

Nakapan, S., Choopun, S. 2018. Geospatial analysis of relationship between climate factors and diffusion of air pollution in Chiang Mai, Thailand. ScienceAsia 44: 325–331.

Nakyai, T., Santasnachok, M., Thetkathuek, A., Phatrabuddha, N. 2025. Influence of meteorological factors on air pollution and health risks: A comparative analysis of industrial and urban areas in Chonburi Province, Thailand. Environ. Adv. 100608.

Prévôt, A.S.H., Henne, S., Keller, J., Hueglin, C., Barmpadimos, I. 2011. Influence of meteorology on PM10 trends and variability in Switzerland from 1991 to 2008. Atmos. Chem. Phys. 11: 1813–1835.

Schober, P., Boer, C., Schwarte, L.A. 2018. Correlation coefficients: Appropriate use and interpretation. Anesth. Analg. 126: 1763–1768.

Su, T., Li, Z., Kahn, R. 2018. Relationships between the planetary boundary layer height and surface pollutants derived from lidar observations over China: Regional pattern and influencing factors. Atmos. Chem. Phys. 18: 15921–15935.

Vongruang, P., Suppoung, K., Kirtsaeng, S., Prueksakorn, K., Thao, P.T.B., Pimonsree, S. 2024. Development of meteorological criteria for classifying PM2.5 risk in a coastal industrial province in Thailand. Aerosol Air Qual. Res. 24: 1–16.

Yang, Q., Yuan, Q., Li, T., Shen, H., Zhang, L. 2017. The relationships between PM2.5 and meteorological factors in China: Seasonal and regional variations. Int. J. Environ. Res. Public Health 14: 1510.

Zhang, H., Wang, Y., Hu, J., Ying, Q., Hu, X.M. 2015. Relationships between meteorological parameters and criteria air pollutants in three megacities in China. Environ. Res. 140: 242–254.

Zhou, X., Huang, X., Sun, P., et al. 2023. Fast secondary aerosol formation in residual layer and its impact on air pollution over eastern China. J. Geophys. Res. Atmos. 128: 15341–15356.

สาขาวิทยาศาสตร์

(Subject: Science)

ภาคโปสเตอร์

(Poster Presentation)

การตรวจสอบความใช้ได้ของวิธีวิเคราะห์สารป้องกันกำจัดแมลงไดคลอร์วอสในข้าวโพดหวาน น้ำ ดิน และแผ่นผ้า

Method validation for the determination of dichlorvos residues in corn, water, soil and patch

นพดล มะโนเย็น*, **จันทิมา ผลกอง**, **อำนาจ กะฐินเทศ**, **สิริพร เหลืองสุชนกุล**

Noppadon Manoyen*, Jantima phonkong, Amnaj Katintet, Siriporn Luengsuchonkul

กลุ่มงานวิจัยผลกระทบจากการใช้วัตถุมีพิษการเกษตร กลุ่มวิจัยวัตถุมีพิษการเกษตร กองวิจัยพัฒนาปัจจัยการผลิตทางการเกษตร กรมวิชาการเกษตร กรุงเทพฯ 10900

Impact of Pesticide Use Subdivision, Agricultural Toxic Substances Research Group, Agricultural Production Sciences Research and Development Office, Department of Agriculture, Bangkok 10900, Thailand

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

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ ได้ศึกษาและตรวจสอบความใช้ได้ของวิธีวิเคราะห์สารป้องกันกำจัดแมลงไดคลอร์วอสในข้าวโพดหวาน น้ำ ดิน และแผ่นผ้ารับสัมผัส โดยการสกัดตัวอย่างด้วย เอทิล อะซิเตท (ethyl acetate) และตรวจวัดด้วยเครื่องแก๊สโครมาโตกราฟ ชนิด flame photometric detector (GC-FPD) พบว่าภายใต้สภาวะที่เหมาะสม สามารถตรวจวิเคราะห์ไดคลอร์วอสได้ในช่วง 0.20–10.00 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม, 0.10–5.00 ไมโครกรัมต่อลิตร, 0.003–0.250 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม และ 0.02–1.00 ไมโครกรัมต่อหนึ่งร้อยตารางเซนติเมตร สำหรับตัวอย่างข้าวโพดหวาน น้ำ ดิน และแผ่นผ้ารับสัมผัส ตามลำดับ โดยมีค่า %Recovery อยู่ในช่วง 78–105 % และมีค่า % Relative standard deviation (% RSD) อยู่ในช่วง 4–11 %

คำสำคัญ: การตรวจสอบความใช้ได้ของวิธี, ข้าวโพดหวาน, ไดคลอร์วอส, สิ่งแวดล้อม

Abstract

This work describes the study and validation of analytical method for determination of dichlorvos in corn, water, soil, and patch. The samples were extracted with ethyl acetate and determined using gas chromatograph with flame photometric detector (GC-FPD). The results showed that under optimized conditions, dichlorvos could be quantified in the ranges of 0.20–10.00 mg/kg, 0.10–5.00 µg/L, 0.003-0.250 mg/kg, and 0.02–1.00 µg/100 cm² for corn, water, soil, and patch samples, respectively. The method showed satisfactory performance, with percent recoveries (%Recovery) ranging from 78–105 % and relative standard deviations (%RSD) ranging from 4–11 %, indicating good accuracy and precision.

Keywords: Corn, Dichlorvos, Environment, Method validation

คำนำ

ไดคลอร์วอส (dichlorvos หรือ 2,2-dichlorovinyl dimethyl phosphate: DDVP) เป็นสารกำจัดแมลงกลุ่มออร์กาโนฟอสฟอรัส (organophosphorus) ที่มีประสิทธิภาพสูงในการควบคุมแมลงศัตรูพืช (เพลี้ยจักจั่น (rice bugs) หนอนเจาะใบ (leafroller moths) หนอนชอนใบ (leaf miners) และเพลี้ยไฟ (thrips) ฯลฯ) ในผัก ผลไม้ พืชไร่ และธัญพืช เช่น ข้าว มะเขือ แตงกวา แอปเปิ้ล ชา และข้าวโพดหวาน เป็นต้น (Food and Agriculture Organization of the United Nations /World Health Organization (FAO/WHO), 1994) ปริมาณการนำเข้าในประเทศไทยปี 2567 เท่ากับ 368,825 กิโลกรัม (สำนักควบคุมพืชและวัสดุการเกษตร,2567) ไดคลอร์วอสจัดเป็นสารกำจัดแมลงที่มีพิษสูง ในระดับ Ib กระทบต่อการทำงานของเอนไซม์ซิทิลโครีนเอสเตอเรสในระบบประสาทของมนุษย์ มีการตกค้างในสิ่งแวดล้อมและผลิตผลทางการเกษตรและกระทบต่อสุขภาพของผู้บริโภค (Turner, 2018)

วิธีการตรวจวิเคราะห์ไดคลอร์วอสเพื่อหาปริมาณการตกค้างในผลิตผลเกษตรและสิ่งแวดล้อม มีหลายเทคนิคที่นำมาใช้ โดย Ma et al. (2009) ได้พัฒนาวิธีการตรวจวิเคราะห์สารออร์กาโนฟอสฟอรัส (Organophosphate: OPPs) (ซึ่งมีสารไดคลอร์วอส เป็นสารหนึ่งชนิดในตัวอย่างที่ศึกษา) ในตัวอย่างน้ำ ด้วยเทคนิค solid-phase extraction (SPE) ร่วมกับ เทคนิค gas chromatography with mass spectrometry. และ García-Vara et al. (2023) ได้พัฒนาวิธีการตรวจวัดสารไดคลอร์วอสในข้าวโพด (corn) องุ่น (grapes) และต้นอัลฟัลฟ่า (alfafa) ด้วยเทคนิค QuEChERS ร่วมกับเทคนิค liquid chromatography-tandem mass spectrometry ได้ค่า % Recovery อยู่ในช่วง 60–95% และ 95–111%. ตามลำดับ.

การตรวจสอบความใช้ได้ของวิธีวิเคราะห์สารป้องกันกำจัดแมลงไดคลอร์วอสในข้าวโพด น้ำ ดิน และแผ่นผ้ารับสัมผัสเป็นการศึกษาวิธีการวิเคราะห์เพื่อให้ได้วิธีที่มีความเหมาะสมและถูกต้องในการวิเคราะห์ปริมาณการตกค้าง นำไปใช้ตรวจวิเคราะห์ปริมาณการตกค้างของไดคลอร์วอสในตัวอย่างข้าวโพดหวาน น้ำผิวดิน ดิน และแผ่นผ้ารับสัมผัส เพื่อนำไปประเมินความเสี่ยงและเฝ้าระวังผลกระทบที่อาจเกิดขึ้นต่อมนุษย์และระบบนิเวศจากการใช้ต่อไป

อุปกรณ์

1. เครื่องแก้วและวัสดุวิทยาศาสตร์ ได้แก่ กระดาษกรอง กรวยกรอง กรวยแยก กระบอกตวง ขวดปริมาตรก้นกลม ขวดรูปชมพู่พร้อมฝาปิด ขวดวัดปริมาตร ขวดสำหรับการฉีดแบบอัตโนมัติ (vial) บีกเกอร์ หลอดพลาสติก หลอดแก้วสำหรับดูดสาร ไมโครปิเปต และหลอดทดลอง

2. เคมีภัณฑ์ชนิดต่าง ๆ ได้แก่ สารพิษมาตรฐาน ไดคลอร์วอส (dichlorvos) ความบริสุทธิ์ 99.37% (g/g) โซเดียมไฮโดรเจนคาร์บอเนต ($NaHCO_3$) โซเดียมซัลเฟต (Na_2SO_4) น้ำกลั่น (H_2O) ไนโตรเจนเหลว อะซิโตน (C_3H_6O) เอทิล อะซิเตท (ethyl acetate: $C_4H_8O_2$) แอนไฮดรัส โซเดียมซัลเฟต (anh. Na_2SO_4)

3. เครื่องมือวิทยาศาสตร์ ได้แก่ เครื่องเขย่า เครื่องเขย่ากรวยแยก เครื่องเขย่าผสมสาร เครื่อง ultrasonic bath เครื่องชั่งละเอียดความละเอียด 0.01 กรัม สำหรับชั่งตัวอย่าง และความละเอียด 0.00001 กรัม สำหรับชั่งสารมาตรฐาน เครื่องปั่นตัวอย่าง เครื่องระเหยสารแบบแก๊สไนโตรเจน เครื่องระเหยสุญญากาศแบบหมุน เครื่องปั่นเหวี่ยง เครื่องแก๊สโครมาโตรกราฟ (gas chromatograph) ยี่ห้อ Agilent Technology รุ่น 6890N พร้อมตัวตรวจวัดชนิด flame photometric detector (GC-FPD) ติดตั้งแคปพิลลารี่คอลัมน์สำหรับแยกสารชนิด DB-5 ยาว 30 เมตร เส้นผ่านศูนย์กลาง 0.25 มิลลิเมตร สารเคลือบ 0.25 ไมโครเมตร

วิธีการ

1. การสกัดตัวอย่าง

1.1 ตัวอย่างข้าวโพดหวาน

นำฝักเมล็ดข้าวโพดหวานรวมซังไปปั่นให้ละเอียด ชั่งตัวอย่าง 20 กรัม สกัดด้วย เอทิล อะซิเตท 20 มิลลิลิตร ร่วมกับ โซเดียมไฮโดรเจนคาร์บอเนต 3 กรัม และ แอนไฮดรัส โซเดียมซัลเฟต (anh. Na_2SO_4) 10 กรัม เขย่าด้วยเครื่อง ultrasonic bath นำไปปั่นเหวี่ยงด้วยเครื่องปั่นเหวี่ยงที่ 10,000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 5 นาที ดูดสารสกัดที่ได้ 1 มิลลิลิตร นำไปตรวจวิเคราะห์ด้วยเครื่อง GC-FPD (Pihlström et al., 2007)

1.2 ตัวอย่างน้ำ (ใช้น้ำผิวดินที่ทำการเก็บจากเขื่อนสิริกิติ์)

ตวงน้ำ 800 มิลลิลิตร สกัดด้วย เอทิล อะซิเตท ปริมาตร 100 มิลลิลิตร กรองสารสกัดผ่าน แอนไฮดรัส โซเดียมซัลเฟต (anh. Na_2SO_4) ใส่ขวดปริมาตรก้นกลม ทำการสกัดซ้ำอีก 2 ครั้งๆ ละ 50 มิลลิลิตร นำสารสกัดทั้งหมดไปลดปริมาตรจนเกือบแห้ง ปรับปริมาตรเป็น 1 มิลลิลิตรด้วย เอทิล อะซิเตท ดูดสารสกัดใส่ vial นำไปตรวจวิเคราะห์ด้วยเครื่อง GC-FPD (Environmental Protection Agency (EPA), 1994)

1.3 ตัวอย่างดิน (ใช้ดินร่วนปนทราย)

ชั่งตัวอย่างดิน 20 กรัม สกัดด้วย เอทิล อะซิเตท 75 มิลลิลิตร เขย่าที่ 210 รอบต่อนาที เป็นเวลา 1 ชั่วโมง กรองผ่าน แอนไฮดรัส โซเดียมซัลเฟต (anh. Na_2SO_4) ใส่ขวดปริมาตรก้นกลม นำไปลดปริมาตรจนเกือบแห้ง ปรับปริมาตรเป็น 1 มิลลิลิตร ด้วย เอทิล อะซิเตท ดูดสารสกัดใส่ vial นำไปตรวจวิเคราะห์ด้วยเครื่อง GC-FPD (Association of Official Analysis Chemistry (AOAC), 2016)

1.4 ตัวอย่างแผ่นผ้ารับสัมผัส (สำหรับนำไปใช้ติดบนส่วนต่าง ๆ ของร่างกายผู้พ่นสาร)

นำแผ่นผ้ารับสัมผัสขนาด 10 x 10 เซนติเมตร ใส่ในหลอดพลาสติกสำหรับปั่นเหวี่ยง สกัดด้วย เอทิล อะซิเตท 20 มิลลิลิตร เขย่าด้วยเครื่อง ultrasonic bath นำไปปั่นเหวี่ยงด้วยเครื่องปั่นเหวี่ยงที่ 4,000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 5 นาที ดูดสารสกัดที่ได้ 5 มิลลิลิตร นำไปลดปริมาตรจนเกือบแห้ง ปรับปริมาตรเป็น 1 มิลลิลิตร ด้วย เอทิล อะซิเตท นำไปตรวจวิเคราะห์ด้วยเครื่อง GC-FPD (Bootsikeaw et al., 2020)

2. การเตรียมสภาวะเครื่อง GC-FPD

กำหนดสภาวะสำหรับวิเคราะห์ไดคลอร์วอส ดังนี้

Column	:	DB-5 capillary column (30 m length x 0.25 mm i.d. x 0.25 µm film thickness)
Detector	:	flame photometric detector (FPD)
Injection mode	:	Splitless
Temperature conditioning	:	injector = 250 °C, detector = 250 °C
Oven program	:	80 °C (2 minute) $\xrightarrow{20\ °C/minute}$ 120 °C (1 minute) $\xrightarrow{15\ °C/minute}$ 150 °C (2 minute) $\xrightarrow{25\ °C/minute}$ 250 °C (1 minute)

Carrier gas	:	helium (1.4 mL/minute)
Ignite gas	:	hydrogen (150 mL/minute), air (110 mL/minute)
Injection volume	:	1 µL
Run time	:	14 minutes

3.การตรวจสอบความใช้ได้ของวิธี

3.1 ขีดจำกัดของการตรวจพบ (Limit of detection, LOD)

โดยการ fortified สารมาตรฐานลงใน sample blank ให้มีความเข้มข้น 0.05 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม 0.02 ไมโครกรัมต่อลิตร 0.001 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม และ 0.005 ไมโครกรัมต่อหนึ่งร้อยตารางเซนติเมตร สำหรับตัวอย่างข้าวโพดหวาน น้ำ ดิน และแผ่นผ้ารับสัมผัส ตามลำดับ สกัดและตรวจวิเคราะห์ตัวอย่างตามวิธีในข้อที่ 1 พิจารณาผลการทดสอบ 10 ซ้ำ ต้องมีค่าสัญญาณการวัด signal/noise (S/N) มากกว่าหรือเท่ากับ 3 (S/N ≥3) (SANTE (2024)

3.2 ขีดจำกัดของการวัดเชิงปริมาณ (Limit of quantitation, LOQ)

โดยการ fortified สารมาตรฐานลงใน sample blank ให้มีความเข้มข้น 0.20 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม 0.10 ไมโครกรัมต่อลิตร 0.003 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม และ 0.02 ไมโครกรัมต่อหนึ่งร้อยตารางเซนติเมตร สำหรับตัวอย่างข้าวโพดหวาน น้ำ ดิน และแผ่นผ้ารับสัมผัสตามลำดับ สกัดและตรวจวิเคราะห์ตัวอย่างตามวิธีในข้อที่ 1 พิจารณาผลการทดสอบ 10 ซ้ำ ต้องมีค่าสัญญาณการวัดค่า S/N ≥10 (SANTE (2024)และมีค่าความแม่น (accuracy) ผ่านเกณฑ์ที่กำหนด (%Recovery = 40-120%, AOAC (2023), SANTE (2024)) และค่าคามเที่ยง (precision) ผ่านเกณฑ์ที่กำหนด (%Relative Standard Deviation; %RSD ≤ 20%, SANTE (2024))

3.3 ความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงของช่วงการใช้งาน (Linearity of working range)

โดยการตรวจวิเคราะห์ตัวอย่างที่เติมสารมาตรฐาน (fortified sample blank) ที่ทราบความเข้มข้นแน่นอน 6 ความเข้มข้น ความเข้มข้นละ 3 ซ้ำ ลงในตัวอย่างข้าวโพดหวาน น้ำ ดิน และแผ่นผ้ารับสัมผัส ประเมินค่า Coefficient of Determination (R^2) ที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นที่ตรวจวัดได้ (Measured concentration) และความเข้มข้นของสารที่เติมลงในตัวอย่าง (Concentration in test sample) ต้องผ่านเกณฑ์ที่กำหนด (Coefficient of Determination (R^2) ≥ 0.98, CAC/GL 40-1993 (2010))

3.4 ความแม่นและความเที่ยง (Accuracy and Precision)

โดยการตรวจวิเคราะห์ตัวอย่างที่เติมสารมาตรฐาน (fortified sample blank) ที่ทราบความเข้มข้นแน่นอน 3 ความเข้มข้น ความเข้มข้นละ 10 ซ้ำ ประเมินผลการทดสอบค่าความแม่น (Accuracy) จากค่า % Recovery ต้องผ่านเกณฑ์กำหนด(%Recovery = 40-120%, AOAC (2023), SANTE (2024)) และค่าความเที่ยง (Precision) จากค่า % Relative standard deviation (% RSD) ต้องผ่านเกณฑ์กำหนด (%RSD ≤20%, SANTE (2024))

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

1. ผลการทดสอบสภาวะของเครื่องแก๊สโครมาโตรกราฟ (GC-FPD)

เมื่อทดสอบสภาวะที่เหมาะสม (หัวข้อที่ 2) ในการตรวจวิเคราะห์ไดคลอร์วอส พบสัญญาณ (response) ที่ระยะเวลา (retention time: RT) ประมาณ 7.8 นาทีและใช้เวลาในการวิเคราะห์ 14 นาทีต่อหนึ่งตัวอย่าง ดังแสดงใน Fig. 1

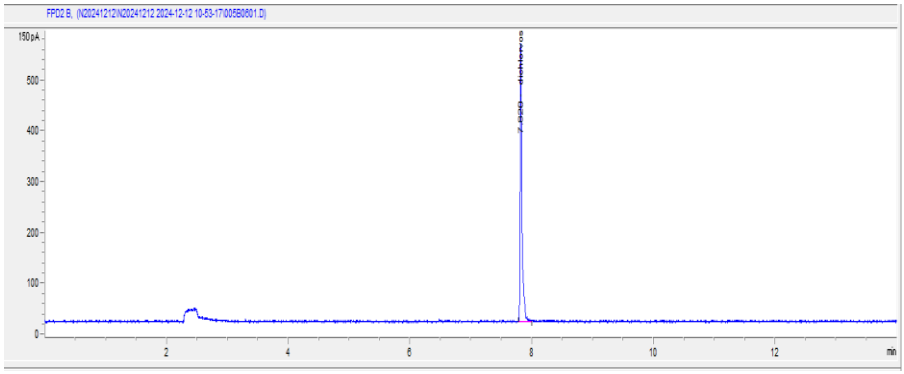


Fig. 1 Chromatogram of dichlorvos retention time in ethyl acetate using GC-FPD

2. ผลการตรวจสอบความใช้ได้ของวิธี ตาม parameter ต่าง ๆ

จากการตรวจสอบความใช้ได้ของวิธี ซึ่งประกอบไปด้วยขีดจำกัดของการตรวจพบ (LOD) ขีดจำกัดของการวัดเชิงปริมาณ (LOQ) ความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงของช่วงการใช้งาน ความแม่นและความเที่ยง พบว่าผ่านเกณฑ์กำหนดทั้งหมด โดยมีรายละเอียดดังนี้

2.1 ขีดจำกัดของการตรวจพบ (LOD) และขีดจำกัดของการวัดเชิงปริมาณ (LOQ)

ผลการทดสอบค่า LOD ของตัวอย่างทั้งหมดมีค่าอยู่ในช่วง 3.5–4.3 ซึ่งผ่านเกณฑ์ที่กำหนดทั้งหมด (S/N ≥ 3) ดังแสดงใน Table 1 ค่า LOQ จากการประเมิน accuracy มีค่า recovery อยู่ในช่วง 78.6–104.8 % และ precision มีค่า % RSD เท่ากับ 5–11% ซึ่งผ่านเกณฑ์กำหนด รายละเอียดดัง Table 2

Table 1 Signal-to-noise ratio (S/N) at the limit of detection (LOD) for dichlorvos analysis in corn, water, soil and patch

Sample (n = 10)	Limit of detection (LOD)		signal/noise (S/N)
Corn	0.05	mg/kg	4.1
Water	0.02	µg/L	3.5
Soil	0.001	mg/kg	4.3
Patch	0.005	µg/100 cm^2	4.2

Note: Criteria: S/N ≥3 (SANTE, 2024)

Table 2 The Limit of Quantitation (LOQ) results for dichlorvos analysis in corn, water, soil and patch

Sample	Limit of Quantitation (LOQ)		Accuracy	Precision
			% Recovery	% RSD
Corn	0.20	mg/kg	85.2	5
Water	0.10	µg/L	78.6	11
Soil	0.003	mg/kg	104.8	6
Patch	0.02	µg/100 cm^2	100.3	6

Note: % recovery = 40-120% if analyte unit 1 ppb (AOAC, 2023)

% recovery = 60-115% if analyte unit 10 ppb (AOAC, 2023)

% recovery = 80-110% if analyte unit > 0.10-10 ppm (AOAC, 2023)

% recovery = 70-120% (SANTE, 2024)

% RSD ≤20% (SANTE, 2024)

2.2 ความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงของช่วงการใช้งาน (Linearity of working range)

ค่า Coefficient of Determination (R^2) ที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นที่ตรวจวัดได้ (Measured concentration) แกน y และความเข้มข้นของสารที่เติมลงในตัวอย่าง (Concentration in test sample) แกน x พบว่าค่า Coefficient of Determination (R^2) อยู่ในช่วง 0.9980-0.9991 ซึ่งผ่านเกณฑ์กำหนด ($R^2 \geq 0.980$) ดังแสดงใน Table 3

Table 3 Linearity of working range of dichlorvos in water, soil, corn and patch

Sample	Working range		Coefficient of Determination (R^2)	
			Value	Criteria *
Corn	0.20 – 10.00	mg/kg	0.9980	0.980
Water	0.10 – 5.00	µg/L	0.9984	
Soil	0.003 – 0.250	mg/kg	0.9991	
Patch	0.02 – 1.00	µg/100 cm^2	0.9985	

Note: * Codex Alimentarius Commission/Good Laboratory (CAC/GL) 40-1993 (2010)

2.3 ความแม่นและความเที่ยง (Accuracy and Precision)

ค่าความแม่นและความเที่ยงของการวิเคราะห์ตัวอย่างข้าวโพดหวาน น้ำ ดิน และแผ่นผ้ารับสัมผัส จากการประเมินค่าความแม่น มีค่า %Recovery เท่ากับ 78.6–81.4%, 102.3–105.1%, 85.2–91.6% และ 88.4–100.3% และค่าความเที่ยง มีค่า % RSD เท่ากับ 7–11%, 4–11%, 4–5% และ 6–11% ตามลำดับ ซึ่งบ่งชี้ว่าค่าทั้งหมดผ่านเกณฑ์ที่กำหนด ดังแสดงใน Table 4

Table 4 Accuracy and precision of dichlorvos analysis in water, soil, corn, and patch samples

Sample	Accuracy	Precision
(*n* = 10)	% Recovery	% RSD
Water	78.6–81.7	7–11
Soil	102.3–105.1	4–11
Corn	85.2–91.6	4–5
Patch	88.4–100.3	6–11

Note: % recovery = 40–120% if analyte unit 1 ppb (AOAC, 2023)

% recovery = 60–115% if analyte unit 10 ppb (AOAC, 2023)

% recovery = 80–110% if analyte unit > 0.10-10 ppm (AOAC, 2023)

% recovery = 70–120% (SANTE, 2024)

% RSD ≤20% (SANTE, 2024)

จากผลการทดสอบพบว่า ขีดจำกัดของการวัดเชิงปริมาณและช่วงการใช้งานของวิธีวิเคราะห์ในตัวอย่างข้าวโพดหวานครอบคลุมค่าปริมาณสารตกค้างสูงสุด (Maximum residue limit: MRL) โดยสำนักงานมาตรฐานสินค้าเกษตรและอาหารแห่งชาติ (สมอ.) ระบุค่า MRL ของไดคลอร์วอสในเมล็ดธัญพืช (cereal) ไว้ที่ 0.2 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม เช่นเดียวกับมูลนิธิวิจัยด้านเคมีอาหารแห่งญี่ปุ่น (The Japan Food Chemical Research Foundation) ระบุค่าไดคลอร์วอสในข้าวโพด (maize including popcorn and sweet corn) ไว้ที่ 0.2 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม (ppm) ส่วนขีดจำกัดของการวัดเชิงปริมาณและช่วงการใช้งานของวิธีวิเคราะห์ในตัวอย่างน้ำสามารถตรวจวิเคราะห์ได้ต่ำกว่าค่าความเข้มข้นสูงสุดที่ยอมให้มีได้ (Maximum Allowable Concentration: MAC) ในน้ำดื่มของประเทศออสเตรเลีย (National Health and Medical Research Council; NHMRC) ที่ระบุค่าไว้ที่ 5 ไมโครกรัมต่อลิตร ในขณะที่ตัวอย่างดินและแผ่นผ้ารับสัมผัสไม่พบการระบุค่า อย่างไรก็ตาม ค่าขีดจำกัดของการวัดเชิงปริมาณของทั้งสองตัวอย่างอยู่ในระดับที่ค่อนข้างต่ำ สามารถนำไปใช้ในการวิเคราะห์สารตกค้างของไดคลอร์วอสในตัวอย่างจากแปลงเกษตรกรต่อไปได้

สรุป

จากการศึกษาวิธีและตรวจสอบความใช้ได้ของวิธีตรวจวิเคราะห์ไดคลอร์วอสในตัวอย่างข้าวโพดหวาน น้ำ ดิน และแผ่นผ้ารับสัมผัส พบว่ามีความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงของช่วงการใช้งานเท่ากับ 0.20–10.00 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม 0.10–5.00 ไมโครกรัมต่อลิตร 0.003–0.250 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม และ 0.02–1.00 ไมโครกรัมต่อหนึ่งร้อยตารางเซนติเมตร ขีดจำกัดของการตรวจพบ (LOD) เท่ากับ 0.05 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม 0.02 ไมโครกรัมต่อลิตร 0.001 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม และ 0.005 ไมโครกรัมต่อหนึ่งร้อยตารางเซนติเมตร และ ขีดจำกัดของการวัดเชิงปริมาณ (LOQ) เท่ากับ 0.20 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม 0.10 ไมโครกรัมต่อลิตร 0.003 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม และ 0.02 ไมโครกรัมต่อหนึ่งร้อยตารางเซนติเมตร ตามลำดับ มีความแม่น (Accuracy)และความเที่ยง (Precision) ผ่านเกณฑ์กำหนด สามารถนำวิธีการที่ได้ศึกษานี้ไปใช้ในการตรวจวิเคราะห์สารตกค้างของไดคลอร์วอสในตัวอย่างได้

เอกสารอ้างอิง

สำนักงานมาตรฐานสินค้าเกษตรและอาหารแห่งชาติ. 2559. ข้อมูลการบริโภคอาหารของประเทศไทย. แหล่งที่มา: https://certify-new.dld.go.th/images/pdfs/export/export4/5P303.pdf (สืบค้นเมื่อ 11 พฤศจิกายน 2568).

สำนักควบคุมพืชและวัสดุการเกษตร. 2567. สรุปการนำเข้าวัตถุอันตราย 2567. แหล่งที่มา: https://www.doa.go.th/ard/wp-content/uploads/2025/11/รายชื่อ.pdf (สืบค้นเมื่อ 11 พฤศจิกายน 2568).

AOAC International. 2016. Organophosphorus pesticide: General multiresidue method. AOAC method 970.52. AOAC International, Washington, DC, USA.

AOAC International. 2023. Guidelines for standard method performance requirements. AOAC official methods of analysis. AOAC International, Washington, DC, USA.

Bootsikeaw, S., Kongtip, P., Nankongnab, N., Chantanakul, S., Sujirarat, D., Mahaboonpeeti, R., Khangkhun, P., Woskie, S. 2020. Urinary glyphosate biomonitoring of sprayers in vegetable farm in Thailand. Hum. Ecol. Risk Assess. 26: 2425–2438. doi.org/10.1080/10807039.2019.1684358

Codex Alimentarius Commission. 2010. Guidelines on good laboratory practice in pesticide residue analysis (CAC/GL 40-1993). Codex Alimentarius Commission, Rome, Italy.

Davies, M.S., Boniface, M., Gibson, S. 2016. Determination of dichlorvos residue levels in vegetables sold in Lusaka, Zambia. Pan Afr. Med. J. 23: 113. doi.org/10.11604/pamj.2016.23.113.8375

Environmental Protection Agency. 1994. Method 8141A: Organophosphorus compounds by gas chromatography: Capillary column technique, revision 1. US EPA, Washington, DC, USA.

European Commission. 1998. Council directive 98/83/EC of 3 November 1998 on the quality of water intended for human consumption. Off. J. Eur. Communities L330: 32–54.

European Commission. 2024. Analytical quality control and method validation procedures for pesticide residues analysis in food and feed (SANTE/11312/2021 v2). European Commission, Brussels, Belgium.

FAO/WHO. 1994. Dichlorvos: Pesticide residues in food—1993 evaluations. Part II: Toxicology. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, Italy.

García-Vara, M., Postigo, C., Palma, P., López de Alda, M. 2023. Development of QuEChERS-based multiresidue analytical methods to determine pesticides in corn, grapes and alfalfa. Food Chem. 405: 143870. doi.org/10.1016/j.foodchem.2022.134870

Ma, J., Xiao, R., Li, J., Zhao, X., Shi, B., Li, S. 2009. Determination of organophosphorus pesticides in underground water by SPE-GC-MS. J. Chromatogr. Sci. 47: 110–115. doi.org/10.1093/chromsci/47.2.110

National Health and Medical Research Council. 2025. Australian drinking water guidelines 6 (2011), version 4.0. National water quality management strategy. NHMRC, Canberra, Australia.

Pihlström, T., Blomkvist, G., Friman, P., Pagard, U., Österdahl, B. 2007. Analysis of pesticide residues in fruit and vegetables with ethyl acetate extraction using gas and liquid chromatography with tandem mass spectrometric detection. Anal. Bioanal. Chem. 389: 1773–1789. doi.org/10.1007/s00216-007-1614-y

The Japan Food Chemical Research Foundation. 2025. MRLs of agricultural chemicals, feed additives and veterinary drugs in foods. The Japan Food Chemical Research Foundation, Tokyo, Japan.

Turner, J.A. 2018. The pesticide manual. 18th ed. British Crop Production Council, Hampshire, UK.

การพัฒนาและตรวจสอบความใช้ได้ของวิธีวิเคราะห์สารกำจัดวัชพืช 2,4-ดี ในน้ำและดิน

Development and validation method for 2,4-D herbicide in water and soil

จันทิมา ผลกอง*, **อำนาจ กะฐินเทศ**, **นพดล มะโนเย็น**, **สิริพร เหลืองสุชนกุล**

Jantima Phonkong*, Amnaj Katintet, Noppadon Manoyen, Siriporn Luengsuchonkul

กองวิจัยพัฒนาปัจจัยการผลิตทางการเกษตร กรมวิชาการเกษตร กรุงเทพฯ 10900

Agricultural Production Science Research and Development Division, Department of Agriculture, Bangkok 10900, Thailand

*Corresponding author. E-mail address: jantipoi6132@gmail.com

บทคัดย่อ

2,4-ไดคลอโรฟีนอกซีอะซิติก (2,4-ดี) เป็นสารกำจัดวัชพืชที่ใช้กำจัดวัชพืชในข้าว อ้อย และข้าวโพด จากการใช้สารทำให้เกิดการปนเปื้อนในสิ่งแวดล้อม งานวิจัยนี้ จึงได้พัฒนาและตรวจสอบความใช้ได้ของวิธีวิเคราะห์ 2,4-D ในน้ำและดิน สกัดด้วยเทคนิค Solid-Phase Extraction และ Solid-Liquid Extraction ตรวจวัดด้วยเทคนิคลิควิดโครมาโทกราฟี ได้ขีดจำกัดของการตรวจพบ (Limit of detection) ในน้ำและดิน เท่ากับ 1.50 µg/L และ 0.05 mg/kg ตามลำดับ ขีดจำกัดของการวัดเชิงปริมาณ (Limit of quantitation) ในน้ำและในดิน เท่ากับ 2.50 µg/L และ 0.10 mg/kg ตามลำดับ วิธีการตรวจวิเคราะห์นี้มีความแม่น (Accuracy) และความเที่ยง (Precision) สามารถนำไปใช้เป็นวิธีมาตรฐานสำหรับใช้ทดสอบในห้องปฏิบัติการได้

คำสำคัญ: การตรวจสอบความใช้ได้ของวิธีวิเคราะห์, โครมาโทกราฟีของเหลว, ดิน, น้ำ, 2,4-ดี

Abstract

2,4-Dichlorophenoxyacetic acid (2,4-D) is a herbicide commonly used for controlling weeds in rice, sugarcane, and corn cultivation. Its application can lead to environmental contamination. Therefore, this study aimed to develop and validate an analytical method for determining 2,4-D in water and soil samples. Solid-phase extraction and solid–liquid extraction techniques were used for sample preparation, and liquid chromatography was employed for quantification. The limits of detection (LOD) for water and soil were 1.50 µg/L and 0.05 mg/kg, respectively, while the limits of quantitation (LOQ) were 2.50 µg/L and 0.10 mg/kg, respectively. The method demonstrated acceptable accuracy and precision, indicating that it can be used as a standard analytical procedure in laboratory testing.

Keywords: Liquid chromatography, Method validation, Soil, Water, 2,4-D

คำนำ

2,4-D ชื่อทางเคมี (IUPAC name) คือ 2,4-Dichlorophenoxyacetic acid สูตรโมเลกุล $C_{18}H_6Cl_2O_3$ น้ำหนักโมเลกุล 221 กรัมต่อโมล สามารถละลายในน้ำได้ดี 2,4-D เป็นสารกำจัดวัชพืชแบบเลือกทำลาย ใช้ควบคุมวัชพืชใบกว้าง (broadleaf weed) หลังงอก ใช้ทั้งในพื้นที่การเกษตรและนอกพื้นที่การเกษตร รวมทั้งสามารถใช้เป็นสารควบคุมการเจริญเติบโตของพืช (plant growth regulator) (Turner, 2018) ได้ ในปี พ.ศ. 2566 มีการนำเข้ามากกว่า 6,000 ตัน (ปริมาณสารสำคัญ) มูลค่ามากกว่า 500 ล้านบาท (สำนักควบคุมพืชและวัสดุการเกษตร, 2566) เกษตรกรส่วนใหญ่ใช้กำจัดวัชพืชในพืชเศรษฐกิจที่สำคัญ ได้แก่ ข้าว อ้อย และข้าวโพด 2,4-D มีความเป็นพิษอยู่ในระดับปานกลาง (Moderate toxicity, WHO class II) (Turner, 2018) หากได้รับสารผ่านการปนเปื้อนเกินค่ามาตรฐานที่กำหนด รวมถึงการสัมผัสสารโดยตรง จะทำให้เกิดอันตรายรบกวนการทำงานของระบบต่อมไร้ท่อ ดังนั้น การใช้และรับสัมผัสสารอย่างต่อเนื่องและเป็นระยะเวลานาน ทำให้เกิดผลกระทบที่อาจจะมีความรุนแรงต่อสุขภาพมนุษย์และสิ่งแวดล้อม ทั้งนี้ การประเมินความเสี่ยงจากการได้รับสารต้องทราบปริมาณของสารพิษตกค้างที่แน่นอนและใช้วิธีการตรวจวิเคราะห์ที่มีความถูกต้องแม่นยำ

วิธีการตรวจวิเคราะห์สารพิษตกค้าง 2,4-D นั้น สามารถวิเคราะห์ได้หลายวิธี จากงานวิจัยในปี 2000 มีการพัฒนาวิธีวิเคราะห์สาร phenoxy acids ในน้ำ โดยเปรียบเทียบวิธีสกัดระหว่างเทคนิค Solid-Phase Extraction (SPE) กับ Liquid-Liquid Extraction (LLE) ตรวจวิเคราะห์ด้วย High Performance Liquid Chromatograph (HPLC) พบว่าทั้งสองเทคนิคได้ %recovery มากกว่า 80% เทคนิค SPE ใช้สารสกัดและระยะเวลาสกัดน้อยกว่า รวมถึงได้ค่า %recovery สูงกว่าเทคนิค LLE (Thorstensen et al., 2000) ปี 2003 มีงานวิจัยการตรวจวิเคราะห์ 2,4-D และอนุพันธ์ในตัวอย่างดิน โดยวิธี Liquid Chromatographic (LC) ตรวจวัดด้วย Diode Array Detector (DAD) ที่ความยาวคลื่น 230 nm ใช้ methanol: ammonium formate buffer ที่ pH 4.5 (50:50) เป็นเฟสเคลื่อนที่ (mobile phase) สกัดตัวอย่างด้วย dichloromethane ได้ %recovery อยู่ในช่วง 80-111% และค่าความเข้มข้นของสารที่ต่ำที่สุดที่สามารถวัดได้อย่างถูกต้องแม่นยำ (limit of quantification; LOQ) เท่ากับ 0.1 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม (Amarante et al., 2003) นอกจากนี้ ยังมีงานวิจัยที่ตรวจวิเคราะห์ 2,4-D ในดินและน้ำ โดยใช้เทคนิค SPE ตรวจวิเคราะห์ด้วย LC และ GC ใช้ acetonitrile: water: acetic acid (80:25:2.5) เป็นสารสกัดในดิน ส่วนตัวอย่างน้ำใช้ตัวดูดซับชนิด C18 (Sutherland et al., 2003) งานวิจัยส่วนใหญ่ตรวจวิเคราะห์ด้วย HPLC-DAD และเลือกเทคนิคการสกัดที่ใช้สารเคมีปริมาณน้อย ระยะเวลาไม่นาน รวมทั้งช่วยลดของเสียจากห้องปฏิบัติการ

งานวิจัยนี้ มุ่งเน้นการพัฒนาและศึกษาวิธีวิเคราะห์สารพิษตกค้าง 2,4-D ในน้ำและดิน เพื่อให้ได้วิธีที่มีประสิทธิภาพ ลดระยะเวลาและลดการใช้สารเคมี พร้อมทั้งทำการตรวจสอบความใช้ได้ของวิธี เพื่อให้ได้วิธีที่มีความถูกต้องและแม่นยำ น่าเชื่อถือ สามารถนำวิธีที่ผ่านการตรวจสอบความใช้ได้ของวิธีใช้เป็นวิธีมาตรฐานสำหรับตรวจวิเคราะห์ปริมาณสารพิษตกค้าง 2,4-D ในน้ำและดินสำหรับห้องปฏิบัติการต่อไป

อุปกรณ์และวิธีการ

วัสดุ อุปกรณ์ สารเคมี และเครื่องมือ

1. เครื่องแก้ว เช่น beaker, cylinder, Petri dish, volumetric flask เป็นต้น
2. วัสดุวิทยาศาสตร์ เช่น กระดาษกรอง No.1, SPE cartridge tube ชนิด C18, PTFE syringe filter เป็นต้น
3. สารเคมี analytical grade และ HPLC grade เช่น ammonium formate, water, methanol เป็นต้น
4. สารพิษมาตรฐาน 2,4-D (pesticide grade) ความบริสุทธิ์ไม่น้อยกว่า 95%

5. เครื่องมือวิทยาศาสตร์ ได้แก่ เครื่องชั่ง, เครื่อง centrifuge และเครื่อง ultra-high performance liquid chromatograph (UHPLC) ยี่ห้อ Agilent Technology รุ่น 1290 หัวตรวจวัดชนิด diode array detector (DAD)

วิธีการ

1. ทดสอบสภาวะที่เหมาะสมของเครื่องมือในการตรวจวิเคราะห์

โดยใช้ water (pH 2.5) เป็นตัวทำละลาย (solvent) และปรับสภาวะเครื่อง HPLC ฉีดสารละลายมาตรฐานที่ความเข้มข้นต่าง ๆ จากนั้นทดสอบ Linearity of calibration curve โดยทดสอบสารละลายมาตรฐานอย่างน้อย 5 ระดับความเข้มข้น ๆ ละไม่น้อยกว่า 3 ซ้ำ เขียนกราฟระหว่างความเข้มข้นของ working standard (แกน X) กับ area response (แกน Y) ได้ค่า coefficient of determination (R^2) ≥0.98 (Codex Alimentarius Commission/Good Laboratory [CAC/GL] 40-1993, 2010)

2. ทดสอบ Matrix effect

โดยใช้สารสกัด sample blank ของตัวอย่างน้ำและดิน เป็นตัวทำละลายในการเตรียมสารละลายมาตรฐาน (Matrix standard) อย่างน้อย 5 ระดับความเข้มข้น ๆ ละไม่น้อยกว่า 3 ซ้ำ โดยพิสูจน์ Metrix effect (ME) จาก Equation 1, หากค่า ME% > ± 20% แสดงว่า สารมี Matrix effects จะต้องใช้ matrix standard ในการเตรียมcalibration curve เพื่อใช้ในการคำนวณผลวิเคราะห์ (European Commission Directorate – General for Health and Food Safety [SANTE], 2024)

$$ME\% = \left(\frac{a_{Matrix}}{a_{Standard}} \right) \text{-}1 \times 100 \qquad (1)$$

Where; a_{Matrix} represents the slope of the matrix standard, and $a_{Standard}$ represents the slope of the solvent standard.

3. พัฒนาวิธีวิเคราะห์

3.1 วิธีวิเคราะห์ในตัวอย่างน้ำ

สกัดตัวอย่างน้ำ ทดสอบโดยเลือกน้ำเขื่อนเป็นตัวแทนตัวอย่างน้ำ (sample blank) ซึ่งจัดเป็นแหล่งน้ำประเภทแหล่งน้ำผิวดิน (surface water) ทำการสกัดตัวอย่างด้วยเทคนิค SPE เปรียบเทียบปริมาตรตัวอย่างที่ใช้ ได้แก่ 100 250 และ 500 มิลลิลิตร เพื่อลดปริมาตรตัวอย่างที่ใช้ทดสอบ และเปรียบเทียบ SPE cartridge tube ชนิด C18 C8 และ Si-OH ที่ใช้ในการสกัด ทำการสกัดตัวอย่างน้ำ อย่างน้อย 5 ซ้ำ ซึ่งก่อนการโหลดตัวอย่างให้เตรียมสภาวะที่เหมาะสมของตัวดูดซับแต่ละชนิด ตามคำแนะนำของตัวดูดซับแต่ละชนิด โดยเลือกชนิดที่ให้ผลการทดสอบ %recovery และ %RSD (Relative Standard Deviation) ที่ดี

3.2 วิธีวิเคราะห์ในตัวอย่างดิน

สกัดตัวอย่างดิน ด้วยเทคนิค Solid-Liquid Extraction เปรียบเทียบวิธีการสกัดตัวอย่างด้วยเครื่อง ultrasonic และ shaker ทำการสกัดตัวอย่างดิน อย่างน้อย 5 ซ้ำ โดยเลือกชนิดที่ให้ผลการทดสอบ %recovery และ %RSD ที่ดี

4. ตรวจสอบความใช้ได้ของวิธีวิเคราะห์ โดยทดสอบวิธีวิเคราะห์ ตาม parameter ต่าง ๆ ดังนี้

4.1 ทดสอบ LOD โดยทำการทดสอบที่ความเข้มข้นต่ำสุดที่ตรวจวิเคราะห์ได้ จำนวน 10 ซ้ำ เพื่อหาค่า LOD ซึ่งเป็นค่าความเข้มข้นของสารที่ให้ค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนมากกว่าหรือเท่ากับ 3 (ค่า S/N ≥ 3) โดยพิจารณาค่า signal/noise ratio (S/N) ที่ได้ต้องผ่านเกณฑ์การยอมรับ ดัง Table 1

4.2 ทดสอบ LOQ โดยทำการทดสอบที่ความเข้มข้นต่ำสุดที่ตรวจวิเคราะห์ได้ จำนวน 10 ซ้ำ และพิสูจน์ความแม่น (accuracy) และความเที่ยง (precision) ดัง Table 1

4.3 ทดสอบ Linearity of working range เติมสารละลายมาตรฐานที่ทราบความเข้มข้นแน่นอนในตัวอย่าง (spiked sample) ในตัวอย่างน้ำ ทดสอบที่ระดับความเข้มข้น 6 ระดับ ได้แก่ 2.5 5.0 11.0 28.0 55.0 และ 110.0 µg/L ความเข้มข้นละ 3 ซ้ำ และตัวอย่างดิน ทดสอบที่ระดับความเข้มข้น 6 ระดับ ได้แก่ 0.1 0.3 0.6 1.0 2.0 และ 4.0 mg/kg ความเข้มข้นละ 3 ซ้ำ เขียนกราฟระหว่างความเข้มข้นของสารในตัวอย่าง (concentration in sample) (แกน X) กับความเข้มข้นของสารในตัวอย่างที่วัดได้ (measured concentration) (แกน Y) (Eurachem, 2025) ได้ค่า R^2 ผ่านเกณฑ์การยอมรับ ดัง Table 1

4.4 ทดสอบ Accuracy และ Precision ทดสอบโดยการตรวจวิเคราะห์ตัวอย่างที่เติมสารมาตรฐานที่ทราบความเข้มข้นแน่นอน ในตัวอย่างน้ำ ทดสอบ sample blank และ spiked sample ที่ความเข้มข้น 2.5 5.0 28.0 และ 110.0 µg/L ความเข้มข้นละ 10 ซ้ำ และตัวอย่างดิน ทดสอบ sample blank และ spiked sample ที่ความเข้มข้น 0.1 0.3 1.0 และ 4.0 mg/kg ความเข้มข้นละ 10 ซ้ำ ประเมินผลการทดสอบจาก Accuracy จากค่า %recovery และ Precision จากค่า %RSD โดยต้องผ่านเกณฑ์การยอมรับ ดัง Table 1

Table 1 Acceptance criteria for method performances characteristic

Parameters	Acceptance Criteria	Reference
Limit of detection	signal/noise ratio (S/N) ≥3	SANTE (2024)
Limit of quantitation	Confirm with Accuracy and Precision	SANTE (2024)
Working Range	Linearity; Coefficient of Determination (R^2) ≥0.98	CAC/GL 40-1993 (2010)
Accuracy	% recovery = 40-120% if analyte unit 1 ppb	AOAC (2023)
	% recovery = 60-115% if analyte unit 10 ppb	
	% recovery = 80-110% if analyte unit > 0.10–10 ppm	
Precision	%RSD ≤20%	SANTE (2024)

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

1. สภาวะที่เหมาะสมของเครื่องมือตรวจวิเคราะห์

สภาวะการทำงานของเครื่อง UHPLC ที่เหมาะสมในการตรวจวิเคราะห์ 2,4-D โดยใช้ C18 column (250 mm length x 4.6 mm i.d., particle size 5 µm) เป็นเฟสคงที่ (stationary phase) และสารละลายบัฟเฟอร์ 5mM ammonium formate (pH 4.0):Methanol (50:50) เป็นเฟสเคลื่อนที่ (mobile phase) ตรวจวัดด้วย DAD ที่ 230 nm สารละลายมาตรฐาน 2,4-D อยู่ในสภาวะที่เป็นกรด จะถูกแยกโดย C18 column เป็น stationary phase และสารละลายบัฟเฟอร์กรดเป็น mobile phase ใช้อัตราส่วนในการไหลแบบคงที่ (isocratic system) ทำให้ 2,4-D คงอยู่ในคอลัมน์และถูกพาให้

เคลื่อนที่ออกจากคอลัมน์ด้วยสารละลายบัฟเฟอร์กรด ตามหลักการสารที่มีสมบัติเหมือนกันจะละลายซึ่งกันและกันได้ดี (like dissolves like) ซึ่งเวลาที่สารเดินทางผ่านคอลัมน์ตั้งแต่เริ่มฉีดสารจนถูกตรวจจับ (retention time; t_R) น้อยกว่า 10 นาที และลักษณะของพีค 2,4-D ดัง Fig. 1 สอดคล้องกับงานวิจัยของ Amarante et al. (2003) ที่ใช้ C18 column เป็นเฟสคงที่ และเลือกใช้ methanol-ammonium formate buffer ที่ pH 4.5 (50:50) เป็นเฟสเคลื่อนที่ ตรวจวัดที่ 230 nm ได้ค่า retention time ที่ใกล้เคียงกัน Linearity of calibration curve ของสารละลายมาตรฐาน 2,4-D ที่ระดับความเข้มข้น 0.03 0.06 0.14 0.28 0.55 1.11 และ 2.22 µg/ml ได้ค่า R^2 เท่ากับ 0.9999 ดัง Fig. 1

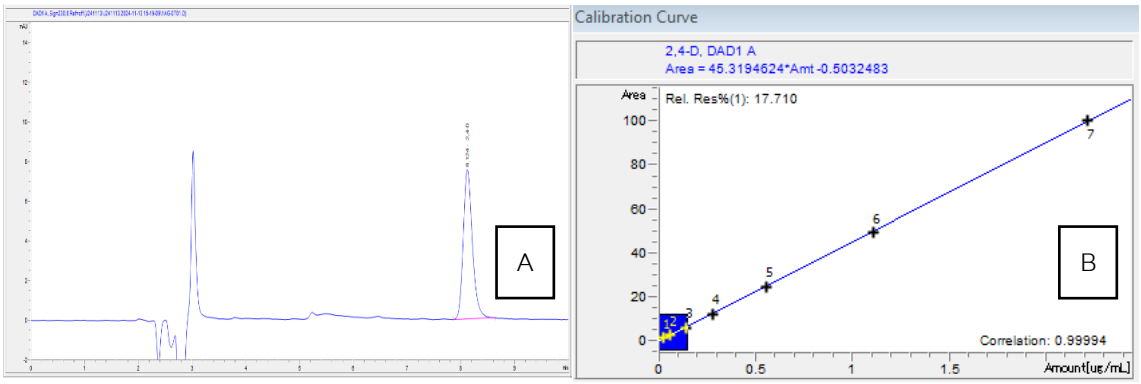


Fig. 1 Chromatogram (A) and calibration curve (B) of the 2,4-D standard solution analyzed by HPLC

2. ผลการทดสอบ Matrix effect

โดยใช้สารสกัด sample blank ของตัวอย่างน้ำและดิน เป็นตัวทำละลายในการเตรียมสารละลายมาตรฐาน ที่ความเข้มข้น 0.03 0.06 0.14 0.28 0.55 1.11 และ 2.22 µg/ml พบว่าค่า ME% ไม่เกิน ±20% ดัง Fig. 2 แสดงว่า matrix ไม่มีผลต่อความเข้มข้นของสารที่ต้องการวิเคราะห์ ดังนั้น สามารถใช้ solvent solution ในการเตรียมสารละลายมาตรฐานได้

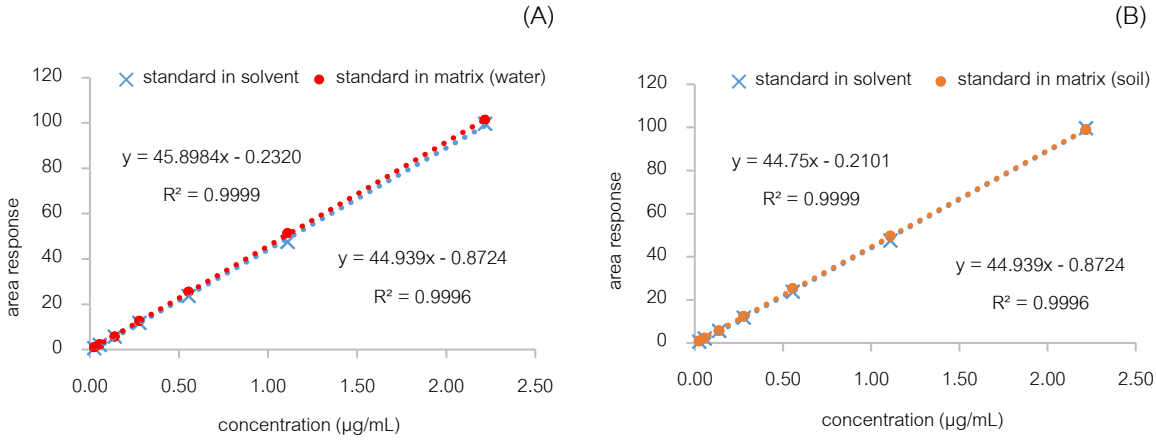


Fig. 2 Matrix effect of 2,4-D analysis method in water (A) and soil (B)

จากผลการทดสอบ Matrix effect พบว่า Matrix ของตัวอย่างน้ำและดิน ไม่มีผลต่อการทดสอบ เนื่องจากในขั้นตอนการสกัด 2,4-D ในตัวอย่างทุกชนิด สารที่ใช้ในการสกัดมีค่า pH เป็นกรด ทำให้ 2,4-D ไม่แตกตัวยังคงอยู่ในรูปกรด

อิสระเหมือนกับ 2,4-D ในสารสะลายมาตรฐานที่ใช้ water (pH 2.5) เป็นตัวทำละลาย ทำให้ความชันของกราฟมาตรฐานมีค่าใกล้เคียงกัน จึงไม่ส่งผลต่อความเข้มข้นของ 2,4-D ที่ตรวจวัดได้

3. ผลการพัฒนาวิธีวิเคราะห์

3.1 การสกัดตัวอย่างน้ำ ได้วิธีการสกัดตัวอย่างน้ำที่มีความเหมาะสม โดยตวงตัวอย่างน้ำ ปริมาตร 100 มิลลิลิตร ปรับ pH 1.0 ด้วย 6M hydrochloric acid นำไปกำจัดสิ่งปนเปื้อน (clean up) ด้วย SPE cartridge tube ชนิด C18 (ผ่านการเตรียมโดยชะด้วย acetonitrile, methanol และ acidified water (pH 1.0) ปริมาตร 5, 5 และ 10 มิลลิลิตร ตามลำดับ) โหลดตัวอย่างด้วยอัตราการไหล 3–4 mL/min จากนั้นชะด้วยสารละลาย 5% w/v ammonium formate ใน methanol ใช้อัตราการไหล 1 mL/min ตรวจวัดด้วยเครื่อง UHPLC-DAD (Thorstensen et al., 2000) ได้ค่า %recovery และ %RSD เท่ากับ 105.2% และ 1.0% ตามลำดับ แสดงว่าผลการทดสอบตัวอย่างน้ำ ปริมาตร 100 มิลลิลิตร ที่ได้นี้ มี accuracy และ precision ส่วนการเลือกใช้ C18 เป็นตัวดูดซับ (sorbent) เนื่องจากได้ผล %recovery และ %RSD ที่ดีกว่าตัวดูดซับชนิดอื่น และอยู่ในเกณฑ์การยอมรับ ผลการทดสอบ ดัง Table 2 โดยก่อนโหลดตัวอย่าง จะปรับสภาวะตัวดูดซับให้เหมาะสมด้วย distilled water pH 1 และตัวอย่างน้ำปรับเป็น pH 1 เพื่อให้ 2,4-D ยังคงอยู่ในรูปกรดอิสระ (non-ionized form) เนื่องจาก 2,4-D มีค่า pKa 2.73 (Turner, 2018) เมื่อ 2,4-D ในตัวอย่างจับกับตัวดูดซับที่เป็น C18 จะถูกชะด้วยสารละลาย 5% w/v ammonium formate ใน methanol (Hammami et al., 2017)

Table 2 Comparison of %recovery and %RSD in water samples with different sorbents.

Types of sorbents	%recovery	%RSD
C8	110.5	1.8
C18	105.2	1.0
Si-OH	ND	-

Note: $\bar{X}$: Mean values (n = 5)

ND: Not Detected

3.2 การสกัดตัวอย่างดิน ได้วิธีการสกัดตัวอย่างดินที่มีความเหมาะสม โดยชั่งตัวอย่างดิน ปริมาณ 10 กรัม ใส่ใน centrifuge tube เติมสารละลายผสมระหว่าง methanol:water:acetic acid (80:20:2.5) ปริมาตร 10 มิลลิลิตร แยกสารโดยใช้วิธี sonication ด้วยเครื่อง ultrasonic cleaner นาน 30 นาที และนำไปปั่นเหวี่ยงตกตะกอนด้วยเครื่อง centrifuge ตรวจวัดด้วยเครื่อง UHPLC-DAD ได้ค่า %recovery และ %RSD เท่ากับ 101.8% และ 4.8% ตามลำดับ ซึ่งการสกัดด้วยเครื่อง ultrasonic cleaner ให้ผล %recovery และ %RSD ที่ดีกว่าการสกัดโดยใช้เครื่อง shaker ซึ่งให้ผล %recovery และ %RSD เท่ากับ 86.5% และ 19.6% ตามลำดับ การสกัดตัวอย่างดินเลือกใช้เทคนิค Solid-Liquid Extraction โดยใช้สารละลายผสมระหว่าง methanol:water:acetic acid (80:20:2.5) ซึ่งมีสภาวะเป็นกรด (Sutherland et al., 2003) เพื่อให้ 2,4-D ยังคงอยู่ในรูปกรดอิสระ ก่อนการตรวจวัดด้วย UHPLC-DAD

4. ผลตรวจสอบความใช้ได้ของวิธีวิเคราะห์ ตามพารามิเตอร์ต่าง ๆ ดังนี้

4.1 ค่า LOD จากการตรวจวิเคราะห์ sample blank ไม่พบ 2,4-D ในตัวอย่าง ดังนั้น จึงประเมินค่า LOD จากการทดสอบ spiked sample ที่ความเข้มข้นระดับต่ำ จำนวน 10 ซ้ำ ประมาณค่า LOD ในตัวอย่างน้ำและดิน จากค่า

เบี่ยงเบนมาตรฐาน (standard deviation; SD) ตัวอย่างน้ำ พิสูจน์ค่า LOD โดยทดสอบที่ความเข้มข้น 1.5 µg/L จำนวน 10 ซ้ำ และตัวอย่างดิน พิสูจน์ค่า LOD โดยทดสอบที่ความเข้มข้น 0.05 mg/kg จำนวน 10 ซ้ำ ได้ค่า S/N อยู่ระหว่าง 4.2-5.8 ผ่านเกณฑ์การยอมรับ ดังนั้นจึงได้ค่า LOD สำหรับการตรวจวิเคราะห์สารในตัวอย่างน้ำและดิน เท่ากับ 1.50 µg/L และ 0.05 mg/kg ตามลำดับ

4.2 ค่า LOQ จากการตรวจวิเคราะห์ sample blank ไม่พบสาร 2,4-D ในตัวอย่างทุกชนิด ดังนั้น จึงประเมินค่า LOQ จากการทดสอบ spiked sample ที่ความเข้มข้นระดับต่ำ จำนวน 10 ซ้ำ ประมาณค่า LOQ ในตัวอย่างน้ำและดิน จากค่า SD โดยตัวอย่างน้ำ ทดสอบที่ความเข้มข้น 2.5 µg/L ทดสอบ 10 ซ้ำ และตัวอย่างดิน ทดสอบที่ความเข้มข้น 0.1 mg/kg ทดสอบ 10 ซ้ำ ได้ผลการทดสอบ ค่า accuracy มีค่า %recovery อยู่ในระหว่าง 94.1–97.7% และ precision มีค่า %RSD อยู่ในระหว่าง 7–11% ผ่านเกณฑ์การยอมรับ ดังนั้นจึงได้ค่า LOQ สำหรับการตรวจวิเคราะห์ในตัวอย่างน้ำและดิน เท่ากับ 2.5 µg/L และ 0.1 mg/kg ตามลำดับ

4.3 Linearity of working range ตัวอย่างน้ำ ทดสอบที่ระดับความเข้มข้น 6 ระดับ ได้แก่ 2.5 5.0 11.0 28.0 55.0 และ 110.0 µg/L ความเข้มข้นละ 3 ซ้ำ ประเมินค่า R^2 ได้เท่ากับ 0.9994 ตัวอย่างดิน ทดสอบที่ระดับความเข้มข้น 6 ระดับ ได้แก่ 0.1 0.3 0.6 1.0 2.0 และ 4.0 mg/kg ความเข้มข้นละ 3 ซ้ำ ประเมินค่า R^2 ได้เท่ากับ 0.9998 ผ่านเกณฑ์การยอมรับ ดัง Fig. 3

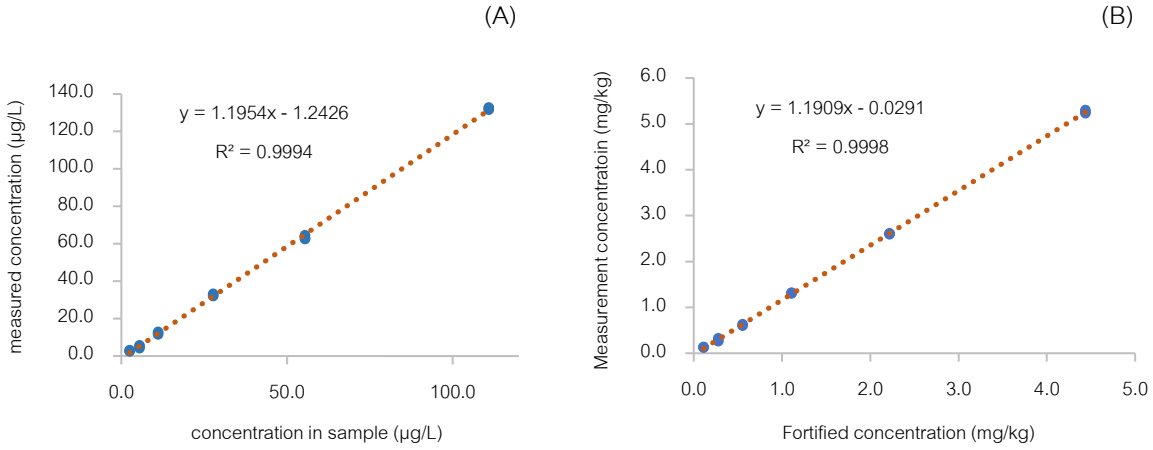


Fig. 3 Linearity of the working range of 2,4-D analysis method in water (A) and soil (B)

จากผลการทดสอบ Linearity of the working range ที่ได้ในตัวอย่างน้ำและดิน นำช่วงความเข้มข้นที่ตรวจวัดได้เทียบกับค่ามาตรฐานที่กำหนด โดยในประเทศไทยไม่มีการกำหนดค่ามาตรฐานที่ยอมให้มีได้ในน้ำดื่มหรือน้ำผิวดิน แต่ U.S. EPA กำหนดค่ามาตรฐานในน้ำดื่มไว้ไม่เกิน 70 µg/L (U.S. EPA, 2009) ส่วน WHO และประเทศออสเตรเลียกำหนดไว้ไม่เกิน 30 µg/L (World Health Organization [WHO], 2022; National Health and Medicinal Research Council [NHMRC], 2025) อยู่ในช่วงการตรวจวัดในตัวอย่างน้ำ ซึ่งเท่ากับ 2.50–110.00 µg/L ส่วนในตัวอย่างดิน ในประเทศไทยมีการกำหนดค่ามาตรฐานคุณภาพดินสำหรับ 2,4-D ไม่เกิน 626.5 mg/kg (ประกาศคณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ, 2564) ค่าต่ำสุดที่ตรวจวัดได้สามารถวัดได้ต่ำกว่าค่ามาตรฐานที่กำหนด

4.4 Accuracy และ Precision จากการตรวจวิเคราะห์ sample blank และ spiked sample ในตัวอย่างน้ำ ทดสอบที่ความเข้มข้น 2.5 5.0 28.0 และ 110.0 µg/L ในตัวอย่างดินทดสอบที่ความเข้มข้น 0.1 0.3 1.0 และ 4.0

mg/kg ความเข้มข้นละ 10 ซ้ำ ได้ผลทดสอบ accuracy มี %recovery อยู่ในระหว่าง 82.4–97.7% และ precision มีค่า %RSD อยู่ในระหว่าง 4–13% ผ่านเกณฑ์ยอมรับ ดัง Table 3

Table 3 Accuracy and precision of 2,4-D determination in water and soil samples.

Type of sample	concentration	%recovery	%RSD
Water	2.5	94.1	11
	5.0	85.9	13
	28.0	86.2	7
	110.0	82.4	4
Soil	0.1	97.7	7
	0.3	90.7	5
	1.0	89.5	5
	4.0	88.8	10

Note: $\bar{X}$: Mean values (n=10)

Unit of concentration of 2,4-D in samples: water (µg/L) and sediment (mg/kg)

เมื่อเปรียบเทียบผลการตรวจวิเคราะห์ระหว่างวิธีการทดสอบเดิมที่ห้องปฏิบัติการใช้ ซึ่งทำการสกัดตัวอย่างน้ำปริมาตร 1000 มิลลิลิตร ด้วยเทคนิค Liquid-Liquid Extraction ใช้ methanol:ethyl ether (2:8) ปริมาตร 100 มิลลิลิตร เป็นสารสกัด และสกัดซ้ำอีก 2 ครั้งๆ ละ 50 มิลลิลิตร นำสารละลายที่สกัดได้ทั้งหมดไปลดปริมาตร และทำการสกัดอีกครั้งด้วยเทคนิค Liquid-Liquid Extraction ใช้ dichloromethane เป็นสารสกัด ทำการสกัด 3 ครั้งๆ ละ 25 มิลลิลิตร นำสารละลายที่สกัดได้ทั้งหมดไปลดปริมาตร นำไปลดปริมาตร จากนั้นทำ methylation ก่อนตรวจวัดด้วยเครื่อง Gas Chromatograph (GC) และสกัดตัวอย่างดิน 20 กรัม ด้วยเทคนิค Solid-Liquid Extraction ใช้ methanol:water (8:2) ปริมาตร 100 มิลลิลิตร เป็นสารสกัด สกัดโดยใช้เครื่อง shaker นาน 30 นาที นำไปลดปริมาตร และทำการสกัดอีกครั้งด้วยเทคนิค Liquid-Liquid Extraction ใช้ dichloromethane เป็นสารสกัด ทำการสกัด 3 ครั้งๆ ละ 25 มิลลิลิตร นำสารละลายที่สกัดได้ทั้งหมดไปลดปริมาตร จากนั้นทำ methylation ก่อนการตรวจวัดด้วยเครื่อง GC ซึ่งพบว่าวิธีใหม่ที่ได้นี้ใช้สารเคมีน้อยลง ลดขั้นตอนการสกัด ทำให้ระยะเวลาในการทดสอบน้อยลง รวมทั้งลดปริมาณของเสียที่เกิดจากกระบวนการทดสอบ และยังให้ผลการทดสอบที่น่าเชื่อถือ มีความถูกต้องและแม่นยำ

สรุป

จากการพัฒนาวิธีวิเคราะห์สารกำจัดวัชพืช 2,4-D ได้วิธีการสกัดตัวอย่างน้ำและดิน ด้วยเทคนิค SPE และ Solid-Liquid Extraction ตามลำดับ และตรวจวิเคราะห์ด้วยเทคนิค Liquid Chromatography ผลการทดสอบได้ working range ในตัวอย่างน้ำ 2.5–110.0 µg/L และในตัวอย่างดิน 0.1–4.0 mg/kg ค่า LOD ในตัวอย่างน้ำ 1.50 µg/L และดิน 0.05 mg/kg ค่า LOQ ในตัวอย่างน้ำ 2.5 µg/L และดิน 0.1 mg/kg วิธีการตรวจวิเคราะห์นี้มี accuracy และ precision จากผลการตรวจสอบความใช้ได้ของวิธี พบว่าวิธีนี้มีความเหมาะสมสำหรับใช้ในการตรวจวิเคราะห์สารกำจัดวัชพืช 2,4-D ในน้ำและดิน สามารถนำไปใช้เป็นวิธีมาตรฐานของห้องปฏิบัติการได้

เอกสารอ้างอิง

ประกาศคณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ. 2564. เรื่อง กำหนดมาตรฐานคุณภาพดิน. https://www.pcd.go.th/laws/25162/, 22 พฤศจิกายน 2568.

สำนักควบคุมพืชและวัสดุการเกษตร. 2566. ข้อมูล 10 อันดับ การนำเข้าวัตถุอันตรายทางการเกษตร ปี พ.ศ. 2566. https://www.doa.go.th/ard/wp-content/uploads/2024/04/3.สรุปการนำเข้าวัตถุอันตรายทางการเกษตร-2566-10-อันดับ.pdf, 22 พฤศจิกายน 2568.

Amarante, D.O.P., Brito, N.M., Santos, T.C.R.D., Nunes, G.S., Ribeiro, M.L. 2003. Determination of 2,4-dichlorophenoxyacetic acid and its major transformation product in soil samples by liquid chromatographic analysis. Talanta 60: 115–121.

Anastassiades, M., Lehotay, S.J., Staibaher, D., Schenck, F.J. 2003. Fast and Easy Multiresidues employing Acetonitrile Extraction/Partitioning and Dispersive Solid-Phase Extraction for Determination of Pesticide Residues in Produce. J. AOAC Int. 86: 412–431.

Association of Official Analysis Chemists. 2023. Guidelines for Standard Method Performance Requirements. AOAC Official Methods of Analysis. https://www.aoac.org/wp-content/uploads/2019/08/app_f.pdf, 17 April 2025.

Codex Alimentarius Commission. 2010. Guidelines on good laboratory practice in pesticide residue analysis (CAC/GL 40-1993). https://www.fao.org/input/download/standards/378/cxg_040e.pdf, 20 November 2025.

Eurachem. 2025. The Fitness for Purpose of Analytical Methods: A Laboratory Guide to Method Validation and Related Topics, 3rd ed. The European Association for Chemical and Analytical Measurement. https://www.eurachem.org/images/stories/Guides/pdf/MV_guide_3rd_ed_V1_EN.pdf, 20 November 2025.

European Commission Directorate - General for Health and Food Safety. 2024. Guidance SANTE/11312/2021 v2 – Analytical quality control and method validation procedures for pesticide residues analysis in food and feed SANTE 11312/2021 V2. https://food.ec.europa.eu/system/files/2023-11/pesticides_mrl_guidelines_wrkdoc_2021-11312.pdf, 20 November 2025.

Hammami, B., Bahri, M., Hassine, S.B., Driss, M.R. 2017. Development of Liquid Chromatography Separation and a Solid-Phase Extraction method for Phenoxy Alkanoic Acid Herbicides in Water. Mod. Chem. Appl. 5: 1–8.

National Health and Medical Research Council. 2025. National Water Quality Management Strategy Australian Drinking Water Guidelines 6 (2011) Version 4.0. Canberra, Australia.

Sutherland, D.J., Stearman, G.K., Wells, M.J.M. 2003. Development of an Analytical Scheme for Simazine and 2,4-D in soil and Water Runoff from Ornamental Plant Nursery Plots. J. Agric. Food Chem. 51: 14–20.

Thorstensen, W.C., Lode, O., Christiansen, A.L. 2000. Development of a Solid-Phase Extraction Method for Phenoxy Acids and Bentazone in water and Comparison to Liquid-Liquid Extraction Method. J. Agric. Food Chem. 48: 5829-5833.

Turner, J.A. 2018. A World Compendium; The Pesticide Manual, 18th ed. British Crop Production Council. UK.

United States Environmental Protection Agency. 2005. 2,4-D RED Facts. https://archive.epa.gov/pesticides/reregistration/web/html/24d_fs.html, 22 November 2025.

United States Environmental Protection Agency. 2024. National Primary Drinking Water Regulations. https://www.epa.gov/ground-water-and-drinking-water/national-primary-drinking-water-regulations, 20 November 2025.

World Health Organization. 2022. Guidelines for Drinking-water Quality, 4th ed. https://iris.who.int/server/api/core/bitstreams/69c17edd-ee26-425b-9d34-33799377e886/content, 22 November 2025.

การส่งเสริมการเจริญเติบโตของ *Spirodela polyrhiza* ด้วยแอคติโนแบคทีเรียที่แยกจากแหนเป็ด

Growth promotion of *Spirodela polyrhiza* using actinobacteria isolated from duckweed

พีรญา บุญชู[a], **กรรณิการ์ ดวงมาลย์**[a,b,*]

Peeraya Boonchu[a], Kannika Duangmal[a,b,*]

[a]ภาควิชาจุลชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

[b]ศูนย์วิจัยทรัพยากรแหนเป็ดฮอโลไบออนต์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

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

[b]Duckweed Holobiont Resource and Research Center (DHbRC), Kasetsart University, Bangkok 10900, Thailand

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

บทคัดย่อ

การศึกษาความสามารถของแอคติโนแบคทีเรียร่วมอาศัยกับแหนเป็ด จำนวน 97 ไอโซเลตในการส่งเสริมการเจริญเติบโตของแหนเป็ด โดยเพาะเลี้ยงร่วมกับ *Spirodela polyrhiza* DKU2002 ปลอดเชื้อในอาหาร modified Hoagland พบว่า 90 ไอโซเลตส่งผลให้แหนเป็ดมีจำนวนฟรอนด์เพิ่มขึ้น ขณะที่ 7 ไอโซเลตส่งผลให้แหนเป็ดมีจำนวนฟรอนด์ลดลง เมื่อเปรียบเทียบกับชุดควบคุม โดยไอโซเลต DW16H6, DW18-4, DW29H4 และ DW29H34 ส่งเสริมให้แหนเป็ดมีจำนวนฟรอนด์เพิ่มขึ้นสูงสุดอยู่ในช่วง 1.37 ถึง 1.46 เท่า ซึ่งไอโซเลตเหล่านี้สามารถสร้างสารไซเดอโรฟอร์ สารประกอบอินโดล และมีความสามารถละลายฟอสเฟตได้ จากการเพาะเลี้ยงแหนเป็ดร่วมกับแอคติโนแบคทีเรียทั้งแบบเชื้อเดี่ยวและแบบสองเชื้อ พบว่าการเพาะเลี้ยงแหนเป็ดร่วมกับเชื้อเดี่ยว สามารถส่งเสริมให้แหนเป็ดมีจำนวนฟรอนด์ น้ำหนักแห้ง และค่าผลต่อการเจริญเติบโตของพืช (EPG) เพิ่มมากกว่าการเพาะเลี้ยงแหนเป็ดร่วมกับสองเชื้อ

คำสำคัญ: การส่งเสริมการเจริญเติบโตของพืช, แหนเป็ด, แอคติโนแบคทีเรีย, *Spirodela polyrhiza*

Abstract

A total of 97 duckweed-associated actinobacterial strains were evaluated for their effects on duckweed growth by co-cultivation with axenic *Spirodela polyrhiza* DKU2002 in modified Hoagland medium. The results showed that 90 isolates increased the duckweed frond number, whereas seven isolates decreased the frond number compared with the control. Among these, isolates DW16H6, DW18-4, DW29H4, and DW29H34 exhibited the highest growth-promoting potential, increasing frond numbers by 1.37–1.46-fold. These isolates were capable of producing siderophores and indole compounds and exhibited phosphate-solubilizing activity. Co-cultivation with duckweed using single and co-inoculation revealed that single inoculation resulted in greater increases in frond number, dry weight, and effect on plant growth (EPG) values than co-inoculation.

Keywords: Actinobacteria, Duckweed, Plant growth promoting, *Spirodela polyrhiza*

คำนำ

แอคติโนแบคทีเรียเป็นแบคทีเรียแกรมบวก พบได้ทั้งในระบบนิเวศทางบกและทางน้ำ ในปัจจุบันมีรายงานการใช้แอคติโนแบคทีเรียในการส่งเสริมการเจริญเติบโตของพืชเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากแอคติโนแบคทีเรียมีคุณสมบัติในการส่งเสริมการเจริญเติบโตของพืช เช่น ความสามารถในการผลิตฮอร์โมนพืชจำพวกกรดอินโดล-3-แอซีติก อีกทั้งยังมีความสามารถในการสร้างสารไซเดอโรฟอร์ ความสามารถในการละลายฟอสเฟตและโพแทสเซียม และยังมีความสามารถในการสร้างสารเมแทบอไลต์ที่สำคัญ เช่น สารปฏิชีวนะ เอนไซม์ เป็นต้น

แหนเป็ด เป็นพืชลอยน้ำขนาดเล็ก ที่เจริญเติบโตได้ดีและรวดเร็วในน้ำนิ่ง เช่น หนอง บึง โดย *Spirodela polyrhiza* (แหนเป็ดใหญ่) เป็นแหนเป็ดชนิดที่มีขนาดฟรอนด์ใหญ่ที่สุดเมื่อเทียบกับแหนเป็ดสปีชีส์อื่น ๆ การที่แหนเป็ดมีการเจริญเติบโตที่รวดเร็ว มีชีวมวลมาก และมีปริมาณโปรตีนและแป้งสูง จึงมีการนำมาใช้ประโยชน์เป็นอาหารสัตว์หรือผสมในอาหารสัตว์ รวมทั้งใช้เพื่อผลิตเชื้อเพลิงชีวภาพ (biofuel) นอกจากนี้แหนเป็ดยังมีความสามารถในการดูดซับ โดยสามารถดูดซับไนโตรเจน ฟอสฟอรัส โลหะหนัก และสารกำจัดศัตรูพืชได้ จึงมีการนำแหนเป็ดมาใช้ในการบำบัดน้ำเสีย (Cui and Cheng, 2015; Baek et al., 2021)

แบคทีเรียที่อยู่ร่วมอาศัยกับแหนเป็ดมีอิทธิพลต่อการเจริญเติบโตของแหนเป็ด โดยจากการศึกษาผลของแบคทีเรียในการส่งเสริมการเจริญเติบโตของแหนเป็ด พบว่าสามารถส่งเสริมให้แหนเป็ดมีชีวมวลเพิ่มขึ้น อีกทั้งยังช่วยให้สามารถผลิตชีวมวลได้ภายใต้สภาวะที่ไม่เหมาะสมกับการเจริญ และเพิ่มประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสีย (Toyama et al., 2018; Boonmak et al., 2023; Saimee et al., 20252018) อย่างไรก็ตามยังไม่มีรายงานการศึกษาผลของแอคติโนแบคทีเรียที่แยกมาจากแหนเป็ดต่อการเจริญเติบโตของแหนเป็ด *S. polyrhiza* ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาความสามารถของแอคติโนแบคทีเรียที่แยกได้จากแหนเป็ดในการส่งเสริมการเจริญเติบโตของแหนเป็ด *S. polyrhiza* DKU2002 ทั้งการใช้แบบเชื้อเดี่ยวและแบบสองเชื้อ เพื่อเป็นแนวทางในการนำแอคติโนแบคทีเรียไปประยุกต์ใช้ในการส่งเสริมการเจริญเติบโตของแหนเป็ดในอนาคต

อุปกรณ์และวิธีการ

แอคติโนแบคทีเรียและแหนเป็ด S. polyrhiza ที่ใช้ในการศึกษา

แอคติโนแบคทีเรียที่ใช้ในการศึกษานี้ มีจำนวน 97 ไอโซเลต ซึ่งแยกมาจากตัวอย่างแหนเป็ด *S. polyrhiza* จากงานวิจัยก่อนหน้า และเก็บรักษาไว้ในห้องปฏิบัติการ โดยไอโซเลตทั้งหมดเก็บรักษาในกลีเซอรอล 20 เปอร์เซ็นต์ ที่อุณหภูมิ -20 องศาเซลเซียส นำมาเพาะเลี้ยงให้เจริญบนอาหารแข็ง glucose yeast extract (GYE) เพื่อใช้ศึกษาในขั้นตอนต่อไป ส่วนแหนเป็ด *S. polyrhiza* เป็นแหนเป็ดปลอดเชื้อสายพันธุ์ DKU2002

การศึกษาความสามารถของแอคติโนแบคทีเรียในการส่งเสริมการเจริญเติบโตของแหนเป็ด

1. การเตรียมแหนเป็ดปลอดเชื้อ

นำแหนเป็ด *S. polyrhiza* DKU2002 ปลอดเชื้อ เลือกฟรอนด์มีลักษณะสมบูรณ์ มาเลี้ยงในอาหารเหลว modified Hoagland พีเอช 7.0 (Ishizawa et al., 2017) ภายใต้สภาวะการให้แสงสลับมืด 16:8 ชั่วโมง ความเข้มแสง 40–45 ไมโครโมลต่อตารางเมตรต่อวินาที (2,960–3,333 ลักซ์) ที่อุณหภูมิ 29±1 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 7 วัน ก่อนนำไปทดสอบในขั้นต่อไป

2. การเตรียมกล้าเชื้อแอคติโนแบคทีเรีย

เลี้ยงแอคติโนแบคทีเรียบนอาหารแข็ง GYE เป็นเวลา 7 วัน จากนั้นใช้ลูปเขี่ยเชื้อขูดเซลล์และสปอร์ ใส่ลงอาหารเหลว GYE ปริมาตร 15 มิลลิลิตร ที่บรรจุในหลอดแก้ว (2.5 × 20 เซนติเมตร) และมีลูกแก้วขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.5 เซนติเมตร นำไปบ่มเขย่า 180 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิ 28 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 48 ชั่วโมง จากนั้นนำไปปั่นเหวี่ยงและล้างเซลล์ด้วยอาหาร modified Hoagland ปริมาตร 15 มิลลิลิตร 2 ครั้ง ก่อนนำมาเตรียมเป็นเซลล์แขวนลอยด้วยอาหาร modified Hoagland โดยมีความขุ่นของเซลล์เท่ากับ McFarland Standard No.3 ซึ่งมีจำนวนเซลล์ประมาณ 9×10^8 เซลล์ต่อมิลลิลิตร

3. การเพาะเลี้ยงแหนเป็ด S. polyrhiza DKU2002 ร่วมกับแอคติโนแบคทีเรียที่แยกได้จากแหนเป็ดเพื่อการคัดเลือกในเบื้องต้น

ปิเปตต์กล้าเชื้อแอคติโนแบคทีเรียที่เตรียมไว้ข้างต้น ปริมาตร 20 มิลลิลิตร ใส่ลงในขวดแก้วปลอดเชื้อ จากนั้นย้ายแหนเป็ดปลอดเชื้อ ใส่ลงในเซลล์แขวนลอย แช่ไว้เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ก่อนย้ายมาใส่ลงในจานหลุมปลอดเชื้อ (6-well plate) ที่มีอาหารเหลว modified Hoagland ปริมาตร 10 มิลลิลิตร จำนวนหลุมละ 4 ฟรอนด์ ทั้งหมด 3 ซ้ำ บ่มที่อุณหภูมิ 29±1 องศาเซลเซียส ภายใต้สภาวะการให้แสงสลับมืด 16:8 ชั่วโมง ความเข้มแสง 40–45 ไมโครโมลต่อตารางเมตรต่อวินาที เป็นเวลา 7 วัน นับจำนวนฟรอนด์ในวันที่ 7 เทียบกับชุดควบคุม (แหนเป็ดที่ไม่ได้เพาะเลี้ยงร่วมกับแอคติโนแบคทีเรีย)

การศึกษาความสามารถของแอคติโนแบคทีเรียที่คัดเลือกแล้วต่อการเจริญเติบโตของแหนเป็ด เมื่อเพาะเลี้ยงด้วยเชื้อเดี่ยวและสองเชื้อร่วมกัน

เลือกแอคติโนแบคทีเรียไอโซเลตที่ส่งเสริมการเพิ่มจำนวนฟรอนด์แหนเป็ดได้ดีจากผลการศึกษาในขั้นต้น มาเลี้ยงร่วมกับแหนเป็ด ซึ่งวิธีแบบใช้เชื้อเดี่ยวทำโดยเตรียมแหนเป็ดปลอดเชื้อ และกล้าเชื้อแอคติโนแบคทีเรียตามวิธีที่กล่าวไว้ก่อนหน้า จากนั้นแช่แหนเป็ดในเซลล์แขวนลอยแอคติโนแบคทีเรียเป็นเวลา 24 ชั่วโมง ก่อนย้ายใส่ลงในฟลาสก์ขนาด 250 มิลลิลิตร ที่บรรจุอาหาร modified Hoagland ปริมาตร 125 มิลลิลิตร จำนวนฟลาสก์ละ 8 ฟรอนด์ ทั้งหมด 3 ซ้ำ นำไปบ่มในตู้จำลองสภาวะแวดล้อม (BiOTRON, NK system) ภายใต้สภาวะการให้แสงสลับมืด 16:8 ชั่วโมง ความเข้มแสง 30 เปอร์เซ็นต์ ที่อุณหภูมิ 28 องศาเซลเซียส ตรวจผลโดยนับจำนวนฟรอนด์และหาน้ำหนักแห้งของแหนเป็ด หลังจากการเพาะเลี้ยงเป็นเวลา 7 วัน

สำหรับการศึกษาความสามารถของแอคติโนแบคทีเรียในการส่งเสริมการเจริญเติบโตของแหนเป็ดโดยใช้ 2 ไอโซเลตร่วมกัน ทำโดยนำกล้าเชื้อแอคติโนแบคทีเรียไอโซเลตที่ทดสอบแล้วด้วยวิธี dual culture ว่าไม่มีผลปฏิปักษ์ต่อกันมาผสมกันในอัตราส่วน 1:1 แล้วเพาะเลี้ยงร่วมกับแหนเป็ดโดยใช้วิธีเดียวกันกับการเพาะเลี้ยงแบบใช้เชื้อเดี่ยว ตรวจผลโดยนับจำนวนฟรอนด์และหาน้ำหนักแห้ง หลังจากการเพาะเลี้ยงเป็นเวลา 7 วัน

การประเมินผลของแอคติโนแบคทีเรียต่อการเจริญเติบโตของแหนเป็ด (effects on plant growth; EPG) (Ishizawa et al., 2017) ทำโดยคำนวณค่าเฉลี่ยของน้ำหนักแห้งหรือจำนวนฟรอนด์ ดัง Equation 1:

$$EPG\ (\%) = [G(T)-G(C)] / G(C)\times 100 \quad (1)$$

โดยที่ G(T) คือ ค่าเฉลี่ยของน้ำหนักแห้งหรือจำนวนฟรอนด์ของแหนเป็ดที่เพาะเลี้ยงร่วมกับแอคติโนแบคทีเรีย และ G(C) คือ ค่าเฉลี่ยของน้ำหนักแห้งหรือจำนวนฟรอนด์ของแหนเป็ดของชุดควบคุม

ความสามารถของแอคติโนแบคทีเรียต่อการส่งเสริมการเจริญเติบโตของแหนเป็ด แบ่งออกเป็น 8 กลุ่มตามช่วงค่าร้อยละของ EPG ได้แก่ 1. excellent plant growth-promoting bacteria (PGPB) (EPG มากกว่า 100 เปอร์เซ็นต์), 2. strong PGPB (EPG อยู่ในช่วง 75 ถึง 100 เปอร์เซ็นต์), 3. moderate PGPB (EPG อยู่ในช่วง 25 ถึง 74 เปอร์เซ็นต์), 4. weak PGPB (EPG อยู่ในช่วง 5 ถึง 24 เปอร์เซ็นต์), 5. non-influent bacteria (EPG อยู่ในช่วง -4 ถึง 4 เปอร์เซ็นต์), 6. weak plant growth-inhibiting bacteria (PGIB) (EPG อยู่ในช่วง -5 ถึง -24 เปอร์เซ็นต์), 7. moderate PGIB (EPG อยู่ในช่วง -25 ถึง -74 เปอร์เซ็นต์), และ 8. strong PGIB (EPG อยู่ในช่วง -75 ถึง -100 เปอร์เซ็นต์) (Boonmak et al., 2023)

การศึกษาคุณสมบัติในการสร้างสารส่งเสริมการเจริญเติบโตของพืชของแอคติโนแบคทีเรีย

นำไอโซเลตที่คัดเลือกแล้วว่าสามารถส่งเสริมการเจริญเติบโตของแหนเป็ดให้มีจำนวนฟรอนด์ได้สูง มาทดสอบความสามารถในการสร้างสารไซเดอโรฟอร์ และการละลายฟอสเฟต ทำโดยเลี้ยงแอคติโนแบคทีเรียบนอาหารแข็ง yeast extract-malt extract (ISP 2) เป็นเวลา 7 วัน ที่อุณหภูมิ 28 องศาเซลเซียส จากนั้นนำ cork borer เบอร์ 2 (ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.5 เซนติเมตร) เจาะโคโลนีแล้วใช้เข็มเขี่ยเชื้อเชี่ยชิ้นวุ้นมาวางบนอาหารแข็ง Chrome azurol S และอาหารแข็ง Pikovskaya บ่มเป็นเวลา 5 วัน และ 14 วัน ตามลำดับ จากนั้นรายงานผลค่าความสามารถในการสร้างสารไซเดอโรฟอร์ และการละลายฟอสเฟต จากอัตราส่วนของเส้นผ่านศูนย์กลางโซนที่เกิดขึ้นบนอาหารต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางโคโลนี ส่วนการสร้างสารประกอบอินโดล ทดสอบในอาหารเหลว ISP 2 ที่เติม 0.2 เปอร์เซ็นต์ L-tryptophan บ่มเขย่าที่ความเร็วรอบ 180 รอบต่อนาที เป็นเวลา 7 วัน ในที่มืด จากนั้นนำไปปั่นเหวี่ยง ดูดส่วนใสปริมาตร 1 มิลลิลิตร มาทำปฏิกิริยากับ Salkowski's reagent ปริมาตร 2 มิลลิลิตร บ่มที่มืด เป็นเวลา 30 นาที จากนั้นนำไปวัดค่าดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 530 นาโนเมตร แล้วคำนวณการสร้างสารประกอบอินโดลด้วยการเปรียบเทียบกับกราฟมาตรฐานกรดอินโดล-3-แอซีติก ความเข้มข้น 0–50 ไมโครกรัมต่อไมโครลิตร

การระบุสปีชีส์แอคติโนแบคทีเรียด้วยการศึกษาลำดับนิวคลีโอไทด์ของยีน 16S rRNA

เลี้ยงแอคติโนแบคทีเรียบนอาหารแข็ง GYE เป็นเวลา 5 วัน เก็บและล้างเซลล์ที่ได้ด้วยน้ำกลั่นปลอดเชื้อ 2 ครั้ง ก่อนนำมาสกัดดีเอ็นเอด้วยชุดสกัด TIANamp Bacteria DNA นำสารละลายดีเอ็นเอที่ได้ มาเพิ่มปริมาณยีน 16S rRNA ด้วยเทคนิค PCR โดยใช้ไพรเมอร์ 27F (5'-AGAGTTTGATCMTGGCTCAG-3') และ 1492R (5'-GGTTACCTTGTTACGACTT-3') จากนั้นนำผลิตภัณฑ์ PCR มาทำให้บริสุทธิ์ด้วยชุด FavorPrep™ Gel/PCR Purification Mini และส่งไปวิเคราะห์หาลำดับนิวคลีโอไทด์ที่บริษัท Macrogen ประเทศเกาหลีใต้ จากนั้นนำลำดับนิวคลีโอไทด์ที่ได้มาตรวจสอบด้วยโปรแกรม BioEdit ก่อนเทียบในฐานข้อมูล EzBioCloud

การวิเคราะห์ค่าทางสถิติ

การเพาะเลี้ยงแหนเป็ดร่วมกับแอคติโนแบคทีเรีย จำนวนฟรอนด์และน้ำหนักแห้งได้ทำการวิเคราะห์ค่าทางสถิติด้วยการวิเคราะห์ One-way ANOVA โดยใช้วิธี Duncan Multiple Rank Test ในการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยด้วยโปรแกรม IBM® SPSS (Statistics Package for the Social Science) statistics version 26 เพื่อประเมินความความแตกต่างระหว่างชุดการทดลองที่ระดับนัยสำคัญทางสถิติ 0.05 (p<0.05)

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

การศึกษาความสามารถของแอคติโนแบคทีเรียในการส่งเสริมการเจริญเติบโตของแหนเป็ด

จากการศึกษาความสามารถของแอคติโนแบคทีเรียทั้ง 97 ไอโซเลต ในการส่งเสริมการเจริญเติบโตของแหนเป็ด *S. polyrhiza* DKU2002 พบว่า หลังจากการเพาะเลี้ยงร่วมกันเป็นเวลา 7 วัน แหนเป็ดมีจำนวนฟรอนด์อยู่ในช่วง 3.67–16.00 ฟรอนด์ และชุดควบคุม (แหนเป็ดปลอดเชื้อ) มีจำนวนฟรอนด์ 10.93±0.38 ฟรอนด์ โดยแอคติโนแบคทีเรียจำนวน 90 ไอโซเลต ส่งผลให้แหนเป็ดมีจำนวนฟรอนด์มากกว่าชุดควบคุม ในขณะที่มี 7 ไอโซเลต ส่งผลทำให้แหนเป็ดมีจำนวนฟรอนด์น้อยกว่าชุดควบคุม โดยไอโซเลต DW18-4 และ DW29H4 สามารถเพิ่มจำนวนฟรอนด์ของแหนเป็ดได้สูงที่สุดเท่ากับ 16.00±0.58 ฟรอนด์ และ 16.00±2.00 ฟรอนด์ ตามลำดับ เมื่อประเมินค่าผลต่อการเจริญเติบโตของพืช (EPG) ซึ่งคำนวณจากค่าเฉลี่ยของจำนวนฟรอนด์ พบว่ามีค่าตั้งแต่ -66.42 ถึง 46.39 เปอร์เซ็นต์ โดยไอโซเลตส่วนใหญ่อยู่ในกลุ่มmoderate PGPB (32 ไอโซเลต) และ weak PGPB (45 ไอโซเลต) ซึ่งส่งเสริมการเจริญเติบโตของแหนเป็ด ขณะที่ 13 ไอโซเลตอยู่ในกลุ่ม non-influent bacteria ซึ่งไม่ส่งผลต่อการเจริญเติบโตของแหนเป็ด และมีเพียง 5 และ 2 ไอโซเลตที่อยู่ในกลุ่ม weak PGIB และ moderate PGIB ตามลำดับ ซึ่งส่งผลยับยั้งการเจริญเติบโตของแหนเป็ด โดยผลการยับยั้งอาจเกิดจากการที่เชื้อมีความสามารถในการสร้างสารเมแทบอไลต์หรือเอนไซม์ที่มีฤทธิ์ยับยั้งการเจริญเติบโตของแหนเป็ด (Fig. 1) ซึ่งสอดคล้องกับผลการวิจัยที่มีรายงานก่อนหน้า รายงานว่าแบคทีเรียแต่ละสปีชีส์ที่แยกออกจากชุมชีพแบคทีเรียในแต่ละแหล่งที่มา มีผลต่อการเจริญเติบโตของแหนเป็ดที่แตกต่างกัน ทั้งในลักษณะส่งเสริมการเจริญเติบโต ยับยั้งการเจริญเติบโต หรือไม่ส่งผลต่อการเจริญเติบโตของแหนเป็ด (Ishizawa et al., 2017; Boonmak et al., 2023)

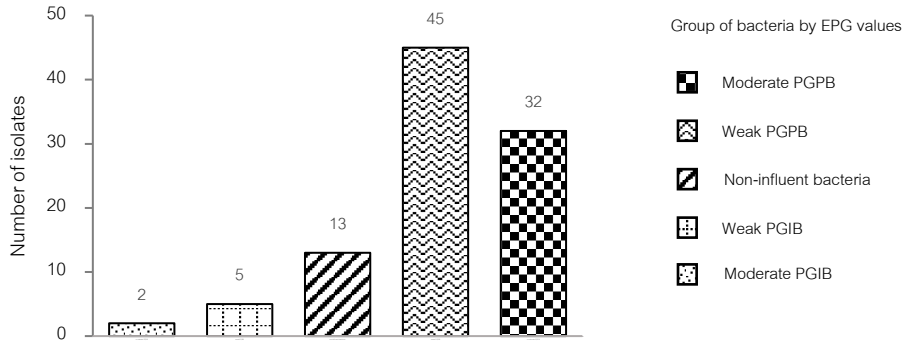


Fig. 1 Groups of bacteria based on EPG values of duckweed-associated actinobacteria on *S. polyrhiza* DKU2002 after co-cultivation in modified Hoagland medium for 7 days.

จากผลการศึกษาได้คัดเลือกไอโซเลตที่สามารถส่งผลให้แหนเป็ดมีจำนวนฟรอนด์เพิ่มขึ้นมากที่สุด (15–16 ฟรอนด์) ได้แก่ DW18-4, DW29H4, DW16H6 และ DW29H34 ทั้ง 4 ไอโซเลตนี้ทำให้จำนวนฟรอนด์เพิ่มขึ้น 1.46, 1.46, 1.40 และ 1.37 เท่า ตามลำดับ เมื่อเทียบกับชุดควบคุม มาศึกษาความสามารถในการส่งเสริมการเจริญเติบโตของแหนเป็ด *S. polyrhiza* DKU2002 เมื่อเพาะเลี้ยงแบบเชื้อเดี่ยวและแบบสองเชื้อร่วมกันในภาชนะขนาด 250 มิลลิลิตร

การศึกษาความสามารถของแอคติโนแบคทีเรียที่คัดเลือกแล้วต่อการเจริญเติบโตของแหนเป็ด S. polyrhiza DKU2002 เมื่อเพาะเลี้ยงแบบเชื้อเดี่ยวและแบบสองเชื้อร่วมกันในภาชนะขนาด 250 มิลลิลิตร

การเพาะเลี้ยงแหนเป็ด *S. polyrhiza* DKU2002 ร่วมกับแอคติโนแบคทีเรียแบบเชื้อเดี่ยว พบว่าหลังจากเพาะเลี้ยงร่วมกันเป็นเวลา 7 วัน สามารถเพิ่มจำนวนฟรอนด์และน้ำหนักแห้งของแหนเป็ดได้ โดยส่งผลให้แหนเป็ดมีจำนวนฟรอนด์อยู่ในช่วง 48.00–64.33 ฟรอนด์ และน้ำหนักแห้ง 18.43–22.50 มิลลิกรัม ทั้งนี้ไอโซเลต DW16H6 ส่งให้แหนเป็ดมีจำนวนฟรอนด์และน้ำหนักเพิ่มมากที่สุด โดยเพิ่ม 1.54 เท่า และ 1.39 เท่า ตามลำดับ รองลงมาเป็นไอโซเลต DW29H4, DW29H34 และ DW18-4 ตามลำดับ ซึ่งเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (p<0.05) เมื่อเปรียบเทียบกับชุดควบคุม (Table 1)

สำหรับการเพาะเลี้ยงแหนเป็ด *S. polyrhiza* DKU2002 ร่วมกับแอคติโนแบคทีเรียแบบสองเชื้อ พบว่าคู่ไอโซเลต DW16H6 กับ DW18-4 และ DW16H6 กับ DW29H4 แสดงลักษณะเป็นปฏิปักษ์ต่อกันในการทดสอบด้วยวิธี dual culture จึงไม่นำมาศึกษาในขั้นตอนนี้ ซึ่งผลการศึกษาคู่ไอโซเลตที่ไม่เป็นปฏิปักษ์ต่อกัน พบว่าส่งผลให้แหนเป็ดมีจำนวนฟรอนด์อยู่ในช่วง 43.33–55.00 ฟรอนด์ และน้ำหนักแห้งอยู่ในช่วง 15.93–20.40 มิลลิกรัม โดยการเพาะเลี้ยงแหนเป็ดร่วมกับคู่ไอโซเลต DW18-4 กับ DW29H4 ส่งผลให้แหนเป็ดมีจำนวนฟรอนด์เพิ่มขึ้นสูงสุด เมื่อเปรียบเทียบกับการเพาะเลี้ยงร่วมกับคู่ไอโซเลตอื่น ๆ โดยจำนวนฟรอนด์เพิ่มขึ้น 1.32 เท่า แต่พบว่าคู่ไอโซเลต DW16H6 กับ DW29H34 ส่งผลให้แหนเป็ดมีน้ำหนักแห้งเพิ่มขึ้นสูงที่สุด (1.26 เท่า) อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (p<0.05) เมื่อเปรียบเทียบกับชุดควบคุม (Table 1)

Table 1 Frond number, dry weight and EPG values of *S. polyrhiza* DKU2002 co-cultivated with actinobacteria for 7 days.

Treatment	Isolate	Frond number	Fold	Dry weight (mg)	Fold	EPG (%) (dry weight)
Single inoculation	DW16H6	64.33±0.67^{a}	1.54	22.50±0.55^{a}	1.39	38.89±4.19
	DW18-4	48.00±1.00^{cde}	1.15	18.43±1.20^{cd}	1.14	13.79±7.81
	DW29H4	56.33±1.45^{b}	1.35	21.30±0.75^{ab}	1.31	31.48±5.25
	DW29H34	51.00±1.15^{bcd}	1.22	22.13±0.64^{a}	1.37	36.63±4.66
Co-inoculation	DW16H6+DW29H34	54.00±1.73^{bc}	1.30	20.40±1.14^{abc}	1.26	25.93±7.46
	DW18-4+DW29H4	55.00±4.62^{bc}	1.32	19.43±0.72^{bcd}	1.20	19.96±5.08
	DW18-4+DW29H34	43.33±1.20^{de}	1.04	15.93±0.62^{e}	0.98	-1.65±4.55
	DW29H4+DW29H34	49.33±3.93^{bcde}	1.18	18.03±0.71^{de}	1.11	11.32±5.03
Control		41.67±2.85^{e}		16.20±0.40^{e}		

Note: Mean±SE in the same column followed by different superscript letters are significantly different (p < 0.05)

มีการศึกษาที่พบว่าการใช้เชื้อ 2 ชนิดร่วมกัน สามารถช่วยส่งเสริมการเจริญเติบโตของพืชได้ดีกว่าการใช้เชื้อเดี่ยว (Neto et al., 2025) แต่จากการศึกษานี้ พบว่าการเพาะเลี้ยงแหนเป็ด *S. polyrhiza* DKU2002 ร่วมกับแอคติโนแบคทีเรียแบบใช้สองเชื้อ มีผลทำให้ความสามารถในการเพิ่มจำนวนฟรอนด์ น้ำหนักแห้ง และค่า EPG ของน้ำหนักแห้งน้อยกว่าการเพาะเลี้ยงร่วมกับแอคติโนแบคทีเรียแบบใช้เชื้อเดี่ยว (Table 1) ซึ่งผลการศึกษานี้สอดคล้องกับรายงานของ Ishizawa et al. (2017) ซึ่งเพาะเลี้ยงแหนเป็ด *Lemna minor* ร่วมกันกับแบคทีเรียที่ส่งเสริมการเจริญเติบโตของแหนเป็ด

สองเชื้อ พบว่าการเจริญเติบโตของแหนเป็ด มีค่า EPG ลดลง เมื่อเปรียบเทียบกับเชื้อเดี่ยว เช่นเดียวกันกับการศึกษาของ Yamakawa et al. (2018) ซึ่งเพาะเลี้ยงแหนเป็ด *L. minor* ร่วมกันกับ *Acinetobacter calcoaceticus* P23 และ *Pseudomonas* sp. Ps6 ซึ่งเป็นแบคทีเรียส่งเสริมการเจริญเติบโตในแหนเป็ด พบว่าการเพาะเลี้ยงแหนเป็ดร่วมกับสองแบคทีเรียนี้ ส่งผลให้แหนเป็ดมีจำนวนฟรอนด์น้อยกว่าแหนเป็ดที่เพาะเลี้ยงร่วมกับ Ps6 เพียงเชื้อเดียว โดยผลอาจเกิดจากการแย่งสารอาหาร หรือการแย่งการใช้สารที่หลั่งออกมาจากพืช อีกทั้งอาหารเลี้ยงเชื้ออาจมีบทบาทสำคัญต่อการผลิตสารเมแทบอไลต์ของ แอคติโนแบคทีเรีย ซึ่งอาจทำให้เชื้อหลั่งสารที่มีฤทธิ์ยับยั้งต่อเชื้ออื่นหรือมีผลต่อการเจริญเติบโตของแหนเป็ดเองอีกด้วย

การศึกษาความสามารถของแอคติโนแบคทีเรียในการสร้างสารส่งเสริมการเจริญเติบโตของพืช

จากการศึกษาแอคติโนแบคทีเรียทั้ง 4 ไอโซเลต ในการสร้างไซเดอโรฟอร์ การละลายฟอสเฟต และการสร้างสารประกอบอินโดล ซึ่งเป็นคุณสมบัติของแบคทีเรียส่งเสริมการเจริญเติบโตของพืช พบว่าทั้ง 4 ไอโซเลตมีความสามารถในการสร้างสารไซเดอโรฟอร์ การละลายฟอสเฟต และการสร้างสารประกอบอินโดล (Table 2) โดยไอโซเลต DW18-4 สามารถสร้างสารไซเดอโรฟอร์และละลายฟอสเฟตได้สูงที่สุดเท่ากับ 2.88 และ 1.34 ตามลำดับ ไอโซเลต DW29H34 สร้างสารประกอบอินโดลได้สูงที่สุดเท่ากับ 148.28 ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร ซึ่งปัจจัยส่งเสริมการเจริญเติบโตของพืชเหล่านี้มีรายงานในแบคทีเรียส่งเสริมการเจริญเติบโตของพืชที่เกี่ยวข้องกับแหนเป็ด เช่น *A. calcoaceticus* P23 มีความสามารถในการละลายฟอสเฟต (Yamaga et al., 2010), *Chryseobacterium* sp. 27AL สามารถสร้างสารประกอบอินโดลและไซเดอโรฟอร์ได้ (Khairina et al., 2021), *Pseudomonas* sp. Ps6 สามารถละลายฟอสเฟตและสร้างสารประกอบอินโดลได้เล็กน้อย (Yamakawa et al., 2018), *Aquitalea magnusonii* H3 สามารถสร้างสารประกอบอินโดล ไซเดอโรฟอร์ และละลายฟอสเฟตได้ (Ishizawa et al., 2017) นอกจากนี้ Ishizawa et al. (2017) รายงานว่าการละลายฟอสเฟตเป็นปัจจัยที่พบว่ามีความสัมพันธ์กับการส่งเสริมการเจริญเติบโตของแหนเป็ด

Table 2 Plant growth-promoting properties and identification based on 16S rRNA gene sequences of the selected actinobacterial strains.

Isolate	Closest type strain (% similarity)	Siderophore production*	Phosphate solubilization*	Indole compounds (μg/ml)
DW16H6	*Micromonospora oryzae* CP2R9-1^T (99.85%)	2.64	1.10	11.76
DW18-4	*Streptomyces albidoflavus* DSM 40455^T (99.34%)	2.88	1.34	10.74
DW29H4	*Streptomyces daghestanicus* NRRL B-5418^T (99.72%)	2.68	1.22	13.21
DW29H34	*Krasilnikoviella muralis* T6220-5-2b^T (99.85%)	1.82	1.16	148.28

Note: *Ratio of the diameter of the zone and colony

การศึกษาลำดับนิวคลีโอไทด์ของยีน 16S ribosomal RNA เพื่อระบุสปีชีส์ของแอคติโนแบคทีเรีย

เมื่อศึกษาลำดับนิวคลีโอไทด์ของยีน 16S rRNA พบว่า DW16H6, DW18-4, DW29H4 และ DW29H34 มีความคล้ายคลึงกับ *Micromonospora oryzae* CP2R9-1^T (99.85 เปอร์เซ็นต์), *Streptomyces albidoflavus* DSM 40455^T (99.34 เปอร์เซ็นต์), *Streptomyces daghestanicus* NRRL B-5418^T (99.72 เปอร์เซ็นต์) และ *Krasilnikoviella muralis* T6220-5-2b^T (99.85 เปอร์เซ็นต์) ตามลำดับ (Table 2)

สกุล *Streptomyces* และ *Micromonospora* มีความสามารถผลิตสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพที่หลากหลายที่มีการนำมาใช้ประโยชน์ทางด้านการเกษตร โดยหลายสปีชีส์มีความสามารถในการส่งเสริมการเจริญเติบโตของพืชและใช้ในการควบคุมจุลินทรีย์ก่อโรค จากรายงานของ Du et al. (2022) พบว่า *S. albidoflavus* St-220 มีความสามารถละลายฟอสเฟต ตรึงไนโตรเจน ผลิตไซเดอโรฟอร์ และผลิตกรดอินโดล-3-แอซีติก ซึ่งอาจเป็นกลไกที่ช่วยส่งเสริมการเจริญเติบโตของต้นกล้าของ *Salvia miltiorrhiza* ส่วน *S. daghestanicus* NRRL B-5418^T มีรายงานสามารถในการยับยั้งแบคทีเรียก่อโรค และสามารถผลิตกรดอินโดล-3-แอซีติกได้ (Tedsree et al., 2022) นอกจากนี้ ในสกุล *Micromonospora* สามารถผลิตฮอร์โมนพืชได้แก่ กรดอินโดล-3-แอซีติก กรดจิบเบอเรลลิก และไซโทไคนินได้ นอกจากนี้สามารถส่งเสริมการเจริญเติบโตของต้นข้าวสาลีภายใต้สภาวะเครียดจากอุณหภูมิสูงได้ (Hassan et al., 2024) จากผลการระบุสปีชีส์ของไอโซเลตที่ส่งเสริมการเจริญเติบโตของแหนเป็ดในงานวิจัยนี้ไม่พบรายงานการก่อโรคในคน พืชและสัตว์

สรุป

จากการศึกษาผลของแอคติโนแบคทีเรียทั้ง 97 ไอโซเลตในการส่งเสริมการเจริญเติบโตของแหนเป็ด *S. polyrhiza* DKU2002 พบว่ามีทั้งแอคติโนแบคทีเรียที่ส่งเสริมการเจริญ ยับยั้งการเจริญ และไม่ส่งผลต่อการเจริญเติบโตของแหนเป็ด และเมื่อคัดเลือกไอโซเลตที่สามารถส่งเสริมการเจริญเติบโตของแหนเป็ดได้ดีที่สุดได้แก่ DW16H6, DW18-4, DW29H4 และ DW29H34 มาศึกษาการสร้างสารส่งเสริมการเจริญเติบโตของพืช พบว่าทั้ง 4 ไอโซเลตสามารถสร้างประกอบอินโดล ไซเดอโรฟอร์ และละลายฟอสเฟตได้ ส่วนการศึกษาการส่งเสริมการเจริญเติบโตของแหนเป็ด *S. polyrhiza* DKU2002 ทั้งการใช้แบบเชื้อเดี่ยวและแบบสองเชื้อ แสดงให้เห็นว่าการใช้แอคติโนแบคทีเรียเพียงไอโซเลตเดียว มีประสิทธิภาพสูงกว่าการใช้แอคติโนแบคทีเรียร่วมกัน 2 ไอโซเลต โดยในการศึกษานี้ทำให้ทราบถึงผลของแอคติโนแบคทีเรียที่แยกมาจากแหนเป็ดต่อการเจริญเติบโตของแหนเป็ด *S. polyrhiza* DKU2002 และสามารถคัดเลือกแอคติโนแบคทีเรียที่สามารถส่งเสริมการเจริญเติบโตของแหนเป็ด *S. polyrhiza* DKU2002 ได้ดี ที่สามารถนำไปพัฒนาเป็นหัวเชื้อในการเพิ่มการผลิตชีวมวลของแหนเป็ดได้ในอนาคต

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณภาควิชาชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ที่เอื้อเฟื้อสถานที่ และอุปกรณ์ในการทำวิจัย และขอขอบคุณการสนับสนุนจาก Science and Technology Research Partnership for Sustainable Development (SATREPS), JICA

เอกสารอ้างอิง

Baek, G., Saeed, M., Choi, H.K. 2021. Duckweeds: their utilization, metabolites and cultivation. Appl. Biol. Chem. 64: 73.

Boonmak, C., Kettongruang, S., Buranathong, B., Morikawa, M., Duangmal, K. 2023. Duckweed-associated bacteria as plant growth-promotor to enhance growth of Spirodela polyrhiza in wastewater effluent from a poultry farm. Arch. Microbiol. 206: 43.

Cui, W., Cheng, J.J. 2015. Growing duckweed for biofuel production: a review. Plant Biol. 17: 16–23.

Du, Y., Wang, T., Jiang, J., et al. 2022. Biological control and plant growth promotion properties of Streptomyces albidoflavus St-220 isolated from Salvia miltiorrhiza rhizosphere. Front. Plant Sci. 13: 976813.

Hassan, A.H., Ahmed, E.S., Sheteiwy, M.S., et al. 2024. Inoculation with Micromonospora sp. enhances carbohydrate and amino acid production, strengthening antioxidant metabolism to mitigate heat stress in wheat cultivars. Front. Plant Sci. 15: 1500894.

Ishizawa, H., Kuroda, M., Morikawa, M., Ike, M. 2017. Evaluation of environmental bacterial communities as a factor affecting the growth of duckweed Lemna minor. Biotechnol. Biofuels 10: 1–10.

Khairina, Y., Jog, R., Boonmak, C., Toyama, T., Oyama, T., Morikawa, M. 2021. Indigenous bacteria, an excellent reservoir of functional plant growth promoters for enhancing duckweed biomass yield on site. Chemosphere 268: 129247.

Neto, W.P., Guterres, J.B., da Luz, L.A., Barros, I.A., Berleze, F.D.B., Ramos, L.M., Astarita, L.V., Santarém, E.R. 2025. Co-inoculation with Streptomyces isolates promotes plant growth and modulates root exudation in maize. Theor. Exp. Plant Physiol. 37: 24.

Saimee, Y., Kuwai, K., Ishizawa, H., Inoue, D., Thamchaipenet, A., Ike, M. 2025. Structural and functional properties of bacterial communities associated with rootless duckweed (Wolffia globosa) and their effect on the Wolffia growth. Environ. Microbiol. 20: 102.

Tedsree, N., Likhitwitayawuid, K., Sritularak, B., Tanasupawat, S. 2022. Diversity and antimicrobial activity of plant growth promoting endophytic actinomycetes isolated from Thai Orchids. Environ. Nat. Resour. J. 20: 379–392.

Toyama, T., Hanaoka, T., Tanaka, Y., Morikawa, M., Mori, K. 2018. Comprehensive evaluation of nitrogen removal rate and biomass, ethanol, and methane production yields by combination of four major duckweeds and three types of wastewater effluent. Bioresour. Technol. 250: 464–473.

Yamaga, F., Washio, K., Morikawa, M. 2010. Sustainable biodegradation of phenol by Acinetobacter calcoaceticus P23 isolated from the rhizosphere of duckweed Lemna aoukikusa. Environ. Sci. Technol. 44: 6470–6474.

Yamakawa, Y., Jog, R., Morikawa, M. 2018. Effects of co-inoculation of two different plant growth-promoting bacteria on duckweed. Plant Growth Regul. 86: 287–296.

การพัฒนาและตรวจสอบความใช้ได้ของวิธีทดสอบอะฟลาทอกซินในเมล็ดแมงลัก

Development and method validation of aflatoxin analysis in basil seed

ฐิตาภรณ์ รัตริน*, อดิศร เจตนะจิตร, รัชนี รักษ์สัตยานันท์, กนกวรรณ พลฉิม, รุจิเรข จรรโลงตระกูล
Thitaporn Rutrin*, Adisorn Jettanajit, Ratchanee Ragsattayanan, Kanokwan Ponchim, Rujirek Chanlongtrakul
กองพัฒนาระบบและรับรองมาตรฐานสินค้าพืช กรมวิชาการเกษตร กรุงเทพฯ 10900
Plant Standard and Certification Division, Department of Agriculture, Bangkok 10900, Thailand
*Corresponding author. E-mail address: rutrin@hotmail.com

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้จัดทำขึ้นเพื่อพัฒนาวิธีทดสอบอะฟลาทอกซินในเมล็ดแมงลักซึ่งดัดแปลงจากวิธีมาตรฐาน AOAC (2023) 999.07 โดยใช้ methanol เป็นสารสกัดที่เหมาะสมในการสกัดอะฟลาทอกซินในเมล็ดแมงลัก จากนั้นตรวจสอบความใช้ได้ของวิธีทดสอบพบว่า ช่วงความสามารถในการทดสอบเป็น 0.50–10 µg/kg ขีดจำกัดของการตรวจพบและขีดจำกัดของการวัดเชิงปริมาณ มีค่าเท่ากับ 0.25 และ 0.50 µg/kg ตามลำดับ ความแม่นและความเที่ยงอยู่ในเกณฑ์ยอมรับ (ร้อยละการกลับคืนเฉลี่ยอยู่ในช่วง 82–92 และร้อยละของค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานสัมพัทธ์อยู่ในช่วง 3.12–9.99) และค่าความไม่แน่นอนในการวัดมีค่าน้อยกว่าร้อยละ 26 ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 นอกจากนี้ได้นำวิธีทดสอบไปใช้ทดสอบเมล็ดแมงลักที่จำหน่ายในท้องตลาด จำนวน 31 ตัวอย่าง พบว่ามีการปนเปื้อนของอะฟลาทอกซิน 21 ตัวอย่าง (ร้อยละ 67.7) และมีจำนวน 1 ตัวอย่าง (ร้อยละ 3.2) มีปริมาณอะฟลาทอกซินเกินมาตรฐานของประเทศไทย

คำสำคัญ : เมล็ดแมงลัก, อะฟลาทอกซิน, HPLC

Abstract

The objective of this study was to develop an analytical method for aflatoxin in basil seed which was modified from AOAC Official Method (2023) 999.07. The optimized extraction solvent for aflatoxin in basil seed was methanol. Then, the modified method was validated, and the results demonstrate that the working range, limit of detection and limit of quantitation were 0.50–10 µg/kg, 0.25 µg/kg and 0.50 µg/kg, respectively. The accuracy and precision of the modified method were within acceptance criteria. (%recovery 82–92%, %relative standard deviation 3.12–9.99%). Moreover, the percentage of measurement uncertainty was less than 26% at 95% confidence interval. This method was used for determination of aflatoxin in thirty-one basil seed samples from domestic market. It was found that 21 samples (67.7%) contaminated with aflatoxin and one sample (3.2%) exceeded maximum limit of the Thai regulation.

Keywords: Aflatoxin, Basil seed, HPLC

คำนำ

แมงลักเป็นพืชล้มลุกมีชื่อวิทยาศาสตร์ว่า *Ocimum aficanum* Lour อยู่ในวงศ์ Lamiaceae จัดเป็นพืชสมุนไพร (กระทรวงเกษตรและสหกรณ์, 2568; คณะเภสัชศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร, 2558) ใบแมงลักมีกลิ่นหอม นิยมนำมาประกอบอาหารและรับประทานสดเป็นเครื่องเคียงได้ ส่วนเมล็ดแมงลักสามารถบริโภคได้และเป็นที่นิยมเช่นกัน โดยเมล็ดแมงลักมีสารเมือก (Mucillage) เป็นใยอาหารที่ละลายน้ำได้ (Soluble dietary fiber) ด้วยคุณสมบัตินี้จึงถูกนำมาใช้ประโยชน์ทางการแพทย์และโภชนาการ (อนันทิตาและคณะ, 2566) นอกจากประโยชน์ที่ได้รับจากการบริโภคเมล็ดแมงลักแล้วพบว่าเมล็ดแมงลักมีความเสี่ยงในการปนเปื้อนอะฟลาทอกซินด้วย (อมรา และคณะ, 2549)

อะฟลาทอกซินเป็นสารพิษจากเชื้อราที่พบในธรรมชาติมี 4 ชนิด ได้แก่ อะฟลาทอกซินบี1 อะฟลาทอกซินบี2 อะฟลาทอกซินจี1 และอะฟลาทอกซินจี2 สร้างโดยเชื้อรา *Aspergillus flavus* และ *Aspergillus parasiticus* อะฟลาทอกซินถูกจัดเป็นสารก่อมะเร็งกลุ่ม 1 (Carcinogenic to humans) เป็นอันตรายต่อสุขภาพของมนุษย์ มีผลก่อให้เกิดมะเร็งตับและก่อการกลายพันธุ์ หากบริโภคในปริมาณสูงทำให้เสียชีวิตได้ (Pitt el at., 2012) และเนื่องด้วยประเทศไทยมีสภาพอากาศร้อนชื้น ซึ่งเป็นสภาวะที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตเชื้อราและสร้างสารพิษได้

ประเทศไทยได้กำหนดปริมาณสูงสุดของอะฟลาทอกซินทั้งหมด (ผลรวมของอะฟลาทอกซินบี1 บี2 จี1 และจี2) ในอาหารไม่เกิน 20 µg/kg ตามประกาศกระทรวงสาธารณสุข (ฉบับที่ 414) พ.ศ. 2563 นอกจากนี้มีประกาศกระทรวงเกษตรและสหกรณ์ เรื่อง กำหนดพืชเป็นพืชควบคุมเฉพาะ พ.ศ. 2556 ที่กำหนดให้เมล็ดแมงลักที่ส่งออกไปยังประเทศญี่ปุ่นเป็นพืชควบคุมเฉพาะต้องทดสอบอะฟลาทอกซินก่อนการส่งออกตามที่ประกาศกำหนด โดยประเทศญี่ปุ่นได้กำหนดปริมาณสูงสุดของอะฟลาทอกซินทั้งหมดในอาหาร ไม่เกิน 10 µg/kg

การทดสอบอะฟลาทอกซินในอาหารมีวิธีทดสอบหลายวิธี เช่น วิธี Enzyme-Linked Immunosorbent Assay (ELISA), Thin-layer chromatography (TLC), High Performance Liquid Chromatography-Fluorescence Detector (HPLC-FLD) เป็นต้น (Latimer, 2023) นอกจากนี้การนำวิธีทดสอบมาใช้จำเป็นต้องมีการตรวจสอบความใช้ได้ของวิธีเพื่อให้มั่นใจได้ว่าวิธีทดสอบนี้มีความถูกต้อง แม่นยำ เหมาะสมกับการนำมาใช้งานภายในห้องปฏิบัติการได้ และสอดคล้องกับมาตรฐานที่กำหนด (Cantwell, 2025) เนื่องจากวิธีทดสอบอะฟลาทอกซินในเมล็ดแมงลักยังไม่มีวิธีทดสอบที่เป็นวิธีมาตรฐาน จึงมีความจำเป็นต้องพัฒนาวิธีทดสอบที่เหมาะสม ดังนั้นงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาวิธีทดสอบอะฟลาทอกซินในเมล็ดแมงลัก โดยวิธีดัดแปลงจากวิธีมาตรฐาน AOAC (2023) 999.07 ซึ่งเป็นวิธีมาตรฐานที่ใช้ในการทดสอบอะฟลาทอกซินในเนยถั่ว พิสตาชิโอบด มะเดื่อบด และผงปาปริกา (Latimer, 2023) และดำเนินการตรวจสอบความใช้ได้ของวิธีทดสอบนี้ให้มีความเหมาะสมสอดคล้องกับมาตรฐานของประเทศไทย และนำวิธีที่พัฒนาขึ้นไปใช้ในห้องปฏิบัติการเพื่อตรวจติดตามและเฝ้าระวังคุณภาพอะฟลาทอกซินในเมล็ดแมงลัก

อุปกรณ์และวิธีการ

สารเคมีที่ใช้

สารมาตรฐานอะฟลาทอกซิน จากบริษัท Sigma จำกัด (สหรัฐอเมริกา) acetonitrile (HPLC grade) acetic acid (AR grade) benzene (AR grade) และ methanol (HPLC grade และ AR grade) จากบริษัท Fisher Chemical จำกัด (สหราชอาณาจักร) immunoaffinity column (AflastarTMS) จากบริษัท Romer lab จำกัด (ออสเตรีย) phosphate buffered solution จากบริษัท Vicam จำกัด (สหรัฐอเมริกา) sodium chloride (AR grade) และ trifluoroacetic acid (TFA) สำหรับงาน spectroscopy จากบริษัท Merck จำกัด (สหรัฐอเมริกา)

การเตรียมสารละลายมาตรฐาน

เตรียมสารละลายมาตรฐานอะฟลาทอกซินให้มีความเข้มข้นตามต้องการ โดยละลายและปรับปริมาตรด้วย benzene-acetonitrile (98:2)

การเตรียมตัวอย่างเพื่อการทดสอบอะฟลาทอกซินดัดแปลงจากวิธีมาตรฐาน AOAC (2023) 999.07

การสกัดตัวอย่าง: ชั่งตัวอย่าง 5 g ใส่ในหลอด centrifuge ขนาด 50 ml เติมเกลือ sodium chloride 1 g และเติมสารละลายใช้ที่สกัด 30 ml เขย่าด้วยเครื่องเขย่าหลอดทดลอง ความเร็ว 2,500 rpm เป็นเวลา 15 min จากนั้นกรองผ่านกระดาษกรอง Whatman เบอร์ 1 นำสารละลายที่กรองได้ 6 ml ผสมกับสารละลาย phosphate buffered solution ปริมาตร 36 ml เขย่าให้เข้ากัน

การกำจัดสารรบกวนด้วย immunoaffinity column (IAC): นำสารละลายที่สกัดได้ไปผ่าน IAC จนหมด ด้วยอัตราการไหล 3 ml/min ล้าง IAC ด้วยน้ำ 15 ml และชะอะฟลาทอกซินออกจาก IAC ด้วย methanol 2 ml ใส่ในขวดสีชาขนาด 8 ml

การทำ derivatization: ระเหย methanol จนแห้งภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน และเติมตัวทำละลายผสม acetonitrile-water (9:1) และ derivatization solution (TFA-acetic acid-water (2:1:7)) ในอัตราส่วน 2:7 ปริมาตร 1 ml จากนั้นนำสารละลายที่ได้บ่มใน water bath อุณหภูมิ 65 °C เป็นเวลา 8.5 min กรองผ่าน syringe filter ชนิด nylon ขนาด 0.22 µm และนำไปวิเคราะห์ปริมาณอะฟลาทอกซิน ด้วยเครื่อง HPLC-FLD

ภาวะของเครื่อง HPLC-FLD: เครื่อง HPLC-FLD ยี่ห้อ Agilent รุ่น 1260 Infinity II โดยใช้คอลัมน์ HPLC รุ่น Symmetry C18 เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 3.9 mm ยาว 150 mm ขนาดอนุภาค 5 µm โดยใช้เฟสเคลื่อนที่เป็น water-methanol-acetonitrile (75:5:20) อัตราการไหลของเฟสเคลื่อนที่เป็น 1 ml/min และใช้ปริมาตรตัวอย่าง 30 µL อุณหภูมิของคอลัมน์ 30 °C ตั้งค่าความยาวคลื่นในการตรวจวัด ได้แก่ excitation wavelength 360 nm และ emission wavelength 440 nm

การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการทดสอบอะฟลาทอกซินในเมล็ดแมงลัก

ทดสอบตัวอย่างเมล็ดแมงลักที่มีความเข้มข้นของอะฟลาทอกซินแต่ละชนิด 5 µg/kg โดยใช้ตัวทำละลายในการสกัดที่แตกต่างกัน 3 ชนิด ได้แก่ สารละลาย methanol-water (8:2, v/v) สารละลาย methanol-water (9:1, v/v) และ methanol ชนิดละ 6 ซ้ำ จากนั้นทำการทดสอบปริมาณอะฟลาทอกซิน ด้วยวิธีดัดแปลงจากวิธีมาตรฐาน AOAC (2023) 999.07 ประเมินค่าเฉลี่ยร้อยละการกลับคืน (%recovery) และร้อยละของค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานสัมพัทธ์ของอะฟลาทอกซินแต่ละชนิด ($\%RSD_r$) (เกณฑ์การยอมรับ: %recovery อยู่ในช่วง 60–115 และ $\%RSD_r \leq 21$) (Latimer, 2023)

การตรวจสอบความใช้ได้ของวิธีทดสอบอะฟลาทอกซินในเมล็ดแมงลัก

การกำหนดคุณลักษณะและวิธีของการตรวจสอบความใช้ได้ของวิธีอ้างอิงตาม Eurachem Guide (Cantwell, 2025) ได้แก่ ความจำเพาะต่อการทดสอบ (Selectivity) ความสัมพันธ์เชิงเส้น (Linearity) ช่วงการใช้งานของวิธีทดสอบ (Working range) ขีดจำกัดของการตรวจพบ (Limit of Detection, LOD) ขีดจำกัดของการวัดเชิงปริมาณ (Limit of Quantification, LOQ) ความแม่น (Accuracy) และความเที่ยง (Precision) นอกจากนี้ทำการประมาณค่าความไม่แน่นอนของการวัด (Measurement uncertainty) ตามแนวทางการใช้ข้อมูลจากการตรวจสอบความใช้ได้ของวิธีทดสอบ (Method validation approach) อ้างอิงตาม VAM Project 3.2.1 Development and Harmonisation of Measurement

Uncertainty Principles. Part (d): Protocol for uncertainty evaluation from validation data (Barwick and Ellison, 2000)

การนำไปประยุกต์ใช้กับการทดสอบอะฟลาทอกซินในเมล็ดแมงลัก

สุ่มเก็บตัวอย่างเมล็ดแมงลักจากแหล่งจำหน่ายภายในประเทศ จำนวน 31 ตัวอย่าง ในช่วงเดือนมีนาคม-กรกฎาคม พ.ศ. 2568 ปริมาณการสุ่มเก็บไม่น้อยกว่า 200 กรัมต่อตัวอย่าง บดเมล็ดแมงลักด้วยเครื่องบดตัวอย่าง ชนิด knife mill รุ่น Grindomix GM 200 ยี่ห้อ Retsch จนตัวอย่างละเอียดเป็นเนื้อเดียวกันและเก็บในถุงพลาสติกปิดสนิทที่อุณหภูมิไม่เกิน -18°C

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการทดสอบอะฟลาทอกซินในเมล็ดแมงลัก

จากผลการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการทดสอบอะฟลาทอกซินในเมล็ดแมงลัก พบว่าการใช้สารละลาย methanol-water (8:2, v/v) methanol-water (9:1, v/v) และ methanol ในการสกัดอะฟลาทอกซินในเมล็ดแมงลักมี $\%RSD_r$ อยู่ในช่วง 5.32–13.67 ซึ่งผ่านเกณฑ์การยอมรับ ($\%RSD_r \leq 21$) เมื่อพิจารณา %recovery ของอะฟลาทอกซินแต่ละชนิด ตาม Fig. 1 พบว่าการใช้สารละลายที่แตกต่างกันมีผลทำให้ %recovery ของอะฟลาทอกซินแต่ละชนิดแตกต่างกัน การใช้สารละลาย methanol-water (8:2, v/v) มี %recovery ของอะฟลาทอกซินบี1 เป็น 57.88 ซึ่งไม่ผ่านเกณฑ์การยอมรับ (%recovery อยู่ในช่วง 60–115) แต่การใช้สารละลาย methanol-water (9:1, v/v) และ methanol มี %recovery ของ อะฟลาทอกซินทุกชนิดอยู่ในช่วง 60.97–79.67 ซึ่งผ่านเกณฑ์การยอมรับ โดยการใช้ methanol ในการสกัดอะฟลาทอกซินในเมล็ดแมงลักมี %recovery ของอะฟลาทอกซินทุกชนิดสูงที่สุด ดังนั้นจึงเลือกใช้ methanol เป็นตัวทำละลายที่ใช้สกัดอะฟลาทอกซินในเมล็ดแมงลัก

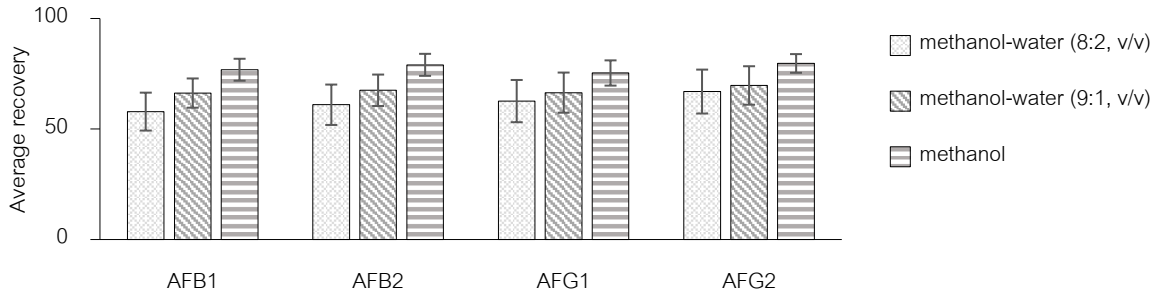


Fig. 1 Average recovery of aflatoxin B1 (AFB1), aflatoxin B2 (AFB2), aflatoxin G1 (AFG1) and aflatoxin G2 (AFG2) obtained by using different types of extraction solvent (n = 6)

การตรวจสอบความใช้ได้ของวิธีทดสอบอะฟลาทอกซินในเมล็ดแมงลัก

ความจำเพาะต่อการทดสอบ: วิเคราะห์สารละลายมาตรฐานอะฟลาทอกซิน 0.50 µg/Lจำนวน 3 ซ้ำ โดยใช้เครื่อง HPLC-FLD พบว่า retention time ของอะฟลาทอกซินบี1 บี2 จี1 และจี2 มีค่าเป็น 4.852±0.014, 12.275±0.046, 3.665±0.008 และ 8.567±0.022 นาที ตามลำดับ (Fig. 2) และทำการทดสอบสารที่ผ่านกระบวนการสกัดโดยไม่ใช้ตัวอย่าง (reagent blank) และตัวอย่างเมล็ดแมงลักที่ไม่พบปริมาณอะฟลาทอกซิน (sample blank) จำนวน 10 ซ้ำ ตาม

วิธีทดสอบปริมาณอะฟลาทอกซินในเมล็ดแมงลัก พบว่าโครมาโทแกรมของ reagent blank และ sample blank ไม่พบสัญญาณของอะฟลาทอกซินทั้ง 4 ชนิด แสดงว่าตัวอย่างและสารเคมีที่ใช้ในการวิเคราะห์ไม่มีสารรบกวนต่อวิธีทดสอบ ดังนั้นวิธีทดสอบที่ใช้มีความจำเพาะต่อการทดสอบอะฟลาทอกซินในเมล็ดแมงลัก

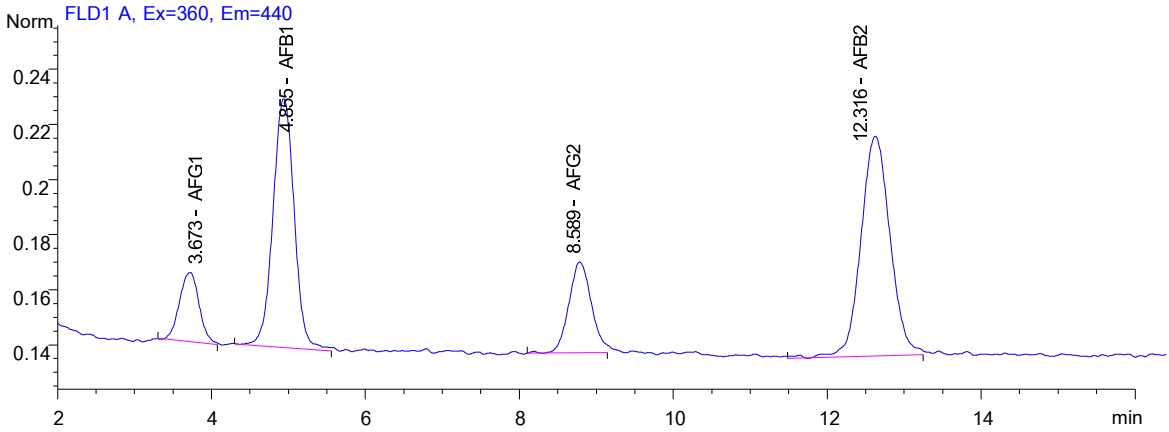


Fig. 2 Chromatogram of aflatoxin standard solution at concentration 0.5 µg/L

ความสัมพันธ์เชิงเส้น: นำสารมาตรฐานอะฟลาทอกซินความเข้มข้นต่างๆ 7 ความเข้มข้น (0.25–10 µg/L) ความเข้มข้นละ 3 ซ้ำ วิเคราะห์ด้วยเครื่อง HPLC-FLD สร้างกราฟมาตรฐานระหว่างความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานอะฟลาทอกซินแต่ละชนิดและค่าพื้นที่ใต้พีก พบว่ามีความสัมพันธ์เชิงเส้นมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 และมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (r) ของอะฟลาทอกซินบี1 บี2 จี1 และจี2 มีค่าเป็น 0.9980, 0.9992, 0.9982 และ 0.9990 ตามลำดับ ซึ่งผ่านเกณฑ์การยอมรับ ($r \geq 0.995$) ดังนั้นความสัมพันธ์เชิงเส้นของสารมาตรฐานอะฟลาทอกซินแต่ละชนิดของวิธีทดสอบนี้อยู่ในช่วง 0.25–10 µg/L

ช่วงการใช้งานของวิธีทดสอบ: นำตัวอย่าง sample blank เติมสารมาตรฐานอะฟลาทอกซินให้มีความเข้มข้นต่างๆ 6 ความเข้มข้น (0.50–10 µg/kg) ความเข้มข้นละ 3 ซ้ำ จากนั้นทดสอบตัวอย่างตามวิธีทดสอบปริมาณอะฟลาทอกซินในเมล็ดแมงลัก สร้างความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นอะฟลาทอกซิน บี1 บี2 จี1 และจี2 ในตัวอย่างเมล็ดแมงลักที่เติมกับค่าความเข้มข้นอะฟลาทอกซินแต่ละชนิดที่ตรวจพบ พบว่ามีความสัมพันธ์เชิงเส้นมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ค่า r ของอะฟลาทอกซินบี1 บี2 จี1 และจี2 มีค่าเป็น 0.9983, 0.9983, 0.9982 และ 0.9985 ตามลำดับ ซึ่งผ่านเกณฑ์การยอมรับ ($r \geq 0.995$) ดังนั้นช่วงการใช้งานของอะฟลาทอกซินแต่ละชนิดของวิธีทดสอบนี้อยู่ในช่วง 0.50-10 µg/kg เมื่อเปรียบเทียบวิธีที่พัฒนาขึ้นกับวิธีมาตรฐาน AOAC (2023) 999.07 พบว่าวิธีที่พัฒนาขึ้นมีช่วงการใช้งานกว้างกว่า โดยวิธีมาตรฐาน AOAC (2023) 999.07 มีช่วงการใช้งานของอะฟลาทอกซินบี1 บี2 จี1 และจี2 เป็น 0.96–8.68, 0.19–1.73, 0.96–8.68 และ 0.19–1.73 µg/kg ตามลำดับ

ขีดจำกัดของการตรวจพบ (LOD): นำตัวอย่าง sample blank เติมสารมาตรฐานอะฟลาทอกซินแต่ละชนิดให้มีความเข้มข้นเป็น 0.25 µg/kg จำนวน 10 ซ้ำ จากนั้นทดสอบตัวอย่างตามวิธีทดสอบปริมาณอะฟลาทอกซินในเมล็ดแมงลัก พิจารณาอัตราส่วนของสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน (s/n) พบว่า s/n ของอะฟลาทอกซินบี1 บี2 จี1 และจี2 ในตัวอย่างเมล็ดแมงลัก มีค่า 22.57±7.52, 20.21±7.23, 6.07±1.55 และ 7.81±2.10 ตามลำดับ โดยผลการทดลองทั้ง 10 ซ้ำมีค่า s/n มากกว่า 3 ซึ่งผ่านเกณฑ์การยอมรับ ($s/n \geq 3$) (Wenzl et al., 2016) ดังนั้น LOD ของอะฟลาทอกซินแต่ละชนิดของวิธีทดสอบนี้มีค่า 0.25 µg/kg

ขีดจำกัดของการวัดเชิงปริมาณ (LOQ): นำตัวอย่าง sample blank เติมสารมาตรฐานอะฟลาทอกซินแต่ละชนิดให้มีความเข้มข้นเป็น 0.50 µg/kg จำนวน 10 ซ้ำ จากนั้นทดสอบตัวอย่างตามวิธีทดสอบปริมาณอะฟลาทอกซินในเมล็ดแมงลัก พิจารณาค่า s/n พบว่า s/n ของอะฟลาทอกซินบี1 บี 2 จี1 และจี2 ในตัวอย่างเมล็ดแมงลัก มีค่า 44.12±7.75, 38.96±6.86, 13.02±2.33 และ 15.94±2.70 ตามลำดับ โดยผลการทดลองทั้ง 10 ซ้ำมีค่า s/n มากกว่า 10 ซึ่งผ่านเกณฑ์การยอมรับ (s/n≥10) (Wenzl et al., 2016) และพิสูจน์ยืนยัน LOQ โดยใช้เกณฑ์ความแม่นและความเที่ยงต่อไป

ความแม่นและความเที่ยง: นำตัวอย่าง sample blank เติมสารมาตรฐานอะฟลาทอกซินแต่ละชนิดให้มีความเข้มข้นเป็น 0.50, 5.0 และ 10 µg/kg ความเข้มข้นละ 10 ซ้ำ จากนั้นทดสอบตัวอย่างตามวิธีทดสอบปริมาณอะฟลาทอกซินในเมล็ดแมงลัก คำนวณ %recovery และ $\%RSD_r$ พิจารณาความแม่นโดยใช้ %recovery พบว่ามีค่าอยู่ในช่วง 82–92 (Table 1) ซึ่งผ่านเกณฑ์การยอมรับ (%recovery อยู่ในช่วง 40–120% ที่ระดับความเข้มข้น 0.50 µg/kg และอยู่ในช่วง 60–115% ที่ระดับความเข้มข้น 5 และ 10 µg/kg) (Latimer, 2023) พิจารณาความเที่ยงโดยใช้ $\%RSD_r$ พบว่ามีค่าอยู่ในช่วง 3.12–9.99% (Table 1) ซึ่งผ่านเกณฑ์การยอมรับ ($\%RSD_r \leq 30\%$ ที่ระดับความเข้มข้น 0.50 µg/kg และ $\%RSD_r \leq 21\%$ ที่ระดับความเข้มข้น 5 และ 10 µg/kg) (Latimer, 2023) ดังนั้นวิธีทดสอบนี้มีความแม่นและความเที่ยงอยู่ในช่วงเกณฑ์การยอมรับ และ LOQ ของอะฟลาทอกซินแต่ละชนิดของวิธีทดสอบนี้มีค่า 0.50 µg/kg

Table 1 Accuracy and precision for aflatoxin analysis in basil seed by HPLC-FLD (n = 10)

Type of aflatoxin	Spiking level (µg/kg)	Detected conc. in sample (µg/kg)	%Recovery	$\%RSD_r$
B1	0.50	0.4411±0.0399	88±8	9.05
	5.0	4.1512±0.2548	83±5	6.14
	10	8.6110±0.2688	86±3	3.12
B2	0.50	0.4591±0.0297	92±6	6.47
	5.0	4.1851±0.2174	84±4	5.19
	10	8.5487±0.2758	85±3	3.23
G1	0.50	0.4444±0.0436	89±9	9.81
	5.0	4.0856±0.2971	82±6	7.27
	10	8.6448±0.4739	86±5	5.48
G2	0.50	0.4415±0.0441	88±9	9.99
	5.0	4.2017±0.2113	84±4	5.03
	10	8.6718±0.3847	87±4	4.44

การประเมินค่าความไม่แน่นอนของการวัด (Measurement uncertainty): ใช้วิธีการประเมินค่าความไม่แน่นอนของการวัดตามแนวทางการใช้ข้อมูลจากการตรวจสอบความใช้ได้ของวิธีทดสอบ (Method validation approach) มีแหล่งของค่าความไม่แน่นอนมาจากความเที่ยง u(P) และความเอนเอียง u(R) แสดงใน Table 2 โดยความไม่แน่นอนของ อะฟลาทอกซินบี1 บี2 จี1 และจี2 ของวิธีทดสอบ มีค่าร้อยละ 22.34, 21.26, 25.33 และ 21.78 ตามลำดับ และมีค่าต่ำกว่า default expanded uncertainty ตาม Commission Implementing regulation (EU) 2023/2782 ที่กำหนดไว้ไม่เกินร้อยละ 50 (European Commission, 2023) แสดงว่าวิธีทดสอบอะฟลาทอกซินในเมล็ดแมงลักมีความเหมาะสมกับการนำไปใช้งาน

Table 2 Evaluation of measurement uncertainty of aflatoxin analysis in basil seed by HPLC-FLD

Source of uncertainty	Relative standard uncertainty			
	Aflatoxin B1	Aflatoxin B2	Aflatoxin G1	Aflatoxin G2
Precision, u(P)	0.0657	0.0514	0.0773	0.0695
Trueness, u(R)	0.0903	0.0931	0.1003	0.0839
Combined uncertainty, u(C) (at Concentration 10 µg/kg)	1.1168	1.0630	1.2664	1.0890
Expanded uncertainty at 95% confidence interval (k = 2)	2.234	2.126	2.533	2.178
Percentage of expanded uncertainty	22.34	21.26	25.33	21.78

การนำไปประยุกต์ใช้กับการทดสอบอะฟลาทอกซินในเมล็ดแมงลัก

นำวิธีที่พัฒนาและตรวจสอบความใช้ได้ของวิธีทดสอบไปวิเคราะห์เมล็ดแมงลักจากแหล่งจำหน่ายภายในประเทศ จำนวน 31 ตัวอย่าง แสดงใน Table 3 พบว่ามีตัวอย่างเมล็ดแมงลักจำนวน 10 ตัวอย่าง ที่ไม่พบการปนเปื้อนของอะฟลาทอกซิน (ร้อยละ 32.3) และพบการปนเปื้อนของอะฟลาทอกซินจำนวน 21 ตัวอย่าง โดยชนิดของอะฟลาทอกซินที่พบในตัวอย่างเมล็ดแมงลัก ได้แก่ บี1 และบี2 นอกจากนี้พบตัวอย่างเมล็ดแมงลักจำนวน 1 ตัวอย่าง (ร้อยละ 3.2) ทีมีปริมาณอะฟลาทอกซินทั้งหมด 33.18 µg/kg ซึ่งเกินค่ามาตรฐานไทย (มากกว่า 20 µg/kg)

Table 3 Occurrence of Aflatoxin in basil seed in domestic market (n=31)

Type of aflatoxin	No. of negative sample* (%)	No. of AF contamination sample (%)		
		0.25-10 µg/kg	>10-20 µg/kg	>20 µg/kg
Aflatoxin B1	10 (32.3)	20 (64.5)	0 (0)	1 (3.2)
Aflatoxin B2	24 (77.4)	7 (22.6)	0 (0)	0 (0)
Aflatoxin G1	31 (100)	0 (0)	0 (0)	0 (0)
Aflatoxin G2	31 (100)	0 (0)	0 (0)	0 (0)
Total aflatoxin (Aflatoxin B1+B2+G1+G2)	10 (32.3)	19 (61.3)	1 (3.2)	1 (3.2)

Note: * negative sample = not detected or below the measurable detection limit of 0.25 µg/kg

สรุป

การพัฒนาวิธีทดสอบอะฟลาทอกซินในเมล็ดแมงลักที่ดัดแปลงจากวิธีมาตรฐาน AOAC (2023) 999.07 โดยใช้เครื่อง HPLC-FLD พบว่าตัวทำละลายที่เหมาะสมในการสกัดอะฟลาทอกซินในเมล็ดแมงลัก คือ methanol และจากการตรวจสอบความใช้ได้ของวิธีทดสอบ พบว่าวิธีที่พัฒนาขึ้นมีค่า LOD และ LOQ ต่ำกว่าค่าเกณฑ์มาตรฐานไทย มีความแม่นและความเที่ยงอยู่ในช่วงเกณฑ์การยอมรับ และค่าความไม่แน่นอนของการวัดมีความเหมาะสมกับ การนำไปใช้งาน จึงสามารถนำวิธีทดสอบที่พัฒนาขึ้นนี้ไปใช้ทดสอบปริมาณอะฟลาทอกซินในเมล็ดแมงลักได้อย่างถูกต้อง เหมาะสม และสอดคล้องกับมาตรฐานของประเทศไทย

เอกสารอ้างอิง

กระทรวงเกษตรและสหกรณ์. 2556. ประกาศกระทรวงเกษตรและสหกรณ์ เรื่อง กำหนดพืชเป็นพืชควบคุมเฉพาะ พ.ศ. 2556. ราชกิจจานุเบกษา เล่ม 132 ตอนพิเศษ 158ง.

กระทรวงเกษตรและสหกรณ์. 2568. มาตรฐานสินค้าเกษตร มกษ. 9045-1-2568 เรื่อง การจัดหมวดหมู่สินค้าเกษตร. ราชกิจจานุเบกษา เล่ม 142 ตอนพิเศษ 170ง.

กระทรวงสาธารณสุข. 2563. ประกาศกระทรวงสาธารณสุข (ฉบับที่ 414) พ.ศ. 2563 เรื่อง มาตรฐานอาหารที่มีสารปนเปื้อน. ราชกิจจานุเบกษา เล่ม 137 ตอนพิเศษ 118ง.

คณะเภสัชศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร. 2558. แมงลัก. [ลิงค์ที่น่าสงสัยถูกลบ], 24 มีนาคม 2567.

อนันทิตา แสงสุริยวงษ์, สุพิชญ์รดา พงศ์ศรีกุล, พรรัตน์ สินชัยพานิช, นภัสสร เพียสุระ, จินตนา ศิริวราศัย. 2566. การศึกษาคุณสมบัติทางเคมีกายภาพของเมือกแมงลักผงและการนำไปใช้พัฒนาเครื่องดื่มควบคุมน้ำหนัก. วารสารวิทยาศาสตร์บูรพา 28: 772–778.

อมรา ชินภูติ, อารีรัตน์ พระเพชร, ศุภรา อัคคะสาระกุล, อรณิชชา สุวรรณโฉม, สมเพชร พรมเมืองดี, ไพศาล รัตนเสถียร. 2549. การแก้ปัญหาการปนเปื้อนของสารแอฟลาทอกซินในเมล็ดแมงลักส่งออกไปประเทศญี่ปุ่น. สำนักวิจัยพัฒนาวิทยาการหลังการเก็บเกี่ยวและแปรรูปผลิตผลเกษตร กรมวิชาการเกษตร. กรุงเทพฯ.

Barwick, V.J., Ellison, S.L.R. 2000. VAM Project 3.2.1 development and harmonisation of measurement uncertainty principles part (d): Protocol for uncertainty evaluation from validation data version 5.1. www.demarcheiso17025.com/private/Protocol20for%20uncertainty%20evaluation%20from%20validation%20data.pdf, 8 May 2024.

Cantwell, H. 2025. Eurachem Guide: The Fitness for Purpose of Analytical Methods – A Laboratory Guide to Method Validation and Related Topics, 3rd ed. www.eurachem.org, 1 June 2025.

European Commission. 2023. Commission implementing regulation (EU) 2023/2782 of 14 December 2023 laying down the methods of sampling and analysis for the control of the levels of mycotoxins in food and repealing Regulation (EC) No 401/2006. http://eurlex.europa.eu/eli/reg_impl/2023/2782/oj, 1 June 2025.

Latimer, G.W. Jr. 2023. Official Method of Analysis of AOAC International, 22nd ed. AOAC International. Chapter 49: 74–76, Appendix F: 1–18.

Pitt, J.I., Wild, C.P., Baan, R.A., Gelderblom, W.C.A., Miller, J.D., Riley, R.T., Wu, F. 2012. Improving Public Health through Mycotoxin Control. IARC Scientific Publication No.158.

Wenzl, T., Haedrich, J., Schaechtele, A., Robouch, P., Stroka, J. 2016. Guidance Document on the Estimation of LOD and LOQ for Measurements in the Field of Contaminants in Feed and Food. https://ec.europa.eu/food/sites/food/files/plant/docs/pesticides_mrl_guidelines_wrkdoc_2017-11813.pdf, 31 December 2018.

การพัฒนาและการทดสอบบรรจุภัณฑ์พลุวัสดุธรรมชาติที่ใช้ในการทำฝนเมฆเย็น

Development and evaluation of packaging designs for natural substance cold cloud seeding powder flare

ศิริเพ็ญ สมเรือน*, ฉันติ เดชโยธิน, ศรีธรรม ดั่นประดิษฐ์, อริสรา นาคบุรี, จตุรภรณ์ ลีนานนท์

Siripen Somruen*, Chanti Detyotin, Sritram Danpradit, Arisara Nakburee, Jaturaporn Leenanon

กรมฝนหลวงและการบินเกษตร กรุงเทพฯ 10900

Department of Royal Rainmaking and Agricultural Aviation, Bangkok 10900, Thailand

*Corresponding author. E-mail address: siripen888@gmail.com

บทคัดย่อ

พลุวัสดุธรรมชาติในการทำฝนเมฆเย็นถูกติดตั้งที่อากาศยานปรับความดัน ปฏิบัติการบนสภาพแวดล้อมที่มีความชื้นสัมพัทธ์สูง อุณหภูมิและความดันบรรยากาศต่ำมาก จึงจำเป็นต้องออกแบบบรรจุภัณฑ์พิเศษเพื่อให้ทนต่อสภาพอากาศได้ งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาและทดสอบบรรจุภัณฑ์พลุ สำหรับบรรจุสาร Natural Ice Nuclei (NIN) โดยออกแบบบรรจุภัณฑ์พลุโมเดล A, B และ C ทดสอบด้วยการจำลองสภาพอากาศที่คล้ายคลึงกับการทำฝนเมฆเย็น พบว่าพลุโมเดล A และ B ไม่สามารถขับดันสาร NIN ได้ แต่พลุโมเดล C มีประสิทธิภาพการขับดันสาร NIN 100% จากนั้นนำพลุโมเดล C ทดสอบภาคอากาศ พบว่าพลุโมเดล C มีการขับสาร NIN 100% จากภาพเอกซเรย์ภายในพลุโมเดล C ที่ผ่านสภาวะจำลองการทำฝนเมฆเย็น พบว่าสาร NIN อยู่หนาแน่นบริเวณฝาปิดท้ายกระสุน ดังนั้น บรรจุภัณฑ์พลุโมเดล C ที่มีวัสดุแกนกระทุ้งที่แข็งแรง จึงสามารถขับดันสาร NIN ที่อยู่หนาแน่นบริเวณฝาปิดท้ายกระสุนได้อย่างมีประสิทธิภาพมากกว่าพลุโมเดล A และ B

คำสำคัญ: แกนน้ำแข็งวัสดุธรรมชาติ, การทดสอบบรรจุภัณฑ์พลุ, การทำฝนเมฆเย็น, บรรจุภัณฑ์พลุวัสดุธรรมชาติ

Abstract

Natural material Pyrotechnic flare for Cold Cloud Seeding operation are usually installed on pressurized aircraft which operate in high relative humidity, extremely low temperature and atmospheric pressure. Therefore, to withstand these extreme conditions, the flare special packaging must be designed. This study aims to develop and test Natural Ice Nuclei (NIN) flare compatible packaging before deploying in operation. Flare Models A, B, and C were designed and tested under simulated Cold Cloud Seeding environments. The results showed that Flare Models A and B were unable to propel the NIN substance, whereas Flare Model C achieved 100% propulsion efficiency. Subsequently, Flare model C was tested by aircraft. The test results showed that Flare Model C achieved 100% NIN propulsion efficiency. Moreover X-ray images of the interior of Flare Model C under simulated Cold Cloud Seeding environments showed the the NIN substance was concentrated around the end cap. In conclusion, the packaging Flare Model C which has strong ejector core material. It has higher efficiency in propelling the NIN substance around the end cap than Flare Models A and B.

