



Research on Modern science and Utilizing Technological Innovation Journal

(RMUTI Journal)

RMUTI Journal

Vol. 18 No. 2 May-August 2025

2025



INSTITUTE OF RESEARCH AND DEVELOPMENT
RAJAMANGALA UNIVERSITY OF TECHNOLOGY ISAN

RMUTI Journal ได้รับการประเมินคุณภาพให้อยู่ในฐานข้อมูล
ของศูนย์ดัชนีการอ้างอิงวารสารไทย (TCI) กลุ่มที่ 2

วารสารงานวิจัยด้านวิทยาศาสตร์สมัยใหม่ และการใช้ประโยชน์นวัตกรรมเทคโนโลยี Research on Modern science and Utilizing Technological Innovation Journal (RMUTI Journal)

วัตถุประสงค์

1. เพื่อเป็นสื่อกลางในการแลกเปลี่ยนองค์ความรู้ด้านวิชาการ ด้านงานวิจัย และสิ่งประดิษฐ์ระหว่างนักวิชาการ และนักวิจัยกับผู้ที่สนใจทั่วไป
2. เพื่อเผยแพร่ผลงานทางวิชาการ ผลงานวิจัย และสิ่งประดิษฐ์ของนักวิชาการและนักวิจัยสู่สาธารณชน

หลักเกณฑ์การส่งบทความ

วารสาร RMUTI Journal เน้นรับบทความทางด้าน Physical Sciences ในสาขาวิชา Chemistry, Engineering, Materials Science, Environmental Science และ Mathematics

ประเภทของบทความที่ตีพิมพ์ บทความวิจัย และบทความวิชาการ

กระบวนการพิจารณาบทความ ใช้กระบวนการพิจารณาบทความโดยผู้ทรงคุณวุฒิที่มาจากหลากหลายหน่วยงาน จำนวน 3 ท่าน ต่อ 1 บทความ บทความทุกบทความจะต้องผ่านการพิจารณาโดยผู้ทรงคุณวุฒิที่เชี่ยวชาญแบบผู้ทรงคุณวุฒิและผู้แต่งไม่ทราบชื่อกันและกัน (double-blind review)

เจ้าของ

สถาบันวิจัยและพัฒนา

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน

744 ถ.สุรนารายณ์ ต.ในเมือง อ.เมือง จ.นครราชสีมา 30000

โทรศัพท์ 0 - 4423 - 3063 โทรสาร 0 - 4423 - 3064

E-mail : rmuti.journal@gmail.com

ตีพิมพ์เผยแพร่ราย 4 เดือน ปีละ 3 ฉบับ

ฉบับที่ 1 ประจำเดือนมกราคม - เดือนเมษายน

ฉบับที่ 2 ประจำเดือนพฤษภาคม - เดือนสิงหาคม

ฉบับที่ 3 เดือนกันยายน - เดือนธันวาคม

ชื่อวารสารใหม่เริ่มใช้ปีที่ 16 ฉบับที่ 3 (กันยายน - ธันวาคม) เป็นต้นไป

ลิขสิทธิ์

ต้นฉบับที่ได้รับการตีพิมพ์ ถือเป็นลิขสิทธิ์ของวารสาร RMUTI Journal และบทความในวารสารเป็นแนวคิดของผู้แต่ง มิใช่เป็นความคิดของคณะกรรมการจัดทำวารสาร และมีใช่เป็นความรับผิดชอบของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน

วารสารงานวิจัยด้านวิทยาศาสตร์สมัยใหม่ และการใช้ประโยชน์นวัตกรรมเทคโนโลยี
(RMUTI Journal)

Research on Modern science and Utilizing Technological Innovation Journal
(RMUTI Journal)

ที่ปรึกษากองบรรณาธิการ

รองศาสตราจารย์ ดร.โมษิต	ศรีภูธร	อธิการบดีมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
รองศาสตราจารย์ ดร.ศักดิ์ระวี	ระวีกุล	ผู้อำนวยการสถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
รองศาสตราจารย์ ดร.วีระชัย	พุทธรังษี	ประธานหลักสูตรนิติวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

กองบรรณาธิการ

ศาสตราจารย์เกียรติคุณ ดร.พีระศักดิ์	ศรีนิเวศน์	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
ศาสตราจารย์กิตติคุณ ดร.เปี่ยมศักดิ์	เมนะเศวต	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ศาสตราจารย์ ญาณวิทย์ ดร.เมธา	วรรณพัฒน์	มหาวิทยาลัยขอนแก่น
ศาสตราจารย์ ดร.กุลเชษฐ์	เพียรทอง	มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
ศาสตราจารย์ ดร.เจษฎา	ธารีบุญ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
ศาสตราจารย์ ดร.ณรงค์ฤทธิ์	สมบัติสมภาพ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ศาสตราจารย์ ดร.ตะวัน	สุชน้อย	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ศาสตราจารย์ ดร.ทวนทอง	จุฑาเกตุ	มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
ศาสตราจารย์ ดร.ปารเมศ	ชุตินา	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ศาสตราจารย์ ดร.พิเชษฐ	ลิมสุวรรณ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ศาสตราจารย์ ดร.มนัส	ชัยจันทร์	มหาวิทยาลัยวลัยลักษณ์
ศาสตราจารย์ ดร.วินัย	ประหลมภ์กาญจน์	มหาวิทยาลัยวลัยลักษณ์
ศาสตราจารย์ ดร.ศุภชัย	ปทุมนากุล	มหาวิทยาลัยขอนแก่น
ศาสตราจารย์ ดร.ศุภชัย	สิงห์ยะบุศย์	มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
ศาสตราจารย์ ดร.สำเริง	จักรใจ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ศาสตราจารย์ ดร.สุชาติ	ลิมกตัญญู	มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
ศาสตราจารย์ ดร.สมชาติ	โสภณธรรมฤทธิ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ศาสตราจารย์ ดร.สุทธวัฒน์	เบญจกุล	มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
ศาสตราจารย์ ดร.สราวดี	สุจิตจร	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ศาสตราจารย์ ดร.อรอนงค์	นัยวิกุล	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
รองศาสตราจารย์ ดร.กนกอร	อินทราพิเชฐ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
รองศาสตราจารย์ ดร.กนต์ธร	ชำนาญประศาสน์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
รองศาสตราจารย์ ดร.คงศักดิ์	ธาดาทอง	มหาวิทยาลัยขอนแก่น
รองศาสตราจารย์ ดร.คณิต	มุกดาใส	มหาวิทยาลัยขอนแก่น
รองศาสตราจารย์ ดร.จักรี	ศรีนนท์ฉัตร	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
รองศาสตราจารย์ ดร.ชนกพร	เผ่าศิริ	มหาวิทยาลัยขอนแก่น
รองศาสตราจารย์ ดร.ณัฐวิวัฒน์	พลดี	มหาวิทยาลัยขอนแก่น
รองศาสตราจารย์ ดร.ตรีศ	สามารถ	มหาวิทยาลัยขอนแก่น
รองศาสตราจารย์ ดร.นริช	สุดสังข์	มหาวิทยาลัยนเรศวร

กองบรรณาธิการ (ต่อ)

รองศาสตราจารย์ ดร.ปราโมทย์
รองศาสตราจารย์ ดร.ปรีชา
รองศาสตราจารย์ ดร.วุฒิพล
รองศาสตราจารย์ ดร.สุรภาพ
รองศาสตราจารย์ ดร.สมพงษ์
รองศาสตราจารย์ ดร.สมพร
รองศาสตราจารย์ ดร.สิทธิชัย
รองศาสตราจารย์ ดร.สรายุทธ
รองศาสตราจารย์ อุดมศักดิ์

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นาถ
รองศาสตราจารย์ ดร.จิตติวัฒน์
รองศาสตราจารย์ ดร.คมเดช
รองศาสตราจารย์ ดร.เชิดศักดิ์
รองศาสตราจารย์ ดร.บัณฑิต
รองศาสตราจารย์ ดร.ปกิต
รองศาสตราจารย์ ดร.รตินันท์
รองศาสตราจารย์ ดร.รพีพงศ์
รองศาสตราจารย์ ดร.สุจิตรา
รองศาสตราจารย์ ดร.อาทิตย์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ไกรสิทธิ์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จักษดา
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชาคริต
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ณัฐพล
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เดือนเพ็ญ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.รัฐพล
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศศิพันธ์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อดิศักดิ์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์อนุชา
ดร.จารุพงษ์
ดร.ฉันทพิชญ์
ดร.เยาวพา
ดร.รัชชาติ
ดร.วัชรินทร์
ดร.สุกัญญา

รองศาสตราจารย์ ดร.ณรงค์ศักดิ์

นางสาววสิริรักษ์

แพ่งคำ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
กอเจริญ วิทยาลัยเทคโนโลยีจิตรลดา
สินธุนาวรัตน์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
แก้วสวัสดิวงศ์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
ดุ่ยจินดาชบาพร มหาวิทยาลัยขอนแก่น
ไชยะ จังหวัดฉะเชิงเทรา
แสงอาทิตย์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
เดชะปัญญา มหาวิทยาลัยบูรพา
สาริบุตร สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร
ลาดกระบัง

สุขศีล มหาวิทยาลัยนครพนม
นิกายัญจนธาร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
ภาพพัฒนบุรี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
สุขศิริพัฒน์พงษ์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
กฤตาคม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
กำบุญมา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
เหลื่อมพล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
เปี่ยมสุวรรณ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
อุ้นเรือน มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
อัสวสุชี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
วสุเพ็ญ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
จรัสวุฒิ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
นวลฉิมพลี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
พิสิฐพิพัฒน์สิน มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
วงศ์สอน มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
สมนา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
วงศ์สุทธาวาส มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
หารจริง มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
กล้าน้อย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
บรรเทา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
ชามาตย์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
ความหมั่น มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
กลิ่นกล้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
ชาติบุปผาพันธ์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
คำหล้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน

บรรณาธิการ

โยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน

ฝ่ายจัดการและธุรการ

ศรีศิลป์ไชย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน

สารบัญ Table of Contents

บทความวิจัย (Research Articles)

Investigation of Physical and Mechanical Properties for Interlocking Paver Block from Foam Waste Binder <i>Chuwit Napia, Chiaewchan Saengthong, Warayut In-aram, and Anuwat Srisuwan</i>	1
การพัฒนาแบบจำลองสารสนเทศอาคารด้วยเครื่องสแกนเลเซอร์ 3 มิติ เพื่อการอนุรักษ์โบราณสถานของศาลเจ้าโรงเกือก : กรณีศึกษาการประเมินผลกระทบจากอุทกภัย <i>ปริฉัตร จันทะแสน และฐิติรัตน์ ปันบำรุงกิจ</i> <i>Parichart Chanthasaen and Thitirat Panbamrungkij</i>	11
The Development of Building Information Modeling (BIM) with 3D Laser Scanner for Rong Kueak Shrine Conservation: A Case Study of Flood Impact Assessment <i>ปริฉัตร จันทะแสน และฐิติรัตน์ ปันบำรุงกิจ</i> <i>Parichart Chanthasaen and Thitirat Panbamrungkij</i>	
พฤติกรรมรอยต่อชิ้นส่วนโครงสร้างคานเสาคอนกรีตสำเร็จรูปภายใต้แรงกระทำพลศาสตร์ <i>พลกฤต จิตต์มาตร, นันทชัย ชูศิลป์ และจุฑามาศ ลักษณะกิจ</i> <i>Phonlakit Jitmart, Nuntachai Chusilp, and Chuthamat Laksanakit</i>	29
การพัฒนาบรรจุภัณฑ์สำหรับมะม่วงน้ำดอกไม้จากกากเส้นใยใบอ้อยและกากหน่อไม้ฝรั่ง <i>ภาวิณี เทียมดี และศุภกิจ เสวะขุนทด</i> <i>Pawinee Theamdee and Suphakit Sewakhuntos</i>	43
การวิเคราะห์แนวโน้มการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO ₂) ในภาคขนส่งโดยใช้อัลกอริทึมเหมืองข้อมูล <i>ปรีชาเกียรติ กองแก้ว, วันชัย ใจศร, รุจิพันธ์ โกษารัตน์ และธนิต เกตุแก้ว</i> <i>Preechakiat Konkaew, Wanchai Jaisorn, Rujipan Kosarat, and Thanit Keatkaew</i>	56
การนำวัสดุเหลือทิ้งถ่านหินไม้อย่างพาราใช้ในการผลิตคอนกรีตบล็อกกลวงไม่รับน้ำหนัก <i>ทวีศักดิ์ ทองขวัญ, ถาวร เกื้อสกุล, จุฑามาศ ลักษณะกิจ, นันทชัย ชูศิลป์, วิศิษฐ์ศักดิ์ ทับยัง, อรุณ ลูกจันทร์, พงศ์ศักดิ์ สุขมณี และเปรมณัช ชุมพร้อม</i> <i>Thaweesak Thongkhwan, Tavorn Kuasakul, Chuthamat Laksanakit, Nuntachai Chusilp, Wisitsak Tabyang, Arun Lukjan, Pongsak Sookmanee, and Premmanat Chumprom</i>	67
การแก้ไขปัญหาฉีดไม่เต็มด้วยการออกแบบช่องระบายอากาศของแม่พิมพ์ฉีดพลาสติกแก้วกาแฟจากวัสดุพลาสติกชีวภาพ <i>ธีรวัฒน์ แสงภาค, อติเรก ชัยนวกุล, ศุภชัย อัครนรากุล, พิเชษฐ ไคว้ตระกูล และศุภสิทธิ์ มะโนเครื่อง</i> <i>Teerawat Sangkas, Adirake Chainawakul, Supachai Aukaranarakul, Pitchet Kowtakul, and Supasit Manokruang</i>	81

สารบัญ (ต่อ)
Table of Contents (Cont.)

บทความวิจัย (Research Articles)

แบคทีเรียและธาตุอาหารในน้ำหมักชีวภาพจากเปลือกมะพร้าวแห้ง	91
Bacteria and Nutrients in Fermented Bio-extracts from Aromatic Coconut Husk	
ธัญชนก ทองเสมอ, นารีรัตน์ สุขชี, สร้อยดาว วินิจนันท์รัตน์, บัณฑิต ทิระชูลี, ภาวิณี พัฒนจันทร์ และ วาสนศักดิ์ ลิ้มควรรสุวรรณ	
Thunchanok Thongsamer, Nareerat Sukkhee, Soydoa Vinitnantharat, Bundit Tirachulee, Pavinee Patanachan, and Vassanasak Limkuansuwan	
สมบัติทางวิศวกรรมและโครงสร้างจุลภาคของมอร์ตาร์มวลเบาเซลลูโลสจากเศษแก้วผสมเถ้าลอยกระตุ้นด้วยต่าง	103
Engineering and Microstructure Properties of Cellular Lightweight Mortar from Recycled Glass mixed with Alkali-activated Fly Ash	
ณัฐพล ฐาตุจิรวงศ์กุล, คำภี จิตชัยภูมิ, รัชกฤษ เมธาธิรัตน์, เสริมศักดิ์ ตียะแสงทอง, ปิยธิดา อยู่สุข และ เชิดศักดิ์ สุขศิริพัฒน์พงศ์	
Natthapon Thatuchirangkul, Khamphree Jitchaiyaphum, Rutchakit Maythathirut, Sermak Tiyasangthong, Piyathida Yoosuk, and Cherdasak Suksiripattanapong	
การพัฒนาและยกระดับงานหัตถกรรมจักสานกระจูดด้วยเครื่องรีดเส้นกระจูดแบบลูกกลิ้งร่วมความร้อน	117
Development and Enhancement of Krajoed Basketry Handicraft Using a Combined Heating Krajoed Fiber Rolling Machine	
วรพงศ์ บุญช่วยแทน, สุรสิทธิ์ ระวีวงศ์, ฐานวิทย์ ไน่มใส และจารุวัฒน์ เจริญจิต	
Worapong Boonchouytan, Surasit Rawangwong, Thanwit Naemsai, and Jaruwat Jareanjit	

Investigation of Physical and Mechanical Properties for Interlocking Paver Block from Foam Waste Binder

Chuwit Napia¹ Chiaewchan Saengthong¹ Warayut In-aram¹ and Anuwat Srisuwan^{1*}

Received: March 25, 2025; Revised: April 24, 2025; Accepted: April 25, 2025

Abstract

This study investigates the feasibility of producing interlocking paver blocks using a mixture of sand and dissolved foam binder at varying contents ranging from 10 to 50 wt%. The results indicate that paver blocks could be successfully formed without edge fractures when the foam binder content was within the range of 20 - 40 wt%. As the foam content increased, the samples exhibited improved densification, while porosity and water absorption significantly decreased due to the infiltration of foam into the micropores. Consequently, the compressive strength of the paver blocks improved with higher foam content, reaching a maximum at 40 wt% foam binder. These findings confirm that interlocking paver blocks produced with 20 - 40 wt% foam binder meet the required strength standards, demonstrating the potential of foam waste as an effective alternative binder in sustainable construction applications.

Keywords: Foam Binder; Paver Block; Waste; Environment

¹ Faculty of Liberal Arts and Sciences, Sisaket Rajabhat University

* Corresponding Author, Tel. 08 1976 0813, E - mail: anuwat.s@sskru.ac.th

Introduction

The increasing volume of waste aligns with the rapid population growth, presenting a critical environmental challenge that demands urgent attention (Ganivet, 2020). The escalating amount of waste arises from various factors, including consumption behaviors and inadequate waste separation at the source (Güven et al., 2023). Inefficient waste management practices have resulted in environmental pollution. Additionally, there exists a lack of sufficient knowledge and capability in reusing materials, further exacerbating environmental issues, such as the greenhouse effect caused by the incineration of waste and the consequent release of carbon dioxide (Mishra, 2024). These ongoing problems adversely affect the environment and living organisms, both terrestrial and aquatic. A significant portion of this waste consists of materials that are resistant to decomposition, with foam or plastic waste being a prominent example (Hollerova et al., 2021).

Foam is extensively utilized in contemporary society, especially as food packaging. Vendors selling ready-to-eat meals and various food products commonly use foam containers for their convenience and efficiency. On average, a Thai individual generates approximately 2.3 foam containers daily (Hu and Meng, 2024). Foam waste is recognized as a non-polar material, rendering it insoluble in polar solvents such as water. However, studies have indicated that foam can dissolve in non-polar solvents, including benzene, thinner, and alcohol, forming a viscous liquid that solidifies upon solvent evaporation (Lozano et al., 2025). This property suggests the potential use of dissolved foam as a binding agent for sand particles, resulting in a solid product post-evaporation. Exploring methods to repurpose foam waste represents a promising strategy for reducing waste volume and creating value-added products.

Interlocking pavers are widely used for both aesthetic and functional purposes, such as preventing water accumulation in residential areas. Conventionally, these pavers are manufactured using cement as the primary material, following stringent production standards and quality testing protocols (Sojobi et al., 2018). Interlocking pavers are available in various sizes and shapes, designed to meet specific standards of strength and durability. The diverse colors and forms facilitate different layout patterns, allowing for rapid construction and the option of relocation without the need for demolition (Chumprom et al., 2024; Palanikumar and Kumar, 2016). Color differentiation can also assist in defining boundaries and designating specific areas to prevent water pooling. Nevertheless, the cement industry significantly contributes to carbon dioxide emissions, a leading factor in global warming. Additionally, the transportation of cement and emissions from factory stacks generate particulate matter, which adversely impacts both communities and the environment. Consequently, reducing cement usage is imperative, necessitating the exploration of alternative solutions.

Addressing the dual issues of waste management and the reduction of cement consumption, this study proposes the production of interlocking pavers using foam waste as an alternative binder to cement. This approach aims to mitigate the volume of foam waste and decrease the reliance on cement in paver manufacturing. If the development of foam-based interlocking pavers fulfills the intended objectives, it could provide an effective means to curtail greenhouse gas emissions while addressing the persistent problem of non-biodegradable waste. The research involves blending fine sand with a dissolved foam solution to determine the optimal ratio that ensures adequate

strength, durability, and lightweight properties. Additionally, this method seeks to add new value to foam waste, contributing to the creation of high-quality building materials. Moreover, this study presents a novel approach to foam waste disposal, potentially alleviating environmental concerns.

Research Methodology

1. Materials preparation

The foam solution (Figure 1) was prepared by dissolving foam in gasoline at a ratio of 30 wt%. Natural sand from the river with a specific gravity of 2.49 was applied in aggregate. Sand was transferred into a hot-air oven at 110 °C which all moisture in the aggregate is eliminated through oven drying until the aggregate attains a constant weight. The moisture content of dried sand was about 3.9 %. Figure 2 presents cumulative passing graph of sand particles that passes through a particular sieve size. The curve on the graph illustrates the distribution behaviour of sand particle sizes. A gradually sloping curve suggests a wider range of particle sizes (< 4 mm.).



Figure 1 Mixed foam solution from 30 wt% foam waste in gasoline.

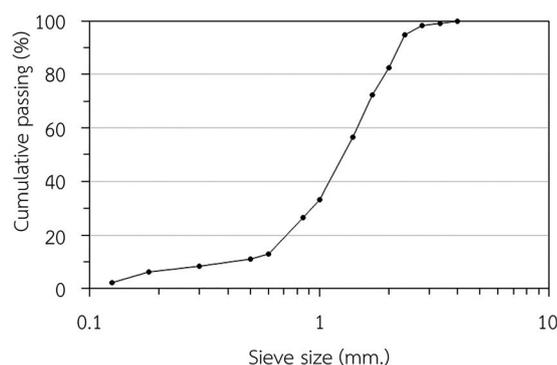


Figure 2 Cumulative passing of sand particle in sieve analysis.

2. Samples preparation and Testing method

Foam binder was prepared from mixed foam solid waste at 30 wt% in gasoline. Foam binder was then used as a bonding agent in the different ratio of 10, 20, 30, 40 and 50 wt% by mixed with sand. The mixtures were pressed in the cubic mold with the length of 5 cm. After molding, the workpieces are removed from the mold and left for 3 hours in a fume hood to eliminate gasoline in binder. Physical properties of the samples were measured by Archimedes method in accordance with ASTM C373-14a (ASTM C373-14a, 2014). This method was applied to determine the relationship

between bulk density (D), porosity (P) and water absorption (W) by calculated from dry weight (M_D), wet weight (M_W) and submerged weight (M_S) as follows (Equation (1) - (3)):

$$D = \frac{(M_D)}{(M_W - M_S)} \quad (1)$$

$$P = \frac{(M_W - M_D)}{(M_W - M_S)} \times 100\% \quad (2)$$

$$W = \frac{M_W - M_D}{M_D} \times 100\% \quad (3)$$

Compressive strength refers to ability of the samples to withstand axial loads without failing when subjected to compression. It is defined as the maximum compressive stress that can bear before failure. It is important mechanical property, which ensure to support expected loads safely. It was tested using the methods specified in ASTM C140 (ASTM C773-88, 2011). All sample tests were repeated 10 times to ensure the accuracy of the results.

Results and Discussions

1. Forming samples

In this study, sand was mixed with a saluted foam binder in varying proportions ranging from 10 to 50 wt%, as illustrated in Figure 3. The effect of binder content on the cohesion and formability of the sand mixture was clearly observable across this range. At lower binder concentrations specifically 10 wt%, the adhesion between sand particles was noticeably weak (Figure 3(a)). This insufficient binding resulted in a loosely structured mixture with poor integrity, making it unsuitable for effective molding or shaping. As the foam binder content increased to within the range of 20 to 40 wt%, a significant improvement in particle cohesion was observed. The enhanced inter-particle bonding allowed the material to retain a well-defined cubic shape upon molding, as evidenced in Figure 3(b) through (d). This indicates that the foam binder at this concentration range successfully penetrated the interstitial spaces between sand grains, creating a stable internal matrix capable of maintaining form without collapse or cracking. However, when the foam binder concentration of 50 wt% (Figure 3(e)), the mixture became excessively fluid, leading to a slurry-like consistency. This over-saturation not only compromised the structural integrity of the molded specimen but also resulted in practical processing issues, such as poor demolding due to surface adhesion within the mold. The high moisture and binder content interfered with shape retention and significantly hindered sample removal. Given these observations, binder concentrations of 20, 30, and 40 wt% were identified as the most promising for further investigation. Samples within this optimal range exhibited desirable forming behavior, with successful molding outcomes and no evidence of crack formation. Consequently, these compositions were selected for subsequent testing to evaluate their physical and mechanical properties, including density, compressive strength, and durability, to determine their suitability for construction or material applications.

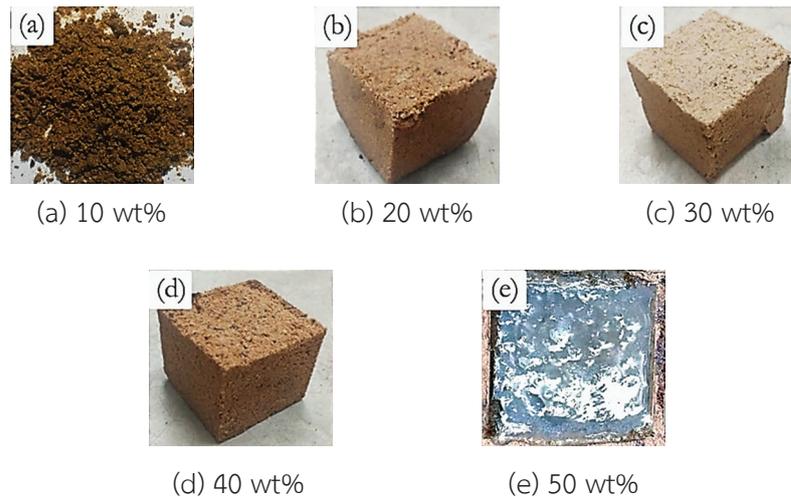


Figure 3 Interlocking pavers with a different foam binder.

2. SEM analysis

SEM micrographs presented in Figure 4 provide valuable insights into the microstructural development of paver block samples fabricated with varying foam binder contents, ranging from 20 to 40 wt%. These high-resolution images offer a deeper understanding of the interface characteristics and internal bonding behavior resulting from different binder concentrations. In the sample containing 20 wt% foam binder (Figure 4(a)), the microstructure reveals distinct micro-cracks and loosely packed sand particles. These cracks are primarily located at the inter-particle interfaces, suggesting that the foam binder was insufficient to form a continuous and cohesive matrix. The limited binder content failed to effectively bridge the sand particles, leading to poor particle adhesion and internal stress concentrations, which could compromise the material's mechanical integrity during handling or under loading conditions. In contrast, with an increase to 30 wt% foam binder content (Figure 4(b)), a marked improvement in microstructural cohesion is observed. The binder uniformly coats the sand grains and thoroughly infiltrates the interstitial voids between particles. This suggests a well-distributed foam network that enhances interparticle bonding and promotes densification, thereby minimizing the formation of micro-cracks and discontinuities. At a 40 wt% binder content (Figure 4(c)), the microstructure shows an even more robust and homogeneous distribution of the foam matrix throughout the sand framework. The foam binder not only permeates the particle interfaces but also appears to partially fill the micro-pores, contributing to a denser, more compact structure. The improved contact and cohesion at the microscopic level are expected to significantly enhance the material's mechanical properties, such as compressive strength and resistance to water infiltration, making this composition particularly suitable for structural and outdoor applications. These observations highlight the critical role of foam binder content in shaping the internal structure and performance of paver blocks. The progression from micro-cracked, under-bound structures to well-bonded, compact matrices demonstrates a clear correlation between binder dosage and material integrity at the micro level.

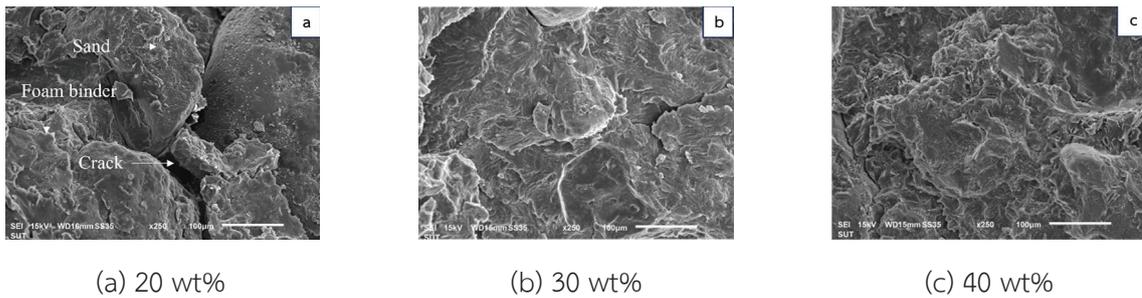


Figure 4 SEM microstructures of fracture surfaces of interlocking paver samples with a different foam binder.

3. Physical property

To understand the influence of foam binder content on the microstructure and physical integrity of paving block samples, a systematic investigation was conducted, focusing on key parameters of apparent density, porosity, and water absorption. These physical properties are critical in determining the mechanical performance and long-term durability of construction materials, particularly those derived from unconventional or recycled inputs. Figure 5 illustrates the variation in apparent density of samples containing different proportions of foam binder (ranging from 20 to 40 wt%). It was observed that the apparent density of the sample incorporating 20 wt% foam binder was approximately 1.41 g/cm^3 . At this concentration, the binder initiates bonding among sand particles, contributing to a moderately compact structure. However, the extent of pore filling remains limited, and a significant proportion of interstitial voids persists. An increase in foam binder content to 30 wt% resulted in a notable improvement in densification, with the apparent density rising to 1.51 g/cm^3 . This enhancement can be attributed to more effective inter-particle bonding facilitated by the foam matrix, which acts as a bridging medium between sand grains. The increase in density at this stage indicates more efficient packing and reduced internal porosity, suggesting that the foam solution aids in closing micropores and enhancing particle cohesion. Interestingly, at 40 wt% foam binder, the apparent density increased further to 1.68 g/cm^3 . This result may appear counterintuitive at first, given the inherently low-density nature of foam; however, it implies that the binder extensively infiltrated and occupied the void spaces within the granular matrix. The penetration of foam at this concentration appears to contribute to a more homogenized microstructure, effectively reducing large air voids and distributing the binder uniformly across particle surfaces. Despite the increase in apparent density, it is important to consider that excessive binder content may lead to over-saturation and a loss of granular skeleton integrity, which, in some cases, can manifest as higher porosity in the solidified structure if not properly cured. Therefore, the relationship between foam content and densification is not merely linear but depends heavily on the microstructural balance between binder infiltration and aggregate skeleton preservation. These findings underscore the critical role of binder optimization in achieving the desired performance characteristics in foam-based construction composites. The observed trends suggest that a binder concentration of approximately 30 wt% may offer an optimal balance between density enhancement and structural stability, while higher concentrations should be evaluated cautiously due to potential changes in pore architecture and mechanical behavior.

Figure 6 presents the apparent porosity values measured in the interlocking paver specimens, providing insight into the microstructural evolution resulting from varying foam binder contents. The observed porosity levels were directly linked to the presence of open pore defects within the matrix. These defects are indicative of incomplete particle packing and insufficient binder infiltration. Both are key determinants of the degree of densification in the composite system. The reduction in apparent porosity with increasing foam binder content can be primarily attributed to the enhanced infiltration capability of the liquid foam. The foam binder effectively penetrates the interstitial voids between sand particles, forming a continuous matrix that bridges and seals the open pore structures. As the foam content increases, it more thoroughly coats the sand grain surfaces and fills micropores, resulting in a more compact and cohesive matrix. This microstructural refinement minimizes unfilled spaces and significantly reduces the occurrence of open pores, thereby promoting improved densification.

Water absorption measurements, also shown in Figure 7, provide complementary evidence regarding the permeability and internal structure of the samples. The ability of water to penetrate the material is directly influenced by pore volume, pore interconnectivity, and surface adhesion characteristics. It was observed that water absorption consistently decreased as the foam binder content increased, further validating the role of the foam solution in reducing porosity and enhancing structural integrity. This trend was visually corroborated by the internal surface analysis in Figure 7, which displayed a notable reduction in visible voids commonly referred to as air pockets in specimens with higher foam content. As the foam solution infiltrated the granular matrix, it effectively displaced entrapped air and filled void regions, thereby limiting the ingress pathways for water. The depletion of these voids through foam infiltration not only reduced water absorption but also contributed to the overall mechanical stability and moisture resistance of the hardened paver blocks. Moreover, the enhanced adhesion between sand particles, facilitated by the foam binder, further restricted water movement through the matrix by eliminating capillary channels and increasing surface contact among the grains. This synergistic effect of pore sealing and particle bonding demonstrates that foam binder content is a key variable in tailoring both porosity and water resistance in composite paving systems.

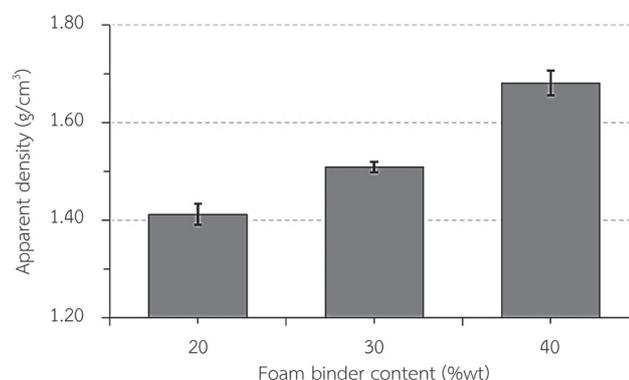


Figure 5 Densification of the interlocking pavers with different foam binder contents.

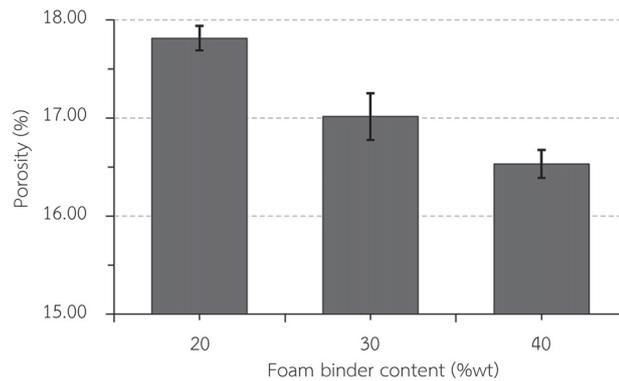


Figure 6 Porosity of the interlocking pavers with different foam binder contents.

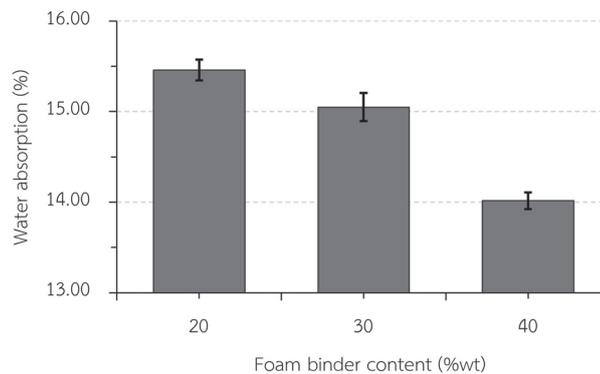


Figure 7 Water absorption of the interlocking pavers with different foam binder contents.

Compressive strength is a critical mechanical property used to evaluate the ability of interlocking paver blocks to resist compressive forces without failure. As these blocks are frequently employed in pavement and structural applications, where they are subjected to both static and dynamic loading conditions of compressive strength serves as a key indicator of their overall quality, durability, and structural suitability. Figure 8 illustrates the compressive strength of interlocking blocks fabricated with varying foam binder contents, ranging from 20 wt% to 40 wt%. The results demonstrate a clear correlation between binder content and the mechanical performance of the composite system. At 20 wt% foam binder, the blocks exhibited a compressive strength of approximately 23.68 MPa, which already exceeds the standard minimum threshold of 20 MPa commonly required for load-bearing paver applications (Oluwarotimi et al., 2021). As the foam binder content increased beyond 30 wt%, a progressive enhancement in compressive strength was observed. This improvement can be attributed to increased matrix densification and enhanced microstructural cohesion resulting from more effective binder distribution. The foam binder, acting as both a filling agent and an adhesive, promotes stronger interfacial bonding between sand particles, reduces internal porosity, and improves load-transfer efficiency throughout the granular skeleton. These factors collectively contribute to improved mechanical integrity and higher load-bearing capacity. The highest compressive strength was recorded in the samples containing 40 wt% foam binder, suggesting that this concentration may represent an optimal balance between particle packing and matrix continuity. This composition likely facilitated maximum particle encapsulation and void reduction, resulting in a reinforced and uniform structure capable of withstanding higher compressive loads without microcracking or brittle failure. It is important

to note, however, that while increasing foam content can enhance strength up to a point, excessive binder may lead to diminishing returns due to over-saturation and a potential reduction in rigidity. Nevertheless, within the investigated range of 20 - 40 wt%, all samples maintained compressive strength values above the standard engineering requirement, confirming their structural viability for practical use in interlocking paver applications. In summary, the findings confirm that foam binder content is a decisive factor in optimizing the compressive performance of interlocking pavers. The behavior observed in this study highlights the synergistic relationship between binder-induced densification and microstructural integrity. These results support the use of optimized foam-binder formulations as a sustainable, high-performance alternative for the production of eco-friendly and structurally reliable paving blocks. The findings from this study suggest that the approach can be applied at the community level through the implementation of planned waste separation systems and the establishment of community groups to produce low-cost and environmentally friendly products.

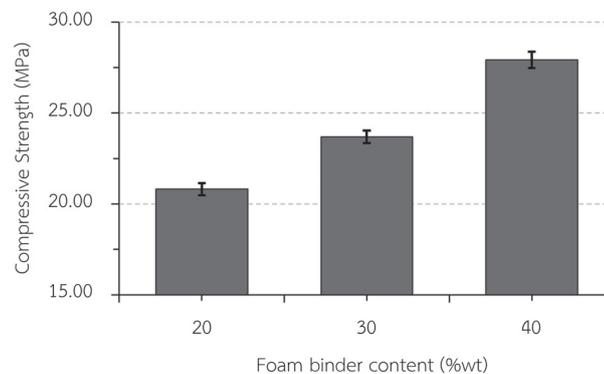


Figure 8 Compressive strength of the interlocking pavers with different foam binder contents.

Conclusions

In this study, interlocking paver blocks were fabricated using mixtures of sand and dissolved foam binder at varying proportions from 10 to 50 wt%. The experimental results showed that paver blocks could be molded successfully without edge fractures when the foam binder content ranged between 20 - 40 wt%. As the foam content increased, the samples demonstrated improved densification, accompanied by a significant reduction in porosity and water absorption. This improvement is attributed to the foam effectively filling the micropores within the matrix. Furthermore, compressive strength values increased with higher foam content, reaching the maximum strength at 40 wt% binder. Notably, paver blocks produced with 20 - 40 wt% foam binder met the standard requirements for structural performance, confirming the potential of foam waste as a viable alternative binder to cement in the production of sustainable interlocking pavers.

Acknowledgements

This research was supported by Sisaket Rajabhat University.

References

- ASTM C373-14a. (2014). *Standard Test Method for Water Absorption, Bulk Density, Apparent Porosity, and Apparent Specific Gravity of Fired Whiteware Products, Ceramic Tiles, and Glass Tiles*. West Conshohocken, PA, USA.
- ASTM C773-88. (2011). *Standard Test Method for Compressive (Crushing) Strength, of Fired Whiteware Materials*. West Conshohocken, PA, USA.
- Chumprom, P., Charoennatkul, C., Boonrasi, P., Laksanakit, C., Swasdi, S., Sookmanee, P. and Thongkun, T. (2024). The Feasibility of Using Rubberwood Bottom Ash in The Mixture of Interlocking Block. *Research on Modern science and Utilizing Technological Innovation Journal (RMUTI Journal)*, 17(1), 15-26. <https://ph01.tci-thaijo.org/index.php/rmutijo/article/view/254604/172132> (in Thai)
- Ganivet, E. (2020). Growth in Human Population and Consumption Both Need to be Addressed to Reach an Ecologically Sustainable Future. *Environment, Development and Sustainability*, 22, 4979-4998. <https://doi.org/10.1007/S10668-019-00446-W>
- Güven, E.D., Akinci, G. and Temel, D. (2023). Driving Forces on Household Solid Waste Management Behaviors: A Research for the City of Izmir, Türkiye. *Industrial and Domestic Waste Management*, 3(1), 1-16. <https://doi.org/10.53623/idwm.v3i1.165>
- Hollerova, A., Hodkovicova, N., Blahova, J., Faldyna, M., Marsalek, P. and Svobodová, Z. (2021). Microplastics as a Potential Risk for Aquatic Environment Organisms - A Review. *Acta Veterinaria Brno*, 90(1), 99-107. <https://doi.org/10.2754/AVB202190010099>
- Hu, X. and Meng, Z. (2024). An Overview of Edible Foams in Food and Modern Cuisine: Destabilization and Stabilization Mechanisms and Applications. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 23(1), 1-30. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.13284>
- Lozano, P., Villa, R., Salas, R., Maciá, M., Velasco, F., Altava, B. and García-Verdugo, E. (2025). How to Easily Depolymerize Polyurethane Foam Wastes by Superbase Catalysts in Ionic Liquids Below 100 °C. *Angewandte Chemie*, 137(5), 3-6. <https://doi.org/10.1002/ange.202418034>
- Mishra, D.K. (2024). Sustainability in Solid Waste Management to Reduce Environmental Impact and Improve Resource Efficiency. *International Journal of Research and Review in Applied Science, Humanities, and Technology*, 1(2), 67-75. <https://doi.org/10.71143/52raj174>
- Oluwarotimi, O., Ayoyinka, M., Oluwatomisin, O. and Boksun, K. (2021). Solid Waste Management in Developing Countries: Reusing of Steel Slag Aggregate in Eco-Friendly Interlocking Concrete Paving Blocks Production. *Case Studies in Construction Materials*, 14, <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2021.e00532>
- Palanikumar, E. and Kumar, P.U. (2016). Structural Design of Interlocking Concrete Paving Block. *International Journal of Engineering Research and Technology*, 5(12), 230-232. <https://doi.org/10.17577/IJERTV5IS120162>
- Sojobi, A.O., Aladegboye, O.J. and Awolusi, T.F. (2018). Green Interlocking Paving Units. *Construction and Building Materials*, 173, 600-614. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.04.061>

การพัฒนาแบบจำลองสารสนเทศอาคารด้วยเครื่องสแกนเลเซอร์ 3 มิติ เพื่อการอนุรักษ์โบราณสถานของศาลเจ้าโรงเกือก : กรณีศึกษาการประเมินผลกระทบจากอุทกภัย

The Development of Building Information Modeling (BIM) with 3D Laser Scanner for Rong Kueak Shrine Conservation: A Case Study of Flood Impact Assessment

ปริฉัตร จันทะแสน^{1*} และฐิติรัตน์ ปันบำรุงกิจ¹

Parichart Chanthasaen^{1*} and Thitirat Panbamrungkij¹

Received: October 16, 2024; Revised: November 15, 2024; Accepted: November 26, 2024

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาการพัฒนาแบบจำลองสารสนเทศอาคารด้วยเครื่องสแกนเลเซอร์สามมิติเพื่อการอนุรักษ์โบราณสถานของศาลเจ้าโรงเกือก กรณีศึกษาการประเมินผลกระทบจากอุทกภัย เนื่องจากปัจจุบันศาลเจ้าโรงเกือก แขวงตลาดน้อย เขตสัมพันธวงศ์ กรุงเทพมหานคร กำลังประสบปัญหาการทรุดโทรมและมีปัญหาน้ำท่วมขังบ่อยครั้ง ผู้วิจัยจึงจัดทำแบบจำลองสารสนเทศอาคาร เพื่อการเก็บข้อมูลรูปแบบสามมิติด้วยเครื่องสแกนเลเซอร์สามมิติ ผลลัพธ์ที่ได้ข้อมูลมีความถูกต้องเท่ากับ 2.9 มิลลิเมตร ซึ่งอยู่ในระดับความถูกต้องที่เชื่อถือได้ตามเกณฑ์งานสำรวจชั้น 3 ตามมาตรฐานของ FGCC1989 จากนั้นผู้วิจัยจึงนำข้อมูลมาพัฒนาเป็นแบบจำลองสารสนเทศอาคารโดยมีมาตรฐานรายละเอียดของแบบจำลองที่ระดับ (LOD.200) ซึ่งสามารถแสดงโครงสร้างทั่วไปของอาคาร มาวิเคราะห์ร่วมกับข้อมูลแบบจำลองความสูงเชิงเลขและข้อมูลน้ำท่วมขังจากสำนักกระแสน้ำกรุงเทพมหานคร ซึ่งแบ่งเป็น 5 ระดับ คือ 0.1 0.3 0.5 0.8 และ 1 เมตร โดยอ้างอิงจากข้อมูลหตุวงรอบที่มีค่าระดับความสูงต่ำสุดในพื้นที่ศึกษาเพื่อใช้ในการประมาณค่าความเสียหายที่เกิดขึ้น ผลการศึกษาพบว่าที่ระดับ 0.1 เมตร พื้นที่เสียหายมีขนาด 197.79 ตร.ม. ระดับน้ำ 0.3 เมตร พื้นที่เสียหายมีขนาด 477.43 ตร.ม. และที่ระดับน้ำ 0.5 0.8 และ 1 เมตร พื้นที่เสียหายเท่ากันรวมพื้นที่ประมาณ 987.33 ตร.ม. ค่าความเสียหายที่เกิดขึ้นที่ระดับ 0.1 เมตร เท่ากับ 44,502.75 บาท ที่ระดับ 0.3 และ 0.5 เมตร เพิ่มขึ้นจากระดับ 0.1 เมตร ประมาณ 41.43 % และ 832.58 % จากนั้นความเสียหายจะคงที่จนถึงที่ระดับน้ำท่วม 0.8 เมตร และเพิ่มขึ้นอีกประมาณ 902.78 % จากระดับ 1 เมตร เนื่องจากการประมาณราคาของงานระบบไฟฟ้าที่เพิ่มเข้ามา โดยข้อมูลประมาณค่าความเสียหายที่เกิดขึ้นสามารถนำไปวางแผนเพื่อปรับปรุง ก่อสร้างหรือซ่อมแซมให้กับเจ้าหน้าที่ผู้ดูแลหรืองานอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้องได้ รวมถึงการวางแผนการป้องกันเพื่อการอนุรักษ์โบราณสถานได้ดียิ่งขึ้น

คำสำคัญ : เครื่องสแกนเลเซอร์สามมิติ; จุดพิกัดสามมิติ; แบบจำลองสารสนเทศอาคาร

¹ คณะอักษรศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

¹ Faculty of Arts, Chulalongkorn University

* Corresponding Author, Tel. 0 2218 4825, E - mail: thitirat.pa@chula.ac.th

Abstract

This research focused on the development of Building Information Modeling (BIM) with a 3D laser scanner for the conservation of Rong Kueak Shrine, focusing on a flood impact assessment case study: The Rong Kueak Shrine, situated in Talat Noi, Samphanthawong District, Bangkok that had been experiencing deterioration exacerbated by recurrent flooding. Thus, a BIM model was created by acquiring data through 3D laser scanning, which produced a highly accurate 3D point cloud, with a precision level of 2.9 mm. The data collected were subsequently utilized to construct a BIM model with a Level of Detail (LOD) of 200. Analysis was conducted in conjunction with Digital Elevation Model (DEM) data and flood data provided by the Bangkok Metropolitan Drainage Department, simulating flood levels of 0.1, 0.3, 0.5, 0.8, and 1 m., referencing the lowest elevation benchmarks within the study area to estimate potential damages. The assessment evaluated the extent of damage sustained by Rong Kueak Shrine to estimate the associated repair costs. Results revealed that at a flood level of 0.1 m, the damaged area encompassed 197.79 sq.m. At 0.3 m., the damage expanded to 477.43 sq.m. For flood levels of 0.5, 0.8, and 1 m., the damage affected totaling approximately 987.33 sq.m. The estimated damage cost at 0.1 m. was 44,502.75 THB, increasing by approximately 41.43 % and 832.58 % at 0.3 and 0.5 m., respectively. The damage cost remained constant until the 0.8 m. level and increased by approximately 902.78 % at the 1 m. level due to the added cost of electrical system repairs. The calculated damage costs can be used to plan improvements, construction, or repairs by responsible authorities or related parties. Additionally, this information supports the development of preventive measures and strategies for the enhanced conservation of the heritage site.

Keywords: 3D Laser Scanning; Point Cloud; BIM

บทนำ

ศาลเจ้าโรงเกือกเป็นศาสนสถานสำคัญที่มีคุณค่าทางประวัติศาสตร์ วัฒนธรรม และเป็นศูนย์รวมจิตใจแห่งหนึ่งของชุมชนในย่านตลาดน้อยซึ่งเป็ย่านประวัติศาสตร์ที่สำคัญของกรุงเทพมหานคร ปัจจุบันศาลเจ้าโรงเกือกกำลังทรุดโทรมจากกระบวนการทางธรรมชาติซึ่งมีสาเหตุมาจากอุทกภัย โดยเฉพาะในช่วงฤดูฝนที่มีฝนตกหนักหรือฝนตกติดต่อกันเป็นเวลานาน ประกอบกับน้ำล้นตลิ่งและการขยายตัวของเมืองทำให้มีสิ่งปลูกสร้างหนาแน่น ส่งผลให้พื้นที่โดยรอบศาลเจ้าโรงเกือกระบายน้ำไม่ทันเกิดน้ำท่วมขัง เข้าเอ่อล้นพื้นที่เกือบทุกปี ดังรูปที่ 1 ดังนั้นการอนุรักษ์และฟื้นฟูศาสนสถานแห่งนี้จึงมีความสำคัญเป็นอย่างมากและจำเป็นต้องมีการสำรวจองค์ประกอบเชิงโครงสร้างดั้งเดิมเพื่อเป็นแนวทางในการอนุรักษ์และการหาวัสดุทดแทนที่ใกล้เคียงวัสดุดั้งเดิมมากที่สุด



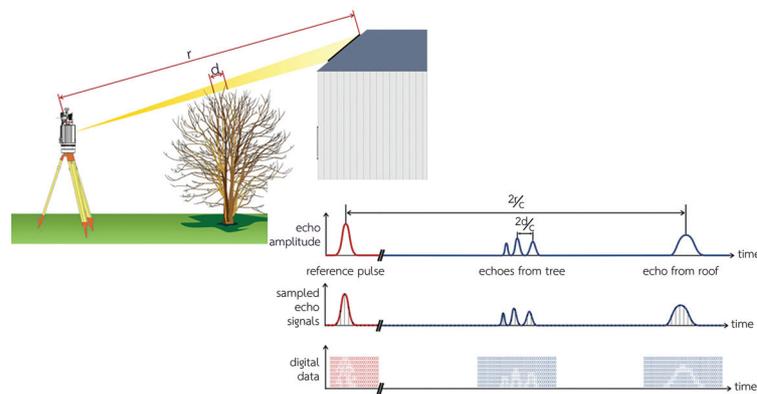
รูปที่ 1 น้ำท่วมขังบริเวณศาลเจ้าโรงเกือก ปี พ.ศ. 2564 (Thai PBS News, 2021)

ปัจจุบันเทคโนโลยีการสำรวจเก็บข้อมูลด้วยเครื่องสแกนเลเซอร์สามมิติ (3D Laser Scanning) ที่มีบทบาทมากขึ้นในการอนุรักษ์โบราณสถาน เพราะสามารถเก็บข้อมูลในรูปแบบจุดพิกัดสามมิติ (Point Cloud) ของวัตถุ อาคาร หรือพื้นที่ที่ต้องการเพื่อนำมาจำลองเป็นภาพสามมิติทำให้กระบวนการอนุรักษ์สามารถทำได้สะดวก รวดเร็วและแม่นยำ โดยการสำรวจจริงวัดที่ไม่ต้องสัมผัสกับอาคารหรือพื้นที่ที่มีความอ่อนไหวและชำรุดเสียหายง่าย ข้อมูลที่ได้จากเครื่องสแกนเลเซอร์สามมิติสามารถนำมาพัฒนาเป็นแบบจำลองสารสนเทศอาคาร (Building Information Modelling: BIM) ที่สามารถใส่องค์ประกอบเพื่อสร้างแบบจำลองเสมือนของอาคาร จากนั้นจึงแสดงผลออกมาในรูปแบบสองมิติและสามมิติ ข้อมูลที่ได้จาก BIM จะนำมาแบ่งแยกองค์ประกอบอาคารและจัดประเภทข้อมูลได้อย่างชัดเจน โดยการศึกษาครั้งนี้ผู้วิจัยมีวัตถุประสงค์หลักคือ เพื่อสร้างแบบจำลองสามมิติในระบบสารสนเทศอาคารจากเครื่องสแกนเลเซอร์สามมิติ และเพื่อทดสอบการประเมินผลกระทบของอุทกภัยจากข้อมูลแบบจำลองสารสนเทศอาคารของศาลเจ้าโรงเกือก ซึ่งจากผลการศึกษาสามารถคาดการณ์ความเสียหายที่เกิดขึ้น รวมถึงการวางแผนการป้องกัน และเป็นข้อมูลเบื้องต้นในการออกแบบมาตรการป้องกันน้ำท่วม เช่น การยกระดับพื้นที่ที่เสี่ยงต่อการเกิดน้ำท่วม หรือการออกแบบเส้นทางระบายน้ำที่เหมาะสมในอนาคตได้

แนวคิด ทฤษฎี งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

หลักการทำงานของเครื่องสแกนเลเซอร์สามมิติ

การทำงานของเครื่องสแกนเลเซอร์สามมิตินั้นมีหลักการวัดอยู่สองแกน ได้แก่ แกนราบ (Horizontal) และ แกนตั้ง (Vertical) ของกล้อง โดยมีจุดกำเนิดเลเซอร์เป็นจุดศูนย์กลางในการใช้อ้างอิงตำแหน่งวัตถุที่ถูกตกกระทบทั้งหมด ซึ่งสามารถคำนวณตำแหน่งได้จากองค์ประกอบสามประการ คือ มุมราบ มุมตั้ง และระยะทางจากจุดกำเนิดไปยังวัตถุ สำหรับการคำนวณมุมราบและมุมตั้งนั้นอ้างอิงจากมุมในการหมุนของแกนราบและแกนตั้งของกล้องแต่การวัดระยะทางของเครื่องเลเซอร์สแกนภาคพื้นดินไปยังวัตถุนั้นอาศัยหลักการสามรูปแบบ คือ การวัดระยะเวลาของแสงเลเซอร์ (Pulse Round Trip Time) การวัดความต่างเฟสของคลื่น (Phase Shift Measurement) และการรังวัดสามเหลี่ยม (Triangulation) เป็นต้น ดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 การทำงานของเครื่องสแกนเลเซอร์สามมิติ (Peifer and Brieze, 2007)

สำหรับหลักการทำงานของเครื่องเลเซอร์สแกนภาคพื้นดินที่นำมาใช้ในการศึกษาครั้งนี้ จะอาศัยหลักการวัดระยะทางด้วยเวลาของการเดินทางแสงเลเซอร์ด้วยสมการที่ (1)

$$r = c \cdot \Delta t / 2 \tag{1}$$

โดยที่

- r คือ ระยะทางที่เลเซอร์เดินทางไปยังวัตถุ
- c คือ ความเร็วแสงที่ 299,792,458 m/s
- t คือ เวลาที่แสงเลเซอร์ใช้ในการเดินทางไปและกลับ

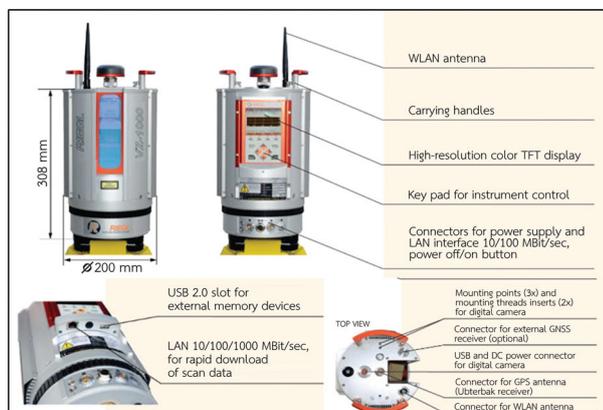
การเก็บข้อมูลของเครื่องเลเซอร์สแกนภาคพื้นดิน การปล่อยคลื่นเลเซอร์ออกไปแต่ละครั้งอาจกระทบวัตถุมากกว่า 1 วัตถุ เช่น การกระทบขอบผนังอาคารแล้วสะท้อนกลับเป็นคลื่นแรก คลื่นบางส่วนทะลุผ่านไปกระทบใบไม้สะท้อนวัตถุด้านหลังตามมาเป็นคลื่นที่สองและคลื่นที่สาม ตามลำดับ หากปล่อยคลื่นออกไปยังทิศทางที่ไม่มีวัตถุตั้งอยู่หรือไกลเกินกว่าที่กล้องจะตรวจจับได้จุดบริเวณนั้นก็จะไม่มีข้อมูล

การตั้งเครื่องเลเซอร์สแกนภาคพื้นดินต้องพิจารณาหลายปัจจัยในการเก็บข้อมูลเพื่อให้ได้ข้อมูลที่สมบูรณ์และถูกต้องมากที่สุด เริ่มจากการวางตำแหน่งเครื่องเลเซอร์สแกนภาคพื้นดินควรตั้งอยู่ในตำแหน่งที่มีมุมมองครอบคลุมวัตถุหรือพื้นที่ที่ต้องการสแกน เพื่อให้ได้ข้อมูลที่ครบถ้วนและต้องใช้หลายตำแหน่งเพื่อหลีกเลี่ยงจุดบอดที่เลเซอร์ไม่สามารถเข้าถึงได้ ระดับความสูงของกล้องควรคำนึงถึงความสามารถในการสแกนส่วนบนและส่วนล่างของวัตถุด้วย เช่น การตั้งกล้องในระดับสายตาหรือระดับที่เหมาะสมสำหรับพื้นที่เป้าหมาย เพื่อให้สามารถเก็บข้อมูลได้ทั้งส่วนบนและส่วนล่างของพื้นที่ได้ครบถ้วน นอกจากนี้ การวางตำแหน่งเครื่องเลเซอร์สแกนภาคพื้นดินให้เกิดการทับซ้อนของจุดสแกนระหว่างการสแกนในตำแหน่งต่าง ๆ จะช่วยให้การรวมข้อมูลในขั้นตอนการประมวลผลมีความแม่นยำมากยิ่งขึ้น และความเสถียรของกล้องเป็นปัจจัยสำคัญในการป้องกันการสั่นสะเทือนหรือการเคลื่อนไหวระหว่างการสแกนเก็บข้อมูล ซึ่งจะช่วยลดการเกิดข้อผิดพลาด และผลลัพธ์มีความถูกต้องสูง รวมไปถึงข้อมูลมีความคมชัดตามสภาพพื้นที่มากที่สุด

แม้ว่าเครื่องเลเซอร์สแกนภาคพื้นดินจะมีข้อดีมากมายแต่ยังมีข้อจำกัดที่ต้องพิจารณา ในกรณีที่พื้นที่สำรวจมีสิ่งกีดขวางหรือบดบัง อาจทำให้ไม่สามารถเก็บข้อมูลได้ครบถ้วน เช่น เฟอร์นิเจอร์หรือเครื่องใช้ไฟฟ้าต่าง ๆ ที่อยู่ตามผนังอาคาร เป็นต้น นอกจากนี้พื้นผิวที่มีการสะท้อนแสงสูง เช่น กระจกหรือโลหะ มักทำให้ข้อมูลที่ได้อาจมีความผิดพลาดอีกประการหนึ่งคือ ค่าใช้จ่ายของเครื่องเลเซอร์สแกนภาคพื้นดินที่ค่อนข้างสูง และขนาดของอุปกรณ์ค่อนข้างใหญ่ อาจทำให้การเคลื่อนย้ายในพื้นที่บางแห่งทำได้ยาก รวมไปถึงการใช้งานต่อเนื่องอาจต้องใช้พลังงานสูงในการทำงาน จึงจำเป็นต้องมีแหล่งพลังงานเพิ่มเติมในการทำงานในระยะเวลาสั้น

อุปกรณ์ที่ใช้ในการศึกษา

ในการศึกษาวิจัยนี้ใช้ RIEGL VZ1000 เป็นเครื่องเลเซอร์สแกนภาคพื้นดินความเร็วสูงจากประเทศออสเตรีย ประเภท Noncontact Class 1 ที่มีความปลอดภัยกับดวงตา ซึ่งถูกออกแบบสำหรับการทำงานสำรวจภูมิประเทศ เหมือนโบราณคดีและมรดกทางวัฒนธรรม รวมทั้งงานด้านการตรวจสอบติดตาม โดยมีความละเอียดถูกต้องแม่นยำสูง และมีขนาดกระทัดรัด น้ำหนักเบาและสามารถสแกนเก็บข้อมูลต่อเนื่องได้นานสูงสุด 5 ชั่วโมง อีกทั้งสามารถทำงานได้ง่ายแม้ในพื้นที่ที่มีข้อจำกัด รวมทั้งในสภาพอากาศที่ไม่เอื้ออำนวย เครื่องเลเซอร์สแกนภาคพื้นดิน RIEGL VZ1000 มาพร้อมกับเครื่องรับสัญญาณ GNSS ในตัวพร้อมเสาอากาศ และกล้องดิจิทัล NIKON D700 ที่มีความละเอียด 12.1 ล้านพิกเซล ซึ่งระยะการสแกนตั้งแต่ 2.5 เมตรถึง 1,400 เมตร มุมการสแกนทางราบ 360° และทางตั้ง 100° มีความถูกต้อง 0.8 มิลลิเมตร และแม่นยำ 0.5 มิลลิเมตร (RIEGL Laser Measurement Systems GmbH, 2012) ดังรูปที่ 3



รูปที่ 3 เครื่องสแกนเลเซอร์สามมิติ RIEGL VZ1000 (RIEGL Laser Measurement Systems GmbH, 2012)

หลักการและกระบวนการของแบบจำลองสารสนเทศอาคาร

ปัจจุบันแบบจำลองข้อมูลสารสนเทศอาคารหรือ BIM กำลังเป็นที่นิยมมากขึ้นในอุตสาหกรรมสถาปัตยกรรม วิศวกรรม การก่อสร้าง ซึ่ง BIM จะสะท้อนสภาพของอาคารที่สร้างขึ้นจริงทั้งการแบ่งส่วนและการจัดประเภทของข้อมูล โดยใช้ Point Cloud ซึ่งกระบวนการนี้เป็นสิ่งจำเป็นเนื่องจากขั้นตอนเดิมนั้นใช้เวลานานและมีโอกาสเกิดข้อผิดพลาดได้ง่าย โดยการทำงานของ BIM คือ การสร้างแบบจำลองอาคาร (Building Model) จากโปรแกรมคอมพิวเตอร์และจะทำการเก็บข้อมูลแบบจำลองพร้อมทั้งข้อมูลสารสนเทศ รวมไปถึงพื้นฐานข้อมูลกลางของระบบ โดยแบบจำลองจะประกอบขึ้นจากองค์ประกอบต่าง ๆ ของอาคาร (Building Component) เช่น พื้น ผนัง เสา ฝ้า ประตูหน้าต่างต่าง และข้อมูลด้านกราฟิก เช่น ขนาด สี และวัสดุ รวมไปถึงข้อมูลที่ไม่ใช่กราฟิก เช่น ข้อมูลผู้ผลิต รุ่น และราคา เป็นต้น และ BIM สามารถแสดงผลแบบจำลองอาคารให้อยู่ในรูปแบบของมุมมอง (View) ที่เหมาะสมตามการใช้งาน เช่น มุมมองแบบสองมิติ ประกอบไปด้วย พื้น รูปด้าน และรูปตัด ส่วนมุมมองแบบสามมิติ ประกอบด้วย รูปทัศนียภาพ และรูป Isometric และ สามารถแสดงผลข้อมูลต่าง ๆ ของแบบจำลองอาคาร เช่น ปริมาณวัสดุ และพื้นที่ใช้สอย (The Association of Siamese Architects Under Royal Patronage, 2015)

การกำหนดมาตรฐานสำหรับการสร้างแบบจำลองสารสนเทศอาคาร เพื่อกำหนดข้อมูลและรายละเอียดของอาคาร เนื่องจากในปัจจุบันมีซอฟต์แวร์ที่หลากหลายในการทำงาน การจัดเก็บไฟล์ข้อมูลที่ต่างกันส่งผลให้ไม่สามารถแลกเปลี่ยนข้อมูลได้อย่างครบถ้วนสมบูรณ์ ในปัจจุบันมีการพัฒนาซอฟต์แวร์ซึ่งมีแนวคิดมาจากแบบจำลองสารสนเทศอาคาร เพื่อนำมาใช้ในงานก่อสร้าง ตัวอย่างเช่น Autodesk Revit ArchiCAD และ Tekla Structures มาตรฐานรายละเอียดขององค์ประกอบอาคารของแบบจำลองสารสนเทศอาคารเรียกว่า LOD หรือ (Level of Development) หมายถึง การกำหนดระดับความละเอียดขององค์ประกอบอาคารและแบบจำลองอาคาร รวมทั้งข้อมูลสารสนเทศที่ประกอบให้สอดคล้องกับการทำงานในขั้นตอนต่าง ๆ สำหรับงานออกแบบทางสถาปัตยกรรม โดยมาตรฐานนี้จะกำหนดค่าเป็นตัวเลข เช่น LOD 100 LOD 200 LOD 300 เป็นต้น หมายถึงการกำหนดขั้นตอนการทำงาน เช่น ขั้นตอนแนวความคิดในการออกแบบ (Conceptual Design) ขั้นตอนพัฒนาแบบ (Design Development) โดยขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์ของการนำ BIM ไปใช้ในการทำงานออกแบบสถาปัตยกรรม และเพื่อให้เกิดความเข้าใจตรงกันของทุกฝ่ายที่เกี่ยวข้อง ทั้งนี้ในการศึกษารั้วนี้ใช้ค่ามาตรฐาน LOD เท่ากับ 200 เนื่องจากสามารถให้รายละเอียดขององค์ประกอบโครงสร้างอาคารได้ครบถ้วน เช่น รูปร่าง ขนาด และตำแหน่งขององค์ประกอบอาคาร เป็นต้น

งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในปัจจุบันแบบจำลองสามมิติได้ถูกพัฒนาขึ้นเป็นจำนวนมาก เนื่องจากแบบจำลองสามารถนำเสนอมุมมองที่ทำให้เห็นภาพเสมือนจริง รวมทั้งความเข้าใจในรูปทรงและสภาพพื้นที่จริงได้มากกว่าภาพสองมิติ มีประโยชน์เป็นอย่างมากกับงานทางด้านสถาปัตยกรรมที่เกี่ยวกับรูปร่างรูปทรงที่มีรายละเอียดและความซับซ้อนสูงรวมทั้งมีความสวยงามอีกด้วย

ในประเทศจีนได้ประยุกต์การสแกนด้วยเลเซอร์แบบภาคพื้นดินในการสร้างแบบจำลองสามมิติของชุมชนดั้งเดิมเพื่อศึกษาหมู่บ้านเฟิงหวง พบว่าเทคนิคการสแกนด้วยเลเซอร์ภาคพื้นดินมีความเหมาะสมเป็นอย่างมากในการการสำรวจการทำแผนที่ และการสร้างแบบจำลอง เนื่องจากมีข้อดีของการวัดแบบไม่สัมผัสกับวัตถุ อีกทั้งยังสามารถตรวจจับวัตถุที่ซับซ้อนได้อย่างแม่นยำ และการทำงานที่มีประสิทธิภาพสูง ซึ่งกระบวนการของการใช้การสแกนด้วยเลเซอร์เพื่อให้ได้ข้อมูลทางสถาปัตยกรรมเพื่อแสดงผลจากการก่อสร้างแบบจำลอง (Lin et al., 2021) เช่นเดียวกับในประเทศจีน หมู่บ้าน HEXINWU เป็นหนึ่งในหมู่บ้าน Hakka โบราณที่มีชื่อเสียงและสำคัญที่สุด ศึกษากระบวนการบันทึกมรดกทางสถาปัตยกรรมของจีนตั้งแต่การใช้เทคนิคการสำรวจสถานที่หลายครั้งจนถึง BIM ในขั้นตอนสุดท้าย ผลการศึกษาดูอธิบายวิธีการสำรวจที่แม่นยำและจัดทำข้อมูลโดยใช้เทคโนโลยีการสแกน เช่น ระบบ Terrestrial Laser Scan (TLS) และอากาศยานไร้คนขับ (Unmanned Aerial Vehicle: UAV) วิธีการสำรวจรวมถึงเทคนิคต่าง ๆ เช่น การเก็บข้อมูล การประมวลผลข้อมูล การรวมข้อมูลและการนำเสนอที่เหมาะสม รวมถึงการสร้างแบบจำลอง BIM จาก Point Cloud แสดงให้เห็นถึงความสามารถในการรวบรวมและบันทึกข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับอาคารได้เป็นอย่างดี ดังนั้นจึงมีประโยชน์เป็นอย่างมากสำหรับการนำเสนอข้อมูลหมู่บ้านโบราณรวมถึงการนำไปประยุกต์ใช้กับบริบทมรดกทางวัฒนธรรมอื่น ๆ ที่มีองค์ประกอบที่ซับซ้อน และการประยุกต์ใช้งานร่วมกับข้อมูลทางภูมิศาสตร์อื่น ๆ สามารถเสนอแผนการท่องเที่ยวและการอนุรักษ์มรดกทางสถาปัตยกรรมในอนาคตได้ (Lin et al., 2020)