Keywords: Cold cloud seeding, Flare packaging testing, Natural ice nuclei, NIN flare packaging

คำนำ

เมฆเย็นเป็นกระบวนการที่เมฆมีการเจริญเติบโตและก่อยอดสูงขึ้นไปในชั้นบรรยากาศที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า 0 องศาเซลเซียส โดยจะเกิดกระบวนการผลึกน้ำแข็ง (Ice–crystal process) ที่บริเวณยอดเมฆที่มีอุณหภูมิของเม็ดน้ำต่ำกว่าจุดเยือกแข็ง แต่ยังไม่กลายเป็นน้ำแข็งที่เรียกว่าเม็ดน้ำเย็นยิ่งยวด (Super cooled droplets) ในกรณีของการเกิดผลึกน้ำแข็งแบบ Heterogeneous nucleation จะมีการใช้แกนน้ำแข็ง (Ice nuclei) เพื่อทำหน้าที่เป็นแกนของการเกิดผลึกน้ำแข็ง (Fletcher, 1958) เมื่อผลึกน้ำแข็งหรือเม็ดน้ำแข็งมีขนาดโตขึ้นก็จะร่วงหล่นลงมาชนกับผลึกน้ำแข็งที่มีขนาดเล็กกว่าและเกาะติดกัน ทำให้ผลึกน้ำแข็งหรือเม็ดน้ำแข็งมีขนาดใหญ่มากขึ้น ในที่สุดก็จะตกพ้นฐานเมฆลงมาเป็นหิมะลูกเห็บหรืออาจละลายเป็นน้ำฝนเมื่อผ่านชั้นบรรยากาศที่มีอุณหภูมิสูงกว่า 0 องศาเซลเซียส ก่อนตกลงสู่พื้นดิน (ศูนย์ฝนหลวงหัวหิน, 2565)

การดัดแปรสภาพอากาศในเมฆเย็นนิยมใช้ซิลเวอร์ไอโอไดด์ (AgI) เป็นแกนน้ำแข็ง (North American Weather Modification Council, 2024) เพื่อช่วยก่อให้เกิดผลึกน้ำแข็งที่อุณหภูมิสูงกว่าที่เกิดในธรรมชาติ และทำให้เกิดฝนตกจากเมฆเย็น ซึ่งมีการใช้อย่างแพร่หลายในต่างประเทศ (Marcolli et al., 2016) อย่างไรก็ตาม ซิลเวอร์ไอโอไดด์เป็นสารประกอบของโลหะ เมื่อเกิดการสะสมของซิลเวอร์ไอโอไดด์ในดินและแหล่งน้ำ อาจส่งผลกระทบต่อสิ่งมีชีวิตที่อาศัยอยู่ในระบบนิเวศหรือสิ่งแวดล้อมในระยะยาว (Fajardo et al., 2016; United States Government Accountability Office, 2024) ในประเทศไทยมีการใช้ซิลเวอร์ไอโอไดด์เพื่อทำฝนจากเมฆเย็นและยับยั้งการเกิดลูกเห็บ งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาออกแบบและทดสอบบรรจุภัณฑ์พลุวัสดุธรรมชาติประเภท Powder Flare เพื่อบรรจุสารวัสดุธรรมชาติที่มีคุณสมบัติเป็นแกนน้ำแข็งที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมและมีประสิทธิภาพในการทำฝนเมฆเย็น เป็นการรองรับมาตรการลดใช้สารเคมีและยังสอดคล้องกับยุทธศาสตร์ชาติ 20 ปี ที่มุ่งเน้นด้านการสร้างนวัตกรรมและเทคโนโลยีที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม

อุปกรณ์และวิธีการ

อุปกรณ์

1. ห้องทดสอบ (Test Chamber) ประกอบด้วย เครื่องยิงพลุ (Flare Launcher) และติดตั้งเกจวัดสุญญากาศ (Vacuum Gauge) ช่วงแรงดัน -1,000–0 mPa (VALUE Mechanical & Electrical Products CO., LTD, ประเทศจีน)

2. เครื่องเขย่า (Shaker Machine) รุ่น AS200 Control (Retsch GmbH, ประเทศเยอรมนี)

3. ตู้ควบคุมอุณหภูมิ (Refrigerator) รุ่น GR-D906 (Toshiba, ประเทศไทย) ซึ่งวัดอุณหภูมิโดยเทอร์โมคัปเปิล (Thermocouple) รุ่น Fluke 54 series 2 ประเภท K วัดอุณหภูมิช่วง -200 °C ถึง 1,372 °C (Fluke Corporation, ประเทศจีน)

4. ปั๊มสุญญากาศ (Vacuum Pump) รุ่น XZ-1A (LEETO, ประเทศจีน)

5. เครื่องทดสอบการสั่นสะเทือน (Vibration Testing Machine) ระดับการสั่นสะเทือน 9.8–588.4 m/s^2 (Weiss Technik North America, Inc., ประเทศอเมริกา)

6. เครื่องควบคุมอุณหภูมิและความชื้น (Temperature and Humidity Test Machine) รุ่น HD-E702-1000K40 ควบคุมอุณหภูมิ -10 °C ถึง 140 °C ความชื้นสัมพัทธ์ 25%–90% (HAIDA Equipment Co. Ltd, ประเทศจีน)

7. เครื่องกำเนิดรังสีเอ็กซ์ (X-ray Generator) รุ่น XR200 (Golden Engineering Inc., ประเทศอเมริกา)

วิธีการวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการออกแบบ, พัฒนาและทดสอบบรรจุภัณฑ์พลุวัสดุธรรมชาติเพื่อใช้ในการทำฝนเมฆเย็น โดยมีแผนภาพขั้นตอนการวิจัยตาม Fig. 1 ประกอบด้วย 1. การออกแบบบรรจุภัณฑ์พลุวัสดุธรรมชาติประเภท Powder Flare เพื่อบรรจุสาร Natural Ice Nuclei (NIN) 2. การทดสอบการขับดันพลุวัสดุธรรมชาติภายใต้การจำลองสภาวะแวดล้อมของอากาศสำหรับการทำฝนเมฆเย็น 3. การทดสอบภาคอากาศ 4. การวิเคราะห์ลักษณะการจัดเรียงอนุภาคของสาร NIN ซึ่งบรรจุอยู่ภายในพลุวัสดุธรรมชาติที่สภาวะอากาศผิวพื้นและภายใต้การจำลองสภาวะแวดล้อมของอากาศสำหรับการทำฝนเมฆเย็น

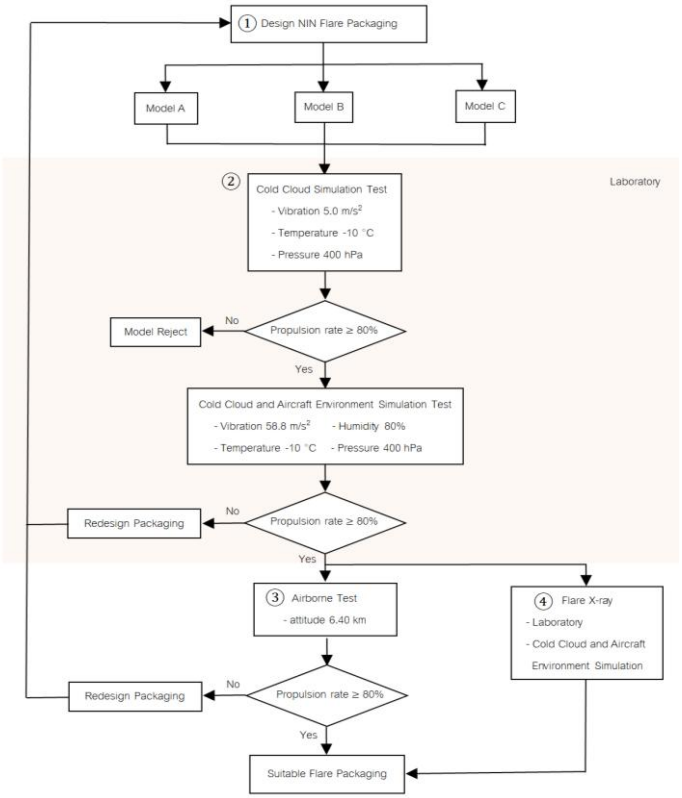


Fig.1 Conceptual Framework for Flare Packing Development and Evaluation

การออกแบบบรรจุภัณฑ์พลุวัสดุธรรมชาติ

คณะผู้วิจัยออกแบบพลุวัสดุธรรมชาติประเภท Powder Flare โมเดล A (Fig. 2A) เมื่อจ่ายกระแสไฟฟ้าไปที่ Electric Primer ดินส่งซึ่งอยู่ภายในจะเกิดการเผาไหม้กลายเป็นก๊าซร้อน (ศูนย์วิจัยพัฒนาวิทยาศาสตร์เทคโนโลยีการบินและอวกาศกองทัพอากาศ, 2539) ซึ่งจะผลักดันสาร NIN ออกทางฝาปิดท้ายกระสุน พลุวัสดุธรรมชาติโมเดล A สามารถขับดันสาร NIN ที่ภาคพื้นได้ 100% แต่เมื่อนำพลุวัสดุธรรมชาติโมเดล A ไปทดสอบภาคอากาศที่ระดับความสูงการทำฝนเมฆเย็นหรือ 6.40 กิโลเมตรพบว่าพลุวัสดุธรรมชาติโมเดล A ขัดข้องไม่สามารถขับดันสาร NIN ออกทางฝาปิดท้ายกระสุน (End Cap) เนื่องจากสภาวะอากาศที่ระดับความสูงในการทำฝนเมฆเย็นมีความแตกต่างกับสภาวะอากาศผิวพื้น ได้แก่ ความดันอากาศต่ำ อุณหภูมิต่ำ และความชื้นสัมพัทธ์สูง อีกทั้งปัจจัยการสั่นสะเทือนจากการทำงานของอากาศยานขณะทำฝนเมฆเย็น อาจส่งผลต่อความสามารถการไหลของผง (Powder Flowability) ลดลง ซึ่งมีหลายปัจจัย อาทิ อุณหภูมิ (Mehrabi et al., 2024) ความชื้นสัมพัทธ์ (Jiaying, 2024) เป็นต้น คณะผู้วิจัยจึงได้พัฒนาแบบพลุวัสดุธรรมชาติโมเดล B

และโมเดล C โดยเพิ่มแกนกระทุ้งและแผ่นรับแรงดัน (Pressure Absorbance (B)) ซึ่งทำให้แกนกระทุ้งอยู่ในตำแหน่งตั้งฉากกับฝาปิดท้ายกระสุน เป็นการเสริมการผลักดันให้ End Cap ออกจากพลุ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการขับดันสาร NIN ออกทาง End Cap ซึ่งพลุวัสดุธรรมชาติโมเดล B เลือกใช้วัสดุแกนกระทุ้งเป็นแกนกระดาษ (Paper Core) (Fig. 2B) ส่วนพลุวัสดุธรรมชาติโมเดล C ใช้ Paper Core ร่วมกับแกนไม้กระทุ้ง (Wood Ejector) (Fig. 2C)

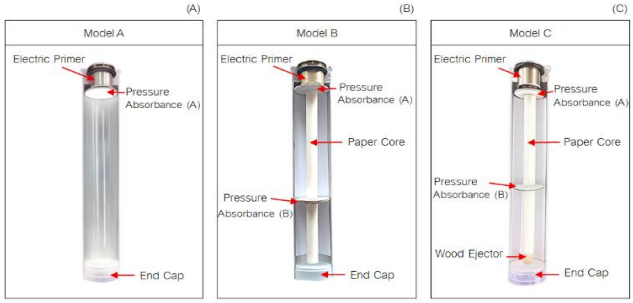


Fig. 2 Design of natural powder flare packaging of (A) model A, (B) model B and (C) model C

การทดสอบพลุวัสดุธรรมชาติ

-การทดสอบการขับดันพลุวัสดุธรรมชาติภายใต้การจำลองสภาวะแวดล้อมของอากาศสำหรับการทำฝนเมฆเย็น เนื่องจากสาร NIN มีคุณสมบัติเป็นแกนผลึกน้ำแข็งเหมือนกับซิลเวอร์ไอโอไดด์ในช่วงอุณหภูมิประมาณ -6 °C ถึง -12 °C มีการทดสอบประสิทธิภาพของพลุซิลเวอร์ไอโอไดด์ที่ระดับความสูง 6.5 กิโลเมตรและที่อุณหภูมิ -10 °C (Silverman et al., 1994) จึงกำหนดการทดสอบพลุวัสดุธรรมชาติโดยจำลองสภาวะสิ่งแวดล้อมของอากาศที่ระดับความสูง 6.5 กิโลเมตร

- การทดสอบการขับดันพลุวัสดุธรรมชาติภายใต้การสั่นสะเทือน อุณหภูมิต่ำ และความกดอากาศต่ำ โดยนำพลุวัสดุธรรมชาติโมเดล A B และ C บรรจุลงในเครื่องเขย่า (Shaker Machine) (Fig. 3A) การสั่นสะเทือน 5.0 m/s^2 เป็นเวลา 2 ชั่วโมง จากนั้นนำพลุวัสดุธรรมชาติไปไว้ในตู้ควบคุมอุณหภูมิ (Fig. 3B) ที่อุณหภูมิ -10 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง โดยวัดอุณหภูมิด้วยเทอร์โมคัปเปิล (Thermocouple) และนำไปบรรจุลงในเครื่องยิงพลุที่อยู่ในห้องทดสอบ (Test Chamber) (Fig. 3C) ต่อวงจรไฟฟ้ากระแสตรงขนาด 12 V เพื่อเป็นแหล่งจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับเครื่องยิงพลุ จากนั้นเปิดปั๊มสุญญากาศ (Vacuum Pump) เพื่อลดความดันอากาศภายในห้องทดสอบ (Test Chamber) ให้มีค่า 400 hPa และกดสวิตช์เพื่อจุดพลุวัสดุธรรมชาติ เนื่องจากพลุซิลเวอร์ไอโอไดด์ที่ใช้ในการทำฝนเมฆเย็นมีประสิทธิภาพการขับดันสารไม่น้อยกว่า 80% (รัชนีวรรณ และประเสริฐ, 2550) จึงได้กำหนดเกณฑ์พลุวัสดุธรรมชาติขับดันสาร NIN ออกจาก End Cap ไม่น้อยกว่า 80% คัดเลือกโมเดลพลุวัสดุธรรมชาติที่ผ่านเกณฑ์เพื่อนำไปทดสอบในขั้นตอนต่อไป

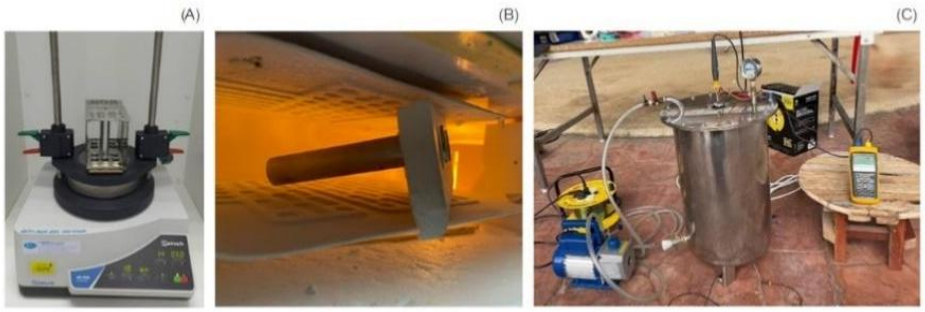


Fig. 3 Simulation Instruments (A) Shaker Machine, (B) Temperature and Humidity Test Machine, (C) Test Chamber and Vacuum Pump

- การทดสอบการขับดันพลุวัสดุธรรมชาติภายใต้การสั่นสะเทือน อุณหภูมิต่ำ ความกดอากาศต่ำ และความชื้นสัมพัทธ์สูง โดยนำพลุวัสดุธรรมชาติโมเดลที่ขับสาร NIN สูงสุด มาบรรจุลงในเครื่องทดสอบการสั่นสะเทือน (Vibration Testing Machine) (Fig. 4A) ที่การสั่นสะเทือน 19.6 m/s^2 เป็นเวลา 2 ชั่วโมง 55 นาที และ 58.8 m/s^2 เป็นเวลา 5 นาที จากนั้นนำพลุวัสดุธรรมชาติบรรจุลงในเครื่องยิงพลุ (Fig. 4B) ที่อยู่ในห้องทดสอบ (Test Chamber) (Fig. 4C) ที่ต่อวงจรไฟฟ้ากระแสตรงขนาด 12 V เพื่อเป็นแหล่งจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับเครื่องยิงพลุ แล้วนำไปติดตั้งในเครื่องควบคุมอุณหภูมิและความชื้น (Temperature and Humidity Test Machine) รุ่น HD-E702-1000K40 (Fig. 4D) ควบคุมความชื้นสัมพัทธ์ใน chamber ให้มีค่า 80% ต่อมาลดอุณหภูมิให้เท่ากับ -10 °C โดยวัดความชื้นสัมพัทธ์และอุณหภูมิด้วยเครื่องวัดอุณหภูมิและความชื้น (Thermo-Hygrometer) จากนั้นเปิดปั๊มสุญญากาศ (Vacuum Pump) เพื่อลดความดันอากาศภายในห้องทดสอบ (Test Chamber) ให้มีค่า 400 hPa เป็นเวลา 1 ชั่วโมง กดสวิตช์เพื่อจุดพลุวัสดุธรรมชาติ กำหนดเกณฑ์พลุวัสดุธรรมชาติขับดันสาร NIN ออกจาก End Cap ไม่น้อยกว่า 80% ทดสอบพลุวัสดุธรรมชาติจำนวน 3 นัด ทดสอบซ้ำจำนวน 5 ครั้ง

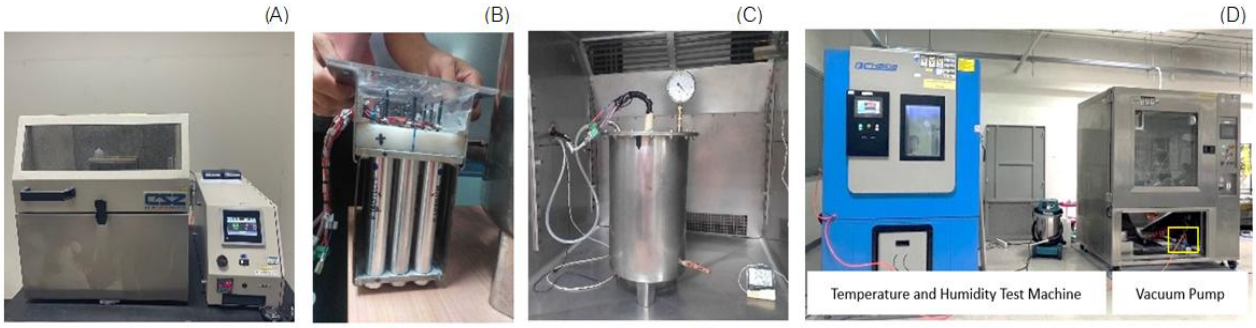


Fig. 4 Simulation Instruments (A) Vibration Testing Machine, (B) Flare Launcher, (C) Test Chamber, (D) Temperature & Humidity Test Machine and Vacuum Pump

การทดสอบการขับดันพลุวัสดุธรรมชาติภาคอากาศที่ระดับความสูง 6.39–6.40 กิโลเมตร ความดันอากาศ 446 hPa อุณหภูมิ -9.1±0.3 °C ความชื้นสัมพัทธ์ 15%–16% ที่อากาศโปร่งโดยไม่ได้ทดสอบกับเมฆ โดยอากาศยาน Super King Air 350 โดยยิงทดสอบพลุวัสดุธรรมชาติครั้งละ 1 นัด จำนวน 3–4 นัด/เที่ยวบิน จำนวน 3 เที่ยวบิน จำนวนรวม 10 นัด

การวิเคราะห์ลักษณะการจัดเรียงอนุภาคของสาร NIN ซึ่งถูกบรรจุอยู่ภายในพลุวัสดุธรรมชาติที่สภาวะอากาศผิวพื้นเปรียบเทียบกับพลุวัสดุธรรมชาติภายใต้การจำลองสภาวะแวดล้อมของอากาศสำหรับการทำฝนเมฆเย็น โดยนำพลุวัสดุธรรมชาติก่อนทดสอบและหลังการทดสอบด้วยเครื่องทดสอบการสั่นสะเทือน (Vibration Testing Machine) ที่การสั่นสะเทือน 19.6 m/s^2 เป็นเวลา 2 ชั่วโมง 55 นาที และ 58.8 m/s^2 เป็นเวลา 5 นาที และอยู่ในห้องทดสอบ (Test Chamber) ภายใต้ความชื้นสัมพัทธ์ 80% อุณหภูมิ -10 °C และความดันอากาศ 400 hPa เป็นเวลา 1 ชั่วโมง นำพลุวัสดุธรรมชาติไปถ่ายภาพรังสีด้วยเครื่องกำเนิดรังสีเอกซ์ (X-ray Generator) รุ่น XR200 ที่ความต่างศักย์ 20V

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

ผลการทดสอบการขับดันพลุวัสดุธรรมชาติภายใต้การสั่นสะเทือน 5.0 m/s^2 อุณหภูมิ -10 °C และ ความดันอากาศ 400 hPa จากผลการทดสอบ Table 1 พบว่าพลุวัสดุธรรมชาติโมเดล A ที่ไม่มีแกนกระทุ้ง และพลุวัสดุธรรมชาติ

โมเดล B ที่มีแกนกระทุ้งกระดาษ (Paper Core) และ Pressure Absorbance (B) ยังมีแรงไม่เพียงพอที่จะผลักฝาปิดท้ายกระสุน (End Cap) จึงทำให้ไม่สามารถขับดันสาร NIN ออกได้ ประกอบกับผงสาร NIN สามารถดูดซับแรงดัน และก่อให้เกิดแรงผลักย้อนกลับไปที่ Electric Primer ทำให้วงจรอิเลกทรอนิกส์เสียหาย ขณะที่พลุวัสดุธรรมชาติโมเดล C ที่ใช้ Paper Core ร่วมกับแกนไม้กระทุ้ง (Wood Ejector) ซึ่งมีความแข็งแรงมากกว่า ส่งผลให้พลุวัสดุธรรมชาติโมเดล C มีประสิทธิภาพการขับดันสาร NIN สูงถึง 100% ด้วยเหตุนี้ จึงคัดเลือกเฉพาะพลุวัสดุธรรมชาติโมเดล C ไปทดสอบในขั้นตอนต่อไป

Table 1 Result of NIN flare packaging test in cold cloud environment simulation laboratory

Model of Natural Flare Packaging	Flare Propulsion Efficiency (%)	Appearance of Flare after testing
A	0	
B	0	
C	100	

ผลการทดสอบการขับดันพลุวัสดุธรรมชาติภายใต้ภายใต้การสั่นสะเทือนสูงสุดที่ 58.8 m/s^2 อุณหภูมิ -10 °C ความชื้นสัมพัทธ์ 80% และความดันอากาศ 400 hPa จากผลการทดสอบ Table 2 พบว่า พลุวัสดุธรรมชาติโมเดล C ซึ่งภายในพลุประกอบด้วย Paper Core และ Wood Ejector มีประสิทธิภาพในการผลักดัน End Cap ออกจากพลุ ส่งผลให้มีการขับดันสาร NIN ออกจากปลอกอลูมิเนียมทางด้าน End Cap 100%

Table 2 Propulsion Test Result of NIN Flare Models C in Cold Cloud and Aircraft environment Simulation Laboratory

Test No. (Repeat)	Flare Propulsion Efficiency (%)	Appearance of Flare after testing
1	100	
2	100	
3	100	
4	100	
5	100	

ผลการทดสอบการขับดันพลุวัสดุธรรมชาติโมเดล C ภาคอากาศที่ระดับความสูง 6.39–6.40 กิโลเมตร ความดันอากาศ 446 hPa อุณหภูมิ -9.1±0.3 °C ความชื้นสัมพัทธ์ 15%–16% ที่อากาศโปร่งโดยไม่ได้ทดสอบกับเมฆ โดยอากาศยาน Super King Air 350 พบว่าพลุวัสดุธรรมชาติโมเดล C ซึ่งมีวัสดุแกนกระทุ้งและแผ่นรับแรงดันที่แข็งแรงมากกว่าพลุวัสดุธรรมชาติโมเดล A และ B ทำให้สามารถขับดันสาร NIN ออกทางฝาปิดท้ายกระสุน 100%

การวิเคราะห์ลักษณะองค์ประกอบภายในพลุวัสดุธรรมชาติจากภาพถ่ายรังสีด้วยเครื่องกำเนิดรังสีเอกซ์ (X-ray Generator) พบว่า ในสภาวะอากาศผิวพื้น ที่อุณหภูมิ 25 °C ความชื้นสัมพัทธ์ 55% และความกดอากาศ 1008 hPa จากภาพถ่ายพลุวัสดุธรรมชาติ Fig. 5A สีน้ำเงินแสดงถึงสาร NIN มีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอภายในพลุ แต่เมื่อพลุวัสดุธรรมชาติผ่านการสั่นสะเทือน 19.6 m/s^2 เป็นเวลา 2 ชั่วโมง 55 นาที และ 58.8 m/s^2 เป็นเวลา 5 นาที จากภาพถ่ายพลุวัสดุธรรมชาติ Fig. 5B มีสีน้ำเงินเข้มมากขึ้นบริเวณ End Cap อีกทั้งมีสีเขียวบริเวณใกล้ Electrical Primer แสดงถึงมีการจัดเรียงตัวของสาร NIN หนาแน่นมากขึ้นบริเวณ End Cap ส่งผลให้เกิดช่องว่างระหว่างอนุภาคสาร NIN เพิ่มมากขึ้นบริเวณใกล้ Electrical Primer ส่วนพลุวัสดุธรรมชาติที่ผ่านการสั่นสะเทือน 19.6 m/s^2 เป็นเวลา 2 ชั่วโมง 55 นาที และ 58.8 m/s^2 เป็นเวลา 5 นาที และอยู่ภายใต้ความชื้นสัมพัทธ์ 80% อุณหภูมิ -10 °C และความดันอากาศ 400 hPa เป็นเวลา 1 ชั่วโมง จากภาพถ่ายพลุวัสดุธรรมชาติ Fig. 5C พบว่าบริเวณใกล้ Electrical Primer สาร NIN มีการกระจายตัวเบาบาง แต่บริเวณ End Cap มีสาร NIN อยู่หนาแน่นมากที่สุด สะท้อนถึงการเลือกชนิดวัสดุแกนกระทุ้งที่มีความแข็งแรงเหมาะสม จึงมีความสำคัญเพื่อกระทุ้งดัน End Cap ออกจากพลุวัสดุธรรมชาติ มีผลต่อประสิทธิภาพการขับดันสาร NIN ของพลุวัสดุธรรมชาติ

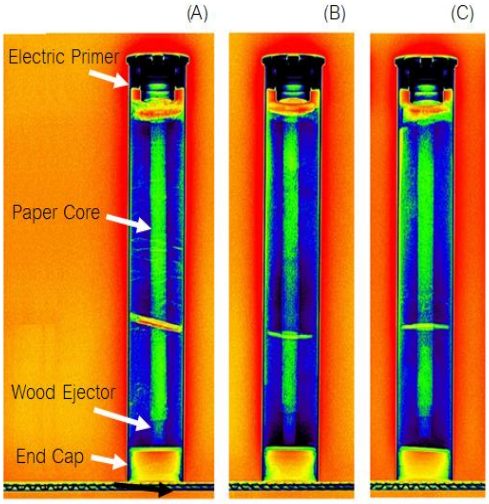


Fig. 5 X-ray result of NIN powders inside flare model C (A) Normal Conditions (B) After vibration test at 58.8 m/s^2 and (C) After Cold Cloud and Aircraft environment test

การดัดแปรสภาพอากาศเมฆเย็นทั่วโลกนิยมใช้พลุซิลเวอร์ไอโอไดด์ที่มีคุณสมบัติเป็นโลหะ ดังนั้น การพัฒนาและทดสอบบรรจุภัณฑ์พลุสำหรับสาร NIN ที่เป็นสารทำฝนชนิดใหม่จากวัสดุธรรมชาติและเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม เพื่อใช้ทดแทนหรือลดการใช้ซิลเวอร์ไอโอไดด์ จึงเป็นการสร้างการเติบโตที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมและทำให้เกิดการพัฒนาอย่างยั่งยืน

สรุป

การออกแบบ, พัฒนาและทดสอบบรรจุภัณฑ์พลุวัสดุธรรมชาติภายใต้การจำลองสภาวะแวดล้อมของอากาศสำหรับการทำฝนเมฆเย็น และการทดสอบภาคอากาศ พบว่าวัสดุแกนกระทุ้งและแผ่นรับแรงดันที่แข็งแรงเป็นปัจจัยสำคัญ

ที่สุดในการขับดันสาร NIN ออกทาง End Cap ได้ 100% ดังนั้น พลุวัสดุธรรมชาติโมเดล C จึงมีความเหมาะสมมากที่สุดที่จะนำไปใช้ในการดัดแปรสภาพอากาศเมฆเย็น ในอนาคตส่วนประกอบอื่น ๆ ของพลุควรผลิตจากวัสดุธรรมชาติ เช่น ฝาปิดท้ายกระสุนควรพัฒนาเป็นกระดาษเคลือบผิว (Coated Paper) หรือวัสดุพลาสติกชีวภาพ (Bioplastic) ซึ่งผลิตจากวัสดุธรรมชาติ ย่อยสลายได้ง่ายและเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณกองทุนส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม (สกสว.) ที่สนับสนุนทุนวิจัย และได้รับความร่วมมือจากศูนย์นาโนเทคโนโลยีแห่งชาติ อีกทั้งความอนุเคราะห์ในการผลิตพลุวัสดุธรรมชาติจากศูนย์วิจัยพัฒนาวิทยาศาสตร์เทคโนโลยีการบินและอวกาศกองทัพอากาศ สนับสนุนเครื่องวิทยาศาสตร์ในการทดสอบจากสถาบันเทคโนโลยีป้องกันประเทศ และรวมถึงคำแนะนำของผู้เชี่ยวชาญและบุคลากรสนับสนุนจากกรมฝนหลวงและการบินเกษตร

เอกสารอ้างอิง

รัชนีวรรณ ตาฟุมาศสวัสดิ์, ประเสริฐ อังสุรัตน์. 2550. สรุปและข้อเสนอแนะ. ใน: ประสิทธิภาพการทำฝนเมฆเย็นเครื่องบิน Alpha Jet. สำนักฝนหลวงและการบินเกษตร. กรุงเทพฯ, หน้า 24.

ศูนย์ฝนหลวงหัวหิน. 2565. กระบวนการเกิดฝนในเมฆเย็น (Cold Rain Process). ใน: รายงานฉบับสมบูรณ์โครงการพัฒนาการประเมินพื้นที่และปริมาณน้ำฝนจากการปฏิบัติการฝนหลวง. กรมฝนหลวงและการบินเกษตร กระทรวงเกษตรและสหกรณ์. กรุงเทพฯ, หน้า 2–12.

ศูนย์วิจัยพัฒนาวิทยาศาสตร์เทคโนโลยีการบินและอวกาศกองทัพอากาศ. 2539. ดินส่ง. ใน: โครงการวิจัยและพัฒนากระสุนสารเคมีซิลเวอร์ไอโอไดด์. กองทัพอากาศ. กรุงเทพฯ, หน้า 12.

Fajardo, C., Costa, G., Ortiz, L.T., Nande, M., Rodriguez-Membibre, M.L., Martin, M., Sanchez-Fortun, S. 2016. Potential risk of acute toxicity induced by AgI cloud seeding on soil and freshwater biota. Ecotoxicol. Environ. Saf. 133: 433–441.

Fletcher, N.H. 1958. Size effect in heterogeneous nucleation. J. Chem. Phys. 29: 572–576.

Jiaying, W. 2024. Powder Flowability: Understanding its Importance and Influencing Factors. J. Powder Metall. Min. 13: 452.

Marcolli, C., Nargare, B., Welti, A., Lohmann, U. 2016. Ice nucleation efficiency of AgI: review and new insights. Atmos. Chem. Phys. 16: 8915–8937.

Mehrabi, M., Talebi, F.A.A., Berry, N., Khajepor, S., Haeri, S., Gardy, J., Oluleke, J., Bayly, A., Hassanpour, A. 2024. Effect of Temperature on Aluminium Powder Flowability and Spreadability. KONA 2026001.

North American Weather Modification Council. 2024. Cold Season Cloud Seeding. https://nawmc.org/publications/, 8 April 2025.

Silverman, B.A., Woodley, W.L., Rosenfeld, D. 1994. The Cold Cloud Experiment. In: Thailand Applied Atmospheric Research Program Volume 3. Bureau of Reclamation. Colorado, D.C., pp. 17–23.

United States Government Accountability Office. 2024. Environmental and health effects of silver iodide and other seeding agents. In: Cloud Seeding Technology: Assessing Effectiveness and Other Challenges. Washington, D.C., p. 18.

การศึกษาร่วมกันระหว่างห้องปฏิบัติการทดสอบของรายการทดสอบสิ่งแปลกปลอมในพริกแกงปรุงสำเร็จชนิดน้ำ

Collaborative study on the extraction of light filth from red curry soup

สุดารัตน์ ขุนเมือง*, **ชาติชาย สุนทรธรรรม**, **ศจีรัตน์ กางกั้น**

Sudarat Khunmuang*, Chatchai Soontorntham, Sageerat Kangkunt

กลุ่มพัฒนาระบบตรวจสอบคุณภาพสินค้า กองพัฒนาระบบและรับรองมาตรฐานสินค้าพืช กรมวิชาการเกษตร, กรุงเทพฯ 10900

Quality Control for Plant and Plant Products Group, Plant Standard and Certificate Division, Department of Agriculture, Bangkok 10900, Thailand

*Corresponding author. E-mail address: sudaratkm695@gmail.com

บทคัดย่อ

การศึกษาร่วมกันระหว่างห้องปฏิบัติการของรายการทดสอบสิ่งแปลกปลอมชนิดเบาในพริกแกงปรุงสำเร็จชนิดน้ำ ซึ่งเป็นวิธีการที่ดัดแปลงขึ้นจาก AOAC official Method (2023) 945.87 เพื่อตรวจสอบความใช้ได้ของวิธีทดสอบห้องปฏิบัติการที่ให้ความร่วมมือในครั้งนี้ประกอบไปด้วย 4 ห้องปฏิบัติการ โดยใส่สิ่งทดสอบ ปีกแมลง และขนหนู ที่ 3 ระดับ คือระดับต่ำ (5 ชิ้น) กลาง (10ชิ้น) และสูง (15 ชิ้น) ลงในพริกแกงปรุงสำเร็จชนิดน้ำ เพื่อตรวจสอบประสิทธิภาพของวิธีที่ใช้วิเคราะห์ ผลปรากฏว่าทุกห้องปฏิบัติการพบ %Recovery ของปีกแมลงทั้ง 3 ระดับ อยู่ในช่วง 90–100% มีค่า %RSD 0-12.83%, %Recovery ของขนหนูทั้ง 3 ระดับอยู่ในช่วง 81.67–97.50% มีค่า %RSD 5.41–12.83% ผลผ่านเกณฑ์ทดสอบทั้ง 4 ห้องปฏิบัติการ คือ % Recovery ของปีกแมลงและขนหนูมีค่า 80–100% และ %RSD < 15% แสดงให้เห็นว่าสามารถใช้วิธี In house method based on AOAC (2023) 945.87 เป็นวิธีวิเคราะห์สิ่งแปลกปลอมชนิดเบาในพริกแกงปรุงสำเร็จชนิดน้ำ

คำสำคัญ: การศึกษาร่วมกันระหว่างห้องปฏิบัติการ, พริกแกงปรุงสำเร็จชนิดน้ำ, สิ่งแปลกปลอมชนิดเบา

Abstract

Collaborative study program for extraction of light filth in red curry soup which is a method modified from AOAC (2023) 945.87. Four laboratories participated in this collaborative study to verify the validity of the test method. Three levels of spike materials, insect fragment and rat hair at low (5 pcs.), medium (10 pcs.) and high (15 pcs.) levels were added to red curry soup for validate this test method. The results showed all laboratories demonstrated %recovery of three levels of insect fragments ranged from 90–100%, with a %RSD value of 0–12.83%. The percent recovery of rat hairs at three levels ranged from 81.67–97.50%, with a %RSD of 5.41–12.83%. All laboratories met the acceptance criteria, showing % recovery of insect fragment and rat hairs within the range of 80–100% and %RSD < 15%. This demonstrates that the In-house method based on AOAC (2023) 945.87 can be used as an analytical method for light filth in red curry soup.

Keywords: Collaborative study, Light filth, Red curry soup

คำนำ

สิ่งแปลกปลอม (Light filth) คือสิ่งที่ไม่เป็นที่ยอมรับของผู้บริโภค มีขนาดเป็นชิ้นเล็ก ๆ ลอยในชั้นน้ำมัน เช่น แมลงทั้งตัว เศษชิ้นของส่วนแมลง ขนสัตว์ฟันแทะต่าง ๆ (Gorham, 1991 และ Latimer, 2012) การตรวจวิเคราะห์สิ่งแปลกปลอมในอาหาร เพื่อใช้ในการควบคุมสุขลักษณะการผลิตในขั้นตอนต่าง ๆ ช่วยให้สะอาดถูกสุขลักษณะเหมาะสมแก่การบริโภค และเพื่อลดปัญหาการกักกันผลิตภัณฑ์อาหารส่งออกไป ประเทศสหรัฐอเมริกา ซึ่งเป็นตลาดหลักของการส่งออกที่มีกำลังซื้อสูง (ทนงพันธ์, 2557)

สิ่งแปลกปลอมในอาหารนั้นจัดเป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่สามารถช่วยสร้างความเชื่อมั่นในคุณภาพสินค้า ปัจจุบันทางห้องปฏิบัติการสิ่งปนปลอมของกรมวิชาการเกษตร ได้รับการรับรอง ISO/IEC 17025 ใช้วิธีวิเคราะห์สิ่งแปลกปลอมในผลิตภัณฑ์อาหารซึ่งเป็นวิธีที่เป็นมาตรฐานสากล แต่อย่างไรก็ตามวิธีวิเคราะห์ที่เป็นมาตรฐานระดับสากลนั้น ส่วนใหญ่จะไม่ครอบคลุมในทุกๆ ผลิตภัณฑ์อาหาร รวมถึงไม่มีวิธีวิเคราะห์พริกแกงปรุงสำเร็จชนิดน้ำ

วัตถุประสงค์ของการทำวิจัยนี้เพื่อหาวิธีวิเคราะห์สิ่งแปลกปลอมชนิดเบา (Light filth) ในพริกแกงปรุงสำเร็จชนิดน้ำเพื่อใช้เป็นวิธีมาตรฐาน หลังจากตรวจสอบความใช้ได้ของวิธีทดสอบ (Method validation) ระหว่างผู้ทดสอบภายในห้องปฏิบัติการแล้ว จากนั้นทำความร่วมมือ (Collaborative study) ทั้งหมด 4 ห้องปฏิบัติการ โดยการใส่สิ่งทดสอบในตัวอย่าง ที่ระดับต่ำ กลาง และสูง (5, 10, 15 ชิ้น) ดังวิธีการศึกษาของ Bryce and Glaze, 1994 ซึ่งทำ Collaborative study ในถั่วบด เพื่อหาความถูกต้องและความแม่นยำ ของวิธีทดสอบและดูประสิทธิภาพของวิธีที่ใช้วิเคราะห์

อุปกรณ์และวิธีการ

อุปกรณ์และสารเคมี

เครื่องทำน้ำร้อนแบบหม้อต้มไฟฟ้า ขนาด 160 ลิตร พร้อมสายฉีด, ตะแกรงร่อน เบอร์ 230 ขนาดรูตะแกรง 63 ไมครอน ชุดเครื่องกรอง ประกอบด้วย Hirsch funnel, Vacuum pump และ Suction flask, กระดาษกรองแบบมีเส้น, กล้องจุลทรรศน์ชนิด Wide field stereo microscope, ขวดแก้วรูปชมพู่ (Erlenmeyer flask) ขนาด 2,000 มิลลิลิตร, แท่ง Metal rod และคลิปหนีบ, น้ำกรอง, Isopropyl alcohol, *n*-Heptane, Glycerol, Ethanol

การเตรียมสิ่งทดสอบ (Spike material)

ประกอบไปด้วย ปีกด้วงงวง (*Sitophilus* spp.) ของตัวเต็มวัย นำมาเตรียม ภายใต้กล้องจุลทรรศน์โดยใช้เข็มเขี่ยและมีดผ่าตัด ตัดให้ได้ ขนาด 0.25 × 0.25 มิลลิเมตร และขนหนู (Rat hair) ชนิดขนอ่อน (Fur hair) ความยาวขนาด 1.0 มิลลิเมตร (Paris et al., 1968) แล้ววางลงบนกระดาษกรองและหยด Clearing agent (Glycerol: Ethanol, 3:2) เพื่อให้ Spike materials ยึดติดอยู่บนกระดาษกรอง ซึ่งในกระดาษกรอง 1 ชิ้น ประกอบไปด้วย ปีกแมลง ขนหนู ตามจำนวนที่ต้องการ จากนั้นจัดเก็บกระดาษกรองในจานเพาะเชื้อ (Petri dish) สำหรับใส่ในตัวอย่างพริกแกงปรุงสำเร็จชนิดน้ำที่จะทำการทดสอบต่อไป แสดงดัง Fig. 1

ศึกษารวบรวมข้อมูลเพื่อหาวิธีทดสอบสิ่งปนปลอมในพริกแกงปรุงสำเร็จชนิดน้ำที่เหมาะสม

เนื่องจากพริกแกงปรุงสำเร็จชนิดน้ำ มีองค์ประกอบที่มีกะทิและไขมัน จึงหาวิธีทดสอบสิ่งปนปลอมที่เหมาะสม โดยศึกษาและดัดแปลงมาจากวิธีทดสอบหาสิ่งปนปลอมใน Mole Paste (LIB 2865) และ มะขาม AOAC (2023) 945.87 เนื่องจากในวิธีเหล่านี้มีการใช้ Isopropyl alcohol ในการกำจัดไขมัน (defatted) และมีการใช้ n-heptane เพื่อดักจับสิ่งปน

ปลอม จากนั้นใช้วิธี trap flask แล้วนำไปตรวจสอบภายใต้กล้องจุลทรรศน์ ปรับวิธีทดสอบจนกระทั่ง ได้ค่า % recovery ของปีกแมลงและขนหนูมากกว่าหรือเท่ากับร้อยละ 80 ตรวจสอบความใช้ได้ของวิธีทดสอบสิ่งปนปลอมในพริกแกงปรุงสำเร็จชนิดน้ำระหว่างผู้ทดสอบในห้องปฏิบัติการ

การศึกษาร่วมกันระหว่างห้องปฏิบัติการ Collaborative study

ติดต่อห้องปฏิบัติการเอกชนที่ได้รับ การรับรองตามมาตรฐาน ISO/IEC 17025 และได้รับการยอมรับความสามารถในการทดสอบสิ่งแปลกปลอมรายการอื่นจากกรมวิชาการเกษตรแล้ว ได้แก่ บริษัท ห้องปฏิบัติการกลาง (ประเทศไทย) จำกัด สาขากรุงเทพฯ บริษัท เอแอลเอส แลบอราทอรี กรุ๊ป (ประเทศไทย) จำกัด และบริษัท ศูนย์ห้องปฏิบัติการและวิจัยทางการแพทย์และการเกษตรแห่งเอเชีย จำกัด (มหาชน) เพื่อขอความร่วมมือในการทดสอบ

เตรียมตัวอย่างทดสอบเพื่อส่งให้ห้องปฏิบัติการ (แสดงดัง Fig. 2) นำพริกแกงปรุงสำเร็จชนิดน้ำ 25 กรัม บรรจุลงในถ้วยพลาสติกพร้อมติดฉลากระบุรหัสตัวอย่าง และทำการเติม Spiked material ดังนี้; Subsample ที่ 1 ไม่ใส่ทั้งปีกแมลงและขนหนู (control), Subsample ที่ 2 ระดับต่ำ ใส่ปีกแมลง และขนหนู อย่างละ 5 ชิ้น, Subsample ที่ 3 ระดับกลาง ใส่ปีกแมลง และขนหนู อย่างละ 10 ชิ้น, Subsample ที่ 4 ระดับสูง ใส่ปีกแมลง และขนหนู อย่างละ 15 ชิ้น รวมตัวอย่างที่ส่งให้หนึ่งห้องปฏิบัติการ มี 4 Subsample แต่ละ Subsample มี 4 ซ้ำ รวมทั้งหมด 16 ตัวอย่าง เก็บในตู้เย็น

ส่งตัวอย่างทดสอบให้กับห้องปฏิบัติการที่ให้ความร่วมมือในการทำ Collaborative Study พร้อมกับได้แนบเอกสารเรื่องวิธีวิเคราะห์ In-house method based on AOAC (2023) 945.87 ในการทดสอบพริกแกงปรุงสำเร็จชนิดน้ำ และใบรายงานผลการทดสอบ

วิธีทดสอบสิ่งแปลกปลอมในพริกแกงปรุงสำเร็จชนิดน้ำ (ผสมกะทิ)

1. นำตัวอย่างพริกแกงปรุงสำเร็จชนิดน้ำออกจากซ่องแช่แข็ง ตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเพื่อให้ตัวอย่างละลาย ประมาณ 30 นาที เทตัวอย่าง 25 กรัม ใส่ในบีกเกอร์ขนาด 1,500 มิลลิลิตร ทำการชะตัวอย่างที่ติดอยู่ที่ถ้วยและฝาด้วย Isopropyl alcohol ลงในบีกเกอร์ จนกระทั่งตัวอย่างออกมาหมด 2) ใส่ magnetic bar เติม Isopropyl alcohol ที่ระดับ 700 มิลลิลิตร ต้มบน Hot plate stirrer จนเดือดเป็นเวลา 10 นาที 3) กรองตัวอย่างด้วยตะแกรงร่อน No. 230 โดยใช้น้ำร้อนล้างตัวอย่างจนให้เหลือแต่ตะกอนหรือน้ำที่ผ่านการล้างตัวอย่างนั้นใส 4) ล้างตัวอย่างในตะแกรงด้วยน้ำกรอง ลงในขวดรูปชมพู่ ขนาด 2000 มิลลิลิตร โดยมีกรวยแก้วรองปากขวด และเติมน้ำกรองลงในขวดรูปชมพู่ ให้ได้ปริมาตร 1000 มิลลิลิตร 5) เติม *n*-Heptane ปริมาตร 50 มิลลิลิตร ใช้แท่ง Metal Rod คนน้ำภายในขวดรูปชมพู่ ค่อนข้างแรง คน 2 นาที เพื่อให้สาร *n*-Heptane จับกับสิ่งแปลกปลอมชนิดเบาภายในขวดรูปชมพู่ และตั้งทิ้งไว้ 5 นาที 6) ครบกำหนดเวลาเติมน้ำกรองให้ชั้น *n*-Heptane ขึ้นมาถึงระดับคอขวดด้านล่าง โดยตั้งทิ้งไว้ 20 นาที และหมุน Metal Rod ทุกๆ 5 นาที เพื่อให้สิ่งแปลกปลอมที่ติด Metal Rod หลุดลอยขึ้นมาติดในชั้นของ *n*-Heptane 7) ครบกำหนดเวลาทำการ Trap Flask โดยการดึง Metal Rod ให้ถึงขวดและเทชั้น *n*-Heptane ลงในบีกเกอร์ ขนาด 500 มิลลิลิตร ทำการล้างคอขวด ด้วยน้ำกรอง 2 รอบ และเทน้ำที่ได้ลงในบีกเกอร์ใบเดิม 8) ครั้งที่ 2 ให้เติม *n*-Heptane ปริมาตร 40 มิลลิลิตร และกวน 2 นาที ตั้งทิ้งไว้ 15 นาที โดยหมุน Metal Rod ทุกๆ 5 นาที ครบกำหนดเวลาให้ทำการ Trap Flask โดยการดึง Metal Rod ให้ถึงคอขวด และเทชั้น *n*-Heptane ลงในบีกเกอร์พร้อมทั้งล้างคอขวด ด้วยน้ำกรอง และเทน้ำที่ได้ลงในบีกเกอร์ใบเดิม 9) ครั้งที่ 3 และ 4 ให้ทำแบบเดียวกันกับครั้งที่ 2 โดยใช้ *n*-Heptane ปริมาตร 30 มิลลิลิตร กวน 2 นาที ตั้งทิ้งไว้ 10 นาที และเทน้ำที่ได้ลงในบีกเกอร์ใบเดิม 10) เมื่อทำครบทั้ง 4 ครั้งแล้ว นำตัวอย่างที่ได้ในบีกเกอร์ไปกรองด้วยชุดเครื่องกรองผ่านกระดาษกรองแบบมีเส้น โดยเขียนรหัสตัวอย่าง วันที่ ลงบนกระดาษกรอง 11) นำกระดาษกรองที่ได้ใส่ลงในจานเพาะเชื้อ พร้อมหยด Clearing

Agent เพื่อรักษาสภาพตัวอย่างบนกระดาษกรอง 12) นำจานเพาะเชื้อไปส่องภายใต้กล้องจุลทรรศน์ Wide field Stereo Microscopes ที่กำลังขยาย 30 เท่า ตรวจนับจำนวน spike materials ปีกแมลงและขนหนูที่พบ, บันทึกผลลงในใบรายงานผลทดสอบ (ขั้นตอนวิธีทดสอบบางส่วน แสดงดัง Fig. 1–3)

การบันทึกผล

รวบรวมผลทดสอบจากห้องปฏิบัติการที่เข้าร่วมการทำ Collaborative study แล้วนำมาคำนวณหาค่าคืนกลับ (%Recovery) และ %ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานสัมพัทธ์ (%Relative standard deviation, %RSD) สรุปผลการทดสอบ

(A) (B) (C)

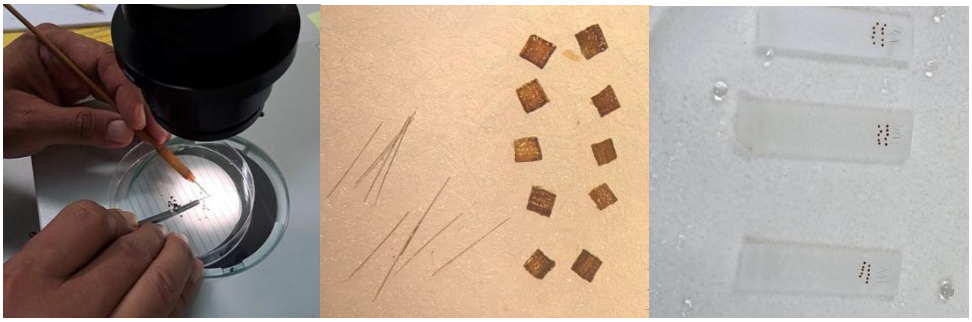


Fig.1 Spike material preparation (A), 10 pcs. of 1 mm. rat hair (fur hair) and insect fragment (elytra square of *Sitophilus* spp.) 0.25 x 0.25 mm. at 10x magnification (B), pieces of filter paper containing spiked material for analysis (C)

Fig. 2 Preparation of red curry soup samples with spiked materials for sending to each collaborator.

(A) (B) (C) (D)

Fig. 3 Light filth extraction of red curry soup; the sample was transferred to a No. 230 sieve and the remainder was washed with hot water (A), the residue on the sieve was transferred to an Erlenmeyer flask, the upper layer of n-heptane was trapped off (B) and transferred to a beaker (C), and it was filtered onto ruled filter paper (D).

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

งานวิจัยนี้ต้องการตรวจสอบความใช้ได้ของวิธีทดสอบสิ่งแปลกปลอมชนิดเบาในพริกแกงปรุงสำเร็จชนิดน้ำ โดยได้พัฒนาวิธีและการตรวจสอบความใช้ได้ภายในห้องปฏิบัติการสิ่งปนปลอม กรมวิชาการเกษตร มาตรวจสอบความใช้ได้ของวิธีทดสอบระหว่างห้องปฏิบัติการ (Collaborative study) ได้ดำเนินการทำกระบวนการต่าง ๆ และขั้นตอนในการขอความร่วมมือจากห้องปฏิบัติการอื่น ๆ คล้ายคลึงกับวิธีของ R.B. Bradicich and etc. (1994) ซึ่งเป็นวิธีการทำ Collaborative Study เพื่อใช้หาสิ่งแปลกปลอมในแป้งสาลี เนื่องจากปัจจุบันการศึกษาทางด้านสิ่งแปลกปลอมมีน้อย วิธีการมาตรฐานในการหาสิ่งแปลกปลอมในผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ จึงไม่ครอบคลุมในทุกๆ ผลิตภัณฑ์เพื่อการส่งออกไปยังประเทศสหรัฐอเมริกาและแคนาดา จึงควรที่จะหาวิธีทดสอบเพื่อใช้เป็นวิธีมาตรฐานเพื่อการส่งออกและเพื่อใช้เป็นวิธีมาตรฐานสำหรับการตรวจสิ่งแปลกปลอมในอาหารต่อไป

การทดสอบโดยวิธีการตรวจสอบความใช้ได้ของวิธี (Method validation) ชนิดนี้ด้วยวิธี In-house method based on AOAC (2016) 945.87 อยู่ในช่วงที่กำหนด คือพบปีกแมลงและขนหนูอยู่ในเกณฑ์การยอมรับที่มากกว่าหรือเท่ากับร้อยละ 80 (%Recovery ≥80) และค่า % RSD (Relative Standard) มีค่าน้อยกว่าร้อยละ 15 (% RSD ‹ 15) จึงถือว่าผ่านเกณฑ์ที่กำหนดไว้ ทั้งนี้ได้นำหลักเกณฑ์มาตรฐานทางกายภาพสำหรับการวิเคราะห์สิ่งแปลกปลอมชนิดเบาในแป้งข้าวเจ้า ของกรมวิทยาศาสตร์การแพทย์ (2561) มาใช้เป็นแนวทางในการกำหนดเกณฑ์มาตรฐาน

เมื่อทำการทวนสอบความใช้ได้ของวิธีและทราบว่าสามารถใช้วิธีวิเคราะห์ดังกล่าวได้ จึงทำการ Collaborative Study กับ 4 ห้องปฏิบัติการคือ; ห้องปฏิบัติการที่ 1 บริษัท ห้องปฏิบัติการกลาง(ประเทศไทย) จำกัด สาขากรุงเทพ, ห้องปฏิบัติการที่ 2 บริษัท เอแอลเอส แลบอราทอรี่ กรุ๊ป (ประเทศไทย) จำกัด, ห้องปฏิบัติการที่ 3 บริษัท ศูนย์ห้องปฏิบัติการและวิจัยทางการแพทย์และการเกษตรแห่ง เอเชีย จำกัด ห้องปฏิบัติการที่ 4 ห้องปฏิบัติการสิ่งปนปลอม กรมวิชาการเกษตร

ผลทำการ Collaborative Study ของการเติมสิ่งทดสอบทั้ง 3 ที่ระดับ ต่ำ (5 ชิ้น) กลาง (10 ชิ้น) และสูง (15 ชิ้น) ค่า %Recovery และค่า %RSD ในปีกแมลง (Table 1) และขนหนู (Table 2) ห้องปฏิบัติการทั้ง 4 แห่ง เป็นดังนี้

ห้องปฏิบัติการที่ 1 พบค่า %Recovery ระดับต่ำ กลาง และสูง ในปีกแมลงร้อยละ 90, 95, 96.67 และมีค่า %RSD = 12.83, 6.08, 3.98 ส่วนขนหนูพบร้อยละ 90, 92.5, 88.33 และ %RSD = 12.83, 5.41 และ 9.50 ตามลำดับ

ห้องปฏิบัติการที่ 2 พบค่า %Recovery ระดับต่ำ กลาง และสูง ในปีกแมลงร้อยละ 95, 95, 96.67 และมีค่า %RSD = 10.53, 6.08, 6.9 ส่วนขนหนูพบร้อยละ 90, 82.5, 81.67 และ %RSD = 12.83, 6.06 และ 4.08 ตามลำดับ

ห้องปฏิบัติการที่ 3 พบค่า %Recovery ระดับต่ำ กลาง และสูง ในปีกแมลงร้อยละ 95.00, 100, 96.67 และมีค่า %RSD = 10.53, 0, 3.98 ส่วนขนหนูพบร้อยละ 90, 97.5, 86.67 และ %RSD = 12.83, 5.13, 8.88 ตามลำดับ,

ห้องปฏิบัติการที่ 4 พบค่า %Recovery ระดับต่ำ กลาง และสูง ในปีกแมลงร้อยละ 95, 95, 95 และมีค่า %RSD = 10.53, 6.08, 3.51 ส่วนขนหนูพบร้อยละ 90, 82.5, 83.33 มีค่า %RSD = 12.83, 6.06 และ 8.00 ตามลำดับ

ผลผ่านเกณฑ์การทดสอบทั้ง 4 ห้องปฏิบัติการ โดยเกณฑ์ที่กำหนดไว้คือพบค่า % Recovery ในปีกแมลงและขนหนู ≥ 80 และ% RSD ‹ 15 ค่าเฉลี่ยของ % Recovery ของทั้ง 4 ห้องปฏิบัติการไม่มีความแตกต่างทางสถิติ (Table 3)

Table 1 Collaborative results for the recovery of insect fragment spikes from red curry soup

Spike added (insect fragment)	Laboratory 1		Laboratory 2		Laboratory 3		Laboratory 4	
	% Recovery	%RSD	% Recovery	%RSD	% Recovery	%RSD	% Recovery	%RSD
Low level 5 pcs.	90.00	12.83	95.00	10.53	95.00	10.53	95.00	10.53
Medium level 10 pcs.	95.00	6.08	95.00	6.08	100.00	0.00	95.00	6.08
High level 15 pcs.	96.67	3.98	96.67	6.90	96.67	3.98	95.00	3.51

Table 2 Collaborative results for the recovery of rat hair spikes from red curry soup

Spike added (rat hair)	Laboratory 1		Laboratory 2		Laboratory 3		Laboratory 4	
	% Recovery	%RSD	% Recovery	%RSD	% Recovery	%RSD	% Recovery	%RSD
Low level 5 pcs.	90.00	12.83	90.00	12.83	90.00	12.83	90.00	12.83
Medium level 10 pcs.	92.50	5.41	82.50	6.06	97.50	5.13	82.50	6.06
High level 15 pcs.	88.33	9.50	81.67	4.08	86.67	8.88	83.33	8.00

Table 3 Mean comparison of the percent recovery of insect fragment and rat hair from collaborative study of light filth in red curry soup

Collaborators		Insect fragment	Rat hair
Laboratory 1	Low	95.00	90.00
	Medium	100.00	97.50
	High	96.67	86.67
Laboratory 2	Low	95.00	90.00
	Medium	95.00	82.50
	High	96.67	81.67
Laboratory 3	Low	90.00	90.00
	Medium	95.00	92.50
	High	96.67	88.33
Laboratory 4	Low	95.00	90.00
	Medium	95.00	82.50
	High	95.00	83.33
F-test		NS	NS
C.V.(%)		7.52	9.39

สรุป

จากผลการทำ Collaborative Study ในพริกแกงปรุงสำเร็จชนิดน้ำ พบว่า ห้องปฏิบัติการ ทั้งหมด จำนวน 4 แห่ง มีผลทดสอบผ่านเกณฑ์ที่กำหนดไว้ คือมีค่า % Recovery ของปีกแมลงและ ขนหนู อยู่ในช่วงร้อยละ 80–100 และมีค่า %RSD น้อยกว่าร้อยละ 15 ดังนั้นการทดสอบหาสิ่งแปลกปลอมในตัวอย่างพริกแกงปรุงสำเร็จชนิดน้ำ ตามวิธี In-house

Method based on AOAC (2023) 945.87 สามารถใช้เป็นวิธีทดสอบได้ในระดับห้องปฏิบัติการ เป็นวิธีมาตรฐานสามารถนำไปใช้ในการวิเคราะห์หาสิ่งแปลกปลอมชนิดเบาเพื่อการส่งออกผลิตภัณฑ์ไปประเทศสหรัฐอเมริกาและแคนาดา ดังนั้นในการทดลองครั้งนี้เพื่อให้มีเอกสารข้อมูลยืนยันในความใช้ได้ของวิธีทดสอบของห้องปฏิบัติการสิ่งแปลกปลอมที่อยู่ในการกำกับดูแลของกรมวิชาการเกษตรและห้องปฏิบัติการอื่นๆ ได้ใช้อ้างอิงวิธีการทดสอบ นอกจากนี้ยังเป็นวิธีมาตรฐานในการพัฒนาหาวิธีตรวจวิเคราะห์สิ่งแปลกปลอมในตัวอย่างชนิดอื่นต่อไป

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณทุนวิจัย งบประมาณสนับสนุนงานมูลฐาน (Fundamental Fund) กองทุนส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม ในงานทดลองของกรมวิชาการเกษตร รหัสการทดลอง FF-68-09-05-68-02 (2.1) และห้องปฏิบัติการเอกชนได้แก่ บริษัท ห้องปฏิบัติการกลาง(ประเทศไทย) จำกัด สาขากรุงเทพ, บริษัท เอแอลเอส แลบอราทอรี่ กรุ๊ป (ประเทศไทย) จำกัด, บริษัท ศูนย์ห้องปฏิบัติการและวิจัยทางการแพทย์และการเกษตรแห่ง เอเชีย จำกัด ที่ให้ความร่วมมือในการเข้าร่วมการทำ Collaborative Study

เอกสารอ้างอิง

กรมวิทยาศาสตร์การแพทย์. 2561. การวิเคราะห์สิ่งแปลกปลอมชนิดเบาในแป้งข้าวเจ้า. ใน: วิธีมาตรฐานสำหรับการวิเคราะห์อาหาร เล่มที่ 6. สำนักพิมพ์ พีทูดีไซน์ แอนด์พรินท์ จำกัด. กรุงเทพฯ, หน้า 243–248.

ทนงพันธ์ สัจจปาละ. 2558. การพัฒนาเทคนิคปฏิบัติในการวิเคราะห์หา Light filth ในอาหาร. วารสารกรมวิทยาศาสตร์การแพทย์ 57: 313–320.

AOAC International. 2023. AOAC Official Methods 945.87 Filth in Whole Tamarind Pulp. In: Official Methods of Analysis of AOAC International, 22nd ed. AOAC International. Chapter 16.

Bradicich, R.B., Chaput, M.P., Dzidowski, G.R., Friedman, S., Obert, M.L., Romer, J.C., VanVelzen, W.T., Washbon, E.C. 1994. Extraction of light filth from whole wheat flour, flotation method. J. AOAC Int. 77: 1150–1152.

Brickey, P.M. Jr., Gecan, J.S., Thrasher, J.J., Eisenberg, W.V. 1968. Notes on microanalytical techniques the analysis of foods for extraneous materials. Part I. J. Assoc. Off. Anal. Chem. 51: 873.

Bryce, J.R., Glaze, L.E. 1994. Extraction of light filth from bean paste: collaborative study. J. AOAC Int. 77: 1143–1146.

Gorham, J.R. 1991. Ecology and management of food - Industry Pests. Association of Official Analytical Chemists. Virginia, pp. 491–492.

Laboratory Information Bulletin (L.I.B.) DFS/ORA. 1985. Improve method for extraction of light filth in mole paste (Vail's method). No. 2865.

Latimer, G.W. 2012. Chapter 16: Extraneous materials: isolation. In: Official method of analysis of AOAC International, 19th ed. Gaithersburg, MD, pp. 1–5.

Natural language processing with WangchanBERTa for classifying causes of death among Thai people living with HIV

Sudawadee Chitlekasakul[a,*], Sirinya Teeraananchai[a,b]

[a]Master of Biomedical Data Science program, Faculty of Science, Kasetsart University, Bangkok 10900, Thailand

[b]Department of Statistics, Faculty of Science, Kasetsart University, Bangkok 10900, Thailand

*Corresponding author. E-mail address: sudawadee.ch@ku.th

Abstract

AIDS-related mortality has declined in recent years, while non-AIDS-related causes have become increasingly common among people living with HIV (PLHIV), highlighting the need for accurate classification to support surveillance and strengthen HIV care. This study applied Natural Language Processing (NLP) to classify AIDS-related and non-AIDS-related deaths using free-text cause-of-death descriptions from PLHIV who started antiretroviral therapy (ART) between 2021 and 2024 and were recorded in the Universal Health Coverage (UHC) program database. Text narratives were transformed into numerical representations using WangchanBERTa embeddings, and class imbalance was addressed using the Synthetic Minority Over-sampling Technique (SMOTE). Model development and tuning were performed through cross-validation, and performance was evaluated using accuracy, sensitivity, specificity, precision, F1-score, and the Area Under the Curve (AUC). The model trained on the original dataset demonstrated limited performance (F1-score 0.5710, AUC 0.5692), whereas applying SMOTE substantially improved discrimination, yielding an F1-score of 0.7807 and an AUC of 0.9063. These findings suggest that transformer-based Thai language models, combined with oversampling techniques, offer an effective and scalable approach for automated mortality classification among PLHIV, providing a strong foundation for future applications in HIV mortality surveillance.

Keywords: HIV mortality, Natural language processing, WangchanBERTa, SMOTE

Introduction

The accurate classification of causes of death among PLHIV is essential for monitoring epidemiological trends and evaluating national program performance. In Thailand, most cause-of-death information is documented as Thai free text within the National AIDS Program database, creating substantial challenges for standardized coding and large-scale analysis. Manual review is time-consuming and prone to inconsistencies, resulting in misclassification that may obscure the true distribution of AIDS-related and non-AIDS-related mortality (Lertpiriyasuwat et al., 2025). As mortality patterns continue to shift toward non-AIDS chronic conditions, strengthening classification systems becomes increasingly important for effective surveillance and policy planning (Smith et al., 2010). Recent advances in NLP have enabled the use of transformer-based models to extract semantic meaning from unstructured clinical narratives. Transformer architectures such as BERT and its specialized variants have demonstrated strong performance in clinical text classification, including adverse event detection, clinical coding, and mortality prediction (Yang et al., 2020; Coutinho and Martins, 2022). WangchanBERTa, a Thai pretrained language model, offers improved representation learning for Thai medical text and provides a scalable approach for automated classification tasks (Lowphansirikul et al., 2021). Applying this model to cause-of-death text allows for the development of an efficient and reproducible system capable of distinguishing AIDS-related from non-AIDS-related mortality without reliance on manual coding. This study, therefore employed WangchanBERTa to classify free-text death summaries in Thailand's national HIV cohort, aiming to enhance the accuracy and consistency of mortality classification and support ongoing public health monitoring efforts.

Materials and Methods

Data Source and Study Population

This study used data from the UHC database and included PLHIV who initiated ART between 2021 and 2024 and were aged 15 years or older. The initial dataset contained 88,993 records. During the screening process, records of individuals who were still alive at the time of data extraction were excluded. In addition, records without a documented cause of death were removed. After applying these exclusion criteria, a total of 5,159 records remained for analysis. All included cases contained Thai free-text cause-of-death descriptions suitable for natural language processing (NLP). Mortality outcomes were categorized into AIDS-related and non-AIDS-related deaths, which served as the binary labels for model development and evaluation.

Data Preprocessing

Free-text cause-of-death descriptions were preprocessed prior to model input. Text cleaning procedures included lowercasing, removal of punctuation, non-informative symbols, and excessive whitespace. No manual feature engineering or keyword selection was performed in order to preserve the original semantic structure of the narratives. Each cleaned text narrative was tokenized and transformed into

contextualized vector representations using WangchanBERTa, a pretrained Thai transformer-based language model. In this study, WangchanBERTa was used as a feature extractor, and the resulting embeddings were used as input for downstream supervised classification.

Handling Class Imbalance

Although the proportion of AIDS-related and non-AIDS-related deaths was relatively balanced, residual class imbalance and overlapping semantic patterns in free-text descriptions may still bias model learning. To mitigate this issue, SMOTE was applied only to the training dataset to generate synthetic samples of the minority class. SMOTE was performed on the WangchanBERTa embedding space, under the assumption that semantically similar text representations lie close to each other in the transformed feature space. Oversampling was not applied to the test dataset to prevent data leakage and ensure unbiased performance evaluation.

Model Training and Optimization

The dataset was divided into a training dataset of 70 percent and a testing dataset of 30 percent. A supervised classification framework was implemented using WangchanBERTa embeddings as input features. The WangchanBERTa model itself was not fine-tuned end-to-end; instead, fixed embeddings were extracted and used for model training. Within the training set, 5-fold cross-validation was employed for hyperparameter tuning and to reduce overfitting. The model was trained with a batch size of 16, a learning rate of 0.00001, and four training epochs. Separate models were developed using the original training data and the SMOTE-augmented training data to assess the impact of class rebalancing.

Data analysis methods

This study uses a supervised machine learning approach to classify causes of death into AIDS-related and non-AIDS-related categories based on free-text descriptions. The analysis first converts each text record into numerical representations using WangchanBERTa, a transformer-based language model for Thai text. WangchanBERTa learns the meaning of a sentence by considering the context of all words together, rather than relying on individual keywords, allowing texts with similar meanings to be represented in a similar way even if different words are used. These numerical representations are then used by a classification model that learns from labeled examples to identify patterns associated with each mortality category. Once trained, the model applies these learned patterns to classify new text records, enabling consistent and scalable analysis of unstructured cause-of-death data.

Model Evaluation

Model performance was evaluated on the independent test dataset using accuracy, sensitivity, specificity, precision, F1-score, and AUC (Fig. 1). These metrics provided a comprehensive assessment of overall classification performance and class-specific discrimination ability. The data analysis was conducted

using a supervised machine learning classification pipeline. Transformer-based embeddings were used to encode unstructured Thai text into numerical feature representations, which were subsequently used for model training and evaluation. Cross-validation was applied to examine model robustness and generalization performance, and multiple evaluation metrics were used to assess discrimination ability, class balance, and predictive reliability.

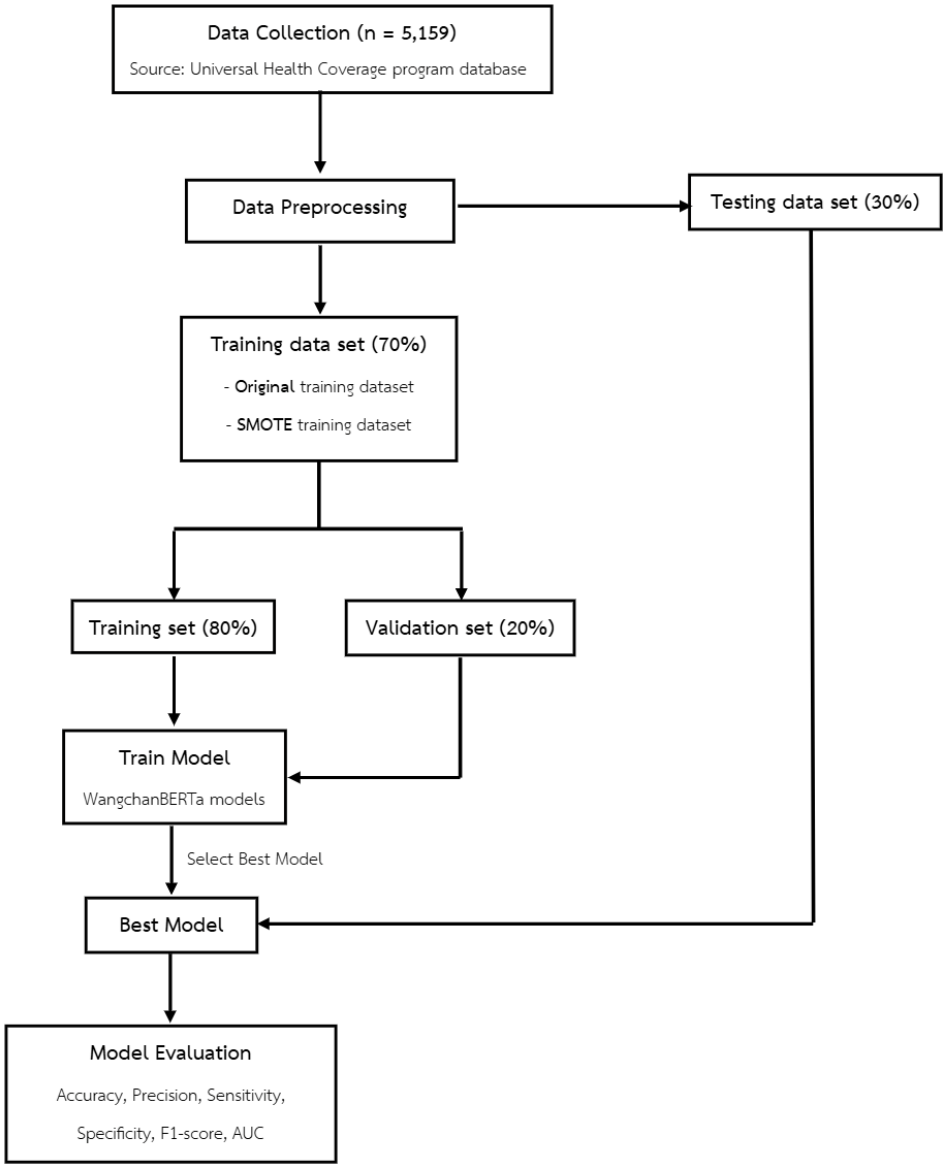


Fig. 1 Flowchart outlines the steps involved in this study.

Results and Discussion

The dataset included 5,159 individuals, consisting of 2,360 AIDS-related deaths (45.7 percent) and 2,799 non-AIDS-related deaths (54.3 percent). This distribution reflects the recent shift in mortality patterns among people living with HIV, where non-AIDS-related causes now represent a slightly larger proportion. The

balanced proportion between the two groups provided a suitable foundation for evaluating model performance while highlighting the need to accurately differentiate between these mortality categories.

As shown in Table 1, the model trained on the original dataset showed clear imbalance in its predictive performance. Sensitivity was relatively high at 0.7274, meaning the model could detect AIDS-related deaths fairly well. However, specificity was much lower at 0.3083, which indicates that the model often misclassified non-AIDS-related deaths. This discrepancy between sensitivity and specificity suggests that the baseline model may have favored certain semantic patterns associated with AIDS-related deaths, while struggling to generalize across heterogeneous non-AIDS-related descriptions. Although the overall class distribution was relatively balanced, variation in linguistic expression and clinical complexity may have contributed to suboptimal baseline performance.

Table 1 Performance evaluation of the WangchanBERTa model on the test dataset.

Data set	Accuracy	Sensitivity	Specificity	Precision	F1-score	AUC
Original	0.5000	0.7274	0.3083	0.4699	0.5710	0.5692
SMOTE	0.7823	0.8475	0.7274	0.7238	0.7807	0.9063

After applying SMOTE to balance the training data, model performance improved across all major metrics. Sensitivity increased to 0.8475 and specificity rose to 0.7274, showing that the model became more consistent in identifying both groups. The F1-score improved from 0.5710 to 0.7807, and the AUC increased from 0.5692 to 0.9063, indicating much stronger discriminative ability. These improvements demonstrate that SMOTE helped the model learn clearer patterns from the minority class and reduced the bias caused by the original class imbalance.

The ROC curve in Fig. 2 clearly shows the performance improvement after applying oversampling. The model trained on the original dataset had limited ability to separate the two classes, with an AUC of 0.5692. After using SMOTE, the ROC curve rose more sharply, indicating better separation between true positives and false positives, and the AUC increased to 0.9063. This rise in AUC suggests that the model became much more effective at distinguishing AIDS-related deaths from non-AIDS-related deaths, confirming that handling class imbalance greatly improved overall model performance.

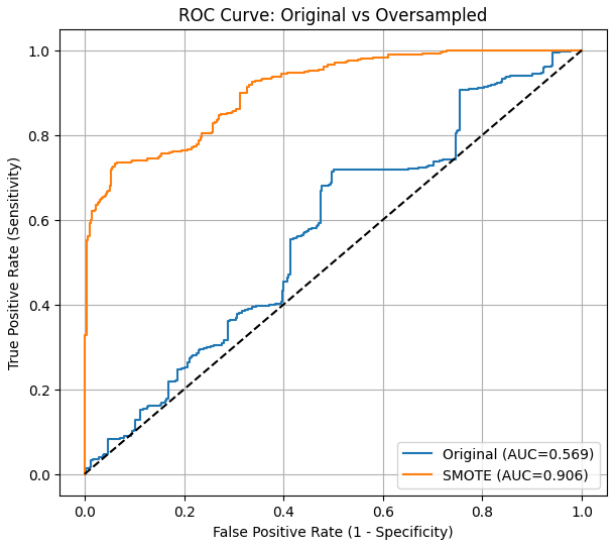


Fig. 2 ROC curves comparing the performance on the original dataset and the SMOTE dataset.

While the application of SMOTE substantially improved classification performance, these results should be interpreted with caution. Oversampling in high-dimensional embedding spaces may amplify latent patterns and potentially inflate evaluation metrics. Nevertheless, the consistent improvement across sensitivity, specificity, F1-score, and AUC suggests that rebalancing enhanced the model's ability to capture informative decision boundaries rather than merely memorizing synthetic samples. Future studies should assess robustness using external validation datasets or alternative imbalance-handling techniques.

Conclusions

This study demonstrates that WangchanBERTa can effectively model Thai free-text cause-of-death data and classify AIDS-related and non-AIDS-related mortality with high reliability. The baseline model showed limited performance due to class imbalance, but applying SMOTE significantly improved key evaluation metrics, including sensitivity, specificity, F1-score, and AUC. These results indicate that rebalancing the training data enhances the model's ability to learn meaningful patterns from both classes and strengthens overall predictive performance. The integration of WangchanBERTa with SMOTE provides a practical data-driven approach for automated HIV mortality classification and supports more accurate and scalable public health analytics.

Conflict of Interest

The authors declare that there are no conflicts of interest.

Acknowledgements

This study was made possible through the guidance and support of Asst. Prof. Dr. Sirinya Teeraananchai and the Co-Advisors of the Department of Biomedical Data Science, Faculty of Science, Kasetsart University. The authors express their sincere gratitude for their valuable assistance. This study was

approved by the Institutional Review Board of Kasetsart University Research Ethics Committee (KUREC-HSR67/043), Thailand. A waiver of informed consent was granted for this secondary data analysis. All data were de-identified by the National Health Security Office prior to analysis.

References

Coutinho, I., Martins, B. 2022. Transformer-based models for ICD-10 coding of death certificates with Portuguese text. J. Biomed. Inform. 136: 104232. doi.org/101016/j.jbi.2022.104232

Lertpiriyasuwat, C., Kerr, S.J., Noknoy, S., Namahoot, P., Punsuwan, N., Apornpong, T., Sophonphan, J., Hiranburana, N., Chetchotisakd, P., Putcharoen, O., Ruxrungtham, K., Avihingsanon, A. 2025. Cause of death in people living with HIV who initiated antiretroviral therapy after enrolling to the Thai National AIDS Program from 2008 to 2021. Lancet Reg. Health Southeast Asia 36: 100576. doi.org/101016/j.lansea.2025.100576

Lowphansirikul, L., Polpanumas, C., Phatthiyaphaibun, W., et al. 2021. WangchanBERTa: Pretraining transformer-based Thai language models. arXiv preprint arXiv:2101.09635.

Rahman, M.M., Davis, D.N. 2013. Addressing the class imbalance problem in medical datasets. Int. J. Mach. Learn. Comput. 3: 224–228. doi.org/107763/IJMLC.2013.V3.307

Smith, C., Duda, S.N., et al. 2010. Time trends in causes of death in people with HIV: Insights from the Swiss HIV Cohort Study. HIV Med. 11: 621–631. doi.org/101111/j.1468-1293.2010.00834.x

Yang, X., Bian, J., Hogan, W.R., Wu, Y. 2020. Clinical concept extraction using transformers. J. Am. Med. Inform. Assoc. 27: 1741–1748. doi.org/101093/jamia/ocaa189

Zhang, S., Fan, R., Liu, Y., Chen, S., Liu, Q. 2023. Applications of transformer-based language models in bioinformatics: a survey. Bioinform. Adv. 3: vbad001. doi.org/101093/bioadv/vbad001

Factors associated with advanced HIV stage among Thai people with HIV by using random forest algorithm

Chanya Srithawatpong[a,*], Sirinya Teeraananchai[a,b]

[a]Master of Biomedical Data Science program, Faculty of Science, Kasetsart University, Bangkok 10900, Thailand

[b]Department of Statistics, Faculty of Science, Kasetsart University, Bangkok 10900, Thailand

*Corresponding author. E-mail address: Chanya.srit@ku.th

Abstract

In this study, Random Forest algorithm was used to identify factors associated with advanced HIV stage (CD4<200 cells/μL) among Thai people living with HIV (PLHIV). Medical records from Thailand's National AIDS Program database of PLHIV in 2014-2024 were analyzed. Performance metrics used to evaluate a random forest model were accuracy, precision, recall, F1-score, and Area under the Receiver Operating Characteristic Curve (AUROC). Feature importance was assessed to identify the variables with the greatest influence on the model's predictions. The result showed that 44.2% of PLHIV started antiretroviral therapy (ART) at advanced HIV stage. Evaluation of the Random Forest classifier yielded an AUC of 0.72, resulting in an accuracy of 67%. Duration between the date that individuals were diagnosed with HIV infection to the date of ART initiation was the most crucial factor associated with advanced HIV stage of PLHIV at ART initiation followed by presence of opportunistic infection, age, HIV stage, and region, respectively.

Keywords: Advanced HIV stage, Low baseline CD4, Machine learning, Random forest

Introduction

Even with global strides in extending access to antiretroviral therapy (ART), a major challenge remains the late initiation of treatment, leading numerous individuals to start therapy during periods of advanced immunosuppression (Rupasinghe et al., 2019). A CD4 count below CD4<200 cells/μL, which defines advanced HIV stage, is strongly implicated in increased vulnerability to opportunistic infections, hospitalization, and death (Oboho et al., 2023; Fatti et al., 2019). Although Thailand has committed significant resources to expanding both HIV screening and ART provision, a persistent challenge remains the high incidence of delayed treatment initiation. Given this reality, the ability to pinpoint individuals at elevated risk of developing advanced HIV disease is critically important (Rupasinghe et al., 2019; Teeraananchai et al., 2025; Eamsakulrat and Kiertiburanakul, 2022). The application of machine learning (ML) techniques has demonstrated significant potential for forecasting health outcomes by capitalizing on intricate structures within extensive data repositories. Unlike conventional regression methods, algorithms possess the inherent ability to manage predictors across high-dimensional spaces and effectively capture non-linear associations (Ghosh and Khandoker, 2024; Abdalnabi et al., 20252024). Random forest algorithms are widely used in clinical practice as predictive tools for clinical prognosis and risk assessment. RF is considered an effective tool used for identification of associated factors of diseases (Ooka et al., 2021; Pal and Parija, 2021). This study applied random forest algorithm to determine factors associated with advanced HIV disease at ART initiation using database from Thai Universal health Coverage program which managed by national health security office, aiming to inform programmatic strategies for earlier ART initiation.

Materials and Methods

Study Population

Medical records of 302,420 PLHIV including 87,998 female and 191,030 male aged 15 years and above who initiated ART between 2014 and 2024 with a documented baseline CD4 count from Thailand's National AIDS Program database were utilized.

Outcome

The dependent variable was advanced HIV disease, defined as CD4 <200 cells/μL at ART initiation.

Data Preprocessing

Missing value of target were deleted and that of predictors were substituted with modes. Since all the independent variables were categorical variables, including age, sex, region, HIV stage at diagnosis, duration from HIV diagnosis to ART initiation, opportunistic infections, ART regimen, and year of ART initiation, one-hot encoding was employed to create dummy variables. There was no class imbalance.

Model Development and Evaluation

The original data was divided using train-test split (70:30) (Fig. 1). Random forest is an ensemble of tree-based machine learning algorithms. The model builds multiple trees by utilizing bootstrapped datasets. At every branching point, only a limited, randomly selected group of predictors is evaluated to produce a robust classification (Breiman, 2001). The RF model was trained. Random forest model was trained. Hyperparameters were tuned using GridsearchCV and 5-fold cross-validation within the training set. The performance metrics including accuracy, precision, recall, F1-score, and AUROC were used to evaluate the ability of the model at classification of PLHIV who started ART with advanced HIV stage.

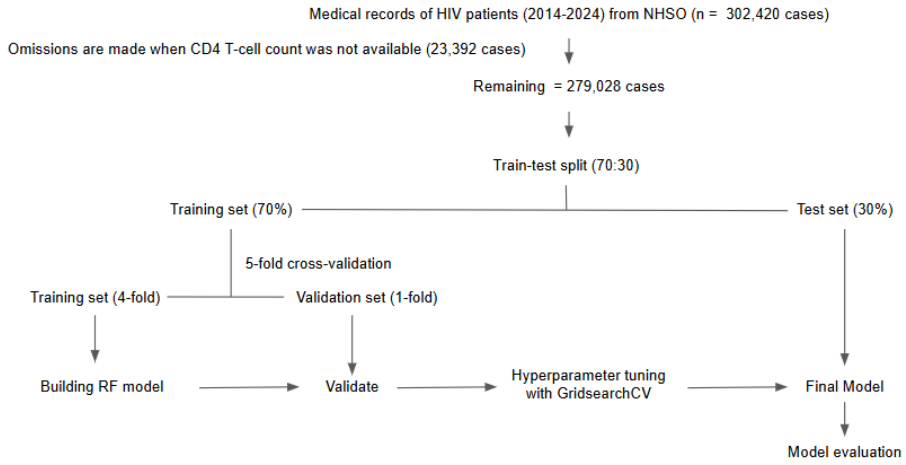


Fig. 1 Data Preprocessing and Model Development

Results and Discussion

Characteristics of study population

The total cohort comprised 279,028 patients, of which 44.19% (123,294) presented with Advanced HIV stage and 55.81% (155,734) which non-advanced HIV stage at ART initiation. The highest proportion of PLHIV presenting with advanced HIV stage at ART initiation was observed in older groups, specifically among those aged 35–49 (43.23%) followed by those aged 25–34 (30.88%), aged ≥50 (14.74%), aged 20–24 (9.1%), and aged 15–19 (2.6%) respectively. PLHIV with advanced HIV stage mostly lived in Northeastern region (25.89%), followed by Central (17.04%), Northern (15.52%), Bangkok (13.82%), Eastern (11.83%), Southern (11.53%), and Western (4.36%) respectively. Asymptomatic HIV stage at the ART initiation had the highest proportion of participants (46.7%) followed by AIDS (34.01%), and Symptomatic HIV (19.29%) respectively. The duration before the initiation of ART which had the highest proportion of PLHIV with advanced HIV stage was 8-30 days (31.12%) followed by 1–3 months (28.63%), >3 months (24.5%), 0 day (7.95%), and 2–7 days (7.8%) respectively. Year of ART initiation which had the highest proportion of PLHIV with advanced HIV stage was 2017–2020 (38.38%) followed by 2014–2016 (32.31%), and 2021–2024 (29.31%) respectively. The absence of

opportunistic infection had more PLHIV with advanced HIV stages (84.79%). The first regimen at ART initiation with the largest number of PLHIV with advanced HIV stage was NNRTI + NRTI (80.05%) followed by DTG-based (17.87%), and PIs + NRTI (2.07%) respectively.

Model Performance Evaluation

The model was evaluated using testing set. The model achieved an AUC of 0.72 (95% Confidence interval, CI: [0.7207–0.7273]) as shown in Fig. 2. The overall accuracy was 67% and F1-score of 0.62. The model achieved a sensitivity (recall) of 61%, indicating the model's ability to identify people with advanced HIV stage at ART initiation as shown in Table 1. Despite large amount of data, performance metrics were considered low. Due to the small number of features in the dataset, feature selection was not implemented in this study. Previous study suggested that irrelevant variables could increase variances and decrease the model performance (Rogers and Gunn, 2006).

Table 1 Result of random forest model performance and evaluation

Accuracy	Sensitivity	Specificity	Precision	F1-score	AUC
0.6709	0.6101	0.719	0.63	0.621	0.724

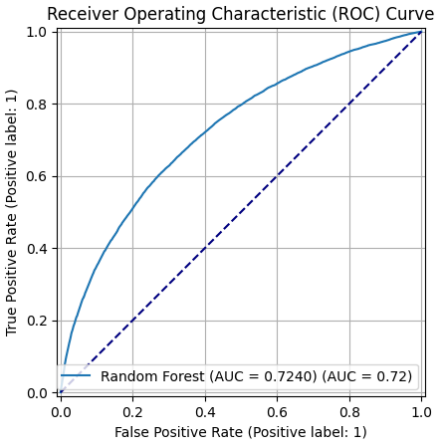


Fig. 2 ROC Curve of Random Forest Model

Analysis of Feature Importance

The feature importance was analyzed to determine the associated contributing factors of advanced HIV infections. The duration before the initiation of antiretroviral drug was the most important factor, contributing over 30% to the model's overall predictive power. First opportunistic infection was ranked second, with a score of 0.2. Age at the time of ART initiation was the third most important factor with a score of 0.19, followed by WHO HIV clinical stage at the time of ART initiation with a score of 0.18. Region and year of ART initiation had scores around 0.05 and 0.027 respectively. First drug regimen at the ART initiation and Sex were ranked among the least important of all the feature, with scores of 0.026 and 0.01 respectively as shown in Fig. 3.

The analysis of feature importance shows the duration before the initiation of ART treatment as the most significant factors of advanced HIV infection of Thai HIV PLHIV which is consistent with previous findings suggesting that late ART initiation is strongly associated with low baseline CD4 counts (Le et al., 2013; Fiseha et al., 2022). Individuals' history of opportunistic infection is also a crucial determinant of low CD4 status with the second highest importance score, aligning with established literature indicating that the occurrence of coinfection is one of important indicators of immune compromise (Caby et al., 2016). Age of Thai PLHIV at ART initiation is ranked the third which corresponds to previous studies suggesting the older the age PLHIV starts ART, the lower baseline CD4 counts compared to those who start at younger age (Lewis et al., 2011).

Since the duration before the initiation of ART treatment was the most significant predictors of advanced HIV infection, the odds ratio (OR) was calculated to measure the effect size of each class of this factor towards the presence of advanced HIV infection. The group with ART initiation within 2–7 days was used as reference according to Thailand national guidelines on HIV aids treatment and prevention. The result showed patients who initiated ART within 8–30 days had 1.73 times higher odds of having CD4 < 200 compared to those who started within 2–7 days. The risk peaked in the >1–3 months group, where the odds of advanced HIV were 2.47 times higher than the reference group. Interestingly, the >3 months showed ORs of 0.87 indicating the reduction of chances of advanced HIV infection. This could result from lack of behavioral and clinical factors which should basically be included in the study. This paradoxical lower odds of Advanced HIV in the >3 months group should be further investigated. Same-date-of-diagnosis group showed ORs of 0.78 indicating a lower likelihood of having CD4 < 200 compared to the 2–7 days group corresponding to previous study suggesting that sooner the initiation of ART in newly-diagnosed PLHIV, better further CD4 T-cell recovery (Le et al., 2013). The result of OR was shown in Fig. 3 and Table 2.

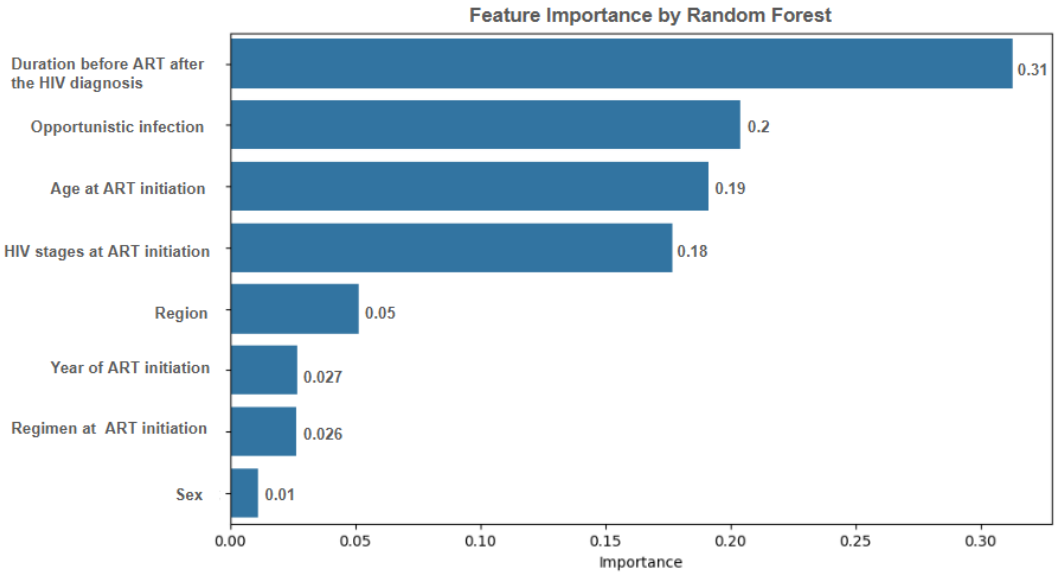


Fig. 3 Feature Importance by Random Forest

Table 2 Association between ART Initiation Timing and Advanced HIV (CD4 < 200)

Timing of ART Initiation (vs. 2–7 days)	Odds Ratio (OR)	95% Confidence Interval (CI)
8–30 days	1.73	(1.681, 1.781)
>1–3 months	2.468	(2.395, 2.544)
>3 months	0.87	(0.845, 0.895)
Same date of HIV diagnosis	0.78	(0.753, 0.808)

Conclusion

The analysis conclusively identifies the duration before ART initiation and the presence of opportunistic infection as the most critical determinants of low baseline CD4 on PLHIV. The predictive model can serve as a valuable risk stratification tool in clinical practice, allowing healthcare providers, particularly in resource-limited settings, to prioritize high-risk patients for immediate care and aggressive follow-up, thereby optimizing treatment outcomes.

Conflict of Interest

The authors declare that there are no conflicts of interest.

Acknowledgements

The author would like to express my deepest gratitude to my principal advisor, Asst. Prof. Dr. Sirinya Teeraananchai for her invaluable guidance, intellectual support, and consistent encouragement throughout the entire process of this research project. This study was approved by the Institutional Review Board of Kasetsart University Research Ethics Committee (KUREC-HSR67/043), Thailand. A waiver of informed consent was granted for this secondary data analysis. All data were de-identified by the National Health Security Office prior to analysis.

References

Abdalnabi, N., Adebiyi, A., Alhonainy, A., Naha, K., Papageorgiou, C., Rao, P. 2025. Impact of tumor location on predicting Early-Stage breast cancer patient survivability using explainable machine learning models. JCO Clin. Cancer Inform. 9: e2400178. doi.org/101200/cci-24-00178

Breiman, L. 2001. Random forests. Mach. Learn. 45: 5–32. doi.org/101023/a:1010933404324

Caby, F., Guihot, A., Lambert-Niclot, S., et al. 2016. Determinants of a low CD4/CD8 ratio in HIV-1–Infected individuals despite long-term viral suppression. Clin. Infect. Dis. 62: 1297–1303. doi.org/101093/cid/ciw076

Eamsakulrat, P., Kiertiburanakul, S. 2022. The Impact of Timing of Antiretroviral Therapy Initiation on Retention in Care, Viral Load Suppression and Mortality in People Living with HIV: A Study in a University Hospital in Thailand. J. Int. Assoc. Provid. AIDS Care 21: 23259582221082607. doi.org/101177/23259582221082607

Fatti, G., Grimwood, A., Nachega, J.B., et al. 2019. Better virological outcomes among people living with human immunodeficiency virus (HIV) Initiating early antiretroviral treatment (CD4 counts ≥500 Cells/μL) in the HIV Prevention Trials Network 071 (POPART) trial in South Africa. Clin. Infect. Dis. 70: 395–403. doi.org/101093/cid/ciz214

Fiseha, T., Ebrahim, H., Ebrahim, E., Gebreweld, A. 2022. CD4+ cell count recovery after initiation of antiretroviral therapy in HIV-infected Ethiopian adults. PLoS One 17: e0265740. doi.org/101371/journal.pone.0265740

Ghosh, S.K., Khandoker, A.H. 2024. Investigation on explainable machine learning models to predict chronic kidney diseases. Sci. Rep. 14: 3687. doi.org/101038/s41598-024-54375-4

Le, T., Wright, E.J., Smith, D.M., et al. 2013. Enhanced CD4+ T-Cell Recovery with Earlier HIV-1 Antiretroviral Therapy. N. Engl. J. Med. 368: 218–230. doi.org/101056/nejmoa1110187

Lewis, J., Walker, A.S., Castro, H., et al. 2011. Age and CD4 Count at Initiation of Antiretroviral Therapy in HIV-Infected Children: Effects on Long-term T-Cell Reconstitution. J. Infect. Dis. 205: 548–556. doi.org/101093/infdis/jir787

Oboho, I.K., Paulin, H., Corcoran, C., et al. 2023. Modelling the impact of CD4 testing on mortality from TB and cryptococcal meningitis among patients with advanced HIV disease in nine countries. J. Int. AIDS Soc. 26: e26070. doi.org/101002/jia2.26070

Ooka, T., Johno, H., Nakamoto, K., Yoda, Y., Yokomichi, H., Yamagata, Z. 2021. Random forest approach for determining risk prediction and predictive factors of type 2 diabetes: large-scale health check-up data in Japan. BMJ Nutr. Prev. Health 4: 140–148. doi.org/101136/bmjnph-2020-000200

Pal, M., Parija, S. 2021. Prediction of Heart Diseases using Random Forest. J. Phys. Conf. Ser. 1817: 012009. doi.org/101088/1742-6596/1817/1/012009

Rogers, J., Gunn, S. 2006. Identifying feature relevance using a random forest. ใน: Lecture Notes in Computer Science. pp. 173–184. doi.org/101007/11752790_12

Rupasinghe, D., Kiertiburanakul, S., Kamarulzaman, A., et al. 2019. Early mortality after late initiation of antiretroviral therapy in the TREAT Asia HIV Observational Database (TAHOD) of the International Epidemiologic Databases to Evaluate AIDS (IeDEA) Asia-Pacific. HIV Med. 21: 397–402. doi.org/101111/hiv.12836

Teeraananchai, S., Boettiger, D.C., Lertpiriyasuwat, C., Triamwichanon, R., Benjarattanaporn, P., Phanuphak, N. 2025. The impact of same-day and rapid ART initiation under the Universal Health Coverage programme on HIV outcomes in Thailand: a retrospective real-life cohort study. J. Int. AIDS Soc. 28: e26406. doi.org/101002/jia2.26406

Genetic improvement of *Saccharomyces cerevisiae* and process optimization for enhanced squalene production

Onanong Inthong[a], Sornsiri Pattanakittivorakul[b], Mamoru Yamada[b,c], Noppon Lertwattanasakul[a,c,*]

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

[b]Graduate School of Sciences and Technology for Innovation, Faculty of Agriculture, Yamaguchi University, Yamaguchi 753-8515, Japan

[c]Research Center for Thermotolerant Microbial Resources, Yamaguchi University, Yamaguchi 753-8515, Japan

[c]Biodiversity Center, Kasetsart University, Bangkok 10900, Thailand

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

Abstract

Squalene is a non-polar triterpenic hydrocarbon ($C_{30}H_{50}$) and the first committed precursor of ergosterol in the isoprenoid pathway. Due to the limited availability of natural sources and increasing extraction costs, microbial production of squalene has gained significant interest. This study aimed to enhance squalene production in *Saccharomyces cerevisiae* through UV mutagenesis, and to evaluate the effects of cultivation parameters on squalene accumulation. *S. cerevisiae* TISTR 5606 was cultivated in YPD medium at 30 °C and 100 rpm, producing 5.28 g/L squalene. UV mutagenesis generated the mutant strain ONI-UV 24(2), which showed increased squalene production of 6.74 g/L, representing a 0.27-fold improvement over the wild-type strain. The effects of oxygen availability were further investigated by varying shaking speeds. The highest squalene accumulation was observed at 150 rpm after 60 h, reaching 7.76 g/L, equivalent to a 0.47-fold increase relative to the wild type. These results demonstrate that UV-induced genetic modification combined with optimized aeration conditions is an effective strategy for enhancing squalene production in *S. cerevisiae*.

Keywords: Aeration, Ergosterol biosynthesis, *Saccharomyces cerevisiae*, Squalene, UV mutagenesis

Introduction

Squalene ($C_{30}H_{50}$) is a naturally occurring, highly unsaturated triterpenic hydrocarbon and a key intermediate in the biosynthesis of sterols, including cholesterol, steroid hormones, and fat-soluble vitamins (Du et al., 2024). It is synthesized through the mevalonic acid (MVA) or 2-C-methyl-D-erythritol 4-phosphate (MEP) pathways (Patel et al., 2022). First identified in 1916 from the liver of deep-sea sharks (*Squalus* spp.), squalene is historically obtained from shark liver oil, which can contain 40–60% squalene. However, harvesting sharks is ecologically unsustainable, as around 100 million are killed annually, with thousands required to produce one ton of squalene, contributing to population decline and threatening marine ecosystems. In addition, shark-derived squalene is difficult and costly to extract due to its rapid degradation after death and sensitivity to oxygen, light, heat, and metal ions (Liu et al., 2020).

Due to these limitations, alternative sources have been explored, including plants, microorganisms, and marine protists. Yeasts, in particular, are promising candidates because they are easy to cultivate, grow rapidly, and can accumulate significant amounts of squalene, which can be further enhanced through strain improvement and optimization of culture conditions (Patel et al., 2022). Reported squalene concentrations in various microorganisms include *Escherichia coli* DH5α (0.612 g/L) (Meng et al., 2020), *S. cerevisiae* BY4741 (11 g/L) (Liu et al., 2020), *Thraustochytrium* sp. TN22 (0.0953 g/L) (Hien et al., 2020), and *Aurantiochytrium* sp. Yonez5–1 (1.07 g/L) (Nakazawa et al., 2014). Squalene has broad applications in pharmaceuticals, cosmetics, and nutraceuticals due to its antioxidant, anticancer, and moisturizing properties, as well as its role in maintaining cell membrane integrity (Wolosik et al., 2025).

Genetic improvement strategies such as UV mutagenesis have been widely employed to disrupt downstream enzymes in the ergosterol pathway, resulting in intracellular accumulation of squalene (Spanova et al., 2012). In addition to genetic factors, environmental parameters—particularly oxygen availability—play a critical role in sterol metabolism and lipid storage (Zhang et al., 2021). To enhance squalene accumulation in *S. cerevisiae* TISTR 5606, UV mutagenesis was applied as a random genetic modification strategy targeting the ergosterol biosynthetic pathway. Because squalene is an essential intermediate that is rapidly converted to ergosterol, increased accumulation is expected to arise from mutations affecting downstream steps of the pathway rather than complete pathway disruption. UV-induced point mutations are likely to generate partial loss-of-function or regulatory alterations in sterol biosynthetic genes such as *ERG1* (squalene epoxidase) and *ERG7* (lanosterol synthase), thereby reducing the conversion of squalene to downstream sterols while maintaining sufficient ergosterol synthesis for cell viability. Accordingly, mutants with attenuated but not abolished sterol biosynthesis were selectively enriched, providing a rational approach for obtaining viable yeast strains with enhanced intracellular squalene accumulation.

This study focuses on enhancing squalene production in *S. cerevisiae* TISTR 5606 through UV mutagenesis and evaluating the effects of shaking speed and incubation time on squalene accumulation. The findings aim to contribute to the development of efficient and sustainable microbial platform for squalene production.

Materials and Methods

Yeast strains and culture conditions

Saccharomyces cerevisiae TISTR 5606 was obtained from the Thailand Institute of Scientific and Technological Research. Yeast strains were maintained on YM agar (3 g/L yeast extract, 3 g/L malt extract, 5 g/L peptone, 10 g/L dextrose, and 15 g/L agar) and stored at –80 °C. Prior to experiments, cultures were revived and grown in YPD (10 g/L yeast extract, 20 g/L peptone, and 20 g/L dextrose) medium.

UV mutagenesis for generating high-squalene-producing mutants

Exponentially growing cells were cultivated in 5 mL YPD at 30 °C for 18–24 h, harvested, washed, and adjusted to OD_{550} = 1.0 (~10^7 cells/mL). Suspensions were diluted to ~3 × 10^3 cells/mL (control) and ~3 × 10^4 cells/mL (UV treatment). Aliquots (100 µL) were spread onto YPD agar plates and irradiated at 0–180 s. Plates were positioned 60 cm from the UV lamp and incubated at 30 °C in the dark for 2 days. The survival percentage of UV-treated cells was calculated by dividing the number of colonies observed on UV-irradiated plates by the number of colonies on non-irradiated control plates, and multiplying the result by 100. The UV exposure generating ~5% survival was selected for further experiments.

Fresh cultures were irradiated using the optimal UV exposure. Colonies from master plates were replica plated onto YEP agar (5 g/L yeast extract, 5 g/L peptone, 3 g/L KH_2PO_4, 3 g/L $(NH_4)_2SO_4$, and 15 g/L agar) with and without ergosterol and Tween 80. Plates were incubated at 30 °C for 1–2 days. Colonies that grew only on supplemented medium were identified as auxotrophic mutants and selected for further lipid extraction and squalene analysis.

Factors affecting squalene accumulation

The effects of shaking speed and incubation time on squalene accumulation were evaluated using selected mutant strains of *S. cerevisiae*. Cultures were grown in 50 mL YPD medium at 30 °C under shaking conditions of 100, 150, 200, or 250 rpm. For the shaking-speed experiment, cultures were incubated for 48 h, after which cell growth (OD_{550}) and squalene accumulation were measured. To assess the time-dependent accumulation of squalene, cultures were incubated under the same shaking conditions (100–250 rpm), and samples were collected at 0, 12, 24, 36, 48, and 60 hr. Cells from each time point were harvested, washed, and subjected to lipid extraction. Squalene content was quantified following lipid extraction and analysis by high-performance liquid chromatography or gas chromatography.

Growth measurement and dry cell weight

Cell growth was monitored by measuring turbidity at OD_{550}. For dry cell weight determination, 5 mL cultures were centrifuged at 5000 rpm, washed twice with distilled water, transferred onto pre-weighed foil (W_1), dried at 105 °C for 8 hr, cooled, and weighed (W_2). Dry cell weight (g/L) was calculated according to Equation 1:

$$\text{Dry cell weight (g/L)} = \frac{W2-W1}{V} \times 1000 \quad (1)$$

where W1 = Weight of filter paper after drying (g); W2 = Weight of filter paper and dry cell after drying (g); V = Volume of suspension solution sample (mL)

Lipid extraction and squalene analysis

Lipid extraction was performed using a modified Bligh and Dyer (1959) protocol. Cell pellets were suspended in 2 mL distilled water, vortexed, and sonicated for 5 min. Chloroform (2.5 mL) and methanol (5 mL) were added and sonicated for an additional 5 min, followed by the addition of 2.5 mL chloroform and vortexing. The mixture was centrifuged at 1300 × g for 15 min, and the chloroform phase was collected. Solvent was evaporated in a vacuum oven at 40 °C for 3–4 h to obtain dried lipids. Dried lipids were dissolved in 200 µL chloroform:methanol (2:1), and squalene was quantified using a PerkinElmer HPLC system equipped with an Eclipse XDB-C18 column and UV detection at 205 nm. The mobile phase consisted of methanol:2-propanol:acetic acid (91.95:8:0.05), with a flow rate of 1 mL/min and 20 µL injection volume. Quantification was performed using a calibration curve generated from squalene standards (FUJIFILM Wako Pure Chemical Corporation, Japan). For GC analysis, lipids were dissolved in 500 µL hexane. Squalene was analyzed using a SHIMADZU SH-Rxi-5ms column under the following conditions: injector temperature 300 °C, column temperature 260 °C, and flame ionization detector (FID) at 300 °C; injection volume was 1 µL. Squalene concentration was quantified using a standard calibration curve correlating peak area with known squalene concentrations.

Statistical analysis

One-way analysis of variance followed by Duncan's post-hoc tests and an independent t-test with a 95% confidence level ($p < 0.05$) were conducted to evaluate significant differences in the data for multigroup, respectively. SPSS software (version 16.0; SPSS Inc., Chicago, IL, USA) was used. The results are expressed as mean values ± standard deviation based on at least three replicates.

Results and Discussion

Squalene production by Saccharomyces cerevisiae TISTR 5606

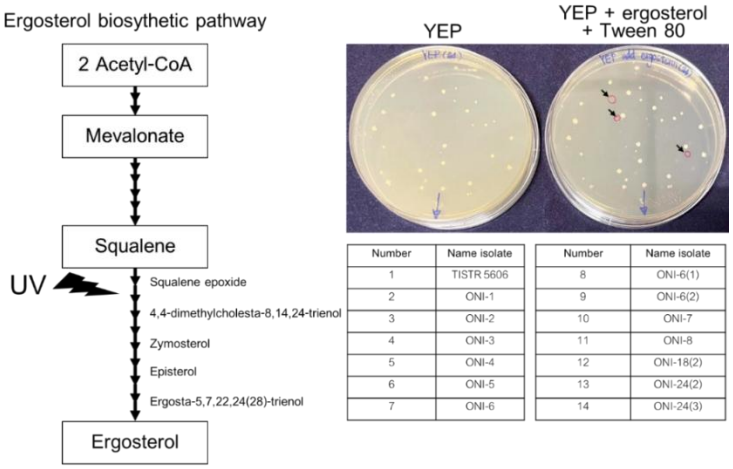
The yeast strain *Saccharomyces cerevisiae* TISTR 5606 was selected as the model organism for evaluating squalene production due to its industrial relevance and well-characterized sterol biosynthetic pathway. Under standard cultivation conditions in YPD medium at 30 °C, the wild-type strain accumulated squalene at a concentration of 5.28 g/L. This relatively high level of squalene accumulation indicates that *S. cerevisiae* TISTR 5606 possesses an intrinsic capacity to channel metabolic flux toward the mevalonate and ergosterol biosynthetic pathways.

Squalene accumulation in *S. cerevisiae* is strongly influenced by the regulation of ergosterol biosynthesis, particularly at the step catalyzed by squalene epoxidase (*Erg1*). Previous studies have demonstrated that partial limitation or deregulation of downstream ergosterol synthesis can lead to intracellular squalene accumulation (Spanova and Daum, 2011). The substantial squalene yield observed in the TISTR 5606 strain suggests that its native regulatory mechanisms favor squalene retention, potentially as a membrane-stabilizing response under cultivation conditions (Pata et al., 2020).

Based on its high baseline squalene production, *S. cerevisiae* TISTR 5606 was selected for further enhancement through UV mutagenesis and subsequent optimization of cultivation parameters to improve squalene accumulation.

Generation of mutant yeast strains with enhanced squalene accumulation via ultraviolet mutagenesis

UV irradiation conditions were optimized to achieve a survival rate between 5–6%, which is suitable for inducing random point mutations while maintaining adequate colony recovery. A 30-second exposure achieved a 6% survival rate, whereas exposure beyond 60 seconds resulted in complete loss of viability. Following mutagenesis, replica plating was performed on YEP medium and YEP supplemented with ergosterol and Tween 80. The supplementation was used to identify mutants defective in ergosterol biosynthesis, as such mutants often accumulate upstream intermediates, including squalene. A total of 52 auxotrophic colonies were obtained, and 13 isolates—ONI-1, ONI-2, ONI-3, ONI-4, ONI-5, ONI-6, ONI-6(1), ONI-6(2), ONI-7, ONI-8, ONI-18(2), ONI-24(2), and ONI-24(3)—were selected for further evaluation (Fig. 1).



Number	Name isolate	Number	Name isolate
1	TISTR 5606	8	ONI-6(1)
2	ONI-1	9	ONI-6(2)
3	ONI-2	10	ONI-7
4	ONI-3	11	ONI-8
5	ONI-4	12	ONI-18(2)
6	ONI-5	13	ONI-24(2)
7	ONI-6	14	ONI-24(3)

Fig. 1 Screening of UV-mutagenized *S. cerevisiae* for enhanced squalene accumulation. Left panel: Ergosterol biosynthetic pathway. Right panel: Colonies grown on YEP medium (control) and colonies grown on YEP medium supplemented with ergosterol, used to identify mutants with altered sterol biosynthesis. Colonies showing impaired ergosterol synthesis and potential squalene overaccumulation are indicated by arrows.

The 13 selected UV mutants were grown in YPD broth at 30 °C and 100 rpm for 48 hr. Squalene content was extracted and analyzed via gas chromatography. The mutant strain ONI-24(2) achieved the highest

squalene concentration at 6.74 g/L, followed by ONI-18(2) (3.99 g/L) and ONI-24(3) (3.98 g/L) (Fig. 2). Several other mutants showed moderate increases, ranging from 3.77–3.80 g/L. Strains ONI-6(1), ONI-6(2), and ONI-8 showed no detectable squalene, likely due to mutations occurring upstream of squalene synthesis, disrupting precursor formation. The wild-type strain produced 5.28 g/L, indicating that ONI-24(2) demonstrated a clear improvement. UV mutagenesis is widely used to enhance metabolic intermediates by disrupting downstream enzymes (Khatri et al., 2019). The increased squalene accumulation in ONI-24(2) suggests partial impairment of squalene epoxidase (*Erg1*) or other downstream enzymes. This mechanism is consistent with reports demonstrating that Erg1 inhibition significantly increases intracellular squalene (Spanova et al., 2012). Non-producing mutants may have acquired mutations affecting acetyl-CoA supply or mevalonate pathway enzymes, both essential for squalene biosynthesis.

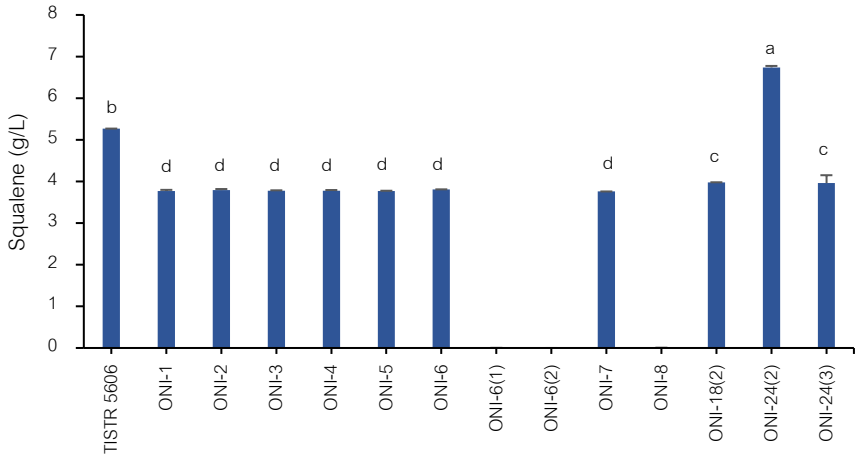


Fig. 2 Squalene production of wild-type and UV-mutagenized *S. cerevisiae* strains. Squalene concentrations (g/L) were measured after 48 h of cultivation in YPD medium at 30 °C and 100 rpm. Different letters above bars indicate statistically significant differences among strains ($p < 0.05$).

Effect of shaking speed on squalene accumulation

Oxygen availability strongly influences sterol and lipid metabolism in yeast. To assess the effect of aeration, the mutant strain ONI-24(2) was cultured at shaking speeds of 100, 150, 200, and 250 rpm. Maximum dry cell weight (DCW) was recorded at 150 rpm, reaching 3.73 g/L at 60 h (Fig. 3). At other speeds, DCW ranged between 2.41–3.48 g/L. Specific growth rates (μ_{max}) ranged from 0.07–0.09 hr^{-1}. The highest squalene concentration, 7.76±0.23 g/L, was recorded at 150 rpm after 60 hr. This represents a 0.47-fold increase over the wild type. A summary of performance: 150 rpm: peak accumulation 7.76 g/L (60 h), 200 rpm: 7.37 g/L (60 h), 100 rpm: 6.74 g/L (48 h), and 250 rpm: 6.51 g/L (24 h). The lowest production occurred at 100 rpm after 12 h (1.82 g/L) (Fig. 3). Moderate aeration (150 rpm) yielded the best results, consistent with findings that oxygen is essential for the mevalonate pathway, but excessive aeration can increase oxidative stress, decreasing lipid accumulation (Zhang et al., 2021). Over-agitation may also disrupt membrane stability, reducing the intracellular retention of nonpolar compounds like squalene. The gradual increase in squalene at 200 rpm suggests partial

oxygen benefit, whereas inhibition at 250 rpm indicates overoxidation or shear stress. The correlation between DCW and squalene accumulation supports the view that squalene storage is closely tied to membrane biosynthesis and the density of lipid droplets (Rajakumari et al., 2008).

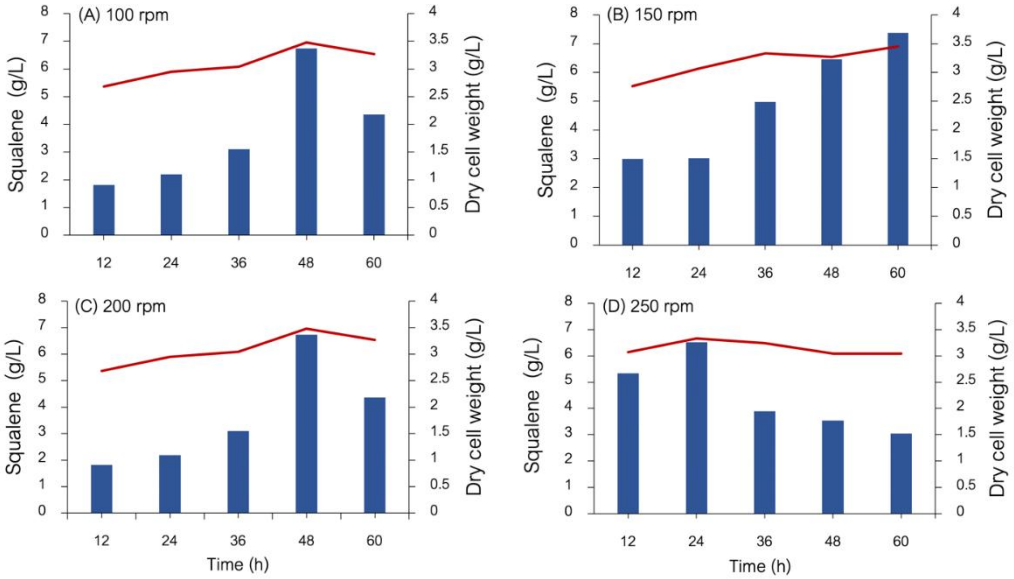


Fig. 3 Time-course analysis of squalene accumulation and dry cell weight in *S. cerevisiae* mutant ONI-24(2) cultivated at different shaking speeds; (A) 100 rpm, (B) 150 rpm, (C) 200 rpm, (D) 250 rpm. Cultures were grown in 50 mL YPD at 30 °C, and samples were collected at 0, 12, 24, 36, 48, and 60 hr. Squalene concentration was quantified from extracted lipids, while dry cell weight was determined gravimetrically. The bar graphs represent squalene accumulation (g/L), and the red line graphs represent dry cell weight (g/L).

Conclusion

UV mutagenesis effectively enhanced squalene production in *S. cerevisiae* TISTR 5606, and process optimization revealed that moderate aeration (150 rpm) and extended cultivation time maximized squalene accumulation. This study highlights the combined importance of genetic improvement and cultivation control for developing efficient microbial squalene production systems.

Conflict of Interest

The authors declare that there are no conflicts of interest.

Acknowledgments

The authors would like to express their sincere gratitude for the financial support provided to the student through the Short Stay Short Visit (SSSV) Program supported by the Japan Student Services Organization (JASSO) in collaboration with Yamaguchi University, as well as the Graduate School Fellowship Program from Kasetsart University. The authors also wish to extend their appreciation to Dr. Duenrut Chonudomkul for her generous support in providing access to the vacuum oven, which was essential to this research.

References

Du, X., Ma, X., Gao, Y. 2024. The physiological function of squalene and its application prospects in animal husbandry. Front. Vet. Sci. doi.org/10.3389/fvets.2023.1284500

Hien, H.T.M., Thom, L.T., Cam Ha, N., Lan Anh, H.T., Hong, D.D. 2020. Optimization of culture conditions for squalene production and squalene extraction method of Thraustochytrium sp. TN22. Acad. J. Biol. 42: 73–85. doi.org/10.15625/2615-9023/v42n4.14978

Khatri, I., Rana, R., Ghosh, S. 2019. UV mutagenesis for strain improvement: Applications in biotechnology. Biotechnol. Adv. 37: 107450.

Liu, G.S., Li, T., Zhou, W., et al. 2020a. The yeast peroxisome: a dynamic storage depot and subcellular factory for squalene overproduction. Metab. Eng. 57: 151–161. doi.org/10.1016/j.ymben.2019.11.001

Meng, Y., Shao, X., Wang, Y., Li, Y., Zheng, X., Wei, G., Kim, S.W., Wang, C. 2020. Extension of cell membrane boosting squalene production in the engineered Escherichia coli. Biotechnol. Bioeng. 117: 3499–3507. doi.org/10.1002/bit.27511

Nakazawa, A., Kokubun, Y., Matsuura, H., et al. 2014. TLC screening of thraustochytrid strains for squalene production. J. Appl. Phycol. 26: 29–41. doi.org/10.1007/s10811-013-0080-x

Pata, S., Yao, L., et al. 2020. Role of squalene in membrane organization and stress tolerance in yeast. Appl. Microbiol. Biotechnol. 104: 3541–3553.

Patel, A., Bettiga, M., Rova, U., Christakopoulos, P., Matsakas, L. 2022. Microbial genetic engineering approach to replace shark livering for squalene. Trends Biotechnol. 40: 1261–1273. doi.org/10.1016/j.tibtech.2022.03.008

Rajakumari, S., Daum, G. 2008. Squalene biosynthesis and lipid droplet formation in yeast. Biochim. Biophys. Acta 1781: 299–304.

Spanova, M., Czabany, T., et al. 2012. Effect of ERG1 disruption on squalene accumulation. Yeast 29: 431–442.

Spanova, M., Daum, G. 2011. Squalene: Distribution, biosynthesis, and function. Eur. J. Lipid Sci. Technol. 113: 1299–1314.

Wolosik, K., Chalecka, M., Gasiewska, G., Palka, J., Surazynski, A. 2025. Squalane as a Promising Agent Protecting UV-Induced Inhibition of Collagen Biosynthesis and Wound Healing in Human Dermal Fibroblast. Molecules 30: 1964. doi.org/10.3390/molecules30091964

การวิเคราะห์ดีเอ็นเอโบราณเพื่อทำให้เข้าใจต้นกำเนิดของคนไทย

Ancient DNA analyses reveal the origin of Thai population

นันทนา ฮะไฮ้[a], **สุพรรณนี แก้วสุทธิ**[b], **พัชรีย์ เลิศฤทธิ์**[b], **วรรณรดา สุราช**[a,*]

Nantana Hahai[a], Supannee Kaewsutthi[b], Patcharee Lertrit[b], Wunrada Surat[a,*]

[a]ภาควิชาพันธุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

[b]ภาควิชาชีวเคมี คณะแพทย์ศาสตร์ ศิริราชพยาบาล มหาวิทยาลัยมหิดล กรุงเทพฯ 10700

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

[b]Department of Biochemistry, Faculty of Medicine Siriraj Hospital, Mahidol University, Bangkok 10700, Thailand

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

บทคัดย่อ

ในเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ เป็นบริเวณที่มีความหลากหลายของกลุ่มชาติพันธุ์และภาษา มีการศึกษาต้นกำเนิดของคนในแถบนี้ แต่ส่วนใหญ่จะเป็นการศึกษาโดยใช้ข้อมูลจากคนปัจจุบันเท่านั้น ในงานวิจัยนี้ได้ใช้ข้อมูลไมโทคอนเดรียดีเอ็นเอของประชากรโบราณของคนไทย มาวิเคราะห์เปรียบเทียบกับประชากรคนปัจจุบันจากกลุ่มชาติพันธุ์ที่ใช้ 4 ตระกูลภาษาหลัก คือ ออสโตรเอเชียติก กะได ออสโตรนีเซียน และชิโน-ทิเบต โดยพบว่าประชากรโบราณในภาคเหนือของไทยมีความสัมพันธ์ทางพันธุกรรมใกล้ชิดกับประชากรปัจจุบันที่ใช้ภาษาออสโตรเอเชียติกมากที่สุด โดยเฉพาะอย่างยิ่งกลุ่มชาติพันธุ์ทิน ปลัง และปะหล่อง ส่วนประชากรโบราณในภาคตะวันออกเฉียงเหนือมีความสัมพันธ์ทางพันธุกรรมใกล้ชิดกับประชากรปัจจุบันที่ใช้ภาษากะไดมากที่สุด โดยเฉพาะอย่างยิ่งกับกลุ่มชาติพันธุ์ไทใหญ่ ภูไท และส่วย

คำสำคัญ: กลุ่มชาติพันธุ์, ดีเอ็นเอโบราณ, ต้นกำเนิดของประชากรไทย, ตระกูลภาษา

Abstract

Southeast Asia is a region with extensive ethnic and linguistic diversity. Many studies have attempted to investigate the origins of people in this area, but most have relied solely on genetic data from present-day populations. In this research, mitochondrial DNA data from ancient Thai populations were analyzed and compared with present-day populations representing four major language families: Austroasiatic, Kra-Dai, Austronesian, and Sino-Tibetan. The results show that ancient populations from northern Thailand are genetically closest to present-day Austroasiatic-speaking groups, particularly the Thin, Blang, and Palaung ethnic groups. In contrast, ancient populations from northeastern Thailand exhibit the closest genetic affinity with present-day Kra-Dai–speaking groups, especially the Shan, Phu Thai, and Suay peoples.

Keywords: Ancient DNA, Ethnic group, Language family, Origin of Thai populations

คำนำ

ต้นกำเนิดของคนโบราณในเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ภาคพื้นทวีป (Mainland Southeast Asia; MSEA) มี 2 ทฤษฎี คือ ชาวโฮบิเนียนที่เก็บของป่าล่าสัตว์ที่อยู่ดั้งเดิมมีการพัฒนาการทำเกษตรกรรมขึ้นเอง และยังอาศัยอยู่ในบริเวณนี้มาจนถึงปัจจุบัน อีกทฤษฎีมีการเข้าแทนที่กลุ่มชาวโฮบิเนียนด้วยกลุ่มเกษตรกรที่มาจากจีนตอนใต้ (Lipson et al.,2018) ซึ่งปัจจุบันพบว่าทั้งสองทฤษฎีนี้ไม่มีทฤษฎีใดที่ถูกต้องทั้งหมด โดยพบว่าต้นกำเนิดของคนในเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ภาคพื้นทวีป จะเป็นการผสมรวมกัน (admixture) ของชาวโฮบิเนียนดั้งเดิมกับกลุ่มคนที่ทำกสิกรรมที่อพยพเข้ามาในภายหลัง (Lipson et al., 2018; Kutanan et al., 2021) ซึ่งพบว่าประชากรปัจจุบันในเอเชียตะวันออกเฉียงใต้มีความหลากหลายของทั้งกลุ่มชาติพันธุ์ (ประมาณ 2,000 กลุ่ม) และภาษา (226 ภาษา) ที่ใช้สูงมาก (Eberhard et al. 2020) ในประเทศไทยพบว่ามีกลุ่มชาติพันธุ์ทั้งหมดประมาณ 60 กลุ่ม ที่ใช้ภาษาจาก 4 ตระกูลภาษาหลัก ได้แก่ ภาษาออสโตรเอเชียติก ไท-กะได ชิโน-ทิเบต และออสโตรนีเซียน โดยกลุ่มชาติพันธุ์ที่ใช้ภาษาออสโตรเอเชียติก ได้แก่ กลุ่มชาติพันธุ์ปลังบรู ชาวบน มลาบรี ญัฮกุร ปะหล่อง โซ่ ส่วย และทิน กลุ่มชาติพันธุ์ที่ใช้ภาษาไท-กะได ได้แก่ กะเลิง ลื้อ ญ้อ ภูไท พวนไทใหญ่ แสก และขึน กลุ่มชาติพันธุ์ที่ใช้ภาษาชิโน-ทิเบต ได้แก่ กะเหรี่ยงปาดวง, กะเหรี่ยงโพ และกะเหรี่ยงซอว์ และกลุ่มชาติพันธุ์ที่ใช้ภาษาออสโตรนีเซียน ได้แก่ มอแกน และอูรักลาโว้ย (Kutanan et al. 2017; 2019; 2021; 2023)

ในงานวิจัยก่อนหน้านี้มีการศึกษาข้อมูลดีเอ็นเอเพื่อทำความเข้าใจเรื่องต้นกำเนิดของคนเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ภาคพื้นทวีป รวมถึงคนไทย แต่พบว่างานวิจัยส่วนใหญ่จะเป็นการวิเคราะห์ข้อมูลดีเอ็นเอของคนปัจจุบันเท่านั้น (Lertrit, Patcharee et al.,2008; McColl et al., 2018) ส่วนงานวิจัยที่ใช้ข้อมูลดีเอ็นเอของคนโบราณยังมีอยู่น้อยมาก เนื่องจากในแถบเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ตั้งอยู่ในเขตร้อนชื้น ซึ่งความร้อนและความชื้นสูงจะทำลายดีเอ็นเอที่อยู่ในตัวอย่างกระดูกโบราณ ทำให้ดีเอ็นเอที่หลงเหลืออยู่ในตัวอย่างมีน้อยมาก และมักหักทำให้ขนาดดีเอ็นเอสั้นมาก โดยพบว่าขนาดดีเอ็นเอที่พบในเขตร้อนชื้นส่วนใหญ่มักมีขนาดไม่เกิน 200 คู่เบส และส่วนใหญ่มีขนาดประมาณเพียง 50 คู่เบสเท่านั้น (McColl et al., 2018) ทำให้โอกาสที่จะสกัดดีเอ็นเอและตรวจสอบลำดับเบสจากตัวอย่างโบราณในแถบนี้ได้สำเร็จมีน้อยมาก แต่อย่างไรก็ตาม ข้อมูลดีเอ็นเอที่ได้จากตัวอย่างโบราณกลับมีความสำคัญอย่างยิ่งที่จะช่วยให้เราเข้าใจถึงต้นกำเนิดของคนได้ดีกว่าการใช้ข้อมูลของคนปัจจุบันเพียงอย่างเดียว

ในงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างประชากรคนโบราณจากจังหวัดแม่ฮ่องสอน จังหวัดนครราชสีมา และจังหวัดอุดรธานีในประเทศไทยกับประชากรปัจจุบันจากกลุ่มชาติพันธุ์ที่ใช้ 4 ตระกูลภาษาหลัก คือ ออสโตรเอเชียติก ไท-กะได ชิโน-ทิเบต และออสโตรนีเซียน ว่ามีความสัมพันธ์กันอย่างไร ซึ่งข้อมูลที่ได้จากงานวิจัยนี้จะช่วยให้เราเข้าใจถึงต้นกำเนิดของคนในเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ภาคพื้นทวีป โดยเฉพาะอย่างยิ่งคนไทยได้ดียิ่งขึ้น

อุปกรณ์และวิธีการทำวิจัย

การเก็บตัวอย่าง

กลุ่มตัวอย่างที่ศึกษาเป็นตัวอย่างเส้นผมที่นำมาทดลองได้ความอนุเคราะห์และความยินยอมจากอาสาสมัคร กลุ่มตัวอย่างที่ใช้ศึกษาทั้งหมดมาจากชาวญัฮกุร ตำบลบ้านไร่ อำเภอเทพสถิต จังหวัดชัยภูมิ 14 ตัวอย่าง ก่อนทำการเก็บตัวอย่างมีการสัมภาษณ์ประวัติครอบครัว เพื่อคัดกรองอาสาสมัครที่ไม่มีความเกี่ยวข้องกันทางสายเลือด อย่างน้อย 2 ชั่วรุ่น

โครงการวิจัยนี้ได้รับอนุมัติจากคณะกรรมการจริยธรรมการวิจัยในมนุษย์ จากคณะแพทยศาสตร์ศิริราชพยาบาล รหัสโครงการ 829/2562(IRB4) เอกสารรับรองโครงการวิจัย (Certificate of Approval) เลขที่ Si 074/2020 และ รหัสโครงการ 501/25se(EC3) เอกสารรับรองโครงการวิจัย (Certificate of Approval) เลขที่ Si 749/2076

การสกัดดีเอ็นเอ การเพิ่มชิ้นส่วนดีเอ็นเอด้วยวิธี PCR และการตรวจสอบลำดับเบส

สกัดดีเอ็นเอจากเส้นผมที่มีรากผมติดอยู่ 6–7 เส้น ต่อตัวอย่าง โดยใช้ชุดสกัดดีเอ็นเอสำเร็จรูป GenepHlow™ Gel/PCR Kit (Geneaid, Taiwan) จากนั้นนำดีเอ็นเอที่ได้ไปเพิ่มปริมาณไมโทคอนเดรียลดีเอ็นเอ บริเวณ D-loop ด้วยปฏิกิริยาลูกโซ่พอลีเมอเรส โดยมีสารในปฏิกิริยาดังนี้ คือ 10× PCR buffer 5 µL, 50 mM $MgCl_2$ 1.25 µL, 10 mM dNTP 1 µL, 10 µM forward primer (L15790 5'-CAT CAT TGG ACA AGT AGC ATC CG -3') 1 µL, 10 µM reverse primer (H743 5'-GAT CGT GGT GAT TTA GAG GG -3') 1 µL (Ballinger SW,1992), Taq DNA polymerase (5 U/µL) 0.2 µL และน้ำกลั่นปลอดเชื้อ 36.5 µL โดยการทำปฏิกิริยาลูกโซ่พอลีเมอเรสใช้อุณหภูมิต่าง ๆ ดังนี้ บ่มที่อุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียส 5 นาที 1 รอบ บ่มที่ 95 องศาเซลเซียส 30 วินาที บ่มที่ 63 องศาเซลเซียส 30 วินาที และ 72 องศาเซลเซียส 30 วินาที ทำซ้ำทั้งหมด 30 รอบ และบ่มที่ 72 องศาเซลเซียส นาน 7 นาที 1 รอบ จากนั้นตรวจสอบปริมาณและคุณภาพของดีเอ็นเอด้วยวิธี Gel electrophoresis โดยใช้ 1% Agarose Gels ที่ 100 โวลท์ เป็นเวลา 15 นาที เมื่อครบเวลาแล้วนำเจลไปย้อมในเอทิเดียมโบรไมด์ (Ethidium Bromine) และใช้เครื่อง UV Transilluminator เพื่อตรวจดูแถบดีเอ็นเอ และ PCR product ที่ได้นำไปทำให้บริสุทธิ์ด้วย GenepHlowTM Gel/PCR Kit (Geneaid, Taiwan) ก่อนนำไปตรวจสอบลำดับเบสด้วยวิธี Sanger (Macrogen, Seoul Korea) นำข้อมูลลำดับเบสที่ได้มาประกอบกัน (assembly) และตรวจสอบตำแหน่งที่มีความแปรผันของเบส (polymorphic site) โดยเทียบกับลำดับเบสอ้างอิง Revised Cambridge Reference Sequence (rCRS; Andrews et al., 1999) ด้วยโปรแกรม BioEdit version 7.2.5 เพื่อตรวจสอบตำแหน่งที่มีความแปรผันของเบส (polymorphic sites) จากนั้นลำดับบริเวณ D-loop ขนาด 337 คู่เบส ถูกจัดเรียงแบบหลายลำดับ (multiple sequence alignment) ด้วย MEGA 11 (Kumar et al., 2018)

ข้อมูลดีเอ็นเอที่รวบรวมมาจากฐานข้อมูล

ข้อมูลประชากรคนโบราณจำนวน 70 ตัวอย่าง จากจังหวัดแม่ฮ่องสอน (35 ตัวอย่าง) (McColl et.al., 2018, Zhang et al., 2020) นครราชสีมา (30 ตัวอย่าง) (Lertrit et al., 2008) และอุดรธานี (5 ตัวอย่าง) (Lipson et al., 2018) แหล่งโบราณคดีจากภาคเหนือและภาคตะวันออกเฉียงเหนือ โดยมาจากแหล่งโบราณคดีถ้ำผีแมนโลงลงรัก (15 ตัวอย่าง) แหล่งโบราณคดีปางมะผ้า (6 ตัวอย่าง) แหล่งโบราณคดีถ้ำลอด (10 ตัวอย่าง) แหล่งโบราณคดีน้ำโขง (2 ตัวอย่าง) และแหล่งโบราณคดีเพิงผาบ้านไร่ (2 ตัวอย่าง) ซึ่งตั้งอยู่ในจังหวัดแม่ฮ่องสอน แหล่งโบราณคดีบ้านหลุมข้าว (13 ตัวอย่าง) และเนินอุโลก (17 ตัวอย่าง) ในจังหวัดนครราชสีมา และมรดกโลกบ้านเชียง (5 ตัวอย่าง) ในจังหวัดอุดรธานี ส่วนตัวอย่างประชากรคนปัจจุบันมาจาก 22 กลุ่มชาติพันธุ์ ที่ใช้ 4 ตระกูลภาษาหลัก คือ ตระกูลภาษาออสโตรเอเชียติก ซึ่งประกอบไปด้วยกลุ่มชาติพันธุ์ปลัง (50 ตัวอย่าง) บรู (24 ตัวอย่าง) ชาวบน (14 ตัวอย่าง) มลาบรี (18 ตัวอย่าง) ญัฮกุร (14 ตัวอย่าง) ปะหล่อง (25 ตัวอย่าง) โซ่ (24 ตัวอย่าง) ส่วย (25 ตัวอย่าง) และทิน (75 ตัวอย่าง) ตระกูลภาษาไท-กะได ประกอบไปด้วยกลุ่มชาติพันธุ์กะเลิง (25 ตัวอย่าง) ลื้อ (89 ตัวอย่าง) ญ้อ (25 ตัวอย่าง) ภูไท (25 ตัวอย่าง) พวน (15 ตัวอย่าง) ไทใหญ่ (26 ตัวอย่าง) แสก (25 ตัวอย่าง) และขืน (25 ตัวอย่าง) ตระกูลภาษาชิโน-ทิเบต ซึ่งประกอบไปด้วยกลุ่มชาติพันธุ์กะเหรี่ยงปาดวง (22 ตัวอย่าง) กะเหรี่ยงโพ (24 ตัวอย่าง) และกะเหรี่ยงซอว์ (33 ตัวอย่าง) (Kutanan et al., 2016; 2018) และตระกูลภาษาออสโตรนีเซียน ประกอบไปด้วยกลุ่มชาติพันธุ์มอแกน (27 ตัวอย่าง) และอูรักลาโว้ย (25 ตัวอย่าง) (Dancause,2009; Pradutkanchana, 2011)

การวิเคราะห์องค์ประกอบหลัก (Principal Component Analysis, PCA) และการวิเคราะห์เครือข่ายแฮโพลไทป์ (Haplotype network)

เพื่อตรวจสอบความสัมพันธ์ทางพันธุกรรมระหว่างกลุ่มประชากรโบราณและปัจจุบัน ข้อมูลลำดับเบสของไมโทคอนเดรียดีเอ็นเอบริเวณ D-loop ถูกนำมาคำนวณระยะทางทางพันธุกรรม (genetic distance) และนำมาวิเคราะห์ PCA ด้วยฟังก์ชัน prcomp ใน R Studio version 2023.12.0 และใช้แพ็กเกจ ggplot2 (Wickham, 2016) โดยวิเคราะห์ประชากรโบราณและประชากรปัจจุบันแยกตามกลุ่มภาษา ซึ่งมีทั้งหมด 4 กลุ่มภาษา จากนั้นเลือกเฉพาะประชากรปัจจุบันในแต่ละกลุ่มภาษาที่มีการทับซ้อนและใกล้ชิดกับประชากรโบราณมาวิเคราะห์องค์ประกอบหลักอีกครั้งหนึ่ง เพื่อดูว่าประชากรโบราณมีความสัมพันธ์ใกล้ชิดกับประชากรปัจจุบันในกลุ่มภาษาใดมากที่สุด โดยใช้ประชากรปัจจุบัน (367 ตัวอย่าง) ในกลุ่มภาษาออสโตรเอเชียติกทั้งหมด 119 ตัวอย่าง จากกลุ่มชาติพันธุ์ปลัง (21 ตัวอย่าง) บรู (11 ตัวอย่าง) ชาวบน (10 ตัวอย่าง) ญัฮกุร (10 ตัวอย่าง) ปะหล่อง (12 ตัวอย่าง) โซ่ (6 ตัวอย่าง) ส่วย (14 ตัวอย่าง) และทิน (35 ตัวอย่าง) ตระกูลภาษาไท-กะได ทั้งหมด 181 ตัวอย่าง จากกลุ่มชาติพันธุ์กะเลิง (21 ตัวอย่าง) ลื้อ (57 ตัวอย่าง) ญ้อ (21 ตัวอย่าง) ภูไท (21 ตัวอย่าง) พวน (11 ตัวอย่าง) ไทใหญ่ (21 ตัวอย่าง) แสก (11 ตัวอย่าง) และขืน (18 ตัวอย่าง) ตระกูลภาษาชิโน-ทิเบต ทั้งหมด 54 ตัวอย่าง จากกลุ่มชาติพันธุ์กะเหรี่ยงปาดวง (18 ตัวอย่าง) กะเหรี่ยงโพ (17 ตัวอย่าง) และกะเหรี่ยงซอว์ (19 ตัวอย่าง) และตระกูลภาษาออสโตรนีเซียน ทั้งหมด 13 ตัวอย่าง จากกลุ่มชาติพันธุ์มอแกน (5 ตัวอย่าง) และอูรักลาโว้ย (8 ตัวอย่าง) ส่วนประชากรโบราณมาจากจังหวัดแม่ฮ่องสอน (35 ตัวอย่าง) นครราชสีมา (24 ตัวอย่าง) และอุดรธานี (5 ตัวอย่าง) จากนั้นใช้ข้อมูลเหล่านี้ในการวิเคราะห์แฮโพลไทป์ด้วยโปรแกรม DnaSP version 5.10.01 (Librado and Rozas, 2009) และวิเคราะห์เครือข่ายแฮโพลไทป์ด้วยโปรแกรม PopART version 1.7 (Bandelt et al., 1999; Leigh and Bryant, 2015) โดยเลือกใช้วิธี Median-Joining (MJ) network

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

มีข้อถกเถียงเกี่ยวกับต้นกำเนิดของคนในแถบเอเชียตะวันออกเฉียงใต้มาหลายทศวรรษ แต่ความเข้าใจในเรื่องนี้ยังไม่ชัดเจนนัก เนื่องจากข้อมูลดีเอ็นจากตัวอย่างคนโบราณในแถบนี้ยังมีน้อยมาก ซึ่งรวมถึงตัวอย่างในประเทศไทยด้วย ซึ่งประเทศไทยตั้งอยู่บริเวณตรงกลางของเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ภาคพื้นทวีป ข้อมูลเรื่องต้นกำเนิดของคนไทย และความสัมพันธ์ของคนโบราณกับกลุ่มชาติพันธุ์ต่าง ๆ ในไทย จะเป็นจิ๊กซอที่สำคัญที่ช่วยให้เราเข้าใจการอพยพเคลื่อนย้ายของผู้คนในภูมิภาคนี้มากยิ่งขึ้น ในงานวิจัยนี้ได้วิเคราะห์ข้อมูลดีเอ็นเอจากทั้งประชากรโบราณและปัจจุบันในประเทศไทย ซึ่งผลจากการวิเคราะห์องค์ประกอบหลัก (Fig. 1) สามารถจำแนกประชากรโบราณและประชากรปัจจุบันที่มีความสัมพันธ์ใกล้ชิดกันออกเป็น 6 กลุ่ม (A–F) โดยกลุ่ม A พบกลุ่มประชากรโบราณแม่ฮ่องสอน มีการทับซ้อนกับกลุ่มประชากรปัจจุบันกลุ่มชาติพันธุ์บรู ปะหล่อง โซ่ และส่วย ที่ใช้ภาษาออสโตรเอเชียติก อูรักลาโว้ยและมอแกนที่ใช้ภาษาออสโตรนีเซียน กะเลิง ลื้อ แสก และภูไท ที่ใช้ภาษาไท-กะได และกะเหรี่ยงปาดวง กะเหรี่ยงโพ กับกะเหรี่ยงซอว์ ที่ใช้ภาษาชิโน-ทิเบต ส่วนกลุ่มประชากรโบราณนครราชสีมา มีการทับซ้อนกับกลุ่มประชากรปัจจุบันกลุ่มชาติพันธุ์บรู ชาวบน ญัฮกุร ปะหล่อง และส่วย ที่ใช้ภาษาออสโตรเอเชียติก กะเลิง ญ้อ พวน และไทใหญ่ ที่ใช้ภาษาไท-กะได สำหรับกลุ่มประชากรโบราณอุดรธานีจากมรดกโลกบ้านเชียง มีการทับซ้อนกับกลุ่มประชากรกลุ่มประชากรปัจจุบันกลุ่มชาติพันธุ์ปลัง และ โซ่ ที่ใช้ภาษาออสโตรเอเชียติก และภูไท ที่ใช้ภาษาไท-กะได กลุ่ม B พบกลุ่มประชากรโบราณแม่ฮ่องสอน กลุ่มประชากรโบราณนครราชสีมา และกลุ่มประชากรโบราณอุดรธานีมีการทับซ้อนกับกลุ่มประชากรปัจจุบันกลุ่มชาติพันธุ์บรู ปะหล่อง และส่วย ที่ใช้ภาษาออสโตรเอเชียติก และกะเลิง ลื้อ ญ้อ พวน ไทใหญ่ แสก และขืน ที่ใช้ภาษาไท-กะได สำหรับกลุ่ม C พบกลุ่มประชากรโบราณแม่ฮ่องสอน และนครราชสีมา มีความใกล้ชิดกับกลุ่มประชากรปัจจุบันกลุ่มชาติพันธุ์ชาวบน โซ่ และ

ทิน ที่ใช้ภาษาออสโตรเอเชียติก ญ้อ ภูไท ไทใหญ่ แสก และขึน ที่ใช้ภาษาไท-กะได และกะเหรี่ยงปาดวง กะเหรี่ยงโพ และกะเหรี่ยงซอว์ ที่ใช้ภาษาซิโน-ทิเบต กลุ่ม D พบกลุ่มประชากรโบราณนครราชสีมา มีการทับซ้อนกับกลุ่มประชากรปัจจุบันกลุ่มชาติพันธุ์ลื้อ ที่ใช้ภาษาไท-กะได และมีความใกล้ชิดกับกลุ่มประชากรปัจจุบันกลุ่มชาติพันธุ์ปลัง ปะหล่อง โซ่ และทิน ที่ใช้ภาษาออสโตรเอเชียติก กะเลิง ลื้อ ญ้อ ภูไท ไทใหญ่ แสก และขึน ที่ใช้ภาษาไท-กะได กลุ่ม E พบกลุ่มประชากรโบราณแม่ฮ่องสอน มีการทับซ้อนกับกลุ่มประชากรปัจจุบันกลุ่มชาติพันธุ์ปลัง ที่ใช้ภาษาออสโตรเอเชียติก กะเลิง ลื้อ ญ้อ ไทใหญ่ และขึน ที่ใช้ภาษาไท-กะได และมีความใกล้ชิดกับกะเหรี่ยงปาดวง ที่ใช้ภาษาซิโน-ทิเบต กลุ่ม F พบกลุ่มประชากรโบราณแม่ฮ่องสอน มีการทับซ้อนกับกลุ่มประชากรปัจจุบันกลุ่มชาติพันธุ์ปลัง บรู โซ่ และทิน ที่ใช้ภาษาออสโตรเอเชียติก ชาวมอแกนและอูรักลาโว้ย ที่ใช้ภาษาออสโตรนีเซียน กะเลิง ลื้อ ภูไท และไทใหญ่ ที่ใช้ภาษาไท-กะได และกะเหรี่ยงปาดวง กะเหรี่ยงโพ และกะเหรี่ยงซอว์ ที่ใช้ภาษาซิโน-ทิเบต

สามารถสรุปความทับซ้อนและความใกล้ชิดของกลุ่มประชากรโบราณกับกลุ่มประชากรปัจจุบันดังนี้ คือ กลุ่มประชากรโบราณในนครราชสีมา มีความสัมพันธ์ใกล้ชิดทางพันธุกรรมกับกลุ่มชาติพันธุ์ทินมากที่สุด รองลงมาคือ ลื้อ ภูไท กะเหรี่ยงซอว์ กะเลิง ปลัง และปะหล่อง ส่วนกลุ่มประชากรโบราณในแม่ฮ่องสอน มีความใกล้ชิดทางพันธุกรรมกับกลุ่มชาติพันธุ์ลื้อมากที่สุด รองลงมาคือ ทิน ปลัง กะเหรี่ยงซอว์ กะเหรี่ยงปาดวง และภูไท สำหรับกลุ่มประชากรโบราณในอุดรธานี มีความใกล้ชิดทางพันธุกรรมกับกลุ่มชาติพันธุ์ลื้อมากที่สุด รองลงมาคือ ปลัง ส่วย ภูไท พวน บรู และญัฮกุร จะเห็นได้ว่ากลุ่มชาติพันธุ์ลื้อ และปลัง มีความใกล้ชิดกับทั้งสามประชากรโบราณ ส่วนกลุ่มชาติพันธุ์ทินมีความสัมพันธ์ใกล้ชิดกับประชากรโบราณจากนครราชสีมาแสดงดัง Fig. 1

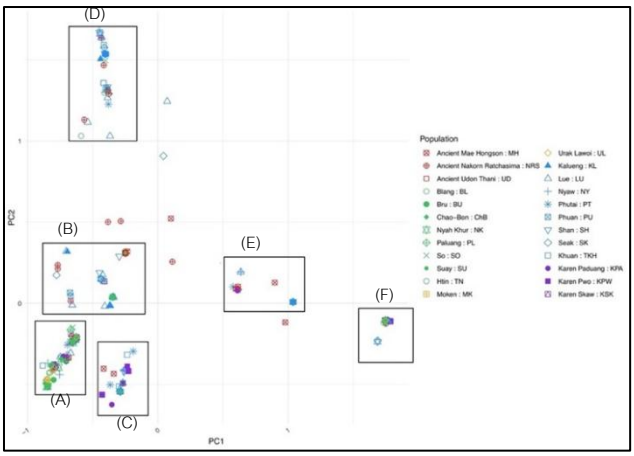


Fig. 1 Principal Component Analysis (PCA) of ancient and present-day populations in Thailand. Ancient populations from Mae Hong Son, Nakhon Ratchasima, and Udon Thani are shown in red. Present-day populations include Austroasiatic-speaking groups (green), Austronesian-speaking groups (yellow), Tai–Kadai–speaking groups (blue), and Sino-Tibetan–speaking groups (purple).

สำหรับผลการวิเคราะห์เครือข่ายแฮโพลไทป์ (Fig. 2) พบว่ามีทั้งหมด 9 แฮโพลไทป์ที่มีประชากรโบราณอยู่ร่วมกับประชากรปัจจุบัน (H2, H4, H16, H25, H37, H54, H63, H83, H101) โดย H2 มีเพียงแฮโพลไทป์เดียวที่มีประชากรโบราณอยู่ร่วมกับประชากรปัจจุบันจากทั้ง 4 ตระกูลภาษา H16 มีประชากรโบราณอยู่ร่วมกับประชากรปัจจุบันจาก 3 ตระกูลภาษา คือ ภาษาออสโตรเอเชียติก ไท-กะได และซิโน-ทิเบต ส่วน H4, H37 และ H25 มีประชากรโบราณอยู่ร่วมกับประชากรปัจจุบันที่ใช้ภาษาออสโตรเอเชียติกและไท-กะได H54 และ H83 ประชากรโบราณอยู่ร่วมกับประชากร

ปัจจุบันที่ใช้ภาษาออสโตรเอเชียติก H63 มีประชากรโบราณอยู่ร่วมกับประชากรปัจจุบันที่ใช้ภาษาไท-กะได H101 มีประชากรโบราณอยู่ร่วมกับประชากรปัจจุบันที่ใช้ภาษาชิโน-ทิเบต และเมื่อเปรียบเทียบผลใน Fig. 2 พบว่า H2 ประกอบด้วยกลุ่มประชากรโบราณจากแหล่งโบราณคดีปางมะผ้า แหล่งโบราณคดีถ้ำลอด จังหวัดแม่ฮ่องสอน กลุ่มประชากรโบราณจากมรดกโลกบ้านเชียง จังหวัดอุดรธานี และประชากรปัจจุบันกลุ่มชาติพันธุ์ปลัง ทิน กะเลิง บรู โซ่ ส่วย ลื้อ ภูไท ไทใหญ่ มอแกน อุรักลาโว้ย กะเหรี่ยงปาดวง กะเหรี่ยงโพ และกะเหรี่ยงซอว์ และยังมีความใกล้ชิดกับกลุ่มชาติพันธุ์อื่น ๆ โดยมีลำดับเบสแตกต่างเพียง 1 ตำแหน่งกับกลุ่มชาติพันธุ์แสก (H15) ภูไท กะเลิง (H49) ปะหล่อง (H53) กลุ่มประชากรโบราณจากเนินอุโลก จังหวัดนครราชสีมา (H64) กะเหรี่ยงโพ และกะเหรี่ยงซอว์ (H124) ทิน (H155) ส่วน H4 ประกอบด้วยกลุ่มประชากรโบราณจากแหล่งโบราณคดีปางมะผ้า แหล่งโบราณคดีถ้ำลอด จังหวัดแม่ฮ่องสอน และกลุ่มประชากรปัจจุบันกลุ่มชาติพันธุ์ปลัง ลื้อ ขืน ไทใหญ่ กะเลิง ญ้อ และยังใกล้ชิดกับกลุ่มชาติพันธุ์อื่น ๆ โดยมีลำดับเบสแตกต่างเพียง 1 ตำแหน่งกับกลุ่มชาติพันธุ์ปะหล่อง (H54) ญ้อ ลื้อ (H57) และกลุ่มประชากรโบราณจากแหล่งโบราณคดีน้ำโขง (H98) ใน H16 ประกอบด้วยกลุ่มประชากรโบราณจากแหล่งโบราณคดีถ้ำผีแมนโลงลงรัก กลุ่มประชากรโบราณจากแหล่งโบราณคดีถ้ำลอด จังหวัดแม่ฮ่องสอน และกลุ่มประชากรปัจจุบันกลุ่มชาติพันธุ์ปะหล่อง ทิน ลื้อ กะเหรี่ยงซอว์ จากภาคเหนือ กลุ่มชาติพันธุ์แสก จากภาคตะวันออกเฉียงเหนือ และยังมีความสัมพันธ์ใกล้ชิดกับกลุ่มชาติพันธุ์อื่น ๆ โดยมีลำดับเบสแตกต่างเพียง 1 ตำแหน่งกับกลุ่มประชากรโบราณจากแหล่งโบราณคดีเนินอุโลก (H25, H81) กลุ่มชาติพันธุ์แสก (H19) ปะหล่อง (H25, H34) ปลัง ส่วย ญัฮกุร ไทใหญ่ และภูไท (H25) ญ้อ (H56) กลุ่มประชากรโบราณจากแหล่งโบราณคดีเพิงผาบ้านไร่ (H101, H102) กะเหรี่ยงปาดวง (H101) ลื้อ (H113) กะเหรี่ยงโพ (H125) กะเหรี่ยงซอว์ (H129) และขืน (H148) แสดงให้เห็นว่าประชากรโบราณจากแหล่งโบราณคดีในจังหวัดแม่ฮ่องสอน มีความสัมพันธ์ใกล้ชิดกับประชากรปัจจุบันที่ใช้ภาษาออสโตรเอเชียติก (กลุ่มชาติพันธุ์ปะหล่องทิน ปลัง ส่วย และญัฮกุร) ไท-กะได (กลุ่มชาติพันธุ์ลื้อ แสก ไทใหญ่ ภูไท ญ้อ และขืน) และชิโน-ทิเบต (กลุ่มชาติพันธุ์กะเหรี่ยงซอว์ กะเหรี่ยงปาดวง และกะเหรี่ยงโพ) ที่มาจากหลากหลายชาติพันธุ์ ใน H25 ประกอบด้วยกลุ่มประชากรโบราณจากแหล่งโบราณคดีเนินอุโลก จังหวัดนครราชสีมา และกลุ่มประชากรปัจจุบันจากกลุ่มชาติพันธุ์ปลัง ภูไท ไทใหญ่ ญัฮกุร ปะหล่อง และส่วย และมีความสัมพันธ์ใกล้ชิดกับกลุ่มชาติพันธุ์อื่น ๆ โดยมีความแตกต่างในลำดับดีเอ็นเอ 1 ตำแหน่งกับกลุ่มประชากรโบราณจากแหล่งโบราณคดีถ้ำผีแมนโลงลงรัก และแหล่งโบราณคดีถ้ำลอด จังหวัดแม่ฮ่องสอน กลุ่มชาติพันธุ์ปะหล่อง แสก ภูไท (H16) ทิน (H16, H143) ลื้อ (H123) ปลัง (H143) และประชากรโบราณจากมรดกโลกบ้านเชียง (H158) แสดงให้เห็นว่าประชากรโบราณจากแหล่งโบราณคดีเนินอุโลก มีความสัมพันธ์ใกล้ชิดกับประชากรปัจจุบันที่ใช้ภาษาออสโตรเอเชียติกกับไท-กะได และประชากรโบราณจากแหล่งโบราณคดีเนินอุโลก มีความสัมพันธ์ใกล้ชิดกับประชากรโบราณถ้ำผีแมนโลงลงรัก แหล่งโบราณคดีถ้ำลอด และมรดกโลกบ้านเชียง ใน H37 ประกอบด้วยกลุ่มประชากรโบราณจากแหล่งโบราณคดีเนินอุโลก จังหวัดนครราชสีมา และกลุ่มประชากรปัจจุบันกลุ่มชาติพันธุ์กะเลิง บรู ชาวบน ส่วย ญ้อ พวน แสก และยังมีความสัมพันธ์ใกล้ชิดกับกลุ่มชาติพันธุ์อื่น ๆ โดยมีลำดับเบสแตกต่างเพียง 1 ตำแหน่งกับกลุ่มประชากรโบราณจากแหล่งโบราณคดีเนินอุโลก จังหวัดนครราชสีมา (H82) และกลุ่มประชากรโบราณจากแหล่งโบราณคดีเพิงผาบ้านไร่ จังหวัดแม่ฮ่องสอน (H101) และลื้อ (H120) แสดงให้เห็นว่าประชากรโบราณจากแหล่งโบราณคดีเนินอุโลกมีความสัมพันธ์ใกล้ชิดกับประชากรปัจจุบันที่ใช้ภาษาออสโตรเอเชียติกและไท-กะได และยังมีความสัมพันธ์ใกล้ชิดกับประชากรโบราณจากแหล่งโบราณคดีเพิงผาบ้านไร่ในจังหวัดแม่ฮ่องสอนอีกด้วย ส่วน H54 ประกอบด้วยกลุ่มประชากรโบราณจากแหล่งโบราณคดีถ้ำผีแมนโลงลงรัก จังหวัดแม่ฮ่องสอน และกลุ่มประชากรปัจจุบันกลุ่มชาติพันธุ์ปะหล่อง และยังมีความสัมพันธ์ใกล้ชิดกับกลุ่มชาติพันธุ์อื่น ๆ โดยมีลำดับเบสแตกต่างเพียง 1 ตำแหน่งกับกลุ่มประชากรโบราณจากแหล่งโบราณคดีปางมะผ้า กลุ่มประชากรโบราณจาก

แหล่งโบราณคดีถ้ำลอด จังหวัดแม่ฮ่องสอน และกลุ่มประชากรปัจจุบันกลุ่มชาติพันธุ์ปลัง ลื้อ ขึน ไทใหญ่ กะเลิง ญ้อ (H4) กลุ่มประชากรโบราณจากแหล่งโบราณคดีถ้ำผีแมนโลงลงรัก จังหวัดแม่ฮ่องสอน (H4, H93) กลุ่มประชากรโบราณจากแหล่งโบราณคดีน้ำโขง จังหวัดแม่ฮ่องสอน (H99) และกะเหรี่ยงปาดวง (H134) แสดงให้เห็นว่ากลุ่มประชากรโบราณจากแหล่งโบราณคดีถ้ำผีแมนโลงลงรัก แหล่งโบราณคดีถ้ำลอด และแหล่งโบราณคดีน้ำโขง มีความสัมพันธ์ใกล้ชิดกัน และมีความสัมพันธ์ใกล้ชิดกับประชากรปัจจุบันที่ใช้ภาษาออสโตรเอเชียติก ใน H63 ประกอบด้วยกลุ่มประชากรโบราณจากแหล่งโบราณคดีเนินอุโลก จังหวัดนครราชสีมา และกลุ่มประชากรปัจจุบันกลุ่มชาติพันธุ์ลื้อ และมีความสัมพันธ์ใกล้ชิดกับประชากรอื่น ๆ โดยมีความแตกต่างในลำดับดีเอ็นเอ 1 ตำแหน่งกับกลุ่มประชากรโบราณจากแหล่งโบราณคดีบ้านหลุมข้าว จังหวัดนครราชสีมา (H74) สรุปได้ว่ากลุ่มประชากรโบราณจากแหล่งโบราณคดีเนินอุโลก และแหล่งโบราณคดีบ้านหลุมข้าว จังหวัดนครราชสีมา มีความสัมพันธ์ใกล้ชิดกับประชากรปัจจุบันที่ใช้ภาษาไท-กะได จากกลุ่มชติพันธุ์ลื้อมากที่สุด แสดงดัง Fig. 2

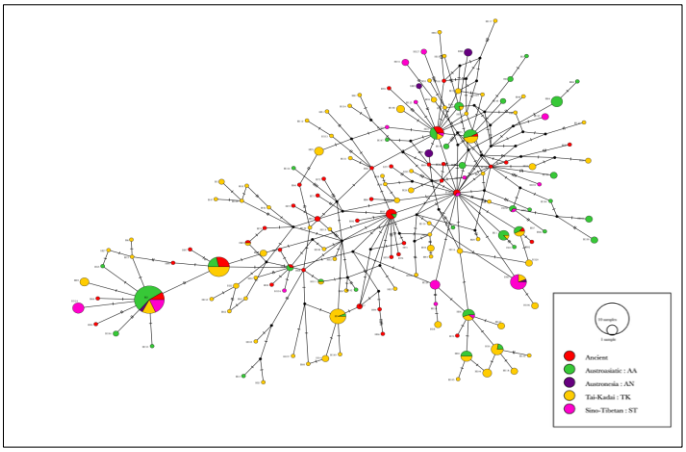


Fig. 2 Haplotype network analysis of ancient and present-day populations in Thailand. Ancient populations include Mae Hong Son (MH), Nakhon Ratchasima (NRS), and Udon Thani (UD). Present-day populations represent four major language families: Austroasiatic (AA), Austronesian (AN), Tai–Kadai (TK), and Sino-Tibetan (ST).