อย่างไรก็ตาม การสร้างแบบจำลองข้อมูลอาคารไม่ได้จำกัดเฉพาะอาคารเท่านั้น การประยุกต์เทคโนโลยี BIM กับงานโครงสร้างพื้นฐาน เช่น ถนน เขื่อน สะพาน เครือข่ายการสื่อสาร ระบบน้ำเสีย และอุโมงค์ เป็นต้น เช่น การใช้เทคโนโลยี BIM สำหรับงานโครงสร้างสะพานยุคกลางที่มีความซับซ้อนในเมืองเลกโก ประเทศอิตาลี โดยการใช้เลเซอร์สแกนและรูปภาพควบคู่ไปกับการพัฒนาอัลกอริทึมที่สามารถจัดการกับรูปร่างที่ไม่สม่ำเสมอและซับซ้อนสูงของสะพาน ทำให้การสร้างองค์ประกอบของสะพานและการกำหนดพารามิเตอร์ขั้นสูงประกอบเข้าด้วยกันเพื่อให้ได้ BIM ที่มีความถูกต้องตรงกับสภาพสะพานจริง พบว่าข้อมูล BIM สามารถให้รายละเอียดได้ครบถ้วนพร้อมความสัมพันธ์ของวัตถุและข้อมูลเชิงคุณลักษณะ (Barazzetti et al., 2016) สำหรับการนำเทคโนโลยีสแกนวัตถุสามมิติมาประยุกต์ใช้ร่วมกับงานด้านอื่น ๆ ก็เป็นที่นิยมเช่นกัน เนื่องจากผลลัพธ์ที่ได้มีความละเอียด ถูกต้องสูง รวมทั้งช่วยลดเวลาในการทำงาน เช่น เปรียบเทียบความแตกต่างของการรังวัดปริมาตรดินและถ่านหินในเมืองแม่เมาะโดยใช้การรังวัดด้วยเครื่องเลเซอร์สแกนภาคพื้นดินซึ่งเป็นวิธีการรังวัดที่มีความถูกต้องสูงและใช้ตรวจสอบปริมาตรการขุดดินและถ่านหินของเหมืองแม่เมาะในปัจจุบันเปรียบเทียบกับวิธีการรังวัดด้วยอากาศยานไร้คนขับ ที่ใช้หลักการประมวลผลภาพถ่ายทางอากาศจากอากาศยานแบบปีกตรึง (Fix Wing) รุ่น Wingtra One ประมวลผลแบบ Post Processing Kinematic (PPK) พร้อมหมุดควบคุมภาพถ่ายทางอากาศ โดยผลของการเปรียบเทียบค่าแตกต่างของการรังวัดปริมาตรในพื้นที่ตัวอย่าง 3 พื้นที่ บริเวณเขตบ่อเหมืองแม่เมาะ พบว่าปริมาตรที่รังวัดได้หารด้วยขนาดพื้นที่แตกต่างกันในระดับไม่เกิน 8 เซนติเมตร ซึ่งสามารถนำมาใช้ในทางรังวัดเก็บรายละเอียดที่ไม่ต้องการความละเอียดถูกต้องสูงมากได้ โดยประหยัดเวลาการทำงานภาคสนามและเพิ่มพื้นที่การรังวัดในแต่ละวันได้กว้างมากยิ่งขึ้น (Lokham et al., 2021)

ในประเทศไทยการประยุกต์เทคโนโลยีสแกนเลเซอร์สามมิติกับแบบจำลองสารสนเทศอาคารก็เป็นที่นิยมเช่นเดียวกัน โดยการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีแบบจำลองสารสนเทศอาคารวิเคราะห์เวลาในการอพยพหนีไฟออกจากอาคารเพื่อจัดทำแนวทางการปรับปรุงเส้นทางหนีไฟสำหรับแต่ละพื้นที่ภายในอาคารให้เป็นไปตามกฎกระทรวงและมาตรฐานการออกแบบเส้นทางหนีไฟ (มยผ. 8301) โดยกรมโยธาธิการและผังเมือง (Sangchan and Panchana, 2018) และอีกงานวิจัยได้มุ่งเน้นศึกษาเกี่ยวกับการประยุกต์ใช้แบบจำลองสารสนเทศอาคาร (Building Information Modeling: BIM) ที่เป็นกระบวนการซึ่งสามารถควบคุมการทำงาน โดยการสร้างความเข้าใจร่วมกันของผู้ร่วมงาน ในกระบวนการออกแบบและการก่อสร้าง รวมถึงศึกษากระบวนการใช้แบบจำลองสารสนเทศอาคารเพื่อนำไปสู่การเสนอแนวทางการใช้แบบจำลองสารสนเทศอาคารในการดำเนินงานและซ่อมแซมบำรุงรักษาอาคาร โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อจัดเตรียมข้อมูลอาคารและแบบก่อสร้างจริงที่ใช้ในการบำรุงรักษาอาคารให้มีประสิทธิภาพ สามารถลดค่าใช้จ่ายที่เกิดจากการซ่อมแซมผิดตำแหน่งและลดระยะเวลาในการเตรียมข้อมูล ผลการศึกษาพบว่าการประยุกต์แบบจำลองสารสนเทศอาคารนั้นเป็นประโยชน์ต่อกระบวนการออกแบบและการก่อสร้าง ช่วยเพิ่มความชัดเจนในการอ่านแบบก่อสร้างและหน้างานจริงได้ถูกต้องตรงตามแบบมากยิ่งขึ้น (Janudom, 2017)

การวิเคราะห์ด้านอวกาศในประเทศไทย มีเกณฑ์การประเมินหลัก ๆ ที่นิยมอยู่ 2 เกณฑ์คือ LEED (Leadership in Energy and Environmental Design) ซึ่งเป็นที่ยอมรับทั่วโลกจากสหรัฐอเมริกา และ TREES (Thai's Rating of Energy and Environmental Sustainability) หรือเกณฑ์การประเมินความยั่งยืนทางพลังงานและสิ่งแวดล้อมไทยจากสถาบันอาคารเขียวไทย รวมทั้งการประเมินผลกระทบสิ่งแวดล้อม (Environmental Impact Assessment: EIA) เพื่อแก้ปัญหาการระบายน้ำได้อย่างทันท่วงทีและไม่เกิดน้ำท่วมขังในพื้นที่ โดยการนำแบบจำลองสารสนเทศอาคาร (BIM) ด้วยโปรแกรม Revit ซึ่งภายในจะมีโปรแกรมเสริม Dynamo ที่มีความสามารถในการดึงข้อมูลจากแบบจำลองมาใช้ในการคำนวณข้อมูลทางคณิตศาสตร์ที่มีความซับซ้อน และสามารถคำนวณปริมาณน้ำฝนไหลหลากได้อย่างอัตโนมัติ ดังนั้นข้อมูลจากแบบจำลองสารสนเทศอาคารสามารถนำมาใช้วิเคราะห์หรือเปรียบเทียบกับข้อมูลส่วนอื่น ๆ เช่น การคำนวณมือ การใช้ตาราง Microsoft Excel หรือการใช้โปรแกรมเฉพาะทาง (SWMM, WinSLAMM, Autodesk Storm and Sanitary) จากการศึกษาวิจัยพบว่าแบบจำลองสารสนเทศอาคาร (BIM) เป็นเครื่องมือที่เข้ามาแก้ไขความซับซ้อนได้เป็นอย่างดี ทำให้นักออกแบบนำข้อมูลไปใช้ต่อได้อย่างมีประสิทธิภาพ (Watcharamethakul and Sreshthaputra, 2020)

วิธีดำเนินการวิจัย

กรอบแนวคิดในงานวิจัย เครื่องมือที่ใช้และวิธีการดำเนินการวิเคราะห์ข้อมูลในขั้นตอนต่าง ๆ สำหรับการพัฒนาแบบจำลองสารสนเทศอาคาร (BIM) ด้วยเครื่องสแกนเลเซอร์สามมิติเพื่อการอนุรักษ์โบราณสถานของศาลเจ้าโรงเกือก กรณีศึกษา การประเมินผลกระทบจากอุทกภัย โดยมีรายละเอียดดังนี้

1. การศึกษาทบทวน แนวคิด ทฤษฎีและวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง ได้แก่ เครื่องสแกนเลเซอร์สามมิติ (3D Laser Scanning) พ้อยท์คลาวด์ (Point Cloud) แบบจำลองสารสนเทศอาคาร หรือ BIM (Building Information Modelling) และวรรณกรรมที่ประยุกต์ใช้เครื่องสแกนเลเซอร์สามมิติ (3D Laser Scanning) เป็นต้น
2. การสร้างหมุดหลักฐานในพื้นที่โครงการเพื่อใช้ในการอ้างอิงตำแหน่งพิกัดทางราบและทางตั้ง ด้วยเครื่องรับสัญญาณดาวเทียม GNSS และการทำวงรอบและระดับเพื่อหาค่าพิกัดทางราบและทางตั้ง
3. การเก็บสำรวจรายละเอียดข้อมูลบริเวณโบราณสถานศาลเจ้าโรงเกือก จากเครื่องสแกนเลเซอร์สามมิติ (3D Laser Scanning)
4. การนำเข้าข้อมูลที่ได้จากการเก็บสำรวจมาประมวลผลและวิเคราะห์ข้อมูล เพื่อจัดทำเป็นแบบจำลองสารสนเทศอาคาร หรือ BIM (Building Information Modelling)
5. การทดสอบการประเมินผลกระทบของอุทกภัยจากข้อมูลแบบจำลองสารสนเทศอาคาร (BIM) ของศาลเจ้าโรงเกือก
6. สรุปผลการศึกษา

1. ข้อมูลที่ใช้ในการศึกษา ข้อมูลที่ใช้ในการศึกษานี้แบ่งออกเป็นสองส่วน ส่วนแรกเป็นข้อมูลที่ผู้วิจัยทำการสำรวจเองในภาคสนาม ได้แก่ ข้อมูลภาพถ่ายบริเวณศาลเจ้าโรงเกือก ทั้งภายนอกและภายในอาคารทั้งหมดที่ได้จากการสำรวจด้วยเครื่องสแกนเลเซอร์สามมิติ ส่วนที่สองเป็นข้อมูลน้ำท่วมขัง จากสำนักการระบายน้ำ กรุงเทพมหานคร

2. ขอบเขตดำเนินงานสำรวจ การสำรวจรังวัดและวิเคราะห์ประมวลผลข้อมูลจากสแกนเลเซอร์สามมิติ ประกอบด้วย 4 ส่วนหลักดังต่อไปนี้

2.1 การจัดทำหมุดหลักฐานควบคุมทางราบและทางตั้ง (Bench Mark) ดำเนินการวางตำแหน่งหมุดควบคุมโดยฝังหมุดนีออสแตนเลสไว้บนพื้นคอนกรีต การสร้างหมุดควบคุมถาวรจะพิจารณาสร้างในบริเวณที่ไม่เสี่ยงต่อการเป็นอุปสรรคหรือถูกทำลาย เพื่อไม่ให้เกิดความคลาดเคลื่อนในทางตำแหน่งในการเก็บข้อมูล

2.2 การสำรวจเชื่อมโยงค่าพิกัดตำแหน่ง หมุดหลักฐานถาวรด้วยเครื่องหาพิกัดด้วยสัญญาณดาวเทียม (GNSS) โดยทำการเชื่อมโยงค่าพิกัดออกจากหมุดหลักฐานแผนที่ของกรมเจ้าท่า ด้วยเครื่องหาพิกัดด้วยสัญญาณดาวเทียม (GNSS) ที่ใช้รังวัดงานยี่ห้อเดซี โดยใช้วิธีรังวัดแบบสถิต (Static Surveying) ไปยังหมุดหลักฐานถาวรที่ได้จัดสร้างไว้ รังวัดพร้อมกันทั้งสามเครื่องเป็นโครงข่ายสามเหลี่ยม ระยะเวลาทำการรังวัดหมุดละไม่ต่ำกว่า 1 ชั่วโมง แล้ววิเคราะห์ข้อมูลด้วยวิธี Post Processing ค่าพิกัดที่คำนวณได้ต้องมีค่าพิกัดทางยี่ห้อเดซี (Geodetic Coordinates) และค่าพิกัดยูทีเอ็มกรีต (Universal Transverse Mercator) บนพื้นหลักฐานสากล WGS 84 (World Geodetic System 1984) และค่าระดับ (Elevation) พื้นหลักฐานอ้างอิงจากพื้นผิวระดับทะเลปานกลาง (Mean Sea Level) โดยผลการวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้ดังนี้

2.3 งานวงรอบจะเป็นสำรวจหาค่าพิกัดทางราบ (Easting และ Northing) ของหมุดอ้างอิง โดยมีระยะทางวงรอบเท่ากับ 417 เมตร ค่าความผิดพลาดเชิงมุมเท่ากับ 23.96 วินาที ซึ่งมีค่าน้อยกว่าค่าที่ยอมรับได้ที่ 49.75 วินาที ดังตารางที่ 1

2.4 งานระดับจะเป็นการสำรวจเพื่อหาค่าพิกัดทางตั้ง หรือเรียกว่า ค่าระดับ (Elevation) ของจุดใด ๆ ที่ต้องการทราบค่า โดยจุดที่มีค่าระดับอ้างอิง โดยการอ้างอิงจากหมุดระดับของกรมเจ้าท่า โดยถ่ายค่าระดับไปยังหมุดหมายเลข 118 และจุดที่หมายเลข 118 ระยะทางรวมเท่ากับ 480.06 เมตร ค่าความถูกต้องของงานระดับจะต้องไม่เกิน 12√K โดยที่ K คือระยะทางที่ทำการเดินระดับ โดยผลการวิเคราะห์ข้อมูลระดับเท่ากับ 0.15 มิลลิเมตร ซึ่งดีกว่าค่าที่ยอมรับได้ที่ค่าเท่ากับ 8.314 มิลลิเมตร ดังตารางที่ 2

ตารางที่ 1 รายการคำนวณวงรอบ

ERROR OF ANGLE	23.96 Sec.	ERROR In NORTH	0.009 m.
ALLOWABLE ERROR	49.75 Sec	ERROR In EAST	-0.004 m.
Correction/Angle	2.27 Sec	Closure Distance	0.0103 m.
Precision Ratio	1 : 40677	Total Distance	417.202

Station	OBS.Angle	Azimuth	OBS. Dist	Adj. North	Adj. East	Station
203		315 00 18.31				203
202	208 25 25.50	343 25 41.63	86.319	1518621.326	663640.086	202
115	100 14 01.00	263 39 40.45	44.506	1518704.058	663615.467	115
116	190 30 21.50	274 09 59.78	67.142	1518699.143	663571.234	116
117	141 52 46.50	236 02 44.10	23.363	1518704.020	663504.270	117
118	102 16 14.50	158 18 56.42	29.422	1518690.970	663484.891	118
119	128 00 23.00	106 19 17.24	48.593	1518663.630	663495.763	119
120	246 00 01.25	172 19 16.31	14.942	1518649.973	663542.398	120
121	101 52 29.75	94 11 43.88	55.049	1518635.164	663544.395	121
122	91 57 05.75	06 08 47.46	30.829	1518631.136	663599.297	122
123	243 02 15.50	69 11 00.78	17.037	1518661.787	663602.598	123
109	243 37 49.50	132 48 48.10		1518667.841	663618.523	109
201						201

ตารางที่ 2 รายการคำนวณระดับ

Station	Distance (M.)	Cumulative Distance (M.)	Differential in elevation (M.)	Unadjusted Elevation (M.)	Correction (M.)	Adjusted Elevation (M.)
118			1.57700		1.57700	
119	30.1	30.1	1.00122	2.57822	-0.00001	2.57823
120	48.6	78.7	-0.49355	2.08467	-0.00002	2.08469
121	20.2	98.9	-0.12566	1.95901	-0.00003	1.95904
122	55.0	153.9	0.01079	1.96980	-0.00005	1.96985
123	30.8	184.7	-0.07840	1.89140	-0.00006	1.89146
109	19.0	203.8	-0.11962	1.77178	-0.00006	1.77184
201	17.8	221.5	0.06083	1.83261	-0.00007	1.83268
202	36.0	257.5	-0.16230	1.67031	-0.00008	1.67039
203	36.0	293.6	0.16195	1.83226	-0.00009	1.83235
115	51.3	344.8	0.00841	1.84067	-0.00011	1.84078
116	44.5	389.4	-0.05200	1.78867	-0.00012	1.78879
117	67.4	456.7	0.04520	1.83387	-0.00014	1.83401
118-R	23.3	480.1	-0.25702	1.57685	-0.00015	1.57700
Total distance			480.06 m.			
Error			0.00015 m.			
Allovable Error			8.314 mm.			

การสำรวจเก็บข้อมูลด้วยสแกนเลเซอร์สามมิติ การสำรวจเก็บรายละเอียดลักษณะข้อมูลทางกายภาพ บริเวณศาลเจ้าโรงเกือก ทั้งภายนอกและภายในอาคารทั้งหมด เพื่อให้ทราบถึงสภาพอาคาร ลักษณะรูปร่าง รูปทรงต่าง ๆ ของอาคาร โดยการตั้งเครื่องสแกนเลเซอร์สามมิติกระจายรอบพื้นที่บริเวณศาลเจ้าโรงเกือก เพื่อให้ได้ข้อมูลจุดพิกัดสามมิติ (Point Clouds) และภาพสีเสมือนจริง (True Color) ดังรูปที่ 4



รูปที่ 4 ข้อมูลพิกัดจุดสามมิติบริเวณศาลเจ้าโรงเกือก

การประมวลผลข้อมูลพิกัดจุดสามมิติด้วยโปรแกรม RiScan Pro จะเป็นการเชื่อมต่อรวบรวมข้อมูล สแกนดังกล่าวทั้งหมด เข้าด้วยกัน (Register) โดยใช้วิธีการตั้งเป้าแบบ Finescanned Reflector โดยใช้หมุดควบคุม ในพื้นที่วิจัยทั้งหมดจำนวน 12 ครั้ง อยู่รอบ ๆ พื้นที่ และใช้วิธี Multistation Adjustment (MSA) ในบริเวณข้างใน อาคารศาลเจ้าโรงเกือก และบริเวณพื้นที่แคบและจำกัด ซึ่งวิธีการนี้เป็นวิธีที่ออกแบบมาสำหรับแก้ปัญหาในพื้นที่มี ข้อจำกัดในการตั้งเป้า จะใช้การคำนวณพื้นผิวของ Point Cloud ของข้อมูลสแกนที่ทราบตำแหน่งพิกัดแน่นอนเป็นตัวอ้างอิง และคำนวณชุดข้อมูลตำแหน่ง Point Cloud จากข้อมูลสแกนที่ยังไม่ทราบพิกัดเข้าด้วยกัน โดยการจับ กลุ่มข้อมูลที่มีลักษณะพื้นผิวคล้ายกัน จากข้อมูลที่สำรวจเก็บข้อมูลมาจำนวน 124 ครั้ง หากรวมทั้งสองวิธีเท่ากับ 136 ครั้ง ในการเก็บข้อมูลสแกน โดยผลลัพธ์ที่ได้จากการคำนวณด้วยโปรแกรมพบว่าค่าความคลาดเคลื่อนเท่ากับ 2.9 มิลลิเมตร

3. การประมวลผลข้อมูลแบบจำลองสารสนเทศอาคาร (BIM)

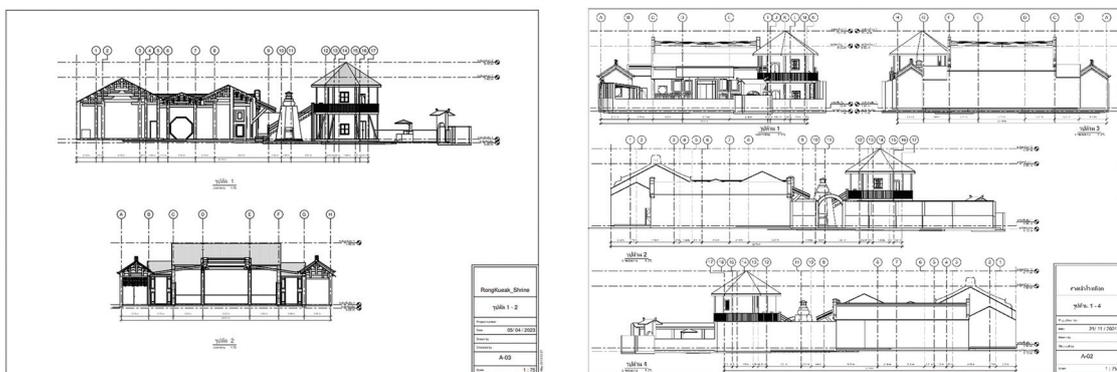
สำหรับการประมวลผลข้อมูลแบบจำลองสารสนเทศอาคาร จะใช้ข้อมูล Point Cloud ที่ได้จากการสำรวจ โดยในการศึกษาจะใช้ซอฟต์แวร์ Autodesk Revit 2023 ซึ่งเป็นโปรแกรมสำหรับการทำงานร่วมกับการสร้างแบบจำลองสารสนเทศอาคาร (BIM) และเลือกประเภทของงานเป็นรูปแบบงานสถาปัตยกรรม (Architecture) ผู้วิจัย จะกำหนดมาตรฐานรายละเอียดของแบบจำลองสารสนเทศอาคาร LOD เท่ากับ 200 ซึ่งเป็นองค์ประกอบของแบบจำลอง ที่ถูกสร้างเป็นแบบทั่วไป โดยมีปริมาณ ขนาด รูปร่าง ตำแหน่ง และทิศทางแบบประมาณ ในการสร้างแบบจำลอง ใน Autodesk Revit 2023

สำหรับการสร้างแบบจำลองสารสนเทศอาคาร 2 มิติ ในซอฟต์แวร์ Autodesk Revit 2023 จะแบ่ง การสร้างกลุ่ม Elements ออกเป็น 3 กลุ่มหลัก ๆ ดังนี้ 1) Model Elements เป็นองค์ประกอบประเภทวัตถุสามมิติ เช่น ผนัง (Walls) หน้าต่าง (Windows) ประตู (Doors) หลังคา (Roofs) และเสา (Column) เป็นต้น โดย Model Elements จะต้องสร้างขึ้นใหม่ เนื่องจากลักษณะของอาคารศาลเจ้าโรงเกือกมีลักษณะที่เฉพาะ ไม่มีรูปแบบเหมือน งานอาคารทั่วไป 2) Datum Elements เป็นองค์ประกอบสำหรับใช้ในการกำหนดสภาพแวดล้อมต่าง ๆ ของโปรเจค โดยจะประกอบด้วยเส้นแนวกริด (Grids) เส้นบอกระดับ (Levels) และระนาบอ้างอิง (Reference Planes) เป็นต้น และ 3) View - Specific Elements เป็นองค์ประกอบของวัตถุที่เป็นคำอธิบายและวัตถุประเภทสองมิติ โดยจะแสดงผลเฉพาะในมุมมองที่ Elements นั้น ๆ ถูกใส่ลงไปและจะไม่ส่งผลกับมุมมองอื่น ๆ เช่น เส้นบอกระยะ (Dimensions) สัญลักษณ์ประกอบแบบ (Tags) และ 2D Detail Components เป็นต้น

แบบจำลองสารสนเทศอาคาร 3 มิติ สามารถแสดงผลได้หลากหลายมุมมอง เช่น รูปทัศนียภาพ รูปแบบ Isometric หรือสามารถอัปโหลดข้อมูลไว้ใน Autodesk Drive ซึ่งเป็นฟังก์ชันเสริมที่มีในซอฟต์แวร์ Autodesk Revit โดยจะแสดงผลข้อมูลแบบจำลองสารสนเทศอาคารที่มีรายละเอียดครบถ้วน ทั้งในรูปแบบ 3 มิติ แบบแปลนพื้น แปลนอาคาร รูปด้าน และรูปตัดขวาง

1. การประมวลผลแบบจำลองสารสนเทศอาคาร (BIM) จากข้อมูลเครื่องสแกนเลเซอร์สามมิติ

การประมวลผลแบบจำลอง BIM จากข้อมูลเครื่องสแกนเลเซอร์สามมิติ พบว่าข้อมูลพิกัดจุดสามมิติจากการประมวลผลมีค่าความคลาดเคลื่อนเท่ากับ 2.9 มิลลิเมตร ซึ่งอยู่ในเกณฑ์งานสำรวจชั้น 3 ซึ่งเป็นเกณฑ์มาตรฐานของงานสำรวจเพื่อการก่อสร้าง ข้อมูลที่ได้จากการเก็บสำรวจเพียงพอที่จะนำมาประมวลผลเพื่อจัดทำแบบจำลองสารสนเทศอาคารที่มาตรฐานรายละเอียดของแบบจำลองสารสนเทศอาคาร LOD เท่ากับ 200 ซึ่งเป็นองค์ประกอบของแบบจำลองที่ถูกสร้างเพื่อเป็นแบบทั่วไป โดยมีปริมาณ ขนาด รูปร่าง ตำแหน่ง และทิศทางแบบประมาณ ผลลัพธ์ที่ได้ของแบบจำลองสารสนเทศอาคารนั้น ข้อมูลมีรายละเอียดครบถ้วนตามมาตรฐาน LOD โดยสามารถแสดงผลในมุมมอง 2 มิติ และ 3 มิติ ในรูปแบบแปลน (Plan) รูปด้าน (Elevation) และรูปตัด (Section) โดยมุมมองทุก ๆ มุมมองนั้นจะมีความเชื่อมโยงและสัมพันธ์กัน อีกทั้งในการทำงานสามารถกำหนดสภาพแวดล้อมของโครงการไปพร้อม ๆ กันได้ รวมถึงการกำหนดวัสดุ (Materials) เพื่อการแสดงผลขององค์ประกอบที่มีความแตกต่างกันของอาคารให้มีความชัดเจนและตรงตามสภาพจริงของศาลเจ้าโรงเกือกมากยิ่งขึ้น โดยสามารถแสดงผลในมุมมอง 2 มิติ ดังรูปที่ 6 และในมุมมอง 3 มิติ ดังรูปที่ 7



รูปที่ 6 แบบรูปตัดขวาง (Section) และแบบรูปด้าน (Elevation) บริเวณศาลเจ้าโรงเกือก

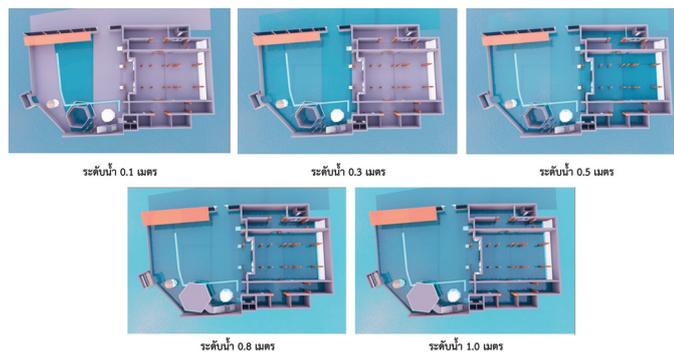


รูปที่ 7 แบบจำลองสารสนเทศอาคาร 3 มิติของศาลเจ้าโรงเกือก

2. การประเมินผลกระทบของอุทกภัยจากข้อมูลแบบจำลองสารสนเทศอาคาร

2.1 การจำลองระดับความสูงของการเกิดอุทกภัย จากการจำลองระดับความสูงของน้ำท่วมร่วมกับแบบจำลองสารสนเทศอาคารบริเวณศาลเจ้าโรงเกือก พบว่าที่ระดับน้ำท่วม 0.1 เมตร บริเวณศาลเจ้าโรงเกือกจะมีน้ำท่วมขังเล็กน้อย เนื่องจากพื้นที่ลานหน้าศาลเจ้าโรงเกือกมีลักษณะเป็นแอ่ง โดยจากข้อมูลแบบจำลองความสูงเชิงเลข (DEM) พบว่าบริเวณนี้เป็นจุดที่มีค่าระดับต่ำสุดในบริเวณพื้นที่ศาลเจ้า โดยมีค่าระดับอยู่ที่ประมาณ

1.4 - 1.7 เมตรจากระดับน้ำทะเลปานกลางที่ระดับน้ำท่วม 0.3 เมตร พบว่าบริเวณลานหน้าศาลเจ้าโรงเกือกทั้งหมด น้ำท่วมจนถึงทางเข้าอาคารศาลเจ้าโรงเกือก รวมทั้งบริเวณถนนตรอกถนนศาลเจ้าโรงเกือกด้วยที่ระดับน้ำท่วม 0.5 เมตร พบว่าน้ำท่วมขังทุกพื้นที่ในบริเวณศาลเจ้าโรงเกือก รวมทั้งเข้าไปในบริเวณอาคารศาลเจ้า ซึ่งเป็นพื้นที่สำหรับประกอบพิธีทางศาสนาเป็นหลัก โดยองค์ประกอบของอาคารศาลเจ้าโรงเกือกส่วนใหญ่จะสร้างมาจากไม้ เช่น เสา คาน หน้าต่าง ประตู เป็นต้น เมื่อมีน้ำท่วมขังวัสดุเหล่านี้จะเกิดความเสียหายได้ง่าย สำหรับงานระบบไฟฟ้า ภายในศาลเจ้าจะติดตั้งอุปกรณ์ไฟฟ้าไว้ที่ตำแหน่งค่อนข้างสูงเช่น ตำแหน่งปลั๊กไฟและสวิตช์ไฟ (Switch) จะอยู่ที่ระดับ 1.2 - 1.5 เมตร ซึ่งไม่ก่อให้เกิดความเสียหายจากน้ำท่วม และที่ระดับน้ำท่วม 0.8 เมตร และ 1 เมตร ความเสียหายที่เกิดขึ้นจะเท่ากับระดับน้ำท่วมที่ 0.5 เมตร ซึ่งมีความต่างเพียงระดับน้ำที่เข้ามาในพื้นที่สูงขึ้น แต่องค์ประกอบความเสียหายมีปริมาณเท่าเดิม ดังรูปที่ 8



รูปที่ 8 แบบจำลองระดับความสูงของน้ำท่วม

2.2 การประมาณราคาจากความเสียหาย การประมาณราคาจากความเสียหาย จากแบบจำลองระดับความสูงของน้ำท่วมร่วมกับแบบจำลองสารสนเทศอาคารบริเวณศาลเจ้าโรงเกือกโดยนำข้อมูลความเสียหายที่เกิดขึ้นกับอาคารศาลเจ้าโรงเกือกมาประมาณราคาเพื่อใช้ในการประมาณค่าความเสียหายที่เกิดขึ้นรวมถึงการวางแผนเพื่อปรับปรุง ก่อสร้าง ซ่อมแซม หรือรื้อถอนบริเวณศาลเจ้าโรงเกือก โดยผู้วิจัยจะทำการสร้างตารางถอดปริมาณ (Scheduling the Building Model) เพื่อถอดปริมาณของวัสดุหรือรายละเอียดของวัสดุต่าง ๆ ที่เกิดความเสียหายจากอุทกภัย โดยข้อมูลจะอยู่ในรูปแบบไฟล์ Excel สำหรับการประมาณราคากลางก่อสร้าง ผู้วิจัยจะใช้หลักเกณฑ์การคำนวณจากราคากลางงานก่อสร้างของทางราชการโดยอ้างอิงราคาจากกรมบัญชีกลาง ปี พ.ศ. 2567 โดยมีรายละเอียดดังตารางที่ 3 - 5

ตารางที่ 3 การประมาณราคาความเสียหายที่ระดับน้ำท่วม 0.1 เมตร

รายการ	ตารางการประมาณค่าใช้จ่ายเบื้องต้น						ราคารวม
	จำนวน	หน่วย	ราคาค่าวัสดุ		ราคาค่าแรง		
			ต่อหน่วย	รวม	ต่อหน่วย	รวม	
พื้นคอนกรีต	197.79	ตร.ม.	125	24,723.75	100	19,779	44,502.75

ตารางที่ 4 การประมาณราคาความเสียหายที่ระดับน้ำท่วม 0.3 เมตร

รายการ	ตารางการประมาณค่าใช้จ่ายเบื้องต้น						ราคารวม
	จำนวน	หน่วย	ราคาค่าวัสดุ		ราคาค่าแรง		
			ต่อหน่วย	รวม	ต่อหน่วย	รวม	
พื้นคอนกรีต	477.43	ตร.ม.	125	59,678.75	100	47,743	107,421.75

ตารางที่ 5 การประมาณราคาความเสียหายที่ระดับน้ำท่วม 0.5 - 0.8 เมตร

รายการ	ตารางการประมาณค่าใช้จ่ายเบื้องต้น						
	จำนวน	หน่วย	ราคาวัสดุ		ราคาแรง		ราคารวม (บาท)
			ต่อหน่วย	รวม	ต่อหน่วย	รวม	
พื้นคอนกรีต	477.43	ตร.ม.	125	59,678.75	100	47,743	107,421.75
พื้นกระเบื้อง	395.38	ตร.ม.	235	92,914.30	300	118,614	211,528.30
เสาไม้สัก ขนาด \varnothing 0.36	31.7	ตร.ม.	50	1,587.08	34	1,079.22	2,666.30
เสาไม้สักเหลี่ยม 0.3 x 0.3 m.	12.96	ตร.ม.	50	648.00	34	440.64	1,088.64
ประตูบานเปิดเดี่ยววงกบ UPVC	6	บาน	-	220.00	-	-	220
ประตูบานเปิดเดี่ยววงกบไม้	2.05	ตร.ม.	50	102.50	34	69.70	172.20
ประตูไม้บานคู่ ขนาด 1.30 x 2.00 m.	5.2	ตร.ม.	50	260.00	34	176.80	436.80
ประตูไม้บานคู่ ขนาด 3.00 x 4.00 m.	24	ตร.ม.	50	1,200.00	34	816.00	2,016.00
ประตูไม้บานคู่ ขนาด 3.30 x 2.4 m.	15.84	ตร.ม.	50	792.00	34	538.56	1,330.56
ประตูไม้บานคู่ ขนาด 3.30 x 2.3 m.	15.18	ตร.ม.	50	759.00	34	516.12	1,275.12
ผนังคอนกรีต	641.89	ตร.ม.	36	23,108.04	30	19,256.70	40,364.74
รวมราคาประมาณ							370,521.41

สำหรับการประมาณราคาความเสียหายที่ระดับน้ำท่วม 1.0 เมตร ผู้วิจัยจะประมาณราคางานระบบไฟฟ้าเพิ่มเติมเข้ามา ถึงแม้ว่าที่ระดับน้ำท่วมขัง 1.0 เมตร จะไม่กระทบถึงตำแหน่งของระบบไฟภายในอาคารศาลเจ้า แต่การที่มีน้ำท่วมขังสูงอาจก่อให้เกิดอันตรายหรือการชำรุดของอุปกรณ์ไฟฟ้าได้ จึงควรพิจารณาการประมาณค่าความเสียหายในส่วนนี้ด้วย เพื่อที่จะวิเคราะห์ความเสียหายได้ใกล้เคียงกับสภาพจริงในอนาคตที่อาจเกิดขึ้นได้ในกรณีต้องซ่อมแซมงานระบบไฟฟ้าด้วย ซึ่งสามารถประมาณราคาได้ดังตารางที่ 6

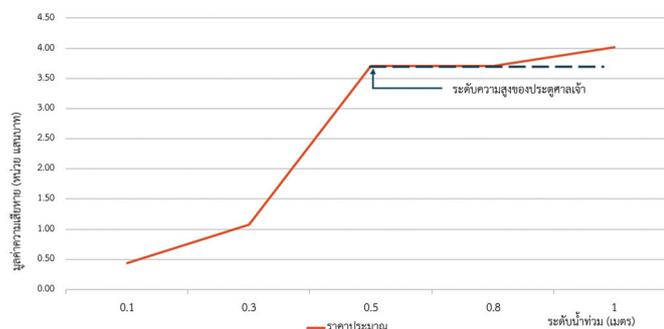
ตารางที่ 6 การประมาณราคาความเสียหายที่ระดับน้ำท่วม 1 เมตร

รายการ	ตารางการประมาณค่าใช้จ่ายเบื้องต้น						
	จำนวน	หน่วย	ราคาวัสดุ		ราคาแรง		ราคารวม (บาท)
			ต่อหน่วย	รวม	ต่อหน่วย	รวม	
พื้นคอนกรีต	477.43	ตร.ม.	125	59,678.75	100	47,743	107,421.75
พื้นกระเบื้อง	395.38	ตร.ม.	235	92,914.30	300	118,614	211,528.30
เสาไม้สัก ขนาด \varnothing 0.36	31.7	ตร.ม.	50	1,587.08	34	1,079.22	2,666.30
เสาไม้สักเหลี่ยม 0.3 x 0.3 m.	12.96	ตร.ม.	50	648.00	34	440.64	1,088.64
ประตูบานเปิดเดี่ยววงกบ UPVC	6	บาน	-	220.00	-	-	220
ประตูบานเปิดเดี่ยววงกบไม้	2.05	ตร.ม.	50	102.50	34	69.70	172.20
ประตูไม้บานคู่ ขนาด 1.30 x 2.00 m.	5.2	ตร.ม.	50	260.00	34	176.80	436.80

ตารางที่ 6 การประมาณราคาความเสียหายที่ระดับน้ำท่วม 1 เมตร (ต่อ)

รายการ	ตารางการประมาณค่าใช้จ่ายเบื้องต้น						ราคารวม (บาท)
	จำนวน	หน่วย	ราคาวัสดุ		ราคาค่าแรง		
			ต่อหน่วย	รวม	ต่อหน่วย	รวม	
ประตูไม้บานคู่ ขนาด 3.00 x 4.00 m.	24	ตร.ม	50	1,200.00	34	816.00	2,016.00
ประตูไม้บานคู่ ขนาด 3.30 x 2.4 m.	15.84	ตร.ม	50	792.00	34	538.56	1,330.56
ประตูไม้บานคู่ ขนาด 3.30 x 2.3 m.	15.18	ตร.ม	50	759.00	34	516.12	1,275.12
ผนังคอนกรีต	641.89	ตร.ม	36	23,108.04	30	19,256.70	40,364.74
ตู้ควบคุมไฟฟ้า (Load Panel)	1	هما	20,000	20,000.00	3,000	3,000.00	23,000.00
ชุดสวิตช์ 1 ทาง 1 ช่อง	11	อัน	120	1,320.00	100	1,100.00	2,420.00
ชุดสวิตช์ 1 ทาง 4 ช่อง	1	อัน	200	200.00	100	100.00	300.00
เต้ารับ (Receptacle)	24	อัน	130	3,120.00	100	2,400.00	5,520.00
รวมราคาประมาณ							401,761.41

จากข้างต้นจะเห็นได้ว่าการประมาณราคาความเสียหายของน้ำท่วมบริเวณศาลเจ้าโรงเกือกที่ระดับ 0.1 เมตร จะมีค่าใช้จ่ายสำหรับการปรับปรุงซ่อมแซมประมาณ 44,502.75 บาท และที่ระดับน้ำท่วมซึ่ง 0.3 เมตร ราคาประมาณความเสียหายจะเพิ่มขึ้นอีกประมาณ 41.43 % หรือประมาณ 2.4 เท่าจากระดับ 0.1 เมตร และเมื่อระดับน้ำท่วมสูงขึ้นเป็น 0.5 เมตร ราคาประมาณความเสียหายจะเท่ากับ 370,521.41 บาท ซึ่งเพิ่มขึ้นประมาณ 832.58 % หรือ 8.3 เท่าจากระดับน้ำท่วมที่ 0.1 เมตร ถึงแม้ว่าระดับน้ำท่วมจะสูงขึ้นเป็น 0.8 เมตร ราคาความเสียหายจะยังคงเท่ากับระดับ 0.5 เมตร และที่ระดับน้ำท่วมสูงสุดของการจำลองน้ำท่วมซึ่งที่ระดับ 1 เมตร ราคาประมาณความเสียหายจะเท่ากับ 401,761.41 บาท ซึ่งจะเพิ่มขึ้นอีกประมาณ 902.78 % จากระดับ 0.1 เมตร ซึ่งมาจากการประมาณราคาของงานระบบไฟฟ้าที่เพิ่มเข้ามา จากข้อมูลข้างต้นสามารถคาดการณ์แนวโน้มของความเสียหายจากน้ำท่วมของโครงสร้างอาคารศาลเจ้าโรงเกือกได้ โดยราคาประมาณความเสียหายจะคงที่จนกว่าระดับน้ำจะสูงขึ้นไปถึงระดับที่ก่อให้เกิดความเสียหายของฝ้าเพดาน คานหรือองค์ประกอบอาคารอื่น ๆ ที่อยู่ในตำแหน่งสูงกว่า 1.2 เมตร ราคาประมาณความเสียหายจึงจะเพิ่มขึ้นจากระดับน้ำท่วมซึ่ง 1 เมตร ดังรูปที่ 9



รูปที่ 9 การประมาณราคาความเสียหายจากน้ำท่วมในแต่ละระดับ

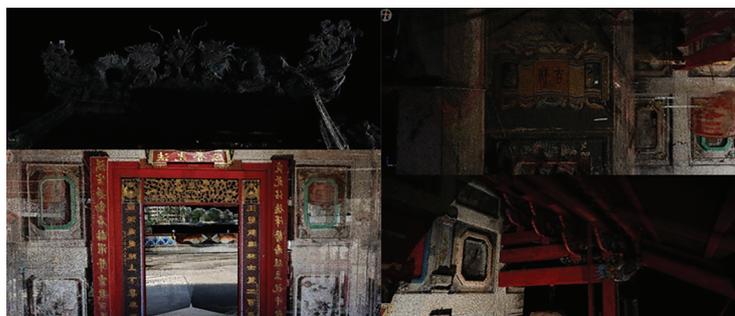
จากการประมาณราคาข้างต้นเป็นเพียงการประมาณค่าความเสียหายที่เกิดขึ้นในกรณีที่มีน้ำท่วมซึ่งระยะสั้นเท่านั้น เนื่องจากกรณีที่มีน้ำท่วมซึ่งเป็นเวลานานอาจจะก่อให้เกิดความเสียหายกับตัวโครงสร้างของอาคารด้วย เช่น น้ำจะซึมเข้าผิวคอนกรีต หรืออาจจะเกิดจากแรงดันน้ำ ส่งผลให้ผิวหน้าคอนกรีตสึกกร่อน ไม่เรียบ รวมไปถึง

การเกิดสนิมในเหล็กที่อยู่ภายในโครงสร้างได้ ดังนั้นแนวทางการแก้ไขปัญหาและค่าใช้จ่ายของผลกระทบจากน้ำท่วมที่มีผลต่องานสถาปัตยกรรมและงานโครงสร้างของตัวอาคารจะประมาณค่าความเสียหายแตกต่างกัน อีกทั้งการประมาณราคาของอาคารศาลเจ้าโรงเกือก เป็นเพียงการประมาณราคาก่อสร้างเบื้องต้นเท่านั้น เพราะการประมาณราคาของอาคารโบราณสถานอาจจะสูงกว่าการประมาณราคางานก่อสร้างทั่วไป เนื่องจากอาคารโบราณสถานมีคุณค่าทางประวัติศาสตร์ ศิลปะ และวัฒนธรรมที่ต้องได้รับการอนุรักษ์และบูรณะด้วยความระมัดระวัง กระบวนการดังกล่าวมักต้องอาศัยผู้เชี่ยวชาญเฉพาะทางและข้อมูลที่ละเอียดเกี่ยวกับโครงสร้างเดิม วัสดุ และเทคนิคที่ใช้ในอดีต ซึ่งการกำหนดต้นทุนของราคาวัสดุเฉพาะอาจสูงกว่าวัสดุทั่วไป เนื่องจากกระบวนการผลิตหรือจัดหา ยก รวมถึงค่าแรงงานของช่างฝีมือหรือผู้เชี่ยวชาญเฉพาะทาง

อภิปรายผล

การพัฒนาแบบจำลอง BIM จากข้อมูลเครื่องสแกนเลเซอร์สามมิติพบว่าผลลัพธ์ที่ได้ที่มีความถูกต้องในระดับมิลลิเมตร ซึ่งเหมาะสมต่อความต้องการในด้านงานก่อสร้างได้อย่างมีประสิทธิภาพ เนื่องจากสามารถวัดขนาดในบริเวณที่ทำการวัดโดยทั่วไปได้ยากและข้อมูลตำแหน่งจุดสามมิติสามารถนำไปใช้เป็นตัวแบบในการทำแบบจำลองสามมิติได้โดยมีความถูกต้องเหมาะสมในการพัฒนาการวางแผนและการจัดการอาคาร รวมถึงจะเกิดประโยชน์อย่างยิ่งในการปรับปรุงประสิทธิภาพของกระบวนการก่อสร้างและลดข้อผิดพลาดที่อาจเกิดขึ้น (Kowczynska et al., 2016) ซึ่งผู้วิจัยกำหนดในการศึกษาที่ LOD 200 ซึ่งสอดคล้องกับงานโครงสร้างทั่วไปตามมาตรฐานของสหรัฐอเมริกา (AIA E202 BIM Protocol) และประเทศไทย โดยที่ LOD 200 มีความเหมาะสมสำหรับการแสดงผลแบบทั่วไปที่ต้องการรูปร่าง ขนาด และตำแหน่งขององค์ประกอบอาคาร ข้อมูลทั่วไปใน 3D ข้อมูลที่ได้จากการจัดทำแบบจำลอง BIM สามารถแสดงผลในมุมมอง 2 มิติ และ 3 มิติ ที่มีการเชื่อมโยงกัน เช่น แพลน รูปด้าน และรูปตัดขวาง ซึ่งเป็นข้อดีของ BIM เพราะทำให้สามารถสร้างความเข้าใจในภาพรวมของอาคารและช่วยลดความคลาดเคลื่อนระหว่างแบบแปลนและการก่อสร้างจริงได้

จากการสำรวจด้วยเครื่องสแกนเลเซอร์สามมิติจะเห็นได้ว่าข้อมูล Point Cloud สามารถบันทึกรายละเอียดทางสถาปัตยกรรมของศาลเจ้าโรงเกือกได้เป็นอย่างดี โดยให้รายละเอียดของสีวัสดุ รูปร่างรูปทรงขนาดจริง รวมถึงตำแหน่งที่ถูกต้อง ดังรูปที่ 10 รวมถึงรูปภาพที่ถ่ายในวันที่ทำการสำรวจเก็บข้อมูล จึงสามารถนำข้อมูล Point Cloud จากการสำรวจมาวิเคราะห์ร่วมกับข้อมูลแบบจำลอง BIM เพื่อสะท้อนรายละเอียดสภาพพื้นที่จริงของศาลเจ้าโรงเกือกได้ถูกต้องและครบถ้วนตรงกับสภาพพื้นที่จริงมากที่สุด ดังนั้นอาจสรุปได้ว่าแบบจำลอง BIM สามารถใช้ประเมินโครงสร้างองค์ประกอบต่าง ๆ ของอาคารได้เป็นอย่างดี และข้อมูล Point Cloud สามารถเก็บรายละเอียดทางด้านสถาปัตยกรรมได้ครบถ้วนทั้งหมด ทั้งขนาด รูปร่าง รูปทรง โดยสามารถวัดระยะและอ้างอิงค่าพิกัดจริงได้ ดังนั้นเพื่อให้ได้ผลลัพธ์ที่ถูกต้องสูงสุด ควรจะใช้ข้อมูลทั้ง 2 ส่วนวิเคราะห์ร่วมกันเพื่ออ้างอิงในรายละเอียดที่ข้อมูลบางส่วนไม่สามารถวิเคราะห์ได้ครบถ้วน



รูปที่ 10 การบันทึกรายละเอียดของโบราณสถานจากข้อมูล Point Cloud

ดังนั้นการใช้เทคโนโลยีจากการสำรวจด้วยเครื่องสแกนเลเซอร์สามมิติของศาลเจ้าโรงเกือกมีความเหมาะสมสำหรับนำข้อมูลที่ได้ออกไปใช้ในการอนุรักษ์ทางด้านศาสนสถานหรือโบราณสถานเนื่องจากลักษณะของข้อมูล Point Cloud มีประโยชน์เป็นอย่างมากกับงานด้านการอนุรักษ์โบราณสถานซึ่งเป็นงานที่ต้องอาศัยข้อมูลที่แม่นยำและครบถ้วน เพื่อคงคุณค่าทางประวัติศาสตร์และวัฒนธรรมของสถานที่ โดยข้อมูล Point Cloud ซึ่งเป็นข้อมูล 3 มิติที่เกิดจากการสแกนด้วยเลเซอร์หรือการถ่ายภาพประกอบในวันที่ทำการสำรวจเก็บข้อมูล จะช่วยสร้างคุณค่าต่อกระบวนการอนุรักษ์ได้อย่างมีประสิทธิภาพรวมถึงการบันทึกรายละเอียดอย่างแม่นยำ ซึ่งข้อมูล Point Cloud ช่วยบันทึกรายละเอียดของโบราณสถานได้เป็นอย่างดี เช่น ขนาด รูปทรง ลวดลาย และพื้นผิวได้อย่างครบถ้วนในระดับมิลลิเมตรจึงเหมาะสำหรับการสร้างเอกสารอ้างอิงที่สามารถเก็บรักษาไว้ในระยะยาวเพื่อใช้สำหรับศึกษาหรือวิเคราะห์ในด้านอื่น ๆ เช่น กรณีการบูรณะปรับปรุง เป็นต้น อีกทั้งข้อมูล Point Cloud สามารถนำมาวิเคราะห์ความเสียหายและการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นกับงานทางโบราณสถานได้ เช่น การแตกร้าว การทรุดตัว หรือการชำรุดของโบราณสถาน โดยเปรียบเทียบข้อมูลในช่วงเวลาต่าง ๆ เพื่อวางแผนการซ่อมแซมและป้องกันการเสื่อมสภาพ ซึ่งปัจจัยหลักของการอนุรักษ์โบราณสถานคือการสำรวจเก็บข้อมูล โดยที่เครื่องสแกนเลเซอร์สามมิติ สำรวจเก็บข้อมูลนั้นไม่ได้สัมผัสกับโบราณสถาน ซึ่งช่วยลดความเสี่ยงต่อการสัมผัสโดยตรงที่อาจทำให้โบราณสถานได้รับความเสียหาย ข้อมูลที่ได้สามารถสร้างเป็นแบบจำลองเสมือนจริงของโบราณสถานได้ สามารถนำมาใช้ในซอฟต์แวร์สำหรับการศึกษาทางวิชาการหรือสร้างเป็นสื่อเพื่อนำเสนอ เช่น การจำลองแบบ Virtual Reality (VR) เพื่อเผยแพร่วัฒนธรรมและให้ประชาชนเข้าถึงโบราณสถานในรูปแบบดิจิทัลสามารถเก็บรักษาในฐานข้อมูลดิจิทัล ซึ่งเป็นทรัพยากรสำคัญสำหรับการวิจัยและการอนุรักษ์ในอนาคตได้

การประมาณราคาความเสียหายจากน้ำท่วมด้วยการวิเคราะห์ข้อมูลจากแบบจำลองระดับความสูงของน้ำ โดยใช้ข้อมูล DEM และแบบจำลอง BIM มีความสำคัญอย่างมากในการวิเคราะห์ผลกระทบและวางแผนการปรับปรุงซ่อมแซมที่มีประสิทธิภาพ การใช้ DEM ช่วยให้สามารถประเมินระดับน้ำท่วมที่มีผลกระทบต่อโครงสร้างอาคารแต่ละส่วนได้อย่างแม่นยำ ขณะที่แบบจำลอง BIM ช่วยให้ข้อมูลเชิงลึกเกี่ยวกับรายละเอียดวัสดุ พื้นที่ ปริมาตรและโครงสร้างขององค์ประกอบอาคาร ทำให้สามารถประมาณราคาความเสียหายได้อย่างรวดเร็วเป็นระบบ ครบถ้วนและมีความถูกต้องสูง ทำให้สามารถคาดการณ์ความเสียหายและวางแผนการป้องกันเพื่อการอนุรักษ์โบราณสถานได้ดียิ่งขึ้น ไม่เพียงแต่ช่วยในการระบุจุดเสี่ยงได้ชัดเจน แต่ยังช่วยในการออกแบบมาตรการป้องกันน้ำท่วม เช่น การยกระดับพื้นที่ที่เสี่ยงต่อการเกิดน้ำท่วม หรือการออกแบบเส้นทางระบายน้ำที่เหมาะสมในอนาคต โดยการใช้แบบจำลอง BIM ยังช่วยให้การวิเคราะห์ทำได้ละเอียดและสามารถปรับแผนการป้องกันได้ในหลายมิติ เช่น การจัดการวัสดุและการออกแบบโครงสร้างเพื่อลดความเสียหายจากน้ำท่วม อีกทั้งการใช้แบบจำลอง BIM ร่วมกับข้อมูล DEM ทำให้การแสดงผลข้อมูล 2 มิติ และ 3 มิติมีความเชื่อมโยงและครอบคลุม จึงมีความเหมาะสมสำหรับผู้ที่เกี่ยวข้องในโครงการเห็นภาพรวมได้ชัดเจนและสามารถวางแผนการจัดการและการซ่อมแซมพื้นที่หลังน้ำท่วมได้อย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งแนวคิดนี้สอดคล้องกับงานวิจัยที่แนะนำให้ใช้ BIM ในการวางแผนเพื่อลดความเสียหายจากภัยพิบัติ โดยเฉพาะในพื้นที่เสี่ยงอุทกภัย (Zlatanova et al., 2017)

ปัญหาและอุปสรรค

การสำรวจภายในศาลเจ้าโรงเกือกค่อนข้างใช้เวลานาน เนื่องจากมีสิ่งของและองค์เทพหลายองค์ที่ประดิษฐานอยู่ภายใน ทำให้เกิดการบดบังบางส่วนของพื้นที่สแกน ผู้วิจัยต้องย้ายตำแหน่งตั้งกล้องหลายครั้งเพื่อเก็บข้อมูลให้ครบ นอกจากนี้ศาลเจ้ายังมีนักท่องเที่ยวมาเยี่ยมชมอยู่เสมอซึ่งมีจำกัดพื้นที่ทำงานและอาจส่งผลให้เกิดการเคลื่อนไหวระหว่างการสแกน ทำให้ข้อมูลที่ได้มีส่วนที่ไม่ต้องการเพิ่มเข้ามา

สำหรับขั้นตอนการพัฒนาแบบจำลอง BIM ผู้วิจัยต้องใช้เวลาในการศึกษาและเรียนรู้การทำงานของซอฟต์แวร์ Autodesk Revit ค่อนข้างนาน และยังพบข้อจำกัดในการสร้างรายละเอียดบางประเภทที่ซับซ้อน เช่น งานปูนปั้นหรือจิตรกรรมฝาผนัง รวมถึงลวดลายไม้ที่ประดับตกแต่งในอาคารศาลเจ้า เป็นต้น ซึ่งผู้วิจัยไม่สามารถเขียนรายละเอียดได้อีกทั้งพบปัญหาในการประมวลผลข้อมูลที่ใช้เวลานาน เนื่องจากขนาดไฟล์ข้อมูลจากเครื่องสแกนเลเซอร์สามมิติมีขนาดใหญ่ ทำให้ต้องใช้คอมพิวเตอร์ที่มีประสิทธิภาพสูงในการประมวลผล

ข้อเสนอแนะ

1. การศึกษาในครั้งนี้เป็นการพัฒนาแบบจำลองสารสนเทศอาคาร (BIM) ด้วยเครื่องสแกนเลเซอร์สามมิติเพียงอย่างเดียว ซึ่งในปัจจุบันยังมีเครื่องมือสำรวจอื่น ๆ ที่สามารถเก็บข้อมูลในรูปแบบจุดพิกัดสามมิติได้เช่นกัน โดยการบูรณาการการใช้เครื่องมือหลายประเภทเพื่อให้ได้ข้อมูลที่มีความถูกต้องสูง รายละเอียดครบถ้วนและสามารถเปรียบเทียบความแม่นยำของเครื่องมือในแต่ละชนิดได้
2. ในการประมาณราคาความเสียหายในครั้งนี้ ผู้วิจัยวิเคราะห์ข้อมูลน้ำท่วมซึ่งในระยะสั้นเท่านั้น ในการศึกษาครั้งต่อไปอาจพิจารณาในกรณีที่เกิดน้ำท่วมซึ่งเป็นเวลานานร่วมด้วย เนื่องจากอาจส่งผลกระทบต่อโครงสร้างอาคารอย่างมาก เช่น การเกิดสนิมในเหล็กภายในคอนกรีตและการสึกกร่อนที่ผิวคอนกรีต ทำให้ต้องเพิ่มงบประมาณในการซ่อมแซมโครงสร้างมากขึ้น เป็นต้น
3. การประมาณราคาของอาคารศาลเจ้าโรงเกือก เป็นเพียงการประมาณราคาก่อสร้างเบื้องต้นเท่านั้น ในการศึกษาต่อไปควรจะใช้ราคาอ้างอิงจากผู้เชี่ยวชาญเฉพาะทางโบราณสถานหรือจากกรมศิลปากร เพื่อให้ได้ข้อมูลประมาณราคาที่ต้องใกล้เคียงกับราคาจริงมากที่สุด
4. ข้อมูลแบบจำลอง BIM สามารถนำไปประยุกต์ใช้พัฒนาต่อในการออกแบบมาตรการป้องกันน้ำท่วม เช่น การยกระดับพื้นที่ที่เสี่ยงต่อการเกิดน้ำท่วม หรือการออกแบบเส้นทางระบายน้ำที่เหมาะสมในอนาคต
5. หากมีการวิจัยในครั้งถัดไปควรพิจารณาตัวแปรที่ทำให้เกิดน้ำท่วมซึ่งในพื้นที่จริงร่วมด้วย เช่น ระดับน้ำทะเล ปริมาณน้ำฝน ระบบระบายน้ำ พื้นที่รับน้ำ เป็นต้น เนื่องจากจะสามารถใช้แบบจำลอง BIM ในการคำนวณและวิเคราะห์ติดตามผลที่เกิดขึ้นได้

กิตติกรรมประกาศ

สำหรับการศึกษาการพัฒนาแบบจำลองสารสนเทศอาคาร (BIM) ด้วยเครื่องสแกนเลเซอร์สามมิติเพื่อการอนุรักษ์โบราณสถานของศาลเจ้าโรงเกือก กรณีศึกษาการประเมินผลกระทบจากอุทกภัย ผู้วิจัยต้องขอขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.รัฐรัตน์ บันบำรุงกิจ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่คอยชี้แนะ ให้คำปรึกษาในการดำเนินการวิจัย เจ้าหน้าที่ศาลเจ้าโรงเกือก ที่อนุเคราะห์ให้ใช้พื้นที่ในการศึกษาวิจัย ขอขอบคุณ บริษัทเอทีเอส เอ็นจิเนียริ่ง คอนซัลแตนท์ จำกัด ที่เอื้อเฟื้ออุปกรณ์ในการสำรวจข้อมูล รวมถึงให้คำแนะนำกับผู้วิจัย จนงานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

References

- Barazzetti, L., Banfi, F., Brumana, R., Previtali, M., and Roncoroni, F. (2016). BIM from Laser Scans... Not Just for Buildings: NURBS-Based Parametric Modeling of a Medieval Bridge. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, III-5, 51-56. <https://doi.org/10.5194/isprs-annals-III-5-51-2016>
- Janudom, P. (2017). *Building Information Modeling (BIM) Guidelines to Manage Building Information and As-Built Drawing for Office Building Operation and Maintenance* [Master's thesis, Thammasat University]. https://ethesisarchive.library.tu.ac.th/thesis/2017/TU_2017_5916030025_7680_9302.pdf (in Thai)
- Kowczynska, B., Litwin, U., Piech, I. and Obirek, P. (2016). The Use of Terrestrial Laser Scanning in Surveying Historic Buildings. *2016 Baltic Geodetic Congress (BGC Geomatics)*, <https://doi.org/10.1109/BGC.Geomatics.2016.54>

- Lin, G., Giordano, A., Sang, K., Stendardo, L. and Yang, X. (2021). Application of Territorial Laser Scanning in 3D Modeling of Traditional Village: A Case Study of Fenghuang Village in China. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 10(11), 770. <https://doi.org/10.3390/ijgi10110770>
- Lin, G., Giordano, A. and Sang, K. (2020). From Site Survey to HBIM Model for the Documentation of Historic Buildings: The Case Study of Hexinwu Village in China. *Conservation Science in Cultural Heritage*, 20(1), 111-123. <https://doi.org/10.6092/issn.1973-9494/12793>
- Lokham, T., Boonprate, B., Chaimala, C., Hanouy, K., Amnart, A., Kongnin, T., Itthikorn, W. and Singhabut, B. (2021). Comparison of Terrestrial Laser Scanner (TLS) and Unman Aerial Vehicle (UAV) for Volume Determination in Mae Moh Mine, Lampang. *The 26th National Convention on Civil Engineering*, 23-25 June. (in Thai)
- Peifer, N. and Briese, C. (2007). Geometrical Aspects of Airborne Laser Scanning and Terrestrial Laser Scanning. *IAPRS*, XXXVI, Part 3 Part 3/W52. 311-319. https://www.isprs.org/proceedings/xxxvi/3-w52/final_papers/Pfeifer_2007_keynote.pdf
- RIEGL Laser Measurement Systems GmbH. (2012). *RIEGL VZ-1000 Data Sheet*. RIEGL. www.riegl.com
- Sangchan, N. and Puchana, D. (2018). *Development of Building Information Modeling for Fire Evacuation Analysis* [Bachelor's of Degree, Burapha University]. https://digital_collect.lib.buu.ac.th/project/b00260626.pdf (in Thai)
- Thai PBS News. (2021, 8 November). *Warning: High Tides Until November 11, Expected Again November 20-26*. Thai PBS. <https://www.thaipbs.or.th/news/content/309484> (in Thai)
- The Association of Siamese Architects Under Royal Patronage. (2015). *Thailand BIM Guideline*. Bangkok: Institute of Siamese Architects. ISBN 978-616-7384-13-9 (in Thai)
- Watcharamethakul, P. and Sreshthaputra, A. (2020). Development of Building Information Modeling (BIM) Tools to Calculate the Stormwater Runoff in Preliminary Design Stage. *Sarasatr*, 3(4), 881-894. <https://so05.tci-thaijo.org/index.php/sarasatr/article/view/241969> (in Thai)
- Zlatanova, S., Li, J. and Peters, R. (2017). Challenges in 3D Modeling and Visualization of Urban Flooding. *ISPRS Annals of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, IV-4/W5, 139-146.

พฤติกรรมรอยต่อชิ้นส่วนโครงสร้างคานเสาคอนกรีตสำเร็จรูปภายใต้แรงกระทำพลศาสตร์

Behaviors of Precast Concrete Beam-Column Joints Under Dynamic Loading

พลกฤต จิตต์มาตร^{1*} นันทชัย ชุติลป์¹ และจุฑามาศ ลักษณะกิจ¹

Phonlakit Jitmart^{1*} Nuntachai Chusilp¹ and Chuthamat Laksanakit¹

Received: December 9, 2024; Revised: December 20, 2024; Accepted: December 25, 2024

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาพฤติกรรมของรอยต่อชิ้นส่วนคานเสาคอนกรีตสำเร็จรูปภายใต้แรงกระทำแบบพลศาสตร์ เปรียบเทียบระหว่างรอยต่อคานเสาชนิดหล่อในที่ Cast in Place Beam-Column Joints (CCJ) กับรอยต่อคานเสาคอนกรีตสำเร็จรูป Precast Beam-Column Joints with Plate and Tube (PCPT) ที่เสริมเหล็กกล่องสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาด 100 x 50 mmหนา 4.5 mm ยาว 300 mm ไว้ภายในจุดต่อรูปแบบชิ้นงานทดสอบประกอบด้วย เสาสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด 150 x 150 mm สูง 450 mm คานสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาด 150 x 250 mm ยาว 500 mm จากขอบเสาทั้ง 2 ด้าน ทดสอบโดยให้แรงกระทำแบบสถิตที่ตำแหน่งกึ่งกลางเสาและให้แรงกระทำแบบพลศาสตร์ในอัตราส่วนร้อยละ 40 60 และ 80 ของแรงกระทำแบบสถิต ความถี่ 1.0 - 5.0 Hz จากการทดสอบพบว่ารอยต่อคานเสาคอนกรีต CCJ และรอยต่อคานเสาคอนกรีตสำเร็จรูป PCPT สามารถรับแรงกระทำแบบสถิตได้ 225.90 และ 193.04 kN จากนั้นทดสอบภายใต้แรงกระทำแบบพลศาสตร์พบว่ารอยต่อคานเสาที่มีรูปแบบการแตกร้าวเพิ่มขึ้นแปรผันตรงไปตามอัตราส่วนที่เพิ่มขึ้นของความถี่และแรงกระทำ โดยจุดต่อคานเสาคอนกรีตสำเร็จรูป PCPT มีความสามารถรับแรงกระทำแบบพลศาสตร์ที่อัตราส่วนร้อยละ 80 ได้ดีกว่าจุดต่อคานเสาคอนกรีต CCJ โดยสามารถรับแรงกระทำที่ความถี่ 5.0 Hz จำนวน 200 รอบ จากนั้นทำการสอบเทียบผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการกับแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์พบว่ารอยต่อคานเสาคอนกรีต CCJ และรอยต่อคานเสาคอนกรีตสำเร็จรูป PCPT สามารถรับแรงกระทำแบบสถิตสูงสุดได้ 234.86 และ 205.90 kN ซึ่งมีความคลาดเคลื่อนเล็กน้อยกับผลทดสอบในห้องปฏิบัติการที่ร้อยละ 3.96 และ 6.66 จากผลการทดสอบพบว่าการเสริมเหล็กกล่องในจุดต่อคานเสาคอนกรีตสำเร็จรูปสามารถนำมาพัฒนาในการเพิ่มประสิทธิภาพให้กับจุดต่อด้านการรับแรงกระทำแบบพลศาสตร์เป็นระยะเวลาต่อเนื่องในสภาวะใช้งานได้ดีเมื่อเทียบกับจุดต่อคานเสาชนิดหล่อในที่

คำสำคัญ : คานเสาคอนกรีตสำเร็จรูป; รอยต่อคานเสาคอนกรีต; พฤติกรรมการวิบัติ; แรงกระทำแบบพลศาสตร์

¹ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย

¹ Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Srivijaya

* Corresponding Author, Tel. 08 0070 8898, E - mail: phonlakit.j@rmutsvmail.com

Abstract

This paper presents the behavior of precast concrete beam-column joints under dynamic loading, compares two types of beam-column joints: cast in place beam-column joints (CCJ) and precast beam-column joints with plate and tube (PCPT). The experimental setup consists of square columns (150 × 150 mm, height 450 mm) and rectangular beams (150 × 250 mm, length 500 mm on both sides of the column). The PCPT joints incorporate a rectangular steel tube (100 × 50 mm, 4.5 mm thickness, 300 mm length) at the joints. Static loading at the column's midspan and dynamic loading at 40 % 60 % and 80 % of the static load, with frequencies of 1.0 - 5.0 Hz, were applied. The results reveal that the ultimate static load capacities of CCJ and PCPT were 225.90 kN and 193.04 kN, respectively. Under dynamic loading, cracking increased proportionally with load ratio and frequency. The PCPT joints demonstrated superior performance under 80 % load at a frequency of 5.0 Hz, sustaining 200 cycles. Finite element analysis calibrated against experimental results showed maximum static load capacities of 234.86 kN for CCJ and 205.90 kN for PCPT, with deviations of 3.96 % and 6.66 % from the experimental results, respectively. The test results indicate that reinforcing beam-column joints of precast concrete with steel tube can be developed to enhance the performance of the joints in resisting dynamic loads over extended periods under service loading, compared to cast in place beam-column joints.

Keywords: Precast Beam-Column; Beam-Column Joints; Failure Behaviors; Dynamic Load

บทนำ

ปัจจุบันการก่อสร้างอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กโดยส่วนใหญ่เป็นโครงสร้างระบบคานเสาชนิดหล่อในที่ ซึ่งวิธีการก่อสร้างในรูปแบบดังกล่าวใช้ระยะเวลาในการก่อสร้างค่อนข้างนาน อีกทั้งยังพบความผิดพลาดในระหว่างการก่อสร้างประกอบกับการก่อสร้างในระบบดังกล่าวต้องใช้แรงงานเป็นจำนวนมาก จึงมีความจำเป็นในการลดระยะเวลา ลดความผิดพลาดและอุบัติเหตุ โดยยังสามารถควบคุมคุณภาพได้ วิธีการแก้ปัญหาที่ได้รับความนิยมเพิ่มขึ้นคือ การก่อสร้างโครงสร้างอาคารแบบสำเร็จรูปจากโรงงานหรือภายนอกสถานที่ก่อสร้าง (Ahn et al., 2020; Kim, S., Hwang and Son, 2022) เช่น คานคอนกรีตสำเร็จรูป เสาคอนกรีตสำเร็จรูป พื้นคอนกรีตสำเร็จรูป เป็นต้น (Thumrongvut et al., 2013; Kongkaew et al., 2021) ซึ่งจะกำหนดขนาด รูปร่างและรูปแบบจุดต่อที่แน่นอนจากสถานที่ผลิตก่อนนำมาติดตั้งภายในสถานที่ก่อสร้าง แต่การก่อสร้างด้วยระบบชิ้นส่วนคอนกรีตเสริมเหล็กสำเร็จรูปจำเป็นต้องมีความรู้ความเข้าใจเกี่ยวกับพฤติกรรมรอยต่อของโครงสร้างรวมถึงวิธีการยึดรอยต่อเข้าด้วยกันเพื่อป้องกันอันตรายและความเสียหายที่จะเกิดขึ้น ในอดีตการออกแบบโครงสร้างรอยต่อในแนวแกนคานเสาคอนกรีตสำเร็จรูปมักจะไม่ได้รับการออกแบบให้มีความสามารถในการรองรับความเสียหายจากแรงกระทำแบบพลศาสตร์หรือแรงกระทำซ้ำ ๆ แบบต่อเนื่องมากนัก ทำให้เกิดความเสียหายต่อโครงสร้างหลัก ดังนั้นเพื่อให้ทราบถึงพฤติกรรมของรอยต่อแต่ละประเภทจึงควรทำการศึกษาพฤติกรรมของรอยต่อก่อนการปรับปรุงจุดต่อคานเสาคอนกรีตสำเร็จรูปมีการเสริมเหล็กข้ออ้อย DB 10 mm ภายในจุดต่อที่มีความยาว 1.5 เท่าของความลึกประสิทธิผลของคาน (Hansapinyo et al., 2016) พบว่าการเพิ่มเหล็กเสริมตามแนวยาวที่ระดับกลางภายในบริเวณจุดต่อยาวต่อเนื่องไปจนถึงปลายคานสามารถรับแรงแผ่นดินไหวได้ดีขึ้นในด้านกำลัง รูปแบบการวิบัติแบบเหนียวได้ดีขึ้นอย่างชัดเจน การเสริมเหล็กข้ออ้อยภายในจุดต่อยังมีการศึกษาเพิ่มเติมโดยการติดตั้งกับแผ่นเหล็กหนา 20 mm เชื่อมยึดกับเหล็กข้ออ้อย DB 16 mm ที่ความยาว 0.5 1.0 และ 1.5 m (Kongkaew et al., 2021) ผลการศึกษาพบว่าการเพิ่มความยาวของเหล็กข้ออ้อยสามารถเพิ่มค่าการแอนตัวของคาน $L/240$ เทียบกับการเสริมเหล็ก

ที่ความยาว 0.5 เท่ากับ 4.27 และ 12.23 % นอกจากการเสริมเหล็กข้ออ้อยยังมีการศึกษาการติดตั้งวัสดุอื่น ๆ เพื่อปรับปรุงจุดต่อคานเสาคอนกรีตสำเร็จรูปอีกหลายรูปแบบ อาทิเช่น การเสริมเหล็กแผ่นและเหล็กกล่องภายในจุดต่อคานเสาคอนกรีตสำเร็จรูปเพื่อย้ายจุดหมุนพลาสติก (Choi et al., 2013) พบว่าการติดตั้งแผ่นเหล็กภายในจุดต่อมีกำลังรับแรงของจุดต่อมากขึ้น 1.15 เท่าเทียบกับจุดต่อแบบหล่อในที่อีกทั้งสามารถเพิ่มระยะการแอนตัวได้ร้อยละ 3.5 มีการศึกษาพฤติกรรมการรับแรงกระทำทั้งแบบวัฏจักรของจุดต่อคานเสาคอนกรีตสำเร็จรูป โดยการติดตั้งเหล็กรูปตัวทีภายในจุดต่อ (Ketiyo, 2017) ผลการทดสอบพบว่าการเสริมเหล็กหน้าตัดรูปตัวทีจำนวน 2 ชุดภายในจุดต่อส่งผลให้ค่ากำลังรับแรงดัดสูงสุดของหน้าตัดคานบริเวณหน้าเสาซึ่งมีความยาวเท่ากับควมลึกประสิทธิภาพของคานมีค่ามากกว่าบริเวณอื่น ๆ เท่ากับ 1.25 เท่า เนื่องจากการย้ายจุดหมุนพลาสติกออกจากหน้าเสา นอกจากนี้มีการศึกษาเพิ่มเติมในการใช้แผ่นเหล็กยึดติดกับสลักเกลียวยึดติดกับเหล็กหน้าตัดรูปตัวไอฝังในคานคอนกรีตสำเร็จรูป (Zhang et al., 2020) ร่วมกับคอนกรีตผสมไฟเบอร์โดยพบว่าจุดต่อมีการย้ายจุดหมุนพลาสติกได้อย่างมีประสิทธิภาพ ในอดีตที่ผ่านมามีการพัฒนารูปแบบจุดต่อคานเสาคอนกรีตค่อนข้างมาก แต่การศึกษาพฤติกรรมของจุดต่อคานเสาคอนกรีตสำเร็จรูปด้วยการติดตั้งเหล็กรูปพรรณชนิดรีดเย็นร่วมกับเหล็กแผ่นนั้นยังไม่เป็นที่แพร่หลาย งานวิจัยนี้จึงได้นำเหล็กรูปพรรณชนิดรีดเย็นหน้าตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้าติดตั้งภายในจุดต่อระหว่างคานและเสาคอนกรีตสำเร็จรูปเพื่อศึกษาพฤติกรรมด้านการรับแรงกระทำแบบพลศาสตร์ ซึ่งการทดสอบรูปแบบของรอยต่อชนิดต่าง ๆ ต้องมีการทดสอบในห้องปฏิบัติการเพื่อให้มีความแม่นยำและมีความน่าเชื่อถือแต่การทดสอบอาจมีข้อผิดพลาดได้ทั้งจากกรณีของวัสดุหรือขั้นตอนของการปฏิบัติงาน วิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์จึงเข้ามามีบทบาทเพื่อนำมาประยุกต์และวิเคราะห์ปัญหาต่าง ๆ ซึ่งจะหาคำตอบประกอบด้วยค่าของตัวแปรตามตำแหน่งต่าง ๆ โดยพิจารณาที่ละเอลิเมนต์ สร้างสมการในแต่ละเอลิเมนต์มาประกอบเข้าด้วยกันทำให้เกิดระบบสมการรวมเพื่อตรวจสอบปัญหาที่แท้จริง ที่ผ่านมามีการประยุกต์ใช้วิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์ในการตรวจสอบความน่าเชื่อถือของการทดสอบมากขึ้น โดยพบว่าผลที่ได้จากแบบจำลองนั้นมีค่าใกล้เคียงกันมากกับทดสอบในห้องปฏิบัติการ (Tejaswini et al., 2015; Atichat et al., 2017; Ketiyo, 2017)

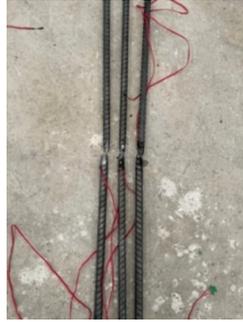
วิธีดำเนินการวิจัย

1. คุณสมบัติวัสดุ

วัสดุที่ใช้สำหรับการศึกษาประกอบด้วย คอนกรีต มอร์ตาร์ เหล็กเส้นกลมผิวเรียบ เหล็กเส้นกลมผิวข้ออ้อย เหล็กแผ่น เหล็กกล่องรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าและเหล็กฉากขนาดเท่ากัน (รูปที่ 1(ก) - (จ)) โดยคุณสมบัติทางกลเป็นไปตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมไทย (มอก.) ทดสอบคอนกรีตรูปทรงลูกบาศก์ที่อายุ 28 วัน โดยทดสอบกำลังรับแรงอัดและแรงดึงของคอนกรีตตามมาตรฐาน ASTM C39 (2018) ทดสอบมอร์ตาร์รูปทรงลูกบาศก์ที่อายุ 5 วัน ตามมาตรฐานการหาค่ากำลังของมอร์ตาร์ ASTM C109 (2021) และตามมาตรฐานการหาค่ากำลังดึงมอร์ตาร์ซีเมนต์ ASTM C190 (1985) เหล็กเส้นกลมผิวเรียบ RB9 mm ทดสอบตาม มอก. 20-2559 (Thai Industrial Standard, 2016a) เหล็กเส้นกลมผิวข้ออ้อย DB12 mm ตาม มอก. 24-2559 (Thai Industrial Standard, 2016b) เหล็กแผ่นหนา 12 mm ทดสอบตาม มอก. 1479-2558 (Thai Industrial Standard, 2015) เหล็กกล่องรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาด (H x B) เท่ากับ 100 x 50 mm หนา 4.5 mm และเหล็กฉากเท่ากันขนาด 65 x 65 mm หนา 5 mm ตาม มอก. 107-2561 (Thai Industrial Standard, 2018) ทดสอบกำลังรับแรงดึงเหล็กกล้าคาร์บอนตามมาตรฐาน ASTM A500 (2018) ซึ่งผลที่ได้จากการทดสอบสอดคล้องกับคุณสมบัติทางกลที่ได้กำหนดไว้ตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมไทย (มอก.) ดังตารางที่ 1 และตารางที่ 2



(ก) เหล็กรูปพรรณ



(ข) เหล็กเส้น



(ค) ทดสอบกำลังอัดคอนกรีต



(ค) ทดสอบกำลังอัดมอร์ต้าร์



(ง) ทดสอบกำลังดึงมอร์ต้าร์



(จ) ทดสอบกำลังดึงคอนกรีต

รูปที่ 1 วัสดุและเครื่องมือทดสอบ

ตารางที่ 1 ผลทดสอบคุณสมบัติทางกลของเหล็กเส้นและเหล็กรูปพรรณ

Material	f_y (MPa)	f_y^* (MPa)	f_u (MPa)	f_u^* (MPa)	E (GPa)	E^* (GPa)
DB12 mm	566	390	662	560	206	210
RB9 mm	431	235	559	385	221	210
PL 100x200x12 mm	367	235	445	400	200	210
L 65x65x5 mm	338	235	485	400	204	210
T 100x50x20x4.5 mm	411	245	470	400	210*	210

* ค่าตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม

จากตารางที่ 1 จะเห็นได้ว่าการทดสอบคุณสมบัติทางกลของเหล็กเส้นและเหล็กรูปพรรณอยู่ในค่าที่เป็นไปตามมาตรฐานโดยเหล็กเส้นกลมผิวข้อย DB12 mm มีค่ากำลังรับแรงดึงที่จุดคราก (f_y) เท่ากับ 566 MPa และค่ากำลังรับแรงดึงประลัย (f_u) 662 MPa เหล็กเส้นกลมชนิดผิวเรียบ RB9 mm ค่ากำลังรับแรงดึงที่จุดคราก (f_y) มีค่าเท่ากับ 431 MPa ค่ากำลังรับแรงดึงประลัย (f_u) เท่ากับ 559 MPa จากนั้นเมื่อทำการทดสอบคุณสมบัติทางกลของเหล็กรูปพรรณพบว่าค่าที่ได้จากการทดสอบเหล็กแผ่นหนา 12 mm (PL100 x 200 x 12 mm) เหล็กฉากขาเท่ากัน (L65 x 65 x 5 mm) และเหล็กกล่องสี่เหลี่ยมผืนผ้า (T100 x 500 x 20 x 4.5 mm) มีค่ากำลังรับแรงดึงที่จุดคราก (f_y) เท่ากับ 367 338 และ 411 MPa และค่ากำลังรับแรงดึงประลัย (f_u) เท่ากับ 445 485 และ 470 MPa ตามลำดับ ค่าโมดูลัสยืดหยุ่น (E) ที่ได้จากการทดสอบอยู่ในช่วงค่ามาตรฐานอุตสาหกรรมไทยกำหนดไว้

ตารางที่ 2 ผลทดสอบคุณสมบัติทางกลของคอนกรีตและมอร์ตาร์

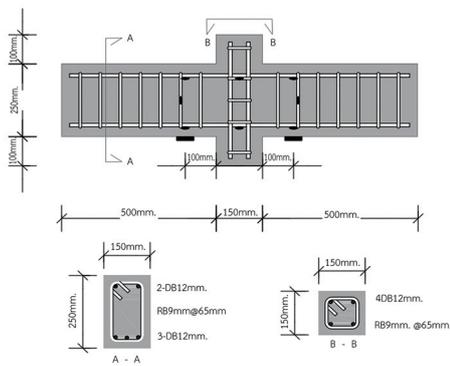
Material	f'_c (MPa)	f'_t (MPa)	E_c (GPa)
Concrete 28 _d	28.99	2.61	25.31
Mortar 5 _d	37.75	2.00	28.88

กำลังอัดและกำลังดึงของคอนกรีตและมอร์ตาร์ที่ใช้ในการวิจัยครั้งนี้ มีค่ากำลังอัดประลัยที่ 28 วัน (f'_c) ของแท่งคอนกรีตทรงลูกบาศก์เท่ากับ 28.99 MPa และค่ากำลังดึงประลัยที่ 28 วัน (f'_t) ของแท่งคอนกรีตทรงกระบอกเท่ากับ 2.61 MPa โดยมอร์ตาร์ที่ใช้สำหรับเทหุ้มรอยต่อระหว่างคานเสาคอนกรีตสำเร็จรูปมีค่ากำลังอัดประลัยที่ 5 วัน (f'_c) ของแท่งมอร์ตาร์ทรงลูกบาศก์เท่ากับ 37.75 MPa และกำลังรับแรงดึงประลัยที่ 5 วัน (f'_t) ของแท่งทรงบริเคทเท่ากับ 2.00 MPa ค่าโมดูลัสยืดหยุ่น (E_c) ของคอนกรีตและมอร์ตาร์คำนวณตาม ACI 318-19 (2019) เป็นไปตามสมการที่ (1)

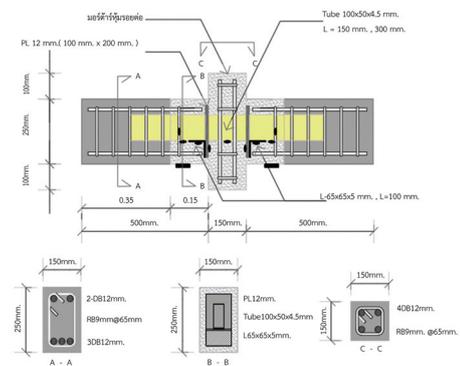
$$E_c = 4700\sqrt{f'_c} \tag{1}$$

ตัวอย่างทดสอบ

ตัวอย่างการทดสอบเป็นจุดต่อคานเสาคอนกรีตเสริมเหล็กชนิดหล่อในที่และคานเสาชนิดคอนกรีตเสริมเหล็กสำเร็จรูปหน้าตัดเสาคี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด 150 x 150 mm สูง 450 mm หน้าตัดคานสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาด 150 x 250 mm ยาว 500 mm จากขอบเสาทั้ง 2 ด้าน ตัวอย่างคานเสาคอนกรีตจำนวน 6 ตัวอย่าง แบ่งเป็น 2 รูปแบบ ได้แก่ รูปแบบที่ 1 Cast in Place Beam-Column Joints (CCJ) เป็นรูปแบบคานเสาคอนกรีตเสริมเหล็กชนิดหล่อในที่ทำการเสริมเหล็ก DB12 mm ภายในคานจำนวน 5 เส้น แบ่งเป็นด้านล่าง 3 เส้น ด้านบน 2 เส้น และเสริมเหล็ก DB12 mm ภายในเสาจำนวน 4 เส้น เหล็กปลอกทั้งหมดใช้เป็นเหล็ก RB9 mm ระยะห่าง 65 mm ตาม มยพ.1301/1302-61 (Hansapinyo et al., 2016; DPT Committee 1301/1302-61, 2020) จากนั้นเทคอนกรีตคานเสาเป็นชิ้นเดียวกัน ดังรูปที่ 2(ก) รูปแบบที่ 2 Precast Beam-Column Joints with Plate and Tube (PCPT) เป็นรูปแบบคานเสา คอนกรีตชนิดสำเร็จรูปทำการเสริมเหล็ก DB12 mm ภายในคานและเสาเหมือนกับรูปแบบชนิดหล่อในที่ โดยที่เหล็กเสริมในคานแยกออกจากกันไม่ฝากเหล็กเข้าภายในเสา จากนั้นทำการฝังเหล็กกล่องสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาด 100 x 50 mm หนา 4.5 mm ยาว 300 mm ในคานคอนกรีตทั้ง 2 ด้าน เทคอนกรีตคานโดยเว้นระยะจากขอบคาน 150 mm ทำการเชื่อมยึดเหล็กกล่องกับเหล็กฉากขาเท่ากันขนาด 65 x 65 mm หนา 5.0 mm เชื่อมติดกับเหล็กแผ่นสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาด 100 x 200 mm หนา 12 mm ที่ติดตั้งภายในเสาคอนกรีต จากนั้นเทมอร์ตาร์หุ้มรอยต่อระหว่างคานเสาให้เป็นชิ้นเดียวกันดังรูปที่ 2(ข)



(ก) รูปแบบคานเสา CCJ

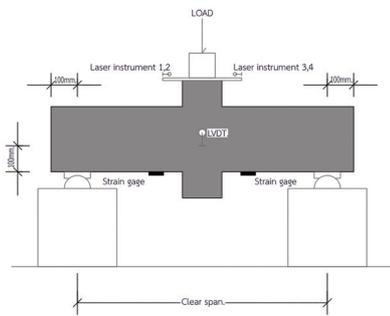


(ข) รูปแบบคานเสา PCPT

รูปที่ 2 รูปแบบจุดต่อคานเสาคอนกรีต

วิธีการทดสอบ

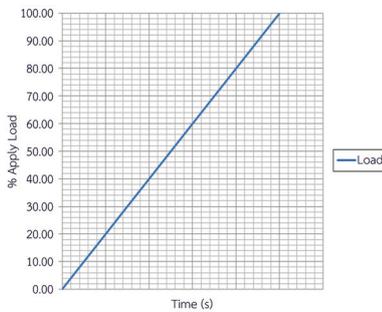
ทำการติดตั้งชิ้นงานคานเสาชนิดหล่อในที่และคานเสาชนิดสำเร็จรูปดังรูปที่ 2(ก) - (ข) กับเครื่องทดสอบ Universal Testing Machine ขนาดกำลัง 500 kN โดยติดตั้งแผ่นเหล็กหนา 12 mm บริเวณด้านบนเพื่อทำการถ่ายแรงกระทำจากเครื่องทดสอบมายังชิ้นงานจากนั้นทำการติดตั้ง Laser Instrument Sensor ที่บริเวณมุมแผ่นเหล็กถ่ายแรงจำนวน 4 ชุด และติดตั้งอุปกรณ์ LVDT ที่บริเวณจุดกลางของเสาคอนกรีตเพื่อทำการเก็บข้อมูลอัตราการเคลื่อนตัวตามแนวตั้ง ติดตั้ง Strain Gauge ภายในเหล็กและผิวคอนกรีตเพื่อตรวจสอบความเครียดที่เกิดขึ้น รูปที่ 3(ก) - (ข) จากนั้นทำการทดสอบโดยให้แรงกระทำแบบสถิตที่บริเวณด้านบนของชิ้นงานโดยเพิ่มแรงกดต่อเนื่องที่อัตรา 2 mm/min จนกระทั่งชิ้นงานเกิดการวิบัติไม่สามารถต้านแรงกระทำได้ ดังรูปที่ 3(ค) เพื่อให้ทราบถึงกำลังสูงสุดที่สามารถรับได้ของแต่ละรูปแบบ เมื่อทราบกำลังสูงสุดของแต่ละรูปแบบแล้วจึงทำการติดตั้งชิ้นงานขึ้นใหม่ทั้งชิ้นงานคานเสาชนิดหล่อในที่ CCJ และชิ้นส่วนคานเสาชนิดสำเร็จรูป PCPT จากนั้นทดสอบชิ้นงานโดยให้แรงกระทำแบบพลศาสตร์ที่น้ำหนักแรงกระทำร้อยละ 40 60 และ 80 ของน้ำหนักแรงกระทำสูงสุดแบบสถิตที่ความถี่ 1.0 - 5.0 Hz จำนวน 200 รอบ ดังรูปที่ 3(ง)



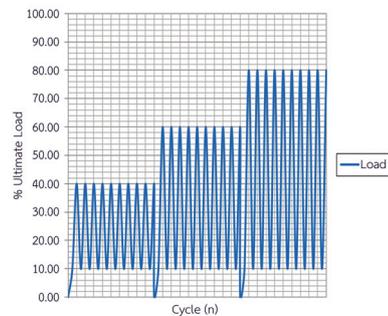
(ก) รูปแบบการติดตั้งชิ้นงาน



(ข) แสดงการติดตั้งชิ้นงาน



(ค) รูปแบบแรงกระทำแบบสถิต



(ง) รูปแบบแรงกระทำแบบพลศาสตร์

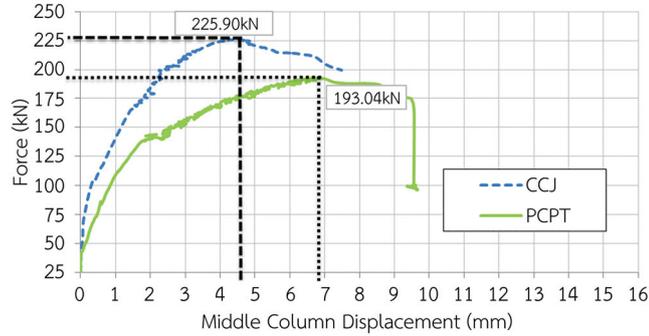
รูปที่ 3 รูปแบบการติดตั้งและการให้แรงกระทำขึ้นตัวอย่างทดสอบ

ผลการทดสอบและอภิปรายผล

พฤติกรรมการรับแรงของจุดต่อคานเสาภายใต้แรงกระทำแบบสถิต

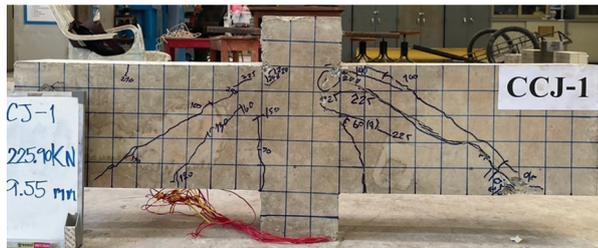
รูปที่ 4 แสดงแผนภาพของความสัมพันธ์ระหว่างการให้แรงกระทำแบบสถิตที่ด้านบนของเสากับระยะการแอ่นตัวที่กึ่งกลางเสา จากแผนภาพพบว่าจุดต่อคานเสาคอนกรีตมีพฤติกรรมการรับแรงกระทำแบ่งเป็น 2 ช่วง โดยในช่วงแรกพฤติกรรมเป็นแบบเชิงเส้น (Linear) จุดต่อทั้ง 2 รูปแบบมีความสามารถในการรับแรงกระทำที่แตกต่างกัน ผลของตัวอย่าง CCJ มีกำลังรับแรงกระทำสูงสุดเท่ากับ 225.90 kN ตัวอย่าง PCPT มีกำลังรับแรงกระทำสูงสุดเท่ากับ 193.04 kN ซึ่งน้อยกว่าตัวอย่างควบคุม 14.54 % จากนั้นเมื่อเข้าสู่ในช่วงที่สองพฤติกรรมแบบไม่เชิงเส้น (Nonlinear) ตัวอย่างทดสอบ CCJ มีความสามารถในการรับแรงกระทำค่อย ๆ ลดลง ค่าการแอ่นตัวที่จุดกึ่งกลางเสามีค่าเพิ่มขึ้นก่อนเกิดการวิบัติ

ตัวอย่างทดสอบ PCPT เมื่อจุดต่อรับแรงกระทำถึงจุดสูงสุด จุดต่อมีกำลังรับแรงกระทำลดลงเล็กน้อยแต่มีค่าการแอ่นตัวเพิ่มขึ้นต่อเนื่องจาก 7 mm ไปจนถึง 9.55 mm จากนั้นจุดต่อแอ่นตัวเพิ่มขึ้นแบบทันทีทันใดจากการวิบัติของเหล็กกล่องขาดออกจากเหล็กแผ่นภายในเสา ซึ่งเป็นการวิบัติจากรอยเชื่อมระหว่างเหล็กแผ่นที่เชื่อมยึดกับเหล็กกล่องขาดออกจากกัน

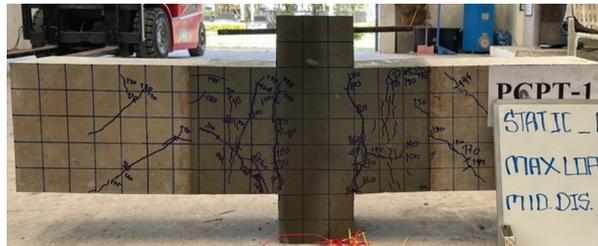


รูปที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำกับระยะการแอ่นตัว

ลักษณะการวิบัติของจุดต่อคานเสาคอนกรีต



(ก) จุดต่อคานเสา CCJ



(ข) จุดต่อคานเสา PCPT

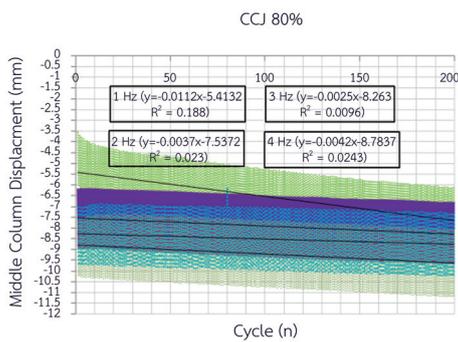
รูปที่ 5 ลักษณะการวิบัติของจุดต่อคานเสาคอนกรีตภายใต้แรงกระทำแบบสถิต

รูปที่ 5 แสดงลักษณะการวิบัติและรูปแบบการแตกร้าว จุดต่อคานเสาคอนกรีตชนิดหล่อในที่ CCJ ตัวอย่างทดสอบเริ่มเกิดรอยร้าวในแนวตั้งทำมุมประมาณ 15 องศา ที่แรงกระทำ 60 kN โดยรอยร้าวห่างจากขอบเสาประมาณ 5 cm และมีความยาว 15 cm หลังจากเพิ่มน้ำหนักแรงกระทำจนถึง 50 % ของแรงกระทำสูงสุดพบมีรอยร้าวเพิ่มขึ้นจากขอบเสาเป็นแนวทแยงประมาณ 45 องศา จากขอบเสาไปยังจุดรองรับทั้ง 2 ด้าน และที่น้ำหนักแรงกระทำ 70 - 80 % ของแรงกระทำสูงสุดรอยร้าวมีการปริแตกอย่างชัดเจนที่บริเวณจุดรองรับและบริเวณด้านบนของคานจากการอัดแตกของพฤติกรรมรับแรงอัดของคอนกรีต โดยจุดต่อคานเสาคอนกรีตชนิดหล่อในที่สามารถรับน้ำหนักแรงกระทำสูงสุดได้ 225.90 kN จุดต่อคานเสาคอนกรีตสำเร็จรูป PCPT เมื่อทำการให้น้ำหนักแรงกระทำไปถึง 40 kN จุดต่อเริ่มมีรอยแตกร้าวของคอนกรีตเป็นแนวตั้งที่บริเวณขอบเสาคอนกรีต จากนั้นเมื่อทำการเพิ่มน้ำหนักแรงกระทำไปที่ 35 - 50 % ของแรงกระทำสูงสุดพบคอนกรีตบริเวณคานทดสอบห่างจากแนวรอยต่อขอบเสาประมาณ 10 cm มีรอยแตกร้าวเป็นแนวนอนและแนวเฉียงโดยมีทิศทางไปด้านจุดรองรับ และเมื่อเพิ่มน้ำหนักแรงกระทำไปจนถึง 75 - 85 %

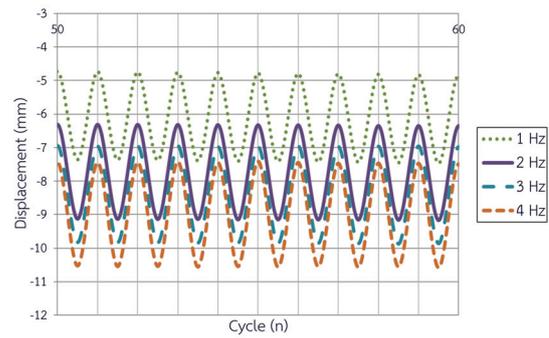
พบรอยแตกร้าวของคอนกรีตเพิ่มขึ้นห่างจากขอบเสา 15 cm เป็นแนวทแยงมุม 45 องศาไปยังจุดรองรับและเมื่อเพิ่มน้ำหนักแรงกระทำไปจนถึงจุดวิบัติ จุดต่อคานเสาสามารถรับแรงกระทำสูงสุดได้ 193.40 kN โดยเหล็กกล่องที่เชื่อมถ่ายแรงระหว่างแผ่นเหล็กภายในเสาขาดออกซึ่งเป็นการวิบัติจากรอยเชื่อมระหว่างเหล็กแผ่นที่เชื่อมยึดกับเหล็กกล่องขาดออกจากกัน

พฤติกรรมการรับแรงของจุดต่อคานเสาภายใต้แรงกระทำแบบพลศาสตร์

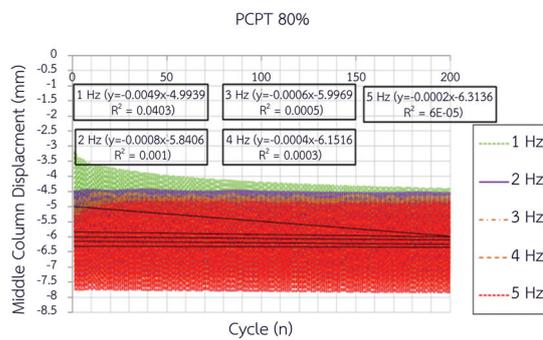
เมื่อทราบกำลังรับแรงกระทำสูงสุดของแต่ละจุดต่อแล้วจากนั้นทำการทดสอบโดยให้แรงกระทำแบบพลศาสตร์ที่ความถี่ 1.0 - 5.0 Hz ที่น้ำหนักแรงกระทำอัตราส่วนร้อยละ 40 60 และ 80 ของกำลังรับแรงกระทำสูงสุด จำนวนรอบการให้แรงกระทำ 200 รอบ เพื่อศึกษาพฤติกรรมของจุดต่อในด้านของความสัมพันธ์ระหว่างระยะการแอ่นตัวกับจำนวนรอบและความถี่การให้แรงกระทำ รวมถึงลักษณะการวิบัติของจุดต่อ ดังรูปที่ 6(ก) - (ง)



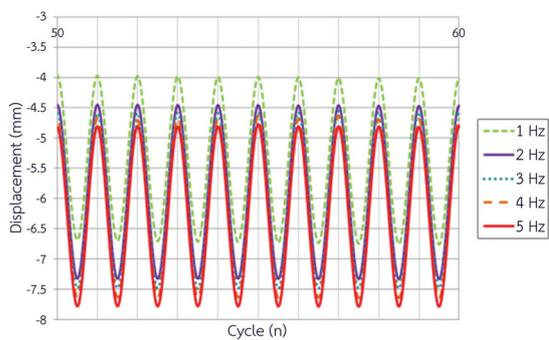
(ก) จุดต่อคานเสา CCJ



(ข) ขยายจุดต่อคานเสา CCJ



(ค) จุดต่อคานเสา PCPT



(ง) ขยายจุดต่อคานเสา PCPT

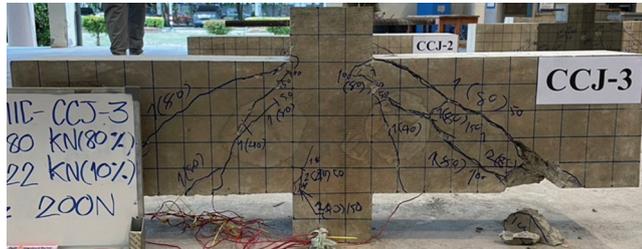
รูปที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะการแอ่นตัวกับจำนวนรอบและความถี่การให้แรงกระทำ

จากการทดสอบเมื่อให้แรงกระทำแบบพลศาสตร์ที่น้ำหนักแรงกระทำอัตราส่วนร้อยละ 80 ของความสามารถรับน้ำหนักสูงสุดจุดต่อทั้ง 2 รูปแบบมีค่าการแอ่นตัวเพิ่มขึ้นตามจำนวนรอบของการให้แรงกระทำและเมื่อเพิ่มความถี่โดยจุดต่อ CCJ ที่เป็นตัวอย่างควบคุมเมื่อให้น้ำหนักแรงกระทำที่ความถี่ 1.0 Hz พบว่าจุดต่อมีการแอ่นตัวเพิ่มขึ้นตามจำนวนรอบของแรงกระทำมากที่สุด เมื่อเปรียบเทียบกับในช่วงความถี่แรงกระทำที่ 2.0 - 4.0 Hz และจุดต่อ CCJ สามารถรับน้ำหนักกระทำที่อัตราส่วนร้อยละ 80 ความถี่แรงกระทำ 4 Hz จำนวน 200 รอบ จุดต่อ PCPT พบว่าสามารถรับแรงกระทำที่อัตราส่วนร้อยละ 80 ได้ดีที่สุด สามารถรับความถี่แรงกระทำ 5.0 Hz โดยความสัมพันธ์ของการแอ่นตัวเมื่อเปรียบเทียบกับความถี่ 1.0 Hz จุดต่อมีค่าการแอ่นตัวเพิ่มขึ้นเล็กน้อยตามจำนวนรอบของแรงกระทำและที่ความถี่ 2.0 - 5.0 Hz มีค่าการแอ่นตัวใกล้เคียงกันเนื่องจากการเสริมเหล็กกล่องภายในทำให้จุดต่อมีความเหนียวเพิ่มขึ้น

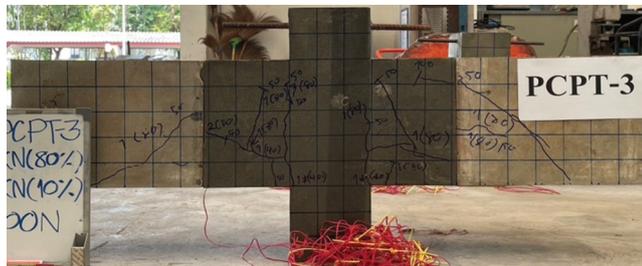
ลักษณะการวิบัติของจุดต่อคานเสาคอนกรีตภายใต้แรงกระทำแบบพลศาสตร์

รูปที่ 7(ก) แสดงลักษณะการวิบัติและรูปแบบการแตกร้าว จุดต่อคานเสาชนิดหล่อในที่ CCJ มีรูปแบบการแตกร้าวเป็นแนวทแยงทำมุม 45 องศาจากขอบเสาไปยังจุดรองรับ โดยรอยร้าวมีความรุนแรงมากขึ้นเมื่อเพิ่มความถี่ของ

แรงกระทำที่ 4.0 Hz คอนกรีตบริเวณจุดรองรับเกิดการปริแตกเสียหายอย่างรุนแรงไม่สามารถเพิ่มความถี่แรงกระทำได้ จุดต่อคานเสาคอนกรีตสำเร็จรูป PCPT เมื่อเพิ่มความถี่แรงกระทำไปที่ 5.0 Hz จุดต่อสามารถรับแรงกระทำได้ตามเดิม ไม่มีความเสียหายเพิ่มขึ้นจากความถี่แรงกระทำ 1.0 2.0 3.0 4.0 Hz โดยรูปแบบการแตกร้าวเกิดขึ้นเป็นแนวตั้ง บริเวณรอยต่อของคานและขอบเสาจากนั้นพบรอยร้าวเพิ่มขึ้นจากขอบเสาด้านบนเป็นแนวทแยงไปยังจุดรองรับ โดยรอยร้าวยังไม่เกิดความเสียหายขั้นรุนแรงจุดต่อยังสามารถรับน้ำหนักแรงกระทำเพิ่มเติม ดังรูปที่ 7(ข)



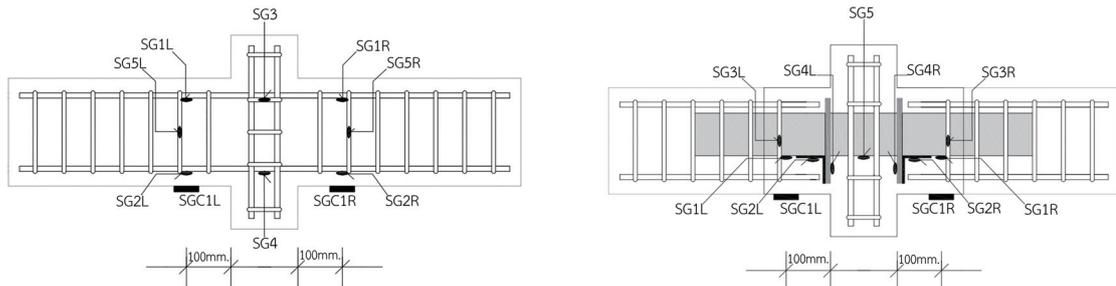
(ก) จุดต่อคานเสา CCJ



(ข) จุดต่อคานเสา PCPT

รูปที่ 7 ลักษณะการวิบัติของจุดต่อคานเสาคอนกรีตภายใต้แรงกระทำแบบพลศาสตร์

การกระจายความเครียดภายในจุดต่อคาน-เสาคอนกรีต



(ก) จุดต่อคานเสา CCJ

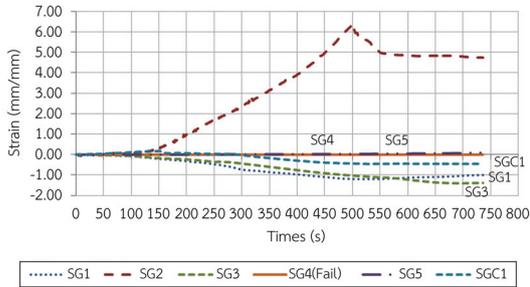
(ข) จุดต่อคานเสา PCPT

รูปที่ 8 ตำแหน่งติดตั้ง Strain Gauge

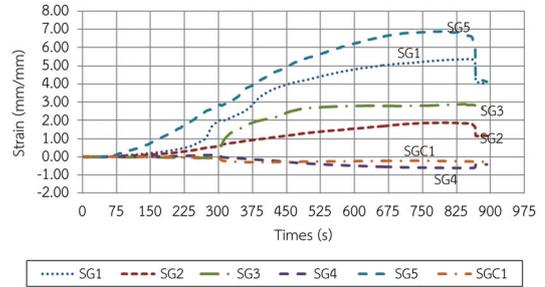
จากการทดสอบได้ทำการติดตั้งชุด Strain Gauge ไว้ภายในเหล็กเสริมและผิวคอนกรีตเพื่อทำการศึกษาพฤติกรรมของเหล็กเสริมและคอนกรีตในขณะรับแรงกระทำแบบสถิตและแรงกระทำซ้ำแบบพลศาสตร์ โดยตำแหน่งการติดตั้ง ดังรูปที่ 8(ก) - (ข)

รูปที่ 9(ก) - (ข) พบว่าพฤติกรรมความเครียดของเหล็กเสริมของจุดต่อคานเสาคอนกรีตชนิดหล่อในที่ CCJ เมื่อรับแรงกระทำแบบสถิตพบว่าพฤติกรรมของเหล็กเสริมหลักด้านล่างของคานตำแหน่งห่างจากขอบเสา 10 cm ถึงจุดคราก หลังจากนั้นเข้าสู่สภาวะไม่เป็นเชิงเส้นก่อนจุดต่อคานเสาคอนกรีตเกิดการวิบัติ จุดต่อคานเสาคอนกรีตชนิดสำเร็จรูป

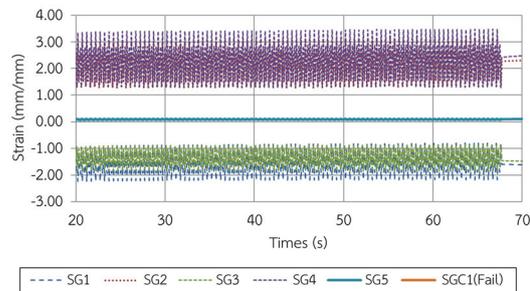
PCPT เมื่อให้น้ำหนักแรงกระทำพบว่าเหล็กกล่องบริเวณภายในเสาถึงจุดครากและเข้าสู่สภาวะไม่เป็นเชิงเส้นก่อนเกิดการวิบัติของจุดต่อ ทั้งนี้เมื่อทำการทดสอบโดยให้แรงกระทำแบบพลศาสตร์ที่ความถี่ 4.0 5.0 Hz พบว่าพฤติกรรมของเหล็กเสริมยังอยู่ในช่วงพฤติกรรมเชิงเส้นยังไม่ถึงจุดคราก โดยจุดต่อ CCJ พบว่าเหล็กเสริมมีความเครียดมากกว่าจุดต่อ PCPT รูปที่ 9(ค) - (ง)



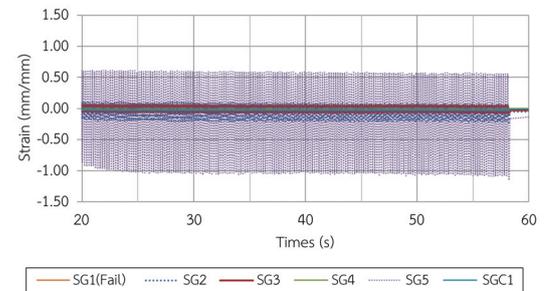
(ก) ความเครียดภายในจุดต่อ CCJ แรงสถิต



(ข) ความเครียดภายในจุดต่อ PCPT แรงสถิต



(ค) ความเครียดภายในจุดต่อ CCJ แรงพลศาสตร์

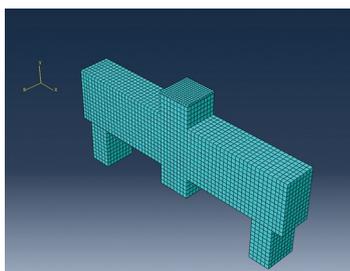


(ง) ความเครียดภายในจุดต่อ PCPT แรงพลศาสตร์

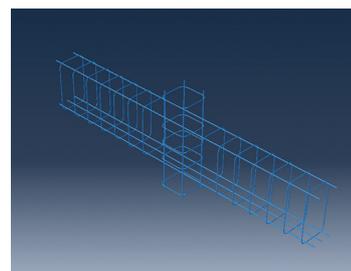
รูปที่ 9 แผนภาพแสดงความเครียดภายในจุดต่อกานเสาคอนกรีต

ผลการเปรียบเทียบแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์

ตัวอย่างจุดต่อทั้ง 2 รูปแบบทำการจำลองจุดต่อด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์โดยโปรแกรม ABAQUS (Dassault Systemes Simulia Corp, 2014) กำหนดชนิดเอลิเมนต์คอนกรีต เหล็กแผ่นและเหล็กรูปฉากเป็นชนิด C3D8R กำหนดชนิดเอลิเมนต์เหล็กเสริมเป็นชนิด T3D2 (Atichat et al., 2017) และกำหนดชนิดเอลิเมนต์เหล็กกล่องเป็นชนิด S4A กำหนดการยึดเหนี่ยวระหว่างเหล็กเสริมและคอนกรีตกำหนดให้เป็นแบบ Embedded Region กำหนดการยึดเหนี่ยวระหว่างเหล็กกล่องและคอนกรีตเป็นแบบ Tie กำหนดขอบเขตระหว่างคอนกรีตวางอยู่บนจุดรองรับแบบ Interaction (Atichat et al., 2017) จากนั้นทำการแบ่งเอลิเมนต์แต่ละชิ้นส่วนออกเป็นขนาด 20 - 30 mm ดังรูปที่ 10(ก) - (ง)

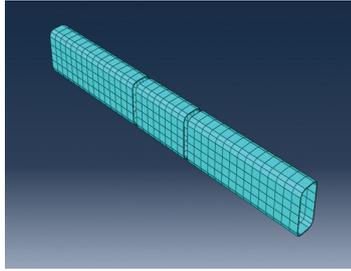


(ก) รูปแบบเอลิเมนต์ C3D8R

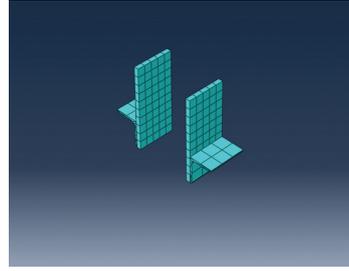


(ข) รูปแบบเอลิเมนต์ T3D2

รูปที่ 10 ชนิดเอลิเมนต์ของแบบจำลองจุดต่อกานเสาคอนกรีต



(ค) รูปแบบเอลิเมนต์ S4A

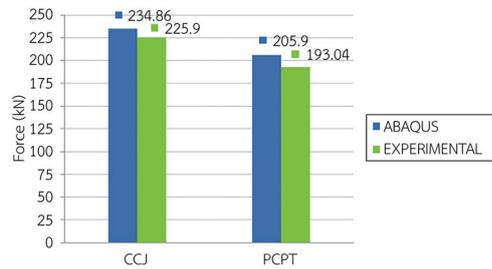


(ง) รูปแบบเอลิเมนต์ C3D8R

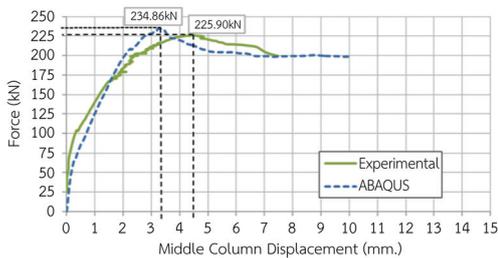
รูปที่ 10 ชนิดเอลิเมนต์ของแบบจำลองจุดต่อคานเสาคอนกรีต (ต่อ)

ผลการวิเคราะห์แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์กับผลทดสอบในห้องปฏิบัติการ

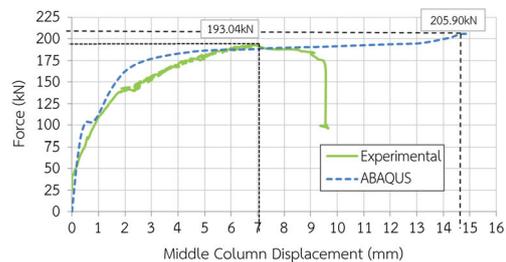
จากผลการวิเคราะห์แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ จุดต่อคานเสาคอนกรีตชนิดหล่อในที่ CCJ มีกำลังรับแรงกระทำสูงสุดที่ 234.86 kN เมื่อเปรียบเทียบกับผลทดสอบในห้องปฏิบัติการมีค่าเท่ากับ 225.90 kN โดยคำตอบจากแบบจำลองมีค่าสูงกว่าผลทดสอบในห้องปฏิบัติการในอัตราส่วนร้อยละ 3.96 จุดต่อคานเสาคอนกรีตชนิดสำเร็จรูป PCPT มีกำลังรับแรงกระทำสูงสุดที่ 205.90 kN เมื่อเปรียบเทียบกับผลทดสอบในห้องปฏิบัติการมีค่าเท่ากับ 193.04 kN รูปที่ 11(ก) คำตอบจากแบบจำลองมีค่าสูงกว่าผลทดสอบในห้องปฏิบัติการในอัตราส่วนร้อยละ 6.66 ผลที่ได้ทั้ง 2 รูปแบบมีกำลังรับแรงกระทำระหว่างแบบจำลองกับผลทดสอบในห้องปฏิบัติการใกล้เคียงกัน (Tejaswini and Rama Raju, 2015; Atichat et al., 2017) แตกต่างกันเล็กน้อยในช่วงพฤติกรรมการแอ่นตัวในขณะรับแรงกระทำดังรูปที่ 11(ข) - (ค) ซึ่งจุดต่อคานเสาคอนกรีตชนิดสำเร็จรูป PCPT มีการยืดตัวเพิ่มขึ้นก่อนเกิดการวิบัติ



(ก) เปรียบเทียบกำลังรับน้ำหนักสูงสุด



(ข) เปรียบเทียบความสัมพันธ์แรงกระทำ CCJ

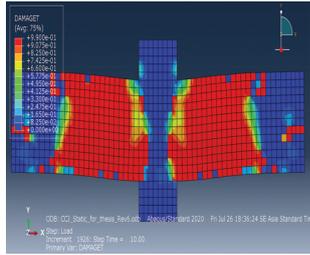


(ค) เปรียบความสัมพันธ์แรงกระทำ PCPT

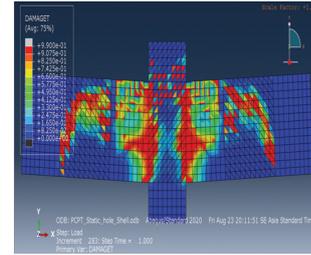
รูปที่ 11 เปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างการให้แรงกระทำกับระยะแอ่นตัว

รูปแบบความเสียหายของจุดต่อคานเสาคอนกรีต

จากแบบจำลองจุดต่อคานเสาคอนกรีตชนิดหล่อในที่และชนิดสำเร็จรูปพบว่ามีลักษณะการวิบัติและรูปการแตกร้าวในลักษณะเดียวกันกับการทดสอบในห้องปฏิบัติการโดยจุดต่อเริ่มมีความเสียหายจากบริเวณขอบเสา จากนั้นมีรอยแตกร้าวเป็นแนวทแยง 45 องศาไปยังจุดรองรับ ดังรูปที่ 12(ก) - (ข)



(ก) จุดต่อคานเสาคอนกรีต CCJ

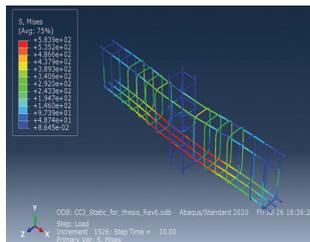


(ข) จุดต่อคานเสาคอนกรีต PCPT

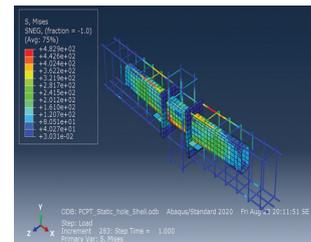
รูปที่ 12 แบบจำลองความเสียหายจุดต่อคานเสาคอนกรีต

การกระจายความเค้นภายในจุดต่อคานเสาคอนกรีต

จากผลการจำลองพบว่าจุดต่อคานเสาชนิดหล่อในที่ CCJ มีค่าความเค้นของเหล็กเสริมเท่ากับ 583.9 MPa ที่บริเวณเหล็กเสริมด้านล่างของคานจากนั้นความเค้นค่อย ๆ กระจายออกไปจนถึงจุดรองรับและจุดต่อคานเสาคอนกรีตสำเร็จรูป PCPT มีค่าความเค้นของเหล็กเท่ากับ 482.9 MPa โดยจุดที่มีความเค้นมากที่สุดคือ บริเวณด้านล่างของเหล็กกล่องถ่ายแรงที่เชื่อมยึดกับแผ่นเหล็กภายในจุดต่อ ซึ่งจากพฤติกรรมของการกระจายความเค้นภายในจุดต่อ สอดคล้องกับผลของความเครียดในเหล็กเสริมที่ทำการทดสอบในห้องปฏิบัติการ ดังรูปที่ 13 (ก) - (ข)



(ก) ความเค้นในเหล็กเสริมจุดต่อ CCJ



(ข) ความเค้นในเหล็กเสริมจุดต่อ PCPT

รูปที่ 13 ความเค้นภายในเหล็กเสริมจุดต่อคานเสาคอนกรีต

บทสรุป

ในบทความนี้ได้ทำการศึกษาพฤติกรรมจุดต่อคานเสาคอนกรีตสำเร็จรูปภายใต้แรงกระทำพลศาสตร์ทำการเปรียบเทียบระหว่างคานเสาคอนกรีตชนิดหล่อในที่กับคานเสาคอนกรีตสำเร็จรูปที่ทำการเสริมเหล็กกล่องภายในจุดต่อ ซึ่งจากผลการวิจัยพบว่าจุดต่อคานเสาคอนกรีตชนิดหล่อในที่ CCJ มีกำลังรับแรงกระทำได้สูงสุดเท่ากับ 225.90 kN จุดต่อคานเสาคอนกรีตสำเร็จรูป PCPT มีกำลังรับแรงกระทำสูงสุดแบบสถิตได้ 193.04 kN ซึ่งน้อยกว่าจุดต่อคานเสาคอนกรีตสำเร็จรูป PCPT ในอัตราส่วนร้อยละ 14.54 เมื่อทำการทดสอบโดยการให้แรงกระทำแบบพลศาสตร์ที่ความถี่ 1.0 - 5.0 Hz จำนวน 200 รอบ พบว่าจุดต่อคานเสาคอนกรีตชนิดหล่อในที่สามารถรับความถี่แรงกระทำได้ 4.0 Hz โดยมีความเสียหายของจุดต่อปริแตกรุนแรงที่บริเวณจุดรองรับและจุดต่อคานเสาคอนกรีตสำเร็จรูปสามารถรับแรงกระทำซ้ำแบบพลศาสตร์ที่อัตราส่วนร้อยละ 80 ของแรงกระทำสูงสุดได้ดีกว่าจุดต่อคานเสาคอนกรีตชนิดหล่อในที่ โดยสามารถรับความถี่แรงกระทำได้ที่ 5.0 Hz โดยที่ความเสียหายของจุดต่อไม่รุนแรง เนื่องจากความเหนียวที่เพิ่มขึ้นจากการเสริมเหล็กกล่องภายใน และเมื่อทำการเปรียบเทียบผลการทดสอบกับแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์พบว่าผลที่ได้จากการวิเคราะห์แบบจำลองกับผลทดสอบในห้องปฏิบัติการในด้านกำลังรับน้ำหนักแรงกระทำสูงสุดแบบสถิตของจุดต่อมีค่าใกล้เคียงกัน โดยผลที่ได้มีความแตกต่างกันระหว่างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์กับผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการของจุดต่อ CCJ และ PCPT ในอัตราส่วนร้อยละ 3.96 และ 6.66 ซึ่งผลการทดสอบบ่งชี้ว่าการเสริมเหล็กกล่องภายในคานเสาสำเร็จรูปและภายในเสาสามารถเพิ่มประสิทธิภาพให้กับจุดต่อในด้านการรับแรงกระทำแบบพลศาสตร์หรือ

แรงกระทำซ้ำ ๆ เป็นระยะเวลาต่อเนื่องในสภาวะการใช้งานได้ดีกว่าเมื่อเทียบกับจุดต่อคานเสาคอนกรีตชนิดหล่อในที่อีกทั้งยังลดความเสียหายรุนแรงในจุดต่อโครงสร้างประเภทสำเร็จรูปได้ดี สามารถนำมาพัฒนาเป็นทางเลือกในการลดระยะเวลาก่อสร้าง เหมาะสำหรับนำมาใช้ในโครงสร้างที่รับแรงกระทำแบบพลศาสตร์หรือรับแรงกระทำแบบซ้ำ ๆ ต่อเนื่อง เช่น โครงสร้างรองรับการสั่นสะเทือนของเครื่องจักร อัฒจันทร์ และอาคารจอดรถ เป็นต้น

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีเนื่องด้วยได้รับความช่วยเหลือจากเจ้าหน้าที่ประจำห้องปฏิบัติการและนักศึกษาระดับปริญญาตรี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย ที่ได้ให้การสนับสนุนในทุกด้านอย่างดีและสนับสนุนในการใช้สถานที่ เครื่องมือและช่วยเหลือในการทดสอบที่จำเป็นอย่างยิ่ง สำหรับการวิจัยในครั้งนี้

References

- ACI Committee 318. (2019). *Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI318-19)*. American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, USA.
- Ahn, S., Crouch, L. and Rameezdeen, R. (2020). Comparison of Worker Safety Risks Between Onsite and Offsite Construction Methods: A Site Management Perspective. *Journal of Construction Engineering and Management*, 146(9), [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CO.1943-7862.0001890](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0001890)
- ASTM C190. (1985). *Standard Test Methods for Tensile Strength of Hydraulic Cement Mortars*. West Conshohocken, PA, USA.
- ASTM A500. (2018). *Standard Specification for Cold-Formed Welded and Seamless Carbon Steel Structural Tubing in Round and Shapes*. West Conshohocken, PA, USA.
- ASTM C39. (2018). *Standard Test Methods for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens*. West Conshohocken, PA, USA.
- ASTM C109. (2021). *Standard Test Methods for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortar*. West Conshohocken, PA, USA.
- Atichat, A., Sirimontree, S. and Witchayangkoon, B. (2017). Behaviors of Concrete Beam to Column Connections under Static Load Using Finite Element Method. *International Transaction Journal of Engineering, Management, & Applied Sciences & Technologies*, 8(2), 57-67. <https://tuengr.com/V08/057.pdf>
- Choi, H.-K., Choi, Y.-C. and Choi, C.-S. (2013). Development and Testing of Precast Concrete Beam-to-column Connections. *Engineering Structures*, 56, 1820-1835. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2013.07.021>
- Dassault Systemes Simulia Corp. (2014). *Abaqus Analysis User's Manual 6.14*. P., RI, USA.
- DPT Committee 1301/1302-61. (2020). *Thailand Seismic Code*. Department of Public Works and Town & Country Planning, Bangkok, Thailand.
- Hansapinyo, C., Pansomboon, R. and Wongmatar, P. (2016). Plastic Hinge Relocation of Interior Beam-column Concrete Frames using Longitudinal Intermediate Bars. *RMUTL Engineering Journal*, 1(1), 9-16. <https://ph01.tci-thaijo.org/index.php/RMUTLEngJ/article/view/184067/129726> (in Thai)
- Ketiyot, R. (2017). *Cyclic Behavior of Precast Concrete Beam-column Connections with Plastic Hinge Relocation using T-section Steel Insert* [Doctoral dissertation, Chaing Mai University]. http://archive.lib.cmu.ac.th/full/T/2017/enci80417rtktyp_tpg.pdf (in Thai)

- Kim, S., Hwang, S. and Son, J. (2022). Safety Management Guidelines for Precast Concrete Production Plants Using Importance-Performance Analysis. *Journal of Construction Engineering and Management*, 148(7), [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CO.1943-7862.0002298](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0002298)
- Kongkaew, C., Seangatith, S. and Thumrongvut, J. (2021). Effect of Embedded Length of Deformed Bars Welded to Steel Plate on Precast Reinforced Concrete Beam. *The 26th National Convention on Civil Engineering*. 1-6. (in Thai)
- Tejaswini, T. and Rama Raju, M.V. (2015). Analysis of RCC Beams using ABAQUS. *International Journal of Innovations in Engineering and Technology (IJET)*, 5(3), 248-255.
- Thumrongvut, J., Seangatith, S. and Kumlue, K. (2013). Tests on Structural Behaviors of Precast Partially-Prestressed Concrete Beam's Joints. *RMUTI Journal*, 6(2), 15-30. <https://ph01.tci-thaijo.org/index.php/rmutijo/article/view/16074/14631> (in Thai)
- Thai Industrial Standard. (2015). *Hot Rolled Flat Steel For General Structure (TIS 1479-2558)*. Thai Industrial Standards Institute, Ministry of Industry, Bangkok. (in Thai)
- Thai Industrial Standard. (2016a). *Steel Bars For Reinforced Concrete: Round Bars (TIS 20-2559)*. Thai Industrial Standards Institute, Ministry of Industry, Bangkok. (in Thai)
- Thai Industrial Standard. (2016b). *Steel Bars For Reinforced Concrete: Deformed Bars (TIS 24-2559)*. Thai Industrial Standards Institute, Ministry of Industry, Bangkok. (in Thai)
- Thai Industrial Standard. (2018). *Carbon Steel Tubes for General Structure (TIS 107-2561)*. Thai Industrial Standards Institute, Ministry of Industry, Bangkok. (in Thai)
- Zhang, J., Ding, C., Rong, X., Yang, H. and Li, Y. (2020). Development and Experimental Investigation of Hybrid Precast Concrete Beam-column Joints. *Engineering Structures*, 219, <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2020.110922>

การพัฒนาบรรจุภัณฑ์สำหรับมะม่วงน้ำดอกไม้จากกากเส้นใยใบอ้อยและกากหน่อไม้ฝรั่ง

Development of Packaging for Mango Nam Dok Mai from Sugarcane Leaf Fibers and Residue Asparagus

ภาวิณี เทียมดี^{1*} และศุภกิจ เสวะขุนทด¹

Pawinee Theamdee^{1*} and Suphakit Sewakhuntos¹

Received: March 3, 2025; Revised: April 15, 2025; Accepted: April 17, 2025

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการเตรียมบรรจุภัณฑ์ผลไม้จากกากเส้นใยใบอ้อยและกากหน่อไม้ฝรั่งสำหรับบรรจุมะม่วงน้ำดอกไม้ ศึกษาอัตราส่วนปริมาณเส้นใยใบอ้อยและกากหน่อไม้ฝรั่งที่แตกต่างกัน ในการเตรียมเส้นใยใบอ้อยใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 10 % w/v อุณหภูมิ 80 - 90 °C เวลา 2 ชั่วโมง ฟอกขาวเส้นใยด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ความเข้มข้น 25 % v/v เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ส่วนกากหน่อไม้ฝรั่งไปอบด้วยเตาอบลมร้อนจนแห้งที่อุณหภูมิ 50 °C เป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง จะได้ผงกากหน่อไม้ฝรั่ง ศึกษาหมู่ฟังก์ชันของเส้นใยใบอ้อยด้วยเครื่อง FTIR ของเส้นใยใบอ้อยหลังฟอกสีเป็นการยืนยันการมีอยู่ของเซลลูโลส จากนั้นเตรียมอัตราส่วนในการขึ้นรูปบรรจุภัณฑ์ผลไม้จากกากเส้นใยใบอ้อยต่อกากหน่อไม้ฝรั่ง ได้แก่ 0:30 (S0A30), 10:20 (S10A20), 20:30 (S20A10) และ 30:0 (S30A0) ในหน่วยกรัม นำไปขึ้นรูปบรรจุภัณฑ์ผลไม้จากการออกแบบรูปแบบบรรจุภัณฑ์โดยใช้ความกว้างยาวตามขนาดเฉลี่ยของผลมะม่วงน้ำดอกไม้สุกและหล่อแบบแม่พิมพ์ด้วยปูนปลาสเตอร์ เพื่อนำตัวอย่างมาวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพ ทางเคมี และทางกล ได้แก่ ความหนา การดูดซึมน้ำ การละลายน้ำ การดูดซับความชื้น การต้านทานแรงกด การต้านทานแรงเฉาะ การต้านทานแรงเฉือนและการย่อยสลายโดยธรรมชาติของตัวอย่าง พบว่าอัตราส่วนที่เหมาะสมที่สุดในการเตรียมบรรจุภัณฑ์ คือ อัตราส่วนระหว่างเส้นใยใบอ้อย 20 กรัม ต่อผงกากหน่อไม้ฝรั่ง 10 กรัม (S20A10) เนื่องจากมีค่าคุณสมบัติทางกายภาพ เคมีและทางกลโดยรวมเหมาะสมที่สุด ได้แก่ บรรจุภัณฑ์มีผิวเรียบสม่ำเสมอ มีค่าการดูดซึมน้ำ ค่าการละลายน้ำ และค่าการดูดซับความชื้นค่อนข้างต่ำ ส่วนความสามารถในการต้านทานแรงกด ต้านทานแรงเฉาะ และต้านทานแรงเฉือนได้ดี และจากการศึกษาร้อยละการย่อยสลายโดยการฝังดิน พบว่าร้อยละการย่อยสลายมีค่า 6.36 ในระยะเวลา 3 เดือน ดังนั้นบรรจุภัณฑ์ผลไม้จากกากหน่อไม้ฝรั่งและเส้นใยใบอ้อยต้นแบบสามารถนำไปใช้งานเพื่อบรรจุมะม่วงน้ำดอกไม้และงานอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้องได้

คำสำคัญ : บรรจุภัณฑ์ผลไม้; ใบอ้อย; กากหน่อไม้ฝรั่ง; การย่อยสลาย

¹ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏเทพสตรี

¹ Faculty of Science and Technology, Thepsatri Rajabhat University

* Corresponding Author, Tel. 08 6213 6336, E - mail: pawinee.t@lawasri.tru.ac.th

Abstract

This research aims to study the preparation of fruit packaging made from sugarcane leaf fibers and asparagus residue for packaging Nam Dok Mai mangoes. It examines different ratios of sugarcane leaf fibers and asparagus residue. The sugarcane leaf fibers were prepared using 10 % w/v sodium hydroxide at a temperature of 80 - 90 °C for 2 hours. The fibers were then bleached with 25 % v/v hydrogen peroxide for 1 hour. Meanwhile, the asparagus residue was dried in a hot air oven at 50 °C for 24 hours to obtain asparagus residue powder. The functional groups of the bleached sugarcane leaf fibers were analyzed using FTIR to confirm the presence of cellulose. Next, prepare the ratio for molding fruit packaging from sugarcane leaf fibers to asparagus powder, including 0:30 (S0A30), 10:20 (S10A20), 20:30 (S20A10), and 30:0 (S30A0) in grams. The fruit packaging was then molded based on the average dimensions of ripe Nam Dok Mai mangoes using a plaster mold. The samples were analyzed for their physical, chemical, and mechanical properties, including thickness, water absorption, water solubility, moisture absorption, compression test, puncture resistance, shear resistance, and biodegradability. The results indicated that the optimal ratio for packaging preparation was 20 grams of sugarcane leaf fiber to 10 grams of asparagus residue powder (S20A10). This ratio yielded the best overall physical, chemical, and mechanical properties. The resulting packaging had a smooth and uniform surface, low water absorption, water solubility, and moisture uptake. Additionally, it exhibited good compressive strength, puncture resistance, and shear resistance. Biodegradability testing through soil burial showed a decomposition rate 6.36 % over a period of 3 months. Therefore, the prototype fruit packaging made from asparagus residue and sugarcane leaf fibers can be used for packaging Nam Dok Mai mangoes and other related applications.