ใน H83 ประกอบด้วยกลุ่มประชากรโบราณจากแหล่งโบราณคดีถ้ำผีแมนโลงลงรัก จังหวัดแม่ฮ่องสอน กลุ่มประชากรโบราณจากแหล่งโบราณคดีเนินอุโลก จังหวัดนครราชสีมา กลุ่มประชากรโบราณจากแหล่งโบราณคดีบ้านเชียง จังหวัดอุดรธานี และกลุ่มประชากรปัจจุบันกลุ่มชาติพันธุ์ส่วย และมีความสัมพันธ์ใกล้ชิดกับประชากรอื่น ๆ โดยมีความแตกต่างในลำดับดีเอ็นเอ 1 ตำแหน่งกับกลุ่มประชากรโบราณจากแหล่งโบราณคดีเนินอุโลก จังหวัดนครราชสีมา (H81) กลุ่มประชากรโบราณจากแหล่งโบราณคดีถ้ำผีแมนโลงลงรัก จังหวัดแม่ฮ่องสอน (H92) และกลุ่มประชากรโบราณจากแหล่งโบราณคดีเพิงผาบ้านไร่ อำเภอปางมะผ้า และกะเหรี่ยงปาดวง (H101) ขึน (H154) แสดงให้เห็นว่ากลุ่มประชากรโบราณในจังหวัดแม่ฮ่องสอน นครราชสีมา และอุดรธานี มีความสัมพันธ์ทางพันธุกรรมใกล้ชิดกัน และยังใกล้ชิดกับประชากรปัจจุบันที่ใช้ภาษาออสโตรเอเชียติก (ส่วย) ไท-กะได (ขึน) และชิโน-ทิเบต (กะเหรี่ยงปาดวง) และ H101 ประกอบด้วยกลุ่มประชากรโบราณจากแหล่งโบราณคดีถ้ำลอด กลุ่มประชากรโบราณจากแหล่งโบราณคดีเพิงผาบ้านไร่ จังหวัดแม่ฮ่องสอน และกลุ่มประชากรปัจจุบันกลุ่มชาติพันธุ์กะเหรี่ยงปาดวง และมีความสัมพันธ์ใกล้ชิดกับประชากรอื่น ๆ โดยมีความแตกต่างในลำดับดีเอ็นเอ 1 ตำแหน่งกับกลุ่มชาติพันธุ์บรู ภูไท โซ่ ส่วย (H11) กลุ่มประชากรโบราณจากแหล่ง

โบราณคดีถ้ำผีแมนโลงลงรัก กลุ่มประชากรโบราณจากแหล่งโบราณคดีถ้ำลอด จังหวัดแม่ฮ่องสอน และกลุ่มประชากรปัจจุบัน ปะหล่อง ทิน ลื้อ กะเหรี่ยงซอว์ แสก (H16) ไทใหญ่ (H30) กลุ่มประชากรโบราณจากแหล่งโบราณคดีเนินอุโลก จังหวัดนครราชสีมา กลุ่มประชากรปัจจุบันจากกลุ่มชาติพันธุ์กะเลิ บรู ชาวบน ส่วย ญ้อ พวน แสก (H37) กะเลิง ลื้อ ภูไท อุรักลาโว้ย กะเหรี่ยงปาดวง กะเหรี่ยงโพ และกะเหรี่ยงซอว์ (H45) ประชากรโบราณจากแหล่งโบราณคดีบ้านหลุมข้าว (H69) แหล่งโบราณคดีถ้ำผีแมนโลงลงรัก จังหวัดแม่ฮ่องสอน ประชากรโบราณจากแหล่งโบราณคดีเนินอุโลก (H83) ลื้อ (H116, H121) กะเหรี่ยงปาดวง กะเหรี่ยงโพ และกะเหรี่ยงซอว์ (H126) ชาวบน (H130) และกลุ่มประชากรโบราณจากแหล่งโบราณคดีบ้านเชียง จังหวัดอุดรธานี (H158) แสดงให้เห็นว่ากลุ่มประชากรโบราณในจังหวัดแม่ฮ่องสอน นครราชสีมา และอุดรธานี มีความสัมพันธ์ทางพันธุกรรมใกล้ชิดกัน โดยประชากรโบราณจากแหล่งโบราณคดีถ้ำลอด จังหวัดแม่ฮ่องสอน มีความสัมพันธ์ใกล้ชิดกับประชากรปัจจุบันที่ใช้ภาษาชิโน-ทิเบต จากกลุ่มชาติพันธุ์กระเหรี่ยงปาดวงมากที่สุด ส่วนกลุ่มประชากรโบราณจากแหล่งโบราณคดีเนินอุโลก จังหวัดนครราชสีมา มีความสัมพันธ์ใกล้ชิดกับประชากรปัจจุบันที่ใช้ภาษาออสโตรเอเชียติกและไท-กะไดจากหลายกลุ่มชาติพันธุ์

สำหรับความสัมพันธ์ของแฮโพลไทป์ที่มีสมาชิกประชากรโบราณอย่างเดียว พบว่าแบ่งออกได้เป็น 5 กลุ่ม ได้แก่ ประชากรโบราณที่มีความใกล้ชิดกับประชากรปัจจุบันที่ใช้ 4 ภาษา มีจำนวน 2 แฮโพลไทป์ ได้แก่ H64 และ H90 ประชากรโบราณที่มีความใกล้ชิดกับประชากรปัจจุบันที่ใช้ 3 ภาษา มีจำนวน 2 แฮโพลไทป์ คือ ออสโตรเอเชียติก, ไท-กะได, ชิโน-ทิเบต มี 1 แฮโพลไทป์ คือ H70 ประชากรโบราณที่มีความใกล้ชิดกับประชากรปัจจุบันที่ใช้ 2 ภาษา มีจำนวน 5 แฮโพลไทป์ คือ ออสโตรเอเชียติก และไท-กะได คือ H67, H73, H74, H80, H81 และH158 ประชากรโบราณที่มีความใกล้ชิดกับประชากรปัจจุบันที่ใช้ภาษาออสโตรเอเชียติก มีจำนวน 6 แฮโพลไทป์ H75, H76, H79, H83, H92 และH93 ประชากรโบราณที่มีความใกล้ชิดกับประชากรปัจจุบันที่ใช้ภาษาไท-กะได มีจำนวน 6 แฮโพลไทป์ H17, H67, H73, H74, H121 และ H151 แสดงให้เห็นว่า ประชากรโบราณส่วนใหญ่มีความใกล้ชิดกับประชากรปัจจุบันที่ใช้ภาษาไท-กะได

พบว่าประชากรโบราณในจังหวัดแม่ฮ่องสอนที่มีความสัมพันธ์ใกล้ชิดกับประชากรปัจจุบันที่ใช้ภาษาออสโตรเอเชียติก และไท-กะได มีทั้งหมด 3 แฮโพลไทป์ (H4, H98 และ H102) ส่วนมีความสัมพันธ์กับประชากรที่ใช้ภาษาไท-กะไดกลุ่มเดียว มีทั้งหมด 3 แฮโพลไทป์ (H16, H17 และ H54) และที่มีความสัมพันธ์กับประชากรที่ใช้ภาษาชิโน-ทิเบต มี 1 แฮโพลไทป์ (H101) สรุปได้ว่าประชากรโบราณในจังหวัดแม่ฮ่องสอน มีความสัมพันธ์ใกล้ชิดกับประชากรปัจจุบันที่ใช้ภาษาออสโตรเอเชียติกมากที่สุด รองลงมาคือ ภาษาไท-กะได และภาษาชิโน-ทิเบต ส่วนประชากรโบราณในจังหวัดนครราชสีมามีความสัมพันธ์ใกล้ชิดกับประชากรที่ใช้ภาษาออสโตรเอเชียติก และไท-กะได มีทั้งหมด 4 แฮลโพลไทป์ (H25, H37, H68 และ H82) ส่วนมีความสัมพันธ์กับประชากรที่ใช้ภาษาออสโตรเอเชียติกกลุ่มเดียว มีทั้งหมด 3 แฮโพลไทป์ (H18, H27 และ H28) และมีความสัมพันธ์กับประชากรที่ใช้ภาษาไท-กะไดกลุ่มเดียว มีทั้งหมด 6 แฮโพลไทป์ (H63, H67, H73, H74, H80 และ H81) สรุปได้ว่าประชากรโบราณจากจังหวัดนครราชสีมา มีความสัมพันธ์ใกล้ชิดกับประชากรปัจจุบันที่ใช้ภาษาไท-กะไดมากที่สุด รองลงมา คือ ภาษาออสโตรเอเชียติก ส่วนประชากรโบราณในจังหวัดอุดรธานี (H83) มีความสัมพันธ์ใกล้ชิดกับประชากรปัจจุบันที่ใช้ภาษาออสโตรเอเชียติกมากที่สุด 1 แฮโพลไทป์ จะเห็นได้ว่าประชากรโบราณมีความสัมพันธ์ใกล้ชิดกับกลุ่มคนที่ใช้ภาษาออสโตรเอเชียติกและไท-กะไดมากกว่าภาษาอื่น ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยก่อนหน้านี้พบว่าเมื่อประมาณ 4,000 ปีก่อน มีกลุ่มคนที่ใช้ภาษาออสโตรเอเชียติกจากเอเชียตะวันออกอพยพเข้ามา จากนั้นกลุ่มคนที่ใช้ภาษากระไดได้เข้ามาตั้งถิ่นฐาน เมื่อประมาณ 2,000 ปีก่อน (McColl et al., 2018) และจากความสัมพันธ์ของประชากรโบราณจากหลายแหล่งโบราณคดีที่มีความสัมพันธ์ใกล้ชิดกัน แสดงให้เห็นว่าตั้งแต่อดีตมีการอพยพของผู้คนและมีการผสมผสานกันของกลุ่มชาติพันธุ์ต่าง ๆ มาอย่างยาวนาน

สรุป

จากการวิเคราะห์องค์ประกอบหลัก พบว่าประชากรโบราณในนครราชสีมามีความสัมพันธ์ใกล้ชิดกับกลุ่มชาติพันธุ์ทินมากที่สุด รองลงมา คือ ลื้อ ภูไท กะเหรี่ยงซอว์ กะเลิง ปลัง และปะหล่อง ส่วนประชากรโบราณในแม่ฮ่องสอนมีความใกล้ชิดกับกลุ่มชาติพันธุ์ลื้อมากที่สุด รองลงมา คือ ทิน ปลัง กะเหรี่ยงซอว์ กะเหรี่ยงปาดวง และภูไท สำหรับกลุ่มประชากรโบราณในอุดรธานี มีความใกล้ชิดกับคนในกลุ่มชาติพันธุ์ลื้อมากที่สุด รองลงมา คือ ปลัง ส่วย ภูไท พวน บรู และญ้อ กุร ส่วนผลการวิเคราะห์เครือข่ายแฮโพลไทป์สรุปได้ว่าประชากรโบราณในจังหวัดแม่ฮ่องสอนและอุดรธานี มีความสัมพันธ์ใกล้ชิดกับประชากรปัจจุบันที่ใช้ภาษาออสโตรเอเชียติกมากที่สุด ส่วนประชากรโบราณจากจังหวัดนครราชสีมามีความสัมพันธ์ใกล้ชิดกับประชากรปัจจุบันที่ใช้ภาษาไท-กะไดมากที่สุด

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจากทุนอุดหนุนการวิจัยและนวัตกรรม ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2566 จากสำนักงานการวิจัยแห่งชาติ (วช.) สัญญาเลขที่ N32A660141

เอกสารอ้างอิง

Andrews, R.M., Kubacka, I., Chinnery, P.F., Lightowlers, R.N., Turnbull, D.M., Howell, N. 1999. Reanalysis and revision of the Cambridge reference sequence for human mitochondrial DNA. Nat. Genet. 23: 147.

Ballinger, S.W., Schurr, T.G., Torroni, A., Gan, Y.Y., Hodge, J.A., Hassan, K., Chen, K.H., Wallace, D.C. 1992. Southeast Asian mitochondrial DNA analysis reveals genetic continuity of ancient Mongoloid migrations. Genetics 130: 139–152.

Bandelt, H.-J., Forster, P., Röhl, A. 1999. Median-joining networks for inferring intraspecific phylogenies. Mol. Biol. Evol. 16: 37–48.

Eberhard, D.M., Simons, G.F., Fennig, C.D. 2020. Ethnologue: Languages of the World, 23rd ed. SIL International.

Kumar, S., Stecher, G., Li, M., Knyaz, C., Tamura, K. 2018. MEGA X: Molecular evolutionary genetics analysis across computing platforms. Mol. Biol. Evol. 35: 1547–1549.

Kutanan, W., Kampuansai, J., Srikummool, M., et al. 2017. Complete mitochondrial genomes of Thai and Lao populations indicate an ancient origin of Austroasiatic groups and demic diffusion in the spread of Tai–Kadai languages. Hum. Genet. 136: 85–98.

Kutanan, W., Kampuansai, J., Srikummool, M., et al. 2019. Contrasting paternal and maternal genetic histories of Thai and Lao populations. Mol. Biol. Evol. 36: 1490–1506.

Kutanan, W., Liu, D., Kampuansai, J., et al. 2021. Reconstructing the human genetic history of Mainland Southeast Asia: Insights from genome-wide data from Thailand and Laos. Mol. Biol. Evol. 38: 3459–3477.

Leigh, J.W., Bryant, D. 2015. PopART: Full-feature software for haplotype network construction. Methods Ecol. Evol. 6: 1110–1116.

Lertrit, P., Poolsuwan, S., Thosarat, R., et al. 2008. Genetic history of Southeast Asian populations as revealed by ancient and modern human mitochondrial DNA analysis. Am. J. Phys. Anthropol. 137: 425–440.

Librado, P., Rozas, J. 2009. DnaSP v5: A software for comprehensive analysis of DNA polymorphism data. Bioinformatics 25: 1451–1452.

Lipson, M., Cheronet, O., Mallick, S., et al. 2018. Ancient genomes document multiple waves of migration in Southeast Asian prehistory. Science 361: 92–95.

McColl, H., Racimo, F., Vinner, L., et al. 2018. The prehistoric peopling of Southeast Asia. Science 361: 88–92.

R Core Team. 2023. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing. Vienna, Austria.

RStudio Team. 2023. RStudio: Integrated Development Environment for R. Posit Software, PBC. Boston, MA, USA.

Wickham, H. 2016. ggplot2: Elegant Graphics for Data Analysis. Springer. New York, NY, USA.

Woravatin, W., Stoneking, M., Srikummool, M., Kampuansai, J., Arias, L., Kutanan, W. 2023. South Asian maternal and paternal lineages in southern Thailand and the role of sex-biased admixture. PLoS One 18: e0291547.

การศึกษาวิธีวิเคราะห์สารกำจัดแมลงไซเพอร์เมทริน ในน้ำ ดิน มะเขือเทศ และแผ่นผ้ารับสัมผัส

Study of cypermethrin insecticide analysis method in water, soil, tomato and patch

สิริพร เหลืองสุชนกุล*, **สิริโชค วงศ์ศรีไพศาล**, **ลักษมี เดชานุรักษ์นุกูล**

Siriporn Luengsuchonkul*, Sirichok Wongsripisarn, Laksamee Dechanuraknukool

กองวิจัยพัฒนาปัจจัยการผลิตทางการเกษตร กรมวิชาการเกษตร กรุงเทพฯ 10900

Agricultural Production Science Research and Development Office, Department of Agriculture, Bangkok 10900, Thailand

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

บทคัดย่อ

การศึกษาวิธีวิเคราะห์สารป้องกันกำจัดแมลงไซเพอร์เมทริน (cypermethrin) ในน้ำ ดิน มะเขือเทศ และแผ่นผ้ารับสัมผัส ด้วยเทคนิคแก๊สโครมาโตกราฟี มีวัตถุประสงค์ในการศึกษาเพื่อพัฒนาวิธีวิเคราะห์ในขั้นตอนสกัด และตรวจสอบความใช้ได้ของวิธีวิเคราะห์ โดยผลการศึกษาพบว่าวิธีที่ศึกษาได้ มีผลทดสอบการตรวจสอบความใช้ได้ของวิธีวิเคราะห์ผ่านเกณฑ์ยอมรับ โดยช่วงการใช้งาน (Working range) ในน้ำ ดิน มะเขือเทศ และแผ่นผ้ารับสัมผัส เท่ากับ 0.02–1.0 µg/L 0.01–1 mg/kg, 0.05–1.0 mg/kg และ 0.03–1.0 µg/100 cm^2 ตามลำดับ ขีดจำกัดของการตรวจพบ (Limit of detection, LOD) ใน น้ำ ดิน มะเขือเทศ และแผ่นผ้ารับสัมผัส เท่ากับ 0.006 µg/L 0.005 mg/kg 0.015 mg/kg และ0.01 µg/100 cm^2 ตามลำดับ และขีดจำกัดของการวัดเชิงปริมาณ (Limit of quantitation, LOQ) ในน้ำ ดิน มะเขือเทศ และแผ่นผ้ารับสัมผัส เท่ากับ 0.02 µg/L 0.01 mg/kg 0.05 mg/kg และ 0.05 µg/100 cm^2 ตามลำดับ โดยวิธีวิเคราะห์นี้มีความแม่น (Accuracy) และความเที่ยง (Precision) ผ่านเกณฑ์ยอมรับในทุกชนิดตัวอย่าง จึงสามารถนำวิธีวิเคราะห์ไปใช้เป็นวิธีมาตรฐานในทดสอบได้

คำสำคัญ: การตรวจสอบความใช้ได้ของวิธีทดสอบ, แก๊สโครมาโตกราฟี, ไซเพอร์มีทริน, วิธีสกัด, สารกำจัดแมลง

Abstract

The study of cypermethrin insecticide analysis method in water, soil, tomato and patch by Gas Chromatograph technique aimed to modify the extraction method and to validate the modified method. The results showed that modified analysis method was accepted the validation criteria. The working range in water, soil, tomato and patch were 0.02–1.0 µg/L, 0.01–1 mg/kg, 0.05–1.0 mg/kg, and 0.03–1.0 µg/100 cm^2 repetitively. The limit of detection (LOD) and limit of quantitation (LOQ) for water, soil, tomatoes, and patch samples were 0.006 µg/L, 0.005 mg/kg, 0.015 mg/kg, and 0.01 µg/100 cm^2 for LOD, and 0.02 µg/L, 0.01 mg/kg, 0.05 mg/kg, and 0.05 µg/100 cm^2 for LOQ, respectively. Therefore, the modified analysis method can be used as a standard analytical procedure in laboratory testing.

Keywords: Cypermethrin, Extraction method, Gas Chromatograph, Insecticide, Method validation

คำนำ

สารกำจัดแมลง cypermethrin เป็นสารป้องกันกำจัดศัตรูพืชที่ถูกจัดอยู่ในบัญชีวัตถุอันตรายที่ต้องเฝ้าระวัง (Watched-list) ของกรมวิชาการเกษตร เนื่องจากมีข้อมูลระบุว่ามีความเสี่ยงสูง (highly hazardous pesticides) (มีระดับความเป็นพิษปานกลาง (LD_{50} 287 mg/kg bw) และเป็นสารที่เป็นอันตรายอย่างรุนแรงต่อสัตว์ที่เป็นประโยชน์ (beneficial organisms) ในสิ่งแวดล้อม เช่น ผึ้ง ปลา และกลุ่มของแมลงผสมเกสร) สารกำจัดแมลง cypermethrin เป็นสารป้องกันกำจัดศัตรูพืชจัดอยู่ในกลุ่มไพรีทรอยด์ มีสูตรโครงสร้างเป็น ester สามารถทำให้ระบบประสาทของแมลงเป็นอัมพาตได้อย่างรวดเร็ว จึงมีประสิทธิภาพดีมากในการควบคุมและกำจัดกลุ่มแมลงปากดูด และกลุ่มหนอน ดังนั้นเกษตรกรจึงนิยมจะใช้ cypermethrin ในการผลิตพืชที่มีการระบาดของศัตรูพืชหลายกลุ่ม เช่น มะเขือเทศซึ่งเป็นพืชอวบน้ำและรับประทานสด และมีความถี่ของการใช้สารดังกล่าวบ่อยตามรอบของการเพาะปลูกและการระบาดของศัตรูพืช ดังนั้นจากการใช้สารอาจส่งผลให้มีการตกค้างของ cypermethrin และก่อผลกระทบต่อผู้ใช้และสิ่งแวดล้อม รวมถึงผู้บริโภคผลผลิตที่มีสารนี้ตกค้างอยู่ โดยคณะกรรมาธิการของโครงการมาตรฐาน (Codex Alimentarius Commission) ได้กำหนดปริมาณสารพิษตกค้างสูงสุด (Maximum Residue Limit; MRL) ของสาร cypermethrin ในมะเขือเทศ เท่ากับ 0.2 mg/kg

งานวิจัยนี้ จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาวิธีวิเคราะห์สารกำจัดแมลง cypermethrin ในน้ำ ดิน มะเขือเทศ และแผ่นผ้ารับสัมผัส (เป็นวัสดุที่ใช้ในการศึกษาปริมาณสารพิษตกค้างบนร่างกายผู้ใช้สาร) ที่ลดเวลาที่ใช้ในการสกัด และหรือลดใช้ปริมาณของสารที่ใช้ในสกัด และตรวจสอบความใช้ได้ของวิธีทดสอบ (method validation) ตามข้อกำหนดการทดสอบและผ่านเกณฑ์การตัดสิน (Table 1) เพื่อนำใช้เป็นวิธีมาตรฐานในตรวจวิเคราะห์ สารกำจัดแมลง cypermethrin ที่ตกค้างในน้ำ ดิน มะเขือเทศ และแผ่นผ้ารับสัมผัส สำหรับห้องปฏิบัติการต่อไป

Table 1 Method performances characteristic that recommended by Codex Alimentarius Commission/Good Laboratory (CAC/GL), Assocoation of Official Analytical Chemists (AOAC) and European Commission Directorate – General for Health and Food Safety (SANTE)

Parameters	Acceptance Criteria	Reference
Working Range	Linearity; Coefficient of Determination (R^2) ≥0.98	CAC/GL40-1993 (2010)
Accuracy	% recovery = 40-120% *if analyte unit 1 ppb* % recovery = 60-115% *if analyte unit 10 ppb* % recovery = 80-110% *if analyte unit > 0.10-10 ppm*	AOAC (2023)
	for food and feed % recovery = 70-120%	SANTE (2024)
Precision	%RSD ≤20%	SANTE (2024)
Limit of detection (LOD)	signal/noise (S/N) ≥3	SANTE (2024)
Limit of quantitation (LOQ)	Confirm with Accuracy and Precision	SANTE (2024)

อุปกรณ์และวิธีการ

1. เครื่องมือ และสารเคมี

1.1 สารเคมี ได้แก่ สารเคมีสำหรับสกัดตัวอย่างชนิดเกรดวิเคราะห์ (Analytic grade) และสารเคมีสำหรับวิเคราะห์เกรดสารป้องกันกำจัดศัตรูพืช (Pesticide grade) และสารมาตรฐาน Cypermethrin ความบริสุทธิ์สูง > 98%

1.2 เครื่องมือตรวจวิเคราะห์ ได้แก่ เครื่อง Gas Chromatograph ยี่ห้อ Agilent Technology รุ่น HP6890 หัวตรวจวัดชนิด Electron Capture Detector (μ-ECD)

2. ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมของเครื่องมือในการตรวจวิเคราะห์

2.1 หาสภาวะที่เหมาะสมของเครื่อง GC-μECD และหาช่วงต่ำสุดและสูงสุดของการวัดสำหรับการตรวจวิเคราะห์ โดยฉีดสารละลายมาตรฐานที่ความเข้มข้นต่างๆ อย่างน้อย 5 ระดับความเข้มข้นๆ ละ 3 ซ้ำ และนำค่าที่ได้ไป plot graph ระหว่างความเข้มข้นของ working standard (แกนX) กับ Area response (แกน Y) ประเมินความเป็นเส้นตรงของกราฟมาตรฐาน (Linearity of calibration) ด้วยค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (Coefficient of Determination (R^2)) ≥ 0.98 (CAC/GL 40-1993, 2010)

3. ศึกษาวิธีสกัด cypermethrin ในตัวอย่างแผ่นผ้ารับสัมผัส ดิน น้ำ และมะเขือเทศ

3.1 วิธีการสกัด cypermethrin ในตัวอย่างน้ำผิวดิน เปรียบเทียบ (1) การสกัดตัวอย่างโดยใช้เทคนิค Liquid-Liquid Extraction (AOAC, 2016a) โดยใช้น้ำปริมาตร 800 mL สกัดด้วย hexane (AR grade) 3 ครั้ง โดยครั้งแรกใช้ปริมาณ 150 ml ครั้งที่ 2 และ 3 ใช้ปริมาณ 50 mL และ (2) การสกัดตัวอย่างน้ำ โดยการใช้ hexane (AR grade) ลดลงร้อยละ 25 โดยสารละลายที่สกัดได้จะนำไปลดปริมาตร และวิเคราะห์ cypermethrin ด้วย GC-μECD และคัดเลือกวิธีการสกัดที่ให้ % mean recovery ที่มากที่สุด

3.2 วิธีการสกัด cypermethrin ในตัวอย่างดินร่วนปนเหนียว โดยเปรียบเทียบ (1) วิธีสกัดด้วยเทคนิค Solid-Liquid Extraction อ้างอิงวิธีการสกัดจาก AOAC (2016b) กับ (2) วิธีสกัดแบบ QuEChERS (Anastassiades, 2003) และคัดเลือกวิธีการสกัดที่ให้ % mean recovery ที่มากที่สุด

3.3 วิธีการสกัด cypermethrin ในตัวอย่างมะเขือเทศด้วยวิธี QuEChERS (Anastassiades et al., 2003) โดยใน (1) ขั้นตอนสกัดเติม trisodium citrate dihydrate และ di-sodium hydrogen citrate sesquihydrate กับ (2) ขั้นตอนสกัดไม่เติม trisodium citrate dihydrate และ di-sodium hydrogen citrate sesquihydrate และคัดเลือกวิธีการสกัดที่ให้ % mean recovery ที่มากที่สุด

3.4 วิธีการสกัด cypermethrin ในตัวอย่างแผ่นผ้ารับสัมผัส (ขนาด 10×10 ตร.ซม.) ทำการสกัดแบบ Solid-liquid extraction อ้างอิงวิธีการสกัดจาก AOAC (2016a) โดยใช้ 1% acetone in hexane (AR grade) ในการสกัด และปรับเปลี่ยนขั้นตอนการสกัดจากเดิมใช้การเขย่าด้วย shaker เป็นเวลา 4 ชั่วโมง เปรียบเทียบกับการใช้ Sonication เวลา 30 นาที และการเขย่าด้วย vortex เป็น เวลา 3 นาที และคัดเลือกวิธีการสกัดที่ให้ % mean recovery ที่มากที่สุด

4. การตรวจสอบความใช้ได้ของวิธีวิเคราะห์

4.1 ทดสอบ Matrix effect (ME) ตามวิธีการของ SANTE (2024) โดยใช้สารสกัด sample blank ของตัวอย่าง น้ำ ดิน มะเขือเทศ และแผ่นผ้ารับสัมผัส เป็นตัวทำละลายที่ใช้ในการเตรียมสารละลายมาตรฐาน ที่ความเข้มข้น

สารละลายมาตรฐาน อย่างน้อย 5 ระดับความเข้มข้น ความเข้มข้นละ 3 ซ้ำ เขียนกราฟระหว่างความเข้มข้นของสารละลาย working standard (แกน X) กับ area response (แกน Y) วิเคราะห์และพิสูจน์ Matrix effect คำนวณได้จากสูตร ดังนี้

$$ME\% = (a_{Matrix} / a_{Standard}) -1 \times 100$$

เมื่อ a_{Matrix} = ค่า slope ของ matrix standard

$a_{Standard}$ = ค่า slope ของ solvent standard

โดยหากค่า ME% > ± 20% แสดงว่าสารชนิดนั้นเกิด Matrix effects จะต้องใช้ matrix standard ในการทำ calibration curve เพื่อใช้ในการคำนวณผลวิเคราะห์

4.2 ทดสอบความเป็นเส้นตรงของช่วงการใช้งาน (Linearity of working range) โดยเติมสารมาตรฐานที่ทราบความเข้มข้นแน่นอน 6 ระดับๆ ละ 3 ซ้ำ เขียนกราฟระหว่างความเข้มข้นของสารมาตรฐานในตัวอย่างที่เติม spiked sample (แกน X) กับความเข้มข้นของผลการวิเคราะห์ตัวอย่าง spiked sample (แกน Y) (Eurachem, 2025) หาค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (Coefficient of determination (R^2)) ≥ 0.98 (CAC/GL 40-1993, 2010)

4.3 ทดสอบความแม่น (Accuracy) ทดสอบโดยเติมสารมาตรฐานที่ระดับความเข้มข้นภายในช่วงการทดสอบ 3 ระดับ คือ ต่ำ กลาง สูง ความเข้มข้นละ 10 ซ้ำ หาเปอร์เซ็นต์ของการตรวจวิเคราะห์กลับคืน (%recovery) ของวัตถุมีพิษที่ เติมลงในตัวอย่าง ประเมินผลการทดสอบจาก % Recovery ผ่านเกณฑ์กำหนดของ AOAC (2023)

4.4 ทดสอบความเที่ยง (Precision) ทดสอบ โดยเติมสารมาตรฐานที่ระดับความเข้มข้นภายในช่วงการทดสอบ 3 ระดับคือ ต่ำ กลาง สูง ความเข้มข้นละ 10 ซ้ำ นำผลการวิเคราะห์ที่ได้มาหาค่าเฉลี่ย (Mean; $\overline{X}$) และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (SD) ของผลการทดสอบ และคำนวณหาค่า% Relative standard deviation (%RSD) ซึ่งค่าที่ได้ต้องผ่านเกณฑ์ยอมรับของ SANTE (2024) โดยค่า% Relative standard deviation (%RSD) หาได้จาก Equation 1:

$$\%\ RSD = \frac{SD \times 100}{\overline{X}} \qquad (1)$$

4.5 ทดสอบขีดจำกัดของการตรวจพบ (Limit of detection, LOD) โดยทำการทดสอบที่ความเข้มข้นต่ำสุดที่ตรวจวิเคราะห์ได้ 10 ซ้ำ พิจารณาค่า signal/noise จะต้องมีค่า ≥3 (SANTE, 2024)

4.6 ทดสอบขีดจำกัดของการหาเชิงปริมาณ (Limit of quantitation, LOQ) โดยทำการทดสอบที่ความเข้มข้นต่ำสุดที่ตรวจวิเคราะห์ได้ อย่างน้อย 5 ซ้ำ และพิสูจน์ accuracy และ precision ผ่านเกณฑ์ยอมรับของ SANTE (2024) และหรือ AOAC (2023)

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

1. ผลการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมของเครื่องมือในการตรวจวิเคราะห์

สภาวะที่เหมาะสมในการตรวจวิเคราะห์สาร cypermethrin ด้วยเครื่อง GC-μECD รายละเอียดตาม Table 2 และช่วงต่ำสุดและสูงสุดของความเข้มข้นสารละลายมาตรฐาน อยู่ ระหว่าง 0.01–1.5 μg/mL ประเมิน Linearity of calibration มีค่า R^2 เท่ากับ 0.99964 ผ่านเกณฑ์ยอมรับ (R^2 ≥ 0.98) (Fig. 1)

Table 2 Instrument optimazation for cypermethrin pesticide analysis

GC column	DB 1701 capillary column, 30m length x 0.32 mm i.d., 0.32 µm film thickness (stationary phase: 14% cyanopropyl-phenyl)-methylpolysiloxane)
Detector	Micro Electron Capture Detector
Temperature	injector = 230 °C , detector = 250 °C
Oven temperature program	80°C (1 min) $\xrightarrow{30\ °C/min}$ 240°C (0 min) $\xrightarrow{35\ °C/min}$ 275°C (0 min) $\xrightarrow{1°C/min}$ 280°C (5 min)
Carrier gas	helium flow 1.2 mL/min
Make up gas	nitrogen flow 60 mL/min
Injection volume	1 µL
Run time	17.33

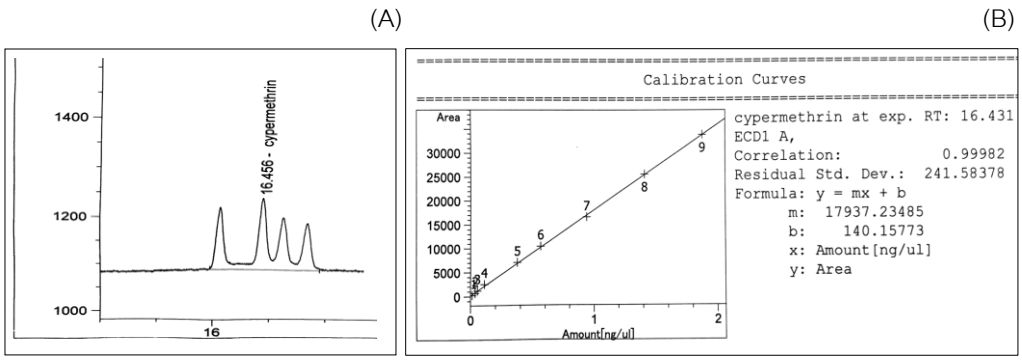


Fig. 1 Chromatogram (A) and calibration curve (B) of cypermethrin

2. ผลการศึกษาวิธีสกัด cypermethrin ในตัวอย่างแผ่นผ้ารับสัมผัส ดิน น้ำ และมะเขือเทศ

ผลการจากการศึกษาวิธีการสกัด cypermethrin ใน น้ำ ดิน มะเขือเทศ และแผ่นผ้ารับสัมผัส พบว่าในทุกวิธีสกัดที่นำมาศึกษาให้ผล % recovery ผ่านเกณฑ์ยอมรับของ AOAC (2023) โดยน้ำจะเลือกใช้วิธีสกัด cypermethrin ที่ใช้ปริมาณตัวทำละลายสำหรับสกัดลดลงร้อยละ 25 เนื่องจากให้ %recovery ใกล้เคียงวิธีวิเคราะห์เดิม ส่วนดินเลือกวิธีที่สกัดแบบ QuEChERS (Anastassiades et al., 2003) เพราะให้ % recovery ที่ดีกว่าวิธีสกัดตาม AOAC (2016b) ส่วนมะเขือเทศเลือกวิธีสกัดแบบ QuEChERS (Anastassiades et al., 2003) ที่ไม่เติม di-sodium hydrogen citrate sesquihydrate เพราะให้ %recovery ดีกว่า และแผ่นผ้ารับสัมผัสซึ่งใช้เทคนิค Sonication และ Vortex mixing ให้ %recovery ไม่แตกต่างกัน แต่เทคนิค Sonication มีความเหมาะสมกว่าเนื่องจากสามารถทำการสกัดพร้อมกันได้หลายตัวอย่างในคราวเดียวกัน รายละเอียดดังแสดงใน Table 3

Table 3 The result of the modified extraction in the samples and its recovery percentage

Sample type (n=3)	Method	concentration	Mean % Recovery
Water	Liquid -Liquid Extraction (AOAC, 2016a)	0.04 µg/L	97–104
	Liquid -Liquid Extraction (AOAC, 2016a) with reduced 25% of extraction solvent	0.04 µg/L	98–101
soil	Solid-Liquid Extraction (AOAC, 2016b)	0.01mg/kg	72–76
	QuEChERS (Anastassiades et al., 2003)	0.01mg/kg	89–91
tomato	QuEChERS (Anastassiades et al., 2003) with no added trisodium citrate dihydrate and di-sodium hydrogen citrate sesquihydrate	0.1 mg/kg	90–92
	QuEChERS (Anastassiades et al., 2003) with added trisodium citrate dihydrate and di-sodium hydrogen citrate sesquihydrate	0.1 mg/kg	86–89
patch	Solid-Liquid Extraction (AOAC, 2016b) with Sonication	0.05 µg/100 cm^2	97–101
	Solid-Liquid Extraction (AOAC, 2016b) with Vortex mixing	0.05 µg/100 cm^2	95–97

3. ผลการตรวจสอบความใช้ได้ของวิธีวิเคราะห์

3.1 ทดสอบ Matrix effect พบว่าค่า ME% ไม่เกิน ±20% และให้ค่า R^2 ผ่านเกณฑ์ยอมรับ ในทุกชนิดตัวอย่าง แสดงว่าสารอื่นในตัวอย่าง (matrix) ไม่ส่งผลต่อความเข้มข้นของสารที่ต้องการวิเคราะห์ (analyte) (no matrix effect) ดังนั้นจึงสามารถใช้ solvent solution (ตัวทำละลาย) ในการเตรียมสารละลายมาตรฐานได้ (Fig. 2)

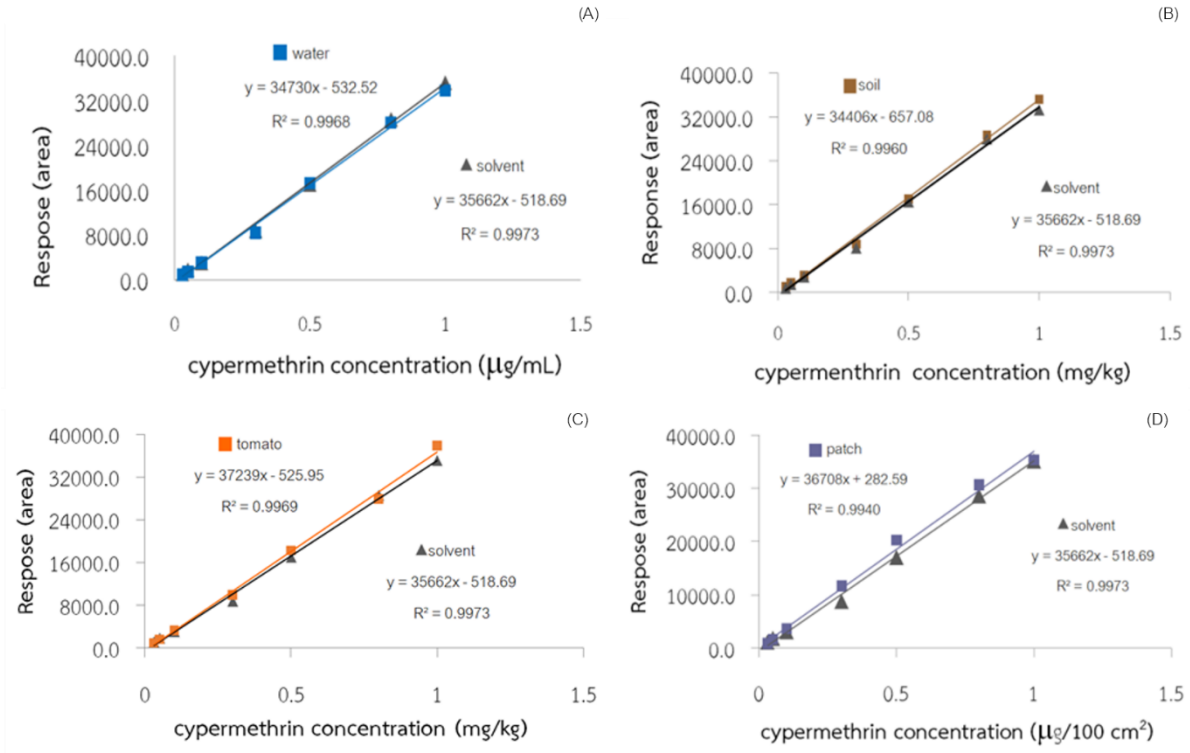


Fig. 2 Matrix effect of cypermethrin analysis method in water (A) soil (B) tomato (C) and patch (D)

3.2 ผลทดสอบ Linearity of Working range ในตัวอย่างน้ำ ดิน มะเขือเทศ และแผ่นผ้า ให้ค่า R^2 ผ่านเกณฑ์ยอมรับ ($R^2 \geq 0.98$) (CAC/GL 40-1993, 2010) รายละเอียดตาม Table 4

Table 4 Linearity of Working range test

Sample type (n=3)	Linearity of Working range	Coefficient of Determination (R^2)*
water	0.02-1.0 µg/L	0.9991
soil	0.01-1.0 mg/kg	0.9962
tomato	0.05-1.0 mg/kg	0.9971
patch	0.03-1.0 µg/100 cm^2	0.9988

Note: *criteria: Coefficient of Determination (R^2) ≥ 0.98 (CAC/GL40-1993, 2010)

3.3 ผลทดสอบความแม่น (Accuracy) และความเที่ยง (Precision) ได้ค่า % recovery และ %RSD ประเมินผ่านตามเกณฑ์กำหนดของ SANTE (2024) และ AOAC (2023) ตามลำดับ (Table 5)

3.4 ผลการทดสอบหาขีดจำกัดของการตรวจพบ (Limit of detection, LOD) จากการทดสอบที่ความเข้มข้นต่ำสุดที่ตรวจวิเคราะห์ได้ 10 ซ้ำ ในตัวอย่างน้ำ ดิน มะเขือเทศ และแผ่นผ้ารับสัมผัส ได้ค่า signal/noise ≥3 ผ่านเกณฑ์ยอมรับ (SANTE, 2024) (Table 6)

3.4 ผลการทดสอบหาขีดจำกัดของการหาเชิงปริมาณ (Limit of quantitation, LOQ) ซึ่งพิสูจน์ accuracy และ precision ต้องผ่านตามเกณฑ์กำหนดของ SANTE (2024) และ AOAC (2023) (Table 7)

Table 5 The result of Accuracy and Precision validation in the samples

Sample type	concentration	Accuracy	Precision
(*n* = 10)		Mean % recovery	%RSD
water	0.02 µg/L	96.2	9.8
	0.10 µg/L	94.8	7.1
	0.50 µg/L	98.2	5.7
soil	0.01 mg/kg	97.9	10.6
	0.05 mg/kg	93.8	8.6
	0.50 mg/kg	91.0	7.38
tomato	0.05 mg/kg	92.3	10.2
	0.10 mg/kg	99.3	9.0
	0.50 mg/kg	99.6	5.9
patch	0.05 mg/kg	96.5	12.5
	0.10 mg/kg	92.5	9.0
	0.50 mg/kg	96.3	7.6

Table 6 The result of LOD validation in the samples

Sample type (*n*=10)	Limit of detection (LOD)		signal/noise ratio
			(S/N ≥ 3)
water	0.006	µg/L	6.3
soil	0.005	mg/kg	14.3
tomato	0.015	mg/kg	13.4
patch	0.010	µg/100 cm^2	5.6

Table 7 The result of LOQ validation in the samples

Sample type (n=10)	Limit of quantitation, LOQ		Accuracy	Precision
			Mean % recovery	% RSD
water	0.02	µg/L	99.0	9.8
soil	0.01	mg/kg	104.2	10.6
tomato	0.05	mg/kg	99.0	10.2
patch	0.05	µg/100 cm^2	96.6	12.5

สรุป

จากการศึกษาวิธีวิเคราะห์สารป้องกันกำจัดแมลงไซเพอร์เมทริน (cypermethrin) ในน้ำ ดิน มะเขือเทศ และแผ่นผ้ารับสัมผัส และตรวจสอบความใช้ได้วิธีวิเคราะห์ที่ศึกษาได้ ผลการตรวจสอบพบว่าช่วงการใช้งาน (Working range) ในน้ำ ดิน มะเขือเทศ และแผ่นผ้ารับสัมผัส มีช่วงการใช้งาน 0.02–1.0 µg/L 0.01–1 mg/kg 0.05–1.0 mg/kg และ 0.03–1.0 µg/100 cm^2 ตามลำดับ ผลการทดสอบความแม่น (Accuracy) และความเที่ยง (Precision) ผ่านเกณฑ์ยอมรับในทุกชนิดตัวอย่าง และมีค่าขีดจำกัดของการตรวจพบ (Limit of detection, LOD) ในตัวอย่างน้ำ ดิน ข้าวโพดหวาน และแผ่นผ้ารับสัมผัส เท่ากับ 0.006 µg/L 0.005 mg/kg 0.015 mg/kg และ0.01 µg/100 cm^2 ตามลำดับ และค่าขีดจำกัดของการวัดเชิงปริมาณ (Limit of quantitation, LOQ) ได้ค่า LOQ ในตัวอย่างน้ำ ดิน มะเขือเทศ และแผ่นผ้ารับสัมผัส เท่ากับ 0.02 µg/L 0.01 mg/kg 0.05 mg/kg และ 0.05 µg/100 cm^2 ตามลำดับ โดยLOQ ในมะเขือเทศ มีค่าต่ำกว่าค่า Codex MRL ของสาร cypermethrin ในมะเขือเทศที่กำหนดไว้ที่ 0.2 mg/kg สรุปได้ว่าวิธีวิเคราะห์นี้มีความเหมาะสมสำหรับใช้ในการตรวจวิเคราะห์สารป้องกันกำจัดแมลง cypermethrinในน้ำ ดิน มะเขือเทศ และแผ่นผ้ารับสัมผัส โดยวิธี Gas Chromatography และนำไปพัฒนาต่อยอดเป็นวิธีวิเคราะห์สารป้องกันกำจัดศัตรูพืชจัดอยู่ในกลุ่มไพรีทรอยด์ชนิดอื่นๆ ต่อไป

เอกสารอ้างอิง

Anastassiades, M., Lehotay, S.J., Staibaher, D., Schenck, F.J. 2003. Fast and Easy Multiresidues employing Acetonitrile Extraction/Partitioning and Dispersive Solid-Phase Extraction for Determination of Pesticide Residues in Produce. J. AOAC Int. 86: 412–431.

Association of Official Analytical Chemists. 2016a. Organochlorine Pesticides in Water, Gas Chromatographic Method. AOAC Method 990.06. AOAC International. Washington, D.C.

Association of Official Analytical Chemists. 2016b. Organophosphorus Pesticide. General Multiresidue Method. AOAC Method 970.52. AOAC International. Washington, D.C.

Association of Official Analytical Chemists. 2023. Guidelines for Standard Method Performance Requirements. AOAC Official Methods of Analysis. https://www.aoac.org/wp-content/uploads/2019/08/app_f.pdf, 17 April 2025.

Codex Alimentarius Commission. 2010. Guidelines on good laboratory practice in pesticide residue analysis (CAC/GL 40-1993). https://www.fao.org/input/download/standards/378/cxg_040e.pdf, 20 November 2025.

Eurachem. 2025. The Fitness for Purpose of Analytical Methods: A Laboratory Guide to Method Validation and Related Topics, 3rd ed. https://www.eurachem.org/images/stories/Guides/pdf/MV_guide_3rd_ed_V1_EN.pdf, 24 March 2024.

European Commission. 2024. Analytical quality control and method validation procedures for pesticide residues analysis in food and feed SANTE 11312/2021 V2. https://food.ec.europa.eu/system/files/2023-11/pesticides_mrl_guidelines_wrkdoc_2021-11312.pdf, 24 March 2024.

การผลิตและตรวจสอบคุณสมบัติของฟิล์มพลาสติกชีวภาพจากแป้งข้าวเจ้าที่เสริมความแข็งแรงด้วยเซลลูโลส

Fabrication and characterization of bioplastic films derived from *Oryza sativa* L. Rice starch reinforced with cellulose

ศิธิญาภรณ์ ลุนสำโรง*, ประไพ บางเชย, ชัยยงค์ เตชะไพโรจน์, ศราวุธ ภู่ไพจิตร์กุล, ชัยวัฒน์ บรรไดเพ็ชร

Sithiyaphon Lunsamrong*, Prapai Bangcheoy, Chaiyong Techapirote, Sarawut Phupaichitkun, Chaiwat Bandaiphet

ภาควิชาเทคโนโลยีชีวภาพ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร นครปฐม 73000

Department of Biotechnology Faculty of Engineering and Industrial Technology Silpakorn University, Nakhon Pathom 73000, Thailand

*Corresponding author. E-mail address: Lunsamrong_s2@old.silpakorn.edu

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการผลิตฟิล์มพลาสติกชีวภาพจากแป้งข้าวเจ้า และปรับปรุงสมบัติเชิงกลด้วยการเติมเซลลูโลส CMC (5–25% w/w ต่อแป้ง) ฟิล์มถูกเตรียมจากแป้งข้าวเจ้า 5–25 g ต่อน้ำกลั่น 100 mL เติมกลีเซอรอล 20% (w/w) เป็นพลาสติไซเซอร์ ให้ความร้อนจนเกิดเจลาติไนซ์ (75 °C) ขึ้นรูปและอบแห้งที่ 50 °C ปริมาณแป้งที่เหมาะสมคือ 5% (w/w) เมื่อทดสอบความทนต่อตัวทำละลายและการดูดซับสารละลาย พบว่าฟิล์มมีความคงรูป ยกเว้นในสารละลาย NaOH ฟิล์มละลายได้ไม่ทนสารละลายด่าง งานวิจัยนี้พบว่า CMC 20 %w/w เป็นปริมาณที่เหมาะสม ทำให้แผ่นฟิล์มมีความสม่ำเสมอ ยืดหยุ่นและแข็งแรงขึ้น เหมาะสำหรับบรรจุภัณฑ์อาหารที่ย่อยสลายได้ ถุงชีวภาพ และฟิล์มหุ้มผักผลไม้

คำสำคัญ: การย่อยสลายได้ทางชีวภาพ, การเสริมแรงด้วยเซลลูโลส, แป้งข้าวเจ้า, ฟิล์มพลาสติกชีวภาพ

Abstract

This study investigated the production of bioplastic films from rice starch and the enhancement of their mechanical properties through the incorporation of CMC cellulose (5–25% w/w based on starch). The films were prepared using 5–25 g of rice starch per 100 mL of distilled water, with 20% (w/w) glycerol added as a plasticizer. The mixture was heated until gelatinization occurred (75 °C), cast, and dried at 50 °C. The optimal starch content was 5% (w/w). When tested for solvent resistance and solution absorption, the films retained their integrity, except in NaOH solution, where they dissolved, indicating poor alkali resistance. After conditioning with CMC at an optimal concentration of 20 % (w/w based on starch), the films were evaluated for their mechanical properties. The addition of cellulose improved the flexibility, uniformity, and overall strength of the films, making them suitable for biodegradable food packaging, biobags, and fruit-and-vegetable wrapping films.

Keywords: Biodegradability, Bioplastic films, Cellulose reinforcement, Rice starch

คำนำ

ปัจจุบันการค้นคว้าและพัฒนาวัสดุที่มีความเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม ได้รับความสนใจโดยเฉพาะวัสดุที่สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพเพื่อลดผลกระทบจากการใช้พลาสติกสังเคราะห์แบบดั้งเดิมหนึ่งในวัตถุดิบที่ได้รับความสนใจอย่างมาก ในงานวิจัยด้านฟิล์มชีวภาพคือแป้งข้าวเจ้าซึ่งเป็นพอลิเมอร์ฐานชีวภาพที่ผลิตจากธรรมชาติและหาได้ง่ายในประเทศ ไทย ราคาถูก ปลอดภัย และมีศักยภาพในการขึ้นรูปเป็นฟิล์มที่มีคุณสมบัติเหมาะสมสำหรับการใช้งานต่างๆ โดยเฉพาะด้านบรรจุภัณฑ์อาหาร เนื่องจากฟิล์มแป้งข้าวเจ้ามีความแข็งแรงยืดหยุ่น และสามารถย่อยสลายได้ตามธรรมชาติจึงเป็นทางเลือกที่สำคัญในการทดแทนพลาสติกจากปิโตรเลียม (Lopattananon et al., 2012)

แป้งข้าวเจ้าเป็นแหล่งของโพลีแซ็กคาไรด์มีองค์ประกอบหลัก คือ อะไมโลส (amylose) 17–21% และ อะไมโลเพก ติน (amylopectin) 79–83% (Kasemsuwan et al.,1999; Oates,1996; Setyaningsih, 2015) โครงสร้างเชิงเส้นของอะไม โลส สร้างพันธะไฮโดรเจนระหว่างสายโซ่ได้ดี ทำให้ฟิล์มที่ได้มีความแข็งแรงและคงรูป ส่วนอะไมโลเพกตินที่มีโครงสร้าง กิ่งก้านมากกว่า จะช่วยเพิ่มความยืดหยุ่นของฟิล์ม แต่ในขณะเดียวกันอาจทำให้ฟิล์มเปราะมากขึ้นเมื่อความยาวสายโซ่ลดลง (Rindlav-Westling et al., 1998; Lourdin et al., 1995) อะไมโลสและอะไมโลเพกติน ส่งผลต่อคุณสมบัติ ในการเกิดเจลาติไนเซชัน การขึ้นรูปฟิล์มและความแข็งแรงของฟิล์มที่ผลิตได้มีส่วนในการสร้าง โครงสร้างเจลและฟิล์ม ที่มี ความแข็งแรง สามารถกักเก็บความชื้นได้ดี และยังมีอุณหภูมิเจลาติไนซ์ที่เหมาะสม (ประมาณ 70–74°C) ซึ่งส่งผลต่อ การเปลี่ยนโครงสร้างสู่เจลสม่ำเสมอที่ช่วยให้การขึ้นรูปฟิล์มเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพ (Thumrongchote et al., 2012)

การเสริมคุณสมบัติของฟิล์มแป้งข้าวเจ้าสามารถทำได้โดยการเติมพลาสติไซเซอร์ เช่น กลีเซอรอล ซึ่งช่วยเพิ่มความยืดหยุ่น ลดความแข็งเปราะ และทำให้ฟิล์มสามารถทนต่อแรงดึงและความชื้นได้ดีขึ้น (Lopattananon et al., 2012) นอกจากนี้ งานวิจัยร่วมสมัยยังพบว่าแป้งข้าวเจ้ามีศักยภาพสูง ในการประยุกต์ใช้เป็นฟิล์มบรรจุภัณฑ์อาหารหรือฟิล์ม ที่กินได้เนื่องจากมีความสามารถในการต้านทานการซึมผ่านของน้ำและก๊าซรวมทั้งย่อยสลายได้ตามธรรมชาติอย่างปลอดภัย (Wittaya, 2012) ด้วยคุณสมบัติเหล่านี้การศึกษาการผลิตฟิล์มชีวภาพจากแป้งข้าวเจ้าและการปรับปรุงคุณสมบัติของฟิล์มจึงมีความสำคัญอย่างยิ่ง

การดำเนินงานวิจัย

การศึกษาปริมาณแป้งข้าวเจ้าในการผลิตฟิล์มพลาสติกชีวภาพ

เตรียมแป้งข้าวเจ้า 5, 10, 15, 20 และ 25 กรัม ละลายในน้ำกลั่น 100 มิลลิลิตร กวนบนเครื่องกวนควบคุม ความร้อนทำเจลาติไนเซชั่น ตอนเริ่มเกิดเจลเติมกลีเซอรอลเป็นพลาสติไซเซอร์ 20% ของน้ำหนักแป้ง แล้วดูดส่วนผสม 20 มิลลิลิตร เทส่วนผสมลงในจานกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 9 เซนติเมตรหรือถาดหล่อฟิล์มขนาด 37 × 25.5 × 1.8 เซนติเมตร เกลี่ยให้เรียบ นำอบในตู้อบที่ 50 องศาเซลเซียสจนแห้ง ลอกแผ่นแป้งออกแล้วนำไปทดสอบคุณสมบัติถัดไป

การศึกษาการเพิ่มความแข็งแรงของฟิล์มพลาสติกชีวภาพจากแป้งข้าวเจ้าด้วยเซลลูโลส

ศึกษาการเพิ่มความแข็งแรงของฟิล์มแป้งข้าวเจ้าด้วยเซลลูโลส โดยการเติมเซลลูโลสจากเปลือกส้มโอ 1–3% เทียบกับเซลลูโลสเคมีเชิงพานิชย์คือ CMC 5–25% ของน้ำหนักแป้ง ฟิล์มถูกผลิตด้วยเทคนิคการหล่อ โดยเตรียม สารละลายแป้งและกลีเซอรอลให้เข้ากันแล้วเติมสารเสริมดังกล่าว จากนั้นให้ความร้อนที่ 75 องศาเซลเซียส นาน 10 นาที

เพื่อให้แป้งเกิดเจลาติไนซ์ก่อนเทลงถาดขึ้นรูป อบที่อุณหภูมิ 55 องศาเซลเซียสจนฟิล์มแห้งสนิท แล้วพักไว้ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส และความชื้นสัมพัทธ์ 50% เป็นเวลา 48 ชั่วโมง ก่อนนำไปทดสอบสมบัติเชิงกล

การทดสอบคุณสมบัติของฟิล์มชีวภาพจากแป้งข้าวเจ้า

ในงานวิจัยนี้ทดสอบคุณสมบัติของฟิล์มแป้งข้าวเจ้าก่อนและหลังเสริมความแข็งแรงด้วยเซลลูโลสในด้านความสามารถในการทนต่อตัวทำละลายและการดูดซับสารละลาย ฟิล์มถูกตัดเป็นขนาด 1 × 1 เซนติเมตร นำไปแช่ใน สารละลายต่างๆ ได้แก่ เอทานอล 70% (v/v) สารละลายกรดอะซิติก ด่าง (NaOH, NH_4OH และ Urea) ความเข้มข้น 0.05 N และน้ำเกลือ(NaCl) ความเข้มข้น 0.9% (w/v) โดยสังเกตการเปลี่ยนแปลงของฟิล์มและบันทึกเวลา ที่ฟิล์มคงรูป ในสารละลายต่างๆ เป็นเวลาต่างๆ (Oliva-Moreno and Encinas, 2021) ส่วนการดูดซับสารละลายของฟิล์มทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D570 [โดยการทดสอบการดูดซับสารละลายตามมาตรฐาน ASTM D570 ฟิล์มถูกอบแห้งที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียสจนมีน้ำหนักคงที่ จากนั้นชั่งน้ำหนักเริ่มต้น (W_0) และนำไปแช่ในสารละลายที่อุณหภูมิห้อง (25 ± 2 °C) เป็นเวลา 24 ชั่วโมง เมื่อครบเวลานำฟิล์มขึ้น ซับสารละลายส่วนเกินออก และชั่งน้ำหนักหลังการแช่ (Wt)] [การทดสอบการดูดซับสารละลายดำเนินการอย่างน้อย 3 ซ้ำต่อสภาวะทดลอง และรายงานผลเป็นค่าเฉลี่ย] (Yokesahachart et al., 2019) โดยอบแห้งฟิล์มก่อนชั่งน้ำหนักแล้วแช่สารละลาย ได้แก่ น้ำกลั่น เอทานอล 70% (v/v) สารละลายกรดอะซิติก ด่าง (NaOH, NH_4OH และ Urea) ความเข้มข้น 0.05 N และน้ำเกลือ (NaCl) ความเข้มข้น 0.9% (w/v) แล้วชั่งน้ำหนักหลังแช่ คำนวณเปอร์เซ็นต์การดูดซับจาก Equation 1:

$$\text{Absorption Percentage (\%)} = \frac{W_t - W_0}{W_0} \times 100 \qquad (1)$$

โดย W_0 คือค่าน้ำหนักแผ่นฟิล์มแห้ง (กรัม) และ (Wt คือค่าน้ำหนักแผ่นฟิล์มหลังแช่สารละลาย (กรัม)

ความตรวจสอบค่าความต้านทานแรงดึง (Tensile Strength) และการยืดตัว (Elongation at Break.)

ความแข็งแรงของฟิล์มแป้งข้าวเจ้าก่อนและหลังการเสริมความแข็งแรงด้วยเซลลูโลสถูกตรวจสอบด้วยเครื่องวัดสมบัติเชิงกลของฟิล์มโดยทดสอบค่าความต้านทานแรงดึงซึ่งเป็นการทดสอบดึงฟิล์ม*(Tensile Strength)* และการยืดตัวของฟิล์ม ซึ่งเป็นคุณสมบัติที่ฟิล์มเกิดการยืดตัว *(Elongation at Break.)* ฟิล์มถูกตัดเป็นขนาด 5×1 นิ้ว แล้วบ่มใน ตู้อบให้ความชื้นสัมพัทธ์คงที่ที่ 50±5% ที่ 25 องศาเซลเซียส นาน 48 ชั่วโมง จึงทดสอบด้วยเครื่อง Texture Analyzer ตามมาตรฐาน ASTM D882 (Yokesahachat et al., 2019) โดยวัดค่าความต้านทานแรงดึง (Tensile Strength) [การทดสอบแรงดึงดำเนินการด้วยอัตราการยืด (strain rate) 10 มิลลิเมตรต่อนาที โดยทดสอบตัวอย่างฟิล์มอย่างน้อย 3 ซ้ำต่อสูตรผสม และรายงานผลเป็นค่าเฉลี่ย] และเปอร์เซ็นต์การยืดตัว (Elongation at Break)

นอกจากนี้ งานวิจัยนี้ได้รายงานค่ามอดูลัสความยืดหยุ่น (Modulus of Elasticity; MOE) ซึ่งแสดงถึงความแข็งหรือความต้านทานต่อการเปลี่ยนรูปของฟิล์ม และค่ามอดูลัสการแตกหัก (Modulus of Rupture; MOR) ซึ่งแสดงถึงความสามารถของวัสดุในการรับแรงก่อนเกิดการแตกหัก พารามิเตอร์ทั้งสองมีความสำคัญต่อการประเมินความเหมาะสมของฟิล์มชีวภาพสำหรับการใช้งานด้านบรรจุภัณฑ์

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

ผลการศึกษาปริมาณแป้งข้าวเจ้าในการผลิตฟิล์มพลาสติกชีวภาพ

จากการทดลองขึ้นรูปฟิล์มพลาสติกชีวภาพจากแป้งข้าวเจ้าที่ปริมาณต่างๆ (5, 10, 15, 20 และ 25 กรัมต่อ 100 มล.) ในจานขึ้นรูปทรงกลม หลังอบฟิล์มที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส ผลแสดงดัง Fig. 1 โดยฟิล์มที่มีปริมาณแป้งข้าว เจ้า 5 กรัมให้ผลดีที่สุด โดยสามารถลอกออกจากพิมพ์ได้ง่ายและคงรูปเป็นแผ่นได้ดี มีเพียงรอยแตกเล็กน้อย ไม่เปราะ หรือแตกละเอียดเหมือนปริมาณที่สูงกว่า จึงเหมาะสมที่สุดสำหรับการขึ้นรูปฟิล์มชีวภาพในงานนี้

ฟิล์มที่มีปริมาณแป้งข้าวเจ้า 5 กรัมให้ผลดีที่สุด โดยสามารถลอกออกจากพิมพ์ได้ง่ายและคงรูปเป็นแผ่นได้ดี มีเพียงรอยแตกเล็กน้อยไม่เปราะหรือแตกละเอียดเหมือนปริมาณที่สูงกว่า จึงเหมาะสมที่สุดสำหรับ การขึ้นรูปฟิล์ม ชีวภาพในงานนี้.

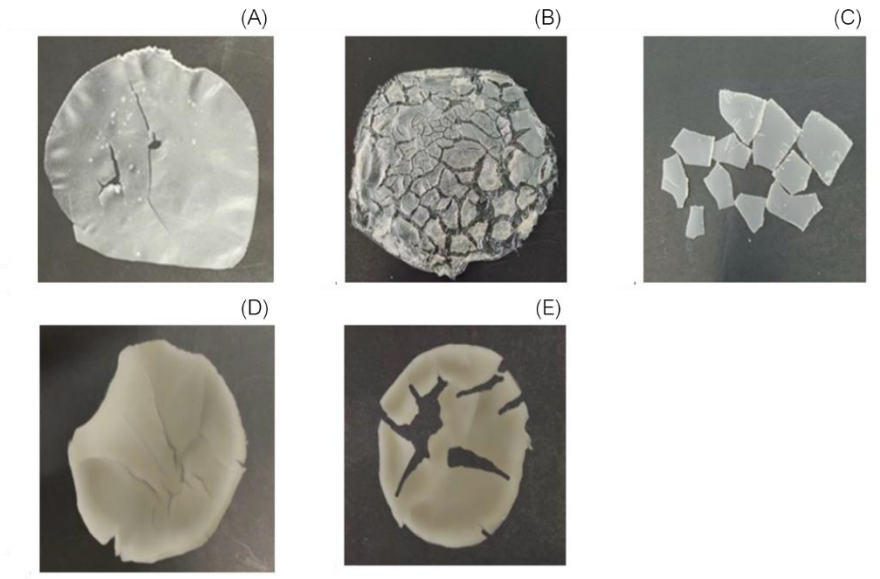
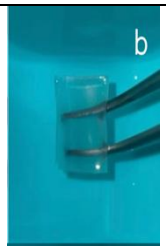


Fig. 1 Rice starch-based bioplastic films dried at 50°C. Figures A-E represent starch concentrations of 5, 10, 15, 20, and 25 g per 100 mL of water, respectively.

ผลการทดสอบการทนต่อตัวทำละลายต่างๆ ของฟิล์มพลาสติกชีวภาพจากแป้งข้าวเจ้า

จาก Table 1 แสดงผลการตรวจลักษณะฟิล์มพลาสติกชีวภาพจากแป้งข้าวเจ้ายังมีความสามารถในการ คงรูปอยู่ เป็นแผ่นได้โดยไม่สลายตัวได้ในสารละลาย กรดอ่อน (CH_3COOH), ด่างอ่อน (NH_4OH, ยูเรีย), เกลือ (NaCl 0.9%) และเอทานอล 70% แต่ไม่ทนต่อด่าง (NaOH) จะเห็นว่าฟิล์มแป้งข้าวเจ้าละลายทั้งหมด เมื่อแช่ไว้ใน สาร ละลายดังกล่าวเป็นเวลา 2 ชั่วโมง โครงสร้างของฟิล์มสามารถต้านทานการละลาย แสดงให้เห็นว่าทนต่อเปลี่ยนแปลง ทางกายภาพในสารและตัวทำละลายได้ดี ฟิล์มมีความแข็งแรงและเสถียรภาพของฟิล์ม (Zhang et al, 2019)

Table 1 Solubility testing of rice starch-based bioplastic films in various solvents

H_2O	CH_3COOH 0.05 N	NaOH 0.05 N	NH_4OH 0.05 N	Urea 0.05N	NaCl 0.05 N	EtOH 70%
+	++	-	++	++	++	+++
						

Note: – = Completely dissolved; + = Gel-like formation; ++ = Softened; +++ = Intact film structure.

ผลการทดสอบการดูดซับสารละลายต่างๆ ของฟิล์มพลาสติกชีวภาพจากแป้งข้าวเจ้า

ฟิล์มแป้งข้าวเจ้ามีการดูดซึมสูงในสารละลายด่าง โดยเฉพาะ NaOH (352.78%) รองลงมาคือ NaCl และ Urea ส่วนการดูดซึมน้ำบริสุทธิ์อยู่ระดับปานกลาง (≈102%) ขณะที่เอทานอลไม่ถูกดูดซึมเลย (0%) แสดงถึงความไว ต่อ สภาวะสารละลายต่างกันอย่างชัดเจนแสดงดัง Fig. 2

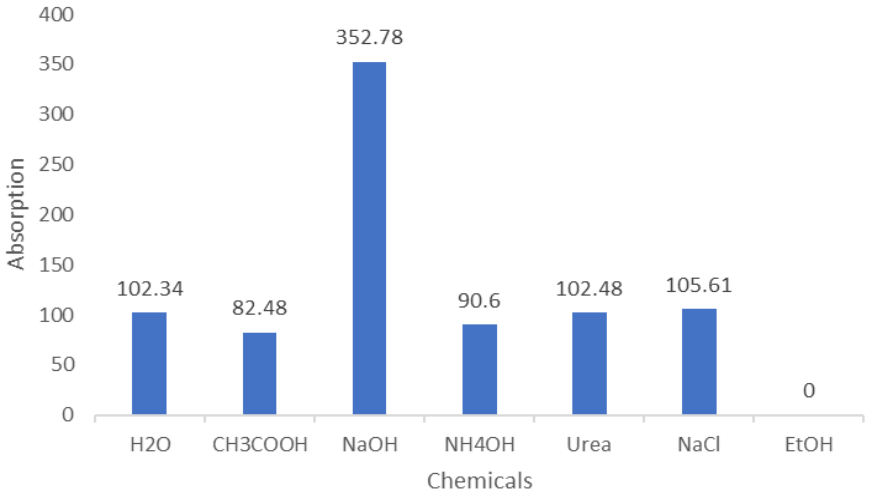


Fig. 2 Absorption testing of rice starch-based bioplastic films in various solutions

ผลการทดสอบความทนทานต่อสารละลายต่างๆของฟิล์มพลาสติกชีวภาพจากแป้งข้าวเจ้า

จาก Fig. 3 ผลการทดสอบความทนทานต่อการละลายในสารละลายต่างๆ ทั้งหมด พบว่า โดยพบว่า แป้ง ข้าวเจ้ามีความคงทนสูง เนื่องจากสามารถคงรูปได้นานถึง 120 นาทีในสารละลายส่วนใหญ่ เช่น น้ำ, NaCl 0.9%, NH_4OH, Urea, Acetic acid และแอลกอฮอล์ 70% โดยไม่มีการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพที่ชัดเจน

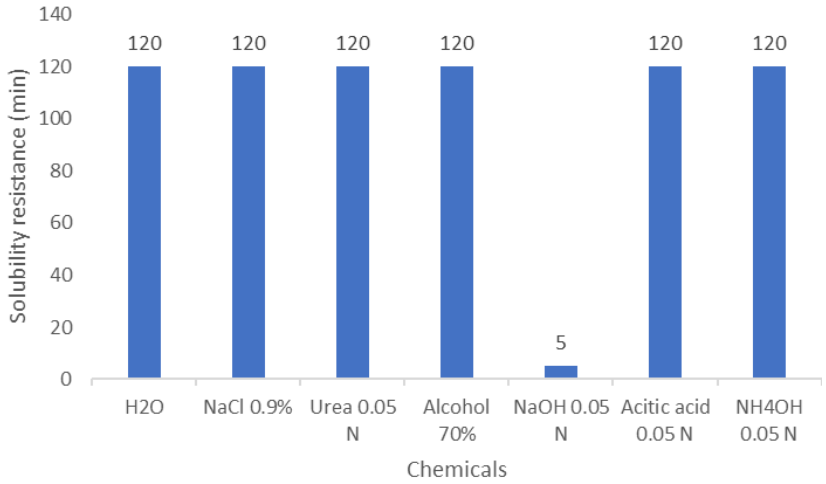


Fig. 3 Solubility resistance of rice starch-based bioplastic films in various chemical solutions

ผลการทดสอบค่าความต้านทานแรงดึง (Tensile Strength) และการยืดตัว (Elongation at Break.)

ฟิล์มชีวภาพจากแป้งข้าวเจ้ามีความยืดตัวต่ำ (4.8%) และรับแรงดึงได้ระดับปานกลาง (Tensile 6.06 MPa) พร้อมค่าความเค้นที่จุดขาด 3.7 MPa. นอกจากนี้ยังมีค่า MOE และ MOR ที่ 11.03 และ 15.43 N/mm² สะท้อนถึง ความแข็งและความทนทานในระดับเหมาะสมต่อการใช้งานพื้นฐาน.

เมื่อเปรียบเทียบค่าความต้านทานแรงดึงของฟิล์มแป้งข้าวเจ้าที่ได้จากงานวิจัยนี้กับฟิล์มชีวภาพเชิงพาณิชย์ที่มีรายงานในเอกสารอ้างอิง ซึ่งมีค่าความต้านทานแรงดึงอยู่ในช่วงประมาณ 5–20 MPa พบว่าฟิล์มที่พัฒนาขึ้นมีสมบัติเชิงกลอยู่ในช่วงที่สามารถนำไปใช้งานได้สำหรับบรรจุภัณฑ์ที่ไม่ต้องรับแรงสูง เช่น ฟิล์มห่ออาหารหรือถุงชีวภาพ ดังแสดงใน Table 2

Table 2 Tensile strength and elongation of rice starch-based bioplastic films.

Sample	Strain (%)	Stress (MPa)	MOE (N/mm^2)	Tensile (MPa)	MOR (N/mm^2)
Rice Flour	4.8	3.7	11.03	6.06	15.43

ผลการเพิ่มความแข็งแรงฟิล์มพลาสติกชีวภาพจากแป้งข้าวโดยการเติม CMC

จาก Fig. 4 ฟิล์มพลาสติกจากแป้งข้าวเจ้า พบว่าชุดควบคุม คือ 0% CMC ที่เติมแป้งเพิ่มทดแทน CMC ในระดับ 5% และ 25% โดยชุดควบคุม (0% CMC ที่เติมแป้งเพิ่มเพื่อทดแทน CMC ในระดับ 5% (ผลแสดงดัง Fig. 4A) ฟิล์มที่ได้มีลักษณะเปราะบางและเกิดการขาดอย่างชัดเจน ส่วนที่เป็นชุดควบคุม (0% CMC ที่เติมแป้งเพิ่มทดแทน CMC ในระดับ 25%) (ผลแสดงดัง Fig. 4G) ฟิล์มมีลักษณะแตก ขาดและมีฟองอากาศจำนวนมากภายในเนื้อฟิล์ม

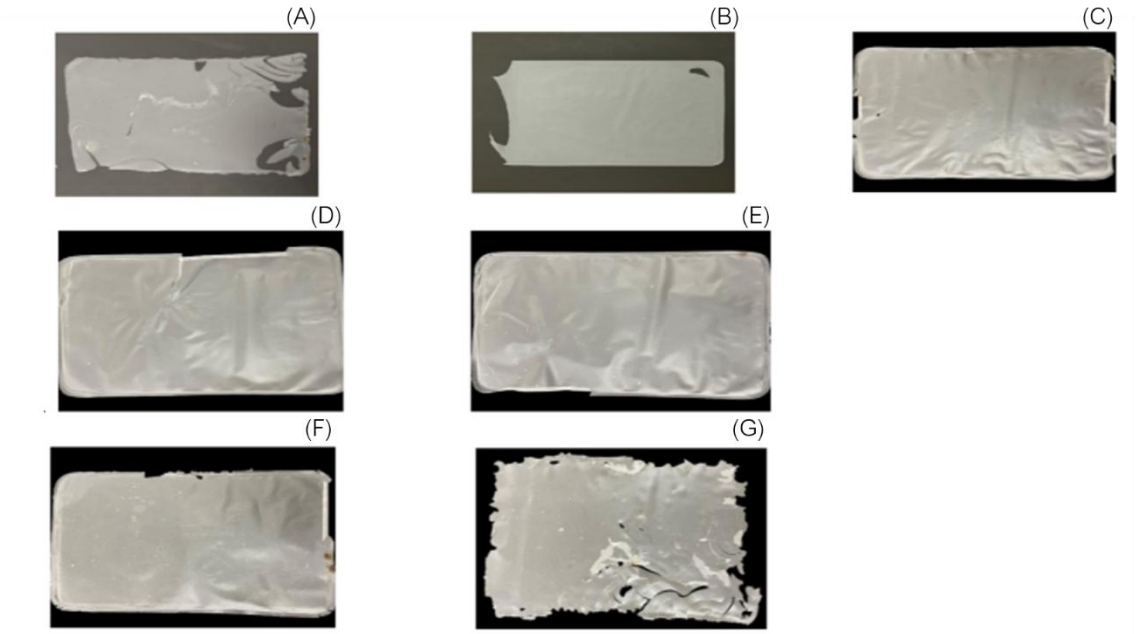


Fig. 4 Physical appearance of rice starch bioplastic films incorporated with 0–25% CMC. Images (A) and (G) represent the control films without CMC (where additional rice starch was substituted at 5% and 25% levels, respectively). Images (B), (C), (D), (E), and (F) show the bioplastic films containing 5%, 10%, 15%, 20%, and 25% CMC by weight of starch, respectively

ผลการทดสอบการละลายและการดูดซับสารของฟิล์มพลาสติกชีวภาพจากแป้งข้าวเจ้า

Table 3 แสดงการทดสอบการละลายของฟิล์มชีวภาพจากแป้งข้าวเจ้า ที่เติม CMC พบว่า ส่วนใหญ่ ยัง สามารถทนการละลายในสารละลายที่ทดสอบได้ มีค่าการดูดซับสารละลายค่อนข้างสูงในหลายตัวอย่าง การเติม CMC ช่วยลดการดูดซับได้ ส่วน Fig. 5 แสดงการดูดซับของฟิล์มชีวภาพจากแป้งข้าวเจ้า ที่เติม CMC สามารถ ดูดซับ สารที่ใช้ทดสอบต่างๆได้ เมื่อเติม CMC เพิ่มขึ้นจะช่วยเพิ่มความหนาแน่นและความคงตัวของโครงสร้างฟิล์ม จึงดูดซับ สารละลายได้ดีกว่าแบบไม่เติมสารเสริม

Table 3 Changes in the appearance of rice starch-based bioplastic films blended with CMC upon testing in different solutions.

Test solutions	0% CMC	CMC 5%	CMC 10%	CMC 15%	CMC 20%	CMC 25%
H_2O	+++	+++	++	+	++	++
EtOH 70%	+++	+++	+	+++	++	++
CH_3COOH	+++	+++	+++	+++	++	+
NaOH	+++	+	+++	+++	+++	+++
NH_4OH	+++	+++	+++	+	+++	+
Urea	+++	+++	+++	+++	++	+
NaCl	+++	+++	+++	+++	+++	+++

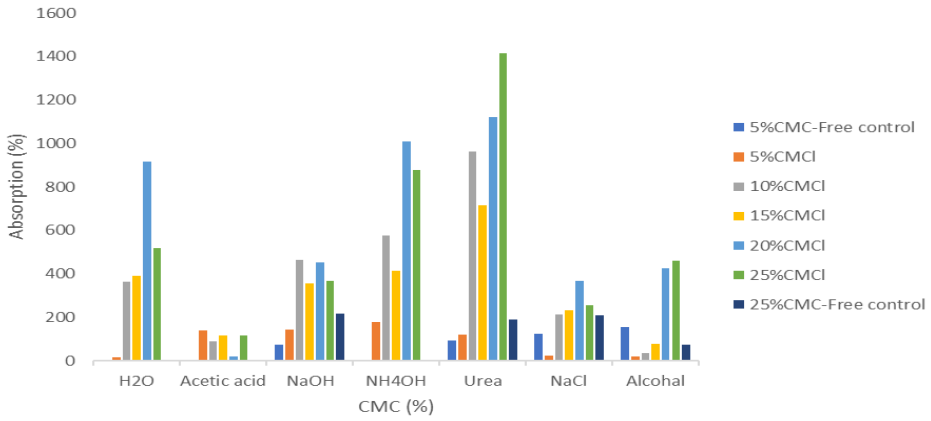


Fig. 5 Absorption capacity of CMC-reinforced rice starch bioplastic films in various solutions

สรุป

ฟิล์มพลาสติกชีวภาพจากแป้งข้าวเจ้าถูกเตรียมจากแป้ง 5 กรัมต่อน้ำกลั่น 100 mL เติมกลีเซอรอล 20% เป็นพลาสติไซเซอร์ ให้ผลฟิล์มคงรูปดีที่สุด ทนต่อการละลายใน เอทานอล กรดอ่อน ด่างอ่อน เกลือ ยูเรีย และน้ำ ตามลำดับ แต่สลายตัวทันทีในด่าง NaOH ฟิล์มยังมีค่าการดูดซับด่าง NaOH และน้ำ แต่ไม่ดูดซับเอทานอล การทดสอบสมบัติเชิงกลพบว่าฟิล์มแป้งข้าวเจ้ามีความยืดตัวต่ำ (4.8%) และมีค่าความต้านทานแรงดึงปานกลาง (6.06 MPa) การเติม CMC ช่วยเพิ่มความหนาแน่นโครงสร้าง ลดการดูดซับสารละลายบางชนิด และเพิ่มความทนต่อสารละลาย ส่วนปริมาณ CMC ระดับต่ำ (5–10%) ให้ความทนทานสารละลายต่างๆ ดีที่สุด เซลลูโลสสามารถเพิ่มความแข็งแรงและความคงรูป สามารถย่อยสลายได้และเหมาะสมต่อการใช้ในงานบรรจุภัณฑ์ชีวภาพ

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณภาควิชาเทคโนโลยีชีวภาพ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาลัยศิลปากร ให้ทุนทำวิจัย สถานที่ และอุปกรณ์ ที่ใช้ทำวิจัย

เอกสารอ้างอิง

Kasemsuwan, T., Baik, B.K., Jane, J. 1999. Rheological properties of rice starch–rice flour doughs and their relationships to the texture of rice noodles. Cereal Chem. 76: 637–643. doi.org/10.1094/CCHEM.1999.76.5.637

Lopattananon, N., Chaiwut, P., Chaiwut, P. 2012. Natural rubber composite reinforced with rice husk derived silica. Compos. Part A Appl. Sci. Manuf. 43: 1125–1132.

Lourdin, D., Della Valle, G., Colonna, P. 1995. Influence of amylose content on starch films and foams. Carbohydr. Polym. 27: 261–270.

Oliva-Moreno, E.E., Encinas, A. 2021. Addition of pine rosin to pectin bioplastic films for improved water resistance. Mater. Lett. 290: 129488. doi.org/10.1016/j.matlet.2021.129488

Rindlav-Westling, Å., Krog, N., Stenius, P., Lindström, T. 1998. Structure, properties, and applications of amylose and amylopectin. Polym. Rev. 38: 847–868.

Setyaningsih, W., Saputro, I.E., Palma, M. 2015. Pressurized liquid extraction of polyphenols from rice grains: Optimization using response surface methodology. Food Chem. 160: 34–40. doi.org/10.1016/j.foodchem.2014.03.067

Thumrongchote, D., Suzuki, T., Laohasongkram, K., Chaiwanichsiri, S. 2012. Properties of non-glutinous Thai rice flour: Effect of rice variety. Res. J. Pharm. Biol. Chem. Sci. 3: 150–164. https://www.researchgate.net/publication/263370943_Properties_of_Non_glutinous_Thai_Rice_Flour_Effect_of_rice_variety

Wittaya, T. 2012. Rice starch-based biodegradable films: Properties enhancement. IntechOpen. https://www.intechopen.com/chapters/38357

Yokesahachart, C., Chardchopowpong, B., Niramitmahapanja, S., Pajareon, S., Yokesahachart, P. 2019. Study on physical and thermal properties of edible films from modified cassava starch incorporated with zein protein. J. Food Technol. Siam Univ. 14: 58–68.

Zhang, B., Huang, Q., Fu, X., Liu, R. 2019. Effect of alkali treatment on structure and properties of high amylose corn starch films prepared by melt extrusion. Polymers 11: 1014. doi.org/10.3390/polym11061014

Cloning and expression of African Swine Fever Virus P32 and P72 recombinant proteins for diagnostic development

Anna Humla[a], Sarthorn Porntrakulpipat[b], Atcha Oraintara[a,*]

[a]Department of Microbiology, Faculty of Science, Khon Kaen University, Khon Kaen 40002, Thailand

[b]Department of Medicine, Faculty of Veterinary Medicine, Khon Kaen University, Khon Kaen 40002, Thailand

*Corresponding author. E-mail address: atcha@kku.ac.th

Abstract

African Swine Fever (ASF) is a highly lethal viral hemorrhagic disease lacking commercial vaccines, posing an urgent threat to the global swine industry. Given this critical situation, precise diagnostic tools are essential for containment. Therefore, this study focused on cloning, expression, and purification of two key highly immunogenic African Swine Fever Virus (ASFV) structural proteins: the major capsid protein P72 (B646L) and the protein P32 (CP204L). The full-length *p32* gene and the synthetic N-terminal domain of *p72* were successfully cloned into pET expression vectors and expressed in *Escherichia coli* BL21(DE3) under 1.0 mM isopropyl-β-D-1-thiogalactopyranoside (IPTG) induction. Purification utilizing Ni-NTA affinity chromatography revealed crucial differences in protein solubility: P32 was efficiently recovered under native conditions. In contrast, P72 formed insoluble inclusion bodies, necessitating purification under denaturing conditions (8 M urea) followed by controlled renaturation using arginine-based method. SDS-PAGE confirmed the successful purification of recombinant P32 (~30 kDa) and P72(~45 kDa). These purified proteins are slated for future evaluation as diagnostic reagents in the indirect ELISA method, aiming to contribute significantly to the development of robust and accurate ASF detection.

Keywords: African swine fever virus, Protein purification, Recombinant protein, P32, P72

Introduction

African Swine Fever (ASF) represents a formidable challenge to global swine health and economics, characterized by mortality rates approaching 100 percent (Li et al., 2022). Recognized by the World Organisation for Animal Health as a devastating hemorrhagic viral disease (Zhang et al., 2021), ASF is caused by the African Swine Fever Virus (ASFV), a large, enveloped double-stranded DNA virus and sole member of the *Asfarviridae* family. Its complex genome encodes over 150 proteins, including 54 structural and more than 100 non-structural proteins (Alejo et al., 2018; Li et al., 2023).

Since its identification in Kenya in 1921, ASF was primarily endemic to Africa. However, the virus has spread globally since 2007, reaching major swine-producing regions including China (2018), Vietnam (2019), and Korea (2019), inflicting devastating economic losses worldwide (Nah et al., 2022; Miao et al., 2023). Clinical manifestations range from peracute fatalities to chronic or subclinical infections, complicating diagnosis and control. Transmission occurs through direct contact, contaminated materials, and biological vectors such as *Ornithodoros* ticks (Gaudreault et al., 2020). The absence of an effective commercial vaccine emphasizes the critical need for rapid and reliable diagnostics to enable early detection and outbreak containment through active surveillance. Current African swine fever diagnostics comprise molecular and serological methods, such as polymerase chain reaction (PCR), loop-mediated isothermal amplification (LAMP), colloidal gold rapid test strips, and enzyme-linked immunosorbent assay (ELISA). ELISA remains the most prevalent technique for the identification of ASFV antibodies (Zhou et al., 2023).

The viral proteins, P32 (CP204L) and P72 (B646L) have been identified as crucial immunogenic targets for serological diagnostics. P32 is an early, abundantly expressed protein demonstrating high immunogenicity and importance for viral internalization (Zhou et al., 2023). P72, the major capsid protein and most abundant structural component of the virion, elicits strong antibody responses in infected animals, making it valuable for both molecular genotyping and antibody detection (Wang et al., 2023). Given their robust immunogenicity, both proteins are considered essential targets for developing sensitive and specific serological assays (Li et al., 2023; Zhou et al., 2023). Therefore, this study aimed to clone, express, and purify recombinant P32 and P72 proteins in *Escherichia coli* for subsequent evaluation as diagnostic antigens in indirect ELISA-based detection of ASF antibodies.

Materials and Methods

Gene selection, synthesis, and cloning

Two African Swine Fever Virus genes were selected for recombinant protein expression: full-length P32 (CP204L, GenBank KC610556.1) and the N-terminal region of P72 (B646L, encoding amino acids 1–290 from ASFV Georgia 2007/1 strain, accession NC_044959.2). The P72 fragment was selected based on findings from Miao et al. (2023) demonstrating high diagnostic potential of monoclonal antibodies targeting this epitope.

The *p32* gene was amplified via polymerase chain reaction (PCR) from ASFV genomic DNA template using primers designed with *BamHI* and *EcoRI* restriction sites at the 5' and 3' ends of the gene, respectively. The PCR product was purified and cloned into pET-28a(+) and pET-32a(+) expression vectors (Novagen, Merck) following standard molecular cloning protocols. The *p72* N-terminal fragment (nucleotides 1–870) was commercially synthesized with flanking *BamHI* and *EcoRI* sites at the 5' and 3' ends, respectively. by Tsingke Biotechnology Co., Ltd. (China) and subcloned into both expression vectors using the same restriction enzyme strategy.

Recombinant plasmids were transformed into *Escherichia coli* BL21(DE3) via electroporation and selected on LB agar containing 50 μg/mL kanamycin (pET-28a(+) clones) or 100 μg/mL ampicillin (pET-32a(+) clones). Positive clones were confirmed by colony PCR and restriction enzyme digestion, with final verification by Sanger sequencing (Macrogen, Korea).

Optimization of recombinant protein expression conditions

E. coli BL21(DE3) transformants were grown in LB broth with appropriate antibiotics to OD_{600} of 0.6–0.8 before induction. The recombinant protein expression was initiated with IPTG at the final concentrations of 0.1, 0.2, 0.5, and 1.0 mM, followed by incubation at 20 °C for 20 hours, or 25 °C for 18 hours, or 37 °C for 4 hours. Auto-induction was performed using modified ZYP-5052 medium protocol from Studier (2005) at 20 °C for 20 hours, or 25 °C for 18 hours, or 37 °C for 18 hours.

Cells were harvested by centrifugation and lysed by ultrasonication. Lysates were centrifuged to separate soluble and insoluble fractions, and protein expression was assessed by SDS-PAGE analysis.

Purification of recombinant proteins

Soluble P32 was purified under native conditions to isolate the protein while preserving its native conformation, utilizing mild buffers. Cell pellets were resuspended in B-PER reagent (Thermo Fisher Scientific), lysed by ultrasonication, and separated by centrifugation. The supernatant was filtered and applied to Ni-NTA agarose column (Macherey-Nagel, Germany). The target proteins were eluted using an elution buffer containing 250 mM imidazole. Eluted fractions were pooled, dialyzed against PBS, concentrated by lyophilization, quantified by Bradford assay, and stored at 4 °C.

P72 was purified from inclusion bodies under denaturing conditions. Harvested cells were lysed and the inclusion body pellet was solubilized in denaturing buffer containing 8 M urea. After centrifugation and filtration, the supernatant was subjected to Ni-NTA affinity chromatography under denaturing conditions and eluted with 250 mM imidazole. The purified protein was renatured by sequential dialysis based on modified protocol from Miao et al. (2023), progressing from 2 M urea buffer through arginine-containing renaturation buffer to PBS. The renatured protein was concentrated, quantified by Bradford assay, and stored at 4 °C.

Results and Discussion

Construction of recombinant plasmids and transformation

The 558 bp *p32* gene amplified from ASFV genomic DNA and the synthetic *p72* gene fragment were successfully cloned into the pET-28a(+) and pET-32a(+) vectors. Colony PCR confirmed the expected *p32* gene sizes for both vectors. Restriction enzyme analysis confirmed the expected plasmid sizes of 6.2 kb for pET28-*p72* and 6.7 kb for pET32-*p72*, indicating successful gene insertion visible in Fig. 1 Sanger sequencing showed 100% identity with the reference sequences.

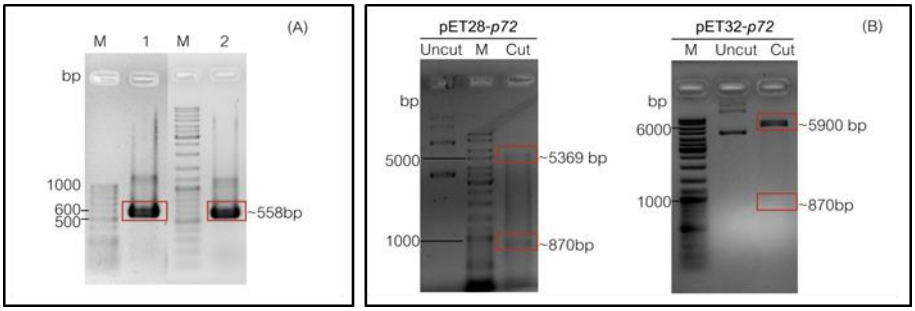


Fig. 1 Agarose gel electrophoresis analysis of recombinant plasmids. (A) Colony PCR of the *p32* gene. Lane 1 and 3: DNA marker (M); Lane 2: PCR product from pET28a-*p32*; Lane 4: PCR product from pET32a-*p32*. (B) Restriction enzyme analysis of pET28-*p72* and pET32-*p72*. Agarose gel shows uncut and digested (Cut) plasmids.

Recombinant protein expression

Both proteins were successfully expressed in *E. coli* BL21(DE3) under IPTG and auto-induction conditions. As shown in Fig. 2 and 3, the P32 recombinant protein band was found at approximately 30 kDa (pET-28a) and 45 kDa (pET-32a with thioredoxin tag), while P72 showed similar patterns at 30 kDa and 45 kDa, consistent with predicted molecular weights including fusion tags. Constructs using pET-32a vectors consistently showed higher expression levels with more intense bands in both figures, reflecting the thioredoxin tag's dual function as solubility enhancer and chaperone-like molecule (LaVallie et al., 1993; Hwang et al., 2013).

Expression optimization revealed significant temperature effects visible in Fig. 2, 3 and 4. Induction at 37 °C produced rapid growth but lowest soluble protein accumulation, consistent with faster synthesis exceeding folding capacity and promoting inclusion body formation (Sahdev et al., 2008). Auto-induction at 20 °C and 25 °C substantially improved protein yield by allowing slower translation and enhanced chaperone-mediated folding. Solubility analysis revealed both proteins predominantly localized to insoluble fractions. P72 demonstrated minimal soluble yield even under optimized conditions, reflecting challenges in expressing viral capsid proteins with extensive hydrophobic surfaces required for virion assembly (Singh and Panda, 2005).

P32 exhibited moderately improved solubility from pET-32a constructs at reduced temperatures, suggesting better intrinsic folding capability.

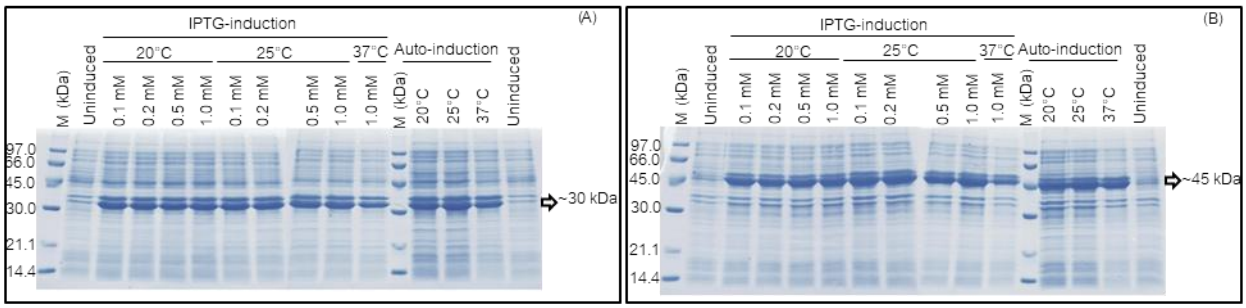


Fig. 2 12.5% SDS-PAGE analysis of whole-cell lysates showing recombinant protein expression under different induction conditions. (A); *E. coli* harboring pET28a-*p32*, (B); *E. coli* harboring pET32a-*p32*.

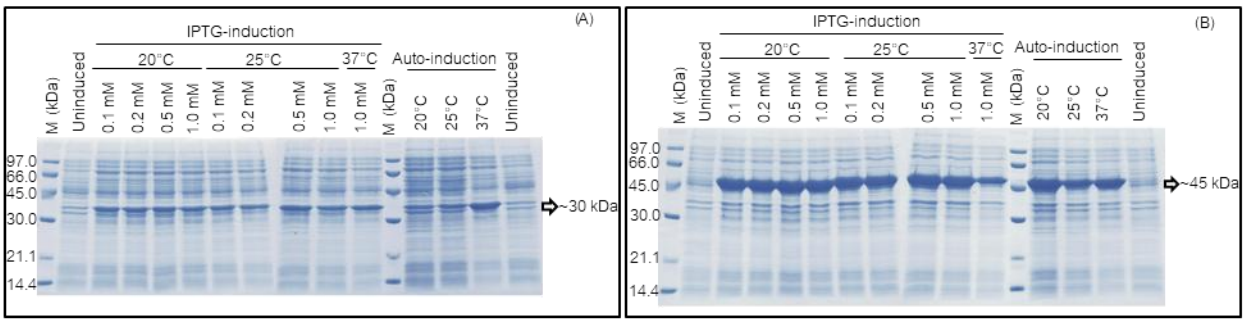


Fig. 3 12.5% SDS-PAGE analysis of whole-cell lysates showing recombinant protein expression under different induction conditions. (A); *E. coli* harboring pET28a-*p72*, (B); *E. coli* harboring pET32a-*p72*.

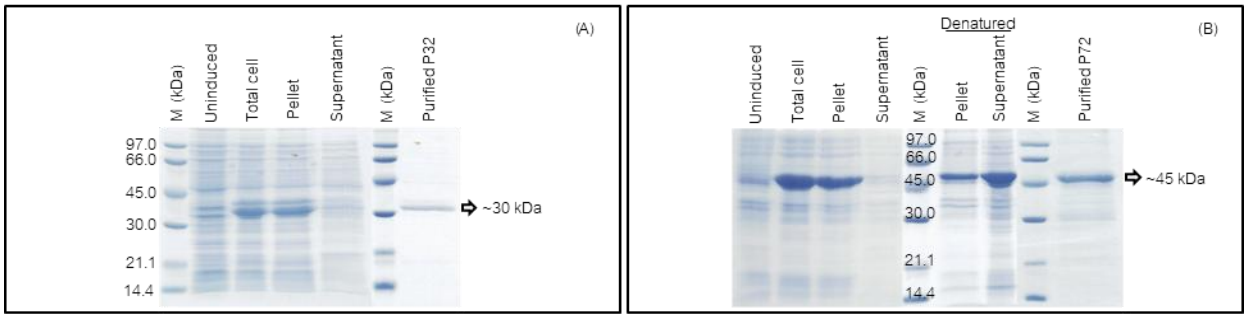


Fig. 4 12.5% SDS-PAGE analysis of solubility and purification of p32 and p72 recombinant proteins. The proteins were expressed at 37 °C for 4 hours with 1 mM IPTG induction. (A) Solubility and purified P32 protein. (B) Solubility and purified P72 protein.

Purification of recombinant proteins

Based on optimization results, pET-28a-*p32* and pET-32a-*p72* were selected for large-scale production. The protein expression was induced with 1 mM IPTG at 37 °C for four hours to maximize biomass,

with purification strategies tailored to each protein's solubility characteristics using nickel-nitrilotriacetic acid affinity chromatography visible in Fig. 4.

P32, exhibiting predominantly soluble expression, was purified under native conditions to preserve conformational integrity and maintain native epitope structures essential for diagnostic antibody recognition.SDS-PAGE verified a predominant band at approximately 30 kDa. The concentration of the purified P32, as determined by spectrophotometric analysis (NanoDrop), was 0.99 mg/mL.

P72 formed extensive inclusion bodies requiring denaturing purification. Isolated inclusion bodies were solubilized with 8 M urea and purified by Ni-NTA chromatography under denaturing conditions. The denatured protein underwent controlled refolding through sequential dialysis with decreasing urea concentrations and arginine addition to suppress aggregation (Tsumoto et al., 2003). This stepwise approach, adapted from protocols by Miao et al. (2023) for ASFV proteins, allowed gradual native structure restoration while minimizing precipitation. SDS-PAGE verified a predominant band at approximately 45 kDa corresponding to thioredoxin-tagged P72. The final concentration of the refolded P72 was measured at 0.72 mg/mL using the Bradford assay.

Successful purification of both proteins demonstrates the feasibility of producing ASFV diagnostic antigens in bacterial systems with appropriate strategies. Native P32 purification ensures conformational epitope retention, while P72 refolding aims to restore immunologically relevant structures. The availability of purified recombinant proteins represents significant progress toward improved ASF serological diagnostics. Current commercial ELISA kits often rely on whole virus lysates requiring high-containment facilities (Gallardo et al., 2019). Defined recombinant antigens offer improved specificity, enhanced safety, and standardized large-scale production potential (Petrovan et al., 2020).

P32 and P72 selection as diagnostic targets is supported by serological studies demonstrating strong immunogenicity during natural infection. P72, the major capsid protein constituting approximately 30% of virion protein mass, consistently elicits robust early antibody responses. P32 similarly induces strong humoral responses detectable in convalescent sera (Gómez-Puertas et al., 1998). Antibodies against both proteins persist for extended periods, making them suitable for serosurveillance programs detecting previous exposure (Sánchez-Vizcaíno et al., 2015).

Future work will evaluate immunoreactivity against well-characterized serum panels from experimentally infected pigs and field samples. A dual-antigen indirect ELISA incorporating both P32 and P72 may provide enhanced sensitivity and specificity compared to single-antigen assays, as targeting multiple antigenic determinants reduces false-negative results from individual antibody response variation (Zhou et al., 2023). The modular expression system established here provides a foundation for producing additional ASFV antigens for multiplex diagnostic formats.

This study demonstrated the successful expression and purification of ASFV P32 and P72 in *E. coli*. P32 was purified under native conditions, while P72 required denaturation and refolding due to inclusion bodies (Fig. 4) both challenges and opportunities in expressing complex viral structural proteins in prokaryotic hosts.

These recombinant antigens provide essential reagents for enhancing serological diagnostics and global ASF surveillance.

Conflict of Interest

The authors declare that they have no competing financial interests or personal relationships that could have appeared to influence the work reported in this paper. This research was conducted in the absence of any commercial or financial relationships that could be construed as a potential conflict of interest.

Acknowledgements

The authors would like to express their sincere gratitude to Assoc. Prof. Dr. Sathorn Porntrakulpipat, DVM, from the Faculty of Veterinary Medicine, Khon Kaen University, for kindly providing the ASFV genomic DNA template essential for this study. We are deeply thankful to Prof. Dr. Sakda Daduang from the Faculty of Pharmaceutical Sciences, Khon Kaen University, for generously supplying the *Escherichia coli* BL21(DE3) strain and the pET32a(+) expression vector. Special thanks are extended to Assoc. Prof. Dr. Nicha Charoensri, MLS, PhD, from the Department of Clinical Microbiology, Faculty of Associated Medical Sciences, Khon Kaen University, for her valuable guidance on cloning strategies. We also acknowledge the Protein and Proteomics Research Center for Commercial and Industrial Purposes (ProCCI), Khon Kaen, Thailand, for providing laboratory facilities and resources that supported this research.

References

Alejo, A., Matamoros, T., Guerra, M., Andrés, G. 2018. A Proteomic Atlas of the African Swine Fever Virus Particle. J. Virol. 92: e01293-18. doi.org/10.1128/jvi.01293-18

Gallardo, C., Fernández-Pinero, J., Arias, M. 2019. African swine fever (ASF) diagnosis, an essential tool in the epidemiological investigation. Virus Res. 271: 197676. doi.org/10.1016/j.virusres.2019.197676

Gaudreault, N.N., Madden, D.W., Wilson, W.C., Trujillo, J.D., Richt, J.A. 2020. African Swine Fever Virus: An Emerging DNA Arbovirus. Front. Vet. Sci. 7: 215. doi.org/10.3389/fvets.2020.00215

Gómez-Puertas, P., Rodríguez, F., Oviedo, J.M., Brun, A., Alonso, C., Escribano, J.M. 1998. The African Swine Fever Virus Proteins p54 and p30 Are Involved in Two Distinct Steps of Virus Attachment and Both Contribute to the Antibody-Mediated Protective Immune Response. Virology 243: 461–471. doi.org/10.1006/viro.1998.9068

Hwang, P.M., Pan, J.S., Sykes, B.D. 2013. Targeted expression, purification, and cleavage of fusion proteins from inclusion bodies in Escherichia coli. FEBS Lett. 588: 247–252. doi.org/10.1016/j.febslet.2013.09.028

LaVallie, E.R., DiBlasio, E.A., Kovacic, S., Grant, K.L., Schendel, P.F., McCoy, J.M. 1993. A Thioredoxin Gene Fusion Expression System That Circumvents Inclusion Body Formation in the E. coli Cytoplasm. Nat. Biotechnol. 11: 187–193. doi.org/10.1038/nbt0293-187

Li, D., Zhang, Q., Liu, Y., et al. 2022. Indirect ELISA Using Multi-Antigenic Dominants of p30, p54 and p72 Recombinant Proteins to Detect Antibodies against African Swine Fever Virus in Pigs. Viruses 14: 2660. doi.org/10.3390/v14122660

Li, J., Jiao, J., Liu, N., et al. 2023. Novel p22 and p30 dual-proteins combination based indirect ELISA for detecting antibodies against African swine fever virus. Front. Vet. Sci. 10: 1093440. doi.org/10.3389/fvets.2023.1093440

Miao, C., Yang, S., Shao, J., et al. 2023. Identification of p72 epitopes of African swine fever virus and preliminary application. Front. Microbiol. 14: 1126794. doi.org/10.3389/fmicb.2023.1126794

Nah, J.J., Kwon, O.K., Choi, J.D., et al. 2022. Development of an indirect ELISA against African swine fever virus using two recombinant antigens, partial p22 and p30. J. Virol. Methods 309: 114611.

Petrovan, V., Murgia, M.V., Wu, P., Lowe, A.D., Jia, W., Rowland, R.R.R. 2020. Epitope mapping of African swine fever virus (ASFV) structural protein, p54. Virus Res. 279: 197871. doi.org/10.1016/j.virusres.2020.197871

Sahdev, S., Khattar, S.K., Saini, K.S. 2008. Production of active eukaryotic proteins through bacterial expression systems: a review of the existing biotechnology strategies. Mol. Cell. Biochem. 307: 249–264. doi.org/10.1007/s11010-007-9603-6

Sánchez-Vizcaíno, J.M., Mur, L., Gomez-Villamandos, J.C., Carrasco, L. 2015. An update on the epidemiology and pathology of African swine fever. J. Comp. Pathol. 152: 9–21. doi.org/10.1016/j.jcpa.2014.09.003

Singh, S.M., Panda, A.K. 2005. Solubilization and refolding of bacterial inclusion body proteins. J. Biosci. Bioeng. 99: 303–310. doi.org/10.1263/jbb.99.303

Studier, F.W. 2005. Protein production by auto-induction in high-density shaking cultures. Protein Expr. Purif. 41: 207–234. doi.org/10.1016/j.pep.2005.01.016

Tsumoto, K., Ejima, D., Kumagai, I., Arakawa, T. 2003. Practical considerations in refolding proteins from inclusion bodies. Protein Expr. Purif. 28: 1–8. doi.org/10.1016/s1046-5928(02)00641-1

Wang, L., Li, D., Liu, Y., Zhang, L., Peng, G., Xu, Z., Jia, H., Song, C. 2023. Development of an effective one-step double-antigen sandwich ELISA based on p72 to detect antibodies against African swine fever virus. Front. Vet. Sci. 10: 1160583. doi.org/10.3389/fvets.2023.1160583

Zhang, X., Liu, X., Wu, X., Ren, W., Zou, Y., Xia, X., Sun, H. 2021. A colloidal gold test strip assay for the detection of African swine fever virus based on two monoclonal antibodies against P30. Arch. Virol. 166: 871–879. doi.org/10.1007/s00705-020-04915-w

Zhou, L., Song, J., Wang, M., et al. 2023. Establishment of a Dual-Antigen Indirect ELISA Based on p30 and pB602L to Detect Antibodies against African Swine Fever Virus. Viruses 15: 1845. doi.org/10.3390/v15091845

การพัฒนาและตรวจสอบความใช้ได้วิธีวิเคราะห์ไกลโฟเซตและอะมิโนเมทิลฟอสโฟนิก แอซิด (AMPA) ในน้ำและดินด้วยเทคนิคลิควิดโครมาโทกราฟี

Development and validation of a method for the determination of Glyphosate and Aminomethylphosphonic Acid (AMPA) in water and soil samples by liquid chromatography

อำนาจ กะฐินเทศ[a,*], **จันทิมา ผลกอง**[a], **นพดล มะโนเย็น**[a], **สิริพร เหลืองสุชนกุล**[a], **ทิตยา บุญทองโท**[b]

Amnaj Katintet[a,*], Jantima Phonkong[a], Noppadon Manoyen[a], Siriporn Luengsuchonkul[a], Tittaya Boontongto[b]

[a]กองวิจัยพัฒนาปัจจัยการผลิตทางการเกษตร กรมวิชาการเกษตร กรุงเทพฯ 10900

[b]ศูนย์วิทยาศาสตร์การแพทย์ที่ 6 ชลบุรี กรมวิทยาศาสตร์การแพทย์ ชลบุรี 20000

[a]Agricultural Production Science Research and Development Division, Department of Agriculture, Bangkok 10900, Thailand

[b]Regional Medical Sciences Center 6 Chonburi, Department of Medical Sciences, Chonburi 20000, Thailand

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

บทคัดย่อ

การใช้สารกำจัดวัชพืชในปริมาณสูงและต่อเนื่องทำให้เกิดการตกค้างในสิ่งแวดล้อม เพื่อให้ทราบข้อมูลการตกค้างในสิ่งแวดล้อมและสามารถนำไปประเมินความเสี่ยงต่อสุขภาพและสิ่งแวดล้อม จึงได้ทำการพัฒนาและตรวจสอบความใช้ได้ของวิธีวิเคราะห์ไกลโฟเซตและอะมิโนเมทิลฟอสโฟนิก แอซิด (Aminomethylphosphonic acid, AMPA)ในตัวอย่างน้ำและดิน ด้วยปฏิกิริยาการทำอนุพันธ์กับ FMOC-Cl ตรวจวิเคราะห์ด้วยเทคนิคลิควิดโครมาโทกราฟี ผลได้ความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงของช่วงการใช้งานไกลโฟเซต และ AMPA ในตัวอย่างน้ำ 1.0–40 ไมโครกรัมต่อลิตร และในตัวอย่างดิน 0.1–4.0 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ค่า LOD และ LOQ ในตัวอย่างน้ำเท่ากับ 0.15 และ 1.00 ไมโครกรัมต่อลิตร และ ตัวอย่างดินเท่ากับ 0.03 และ 0.10 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ ค่า %recovery ในตัวอย่างน้ำและตัวอย่างดินอยู่ในช่วง 80.1–111.8% และ 80.0–107.4% ตามลำดับ ตรวจวิเคราะห์ตัวอย่างน้ำและดินสุ่มเก็บในแปลงยางพารา ส้ม ลำไย มันสำปะหลัง อ้อยปลูกใหม่ จำนวนรวม 10 ตัวอย่าง พบการตกค้างในน้ำ ปริมาณ 1.74–3.99 ไมโครกรัมต่อลิตร และดิน ปริมาณ 1.80–3.89 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม

คำสำคัญ: ไกลโฟเซต, ดิน, น้ำ, ลิควิดโครมาโทกราฟี, อะมิโนเมทิลฟอสโฟนิก แอซิด

Abstract

The intensive and continuous use of herbicides can lead to their persistence and accumulation in the environment. To obtain reliable information on environmental residues and to support risk assessment for human health and the environment, a method for the determination of glyphosate and aminomethylphosphonic acid (AMPA) in water and soil samples was developed and validated. The analytical procedure involved derivatization with fluorenylmethoxycarbonyl chloride (FMOC-Cl), followed by analysis using liquid chromatography. The method exhibited good linearity over the concentration ranges of 1.0–40 µg/L for both glyphosate and AMPA in water samples, and 0.1–4.0 mg/kg in soil samples. The limits of detection (LOD) and limits of quantification (LOQ) were 0.15 and 1.00 µg/L for water samples, and 0.03 and 0.10 mg/kg for soil samples, respectively. The recoveries ranged from 80.1%–111.8% for water samples and from 80.0%–107.4% for soil samples. Application of the method to ten water and soil samples collected from rubber, orange, longan, cassava, and newly planted sugarcane fields revealed residue levels of 1.74–3.99 µg/L in water and 1.80–3.89 mg/kg in soil.

Keywords: Aminomethylphosphonic acid, Glyphosate, Liquid chromatography, Soil, Water

คำนำ

ไกลโฟเซต (glyphosate) มีชื่อ IUPAC คือ N-(phosphonomethyl) glycine สูตรโมเลกุล $C_3H_8NO_5P$ และมวลโมเลกุล 169.1 กรัมต่อโมล จัดอยู่ในกลุ่มฟอสโฟโนไกลซีน ละลายในน้ำปริมาณ 10.5 กรัมต่อลิตร (pH 1.9, 20˚C) เป็นสารป้องกันกำจัดวัชพืช ประเภทไม่เลือกทำลายชนิดดูดซึมทางใบจะเคลื่อนย้ายไปส่วนต่าง ๆ ของพืช ใช้หลังวัชพืชงอกประมาณ 2-4 สัปดาห์ เกษตรกรนิยมนำมาใช้กำจัดวัชพืชในข้าวโพด ถั่วเหลือง สับปะรด ปาล์มน้ำมัน และสวนยางพารา (สำนักวิจัยพัฒนาการอารักขาพืช, 2554) ไกลโฟเซตมีค่าความเป็นพิษเฉียบพลันทางปาก (acute oral, LD_{50}) ในหนู >5,000 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม น้ำหนักตัว และความเป็นพิษเฉียบพลันทางผิวหนัง (acute dermal, LD_{50}) ในกระต่าย >5000 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม น้ำหนักตัว (Turner, 2018) สำหรับการตกค้างในสิ่งแวดล้อม พบค่า DT_{50} ในน้ำ 1-91 วัน และดิน 1-130 วัน จุลินทรีย์ชนิด *Pseudomonas sp., Arthrobacter atrocyaneus* และ *Flavobacterium sp.* ที่อยู่ในดินและน้ำจะย่อยสลายไกลโฟเซตเกิดสาร metabolite ชนิด Aminomethylphosphonic acid (AMPA) (Turner, 2018)

ไกลโฟเซต จัดเป็นสารที่มีขั้ว (polar) การตรวจวัดด้วย High performance liquid chromatography (HPLC) ตัวตรวจวัด Diode array detector มีข้อจำกัดที่ความเข้มข้นสารในระดับต่ำ ๆ ไม่สามารถตรวจวัดได้ ในปี 1990 ได้มีการพัฒนาวิธีการตรวจวิเคราะห์ไกลโฟเซตและ AMPA ในตัวอย่างน้ำด้วยการทำ derivatization กับ o-phthalaldehyde (OPA) ได้ค่า LOQ เท่ากับ 3.2 และ 1.2 ไมโครกรัมต่อลิตร ตามลำดับ มีข้อจำกัดในการใช้ post-column ที่อุดตันบ่อย สารเคมีที่ใช้มีราคาแพง ต่อมาในปี 2005 มีการพัฒนาวิธีการตรวจวิเคราะห์ไกลโฟเซตและ AMPA ในตัวอย่างน้ำและตัวอย่างดิน โดยสกัดตัวอย่างดินด้วย potassium hydroxide ทำ derivatization กับ FMOC-Cl วิเคราะห์ด้วยเครื่อง HPLC-MS/MS ได้ค่า LOQ ในตัวอย่างน้ำ 50 นาโนกรัมต่อลิตรและตัวอย่างดิน 0.05 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม เป็นวิธีที่ง่ายและลด matrix effect ได้ แต่เครื่องมือวิเคราะห์มีราคาสูงมาก จากข้อจำกัดดังกล่าว นักวิจัยจึงได้ทำการพัฒนาและตรวจสอบความใช้ได้ของวิธีตรวจวิเคราะห์ไกลโฟเซตและอนุพันธ์ AMPA ในตัวอย่างน้ำและตัวอย่างดิน เพื่อลดระยะเวลาความยุ่งยากและความซับซ้อน รวมทั้งลดสารรบกวน (interference) ในการตรวจวิเคราะห์ ให้สามารถตรวจวิเคราะห์ไกลโฟเซตและอนุพันธ์ AMPA ในระดับปริมาณต่ำ ๆ ในตัวอย่างน้ำและตัวอย่างดินได้

อุปกรณ์และวิธีการ

1. สารเคมีและวัสดุวิทยาศาสตร์ (Chemicals and materials)

สารมาตรฐานไกลโฟเซตและ AMPA ฟลูออรีนิลเมทอกซีคาร์บอนิล คลอไรด์ (fluorenylmethoxycarbonyl chloride, FMOC-Cl) โพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต (Potassium dihydrogen phosphate, KH_2PO_4) ไดโซเดียมไฮโดรเจนฟอสเฟต (Disodium hydrogen phosphate, Na_2HPO_4) ไตรโซเดียมซิเตรตไดไฮเดรต (Trisodium citrate dihydrate, $C_6H_5Na_30_7$) โซเดียมเตตระบอเรต (Disodium tetraborate, $Na_2B_4O_7{\cdot}10H_2O$) เมทานอล (methanol, CH_3OH) อะซีโตไนไตรล์ (acetonitrile, CH_3CN) ไดเอทธิล อีเทอร์ (diethyl ether, $C_4H_{10}O$) กรดไฮโดรคลอริค (hydrochloric acid, HCl) น้ำ (HPLC) ตัวดูดซับชนิดของแข็ง (Solid phase extraction, SPE) ชนิด AFFINIMIP® และโพลีเตตระฟลูออโรเอทิลลีน (polytetrafluoroethylene, PTFE)

2. การพัฒนาวิธีการสกัดตัวอย่าง (Development of sample extraction method)

2.1 ตัวอย่างน้ำ (น้ำผิวดิน) ตวงน้ำปริมาตร 100 มิลลิลิตร ก่อนสกัดทำการปรับสภาพของ SPE-AFFINIMIP® ด้วย 6 มิลลิลิตร น้ำ จากนั้นโหลดตัวอย่างน้ำผ่าน SPE ด้วย vacuum manifold ล้างด้วย 6 มิลลิลิตร น้ำ ทำการชะด้วย 5

มิลลิลิตร 0.1M HCl ใส่ในหลอดทดลอง 15 มิลลิลิตร (Claude *et al.,* 2017) ปิเปตสารสกัดตัวอย่างปริมาตร 1 มิลลิลิตร ไปทำปฏิกิริยา derivatization ตามข้อที่ 3.1 เปรียบเทียบกับการโหลดตัวอย่างน้ำ 15 มิลลิลิตร ทำการชะด้วย 4 มิลลิลิตร 0.1M HCl จากนั้นนำตัวอย่างไปลดปริมาตรด้วยเครื่อง Evaporator ให้แห้ง ปรับด้วยน้ำให้ปริมาตรเป็น 15 มิลลิลิตร

2.2 ตัวอย่างดิน (ดินร่วนปนทราย) ชั่งดิน 10 กรัม ใส่ในหลอด centrifuge tube ขนาด 50 มิลลิลิตร เติม 35 มิลลิลิตร ของสารผสม 0.03M Na_2HPO_4 และ 0.01M $C_6H_5Na_30_7$ นำไป sonicate ด้วยเครื่อง Ultrasonic bath นาน 30 นาที ปั่นเหวี่ยงตกตะกอนด้วยเครื่อง Centrifuge ที่ 10,000 รอบต่อนาที นาน 10 นาที กรองผ่านกระดาษ whatman no.1 ทำซ้ำอีกครั้งด้วย 15 มิลลิลิตร ของสารผสม 0.03M Na_2HPO_4 และ 0.01M $C_6H_5Na_30_7$ (Sun *et al.,* 2017) ปิเปตสารสกัดตัวอย่างปริมาตร 1 มิลลิลิตรไปทำปฏิกิริยา derivatization ตามข้อที่ 3.1 เปรียบเทียบกับการสกัดด้วย 0.03M Na_3PO_4+0.01M $Na_3C_6H_5O_7$ ทำการ sonicate 30 นาที

3. ปฏิกิริยาการทำอนุพันธ์ (Derivatization reaction)

3.1 สารสกัดตัวอย่าง ปริมาตร 1 มิลลิลิตร เติม 1 มิลลิลิตร 0.02M FMOC-Cl และ 2 มิลลิลิตร 0.05M Borate buffer (pH 9) ผสมให้เข้ากัน เขย่าด้วยเครื่องเขย่าที่ 180 รอบต่อนาที นาน 15 นาที เติม 3 มิลลิลิตร ไดเอทิล อีเทอร์ เขย่า 3 นาที ทิ้งชั้นบน เติม 100 ไมโครลิตร 10% v/v HCl ผสมให้เข้ากัน กรองด้วย PTFE 0.45 ไมครอน ใส่ขวด vial วิเคราะห์ด้วย UHPLC-FLD (Garba *et al.,* 2018)

3.2 สารมาตรฐานของไกลโฟเซตและ AMPA ปริมาตร 1 มิลลิลิตร ขั้นตอนของปฏิกิริยาการทำอนุพันธ์เช่นเดียวกับข้อ 3.1

4. การแยกสาร (Chromatographic conditions)

ใช้คอลัมน์ชนิด reversed-phase C_{18} ยี่ห้อ BDS Hypersil™ (250 x 4.6 mm i.d., 5 µm) ฉีดสารปริมาตร 20 ไมโครลิตร อัตราการไหล 0.7 มิลลิลิตรต่อนาที โมบายเฟส 2 ชนิด ชนิด A 50mM KH_2PO_4 (pH 5.5) และชนิด B อะซีโตไนไตรล์ แยกสารแบบ gradient elution อัตราส่วน A:B ดังนี้ 0 นาที (75:25), 3 นาที (65:35), 6 นาที (60:40), 8 นาที (40:60), 9 นาที (20:80) และ 12 นาที (75:25) อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส ค่า excitation 270 นาโนเมตร และ emission 315 นาโนเมตร ตรวจวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Ultra-high performance liquid chromatography ตัวตรวจวัด fluorescence detector (UHPLC-FLD)

5. การตรวจสอบความใช้ได้ของวิธีทดสอบ (Criteria for method validation)

5.1 ทดสอบความจำเพาะเจาะจง (Selectivity) วิเคราะห์ reagent, sample blank และ sample blank น้ำและดินที่เติมละลายมาตรฐานไกลโฟเซตและ AMPA (Eurachem, 2025) ด้วยเครื่อง UHPLC-FLD

5.2 ทดสอบ Matrix effect (%ME) เตรียมสารละลายมาตรฐานไกลโฟเซตและ AMPA ในสารสกัดจากตัวอย่างน้ำและตัวอย่างดิน ทดสอบ ≥6 ความเข้มข้น ความเข้มข้นละ 3 ซ้ำ คำนวณค่า %ME จาก Equation 1:

$$\%ME = \left(\frac{a_{Matrix}}{a_{Standard}} \right) \text{-}1 \times 100 \qquad (1)$$

Where; a_{Matrix} represents the slope of the matrix standard, and $a_{Standard}$ represents the slope of the solvent standard.

เกณฑ์ประเมิน %ME >± 20% หากค่า %ME > ±20% แสดงว่าสารมี Matrix effects จะต้องใช้ matrix standard ในการเตรียม calibration curve เพื่อใช้ในการคำนวณผลวิเคราะห์ (European Commission Directorate-General for Health and Food Safety [SANTE], 2024)

5.3 ทดสอบขีดจำกัดของการตรวจพบ (Limit of detection, LOD) ทำการ spike สารมาตรฐานไกลโฟเซตและ AMPA ที่ระดับความเข้มข้นต่ำ ๆ ที่สามารถตรวจวัดสัญญาณได้ จำนวน 10 ซ้ำ คำนวณค่า signal to noise ratio (S/N) ประเมิน LOD มีค่า ≥ 3S/N (SANTE, 2024) แสดงใน Table 1

5.4 ทดสอบขีดจำกัดของการวัดเชิงปริมาณ (Limit of quantitation, LOQ) ทำการ spike สารมาตรฐานไกลโฟเซตและ AMPA ที่ระดับความเข้มข้นต่ำ จำนวน 10 ซ้ำ คำนวณค่า signal to noise ratio (S/N) ประเมิน LOQ มีค่า ≥ 10S/N ต้องมีความถูกต้อง (accuracy) และความเที่ยง (precision) (AOAC, 2023; SANTE, 2024) แสดงใน Table 1

5.5 ทดสอบความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงของช่วงการใช้งาน (Linearity of working range) ทดสอบไกลโฟเซตและ AMPAที่ระดับความเข้มข้น 6 ระดับ ความเข้มข้นละ 3 ซ้ำ โดยตัวอย่างน้ำ ทดสอบที่ความเข้มข้น 1.00, 2.50, 5.00, 10.00, 30.12, 40.12 และ 1.00, 2.50, 5.00, 10.00, 30.06, 39.96 ไมโครกรัมต่อลิตร ตัวอย่างดิน ทดสอบที่ความเข้มข้น 0.10, 0.25, 0.50, 1.00, 3.00, 4.01 และ 0.10, 0.25, 0.50, 1.00, 3.00, 4.00 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม สร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารที่เติมลงในตัวอย่าง (concentration in test sample, X-axis) และความเข้มข้นที่ตรวจวัดได้ (measured concentration, Y-axis) (Eurachem, 2025) ประเมินค่าด้วย Coefficient of Determination (R^2) ≥0.98 (Codex Alimentarius Commission/Good Laboratory 40-1993 [CAC/GL], 2010) แสดงใน Table 1

5.6 ทดสอบความถูกต้อง (Accuracy) และความเที่ยง (Precision) ทดสอบไกลโฟเซตและ AMPA ที่ระดับความเข้มข้น 3 ระดับ ความเข้มข้นละ 10 ซ้ำ โดยตัวอย่างน้ำ ทดสอบที่ความเข้มข้น 1.00, 10.00, 40.12 และ 1.00, 10.00, 39.96 ไมโครกรัมต่อลิตร และตัวอย่างดิน ทดสอบที่ความเข้มข้น 0.10, 1.00, 4.01 และ 0.10, 10.00, 4.00 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ประเมินค่า accuracy จาก %recovery (Association of Official Analysis Chemists [AOAC], 2023) และ precision จาก Relative Standard Deviation (%RSD) (SANTE, 2024) แสดงใน Table 1

Table 1 Acceptance criteria for method performance characteristics

Parameters	Acceptance Criteria	Reference
Limit of detection	signal to noise ratio (S/N)	SANTE (2024)
Limit of quantitation	Confirm with Accuracy and Precision	Eurachem (2025); SANTE (2024)
Working Range	Linearity; Coefficient of Determination (R^2) ≥0.98	CAC/GL 40-1993 (2010)
Accuracy	%recovery = 40-120% *if analyte unit 1 ppb* %recovery = 60-115% *if analyte unit 10 ppb* %recovery = 80-110% *if analyte unit > 0.10-10 ppm*	AOAC (2023)
Precision	%RSD ≤20%	SANTE (2024)

ผลการทดลองและวิจารณ์

1. ผลการพัฒนาวิธีวิเคราะห์

ผลทดสอบไกลโฟเซต และ AMPA ในตัวอย่างน้ำ ความเข้มข้น 10.00 ไมโครกรัมต่อลิตร ค่า %recovery เฉลี่ย 97.5 และ 91.3 ตัวอย่างดิน ทดสอบที่ความเข้มข้น 1.00 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ค่า %recovery เฉลี่ย 88.2 และ 87.8 ตามลำดับ (n = 3) วิธีที่ทำการพัฒนาให้ผลค่า %recovery ที่ดีกว่า ผลการเปรียบเทียบแสดงใน Table 2

Table 2 The recovery results indicated comparable extraction efficiencies for water and soil samples.

Pesticides	Mean recovery (%)					
	Water sample		Soil sample			
	5 mL 0.1M HCl	4 mL 0.1M HCl	0.03M $C_6H_5Na_3O_7$	Na_2HPO_4+0.01M	0.03M $Na_3C_6H_5O_7$	Na_3PO_4+0.01M
Glyphosate	97.5	68.0	88.2		85.0	
AMPA	91.3	82.0	87.8		NT	

Note: NT= not test

2. ผลการทดสอบความจำเพาะเจาะจง (Selectivity)

ในตัวอย่างน้ำและดิน ไม่พบสัญญาณรบกวนพีคหลักและสามารถพิสูจน์สารเป้าหมายในตัวอย่างได้ ซึ่งสามารถตรวจวัดได้โดยไม่มีสัญญาณอื่นรบกวนและซ้อนทับกับ retention time (t_R) ของสารไกลโฟเซต (t_R = 5.254 นาที) และ AMPA (t_R = 7.521 นาที) แสดงดัง Fig. 1

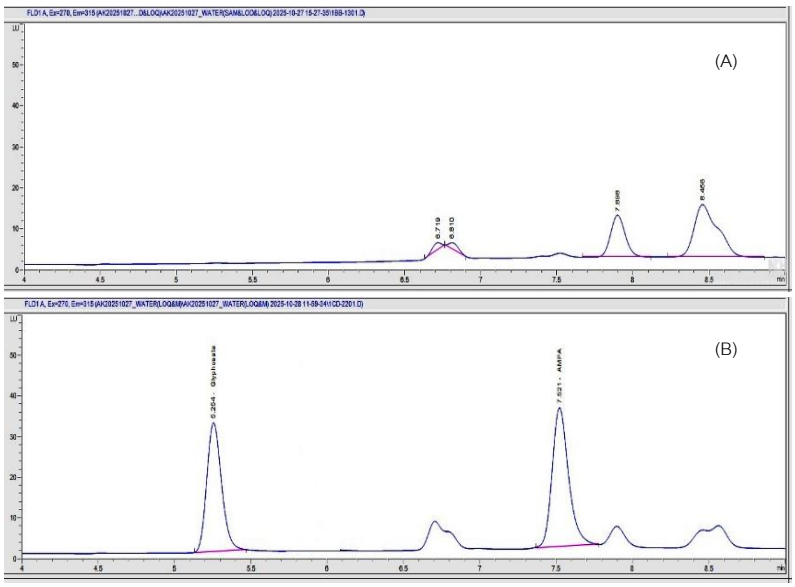


Fig. 1 Chromatograms of glyphosate and AMPA for A) blank water sample B) water sample spiked with glyphosate and AMPA

3. ผลการทดสอบ Matrix effect

ค่า %ME ในสารสกัดตัวอย่างน้ำและสารสกัดจากตัวอย่างดิน มีค่า 6.3%, 4.4% และ 2.3%, -7.7% แสดงว่า matrix น้ำและดินไม่ส่งผลกระทบต่อการวัดค่าสัญญาณการตรวจวิเคราะห์ สามารถเตรียมสารมาตรฐานไกลโฟเซตและ AMPA ในสารละลายได้ แสดงใน Table 3

Table 3 Linearity and matrix effects.

Pesticides	Solvent		Water matrix		Soil matrix		%ME	
	Slope	R^2	Slope	R^2	Slope	R^2	Water	Soil
glyphosate	1311	0.9998	1393.4	0.9998	1341.2	0.9979	6.3	2.3
AMPA	1977.6	0.9998	2065.0	0.9973	1825.9	0.9999	4.4	-7.7

4. ผลการทดสอบขีดจำกัดของการตรวจพบ (Limit of detection, LOD)

จากการทดสอบไกลโฟเซตและ AMPA ในตัวอย่างน้ำและตัวอย่างดินที่ระดับความเข้มข้น 0.15 ไมโครกรัมต่อลิตร และ 0.03 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม จำนวน 10 ซ้ำ มีค่า signal to noise ratio (S/N) เฉลี่ย 3.6, 4.6 และ 5.3, 4.4 ตามลำดับ ผ่านเกณฑ์การยอมรับที่ LOD ≥ 3S/N

5. ผลการทดสอบขีดจำกัดของการวัดเชิงปริมาณ (Limit of quantitation, LOQ)

จากการทดสอบไกลโฟเซตและ AMPA ในตัวอย่างน้ำและดินที่ระดับความเข้มข้น 1.00 ไมโครกรัมต่อลิตร และ 0.10 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม จำนวน 10 ซ้ำ มีค่า signal to noise ratio (S/N) เฉลี่ย 19.1, 21.2 และ 17.4, 31.5 ความถูกต้อง (accuracy) จากค่า recovery ในช่วง 79.2–111.8%, 75.6–108.8% และ 97.7–107.1%, 80.9-107.4% และความเที่ยง (precision) พบค่า %RSD ในช่วง 3-12% การทดสอบผ่านเกณฑ์การยอมรับมีความถูกต้อง และความเที่ยง

6. ผลการทดสอบความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงของช่วงการใช้งาน (Linearity of working range)

ทดสอบไกลโฟเซตและ AMPA ในตัวอย่างน้ำที่ระดับความเข้มข้นในช่วง 1.00–40.12 ไมโครกรัมต่อลิตรและในตัวอย่างดิน 0.10–4.01 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม มีค่า R^2 เท่ากับ 0.9957, 0.9926 และ 0.9979, 0.9995 ตามลำดับ แสดงว่าวิธีวิเคราะห์ในตัวอย่างน้ำและตัวอย่างดินมีความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นในตัวอย่างและสัญญาณการตรวจวัดมีความเป็นเส้นตรง สามารถตรวจวิเคราะห์ไกลโฟเซตและ AMPA ได้ (R^2 ≥ 0.98) แสดงดัง Fig. 2

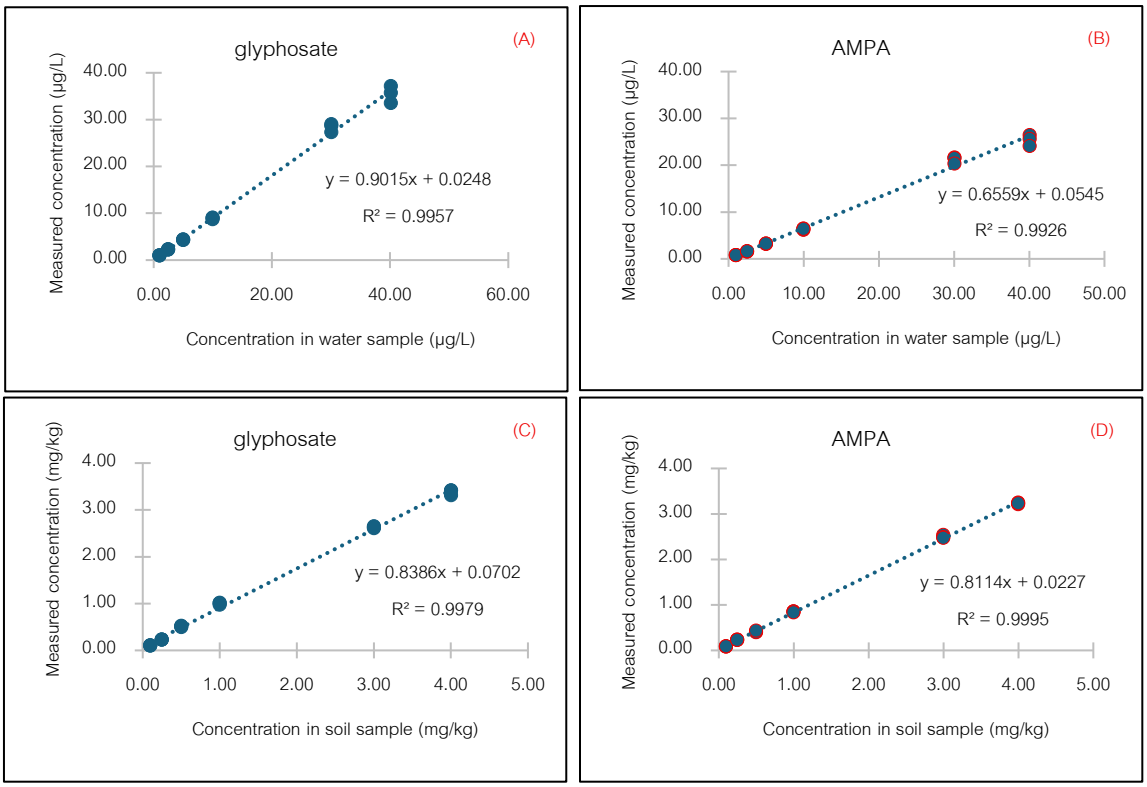


Fig. 2 The linearity of the working range for glyphosate and AMPA for A) glyphosate in the water matrix B) AMPA in the water matrix C) glyphosate in the soil matrix D) AMPA in the soil matrix.

7. ผลการทดสอบความถูกต้อง (Accuracy) และความเที่ยง (Precision)

ทดสอบที่ 3 ระดับความเข้มข้นไกลโฟเซตและ AMPA ในตัวอย่างน้ำความเข้มข้น 1.00, 10.00, 40.12 และ 1.00, 10.00, 39.96 ไมโครกรัมต่อลิตรและตัวอย่างดิน 0.10, 1.00, 4.01 และ 0.10, 1.00, 4.00 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมจำนวน 10 ซ้ำ ผลความถูกต้อง (accuracy) ในน้ำไกลโฟเซตและ AMPA มีค่า recovery อยู่ในช่วง 79.2–111.8%, 91.2–110.3%, 90.6–109.3% และ 75.6–108.8%, 68.2–88.7%, 80.1–84.6% และดิน 97.7–107.1%, 86.3–95.3%, 82.5–91.7% และ 80.9–107.4%, 80.0–86.3%, 80.4–88.9% และความเที่ยง (precision) ในตัวอย่างน้ำ มีค่า %RSD ของไกลโฟเซต และ AMPA อยู่ในช่วง 7–12% และ 6–11% และในตัวอย่างดิน 3–4% และ 2–9% ตามลำดับ จากผลการทดสอบค่าความถูกต้องและความเที่ยงในน้ำและดินทุกช่วงความเข้มข้นผ่านเกณฑ์การทดสอบทั้งหมด สามารถตรวจวิเคราะห์ไกลโฟเซตและ AMPA ตัวอย่างน้ำและดินได้อย่างถูกต้องและมีความเที่ยง แสดงใน Table 3

Table 3 Accuracy and precision of glyphosate and AMPA in water and soil samples.

Samples	glyphosate			AMPA		
	concentration	%recovery	%RSD	concentration	%recovery	%RSD
Water	1.00 µg/L	79.2-111.8	12	1.00 µg/L	75.6-108.8	11
	10.00 µg/L	91.2-110.3	6	10.00 µg/L	68.2-88.7	9
	40.12 µg/L	90.6-109.3	7	39.96 µg/L	80.1-84.6	6
Soil	0.10 mg/kg	97.7-107.1	3	0.10 mg/kg	80.9-107.4	9
	1.00 mg/kg	86.3-95.3	4	1.00 mg/kg	80.0-86.3	2
	4.01 mg/kg	82.5-91.7	3	4.00 mg/kg	80.4-88.9	3

นำวิธีการที่ได้พัฒนาและผ่านการตรวจสอบความใช้ได้ของวิธีไปตรวจวิเคราะห์ตัวอย่างน้ำและดินที่สุ่มเก็บในแปลงยางพารา ส้ม ลำไย มันสำปะหลัง อ้อยปลูกใหม่ ในจังหวัดจันทบุรี เชียงใหม่ ลำพูน นครสวรรค์ และกาญจนบุรี ตามลำดับ จำนวนรวม 10 ตัวอย่าง ผลการตรวจวิเคราะห์ปริมาณไกลโฟเซต ในตัวอย่างน้ำและดิน มีค่าดังนี้ nd, 3.99, 3.17, 1.74, nd ไมโครกรัมต่อลิตร และในตัวอย่างดิน 3.89, 1.80, nd, nd, nd มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ สำหรับ AMPA ตรวจไม่พบทั้งในน้ำและดิน (Table 4) พบการตกค้างไม่เกินค่ามาตรฐาน โดยค่ามาตรฐานไกลโฟเซตในน้ำดื่ม (Maximum acceptable concentration, MAC) ประเทศสหรัฐอเมริกา 700 ไมโครกรัมต่อลิตร (United State Environmental Protection Agency [U.S. EPA], 2009) สำหรับค่ามาตรฐานในดิน ≤5,960 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม (ประกาศคณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ, 2564)

Table 4 Results of glyphosate and AMPA in water and soil samples collected from agricultural fields.

Sampling Area / Crop Type	Province	Water sample (µg/L)		Soil sample (mg/kg)	
		glyphosate	AMPA	glyphosate	AMPA
Rubber plantation	Chanthaburi	nd	nd	3.89	nd
Orange orchard	Chiang Mai	3.99	nd	1.80	nd
Longan orchard	Lamphun	3.17	nd	nd	nd
Cassava field	Nakhon Sawan	1.74	nd	nd	nd
Newly planted sugarcane	Kanchanaburi	nd	nd	nd	nd

Note: nd = not detected

สรุปผลการทดลองและคำแนะนำ

การพัฒนาและตรวจสอบความใช้ได้วิธีวิเคราะห์ไกลโฟเซตและ AMPA ในน้ำและดิน โดยการทำปฏิกิริยาอนุพันธ์ด้วย FMOC-Cl วิเคราะห์ด้วยเทคนิคลิควิดโครมาโทกราฟี สามารถตรวจวิเคราะห์สารตกค้างในตัวอย่างน้ำและตัวอย่างดินได้อย่างถูกต้อง มีความเที่ยง และประหยัดสารเคมี ได้ค่า LOQ อยู่ในระดับต่ำ ผลการทดสอบค่า % recovery และ %RSD ผ่านเกณฑ์การทดสอบทุกช่วงความเข้มข้น วิธีนี้มีความเหมาะสม สามารถนำไปใช้เป็นวิธีมาตรฐานสำหรับห้องปฏิบัติการในการตรวจวิเคราะห์ไกลโฟเซตและ AMPA ในตัวอย่างน้ำและดิน

เอกสารอ้างอิง

ประกาศคณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ. 2564. เรื่อง กำหนดคุณภาพมาตรฐานดิน. https://epo04.pcd.go.th/attachment/iu/download.php?WP=qUIcnKtlpQIgZKqCGWOghJstqTgcWatjpQWgAUpmGQEgG2rDqYyc4Uux, 3 พฤศจิกายน 2568.

สำนักวิจัยพัฒนาการอารักขาพืช. 2554. การควบคุมวัชพืชและการใช้สารกำจัดวัชพืช ปี 2554. ชุมนุมสหกรณ์การเกษตรแห่งประเทศไทย จำกัด. กรุงเทพมหานคร.

Agency for Toxic Substances and Disease Registry. 2020. Toxicological Profile for Glyphosate. https://www.atsdr.cdc.gov/toxprofiles/tp214.pdf, 30 October 2025.

Association of Official Analytical Chemists. 2023. Appendix F Guidelines for Standard Method Performance Requirements. https://www.aoac.org/wp-content/uploads/2019/08/app_f.pdf, 17 April 2025.

Claude, B., Berho, C., Bayoudh, S., Amalric, L., Coisy, E., Nehmé, R., Morin, P. 2017. Preliminary recovery study of a commercial molecularly imprinted polymer for the extraction of glyphosate and AMPA in different environmental waters using MS. Environ. Sci. Pollut. Res. 24: 1–8. doi.org/10.1007/s11356-017-8528-4

Codex Alimentarius Commission. 2010. Guidelines on good laboratory practice in pesticide residue analysis (CAC/GL 40-1993). https://www.fao.org/input/download/standards/378/cxg_040e.pdf, 20 November 2025.

Eurachem. 2025. The Fitness for Purpose of Analytical Methods: A Laboratory Guide to Method Validation and Related Topics, 3rd ed. https://www.eurachem.org/images/stories/Guides/pdf/MV_guide_3rd_ed_V1_EN.pdf, 20 November 2025.

European Commission Directorate-General for Health and Food Safety. 2024. Guidance SANTE/11312/2021 v2-Analytical quality control and method validation procedures for pesticide residues analysis in food and feed SANTE 11312/2021 V2. https://food.ec.europa.eu/system/files/2023-11/pesticides_mrl_guidelines_wrkdoc_2021-11312.pdf, 20 November 2025.

Garba, J., Samsuri, A.W., Othman, R., Hamdani, M.S.A. 2018. Simplified method for derivatization of extractable glyphosate and aminomethylphosphonic acid and their determination by high performance liquid chromatography. Environ. Res. Technol. 1: 19–30.

Sun, L., Kong, D., Gu, W., Guo, X., Tao, W., Shan, Z., Wang, Y., Wang, N. 2017. Determination of glyphosate in soil/sludge by high performance liquid chromatography. J. Chromatogr. A 1502: 8–13.

Turner, J.A. 2018. The Pesticide Manual, 18th ed. British Crop Production Council. United Kingdom.

United States Environmental Protection Agency. 2009. National Primary Drinking Water Regulations. https://ep.gov/sites/default/file/2016-06/documents/npwdr_complete_table.pdf, 27 April 2024.

Geographical origin discrimination of Thai Durian using multi-elemental profiles by ICP-MS

Saowaluck Thong-in[a], Kiadtisak Saenboonruang[a], Paiboon Reunpatthanaphong[a], Wanwisa Sudprasert[a], Harinate Mungpayaban[b], Rewadee Meesat[c], Ridthee Meesat[a,*]

[a]Department of Applied Radiation and Isotopes, Faculty of Science, Kasetsart University, Bangkok 10900, Thailand

[b]Nuclear Security and Safeguards Technical Support Section, Regulatory Technical Support Division, Office of Atoms for Peace, Bangkok 10900, Thailand

[c]Thailand Institute of Scientific and Technological Research (TISTR), Pathum Thani 12120, Thailand

*Corresponding author. E-mail address: ridthee.m@ku.th

Abstract

Geographical Indication (GI) authentication is essential for protecting the quality, reputation, and market value of Thai durian. This study evaluates the potential of multi-elemental composition as a chemical fingerprint for geographical origin discrimination. Durian samples were collected from five major production regions in Thailand—Uttaradit, Sisaket, Kanchanaburi, Chanthaburi, and Chumphon—along with samples of unknown origin. Elemental concentrations in seed, pulp, peel, and stalk tissues were determined using inductively coupled plasma mass spectrometry (ICP-MS). The analytical method showed excellent performance, with high linearity ($R^2 \geq 0.995$), low limits of quantification, and acceptable precision. Significant differences ($p < 0.05$) in elemental composition were observed among geographical origins and tissue types. Non-edible tissues, particularly peel and stalk, exhibited higher macro- and trace-element concentrations than edible tissues, highlighting their enhanced discriminatory potential. Linear Discriminant Analysis (LDA) using selected elements (Mg, K, Ca, Mn, Fe, and Zn) revealed clear clustering of samples from known regions, while samples of unknown origin showed elemental similarity to specific regional groups. Overall, multi-element profiling combined with exploratory chemometric analysis provides a practical approach for preliminary durian origin traceability and GI authentication.

Keywords: Chemometrics, Durian, Elemental Profiles, Geographical Indication (GI), ICP-MS

Introduction

Durian (*Durio zibethinus Murr*.) is one of the most economically important fruit crops in the ASEAN region, with Thailand recognized as the world's leading producer and exporter. Favorable tropical climatic conditions, together with diverse agro-ecological zones, contribute to high production volumes and consistent fruit quality. In 2022, the export value of fresh durian from Thailand exceeded 100 billion Thai Baht, driven primarily by rapidly increasing demand from the Chinese market (FAO, 2023; Ministry of Commerce, Thailand, 2023).

In recent years, however, competition from neighboring exporting countries, particularly Malaysia and Vietnam, has intensified. Although Thai cultivars such as Monthong remain highly valued for their characteristic sensory attributes, competing countries offer distinct varietal profiles that appeal to specific international consumer preferences. As a result, the protection of product authenticity and geographical origin has become increasingly important for maintaining Thailand's competitiveness in the global durian market.

Several major durian cultivation zones in Thailand, including Chanthaburi, Rayong, Trat, Chumphon, and Surat Thani, are recognized for their unique geographical and agro-environmental characteristics and are protected under the Geographical Indication (GI) system. Nevertheless, the integrity of the Thai durian supply chain continues to be challenged by practices such as premature harvesting, mislabeling of geographical origin, and fraudulent rebranding of imported fruits as Thai produce. These issues undermine consumer confidence and highlight the urgent need for objective, science-based authentication tools capable of supporting GI enforcement and quality assurance (Luykx and van Ruth, 2008; Danezis et al., 2016).

Elemental and isotopic techniques have been widely applied for food origin traceability due to their robustness and close association with environmental and agricultural factors such as soil composition, fertilization practices, and climatic conditions. Previous studies have demonstrated the potential of multi-elemental fingerprints and stable isotope ratios for the geographical discrimination of durian and other tropical fruits (Camin et al., 2017; Zhou et al., 2021). However, most existing investigations have focused primarily on edible tissues or combined isotope–element approaches. Limited information is available regarding tissue-specific elemental distribution patterns and their applicability for practical GI screening, particularly for the assessment of unknown samples within the Thai durian production context. In contrast to most previous studies focusing on edible tissues, this work emphasizes non-edible durian tissues, particularly peel and stalk, as informative matrices for geographical discrimination. This approach is further justified by practical considerations in the Thai durian market, where GI fruits are traded as whole units, making non-destructive sampling essential for preserving commercial value.

Therefore, the objective of this study was to characterize the multi-elemental composition of different durian tissues, including seed, pulp, peel, and stalk, collected from major cultivation regions in Thailand using inductively coupled plasma mass spectrometry (ICP-MS). Statistical differences among geographical regions and tissue types were evaluated, and the feasibility of elemental fingerprints combined with chemometric analysis for GI authentication and unknown sample assessment was systematically investigated.

Materials and Methods

Sample collection and preparation

Fresh durian samples were collected from five major durian-producing regions of Thailand representing different geographical zones: Uttaradit (Northern), Sisaket (Northeastern), Kanchanaburi (Western), Chanthaburi (Eastern), and Chumphon (Southern). All samples were collected within the same harvest season to minimize the influence of seasonal variability.

Upon arrival at the laboratory, each fruit was manually separated into four distinct tissues: seed, pulp, peel, and stalk. In addition, durian samples of undisclosed geographical origin (hereafter referred to as "unknown samples") were included to evaluate the discriminatory performance and practical applicability of the proposed elemental fingerprinting approach. The morphological characteristics of the durian tissues analyzed in this study are illustrated in Fig. 1.

All tissue samples were thoroughly rinsed with deionized water to remove adhering soil particles and surface contaminants. The samples were then oven-dried at 60 °C until constant weight to ensure complete moisture removal while minimizing thermal degradation. Dried samples were finely ground using a laboratory mill and sieved through an 80 μm mesh to obtain homogeneous powders prior to chemical digestion and elemental analysis. Similar sample preparation procedures have been widely employed in elemental fingerprinting studies to improve analytical reproducibility and accuracy (Luykx & van Ruth, 2008; Danezis et al., 2016).

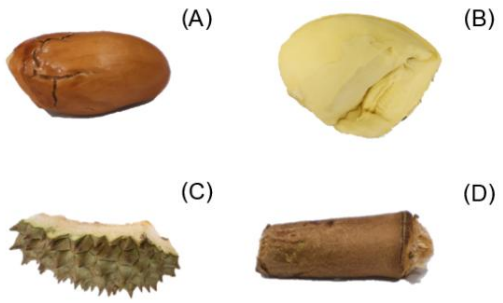


Fig. 1 Morphological parts of durian used for multi-element analysis: (A) seed, (B) pulp, (C) peel, and (D) stalk

Instrumentation

Multi-element analysis was carried out using an Agilent 7700x inductively coupled plasma mass spectrometer (ICP-MS; Agilent Technologies, USA) operated in high matrix introduction (HMI) mode. The instrument was optimized for the determination of macro- and trace elements, including Na (23), Mg (24), Al (27), K (39), Ca (43), Cr (52), Mn (55), Fe (56), Co (59), Ni (60), Cu (63), Zn (66), As (75), Rb (85), Sr (88), Cd (111), Ba (137), and Pb (208).

Calibration was performed using Multi-Element Standard 2A with external calibration curves constructed prior to analysis. The radio frequency (RF) power was set to 1550 W, with a carrier gas flow rate

of 1.05 L min^{-1}. Sample introduction was achieved using a nebulizer pump speed of 0.10 rps. Each sample was analyzed in triplicate to ensure analytical precision, with a stabilization time of 10 s prior to data acquisition.

Sample digestion and quality control

Approximately 0.1000 g of each homogenized and dried sample was accurately weighed into Teflon digestion vessels. Subsequently, 3.0 mL of concentrated nitric acid (HNO_3, 65%, analytical grade) was added, and the mixture was allowed to pre-react for 30 min at room temperature to reduce excessive foaming during heating. The samples were then heated on a hot plate at 60 °C until near dryness, ensuring complete decomposition of the organic matrix. After cooling to ambient temperature, the digests were quantitatively transferred and diluted to a final volume of 10.0 mL with 2% (v/v) HNO_3 prior to elemental analysis by inductively coupled plasma mass spectrometry (ICP-MS). A schematic overview of the sample digestion and analytical workflow is presented in Fig. 2.

Procedural blanks were included in each digestion batch to monitor potential contamination arising from reagents, vessels, or laboratory handling. Due to the absence of matrix-matched certified reference materials (CRMs) for durian tissues, method performance was evaluated using alternative quality control parameters, including calibration linearity, limits of quantification (LOQs), analytical precision, and consistency of measured elemental concentrations with ranges previously reported for durian and related tropical fruit matrices. This approach has been widely adopted in elemental fingerprinting studies where suitable CRMs are unavailable (Luykx and van Ruth, 2008; Danezis et al., 2016; Zhou et al., 2021). While the absence of matrix-matched CRMs may influence absolute accuracy, this limitation does not affect the comparative discrimination objective of the study, which relies on relative differences in elemental profiles among geographical origins.

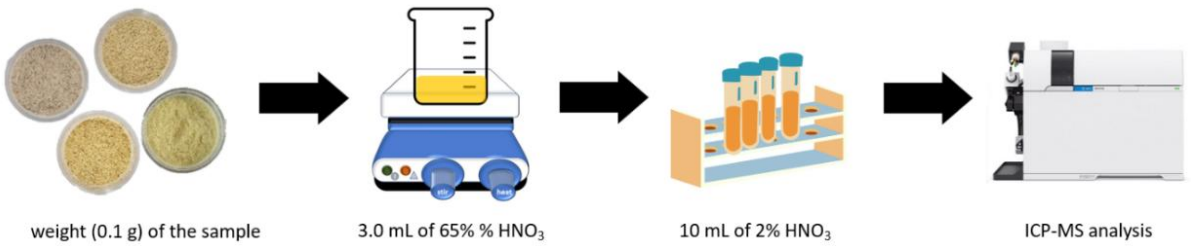


Fig. 2 Schematic diagram of sample preparation and ICP-MS analysis

Statistical and chemometric analysis

Statistical analyses were performed to evaluate differences in elemental composition among geographical origins and durian tissue types. Two-way analysis of variance (ANOVA) was applied to assess the main effects of geographical origin and tissue type, as well as their interaction (Montgomery, 2017). When

statistically significant effects were observed, mean comparisons were conducted using the least significant difference (LSD) post hoc test. A significant level of $p < 0.05$ was adopted for all statistical tests.

Chemometric analysis was conducted using Linear Discriminant Analysis (LDA) to explore the geographical discrimination potential of elemental fingerprints (Berrueta et al., 2007; Brereton, 2015). LDA was performed separately for each durian tissue (seed, pulp, peel, and stalk) in order to evaluate tissue-specific discrimination performance. Prior to analysis, elemental concentration data were standardized (z-score normalization) to minimize the influence of scale differences among variables and to ensure equal weighting of all elements in the multivariate models. The first two discriminant functions explained 53.3% and 30.4% of the total variance, respectively, accounting for more than 80% of the explained variance and facilitating clear visualization of geographical clustering patterns.

In this study, LDA was employed as an exploratory chemometric tool to visualize geographical clustering patterns and to assess the relative discriminative capability of different durian tissues. The analysis was not intended to establish a fully validated predictive classification model; rather, it aimed to provide a preliminary assessment of the suitability of tissue-specific elemental fingerprints for geographical indication (GI) authentication and the evaluation of samples of unknown origin (Brereton, 2015; Berrueta et al., 2007).

Results and Discussion

Analytical performance and method validation

The analytical performance of the ICP-MS method was evaluated in terms of linearity, sensitivity, and precision to ensure its suitability for multi-element determination in durian tissues. Calibration curves were constructed using seven concentration levels of multi-element standard solutions. All investigated elements exhibited excellent linearity over the tested concentration ranges, with correlation coefficients (R^2) between 0.9954 and 0.9999, indicating a strong linear relationship between signal intensity and analyte concentration.

Method sensitivity was assessed through the limits of quantification (LOQs), calculated as ten times the standard deviation of the procedural blank signals divided by the slope of the corresponding calibration curves. The obtained LOQ values ranged from 0.03 to 0.27 μg L^{-1} (Table 1), demonstrating high analytical sensitivity for both macro-elements (e.g., Na, K, Ca, and Mg) and trace elements (e.g., Cr, Mn, Cd, and Pb). These LOQ levels are sufficiently low for the accurate determination of elemental concentrations typically encountered in fruit matrices.

Analytical precision was evaluated based on replicate measurements and expressed as relative standard deviation (%RSD). The %RSD values ranged from 0.2% to 6.3%, reflecting good repeatability of the method and compliance with commonly accepted performance criteria for ICP-MS analysis of food samples (AOAC, 2016; Eurachem, 2014). Overall, the obtained validation parameters confirm that the proposed analytical protocol provides reliable and reproducible multi-element data suitable for subsequent statistical and chemometric analyses.

Table 1 Analytical performance for determination of Multi-Element Standard 2A

Element	R^2	LOQ ($\mu g\ L^{-1}$)	% RSD
Na	0.9992	0.16	1.5
Mg	0.9996	0.27	3.9
Al	0.9998	0.06	0.7
K	0.9994	0.20	1.2
Ca	0.9954	0.25	3.9
Cr	0.9998	0.03	0.4
Mn	0.9999	0.06	0.2
Fe	0.9993	0.11	4.9
Co	0.9997	0.05	3.9
Ni	0.9999	0.18	2.8
Cu	0.9998	0.07	1.6
Zn	0.9990	0.19	1.6
As	0.9999	0.18	2.3
Rb	0.9998	0.14	6.3
Sr	0.9997	0.05	4.0
Cd	0.9996	0.08	1.6
Ba	0.9995	0.20	5.0
Pb	0.9994	0.09	4.1

Multi-Element composition of durian samples

The multi-elemental composition of durian samples collected from five Thai geographical origins, together with samples of unknown origin, is summarized in Table 2. Statistically significant differences in elemental concentrations were observed among both geographical origins and tissue types ($p < 0.05$), as revealed by two-way analysis of variance (ANOVA) followed by the least significant difference (LSD) post hoc test. In this study, the LSD test was intentionally employed to enhance sensitivity for detecting potential regional differences, as the primary objective was to identify discriminative elemental markers for geographical indication (GI) purposes rather than to perform conservative confirmatory comparisons.

Macro-elements such as Mg, K, and Ca exhibited pronounced geographical variability across the investigated regions. These variations likely reflect differences in soil geochemistry, fertilization practices, and local agro-environmental conditions characteristic of each production area. Similar regional dependencies of macro-element composition have been reported for other fruit crops and have been widely exploited for geographical origin discrimination (Luykx and van Ruth, 2008; Camin et al., 2017).

Across all geographical origins, a consistent tissue-dependent distribution pattern was observed. Peel and stalk tissues generally contained significantly higher concentrations of both macro- and trace elements compared with pulp and seed tissues. This enrichment pattern suggests that non-edible tissues act as effective sinks for mineral accumulation, likely due to their structural and physiological roles in nutrient transport and storage. As a result, peel and stalk tissues provide enhanced elemental contrast among regions,

thereby increasing their suitability for geographical discrimination and GI authentication. Similar findings have been reported in previous elemental fingerprinting studies of fruits, where non-edible tissues demonstrated superior discriminatory power compared with edible portions (Danezis et al., 2016; Zhou et al., 2021).

The elemental composition of the unknown sample (UNK1) generally fell within the concentration ranges observed for specific geographical origins and tissue types, indicating the potential applicability of tissue-specific elemental fingerprints for the preliminary assessment of samples of unknown provenance. This observation supports the feasibility of combining multi-element analysis with chemometric techniques for practical GI screening and origin verification of Thai durian. It should be emphasized that no definitive geographical assignment is claimed for unknown samples; the observed clustering reflects elemental similarity rather than confirmed origin.

Table 2 Multi-element composition of durian samples collected from five Thai origins and an unknown sample

Element	Tissue	Location					
		UTT	SSK	KRI	CTI	CPN	UNK1
Mg [g kg^{-1}]	seed	1.52±0.03^{b}	2.34±0.04^{f}	2.20±0.04^{e}	1.70±0.04^{d}	1.20±0.02^{a}	1.20±0.02^{a}
	pulp	1.05±0.01^{k}	0.53±0.00^{d}	0.57±0.00^{f}	0.68±0.00^{j}	0.34±0.00^{a}	0.34±0.00^{a}
	peel	2.58±0.01^{k}	1.93±0.01^{f}	2.27±0.01^{g}	1.67±0.01^{d}	0.72±0.00^{a}	0.72±0.00^{a}
	stalk	5.40±0.03^{f}	5.28±0.04^{e}	7.46±0.04^{l}	4.91±0.04^{d}	1.26±0.01^{a}	1.26±0.00^{a}
K [g kg^{-1}]	seed	19.40±0.32^{e}	22.33±0.38^{g}	21.38±0.51^{f}	16.43±0.40^{b}	17.00±0.28^{c}	16.97±0.29^{c}
	pulp	18.74±0.06^{i}	15.56±0.10^{c}	18.17±0.10^{g}	18.01±0.12^{f}	13.29±0.08^{b}	13.29±0.11^{b}
	peel	23.51±0.15^{f}	21.10±0.06^{d}	27.89±0.15^{j}	18.47±0.12^{b}	15.33±0.08^{a}	15.36±0.12^{a}
	stalk	27.33±0.13^{d}	31.65±0.23^{f}	59.23±0.36^{i}	25.65±0.16^{c}	24.29±0.12^{b}	24.24±0.24^{b}
Ca [g kg^{-1}]	seed	0.59±0.01^{a}	1.50±0.03^{f}	1.23±0.02^{d}	1.10±0.02^{c}	1.02±0.02^{b}	1.02±0.01^{b}
	pulp	0.05±0.00^{a}	0.93±0.01^{h}	0.87±0.00^{g}	0.77±0.01^{c}	0.93±0.01^{i}	0.93±0.01^{h}
	peel	0.78±0.01^{a}	1.61±0.01^{g}	1.81±0.01^{j}	1.73±0.01^{h}	1.16±0.01^{b}	1.16±0.00^{b}
	stalk	2.47±0.01^{d}	0.92±0.01^{b}	5.21±0.03^{j}	4.51±0.02^{i}	2.72±0.01^{e}	2.71±0.00^{e}
Mn [mg kg^{-1}]	seed	21.38±0.34^{j}	15.84±0.27^{h}	3.71±0.08^{a}	14.13±0.28^{g}	4.90±0.08^{b}	4.91±0.11^{b}
	pulp	5.32±0.03^{h}	3.99±0.03^{e}	2.93±0.02^{b}	6.80±0.05^{k}	4.12±0.02^{f}	4.12±0.01^{f}
	peel	15.52±0.10^{j}	24.23±0.17^{k}	0.91±0.01^{a}	8.73±0.06^{f}	1.36±0.01^{b}	1.36±0.01^{b}
	stalk	29.39±0.12^{k}	38.81±0.24^{l}	1.42±0.01^{a}	15.23±0.08^{h}	2.02±0.01^{b}	2.02±0.01^{b}
Fe [mg kg^{-1}]	seed	24.39±0.38^{f}	16.08±0.29^{a}	21.07±0.45^{d}	17.85±0.33^{b}	20.65±0.29^{d}	20.71±0.41^{d}
	pulp	8.27±0.03^{a}	10.80±0.08^{b}	19.98±0.12^{k}	11.20±0.04^{c}	12.85±0.07^{g}	12.86±0.08^{g}
	peel	26.73±0.15^{l}	14.71±0.10^{c}	13.85±0.08^{b}	15.75±0.09^{e}	19.57±0.11^{i}	19.52±0.04^{i}
	stalk	17.94±0.10^{c}	15.62±0.08^{a}	17.21±0.10^{b}	19.02±0.16^{d}	22.73±0.11^{f}	22.63±0.12^{f}
Zn [mg kg^{-1}]	seed	8.54±0.26^{c}	6.54±0.14^{b}	8.51±0.15^{c}	10.62±0.23^{e}	19.20±0.24^{g}	19.16±0.20^{g}
	pulp	9.43±0.06^{e}	13.97±0.10^{h}	29.44±0.19^{j}	4.76±0.04^{b}	8.99±0.05d	8.98±0.07^{d}
	peel	21.47±0.12^{j}	10.75±0.07^{g}	8.24±0.05^{f}	5.34±0.03^{c}	26.28±0.13^{k}	26.38±0.09^{k}
	stalk	8.91±0.04^{c}	4.78±0.05^{a}	9.07±0.05^{d}	10.79±0.12^{e}	14.81±0.10^{h}	14.84±0.13^{h}

Note: *Different superscript letters within the same row indicate statistically significant differences among geographical origins ($p < 0.05$), as determined by two-way ANOVA followed by the LSD test.

Units: Mg, K, and Ca are reported in g kg^{-1}; all other elements are reported in mg kg^{-1}.

Abbreviations: UTT, Uttaradit; SSK, Sisaket; KRI, Kanchanaburi; CTI, Chanthaburi; CPN, Chumphon; UNK 1, unknown sample. Key elements relevant to geographical discrimination are highlighted in the discussion.

LDA modeling for origin traceability

Linear Discriminant Analysis (LDA) was applied to evaluate the exploratory geographical discrimination of durian samples from different production regions based on selected elemental compositions (Mg, K, Ca, Mn, Fe, and Zn). These elements were selected according to their statistical significance in ANOVA, their contribution to inter-regional variance, and their known relevance to soil–plant interactions and mineral uptake processes. Prior to analysis, elemental concentration data from all tissues were combined and standardized (z-score normalization) to ensure equal weighting of variables.

The LDA score plot (Fig. 3) revealed a discernible separation among durian samples from known production regions, indicating that the selected elemental variables captured meaningful geographical variation. The first two discriminant functions accounted for the majority of the explained variance, reflecting the combined influence of macro-elements (Mg, K, and Ca) and trace elements (Mn, Fe, and Zn) on regional differentiation. These results are consistent with previous studies demonstrating that multi-element fingerprints associated with soil and agro-environmental factors can provide effective geographical discrimination for agricultural products.

Partial overlap among clusters was observed, which likely reflects shared environmental conditions, similar soil characteristics, and comparable agricultural practices across certain regions. Such overlap is commonly reported in food origin studies and underscores the inherent complexity of geographical discrimination in agriculturally connected regions. Samples of unknown geographical origin were projected into the same discriminant space and were located in proximity to the Chanthaburi and Chumphon clusters. This spatial association suggests similarities in elemental composition rather than definitive geographical assignment, highlighting the exploratory nature of the present LDA approach.

In this study, LDA was intentionally employed as an exploratory chemometric tool to visualize geographical patterns and to assess the feasibility of elemental fingerprints for origin traceability. The analysis was not intended to establish a fully validated classification or predictive model, but rather to provide a preliminary assessment supporting the potential application of multi-element profiling combined with chemometric analysis for durian geographical indication (GI) screening.