Keywords: Fruit Packaging; Sugarcane Leaf Fibers; Residue Asparagus; Degradation

บทนำ

มะม่วงเป็นผลไม้ทางเศรษฐกิจที่สำคัญของประเทศไทยโดยได้รับการส่งเสริมศักยภาพการผลิตเพื่อการส่งออกจากรัฐบาลมาโดยตลอด ทั้งในด้านการขยายพื้นที่เพาะปลูกและการพัฒนาคุณภาพอย่างต่อเนื่อง โดยรูปแบบการส่งออกประกอบด้วยมะม่วงผลสดร้อยละ 2 ผลิตภัณฑ์แปรรูปร้อยละ 2 และมากกว่าร้อยละ 90 ใช้สำหรับการบริโภคภายในประเทศ มะม่วงพันธุ์น้ำดอกไม้ จัดเป็นมะม่วงที่มีศักยภาพในการผลิต และเป็นที่ต้องการของผู้บริโภคทั้งในและต่างประเทศ (Ngamrabam et al., 2018) แต่การขนส่งมะม่วงน้ำดอกไม้สุกเป็นจำนวนมาก ๆ ในแต่ละภูมิภาค จึงจำเป็นต้องอาศัยบรรจุภัณฑ์ในการขนส่งเพื่อห่อหุ้มไม่ทำให้มะม่วงช้ำก่อนถึงมือผู้บริโภค ดังนั้นบรรจุภัณฑ์ผลไม้จึงจำเป็นต้องการขนส่งเป็นอย่างมาก (Sakorn, 2022) เพื่ออำนวยความสะดวกต่อการขนส่งและป้องกันการกระทบกระชားระหว่างการขนส่งระหว่างการขนส่งผลไม้ ซึ่งในปัจจุบันบรรจุภัณฑ์แบบเดิมใช้กระดาษฟอย โฟมพลาสติกและโฟมตาข่าย ซึ่งเป็นวัสดุที่ใช้งานครั้งเดียวทำให้เหลือเศษวัสดุที่ได้จากการขนส่งในแบบต่าง ๆ จำนวนมาก (Suwannasre et al., 2017) จึงมีแนวคิดการพัฒนาบรรจุภัณฑ์ที่ผลิตจากเศษวัสดุเหลือทิ้งในการเกษตร เพื่อทดแทนการใช้บรรจุภัณฑ์ที่ผลิตจากพลาสติกซึ่งส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม จากการวิจัยของประทุมทอง ไตรรัตน์ (Tirat, 2017) ทำการศึกษาการพัฒนาบรรจุภัณฑ์แบบเยื่อกระดาษจากก้านของต้นกุหลาบและออกแบบบรรจุภัณฑ์จากเยื่อกระดาษสำหรับผลไม้ 2 ชนิด ได้แก่ มะม่วงมะละกอ และเติมสารสกัดจากสมุนไพรไทยจากใบขี้เหล็ก ใบมะกรูด และข่า เพื่อลดการเกิดเชื้อราลงได้

ผู้วิจัยสนใจจากหน่อไม้ฝรั่ง (*Asparagus officinalis* L.: green asparagus) (Guo et al., 2020) เนื่องจากชุมชนหมู่บ้านอินทรี บ้านท่าปลวกสูง ตำบลท่าดินดำ อำเภอชัยบาดาล จังหวัดลพบุรี มีการปลูกหน่อไม้ฝรั่งและผลิตผลิตภัณฑ์น้ำที่สกัดจากหน่อไม้ฝรั่ง จึงทำให้เหลือกากหน่อไม้ฝรั่งในปริมาณมาก กากหน่อไม้ฝรั่งมีสารสำคัญทางชีวภาพ ได้แก่ ฟลาโวนอยด์ และฟีนอลิก เป็นต้น สารต้านอนุมูลอิสระ 5 ชนิด ได้แก่ กรดเฟอรูลิก เคมเพอรอล เคอร์ซีติน รูติน และไอซอร์ แฮมเนติน (Fan et al., 2015) และองค์ประกอบทางเคมี ได้แก่ เซลลูโลสและเคอซิติน ดังนั้นกากหน่อไม้ฝรั่งจึงไม่มีความเป็นพิษ ไม่เป็นอันตราย และมีคุณสมบัติต้านอนุมูลอิสระ และต้านจุลชีพ (Jin et al., 2021) แต่เส้นใยจากกากหน่อไม้ฝรั่งเพียงอย่างเดียวนั้นทำให้มีความแข็งแรงน้อยเมื่อนำมาขึ้นรูปเป็นบรรจุภัณฑ์ จึงต้องหาเส้นใยอื่นเข้ามาช่วย เส้นใยจากธรรมชาติที่น่าสนใจ คือ เส้นใยจากใบอ้อย (*Saccharum officinarum* L.) ซึ่งมีมากในจังหวัดลพบุรี เนื่องจากประชากรส่วนใหญ่ประกอบอาชีพเกษตรกรรม ใบอ้อยมักเป็นวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร และยังไม่สามารถเพิ่มมูลค่าจากใบอ้อยได้ เกษตรกรส่วนใหญ่มักเผาใบอ้อยเพื่อลดปัญหาด้านแรงงานและเพื่อการเก็บเกี่ยว จึงทำให้เกิดปัญหาต่าง ๆ ตามมา เช่น ฝุ่น PM 2.5 เป็นต้น ใบอ้อยมีองค์ประกอบทางเคมี ได้แก่ เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน มีความแข็งแรงของเส้นใยสูง (Mbise et al., 2021; Ratanamane et al., 2022) ผู้วิจัยจึงเห็นว่าการนำใบอ้อยมาทำเป็นเส้นใยใช้เป็นวัสดุร่วมกับกากหน่อไม้ฝรั่งจะทำให้บรรจุภัณฑ์ผลไม้มีความแข็งแรง เช่น จากงานวิจัยของ Lungnongkhun et al. (2017) ศึกษาการพัฒนากระบวนการผลิตเส้นด้ายจากใบอ้อยร่วมกับฝ้าย เมื่อทำการทดสอบความแข็งแรงและแรงดึงขาดของเส้นด้าย พบว่าเส้นด้ายจากใบอ้อยร่วมกับฝ้ายมีความแข็งแรงและทนต่อแรงดึงขาดของเส้นด้ายสูงสุด

งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อเตรียมบรรจุภัณฑ์ผลไม้จากกากหน่อไม้ฝรั่งและเส้นใยใบอ้อย จากนั้นศึกษาสมบัติทางกายภาพ ทางเคมีและทางกล รวมถึงศึกษาอัตราการย่อยสลายของบรรจุภัณฑ์ผลไม้ สามารถเพิ่มมูลค่าให้กับใบอ้อยและกากหน่อไม้ฝรั่ง และเพิ่มรายได้ให้แก่เกษตรกร เพื่อเป็นแนวทางในการพัฒนาบรรจุภัณฑ์ผลไม้ชนิดอื่นได้อีกทั้งเป็นการนำวัสดุเหลือใช้ให้เกิดประโยชน์และลดการเสียหายในการขนส่ง ลดการใช้สารเคมี ซึ่งจะส่งผลดีต่อเศรษฐกิจและสิ่งแวดล้อมของประเทศได้

ระเบียบวิธีวิจัย

วัสดุและอุปกรณ์

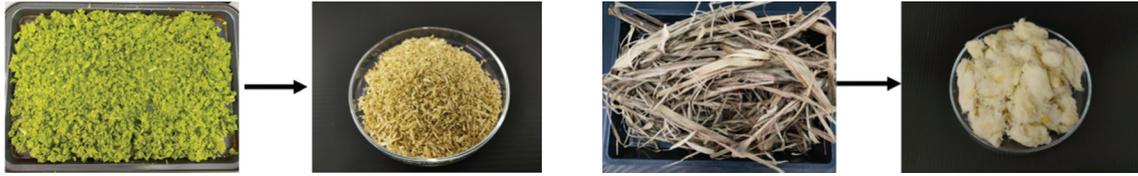
กากหน่อไม้ฝรั่ง ได้รับความอนุเคราะห์จากชุมชนหมู่บ้านอินทรี บ้านท่าปลวกสูง ตำบลท่าดินดำ อำเภอชัยบาดาล จังหวัดลพบุรี ใบอ้อยพันธุ์ลำปาง ระยะเวลาปลูก 12 เดือน ได้รับความอนุเคราะห์จากชุมชนบ้านดงไฟไหม้ ตำบลดงมะรุม อำเภอโคกสำโรง จังหวัดลพบุรี สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (Sodium Hydroxide) ความเข้มข้น 10 % w/v สารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (Hydrogen Peroxide) ความเข้มข้น 25 % v/v และปูนปลาสเตอร์ บริษัทห้างหุ้นส่วนจำกัด ชายนต์พิค คอลซัพพลาย

การเตรียมผงกากหน่อไม้ฝรั่ง

นำกากหน่อไม้ฝรั่งไปอบด้วยเตาอบลมร้อนจนแห้งที่อุณหภูมิ 50 °C เป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นนำไปปั่นด้วยเครื่องปั่นไฟฟ้าประมาณ 30 วินาที จะได้ผงกากหน่อไม้ฝรั่งเก็บในตู้ดูดความชื้นเพื่อใช้งานต่อไป (รูปที่ 1(ก))

การเตรียมเส้นใยใบอ้อย

ดัดแปลงตามวิธีของ Hadthamard et al. (2024) ตัดใบอ้อยแห้งให้มีขนาดยาวประมาณ 3 - 4 เซนติเมตร ปริมาณ 300 กรัม ล้างน้ำทำความสะอาดใบอ้อย และนำไปแช่น้ำทิ้งไว้เป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง เพื่อทำให้ใบอ้อยนุ่ม และนำไปต้มกับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้น 10 % w/v ที่อุณหภูมิ 80 - 90 °C เป็นระยะเวลา 2 ชั่วโมง ต่อมานำเส้นใยไปล้างให้สะอาดจนหายสี จากนั้นนำไปฟอกขาวเส้นใยโดยนำไปแช่ในสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ความเข้มข้น 25 % v/v เป็นเวลา 1 ชั่วโมง นำไปล้างในน้ำสะอาดจนครบ 3 ครั้ง จะได้เส้นใยที่ถูกกำจัดลิกนินและเฮมิเซลลูโลสออกไป นำเส้นใยไปอบด้วยเตาอบลมร้อนจนแห้งที่อุณหภูมิ 40 °C เป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง เก็บในตู้ดูดความชื้นเพื่อใช้งานต่อไป (ดังรูปที่ 1(ข))



(ก) ผงกากหน่อไม้ฝรั่งจากกากหน่อไม้ฝรั่งสด

(ข) เส้นใยใบบ่อยหลังลอกสี

รูปที่ 1 การเตรียมผงกากหน่อไม้ฝรั่งและการเตรียมเส้นใยใบบ่อยหลังลอกสีจากใบบ่อย

การออกแบบแม่พิมพ์บรรจุภัณฑ์ผลไม้

การออกแบบแม่พิมพ์บรรจุภัณฑ์มะม่วงน้ำดอกไม้ เริ่มจากการกำหนดขนาดของบรรจุภัณฑ์จากขนาดเฉลี่ยของผลมะม่วงน้ำดอกไม้ในระยะเก็บเกี่ยว ซึ่งได้จากการวัดผลมะม่วงตัวอย่างจำนวนหนึ่ง เพื่อให้บรรจุภัณฑ์มีขนาดพอดีกับผลไม้ วัสดุที่ใช้สำหรับหล่อแม่พิมพ์ ได้แก่ ปูนพลาสติก เนื่องจากมีคุณสมบัติคงรูปที่ดี จากนั้นเทลงในแบบที่เตรียมไว้และปล่อยให้แห้งตัวจนได้แม่พิมพ์ที่มีรูปร่างและขนาดตามต้องการ ทำการเจาะรูทั้งสองฝั่งเพื่อให้สามารถระบายน้ำออกได้ ทั้งนี้การออกแบบแม่พิมพ์จะต้องคำนึงถึงความโค้งมนของพื้นผิวและมุมต่าง ๆ เพื่อช่วยในการถอดชิ้นงานออกจากพิมพ์ได้ง่าย และต้องเผื่อขนาดเพื่อชดเชยการหดตัวของวัสดุเส้นใยธรรมชาติ ดังรูปที่ 2



(ก) แม่พิมพ์ฝั่งบน



(ข) แม่พิมพ์ฝั่งล่าง

รูปที่ 2 ออกแบบแม่พิมพ์บรรจุภัณฑ์มะม่วงน้ำดอกไม้ด้วยปูนพลาสติก

การเตรียมส่วนผสมในการขึ้นรูปบรรจุภัณฑ์ผลไม้

ดัดแปลงตามวิธีของ Trirat (2017) อัตราส่วนในการขึ้นรูปบรรจุภัณฑ์ผลไม้จากกากหน่อไม้ฝรั่งและเส้นใยใบบ่อย ดังตารางที่ 1 นำแต่ละอัตราส่วนใส่ลงในเครื่องปั่นไฟฟ้า เติมน้ำปริมาตร 1,000 มิลลิลิตร ปั่นจนเป็นเวลา 30 วินาทีจนเนียนและละเอียด นำเยื่อที่ปั่นเหลวแผ่นเฟรมไม้ขนาด 22 x 30 เซนติเมตร วางด้วยผ้าขาวบางด้านบน เกลี่ยเยื่อกระจายให้ทั่วแผ่น ใช้ฟองน้ำซับน้ำออกเพื่อให้เยื่อแน่นขึ้น นำเยื่อขึ้นจากแผ่นเฟรมไม้แล้วนำมาวางลงในแบบแม่พิมพ์ปูนพลาสติกที่สร้างขึ้น เกลี่ยขึ้นรูปโดยใช้ฟองน้ำซับน้ำออกเพื่อให้เยื่อแน่นขึ้น จากนั้นนำไปผึ่งลมให้แห้งเป็นเวลา 2 วัน จากนั้นทำการตัดขอบบรรจุภัณฑ์ผลไม้ให้เป็นรูปทรงมะม่วง ดังรูปที่ 3



รูปที่ 3 การขึ้นรูปบรรจุภัณฑ์ผลไม้จากกากหน่อไม้ฝรั่งและเส้นใยใบบ่อย

ตารางที่ 1 อัตราส่วนในการขึ้นรูปบรรจุภัณฑ์ผลไม้

ตัวอย่าง	เส้นใยไบอ้อย (กรัม)	กากหน่อไม้ฝรั่ง (กรัม)	น้ำ (มิลลิลิตร)
S0A30	0	30	1,000
S10A20	10	20	1,000
S20A10	20	10	1,000
S30A0	30	0	1,000

หมายเหตุ : S = เส้นใยไบอ้อย A = กากหน่อไม้ฝรั่ง

การวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพ เคมี และทางกล

วิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพ

ความหนา

วิเคราะห์ความหนาของบรรจุภัณฑ์ด้วยเครื่องไมโครมิเตอร์ ยี่ห้อ Mitutoyo Scientifica รุ่น M110-25 โดยตัดขึ้นตัวอย่างขนาด 4 x 4 เซนติเมตร ของทุกอัตราส่วนมาทดสอบ 3 ซ้ำ ที่ตำแหน่งต่างกัน 3 จุด แล้วคำนวณหาค่าเฉลี่ย

การทดสอบสมบัติการดูดซึมน้ำ (Water Absorption)

ดัดแปลงตามวิธีของ Tajvidi et al. (2005), Patricia et al. (2018) โดยนำชิ้นงานขนาด 4 x 4 เซนติเมตร (อัตราส่วนละ 3 ชิ้น) เก็บไว้ในภาชนะดูดความชื้นที่บรรจุซิลิกาเจลเป็นเวลา 3 วัน ที่อุณหภูมิ 28 ± 2 °C ชั่งน้ำหนักชิ้นงานก่อนทดสอบ (W_i) นำไปแช่ในน้ำกลั่น 100 มิลลิลิตร เก็บไว้ที่อุณหภูมิ 28 ± 2 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง นำตัวอย่างไปชั่งน้ำหนักหลังการทดสอบ (W_a) ทำการทดสอบ 3 ซ้ำ และคำนวณหาค่าร้อยละการดูดซึมน้ำ ดังสมการที่ (1)

$$\text{ร้อยละการดูดซึมน้ำ} = \frac{(W_a - W_i)}{W_i} \times 100 \quad (1)$$

การทดสอบสมบัติการละลายน้ำ (Water Solubility)

การทดสอบสมบัติการละลายน้ำช่วยให้สามารถประเมินความทนทานและความเหมาะสมของบรรจุภัณฑ์ในสภาพแวดล้อมที่มีความชื้นหรือการสัมผัสกับน้ำ ดัดแปลงตามวิธีของ Sanyang et al. (2016) โดยนำชิ้นงานขนาด 2 x 2 เซนติเมตร (อัตราส่วนละ 3 ชิ้น) ถูกทำให้แห้งในเตาอบลมร้อนที่อุณหภูมิ 105 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง นำไปชั่งแล้วบันทึกค่าก่อนการทดสอบ (W_i) นำไปแช่ในน้ำกลั่น 30 มิลลิลิตร จากนั้นเข้าเครื่องเขย่าสาร (Shaker) เป็นเวลา 1 ชั่วโมง จากนั้นนำไปอบที่อุณหภูมิ 105 °C นำตัวอย่างไปชั่งน้ำหนักหลังการทดสอบ (W_o) ทำการทดสอบ 3 ซ้ำ และคำนวณหาค่าร้อยละการละลายน้ำ ดังสมการที่ (2)

$$\text{ร้อยละการละลายน้ำ} = \frac{(W_i - W_o)}{W_i} \times 100 \quad (2)$$

การทดสอบสมบัติการดูดซับความชื้น (Moisture Absorption)

ดัดแปลงตามวิธีของ Bergel et al. (2018), Begum et al. (2021) โดยนำชิ้นงานขนาด 5 x 5 เซนติเมตร (อัตราส่วนละ 3 ชิ้น) มาไล่ความชื้นด้วยเตาอบลมร้อนที่อุณหภูมิ 105 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ชั่งน้ำหนักชิ้นงานก่อนทดสอบ (W_o) จากนั้นนำชิ้นงานมาเก็บในโถที่มีสภาวะความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 90 เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 28 ± 2 °C หลังจากครบเวลา ชิ้นงานถูกชั่งน้ำหนักอีกครั้ง (W_1) โดยแต่ละตัวอย่างทำการทดสอบ 3 ซ้ำ และคำนวณหาค่าร้อยละการดูดซับความชื้น ดังสมการที่ (3)

$$\text{ร้อยละการดูดซับความชื้น} = \frac{(W_1 - W_o)}{W_1} \times 100 \quad (3)$$

วิเคราะห์คุณสมบัติทางเคมี

ทำการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันโดยตรวจสอบเอกลักษณ์ของหมู่ฟังก์ชัน ด้วยเครื่องวิเคราะห์เทคนิค FTIR Spectrometer (Perkin Elmer, U.S.A.) โดยใช้ Attenuated Total Reflectance (ATR) มีช่วงเลขคลื่นในการวิเคราะห์เท่ากับ $4,000 - 400 \text{ cm}^{-1}$

วิเคราะห์คุณสมบัติทางกล

การศึกษาสมบัติทางกลด้วยเครื่องวิเคราะห์ลักษณะเนื้อสัมผัส (Texture Analyzer) (TA.XT.plus, U.S.A.) ส่วนทดสอบการต้านทานแรงกด นำตัวอย่างที่ได้ไปทดสอบ โดยใช้หัววัดแบบแผ่นแบน (Flat Plate Compression Test) ระยะการกดร้อยละ 75 ของความสูงตัวอย่าง ทำการทดสอบจำนวน 3 ซ้ำ (Schmidt and Laurindo, 2010; Bos et al., 2002) ทดสอบการต้านทานแรงเฉาะ ตัดชิ้นงานให้มีขนาด 2×2 เซนติเมตร (อัตราส่วนละ 3 ชั้น) ใช้หัววัด HDP/CFS และ HDP/90 Heavy Duty Platform ระยะในการทดสอบ 8 มิลลิเมตร ความเร็วของเข็มที่เคลื่อนที่ลงถูกตั้งค่าไว้ที่ 10 มิลลิเมตร/นาที ทำการวัดทั้งหมด 3 ซ้ำ (Hu et al., 2021; Theamdee et al., 2024) ทดสอบการต้านทานแรงเฉือน นำตัวอย่างที่ได้ไปทดสอบ ใช้หัววัด HDP/BS Blade Set ความเร็วของหัววัด (Cross-Head Speed) ที่ใช้ในการทดสอบ ถูกตั้งค่าไว้ที่ 10 มิลลิเมตรต่อวินาที และระยะที่กดลงตัวอย่าง 6 มิลลิเมตรทำการวัดทั้งหมด 3 ซ้ำ (Herrera-Franco and Valadez-Gonzalez, 2004)

ศึกษาอัตราการย่อยสลาย

การทดสอบอัตราการย่อยสลายดำเนินการโดยการฝังกลบในดินแบบง่าย (Simple Soil Burial Test) เพื่อจำลองกระบวนการย่อยสลายตามธรรมชาติ ตัดชิ้นงานขนาด 4×4 เซนติเมตร ชั่งน้ำหนักชิ้นงานก่อนการทดสอบ (W_0) ชิ้นงานทุกอัตราส่วนถูกฝังลงในดินร่วน บรรจุดินลงในถังเพาะชำขนาด $80 \times 48 \times 50$ เซนติเมตร และฝังชิ้นงานให้มีความลึกประมาณ 10 เซนติเมตร เป็นเวลา 3 เดือน วางไว้ในที่ร่ม ที่มีอุณหภูมิเฉลี่ยประมาณ $32 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ ความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 80 และไม่มีกรดน้ำ หลังจากครบเวลาทดสอบ ตัวอย่างที่ถูกฝังกลบถูกกำจัดเศษดินออกจากพื้นผิว จากนั้นนำไปอบแห้งที่อุณหภูมิ $60 \text{ }^\circ\text{C}$ จนกว่าตัวอย่างจะมีน้ำหนักคงที่ บันทึกการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักชิ้นงาน (W_1) บันทึกผลการทดลองและคำนวณการย่อยสลายของชิ้นงาน ดังสมการที่ (4) (Yussuf et al., 2010)

$$\text{ร้อยละการย่อยสลาย} = \frac{(W_0 - W_1)}{W_0} \times 100 \quad (4)$$

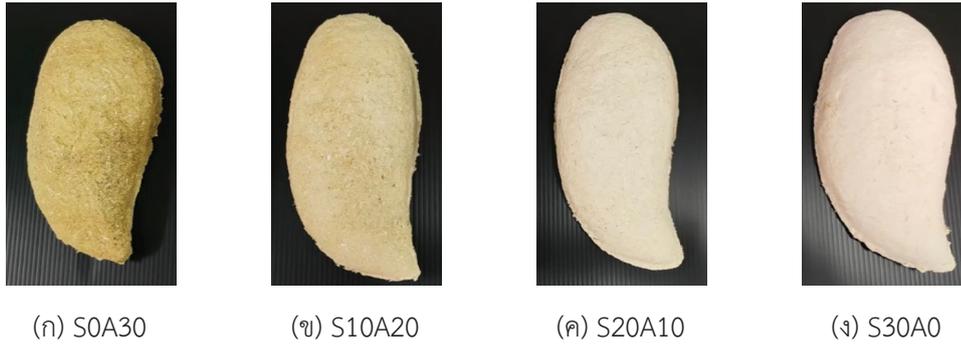
การวิเคราะห์ผลทางสถิติ

วิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติด้วยการวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) และเปรียบเทียบค่าผลต่างด้วยวิธี Duncan's Multiple Range Test ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 % ($p < 0.05$) โดยใช้โปรแกรม SPSS® Version 12 (SPSS Inc., สหรัฐอเมริกา)

ผลการวิจัยและการอภิปรายผล

ลักษณะทางกายภาพของบรรจุภัณฑ์ผลไม้ที่ทำจากเส้นใยไผ่อ้อยและกากหน่อไม้ฝรั่ง

จากการศึกษาบรรจุภัณฑ์ที่ทำจากเส้นใยไผ่อ้อยและกากหน่อไม้ฝรั่งทุกอัตราส่วน พบว่าบรรจุภัณฑ์ผลไม้ที่ทำจากเส้นใยไผ่อ้อยและกากหน่อไม้ฝรั่งอัตราส่วน S0A30 และ S10A20 (รูปที่ 4(ก) - (ข)) มีลักษณะเป็นสีเหลือง-น้ำตาล เกิดจากสีของกากหน่อไม้ฝรั่ง ผิวขรุขระ แผ่นบาง แตกและเปราะ บรรจุภัณฑ์ผลไม้อัตราส่วน S20A10 (รูปที่ 4(ค)) มีลักษณะผิวเรียบ มีความหนามากขึ้น แข็งแรง ไม่แตกและไม่เปราะง่าย และบรรจุภัณฑ์ผลไม้อัตราส่วน S30A0 (รูปที่ 4(ง)) มีลักษณะผิวขรุขระน้อย แข็ง ค่อนข้างหนามากกว่าทุกอัตราส่วน จากลักษณะทางกายภาพของบรรจุภัณฑ์ผลไม้เมื่อเพิ่มปริมาณเส้นใยไผ่อ้อยมากขึ้นทำให้มีความหนาและมีสีขาวมากขึ้น เนื่องจากเส้นใยไผ่อ้อยหลังจากการฟอกสีมีลักษณะเส้นใยที่เป็นสีขาว (รูปที่ 1(ข)) สอดคล้องกับงานวิจัยของ Mbise et al. (2021)



รูปที่ 4 ลักษณะบรรจุภัณฑ์สำหรับมะม่วงน้ำดอกไม้จากเส้นใยไบอ้อยและกากหน่อไม้ฝรั่งที่อัตราส่วนต่าง ๆ

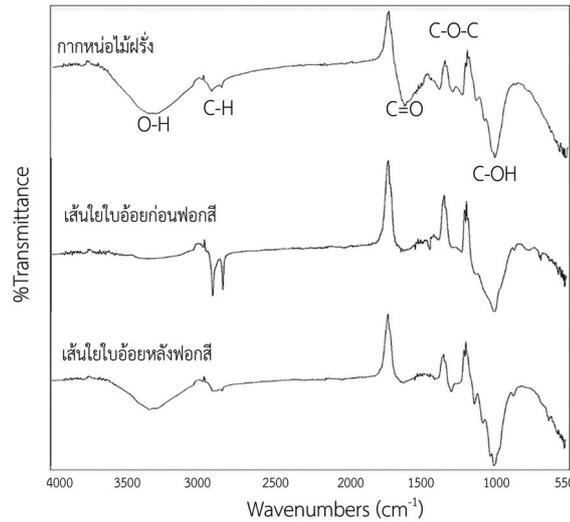
จากตารางที่ 2 แสดงผลการวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพของบรรจุภัณฑ์สำหรับมะม่วงน้ำดอกไม้จากเส้นใยไบอ้อยและกากหน่อไม้ฝรั่งที่อัตราส่วนต่าง ๆ จากการศึกษพบว่าค่าความหนาของบรรจุภัณฑ์อยู่ในช่วง 2.11 - 3.23 mm ซึ่งมีค่าความหนาเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) ตามอัตราส่วนของเส้นใยไบอ้อยที่มากขึ้น จากการศึกษาค่าร้อยละการดูดซึมน้ำ ร้อยละการละลายน้ำ และร้อยละการดูดซับความชื้น พบว่าค่าการดูดซึมน้ำ ค่าการละลายน้ำ และค่าการดูดซับความชื้นมีแนวโน้มลดลงเมื่อปริมาณอัตราส่วนของไบอ้อยมากขึ้น เนื่องจากเซลลูโลสเป็นองค์ประกอบหลักทางเคมีของเส้นใยไบอ้อย ซึ่งเซลลูโลสสามารถสร้างโครงสร้างผลึกสถานะผลึกจะมีพลังงานอิสระต่ำทำให้สถานะผลึกของเซลลูโลสละลายน้ำได้ยาก (Medronho et al., 2012) ทำให้ค่าการดูดซึมน้ำ ค่าการละลายน้ำ และค่าการดูดซับความชื้นลดลงเมื่อปริมาณเส้นใยไบอ้อยเพิ่มขึ้น สอดคล้องกับงานวิจัยของ Kiangkoo et al. (2017) ทำการศึกษาการผลิตแผ่นกันความร้อนจากเศษผลผลิตเส้นใยชานอ้อย พบว่าเศษผลผลิตสามารถดูดซับน้ำได้ง่ายกว่าเส้นใยชานอ้อย เนื่องจากเซลลูโลสธรรมชาติในเส้นใยชานอ้อยมีความเหนียว ผนังเซลล์แข็งจึงดูดซับน้ำได้น้อยกว่า

ตารางที่ 2 สมบัติทางกายภาพของบรรจุภัณฑ์ผลไม้จากเส้นใยไบอ้อยและกากหน่อไม้ฝรั่งที่อัตราส่วนต่าง ๆ

ตัวอย่าง	ความหนา (mm)	การดูดซึมน้ำ (%)	การละลายน้ำ (%)	การดูดซับความชื้น (%)
S0A30	2.11±0.01 ^d	391.67±17.61 ^d	26.11±2.73 ^c	32.70±1.10 ^d
S10A20	2.26±0.03 ^c	322.73±25.31 ^c	14.68±2.41 ^b	18.60±0.43 ^c
S20A10	2.37±0.02 ^b	257.54±26.88 ^b	11.66±1.30 ^b	12.28±0.87 ^b
S30A0	3.23±0.03 ^a	171.41±47.54 ^a	5.40±1.77 ^a	9.29±0.97 ^a

หมายเหตุ : S = เส้นใยไบอ้อย A = กากหน่อไม้ฝรั่ง, ค่าเฉลี่ย ± ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน ตัวอักษร ^{a, b, c, d} ที่แตกต่างกันมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

รูปที่ 5 การศึกษาหมู่ฟังก์ชันของเส้นใยกากหน่อไม้ฝรั่ง เส้นใยไบอ้อยก่อนฟอกสี และเส้นใยไบอ้อยหลังฟอกสี ด้วยเครื่อง FTIR พบว่าลักษณะสเปกตรัมของเส้นใยกากหน่อไม้ฝรั่งและเส้นใยไบอ้อยก่อนฟอกสีพบสัญญาณเลขคลื่นที่ตำแหน่ง 3,285 cm^{-1} แสดงหมู่ O-H Stretching สัญญาณเลขคลื่นที่ตำแหน่ง 2,917 cm^{-1} แสดงหมู่ C-H Stretching สัญญาณเลขคลื่นที่ตำแหน่ง 1,030 cm^{-1} แสดงหมู่ C-OH ของเซลลูโลส สัญญาณเลขคลื่นที่ตำแหน่ง 1654 cm^{-1} แสดงหมู่ C=O ของเฮมิเซลลูโลส และพบสัญญาณเลขคลื่นที่ตำแหน่ง 1249 cm^{-1} แสดงหมู่ C-O-C ของลิกนิน จากเส้นสเปกตรัมเส้นใยไบอ้อยหลังฟอกสีสัญญาณของตำแหน่งเฮมิเซลลูโลสและลิกนินลดลง ซึ่งเป็นการยืนยันว่าการฟอกสีเส้นใยไบอ้อยมีผลต่อการมีอยู่ของเฮมิเซลลูโลสและลิกนิน สอดคล้องกับงานวิจัย Maduang et al. (2018) ซึ่งการมีอยู่ของเฮมิเซลลูโลสนั้นทำให้เส้นใยมีความไวต่อความชื้นสูง ทำให้เส้นใยดูดซับน้ำง่าย ส่วนการมีอยู่ของลิกนินนั้นสีของลิกนินตามธรรมชาติมีสีน้ำตาลเข้มถึงดำ ทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีสีคล้ำไม่สวยงาม



รูปที่ 5 สเปกตรัม FTIR ของเส้นใย

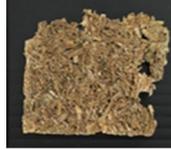
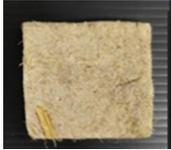
จากตารางที่ 3 แสดงผลการวิเคราะห์สมบัติทางกลของบรรจุภัณฑ์ผลไม้จากเส้นใยใบอ้อยและกากหน่อไม้ฝรั่งที่อัตราส่วนแตกต่างกัน พบว่าค่าการต้านทานแรงกด ค่าความต้านทานแรงเฉาะ และค่าความต้านทานแรงฉีกของตัวอย่างมีค่าเพิ่มขึ้น ($p \leq 0.05$) เมื่อปริมาณเส้นใยใบอ้อยมากขึ้น เนื่องจากมีปริมาณเซลลูโลสภายในตัวเส้นใยใบอ้อยทำหน้าที่เป็นสารเสริมแรงที่ช่วยเพิ่มความแข็งแรงและความทนทานของวัสดุ (Soison and Pratumshat, 2017) อีกทั้งบรรจุภัณฑ์ผลไม้ไม่มีความหนาเพิ่มขึ้น ดังตารางที่ 2 ส่งผลให้สมบัติเชิงกลของวัสดุมากขึ้น สอดคล้องกับงานวิจัยของ Kawsuk and Somjai (2022) ทำการศึกษาสมบัติของกระดาษจากเปลือกหน่อไม้ผสมเปลือกข้าวโพด เมื่อเพิ่มปริมาณเส้นใยเปลือกข้าวโพดทำให้สมบัติเชิงกลดีขึ้น เนื่องจากเส้นใยเปลือกข้าวโพดมีสมบัติในการเพิ่มความเหนียวและเส้นใยหน่อไม้มีขนาดใหญ่ หนา และยาว การผสมรวมเส้นใยทั้งสองจึงเพิ่มสมบัติเชิงกลได้ดีมากขึ้น

ตารางที่ 3 สมบัติทางกลของบรรจุภัณฑ์ผลไม้จากเส้นใยใบอ้อยและกากหน่อไม้ฝรั่งที่อัตราส่วนต่าง ๆ

ตัวอย่าง	ความต้านทานแรงกด (N/m ²)	ความต้านทานแรงเฉาะ (N/m ²)	ความต้านทานแรงฉีก (N/m ²)
S0A30	34.83±1.34 ^d	3.25±0.53 ^c	161.50±3.77 ^d
S10A20	46.56±1.46 ^c	13.28±2.07 ^b	172.94±5.93 ^c
S20A10	53.18±2.01 ^b	19.39±2.62 ^a	232.01±4.03 ^b
S30A0	60.56±2.25 ^a	23.29±2.56 ^a	272.40±6.24 ^a

หมายเหตุ : S = เส้นใยใบอ้อย A = กากหน่อไม้ฝรั่ง, ค่าเฉลี่ย ± ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน
ตัวอักษร ^{a, b, c, d} ที่แตกต่างกันมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

ตารางที่ 4 การย่อยสลายของบรรจุภัณฑ์ผลไม้จากเส้นใยไผ่อ้อยและกากหน่อไม้ฝรั่งที่อัตราส่วนต่าง ๆ

ตัวอย่าง	ลักษณะทางกายภาพ ระยะเวลา (เดือน)				การย่อย สลาย (%)
	0	1	2	3	
SOA30					28.84
S10A20					25.72
S20A10					6.36
S30A0					1.57

จากการศึกษาอัตราการย่อยสลายของบรรจุภัณฑ์ผลไม้ที่ทำจากเส้นใยไผ่อ้อยและกากหน่อไม้ฝรั่งที่อัตราส่วนที่แตกต่างกัน โดยชิ้นงานมีขนาด 4 x 4 เซนติเมตร ถูกฝังในดินเป็นระยะเวลา 3 เดือน โดยพิจารณาการย่อยสลายจากค่าการสูญเสียน้ำหนักเฉลี่ยของชิ้นงาน ซึ่งแสดงดังตารางที่ 4 พบว่าร้อยละการย่อยสลายอยู่ในช่วง 1.57 - 28.84 ซึ่งบรรจุภัณฑ์ผลไม้อัตราส่วน SOA30 มีการย่อยสลายมากที่สุด (ร้อยละ 28.84) เนื่องจากความหนาของบรรจุภัณฑ์ผลไม้ที่น้อย มีสมบัติเชิงกลน้อยและความเสถียรต่อความชื้นต่ำ จึงเกิดการย่อยสลายทางชีวภาพอย่างค่อยเป็นค่อยไป ซึ่งมีสาเหตุหลักมาจากความชื้นและจุลินทรีย์ที่มีอยู่ในดิน ส่งผลให้ชิ้นงานค่อย ๆ สลายตัวเป็นชิ้นเล็ก ๆ แต่เมื่อเพิ่มปริมาณเส้นใยไผ่อ้อยมากขึ้น ร้อยละการย่อยสลายมีค่าลดลงซึ่งมีความหนาของบรรจุภัณฑ์ผลไม้ที่มาก มีสมบัติเชิงกลมาก และมีความเสถียรต่อความชื้นที่สูงกว่าจึงทำให้เกิดการย่อยสลายได้ช้าที่สุด (Wang et al., 2020; Liu et al., 2022)

ศึกษาการออกแบบและสร้างต้นแบบบรรจุภัณฑ์มะม่วงน้ำดอกไม้จากเส้นใยไผ่อ้อยและกากหน่อไม้ฝรั่ง

จากผลการวิจัยโดยรวมของชิ้นงานแต่ละอัตราส่วน พบว่าอัตราส่วนที่เหมาะสมในการสร้างต้นแบบบรรจุภัณฑ์ผลไม้คือ อัตราส่วนเส้นใยไผ่อ้อย 20 กรัม ต่อผงกากหน่อไม้ฝรั่ง 10 กรัม โดยบรรจุภัณฑ์มีผิวเรียบสม่ำเสมอ การดูดซึมน้ำ การละลายน้ำ และการดูดซับความชื้นต่ำ มีความสามารถในการต้านทานแรงกด ต้านทานแรงเฉาะ และต้านทานแรงฉีกได้ดี อีกทั้งสามารถย่อยสลายทางชีวภาพได้ ถึงแม้ว่าอัตราส่วนไผ่อ้อย 20 กรัม ต่อผงกากหน่อไม้ฝรั่ง 10 กรัม (S20A10) ถูกสรุปว่าเหมาะสมที่สุดในการทำบรรจุภัณฑ์ แต่เมื่อเปรียบเทียบกับอัตราส่วนไผ่อ้อย 30 กรัมต่อผงกากหน่อไม้ฝรั่ง 0 กรัม (S30A0) ซึ่งมีคุณสมบัติดีกว่าของอัตราส่วน S20A10 แต่อัตราส่วนไผ่อ้อย 30 กรัม เพียงอย่างเดียวทำให้บรรจุภัณฑ์ที่ได้มีเนื้อสัมผัสที่แข็ง หยิบ และหนามากเกินไป ส่งผลให้เกิดการหดตัว และเมื่อประกอบชิ้นส่วนของบรรจุภัณฑ์เข้าด้วยกันจึงเกิดช่องว่างระหว่างชิ้นงาน ดังนั้น S20A10 จึงยังคงเป็นสัดส่วนที่เหมาะสมที่สุด โดยให้ความสมดุลทั้งในด้านคุณสมบัติและความสมบูรณ์ของรูปร่างบรรจุภัณฑ์ จึงเหมาะสมสำหรับนำมาสร้างต้นแบบบรรจุภัณฑ์มะม่วงน้ำดอกไม้ โดยทั่วไปนั้นมะม่วงน้ำดอกไม้มีขนาดและน้ำหนักแตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับสายพันธุ์และสภาพแวดล้อมในการปลูก ดังนั้นการออกแบบบรรจุภัณฑ์ต้องยืดหยุ่นต่อขนาดที่หลากหลาย เช่น การใส่เศษบรรจุภัณฑ์ผลไม้ที่เหลือจากการตัดขอบสำหรับมะม่วงน้ำดอกไม้ที่มีขนาดน้อยกว่าบรรจุภัณฑ์เพื่อลดการขยับภายในบรรจุภัณฑ์ ป้องกันแรงกระแทก

สามารถเปิดฝาท่อออกได้ที่ละด้านลดการสัมผัสโดยตรงที่ผลไม้ และบรรจุภัณฑ์ผลไม้เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม ช่วยเพิ่มมูลค่า และสร้างจุดขายให้กับสินค้า ดังรูปที่ 6



รูปที่ 6 บรรจุภัณฑ์มะม่วงน้ำดอกไม้ต้นแบบจากเส้นใยใบบ่อยและกากหน่อไม้ฝรั่ง

สรุปผลการทดลอง

งานวิจัยนี้ศึกษาการพัฒนาบรรจุภัณฑ์สำหรับมะม่วงน้ำดอกไม้จากกากเส้นใยใบบ่อยและกากหน่อไม้ฝรั่ง โดยศึกษาอัตราส่วนของเส้นใยใบบ่อยและกากหน่อไม้ฝรั่งที่แตกต่างกัน พบว่าจากการศึกษาสมบัติทางกายภาพ ทางเคมี และทางกล อัตราส่วนที่เหมาะสมที่สุดในการเตรียมบรรจุภัณฑ์ คือ อัตราส่วนระหว่างเส้นใยใบบ่อย 20 กรัม ต่อผงกากหน่อไม้ฝรั่ง 10 กรัม (S20A10) เนื่องจากมีค่าคุณสมบัติทางกายภาพ เคมีและทางกลโดยรวมเหมาะสมที่สุด ได้แก่ บรรจุภัณฑ์ที่มีผิวเรียบสม่ำเสมอ มีค่าการดูดซึมน้ำ ค่าการละลายน้ำ และค่าการดูดซับความชื้นค่อนข้างต่ำ ส่วนความสามารถในการต้านทานแรงกด ต้านทานแรงเจาะ และต้านทานแรงเฉือนได้ดี ดังนั้นอัตราส่วน S20A10 ยังคงเป็นสัดส่วนที่เหมาะสมที่สุด โดยให้ความสมดุลทั้งในด้านคุณสมบัติและความสมบูรณ์ของรูปร่างบรรจุภัณฑ์ ผลการศึกษาหุ้ฟงักซึ้นด้วยเครื่อง FTIR เพื่อยืนยันการมีอยู่ของเซลลูโลสและการลดลงของเฮมิเซลลูโลสและลิกนินของเส้นใยใบบ่อยหลังการฟอกสี และจากการศึกษาร้อยละการย่อยสลายโดยการฝังดิน พบว่าร้อยละการย่อยสลายมีค่า 6.36 ในระยะเวลา 3 เดือน ซึ่งมีความเหมาะสมในการขึ้นรูปเป็นบรรจุภัณฑ์และสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับผลไม้ชนิดอื่นได้ อีกทั้งยังช่วยเพิ่มมูลค่าให้กับวัสดุเหลือใช้ ลดความเสียหายระหว่างการขนส่ง ลดการใช้สารเคมีหรือผลิตภัณฑ์ราคาแพง ลดมลพิษทางอากาศจากการเผาเศษวัสดุย่อย ซึ่งส่งผลดีต่อเศรษฐกิจและสิ่งแวดล้อมของประเทศ

ข้อเสนอแนะในการพัฒนางานวิจัยในอนาคต

- ควรศึกษาความเป็นไปได้ในการนำบรรจุภัณฑ์กลับมาใช้ซ้ำ รวมถึงการศึกษาความสามารถในการจัดเรียงซ้อนทับของบรรจุภัณฑ์ เพื่อประเมินจำนวนชั้นที่สามารถซ้อนทับได้โดยไม่ทำให้บรรจุภัณฑ์เสียหาย
- ศึกษาเพิ่มเติมถึงประสิทธิภาพของบรรจุภัณฑ์ในการชะลอการเน่าเสียของมะม่วงน้ำดอกไม้ เพื่อประเมินความเหมาะสมในการใช้งานจริงด้านการยืดอายุการเก็บรักษาผลผลิต

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับงบประมาณสนับสนุนการดำเนินงานวิจัยจากมหาวิทยาลัยราชภัฏเทพสตรี ประจำปีงบประมาณ 2567 และขอขอบคุณสาขาวิชาเคมี (ค.บ.) สาขาวิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร และศูนย์วิทยาศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏเทพสตรี ที่เอื้อเฟื้อสถานที่และอุปกรณ์สำหรับการทำวิจัยในครั้งนี้

References

- Begum, H.A., Tanni, T.R. and Shahid, M.A. (2021). Analysis of Water Absorption of Different Natural Fibers. *Journal of Textile Science and Technology*, 7(4), 152-160. <https://doi.org/10.4236/jtst.2021.74013>
- Bergel, B.F., Dias Osorio, S., da Luz, L. M. and Santana, R.M.C. (2018). Effects of Hydrophobized Starches on Thermoplastic Starch Foams Made from Potato Starch. *Carbohydrate Polymers*, 200, 106-114. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2018.07.047>

- Bos, H.L., Van Den Oever, M.J.A. and Peters, O.C.J.J. (2002). Tensile and Compressive Properties of Flax Fibres for Natural Fibre Reinforced Composites. *Journal of Materials Science*, 37, 1683-1692. <https://doi.org/10.1023/A:1014925621252>
- Fan, R., Yuan, F., Wang, N., Gao, Y. and Huang, Y. (2015). Extraction and Analysis of Antioxidant Compounds from the Residues of *Asparagus officinalis* L. *Journal of Food Science and Technology*, 52, 2690-2700. <https://doi.org/10.1007/s13197-014-1360-4>
- Guo, Q., Wang, N., Liu, H., Li, Z., Lu, L. and Wang, C. (2020). The Bioactive Compounds and Biological Functions of *Asparagus officinalis* L. – A Review. *Journal of Functional Foods*, 65, 103727. <https://doi.org/10.1016/j.jff.2019.103727>
- Hadthamad, N., Opamawutthikul, M., Phattarakunamorn, K., Thongpan, N., Champa, L. and Siriphonllakun, P. (2024). Development of Eco-Friendly Paper Boxes from Sugarcane Waste. *Journal of Science and Technology, Ubon Ratchathani University*, 26(2), 25-38. (in Thai)
- Herrera-Franco, P.J. and Valadez-González, A. (2004). Mechanical Properties of Continuous Natural Fibre-Reinforced Polymer Composites. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 35(3), 339-345. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2003.09.012>
- Hu, J., Zhang, Yan., Liang, C., Wang, P. and Dongmei, H. (2021). The Preparation and Characteristics of High Puncture Resistant Composites Inspired by Natural Silk Cocoon. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 149, 106537. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2021.106537>
- Jin, T., Yan, L., Liu, W., Liu, S., Liu, C. and Zheng, L. (2021). Preparation and Physicochemical/Antimicrobial Characteristics of Asparagus Cellulose Film Containing Quercetin. *Food Science and Human Wellness*, 10(2), 251-257. <https://doi.org/10.1016/j.fshw.2021.02.015>
- Kawsuk, M. and Somjai, T. (2022). Properties of Paper from Mixed Fiber of Bamboo Sprout Coat and Corn Husk. *Journal of Manufacturing and Management Technology (JMMT)*, 1(2), 1-11. <https://ph01.tci-thaijo.org/index.php/jMMT/article/view/249135/170178> (in Thai)
- Kiangkoo, N., Ngencharoen, S. and Tanghengjarern, C. (2017). Manufacturing of Thermal Insulation Sheet from Beverage Labelling Waste and Bagasse Fiber. *Thaksin University Journal*, 20(2), 44-53. <https://ph02.tci-thaijo.org/index.php/tsujournal/article/view/106713/84460> (in Thai)
- Liu, J., Wang, C., Ewulonu, C. M., Chen, X., Wu, M. and Huang, Y. (2022). Fabrication of Superhydrophobic and Degradable Cellulose Paper Materials for Straw Application. *Cellulose*, 29, 52-540. <https://doi.org/10.1007/s10570-021-04279-7>
- Lungnongkhun, P., Jatuphatwarodom, S. and Chonsakorn, S. (2017). The Process Development of Yarn Production from Sugarcane Leafs. *TNI Journal of Engineering and Technology*, 5(2), 18-22. <https://ph01.tci-thaijo.org/index.php/TNIJournal/article/view/144862/107109> (in Thai)
- Maduang, T., Chunchart, O. and Pawongrat, R. (2018). The Effect on Morphological Change of Cellulose Fibers by Sonochemical-Assisted Pretreatment of Lignocellulosic Biomass. *RMUTSB Academic Journal*, 6(1), 26-36. <https://li01.tci-thaijo.org/index.php/rmutsb-sci/article/view/124475/98416> (in Thai)
- Mbise, E., Said, I. and Minja, R. J. (2021). Potential of Using Sugarcane Leaves to Produce Pulp for Paper Making. *Journal of Textile Engineering and Fashion Technology (JTEFT)*, 3(1), 32-35.
- Medronho, B., Romano, A., Miguel, M.G., Stigsson, L. and Lindman, B. (2012). Rationalizing Cellulose (in)Solubility: Reviewing Basic Physicochemical Aspects and Role of Hydrophobic Interactions. *Cellulose*, 19, 581-587. <https://doi.org/10.1007/s10570-011-9644-6>

- Ngamrabam, R., Aungsuratana, A. and Saridnirun, P. (2018). Potential of “NAM DOK MAI” Mango Production Through Supply Chain for Export in Ratchaburi Province. *Veridian E-Journal, Silpakorn University*, 11(2), 2563-2579. <https://he02.tci-thaijo.org/index.php/Veridian-E-Journal/article/view/144963/119438> (in Thai)
- Patricia, C., Manuel, V. and Gonzalo, V. (2018). Cellulose-Glycerol-Polyvinyl Alcohol Composite Films for Food Packaging: Evaluation of Water Adsorption, Mechanical Properties, Light-Barrier Properties and Transparency. *Carbohydrate Polymers*, 195, 432-443. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2018.04.120>
- Ratanamane, A., Suwannapan, S., Satchawan, S. and Inkum, R. (2022). Synthesis and Properties of Carboxymethyl Cellulose from Agricultural Waste - Sugarcane Leaves. *Cellulose Chemistry and Technology*, 56(5-6), 509-516. [https://www.cellulosechemtechnol.ro/pdf/CCT5-6\(2022\)/p.509-516.pdf](https://www.cellulosechemtechnol.ro/pdf/CCT5-6(2022)/p.509-516.pdf)
- Sakorn, J. (2022). Improving Packaging to Reduce Damage in the Transportation of Ripe Nam Dok mai Mango: A Case Study of Nam Dok Mai Mango in Chachoengsao Province. *Interdisciplinary Sripatum Chonburi Journal*, 8(1), 48-58. <https://so04.tci-thaijo.org/index.php/ISCJ/article/view/257288/175156> (in Thai)
- Sanyang, M.L., Sapuan, S., Jawaid, M.M., Ishak, M.R. and Sahari, J. (2016). Development and Characterization of Sugar Palm Starch and Poly(lactic acid) Bilayer Films. *Carbohydrate Polymers*, 146, 36-45. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2016.03.051>
- Schmidt, V.C.R. and Laurindo, J.B. (2010). Characterization of Foams Obtained from Cassava Starch, Cellulose Fibres and Dolomitic Limestone by a Thermopressing Process. *Brazilian Archives of Biology and Technology*, 53(1), 185-192. <https://doi.org/10.1590/S1516-89132010000100023>
- Soison, P. and Pratumshat, S. (2017). Effect of Surface Modifications of Fiber on the Mechanical Properties and Morphology of Poly (lactic acid) and Pineapple Leaf Fiber Composite. *Vocational Education Innovation and Research Journal*, 1(2), 48-54. <https://so06.tci-thaijo.org/index.php/ve-irj/article/view/195757/136031> (in Thai)
- Suwannasre, P., Egwutvongsa, S. and Seviset, S. (2017). Study and Design Furniture of Residues from Transport Wood Package. *Art and Architecture Journal Naresuan University*, 8(1), 142-154. <https://so01.tci-thaijo.org/index.php/ajnu/article/view/91251/71653> (in Thai)
- Tajvidi, M., Najafi, S.K. and Moteei, N. (2005). Long-Term Water Uptake Behavior of Natural Fiber/Polypropylene Composites. *Journal of Applied Polymer Science*, 99(5), 2199-2203. <https://doi.org/10.1002/app.21892>
- Theamdee, P., Khadsai, S. and Puborom, W. (2024). The Preparation of Naturally Dyed Banana Rope (*Musa x paradisiaca* L.) from *Curcuma longa* L. and *Caesalpinia sappan* L. Using Micro-wax Coating for Handicraft Products. *Journal of Research Unit on Science, Technology and Environment for Learning*, 15(2), 164-178. <https://ejournals.swu.ac.th/index.php/JSTEL/article/view/16312/13047> (in Thai)
- Trirat, P. (2017). Packaging Development from Agricultural Debris and Weeds as Molded Pulp for Fruit. *Art and Architecture Journal Naresuan University*, 8(2), 186-199. <https://so01.tci-thaijo.org/index.php/ajnu/article/view/107382/84969> (in Thai)

- Wang, X., Pang, Z., Chen, C., Xia, Q., Zhou, Y., Jing, S., Wang, R., Ray, U., Gan, W., Li, C., Chen, G., Foster, B., Li, T. and Hu, L. (2020). All-Natural, Degradable, Rolled-Up Straws Based on Cellulose Micro- and Nano-Hybrid Fibers. *Advanced Functional Materials*, 30(22), <https://doi.org/10.1002/adfm.201910417>
- Yussuf, A.A., Massoumi, I. and Hassan, A. (2010). Comparison of Polylactic Acid/Kenaf and Polylactic Acid/Rise Husk Composites: The Influence of the Natural Fibers on the Mechanical, Thermal and Biodegradability Properties. *Journal of Polymers and the Environment*, 18, 422-429. <https://doi.org/10.1007/s10924-010-0185-0>

การวิเคราะห์แนวโน้มการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) ในภาคขนส่ง โดยใช้อัลกอริทึมเหมืองข้อมูล

Trend Analysis of CO₂ Emissions in the Transport Sector Using Data Mining Algorithms

ปรีชาเกียรติ กองแก้ว^{1*} วันชัย ใจศร¹ รุจีพันธุ์ โกษารัตน์¹ และธนิต เกตุแก้ว¹

Preechakiat Konkaew^{1*} Wanchai Jaisorn¹ Rujipan Kosarat¹ and Thanit Keatkaew¹

Received: March 13, 2025; Revised: April 16, 2025; Accepted: April 17, 2025

บทคัดย่อ

การวิเคราะห์แนวโน้มการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในภาคขนส่งเป็นประเด็นสำคัญที่ส่งผลต่อสิ่งแวดล้อมและสุขภาพมนุษย์ งานวิจัยนี้เน้นการประยุกต์ใช้เทคนิคเหมืองข้อมูล ได้แก่ การแบ่งกลุ่มข้อมูล การวิเคราะห์ถดถอยเชิงเส้น และการสุ่มป่าไม้ เพื่อจัดกลุ่มและทำนายแนวโน้มการปล่อย CO₂ โดยใช้ข้อมูลจากการใช้เชื้อเพลิงน้ำมันในอดีต พร้อมประเมินประสิทธิภาพของแต่ละเทคนิคด้วยตัวชี้วัด เช่น ค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยเชิงสัมบูรณ์ ค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย และค่าสัมประสิทธิ์การกำหนด จากผลการวิจัยพบว่า เทคนิคการสุ่มป่าไม้มีความแม่นยำสูงสุด โดยให้ค่าสัมประสิทธิ์การกำหนดถึงร้อยละ 97.14 ในขณะที่เทคนิคถดถอยเชิงเส้นและการแบ่งกลุ่มข้อมูลมีค่าอยู่ที่ร้อยละ 86.58 และ 51.14 แสดงให้เห็นถึงศักยภาพของการสุ่มป่าไม้ในการพยากรณ์การปล่อยก๊าซในอนาคตเพื่อใช้ในการวางแผนลดก๊าซเรือนกระจก

คำสำคัญ : การปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์; การเหมืองข้อมูล; เทคนิคการแบ่งกลุ่มข้อมูล; การวิเคราะห์ข้อมูลถดถอยเชิงเส้น; เทคนิคการสุ่มป่าไม้

¹ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา

¹ Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Lanna

* Corresponding Author, Tel. 09 6501 2964, E - mail: preechakiat_ko66@live.rmutl.ac.th

Abstract

Analyzing trends in carbon dioxide (CO₂) emissions in the transportation sector is a critical issue that impacts both the environment and human health. This research focuses on the application of data mining techniques—namely clustering, linear regression analysis, and random forest—to group and predict future CO₂ emission trends. Historical fuel consumption data was used as the primary input for analysis. The performance of each technique was evaluated using metrics such as Mean Absolute Error (MAE), Root Mean Square Error (RMSE), and the coefficient of determination (R²). The results revealed that the random forest technique provided the highest accuracy, achieving an R² of 97.14 %. In comparison, linear regression and clustering yielded R² values of 86.58 % and 51.14 %. These findings highlight the potential of the random forest algorithm as an effective tool for forecasting carbon emissions to support greenhouse gas reduction planning efforts.

Keywords: CO₂ Emissions; Data Mining; K-means; Linear Regression; Random Forest

บทนำ

การเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศและปัญหาสิ่งแวดล้อมจากการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (Aekrattanawat et al., 2024; Palason et al., 2024) ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม เศรษฐกิจ และสุขภาพของประชากร โดยเฉพาะในภูมิภาคที่มีการเติบโตทางเศรษฐกิจและอุตสาหกรรมอย่างรวดเร็ว ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ซึ่งมาจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงฟอสซิลในหลายภาคส่วน โดยเฉพาะภาคขนส่ง มีบทบาทสำคัญต่อภาวะเรือนกระจกและภาวะโลกร้อน การปล่อยก๊าซจากภาคขนส่งยังส่งผลให้เกิดปัญหาฝุ่น PM2.5 (Kanabkaew, 2024) ซึ่งเป็นฝุ่นละอองขนาดเล็กที่กระทบต่อระบบทางเดินหายใจ หัวใจ และหลอดเลือด รวมถึงระบบอื่น ๆ ในร่างกาย (Namcome and Tansuchat, 2021; Wongchan, 2023; Maijaroensri and Hirunrueng, 2024) โดยเฉพาะในพื้นที่ที่มีการจราจรหนาแน่นหรือกิจกรรมอุตสาหกรรมสูง ปัจจุบันมีการใช้เทคนิคเหมืองข้อมูล (Data Mining) (Khruachalee et al., 2024) ในการวิเคราะห์ข้อมูลขนาดใหญ่เพื่อค้นหารูปแบบและแนวโน้มที่ซ่อนอยู่ การศึกษานี้จึงประยุกต์ใช้ K-means Clustering (Khatbanjong and Mawan, 2021; Posing et al., 2024; Phounsathorn and Bamroongcheep, 2025) ในการจัดกลุ่มข้อมูลการปล่อยก๊าซตามประเภทเชื้อเพลิงและช่วงเวลา รวมถึงอัลกอริทึม Linear Regression (Patcharacharnwong et al., 2020; Settakumpoo and Benjaoran, 2022; Karseewong and Boonlha, 2024) และ Random Forest (Ongrungrueng et al., 2020; Rattanachoung, 2023; Sangthong et al., 2023; Lekdee et al., 2024) เพื่อพยากรณ์แนวโน้มการปล่อยก๊าซในอนาคต เทคนิคเหล่านี้ช่วยให้เข้าใจพฤติกรรมของการปล่อยก๊าซของภาคขนส่ง และสามารถประเมินผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและสุขภาพได้อย่างแม่นยำ

การวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อวิเคราะห์แนวโน้มการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในภาคขนส่ง และเปรียบเทียบประสิทธิภาพของอัลกอริทึมต่าง ๆ ในการพยากรณ์การปล่อยก๊าซ โดยใช้ตัวชี้วัด เช่น Mean Absolute Error (MAE), Root Mean Squared Error (RMSE) และ R-squared ในการประเมินความแม่นยำของแบบจำลอง ผลการศึกษานี้สามารถใช้พยากรณ์การปล่อยก๊าซในอนาคต รวมถึงใช้เป็นแนวทางในการพัฒนาและวางแผนกลยุทธ์ลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกและมลพิษทางอากาศ เช่น PM2.5 ได้อย่างมีประสิทธิภาพ พร้อมกำหนดมาตรการเพื่อปรับปรุงคุณภาพอากาศและลดผลกระทบต่อสุขภาพ การศึกษานี้ยังเน้นการใช้เทคนิคเหมืองข้อมูลเพื่อให้ได้ข้อมูลเชิงลึกที่สนับสนุนการตัดสินใจด้านนโยบายและกลยุทธ์ในการลดการปล่อยมลพิษจากภาคขนส่ง ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญในการรักษาสิ่งแวดล้อมและส่งเสริมความยั่งยืนในอนาคต

วิธีการดำเนินงานวิจัย

เริ่มต้นจากการจัดเตรียมและทำความสะอาดข้อมูลให้พร้อมสำหรับการวิเคราะห์ จากนั้นใช้วิธี K-means Clustering เพื่อแบ่งข้อมูลออกเป็นกลุ่มน้ำมันและก๊าซธรรมชาติ ข้อมูลแต่ละกลุ่มถูกนำไปวิเคราะห์ด้วยโมเดล Linear Regression และ Random Forest เพื่อประเมินประสิทธิภาพในการพยากรณ์ สุดท้ายเปรียบเทียบผลลัพธ์ของแต่ละโมเดลเพื่อสรุปว่าโมเดลใดมีความเหมาะสมสูงสุด โดยขั้นตอนทั้งหมดแสดงดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 ขั้นตอนการวิเคราะห์ข้อมูล

1. การรวบรวมข้อมูลการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) ในภาคขนส่ง

ดำเนินการโดยใช้ข้อมูลจากศูนย์เทคโนโลยีสารสนเทศและการสื่อสาร สำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน (สนพ.) ที่เผยแพร่ผ่านคลังข้อมูลเปิดภาครัฐ (Open Data) ซึ่งจัดทำจากรายงานของกรมธุรกิจพลังงาน โดยมีรายละเอียดการใช้พลังงานในภาคขนส่ง แยกตามประเภทเชื้อเพลิง พร้อมการคำนวณการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) รายเดือน ข้อมูลครอบคลุม 37 ปี 9 เดือน ตั้งแต่ มกราคม 2530 ถึง ตุลาคม 2567 รวม 740 รายการ ครอบคลุมทั่วประเทศไทย https://catalog.eppo.go.th/dataset/dataset_11_63

2. การเตรียมข้อมูล

ทำความสะอาดข้อมูล (Data Cleaning) เช่น จัดการค่าขาดหาย (Missing Value) พร้อมแปลงข้อมูล (Data Transform) ให้อยู่ในรูปแบบที่วิเคราะห์ได้

3. การวิเคราะห์ด้วยอัลกอริทึมเหมืองข้อมูล

3.1 K-means Clustering เป็นอัลกอริทึมการจัดกลุ่มข้อมูลที่ได้รับคามนิยมอย่างแพร่หลายในด้าน Machine Learning และ Data Mining โดยเป็นอัลกอริทึมประเภท Unsupervised Learning ซึ่งไม่จำเป็นต้องมีฉลาก (Labels) กำกับข้อมูลล่วงหน้า การทำงานของ K-means เริ่มจากการกำหนดจำนวนคลัสเตอร์ที่ต้องการ (K) แล้วสุ่มเลือกจุดศูนย์กลาง (Centroids) ให้แต่ละคลัสเตอร์ จากนั้นระบบจะทำการจัดกลุ่มข้อมูลโดยพิจารณาระยะห่างระหว่างข้อมูลแต่ละจุดกับ Centroid และกำหนดให้ข้อมูลนั้นอยู่ในกลุ่มที่ใกล้ที่สุด ต่อมาจะมีการคำนวณหาตำแหน่งใหม่ของ Centroid โดยใช้ค่าเฉลี่ยของจุดข้อมูลภายในแต่ละกลุ่ม กระบวนการนี้จะทำซ้ำไปเรื่อย ๆ จนกว่าตำแหน่งของ Centroid จะคงที่ หรือเมื่อค่าความคลาดเคลื่อนลดลงเพียงเล็กน้อย ซึ่งถือว่าอัลกอริทึมได้เข้าสู่จุดสมดุล

สมการของ K-means Clustering ใช้สมการระยะห่าง (Euclidean Distance) เพื่อจัดกลุ่มข้อมูล ดังสมการที่ (1)

$$d(x, y) = \sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2} \quad (1)$$

โดย x, y คือ จุดข้อมูล
 n คือ จำนวนมิติของข้อมูล
 การคำนวณ Centroid C_k ของแต่ละกลุ่มดังสมการที่ (2)

$$C_k = \frac{1}{N_k} \sum_{i=1}^{N_k} x_i \quad (2)$$

โดย N_k คือ จำนวนข้อมูลในกลุ่ม k

3.2 Linear Regression (การถดถอยเชิงเส้น) เป็นอัลกอริทึม Supervised Learning ที่ใช้ในการ พยากรณ์ ค่าต่อเนื่อง หรือหาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปร โดยมีลักษณะเป็นเส้นตรง (Linear Relationship) ระหว่างตัวแปรอิสระ (Independent Variable, X) และตัวแปรตาม (Dependent Variable, Y) สมการทั่วไปของ Simple Linear Regression (มีตัวแปรอิสระ 1 ตัว) ดังสมการที่ (3)

$$Y = mX + b \quad (3)$$

โดยที่

Y = ค่าที่ต้องการพยากรณ์ (ตัวแปรตาม)
 X = ตัวแปรอิสระ (Feature)
 m = ค่าสัมประสิทธิ์ (Coefficient) หรือความชันของเส้น
 b = ค่าคงที่ (Intercept)

ถ้ามีตัวแปรอิสระหลายตัว (Multiple Linear Regression) ดังสมการที่ (4)

$$Y = b_0 + b_1X_1 + b_2X_2 + \dots + b_nX_n \quad (4)$$

โดยที่ b_0 เป็นค่าคงที่ และ b_1, b_2, \dots, b_n เป็นค่าสัมประสิทธิ์ของแต่ละตัวแปร

หลักการการทำงานของ Linear Regression

1. กำหนดตัวแปร X และ Y
2. Fit เส้นตรงที่เหมาะสมกับข้อมูล โดยใช้วิธี Least Squares เพื่อลดค่า Loss Function สมการที่ (5)

$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2 \quad (5)$$

Loss Function Mean Squared Error (MSE) ซึ่งเป็นค่าเฉลี่ยของผลต่างระหว่างค่าจริง Y_i และค่าพยากรณ์ \hat{Y}_i

3. อัปเดตค่าสัมประสิทธิ์ m และ b โดยใช้ *Gradient Descent* หรือ *Ordinary Least Squares (OLS)*
4. เมื่อ Loss ลดลงจนคงที่ แสดงว่าได้เส้นที่เหมาะสมที่สุดแล้ว

3.3 Random Forest เป็นอัลกอริทึม Machine Learning ประเภท Supervised Learning ที่ใช้สำหรับ Regression (การพยากรณ์ค่าต่อเนื่อง) โดยเป็นการรวม Decision Trees หลายต้น (Ensemble Learning) เข้าด้วยกัน เพื่อให้การพยากรณ์แม่นยำขึ้นและลดปัญหา Overfitting

หลักการการทำงานของ Random Forest

1. สร้างชุดข้อมูลสุ่ม (Bootstrapping) และเลือกตัวแปรแบบสุ่ม
 - 1.1 ระบบจะสุ่มเลือกข้อมูลบางส่วนจาก Training Set และเลือกตัวแปรบางตัวเพื่อสร้าง Decision Tree

- 1.2 แต่ละต้นไม้จะถูกฝึกด้วยชุดข้อมูลที่แตกต่างกัน
 2. สร้างและฝึก Decision Trees หลายต้น
 - 2.1 แต่ละ Decision Tree จะทำการพยากรณ์ค่า y โดยอิงจากตัวแปรที่เลือกมา
 - 2.2 แต่ละต้นไม้จะให้ค่าพยากรณ์ที่แตกต่างกัน
 3. รวมผลลัพธ์จากทุกต้นไม้
 - 3.1 นำค่าที่ได้จากทุก Decision Tree มาเฉลี่ยกัน
 - 3.2 ผลลัพธ์สุดท้ายจะเป็นค่าพยากรณ์เฉลี่ยของทุกต้นไม้
- สมการของ Random Forest ดังสมการที่ (6)

$$\hat{y} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N f_i(X) \quad (6)$$

โดยที่

- \hat{y} = ค่าพยากรณ์สุดท้าย
- N = จำนวนต้นไม้ในป่า (Number of Trees)
- $f_i(X)$ = ค่าพยากรณ์จาก Decision Tree ต้นที่ i

การประเมินผลโมเดล คือกระบวนการวัดและวิเคราะห์ประสิทธิภาพของโมเดลว่าทำงานได้ดีเพียงใดกับข้อมูลใหม่ ช่วยให้เลือกโมเดลที่เหมาะสมและปรับปรุงผลลัพธ์ให้ดียิ่งขึ้น ซึ่งเป็นขั้นตอนสำคัญใน Machine Learning และ Data Science

1. Mean Absolute Error (MAE) เป็นตัวชี้วัดที่ใช้วัดความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยระหว่างค่าที่ทำนาย (\hat{y}_i) กับค่าจริง (y_i) โดยวัดจากค่าเฉลี่ยของความแตกต่างแบบสัมบูรณ์ (Absolute) ของแต่ละจุดข้อมูล ดังสมการที่ (7)

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i - \hat{y}_i| \quad (7)$$

2. Root Mean Squared Error (RMSE) เป็นตัวชี้วัดที่ใช้วัดความคลาดเคลื่อนแบบกำลังสอง และคำนวณค่าเฉลี่ยของความคลาดเคลื่อนก่อนที่จะนำมาถอดรากที่สอง เน้นให้ค่าความผิดพลาดที่สูงมีผลต่อค่า RMSE มากขึ้น ดังสมการที่ (8)

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2} \quad (8)$$

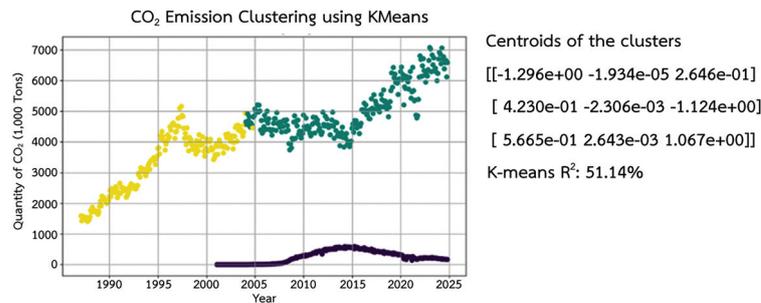
3. R^2 Score (Coefficient of Determination) เป็นตัววัดที่ใช้บอกว่าโมเดลของเราสามารถอธิบายความแปรปรวนของข้อมูลได้ดีแค่ไหน เมื่อเทียบกับค่าเฉลี่ยของข้อมูล ดังสมการที่ 9

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \quad (9)$$

ผลการทดลอง

1. ผลการพยากรณ์การปล่อย CO_2 ที่เกิดจากการใช้ก๊าซธรรมชาติด้วยอัลกอริทึม K-means Clustering โดยข้อมูลการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ในภาคขนส่งถูกจัดกลุ่มออกเป็น 3 กลุ่มหลัก ได้แก่ กลุ่มที่มีการปล่อยต่ำ แสดงถึงการปล่อย CO_2 อยู่ในระดับต่ำจากการใช้ก๊าซเป็นเชื้อเพลิงเพื่อเป็นพลังงานทางเลือกกลุ่มที่มีการปล่อยปานกลาง

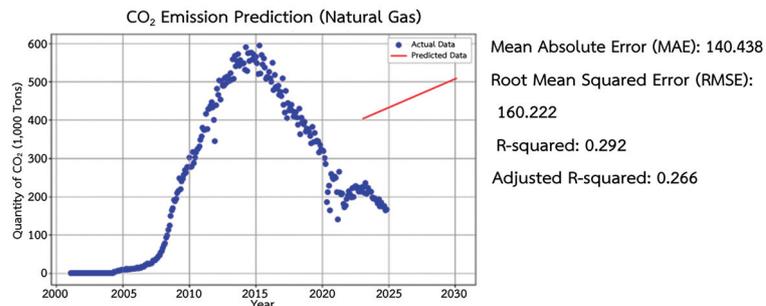
แสดงถึงการปล่อย CO₂ ในระดับปานกลาง ซึ่งพบในช่วงเวลาที่ผ่านมาและกลุ่มที่มีการปล่อยสูง สะท้อนการปล่อย CO₂ สูงในช่วงเวลาที่มีการขยายตัวของอุตสาหกรรมจนถึงปัจจุบัน เมื่อทำการเปรียบเทียบพฤติกรรมของการปล่อย CO₂ จากแต่ละกลุ่ม พบว่าแนวโน้มที่ชัดเจนคือ การเพิ่มขึ้นของการปล่อย CO₂ ต่อเนื่องในปัจจุบัน เมื่อเทียบกับอดีต การเปลี่ยนแปลงนี้สะท้อนถึงการใช้เชื้อเพลิงที่มีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและการปล่อย CO₂ จากกิจกรรมทางเศรษฐกิจที่ขยายตัว ทั้งนี้การศึกษาดังกล่าวได้เน้นย้ำถึงความสำคัญในการใช้พลังงานที่มีความยั่งยืนเพื่อลดการปล่อย CO₂ และช่วยในการต่อสู้กับการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศในอนาคต



รูปที่ 2 การปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) โดยอัลกอริทึม K-means Clustering

จากรูปที่ 2 แสดงให้เห็นโดยชัดเจนว่ามีการแบ่งกลุ่มของการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) ถูกจัดกลุ่มอย่างชัดเจนด้วยเทคนิค K-means ได้ 3 กลุ่ม คือ กลุ่มที่ 1 (สีเหลือง) กลุ่มนี้คือ การปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) จากน้ำมันเชื้อเพลิงในอดีต ก่อนปี ค.ศ. 2005 ซึ่งมีจะมีปริมาณการปล่อยที่สูงในช่วงแรก ๆ และอาจมีลักษณะที่กระจุกตัวเนื่องจากการพึ่งพาพลังงานจากน้ำมันเป็นหลักในช่วงเวลานั้น โดยกลุ่มนี้จะมีลักษณะการกระจายที่ชัดเจนในช่วงเวลานี้ กลุ่มที่ 2 (สีเขียว) การปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) จากน้ำมันเชื้อเพลิงในช่วงปี ค.ศ. 2005 ถึงปัจจุบัน แม้ว่าจะมีการพยายามใช้พลังงานทางเลือกเพื่อทดแทน แต่การใช้พลังงานจากน้ำมันยังคงเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง กลุ่มนี้จะแสดงให้เห็นถึงการขยายตัวของภาคอุตสาหกรรมและการขนส่งที่ยังคงใช้เชื้อเพลิงฟอสซิลเป็นหลัก กลุ่มที่ 3 (สีม่วง) กลุ่มนี้จะเกี่ยวข้องกับการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) จากกิจกรรมทางเศรษฐกิจที่เพิ่มขึ้นในช่วงเวลาปัจจุบัน โดยอาจจะจะมีลักษณะการกระจายที่ต่ำกว่าและแตกต่างจากกลุ่มน้ำมัน เนื่องจากกิจกรรมทางเศรษฐกิจมักถูกมองว่าเป็นพลังงานสะอาดมากกว่า แต่ก็ยังมีการปล่อยมลพิษที่ไม่สามารถหลีกเลี่ยงได้ทั้งหมด การปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) โดยเฉพาะจากน้ำมันเชื้อเพลิงยังคงเพิ่มสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง แม้ว่าจะมีความพยายามในการนำพลังงานทดแทนมาใช้ในการขนส่ง แต่การปล่อยก๊าซ CO₂ ก็ยังไม่ลดลงตามที่คาดหวัง โดยปริมาณการปล่อยจากน้ำมันเชื้อเพลิงยังคงมีความสำคัญและส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมอย่างต่อเนื่อง