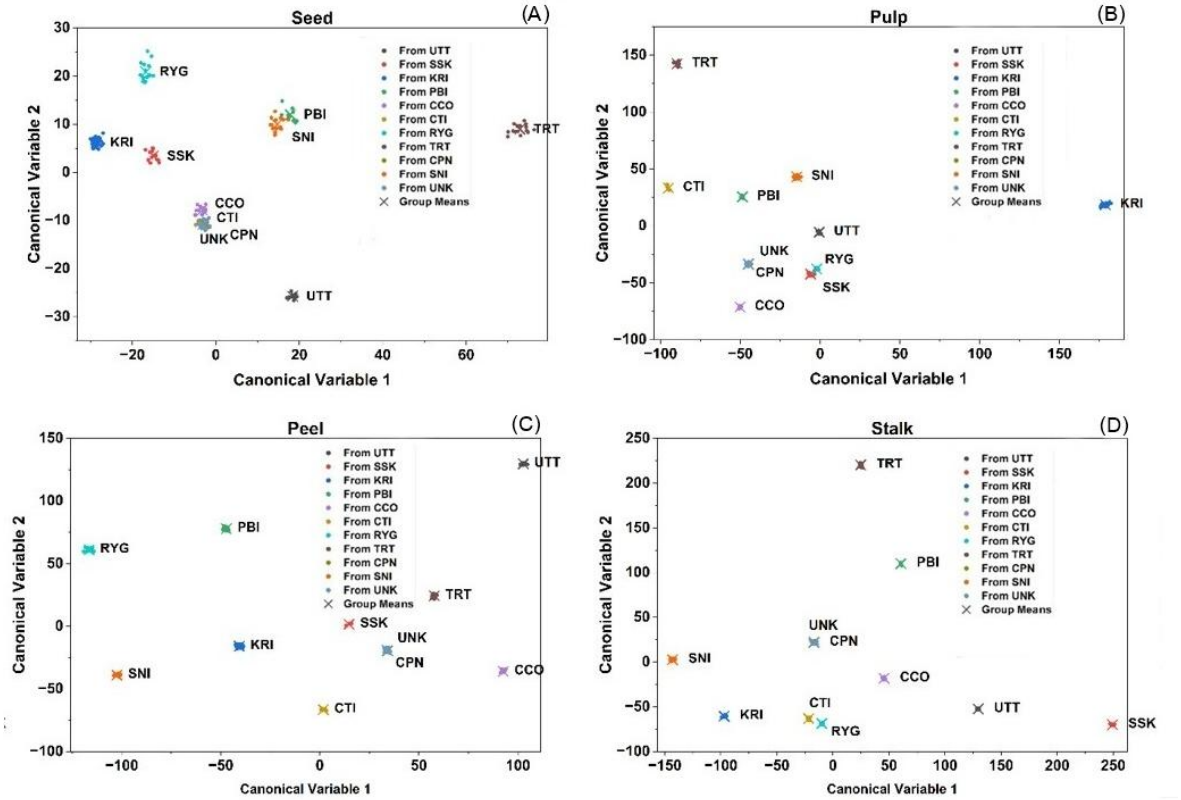


Fig. 3 LDA score plots of durian samples based on selected elemental compositions (Mg, K, Ca, Mn,Fe, and Zn) for different tissues: (A) seed, (B) pulp, (C) peel, and (D) stalk. LDA score plots based on z-score standardized elemental concentrations.

Discussion

The validated ICP-MS method provided reliable and reproducible multi-elemental data suitable for subsequent multivariate chemometric analysis. The observed variations in elemental composition among durian samples were influenced by both geographical origin and tissue type, reflecting the combined effects of soil geochemistry, agro-environmental conditions, agricultural practices, and plant physiological processes. In particular, macro-elements such as Mg, K, and Ca exhibited pronounced spatial variability among production regions, which can be attributed to differences in soil mineral composition, fertilization regimes, and regional growing conditions. These findings are consistent with previous studies demonstrating the strong linkage between elemental fingerprints and environmental factors governing plant mineral uptake (Luykx and van Ruth, 2008; Camin et al., 2017).

A consistent tissue-dependent distribution pattern was observed across all regions, with peel and stalk tissues containing significantly higher concentrations of both macro- and trace elements compared with edible tissues (seed and pulp). This enrichment pattern supports the concept that non-edible tissues function as mineral accumulation sinks due to their structural roles and involvement in nutrient transport and storage. As a result, these tissues preserve stronger geographical signals and provide enhanced discriminatory potential. Similar tissue-dependent elemental enrichment has been reported in other tropical fruit and

agricultural product studies, underscoring the importance of tissue selection in origin traceability research (Danezis et al., 2016; Zhou et al., 2021).

Exploratory chemometric analysis using Linear Discriminant Analysis (LDA) further demonstrated that the selected elemental variables (Mg, K, Ca, Mn, Fe, and Zn) capture meaningful geographical variation among durian samples. The combined-tissue LDA approach provided an overall visualization of regional clustering, while tissue-specific LDA revealed differences in discrimination performance among seed, pulp, peel, and stalk matrices. Partial overlap among regional clusters was observed, reflecting shared environmental conditions, similar soil characteristics, and comparable agricultural practices across certain production areas. Such overlap is commonly reported in food origin studies and highlights the inherent complexity of geographical discrimination in interconnected agro-ecosystems (Brereton, 2015).

The projection of unknown samples within the discriminant space suggested elemental similarity to specific regional groups rather than definitive geographical assignment. This observation emphasizes the exploratory nature of the present chemometric approach and supports its application for preliminary screening and plausibility assessment rather than conclusive origin determination. Importantly, this framework aligns well with practical GI authentication needs, where rapid screening tools can assist regulatory bodies and industry stakeholders in identifying potentially mislabeled products for further investigation.

Overall, the findings of this study indicate that multi-element profiling combined with exploratory chemometric analysis provides a practical and scientifically sound approach for preliminary geographical origin screening and GI authentication of Thai durians. The results highlight the added value of non-edible tissues as informative matrices and support the use of both tissue-specific and combined-tissue strategies to enhance origin discrimination. Future studies incorporating larger sample sets, seasonal and inter-annual variability, and complementary analytical techniques such as stable isotope analysis or spectroscopic methods are recommended to further improve model robustness, discrimination power, and predictive capability.

Conflict of Interest

The authors declare that there are no conflicts of interest.

Acknowledgements

The author would like to gratefully acknowledge the financial support provided by the Kasetsart University Research and Development Institute (KURDI) under the research project code FF(KU-SRIU)14.67, as well as analytical support provided by the Nuclear Forensics Laboratory, Security and Safeguards Technical Support Section, Regulatory Technical Support Division, Office of Atoms for Peace. This support was essential for the successful completion of this research. In addition, the author gratefully acknowledges Associate Professor Dr. Orapin Chienthavorn for valuable guidance and constructive suggestions that contributed to the conceptual development of this study.

References

Berrueta, L.A., Alonso-Salces, R.M., Héberger, K. 2007. Supervised pattern recognition in food analysis. J. Chromatogr. A 1158: 196–214. doi.org/10.1016/j.chroma.2007.05.024

Brereton, R.G. 2015a. Chemometrics: Data analysis for the laboratory and chemical plant. John Wiley & Sons, Chichester, UK.

Brereton, R.G. 2015b. Chemometrics for pattern recognition. John Wiley & Sons, Chichester, UK.

Camin, F., Boner, M., Bontempo, L., Fauhl-Hassek, C., Kelly, S., Riedl, J., Rossmann, A. 2017. Stable isotope techniques for verifying the declared geographical origin of food. TrAC Trends Anal. Chem. 90: 75–89. doi.org/10.1016/j.trac.2017.02.009

Danezis, G.P., Tsagkaris, A.S., Camin, F., Brusic, V., Georgiou, C.A. 2016. Food authentication: Techniques, trends and emerging approaches. TrAC Trends Anal. Chem. 85: 123–132. doi.org/10.1016/j.trac.2016.02.026

Eurachem. 2014. The fitness for purpose of analytical methods: A laboratory guide to method validation and related topics. Eurachem, UK.

FAO. 2023. FAOSTAT statistical database. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, Italy.

Luykx, D.M.A.M., van Ruth, S.M. 2008. An overview of analytical methods for determining the geographical origin of food products. Food Chem. 107: 897–911. doi.org/10.1016/j.foodchem.2007.09.038

Ministry of Commerce, Thailand. 2023. Thailand export statistics for agricultural commodities. Ministry of Commerce, Bangkok, Thailand.

Zhou, X., Wu, H., Pan, J., Chen, H., Jin, B., Yan, Z., Xie, L., et al. 2021. Mineral element compositions of food products for geographical origin discrimination. J. Food Compos. Anal. 101: 103940. doi.org/10.1016/j.jfca.2021.103940

สาขาวิทยาศาสตร์สุขภาพ

(Subject: Health Sciences)

ภาคโปสเตอร์

(Poster Presentation)

Comparative analysis of sleep quality across skeletal class I and class II using the Pittsburgh Sleep Quality Index

Chanistha Sirichan[a,*], Narissaporn Chaiprakit[b], Siripatra Patchanee[a]

[a]Division of Orthodontics, Faculty of dentistry, Thammasat University, Pathum Thani 12121, Thailand

[b]Division of Oral and Maxillofacial Surgery, Faculty of dentistry, Thammasat University, Pathum Thani 12121, Thailand

*Corresponding author. E–mail address: chanistha.siri@gmail.com

Abstract

The study purpose is to evaluate the subjective sleep quality in patients with Class I and Class II skeletal patterns, including those with Class II subtypes. Fifty–nine participants were classified into Skeletal Class I (n = 30) and Class II (n = 29). Class II subjects were further divided into prognathic maxilla, retrognathic mandible, and combined subtypes. Cephalometric analysis measures the SNA, SNB, and ANB angles using the Dolphin Imaging software, and sleep quality was assessed with the Thai–Pittsburgh Sleep Quality Index (Thai–PSQI). No significant differences in total PSQI or its subcomponent scores between skeletal classes or among Class II subgroups (p > 0.05). Spearman's rank correlation analysis showed generally weak and nonsignificant associations between cephalometric variables and PSQI (r = –0.685–0.522, p > 0.05), except in the prognathic maxilla subgroup, which showed a moderate negative correlation between ANB and PSQI (r = –0.685, p < 0.05). These results suggest that skeletal pattern alone does not significantly influence subjective sleep quality. However, a forward maxillary position may be associated with better sleep quality, potentially due to its hypothesized positive effect on upper airway dimensions. Therefore, further research with larger samples and direct airway evaluations is necessary.

Keywords: Pittsburgh Sleep Quality Index, PSQI, Skeletal patterns, Skeletal relationships, Sleep quality

Introduction

Quality sleep plays a critical role in cognitive performance, emotional regulation, mental health, and overall cardiovascular, cerebrovascular, and metabolic functioning (Crivello et al., 2019). The most common tool for assessing sleep quality in both clinical and non-clinical populations is the Pittsburgh Sleep Quality Index (PSQI) (Manzar et al., 2018). It was created to distinguish between "good" and "poor" sleepers, provide a simplistic, user-friendly index for both participants and clinicians, and provide a standardized, valid, and reliable measure of sleep quality. In addition, the PSQI enables a rapid and clinically meaningful assessment of multiple sleep-related problems that may influence overall sleep quality (Buysse et al., 1989).

Cephalometric analyses often utilize skeletal relationships to characterize the positional differences between the maxilla and mandible (Hussels and Nanda, 1984). A skeletal sagittal discrepancy is commonly assessed using the ANB angle and the Wits appraisal, which divides the skeletal relationships into three categories: skeletal class I (Sk-I), class II (Sk-II), and class III (Sk-III) (Riedel, 1950; Jacobson, 1975; Oktay, 1991). The ANB angle is the difference between angles SNA and SNB (Oktay, 1991; Daskalogiannakis, 2000). The maxilla's anteroposterior position in relation to the cranial base can be evaluated using SNA, whereas the mandible's anteroposterior position in relation to the cranial base can be evaluated using SNB. As for the Wits appraisal (AO-BO), it uses the distance from the perpendicular lines from point A (the deepest midline point along the ANS-prosthion curvature) and point B (the deepest midline point on the bony curvature of the anterior mandible, between infradentale and pogonion) to the functional occlusal plane (Daskalogiannakis, 2000).

Orthodontists are especially interested in the airway since it is important for craniofacial development and can be used to diagnose and treat disorders, including sleep disorders and mouth breathing (Alswairki et al., 2022). Furthermore, recent research suggests that the mandible's and maxilla's anteroposterior position can influence upper airway dimensions and potentially contribute to sleep disturbances (Samman et al., 2003; Ucar and Uysal, 2011). Previous research found that Sk-III, Sk-I, and Sk-II had decreased posterior airway space and oropharyngeal volume in that order; the most constricted area was close to the base of the tongue (El and Palomo, 2013; Pornsuksiri et al., 2013); and Sk-I, Sk-III, and Sk-II had decreased nasal passage volume, in that order (El and Palomo, 2013).

In orthodontic practice, lateral cephalometric radiographs are routinely assessed to determine skeletal classification in every patient. This evaluation provides essential information about maxillomandibular relationships and craniofacial morphology. Therefore, examining whether skeletal classification affects sleep quality is clinically meaningful, as variations in skeletal patterns—particularly within skeletal Class II—may alter airway patency and potentially contribute to sleep-related problems.

This study is a preliminary investigation aiming to examine the association between skeletal classification (Class I, Class II, and Class II subtypes) and sleep quality, as assessed by the Pittsburgh Sleep Quality Index (PSQI), and to analyze the correlations between cephalometric measurements (SNA, SNB, and ANB) and PSQI scores. The findings are intended to generate hypotheses regarding the role of craniofacial morphology in sleep quality and to guide further research for potential clinical application.

Materials and Methods

A total of 59 participants were recruited from an orthodontic clinic. Thai orthodontic patients aged between 18 and 50 years who had verified growth completion based on cervical vertebrae maturation (CVM) status met the inclusion criteria. Individuals with obesity, a history of shift work, prior orthodontic treatment, chronic respiratory conditions, tonsillectomy/adenoidectomy, a diagnosis of obstructive sleep apnea, systemic diseases, craniofacial trauma, pathology in the study area, or mental/psychiatric disorders were excluded. Participants were categorized into Skeletal Class I (Sk-I; $n = 30$) and Skeletal Class II (Sk-II; $n = 29$). The Skeletal Class II group was further divided into three subtypes: prognathic maxilla (Sk-II Prog mx; $n = 10$), retrognathic mandible (Sk-II Retrog md; $n = 12$), and combined prognathic maxilla and retrognathic mandible (Sk-II combined; $n = 7$). All subjects were positioned with the Frankfort horizontal plane parallel to the floor, and lateral cephalometric radiographs were taken. This study has been reviewed and approved by the Human Research Ethics Committee of Thammasat University (Science), Thailand, based on the Declaration of Helsinki, the Belmont Report, CIOMS guidelines, and the international practice (ICH-GCP). Informed consent was obtained from all participants prior to data collection.

Analysis of the skeletal classification

Cephalometric analyses were performed using Dolphin Imaging 11.95.08.50 (Dolphin Imaging and Management Solution, Los Angeles, CA, USA). Participants were classified into Sk-I, Sk-II, and Sk-II subtypes based on the Thai normative ANB angle (2.8°±2.3°): Sk-I, 0.5°–5.1°; and Sk-II, >5.1°. The Thai normative values for SNA (84.6°±3.5°), where higher values indicate a prognathic maxilla, and SNB (81.8°±3.8°), where lower values indicate a retrognathic mandible, were also considered. Normal SN length (66.8±3.8 mm) and SN-FH angle (6.9°±3.1°) were verified. If either value deviated from the Thai norm, the Wits appraisal (AO–BO; -1.2±2.8 mm) was used for confirmation; values within the normal range were classified as Sk-I, and higher positive values as Sk-II (Sutthiprapaporn et al., 2020). Twenty percent of the total samples were randomly selected and re-measured two weeks after the initial assessment. The Intraclass Correlation Coefficient (ICC) was used to evaluate the reliability of the measurements, which ranged from 0.97 to 0.99 for all cephalometric measurements between the first and second assessments.

Sleep quality assessment

Sleep quality was assessed using the Thai-Pittsburgh Sleep Quality Index (Thai-PSQI). These nineteen questions are scored equally on a 0–3 scale for subjective sleep quality (SQ), sleep latency (SL), sleep duration (SD), habitual sleep efficiency (HSE), sleep disturbances (SDI), sleep medication use (SM), and daytime dysfunction (DD). The total of the seven subcomponent scores results in a global PSQI score ranging from 0–21. A total global PSQI score of 5 or less indicates good sleep quality, while a score greater than 5 indicates poor sleep quality. Higher global PSQI scores indicate poorer sleep (Buysse et al., 1989).

Statistical analysis

Descriptive statistics were used to report the means and standard deviations for each group. The Mann–Whitney U test and Kruskal–Wallis test were used to compare PSQI scores among the groups, with statistical significance set at 0.05. Correlations between SNA, SNB, ANB, and PSQI were analyzed using Spearman's rank correlation, with statistical significance set at 0.05.

Results and Discussion

Demographic characteristics

This study included 59 participants: 30 in the Sk-I group and 29 in the Sk-II group. There were no significant differences in sex, age, weight, height, or BMI between the Sk-I and Sk-II groups ($p > 0.05$ for all variables). Cephalometric comparison also showed no significant differences in SNA, SN length, and SN–FH angle. However, the Sk-II group demonstrated significantly higher ANB and AO–BO values ($p < 0.001$), consistent with typical Class II skeletal morphology (Table 1).

Table 1 Sample characteristics in the Sk-I, and Sk-II groups ($n = 59$)

Variable	Sk-I ($n = 30$) Mean±SD	Sk-II ($n = 29$) Mean±SD	Total ($n = 59$) Mean±SD	p value[c]
Male(%):Female(%)	8(26.67):22(73.33)	9(31.03):20(68.97)	17(28.81):42(71.19)	0.78[a]
Age (years)	23.00±4.43	24.79±7.44	23.88±6.11	0.66
Weight (kg)	54.47±10.53	59.07±11.72	56.73±11.28	0.10
Height (m)	1.64±0.08	1.64±0.07	1.64±0.08	0.79[b]
BMI (kg/m^2)	20.23±2.67	21.88±3.77	21.04±3.33	0.12
SNA (^{o})	84.01±2.71	85.31±3.15	84.65±2.98	0.10[b]
SNB (^{o})	80.63±2.73	78.99±3.39	79.83±3.15	0.05[b]
ANB (^{o})	3.37±0.94	6.39±0.91	4.85±1.78	*<0.001
SN (mm)	63.92±2.60	64.78±3.38	64.34±3.01	0.28[b]
SN-FH (^{o})	8.59±1.57	8.33±2.42	8.46±2.02	0.64
AO-BO (mm)	-0.12±2.57	3.03±2.41	1.43±2.94	*<0.001

[a] Chi-square test: data are presented as frequencies (percentages), [b] independent T-test and [c] Mann–Whitney U test were performed for intergroup differences (*$p < 0.05$).

Post-hoc pairwise comparisons among Sk-II subtypes revealed that the SNA angle in the Sk-II Prog mx subgroup was significantly different from both the Sk-II Retrog md and combined subgroups ($p < 0.001$ for both). Conversely, the SNB angle in the Sk-II Retrog md subgroup differed significantly from both the Sk-II Prog mx and combined subgroups ($p < 0.001$ for both), indicating opposing maxillary and mandibular sagittal

positions. There was a significant difference in ANB between the Sk-II Retrog md subgroup and the Sk-II combined subgroup (p = 0.02) and in AO–BO values between the Sk-II Prog mx and Sk-II Retrog md subgroups (p = 0.02) as well as between the Sk-II Retrog md subgroup and the Sk-II combined subgroup (p = 0.01). Notably, no significant differences were found between the Sk-II Prog mx and Sk-II combined subgroups in any cephalometric variable (Table 2). These findings highlight that mandibular retrusion is the major contributor to the sagittal discrepancy in Class II malocclusion in this study. The elevated ANB and AO–BO values observed in the Sk-II group show that the anatomical distinction between maxillary protrusion and mandibular retrusion contributes to Class II malocclusion (Bishara, 2006).

Table 2 Sample characteristics in the Sk-II subgroups (n = 29)

Variable	Sk-II Prog mx (n = 10) Mean±SD	Sk-II Retrog md (n = 12) Mean±SD	Sk-II combined (n = 7) Mean±SD	Total (n = 29) Mean±SD	p value[c]
Male(%):Female(%)	1(10.00):9(90.00)	6(50.00):6(50.00)	2(28.57):5(71.43)	9(31.03):20(68.97)	0.128[a]
Age (years)	22.40±3.98	28.33±9.66	22.14±4.56	24.79±7.44	0.13
Weight (kg)	56.85±10.27	60.79±11.26	59.29±15.37	59.07±11.72	0.56
Height (m)	1.63±0.07	1.66±0.71	1.63±0.07	1.64±0.71	0.44
BMI (kg/m^2)	21.44±3.64	22.04±3.47	22.22±4.88	21.88±3.77	0.84
SNA (°)	88.54±1.73[d, e]	82.65±2.28[d]	85.24±0.99[e]	85.31±3.15	*<0.001[b]
SNB (°)	82.25±1.60[d]	75.74±2.23[d, e]	79.91±0.91[e]	78.99±3.39	*<0.001
ANB (°)	6.26±0.57	6.93±1.06[d]	5.64±0.36[d]	6.39±0.91	*0.01
SN (mm)	64.72±2.30	65.53±4.51	63.59±2.34	64.78±3.38	0.50[b]
SN-FH (°)	7.36±1.97	9.18±2.87	8.26±1.83	8.33±2.42	0.22[b]
AO-BO (mm)	2.20±1.79[d]	4.57±2.59[d, e]	1.60±1.34[e]	3.03±2.41	*0.01[b]

[a] Chi-square test: data are presented as frequencies (percentages). [b] One-way ANOVA and [c] A Kruskal-Wallis test were performed for intergroup differences in the Sk-II subgroups (*p < 0.05). [d, e] Indicate significant differences between subgroups according to post-hoc pairwise comparisons.

A comparison and correlation of PSQI scores and sagittal skeletal patterns

The sleep quality was assessed using the PSQI across skeletal classes and Class II subtypes. A mean PSQI score greater than 5 typically indicates poor sleep quality. Although the Sk-II group showed the highest total PSQI score, followed by the Sk-I group, no statistically significant differences were observed between them in total PSQI scores (Sk-I: 6.16±2.35; Sk-II: 6.24±3.03; p = 0.64). Likewise, no significant differences were found in any PSQI subcomponents, including sleep duration (DURAT), sleep disturbances (DISTB), sleep latency (LATEN), daytime dysfunction (DAYDYS), habitual sleep efficiency (HSE), sleep quality (SLPQUAL), and sleep

medication use (MEDS) (p = 0.13–0.88) (Table 3). Similarly, within the Sk-II subgroups (the Sk-II Prog mx, Sk-II Retrog md, and Sk-II combined subgroups) demonstrated no significant differences in total PSQI scores (5.90±2.23, 6.58±4.10, and 6.14±2.04, respectively; p = 0.89) or in subcomponent scores (p = 0.23–0.94) (Table 4). These findings indicate that overall sleep quality is comparable across skeletal classes and Class II subtypes, suggesting that skeletal patterns are not associated with significant differences in subjective sleep quality in this study.

Table 3 A comparison of PSQI scores and subcomponent scores in the Sk-I and Sk-II groups

Variable	Sk-I (n = 30)			Sk-II (n = 29)			Total	p value[a]
	Mean±SD	Median (IQR)	Mean rank	Mean±SD	Median (IQR)	Mean rank	(n = 59) Mean±SD	
1 DURAT	0.70±0.65	1(1)	30.65	0.76±0.99	0(1.5)	29.33	0.72±0.83	0.75
2 DISTB	1.13±0.43	1(0)	28.55	1.24±0.44	1(0.5)	31.50	1.19±0.43	0.36
3 LATEN	1.20±0.71	1(1)	29.70	1.24±0.83	1(1)	30.31	1.22±0.77	0.88
4 DAYDYS	1.36±0.85	1(1)	31.52	1.20±0.82	1(1)	28.43	1.29±0.83	0.46
5 HSE	0.23±0.63	0(0)	27.45	0.41±0.63	0(1)	32.64	0.32±0.63	0.13
6 SLPQUAL	1.36±0.61	1(1)	32.00	1.24±0.74	1(1)	27.93	1.30±0.68	0.31
7 MEDS	0.17±0.59	0(0)	30.43	0.14±0.58	0(0)	29.55	0.15±0.58	0.68
Total PSQI scores	6.16±2.35	6(2.25)	31.02	6.24±3.03	5(3.5)	28.95	6.20±2.68	0.64

[a] The Mann-Whitney U test; (p < 0.05). Abbreviations: DURAT, sleep duration; DISTB, sleep disturbances; LATEN, sleep latency; DAYDYS, daytime dysfunction; HSE, habitual sleep efficiency; SLPQUAL, subjective sleep quality; MEDS, sleep medication use.

Despite the lack of significant group differences, subtype-specific correlations between craniofacial angles and PSQI were observed. Specifically, the Sk-II Prog mx subgroup demonstrated a moderately negative correlation between ANB and PSQI (r = –0.685, p < 0.05) (Table 5), indicating that a more forward position of the maxilla relative to the normal position of the mandible may improve sleep quality. This finding may support the hypothesis that an anteriorly positioned maxilla plays a role in enlarging pharyngeal airway dimensions (Lee et al., 2011; Soni et al., 2015), which may subsequently improve sleep quality. Reduced airway patency is generally found in skeletal class II morphology (Ceylan and Oktay, 1995; Nanda et al., 2012; Claudino et al., 2013; Pornsuksiri et al., 2013), especially in the retrognathic mandible subtype, where the oropharyngeal space is reduced by the posterior positioning of the tongue and hyoid bone (Muto et al., 2008; El and Palomo, 2011). However, no significant correlations were observed in the Sk-II Retrog md and Sk-II combined subgroups.

Similarly, overall analyses of all Class II subjects (r = –0.210, p = 0.274) and Class I subjects (r = 0.254, p = 0.175) showed no significant associations (Table 5), suggesting that subtype-specific effects can be masked when skeletal groups are analyzed in total. Nevertheless, due to the limited sample size in this subgroup, this correlation should be interpreted with caution.

Table 4 A comparison of PSQI scores and subcomponent scores in the Sk-II subgroups

Variable	Sk-II Prog mx (n = 10)			Sk-II Retrog md (n = 12)			Sk-II combined (n = 7)			Total (n = 29)	Kruskal-Wallis H	p value [a]
	Mean ±SD	Median (IQR)	Mean rank	Mean ±SD	Median (IQR)	Mean rank	Mean ±SD	Median (IQR)	Mean rank	Mean±SD		
1 DURAT	0.70± 1.06	0(1.25)	14.35	0.92± 1.01	1(1.75)	16.58	0.57± 0.98	0(2)	13.21	0.79±0.99	0.95	0.62
2 DISTB	1.30± 0.48	1(1)	15.85	1.33± 0.49	1(1)	16.33	1.00± 0.00	1(0)	11.50	1.24±0.44	2.87	0.24
3 LATEN	1.30± 0.67	1(0.25)	15.20	1.08± 1.08	1(2)	13.54	1.43± 0.53	1(1)	17.21	1.24±0.83	0.96	0.62
4 DAYDYS	1.10± 0.88	1(0.5)	13.65	1.25± 0.97	1(1.75)	15.46	1.29± 0.49	1(1)	16.14	1.21±0.82	0.49	0.78
5 HSE	0.40± 0.70	0(1)	14.55	0.42± 0.67	0(1)	14.92	0.43± 0.53	0(1)	15.79	0.41±0.63	0.13	0.94
6 SLPQUAL	1.10± 0.74	1(1.25)	14.00	1.25± 0.75	1(0.75)	14.96	1.43± 0.79	1(1)	16.50	1.24±0.74	0.47	0.79
7 MEDS	0.00± 0.00	0(0)	14.00	0.33± 0.89	0(0)	16.42	0.00± 0.00	0(0)	14.00	0.14±0.58	2.94	0.23
Total PSQI scores	5.90± 2.23	5.5(2.5)	15.50	6.58± 4.10	5(5)	14.13	6.14± 2.04	5(4)	15.79	6.24±3.03	0.23	0.89

[a] The Kruskal-Wallis test; (p < 0.05). Abbreviations as defined in Table 3.

Table 5 Spearman's rank correlation of SNA, SNB, and ANB with Pittsburgh Sleep Quality Index (PSQI)

Group and subgroup	Variable pair	rho	*p* value
Sk-I group (*n* = 30)	SNA – PSQI	–0.100	0.599
	SNB – PSQI	–0.179	0.345
	ANB – PSQI	0.254	0.175
Sk-II group (*n* = 29)	SNA – PSQI	0.173	0.369
	SNB – PSQI	0.218	0.255
	ANB – PSQI	–0.210	0.274
Sk-II Prog mx subgroup (*n* = 10)	SNA – PSQI	–0.197	0.586
	SNB – PSQI	–0.043	0.905
	ANB – PSQI	–0.685	*0.029
Sk-II Retrog md subgroup (*n* = 12)	SNA – PSQI	0.501	0.097
	SNB – PSQI	0.522	0.082
	ANB – PSQI	0.147	0.649
Sk-II combined subgroup (*n* = 7)	SNA – PSQI	–0.206	0.658
	SNB – PSQI	0.281	0.542
	ANB – PSQI	0.275	0.551

* Correlation is significant at $p < 0.05$ (2-tailed).

Conclusion

This study indicates that skeletal pattern alone does not significantly influence subjective sleep quality, although a more anterior maxillary position was associated with better sleep outcomes. We hypothesize that this improvement may be attributed to a more favorable upper airway configuration, though this remains a preliminary observation. Given that skeletal morphology does not consistently correlate with patients' perceived sleep quality, orthodontists should not rely solely on cephalometric measurements (SNA, SNB, ANB) for assessment. Therefore, incorporating sleep questionnaires into pre-treatment screening is recommended to effectively identify patients requiring further airway evaluation or a multidisciplinary approach. Since this study was exploratory, future research with larger sample sizes and direct airway assessments is necessary to validate these findings and refine clinical decision-making in orthodontic and orthognathic treatments.

Conflict of Interest

This research did not receive any specific grant from funding agencies in the public, commercial, or not-for-profit sectors.

Acknowledgements

The data collection process was greatly aided by Thammasat University Hospital and the Department of Orthodontics within the Faculty of Dentistry at Thammasat University.

References

Alswairki, H.J., Alam, M.K., Rahman, S.A., Alsuwailem, R., Alanazi, S.H. 2022. Upper airway changes in diverse orthodontic looms: A systematic review and meta-analysis. Appl. Sci. 12: 916. doi.org/10.3390/app12020916

Bishara, S.E. 2006. Class II malocclusions: Diagnostic and clinical considerations with and without treatment. Semin. Orthod. 12: 11–24. doi.org/10.1053/j.sodo.2005.10.005

Buysse, D.J., Reynolds, C.F., Monk, T.H., Berman, S.R., Kupfer, D.J. 1989. The Pittsburgh sleep quality index: A new instrument for psychiatric practice and research. Psychiatry Res. 28: 193–213. doi.org/10.1016/0165-1781(89)90047-4

Ceylan, I., Oktay, H. 1995. A study on the pharyngeal size in different skeletal patterns. Am. J. Orthod. Dentofacial Orthop. 108: 69–75. doi.org/10.1016/S0889-5406(95)70068-4

Claudino, L.V., Mattos, C.T., Ruellas, A.C., Sant' Anna, E.F. 2013. Pharyngeal airway characterization in adolescents related to facial skeletal pattern: A preliminary study. Am. J. Orthod. Dentofacial Orthop. 143: 799–809. doi.org/10.1016/j.ajodo.2013.01.015

Crivello, A., Barsocchi, P., Girolami, M., Palumbo, F. 2019. The meaning of sleep quality: A survey of available technologies. IEEE Access 7: 167374–167390. doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2953835

Daskalogiannakis, J. 2000. Glossary of orthodontic terms. Quintessence Books. Michigan, USA.

El, H., Palomo, J.M. 2011. Airway volume for different dentofacial skeletal patterns. Am. J. Orthod. Dentofacial Orthop. 139: e511–e521. doi.org/10.1016/j.ajodo.2011.02.015

El, H., Palomo, J.M. 2013. An airway study of different maxillary and mandibular sagittal positions. Eur. J. Orthod. 35: 262–270. doi.org/10.1093/ejo/cjs008

Hussels, W., Nanda, R.S. 1984. Analysis of factors affecting angle ANB. Am. J. Orthod. 85: 411–423. doi.org/10.1016/0002-9416(84)90162-3

Jacobson, A. 1975. The "Wits" appraisal of jaw disharmony. Am. J. Orthod. 67: 125–138. doi.org/10.1016/0002-9416(75)90065-2

Lee, J.W., Park, K.H., Kim, S.H., Park, Y.G., Kim, S.J. 2011. Correlation between skeletal changes by maxillary protraction and upper airway dimensions. Angle Orthod. 81: 426–432. doi.org/10.2319/082610-499.1

Manzar, M.D., BaHammam, A.S., Hameed, U.A., Spence, D.W., Pandi-Perumal, S.R., Moscovitch, A., Streiner, D.L. 2018. Dimensionality of the Pittsburgh sleep quality index: A systematic review. Health Qual. Life Outcomes 16: 89. doi.org/10.1186/s12955-018-0915-x

Muto, T., Yamazaki, A., Takeda, S. 2008. A cephalometric evaluation of the pharyngeal airway space in patients with mandibular retrognathia and prognathia, and normal subjects. Int. J. Oral Maxillofac. Surg. 37: 228–231. doi.org/10.1016/j.ijom.2007.06.020

Nanda, M., Singla, A., Negi, A., Jaj, H., Mahajan, V. 2012. The association between maxillomandibular sagittal relationship and pharyngeal airway passage dimensions. J. Indian Orthod. Soc. 46: 48–52. doi.org/10.1177/0974909820120108

Oktay, H. 1991. A comparison of ANB, WITS, AF-BF, and APDI measurements. Am. J. Orthod. Dentofacial Orthop. 99: 122–128. doi.org/10.1016/0889-5406(91)70114-C

Pornsuksiri, B., Sirichompun, C., Panmekiate, S. 2013. A comparison of upper airway dimensions in a group of Thai orthodontic patients with different skeletal types. CU Dent. J. 36: 9–20. doi.org/10.58837/CHULA.CUDJ.36.1.2

Riedel, R.A. 1950. Esthetics and its relation to orthodontic therapy. Angle Orthod. 20: 168–178. doi.org/10.1043/0003-3219(1950)020<0168:EAIRTO>2.0.CO;2

Samman, N., Mohammadi, H., Xia, J. 2003. Cephalometric norms for the upper airway in a healthy Hong Kong Chinese population. Hong Kong Med. J. 9: 25–30.

Soni, J., Shyagali, T.R., Bhayya, D.P., Shah, R. 2015. Evaluation of pharyngeal space in different combinations of Class II skeletal malocclusion. Acta Inform. Med. 23: 285–289. doi.org/10.5455/aim.2015.23.285-289

Sutthiprapaporn, P., Manosudprasit, A., Pisek, A., Manosudprasit, M., Pisek, P., Phaoseree, N., Manosudprasit, A. 2020. Establishing esthetic lateral cephalometric values for Thai adults after orthodontic treatment. Khon Kaen Dent. J. 23: 31–41.

Ucar, F.I., Uysal, T. 2011. Orofacial airway dimensions in subjects with Class I malocclusion and different growth patterns. Angle Orthod. 81: 460–468. doi.org/10.2319/091910-545.1

การประมาณและเปรียบเทียบอัตราการได้รับเข็มและกระบอกฉีดยาที่สะอาด ในกลุ่มผู้ใช้สารเสพติดด้วยวิธีฉีด มูลนิธิรักษ์ไทย ประเทศไทย

Estimation and comparison of access rates to clean needles and syringes among people who inject drugs: Raks Thai Foundation, Thailand

ธันยพร จำปาเทศ[a,*], **ปรารถนา สถิตย์วิภาวี**[a], **จุฑาธิป ศีลบุตร**[a], **พร้อมบุญ พานิชภักดิ์**[b]

Thanyaporn Champathed[a,*], Pratana Satitvipawee[a], Jutatip Sillabutra[a], Promboon Panitchpakdi[b]

[a]ภาควิชาชีวสถิติ คณะสาธารณสุขศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล กรุงเทพฯ 10400

[b]มูลนิธิรักษ์ไทย กรุงเทพฯ 10400

[a]Department of Biostatistics, Faculty of Public Health, Mahidol University, Bangkok 10400, Thailand

[b]Raks Thai Foundation, Bangkok 10400, Thailand

*Corresponding author. E–mail address: thanyaporn.chm@mahidol.ac.th

บทคัดย่อ

การเข้าถึงเข็มและกระบอกฉีดยาที่สะอาดเป็นมาตรการลดอันตรายสำหรับผู้ใช้สารเสพติดด้วยวิธีฉีด (PWID) จากการติดเชื้อเอชไอวีและไวรัสตับอักเสบ การศึกษานี้มุ่งเน้นการประมาณและเปรียบเทียบจำนวนเข็มที่ได้รับต่อปีระหว่างกลุ่ม PWID และ กลุ่ม PWID ที่มีพฤติกรรมเสี่ยงด้านอื่นร่วมด้วย (PWID with additional risk behaviors, PWID–ARB) ได้แก่ พนักงานบริการ ชายที่มีเพศสัมพันธ์กับชาย สตรีข้ามเพศ ผู้ใช้ยาเสพติด และคู่นอนที่เป็นกลุ่มความเสี่ยงสูง โดยวิเคราะห์ข้อมูลทุติยภูมิของผู้เข้าร่วมโครงการ 21,455 ราย จากมูลนิธิรักษ์ไทย ปี 2567 ด้วยสถิติ Mann–Whitney U และ Kruskal–Wallis ผลการศึกษาพบว่ากลุ่ม PWID มีค่ามัธยฐานของจำนวนเข็มต่อปีสูงกว่ากลุ่ม PWID–ARB อย่างมีนัยสำคัญ (30 เทียบกับ 25 เข็มต่อปี ตามลำดับ; $p < 0.001$) และพบการได้รับเข็มต่อปีที่แตกต่างกันระหว่างกลุ่ม PWID–ARB สะท้อนถึงความหลากหลายของกลุ่ม PWID ด้านการเข้าถึงบริการ ควรพัฒนาการบริการแบบเฉพาะกลุ่ม เพื่อเพิ่มความครอบคลุมของการแจกอุปกรณ์ฉีดยาและลดความเสี่ยงในการติดเชื้อในอนาคต

คำสำคัญ: การลดอันตรายจากยาเสพติด, กลุ่มประชากรที่มีความเสี่ยงสูง, โครงการจัดหาเข็มและกระบอกฉีดยาที่สะอาด, ผู้ใช้สารเสพติดด้วยวิธีฉีด, มูลนิธิรักษ์ไทย

Abstract

Access to sterile needles and syringes is a fundamental harm–reduction intervention for people who inject drugs (PWID) to prevent HIV and viral hepatitis infection. This study aimed to estimate and compare the annual number of needles received between PWID and PWID with additional risk behaviors (PWID–ARB), including sex workers, men who have sex with men, transgender women, people who use drugs and partners of individuals in high–risk groups. Secondary data from 21,455 participants enrolled in Rak Thai Foundation programs in 2024 were analyzed using the Mann–Whitney U test and the Kruskal–Wallis test. The results indicated that PWID had a significantly higher median number of needles received per year than PWID–ARB (30 vs. 25 needles; $p < 0.001$). These findings highlight disparities in service access and the need for targeted harm reduction interventions.

Keywords: Harm reduction, Key populations, Needle and syringe program, People who inject drugs, Raks Thai Foundation

คำนำ

การใช้สารเสพติดชนิดฉีด (Injection Drug Use: IDU) เป็นปัจจัยเสี่ยงสำคัญที่ส่งผลให้เกิดการแพร่ระบาดของเชื้อเอชไอวี ไวรัสตับอักเสบซี และไวรัสตับอักเสบบีในระดับโลก รายงานสถานการณ์ยาเสพติดโลก พ.ศ. 2567 ของสำนักงานสหประชาชาติว่าด้วยยาเสพติดและอาชญากรรม (United Nations Office on Drugs and Crime, UNODC) ระบุว่ามีผู้ใช้สารเสพติดสะสมทั่วโลกประมาณ 292 ล้านคน โดยกว่า 13 ล้านคนเป็นผู้ใช้สารเสพติดชนิดฉีด แสดงให้เห็นถึงความรุนแรงของปัญหาที่ส่งผลกระทบทั้งด้านสุขภาพ เศรษฐกิจ และสังคม ปัญหาดังกล่าวยังพบได้ในภูมิภาคเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ รวมทั้งประเทศไทย ซึ่งยังคงมีผู้ใช้สารเสพติดฉีดและพฤติกรรมเสี่ยงในระดับสูง (Torre, 2009; Mekthon, 2022; Joint United Nations Program on HIV/AIDS (UNAIDS), 2023a; Nelson, 2023; UNODC, 2023; UNODC 2024) โดยองค์การอนามัยโลกแนะนำให้ดำเนินนโยบายลดอันตราย (Harm Reduction) โดยเฉพาะการดำเนินโครงการจัดหาเข็มและกระบอกฉีดยาที่สะอาด (Needle and Syringe Programs: NSP) ซึ่งได้รับการพิสูจน์ว่าสามารถลดการแพร่เชื้อเอชไอวีและไวรัสตับอักเสบได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยการดำเนินงานโครงการจัดหาเข็มและกระบอกฉีดยาที่สะอาด (NSP) ภายใต้แนวคิดการลดอันตราย (Harm Reduction) มีวัตถุประสงค์หลักเพื่อเป็นมาตรการทางสาธารณสุขในการควบคุมและป้องกันการแพร่ระบาดของเชื้อเอชไอวีและไวรัสตับอักเสบในกลุ่มผู้ใช้สารเสพติด ทั้งนี้ มาตรการดังกล่าวไม่ได้มีวัตถุประสงค์เพื่อส่งเสริมหรือสนับสนุนให้เกิดการใช้สารเสพติดเพิ่มขึ้น โดยมีหลักฐานเชิงประจักษ์ในระดับสากลยืนยันว่า การจัดบริการ NSP ไม่ได้ส่งผลต่อการเพิ่มอัตราการใช้สารเสพติดในชุมชน แต่เป็นช่องทางสำคัญที่ช่วยให้ผู้ใช้ยาสามารถเข้าถึงระบบบริการสุขภาพและการบำบัดรักษาได้มากขึ้น (Larney et al., 2017; UNAIDS, 2022; World Health Organization (WHO), 2023) ซึ่ง WHO กำหนดเกณฑ์การแจกเข็มอยู่ที่ 200 เข็มต่อคนต่อปี (UNODC, 2023; UNODC 2024) ยกตัวอย่างประเทศออสเตรีย ปี 2023–2024 สามารถแจกเข็มได้จำนวน 749 เข็มต่อคนต่อปี (Heard et al., 2024) ในปี 2022 ประเทศฟินแลนด์และเนเธอร์แลนด์สามารถแจกเข็มได้จำนวน 450 และ 367 เข็มต่อคนต่อปี ตามลำดับ (Colledge–Frisby et al., 2023; Houdroge et al., 2025) สำหรับประเทศไทยยังไม่สามารถบรรลุเป้าหมายของ WHO ได้ แต่มีแนวโน้มในการแจกเข็มฉีดยาที่สะอาดเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ โดยข้อมูลจากรายงานความก้าวหน้าของประเทศไทยในการยุติปัญหาเอดส์ ตั้งแต่ปี 2019–2024 ค่าเฉลี่ยจำนวนเข็มที่ประเทศไทยแจกเข็มอยู่ที่ 10.9, 12.2, 13.6, 15.2, 17.4 และ 23.6 ตามลำดับ (ศูนย์รวมข้อมูลสารสนเทศด้านเอชไอวีของประเทศไทย, 2568) แม้ว่าอัตราการแจกเข็มฉีดยาที่สะอาดในประเทศไทยมีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้น แต่ยังไม่สามารถบรรลุเป้าหมายที่ประเทศไทยตั้งไว้ได้ คือ 48 เข็มต่อคนต่อปี (คณะกรรมการแห่งชาติว่าด้วยการป้องกันและแก้ไขปัญหาเอดส์ (คช.ปอ.), 2566) เนื่องจากการเข้าถึงเข็มและอุปกรณ์ฉีดยาที่สะอาดเป็นไปอย่างจำกัด นอกจากนี้ ปัจจัยทางสังคม เช่น การตีตรา การเลือกปฏิบัติ และนโยบายทางกฎหมาย ยังก่อให้เกิดอุปสรรคสำคัญในการเข้าถึงบริการด้านการลดอันตราย (Harm Reduction) สำหรับกลุ่มผู้ใช้สารเสพติด (อภิศักดิ์ และคณะ, 2560) อย่างไรก็ตามการดำเนินงานด้าน NSP ในประเทศไทยยังคงประสบปัญหาหลากหลายมิติ ทั้งในเรื่องนโยบายสนับสนุนที่ยังไม่ชัดเจน งบประมาณที่จำกัด รวมถึงความไม่เข้าใจของสังคมเกี่ยวกับแนวทางการลดอันตราย ส่งผลให้ผู้ใช้สารเสพติดยังไม่สามารถเข้าถึงเข็มและอุปกรณ์ฉีดยาที่สะอาดได้อย่างครอบคลุมทั่วถึงและต่อเนื่องจากภาครัฐซึ่งเป็นการบริหารแบบเชิงรับ (Kerr et al., 2010; Carpenter et al., 2023; คช.ปอ., 2566) ขณะที่หน่วยงานภาคเอกชน (NGOs) มีการบริหารจัดการแบบเชิงรุก โดยเข้าถึงชุมชนผู้ใช้สารเสพติด เช่น มูลนิธิรักษ์ไทย โดยทางมูลนิธิรักษ์ไทยเข้ามามีบทบาทสำคัญในการลดปัญหาที่ผู้ใช้สารเสพติดยังไม่สามารถเข้าถึงเข็มและอุปกรณ์ฉีดยาที่สะอาด และลดโรคติดต่อจากการใช้เข็มฉีดยาร่วมกัน อีกทั้งยังช่วยส่งเสริมการลดพฤติกรรมเสี่ยงในกลุ่มผู้ใช้สารเสพติด อันจะนำไปสู่การลดอัตราการติดเชื้อรายใหม่ได้อย่างยั่งยืนในระยะยาว (วรกานต์, 2562; สุภาภรณ์, 2566)

จากการทบทวนวรรณกรรม ยังไม่พบงานวิจัยที่ศึกษาอย่างเป็นระบบเกี่ยวกับการเข้าถึงบริการเข็มและกระบอกฉีดยาที่สะอาด รวมถึงผลลัพธ์ด้านสุขภาพของกลุ่มผู้ใช้สารเสพติดฉีดที่รับบริการจากองค์กรภาคเอกชนในประเทศไทย โดยการศึกษางานวิจัยเรื่อง “การประมาณและเปรียบเทียบอัตราการได้รับเข็มและกระบอกฉีดยาที่สะอาดในกลุ่มผู้ใช้สารเสพติดด้วยวิธีฉีด” จึงมีความสำคัญอย่างยิ่ง ผลการศึกษานี้จะช่วยสนับสนุนการพัฒนานโยบายและระบบบริการที่สอดคล้องกับบริบทของผู้ใช้ยา เพิ่มประสิทธิภาพของการดำเนินงานด้าน Harm Reduction และเสริมสร้างการมีส่วนร่วมของภาคส่วนต่าง ๆ เพื่อลดการแพร่ระบาดของโรคติดต่อที่เกี่ยวข้องกับการใช้เข็มร่วมกัน อันจะนำไปสู่การพัฒนาระบบสุขภาพที่เป็นมิตรต่อผู้ใช้สารเสพติดและสังคมที่มีความเข้าใจต่อปัญหายาเสพติดมากยิ่งขึ้นในระยะยาว

อุปกรณ์และวิธีการ

รูปแบบการศึกษาและกลุ่มตัวอย่าง

การศึกษานี้เป็นการวิเคราะห์ข้อมูลทุติยภูมิจากฐานข้อมูลมูลนิธิรักษ์ไทย ระหว่างวันที่ 1 มกราคม ถึง 31 ธันวาคม พ.ศ. 2567 ศึกษาในผู้ใช้สารเสพติดด้วยวิธีฉีด (PWID) จำนวน 21,455 ราย โดยแบ่งเป็น 2 กลุ่มหลัก ได้แก่

1. กลุ่ม PWID คือผู้ใช้สารเสพติดด้วยวิธีฉีดเพียงอย่างเดียว ซึ่งระบุประเภทในฐานข้อมูลเป็นกลุ่มสมาชิกหลัก โดยไม่มีพฤติกรรมเสี่ยงอื่นร่วมด้วย จำนวน 17,854 ราย

2. กลุ่ม PWID–ARB คือผู้ใช้สารเสพติดด้วยวิธีฉีดที่มีพฤติกรรมเสี่ยงด้านอื่นร่วมด้วย (Additional Risk Behaviors) โดยพิจารณาจากกลุ่มสมาชิกรอง (Secondary Group) ที่ระบุในฐานข้อมูล ได้แก่ พนักงานบริการหญิง (FSW), พนักงานบริการชาย (MSW), ชายที่มีเพศสัมพันธ์กับชาย (MSM), สตรีข้ามเพศ (TGW), ผู้ใช้ยาเสพติด (PWUD) และคู่นอนของกลุ่มประชากรหลัก (Partner KP) จำนวน 3,601 ราย

ทั้งนี้ เพื่อป้องกันการนับซ้ำในการวิเคราะห์ หากผู้รับบริการรายใดมีพฤติกรรมเสี่ยงซ้อนทับกัน จะถูกจัดกลุ่มตามประเภทความเสี่ยงหลักที่ระบุไว้ในฐานข้อมูลเป็นสำคัญ

การวิเคราะห์ทางสถิติและตัวแปร

ตัวแปรหลักคือจำนวนเข็มและกระบอกฉีดยาสะอาดที่ได้รับต่อคนต่อปี วิเคราะห์ข้อมูลด้วยโปรแกรม SPSS version 29 กำหนดระดับนัยสำคัญที่ 0.05

สถิติเชิงพรรณนา ใช้ค่ามัธยฐาน (Median) และช่วงควอไทล์ (IQR) เนื่องจากข้อมูลมีการแจกแจงไม่เป็นปกติ (Kolmogorov–Smirnov test, $p < 0.001$)

สถิติเชิงอนุมาน ใช้ Mann–Whitney U test เปรียบเทียบสองกลุ่มหลัก และใช้ Kruskal–Wallis test พร้อมด้วย Dunn’s post hoc test เพื่อเปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างกลุ่มพฤติกรรมเสี่ยงย่อยภายในกลุ่ม PWID–ARB

จริยธรรมการวิจัย

การศึกษานี้ได้รับการอนุญาตให้ใช้ข้อมูลจากมูลนิธิรักษ์ไทย โดยข้อมูลที่นำมาวิเคราะห์ไม่มีการเปิดเผยชื่อหรือข้อมูลส่วนบุคคลที่สามารถระบุตัวตนได้ เพื่อคุ้มครองสิทธิและความเป็นส่วนตัวของผู้เข้าร่วมตามหลักจริยธรรมการวิจัยในมนุษย์และได้รับการอนุญาตจากคณะกรรมการจริยธรรมการวิจัยในมนุษย์ คณะสาธารณสุขศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล เลขที่ อว 78.141.3/EC 440 รับรองวันที่ 26 พฤษภาคม 2568

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

การวิเคราะห์ข้อมูลผู้เข้าร่วมโครงการของทางมูลนิธิรักษ์ตั้งแต่วันที่ 1 มกราคม พ.ศ. 2567 ถึงวันที่ 31 ธันวาคม พ.ศ. 2567 ทั้งหมด 21,455 ราย ส่วนใหญ่เป็นเพศชาย (75.05%) และมีช่วงเงินเดือนอยู่ที่ 5,000–10,000 บาทต่อเดือน (18.48%) ภายใต้การดูแลของมูลนิธิรักษ์ไทยและกลุ่มเครือข่ายอีกจำนวน 9 แห่ง กระจายอยู่ 22 จังหวัด ทั่วทุกภูมิภาคของประเทศไทย ได้แก่ กรุงเทพมหานครฯ ขอนแก่น ฉะเชิงเทรา ชลบุรี ตรัง ตาก นครราชสีมา นครศรีธรรมราช นนทบุรี นราธิวาส ปทุมธานี ปัตตานี พัทลุง ยะลา สงขลา สตูล สมุทรปราการ สุราษฎร์ธานี อุดรธานี เชียงใหม่ เชียงราย และแม่ฮ่องสอน ซึ่งใน 21,455 รายนั้น แบ่งเป็นผู้ใช้สารเสพติดด้วยวิธีฉีด (PWID) จำนวน 17,854 ราย และผู้ใช้สารเสพติดด้วยวิธีฉีดที่มีพฤติกรรมเสี่ยงด้านอื่นร่วมด้วย (PWID with additional risk behaviors, PWID–ARB) จำนวน 3,601 ราย โดยทั้ง 2 กลุ่ม มีการแจกแจงแบบไม่ปกติ จากทดสอบด้วยสถิติ Kolmogorov Smirnov test แสดงดัง Table 1 ดังนั้นผู้วิจัยจึงนำเสนอข้อมูลจำนวนเข็มและกระบอกฉีดยาที่สะอาดที่ได้รับต่อคนต่อปี ในรูปแบบของค่ามัธยฐาน (Median) พร้อมช่วงการกระจายของข้อมูลระหว่างควอไทล์ที่ 1 และควอไทล์ที่ 3 (IQR) ดัง Table 2

Table 1 The normality of the annual number of needles received among PWID and PWID–ARB was tested using the Kolmogorov Smirnov test at a significance level of 0.05.

	N	z	*p*-value
PWID	17,854	23.001	< 0.001
PWID–ARB	3,601	16.809	< 0.001

PWID: People Who Inject Drugs, PWID–ARB: People Who Inject Drugs with additional risk behaviors

การเปรียบเทียบจำนวนเข็มที่ได้รับต่อปีระหว่างสองกลุ่มหลัก พบความแตกต่างที่มีนัยสำคัญทางสถิติ โดยกลุ่ม PWID มีค่ามัธยฐานของการได้รับจำนวนเข็มและกระบอกฉีดยาที่สะอาดต่อปีเท่ากับ 30 เข็มต่อคนต่อปี (IQR: 15–50) มากกว่ากลุ่ม PWID–ARB ที่มีค่ามัธยฐานอยู่ที่ 25 เข็มต่อคนต่อปี (IQR: 5–40) แสดงใน Table 2 กลุ่ม PWID มีค่ามัธยฐานของการได้รับจำนวนเข็มและกระบอกฉีดยาที่ได้รับต่อปีสูงกว่ากลุ่ม PWID–ARB อย่างมีนัยสำคัญ (30 เทียบกับ 25 เข็มต่อคนต่อปี) โดยช่วง IQR ของกลุ่ม PWID (15–50) แสดงถึงการได้รับเข็มอย่างสม่ำเสมอกว่า ขณะที่กลุ่ม PWID–ARB มีช่วง IQR ที่กว้างกว่า (5–40) สะท้อนถึงความหลากหลายของพฤติกรรมการฉีดและรูปแบบการใช้บริการภายในกลุ่ม และเมื่อทดสอบความแตกต่างของจำนวนเข็มที่ได้รับต่อปีของทั้งสองกลุ่มมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ แสดงใน Table 3

Table 2 Descriptive statistics of the annual number of needles received per person among PWID and PWID–ARB.

	N	Median (IQR)
PWID	17,854	30 (15,50)
PWID–ARB	3,601	25 (5,40)

PWID: People Who Inject Drugs, PWID–ARB: People Who Inject Drugs with additional risk behaviors, IQR: Interquartile Range

Table 3 The Result of Mann Whitney U Test among PWID and PWID with other risk factors.

Variable	Group	N	z	*p*-value
The number of needles per person	PWID	17,854	19.132	< 0.001
	PWID–ARB	3,601		

PWID: People Who Inject Drugs, PWID–ARB: People Who Inject Drugs with additional risk behaviors

เมื่อวิเคราะห์เชิงลึกภายในกลุ่ม PWID–ARB โดยใช้สถิติ Kruskal–Wallis พบความแตกต่างระหว่างกลุ่มพฤติกรรมเสี่ยงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($\chi^2 = 266.120$, $p < 0.001$) ได้แก่ พนักงานบริการหญิง (FSW) และ สตรีข้ามเพศ (TGW) มีค่ามัธยฐานต่ำที่สุด คือ 5 เข็มต่อคนต่อปี ในทางตรงกันข้าม คู่นอน/คู่สมรส (Partner KP) มีค่ามัธยฐานสูงที่สุด คือ 40 เข็มต่อคนต่อปี รองลงมาคือผู้ใช้ยาเสพติด (PWUD) ชายที่มีเพศสัมพันธ์กับชาย (MSM) และพนักงานบริการชาย (MSW) มีค่ามัธยฐาน คือ 25, 25 และ 10 เข็มต่อคนต่อปี ตามลำดับ แสดงใน Table 4

Table 4 Descriptive statistics of the number of needles received per person in PWID with other risk factors.

People Who Inject Drugs with Key Population	N	Median (IQR)
FSW	162	5 (5,5)
TGW	33	5 (5,25)
MSW	33	10 (5,35)
PWUD	576	25 (10,55)
MSM	2,759	25 (5,35)
Partner KP	38	40 (30,60)

FSW: Female Sex Workers, MSM: Men who have Sex with Men, MSW: Male Sex Workers, TGW: Transgender Women, PWUD: People Who Use Drugs. Partner KP: Partner with Key Population

จากการวิเคราะห์เปรียบเทียบอัตราการได้รับเข็มและกระบอกฉีดยาที่สะอาดในกลุ่มผู้ใช้สารเสพติดด้วยวิธีฉีดที่มีพฤติกรรมเสี่ยงด้านอื่นร่วมด้วย (PWID–ARB) ใน Table 5 พบว่าอัตราการได้รับอุปกรณ์ฉีดยาที่สะอาดมีความแตกต่างกันระหว่างกลุ่มพฤติกรรมเสี่ยง โดยทดสอบความแตกต่างรายคู่ด้วยสถิติ Dunn's test ภายหลังการวิเคราะห์ด้วย Kruskal–Wallis test มี 12 คู่ของกลุ่มพฤติกรรมเสี่ยงที่มีอัตราการได้รับเข็มและกระบอกฉีดยาที่สะอาดต่อคนต่อปีแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.001$) ผลลัพธ์ดังกล่าวสะท้อนถึงความไม่สม่ำเสมอของการใช้บริการและความต้องการอุปกรณ์ฉีดยาที่แตกต่างกันภายในกลุ่ม PWID–ARB ซึ่งอาจได้รับอิทธิพลจากลักษณะเฉพาะแต่ละกลุ่ม เช่น ความถี่ในการฉีด สถานการณ์ทางสังคม และอุปสรรคในการเข้าถึงบริการ

Table 5 Dunn's test for multiple comparisons of the number of needles received per person in PWID with other risk factors.

Variable	Comparison	z	*p*-value
The number of needles per person	FSW vs. MSM	-12.70	< 0.001*
	FSW vs. MSW	-3.89	< 0.001*
	FSW vs. Partner KP	-9.89	< 0.001*
	FSW vs. PWUD	-15.40	< 0.001*
	FSW vs. TGW	-2.27	0.1754
	MSM vs. MSW	1.62	0.7858
	MSM vs. Partner KP	-4.63	< 0.001*
	MSM vs. PWUD	-7.52	< 0.001*
	MSM vs. TGW	3.39	0.0053*
	MSW vs. Partner KP	-4.37	0.0001*
	MSW vs. PWUD	-3.51	0.0034*
	MSW vs. TGW	1.26	1.0000
	Partner KP vs. PWUD	2.46	0.1047
	Partner KP vs. TGW	5.67	< 0.001*
	PWUD vs. TGW	5.24	< 0.001*

FSW (Female Sex Workers), MSM (Men who have Sex with Men), MSW (Male Sex Workers), TGW (Transgender Women), PWUD (People Who Use Drugs). Partner KP (Partner with Key Population) *Significant ($p < 0.05$)

ผลการศึกษานี้ชี้ให้เห็นถึงความแตกต่างของจำนวนเข็มและกระบอกฉีดยาที่สะอาดที่ได้รับต่อคนต่อปีระหว่างกลุ่ม PWID และ กลุ่ม PWID–ARB โดยพบว่า PWID มีค่ามัธยฐานสูงกว่าอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งอยู่ในทิศทางเดียวกับหลักฐานทางสากลที่ระบุว่าการเข้าถึงเข็มและกระบอกฉีดยาที่สะอาดมักสูงในกลุ่ม PWID ซึ่งกลุ่มเหล่านี้มีรูปแบบการใช้ยาเสพติดอย่างต่อเนื่อง (Strathdee and Beyrer, 2015; UNAIDS, 2023a, 2023b) ในขณะที่กลุ่ม PWID–ARB โดยเฉพาะ FSW และ TGW มักมีพฤติกรรมฉีดเป็นครั้งคราว (Occasional injectors) หรือใช้สารหลายชนิดผ่านวิธีอื่นร่วมด้วย (Multi–drug used) ซึ่งมีการใช้สารด้วยวิธีอื่นมากกว่าการฉีด ส่งผลให้ได้รับเข็มและกระบอกฉีดยาที่สะอาดต่อคนต่อปีในระดับต่ำ ความแตกต่างดังกล่าวสะท้อนถึงความหลากหลายของพฤติกรรมและบริบททางสังคมภายในกลุ่มผู้ใช้ยาเสพติด (WHO, 2016; Platt et al., 2017) ซึ่งทำให้รูปแบบบริการ NSP แบบเดิมอาจไม่สามารถตอบสนองความต้องการได้อย่างเหมาะสม ดังนั้น การพัฒนามาตรการลดอันตรายในประเทศไทยควรมุ่งสู่การจัดบริการแบบเฉพาะกลุ่ม ที่คำนึงถึงรูปแบบการใช้ยาเชิงสถานการณ์ ลดอุปสรรคเชิงโครงสร้าง เช่น การถูกตีตรา ความรุนแรง หรือความไม่มั่นคงทางเศรษฐสังคม (Schonning, 2020) และข้อจำกัดด้านกฎหมายที่ยังส่งผลให้การให้บริการเชิงรุกทำได้ยากในหลายพื้นที่ของประเทศไทย (จุฑามาศ, 2564) เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการเข้าถึงบริการและลดความเสี่ยงด้านสุขภาพในระยะยาว

อย่างไรก็ตาม แม้อัตราการแจกจ่ายเข็มในภาพรวมจะยังไม่บรรลุเป้าหมายที่ประเทศไทยตั้งไว้ (48 เข็ม) หรือเกณฑ์ขององค์การอนามัยโลก (200 เข็ม) แต่ต้องเน้นย้ำว่าการดำเนินโครงการจัดหาเข็มและกระบอกฉีดยาที่สะอาด

(Needle and Syringe Programs: NSP) ภายใต้แนวคิดการลดอันตราย (Harm Reduction) มีวัตถุประสงค์เพื่อเป็นมาตรการสาธารณสุขในการลดอันตรายและป้องกันการแพร่กระจายเชื้อ HIV และไวรัสตับอักเสบเท่านั้น มาตรการนี้ไม่ได้มีวัตถุประสงค์เพื่อสนับสนุนหรือส่งเสริมให้เกิดการใช้ยาเสพติดเพิ่มขึ้น และมีหลักฐานเชิงประจักษ์ในระดับสากลยืนยันว่า NSP ไม่ได้ส่งผลต่อการเพิ่มอัตราการใช้สารเสพติด อุปสรรคสำคัญที่ทำให้การเข้าถึงยังไม่ครอบคลุมคือปัญหาเชิงโครงสร้าง การถูกตีตรา และความไม่ชัดเจนของนโยบายสนับสนุนจากภาครัฐ

สรุป

การศึกษานี้แสดงให้เห็นว่าอัตราการได้รับเข็มและกระบอกฉีดยาที่สะอาดระหว่างกลุ่ม PWID และ PWID–ARB มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ โดยกลุ่ม PWID มีการเข้าถึงที่สูงกว่าตามความถี่ในการใช้งาน ทั้งนี้ การดำเนินโครงการจัดหาเข็มและกระบอกฉีดยาที่สะอาด (NSP) ถือเป็นมาตรการทางด้านสาธารณสุขเพื่อลดความเสี่ยงในการติดเชื้อ HIV และไวรัสตับอักเสบ มิใช่มาตรการเพื่อส่งเสริมหรือเพิ่มจำนวนผู้ใช้ยาเสพติดแต่อย่างใด แม้ว่าปริมาณเข็มและกระบอกฉีดยาที่สะอาดต่อคนต่อปีของทั้งกลุ่ม PWID และกลุ่ม PWID–ARB จะต่ำกว่าเกณฑ์ที่ประเทศไทยและองค์การอนามัยโลกกำหนด ซึ่งสะท้อนให้เห็นว่าระบบบริการยังไม่สามารถครอบคลุมได้อย่างเต็มประสิทธิภาพด้านการบริการ ผลการศึกษาพบความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญของจำนวนเข็มและกระบอกฉีดยาที่สะอาดที่ได้รับต่อคนต่อปีระหว่างสองกลุ่ม โดยกลุ่ม PWID มีค่ามัธยฐานสูงกว่า สอดคล้องกับความถี่ในการฉีดที่มากกว่า อย่างไรก็ตาม ปริมาณเข็มที่ต่ำกว่าในกลุ่ม PWID–ARB ไม่ควรถูกตีความว่าเป็นปัญหาการเข้าถึงบริการเพียงประการเดียว หากแต่ยังสะท้อนพฤติกรรมรูปแบบการฉีดที่เป็นครั้งคราวหรือไม่ต่อเนื่อง ซึ่งพบได้บ่อยในกลุ่มที่เผชิญความเสี่ยงซ้อนทับทางสังคมและโครงสร้าง เช่น TGW, FSW และ PWUD ที่อาจเปลี่ยนรูปแบบการใช้ระหว่างฉีดและไม่ฉีด ความแตกต่างดังกล่าวชี้ให้เห็นถึงความจำเป็นในการพัฒนารูปแบบบริการแบบเฉพาะกลุ่ม (Targeted Intervention) ให้สอดคล้องกับพฤติกรรมการใช้ยาและบริบททางสังคมที่แตกต่างกัน รัฐบาลควรสนับสนุนองค์กรภาคประชาสังคมในการดำเนินงานเชิงรุก ควบคู่ไปกับการลดอุปสรรคทางกฎหมายและการตีตรา เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการเข้าถึงบริการและสร้างระบบสุขภาพที่มีความเท่าเทียมในระยะยาว

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัย ขอขอบพระคุณ มูลนิธิรักษ์ไทย เป็นอย่างสูง ที่กรุณาให้ข้อมูลและคำแนะนำอันเป็นประโยชน์ต่อการดำเนินงานวิจัยครั้งนี้ และ ดร. ศาริกา พัฒนสิน สำหรับความช่วยเหลือทางเทคนิคและความเชี่ยวชาญด้านการจัดการฐานข้อมูลขนาดใหญ่ การสนับสนุนจากท่านมีส่วนสำคัญอย่างยิ่งให้การศึกษาครั้งนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี ข้าพเจ้าขอขอบคุณมา ณ โอกาสนี้

เอกสารอ้างอิง

Carpenter, D.M., Evon, D.M., Hennessy, C.M., et al. 2023. Factors associated with perceived ease of access to syringes in Appalachian North Carolina. J. Rural Health. 39: 212–222. doi.org/10.1111/jrh.12698

Colledge–Frisby, S., Cunningham, E.B., Dore, G.J., et al. 2023. Global coverage of interventions to prevent and manage drug-related harms among people who inject drugs: a systematic review. The Lancet Global Health. 11: 673–683. doi.org/10.1016/S2214-109X(23)00058-X

Heard, S., Kwon, J.A., Mathers, B., et al. 2024. Needle Syringe Program National Minimum Data Collection, National Data Report 2024. Kirby Institute, UNSW Sydney.

Houdroge, F., Stoove, M.A., Scott, N. 2025. Prison needle programs could save double what they cost - our new modelling shows how. https://www.burnet.edu.au/news/prison-needle-programs-could-save-double-what-they-cost-our-new-modelling-shows-how/, 30 November 2025.

Joint United Nations Program on HIV/AIDS (UNAIDS). 2022. Global AIDS Monitoring 2023. Geneva, Switzerland.

Joint United Nations Program on HIV/AIDS (UNAIDS). 2023a. The path that ends AIDS: UNAIDS Global AIDS Update 2023. Geneva, Switzerland.

Joint United Nations Program on HIV/AIDS (UNAIDS). 2023b. Needles and syringes distributed per person who injects drugs. Geneva, Switzerland.

Kerr, T., Wood, E., Zhang, R., et al. 2010. Difficulty accessing syringes and syringe borrowing among injection drug users in Bangkok, Thailand. Drug Alcohol Rev. 29: 157–161. doi.org/10.1111/j.1465-3362.2009.00093.x

Larney, S., Leung, J., Peacock, A., et al. 2017. Global, regional, and country-level coverage of interventions to prevent and manage HIV and hepatitis C among people who inject drugs: a systematic review. The Lancet Global Health. 5: 1208–1220. doi.org/10.1016/S2214-109X(17)30373-X

Mekthon, S. 2022. Thai National AIDS Program Review 2022. Department of Disease Control, Ministry of Public Health., Thailand.

Nelson, E.U. 2023. Harm reduction interventions for people who inject drugs. The Lancet Global Health. 11: 632–633. doi.org/10.1016/S2214-109X(23)00111-0

Platt, L., Minozzi, S., Reed, J., Vickerman, P., et al. 2017. Needle syringe programmes and opioid substitution therapy for preventing hepatitis C transmission in people who inject drugs. Cochrane Database Syst Rev, 9: 12021–12024. doi.org/10.1002/14651858.CD012021.pub2

Schonning, S., 2020. The impact of a multi-country harm reduction advocacy grant in South-East Asia Changing hearts and minds, policies and practices. Harm Reduction International. London, United Kingdom.

Strathdee, S.A., Beyrer, C. 2015. Threading the Needle--How to Stop the HIV Outbreak in Rural Indiana. N Engl J Med. 373: 397–399. doi.org/10.1056/NEJMp1507252

Torre, C. 2009. Syringe exchange programmes in the context of harm reduction. Arquivos de Medicina. 23: 119–131.

United Nations Office on Drugs and Crime (UNODC). 2023. *World Drug Report* 2023. United Nations publication. Vienna, Austria.

United Nations Office on Drugs and Crime (UNODC). 2024. *World Drug Report* 2024. United Nations publication. Vienna, Austria.

Walsh, N., Verster, A., Rodolph, M., et al. 2014. WHO guidance on the prevention of viral hepatitis B and C among people who inject drugs. The International journal on drug policy. 25: 363–371.

World Health Organization. 2016. Consolidated guidelines on HIV prevention, diagnosis, treatment and care for key populations : *2016* update. World Health Organization. Geneva, Switzerland.

World Health Organization. 2023. Global HIV, Hepatitis and STIs Programmes. https://www.who.int/teams/global-hiv-hepatitis-and-stis-programmes/populations/people-who-inject-drugs, 7 May 2025.

คณะกรรมการแห่งชาติว่าด้วยการป้องกันและแก้ไขปัญหาเอดส์. 2566. แผนปฏิบัติการยุติปัญหาเอดส์ ประเทศไทย พ.ศ. 2566–2569. บริษัท เอ็นซี คอนเซ็ปต์ จำกัด. นนทบุรี.

จุฑามาศ มากกุญชร. 2564. ผลการจัดบริการป้องกันการติดเชื้อเอชไอวีในกลุ่มผู้ใช้ยาเสพติดด้วยวิธีฉีดภายใต้นโยบายลดอันตรายจากยาเสพติด. Thai AIDS Journal. 33: 73–90.

วรกานต์ สินสมบูรณ์. 2562. แนวทางการพัฒนากระบวนการบำบัดยาเสพติดโดยระบบสมัครใจในองค์กร NGOs (non governmental organizations). วิทยานิพนธ์ปริญญาโท มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์.

ศูนย์รวมข้อมูลสารสนเทศด้านเอชไอวีของประเทศไทย. 2568. ผลการดำเนินงานการป้องกันการติดเชื้อเอชไอวี. https://hivhub.ddc.moph.go.th/officer/response.php, 30 พฤศจิกายน 2568.

สุภาภรณ์ อัษฎมงคล. 2566. TDN “เครือข่ายผู้ใช้ยาฯ” เจ้าของปัญหากับหลักการทำงานแบบเพื่อนช่วยเพื่อน. https://raksthai-insights.org/tdn-%e0%b9%80%e0%b8%84%e0%b8%a3%e0%b8%b7%e0%b8%ad%e0%b8%82%e0%b9%88%e0%b8%b2%e0%b8%a2%e0%b8%9c%e0%b8%b9%e0%b9%89%e0%b9%83%e0%b8%8a%e0%b9%89%e0%b8%a2%e0%b8%b2%e0%b8%af-%e0%b9%80/, 7 พฤษภาคม 2568.

อภิศักดิ์ วิทยานุกูลลักษณ์, มณฑินี วสันติอุปโภคากร, สุชาดา เจียมศิริ, ลีซ่า กันธมาลา, นุชนารถ แก้วดำเกิง, ชนัดดา ตั้งวงศ์จุลเนียม, จุฑามาศ มากกุญชร, พัชรียา กิจชม. 2560. แนวทางการดำเนินงานการจัดบริการเข็มและอุปกรณ์ฉีดยาที่สะอาด ในกลุ่มผู้ใช้ยาเสพติดด้วยวิธีฉีด ภายใต้แนวคิดการลดอันตราย จากการใช้ยาเสพติด. บริษัท เรดิเอชั่น จำกัด. กรุงเทพฯ.

Intracellular expression of B–Domain–Deleted factor VIII using circular mRNA in Chinese hamster ovary cells

Priyasha Wiangwiset[a], Pitchayapa Kaewchumpon[a], Patompon Wongtrakoongate[b], Suradej Hongeng[c], Pansakorn Tanratana[a,*]

[a]Department of Pharmacology, Faculty of Science, Mahidol University, Bangkok 10400, Thailand

[b]Department of Biochemistry, Faculty of Science, Mahidol University, Bangkok 10400, Thailand

[c]Department of Pediatrics, Faculty of Medicine Ramathibodi Hospital, Mahidol University, Bangkok 10400, Thailand

*Corresponding author. E–mail address: Pansakorn.tan@mahidol.ac.th

Abstract

Hemophilia A is an X–linked bleeding disorder caused by mutations in the *F8* gene, leading to deficiency of clotting factor VIII (FVIII). Current therapy relies on frequent recombinant FVIII infusions, which are limited by short protein half–life. Circular mRNA (circRNA) has emerged as a promising expression platform due to its enhanced stability and translational efficiency. This study evaluated expression of full–length FVIII (FL–FVIII) and B–domain–deleted FVIII (BDD–FVIII) derived from circRNA in Chinese hamster ovary (CHO) cells. Plasmids encoding FL–FVIII and BDD–FVIII were first transformed into *E. coli*, validated by restriction digestion, and used for *in vitro* transcription and RNA circularization. CHO cells were transfected with FL–circRNA or BDD–circRNA, and FVIII expression was analyzed at 24–, 48–, 72–, and 96–hour post–transfection. FVIII expression from FL–circRNA remained indistinguishable from endogenous background at all time point in both cell supernatant and lysate. In contrast, a distinct intracellular protein band of approximately 170 kDa, consistent with single-chain BDD–FVIII, was detected at 24 hours in cells transfected with BDD–circRNA, clearly exceeding the endogenous background signal. These findings demonstrate that BDD–circRNA supports efficient intracellular FVIII translation but not secretion, highlighting its potential for further optimization of circRNA–based FVIII expression systems.

Keywords: B–domain deleted factor VIII, Circular mRNA, Coagulation factor VIII, Hemophilia A

Introduction

Hemophilia A is an X-linked recessive bleeding disorder caused by *F8* gene mutations, leading to deficient Factor VIII (FVIII) and subsequent prolonged hemorrhage; disease severity correlates directly with residual FVIII activity. Current prophylactic treatment with recombinant FVIII concentrates is limited by the protein's short half-life and the need for frequent, costly infusions (Chernyi et al., 2024). These constraints have spurred the development of advanced therapies, including gene therapy and mRNA technology. To improve the notoriously challenging biosynthesis and stability of FVIII, researchers have focused on B-domain-deleted FVIII (BDD-FVIII) constructs, as the B domain is non-essential for procoagulant function (Pipe, 2009; Powell, 2009). Although BDD-FVIII linear mRNA successfully increases F8 mRNA expression, this does not reliably translate into high levels of secreted protein, primarily due to the intrinsic instability and short half-life of linear mRNA in the cytoplasm (Nguyen et al., 2017; Hu et al., 2022). Therefore, current research is highly focused on optimizing BDD-FVIII constructs and delivery methods, such as utilizing circular mRNA, to specifically enhance protein production and secretion efficiency.

FVIII is an essential protein cofactor synthesized mainly in the liver's sinusoidal endothelial cells. It features a six-domain architecture (A1–A2–B–A3–C1–C2) and circulates bound non-covalently to von Willebrand factor (vWF), a stabilizing glycoprotein that prevents premature degradation (Ngo et al., 2008). Vascular injury triggers the activation of FVIII by the enzyme thrombin (Factor IIa). This activation requires the dissociation of FVIII from vWF and the proteolytic removal of the B domain. Activated FVIII then plays a necessary role in the intrinsic pathway of the coagulation cascade, which culminates in the production of a stable fibrin clot at the site of injury (O'Donnell et al., 2019).

Circular mRNA (circRNA) has emerged as a promising alternative to conventional linear mRNA constructs. Its defining feature is a covalently closed-loop structure which inherently lacks the labile 5' cap and 3' polyadenylated tail (Wang et al., 2023). This unique topology provides circRNA resistance to exonuclease–mediated degradation and significantly enhanced physicochemical stability. Consequently, evidence indicated that circRNA can markedly augment protein translation efficiency and sustain protein expression for substantially longer periods relative to its linear counterpart (Chen et al., 2023; Unti and Jaffrey, 2024).

Our current investigation was therefore specifically designed to evaluate and compare the expression profiles of recombinant FVIII expressed by Full-length circRNA (FL–circRNA) versus B–domain–deleted circRNA (BDD–circRNA) in an *in vitro* system. The core objective of this study is to delineate the translational advantages offered by these circRNA–based constructs, particularly their capacity to improve transcript stability and enhance FVIII expression. The findings are intended to provide critical data to advance next-generation mRNA therapeutics for the sustained treatment of Hemophilia A and related coagulopathies.

Materials and Methods

B–domain–deleted factor VIII (BDD–FVIII) plasmid DNA transformation

The plasmid pUC57–101(+)–circFVIII–BDD, encoding B-domain-deleted factor VIII (BDD–FVIII) and containing internal ribosomal entry sites (IRESs), was designed through a collaborative effort from Associate Professor Dr. Patompon Wongtrakoongate and was synthesized by RI Technologies Ltd. NEB® 5–alpha competent *E. coli* were transformed with 50 ng of the plasmid using KCM buffer (KCl, $CaCl_2$, $MgCl_2$). The transformation mixture, consisting of plasmid DNA, 10 µL of 5× KCM buffer, and 39 µL of ultrapure water, was prepared, incubated for 5 minutes, and then mixed with an equal volume of competent cells. After incubation on ice for 20 minutes and at room temperature for 10 minutes, 400 µL of LB broth was added to the cells, which were then shaken at 180–250 rpm for 1 hour at 37°C. Transformed cells (50–100 µL) were spread onto LB agar plates containing ampicillin (100 µg/mL) and incubated at 37°C for 16–18 hours. For subsequent culture, a single colony was selected, inoculated into selective LB broth, and grown overnight at 37°C.

Plasmid extraction

After overnight amplification of *E. coli* in LB broth, plasmid DNA extraction was performed using the DNA–spin Plasmid DNA Purification Kit (iNtRON Biotechnology) according to the manufacturer's instructions. Briefly, 3–5 mL of the *E. coli* suspension was centrifuged at 13,000 rpm for 30 seconds at room temperature. The supernatant was discarded, 250 µL of resuspension buffer was added, and the pellet was vortexed. Subsequently, 250 µL of lysis buffer was added, and the mixture was incubated for 3 minutes. Neutralization was achieved by adding 350 µL of neutralization buffer, followed by incubation on ice for 5 minutes and centrifugation at 13,000 rpm for 10 minutes at 4°C. The supernatant was then transferred to a spin column and centrifuged at 13,000 rpm for 1 minute. The filtrate was discarded, and the column was washed sequentially with 500 µL of washing buffer A and 700 µL of washing buffer B, with centrifugation at 13,000 rpm for 1 minute after each wash. After discarding the filtrate, the column was centrifuged again at the same speed for 1 minute to remove residual buffer. Finally, the column was transferred to a new 1.5 mL microcentrifuge tube, 50 µL of elution buffer was added, incubated for 1 minute, and centrifuged at 13,000 rpm for 1 minute to elute the plasmid DNA.

Restriction digest analysis

Restriction digestion was performed on 500 ng of the pUC57_101(+)_circBDD–FVIII plasmid using the restriction enzymes AgeI–HF and HindIII–HF (New England Biolabs Inc., NEB). The reaction mixture consisted of 500 ng of pUC57_101(+)_circBDD–FVIII plasmid, 1× rCutSmart buffer (NEB), ultrapure water, and 4 U each of AgeI–HF and HindIII–HF. Prior to enzyme addition, the plasmid DNA was mixed with ultrapure water, denatured by heating at 80°C for 10 minutes, and then placed on ice for 5 minutes. Subsequently, the buffer

and restriction enzymes were added, and the reaction mixture was incubated at 37°C for 1 hour and 30 minutes. The resulting DNA fragments were separated and visualized by electrophoresis on a 0.8% agarose gel prepared in 1× TBE buffer.

In vitro transcription (IVT) and circularization

In vitro transcription of circular mRNA was performed using the HiScribe T7 kit (NEB). Briefly, a reaction mixture containing 0.5 µg of linearized DNA template, 1 µL of 10× T7 buffer, 1 µL each of ATP, CTP, GTP, and UTP (100 mM), 0.5 µL of DTT, 0.25 µL of RNase inhibitor, 1 µL of T7 RNA polymerase, and 10 µL of deionized water was prepared. The mixture was incubated at 37°C for 2 hours. DNase I treatment was subsequently performed by adding 1 µL of 10× DNase I buffer, 0.25 µL of DNase I, and 3.75 µL of ultrapure water, followed by incubation for 30 minutes. The resulting RNA was purified using the Monarch® RNA Cleanup Kit according to the manufacturer's instructions.

For circularization, the *in vitro*–transcribed RNA was heated at 65°C for 5 minutes and then placed on ice for 3 minutes. A circularization reaction mixture was prepared by combining 6.2 µL of 10× T4 ligase buffer (NEB), 1.24 µL of 100 mM GTP, 53 µL of RNA template, and 1.56 µL of ultrapure water. The mixture was then heated at 65°C for 15 minutes. Purification of the circular RNA was performed using the Monarch® RNA Cleanup Kit according to the manufacturer's instructions.

Cell culture and transfection

CHO cells were cultured in Dulbecco's Modified Eagle Medium (DMEM)/F12 supplemented with 10% fetal bovine serum (FBS), 2 mM L–glutamine, 100 units/mL penicillin, and 100 units/mL streptomycin. The cells were maintained as a monolayer at 37°C in a humidified atmosphere containing 5% CO_2 and 95% humidity. The culture medium was replaced every 2 days.

Transfection was performed using Lipofectamine™ MessengerMAX™ Transfection Reagent according to the manufacturer's instructions. Briefly, cells were seeded at a density of 2×10^5 cells per well in a 24–well plate and cultured until 70–90% confluence was reached. Lipofectamine™ MessengerMAX™ reagent (1.5 µL) was diluted in 25 µL of Opti–MEM™ medium and incubated for 10 minutes at room temperature. An mRNA master mix was prepared by diluting 1 µg of linear or circular mRNA in 50 µL of Opti–MEM™ medium. Subsequently, 25 µL of the mRNA solution was combined with 25 µL of diluted Lipofectamine™ MessengerMAX™ reagent and incubated for 5 minutes at room temperature. The resulting mRNA–lipid complexes (50 µL) were added to the cells. Cell culture supernatants were collected at 24–, 48–, 72–, and 96–hours post–transfection.

Cell lysate collection

Cell lysates were collected at 24–, 48–, 72–, and 96–hours post-transfection. RIPA lysis buffer was freshly prepared prior to use by combining 100 µL of 10× RIPA buffer, 10 µL of 100× protease inhibitor cocktail, and 890 µL of ultrapure water. After collecting the cell culture supernatant, the cells were gently washed once with cold 1× phosphate–buffered saline (PBS). Cell lysis was performed by adding 100 µL of cold RIPA lysis buffer to each well, followed by incubation at 4°C for 2 minutes. The cells were then mechanically detached using a cell scraper, and the lysate was transferred to a microcentrifuge tube. Subsequently, the lysate was centrifuged at 12,000 rpm for 15 minutes at 4°C, and the clarified cell lysate was carefully collected.

Sodium dodecyl sulfate–polyacrylamide gel electrophoresis (SDS–PAGE) and western blot analysis

Laemmli buffer containing β–mercaptoethanol was added to the prepared samples, which were then heated at 90°C for 5 minutes. Commercial full-length recombinant human factor VIII (rhFVIII; Kovaltry) was used as a positive control. The samples were loaded onto an 8% Bis-Tris SDS–PAGE gel and electrophoresed at 100 V for 2 hours. Proteins were then transferred onto a PVDF membrane (Thermo Fisher Scientific, USA) at 200 mA for 2 hours. After transfer, the PVDF membrane was activated with absolute methanol for 3 minutes, washed with deionized water for 5 minutes, and equilibrated in transfer buffer for an additional 5 minutes. The membrane was subsequently blocked with 5% skimmed milk in Tris-buffered saline containing 0.1% Tween-20 (TBS-T) for 18 hours. Following blocking, the membrane was washed five times for 5 minutes each with 1× TBS containing 0.5% Tween-20. The membrane was then incubated with an anti–factor VIII mouse monoclonal antibody (ab78852, Abcam) diluted 1:20,000 for 3 hours at room temperature, followed by five washes with 1× TBS containing 0.1% Tween-20. Subsequently, the membrane was incubated with a goat anti-mouse IgG H&L (HRP) secondary antibody (ab205719, Abcam) diluted 1:20,000 in 5% skimmed milk. Chemiluminescent signals were detected using an ECL substrate kit (Bio-Rad, Hertfordshire, UK) and visualized with a gel documentation system.

Results and Discussion

Restriction digest analysis

The integrity of the pUC57_101(+) circBDD–FVIII plasmid DNA was first confirmed by restriction digestion using AgeI–HF and HindIII–HF. The plasmid, with a total length of 8,419 base pairs, was subjected to restriction enzyme digestion, which was predicted to generate two DNA fragments of 5,257 bp and 3,162 bp, respectively. The analysis confirmed these expected band sizes following digestion, in sharp contrast to the single intact band observed in the non-digested plasmid control (Fig. 1, lane 2). This confirmed the correct plasmid architecture and validated its suitability as a template for subsequent *in vitro* transcription and circular mRNA (circRNA) production (Fig. 1, lane 3).

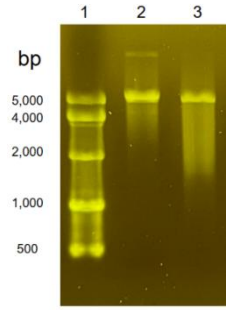


Fig. 1 The quality control of restriction digest analysis. DNA Band of pUC57_101(+)_circBDD–FVIII plasmid. Lane 1: DNA ladder (Thermo Scientific™), Lane 2: Intact pUC57_101(+)_circBDD–FVIIIplasmid, Lane 3: pUC57_101(+)_circBDD–FVIII plasmid fragment after restriction digestion

In vitro transcription (IVT) and circularization

The mRNA products generated from *in vitro* transcription (IVT) and subsequent circularization of the B–domain–deleted FVIII (BDD–FVIII) construct were analyzed by agarose gel electrophoresis. Linear BDD–FVIII mRNA and the circularized RNA product were included as controls for comparison (Fig. 2, lane 2). The expected size of the BDD–circRNA was approximately 5,257 bp. Electrophoretic analysis on a 0.8% agarose gel revealed clear and distinct RNA bands migrating at the predicted size in samples obtained from both the IVT and circularization steps (Fig. 2, lane 3). These results confirm the successful synthesis and circularization of the BDD–circRNA with the expected molecular size, providing strong evidence for accurate production of the target construct.

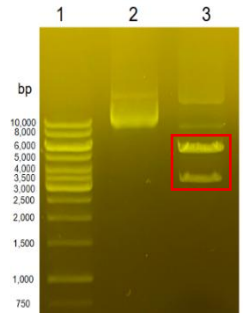


Fig. 2 The quality control of BDD–circRNA production using gel electrophoresis. Lane 1: The DNA ladder (Thermo Scientific™), Lane 2: IVT product (BDD–FVIII linear mRNA), Lane 3: BDD–FVIII circRNA.

Expression of Full–length and BDD–FVIII circular mRNA in CHO cells overtime

While Factor VIII (FVIII) biosynthesis is predominantly attributed to Liver Sinusoidal Endothelial Cells (LSECs), a low level of endogenous *F8* gene expression has been observed in diverse cell lines (Campos–da–

Paz et al., 2008). To select the most appropriate host for recombinant expression, the inherent FVIII expression profiles of non-transfected CHO cells, HEK293T cells, and Vero cells were assessed using both cell supernatant and lysate (Fig. 3). Results from the supernatant consistently showed FVIII-immunoreactive bands at 65 – 75 kDa in all tested lines. FVIII–reactive bands were observed in both cell lysates and culture supernatants across all cell lines tested, suggesting the presence of minimal endogenous FVIII expression or they could be a nonspecific antibody binding. Of the cell lines evaluated, CHO cells displayed the lowest background signal and were consequently chosen as the expression system for subsequent recombinant FVIII studies.

CHO cells were transfected with either full–length circRNA (FL–circRNA) or B–domain–deleted circRNA (BDD–circRNA), and both culture supernatants and cell lysates were collected at 24–, 48–, 72–, and 96–hours post–transfection. Western blot analysis of cell supernatants revealed weak immunoreactive bands at approximately 65 kDa in all experimental conditions, including the non–transfected negative control (Fig. 4). The presence of these bands across all samples could represent background signals attributable to low–level endogenous expression of an FVIII–related protein or nonspecific antibody binding. Consequently, the approximately 65 kDa band is most likely derived from an endogenous FVIII fragment or an immunologically cross–reactive protein intrinsic to CHO cells, rather than representing expression of the intended recombinant FVIII products encoded by the transfected circular mRNA constructs (Fig. 4A).

In contrast, analysis of cell lysates revealed FVIII–immunoreactive bands of varying molecular weights, consistent with the endogenous background from CHO cells. Notably, the lysate collected at 24 hours post-transfection with BDD–circRNA exhibited a prominent band at approximately 170 kDa that was clearly distinguishable from endogenous FVIII–related signals (Fig. 4B, lane 8). This molecular weight corresponds closely to that of single–chain BDD–FVIII (Grushin et al., 2014), thereby confirming successful intracellular translation of the transfected circRNA construct. The signal intensity decreased at later time points, suggesting either protein degradation or reduced translational output over time. Whereas transfection with FL–circRNA did not result in a detectable increase in FVIII signal above background levels, which would be expected to appear as a band at approximately 230–280 kDa (Fig. 4B, lanes 4–7). The marked intracellular accumulation of FVIII observed in BDD–circRNA–transfected CHO cells was likely attributable to the absence of the native B domain, a region known to play a critical role in FVIII trafficking and secretion through the endoplasmic reticulum and Golgi apparatus. This impaired secretion was consistent with the absence of detectable recombinant FVIII in the corresponding cell culture supernatants.

The absence of detecting recombinant FVIII in the cell supernatant, despite pronounced intracellular accumulation of BDD–FVIII, indicated the presence of a limiting step at the level of post–translational processing and secretory trafficking. Although deletion of the B domain has been widely associated with enhanced recombinant FVIII expression, efficient secretion remains contingent upon correct protein folding, proper glycosylation, and coordinated interactions with endoplasmic reticulum chaperone systems, including BiP, calnexin, and calreticulin (Kaufman et al., 1997). In the absence of optimized intracellular trafficking and quality–

control mechanisms, nascent FVIII molecules are likely retained within the endoplasmic reticulum, resulting in intracellular accumulation and impaired progression through the ER–Golgi secretory pathway.

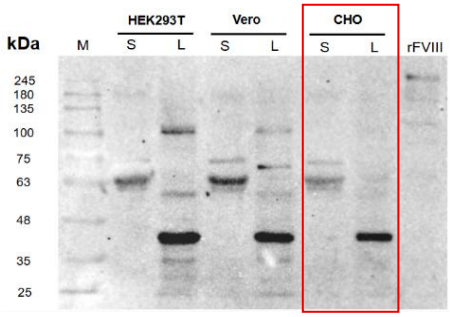


Fig. 3 Endogenous FVIII expression profile in HEK293T, Vero, and CHO cells. Lane 1: Marker (BlueEye Prestained, Protein Marker, Jena Bioscience), lane 2–3: HEK293T cell supernatant and cell lysate, lane 4–5: Vero cell supernatant and cell lysate, lane 6–7: CHO cell supernatant and cell lysate, lane 8: rFVIII or Kovaltry (positive control).

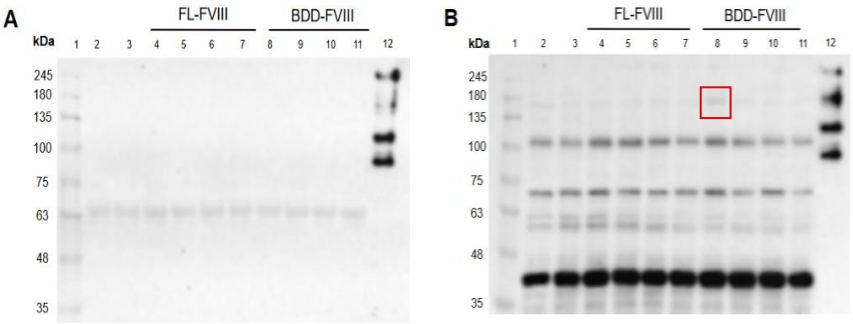


Fig. 4 Stability investigation of the full-length and BDD-circRNA. (A) Cell supernatant. Lane 2: negative control, Lane 3: CHO cells treated with Lipofectamine™ MessengerMAX™, lane 4–7: CHO cells transfected with FL-circRNA, lane 8–11: CHO cells transfected with BDD- circRNA, lane 12: Kovaltry (positive control). (B) Cell lysate. lane 2: negative control, lane 3: CHO cells treated with Lipofectamine™ MessengerMAX™, lane 4–7: CHO cells transfected with FL-circRNA. lane 8–11: CHO cells transfected with BDD-circRNA, lane 12: Kovaltry (positive control). Both cell supernatant and cell lysate were collected at 24-,48-,72-, and 96-hour post-transfection.

BDD-FVIII expression at 24-hour post-transfection

A replication experiment was performed in which CHO cells were transfected with either FL-circRNA or BDD-circRNA, followed by collection of cell lysates and culture supernatants at 24 hours post-transfection for Western blot analysis (Fig. 5). This study was designed to validate the previously observed differential expression profile, particularly the enhanced intracellular accumulation of FVIII in CHO cells transfected with

BDD-circRNA. Consistent with the initial results, a distinct approximately 170 kDa single-chain BDD-FVIII protein was clearly detected in the lysates of BDD-circRNA–transfected cells above the endogenous background (Fig. 5, lane 8). In contrast, no intact FVIII protein was detected in the corresponding culture supernatants. The absence of extracellular FVIII was attributed to deletion of the B domain, a structural region essential for efficient endoplasmic reticulum–to–Golgi trafficking and subsequent secretion of factor VIII, resulting in intracellular retention of the newly synthesized protein.

This replication experiment further substantiated the conclusion that circRNA constituted a promising expression platform for efficient intracellular translation of FVIII. Nevertheless, extracellular secretion remained markedly inefficient under the present experimental conditions, a limitation that was likely attributable to the absence of the B domain within the *F8* gene, which is critical for proper intracellular trafficking and secretion of factor VIII. Accordingly, future studies should focus on optimizing the BDD-circRNA construct through the incorporation of specific sequence elements that promote efficient intracellular trafficking and secretion of FVIII.

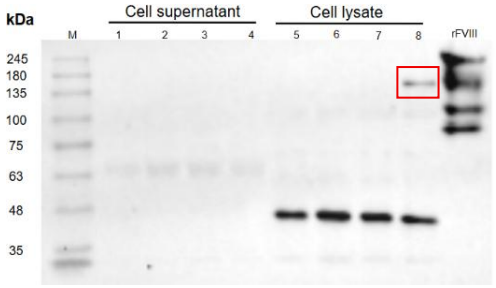


Fig. 5 24-hour post-transfection of FL-circRNA and BDD-circRNA. lane 1–4: Cell supernatant, lane 1: negative control, lane 2: Lipofectamine™ MessengerMAX™, lane 3: FL-circRNA, lane 4: BDD-circRNA, lane 5–8: Cell lysate, lane 5: negative control, lane 6: Lipofectamine™ MessengerMAX™, lane 7: FL-circRNA, lane 8: BDD-circRNA, Lane 9: Kovaltry (positive control).

Conclusion

In conclusion, our initial assessment confirmed that CHO cells exhibited the lowest endogenous FVIII expression background when compared to HEK293T and imHC cell lines, establishing their suitability for recombinant expression studies. Following transfection with the BDD-circRNA, FVIII distinguish from an endogenous background was undetectable in the cell supernatant, a result attributed to the removal of the B-domain, which is critical for efficient FVIII secretion. Critically, however, analysis of the cell lysate revealed a promising, distinct single-chain FVIII protein band in the BDD-circRNA group, demonstrating superior intracellular production compared to the FL-circRNA construct at 24-hour post-transfection.

Conflict of interest

The authors confirm that they have no competing financial or personal interests that could have influenced the work presented in this study.

Acknowledgements

We would like to express my deepest appreciation to our major advisor, Assistant Professor Dr. Pansakorn Tanratana, for his exceptional guidance and support throughout this research. His expert advice was critical in shaping the methodology and analysis of this study, and his continuous encouragement was invaluable in successfully completing this project.

We would like to extend my sincere gratitude to Associate Professor Dr. Patompon Wongtrakoongate for his invaluable contribution to this study. His generous provision of essential background knowledge regarding the principles and techniques for producing circular mRNA (circRNA) was instrumental in initiating this research. Furthermore, we acknowledge his critical support in supplying the necessary reagents that facilitated the successful execution of the transcription (IVT) and circularization procedures.

Artificial intelligence tools were utilized to assist in the polishing and refinement of the language in this study.

References

Abe, B.T., Amaya, L., Belk, J.A., et al. 2023. Engineering circular RNA for enhanced protein production. Nat. Biotechnol. 41: 262–272. doi.org/10.1038/s41587-022-01393-0

Arruda, V.R., Camire, R.M., Davidson, R.J., et al. 2017. Novel factor VIII variants with a modified furin cleavage site improve the efficacy of gene therapy for hemophilia A. J. Thromb. Haemost. 15: 110–121. doi.org/10.1111/jth.13543

Bezsonov, E., Chernyi, N., Gavrilova, D., Karabelsky, A., Malogolovkin, A., Oloruntimehin, E.S., Saruhanyan, M. 2024. Recent advances in gene therapy for hemophilia: Projecting the perspectives. Biomolecules 14: 7. doi.org/10.3390/biom14070854

Dalm, D., Grushin, K., Healey, J.F., Lollar, P., Miller, J., Parker, E.T., Stoilova-McPhie, S. 2014. Lack of recombinant factor VIII B-domain induces phospholipid vesicle aggregation: Implications for the immunogenicity of factor VIII. Haemophilia 20: 723–731. doi.org/10.1111/hae.12421

Dong, J., Lu, Y., Wang, W. 2023. Circular mRNA: A novel therapeutic agent. Biotechnol. Notes 4: 58–63. doi.org/10.1016/j.biotno.2023.09.001

Furie, B., Furie, B., Huang, M., Ngo, J.C., Roth, D.A. 2008. Crystal structure of human factor VIII: Implications for the formation of the factor IXa-factor VIIIa complex. Structure 16: 597–606. doi.org/10.1016/j.str.2008.03.001

Hu, Z., Li, Z., Liang, D.S., Wu, L., Wu, Y., Zhao, J.Y., Zhou, M.J. 2022. Targeted B-domain deletion restores F8 function in human endothelial cells and mice. Signal Transduct. Target. Ther. 7: 189. doi.org/10.1038/s41392-022-01016-9

Jaffrey, S.R., Unti, M.J. 2024. Highly efficient cellular expression of circular mRNA enables prolonged protein expression. Cell Chem. Biol. 31: 163–176. doi.org/10.1016/j.chembiol.2023.09.015

Kaufman, R.J., Moussalli, M., Pipe, S.W., Swaroop, M., Tagliavacca, L. 1997. Biosynthesis, assembly and secretion of coagulation factor VIII. Blood Coagul. Fibrinolysis 8: S3–14.

O'Donnell, J.S., O'Sullivan, J.M., Preston, R.J.S. 2019. Advances in understanding the molecular mechanisms that maintain normal haemostasis. Br. J. Haematol. 186: 24–36. doi.org/10.1111/bjh.15872

Pipe, S.W. 2009. Functional roles of the factor VIII B domain. Haemophilia 15: 1187–1196. doi.org/10.1111/j.1365-2516.2009.02026.x

Powell, J.S. 2009. Recombinant factor VIII in the management of hemophilia A: Current use and future promise. Ther. Clin. Risk Manag. 5: 391–402. doi.org/10.2147/tcrm.s4412

สาขาวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์

(Subject: Engineering and Architecture)

ภาคโปสเตอร์

(Poster Presentation)

การพัฒนาแพลตฟอร์มระดมทุนแบบคราวด์ฟันดิงด้วยเทคโนโลยีบล็อกเชน กรณีศึกษาโครงการพลังงานสำหรับอาคารสูง

Development of a Blockchain-based Crowdfunding Platform: Case study in Energy Projects for High-Rise Buildings

สุปรีชา ทองสกุลพานิชย์*, **สุวรรณี อัศวกุลชัย**
Suprecha Thongsakulpanich*, Suwannee Adsavakulchai
สาขาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์และเทคโนโลยีการเงิน คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยหอการค้าไทย กรุงเทพฯ 10400
Department of Computer Engineering and Financial Technology, Faculty of Engineering, University of the Thai Chamber of Commerce, Bangkok 10400, Thailand
*Corresponding author. E-mail address: tsuprecha@gmail.com

บทคัดย่อ

การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาแพลตฟอร์มต้นแบบระดมทุนแบบคราวด์ฟันดิงสำหรับโครงการพลังงานในอาคารสูงด้วยเทคโนโลยีบล็อกเชน เพื่อแก้ไขปัญหาข้อจำกัดด้านต้นทุนเริ่มต้นและการเข้าถึงแหล่งเงินทุนของเจ้าของอาคาร โดยดำเนินการพัฒนาแพลตฟอร์มตามวงจรการพัฒนาซอฟต์แวร์ ด้วยสถาปัตยกรรมแบบผสมผสานระหว่างเทคโนโลยี Web2 (Node.js, Express.js, Next.js, PostgreSQL) และ Web3 โดยใช้สัญญาอัจฉริยะภาษา Solidity บนเครือข่าย Optimism Sepolia Layer 2 เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพและลดค่าธรรมเนียมธุรกรรม ระบบที่พัฒนาครอบคลุมฟังก์ชันตั้งแต่ การลงทะเบียน การยืนยันตัวตนและตรวจสอบการฟอกเงิน การระดมทุน การจัดการสถานะโครงการ จนถึงการบริหารจัดการผลตอบแทนอัตโนมัติ ผลการทดสอบระบบและการทดสอบยอมรับจากผู้ใช้งานพบว่าแพลตฟอร์มทำงานได้ถูกต้อง แม่นยำ และความปลอดภัยในระดับสูง การศึกษานี้ยังแสดงให้เห็นว่าเทคโนโลยีบล็อกเชนช่วยเพิ่มประสิทธิภาพ ความโปร่งใส และสภาพคล่องในการระดมทุน ซึ่งสอดคล้องกับแผนยุทธศาสตร์ชาติในการขับเคลื่อนเศรษฐกิจดิจิทัลและเป้าหมายความเป็นกลางทางคาร์บอนของประเทศอีกด้วย

คำสำคัญ: โครงการพลังงานในอาคารสูง, คราวด์ฟันดิง, โทเคนดิจิทัล, บล็อกเชน, สัญญาอัจฉริยะ

Abstract

The objective of this study is to develop a blockchain-based crowdfunding platform prototype for energy projects in high-rise buildings, aiming to address the high initial costs and financing gaps faced by building owner. The platform was developed following the Software Development Life Cycle utilizing a hybrid architecture that integrates Web2 technologies (Node.js, Express.js, Next.js, PostgreSQL) with Web3 capabilities via Solidity-based Smart Contracts on the Optimism Sepolia network Layer 2 to enhance efficiency and minimize transaction fees. The developed system encompasses key functions, including Registration Identity Verification, Fundraising, Project status management, and automated return distribution. System testing and User Acceptance Testing results indicated that the platform operates with high accuracy, security, and user satisfaction. This study demonstrates that blockchain technology significantly improves fundraising efficiency, transparency, and liquidity, aligning with the national strategy for the digital economy and the country's carbon neutrality goals.

Keywords: Blockchain, Crowdfunding, Digital token, Energy project in high-rise building, Smart contract

คำนำ

ในศตวรรษที่ 21 ประชาคมโลกกำลังเผชิญกับวิกฤตการณ์การเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ ประเทศไทยได้ตั้งเป้าหมายความเป็นกลางทางคาร์บอน (Carbon Neutrality) ภายในปี ค.ศ. 2050 และการปล่อยก๊าซเรือนกระจกสุทธิเป็นศูนย์ (Net Zero) ภายในปี ค.ศ. 2065 (Ministry of Foreign Affairs Kingdom of Thailand, 2022) การบรรลุเป้าหมายเหล่านี้จำเป็นต้องอาศัยการปรับเปลี่ยนโครงสร้างทางพลังงานอย่างเร่งด่วน โดยเฉพาะในกลุ่มอาคารสูงและอาคารพาณิชย์ ซึ่งเป็นผู้ใช้พลังงานหลักและมีศักยภาพสูงในในการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจก อย่างไรก็ตามการดำเนินโครงการเหล่านี้ต้องเผชิญกับปัญหาด้านการเงินและการบริหารจัดการผลประโยชน์ของผู้มีส่วนได้ส่วนเสีย กล่าวคือ โครงการพลังงานในอาคารสูง เช่น ระบบผลิตพลังงานไฟฟ้าแสงอาทิตย์ การเพิ่มประสิทธิภาพระบบปรับอากาศ หรือระบบจัดการพลังงานในอาคารอัจฉริยะ จำเป็นต้องใช้ต้นทุนเริ่มต้นที่สูงมาก ซึ่งเป็นภาระหนักสำหรับเจ้าของอาคารที่มักขาดสภาพคล่อง ในขณะเดียวกัน นักลงทุนก็เผชิญกับความเสี่ยงจากความไม่แน่นอนของผลตอบแทน ขาดความโปร่งใส ขาดความเชื่อมั่น และมีต้นทุนธุรกรรมสูง ทำให้สถาบันการเงินประเมินความเสี่ยงไว้สูงและระมัดระวังในการปล่อยสินเชื่อ ส่งผลให้ผู้ประกอบการเหล่านี้ขาดโอกาสในการเข้าถึงแหล่งเงินทุนที่จำเป็น (วีรวิชญ์, 2025; นันทวัฒน์ และวาทิต, 2018)

เพื่อแก้ไขปัญหาดังกล่าว การระดมทุนแบบคราวด์ฟันดิงจึงเป็นทางเลือกที่มีประสิทธิภาพ โดยในบริบทของประเทศไทย การระดมทุนรูปแบบนี้ต้องอยู่ภายใต้การกำกับดูแลของพระราชบัญญัติหลักทรัพย์และตลาดหลักทรัพย์ พ.ศ. 2535 ซึ่งดูแลโดยคณะกรรมการกำกับหลักทรัพย์และตลาดหลักทรัพย์ (ก.ล.ต.) เพื่อคุ้มครองผู้ลงทุน อย่างไรก็ตามเมื่อเปรียบเทียบกับการระดมทุนในระบบดั้งเดิมที่ดำเนินการผ่านแพลตฟอร์มแบบรวมศูนย์สำหรับโครงการพลังงานในอาคารสูง จะพบข้อจำกัดสำคัญคือ ค่าธรรมเนียมตัวกลางในอัตราที่สูง กระบวนการแบ่งปันผลซับซ้อนและล่าช้า ต้องพึ่งพาการบริหารจัดการโดยมนุษย์ เสี่ยงต่อความผิดพลาด ขาดความโปร่งใสในการตรวจสอบเส้นทางการเงิน ปัญหาสภาพคล่องของเงินลงทุน และสินทรัพย์เปลี่ยนมือได้ยาก ดังนั้นเทคโนโลยีบล็อกเชนและสัญญาอัจฉริยะ ถูกนำมาประยุกต์ใช้เพื่อแก้ไขปัญหาข้างต้น โดยช่วยลดบทบาทตัวกลางทางการเงิน ทำให้ต้นทุนธุรกรรมเหลือเพียงค่าธรรมเนียมเครือข่าย อีกทั้งด้านการบริหารผลประโยชน์โดยใช้สัญญาอัจฉริยะช่วยการคำนวณและจัดสรรส่วนแบ่งรายได้เป็นไปอย่างอัตโนมัติ แม่นยำ โปร่งใส และตรวจสอบธุรกรรมได้ และเพิ่มสภาพคล่องของนักลงทุนจากการแปลงสิทธิ์การลงทุนเป็นโทเคนดิจิทัล ซึ่งสามารถเปลี่ยนมือได้และสร้างโอกาสให้นักลงทุนรายย่อยเข้าถึงได้มากขึ้น (Priyanka et al., 2024; ERIKA, 2022)

งานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นพัฒนาแพลตฟอร์มระดมทุนแบบคราวด์ฟันดิงด้วยเทคโนโลยีบล็อกเชนสำหรับกรณีศึกษาโครงการพลังงานในอาคารสูง โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อสร้างแพลตฟอร์มต้นแบบที่ช่วยเพิ่มโอกาสการเข้าถึงแหล่งเงินทุน เพิ่มประสิทธิภาพและความโปร่งใสในการทำธุรกรรมผ่านสัญญาอัจฉริยะ โดยเลือกใช้เครือข่าย Optimism Layer 2 เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพและความรวดเร็ว และเลือกใช้สกุลเงินดิจิทัลที่มีความผันผวนต่ำอย่าง USDC Stablecoin เป็นสื่อกลางในการลงทุนและจ่ายปันผลแทนการใช้เงินบาทหรือคริปโทเคอร์เรนซีทั่วไป เพื่อขจัดความเสี่ยงจากความผันผวนของราคาเหรียญ แพลตฟอร์มต้นแบบนี้มุ่งหวังที่จะช่วยเพิ่มโอกาสการเข้าถึงแหล่งเงินทุนของเจ้าของอาคารสำหรับโครงการพลังงานในอาคารสูง ลดความเสี่ยงให้นักลงทุน และสนับสนุนยุทธศาสตร์ชาติในการขับเคลื่อนเศรษฐกิจดิจิทัลเพื่อความยั่งยืนของประเทศ

อุปกรณ์และวิธีการ

การศึกษานี้ดำเนินการตามระเบียบวิธีวิจัยแบบวงจรการพัฒนาซอฟต์แวร์ (Software Development Life Cycle หรือ SDLC) โดยมีรายละเอียดขั้นตอนการดำเนินงาน เครื่องมือที่ใช้ และการออกแบบระบบ ดังนี้

การศึกษาและวิเคราะห์ปัญหา

ในขั้นตอนแรก ศึกษาและวิเคราะห์ปัญหาจากการทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง เพื่อทำความเข้าใจบริบทและนำมาวิเคราะห์จุดแข็งและจุดอ่อนของแพลตฟอร์มระดมทุนที่มีอยู่ในปัจจุบัน ตลอดจนศึกษาอุปสรรคเฉพาะเจาะจงของโครงการพลังงานในอาคารสูง จากนั้นจึงนำข้อมูลที่ได้มาวิเคราะห์ผู้มีส่วนได้ส่วนเสียเพื่อออกแบบระบบให้รองรับผู้ใช้งาน

การศึกษาความเป็นไปได้

ขั้นตอนนี้ดำเนินการศึกษาความเป็นไปได้โดยครอบคลุม 4 มิติสำคัญ ได้แก่

1. ความเป็นไปได้เชิงเทคนิค ประเมินคุณสมบัติเชิงเทคนิคของเทคโนโลยีบล็อกเชนในแก้ไขปัญหาความน่าเชื่อถือ โดยพิจารณาจากคุณสมบัติด้านความโปร่งใส ความไม่สามารถเปลี่ยนแปลงข้อมูลได้ และความเป็นส่วนตัวของข้อมูล รวมถึงความสามารถของสัญญาอัจฉริยะในการลดบทบาทของตัวกลาง

2. การวิเคราะห์ความเสี่ยงและแนวทางลดความเสี่ยง ทำการวิเคราะห์ข้อจำกัดและความเสี่ยงที่สำคัญของเทคโนโลยี ได้แก่ ความผันผวนของราคาคริปโทเคอร์เรนซี ปัญหาค่าธรรมเนียมธุรกรรมที่สูง (Gas Fees) และความเร็วในการประมวลผลธุรกรรม เพื่อนำมาออกแบบกลยุทธ์ทางเทคนิคที่แก้ไขปัญหาเหล่านี้

3. ความเป็นไปได้เชิงเศรษฐศาสตร์และการดำเนินงาน วิเคราะห์แนวทางการแปลงสิทธิ์ในผลประโยชน์ของโครงการพลังงานให้เป็นสินทรัพย์ดิจิทัล และสร้างกลไกสภาพคล่องให้กับนักลงทุน

4. เงื่อนไขทางกฎหมาย ศึกษาและวิเคราะห์ข้อกำหนดทางกฎหมายที่เกี่ยวข้องในประเทศไทย ประกอบด้วย พระราชบัญญัติหลักทรัพย์และตลาดหลักทรัพย์ พ.ศ. 2535 และพระราชกำหนดการประกอบธุรกิจสินทรัพย์ดิจิทัล พ.ศ. 2561 นอกจากนี้ยังรวมถึงการปฏิบัติตามกฎหมายป้องกันและปราบปรามการฟอกเงินและพระราชบัญญัติคุ้มครองข้อมูลส่วนบุคคล

การออกแบบระบบและเลือกใช้เทคโนโลยี

ในขั้นการออกแบบสถาปัตยกรรมระบบ แผนภาพ Unified Modeling Language (UML) ได้ถูกนำมาใช้ เพื่อกำหนดโครงสร้างแบบผสมผสานที่เชื่อมโยงการทำงานระหว่างเทคโนโลยี Web2 และ Web3 เข้าด้วยกัน โดยเริ่มต้นจากการสร้างแผนภาพกรณีการใช้งาน (Use Case Diagram) และแผนภาพกิจกรรม (Activity Diagram) เพื่อกำหนดขอบเขตและปฏิสัมพันธ์ของผู้ใช้งานกับระบบ ในขณะเดียวกันแผนภาพลำดับ (Sequence Diagram) ได้ถูกใช้เพื่อกำหนดลำดับการทำงานระหว่าง ส่วนติดต่อผู้ใช้งาน ส่วนประมวลผลฝั่งเซิร์ฟเวอร์ ฐานข้อมูล และสัญญาอัจฉริยะ นอกจากนี้ยังได้ออกแบบโครงสร้างข้อมูลผ่านแผนภาพคลาส (Class Diagram) เพื่อจำแนกองค์ประกอบออกเป็น 2 ส่วนหลัก ได้แก่

1. ส่วนประมวลผลนอกบล็อกเชน (Off-chain) ทำหน้าที่จัดการข้อมูลทั่วไปและข้อมูลส่วนบุคคลที่มีความละเอียดอ่อน ซึ่งต้องปฏิบัติตามกฎหมายคุ้มครองข้อมูลส่วนบุคคล รวมถึงการประมวลผลข้อมูลที่มีความซับซ้อนและต้องการความรวดเร็วในการเรียกดูข้อมูล โดยเทคโนโลยีที่ใช้ในส่วนการติดต่อผู้ใช้งาน (Frontend) เลือกใช้ Next.js ร่วมกับ React.js เพื่อสร้างเว็บแอปพลิเคชันที่ตอบสนองรวดเร็วและรองรับ Server-Side Rendering (SSR) สำหรับส่วนประมวลผลฝั่งเซิร์ฟเวอร์ ถูกพัฒนาด้วย Node.js และ Express.js เพื่อสร้าง RESTful API สำหรับจัดการตรรกะทางธุรกิจเชื่อมต่อกับผู้ให้บริการภายนอก และบริหารจัดการฐานข้อมูลโดยใช้ PostgreSQL เป็นระบบฐานข้อมูลเชิงสัมพันธ์ในการจัดเก็บข้อมูลผู้ใช้งานและรายละเอียดโครงการ

2. ส่วนประมวลผลบนบล็อกเชน (On-chain) ทำหน้าที่ในการจัดการธุรกรรมทางการเงินที่ต้องการความโปร่งใสและไม่สามารถเปลี่ยนแปลงข้อมูลได้ โดยใช้สัญญาอัจฉริยะในการควบคุมกฎเกณฑ์การระดมทุน สร้างสินทรัพย์ดิจิทัล

และการคำนวณส่วนแบ่งผลตอบแทนให้เป็นไปโดยอัตโนมัติ นอกจากนี้สัญญาอัจฉริยะถูกพัฒนาด้วยภาษา Solidity ทำงานบนเครือข่ายบล็อกเชน Optimism Sepolia Layer 2 เพื่อลดค่าธรรมเนียมและเพิ่มความเร็วธุรกรรม ทั้งนี้ กระบวนการพัฒนาและทดสอบสัญญาอัจฉริยะดำเนินการผ่านกรอบการทำงาน Hardhat ร่วมกับไลบรารี Ethers.js และ Wagmi ในการเชื่อมต่อระหว่างเว็บแอปพลิเคชันและเครือข่ายบล็อกเชน

การพัฒนาแพลตฟอร์ม

การพัฒนาแบ่งออกเป็น 2 ส่วนหลักที่ทำงานประสานกัน ได้แก่

ส่วนสัญญาอัจฉริยะ

ระบบถูกออกแบบเป็นสถาปัตยกรรมแบบแยกส่วน โดยกำหนดเงื่อนไขและการทำงานหลัก 3 ส่วน ดังนี้

1. สัญญา ProjectFactory เป็นสัญญาอัจฉริยะที่ทำหน้าที่เป็นแม่แบบในการสร้างสัญญาอัจฉริยะสำหรับแต่ละโครงการเพื่อให้มีมาตรฐานเดียวกัน โดยสัญญาอัจฉริยะนี้จะสร้างสัญญา ProjectManagement และ ProjectToken ควบคู่กัน พร้อมทั้งกำหนดค่าเริ่มต้นและเชื่อมโยงสิทธิ์การบริหารจัดการระหว่างกันโดยอัตโนมัติ

2. สัญญา ProjectManagement ทำหน้าที่เป็นศูนย์กลางควบคุมสถานะและตรรกะทางการเงินของโครงการ โดยมีเงื่อนไขสำคัญได้แก่ เปิดรับระดมทุนพร้อมทั้งตรวจสอบเงื่อนไขเวลาและเป้าหมายระดมทุน ถอนเงินลงทุนสำหรับนักลงทุนเมื่อโครงการระดมทุนไม่สำเร็จ ส่งคำสั่งสร้างโทเคนให้นักลงทุนตามสัดส่วนเงินลงทุนในกรณีระดมทุนสำเร็จ อนุญาตเบิกถอนเงินทุนให้เจ้าของอาคาร รวมถึงรองรับการฝากเงินปันผลกลับเข้ามาในระบบ

3. สัญญา ProjectToken Contract เป็นสัญญามาตรฐาน ERC-20 ที่ใช้แสดงสิทธิ์ความเป็นเจ้าของโครงการ โดยมีเงื่อนไขจำกัดสิทธิ์ฟังก์ชันการสร้างโทเคนผ่านทางสัญญา ProjectManagement เพื่อป้องกันการสร้างเหรียญเกินจำนวนเงินลงทุนจริงและควบคุมจำนวนโทเคนให้สอดคล้องกับเงินระดมทุนของโครงการเสมอ

ส่วนเว็บแอปพลิเคชันและระบบป้องกันการฟอกเงิน

ส่วนนี้ได้ดำเนินการพัฒนาส่วนติดต่อผู้ใช้งาน ควบคู่ไปกับการพัฒนาระบบประมวลผลฝั่งเซิร์ฟเวอร์ที่ทำหน้าที่เชื่อมต่อกับบริการภายนอกเพื่อจำลองกระบวนการตรวจสอบมาตรการป้องกันการฟอกเงิน และเชื่อมต่อกับเครือข่ายบล็อกเชนผ่านโปรโตคอล RPC สำหรับดึงข้อมูลและแสดงผลสถานะของสัญญา นอกจากนี้ ระบบบริการเบื้องหลังได้ถูกพัฒนา เพื่อตรวจสอบติดตามสถานะของโครงการบนเครือข่ายบล็อกเชน และแก้ไขสถานะในฐานข้อมูลโดยอัตโนมัติ

การทดสอบระบบ

การทดสอบถูกดำเนินการใน 3 ระดับ

Unit Testing

ทดสอบระบบย่อยของสัญญาอัจฉริยะ และ API เพื่อตรวจสอบตรรกะและการจัดการข้อผิดพลาด

Integration Testing

ทดสอบการทำงานร่วมกันระหว่าง ส่วนติดต่อผู้ใช้งาน Backend และสัญญาอัจฉริยะบนเครือข่าย Optimism Sepolia เพื่อตรวจสอบความถูกต้องของกระบวนการตั้งแต่ต้นจนจบ เนื่องจากเป็นเครือข่ายที่เลียนแบบสถาปัตยกรรมของ

Optimism Mainnet ทั้งหมด แต่ใช้เหรียญ ETH จำลองที่ไม่มีมูลค่าจริงในการชำระค่าธรรมเนียม สามารถตรวจสอบสัญญาอัจฉริยะและประสิทธิภาพของระบบได้โดยไม่มีความเสี่ยงทางการเงิน

User Acceptance Testing (UAT)

ทำการทดสอบกับกลุ่มผู้ใช้งานตัวอย่างเพื่อประเมินความพึงพอใจและการใช้งานจริง

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

บทนี้นำเสนอผลการศึกษาที่ได้จากการดำเนินงานวิจัยตามวงจรการพัฒนาซอฟต์แวร์ (SDLC) ดังนี้

ผลการศึกษาและรวบรวมข้อมูล

จากการทบทวนวรรณกรรมพบว่า โครงการพลังงานในอาคารสูงประสบปัญหาต้นทุนสูง คืนทุนช้า และขาดความโปร่งใส ทำให้สถาบันการเงินปล่อยกู้ยากและนักลงทุนขาดความเชื่อมั่นและขาดสภาพคล่อง (วีรวิชญ์, 2025; นันทวัฒน์และวาทิต, 2018) การใช้เทคโนโลยีบล็อกเชน จึงเป็นทางออกที่ช่วยเพิ่มความโปร่งใส ตรวจสอบเส้นทางการเงินได้ รวมถึงสร้างสภาพคล่องและปันผลอัตโนมัติผ่านระบบโทเคน (Priyanka et al.,, 2024; Rotem Shneor, 2020)"

ผลการศึกษาความเป็นไปได้

จากผลการศึกษาความเป็นไปได้ พบว่าปัญหาสำคัญต่อการบูรณาการเทคโนโลยีบล็อกเชนคือ อัตราค่าธรรมเนียม (Gas Fee) ที่สูง และความล่าช้าในการทำธุรกรรมบนเครือข่าย Ethereum ดังนั้นเพื่อเป็นการแก้ไขปัญหาดังกล่าว การศึกษานี้เลือกใช้เครือข่าย Optimism Sepolia ที่เลียนแบบมาจากสถาปัตยกรรมของ Optimism Mainnet ทั้งหมด ซึ่งเป็นเทคโนโลยี Layer 2 Scaling Solution ที่ทำงานด้วยกลไกรวบรวมและประมวลผลธุรกรรมนอกเครือข่ายหลักก่อนบันทึกผลสรุปลงสู่เครือข่ายหลัก อีกทั้งเมื่อพิจารณาเปรียบเทียบโครงสร้างต้นทุนกับวิธีการระดมทุนแบบดั้งเดิมในกิจกรรมต่าง ๆ พบว่าการใช้เทคโนโลยีบล็อกเชน Layer 2 มีความได้เปรียบดังนี้

1. ต้นทุน Gas fee ในการสร้างสัญญาอัจฉริยะและโทเคนโครงการมีลักษณะเป็นต้นทุนคงที่ที่ต่ำมาก เมื่อเทียบกับค่าธรรมเนียมแรกเข้าหรือค่าธรรมเนียมการจัดเตรียมเอกสารของแหล่งทุนสถาบัน
2. ผู้ลงทุนไม่มีภาระค่าใช้จ่ายในการถือครองสินทรัพย์ดิจิทัลในกระเป๋าเงิน ซึ่งแตกต่างจากการฝากเงินหรือบัญชีหลักทรัพย์ที่อาจมีค่าธรรมเนียมรักษาบัญชีรายปี
3. ค่าธรรมเนียมธุรกรรมในการโอน USDC เพื่อลงทุนบน Layer 2 มีอัตราที่ต่ำมาก ซึ่งต่ำกว่าค่าธรรมเนียมในระบบระดมทุนออนไลน์ทั่วไปหรือค่าธรรมเนียมการโอนเงินระหว่างประเทศมาก
4. การใช้สัญญาอัจฉริยะกระจายผลตอบแทนช่วยลดภาระงานบริหารจัดการของตัวกลางลง

นอกจากนี้ USDC Stablecoin ถูกจำลองและใช้เป็นสื่อกลางในการแลกเปลี่ยนเพื่อลดความเสี่ยงจากความผันผวนของราคาคริปโทเคอร์เรนซี อย่างไรก็ตาม เนื่องจากการระดมทุนบนแพลตฟอร์มต้นแบบนี้ดำเนินการด้วยสกุลเงิน USDC ที่อ้างอิงมูลค่ากับดอลลาร์สหรัฐ แทนการใช้สกุลเงินบาท จึงเป็นประเด็นที่นักลงทุนต้องพิจารณาถึงความเสี่ยงจากความผันผวนของอัตราแลกเปลี่ยนเงินตราเพื่อเข้าลงทุนหรือรับผลตอบแทน นอกจากนี้ มาตรฐาน ERC20 Token ถูกเลือกใช้ในการแปลงสิทธิ์ความเป็นเจ้าของโครงการให้เป็นสินทรัพย์ดิจิทัล เนื่องจากเป็นมาตรฐานสากลที่สามารถทำงานร่วมกับกระเป๋าเงินดิจิทัลและกระดานแลกเปลี่ยนทั่วไปได้ อีกทั้งสามารถตรวจสอบยอดถือครอง โอนย้ายผู้ถือครองเพื่อเพิ่มสภาพคล่องให้กับนักลงทุน (Priyanka et al.,, 2024; Anish Shree Kandel, 2026)

ผลการวิเคราะห์ความต้องการและการออกแบบระบบ

ผลจากจากการวิเคราะห์ความต้องการได้ถูกนำมาใช้ออกแบบสถาปัตยกรรมแบบผสม โดยแยกส่วนข้อมูลที่มีความอ่อนไหวออกจากข้อมูลสาธารณะบนเครือข่ายบล็อกเชน นอกจากนี้ การนำ Activity Diagram และ Class Diagram มาประยุกต์ใช้ ช่วยให้เห็นภาพรวมของกระบวนการและการโต้ตอบระหว่างผู้ใช้กับระบบอย่างเป็นลำดับขั้น โดยมีผลลัพธ์ดังนี้

Fig. 1 แสดงกิจกรรมลำดับขั้นตอนกระบวนการตั้งแต่ต้นจนจบ โดยเริ่มต้นจากกระบวนการลงทะเบียนและยืนยันตัวตนของผู้ใช้งาน การสร้างและอนุมัติโครงการระดมทุน การทำธุรกรรมการลงทุนด้วยสกุลเงินดิจิทัล การสร้างและแจกจ่ายโทเคนดิจิทัลเมื่อโครงการระดมทุนสำเร็จ ไปจนถึงขั้นตอนสุดท้ายคือการบริหารจัดการผลตอบแทนและการรับเงินปันผลของนักลงทุน โดยจำแนกขอบเขตระหว่างผู้ใช้งานและโครงการระดมทุน

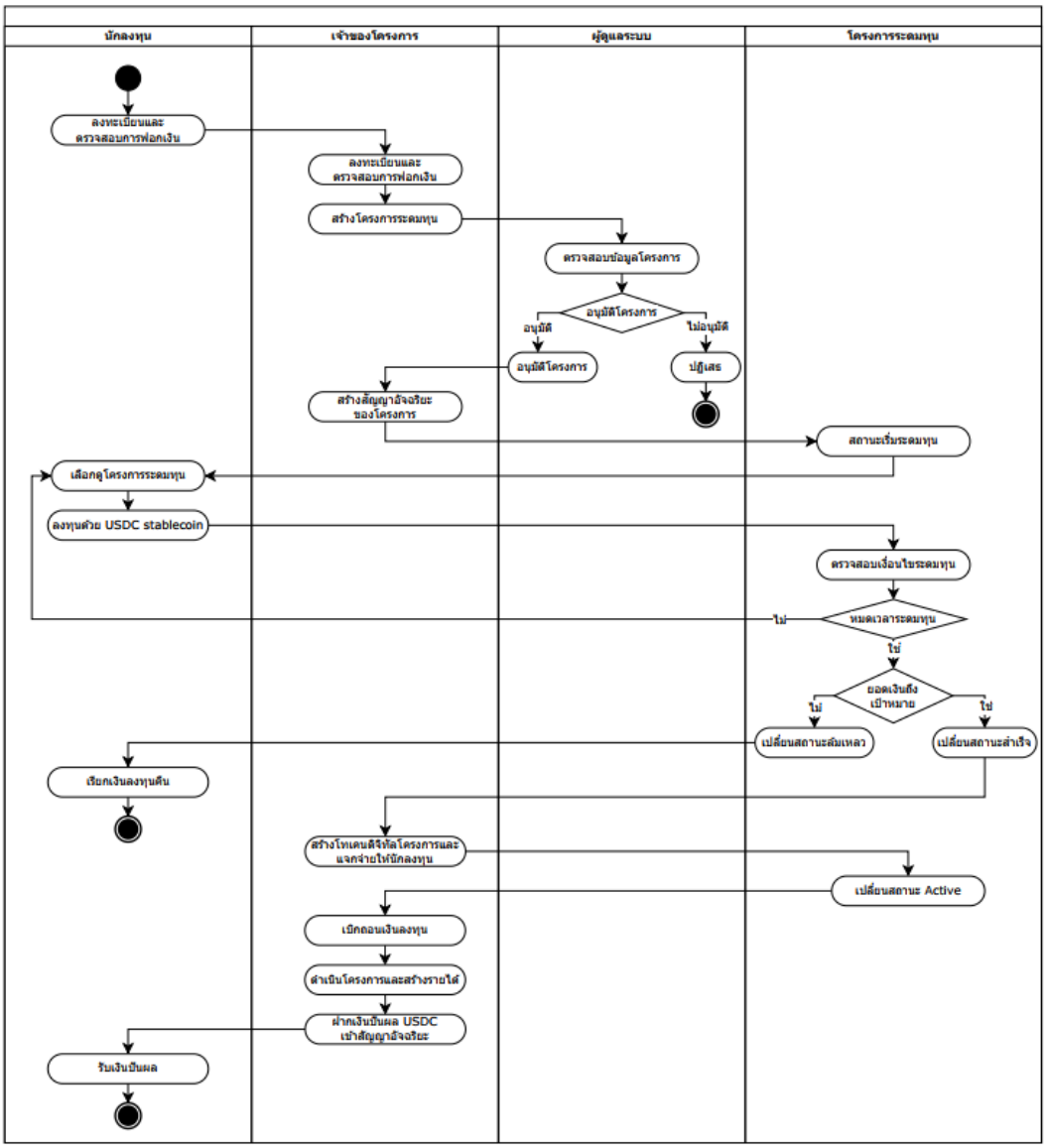


Fig. 1 Activity diagram of the blockchain-based crowdfunding platform for the high-rise building energy project case study

Fig. 2 แสดงโครงสร้างเชิงวัตถุของระบบที่ออกแบบให้เชื่อมโยงระหว่างระบบฐานข้อมูล และระบบสัญญาอัจฉริยะ โดยในส่วนจัดการข้อมูลผู้ใช้งาน ได้กำหนดคลาสพื้นฐานเพื่อจัดเก็บข้อมูลสำคัญ เช่น รหัสผู้ใช้ ที่อยู่กระเป๋าเงินดิจิทัล และสถานะการยืนยันตัวตน ซึ่งทำหน้าที่เป็นคลาสต้นแบบส่งต่อคุณสมบัติไปยังผู้ใช้งาน 3 กลุ่มหลัก ได้แก่ ผู้ดูแลระบบ นักลงทุน และเจ้าของโครงการ ควบคู่ไปกับคลาสโครงการที่ทำหน้าที่เก็บรายละเอียดเชิงลึกไว้ในฐานข้อมูล

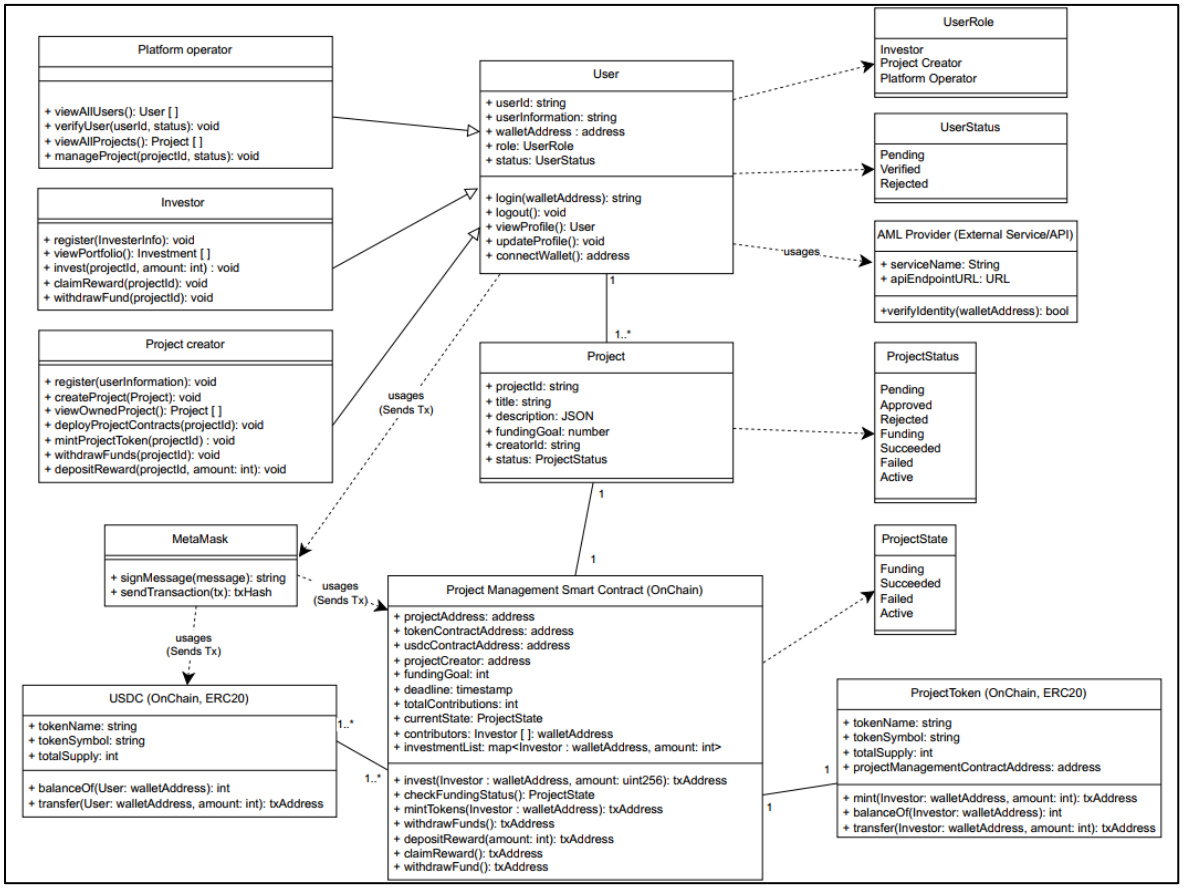


Fig. 2 Class diagram of the blockchain-based crowdfunding platform for the high-rise building energy project case study

สำหรับส่วนสถาปัตยกรรมบนบล็อกเชน สัญญาอัจฉริยะจัดการโครงการ เป็นแกนหลักในการควบคุมเงื่อนไขการระดมทุนและธุรกรรมทางการเงิน โดยทำงานร่วมกับ สัญญาอัจฉริยะโทเคนโครงการ ตามมาตรฐาน ERC20 เพื่อแสดงสิทธิ์ความเป็นเจ้าของ ซึ่งสิทธิ์การสร้างโทเคนจะถูกจำกัด ทำได้ผ่านสัญญาอัจฉริยะหลักเท่านั้น นอกจากนี้ ระบบยังรองรับการแลกเปลี่ยนด้วยเหรียญที่มีมูลค่าคงที่ USDC Stablecoin และเชื่อมต่อกับระบบภายนอกผ่าน MetaMask เพื่อลงนามธุรกรรม รวมถึงมีระบบ AML Provider เพื่อป้องกันการฟอกเงิน อีกทั้งยังมีการใช้คลาสค่าคงที่ เพื่อกำหนดสถานะมาตรฐานให้ข้อมูลระหว่างฐานข้อมูลและบล็อกเชนมีความสอดคล้องกัน

ผลการพัฒนาแพลตฟอร์ม

แพลตฟอร์มต้นแบบที่พัฒนาขึ้นสามารถรองรับกระบวนการทำงานหลักได้ครบถ้วนตามขอบเขตที่กำหนด โดยมีโดยมีรายละเอียดดังนี้

ระบบการลงทะเบียนและยืนยันตัวตน

แพลตฟอร์มสามารถรองรับการลงทะเบียนผู้ใช้งานผ่านเว็บแอปพลิเคชันได้อย่างสมบูรณ์ ผู้ใช้งานเริ่มต้นด้วยการเชื่อมต่อกระเป๋าเงิน MetaMask ซึ่งทำหน้าที่เป็น Digital Identity ของผู้ใช้ และตรวจสอบความถูกต้องของลายเซ็นดิจิทัล (Digital Signature Verification) เพื่อยืนยันว่าผู้ใช้งานเป็นเจ้าของกระเป๋าเงินจริง นอกจากนี้ ระบบยังได้จำลองกระบวนการป้องกันการฟอกเงิน (Anti-Money Laundering: AML) ซึ่งเป็นมาตรการตรวจสอบเพื่อป้องกันไม่ให้มีการนำเงินที่ได้จากการกระทำผิดกฎหมายเข้าสู่ระบบการเงิน โดยในการศึกษานี้เลือกใช้วิธีการคัดกรองที่อยู่กระเป๋าเงินดิจิทัลผ่านการเชื่อมต่อ API กับผู้ให้บริการภายนอก เพื่อตรวจสอบรายชื่อผู้ถูกคว่ำบาตรและประเมินความเสี่ยงของธุรกรรม เมื่อผู้ใช้งานผ่านการตรวจสอบ ระบบจึงจะอนุญาตให้ใช้งาน

ระบบสร้างและบริหารจัดการโครงการ

ระบบอนุญาตให้เจ้าของโครงการที่ผ่านการลงทะเบียนแล้ว สร้างโครงการระดมทุนโดยระบุรายละเอียดเชิงลึก เช่น แผนการเงินและเอกสารทางเทคนิค เมื่อโครงการได้รับอนุมัติจากผู้ดูแลระบบแล้ว เจ้าของโครงการสามารถสร้างสัญญาอัจฉริยะของโครงการขึ้นสู่เครือข่าย Optimism Sepolia โดยอัตโนมัติ พร้อมทั้งบันทึกที่อยู่สัญญาลงฐานข้อมูล

กระบวนการระดมทุนและการลงทุน

ในส่วนของการนำเสนอข้อมูลผ่านหน้าต่างแสดงผลโครงการ ระบบสามารถแสดงสถานะความคืบหน้าของการระดมทุนได้ทันที โดยอาศัยข้อมูลโดยตรงจากเครือข่ายบล็อกเชน จากการทดสอบกระบวนการลงทุนพบว่าระบบมีความเร็วในการยืนยันผลธุรกรรมภายในระยะเวลาเฉลี่ยเพียง 2-5 วินาที มีความถูกต้องแม่นยำของสัญญาอัจฉริยะในการตรวจสอบและปฏิเสธธุรกรรมที่ไม่เป็นไปตามเงื่อนไขที่กำหนดไว้ เช่น การระบุยอดเงินลงทุนที่มากกว่าเป้าหมายระดมทุน

การจัดการโทเคนและผลตอบแทน

เมื่อการระดมทุนสำเร็จ ระบบสามารถเปลี่ยนสถานะและอนุญาตให้เจ้าของโครงการสร้างโทเคนดิจิทัลได้ ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าระบบสามารถคำนวณสัดส่วนโทเคนและกระจายเข้าสู่กระเป๋าของนักลงทุนทุกคนได้อย่างถูกต้องและรวดเร็ว ในส่วนของการจ่ายเงินปันผล ระบบรองรับการฝากเงิน Stablecoin เข้าสู่สัญญาอัจฉริยะ และเมื่อนักลงทุนเรียกรับเงินปันผล สัญญาอัจฉริยะจะคำนวณยอดเงินที่พึงได้รับตามระยะเวลาการถือครองและสัดส่วนโทเคน และโอนเงินเข้ากระเป๋านักลงทุนได้อย่างถูกต้อง

ผลการทดสอบประสิทธิภาพและความถูกต้อง

ผลการทดสอบเชิงเทคนิคยืนยันถึงความเสถียรและความถูกต้องของระบบ ดังรายละเอียดในตารางข้อมูล

จาก Table 1 จะเห็นได้ว่าสัญญาอัจฉริยะหลักของโครงการทั้ง 2 มีค่าความครอบคลุมของการทดสอบในระดับ 100% ซึ่งหมายความว่าทุกบรรทัดของโค้ดที่ควบคุมตรรกะการเงินได้รับการตรวจสอบแล้ว ส่วนค่าเฉลี่ยรวมที่ลดลงเกิดจากไฟล์ สัญญาอัจฉริยะจำลอง USDC stablecoin และ สัญญาอัจฉริยะจัดการแพลตฟอร์ม ไม่ได้ถูกทดสอบระดับ Unit Test นี้ แต่ได้รับการตรวจสอบแล้วในการทดสอบระดับระบบ

Table 1 Test coverage report of the smart contracts

File	% Stmts	% Branc	% Funcs	% Lines	Uncovered Lines
contracts\	84.72	89.19	78.26	87.88	
IProjectManage-ment.sol	100	100	100	100	
MockedUSDC.sol	0	0	0	0	14,18,22
ProjectFactory.sol	0	100	0	0	...54,55,56,58
ProjectManage-ment.sol	100	90.63	100	100	
ProjectToken.sol	100	100	100	100	
All files	84.72	89.19	78.26	87.88	

สำหรับการทดสอบระบบ Backend ด้วยเครื่องมือ Jest พบว่าจากจำนวนกรณีทดสอบทั้งหมด 138 กรณี ระบบสามารถทำงานได้ถูกต้องทั้งหมดครอบคลุมทั้งการจัดการผู้ใช้งาน, ตรรกะการลงทุน, และการจัดการข้อผิดพลาดต่างๆ

ผลการประเมินความพึงพอใจของผู้ใช้งาน

จากการเก็บรวบรวมข้อมูลความพึงพอใจจากกลุ่มผู้ใช้งานตัวอย่างจำนวน 15 คน โดยใช้เกณฑ์การประเมิน 5 ระดับ ได้ผลสรุปดังแสดงใน Table 2

Table 2 Summary of user satisfaction evaluation (n = 15)

Evaluation Items	Mean Score	Satisfaction Level
Confidence in Blockchain Technology	3.72	Moderate
System Security	4.65	High
System Performance and Efficiency	4.43	Very High
Aesthetics and Design	3.27	Moderate
Total Average	4.018	High

ผลการประเมินชี้ให้เห็นว่า จุดเด่นที่สุดของแพลตฟอร์มคือ ความปลอดภัยของระบบ เนื่องจากธุรกรรมบนบล็อกเชนยากต่อการถูกโจรกรรม ไม่สามารถเปลี่ยนแปลง และตรวจสอบได้ ในอันดับถัดมา ผู้ใช้งานรับรู้ถึงประสิทธิภาพการทำงานเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ต่างจากการใช้งานเครือข่ายบล็อกเชน Ethereum แบบเดิม ซึ่งเป็นผลโดยตรงจากการเลือกใช้เครือข่าย Layer 2 Optimism ที่ทำให้ธุรกรรมรวดเร็วและราคาถูก อย่างไรก็ตาม คะแนนด้านความมั่นใจในเทคโนโลยีและความสวยงาม ที่อยู่ในระดับปานกลาง สะท้อนให้เห็นถึงความจำเป็นในการให้ความรู้แก่ผู้ใช้งาน และการปรับปรุงส่วนติดต่อผู้ใช้งานให้ง่ายและทันสมัยมากขึ้น รวมถึงการป้องกันการโจมตีและข้อมูลรั่วไหลจากระบบฐานข้อมูล

สรุป

งานวิจัยฉบับนี้ได้นำเสนอการพัฒนาแพลตฟอร์มระดมทุนแบบคราวด์ฟันดิงด้วยเทคโนโลยีบล็อกเชน เพื่อเป็นทางเลือกใหม่ในการระดมทุนสำหรับโครงการพลังงานในอาคารสูง โดยดำเนินการตามวงจรการพัฒนาซอฟต์แวร์ SDLC และประยุกต์ใช้เทคโนโลยี Web3 บนเครือข่าย Optimism Sepolia ร่วมกับ Web2 ผลการศึกษาและการพัฒนาแพตฟอร์ม

ต้นแบบ พบว่าการบูรณาการเทคโนโลยีสมัยใหม่เข้ากับเทคโนโลยีบล็อกเชนสามารถสร้างระบบนิเวศทางการเงินที่มีประสิทธิภาพ โปร่งใส และต้นทุนต่ำได้จริง

นอกจากนี้ การศึกษาสามารถแก้ไขปัญหาคอขวดของการระดมทุนแบบดั้งเดิมได้หลายประการ ได้แก่ ลดต้นทุนตัวกลางและค่าธรรมเนียมธุรกรรม เพิ่มความโปร่งใสและความน่าเชื่อถือด้วยสัญญาอัจฉริยะ ขจัดความผันผวนของราคาด้วย Stablecoin สร้างกลไกการจ่ายผลตอบแทนที่อัตโนมัติและตรวจสอบได้ และการแปลงสิทธิ์การลงทุนเป็นโทเคนดิจิทัลเพื่อเพิ่มสภาพคล่องให้กับนักลงทุน

ในเชิงนโยบาย แพลตฟอร์มนี้สอดคล้องและสนับสนุนยุทธศาสตร์ชาติ 20 ปีของประเทศไทย ในด้านการสร้างความสามารถในการแข่งขันและการเติบโตที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม โดยเป็นเครื่องมือสำคัญที่จะช่วยปลดล็อกเม็ดเงินลงทุนจากภาคประชาชนเข้าสู่ภาคพลังงานสะอาด ช่วยให้โครงการประหยัดพลังงานขนาดเล็กและกลางสามารถเกิดขึ้นได้จริง ซึ่งเป็นแรงผลักดันที่ช่วยให้ประเทศไทยบรรลุเป้าหมายความเป็นกลางทางคาร์บอนภายในปี ค.ศ. 2050 และ การปล่อยก๊าซเรือนกระจกสุทธิเป็นศูนย์ภายในปี ค.ศ. 2065 ได้อย่างยั่งยืน

กิตติกรรมประกาศ

การศึกษาวิจัยฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยความกรุณาและความช่วยเหลืออย่างดียิ่งจาก รองศาสตราจารย์ ดร. สุวรรณี อัศวกุลชัย ผู้ซึ่งได้สละเวลาอันมีค่าในการให้คำปรึกษา แนะนำแนวคิด ตรวจทาน และแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆ ด้วยความเอาใจใส่และวิริยอุตสาหะตลอดระยะเวลาการดำเนินงาน ผู้ศึกษาขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง และขอขอบคุณคณาจารย์ประจำหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์และเทคโนโลยีการเงิน มหาวิทยาลัยหอการค้าไทย ทุกท่านที่ได้ให้ความรู้และประสบการณ์อันเป็นรากฐานสำคัญในการวิจัยครั้งนี้

เอกสารอ้างอิง

นันทวัฒน์ พรเลิศกชกร, วาทิต อินทุลักษณ์, ชาคริต ศรีสกุน. 2561. ปัญหา อุปสรรค และความท้าทายของการระดมทุนสาธารณะสำหรับวิสาหกิจขนาดกลางและขนาดย่อม. วารสารวิทยาลัยดุสิตธานี 13: 1–15. https://so01.tci-thaijo.org/index.php/journaldtc/article/download/130356/97794/, 7 เมษายน 2569.

วีรวิชญ์ ภมรสมิต. 2568. การส่งเสริมและสนับสนุนการติดตั้ง Solar Rooftop อาคารโรงงาน อาคารพาณิชย์ และอาคารอื่น ๆ เพื่อส่งเสริมการใช้พลังงานทดแทนและลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกตามเป้าหมายปี 2030. https://www.ocsc.go.th/wp-content/uploads/2025/06/IS10151_วีรวิชญ์ภมรสมิต_สนับสนุนติดตั้ง-solar-rooftop-1.pdf, 7 เมษายน 2569.

Gupta, P., Sangle, V., Patil, R., Jadhav, A., Aher, M., Khivansara, S. 2024. A Comparative Dive into Crowdfunding Methods - Traditional vs Blockchain. Int. J. Res. Publ. Rev. 5: 60–63.

Jáki, E., Csepy, G., Kovács, N. 2022. Conceptual framework of the crowdfunding success factors – Review of the academic literature. Acta Oecon. 72: 393–412. doi: 10.1556/032.2022.00028

Kandel, A.S. 2022. Research on the Mechanism Issues and Limitations of Traditional Crowdfunding Platforms and Application of Blockchain Technology to Enhance the Way of Investment and Funding. doi: 10.13140/RG.2.2.14579.91686

Ministry of Foreign Affairs Kingdom of Thailand. 2022. The Prime Minister participated in the World Leaders Summit during the 26th United Nations Framework Convention on Climate Change Conference of the

Parties (UNFCCC COP26) in Glasgow United Kingdom. https://www.mfa.go.th/en/content/cop26-glasgow?page=5d5bd3cb15e39c306002a9ac&menu=5d5bd3cb15e39c306002a9ad, 7 เมษายน 2569.

Shneor, R. 2020. Crowdfunding Models Strategies and Choices Between Them. ใน: Shneor, R., Zhao, L., Flåten, B.T. (Eds.). Advances in Crowdfunding. Palgrave Macmillan. Cham, Switzerland, pp. 21–42. doi: 10.1007/978-3-030-46309-0_2

Aerodynamic Optimization of a Savonius Wind Turbine Using Multiple Configurations of Fixed Deflectors

Blanchard Basile[a,b,*], Weerachai Chaiworapuek[a], Jay-Tawee Pukrushpan[a]

[a]Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Kasetsart University, Bangkok 10900, Thailand

[b]Mechanical Engineering, ECAM LaSalle Campus of Lyon, Lyon 69005, France

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

Abstract

Savonius wind turbines are well suited for urban wind energy harvesting due to their omnidirectional operation and low startup speed; however, their aerodynamic efficiency remains limited by the negative torque generated on the returning blade. One effective passive strategy to mitigate this limitation is the use of external deflectors to redirect and accelerate the incoming airflow toward the advancing blade. This study presents a comparative three-dimensional CFD investigation of a Savonius wind turbine equipped with multiple fixed deflector configurations, including flat, curved (arc-shaped), and convergent Venturi-type geometries. All configurations were evaluated under identical operating conditions using transient simulations in ANSYS Fluent, allowing a consistent comparison of aerodynamic torque, moment coefficient, and flow behavior. The results demonstrate that deflectors significantly improve turbine performance by enhancing flow guidance and reducing adverse pressure on the returning blade. Among the studied designs, the Venturi-type deflectors provide the highest performance improvement, generating the largest torque magnitude and moment coefficient due to localized flow acceleration and increased dynamic pressure on the advancing blade. Curved deflectors offer a balanced improvement with smoother torque evolution, while flat deflectors provide moderate gains with higher oscillations. These findings confirm that passive aerodynamic augmentation using fixed deflectors constitutes a cost-effective and mechanically simple solution for improving Savonius turbine efficiency in low-wind urban environments, and they provide a solid numerical foundation for future experimental validation.

Keywords: Deflector, Savonius, Wind turbine

Symbol / Term	Description
CFD	Computational Fluid Dynamics, numerical method used to solve fluid flow equations
VAWT	Vertical Axis Wind Turbine
HAWT	Horizontal Axis Wind Turbine
Savonius turbine	Drag-based vertical axis wind turbine using semi-cylindrical blades
Deflector	Passive aerodynamic structure used to redirect or accelerate airflow toward the
Venturi deflector	Convergent duct designed to accelerate airflow based on the Venturi effect
Arc deflector	Curved deflector guiding airflow smoothly toward the advancing blade
Flat deflector	Planar deflector used to redirect wind toward the rotor
Torque / Moment	Aerodynamic moment generated by the turbine due to pressure and drag forces
Cm	Moment coefficient, dimensionless parameter used to normalize torque
ω	Angular velocity of the turbine rotor ($rad \cdot s^{-1}$)
U_∞	Free-stream wind velocity ($m \cdot s^{-1}$)
ρ	Air density ($kg \cdot m^{-3}$)
A	Swept area of the turbine (m^2)
D	Rotor diameter (m)
MRF	Multiple Reference Frame method used for rotating flow simulations
Pathlines	Flow visualization showing the trajectory of fluid particles over time
Dynamic pressure	Pressure associated with fluid velocity, defined as $\frac{1}{2}\rho U^2$
Returning blade	Blade moving against the incoming wind, producing negative torque
Advancing blade	Blade moving with the incoming wind, producing positive torque

Introduction

Wind energy plays an increasingly important role in sustainable power generation, particularly for decentralized applications in urban environments. While horizontal-axis wind turbines (HAWTs) are highly effective at large scales, they perform poorly in cities where wind is typically slow, turbulent, and strongly influenced by surrounding buildings. Vertical-axis wind turbines (VAWTs) offer a more suitable alternative for

these conditions due to their omnidirectional operation and ability to function under low wind speeds. Among VAWT designs, the Savonius turbine is especially appealing because of its simplicity, low manufacturing cost, and excellent startup performance.

Despite these advantages, the main limitation of the Savonius turbine is its relatively low aerodynamic efficiency. As a drag-based device, it generates useful torque primarily on the advancing blade, while the returning blade produces negative torque that reduces the overall power output. This drawback has motivated numerous studies aimed at improving rotor performance through geometric modifications such as optimized overlaps, end plates, helical blades, and multi-stage configurations. However, one of the most effective and practical enhancement strategies is the use of external deflectors—passive structures designed to control the flow around the turbine.

Deflectors help improve performance by redirecting the incoming wind toward the advancing blade while shielding the returning blade. Abohela et al. (2013) demonstrated that guiding structures placed near rooftop turbines can significantly improve local wind directionality and slightly increase local wind speed. For Savonius turbines specifically, Wenehenubun et al. (2015) showed that curved deflectors can alter pressure distribution around the rotor in a way that increases net torque and power output. Their results highlighted that both shape and orientation of the deflector strongly influence aerodynamic performance.

More recently, researchers have explored Venturi-effect structures, which use convergent channels to accelerate airflow before reaching the turbine. Although commonly used for horizontal-axis turbines, convergent ducts also show strong potential for drag-based turbines. Abdulrahman et al. (2020) demonstrated that Venturi-like geometries can significantly increase local wind speeds in low-wind environments through passive flow acceleration mechanisms.

These strategies are particularly relevant for urban microgeneration, where typical wind speeds range between 1 and 6 m/s and where turbulence is highly variable. According to Jamei et al. (2021), such conditions make it difficult for conventional turbines to operate efficiently, whereas VAWTs—especially when aerodynamically enhanced—are better suited for capturing available wind energy.

Although several studies have examined the benefits of deflectors, fewer have provided systematic numerical comparisons of different geometries under identical conditions. Computational fluid dynamics (CFD) offers a valuable approach to fill this gap, as it allows detailed analysis of pressure fields, velocity distributions, and torque generation around the rotor. Compared with experimental setups, numerical methods enable rapid iteration and precise visualization of flow behaviour.

This paper presents a numerical investigation of a Savonius turbine equipped with three deflector configurations: a flat plate, a curved guide, and a convergent (Venturi-type) structure. Three-dimensional CAD models were created in PTC Creo and evaluated using ANSYS Fluent under wind conditions representative of urban microclimates. The goal is to quantify the aerodynamic benefits provided by each deflector type and

identify which configuration offers the greatest performance improvement relative to complexity and manufacturability.

Materials and Methods

In order to evaluate the aerodynamic influence of different deflector concepts on a Savonius wind turbine, four detailed three-dimensional models were developed using Creo PTC. These CAD models serve as the base geometries for the subsequent CFD simulations. Each design is constructed around a standard two-blade Savonius rotor with a diameter of 100 mm, ensuring consistency across all configurations so that performance differences can be attributed solely to the deflector geometry.

All configurations were initially modeled with an external cylindrical housing, representing the structural support for the deflectors in a physical setup. However, for CFD analyses, this housing is removed to simplify the mesh generation, reduce computational cost, and isolate the aerodynamic effects of the rotor–deflector interaction. As a result, each configuration is presented in two forms:

- the complete CAD model with housing, intended for physical representation,
- the simplified CFD-ready model, where the housing is removed.

The study investigates four configurations:

1. A baseline Savonius turbine without deflectors
2. A Savonius turbine equipped with six flat deflectors
3. A Savonius turbine equipped with two curved (arc-shaped) deflectors
4. A Savonius turbine equipped with three Venturi-type convergent deflectors

Classic Savonius Turbine

The baseline model features a classical two-bucket Savonius rotor without any flow-modifying elements. It provides the reference performance level against which all augmented designs are evaluated. This model serves to quantify how much aerodynamic improvement can be achieved using deflectors as shown in Fig. 1 and Fig. 2.

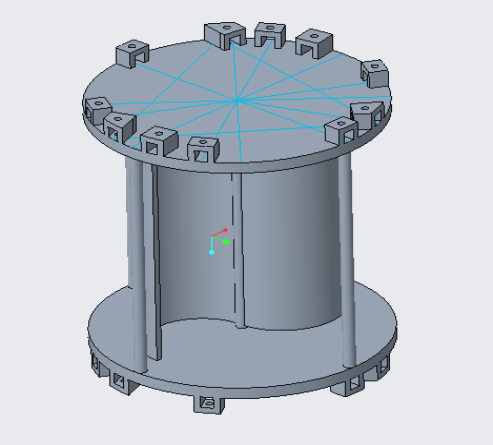


Fig.1 CAD model of classic Savonius Wind Turbine

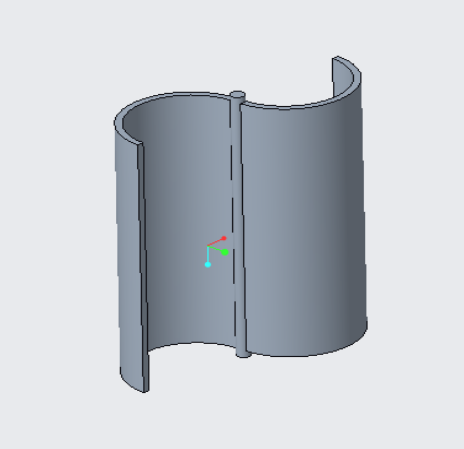


Fig. 2 model used for the CFD (without the housing)

Savonius Turbine with Six Flat Deflectors

This configuration integrates six flat deflectors, uniformly distributed around the rotor. These planar elements are designed to:

- redirect incoming airflow toward the advancing blade, increasing its driving torque,
- and shield portions of the returning blade to reduce negative torque.

Flat deflectors represent the simplest form of aerodynamic augmentation. The performance objective of this configuration is to determine whether multiple planar guides—despite their simplicity—can effectively channel and control the surrounding airflow to enhance the rotor's torque output and overall aerodynamic efficiency as shown in Fig. 3 and Fig. 4.

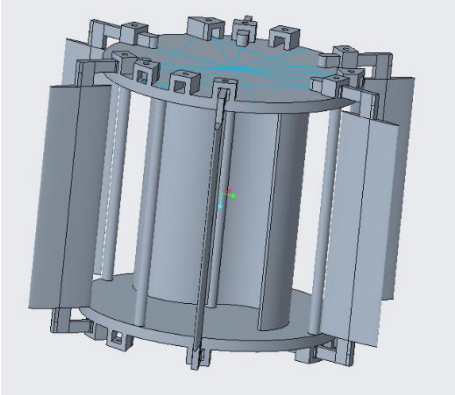


Fig. 1 CAD model of the Flat-deflector i Savonius Wind Turbine

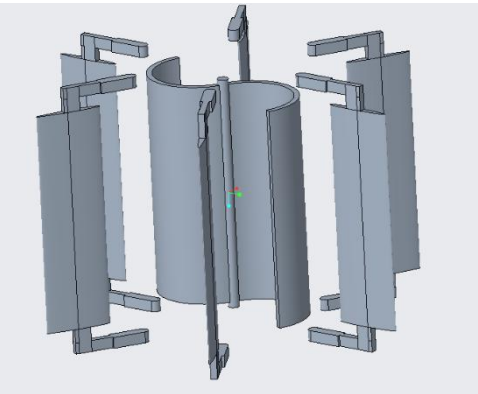


Fig. 2 model used for the CFD (without the housing)

Savonius Turbine with Two Curved (Arc) Deflectors

In this design, two arc-shaped deflectors are strategically positioned around the rotor. The curved geometry is intended to:

- smoothly guide the incoming wind toward the advancing blade,
- minimize flow separation and turbulence near the returning blade,
- and create a more coherent and directed airflow trajectory.

Compared to flat deflectors, curved deflectors are expected to generate more stable and efficient flow redirection. The goal here is to enhance torque production through smoother aerodynamic guidance without relying on complex structures as shown in Fig. 5 and Fig. 6.