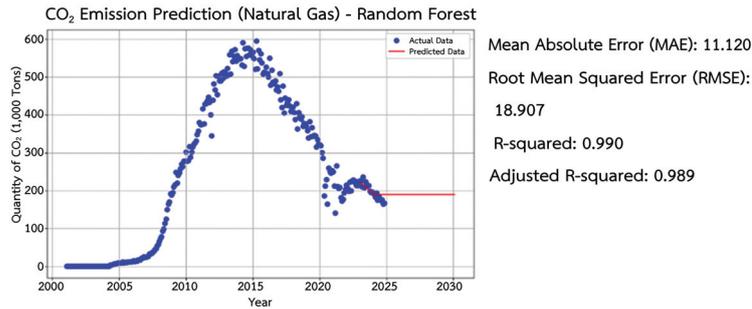
2. การพยากรณ์การปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) จากการใช้ก๊าซธรรมชาติด้วยอัลกอริทึม Linear Regression



รูปที่ 3 การปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) ที่เกิดจากการใช้ก๊าซธรรมชาติเป็นเชื้อเพลิงโดยอัลกอริทึม Linear Regression

จากรูปที่ 3 แสดงให้เห็นว่าค่าที่ได้จากการที่จัดทำนาย (สีแดง) แตกต่างจากจุดจริง (สีน้ำเงิน) มาก แสดงว่าโมเดลไม่สามารถทำนายค่าได้อย่างแม่นยำ ซึ่งอาจเกิดจากปัจจัยที่โมเดลไม่ได้คำนึงถึง เช่น ความผันผวนของราคา ก๊าซธรรมชาติ (Natural Gas) ที่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วและค่าใช้จ่ายที่สูง ทำให้ทำนายยากขึ้น เพราะราคา ก๊าซธรรมชาติมีผลต่อปัจจัยหลายอย่างในการคำนวณต้นทุนที่อาจไม่ได้รับการพิจารณาในโมเดลนี้ การใช้โมเดลที่ซับซ้อนมากขึ้นอาจช่วยจับความสัมพันธ์ที่ลึกซึ้งซึ่งระหว่างปัจจัยเหล่านี้และปรับปรุงความแม่นยำในการทำนายได้

3. การพยากรณ์การปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) จากการใช้ก๊าซธรรมชาติด้วยอัลกอริทึม Random Forest



รูปที่ 4 การปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) ที่เกิดจากการใช้ก๊าซเป็นเชื้อเพลิงโดยใช้แบบจำลอง Random Forest

จากรูปที่ 4 พบว่าโมเดล Random Forest ให้ค่า MAE และ RMSE ที่ต่ำแสดงว่าโมเดล Random Forest สามารถทำนายได้แม่นยำขึ้น โดยค่าผิดพลาดเฉลี่ยและความผิดพลาดที่ยกกำลังสองมีค่าน้อยมาก ซึ่งหมายความว่าโมเดล ทำงานได้ดีในการทำนายข้อมูลจริง ส่วนค่า R-squared ที่สูงถึง 0.990 และ Adjusted R-squared ที่ 0.989 แสดงว่าโมเดลสามารถอธิบายความแปรปรวนของข้อมูลได้เกือบทั้งหมด การใช้ Natural Gas ด้วย Random Forest มีความแม่นยำสูง เพราะโมเดลนี้สามารถจับความสัมพันธ์ที่ซับซ้อนได้ดีกว่าโมเดลอื่น ๆ และเหมาะสมกับข้อมูลที่มีความหลากหลาย

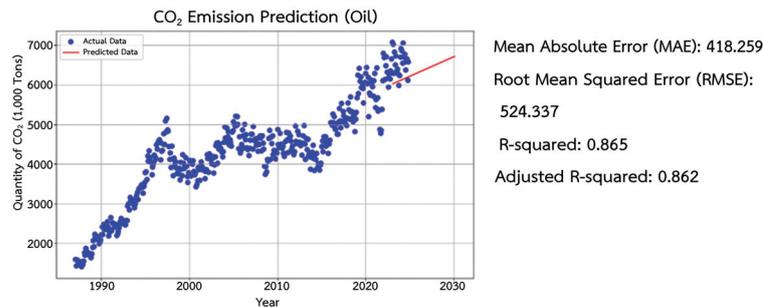
ตารางที่ 1 เปรียบเทียบค่าตัวชี้วัดที่ได้การปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากการใช้ก๊าซธรรมชาติแต่ละโมเดล (Linear Regression, Random Forest, K-means)

Metric	Linear Regression	Random Forest	K-means
MAE	140.44	11.12	-
RMSE	160.22	18.91	-
R-squared	29.00 %	99.02 %	51.14 %
Adjusted R-squared	26.70 %	98.98 %	-

จากตารางที่ 1 จากการเปรียบเทียบค่าตัวชี้วัดของโมเดลที่ใช้ในการพยากรณ์ข้อมูลการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากก๊าซธรรมชาติ พบว่าโมเดล Linear Regression แม้จะสามารถแสดงแนวโน้มเชิงเส้นของข้อมูลได้ดี และมีความเรียบง่ายในการตีความ แต่ให้ผลลัพธ์ที่แม่นยำไม่มากนัก โดยมีค่า MAE และ RMSE สูงถึง 140.44 และ 160.22 ขณะที่ค่า R-squared อยู่ที่เพียงร้อยละ 29 สะท้อนว่าโมเดลยังไม่สามารถจับความสัมพันธ์ของข้อมูลได้ดีนัก โดยเฉพาะในกรณีที่มีความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรไม่เป็นเชิงเส้นอย่างชัดเจน ในทางตรงกันข้ามโมเดล Random Forest ซึ่งเป็นอัลกอริทึมแบบ Ensemble Learning ที่รวมผลของหลายต้นไม้ตัดสินใจ (Decision Trees) สามารถเรียนรู้ความสัมพันธ์ที่ซับซ้อนและไม่เป็นเชิงเส้นของข้อมูลได้อย่างมีประสิทธิภาพ ส่งผลให้ค่าความผิดพลาดลดลงอย่างมาก โดย MAE เท่ากับ 11.12 และ RMSE เท่ากับ 18.91 และค่า R-squared สูงถึงร้อยละ 99.02 ซึ่งชี้ว่าโมเดลสามารถอธิบายความแปรปรวนของข้อมูลได้เกือบทั้งหมด จึงถือว่าเป็นโมเดลที่เหมาะสมและแม่นยำที่สุดในบริบทของการพยากรณ์

การปล่อย CO₂ จากก๊าซธรรมชาติ ส่วนโมเดล K-means ซึ่งใช้สำหรับการจัดกลุ่มข้อมูล ไม่ใช่การพยากรณ์โดยตรง จึงไม่มีค่าชี้วัด MAE หรือ RMSE อย่างไรก็ตาม ค่า R-squared ที่ได้จากการจัดกลุ่มอยู่ที่ร้อยละ 51.14 แสดงให้เห็นว่าการจัดกลุ่มสามารถอธิบายความแปรปรวนของข้อมูลได้ในระดับหนึ่ง อาจเป็นประโยชน์สำหรับการจำแนกประเภทของกิจกรรมที่ส่งผลต่อการปล่อย CO₂ เพื่อการวิเคราะห์เชิงสำรวจ (Exploratory Analysis) มากกว่าการพยากรณ์

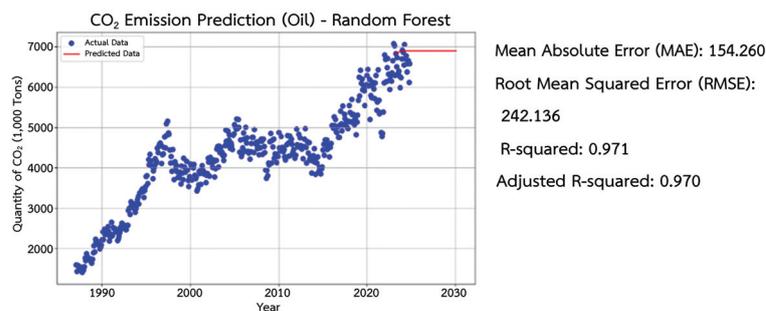
4. การพยากรณ์การปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) จากการใช้น้ำมันเป็นเชื้อเพลิงด้วยอัลกอริทึม Linear Regression



รูปที่ 5 การปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) ที่เกิดจากการใช้น้ำมันเป็นเชื้อเพลิงโดยใช้แบบจำลอง Linear Regression

จากรูปที่ 5 พบว่าค่าทำนาย (สีแดง) แตกต่างจากจุดจริง (สีน้ำเงิน) น้อย แสดงว่าโมเดลทำนายได้ดีขึ้น โดยมีค่า MAE และ RMSE ที่ต่ำกว่า ซึ่งหมายความว่าโมเดลมีความผิดพลาดน้อยลง และสามารถทำนายได้แม่นยำขึ้น นอกจากนี้ ค่า R-squared ที่สูงถึง 0.865 และ Adjusted R-squared ที่ 0.862 แสดงว่าโมเดลสามารถอธิบายความแปรปรวนของข้อมูลได้มากกว่าร้อยละ 86 การใช้น้ำมันเป็นตัวแปรที่ค่อนข้างคาดการณ์ได้ เพราะมีการใช้งานอย่างต่อเนื่องและสามารถตรวจสอบปัจจัยต่าง ๆ ได้ง่ายกว่าการใช้งานของพลังงานประเภทอื่น ๆ

5. การพยากรณ์การปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) จากการใช้น้ำมันเป็นเชื้อเพลิงด้วยอัลกอริทึม Random Forest



รูปที่ 6 การปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) ที่เกิดจากการใช้น้ำมันเป็นเชื้อเพลิงโดยใช้แบบจำลอง Random Forest

จากรูปที่ 6 พบว่าค่าทำนาย (สีแดง) ใกล้เคียงกับจุดจริง (สีน้ำเงิน) แสดงว่าโมเดล Random Forest ทำงานได้ดี โดยมีค่า MAE และ RMSE ที่ต่ำ แสดงถึงความผิดพลาดที่ไม่มากนัก ค่า R-squared และ Adjusted R-squared ที่สูงถึง 0.971 และ 0.970 หมายความว่าโมเดลสามารถอธิบายข้อมูลได้เกือบร้อยละ 97 โมเดลนี้เหมาะสมในการทำนายข้อมูลที่มีความซับซ้อนและความแปรปรวนสูง ผลลัพธ์นี้บ่งชี้ว่าโมเดลสามารถจับความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรต่าง ๆ ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

ตารางที่ 2 เปรียบเทียบค่าตัวชี้วัดที่ได้จากน้ำมันเชื้อเพลิงแต่ละโมเดล (Linear Regression, Random Forest, K-means)

Metric	Linear Regression	Random Forest	K-means
MAE	418.259	154.260	-
RMSE	524.337	242.136	-
R-squared	86.50 %	97.10 %	51.14 %
Adjusted R-squared	86.20 %	97.00 %	-

จากตารางที่ 2 พบว่าโมเดล Random Forest มีประสิทธิภาพในการพยากรณ์สูงสุดเมื่อเทียบกับ Linear Regression และ K-means โดยมีค่า MAE และ RMSE ต่ำที่สุด (154.260 และ 242.136) ซึ่งแสดงถึงความแม่นยำในการทำนายสูง และค่าความแปรปรวนที่โมเดลสามารถอธิบายได้ (R-squared) อยู่ที่ 97.1 % ถือว่าสูงมากใกล้เคียงกับโมเดลสมบรูณ์แบบ ขณะที่โมเดล Linear Regression แม้จะมีค่า R-squared สูงถึง 86.5 % แต่ค่าความผิดพลาด MAE และ RMSE ยังคงค่อนข้างสูง (418.259 และ 524.337) ซึ่งอาจเกิดจากสมมติฐานเชิงเส้นของโมเดลที่ไม่สามารถจับความสัมพันธ์ที่ซับซ้อนในข้อมูลได้อย่างมีประสิทธิภาพ สำหรับ K-means Clustering แม้จะไม่ใช่โมเดลสำหรับการพยากรณ์โดยตรง จึงไม่มีค่า MAE และ RMSE แต่ยังสามารถใช้ประโยชน์ในการจำแนกกลุ่มของข้อมูลการปล่อย CO₂ ได้ระดับหนึ่ง โดยมีค่า R-squared อยู่ที่ 51.14 % ซึ่งสามารถนำไปใช้วิเคราะห์โครงสร้างของข้อมูลเบื้องต้น หรือใช้ร่วมกับโมเดลอื่น ๆ ในการวางกลยุทธ์เชิงกลุ่มได้

สรุปการเปรียบเทียบ

จากการเปรียบเทียบผลลัพธ์ของโมเดล Linear Regression, Random Forest และ K-means โดยอิงจากข้อมูลการใช้เชื้อเพลิงธรรมชาติที่มีความผันผวน พบว่า Random Forest ให้ผลแม่นยำที่สุด โดยมีค่า MAE และ RMSE ต่ำกว่า Linear Regression อย่างมีนัยสำคัญ สะท้อนถึงความสามารถในการพยากรณ์ CO₂ ได้ดีกว่า อีกทั้งค่า R-squared และ Adjusted R-squared ของ Random Forest อยู่ที่ 99.02 % และ 98.98 % แสดงให้เห็นถึงความสามารถในการอธิบายความแปรปรวนของข้อมูลได้ดีกว่า Linear Regression ที่มีเพียง 29.00 % ขณะที่ K-means ซึ่งเน้นการจัดกลุ่มข้อมูลมีค่า R-squared 51.14 % สูงกว่า Linear Regression แต่ยังคงต่ำกว่า Random Forest อย่างชัดเจน โดยสรุป Random Forest เหมาะสำหรับการพยากรณ์ CO₂ ที่ซับซ้อนและไม่เป็นเชิงเส้น ในขณะที่ Linear Regression อธิบายความแปรปรวนได้จำกัด และ K-means เหมาะกับการจัดกลุ่มมากกว่าพยากรณ์ เมื่อทดสอบกับข้อมูลการใช้น้ำมันที่มีความผันผวนน้อย Random Forest ยังคงให้ผลลัพธ์แม่นยำสูงสุดเช่นเดิม

สาเหตุที่ Random Forest มีประสิทธิภาพเหนือกว่า Linear Regression และ K-means มาจากลักษณะข้อมูลการใช้เชื้อเพลิงที่มีความผันผวนสูงและความสัมพันธ์ที่ไม่เป็นเชิงเส้น อีกทั้งอาจมีปฏิสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรที่ซับซ้อน ซึ่ง Linear Regression ซึ่งเป็นโมเดลเชิงเส้นไม่สามารถจัดการกับความซับซ้อนได้ดี ในขณะที่ Random Forest ซึ่งเป็นโมเดลแบบ Tree-Based Ensemble สามารถจับความสัมพันธ์ที่ไม่เป็นเชิงเส้นได้ดี โดยอาศัยการรวมผลของหลายต้นไม้เพื่อลดความเอนเอียงและเพิ่มความแม่นยำในการพยากรณ์ ส่วน K-means แม้จะช่วยจัดกลุ่มข้อมูลตามลักษณะการใช้เชื้อเพลิงได้ แต่ไม่เหมาะกับการพยากรณ์เพราะไม่ได้ออกแบบมาเพื่อหาแนวโน้มของตัวแปรเป้าหมายและไม่พิจารณาความสัมพันธ์เชิงสาเหตุ นอกจากนี้เมื่อทดสอบด้วยข้อมูลการใช้น้ำมันที่มีความผันผวนน้อย ผลลัพธ์ยังแสดงว่า Random Forest มีความแม่นยำสูงสุด สะท้อนถึงความยืดหยุ่นและความแข็งแกร่งของโมเดลในการพยากรณ์ CO₂ จากข้อมูลที่หลากหลาย

สรุปผล

การวิจัยนี้มุ่งเน้นการวิเคราะห์และพยากรณ์การปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) ในภาคขนส่ง โดยใช้อัลกอริทึมเหมืองข้อมูล (Data Mining Algorithms) เช่น K-means Clustering, Linear Regression และ Random Forest

เพื่อตรวจสอบแนวโน้มการปล่อย CO₂ และคาดการณ์ในอนาคต รวมทั้งเปรียบเทียบประสิทธิภาพของอัลกอริทึมที่ใช้การพยากรณ์ด้วย Linear Regression แบบจำลอง Linear Regression ช่วยแสดงแนวโน้มการเพิ่มขึ้นของการปล่อย CO₂ โดยพยากรณ์การปล่อย CO₂ ในระยะยาว ผลลัพธ์ที่ได้มีความแม่นยำพอสมควร โดยค่าตัวชี้วัด MAE, RMSE และ R-squared ซึ่งให้เห็นว่าแม้จะมีความสัมพันธ์เชิงบวกกับปริมาณเชื้อเพลิงที่ใช้ แต่ค่าความแม่นยำยังอยู่ในระดับที่สามารถปรับปรุงได้ การพยากรณ์ด้วย Random Forest การใช้ Random Forest ช่วยเพิ่มความแม่นยำในการพยากรณ์การปล่อย CO₂ โดยค่าตัวชี้วัด MAE, RMSE และ R-squared ซึ่งให้เห็นว่า Random Forest ให้ผลลัพธ์ที่แม่นยำและเสถียรมากกว่า Linear Regression มาก โดยมี R-squared ใกล้เคียงกับ 1 ซึ่งบ่งชี้ถึงความสัมพันธ์ที่แข็งแกร่งระหว่างข้อมูลที่ใช้จากการเปรียบเทียบพบว่า Random Forest ให้ผลลัพธ์ที่แม่นยำและเสถียรมากกว่า Linear Regression อย่างมีนัยสำคัญ จึงถือเป็นโมเดลที่เหมาะสมสำหรับการพยากรณ์การปล่อย CO₂ ในบริบทของข้อมูลที่มีความผันผวนและซับซ้อน นอกจากนี้แบบจำลอง Random Forest ยังสามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้อย่างมีประสิทธิภาพทั้งในภาครัฐและภาคเอกชน โดยในภาครัฐ เช่น สำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน (สนพ.) หรือกระทรวงพลังงาน สามารถใช้เพื่อวางแผนเชิงนโยบายด้านการใช้เชื้อเพลิงอย่างแม่นยำยิ่งขึ้น และคาดการณ์ปริมาณการปล่อย CO₂ เพื่อสนับสนุนการกำหนดมาตรการลดก๊าซเรือนกระจกได้อย่างมีประสิทธิภาพ ส่วนในภาคเอกชน โดยเฉพาะกลุ่มธุรกิจโลจิสติกส์หรือขนส่ง โมเดลนี้สามารถนำไปใช้ในการประเมินคาร์บอนฟุตพริ้นท์จากกิจกรรมขนส่ง ตลอดจนวางกลยุทธ์ลดการใช้เชื้อเพลิงฟอสซิล เช่น การปรับเปลี่ยนเส้นทางการเดินทาง หรือการเลือกใช้น้ำมันที่มีประสิทธิภาพด้านพลังงาน เพื่อส่งเสริมการดำเนินงานที่ยั่งยืนและเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม

References

- Aekrattanawat, S., Sangkhiew, N., Karot, T. and Jomtong, P. (2024). The Analysis of Carbon Dioxide Emissions from Driving Behavior Using Multiple Linear Regression: A Case Study of Sample Company. *The Journal of Industrial Technology: Suan Sunandha Rajabhat University*, 12(2), 87-95. <https://ph01.tci-thaijo.org/index.php/fit-ssru/article/view/257827/173941> (in Thai)
- Kanabkaew, T. (2024). Thailand and Overcoming the PM2.5 Crisis. *Journal of Multidisciplinary Academic Research and Development (JMARD)*, 6(4), 1-9. <https://he02.tci-thaijo.org/index.php/JMARD/article/view/272524/185467> (in Thai)
- Karseewong, S. and Boonlha, K. (2024). Prediction of Carbon Dioxide Emission from Energy Consumption in Thailand with Sarima-Ann-Reg Model. *Srinakharinwirot University Journal of Sciences and Technology*, 16(32), 1-11, <https://ph02.tci-thaijo.org/index.php/swujournal/article/view/251667/171410> (in Thai)
- Khruachalee, K., Kitkamhang, O. and Apinawin, W. (2024). An Assessment and Forecasting of Carbon Dioxide (CO₂) Emissions from the Transportation Sector Using Regression Analysis and Artificial Neural Network Methods. *Journal of Energy and Environment Technology*, 11(2), 50-65. <https://ph01.tci-thaijo.org/index.php/JEET/article/view/258090/173778> (in Thai)
- Khatbanjong, S. and Mawan, V. (2021). Artificial Intelligence (AI) Technology and the Categorization of Fifth Grade Students' Academic Achievements Using K-means Clustering Learning Algorithm. *Journal of Education Studies*, 49(2), EDUCU4902015. <https://doi.org/10.14456/educu.2021.36>
- Lekdee, T., Santianotai, R. and Udompittayason, J. (2024). Efficiency Comparison of Lung Cancer Risk Prediction Models using Data-mining Techniques. *Science and Technology to Community*, 2(1), 22-35. <https://li02.tci-thaijo.org/index.php/STC/article/view/705/449> (in Thai)

- Maijaroensri, P. and Hirunrueng, T. (2024). A Study of Method for Solving Air Pollution from Particulate Matter and Impacts of Health: Case Study in Tapioca Starch Business and Cement Grinding and Mix Business. *Regional Health Promotion Center 9 Journal*, 18(3), 1074-1090. <https://he02.tci-thaijo.org/index.php/RHPC9Journal/article/view/269434/184443> (in Thai)
- Namcome, T. and Tansuchat, R. (2021). The Impact of Fine Particulate Matter (PM 2.5) Pollution on the Number of Foreign Tourists in Chiang Mai and Bangkok. *Rajabhat Chiang Mai Research Journal*, 22(3), 19-35. <https://so05.tci-thaijo.org/index.php/cmruresearch/article/view/247437/173176> (in Thai)
- Ongrungrueng, D., Thaiwirach, S. and Prachuabsupakij, W. (2020). Forecasting Model for the Amount of Spare Parts Storage in the Warehouse Using Machine Learning Techniques: Case Study of a Cement Plant. *PSRU Journal of Science and Technology*, 5(1), 81-92. <https://ph01.tci-thaijo.org/index.php/Scipsru/article/view/239979/163864> (in Thai)
- Palason, K., Pol-ard, P. and Rattanasamakarn, T. (2024). Analyzing the Relationship between Economic Growth and Carbon Dioxide (CO₂) Emissions in Thailand: An Application of the VAR Model. *Journal of Management Science and Communication*, 3(2), 1-28. https://so07.tci-thaijo.org/index.php/jmsc_journal/article/view/5587/3885 (in Thai)
- Patcharachoenwong, C., Hernmek, K. and Kimpan, W. (2020). Arrival Time Prediction Model to a Pier for Public Transportation Boats. *Journal of Science Ladkrabang*, 29(2), 31-44. https://li01.tci-thaijo.org/index.php/science_kmitl/article/view/241105/169801 (in Thai)
- Phounsathaphorn, A. and Bamroongcheep, U. (2025). Intelligent Student Grouping with “Altair Studio K-means AI” The Helper for Teachers Digital Era. *Journal of Innovation in Administration and Educational Management*, 3(1), 106-122. <https://so11.tci-thaijo.org/index.php/IAEM/article/view/1287/596> (in Thai)
- Posing, N., Luangsiriwan, A., Boonpok, W. and Moonjat, T. (2024). An Analysis and Clustering of Relationships of Digital Literacy Instructors’ data Using Unsupervised Learning of Data Mining Techniques. *Journal of Technology Management Rajabhat Maha Sarakham University*, 11(1), 144-158. <https://ph02.tci-thaijo.org/index.php/itm-journal/article/view/252989/170699> (in Thai)
- Rattanachoung, N. (2023). Rapid Prediction of Melon Sweetness Using Image Processing Techniques and Algorithmic Models. *Journal of Applied Research on Science and Technology (JARST)*, 22(1), 117-127. <https://ph01.tci-thaijo.org/index.php/rmutt-journal/article/view/250908/170622> (in Thai)
- Sangthong, K., Chotchara, P., Jantawong, L. and Aiadrit, A. (2023). The Comparison of Data Classification Efficiency to Predict the Decision-Making in Future Elections Among Thai Businesspersons Using Data Mining Techniques. *Local Administration Journal*, 16(4), 559-578. <https://so04.tci-thaijo.org/index.php/colakkujournals/article/view/265610/182405> (in Thai)
- Settakhumpoo, J. and Benjaoran, V. (2022). The Comparative Accuracy Evaluation of Water Evaporation using Multiple Linear Regression and Simplified Penman’s Equation. *Ladkrabang Engineering Journal*, 39(4), 138-148. <https://ph01.tci-thaijo.org/index.php/lej/article/view/248401/170141> (in Thai)
- Wongchan, W. (2023). Health Promotion and Prevention Diseases of Particulate Matter (PM_{2.5}) in School-Age Children. *Ramathibodi Medical Journal*, 46(4), 52-65. <https://he02.tci-thaijo.org/index.php/ramajournal/article/view/266309/181836> (in Thai)

การนำวัสดุเหลือทิ้งเถ้านักไม้ยางพาราใช้ในการผลิตคอนกรีตบล็อกกลวงไม่รับน้ำหนัก

Utilization of Waste Materials Rubberwood Bottom Ash in the Production of Hollow Non-Load-Bearing Concrete Masonry Unit

ทวีศักดิ์ ทองขวัญ¹ ถาวร เกื้อสกุล^{1*} จุฑามาศ ลักษณะกิจ¹ นันทชัย ชูศิลป์¹ วิศิษฐ์ศักดิ์ ทับยัง¹ อรุณ ลูกจันทร์¹ พงศ์ศักดิ์ สุขมณี¹ และเปรมณัช ชุมพร้อม¹

Thaweesak Thongkwan¹ Tavorn Kuasakul^{1*} Chuthamat Laksanakit¹ Nuntachai Chusilp¹ Wisitsak Tabyang¹ Arun Lukjan¹ Pongsak Sookmanee¹ and Premmanat Chumprom¹

Received: December 31, 2024; Revised: April 30, 2025; Accepted: April 30, 2025

บทคัดย่อ

การวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินความเป็นไปได้ในการใช้เถ้านักไม้ยางพาราเป็นมวลรวมสำหรับการผลิตคอนกรีตบล็อกกลวงไม่รับน้ำหนัก โดยใช้เถ้านักไม้ยางพาราแทนที่มวลรวมจากหินฝุ่นร้อยละ 25 และ 50 โดยน้ำหนัก มีอัตราส่วนของปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกต่อมวลรวม 1:6 1:7 1:8 1:9 และ 1:10 โดยศึกษาอัตราส่วนของน้ำต่อซีเมนต์ (W/C) สามารถรับคือ 0.50 0.60 และ 0.70 รวมทั้งสิ้น 45 อัตราส่วน คัดเลือกอัตราส่วนที่มีความต้านทานแรงอัดเฉลี่ยของก้อนตัวอย่างที่อายุ 28 วัน มากกว่า 4.14 MPa เพื่อนำไปผลิตคอนกรีตบล็อกกลวงไม่รับน้ำหนักและทดสอบสมบัติตามเกณฑ์ของ มอก.58-2560 คือ ความหนาแน่น การดูดซึมน้ำ ความต้านทานแรงอัดเฉลี่ย และการนำความร้อนพบว่ามีเพียง 5 อัตราส่วนที่มีสมบัติผ่านเกณฑ์ คือ อัตราส่วน 1:6 หินฝุ่นร้อยละ 75 เถ้านักไม้ยางพาราร้อยละ 25 ค่า W/C 0.6 - 0.7 อัตราส่วน 1:6 หินฝุ่นและเถ้านักไม้ยางพาราเท่ากันร้อยละ 50 ค่า W/C 0.7 และอัตราส่วน 1:7 หินฝุ่นร้อยละ 75 เถ้านักไม้ยางพาราร้อยละ 25 ค่า W/C 0.6 - 0.7 โดยอัตราส่วนที่ดีที่สุดคือ อัตราส่วน 1:6 หินฝุ่นและเถ้านักไม้ยางพาราเท่ากันร้อยละ 50 ค่า W/C 0.7 เพราะไม่เพียงแต่ใช้ปริมาณเถ้านักไม้ยางพาราได้สูงถึงร้อยละ 50 ยังมีค่าการนำความร้อนต่ำสุดเท่ากับ 0.863 W/m-K แสดงให้เห็นว่า มีความเป็นไปได้ค่อนข้างสูงในการนำเถ้านักไม้ยางพาราแทนที่มวลรวมเพื่อผลิตคอนกรีตบล็อกกลวงไม่รับน้ำหนักและเป็นแนวทางการพัฒนาวัสดุก่อสร้างที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม

คำสำคัญ : คอนกรีตบล็อกกลวงแบบไม่รับน้ำหนัก; เถ้านักไม้ยางพารา; หินฝุ่น; วัสดุก่อสร้างที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม

¹ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย

¹ Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Srivijaya

* Corresponding Author, Tel. 08 6299 6353, E - mail: tavorn.k@rmutsv.ac.th

Abstract

This study aims to evaluate the feasibility of using rubberwood bottom ash (RWBA) as an aggregate in the production of non-load-bearing hollow concrete blocks. The investigation involves replacing 25 % and 50 % by weight of stone dust with rubberwood bottom ash. Five mixtures of hydraulic cement to aggregate by weight were tested: 1:6, 1:7, 1:8, 1:9, and 1:10. Each mixture was further analyzed at three different water-to-cement (W/C) ratios: 0.50, 0.60, and 0.70, resulting in a total of 45 mixtures. Mixtures at 28-days curing age with average compressive strength exceeding 4.14 MPa were selected for the production of hollow concrete blocks. These blocks were subsequently tested for compliance with the Thai Industrial Standard TIS 58-2560, assessing density, water absorption, average compressive strength, and thermal conductivity. The results revealed that only five mixtures met the standard criteria: Mix ratio 1:6 with 75 % stone dust and 25 % RWBA at W/C ratios of 0.6 and 0.7, Mix ratio 1:6 with equal proportions (50 %) of stone dust and RWBA at a W/C ratio of 0.7, and Mix ratio 1:7 with 75 % stone dust and 25 % RWBA at W/C ratios of 0.6 and 0.7. Among these, the optimal mixture was identified as the mix ratio 1:6 with 50 % stone dust and 50 % RWBA at a W/C ratio of 0.7. This mixture not only allowed for the highest replacement rate of RWBA (50 %) but also exhibited the lowest thermal conductivity at 0.863 W/m.K. The findings indicate a high potential for utilizing rubberwood bottom ash as a partial replacement for fine aggregates in the production of non-load-bearing hollow concrete blocks. This approach contributes to the development of environmentally friendly construction materials.

Keywords: Non-Load-Bearing Hollow Concrete Blocks; Rubberwood Bottom Ash; Stone Dust; Eco-Friendly Construction Materials

บทนำ

คอนกรีตบล็อกกลวงไม่รับน้ำหนักเป็นวัสดุประเภทหนึ่งที่ใช้สำหรับการก่อสร้างทำผนัง และใช้เป็นที่แพร่หลาย เนื่องจากสามารถผลิตได้ง่ายมีราคาถูก การก่อสร้างยังทำได้เร็วกว่าอิฐมอญเนื่องจากมีขนาดก้อนที่ใหญ่กว่าและมีค่าการนำความร้อนที่ต่ำกว่าอิฐมอญ แต่ก็ยังสูงกว่าคอนกรีตมวลเบา คอนกรีตบล็อกเป็นวัสดุประเภทหนึ่งที่ใช้สำหรับการก่อสร้างทำผนัง และใช้เป็นที่แพร่หลายมาเป็นเวลานานเนื่องจากเป็นวัสดุที่ผลิตได้ง่ายมีผู้ผลิตจำนวนมาก และครอบคลุมไปทุกพื้นที่ การก่อสร้างยังทำได้รวดเร็วจึงทำให้คอนกรีตบล็อกยังเป็นที่ยอมรับใช้งานอยู่ในปัจจุบันด้วยราคาของคอนกรีตบล็อกที่ถูกกว่าคอนกรีตมวลเบาหลายเท่า (Thammasri et al., 2022) โดยลักษณะนั้นจะเป็นบล็อกที่มีรูกลวงเป็นช่องอากาศภายใน ซึ่งเป็นคุณสมบัติที่ดีของการเป็นฉนวน (Hendry, 2001) โดยการผลิตใช้มวลรวมผสมกับปูนซีเมนต์ใช้น้ำสะอาดในปริมาณน้ำเหมาะสมในการเชื่อมประสาน ทำการอัดเป็นก้อนด้วยเครื่องอัดแล้วนำมาบ่มให้คอนกรีตบล็อกแข็งตัว ซึ่งมวลรวมที่ใช้ส่วนใหญ่ทางภาคใต้จะเป็นจำพวกหินฝุ่น ที่ได้จากการย่อยหินซึ่งต้องทำลายทรัพยากรธรรมชาติ โดยการระเบิดภูเขาเพื่อนำมาไม่หินแล้วแยกเป็นขนาดต่าง ๆ เกิดฝุ่นละอองในอากาศส่งผลกระทบต่อเนื่องด้านทัศนียภาพ และยังส่งผลกระทบต่อคุณภาพอากาศด้วย (Kumlom and Nanthabut, 2020)

จากปัญหาดังกล่าวจึงมีแนวคิดในการใช้ประโยชน์จากของเสียที่เกิดจากกระบวนการเผาไม้ยางพาราเพื่อใช้เป็นเชื้อเพลิงในโรงงาน และโรงไฟฟ้าชีวมวลในพื้นที่จังหวัดสงขลา โดยจากข้อมูลพบว่าบริษัทผลิตไม้ปาร์ติเกิลบอร์ดอำเภอหาดใหญ่ จังหวัดสงขลา แห่งหนึ่งที่มีปริมาณแถ้าหนักไม้ยางพาราเหลือทิ้งมากกว่า 10 ตันต่อเดือน ที่ผ่านมามีการศึกษากำลังของมอร์ตาร์ที่ใช้แถ้าลอยไม้ยางพาราแทนที่ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก (Thongkhwan et al., 2024) นำมา

ใช้ทดแทนปูนซีเมนต์สำหรับผลิต รวมถึงนำมาผลิตแผ่นซีเมนต์ไฟเบอร์สำหรับลดความร้อนและช่วยดูดซับเสียง (Laksanakit et al., 2023) สำหรับถ้ำหนักไม้ยางพาราที่ผ่านมามีการนำมาใช้สำหรับทดแทนมวลรวมดินลูกรังในส่วนผสมของอิฐบล็อกประสาน (Kuasakul et al., 2017) พบว่าสามารถแทนที่มวลรวมได้สูงถึงร้อยละ 50 (Chumprom et al., 2024) ในการวิจัยถ้ำหนักไม้ยางพาราสำหรับผลิตภัณฑ์คอนกรีตที่ผ่านมามีส่วนใหญ่วิจัยศึกษาโดยใช้ถ้ำหนักไม้ยางพารา (Dasaesamoh et al., 2011; Klathae et al., 2020) งานวิจัยที่ใช้ถ้ำหนักไม้ยางพาราน้อยมาก แต่จากข้อมูลบริษัท พาเนล พลาสติก จำกัด มีของเสียถ้ำหนักไม้ยางพาราเหลือทิ้งมากถึง 150 ตันต่อวัน โดยมีถ้ำหนักร้อยละ 30 และถ้ำหนักมากถึงร้อยละ 70 การวิจัยนี้จึงเห็นความสำคัญของถ้ำหนักไม้ยางพาราที่ใช้เพื่อทดแทนวัสดุมวลรวมหินฝุ่นที่สำคัญสำหรับการผลิตคอนกรีตบล็อกกลวง (Saengarhit, 2013) ที่ผ่านเกณฑ์ตามมาตรฐาน มอก.58-2560 (Thai Industrial Standards Institute, 2017) โดยออกแบบส่วนผสมและหล่อตัวอย่างขนาด $50 \times 50 \times 50 \text{ mm}^3$ เพื่อทดสอบแรงอัดสำหรับคัดเลือกอัตราส่วนที่มีค่าความต้านทานแรงอัดเฉลี่ยสูงกว่า 4.14 MPa ในการผลิตคอนกรีตบล็อกกลวง และทดสอบความหนาแน่น กำลังรับแรงอัด การดูดซึมน้ำ และการนำความร้อน เพื่อพิจารณาความเป็นไปได้ในการนำถ้ำหนักไม้ยางพาราใช้ประโยชน์ และลดปริมาณของเสียที่ก่อให้เกิดมลภาวะต่อสิ่งแวดล้อม และลดการทำลายธรรมชาติจากการผลิตหินฝุ่น

วิธีการวิจัย

1. วัสดุที่ใช้ในการวิจัย

1.1 ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกชนิดใช้งานทั่วไป (Hydraulic Cement - General Use: GU) ตามมาตรฐาน มอก.2594-2556 (Thai Industrial Standards Institute, 2013) และ ASTM C1157-17 (American Society for Testing and Materials (ASTM), 2014)

1.2 มวลรวม (Aggregate: A) งานวิจัยนี้มี 2 ชนิด คือ

1) ถ้ำหนักไม้ยางพารา (Rubberwood Bottom Ash: RWBA) จากการเผาไหม้ผลิตไฟฟ้าในโรงไฟฟ้าชีวมวล พาเนล พลาสติก ไอโอ-เพาเวอร์ อำเภอบางใหญ่ จังหวัดสงขลา ดังรูปที่ 1 โดยร่อนผ่านตะแกรงขนาด 4.75 mm . มีค่าหน่วยน้ำหนักเท่ากับ 1099.64 kg/m^3 ความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.21 ค่าการดูดซึมน้ำร้อยละ 4.86 และมีขนาดคละดังรูปที่ 2

2) หินฝุ่น (Stone Dust: SD) จากโรงผลิตคอนกรีตบล็อกในอำเภอบางใหญ่ จังหวัดสงขลา ดังรูปที่ 1 โดยร่อนผ่านตะแกรงขนาด 4.75 mm . มีค่าหน่วยน้ำหนักเท่ากับ $1,944.22 \text{ kg/m}^3$ ความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.73 ค่าการดูดซึมน้ำร้อยละ 1.34 และมีขนาดคละดังรูปที่ 2

1.3 น้ำสะอาด (Water) เลือกใช้น้ำประปา

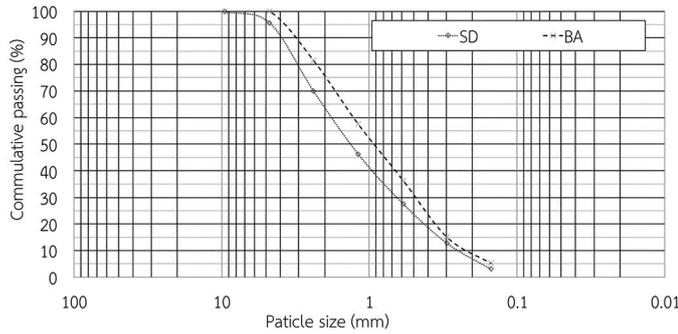


(ก) หินฝุ่น



(ข) ถ้ำหนักไม้ยางพารา

รูปที่ 1 มวลรวมสำหรับผลิตคอนกรีตบล็อกกลวงไม่รับน้ำหนัก



รูปที่ 2 ขนาดคละของเถ้าหนักไม้ยางพาราและหินฝุ่น

2. การออกแบบอัตราส่วนผสมและทดสอบกำลังของมอร์ตาร์ที่ใช้ในการวิจัย

2.1 การออกแบบอัตราส่วนผสม (ตารางที่ 1)

1) อัตราส่วนปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกต่อมวลรวม (GU:A) มี 5 อัตราส่วน คือ 1:6 1:7 1:8 1:9 และ 1:10 โดยน้ำหนัก ซึ่งสอดคล้องงานวิจัยของสิทธิชัย แสงอาทิตย์ ได้นำเสนอส่วนผสมสำหรับคอนกรีตบล็อกโดยมีอัตราส่วนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทหนึ่งต่อหินฝุ่นในอัตราส่วนผสม 1:6 1:7 1:8 1:9 1:10 และ 1:11 โดยใช้ปริมาณน้ำคงที่ทุก (Saengarathit, 2013)

2) อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกมี 3 อัตราส่วน คือ 0.50 0.60 และ 0.70 โดยน้ำหนัก ซึ่งสอดคล้องงานวิจัยของนิพนธ์ ต้นไพบูลย์กุล นำหินฝุ่นมาเป็นส่วนผสมร่วมกับทราย และปูนซีเมนต์ สำหรับคอนกรีตบล็อกประสาน โดยนำเสนออัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ที่ 0.40 0.45 0.50 0.55 0.60 0.65 0.70 0.75 และ 0.80 (Tanpaiboonkul, 2017)

3) อัตราส่วนของมวลรวมใช้เถ้าหนักไม้ยางพาราทดแทนหินฝุ่น มี 3 อัตราส่วน คือ ร้อยละ 0 25 และ 50 โดยน้ำหนัก ซึ่งสอดคล้องงานวิจัยของเปรมนัช ชุมพร้อม และคณะ นำเถ้าหนักไม้ยางพาราเป็นมวลรวมของอิฐบล็อกประสาน ที่ร้อยละ 10 30 และ 50 (Chumprom et al., 2024)

ตารางที่ 1 อัตราส่วนผสมโดยน้ำหนัก ที่มีเถ้าหนักไม้ยางพาราส่วนประกอบ

ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก:	มวลรวม (%)		น้ำต่อปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก			
	มวลรวม	หินฝุ่น	เถ้าหนักไม้ยางพารา	0.50	0.60	0.70
1:6		100	0	✓	✓	✓
		75	25	✓	✓	✓
		50	50	✓	✓	✓
1:7		100	0	✓	✓	✓
		75	25	✓	✓	✓
		50	50	✓	✓	✓
1:8		100	0	✓	✓	✓
		75	25	✓	✓	✓
		50	50	✓	✓	✓
1:9		100	0	✓	✓	✓
		75	25	✓	✓	✓
		50	50	✓	✓	✓
1:10		100	0	✓	✓	✓
		75	25	✓	✓	✓
		50	50	✓	✓	✓

2.2 การทดสอบความต้านทานแรงอัดของแต่ละอัตราส่วน

จากการออกแบบส่วนผสมมีจำนวนส่วนผสมทั้งหมด 45 อัตราส่วน จึงได้ทำการทดสอบการต้านทานแรงอัดด้วยก้อนตัวอย่างขนาด $50 \times 50 \times 50 \text{ mm}^3$ จำนวน 3 ตัวอย่าง ที่อายุ 28 วัน ทำการบ่มโดยไม่พรมน้ำ (Thai Industrial Standards Institute, 2017; Thai Industrial Standards Institute, 1990) เพื่อคัดเลือกเฉพาะอัตราส่วนที่มีผลทดสอบความต้านทานแรงอัดเฉลี่ยไม่น้อยกว่า 4.14 MPa ซึ่งเป็นเกณฑ์มาตรฐาน มอก.58-2560 (Thai Industrial Standards Institute, 2017) สำหรับคอนกรีตบล็อกกลวงไม่รับน้ำหนัก หากอัตราส่วนใดมีค่ามากกว่าเกณฑ์มาตรฐานจะนำอัตราส่วนดังกล่าวไปทำการผลิตคอนกรีตบล็อกกลวงต่อไป

3. การผลิต การบ่ม และทดสอบคอนกรีตบล็อกกลวงไม่รับน้ำหนัก

3.1 การผลิตคอนกรีตบล็อกกลวง

- 1) เตรียมส่วนผสมตามอัตราส่วนข้อที่ 2.2 เทลงในเครื่องผสมให้เป็นเนื้อเดียวกัน
- 2) การอัดขึ้นรูปคอนกรีตบล็อกกลวงขนาด $70 \times 190 \times 390 \text{ mm}$ ด้วยเครื่องอัดไฮดรอลิกของโรงงานผลิตคอนกรีตบล็อกกลวง อำเภอบางบาล จังหวัดสุพรรณบุรี จำนวน 12 ก้อนต่ออัตราส่วน

3.2 การบ่มคอนกรีตบล็อกกลวง

นำคอนกรีตบล็อกที่ได้ไปตากในที่ร่ม และทำการบ่มในอากาศไม่พรมน้ำเพื่อให้เหมือนกับการผลิตจริงของโรงงาน (Choosakul and Yongsata, 2022) ที่อายุ 28 วัน

3.3 การทดสอบคอนกรีตบล็อก

- 1) ทดสอบหาค่าความหนาแน่นของคอนกรีตบล็อกอัตราส่วนผสมละ 5 ตัวอย่าง ตามมาตรฐาน มอก.58-2560 (Thai Industrial Standards Institute, 2017) คำนวณค่าความหนาแน่นด้วยสมการที่ (1)

$$\rho = \frac{m_d \times 1000}{m_s - m_i} \quad (1)$$

เมื่อ

ρ	คือ	ความหนาแน่นมวลเชิงปริมาตร (kg/m^3)
m_s	คือ	มวลชิ้นทดสอบเมื่ออิมตัวด้วยน้ำ (kg)
m_i	คือ	มวลชิ้นทดสอบเมื่อชั่งในน้ำ (kg)
m_d	คือ	มวลชิ้นทดสอบเมื่ออบแห้ง (kg)

- 2) ทดสอบหาค่าการดูดซึมน้ำของคอนกรีตบล็อก หามวลอบแห้งโดยนำคอนกรีตบล็อกอบแห้งที่อุณหภูมิ 110 ถึง 115 เป็นเวลา 24 ชั่วโมง และหามวลอิมตัวด้วยน้ำด้วยการแช่น้ำจมน้ำเป็นเวลา 24 ชั่วโมงจากการทดสอบค่าความหนาแน่นมาคำนวณตาม มอก.109-2517 (Thai Industrial Standards Institute, 1974) ด้วยสมการที่ (2)

$$\text{ค่าการดูดซึมน้ำ} = \frac{(m_s - m_d)}{m_d} \times 100\% \quad (2)$$

เมื่อ

m_s	คือ	มวลชิ้นทดสอบเมื่ออิมตัวด้วยน้ำ (kg)
m_d	คือ	มวลชิ้นทดสอบเมื่ออบแห้ง (kg)

- 3) ทดสอบความต้านทานแรงอัดสุทธิของคอนกรีตบล็อกที่มีอายุการบ่ม 28 วัน อัตราส่วนผสมละ 5 ตัวอย่าง ใช้ปูนปลาสเตอร์ผสมน้ำฉาบปิดด้านบนและด้านล่างของก้อนตัวอย่างให้เรียบเสมอกันตาม มอก.109-2517 (Thai Industrial Standards Institute, 1974) ก่อนนำไปทดสอบกำลังรับแรงอัดแนวตั้งด้านแนวยาว (Length-Wise) โดยวิธี Bearing

Plate ใช้เครื่อง Universal Testing Machine (UTM) ตามมาตรฐาน มอก.58-2560 (Thai Industrial Standards Institute, 2017) คำนวณค่ากำลังรับแรงอัดด้วยสมการที่ (3)

$$P = \frac{F}{A_{n,avg}} \quad (3)$$

เมื่อ

P คือ ความต้านแรงอัดสุทธิ (MPa)
 F คือ แรงอัดสูงสุด (N)
 $A_{n,avg}$ คือ พื้นที่หน้าตัดสุทธิเฉลี่ย (mm^2)

การหาคำนวณค่าพื้นที่หน้าตัดสุทธิเฉลี่ย จากการเฉลี่ยพื้นที่หน้าตัดสุทธิของคอนกรีตบล็อกกลวง โดยพิจารณาน้ำหนักและความสูงของแต่ละตัวอย่างจำนวน 5 ตัวอย่างต่ออัตราส่วนผสม คำนวณค่าพื้นที่หน้าตัดสุทธิด้วยสมการที่ (4)

$$A_n = \frac{(m_s - m_i) \times 10^6}{H} \quad (4)$$

เมื่อ

A_n คือ พื้นที่หน้าตัดสุทธิ (mm^2)
 H คือ ความสูงเฉลี่ยของตัวอย่าง (mm)
 m_s คือ มวลขึ้นทดสอบเมื่ออิมตัวด้วยน้ำ (kg)
 m_i คือ มวลขึ้นทดสอบเมื่อชั่งในน้ำ (kg)

4) ทดสอบค่าการนำความร้อนของคอนกรีตกลวง โดยทำการตัดตัวอย่างเปลือกผิวของคอนกรีตบล็อกกลวงขนาด $50 \times 50 \text{ mm}^2$ จำนวน 2 ชิ้นตัวอย่างต่ออัตราส่วนผสม ตำแหน่งในการตัดดังรูปที่ 3 โดยใช้เทคนิคการทดสอบ Transient Plane Source Method ด้วยเครื่อง Thermal Constant Analyser รุ่น TPS 2500S ของสำนักเครื่องมือวิทยาศาสตร์และการทดสอบ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ จังหวัดสงขลา



รูปที่ 3 ตัวอย่างคอนกรีตกลวงสำหรับทดสอบสมบัติการนำความร้อน

ผลการวิจัยและการอภิปราย

1. ความต้านทานแรงอัดของแต่ละอัตราส่วน

การทดสอบตัวอย่างขนาด $50 \times 50 \times 50 \text{ mm}^3$ ที่อายุ 28 วัน จำนวน 45 อัตราส่วนผสม ค่าการต้านทานแรงอัดเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 0.69 - 27.48 MPa ดังตารางที่ 2 พบว่ากำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ที่แทนที่หินฝุ่นด้วยเถ้าหนักไมยางพารามีค่ากำลังรับแรงอัดลดลงทุกอัตราส่วนผสม โดยอัตราส่วนการแทนที่เถ้าหนักไมยางพาราเพิ่มขึ้นส่งผลให้กำลังรับแรงอัดลดลง (Gupta et al., 2019) เช่นเดียวกับอัตราส่วนต่อปูนซีเมนต์ต่อมวลรวม พบว่ากำลังรับแรงอัด

มีค่าลดลงตามปริมาณมวลรวมที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากปูนซีเมนต์ทำหน้าที่เป็นตัวเชื่อมประสานโดยอาศัยการทำปฏิกิริยาไฮเดรชันเกิดเป็นสารประกอบแคลเซียมซิลิเกต (C-S-H) เมื่อปริมาณปูนซีเมนต์เพิ่มขึ้นการเกิด C-S-H เพิ่มส่งผลให้กำลังรับแรงอัดสูงเช่นกัน (Choosakul and Yongsata, 2018; Sukontasukkul, 2013) ในการทำปฏิกิริยาไฮเดรชันอาศัยน้ำเป็นตัวกระตุ้นปฏิกิริยาเพราะฉะนั้นอัตราส่วนของน้ำต่อปูนซีเมนต์จึงส่งผลต่อกำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ซึ่งพบว่าที่อัตราส่วนของน้ำต่อปูนซีเมนต์มีค่าเพิ่มขึ้นกำลังรับแรงอัดเพิ่มขึ้นเช่นกัน เนื่องจากการดูดซึมน้ำของมวลรวมที่มีค่าสูงทำให้น้ำสำหรับทำปฏิกิริยาไฮเดรชันหายไป การเปลี่ยนแปลงของอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์จึงส่งผลต่อกำลังรับแรงอัด (Choosakul and Yongsata, 2018; Sukontasukkul, 2013) อย่างไรก็ตามเมื่อทำการเปรียบเทียบกับเกณฑ์ที่กำหนดใน มอก.58-2560 (Thai Industrial Standards Institute, 2017) คอนกรีตบล็อกชนิดไม่รับน้ำหนักซึ่งมีการกำหนดความต้านทานแรงอัดเฉลี่ยไม่น้อยกว่า 4.14 MPa พบว่ามีอัตราส่วนที่ผ่านทั้งสิ้น 22 อัตราส่วน และมีส่วนผสมของเถ้าหนักไม่ย่างพาราเพียง 11 อัตราส่วน การผลิตคอนกรีตบล็อกกลางพิจารณาอัตราส่วนที่มีส่วนผสมของเถ้าหนักไม่ย่างพาราเป็นสำคัญ สามารถสรุปได้ดังนี้

1) อัตราส่วนปูนซีเมนต์ต่อมวลรวม 1:6 ผ่านเกณฑ์มาตรฐานทุกส่วน และใช้ทุกอัตราส่วนผสมที่นำไปขึ้นรูปคอนกรีตบล็อกกลาง

2) อัตราส่วนปูนซีเมนต์ต่อมวลรวม 1:7 ผ่านเกณฑ์มาตรฐานจำนวน 6 อัตราส่วน ได้แก่ 1:7-100:0-0.50 1:7-100:0-0.60 1:7-100:0-0.70 1:7-75:25-0.50 1:7-75:25-0.60 และ 1:7-75:25-0.70 โดยอัตราส่วนหินฝุ่นต่อเถ้าหนัก 50:50 ไม่มีอัตราส่วนผสมใดผ่านเกณฑ์มาตรฐาน โดยเลือกทั้ง 6 อัตราส่วนผสมนำไปขึ้นรูปคอนกรีตบล็อกกลาง

3) อัตราส่วนปูนซีเมนต์ต่อมวลรวม 1:8 ผ่านเกณฑ์มาตรฐานจำนวน 4 อัตราส่วน ได้แก่ 1:8-100:0-0.50 1:8-100:0-0.60 1:8-100:0-0.70 และ 1:8-75:25-0.70 โดยเลือก 2 อัตราส่วนผสม คือ 1:8-100:0-0.70 และ 1:8-75:25-0.70 นำไปขึ้นรูปคอนกรีตบล็อกกลาง

4) อัตราส่วนปูนซีเมนต์ต่อมวลรวม 1:9 ผ่านเกณฑ์มาตรฐาน จำนวน 3 อัตราส่วน ได้แก่ 1:9-100:0-0.60 1:9-100:0-0.70 และ 1:9-75:25-0.70 โดยเลือก 2 อัตราส่วนผสม คือ 1:9-100:0-0.70 และ 1:9-75:25-0.70 นำไปขึ้นรูปคอนกรีตบล็อกกลาง

5) อัตราส่วนปูนซีเมนต์ต่อมวลรวม 1:10 ไม่มีอัตราส่วนผสมใดผ่านเกณฑ์มาตรฐาน

ตารางที่ 2 ความต้านทานแรงอัดก้อนตัวอย่างขนาด 50 x 50 x 50 mm³ ที่อายุ 28 วัน

ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก: มวลรวม	มวลรวม (%)		ความต้านทานแรงอัด น้ำต่อปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก		
	หินฝุ่น	เถ้าหนักไม่ย่างพารา	0.50	0.60	0.70
1:6	100	0	16.42	26.62	27.48
	75	25	9.18	13.37	15.47
	50	50	6.70	7.11	7.79
1:7	100	0	10.06	15.73	19.7
	75	25	5.63	5.88	8.98
	50	50	2.73	2.83	4.08
1:8	100	0	5.36	11.45	15.22
	75	25	2.42	2.51	7.13
	50	50	1.20	1.73	2.70

ตารางที่ 2 ความต้านทานแรงอัดก้อนตัวอย่างขนาด 50 x 50 x 50 mm³ ที่อายุ 28 วัน (ต่อ)

ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก: มวลรวม	มวลรวม (%)		ความต้านทานแรงอัด น้ำต่อปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก		
	หินปูน	เถ้าหนักไม่ยางพารา	0.50	0.60	0.70
1:9	100	0	3.95	6.12	12.48
	75	25	1.57	3.10	5.44
	50	50	0.88	1.15	2.67
1:10	100	0	2.05	3.31	3.64
	75	25	1.49	2.27	3.68
	50	50	0.78	0.69	1.17

2. ลักษณะทางกายภาพของคอนกรีตบล็อกกลวง

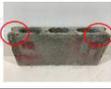
การผลิตคอนกรีตบล็อกกลวงพบว่าสามารถอัดขึ้นรูปได้ 18 อัตราส่วน มีเพียงอัตราส่วนผสม 1:6-50:50-0.50 มีการแตกร้าว และยุบตัวไม่สามารถทดสอบคุณสมบัติได้ เนื่องจากการเตรียมตัวอย่างขนาด 50 x 50 x 50 mm³ จะถอดแบบที่อายุ 24 ชั่วโมง จึงทำให้ก้อนตัวอย่างมีการแข็งตัวแล้ว ต่างจากการอัดขึ้นรูปคอนกรีตบล็อกจะดันตัวอย่างออกจากแบบหล่อของเครื่องทันทีทันใด (Chatveera et al., 2004) จึงแสดงให้เห็นว่าอัตราส่วนดังกล่าวไม่เหมาะสมสำหรับการผลิตเป็นคอนกรีตบล็อกกลวงได้

เมื่อพิจารณาลักษณะทางกายภาพของคอนกรีตบล็อกกลวง ตามมาตรฐานมอก. 58-2560 ซึ่งกำหนดไว้ว่าผิวด้านหน้าคอนกรีตบล็อกกลวงไม่รับน้ำหนักต้องไม่มีรอยผิวกะเทาะ รอยร้าว ถ้ามีรอยผิวกะเทาะต้องมีขนาดไม่มากกว่า 25 mm ณ ตำแหน่งใด ๆ รอยร้าวต้องมีขนาดกว้างไม่มากกว่า 0.5 mm และมีความยาวไม่มากกว่า 25 % ของความสูง พบว่าเมื่อครบอายุ 28 วัน มีเพียง 9 อัตราส่วน ที่มีลักษณะทางกายภาพที่ผ่านเกณฑ์ตามมาตรฐานมอก. 58-2560 ดังตารางที่ 3 และมีอัตราส่วนที่ทดแทนเถ้าหนักไม่ยางพาราผ่านเกณฑ์จำนวน 5 อัตราส่วน คือ 1:6-75:25-0.60 1:6-75:25-0.70 1:6-50:50-0.70 1:7-75:25-0.60 และ 1:7-75:25-0.70 ในการทดสอบความหนาแน่น การดูดซึมน้ำ และความต้านทานแรงอัดสุทธิจึงเลือกเพียง 9 อัตราส่วนผสมที่ผ่านเกณฑ์ตามมาตรฐานมอก. เท่านั้น นอกจากนี้พบอีกว่าตัวอย่างที่ทดแทนเถ้าหนักไม่ยางพารามีเพียงอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกที่ 0.60 และ 0.70 ที่ใช้หินปูนเพียงอย่างเดียวที่ 0.50 และ 0.60 สามารถผลิตคอนกรีตบล็อกกลวงโดยไม่มีตำหนิ

ตารางที่ 3 ลักษณะทางกายภาพของคอนกรีตบล็อกกลวงที่มีส่วนผสมมวลรวมหินปูนและเถ้าหนักไม่ยางพารา

อัตราส่วนผสม	ตัวอย่างที่ 1	ตัวอย่างที่ 2	ตัวอย่างที่ 3	ความสามารถในการขึ้นรูป
1:6-100:0-0.5				ไม่มีตำหนิ
1:6-100:0-0.6				มีรอยร้าว
1:6-100:0-0.7				มีรอยร้าว
1:6-75:25-0.5				มีรอยผิวกะเทาะ
1:6-75:25-0.6				ไม่มีตำหนิ

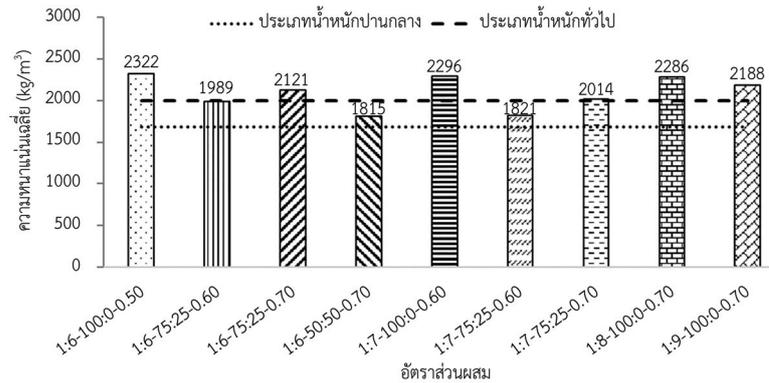
ตารางที่ 3 ลักษณะทางกายภาพของคอนกรีตบล็อกกลางที่มีส่วนผสมมวลรวมหินฝุ่นและเถ้าหนักไม่ย่างพารา (ต่อ)

อัตราส่วนผสม	ตัวอย่างที่ 1	ตัวอย่างที่ 2	ตัวอย่างที่ 3	ความสามารถในการขึ้นรูป
1:6-75:25-0.7				ไม่มีตำหนิ
1:6-50:50-0.5				ไม่สามารถขึ้นรูปได้
1:6-50:50-0.6				มีรอยผิวกะเทาะ
1:6-50:50-0.7				ไม่มีตำหนิ
1:7-100:0-0.5				มีรอยผิวกะเทาะ
1:7-100:0-0.6				ไม่มีตำหนิ
1:7-100:0-0.7				มีรอยร้าว
1:7-75:25-0.5				มีรอยผิวกะเทาะ
1:7-75:25-0.6				ไม่มีตำหนิ
1:7-75:25-0.7				ไม่มีตำหนิ
1:8-100:0-0.7				ไม่มีตำหนิ
1:8-75:25-0.7				มีรอยผิวกะเทาะ
1:9-100:0-0.7				ไม่มีตำหนิ
1:9-75:25-0.7				มีรอยผิวกะเทาะ

3. ผลทดสอบความหนาแน่นของคอนกรีตบล็อกกลางไม่รับน้ำหนัก

จากผลการทดสอบความหนาแน่นของคอนกรีตบล็อกกลาง พบว่าเมื่อเพิ่มอัตราส่วนของเถ้าหนักลงไป ในคอนกรีตบล็อกกลางไม่รับน้ำหนักจะทำให้ความหนาแน่นน้อยลง เมื่อเทียบกับอัตราส่วนที่มีหินฝุ่นเป็นวัสดุมวลรวม เพียงอย่างเดียว สาเหตุที่ทำให้หน่วยน้ำหนักลดลงเนื่องจากสมบัติทางกายภาพของเถ้าหนักที่มีหน่วยน้ำหนักต่ำกว่าหินฝุ่น และเป็นเหตุผลทำให้ความหนาแน่นของคอนกรีตบล็อกกลาง (Kroehong et al., 2016; Torkittikul et al., 2017) ดังรูปที่ 4 และพบว่าความหนาแน่นของคอนกรีตบล็อกกลาง 2 ประเภท ตามมาตรฐานมอก. 58-2560 (Thai Industrial Standards Institute, 2017) คือ

- 1) ความหนาแน่นประเภทร้าหนักทั่วไป ($\rho \geq 2000$) มีทั้งสิ้น 6 อัตราส่วนผสม คือ 1:6-100:0-0.50 1:6-75:25-0.70 1:7-100:0-0.60 1:7-75:25-0.70 1:8-100:0-0.70 และ 1:9-100:0-0.70 พบว่าส่วนใหญ่ อัตราส่วนผสมที่มีความหนาแน่นทั่วไปจะเป็นตัวอย่างของคอนกรีตบล็อกกลวงที่มีส่วนผสมของหินฝุ่นต่อเถ้าหนักไม่ยางพารา 100:0 มีเพียง 2 อัตราส่วนผสมที่มีเถ้าหนักทดแทนหินฝุ่นคือ 75:25 ที่อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ 0.70 เท่านั้น
- 2) ความหนาแน่นประเภทร้าหนักปานกลาง ($1680 \leq \rho < 2000$) มีทั้งสิ้น 3 อัตราส่วนผสมคือ 1:6-75:25-0.60 1:6-50:50-0.70 และ 1:7-75:25-0.60 พบว่าทุกอัตราส่วนของคอนกรีตบล็อกนั้นมีเถ้าหนักทดแทนหินฝุ่น ซึ่งสอดคล้องกับคุณสมบัติพื้นฐานของวัสดุมวลรวมที่ความหนาแน่นของเถ้าหนักมีค่าน้อยกว่าหินฝุ่น



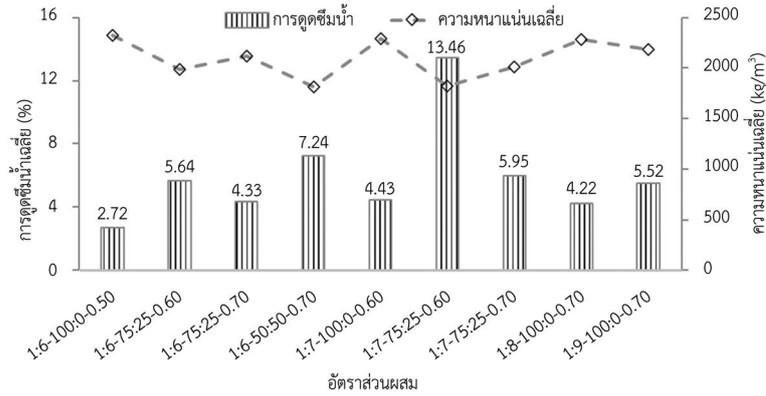
รูปที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นเฉลี่ย (kg/m^3) และอัตราส่วนผสมต่าง ๆ ของคอนกรีตบล็อกกลวง

4. การดูดซึมน้ำของคอนกรีตบล็อกกลวงไม่รับน้ำหนัก

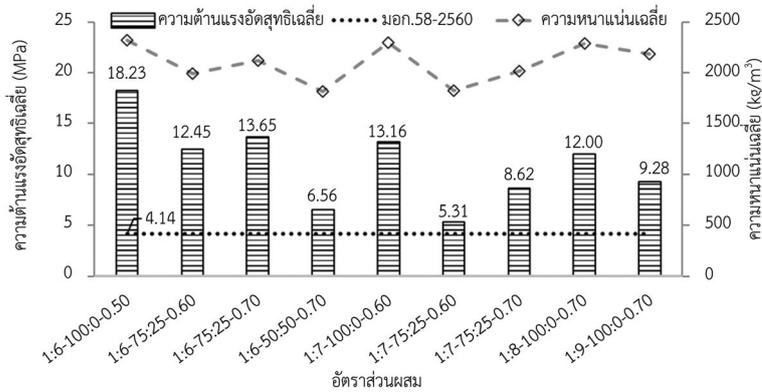
การทดสอบการดูดซึมน้ำของคอนกรีตบล็อกมีค่าอยู่ระหว่าง 13.46 - 2.72 % ดังรูปที่ 5 พบว่าการดูดซึมน้ำเพิ่มขึ้นเมื่อความหนาแน่นลดลง (Riaz et al., 2020; Vimuttasoongviriya, 2022; Phohirun et al., 2023) เพิ่มอัตราส่วนของมวลรวมจากเถ้าหนักทดแทนหินฝุ่นส่งผลให้ค่าการดูดซึมน้ำเฉลี่ยเพิ่ม โดยที่อัตราส่วน 1:7-75:25-0.60 มีค่าการดูดซึมน้ำสูงที่สุด รองลงมาคือ อัตราส่วน 1:6-50:50-0.70 1:6-75:25-0.70 1:7-75:25-0.60 และ 1:7-75:25-0.70 ตามลำดับ และพบว่าที่อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกที่ 0.50 และ 0.60 การดูดซึมน้ำเพิ่มมากขึ้นอย่างมากเมื่อเทียบกับที่ 0.70 ของคอนกรีตบล็อกที่มีส่วนผสมเถ้าหนัก และคอนกรีตบล็อกที่ใช้มวลรวมเพียงหินฝุ่นมีการดูดซึมน้ำจะแปรผันตามอัตราส่วนระหว่างปูนซีเมนต์ต่อมวลรวม และน้ำต่อปูนซีเมนต์ (Kroehong et al., 2016) ทั้งนี้การดูดซึมน้ำทุกอัตราส่วนผสมมีค่าน้อยกว่า 25 % ซึ่งเป็นเกณฑ์มาตรฐาน มอก.58-2533 (Thai Industrial Standards Institute, 1990) แม้ว่าปัจจุบัน มอก.58-2560 (Thai Industrial Standards Institute, 2017) ไม่มีข้อกำหนดเรื่องการดูดซึมน้ำแล้วนั้น ในการพิจารณาถึงการใช้งริงควรรศึกษาค่าการดูดซึมน้ำ เพื่อปัญหาการดูดซึมน้ำสูงจะมีผลต่อปัญหาการแตกร้าวของปูนก่อและฉาบได้

5. ความต้านทานแรงอัดสุทธิของคอนกรีตบล็อกกลวงไม่รับน้ำหนัก

การทดสอบความต้านทานแรงอัดสุทธิเฉลี่ยของคอนกรีตบล็อกทั้ง 9 อัตราส่วน ดังรูปที่ 6 มีค่ามากกว่า 4.14 MPa ตามเกณฑ์มาตรฐาน มอก.58-2560 (Thai Industrial Standards Institute, 2017) โดยมีค่าอยู่ระหว่าง 5.31 - 18.23 MPa และพบว่าความต้านทานแรงอัดสุทธิเฉลี่ยจะแปรผันตามปริมาณอัตราส่วนของปูนซีเมนต์ต่อมวลรวม โดยความต้านทานแรงอัดสุทธิเฉลี่ยมีค่าสูงขึ้นตามค่าความหนาแน่นที่เพิ่มขึ้น (Jarunvorakunvong et al., 2023; Khamput et al., 2024) ทั้งที่มีและไม่มีมวลรวมจากเถ้าหนักไม่ยางพาราเป็นส่วนผสม และการดูดซึมน้ำของเถ้าหนักไม่ยางพาราที่มีค่าสูงทำให้ปริมาณน้ำในคอนกรีตบล็อกหายไป ก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของค่าสัดส่วนน้ำต่อซีเมนต์และส่งผลกระทบต่อความต้านทานแรงอัด (Choosakul and Yongsata, 2018; Jarunvorakunvong et al., 2023)



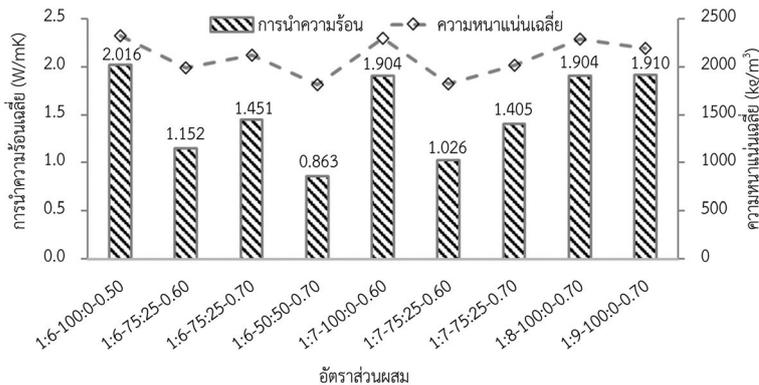
รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างการดูดซึมน้ำ (%) และอัตราส่วนผสมต่าง ๆ