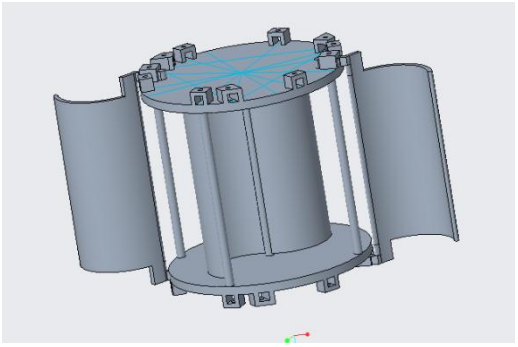


Fig. 3 CAD model of the Arc Savonius Wind Turbine

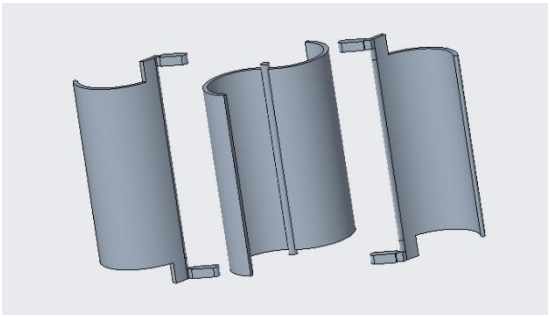


Fig. 4 model used for the CFD (without the housing)

Savonius Turbine with Three Venturi-Type Deflectors

This configuration incorporates three Venturi-shaped convergent deflectors, forming partial ducts around the turbine. These structures use geometric constriction to:

- accelerate incoming airflow before it reaches the advancing blade,
- increase local dynamic pressure and effective driving force,
- and partially shield the returning blade by creating a low-pressure wake region.

Venturi deflectors aim to produce the strongest aerodynamic enhancement among the tested geometries by leveraging passive flow acceleration. The expected result is a noticeable boost in rotor torque and energy capture under low-wind conditions, where the Savonius turbine typically struggles as shown in Fig. 7 and Fig. 8.

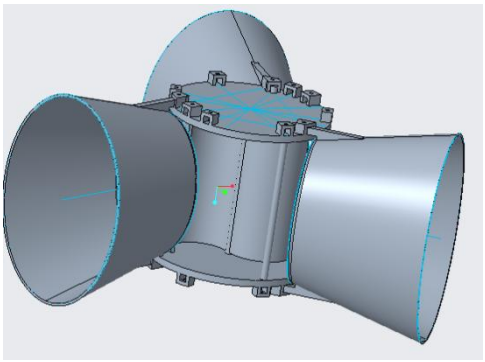


Fig. 5 CAD model of the Venturi Savonius Wind Turbine

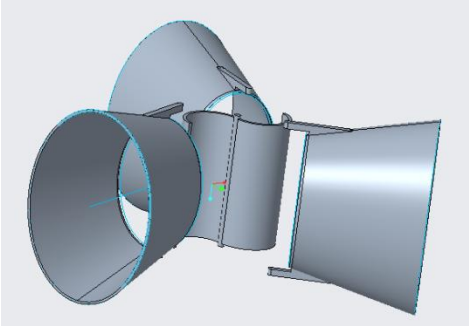


Fig. 6 Model used for the CFD (without the housing)

Together, these four geometries allow for a structured comparison of how different passive aerodynamic augmentation strategies influence the performance of a Savonius rotor. By standardizing rotor dimensions and simplifying the CFD models through housing removal, the numerical analysis focuses exclusively on the aerodynamic contribution of each deflector type, enabling a clear assessment of their relative effectiveness

CFD Methodology

The aerodynamic performance of the Savonius turbine configurations was investigated using Computational Fluid Dynamics (CFD) simulations performed in ANSYS Fluent. The simulations were conducted under the assumption of incompressible, isothermal airflow, which is appropriate for the low wind speeds considered in urban environments.

The governing equations consist of the incompressible Navier–Stokes equations, including the conservation of mass and momentum:

$$\nabla \cdot \vec{u} = 0$$
$$\rho\left(\frac{\partial \vec{u}}{\partial t} + \vec{u} \cdot \nabla \vec{u}\right) = -\nabla p + \mu \nabla^2 \vec{u}$$

where $\vec{u}$ is the velocity vector, p the static pressure, ρ the air density, and μ the dynamic viscosity.

To model turbulence effects, a Reynolds-Averaged Navier–Stokes (RANS) approach was adopted using the *k–ω SST* turbulence model. This model was selected for its robustness in capturing flow separation and adverse pressure gradients, which are dominant features in drag-based vertical-axis wind turbines.

The computational domain consists of a cylindrical control volume large enough to avoid blockage effects and artificial flow acceleration. A uniform velocity profile corresponding to the free-stream wind speed was imposed at the inlet boundary, while a constant static pressure condition was applied at the outlet. All turbine blades and deflectors were treated as no-slip walls.

Rotor motion was modeled using a transient rotating reference approach, allowing the instantaneous aerodynamic torque to be computed as a function of time. The aerodynamic torque T acting on the rotor was obtained by integrating pressure and viscous forces over the blade surfaces:

$$T = \int_A \vec{r} \times \vec{F} \, dA$$

where $\vec{r}$ is the position vector relative to the rotation axis and $\vec{F}$ represents the local aerodynamic force.

A time step corresponding to a fixed angular increment of rotor rotation was applied to ensure consistent temporal resolution across all configurations. Mesh density was refined in the rotor and deflector regions to accurately capture velocity gradients and wake structures. A mesh-independence study was conducted to confirm that the computed torque values were not sensitive to further mesh refinement.

Although the present study is purely numerical, future work will focus on experimental validation through wind tunnel testing of scaled prototypes. Such experiments will enable direct comparison between numerical predictions and measured torque and power output, improving confidence in the CFD-based performance assessment.

Result and Discussion

Computational Fluid Dynamics (CFD) is a numerical method used to model and solve fluid-flow problems by approximating the Navier–Stokes equations. It enables the prediction of aerodynamic behavior such as pressure distribution, velocity fields, turbulence patterns, and the forces applied to rotating machinery. In the context of Savonius turbines, CFD is particularly useful because it provides insight into the torque variations generated during rotation—information that would be difficult to capture experimentally at this design stage.

For this study, the four CAD models developed in Creo PTC were imported into ANSYS Fluent, the CFD software chosen for all aerodynamic simulations. ANSYS is well suited for this type of analysis thanks to its robust meshing capabilities, rotating reference frame (MRF) and sliding mesh features, and its turbulence modelling options, which allow precise evaluation of flow interactions around rotating bodies.

The CFD setup was designed to compare the influence of each deflector type on three key aerodynamic indicators:

1. The aerodynamic moment (torque) generated by the turbine
2. The moment coefficient (Cm), allowing normalized performance comparison
3. The flow behavior visualized through air pathlines, especially the guidance, acceleration, or shielding produced by each deflector configuration Because the rotation direction occasionally reversed during the simulations, several torque curves appeared with negative values. Since the objective is to compare torque intensity, independently of rotation direction, all observations are made using absolute values.

4.0 Definition of Aerodynamic Parameters

In transient CFD simulations of drag-based vertical-axis wind turbines, the aerodynamic torque generated by the rotor varies periodically as a function of the blade angular position. To ensure a clear and consistent interpretation of the numerical results, the main parameters used in this study are defined as follows.

The aerodynamic torque T represents the instantaneous rotational moment generated by pressure and viscous forces acting on the rotor blades. It is expressed in newton-meters (N·m) and directly reflects the ability of the turbine to produce mechanical power.

The torque amplitude corresponds to the peak-to-peak variation of the torque signal over one complete rotor revolution. A high amplitude indicates strong cyclic loading, which is characteristic of Savonius turbines due to the alternating exposure of the advancing and returning blades to the incoming flow.

Torque oscillations refer to the periodic fluctuations of the torque signal during rotation. These oscillations originate from flow separation, blade interaction with the wake, and changes in pressure distribution around the rotor. Reducing torque oscillations is desirable, as it leads to smoother mechanical operation and reduced structural fatigue.

The oscillation frequency of the torque signal is directly linked to the rotor rotational speed and corresponds to the number of torque cycles per revolution. In the present study, all configurations were simulated using the same angular velocity and time-step size, ensuring that differences in oscillation frequency are not caused by numerical settings but solely by aerodynamic effects.

Because the direction of rotation may temporarily reverse during the transient startup phase, the absolute value of torque is used for comparative purposes. This approach allows the magnitude of aerodynamic loading to be evaluated independently of instantaneous rotation direction and does not affect the relative comparison between configurations.

Torque Comparison Between Configurations

The torque curves extracted from ANSYS Fluent (see *Figure 9: Torque Curves Comparison*) reveal clear differences in aerodynamic performance among the four turbine configurations. Because the CFD simulations sometimes produced reverse rotation depending on the instantaneous pressure distribution, the raw torque data include both positive and negative values. These sign changes do not represent a loss in torque intensity, but only a reversal in rotational direction.

For this reason, all torque results presented here are interpreted in absolute value, ensuring that the comparison focuses strictly on the magnitude of aerodynamic torque, which is the relevant indicator of performance for a Savonius turbine.

Classic Savonius (No Deflector)

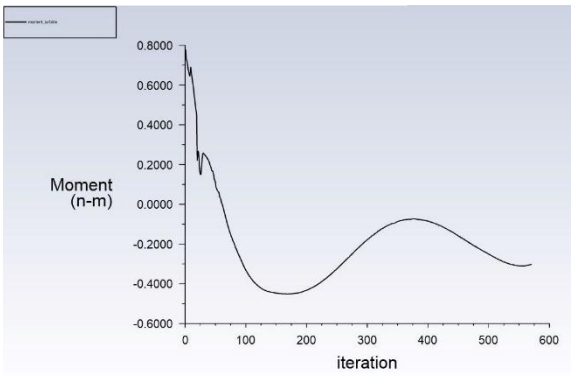


Fig 7. Graph representation of the Torque(nm) by time step Iteration of the Classic Savonius

The classic rotor presents the lowest torque magnitude. The curve oscillates strongly due to the alternating exposure of the advancing and returning blades—typical of a standard Savonius configuration.

Savonius With Flat Deflectors (6 deflectors)

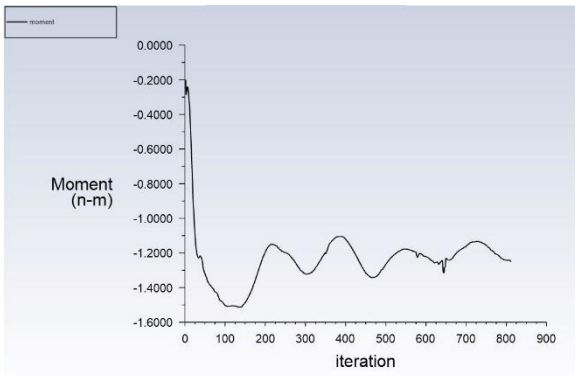


Fig. 8 Graph representation of the Torque(nm) by time step Iteration of the Flat-deflector Savonius

With six flat deflectors, the turbine shows a clear increase in torque amplitude. The deflectors redirect the flow toward the advancing blade, but the redirection remains abrupt, leading to irregular torque peaks and sustained oscillations.

Savonius With Arc Deflectors (2 curved deflectors)

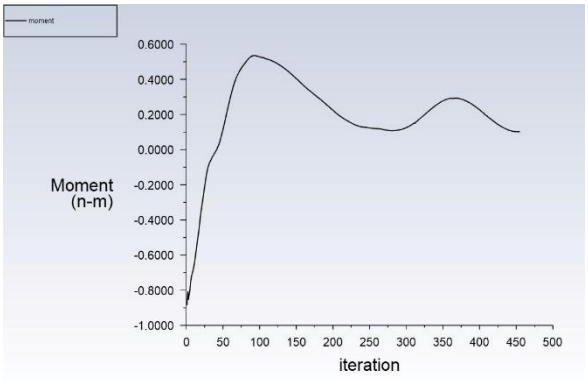


Fig. 9 Graph representation of the Torque(nm) by time step Iteration of the Arc Savonius

The arc-shaped deflectors yield a smoother and significantly stronger torque curve. Their curvature enhances flow attachment and provides more effective shielding of the returning blade, resulting in more stable torque generation over a full rotation.

Savonius With Venturi Deflectors (3 convergent deflectors)

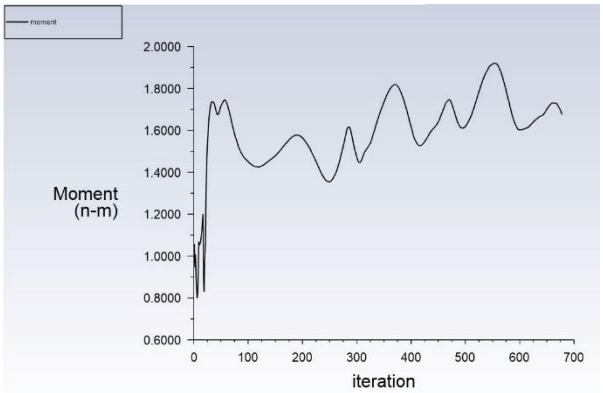


Fig. 10 Graph representation of the Torque(nm) by time step Iteration of the Venturi Savonius

The Venturi configuration produces the highest torque magnitude among all four designs. The convergent structure accelerates incoming airflow, increasing dynamic pressure on the advancing blade. This results in torque peaks that exceed those of the classic, flat-deflector, and arc-deflector configurations.

Moment Coefficient (Cm)

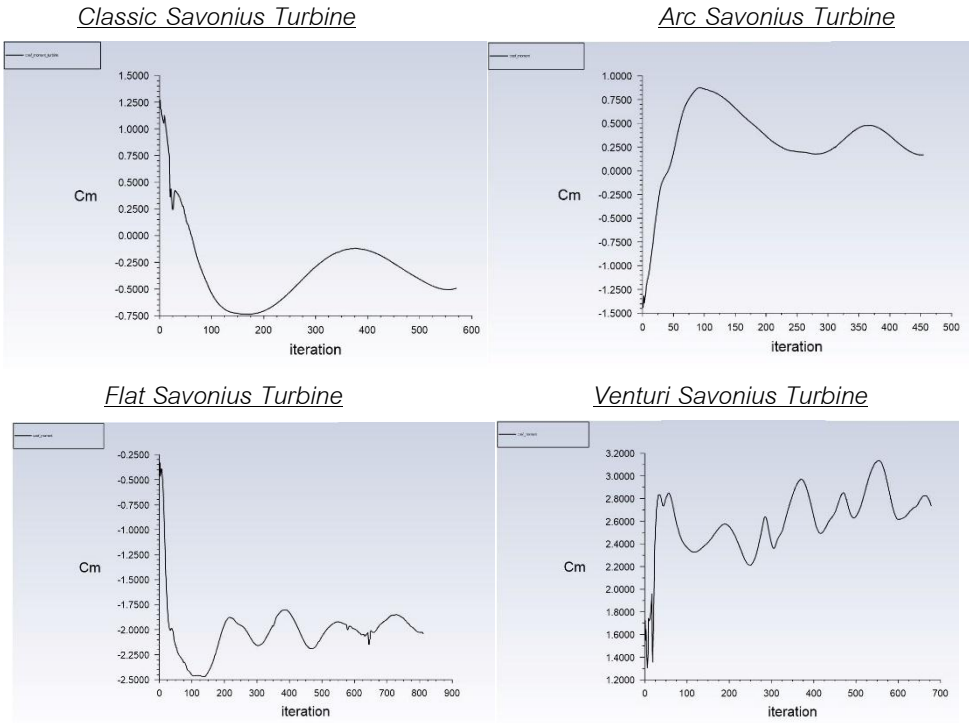


Fig. 13 The moment coefficient confirms the torque hierarchy observed in the simulations: Classic < Arc < Flat < Venturi.

Cm normalization ensures that the performance improvements result from aerodynamic effects rather than differences in geometry or blockage.

Power Coefficient as a Function of Tip-Speed Ratio

To enhance the engineering relevance of the results and enable comparison with existing Savonius turbine studies, the power coefficient C_p was evaluated for each configuration as a function of the tip-speed ratio λ.

The power coefficient is defined as:

$$C_p = \frac{P}{\frac{1}{2}\rho A U_\infty^3}$$

where the mechanical power P is obtained from the aerodynamic torque:

$$P = T \cdot \omega$$

The tip-speed ratio is defined as:

$$\lambda = \frac{\omega R}{U_\infty}$$

with ω the angular velocity, R the rotor radius, and U_∞ the free-stream wind speed.

For each configuration, the instantaneous torque obtained from the transient CFD simulations was time-averaged over one complete rotor revolution in order to compute the mean power output. This averaging procedure ensures that periodic torque oscillations inherent to drag-based vertical-axis turbines do not bias the performance comparison.

The resulting $C_p(\lambda)$curves (Figure XX) show clear differences between the four configurations. The baseline Savonius turbine exhibits the lowest power coefficient across the investigated range of tip-speed ratios. The flat-deflector configuration provides a moderate increase in C_p, although with noticeable fluctuations due to unsteady flow separation. The curved deflector configuration achieves a higher and more stable power coefficient, indicating improved flow attachment and reduced negative torque on the returning blade.

The Venturi-type deflector configuration yields the highest power coefficient for all examined tip-speed ratios. This improvement is attributed to the convergent geometry, which increases the local flow velocity and dynamic pressure on the advancing blade, thereby enhancing the aerodynamic power extraction capability of the turbine.

These results confirm that fixed deflectors not only increase torque magnitude but also significantly improve the overall energy conversion efficiency of the Savonius turbine, with the Venturi configuration providing the most substantial performance gains.

Pathline Visualization and Flow Behaviour

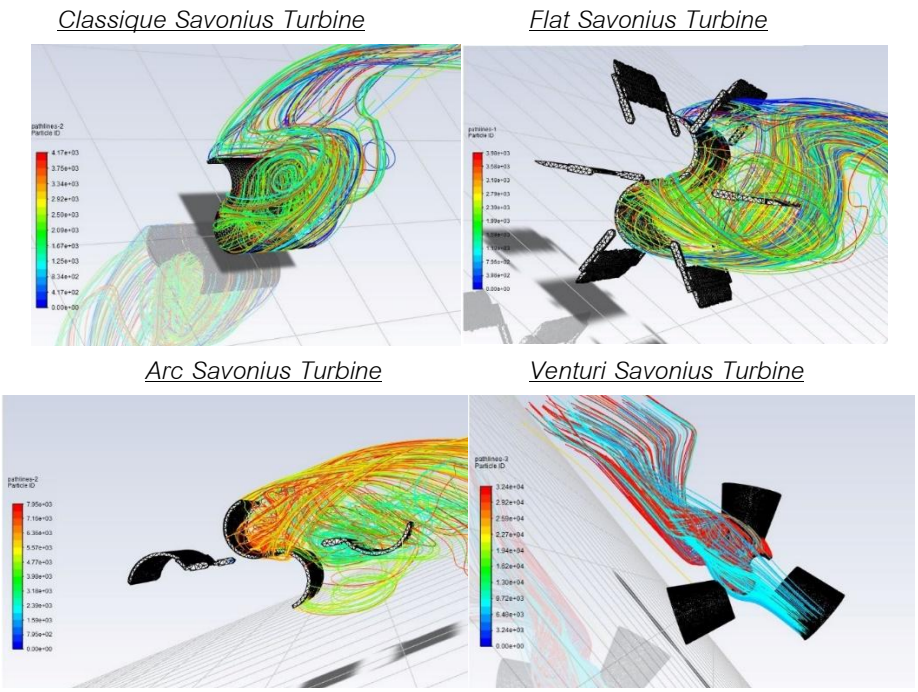


Fig. 14 Flow Pathline visualization provides qualitative insight into the physical mechanisms responsible for the observed differences in aerodynamic torque among the studied configurations.

For the classic Savonius turbine, the incoming flow directly impinges on both the advancing and returning blades, generating large recirculation zones and a wide turbulent wake downstream of the rotor. These flow structures result in significant negative pressure on the returning blade, which contributes to strong torque oscillations and overall low aerodynamic efficiency.

In the flat-deflector configuration, the deflectors partially redirect the incoming airflow toward the advancing blade, reducing the direct exposure of the returning blade. However, due to the sharp edges of the flat plates, flow separation occurs at the deflector tips, producing disturbed streamlines and secondary vortices. While this configuration increases torque magnitude compared to the baseline case, the irregular flow structures explain the persistence of torque oscillations observed in the transient results.

The arc-shaped deflector configuration exhibits smoother flow guidance. The curved geometry promotes gradual redirection of streamlines toward the advancing blade while limiting separation and turbulence intensity. This results in a more coherent velocity field and improved shielding of the returning blade. Consequently, the torque signal becomes more stable, with reduced amplitude fluctuations and a higher average moment coefficient.

The Venturi-type deflector configuration produces the most pronounced modification of the flow field. The convergent geometry accelerates the incoming airflow before it reaches the advancing blade, leading to a localized increase in velocity and dynamic pressure. At the same time, the returning blade is effectively shielded by a low-pressure region formed downstream of the convergent section. This combination of flow acceleration and pressure redistribution explains the significantly higher torque and moment coefficient obtained for this configuration.

Conclusion

This study presented a three-dimensional CFD-based comparative analysis of a Savonius wind turbine equipped with multiple fixed deflector configurations under identical operating conditions. The objective was to quantify the aerodynamic performance improvements achievable through passive flow control strategies suitable for low-wind urban environments.

The numerical results demonstrate that all deflector configurations improve the aerodynamic performance of the Savonius turbine compared to the baseline case. The flat deflectors provide moderate torque and power coefficient enhancements but introduce significant unsteady oscillations due to abrupt flow separation. The curved (arc-shaped) deflectors offer a more balanced improvement, producing smoother torque evolution and a higher moment coefficient as a result of improved flow guidance and reduced turbulence.

Among all configurations, the Venturi-type convergent deflectors deliver the highest aerodynamic performance. This configuration consistently generates the largest torque magnitude, moment coefficient, and power coefficient over the investigated tip-speed ratio range. Flow visualization confirms that these gains

originate from localized flow acceleration and effective shielding of the returning blade, which together maximize the pressure difference driving rotor rotation.

Overall, the findings confirm that passive aerodynamic augmentation using fixed deflectors is an effective and mechanically simple approach to enhancing Savonius turbine efficiency. The Venturi configuration, in particular, shows strong potential for urban microgeneration applications where wind speeds are low and highly variable.

Future work will focus on experimental validation through wind tunnel testing and field measurements using scaled prototypes. These experiments will enable direct comparison with numerical predictions and support further optimization of deflector geometry, positioning, and integration into real-world urban installations.

Acknowledgements

The author gratefully acknowledges the Auvergne–Rhône–Alpes (AURA) Region for its financial and institutional support, which enabled the completion of an academic year at Kasetsart University, Bangkok. This international academic experience provided access to valuable research resources, expert supervision, and a stimulating research environment that were instrumental in the preparation and completion of this paper.

References

Abdulrahman, S., Wood, D.H., Hammad, A.A. 2020. Effect of Venturi profile on the performance of a vertical axis wind turbine. J. Renewable Energy 2020: 8848141.

Abohela, I., Hamza, N., Dudek, S. 2013. Effect of roof shape, wind direction, building height and urban layout on wind flow over roof-mounted wind turbines. Renewable Energy 52: 110–122.

ANSYS Inc. 2021. ANSYS Fluent Theory Guide. ANSYS Inc. Canonsburg, PA, USA.

Bhutta, M.M.A., Hayat, N., Farooq, A.U., Ali, Z., Jamil, S.R., Hussain, Z. 2012. Vertical axis wind turbine – A review of various configurations and design techniques. Renewable Sustainable Energy Rev. 16: 1926–1939.

Jamei, E., Rajagopalan, P., Seyedmahmoudian, M., Jamei, Y. 2021. Review on the integration of passenger vehicles and wind turbines. Sustainable Cities Soc. 65: 102626.

PTC. 2021. PTC Creo Parametric Documentation. PTC Inc. Boston, MA, USA.

Wenehenubun, F., Saputra, A., Sutanto, H. 2015. An experimental study on the performance of Savonius wind turbines related with the number of blades. Energy Procedia 68: 297–304.

การประเมินประสิทธิภาพเชิงกลของรากแฝกและไผ่ต่อเสถียรภาพลาดดินภายใต้สภาวะน้ำใต้ดินต่างกันด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

Numerical Evaluation of Vetiver and Bamboo Root Reinforcement Effects on Slope Stability across Groundwater States

รวีฟ้า สุภานันท์[a,*], **อภินิติ โซติสังกาศ**[a], **กรกช ธัญญเจริญ**[b], **วชิรวัติ ประภัสสร**[a]

Rawefah Supanunt[a,*], Apinit Joisangkas[a], Korakot Tanyacharoen[b], Washirawat Praphatsorn[a]

[a]ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

[b]บริษัท กรีนกราวด์โซลูชั่นส์ จำกัด กรุงเทพฯ 10210

[a]Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Kasetsart University, Bangkok 10900, Thailand

[b]Green Ground Solution, Co.Ltd, Bangkok 10210, Thailand

*Corresponding author. E-mail address: rawefah.su@ku.th

บทคัดย่อ

การชะล้างพังทลายของลาดดินแบบตื้นในประเทศไทยมีความรุนแรงขึ้นจากการเปลี่ยนแปลงภูมิอากาศ งานวิจัยนี้ประเมินประสิทธิภาพเชิงกลของรากแฝกและไผ่ และแบบผสมผสานต่อเสถียรภาพลาดดินภายใต้สภาวะน้ำใต้ดินสามระดับ ทดสอบแรงดึงรากในห้องปฏิบัติการและวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยวิธีลิมิตอิควิลิเบรียมผ่านโปรแกรม GeoStudio กำหนดความลึกรากแฝก 2.0 ม. ไผ่ 0.5 ม. โดยแฝกและไผ่มีระบบรากต่างกัน ผลพบว่าระดับน้ำใต้ดินมีผลต่อเสถียรภาพของลาดดิน กรณีที่ไม่มีการเสริมกำลังด้วยพืชค่า F.S. ลดลงมากที่สุด พบความสัมพันธ์ระหว่างเส้นผ่านศูนย์กลางรากกับแรงดึงอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.01$) แบบจำลองของแฝกมีนัยสำคัญทางสถิติที่เด่นชัดกว่าไผ่ โดยหญ้าแฝกให้ประสิทธิภาพสูงกว่าไผ่ทุกสภาวะ เพิ่มค่า F.S. ประมาณ 12–52% การปลูกพืชแบบผสมมีศักยภาพปานกลาง สามารถใช้ประโยชน์ด้านอื่นได้ ซึ่งควรใช้ร่วมกับระบบระบายน้ำหรือวิธีทางวิศวกรรม

คำสำคัญ: การวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดิน, การเสริมกำลังด้วยรากพืช, ชีววิศวกรรมปฐพี

Abstract

Shallow landslides in Thailand have intensified due to climate change–induced rainfall variability and rising groundwater levels. This study assesses soil bioengineering using vetiver and bamboo under three groundwater conditions through laboratory root tensile tests and limit equilibrium slope stability analysis in GeoStudio. Significant relationships between root diameter and tensile strength were observed ($p < 0.01$), with vetiver outperforming bamboo. Vetiver increased the factor of safety by approximately 12–52%, while mixed planting showed moderate benefits. These methods should be combined with drainage or conventional engineering measures.

Keywords: Root reinforcement, Slope stability analysis, Soil bioengineering

คำนำ

การพังทลายดินในพื้นที่ลาดชันเป็นปัญหาทางธรณีวิศวกรรมที่เกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องในประเทศไทย โดยเฉพาะในภาคเหนือซึ่งมีลักษณะลาดชันร่วมกับการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ ฝนตกหนักในช่วงเวลาสั้นส่งผลให้ระดับน้ำใต้ดินสูงขึ้นและกำลังเฉือนของดินลดลงอย่างรวดเร็ว เพิ่มความเสี่ยงต่อการพังทลายของดินแบบตื้น เกิดผลกระทบต่อโครงสร้างพื้นฐานและความปลอดภัยของชุมชน ปัจจุบันมีการประยุกต์ใช้แนวทางชีววิศวกรรมปฐพี (soil bio-engineering) อย่างแพร่หลาย เนื่องจากเป็นวิธีที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม ใช้ทรัพยากรท้องถิ่น และสามารถลดการพังทลายของดินชั้นตื้นได้อย่างมีประสิทธิภาพ

หญ้าแฝก *(Chrysopogon zizanioides)* และไผ่ *(Dendrocalamus)* เป็นพืชที่นิยมใช้ในงานอนุรักษ์ดินและน้ำ อภินิติ (2556) กล่าวว่า แฝกมีระบบรากฝอยหนาแน่นยาวและลึก สามารถแทงหยั่งลงไปทางดิ่งได้ลึกมาก จัดอยู่ในกลุ่ม VH-Type และไผ่เป็นพืชเศรษฐกิจที่ระบบรากส่วนใหญ่ขยายออกในแนวราบ มีขอบเขตด้านข้างมาก จัดอยู่ในกลุ่ม H-Type ซึ่งทั้งสองชนิดเป็นกลุ่มรากที่ช่วยเสริมเสถียรภาพของลาด (slope stabilizing root type) อย่างไรก็ตามระบบรากพืช 2 ชนิดต่างกันทั้งในด้านรูปร่าง ระบบราก และการนำไปใช้ประโยชน์ จำเป็นต้องมีการประยุกต์ใช้อย่างเหมาะสม ในด้านวิศวกรรมระบบรากพืชสามารถเพิ่มกำลังเฉือนและเสถียรภาพของลาดดินได้ โดยรากทำหน้าที่รับแรงดึงในขณะที่ดินเกิดการเสียรูป ส่งผลให้ความสามารถในการต้านแรงเฉือนโดยรวมเพิ่มขึ้น (Giadrossich et al., 2017) ประสิทธิภาพการเสริมกำลังด้วยรากขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย เช่น ความหนาแน่นของราก ความแข็งแรงดึง อัตราส่วนความยาวต่อเส้นผ่านศูนย์กลางราก โมดูลัสแรงดึง ทิศทางการวางตัวของราก อย่างไรก็ตามงานวิจัยที่ประเมินประสิทธิภาพเชิงเปรียบเทียบของการปลูกหญ้าแฝก ไผ่ และการปลูกแบบผสมผสานยังมีอยู่อย่างจำกัด

ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงมุ่งประเมินและเปรียบเทียบศักยภาพเชิงกลศาสตร์ของระบบรากหญ้าแฝก ไผ่ และการปลูกพืชแบบผสมผสาน ต่อเสถียรภาพของลาดดินตื้น ภายใต้สภาพน้ำใต้ดินสามกรณี ได้แก่ ไม่มีน้ำใต้ดิน น้ำใต้ดินอยู่ที่ความลึก 0.6 เมตร น้ำใต้ดินอยู่ที่ผิวดิน โดยดำเนินการทดสอบกำลังรับแรงดึงของราก การคำนวณค่าความเชื่อมแน่นจากรากและการวิเคราะห์ความปลอดภัยของลาดดินด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ค่าพารามิเตอร์ดินที่ใช้ศึกษานำมาจากลาดดินทางเข้าหมู่บ้านห้วยหินลาดใน จังหวัดเชียงราย เพื่อเป็นตัวแทนของดินที่มักพบในพื้นที่เสี่ยงดินถล่มในภาคเหนือ

อุปกรณ์และวิธีการ

การทดสอบกำลังรับแรงดึงของรากดำเนินการด้วยการดึงแบบแกนเดียว (uniaxial tension) จนรากเกิดความวิบัติ โดยค่ากำลังดึงสามารถคำนวณได้จากสมการ (1) ซึ่งใช้แรงดึงสูงสุดหารด้วยพื้นที่หน้าตัดของราก ณ จุดขาด

$$T=\frac{F_f}{\pi(D_f^2/4)} \qquad (1)$$

โดยที่ F_f คือ แรงดึงสูงสุดที่ทำให้รากขาด และ D_f คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของราก ณ จุดที่เกิดการวิบัติ โดยค่า กำลังดึงของราก (T) นี้สามารถนำไปใช้ทำนายกำลังเฉือนของดินที่เสริมแรงด้วยรากได้ โดยใช้ แบบจำลอง Mohr–Coulomb ที่ปรับแก้ให้รวมผลของรากเข้าไปตาม Waldron (1977) และ Wu et al. (1979) แสดงดังสมการ (2)

$$S=(c'+c_r)+(\sigma-u_w)\tan\phi' \qquad (2)$$

โดย S คือค่ากำลังเฉือนรวมผลของดินกับรากพืช (Total shear strength) ค่า c' หมายถึงค่าแรงยึดเหนี่ยวเชิงประสิทธิผลของดิน (effective cohesion) ที่เกิดจากโครงสร้างและปฏิสัมพันธ์ระหว่างเม็ดดิน ขณะที่ c_r คือค่าแรงยึดเหนี่ยวที่เพิ่มขึ้นจากการเสริมแรงของรากพืช (root cohesion) สามารถประมาณได้จากค่ากำลังดึงเฉลี่ยของราก และ σ แทนความเค้นปกติรวมที่กระทำตั้งฉากกับระนาบวิบัติ ส่วน u_w คือ แรงดันน้ำในรูพรุน ซึ่งมีผลลดค่าความเค้นที่ดินสามารถรับได้ ดังนั้นผลต่าง $(\sigma - u_w)$ จึงเป็นความเค้นปกติเชิงประสิทธิผล สำหรับ ϕ' คือ มุมเสียดทานภายในเชิงประสิทธิผลของดิน ซึ่งแสดงความสามารถในการต้านทานการเลื่อนตัวจากแรงเสียดทานระหว่างเม็ดดิน สมการดังกล่าวจึงสะท้อนให้เห็นว่ากำลังเฉือนของดินเกิดจากผลรวมของแรงยึดเหนี่ยวของดินและรากพืช ร่วมกับแรงเสียดทานภายใต้ความเค้นเชิงประสิทธิผล และสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการประเมินเสถียรภาพของลาดดินในงานชีววิศวกรรมปฐพีได้อย่างเหมาะสม Schwarz et al. (2010) แสดงให้เห็นว่า ความเค้นแรงดึงของรากที่ถูกใช้งานจริงโดยเฉลี่ย (average mobilized tensile stress) มีค่าประมาณ 40% ของกำลังรับแรงดึงสูงสุดของราก T_R (กล่าวคือ $\sigma_t \approx 0.4\ T_R$) และแนวทางการประมาณค่านี้ได้ถูกนำมาใช้ในการศึกษานี้เพื่อแปลงค่ากำลังรับแรงดึงของราก ดังนั้น ค่า root cohesion (c_r) สามารถประมาณค่าได้เป็นฟังก์ชันของ กำลังรับแรงดึงเฉลี่ยของราก ($\overline{T_R}$) ดังสมการต่อไปนี้

$$C_r = 0.48 \times \overline{T_R} \left(\frac{A_R}{A}\right) \qquad (3)$$

โดย T_R คือ แรงดึงสูงสุดของรากต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ดิน, A_R คือ พื้นที่หน้าตัดรวมของรากพืช, A คือ พื้นที่หน้าตัดลาดดินและ $\left(\frac{A_R}{A}\right)$ คือ root area ratio ซึ่งระบบรากของพืชโดยทั่วไปจะกระจุกตัวอยู่ใกล้ผิวดิน มีความหนาแน่นลดลงตามความลึกของดิน อันเนื่องมาจากข้อจำกัดด้านธาตุอาหาร การแพร่กระจายของออกซิเจน และความต้านทานเชิงกลของดิน ดังนั้น อัตราส่วนพื้นที่หน้าตัดของรากต่อดิน (Root Area Ratio: RAR) จึงมีลักษณะเปลี่ยนแปลงตามความลึกและไม่ควรสมมติให้มีค่าเท่ากันตลอดชั้นดิน (Waldron, 1977; Wu et al., 1979) Schwarz et al., (2010) พบว่า ค่าแรงยึดเหนี่ยวจากราก (c_r) จะเป็นฟังก์ชันโดยตรงของค่า RAR และกำลังดึงของราก ดังนั้น การลดลงของค่า RAR ตามความลึกจึงส่งผลให้ค่า c_r ลดลงตามไปด้วย ส่งผลให้ประสิทธิภาพในการเสริมเสถียรภาพลาดดินของรากมีค่าสูงสุดในบริเวณผิวดินและลดลงในชั้นดินที่ลึกกว่า

การดำเนินงานวิจัยประกอบด้วยการทดสอบคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินมาตรฐาน ASTM ได้แก่ การกระจายขนาดเม็ดดิน ความถ่วงจำเพาะ การซึมผ่านของน้ำ การทดสอบแรงเฉือนแกนเดียว การทดสอบสมบัติเชิงกลของราก และการสร้างแบบจำลองเสถียรภาพด้วยวิธี Limit Equilibrium (LEM) ผ่านโปรแกรม GeoStudio โดยใช้ความลาดชัน 26.6 องศา (อัตราส่วน 1:2 v:h) ซึ่งในแบบจำลองลาดดินประกอบด้วยดินชั้นบน (Top soil) หนา 0.2 เมตร วางอยู่เหนือชั้นดินแน่น (Dense soil) หนา 1.4 เมตร และทั้งหมดวางอยู่เหนือชั้นดินฐาน (Bedrock) ค่ากำลังของดินที่ใช้วิเคราะห์ในแบบจำลองอ้างอิงจาก อภินิติและคณะ (2568) แสดงดัง Table 1 การปลูกหญ้าแฝกถูกพิจารณาในรูปของ เขตราก (Root zone) ที่มีความลึก 2 เมตร และไผ่กำหนดที่ 0.5 เมตรจากผิวลาด ซึ่งเป็นค่าที่สอดคล้องกับสภาพในรายะยาวที่รากพืชเติบโตเต็มที่ ลักษณะการปลูกและระยะห่างของแถวแฝกและไผ่แสดงใน Fig. 1(a), Fig. 1(b), Fig. 1(c) และ Fig. 1(d) โดยสมมติให้ความหนาแน่นของรากมีค่าอยู่ในช่วง 0.1%–0.2% ตามดิถี (2543) ซึ่งครอบคลุมค่าความหนาแน่นรากหญ้าแฝกจากการศึกษาในอดีต โดยมีค่าต่ำกว่างานวิจัยของ Mahannopkul (2019) เพื่อจำลองให้สอดคล้องกับสภาวะจริงในสนาม และงานวิจัยนี้พิจารณานัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05

Table 1 Soil Parameters used in stability model

Material	Unit weight (g), kN/m³	Cr (KPa) RAR= 0.1%	Cr (KPa) RAR = 0.2%	ϕ'
Dense soil	20.42	0	0	39.66 °
Top soil	20.22	8.21	8.21	40.71
Vetiver root zone	20.22	24.2975	40.3851	28.12 °
Bamboo root zone	20.22	11.5699	14.9298	28.12 °

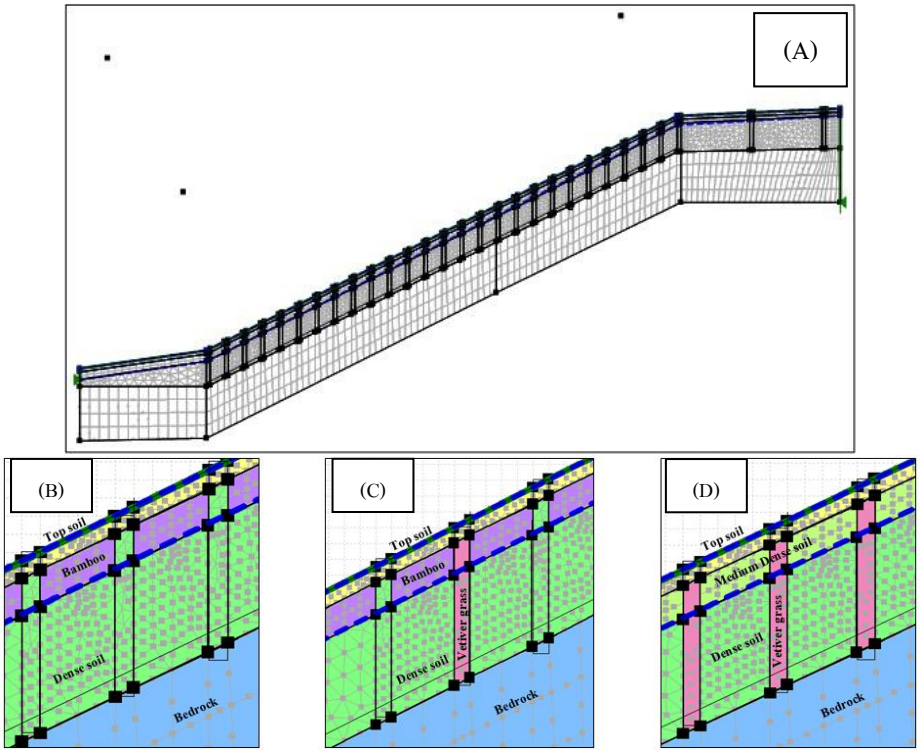


Fig. 1 Cross-sectional geometry of the soil slope and finite element mesh for the analysis **(A)**, (B–D) Zoomed-in views of the near-surface soil layer in Fig. 1(B) bamboo root reinforcement, (C) combined bamboo and vetiver root reinforcement, and (D) vetiver root reinforcement.

สำหรับการทดสอบคุณสมบัติเชิงกลของรากพืช เลือกรากหญ้าแฝกและรากไผ่ตามธรรมชาติด้วยวิธีขุดล้าง และคัดเลือกตามช่วงเส้นผ่านศูนย์กลาง ก่อนทำการทดสอบแรงดึง เพื่อหาค่ากำลังดึงสูงสุดและวิเคราะห์ความสัมพันธ์เชิงกำลังระหว่างแรงดึงกับเส้นผ่านศูนย์กลางแสดงดัง Fig.2 พบว่าในช่วงเส้นผ่าศูนย์กลางน้อยกว่า 1 มิลลิเมตร รากแฝกมีกำลังดึงสูงกว่าไผ่ ค่าความเชื่อมแน่นจากรากถูกคำนวณตามสมการ (3) โดยใช้ค่า Root Area Ratio (RAR) 0.1% และ 0.2% และใช้ข้อมูลตาม Table 2 ประกอบในการวิเคราะห์เสถียรภาพลาดด้วย LEM โดยพิจารณา 3 สภาวะน้ำใต้ดิน ได้แก่ ไม่มีน้ำใต้ดิน น้ำใต้ดินที่ความลึก 0.6 เมตร และน้ำใต้ดินอยู่ที่ผิวดินซึ่งใช้เส้น Pizeometric line วิเคราะห์ในแบบจำลอง

Table 2 Root tensile strength–diameter functions and calculated root cohesion (Cr) for vetiver grass and bamboo under different root concentrations

Plants Species			Tr (MPa)	Cr (KPa) RAR= 0.1%	Cr (KPa) RAR = 0.2%
Chrysopogon zizanioides	$y = 15.872x^{-1.916}$	$R^2 = 0.7308$	33.5157	16.0875	32.175
Bambusoideae	$y = 17.122x^{-1.265}$	$R^2 = 0.3342$	6.9998	3.3599	6.720

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

ผลการวิเคราะห์แรงดึงของรากพืชทั้งสองชนิด ได้แก่ หญ้าแฝกและไผ่แสดงความสัมพันธ์แบบผกผันระหว่างเส้นผ่านศูนย์กลางราก (root diameter) และค่าแรงดึง (tensile strength) โดยข้อมูลพบว่ารากที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางเล็กจะให้ค่าแรงดึงสูงกว่า ขณะที่รากที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางใหญ่ให้ค่าแรงดึงต่ำลง Fig. 2 แสดงกราฟความสัมพันธ์แบบ Power Function สำหรับรากหญ้าแฝกมีค่าสัมประสิทธิ์การกำหนด ($R^2 = 0.7308$) สูงกว่าไผ่ ($R^2 = 0.3342$) สะท้อนว่าข้อมูลของหญ้าแฝกมีความสอดคล้องและเสถียรสูงกว่า สาเหตุอาจเนื่องจากการสังเกตุในห้องปฏิบัติการ โครงสร้างรากของหญ้าแฝกที่เป็นเส้นใยละเอียดแบบรวมกลุ่ม (dense fibrous system) ขณะที่ไผ่มีความแปรผันของเส้นผ่านศูนย์กลางรากมากกว่าและมีสัดส่วนรากขนาดใหญ่สูงกว่า ซึ่งอาจส่งผลให้ค่าทางกลมีความแปรปรวนมากขึ้น ทั้งนี้ค่าแรงดึงรากในงานวิจัยนี้มาจากการทดสอบพืชซึ่งปลูกในพื้นที่ราบ และเป็นคนละสถานที่ไม่ได้มาจากลาดจริง จึงอาจมีความไม่แน่นอนในค่ากำลังดึงของรากที่ใช้ ควรมีการศึกษาเพิ่มเติมในอนาคต

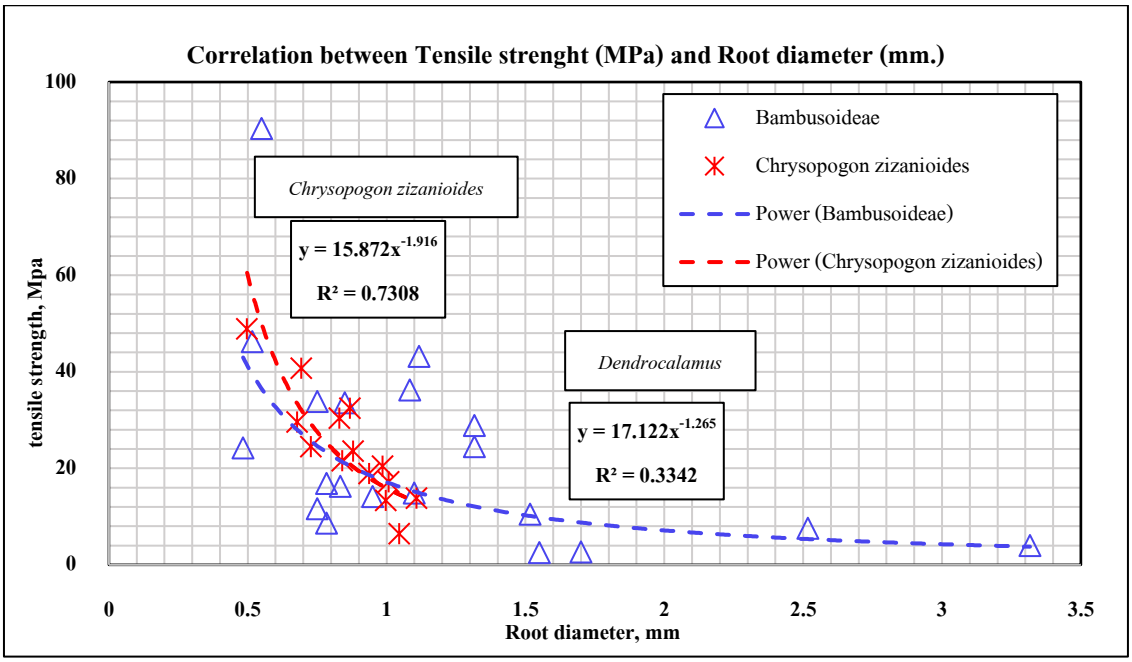


Fig. 2 Relationship between root tensile strength (MPa) and root diameter (mm) of *Chrysopogon zizanioides* and *Dendrocalamus* based on a power function

การวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดินภายใต้แบบจำลอง Mohr–Coulomb ภายใต้สภาพน้ำใต้ดินสามกรณี ได้แก่ ไม่มีน้ำใต้ดิน น้ำใต้ดินอยู่ที่ความลึก 0.6 เมตร น้ำใต้ดินอยู่ที่ผิวดิน เพื่อประเมินศักยภาพของพืชสองชนิด คือ หญ้าแฝก (*Chrysopogon zizanioides*) และไผ่ (*Dendrocalamus)* ต่อค่าปัจจัยความปลอดภัย (Factor of Safety: F.S.) โดยเปรียบเทียบกับลาดดินเปลือย ผลการวิเคราะห์แสดงดัง Table 3 แสดงให้เห็นว่า ระดับน้ำใต้ดินเป็นตัวแปรที่ส่งผลโดยตรงต่อเสถียรภาพของลาด และรากพืชสามารถเพิ่มความมั่นคงของลาดได้

Table 3 Summary of slope stability analysis results under three moisture conditions.

Case	Factor of Safety (F.S.)		
	Dry Condition	Field Moisture condition	Saturated condition
Bare slope	1.809	1.232	0.889
Vegetation-reinforced slope (Vetiver grass)			
root concentration 0.1%	2.029	1.493	1.208
root concentration 0.2%	2.261	1.73	1.435
Vegetation-reinforced slope (Bamboo)			
root concentration 0.1%	1.815	1.244	0.941
root concentration 0.2%	1.802	1.247	0.943
Vegetation-reinforced slope (Bamboo and Vetiver)			
root concentration 0.1%	1.934	1.372	1.072
root concentration 0.2%	2.041	1.504	1.202

ผลการวิเคราะห์พบว่า ลาดดินเปลือยมีค่า Factor of Safety (F.S.) ลดลงอย่างต่อเนื่องเมื่อระดับน้ำใต้ดินเพิ่มขึ้น โดยมีค่า F.S. เท่ากับ 1.809 ในสภาวะไม่มีน้ำใต้ดิน ลดลงเป็น 1.232 ในสภาวะระดับน้ำใต้ดินอยู่ที่ 0.6 เมตร และต่ำสุดเป็น 0.889 ในสภาวะน้ำใต้ดินอยู่ที่ผิวดิน

การเสริมกำลังด้วยระบบรากหญ้าแฝก ช่วยเพิ่มค่า F.S. อย่างชัดเจนในทุกสภาวะ โดยในกรณีอัตราส่วนรากต่อพื้นที่ 0.2% ค่า F.S. เพิ่มขึ้นเป็น 2.261, 1.730 และ 1.435 ในสภาวะไม่มีน้ำใต้ดิน สภาวะระดับน้ำใต้ดินอยู่ที่ 0.6 เมตร สภาวะน้ำใต้ดินอยู่ที่ผิวดิน ตามลำดับ สะท้อนถึงประสิทธิภาพของระบบรากแฝกในการเสริมเสถียรภาพของชั้นดินตื้น

การเสริมกำลังด้วยระบบรากไผ่ พบว่าค่า F.S. เพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยเมื่อเทียบกับลาดดินเปลือย โดยมีค่า F.S. เท่ากับ 1.802, 1.247 และ 0.943 สำหรับอัตราส่วนรากต่อพื้นที่ 0.2% ซึ่งต่ำกว่ากรณีหญ้าแฝกในทุกสภาวะ แสดงให้เห็นว่าระบบรากไผ่มีบทบาทในการเสริมเสถียรภาพของลาดดินในระดับจำกัด

สำหรับการปลูกไผ่และหญ้าแฝกร่วมกัน ค่า F.S. อยู่ในระดับกึ่งกลางระหว่างการปลูกพืชเดี่ยว โดยในกรณีอัตราส่วนรากต่อพื้นที่ 0.2% ค่า F.S. เท่ากับ 2.041, 1.504 และ 1.202 ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าการปลูกแบบผสมผสานสามารถเพิ่มเสถียรภาพของลาดดินได้ดีกว่าการปลูกเพียงชนิดเดียว เป็นแนวทางที่มีศักยภาพในการประยุกต์ใช้ในพื้นที่ลาดชัน สามารถใช้ประโยชน์จากพืชทั้งสองชนิดได้ดี แต่มีข้อควรระวังคือ ช่วงการเติบโตของพืชทั้งสองชนิดที่ไม่ตรงกัน ต้องมีการวางแผนที่เหมาะสมในการใช้พื้นที่ ทั้งนี้ยังสามารถใช้ประโยชน์จากรากพืชที่มีหลายระดับได้ แม้ว่าการเสริมกำลังลาดดินด้วยรากพืชจะช่วยเพิ่มค่าอัตราส่วนความปลอดภัยได้อย่างมีประสิทธิภาพ แต่ก็เป็นกรณีที่กำหนดให้รากมีความโตเต็มที่ ในขณะที่พืชยังไม่โตเต็มที่หรือเพิ่งเริ่มปลูก ความเสถียรภาพของลาดจะยังไม่ถึงระดับปลอดภัย แสดงให้

เห็นว่าวิธีชีววิศวกรรมปฐพีควรได้รับการประยุกต์ใช้ร่วมกับมาตรการทางวิศวกรรมอื่น เช่น โครงสร้างเสริมกำลังในช่วงแรกที่พืชยังไม่หยั่งรากลึก หรือระบบระบายน้ำเพื่อเพิ่มความปลอดภัยของลาดดินในพื้นที่เสี่ยงสูง

สรุป

การศึกษานี้ประเมินประสิทธิภาพเชิงกลของรากแฝกและไผ่ต่อเสถียรภาพลาดดินภายใต้สภาวะน้ำใต้ดินต่างกันด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ และการทดสอบแรงดึงของรากพืชในห้องปฏิบัติการ ผลการศึกษาพบว่า ผลการวิเคราะห์แสดงให้เห็นอย่างชัดเจนว่าระดับน้ำใต้ดินมีอิทธิพลอย่างมากต่อเสถียรภาพของลาดดิน โดยเฉพาะในกรณีที่ไม่มีการเสริมกำลังด้วยพืช ซึ่งค่า Factor of Safety ลดลงมากที่สุด การเสริมกำลังด้วยระบบรากพืชช่วยเพิ่มค่า Factor of Safety ในทุกสภาวะ โดยกลไกหลักมาจากการเพิ่มค่าแรงยึดเหนี่ยว (root cohesion, Cr) ในชั้นดินตื้น ซึ่งเป็นบริเวณวิกฤตของการวิบัติแบบไถลตื้น ผลการวิเคราะห์แสดงให้เห็นว่าอัตราส่วนรากต่อพื้นที่มีบทบาทสำคัญต่อระดับการเพิ่มเสถียรภาพ โดยกรณีอัตราส่วนต่อพื้นที่ของราก 0.2% หรือกรณีพืชมีอายุและปริมาณรากสูงให้ค่า F.S. สูงกว่ากรณี 0.1% หรือกรณีช่วงเริ่มต้นที่ปริมาณรากยังไม่สูงมาก

เมื่อเปรียบเทียบระหว่างชนิดพืช พบว่าหญ้าแฝกให้ประสิทธิภาพในการเสริมเสถียรภาพสูงกว่า สาเหตุหลักมาจากลักษณะระบบรากของหญ้าแฝกที่มีความหนาแน่นสูงในแนวดิ่งในช่วงความลึก 2 เมตร ส่งผลให้ค่า root area ratio และค่า Cr มีค่าสูงกว่า และสามารถเสริมเสถียรภาพได้ดีกว่ารากไผ่ อย่างไรก็ตาม การปลูกแฝกผสมผสานกับไผ่ ก็ยังให้ค่า FS ในระดับที่เพียงพอ (> 1.2) จึงมีความน่าสนใจในการปลูกพืชผสมผสานเพื่อให้เกิดประโยชน์ด้านอื่นๆ

เอกสารอ้างอิง

อภินิติ โชติสังกาศ, และคณะ. 2568. โครงการงานวิจัยการประยุกต์ใช้หญ้าแฝกเพื่อการป้องกันดินถล่ม กรณีศึกษาบ้านห้วยหินลาดใน อำเภอเวียงป่าเป้า จังหวัดเชียงราย. รายงานฉบับสมบูรณ์.

Boldrin, D., Leung, A.K., Bengough, A.G. 2017. Root biomechanical properties during establishment of woody perennials. Ecol. Eng. 109: 196–206. doi.org/10.1016/j.ecoleng.2017.05.002

Fredlund, D.G., Morgenstern, N.R., Widger, R.A. 1978. The shear strength of unsaturated soils. Can. Geotech. J. 15: 313–321. doi.org/10.1139/t78-029

Gray, D.H., Sotir, R.B. 1996. Biotechnical and soil bioengineering slope stabilization: A practical guide for erosion control. Wiley. New York, USA.

Jotisankasa, A., Sirirattanachat, T. 2017. Effects of grass roots on soil water retention curve and permeability. Can. Geotech. J. 54: 1612–1622.

Jotisankasa, A., Taworn, D. 2016. Direct shear testing of root-reinforced soils. Geotech. Test. J. 39: 608–620.

Mahannopkul, K., Jotisankasa, A. 2019. Influence of root suction on tensile strength of Chrysopogon zizanioides roots and its implication on bio-slope stabilization. J. Mt. Sci. 16: 275–284. doi.org/10.1007/s11629-018-5134-8

Norris, J.E., Stokes, A., Mickovski, S.B., Cammeraat, E., van Beek, R., Nicoll, B., Achim, A. (Eds.). 2008. Slope stability and erosion control: Ecotechnological solutions. Springer. doi.org/10.1007/978-1-4020-6676-4

Schwarz, M., Lehmann, P., Or, D. 2010. Quantifying lateral root reinforcement in steep slopes. Earth Surf. Process. Landf. 35: 354–367.

Thomas, R.E., Pollen-Bankhead, N. 2010. Modeling root reinforcement with a fiber-bundle approach. Ecol. Eng. 36: 47–61.

Truong, P.N., Loch, R.J. 2004. Vetiver system for erosion and sediment control. Pacific Rim Vetiver Network.

van Genuchten, M.T. 1980. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. Soil Sci. Soc. Am. J. 44: 892–898. doi.org/10.2136/sssaj1980.03615995004400050002x

Waldron, L.J. 1977. The shear resistance of root-permeated homogeneous and stratified soil. Soil Sci. Soc. Am. J. 41: 843–849. doi.org/10.2136/sssaj1977.03615995004100050005x

Wu, T.H., McKinnell, W.P.III., Swanston, D.N. 1979. Strength of tree roots and landslides on Prince of Wales Island, Alaska. Can. Geotech. J. 16: 19–33. doi.org/10.1139/t79-003

Zhang, C., Zhou, X., Jiang, J., et al. 2019. Effects of root moisture content on tensile properties. Catena 172: 140–147.

การพัฒนาและประเมินสมรรถนะอุปกรณ์ให้ปุ๋ยและเคมีเกษตรพร้อมระบบน้ำขนาดเล็ก (MiniCHEM) สำหรับระบบชลประทานแรงดันต่ำ

Development and Performance Evaluation of Mini Chemigation Device (MiniCHEM) for Low-Pressure Irrigation Systems

ธนวัฒน์ โชติวรรณ[a], **ปิยะพงษ์ สอนแก้ว**[b],**วรภัทร วชิรยากรณ์**[a,*]

Tanawat Chotivan[a], Piyapong Sonkaew[b], Voraphat Vachirayakon[a,*]

[a]สาขาวิชาเทคโนโลยีการเกษตร คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ปทุมธานี 12120

[b]ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์เพื่อการวิจัยชั้นสูง มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ปทุมธานี 12120

[a]Department of Agricultural Technology, Faculty of Science and Technology, Thammasat University, Pathum- Thani 12120, Thailand

[b]Center of Scientific Equipment for Advanced research, Thammasat University, Pathum Thani 12120, Thailand

*Corresponding author. E-mail address: vore405@gmail.com

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้พัฒนา MiniCHEM อุปกรณ์ให้ปุ๋ยพร้อมระบบชลประทานแรงดันต่ำ โดยบูรณาการสมการแบร์นูลลีร่วมกับระบบไหลเวียนวงจรปิดเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการปลดปล่อยธาตุอาหาร ผลการทดสอบที่แรงดัน 1.5 บาร์ พบว่า MiniCHEM มีประสิทธิภาพการใช้ปุ๋ยสูงกว่าหัวฉีดเวนทูรี่ดั้งเดิมอย่างมีนัยสำคัญ โดยค่าประสิทธิภาพของฟอสฟอรัส (P) สังกะสี (Zn) และเหล็ก (Fe) สูงถึงร้อยละ 91.60, 79.09 และ 75.14 ตามลำดับ ในขณะที่อุปกรณ์ดั้งเดิมมีค่าต่ำกว่าร้อยละ 60 จึงนับเป็นนวัตกรรมทางเลือกที่มีศักยภาพสูงสำหรับการจัดการธาตุอาหารในสวนผลไม้

คำสำคัญ: การให้ปุ๋ยความแม่นยำสูง, ประสิทธิภาพการใช้ปุ๋ย, ระบบไหลเวียนวงจรปิด, เวนทูรี่, อุปกรณ์ให้ปุ๋ย

Abstract

This research developed MiniCHEM, a low-pressure fertigation device integrating Bernoulli's principle with closed-loop circulation to enhance injection efficiency. Tests at 1.5 bar revealed that MiniCHEM significantly surpassed conventional Venturi injectors in fertilizer use efficiency. Specifically, Phosphorus (P), Zinc (Zn), and Iron (Fe) efficiencies reached 91.60%, 79.09%, and 75.14%, respectively, whereas conventional devices remained below 60%. MiniCHEM thus demonstrates high potential as an alternative for precision nutrient management in orchards.

Keywords: Closed-loop circulation, Fertilizer use efficiency, Fertigation device, Precision fertigation, Venturi

คำนำ

การบริหารจัดการธาตุอาหารพืชอย่างแม่นยำผ่านระบบชลประทาน ที่ให้น้ำไปพร้อมกับปุ๋ย หรือที่เรียกว่า "เฟอร์ติเกชัน" (Fertigation) ถือเป็นกลยุทธ์สำคัญในการยกระดับประสิทธิภาพการผลิตไม้ผลเชิงพาณิชย์ในปัจจุบัน เนื่องจากสามารถลดต้นทุนแรงงานและเพิ่มประสิทธิภาพการใช้ปุ๋ย (Fertilizer Use Efficiency: FUE) ได้อย่างมีนัยสำคัญ (Hartz and Hochmuth, 1996) ในทางปฏิบัติ เกษตรกรส่วนใหญ่นิยมเลือกใช้อุปกรณ์จ่ายปุ๋ยแบบเวนทูรี่ (Venturi Injector) เป็นอุปกรณ์หลัก เนื่องจากมีข้อได้เปรียบด้านต้นทุนต่ำ โครงสร้างทางวิศวกรรมไม่ซับซ้อน และง่ายต่อการบำรุงรักษาเมื่อเปรียบเทียบกับระบบปั๊มฉีดสารละลาย (Dosing Pump) (Munoz-Carpena et al., 2008) โดยกลไกการทำงานของอุปกรณ์ชนิดนี้อาศัยหลักการสร้างความแตกต่างของแรงดัน (Pressure Differential) ระหว่างท่อทางเข้าและทางออก เพื่อเหนี่ยวนำให้เกิดสภาวะสุญญากาศตามสมการของแบร์นูลลี (Bernoulli's Principle) (Hoffman et al., 2007)

อย่างไรก็ตาม อุปกรณ์เวนทูรี่แบบดั้งเดิมยังประสบข้อจำกัดทางสมรรถนะที่สำคัญ กล่าวคือ การสูญเสียแรงดันรวมในระบบ (Total Head Loss) ในระดับสูง โดยระบบจำเป็นต้องสร้างความแตกต่างของแรงดันให้ได้ร้อยละ 30–50 ของแรงดันขาเข้า จึงจะสามารถสร้างแรงดูดที่เพียงพอต่อการใช้งาน (Sun and Niu, 2012) ข้อจำกัดนี้ส่งผลให้ระบบจำเป็นต้องมีแรงดันน้ำต้นทาง (Inlet Pressure) สูงกว่า 2.5 บาร์ เพื่อชดเชยการสูญเสียดังกล่าว ซึ่งขัดแย้งกับบริบทของพื้นที่เกษตรกรรมทั่วไปที่นิยมใช้ "ระบบชลประทานแรงดันต่ำ" (Low-Pressure Irrigation System) ซึ่งในงานวิจัยนี้กำหนดนิยามหมายถึงระบบที่มีแรงดันใช้งานปกติในช่วง 1.0 – 1.5 บาร์ เกณฑ์ดังกล่าวสอดคล้องกับบริบทการใช้งานจริงในพื้นที่สวนผลไม้ (เช่น ทุเรียน มังคุด) ที่เกษตรกรส่วนใหญ่นิยมใช้ปั๊มน้ำหอยโข่งธรรมดา (Single-stage Centrifugal Pump) ซึ่งสร้างแรงดันเฉลี่ยในระบบท่อเมนได้เพียง 1.5 - 2.0 บาร์ ทำให้การใช้อุปกรณ์เวนทูรี่แบบเดิมที่ต้องการแรงดันสูงกลายเป็นข้อจำกัดทางเทคนิคที่ต้องเพิ่มกำลังของปั๊มให้มีแรงดันมากกว่า 2.5 บาร์ขึ้นไป จึงสามารใช้งานได้ ซึ่งส่งผลต่อต้นทุนการวางระบบชลประทานแบบเฟอร์ติเกชัน สภาวะดังกล่าวส่งผลกระทบโดยตรงต่อเสถียรภาพของความสม่ำเสมอในการจ่ายน้ำ (Irrigation Uniformity) ของหัวมินิสปริงเกลอร์ในแปลงปลูก ทำให้เกษตรกรจำเป็นต้องติดตั้งปั๊มเสริมแรงดัน (Booster Pump) เพิ่มเติม ซึ่งส่งผลให้ต้นทุนพลังงานและความซับซ้อนในการติดตั้งระบบเพิ่มสูงขึ้น (Yan et al., 2012) นอกจากนี้ในพื้นที่ที่มีข้อจำกัดด้านแรงดันน้ำ (Low Operating Pressure) อุปกรณ์เวนทูรี่มักแสดงสมรรถนะการทำงานที่ไม่เสถียร ส่งผลให้อัตราการจ่ายปุ๋ยมีความแปรปรวนสูง (Manzano, 2016)

แม้ว่างานวิจัยในอดีตได้พยายามปรับปรุงสมรรถนะของเวนทูรี่ผ่านการปรับเปลี่ยนสัณฐานเรขาคณิตของคอคอด (Throat Geometry) และมุมองศาของท่อทางเข้าและทางออก (Convergent/Divergent Angles) โดยประยุกต์ใช้เทคนิคพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (Computational Fluid Dynamics: CFD) เพื่อลดสัมประสิทธิ์แรงต้านการไหล (Zhang et al., 2017; Garcia-Saldana et al., 2024) แต่การพัฒนาอุปกรณ์ที่สามารถรักษาประสิทธิภาพการจ่ายปุ๋ยภายใต้สภาวะแรงดันต่ำโดยปราศจากการใช้พลังงานไฟฟ้าเสริม ยังคงเป็นโจทย์วิจัยที่ท้าทายและมีความสำคัญเร่งด่วน

เพื่อตอบสนองต่อประเด็นปัญหาดังกล่าว งานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้น การพัฒนาและประเมินสมรรถนะของ “อุปกรณ์ให้ปุ๋ยและเคมีเกษตรพร้อมระบบน้ำขนาดเล็ก” (Mini Chemigation Device: MiniCHEM) ซึ่งมีความแปลกใหม่ (Novelty) ด้วยการออกแบบภายใต้กรอบแนวคิดระบบไหลเวียนแบบวงจรปิด (Closed-Loop Circulation) บูรณาการร่วมกับถังทนแรงดัน (Pressure-Resistant Tank) โดยกำหนด มุมฉีดสารละลายที่เหมาะสม (Optimized Injection Angle) ไว้ที่ 21 องศา อ้างอิงพารามิเตอร์โครงสร้างจาก Zhang et al. (2017) เพื่อลดการสูญเสียพลังงานจลน์และเพิ่มประสิทธิภาพการผสมผสานของของไหล วัตถุประสงค์หลักของการพัฒนานวัตกรรมคือการยกระดับความแม่นยำในการจัดการธาตุอาหารพืชและแก้ปัญหาการสูญเสียแรงดันในระบบชลประทาน ซึ่งถือเป็นทางเลือกที่มีศักยภาพ (Potential Alternative) สำหรับเกษตรกรผู้ปลูกไม้ผลที่มีระบบน้ำเดิมอยู่แล้ว ให้สามารถเข้าถึงเทคโนโลยีเกษตรแม่นยำได้โดยไม่ต้องลงทุนปรับเปลี่ยน

ระบบปั๊มขนาดใหญ่ ช่วยลดต้นทุนพลังงานและปุ๋ยเคมี พร้อมทั้งเพิ่มขีดความสามารถในการแข่งขันของเกษตรกรรายย่อยได้อย่างยั่งยืน

อุปกรณ์และวิธีการ

การออกแบบและสร้างอุปกรณ์ต้นแบบ (Design and Fabrication of Prototype)

การทำงานของอุปกรณ์ฉีดปุ๋ยแบบเวนทูรี่อาศัยหลักการพื้นฐานของสมการแบร์นูลลี (Bernoulli's Equation) ซึ่งอธิบายความสัมพันธ์ระหว่างความดันและความเร็วของของไหล อย่างไรก็ตาม การประยุกต์ใช้สมการแบร์นูลลีในสภาวะอุดมคติเพียงอย่างเดียวไม่เพียงพอต่อการอธิบายพฤติกรรมการสูญเสียพลังงานที่เกิดขึ้นจริงภายในอุปกรณ์ ดังนั้น ในงานวิจัยนี้จึงพิจารณา "สมดุลพลังงานในปริมาตรควบคุม" (Energy Balance in Control Volume) ระหว่างทางเข้า (Inlet, 1) และคอคอด (Throat, 2) โดยคำนึงถึงค่าการสูญเสียเฮดรวม (Total Head Loss, h_L) ตาม Equation 1 :

$$\frac{P_1}{\gamma}+\frac{\upsilon_1^2}{2g}+z_1=\frac{P_2}{\gamma}+\frac{\upsilon_2^2}{2g}+z_2+h_L \qquad (1)$$

Where; P_1, P_2 is Static pressure at the inlet and throat sections (Pa)

υ_1,υ_2 is Average fluid velocity at the inlet and throat sections (m/s)

z_1,z_2 is Elevation head (m), which is equal in a horizontal pipe ($z_1=z_2$)

γ is Specific weight of the fluid (N/m^3)

g is Gravitational acceleration (m/s^2)

h_L is Total head loss (m), which is associated with the loss coefficient (K) according to the equation:

$$h_L=K\cdot\left(\frac{\upsilon^2}{2g}\right)$$

จากสมการดังกล่าว การออกแบบลดขนาดพื้นที่หน้าตัดบริเวณคอคอดจะส่งผลให้ความเร็วของของไหลเพิ่มขึ้น ($\upsilon_2 > \upsilon_1$) ทำให้ความดันสถิตลดลง ($P_2<P_1$) จนเกิดสภาวะสุญญากาศที่เพียงพอต่อการดูดสารละลาย อย่างไรก็ตาม งานวิจัยในอดีตของ Papadopoulos (1996) ระบุว่าข้อจำกัดสำคัญของอุปกรณ์เวนทูรี่แบบดั้งเดิมคือการสูญเสียแรงดัน (Head Loss) ที่สูงมาก โดยอาจสูญเสียได้ถึง 1 ใน 3 ของแรงดันใช้งานปกติ ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Badr et al. (2006) ที่พบว่าประสิทธิภาพการดูดจ่ายปุ๋ยของเวนทูรี่จะขึ้นอยู่กับความแตกต่างของแรงดัน (ΔP) อย่างมาก ทำให้ประสิทธิภาพลดลงเมื่อใช้งานในระบบที่มีแรงดันต่ำ

เพื่อแก้ไขข้อจำกัดดังกล่าว งานวิจัยนี้จึงได้กำหนดพารามิเตอร์การออกแบบโดยอ้างอิงโครงสร้างที่เหมาะสมที่สุดจากการศึกษาของ Zhang et al. (2017) ซึ่งระบุว่าการกำหนด มุมฉีดสารละลาย (Injection Angle) ที่ 21 องศา (Fig. 1)

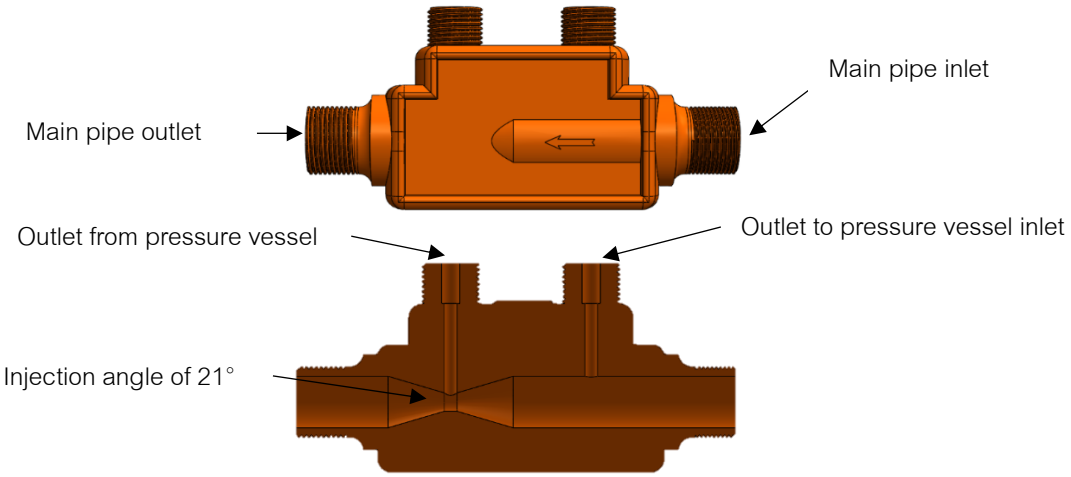


Fig. 1 Mini chemigation device: MiniCHEM

จะช่วยลดค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านทานการไหล (Resistance Coefficient, K) และลดการเกิดการแยกตัวของการไหล (Flow Separation) บริเวณคอคอดได้อย่างมีนัยสำคัญ ส่งผลให้ลดการสูญเสียพลังงาน (h_L) ในระบบ และทำให้อุปกรณ์สามารถสร้างแรงดูดที่เสถียรได้แม้ในสภาวะแรงดันน้ำต่ำ

การขึ้นรูปอุปกรณ์ต้นแบบดำเนินการด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์สามมิติ (3D Printing) แบบ Fused Deposition Modeling (FDM) โดยใช้เครื่องพิมพ์รุ่น Creator 3 Pro (Flashforge, China) วัสดุที่ใช้ในการขึ้นรูปคือพลาสติกชนิด Polylactic Acid (PLA) ซึ่งเป็นพลาสติกชีวภาพที่มีความเสถียรของรูปทรงสูง กระบวนการพิมพ์กำหนดค่าความหนาแน่นของโครงสร้างภายใน (Infill Density) ที่ร้อยละ 100 เพื่อให้ชิ้นงานมีความทึบตัน (Solid Structure) สูงสุด ส่งผลให้อุปกรณ์มีคุณสมบัติเชิงกลที่แข็งแรง สามารถทนต่อแรงดันน้ำในระบบชลประทานได้ดีและไม่เกิดการรั่วซึมระหว่างการใช้งาน

การติดตั้งระบบน้ำและการเตรียมสารละลายธาตุอาหาร (Experimental Setup and Nutrient Preparation)

การทดสอบสมรรถนะดำเนินการ ณ แปลงทดลองทางการเกษตร อาคารบรรยายเรียนรวม 5 คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต โดยติดตั้งอุปกรณ์ต้นแบบเปรียบเทียบกับอุปกรณ์เวนทูรี่แบบดั้งเดิม (Conventional Venturi) ร่วมกับระบบมินิสปริงเกลอร์ (Fig. 2)

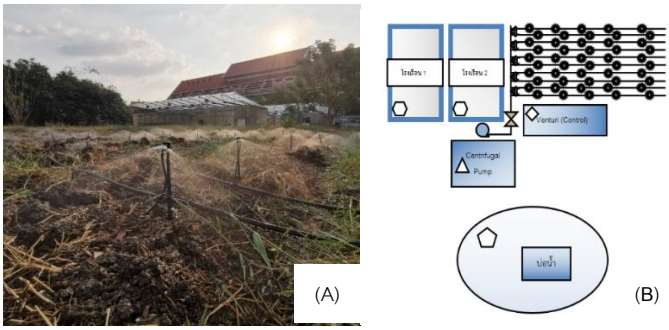


Fig. 2 The mini-sprinkler irrigation system (A) was set up for evaluating the performance of the MiniCHEM device at the gricultural experimental plot near lecture building 5, Faculty of science and technology, Thammasat university, Rangsit campus (B).

การเตรียมสารละลายปุ๋ยต้นทาง (Stock Solution) กำหนดความเข้มข้นของธาตุอาหารเพื่อใช้เป็นตัวชี้วัดประสิทธิภาพการทำงาน โดยครอบคลุมทั้งธาตุอาหารหลัก (Macronutrients) และจุลธาตุ (Micronutrients) ตามสัดส่วนความต้องการของพืช ดังนี้:

- ธาตุอาหารหลัก: ใช้ฟอสฟอรัส (P) เป็นตัวแทนทดสอบ ที่ความเข้มข้น 16.67 mg/L
- ธาตุอาหารเสริม: ใช้เหล็ก (Fe), สังกะสี (Zn) และ แมงกานีส (Mn) ที่ความเข้มข้น 5.39, 1.10 และ 0.56 mg/L ตามลำดับ

การทดสอบพฤติกรรมการปลดปล่อยสารละลาย (Solution Release Characteristic Test)

ทำการศึกษาพฤติกรรมการกระจายตัวและการปลดปล่อยสารละลายเข้าสู่ระบบท่อจ่ายน้ำ โดยใช้วิธีติดตามสี (Dye Tracer Technique) ด้วยการผสมสีผสมอาหาร (Food Coloring) ลงในถังบรรจุสารละลายต้นทาง ทดสอบภายใต้สภาวะแรงดันใช้งาน 1.5 บาร์ และใช้อุปกรณ์มินิสปริงเกลอร์ที่มีอัตราการไหล 150 ลิตรต่อชั่วโมง การเก็บรวบรวมข้อมูลดำเนินการโดยเก็บตัวอย่างน้ำที่ผ่านหัวจ่ายมินิสปริงเกลอร์ทุก ๆ 1-5 นาที อย่างต่อเนื่องเป็นเวลา 20 นาที นำตัวอย่างที่ได้ไปวัดค่าการดูดกลืนแสง (Absorbance) เพื่อหาความเข้มข้นของสารละลายด้วยเครื่อง Spectrophotometer ที่ความยาวคลื่น (Wavelength) 629.8 นาโนเมตร ซึ่งเป็นช่วงคลื่นที่เหมาะสมสำหรับการตรวจวัดความเข้มข้นของสีที่ใช้ทดสอบ

การทดสอบสมรรถนะและการเก็บรวบรวมข้อมูล (Performance Testing and Data Collection)

การทดลองวางแผนแบบสุ่มสมบูรณ์ (Completely Randomized Design: CRD) โดยแบ่งชุดการทดลองออกเป็น 2 กลุ่มและกำหนดเงื่อนไขแรงดันใช้งาน (Operating Pressure) ที่แตกต่างกันตามวัตถุประสงค์ของการทดสอบดังนี้: (1) ระบบอุปกรณ์ MiniCHEM (Fig. 3): ทดสอบที่ระดับแรงดันคงที่ 1.5 บาร์ ซึ่งเป็นจุดออกแบบ (Design Point) ที่เหมาะสมสำหรับการใช้งานจริง และ (2) อุปกรณ์เวนทูรี่แบบดั้งเดิม (Fig. 4): ทดสอบที่ระดับแรงดัน 1.0, 1.5 และ 1.8 บาร์ เพื่อประเมินความอ่อนไหวของอุปกรณ์ต่อการเปลี่ยนแปลงแรงดัน (Sensitivity Analysis) และใช้เป็นฐานข้อมูลเปรียบเทียบ

Fig. 3 Mini chemigation device system

Fig. 4 Conventional venturi system

การเก็บรวบรวมข้อมูลดำเนินการโดยเก็บตัวอย่างน้ำที่ผ่านออกจากหัวจ่ายมินิสปริงเกลอร์ในแต่ละชุดการทดลอง เพื่อนำไปวิเคราะห์ปริมาณธาตุอาหารเชิงปริมาณในห้องปฏิบัติการที่ได้รับการรับรองมาตรฐาน ISO/IEC 17025 โดยมีขั้นตอนการวิเคราะห์ตามมาตรฐานสากล ดังนี้:

- การเตรียมตัวอย่าง (Sample Digestion): ย่อยสลายตัวอย่างด้วยเทคนิค Microwave Digestion โดยใช้กรดไนตริก (HNO_3) และไฮโดรเจนเพอร์ออกไซด์ (H_2O_2) เพื่อกำจัดสารอินทรีย์และละลายธาตุอาหารออกมาอย่างสมบูรณ์ตามมาตรฐาน US EPA Method 3051A
- การวิเคราะห์ธาตุอาหาร (Instrumental Analysis): ตรวจวัดความเข้มข้นของธาตุอาหาร (P, Fe, Mn, Zn) ด้วยเครื่อง Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry (ICP-MS) รุ่น NexION 350X (PerkinElmer, USA) ตามวิธีมาตรฐานในการวิเคราะห์คุณภาพน้ำเพื่อการเกษตร (APHA, 2017)

การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ (Statistical Analysis)

วางแผนการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ (Completely Randomized Design; CRD) วิเคราะห์ความแปรปรวนของข้อมูล (ANOVA) ด้วยโปรแกรม SAS OnDemand for Academics เปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยด้วยวิธี Duncan's Multiple Range Test (DMRT) ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ($P < 0.05$)

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

ประสิทธิภาพการจ่ายธาตุอาหาร (Fertilizer Injection Efficiency) จากการทดสอบสมรรถนะของอุปกรณ์ MiniCHEM เปรียบเทียบกับอุปกรณ์เวนทูรี่แบบดั้งเดิม (Conventional Venturi) ภายใต้สภาวะแรงดันใช้งาน 1.0, 1.5 และ 1.8 บาร์ โดยการวิเคราะห์ความเข้มข้นของธาตุอาหารปลายทางด้วยเทคนิค ICP-MS พบว่าระดับแรงดันใช้งานมีอิทธิพลอย่างมีนัยสำคัญ ($P < 0.05$) ต่อประสิทธิภาพการทำงานของอุปกรณ์ทั้งสองชนิด

ผลการทดลองใน Table 1 แสดงให้เห็นว่า ที่ระดับแรงดันใช้งาน 1.5 บาร์ อุปกรณ์ MiniCHEM สามารถรักษาความเข้มข้นของธาตุอาหารได้ใกล้เคียงกับค่าเป้าหมายมากที่สุด มีประสิทธิภาพการใช้ปุ๋ย (Fertilizer Use Efficiency: FUE) สูงกว่าอุปกรณ์เวนทูรี่แบบดั้งเดิมในทุกธาตุอาหารที่ทำการทดสอบ ดังรายละเอียดใน Table 1 โดยเฉพาะอย่างยิ่ง

ธาตุฟอสฟอรัส (P) ซึ่งมีความเข้มข้นเป้าหมาย C_{target} อยู่ที่ 16.67 mg/L อุปกรณ์ MiniCHEM สามารถจ่ายปุ๋ยได้จริง $C_{measured}$ สูงถึง 15.27 ± 0.08 mg/L คิดเป็นประสิทธิภาพการใช้ปุ๋ย (FUE) ร้อยละ 91.60 ซึ่งสูงกว่าอุปกรณ์แบบดั้งเดิมที่ทำได้เพียง 9.59 ± 0.30 mg/L คิดเป็นร้อยละ 57.53 ที่ระดับแรงดันเดียวกันอย่างมีนัยสำคัญ

นอกจากนี้ยังพบแนวโน้มเช่นเดียวกันในกลุ่มธาตุอาหารเสริม (Micronutrients) ได้แก่ สังกะสี (Zn) ซึ่งมีค่าเป้าหมาย 1.10 mg/L อุปกรณ์ MiniCHEM สามารถจ่ายได้จริง 0.87 ± 0.02 mg/L (ประสิทธิภาพร้อยละ 79.09) ซึ่งสูงกว่าอุปกรณ์แบบดั้งเดิมที่จ่ายได้เพียง 0.49 ± 0.04 mg/L อย่างมีนัยสำคัญ อย่างไรก็ตาม เมื่อพิจารณาผลการทดลองของอุปกรณ์ดั้งเดิมที่แรงดันระดับ 1.8 บาร์ พบว่าประสิทธิภาพการจ่ายธาตุอาหารไม่ได้เพิ่มขึ้นตามสัดส่วนของแรงดัน โดยค่าความเข้มข้นของฟอสฟอรัสลดลงเหลือ 8.98 ± 0.40 mg/L ปรากฏการณ์นี้อาจอธิบายได้ด้วยการเกิดคาวิเทชัน (Cavitation) บริเวณคอคอด เมื่อความเร็วของไหลสูงเกินขีดจำกัดทางชลศาสตร์ของการออกแบบ (Hydraulic Design Limit) ส่งผลให้เกิดฟองอากาศขัดขวางพื้นที่หน้าตัดการไหลและลดประสิทธิภาพการดูดสารละลายลง

ประสิทธิภาพการใช้ปุ๋ย (Fertilizer Use Efficiency: FUE) คำนวณจากอัตราส่วนร้อยละของความเข้มข้นธาตุอาหารที่ตรวจวัดได้จริงจากหัวจ่ายน้ำ ($C_{measured}$) เปรียบเทียบกับความเข้มข้นเป้าหมายทางทฤษฎี (C_{target}) ตามEquation 2:

$$FUE\ (\%) = \frac{C_{measured}}{C_{target}} \times 100 \qquad (2)$$

ซึ่งค่านี้บ่งบอกถึงความสามารถของอุปกรณ์ในการนำส่งธาตุอาหารไปยังจุดใช้งานจริงโดยมีการสูญเสียในระบบน้อยที่สุด

Table 1 Comparison of target concentration, measured concentration and Fertilizer Use Efficiency (FUE) between Conventional Venturi and MiniCHEM devices at different operating pressures.

Devices	Pressure (bar)	Nutrient	Target Conc. *(mg/L)*	Measured Conc. *(mg/L)*	FUE (%)
Conventional	1.0	Phosphorus (P)	16.67	9.31 ± 0.35^{b}	55.85 ± 2.1^{b}
		Iron (Fe)	5.39	1.56 ± 0.19^{c}	28.94 ± 3.5^{c}
		Manganese (Mn)	1.10	0.43 ± 0.05^{b}	39.29 ± 4.1^{b}
		Zinc (Zn)	0.56	0.10 ± 0.02^{c}	18.18 ± 2.8^{c}
Conventional	1.5	Phosphorus (P)	16.67	9.59 ± 0.30^{b}	57.53 ± 1.8^{b}
		Iron (Fe)	5.39	1.89 ± 0.16^{b}	35.06 ± 2.9^{b}
		Manganese (Mn)	1.10	0.49 ± 0.04^{ab}	44.64 ± 3.8^{ab}
		Zinc (Zn)	0.56	0.15 ± 0.02^{b}	26.36 ± 3.2^{b}
Conventional	1.8	Phosphorus (P)	16.67	8.98 ± 0.40^{b}	53.87 ± 2.4^{b}
		Iron (Fe)	5.39	1.97 ± 0.17^{b}	36.55 ± 3.1^{b}
		Manganese (Mn)	1.10	0.51 ± 0.04^{a}	46.43 ± 3.5^{a}
		Zinc (Zn)	0.56	0.16 ± 0.01^{b}	28.18 ± 2.6^{b}
MiniCHEM	1.5	Phosphorus (P)	16.67	15.27 ± 0.08^{a}	91.60 ± 0.5^{a}
		Iron (Fe)	5.39	4.05 ± 0.06^{a}	75.14 ± 1.2^{a}
		Manganese (Mn)	1.10	0.53 ± 0.01^{a}	48.21 ± 2.5^{a}
		Zinc (Zn)	0.56	0.44 ± 0.02^{a}	79.09 ± 1.5^{a}

Note: Means in a same column followed by the different letters are significantly different by DMRT significantly different ($P < 0.05$)

การสูญเสียธาตุอาหารในระบบ (Element Loss)

จากการวิเคราะห์อัตราการสูญเสียธาตุอาหาร (Element Loss) พบว่าอุปกรณ์ MiniCHEM มีอัตราการสูญเสียต่ำกว่าอุปกรณ์เวนทูรี่แบบดั้งเดิมอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติในทุกชุดการทดลอง ดังแสดงใน Table 2 โดยที่แรงดัน 1.5 บาร์ อุปกรณ์ MiniCHEM มีการสูญเสียธาตุฟอสฟอรัส (P) ต่ำที่สุดเพียงร้อยละ 8.40 ในขณะที่อุปกรณ์แบบดั้งเดิมมีการสูญเสียสูงถึงร้อยละ 42.47–46.13 สำหรับธาตุสังกะสี (Zn) ซึ่งเป็นจุลธาตุที่มีราคาสูง พบว่าอุปกรณ์ MiniCHEM สามารถลดการสูญเสียลงเหลือเพียงร้อยละ 20.91 เทียบกับอุปกรณ์เดิมที่สูญเสียสูงถึงร้อยละ 73.64 ข้อมูลนี้ชี้ให้เห็นว่าการใช้อุปกรณ์ MiniCHEM จะช่วยลดต้นทุนค่าปุ๋ยที่สูญเปล่าไปกับกระบวนการจ่ายน้ำได้อย่างมีประสิทธิภาพ การประเมินอัตราการสูญเสียธาตุอาหาร (Element Loss Percentage) คำนวณโดยเปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างความเข้มข้นของสารละลายธาตุอาหารที่เตรียมไว้ (Target Concentration) กับความเข้มข้นของธาตุอาหารที่ตรวจวัดได้จริงจากหัวจ่ายน้ำ (Measured Concentration) ตาม Equation 3:

$$\text{Element Loss}\,(\%) = \frac{(C_{target} - C_{measured})}{C_{target}} \times 100 \qquad (3)$$

where; C_{target} is Target Concentration

$C_{measured}$ is Measured Concentration from ICP-MS Technique

Table 2 Comparison of element loss (%) between conventional venturi and MiniCHEM device.

Elements	Conventional (1.0 bar)	Conventional (1.5 bar)	Conventional (1.8 bar)	MiniCHEM (1.5 bar)
Phosphorus (P)	44.15 ± 2.5[a]	42.47 ± 2.1[a]	46.13 ± 2.9[a]	8.40 ± 0.8[b]
Iron (Fe)	71.06 ± 3.8[a]	64.94 ± 3.2[a]	63.45 ± 3.5[a]	24.86 ± 1.5[b]
Manganese (Mn)	60.71 ± 3.1[a]	55.36 ± 2.8[a]	53.57 ± 2.9[a]	51.79 ± 2.2[b]
Zinc (Zn)	81.82 ± 4.2[a]	73.64 ± 3.6[b]	71.82 ± 3.9[b]	20.91 ± 1.1[c]

Note: Means in a same column followed by the different letters are significantly different by DMRT significantly different ($P<0.05$)

พฤติกรรมการปลดปล่อยสารละลาย (Solution Release Characteristics)

จากการทดสอบการปลดปล่อยสารละลายเข้าสู่ระบบท่อจ่ายน้ำที่แรงดัน 1.5 บาร์ พบว่าความเข้มข้นของสารละลายที่จ่ายออกจากอุปกรณ์ MiniCHEM มีความสัมพันธ์กับเวลาในรูปแบบลดลงแบบลอการิทึม (Logarithmic Decay) ดังแสดงใน Fig. 5

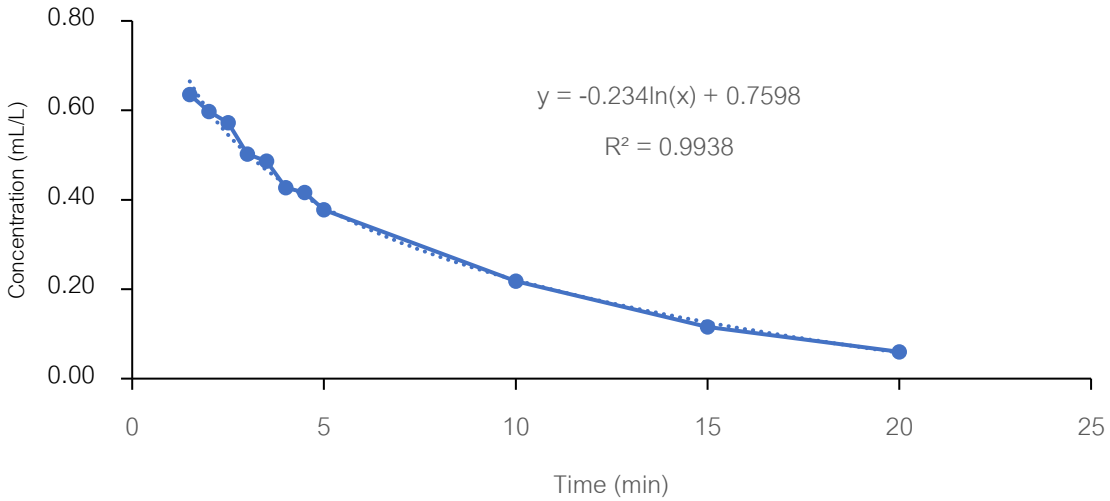


Fig. 5 Relationship between solution concentration and time during the operation of MiniCHEM device at 1.5 bar, showing logarithmic decay pattern.

โดยความเข้มข้นเริ่มต้นอยู่ที่ประมาณ 0.64 mL/L ในช่วงนาทีที่ 1.5 และลดระดับลงอย่างรวดเร็วในช่วง 5 นาทีแรก จากนั้นอัตราการลดลงจะเริ่มคงที่จนกระทั่งนาทีที่ 20 มีความเข้มข้นคงเหลือประมาณ 0.06 mL/L พฤติกรรมดังกล่าวสามารถอธิบายได้ด้วยสมการถดถอย (Regression Equation) ตาม Equation 4:

$$y=-0.198\ln(x)+0.6552 \quad (R^2=0.9938) \qquad (4)$$

where; y is Solution Concentration (mL/L)

x is Time (Min.)

ผลการทดลองนี้สอดคล้องกับงานวิจัยของ Li et al. (2007) ที่ศึกษาพฤติกรรมของถังให้ปุ๋ยแบบอาศัยความต่างดัน (Differential Pressure Tank) ซึ่งพบว่าความเข้มข้นของปุ๋ยในระบบจะลดลงในลักษณะ การเสื่อมสลายแบบเอกซ์โพเนนเชียล (Exponential Decay) เนื่องจากการเจือจางอย่างต่อเนื่องของน้ำที่ไหลเข้ามาแทนที่สารละลายเดิม ซึ่งแตกต่างจากอุปกรณ์เวนทูรี่แบบดั้งเดิม (Conventional Venturi) ที่ดูดสารละลายจากถังเปิด ซึ่งมักจะมีอัตราการจ่ายสารละลายและความเข้มข้นที่คงที่ (Constant Rate) ตราบเท่าที่แรงดันน้ำในระบบคงที่ (Kafkafi and Tarchitzky, 2011)

การที่อุปกรณ์ MiniCHEM แสดงพฤติกรรมแบบลดลงตามเวลา (Time-Dependent Decay) คล้ายกับระบบถังแรงดัน แม้จะใช้กลไกเวนทูรี่ในการดูด เป็นผลมาจากโครงสร้างการไหลเวียนแบบวงจรปิด (Closed-Loop Circulation) ที่ออกแบบไว้ ซึ่งข้อดีของรูปแบบการปลดปล่อยนี้คือ ช่วยให้พืชได้รับธาตุอาหารอย่างรวดเร็วในช่วงแรก และความเข้มข้นที่เจือจางลงในช่วงท้ายจะช่วยลดความเสี่ยงของการเกิดอาการใบไหม้ (Fertilizer Burn) จากความเข้มข้นที่สูงเกินไปได้

วิจารณ์ผลการทดลอง

ประสิทธิภาพที่เหนือกว่าอย่างมีนัยสำคัญของอุปกรณ์ MiniCHEM เป็นผลสืบเนื่องมาจากการออกแบบโครงสร้างภายในด้วยแบบจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (CFD) โดยเฉพาะการกำหนด มุมฉีดสารละลายที่ 21

องศา ซึ่งเป็นจุดวิกฤตที่ช่วยลด ค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียพลังงาน (Energy Loss Coefficient, K) ในสมการสมดุลพลังงาน ส่งผลให้กระแสของไหลเกิดการรวมตัว (Flow Merging) ได้อย่างราบรื่น ลดการแยกตัวของการไหล (Flow Separation) และความปั่นป่วน (Turbulence) บริเวณคอคอด ซึ่งเป็นสาเหตุหลักของการสูญเสียแรงดันในอุปกรณ์เวนทูรี่ทั่วไป (Sun and Niu, 2012) นอกจากปัจจัยด้านเรขาคณิต ระบบไหลเวียนแบบวงจรปิด (Closed-Loop Circulation) ยังมีบทบาทสำคัญในการรักษาเสถียรภาพของโมเมนตัมภายในระบบ ช่วยให้ความแตกต่างของแรงดัน (ΔP) ตามหลักการของสมการแบร์นูลลียังคงอยู่แม้ในสภาวะที่มีแรงดันน้ำต้นทางต่ำเพียง 1.5 บาร์ ทำให้ระบบสามารถสร้างแรงดูดสุญญากาศที่เพียงพอต่อการดึงสารละลายเข้าสู่ระบบได้อย่างต่อเนื่อง ผลการศึกษานี้สอดคล้องกับงานวิจัยของ Garcia-Saldana et al. (2024) ที่ระบุว่าการปรับปรุงรูปทรงเรขาคณิตของท่อทางเข้าและทางออก (Convergent/Divergent Sections) เป็นปัจจัยสำคัญที่ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพเชิงชลศาสตร์ในระบบชลประทานแรงดันต่ำ

นอกจากประเด็นด้านกลไกการไหล ประเด็นความถูกต้องแม่นยำของการวัดค่า FUE และการสูญเสียธาตุอาหารเป็นอีกปัจจัยที่สำคัญ ซึ่งในการศึกษานี้อ้างอิงจากความเข้มข้นที่วัดได้จริง ($C_{measured}$) โดยผลการวิเคราะห์ทางสถิติแสดงค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (SD) ในระดับต่ำ ข้อมูลนี้บ่งชี้ว่าอุปกรณ์ MiniCHEM มีความสามารถในการจ่ายสารละลายที่มี ความสม่ำเสมอเชิงเวลา (Temporal Stability) สูง สำหรับในบริบทของ ความสม่ำเสมอเชิงพื้นที่ (Spatial Uniformity) เมื่อนำไปใช้งานในแปลงเกษตรจริง ความแม่นยำอาจได้รับอิทธิพลจากสมรรถนะของระบบกระจายน้ำ (เช่น ค่าความสม่ำเสมอ CU ของหัวสปริงเกลอร์) อย่างไรก็ตาม การที่อุปกรณ์ต้นทางสามารถรักษาความเข้มข้นให้คงที่และแม่นยำได้ตามค่าเป้าหมาย (C_{target}) จะทำให้พืชในแต่ละตำแหน่งมีโอกาสได้รับธาตุอาหารในสัดส่วนที่ถูกต้อง โดยเฉพาะหัวสปริงเกลอร์ที่มีอยู่ระยะไกลมากจากจุดผสม ตามแนวคิดของ Li et al. (2015) ที่ระบุว่าความสม่ำเสมอของปุ๋ยจะแปรผันตรงกับการกระจายตัวของน้ำในระบบที่ได้รับการออกแบบอย่างเหมาะสม

จากผลการทดลองและหลักการข้างต้น ชี้ให้เห็นว่าอุปกรณ์ MiniCHEM เป็นอุปกรณ์ที่มีศักยภาพและสามารถนำไปประยุกต์ใช้เพื่อการจัดการธาตุอาหารแบบแม่นยำในสวนผลไม้ที่ใช้ระบบน้ำแรงดันต่ำและจะสามารถช่วยลดต้นทุนการผลิตของเกษตรกรได้

สรุป

จากการศึกษาและพัฒนาอุปกรณ์ให้ปุ๋ยและเคมีเกษตรพร้อมระบบน้ำขนาดเล็ก (MiniCHEM) โดยประยุกต์ใช้เทคโนโลยีการพิมพ์สามมิติและหลักการพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (CFD) เพื่อแก้ปัญหาการสูญเสียแรงดันในระบบชลประทาน อุปกรณ์ MiniCHEM ที่ได้รับการออกแบบมุมฉีดสารละลายที่ 21 องศา ร่วมกับระบบไหลเวียนแบบวงจรปิด มีสมรรถนะในการทำงานสูงสุดที่ระดับแรงดันใช้งาน 1.5 บาร์ สามารถเพิ่มประสิทธิภาพการใช้ปุ๋ย (Fertilizer Use Efficiency) ได้ร้อยละ 91.60 สำหรับธาตุฟอสฟอรัส และร้อยละ 75 สำหรับธาตุอาหารเสริม (Zn, Fe) พร้อมทั้งลดอัตราการสูญเสียธาตุอาหารได้ต่ำกว่าร้อยละ 10 มีประสิทธิภาพเหนือกว่าอุปกรณ์เวนทูรี่แบบดั้งเดิมอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ โครงสร้างของอุปกรณ์ที่ขึ้นรูปด้วยวัสดุ PLA แบบความหนาแน่นร้อยละ 100 มีความแข็งแรงทนทานต่อสภาวะการใช้งานจริง เป็นทางเลือกที่มีประสิทธิภาพสำหรับเกษตรกรผู้ปลูกไม้ผล ช่วยลดต้นทุนพลังงานจากการติดตั้งปั๊มเสริมแรงดันและเพิ่มความแม่นยำในการจัดการธาตุอาหารพืชได้

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณสำนักงานการวิจัยแห่งชาติ (วช.) สำหรับทุนอุดหนุนการทำกิจกรรมส่งเสริมและสนับสนุนการวิจัยและนวัตกรรม ภายใต้โครงการการยกระดับนักวิจัย นักประดิษฐ์ เพื่อการพัฒนาที่ยั่งยืน Invention to Business (I-2B) ประจำปี 2565 บริษัทอีสเทิร์น อกรีเท็ค จำกัด และสวนวนาพร อ.วังจันทร์ จ.ระยอง สำหรับอุปกรณ์มินิสปริงเกลอร์ และแปลงทดสอบอุปกรณ์ MiniCHEM

เอกสารอ้างอิง

APHA. 2017. Standard methods for the examination of water and wastewater, 23rd ed. American Public Health Association. Washington, D.C., USA.

Badr, A.E.A., El-Ebabi, F.G., Eltomy, E.O. 2006. Fertigation methods effects on water and fertilizer uniformity in drip irrigation. Misr J. Agric. Eng. 23: 122–136.

Garcia-Saldana, A., Castañeda-Chávez, M.D.R., Pérez-Vázquez, A., Martínez-Dávila, J.P. 2024. Design of venturi-type fertilizer injectors to low-pressure irrigation systems. J. Agric. Sci. 15: 1–25. doi.org/10.5539/jas.v15n2p25

Hartz, T.K., Hochmuth, G.J. 1996. Fertility management of drip-irrigated vegetables. HortTechnology 6: 168–172. doi.org/10.21273/HORTTECH.6.3.168

Hoffman, G.J., Evans, R.G., Jensen, M.E., Martin, D.L., Elliott, R.L. 2007. Design and operation of farm irrigation systems, 2nd ed. ASABE. St. Joseph, MI, USA. doi.org/10.13031/2013.23684

Kafkafi, U., Tarchitzky, J. 2011. A tool for efficient fertilizer and water management. International Potash Institute (IPI). Paris, France.

Li, J., Li, M., Zhang, J. 2007. Hydraulic performance of differential pressure tanks for fertigation. Trans. CSAE 23: 41–45. doi.org/10.13031/2013.22302

Manzano, J., Palau, C., Benito, V., Guilherme, M.D.A., Vasconcelos, D.V. 2016. Geometry and head loss in venturi injectors through computational fluid dynamics. Eng. Agríc. 36: 482–491. doi.org/10.1590/1809-4430-Eng.Agric.v36n3p482-491/2016

Munoz-Carpena, R., Dukes, M.D., Li, Y.C., Klassen, W. 2008. Design and field evaluation of a new controller for soil-water based irrigation. Appl. Eng. Agric. 24: 183–191. doi.org/10.13031/2013.24266

Papadopoulos, I. 1996. Micro-irrigation systems and fertigation, pp. 309–322. In: Pereira, L.S., Feddes, R., Gilley, J.R., Lesaffre, B. (Eds.). Sustainability of Irrigated Agriculture. Kluwer Academic Publishers. Dordrecht, Netherlands. doi.org/10.1007/978-94-015-8700-6

Sun, Y., Niu, W. 2012. Simulating the effects of structural parameters on the hydraulic performances of venturi tube. Modell. Simul. Eng. 2012: 458368. doi.org/10.1155/2012/458368

US EPA. 2007. Method 3051A: Microwave assisted acid digestion of sediments, sludges, soils, and oils. U.S. Environmental Protection Agency. Washington, D.C., USA.

Yan, H.J., Chen, Y., Chu, X.Y., Xu, Y.C., Wang, Z.P. 2012. Effect of structural optimization on performance of venturi injector. IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci. 15: 072014. doi.org/10.1088/1755-1315/15/7/072014

Zhang, J., Li, J., Wu, H., Ma, Z., Waleed, E., Hu, H. 2017. Design and experiment of low-pressure venturi injector based on double fertilizer inlets. Trans. Chin. Soc. Agric. Eng. 33: 115–121. doi.org/10.11975/j.issn.1002-6819.2017.14.016

ผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศต่อการเจริญเติบโตและผลผลิตข้าวในลุ่มน้ำมูลตอนบนโดยใช้แบบจำลอง PyAEZ

Impact of Climate Change on Growth and Yield of Rice in the Upper Mun River Basin by Using the PyAEZ Model.

กิตติพล บุญมา[a], **ลพรรณพลอย ชาวเรือ**[b,*], **กัณฐ์ฐณัฐ กรกรัณย์พล**[b], **ชัยยะ พึ่งโพธิ์สภ**[b], **นิติทัศน์ บัวผัน**[b], **ธมลวรรณ สายพิมพ์**[b], **ปิยธิดา โรจน์กิจวิมล**[b]

Kittipol Boonma[a], Lapanploy Chawrua[b,*], Gunnranutt Konkharanpon[b], Chaiya Phoungphotisop[b], Nitithat Buaphan[b], Tamonwan Saipim[b], Piyathida Rotkitwimol[b]

[a]ศูนย์ภูมิสารสนเทศ สถาบันเทคโนโลยีแห่งเอเชีย ปทุมธานี 12120

[b]วิทยาลัยการชลประทาน กรมชลประทาน สถาบันสมทบมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ นนทบุรี 12120

[a]Geoinformatics Center, Asian Institute of Technology, Pathum Thani 12120, Thailand

[b]Irrigation College, Royal Irrigation Department, affiliated to Kasetsart University, Nonthaburi 11120, Thailand

*Corresponding author E-mail address: Lapanploy.c@ku.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศต่อการเพาะปลูกข้าวในพื้นที่ลุ่มน้ำมูลตอนบน โดยใช้แบบจำลอง PyAEZ (Python Agro-Ecological Zoning) ภายใต้สถานการณ์การปล่อยก๊าซเรือนกระจก SSP2-4.5 และ SSP5-8.5 เพื่อคาดการณ์ตัวแปรทางภูมิอากาศ กำหนดช่วงเวลาเพาะปลูกที่เหมาะสม และประเมินศักยภาพผลผลิตข้าวสูงสุดในอนาคต 3 ช่วงเวลา (2015–2099) เปรียบเทียบกับข้อมูลในอดีต (1984-2014) ผลการศึกษาพบว่าอุณหภูมิมีแนวโน้มสูงขึ้นในทุกสถานการณ์ ส่งผลให้ระยะเวลาการเจริญเติบโตของพืช (LGP) สั้นลง และวันเริ่มต้นเพาะปลูกที่เหมาะสมล่าช้าออกไป โดยเฉพาะอย่างยิ่งในพื้นที่เกษตรน้ำฝนภายใต้สถานการณ์ SSP5-8.5 นอกจากนี้ ผลผลิตข้าวมีแนวโน้มลดลงในอนาคต โดยพื้นที่เกษตรน้ำฝนจะได้รับผลกระทบรุนแรงกว่าพื้นที่ในเขตชลประทานอย่างมีนัยสำคัญ ผลการศึกษานี้จะเป็นประโยชน์ต่อการวางแผนกลยุทธ์การปรับตัวและการบริหารจัดการน้ำเพื่อความมั่นคงทางอาหารในระยะยาว

คำสำคัญ: การเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ, ข้าว, ลุ่มน้ำมูลตอนบน, ผลผลิตข้าว, วันเพาะปลูก, PyAEZ

Abstract

This research assesses the impacts of climate change on rice cultivation in the Upper Mun River Basin using the PyAEZ (Python Agro-Ecological Zoning) model. The study analyzes two greenhouse gas emission scenarios, SSP2-4.5 and SSP5-8.5, to forecast climatic variables, determine optimal planting periods, and evaluate maximum potential rice yields across three future periods (2015-2099) compared to a historical baseline (1984-2014). The results indicate a rising temperature trend in all scenarios, leading to a shortened Length of Growing Period (LGP) and delayed optimal planting dates, particularly for rainfed cultivation under the SSP5-8.5 scenario. Furthermore, rice yields are projected to decline, with rainfed systems facing significantly more severe impacts than irrigated systems. These findings provide crucial insights for developing adaptation strategies and water resource management plans to ensure long-term food security.

Keywords: Climate Change, Rice, Upper Mun River Basin, PyAEZ, Rice Yield, Planting Date

บทนำ

ข้าวเป็นพืชเศรษฐกิจหลักของประเทศไทย โดยเฉพาะในพื้นที่ลุ่มน้ำมูลซึ่งครอบคลุมพื้นที่เกษตรกรรมขนาดใหญ่ในภาคตะวันออกเฉียงเหนือ อย่างไรก็ตาม การเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศในปัจจุบัน ทั้งความแปรปรวนของปริมาณน้ำฝนและอุณหภูมิที่สูงขึ้น ส่งผลกระทบโดยตรงต่อศักยภาพการผลิตข้าว. การประเมินผลกระทบดังกล่าวจึงมีความจำเป็นเร่งด่วนเพื่อหาแนวทางปรับตัวที่เหมาะสม การศึกษานี้เลือกใช้แบบจำลอง PyAEZ (Python Agro-Ecological Zoning) ซึ่งเป็นเครื่องมือวิเคราะห์ตามมาตรฐาน FAO ที่มีความยืดหยุ่นสูงและเป็นรหัสเปิด (Open Source) ข้อดีของ PyAEZ เมื่อเทียบกับแบบจำลองอื่นคือสามารถวิเคราะห์ความเหมาะสมของพื้นที่ (Zoning) ได้ครอบคลุมทั้งปัจจัยดินและภูมิอากาศ โดยไม่จำเป็นต้องใช้ข้อมูลนำเข้าที่ซับซ้อนมากเท่ากับแบบจำลองระดับแปลง (เช่น DSSAT) ทำให้เหมาะสำหรับการวิเคราะห์ในระดับลุ่มน้ำที่มีข้อจำกัดด้านข้อมูล วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้คือ เพื่อประเมินผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศต่อการเจริญเติบโตและผลผลิตข้าวในลุ่มน้ำมูลตอนบน โดยจำลองสถานการณ์ภายใต้ภาพฉาย SSP2-4.5 และ SSP5-8.5 เพื่อวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงของ ระยะเวลาการเจริญเติบโตของพืช (Length of Growing Period: LGP) ซึ่งหมายถึงจำนวนวันที่พืชได้รับความชื้นและอุณหภูมิเพียงพอต่อการเจริญเติบโต รวมถึงวิเคราะห์วันเริ่มต้นเพาะปลูกที่เหมาะสมและศักยภาพผลผลิตสูงสุด เพื่อใช้เป็นแนวทางในการบริหารจัดการน้ำและวางแผนการเพาะปลูกในอนาคต

การตรวจเอกสาร

หลักการทำงานของ PyAEZ

โปรแกรม PyAEZ (เวอร์ชัน 2.2) เป็นโปรแกรมประยุกต์ (Application) ที่พัฒนาขึ้นเพื่อดำเนินการวิเคราะห์ AEZ โดยอัตโนมัติตามหลักการของ FAO การทำงานเป็นการ คำนวณเชิงกระบวนการ (Process-based calculation) โดยใช้สมการและพารามิเตอร์ที่กำหนดไว้ เช่น การคำนวณสมดุลน้ำ ไม่ใช่แบบจำลองที่ต้องมีการสอบเทียบ (Calibration) โดยในงานวิจัยนี้ใช้ 3 โมดูลหลัก ดังนี้

โมดูลที่ 1 (Climate Regime): วิเคราะห์ข้อมูลภูมิอากาศเพื่อประเมินตัวชี้วัดสำคัญ เช่น การคำนวณระยะเวลาการเจริญเติบโตของพืช (LGP) ซึ่งเป็นจำนวนวันที่ Eta/Etm ≥ 0.4 และ LGP เทียบเท่า (Equivalent LGP) ที่ปรับค่าด้วยดัชนีความชื้น ในโมดูลที่ 1 (Climate Regime) โปรแกรมจะคำนวณสมดุลน้ำในดินเพื่อหาค่าการคายระเหยจริง (Actual Evapotranspiration: Eta) เทียบกับค่าการคายระเหยสูงสุด (Maximum Evapotranspiration: Etm) โดยเกณฑ์ Eta/Etm ≥ 0.4 หมายถึงช่วงเวลาที่พืชได้รับความชื้นเพียงพอที่จะดำรงชีพและเจริญเติบโตได้ หากต่ำกว่านี้ถือว่าพืชขาดน้ำรุนแรง

โมดูลที่ 2 (Crop Simulation): ใช้เพื่อหา "วันเริ่มต้นเพาะปลูกที่เหมาะสมที่สุด" โดยโปรแกรมจะจำลองรอบการเพาะปลูกข้าว 365 รอบต่อปี ในแต่ละจุดกริดและคัดเลือกวันที่ให้ผลผลิตชีวมวลสูงสุดภายใต้ข้อจำกัดด้านสมดุลน้ำและอุณหภูมิ

โมดูลที่ 3 (Climatic Constraints): ใช้ประเมิน "ข้อจำกัดทางภูมิอากาศ" เพื่อปรับลดค่าผลผลิตสูงสุดจากโมดูล 2 ให้สมจริงยิ่งขึ้น ข้อจำกัดเหล่านี้รวมถึง 4 กลุ่มหลัก ได้แก่ 1) ความเสียหายจากศัตรูพืช/โรคต่อการเจริญเติบโต 2) ความเสียหายต่อคุณภาพผลผลิต 3) ปัจจัยภูมิอากาศที่ส่งผลต่อการเพาะปลูก และ 4) อันตรายจากน้ำค้างแข็ง

อุปกรณ์และวิธีการ

ขอบเขตพื้นที่และช่วงเวลาศึกษา

การวิจัยนี้มุ่งเน้นศึกษาพื้นที่ลุ่มน้ำมูลตอนบน (Latitude: 14-16 องศา, Longitude: 101-103 องศา) ดังแสดงในภาพที่ 1 ซึ่งเป็นพื้นที่ต้นน้ำของแม่น้ำมูลในภาคตะวันออกเฉียงเหนือ พื้นที่ส่วนใหญ่เป็นเกษตรกรรม โดยเฉพาะการปลูกข้าว ซึ่งต้องเผชิญกับความท้าทายจากความแปรปรวนของฝน โดยใช้ข้อมูลสภาพภูมิอากาศครอบคลุมช่วงเวลาตั้งแต่ปี 1984 ถึง 2099 ซึ่งแบ่งออกเป็น 4 ช่วง คือ ช่วงอดีต (1984-2014) และช่วงอนาคต 3 ระยะ ได้แก่ ระยะใกล้ (2015-2039), ระยะปานกลาง (2040-2069) และระยะไกล (2070-2099)

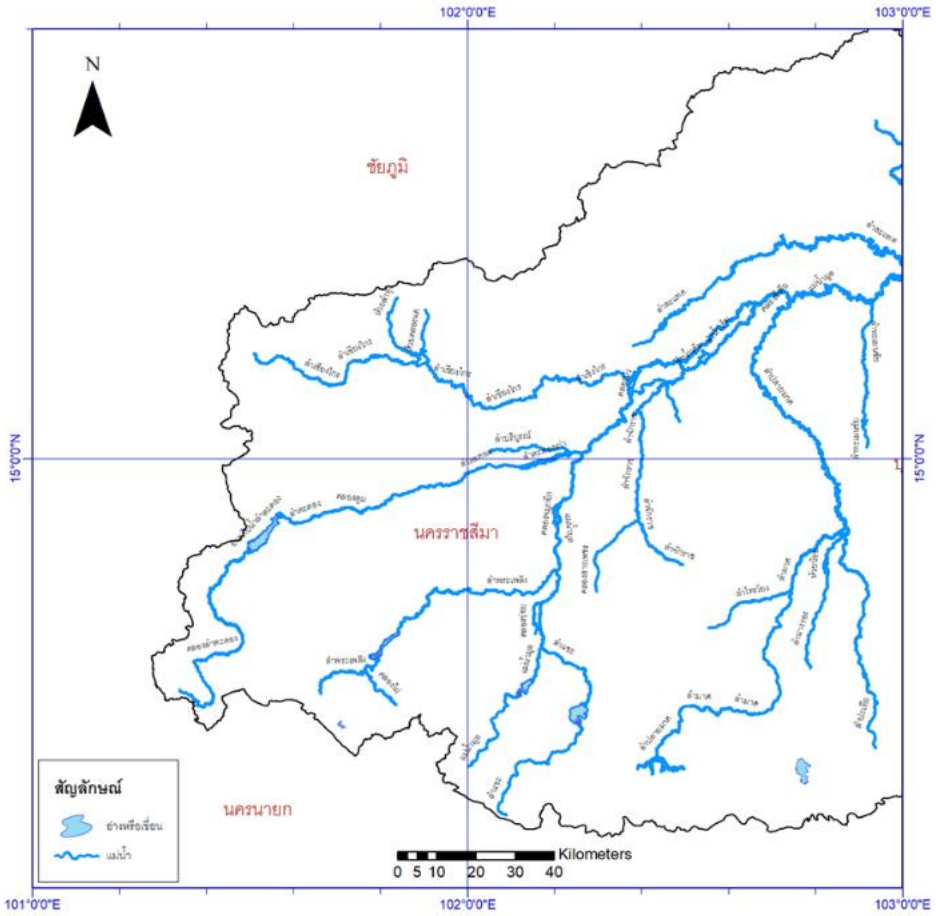


Fig. 1 The study area covers the upper Mun River basin.

การรวบรวมข้อมูล

ข้อมูลหลักที่ใช้ในการวิเคราะห์ สรุปได้ดัง Table 1 ซึ่งรวบรวมข้อมูลภูมิอากาศ ภูมิศาสตร์ และข้อมูลพืชที่จำเป็นสำหรับแบบจำลอง PyAEZ

Table 1 Data used in the analysis

Data Category	Dataset / Variable Name	Description / Resolution	Data Source
Climate (GCM)	CNRM-CMIP6 (SSP2-4.5, SSP5-8.5)	55 km resolution (monthly) (Precipitation, Temperature, Solar radiation, Relative humidity, Wind speed)	Centre National de Recherches Météorologiques
Climate (Observed)	TerraClimate	4.6 km resolution (monthly)	TerraClimate
Study Area Boundary	Thailand's boundary map	Shapefile	Humanitarian Data Exchange
Topography (LULC)	Terrain land use / land cover	GeoTIFF	GAEZ Data Portal (Fischer et al., 2002)
Topography (Elevation)	Elevation and slope data	GeoTIFF	Shuttle Radar Topography Mission (SRTM)
Crop Data	Crop-related data (HI, LAI, crop cycle, etc.)	Microsoft Excel	GAEZ Appendix (Fischer et al., 2002)

1. ข้อมูลสภาพภูมิอากาศ: ใช้ข้อมูลสภาพภูมิอากาศในอดีตจาก TerraClimate และข้อมูลคาดการณ์ในอนาคตจากแบบจำลองภูมิอากาศโลก CNRM-CM6 ภายใต้โครงการ CMIP6 ซึ่งครอบคลุมตัวแปร 6 ชนิด คือ ปริมาณน้ำฝน, อุณหภูมิสูงสุด, อุณหภูมิต่ำสุด, รังสีคลื่นสั้น, ความชื้นสัมพัทธ์ และความเร็วลม ข้อมูลคาดการณ์ในอนาคตพิจารณา 2 สถานการณ์ คือ SSP2-4.5 (การปล่อยก๊าซระดับปานกลาง) และ SSP5-8.5 (การปล่อยก๊าซระดับสูง)

2. ข้อมูลภูมิศาสตร์และภูมิประเทศ: ใช้ข้อมูลขอบเขตพื้นที่ลุ่มน้ำจาก Humanitarian Data Exchange, ข้อมูลระดับความสูงและความลาดชันจาก Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) และข้อมูลการใช้ประโยชน์ที่ดินจาก GAEZ Data portal

3. ข้อมูลพืช: ใช้ข้อมูลพารามิเตอร์ของข้าวที่จำเป็นต่อการจำลองการเจริญเติบโต เช่น ดัชนีการเก็บเกี่ยว (HI), ดัชนีพื้นที่ใบ (LAI), ระยะเวลาของวงจรการเจริญเติบโต และความต้องการน้ำของพืช ซึ่งรวบรวมจากฐานข้อมูลของ Global Agro-Ecological Zones (GAEZ)

4. เครื่องมือในการวิจัย: ใช้โปรแกรม QGIS สำหรับการเตรียมข้อมูลเชิงพื้นที่ และใช้โปรแกรม PyAEZ (เวอร์ชัน 2.2) เป็นเครื่องมือหลักในการวิเคราะห์

การกำหนดสถานการณ์และวันเริ่มต้นเพาะปลูก

การกำหนดเงื่อนไขและวันเริ่มต้นเพาะปลูกในอดีต (1984-2014) โดยอ้างอิงจากนิยามศัพท์และปฏิทินการเพาะปลูกทั่วไปในพื้นที่ ดังนี้:

วันเริ่มต้นอดีต (สภาพการเพาะปลูกแบบชลประทาน (Irrigated)): กำหนดเป็น วันที่ 1 (1 มกราคม) ซึ่งสอดคล้องกับช่วงเวลาของ ข้าวนาปรัง (1 พ.ย. - 30 เม.ย.) ที่มีการจัดการน้ำเพียงพอ

วันเริ่มต้นอดีต (สภาพการเพาะปลูกแบบอาศัยน้ำฝน (Rainfed)): กำหนดเป็น วันที่ 107 (17 เมษายน) ซึ่งสอดคล้องกับช่วงเริ่มต้นของ ข้าวนาปี (1 พ.ค. - 31 ต.ค.) ที่ต้องอาศัยน้ำฝนเป็นหลัก

ได้จำแนกผลกระทบเป็น 3 สถานการณ์ย่อย:

1. สภาพการเพาะปลูกแบบชลประทาน (มีข้อจำกัด): คือ การเพาะปลูกที่มีน้ำเพียงพอ (ไม่มีข้อจำกัดด้านน้ำจากโมดูล 2) แต่ยังคงอยู่ภายใต้ "ข้อจำกัดทางภูมิอากาศ" เช่น ศัตรูพืช, โรค ตามโมดูลที่ 3

2. สภาพการเพาะปลูกแบบอาศัยน้ำฝน (ไม่มีข้อจำกัด): คือ การเพาะปลูกที่อาศัยน้ำฝน (มีข้อจำกัดด้านน้ำจากโมดูล 2) แต่สมมติว่า "ไม่มีข้อจำกัดทางภูมิอากาศ" (ไม่คิดผลกระทบจากโมดูล 3)

3. สภาพการเพาะปลูกแบบอาศัยน้ำฝน (มีข้อจำกัด): คือ การเพาะปลูกที่อาศัยน้ำฝน (มีข้อจำกัดด้านน้ำจากโมดูล 2) และอยู่ภายใต้ "ข้อจำกัดทางภูมิอากาศ" (คิดผลกระทบจากโมดูล 3) ซึ่งเป็นสถานการณ์ที่สะท้อนความเปราะบางจริงในพื้นที่เกษตรน้ำฝน

การวิเคราะห์ข้อมูล

การวิเคราะห์ข้อมูลดำเนินการตามกรอบแนวคิดดังแสดงใน ภาพที่ 2 โดยเริ่มต้นจากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้อง (ทฤษฎี AEZ, GCMs, SSPs) และการใช้งานโปรแกรม PyAEZ จากนั้นทำการรวบรวมและจัดเตรียมข้อมูลนำเข้า 3 ส่วนหลัก ได้แก่ 1) ข้อมูลภูมิศาสตร์และภูมิประเทศ 2) ข้อมูลสภาพภูมิอากาศ (CNRM6 SSPs) และ 3) ข้อมูลพืช (Crop Data) ข้อมูลทั้งหมดจะถูกนำมาวิเคราะห์ในโปรแกรม PyAEZ โดยใช้โมดูลต่างๆ เพื่อวิเคราะห์สภาพภูมิอากาศที่เปลี่ยนแปลง (โมดูล 1) , วิเคราะห์ความเหมาะสมของวันเริ่มต้นเพาะปลูก (โมดูล 2) , และวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงของผลผลิตสูงสุด (โมดูล 3) ก่อนนำไปสรุปและนำเสนอผล

การลดขนาดข้อมูลและการแก้ไขความเอนเอียง (Downscaling and Bias-Correction)

เนื่องจากข้อมูลจากแบบจำลอง GCM (CNRM-CM6) มีความละเอียดเชิงพื้นที่ต่ำ (55 กม.) ซึ่งไม่เพียงพอต่อการประเมินในระดับลุ่มน้ำ จึงจำเป็นต้องผ่าน กระบวนการลดขนาดข้อมูลทางสถิติ (Statistical Downscaling) และการแก้ไขความเอนเอียง (Bias Correction) โดยในงานวิจัยนี้อ้างอิงกับชุดข้อมูลสังเกตการณ์ TerraClimate ที่มีความละเอียดสูงกว่า (4.6 กม.) และใช้วิธีการปรับแผนภาพเชิงปริมาณเชิงประจักษ์ (empirical quantile mapping) เพื่อให้ข้อมูลคาดการณ์ในอนาคตมีความแม่นยำและสอดคล้องกับลักษณะภูมิอากาศจริงในพื้นที่ศึกษาก่อนนำไปใช้ในแบบจำลอง

ข้อจำกัดและขอบเขตการศึกษา

1. การศึกษานี้เน้นการประเมิน "ศักยภาพเชิงภูมิอากาศและนิเวศเกษตร" (Agro-Ecological Potential) โดยในกรณีศึกษาพื้นที่ชลประทาน (Irrigated) แบบจำลองมีสมมติฐานว่ามีน้ำต้นทุนเพียงพอต่อความต้องการของพืชตลอดฤดูกาล เพื่อชี้ให้เห็นถึงความต้องการน้ำและผลกระทบจากอุณหภูมิที่แท้จริง โดยไม่ได้นำเงื่อนไขการบริหารจัดการน้ำของเขื่อนขนาดใหญ่ทั้ง 5 แห่งในพื้นที่มาเป็นข้อจำกัดในการคำนวณ 2. ข้อมูลภูมิอากาศในอนาคตใช้แบบจำลอง CNRM-CM6 เพียงแบบเดียว ซึ่งอาจมีความไม่แน่นอน (Uncertainty) เมื่อเทียบกับการใช้แบบจำลองหลายตัว (Ensemble) อย่างไรก็ตาม CNRM-CM6 ได้รับการยอมรับในการจำลองวัฏจักรน้ำและมรสุมในภูมิภาคเอเชียได้ดีในระดับหนึ่ง

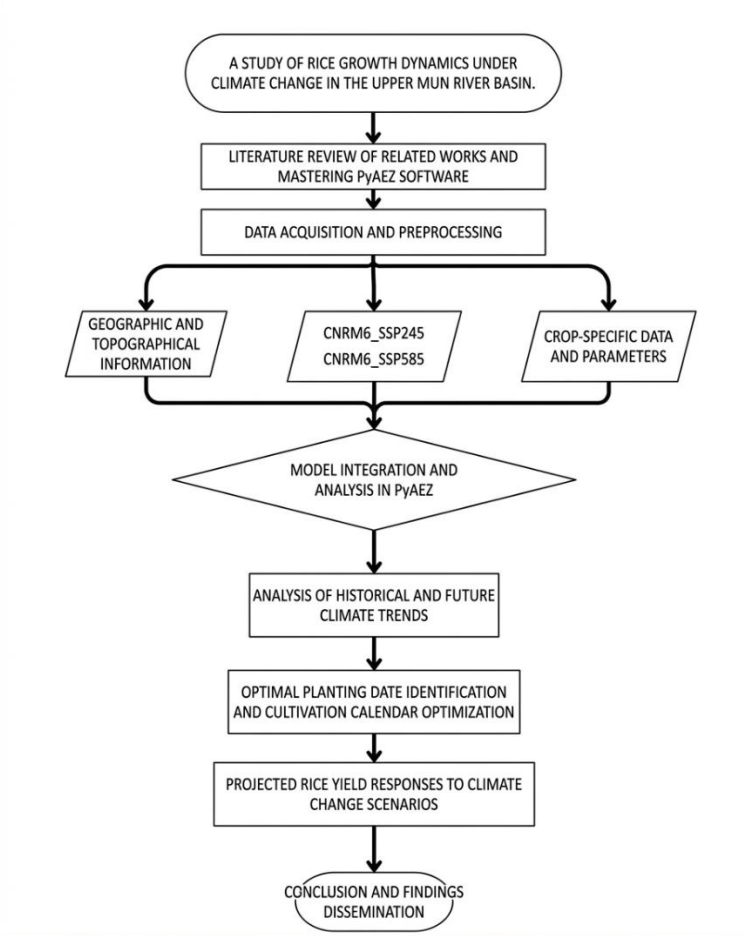


Fig 2 Framework for implementation.

ผลการทดลองและวิจารณ์

การเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศในอนาคต

ผลการวิเคราะห์ข้อมูลคาดการณ์สภาพภูมิอากาศในอนาคต (Table 2) พบว่าอุณหภูมิเฉลี่ย (ทั้งสูงสุดและต่ำสุด) มีแนวโน้มสูงขึ้นอย่างต่อเนื่องในทุกสถานการณ์ โดยเฉพาะในอนาคตระยะไกล (SSP5-8.5) ที่อุณหภูมิสูงสุดอาจเพิ่มขึ้นจากอดีตถึง 4.08 °C และอุณหภูมิต่ำสุดเพิ่มขึ้น 4.23 °C

สำหรับปริมาณน้ำฝนรายปี (Table 2) แม้ภาพรวมในอนาคตระยะไกลจะมีแนวโน้มใกล้เคียงกับอดีต แต่แสดงให้เห็น ความผันผวน อย่างชัดเจน โดยในทั้งสองสถานการณ์ (SSP2-4.5 และ SSP5-8.5) ค่าเฉลี่ยปริมาณน้ำฝนมีแนวโน้มลดลง ในช่วงอนาคตระยะปานกลาง (2040-2069) ก่อนที่จะ เพิ่มขึ้น อีกครั้งในอนาคตระยะไกล การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิ (ซึ่งเพิ่มการระเหย) ประกอบกับความผันผวนของน้ำฝนนี้ ชี้ให้เห็นถึงความเสี่ยงต่อภาวะขาดแคลนน้ำในบางช่วงเวลาที่เพิ่มสูงขึ้น ปริมาณน้ำฝนมีความผันผวนโดยมีแนวโน้มลดลงในช่วงอนาคตระยะปานกลางและเพิ่มขึ้นในระยะไกล สาเหตุหลักเกิดจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิโลกที่ส่งผลต่อรูปแบบการไหลเวียนของบรรยากาศและมรสุมตะวันตกเฉียงใต้ ซึ่งสอดคล้องกับรายงาน IPCC ที่ระบุว่าการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศจะทำให้เหตุการณ์สภาพอากาศสุดขั้วมีความรุนแรงและคาดการณ์ได้ยากขึ้น

การเปลี่ยนแปลงดังกล่าวส่งผลให้ ระยะเวลาการเจริญเติบโตของพืช (LGP) มีแนวโน้มลดลงอย่างมีนัยสำคัญ (Table 3) โดยในอดีตมีค่าเฉลี่ย 195 วัน แต่ในอนาคตระยะไกล (SSP2-4.5) ลดลงเหลือ 176 วัน และในอนาคตระยะปาน

กลางของ SSP5-8.5 ลดลงเหลือเพียง 164 วัน การที่ช่วงเวลาเจริญเติบโตสั้นลงเป็นข้อจำกัดที่สำคัญต่อการสะสมชีวมวลของพืช (ดังแสดงใน Fig 3)

Table 2 Changes in future average maximum temperatures and annual rainfall compared to the past (1984–2014).

Scenario	Time Period	Maximum Temperature (°C)	Minimum Temperature (°C)	Annual Precipitation (mm/year)
Historical	1984-2014	32.75	22.14	1167.74
SSP2-4.5	Near future	33.86	22.94	1121.66
	Mid-term future	34.61	23.82	1116.97
	Far future	35.45	24.71	1142.49
SSP5-8.5	Near future	33.83	23.01	1113.96
	Mid-term future	35.21	24.45	1031.14
	Far future	36.83	26.37	1194.85

Table 3 Average growth period of plants in the upper Mun River basin under climatic conditions SSP2-4.5 and SSP5-8.5

Scenario	Average plant growth period (days)			
	Historical (1984-2014)	Near future (2015-2039)	Mid-term future (2040-2069)	Far future (2070-2099)
SSP2-4.5	195	183	180	176
SSP5-8.5	195	184	164	179

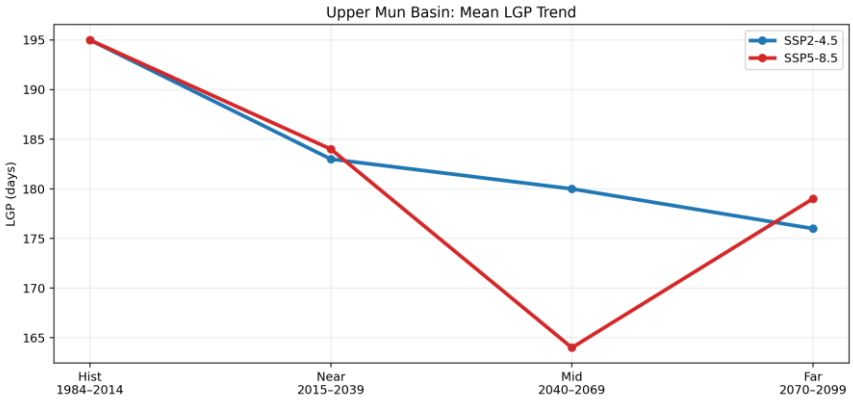


Fig 3 Changes in plant growth phase (LGP) under SSP2-4.5 and SSP5-8.5 conditions.

วันเริ่มต้นเพาะปลูกและปฏิทินการเพาะปลูกที่เหมาะสม

จากการจำลองรอบการเพาะปลูก 365 รอบ (โมดูล 2) พบว่าวันเริ่มต้นเพาะปลูกข้าวที่เหมาะสมที่สุดมีแนวโน้มเปลี่ยนแปลงไปอย่างชัดเจน (ตารางที่ 3) ใน สภาพการเพาะปลูกด้วยน้ำฝน (Rainfed) ซึ่งต้องรอความชื้นในดินที่เหมาะสม วันเริ่มต้นปลูกมีแนวโน้ม ล่าช้าออกไป ในทุกสถานการณ์ โดยล่าช้าที่สุดในอนาคตระยะไกล (SSP5-8.5) ที่อาจต้องเลื่อนการเพาะปลูกจากกลางเดือนเมษายน (วันที่ 107) ไปเป็นปลายเดือนกรกฎาคม (วันที่ 204) หรือล่าช้าไปกว่า

3 เดือน ใน สภาพการเพาะปลูกด้วยการชลประทาน (Irrigated) ซึ่งมีน้ำพร้อม วันเริ่มต้นปลูกในอดีตคือวันที่ 1 มกราคม แต่ในอนาคตระยะไกล (SSP5-8.5) วันที่เหมาะสมที่สุดอาจต้องเลื่อนไปจนถึงช่วงปลายเดือนพฤศจิกายน (วันที่ 319) เพื่อหลีกเลี่ยงสภาพอากาศที่ไม่เหมาะสม เช่น อุณหภูมิสูงจัด ในช่วงการเจริญเติบโต

Table 3 The optimal start date for rice cultivation (date of the year) under various conditions and circumstances.

Scenario	Periods	Irrigated farming conditions	Rain-fed farming conditions
Historical	1984-2014	1	107
SSP2-4.5	Near future	2	109
	Mid-term future	8	136
	Far future	187	169
SSP5-8.5	Near future	32	156
	Mid-term future	79	191
	Far future	319	204

ผลผลิตข้าวสูงสุดที่เป็นไปได้

การเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศส่งผลกระทบโดยตรงต่อศักยภาพผลผลิตข้าวสูงสุด (ตารางที่ 4) ในสภาพการชลประทาน ซึ่งไม่มีข้อจำกัดด้านน้ำ ผลผลิตที่ลดลงจึงเป็นผลกระทบโดยตรงจากปัจจัยอื่น เช่น อุณหภูมิที่สูงขึ้น โดยในสถานการณ์ SSP5-8.5 อนาคตระยะไกล ผลผลิตอาจลดลงจาก 833.93 กก./ไร่ เหลือ 783.04 กก./ไร่ อย่างไรก็ตาม ผลกระทบจะรุนแรงกว่าอย่างเห็นได้ชัดใน สภาพการเพาะปลูกด้วยน้ำฝน (ภาพที่ 4) เมื่อพิจารณาผลผลิตภายใต้ "ข้อจำกัดทางภูมิอากาศ" (มีข้อจำกัด) ซึ่งเป็นสถานการณ์ที่สมจริงที่สุดสำหรับเกษตรกรที่อาศัยน้ำฝน พบว่าผลผลิตลดลงในอัตราที่สูงมาก โดยเฉพาะในสถานการณ์ SSP5-8.5 อนาคตระยะไกล ผลผลิตคาดว่าจะลดลงจาก 654.16 กก./ไร่ในอดีต เหลือเพียง 575.42 กก./ไร่ หรือลดลงถึง 12% ซึ่งชี้ให้เห็นว่าการทำนาข้าวแบบอาศัยน้ำฝนมีความเปราะบางต่อการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศสูงมาก ผลการศึกษาที่พบว่าผลผลิตข้าวมีแนวโน้มลดลงโดยเฉพาะในนาปี สอดคล้องกับงานวิจัยของ Droogers et al. (2004) และ Krishnan et al. (2007) ที่พบว่าอุณหภูมิที่สูงขึ้นส่งผลลบต่อกระบวนการสังเคราะห์แสงและเร่งระยะเวลาการเจริญเติบโตให้สั้นลง ทำให้พืชสะสมน้ำหนักเมล็ดได้น้อยลง. นอกจากนี้ การที่วันเพาะปลูกต้องเลื่อนออกไปในกรณีนาปี (Rainfed) สะท้อนถึงความแปรปรวนของฝนต้นฤดูซึ่งเป็นปัญหาที่พบได้ทั่วไปในภูมิภาคเอเชียตะวันออกเฉียงใต้

Table 4 Maximum possible rice yield (kg/rai) under various conditions and scenarios.

Scenario	Periods	Irrigated farming conditions	Rain-fed farming no conditions	Rain-fed farming conditions
Historical	1984-2014	833.93	737.88	654.16
SSP2-4.5	Near future	843.87	747.06	657.37
	Mid-term future	837	735.53	647.18
	Far future	823.61	719.8	633.35
SSP5-8.5	Near future	836.91	720.16	633.9
	Mid-term future	823.98	705.66	620.9
	Far future	783.04	653.97	575.42

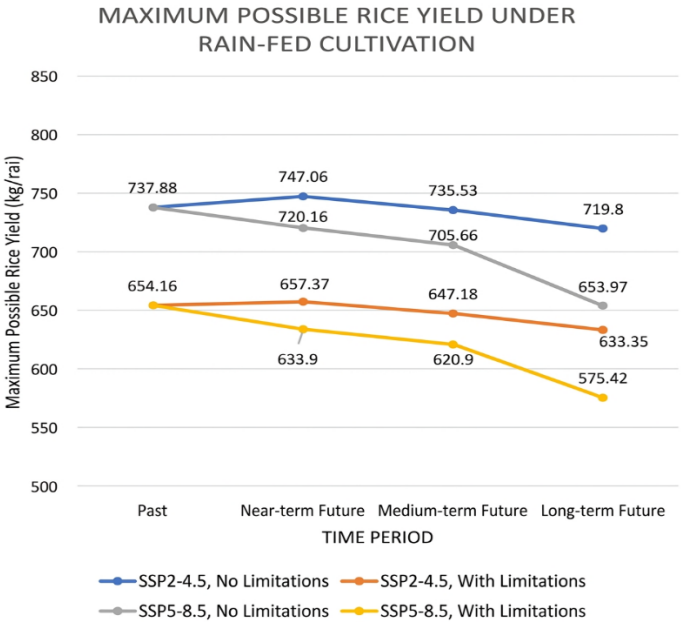


Fig 4 The graph shows the trend of change in the maximum possible yield of rice under rain-fed cultivation.

สรุปผลและเสนอแนะ

การศึกษานี้ได้ประยุกต์ใช้แบบจำลอง PyAEZ เพื่อวิเคราะห์ผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศต่อการเพาะปลูกข้าวในพื้นที่ลุ่มน้ำมูลตอนบน โดยเปรียบเทียบข้อมูลในอดีต (1984-2014) กับการคาดการณ์ในอนาคต 3 ระยะ ภายใต้สถานการณ์การปล่อยก๊าซเรือนกระจก 2 รูปแบบ (SSP2-4.5 และ SSP5-8.5) ผลการวิจัยสามารถสรุปประเด็นสำคัญได้ ดังนี้

1. สภาพภูมิอากาศมีแนวโน้มรุนแรงขึ้น: ผลการวิเคราะห์ยืนยันชัดเจนว่าพื้นที่ลุ่มน้ำมูลตอนบนจะต้องเผชิญกับอุณหภูมิที่สูงขึ้นอย่างต่อเนื่องในอนาคต โดยเฉพาะในสถานการณ์ SSP5-8.5 อุณหภูมิสูงสุดอาจเพิ่มขึ้นจากในอดีตถึง 4.08 °C ในขณะที่ปริมาณน้ำฝนมีความผันผวนสูง โดยมีแนวโน้มลดลงในช่วงกลางศตวรรษ (2040-2069) ก่อนจะเพิ่มขึ้นในปลายศตวรรษ 3 ซึ่งเพิ่มความไม่แน่นอนในการบริหารจัดการน้ำ

2. วงจรการเจริญเติบโตของพืชสั้นลง: ผลกระทบโดยตรงจากการที่อุณหภูมิสูงขึ้น คือ ระยะเวลาการเจริญเติบโตของพืช (LGP) หรือช่วงเวลาที่สภาพอากาศเหมาะสมต่อการสะสมชีวมวลของพืช มีแนวโน้มสั้นลงอย่างมีนัยสำคัญ จากเดิมในอดีตที่มีค่าเฉลี่ย 195 วัน จะลดลงเหลือเพียง 164-176 วันในอนาคต (ขึ้นอยู่กับสถานการณ์)

3. ปฏิทินการเพาะปลูกถูกเลื่อนออกไป: เมื่อ LGP สั้นลง ประกอบกับรูปแบบภูมิอากาศที่เปลี่ยนแปลงไป ส่งผลให้ วันเริ่มต้นเพาะปลูกที่เหมาะสมที่สุดต้องเลื่อนออกไป จากเดิมอย่างมาก โดยเฉพาะใน การเพาะปลูกแบบอาศัยน้ำฝน (Rainfed) ซึ่งเกษตรกรต้องรอความชื้นในดินที่เพียงพอ แบบจำลองชี้ว่าอาจต้องเลื่อนการปลูกจากเดิมกลางเดือนเมษายน (วันที่ 107) ไปเป็นปลายเดือนกรกฎาคม (วันที่ 204) ในสถานการณ์ SSP5-8.5 ซึ่งการเปลี่ยนแปลงนี้ส่งผลกระทบมหาศาลต่อวิถีการทำนาแบบดั้งเดิม

4. ผลผลิตข้าวมีความเปราะบางสูง (โดยเฉพาะนาปี): ประเด็นสำคัญที่สุดที่ค้นพบคือ ศักยภาพผลผลิตข้าวมีแนวโน้มลดลง และมีความเปราะบางแตกต่างกันอย่างชัดเจนระหว่างสองระบบการผลิต

- สภาพการเพาะปลูกแบบชลประทาน (Irrigated): แม้จะมีการจัดการน้ำ แต่ผลผลิตยังคงลดลงจากปัจจัยด้านอุณหภูมิ โดยในสถานการณ์ SSP5-8.5 ผลผลิตลดลงจาก 833.93 กก./ไร่ เหลือ 783.04 กก./ไร่

- สภาพการเพาะปลูกแบบอาศัยน้ำฝน (Rainfed): ซึ่งเป็นพื้นที่ส่วนใหญ่ของลุ่มน้ำมูลตอนบน ได้รับผลกระทบรุนแรงกว่ามาก เมื่อพิจารณาสถานการณ์ที่สมจริงที่สุด (มีข้อจำกัดทางภูมิอากาศ) ผลผลิตข้าวภายใต้สถานการณ์ SSP5-8.5 จะ ลดลงจาก 654.16 กก./ไร่ในอดีต เหลือเพียง 575.42 กก./ไร่ หรือลดลงถึง 12%

โดยสรุป ผลลัพธ์เหล่านี้ชี้ให้เห็นว่าการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศไม่ได้เป็นเพียงปัญหาในอนาคต แต่กำลังส่งผลกระทบเชิงโครงสร้างต่อระบบการผลิตข้าวในลุ่มน้ำมูลตอนบน ทำให้ปลูกได้ยากขึ้น (LGP สั้นลง), ต้องปลูกช้าลง (วันเริ่มต้นล่าช้า) และได้ผลผลิตน้อยลง โดยเฉพาะในกลุ่มเกษตรกรนาปีที่ไม่มีระบบชลประทานซึ่งเป็นกลุ่มที่เปราะบางที่สุด

ข้อเสนอแนะ

1. การเลื่อนวันปลูก: จากผลการศึกษา เกษตรกรในพื้นที่น้ำฝนควรพิจารณาเลื่อนวันปลูกจากเดือนเมษายนเป็นเดือนกรกฎาคมในอนาคตระยะไกล (SSP5-8.5) เพื่อให้สอดคล้องกับช่วงที่มีฝนตกชุกและหลีกเลี่ยงภาวะฝนทิ้งช่วง.

2. การปรับปรุงพันธุ์ข้าว: ควรวิจัยและส่งเสริมพันธุ์ข้าวที่มีอายุการเก็บเกี่ยวสั้นลง (เพื่อรองรับ LGP ที่ลดลง) และทนต่ออุณหภูมิสูง

3. การจัดการน้ำ: หน่วยงานชลประทานควรใช้ข้อมูลความต้องการน้ำที่เพิ่มขึ้นจากการระเหย (Etm) ในการวางแผนสำรองน้ำในเขื่อนหลักทั้ง 5 แห่ง เพื่อรองรับความเสี่ยงในช่วงฝนทิ้งช่วงที่แบบจำลองชี้ว่าจะรุนแรงขึ้น

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ ผู้ร่วมวิจัยและผู้เชี่ยวชาญที่ให้คำแนะนำ และข้อมูลที่เป็นประโยชน์มาใช้ในงานวิจัยครั้งนี้ และนายนิติทัศน์ บัวผัน นางสาวธมลวรรณ สายพิมพ์ นางสาวปิยธิดา โรจน์กิจวิมล ที่เป็นกำลังสำคัญในการทำงานวิจัยครั้งนี้ให้ประสบผลสำเร็จ จึงขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ โอกาสนี้

เอกสารอ้างอิง

Aggarwal, P.K., et al. 2006. Climate change and India's food security. Int. J. Global Environ. Issues.

Cuculeanu, V., et al. 2002. Climate change impact on agricultural crops and adaptation options in Romania. Clim. Res.

Droogers, P., et al. 2004. Water resources trends in Middle East and North Africa towards 2050. Hydrol. Earth Syst. Sci.

FAO. 1978. Report on the Agro-Ecological Zones Project, Vol. 1: Methodology and Results for Africa. World Soil Resources Report 48/1. FAO. Rome, Italy.

Fischer, G., Shah, M., Tubiello, F.N., van Velthuizen, H. 2002. Global Agro-ecological Assessment for Agriculture in the 21st Century: Methodology and Results. RR-02-002. International Institute for Applied Systems Analysis. Laxenburg, Austria.

Fujihara, Y., et al. 2008. Assessing the impacts of climate change on the water resources of the Seyhan River Basin in Turkey. Hydrol. Process.

IPCC. 2023. Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. IPCC. Geneva, Switzerland.

Krishnan, P., et al. 2007. Impact of climate change on Indian agriculture. Mitig. Adapt. Strateg. Glob. Chang.

Reddy, V.R. 2000. Climate Change effects on crop yield. J. Soil Water Conserv.

Riahi, K., van Vuuren, D.P., Kriegler, E., Edmonds, J., O'Neill, B.C., et al. 2017. The Shared Socioeconomic Pathways and their energy, land use, and greenhouse gas emissions implications: An overview. Global Environ. Chang. 42: 153–168.

Wilby, R.L., Wigley, T.M.L. 1997. Downscaling general circulation model output: a review of methods and limitations. Prog. Phys. Geogr.

การศึกษารูปแบบการเสื่อมสภาพของอาคารสถาปัตยกรรมสมัยใหม่ในสถาบันการศึกษา

A Study of Deterioration Patterns of Modern Architecture in Educational Institutions

ปรีลดา แก้วอุไร, ขวัญชัย กาแก้ว, ฐิติวุฒิ ชัยสวัสดิ์อารี, ปฏิพล ยอดสุรางค์*
Prelada Kaewurai, Kuanchai Kakaew, Thitiwoot Chaisawataree[c], Patiphol Yodsurang*
ภาควิชาสถาปัตยกรรมศาสตร์ คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900
Department of Architecture, Faculty of Architecture, Kasetsart University, Bangkok 10900, Thailand
*Corresponding author. E-mail address: patiphol.y@ku.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินสภาพความเสียหายทางกายภาพของอาคารสถาปัตยกรรมสมัยใหม่จำนวน 33 หลัง ภายในมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตบางเขน โดยประยุกต์ใช้วิธีการตรวจพินิจด้วยสายตา (Visual Inspection) ร่วมกับเกณฑ์ประเมินความเสี่ยง 5 ระดับ ผลการศึกษาบ่งชี้ว่าแม้อาคารส่วนใหญ่อยู่ในเกณฑ์สภาพดีถึงปานกลาง แต่พบความเสียหายระดับวิกฤตในกลุ่มอาคารช่วงปี พ.ศ. 2496–2510 โดยเฉพาะปัญหาคอนกรีตระเบิดร่อนจากปฏิกิริยาคาร์บอเนชันในอาคารปฏิบัติการวนผลิตภัณฑ์ 3 และกองกิจการนิสิต (ตึก 8) รวมถึงความเสียหายรุนแรงบริเวณเสาไม้โครงสร้างหลักของหอพักชาย (หอ 3) อันเกิดจากการซ่อมแซมเดิมด้วยวิธีดามแผ่นเหล็กที่เร่งกระบวนการความชื้นสะสมภายใน นอกจากนี้ยังพบปัญหารอยแยกจากการทรุดตัวแตกต่างในกลุ่มหอพักหญิง งานวิจัยจึงเสนอแนวทางฟื้นฟูเร่งด่วนตามหลักวิศวกรรม ได้แก่ การเสริมกำลังด้วยวัสดุคอมโพสิต (CFRP) การตรวจสอบแบบไม่ทำลาย (NDT) ควบคู่การต่อทาบเสาไม้และการทำรอยต่อแยกโครงสร้างเพื่อการอนุรักษ์มรดกทางสถาปัตยกรรมให้คงอยู่อย่างยั่งยืน

คำสำคัญ: การตรวจพินิจด้วยตาเปล่า, การบำรุงรักษาเชิงป้องกัน, การเสื่อมสภาพอาคาร, สถาปัตยกรรมสมัยใหม่

Abstract

This research aims to assess physical deterioration in 33 modern architectural buildings at Kasetsart University, Bangkhen Campus, using visual inspection (Visual Inspection) combined with a 5-level risk assessment scale. Findings reveal that most buildings are in good to moderate condition, yet critical damage appears in structures from 1953–1967 (B.E. 2496–2510), particularly concrete spalling due to carbonation in Building 3 (Forest Products Laboratory) and Student Affairs Building 8. Severe deterioration also affects the main timber columns in Male Dormitory 3, exacerbated by prior steel plate repairs, which have accelerated internal moisture accumulation. Female dormitories exhibit differential settlement cracks. The study proposes urgent engineering restoration: composite material reinforcement (CFRP), non-destructive testing (NDT) with timber splicing, and isolation joints to ensure sustainable preservation of this architectural heritage.

Keywords: Building deterioration, Modern architecture, Preventive maintenance, Visual inspection

คำนำ

การเปลี่ยนแปลงบริบททางสังคมและการเมืองภายหลังปี พ.ศ. 2475 โดยเฉพาะนโยบายสร้างชาติในสมัยรัฐบาลจอมพล ป. พิบูลสงคราม ได้ส่งผลอย่างมีนัยสำคัญต่อทิศทางการพัฒนาสถาปัตยกรรมไทย (ชาตรี, 2547) บริบทดังกล่าวเป็นแรงผลักดันให้สถาปนิกไทยรับเอาแนวคิด “สถาปัตยกรรมสมัยใหม่” (Modernism) (Jones and Canniffe, 2012) มาประยุกต์ใช้อย่างเป็นระบบ เพื่อสร้างอัตลักษณ์ทางกายภาพของรัฐชาติผ่านอาคารสาธารณะและสถาบันการศึกษาในช่วงระหว่าง พ.ศ. 2475–2510 กลุ่มอาคารภายในมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตบางเขน จึงถือเป็นกรณีศึกษาที่สะท้อนพัฒนาการและลักษณะสำคัญของสถาปัตยกรรมสมัยใหม่ในประเทศไทยได้อย่างชัดเจน

มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตบางเขน แสดงออกถึงภาพลักษณ์ของ “ความเจริญทางวิทยาการ” ผ่านงานออกแบบที่เน้นความเรียบง่าย ความเป็นเหตุเป็นผลเชิงโครงสร้าง และการใช้เทคโนโลยีคอนกรีตเสริมเหล็ก ซึ่งเป็นนวัตกรรมที่มีบทบาทสำคัญต่อการเปลี่ยนแปลงวงการสถาปัตยกรรมไทยในช่วงเวลาดังกล่าว (ภาณุวัฒน์ และ สุนิติ, 2557) อาคารเหล่านี้จึงมีคุณค่าในฐานะมรดกทางสถาปัตยกรรมสมัยใหม่ที่ควรได้รับการอนุรักษ์ (ชมชน, 2559) อย่างไรก็ตาม ด้วยอายุการใช้งานที่ยาวนานกว่า 70 ปี อาคารจำนวนมากเริ่มประสบปัญหาความเสื่อมสภาพจากกาลเวลา โดยเฉพาะการกัดกร่อนของเหล็กเสริมจากปฏิกิริยาคาร์บอเนชัน (นันทวัฒน์, 2555) ร่วมกับปัญหาการแตกร้าว การทรุดตัวแตกต่าง และการสะสมของความชื้น ซึ่งส่งผลกระทบต่อเสถียรภาพและความปลอดภัยของโครงสร้างอาคาร (กรมโยธาธิการและผังเมือง, 2560; กรมโยธาธิการและผังเมือง, ม.ป.ป.)

นอกจากนี้ สภาพภูมิอากาศร้อนชื้นของประเทศไทยยังเป็นปัจจัยที่เร่งกระบวนการเสื่อมสภาพของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กจากปฏิกิริยาคาร์บอเนชันและการแทรกซึมของคลอไรด์ให้เกิดขึ้นเร็วกว่าปกติประมาณ 2–3 เท่า (Bordalo et al., 2011) แม้ปัญหาดังกล่าวจะมีความรุนแรงในเชิงวิศวกรรม แต่ยังขาดฐานข้อมูลการสำรวจและประเมินความเสื่อมสภาพของอาคารสถาบันการศึกษาในบริบทมหาวิทยาลัยอย่างเป็นระบบ ส่งผลให้การวางแผนบำรุงรักษาขาดประสิทธิภาพและไม่สามารถดำเนินการได้อย่างทันท่วงที (นันทวัฒน์, 2555; กรมโยธาธิการและผังเมือง, 2560; ASTM E2018-15) ด้วยเหตุนี้ งานวิจัยจึงมุ่งศึกษาสภาพการเสื่อมสภาพของอาคารสถาปัตยกรรมสมัยใหม่จำนวน 34 หลัง ภายในมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตบางเขน โดยครอบคลุมองค์ประกอบทางกายภาพหลัก 5 ประการ และบูรณาการคุณค่าทางสถาปัตยกรรมเข้ากับข้อมูลความเสียหายจากการสำรวจภาคสนาม เพื่อสังเคราะห์องค์ความรู้และจัดทำฐานข้อมูลสำหรับการบำรุงรักษาเชิงป้องกัน อันนำไปสู่แนวทางการอนุรักษ์อาคารอย่างยั่งยืนในระยะยาว

อุปกรณ์และวิธีการ

งานวิจัยนี้ใช้การตรวจพินิจด้วยสายตา (Visual Inspection) เป็นเครื่องมือหลักในการประเมินสภาพทางกายภาพของอาคาร ตามแนวทางของ ปฏิพล (2562) โดยอ้างอิงกรอบแนวคิดการเสื่อมสภาพของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กจากปฏิกิริยาคาร์บอเนชัน การแทรกซึมของคลอไรด์ และการทรุดตัวต่างระดับ (Bordalo et al., 2011) การสำรวจครอบคลุมอาคารสถาปัตยกรรมสมัยใหม่จำนวน 33 หลัง ภายในมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตบางเขน เพื่อจัดทำฐานข้อมูลสำหรับการบำรุงรักษาเชิงป้องกันให้สอดคล้องกับมาตรฐาน ASTM E2018-15

การเก็บข้อมูลภาคสนามดำเนินการระหว่างวันที่ 14 มิถุนายน ถึง 28 พฤศจิกายน พ.ศ. 2568 รวมระยะเวลา 6 เดือน ควบคู่กับการศึกษาข้อมูลจากเอกสารที่เกี่ยวข้อง การคัดเลือกกลุ่มตัวอย่างใช้วิธีการเลือกแบบเจาะจงจากอาคารทั้งหมด 56 หลัง โดยพิจารณาจากข้อจำกัดด้านการเข้าถึงพื้นที่เป็นหลัก ขอบเขตการสำรวจครอบคลุมองค์ประกอบทางกายภาพ 5 ส่วน ได้แก่ โครงสร้างเสาและคาน ผนัง พื้น หลังคา และฝ้าเพดาน โดยจำกัดเฉพาะอาคารที่ก่อสร้างในช่วง

พ.ศ. 2486–2520 ดังแสดงตำแหน่งอาคารในภาพที่ Fig. 1 ซึ่งเป็นช่วงเวลาที่สะท้อนพัฒนาการสำคัญของสถาปัตยกรรมไทย (ชาตรี 2547; Fusinpaiboon, 2016)

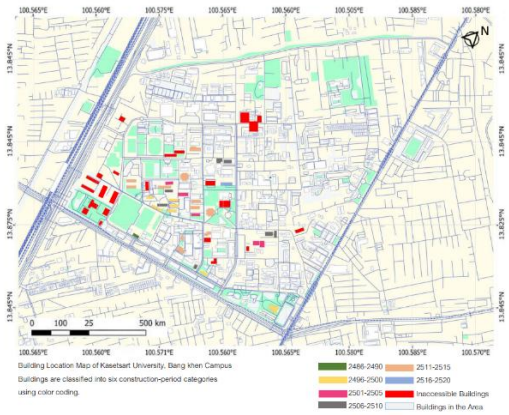


Fig. 1 Map showing the locations of buildings within Kasetsart University, Bangkhen Campus, classified by construction period into six-time ranges using color codes, and indicating areas that are accessible for inspection and areas that are not accessible for inspection.

เกณฑ์การประเมินความเสี่ยงอ้างอิงแนวทางของกรมโยธาธิการและผังเมือง (2560) และมาตรฐาน ASTM E2018-15 (2015) จำแนกระดับความเสี่ยงออกเป็น 5 ระดับตามรหัสสี ตั้งแต่สภาพปกติจนถึงระดับวิกฤต ผลการประเมินถูกนำไปสังเคราะห์เพื่อเสนอแนะแนวทางการบำรุงรักษาและการซ่อมแซมที่เหมาะสมกับระดับความเสื่อมสภาพของอาคารแต่ละหลังโดยแบ่งระดับความเสี่ยงตาม Table 1

Table 1 Criteria for assessing building deterioration risk levels, classified by severity and indicated with color bands

Evaluation of Risk Level of Deterioration of Modern Buildings		
	None	
	Low Risk	The building is safe and has no risk that affects the structure
	Moderate Risk	Minimal risk such as cracks from non-structural impacts
	Moderate to High Risk	Begins to clearly show the risks, such as the central structure sinks, sinking floor/cracks, corroded beams /columns
	High Risk	Large significant damage to the central structure such as large cracks; pier column tilting

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

ผลการสำรวจจำแนกอาคารตามช่วงเวลาการก่อสร้างระหว่างปี พ.ศ. 2486–2515 ออกเป็น 6 ช่วงเวลา พบว่าอาคารส่วนใหญ่อยู่ในช่วงปี พ.ศ. 2511–2515 (11 อาคาร) ขณะที่ช่วงเริ่มต้นมีจำนวนอาคารน้อยที่สุด (1 อาคาร) ในด้านโครงสร้าง พบว่าอาคารส่วนใหญ่เป็นโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก (30 อาคาร) รองลงมาคือโครงสร้างไม้และผสมไม้ (3 อาคาร) โดยอาคารในช่วงปี พ.ศ. 2486–2520 มีพื้นที่ใช้สอยเฉลี่ย 1,237.90 ตารางเมตร จากนั้นจึงทำการประเมินรูปแบบ

ความเสื่อมสภาพของอาคารตามช่วงปีที่ก่อสร้าง โดยใช้เกณฑ์การประเมินระดับความเสี่ยงต่อการเสื่อมสภาพ พร้อมสเกลสีตาม Table 1 และสรุปตำแหน่งความเสียหายที่พบบ่อยที่สุดและพบน้อยที่สุดไว้ใน Table 2

Table 2 Summary of research findings on building deterioration patterns classified by construction period, indicating the most frequently and least frequently observed types of damage

Period (B.E.)	Defect Checklist	Number of buildings	Columns-Beams					Masonry / Concrete Walls					Flooring System					Roof / Roof Structure					Ceiling System				
			Normal	Low Risk	Moderate Risk	Moderate to High Risk	High Risk	Normal	Low Risk	Moderate Risk	Moderate to High Risk	High Risk	Normal	Low Risk	Moderate Risk	Moderate to High Risk	High Risk	Normal	Low Risk	Moderate Risk	Moderate to High Risk	High Risk	Normal	Low Risk	Moderate Risk	Moderate to High Risk	High Risk
2486 - 2490		1	31	0	1	0	0	42	0	6	0	0	39	0	1	0	0	31	1	0	0	0	10	1	21	0	0
2496 - 2500		8	20	0	2	0	1	24	1	10	0	2	23	1	4	2	0	23	1	0	0	0	20	0	8	0	0
2501 - 2505		5	17	1	1	3	6	24	1	16	0	2	25	1	4	4	25	19	1	5	3	0	16	0	5	7	0
2506 - 2510		7	36	0	0	0	1	34	0	17	3	0	34	0	2	9	34	36	0	0	0	0	23	0	13	0	0
2511 - 2515		11	8	0	0	0	0	10	0	2	0	0	8	0	0	2	10	8	0	0	0	0	6	0	2	0	0
2516 - 2520		1	4	0	0	0	0	6	0	0	0	0	5	0	0	0	4	4	0	0	0	0	1	0	3	0	0
Grand Total		33	116	1	4	3	8	140	2	51	3	4	134	2	11	17	73	121	3	5	3	0	76	1	52	7	0

อาคารที่สร้างขึ้นปี พ.ศ. 2486 – 2490 จำนวน 1 อาคาร อาคารหอประวัติศาสตร์ ตั้งอยู่บริเวณมุมตะวันตกเฉียงใต้ของวิทยาเขตบางเขน ห่างจากถนนพหลโยธินประมาณ 500 เมตร เป็นอาคารก่ออิฐถือปูน 2 ชั้น ประกอบด้วยหลังคาทรงจั่วแบบดั้งเดิม เสาคอนกรีตรับน้ำหนัก และหน้าต่างไม้แบบดั้งเดิม จัดอยู่ในระดับความเสี่ยงปานกลาง (สีเขียวอ่อน) โดยโครงสร้างหลักยังคงสภาพเสถียรสมบูรณ์ ไม่ปรากฏรอยแตกร้าวรุนแรงที่ส่งผลต่อความมั่นคง ความเสียหายพบจำกัดเฉพาะความเสื่อมโทรมของวัสดุปิดผิว หลักๆ คือ คราบน้ำรั่วซึมบริเวณฝ้าเพดาน สาเหตุหลักมาจากการระบายน้ำไม่สมบูรณ์ที่เก่งจั่วของหลังคา ส่งผลให้ความชื้นสะสมตามอายุการใช้งาน 80 ปี และการหลุดร่อนของสีทาบ้านภายนอกจากปัจจัยสภาพแวดล้อมในระยะยาว การดูแลรักษาอย่างต่อเนื่องช่วยยับยั้งการเสื่อมสภาพ ทำให้อาคารหลังนี้มีสภาพดีกว่าอาคารร่วมยุคอื่นๆ อย่างเห็นได้ชัดแสดงดัง Fig. 2

(A) (B) (C)

Fig. 2 Physical deterioration characteristics of the Kasetsart University Historical Hall building (A) Front exterior view of the building (B) Evidence of water leakage and moisture stains on the ceiling (C) Peeling of paint due to material deterioration

อาคารที่สร้างขึ้นปี พ.ศ. 2496 – 2500 จำนวน 8 อาคาร ประกอบด้วย หอประชุมใหญ่ มก., กองกิจการนิสิต (หอ 2, หอ 4, ตึก 8), อาคารกำพล อดุลวิทย์, อาคารบรรเจิด คติการ, ตึกภาควิชาคหกรรมศาสตร์ (ศ.ชวนชม จันทระเปารยะ) และอาคารพนมสมิตานนท์ จัดอยู่ในระดับความเสี่ยงวิกฤตและเสื่อมโทรม (สีแดง/ส้ม) ซึ่งเป็นระดับที่ต้องเฝ้าระวัง

สูงสุด ความเสียหายทางกายภาพมีความรุนแรงเกินกว่าคุณค่าทางสถาปัตยกรรม จุดวิกฤตหลักพบที่ระบบฝ้าเพดานและโครงสร้าง โดยเฉพาะการเปื่อยยุ่ยของฝ้าเพดานทั่วทั้งกลุ่มและรอยแตกร้าวรุนแรงบริเวณเสาคอนกรีตของกองกิจการนิสิต (ตึก 8) ซึ่งอาจสัมพันธ์กับแรงสั่นสะเทือนจากแผ่นดินไหวในอดีต สาเหตุหลักของปัญหาฝ้าเพดานมาจากความล้มเหลวของระบบกันซึมดาดฟ้าที่นำความชื้นลงสู่โครงสร้าง อาคารสำคัญทั้งสามแห่ง ได้แก่ ตึก 8, หอประชุมใหญ่ และตึกคหกรรมศาสตร์ ซึ่งลักษณะอาคารเป็นอาคารคอนกรีตสองชั้นแสดงรูปแบบความเสียหายแบบต่อเนื่อง จากระบบกันซึมสู่โครงสร้างหลัก สะท้อนปัญหาสะสมระยะยาว มาตรการแก้ไขเร่งด่วน ประกอบด้วยการเปลี่ยนระบบกันซึมดาดฟ้าใหม่และซ่อมแซมโครงสร้างด้วยวัสดุไม่หดตัวโดย เฉพาะตึก 8 ที่มีความเสี่ยงสูงสุดจากทั้งปัญหากันซึมและรอยแตกร้าว แสดงดัง Fig.3

(D) (E) (F)

Fig. 3 Severe cracking in concrete columns of the Student Affairs Division building (Building 8) (D) Exterior view of the Department of Home Economics building (E) Severe peeling and spalling of exterior paint due to material deterioration (F) Peeling and deterioration of ceiling panels.

อาคารที่สร้างขึ้นปี พ.ศ. 2501–2505 จำนวน 5 อาคาร ได้แก่ อาคารกองกิจการนิสิต (ตึก 8), หอพักชาย (ตึก 5), หอพักชาย (หอ 3), อาคารภาควิชาการจัดการป่าไม้ และอาคารสโมสรนิสิตวนศาสตร์ (สมาคมศิษย์เก่า) พบลักษณะความเสียหายที่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ โดยกลุ่มอาคารส่วนใหญ่ตรวจพบความเสียหายในระดับเฝ้าระวัง (สีเขียว) อาทิ รอยแตกร้าวของไม้ระแนงและคราบเชื้อราบริเวณผนังและฝ้าเพดาน ซึ่งแม้จะไม่ส่งผลกระทบต่อความปลอดภัยของโครงสร้างในปัจจุบัน แต่จำเป็นต้องได้รับการบำรุงรักษาเชิงป้องกันเพื่อระงับยับยั้งการลุกลาม ในทางตรงกันข้าม อาคารหอพักชาย (หอ 3) กลับแสดงระดับความเสื่อมสภาพที่วิกฤตที่สุด (สีแดง/ส้ม) เมื่อเทียบกับอาคารอื่น โดยเฉพาะโครงสร้างเสาไม้หลักที่พบการชำรุดรุนแรงและการซ่อมแซมเดิมด้วยวิธีดามแผ่นเหล็ก ซึ่งอาจเป็นปัจจัยเร่งการผุกร่อนจากความชื้นสะสม ดังนั้น จึงมีข้อเสนอแนะเร่งด่วนให้ตรวจสอบความสมบูรณ์ของเนื้อไม้ด้วยวิธีไม่ทำลาย เพื่อประเมินแนวทางการเสริมกำลังโครงสร้างด้วยเทคนิคทางวิศวกรรมฟื้นฟูที่เหมาะสมต่อไป แสดงดัง Fig.4

(G) (H) (I)

Fig. 4 Physical deterioration characteristics of the male dormitory building (Dormitory 3) (G) Exterior view of the building; (H) Damage and cracking of floor beams (I) Damage to main structural wooden columns with evidence of prior steel plate bracing repairs.

อาคารที่สร้างขึ้นปี พ.ศ. 2506–2510 จำนวน 7 อาคาร ประกอบด้วย อาคารห้องสมุดพิทยาลงกรณ์ อาคารเทคโนโลยีไม้เชิงกล อาคารปฏิบัติการวนผลิตภัณฑ์ 3 (ตึกโชติรักติประกร) อาคารภาควิชาพืชไร่นา (อาคาร 1 และ 2) และหอพักชาย (หอ 12 และตึก 13) แสดงดัง Fig.5 จากการประเมินสภาพความเสียหายทางกายภาพ พบว่าอาคารกลุ่มนี้ส่วนใหญ่อยู่ในระดับความเสี่ยงวิกฤต (สีแดง) โดยมีความเสียหายรุนแรงที่สุดที่อาคารปฏิบัติการวนผลิตภัณฑ์ 3 ซึ่งตรวจพบการแตกร้าวและคอนกรีตระเบิดร่อนบริเวณโครงสร้างเสา อันเกิดจากปฏิกิริยาคาร์บอเนชันที่ทำให้เหล็กเสริมเกิดสนิมและดันผิวคอนกรีตหลุดล่อน นอกจากนี้ยังพบความเสียหายทางสถาปัตยกรรม เช่น ฝ้าเพดานพังและหน้าต่างชำรุด สะท้อนการเสื่อมสภาพที่ลุกลามจากเปลือกอาคารเข้าสู่โครงสร้างหลัก จึงไม่ควรฉาบปูนทับหน้าโดยเด็ดขาด

ความแตกต่างของระดับความเสียหายในกลุ่มอาคารนี้สัมพันธ์กับลักษณะการใช้งานและการดูแลรักษา โดยอาคารห้องสมุดพิทยาลงกรณ์ยังคงมีสภาพกายภาพดี (สีเขียว) เนื่องจากมีความหนาแน่นการใช้งานต่ำและได้รับการดูแลอย่างต่อเนื่อง ขณะที่อาคารปฏิบัติการและหอพักซึ่งรองรับการใช้งานหนักและมีความชื้นสะสมสูง มีอัตราการเสื่อมสภาพของโครงสร้างคอนกรีตสูงกว่าอย่างชัดเจน

(J) (K) (L)

Fig. 5 Physical deterioration of the Forest Products Laboratory Building 3 (Chotirak Prakorn Building) (J) Exterior view of the building (K) Critical structural damage, including concrete spalling and column cracking (L) Collapse and deterioration of the wooden slatted ceiling system.

กลุ่มอาคารที่ก่อสร้างระหว่างปี พ.ศ. 2511–2515 จำนวน 11 อาคาร ได้แก่ อาคารวิศวกรรมสำรวจฯ (อาคาร 12) อาคารวัสดุธานี (อาคาร 10) อาคารวิฑูรย์ หงส์สุมาลย์ และกลุ่มหอพักนิสิต จากการประเมินสภาพความเสียหายโดยภาพรวม พบว่าอาคารกลุ่มนี้อยู่ในระดับความเสี่ยงสูงและเสื่อมโทรม (สีส้ม) โดยอาคารวิฑูรย์ หงส์สุมาลย์ แสดงความเสียหายทางวิศวกรรมเด่นชัดที่สุด ตรวจพบการหลุดร่อนของผิวคอนกรีตลึกถึงระดับโครงสร้างผนัง อันเป็นผลจากปฏิกิริยาคาร์บอเนชันและการกัดกร่อนจากความชื้นสะสม ขณะที่อาคารอื่นในกลุ่มส่วนใหญ่มีความเสียหายจำกัดอยู่เพียงวัสดุปิดผิว ในกรณีหอพักหญิงดาราวัตน์และวาสนา ซึ่งเป็นอาคารคอนกรีตเสริมเหล็ก 5 ชั้น พบรอยแตกร้าวแยกตัวระหว่างพื้นคอนกรีตรอบอาคารกับโครงสร้างหลัก สาเหตุจากการทรุดตัวแตกต่างระหว่างฐานรากเสาเข็มลึกของตัวอาคารและพื้นลานคอนกรีตรอบข้าง โดยสรุปมาตรการแก้ไขเร่งด่วนควรให้ความสำคัญกับการซ่อมแซมรอยร้าวผนังและโครงสร้างของอาคารวิฑูรย์ หงส์สุมาลย์ เพื่อชะลอการกัดกร่อน ควบคู่กับการปรับปรุงรอยต่อพื้นรอบอาคารในกลุ่มหอพักหญิง เพื่อให้สามารถรองรับการเคลื่อนตัวได้อย่างเหมาะสมและป้องกันปัญหาน้ำกัดเซาะฐานรากในระยะยาวแสดงดัง Fig.6

(M) (N) (O)

Fig. 6 Physical deterioration of the Watsana Female Dormitory (M) Exterior view of the building (N) Separation cracks in concrete floors (O) Black mold accumulation and peeling of ceiling surfaces with cracks.

สำหรับอาคารที่ก่อสร้างในช่วงปี พ.ศ. 2516–2520 พบจำนวน 1 อาคาร ได้แก่ อาคารภาควิชาปฐพีวิทยา (สรสิทธิ์ วัชโรทยาน) เป็นอาคารคอนกรีตเสริมเหล็ก 5 ชั้น จัดอยู่ในระดับความเสี่ยงต่ำ (สีเขียว) จากการสำรวจพบความชำรุดกระจุกตัวอยู่ในงานสถาปัตยกรรม ได้แก่ ฝ้าเพดานและวัสดุปิดผิว ขณะที่โครงสร้างหลัก ผนังรับน้ำหนัก และช่องเปิดยังคงสภาพสมบูรณ์ ไม่ปรากฏความเสียหาย ลักษณะความชำรุดสะท้อนปัญหาความชื้นจากส่วนบนที่สัมพันธ์กับระบบกันซึมหลังคาและการรับน้ำฝน โดยพบคราบน้ำ การหลุดร่อนของฝ้าเพดาน และรอยแตกร้าวขนาดเล็กบริเวณขอบระเบียงบางส่วนซึ่งเคยได้รับการซ่อมแซมเฉพาะจุด แสดงดัง Fig.7

(P) (Q) (R)

Fig. 7 Physical deterioration of the Sarasit Wacharothayan Building (P) Overall view of the building (Q) Water stains on the building surface (R) Peeling of exterior paint.

สรุป

การศึกษานี้ได้ประเมินสภาพทางกายภาพของอาคารสถาปัตยกรรมสมัยใหม่จำนวน 33 หลัง ภายในมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตบางเขน โดยประยุกต์ใช้การตรวจพินิจด้วยสายตา (Visual Inspection) ร่วมกับเกณฑ์ประเมินความเสี่ยง 5 ระดับ ผลการศึกษาชี้ให้เห็นว่าอาคารส่วนใหญ่อยู่ในเกณฑ์สภาพดีถึงปานกลาง (ระดับสีเขียว) โดยความเสียหายมักจำกัดอยู่เพียงวัสดุปิดผิวและงานสถาปัตยกรรม เช่น สีหลุดร่อนและคราบเชื้อรา ซึ่งสะท้อนให้เห็นว่า "ความชื้น" เป็นปัจจัยหลักที่เร่งกระบวนการเสื่อมสภาพ

อย่างไรก็ตาม พบกลุ่มอาคารที่มีความเสี่ยงระดับวิกฤต (สีแดง) โดยเฉพาะอาคารช่วงปี พ.ศ. 2496–2510 ได้แก่ อาคารปฏิบัติการวนผลิตภัณฑ์ 3 (ตึกโชติรักติประกร) และกองกิจการนิสิต (ตึก 8) ซึ่งประสบปัญหาคอนกรีตระเบิดร่อนจากปฏิกิริยาคาร์บอเนชัน และ อาคารหอพักชาย (หอ 3) ซึ่งเป็นโครงสร้างผสมที่พบการผุพังรุนแรงของเสาไม้โครงสร้างหลัก อันเป็นผลจากการซ่อมแซมเดิมด้วยวิธีดามแผ่นเหล็ก ที่เร่งให้เกิดความชื้นสะสมภายใน นอกจากนี้ ในกลุ่มความเสี่ยงสูง (สีส้ม) เช่น หอพักหญิงดารารัตน์และวาสนา ยังพบปัญหารอยแยกจากการทรุดตัวแตกต่างของพื้นรอบอาคาร ซึ่งเสี่ยงต่อการกัดเซาะดินฐานรากในระยะยาว

เพื่อให้การอนุรักษ์ดำเนินไปอย่างปลอดภัยและยั่งยืน งานวิจัยนี้เสนอแนวทางจัดการแบบบูรณาการ โดยเน้นมาตรการเร่งด่วนในการเสริมกำลังโครงสร้างให้สอดคล้องกับวัสดุ ได้แก่ การใช้แผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ (CFRP) สำหรับโครงสร้างคอนกรีต และ การตรวจสอบแบบไม่ทำลาย (NDT) ควบคู่กับเทคนิคการต่อทาบเสา สำหรับโครงสร้างไม้รวมถึงการแก้ไขปัญหารอยแยกด้วยการทำ รอยต่อแยกโครงสร้างพร้อมวัสดุยาแนว ทั้งนี้การบำรุงรักษาในระยะยาวควรมุ่งเน้นการจัดการความชื้นทั้งระบบเปลือกอาคารและหลังคา เพื่อยืดอายุการใช้งานและรักษาคุณค่าของมรดกทางสถาปัตยกรรมให้คงอยู่สืบไป (Lassus, 2017; Jones and Canniffe, 2012) โดยรายละเอียดแนวทางแก้ไขจำแนกตามช่วงปีได้สรุปไว้ใน Table 3

Table 3 Summary of research findings and management strategies for addressing deterioration in modern architectural buildings.

Period (B.E.)	Key Buildings	Risk Level	Critical Defect	Damaged Material	Root Cause	Remedial Measures
2486–2490	Hall of History, KU	None/ Low Risk (Moderate)	Walls and Surface Finishes	• Plaster • Exterior Paint	Rising Damp (Accumulated Moisture in Walls)	• Improve Foundation Waterproofing System to prevent moisture ingress. • Apply Breathable Paint instead of non-breathing film paint.
2496–2500	Student Affairs Division (Bldg. 8), KU Main Auditorium	High Risk / Moderate to High Risk	Ceiling and Structural Components	• Exterior Paint • Ceiling (Decayed)	Roof Waterproofing Failure and Corrosion of Reinforcement	• Replace Rooftop Waterproofing with Membrane System. • Structural Repair using Non-Shrink Grout.
2501–2505	Male Dormitory (Dorm 3)	High Risk (Critical)	Severe decay and splitting of main structural timber columns	•Timber Columns (Existing Steel Splinting) • Mixed Structure (Concrete/Wood)	Moisture entrapment behind steel splints accelerating internal rot, fungal decay and termite attack	• Perform NDT (e.g., Resistograph) to assess internal core integrity. • Remove existing steel plates. • Structural strengthening via Timber Splicing or FRP Jacketing.
2506–2510	Forest Products Laboratory	None/ Low Risk (Moderate)	Structural Components (Columns)	• Concrete Columns (Cracked) • Reinforced Concrete (Spalling)	Carbonation and Long-term Accumulated Moisture	• DO NOT Plaster over. • Concrete Replacement: Surface chipping, rust removal, and Structural Strengthening
2511–2515	Male Dormitory, Chote Raktiprakorn Building	High Risk (Critical)	Separation Cracks between Apron and Building	• Concrete Walkway	Differential Settlement between deep pile foundation and slab on grade	• Create Isolation Joint to allow independent movement. • Seal joints with Flexible Material (PU Sealant) to prevent water ingress.
2516–2520	Soil Science Dept.	None	Ceiling and Finishes	• Ceiling Board • Paint	Top-Down Moisture (Minor Roof Leaks)	• Spot Repair • Regular Roof Maintenance

เอกสารอ้างอิง

กรมโยธาธิการและผังเมือง. 2551. มาตรฐานการตรวจสอบโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กด้วยวิธีการทดสอบแบบไม่ทำลาย (มยผ. 1502-51). กระทรวงมหาดไทย, กรุงเทพฯ, ประเทศไทย.

กรมโยธาธิการและผังเมือง. 2560. คู่มือการสำรวจความเสียหายขั้นต้นของโครงสร้างอาคารหลังเหตุการณ์แผ่นดินไหว. กระทรวงมหาดไทย, กรุงเทพฯ, ประเทศไทย.

ชมชน ฟูสินไพบูลย์. 2559. ประวัติศาสตร์นิพนธ์ด้านสถาปัตยกรรมสมัยใหม่ในประเทศไทย. วารสารหน้าจั่ว 13: 154–173.

ชาตรี ประกิตนนทการ. 2547. การเมืองและสังคมในศิลปสถาปัตยกรรม: สยามสมัยใหม่ ภาค 2475-2500. สำนักพิมพ์มติชน, กรุงเทพฯ, ประเทศไทย.

นันทวัฒน์ ขมหวาน. 2555. การเสื่อมสภาพของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก. สถาบันวิจัยและพัฒนามหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ, ประเทศไทย.

ปฏิพล ยอดสุรางค์. 2562. ภัยคุกคามต่อลักษณะทางกายภาพของชุมชนเก่าริมน้ำในเขตที่ราบลุ่มน้ำเจ้าพระยา. วารสารคณะสถาปัตยกรรมศาสตร์ สจล. 28: 21–34.

ภาณุวัฒน์ จ้อยกลัด, สุนิติ สุภาพ. 2557. คอนกรีตเสริมเหล็ก: จากแหล่งกำเนิดสู่สยามประเทศ. วิศวกรรมสาร 67: 17–25.

ASTM International. 2015. ASTM E2018-15 Standard guide for property condition assessments: Baseline property condition assessment process. ASTM International, West Conshohocken, PA, USA.

Bordalo, R., de Brito, J., Gaspar, P.L., Silva, A. 2011. Service life prediction modelling of adhesive ceramic tiling systems. Build. Res. Inf. 39: 66–78.

Fusinpaiboon, C. 2016. Modernization of building: The transplantation of modern architecture in Thailand, 1930s–1950s. PhD Thesis, University of Sheffield, Sheffield, UK.

Jones, P.B., Canniffe, E. 2012. Modern architecture through case studies 1945 to 1990. Routledge, London, UK.

Lassus, P. 2017. Modern architecture in Thailand. Docomomo J. 57: 64–73.

สาขาอุตสาหกรรมเกษตร

(Subject: Agro-Industry)

ภาคโปสเตอร์

(Poster Presentation)

การเพิ่มประสิทธิภาพการต้านทานน้ำของฟิล์มเคซีนด้วยการเชื่อมขวางโดยกรดอินทรีย์ภายใต้สภาวะด่าง

Enhancement of water resistance in casein films with organic acid cross-linking under alkaline condition

อรณิชา กำเหนิดแขก, ฐิติพร แก้วเพ็ชร, ธัญญารัตน์ จิญกาญจน์*

Onnicha Kamnerdkhag, Thitiporn Kaewpetch, Tunyarut Jinkarn*

ภาควิชาเทคโนโลยีการบรรจุและวัสดุ คณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

Department of Packaging and Materials Technology, Faculty of Agro-Industry, Kasetsart University, Bangkok 10900, Thailand

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

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อปรับปรุงสมบัติการต้านทานน้ำของฟิล์มโปรตีนเคซีนเพื่อใช้เป็นบรรจุภัณฑ์อาหาร โดยการดัดแปรโครงสร้างเคซีนแบบผสมผสาน ด้วยการเชื่อมขวางด้วยกรดอินทรีย์ (กรดซิตริก, กรดมาลิก หรือ กรดซักซินิก) เตรียมสารละลายโซเดียมเคซีเนตร้อยละ 5 (โดยน้ำหนักต่อปริมาตร) ภายใต้สภาวะด่าง (pH 12) เติมกรดร้อยละ 3 (โดยน้ำหนักโปรตีน) และกลีเซอรอลเป็นพลาสติไซเซอร์ ผลการทดลองพบว่าการละลายน้ำลดลงจากร้อยละ 81.26 ในฟิล์มพื้นฐาน (pH 7) เป็นร้อยละ 25.72 ถึง 30.51 ในฟิล์มดัดแปร การวิเคราะห์ FT-IR แสดงการเลื่อนตำแหน่งของพีค Amide I และ Amide II ไปยังตำแหน่งความยาวคลื่นสูงขึ้น บ่งชี้การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทุติยภูมิและการจัดเรียงตัวใหม่ของโปรตีนจากสภาวะด่าง โครงสร้างหลังจัดเรียงตัวมีความเสถียรด้วยพันธะเชื่อมขวาง ฟิล์มจึงทนทานต่อน้ำเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ ฟิล์มทุกสูตรยังต้านทานน้ำมันได้ดี (KIT Rating 12) งานวิจัยนี้ยืนยันว่าการใช้สภาวะด่างร่วมกับการเชื่อมขวางด้วยกรดอินทรีย์ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการต้านทานน้ำของฟิล์มเคซีนให้สูงขึ้น

คำสำคัญ: การเชื่อมขวาง, ต้านทานน้ำ, ไบโอโพลิเมอร์, ฟิล์มเคซีน, สภาวะด่าง

Abstract

This research aimed to improve the water resistance of a casein protein film, a promising biopolymer for biodegradable packaging that is limited by its high hydrophilicity. The study investigated a combined casein modification strategy involving organic acid cross-linking (citric acid, malic acid, or succinic acid) under alkaline condition. Sodium caseinate solution (5%, w/v) was prepared under alkaline condition (pH 12) with 3% acid (by protein weight) and glycerol as a plasticizer, then cast into films. The results showed that water solubility decreased from 81.26% for the control film (pH 7) to 25.72–30.51% in the modified films. FT-IR analysis revealed shifting of Amide I and Amide II peaks to higher wavenumbers, indicating secondary structural changes and protein reorganization into a denser network under alkaline condition. This reorganized structure was stabilized by cross-linking bonds, resulting in increased water durability. Furthermore, all film formulations retained good oil resistance (KIT Rating 12). This research confirms that combining alkaline condition with organic acid cross-linking effectively enhances the water resistance of casein films.

Keywords: Alkaline condition, Biopolymer, Casein film, Cross-linking, Water resistance

คำนำ

ฟิล์มโปรตีนได้รับความสนใจอย่างสูงในฐานะวัสดุทางเลือกสำหรับบรรจุภัณฑ์อาหาร เนื่องจากย่อยสลายได้และมีสมบัติเด่นในการป้องกันการซึมผ่านของแก๊สได้ดี ซึ่งช่วยยืดอายุการเก็บรักษาของผลิตภัณฑ์ (Atarés and Chiralt, 2015) โดยเฉพาะอย่างยิ่ง ฟิล์มเคซีน (Casein film) ซึ่งเป็นโปรตีนหลักในน้ำนม มีความแข็งแรงกว่าฟิล์มโปรตีนจากแหล่งอื่น (Wu et al., 2021) อย่างไรก็ตาม ข้อจำกัดที่สำคัญของฟิล์มเคซีน คือ มีสมบัติชอบน้ำ (Hydrophilic) และไวต่อความชื้นสูง เนื่องจากโครงสร้างมีกรดอะมิโนที่มีขั้วจำนวนมาก ทำให้มีการซึมผ่านของไอน้ำสูงและเป็นอุปสรรคต่อการใช้งานในสภาวะที่มีความชื้นสูง (Rastogi and Samyn, 2015) เพื่อแก้ไขข้อจำกัดดังกล่าว งานวิจัยในปัจจุบันมุ่งเน้นการดัดแปรโครงสร้างด้วยเทคนิคทางเคมี โดยแบ่งเป็น 2 แนวทางหลัก ได้แก่ การปรับให้อยู่ในสภาวะด่าง (Alkaline condition) ซึ่งช่วยให้โครงสร้างโปรตีนเกิดการคลายตัวและเกิดการจัดเรียงตัวใหม่ จนได้โครงสร้างร่างแหที่มีความหนาแน่นและเป็นระเบียบขึ้น ส่งผลให้ฟิล์มมีความยืดหยุ่นและลดการซึมผ่านของแก๊ส (Plumier et al., 2023) และแนวทางที่สอง คือ การเชื่อมขวาง (Cross-linking) ด้วยกรดอินทรีย์ เพื่อสร้างพันธะโควาเลนต์ที่แข็งแรงขึ้นภายในโครงสร้างฟิล์ม ช่วยลดการบวมตัวและเพิ่มความต้านทานน้ำ (Azeredo and Waldron, 2016; Bhatia et al., 2022) อย่างไรก็ตาม การแยกใช้เทคนิคเหล่านี้ยังมีข้อจำกัด โดยการใช้เพียงสภาวะด่างไม่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงอัตราการซึมผ่านของไอน้ำอย่างมีนัยสำคัญ ในขณะที่ การใช้สารเชื่อมขวางในสภาวะปกติส่งผลให้การเกิดปฏิกิริยาที่ต่ำ เนื่องจากโครงสร้างโปรตีนที่ขดม้วนตัวเป็นไมเซลล์ที่มีความซับซ้อนและหนาแน่น (Partschefeld et al., 2006) ส่งผลให้เกิดความเกะกะของสเตอริก (Steric hindrance) ที่บดบัง ทำให้สารเชื่อมขวางไม่สามารถเข้าทำปฏิกิริยาได้อย่างทั่วถึง ซึ่งปัจจุบันยังมีงานวิจัยที่ศึกษาถึงผลร่วมของการผสมผสานเทคนิคทั้ง 2 อยู่อย่างจำกัด งานวิจัยนี้จึงมุ่งศึกษาแนวทางดังกล่าว เนื่องจากสภาวะด่างที่ทำให้สายโซ่โปรตีนคลายตัวอาจช่วยเปิดโอกาสให้โมเลกุลของสารเชื่อมขวางสามารถเข้าทำปฏิกิริยากับหมู่ฟังก์ชันภายในสายโซ่โปรตีนได้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น (Ghasemi and Abbasi, 2014) เมื่อเทียบกับการเชื่อมขวางในสภาวะปกติ

งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของการใช้เทคนิคการเชื่อมขวางด้วยกรดอินทรีย์ 3 ชนิด ได้แก่ กรดซิตริก (Citric acid) กรดมาลิก (Malic acid) และกรดซักซินิก (Succinic acid) ร่วมกับสภาวะด่าง ต่อสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของฟิล์มโปรตีนเคซีน โดยมุ่งเน้นการเพิ่มประสิทธิภาพในการต้านทานน้ำเป็นสำคัญ เพื่อพัฒนาประสิทธิภาพของฟิล์มเคซีนสำหรับนำไปประยุกต์ใช้เป็นบรรจุภัณฑ์ย่อยสลายได้ที่ยั่งยืนต่อไป

อุปกรณ์และวิธีการ

สารเคมีที่ใช้

วัตถุดิบที่ใช้ในการเตรียมสารละลายโปรตีน ประกอบด้วย โซเดียมเคซีเนต (Sodium caseinate) (Sigma-aldrich, USA) โดยใช้กลีเซอรอล (Glycerol) (KemAus, Australia) เป็นพลาสติไซเซอร์ และใช้น้ำกลั่น (Deionized water) เป็นตัวทำละลาย สำหรับการปรับให้อยู่ในสภาวะด่างของสารละลายจะใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ (Sodium Hydroxide, NaOH) (QR&C, New Zealand) ในส่วนของกรดอินทรีย์ที่ใช้เป็นสารเชื่อมขวาง (Crosslinkers) ได้แก่ กรดซิตริก (RCI Labscan, Thailand), กรดมาลิก (HiMedia, India) และ กรดซักซินิก (KemAus, Australia)

การเตรียมสารละลายเคซีนสูตรพื้นฐานและสูตรดัดแปร

เตรียมสารละลายเคซีนสูตรพื้นฐาน โดยละลายกลีเซอรอลในน้ำกลั่นที่ระดับความเข้มข้นร้อยละ 30 (โดยน้ำหนักต่อน้ำหนักของผงโปรตีน) จากนั้นเติมผงโซเดียมเคซีเนตที่ระดับความเข้มข้นร้อยละ 5 (โดยน้ำหนักต่อปริมาตร) คนสารละลายอย่างต่อเนื่องโดยใช้เครื่องกวนสารละลายพร้อมให้ความร้อน (Hot Plate With Magnetic Stirrer,

IKA C-MAG HS 7, Germany) ที่ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง (Yin et al., 2014) จนผงโซเดียมเคซีนเนตละลายอย่างสมบูรณ์ จากนั้นนำสารละลายเคซีนที่ได้ (สูตรพื้นฐาน) เตรียมเป็นสารละลายเคซีนสูตรดัดแปร 4 สูตร โดยแบ่งออกเป็น 2 แบบ ได้แก่

1. สูตรที่ 1: ปรับระดับค่า pH ให้อยู่ในสภาวะด่างที่ pH 12
2. สูตรที่ 2, 3 และ 4: นำสารละลายจากข้อ 1 มาเติมสารเชื่อมขวางแต่ละชนิด ได้แก่ กรดซิตริก, กรดมาลิก และกรดซักซินิก ที่ความเข้มข้นร้อยละ 3 (โดยน้ำหนักต่อน้ำหนักของผงโปรตีน)

จากนั้นนำสารละลายเคซีนสูตรพื้นฐานมาปั่นผสมด้วยเครื่องปั่นผสมความเร็วสูง (Homogenizer, IKA T25 Digital ULTRA-TURAX, Germany) ที่ความเร็ว 7,000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 10 นาที ทำเช่นเดียวกันกับสารละลายเคซีนสูตรดัดแปร จากนั้นนำเข้าเครื่องกำเนิดคลื่นเสียงความถี่สูง (Ultrasonic Processor, VCX 750, Sonic & Materials, Inc., USA) โดยกำหนดค่า pulse on ที่ 20 และค่า pulse off ที่ 10 และค่า amplitude ที่ร้อยละ 20 เป็นเวลา 5 นาที

การขึ้นรูปฟิล์มเคซีน

นำสารละลายเคซีนออกจากเครื่องกำเนิดคลื่นเสียงความถี่สูง เทลงในถาดวัสดุโพลีสไตรีนสำหรับขึ้นรูปฟิล์ม และนำเข้าตู้อบลมร้อน (Universal Oven, Memmert UF160, Germany) ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 15 ชั่วโมง หลังจากนั้นนำฟิล์มที่ได้ไปทดสอบสมบัติต่าง ๆ

การวัดสี

วัดสีที่ผิวของฟิล์มด้านที่รับแสงสว่าง ตามมาตรฐาน ASTM D2244 โดยใช้เครื่องวัดสี (Colorimeter, UltraScan VIS Spectrophotometer, HunterLab, USA) ในระบบสี CIE Lab* และแสดงผลค่าสีเป็น L*, a* และ b* (L*: ความสว่าง, a*: ความเป็นสีแดง-สีเขียว และ b* : ความเป็นสีเหลือง-สีน้ำเงิน) คำนวนค่าความแตกต่างของสีรวม (ΔE) เปรียบเทียบกับค่าสีของฟิล์มสูตรพื้นฐานตาม Equation 1:

$$\Delta E = \sqrt{(L^* - L_0^*)^2 + (a^* - a_0^*)^2 + (b^* - b_0^*)^2} \quad (1)$$

Where; L*, a*, b* are the CIELAB color values (lightness, red-green, yellow-blue) of the sample.

L_0^*, a_0^*, b_0^* are the CIELAB color values (lightness, red-green, yellow-blue) of the control.

การวิเคราะห์โครงสร้างทางเคมี

วิเคราะห์โครงสร้างทางเคมีของฟิล์มเคซีนโดยใช้ความยาวคลื่นช่วงอินฟราเรด (Fourier Transform Infrared Spectrometer (FT-IR), Bruker Tensor 27, Germany) เพื่อศึกษาเปรียบเทียบก่อนและหลังการเชื่อมขวาง ในการตรวจสอบหมู่ฟังก์ชันทางเคมีและการเกิดพันธะใหม่ที่บ่งบอกถึงการเชื่อมขวางที่ Wavenumber 500–4,000 cm^{-1} ความละเอียด 4 cm^{-1} และสแกน 32 ครั้งต่อสเปกตรัม

การละลายในน้ำ

โดยดัดแปลงการทดสอบจากมาตรฐาน ASTM D570 ตัดฟิล์มขนาด 5x5 เซนติเมตร นำไปอบไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส ชั่งน้ำหนักฟิล์มเริ่มต้น (W_0) จากนั้นนำไปแช่ในน้ำกลั่นปริมาตร 50 มิลลิลิตร ที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นกรองด้วยกระดาษกรองเบอร์ 1 (Filter Paper, Whatman No.1, UK) และนำไปอบไล่ความชื้นที่ 105 องศาเซลเซียส อีกครั้ง จากนั้นชั่งน้ำหนักของฟิล์มส่วนที่ไม่ละลาย (W_{res}) และคำนวณหาร้อยละของความสามารถในการละลายน้ำ (%Water Solubility) ของฟิล์มเคซีนตาม Equation 2:

$$\%Water\ Solubility = \frac{W_0 - W_{res}}{W_0} \times 100 \quad (2)$$

Where; W_0 is the initial dry weight of the sample in gram (g) unit.

W_{res} is the residual dry weight of the sample after immersion in gram (g) unit.

การทดสอบการต้านทานน้ำมัน

การทดสอบ KIT Test ดัดแปลงจากมาตรฐาน TAPPI T559 ใช้ประเมินความสามารถในการต้านทานน้ำมันและไขมันบนพื้นผิวของวัสดุ โดยใช้ชุดสารละลายมาตรฐาน 12 ระดับ (KIT Rating 1–12) ซึ่งมีส่วนผสมของน้ำมันละหุ่ง (Castor Oil) โทลูอีน (Toluene) และเฮปเทน (Heptane) ที่มีความรุนแรงเพิ่มขึ้นตามลำดับแสดงดัง Table 1

Table 1 Score and composition of the solutions for the test of grease resistance.

KIT Rating	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Castor oil (wt %)	100	90	80	70	60	50	40	30	20	10	0	0
Toluene (wt %)	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	45
N-Heptane (wt %)	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55

ทำการหยดสารละลาย 3 ซ้ำ ในบริเวณที่ต่างกัน โดยเริ่มจากระดับที่ 1 ลงบนพื้นผิวฟิล์ม ปล่อยไว้ 15 วินาที จากนั้นเช็ดออกและสังเกตว่าเกิดรอยด่างหรือรอยคล้ำ (Darkening) หรือไม่ หากไม่ปรากฏ แสดงว่าฟิล์มทนต่อสารละลายในระดับนั้นได้ (Silva et al., 2023) จากนั้นดำเนินการทดสอบซ้ำโดยใช้สารละลายที่มี KIT Number สูงขึ้นในบริเวณอื่นของฟิล์ม จนกระทั่งพบร่องรอยการซึมผ่านของสารละลาย ผลการทดสอบจะถูกบันทึกเป็นค่า KIT Rating ซึ่งหมายถึงค่าตัวเลขสูงสุดของสารละลายที่ชิ้นงานสามารถต้านทานได้

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

ลักษณะทางกายภาพและสีของฟิล์ม

จากการศึกษาลักษณะปรากฏของฟิล์มเคซีนดังแสดงใน Fig. 1 และผลการวัดค่าสีของฟิล์มเคซีนดังแสดงใน Table 2 พบว่าฟิล์มเคซีนสูตรพื้นฐานมีลักษณะใสและโปร่งแสง โดยมีค่าความสว่างอยู่ที่ 32.44±0.99 อย่างไรก็ตาม เมื่อนำฟิล์มมาผ่านกระบวนการดัดแปรด้วยสภาวะด่างร่วมกับการเติมสารเชื่อมขวางกรดอินทรีย์ พบว่าลักษณะปรากฏของฟิล์มมีการเปลี่ยนแปลงไป โดยเฉพาะอย่างยิ่งในสูตรที่เติมกรดซักซินิก ซึ่งส่งผลให้ฟิล์มมีสีเหลืองเข้มขึ้น

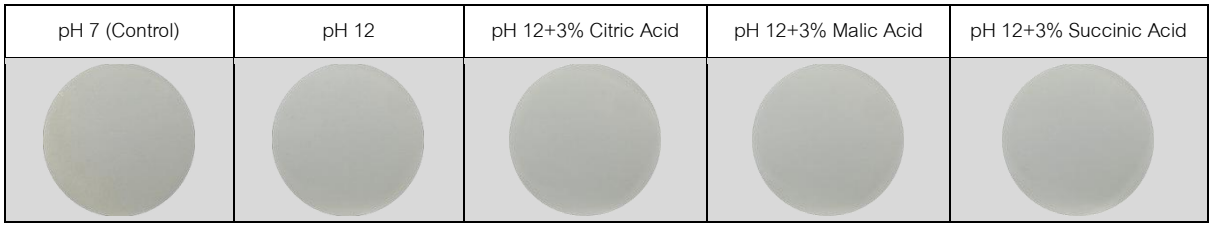


Fig. 1 Visual appearance of casein films prepared under different pH conditions and with various cross-linking treatments.

ผลการวิเคราะห์ค่าสีใน Table 2 ยืนยันการเปลี่ยนแปลงดังกล่าว โดยพบว่าฟิล์มสูตร pH 12+3% Succinic Acid แสดงค่าความสว่างลดลงมากที่สุด อยู่ที่ 24.55±0.37 และมีค่าความแตกต่างของสีรวมสูงที่สุด คือ 8.08±0.40 การเปลี่ยนแปลงนี้คาดว่าเป็นผลมาจากการเกิดพันธะเชื่อมขวางระหว่างหมู่คาร์บอกซิล (-COOH) ของกรดอินทรีย์กับหมู่อะมิโน ($-NH_2$) หรือหมู่ไฮดรอกซิล (-OH) ในสายโซ่โปรตีนเคซีน ซึ่งถูกเร่งปฏิกิริยาด้วยความร้อนระหว่างขั้นตอนการอบแห้ง โดยสันนิษฐานว่าโครงสร้างทางเคมีของกรดซักซินิกที่ไม่มีหมู่ไฮดรอกซิลเป็นองค์ประกอบ ส่งผลให้มีความเกะกะของสเตอริกน้อยกว่า เมื่อเปรียบเทียบกับกรดซิตริกและกรดมาลิกที่มีหมู่ไฮดรอกซิลเป็นองค์ประกอบ จึงทำให้ประสิทธิภาพการเกิดพันธะเชื่อมขวางเกิดขึ้นได้ดีกว่า

Table 2 Color values (L*, a*, b*, and ΔE) of casein films.

Film Formula	L*	a*	b*	ΔE
pH 7 (Control)	32.44±0.99^{b}	-0.17±0.11^{c}	-0.32±0.53^{b}	Standard^{a}
pH 12	31.57±1.80^{b}	-0.40±0.19^{bc}	-0.44±0.68^{b}	1.83±0.76^{b}
pH 12+3% Citric Acid	36.08±2.79^{c}	-0.22±0.15^{c}	-1.47±0.28^{a}	4.10±2.26^{c}
pH 12+3% Malic Acid	31.47±1.30^{b}	-1.02±0.28^{a}	-0.37±0.65^{b}	1.57±1.09^{b}
pH 12+3% Succinic Acid	24.55±0.37^{a}	-0.54±0.10^{b}	-1.98±0.50^{a}	8.08±0.40^{d}

*Means±SD in the same column followed by different superscripts are significantly different ($p < 0.05$)

การวิเคราะห์โครงสร้างทางเคมี

จากผลการวิเคราะห์โครงสร้างทางเคมีด้วยเทคนิค FT-IR (Fig. 2A) พบว่าสเปกตรัมของหมู่ฟังก์ชันในฟิล์มเคซีนทุกสูตรแสดงช่วงการดูดกลืนแสงที่เป็นลักษณะเฉพาะของโปรตีน แต่มีการเปลี่ยนแปลงในตำแหน่งของพีคสำคัญเมื่อผ่านการดัดแปร ได้แก่ พีค Amide I (C=O) มีการเลื่อนจากตำแหน่ง 1631 cm^{-1} (จุด a) ในฟิล์มเคซีนสูตรพื้นฐานไปยัง 1635–1637 cm^{-1} (จุด b) ในฟิล์มสูตรดัดแปร และ พีค Amide II (N-H และ C-N) เลื่อนจาก 1539 cm^{-1} (จุด c) ในฟิล์มเคซีนสูตรพื้นฐาน ไปยัง 1543–1545 cm^{-1} (จุด d) ในฟิล์มสูตรดัดแปร ดังแสดงใน Fig. 2B การเปลี่ยนแปลงตำแหน่งพีคดังกล่าวบ่งชี้ถึงการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทุติยภูมิของโปรตีน (Kong and Yu, 2007) ซึ่งเป็นผลมาจากการปรับสภาวะให้เป็นด่างที่กระตุ้นให้โปรตีนเกิดการคลายตัวและจัดเรียงตัวใหม่ให้มีโครงสร้างที่อัดแน่นขึ้น แม้สเปกตรัม FT-IR จะไม่สามารถระบุพีคใหม่ที่เกิดจากการเชื่อมขวางได้อย่างชัดเจนเนื่องจากการซ้อนทับของพีค แต่การจัดเรียงตัวใหม่ของโครงสร้างโปรตีนนี้มีความสอดคล้องโดยตรงกับสมบัติการต้านทานน้ำที่ดีขึ้นซึ่งจะอธิบายในส่วนถัดไป แสดงให้เห็นว่า

โครงสร้างที่หนาแน่นขึ้นจากการดัดแปรมีส่วนช่วยยึดตรึงโครงสร้างฟิล์มให้มีความเสถียรและทนต่อการละลายน้ำได้ดีกว่าฟิล์มสูตรพื้นฐานและสูตรที่ปรับเพียงสภาวะด่างเพียงอย่างเดียว อย่างไรก็ตามการศึกษาเพิ่มเติมโดยใช้เทคนิค NMR (Nuclear Magnetic Resonance) อาจจะสามารถทำให้อธิบายผลการทดลองในส่วนนี้ได้ชัดเจนยิ่งขึ้น

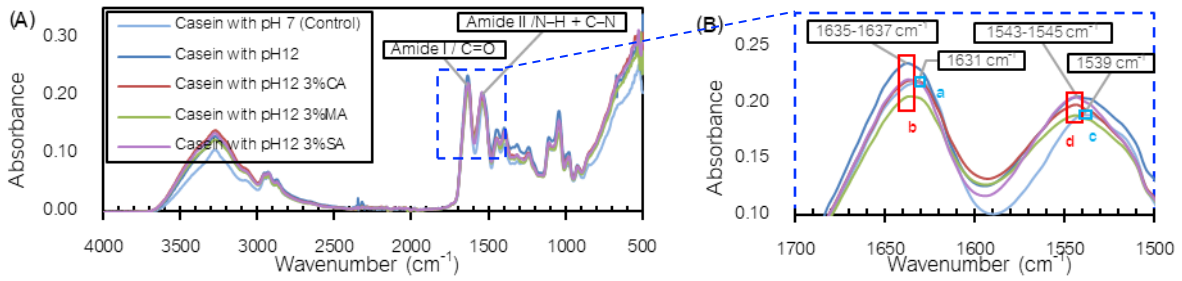


Fig. 1 FT-IR spectra of control and modified casein films: (A) Full spectra and (B) Peak shifting of Amide I and II bands in the 1700–1500 cm^{-1} region.

สมบัติการละลายในน้ำ

จากผลการทดสอบการละลายในน้ำดัง Fig. 3 แสดงให้เห็นว่าฟิล์มสูตรพื้นฐานมีความสามารถในการละลายน้ำสูงที่ร้อยละ 81.26 ซึ่งเป็นข้อจำกัดของฟิล์มโปรตีนโดยทั่วไป ในทางตรงกันข้าม ฟิล์มที่ผ่านการดัดแปรด้วยการเติมสารเชื่อมขวางภายใต้สภาวะด่างมีความสามารถในการละลายน้ำลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) โดยฟิล์มที่เติมกรดซิตริก กรดมาลิก และกรดซักซินิก มีค่าการละลายน้ำลดลงเหลือร้อยละ 29.37, 30.51 และ 25.72 ตามลำดับ การลดลงของค่าการละลายน้ำนี้สอดคล้องกับผลการวิเคราะห์โครงสร้างทางเคมีด้วยเทคนิค FT-IR ที่พบการเลื่อนตำแหน่งของพีคในกลุ่ม Amide I และ Amide II ซึ่งบ่งชี้ถึงการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทุติยภูมิและการจัดเรียงตัวใหม่ของโปรตีนให้มีความหนาแน่นมากขึ้น อันเป็นผลมาจากสภาวะด่างและการยึดตรึงจากสารเชื่อมขวาง โครงสร้างร่างแหที่แน่นหนานี้ทำหน้าที่ขัดขวางการแทรกซึมของโมเลกุลน้ำ ส่งผลให้ฟิล์มมีสมบัติการต้านทานน้ำ (Water resistance) ที่ดีขึ้นอย่างชัดเจน

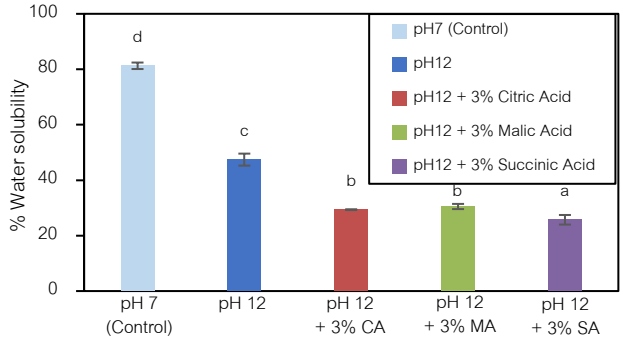


Fig. 2 Water solubility of various casein film formulations

สมบัติการต้านทานน้ำมัน

จากการทดสอบ KIT Test ดังแสดงใน Fig. 4 พบว่าฟิล์มเคซีนทุกสูตรมีสมบัติการต้านทานน้ำมันในระดับสูงสุด โดยมีค่า KIT Rating ที่ระดับ 12 และไม่พบการดูดซับของเหลว ดังปรากฏใน Table 3 ทั้งนี้เนื่องจากโมเลกุลของเคซีนมีสมบัติเป็นทั้งส่วนที่ชอบและไม่ชอบน้ำ (Amphiphilic) ที่เมื่อจัดเรียงตัวเป็นฟิล์มจะหันส่วนที่มีขั้ว (Polar) ออกด้านนอก ทำให้ที่มีพลังงานพื้นผิวสูง (High Surface Energy) ซึ่งพื้นผิวลักษณะนี้จะไม่ชอบของเหลวที่ไม่มีขั้ว (Non-polar) อย่างน้ำมันโดยธรรมชาติ (Khwaldia et al., 2004; Rastogi and Samyn, 2015) แม้ว่าผลการทดสอบจะแสดงค่าที่เท่ากันในทุกสูตร แต่การทดสอบนี้มีความสำคัญอย่างยิ่งในการยืนยันว่ากระบวนการดัดแปรโครงสร้างเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการต้านทานน้ำ ไม่ได้ส่งผลกระทบเชิงลบต่อสมบัติการต้านทานไขมันซึ่งเป็นสมบัติเด่นดั้งเดิมของเคซีน ผลการทดลองนี้จึงแสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพของฟิล์มดัดแปรที่ยังคงรักษาการป้องกันการซึมผ่านของไขมันได้ดี ซึ่งเป็นสมบัติที่จำเป็นอย่างมากสำหรับการนำไปประยุกต์ใช้เป็นบรรจุภัณฑ์สำหรับอาหารที่มีไขมัน

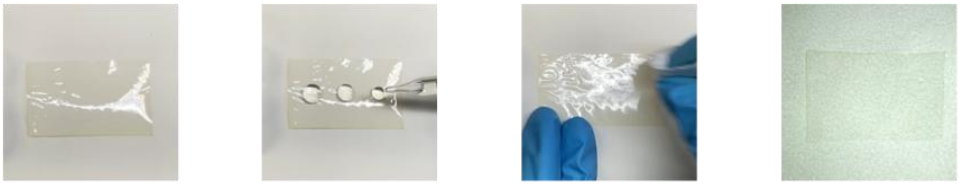


Fig. 3 Illustration of the oil resistance evaluation using the KIT Test method.

Table 3 Oil resistance (KIT Rating) of casein films.

Film Formula	KIT Rating												Result
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
pH 7 (Control)	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	No oil absorption
pH 12	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	No oil absorption
pH 12 + 3% Citric Acid	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	No oil absorption
pH 12 + 3% Malic Acid	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	No oil absorption
pH 12 + 3% Succinic Acid	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	No oil absorption

Note: Green dots (●) indicate passing the respective KIT rating level.

สรุป

การดัดแปรฟิล์มโปรตีนเคซีนโดยการปรับค่า pH ให้อยู่ในสภาวะด่างร่วมกับการใช้สารเชื่อมขวางจากกรดอินทรีย์ (กรดซิตริก, กรดมาลิก และกรดซักซินิก) ที่ความเข้มข้นร้อยละ 3 สามารถปรับปรุงสมบัติการต้านทานน้ำของฟิล์มได้อย่างมีนัยสำคัญ ฟิล์มที่ผ่านการดัดแปรมีค่าการละลายน้ำลดลงเหลือเพียงร้อยละ 25.72 ถึง 30.51 จากเดิมที่ฟิล์มสูตรพื้นฐานละลายน้ำได้สูงถึงร้อยละ 81.26 การวิเคราะห์ด้วยเทคนิค FT-IR ยืนยันการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางเคมีผ่านการเลื่อนตำแหน่งของพีค Amide I และ Amide II ซึ่งบ่งชี้ถึงการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทุติยภูมิและการจัดเรียงตัวใหม่ของโปรตีนให้มีความหนาแน่นขึ้น อันเป็นผลมาจากสภาวะด่างและการเชื่อมขวาง ในขณะที่สมบัติด้านการต้านทานน้ำมัน

ของฟิล์มยังคงดีในทุกสูตรการทดลอง โดยมีค่า KIT Rating ที่ระดับ 12 ผลการวิจัยนี้ยืนยันว่าการใช้เทคนิคผสมผสานสามารถปรุบปรุงความไวต่อความชื้นของฟิล์มโปรตีนได้สำเร็จ ส่งผลให้ฟิล์มเคซีนดัดแปรมีศักยภาพในการนำไปประยุกต์ใช้เป็นบรรจุภัณฑ์สำหรับอาหารที่มีไขมันและมีความชื้น เช่น ซองบรรจุน้ำมัน หรือกระดาษเคลือบสำหรับห่ออาหารทอด ซึ่งเป็นทางเลือกใหม่ของวัสดุบรรจุภัณฑ์ย่อยสลายได้ทางชีวภาพในอุตสาหกรรมอาหาร

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณคณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ที่ให้การสนับสนุนทุนนำเสนอผลงานในงานประชุมวิชาการมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 64

เอกสารอ้างอิง

Atarés, L., Chiralt, A. 2015. Essential oils as additives in biodegradable films and coatings for active food packaging. Trends Food Sci. Technol. 48: 51–62. doi.org/10.1016/j.tifs.2015.12.001

Azeredo, H. M., Waldron, K.W. 2016. Crosslinking in polysaccharide and protein films and coatings for food contact – A review. Trends Food Sci. Technol. 52: 109–122. doi.org/10.1016/j.tifs.2016.04.008

Bhatia, S., Al-Harrasi, A., Al-Azri, M. S., Ullah, S., Makeen, H. A., Meraya, A. M., Albratty, M., Najmi, A., Anwer, M. K. 2022. Gallic Acid crosslinked gelatin and casein based composite films for food packaging applications. Polymers 14: 4065. doi.org/10.3390/polym14194065

Ghasemi, S., Abbasi, S. 2014. Formation of natural casein micelle nanocapsule by means of pH changes and ultrasound. Food Hydrocoll. 34: 42–47. doi.org/10.1016/j.foodhyd.2013.10.028

Khwaldia, K., Perez, C., Banon, S., Desobry, S., Hardy, J. 2004. Milk proteins for edible films and coatings. Crit. Rev. Food Sci. Nutr. 44: 239–251. doi.org/10.1080/10408690490464906

Kong, J., Yu, S. 2007. Fourier transform infrared spectroscopic analysis of protein secondary structures. Acta Biochim. Biophys. Sin. 39: 549–559. doi.org/10.1111/j.1745-7270.2007.00320.x

Partschefeld, C., Schreiner, J., Schwarzenbolz, U., Henle, T. 2009. Studies on enzymatic crosslinking of casein micelles. Czech J. Food Sci. 27: S99–S101. doi.org/10.17221/938-CJFS

Plumier, B., Akkurt, S., Bonnaillie, L., et al. 2023. Effect of alkaline pH values on physical and functional properties of edible films made from calcium caseinates. Int. Dairy J. 151: 105851. doi.org/10.1016/j.idairyj.2023.105851

Rastogi, V., Samyn, P. 2015. Bio-Based Coatings for Paper Applications. Coatings 5: 887–930. doi.org/10.3390/coatings5040887

Silva, D.W., Batista, F.G., Scatolino, M.V., et al. 2023. Developing a Biodegradable Film for Packaging with Lignocellulosic Materials from the Amazonian Biodiversity. Polymers 15: 3646. doi.org/10.3390/polym15173646

Wu, S., Cronin, K., Fitzpatrick, J., Miao, S. 2021. Updating insights into the rehydration of dairy-based powder and the achievement of functionality. Crit. Rev. Food Sci. Nutr. 62: 6664–6681. doi.org/10.1080/10408398.2021.1904203

Yin, Y.C., Yin, S.W., Yang, X.Q., Tang, C.H., Wen, S.H., Chen, Z., Xiao, B.J., Wu, L.Y. 2014. Surface modification of sodium caseinate films by zein coatings. Food Hydrocoll. 36: 1–8. doi.org/10.1016/j.foodhyd.2013.08.027

Influence of UV-C irradiation dose on quality attributes of Thai jasmine milled and brown rice

Aphisara Peawdumkam[a], Kanithaporn Vangnai[a,*], Kullanart Tongkhao[a], Wipada Siri-anusornsak[b]

[a] Department of Food Science and Technology, Faculty of Agro-Industry, Kasetsart University, Bangkok 10900, Thailand

[b] Scientific Equipment and Research Division, Kasetsart University Research and Development Institute, Kasetsart University, Bangkok 10900, Thailand

*Corresponding author. E-mail address: kanithaporn.v@ku.th

Abstract

Ultraviolet-C (UV-C) irradiation has gained interest as a non-thermal postharvest technology for cereal grains; however, its effects on rice quality are dose-dependent and influenced by processing state. This study examined the impact of UV-C doses ranging from 0–173.22 J/cm² on the physicochemical and cooking qualities of Thai jasmine milled and brown rice. Evaluated parameters included color attributes, grain integrity, cooking-related morphological changes, water uptake, and total phenolic content. Overall, UV-C treatment produced measurable but moderate changes in rice quality. Milled rice showed greater sensitivity to irradiation, reflected by reductions in lightness (L*), higher proportions of damaged grains, and slight decreases in water uptake ratio. Brown rice exhibited greater stability, likely due to the protective bran layer. Grain morphology—length-to-width ratio, grain elongation, and width expansion—was minimally affected in both rice types. Total phenolic content displayed minor fluctuations without substantial degradation across treatments. These findings indicate that UV-C dose critically shapes quality responses and that milled and brown rice differ in tolerance to irradiation. Low to moderate doses preserved key quality attributes, whereas higher doses increased grain damage, particularly in milled rice. The results offer practical guidance for optimizing UV-C treatment to maintain the quality of premium aromatic rice.

Keywords: Cooking qualities, Exposure time, Physicochemical properties, Rice quality, UV-C irradiation

Introduction

Rice (*Oryza sativa* L.) is a primary staple food for more than half of the world's population, and its quality attributes—particularly appearance, physicochemical properties, and cooking behavior—play a crucial role in consumer acceptance and market value. In premium aromatic cultivars such as Thai jasmine rice, even subtle changes in grain color, texture, or cooking performance can markedly influence perceived quality and economic value (Siriphollakul et al., 2017; Lanceras et al., 2000). During postharvest handling and storage, rice quality may be altered through biochemical and structural modifications involving starch, proteins, lipids, and phenolic compounds, which collectively determine visual quality, cooking behavior, and nutritional value (Ciulu et al., 2018).

Ultraviolet-C (UV-C) irradiation (200–280 nm) has gained increasing attention as a non-thermal postharvest technology due to its effectiveness in microbial inactivation and its ability to induce physicochemical changes without the use of chemical preservatives (Ferreira et al., 2021). Previous studies have demonstrated that UV-C treatment can influence color parameters, oxidative reactions, protein functionality, starch structure, and phenolic content in cereal grains (Kumar et al., 2021; Rostamabadi et al., 2023). While moderate UV-C doses may help preserve certain quality-related attributes, excessive irradiation has been associated with pigment formation, oxidative reactions, and deterioration of grain surface integrity (Dittgen et al., 2021), indicating that quality responses are strongly dose-dependent.

Beyond quality modification, UV-C irradiation has been explored as a strategy for fungal control and mycotoxin reduction in rice during storage, highlighting its potential role in enhancing food safety (Ferreira et al., 2021). However, the physicochemical consequences of UV-C exposure are not uniform and may vary according to rice processing state. In particular, the presence or absence of the bran layer represents a key structural difference that can influence light penetration, oxidative stability, moisture transport, and subsequent cooking behavior. Despite its importance, comparative information on the dose-dependent responses of milled and brown rice under identical UV-C irradiation conditions remains limited.

Most previous studies have focused on narrow UV-C dose ranges or isolated quality attributes, often overlooking processing-related structural differences. Consequently, the combined effects of UV-C dose and rice processing state on cooking-related quality attributes, including grain morphology and water uptake, are still poorly understood.

The present study aims to provide a systematic evaluation of the effects of UV-C irradiation across a broad dose range on Thai jasmine milled and brown rice. By simultaneously assessing visual quality (color parameters), physical integrity (damaged grains), cooking-related morphology, water uptake behavior, and total phenolic content, this work offers an integrated perspective on how UV-C dose and rice processing state jointly influence physicochemical and functional quality attributes. The findings aim to identify dose-dependent trends and potential thresholds beyond which quality deterioration may occur, thereby contributing new insights to support the rational application of UV-C irradiation for maintaining quality in premium aromatic rice.

Materials and Methods

Raw materials

Thai jasmine milled and brown rice samples were purchased from local supermarkets in Bangkok, Thailand. All samples were obtained from the same harvest year and stored under dry conditions at ambient temperature prior to experimentation.

UV-C irradiation treatment

Rice samples (200 g per treatment) were placed in a UV-C irradiation chamber (40 × 120 × 50 cm) equipped with a Philips® 30 W low-pressure mercury lamp emitting at 254 nm with an average irradiance of 0.008 W/cm². Samples were evenly spread as a single layer on foil-lined aluminum trays positioned 43 cm below the UV-C source. UV-C irradiation was applied at exposure times of 0, 30 (14.43 J/cm²), 45 (21.65 J/cm²), 60 (28.87 J/cm²), 120 (57.74 J/cm²), 180 (86.61 J/cm²), 240 (115.48 J/cm²), 300 (144.35 J/cm²), and 360 min (173.22 J/cm²). The UV-C dose was calculated as the product of irradiance (W/cm²) and exposure time (s). For data interpretation, short exposure times ($\leq$60 min) were classified as low UV-C doses, intermediate exposure times (120–180 min) as moderate doses, and prolonged exposure times ($\geq$240 min) as high doses.

Color Measurement

Color parameters of raw milled and brown rice samples were measured before and after UV-C irradiation using a HunterLab UltraScan PRO colorimeter and expressed as CIE L*, a*, and b* values.

Determine of damaged grains

The percentage of broken rice was calculated as (weight of broken rice / total rice weight) × 100, with broken grains identified and counted by visual inspection following the USDA method, with slight modifications. (USDA, 2016)

Cooking procedure and water uptake ratio

Milled and brown rice were cooked using water-to-rice ratios of 1:1.2 and 1:1.6 (w/w), respectively, based on commercial cooking instructions and typical household rice cooker conditions. Brown rice was soaked for 30 min prior to cooking. Water uptake ratio (WUR) was calculated as the ratio of cooked weight to initial raw weight.

Grain morphology

Grain length and width before and after cooking were measured using a digital vernier caliper, and the length-to-width ratio (L/W ratio), grain elongation ratio, and width expansion ratio were calculated. For each replication, 15 rice grains were randomly selected from 100 g rice sample.

Analysis of total phenolic content

Total phenolic content (TPC) was determined using the Folin–Ciocalteu method and expressed as mg gallic acid equivalents per gram of sample (mg GAE/g). Briefly, ground rice samples were extracted with 80% methanol (1:10, w/v), centrifuged, and the supernatant was reacted with Folin–Ciocalteu reagent and sodium carbonate (Mantiri et al., 2024).

Statistical analysis

All experiments were conducted in duplicate using a randomized complete block design (RCBD). Data were analyzed using one-way ANOVA, and mean comparisons were conducted using Duncan's multiple range test at $p \leq 0.05$ using SPSS software.

Result and Discussion

Color parameters

Color parameters (L*, a*, and b*) were measured separately in raw milled and raw brown rice. Brown rice was evaluated before milling, and comparisons were therefore made between rice types rather than on the same grains before and after milling. As shown in Fig. 1, UV-C irradiation did not result in statistically significant differences ($p \leq 0.05$) in color values among exposure times within each rice type, although minor numerical variations were observed. In contrast, clear differences in color parameters were consistently found between milled and brown rice, with brown rice exhibiting lower L* values due to the presence of the bran layer. These results indicate that rice processing state is an important factor influencing color characteristics, and the observed trends are consistent with the protective role of the bran layer reported in previous studies. (Dittgen et al., 2021; Ferreira et al., 2021; Rostamabadi et al., 2023).

Damaged grains

The increase in damaged grains from 5.32 to 8.79% in milled rice, compared with the narrower range observed in brown rice (3.75–4.10%), highlights a clear differential response to UV-C irradiation between rice types (Fig. 2). The more pronounced increase at higher doses suggests that prolonged UV-C exposure may compromise kernel surface integrity, potentially through localized weakening of starch–protein matrices. (Vatanasuchart et al. 2005) In brown rice, the bran layer likely acts as a mechanical and optical barrier, dissipating part of the irradiation energy and reducing stress concentration within the endosperm. Although UV-C irradiation has been reported to reduce insect infestation and subsequent storage-related damage, the present results indicate that excessive irradiation may introduce a trade-off between protective effects and physical grain quality, particularly for milled rice (Dittgen et al., 2021; Ferreira et al., 2021).

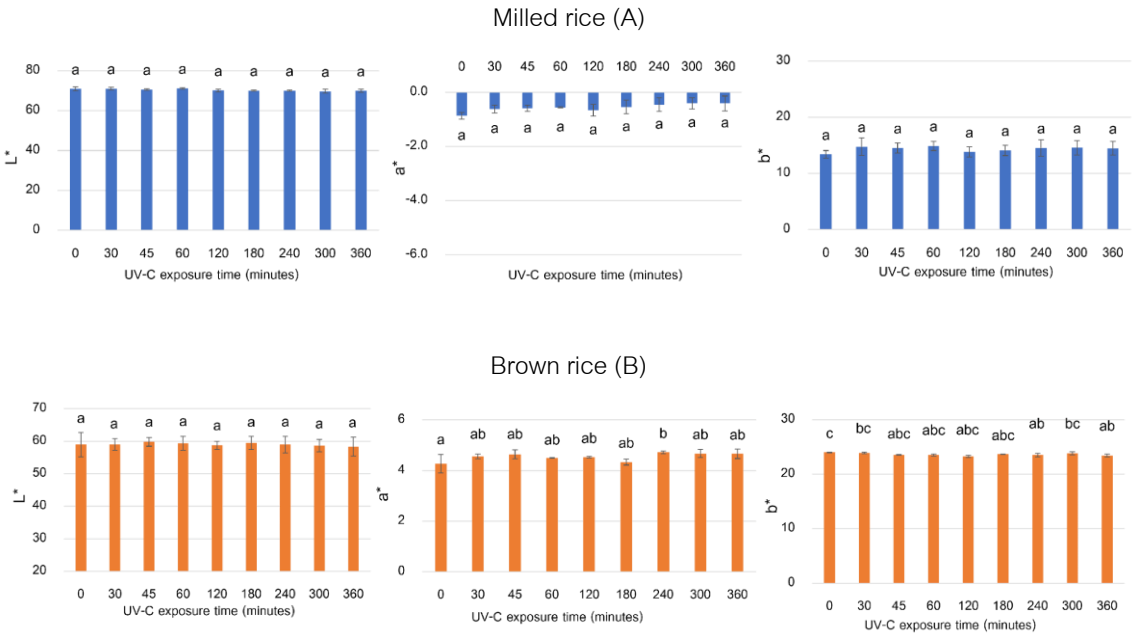


Fig. 1 Color parameters of milled rice (A) and brown rice (B) treated with UV-C treatments.

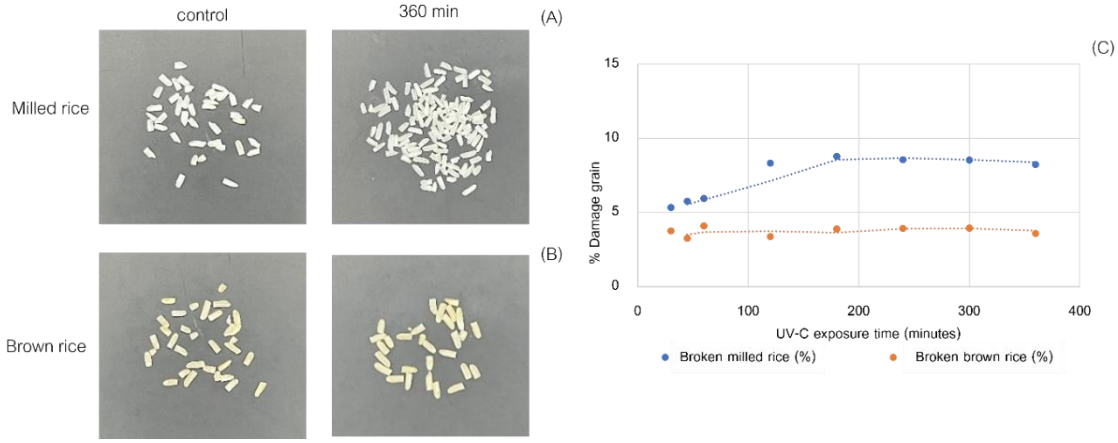


Fig. 2 Damaged grains in milled rice (A) and brown rice (B), and the percentage of damaged grains after UV-C exposure (C).

Grain morphology

As shown in Table 1, changes in the L/W ratio across UV-C treatments were relatively small, with values ranging from 3.70–4.02 in milled rice and 2.84–3.25 in brown rice. Although statistically significant differences were observed at specific exposure times (180 and 300 min in milled rice; 120–180 min in brown rice), the overall magnitude of variation was limited, indicating no substantial dimensional deformation during cooking. Minor increases in the L/W ratio of milled rice at intermediate to high doses may reflect slight changes in surface swelling, while the transient decrease in brown rice at 120 min suggests morphology is influenced by moisture transport constraints imposed by the bran layer. Overall, the limited variation in grain elongation and width expansion ratios indicates that cooking-related dimensional properties of Thai jasmine rice were largely preserved across the tested UV-C dose range (Lanceras et al., 2000; Siriphollakul et al., 2017; Rostamabadi et al., 2023).

Water uptake ratio

The reduction in water uptake ratio observed in milled rice at low UV-C dose (from 2.04 to approximately 1.83–1.88), as well as the gradual decline in brown rice at higher doses (down to 1.77 at 360 min), indicates that UV-C irradiation may influence hydration behavior in a dose- and rice-type–dependent manner, which is closely related to cooking quality (Lanceras et al., 2000; Siriphollakul et al., 2017). However, the narrow range of WUR variation suggests that these effects are modest and unlikely to cause significant deterioration in cooking quality. The consistency between limited changes in WUR and minimal alterations in grain morphology supports the view that UV-C irradiation primarily affects surface characteristics rather than internal starch gelatinization, as radiation-induced modifications are typically confined to near-surface regions of starch granules (Rostamabadi et al., 2023). Consequently, low to moderate UV-C doses appear suitable for application without substantially compromising water absorption during cooking.

Table 1 Effect of UV-C irradiation on length-to-width ratio (L/W ratio) of raw rice, grain elongation ratio (GER), width expansion ratio and water uptake ratio of cooked rice

UV-C exposure time (min)	Milled rice				Brown rice			
	L/W ratio	Grain Elongation	Width Expansion	Water uptake ratio	L/W ratio	Grain Elongation	Width Expansion	Water uptake ratio
0	3.70±0.12^{a}	0.22±0.07^{a}	0.06±0.04^{a}	2.04±0.17^{a}	3.25±0.10^{c}	0.13±0.01^{a}	0.06±0.01^{ab}	1.94±0.13^{a}
30	3.91±0.05^{ab}	0.25±0.04^{a}	0.05±0.00^{a}	1.87±0.08^{a}	3.02±0.05^{ab}	0.09±0.01^{a}	0.07±0.01^{b}	1.88±0.05^{a}
45	3.90±0.01^{ab}	0.22±0.01^{a}	0.04±0.00^{a}	1.83±0.04^{a}	3.08±0.12^{abc}	0.09±0.01^{a}	0.07±0.01^{b}	1.86±0.01^{a}
60	3.85±0.08^{ab}	0.20±0.04^{a}	0.04±0.01^{a}	1.88±0.06^{a}	3.13±0.06^{bc}	0.07±0.03^{a}	0.05±0.00^{ab}	1.88±0.02^{a}
120	3.89±0.04^{ab}	0.19±0.00^{a}	0.03±0.00^{a}	1.83±0.08^{a}	2.84±0.17^{a}	0.08±0.02^{a}	0.09±0.01^{c}	1.87±0.02^{a}
180	3.99±0.11^{b}	0.23±0.04^{a}	0.04±0.01^{a}	1.87±0.06^{a}	3.04±0.05^{ab}	0.07±0.01^{a}	0.07±0.01^{b}	1.80±0.08^{a}
240	3.82±0.13^{ab}	0.18±0.04^{a}	0.04±0.01^{a}	1.85±0.08^{a}	3.15±0.01^{bc}	0.08±0.02^{a}	0.05±0.01^{a}	1.87±0.01^{a}
300	4.02±0.16^{b}	0.22±0.08^{a}	0.03±0.00^{a}	1.86±0.06^{a}	3.06±0.08^{abc}	0.07±0.05^{a}	0.06±0.01^{ab}	1.81±0.07^{a}
360	3.93±0.18^{ab}	0.22±0.07^{a}	0.04±0.01^{a}	1.86±0.06^{a}	3.18±0.02^{bc}	0.07±0.04^{a}	0.05±0.01^{a}	1.77±0.15^{a}

* The same superscript letter within the same column indicates that the values were insignificantly different ($p > 0.05$).

Total phenolic content

The fluctuation of total phenolic content (TPC) in milled rice (18.98–15.19 mg GAE/g) and the relatively stable, slightly declining trend in brown rice indicate that UV-C irradiation did not cause substantial phenolic degradation (Fig. 3). The higher baseline TPC in brown rice agrees with previous reports that phenolic compounds are mainly concentrated in the bran layer, which may also provide protection against UV-induced degradation (Butsat and Siriamornpun, 2010; Ciulu et al., 2018). The lack of an increasing trend suggests

that the applied UV-C doses were insufficient to induce phenolic biosynthesis or release. Although the Folin–Ciocalteu assay reflects overall reducing capacity rather than individual phenolic compounds, the overall stability of TPC indicates that rice chemical quality was largely preserved across the studied UV-C dose range.

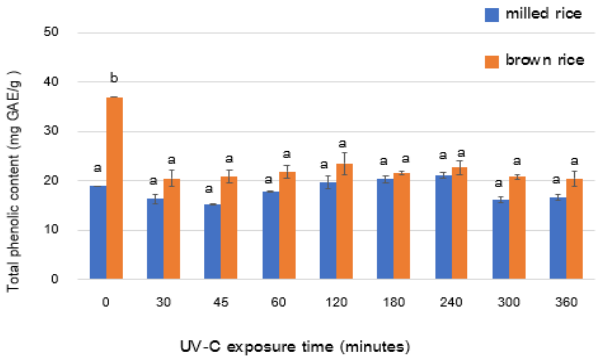


Fig. 3 Total phenolic content (TPC) milled and brown rice treated with UV-C treatments

Conclusion

UV-C irradiation induced dose-dependent but generally moderate changes in the physicochemical and cooking qualities of Thai jasmine rice, with milled rice showing greater sensitivity than brown rice due to the absence of the bran layer. Low to moderate UV-C doses preserved key quality attributes, supporting the potential of UV-C as a non-thermal postharvest treatment. However, as this study was conducted under small-scale conditions with uniform exposure, the applicability of these findings to large-scale storage systems may be limited due to restricted UV-C penetration. Further evaluation under industrial-scale conditions is therefore required.

Conflict of Interest

The authors declare that there are no conflicts of interest.

Acknowledgements

The authors gratefully acknowledge financial support from Kasetsart University Research and Development Institute (KURDI), Kasetsart University, Bangkok, Thailand under grant No. FF(KU)12.68. This work was supported by the Faculty of Agro-Industry, Kasetsart University, through a grant for presentation at the 64th Kasetsart University Annual Conference.

References

Butsat, S., Siriamornpun, S. 2010. Antioxidant capacities and phenolic compounds of the husk, bran and endosperm of Thai rice. Food Chemistry 119: 606–613. doi.org/10.1016/j.foodchem.2009.07.001

Ciulu, M., Cádiz-Gurrea, M.L., Segura-Carretero, A. 2018. Extraction and analysis of phenolic compounds in rice: A review. Molecules 23: 2890. doi.org/10.3390/molecules23112890

Dittgen, C.L., M.M.d. Silveira, D.P. Kroning, V. Ziegler, M.d. Oliveira, C.D. Ferreira. 2020. Chemical, physical, and sensory changes in rice subjected to UV-C radiation and its acceptability to rice weevil *Sitophilus oryzae* (L.) (Coleoptera: curculionidae) and humans. Journal of Stored Products Research 90: 101760. doi.org/10.1016/j.jspr.2020.101760

Ferreira, C.D., Land, G.H., Lindemann, I.d.S., Timm, N.d.S., Hoffmann, J.F., Ziegler, V., Oliveira, M.d. 2021. Postharvest UV-C irradiation for fungal control and reduction of mycotoxins in brown, black, and red rice during long-term storage. Food Chemistry 339: 127810. doi.org/10.1016/j.foodchem.2020.127810

Kumar, M., Tomar, M., Punia, S., Bhuyan, D.J., Grasso, S., Sá, A.G.A., Carpena, M., Santana, A.L.B. 2021. Impact of UV-C radiation on structural, physicochemical and functional properties of cereal and legume starches. Food Hydrocolloid 113: 105845. doi: 10.1016/j.foodhyd.2020.105845

Lanceras, J.C., Huang, Z.-L., Naivikul, O., Vanavichit, A., Ruanjaichon, V., Tragoonrung, S. 2000. Mapping of genes for cooking and eating qualities in Thai jasmine rice (KDML105). DNA Research 7: 93–101. doi.org/10.1093/dnares/7.2.93

Rostamabadi, H., Demirkesen, I., Hakgüder, B., Karaca, A.C. 2023. Ionizing and nonionizing radiations can change physicochemical and technofunctional attributes of starch. Food Chemistry: X 19: 100771. doi.org/10.1016/j.fochx.2023.100771

Siriphollakul, P., Nakano, K., Kanlayanarat, S., Ogata, T. 2017. Eating quality evaluation of Khao Dawk Mali 105 rice using near-infrared spectroscopy. LWT – Food Science and Technology 79: 70–77. doi.org/10.1016/j.lwt.2017.01.014

Vatanasuchart, N., Naivikul, O., Charoenrein, S., Sriroth, K. 2005. Molecular properties of cassava starch modified with different UV irradiations to enhance baking expansion. Carbohydrate Polymers 61: 80–87.

United States Department of Agriculture (USDA). 2016. USDA innovation improves rice grading. Washington, DC, USA. https://www.usda.gov/about-usda/news/blog/usda-innovation-improves-rice-grading,10 January 2026.

การพัฒนาผลิตภัณฑ์ขนมขบเคี้ยวปราศจากกลูเตนผสมผักโขมและเสริมใยอาหาร

Development of gluten-free spinach snack products fortified with dietary fiber

วาสนา นาราศรี[a,*], **ทิพย์ธิดา แก้วตาทิพย์**[b]

Wassana Narasri[a,*], Thipthida Kaewtathip[b]

[a] ฝ่ายโภชนาการและสุขภาพ สถาบันค้นคว้าและพัฒนาผลิตภัณฑ์อาหาร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

[b] ฝ่ายเคมีและกายภาพอาหาร สถาบันค้นคว้าและพัฒนาผลิตภัณฑ์อาหาร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

[a] Department of Nutrition and Health, Institute of Food Research and Product Development, Kasetsart University, Bangkok 10900, Thailand

[b] Department of Food Chemistry and Physics, Institute of Food Research and Product Development, Kasetsart University, Bangkok 10900, Thailand

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

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาผลิตภัณฑ์ขนมขบเคี้ยวปราศจากกลูเตนผสมผักโขมและเสริมใยอาหาร โดยหาอัตราส่วนของแป้งข้าวเจ้าต่อแป้งข้าวเหนียว และปริมาณแซนแทนกัมที่เหมาะสม พบว่า มีอัตราส่วนของแป้งข้าวเจ้าต่อแป้งข้าวเหนียว เท่ากับ 50:50 โดยน้ำหนัก ปริมาณผงผักโขม อินูลิน และแซนแทนกัมร้อยละ 6, 15 และ 1 ของน้ำหนักแป้งตามลำดับ ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีความชื้นร้อยละ 3.89 ค่าวอเตอร์แอคติวิตี้เท่ากับ 0.28 ค่าความสว่าง (L*) 55.10 ค่าความเป็นสีเขียว (a*) -4.37 ค่าความเป็นสีเหลือง (b*) 29.71 ค่าความแข็ง 18.44 นิวตัน ค่าความหนาแน่น 0.47 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร มีคะแนนความชอบโดยรวมอยู่ในระดับชอบปานกลาง (7.1 คะแนน) ฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระที่ทดสอบด้วยวิธี DPPH และ FRAP มีค่าเท่ากับ 0.32 และ 0.78 มิลลิกรัมสมมูลของโทรลอกซ์ต่อกรัมของผลิตภัณฑ์ขนมขบเคี้ยวตามลำดับ ขนมขบเคี้ยวหนึ่งหน่วยบริโภค (30 กรัม) มีปริมาณใยอาหารหยาบ 1.2 กรัม และใยอาหารทั้งหมด 2.68 กรัม ซึ่งเป็นการเพิ่มมูลค่าของขนมขบเคี้ยวปราศจากกลูเตน และส่งผลดีต่อสุขภาพของผู้บริโภค

คำสำคัญ: ขนมขบเคี้ยวปราศจากกลูเตน, แป้งข้าวเจ้า, แป้งข้าวเหนียว, ผงผักโขม, ใยอาหาร

Abstract

This research aimed to develop a gluten-free snack product fortified with spinach and dietary fiber. The study focused on determining the optimal ratio of rice flour to glutinous rice flour and the appropriate amount of xanthan gum. The results showed that the optimal formulation consisted of a rice flour to glutinous rice flour ratio of 50:50 with spinach powder, inulin and xanthan gum at 6%, 15% and 1% of flour weight, respectively. The snack product had a moisture content of 3.89%, water activity of 0.28 and color values of L* = 55.10, a* = -4.37 and b* = 29.71. The hardness and bulk density were 18.44 N and 0.47 g/cm^3, respectively. Sensory evaluation revealed that the product achieved an overall acceptability score of 7.1, corresponding to a moderate liking level. The antioxidant activities, determined using the DPPH and FRAP assays, were 0.32 and 0.78 mg Trolox equivalents per gram of snack product, respectively. One serving of the snack (30 g) contained 1.2 g of crude dietary fiber and 2.68 g of total dietary fiber. This represents an added value for gluten-free snack products and contributes positively to consumer health.

Keywords: Dietary fiber, Gluten-free snack, Glutinous rice flour, Rice flour, Spinach powder

คำนำ

กลูเตนเป็นโปรตีนที่พบในข้าวสาลี ข้าวไรย์ และข้าวบาร์เล่ย์ จึงใช้แป้งทางเลือก เช่น แป้งข้าวเจ้า แป้งกล้วยดิบ แป้งข้าวโพด และแป้งมันเทศ ผลิตภัณฑ์อาหารปราศจากกลูเตนยังมีช่องว่างทางโภชนาการ โดยเฉพาะโปรตีน ใยอาหาร วิตามิน และแร่ธาตุ ขณะที่ขนมขบเคี้ยวในท้องตลาดมีน้ำตาล ไขมัน และค่าดัชนีน้ำตาลสูง ผู้บริโภคจึงหันมาสนใจขนมขบเคี้ยวทางเลือกที่มีคุณค่าทางโภชนาการ โดยเฉพาะผลิตภัณฑ์ที่มีสารต้านอนุมูลอิสระและใยอาหารเพื่อส่งเสริมสุขภาพ ผักโขม (*Spinacia oleracea L.*) เป็นผักใบเขียวเข้ม จัดอยู่ในวงศ์ *Chenopodiaceae* (Li et al., 2019) ที่บริโภคอย่างแพร่หลายทั่วโลก มีสารพฤกษเคมีและสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพ เช่น เบตาแคโรทีน ลูทีน ซีแซนทีน วิตามินซี ฟลาโวนอยด์ และพอลิฟีนอล (Salehi et al., 2019; Manzoor et al., 2020) รวมถึงใยอาหารและแร่ธาตุสำคัญ บิสกิตที่พัฒนาจากแป้งสาลี แป้งถั่วลูกไก่และผงผักโขมในอัตราส่วน 45:45:10 โดยน้ำหนัก มีคุณค่าทางโภชนาการสูง โดยอุดมด้วยโปรตีน ใยอาหาร แร่ธาตุ และสารต้านอนุมูลอิสระ (Jyoti, 2022) อินูลินเป็นใยอาหารที่ละลายน้ำได้ ไม่ถูกย่อยในระบบทางเดินอาหารและไม่ให้พลังงาน แต่ถูกย่อยด้วยแบคทีเรียในลำไส้ใหญ่ จึงมีสมบัติพรีไบโอติกและช่วยปรับปรุงเนื้อสัมผัสของอาหาร โดยเฉพาะการพองตัว ทั้งนี้ การทดแทนแป้งสาลีด้วยอินูลินในขนมขบเคี้ยวชนิดพองกรอบช่วยเพิ่มการขยายตัวของผลิตภัณฑ์ (Brennan et al, 2008)

ผลิตภัณฑ์ขนมขบเคี้ยวปราศจากกลูเตนมีคุณภาพด้านเนื้อสัมผัสลดลง โดยเฉพาะความแข็งที่ส่งผลต่อการยอมรับทางประสาทสัมผัส วัตถุประสงค์ของการศึกษานี้ เพื่อพัฒนาผลิตภัณฑ์ขนมขบเคี้ยวปราศจากกลูเตนผสมผักโขมและเสริมใยอาหาร โดยใช้แป้งข้าวเจ้าและแป้งข้าวเหนียวเป็นวัตถุดิบหลัก เพิ่มสารต้านอนุมูลอิสระจากผักโขม และเสริมใยอาหารจากอินูลิน และปรับปรุงคุณภาพของผลิตภัณฑ์โดยใช้แซนแทนกัม ซึ่งจะเป็นแนวทางในการยกระดับคุณค่าทางโภชนาการ และตอบสนองความต้องการด้านสุขภาพของผู้บริโภค

อุปกรณ์และวิธีการ

1. การเตรียมวัตถุดิบและวิเคราะห์คุณภาพ

1.1 การเตรียมผงผักโขม

ล้างผักโขมให้สะอาด ใช้เฉพาะส่วนใบและตัดสั้นประมาณ 1 นิ้ว ลวกในน้ำเดือด 1 นาที แล้วแช่น้ำเย็นทันที พักให้สะเด็ดน้ำ ทำแห้งด้วยตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส นาน 8 ชั่วโมง บดละเอียด ร่อนผ่านตะแกรงขนาด 80 เมช บรรจุใส่ถุงอลูมิเนียมฟอยด์ ปิดสนิท เก็บรักษาไว้ที่อุณหภูมิห้องเพื่อนำไปวิเคราะห์คุณภาพ ดังนี้

1.1.1 คุณภาพทางเคมีของผงผักโขม

ปริมาณความชื้น ตามวิธีการของ AOAC (2000) ปริมาณใยอาหารหยาบ ตามวิธีการของ AOAC (2000) ค่าวอเตอร์แอคติวิตี้ วัดด้วยเครื่องยี่ห้อ Novasina รุ่น LabMaster Aw เตรียมตัวอย่างเป็นผงละเอียด (3 ซ้ำ)

ทดสอบฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระด้วยวิธี DPPH Radical Scavenging Activity (ดัดแปลงจาก Techo et al., 2019) คำนวณ DPPH scavenging activity (%) ตาม Equation 1:

$$\text{DPPH scavenging activity (\%)} = \frac{(A_{control} - A_{sample})}{A_{control}} \times 100 \quad (1)$$

Where; $A_{control}$ and A_{sample} represent the absorbance value of DPPH and sample solutions, respectively.

ทดสอบฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระด้วย Ferric reducing antioxidant power (FRAP) assay (ดัดแปลงจาก Kubola and Siriamornpun, 2008) สร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นต่าง ๆ ของสารละลายมาตรฐานโทรลอกซ์กับค่าการดูดกลืนแสง จะได้กราฟมาตรฐาน ค่าที่ได้อยู่ในหน่วยมิลลิกรัมสมมูลของโทรลอกซ์ต่อกรัมของตัวอย่าง

1.1.2 คุณภาพทางกายภาพของผงผักโขม

วัดค่าสีระบบ CIE L*a*b* บันทึกค่า L* a* และ b* โดยใช้เครื่องวัดค่าสี ยี่ห้อ Datacolor รุ่น Spectraflash SF600PLUS

1.2 วิเคราะห์ปริมาณแอมิโลสของแป้งข้าวเจ้า และแป้งข้าวเหนียว

วิเคราะห์ปริมาณแอมิโลส ตามวิธีการของ Juliano (1971) วัดค่า 3 ซ้ำ

2. การศึกษาอัตราส่วนของแป้งข้าวเจ้าต่อแป้งข้าวเหนียวที่มีผลต่อคุณภาพของขนมขบเคี้ยวปราศจากกลูเตนผสมผักโขม

ทำการศึกษาอัตราส่วนระหว่างแป้งข้าวเจ้าและแป้งข้าวเหนียวที่มีผลต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์ โดยอัตราส่วนแป้งข้าวเจ้าต่อแป้งข้าวเหนียวเท่ากับ 100:0, 75:25, 50:50, 25:75 และ 0:100 โดยน้ำหนัก ปริมาณแป้งผสม (2 ชนิดรวมกัน) เท่ากับร้อยละ 54 และผงผักโขมร้อยละ 6 กำหนดให้ส่วนผสมอื่น ๆ มีปริมาณคงที่ ได้แก่ สารขึ้นฟู แซนแทนกัม น้ำตาลทราย และเกลือเท่ากับร้อยละ 1.5, 0.2, 10 และ 0.2 ตามลำดับ มีปริมาณของเหลว (น้ำและไข่ไก่ทั้งฟอง) เท่ากับร้อยละ 21 และน้ำมันพืชเท่ากับร้อยละ 7.1 รวมน้ำหนักของส่วนผสมทั้งหมด 100 กรัม กรรมวิธีการผลิตเริ่มด้วยการนำส่วนผสมใส่เครื่องผสมอาหาร (Kitchen Aid) นวดให้เป็นเนื้อเดียวกัน นาน 2 นาที ใส่ภาชนะปิดสนิทและพักที่อุณหภูมิห้อง 30 นาที จากนั้นชั่งแป้งก้อนละ 2 กรัม คลึงเป็นก้อนกลมเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.5 เซนติเมตร เรียงลงถาดและอบที่อุณหภูมิ 150 °C เป็นเวลา 20 นาที พักให้เย็น จะได้ขนมขบเคี้ยวน้ำหนักรวม 63 กรัม บรรจุในถุงอะลูมิเนียมฟอยด์และนำไปวิเคราะห์คุณภาพ

2.1 คุณภาพทางเคมีของขนมขบเคี้ยว

ปริมาณความชื้น และค่าวอเตอร์แอคติวิตี้ (3 ซ้ำ) ตามวิธีการข้อที่ 1.1.1

2.2 คุณภาพทางกายภาพของขนมขบเคี้ยว

วัดค่าสีระบบ CIE L*a*b* ตามวิธีการข้อที่ 1.1.2 ลักษณะเนื้อสัมผัส วัดค่าความแข็ง ด้วยเครื่อง Texture Analyzer ยี่ห้อ Stable Micro Systems รุ่น TA.XT plus โดยใช้หัววัด P/50 กดลงไปเป็นระยะทางร้อยละ 50 ของความสูงชิ้นตัวอย่าง ด้วยความเร็วในการทดสอบ 1 มล./ นาที (10 ซ้ำ) บันทึกค่าแรงสูงสุดมีหน่วยเป็นนิวตัน (N) และวัดค่าความหนาแน่น (bulk density) ตามวิธีการของ Nur Adibah et al, (2024) โดยใช้วิธีการวัดแบบการแทนที่ของเมล็ดงา (5 ซ้ำ)

2.3 คุณภาพทางประสาทสัมผัสของขนมขบเคี้ยว

นำขนมขบเคี้ยวที่ผลิตได้มาประเมินความชอบด้วยวิธีการให้คะแนนความชอบ (9-point hedonic scale) กับผู้ทดสอบที่ไม่ผ่านการฝึกฝน จำนวน 30 คน ประเมินคุณลักษณะด้านสี กลิ่น รสชาติ เนื้อสัมผัส และความชอบโดยรวม

3. การศึกษาผลของแซนแทนกัมต่อคุณภาพของขนมขบเคี้ยวปราศจากกลูเตนผสมผักโขมและเสริมใยอาหาร

นำขนมขบเคี้ยวสูตรที่ผ่านการคัดเลือกโดยใช้เกณฑ์คะแนนความชอบด้านเนื้อสัมผัส และความชอบโดยรวมสูงที่สุดในข้อ 2 มาศึกษาปริมาณแซนแทนกัมทดแทนแป้งผสม 4 ระดับ คือ ร้อยละ 0, 1, 2 และ 3 การเสริมใยอาหารในการศึกษาครั้งนี้ใช้อินูลิน (มีค่า degree of polymerization; DP ≥ 14 มีปริมาณอินูลินมากกว่าร้อยละ 94.7 น้ำตาล (ซูโครส กลูโคสและฟรุคโตส) น้อยกว่าร้อยละ 5.2 จากบริษัทกรุงเทพเคมี จำกัด) ทั้งนี้ปริมาณอินูลินที่ใช้ในสูตรมาจากการนำค่าคุณภาพของปริมาณอินูลินร้อยละ 94.7 มาใช้คำนวณ จากน้ำหนักส่วนผสมทั้งหมด 100 กรัม มีปริมาณแป้งผสมร้อยละ 54 ผงผักโขมร้อยละ 6 และแทนที่แป้งผสมด้วยอินูลินในระดับร้อยละ 15 ขนมขบเคี้ยวที่ได้มีน้ำหนักประมาณ 63 กรัม จะมีอินูลินประมาณ 8.52 กรัม หรือขนมขบเคี้ยวหนึ่งหน่วยบริโภค 30 กรัม จะมีอินูลินประมาณ 4 กรัม โดยเป็นปริมาณที่สามารถก่อให้เกิดประโยชน์ต่อสุขภาพได้ เนื่องจากการบริโภคอินูลินในปริมาณ 4–5 กรัมต่อวัน จะมีฤทธิ์เป็นพรีไบโอติก (Rao, 2001) สำหรับส่วนผสมอื่น ๆ กำหนดให้มีปริมาณคงที่และกรรมวิธีการผลิตตามการศึกษาข้อที่ 2 จากนั้นนำมาวิเคราะห์คุณภาพดังนี้

3.1 คุณภาพทางเคมีของขนมขบเคี้ยว

ปริมาณความชื้น และค่าวอเตอร์แอคติวิตี้ ตามวิธีการข้อที่ 1.1.1

3.2 คุณภาพทางกายภาพของขนมขบเคี้ยว

วัดค่าสีระบบ CIE L*a*b* ตามวิธีการข้อที่ 1.1.2 ลักษณะเนื้อสัมผัส วัดค่าความแข็ง และวัดค่าความหนาแน่น (Bulk density) ตามวิธีการข้อที่ 2.2

3.3 คุณภาพทางประสาทสัมผัสของขนมขบเคี้ยว ตามวิธีการข้อที่ 2.3

4. การวิเคราะห์คุณภาพของขนมขบเคี้ยวที่พัฒนาได้

นำขนมขบเคี้ยวหน่วยการทดลองที่มีค่าเฉลี่ยของคะแนนความชอบโดยรวมสูงที่สุด วิเคราะห์ปริมาณใยอาหารหยาบ ตามวิธีการของ AOAC (2000) ปริมาณใยอาหารทั้งหมด (ใยอาหารที่ละลายน้ำได้ และใยอาหารที่ไม่ละลายน้ำ) โดยใช้ Total Dietary Fiber Assay Kit ของ Megazyme และทดสอบฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ ด้วยวิธี DPPH Radical Scavenging Activity และวิธี Ferric Reducing Antioxidant Power (FRAP) ตามวิธีการข้อที่ 1.1.1

5. การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

การวิเคราะห์ความแปรปรวนของข้อมูล (ANOVA) และเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยด้วยวิธี Duncan's New Multiple Range Test โดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูป SPSS for Windows Ver.12.0 (SPSS Inc., Thailand)

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

1. คุณภาพของวัตถุดิบ

ผงผักโขมมีความชื้น ร้อยละ 4.84±0.01 ใยอาหารหยาบร้อยละ 7.94±1.38 ค่าวอเตอร์แอคติวิตี้ เท่ากับ 0.25±0.73 จากการทดสอบฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระด้วยวิธี DPPH และวิธี FRAP มีค่าเท่ากับ 0.43±0.01 และ 3.2±0.07 มิลลิกรัมสมมูลของโทรลอกซ์ต่อกรัมของผงผักโขม ตามลำดับ มีลักษณะสีเขียวเข้ม จากการวัดค่าสี พบว่า มีค่าความสว่าง (L*) 39.95±0.75 ค่าความเป็นสีเขียว (a*) -7.00±0.27 และค่าความเป็นสีเหลือง (b*) 12.20±0.87 แป้งข้าวเจ้าและแป้งข้าวเหนียวมีปริมาณแอมิโลสเท่ากับร้อยละ 33.15±1.40 และ 6.40±0.86 ตามลำดับ

2. การศึกษาอัตราส่วนของแป้งข้าวเจ้าต่อแป้งข้าวเหนียวที่มีผลต่อคุณภาพของขนมขบเคี้ยวปราศจากกลูเตนผสมผักโขม

ผลของอัตราส่วนแป้งข้าวเจ้าและแป้งข้าวเหนียวต่อคุณภาพของขนมขบเคี้ยวปราศจากกลูเตนผสมผักโขม (Table 1) พบว่า มีปริมาณความชื้นอยู่ในช่วงร้อยละ 3.51–3.70 ค่าวอเตอร์แอคติวิตี้อยู่ในช่วงเท่ากับ 0.25–0.29 อัตราส่วนของแป้งที่แตกต่างกันมีผลต่อค่าสี (L* a* b*) ของผลิตภัณฑ์อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) โดยค่าความสว่าง (L*) อยู่ในช่วง 53.84–57.39 ค่าความเป็นสีเขียว (a*) อยู่ในช่วง -8.14 ถึง -7.64 และค่าความเป็นสีเหลือง (b*) อยู่ในช่วง 31.08–32.19 เมื่อพิจารณาค่าความแข็งและค่าความหนาแน่นของผลิตภัณฑ์ การเพิ่มปริมาณแป้งข้าวเหนียวมีผลทำให้ค่าความแข็งและค่าความหนาแน่นลดลง อาจเนื่องจากคุณสมบัติของแป้งข้าวเหนียวมีปริมาณแอมิโลเพคตินสูงและมีปริมาณแอมิโลสต่ำ โดยแป้งที่มีแอมิโลเพคตินสูงจะมีโครงสร้างที่หลวม ทำให้น้ำสามารถทำปฏิกิริยากับแป้งได้ง่ายและขยายตัวได้ดี อีกทั้งเกิดการคืนตัวของแป้งต่ำ ขนมขบเคี้ยวที่ได้จากอัตราส่วนแป้งข้าวเหนียวที่เพิ่มขึ้น จึงมีผลให้ผลิตภัณฑ์ขยายตัวได้ดีและมีความหนาแน่นลดลง ซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษาของ Kraboun et al., (2020) พบว่า คุกกี้ปราศจากกลูเตนที่ทำจากแป้งข้าวไรส์เบอรี่ผสมแป้งข้าวเหนียว อัตราส่วน 25:75 มีค่าความแข็งลดลง

จากการทดสอบทางประสาทสัมผัส ดังแสดงใน Table 2 พบว่า อัตราส่วนของแป้งที่แตกต่างกันไม่มีผลต่อค่าคะแนนความชอบด้านสี กลิ่น และรสชาติ ($p > 0.05$) แต่มีผลต่อคะแนนความชอบด้านเนื้อสัมผัสและความชอบโดยรวม อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) เมื่อเพิ่มปริมาณแป้งข้าวเหนียวทำให้ค่าความแข็งและความหนาแน่นลดลง (Table 1) มีคะแนนความชอบด้านเนื้อสัมผัสและความชอบโดยรวมเพิ่มขึ้น โดยอัตราส่วนของแป้งข้าวเจ้าต่อแป้งข้าวเหนียวที่มีผลให้คะแนนความชอบด้านเนื้อสัมผัสและความชอบโดยรวมสูงที่สุด คือ 50:50 โดยน้ำหนัก

Table 1 Moisture content, water activity, color, hardness and bulk density of gluten-free spinach snack products.

Quality	Rice flour to glutinous rice flour				
	100:0	75:25	50:50	25:75	0:100
Moisture content (%)	3.51±0.09^{b}	3.62±0.00^{ab}	3.57±0.02^{b}	3.70±0.02^{a}	3.63±0.11^{ab}
Water activity	0.29±0.01^{a}	0.26±0.00^{b}	0.29±0.04^{a}	0.25±0.01^{b}	0.28±0.01^{a}
Color L*	53.84±2.38^{b}	55.17±0.75^{ab}	56.06±1.87^{a}	57.14±1.49^{a}	57.39±0.77^{a}
a*	-8.04±0.36^{a}	-8.14±0.26^{a}	-7.72±0.17^{ab}	-7.64±0.16^{ab}	-7.65±0.33^{ab}
b*	31.08±1.30^{b}	32.19±0.80^{a}	31.44±1.56^{ab}	32.02±0.94^{a}	31.57±1.85^{ab}
Hardness (N)	33.04±2.61^{a}	30.11±2.67^{ab}	25.88±11.67^{b}	20.42±13.64^{bc}	16.50±23.59^{c}
Bulk density (g/cm^{3})	0.87±1.20^{a}	0.84±0.85^{a}	0.75±1.19^{b}	0.69±1.48^{bc}	0.67±1.30^{c}

*Means±SD in the same row followed by different superscripts are significantly different ($p \leq 0.05$).

Table 2 Sensory characteristic of gluten-free spinach snack products.

Attribute	Rice flour to glutinous rice flour				
	100:0	75:25	50:50	25:75	0:100
Color^{ns}	7.1±1.1	7.0±0.7	7.2±1.1	6.8±1.3	7.0±1.5
Flavor^{ns}	6.8±1.2	7.1±1.0	6.9±0.9	6.8±0.7	6.9±0.9
Taste^{ns}	6.8±1.0	6.7±1.2	6.8±1.4	6.8±2.1	6.6±1.0
Texture	6.3±0.4^{bc}	6.6±1.0^{ab}	7.0±1.2^{a}	6.8±1.7^{a}	6.2±1.4^{c}
Overall liking	6.2±2.0^{bc}	6.5±0.6^{b}	7.0±1.1^{a}	6.7±0.8^{ab}	6.0±0.8^{c}

*Means±SD in the same row followed by different superscripts are significantly different ($p \leq 0.05$).

*^{ns} not significant.

3. การศึกษาผลของแซนแทนกัมต่อคุณภาพของขนมขบเคี้ยวปราศจากกลูเตนผสมผักโขมและเสริมใยอาหาร

การศึกษาผลของปริมาณแซนแทนกัมทดแทนแป้งผสมที่แตกต่างกัน (ร้อยละ 0, 1, 2 และ 3 ของน้ำหนักแป้ง) ต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์ขนมขบเคี้ยวปราศจากกลูเตนผสมผักโขมที่เสริมใยอาหารจากอินูลิน ดังแสดงใน Table 3 พบว่าปริมาณแซนแทนกัมไม่มีผลต่อปริมาณความชื้น (3.84–3.91) ค่าวอเตอร์แอคติวิตี้ (0.26–0.28) และค่าความเป็นสีเหลือง (b*) (29.71–31.65) อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$) อย่างไรก็ตาม การเพิ่มปริมาณแซนแทนกัมส่งผลให้ค่าความสว่าง (L*) ค่าความเป็นสีเขียว (a*) ค่าความแข็ง และค่าความหนาแน่นของผลิตภัณฑ์เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) ผลิตภัณฑ์ที่ไม่เติมแซนแทนกัม (ร้อยละ 0) มีค่าความแข็ง 25.76 N เมื่อเติมแซนแทนกัมร้อยละ 1 ค่าความแข็งลดลงเป็น 18.44 N เมื่อเพิ่มปริมาณแซนแทนกัมร้อยละ 2 และ 3 มีผลให้ค่าความแข็งเพิ่มเป็น 52.60 และ 73.50 N ตามลำดับ สอดคล้องกับการศึกษาของ Lazaridou et al, (2007) พบว่า โครงสร้างของโด (Dough) ที่เสริมแซนแทนกัม (ร้อยละ 2) มีความแข็งแรงมากขึ้น เนื่องจากปริมาณแซนแทนกัมที่มากขึ้นจะจำกัดการขยายตัวฟองอากาศในระหว่างการหมักและการอบ ส่งผลให้ปริมาตรรูพรุนของขนมปังลดลง และทำให้ความแข็งของเนื้อขนมปังเพิ่มขึ้น สำหรับค่าความหนาแน่นของผลิตภัณฑ์ที่ไม่เติมแซนแทนกัม (ร้อยละ 0) มีค่าสูงที่สุด 0.73 g/cm^3 การเติมแซนแทนกัมร้อยละ 1 ทำให้ค่าความหนาแน่นลดลงเหลือ 0.47 g/cm^3 ($p \leq 0.05$) แสดงให้เห็นว่าผลิตภัณฑ์มีการขยายตัวที่ดีขึ้น เมื่อเพิ่มปริมาณแซนแทนกัมเป็นร้อยละ 2 และ 3 ค่าความหนาแน่นเพิ่มขึ้นเป็น 0.54 และ 0.67 g/cm^3 ตามลำดับ

จากภาพตัดขวางของผลิตภัณฑ์ ดังแสดงใน Fig. 1 พบความแตกต่างอย่างชัดเจน ตัวอย่างที่มีแซนแทนกัมร้อยละ 1 (B) มีโครงสร้างที่ขยายตัวมากที่สุดพร้อมรูพรุนจำนวนมากและมีขนาดใหญ่ ในขณะที่ตัวอย่างที่มีแซนแทนกัมร้อยละ 2 และ 3 (C และ D) แสดงโครงสร้างภายในของผลิตภัณฑ์ที่มีรูพรุนน้อยและมีความหนาแน่นสูง ตามลำดับ

Table 3 Moisture content, water activity, color, hardness and bulk density of gluten-free spinach snack products fortified with dietary fiber.

Quality	Xanthan gum			
	0%	1%	2%	3%
Moisture content (%)^{ns}	3.84±0.16	3.89±0.00	3.91±0.10	3.88±0.06
Water activity^{ns}	0.28±0.10	0.28±0.03	0.26±0.00	0.27±0.02
Color L*	56.35±0.60^{ab}	55.10±1.49^{b}	55.96±2.07^{ab}	57.64±1.07^{a}
a*	-4.10±0.15^{b}	-4.37±0.24^{b}	-4.30±0.26^{b}	-5.10±0.28^{a}
b*^{ns}	31.65±1.05	29.71±1.25	30.60±1.04	31.64±2.53
Hardness (N)	25.76±8.42^{c}	18.44±8.12^{c}	52.60±5.42^{b}	73.50±12.77^{a}
Bulk density (g/cm^3)	0.73±0.86^{a}	0.47±1.26^{bc}	0.54±0.70^{b}	0.67±1.00^{ab}

*Means±SD in the same row followed by different superscripts are significantly different ($p \leq 0.05$).
*^{ns} not significant.

\

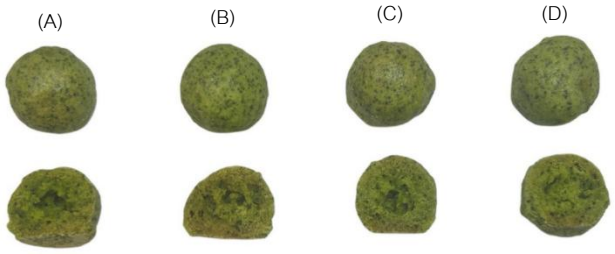


Fig. 1 Gluten-free spinach snack products fortified with dietary fiber containing different levels of xanthan gum: (A) 0%, (B) 1%, (C) 2%, and (D) 3%

จากการทดสอบทางประสาทสัมผัสของขนมขบเคี้ยวปราศจากกลูเตนผสมผักโขมและเสริมใยอาหารที่ใช้ปริมาณแซนแทนกัมที่แตกต่างกัน ดังแสดงใน Table 4 พบว่า ปริมาณแซนแทนกัมไม่มีผลต่อคุณลักษณะทางประสาทสัมผัสด้านสี และกลิ่นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$) แต่ปริมาณแซนแทนกัมมีผลต่อคะแนนความชอบด้านรสชาติ เนื้อสัมผัส และความชอบโดยรวม ($p \leq 0.05$) การใช้แซนแทนกัมร้อยละ 1 มีคะแนนความชอบด้านเนื้อสัมผัสและความชอบโดยรวมสูงที่สุด 7.3 และ 7.1 คะแนน ตามลำดับ สำหรับการใช้แซนแทนกัมร้อยละ 2 และร้อยละ 3 ทำให้ความชอบด้านเนื้อสัมผัสและความชอบโดยรวมมีคะแนนลดลง เพราะผลิตภัณฑ์มีค่าความแข็งเพิ่มขึ้น จากภาพตัดขวาง Fig. 1 (C และ D) ผลิตภัณฑ์มีรูพรุนน้อยและมีความหนาแน่นสูง

Table 4 Sensory characteristic of gluten-free spinach snack products fortified with dietary fiber.

Attribute	Xanthan gum			
	0%	1%	2%	3%
Color^{ns}	7.1±0.7	7.0±1.2	6.8±1.2	6.9±0.5
Flavor^{ns}	6.8±0.8	6.9±1.3	6.8±0.6	7.0±1.3
Taste	6.7±1.2^{ab}	7.0±1.1^{a}	6.5±1.2^{b}	6.7±1.5^{ab}
Texture	6.9±1.5^{b}	7.3±0.5^{a}	6.6±0.8^{bc}	6.4±1.5^{bc}
Overall liking	6.8±0.7^{bc}	7.1±0.7^{a}	6.5±0.5^{c}	6.2±1.1^{c}

*Means±SD in the same row followed by different superscripts are significantly different ($p \leq 0.05$).

*^{ns} not significant.

4. การวิเคราะห์คุณภาพของขนมขบเคี้ยวที่พัฒนาได้

ขนมขบเคี้ยวที่พัฒนาได้มีปริมาณใยอาหารหยาบร้อยละ 3.97±0.85 ใยอาหารทั้งหมดร้อยละ 8.92±0.22 มาจากใยอาหารที่ละลายน้ำได้ร้อยละ 6.20±0.17 และใยอาหารที่ไม่ละลายน้ำร้อยละ 2.72±0.45 ขนมขบเคี้ยวหนึ่งหน่วยบริโภค 30 กรัม จะมีใยอาหารหยาบ 1.2 กรัม และใยอาหารทั้งหมด 2.68 กรัม ซึ่งปริมาณใยอาหารทั้งหมดมีค่าสูงกว่า ร้อยละ 10 ของ Thai RDIs สำหรับใยอาหาร คือ 2.5 กรัม (กระทรวงสาธารณสุข, 2566) ดังนั้นผลิตภัณฑ์นี้สามารถกล่าวอ้างได้ว่าเสริมใยอาหาร ส่วนฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระจากการทดสอบด้วยวิธี DPPH และวิธี FRAP มีค่าเท่ากับ 0.32±0.01 และ 0.78±0.04 มิลลิกรัมสมมูลของโทรลอกซ์ต่อกรัมของผลิตภัณฑ์ขนมขบเคี้ยว ตามลำดับ

สรุป

ขนมขบเคี้ยวปราศจากกลูเตนที่พัฒนาได้มีอัตราส่วนของแป้งข้าวเหนียวต่อแป้งข้าวเจ้า เท่ากับ 50:50 ผงผักโขม อินูลิน และแซนแทนกัมปริมาณที่เหมาะสมร้อยละ 6, 15 และ 1 ของน้ำหนักแป้ง ตามลำดับ ผลิตภัณฑ์มีค่าความแข็งและค่าความหนาแน่นต่ำ มีโครงสร้างที่ขยายตัวมีรูพรุนจำนวนมาก ขนมขบเคี้ยวมีคุณค่าทางโภชนาการด้านใยอาหารที่สามารถกล่าวอ้างได้ว่าเสริมใยอาหาร และมีอินูลินประมาณ 4 กรัม (จากการคำนวณ) ที่มีฤทธิ์เป็นพรีไบโอติก มีประโยชน์ต่อสุขภาพ มีฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ คุณภาพทางประสาทสัมผัสมีคะแนนความชอบโดยรวมเฉลี่ยอยู่ในระดับชอบปานกลาง (7.1 คะแนน) งานวิจัยนี้เป็นแนวทางการเสริมคุณค่าทางโภชนาการ (ใยอาหาร พรีไบโอติก สารต้านอนุมูลอิสระ) ของผลิตภัณฑ์ขนมขบเคี้ยวปราศจากกลูเตน ซึ่งเป็นการเพิ่มมูลค่าให้กับผลิตภัณฑ์ที่ส่งผลดีต่อสุขภาพ และสร้างความหลากหลายให้กับผลิตภัณฑ์ สามารถนำไปพัฒนาต่อยอดในด้านรสชาติ และกระบวนการผลิตเพื่อเพิ่มโอกาสในการผลิตสู่เชิงพาณิชย์

เอกสารอ้างอิง

กระทรวงสาธารณสุข. 2566. ประกาศกระทรวงสาธารณสุข (ฉบับที่ 445) พ.ศ. 2566 เรื่อง ฉลากโภชนาการ. https://food.fda.moph.go.th/food-law/announ-moph-445, 18 สิงหาคม 2568.

AOAC. 2000. Official methods of analysis. 15th ed. Association of Official Analytical Chemists, Arlington, USA.

Brennan, M.A., Monro, J.A., Brennan, C.S. 2008. Effect of inclusion of soluble and insoluble fibres into extruded breakfast cereal products made with reverse screw configuration. Int. J. Food Sci. Technol. 43: 2278–2288. doi.org/10.1111/j.1365-2621.2007.01545.x

Juliano, B.O. 1971. A simplified assay for milled-rice amylose. Cereal Sci. Today 16: 334–340.

Jyoti, Sangwan, V., Jood, S. 2022. Sensory and nutritional analysis of spinach powder fortified biscuits. Curr. J. Appl. Sci. Technol. 41: 10–16. doi.org/10.9734/cjast/2022/v41i1016532

Kraboun, K., Punumong, P., Rojsuntornkitti, K., Kongbangkerd, T., Tantivititapong, T., Junthong, N., Roipomma, P., Saimek, M. 2020. Effect of riceberry rice flour and glutinous rice flour on some qualities of gluten-free cookies. Rajabhat Agric. 19: 20–27.

Kubola, J., Siriamornpun, S. 2008. Phenolic contents and antioxidant activities of bitter gourd (*Momordica charantia L.*) leaf stem and fruit fraction extracts in vitro. Food Chem. 110: 881–890. doi.org/10.1016/j.foodchem.2008.02.076

Lazaridou, A., Duta, D., Papageorgiou, M., Belc, N., Biliaderis, C.G. 2007. Effects of hydrocolloids on dough rheology and bread quality parameters in gluten-free formulations. J. Food Eng. 79: 1033–1047. doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2006.03.032

Li, S.F., Guo, Y.J., Li, J.R., Zhang, D.X., Wang, B.X., Li, N., Deng, C.L., Gao, Y. 2019. The landscape of transposable elements and satellite DNAs in the genome of a dioecious plant spinach (*Spinacia oleracea L.*). Mobile DNA 10: 3. doi.org/10.1186/s13100-019-0140-3

Manzoor, M.F., Ahmed, Z., Ahmad, N., et al. 2020. Novel processing techniques and spinach juice: Quality and safety improvements. J. Food Sci. 85: 1018–1026. doi.org/10.1111/1750-3841.15087

Megazyme. 2018. Total dietary fiber assay kit. Megazyme International, Ireland.

Nur Adibah, L., Nor Afizah, M., Wan Zunairah, W.I., Syed Muhammad, S.K. 2024. Development of fibre-rich okara-based expanded snack via single screw extrusion. Food Res. 8: 48–56. doi.org/10.26656/fr.2017.8(1).1038

Salehi, B., Tumer, T.B., Ozleyen, A., Peron, G., Dall'Acqua, S., Rajkovic, J., Labanca, F., Milella, L. 2019. Plants of the genus spinacia: From bioactive molecules to food and phytopharmacological applications. Trends Food Sci. Technol. 88: 260–273. doi.org/10.1016/j.tifs.2019.03.002

Techo, J., Soponronnarit, S., Devahastin, S., Wattanasiritham, L.S., Thuwapanichayanan, R., Prachayawarakorn, S. 2019. Effects of heating method and temperature in combination with hypoxic treatment on γ-aminobutyric acid, phenolics content and antioxidant activity of germinated rice. Int. J. Food Sci. Technol. 54: 1330–1341. doi.org/10.1111/ijfs.14036

Effect of peppermint oil nanoemulsion on surface wettability of vegetables

Dalluchawan Kalantagaphan[a], Kanithaporn Vangnai[a], Pitirat Klintham[b], Sasitorn Tongchitpakdee[a,*]

[a] Department of Food Science and Technology, Faculty of Agro-Industry, Kasetsart University, Bangkok 10900, Thailand

[b] School of Integrated Science, Kasetsart University, Bangkok 10900, Thailand

*Corresponding author. E-mail address: sasitorn.ch@ku.th

Abstract

Surface wettability plays an important role in the effectiveness of vegetable washing by influencing the spreading and interaction of washing solutions on plant surfaces. This study examined the effect of peppermint oil nanoemulsion (PON) on the surface wettability of vegetables with different surface characteristics, including yard long bean, bok choy, Chinese kale, and red chili. Vegetables were washed with peppermint oil nanoemulsion, a surfactant solution, or filtered water. Wettability was evaluated by measuring contact angles, and data were analyzed using two-way ANOVA. Dynamic light scattering analysis showed that PON droplets had a mean size of 241±6.58 nm with a low polydispersity index (0.158), indicating good stability. The zeta potential value of -39.33 mV further confirmed nanoemulsion stability. Vegetable type and washing formulation significantly affected contact angle values ($p < 0.05$). Washing solutions containing surfactants reduced contact angles compared with filtered water. PON provided greater wettability improvement than the surfactant solution for bok choy and Chinese kale, reducing contact angles by 13–56%.

Improved wettability from PON suggests enhanced spreading and penetration of washing solutions, supporting its potential application in vegetable washing systems.

Keywords: Contact Angle, Peppermint oil nanoemulsion, Vegetable, Washing agent, Washing process

Introduction

Washing fresh vegetables prior to consumption is a critical step in reducing surface contaminants such as pesticides, dust, and microorganisms. The effectiveness of washing procedures depends on the ability of the washing solution to spread and uniformly wet the vegetable surface, which is governed by surface wettability. Vegetable surfaces are heterogeneous, varying among species in terms of surface roughness and epicuticular wax composition which strongly influence liquid spreading and may limit wetting on hydrophobic surfaces (Yang et. al., 2022).

Surfactants are commonly used to reduce surface tension and enhance wetting, while essential oils have gained attention due to their interactions with lipid-based surface components. However, information regarding the combined effects of surfactants and essential oils on vegetable surface wettability remains limited. Contact angle measurement is a well-established method for evaluating surface wettability, with lower contact angles indicating improved wetting (Lin et. al., 2016).

Therefore, this study investigates the effects of vegetable type and washing formulation on surface wettability using contact angle measurements. Four vegetables—yard long bean, Bok choy, Chinese kale, and chili—were washed with filtered water, a surfactant-based solution, and a surfactant–peppermint essential oil formulation.

Materials and Methods

Raw materials

Yard long bean (*Vigna unguiculata* subsp. *sesquipedalis*), bok choy (*Brassica rapa* subsp. *chinensis*), Chinese kale (*Brassica oleracea* var. *alboglabra*), and red chili (*Capsicum annuum*) were purchased from a local market in Bangkok, Thailand. All samples were washed using filtered water and blotted dry before washing with different solutions.

Washing solution preparation

Peppermint oil nanoemulsion was prepared using a low-energy spontaneous emulsification approach by blending peppermint oil with food-grade non-ionic surfactants namely polyoxyethylene sorbitan ester (high-HLB), sorbitan fatty acid esters (low-HLB), and alkyl polyglucoside-based surfactant together with a solvent or co-solvent according to proprietary formulations developed in this study. The mixtures were continuously stirred using a magnetic stirrer at 400 rpm at room temperature for 24 h without the use of high-energy homogenization equipment. The formulation contained peppermint oil at a concentration of approximately 80–85% (w/w). The surfactant solution was prepared following the same procedure and formulation, but without the addition of peppermint oil.

Characterization of peppermint oil nano emulsion

Morphological characterization of peppermint oil droplets using optical microscopy

The morphological characteristics of peppermint oil droplets were examined using optical microscopy. Twenty µL of the peppermint oil washing formulation was added dropwise to 20 mL of distilled water (dilution ratio 1:1000). The mixture was gently agitated at 200 rpm and 25 °C for 15 min to allow spontaneous emulsification. The morphology of peppermint oil droplets in the resulting emulsion was observed at 1000× (using a 100x objective lens and 10x eyepiece lens were capture using optical microscope (CX23, Olympus, Japan) equipped with Magnus Analytics MagVision software (version x64) for image acquisition, as this magnification provide the clearest visualization of droplet morphology.

Measurement of peppermint oil droplets size and zeta potential by dynamic light scattering (DLS)

The emulsion was prepared by adding 20 µL of the peppermint oil washing formulation dropwise to 20 mL of distilled water (dilution ratio 1:1000) followed by gentle agitation at 200 rpm and 25 °C for 15 min to allow spontaneous emulsification. The particle size of oil droplets was subsequently measured using dynamic light scattering (DLS). In this analysis, distilled water was used as the dispersant, with a refractive index (RI) of 1.33 and a viscosity of 0.89 cP at 25 °C and the RI of peppermint oil was 1.462. All measurements were conducted at 25 °C. Particle size and zeta potential measurements were performed in triplicate, and the results were reported as the Z-average mean particle size along with the polydispersity index (PDI). In addition, zeta potential results were expressed as the mean ± standard deviation.

Washing process

Vegetables were washed using peppermint oil nanoemulsion, surfactant solution, or filtered water at a vegetable-to-water ratio of 1:20 (w/v). Washing solutions were prepared by diluting the washing agents with water at a ratio of 1:200 (v/v); the surfactant stock concentration was 25%. The vegetable washing solution contained low concentrations of non-ionic surfactants (0.01–0.02%) and peppermint oil (0.2%), formulated to evaluate their effects on surface wettability. Samples were soaked for 3 min at room temperature, air-dried under ambient conditions, and then subjected to contact angle measurement. All treatments followed a two-step washing procedure as described by Klimtham et al. (2018).

Contact angle measurement

Surface wettability was evaluated by static contact angle measurement using the sessile drop method. A droplet of deionized (DI) water with a volume of 3 µL was gently deposited onto the vegetable surface. Contact angle measurements were performed at three different locations on each sample to account for surface heterogeneity, and the average value was used for statistical analysis (Li et. al., 2024).

Contact angle is the angle formed between the tangent to the liquid-vapor interface and the solid surface at the point where they meet, typically measured in degrees. This angle is a key parameter for assessing the wettability of a solid surface by a water. A lower contact angle (usually below 90°)

indicates that the liquid spreads well on the surface, suggesting good wettability, while a higher contact angle (above 90°) means the liquid tends to bead up, indicating poor wettability or a hydrophobic surface (Fig. 1).

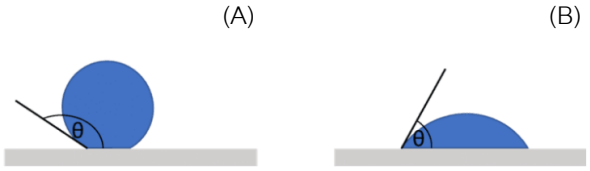


Fig. 1 Schematic contact angle, droplets interacting with a surface. (A) an example of a liquid with a large contact angle, showing poor wetting properties on that particular surface; (B) an example of a liquid with a small contact angle, showing good wetting of that surface.

Source Centre for Industrial Rheology (2025)

Data and statistical analysis

Results are presented as mean ± standard deviation (SD). Differences among treatments were evaluated through comparative statistical analysis, with significance inferred from probability values below 0.05.

Results and Discussion

Optical microscopy observations of the peppermint oil nanoemulsion washing formulation at 1000× magnification revealed that the peppermint oil droplets were spherical in shape, finely dispersed, and suspended throughout the aqueous phase, with droplet sizes smaller than 10 μm. The emulsion exhibited good physical stability, showing no evidence of phase separation or sedimentation after storage for 5 days at room temperature. Even after storage, the peppermint oil droplets remained spherical and uniformly dispersed in the solution, as shown in Fig. 2

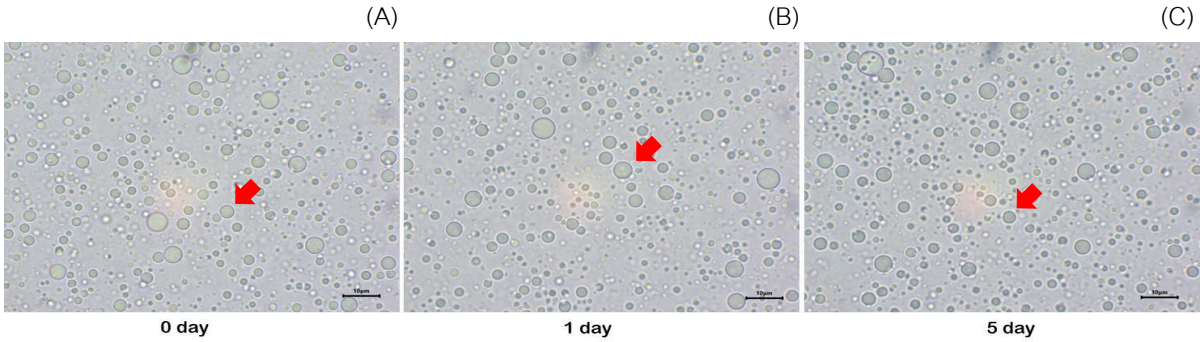


Fig. 2 Optical microscopy images showing the morphology of peppermint oil droplets suspended in the aqueous solution on day 0 (A), day 1 (B), and day 5 (C) after preparation, captured at 1000× magnification.

The results of particle size and size distribution analysis of peppermint oil droplets determined by DLS are presented in Table 1. The mean droplet size of peppermint oil was 241.00±6.58 nm, with a polydispersity index (PDI) of 0.158. A PDI value below 0.3 indicates a narrow and uniform droplet size distribution, reflecting a relatively homogeneous population of oil droplets.

Table 1 Droplet size and zeta potential of peppermint oil nanoemulsion

Replicate	Z-Average		Zeta potential
	d. nm	PDI	mV
1	244.800	0.078	-39.20
2	244.800	0.184	-39.60
3	233.400	0.213	-39.20
X±SD	241.000±6.580	0.158±0.071	-39.33±0.23

Zeta potential is commonly used to evaluate the stability of systems containing suspended small particles, such as emulsions, solutions, or nanoparticles. It is reported in millivolts (mV) and reflects the magnitude of electrostatic repulsive or attractive forces between particles, which directly influence the stability of the system. Zeta potential value greater than ±30 mV indicates high stability of suspended, whereas values lower than ±10 mV suggest poor stability, with an increased tendency for particle aggregation, sedimentation, and phase separation due to insufficient electrostatic repulsion (McClements and Rao, 2011). This interpretation is consistent with high absolute zeta potential value (-39.33 mV) observed for the peppermint oil nanoemulsion (PON) in this study, indicating strong electrostatic repulsion and high colloidal stability that enhance uniformity and spreading potential on vegetable surface, influencing contact angle reduction (Zhao et al., 2017).

Visualization of wettability trends

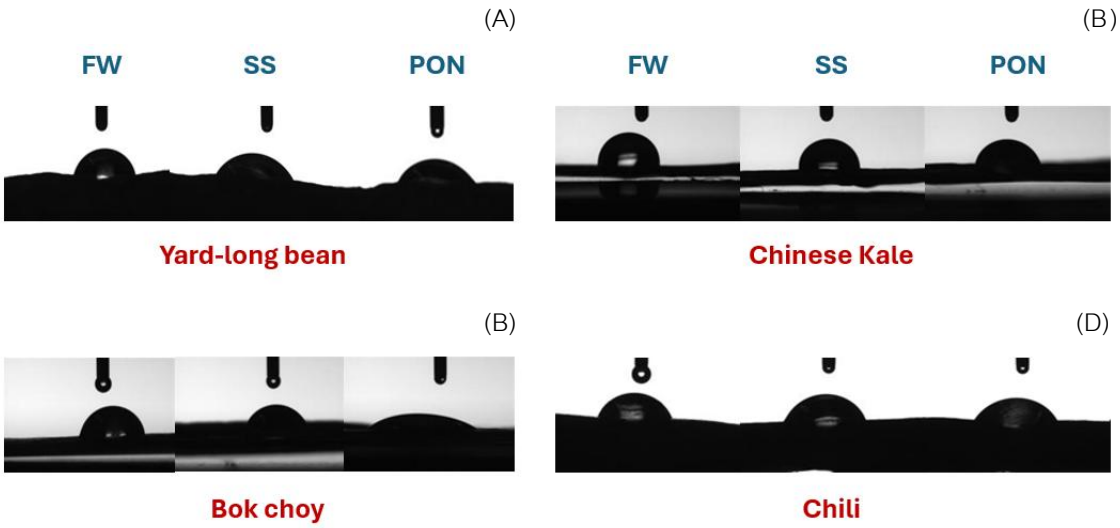


Fig. 3 Contact angle photo of different vegetables after washing with Filtered water (FW), Surfactant solution (SS) and peppermint oil nanoemulsion (PON): Yard-long bean (A); Chinese Kale (B); Bok choy (C); Chili (D).

The effects of washing formulation and vegetable type on contact angle values are illustrated in Fig. 3. A general decrease in contact angle was observed for surfactant-containing treatments (peppermint oil nanoemulsion and surfactant solution treatment) compared to water across all vegetables. The peppermint oil nanoemulsion resulted in the lowest contact angles for most vegetables, particularly bok choy. Peppermint oil

nanoemulsions reduce the contact angle, thereby enhancing surface wettability, due to the presence of surfactants and nanoscale oil droplets that significantly decrease interfacial tensions. The reduction in surface tension promotes droplet spreading on hydrophobic surfaces, resulting in lower contact angles (Pirozzi et. al., 2020).

Despite overall improvements in wettability observed with surfactant solution and peppermint oil nanoemulsion treatments, Chinese kale consistently exhibited high contact angle values across all washing protocols. This indicates a notable resistance to surface modification, which is likely attributed to the presence of a dense and complex layer of epicuticular wax on its surface (Neinhuis et. al., 1997) a characteristic commonly reported for Brassica species, including Chinese kale. Epicuticular wax serves as a natural barrier, composed of long-chain aliphatic compounds that confer strong hydrophobicity to plant surfaces. The micro- and nano-scale wax structures create a rough, low-energy surface that limits water penetration and enhances the contact angle, thereby reducing the effectiveness of wetting agents (Ma et. al., 2022)

Contact angle values after washing treatments

The mean contact angle values of the vegetable surfaces following different washing treatments are summarized in Table 2 Across all vegetables, washing treatments containing surfactants resulted in lower contact angle values compared to filtered water, indicating improved surface wettability. However, the magnitude of this improvement varied among vegetable types.

Table 2 Mean contact angle (°) ± standard deviation of vegetable surfaces with different types of washing solution

Vegetable	Filtered water	Surfactant solution	Peppermint oil nanoemulsion
Yard long bean	78.74±7.03^{a}	67.16±4.76^{b}	58.38±6.08^{b}
Bok choy	77.37±4.85^{a}	70.03±2.47^{b}	33.76±6.89^{c}
Chinese kale	104.01±5.32^{a}	90.11±8.62^{a}	76.33±5.11^{b}
Chili	80.50±9.60^{a}	77.42±9.93^{ab}	70.11±3.78^{b}

$^{a\text{-}c}$Different superscript letters within the same row indicate significant difference ($p < 0.05$)

Under the peppermint oil nanoemulsion (PON) treatment, Bok choy exhibited the lowest contact angle, followed by Yard long bean, Chili, and Chinese kale. Post hoc analysis indicated statistically significant differences among all vegetables under this treatment, suggesting that the combined formulation accentuated surface-dependent wettability differences. For the surfactant solution treatment, yard long bean and bok choy showed similar contact angle values, while chili exhibited moderately higher values. Chinese kale consistently exhibited higher contact angles than the other vegetables, indicating limited wettability enhancement despite the presence of surfactant. When washed with only filtered water, no significant differences were observed among bok choy, yard long bean, and chili. In contrast, Chinese kale displayed higher contact angle values, reflecting a more hydrophobic surface under untreated conditions.

Due to the hydrophobic nature of epicuticular wax is directly correlated with higher contact angles. These waxes have the interaction between aqueous solutions and the plant surface, which limits the spreading

of surfactants and essential oils and reduces their contact with the plant surface. Recent research highlights that the composition and morphology of epicuticular wax, such as tubular or platelet structures, further contribute to the superhydrophobic properties of certain vegetables, resulting in persistent high contact angles even after washing treatments. Thus, the inherent physicochemical properties of the wax layer on Chinese kale explain its limited response to surface modification and underscore the importance of considering wax characteristics when designing washing protocols for different vegetable types (Koch et. al., 2008).

Leaf surface morphology has a pronounced effect on contact angle and, consequently, on surface hydrophobicity. Silvestre and Zambrano (2019) clearly demonstrated this relationship through contact angle measurements on both adaxial and abaxial leaf surfaces of several plant species with distinct trichome structures. Which is outgrowth structures that originate from the epidermal cells of plants and protrude from the surface of leaves, stems, or other aerial organs effecting to the contact angle.

Surfactant-containing washing solution resulted in contact angle reductions ranging from approximately 4–15%, depending on vegetable type. The incorporation of peppermint oil nanoemulsion (PON) further increased the percentage reduction for all vegetables, yielding reductions of approximately 13–56%. The greatest reduction was observed for Bok choy, indicating a strong response of this leafy vegetable to the combined formulation.

The peppermint oil nanoemulsion contributes to the reduction of contact angles on vegetable surfaces, particularly when combined with surfactants, thereby enhancing the spreading and wetting properties of aqueous solutions. Numerous studies have demonstrated that the incorporation of essential oils into washing solutions can effectively decrease surface tension and improve the dispersal of liquids across diverse surfaces, including those of plant and biological origin. For instance, Sapper et al. (2019) reported that the addition of plant-derived essential oils, such as thyme oil, to surfactant solutions resulted in a significant reduction in contact angle and surface tension, indicating improved wettability. Moreover, investigations into intermolecular forces have revealed that essential oils promote the accumulation of water molecules on surfaces, leading to a reduction in both intermolecular forces and surface tension.

Conclusion

This study demonstrates that surface wettability of fresh vegetables is determined by the interplay between intrinsic surface properties and washing formulation. The peppermint oil nanoemulsion exhibited high physicochemical stability and consistently reduced contact angle values relative to filtered water and the surfactant solution, indicating enhanced wetting and spreading on vegetable surfaces. The improved wettability is attributed to the combined effects of surfactants and nanoscale oil droplets, which effectively lower interfacial tension at the liquid–surface interface. Vegetables with less pronounced epicuticular wax layers, such as bok choy, showed the greatest response to the nanoemulsion treatment, whereas Chinese kale remained highly hydrophobic due to its dense wax structure. Overall, these findings highlight the importance of surface morphology in postharvest washing efficiency and support the application of essential oil–based nanoemulsions as a promising, food-grade approach for improving fresh produce washing processes.

Conflict of Interest

The authors declare that there are no conflicts of interest.

Acknowledgements

This research was funded by Project on the Development of a Natural Extract-Based Fresh Produce Wash Formulation with Self-Emulsifying Properties, YF(KU)30.67 and the Faculty of Agro-Industry, Kasetsart University, through a grant for presentation at the 64th Kasetsart University Annual Conference. The authors also acknowledge the support of the Department of Food Science and Technology, Faculty of Agro-Industry, Kasetsart University.

Reference

Klintham, P., Tongchitpakdee, S., Chinsirikul, W., Mahakarnchanakul, W. 2018. Two-step washing with commercial vegetable washing solutions, and electrolyzed oxidizing microbubbles water to decontaminate sweet basil and Thai mint: A case study. Food Control 94: 324–330. doi.org/10.1016/j.foodcont.2018.07.016

Koch, K., Ensikat, H.J. 2008. The hydrophobic coatings of plant surfaces: Epicuticular wax crystals and their morphologies, crystallinity and molecular self-assembly. Micron 39: 759–772. doi.org/10.1016/j.micron.2007.11.010

Li, X., Liu, C., Liu, F., et al. 2024. Substantial removal of four pesticide residues in three fruits with ozone microbubbles. Food Chem. 441: 138293. doi.org/10.1016/j.foodchem.2023.138293

Lin, H., Zhou, H., Xu, L., Zhu, H., Huang, H. 2016. Effect of surfactant concentration on the spreading properties of pesticide droplets on Eucalyptus leaves. Biosyst. Eng. 143: 42–49. doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2015.12.011

Ma, J., Liu, K., Dong, X., Chen, C., Qiu, B., Zhang, S. 2022. Effects of leaf surface roughness and contact angle on in vivo measurement of droplet retention. Agronomy 12: 2228. doi.org/10.3390/agronomy12092228

McClements, D.J., Rao, J. 2011. Food-grade nanoemulsions: Formulation, fabrication, properties, performance, biological fate, and potential toxicity. Crit. Rev. Food Sci. Nutr. 51: 285–330. doi.org/10.1080/10408398.2011.559558

Neinhuis, C., Barthlott, W. 1997. Characterization and distribution of water-repellent, self-cleaning plant surfaces. Ann. Bot. 79: 667–677. doi.org/10.1006/anbo.1997.0400

Pirozzi, A., Del Grosso, V., Ferrari, G., Donsì, F. 2020. Edible coatings containing oregano essential oil nanoemulsion for improving postharvest quality and shelf life of tomatoes. Foods 9: 1605. doi.org/10.3390/foods9111605

Silvestre, M.L.T., Zambrano, A.R.C., Linis, V.C., Janairo, J.I.B. 2019. Surface morphological and wetting characterization of the hydrophobic and superhydrophobic leaves of Pistia stratiotes L., Salvinia molesta D. Mitch., *Ananas comosus* (L.) Merr. and *Dyckia platyphylla* L.B. Smith for bioinspired oil

adsorbent materials. IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 479: 012003. doi.org/10.1088/1757-899X/479/1/012003

Yang, S.J., Mun, S., Kim, H.J., et al. 2022. Effectiveness of different washing strategies on pesticide residue removal: The first comparative study on leafy vegetables. Foods 11: 2916. doi.org/10.3390/foods11182916

Zhao, X., Zhu, Y., Zhang, C., Lei, J., Ma, Y., Du, F. 2017. Positive charge pesticide nanoemulsions prepared by the phase inversion composition method with ionic liquids. RSC Adv. 7: 48586–48596. doi.org/10.1039/C7RA09058A

สาขาทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม

(Subject: Natural Resources And Environment)

ภาคโปสเตอร์

(Poster Presentation)

การลดปริมาณธาตุอาหารไนโตรเจนและฟอสฟอรัสในน้ำด้วยถ่านชีวภาพจากไมยราบยักษ์ (*Mimosa pigra* L.) ร่วมกับสารเสริมประสิทธิภาพ

Removing nitrogen and phosphorus from water by modified biochar derived from *Mimosa pigra* L.

มัลลิกา พะย่ำ*, **นลินอร มงคลหัตถี**

Manlika Phaya*, Nalinon Mongkolhuttee

สำนักวิจัยและพัฒนา กรมชลประทาน นนทบุรี 11120

Bureau of Research and Development, Royal Irrigation Department, Nonthaburi 11120, Thailand

*Corresponding author. E-mail address: malimila737@gmail.com

บทคัดย่อ

การศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับธาตุอาหารไนโตรเจนและฟอสฟอรัสในแหล่งน้ำด้วยถ่านชีวภาพจากไมยราพยักษ์ร่วมกับสารเสริมประสิทธิภาพ ได้แก่ สารละลายอลูมิเนียมคลอไรด์เฮกซะไฮเดรต ($AlCl_3.6H_2O$), แมกนีเซียมคลอไรด์เฮกซะไฮเดรต ($MgCl_3.6H_2O$) และเฟอร์ริกคลอไรด์เฮกซะไฮเดรต ($FeCl_3.6H_2O$) ที่ความเข้มข้น 0.25, 0.50, 0.75 และ 1.0 M ผลการดูดซับพบว่า ถ่านชีวภาพจากไมยราบยักษ์ที่ปรับสภาพด้วยสารละลาย $AlCl_3.6H_2O$ ที่ความเข้มข้น 0.5 M มีประสิทธิภาพการดูดซับไนเตรตสูงสุด ซึ่งมากกว่าถ่านชีวภาพจากไมยราบยักษ์ที่ไม่ได้ปรับสภาพถึง 83% หรือ 8 เท่า ที่อัตราส่วนถ่านชีวภาพ 7% เป็นเวลา 24 hr ส่วนถ่านชีวภาพจากไมยราบยักษ์ที่ปรับสภาพด้วยสารละลาย $MgCl_3.6H_2O$ ที่ความเข้มข้น 0.5 M มีประสิทธิภาพการดูดซับฟอสเฟตสูงสุด ซึ่งมากกว่าถ่านชีวภาพจากไมยราบยักษ์ที่ไม่ได้ปรับสภาพถึง 96% หรือ 10 เท่า ที่อัตราส่วนถ่านชีวภาพ% 5 เป็นเวลา 24 hr ประสิทธิภาพที่เพิ่มขึ้นเป็นผลมาจากพื้นที่ผิวที่เพิ่มขึ้นโดยเพิ่มสูงขึ้นจากถ่านชีวภาพที่ไม่มีการปรับสภาพมากถึง 10 เท่า

คำสำคัญ: การดูดซับ, ถ่านชีวภาพ, ไมยราบยักษ์

Abstract

The study investigated the adsorption efficiency of nitrogen and phosphorus nutrients from water using biochar derived from *Mimosa pigra* L. combined with efficiency-enhancing agents: aluminum chloride hexahydrate ($AlCl_3.6H_2O$), magnesium chloride hexahydrate ($MgCl_3.6H_2O$), and ferric chloride hexahydrate ($FeCl_3.6H_2O$) at concentrations of 0.25, 0.50, 0.75, and 1.0 M. The results showed that biochar derived from *Mimosa pigra* L. modified with 0.5 M $AlCl_3.6H_2O$ exhibited the highest nitrate adsorption efficiency, which was 83% (8 times) greater than that of unmodified biochar, at a biochar dosage of 7% for an exposure time of 24 hours. Conversely, biochar modified with 0.5 M $MgCl_3.6H_2O$ showed the highest phosphate adsorption efficiency, which was 96% (10 times) greater than that of unmodified biochar, at a biochar dosage of 5% for 24 hours. This enhanced performance is attributed to the increase in surface area, which was up to 10 times higher than that of unmodified biochar.

Keywords: Adsorption, Biochar, *Mimosa pigra* L.

คำนำ

การแพร่ระบาดอย่างรวดเร็วของแพลงก์ตอนพืชและวัชพืชน้ำในคลองชลประทาน มีสาเหตุมาจากปริมาณธาตุอาหารจำพวกสารประกอบไนโตรเจนและฟอสฟอรัสที่มากเกินไป กระตุ้นให้แพลงก์ตอนพืชและวัชพืชน้ำในแหล่งน้ำมีการเจริญเติบโตอย่างรวดเร็ว หรือที่เรียกว่าปรากฏการณ์ยูโทรฟิเคชัน (Eutrophication) ซึ่งส่งผลกระทบต่อคุณภาพน้ำและสิ่งมีชีวิตในแหล่งน้ำ (ยุวดี, 2549) การลดปริมาณธาตุอาหารดังกล่าวจากแหล่งกำเนิดประเภทเกษตรกรรมควบคุมได้ยาก ประกอบกับไม่มีการกำหนดปริมาณฟอสฟอรัสในมาตรฐานน้ำทิ้งจากชุมชน เกษตรกรรม และอุตสาหกรรม เดิมวิธีการลดปริมาณธาตุอาหารในน้ำนิยมใช้กระบวนการทางเคมีและชีวภาพ เช่น การตกตะกอนทางเคมีด้วยสารอะลูมิเนียม เหล็ก และปูนขาว เป็นต้น แต่อย่างไรก็ตามกระบวนการดังกล่าวส่งผลให้เกิดกากตะกอนเคมีส่วนเกินในน้ำ ส่วนกระบวนการชีวภาพ ได้แก่ กระบวนการฟอสทริป ระบบแอนแอโรบิค/ออกซิค และพื้นที่ชุ่มน้ำนั้น เป็นกระบวนการมีความซับซ้อน เกิดสารตกค้าง และมีค่าใช้จ่ายในการดำเนินการสูง (มั่นสิน ตัณฑุลเวศม์, 2545)

ปัจจุบันการใช้สารดูดซับในการลดปริมาณไนโตรเจนและฟอสฟอรัสในน้ำเป็นวิธีที่ได้รับความสนใจ เนื่องจากง่ายต่อการดำเนินการ สามารถนำผลิตภัณฑ์หลังจากการดูดซับไปใช้ประโยชน์ได้ และมีประสิทธิภาพในการลดปริมาณไนโตรเจนและฟอสฟอรัสสูง ซึ่งตัวดูดซับที่นิยมได้แก่ ถ่านกัมมันต์ ซีโอไลต์ และถ่านชีวภาพ เป็นต้น (Li et al., 2020) โดยเฉพาะอย่างยิ่งถ่านชีวภาพ นิยมนำมาใช้เป็นวัสดุสำหรับดูดซับทั้งสารพิษตกค้างทั้งในดินและน้ำ เพราะเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม ราคาถูก และการดูดซับมีประสิทธิภาพสูง (Wang et al., 2010) มีการรายงานการนำไบโอชาร์มาใช้งานร่วมกับสารเสริมประสิทธิภาพเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการดูดซับ ไม่ว่าจะเป็นการนำถ่านชีวภาพจากลำต้นข้าวโพดร่วมกับสาร $FeCl_3$ พบว่า สามารถลดปริมาณไนโตรเจนและฟอสฟอรัสได้มากถึงร้อยละ 80 นอกจากนี้มีการนำถ่านชีวภาพจากมูลของหมีแพนด้าร่วมกับสาร Carboxymethyl Cellulose (CMC) และ Nano Zero-Valent Iron (nZVI) พบสารดังกล่าวสามารถดูดซับไนโตรเจนและฟอสฟอรัสได้มากถึง 40.31 และ 154.30 mg/g ตามลำดับ (Li et al. 2020; Wang et al., 2020) ยิ่งไปกว่านั้นมีรายงานว่ามีการใช้ไบโอชาร์จากไมยราพยักษ์ร่วมกับสาร $AlCl_3$ โดยสามารถดูดซับฟอสฟอรัสได้มากถึง 70.64 mg/g (Phuong et al., 2021)

ไมยราพยักษ์ (*Mimosa pigra* L.) เป็นหนึ่งในวัชพืชที่ร้ายแรงที่แพร่ระบาดในพื้นที่ชลประทาน หากถูกนำมาใช้ประโยชน์จะเป็นการเพิ่มมูลค่า และเป็นการนำชีวมวลดังกล่าวมาใช้ประโยชน์อย่างยั่งยืน ดังนั้นโครงการนี้จึงเล็งเห็นถึงศักยภาพของไบโอชาร์จากไมยราพยักษ์มาใช้เป็นตัวดูดซับร่วมกับสารเสริมฤทธิ์เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของการดูดซับธาตุอาหารไนโตรเจนและฟอสฟอรัสในน้ำ เพื่อแก้ปัญหาคุณภาพน้ำ ลดมลภาวะจากธาตุอาหาร อีกทั้งเป็นการใช้ทรัพยากรที่มีอยู่มาใช้ให้คุ้มค่าและเกิดประโยชน์อย่างยั่งยืน

อุปกรณ์และวิธีการ

การเตรียมชีวมวลไมยราบยักษ์และการปรับสภาพด้วยสารเสริมประสิทธิภาพและผลิตถ่านชีวภาพด้วยกระบวนการไพโรไลซิส

เก็บตัวอย่างไมยราบยักษ์แบบสด สับบดต้นไมยราบยักษ์ให้ละเอียดโดยใช้เครื่องมือสำหรับบดย่อย และล้างทำความสะอาดเพื่อขจัดเศษปนเปื้อนอื่น ๆ จากนั้นนำไปผึ่งให้แห้ง จากนั้นนำไปปรับสภาพด้วยสารเสริมประสิทธิภาพ ได้แก่ สารละลาย $AlCl_3.6H_2O$, $MgCl_3.6H_2O$ และ $FeCl_3.6H_2O$ ที่ความเข้มข้น 0.25, 0.50, 0.75 และ 1.0 Mในอัตราส่วนชีวมวลต่อสารละลายเท่ากับ 1 : 5 เป็นเวลา 24 hr จากนั้นกรองเอาสารละลายออก เก็บส่วนชีวมวลไปผึ่งให้แห้ง จากนั้นเผาด้วยกระบวนการไพโรไลซีสด้วยเตาเผาแบบโลหะขนาด 200 L ในสภาวะปราศจากออกซิเจน ภายใต้อุณหภูมิสูงประมาณ 400 ถึง 800 °C เป็นเวลา 3 hr

ศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับไนโตรเจนและฟอสฟอรัส

ศึกษาความสามารถในการดูดซับไนโตรเจนและฟอสฟอรัสของถ่านชีวภาพจากไมยราบยักษ์ที่ปรับสภาพด้วยสารเสริมประสิทธิภาพ โดยนำตัวอย่างถ่านชีวภาพจากไมยราบยักษ์ทั้งที่ไม่ได้ปรับสภาพ และถ่านที่ปรับสภาพด้วยสารเสริมประสิทธิภาพปริมาณ 5 g ศึกษาความสามารถในการดูดซับไนโตรเจนและฟอสฟอรัส ด้วยสารละลายมาตรฐานไนเตรตไนโตรเจนและออร์โธฟอสเฟตที่ความเข้มข้น 50 mg/L ที่เตรียมจากสารละลาย KNO_3 และ KH_2PO_4ปริมาตร 100 ml ตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 24 hr นำไปวัดปริมาณของไนเตรตไนโตรเจนและออร์โธฟอสเฟตที่เหลืออยู่ด้วยวิธีบรูซีน (Brucine) และแอสคอบิก (Ascorbic) (APHA. AWWA, AND WPCF, 1995)

ประสิทธิภาพของการดูดซับแสดงเป็นร้อยละของการดูดซับ (% Adsorption) ไนเตรตไนโตรเจนและออร์โธฟอสเฟต โดยเปรียบเทียบปริมาณไนเตรตไนโตรเจนและออร์โธฟอสเฟตก่อนและหลังการดูดซับ (Equation1):

$$\% \text{ Adsorption} = ((C_0 - C_e)/ C_0) \times 100 \quad (1)$$

เมื่อ C_0 คือ ความเข้มข้นของสารละลายเริ่มต้น (mg/L), C_e คือ ความเข้มข้นของสารละลายที่สมดุล (mg/L), V คือ ปริมาตรของ สารละลายที่ถูกดูดซับ (L), mass คือ ปริมาณของตัวดูดซับ (g)

ศึกษาผลของปริมาณร้อยละของถ่านที่ใช้ในการดูดซับไนโตรเจนและฟอสฟอรัส

คัดเลือกตัวอย่างถ่านชีวภาพจากไมยราบยักษ์ที่มีความสามารถในการดูดซับไนโตรเจนและฟอสฟอรัสที่ดีที่สุดมาอย่างละ 1 ตัวอย่างปริมาณ 1%, 3%, 5%, 7% และ 10% มาศึกษาปริมาณร้อยละของถ่านที่ใช้ในการดูดซับ โดยนำสารละลายมาตรฐานไนเตรตไนโตรเจนและออร์โธฟอสเฟตที่ความเข้มข้น 50 mg/L ที่เตรียมจากสารลาลาย KNO_3 และ KH_2PO_4 ปริมาตร 100 mL ตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 24 hr นำไปหาปริมาณของไนเตรตไนโตรเจนและออร์โธฟอสเฟตที่เหลืออยู่ด้วยวิธีบรูซีน และแอสคอบิก ประสิทธิภาพของการดูดซับไนเตรตไนโตรเจนและออร์โธฟอสเฟตโดยเปรียบเทียบปริมาณไนเตรตไนโตรเจนและออร์โธฟอสเฟตก่อนและหลังการดูดซับ

ศึกษาลักษณะและคุณสมบัติทางเคมีของถ่านชีวภาพจากไมยราบยักษ์

นำตัวอย่างถ่านชีวภาพจากไมยราบยักษ์ทั้งที่ไม่ได้ปรับสภาพ และถ่านที่ปรับสภาพด้วยสารเสริมประสิทธิภาพวิเคราะห์ลักษณะคุณสมบัติได้แก่ พื้นที่ผิวจำเพาะ ปริมาตรรูพรุนรวม ขนาดรูพรุนเฉลี่ย ลักษณะทางสัญฐานวิทยาของของถ่านชีวภาพ องค์ประกอบธาตุ ความเป็นกรด-ด่าง ปริมาณคาร์บอนอินทรีย์ ปริมาณอินทรียวัตถุ และปริมาณธาตุอาหารทั้งหมด

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

ความสามารถในการดูดซับไนโตรเจนและฟอสฟอรัสของถ่านชีวภาพจากไมยราบยักษ์ พบว่า ถ่านชีวภาพจากไมยราบยักษ์ที่ไม่ได้ปรับสภาพหรือ BC มีความสามารถในการดูดซับสารละลาย KNO_3 เท่ากับ 8.33% แต่เมื่อทำการปรับสภาพชีวมวลถ่านชีวภาพด้วยสารเสริมประสิทธิภาพ พบว่า ค่าเฉลี่ยของร้อยละการดูดซับมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ($p < 0.05$) มีค่าร้อยละการดูดซับไนเตรตอยู่ระหว่าง น้อยกว่า 0.10% ถึง 68.75% หรือ 0.01 ถึง 6.88 mg/g โดยถ่านชีวภาพจากไมยราบยักษ์ที่ปรับสภาพด้วยสารละลาย $AlCl_3.6H_2O$ ที่ความเข้มข้น 0.5 M หรือ BAL0.50 เป็นเวลา 24 hr มีประสิทธิภาพการดูดซับไนเตรตสูงสุด ซึ่งมากกว่าถ่านชีวภาพจากไมยราบยักษ์ที่ไม่ได้ปรับสภาพถึง 83% หรือ 8 เท่า ส่วนความสามารถในการดูดซับสารละลาย KH_2PO_4 พบว่า ถ่านชีวภาพจาก

ไมยราบยักษ์ BC มีความสามารถในการดูดซับฟอสเฟตน้อยกว่า 0.1% หรืออนุมานได้ว่าไม่มีประสิทธิภาพในการดูดซับสารฟอสเฟตในน้ำ แต่เมื่อทำการปรับสภาพชีวมวลถ่านชีวภาพด้วยสารเสริมประสิทธิภาพ พบว่า ค่าเฉลี่ยของร้อยละการดูดซับมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ($p < 0.05$) มีค่าร้อยละการดูดซับอยู่ระหว่าง 11.25% ถึง 96.25% หรือ 0 ถึง 9.63 mg/g โดยถ่านชีวภาพจากไมยราบยักษ์ที่ปรับสภาพด้วยสารละลาย $MgCl_3.6H_2O$ ที่ความเข้มข้น 0.5 M หรือ BMG0.50 เป็นเวลา 24 hr มีประสิทธิภาพการดูดซับฟอสเฟตสูงสุด ซึ่งมากกว่าถ่านชีวภาพจากไมยราบยักษ์ที่ไม่ได้ปรับสภาพถึง 96% หรือ 10 เท่า ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Phuong et al. (2021) ทำการปรับสภาพถ่านชีวภาพจากไมยราบยักษ์ในการดูดซับฟอสเฟตโดยใช้สารอะลูมิเนียมคลอไรด์ ($AlCl_3.6H_2O$) ที่ความเข้มข้น 0.5, 1, 2 และ 3 โมลาร์ และเผาด้วยกระบวนการไพโรไรซีสที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง พบว่า สามารถดูดซับสารละลายฟอสเฟต (PO_4^{3}) เท่ากับ 70.6 mg/g ซึ่งมีค่ามากกว่าถ่านชีวภาพที่ไม่ได้ปรับสภาพมากถึง 14 เท่า (ถ่านชีวภาพที่ยังไม่ได้ปรับสภาพเท่ากับ 5.1 mg/g) แสดงดัง Fig. 1

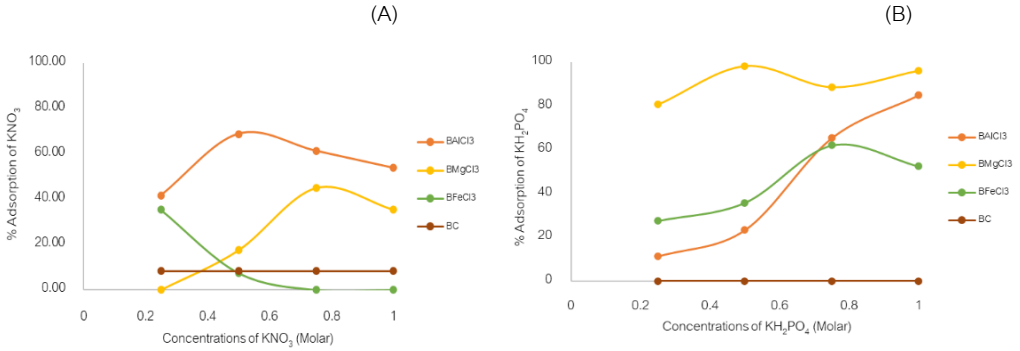


Fig. 1 %Adsorption of KNO_3 (A) and $KHPO_4$ (B) by biochar and modified biochar derived from *Mimosa pigra* L.

ปริมาณร้อยละของถ่านชีวภาพที่ใช้ในการดูดซับ KNO_3 ด้วย BAL0.50 1%, 3%, 5%, 7% และ 10% ต่อสารละลาย KNO_3 100 mL พบว่า ตัวอย่างถ่านชีวภาพจากไมยราบยักษ์ BAL0.50 7% โดยให้ค่าเฉลี่ยของร้อยละการดูดซับที่ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ($p<0.05$) สามารถดูดซับสารละลายไนเตรตที่ความเข้มข้นเริ่มต้นเท่ากับ 50 mg/L ได้ดีที่สุด ส่วนตัวอย่างถ่านชีวภาพจากไมยราบยักษ์ BMG0.50 5% โดยให้ค่าเฉลี่ยของร้อยละการดูดซับที่ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ($p<0.05$) สามารถดูดซับสารละลายฟอสเฟตที่ความเข้มข้นเริ่มต้นเท่ากับ 50 mg/L ได้ดีที่สุด แสดงดัง Fig. 2

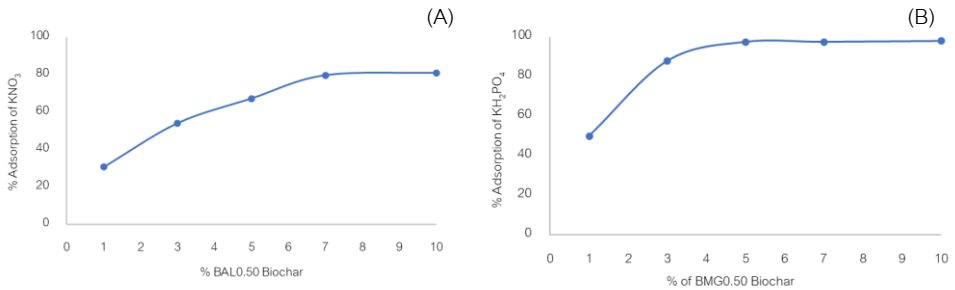


Fig. 2 %Adsorption of KNO_3 and $KHPO_4$ by % of modified biochar (BAL0.50 and BMG0.50) derived from *Mimosa pigra* L.