รูปที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานแรงอัดสุดท้ายเฉลี่ยและอัตราส่วนผสมต่าง ๆ

6. การนำความร้อนของคอนกรีตบล็อกกลวงไม่รับน้ำหนัก

การทดสอบค่าการนำความร้อนเฉลี่ยของคอนกรีตบล็อกทั้ง 9 อัตราส่วน ดังรูปที่ 7 มีค่าอยู่ระหว่าง 0.863 - 2.016 W/mK พบว่าปริมาณส่วนผสมของเถ้าหนักมีผลต่อการลดลงของค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน หรือกล่าวได้ว่าเถ้าหนักมีผลทำให้คอนกรีตบล็อกดังกล่าวมีความเป็นฉนวนป้องกันความร้อนที่ดีขึ้น เนื่องจากเถ้าหนักเป็นวัสดุที่มีความพรุนและช่องว่างจำนวนมาก ซึ่งเป็นลักษณะของวัสดุที่มีความเป็นฉนวนป้องกันความร้อนที่ดี (Kroehong et al., 2016; Khamput et al., 2024) โดยคอนกรีตบล็อกที่มีส่วนผสม 50:50 มีปริมาณเถ้าหนักมากที่สุดเป็นคอนกรีตบล็อกที่มีสัมประสิทธิ์การนำความร้อนต่ำ โดยการนำความร้อนเฉลี่ยแปรผันกับความหนาแน่นเฉลี่ยของคอนกรีตบล็อก



รูปที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่างการนำความร้อนของคอนกรีตบล็อกกลวงไม่รับน้ำหนักและอัตราส่วนผสมต่าง ๆ

บทสรุป

การวิจัยนี้ได้ศึกษาการใช้เถ้าหนักไม้ยางพาราทดแทนหินฝุ่นในการผลิตคอนกรีตบล็อกกลวงไม่รับน้ำหนัก โดยมุ่งเน้นการลดปริมาณของเสียที่เกิดขึ้นจากโรงงานอุตสาหกรรมที่ใช้เชื้อเพลิงชีวมวล ผลการวิจัยสามารถสรุปได้ดังนี้

1. การใช้เถ้าหนักไม้ยางพาราทดแทนหินฝุ่นทำให้ความหนาแน่นของคอนกรีตบล็อกลดลงทุกอัตราส่วนผสม และสามารถทดแทนได้ร้อยละ 25 และ 50 ขึ้นอยู่กับปริมาณน้ำตอปูนซีเมนต์ที่เหมาะสม
2. สมบัติทางกายภาพของคอนกรีตบล็อกกลวงที่ใช้เถ้าหนักแทนหินฝุ่นผ่านมาตรฐาน มอก. 58-2560 โดยมีความต้านทานแรงอัดสุทธิมีค่าความต้านทานแรงอัดสุทธิเฉลี่ยมากกว่า 4.14 MPa ซึ่งเป็นเกณฑ์มาตรฐาน
3. คอนกรีตบล็อกที่มีการผสมเถ้าหนักมีการนำความร้อนต่ำกว่าคอนกรีตบล็อกที่ใช้หินฝุ่นเพียงอย่างเดียว ส่งผลให้เป็นฉนวนกันความร้อนที่ดีเหมาะสำหรับการใช้งานในอาคารที่ต้องการลดการถ่ายเทความร้อน
4. การดูดซึมน้ำของคอนกรีตบล็อกที่ใช้เถ้าหนักแทนหินฝุ่นเพิ่มขึ้นเล็กน้อย แต่ยังคงอยู่ในเกณฑ์ที่เหมาะสมตามมาตรฐาน

จากผลการวิจัยสามารถยืนยันได้ว่าการนำเถ้าหนักไม้ยางพารามาใช้ในคอนกรีตบล็อกกลวงไม่รับน้ำหนัก เป็นแนวทางการส่งเสริมการใช้วัสดุเหลือทิ้งในอุตสาหกรรมชีวมวลอย่างยั่งยืนและลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม

ข้อเสนอแนะ

1. คณะผู้วิจัยเสนอแนะให้มีการเปรียบเทียบต้นทุนต่อหน่วย หรือการวิเคราะห์ผลตอบแทนต่อการลงทุน (ROI) หากสามารถศึกษาเชิงเศรษฐศาสตร์ได้จะช่วยให้เกิดการนำไปใช้จริงในเชิงพาณิชย์
2. การประเมิน Life Cycle Assessment (LCA) เพื่อเปรียบเทียบผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม ทดลองก่อสร้างจริง เช่น สร้างผนังทดลอง หรือก่อเป็นอาคารเล็ก ๆ เพื่อประเมินพฤติกรรมในสภาพแวดล้อมจริง จะช่วยเพิ่มความเชื่อมั่นและความน่าเชื่อถือของผลการวิจัย
3. สามารถพัฒนาแนวทางการใช้วัสดุเหลือทิ้งร่วมกัน เช่น เถ้าหนักไม้ยางพารากับเถ้าปาล์ม หรือวัสดุชีวมวลอื่น ๆ เพื่อสร้างผลิตภัณฑ์ที่มีประสิทธิภาพและยั่งยืนมากขึ้น
4. การวิจัยใช้เถ้าหนักไม้ยางพารามาจากโรงไฟฟ้าแห่งเดียวในจังหวัดสงขลา ซึ่งอาจมีข้อจำกัดด้านคุณสมบัติของเถ้าหนักที่แปรผันตามแหล่งที่มา อาจไม่สามารถนำไปอ้างอิงใช้กับแหล่งเถ้าหนักอื่นได้โดยตรง เนื่องจากคุณสมบัติของเถ้าอาจแปรผันตามอุณหภูมิการเผา ชนิดไม้ และระบบเตาเผา

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย ที่สนับสนุนงบประมาณการวิจัย จากกองทุนวิจัยเงินรายได้ ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2565 และขอบคุณสาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ สนับสนุนห้องปฏิบัติการในการดำเนินการวิจัยในครั้งนี้ ขอขอบคุณบริษัท พาเนล พลาสติก จำกัด อำเภอหาดใหญ่ จังหวัดสงขลา ที่สนับสนุนวัสดุที่ใช้ในการทำวิจัย และขอขอบคุณนางสาวพรภัส พลสวัสดิ์ นายวิชิต คงสม และนายฟาลิต ฆามาสัน นักศึกษาสาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย ที่ช่วยให้การวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี

References

- American Society for Testing and Materials (ASTM). (2014). *Annual Book of ASTM Standards*. ASTM.
- Chatveera, B., Makul, N. and Ruxsadee, B. (2004). Use of Unground Rice Husk Ash in Concrete Block Production. *KMUTT Research and Development Journal*, 27(4), 483-496. (in Thai)

- Choosakul, C. and Yongsata, K. (2018). Compressive Strength of Mortar Using the Mineral Dust Partial Replacement in Sand. *RMUTSV Research Journal*, 10(2), 324-332. (in Thai)
- Choosakul, C. and Yongsata, K. (2022). The Utilization of Construction Waste in Hollow Non-Load-Bearing Concrete Masonry Unit. *Recent Science and Technology*, 14(2), 430-440. <https://li01.tci-thaijo.org/index.php/rmutsvrj/article/view/245999/174711> (in Thai)
- Chumprom, P., Charoennatkul, C., Boonrasi, P., Laksanakit, C., Swasdi, S., Sookmanee, P. and Thongkun, T. (2024). The Feasibility of Using Rubberwood Bottom Ash in the Mixture of Interlocking Block. *Research on Modern Science and Utilizing Technological Innovation Journal (RMUTI Journal)*, 17(1), 15-26. <https://ph01.tci-thaijo.org/index.php/rmutijo/article/view/254604/172132> (in Thai)
- Dasaesamoh, A., Maming, J., Radeang, N. and Awae, Y. (2011). Physical Properties and Mechanical Properties of Para Rubber Wood Fly Ash Brick. *Journal of Yala Rajabhat University*, 6(1), 25-35. (in Thai)
- Gupta, T., Kothari, S., Siddique, S., Sharma, R.K. and Chaudhary, S. (2019). Influence of Stone Processing Dust on Mechanical, Durability and Sustainability of Concrete. *Construction and Building Materials*, 223, 918-927. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.07.188>
- Hendry, E.A.W. (2001). Masonry Walls: Materials and Construction. *Construction and Building Materials*, 15(8), 323-330. [https://doi.org/10.1016/S0950-0618\(01\)00019-8](https://doi.org/10.1016/S0950-0618(01)00019-8)
- Jarunvorakunvong, A., Choosit, P., Nilas, N., Wikrantanon, P. and Taweeaugornphun, S. (2023). Product of Light Weight Concrete Block Mixed with Ceramic Waste from Industry for Green Building Construction. *Journal of Technical Education Development*, 35(125), 119-128. <https://so09.tci-thaijo.org/index.php/jted/article/view/1668/797> (in Thai)
- Khamput, P., Choosakul, C., Klathae, T., Rittipakdee, S. and Monkeaw, S. (2024). Product of Hollow Concrete Blocks Mixed with Rice Husk Ash and Cassava Fermentation Waste. *ASEAN Journal of Scientific and Technological Reports*, 27(5), e253838. <https://ph02.tci-thaijo.org/index.php/tsujournal/article/view/253838/171143> (in Thai)
- Klathae, T., Sornpakdee, N., Buathongkhue, C. and Deedard, N. (2020). Utilization of Parawood Ash in Concrete Paving Blocks. *RMUTSV Research Journal*, 12(1), 36-48. <https://li01.tci-thaijo.org/index.php/rmutsvrj/article/view/241931/165048> (in Thai)
- Kroehong, W., Sangpaen, S., Sitkanarak, P. and Wilairat, J. (2016). Mechanical Properties, Microstructure and Thermal Conductivity of Concrete Block Containing Fly Ash. *KMUTT Research and Development Journal*, 39(3), 407-425. (in Thai)
- Kuasakul, T., Charoennatkul, C. and Lukjan, A. (2017). Engineering Properties of Interlocking Blocks Containing Rubber Wood Ash of a Fishmeal Factory. In The 14th National Kasetsart University Kamphaeng Saen Conference (The 14th KU-KPS) Conference. 384-392. (in Thai)
- Kumlom, T. and Nanthabut, N. (2020). Opinions About the Impact of Quarry on Nearby Communities, Takua Thung District, Phang Nga Province. *Research and Development Journal Suan Sunandha Rajabhat University*, 12(1), <https://so05.tci-thaijo.org/index.php/irdssru/article/view/243996/165790> (in Thai)

- Laksanakit, C., Swasdi, S., Tabyang, W., Chusilp, N., Kuasakul, T., Thongkun, T., Kongphet, N., Petchdee, T. and Naemsai, T. (2023). Effect of Rubberwood Fly Ash on Thermal Conductivity of Cement Fiber Board. *Research on Modern Science and Utilizing Technological Innovation Journal (RMUTI Journal)*, 16(3), 51-65. <https://ph01.tci-thaijo.org/index.php/rmutijo/article/view/254443/171751> (in Thai)
- Phohirun, S., Kanbua, P. and Intaboot, N. (2023). Properties of Concrete Mixed with Recycled Crumb Rubber-Tires. *RMUTI JOURNAL Science and Technology*, 16(1), 28-37. <https://ph01.tci-thaijo.org/index.php/rmutijo/article/view/250962/170608> (in Thai)
- Riaz, M.H., Khitab, A., Ahmad, S., Anwar, W. and Arshad, M.T. (2020). Use of Ceramic Waste Powder for Manufacturing Durable and Eco-Friendly Bricks. *Asian Journal of Civil Engineering*, 21, 243-252. <https://doi.org/10.1007/s42107-019-00205-2>
- Saengarhit, S. (2013). The Optimal Cement-to-Stone Dust Ratio for Concrete Block Production. *Journal of the Thailand Concrete Association*, 20, 1-5. <https://thaitca.or.th/wp-content/uploads/2020/04/journal20.pdf> (in Thai)
- Sukontasukkul, P. (2013). *Concrete* (2nded.). Wankawee Publishing. (in Thai)
- Tanpaiboonkul, N. (2017). Replacing Cement by Dust from Rock Crushing Plant in Interlocking Block Production. *Princess of Naradhiwas University Journal*, 9(1), 126-135. <https://li01.tci-thaijo.org/index.php/pnujr/article/view/65468/61108> (in Thai)
- Thai Industrial Standards Institute. (1974). *TIS 109-1974: Standard for Sampling and Testing Concrete Masonry Unit*. Ministry of Industry, Bangkok. (in Thai)
- Thai Industrial Standards Institute. (1990). *TIS 58-2533: Hollow Non-Load Bearing Concrete Masonry Unit*. Ministry of Industry, Bangkok. (in Thai)
- Thai Industrial Standards Institute. (2013). *TIS Standard 2594-2556: Hydraulic Cement*. Ministry of Industry, Bangkok. (in Thai)
- Thai Industrial Standards Institute. (2017). *TIS Standard 58-2560: Hollow Non-Load Bearing Concrete Masonry Unit*. Ministry of Industry, Bangkok. (in Thai)
- Thammasri, W., Aonpadcha, N., Peenok, U. and Srithomgkam, M. (2022). Utilization of Waste Materials from Coconut to Production of Concrete Blocks. *Academic Journal Uttaradit Rajabhat University*, 17(1), 117-129. <https://ph01.tci-thaijo.org/index.php/uruj/article/view/245795/168670> (in Thai)
- Thongkhan, T., Laksanakit, C., Chusilp, N., Tabyang, W., Lukjan, A., Sookmanee, P., Iyaruk, A., Kuasakul, T. and Chumprom, P. (2024). The Strength of Cement Mortar with Industrial Rubberwood Fly Ash. *Research on Modern Science and Utilizing Technological Innovation Journal (RMUTI Journal)*, 17(1), 1-14. <https://ph01.tci-thaijo.org/index.php/rmutijo/article/view/254602/172125> (in Thai)
- Torkittikul, P., Nochaiya, T., Wongkeo, W. and Chaipanich, A. (2017). Utilization of Coal Bottom Ash to Improve Thermal Insulation of Construction Material. *Journal of Material Cycles and Waste Management*, 19, 305-317. <https://doi.org/10.1007/s10163-015-0419-2> (in Thai)
- Vimuttasoongviriya, C. (2022). A Study on the Properties of Non-Load-Bearing Concrete Blocks Mixed with Biomass Fly Ash in Buriram Province. *Udon Thani Rajabhat University Journal of Sciences and Technology*, 10(1), 1-15. (in Thai)

การแก้ไขปัญหาฉีดไม่เต็มด้วยการออกแบบช่องระบายอากาศของแม่พิมพ์ฉีดพลาสติกแก้วกาแฟจากวัสดุพลาสติกชีวภาพ

Solving Short Shot Defect by Designing Air Vents in Plastic Injection Molds for Coffee Cups with Biodegradable Material

ธีรวัฒน์ แสงภาศ¹ อติเรก ชัยนวกุล¹ ศุภชัย อัครนรากุล¹ พิเชษฐ โคว์ตระกูล¹ และศุภสิทธิ์ มะโนเครื่อง^{1*}
Teerawat Sangkas¹ Adirake Chainawakul¹ Supachai Aukaranarakul¹ Pitchet Kowtakul¹
and Supasit Manokruang^{1*}

Received: April 2, 2025; Revised: May 6, 2025; Accepted: May 8, 2025

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อแก้ไขปัญหาคัดพลาสติก โดยเฉพาะการเกิดข้อบกพร่องที่ชิ้นงานฉีดไม่เต็ม (Short Shot Defect) ซึ่งเป็นปัญหาหลักที่ส่งผลกระทบต่อคุณภาพของชิ้นงานที่ผลิต ปัญหาเกิดจากหลายปัจจัยสำคัญ เช่น คุณสมบัติของวัสดุที่ใช้ในกระบวนการฉีด รูปแบบที่ซับซ้อนของชิ้นงาน และการออกแบบแม่พิมพ์ที่ไม่เหมาะสม โดยงานวิจัยนี้ได้นำเสนอวิธีการแก้ไขปัญหาคัดพลาสติกโดยการออกแบบระบบระบายอากาศ (Air Vent System Design) ในแม่พิมพ์ฉีดพลาสติก ซึ่งใช้ในการผลิตแก้วกาแฟที่ทำจากวัสดุพลาสติกชีวภาพ (Biodegradable Material) การออกแบบระบบระบายอากาศในครั้งนี้ได้ทำการติดตั้งช่องระบายอากาศจำนวน 2 ช่องในแม่พิมพ์ โดยช่องระบายอากาศหลักมีที่ 0.05 มม. ความกว้างที่ 2 มม. และช่องระบายอากาศรองความลึก 0.1 มม. ความกว้างที่ 10 มม. ซึ่งช่วยระบายอากาศบริเวณจุดที่น้ำพลาสติกไหลมาบรรจบกัน โดยกำหนดค่าพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องในกระบวนการฉีด ดังนี้ ค่าความดันฉีด (Injection Pressure) ที่ 54 บาร์ อัตราความเร็วฉีด (Injection Speed Rate) ที่ 40 ซม.³/วินาที แรงปิดแม่พิมพ์ (Clamping Force) ที่ 100 ตัน อุณหภูมิในการหลอมเหลว (Melt Temperature) ที่ 200 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิแม่พิมพ์ (Mould Temperature) ที่ 90 องศาเซลเซียส ผลการทดลองพบว่า การออกแบบระบบระบายอากาศในแม่พิมพ์ที่ถูกต้องและมีประสิทธิภาพนี้ สามารถลดการเกิดข้อบกพร่องในการฉีดไม่เต็มได้อย่างมีนัยสำคัญ ทำให้ได้ชิ้นงานที่มีคุณภาพสูงและลดความสูญเสียในกระบวนการผลิต งานวิจัยนี้จึงเป็นแนวทางสำคัญในการพัฒนาและปรับปรุงการออกแบบแม่พิมพ์ฉีดพลาสติกในอนาคต โดยเน้นที่การระบายอากาศในแม่พิมพ์เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการผลิต

คำสำคัญ : ข้อบกพร่องฉีดไม่เต็ม; การออกแบบระบบช่องระบายอากาศ; แม่พิมพ์ฉีดพลาสติก

¹ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา

¹ Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Lanna

* Corresponding Author, Tel. 08 6560 3553, E - mail: supasit.m@rmutl.ac.th

Abstract

This research addresses issues in plastic injection molding, particularly the occurrence of short shot defects, which significantly impact the quality of the produced parts. These defects arise from several critical factors, such as the material's properties used in the injection process, the complexity of the part design, and inadequate mold design. This study proposed a solution by designing an air vent system within the plastic injection mold, specifically for manufacturing coffee cups made from biodegradable materials. In this system design, two air vents were installed in the mold: the main air vent with a depth of 0.05 mm and a width of 2 mm, and the secondary air vent with a depth of 0.1 mm and a width of 10 mm, which help to vent the air generated at the final melt point of the plastic. The relevant parameters of the injection process were set as follows: injection pressure at 54 bar, injection speed rate at 40 cm³/s, clamping force at 100 Tons, melt temperature at 200 °C, and mold temperature at 90 °C. The experimental results showed that properly and efficiently designed air vent system design in the mold can significantly reduce the occurrence of incomplete injection defects, resulting in high-quality parts and reducing production losses. Therefore, this research is an important guideline for the development and improvement of future plastic injection mold designs, focusing on air vent system in the mold to increase production efficiency.

Keywords: Short Shot Defect; Air Vent System Design; Plastic Injection Mold

บทนำ

ปัจจุบันการผลิตด้วยกระบวนการฉีดพลาสติกเป็นหนึ่งในเทคโนโลยีการผลิตที่มีความสำคัญในอุตสาหกรรมหลากหลายประเภท อาทิเช่น กลุ่มผลิตภัณฑ์ชิ้นส่วนอุตสาหกรรมยานยนต์ อุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ และอุตสาหกรรมบรรจุภัณฑ์ เป็นต้น อย่างไรก็ตาม ปัญหาที่หลักของกระบวนการฉีดพลาสติกคือ การเกิดข้อบกพร่องชิ้นงานฉีดไม่เต็ม (Short Shot Defect) ซึ่งเป็นปัญหาที่เกิดจากการที่พลาสติกไหลตัวเข้าสู่แม่พิมพ์ไม่สมบูรณ์ (Moayyedian et al., 2017; Kanjanakarn et al., 2023) ส่งผลให้ชิ้นงานเกิดปัญหาดังกล่าว โดยเฉพาะอย่างยิ่งในกรณีของชิ้นงานที่มีรูปร่างที่ซับซ้อน หรือใช้วัสดุที่มีคุณสมบัติพิเศษ เช่น พลาสติกชีวภาพ (Biodegradable) ที่ได้รับความนิยมเพิ่มมากขึ้นในการผลิตผลิตภัณฑ์ที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม (Terroba-Delicado et al., 2021; Phongphattarawut et al., 2024) ปัญหาการฉีดไม่เต็มมักเกิดจากการติดค้างของอากาศภายในแม่พิมพ์ ซึ่งอากาศที่ติดค้างจะเป็นอุปสรรคต่อการไหลของพลาสติก ส่งผลให้เกิดชิ้นงานที่ไม่สมบูรณ์ ยังทำให้เกิดเวลาสูญเสียในกระบวนการผลิต การแก้ไขปัญหานี้จึงเป็นสิ่งสำคัญสำหรับการปรับปรุงประสิทธิภาพการผลิตและลดเวลาความสูญเสียที่เกิดขึ้น (Limboe and Kale, 2019)

การออกแบบระบบช่องระบายอากาศ (Air Vent System Design) ในแม่พิมพ์ฉีดพลาสติกเป็นวิธีการที่มีประสิทธิภาพในการลดปัญหาการฉีดไม่เต็ม โดยช่องระบายอากาศจะช่วยให้อากาศที่ติดค้างอยู่ในแม่พิมพ์สามารถถูกปล่อยออกมาได้อย่างรวดเร็วและมีประสิทธิภาพ ทำให้พลาสติกหลอมเหลวสามารถไหลเข้าไปเติมเต็มแม่พิมพ์ได้อย่างสมบูรณ์ (Kimura et al., 2021) ลดโอกาสการเกิดข้อบกพร่องในชิ้นงาน นอกจากนี้การออกแบบช่องระบายอากาศที่เหมาะสมยังสามารถช่วยลดแรงดันที่จำเป็นในการฉีดพลาสติก ซึ่งสามารถลดการใช้พลังงานและเพิ่มประสิทธิภาพของกระบวนการผลิตได้อีกด้วย (Miranda and Nogueira, 2019) สำหรับการผลิตแก้วจากวัสดุพลาสติกชีวภาพ ปัญหาการฉีดไม่เต็มเป็นปัญหาหลัก เนื่องจากวัสดุพลาสติกชีวภาพมีคุณสมบัติที่แตกต่างจากพลาสติกทั่วไป วัสดุชนิดนี้มักจะมีการหดตัวมากขึ้นในกระบวนการฉีด ทำให้การไหลของพลาสติกหลอมเหลวในแม่พิมพ์ยากขึ้น การออกแบบ

ช่องระบายอากาศที่มีประสิทธิภาพจึงมีความสำคัญอย่างยิ่งต่อการผลิตชิ้นงานที่มีคุณภาพสูงและลดการสูญเสียที่เกิดขึ้นในกระบวนการผลิต

งานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นไปที่การศึกษาและพัฒนาการออกแบบระบบช่องระบายอากาศ (Air Vent System Design) ในแม่พิมพ์ฉีดพลาสติกสำหรับแก้วกาแฟจากวัสดุพลาสติกชีวภาพ เริ่มจากการศึกษาทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง การวางตำแหน่งชิ้นงาน การออกแบบระบบทางเข้า (Runner System) การออกแบบระบบระบายอากาศ (Air Vent System) การปรับฉีดชิ้นงาน เพื่อแก้ไขปัญหาของการฉีดไม่เต็มที่เกิดขึ้นได้

วัตถุประสงค์งานวิจัย

1. เพื่อออกแบบระบบระบายอากาศของแม่พิมพ์ฉีดพลาสติกแก้วกาแฟ
2. เพื่อแก้ไขข้อบกพร่องของการฉีดไม่เต็มของชิ้นงานแก้วกาแฟ

แนวคิดทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

1. ข้อบกพร่องการฉีดไม่เต็ม (Short Shot Defect)

งานฉีดพลาสติกส่วนใหญ่หลังจากการฉีดขึ้นรูปชิ้นงานพบปัญหาที่หลากหลายหนึ่งในนั้นพบปัญหาการฉีดไม่เต็ม หรือการเกิดรอยแห้ว (Short Shot) (Zhou et al., 2023) เป็นปัญหาที่เกิดขึ้นเป็นประจำ สาเหตุหลักของการเกิดมีหลายปัจจัย เช่น ชนิดวัสดุ คุณสมบัติการไหลตัวของวัสดุ การวางตำแหน่งชิ้นงาน รูปร่างชิ้นงาน และการออกแบบแม่พิมพ์ที่ไม่มีช่องระบายอากาศ (Air Vent) การแก้ไขปัญหาดังกล่าวสามารถทำได้โดยการปรับพารามิเตอร์ของงานฉีด อาทิเช่น อุณหภูมิหลอมเหลวของวัสดุ (Melt Temperature) ความดันฉีด (Injection Pressure) เป็นต้น (Mawardi et al., 2019; Nithikarnjanatharn et al., 2018) และการแก้ไขการออกแบบแม่พิมพ์ โดยการออกแบบระบบช่องระบายอากาศ (Air Vent Design) (Zhang et al., 2018)

2. คุณสมบัติของวัสดุพลาสติกชีวภาพ (Biodegradable Material)

วัสดุในการทดลองนี้เป็นวัสดุที่สามารถย่อยสลายได้ มีส่วนประกอบของวัสดุพอลิแลคติกแอซิด (Polylactic Acid: PLA) เกรด 4043D ปริมาณ 70 % และวัสดุเหลือใช้จากกากกาแฟปริมาณ (30 %) โดยมีพารามิเตอร์ของการปรับฉีด ดังตารางที่ 1

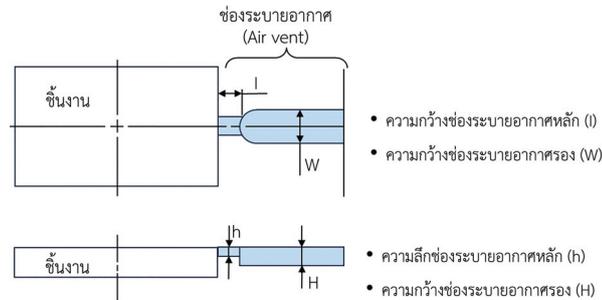
ตารางที่ 1 พารามิเตอร์ของวัสดุพอลิแลคติกแอซิด (Polylactic Acid: PLA) ผสมกากกาแฟ (Mawardi et al., 2019)

รายการ	ตัวย่อ	ค่า	หน่วย
1. ความหนาแน่น	ρ	1.25	กรัม/ซม. ³
2. อุณหภูมิหลอมเหลว	Tm	190 - 220	องศาเซลเซียส
3. อุณหภูมิแม่พิมพ์	Tw	90 - 100	องศาเซลเซียส
4. อัตราการหดตัว		0.3	%

3. การออกแบบช่องระบายอากาศของแม่พิมพ์ฉีดพลาสติก (Air Vent Design)

ช่องระบายอากาศเป็นองค์ประกอบสำคัญที่ช่วยลดปัญหาความดันอากาศภายในแม่พิมพ์ในระหว่างกระบวนการฉีดพลาสติก โดยช่องระบายอากาศทำหน้าที่ปล่อยอากาศที่ถูกกักอยู่ในโพรงแม่พิมพ์เมื่อพลาสติกเหลวถูกฉีดเข้าไป (Totalenergies-corbion, 2019) การออกแบบที่ไม่เหมาะสมจะนำไปสู่ปัญหาต่าง ๆ เช่น การเกิดฟองอากาศ (Air Traps) รอยเชื่อมชน (Weld Line) หรือการฉีดไม่เต็ม (Short Shot) (Sorgato et al., 2017; Ganeshkar and Patil, 2014) ทำให้ชิ้นงานเสียหาย การออกแบบช่องระบายอากาศนั้นควรมีความสมดุลระหว่างการระบายอากาศที่มีประสิทธิภาพและการป้องกันไม่ไห้พลาสติกเหลวไหลออกจากช่องระบายอากาศ ช่องระบายอากาศมักจะถูกออกแบบให้มีขนาดเล็กมากประมาณ 0.02 - 0.05 มม. เพื่อให้ระบายอากาศได้ดีแต่ไม่ให้พลาสติกผ่านเข้าไปได้ ช่องระบายอากาศมักถูกวางตำแหน่งในพื้นที่ที่มีการไหลของพลาสติกไหลจุดสุดท้าย เช่น บริเวณมุมและขอบของโพรงแม่พิมพ์ เพื่อให้การระบายอากาศสมบูรณ์ทั่วทุกส่วนของชิ้นงาน นอกจากนี้การระบายอากาศที่ดีช่วยลดแรงดัน

ภายในแม่พิมพ์ ลวดการเสี้ยนที่จะเกิดข้อบกพร่องในชิ้นงาน เช่น รอยไหม้ (Burn Marks) (Wibowo et al., 2020) ซึ่งเกิดจากการสะสมของความร้อนและแรงดันที่สูงเกินไปในจุดที่อากาศไม่สามารถออกได้ อีกทั้งการใช้ช่องระบายอากาศก็เป็นสิ่งจำเป็น เพื่อให้ช่องระบายอากาศมีการทำงานอย่างมีประสิทธิภาพ การบำรุงรักษาแม่พิมพ์ก็เป็นสิ่งที่ไม่ควรมองข้าม เพราะสิ่งสกปรกที่สะสมอยู่ในช่องระบายอากาศอาจทำให้ระบบการระบายอากาศทำงานได้ไม่เต็มประสิทธิภาพ โดยรูปร่างของช่องระบายอากาศดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 ความกว้างและความลึกของช่องระบายอากาศ (Li et al., 2021)

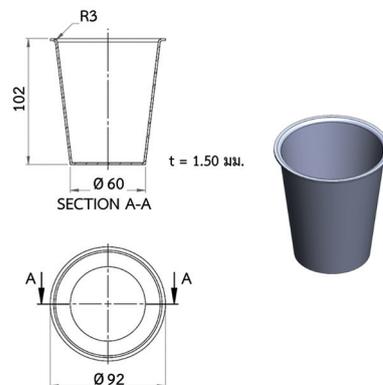
ความลึกของช่องระบายอากาศหลัก (h) ขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของวัสดุของการฉีดวัสดุ โดยความลึกสามารถแบ่งออกเป็น 3 ช่วงดังต่อไปนี้ (Misumi, 2024)

- วัสดุที่มีความหนืดต่ำ: 0.01 - 0.03 มม.
- วัสดุที่มีความหนืดปานกลาง: 0.03 - 0.05 มม.
- วัสดุที่มีความหนืดสูง: 0.05 - 0.08 มม.

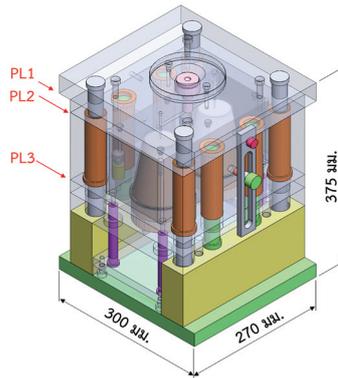
ความกว้างช่องระบายอากาศหลัก (l) คือ 2 - 5 มม. ความกว้างของช่องระบายอากาศรอง (W) คือ 2 - 10 มม. และความลึกของช่องระบายอากาศรอง (H) คือ 0.1 - 0.5 มม.

4. พารามิเตอร์ปรับฉีดพลาสติก (Plastic Injection Mould Parameters)

การกำหนดพารามิเตอร์ปรับฉีดของชิ้นงานขึ้นอยู่กับรูปแบบชิ้นงาน วัสดุที่เลือกใช้การออกแบบแม่พิมพ์ และความสามารถของเครื่องฉีดพลาสติก (Plastic Injection Machine) (Jackie, 2019) ดังรูปที่ 2 แสดงขนาดของแก้วกาแฟขนาด 16 ออนซ์ และรูปที่ 3 แสดงขนาดแบบแม่พิมพ์แบบ 3 แผ่นของแก้วกาแฟความกว้าง 270 มม. ความยาว 300 มม. และความสูง 375 มม. และรูปที่ 4 แสดงเครื่องฉีดพลาสติกรุ่น HYF-1000 ขนาดแรงปิดแม่พิมพ์สูงสุด (Clamping Force) ที่ 100 ตัน ตามลำดับ



รูปที่ 2 ขนาดแก้วกาแฟ 16 ออนซ์



รูปที่ 3 การออกแบบแม่พิมพ์แบบ 3 แผ่น ของแก้วกาแฟขนาด 16 ออนซ์



รูปที่ 4 เครื่องฉีดพลาสติก รุ่น HYF-1000

โดยคุณสมบัติของการปรับฉีดชิ้นงานแก้วกาแฟจากวัสดุพลาสติกชีวภาพที่สำคัญ ได้แก่ น้ำหนักชิ้นงาน อุณหภูมิหลอมเหลวของวัสดุ อุณหภูมิแม่พิมพ์ แรงปิดแม่พิมพ์ ความดันฉีด และอัตราความเร็วฉีด ดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 คุณสมบัติการปรับฉีดของแก้วกาแฟจากวัสดุพลาสติกชีวภาพ

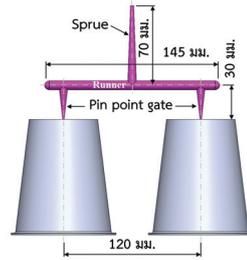
รายการ	ตัวย่อ	ค่า	หน่วย
1. น้ำหนัก	m	148.88	กรัม
2. อุณหภูมิหลอมเหลว	T_m	190	องศาเซลเซียส
3. อุณหภูมิแม่พิมพ์	T_w	90	องศาเซลเซียส
4. แรงปิดแม่พิมพ์	F	100	ตัน
5. ความดันฉีด	P	54	บาร์
6. อัตราความเร็วฉีด	I	40	ชม. ³ /วินาที

* น้ำหนักชิ้นงานได้มาจากการคำนวณในโปรแกรม CAD

วิธีการดำเนินการวิจัย

1. การวางตำแหน่งชิ้นงานแก้วขนาด 16 ออนซ์

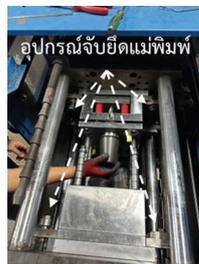
การออกแบบชิ้นงานแก้วกาแฟขนาด 16 ออนซ์ มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของปากแก้วกาแฟ 92 มม. เส้นผ่านศูนย์กลางก้นแก้ว 60 มม. สูง 102 มม. และความหนา 1.5 มม. และการฉีดชิ้นงานแก้วกาแฟสามารถฉีดได้ 2 ชิ้น/ครั้ง ความยาวของทางวิ่ง (Runner) 145 มม. ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางทางวิ่ง (Runner) หลั 6 มม. และความสูงของแกนรูปฉีด (Sprue) 70 มม. ความสูงของทางเข้าแบบเข็ม (Pin Point Gate) 30 มม. ระยะห่างอยู่ที่ 120 มม. ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.5 มม. และชนิดวัสดุอินเสิร์ต P20 ดังรูปที่ 5



รูปที่ 5 การวางตำแหน่งแก๊วกาแฟในแม่พิมพ์ฉีดพลาสติก

2. ปัญหาของการฉีดไม่เต็ม

การฉีดแก๊วกาแฟในแม่พิมพ์ติดตั้งกับเครื่องฉีดพลาสติกรุ่น HYF-1000 โดยการใช้ตัวจับยึดแม่พิมพ์ (Clamping) และการปลดชิ้นงานด้วยระบบแผ่นดันปลดบริเวณขอบของชิ้นงาน ดังรูปที่ 6 ผลของการฉีดพบว่าชิ้นงานเกิดปัญหาแก๊วกาแฟไม่เต็มหรือเกิดรอยแหวน (Short Shot) ที่แก๊วกาแฟ ดังรูปที่ 7

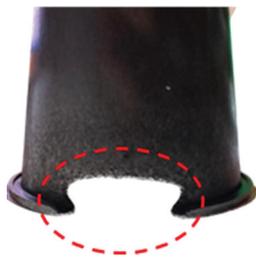


(ก) การติดตั้งแม่พิมพ์



(ข) การปลดชิ้นงานออกจากแม่พิมพ์

รูปที่ 6 การติดตั้งแม่พิมพ์และระบบปลดชิ้นงาน



(ก) การฉีดครั้งที่ 1



(ข) การฉีดครั้งที่ 2



(ค) การฉีดครั้งที่ 3

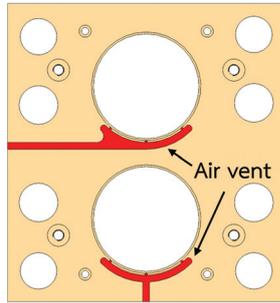
รูปที่ 7 แก๊วกาแฟเกิดปัญหาการฉีดไม่เต็ม หรือ รอยแหวน (Short shot)

การทดลองฉีดครั้งที่ 1 ค่าพารามิเตอร์ปรับฉีดจากตารางที่ 2 พบว่าชิ้นงานแก๊วกาแฟเกิดปัญหาการเกิดรอยแหวน (Short Shot) บริเวณขอบของแก๊วกาแฟ จึงได้มีการปรับความดันฉีดจาก 54 บาร์ เป็น 60 บาร์ ของการทดลองฉีดครั้งที่ 2 การเกิดลดลงแต่ชิ้นงานแก๊วกาแฟยังไม่เต็มสมบูรณ์ จึงได้มีการปรับค่าพารามิเตอร์ของการเพิ่มอุณหภูมิหลอมเหลวของวัสดุจาก 200 องศาเซลเซียส เป็น 220 องศาเซลเซียส เพื่อช่วยในการไหลตัวของน้ำพลาสติกของการทดลองฉีดครั้งที่ 3 พบว่าชิ้นงานแก๊วกาแฟเกือบเต็มสมบูรณ์ โดยมีจุดสังเกตของการเกิดรอยแหวน (Short Shot) มีลักษณะอยู่เหนือแนวแยกของแม่พิมพ์ (Parting Line) (Sarac et al., 2021) ทำให้ชิ้นงานแก๊วกาแฟยังคงเกิดปัญหาดังกล่าว

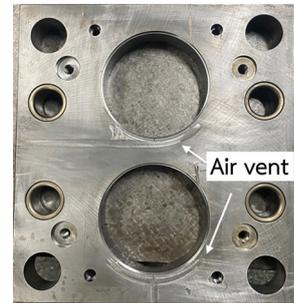
3. การปรับปรุงแม่พิมพ์ฉีดพลาสติกแก๊วกาแฟด้วยช่องระบายอากาศ

การวิเคราะห์สาเหตุบริเวณที่เกิดอากาศสะสมทำให้น้ำพลาสติกไม่สามารถออกจากบริเวณที่เกิดปัญหาการเกิดรอยแหวน (Short Shot) นำไปสู่การปรับปรุงการออกแบบแม่พิมพ์ฉีดพลาสติก โดยการเพิ่มการออกแบบ

ช่องระบายอากาศ (Air Vent) บริเวณที่น้ำพลาสติกไหลมาบรรจบกัน ซึ่งเป็นบริเวณที่เกิดปัญหาข้างต้น จึงทำการออกแบบระบบช่องระบายอากาศ (Air Vent) บริเวณของแผ่นต้นปลด ดังรูปที่ 8



(ก) การออกแบบ Air Vent



(ข) Air Vent บนแผ่นต้นปลด

รูปที่ 8 การออกแบบระบบช่องระบายอากาศ (Air Vent) บนแผ่นต้นปลด

วัสดุพลาสติกชีวภาพที่มีส่วนผสมของวัสดุพอลิแลคติกแอซิด (Polylactic Acid: PLA) และวัสดุเหลือใช้จากกากกาแฟ จัดอยู่ในกลุ่มของวัสดุที่มีความหนืดสูงดังนั้นการออกแบบความลึกของช่องระบายอากาศหลัก (h) ที่ 0.05 มม. ความกว้างที่ 2 มม. และความลึกของช่องระบายอากาศรอง (H) ที่ 0.1 มม. ความกว้างที่ 10 มม.

ผลการทดลองและอภิปรายผล

ผลการออกแบบระบบช่องระบายอากาศของแม่พิมพ์ฉีดพลาสติกแก้วกาแฟจากวัสดุพลาสติกชีวภาพ ดังรูปที่ 9 โดยค่าพารามิเตอร์ของการปรับฉีดตามตารางที่ 2 และไม่มีการปรับตั้งค่าต่าง ๆ ขึ้นงานแก้วกาแฟฉีดเต็มสมบูรณ์ตามที่ออกแบบไว้ ซึ่งแสดงให้เห็นถึงความสำคัญของการออกแบบช่องระบายอากาศในระบบของแม่พิมพ์ฉีดพลาสติกทำให้ส่งผลทางอ้อมกับการปรับฉีดแม่พิมพ์ โดยสามารถลดเวลาของการปรับฉีดพลังงานที่ใช้ต่าง ๆ ของเครื่องฉีดพลาสติกได้



รูปที่ 9 ผลการฉีดขึ้นงานแก้วกาแฟที่มีระบบช่องระบายอากาศ

การออกแบบระบบระบายอากาศในแม่พิมพ์พลาสติกมีส่วนสำคัญต่อคุณภาพชิ้นงาน เพราะช่วยลดการสะสมอากาศที่ขัดขวางการฉีดให้เต็มแม่พิมพ์ และแก๊สของการหลอมเหลวของวัสดุ (Raj et al., 2021) กล่าวถึงการลดปัญหาการฉีดขึ้นงานพลาสติกไม่เต็มหรือการเกิดรอยแห้ว ให้ความสำคัญของการเพิ่มแรงดันย่ำ (Holding Pressure) ที่ 20 30 และ 40 บาร์ แรงดันฉีด (Injection Pressure) 45 บาร์ ซึ่งได้ค่าของแรงดันย่ำ (Holding Pressure) ที่ 40 บาร์ อุณหภูมิในการหลอมเหลว (Melt Temperature) ที่ 200 องศาเซลเซียส สามารถช่วยให้ชิ้นงานไม่มีปัญหาการฉีดไม่เต็มหรือรอยแห้ว (Aribowo and Dani, 2023) และกล่าวถึงการออกแบบระบบช่องระบายอากาศในแม่พิมพ์ฉีดพลาสติก ที่แก้ไขปัญหการเกิดรอยแห้ว (Short Shot) และการเกิดรอยไหม้ (Burn Mark) งานวิจัยที่กล่าวมาได้แสดงถึงการแก้ไขปัญหาด้านคุณภาพของชิ้นงานพลาสติก สามารถปรับปรุงด้วยวิธีการปรับค่าพารามิเตอร์ของการฉีดและการปรับปรุงการออกแบบแม่พิมพ์ สามารถนำไปสู่การแก้ไขปัญหาด้านคุณภาพต่าง ๆ ในงานฉีดขึ้นงานพลาสติก

สรุปผลการทดลอง

การแก้ไขปัญหาด้านไม่เต็มด้วยการออกแบบช่องระบายอากาศของแม่พิมพ์ฉีดพลาสติกแก้วกาแฟจากวัสดุพลาสติกชีวภาพ ทำการออกแบบระบบระบายอากาศช่องทางหลัก มีความลึก (h) ที่ 0.05 มม. ความกว้างที่ 2 มม. และความลึกของช่องระบายอากาศรอง (H) ที่ 0.1 มม. ความกว้างที่ 10 มม. ส่วนของค่าพารามิเตอร์ของการปรับฉีด ค่าความดันฉีด (Injection Pressure) ที่ 54 บาร์ อัตราความเร็วฉีด (Injection Speed Rate) ที่ 40 ซม.³/วินาที แรงปิดแม่พิมพ์ (Clamping Force) ที่ 100 ตัน อุณหภูมิในการหลอมเหลว (Melt Temperature) ที่ 200 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิแม่พิมพ์ (Mould Temperature) ที่ 90 องศาเซลเซียส แสดงให้เห็นว่าการออกแบบระบบช่องระบายอากาศช่วยแก้ไขปัญหาด้านการเกิดฉีดไม่เต็มหรือรอยแห้ว อีกทั้งเพื่อลดเวลาในการปรับตั้งค่าพารามิเตอร์ของการปรับฉีดได้อีกทางด้วยเช่นกัน

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณหลักสูตรวิศวกรรมแม่พิมพ์และเครื่องมือ สาขาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา เชียงใหม่ สำหรับการให้เครื่องมือ เครื่องจักร สำหรับการออกแบบและสร้างแม่พิมพ์ฉีดพลาสติกในครั้งนี้

References

- Aribowo, M.S. and Dani, A. (2023). The Effect of Holding Pressure and Inject Pressure to Short Shot Defect in Injection Molding Cover Pot. *Journal of Engineering Design and Technology*, 23(2), 147-154. <https://doi.org/10.31940/logic.v23i2.147-154>
- Ganeshkar, J.D. and Patil, R.B. (2014). Design of Plastic Injection Mold for an Air Vent Bezel Through Flow Analysis (CAE) for Design Enhancement. *International Journal of Research in Engineering and Technology*, 3(12), 236-241. <https://ijret.org/volumes/2014v03/i12/IJRET20140312031.pdf>
- Jackie. (2019). *Mold Venting System & Design Principles - Ecomolding*. Injectionmould.com. <https://www.injectionmould.org/2019/03/13/mold-venting/>
- Kanjanakarn, P., Nithikarnjanatharn, J., Nutkhum, W. and Wasanbongngem, N. (2023). CAD/CAE Integration and Tagushi Method in Finding Parameters Injection Molding of Polypropylene Plastic in 2 Cavities Plastic Injection Moldsplastic Case Study Pencil Box. *Journal of Engineering and Innovation*, 17(3), 124-133. https://ph02.tci-thaijo.org/index.php/eng_ubu/article/view/250617/171146 (in Thai)
- Kimura, F., Kadoya, S. and Kajihara, Y. (2021). Active Air Venting of Mold Cavity to Improve Performance of Injection Molded Direct Joining. *Nanomanufacturing and Metrology*, 4, 109-117. <https://doi.org/10.1007/s41871-021-00097-4>
- Li, J., Liu, W., Xia, X., Zhou, H., Jing, L., Peng, X. and Jiang, S. (2021). Reducing the Burn Marks on Injection-Molded Parts by External Gas-Assisted Injection Molding. *Polymers*, 13(23), 4087. <https://doi.org/10.3390/polym13234087>
- Limbore, S.S. and Kale, P.D. (2019). Design and Optimization of Plastic Injection Mould for Plastic Lid. *5th Mechanical Engineering Post Graduate Students' Conference MECHPGCON2019*, Board of Studies (Mechanical Engineering), Faculty of Science and Technology, Savitribai Phule Pune University, Pune, Maharashtra, India Department of Mechanical Engineering, Amrutvahini College of Engineering, Samgamner; 21-22 June 2019

- Mawardi, I., Jannifar, A. and Lubis, H. (2019). Effect of Injection Temperature on Defect Plastic Products. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 536, 012102. <https://doi.org/10.1088/1757-899x/536/1/012102>
- Miranda, D.A.D. and Nogueira, A.L. (2019). Simulation of an Injection Process Using a CAE Tool: Assessment of Operational Conditions and Mold Design on the Process Efficiency. *Materials Research*, 22, e20180564. <https://doi.org/10.1590/1980-5373-mr-2018-0564>
- Misumi. (2024). #064 Method of Providing Air Vents: Technical Tutorial. <https://www.misumi-techcentral.com/tt/en/mold/2010/12/062-method-of-providing-air-vents.html>
- Moayyedian, M., Abhary, K. and Marian, R. (2017). The Analysis of Short Shot Possibility in Injection Molding Process. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 91, 3977-3889. <https://doi.org/10.1007/s00170-017-0055-1>
- Nithikarnjanatharn, J., Sukrueangkul, W. and Wasanbongngem, N. (2018). Analysis Shrinkage of Recycle Plastic Injection Molding by Using Taguchi Methodology. *UBU Engineering Journal*, 12(2), 123-134. https://ph02.tci-thaijo.org/index.php/eng_ubu/article/view/233062/163604
- Phongphattarawut, W., Muparang, S., Wasanbongngem, N., Nithikarnjanatharn, J. and Nutkhum W. (2024). Comparison of Polypropylene Flow Index to Increase Injection Efficiency in Plastic Injection Mold, 2 Cavities of Different Shapes Plastic (Case Study: Pencil Box). *Rajamangala University of Technology Lanna (RMUTL) Engineering Journal*, 9(2), 21-29. <https://ph01.tci-thaijo.org/index.php/RMUTLEngJ/article/view/256812/173735>
- Raj, M.P., Kumar, M. and Pramanick, A.K. (2021). Selection of Optimal Parting Line for Forging in Various Equipments Using Numerical Analysis. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 1091(1), 012033. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1091/1/012033>
- Sarac, T., Sipahioğlu, A. and Ozer, E.A. (2021). A Two-Stage Solution Approach for Plastic Injection Machines Scheduling Problem. *Journal of Industrial and Management Optimization*, 17(3), 1289-1314. <https://doi.org/10.3934/jimo.2020022>
- Sorgato, M., Babenko, M., Lucchetta, G. and Whiteside, B. (2017). Investigation of the Influence of Vacuum Venting on Mould Surface Temperature in Micro Injection Moulding. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 88, 547-555. <https://doi.org/10.1007/s00170-016-8789-8>
- Terroba-Delgado, E., Fiori S., Torres-Giner, S., Gomez-Caturla J., Montanes, N. and Sanchez-Nacher, L. (2021). Improving the Mechanical Ductility and Toughness of Injection-Molded Polylactide Pieces by the Dual Incorporation of Liquor Waste Derived Spent Coffee Grounds and Oligomers of Lactic Acid. *Research Square (Research Square)*. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-1035447/v1>
- Totalenergies-corbion. (2019). *Processing-guide-injection-molding*. <https://www.totalenergiescorbion.com/media/ny1kwp02/processing-guide-injection-molding-of-standard-and-high-heat-pla-compounds-20220722.pdf>
- Wibowo, E.A., Syahriar, A. and Kaswadi, A. (2020). Analysis and Simulation of Short Shot Defects in Plastic Injection Molding at Multi Cavities. *Proceedings of the 2020 International Conference on Engineering and Information Technology for Sustainable Industry*. (pp. 1-6). <https://doi.org/10.1145/3429789.3429837>



- Zhang, Y., Hou, B., Wang, Q., Huang, Z. and Zhou, H. (2018). Automatic Generation of Venting System on Complex Surfaces of Injection Mold. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 98, 1379-1389. <https://doi.org/10.1007/s00170-018-2327-9>
- Zhou, Z.W., Yang, H.Y., Xu, B.X., Ting, Y.H., Chen, S.C. and Jong, W.R. (2023). Prediction of Short-Shot Defects in Injection Molding by Transfer Learning. *Applied Sciences*, 13(23), 12868. <https://doi.org/10.3390/app132312868>

แบคทีเรียและธาตุอาหารในน้ำหมักชีวภาพจากเปลือกมะพร้าวแห้งน้ำหอม

Bacteria and Nutrients in Fermented Bio-extracts from Aromatic Coconut Husk

ชญชนก ทองเสมอ¹ นารีรัตน์ สุขชี¹ สร้อยดาว วินิจนันท์รัตน์^{1*} บัณฑิต ทิรชูลี² ภาวิณี พัฒนจันทร์² และ
วาสนศักดิ์ ลิ้มควรรสุวรรณ³

Thunchanok Thongsamer¹ Nareerat Sukkhee¹ Soydoa Vinitnantharat^{1*} Bundit Tirachulee²
Pavinee Patanachan² and Vassanasak Limkuansuwan³

Received: March 14, 2025; Revised: May 14, 2025; Accepted: May 14, 2025

บทคัดย่อ

การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อวิเคราะห์สมบัติของน้ำหมักชีวภาพจากเปลือกมะพร้าวแห้งน้ำหอมสดเหลือทิ้ง ที่ใช้หัวเชื้อจุลินทรีย์
ในกระบวนการหมักต่างกัน ได้แก่ สารเร่งซูเปอร์ พด.2 และ พด.7 เป็นระยะเวลา 30 วัน นำน้ำหมักมาวิเคราะห์
กลุ่มประชากรแบคทีเรีย และศึกษาการเปลี่ยนแปลงของค่าความเป็นกรดต่าง การนำไฟฟ้า แทนนิน องค์กรประกอบ
ธาตุอาหาร ผลการศึกษาพบว่า น้ำหมักที่ใช้ พด.2 มีแบคทีเรีย Lactobacillales ร้อยละ 80 ขณะที่น้ำหมักที่ใช้ พด.7
มีแบคทีเรีย Bacillales มากถึงร้อยละ 53 และ Lactobacillales ร้อยละ 24 น้ำหมักจากเปลือกมะพร้าวแห้งน้ำหอม
มีปริมาณธาตุอาหารหลักและธาตุอาหารรองในระดับที่ใกล้เคียงกับสูตรอาหารพืชไร้ดินยกร่วนปริมาณไนโตรเจน
นอกจากนี้ยังตรวจพบสารแทนนินในน้ำหมักทั้งสองชนิด ดังนั้นน้ำหมักชีวภาพจากเปลือกมะพร้าวแห้งน้ำหอมจะนำไปใช้
ในการเกษตรเพื่อปรับปรุงดิน รวมทั้งมีสารต้านจุลชีพ และจุลินทรีย์ที่เป็นประโยชน์

คำสำคัญ : มะพร้าวแห้งน้ำหอม; น้ำหมักชีวภาพ; จุลินทรีย์; ธาตุอาหารพืช

¹ คณะพลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

² สถาบันพัฒนาและฝึกอบรมโรงงานต้นแบบ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

³ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสวนดุสิต

¹ School of Energy, Environment and Materials, King Mongkut's University of Technology Thonburi

² Pilot Plant Development and Training Center Institute, King Mongkut's University of Technology Thonburi

³ Faculty of Science, Suan Dusit University

* Corresponding Author, Tel. 08 1443 6054, E - mail: soydoa.vin@mail.kmutt.ac.th

Abstract

This study aimed to analyze the characteristics of bio-extracts from discarded fresh aromatic coconut husk using different microbial seeds, super PD.2 and PD.7 for 30 days. The bio-extracts were analyzed for microbial community and the variation of pH, electrical conductivity, tannin, and nutrient composition. The results showed that the bio-extract using PD.2 predominantly contained Lactobacillales of 80 %, while the bio-extract using PD.7 contained Bacillales of 53 % and Lactobacillales of 24 %. The bio-extract contained macro and micronutrients at levels comparable to soilless plant nutrient formulas, except for nitrogen content. Moreover, tannin was detected in both bio-extracts. Therefore, the bio-extracts from coconut husks may be used in agriculture to improve soil quality. In addition, it contains anti-microbial and beneficial microorganisms.

Keywords: Aromatic Coconut; Bio-Extract; Microorganisms; Plant Nutrients

บทนำ

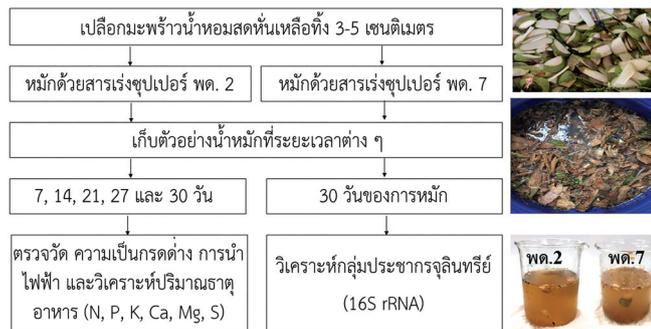
น้ำหมักชีวภาพมีการนำมาใช้ในภาคการเกษตร เพื่อปรับปรุงบำรุงดิน ควบคุมศัตรูพืช รวมถึงการใช้เป็นแหล่งธาตุอาหาร สำหรับการปลูกพืชไร้ดิน เปลือกมะพร้าวแห้งเป็นของเหลือทิ้งจากการตัดแต่งลูกมะพร้าว โดยเฉพาะจากโรงงานผู้ผลิตมะพร้าวแห้งเพื่อบริโภคในจังหวัดราชบุรี ซึ่งเป็นแหล่งเพาะปลูกมะพร้าวแห้งอันดับหนึ่งของประเทศ ส่งผลให้มีปริมาณเปลือกมะพร้าวแห้งเหลือทิ้งมีอยู่ปริมาณมาก ทำให้เกิดปัญหาในการจัดการ เช่น การฝังกลบ กองทิ้ง เกิดปัญหากลิ่น และน้ำเสีย ฉะนั้นการนำเปลือกมะพร้าวแห้งทิ้งไปใช้ประโยชน์เป็นน้ำหมักชีวภาพ จึงเป็นทางเลือกหนึ่งในการจัดการ อีกทั้งเป็นเทคโนโลยีที่ทำได้ง่าย ช่วยลดปัญหาสิ่งแวดล้อมจากการกองทิ้งเปลือกมะพร้าวหรือฝังกลบในพื้นที่ได้อีกทางหนึ่ง การวิจัยก่อนหน้านี้พบว่า น้ำหมักชีวภาพ ที่หมักด้วยเศษชิ้นส่วนของปลาเนื้ และหมักจากเศษผักผลไม้ โดยใช้หัวเชื้อจากสับปะรด รวมทั้งมีการเติมเชื้อ *Lactobacillus plantarum* และ *L. caseii* น้ำหมักชีวภาพที่ได้ ประกอบด้วย กรดอะมิโน โปรตีน และฮอร์โมนพืช โดยวัตถุดิบและหัวเชื้อในการหมักมีผลต่อองค์ประกอบของน้ำหมัก (Aroonrungsikul et al., 2004) สำหรับองค์ประกอบของเปลือกมะพร้าวมีปริมาณเซลลูโลส และลิกนินสูง โดยมีปริมาณร้อยละ 39.31 และ 29.79 (Vaithanomsat et al., 2011) และในเส้นใยมะพร้าวแห้งเท่ากับร้อยละ 49.59 และ 31.83 (Rattanaporn, 2019) และธาตุอาหาร เช่น ไนโตรเจน ฟอสฟอรัส และโพแทสเซียม สูงถึง 5.03 1.32 และ 13.23 กรัม/กิโลกรัม ตามลำดับ (Saradhuldhath et al., 2014) การศึกษาน้ำชะจากเปลือกมะพร้าวพบแทนนิน 1,077 มิลลิกรัม/ลิตร (Sukkhee et al., 2024) นอกจากนี้การใช้น้ำสกัดจากปุ๋ยหมักขุยมะพร้าว ผิดพันในการปลูกข้าว ช่วยลดการระบาดของโรคใบไหม้ และโรคใบจุดสีน้ำตาลได้ (Kusuwanwichid et al., 2017) การศึกษาน้ำหมักจากเปลือกมะพร้าวอ่อนหมักร่วมกับน้ำตาลและจุลินทรีย์ที่มีประสิทธิภาพ พบว่ามีแทนนินและกรดอินทรีย์ที่ช่วยป้องกันโรคพืชและส่งเสริมการเจริญของผักบุงได้ (Refilda, Yasmine and Zilfa, 2019) ซึ่งในระหว่างการหมักเกิดการเปลี่ยนแปลงของจุลินทรีย์ได้ โดยมีจุลินทรีย์ที่เป็นประโยชน์ และจุลินทรีย์ก่อโรค การหมักที่นานเกินไปทำให้จุลินทรีย์ก่อโรคลกลับมีจำนวนมากขึ้นและสารที่เป็นประโยชน์ลดลงได้ โดยระยะเวลาหมักที่เหมาะสมควรอยู่ที่ 30 วัน (Zhu et al., 2024) หัวเชื้อจุลินทรีย์ของกรมพัฒนาที่ดินที่ใช้ทำน้ำหมักชีวภาพ ได้แก่ สารเร่งซูปเปอร์ พด.2 (พด.2) เพื่อผลิตเป็นปุ๋ยอินทรีย์น้ำ และสารเร่งซูปเปอร์ พด.7 (พด.7) เพื่อผลิตสารป้องกันแมลงศัตรูพืช ซึ่งเกษตรกรสามารถนำมาใช้ทำน้ำหมักชีวภาพได้ โดยมีขั้นตอนการทำไม่ยุ่งยาก ประกอบกับเปลือกมะพร้าวแห้งที่มีอยู่เป็นจำนวนมากสามารถผลิตในปริมาณมากได้อย่างต่อเนื่องและมีความสม่ำเสมอของคุณภาพน้ำหมัก ซึ่งอาจนำกลับมาใช้ในแปลงสวน การเกษตรได้อีก หรือผลิตเพื่อจำหน่าย ซึ่งเป็นการสร้างมูลค่าให้กับของเสียและสร้างรายได้ให้กับเกษตรกรได้อีกทางหนึ่ง ทั้งนี้การศึกษานำเปลือกมะพร้าวแห้งสดมาใช้ทำน้ำหมักมีอยู่น้อย และไม่ได้ทำการศึกษหาปริมาณธาตุอาหารหลัก

และแบคทีเรียในน้ำหมัก ดังนั้นการทราบองค์ประกอบของธาตุอาหารพืช และแบคทีเรียในน้ำหมักจะช่วยให้มีการปรับการใช้หมักชีวภาพได้อย่างเหมาะสม และลดความเสี่ยงจากการนำไปใช้ งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาแบคทีเรียในน้ำหมัก และการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางเคมี ธาตุอาหารหลัก และธาตุอาหารรองของน้ำหมัก เพื่อเป็นข้อมูลสำหรับการนำไปใช้ประโยชน์ทางการเกษตรต่อไป

วิธีดำเนินการวิจัย

1. การทำน้ำหมักชีวภาพจากเปลือกมะพร้าวน้ำหอม

เปลือกมะพร้าวน้ำหอมที่ใช้ในการศึกษาวิจัยนี้ เป็นเปลือกมะพร้าวน้ำหอมสดจากสวนของโรงงานอุตสาหกรรมในจังหวัดราชบุรี เป็นมะพร้าวน้ำหอมพันธุ์ก้นจีบอายุ 190 - 200 วัน นำมาหั่นเอาเปลือกมะพร้าวออกให้มีขนาด 3 - 5 เซนติเมตร แล้วนำมาหมักหลังจากการหั่นเปลือกออกประมาณ 1 วัน ตามวิธีของกรมพัฒนาที่ดิน (Land Development Department, 2025) โดยใช้ พด.2 และ พด.7 ในถังพลาสติกขนาด 60 ลิตร ดังตารางที่ 1 เติมน้ำประปาในปริมาตรพอดีท่วมกับปริมาณส่วนผสมที่ใช้ในการหมัก จากนั้นกวนให้เข้ากันแล้วจึงปิดฝา โดยแฉกฝาไว้เล็กน้อย เพื่อระบายก๊าซที่เกิดขึ้นจากกระบวนการหมัก เริ่มหมักในช่วงเดือนมกราคม-กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2565 โดยขั้นตอนการดำเนินการวิจัยดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย

ตารางที่ 1 การทำน้ำหมักชีวภาพจากเปลือกมะพร้าวน้ำหอมสด

	เปลือกมะพร้าวสด (กก)	รำข้าว (กรัม)	น้ำตาลทราย (กก)	น้ำประปา (ลิตร)	สารเร่งซูเปอร์ พด. 2 (กรัม)	สารเร่งซูเปอร์ พด. 7 (กรัม)
น้ำหมัก พด.2	28	-	3.5	32	17.5	-
น้ำหมัก พด.7	21	70	7	30	-	17.5

2. การวิเคราะห์ตัวอย่างน้ำหมัก

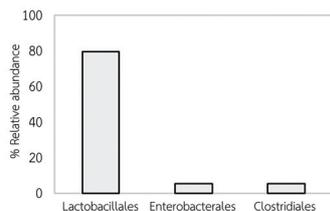
เก็บตัวอย่างน้ำหมักที่ระยะเวลา 7 14 21 27 และ 30 วันของการหมัก นำมากรองผ่านกระดาษกรอง GF/C นำของเหลวที่กรองได้มาตรวจวัดค่าความเป็นกรดต่าง และการนำไฟฟ้าด้วยเครื่อง WTW, pH3210 ตรวจวัดไอออนบวก ได้แก่ แอมโมเนียม โพแทสเซียม แคลเซียม และแมกนีเซียม ด้วยเครื่องไอออนโครมาโทกราฟี 761 Compact IC, Metrohm, column Metrosep C4-100/4.0 ที่อัตราการไหล 0.9 มิลลิลิตร/นาที ตรวจวัดไอออนลบ ได้แก่ ไนเตรต ฟอสเฟต และซัลเฟต ด้วยเครื่องไอออนโครมาโทกราฟี 761 Compact IC, Metrohm, column Metrosep A Supp5-150/4.0 ที่อัตราการไหล 0.7 มิลลิลิตร/นาที และตรวจวัดปริมาณแทนนินด้วยวิธีเปรียบเทียบสี โดยการนำของเหลวที่กรองได้ เติมน้ำยาสั่ง Folin-Ciocalteu และนำไปวัดความยาวคลื่นที่ 760 นาโนเมตร (Sirisangsawang and Phetyim, 2023)

การศึกษากลุ่มประชากรจุลินทรีย์ใช้เทคนิคเมตาจีโนมิกส์ (Metagenomics) ด้วยการนำน้ำหมักที่ระยะเวลาการหมัก 30 วัน ปริมาตร 100 มิลลิลิตร มากรองผ่านกระดาษกรองเมมเบรนขนาด 0.47 ไมครอน จากนั้นสกัดสารพันธุกรรมดีเอ็นเอ (DNA) โดยใช้ชุดสกัด Dneasy Power Water Kit (Qiagen) วิเคราะห์ลำดับพันธุกรรม 16S rRNA โดยใช้เทคโนโลยี Oxford Nanopore โดยใช้ 16S Barcoding Kit (SQK-RAB204) ใช้ Flow cell รุ่น R9.4.1 และโปรแกรม MinKNOW Version 21.11.7 แปลงผลให้เป็นลำดับเบส (Basecalling) ด้วยโปรแกรม Guppy version 6.4.6 และวิเคราะห์ผลอนุกรมวิธาน (Taxonomy) โดยใช้ EPI2ME Platform ตามวิธีของ Oxford Nanopore (ONT, 2022) และหาร้อยละความชุกชุมสัมพัทธ์ (% Relative Abundance) ซึ่งเป็นสัดส่วนจุลินทรีย์ที่สนใจกับจุลินทรีย์ทั้งหมด

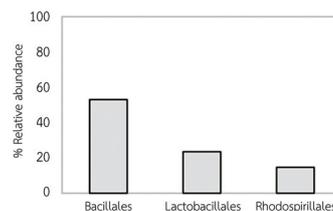
ผลการทดลองและวิจารณ์

1. จุลินทรีย์ในน้ำหมักชีวภาพ

จุลินทรีย์ที่มีอยู่ใน พด.2 ของกรมพัฒนาที่ดินที่ระบุไว้ (Land Development Department, 2025) ได้แก่ ยีสต์ผลิตแอลกอฮอล์และกรดอินทรีย์ (*Pichia* sp.) แบคทีเรียผลิตกรดแลกติก (*Lactobacillus* sp.) แบคทีเรียย่อยสลายโปรตีนและไขมัน (*Bacillus* sp.) และแบคทีเรียละลายอนินทรีย์ฟอสฟอรัส (*Burkholderia* sp.) และจุลินทรีย์ใน พด.7 ได้แก่ ยีสต์ (*Saccharomyces* sp.) แบคทีเรียผลิตกรดแลกติก และแบคทีเรียผลิตกรดอะซิติก (*Gluconobacter* sp.) จุลินทรีย์ดังกล่าวเป็นจุลินทรีย์เริ่มต้น จึงทำให้เกิดการย่อยสลายโมเลกุลใหญ่ ๆ ได้ ทำให้เปลี่ยนรูปจากสารอินทรีย์เป็นสารอนินทรีย์ (Mineralization) เพิ่มธาตุอาหารพืช และแปรสภาพจากสารอินทรีย์ที่ไม่เป็นประโยชน์ให้อยู่ในรูปที่ละลายได้ และเป็นประโยชน์ต่อพืช นับเป็นจุลินทรีย์หลักในกระบวนการหมัก ซึ่งนอกจากแบคทีเรียผลิตกรดแลกติก และยีสต์แล้วยังมีเชื้อราที่สามารถย่อยโมเลกุลใหญ่ ๆ ด้วยกระบวนการไฮโดรไลซิส (Hydrolysis) เช่น การย่อยสลายโปรตีน (Proteolysis) โดยจุลินทรีย์ซบเอนไซม์โปรติเอส ออกมานอกเซลล์ (Christensen et al., 2022) ในสภาวะที่เป็นเบสและกลางกลุ่ม *Bacillus* sp. เป็นกลุ่มหลักที่ผลิตเอนไซม์โปรติเอส ส่วนในสภาวะกรดจุลินทรีย์ที่เป็นกลุ่มหลักเป็นเชื้อรา (Song et al., 2023) ผลวิเคราะห์แบคทีเรียในระดับอันดับ (Order) ที่ตรวจพบในน้ำหมักในวันที่ 30 ของการหมัก ดังรูปที่ 2 พบว่าร้อยละความชุกชุมสัมพัทธ์ (Relative Abundance) ในน้ำหมักที่ใช้ พด.2 แตกต่างจาก พด.7 โดยจุลินทรีย์ในน้ำหมัก พด.2 ส่วนใหญ่พบ Lactobacillales ถึงร้อยละ 80 ส่วนในน้ำหมัก พด.7 ส่วนใหญ่พบ Bacillales ร้อยละ 53 รองมาคือ Lactobacillales ร้อยละ 24 โดย *Weissella confusa* เป็นจุลินทรีย์ที่พบมากที่สุดโดยมีค่าร้อยละของความชุกชุมสัมพัทธ์เท่ากับ 52.28 และ 15.92 ในน้ำหมัก พด.2 และ พด.7 แบคทีเรียในระดับ Genus ที่ตรวจพบในน้ำหมัก พด.2 และ พด.7 ดังรูปที่ 3 แบคทีเรียผลิตกรดแลกติก ยังสามารถผลิตเอ็กโซพอลิแซ็กคาไรด์ (Exopolysaccharides) ทำให้ดินจับกันเป็นก้อน จึงช่วยปรับสภาพดิน และทำให้จุลินทรีย์เกาะติดได้ดี (Simionescu and Petrovici, 2024) เนื่องจากเอ็กโซพอลิแซ็กคาไรด์เป็นพอลิเมอร์ชีวภาพ (Biopolymer) มีลักษณะเป็นสารเมือกมีความหนืดมีพื้นผิวประจุเป็นลบ จึงสามารถเก็บกักธาตุอาหารพืช รวมทั้งลดความเป็นพิษจากโลหะหนักได้ (Costa et al., 2018) แบคทีเรียบางชนิดสามารถใช้ชีวิตทั้งหมดหรือบางส่วนอยู่ในเนื้อเยื่อพืช โดยให้ประโยชน์แก่พืชอาศัย เรียกว่า แบคทีเรียเอนโดไฟต์ (Endophytic bacteria) แบคทีเรียผลิตกรดแลกติกที่สามารถตรวจพบในเนื้อเยื่อพืชได้ ได้แก่ *Weissella*, *Enterococcus*, *Lactococcus*, *Lactobacillus*, *Leuconostoc* และ *Streptococcus* (Yu et al., 2020)