คุณสมบัติทางเคมีของถ่านชีวภาพจากไมยราบยักษ์ พบว่า ถ่านชีวภาพจากไมยราบยักษ์ BC มีพื้นที่ผิวจำเพาะ ปริมาตรของรูพรุน และขนาดรูพรุนของ เท่ากับ 12.95±0.15 m^2/g, 0.03 cm^3/g และ 4.09 nm ตามลำดับ แต่เมื่อทำการ

ปรับสภาพด้วยสารเสริมประสิทธิภาพพบว่าถ่านชีวภาพจากไมยราบยักษ์ BAL0.5 มีพื้นที่ผิวจำเพาะเท่ากับ 124.48±0.50 m^2/g ซึ่งมากกว่า BC 10 เท่า นอกจากนี้ยังมีขนาดรูพรุนที่เล็กลงเท่ากับ 0.96 nm ซึ่งขนาด รูพรุนลดลงกว่า BC ประมาณ 4 เท่า ส่วน BMG0.5 มีพื้นที่ผิวจำเพาะเท่ากับ 37.71±0.20 m^2/g ซึ่งเพิ่มขึ้นจาก BC ประมาณ 3 เท่า แต่มีขนาดรูพรุนเท่าเดิมเท่ากับ 2.67 nm ซึ่งขนาดรูพรุนลดลงกว่า BC 1.5 เท่า แสดงดัง Table 1 โดยพฤติกรรมการดูดซับ พบตัวอย่างถ่านไมยราบยักษ์ที่ปรับสภาพด้วยสารเสริมประสิทธิภาพประกอบด้วย Micropore ในสัดส่วนที่สูงขึ้น แสดงดัง Fig. 3 กล่าวคือ เมื่อค่อย ๆ เพิ่มความดันในช่วงแรก (ที่ค่า P/P_0 น้อย ๆ) อย่างช้า ๆ จะเห็นปริมาตรแก๊สที่ตัวอย่างดูดซับไว้ได้ในช่วงนี้มีค่ามาก โดยที่ค่า P/P_0 เพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยในช่วงแรก ช่วงนี้จะเป็นการดูดซับแก๊สใน Micropore ช่วงถัดไปจะเป็นช่วงการดูดซับ (และควบแน่น) ในส่วนของ Mesopore ปริมาตรแก๊สที่ตัวอย่างดูดซับได้ในช่วงนี้จะมากหรือน้อยเท่าใดจะแปรผันตามปริมาณ Mesopore ที่มีอยู่ แต่ในช่วงท้าย ๆ ก็ยังมีการเกิด Hysteresis Loop ที่เกิดจากการคายซับแก๊สออกจาก Mesopore เส้นสีแดงเข้ม จากผลการศึกษาข้างต้น ค่าพื้นที่ผิวจำเพาะเป็นปัจจัยสำคัญต่อการนำถ่านชีวภาพมาใช้เพื่อการปรับปรุงคุณภาพน้ำและดิน และเพิ่มผลผลิตทางการเกษตร เนื่องจากพื้นที่ผิวจำเพาะมีผลต่อความสามารถในการดูดซับและการเกิดปฏิกิริยาต่าง ๆ ที่พื้นที่ผิว รวมทั้งการแลกเปลี่ยนประจุบวกกับธาตุอาหารต่าง ๆ ในดิน การผลิตถ่านชีวภาพด้วยกระบวนการไพโรไลซิส ทำให้โครงสร้างของถ่านชีวภาพมีลักษณะเป็นรูพรุนเล็ก ๆ จำนวนมาก ซึ่งเกิดจากช่องว่างระหว่างผลึกในการจัดเรียงตัวของคาร์บอนอะตอม ซึ่งมีการจัดเรียงตัวของโครงสร้างผลึกที่ไม่เป็นระเบียบ จึงมีช่องว่างหรือรูพรุนระหว่างผลึกจำนวนมากและมีพื้นที่ผิวภายในถ่านชีวภาพมาก โดยรูพรุนส่วนใหญ่ของถ่านชีวภาพเป็นรูพรุนประเภท Micropore ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางรูพรุนประมาณ 0.5–1.2 nm (Chen et al., 2012) โดยทั่วไปถ่านชีวภาพมีปริมาตรรูพรุน (Total Pore Volume) ประมาณ 0.03–0.09 ตารางเซนติเมตรต่อกรัม (Vimal et al, 2019) ซึ่งปริมาตรรูพรุนของถ่านชีวภาพมีผลต่อความสามารถในการดูดซับ (Adsorption) ของถ่านชีวภาพ ทั้งนี้ปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อปริมาตรรูพรุน พื้นที่ผิวภายในของถ่านชีวภาพ และการกระจายตัวของรูพรุน คือ ชนิดของวัตถุดิบและอุณหภูมิในกระบวนการไพโรไลซิส (Downie et al., 2009)

นอกจากนี้ โครงสร้างของถ่านชีวภาพที่มีลักษณะเป็นรูพรุนจำนวนมาก ซึ่งมีขนาดที่แตกต่างกัน ทำให้เกิดพื้นที่ผิวสัมผัสมากขึ้น จึงช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการดูดยึดสารประกอบอินทรีย์คาร์บอนและสารอนินทรีย์ได้ อีกทั้งยังทำให้เกิดปฏิกิริยาต่าง ๆ ได้มากขึ้นด้วย นอกจากนั้นรูพรุนของถ่านชีวภาพยังเป็นแหล่งที่อยู่อาศัยที่เหมาะสมและเป็นแหล่งของจุลินทรีย์ (Thies and Rillig, 2009) จึงทำให้จุลินทรีย์ดินสามารถเพิ่มจำนวนและทำกิจกรรมได้ดีขึ้น

Table 1 The result of specific surface area, pore volume and pore size of biochar and modified biochar derived from *Mimosa pigra* L.

Biochar	Specific Surface Area (m^2/g)	Pore Volume(cm^3/g)	Pore Size (nm)
BC	12.95±0.15	0.03	4.09
BAL0.5	124.48±0.50	0.19	0.96
BMG0.5	37.71±0.20	0.09	2.67

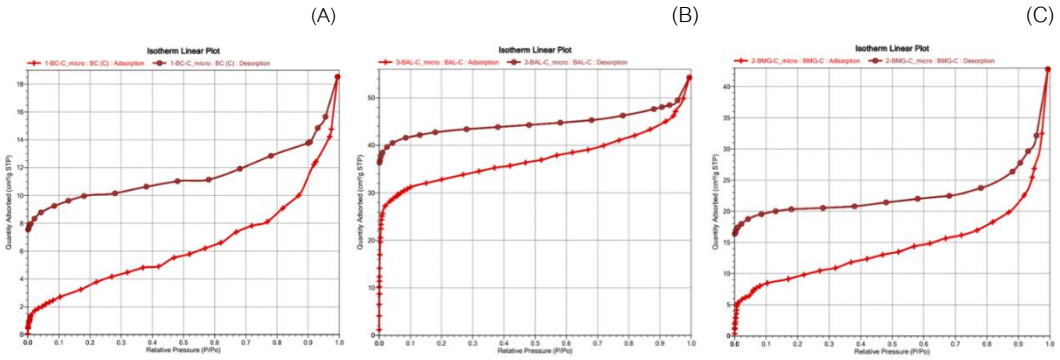


Fig. 3 Isotherm linear plot between quantity adsorbed (cm^3/g STP) and relative pressure (P/P_o) of BC (A), BAL0.5 (B) and BMG0.5 biochar (C), respectively

ลักษณะทางสัญฐานวิทยาของของถ่านชีวภาพจากไมยราบยักษ์ BC ด้วยเทคนิค Scanning Electron Microscope (SEM) (Fig. 4) และสเปกตรัมของธาตุองค์ประกอบด้วยวิธี Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy (EDS) แสดงดัง Table 2 พบว่า มีธาตุองค์ประกอบหลัก 2 ชนิด ได้แก่ คาร์บอน (C) และออกซิเจน (O) เท่ากับ 88.85% และ 10.73% ตามลำดับ ถ่านชีวภาพจากไมยราบยักษ์ BAL0.50 มีธาตุองค์ประกอบหลัก 4 ชนิด ได้แก่ คาร์บอน (C) และออกซิเจน (O) อะลูมิเนียม (Al) และคลอไรด์ (Cl) เท่ากับ 82.01%, 8.16%, 6.14% และ 1.97% ตามลำดับ และถ่านชีวภาพจากไมยราบยักษ์ BMG0.50 มีธาตุองค์ประกอบหลัก 4 ชนิด ได้แก่ คาร์บอน (C) และออกซิเจน (O) และแมกนีเซียม (Mg) และ คลอไรด์ (Cl) เท่ากับ 82.01%, 8.16%, 6.14% และ 1.97% ตามลำดับ

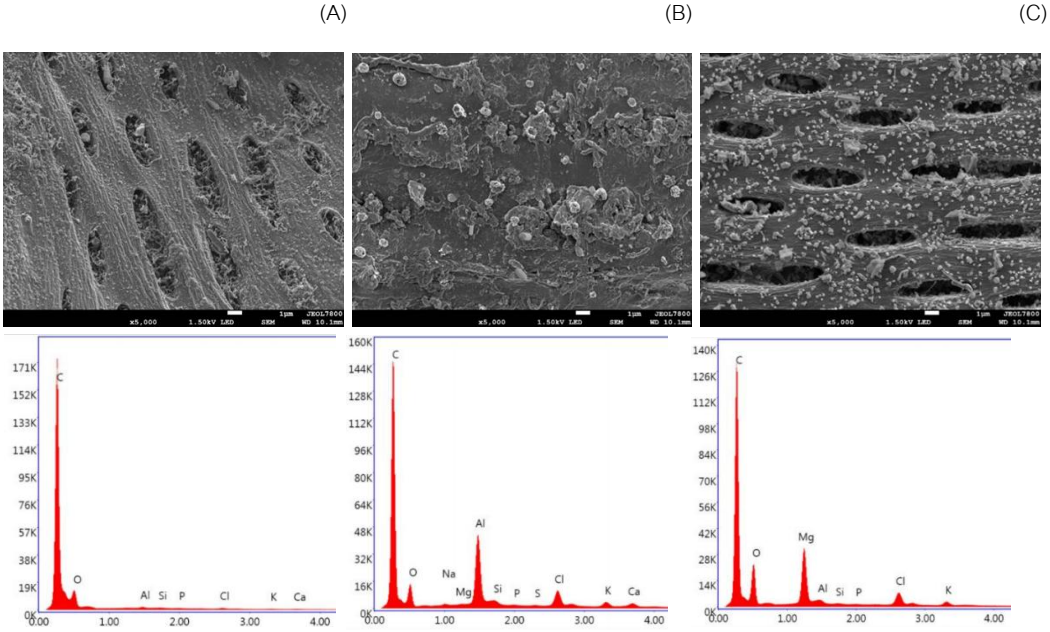


Fig. 4 SEM at X5,000 magnification and EDS spectrum and quantification result of BC (A), BAL0.5 (B) and BMG0.5 biochar (C), respectively

คุณสมบัติทางเคมีของของถ่านชีวภาพจากไมยราบยักษ์ทั้งก่อนและหลังการปรับสภาพ ได้แก่ ความเป็นกรด-ด่าง (pH) ปริมาณคาร์บอนอินทรีย์ อินทรียวัตถุ สัดส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน และปริมาณธาตุอาหารทั้งหมด แสดงดัง Table 2 พบว่า ค่า pH ของถ่านชีวภาพจากไมยราบยักษ์ BC เท่ากับ 9.3 ถ่านชีวภาพจากไมยราบยักษ์ BAL0.50 เท่ากับ

8.8 และถ่านชีวภาพจากไมยราบยักษ์ BMG0.50 เท่ากับ 4.3 ซึ่งสอดคล้อง กับผลงานวิจัยที่ชี้ให้เห็นว่า ถ่านชีวภาพมีค่า pH อยู่ระหว่าง 4–12 ขึ้นอยู่กับประเภทของวัตถุดิบและสภาพแวดล้อมในการผลิตหรือการให้ความร้อนแก่วัตถุดิบนั้น ๆ (Bagreev et al., 2001) โดยเมื่ออุณหภูมิในกระบวนการไพโรไลซิสเพิ่มสูงขึ้นจะทำให้ถ่านชีวภาพที่ได้มีค่า pH สูงขึ้น (Mukherjee et al., 2011) ปริมาณคาร์บอนอินทรีย์ อินทรียวัตถุ และสัดส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน พบว่า ถ่านชีวภาพจากไมยราบยักษ์ BC เท่ากับ 3.50%, 6.02% และ 6:1 ตามลำดับ ถ่านชีวภาพจากไมยราบยักษ์ BAL0.50 เท่ากับ 42.19%, 72.56% และ 64:1 ตามลำดับ และถ่านชีวภาพจากไมยราบยักษ์ BMG0.50 เท่ากับ 36.77%, 63.24% และ 69:1 ตามลำดับ ซึ่งเมื่อมีการปรับสภาพด้วยสารเสริมประสิทธิภาพทำให้ปริมาณคาร์บอนอินทรีย์ อินทรียวัตถุ และสัดส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนในถ่านชีวภาพเพิ่มสูงขึ้น ทั้งนี้เป็นผลมาจากวัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตถ่านชีวภาพและสภาวะในการให้ความร้อนแก่วัตถุดิบ โดยปริมาณคาร์บอนจะเพิ่มสูงขึ้นเมื่ออุณหภูมิในการไพโรไลซิส (Sohi et al., 2009) คาร์บอนอินทรีย์มีความสัมพันธ์ไปในทิศทางเดียวกันกับความจุในการแลกเปลี่ยนประจุบวก กล่าวคือ เมื่อปริมาณคาร์บอนอินทรีย์ในถ่านชีวภาพมีค่ามากจะมีผลทำให้ค่าความจุในการแลกเปลี่ยนประจุบวกของถ่านชีวภาพนั้นเพิ่มมากขึ้นตามไปด้วย (Seybold et al, 2005) ทั้งนี้ จากกระบวนการเปลี่ยนสภาพจากชีวมวลไปเป็นถ่านชีวภาพจะทำให้คาร์บอนในชีวมวลคงเหลืออยู่ประมาณ 50% ของคาร์บอนในชีวมวลและคาร์บอนดังกล่าวมีความเสถียรและคงตัวจึงอยู่ในพื้นดินได้เป็นระยะเวลานาน (Glaser et al., 2002) ด้วยลักษณะดังกล่าว ถ่านชีวภาพจึงถูกนำมาใช้ประโยชน์อีกวัตถุประสงค์หนึ่ง คือ เป็นวัตถุในการกักเก็บคาร์บอนลงสู่ดิน (Yooyen et al., 2015)

ปริมาณธาตุอาหารทั้งหมดประกอบไปด้วย ไนโตรเจน (N) ฟอสฟอรัส (P) และโพแทสเซียม (K) ของถ่านชีวภาพจากไมยราบยักษ์ที่ไม่ได้ผ่านการปรับสภาพด้วยสารเสริมประสิทธิภาพหรือ BC เท่ากับ 0.55%, 0.13% และ 1.36% ตามลำดับ ถ่านชีวภาพจากไมยราบยักษ์ BAL0.50 เท่ากับร้อยละ 0.66%, 0.08% และ 0.35% ตามลำดับ และถ่านชีวภาพจากไมยราบยักษ์ BMG0.50 เท่ากับ 0.53%, 0.08% และ 0.30% ตามลำดับ ปริมาณธาตุอาหารในถ่านชีวภาพประกอบด้วย ธาตุอาหารหลักและธาตุอาหารรอง ซึ่งปริมาณธาตุอาหารในถ่านชีวภาพขึ้นอยู่กับปริมาณธาตุอาหารในวัตถุดิบที่นำมาผลิตถ่านชีวภาพและกระบวนการในการผลิตและอุณหภูมิที่ใช้ในการผลิต (Lang et al, 2005) โดยกระบวนการไพโรไลซิสวัตถุดิบในสภาพที่อุณหภูมิสูงทำให้ปริมาณและความเป็นประโยชน์ของไนโตรเจนลดลงเนื่องมาจากไนโตรเจนถูกปลดปล่อยออกมาอย่างต่อเนื่องระหว่างกระบวนการไพโรไลซิส โดยจะมีปริมาณลดลงมากกว่าครึ่งหนึ่งของปริมาณไนโตรเจนที่มีอยู่ในวัตถุดิบ (Bagreev et al, 2001)

Table 2 Chemical properties of biochar derived from *Mimosa pigra* L. before and after modification

Biochar	pH	Organic Carbon (%)	Organic Matter (%)	C/N ratio	Nutrient (%)		
					N	P	K
BC	9.3	3.50	6.02	6:1	0.55	0.13	1.36
BAL0.50	8.8	42.19	72.56	64:1	0.66	0.08	0.35
BMG0.50	4.3	36.77	63.24	69:1	0.53	0.08	0.30

การผลิตของถ่านชีวภาพจากไมยราบยักษ์ในหน่วย 1 กิโลกรัมน้ำหนักแห้งของชีวมวลไมยราบยักษ์ระดับห้องปฏิบัติการ ดังนี้ ถ่านชีวภาพจากไมยราบยักษ์ที่ไม่ได้ปรับสภาพ BC เท่ากับ 300 บาท ส่วนถ่านชีวภาพจากไมยราบยักษ์ BAL0.50 และถ่านชีวภาพจากไมยราบยักษ์ BMG0.50 เท่ากับ 1,200 และ 950 บาท ตามลำดับ โดยข้อจำกัดของต้นทุนการผลิตเป็นเพียงการประมาณสำหรับระดับห้องปฏิบัติการ ซึ่งอาจจะมีต้นทุนที่สูง อีกทั้งต้นทุนที่มีการใช้สารเสริมประสิทธิภาพมีต้นทุนสูงกว่าการผลิตถ่านชีวภาพจากไมยราบยักษ์ที่ไม่มีการปรับสภาพ แต่อย่างไรก็ตามเมื่อเทียบกับ

ประสิทธิภาพ การใช้สารเสริมประสิทธิภาพมีประสิทธิภาพในการลดปริมาณสารอาหารในแหล่งน้ำมากกว่า 10 เท่า ดังนั้น การให้การสนับสนุนงบประมาณเพื่อการขยายสเกลและการให้ความสำคัญต่อประสิทธิภาพของการดูดซับ จึงถือเป็นเรื่องที่คุ้มทุนกว่า

สรุป

ประสิทธิภาพการดูดซับไนโตรเจนและฟอสฟอรัสของถ่านชีวภาพจากไมยราบยักษ์ที่ไม่ได้ปรับสภาพ BC มีความสามารถในการดูดซับไนเตรต (KNO_3) เท่ากับ 8.33% แลอนุมานได้ว่าไม่มีประสิทธิภาพในการดูดซับสารฟอสเฟตในน้ำ แต่เมื่อทำการปรับสภาพชีวมวลถ่านชีวภาพด้วยสารเสริมประสิทธิภาพ พบว่า โดยถ่านชีวภาพจากไมยราบยักษ์ที่ปรับสภาพด้วยสารละลายอลูมิเนียมคลอไรด์เฮกซะไฮเดรตที่ความเข้มข้น 0.5 โมลาร์ (BAL0.50) มีประสิทธิภาพการดูดซับไนเตรตสูงสุด โดยใช้ระยะเวลาในการดูดซับเป็นเวลา 24 hr เท่ากับร้อยละ 68.75 หรือ 6.88 mg/g ซึ่งมากกว่าถ่านชีวภาพจากไมยราบยักษ์ที่ไม่ได้ปรับสภาพถึงร้อยละ 83 หรือ 8 เท่า ส่วนถ่านชีวภาพจากไมยราบยักษ์ที่ปรับสภาพด้วยสารละลายแมกนีเซียมคลอไรด์เฮกซะไฮเดรตที่ความเข้มข้น 0.5 โมลาร์ (BMG0.50) โดยใช้ระยะเวลาในการดูดซับเป็นเวลา 24 ชั่วโมง มีประสิทธิภาพการดูดซับฟอสเฟตสูงสุด ซึ่งมากกว่าถ่านชีวภาพจากไมยราบยักษ์ที่ไม่ได้ปรับสภาพถึง 96% หรือ 10 เท่า ประสิทธิภาพที่เพิ่มขึ้นเป็นผลมาจากพื้นที่ผิวที่เพิ่มขึ้น โดยเพิ่มสูงขึ้นจากถ่านชีวภาพที่ไม่มีการปรับสภาพมากถึง 10 เท่า

การทดลองนี้ยังเป็นการทดลองระดับห้องปฏิบัติการ ควรมีการขยายงานวิจัยเป็นสเกลที่ใหญ่ขึ้นเพื่อที่จะสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ในพื้นที่จริง และต่อยอดให้เกิดนวัตกรรมที่สามารถแก้ไขปัญหาการเกิดยูโทรฟิเคชันในแหล่งน้ำชลประทานได้ในอนาคต รวมถึงสารปนเปื้อนอื่น ๆ ในแหล่งน้ำ เช่น โลหะหนัก สารกำจัดศัตรูพืช และสารอินทรีย์ เป็นต้น

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ นายณัฐพล วุฒิจันทร์ ผู้อำนวยการสำนักวิจัยและพัฒนา นางสาวอุไร เพ่งพิศ ผู้เชี่ยวชาญด้านวิจัยและพัฒนา(นักวิทยาศาสตร์เชี่ยวชาญ) และนางธัญลักษณ์ แต่บรรพกุล ผู้อำนวยการส่วนวิจัยและพัฒนาด้านวิทยาศาสตร์และสิ่งแวดล้อม สำนักวิจัยและพัฒนากรมชลประทาน ที่ให้คำแนะนำและให้การสนับสนุนเป็นอย่างดี

เอกสารอ้างอิง

มั่นสิน ตัณฑุลเวศม์. 2545. เคมีวิทยาของน้ำและน้ำเสีย. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพฯ.

พีรพรพิศาล. 2549. สาหร่ายวิทยา. ภาควิชาชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, เชียงใหม่.

APHA, AWWA, WPCF. 2012. Standard methods for the examination of water and wastewater, 20th ed. American Public Health Association, Washington D.C., USA.

Bagreev, A., Bandosza, T.J., Locke, D.C. 2001. Pore structure and surface chemistry of adsorbents obtained by pyrolysis of sewage sludge-derived fertilizer. Carbon 39: 1971–1979.

Chen, Y.Q., Yang, H.P., Wang, X.H. 2012. Biomass-based pyrolytic polygeneration system on cotton stalk pyrolysis: Influence of temperature. Bioresour. Technol. 107: 411–418.

Downie, A., Crosky, A., Munroe, P. 2009. Physical properties of biochar. In: Lehmann, J., Joseph, S. (Eds.), Biochar for environmental management: Science and technology. Earthscan, London, UK, pp. 13–32.

Glaser, B., Lehmann, J., Zech, W. 2002. Ameliorating physical and chemical properties of highly weathered soils in the tropics with charcoal-a review. Biol. Fertil. Soils 35: 219–230.

Lang, T., Jensen, A.D., Jensen, P.A. 2005. Retention of organic elements during solid fuel pyrolysis with emphasis on the peculiar behavior of nitrogen. Energy Fuels 19: 1631–1643.

Li, M., Zhang, Z., Li, Z., Wu, H. 2020. Removal of nitrogen and phosphorus pollutants from water by FeCl3 impregnated biochar. Ecol. Eng. 149: 1057–1092.

Mukherjee, A., Zimmerman, A.R., Harris, W. 2011. Surface chemistry variations among a series of laboratory-produced biochars. Geoderma 163: 247–255.

Seybold, C.A., Grossman, R.B., Reinsch, T.G. 2005. Predicting cation exchange capacity for soil survey using linear models. Soil Sci. Soc. Am. J. 69: 856–863.

Sohi, S., Lopez-Capel, E., Krull, E., Bol, R. 2009. Biochar, climate change and soil: A review to guide future research. CSIRO Land and Water Science Report, Australia.

Thies, J.E., Rilling, M.C. 2009. Characteristic of biochar: Biological properties. In: Lehmann, J., Joseph, S. (Eds.), Biochar for environmental management: Science and technology. Earthscan, London, UK.

Tran, P., Nguyen, P., Nguyen, T.N., Tran, N.T., Nguyen, T.A.H., Tran, Q.B., Nguyen, X.C. 2021. Enhancement of phosphate adsorption by chemically modified biochars derived from Mimosa pigra invasive plant. Case Stud. Chem. Environ. Eng. 4: 100–117.

Vimal, V., Patel, M., Mohan, D. 2019. Aqueous carbofuran removal using slow pyrolyzed sugarcane bagasse biochar: Equilibrium and fixed-bed studies. RSC Adv. 9: 26338–26350.

Wang, S., Peng, Y. 2010. Review natural zeolites as effective adsorbents in wastewater treatment. Chem. Eng. J. 156: 11–24.

Yooyen, J., Wijitkosum, S., Sriburi, T. 2015. Increasing yield of soybean by adding biochar. J. Environ. Res. Dev. 9: 1066–1074.

ประสิทธิภาพของการใช้แมกเนติกไฮดรอกซีอะพาไทต์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในกระบวนการโอโซเนชันเพื่อกำจัดเอนโรฟลอกซาซินในน้ำเสียสังเคราะห์

Efficiency of magnetic hydroxyapatite as a catalyst in the ozonation process for the removal of enrofloxacin from synthetic wastewater

นิชดา เมฆ*, **ชลอ จารุสุทธิรักษ์**, **มณีกาญจน์ อยู่เอี่ยม**

Nichada Mek*, Chalor Jarusutthirak, Maneekarn Yoo-iam

ภาควิชาเทคโนโลยีและการจัดการสิ่งแวดล้อม คณะสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

Department of Environmental Technology and Management, Faculty of Environment, Kasetsart University, Bangkok 10900, Thailand

*Corresponding author. E-mail address: Nichada.me@ku.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มุ่งศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดเอนโรฟลอกซาซินในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกระบวนการโอโซเนชันร่วมตัวเร่งปฏิกิริยา โดยใช้แมกเนติกไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่สังเคราะห์จากเปลือกหอยเชอรี่และบรรจุอนุภาคเหล็กออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ยืนยันโครงสร้างสำเร็จด้วย FT-IR จากสัญญาณการสั่นของหมู่ Fe–O การทดลองประเมินภายใต้ความเข้มข้นเอนโรฟลอกซาซิน 5.0, 10.0, 20.0 มก./ล. ค่า pH 5.0, 7.0, 9.0 ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 0.3, 0.7, 1.0 ก./ล. และเวลาสัมผัส 90 นาที ผลพบว่าสภาวะเหมาะสมคือความเข้มข้นเริ่มต้น 20.0 มก./ล. ที่ pH 7.0 ตัวเร่งปฏิกิริยา 0.7 ก./ล. ให้ประสิทธิภาพการกำจัดสูงถึง 75.63% สูงกว่าโอโซนอย่างเดียวที่ 58.29% การวิเคราะห์จลนพลศาสตร์พบว่าการสลายเอนโรฟลอกซาซินสอดคล้องกับแบบจำลองปฏิกิริยาอันดับสองเทียม โดยมีค่าคงที่อัตราเร็ว (k) เท่ากับ 0.0134 และ 0.0095 นาที$^{-1}$ ตามลำดับ การเพิ่มประสิทธิภาพเกิดจากความสามารถของตัวเร่งปฏิกิริยาในการกระตุ้นการสลายโอโซนให้เกิดไฮดรอกซิลแรดิคัล (•OH) ซึ่งมีศักยภาพออกซิเดชันสูงกว่า นอกจากนี้ ตัวเร่งปฏิกิริยายังแสดงศักยภาพการนำกลับมาใช้ซ้ำด้วยการแยกออกจากน้ำเสียได้อย่างรวดเร็วด้วยการใช้แม่เหล็กดูด อีกทั้งยังคงมีประสิทธิภาพได้มากกว่า 60% หลังการใช้งาน 5 รอบ

คำสำคัญ: กระบวนการโอโซเนชัน, ตัวเร่งปฏิกิริยา, แมกเนติไฮดรอกซีอะพาไทต์, เอนโรฟลอกซาซิน

Abstract

This study investigated the efficiency of enrofloxacin removal from synthetic wastewater using an ozonation process coupled with a magnetic hydroxyapatite catalyst synthesized from golden apple snail shells and loaded with iron oxide particles. The structural formation of the catalyst was confirmed by FT-IR, indicated by the characteristic Fe–O vibration bands. The performance was evaluated under enrofloxacin concentrations of 5.0, 10.0, and 20.0 mg/L; pH levels of 5.0, 7.0, and 9.0; catalyst dosages of 0.3, 0.7, and 1.0 g/L; and a reaction time of 90 minutes. Results indicated that the optimal condition was achieved at an initial concentration of 20.0 mg/L, pH 7.0, and a catalyst dosage of 0.7 g/L, yielding a removal efficiency of 75.63%, which was higher than that of ozonation alone 58.29%. Kinetic analysis revealed that the degradation of enrofloxacin followed a pseudo-second-order model, with rate constants (k) of 0.0134 and 0.0095 min^{-1} for the catalytic ozonation and ozonation alone, respectively. The enhanced removal efficiency was attributed to the catalyst's ability to promote ozone decomposition, generating highly reactive hydroxyl radicals (•OH). Moreover, the catalyst exhibited good reusability and could be rapidly separated from the treated water using a magnet, maintaining over 60% efficiency after five reuse cycles.

Keywords: Catalyst, Enrofloxacin, Ozonation process, Magnetic hydroxyapatite

คำนำ

เอนโรฟลอกซาซิน (Enrofloxacin: ENR) เป็นยาปฏิชีวนะในกลุ่มฟลูออโรควิโนโลน (Fluoroquinolone) ที่มีการถูกนำมาใช้ประโยชน์ในทางการแพทย์และการเพาะเลี้ยงฟาร์มปศุสัตว์ (Moulin et al., 2008) สามารถออกฤทธิ์ในการทำลายและยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อแบคทีเรีย ในประเทศไทยมีการนำเอนโรฟลอกซาซินมาใช้ในการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำและฟาร์มปศุสัตว์ ซึ่งการใช้สารเอนโรฟลอกซาซินที่แพร่หลายนี้อาจนำไปสู่การตกค้างในสิ่งแวดล้อมที่หลากหลาย ทั้งน้ำผิวดิน น้ำใต้ดิน น้ำเสียจากชุมชน หรือแม้แต่ในน้ำที่ใช้ในการอุปโภคและบริโภค (Pollution Control Department, 2002) เมื่อได้รับสัมผัสหรือมีการบริโภค จะส่งผลทำให้เกิดการทำงานที่ผิดปกติของร่างกาย เกิดการระคายเคืองต่อระบบทางเดินอาหาร มีการอาเจียนและคลื่นไส้ รวมถึงส่งผลต่อระบบประสาท เช่น ปวดศีรษะ วิงเวียน หน้ามืด และยังสามารถก่อให้เกิดการเป็นต้อกระจกซึ่งจะส่งผลต่อมองเห็นอีกด้วย (World Health Organization, 1997) ในปัจจุบันการกำจัดสารเอนโรฟลอกซาซินสามารถทำได้หลากหลายวิธี เช่น วิธีการดูดซับ (Adsorption) (Ashiq et al., 2021) และวิธีการย่อยสลายทางชีวภาพและการฟื้นฟูด้วยพืช (Biodegradation and Phytoremediation) (Qiu et al., 2021) รวมถึงการกำจัดด้วยกระบวนการออกซิเดชันขั้นสูง (Advanced Oxidation Processes, AOPs) (Long and Jin, 2012)

การนำกระบวนการออกซิเดชันขั้นสูง (Advanced Oxidation Processes, AOPs) โดยใช้ก๊าซโอโซน (O_3) มาบำบัดมลสาร ถือว่าเป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพสูงและใช้เวลาในการบำบัดน้อยอีกทั้งยังไม่ทิ้งสารตกค้างหลังการบำบัด จึงมักได้รับความนิยมในการกำจัดมลพิษในแหล่งน้ำ (Kumhomkul, 2020) แต่อย่างไรก็ตามโอโซนก็ยังมีข้อจำกัดด้านการออกฤทธิ์กับมลสารที่มีความจำเพาะ จึงต้องมีการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพ โดยในปัจจุบันนี้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่นิยมใช้มีหลากหลาย เช่น เหล็ก (Fe^{2+}) โคบอลต์ (Co^{2+}) แมงกานีส (Mn^{2+}) ซึ่งตัวเร่งปฏิกิริยานี้จะไปช่วยทำให้เร่งการสลายตัวของโอโซนเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการออกซิเดชัน โดยสารเหล่านี้จะสร้างอนุมูลไฮดรอกซิล (•OH) ซึ่งเป็นตัวออกซิไดซ์ที่มีฤทธิ์แรงกว่าโอโซน (Xiang et al., 2021) อย่างไรก็ตาม การใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาก็ยังคงมีข้อจำกัดในการใช้ คือ ความยากในการการแยกตัวเร่งปฏิกิริยาออกจากน้ำเสียหลังการบำบัด จึงต้องมีการใช้วัสดุรองรับมาเป็นวัสดุตัวกลางในการยึดเกาะของตัวเร่งปฏิกิริยาเพื่อเพิ่มพื้นที่ผิวและส่งเสริมให้ตัวเร่งปฏิกิริยามีประสิทธิภาพมากขึ้น ซึ่งสารไฮดรอกซีอะพาไทต์ (Hydroxyapatite: HAp) เป็นสารประกอบแคลเซียมฟอสเฟตที่ได้จากแหล่งธรรมชาติ เช่น กระดูกหรือเปลือกหอย มีศักยภาพสูงในการใช้เป็นวัสดุรองรับตัวเร่งปฏิกิริยา เนื่องจากมีความเข้ากันได้ทางชีวภาพ โครงสร้างพรุน และมีความไวต่อปฏิกิริยาบนผิววัสดุ (มานิต, 2558) ในงานวิจัยนี้ได้ใช้เปลือกหอยเชอรี่ (*Pomacea canaliculata*) ซึ่งเป็นสัตว์น้ำต่างถิ่นรุกรานในประเทศไทยและเป็นศัตรูพืชที่สร้างความเสียหายในนาข้าว (Prakongkep et al., 2021) มาเป็นวัสดุที่ใช้ในการสังเคราะห์ HAp และเมื่อมีการเติมออกไซด์ของเหล็กลงไป HAp สามารถทำหน้าที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาแบบแม่เหล็ก ทำให้เพิ่มทั้งประสิทธิภาพการย่อยสลายสารและความสะดวกในการแยกออกหลังการกำจัด

การศึกษาครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาประสิทธิภาพกำจัดเอนโรฟลอกซาซินในน้ำเสียสังเคราะห์โดยเปรียบเทียบระหว่างการไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยากับการใช้แมกเนติกไฮดรอกซีอะพาไทต์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา พร้อมทั้งศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการกำจัด ได้แก่ ความเข้มข้นเริ่มต้นของเอนโรฟลอกซาซิน ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา และค่าความเป็นกรดด่างของน้ำเสียสังเคราะห์ เพื่อสามารถนำผลการวิจัยที่ได้ไปประยุกต์ใช้ในกระบวนการบำบัดน้ำเสีย

อุปกรณ์และวิธีการ

การสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยา

ตัวเร่งปฏิกิริยาจะถูกสังเคราะห์จากเปลือกหอยเชอรี่ โดยนำเปลือกหอยเชอรี่มาล้างให้สะอาด อบให้แห้งและทำการบดให้ละเอียด จากนั้นนำไปเผาที่อุณหภูมิ 850 °C เพื่อให้ได้แคลเซียมออกไซด์ (CaO) และทำการเติมน้ำกลั่นและสารละลาย $(NH_4)_2HPO_4$ 50 มล. ปั่นกวนสารทำการควบคุม pH เป็น 9.0 โดยการเติม 25%NH_4OH ตั้งทิ้งไว้ 24 ชั่วโมง แล้วทำการล้างตะกอนจน pH เป็นกลาง อบให้แห้งและนำไปเผาที่อุณหภูมิ 950 °C เพื่อให้ได้สารไฮดรอกซีอะพาไทต์ (Sari and Yusuf, 2018) จากนั้นนำสารไฮดรอกซีอะพาไทต์มาบรรจุอนุภาคแม่เหล็กโดยใช้ $FeSO_4 \cdot 7H_2O$ และ $FeCl_3 \cdot 6H_2O$ ขณะปั่นกวนจะสังเกตเห็นตะกอนสีดำ ปรับ pH เป็น 11.0 โดยใช้ NaOH ตั้งทิ้งไว้ 24 ชั่วโมง จากนั้นทำการล้างตะกอน อบให้แห้งแล้วนำมาบดโดยใช้โกร่ง จะได้ตัวเร่งปฏิกิริยาแมกเนติกไฮดรอกซีอะพาไทต์ (Feng et al., 2010) และทำการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันตัวเร่งปฏิกิริยาโดยใช้เทคนิค Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FT-IR)

การติดตั้งถังปฏิกิริยาและการเดินระบบโอโซเนชัน

ถังปฏิกิริยาที่ทำในงานวิจัยนี้เป็นถังอะคริลิคใสทรงสี่เหลี่ยมขนาดกว้าง 12 ซม. ยาว 12 ซม. และสูง 15 ซม. ปริมาตรสุทธิ 2 ล. ต่อเข้ากับเครื่องผลิตโอโซน (Ozone Generator) ที่มีอัตราการผลิตอยู่ที่1.18 มก./นาที หรือ 70.8 มก./ชั่วโมง และ อุปกรณ์เวนทูรี (Venturi) ซึ่งมีจุดเก็บตัวอย่างอยู่เหนือเวนทูรี 5 ซม. นอกจากนั้นยังมีการต่อกับอุปกรณ์ที่บรรจุสารโซเดียมไทโอซัลเฟต (Na_2S_2O) เพื่อดักจับแก๊สโอโซนก่อนปล่อยออกสู่สิ่งแวดล้อมทางช่องทางแก๊สออก (Fig. 1) การเดินระบบโอโซเนชันในการทดลองครั้งนี้จะถูกแบ่งออกเป็น 2 รูปแบบ คือ การเดินระบบโอโซเนชันแบบไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยา และ การเดินระบบโอโซเนชันแบบมีตัวเร่งปฏิกิริยา

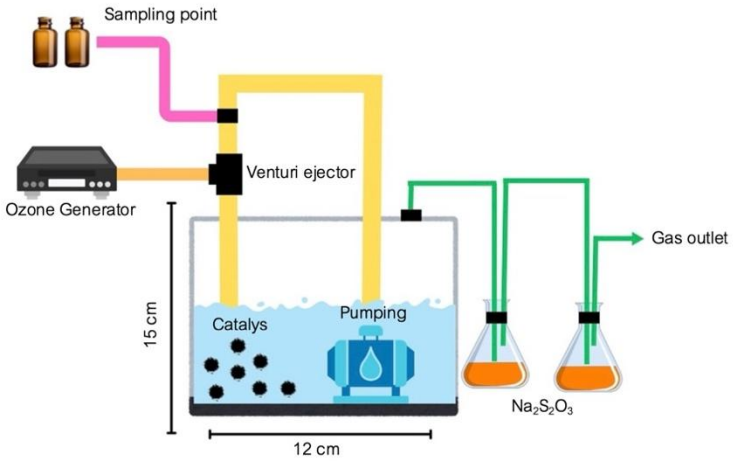


Fig. 1 Installation of the ozonation system.

ตัวอย่างน้ำเสีย

เตรียมน้ำเสียสังเคราะห์จากยาเอนโรฟลอกเข้มข้น 30.0 มก./ล. เพื่อใช้เป็นสารละลายสต๊อก และนำไปวัดหาปริมาณความเข้มข้นของสารละลายโดยการวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่อง UV-vis spectrophotometry ที่ความยาวคลื่น 271 นาโนเมตร (Baldez et al., 2024)

การศึกษาเปรียบเทียบการบำบัดเอนโรฟลอกซาซินที่ไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยาและมีตัวเร่งปฏิกิริยา

ในการทดลองครั้งนี้จะทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดเอนโรฟลอกซาซิน ด้วยกระบวนการโอโซเนชันที่มีและไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยาในน้ำเสียสังเคราะห์ โดยมีปัจจัยที่ศึกษา ได้แก่ ปัจจัยความเข้มข้นเริ่มต้นเอนโรฟลอกซาซิน (5.0, 10.0 และ 20.0 มก./ล.) ปัจจัยค่าความเป็นกรดด่าง (5.0, 7.0 และ 9.0) และปัจจัยปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา (0.3, 0.7 และ 1.0 ก./ล.) ในปริมาตรน้ำเสีย 1 ลิตร ที่เวลา 90 นาที

การศึกษาศักยภาพการนำกลับมาใช้ใหม่ของตัวเร่งปฏิกิริยา

ในการทดลองครั้งนี้จะทำการศึกษาศักยภาพการนำกลับมาใช้ใหม่ของตัวเร่งปฏิกิริยา โดยการนำตัวเร่งปฏิกิริยาไปทำความสะอาดด้วยเครื่องอัลตร้าโซนิค ที่ความถี่ 20-80 kHz ด้วยน้ำกลั่น จากนั้นนำไปอบที่ 105 °C เวลา 1 ชั่งโมง ก่อนนำมาใช้ซ้ำ เพื่อดูว่าการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาซ้ำจะส่งผลให้ประสิทธิภาพการกำจัดลดลงหรือไม่

การศึกษาจลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาการกำจัดเอนโรฟลอกซาซิน

ศึกษาจลนพลศาสตร์โดยหาความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นเริ่มต้นของเอนโรฟลอกซาซิน ความเข้มข้นของเอนโรฟลอกซาซินที่เหลือจากการบำบัด ณ เวลาหนึ่ง และระยะเวลาที่ใช้ทำปฏิกิริยา มาแทนที่ Equation 1–3 เพื่อหาอัตราการเกิดปฏิกิริยาการกำจัดเอนโรฟลอกซาซิน และพิจารณาอันดับของปฏิกิริยาจากค่า R^2 ที่ได้

ปฏิกิริยาอันดับศูนย์	$C_t = C_0 - kt$	(1)
ปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง	$\ln (C_t/C_0) = - kt$	(2)
ปฏิกิริยาอันดับสอง	$1/C_t = kt + (1/C_0)$	(3)

โดย C_0 คือ ความเข้มข้นเริ่มต้นของเอนโรฟลอกซาซินในน้ำเสีย (มิลลิกรัม/ลิตร)
C_t คือ ความเข้มข้นของเอนโรฟลอกซาซินที่ตรวจวัดได้ ณ เวลาใดเวลาหนึ่ง (มิลลิกรัม/ลิตร)
k คือ ค่าคงที่อัตราการเกิดปฏิกิริยา
t คือ ระยะเวลาที่ใช้ทำปฏิกิริยา (นาที)

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

ผลการศึกษาความเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

จากผล FTIR ช่วง 400–4000 cm^{-1}(Fig. 2) พบที่ 631.48 cm^{-1}เป็นการสั่นของพันธะ (–OH) ขณะที่พีคที่ 566.72, 962.6, 1029.20 และ 1088.58 cm^{-1} เป็นหมู่ฟังก์ชันฟอสเฟต (P–O) โดยบ่งบอกว่าเป็นหมู่ฟังก์ชันของไฮดรอกซีอะพาไทต์ พีคที่ 1454.42 และ 1416.64 cm^{-1} เป็นหมู่คาร์บอเนต พีคที่ 573.73 cm^{-1} ซึ่งเป็นพันธะ Fe–O ของเหล็กออกไซด์ สะท้อนว่าอนุภาคเหล็กออกไซด์ถูกบรรจุลงบนไฮดรอกซีอะพาไทต์ได้สำเร็จ (Ayed et al., 2024)

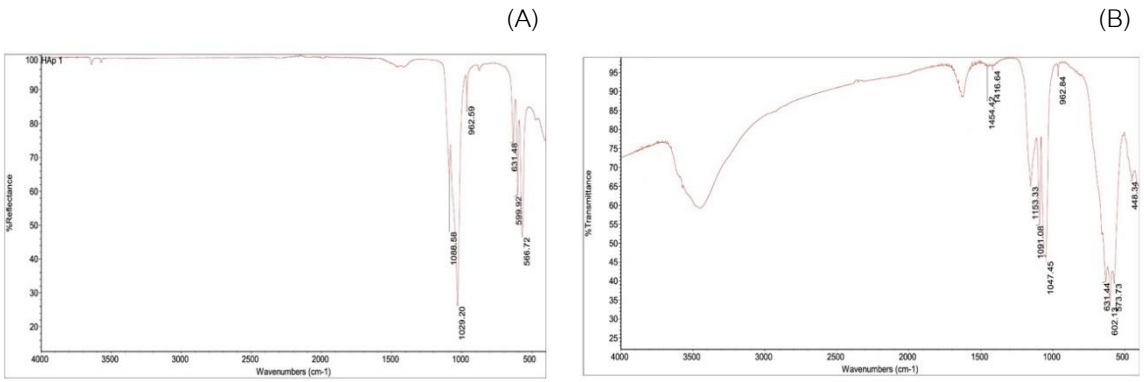


Fig. 2 Functional group analysis by FT-IR (A) Hydroxyapatite, (B) Magnetic hydroxyapatite.

ผลการศึกษาความเข้มข้นเริ่มต้นของเอนโรฟลอกซาซิน

การศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดเอนโรฟลอกซาซินด้วยกระบวนการโอโซเนชันที่มีและไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยา โดยใช้ความเข้มข้นของเอนโรฟลอกซาซิน 5.0, 10.0 และ 20.0 มก./ล. ที่เวลาปฏิกิริยา 90 นาที pH 7.0 ซึ่งผลการทดลองพบว่าประสิทธิภาพการกำจัดสูงสุดสำหรับความเข้มข้น 5.0, 10.0 และ 20.0 มก./ล. โดยใช้โอโซนอย่างเดียวอยู่ที่ 66.50±1.37%, 60.72±1.23% และ 58.29±1.16% ตามลำดับ และเมื่อใช้ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 1.0 ก./ล. พบว่าประสิทธิภาพเพิ่มขึ้นเป็น 79.93±1.45%, 70.98±1.14% และ 72.02±1.63% ตามลำดับ (Fig. 3) ซึ่งชี้ให้เห็นว่ากระบวนการโอโซเนชันที่ใช้โอโซนเพียงอย่างเดียวจะให้ประสิทธิภาพสูงเมื่อความเข้มข้นต่ำและเมื่อเพิ่มความเข้มข้นจะทำให้ประสิทธิภาพลดลง แต่เมื่อใส่ตัวเร่งปฏิกิริยาลงไป จะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการกำจัดให้สูงขึ้นแม้ในเข้มข้นที่มาก เนื่องจากตัวเร่งปฏิกิริยาจะช่วยทำให้โอโซนแตกตัวและเกิดอนุมูลไฮดรอกซิลแรดิคอล (•OH) ที่เป็นตัวออกซิไดซ์ที่แรงกว่าโอโซน ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Wang et al. (2016)

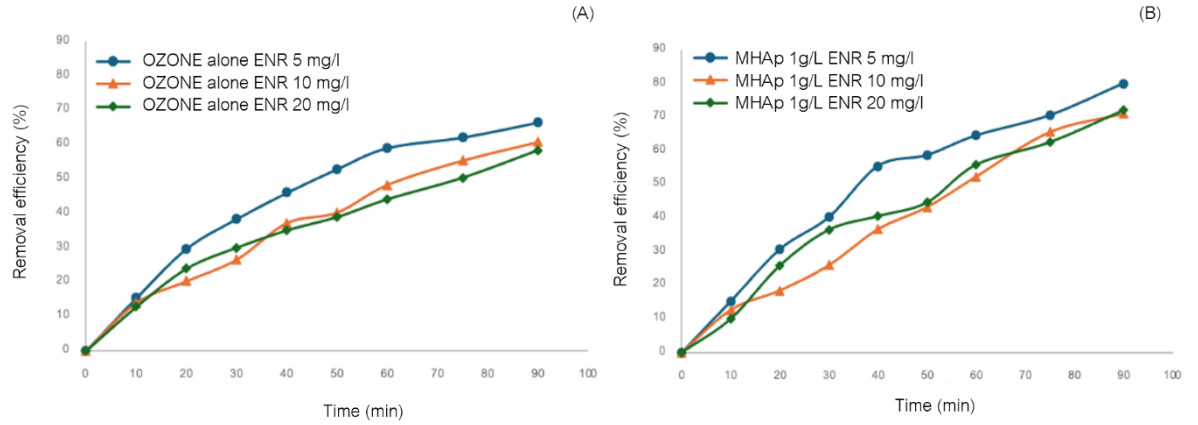


Fig. 3 Effect of ENR concentration on ENR removal efficiency (A) Ozone alone, (B) Catalyst Magnetic hydroxyapatite (MHAp) 1g/L.

ผลการศึกษาปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา

การทดลองครั้งนี้ใช้ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 0.3, 0.7 และ 1.0 ก./ล. ในสภาวะความเข้มข้น ENR 20.0 มก./ล. pH 7.0 พบว่าประสิทธิภาพการกำจัดเอนโรฟลอกซาซินอยู่ที่ 69.10±1.26%, 75.63±1.34% และ 72.02±1.63% เมื่อเทียบกับการไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาอยู่ที่ 58.29±1.16% (Fig. 4) ซึ่งเห็นได้ว่าที่ตัวเร่งปฏิกิริยา 0.7 ก./ล. จะให้ประสิทธิภาพการบำบัด

ที่สูงสุด เนื่องจากมีตัวเร่งปฏิกิริยาที่สร้างไฮดรอกซิลแรดิคอล (•OH) ได้มากกว่าที่ 0.3 ก./ล. ในขณะที่การใส่ตัวเร่งปฏิกิริยา 1.0 ก./ล. อาจส่งผลให้ตัวเร่งปฏิกิริยาเกิดการรวมตัวกัน (agglomeration) ทำให้ประสิทธิภาพการกำจัดลดลง ซึ่งผลการทดลองสอดคล้องกับงานวิจัยของ Chen et al. (2017)

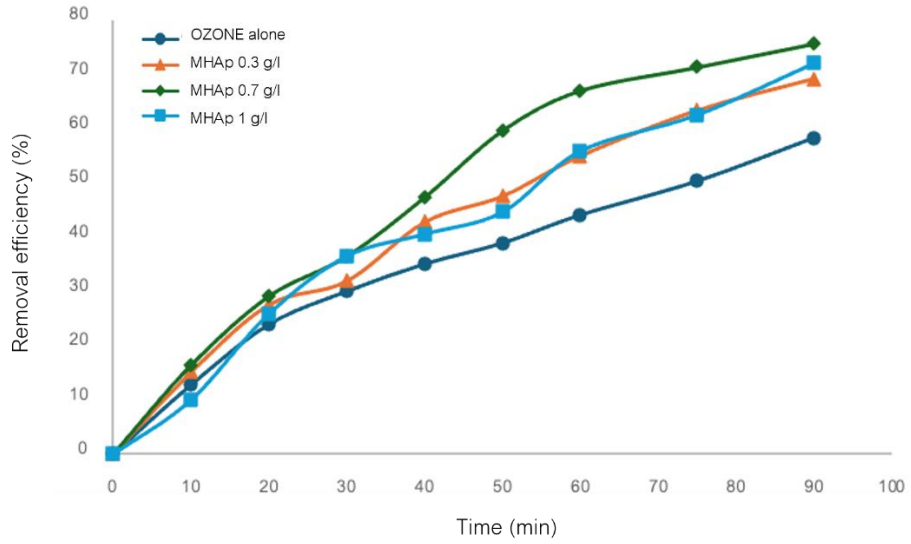


Fig. 4 Effect of catalyst dosage on ENR removal efficiency (operating conditions [ENR] = 20.0 mg/L, pH = 7.0)

ผลการศึกษาค่าความเป็นกรดด่างของน้ำเสียสังเคราะห์

การศึกษาจะดำเนินการในสภาวะการทดลองที่ความเข้มข้นเริ่มต้นเอนโรฟลอกซาซิน 20.0 มก./ล. ตัวเร่งปฏิกิริยา 1.0 ก/ล. ที่ pH 5.0, 7.0 และ 9.0 (Fig. 5) พบว่าเมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา ประสิทธิภาพการกำจัดเท่ากับ 70.12±1.17%, 72.02±1.63% และ 74.76±1.34% ตามลำดับ ซึ่งสูงกว่าการใช้โอโซนอย่างเดียวที่ให้ค่าประสิทธิภาพ 52.85±1.37%, 58.29±1.16% และ 65.14±1.29% โดยเพิ่มขึ้น 17.27%, 13.73% และ 9.62% ตามลำดับ ผลการทดลองแสดงว่าประสิทธิภาพการกำจัดเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงต้นและค่อย ๆ ลดลงในระยะหลัง แต่ยังคงมีประสิทธิภาพสูงที่ค่า pH สูง ทั้งนี้ ค่า pH 7.0 และ 9.0 ให้ผลใกล้เคียงกัน อาจเนื่องมาจากความเข้มข้นของไฮดรอกไซด์ไอออนที่มากกว่าขณะที่ pH 5 แสดงผลชัดเจนว่าตัวเร่งปฏิกิริยามีส่วนช่วยเพิ่มประสิทธิภาพโดยส่งเสริมการเกิดอนุมูลไฮดรอกซิล (•OH) ซึ่งเป็นตัวออกซิไดซ์มีศักยภาพสูงกว่าโอโซน ซึ่งผลการทดลองสอดคล้องกับงานวิจัยของ Wang et al. (2022)

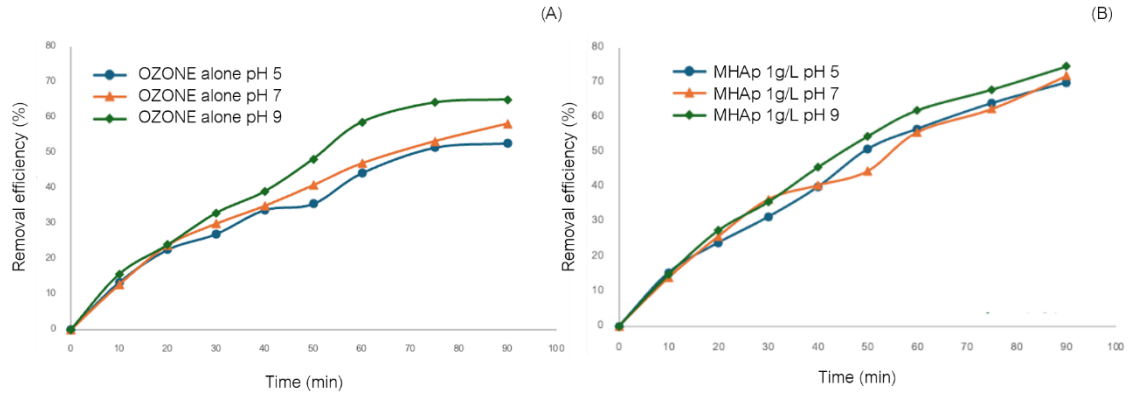


Fig. 5 Effect of pH on ENR removal efficiency (operating conditions [ENR] = 20.0 mg/L) (A) Ozone alone, (B) Catalyst MHAp 1.0 g/L.

ผลการศึกษาจลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาการกำจัดเอนโรฟลอกซาซิน

จากการศึกษาจลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาการกำจัดเอนโรฟลอกซาซินความเข้มข้น 5.0, 10.0 และ 20.0 มก./ล. ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 0.3, 0.7 และ 1.0 ก./ล. ที่ pH 5.0, 7.0 และ 9.0 พบว่าจลนพลศาสตร์แสดงให้เห็นว่าการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาทำให้ค่าคงที่อัตราการเกิดปฏิกิริยา (k) เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญเมื่อเทียบกับโอโซนอย่างเดียว และจากผลการทดลองแสดงดัง Table 1 พบว่าการกำจัดเอนโรฟลอกซาซินโดยใช้โอโซนอย่างเดียวและโอโซนกับตัวเร่งปฏิกิริยาสอดคล้องกับแบบจำลองปฏิกิริยาอันดับสองเทียม บ่งชี้ว่าความเข้มข้นเอนโรฟลอกซาซินหรือตัวเร่งปฏิกิริยาส่งผลโดยตรงต่อค่าคงที่อัตราการเกิดปฏิกิริยา ซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษาของ Jabbari et al. (2020)

Table 1 The reaction rate constants for the removal of ENR under different pH

List	Catalyst (g/L)	pH	ENR (mg/L)	Rate constant		Reaction order
				Ozone alone	Catalytic ozonation	
1	0.3	5	5	0.0035	0.0051	2^{nd}
2	0.3	5	10	0.0108	0.0138	2^{nd}
3	0.3	5	20	0.0088	0.0135	2^{nd}
4	0.7	7	5	0.0135	0.0202	2^{nd}
5	0.7	7	10	0.0014	0.0029	2^{nd}
6	0.7	7	20	0.0095	0.0134	2^{nd}
7	1.0	9	5	0.0047	0.0109	2^{nd}
8	1.0	9	10	0.0140	0.0176	2^{nd}
9	1.0	9	20	0.0122	0.0154	2^{nd}

หลังการกำจัดเอนโรฟลอกซาซินทุกครั้งจะทำการแยกตัวเร่งปฏิกิริยาออกจากน้ำเสีย โดยในการทดลองนี้ ใช้การแยกออกโดยแม่เหล็ก ทำให้ตัวเร่งปฏิกิริยาเกิดการดูดติดกับแม่เหล็กและเกิดการตกตะกอนได้อย่างรวดเร็ว โดยจะทำให้ประหยัดเวลามากกว่าการปล่อยให้ตัวเร่งปฏิกิริยาตกตะกอนเอง (Fig. 6)

(A) (B)

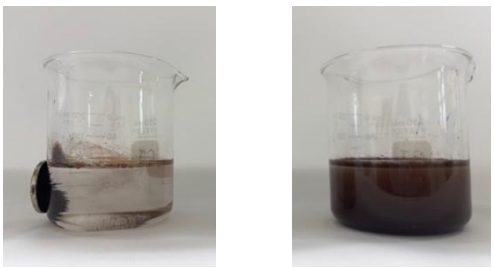


Fig. 6 Catalyst sedimentation (A) using a magnet, (B) Catalyst sedimentation at 5 minutes,

ผลการศึกษาศักยภาพการนำกลับมาใช้ใหม่ของตัวเร่งปฏิกิริยา

ผลการศึกษาศักยภาพการนำกลับมาใช้ใหม่ของตัวเร่งปฏิกิริยา พบว่าประสิทธิภาพการกำจัดเอนโรฟลอกซาซินด้วยกระบวนการโอโซเนชันโดยใช้แมกเนติกไฮดรอกซีอะพาไทต์ หลังจากผ่านการใช้งาน 5 ครั้ง อยู่ที่ 72.02%, 70.91%, 65.97%, 63.14% และ 60.68% ตามลำดับ (Fig. 7) ในสภาวะเอนโรฟลอกซาซินความเข้มข้น 20.0 มล./ล. ตัวเร่งปฏิกิริยา 1.0 ก./ล. จากผลจะเห็นว่าตัวเร่งปฏิกิริยาจะมีประสิทธิภาพการกำจัดลดลงในแต่ละรอบ แต่ยังคงประสิทธิภาพการกำจัด

เอนโรฟลอกซาซินได้ถึง 60% อย่างไรก็ตามการลดลงของประสิทธิภาพอาจจะมีปัจจัยมาจากการหลุดละลายของเหล็ก (Iron leaching) หรือการที่ผิวหน้าของตัวเร่งปฏิกิริยาถูกจับโดยสารผลพลอยได้ตัวอื่น (Fouling of active sites)

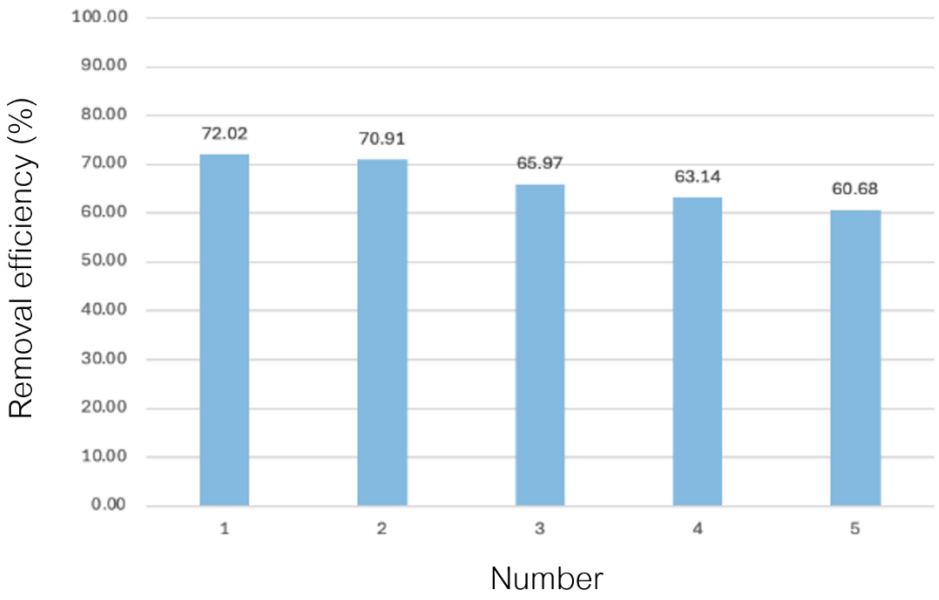


Fig. 7 Reusability Potential of the Catalyst MHAp.

สรุป

งานวิจัยนี้ได้สังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาแมกเนติกไฮดรอกซีอะพาไทต์ โดยใช้อนุภาคของเหล็ก $FeSO_4$ และ $FeCl_3$ บนวัสดุรองรับไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่สังเคราะห์จากเปลือกหอยเชอรี่ และวิเคราะห์โดยใช้เทคนิค FT-IR พบหมู่ฟังก์ชันฟอสเฟต (P–O) ของสารไฮดรอกซีอะพาไทต์ และหมู่ฟังก์ชัน Fe–O ของเหล็กออกไซด์ บ่งชี้ว่า $FeSO_4$ และ $FeCl_3$ ถูกบรรจุลงบนวัสดุรองรับได้สำเร็จ อีกทั้งยังมีคุณสมบัติของการเป็นแม่เหล็กที่ช่วยทำให้แยกออกได้ง่ายและรวดเร็วหลังการใช้งาน การศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดเอนโรฟลอกซาซินด้วยกระบวนการโอโซเนชันโดยใช้โอโซนเพียงอย่างเดียวเปรียบเทียบกับกระบวนการโอโซเนชันที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา พบว่าการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาให้ประสิทธิภาพการกำจัดที่สูงกว่าเนื่องจากตัวเร่งปฏิกิริยาจะช่วยกระตุ้นการสร้างอนุมูลไฮดรอกซิล (•OH) ซึ่งเป็นตัวออกซิไดซ์ที่มีศักยภาพสูงกว่าโอโซน นอกจากนั้นพบว่าการศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดเอนโรฟลอกซาซินแปรผันตามค่า pH 5.0, 7.0 และ 9.0 ปริมาณตัวเร่ง 0.3, 0.7 และ 1.0 ก./ล. และพบว่าค่าประสิทธิภาพการกำจัดยังแปรผกผันกับความเข้มข้นเริ่มต้นเอนโรฟลอกซาซินที่ 5.0, 10.0 และ 20.0 มก./ล. โดยความเข้มข้นเอนโรฟลอกซาซิน 20.0 มก./ล. การใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาจะส่งผลให้ประสิทธิภาพการกำจัดเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัด และที่ pH 5 การใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาจะให้ประสิทธิภาพการกำจัดสูงใกล้เคียงกับ pH อื่นๆ การวิเคราะห์จลนพลศาสตร์การกำจัดเอนโรฟลอกซาซินด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาสอดคล้องกับแบบจำลองปฏิกิริยาอันดับสองเทียม โดยค่าคงที่อัตราการเกิดปฏิกิริยาจะเพิ่มขึ้นเมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา และการศึกษาศักยภาพการนำตัวเร่งปฏิกิริยากลับมาใช้ใหม่ พบว่าแมกเนติกไฮดรอกซีอะพาไทต์ยังคงมีประสิทธิภาพการกำจัดสูงถึง 60% หลังการใช้ซ้ำ 5 รอบ

ข้อเสนอแนะ

1.งานวิจัยนี้ ใช้น้ำเสียสังเคราะห์ในการทดลอง ซึ่งถูกเตรียมขึ้นภายในห้องปฏิบัติการ จึงมีคุณสมบัติที่แตกต่างจากน้ำเสียจริงจากระบบบำบัดของชุมชน โรงพยาบาล หรือ โรงงานอุตสาหกรรมยา ดังนั้นควรทำการศึกษาน้ำเสียในระบบจริงเพื่อนำมาเปรียบเทียบและปรับใช้ในระบบบำบัดน้ำได้จริง

2. ควรทำการวิเคราะห์ความเป็นพิษ (Toxicity assessment) ของสารผลพลอยได้ (By products) ที่เกิดจากกระบวนการบำบัดด้วยโอโซเนชันที่มีแมกเนติกไฮดรอกซีอะพาไทต์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณคณะสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ที่ให้การสนับสนุนด้านสถานที่ ด้านอุปกรณ์ ด้านทุนการศึกษา (ทุนวิจัยเพื่อการพัฒนาบัณฑิตศึกษาคณะสิ่งแวดล้อม) เจ้าหน้าที่ของคณะสิ่งแวดล้อมและผู้ที่มีส่วนเกี่ยวข้องทุกท่านที่ช่วยให้งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี

เอกสารอ้างอิง

มานิต อังโชติพันธุ์. 2558. การดูดซับทองแดงและตะกั่วในน้ำเสียด้วยไฮดรอกซีอะพาไทต์จากเปลือกไข่. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.

Ashiq, A., Vithanage, M., Sarkar, B., Kumar, M., Bhatnagar, A., Khan, E., Xi, Y., Ok, Y.S. 2021. Carbon-based adsorbents for fluoroquinolone removal from water and wastewater: A critical review. Environ. Res. 197: 111091.

Ayed, S.B., Sbihi, H.M., Azam, M., Al-Resayes, S.I., Ayadi, M.T., Ayari, F. 2021. Local iron ore identification: Comparison to synthesized Fe3O4 nanoparticles obtained by ultrasonic assisted reverse co-precipitation method for Auramine O dye adsorption. Desalin. Water Treat. 220: 446–458.

Baldez, W.M.C., Santos, J.D.J.P., Santos, W.D.C., et al. 2024. Enhanced photodegradation of enrofloxacin antibiotic using ZnO@FAU composite: A promising material for contaminant removal. Desalin. Water Treat. 318: 100356.

Chen, W., Jiang, Y., Li, X., Wang, J. 2017. Heterogeneous catalytic ozonation for water and wastewater treatment: Recent advances and perspective. Environ. Sci. Pollut. Res. 24: 11060–11082.

Feng, Y., Gong, J.L., Zeng, G.M., Niu, Q.Y., Zhang, H.Y., Nui, C.G., Deng, J.H., Yan, M. 2010. Adsorption of Cd(II) and Zn(II) from aqueous solutions using magnetic hydroxyapatite nanoparticles as adsorbents. Chem. Eng. J. 162: 487–494.

Jabbari, F., Eslami, A., Mahmoudian, J. 2020. Degradation of diclofenac in water using the O3/UV/S2O8 advanced oxidation process. Health Scope 9: e99436.

Jian Long, W., Le Jin, X. 2012. Advanced oxidation processes for wastewater treatment: Formation of hydroxyl radical and application. Crit. Rev. Environ. Sci. Technol. 42: 251–325.

Kumhomkul, T. 2020. Contamination and effect of pharmaceutical products in environment. EAU Heritage J. Sci. Technol. 14: 40–50.

Moulin, G., Cavalie, P., Pellanne, I., Chevance, A., Laval, A., Millemann, Y., Colin, P., Chauvin, C. 2008. A comparison of antimicrobial usage in human and veterinary medicine in France from 1999 to 2005. J. Antimicrob. Chemother. 62: 617–625.

Pollution Control Department. 2002. Pollution control report in Thailand. Ministry of Natural Resources and Environment. https://www.pcd.go.th/publication/3589

Prakongkep, N., Kruatrachue, M., Chitramvong, Y.P., Tanaka, K. 2021. Golden apple snail (Pomacea canaliculata) as an invasive species and major rice pest in Southeast Asia. Agric. Nat. Resour. 55: 373–385.

Qiu, G., Chen, H., Raghavan, D.S.S., Ting, Y.-P. 2021. Removal behaviors of antibiotics in a hybrid microfiltration-forward osmotic membrane bioreactor for real municipal wastewater treatment. Chem. Eng. J. 417: 129146.

Sari, M., Yusuf, Y. 2018. Synthesis and characterization of hydroxyapatite based on green mussel shells (Perna viridis) with calcination temperature variation using the precipitation method. Int. J. Nanoelectron. Mater. 11: 357–370.

Wang, H., Zhao, Y., Li, T., Chen, Z., Wang, Y., Qin, C. 2016. Properties of calcium peroxide for release of hydrogen peroxide and oxygen: A kinetics study. Chem. Eng. J. 303: 450–457.

Wang, S., Zhou, L., Zheng, M., Han, J., Liu, R., Yun, J. 2022. Catalytic ozonation over Ca2Fe2O5 for the degradation of quinoline in an aqueous solution. Ind. Eng. Chem. Res. 61: 6343–6353.

World Health Organization. 1997. Antibiotic use in food-producing animals must be curtailed to prevent increased resistance in humans. Press release WHO/73.

Xie, Y., Chen, Y., Yang, J., Liu, C., Zhao, H., Cao, H. 2018. Distinct synergetic effects in the ozone enhanced photocatalytic degradation of phenol and oxalic acid with Fe3+/TiO2 catalyst. Chin. J. Chem. Eng. 26: 1528–1535.

Effect of polyvinyl chloride microplastics (<125 μm) at 0 – 20 mg/kg on sweet corn seed germination and seedling growth

Sasivimon Aimampiy[a], Alissara Reungsang[b,c,d], Sureewan Sittijunda[a,*]

[a]Faculty of Environment and Resource Studies, Mahidol University, Nakhon Pathom 73170, Thailand

[b]Biotechnology Program, Faculty of Technology, Khon Kaen University, Khon Kaen 40002, Thailand

[c]Research Group for Development of Microbial Hydrogen Production Process from Biomass, Khon Kaen University, Khon Kaen 40002, Thailand

[d]Academy of Science, Royal Society of Thailand, Bangkok 10300, Thailand

*Corresponding author. E-mail address: sureewan.sit@mahidol.ac.th

Abstract

Microplastics have become a significant environmental pollutant affecting agricultural soils worldwide. This study investigated the effect of polyvinyl chloride microplastics (PVC – MPs) on sweet corn seed germination and seedling growth. PVC – MPs with particle size less than 125 μm were mixed with silt loam soil at concentrations of 0, 3, 5, 7, 10, 15, and 20 mg/kg, with 24 seeds per treatment. Sweet corn seeds were planted in seedling trays containing 1 kg of treated soil. Germination and seedling growth parameters including germination percentage, root length, shoot length, and wet weight were measured over 7 days. Results showed that germination (79.17 – 95.83%) was not significantly affected by PVC – MPs ($p = 0.226$). However, shoot length was significantly reduced at 15 mg/kg (7.79 cm, 32% reduction) compared to 3 mg/kg (11.39 cm) ($p = 0.042$). Root length ($p = 0.226$) and wet weight ($p = 0.237$) showed no significant differences. These findings suggest a potential threshold concentration of 10 – 15 mg/kg under greenhouse conditions, above which PVC – MPs may negatively impact corn seedling development. Further field validation is recommended to confirm these preliminary observations for assessing contamination risks in agricultural soils.

Keywords: Germination, Microplastics, PVC, Seedling growth, Sweet corn

Introduction

The widespread use of plastic materials has resulted in significant environmental pollution, with microplastics (MPs; particles <5 mm) becoming one of the most pervasive anthropogenic pollutants (Sukrita Punyauppa-patha, 2019). Agricultural soils are particularly vulnerable to MPs contamination through plastic mulch films, sewage sludge application, and irrigation systems, with concentrations reaching up to 430 MPs/kg in some agricultural areas (Zhang and Liu, 2018). Although MP contamination is often reported in particle counts (MPs/kg), mass-based concentrations typically range from 0.1 to 50 mg/kg in agricultural soils, depending on the intensity of plastic use and soil management practices (Huang et al., 2020). The concentrations used in this study (3 – 20 mg/kg) represent low to moderate contamination levels that are environmentally relevant for agricultural soils with a history of plastic mulch application.

Microplastics in agricultural soils can alter soil properties such as water holding capacity and aggregate stability, impact microbial community activity, and ultimately hinder plant growth and development (Boots et al., 2019). Polyvinyl chloride (PVC), widely used in agricultural pipes, films, and packaging, is of particular concern because it typically contains 30 – 40% by weight of plasticizers, predominantly phthalates such as di(2-ethylhexyl) phthalate (DEHP). These additives can leach into the soil environment during degradation and have been shown to reduce chlorophyll content and inhibit root elongation at elevated concentrations (Ma et al., 2014; Wang et al., 2022). Therefore, PVC was selected as the model microplastic in this study due to its widespread agricultural use and potential for additive-mediated phytotoxicity.

Sweet corn (*Zea mays var. saccharata*) is an important cereal crop extensively cultivated worldwide and in Thailand. The germination and early seedling stages are critical periods that determine plant establishment and subsequent yield. However, limited information exists regarding the specific effects of PVC – MPs on corn germination and early growth under environmentally relevant exposure conditions.

Therefore, this study aimed to investigate the effects of PVC microplastics at different concentrations (0, 3, 5, 7, 10, 15, and 20 mg/kg) on seed germination percentage and seedling growth parameters including root length, shoot length, and wet weight of sweet corn under greenhouse conditions.

Materials and Methods

Microplastic and sweet corn soil preparation

Polyvinyl chloride (PVC) microplastics were obtained from Sigma, USA, ground using a freezer mill (SPEX-6875) at -196°C for 10 minutes, and sieved to obtain particles with size less than 125 µm. The resulting PVC-MPs exhibited irregular fragment morphology typical of cryogenic grinding. The PVC – MPs were stored in sealed containers at room temperature in the dark until use.

Sweet corn (*Zea mays var. saccharata*) seeds with minimum germination rate of 70% and silt loam soil were purchased from a local garden market in Khon Kaen province, Thailand. Uniformly sized seeds were selected for the experiment, and the soil was air-dried before use. The soil characteristics were as follows:

sand 24.84%, silt 53.71%, clay 21.45% (silt loam texture), cation exchange capacity (CEC) 23.60 cmol/kg, and organic matter content 8.50%.

Experimental design

The experiment followed a completely randomized design (CRD) with seven PVC-MPs concentrations (0, 3, 5, 7, 10, 15, and 20 mg/kg dry soil) with 24 seeds per treatment (n=24 per treatment). PVC-MPs were thoroughly mixed with 1 kg of air-dried soil and placed in seedling trays (6×4 cells). Seeds were randomly planted at 1 cm depth, one seed per cell.

The experiment was conducted in a greenhouse with temperature maintained at 20 – 30°C and soil moisture kept at field capacity by daily watering. Germination was recorded daily from day 1 to day 7, with seeds considered germinated when radicle emergence was visible (≥ 2 mm).

Data Collection

On day 7, seedlings were carefully harvested and germination percentage was calculated using Equation (1). Root length and shoot length were measured from the root-shoot junction to the longest root tip and leaf tip, respectively, using a ruler with 1 mm graduations (precision ±1 mm). Seedling wet weight was determined by gently washing seedlings with distilled water to remove soil, blotting with tissue paper, and weighing immediately using an analytical balance (precision ±0.0001 g).

Statistical analysis

Data are presented as mean ± standard deviation (n=24). One-way analysis of variance (ANOVA) was used to determine significant differences among treatments, followed by Least Significant Difference (LSD) test for mean comparisons ($p < 0.05$). Statistical analyses were performed using SPSS Statistics version 30.0 (Equation 1):

$$\text{Germination percentage (\%)} = \left(\frac{\text{Number of germinated seeds}}{\text{total number of seeds}}\right) \times 100 \quad (1)$$

Where germinated seeds were counted daily, and the final count on day 7 was used for calculation.

Results and Discussion

Effect of PVC-MPs on corn seed germination

The germination of sweet corn seeds under different PVC-MPs concentrations is presented in Table 1 . Germination was first observed on day 1 and continued progressively until day 7. The final germination percentage ranged from 79.17% to 95.83% across all treatments, with no significant differences among treatments ($p > 0.05$, one-way ANOVA).

Table 1 Cumulative number of germinated seeds and final germination percentage of sweet corn under different PVC-MPs concentrations.

Concentration (mg/kg)	Day 1	Day 2	Day 3	Day 4	Day 5	Day 6	Day 7	Germination (%)
0	0	2	4	10	12	17	20	83.33^{ns}
3	0	1	8	12	15	19	21	87.50^{ns}
5	0	4	8	12	17	21	22	91.67^{ns}
7	0	0	2	7	11	13	19	79.17^{ns}
10	0	1	3	11	16	18	23	95.83^{ns}
15	0	0	9	12	14	17	21	87.50^{ns}
20	0	0	2	10	17	17	19	79.17^{ns}

Note: ^{ns} Not significant at $p > 0.05$ by one-way ANOVA (n=24 seeds per treatment)

The highest germination percentage was observed at 10 mg/kg (95.83%), followed by 5 mg/kg (91.67%), while the lowest occurred at 7 and 20 mg/kg (79.17%). However, statistical analysis revealed that these differences were not significant (p = 0.226), indicating that PVC-MPs concentrations up to 20 mg/kg did not substantially affect sweet corn seed germination. Interestingly, the control treatment (0 mg/kg, 83.33%) did not show the highest germination percentage. This suggests that low to moderate concentrations of PVC-MPs (3 – 15 mg/kg) do not inhibit germination and may even have neutral or slightly positive effects, possibly by improving soil aeration or water retention at these low contamination levels.

These results are consistent with Lozano and Rillig (2020), who reported that low concentrations of microplastics did not significantly affect seed germination in various plant species. The lack of germination inhibition in our study may be attributed to the relatively large size of corn seeds (8 – 10 mm), which contain sufficient endosperm reserves to support germination even under moderate environmental stress. However, Bosker et al. (2019) found that microplastics could reduce germination in some smaller-seeded species, suggesting that germination response to MPs may be species-specific and dependent on seed size, particle size, and MP concentration. (Lozano and Rillig, 2020) (Bosker et al., 2019)

Effect of PVC-MPs on seedling growth

Root length, shoot length, and wet weight of corn seedlings at day 7 under different PVC-MPs concentrations are shown in Table 2. Statistical analysis revealed that shoot length was significantly affected by PVC-MPs concentration ($p < 0.05$), while root length (p = 0.226) and wet weight (p = 0.237) showed no significant differences among treatments.

Table 2 Effect of PVC-MPs concentrations on root length, shoot length, and wet weight of sweet corn seedlings at day 7.

Concentration (mg/kg)	Root length* (cm)	Shoot length* (cm)	Wet weight* (g)
0	9.96±4.57^{ab}	10.89±5.19^{a}	0.89±0.36^{a}
3	11.07±4.13^{a}	11.39±4.14^{a}	0.84±0.23^{ab}
5	11.72±4.35^{a}	10.51±3.30^{a}	0.84±0.26^{ab}
7	11.22±5.22^{a}	8.41±3.90^{bc}	0.81±0.26^{ab}
10	10.81±4.03^{ab}	9.99±4.37^{ab}	0.83±0.22^{ab}
15	8.35±4.22^{b}	7.79±4.52^{c}	0.70±0.22^{b}
20	11.12±4.29^{a}	11.21±3.92^{a}	0.73±0.29^{ab}

Note: Values are mean ± S*D* (n = 24 seedlings per treatment); * Different superscript letters within the same column indicate significant differences at $p < 0.05$ by LSD test with one-way ANOVA.

Root length ranged from 8.35±4.22 cm (15 mg/kg) to 11.72±4.35 cm (5 mg/kg), but these differences were not statistically significant (p = 0.226). The relatively high standard deviations observed across all treatments (e.g., root length at 15 mg/kg: 8.35±4.22 cm) indicate considerable variability in seedling growth responses. This variability may be attributed to inherent genetic differences among individual seeds within the commercial seed lot, as well as micro-environmental variations in soil moisture and temperature distribution within the greenhouse. Despite this variability, the consistent pattern of reduced growth at 15 mg/kg across multiple parameters supports the reliability of the observed treatment effects.

In contrast, shoot length showed significant variation among treatments (p = 0.042). The highest shoot length was observed at 3 mg/kg (11.39±4.14 cm), which was significantly greater than treatments at 15 mg/kg (7.79±4.52 cm) and 7 mg/kg (8.41±3.90 cm). Shoot lengths at 15 and 7 mg/kg were approximately 32% and 26% lower, respectively, compared to the optimal growth at 3 mg/kg, suggesting that high PVC-MPs concentrations negatively impact shoot development. The control treatment (10.89±5.19 cm) showed intermediate shoot length, further supporting the observation that low PVC-MPs concentrations (3 – 10 mg/kg) do not inhibit early seedling growth.

Seedling wet weight ranged from 0.70±0.22 g (15 mg/kg) to 0.89±0.36 g (control), but these differences were not statistically significant (p = 0.237). The high variability in wet weight measurements and relatively small sample biomass at this early growth stage may have limited the statistical power to detect differences among treatments.

The concentration- dependent effects observed in this study can be explained by several mechanisms. At low concentrations (3 – 10 mg/kg), PVC-MPs did not appear to create significant physical barriers to seedling growth. One hypothesis is that low concentrations of microplastics may slightly alter soil physical properties such as aeration or water distribution, as suggested by de Souza Machado et al. (2019), though this was not directly measured in the present study and requires further investigation. However, at higher concentrations

(15 – 20 mg/kg), the accumulation of microplastic particles in soil pores creates physical barriers that restrict root elongation and reduce water and nutrient availability (de Souza Machado et al., 2019).

Additionally, PVC-MPs may alter soil water holding capacity and bulk density, indirectly affecting seedling growth (Zhang et al., 2021). The preferential effect on shoot length rather than root length suggests that aboveground growth may be more sensitive to PVC-MPs contamination during early development, possibly due to reduced nutrient translocation or physiological stress responses.

Furthermore, PVC-MPs may release phthalate plasticizers and other additives that could potentially interfere with plant physiological processes, including reduction of chlorophyll content and inhibition of root cell division, at higher concentrations (Wang et al., 2022; Ma et al., 2014). However, since chemical leaching and tissue accumulation were not measured in this study, this remains a potential mechanism rather than a confirmed cause of the observed growth reduction. The observed threshold effect at approximately 10 – 15 mg/kg suggests a critical concentration above which negative impacts become pronounced.

The findings of this study demonstrate that the effects of PVC-MPs on sweet corn germination and seedling growth are concentration-dependent. While germination remained unaffected across all tested concentrations, seedling shoot growth was significantly reduced at concentrations ≥15 mg/kg, indicating that early seedling development is more sensitive to PVC – MPs contamination than germination. These results suggest a potential threshold of approximately 10 mg/kg under greenhouse conditions, above which adverse effects on corn seedling growth may occur.

The decrease in root length at 15 mg/kg concentration may be attributed to the physical barrier created by microplastic particles in soil pores, which could restrict root elongation (de Souza Machado et al., 2019). Additionally, microplastics may alter soil properties such as water holding capacity and bulk density, indirectly affecting seedling growth (Zhang et al., 2021).

The findings of this study suggest that the effect of PVC-MPs on corn germination and seedling growth is concentration-dependent. Low concentrations (3 – 10 mg/kg) did not show inhibitory effects, while higher concentrations (15 – 20 mg/kg) tended to reduce seedling growth parameters as show Fig. 1.

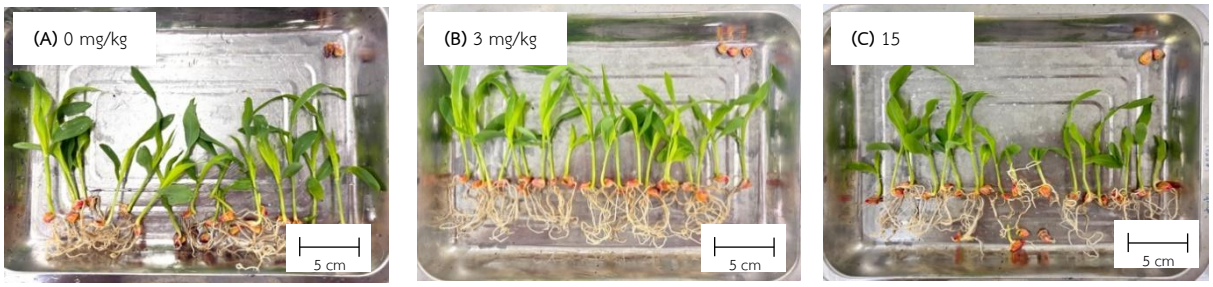


Fig. 1 Visual comparison of sweet corn seedlings at day 7 under different PVC-MPs concentrations: (A) control (0 mg/kg) showing moderate growth; (B) 3 mg/kg showing optimal growth with longest shoots; and (C) 15 mg/kg showing reduced growth with shortest shoots. Images demonstrate the concentration-dependent effect of PVC-MPs on shoot development

Conclusion

This study demonstrated that PVC-MPs at 0–20 mg/kg did not significantly affect sweet corn germination (79.17–95.83%, $p = 0.226$) but significantly reduced shoot length at concentrations ≥15 mg/kg ($p = 0.042$), with shoot length decreasing to 7.79±4.52 cm compared to 11.39±4.14 cm at 3 mg/kg. Root length ($p = 0.226$) and wet weight ($p = 0.237$) were not significantly affected. These results suggest a potential threshold concentration of 10–15 mg/kg under greenhouse conditions, above which PVC – MPs may impair early seedling development. Future research should focus on: (1) long-term studies following plant growth through the complete life cycle to harvest, (2) investigating the effects of PVC-MPs on soil microbial communities and nutrient cycling, (3) measuring phthalate leaching and accumulation in plant tissues to elucidate toxicity mechanisms, and (4) field validation studies to confirm these greenhouse observations under natural soil conditions.

Conflict of Interest

The authors declare that they have no known competing financial interests or personal relationships that could have appeared to influence the work reported in this paper.

Acknowledgements

This research project has been supported by Mahidol University (Fundamental Fund: fiscal year 2025 by National Science Research and Innovation Fund (NSRF). Partially supported by JST NEXUS, Japan Grant Number JPMJNX25B2 and National Research Council of Thailand (NRCT) (Grant No. N42A670487). The authors would like to express their sincere gratitude to the Bio-hyphae Pilot Plant, Khon Kaen University, for providing the necessary facilities and support.

Reference

Boots, B., Russell, C.W., Green, D.S. 2019. Effects of microplastics in soil ecosystems: Above and below ground. Environ. Sci. Technol. 53: 11496–11506.

Bosker, T., Bouwman, L.J., Brun, N.R., Behrens, P., Vijver, M.G. 2019. Microplastics accumulate on pores in seed capsule and delay germination and root growth of the terrestrial vascular plant Lepidium sativum. Chemosphere 226: 774–781.

De Souza Machado, A.A., Lau, C.W., Kloas, W., et al. 2019. Microplastics can change soil properties and affect plant performance. Environ. Sci. Technol. 53: 6044–6052.

Huang, Y., Liu, Q., Jia, W., Yan, C., Wang, J. 2020. Agricultural plastic mulching as a source of microplastics in the terrestrial environment. Environ. Pollut. 260: 114096.

Lozano, Y.M., Rillig, M.C. 2020. Effects of microplastic fibers and drought on plant communities. Environ. Sci. Technol. 54: 6166–6173.

Ma, T., Teng, Y., Christie, P., Luo, Y. 2014. Phytotoxicity in seven higher plant species exposed to di-n-butyl phthalate or bis (2-ethylhexyl) phthalate. Front. Environ. Sci. Eng. 9: 259–268.

Punyauppa-Patha, S. 2019. Microplastics: Origin, environmental impact, environmental contamination and management methods. J. Environ. Manage. 15: 88–105.

Wang, F., Wang, Q., Adams, C.A., Sun, Y., Zhang, S. 2022. Effects of microplastics on soil properties: Current knowledge and future perspectives. J. Hazard. Mater. 424: 127531.

Zhang, G.S., Liu, Y.F. 2018. The distribution of microplastics in soil aggregate fractions in southwestern China. Sci. Total Environ. 642: 12–20.

Zhang, J., Zou, G., Wang, X., et al. 2021. Exploring the occurrence characteristics of microplastics in typical maize farmland soils with long-term plastic film mulching in northern China. Front. Mar. Sci. 8.

การบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์ไอบูโพรเฟนโดยกระบวนการโอโซเนชันร่วมกับถ่านชีวภาพแม่เหล็ก

Treatment of Synthetic ibuprofen-contaminated wastewater by ozonation coupled with magnetic biochar

ชญานิน เหมวรรณานุกูล*, **ชลอ จารุสุทธิรักษ์**

Chayanin Hemvannanukul*, Chalor Jarusutthirak

ภาควิชาเทคโนโลยีและการจัดการสิ่งแวดล้อม คณะสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

Department of Environmental Technology and Management, Faculty of Environment, Kasetsart Universit, Bangkok 10900, Thailand

*Corresponding author E-mail address: chayanin.h@ku.th

บทคัดย่อ

ถ่านชีวภาพแม่เหล็กถูกสังเคราะห์จาก $FeSO_4 \cdot 7H_2O$ 0.01 โมล และ $FeCl_3$ 0.01 โมล โดยผล FTIR ยืนยันการเกิดของชั้นเหล็กออกไซด์ (Fe_3O_4) ซึ่งบ่งชี้สมบัติแม่เหล็กของวัสดุ การประเมินประสิทธิภาพพบว่า โอโซนร่วมถ่านชีวภาพแม่เหล็กสามารถบำบัดไอบูโพรเฟน (IBU) ได้ดีกว่าโอโซนเดี่ยว ในทุกสภาวะ เนื่องจากตัวเร่งปฏิกิริยาช่วยเพิ่มการเกิดอนุมูลไฮดรอกซิล (•OH) สภาวะเหมาะสมคือ pH 7.0 ให้ประสิทธิภาพการบำบัดสูงสุด 65.90±19.66% ที่ความเข้มข้น 20 มิลลิกรัม/ลิตร ด้านจลนพลศาสตร์ ปฏิกิริยาการบำบัดเป็นแบบ อันดับสอง โดยค่าคงที่อัตรา (k) ของโอโซนร่วมถ่านชีวภาพแม่เหล็ก (0.00065-0.00119 $L \cdot mg^{-1} \cdot min^{-1}$) สูงกว่าโอโซนเดี่ยว (0.00009 $L \cdot mg^{-1} \cdot min^{-1}$) อย่างชัดเจน ถ่านชีวภาพแม่เหล็กยังสามารถนำกลับมาใช้ซ้ำได้ โดยประสิทธิภาพลดลงเพียงเล็กน้อยหลังการใช้งานครั้งแรก แสดงถึงศักยภาพของถ่านชีวภาพแม่เหล็กเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาการบำบัดน้ำเสียด้วยกระบวนการโอโซเนชัน

คำสำคัญ: ตัวเร่งปฏิกิริยาโอโซเนชัน, ถ่านชีวภาพ, เหล็กออกไซด์, โอโซเนชัน, ไอบูโพรเฟน

Abstract

Magnetic biochar was synthesized using 0.01 mol $FeSO_4 \cdot 7H_2O$ and 0.01 mol $FeCl_3$, with FTIR analysis confirming the formation of iron oxide (Fe_3O_4) layers that indicate the magnetic properties of the material. Performance evaluation showed that ozonation coupled with magnetic biochar achieved significantly higher ibuprofen (IBU) removal than ozonation alone under all tested conditions, owing to the catalyst's ability to enhance hydroxyl radical (•OH) generation. The optimal condition was observed at pH 7.0, providing the highest removal efficiency of 65.90±19.66% at an initial concentration of 20 mg/L. Kinetic analysis revealed that the degradation followed a second-order reaction, with the rate constants (k) of catalytic ozonation (0.00065-0.00119 $L \cdot mg^{-1} \cdot min^{-1}$) being markedly higher than those of single ozonation (0.00009 $L \cdot mg^{-1} \cdot min^{-1}$). Magnetic biochar also demonstrated reusability, with only a slight decrease in performance after the first cycle, confirming its potential as an effective catalyst for ozonation-based wastewater treatment.

Keywords: Biochar, Catalytic ozonation, Ibuprofen, Iron oxide, Ozonation

คำนำ

ไอบูโพรเฟน (Ibuprofen: IBU) เป็นยาในกลุ่ม NSAIDs ที่ใช้บรรเทาอาการปวดและการอักเสบ และเป็นหนึ่งในยาที่ถูกใช้มากที่สุดทั่วโลก (Chopra and Kumar, 2020) หลังการบริโภค ยาจะไม่ถูกเผาผลาญหมดและถูกขับออกทางปัสสาวะ ทำให้ตกค้างในระบบน้ำเสีย รวมถึงพบได้จากน้ำเสียโรงพยาบาล โรงงานผลิตยา และฟาร์มปศุสัตว์ (Chopra et al., 2020) IBU ที่สะสมในสิ่งแวดล้อมมีรายงานว่าส่งผลกระทบต่อระบบสืบพันธุ์และสิ่งมีชีวิตในห่วงโซ่อาหาร (Davarnejad et al., 2018) จึงจำเป็นต้องได้รับการบำบัดก่อนปล่อยสู่แหล่งน้ำธรรมชาติอย่างเหมาะสม วิธีการบำบัด IBU มีทั้งทางกายภาพ เช่น นาโนฟิลเตรชันและรีเวิร์สออสโมซิส ซึ่งแม้มีประสิทธิภาพสูงแต่มีข้อจำกัด ด้านการจัดการน้ำปริมาณเข้มข้น (Davarnejad et al., 2018) วิธีชีวภาพ เช่น ระบบตะกอนเร่ง แม้บำบัด IBU ที่ความเข้มข้นต่ำได้ดี แต่ประสิทธิภาพจะลดลงเมื่อความเข้มข้นสูง (Aissaoui et al., 2017) ในทางเคมีออกซิเดชัน โอโซนเป็นสารออกซิไดซ์ที่มีศักยภาพสูง (2.08 V) สามารถย่อยสลาย IBU ได้ทั้งผ่านปฏิกิริยาโดยตรงกับสารมลพิษ และปฏิกิริยาโดยอ้อมผ่านอนุมูลไฮดรอกซิล (•OH) ซึ่งมีศักยภาพออกซิเดชันสูงกว่า (2.80 V) (Cuerda-Correa et al., 2019; Huber et al., 2005) กระบวนการที่อาศัยอนุมูล •OH ถูกจัดเป็นกระบวนการออกซิเดชันขั้นสูง (AOPs) ซึ่งเป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพสูงในการกำจัดสารอินทรีย์เสถียรอย่าง IBU (Quero-Pastor et al., 2014)

การเพิ่มตัวเร่งปฏิกิริยาช่วยกระตุ้นการสลายตัวของโอโซนและเพิ่มการสร้างไฮดรอกซิลเรดิคอล •OH (Huang et al., 2005) ตัวเร่งปฏิกิริยามีทั้งแบบเอกพันธุ์ เช่น Mn^{2+}, Fe^{2+}, Fe^{3+}, Co^{2+} และ Cu^{2+} ซึ่งมีประสิทธิภาพสูงแต่แยกออกจากน้ำได้ยาก และอาจเสี่ยงต่อการปนเปื้อนโลหะหนัก และแบบวิวิธพันธุ์ เช่น MnO_2, Fe_2O_2 และ TiO_2 โดยเฉพาะเหล็กออกไซด์ที่มีประสิทธิภาพสูงและไม่ก่อสารตกค้างอันตราย (Jian and Le, 2012; Wang and Chen, 2020) อย่างไรก็ตามอนุภาคเหล็กออกไซด์ที่มีขนาดเล็กทำให้แยกออกจากน้ำได้ยาก เพื่อแก้ไขปัญหานี้ จึงมีการใช้ถ่านชีวภาพเป็นวัสดุรองรับเนื่องจากมีโครงสร้างพรุนและพื้นที่ผิวสูง ช่วยกระจายตัวเร่งปฏิกิริยาและส่งเสริมการเกิดอนุมูลอิสระ •OH เกิดจากหมู่ฟังก์ชันที่มีออกซิเจนบนถ่านชีวภาพและเฟส Fe_3O_4 ซึ่งจะเร่งการสลายตัวของ O_3 ผ่านปฏิกิริยารีดอกซ์ Fe^{2+}/Fe^{3+} (Thines et al., 2017) และเมื่อดัดแปลงให้มีสมบัติแม่เหล็ก ถ่านชีวภาพแม่เหล็กสามารถแยกออกจากน้ำหลังการบำบัดได้ง่ายด้วยสนามแม่เหล็ก ลดการสูญหายและลดเวลาการตกตะกอน (Wang & Bai, 2017)

งานวิจัยนี้มุ่งศึกษาการสังเคราะห์ถ่านชีวภาพแม่เหล็กและประสิทธิภาพในการเร่งปฏิกิริยาโอโซเนชันเพื่อบำบัดไอบูโพรเฟน โดยประเมินผลของระยะเวลาบำบัด ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา ความเข้มข้นเริ่มต้นของ IBU ค่า pH การใช้ซ้ำของตัวเร่งปฏิกิริยา และจลนพลศาสตร์ ผลการศึกษาสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการพัฒนาระบบบำบัดน้ำเสียจากชุมชน โรงพยาบาล และอุตสาหกรรมผลิตยาได้อย่างมีประสิทธิภาพ

อุปกรณ์และวิธีการ

การติดตั้งถังปฏิกิริยาและการเดินระบบ

ลักษณะของถังปฏิกิริยาเป็นทรงสี่เหลี่ยมจัตุรัสทำจากอะคริลิก มีขนาด 12 เซนติเมตร สูง 15 เซนติเมตร ปริมาตรรวมทั้งหมด 2 ลิตร ปั๊มน้ำจะจุ่มอยู่ในน้ำเพื่อสูบน้ำให้วนในระบบ จุดเก็บตัวอย่างอยู่เหนือท่อเวนทูรี 5 เซนติเมตร โดยก๊าซโอโซนจะเข้าทางอุปกรณ์เวนทูรี และมีจะระบายก๊าซโอโซนส่วนเกินอยู่บริเวณด้านบนของถัง โดยมีขวดดักก๊าซโอโซนที่ใช้สารละลายโซเดียมไทโอซัลเฟต ($Na_2S_2O_3$) ดัง Fig.1 ความเข้มข้นของก๊าซโอโซนที่ผลิตออกมาจากเครื่องผลิตโอโซนที่ใช้ 63.744 มิลลิกรัม/ชั่วโมง

การสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยา

ชั่งไบโอชาร์ไม้ไผ่ 2.5 กรัม เติมลงในสารละลายเหล็กผสม 50 มิลลิลิตร ($FeSO_4 \cdot 7H_2O$ 0.01 โมล และ $FeCl_3$ 0.01 โมล) นำไปให้ความร้อนที่ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที และทำการกวนอย่างช้าๆ และปล่อยให้อุณหภูมิเย็นลง จากนั้นเติมสารละลาย ความเข้มข้น 5 โมลาร์ NaOH ให้ pH อยู่ระหว่าง 10-11 ตั้งทิ้งไว้ให้เกิดการตกตะกอน 24 ชั่วโมง จากนั้นทำการล้างด้วยน้ำกลั่นจนกระทั่งมีค่าเท่ากับ pH 7.0 และทำการอบแห้งที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง (Xin et al., 2024) ตัวเร่งปฏิกิริยาที่สังเคราะห์ได้ถูกวิเคราะห์คุณสมบัติเปรียบเทียบกับไบโอชาร์ด้วยวิธี Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR)

การเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์

ใช้ตัวยาในท้องตลาดที่มีความเข้มข้นของไอบูโพรเฟนอยู่ 400 มิลลิกรัม ในตัวยา 1 เม็ด นำไปบดให้ละเอียด ละลายด้วย 0.1 โมล NaOH ปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่น 100 มิลลิลิตร ได้เป็น stock และความเข้มข้นไอบูโพรเฟนตามที่คำนวณได้ 100 มิลลิกรัม/ลิตร เอาตัวอย่างนำไปเปรียบเทียบกับสารมาตรฐานไอบูโพรเฟน วัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาว 221 นาโนเมตร ด้วย UV-Vis Spectrophotometer (Eraga et al., 2015)

การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพการบำบัด

ความเข้มข้นเริ่มต้นของไอบูโพรเฟน โดยแปรค่าความเข้มข้นที่ 1, 5, 10 และ 20 มิลลิกรัม/ลิตร ระยะเวลา 60 นาที ทำการควบคุมปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา โดยทำการเปรียบเทียบระหว่างการใช้โอโซนอย่างเดียวและการใช้โอโซนร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยาถ่านชีวภาพ 2 กรัม/ลิตร และอีกปัจจัยเป็นการแปรค่า pH ที่ 3.0, 5.0, 7.0 และ 9.0 จากนั้นนำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ 221 นาโนเมตร ด้วย UV-Vis Spectrophotometer

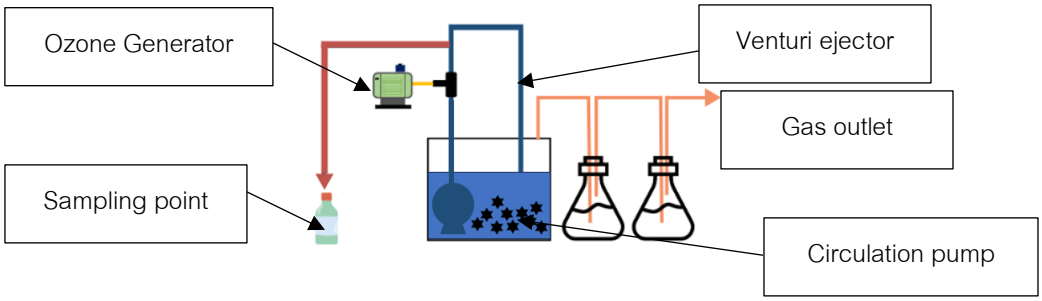


Fig. 1 Venturi-type ozone reactor

การศึกษาการใช้ซ้ำของถ่านชีวภาพแม่เหล็ก

นำเอทานอล 95% 50 มิลลิลิตร ใส่ลงในถ่านชีวภาพแม่เหล็ก จากนั้นนำไปใส่ในเครื่อง ultrasonic bath 20 นาที ล้างด้วยน้ำกลั่นหลายครั้งจนค่า pH เป็นกลาง และจึงนำไปอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง (Chakhtouna et al. 2021)

การศึกษาจลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาการบำบัดไอบูโพรเฟน

ในการบำบัดไอบูโพรเฟนด้วยกระบวนการโอโซเนชันโดยมีถ่านชีวภาพแม่เหล็กเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา เพื่อเปรียบเทียบกับกระบวนการโอโซเนชันเพียงอย่างเดียวกับค่า pH ต่างๆ สามารถเปรียบเทียบได้โดยนำค่าความเข้มข้นของ

ไอบูโพรเฟน (มิลลิกรัม/ลิตร) ตาม Table 1 สมการอันดับปฏิกิริยา ซึ่งเป็นสมการเชิงเส้นเพื่อหาค่าคงที่อัตราการเกิดปฏิกิริยาการบำบัดไอบูโพรเฟน

Table 1 Reaction order equation

Reaction Order	Linear Equation
Zero-Order Reaction	$C_t = C_0 - kt$
First-Order Reaction	$\ln C_t = \ln C_0 e^{-kt}$
Second-Order Reaction	$1/C_t = 1/C_0 + kt$

โดย C_0 = ความเข้มข้นเริ่มต้นของไอบูโพรเฟน (มิลลิกรัม/ลิตร)

C_t = ความเข้มข้นของไอบูโพรเฟนที่เวลาต่างๆ (มิลลิกรัม/ลิตร)

t = เวลาที่เกิดปฏิกิริยา (นาที)

k = ค่าคงที่อัตราการเกิดปฏิกิริยา

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

การสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยา

ถ่านชีวภาพแม่เหล็กที่สังเคราะห์จาก $FeSO_4 \cdot 7H_2O$ และ $FeCl_3$ แสดงผล FTIR ที่ยืนยันการก่อตัวของ Fe_3O_4 และการคงอยู่ของหมู่ฟังก์ชันสำคัญบนพื้นผิวถ่านชีวภาพ โดยพีคที่ 587.99 และ 432.99 cm^{-1} เป็นลักษณะเฉพาะของพันธะ Fe–O ในโครงสร้างสปินเนลของ Fe_3O_4 ซึ่งบ่งชี้สมบัติแม่เหล็กและตำแหน่งเร่งปฏิกิริยาบนพื้นผิววัสดุ ขณะที่พีคที่ 3439.43, 1726.40 และ 1114.32 cm^{-1} พบหมู่ไฮดรอกซิล คาร์บอนิล/คาร์บอกซิล และหมู่ C–O/C–O–C ซึ่งมีบทบาทในการดูดซับ การกระตุ้นการแตกตัวของโอโซนและอนุมูลไฮดรอกซิล (•OH) พร้อมกันนี้ Fe_3O_4 ทำหน้าที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาแบบการเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธุ์ ที่เร่งการสลายตัวของ O_3 ด้วยปฏิกิริยารีดอกซ์ $Fe^{2+}/Fe3^+$ ส่งผลให้เกิดการทำงานร่วมกันระหว่างหมู่ฟังก์ชันของถ่านชีวภาพและ Fe_3O_4 ซึ่งจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของกระบวนการโอโซนเนชันแบบมีตัวเร่งปฏิกิริยาและ (Huang et al., 2021; Quero-Pastor et al., 2014; Wang and Bai, 2017)

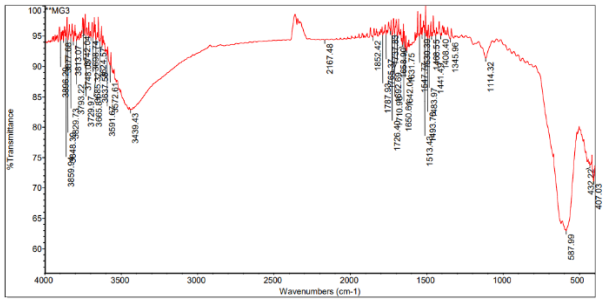


Fig. 2 FTIR Analysis of Magnetic Biochar

การเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์

ไอบูโพรเฟนตามท้องตลาดที่ความเข้มข้น 100 มิลลิกรัม/ลิตร พบว่ามีค่าการดูดกลืนแสงเกินกว่าค่ามาตรฐานไอบูโพรเฟน ซึ่งค่าความยาวคลื่นที่ควรได้คือ 0.2115 แต่ค่าที่ได้เกินกว่ามาตรฐาน เพราะว่านอกจากตัวยาไอบูโพรเฟนแล้วยังมีสารอื่นๆปนอยู่ซึ่งมีส่วนทำให้ค่าการดูดกลืนแสงสูงขึ้น ที่การดูดกลืนแสง 221 นาโนเมตร เหมือนกัน นอกจากบำบัด

ไอบูโพรเฟน สารอินทรีย์ตัวอื่นอาจถูกบำบัดไปด้วยโดยโอโซน เปอร์เซ็นต์ในการบำบัดที่ไม่ใช่ไอบูโพรเฟนนั้นอาจเป็นสารอินทรีย์ตัวอื่นที่ปนเปื้อนอยู่ ค่าความเข้มข้นที่ใช้จะไม่ใช่ค่าความเข้มข้นของไอบูโพรเฟนเพียงอย่างเดียว (Quero-Pastor et al., 2014)

ผลของความเข้มข้นต่อประสิทธิภาพการบำบัด

เตรียมไอบูโพรเฟนที่ความเข้มข้น 1, 5, 10 และ 20 มิลลิกรัม/ลิตร ระยะเวลา 60 นาที ที่ pH 7.0 ดัง Fig. 3 ซึ่งทำการเปรียบเทียบระหว่างกระบวนการโอโซเนชันเพียงอย่างเดียวและกระบวนการโอโซเนชันร่วมตัวเร่งปฏิกิริยาถ่านชีวภาพแม่เหล็กที่ 2 กรัม/ลิตร พบว่าเมื่อใช้โอโซนเพียงอย่างได้มีประสิทธิภาพการบำบัดอยู่ที่ 12.75±4.62%, 13.45±4.73%, 14.80±5.30 และ 9.48±3.49 ตามลำดับ และเมื่อใช้โอโซนร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยาถ่านชีวภาพแม่เหล็กพบว่าประสิทธิภาพในการบำบัดอยู่ที่ 64.50±22.14, 71.22±27.23, 64.34±23.65 และ 55.24±16.90 ตามลำดับ ซึ่งการเติมตัวเร่งปฏิกิริยานั้นทำให้ประสิทธิภาพการบำบัดเพิ่มขึ้น เนื่องจากตัวเร่งปฏิกิริยาช่วยเพิ่มอนุมูลไฮดรอกซิล (•OH) ให้มีปริมาณเพิ่มขึ้น ส่งผลให้การใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาในการบำบัดมีประสิทธิภาพมากกว่าการใช้โอโซนเพียงอย่างเดียว (Quero-Pastor et al., 2014)

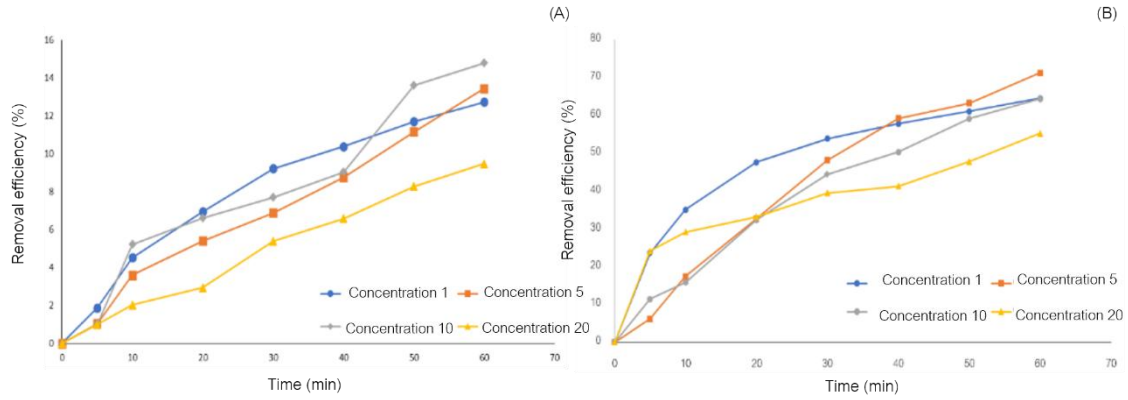


Fig. 3 Effect of IBU concentration on IBU removal efficiency (A) Ozone alone, (B) Catalyst 2 g/L.

ผลการศึกษาของ pH ต่อประสิทธิภาพการบำบัด

การบำบัดไอบูโพรเฟนที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 20 มิลลิกรัม/ลิตร เป็นเวลา 60 นาที ที่ pH 3.0, 5.0, 7.0 และ 9.0 แสดงให้เห็นว่าโอโซนเพียงอย่างเดียวให้ประสิทธิภาพการกำจัดค่อนข้างต่ำและใกล้เคียงกัน โดยมีค่าเท่ากับ 8.50±2.79%, 8.46±2.99%, 9.48±3.49% และ 10.83±3.75% ตามลำดับ ขณะที่การใช้โอโซนร่วมกับถ่านชีวภาพแม่เหล็กช่วยเพิ่มประสิทธิภาพอย่างมีนัยสำคัญเป็น 54.30±18.23%, 57.63±17.44%, 55.24±16.90% และ 65.90±19.66% แสดงดัง Fig. 4 โดยพบว่าประสิทธิภาพสูงสุดเกิดที่ pH 9.0 ในสภาวะกรดตัวเร่งปฏิกิริยาสามารถช่วยกระตุ้นการเกิดอนุมูลอิสระผ่านปฏิกิริยาระหว่างโอโซนกับไฮโดรเจนไอออน (H^+) ส่งผลให้เกิดอนุมูลไฮดรอกซิล (•OH) เพิ่มขึ้นและช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการบำบัด ขณะที่ในสภาวะด่าง โอโซนสลายตัวได้รวดเร็วผ่านกลไกลแบบปฏิกิริยาลูกโซ่ที่ทำให้เกิด •OH ในปริมาณมาก ประกอบกับการแตกตัวของหมู่ฟังก์ชันที่มีออกซิเจนบนพื้นผิวถ่านชีวภาพแม่เหล็กซึ่งทำให้พื้นผิวมีประจุลบมากขึ้น และปฏิกิริยารีดอกซ์ Fe^{2+}/Fe^{3+} บนพื้นผิว Fe_3O_4 และเร่งการสลายตัวของ O_3 ทำให้ในสภาวะด่างที่มีตัวเร่งปฏิกิริยา มีประสิทธิภาพการบำบัดจึงสูงสุดที่ pH 9.0 โดยมีแนวโน้มสอดคล้องกับรายงานก่อนหน้าที่ระบุว่าสภาวะด่างช่วยเพิ่มการเกิดอนุมูลอิสระและประสิทธิภาพของกระบวนการโอโซเนชันแบบมีตัวเร่งปฏิกิริยา (Nica et al., 2022)

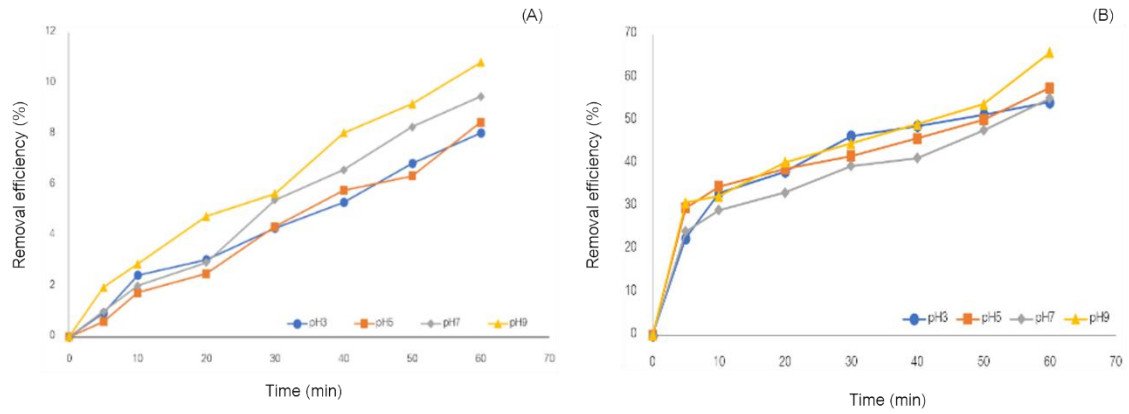


Fig 4. Effect of IBU pH on IBU removal efficiency (A) Ozone alone, (B) Catalyst 2 g/L

การนำถ่านชีวภาพแม่เหล็กกลับมาใช้ซ้ำ

การประเมินความสามารถในการนำถ่านชีวภาพแม่เหล็กกลับมาใช้ซ้ำภายใต้สภาวะที่เหมาะสม ความเข้มข้นไอบูโพรเฟนเริ่มต้น 20 มิลลิกรัม/ลิตร และ pH 9.0 พบว่า ประสิทธิภาพการบำบัดลดลงเล็กน้อยหลังการใช้งานครั้งแรก ซึ่งประสิทธิภาพการบำบัดอยู่ที่ 65.90±19.66%, 58.53±17.99%, 57.30±17.69 และ 55.50±17.20% แสดงดัง Fig. 5 ซึ่งตัวเร่งปฏิกิริยาในกระบวนการโอโซเนชันมักเกิดการเสื่อมสภาพจากการยึดเกาะของสารอินทรีย์หรือการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างผิววัสดุหลังการใช้งาน (Wang & Bai, 2017; Huang et al., 2021) ประสิทธิภาพการนำกลับมาใช้ใหม่อยู่ที่ร้อยละ 50 ซึ่งชี้ให้เห็นว่าถ่านชีวภาพแม่เหล็กยังสามารถนำกลับมาใช้ประโยชน์ได้อย่างมีศักยภาพในระบบบำบัดจริง

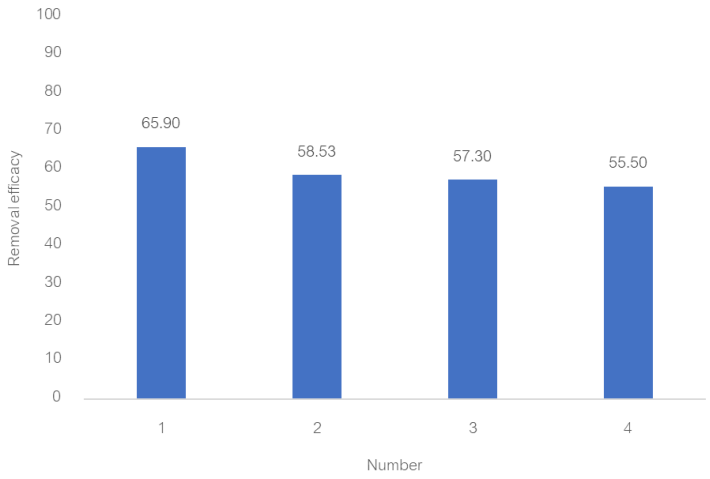


Fig. 5 Reusability of Catalyst

การศึกษาจลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาการบำบัดไอบูโพรเฟน

ผลการศึกษาจลนพลศาสตร์แสดงให้เห็นว่าการย่อยสลายไอบูโพรเฟนที่ความเข้มข้นเริ่มต้น มิลลิกรัม/ลิตร สามารถอธิบายได้ด้วยปฏิกิริยาอันดับสอง โดยระบบโอโซนเพียงอย่างเดียวให้ค่าคงที่อัตราการเกิดปฏิกิริยา (k) เท่ากับ 0.00009 $L \cdot mg^{-1} \cdot min^{-1}$ ในทุกช่วง pH พร้อมค่า R^2 สูงกว่า 0.9875 ซึ่งบ่งชี้ถึงการควบคุมปฏิกิริยาโดยการออกซิเดชันโดยตรงของ O_3 ขณะที่กระบวนการโอโซนร่วมถ่านชีวภาพแม่เหล็กให้ค่า k สูงขึ้นอย่างมีนัยสำคัญอยู่ในช่วง 0.00065-0.00119 $L \cdot mg^{-1} \cdot min^{-1}$ อันเป็นผลจากการเร่งการเกิดอนุมูลไฮดรอกซิล (•OH) บนพื้นผิวตัวเร่งแสดงดัง Table 2 (Quero-

Pastor et al., 2014; Rosal et al., 2008) ค่า R^2 ที่ลดลงในบางสภาวะแสดงถึงความซับซ้อนของกลไกในระบบโอโซเนชันแบบมีตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งเกี่ยวข้องกับการเกิดปฏิกิริยา รวมถึงการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา

Table 2 Kinetic study of the ibuprofen degradation reaction

pH	Secondary order reaction			
	Ozone alone		Catalytic ozonation	
	Rate constant (L•mg^{-1}•min^{-1})	R^2	Rate constant (L•mg^{-1}•min^{-1})	R^2
3	0.00009	0.9875	0.00087	0.9279
5	0.00009	0.9885	0.00085	0.9081
7	0.00009	0.9934	0.00065	0.9304
9	0.00009	0.9893	0.00119	0.8988

สรุป

ถ่านชีวภาพแม่เหล็กถูกสังเคราะห์จาก $FeSO_4$•7H2O และ $FeCl_3$ ผ่านกระบวนการตกตะกอนร่วม การวิเคราะห์ด้วย FTIR ยืนยันการก่อตัวของชั้นเหล็กออกไซด์ (Fe_3O_4) ซึ่งเป็นตัวบ่งชี้สมบัติแม่เหล็กของวัสดุ โดยพบพีคของพันธะ Fe–O ที่ 587.99 cm^{-1} และ 432.99 cm^{-1} นอกจากนี้ยังพบหมู่ฟังก์ชันที่สำคัญของถ่านชีวภาพ เช่น O–H, C=O, และ C–O ประสิทธิภาพการบำบัดและกลไก การใช้โอโซนร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยาถ่านชีวภาพแม่เหล็กสามารถเพิ่มประสิทธิภาพการบำบัด IBU ได้สูงกว่า เมื่อเทียบกับการใช้โอโซนเพียงอย่างเดียว ประสิทธิภาพที่เพิ่มขึ้นเป็นผลมาจากการที่ตัวเร่งปฏิกิริยาช่วยส่งเสริมการเกิดอนุมูลไฮดรอกซิล (•OH) ซึ่งมีศักยภาพออกซิเดชันสูงและมีบทบาทในการย่อยสลายสารอินทรีย์ IBU ประสิทธิภาพการบำบัดสูงสุดของกระบวนการโอโซนร่วมถ่านชีวภาพแม่เหล็กพบที่ pH 9.0 ที่สภาวะนี้สามารถบำบัด IBU ที่ความเข้มข้น 20 มิลลิกรัม/ลิตร ได้ 65.90±19.66% จลนพลศาสตร์และการนำกลับมาใช้ซ้ำ จลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาการบำบัด IBU เป็นไปตามปฏิกิริยาอันดับที่สอง ค่าคงที่อัตราการเกิดปฏิกิริยา (k) ของกระบวนการโอโซนร่วมถ่านชีวภาพแม่เหล็กอยู่ระหว่าง 0.00065-0.00119 L•mg^{-1}•min^{-1}ค่า k ที่สูงขึ้นนี้มาจากบทบาทของตัวเร่งปฏิกิริยาที่ช่วยเกิดปฏิกิริยาให้รวดเร็วขึ้น ถ่านชีวภาพแม่เหล็กแสดงให้เห็นถึงความเสถียรและความเหมาะสมในการนำกลับมาใช้ซ้ำ โดยประสิทธิภาพการบำบัดลดลงหลังการใช้งานครั้งแรก จาก 65.90±19.66% เป็น 55.50±17.20% ในรอบที่ 4 ซึ่งอาจเกิดจากการหลุดของเหล็กออกไซด์จากพื้นผิวตัวเร่ง และการอุดตันของรูพรุนโดยสารอินทรีย์ ส่งผลการสร้าง •OH ลดลง

กิตติกรรมประกาศ

ข้าพเจ้าขอขอบคุณคณะสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ที่ให้การสนับสนุนด้านสถานที่และอุปกรณ์ ทุนการวิจัยเพื่อการพัฒนาบัณฑิตศึกษาคณะสิ่งแวดล้อม พี่เจ้าหน้าที่ที่ช่วยเหลือในการดำเนินงานและงานทางด้านเอกสาร

เอกสารอ้างอิง

Aissaoui, S., Ouled-Haddar, H., Sifour, M., Beggah, C., Benhamada, F. 2017. Biological removal of the mixed pharmaceuticals: Diclofenac, ibuprofen, and sulfamethoxazole using a bacterial consortium. Iran. J. Biotechnol. 15: 135–142.

Chakhtouna, H., Benzeid, H., Zari, N., Qaiss, A.E.K., Bouhfid, R. 2021. Functional CoFe2O4-modified biochar derived from banana pseudostem as an efficient adsorbent for the removal of amoxicillin from water. Sep. Purif. Technol. 266: 118592.

Chopra, S., Kumar, D. 2020. Ibuprofen as an emerging organic contaminant in environment, distribution and remediation. Heliyon 6: e04087.

Cuerda-Correa, E.M., Alexandre-Franco, M.F., Fernández-González, C. 2019. Advanced oxidation processes for the removal of antibiotics from water: An overview. Water 12: 102.

Davarnejad, R., Soofi, B., Farghadani, F., Behfar, R. 2018. Ibuprofen removal from a medicinal effluent: A review on the various techniques for medicinal effluents treatment. Environ. Technol. Innov. 11: 308–320.

Eraga, S.O., Arhewoh, M.I., Chibuogwu, R.N., Iwuagwu, M.A. 2015. A comparative UV-HPLC analysis of ten brands of ibuprofen tablets. Asian Pac. J. Trop. Biomed. 5: 880–884.

Huber, M.M., Göbel, A., Joss, A., Hermann, N., Löffler, D., McArdell, C.S., Ried, A., Siegrist, H., Ternes, T.A., von Gunten, U. 2005. Oxidation of pharmaceuticals during ozonation of municipal wastewater effluents: A pilot study. Environ. Sci. Technol. 39: 4290–4299.

Jan-Roblero, J., Cruz-Maya, J.A. 2023. Ibuprofen: Toxicology and biodegradation of an emerging contaminant. Molecules 28: 2097.

Nica, A.-V., Olaru, E.A., Bradu, C., Dumitru, A., Avramescu, S.M. 2022. Catalytic ozonation of ibuprofen in aqueous media over polyaniline-derived nitrogen containing carbon nanostructures. Nanomaterials 12: 3468.

Quero-Pastor, M.J., Garrido-Perez, M.C., Acevedo, A., Quiroga, J.M. 2014. Ozonation of ibuprofen: A degradation and toxicity study. Sci. Total Environ. 466–467: 957–964.

Thines, K.R., Abdullah, E.C., Mubarak, N.M., Ruthiraan, M. 2017. Synthesis of magnetic biochar from agricultural waste biomass to enhancing route for waste water and polymer application: A review. Renew. Sustain. Energy Rev. 67: 257–276.

Wang, J., Bai, Z. 2017. Fe-based catalysts for heterogeneous catalytic ozonation of emerging contaminants in water and wastewater. Chem. Eng. J. 312: 79–98.

Wang, J., Chen, H. 2020. Catalytic ozonation for water and wastewater treatment: Recent advances and perspective. Sci. Total Environ. 704: 135249.

Wang, J.L., Xu, L.E.J. 2012. Advanced oxidation processes for wastewater treatment: Formation of hydroxyl radical and application. Crit. Rev. Environ. Sci. Technol. 42: 251–325.

Xin, H., Yang, J., Lu, Y., Xiao, H., Wang, H., Eltohamy, K.M., Zhu, X., Liu, C., Fang, Y., Ye, Y., Liang, X. 2024. Potentials of emergent plant residue derived biochar to be alternative carbon-based phosphorus fertilizer by Fe(II)/Fe(III) magnetic modification. Biochar 6.

การวิเคราะห์ความสัมพันธ์เชิงพื้นที่และเวลาระหว่างปริมาณจราจร ดัชนีพืชพรรณ และอุณหภูมิพื้นผิว ในเขตกรุงเทพมหานครและปทุมธานี (พ.ศ. 2563–2567)

Spatiotemporal analysis of the relationship between traffic volume, vegetation index, and land surface temperature in Bangkok and Pathum Thani (2020–2024)

พิชญุตม์ จอมใจเหล็ก*, **ตุลวิทย์ สถาปนจารุ**

Pitchayut Jomjailek*, Tunlawit Satapanajaru

ภาควิชาเทคโนโลยีและการจัดการสิ่งแวดล้อม คณะสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

Department of Environmental Technology and Management, Faculty of Environment, Kasetsart University, Bangkok 10900, Thailand

*Corresponding author. E-mail address: Pitchayut.jo@ku.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้วิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณจราจร (Annual Average Daily Traffic: AADT) ดัชนีพืชพรรณ (Normalized Difference Vegetation Index: NDVI) และอุณหภูมิพื้นผิว (Land Surface Temperature: LST) ในกรุงเทพฯ และปทุมธานี (พ.ศ. 2563–2567) ครอบคลุม 18 จุดตรวจวัด ด้วยเทคโนโลยีสำรวจระยะไกลและการถดถอยพหุคูณ ผลพบว่าปริมาณจราจรลำพังมีความสัมพันธ์กับอุณหภูมิต่ำ แต่เมื่อผนวกดัชนีพืชพรรณค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญสูงสุดในปี 2564 (R^2=0.75) ยืนยันบทบาทหลักของพื้นที่สีเขียวในการลดความร้อน อย่างไรก็ตาม ในปี 2563 (โควิด-19) พบค่าความสัมพันธ์รวมต่ำสุด (R^2=0.49) แต่ปริมาณจราจรกลับเป็นปัจจัยเดียวที่มีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) ขณะที่ NDVI ไม่มีนัยสำคัญ สะท้อนว่าเมื่อกิจกรรมเมืองลดลง ความร้อนจากภาคขนส่งจะแสดงอิทธิพลเด่นชัดโดยไม่ถูกลดทอน สรุปได้ว่าแม้จราจรจะส่งผลต่ออุณหภูมิ แต่พื้นที่สีเขียวเป็นปัจจัยสำคัญที่สุดในการกำหนดอุณหภูมิพื้นผิวและเพิ่มความแม่นยำของแบบจำลอง

คำสำคัญ: ดัชนีพืชพรรณ, เทคโนโลยีการสำรวจระยะไกล, ปริมาณจราจร, อุณหภูมิพื้นผิว

Abstract

This research analyzes the relationship between Annual Average Daily Traffic (AADT), Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), and Land Surface Temperature (LST) in Bangkok and Pathum Thani (2020–2024) across 18 stations. Using GIS with a 200-meter buffer and Multiple Regression Analysis, results show that traffic volume alone has a low correlation with LST. However, incorporating NDVI significantly improved model accuracy, peaking in 2021 (R^2 = 0.75), confirming that green spaces effectively mitigate heat. Notably, the lowest correlation occurred in 2020 (R^2 = 0.49) due to COVID-19; traffic became the sole significant factor ($p < 0.05$) while NDVI was insignificant, reflecting that reduced urban activity isolated and highlighted transport-induced heat. The study concludes that while traffic contributes to heat, vegetation is the primary determinant for surface temperature regulation.

Keywords: Land Surface Temperature (LST), Remote sensing, Traffic volume (AADT), Vegetation index (NDVI)

คำนำ

กรุงเทพมหานครเป็นเมืองหลวงและศูนย์กลางทางเศรษฐกิจที่สำคัญที่สุดของประเทศไทย มีการเจริญเติบโตอย่างรวดเร็วทั้งในด้านประชากรและโครงสร้างพื้นฐาน โดยมีพื้นที่ทั้งหมดประมาณ 1,568.750 ตารางกิโลเมตรและเป็นศูนย์กลางการขับเคลื่อนผลิตภัณฑ์มวลรวมภายในประเทศ (GDP) ที่สำคัญการพัฒนาในด้านอุตสาหกรรมและพาณิชยกรรมส่งผลให้เกิดการขยายตัวของเมืองไม่ได้ถูกจำกัดอยู่ในเขตกรุงเทพมหานครเพียงอย่างเดียวเท่านั้น แต่ได้แผ่ขยายออกสู่พื้นที่ปริมณฑลอย่างรวดเร็ว โดยเฉพาะจังหวัดปทุมธานี การเปลี่ยนแปลงนี้ส่งผลให้ความต้องการใช้พลังงานและจำนวนยานพาหนะเพิ่มสูงขึ้น จนนำไปสู่ผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมที่รุนแรงในระดับมหภาค

ปัจจุบันพื้นที่เมืองเผชิญกับปัญหาอุณหภูมิพื้นผิวที่สูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง ปัจจัยหลักมาจากการเปลี่ยนแปลงสภาพกายภาพของเมือง ซึ่งเกิดจากการเปลี่ยนแปลงสัดส่วนการใช้ที่ดิน โดยพื้นผิวเมืองที่เต็มไปด้วยสิ่งปลูกสร้าง คอนกรีต และยางมะตอย จะมีความสามารถในการดูดซับและสะสมความร้อนได้มากกว่าพื้นที่เกษตรกรรมหรือพื้นที่ธรรมชาติ (Estoqué et al., 2020) นอกจากปัจจัยด้านกายภาพแล้ว กิจกรรมของมนุษย์ยังเป็นแหล่งกำเนิดความร้อน (Anthropogenic Heat) ที่สำคัญ โดยเฉพาะในพื้นที่ที่มีการจราจรหนาแน่น ซึ่งมีการระบายความร้อนจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงของยานพาหนะโดยตรง (Zhu et al., 2017) ผลกระทบจากอุณหภูมิที่สูงขึ้นไม่ได้จำกัดอยู่เพียงมิติด้านความร้อน แต่ยังส่งผลต่อเนื่องถึงสุขภาพของประชาชน เช่น ความเสี่ยงต่อโรคระบบทางเดินหายใจ พื้นที่สีเขียวหรือดัชนีพืชพรรณ (Vegetation Index) จึงมีความจำเป็นอย่างยิ่ง ที่จะเป็นกลไกธรรมชาติที่สำคัญในการลดอุณหภูมิเมือง ดังนั้น การศึกษาวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์หลักเพื่อ วิเคราะห์ความสัมพันธ์ปริมาณจราจรและดัชนีพืชพรรณ ที่ส่งผลต่ออุณหภูมิพื้นผิวในเขตกรุงเทพมหานครและจังหวัดปทุมธานี ช่วงปี พ.ศ. 2563–2567 โดยประยุกต์ใช้ระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์ (GIS) และการวิเคราะห์ทางสถิติ เพื่อประเมินอิทธิพลร่วมของปัจจัยดังกล่าวต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ ประโยชน์จากงานวิจัยนี้สามารถช่วยให้ระบุพิกัดพื้นที่ร้อนจัดเพื่อวางผังเมืองและเพิ่มพื้นที่สีเขียวได้อย่างแม่นยำ ช่วยลดการใช้พลังงานในอาคารผ่านการเลือกใช้วัสดุสะท้อนความร้อน และยกระดับสุขภาพคนเมืองด้วยการลดความเสี่ยงจากโรคลมแดดอย่างยั่งยืนครับ

อุปกรณ์และวิธีการ

อุปกรณ์ที่ใช้

-ภาพถ่ายดาวเทียมจาก USGS Earth Explorer

-ซอฟแวร์ระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์ หรือ QGIS

-ข้อมูลการจราจรจากกรมทางหลวง (Department of Highways - DOH)

วิธีการ

ในงานวิจัยนี้แบ่งออกเป็นสามส่วน

ส่วนที่ 1 การเก็บรวบรวมข้อมูล

ผู้วิจัยได้ใช้เครื่องมือเทคโนโลยีการสำรวจข้อมูลระยะไกล (Remote sensing) ในการเก็บรวบรวมข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียมของกรุงเทพมหานครและจังหวัดปทุมธานีจากดาวเทียม LANDSAT-8 และ LANDSAT-9 Collection 2 Level 2 ซึ่งติดตั้ง Operational Land Imager (OLI) และ Thermal Infrared Sensor (TIRS) ใน Path 129/Row 50, 51 ที่ Cloud cover น้อยกว่า 10% ในช่วงฤดูร้อนตั้งแต่กลางเดือนกุมภาพันธ์ ไปจนถึงกลางเดือนพฤษภาคม ปี 2563 – 2567 จาก

เว็บไซต์ของ USGS Earth Explorer และคัดเลือกภาพที่ได้ทั้งหมดให้เหลือปีละ 1 ภาพที่ครอบคลุมของทั้งสองพื้นที่ศึกษา และมีเมฆบดบังน้อยที่สุดหรือไม่มีเลยเพื่อเตรียมมาใช้ในการวิเคราะห์อุณหภูมิพื้นผิวดิน (Land Surface Temperature - LST) และ ดัชนีความแตกต่างพืชพรรณ (Normalized Difference Vegetation Index - NDVI) และข้อมูลความหนาแน่นของการจราจรจะถูกนำมาจากฐานข้อมูลการจราจรจากกรมทางหลวง (Department of Highways – DOH) และนำข้อมูลที่ได้ทั้งหมดมาหาความสัมพันธ์ที่มีผลต่ออุณหภูมิพื้นผิวดิน

ส่วนที่ 2 การเตรียมข้อมูล

ความหนาแน่นของการจราจร (AADT)

เก็บข้อมูลโดยเลือกจุดสำรวจบนทางหลวงที่อยู่ในเขตกรุงเทพและปทุมธานี ในแต่ละปีที่มีปริมาณความหนาแน่นของการจราจรสูง จำนวน 43 จุดสำรวจและนำทั้งหมดมาคัดเลือกให้เหลือ กรุงเทพ 8 จุด และปทุมธานี 10 รวมเป็น 18 จุด สำรวจที่มีความสำคัญ เช่น ทางหลวงที่ 351 ตอนควบคุมที่ 100 จุดสำรวจที่ กม. 4+700 สถานที่มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ – คันนายาว ที่มีการจราจรในช่วงปี 2567 เฉลี่ยอยู่ที่ 76671 คัน แบ่งตาม ทางหลวงที่ ตอนควบคุมที่ และจุดสำรวจที่ และนำข้อมูลดังกลาวมาหาค่าพิกัดลองติจุด, ละติจุด ใน google maps เพื่อใช้ในการสร้างจุดกันชนหรือวงกลมรัศมี 200 เมตร รอบจุดพิกัด (Buffer Zone) เพื่อให้ครอบคลุมถนนที่มีรถสัญจรในบริเวณโดยรอบ และนำข้อมูลที่ได้ทั้งหมดมาหาความสัมพันธ์กับปัจจัยอื่นๆ ต่อไป

ดัชนีความแตกต่างพืชพรรณ (Normalized Difference Vegetation Index - NDVI)

สกัดข้อมูลจากภาพถ่ายดาวเทียม Band 4 และ Band 5 จากดาวเทียม Landset 8-9 Landsat Collection 2 Level 2 (ST Product) เพื่อคำนวณอัตราส่วนจากการวัดความเขียวขจีของพืชพรรณ โดยใช้การสะท้อนแสงอินฟราเรดใกล้ (Near-Infrared, NIR) และแสงสีแดง (Red) (Equation 1):

$$NDVI = \frac{NIR-Red}{NIR+Red} \quad (1)$$

โดยที่:

NDVI คือ ดัชนีความแตกต่างพืชพรรณ (Normalized Difference Vegetation Index)

NIR คือ แสงอินฟราเรดใกล้ (Near-Infrared, NIR)

Red คือ แสงสีแดง (Red)

อุณหภูมิพื้นผิวดิน (Land Surface Temperature - LST)

สกัดข้อมูลจากภาพถ่ายดาวเทียม Band 10 จากดาวเทียม Landset 8-9 Landsat Collection 2 Level 2 (ST Product) เพื่อคำนวณอุณหภูมิพื้นผิวดิน (Equation 2):

$$LST\ (Celsius) = (DN_{ST} \times Scale\ Factor) + Offset - 273.15 \quad (2)$$

โดยที่:

LST (Celsius) คือ อุณหภูมิพื้นผิวดินในหน่วยองศาเซลเสียส

DN_{ST} คือ ค่าตัวเลขดิจิทัล (Digital Number) ของแบนด์อุณหภูมิพื้นผิว (Band 10)

Scale Factor คือ ตัวคูนปรับมาตราส่วนกำหนดที่ 0.0034172

Offset คือ ค่าชดเชย หรือ ค่าคงที่ปรับสมดุล (Additive Offset)

ส่วนที่ 3 การวิเคราะห์ข้อมูล

นำข้อมูลที่ถูกเตรียมไว้ในส่วนที่ 2 มาวิเคราะห์ข้อมูลหาความสัมพันธ์ด้วยแบบจำลองพหุนามกำลังสองเพื่อวิเคราะห์ว่าความสัมพันธ์ของ ปริมาณการจราจรและดัชนีพืชพรรณ ที่ส่งผลต่ออุณหภูมิพื้นผิวดินอย่างไรด้วยวิธีการทางสถิติ

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

จากการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการจราจร (AADT) ดัชนีพืชพรรณ (NDVI) และอุณหภูมิพื้นผิวดิน (LST) ในพื้นที่ศึกษาพบว่าในแต่ละปีมีลักษณะการกระจายของข้อมูลที่แตกต่างกันอย่างชัดเจน ปี พ.ศ. 2563 พบว่าปริมาณการจราจรสูงที่สุดมีค่า 329,746 คันต่อวัน ซึ่งอาจเกิดจากการเติบโตแบบก้าวกระโดดของธุรกิจจัดส่งอาหาร (Food Delivery) จากมาตรการล็อกดาวน์ช่วงวิกฤตโควิด-19 ส่งผลให้ยานพาหนะสำหรับส่งสินค้าและบริการมีการสัญจรที่หนาแน่นและต่อเนื่องตลอดทั้งวัน โดยจุดดังกล่าวมีค่า NDVI เท่ากับ 0.1124 และมีค่าอุณหภูมิพื้นผิวดินเฉลี่ย 43.13 องศาเซลเซียส ขณะที่ปริมาณการจราจรต่ำที่สุดในปีเดียวกันมีค่าเพียง 8,240 คันต่อวัน ซึ่งมีค่า NDVI เท่ากับ 0.1607 และมีค่า LST เฉลี่ย 39.34 องศาเซลเซียส แสดงให้เห็นว่าในปีนี้ พื้นที่ที่มีการจราจรหนาแน่นมักมีค่าอุณหภูมิพื้นผิวสูงกว่าพื้นที่ที่มีการจราจรต่ำตาม Table 1

Table 1 Stations with the Highest Annual Average Daily Traffic (AADT) in Each Year (2563–2567)

Year	Station ID	Location	Province	AADT	LST mean(°C)	NDVI mean
2563	1-201-35+550	Thupatemi Stadium – Khlong Luang Interchange	Pathum Thani	329,746	43.13	0.1124
2564	1-201-35+550	Thupatemi Stadium – Khlong Luang Interchange	Pathum Thani	248,026	41.52	0.1517
2565	1-201-35+550	Thupatemi Stadium – Khlong Luang Interchange	Pathum Thani	198,022	37.90	0.1224
2566	1-201-35+550	Thupatemi Stadium – Khlong Luang Interchange	Pathum Thani	200,760	37.64	0.1132
2567	1-201-35+550	Thupatemi Stadium – Khlong Luang Interchange	Pathum Thani	201,603	41.52	0.1224

ปี พ.ศ. 2564 พบว่าปริมาณการจราจรสูงที่สุดลดลงมาอยู่ที่ 248,026 คันต่อวัน โดยมีค่า NDVI เท่ากับ 0.1517 และค่า LST เฉลี่ย 41.52 องศาเซลเซียส ขณะที่จุดที่มีปริมาณการจราจรต่ำที่สุดอยู่ที่ 7,540 คันต่อวัน ซึ่งมีค่า NDVI สูงขึ้นเป็น 0.2444 และมีค่า LST เฉลี่ย 39.70 องศาเซลเซียส สะท้อนให้เห็นว่าพื้นที่ที่มีพืชพรรณหนาแน่นกว่าในปีนี้มีอุณหภูมิพื้นผิวต่ำกว่าอย่างชัดเจน สำหรับปี พ.ศ. 2565 ปริมาณการจราจรสูงที่สุดมีค่า 198,022 คันต่อวัน โดยมีค่า NDVI เท่ากับ 0.1224 และค่า LST เฉลี่ย 37.90 องศาเซลเซียส ในขณะที่ปริมาณการจราจรต่ำที่สุดอยู่ที่ 15,262 คันต่อวัน ซึ่งมีค่า NDVI สูงถึง 0.3179 และมีค่า LST ต่ำลงอย่างชัดเจนที่ 32.73 องศาเซลเซียส แสดงให้เห็นถึงบทบาทของพื้นที่สีเขียวที่เด่นชัดต่อการลดอุณหภูมิพื้นผิวในปีนี้ และในปี พ.ศ. 2566 พบว่าปริมาณการจราจรสูงที่สุดเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเป็น 200,760 คันต่อวัน โดยมีค่า NDVI เท่ากับ 0.1132 และค่า LST เฉลี่ย 37.64 องศาเซลเซียส ขณะที่จุดที่มีปริมาณการจราจรต่ำที่สุดอยู่ที่ 16,700 คันต่อวัน ซึ่งมีค่า NDVI เท่ากับ 0.3040 และมีค่า LST ต่ำที่สุดในปีนี้ที่ 32.50 องศาเซลเซียส สะท้อนให้เห็นแนวโน้มที่สอดคล้องกับปี 2565 กล่าวคือ พื้นที่ที่มี NDVI สูงมีอุณหภูมิพื้นผิวต่ำกว่าอย่างชัดเจนสุดท้ายในปี พ.ศ. 2567 พบว่าปริมาณการจราจรสูงที่สุดอยู่ที่ 201,603 คันต่อวัน โดยมีค่า NDVI เท่ากับ 0.1224 และค่า LST เฉลี่ย 41.52 องศาเซลเซียส ขณะที่ปริมาณการจราจรต่ำที่สุดมีค่า 17,060 คันต่อวัน ซึ่งมีค่า NDVI เท่ากับ 0.2444 และมีค่า LST เฉลี่ย

39.70 องศาเซลเซียส แสดงให้เห็นว่าภาพรวมของปีนี้ยังคงมีลักษณะคล้ายกับปี 2564 โดยพื้นที่ที่มีการจราจรหนาแน่นและมีพื้นที่สีเขียวน้อยมีแนวโน้มแสดงอุณหภูมิพื้นผิวสูงกว่า

เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณจราจร (AADT) และอุณหภูมิพื้นผิวดิน (LST) ดัง Fig. 1 ในช่วงปี พ.ศ. 2563–2567 พบว่า ปี พ.ศ. 2563 เป็นปีที่ปริมาณการจราจรส่งผลต่ออุณหภูมิพื้นผิวสูงที่สุด โดยมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์เพียร์สัน r = 0.65 และมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ $p = 0.003$ ซึ่งให้ค่า $r^2 = 0.42$ แสดงว่า ในปีดังกล่าว AADT เพียงปัจจัยเดียวสามารถอธิบายความแปรปรวนของอุณหภูมิพื้นผิวดินได้ประมาณร้อยละ 42.2 ($R^2 = 0.42$) ซึ่งจัดอยู่ในระดับอิทธิพลที่ค่อนข้างสูงเมื่อเทียบกับปีอื่น ๆ สาเหตุสำคัญคาดว่าเกิดจาก การลดลงของความร้อนพื้นหลัง (Reduction of Background Thermal Noise) ซึ่งเป็นผลพวงจากมาตรการล็อกดาวน์ช่วงวิกฤตโควิด-19 ที่ทำให้กิจกรรมเมืองในภาคส่วนอื่นลดลงอย่างมาก ในขณะที่ ภาคการขนส่งและโลจิสติกส์ยังคงดำเนินกิจกรรมต่อเนื่อง ปัจจัยเหล่านี้สะท้อนให้เห็นว่า ในปี พ.ศ. 2563 ความหนาแน่นของการจราจรจึงมีบทบาทสำคัญและแสดงอิทธิพลต่อการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิพื้นผิวอย่างชัดเจนที่สุดในทางตรงกันข้าม ปี พ.ศ. 2564 เป็นปีที่ปริมาณจราจร (AADT) ส่งผลต่ออุณหภูมิพื้นผิวดิน (LST) ต่ำที่สุด โดยพบค่าสหสัมพันธ์ $r = 0.45$ หรือคิดเป็น $r^2 = 0.20$ และไม่พบความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p = 0.061$) ซึ่งแสดงให้เห็นว่าในปีดังกล่าวปริมาณการจราจรสามารถอธิบายความแปรปรวนของอุณหภูมิพื้นผิวได้เพียงประมาณร้อยละ 20 และยังไม่เพียงพอที่จะสรุปได้ว่าการจราจรเป็นปัจจัยหลักที่กำหนดอุณหภูมิพื้นผิว อาจสะท้อนถึงบทบาทของปัจจัยแวดล้อมอื่น เช่น สภาพอุตุนิยมวิทยา หรือการกระจายตัวของพื้นที่สีเขียวที่เข้ามามีอิทธิพลมากขึ้นในช่วงเวลานั้น สำหรับปี พ.ศ. 2565, 2566 และ 2567 พบว่าความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณจราจรต่อวันและอุณหภูมิพื้นผิวดินอยู่ในระดับปานกลาง โดยปี พ.ศ. 2565 มีค่า $r = 0.56$ และ นัยสำคัญทางสถิติ $p = 0.016$ ปี พ.ศ. 2566 มีค่า $r = 0.49$ ($r^2 = 0.24$, $p = 0.037$) และปี พ.ศ. 2567 มีค่า $r = 0.48$ ($r^2 = 0.23$, $p = 0.042$) ผลดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าแม้อิทธิพลของการจราจรต่ออุณหภูมิพื้นผิวจะลดลงเมื่อเทียบกับปี 2563 แต่ปริมาณการจราจรยังคงเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่ออุณหภูมิพื้นผิวโดยสามารถอธิบายความแปรปรวนของอุณหภูมิพื้นผิวได้ประมาณร้อยละ 23–31 ในแต่ละปี เมื่อพิจารณาเชิงพื้นที่ พบความแตกต่างระหว่างจังหวัดปทุมธานีและกรุงเทพมหานครอย่างชัดเจน โดยสถานีตรวจวัดในจังหวัดปทุมธานี ซึ่งส่วนใหญ่อยู่ในบริเวณรอยต่อเมือง – ชานเมืองและแนวเส้นทางคมนาคมหลัก มักมีค่า AADT และค่า LST เฉลี่ยสูงกว่าสถานีในกรุงเทพมหานคร แม้บางพื้นที่จะมีค่า NDVI

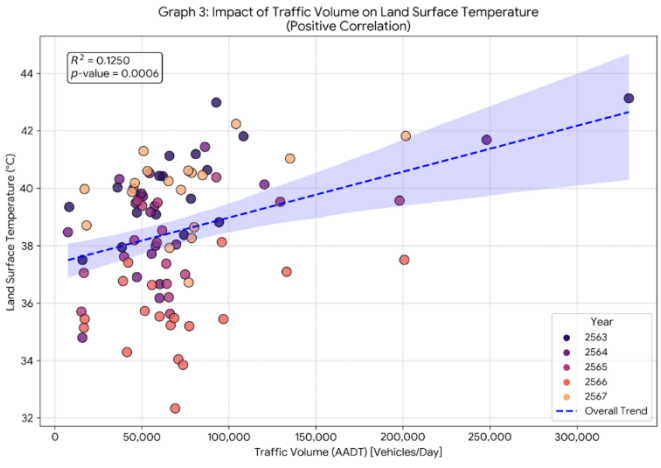


Fig. 1 Scatter Plot showing the Relationship between Annual Average Daily Traffic (AADT) and Land Surface Temperature (LST)

เมื่อพิจารณาเฉพาะผลของ AADT ต่อ LST ในเชิงสถิติ จะเห็นได้ว่า AADT เพียงตัวแปรเดียวสามารถอธิบายความแปรปรวนของอุณหภูมิพื้นผิวได้ตั้งแต่ประมาณร้อยละ 20 ในปีที่อิทธิพลต่ำที่สุด ไปจนถึงมากกว่าร้อยละ 40 ในปีที่อิทธิพลสูงที่สุด ซึ่งมีความหมายเชิงกายภาพว่า ความร้อนจากกิจกรรมการคมนาคมมีบทบาทสำคัญต่อปรากฏการณ์เกาะ

ความร้อนในเมือง แต่ยังไม่สามารถอธิบายความแปรปรวนของ LST ได้ทั้งหมด อย่างไรก็ตาม เมื่อผนวกรวม AADT เข้ากับ NDVI พบว่าความสามารถในการอธิบายความแปรปรวนของ LST เพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน โดยเฉพาะในปี พ.ศ. 2566 แสดงดัง Fig. 2 ซึ่งแบบจำลองถดถอยพหุคูณที่ใช้ AADT และ NDVI ร่วมกันให้ค่า $R^2 = 0.59$ หมายความว่า ตัวแปรทั้งสองสามารถอธิบายอุณหภูมิพื้นผิวดินได้ถึงประมาณร้อยละ 59 ซึ่งสูงกว่าการใช้ AADT เพียงตัวเดียวอย่างมีนัยสำคัญ ผลลัพธ์นี้สอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ที่พบว่า NDVI มีความสัมพันธ์เชิงลบกับ LST ในระดับค่อนข้างสูงถึงสูงมากในทุกปี (r อยู่ในช่วงประมาณ - 0.51 ถึง - 0.75, $p < 0.05$) แสดงให้เห็นว่าพื้นที่สีเขียวมีบทบาทสำคัญในการลดทอนความร้อนและช่วยชดเชยผลกระทบจากการจราจร แสดงดัง Fig. 3 (Peng et al., 2020).

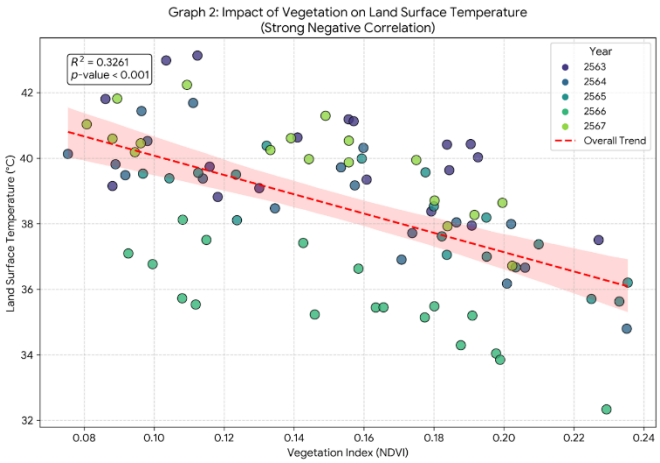


Fig. 2 Scatter Plot showing the Negative Correlation between Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) and Land Surface Temperature (LST)

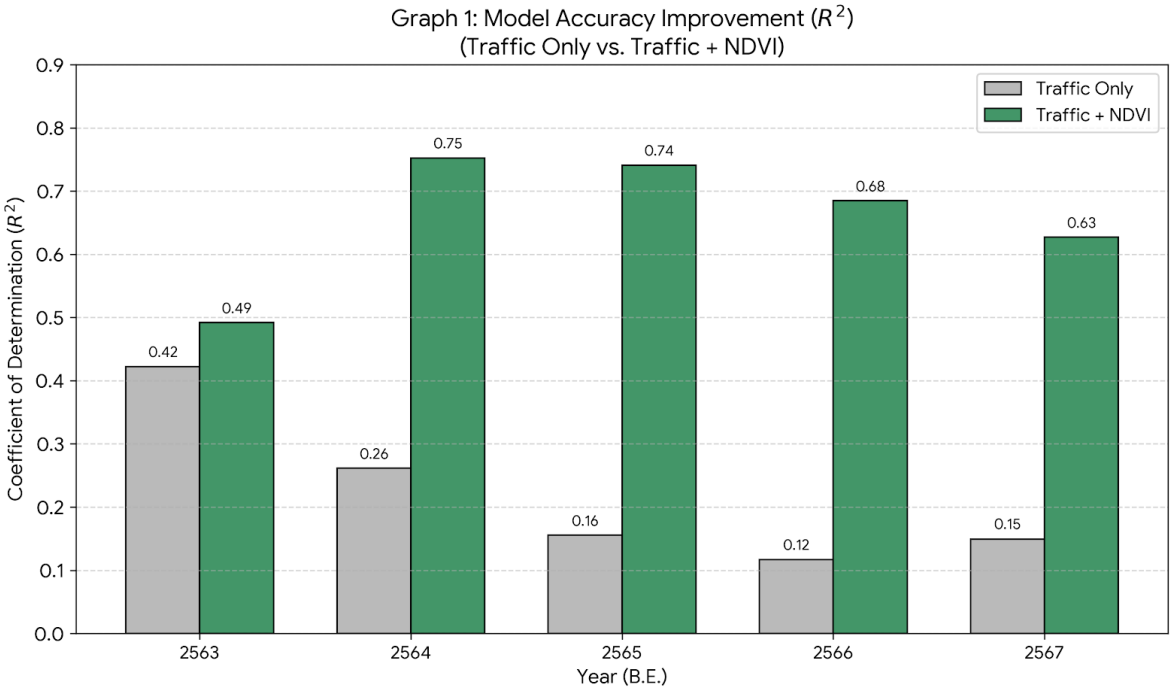


Fig. 3 Comparison of Coefficient of Determination (R^2) between Traffic-Only Model and Traffic-plus-NDVI Model (2020–2024)

สรุป

จากการวิเคราะห์ข้อมูลด้วยระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์และการวิเคราะห์ทางสถิติเชิงลึก พบข้อสรุปที่สำคัญดังนี้:

1. ภาพรวมของอุณหภูมิพื้นผิว (LST): พื้นที่ศึกษาในเขตกรุงเทพมหานครและปทุมธานีมีอุณหภูมิเฉลี่ยอยู่ในระดับสูง (ประมาณ 37–40 องศาเซลเซียส) โดยมีความผันแปรไปตามสภาพภูมิอากาศรายปี อย่างไรก็ตาม พบลักษณะทางกายภาพที่แตกต่างกัน ซึ่งสะท้อนถึงความซับซ้อนของการใช้ประโยชน์ที่ดินแบบเมืองผสมผสาน

2. ความสัมพันธ์ของตัวแปร:

- ปริมาณจราจร (AADT): มีความสัมพันธ์เชิงบวกกับอุณหภูมิพื้นผิวในทุกปีการศึกษา แต่เมื่อพิจารณาเป็นปัจจัยเดี่ยว พบว่ามีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ r^2 ต่ำถึงปานกลาง (0.23 – 0.42) ซึ่งบ่งชี้ว่าลำพังเพียงความร้อนจากยานพาหนะไม่สามารถอธิบายปรากฏการณ์เกาะความร้อนทั้งหมดได้

- ดัชนีพืชพรรณ (NDVI): เป็นปัจจัยที่มีอิทธิพลต่ออุณหภูมิพื้นผิวดินมากที่สุด โดยมีความสัมพันธ์เชิงลบอย่างมีนัยสำคัญในทุกปี (r = - 0.51 ถึง - 0.75, $p < 0.05$)

3. ประสิทธิภาพของแบบจำลอง: การผนวกดัชนีพืชพรรณ (NDVI) เข้าสู่สมการถดถอยพหุคูณร่วมกับปริมาณจราจร มีส่วนช่วยในการเพิ่มความแม่นยำในการทำนายอุณหภูมิได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยค่า R^2 เพิ่มขึ้นไปอยู่ในระดับสูง (0.63 – 0.75) ซึ่งยืนยันว่าอุณหภูมิพื้นผิวเมืองถูกกำหนดโดยสมดุลระหว่างความร้อนจากกิจกรรมมนุษย์และความเย็นจากพื้นที่สีเขียว

กิตติกรรมประกาศ

ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณ อาจารย์ที่ปรึกษา ผู้ให้คำแนะนำ คำปรึกษา และข้อเสนอแนะอันมีคุณค่าตลอดระยะเวลาการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ขอขอบคุณคณะสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ที่อนุเคราะห์ข้อมูล รวมถึงสนับสนุนด้านสถานที่ อุปกรณ์ หรือทรัพยากรที่จำเป็น นอกจากนี้ ข้าพเจ้าขอขอบคุณ ครอบครัวและคนรักที่คอยให้กำลังใจและสนับสนุนทั้งทางตรงและทางอ้อมตลอดระยะเวลาการศึกษาและการจัดทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ สุดท้ายนี้ หากปรากฏข้อบกพร่องใด ๆ ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ข้าพเจ้ายินดีน้อมรับผิดแต่เพียงผู้เดียว

เอกสารอ้างอิง

Estoqué, R.C., Murayama, Y., Myint, S.W. 2020. Effects of landscape composition and pattern on land surface temperature: An urban heat island study in Bangkok Metropolitan Area, Thailand. Sustainability 12: 2359.

Li, X., Zhou, Y., Asrar, G.R., Imhoff, M., et al. 2017. Urban heat island: Aerodynamic and hydrological effects on urban thermal environment. Remote Sens. Environ. 201: 269–283.

Peng, J., Xie, P., Liu, Y., Ma, J. 2020. Urban thermal environment dynamics and associated landscape pattern factors: A case study of Beijing, China. Remote Sens. 12: 624.

Zhu, R., Wong, M.S., Guilbert, É., Chan, P.-W. 2017. Understanding heat patterns produced by vehicular flows in urban areas. Sci. Rep. 7: 16309.

การศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับน้ำมันเครื่องยนต์และน้ำมันดีเซลจากวัสดุเส้นใยธรรมชาติและวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร

A study on the efficiency of engine oil and diesel fuel absorption using natural fibers and agricultural residues

พงศกร มณีสุต*, ประไพ บางเชย, ธีรวัฒน์ รังกุพันธ์, ชัยวัฒน์ บรรไดเพ็ชร

Pongsakorn Maneesut*, Prapai Bangcheoy, Theerawat Rungkuphun, Chaiwat Bandaiphet

ภาควิชาเทคโนโลยีชีวภาพ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร นครปฐม 73000

Department of Biotechnology Faculty of Engineering and Industrial Technology Silpakorn University, Nakhon Pathom 73000, Thailand

*Corresponding author. E-mail address: Maneesut_p@silpakorn.edu

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาการผลิตและทดสอบประสิทธิภาพในการดูดซับน้ำมันของวัสดุจากเส้นใย 3 ชนิด ได้แก่ เส้นใยนุ่น เส้นใยธูปฤาษีและเส้นใยจากเปลือกข้าวโพด โดยเปรียบเทียบเส้นใยธรรมชาติและวัสดุขึ้นรูปเป็นแผ่นในการทดสอบดูดซับน้ำมันดีเซลและน้ำมันเครื่อง ผลการศึกษาพบว่าเส้นใยนุ่นสามารถดูดซับดีที่สุด โดยในลักษณะเส้นใยธรรมชาตินุ่นดูดซับน้ำมันดีเซลและน้ำมันเครื่อง ได้ 42.7 กรัม/กรัม และ 40.9 กรัม/กรัม รองลงมาคือเส้นใยธูปฤาษี (28.3 และ 26.1 กรัม/กรัม) และเปลือกข้าวโพด (19.9 และ 16.5 กรัม/กรัม) ขณะที่วัสดุที่ผ่านการขึ้นรูปเป็นแผ่น พบว่ามีการดูดซับไม่ดีเท่าเส้นใยธรรมชาติ เส้นใยนุ่นเป็นวัสดุที่มีศักยภาพสูงสุดในการนำมาพัฒนาเป็นวัสดุดูดซับน้ำมันเนื่องจากมีคุณสมบัติไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic) และชอบน้ำมัน (Oleophilic) ตามธรรมชาติ วัสดุดูดซับทุกชนิดดูดซับน้ำมันเครื่องที่มีความหนืดสูงได้ดีกว่าน้ำมันดีเซลโดยใช้เวลาจนอิ่มตัวภายใน 15 นาที เป็นแนวทางในการจัดการมลพิษทางน้ำด้วยวัสดุท้องถิ่นธรรมชาติและส่งเสริมการใช้ทรัพยากรธรรมชาติอย่างยั่งยืน

คำสำคัญ: การดูดซับน้ำมัน, ชนิดของน้ำมัน, วัสดุดูดซับ, วัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร, เส้นใยธรรมชาติ

Abstract

This research investigated the production and oil absorption efficiency of materials derived from three types of fibers: Kapok fiber, Cattail fiber, and Corn husk fiber. The study compared the performance of natural fibers and fibers molded into sheets to test the absorption capacity against diesel oil and engine oil. The results indicated that Kapok fiber exhibited the highest absorption capacity for diesel oil and engine oil, about 42.7 g/g and 40.9 g/g in its natural form, followed by Cattail fiber (28.3 and 26.1 g/g) and Corn husk fiber (19.9 and 16.5 g/g). Kapok fiber is the most promising material for oil sorbent development due to its inherent hydrophobic and oleophilic properties. It was found that molding fiber sheets resulted in the absorption capacity being lower than that of natural fiber. All tested materials showed an efficiency in absorbing engine oil with its higher viscosity, higher than that of diesel oil, until saturation within 15 minutes. This serves as an approach for managing water pollution using local natural materials and promoting the sustainable use of natural resources.