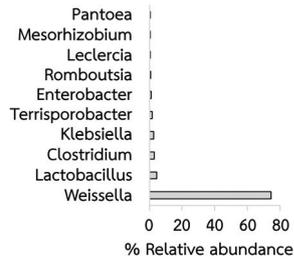


(ก) น้ำหมัก พด.2

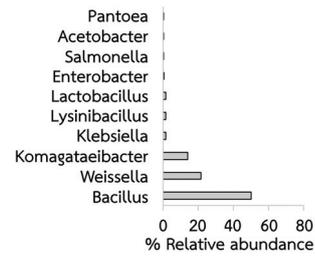


(ข) น้ำหมัก พด.7

รูปที่ 2 แบคทีเรีย 3 กลุ่มแรก ในระดับ Order ที่ตรวจพบในน้ำหมักชีวภาพจากเปลือกมะพร้าวน้ำหอมสด โดยใช้จุลินทรีย์ พด.2 และ พด.7 ณ วันที่ 30



(ก) น้ำหมัก พด.2



(ข) น้ำหมัก พด.7

รูปที่ 3 แบคทีเรีย 10 กลุ่มแรก ในระดับ Family ที่ตรวจพบในน้ำหมักชีวภาพจากเปลือกมะพร้าว น้ำหอมสด โดยใช้ จุลินทรีย์ พด.2 และ พด.7 ณ วันที่ 30

Bacillus sp. สามารถสร้างเอนไซม์โปรติเอส ย่อยสลายโปรตีนได้ (Song et al., 2023) และมีสารออกฤทธิ์ที่สามารถยับยั้งเชื้อรา *Rigidoporus microporus* ที่ก่อให้เกิดโรครากขาวในยางพารา (Sungtong et al., 2021) และย่อยสลายลิกนิน *Bacillus subtilis* ผลิตไลโปเปปไทด์ เป็นสารลดแรงตึงผิวที่สามารถยับยั้งเชื้อรา *Fusarium oxysporum* สาเหตุโรคน้ำของหัวมันฝรั่งได้ โดยการยับยั้งเกิดจากกลไกการทำลายเยื่อหุ้มเซลล์ของเชื้อราทำให้โปรตีนในเซลล์ของเชื้อราเปลี่ยนแปลง ส่งผลให้พืชมีความต้านทานต่อโรค และช่วยส่งเสริมการเจริญเติบโตของพืช (Hussain et al., 2023) *Bacillus subtilis* ยังสามารถย่อยสลายเซลลูโลส (Li et al., 2023) และลิกนิน ซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักของเปลือกมะพร้าวได้ แต่ประสิทธิภาพในการย่อยสลายลิกนินต่ำกว่าเชื้อรา (Grgas et al., 2023) น้ำหมัก พด.2 และ พด.7 ตรวจพบแบคทีเรียที่สร้างเอนไซม์ โปรติเอสย่อยสลายโปรตีน เซลลูเลส (Cellulase) ย่อยสลายเซลลูโลส ลิกนินเพอร์ออกซิเดส (Lignin Peroxidase) ย่อยสลายลิกนิน แทนนเนส (Tannase) ย่อยสลายแทนนิน สารต้านอนุมูลอิสระ (Antioxidant) และสารต่าง ๆ โดยมีค่าร้อยละความชุกชุมสัมพัทธ์ (Relative Abundance) ดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 แบคทีเรียที่ตรวจพบในน้ำหมัก และค่าร้อยละความชุกชุมสัมพัทธ์

แบคทีเรีย	บทบาท	ร้อยละความชุกชุมสัมพัทธ์	
		พด.2	พด.7
<i>Bacillus</i> sp.	จุลินทรีย์ผลิตเอนไซม์โปรติเอส (Hussain et al., 2023) และย่อยสลายลิกนิน (Grgas et al., 2023)	0.03620	0.50040
<i>Bacillus subtilis</i>	ผลิตเอนไซม์โปรติเอส (Hussain et al., 2023) เซลลูเลส (Li et al., 2023) และลิกนินเพอร์ออกซิเดส (Grgas et al., 2023)	0	0.00145
<i>Bacillus licheniformis</i>	จุลินทรีย์ผลิตเอนไซม์โปรติเอส (Hussain et al., 2023)	0	0.00010
<i>Bacillus nakamurai</i>		0	0.00151
<i>Bacillus tropicus</i>		0	0.07931
<i>Oricola cellulositytica</i>	สร้างเอนไซม์เซลลูเลส (Hameed et al., 2015)	0.00009	0
<i>Bacillus polymyxa</i>	สร้างเอนไซม์แทนเนส (Muhammad et al., 2017)	0	0.00019
<i>Lactobacillus acidophilus</i>	สร้างเอนไซม์แทนเนส (Aguilar-Zarate et al., 2014)	0.00018	0
<i>Lactobacillus plantarum</i>	สร้างเอนไซม์แทนเนส (Tomás-Cortázar et al., 2018)	0.00036	0

ตารางที่ 2 แบคทีเรียที่ตรวจพบในน้ำหมัก และค่าร้อยละความชุกชุมสัมพัทธ์ (ต่อ)

แบคทีเรีย	บทบาท	ร้อยละความชุกชุมสัมพัทธ์	
		พด.2	พด.7
<i>Klebsiella pneumoniae</i>	สร้างเอนไซม์เซลลูเลส (Muhammad et al., 2017) แทนเนส (Aguilar-Zarate et al., 2014) ผลิตสารควบคุมชีวภาพ 2-3-butanediol ลดการเหี่ยวเฉาของมะเขือเทศ (Kim et al., 2022) ส่งเสริมการเจริญของพืช ผ่านกระบวนการตรึงไนโตรเจน ละลายฟอสเฟต ผลิตแอมโมเนีย และไซโตโรฟอร์ (Liu et al., 2018)	0.02579	0.01664
<i>Cyanobacteria</i> sp.	ตรึงไนโตรเจน สร้างเอ็กโซพอลิแซ็กคาไรด์ (Ji et al., 2014)	0.00153	0.00019
<i>Lactobacillus helveticus</i>	ส่งเสริมการเจริญของจุลินทรีย์ สร้างสารต้านอนุมูลอิสระ กระตุ้นระบบภูมิคุ้มกัน ต้านจุลชีพ (Tomás-Cortázar et al., 2018)	0.00009	0.00002
<i>Weissella confusa</i>	สร้างเอ็กโซพอลิแซ็กคาไรด์ และสารต้านอนุมูลอิสระ (Liu et al., 2018)	0.52285	0.15924
<i>Bacillus megaterium</i>	สร้างเอนไซม์แทนเนส (Aguilar-Zarate et al., 2014) และเซลลูเลส (Li et al., 2023) ย่อยสลายฟอสเฟต (Rodríguez and Fraga, 1999)	0	0.00017

Klebsiella pneumoniae เป็นจุลินทรีย์ที่ช่วยการเจริญเติบโตของพืช จึงมีบทบาทสำคัญในด้านต่าง ๆ ได้แก่ กระบวนการตรึงไนโตรเจน การผลิตแอมโมเนีย และการละลายฟอสเฟต และผลิตสารไซโตโรฟอร์ (Siderophore) (Liu et al., 2018) ซึ่งเป็นสารที่ช่วยนำธาตุเหล็กเข้าสู่เซลล์จุลินทรีย์ภายใต้ภาวะที่ขาดแคลนหรือมีปริมาณเหล็กจำกัด โดยธาตุเหล็กเป็นแร่ธาตุที่มีความสำคัญสำหรับการเจริญของจุลินทรีย์ และยับยั้งการเจริญของจุลินทรีย์ก่อโรค เพิ่มความต้านทานให้กับพืช (Ji et al., 2014) จุลินทรีย์บ่งชี้ที่ตรวจพบในน้ำหมักที่เป็นเชื้อก่อโรคทางเดินอาหารหรืออาหารเป็นพิษในน้ำหมัก พด.2 และ พด.7 ดังตารางที่ 3 พบว่า น้ำหมัก พด.2 ตรวจพบเชื่อน้อยกว่าน้ำหมัก พด.7 และตรวจไม่พบ *Escherichia coli*, *Salmonella Typhi* และ *Serratia marcescens* ในน้ำหมักทั้ง พด.2 และ พด.7 อย่างไรก็ตามการตรวจวัดดีเอ็นเอ สามารถตรวจวัดได้ทั้งแบคทีเรียที่มีชีวิต และไม่มีชีวิต

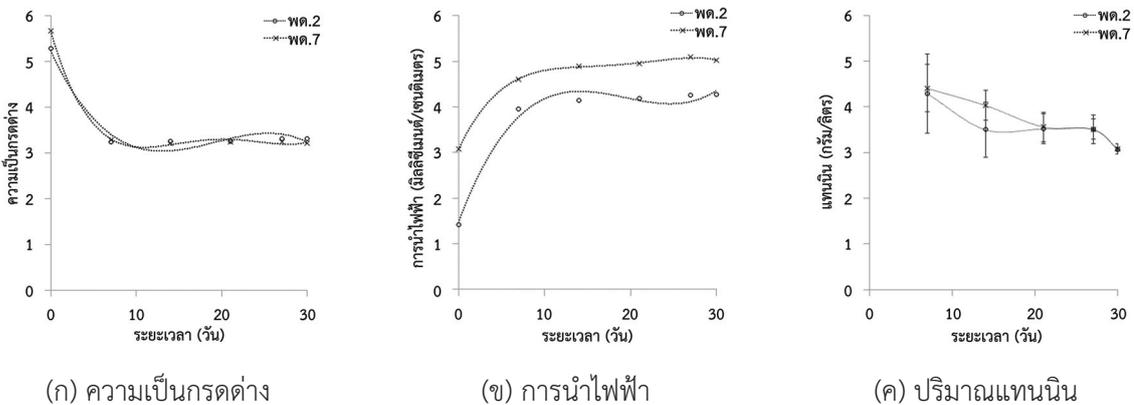
ตารางที่ 3 ร้อยละความชุกชุมสัมพัทธ์ของแบคทีเรียบ่งชี้ที่ก่อโรคและตรวจพบในน้ำหมัก

แบคทีเรียบ่งชี้	ร้อยละความชุกชุมสัมพัทธ์	
	พด.2	พด.7
<i>Salmonella Typhi</i>	0	0
<i>Salmonella bongori</i>	0.00027	0.00035
<i>Salmonella enterica</i>	0.00389	0.00347
<i>Staphylococcus aureus</i>	0	0.00010
<i>Clostridium perfringens</i>	0	0.00002
<i>Citrobacter freundii</i>	0	0.00002
<i>Escherichia coli</i>	0	0
<i>Serratia marcescens</i>	0	0

2. การเปลี่ยนแปลงขององค์ประกอบทางเคมีของน้ำหมัก

จากผลการศึกษาพบว่า การหมักทำให้เกิดสภาพเป็นกรดเนื่องจากการย่อยสลายสารอินทรีย์โมเลกุลใหญ่ ทำให้เกิดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ และกรดอินทรีย์ต่าง ๆ ค่าความเป็นกรดต่างจึงลดลง และเริ่มมีค่าคงที่ที่ 7 วัน ดังรูปที่ 4(ก) โดยที่ระยะเวลาหมัก 30 วัน น้ำหมัก พด.2 และพด.7 มีค่าความเป็นกรดต่างเท่ากับ 3.31 และ 3.29 ทำให้เกิดการละลายของแร่ธาตุต่าง ๆ และทำให้ค่าการนำไฟฟ้าเพิ่มขึ้น (รูปที่ 4(ข)) โดยค่าการนำไฟฟ้าของน้ำหมัก พด.2 มีค่าสูงกว่าน้ำหมัก พด.7 เล็กน้อย

ปริมาณแทนนินในน้ำหมักมีค่าสูงในวันที่ 7 ของการหมัก และมีแนวโน้มลดลง ดังรูปที่ 4(ค) แสดงให้เห็นว่าเกิดการย่อยสลายของแทนนินที่ปล่อยออกจากเปลือกมะพร้าวน้ำหอมได้ เนื่องจากแทนนินเป็นสารประกอบโพลีฟีนอล (Polyphenolic Compound) ซึ่งสามารถเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนร่วมกับโปรตีน และโมเลกุลขนาดใหญ่ เช่น เซลลูโลสได้ แทนนินจึงย่อยสลายได้ยากต่ออาศัยเอนไซม์แทนเนส ผลิตโดยจุลินทรีย์ ซึ่งสามารถย่อยไฮโดรไลซ์แทนนิน (Hydrolysable Tannin) คอนเดนซ์แทนนิน และกรดแกลลิก (Gallic Acid) ไปเป็นโมเลกุลที่มีขนาดเล็กลง เช่น ฟีนอล (Phenol) และน้ำตาลกลูโคส (Glucose) (Yang et al., 2023) นอกจากนี้เชื้อราและยีสต์สามารถผลิตเอนไซม์แทนเนสได้ กลุ่มราเส้นใย (Filamentous Fungi) ได้แก่ กลุ่ม *Penicillium* sp. และ *Aspergillus* sp. สามารถใช้ แกลโลแทนนิน (Gallotannin) และกรดแกลลิก เป็นแหล่งคาร์บอนได้ (Saxena et al., 1995) ซึ่งจากการตรวจวัด ดีเอ็นเอพบว่า มีแบคทีเรียที่ย่อยสลายแทนนินได้ (ตารางที่ 2) สอดคล้องกับการลดลงของปริมาณแทนนินตามระยะเวลาหมัก อย่างไรก็ตาม ปริมาณแทนนินในน้ำหมักอาจขึ้นกับความชื้นของวัสดุหมักได้ โดยการศึกษาการอบแห้งดอกโสน พบว่าดอกโสนอบแห้งมีปริมาณฟีนอลิกทั้งหมดคงเหลือร้อยละ 17 - 24 เมื่อเทียบกับดอกโสนสด (Lioatrakoon et al., 2018) นอกจากนี้แทนนินเป็นสารที่ช่วยยับยั้งจุลินทรีย์ก่อโรค มีบทบาทในการต้านโรคพืช แต่หากมีปริมาณมากทำให้เกิดการตกตะกอนของโปรตีน (Adamczyk et al., 2008) ส่งผลต่อการเจริญเติบโตของไนโตรเจน การเจริญของจุลินทรีย์ และอาจส่งผลต่อการเจริญเติบโตของพืช และมีรายงานว่าที่ปริมาณแทนนิน 300 - 1,500 มิลลิกรัมต่อลิตร มีผลต่อการงอกของเมล็ดกัญชาได้ (Jantassana and Maniin, 2024)

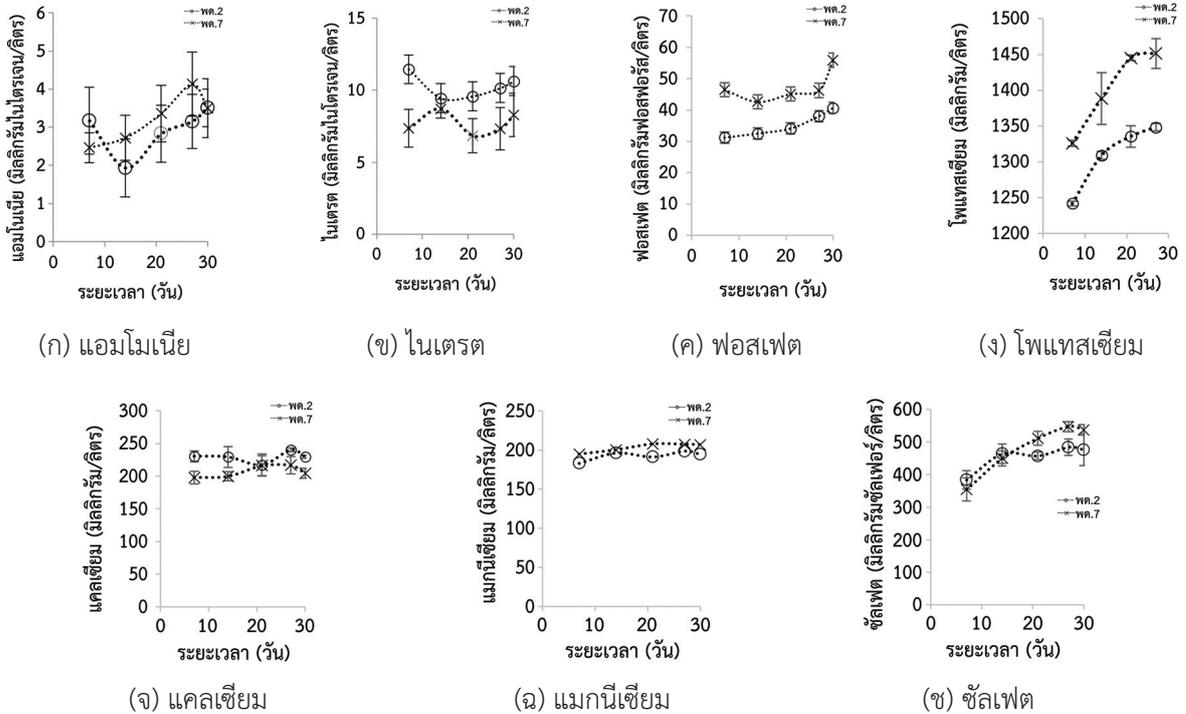


รูปที่ 4 การเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบของตัวอย่างน้ำหมักชีวภาพจากเปลือกมะพร้าว น้ำหอมสด โดยใช้จุลินทรีย์ พด.2 และ พด.7 ที่ระยะเวลาต่าง ๆ

ธาตุอาหารหลักพืช ได้แก่ ไนโตรเจน ฟอสฟอรัส และโพแทสเซียม ธาตุอาหารรอง ได้แก่ แคลเซียม แมกนีเซียม และซัลเฟอร์ โดยรูปของไนโตรเจนที่พืชสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ ได้แก่ แอมโมเนียม และไนเตรต เนื่องจากการหมักทำในถังพลาสติก 60 ลิตร และไม่ได้เติมอากาศ ทำให้เกิดสภาวะไร้ออกซิเจนขึ้นได้ ดังนั้นกระบวนการย่อยสลายอินทรีย์ไนโตรเจนไปเป็นแอมโมเนีย จึงเกิดจากกระบวนการไฮโดรไลซิสของโปรตีนโดยเอนไซม์ และกระบวนการสร้างกรด (Acidogenesis) เกิดกรดไขมัน (Fatty Acid) และแอมโมเนีย (Ramsay and Pullammanappallil, 2001)

ปริมาณแอมโมเนียในน้ำหมักต่ำ และเพิ่มขึ้นเล็กน้อยในระหว่างการหมัก (รูปที่ 5(ก)) ส่วนปริมาณไนเตรตมีมากกว่าแอมโมเนีย และไม่ค่อยเปลี่ยนแปลงมากนักในระหว่างการหมัก (รูปที่ 5(ข)) การเกิดกรดอินทรีย์ทำให้ค่าความ

เป็นกรดต่างของน้ำหมักต่ำ เกิดการละลายของธาตุต่าง ๆ รวมทั้งธาตุอาหารหลักของพืช เช่น ฟอสเฟต และโพแทสเซียม ทำให้มีปริมาณเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาการหมักดังรูปที่ 5(ค) และ 5(ง) การใช้ พด.7 ทำให้น้ำหมักมีปริมาณฟอสเฟต และโพแทสเซียมสูงกว่าการใช้ พด.2 เนื่องจากความเป็นกรดของน้ำหมัก พด.7 มากกว่า พด.2 และในน้ำหมัก พด.7 พบแบคทีเรีย 2 สปีชีส์ที่ละลายฟอสเฟต และย่อยสลายเซลลูโลสได้ ได้แก่ *Klebsiella pneumoniae* และ *Bacillus megaterium*



รูปที่ 5 การเปลี่ยนแปลงของธาตุอาหารในน้ำหมักที่ระยะเวลาต่าง ๆ

ปริมาณแคลเซียมและแมกนีเซียม ไม่ค่อยเปลี่ยนแปลงมากนักในระหว่างการหมัก (รูปที่ 5(จ) และ (ฉ)) ส่วนซัลเฟตมีปริมาณเพิ่มขึ้นตามระยะเวลา โดยน้ำหมัก พด.7 มีปริมาณแมกนีเซียมและซัลเฟตสูงกว่าน้ำหมัก พด.2 เมื่อเปรียบเทียบปริมาณธาตุอาหารของน้ำหมักจากเปลือกมะพร้าว น้ำหอม พบว่าน้ำหมัก พด.7 มีค่าสูงกว่างานวิจัยอื่น ๆ และสูตรอาหารสำหรับพืชไร้ดิน ยกเว้นไนโตรเจนที่มีค่าต่ำกว่า ส่วนน้ำหมัก พด.2 มีปริมาณฟอสฟอรัส และโพแทสเซียม มีค่าใกล้เคียงกับน้ำหมักจากกรรสุกร ดังตารางที่ 4 ค่าไนโตรเจนของงานวิจัยนี้เป็นผลรวมของแอมโมเนียและไนเตรต จึงมีค่าต่ำ ส่วนงานวิจัยอื่น ๆ เป็นค่าไนโตรเจนทั้งหมด และน้ำหมักชีวภาพที่มีส่วนผสมของสัตว์มีปริมาณไนโตรเจนสูงกว่า น้ำหมักที่ได้จากพืช โพแทสเซียมของน้ำหมักเปลือกมะพร้าวมีปริมาณสูงที่สุดเมื่อเทียบกับธาตุอาหารอื่น ๆ เนื่องจากองค์ประกอบทางเคมีของเปลือกมะพร้าว น้ำหอม ทั้งนี้มะพร้าว น้ำหอม 1 ทะลาย มีธาตุโพแทสเซียมมากที่สุด และสัดส่วนปริมาณธาตุอาหารส่วนใหญ่สะสมอยู่ในส่วนของเปลือกมะพร้าวมากกว่าร้อยละ 50 (Saradhuldhath et al., 2014)

ตารางที่ 4 ปริมาณธาตุอาหารของน้ำหมักชีวภาพต่าง ๆ และสูตรอาหารสำหรับพืชไร้ดิน

ประเภท	ไนโตรเจน* (ร้อยละ)	ฟอสฟอรัส (ร้อยละ)	โพแทสเซียม (ร้อยละ)	แคลเซียม (ร้อยละ)	แมกนีเซียม (ร้อยละ)	ซัลเฟอร์ (ร้อยละ)	อ้างอิง
น้ำหมักเปลือก มะพร้าว พด.2	0.001	0.004	0.135	0.023	0.019	0.047	งานวิจัยนี้
น้ำหมักเปลือก มะพร้าว พด.7	0.001	0.006	0.144	0.020	0.021	0.057	

ตารางที่ 4 ปริมาณธาตุอาหารของน้ำหมักชีวภาพต่าง ๆ และสูตรอาหารสำหรับพืชไร้ดิน (ต่อ)

ประเภท	ไนโตรเจน* (ร้อยละ)	ฟอสฟอรัส (ร้อยละ)	โพแทสเซียม (ร้อยละ)	แคลเซียม (ร้อยละ)	แมกนีเซียม (ร้อยละ)	ซัลเฟอร์ (ร้อยละ)	อ้างอิง
น้ำหมักผลไม้	0.11	0.002	0.112				(Ruengdechawiw at et al., 2022)
น้ำหมักนมสด	0.23	0.002	0.093				
น้ำหมักหน่อกล้วย	0.04	0.0004	0.107				
น้ำหมักกรรสุกร	0.42	0.004	0.103				(Wattana et al., 2022)
สารละลาย Hoagland & Arnon	0.020	0.003	0.023	0.016	0.0034	0.0064	(Ali Al Meselmani, 2023)
สารละลาย Hewitt	0.016	0.004	0.015	0.016	0.0036	0.0048	

หมายเหตุ * ค่าไนโตรเจนเป็นผลรวมของแอมโมเนีย และไนเตรต ยกเว้นน้ำหมักผลไม้ น้ำหมักนมสด น้ำหมักหน่อกล้วย น้ำหมักกรรสุกร เป็นค่าไนโตรเจนทั้งหมด

สรุปผลการวิจัย

การใช้หัวเชื้อตั้งต้น พด.2 และ พด.7 มีผลทำให้จุลินทรีย์ในน้ำหมักมีความแตกต่างกัน โดยที่จุลินทรีย์ในน้ำหมัก พด.2 ส่วนใหญ่พบ Lactobacillales ถึงร้อยละ 80 ส่วนในน้ำหมัก พด.7 ส่วนใหญ่พบ Bacillales ร้อยละ 53 ทั้งนี้เกิดการผลิตกรดอินทรีย์ในน้ำหมัก ทำให้ค่าความเป็นกรดต่างต่ำ ส่งผลต่อธาตุอาหารต่าง ๆ และแทนนินที่ปล่อยออกมา น้ำหมักจากเปลือกมะพร้าว น้ำหอมมีปริมาณโพแทสเซียมสูงที่สุด รวมทั้งมีจุลินทรีย์ที่เป็นประโยชน์ในการย่อยสลาย และเป็นประโยชน์ต่อพืช มีแนวโน้มช่วยปรับโครงสร้างดินได้ น้ำหมักมีสารแทนนิน ซึ่งเป็นสารที่ช่วยยับยั้งจุลินทรีย์ก่อโรค แต่มีปริมาณไนโตรเจนที่พืชสามารถนำไปใช้ได้ต่ำ จึงไม่ใช่แหล่งให้ไนโตรเจนกับพืชโดยตรง ต้องใช้ร่วมกับปุ๋ยไนโตรเจน และอาจปรับให้มีองค์ประกอบทางเคมีให้เหมาะสมเพื่อนำมาใช้สำหรับการใช้ปลูกพืชไร้ดิน

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณ แหล่งทุนจากสำนักงานคณะกรรมการส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัย และนวัตกรรม ทุนสนับสนุนด้านวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม ผ่านแผนงานวิจัยเพื่อการพัฒนาที่ยั่งยืนและครอบคลุมทั่วถึงบนฐานการพัฒนาเชิงพื้นที่ และสร้างผลกระทบต่อชุมชน มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี รหัส FD(14)6700297

References

- Adamczyk, B., Kitunen, V. and Smolander, A. (2008). Protein Precipitation by Tannins in Soil Organic Horizon and Vegetation in Relation to Tree Species. *Biology and Fertility of Soils*, 45, 55-64. <https://doi.org/10.1007/s00374-008-0308-0>
- Aguilar-Zarate, P., Cruz-Hernandez, M.A., Montanez, J.C., Belmares-Cerda, R.E. and Aguilar, C.N. (2014). Bacterial Tannases: Production, Properties and Applications Tanasas Bacterianas: Produccion, Propiedades Y Aplicaciones. *Revista Mexicana de Ingenieria Quimica*, 13(1), 63-74. <https://www.redalyc.org/pdf/620/62031166005.pdf>

- Ali Al Meselmani M. (2023). Nutrient Solution for Hydroponics. In Metin Turan, Sanem Argin, Ertan Yildirim and Adem Güneş (Eds), *Recent Research and Advances in Soilless Culture*. (pp. 1-21).
- Aroonrungsikul, C., Rattanakritakul, C., Korpraditskul R. and Romphopak T. (2004). *Bio-Fermented Juice Quality and Components*. Proceedings of the 42nd Kasetsart University Annual Conference (pp. 481-488). Bangkok, Thailand (in Thai)
- Christensen, L.F., García-Béjar, B., Bang-Berthelsen, C.H. and Hansen, E.B. (2022). Extracellular Microbial Proteases with Specificity for Plant Proteins in Food Fermentation. *International Journal of Food Microbiology*, 381, 109889. <https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2022.109889>
- Costa, O.Y.A., Raaijmakers, J.M. and Kuramae, E.E. (2018). Microbial Extracellular Polymeric Substances: Ecological Function and Impact on Soil Aggregation. *Frontier in Microbiology*, 9, 1636. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2018.01636>
- Grgas, D., Rukavina, M., Bešlo, D., Štefanac, T., Crnek, V., Šikić, T., Habuda-Stanić, M. and Landeka Dragičević, T. (2023). The Bacterial Degradation of Lignin-A Review. *Water*, 15(7), 1272. <https://doi.org/10.3390/w15071272>
- Hameed, A., Shahina, M., Lai, W.A., Lin, S.Y., Young, L.S., Liu, Y.C., Hsu, Y.H. and Young, C.C. (2015). *Oricola cellulositytica* gen. nov., sp. nov., A Cellulose-degrading Bacterium of the Family *Phyllobacteriaceae* Isolated from Surface Seashore Water, and Emended Descriptions of *Mesorhizobium loti* and *Phyllobacterium myrsinacearum*. *Antonie Van Leeuwenhoek*, 107(3), 759-771. <https://doi.org/10.1007/s10482-014-0370-6>
- Hussain, T., Khan, A.A. and Mohamed, H.I. (2023). Metabolites Composition of *Bacillus subtilis* Hussain T-AMU Determined by LC-MS and Their Effect on Fusarium Dry Rot of Potato Seed Tuber. *Phyton-International Journal of Experimental Botany*, 92(3), 783-799. <https://doi.org/10.32604/phyton.2022.026045>
- Jantassana, C. and Maniin, P. (2024). Effect of Tannin Concentrate on Seed Germination of Cannabis RSU 01. *Journal of Science and Technology*, 13(2), 1-9. (in Thai) <http://ph03.tci-thaijo.org/index.php/JSTKU/article/view/3202/2470> (in Thai)
- Ji, S.H., Gururani, M.A. and Chun, S.-C. (2014). Isolation and Characterization of Plant Growth Promoting Endophytic Diazotrophic Bacteria from Korean Rice Cultivars. *Microbiological Research*, 169(1), 83-98. <https://doi.org/10.1016/j.micres.2013.06.003>
- Kim, B., Park, A.R., Song, C.W., Song, H. and Kim, J.-C. (2022). Biological Control Efficacy and Action Mechanism of *Klebsiella pneumoniae* JCK-2201 Producing Meso-2,3- Butanediol Against Tomato Bacterial Wilt. *Frontier in Microbiology*, 13, 914589. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2022.914589>
- Kusuwanwichid, S., Laptrakoon, T., Tripetchkul, S. and Akeprathumchai, S. (2017). Utilization of Compost Tea from Coir Pith Compost in Parachute Rice Transplantation. In The 55th Kasetsart University Annual Conference. (pp. 919-926). Bangkok, Kasetsart University (in Thai)
- Land Development Department. (2025, 10 January). *Wonder PD*. https://www.ddd.go.th/menu_5wonder/ (in Thai)
- Li, H., Zhang, M., Zhang, Y., Xu, X., Zhao, Y., Jiang, X., Zhang, R. and Gui, Z. (2023). Characterization of Cellulose-Degrading Bacteria Isolated from Silkworm Excrement and Optimization of Its Cellulase Production. *Polymers*, 15(20), 4142. <https://doi.org/10.3390/polym15204142>

- Liaotrakoon, W., Jirasatitanusorn, T., Aemnin, N. and Liaotrakoon, V. (2018). Effect of Drying Temperatures on Drying Rate, Physical and Antioxidative Properties of *Sesbania javanica* Mig. Flowers. *RMUTI JOURNAL Science and Technology*, 11(3), 57-69. <https://ph01.tci-thaijo.org/index.php/rmutijo/article/view/167535/120747> (in Thai)
- Liu, D., Chen, L., Zhu, X., Wang, Y., Xuan, Y., Liu X., Chen, L. and Duan, Y. (2018). *Klebsiella pneumoniae* SnebYK Mediates Resistance Against *Heterodera glycines* and Promotes Soybean Growth. *Frontier in Microbiology*, 9, 1134. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2018.01134>
- Muhammad, A., Fang, Y., Hou, Y. and Shi, Z. (2017). The Gut Entomotype of Red Palm Weevil *Rhynchophorus ferrugineus* Olivier (Coleoptera: Dryophthoridae) and Their Effect on Host Nutrition Metabolism. *Frontiers in Microbiology*, 8, 1-15. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2017.02291>
- ONT. (2022, 3 May). *16S Barcoding Kit*. <https://nanoporetech.com>
- Ramsay, I.R. and Pullammanappallil, P.C. (2001). Protein Degradation During Anaerobic Wastewater Treatment: Derivation of Stoichiometry. *Biodegradation*, 12, 247-257. <https://doi.org/10.1023/A:1013116728817>
- Rattanaporn, K. (2019). *Improvement of the Green Coconut Fiber Properties by Cellulase Enzyme for Yarn Production* [Master's Thesis]. Rajamangala University of Technology Thanyaburi. <http://www.repository.rmutt.ac.th/xmlui/handle/123456789/3848> (in Thai)
- Refilda, Yasmine, S. and Zilfa. (2019). Characterization and Utilization of Young Coconut Waste (*Cocos nucifera* L) for Manufacturing Fermented Plant Extracts having Potential as Natural Fertilizer and Pesticide. *Research of Journal Chemistry and Environment*, 23(2), 23-30. <http://repo.unand.ac.id/28383/1/BP-RFD-01.pdf>
- Rodríguez, H. and Fraga, R. (1999). Phosphate Solubilizing Bacteria and Their Role in Plant Growth Promotion. *Biotechnology Advances*, 17(4-5), 319-339. [https://doi.org/10.1016/S0734-9750\(99\)00014-2](https://doi.org/10.1016/S0734-9750(99)00014-2)
- Ruengdechawiwat, S., Sanawong, P. and Thuanrod, O. (2022). Fermented Bioextracts Natural Products to Enhance Growth and Yield of RD41 Rice (*Oryza sativa* L.). *Science and Technology Nakhon Sawan Rajabhat University Journal*, 14(19), 1-11. <https://ph02.tci-thaijo.org/index.php/JSTNSRU/article/view/244120/166904> (in Thai)
- Saradhuldhat, P., Choorueng, M., Abdullakasim, S. and Phavaphutanon, L. (2014). Macro-Nutrient Content in Aromatic Coconut Produce. *Khon Kaen Agriculture Journal*, 42, 192-197. https://ag2.kku.ac.th/kaj/PDF.cfm?filename=F_037.pdf&id=1565&keeptrack=8 (in Thai)
- Saxena, R.K., Sharmila, P. and Singh, V.P. (1995). *Microbial Degradation of Tannins*. *Progress in Industrial Microbiology*, 32, 259-270. [https://doi.org/10.1016/S0079-6352\(06\)80038-X](https://doi.org/10.1016/S0079-6352(06)80038-X)
- Simionescu, N. and Petrovici, A.-R. (2024). Enhancing the Antioxidant Potential of *Weissella confusa* PP29 Probiotic Media through Incorporation of *Hibiscus sabdariffa* L. Anthocyanin Extract. *Antioxidants*, 13(2), 165. <https://doi.org/10.3390/antiox13020165>
- Sirisangsawang, R. and Phetyim, N. (2023). Optimization of Tannin Extraction from Coconut Coir through Response Surface Methodology. *Heliyon*, 9(2), e13377. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e13377>
- Song, P., Zhang, X., Wang, S., Xu, W., Wang, F., Fu, R. and Wei, F. (2023). Microbial Proteases and Their Applications. *Frontier in Microbiology*, 14, 1236368. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2023.1236368>

- Sukkhee, N., Vinitnantharat, S., Pratinthong, N., Intarapong, P., Singtosri, S. and Manakij, A. (2024). Organic Plant Pot from Discarded Aromatic Coconut and Flooring Materials from Pig House. *Science and Technology Nakhon Sawan Rajabhat University Journal*, 16(24), 42-55. <https://ph02.tci-thaijo.org/index.php/JSTNSRU/article/view/253448/171305> (in Thai)
- Sungton, S., Pengnoo, A. and Boonyapipat, P. (2021). Efficacy of *Bacillus* spp. in Controlling Soilborne Pathogen *Rigidoporus microporus* under Control Conditions. *Songklanakarin Journal of Plant Science*, 8(1), 34-43. <https://www.sjplantscience.com/index.php/ojs/article/view/48/23> (in Thai)
- Tomás-Cortázar, J., Plaza-Vinuesa, L., de las Rivas, B., Lavin, J.L., Barriales, D., Abecia, L., Mancheno, J.M., Aransay, A.M., Munoz, R., Anguita, J. and Rodriguez, H. (2018). Identification of a Highly Active Tannase Enzyme from the Oral Pathogen *Fusobacterium nucleatum* subsp. *Polymorphum*. *Microbial Cell Factories*, 17(33), <https://doi.org/10.1186/s12934-018-0880-4>
- Vaithanomsat, P., Apiwatanapiwat, W., Chumchuent, N., Kongtud, W. and Sundhrarajun, S. (2011). The Potential of Coconut Husk Utilization for Bioethanol Production. *Kasetsart Journal - Natural Science*, 45(1), 159-164.
- Wattana, K., Pankrun, R. and Sriplai, A. (2022). The Effect of Various Fermented Bio-extract on Yield of Thai Striped Eggplant (*Solanum melongena* L.) Variety Nang Pha Ya, *Agriculture and Technology Journal*, 3(2), 76-85. <https://li01.tci-thaijo.org/index.php/atj/article/view/255339/177895> (in Thai)
- Yang, F., Chen, C., Ni, D., Yang, Y., Tian, J., Li, Y., Chen, S., Ye, X. and Wang, L. (2023). Effects of Fermentation on Bioactivity and the Composition of Polyphenols Contained in Polyphenol-Rich Foods: A Review. *Foods*, 12(17), 3315. <https://doi.org/10.3390/foods12173315>
- Yu, A.O., Leveau, J.H.J. and Marco, M.L. (2020). Abundance, Diversity and Plant-Specific Adaptations of Plant-associated Lactic Acid Bacteria. *Environmental Microbiology Reports*, 12(1), 16-29. <https://doi.org/10.1111/1758-2229.12794>
- Zhu, M., Xu, D., Liao, C., Zhang, T., Zhou, B., Wang, K., Li, P., Cheng, Z. and Chen, C. (2024). Microbial Dynamics and Pathogen Control During Fermentation of Distiller Grains: Effects of Fermentation Time on Feed Safety. *International Journal of Molecular Sciences*, 25(21), 11463. <https://doi.org/10.3390/ijms252111463>

สมบัติทางวิศวกรรมและโครงสร้างจุลภาคของมอร์ตาร์มวลเบาเซลลูล่าจากเศษแก้วผสมเถ้าลอยกระตุ้นด้วยต่าง

Engineering and Microstructure Properties of Cellular Lightweight Mortar from Recycled Glass mixed with Alkali-activated Fly Ash

ณัฐพล ฐาตุจิรวงศ์กุล¹ คำภี จิตชัยภูมิ^{1*} รัชกฤษ เมธาธิรัตน์¹ เสริมศักดิ์ ตียะแสงทอง¹ ปิยธิดา อยู่สุข¹ และ
เชิดศักดิ์ สุขศิริพัฒน์พงศ์¹

Natthapon Thatuchirangkul¹ Khamphree Jitchaiyaphum¹ Rutchakit Maythathirut¹

Sermsak Tiyasangthong¹ Piyathida Yoosuk¹ and Cherdasak Suksiripattanapong¹

Received: February 12, 2025; Revised: May 16, 2025; Accepted: May 19, 2025

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ในการนำเศษแก้วบดละเอียด (RG) ที่เป็นผลพลอยได้จากกระบวนการผลิตขวดแก้วและเถ้าลอยถ่านหิน (FA) ที่เป็นผลพลอยได้ (by-product) ในการเผาถ่านหินจากกระบวนการผลิตกระแสไฟฟ้า นำมาผลิตเป็นมอร์ตาร์มวลเบาเซลลูล่าจากเศษแก้วบดละเอียดผสมเถ้าลอยกระตุ้นด้วยต่าง โดยศึกษาอิทธิพลความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ที่ระดับ 1 3 5 และ 7 โมลาร์ อัตราส่วนสารกระตุ้นต่อเถ้าลอย (L/FA) เท่ากับ 0.6 0.7 และ 0.8 ด้วยปริมาณฟองอากาศ (Ac) ร้อยละ 1 3 และ 5 โดยน้ำหนักของ FA ที่มีต่อสมบัติทางวิศวกรรมและโครงสร้างจุลภาค (Microstructure) ของตัวอย่างมอร์ตาร์มวลเบาเซลลูล่าที่อายุบ่ม 7 วัน ผลการทดสอบพบว่าหน่วยน้ำหนักต่ำสุดของก้อนตัวอย่างเมื่อความเข้มข้นของ NaOH เท่ากับ 1 โมลาร์ อัตราส่วน L/FA เท่ากับ 0.8 และปริมาณ Ac ร้อยละ 5 โดยน้ำหนักของ FA แห่งตัวอย่างให้กำลังรับแรงอัดสูงสุดเท่ากับ 23.8 MPa เมื่อความเข้มข้นของ NaOH เท่ากับ 7 โมลาร์ อัตราส่วน L/FA เท่ากับ 0.6 และปริมาณ Ac ร้อยละ 0 เมื่อเปรียบเทียบกับมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม (มอก.) พบว่าอัตราส่วนที่เหมาะสมสำหรับบล็อกมวลเบาเติมฟองอากาศชนิด C10 คือความเข้มข้นของ NaOH เท่ากับ 1 โมลาร์ อัตราส่วน L/FA เท่ากับ 0.6 และปริมาณ Ac ร้อยละ 3 โดยน้ำหนักของ FA ขณะที่อัตราส่วนที่เหมาะสมสำหรับบล็อกมวลเบาแบบเติมฟองอากาศชนิด C12 คือความเข้มข้นของ NaOH เท่ากับ 1 โมลาร์ อัตราส่วนของ L/FA เท่ากับ 0.6 และปริมาณ Ac ร้อยละ 1 โดยน้ำหนักของ FA โครงสร้างทางจุลภาคแสดงให้เห็นว่าความเข้มข้นของสารละลาย NaOH และอัตราส่วน L/FA ที่เพิ่มขึ้นทำให้ผลผลิตแคลเซียมอะลูมิโนซิลิเกตไฮเดรต (C-A-S-H) อยู่ร่วมกับจีโอโพลิเมอร์เจล (Sodium Aluminosilicate Hydrate, NASH) เพิ่มขึ้น ในขณะที่ผลิตภัณฑ์จีโอโพลิเมอร์ไรเซชันลดลงตามปริมาณโพลีเมอร์ที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากปริมาณโพลีเมอร์ที่เพิ่มขึ้นในส่วนผสมมีคุณสมบัติเป็นสารลดแรงตึงผิว และสารพลาสติกเคลือบผิว

คำสำคัญ : เศษแก้ว; มอร์ตาร์มวลเบาเซลลูล่า; บล็อกมวลเบา

¹ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน

¹ Faculty of Engineering and Technology, Rajamangala University of Technology Isan

* Corresponding Author, Tel. 08 5492 2456, E - mail: khamphreej@yahoo.com

Abstract

This research aimed to investigate the use of the ground recycled glass (RG), a by-product from glass bottle process and the coal fly ash (FA), a by-product of the electricity generation process through coal combustion. These materials were used to produce the cellular lightweight mortar from the ground glass waste mixed with alkali-activated FA. The effect of sodium hydroxide (NaOH) solution concentration of 1, 3, 5, and 7 M, liquid alkaline activator (L) content to FA ratio of 0.6, 0.7, and 0.8 with the air foam content (Ac) of 1, 3, and 5 % by weight of FA on 7 days cured age to the engineering and microstructure properties were evaluated. The lowest unit weight of the samples was observed with a NaOH concentration of 1 molar, with L/FA ratio of 0.8 and the Ac content were 5 % by weight of FA. In contrast, the maximum compressive strength of the samples was 23.8 MPa with NaOH concentration of 7 molars, L/FA ratio of 0.6 and the Ac content was 0 %. When compared to Thai Industrial Standards (TIS), the optimal ratio for C10-type lightweight blocks was a NaOH concentration of 1 molar, L/FA ratio of 0.6 and the Ac content were 3 % by weight of FA. Meanwhile, the optimal ratio for C12-type lightweight blocks was a NaOH concentration of 1 molar, L/FA ratio of 0.6 and the Ac content was 1 % by weight of FA. The microstructure analysis revealed that increasing the NaOH solution concentration and L/FA ratio resulted in higher production of calcium aluminosilicate hydrate (C-A-S-H) coexisting with the geopolymer gel (NASH). However, the geopolymerization products decreased with the air foam content increased. This is attributed to the foam acting as a surfactant and plasticizer coating the particle surfaces.

Keywords: Recycled Glass; Cellular Lightweight Mortar; Lightweight Block

บทนำ

เศษแก้วเหลือทิ้งจำนวนมากจากกระบวนการผลิตขวดแก้วทั่วโลกมีปริมาณเพิ่มขึ้นทุกปี เฉพาะที่ประเทศออสเตรเลีย มีปริมาณเศษแก้วเหลือทิ้งประมาณ 1,000,000 ตันต่อปี ถูกนำไปทิ้งเป็นวัสดุฝังกลบดิน (Arulrajah et al., 2016) ในขณะที่ประเทศไทยมีเศษขวดแก้วที่เหลือทิ้งกลายเป็นขยะประมาณ 40,000 ตันต่อปี (Suntharanurak and Tonayopas, 2013) โดยไม่ได้นำกลับมารีไซเคิล (Recycle) ในกระบวนการผลิตเป็นแก้วใหม่ มีงานวิจัยจำนวนมาก ได้ทำการศึกษาการนำเอาเศษแก้วที่เป็นผลพลอยได้จากการบดขวดแก้วและผลิตภัณฑ์แก้วอื่น ๆ มาใช้ทำเป็นวัสดุ ก่อสร้างต่าง ๆ เช่น คอนกรีต (Ali and Al-Tersawy, 2012) ถนนคอนกรีต (Arulrajah et al., 2013; Grubb et al., 2006; Ooi et al., 2008; Imteaz et al., 2012) ทางเท้าคอนกรีต (Arulrajah et al., 2012) และคอนกรีตบล็อก (Arulrajah et al., 2016) อย่างไรก็ตาม กระบวนการผลิตวัสดุก่อสร้างดังกล่าวใช้ปูนซีเมนต์เป็นหลัก เป็นที่ทราบกันดีว่า กระบวนการผลิตปูนซีเมนต์นั้นได้ปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ในปริมาณมาก ซึ่งส่งผลเสียต่อสภาพแวดล้อม อันเป็นสาเหตุหลักของการเกิดภาวะโลกร้อน (Greenhouse Effect) ขึ้นในปัจจุบัน (Mishra et al., 2023)

เถ้าลอยถ่านหิน (Coal Fly Ash; FA) เป็นผลพลอยได้จากกระบวนการผลิตกระแสไฟฟ้าโดยการเผาถ่านหิน ซึ่งมีธาตุ Si และ Al ในปริมาณสูง Palomo et al. (1999) พบว่าเถ้าลอยชนิดต่าง ๆ ที่ถูกกระตุ้นด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ความเข้มข้น 8 โมลาร์ ถึง 12 โมลาร์ และบ่มที่อุณหภูมิ 85 °C เป็นเวลานาน 24 ชั่วโมง สามารถทำให้ได้เถ้าลอยจีโอโพลีเมอร์ที่มีกำลังรับแรงอัดประมาณ 35 MPa ถึง 40 MPa และประมาณ 90 MPa หากเติมโซเดียมซิลิเกต (Na_2SiO_3) ลงในสารละลาย NaOH ส่วน Xie and Yunping (2001) พบว่ากระบวนการแข็งตัวของเถ้าลอยจีโอโพลีเมอร์ที่ถูกกระตุ้นด้วย Na_2SiO_3 มีสาเหตุหลักมาจากผลิตภัณฑ์ทำปฏิกิริยาที่มีลักษณะคล้ายเจล

ซึ่งช่วยยืดอายุการใช้งานได้ยาวนาน จากงานวิจัยในอดีต Arulrajah et al. (2012) ได้ศึกษากำลักรับแรงอัดและโครงสร้างจุลภาคของเศษแก้วผสมเถ้าลอยจีโอโพลีเมอร์สำหรับวัสดุก่อสร้างคาร์บอนต่ำ พบว่าอัตราส่วน Na_2SiO_3 ต่อ NaOH เท่ากับ 70:30 และอัตราส่วนของสารกระตุ้นต่อเถ้าลอยเท่ากับ 0.625 เป็นส่วนผสมที่ให้ค่ากำลังรับแรงอัดสูงสุดประมาณ 17 MPa ซึ่งผ่านเกณฑ์มาตรฐานในการผลิตบล็อกก่อสร้าง Suksiripattanapong et al. (2015) ได้พัฒนาบล็อกมวลเบาระบบเซลลูโลสจากตะกอนประปา เถ้าลอย จีโอโพลีเมอร์ ผลการศึกษาพบว่าส่วนผสมที่เหมาะสมคืออัตราส่วน Na_2SiO_3 ต่อ NaOH เท่ากับ 80:20 และอัตราส่วน L:FA เท่ากับขีดจำกัดเหลว (Liquid Limit) พอดีสำหรับทุกอุณหภูมิและระยะเวลาบ่ม ซึ่งอุณหภูมิที่ 65 °C เป็นอุณหภูมิที่เหมาะสมในการผลิตจีโอโพลีเมอร์ที่ทำจากตะกอนประปาผสมเถ้าลอย โดยบ่มเป็นเวลานาน 72 ชั่วโมง

วัตถุประสงค์ของการศึกษา

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการนำเอาเศษแก้วซึ่งเป็นผลพลอยได้ (By Product) จากโรงงานอุตสาหกรรมมาบดให้ละเอียดทำเป็นมวลรวมผสมกับเถ้าลอยถ่านหินซึ่งเป็นผลพลอยได้จากการผลิตกระแสไฟฟ้ามาทำเป็นมอร์ตาร์มวลเบาเซลลูโลสกระตุ้นด้วยต่าง NaOH โดยศึกษาอิทธิพลความเข้มข้นของ NaOH อัตราส่วนสารกระตุ้นต่อเถ้าลอยถ่านหิน และปริมาณฟองอากาศที่เติมเข้าไปต่อสมบัติทางวิศวกรรมและโครงสร้างทางจุลภาคของก้อนตัวอย่างมอร์ตาร์มวลเบาเซลลูโลสที่ทำจากเศษแก้วบดละเอียดผสมเถ้าลอยถ่านหินกระตุ้นด้วยต่าง NaOH ที่อายุบ่ม 7 วัน

วิธีดำเนินการวิจัย

1. วัสดุ

เศษแก้ว (Recycled Glass) ที่ใช้ในการศึกษานี้เป็นเศษแก้วสีชาที่ได้มาจากบริษัท แก้วกรุงไทย จำกัด ดังรูปที่ 1(ก) (ลูกศรชี้) การเตรียมตัวอย่างเศษแก้วทำได้โดยนำไปล้างน้ำให้สะอาดแล้วตากแดดจนแห้ง จากนั้นนำไปบดให้ละเอียดด้วยเครื่อง Los Angeles ใช้เวลาในการบดประมาณ 10 นาที จากนั้นนำไปร่อนผ่านตะแกรงมาตรฐาน ASTM เบอร์ 16 นำส่วนที่ลอดผ่านตะแกรงไปทดสอบ เศษแก้วที่ผ่านการบดละเอียดแล้ว (Ground Recycled Glass, RG) มีลักษณะดังรูปที่ 1(ข)



(ก) กองเศษแก้ว



(ข) เศษแก้วที่บดละเอียดแล้ว

รูปที่ 1 เศษแก้วเหลือทิ้งจากกระบวนการผลิตขวดแก้ว

เถ้าลอยถ่านหิน (Coal Fly Ash, FA) ที่ใช้ในการศึกษานี้ได้มาจากโรงไฟฟ้าพลังงานความร้อนแม่เมาะ อำเภอมะเมาะ จังหวัดลำปาง เถ้าลอยสำหรับใช้เป็นวัสดุตั้งต้นนี้ถูกนำไปผสมกับเศษแก้วบดละเอียด (RG) ในอัตราส่วน 50:50

สารกระตุ้นที่ใช้ในการทดสอบเป็นโซเดียมซิลิเกต (Na_2SiO_3) สำเร็จรูปชนิดน้ำเกรดอุตสาหกรรม (สัดส่วนความเข้มข้น $\text{SiO}_2 = 30\%$ ต่อ $\text{Na}_2\text{O} = 9\%$) และโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ชนิดเกล็ดเกรดอุตสาหกรรมความบริสุทธิ์ 98% โดยน้ำหนัก สำหรับชะละลาย (Leaching) กับวัสดุตั้งต้น (RG + FA) โดยใช้สัดส่วนโซเดียมซิลิเกตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์ ($\text{Na}_2\text{SiO}_3:\text{NaOH}$) เท่ากับ 70:30 ความเข้มข้นของ NaOH เท่ากับ 1 3 5 และ 7 โมลาร์

สารเพิ่มฟองที่ใช้ในการทดสอบเป็นผลิตภัณฑ์สารลดแรงตึงผิวสำเร็จรูปชื่อทางการค้า Sika Poro 40 โดยนำไปเจือจางกับน้ำกลั่นในอัตราส่วนสารเพิ่มฟองต่อน้ำกลั่นเท่ากับ 1:40 ก่อนฉีดเป็นฟองหรือโฟมผสมลงบนมอร์ตาร์สดในปริมาณร้อยละ 1 3 และ 5 โดยน้ำหนักของ FA

2. ปฏิภาคส่วนผสมและการผลิตมอร์ตาร์มวลเบาเซลลูล่า

การผลิตมอร์ตาร์มวลเบาเซลลูล่าจากเศษแก้วบดละเอียดผสมเถ้าลอยถ่านหินกระตุ้นด้วยต่าง ขั้นตอนแรกเริ่มจากการเจือจางสารเพิ่มฟองเตรียมไว้ (สารเพิ่มฟองต่อน้ำกลั่น 1:40) โดยเทลงไปในเครื่องสร้างฟองอากาศ Foam Generator) พร้อมกับเขย่าเล็กน้อยเพื่อให้ น้ำกลั่นและสารเพิ่มฟองละลายเข้าด้วยกัน จากนั้นนำไปต่อเข้ากับเครื่องอัดอากาศ (Air Pump) ที่ความดัน 0.55±0.05 MPa เมื่อฉีดออกมาจะได้เนื้อฟองอากาศลักษณะคล้ายฟองครีมให้ปริมาณมาก ขั้นตอนที่สองเป็นการเตรียมเศษแก้วบดละเอียด (RG) ผสมกับเถ้าลอยถ่านหิน (Coal Fly Ash, FA) ในอัตราส่วน 50:50 ด้วยเครื่องผสมมอร์ตาร์จนส่วนผสมรวมเป็นเนื้อเดียวกัน จากนั้นเติมสารกระตุ้น (Liquid Alkaline Activator, L) ในอัตราส่วน L/FA เท่ากับ 0.6 0.7 และ 0.8 ผสมต่อไปอีกจนส่วนผสมเป็นเนื้อเดียวกัน โดยที่ L เป็นสัดส่วนระหว่าง Na_2SiO_3 ต่อ NaOH เท่ากับ 70:30 และความเข้มข้นของ NaOH เท่ากับ 1 3 5 และ 7 โมลาร์ตามปฏิภาคส่วนผสมดังตารางที่ 1

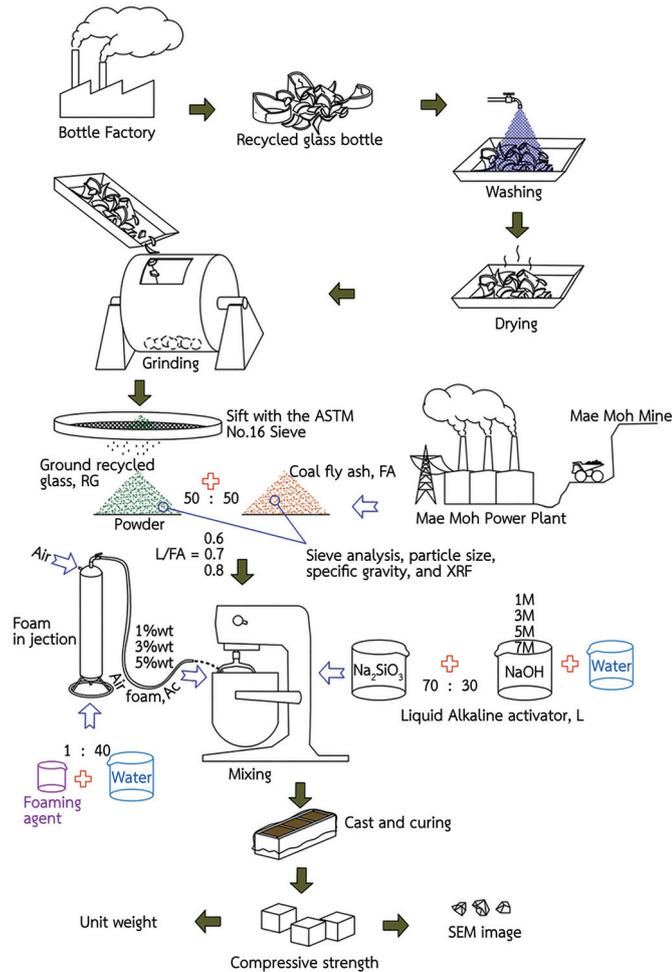
ตารางที่ 1 ปฏิภาคส่วนผสมมอร์ตาร์มวลเบาเซลลูล่าจากเศษแก้วบดละเอียดและเถ้าลอยถ่านหินกระตุ้นด้วยต่างต่อ 1 m³

Mix No.	Na ₂ SiO ₃ :NaOH	RG (kg)	FA (kg)	Air foam, Ac		Liquid alkaline activator, L				L/FA	
				%	(kg)	Na ₂ SiO ₃ (kg)	NaOH (kg)	Water (kg)	(kg)		
1	70 : 30	870	870	0	0	45.3	1	19.4	457.3	522	0.6
2	70 : 30	870	870	0	0	131.0	3	56.0	335.0	522	0.6
3	70 : 30	870	870	0	0	210.0	5	90.0	222.0	522	0.6
4	70 : 30	870	870	0	0	278.8	7	119.5	123.7	522	0.6
5	70 : 30	870	870	1	8.7	45.3	1	19.4	448.6	522	0.6
6	70 : 30	870	870	1	8.7	131.0	3	56.0	326.3	522	0.6
7	70 : 30	870	870	1	8.7	210.0	5	90.0	213.3	522	0.6
8	70 : 30	870	870	1	8.7	278.8	7	119.5	115.0	522	0.6
9	70 : 30	870	870	3	26.1	45.3	1	19.4	431.2	522	0.6
10	70 : 30	870	870	3	26.1	131.0	3	56.0	308.9	522	0.6
11	70 : 30	870	870	3	26.1	210.0	5	90.0	195.9	522	0.6
12	70 : 30	870	870	3	26.1	278.8	7	119.5	97.6	522	0.6
13	70 : 30	870	870	5	43.5	45.3	1	19.4	413.8	522	0.6
14	70 : 30	870	870	5	43.5	131.0	3	56.0	291.5	522	0.6
15	70 : 30	870	870	5	43.5	210.0	5	90.0	178.5	522	0.6
16	70 : 30	870	870	5	43.5	278.8	7	119.5	80.2	522	0.6
17	70 : 30	870	870	0	0	52.8	1	22.6	533.6	609	0.7
18	70 : 30	870	870	0	0	152.4	3	65.3	391.3	609	0.7
19	70 : 30	870	870	0	0	245.0	5	105.0	259.0	609	0.7
20	70 : 30	870	870	0	0	325.5	7	139.5	144.0	609	0.7
21	70 : 30	870	870	1	8.7	52.8	1	22.6	524.9	609	0.7
22	70 : 30	870	870	1	8.7	152.4	3	65.3	382.6	609	0.7
23	70 : 30	870	870	1	8.7	245.0	5	105.0	250.3	609	0.7
24	70 : 30	870	870	1	8.7	325.5	7	139.5	135.3	609	0.7

ตารางที่ 2 ปฏิภาคส่วนผสมมอร์ตาร์มวลเบาเซลลูโลสจากเศษแก้วบดละเอียดและแก้าลอยถ่านหินกระตุ้นด้วยต่างต่อ 1 m^3 (ต่อ)

Mix No.	$\text{Na}_2\text{SiO}_3:\text{NaOH}$	RG (kg)	FA (kg)	Air foam, Ac		Liquid alkaline activator, L				L/FA	
				%	(kg)	Na_2SiO_3 (kg)	M	NaOH (kg)	Water (kg)		(kg)
25	70 : 30	870	870	3	26.1	52.8	1	22.6	507.5	609	0.7
26	70 : 30	870	870	3	26.1	152.4	3	65.3	365.2	609	0.7
27	70 : 30	870	870	3	26.1	245.0	5	105.0	232.9	609	0.7
28	70 : 30	870	870	3	26.1	325.5	7	139.5	117.9	609	0.7
29	70 : 30	870	870	5	43.5	52.8	1	22.6	490.1	609	0.7
30	70 : 30	870	870	5	43.5	152.4	3	65.3	347.8	609	0.7
31	70 : 30	870	870	5	43.5	245.0	5	105.0	215.5	609	0.7
32	70 : 30	870	870	5	43.5	325.5	7	139.5	100.5	609	0.7
33	70 : 30	870	870	0	0	60.4	1	25.9	609.7	696	0.8
34	70 : 30	870	870	0	0	174.3	3	74.7	447.0	696	0.8
35	70 : 30	870	870	0	0	280.2	5	120.1	295.7	696	0.8
36	70 : 30	870	870	0	0	371.9	7	159.4	164.7	696	0.8
37	70 : 30	870	870	1	8.7	60.4	1	25.9	601.0	696	0.8
38	70 : 30	870	870	1	8.7	174.3	3	74.7	438.3	696	0.8
39	70 : 30	870	870	1	8.7	280.2	5	120.1	287.0	696	0.8
40	70 : 30	870	870	1	8.7	371.9	7	159.4	156.0	696	0.8
41	70 : 30	870	870	3	26.1	60.4	1	25.9	583.6	696	0.8
42	70 : 30	870	870	3	26.1	174.3	3	74.7	420.9	696	0.8
43	70 : 30	870	870	3	26.1	280.2	5	120.1	269.6	696	0.8
44	70 : 30	870	870	3	26.1	371.9	7	159.4	138.6	696	0.8
45	70 : 30	870	870	5	43.5	60.4	1	25.9	566.2	696	0.8
46	70 : 30	870	870	5	43.5	174.3	3	74.7	403.5	696	0.8
47	70 : 30	870	870	5	43.5	280.2	5	120.1	252.2	696	0.8
48	70 : 30	870	870	5	43.5	371.9	7	159.4	121.2	696	0.8

จากนั้นฉีดโฟม (Air Foam, AC) ลงบนตัวอย่าง RG-FA-L ในปริมาณร้อยละ 1 3 และ 5 โดยน้ำหนักของ FA ทำการผสมต่อไปอีกจนกระทั่งส่วนผสมทั้งหมดรวมเป็นเนื้อเดียวกันจึงได้มอร์ตาร์มวลเบาเซลลูโลส ซึ่งขั้นตอนที่สองใช้เวลาประมาณ 10 นาที จากนั้นเทมอร์ตาร์สดลงในแบบหล่อทรงลูกบาศก์ขนาด $50 \times 50 \times 50$ มิลลิเมตร พร้อมทั้งห่อด้วยแผ่นพลาสติกให้มิดชิดเพื่อป้องกันการสูญเสียน้ำอย่างรวดเร็วอันเป็นสาเหตุของการหดตัวสภาพพลาสติก จากนั้นนำไปบ่มในห้องปฏิบัติการที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลานาน 7 วัน ก่อนทำการทดสอบหน่วยน้ำหนัก ทดสอบกำลังรับแรงอัดตามมาตรฐาน ASTM C 109 และนำชิ้นส่วนแตกของก้อนตัวอย่างไปทดสอบโครงสร้างทางจุลภาคด้วยเทคนิค Scanning Electron Microscope (SEM) ตามแผนผังดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 แผนผังการผลิตมอร์ตาร์มวลเบาเซลลูล่าจากเศษแก้วบดละเอียดและเถ้าลอยถ่านหินกระตุ้นด้วยต่าง

3. การทดสอบหน่วยน้ำหนัก

การทดสอบหาหน่วยน้ำหนักแห้ง (Dry Unit Weight) หรือความหนาแน่นแห้ง (Dry Density) ทำได้โดยนำก้อนตัวอย่างมอร์ตาร์มวลเบาเซลลูล่าขนาด $0.05 \times 0.05 \times 0.05$ เมตร ที่ผ่านการอบแห้งแล้วเป็นเวลา 24 ชั่วโมง ไปชั่งน้ำหนัก (Weight, W) มีหน่วยเป็นนิวตัน (N)หารด้วยปริมาตร (Volume, V) ของก้อนตัวอย่างมีหน่วยเป็นลูกบาศก์เมตร (m^3) หน่วยน้ำหนักแห้งมีหน่วยเป็นนิวตันต่อลูกบาศก์เมตร (N/m^3) ดังสมการที่ (1)

$$Unit\ weight\ (N/m^3) = \frac{W}{V} \quad (1)$$

4. การทดสอบกำลังรับแรงอัด

วิธีการทดสอบกำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์มวลเบาเซลลูล่าทำตามมาตรฐาน ASTM C 109M ทำได้โดยนำแท่งทดสอบไปกดเพื่อหาค่าแรงกดสูงสุดหรือแรงอัดประลัย (Ultimate) ก่อนการวิบัติ โดยมีอัตราการให้แรงกดลงบนแท่งทดสอบอยู่ระหว่าง 900 นิวตัน/วินาที ถึง 1,800 นิวตัน/วินาที กำลังรับแรงอัดมีหน่วยเป็น N/m^2 หรือ Pa คำนวณได้จากเอาแรงอัดประลัย (Ultimate Force, P) ก่อนการวิบัติมีหน่วยเป็นนิวตัน (N) หารด้วยพื้นที่หน้าตัดขวาง (Cross Section Area, A) มีหน่วยเป็นตารางเมตร (m^2) ดังสมการที่ (2)

$$Compressive\ strength\ (N/m^2) = \frac{P}{A} \quad (2)$$

5. การทดสอบโครงสร้างทางจุลภาค

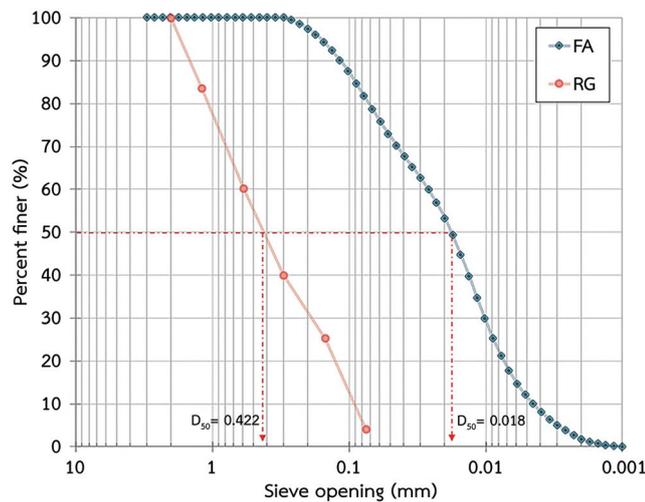
หลังจากการทดสอบกำลังรับแรงอัด ขึ้นส่วนแตกของก้อนตัวอย่างมอร์ตาร์มวลเบาเซลลูล่าจากเศษแก้ว บดละเอียดผสมแล้วลอยถ่านหินกระตุ้นด้วยต่างถูกนำไปถ่ายภาพขยายอนุภาคกำลังสูง (Scanning Electron Microscopy) เพื่อนำภาพถ่ายมาวิเคราะห์ผลการเตรียมตัวอย่างทำได้โดยทุบชิ้นส่วนแตกให้เป็นก้อนขนาดเล็กประมาณ 10×10 มิลลิเมตร ความหนา 5 มิลลิเมตร จากนั้นนำชิ้นตัวอย่างไปทำให้แห้งด้วยเครื่อง Freeze-Dryer ที่อุณหภูมิ $-40 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ภายใต้ความดัน 0.5 Pascal เป็นเวลานาน 2 วัน จากนั้นนำชิ้นตัวอย่างไปเคลือบผิวด้วยทองคำแล้วจึงนำไปทดสอบการถ่ายภาพขยายอนุภาคกำลังสูงด้วยเครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM)

ผลการทดสอบและวิจารณ์ผล

1. คุณสมบัติของวัสดุ

ผลการทดสอบหาค่าความถ่วงจำเพาะ (Specific Gravity) ของ RG ทำตามมาตรฐาน ASTM C 128 พบว่าค่าความถ่วงจำเพาะของ RG เท่ากับ 2.51 เมื่อนำไปทดสอบหาขนาดคละของมวลรวมละเอียด วิธีทดสอบทำตามมาตรฐาน ASTM C 136 พบว่ามีค่าโมดูลัสความละเอียด (Fineness Modulus, FM) เท่ากับ 2.87 และเมื่อเทียบกับค่า FM ของเศษแก้วบดละเอียดกับค่า FM ของทรายแม่น้ำทั่วไป พบว่า RG อยู่ในช่วงทรายหยาบ เพราะว่า FM อยู่ระหว่าง 2.50 - 3.50 นอกจากนี้มีขนาดเฉลี่ยของอนุภาค RG ที่ลอดผ่านตะแกรง (Percent Finer หรือ Percent Passing) หรือ D_{50} เท่ากับ 0.422 mm การกระจายขนาดคละของอนุภาค RG มีขนาดตั้งแต่ 0.075 mm ถึง 2 mm ดังรูปที่ 3