Keywords: Agricultural waste, Natural fiber, Oil absorption, Oil types, Sorbent material

คำนำ

ปัญหาน้ำมันหรือผลิตภัณฑ์น้ำมันปิโตรเลียมรั่วไหลเป็นปัญหาที่สำคัญ เนื่องจากน้ำมันย่อยสลายยาก เมื่อปนเปื้อนลงสู่แหล่งน้ำเกิดฟิล์มปิดกั้นการแพร่ของออกซิเจน ส่งผลต่อระบบนิเวศและสิ่งมีชีวิตในธรรมชาติ วิธีการกำจัดน้ำมันขั้นต้นคือการใช้ วัสดุดูดซับน้ำมัน" ซึ่งช่วยกำจัดน้ำมันได้ในปริมาณมาก ใช้เวลาไม่นาน และขั้นตอนไม่ยุ่งยาก อย่างไรก็ตาม วัสดุดูดซับที่ใช้ส่วนใหญ่เป็นวัสดุสังเคราะห์ เช่น โพลิเอทิลีน และโพลิโพรพิลีน ซึ่งมีราคาสูงและต้องนำเข้าจากต่างประเทศ ตัวอย่างเช่น แผ่นดูดซับน้ำมันจากเส้นใยโพลิโพรพิลีนด้วยกระบวนการ Melt blown เช่น รุ่น OP001W โดยบริษัท ออฟฟิศเมท มีราคาจำหน่ายสูงถึงประมาณ 3,300 บาท ต่อ 100 แผ่น (เฉลี่ยแผ่นละ 33 บาท) ทำให้ต้นทุนในการกำจัดน้ำมันสูงขึ้นอย่างมาก (จิรายุ มั่งสุวรรณ, 2554)

มีรายงานศึกษาการใช้เส้นใยธรรมชาติและวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรและเส้นใยธรรมชาติการเกษตรไปทดสอบความสามารถในการดูดซับน้ำมัน มาทดแทนวัสดุสังเคราะห์ เนื่องจากหาได้ง่าย ราคาถูก และช่วยเพิ่มมูลค่า (ศิริพร พงษ์สันติสุข, 2541; Hori, K. et al., 1999) รายงานกลไกการดูดซับว่าเกิดจากการที่ของเหลวถูกดึงเข้าไปภายในรูพรุนของวัสดุดูดซับ โดยถูกต้านทานโดยอากาศในรูพรุนเมื่อความดันคาปิลารี(Capillary pressure) เท่ากับความดันอากาศภายในรูพรุน ของเหลวจึงไม่ถูกดึงเข้าไปอีก โดยองค์ประกอบแต่ละชนิดในสารละลายมีความสามารถในการกระจายตัวบนพื้นผิวและเกิดแรงดึงดูดกับผิวได้แตกต่างกัน (จิรายุ มั่งสุวรรณ, 2554) อย่างไรก็ดี ในทางปฏิบัติการใช้เส้นใยธรรมชาติไปใช้ในแหล่งน้ำทำได้ยาก เพราะวัสดุมีน้ำหนักเบา เก็บกู้ลำบาก และอาจก่อให้เกิดมลพิษซ้ำซ้อนจากการหลุดลอยของเส้นใย

งานวิจัยนี้ มีวัตถุประสงค์ เพื่อศึกษาและเปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซับน้ำมัน ของเส้นใยนุ่น เส้นใยฐูปฤาษี และเส้นใยจากเปลือกข้าวโพด ทั้งในรูปแบบเส้นใยธรรมชาติและรูปแบบที่ผ่านการขึ้นรูปเป็นแผ่น เพื่อข้อมูลเชิงเปรียบเทียบถึงศักยภาพของวัสดุชีวภาพในการนำมาพัฒนาเป็นแผ่นดูดซับน้ำมันทดแทนวัสดุสังเคราะห์ที่มีราคาแพง

อุปกรณ์และวิธีการ

สำหรับการเตรียมวัสดุเส้นใยที่นำมาทดสอบ โดยเป็นทั้งวัสดุตามธรรมชาติได้แก่ นุ่น ฐูปฤาษี และวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร ได้แก่เปลือกข้าวโพด ซึ่งเป็นวัสดุที่หาได้ง่ายและมีปริมาณมากในจังหวัดนครปฐม

น้ำมันที่ใช้ทดสอบประสิทธิภาพของวัสดุ ได้แก่ น้ำมันดีเซล (บริษัท Shell) มีค่าความหนาแน่น 0.820 -0.870 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร และมีค่าความหนืดอยู่ในช่วง 1 ถึง 10 เซนติพอยส์ (cP) และน้ำมันเครื่องยนต์ (บริษัท PTT lubricants) มีความหนาแน่น 0.860–0.930 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร และมีความหนืด 200 ถึง 400 เซนติพอยส์ (cP)

โซเดียมไฮดรอกไซด์ Sodium Hydroxide (NaOH) ซึ่งนำมาใช้ในขั้นตอนการต้มเพื่อเปลี่ยนเส้นใยธรรมชาติให้เป็นน้ำเยื่อสำหรับการขึ้นรูปเป็นแผ่นดูดซับและ n-Hexane (C6H14) จากนั้นตรวจสอบลักษณะเส้นใยภายใต้กล้องจุลทรรศน์ โดยนำเส้นใยที่ต้องการศึกษาวางลงบนเพลทเกลี่ยให้บางปรับกำลังขยาย 40 เท่า โดยใช้กล้องจุลทรรศน์ Premiere รุ่น XSZ-135D ถ่ายภาพเส้นใยจากกล้อง

วิธีดำเนินการวิจัย

การเตรียมเส้นใย: ส่วนของนุ่นและฐูปฤาษี จะเริ่มจากการคัดแยกฝุ่นละอองและเศษขยะออก แล้วนำเส้นใยมาล้างทำความสะอาดด้วยน้ำสะอาดเพื่อกำจัดสิ่งสกปรกที่ตกค้างบนผิววัสดุ จากนั้นนำไปอบในตู้อบที่อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง เพื่อไล่ความชื้นก่อนนำไปเก็บในที่แห้ง สำหรับการเตรียมเส้นใยจากเปลือกข้าวโพดซึ่งมีโครงสร้างที่แข็งกว่า เริ่มจากการนำเปลือกข้าวโพดสดมาล้างน้ำสะอาดและหั่นให้มีขนาดประมาณ 1 นิ้ว จากนั้นนำไปปั่นในเครื่องปั่นโดยมีการเติมน้ำสะอาดในอัตราส่วน 1:1 ซึ่งเป็นสัดส่วนระหว่างน้ำหนักหรือปริมาตรของวัตถุดิบพืชสดต่อน้ำ

เพื่อช่วยให้เครื่องปั่นสามารถแยกเส้นใยออกจากเนื้อเยื่อพืชได้ละเอียดและทั่วถึงมากขึ้น เมื่อปั่นจนได้เส้นใยแล้วจึงทำการกรองแยกน้ำออก แล้วนำเส้นใยที่ได้ไปอบในตู้อบที่อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จนแห้งสนิทและเก็บรักษาในที่แห้งมิดชิดเพื่อรอการทดสอบต่อไป

การขึ้นรูปเป็นแผ่น: นำเส้นใยจากวัสดุที่เตรียมได้ 5 กรัม มาเติมโซเดียมไฮดรอกไซด์ 54 กรัม ต้มในน้ำปริมาตร 300 มิลลิลิตร จนได้เป็นน้ำเยื่อ ตั้งทิ้งให้เย็น แยกเยื่อออกจากเส้นใย จากนั้นล้างในน้ำสะอาด กรองแยกเยื่อโดยใช้ตะแกรง เกลี่ยขึ้นรูปให้เป็นแผ่น จากนั้นนำไปตากแดดจนแห้ง (วิวัฒน์ ตัณฑะพานิชกุลและคณะ, 2547) สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้าไปกำจัดสิ่งปนเปื้อนและลิกนินบางส่วนโดยการต้มด้วย NaOH ทำให้เส้นใยพองตัวและขาวขึ้น เนื่องจากกำจัดลิกนินออก โครงสร้างเซลลูโลสขยายตัวพร้อมดูดซับ น้ำมันดังแสดงใน Fig 1

Fig.1 The molded fiber sheets: (A) Cattail fiber, (B) Kapok fiber, (C) Corn husk fiber.

การทดสอบการดูดซับน้ำมัน: นำเส้นใยธรรมชาติ 0.5 กรัม และแผ่นวัสดุขึ้นรูปจากเส้นใยนุ่น ธูปฤาษี และเปลือกข้าวโพดที่เตรียมไว้ มาตัดเป็นแผ่นตัวอย่างละ 0.5 กรัม แล้วนำไปทดสอบดูดซับน้ำมันดีเซลและน้ำมันเครื่องยนต์ในบีกเกอร์ 30 มิลลิลิตร 2 เวลาคือ ช่วงสั้น 15 นาที และช่วงยาว 24 ชั่วโมง ตามวิธีของ (จิรายุ มั่งสุวรรณ, 2554) แยกเส้นใยและแผ่นวัสดุไปชั่งน้ำหนักเส้นใยก่อนและหลังการดูดซับน้ำมัน คำนวณค่าการดูดซับน้ำมันตามสมการ (Equation 1) ประสิทธิภาพการดูดซับน้ำมัน (พงษ์ธิพันธ์ ผึ่งผาย 2561):

$$\text{Oil Absorption Efficiency} = \frac{S}{S_0} \times 100 \qquad (1)$$

Where, Oil sorption efficiency is expressed in percent of adsorbed oil weight per fiber weight (% W/W),

S_0 = Weight of the oil before adsorption/absorption (unit: gram)

S_1 = Weight of the remaining oil after adsorption/absorption (unit: gram)

S = Weight of the oil lost/missing oil, which is calculated from $S=S_0-S_1$

การดูดซับน้ำมันในหน่วยกรัมน้ำมันต่อกรัมวัสดุตัวดูดซับ (Wang et al. 2012) (Equation 2):

$$\text{Oil Absorption Capacity} = \frac{m_2-m_1}{m_1} \qquad (2)$$

Where, Oil Absorption Capacity is expressed in grams of adsorbed oil per gram of sorbent fiber

m_1 = Weight of the sample before oil adsorption (unit: gram)

m_2 = Weight of the sample after oil adsorption (unit: gram)

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

ผลการศึกษาความสามารถในการดูดซับน้ำมันเครื่องยนต์และน้ำมันดีเซลแสดงไว้ใน Fig. 2 และ Fig. 3 ตามลำดับ พบว่า เส้นใยธูปฤาษี เส้นใยนุ่นและเปลือกข้าวโพด ดูดซับน้ำมันเครื่องยนต์ได้ดีกว่าน้ำมันดีเซล เนื่องจากน้ำมันเครื่องยนต์มีค่าความถ่วงจำเพาะและความหนืดที่สูงกว่า น้ำมันสามารถยึดติดบนพื้นผิวของวัสดุดูดซับได้หนาแน่นกว่า ระยะเวลาในการแช่วัสดุส่งผลโดยตรงต่อการดูดซับ โดยเมื่อระยะเวลาเพิ่มขึ้น วัสดุดูดซับที่สูงขึ้น ซึ่งเส้นใยนุ่นแสดงประสิทธิภาพการดูดซับถึงร้อยละ 82.63 การดูดซับน้ำมันที่ดีต้องมีคุณสมบัติชอบน้ำมัน (Oleophilic fiber) และดูดซับน้ำได้น้อย (Hydrophobic) เส้นใยธูปฤาษีและเส้นใยนุ่นมีชั้นขี้ผึ้งธรรมชาติเคลือบอยู่บริเวณผิวหน้าของเส้นใย ซึ่งคุณสมบัตินี้ทำให้วัสดุทั้งสองชนิดชอบน้ำมันสูงและดึงดูดน้ำมันได้ดี ในขณะที่เปลือกข้าวโพดไม่มีสารจำพวกไขมันหรือขี้ผึ้งเคลือบอยู่ตามธรรมชาติ จึงส่งผลให้ความสามารถในการดูดซับน้ำมันต่ำกว่าวัสดุชนิดอื่น

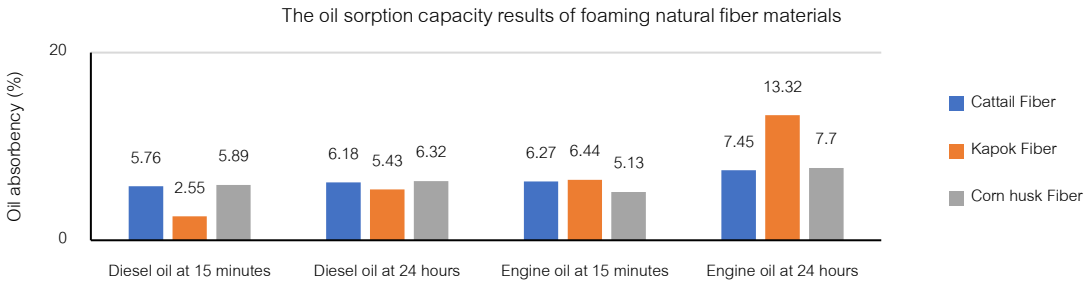


Fig. 2 Oil sorption capacity of natural fibers in diesel and engine oil at 15 minutes and 24 hours

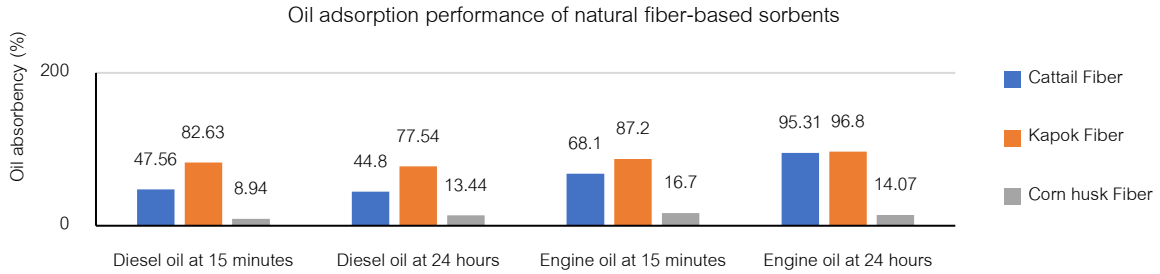


Fig.3 Oil sorption capacity of fiber sheet in diesel and engine oil at 15 minutes and 24 hours

เส้นใยธรรมชาติ (Natural Fibers) มีโครงสร้างรูพรุนและช่องว่างภายในท่อกลวง (Lumen) ที่เปิดกว้างและเป็นอิสระต่อกัน ทำให้มีพื้นที่ผิวสัมผัสสูงและน้ำมันสามารถแทรกซึมเข้าไปกักเก็บได้ในปริมาณมหาศาลด้วยแรงดันคาปิลารี แต่ใน Fig. 3 เมื่อนำเส้นใยมาผ่านกระบวนการต้มด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์และขึ้นรูปเป็นแผ่น (Molded/Forming Fiber) เส้นใยจะถูกเบียดอัดจนแน่นคล้ายเนื้อกระดาษ ส่งผลให้ช่องว่างระหว่างเส้นใยและรูพรุนภายในลดลงอย่างมาก น้ำมันจึงไม่สามารถซึมผ่านเข้าไปได้ดีเท่ากับแบบเส้นใยอิสระ สอดคล้องกับผลการทดลองที่พบว่าเส้นใยนุ่นธรรมชาติมีประสิทธิภาพสูงกว่าแบบแผ่นถึง 22 เท่า อย่างไรก็ตาม แม้ค่าเปอร์เซ็นต์ในแบบแผ่นจะต่ำกว่า แต่ทั้งสองภาพยังแสดงแนวโน้มที่สอดคล้องกันคือการดูดซับน้ำมันเครื่องที่มีความหนืดสูงได้ดีกว่าน้ำมันดีเซล เนื่องจากน้ำมันที่มีความหนืดสูงสามารถยึดเกาะบนพื้นผิววัสดุได้หนาแน่นกว่าน้ำมันที่มีความหนืดต่ำ โดยแบบแผ่นประสิทธิภาพต่ำกว่าแบบอิสระ (นุ่นลดลงถึง 22 เท่า) เพราะเส้นใยถูกเบียดอัดจนแน่นทำให้รูพรุนลดลง

โดยทำให้ทราบว่าเส้นใยนุ่นมีประสิทธิภาพในการดูดซับน้ำมันดีกว่าเส้นใยอื่นและดูดซับน้ำมันเครื่องดีกว่าน้ำมันดีเซลใน Fig.4 ส่วนเส้นใยเปลือกข้าวโพดชนิดขึ้นรูปมีประสิทธิภาพในการดูดซับน้ำมันดีเซลดีกว่าน้ำมันชนิดอื่นและเส้นใย

นุ่นชนิดขึ้นรูปมีประสิทธิภาพในการดูดซับน้ำมันเครื่องดีว่าเส้นใยชนิดอื่นแต่ในขณะเดียวกันหลังจาก 15 นาที โดยเส้นใยทั้งหมดหลังจาก 15 นาที ตัวของเส้นใยเกิดการอิ่มตัวจึงมีการทดลองเพิ่มเติม ในเวลา15 นาที, 30 นาที และ 60 นาที ในตัวอย่างน้ำมันเครื่อง โดยจะแทนช่วงเวลา 15, 30 และ 60 เป็น E15, E30 และ E60 ตามลำกับ ดังแสดงใน Fig. 4

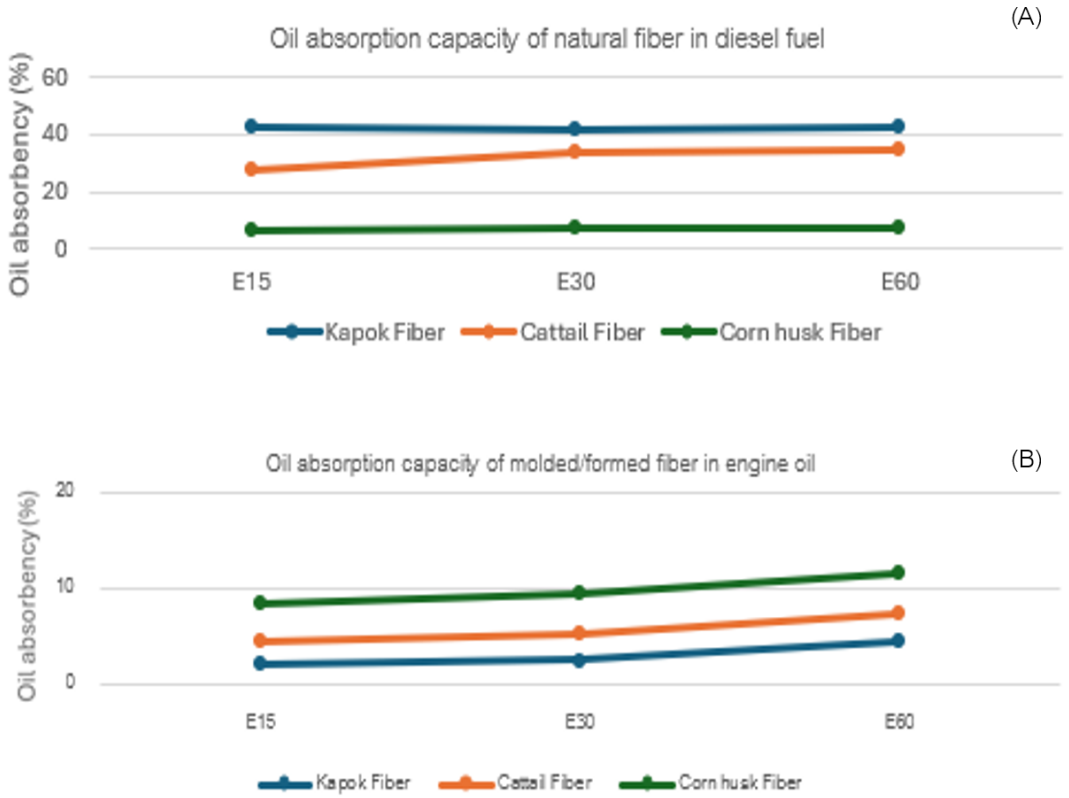


Fig. 4 Oil absorption capacity of natural fiber in diesel fuel (A) Oil absorption capacity of molded/formed fiber in engine oil (B)

ความสามารถการดูดซับน้ำมันเครื่องของเส้นใยธรรมชาติทุกและชนิดของเส้นใยขึ้นรูปทุกชนิด แสดงดัง Fig. 4 พบว่ามี แนวโน้มการดูดซับน้ำมันคงที่ไม่มีความแตกต่างกันมากในแต่ละช่วงเวลา 15-60 นาที พบว่าเส้นใยนุ่นในรูปแบบเส้นใยธรรมชาติมีความสามารถในการดูดซับน้ำมันดีที่สุดเมื่อเทียบกับวัสดุชนิดอื่น เนื่องจากมีโครงสร้างท่อกลวง (Lumen) และรูพรุนที่เปิดกว้างตามธรรมชาติช่วยให้กักเก็บน้ำมันได้ปริมาณมาก ในขณะที่วัสดุชนิดขึ้นรูปแผ่นมีประสิทธิภาพลดลงอย่างชัดเจน เนื่องจากกระบวนการขึ้นรูปทำให้เส้นใยถูกเบียดอัดจนแน่น ส่งผลให้ช่องว่างและรูพรุนภายในลดลง น้ำมันจึงซึมเข้าสู่ตัววัสดุได้ยากขึ้น อีกทั้งการต้มด้วย NaOH ยังทำลายชั้นขี้ผึ้งธรรมชาติที่ช่วยดึงดูดน้ำมันออกไปบางส่วน แม้การขึ้นรูปวัสดุเป็นแผ่นจะช่วยเพิ่มความสะดวกในการใช้งาน การขนย้าย และการจัดเก็บในพื้นที่จริงได้ดีกว่า แต่ไม่สามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการดูดซับน้ำมันให้สูงขึ้นกว่ารูปแบบเส้นใยธรรมชาติอิสระได้ เนื่องจากวัสดุดูดซับน้ำมันเครื่อง (ความหนืดสูง) ได้ดีกว่าน้ำมันดีเซลเพราะยึดเกาะพื้นผิวได้หนาแน่นกว่า และการดูดซับอิ่มตัวตั้งแต่ 15 นาทีแรก

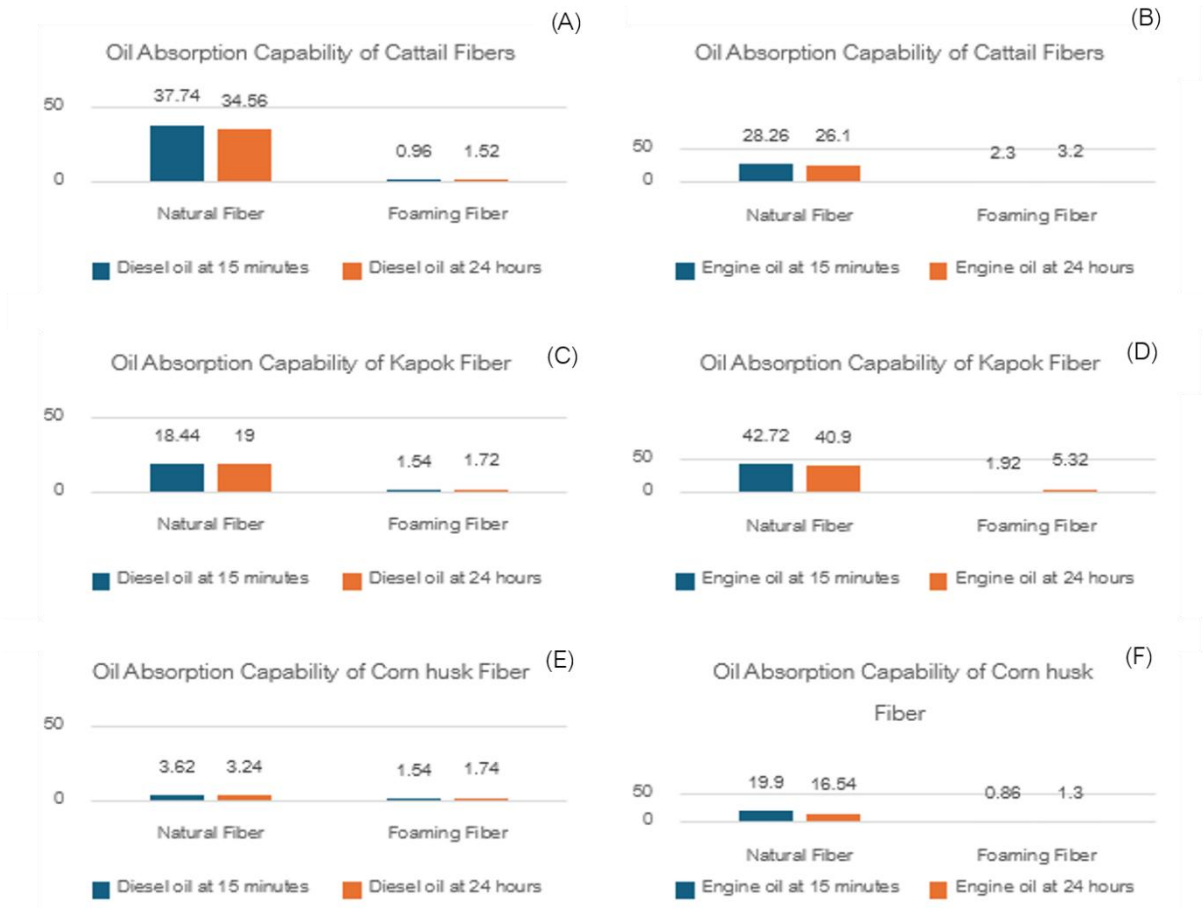


Fig. 5 The oil absorption capability of three fiber types, where (A), (C), and (E) are exposed to diesel fuel, and (B), (D), and (F) are exposed to engine oil.

ผลการศึกษาลักษณะของการดูดซับน้ำมันเส้นใยธรรมชาติหลังการทดสอบการดูดซับ 24 ชั่วโมง พบลักษณะของเส้นใยหลังจากการดูดซับน้ำมันดีเซลและน้ำมันเครื่องภายใต้กล้องจุลทรรศน์ แสดงผลดัง Fig. 6

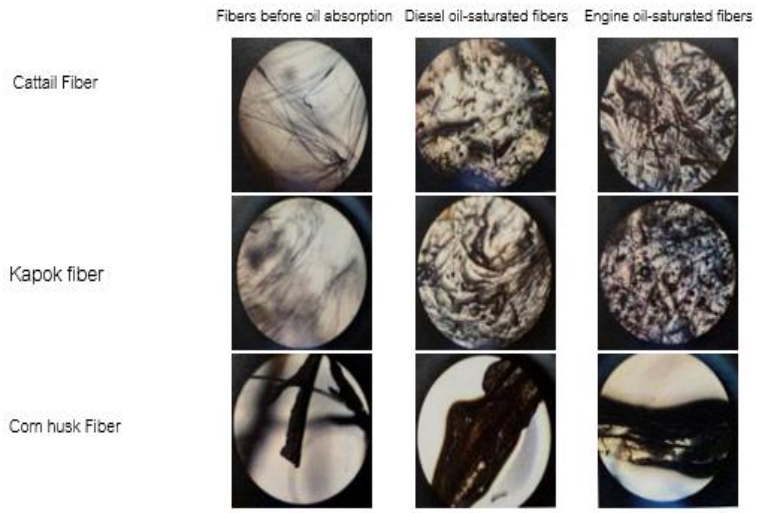


Fig. 6 Microscopic characteristics of the natural fibers following the 24-hour absorption test with diesel fuel and engine oil

จากการศึกษาลักษณะทางจุลทรรศน์ในรูปที่ 6 พบว่าหลังผ่านการดูดซับเป็นเวลา 24 ชั่วโมง น้ำมันสามารถแทรกซึมเข้าสู่โครงสร้างภายในของเส้นใยได้อย่างสมบูรณ์ โดยอาศัยกลไกแรงดันคาปิลลารี (Capillary action) เข้าไปกักเก็บในส่วนของท่อกลวง (Lumen) และช่องว่างระหว่างโมเลกุล ซึ่งยืนยันได้จากลักษณะของเส้นใยที่ทึบแสงและพองตัวขึ้น เนื่องจากมีน้ำมันเคลือบอยู่ทั้งภายในและภายนอกอย่างหนาแน่น โดยเฉพาะในน้ำมันเครื่องที่มีความหนืดสูงจะปรากฏการยึดเกาะที่พื้นผิวชัดเจนกว่าน้ำมันดีเซล สอดคล้องกับผลการทดลองเชิงสถิติที่ระบุว่าวัสดุเกิดการอิ่มตัวตั้งแต่นาทีที่ 15 และสามารถโอบอุ้มน้ำมันไว้ได้คงที่จนครบ 24 ชั่วโมงโดยไม่เกิดการปลดปล่อยออกมา แสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพในการกักเก็บ (Retention capacity) ที่เสถียรของทั้งเส้นใยนุ่น ธูปฤาษี และเปลือกข้าวโพด

สรุป

การเลือกศึกษาเส้นใยทั้ง 3 ชนิด ได้แก่ นุ่น ธูปฤาษี และเปลือกข้าวโพด เนื่องจากเป็นวัสดุที่หาได้ง่ายและมีปริมาณมากในจังหวัดนครปฐม ซึ่งเป็นทั้งวัสดุตามธรรมชาติและวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร เพื่อมุ่งเน้นการเพิ่มมูลค่าและลดต้นทุนในการจัดการมลพิษทางน้ำทดแทนวัสดุสังเคราะห์ที่มีราคาสูงถึงแผ่นละ 33 บาท ผลการศึกษาพบว่าเส้นใยนุ่นมีความสามารถในการดูดซับน้ำมันดีเซลได้ 42.72 กรัม/กรัม และน้ำมันเครื่อง 40.9 กรัม/กรัม ซึ่งเป็นค่าที่สูงที่สุดเมื่อเทียบกับเส้นใยธูปฤาษี (28.26 และ 26.1 กรัม/กรัม) และเปลือกข้าวโพด (19.9 และ 16.54 กรัม/กรัม) ตามลำดับ สาเหตุที่เส้นใยนุ่นมีประสิทธิภาพดีที่สุดเนื่องจากมีโครงสร้างท่อกลวง (Lumen) และรูพรุนที่เปิดกว้าง อีกทั้งยังมีคุณสมบัติไม่ชอบน้ำแต่ชอบน้ำมัน จากชั้นขี้ผึ้งที่เคลือบผิวตามธรรมชาติ โดยวัสดุทุกชนิดดูดซับน้ำมันเครื่องได้ดีกว่าน้ำมันดีเซลเนื่องจากความหนืดที่สูงกว่าช่วยให้ยึดเกาะพื้นผิวได้ดี สำหรับช่วงเวลาที่เหมาะสมในการใช้งานคือ 15–60 นาที เนื่องจากเส้นใยจะเกิดการอิ่มตัวและมีแนวโน้มการดูดซับคงที่หลังจากนั้น ในแง่ความเป็นไปได้ในการนำไปใช้จริง แม้การขึ้นรูปเป็นแผ่นจะทำให้ประสิทธิภาพการดูดซับลดลงจากกระบวนการเบียดอัดเส้นใยและการสูญเสียชั้นขี้ผึ้งจากการต้มด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ แต่มีความเหมาะสมในทางปฏิบัติมากกว่าเส้นใยอิสระ เพราะช่วยลดปัญหามลพิษซ้ำซ้อนจากการหลุดลอยของเส้นใยและทำให้การเก็บกู้หลังการใช้งานทำได้สะดวกยิ่งขึ้น

ข้อเสนอแนะ

ในแง่ของ ความคุ้มทุนทางเศรษฐศาสตร์ เมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุดูดซับสังเคราะห์โพลิโพรพิลีนที่มีราคาสูงถึงแผ่นละ 33 บาท การผลิตแผ่นดูดซับจากวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรในงานวิจัยนี้มีต้นทุนที่ต่ำกว่ามาก เนื่องจากวัตถุดิบหลักอย่างเปลือกข้าวโพดหรือธูปฤาษีเป็นของเสียที่แทบไม่มีมูลค่าในท้องถิ่น แม้กระบวนการขึ้นรูปเป็นแผ่นจะทำให้ความสามารถในการดูดซับลดลงเมื่อเทียบกับรูปแบบเส้นใยอิสระ (เช่น เส้นใยนุ่นธรรมชาติมีประสิทธิภาพสูงกว่าแบบแผ่นถึง 22 เท่า) แต่เมื่อพิจารณาถึงความสะดวกในการเก็บกู้และความคุ้มค่าในการจัดการสิ่งแวดล้อมในระยะยาว แผ่นดูดซับจากเส้นใยธรรมชาติถือเป็นทางเลือกที่มีศักยภาพสูงในการลดต้นทุนการจัดการมลพิษทางน้ำได้อย่างยั่งยืน

กิตติกรรมประกาศ

ขอบคุณภาควิชาเทคโนโลยีชีวภาพ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาลัยศิลปากร ที่ให้ทุนทำวิจัย และสนับสนุนสถานที่ เครื่องมือ อุปกรณ์ที่ใช้ทำวิจัย

เอกสารอ้างอิง

จิรายุ มั่งสุวรรณ. 2554. การประยุกต์ใช้ของเสียจากอุตสาหกรรมเส้นใยเรยอนกับเส้นใยนุ่นเพื่อเป็นวัสดุดูดซับน้ำมัน. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

พงษ์ธิพันธ์ ผึ่งผาย, อำนวย วัฒนกรศิริ, นภาพร แข่งขัน. 2561. การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซับคราบน้ำมันโดยใช้วัสดุที่มีรูพรุนนาโนเทคโนโลยี. วารสารวิทยาศาสตร์ คชสาส์น 1: 38–49.

วิวัฒน์ ตัณฑะพานิชกุล, ปรีชา แสงธีระปิติกุล, นฤมล ศรีวิฑูรย์, ทศพล ประเสริฐเดชาโต. 2547. การผลิตเซลลูโลสที่มีลักษณะคล้ายฟองน้ำจากวัสดุเหลือใช้เป็นวัสดุดูดซับและ/หรือตัวเร่งปฏิกิริยาในอุตสาหกรรมปิโตรเคมี. ศูนย์วิทยาทรัพยากร จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพฯ.

ศิริพร พงษ์สันติสุข. 2541. การกำจัดคราบน้ำมันในน้ำโดยใช้วัสดุธรรมชาติเป็นตัวดูดซับ. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต, มหาวิทยาลัยมหิดล.

Hori, K., Maxima, E.F., Kuga, S., Lam, T.B.T., Iiyamal, K. 1999. Excellent oil absorbent kapok [Ceiba pentandra (L.) Gaertn.] fiber: Fiber structure, chemical characteristics and application: 401–404.

Wang, J., Zheng, Y., Wang, A. 2012. Effect of kapok fiber treated with various solvents on oil adsorbency. Ind. Crops Prod. 40: 178–184.

สมบัติการดูดซับตะกั่วและแคดเมียมของไดอะทอไมต์ธรรมชาติและไดอะทอไมต์ที่ผ่านการดัดแปลงด้วยกรดและการเผา

Adsorption properties of lead and cadmium by natural and acid-/calcination-modified diatomite

วันเพ็ญ บัวเมือง, ดาวจรัส เกตุโรจน์*, เสาวนุช ถาวรพฤกษ์, ทิมทอง ดรุณสนธยา, วิทยา จินดาหลวง

Wanpen Buamuang, Daojarus Ketrot*, Saowanuch Tawornpruek, Timtong Darunsontaya, Wittaya Jindaluang

ภาควิชาปฐพีวิทยา คณะเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

Department of Soil Science, Faculty of Agriculture, Kasetsart University, Bangkok 10900, Thailand

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

บทคัดย่อ

การวิจัยนี้ศึกษาสมบัติของไดอะทอไมต์ก่อนและหลังการดัดแปลงด้วยการล้างด้วยกรดและการเผา และประเมินสมบัติการดูดซับตะกั่วและแคดเมียมในสภาวะพีเอชที่แตกต่างกัน ผลการวิเคราะห์พบว่าการล้างด้วยกรดช่วยเพิ่มความบริสุทธิ์ของไดอะทอไมต์และพื้นที่ผิวจำเพาะ ขณะที่การเผาช่วยเพิ่มพื้นที่ผิวจำเพาะและความจุแลกเปลี่ยนแคตไอออน โดยไม่มีผลกระทบต่อพีเอชและสภาพการนำไฟฟ้า และพบว่าไดอะทอไมต์ก่อนและหลังการดัดแปลงสามารถดูดซับตะกั่วและแคดเมียมได้ดีขึ้น โดยไดอะทอไมต์สามารถดูดซับตะกั่วและแคดเมียมได้สูงสุดในช่วง pH ~5.5-6.5 และลักษณะการดูดซับสอดคล้องกับแบบจำลอง Langmuir โดยการเผาช่วยเพิ่มความสามารถในการดูดซับตะกั่วโดยมีค่าการดูดซับสูงสุดเท่ากับ 23.36 mg/g ส่วนการล้างด้วยกรดและการเผาช่วยเพิ่มความสามารถในการดูดซับแคดเมียมสูงสุดเป็น 7.12 และ 6.74 mg/g ตามลำดับ ผลการศึกษาชี้ให้เห็นว่าไดอะทอไมต์มีศักยภาพในการเป็นวัสดุดูดซับสำหรับการบำบัดน้ำเสียและฟื้นฟูดินปนเปื้อนตะกั่วและแคดเมียมได้

คำสำคัญ: การดัดแปลง, แคดเมียม, ไดอะทอไมต์, ตะกั่ว, สมบัติการดูดซับ

Abstract

This study investigated the properties of diatomite before and after modification by acid washing and calcination, and evaluated its adsorption behavior toward lead and cadmium under different pH conditions. The results showed that acid washing increased the purity and specific surface area (SSA) of diatomite, whereas calcination increased the SSA and cation exchange capacity without significantly affecting its pH and electrical conductivity. Adsorption experiments revealed that both natural and modified diatomite were capable of adsorbing lead and cadmium, with the highest adsorption occurring at pH ~5.5–6.5. The adsorption behavior followed the Langmuir model, in which calcination increased the maximum adsorption capacity of lead (23.36 mg/g), while both acid washing and calcination enhanced cadmium adsorption capacity (7.12 and 6.74 mg/g, respectively). Overall, the findings demonstrate that diatomite has the potential as an adsorbent for wastewater treatment and remediation of soils contaminated with lead and cadmium.

Keywords: Adsorption properties, Cadmium, Diatomite, Lead, Modification

คำนำ

ไดอะทอไมต์ (Diatomite) หรือดินเบา เป็นหินตะกอนเนื้อเบาที่เกิดจากการทับถมของซากไดอะตอม ประกอบด้วยซิลิกาเป็นองค์ประกอบหลัก มีลักษณะเด่นคือความหนาแน่นต่ำ พื้นที่ผิวจำเพาะสูง และมีโครงสร้างที่มีรูพรุนจำนวนมาก (Dong and Zhang, 2014) คุณสมบัติเหล่านี้ทำให้ไดอะทอไมต์ถูกนำไปใช้ในหลากหลายอุตสาหกรรม ทั้งด้านการกรองของเหลว การดูดซับสารเคมีและน้ำมันรั่วไหล ตลอดจนการปรับปรุงคุณสมบัติดินและการส่งเสริมการเจริญเติบโตของพืช (Li et al., 2021) ในด้านสิ่งแวดล้อมปัญหาการปนเปื้อนโลหะหนักในดินและน้ำเป็นประเด็นสำคัญที่ส่งผลต่อสุขภาพมนุษย์และระบบนิเวศ ไดอะทอไมต์จึงได้รับความสนใจเพิ่มมากขึ้นเนื่องจากมีศักยภาพในการดูดซับโลหะหนัก เช่น ตะกั่ว (Pb) และแคดเมียม (Cd) ซึ่งเป็นธาตุโลหะที่มีความเป็นพิษสูงและสามารถสะสมในสิ่งมีชีวิตได้ (สุชาดา, 2553; Aw et al., 2012; Piri et al., 2021) นอกจากนี้ การดัดแปลงไดอะทอไมต์ด้วยวิธีการต่าง ๆ เช่น การล้างด้วยกรด การเผา หรือการเคลือบด้วยโลหะออกไซด์ สามารถช่วยเพิ่มพื้นที่ผิวและจำนวนตำแหน่งดูดซับ ทำให้ประสิทธิภาพในการดูดซับโลหะหนักดีขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ (Dong and Zhang, 2014)

ประเทศไทยมีแหล่งไดอะทอไมต์กระจายอยู่ในหลายพื้นที่โดยเฉพาะในจังหวัดลำปาง (กรมทรัพยากรธรณี, 2563) อย่างไรก็ตาม ข้อมูลเชิงลึกเกี่ยวกับศักยภาพของไดอะทอไมต์ โดยเฉพาะด้านการดูดซับโลหะหนัก รวมถึงผลของการดัดแปลงต่อคุณสมบัติการดูดซับยังคงมีจำกัด อีกทั้งสมบัติของไดอะทอไมต์มักแตกต่างกันตามสภาพพื้นที่และองค์ประกอบทางธรณีวิทยา ทำให้ความสามารถในการประยุกต์ใช้แตกต่างกันไป ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อ 1) ศึกษาสมบัติของไดอะทอไมต์ก่อนและหลังการดัดแปลง และ 2) ประเมินความสามารถในการดูดซับโลหะหนักโดยมุ่งเน้นการดูดซับตะกั่วและแคดเมียมภายใต้สภาวะพีเอชและความเข้มข้นโลหะหนักที่แตกต่างกันในสารละลาย ผลการศึกษาในครั้งนี้สามารถให้ข้อมูลสำคัญเกี่ยวกับศักยภาพของไดอะทอไมต์ก่อนและหลังการดัดแปลงในการเป็นวัสดุดูดซับโลหะหนัก ซึ่งสามารถนำไปประยุกต์ใช้สำหรับการบำบัดน้ำเสียและฟื้นฟูดินที่ปนเปื้อนโลหะหนักได้อย่างมีประสิทธิภาพในอนาคต

อุปกรณ์และวิธีการ

แหล่งที่มาของไดอะทอไมต์และการเตรียมตัวอย่าง

ไดอะทอไมต์ที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้ (DMN) เป็นตัวอย่างที่เก็บจากความลึกประมาณ 15 เมตร จากผิวดิน จากพื้นที่ตำบลน้ำโจ้ อำเภอแม่ทะ จังหวัดลำปาง นำตัวอย่างที่ได้มาอบให้แห้งในตู้อบที่อุณหภูมิ 105°C จนมีน้ำหนักคงที่ จากนั้นบดให้ละเอียดและร่อนผ่านตะแกรงขนาด 0.5 มม. แล้วนำตัวอย่างไปเก็บไว้ในโถดูดความชื้นเพื่อใช้ในการทดลอง

วิธีการดัดแปลงไดอะทอไมต์

ทำการดัดแปลงคุณสมบัติของไดอะทอไมต์ด้วย 2 วิธีการ ได้แก่ 1) วิธีทางเคมี (DMA) โดยการล้างด้วยกรด 5 M HCl โดยใช้อัตราส่วนที่ 1 g : 20 mL ให้ความร้อนอุณหภูมิ 95°C และกวนต่อเนื่อง 24 ชั่วโมง จากนั้นล้างด้วยน้ำปราศจากไอออน และนำเข้าตู้อบที่ 105°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง (Samani et al., 2024) และ 2) วิธีทางฟิสิกส์ (DMC) โดยการเผาที่อุณหภูมิ 600°C เป็นเวลา 6 ชั่วโมง (Sungworawongpana and Pengprecha, 2011) ด้วย muffle furnace (MF-Series, HYSC, Korea)

การวิเคราะห์สมบัติของไดอะทอไมต์ก่อนและหลังการดัดแปลง

นำตัวอย่างไดอะทอไมต์ (DMN, DMA และ DMC) มาวิเคราะห์สมบัติทางฟิสิกส์ ได้แก่ พื้นที่ผิวจำเพาะด้วยวิธี BET-N_2 adsorption (Surface analyzer; 3Flex Surface characterization, Micromeritics, Geogia, USA) และสมบัติทางเคมี ได้แก่ พีเอชที่อัตราส่วน 1:2 H_2O ($pH_{1:2}$) สภาพการนำไฟฟ้าที่อัตราส่วน 1:5 H_2O ($EC_{1:5}$) ความจุแลกเปลี่ยนแคตไอออน (CEC) ด้วยวิธี 1 M NH_4OAc pH 7.0 (ทัศนีย์ และจงรัก, 2551) ชนิดแร่องค์ประกอบด้วย X-Ray Diffractometer (XRD; Bruker, D8 Advance, Karlsruhe, Germany) และธาตุองค์ประกอบด้วยเครื่อง X-ray fluorescence (XRF; S2 PUMA, Bruker AXS, Karlsruhe, Germany)

การทดสอบสมบัติการดูดซับตะกั่วและแคดเมียมของไดอะทอไมต์

การศึกษาสมบัติการดูดซับตะกั่วและแคดเมียมของไดอะทอไมต์ (DMN, DMA และ DMC) ดำเนินการภายใต้สภาวะพีเอชของสารละลายที่แตกต่างกันโดยใช้วิธีแบบแบตช์ (batch method) ทำการทดลองทั้งหมด 3 ซ้ำ โดยชั่งตัวอย่างไดอะทอไมต์ 0.100±0.003 g เติมสารละลาย $Pb(NO_3)_2$ ที่มีความเข้มข้นเริ่มต้น 200 mg Pb/L หรือ $Cd(NO_3)_2$ มีความเข้มข้นเริ่มต้น 100 mg Cd/L ปริมาตร 25 mL จากนั้นปรับค่าพีเอชของสารละลายเป็น 4.0, 5.0, 6.0, 7.0 และ 8.0 โดยใช้สารละลาย HNO_3 และ NaOH ก่อนนำไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่า (Shaker) ที่ความเร็ว 180 รอบ/นาที เป็นเวลา 24 ชั่วโมงเพื่อให้เข้าสู่สภาวะสมดุล (Pantoja et al., 2014; Piri et al., 2020) เมื่อครบกำหนดเวลาแล้ว ทำการวัดและบันทึกค่าพีเอชของสารละลายอีกครั้ง จากนั้นปั่นเหวี่ยงที่ความเร็ว 4,000 รอบ/นาที เป็นเวลา 3 นาที เพื่อแยกสารละลายใส และนำสารละลายใสไปวิเคราะห์ความเข้มข้นของตะกั่วและแคดเมียมด้วยเครื่อง Atomic Absorption Spectrophotometer (AAS; PinAcle 900F, PerkinElmer, Waltham, USA) ทั้งนี้ ได้ทำการวิเคราะห์ความเข้มข้นของตะกั่วและแคดเมียมในสารละลายตั้งต้นทุกช่วงพีเอชที่ทำการทดสอบโดยไม่มีวัสดุดูดซับ (blank) ควบคู่ด้วย เพื่อให้ทราบความเข้มข้นของโลหะที่ละลายได้จริงก่อนการทดลองดูดซับ

การศึกษาความจุในการดูดซับตะกั่วและแคดเมียมของไดอะทอไมต์ (DMN, DMA และ DMC) โดยใช้ไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงเมียร์ (Langmuir isotherm) (Safa et al., 2012) ทำการทดลองด้วยวิธีแบบแบตช์ จำนวน 3 ซ้ำ โดยชั่งตัวอย่าง 0.100±0.003 g เติมสารละลาย $Pb(NO_3)_2$ หรือ $Cd(NO_3)_2$ ที่มีความเข้มข้นเริ่มต้นแตกต่างกัน 6 ความเข้มข้น ตั้งแต่ 5–400 mg Pb/L และ 5–400 mg Cd/L ทำการปรับพีเอชของสารละลายให้อยู่ในช่วงที่เหมาะสมตามผลการทดลองที่ได้จากการทดลองก่อนหน้าด้วย HNO_3 และ NaOH เขย่าด้วยเครื่องเขย่าที่ความเร็ว 180 รอบ/นาที เป็นเวลา 24 ชั่วโมง บันทึกค่าพีเอชของสารละลาย จากนั้นทำการปั่นเหวี่ยงที่ความเร็ว 4,000 รอบ/นาที เป็นเวลา 3 นาที แล้วนำสารละลายใสที่ได้ไปวิเคราะห์ความเข้มข้นของตะกั่วและแคดเมียมด้วยเครื่อง AAS แล้วคำนวณปริมาณการดูดซับสูงสุดตามสมการแลงเมียร์ (Safa et al., 2012) ดัง Equation 1:

$$q_e = \frac{q_m b C_e}{1+bC_e} \qquad (1)$$

Where; q_e = Adsorption amount at equilibrium (mg/g)

q_m = Maximum adsorption capacity (mg/g)

b = Langmuir constant (L/mg)

C_e = Equilibrium concentration (mg/L)

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

สมบัติทางฟิสิกส์และเคมีของไดอะทอไมต์ก่อนและหลังการดัดแปลง

ผลการวิเคราะห์สมบัติทางฟิสิกส์และเคมีของไดอะทอไมต์ก่อนและหลังการดัดแปลงแสดงใน Table 1 พบว่าไดอะทอไมต์ที่ผ่านการล้างด้วยกรด (DMA) และการเผาที่อุณหภูมิสูง (DMC) มีการเปลี่ยนแปลงของสมบัติสำคัญหลายประการเมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างธรรมชาติ (DMN) โดยค่าพื้นที่ผิวจำเพาะของไดอะทอไมต์มีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อยหลังการดัดแปลง โดย DMA มีค่าพื้นที่ผิวจำเพาะสูงที่สุดเท่ากับ 29.73 m^2/g รองลงมาคือ DMC (28.23 m^2/g) ซึ่งสูงกว่า DMN (27.59 m^2/g) สะท้อนว่าการล้างด้วยกรดช่วยกำจัดสิ่งเจือปนที่อุดตันรูพรุนของโครงสร้างซิลิกา ขณะที่การเผาช่วยปรับปรุงรูพรุนให้เปิดมากขึ้น สำหรับพีเอชของไดอะทอไมต์พบว่ามีค่าลดลงอย่างชัดเจนในตัวอย่าง DMA มีค่าเท่ากับ 2.25 ซึ่งน่าจะเป็นผลของกรดที่ยังคงเหลือหรือการกำจัดแร่คาร์บอเนตออกไป ส่งผลให้ตัวอย่าง DMA มีความเป็นกรดมากที่สุด ขณะที่ตัวอย่าง DMC ยังคงมีค่าพีเอชใกล้เคียงกับตัวอย่าง DMN (pH = 4.17 และ 4.30 ตามลำดับ) สำหรับสภาพการนำไฟฟ้าพบว่ามีค่าสูงขึ้นในตัวอย่าง DMA (1.73 dS/m) เมื่อเทียบกับตัวอย่าง DMN และ DMC (0.59 และ 0.56 dS/m ตามลำดับ) ซึ่งอาจเกิดจากการปลดปล่อยไอออนที่ละลายน้ำได้จากโครงสร้างหลังการล้างด้วยกรดและผลตกค้างจากการล้างด้วยกรด ในขณะที่การเผา (DMC) ไม่เพิ่มสภาพการนำไฟฟ้าของตัวอย่าง สำหรับค่าความจุแลกเปลี่ยนแคตไอออนพบว่าตัวอย่าง DMC มีค่าสูงที่สุด (16.54 $cmol_c/kg$) รองลงมาคือ DMN (15.50 $cmol_c$ /kg) และ DMA (14.14 $cmol_c$ /kg) ตามลำดับ ซึ่งอาจเป็นผลมาจากการล้างด้วยกรดที่กำจัดองค์ประกอบบางชนิดที่มีส่วนเพิ่มค่าความจุแลกเปลี่ยนแคตไอออนออกไป นอกจากนี้ พบว่าตัวอย่าง DMN ประกอบด้วยแร่ควอร์ตเป็นองค์ประกอบหลัก และมีแร่เหล็กออกไซด์ (goethite) แร่มัสโคไวต์ และแร่ดินเหนียว (kaolinite) ในปริมาณเล็กน้อย ส่วนการล้างด้วยกรดและการเผามีผลต่อคุณสมบัติเชิงแร่ กล่าวคือ ไม่พบแร่เหล็กออกไซด์ในรูปผลึกหลังการดัดแปลง ซึ่งเป็นไปได้ว่าการล้างด้วยกรดได้กำจัดแร่เหล็กออกไซด์ออกไป และการเผาอาจทำให้แร่เหล็กออกไซด์เปลี่ยนไปอยู่ในรูปอสัณฐานจนไม่สามารถตรวจวัดได้ด้วย XRD

Table 1 Physical and chemical properties of natural diatomite (DMN) and modified diatomite prepared by acid washing (DMA) and calcination (DMC)

Properties	Diatomite sample		
	DMN	DMA	DMC
Specific Surface Area (m^2/g)[1]	27.59	29.73	28.23
pH (1:2 H_2O)[2]	4.30±0.01	2.25±0.04	4.17±0.04
EC (1:5 H_2O) (dS/m)[2]	0.59±0.00	1.73±0.06	0.56±0.02
CEC ($cmol_c/kg$)[2]	15.50±0.71	14.14±0.35	16.54±0.88
Mineralogy[1]	Quartz >> Goe., Mus., Kao.	Quartz >> Mus., Kao.	Quartz >> Mus., Kao.

Note: EC = Electrical conductivity; CEC= Cation exchange capacity; Goe = Goethite; Mus = Muscovite; Kao = Kaolinite. [1] = ทำการวิเคราะห์ 1 ซ้ำ; [2] = ทำการวิเคราะห์ 2 ซ้ำ

สำหรับธาตุองค์ประกอบของตัวอย่างไดอะทอไมต์ก่อนและหลังการดัดแปลงแสดงดัง Table 2 พบว่าซิลิคอนเป็นองค์ประกอบหลักในทุกตัวอย่าง โดย DMN และ DMC มีปริมาณใกล้เคียงกัน (36.94% และ 36.80% ตามลำดับ) ขณะที่ DMA มีปริมาณซิลิคอนสูงสุดเท่ากับ 39.83% ซึ่งสอดคล้องกับผลของการล้างด้วยกรดที่สามารถกำจัดสิ่งเจือปนที่

ละลายน้ำหรือถูกกัดกร่อนได้ออกไป ส่งผลให้สัดส่วนของซิลิคอนเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน สำหรับอะลูมิเนียมและเหล็กซึ่งเป็นองค์ประกอบของแร่ดินเหนียวและสิ่งเจือปนอื่น พบว่ามีปริมาณลดลงในตัวอย่าง DMA (Al = 4.72%, Fe = 1.40%) โดยเฉพาะปริมาณเหล็กที่ลดลงอย่างเด่นชัดเมื่อเทียบกับ DMN (Al = 5.20%, Fe = 4.97%) สะท้อนให้เห็นว่าการล้างด้วยกรดมีประสิทธิภาพสูงในการละลายและกำจัดเหล็กออกจากตัวอย่างไดอะทอไมต์ ขณะที่ตัวอย่างที่ผ่านการเผา (DMC) ยังคงมีค่าอะลูมิเนียม (5.11%) และเหล็ก (5.42%) ใกล้เคียงกับ DMN ส่วนธาตุองค์ประกอบได้แก่ โพแทสเซียม แมกนีเซียม และไทเทเนียมมีค่าค่อนข้างใกล้เคียงกัน โดยพบอยู่ในช่วง 1.73–2.17%, 0.28–0.42% และ 0.32–0.41% ตามลำดับ ซึ่งไม่เปลี่ยนแปลงมากนักจากกระบวนการดัดแปลง นอกจากนี้ยังพบปริมาณแคลเซียม แมงกานีส และกำมะถันอยู่ในระดับต่ำมาก และในตัวอย่าง DMA มีปริมาณธาตุดังกล่าวต่ำจนไม่สามารถตรวจวัดได้ ซึ่งเป็นผลจากการชะล้างด้วยกรดที่สามารถกำจัดไอออนที่ละลายน้ำได้อย่างมีประสิทธิภาพ

Table 2 Elemental composition of natural diatomite (DMN) and modified diatomite prepared by acid washing (DMA) and Calcination (DMC)

Sample	%Si	%Al	%Fe	%K	%Mg	%Ti	%Ca	%Mn	%S
DMN	36.94	5.20	4.97	1.73	0.42	0.32	0.16	0.02	0.05
DMA	39.83	4.72	1.40	2.17	0.28	0.41	nd	nd	nd
DMC	36.80	5.11	5.42	1.81	0.39	0.35	0.16	0.02	0.04

Note: nd = not detected

ผลของพีเอชต่อสมบัติการดูดซับตะกั่วและแคดเมียมของไดอะทอไมต์

ผลการศึกษาพบว่าพีเอชมีผลอย่างชัดเจนต่อปริมาณการดูดซับตะกั่วและแคดเมียม โดยปริมาณการดูดซับจะเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของพีเอชจนถึงช่วงประมาณพีเอช 5.0–6.5 ซึ่งเป็นช่วงที่ตัวอย่าง DMN, DMA และ DMC มีค่าการดูดซับสูงสุด (Fig. 1–2) เนื่องจากในช่วงพีเอชต่ำไฮโดรเจนไอออน (H^+/H_3O^+) จะแข่งขันกับไอออนโลหะบนตำแหน่งดูดซับบนพื้นผิวของวัสดุ ส่งผลให้การดูดซับต่ำกว่า อย่างไรก็ตาม เมื่อพีเอชสูงขึ้น พื้นผิวของวัสดุเกิดกระบวนการ deprotonation และมีประจุลบเพิ่มขึ้น จึงเพิ่มแรงดึงดูดทางไฟฟ้าสถิต (electrostatic interaction) ระหว่างพื้นผิวของวัสดุกับไอออนโลหะที่มีประจุบวก (Gupta et al., 2021)

ลักษณะการดูดซับตะกั่วของไดอะทอไมต์ทั้งก่อนและหลังการดัดแปลงมีค่าสูงสุดอยู่ในช่วงประมาณ pH 5.0–6.0 ก่อนที่จะลดลงอย่างชัดเจนเมื่อ pH สูงกว่า 6.5 ซึ่งมีแนวโน้มสอดคล้องกับการเริ่มตกตะกอนของ $Pb(OH)_2$ ในสารละลาย ทำให้ตะกั่วถูกกำจัดผ่านกระบวนการตกตะกอนมากกว่าการดูดซับบนพื้นผิววัสดุ (An et al., 2024) ในทำนองเดียวกันการดูดซับแคดเมียมมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามพีเอช จนถึงช่วงประมาณ pH 5.5–6.5 โดยเฉพาะ DMA และ DMC ที่ให้ค่าการดูดซับแคดเมียมสูงกว่า DMN ในช่วงดังกล่าว เมื่อ pH สูงกว่า 7.0 พบว่าการดูดซับแคดเมียมลดลงอย่างชัดเจนในทุกตัวอย่าง ซึ่งสันนิษฐานว่ามีการเริ่มตกตะกอนของ $Cd(OH)_2$ (An et al., 2024) ส่งผลให้การกำจัดแคดเมียมมาจากการตกตะกอนมากกว่าการดูดซับบนพื้นผิวไดอะทอไมต์ทำให้ค่าการดูดซับที่ตรวจวัดได้ลดลงเช่นเดียวกันกับตะกั่ว

ความจุในการดูดซับตะกั่วและแคดเมียมของไดอะทอไมต์

ผลการวิเคราะห์สมบัติการดูดซับตะกั่วและแคดเมียมของไดอะทอไมต์พบว่าสามารถอธิบายได้ด้วยแบบจำลองแลงเมียร์ได้ดี มีพฤติกรรมการดูดซับโลหะหนักแบบชั้นเดียว โดยตัวอย่าง DMN, DMA และ DMC มีลักษณะการดูดซับตะกั่วที่ให้ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) สูงกว่าลักษณะการดูดซับแคดเมียมในทุกตัวอย่าง (Table 3) บ่งชี้ว่า

แบบจำลองแลงเมียร์สามารถอธิบายกลไกการดูดซับของตะกั่วได้แม่นยำกว่าแคดเมียม และโดยภาพรวมพบว่าไดอะทอไมต์มีความจุการดูดซับสูงสุด (q_m= 13.04 – 23.36 mg/g) ได้สูงกว่าแคดเมียม (q_m = 3.90 – 7.12 mg/g) อย่างชัดเจน ซึ่งสอดคล้องกับคุณสมบัติทางเคมีของตะกั่วที่เอื้อต่อการเกิด surface complexation และแรงดึงดูดทางไฟฟ้าสถิตมากกว่าแคดเมียม ทั้งนี้ Pb^{2+} มีแนวโน้มเกิด inner-sphere complexation และมีพลังงาน hydration ต่ำกว่า Cd^{2+} ทำให้สามารถยึดเกาะบนพื้นผิววัสดุได้ง่ายกว่า (Gupta et al., 2021; An et al., 2024)

การดัดแปลงไดอะทอไมต์ด้วยการเผามีส่วนช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการดูดซับตะกั่วได้อย่างเด่นชัด โดยตัวอย่าง DMC ให้ค่าความจุการดูดซับสูงสุด (q_m) สูงที่สุด ซึ่งอาจเป็นผลจากการเพิ่มขึ้นของตำแหน่งแลกเปลี่ยนประจุผ่านกระบวนการ dehydroxylation ส่งผลให้ Pb^{2+} ซึ่งมีความไวต่อค่าความจุแลกเปลี่ยนแคตไอออนและแรงดึงดูดทางไฟฟ้าสถิต จึงสามารถยึดจับกับพื้นผิวได้มากขึ้น (Posi et al., 2013) ในกรณีของแคดเมียมพบว่าทั้งการล้างด้วยกรดและการเผาสามารถเพิ่มค่าความจุการดูดซับได้ใกล้เคียงกัน (7.12 และ 6.74 mg/g ตามลำดับ) ซึ่งน่าจะเกี่ยวข้องกับการเพิ่มขึ้นของตำแหน่งดูดซับบนพื้นผิว เนื่องจากแคดเมียมมีการ hydration สูงซึ่งมักเกิด outer-sphere complexation (Hao et al., 2020; An et al., 2024) ทำให้ Cd^{2+} มีความไวต่อพื้นที่ผิวจำเพาะมากกว่าค่าความจุแลกเปลี่ยนแคตไอออน (Table 1 และ 3)

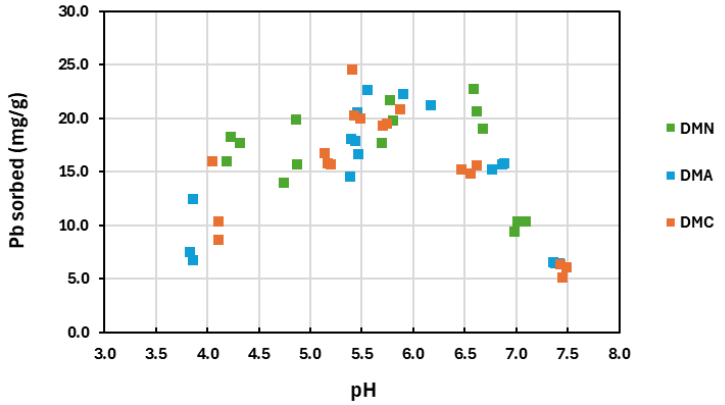


Fig. 1 Lead adsorption behavior of natural diatomite (DMN) and modified diatomite prepared by acid washing (DMA) and calcination (DMC) at varying solution pH levels.

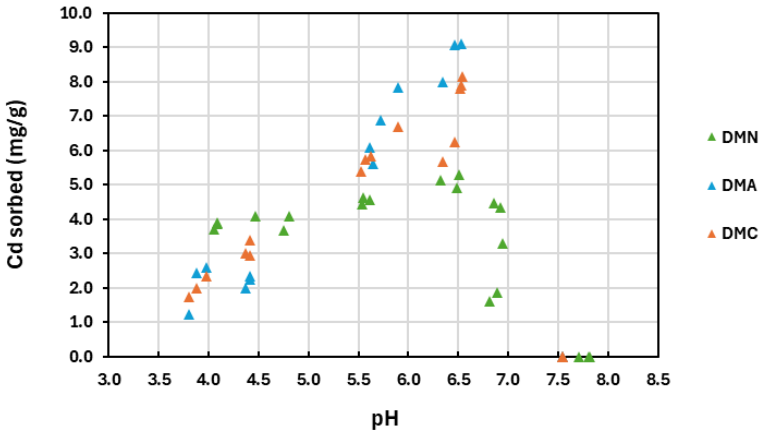


Fig. 2 Cadmium adsorption behavior of natural diatomite (DMN) and modified diatomite prepared by acid washing (DMA) and calcination (DMC) at varying solution pH levels.

Table 3 Langmuir adsorption parameters of natural diatomite (DMN) and modified diatomite prepared by acid washing (DMA) and calcination (DMC) for Pb and Cd adsorption

Sample	Pb	Cd
DMN		
R^2	0.9842	0.9431
q_m (mg/g)	15.02	3.90
b (L/mg)	0.06	0.17
DMA		
R^2	0.9619	0.7833
q_m (mg/g)	13.04	7.12
b (L/mg)	0.07	0.06
DMC		
R^2	0.9555	0.9178
q_m (mg/g)	23.36	6.74
b (L/mg)	0.08	0.05

Note: R^2 = Coefficient of determination; q = Maximum adsorption capacity; b = Langmuir constant

สรุป

ผลการศึกษาพบว่าไดอะทอไมต์มีการเปลี่ยนแปลงสมบัติอย่างชัดเจนหลังการดัดแปลงด้วยวิธีการล้างด้วยกรดและวิธีการเผา ทั้งในด้านฟิสิกส์ เคมี รวมถึงแร่และธาตุองค์ประกอบ โดยวิธีการดัดแปลงด้วยการล้างด้วยกรดส่งผลให้ไดอะทอไมต์มีความบริสุทธิ์สูงขึ้น โดยเฉพาะการเพิ่มสัดส่วนของซิลิคอน และยังส่งผลต่อการเพิ่มขึ้นของพื้นที่ผิวจำเพาะด้วย ในขณะที่การเผามีผลทำให้พื้นที่ผิวจำเพาะและความจุแลกเปลี่ยนแคตไอออนมีค่าสูงขึ้นแต่ไม่ส่งผลกระทบต่อค่าพีเอชและสภาพการนำไฟฟ้า สำหรับการประเมินความสามารถในการดูดซับโลหะหนักพบว่าไดอะทอไมต์ทั้งก่อนและหลังการดัดแปลงสามารถดูดซับตะกั่วและแคดเมียมได้ดี โดยมีประสิทธิภาพสูงสุดในช่วงพีเอชประมาณ 5.5–6.5 และสามารถอธิบายด้วยแบบจำลองแลงเมียร์ได้ดี ทั้งนี้พบว่าการดัดแปลงด้วยวิธีการเผาช่วยเพิ่มความจุในการดูดซับตะกั่วของไดอะทอไมต์ และการดัดแปลงไดอะทอไมต์ด้วยวิธีการล้างด้วยกรดและการเผาสามารถเพิ่มความจุในการดูดซับแคดเมียมได้ทั้ง 2 วิธี ผลการศึกษาได้ชี้ให้เห็นว่าไดอะทอไมต์ธรรมชาติและที่ผ่านการดัดแปลง มีศักยภาพสูงในการใช้เป็นวัสดุดูดซับสำหรับการบำบัดน้ำเสียและการฟื้นฟูดินที่ปนเปื้อนโลหะหนัก และสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในงานจัดการสิ่งแวดล้อมได้อย่างมีประสิทธิภาพ อย่างไรก็ตาม ควรมีการศึกษาเพิ่มเติมเพื่อกำหนดอัตราการใช้ที่เหมาะสม รวมถึงการประเมินสมรรถนะภายใต้สภาพพื้นที่จริง เพื่อสนับสนุนการนำไปใช้ทั้งในด้านการบำบัดน้ำเสียและการฟื้นฟูดินในพื้นที่ปนเปื้อนได้อย่างมีประสิทธิภาพสูงสุด

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณสำนักงานพัฒนาการวิจัยการเกษตร (องค์การมหาชน) และบริษัท สยามดินเบา จำกัด สำหรับการสนับสนุนทุนวิจัยและการจัดส่งตัวอย่างที่ใช้ในการศึกษา ตลอดจนผู้ที่มีส่วนเกี่ยวข้องทุกท่านที่ได้ให้ความร่วมมือจนงานวิจัยสำเร็จลุล่วงด้วยดี

เอกสารอ้างอิง

กรมทรัพยากรธรณี. 2563. แผนที่ทรัพยากรธรณีในประเทศไทย. กรมทรัพยากรธรณี, กรุงเทพฯ.
ทัศนีย์ วงศ์ประเสริฐ, จังรักษ์ แซ่ลิ้ม. 2551. การวิเคราะห์ดิน พืช และปุ๋ย. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

สุชาดา สังวรวงษ์พนา และคณะ. 2553. ผลของการเผาแร่ดินเบาที่มีต่อการดูดซับโครเมต. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

An, W., Liu, Y., Chen, H., Sun, X., Wang, Q., Hu, X., Di, J. 2024. Adsorption properties of Pb(II) and Cd(II) in acid mine drainage by oyster shell loaded lignite composite in different morphologies. Sci. Rep. 14: 11627. doi.org/10.1038/s41598-024-62506-0

Aw, M.S. 2012. Porous silica microshells from diatoms as biocarrier for drug delivery applications. Powder Technol. 223: 52–58.

Dong, G.R., Zhang, Y. 2014. Diatomite modification and its adsorption of heavy metal ions. Adv. Mater. Res. 864: 664–667.

Gupta, A., Sharma, V., Sharma, K., et al. 2021. A review of adsorbents for heavy metal decontamination: Growing approach to wastewater treatment. Materials 14: 4702. https://www.mdpi.com/1996-1944/14/16/4702, 15 January 2026.

Hao, W., Kashiwabara, T., Jin, R., Takahashi, Y., Gingras, M., Alessi, D.S., Konhauser, K.O. 2020. Clay minerals as a source of cadmium to estuaries. Sci. Rep. 10: 10417. doi.org/10.1038/s41598-020-67279-w

Li, C., Wang, M., Chen, Z., Chen, J. 2021. Enhanced thermal conductivity and photo-to-thermal performance of diatomite-based composite phase change materials for thermal energy storage. J. Energy Storage 34: 102171. doi.org/10.1016/j.est.2020.102171

Li, Z., Chen, L., Chen, Z., Chen, G., Zhou, J., Liu, X. 2022. Study of the effects on Mn, Pb, and Zn solidification in soil by a mixed curing agent of modified diatomite. ACS Omega 7: 25229–25238. doi.org/10.1021/acsomega.2c02135

Pantoja, M.L., Jones, H., Garelick, H., Mohamedbakr, H.G., Burkitbayev, M. 2014. The removal of arsenate from water using iron-modified diatomite (D-Fe): Isotherm and column experiments. Environ. Sci. Pollut. Res. 21: 495–506.

Piri, M., Sepehr, E., Samadi, A., Farhadi, K., Alizadeh, M. 2020. Application of diatomite for sorption of Pb, Cu, Cd and Zn from aqueous solutions: Kinetic, thermodynamic studies and application of response surface methodology (RSM). Water Environ. Res. 93: 714–726.

Piri, M., Sepehr, E., Samadi, A., Farhadi, K.H., Alizadeh, M. 2021. Contaminated soil amendment by diatomite: Chemical fractions of zinc, lead, copper and cadmium. Int. J. Environ. Sci. Technol. 18: 1191–1200.

Posi, P., Lertnimoolchai, S., Sata, V., Chindaprasirt, P. 2013. Pressed lightweight concrete containing calcined diatomite aggregate. Constr. Build. Mater. 47: 896–901. doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.05.094

Safa, M., Larouci, M., Meddah, B., Valemens, P. 2012. The sorption of lead, cadmium, copper and zinc ions from aqueous solutions on a raw diatomite from Algeria. Water Sci. Technol. 65: 1729–1737.

Sungworawongpana, S., Pengprecha, S. 2011. Calcination effect of diatomite to chromate adsorption. Procedia Eng. 8: 53–57. doi.org/10.1016/j.proeng.2011.03.010

Zhao, Y., Tian, G., Duan, X., Liang, X., Meng, J., Liang, J. 2019. Environmental applications of diatomite minerals in removing heavy metals from water. Ind. Eng. Chem. Res. 58: 11638–11652. doi.org/10.1021/acs.iecr.9b01941

ภาคผนวก

รายชื่อผู้ทรงคุณวุฒิ

สาขาวิทยาศาสตร์: ผู้ทรงคุณวุฒิภายใน

1. รศ.ดร.ปกรณ์ วรรธณอมร	ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์
2. รศ.ดร.พิทักษ์ เชื้อวงศ์	ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์
3. ผศ.ดร.ฐิตพัฒน์ เงินสุทธิวรกุล	ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์
4. ผศ.ดร.ธารินี สาลีโภชน์	ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์
5. ดร.ณัฐพงศ์ จันทร์ทิพย์มณี	ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์
6. ดร.พงษ์ศักดิ์ โล้วมั่นคง	ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์
7. ดร.สรฉัตร ธารมรรค	ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์
8. รศ.ดร.ภานุ พิมพ์วิริยะกุล	ภาควิชาชีวเคมี คณะวิทยาศาสตร์
9. รศ.ดร.ชัชวาล จันทราสุริยารัตน์	ภาควิชาพันธุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์
10. รศ.ดร.อัญชณี คูเบอร่า	ภาควิชาพันธุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์
11. รศ.ดร.อัญชลี ศิริขจรกิจ	ภาควิชาพันธุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์
12. รศ.ดร.จันทิกา ชูโชติรส	ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์
13. ดร.ณัฐวุฒิ ยันตรวัฒนา	ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์
14. ผศ.ดร.ภาณุ ตรัยเวช	ภาควิชาวิทยาศาสตร์พื้นพิภพ คณะวิทยาศาสตร์
15. ผศ.ดร.ลัดดา แต่งวัฒนานุกูล	ภาควิชาวิทยาศาสตร์พื้นพิภพ คณะวิทยาศาสตร์
16. รศ.ดร.จุฑาภรณ์ สินสมบูรณ์ทอง	ภาควิชาสถิติ คณะวิทยาศาสตร์
17. ผศ.ดร.สวพร หิญชีระนันทน์	ภาควิชาสถิติ คณะวิทยาศาสตร์

Editorial Board

Subject: Science (Internal)

1. Assoc.Prof.Dr.Pakorn Wattana-Amorn	2. Assoc.Prof.Dr.Pitak Chuawong
3. Asst.Prof.Dr.Thitaphat Ngernsutivorakul	4. Asst.Prof.Dr.Tharinee Saleepochn
5. Dr.Nattapong Chantipmanee	6. Dr.Pongsak Lowmonkong
7. Dr.Sorachat Tharamak	8. Assoc.Prof. Dr.Panu Pimviriyakul
9. Assoc.Prof.Dr Chatchawan Jantasuriyarat	10. Assoc.Prof.Dr.Anchanee Cubera
11. Assoc.Prof.Dr.Anchalee Sirikhachornkit	12. Assoc.Prof.Dr.Chantika Chootirot
13. Dr.Nattawut Yuntawattana	14. Asst.Prof.Dr.Panu Trivej
15. Asst.Prof.Dr.Ladda Tangwatananukul	16. Assoc.Prof.Dr.Juthaporn Sinsomboonthong
17. Asst.Prof.Dr.Sawaporn Hinsheranan	

รายชื่อผู้ทรงคุณวุฒิ

สาขาวิทยาศาสตร์สุขภาพ: ผู้ทรงคุณวุฒิภายใน

1. รศ.นพ.พิงควรรศ คงมาลัย	ภาควิชาออร์โธปิดิกส์ คณะแพทยศาสตร์
2. ผศ.ณัฐเมธี เครือภูงา	ภาควิชากายวิภาคศาสตร์ คณะแพทยศาสตร์
3. ผศ.ภญ.วิภาพร ขจรวงศ์วัฒนา	ภาควิชาเภสัชวิทยา คณะแพทยศาสตร์
4. ดร.กรกช เพ็ชรศรี	ภาควิชาเภสัชวิทยา คณะแพทยศาสตร์
5. ดร.ธัญวรินทร์ ฐิติภัทรภูวนนท์	ภาควิชากายวิภาคศาสตร์ คณะแพทยศาสตร์
6. ดร.วิทวัส ศรีแก้วณวรรณ	ภาควิชากายวิภาคศาตร์ คณะแพทยศาสตร์
7. ดร.วันฉัตร ศิริสาร	ภาควิชาจุลชีววิทยา คณะแพทยศาสตร์
8. ดร.ปริชญา ภิรมย์รัตน์	ภาควิชาพยาธิวิทยา คณะแพทยศาสตร์
9. ดร.ไอระดา พิณทอง	ภาควิชาปริสิตวิทยา คณะแพทยศาสตร์
10. ดร.ณัฐวดี เพ็งรัตนโชติ	ภาควิชาสรีรวิทยา คณะแพทยศาสตร์
11. ดร.นาวิน จันทรา	ภาควิชาชีวเคมีและพันธุวิศวกรรม คณะแพทยศาสตร์

Editorial Board

Subject: Health Science (Internal)

1. Assoc.Prof.Pinkawas Kongmalai, M.D.	Department of Orthopaedics
2. Asst.Prof.Dr.Nutmethee Kruepunga	Department of Anatomy
3. Asst.Prof.Dr.Wipaporn Kajornwongwattana	Department of Pharmacology
4. Dr.Korrakod Petsri	Department of Pharmacology
5. Dr.Thanvarin Thitiphatphuvanon	Department of Anatomy
6. Dr.Wittawas Srikawnawan	Department of Anatomy
7. Dr.Wanchat Sirisarn	Department of Microbiology
8. Dr.Parichya Piromrat	Department of Pathology
9. Dr.Ai-rada Pintong	Department of Parasitology
10. Dr.Nattavadee Pengrattanachot	Department of Physiology
11. Dr.Nawin Chanthra	Department of Biochemistry and Genetic Engineering

รายชื่อผู้ทรงคุณวุฒิ

สาขาวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์: ผู้ทรงคุณวุฒิภายใน

1. ดร.กัญจนสิทธ ทองเล็ก	ภาควิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์
2. ดร.ปิยะ ลิ้มเจริญ	ภาควิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์
3. รศ.ดร.กานดิส สุดสาคร	ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์
4. รศ.ดร.อนุสิษฐ์ ธนะพิมพ์เมธา	ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์
5. ศ.ดร.มานพ เจริญไชยตระกูล	ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์
6. รศ.ดร.ชินธันย์ อารีประเสริฐ	ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์
7. รศ.ดร.วรางค์รัตน์ จันทสาโร	ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์
8. ดร.สรวิศ ลิ้มทองกุล	ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์
9. Dr.Deepshikha Bhargava	ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์
10. ผศ.ดร.จตุพร สมพอง	ภาควิชาวิศวกรรมทรัพยากรน้ำ คณะวิศวกรรมศาสตร์
11. ผศ.ดร.จิรเมธ ช้างคล่อม	ภาควิชาวิศวกรรมทรัพยากรน้ำ คณะวิศวกรรมศาสตร์
12. ผศ.ดร.ดนย์ปภพ มะณี	ภาควิชาวิศวกรรมทรัพยากรน้ำ คณะวิศวกรรมศาสตร์
13. ดร.ณัชพล จารุวิมลกุล	ภาควิชาวิศวกรรมทรัพยากรน้ำ คณะวิศวกรรมศาสตร์
14. ดร.เดชพล จิตรวัฒน์กุลศิริ	ภาควิชาวิศวกรรมทรัพยากรน้ำ คณะวิศวกรรมศาสตร์
15. ผศ.ดร.เด่นชัย วรเศวต	ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์
16. ผศ.ดร.นิธิพัฒน์ ทีรฆวณิช	ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์
17. ผศ.ดร.วีรวุฒิ กนกบรรณกร	ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์
18. รศ.ดร.วรดร วัฒนพานิช	ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์
19. รศ.ดร.สัญชัย เดชานุภาพฤทธา	ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์
20. ผศ.ดร.จักรพันธ์ เทือกต๊ะ	ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์
21. ผศ.ดร.จิรัฏฐ์ เทพรักษ์	ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์
22. ผศ.ดร.ศุภศิษฏ์ ศรีวรานันท์	ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์
23. ผศ.ดร.สุริยน เปรมปราโมทย์	ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์
24. ผศ.ดร.สุสิทธิ์ ฉายประกายแก้ว	ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์
25. รศ.ดร.กิจพัฒน์ ภู่วรวรรณ	ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์
26. รศ.ดร.ปัญญาวุธ จิรดิลก	ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์
27. รศ.ดร.ปิยนุช เวทย์วิวรณ์	ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์
28. รศ.ดร.วีระเกษตร สวนผกา	ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์

29. รศ.ดร.ศุภวุฒิ มาลัยกฤษณะชลี ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์
30. รศ.ดร.สุทธิศักดิ์ ศรลัมพ์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์
31. รศ.ดร.สุธาริน สถาปิตานนท์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์
32. รศ.ธนัช สุขวิมลเสรี ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์
33. ศ.ดร.อภินิติ โชติสังกาศ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์
34. ผศ.ดร.กฤษฎา สุรวัฒนวิเศษ ภาควิชาวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์
35. ผศ.ดร.นเร ผิวนิ่ม ภาควิชาวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์
36. ผศ.ดร.อัมพิกา บันสิทธิ์ ภาควิชาวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์
37. ผศ.พรทิพย์ เล็กพิทยา ภาควิชาวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์
38. รศ.ดร.กษิดิศ พนมสุวรรณ ภาควิชาวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์
39. รศ.ดร.นุชนภา ตั้งบริบูรณ์ ภาควิชาวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์
40. รศ.ดร.ราชธีร์ เตชไพศาลเจริญกิจ ภาควิชาวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์
41. รศ.ดร.อภิรัตน์ เลาห์บุตรี ภาควิชาวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์
42. รศ.ดร.อรทัย จงประทีป ภาควิชาวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์
43. ผศ.ดร.ณัฐพล ลี้อบาย ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์
44. ผศ.ดร.ทักษิณา โพธิ์ใหญ่ ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์
45. ผศ.ดร.วรินทร์พร อโศกบุญรัตน์ ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์
46. ผศ.ดร.วิทรัช ยุทธวงศ์ ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์
47. รศ.ดร.จีมา ศรลัมพ์ ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์
48. รศ.ดร.สัญญา สิริวิทยาปกรณ์ ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์
49. ดร.จารวี แก้วใหญ่ ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์
50. ดร.จารุเดช อาสิงสมานันท์ ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์
51. ผศ.เริงทิวา ทิพยศักดิ์ ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์
52. ดร.ประพล จิวะพรทิพย์ ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์
53. รศ.ดร.จักรกฤษณ์ พจนศิลป์ ภาควิชาเศรษฐศาสตร์เกษตรและทรัพยากร คณะเศรษฐศาสตร์
54. รศ.ดร.อนุวัฒน์ อรรถไชยวุฒิ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ ศรีราชา

สาขาวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์: ผู้ทรงคุณวุฒิภายนอก

1. ผศ. ดร.ศักดิ์ดา หอมหวล	คณะสังคมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
2. ดร.ชูตระกูล ศิริไพบูลย์	สาขาวิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยสุโขทัยธรรมาธิราช
3. ดร.พงศกร วงศ์พิพันธ์	กรมชลประทาน
4. รศ. ดร.โกวิท สุวรรณหงส์	คณะสาธารณสุขศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา
5. ผศ. ดร.ภวิสร ชื่นชุ่ม	คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
6. รศ. ดร.ศศิมา เจริญกิจ	คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์และการออกแบบ มหาวิทยาลัยนเรศวร
7. รศ. ดร.วนารัตน์ กรสิรานุกูล	คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
8. ผศ. ดร.กรีฑา สมเกียรติกุล	คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันการจัดการปัญญาภิวัฒน์

Editorial Board

Subject: Engineering and Architecture (Internal)

1. Dr.Kundjanasith Thonglek	2. Dr.Piya Limcharoen
3. Assoc.Prof.Dr.Kandis Sudsakorn	4. Assoc.Prof.Dr. Anusith Thanapimmetha
5. Prof.Dr.Manop Charoenchaitrakool	6. Assoc.Prof.Dr.Chinnathan Areeprasert
7. Assoc.Prof.Dr.Varangrat Juntasaro	8. Dr.Sorawit Limthongkul
9. Dr.Deepshikha Bhargava	10. Asst.Prof.Dr.Chatuphorn Somphong
11. Asst.Prof.Dr.Jiramate Changklom	12. Asst.Prof.Dr.Donpapob Manee
13. Dr.Natchapol Charuwimolkul	14. Dr.Detchphol Chitwatkulsiri
15. Asst.Prof.Dr.Denchai Worasawate	16. Asst.Prof.Dr.Nithiphat Teerakawanich
17. Asst.Prof.Dr.Weerawoot Kanokbannakorn	18. Assoc.Prof.Dr.Woradorn Wattanapanitch
19. Assoc.Prof.Dr.Sanchai Dechanupaprittha	20. Asst.Prof.Dr.Chakrapan Tuakta
21. Asst.Prof.Dr.Jirat Teparaksa	22. Asst.Prof.Dr.Supasit Srivaranun
23. Asst.Prof.Dr.Suriyon Prempramote	24. Asst.Prof.Dr.Susit Chaiprakaikeow
25. Assoc.Prof.Dr.Kitjapat Phuvoravan	26. Assoc.Prof.Dr.Punyawut Jiradilok
27. Assoc.Prof.Dr.Piyanut Wethyavivorn	28. Assoc.Prof.Dr.Weerakaset Suanpaga
29. Assoc.Prof.Dr.Suphawut Malaikrisanachalee	30. Assoc.Prof.Dr.Suttisak Soralump
31. Assoc.Prof.Dr.Sutharin Sthapitanonda	32. Assoc.Prof.Thanutch Sukwimolseree

33. Prof.Dr.Apiniti Jotisankasa
34. Asst.Prof.Dr.Krissada Surawathanawises
35. Asst.Prof.Dr.Naray Pewnim
36. Asst.Prof.Dr.Ampika Bansiddhi
37. Asst.Prof.Dr.Porntip Lekpittaya
38. Assoc.Prof.Dr.Gasidit Panomsuwan
39. Assoc.Prof.Dr.Nuchnapa Tangboriboon
40. Assoc.Prof.Dr.Ratchatee Techapiesancharoenkij
41. Assoc.Prof.Dr.Apirat Laobuthee
42. Assoc.Prof.Dr.Oratai Jongprateep
43. Asst.Prof.Dr.Nattapon Leeabai
44. Asst.Prof.Dr.Thaksina Poyai
45. Asst.Prof.Dr.Varinporn Asokbunyarat
46. Asst.Prof.Dr.Vitharuch Yuthawong
47. Assoc.Prof.Dr.Cheema Soralump
48. Assoc.Prof.Dr.Sanya Sirivithayapakorn
49. Dr.Jarawee Kaewyai
50. Dr.Jarudej Asingsamanunt
51. Asst.Prof.Rerngtiwa Thipyasak
52. Dr.Prapol Chiwapornthip
53. Assoc.Prof.Dr.Anuwat Attachaiyawuth
54. Assoc.Prof.Dr.Chakrit Potchanasin

Subject: Engineering and Architecture (External)

1. Asst.Prof.Dr.Sakda Homhuan
2. Dr.Chootrakul Siripaiboon
3. Dr.Pongsakorn Wongpipan
4. Assoc.Prof.Dr.Kowit Suwannahong
5. Asst.Prof.Dr.Pavisorn Chuenchum
6. Assoc.Prof.Dr.Sasima Charoenkit
7. Assoc.Prof.Dr.Wanarat Konisranukul
8. Asst.Prof.Dr.Kreetha Somkiatkul

รายชื่อผู้ทรงคุณวุฒิ

สาขาอุตสาหกรรมเกษตร: ผู้ทรงคุณวุฒิภายใน

1. รศ. ดร.กิติพงษ์ รัตนาภรณ์	ภาควิชาเทคโนโลยีชีวภาพ คณะอุตสาหกรรมเกษตร / สมาชิกสมาคมเทคโนโลยีชีวภาพแห่งประเทศไทย
2. ดร.คุณาลัย พลอยดนัย	ภาควิชาเทคโนโลยีอุตสาหกรรมเกษตร คณะอุตสาหกรรมเกษตร
3. ผศ. ดร.ชนนิกานต์ ศรีกัลยา	ภาควิชาพัฒนาผลิตภัณฑ์ คณะอุตสาหกรรมเกษตร
4. ผศ. ดร.ชวขวัญ นิติกรวรากุล	ภาควิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร คณะอุตสาหกรรมเกษตร
5. ดร.ฐิตาภรณ์ ตัมพานุวัตร	ฝ่ายกระบวนการผลิตและแปรรูป สถาบันค้นคว้าและพัฒนาผลิตภัณฑ์อาหาร
6. รศ. ดร.ณัฐทินี บำบัดสรรพโรค	ภาควิชาเทคโนโลยีการบรรจุและวัสดุ คณะอุตสาหกรรมเกษตร

7. ผศ.ดร.เทพกัญญา หาญศีลวัต	ภาควิชาพัฒนาผลิตภัณฑ์ คณะอุตสาหกรรมเกษตร
8. รศ. ดร.นพรัตน์ ปราบสงบ	ภาควิชาพัฒนาผลิตภัณฑ์ คณะอุตสาหกรรมเกษตร
9. รศ. ดร.น้ำฝน ลำดับวงศ์	ภาควิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร คณะอุตสาหกรรมเกษตร
10. ผศ. ดร.นิสิต วัฒนศักดิ์ภูบาล	ภาควิชาเทคโนโลยีชีวภาพ คณะอุตสาหกรรมเกษตร
11. ผศ.ดร.บัณฑิตา วานิกร	ภาควิชาเทคโนโลยีชีวภาพ คณะอุตสาหกรรมเกษตร
12. รศ. ดร.ปิยะวณี จริยะสกุลโรจน์	ภาควิชาเทคโนโลยีการบรรจุและวัสดุ คณะอุตสาหกรรมเกษตร
13. รศ. ดร.มัสลิน นาคไพจิตร	ภาควิชาเทคโนโลยีชีวภาพ คณะอุตสาหกรรมเกษตร
14. ผศ. ดร.มาศอุบล ทองงาม	ภาควิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร คณะอุตสาหกรรมเกษตร
15. รศ. ดร.รวิพิมพ์ ฉวีสุข	ภาควิชาเทคโนโลยีอุตสาหกรรมเกษตร คณะอุตสาหกรรมเกษตร/ สมาชิกสมาคมวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีทางอาหารแห่งประเทศไทย
16. รศ. ดร.วรรณี จิรภาคย์กุล	ภาควิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร คณะอุตสาหกรรมเกษตร / สมาชิกสมาคมวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีทางอาหารแห่งประเทศไทย
17. ผศ. วัชรพงศ์ เลิศสุรวัฒน์	ภาควิชาเทคโนโลยีอุตสาหกรรมเกษตร คณะอุตสาหกรรมเกษตร
18. รศ. ดร.วีรเชษฐ์ จิตตาณิชย์	ภาควิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร คณะอุตสาหกรรมเกษตร
19. ผศ.ดร.ศศิธร ตรงจิตภักดี	ภาควิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร คณะอุตสาหกรรมเกษตร
20. รศ. ดร.สุนทรี สุวรรณสิชณน์	ภาควิชาพัฒนาผลิตภัณฑ์ คณะอุตสาหกรรมเกษตร
21. รศ. ดร.สุวิมล เจริญสิทธิ์	ภาควิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร คณะอุตสาหกรรมเกษตร
22. รศ. ดร.อุทัย กลิ่นเกษร	ภาควิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร คณะอุตสาหกรรมเกษตร

สาขาอุตสาหกรรมเกษตร: ผู้ทรงคุณวุฒิภายนอก

1. ผศ. ดร.ชิตาพัณณ์ ใบงิ้ว	สำนักวิชาอุตสาหกรรมเกษตร คณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
2. ผศ. ดร.พงศกร พิชยดนย์	สำนักงานวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีชั้นสูง มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต
3. ผศ.ดร.เบญจรัตน์ เทพสงเคราะห์	สาขาวิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต
4. รศ. ดร.ปริศนา สุวรรณาภรณ์	ภาควิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร คณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ (อาจารย์เกษียณ)
5. รศ. ดร.วันเพ็ญ เตชะบุญเกียรติ	ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย / สมาชิกสมาคมพอลิเมอร์ประเทศไทย
6. ผศ. ดร.ศศิธร มหาคุณาจีระกุล	บัณฑิตวิทยาลัยการจัดการและนวัตกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
7. รศ. ดร.สิริชัย ส่งเสริมพงษ์	ภาควิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร คณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ (อาจารย์เกษียณ)
8. รศ. ดร.สุนีย์ นิธิสินประเสริฐ	ภาควิชาเทคโนโลยีชีวภาพ คณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ (ผู้ทรงคุณวุฒิพิเศษ)
9. ศ.เกียรติคุณ ดร.อรอนงค์ นัยวิกุล	ภาควิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร คณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ (อาจารย์เกษียณ) / ราชบัณฑิต ราชบัณฑิตยสภา / ที่ปรึกษาสมาคมวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีทางอาหาร แห่งประเทศไทย

Editorial Board

Subject: Agro-Industry (Internal)

1. Assoc.Prof.Dr.Kittipong Rattanaporn
2. Dr.Kunalai Ploydanai
3. Asst.Prof.Dr.Chonnikarn Srikanlaya
4. Asst.Prof.Dr.Chawakwan Nitikornwarakul
5. Dr.Titaporn Tumpanuvatr
6. Assoc.Prof.Dr.Nattinee Bumbudsanpharoke
7. Asst.Prof.Dr.Thepkunya Harnsilawat
8. Assoc.Prof.Dr.Nopparat Prabsangob
9. Assoc.Prof.Dr.Namfone Lumdubwong
10. Asst.Prof.Dr.Nisit Watthanasakphuban
11. Asst.Prof.Dr.Bandhita Wanikorn
12. Assoc.Prof.Dr.Piyawanee Jariyasakoolroj
13. Assoc.Prof.Dr.Massalin Nakphaichit
14. Asst.Prof.Dr.Masubon Thongngam
15. Assoc.Prof.Dr.Ravipim Chaveesuk
16. Assoc.Prof.Dr.Wannee Jirapakkul
17. Asst.Prof.Watcharaphong Leartsurawat
18. Assoc.Prof.Dr.Weerachet Jittanit
19. Asst.Prof.Dr.Sasitorn Tongchitpakdee
20. Assoc.Prof.Dr.Suntaree Suwonsichon
21. Assoc.Prof.Dr.Suvimol Charoensiddhi
22. Assoc.Prof.Dr.Utai Klinkesorn

Subject: Agro-Industry (External)

1. Asst.Prof.Dr.Shitapan Bai-Ngew
2. Asst.Prof.Dr.Pongsakorn Pitchayadol
3. Asst.Prof.Dr.Benjarat Tepsongkroh
4. Assoc.Prof.Dr.Prisana Suwannaporn
5. Assoc.Prof.Dr.Wanpen Tachaboonyakiat
6. Asst.Prof.Dr.Sasithorn Mahakunajirakul
7. Assoc.Prof.Dr.Sirichai Songsermpong
8. Assoc.Prof.Dr.Sunee Nitisinprasert
9. Emeritus Prof.Dr.Onanong Naivikul

รายชื่อผู้ทรงคุณวุฒิ

สาขาทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม: ผู้ทรงคุณวุฒิภายใน

1. รศ.ดร.วรงค์ สุขเสวต	ภาควิชาชีววิทยาป่าไม้ คณะวนศาสตร์
2. ผศ.ดร.พิชิต ลำใย	ภาควิชาการจัดการป่าไม้ คณะวนศาสตร์
3. ผศ.ดร.เสฏฐวิทย์ เกิดผล	ภาควิชาวิทยาการคอมพิวเตอร์ คณะวิทยาศาสตร์
4. รศ.ดร.วีระภาส คุณรัตนสิริ	ภาควิชาการจัดการป่าไม้ คณะวนศาสตร์
5. รศ.ดร.อรอนงค์ ผิวนิล	ภาควิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม คณะสิ่งแวดล้อม
6. รศ.ดร.สุรัตน์ บัวเลิศ	ภาควิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม คณะสิ่งแวดล้อม
7. ผศ.ดร.นพวรรณ เสมวิมล	ภาควิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม คณะสิ่งแวดล้อม
8. ผศ.ดร.ธนิศร์ ปัทมพิฑูร	ภาควิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม คณะสิ่งแวดล้อม
9. ผศ.ดร.วัชรพงษ์ วาระรัมย์	ภาควิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม คณะสิ่งแวดล้อม
10. ผศ.ดร.สุธี จรรยาสุทธิวงศ์	ภาควิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม คณะสิ่งแวดล้อม
11. รศ.ดร.ภาคภูมิ ชูมณี	ภาควิชาเทคโนโลยีและการจัดการสิ่งแวดล้อม คณะสิ่งแวดล้อม
12. ดร.ภาคิน มาสกุลรัตน์	ภาควิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม คณะสิ่งแวดล้อม
13. รศ.ดร.ตุลวิทย์ สถาปนจารุ	ภาควิชาเทคโนโลยีและการจัดการสิ่งแวดล้อม คณะสิ่งแวดล้อม
14. รศ.ดร.ชลอ จารุสุทธิรักษ์	ภาควิชาเทคโนโลยีและการจัดการสิ่งแวดล้อม คณะสิ่งแวดล้อม
15. ผศ.ดร.ประไพพิศ ชัยรัตนมโนกร	ภาควิชาเทคโนโลยีและการจัดการสิ่งแวดล้อม คณะสิ่งแวดล้อม
16. รศ.ดร.ภัทรา เพ่งธรรมกีรติ	ภาควิชาเทคโนโลยีและการจัดการสิ่งแวดล้อม คณะสิ่งแวดล้อม
17. ผศ.ดร.ธัญภัสสร์ ทองเย็น	ภาควิชาเทคโนโลยีและการจัดการสิ่งแวดล้อม คณะสิ่งแวดล้อม
18. ดร.มณีกาญจน์ อยู่เอี่ยม	ภาควิชาสิ่งแวดล้อมเพื่อความยั่งยืน คณะสิ่งแวดล้อม
19. ดร.อาทิตยา ช่างด้วง	ภาควิชาสิ่งแวดล้อมเพื่อความยั่งยืน คณะสิ่งแวดล้อม
20. ดร.ธนพัฒน์ จันทร์สระคู	ภาควิชาสิ่งแวดล้อมเพื่อความยั่งยืน คณะสิ่งแวดล้อม

สาขาทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม: ผู้ทรงคุณวุฒิภายนอก

1. ดร.กัมปนาท ดีอุดมจันทร์	สำนักงานพัฒนาเทคโนโลยีอวกาศและภูมิสารสนเทศ (องค์การมหาชน)
2. ผศ.ดร.อนันต์ ศรีสุภาพ	มหาวิทยาลัยมหิดล
3. ศ.ดร.ดุสิต เวชกิจ	ข้าราชการบำนาญ มหาวิทยาลัยสุโขทัยธรรมาธิราช
4. ผศ.ดร.ต่อลาภ คำโย	มหาวิทยาลัยแม่โจ้-แพร่ เฉลิมพระเกียรติ

5. ดร.โดม ประทุมทอง	องค์การพิพิธภัณฑ์วิทยาศาสตร์แห่งชาติ(อพวช.)
6. รศ.ดร.รัตนวัฒน์ ไชยรัตน์	มหาวิทยาลัยมหิดล
7. นายพรนรินทร์ คุ้มทอง	ผู้อำนวยการส่วนอนุรักษ์สัตว์ป่า สำนักบริหารพื้นที่อนุรักษ์ที่ 16 (เชียงใหม่)
8. ดร.รุ่งโรจน์ จินตเมธาสวัสดิ์	ศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ (NECTEC)

Editorial Board

Subject: Plant Sciences (Internal)

1. Assoc.Prof.Dr.Warong Suksavate	2. Asst.Prof.Dr. Pichit Lumyai
3. Asst.Prof.Dr.Setthawit Kerdpol	4. Assoc.Prof.Dr.Weeraphart Khunrattanasiri
5. Assoc.Prof.Dr.Onanong Phew-nil	6. Assoc.Prof.Dr.Surat Bualert
7. Asst.Prof.Dr.Noppawan Semwimon	8. Asst.Prof.Dr.Thanis Patmapithura
9. Asst.Prof.Dr.Watcharapong Wararam	10. Asst.Prof.Dr.Suthee Janyasuthiwong
11. Assoc.Prof.Dr.Pakpoom Chumanee	12. Dr.Phakin Maskulrat
13. Assoc.Prof.Dr.Tulwit Sthapancharu	14. Assoc.Prof.Dr.Chalo Charusutthirak
15. Asst.Prof.Dr.Prapaipis Chairattanamanokorn	16. Assoc.Prof.Dr.Phatthara Phengthammakeerati
17. Asst.Prof.Dr.Thanyaphat Thongyen	18. Dr.Maneekan Yuu-iam
19. Dr.Athittaya Changduang	20. Dr.Thanaphat Chansaraku

Subject: Plant Sciences (External)

1. Dr.Kampanat Deeudomchan	2. Asst.Prof.Dr.Anan Srisuphap
3. Prof.Dr.Dusit Wechakit	4. Asst.Prof.Dr.Tollap Khamyo
5. Dr.Dome Prathumthong	6. Assoc.Prof.Dr.Rattanawat Chairat
7. Mr.Pornnarit Khumthong	8. Dr. Rungroj Jintamethasawat

ประกาศมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เรื่อง แต่งตั้งคณะกรรมการจัดการประชุมทางวิชาการ ครั้งที่ ๖๔ ของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ด้วยมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ร่วมกับกระทรวงการอุดมศึกษา วิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม กระทรวงดิจิทัล เพื่อเศรษฐกิจและสังคม กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม กระทรวงศึกษาธิการ กระทรวงเกษตรและสหกรณ์ มหาวิทยาลัยกลุ่มเครือข่ายวิจัยประชาชื่น สำนักงานการวิจัยแห่งชาติ และสำนักงานคณะกรรมการส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม จัดให้มีการประชุมทางวิชาการครั้งที่ ๖๔ ของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ในปีพุทธศักราช ๒๕๖๙ มีวัตถุประสงค์เพื่อนำเสนอผลงานวิจัย แลกเปลี่ยนความรู้ความคิดเห็น ประสบการณ์ และเพื่อเผยแพร่ผลงานวิจัยสาขาต่างๆ สู่สาธารณชน

เพื่อให้การประชุมทางวิชาการครั้งที่ ๖๔ ดำเนินไปด้วยความเรียบร้อยและบรรลุผลสำเร็จตามวัตถุประสงค์ที่วางไว้ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์จึงแต่งตั้งคณะกรรมการจัดการประชุมทางวิชาการ ครั้งที่ ๖๔ ของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ดังต่อไปนี้

คณะกรรมการอำนวยการจัดการประชุมทางวิชาการ

๑.	นายกสภามหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์	ที่ปรึกษา
๒.	ปลัดกระทรวงการอุดมศึกษา วิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม	ที่ปรึกษา
๓.	ปลัดกระทรวงดิจิทัลเพื่อเศรษฐกิจและสังคม	ที่ปรึกษา
๔.	ปลัดกระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม	ที่ปรึกษา
๕.	ปลัดกระทรวงศึกษาธิการ	ที่ปรึกษา
๖.	ปลัดกระทรวงเกษตรและสหกรณ์	ที่ปรึกษา
๗.	ผู้อำนวยการสำนักงานคณะกรรมการส่งเสริมวิทยาศาสตร์วิจัยและนวัตกรรม	ที่ปรึกษา
๘.	ผู้อำนวยการสำนักงานการวิจัยแห่งชาติ	ที่ปรึกษา
๙.	ประธานกลุ่มมหาวิทยาลัยเครือข่ายวิจัยประชาชื่น	ที่ปรึกษา
๑๐.	อธิบดีกรมการข้าว	ที่ปรึกษา
๑๑.	อธิบดีกรมชลประทาน	ที่ปรึกษา
๑๒.	อธิบดีกรมพัฒนาที่ดิน	ที่ปรึกษา
๑๓.	อธิบดีกรมปศุสัตว์	ที่ปรึกษา
๑๔.	อธิบดีกรมส่งเสริมการเกษตร	ที่ปรึกษา
๑๕.	อธิบดีกรมวิชาการเกษตร	ที่ปรึกษา
๑๖.	อธิบดีกรมส่งเสริมสหกรณ์	ที่ปรึกษา
๑๗.	อธิบดีกรมป่าไม้	ที่ปรึกษา
๑๘.	อธิบดีกรมควบคุมมลพิษ	ที่ปรึกษา
๑๙.	อธิบดีกรมทรัพยากรธรณี	ที่ปรึกษา
๒๐.	อธิบดีกรมทรัพยากรทางทะเลและชายฝั่ง	ที่ปรึกษา

๒๑.	อธิบดีกรมการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศและสิ่งแวดล้อม	ที่ปรึกษา
๒๒.	อธิบดีกรมอุทยานแห่งชาติ สัตว์ป่า และพันธุ์พืช	ที่ปรึกษา
๒๓.	ผู้แทนอธิบดีกรมประมง (นายพลพิศิลป์ สุวรรณชัย)	ที่ปรึกษา
๒๔.	ผู้อำนวยการสำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ	ที่ปรึกษา
๒๕.	นายกสมาคมนิสิตเก่ามหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ในพระบรมราชูปถัมภ์	ที่ปรึกษา
๒๖.	รักษาการแทนอธิการบดีมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์	ประธานกรรมการ
๒๗.	รองอธิการบดีฝ่ายวิจัยและความเป็นสากล	รองประธานกรรมการ
๒๘.	รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการและการเรียนรู้ตลอดชีวิต	รองประธานกรรมการ
๒๙.	รองอธิการบดีฝ่ายเทคโนโลยีดิจิทัลและปัญญาประดิษฐ์	กรรมการ
๓๐.	รองอธิการบดีฝ่ายนวัตกรรมและพันธกิจเพื่อสังคม	กรรมการ
๓๑.	รองอธิการบดีฝ่ายกิจการนิสิตและพัฒนาอย่างยั่งยืน	กรรมการ
๓๒.	รองอธิการบดีฝ่ายพัฒนาคุณภาพและระบบฐานข้อมูล	กรรมการ
๓๓.	รองอธิการบดีฝ่ายการเงินและบริหารทรัพย์สิน	กรรมการ
๓๔.	รองอธิการบดีฝ่ายทรัพยากรมนุษย์และยุทธศาสตร์	กรรมการ
๓๕.	รองอธิการบดีฝ่ายพัฒนาวิทยาศาสตร์สุขภาพและเขตพื้นที่สุพรรณบุรี	กรรมการ
๓๖.	รองอธิการบดีวิทยาเขตกำแพงแสน	กรรมการ
๓๗.	รองอธิการบดีวิทยาเขตศรีราชา	กรรมการ
๓๘.	รองอธิการบดีวิทยาเขตเฉลิมพระเกียรติ จังหวัดสกลนคร	กรรมการ
๓๙.	คณบดีคณะเกษตร	กรรมการ
๔๐.	คณบดีคณะประมง	กรรมการ
๔๑.	คณบดีคณะสัตวแพทยศาสตร์	กรรมการ
๔๒.	คณบดีคณะเทคนิคการสัตวแพทย์	กรรมการ
๔๓.	คณบดีคณะวิทยาศาสตร์	กรรมการ
๔๔.	คณบดีคณะสิ่งแวดล้อม	กรรมการ
๔๕.	คณบดีคณะวนศาสตร์	กรรมการ
๔๖.	คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์	กรรมการ
๔๗.	คณบดีคณะสถาปัตยกรรมศาสตร์	กรรมการ
๔๘.	คณบดีคณะอุตสาหกรรมเกษตร	กรรมการ
๔๙.	คณบดีคณะเศรษฐศาสตร์	กรรมการ
๕๐.	คณบดีคณะบริหารธุรกิจ	กรรมการ
๕๑.	คณบดีคณะศึกษาศาสตร์	กรรมการ
๕๒.	คณบดีคณะสังคมศาสตร์	กรรมการ
๕๓.	คณบดีคณะมนุษยศาสตร์	กรรมการ
๕๔.	คณบดีคณะแพทยศาสตร์	กรรมการ
๕๕.	คณบดีคณะพยาบาลศาสตร์	กรรมการ
๕๖.	คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย	กรรมการ
๕๗.	ผู้อำนวยการสำนักบริหารการศึกษา	กรรมการ

๕๘.	ผู้อำนวยการสำนักหอสมุด	กรรมการ
๕๙.	ผู้อำนวยการสำนักพัฒนาการเรียนรู้ตลอดชีวิต	กรรมการ
๖๐.	ผู้อำนวยการสำนักบริการคอมพิวเตอร์	กรรมการ
๖๑.	ผู้อำนวยการสถาบันวิจัยและพัฒนาแห่งมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์	กรรมการและเลขานุการ
๖๒.	รองผู้อำนวยการสถาบันวิจัยและพัฒนาแห่งมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ฝ่ายบริหาร	กรรมการและผู้ช่วยเลขานุการ
๖๓.	หัวหน้าสำนักงานเลขานุการ สถาบันวิจัยและพัฒนาแห่งมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์	กรรมการและผู้ช่วยเลขานุการ
๖๔.	นางสาวพิชชาอรฐ์ สิริชีวเกษร	กรรมการและผู้ช่วยเลขานุการ

โดยให้คณะกรรมการชุดนี้มีหน้าที่ ให้ข้อคิดเห็นและอำนวยการให้การจัดการประชุมทางวิชาการครั้งที่ ๖๔ ดำเนินไปด้วยความเรียบร้อย

ทั้งนี้ ตั้งแต่บัดนี้เป็นต้นไปโดยมีวาระ ๑ ปี

ประกาศ ณ วันที่ ๑๙ กันยายน พ.ศ. ๒๕๖๘

(นายดำรงค์ ศรีพระราม)
รักษาการแทนอธิการบดีมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ประกาศมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เรื่อง แต่งตั้งคณะกรรมการจัดการประชุมทางวิชาการ ครั้งที่ ๖๔ ของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ (เพิ่มเติม)

อนุสนธิประกาศมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ เรื่อง แต่งตั้งคณะกรรมการจัดการประชุมทางวิชาการ ครั้งที่ ๖๔ ของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ลงวันที่ ๑๙ กันยายน พ.ศ. ๒๕๖๘ นั้น

เพื่อให้การจัดการประชุมทางวิชาการ ครั้งที่ ๖๔ ของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ดำเนินไปด้วยความเรียบร้อย และบรรลุตามวัตถุประสงค์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์จึงขอแต่งตั้งคณะกรรมการจัดการประชุมทางวิชาการ ครั้งที่ ๖๔ ของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ (เพิ่มเติม) ดังนี้

คณะกรรมการอำนวยการจัดการประชุมทางวิชาการ

๑.	นายกสมาคมปรับปรุงพันธุ์และขยายพันธุ์พืชแห่งประเทศไทย	กรรมการ
๒.	นายกสมาคมเทคโนโลยีชีวภาพสัมพันธ์	กรรมการ
๓.	นายกสัตวแพทยสภา	กรรมการ
๔.	นายกสัตวแพทยสมาคมแห่งประเทศไทย ในพระบรมราชูปถัมภ์	กรรมการ
๕.	นายกสมาคมสัตวแพทย์ผู้ประกอบการบำบัดโรคสัตว์แห่งประเทศไทย	กรรมการ
๖.	นายกสมาคมเทคนิคการสัตวแพทย์แห่งประเทศไทย	กรรมการ
๗.	นายกสภาวิชาชีพวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย	กรรมการ
๘.	นายกสมาคมสถาบันอุดมศึกษาสิ่งแวดล้อมไทย	กรรมการ
๙.	นายกสมาคมคหเศรษฐศาสตร์แห่งประเทศไทย ในพระบรมราชินูปถัมภ์	กรรมการ
๑๐.	นายกสมาคมเศรษฐศาสตร์เกษตรแห่งประเทศไทย ในพระบรมราชูปถัมภ์	กรรมการ
๑๑.	นายกสมาคมเศรษฐศาสตร์แห่งมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์	กรรมการ
๑๒.	นายกสมาคมศิษย์เก่าเศรษฐศาสตร์และบริหารธุรกิจ	กรรมการ
๑๓.	นายกสมาคมการตลาดแห่งประเทศไทย	กรรมการ
๑๔.	นายกสมาคมสัตวบาลแห่งประเทศไทย ในพระราชูปถัมภ์ สมเด็จพระเทพรัตนราชสุดาฯ สยามบรมราชกุมารี	กรรมการ
๑๕.	นายกสมาคมวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีทางอาหารแห่งประเทศไทย	กรรมการ
๑๖.	นายกสมาคมเทคโนโลยีชีวภาพแห่งประเทศไทย	กรรมการ
๑๗.	นายกสมาคมสภาวิชาการอุตสาหกรรมเกษตร	กรรมการ
๑๘.	นายกสมาคมหลักสูตรและการสอนแห่งประเทศไทย	กรรมการ
๑๙.	นายกสมาคมการค้าปัจจัยการผลิตสัตว์น้ำไทย	กรรมการ
๒๐.	นายกสมาคมส่งเสริมกิจการประมงไทย	กรรมการ
๒๑.	นายกสมาคมปลานิลไทย	กรรมการ
๒๒.	นายกสมาพันธ์การเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำไทย	กรรมการ

๒๓.	นายกสมาคมผู้เพาะเลี้ยงปลาทะเลไทย	กรรมการ
๒๔.	นายกสมาคมวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมแห่งประเทศไทย	กรรมการ
๒๕.	นายกสมาคมวิศวกรโครงสร้างแห่งประเทศไทย	กรรมการ
๒๖.	นายกสมาคมหุ่นยนต์ไทย	กรรมการ
๒๗.	นายกสมาคมการผังเมืองไทย	กรรมการ
๒๘.	นายกสมาคมภูมิสถาปนิกประเทศไทย	กรรมการ
๒๙.	นายกสมาคมสถาปนิกสยาม ในพระบรมราชูปถัมภ์	กรรมการ
๓๐.	นายกสมาคมนักออกแบบผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม	กรรมการ
๓๑.	นายกสภาสถาปนิก	กรรมการ
๓๒.	นายกสมาคมธุรกิจไม้โตเร็ว	กรรมการ
๓๓.	นายกสมาคมรุกขกรรมไทย	กรรมการ
๓๔.	นายกสมาคมจิตวิทยาแห่งประเทศไทย	กรรมการ
๓๕.	นายกสมาคมนักสังคมวิทยาและมานุษยวิทยาสยาม	กรรมการ
๓๖.	นายกสมาคมสังคมวิทยาสาธารณะ ประเทศไทย	กรรมการ
๓๗.	คณบดีคณะสังคมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ	กรรมการ

โดยให้คณะกรรมการชุดนี้มีหน้าที่ ให้ข้อคิดเห็นและอำนวยการให้การจัดการประชุมทางวิชาการครั้งที่ ๖๔ ดำเนินไปด้วยความเรียบร้อย

คณะกรรมการฝ่ายวิชาการ

๑.	รองอธิการบดีฝ่ายวิจัยและความเป็นสากล	ที่ปรึกษา
๒.	รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการและการเรียนรู้ตลอดชีวิต	ที่ปรึกษา
๓.	ผู้อำนวยการสถาบันวิจัยและพัฒนาแห่งมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์	ที่ปรึกษา
๔.	รองผู้อำนวยการสถาบันวิจัยและพัฒนาแห่งมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ฝ่ายบริหาร	ประธานกรรมการ
๕.	ผู้ช่วยอธิการบดีฝ่ายวิชาการและการเรียนรู้ตลอดชีวิต (นางสาวนีรนุช ภาชนะทิพย์)	ประธานกรรมการร่วม
๖.	นางสาวกัญญารัตน์ สุวรรณทีป	กรรมการและเลขานุการ
๗.	นายปฏิภักดิ์ ปัญญาพูนตระกูล	ผู้ช่วยเลขานุการ
๘.	**กรรมการหมวดวิชาการเกษตรศาสตร์**	
	๘.๑ สาขาพืช	
๑.	คณบดีคณะเกษตร	ที่ปรึกษา
๒.	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ปริยานุช จุลกะ	ประธานกรรมการ
๓.	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ทัศไนย จารุวัฒนพันธ์	รองประธานกรรมการ
๔.	รองศาสตราจารย์สุตเขตต์ นาคะเสถียร	กรรมการ
๕.	รองศาสตราจารย์ธานี ศรีวงศ์ชัย	กรรมการ
๖.	รองศาสตราจารย์เฉลิมพล ภูมิไชย์	กรรมการ
๗.	รองศาสตราจารย์ภัศจี คงศีล	กรรมการ
๘.	รองศาสตราจารย์ปิติพงษ์ โตบันลือภพ	กรรมการ

๙. รองศาสตราจารย์ธนพล ไชยแสน	กรรมการ
๑๐. รองศาสตราจารย์เสาวนุช ถาวรพฤกษ์	กรรมการ
๑๑. รองศาสตราจารย์อัศเลข รัตนวรรณี	กรรมการ
๑๒. รองศาสตราจารย์เอกพันธ์ ไกรจักร	กรรมการ
๑๓. รองศาสตราจารย์ธิดา เดชฮวบ	กรรมการ
๑๔. รองศาสตราจารย์อรอุมา เพียซ้าย	กรรมการ
๑๕. รองศาสตราจารย์วันวิสา ศิริวรรณ์	กรรมการ
๑๖. รองศาสตราจารย์เนตรนภิส เขียวขำ	กรรมการ
๑๗. ผู้ช่วยศาสตราจารย์กาญจนา บุญเรือง	กรรมการ
๑๘. ผู้ช่วยศาสตราจารย์จรีรัตน์ ฉันทวุฒิพร	กรรมการ
๑๙. ผู้ช่วยศาสตราจารย์จุติภรณ์ ทัสสกุลพนิช	กรรมการ
๒๐. ผู้ช่วยศาสตราจารย์เจนจิรา ชุมภูคำ	กรรมการ
๒๑. ผู้ช่วยศาสตราจารย์เฌอมาลย์ วงศ์ชาวจันท์	กรรมการ
๒๒. ผู้ช่วยศาสตราจารย์เบญญา มะโนชัย	กรรมการ
๒๓. ผู้ช่วยศาสตราจารย์พิจิตรา แก้วสอน	กรรมการ
๒๔. ผู้ช่วยศาสตราจารย์อัณณ์ชญาน์ มงคลชัยพฤกษ์	กรรมการ
๒๕. ผู้ช่วยศาสตราจารย์อารยา อาจเจริญ เทียนหอม	กรรมการ
๒๖. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ปาริชาติ พรมโชติ	กรรมการ
๒๗. ผู้ช่วยศาสตราจารย์สราวุธ รุ่งเมฆารัตน์	กรรมการ
๒๘. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ปิยะ กิตติภาดากุล	กรรมการ
๒๙. ผู้ช่วยศาสตราจารย์สุจินต์ เจนวีรวัฒน์	กรรมการ
๓๐. ผู้ช่วยศาสตราจารย์นพ ตัณมุขยกุล	กรรมการ
๓๑. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ทรงยศ โชติชุติมา	กรรมการ
๓๒. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ดำรงวุฒิ อ่อนวิมล	กรรมการ
๓๓. ผู้ช่วยศาสตราจารย์วรรณสิริ วรรณรัตน์	กรรมการ
๓๔. ผู้ช่วยศาสตราจารย์อรุณี วงษ์แก้ว	กรรมการ
๓๕. ผู้ช่วยศาสตราจารย์วีรชัย มัธยัสถ์ถาวร	กรรมการ
๓๖. ผู้ช่วยศาสตราจารย์สุพจน์ กาเซ็ม	กรรมการ
๓๗. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ณัฐกร คุณเจริญ	กรรมการ
๓๘. ผู้ช่วยศาสตราจารย์อุดมศักดิ์ เลิศสุชาตวนิช	กรรมการ
๓๙. ผู้ช่วยศาสตราจารย์อนงค์นุช สาสนรักกิจ	กรรมการ
๔๐. นางสาวนิตยา ชูเกาะ	กรรมการ
๔๑. นายเจตษฎา อุตรพันธ์	กรรมการ
๔๒. นางสาวภารดี ธรรมาภิชัย	กรรมการ
๔๓. นายอภิเดช รักเป็นไทย	กรรมการ
๔๔. นางสาวรมิดา กร่ำศรี	กรรมการ
๔๕. นางสาวสรัญญา จันทรวิวัฒน์	กรรมการและเลขานุการ
๔๖. นางสาวธัญธิดา ลังกา	กรรมการและผู้ช่วยเลขานุการ

๘.๒ สาขาสัตว์

๑.	คณบดีคณะเกษตร	ที่ปรึกษา
๒.	นายกสมาคมสัตวบาลแห่งประเทศไทย ในพระราชูปถัมภ์ สมเด็จพระเทพรัตนราชสุดาฯ สยามบรมราชกุมารี	ที่ปรึกษา
๓.	ศาสตราจารย์ชัยภูมิ บัญชาศักดิ์	ประธานกรรมการ
๔.	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ก.ทีปลักษณ์ ระงับเหตุ	รองประธานกรรมการ
๕.	เลขาธิการสมาคมสัตวบาลแห่งประเทศไทย ในพระราชูปถัมภ์ สมเด็จพระเทพรัตนราชสุดาฯ สยามบรมราชกุมารี	กรรมการ
๖.	รองศาสตราจารย์พรรณวดี โสพรรณรัตน์	กรรมการ
๗.	รองศาสตราจารย์ศกร คุณวุฒิฤทธิรณ	กรรมการ
๘.	รองศาสตราจารย์วิริยา ลุ้งใหญ่	กรรมการ
๙.	รองศาสตราจารย์ธีรวิทย์ เปี่ยคำภา	กรรมการ
๑๐.	รองศาสตราจารย์อัจฉรา ขยัน	กรรมการ
๑๑.	รองศาสตราจารย์ชาญวิทย์ แก้วตาปี	กรรมการ
๑๒.	รองศาสตราจารย์ธนาทิพย์ สุวรรณโสภี	กรรมการ
๑๓.	ผู้ช่วยศาสตราจารย์กนกพร พ่วงพงษ์	กรรมการ
๑๔.	ผู้ช่วยศาสตราจารย์เชาว์วิทย์ ระฆังทอง	กรรมการ
๑๕.	ผู้ช่วยศาสตราจารย์พงศ์ธร คงมั่น	กรรมการ
๑๖.	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ดนัย จัตวา	กรรมการ
๑๗.	ผู้ช่วยศาสตราจารย์พนัดดา บึงศรีสวัสดิ์	กรรมการ
๑๘.	นางสาวมัธย์ฤน โล่ทอง	กรรมการ
๑๙.	นายสมบัติ ประสงค์สุข	กรรมการ
๒๐.	นางสาวทิพย์มนต์ ใยเกษ	กรรมการ
๒๑.	นายพัลลภ ตั้งตระกูลทรัพย์	กรรมการ
๒๒.	นายเสวก เกียรติสมภพ	กรรมการและเลขานุการ
๒๓.	นางสาววัชราภรณ์ ศรีพลน้อย	กรรมการและเลขานุการ
๒๔.	นางสาวสุภาพร ย้อนโคกสูง	กรรมการและผู้ช่วยเลขานุการ
๒๕.	นางสาวนิภารัตน์ โคตะนนท์	กรรมการและผู้ช่วยเลขานุการ
๒๖.	นางสาวอัญชลี บวดขุนทด	กรรมการและผู้ช่วยเลขานุการ
๒๗.	นายพัทธ์ดนัย ไดนา	กรรมการและผู้ช่วยเลขานุการ

๘.๓ สาขาประมง

๑.	คณบดีคณะประมง	ที่ปรึกษา
๒.	รองคณบดีฝ่ายวิเทศสัมพันธ์	ประธานกรรมการ
๓.	ผู้ช่วยคณบดีฝ่ายวิเทศสัมพันธ์	กรรมการ
๔.	หัวหน้าศูนย์บริหารงานวิจัยและสนับสนุนวิชาการ	กรรมการ
๕.	รองศาสตราจารย์วราห์ เทพาหุดี	กรรมการ
๖.	รองศาสตราจารย์ประพันธ์ศักดิ์ ศิรษะภูมิ	กรรมการ
๗.	รองศาสตราจารย์สาทิต ฉัตรชัยพันธ์	กรรมการ
๘.	รองศาสตราจารย์กังสดาลย์ บุญปราบ	กรรมการ

๙. ผู้ช่วยศาสตราจารย์เมธี แก้วเนิน	กรรมการ
๑๐. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ณัฏฐิกาฑ์ เหมภัทรสุวรรณ	กรรมการ
๑๑. ผู้ช่วยศาสตราจารย์พัชรี ครูขยัน	กรรมการ
๑๒. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ถิรวัฒน์ รายรัตน์	กรรมการ
๑๓. ผู้ช่วยศาสตราจารย์สุชาย วรชนะนันท์	กรรมการ
๑๔. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ธนัสพงษ์ โภควนิช	กรรมการและเลขานุการ
๑๕. ผู้ช่วยศาสตราจารย์สันติ พ่วงเจริญ	กรรมการและผู้ช่วยเลขานุการ
๑๖. นางสาวกาญจนา ทองเครือ	ผู้ช่วยเลขานุการ
๑๗. นางสาวสุมิตตรา สุพรรณ์นอก	ผู้ช่วยเลขานุการ

๘.๔ สาขาสัตวแพทยศาสตร์

๑. คณบดีคณะสัตวแพทยศาสตร์	ที่ปรึกษา
๒. รองศาสตราจารย์กัญจน์ แก้วมงคล	ที่ปรึกษา
๓. ผู้ช่วยศาสตราจารย์กานต์สุดา ลีฬหาพงศธร	ประธานกรรมการ
๔. รองศาสตราจารย์นิอร รัตนภพ	กรรมการ
๕. รองศาสตราจารย์มานะกร สุขมาก	กรรมการ
๖. รองศาตราจารย์พิษณุ ตุลยกุล	กรรมการ
๗. รองศาสตราจารย์เกษริน ขำยิ่งเกิด	กรรมการ
๘. ผู้ช่วยศาสตราจารย์สิริรัตน์ นิยม	กรรมการ
๙. ผู้ช่วยศาสตราจารย์อักษร แสงเทียนชัย	กรรมการ
๑๐. ผู้ช่วยศาสตราจารย์มณีนุช เขียวอินทร์	กรรมการ
๑๑. นายศุภชาติ ปานเนียม	กรรมการ
๑๒. นายวงศ์วิศว์ เจริญผล	กรรมการและเลขานุการ
๑๓. นางสาวญาดา หาญปัญญาพิชิต	กรรมการและผู้ช่วยเลขานุการ
๑๔. นางสาววริศรา มารยาท	กรรมการและผู้ช่วยเลขานุการ
๑๕. นางสาวสุพิชชา ดันนอก	กรรมการและผู้ช่วยเลขานุการ

๘.๕ สาขาส่งเสริมการเกษตรและคหกรรมศาสตร์

๑. คณบดีคณะเกษตร	ที่ปรึกษา
๒. นายกสมาคมคหเศรษฐศาสตร์แห่งประเทศไทย ในพระบรมราชินูปถัมภ์	ที่ปรึกษา
๓. รองศาสตราจารย์กานต์สุดา วันจันทึก	ประธานกรรมการ
๔. ผู้ช่วยศาสตราจารย์นริศรา อินทะสิริ	รองประธานกรรมการ
๕. รองศาสตราจารย์พิชัย ทองดีเลิศ	กรรมการ
๖. รองศาสตราจารย์พัชราวดี ศรีบุญเรือง	กรรมการ
๗. รองศาสตราจารย์สุภาภรณ์ เลิศศิริ	กรรมการ
๘. รองศาสตราจารย์ปาริสุทธิ์ เฉลิมชัยวัฒน์	กรรมการ
๙. รองศาสตราจารย์สุธีลักษณ์ ไกรสุวรรณ	กรรมการ
๑๐. ผู้ช่วยศาสตราจารย์พนามาศ ตรีวรรณกุล	กรรมการ
๑๑. ผู้ช่วยศาสตราจารย์สุพัตรา ศรีสุวรรณ	กรรมการ
๑๒. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ธานินทร์ คงศิลา	กรรมการ
๑๓. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ชลาธร จุลเจริญ	กรรมการ

๑๔. ผู้ช่วยศาสตราจารย์เมตตา เร่งขวนขวาย	กรรมการ
๑๕. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ปพิชญา จินตพิทักษ์สกุล	กรรมการ
๑๖. ผู้ช่วยศาสตราจารย์จิตต์โสภิณ มีระเกตุ	กรรมการ
๑๗. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ทวีศักดิ์ เตชะเกรียงไกร	กรรมการ
๑๘. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ศรันยา เผือกผ่อง	กรรมการ
๑๙. ผู้ช่วยศาสตราจารย์น้องนุช ศรีวงศ์	กรรมการ
๒๐. ผู้ช่วยศาสตราจารย์สุจิตตา เรืองรัศมี	กรรมการ
๒๑. ผู้ช่วยศาสตราจารย์อำพร แจ่มผล	กรรมการ
๒๒. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ศิริพร เรียบร้อย คิม	กรรมการ
๒๓. ผู้ช่วยศาสตราจารย์รุ่งทิพย์ ลุยเลา	กรรมการ
๒๔. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ชุติมา ชวลิตมณเฑียร	กรรมการ
๒๕. ผู้ช่วยศาสตราจารย์วัลภา แต้มทอง	กรรมการ
๒๖. ผู้ช่วยศาสตราจารย์พีรานุช เลิศวัฒนารักษ์	กรรมการ
๒๗. ผู้ช่วยศาสตราจารย์กรกฎ แพทย์หลักฟ้า	กรรมการ
๒๘. ผู้ช่วยศาสตราจารย์วิภูษณะ ศุภนคร	กรรมการ
๒๙. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ศศิประภา รัตนดิลก ณ ภูเก็ต	กรรมการ
๓๐. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ทิพวรรณ ดวงปัญญา	กรรมการ
๓๑. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ฤทัย เรืองธรรมสิงห์	กรรมการ
๓๒. ผู้ช่วยศาสตราจารย์สาวิตรี พังงา	กรรมการ
๓๓. นายกษิดิ์เดช อ่อนศรี	กรรมการ
๓๔. นางทิพากร ม่วงถึก	กรรมการ
๓๕. นางสาววสพร นิชรัตน์	กรรมการ
๓๖. นางสุขกมล ปัญญาจันทร์	กรรมการ
๓๗. นางศรัญญา ศรีโยธิน	กรรมการ
๓๘. นางสาวพิมพ์อร สุขแล้ว	กรรมการ
๓๙. นางสาวแพร เจริญวุฒิพงศ์	กรรมการและเลขานุการ
๔๐. นางสาวสุภิญญา ขาวผ่อง	กรรมการและผู้ช่วยเลขานุการ
๔๑. นางกัญญ์พิชชา โทนพงศ์ษา	กรรมการและผู้ช่วยเลขานุการ
๔๒. นางสาวมณินทร เดชแห้ว	กรรมการและผู้ช่วยเลขานุการ
๔๓. นางสาวกรรณิกา พุ่มสาหร่าย	กรรมการและผู้ช่วยเลขานุการ
๔๔. นายภูษิตฐ์คมนต์ แสงศรีเพชรกล้า	กรรมการและผู้ช่วยเลขานุการ
๔๕. นางสาวสวรรญา แย้มบัวเพ็ง	กรรมการและผู้ช่วยเลขานุการ
๔๖. นางสาวกัญตนา หลอดทองหลาง	กรรมการและผู้ช่วยเลขานุการ
๔๗. นางสาวรจนา สังข์ทอง	กรรมการและผู้ช่วยเลขานุการ

๙. กรรมการหมวดวิชาการวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม

๙.๑ สาขาวิทยาศาสตร์

๑. คณบดีคณะวิทยาศาสตร์	ที่ปรึกษา
๒. รองศาสตราจารย์ชัชวาล จันทราสุริยารัตน์	ประธานกรรมการ
๓. รองศาสตราจารย์พิทักษ์ เชื้อวงศ์	รองประธานกรรมการ

๔. รองศาสตราจารย์ภานุ พิมพ์วิริยะกุล	กรรมการ
๕. รองศาสตราจารย์ปกรณ์ วรรธนะอมร	กรรมการ
๖. รองศาสตราจารย์โชติกา หยกทองวัฒนา	กรรมการ
๗. รองศาสตราจารย์ฉัตรชัย เงินแสงสรวย	กรรมการ
๘. รองศาสตราจารย์ศุภชัย วุฒิพงศ์ชัยกิจ	กรรมการ
๙. รองศาสตราจารย์ศิริกาญจนา ทองมี	กรรมการ
๑๐. รองศาสตราจารย์ธรรมกร แซ่ตั้ง	กรรมการ
๑๑. รองศาสตราจารย์เกียรติศักดิ์ แสนบุญเรือง	กรรมการ
๑๒. รองศาสตราจารย์พงศ์เทพ ประจงทัศน์	กรรมการ
๑๓. รองศาสตราจารย์วชิรญาณ์ ธงอาสา	กรรมการ
๑๔. ผู้ช่วยศาสตราจารย์แคทลียา ดาวสุด	กรรมการ
๑๕. ผู้ช่วยศาสตราจารย์จุรีภรณ์ เชื้อดวงผุย	กรรมการ
๑๖. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ลัดดา แต่งวัฒนานุกูล	กรรมการ
๑๗. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ศิริญญา ธีระอนันต์ชัย	กรรมการ
๑๘. นายวรพงศ์ สิงห์ชาติ	กรรมการ
๑๙. นางสาวรอยพิมพ์ ธนานุศักดิ์	กรรมการ
๒๐. นายฐิติพงศ์ พันทุม	กรรมการ
๒๑. นางสาววริศษา นรินทร	กรรมการ
๒๒. นางสาวพรทิพย์ บุญมหามงคล	กรรมการและเลขานุการ
๒๓. นายรับพันธ์ ตรงวิวัฒน์	กรรมการและผู้ช่วยเลขานุการ
๒๔. นายสาธิต ประเสริฐมานะกิจ	กรรมการและผู้ช่วยเลขานุการ
๒๕. นายวิธวัช หงษ์ตระกูล	กรรมการและผู้ช่วยเลขานุการ
๒๖. ว่าร้อยตรีหญิงผุสดี แสนชอบ	กรรมการและผู้ช่วยเลขานุการ
๒๗. นางสาวกานต์สินี พรหมสมัคร	กรรมการและผู้ช่วยเลขานุการ

๙.๒ สาขาวิทยาศาสตร์สุขภาพ

๑. คณบดีคณะแพทยศาสตร์	ที่ปรึกษา
๒. ศาสตราจารย์เกียรติคุณ พลตรีหญิง เสาวนีย์ ลีละยูวะ	ที่ปรึกษา
๓. ศาสตราจารย์ พลตรี มฑิรุทธ มุ่งถิ่น	ที่ปรึกษา
๔. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ พลตรีหญิง จันทราภา ศรีสวัสดิ์	ที่ปรึกษา
๕. รองศาสตราจารย์พิงควรรศ คงมาลัย	ประธานกรรมการ
๖. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ณัฐเมธี เครือภูงา	กรรมการ
๗. นางสาววิภาพร ขจรวงศ์วัฒนา	กรรมการ
๘. นางธัญวรินทร์ ฐิติภัทรภูวนนท์	กรรมการ
๙. นายวันฉัตร ศิริสาร	กรรมการ
๑๐. นายวิทวัส ศรีแก้วณวรรณ	กรรมการ
๑๑. นางสาวปริชญา ภิรมย์รัตน์	กรรมการ
๑๒. นางสาวไอระดา พิณทอง	กรรมการ
๑๓. นางสาวณัฐวดี เพ็งรัตนโชติ	กรรมการ

๑๔. นายนาวิน จันทรา	กรรมการและเลขานุการ
๑๕. นางทิพย์ระวี รัศมีพงศ์	กรรมการและผู้ช่วยเลขานุการ
๑๖. นางสาวณิชกานต์ พุทธสูงเนิน	กรรมการและผู้ช่วยเลขานุการ

๙.๓ สาขาวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์

๑. คณบดีคณะสถาปัตยกรรมศาสตร์	ที่ปรึกษา
๒. คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์	ที่ปรึกษา
๓. รองศาสตราจารย์สิริพล อนันตวรสกุล	ประธานกรรมการ
๔. รองศาสตราจารย์นวลวรรณ ทวยเจริญ	รองประธานกรรมการ
๕. รองศาสตราจารย์จักรพันธ์ อร่ามพงษ์พันธ์	กรรมการ
๖. รองศาสตราจารย์กษิดิศ พนมสุวรรณ	กรรมการ
๗. รองศาสตราจารย์กานดิส สุดสาคร	กรรมการ
๘. รองศาสตราจารย์สัญญา สิริวิทยาปกรณ์	กรรมการ
๙. รองศาสตราจารย์กฤษณะ ไวยมัย	กรรมการ
๑๐. รองศาสตราจารย์อรทัย จงประทีป	กรรมการ
๑๑. รองศาสตราจารย์วรดร วัฒนพานิช	กรรมการ
๑๒. รองศาสตราจารย์จันทร์ศิริ สิงห์เถื่อน	กรรมการ
๑๓. รองศาสตราจารย์ชินธันย์ อารีประเสริฐ	กรรมการ
๑๔. รองศาสตราจารย์ปัญญาวุธ จิรดิลก	กรรมการ
๑๕. นายเดชพล จิตรวัฒน์กุลศิริ	กรรมการ
๑๖. นางสาวศุภัชชา ชัยเมธานันท์	กรรมการ
๑๗. นายสิงห์อำพล จันทร์วิเศษ	กรรมการและเลขานุการ
๑๘. นางสาวขวัญกมล บุญโปร่ง	กรรมการและผู้ช่วยเลขานุการ
๑๙. นางสาวสหพร แบบประดับ	กรรมการและผู้ช่วยเลขานุการ
๒๐. นางสาวสุทัตตา พาหุมันโต	กรรมการและผู้ช่วยเลขานุการ

๙.๔ สาขาอุตสาหกรรมเกษตร

๑. รองศาสตราจารย์อุลัยวรรณ์ วิทยเกียรติ	ประธานกรรมการ
๒. รองศาสตราจารย์ธัญญารัตน์ จิญกาญจน์	รองประธานกรรมการ
๓. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ขนิษฐา วัชราภรณ์	รองประธานกรรมการ
๔. รองศาสตราจารย์รังรอง ยกส้าน	กรรมการ
๕. รองศาสตราจารย์วราภรณ์ บุญทรัพย์ทิพย์	กรรมการ
๖. รองศาสตราจารย์สุดสาย ตรีวานิช	กรรมการ
๗. รองศาสตราจารย์รวิพิมพ์ ฉวีสุข	กรรมการ
๘. รองศาสตราจารย์กิติญา วงษ์คำจันทร์ โอราน	กรรมการ
๙. รองศาสตราจารย์นพรัตน์ ปราบสงบ	กรรมการ
๑๐. ผู้ช่วยศาสตราจารย์พรรณภัทร พรหมเพ็ญ	กรรมการ
๑๑. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ชนนิกานต์ ศรีกัลยา	กรรมการ
๑๒. ผู้ช่วยศาสตราจารย์วัชรพงศ์ เลิศสุรวัฒน์	กรรมการ
๑๓. นางสาวทัศนีย์ ปลั่งกลาง	กรรมการ
๑๔. นายวีรวิชญ์ ภัทรยิ่งสกุล	กรรมการ

๑๕. นางสาวจารุพร รักใหม่	กรรมการ
๑๖. นางสาวนัฏพร ขนุนก้อน	กรรมการ
๑๗. รองศาสตราจารย์ประกิต สุขใย	กรรมการและเลขานุการ
๑๘. นางสาวดวงสมร โตเปี้ยว	กรรมการและผู้ช่วยเลขานุการ
๑๙. นางสาวอัญชนา ชมภูแก้ว	กรรมการและผู้ช่วยเลขานุการ

๙.๕ สาขาทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม

๑. คณบดีคณะวนศาสตร์	ที่ปรึกษา
๒. คณบดีคณะสิ่งแวดล้อม	ที่ปรึกษา
๓. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ลัดดาวรรณ เหรียญตระกูล	ประธานกรรมการ
๔. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ขรรค์ชัย ประสานัย	รองประธานกรรมการ
๕. รองศาสตราจารย์นิสา เหล็กสูงเนิน	กรรมการ
๖. รองศาสตราจารย์สุรัตน์ บัวเลิศ	กรรมการ
๗. รองศาสตราจารย์ชลอ จารุสุทธิรักษ์	กรรมการ
๘. รองศาสตราจารย์รัฐชา ชัยชนะ	กรรมการ
๙. รองศาสตราจารย์ภัทรา เพ่งธรรมกีรติ	กรรมการ
๑๐. รองศาสตราจารย์ภาคภูมิ ชูมณี	กรรมการ
๑๑. รองศาสตราจารย์กิติชัย รัตนะ	กรรมการ
๑๒. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ศุภศิษย์ ศรีอักขรินทร์	กรรมการ
๑๓. ผู้ช่วยศาสตราจารย์นิตยา เมี้ยนมิตร	กรรมการ
๑๔. ผู้ช่วยศาสตราจารย์พฤทธิ์ ราชรักษ์	กรรมการ
๑๕. ผู้ช่วยศาสตราจารย์อรอนงค์ ผิวนิล	กรรมการ
๑๖. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ภาสิณี วรชนะนันท์	กรรมการ
๑๗. ผู้ช่วยศาสตราจารย์กิตติชัย ดวงมาลย์	กรรมการ
๑๘. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ประไพพิศ ชัยรัตนมโนกร	กรรมการ
๑๙. ผู้ช่วยศาสตราจารย์นพวรรณ เสมวิมล	กรรมการ
๒๐. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ธนิศร์ ปัทมพิฑูร	กรรมการ
๒๑. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ธัญภัสสร์ ทองเย็น	กรรมการ
๒๒. ผู้ช่วยศาสตราจารย์วัชรพงษ์ วาระรัมย์	กรรมการ
๒๓. นายพงษ์ศักดิ์ เฮงนิรัดร์	กรรมการ
๒๔. นางสาวนรินธร จำวงษ์	กรรมการ
๒๕. นายเจษฎา วงค์พรหม	กรรมการ
๒๖. นางสาวแอน กำภู ณ อยุธยา	กรรมการ
๒๗. นางสาวมณีกาญจน์ อยู่เอี่ยม	กรรมการ
๒๘. นางสาวอาทิตยา ช่างด้วง	กรรมการ
๒๙. นายภาคิน มาสกุลรัตน์	กรรมการ
๓๐. นางสาวศิรภัสสร ชมเชย	กรรมการและผู้ช่วยเลขานุการ
๓๑. นางสาวจินตลา กลิ่นหวล	กรรมการและผู้ช่วยเลขานุการ
๓๒. นายกมนณพ ฤดีจรัสวัลย์	กรรมการและผู้ช่วยเลขานุการ

๓๓. นางสาวนิชาภา อ้วนเต็ม กรรมการและผู้ช่วยเลขานุการ
๓๔. นางณิชชา ประจันตะเสน กรรมการและผู้ช่วยเลขานุการ
๓๕. นางมธุรา อ่างแก้ว กรรมการและผู้ช่วยเลขานุการ

๑๐. กรรมการหมวดวิชาการมนุษยศาสตร์ สังคมศาสตร์และศึกษาศาสตร์

๑๐.๑ สาขาเศรษฐศาสตร์และบริหารธุรกิจ

๑. คณบดีคณะเศรษฐศาสตร์ ที่ปรึกษา
๒. คณบดีคณะบริหารธุรกิจ ที่ปรึกษา
๓. รองศาสตราจารย์วิษณุ อรรถวานิช ประธานกรรมการ
๔. รองศาสตราจารย์พลวัฒน์ เลิศกุลวัฒน์ รองประธานกรรมการ
๕. รองศาสตราจารย์รวิสสาข์ สุชาโต รองประธานกรรมการ
๖. ศาสตราจารย์ภูมิฐาน รังคกูลนุวัฒน์ กรรมการ
๗. รองศาสตราจารย์กนกวรรณ จันทร์เจริญชัย กรรมการ
๘. รองศาสตราจารย์พิทวัส เอื้อสังคมเศรษฐ์ กรรมการ
๙. รองศาสตราจารย์สุธาวัลย์ พฤกษ์อำไพ กรรมการ
๑๐. รองศาสตราจารย์วุฒิไกร งามศิริจิตต์ กรรมการ
๑๑. รองศาสตราจารย์ธงชัย ศรีวรรธนะ กรรมการ
๑๒. ผู้ช่วยศาสตราจารย์อุชุก ด้วงบุตรศรี กรรมการ
๑๓. ผู้ช่วยศาสตราจารย์นภสม สินเพิ่มสุขสกุล กรรมการ
๑๔. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ธีรศักดิ์ ทรัพย์วโรบล กรรมการ
๑๕. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ณัฏฐณิชา ฉายรัศมี กรรมการ
๑๖. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ณัฐวุฒิ คูวัฒนเธียรชัย กรรมการ
๑๗. ผู้ช่วยศาสตราจารย์จุมทิพย์ เสนีย์รัตนประยูร กรรมการ
๑๘. นางลลิตา จันทรวงศ์ไพศาล หงุ่ยตระกูล กรรมการ
๑๙. นางสาวธิดารัตน์ คุ้มกิจ กรรมการ
๒๐. นายคุณากร วิวัฒนากรวงศ์ กรรมการ
๒๑. นางสาวชนัญชิดา เค็งสม กรรมการและเลขานุการ
๒๒. นายกสิณ บุญปาล กรรมการและเลขานุการ
๒๓. นายภคพงศ์ พวงศรี กรรมการและผู้ช่วยเลขานุการ
๒๔. นางสาวภีรตา รัตนสิงหกุล กรรมการและผู้ช่วยเลขานุการ
๒๕. นางสาวรัตติยา สาระโท กรรมการและผู้ช่วยเลขานุการ
๒๖. นางสาวนงนุช ขำเลิศ กรรมการและผู้ช่วยเลขานุการ
๒๗. นางสาวสมพิศ ทิมเทศ กรรมการและผู้ช่วยเลขานุการ
๒๘. นางสาวจินตนา บุญสุวรรณ กรรมการและผู้ช่วยเลขานุการ
๒๙. นางสาวนิสรา รุ่งเรือง กรรมการและผู้ช่วยเลขานุการ
๓๐. นางสาวกัญจน์ณัฏฐ์ อยู่ถนอม กรรมการและผู้ช่วยเลขานุการ
๓๑. นางสาววรรณนิภา ชาวนา กรรมการและผู้ช่วยเลขานุการ
๓๒. นายสมชาย ตามบุญ กรรมการและผู้ช่วยเลขานุการ
๓๓. นายสัญชัย ทองขาว กรรมการและผู้ช่วยเลขานุการ
๓๔. นางสาวนงลักษณ์ จงกฎ กรรมการและผู้ช่วยเลขานุการ

๓๕. นางสาวลักษมณ ปิตานนท์ชัย	กรรมการและผู้ช่วยเลขานุการ
๓๖. นางสาวจารุวรรณ ไชยธวัชพุทธิพร	กรรมการและผู้ช่วยเลขานุการ
๓๗. นางสาวชุดติมา อุบลบาน	กรรมการและผู้ช่วยเลขานุการ
๓๘. นางสาวอรัญณี ทองจันทร์แก้ว	กรรมการและผู้ช่วยเลขานุการ
๓๙. นางสาวสุกัญญา ใบกาวิน	กรรมการและผู้ช่วยเลขานุการ
๔๐. นางพัชรินทร์ อุดมรัตน์	กรรมการและผู้ช่วยเลขานุการ
๔๑. นางสาวธัญลักษณ์ เพ็งพินิจ	กรรมการและผู้ช่วยเลขานุการ
๔๒. นางสาวเขมวิการ์ ลาภส่งเสริม	กรรมการและผู้ช่วยเลขานุการ

๑๐.๒ สาขาศึกษาศาสตร์

๑. รองศาสตราจารย์ชาตรี ฝ่ายคำตา	ประธานกรรมการ
๒. รองศาสตราจารย์ภัทรวรรธน์ จีรพัฒน์ธนธร	รองประธานกรรมการ
๓. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ธนนันท์ ธนารัชตะภูมิ	รองประธานกรรมการ
๔. รองศาสตราจารย์ณัฐพล รำไพ	กรรมการ
๕. รองศาสตราจารย์จีระวรรณ เกษสิงห์	กรรมการ
๖. ผู้ช่วยศาสตราจารย์สุรเดช ศรีทา	กรรมการ
๗. ผู้ช่วยศาสตราจารย์บุญเลิศ อุทยานิก	กรรมการ
๘. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ณัฐิกา เพ็งลี	กรรมการ
๙. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ภูเบศร์ นภัทรพิทยาธร	กรรมการ
๑๐. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ภัทรพร แจ่มใส	กรรมการ
๑๑. นางสาวจิตติมา พิศาภาค	กรรมการ
๑๒. นายชาครีย์ เกิดสมบูรณ์	กรรมการ
๑๓. นายเดชศิริ โนภาส	กรรมการ
๑๔. นายวรัญญู ฉายาบรรณ์	กรรมการ
๑๕. นายสกล ตั้งเก้าสกุล	กรรมการ
๑๖. นางสาวสุวรรณา ปรมาพจน์	กรรมการและเลขานุการ
๑๗. นายณรงค์ศักดิ์ หวังรัตนปราณี	กรรมการและผู้ช่วยเลขานุการ
๑๘. นายธีระภัณฑ์ ศิริสุวรรณ	กรรมการและผู้ช่วยเลขานุการ
๑๙. นางสาวธนวัลย์ ตั้งเสถียรวงศา	กรรมการและผู้ช่วยเลขานุการ
๒๐. นางสาวธันยพร อินทรอุทก	กรรมการและผู้ช่วยเลขานุการ
๒๑. นางสาววิภา เสริฐสันติ	กรรมการและผู้ช่วยเลขานุการ

๑๐.๓ สาขามนุษยศาสตร์และสังคมศาสตร์

๑. คณบดีคณะสังคมศาสตร์	ที่ปรึกษา
๒. คณบดีคณะมนุษยศาสตร์	ที่ปรึกษา
๓. รองศาสตราจารย์กังสดาล เชาว์วัฒนกุล	ประธานกรรมการ
๔. รองศาสตราจารย์นัทธนัย ประสานนาม	รองประธานกรรมการ
๕. ผู้ช่วยศาสตราจารย์เฉลิมขวัญ สิงห์วี	รองประธานกรรมการ
๖. รองศาสตราจารย์ธนารดี คำยา	กรรมการ
๗. รองศาสตราจารย์ชยพจน์ ลีอนันต์	กรรมการ
๘. ผู้ช่วยศาสตราจารย์นรุตม์ พรประสิทธิ์	กรรมการ

๙. ผู้ช่วยศาสตราจารย์อรนันท์ กลันทปุระ	กรรมการ
๑๐. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ปุรินทร์ นาคสิงห์	กรรมการ
๑๑. ผู้ช่วยศาสตราจารย์พรทิพย์ ลิ้มพหะพันธ์	กรรมการ
๑๒. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ภิรดา ชัยรัตน์	กรรมการ
๑๓. ผู้ช่วยศาสตราจารย์วรภัทร รัตนาพาณิชย์	กรรมการ
๑๔. ผู้ช่วยศาสตราจารย์สอนกิจจา บุญโปร่ง	กรรมการ
๑๕. ผู้ช่วยศาสตราจารย์สายทิพย์ เหล่าทองมีสกุล	กรรมการ
๑๖. ผู้ช่วยศาสตราจารย์นันทนุช อุดมละมุล	กรรมการ
๑๗. ผู้ช่วยศาสตราจารย์พณิตา ฉัตรานนท์	กรรมการ
๑๘. ผู้ช่วยศาสตราจารย์วิภาดา รัตนดิลก ณ ภูเก็ต	กรรมการ
๑๙. นางสาวนฤมล ช้างบุญมี	กรรมการ
๒๐. นางสาวจุฑารัตน์ จิตโสภา	กรรมการ
๒๑. นายชุติพงศ์ ร่มสนธิ์	กรรมการ
๒๒. นายชัยรัตน์ วงศ์กิจรุ่งเรือง	กรรมการ
๒๓. นายณัฐภัทร์ รักวงศ์วาน	กรรมการ
๒๔. นางสาวนิสารัตน์ ขันธโภค	กรรมการ
๒๕. นายสมรรถพงศ์ ขจรมณี	กรรมการ
๒๖. นางสาวจริยา สุพรรณ	กรรมการ
๒๗. นางสาวผาณิตา ชัยดิเรก	กรรมการ
๒๘. นายธัญพัฒน์ ไกรจริยาเวทย์	กรรมการ
๒๙. นางสาวอภิญญา แก้วมา	กรรมการและเลขานุการ
๓๐. นางสาวพรปวีณ์ สามปรุ	กรรมการและผู้ช่วยเลขานุการ
๓๑. นางสาวทิพวัลย์ รามรง	กรรมการและผู้ช่วยเลขานุการ
๓๒. นางสาวศรีวรรณ บุญประเสริฐ	กรรมการและผู้ช่วยเลขานุการ

๑๑. **คณะกรรมการโดยสมาคมวิชาการ วิชาชีพ**

๑. ศาสตราจารย์อมร พิมานมาศ	กรรมการ
๒. รองศาสตราจารย์สุชาติ เหลืองประเสริฐ	กรรมการ
๓. รองศาสตราจารย์กาญจนพันธุ์ สุขวิชชัย	กรรมการ
๔. รองศาสตราจารย์ประกิต สุขใย	กรรมการ
๕. รองศาสตราจารย์สายวรุฬ ชัยวานิชศิริ	กรรมการ
๖. รองศาสตราจารย์สิริชัย ส่งเสริมพงษ์	กรรมการ
๗. รองศาสตราจารย์สิรี ชัยเสรี	กรรมการ
๘. รองศาสตราจารย์พรเทพ เหมือนพงษ์	กรรมการ
๙. รองศาสตราจารย์ศรัณย์ วรรธนัจฉริยา	กรรมการ
๑๐. รองศาสตราจารย์โสมสกาว เพชรานนท์	กรรมการ
๑๑. ผู้ช่วยศาสตราจารย์พิสิฏฐ์ ธรรมวิถี	กรรมการ
๑๒. ผู้ช่วยศาสตราจารย์สุเชษฐ์ สมุหเสนีโต	กรรมการ
๑๓. ผู้ช่วยศาสตราจารย์อาณดี นิติธรรมยง	กรรมการ
๑๔. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ธนภณ พันธเสน	กรรมการ

๑๕. นายกิติพงศ์ ตั้งกิจ	กรรมการ
๑๖. นางสาวอรยา สูตะบุตร	กรรมการ
๑๗. นายบัลลพ ขำเจริญ	กรรมการ
๑๘. นางสาวชณิภัฏ ชวนานนท์	กรรมการ
๑๙. นายประภากร วทานยกุล	กรรมการ

โดยให้คณะกรรมการชุดนี้มีหน้าที่ จัดการเสนอผลงานในการประชุมทางวิชาการ ครั้งที่ ๖๔ ของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กำหนดหน้าที่รับผิดชอบ กำหนดแนวทางการคัดเลือกผลงานที่นำมาเสนอ และรับนโยบายจากคณะกรรมการอำนวยการ มาปฏิบัติให้บรรลุตามวัตถุประสงค์

คณะกรรมการฝ่ายบริหารจัดการประชุมทางวิชาการ

๑. รองอธิการบดีฝ่ายวิจัยและความเป็นสากล	ที่ปรึกษา
๒. ผู้อำนวยการสถาบันวิจัยและพัฒนาแห่งมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์	ประธานกรรมการ
๓. ผู้อำนวยการสำนักบริการคอมพิวเตอร์	ประธานกรรมการร่วม
๔. ผู้อำนวยการสำนักพัฒนาการเรียนรู้ตลอดชีวิต	ประธานกรรมการร่วม
๕. รองผู้อำนวยการสถาบันวิจัยและพัฒนาแห่งมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ฝ่ายบริหาร	รองประธานกรรมการ
๖. ประธานฝ่ายเลขานุการ (นางอัจฉราวรรณ คล้องช้าง)	กรรมการ
๗. ประธานฝ่ายสารสนเทศ (ผู้อำนวยการสำนักบริการคอมพิวเตอร์)	กรรมการ
๘. ประธานฝ่ายสถานที่ (ผู้อำนวยการสำนักบริการคอมพิวเตอร์ และ รองผู้อำนวยการสถาบันวิจัยและพัฒนาแห่งมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ฝ่ายวิจัยและวิเทศสัมพันธ์)	กรรมการ
๙. ประธานฝ่ายประชาสัมพันธ์ (หัวหน้างานสื่อสารองค์กร)	กรรมการ
๑๐. ประธานฝ่ายโสตทัศนูปกรณ์ (นายสุวิทย์ คำแสง)	กรรมการ
๑๑. ประธานฝ่ายผลิตสื่อวิชาการ (รองผู้อำนวยการสถาบันวิจัยและพัฒนาแห่งมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ฝ่ายเผยแพร่งานวิจัย)	กรรมการ
๑๒. ประธานฝ่ายการเงิน (นางสาววรรณวิมล ราชอุปนันท์)	กรรมการ
๑๓. ประธานฝ่ายจัดการฐานข้อมูล (ผู้อำนวยการสำนักหอสมุด)	กรรมการ
๑๔. นายปฏิภักดิ์ ปัญญาพูนตระกูล	กรรมการและเลขานุการ
๑๕. นายพลากร คำแก้ว	กรรมการและผู้ช่วยเลขานุการ

โดยให้คณะกรรมการชุดนี้มีหน้าที่ ประสานงาน ดำเนินการ และอำนวยความสะดวกการจัดประชุมทางวิชาการ ครั้งที่ ๖๔ โดยประสานงานกับคณะกรรมการอำนวยการ และคณะกรรมการฝ่ายวิชาการเพื่อให้การดำเนินงานสำเร็จลุล่วงและเป็นไปด้วยความเรียบร้อย

ทั้งนี้ ตั้งแต่บัดนี้เป็นต้นไปโดยมีวาระ ๑ ปี

ประกาศ ณ วันที่ ๒๔ พฤศจิกายน พ.ศ. ๒๕๖๘

(นายดำรงค์ ศรีพระราม)
รักษาการแทนอธิการบดีมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

คำสั่งสถาบันวิจัยและพัฒนาแห่งมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
ที่ ๙๐/๒๕๖๘
เรื่อง แต่งตั้งคณะทำงานฝ่ายผลิตสื่อวิชาการ การจัดการประชุมทางวิชาการ ครั้งที่ ๖๔
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เพื่อให้การจัดการประชุมทางวิชาการ ครั้งที่ ๖๔ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ดำเนินไปด้วยความเรียบร้อยและบรรลุตามวัตถุประสงค์ สถาบันวิจัยและพัฒนาแห่งมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ จึงให้แต่งตั้งคณะทำงานฝ่ายผลิตสื่อวิชาการ ดังรายนามต่อไปนี้

๑. รองผู้อำนวยการฝ่ายเผยแพร่งานวิจัย สถาบันวิจัยและพัฒนาแห่งมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์	ประธานคณะทำงาน
๒. นางสาวทิสยา ทิศเสถียร	คณะทำงาน
๓. นางสาววนิดา รัตตมณี	คณะทำงาน
๔. นายวิทวัส ยุทธโกศา	คณะทำงาน
๕. นางสาวมณฑา ปานทิม	คณะทำงาน
๖. นางสาวธมนวรรณ เทาศิริ	คณะทำงาน
๗. นางสาวกัญญารัตน์ สุวรรณทีป	คณะทำงานและเลขานุการ

โดยให้คณะทำงานชุดนี้ มีหน้าที่ ดำเนินการผลิตสื่อวิชาการ อาทิ สื่อประชาสัมพันธ์งานประชุมทางวิชาการ สื่อข้อกำหนดต่างๆ จัดทำกำหนดการ หนังสือสูจิบัตร หนังสือรวบรวมบทคัดย่อ (Book of Abstracts) หนังสือตีพิมพ์ผลงานวิจัยเรื่องเต็ม (E-Proceedings) การประสานงานตีพิมพ์ในวารสารวิชาการ รวมถึงการผลิตสื่อมัลติมีเดียและการถ่ายทอดสดงานประชุม โดยประสานงานกับฝ่ายวิชาการและฝ่ายต่างๆ ให้ดำเนินงานเป็นไปด้วยความเรียบร้อยและมีประสิทธิภาพ

ทั้งนี้ ตั้งแต่บัดนี้เป็นต้นไป

ประกาศ ณ วันที่ ๑๑ ธันวาคม พ.ศ. ๒๕๖๘

(รองศาสตราจารย์เอกไท วิโรจน์สกุลชัย)
รองผู้อำนวยการฝ่ายบริหาร
รักษาการแทนผู้อำนวยการสถาบันวิจัยและพัฒนา
แห่งมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ปรัชญา

เป็นสถาบันที่มีปณิธานมุ่งมั่นในการสั่งสมเสาะแสวงหา และพัฒนาความรู้
ให้เกิดความเจริญงอกงามทางภูมิปัญญาที่เพียบพร้อมด้วย
วิชาการ จริยธรรม และคุณธรรม ตลอดจนเป็นผู้ชี้นำทิศทางสืบทอด
เจตนารมณ์ที่ดีของสังคม เพื่อความคงอยู่ ความเจริญ
และความเป็นอารยะของชาติ

จัดโดย

มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ร่วมกับ

กระทรวงการอุดมศึกษา วิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม
กระทรวงเกษตรและสหกรณ์
กระทรวงศึกษาธิการ
กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม
กระทรวงดิจิทัลเพื่อเศรษฐกิจและสังคม
สำนักงานคณะกรรมการส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม
สำนักงานการวิจัยแห่งชาติ
เครือข่ายวิจัยประชาชื่น

ฝ่ายเลขานุการคณะกรรมการดำเนินการจัดการประชุมทางวิชาการ ครั้งที่ 64
สถาบันวิจัยและพัฒนาแห่งมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

annualconference.ku.ac.th
KUannualconf@gmail.com