ผลการทดสอบคุณสมบัติเบื้องต้นของ FA ทดสอบหาค่าความถ่วงจำเพาะตามมาตรฐาน ASTM C 188 ได้ค่าความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.34 เมื่อนำไปทดสอบด้วยเครื่อง Laser Particle Size Analyzer พบว่าขนาดเฉลี่ยของอนุภาค FA ที่ลอดผ่านตะแกรง (Percent Finer หรือ Percent Passing) ร้อยละ 50 หรือ D_{50} เท่ากับ 0.018 mm การกระจายขนาดคละของอนุภาค FA มีขนาดตั้งแต่ 0.001 mm ถึง 3 mm ดังรูปที่ 3



รูปที่ 3 การกระจายขนาดคละของ RG และ FA

ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีโดยเครื่อง X-ray Fluorescence หรือ XRF ของเศษแก้วบดละเอียด (RG) และถ่านหิน (FA) ดังตารางที่ 2 พบว่า RG มีปริมาณซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) เท่ากับ 87.88 % ซึ่งมากกว่า 70 % จึงจัดเป็นวัสดุพอลิซิลิโคนชนิดสังเคราะห์ชั้น F เนื่องจากเศษแก้วผ่านการเผาที่อุณหภูมิสูงมาแล้ว ส่วน FA มีปริมาณซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) และอลูมิเนียมไตรออกไซด์ (Al_2O_3) เท่ากับ 43.19 % และ 15.77 % ซึ่งผลรวมปริมาณของ $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ มีมากกว่า 70 % โดยน้ำหนัก จึงจัดเป็นวัสดุพอลิซิลิโคนชนิดสังเคราะห์

ชั้น F (Class F) และยังมีปริมาณแคลเซียมออกไซด์ (CaO) สูงเกินกว่า 10 % โดยน้ำหนัก หรือเป็นเถ้าลอยแคลเซียมสูง (High-Calcium Fly Ash) ตามมาตรฐาน ASTM C 618 ส่วนการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผา (Loss On Ignition, LOI) พบว่า RG และ FA เท่ากับ 0.41 % และ 0.84 % โดยน้ำหนัก ทั้ง RG และ FA มีค่าการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผาไม่เกิน 6 % ตามที่มาตรฐาน ASTM C 618 กำหนดไว้ ซึ่งแสดงถึงการมีสารมลทิน (เช่น คาร์บอน คาร์บอนเนต และน้ำในโครงสร้าง) เจือปนในปริมาณต่ำที่นอกเหนือจากสารประกอบหลัก (Si และ Al) มีปริมาณที่เพียงพอ ดังนั้นวัสดุ RG และ FA ที่ศึกษานี้จึงมีความเหมาะสมในการทดสอบจีโอโพลีเมอร์

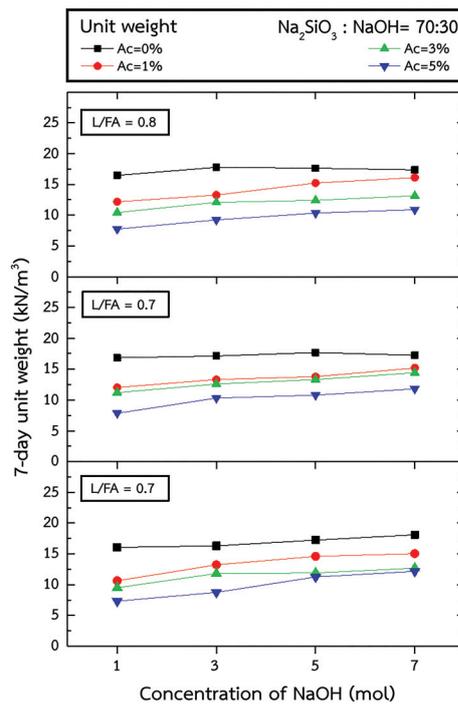
ตารางที่ 2 องค์ประกอบทางเคมีในรูปสารประกอบออกไซด์ของ RG และ FA

Chemical Composition	Ground Recycled Glass, RG (% by Weight)	Coal Fly Ash, FA (% by Weight)
SiO ₂	87.88	43.19
Al ₂ O ₃	N.D.	15.77
Fe ₂ O ₃	0.81	14.43
CaO	8.35	19.55
MgO	2.13	N.D.
SO ₃	N.D.	3.86
Na ₂ O	N.D.	0.91
K ₂ O	0.42	1.45
LOI	0.41	0.84

หมายเหตุ : N.D. = Not Detected, LOI = Loss On Ignition

2. หน่วยน้ำหนัก

รูปที่ 4 แสดงหน่วยน้ำหนักของตัวอย่างมอร์ตาร์มวลเบาเซลลูโลสจากเศษแก้วบดละเอียดผสมเถ้าลอยถ่านหิน กระตุ้นด้วยด่าง โดยตัวอย่างทดสอบมีอัตราส่วน RG ต่อ FA เท่ากับ 50:50 อัตราส่วน Na₂SiO₃ ต่อ NaOH เท่ากับ 70:30 ความเข้มข้นของ NaOH เท่ากับ 1 3 5 และ 7 โมลาร์ อัตราส่วน L/FA เท่ากับ 0.6 0.7 และ 0.8 และปริมาณ Ac ร้อยละ 0 1 3 และ 5 โดยน้ำหนักของ FA ตามลำดับ ผลการทดสอบพบว่าแท่งตัวอย่างมอร์ตาร์มวลเบาเซลลูโลสจาก เศษแก้วบดละเอียดผสมเถ้าลอยถ่านหินกระตุ้นด้วยด่างที่ไม่ได้เติมฟองอากาศเข้าไป (Ac = 0 %) มีหน่วยน้ำหนักแห้ง ประมาณ 17.5 kN/m³ แต่เมื่อเติมฟองอากาศเข้าไปและกระตุ้นด้วยด่าง NaOH ในสัดส่วน L/FA ต่าง ๆ พบว่า แท่งตัวอย่างมีหน่วยน้ำหนักลดลง นั้นแสดงให้เห็นว่าความเข้มข้นของ NaOH อัตราส่วนของ L/FA และ Ac ส่งอิทธิพล ต่อหน่วยน้ำหนักของมอร์ตาร์มวลเบาเซลลูโลสจากเศษแก้วบดละเอียดผสมเถ้าลอยถ่านหินกระตุ้นด้วยด่าง หน่วยน้ำหนักของก้อนตัวอย่างเพิ่มขึ้นเล็กน้อยตามความเข้มข้นของ NaOH และอัตราส่วนของ L/FA เนื่องจาก ความเข้มข้นที่เพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย (จาก 1 ถึง 7 โมลาร์) ส่งผลให้หน่วยน้ำหนักของ NaOH เพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย (Suksiripattanapong et al., 2015) ในขณะที่หน่วยน้ำหนักของก้อนตัวอย่างลดลงตามปริมาณ Ac ที่เพิ่มขึ้น เนื่องจาก Ac ที่เพิ่มขึ้นทำให้ช่องว่างในตัวอย่างเพิ่มขึ้น (Yoosuk et al., 2021) หน่วยน้ำหนักต่ำที่สุดของตัวอย่าง มอร์ตาร์มวลเบาเซลลูโลสจากเศษแก้วบดละเอียดผสมเถ้าลอยถ่านหินกระตุ้นด้วยด่างพบที่ความเข้มข้นของ NaOH เท่ากับ 1 โมลาร์ อัตราส่วนของ L/FA เท่ากับ 0.8 และปริมาณ Ac ร้อยละ 5 โดยน้ำหนักของ FA

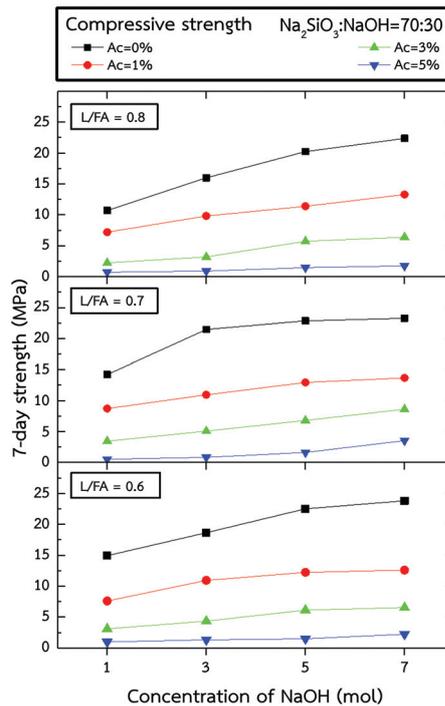


รูปที่ 4 หน่วยน้ำหนักของมอร์ตาร์มวลเบาเซลลูโลสจากเศษแก้วบดละเอียดผสมเถ้าลอยถ่านหินกระตุ้นด้วยต่าง

3. กำลังรับแรงอัด

รูปที่ 5 แสดงกำลังรับแรงอัดของก้อนตัวอย่างมอร์ตาร์มวลเบาเซลลูโลสจากเศษแก้วบดละเอียดผสมเถ้าลอยถ่านหินกระตุ้นด้วยต่าง โดยตัวอย่างทดสอบมีอัตราส่วน RG ต่อ FA เท่ากับ 50:50 อัตราส่วน Na₂SiO₃ ต่อ NaOH เท่ากับ 70:30 ความเข้มข้นของ NaOH เท่ากับ 1 3 5 และ 7 โมลาร์ อัตราส่วน L/FA เท่ากับ 0.6 0.7 และ 0.8 และปริมาณ Ac ร้อยละ 0 1 3 และ 5 โดยน้ำหนักของ FA ตามลำดับ ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่ากำลังรับแรงอัดของตัวอย่างมอร์ตาร์มวลเบาเซลลูโลสจากเศษแก้วบดละเอียดผสมเถ้าลอยถ่านหินกระตุ้นด้วยต่างเพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นของ NaOH ที่เพิ่มขึ้น กำลังรับแรงอัดสูงสุดของตัวอย่างมีค่าเท่ากับ 23.8 MPa ที่อัตราส่วน Na₂SiO₃ ต่อ NaOH เท่ากับ 70:30 อัตราส่วน L/FA เท่ากับ 0.6 และปริมาณ Ac ร้อยละ 0 ปริมาณ L มีผลต่อกำลังรับแรงอัดอย่างเห็นได้ชัด กำลังรับแรงอัดของตัวอย่างมีค่าลดลงตามการเพิ่มขึ้นของปริมาณ L เนื่องจากปริมาณ L ที่มากเกินไปทำให้เกิดการยุบตัว และเกิดรอยแตกร้าว เมื่อตัวอย่างเสียความชื้น เช่นเดียวกันกับการเพิ่มขึ้นของ Ac กำลังรับแรงอัดของตัวอย่างมีค่าลดลงตามการเพิ่มขึ้นของ Ac เนื่องจาก Ac ทำให้ตัวอย่างมีความพรุน ช่องว่างขนาดเล็กที่อยู่ระหว่าง RG จำนวนมาก จึงทำให้กำลังรับแรงอัดลดลง

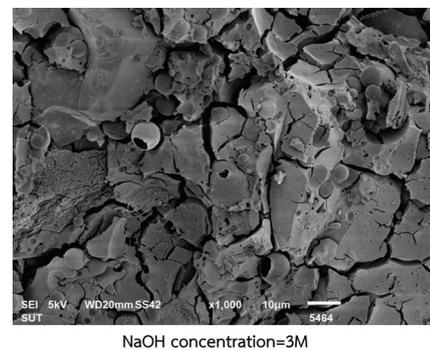
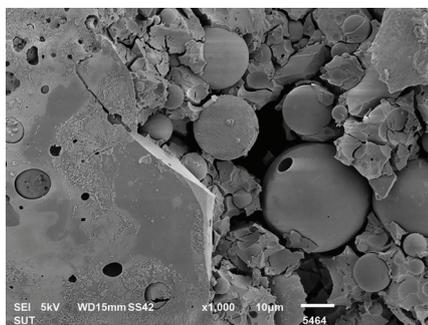
เมื่อเปรียบเทียบหน่วยน้ำหนักและกำลังรับแรงอัดของตัวอย่างมอร์ตาร์มวลเบาเซลลูโลสจากเศษแก้วบดละเอียดผสมเถ้าลอยถ่านหินกระตุ้นด้วยต่างกับมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมคอนกรีตบล็อกมวลเบาเติมฟองอากาศ มอก. 2601-2556 (C10 และ C12) ที่ระบุเกณฑ์กำลังต้านทานแรงอัดตามมาตรฐานไว้ไม่น้อยกว่า 2.55 MPa และหน่วยน้ำหนักแห้งอยู่ระหว่าง 900 kg/m³ ถึง 1,200 kg/m³ พบว่าอัตราส่วน (เศษแก้วบดละเอียด เถ้าลอย ปริมาณสารกระตุ้น และสารเพิ่มฟอง) ที่เหมาะสมในการเตรียมตัวอย่างเพื่อให้ได้มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมคอนกรีตบล็อกมวลเบาแบบเติมฟองอากาศชนิด C10 คือความเข้มข้นของ NaOH เท่ากับ 1 โมลาร์ อัตราส่วน L/FA เท่ากับ 0.6 และปริมาณ Ac ร้อยละ 3 โดยน้ำหนักของ FA ซึ่งให้หน่วยน้ำหนักและกำลังรับแรงอัดเท่ากับ 9.8 kN/m³ และ 2.8 MPa และอัตราส่วน (เศษแก้วบดละเอียด เถ้าลอย ปริมาณสารกระตุ้น และสารเพิ่มฟอง) ที่เหมาะสมในการเตรียมตัวอย่างเพื่อให้ได้มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมคอนกรีตบล็อกมวลเบาแบบเติมฟองอากาศชนิด C12 คือความเข้มข้นของ NaOH เท่ากับ 1 โมลาร์ อัตราส่วนของ L/FA เท่ากับ 0.6 และปริมาณ Ac ร้อยละ 1 โดยน้ำหนักของ FA ซึ่งให้หน่วยน้ำหนักและกำลังรับแรงอัดเท่ากับ 10.3 kN/m³ และ 7.5 MPa



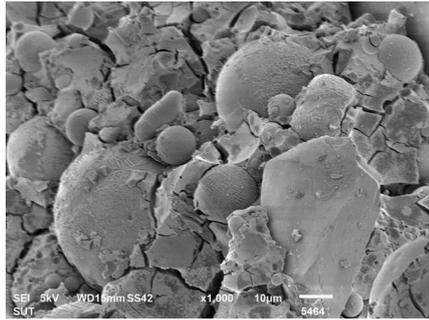
รูปที่ 5 กำลังรับแรงอัดของตัวอย่างมอร์ตาร์มวลเบาเซลลูโลสจากเศษแก้วบดละเอียดผสมเถ้าลอยถ่านหินกระตุ้นด้วยต่าง

4. โครงสร้างทางจุลภาค

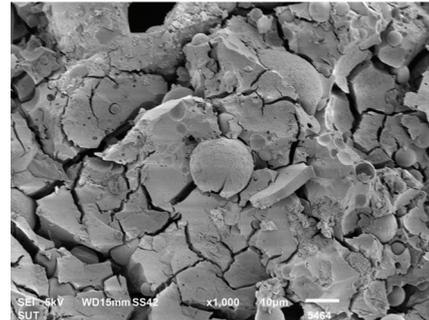
รูปที่ 6 แสดงโครงสร้างทางจุลภาคของตัวอย่างมอร์ตาร์มวลเบาเซลลูโลสจากเศษแก้วบดละเอียดผสมเถ้าลอยถ่านหินกระตุ้นด้วยต่างที่อัตราส่วน RG ต่อ FA เท่ากับ 50:50 อัตราส่วน Na_2SiO_3 ต่อ NaOH เท่ากับ 70:30 อัตราส่วน L/FA เท่ากับ 0.6 ปริมาณ Ac ร้อยละ 0 และความเข้มข้นของ NaOH เท่ากับ 1 3 5 และ 7 โมลาร์ ตามลำดับ พบว่าความเข้มข้นของสารละลาย NaOH ที่เพิ่มขึ้นจะชะงักซิลิกอนและอลูมิเนียมบริเวณผิวของเถ้าลอยหลุดออก เกิดโพรงขนาดใหญ่ และขยายโพรงให้ใหญ่ขึ้น เถ้าลอยขนาดเล็กอัดตัวเข้าไปในโพรงเกิดผลิตภัณฑ์ทั้งภายในและภายนอกผิวของเถ้าลอย (Yoosuk et al., 2021) และสารละลาย NaOH ที่มีความเข้มข้นมากขึ้นจะทำปฏิกิริยากับแคลเซียมซิลเฟต ทำให้เกิดแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ซึ่งแคลเซียมไฮดรอกไซด์จะทำปฏิกิริยากับซิลิกา และอลูมินาจากเถ้าลอยเกิดเป็นแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) และแคลเซียมอะลูมิเนตไฮเดรต (C-A-H) หรือที่เรียกว่า ปฏิกิริยาปอซโซลานิก เมื่อสารประกอบ C-S-H มากขึ้น (Horpibulsuk et al., 2015) สารนี้จะเพิ่มความแน่นทำให้ลดช่องว่างของเพสต์สอดคล้องกับค่ากำลังรับแรงอัดที่เพิ่มขึ้น



รูปที่ 6 โครงสร้างจุลภาคของตัวอย่างมอร์ตาร์มวลเบาเซลลูโลสจากเศษแก้วบดละเอียดผสมเถ้าลอยถ่านหินกระตุ้นด้วยต่าง ปริมาณ Ac = 0 %, L/FA = 0.6 ความเข้มข้น NaOH = 1 3 5 และ 7 โมลาร์



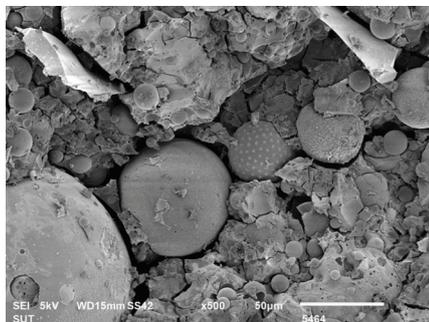
NaOH concentration=5M



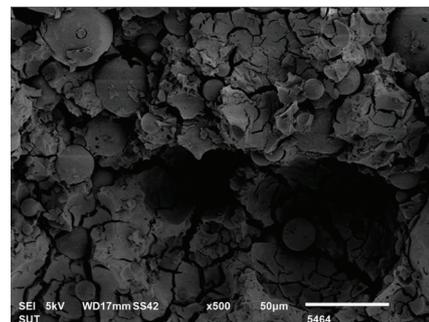
NaOH concentration=7M

รูปที่ 6 โครงสร้างจุลภาคของตัวอย่างมอร์ตาร์มวลเบาเซลลูโลสจากเศษแก้วบดละเอียดผสมเถ้าลอยถ่านหินกระตุ้นด้วยต่าง ปริมาณ Ac = 0 %, L/FA = 0.6 ความเข้มข้น NaOH = 1 3 5 และ 7 โมลาร์ (ต่อ)

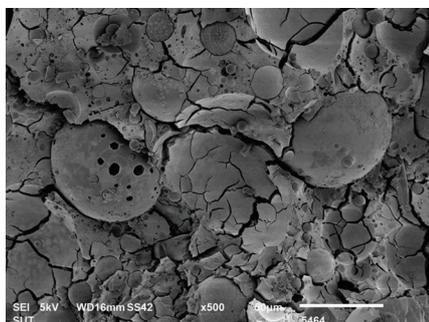
รูปที่ 7 แสดงโครงสร้างทางจุลภาคของตัวอย่างมอร์ตาร์มวลเบาเซลลูโลสจากเศษแก้วบดละเอียดผสมเถ้าลอยถ่านหินกระตุ้นด้วยต่างที่อัตราส่วน RG ต่อ FA เท่ากับ 50:50 อัตราส่วน Na_2SiO_3 ต่อ NaOH เท่ากับ 70:30 ความเข้มข้นของ NaOH เท่ากับ 5 โมลาร์ ที่อัตราส่วน L/FA เท่ากับ 0.6 และปริมาณ Ac ร้อยละ 0 1 3 และ 5 โดยน้ำหนักของ FA ตามลำดับ พบว่าผลิตภัณฑ์ (สารประกอบใด ๆ ที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาเคมีระหว่างสารตั้งต้น เช่น จากปฏิกิริยาปอซโซลานิก จากปฏิกิริยาไฮเดรชัน จากปฏิกิริยาโพลีเมอร์ ฯลฯ ทางวิศวกรรมโยธา เรียกว่า ผลิตภัณฑ์) จีไอโพลีเมอร์ไรเซชันมีค่าลดลงตามปริมาณโพนที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากปริมาณโพนที่เพิ่มขึ้นในส่วนผสม มีคุณสมบัติเป็นสารลดแรงตึงผิวและสารพลาสติกเคลือบผิว อาจกล่าวได้ว่าด้วยคุณสมบัตินี้ทำให้โพนเข้าไปเคลือบผิวของเถ้าลอย จึงส่งผลให้ความสามารถของสารละลาย NaOH ในการชะซิลิกาและอลูมินาลดลง เห็นได้ชัดเจนจากอนุภาคเถ้าลอยที่ไม่เกิดปฏิกิริยาและมีอนุภาคเถ้าลอยฝังอยู่ในเนื้อวัสดุเชื่อมประสาน



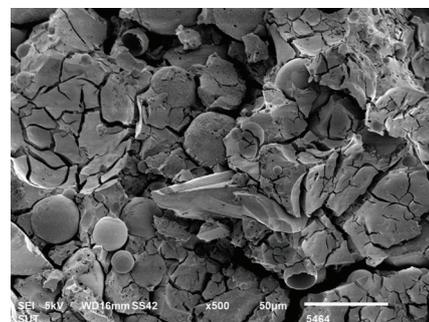
Foam content=0%



Foam content=1%



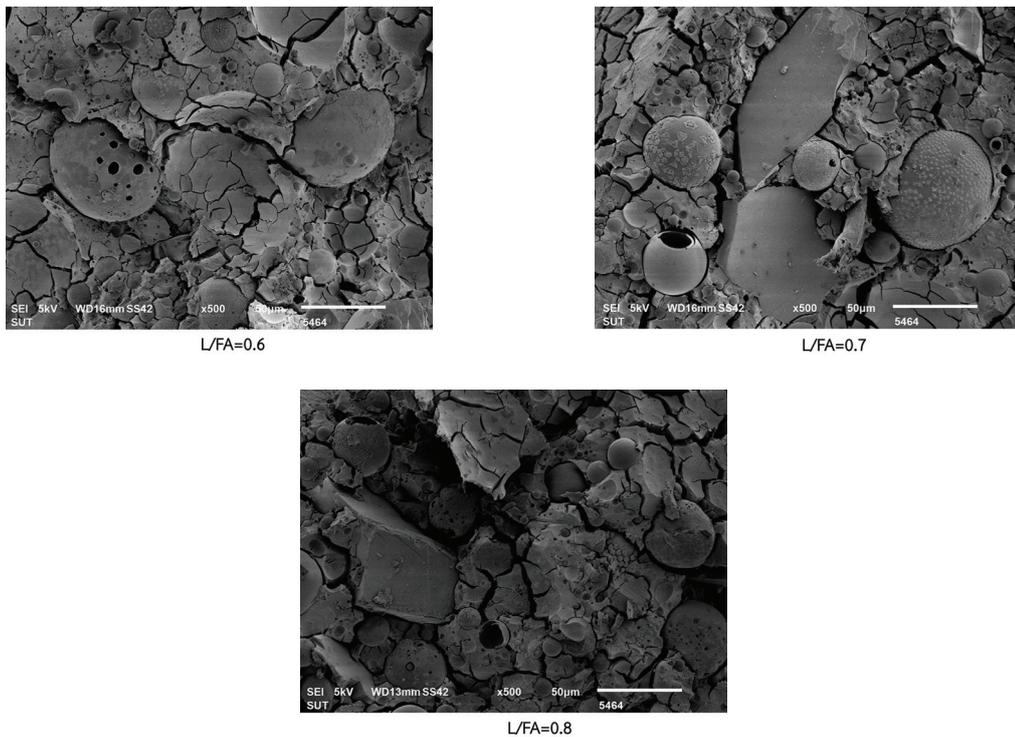
Foam content=3%



Foam content=5%

รูปที่ 7 โครงสร้างจุลภาคของมอร์ตาร์มวลเบาเซลลูโลสจากเศษแก้วบดละเอียดผสมเถ้าลอยถ่านหินกระตุ้นด้วยต่าง ปริมาณ Ac = 0 1 3 และ 5 %, L/FA = 0.6 ความเข้มข้น NaOH = 5 โมลาร์

รูปที่ 8 แสดงโครงสร้างทางจุลภาคของตัวอย่างมอร์ตาร์มวลเบาเซลลูโลสจากเศษแก้วบดละเอียดผสมเถ้าลอยถ่านหินกระตุ้นด้วยต่างที่อัตราส่วน RG ต่อ FA เท่ากับ 50:50 อัตราส่วน Na_2SiO_3 ต่อ NaOH เท่ากับ 70:30 ความเข้มข้นของ NaOH เท่ากับ 5 โมลาร์ อัตราส่วน L/FA เท่ากับ 0.6 0.7 0.8 และปริมาณ Ac ร้อยละ 3 โดยน้ำหนักของ FA พบว่าโครงสร้างทางจุลภาคของก้อนตัวอย่างมีลักษณะการก่อตัวเป็นเนื้อเดียวกันค่อนข้างดีนอกจากนี้สามารถสังเกตได้ว่าโครงสร้างจีโอโพลีเมอร์เกิดผลผลิตแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) หรือแคลเซียมอะลูมิโนซิลิเกตไฮเดรต (C-A-S-H) อยู่ร่วมกับจีโอโพลีเมอร์เจล (NASH) เพิ่มขึ้น (Posi et al., 2013)



รูปที่ 8 โครงสร้างจุลภาคของตัวอย่างมอร์ตาร์มวลเบาเซลลูโลสจากเศษแก้วบดละเอียดผสมเถ้าลอยถ่านหินกระตุ้นด้วยต่าง ปริมาณ Ac = 3 %, L/FA = 0.6 0.7 และ 0.8 ความเข้มข้น NaOH = 5 โมลาร์

สรุปผล

จากการศึกษาสมบัติทางวิศวกรรมและโครงสร้างทางจุลภาคของมอร์ตาร์มวลเบาเซลลูโลสจากเศษแก้วบดละเอียดผสมเถ้าลอยถ่านหินกระตุ้นด้วยต่างโดยแปรผันความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) อัตราส่วนสารกระตุ้นต่อเถ้าลอยและปริมาณโพลีเมอร์ สรุปผลการทดสอบได้ดังนี้

1. หน่วยน้ำหนักต่ำที่สุดของตัวอย่างมอร์ตาร์มวลเบาเซลลูโลสจากเศษแก้วบดละเอียดผสมเถ้าลอยกระตุ้นด้วยต่างเมื่อความเข้มข้นของ NaOH เท่ากับ 1 โมลาร์ อัตราส่วนของ L/FA เท่ากับ 0.8 และปริมาณ Ac ร้อยละ 5 โดยน้ำหนักของ FA
2. กำลังรับแรงอัดสูงสุดของตัวอย่างมีค่าเท่ากับ 23.8 MPa ที่ความเข้มข้นของ NaOH เท่ากับ 7 โมลาร์ อัตราส่วน L/FA เท่ากับ 0.6 และปริมาณ Ac ร้อยละ 0
3. อัตราส่วนที่เหมาะสมสำหรับบล็อกมวลเบาแบบเติมฟองอากาศชนิด C10 คือความเข้มข้นของ NaOH เท่ากับ 1 โมลาร์ อัตราส่วน L/FA เท่ากับ 0.6 และปริมาณ Ac ร้อยละ 3 โดยน้ำหนักของ FA ในขณะที่อัตราส่วนที่เหมาะสมสำหรับบล็อกมวลเบาแบบเติมฟองอากาศชนิด C12 คือ ความเข้มข้นของ NaOH เท่ากับ 1 โมลาร์ ของ L/FA เท่ากับ 0.6 และปริมาณ Ac ร้อยละ 1 โดยน้ำหนักของ FA

4. โครงสร้างทางจุลภาคแสดงให้เห็นว่าระดับความเข้มข้นสูงของ NaOH มีประสิทธิภาพในการชะซิลิกอนและอลูมิเนียมบริเวณผิวแก้วลอยหลุดออกทำให้พรองขยายใหญ่ขึ้น แก้วลอยขนาดเล็กเข้าไปอัดตัวแทรกในพรองเกิดผลิตภัณฑ์ทั้งภายในและภายนอกผิวของแก้วลอย ในขณะที่ผลิตภัณฑ์จีโอโพลีเมอร์โรเซชันมีค่าลดลงตามปริมาณโพลีเมอร์ที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากโพลีเมอร์มีคุณสมบัติเป็นสารลดแรงตึงผิวและสารพลาสติกเคลือบผิว

5. โครงสร้างทางจุลภาคของตัวอย่างที่อัตราส่วน L/FA ต่าง ๆ มีลักษณะการก่อตัวเป็นเนื้อเดียวกันค่อนข้างดี นอกจากนี้ยังสามารถสังเกตได้ว่าโครงสร้างจีโอโพลีเมอร์เกิดผลผลิตแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) หรือแคลเซียมอะลูมิโนซิลิเกตไฮเดรต (C-A-S-H) อยู่ร่วมกับจีโอโพลีเมอร์เจล (NASH) เพิ่มขึ้น

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนจากกองทุนส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม ประเภททุนสนับสนุนงานมูลฐาน (Fundamental Fund) ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2568 รหัสโครงการ FF68/NKR/130 เครื่องมือและสถานที่วิจัยได้รับการสนับสนุนจากสาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี และเศษขวดแก้วที่ใช้ในการศึกษาได้รับความอนุเคราะห์จาก บริษัท แก้วกรุงไทย จำกัด

References

- Ali, E.E. and Al-Tersawy, S.H. (2012). Recycled Glass as a Partial Replacement for Fine Aggregate in Self-Compacting Concrete. *Construction and Building Materials*, 35, 785-791. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.04.117>
- Arulrajah, A., Ali, M.M.Y., Disfani, M.M., Piratheepan, J. and Bo, M.W. (2012). Geotechnical Performance of Recycled Glass-Waste Rock Blends in Footpath Bases. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 25(5), 653-661. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0000617](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000617)
- Arulrajah, A., Ali, M.M.Y., Disfani, M.M. and Horpibulsuk, S. (2013). Recycled-Glass Blends in Pavement Base/Subbase Applications: Laboratory and Field Evaluation. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 26(7), [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0000966](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000966)
- Arulrajah, A., Kua, T.A., Horpibulsuk, S., Phetchuay, C., Suksiripattanapong, C. and Du, Y.J. (2016). Strength and Microstructure Evaluation of Recycled Glass-Fly Ash Geopolymer as Low-Carbon Masonry Units. *Construction and Building Materials*, 114, 400-406. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.03.123>
- Grubb, D.G., Gallagher, P.M., Wartman, J., Liu, Y. and Carnivale, M. (2006). Laboratory Evaluation of Crushed Glass-Dredged Material Blends. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 132(5), 562-576. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(2006\)132:5\(562\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2006)132:5(562))
- Horpibulsuk, S., Suksiripattanapong, C., Samingthong, W., Rachan, R. and Arulrajah A. (2015). Durability Against Wetting-Drying Cycles of Water Treatment Sludge-Fly Ash Geopolymer and Water Treatment Sludge-Cement and Silty Clay-Cement Systems. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 28(1), 04015078. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0001351](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001351)
- Imteaz, M.A., Ali, M.Y. and Arulrajah, A. (2012). Possible Environmental Impacts of Recycled Glass Used as a Pavement Base Material. *Waste Management & Research: The Journal for a Sustainable Circular Economy*, 30(9), 917-921. <https://doi.org/10.1177/0734242X12448512>

- Mishra, G., Danoglidis, P.A., Shah, S.P. and Konsta Gdoutos, M.S. (2023). Carbon Capture and Storage Potential of Biochar-Enriched Cementitious Systems. *Cement and Concrete Composites*, 140, 105078. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2023.105078>
- Ooi, P.S.K., Li, M.M.W., Sagario, M.L.Q. and Song, Y. (2008). Shear Strength Characteristics of Recycled Glass. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2059(1), 52-62. <https://doi.org/10.3141/2059-06>
- Palomo, A., Grutzeck, M.W. and Blanco, M.T. (1999). Alkali-Activated Fly Ashes: A Cement for the Future. *Cement and Concrete Research*, 29(8), 1323-1329. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(98\)00243-9](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(98)00243-9)
- Posi, P., Teerachanwit, C., Tanutong, C., Limkamoltip, S., Lertnimooolchai, S., Sata, V. and Chindaprasirt, P. (2013). Lightweight Geopolymer Concrete Containing Aggregate from Recycles Lightweight Block. *Materials and Design*, 52, 580-586. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2013.06.001>
- Suksiripattanapong, C., Horpibulsuk, S., Chanprasert, P., Sukmak, P. and Arulrajah, A. (2015). Compressive Strength Development in Fly Ash Geopolymer Masonry Units Manufactured from Water Treatment Sludge. *Construction and Building Materials*, 82, 20-30. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.02.040>
- Suntharanurak, J. and Tonnayopas, D. (2013). Strength Development and Sulfate Durability of Waste Clear Bottle Glass Aggregate Concrete Containing Sugarcane Bagasse Ash. *The Journal of Industrial Technology*, 10(1), 62-69. https://ph01.tci-thaijo.org/index.php/jit_journal/article/view/32813/27943 (in Thai)
- Xie, Z. and Yunping, X. (2001). Hardening Mechanisms of an Alkaline-Activated Class F Fly Ash. *Cement and Concrete Research*, 31(9), 1245-1249. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(01\)00571-3](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(01)00571-3)
- Yoosuk, P., Suksiripattanapong, C., Sukontasukkul, P. and Chindaprasirt, P. (2021). Properties of Polypropylene Fiber Reinforced Cellular Lightweight High Calcium Fly Ash Geopolymer Mortar. *Case Studies in Construction Materials*, 15, e00730. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2021.e00730>

การพัฒนาและยกระดับงานหัตถกรรมจักสานกระจูดด้วยเครื่องรีดเส้นกระจูดแบบลูกกลิ้งร่วมความร้อน

Development and Enhancement of Krajoed Basketry Handicraft Using a Combined Heating Krajoed Fiber Rolling Machine

วรพงศ์ บุญช่วยแทน^{1*} สุรัสวดี ระวังวงศ์¹ ธวานวิทย์ แนนไส¹ และจารุวัฒน์ เจริญจิต¹

Worapong Boonchouytan^{1*} Surasit Rawangwong¹ Thanwit Naemsai¹ and Jaruwat Jareanjit¹

Received: March 18, 2025; Revised: May 20, 2025; Accepted: May 22, 2025

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อออกแบบ สร้าง และทดสอบสมรรถนะเครื่องรีดเส้นกระจูดแบบลูกกลิ้งร่วมความร้อนสำหรับการพัฒนาและยกระดับงานหัตถกรรมจักสานกระจูด โดยเครื่องมีขนาดความกว้าง 450 มิลลิเมตร ความยาว 850 มิลลิเมตร และความสูง 700 มิลลิเมตร โดยเครื่องใช้มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง ขนาดแรงดันไฟฟ้า 24 โวลต์ กำลังไฟฟ้า 350 วัตต์ เป็นต้นกำลัง ซึ่งส่งกำลังไปยังเพลย์ที่ต่อเข้ากับสายพาน เชื่อมต่อกับลูกกลิ้งรีดกระจูดที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 76 มิลลิเมตร มีแกนเพลลาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 25 มิลลิเมตร จำนวน 6 ชุด ลูกกลิ้งจำนวน 12 ลูก ระบบให้ความร้อน ใช้ความร้อนจากฮีตเตอร์แห่งแรงดันไฟฟ้า 220 โวลต์ กำลังไฟฟ้า 650 วัตต์ พร้อมติดตั้งเซนเซอร์สำหรับวัดระดับความร้อน สำหรับควบคุมอุณหภูมิให้มีความร้อนอยู่ในระดับตามที่กำหนด ปัจจัยการทดลองประกอบด้วย ความเร็วรอบมี 3 ระดับ คือ 10 20 และ 30 รอบต่อนาที และอุณหภูมิการรีดมี 3 ระดับ คือ 50 70 และ 90 องศาเซลเซียส ผลการทดลองพบว่า เครื่องรีดเส้นกระจูดแบบลูกกลิ้งร่วมความร้อนที่ความเร็วรอบ 10 รอบต่อนาที และอุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส เป็นสภาวะที่ดี เนื่องจากไม่มีอัตราการแตกของเส้นกระจูด และมีค่าความหนาของเส้นกระจูดที่ต้องการ โดยมีอัตราการผลิต 6.9 กิโลกรัมต่อชั่วโมง มากกว่าแรงงานที่มีอัตราการผลิต 3.6 กิโลกรัมต่อชั่วโมง คิดเป็น 2 เท่าของแรงงานคน ความหนาของเส้นกระจูดมีค่าเฉลี่ยความหนาเส้นกระจูดที่ 0.31 มิลลิเมตร

คำสำคัญ : หัตถกรรมจักสาน; กระจูด; เครื่องรีดเส้น; ลูกกลิ้งร้อน

¹ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย

¹ Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Srivijaya

* Corresponding Author, Tel. 08 1569 7303, E - mail: worapong.b@rmutsv.ac.th

Abstract

This study aims to design, construct, and evaluate the performance of a co-heating sedge thread rolling machine to support the development and improvement of sedge weaving handicrafts. The machine has dimensions of 450 mm in width, 850 mm in length, and 700 mm in height. It is powered by a 24 V, 350 W DC motor that drives pulleys connected to a belt, transmitting power to six sets of rollers designed for sedge compression. The rollers have a diameter of 76 mm, and the shafts have a diameter of 25 mm, with a total of 12 rollers. The heating system utilizes a 220 V, 650 W heating rod equipped with a temperature sensor to ensure precise control of the heat level. The experimental parameters included three rotational speeds: 10, 20, and 30 rpm, and three rolling temperatures: 50, 70, and 90 °C. The results demonstrated that the optimal operating conditions were achieved at a rotational speed of 10 rpm and a temperature of 90 °C. Under these conditions, there was no thread breakage, and the desired sedge thread thickness was consistently produced. The machine achieved a production rate of 6.9 kg/hr, which is twice the efficiency of manual labor 3.6 kg/hr. The average sedge thread thickness was measured at 0.31 mm.

Keywords: Basketry Handicrafts; Krajoody; Rolling Machine; Hot Roller

บทนำ

กระจูด (ชื่อวิทยาศาสตร์: *Lepironia articalata*) เป็นพันธุ์ไม้จำพวก กก ลักษณะลำต้นกลมสีเขียวอ่อน สูงประมาณ 1 - 2 เมตร ออกดอกเป็นกระจุกแน่น กระจูดชอบขึ้นในพื้นที่น้ำขังซึ่งเรียกว่า โพรเซ หรือ ป่าพรุ มีน้ำขังตลอดปี มีถิ่นกำเนิดจากทางเกาะมาดากัสการ์ มอริเชียส ลังกา สุมาตรา แหลมมลายู หมู่เกาะต่าง ๆ ในแหลมมลายู แหลมอินโดจีนตอนริมฝั่งทะเล ช่องกบ บอร์เนียว ตลอดถึงทวีปออสเตรเลีย ริมฝั่งตะวันออก (Sustainable Arts and Crafts Institute of Thailand, 2019) โดยทั่วไปราษฎรทางภาคใต้ใช้กระจูดในการสานเสื่อ สานใบเรือ เชือกผูกมัด สิ่งของ และกระสอบบรรจุสินค้าเกษตรและสิ่งของอื่น ๆ กรรมวิธีสานเสื่อจุดนั้นจะแตกต่างจากการสานเสื่อทั่วไป คือ จะนำต้นกระจูดมาคลุกดินขาวก่อนตากแดดให้แห้งแล้วจึงทุบต้นกระจูดให้แบนเพื่อให้ความนิ่มตัว หากต้องการให้มีสีสันทึมนำไปย้อมสีก่อนนำมาสาน นิยมนำมาสานเป็นเสื่อปูรองนั่งที่เรียกกันว่า “เสื่อกระจูด” หรือ “เสื่อจุด” โดยการสานเสื่อกระจูดโดยทั่วไปนิยมสานลวดลายมาตรฐาน คือ ลายขัดสอง หรือลายขัดสาม และมีการพัฒนาดัดแปลงลวดลาย เช่น ลายลูกแก้ว ลายดาวล้อมเดือน ลายดอกจันทร์ ลายก้านต่อดอก ลายโคม ลายแก้วเนือง ลายแก้วบ้านดอน ลายตัวหนังสือ เป็นต้น แหล่งผลิตกระจูดที่สำคัญ เช่น ที่หมู่บ้านทะเลน้อย จังหวัดพัทลุง หมู่บ้านป่องกรัง จังหวัดสุราษฎร์ธานี หมู่บ้านสะกอม จังหวัดสงขลา หมู่บ้านทอน จังหวัดนราธิวาส เป็นต้น (Malisuwan, 2018) ปัจจุบันมีการผลิตจำหน่ายมากในตำบลศรี อำเภอชะอวด จังหวัดนครศรีธรรมราช แต่ละพื้นที่มีรูปแบบ ลวดลาย และเอกลักษณ์การทำผลิตภัณฑ์สานกระจูดต่างแตกต่างกันออกไปบ้างตามการพัฒนา ตามวิถีชีวิต ความคิด ความเชื่อ และการใช้งานซึ่งจะต่างกันไปตามแต่ละชุมชน ที่ทะเลน้อย อำเภอควนขนุน จังหวัดพัทลุง เป็นอีกเมืองหนึ่งที่มีป่าพรุและมีต้นกระจูดขึ้นเป็นจำนวนมาก ทำให้เกิดผลิตภัณฑ์สานกระจูดในรูปแบบต่าง ๆ ที่หลากหลายและยังคงเสน่ห์และกลิ่นอายของวิถีแห่งงานหัตถกรรมพื้นบ้านที่สะท้อนเอกลักษณ์ของชุมชน เอกลักษณ์รูปแบบผลิตภัณฑ์กระจูดที่ทะเลน้อย อำเภอควนขนุน จังหวัดพัทลุง อาทิ หมวก เสื่อ กระเป๋า กระสอบ รองเท้า จานรอง เป็นต้น จึงกลายเป็นผลิตภัณฑ์ของฝากที่มีชื่อเสียงที่เป็นที่นิยมสำหรับนักท่องเที่ยวที่มาเยือนถิ่นทะเลน้อยนับมาจนถึงปัจจุบัน

ปัจจุบันชุมชนมีข้อจำกัดในการผลิตเส้นกระจูดที่ขาดคุณภาพ และยังต้องการแรงงานในการผลิตเส้นกระจูดเป็นจำนวนมาก โดยเฉพาะการเตรียมเส้นกระจูดแห้งเพื่อจักสานให้มีความเรียบและมีความหนาเท่ากันสม่ำเสมอ

ซึ่งต้องใช้ความชำนาญในการปฏิบัติ มีอัตราการทำงานต่ำ และคุณภาพไม่คงที่ วัสดุที่เตรียมได้มีผลต่อคุณภาพ และความสวยงามของการจักสานมากที่สุด (Treeamnuak and Treeamnuak, 2013) หากมีคุณภาพดีสามารถช่วยให้ผู้ผลิตทำงานได้ง่าย สะดวก และรวดเร็ว สินค้าที่มีคุณภาพดี ลวดลายสวยงาม มาตรฐานยอมรับ สามารถยกระดับสินค้า และจำหน่ายได้ในราคาที่สูง ในอดีตมีผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการพัฒนากระบวนการรีดเส้นกระจูดอย่างต่อเนื่อง เช่น เครื่องปรับขนาดเส้นกระจูดเพื่องานหัตถกรรมจักสานเส้นกระจูดแบบประณีต โดยใช้ท่อ PVC กลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 150 มิลลิเมตร จำนวน 3 ชุด วางเรียงเป็นแถวลักษณะลาดเอียง ให้ชุดลูกกลิ้งหมุนสวนทางกัน ใช้มอเตอร์ขนาดกำลัง 1 แรงม้า ชุดลูกกลิ้งทุกตัวหมุนพร้อมกันที่ความเร็วรอบ 36 รอบต่อวินาที ผลการทดลองพบว่าเส้นกระจูดที่ผ่านการตากแห้งมาแล้วมีความชื้นอยู่ในเกณฑ์ดี คือ 12.68 และ 16.34 เปอร์เซ็นต์ (%) เมื่อป้อนผ่านชุดลูกกลิ้งของเครื่องปรับขนาดเส้นกระจูด เส้นกระจูดที่ออกมาแบนเท่ากันที่ขนาดความหนา 0.8 มิลลิเมตร ทุกเส้น (Kaewjang et al., 2014) เครื่องรีดและกรีดเส้นผักตบชวาที่สร้างขึ้นมีขนาด 459 x 1048 x 750 มิลลิเมตร ใช้มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับ 220 โวลต์ ขนาด ½ แรงม้า เป็นต้นกำลัง ประกอบไปด้วย ชุดลูกกลิ้งคู่จำนวน 2 ชุด และชุดมีดกรีด 1 ชุด ซึ่งทำหน้าที่กรีดผักตบชวาออกเป็นเส้นขนาด 15 และ 5 มิลลิเมตร นอกจากนี้เครื่องยังถูกออกแบบให้มีช่องป้อนสำหรับการรีดผักตบชวาโดยไม่กรีดได้อีกด้วย ค่าเปอร์เซ็นต์การกรีดอยู่ในช่วง 87.70 - 94.07 % ค่าการใช้พลังงานจำเพาะสูงสุดของเครื่องคือ 259.16 กิโลกรัมต่อกิโลวัตต์ (น้ำหนักผักตบชวาแห้ง) (Jaito et al., 2013) เครื่องรีดเชือกกล้วยเพื่องานหัตถกรรมโดยจะใช้ลูกกลิ้งหมุนเข้าหากันใช้ต้นกำลังจากมอเตอร์ปรับเปลี่ยนระยะห่างของลูกกลิ้งได้เพื่อให้ได้ความหนาตามที่ต้องการ หลังจากสร้างเครื่องรีดเชือกกล้วยแล้ว ได้สาธิตการทำงานของเครื่องให้ผู้เชี่ยวชาญ จำนวน 5 ท่าน ประเมินคุณภาพใน 3 ด้าน คือ ด้านโครงสร้าง ด้านการใช้งาน และด้านคุณภาพของผลิตภัณฑ์ จากการนำผลประเมินนำมาวิเคราะห์ พบว่าเครื่องรีดเชือกกล้วยมีคุณภาพอยู่ในระดับคุณภาพดีมากทั้งในภาพรวมและแต่ละด้าน การวิเคราะห์ประสิทธิภาพของเครื่อง สอดคล้องกับสมมติฐานที่ตั้งไว้ คือ ค่าเฉลี่ยของเปอร์เซ็นต์เส้นดีจากการรีดด้วยเครื่องรีดเชือกกล้วย มีค่าเท่ากับ 97.77 % (Boonrawd et al., 2017) จากงานวิจัยที่เกี่ยวข้องที่ได้กล่าวมานั้นจะพบว่า เครื่องจักรที่อำนวยความสะดวกในการรีดเส้นกระจูด เส้นผักตบชวา หรือเส้นกล้วยนั้นต่างก็ใช้ลูกกลิ้งสองลูกบีบหมุนเข้าหากัน การทำงานเมื่อเสร็จหนึ่งรอบก็จะนำเส้นกระจูดมารีดใหม่อีกครั้งวนไปวนมาจนเสร็จกระจูดนั้นได้ความเรียบตามความต้องการโดยใช้ความรู้สึกและลักษณะทางกายภาพเป็นการตัดสินใจ ซึ่งบางครั้งต้องรีดเส้นกลับไป-กลับมามากหลายรอบ เพื่อให้ได้ความเรียบของเส้นกระจูดตามต้องการ ดังนั้นงานวิจัยพัฒนากระบวนการผลิตเส้นกระจูดเพื่อพัฒนาและยกระดับงานหัตถกรรมจักสานกระจูดในครั้งนี้ได้ออกแบบให้มีการใช้ลูกกลิ้งร้อนในระหว่างการรีดเส้นกระจูด เพื่อเพิ่มอัตราการผลิตของการรีดเส้นกระจูดให้มากขึ้น ลดภาระการรีดเส้นกระจูดซ้ำหลายครั้ง และลดเวลาการทำงานของกระบวนการรีดเส้นกระจูดลง

ดังนั้นจากความสำเร็จ ที่มา และงานวิจัยที่เกี่ยวข้องของผลงานวิจัย งานวิจัยในครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อออกแบบและสร้างเครื่องรีดเส้นกระจูดแบบลูกกลิ้งร่วมความร้อนสำหรับการพัฒนาและยกระดับงานหัตถกรรมจักสานกระจูด และเพื่อทดสอบสมรรถนะการรีดเส้นกระจูดของเครื่องรีดเส้นกระจูดแบบลูกกลิ้งร่วมความร้อน ให้เหมาะสมกับการใช้งานของภาคอุตสาหกรรมครัวเรือน และยกระดับประสิทธิภาพการผลิตของชุมชนต่อไป

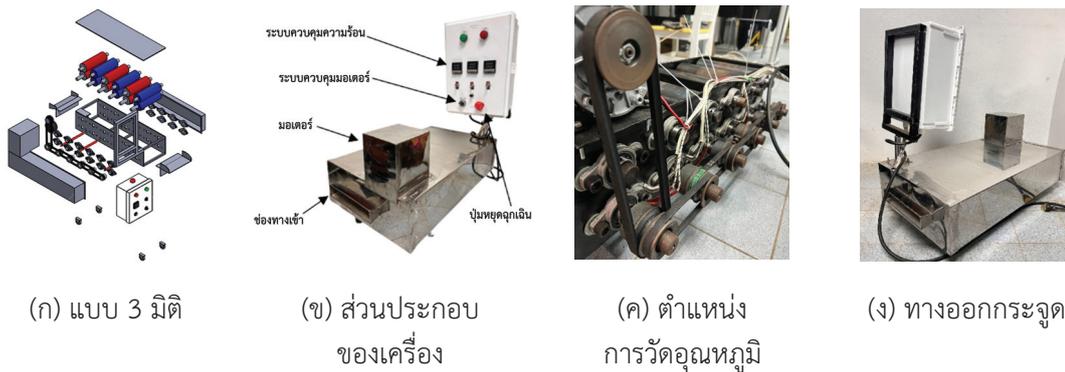
วิธีดำเนินการวิจัย

งานวิจัยในครั้งนี้ได้ออกแบบกระบวนการวิจัยตั้งแต่กระบวนการออกแบบและสร้างเครื่องรีดเส้นกระจูดแบบลูกกลิ้งร่วมความร้อน ปัจจัยในการทดสอบสมรรถนะการรีดเส้นกระจูดของเครื่อง และการประเมินประสิทธิภาพเครื่องรีดเส้นกระจูดแบบลูกกลิ้งร่วมความร้อนโดยกลุ่มผู้ผลิตผลิตภัณฑ์กระจูด วิสาหกิจชุมชนของกลุ่มผู้ผลิตกระจูดสตรีสหกรณ์ ศุภนิมิตชะอวด อำเภอชะอวด จังหวัดนครศรีธรรมราช

1. เครื่องรีดเส้นกระจูดแบบลูกกลิ้งร่วมความร้อน

เครื่องรีดเส้นกระจูดแบบลูกกลิ้งร่วมความร้อน ใช้เหล็กแผ่นขนาดความหนา 6 มิลลิเมตร เป็นส่วนของโครงเครื่อง โดยเครื่องมีขนาดความกว้าง 450 มิลลิเมตร ความยาว 850 มิลลิเมตร และความสูง 700 มิลลิเมตร

โดยเครื่องใช้มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง ขนาดแรงดันไฟฟ้า 24 โวลต์ กำลังไฟฟ้า 350 วัตต์ เป็นต้นกำลัง ซึ่งส่งกำลังไปยัง พลูเลย์ที่ต่อเข้ากับสายพาน เชื่อมต่อกับลูกกลิ้งรีดกระดาษ ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 76 มิลลิเมตร มีแกนเพลก ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 25 มิลลิเมตร เมื่อส่งกำลังเข้าไปยังลูกกลิ้งชุดแรก จะถูกขับเคลื่อนต่อไปยังพลูเลย์ 2 ร่อง ที่ต่อเข้ากับลูกกลิ้งชุดที่สอง และขับเคลื่อนต่อไปยังลูกกลิ้งชุดที่ 3 4 5 และ 6 ตามลำดับ ซึ่งจะมีชุดรีดกระดาษด้วย ลูกกลิ้งจำนวน 6 ชุด ลูกกลิ้งจำนวน 12 ลูก โดยมีระยะห่างของลูกกลิ้งแต่ละชุด ดังตารางที่ 1 ระบบควบคุมความร้อน ใช้ความร้อนจากฮีตเตอร์แห่งแรงดันไฟฟ้า 220 โวลต์ กำลังไฟฟ้า 650 วัตต์ พร้อมติดตั้งเซนเซอร์สำหรับวัดระดับ ความร้อน สำหรับควบคุมอุณหภูมิให้มีความร้อนอยู่ในระดับตามที่กำหนด (Boonchouytan and Rangwangwong, 2023) ดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 เครื่องรีดเส้นกระดาษแบบลูกกลิ้งร่วมความร้อน

ตารางที่ 1 ระยะห่างของลูกกลิ้งแต่ละชุด

ชุดลูกกลิ้ง	1	2	3	4	5	6
ระยะห่างลูกกลิ้ง (มิลลิเมตร)	2.5	2.0	1.5	1.0	0.7	0.3

กระบวนการรีดกระดาษโดยใช้เครื่องรีดเส้นกระดาษแบบลูกกลิ้งร่วมความร้อน เริ่มจากดำเนินการเปิดเบรกเกอร์ ควบคุมเครื่องซึ่งอยู่ในกล่องควบคุม และทำการเปิดสวิตช์มอเตอร์บริเวณกล่องควบคุม จากนั้นเปิดระบบความร้อน ที่กล่องควบคุม รอจนกว่าความร้อนจะถึงระดับอุณหภูมิที่ต้องการ เมื่อได้ความร้อนตามระดับที่ต้องการแล้ว จึงหมุน เปิดปุ่มควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์หมุนตามรอบที่ต้องการ จากนั้นนำส่งเส้นกระดาษผ่านทางช่องทางเข้า ชุดลูกกลิ้ง จะดำเนินการรีดกระดาษให้แบนลง และเส้นกระดาษจะถูกนำส่งต่อไปยังชุดลูกกลิ้งรีดกระดาษต่อ ๆ ไปจนออกสู่ทางออก ภายนอกเครื่องเป็นอันเสร็จสิ้นกระบวนการรีดเส้นกระดาษ

2. เส้นกระดาษ

เส้นกระดาษที่ใช้สำหรับการทดสอบสมรรถนะของเครื่อง จะใช้เส้นกระดาษที่ผ่านการตากแห้ง โดยมีความชื้นของเส้นกระดาษไม่เกิน 10 % ก่อนดำเนินการทดสอบจะวัดความชื้นของเส้นกระดาษด้วยเครื่องวัดความชื้น ยี่ห้อ Wood Moisture Meter รุ่น MT10 โดยมีค่าความละเอียด 0.5 % และมีค่าความคลาดเคลื่อน ± 0.1 % และมีขนาดความหนาของเส้นกระดาษตั้งแต่ 3 - 5 มิลลิเมตร ขนาดความยาวของกระดาษ 900 - 1000 มิลลิเมตร และกำหนด จุดวัดความหนาของกระดาษในทุกๆ ระยะความยาวที่ 200 มิลลิเมตร โดยใช้เวอร์เนียคาลิเปอร์ดิจิทัล ค่าความละเอียด 0.01 มิลลิเมตร ยี่ห้อ Mitutoyo เป็นอุปกรณ์วัดความหนาเส้นกระดาษ

3. ปัจจัยในการทดสอบสมรรถนะการรีดเส้นกระดาษของเครื่อง

การทดสอบสมรรถนะการรีดเส้นกระดาษของเครื่อง โดยกำหนดปัจจัยการทดลอง ดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ปัจจัยในการทดสอบสมรรถนะการรีดเส้นกระจุตของเครื่อง

ปัจจัย	ระดับการทดสอบ		
	ระดับ 1	ระดับ 2	ระดับ 3
ความเร็วหมุนลูกกลิ้ง (รอบต่อนาที)	10	20	30
อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	50	70	90

จากตารางที่ 2 กำหนดให้ความเร็วรอบของลูกกลิ้ง (Rotation Speed) มี 3 ระดับ คือ 10 20 และ 30 รอบต่อนาที และกำหนดให้อุณหภูมิการรีด (Temperature) มี 3 ระดับ คือ 50 70 และ 90 องศาเซลเซียส จากนั้นดำเนินการวัดผลความหนาเส้นกระจุตที่ผ่านการรีด และเปรียบเทียบทั้ง 3 ความเร็วรอบ และ 3 อุณหภูมิ โดยผลที่ได้เป็นค่าเฉลี่ยของการรีดเส้นกระจุตจำนวน 10 ครั้ง เพื่อนำผลการทดสอบการรีดเส้นกระจุตความร้อนที่อุณหภูมิที่เหมาะสมมาเปรียบเทียบกับกรีดเส้นกระจุตด้วยแรงงานคนต่อไป ทั้งนี้จะกำหนดระยะห่างของชุดลูกกลิ้งชุดที่ 6 ให้มีขนาดระยะห่าง 0.3 มิลลิเมตร เนื่องจากเป็นขนาดความหนาของกระจุตที่กลุ่มหัตถกรรมนำไปผลิตงานจักรสานได้ จากนั้นดำเนินการวิเคราะห์เศรษฐศาสตร์เพื่อนำเครื่องต้นแบบไปใช้งานในการผลิตต่อไป

ผลการทดลองและวิจารณ์

ผลจากการทดสอบสมรรถนะการรีดเส้นกระจุตของเครื่องรีดเส้นกระจุตแบบลูกกลิ้งร่วมความร้อนที่ความเร็วรอบ 3 ระดับ คือ 10 20 และ 30 รอบต่อนาที และอุณหภูมิการรีด 3 ระดับ คือ 50 70 และ 90 องศาเซลเซียส จากนั้นนำมาวัดความหนาของเส้นกระจุตหลังจากการรีด ทำการบันทึกผลการทดลอง ดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ผลการทดสอบประสิทธิภาพการรีดเส้นกระจุตด้วยเครื่องรีดเส้นกระจุตแบบลูกกลิ้งร่วมความร้อน

ความเร็วหมุนเชื่อม (รอบต่อนาที)	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	เวลาในการรีด (วินาที)	ความหนากระจุต (มิลลิเมตร)			ค่าเฉลี่ย	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน
			ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		
10		2.7	0.60	0.52	0.31	0.48	0.15
20	50	1.9	0.63	0.55*	0.32	0.50	0.16
30		1.2	0.61*	0.53	0.33	0.49	0.14
10		2.8	0.52	0.32	-	0.42	0.14
20	70	1.8	0.53	0.33	-	0.43	0.14
30		1.1	0.54*	0.34	-	0.44	0.14
10		2.6	0.31	-	-	0.31	0.00
20	90	1.9	0.33	-	-	0.33	0.00
30		1.3	0.35	-	-	0.35	0.00

สัญลักษณ์ * คือ เส้นกระจุตที่ขาดหลังจากการรีด และสัญลักษณ์ - คือ เส้นกระจุตมีความหนาตามที่ต้องการ

ผลการทดลองการรีดเส้นกระจุตจากตารางที่ 3 พบว่า ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส ทั้ง 3 ความเร็วรอบพบว่า ความเร็วรอบ 10 รอบต่อนาที จะได้ขนาดความหนาของกระจุตน้อยที่สุด คือ 0.31 มิลลิเมตร นอกจากนี้เมื่อสังเกตลักษณะทางกายภาพพบว่า เส้นกระจุตมีความเรียบ ไม่มีรอยแตกของเส้นกระจุตที่ความเร็วรอบ 10 รอบต่อนาที ดังรูปที่ 2 และพบรอยแตกของเส้นกระจุตที่ความเร็วรอบ 20 และ 30 รอบต่อนาที ดังรูปที่ 3 ทั้งนี้เมื่อใช้อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส ในการรีดเส้นกระจุตจะต้องดำเนินการรีดเส้นกระจุตจำนวน 3 รอบ จึงจะทำให้ได้ขนาดความหนาของเส้นกระจุตที่มีค่าความหนา 0.30 - 0.35 มิลลิเมตร ที่พร้อมนำไปผลิตเป็นหัตถกรรมจักรสานต่อไป

ผลการทดลองการรีดเส้นกระดาษที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส ทั้ง 3 ความเร็วรอบพบว่า ความเร็วรอบ 10 รอบต่อนาที จะได้ขนาดความหนาของกระดาษน้อยที่สุด คือ 0.32 มิลลิเมตร นอกจากนี้เมื่อสังเกตลักษณะทางกายภาพพบว่า เส้นกระดาษมีความเรียบที่ความเร็วรอบ 10 และ 20 รอบต่อนาที ไม่มีรอยแตกของเส้นกระดาษ และพบรอยแตกของเส้นกระดาษที่ความเร็วรอบ 30 รอบต่อนาที ทั้งนี้เมื่อใช้อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส ในการรีดเส้นกระดาษจะต้องดำเนินการรีดเส้นกระดาษจำนวน 2 รอบ จึงจะทำให้ได้ขนาดความหนาของเส้นกระดาษที่มีค่าความหนา 0.30 - 0.35 มิลลิเมตร ที่พร้อมนำไปผลิตเป็นหัตถกรรมจักรสานต่อไป

ผลการทดลองการรีดเส้นกระดาษที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส ทั้ง 3 ความเร็วรอบพบว่า ความเร็วรอบ 10 รอบต่อนาที จะได้ขนาดความหนาของกระดาษน้อยที่สุด คือ 0.31 มิลลิเมตร นอกจากนี้เมื่อสังเกตลักษณะทางกายภาพพบว่า เส้นกระดาษมีความเรียบ และไม่พบรอยแตกของเส้นกระดาษทั้ง 3 ความเร็วรอบ ทั้งนี้เมื่อใช้อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส ในการรีดเส้นกระดาษเพียง 1 รอบก็จะทำให้ได้ขนาดความหนาของเส้นกระดาษที่มีค่าความหนา 0.30 - 0.35 มิลลิเมตร ที่พร้อมนำไปผลิตเป็นหัตถกรรมจักรสานต่อไป



รูปที่ 2 เส้นกระดาษที่ผ่านการรีดด้วยลูกกลิ้งร้อน



รูปที่ 3 เส้นกระดาษที่มีการฉีกขาดหลังจากการรีด

วิจารณ์ผลการทดลองจากตารางที่ 3 พบว่า ความเร็วรอบของลูกกลิ้งมีผลต่อการรีดเส้นกระดาษ กล่าวคือ เมื่อเพิ่มความเร็วรอบมากขึ้นจะทำให้ขนาดความหนาของกระดาษมากขึ้นตามไปด้วย และในขณะเดียวกันถ้าใช้ความร้อนในการรีดเส้นกระดาษที่มีค่าความชื้นสูงจะส่งผลต่อการแตกของเส้นกระดาษ ซึ่งให้ผลการทดลองไปในทิศทางเดียวกัน คือ การรีดผักตบชวาที่มีความชื้นที่สูงมีผลต่อความเรียบ และความสามารถในการรีดของผักตบชวา (Kaewjang et al., 2014; Treeamnuak et al., 2017) ซึ่งให้ผลการทดลองไปในทิศทางเดียวกัน คือ ความชื้นของเส้นกระดาษมีผลต่อการใช้เครื่องปรับขนาดเส้นกระดาษเป็นอย่างมาก ความชื้นที่สูงส่งผลต่อความเรียบ ความนิ่ม และการแตกของเส้นกระดาษ (Treeamnuak and Treeamnuak, 2013)

ผลการทดสอบการวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) ของเครื่องรีดเส้นกระดาษแบบลูกกลิ้งร่วมความร้อน เพื่อเปรียบเทียบผลของความเร็วรอบของลูกกลิ้งและอุณหภูมิการรีดต่อความหนาของเส้นกระดาษที่รีดได้ โดยมีปัจจัยความเร็วรอบของลูกกลิ้ง 3 ระดับ คือ 10 20 และ 30 รอบต่อนาที และอุณหภูมิการรีด 3 ระดับ คือ 50 70 และ 90 องศาเซลเซียส ผลการวิเคราะห์ดังตารางที่ 4

ตารางที่ 4 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของประสิทธิภาพการรีดเส้นกระจุตด้วยเครื่องรีดเส้นกระจุตแบบลูกกลิ้งร่วมความร้อน

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	8	0.123852	0.015481	174.17	0.000
Linear	4	0.122415	0.030604	344.29	0.000
Rotation speed (rpm)	2	0.002496	0.001248	14.04	0.000
Temperature (°C)	2	0.119919	0.059959	674.54	0.000
2-Way Interactions	4	0.001437	0.000359	4.04	0.016
Rotation speed (rpm) *	4	0.001437	0.000359	4.04	0.016
Temperature (°C)					
Error	18	0.001600	0.000089		
Total	26	0.125452			
S = 0.0094281 R-Sq = 98.72 % R-Sq(adj) = 98.16 % R-sq(pred) = 97.13 %					

จากตารางที่ 4 สามารถสรุปได้จากการวิเคราะห์ข้อมูลของความหนาเส้นกระจุตที่รีดได้ตามปัจจัยต่าง ๆ ได้ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ R^2 เท่ากับ 98.72 % หมายความว่า ความผันแปรต่าง ๆ ของการทดลองที่สามารถควบคุมได้ (Controllable) เช่น เครื่องมือ อุปกรณ์หรือปัจจัยต่าง ๆ ที่กำหนดให้คงที่ในการทดลองมีค่าเท่ากับ 98.72 % ส่วนที่เหลือประมาณ 1.28 % เกิดจากปัจจัยต่าง ๆ ที่ไม่สามารถควบคุมได้ (Uncontrollable) ดังนั้นการออกแบบการทดลองครั้งนี้ ถือว่าอยู่ในระดับที่ยอมรับได้เนื่องจากค่า R^2 มากกว่า 70 %

ปัจจัยทั้งสองปัจจัย คือ ความเร็วรอบของลูกกลิ้ง และอุณหภูมิการรีด ส่งผลอย่างมีนัยสำคัญต่อความหนาเส้นกระจุตที่รีดได้ เนื่องจากมีค่า P-Value น้อยกว่า 0.05 ซึ่งเชื่อได้ว่าส่งผลโดยตรงต่อการรีดเส้นกระจุต นอกจากนี้ ปัจจัยร่วมของทั้งสองปัจจัยส่งผลอย่างมีนัยสำคัญต่อความหนาเส้นกระจุตที่รีดได้ เนื่องจากมีค่า P-Value น้อยกว่า 0.05 ซึ่งเชื่อได้ว่าส่งผลโดยตรงต่อการรีดเส้นกระจุตเช่นกัน

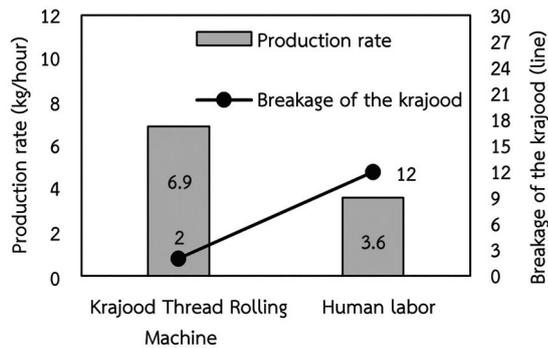
ผลการทดสอบสมรรถนะการรีดเส้นกระจุตของเครื่องรีดเส้นกระจุตแบบลูกกลิ้งร่วมความร้อน โดยการนำผลการทดลองจากตารางที่ 3 ที่ความเร็วรอบ 10 รอบต่อนาที และอุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส มาดำเนินการทดลองหาสมรรถนะการรีดเส้นกระจุตของเครื่องรีดเส้นกระจุตแบบลูกกลิ้งร่วมความร้อน เนื่องจากไม่มีอัตราการแตกของเส้นกระจุต และมีค่าความหนาของเส้นกระจุตเท่ากับ 0.31 มิลลิเมตร ซึ่งมีผลของค่าความหนาใกล้เคียงกับขนาดที่เหมาะสมสำหรับงานหัตถกรรมจักสาน และได้ทำการจับเวลาการรีดเส้นกระจุตด้วยเครื่องจักรเปรียบเทียบกับแรงงานคน ผลการทดลองดังตารางที่ 5

ตารางที่ 5 ผลการรีดเส้นกระจุตเมื่อเปรียบเทียบระหว่างเครื่องจักรกับแรงงาน

รูปแบบการรีดกระจุต	อัตราการผลิต (กิโลกรัมต่อชั่วโมง)	ความหนาของกระจุต (มิลลิเมตร)	การฉีกขาดของกระจุต (เส้น)
เครื่องจักร	6.9	0.31	2
แรงงานคน	3.6	0.34	12

จากตารางที่ 5 ผลการทดลองรีดเส้นกระจุตเปรียบเทียบระหว่างการใช้เครื่องจักรกับแรงงานคนพบว่า เครื่องรีดเส้นกระจุตแบบลูกกลิ้งร่วมความร้อนมีกำลังการผลิต 6.9 กิโลกรัมต่อชั่วโมง มากกว่าแรงงานคนที่มีกำลังการผลิต 3.6 กิโลกรัมต่อชั่วโมง ซึ่งการใช้เครื่องให้กำลังการผลิตเป็น 2 เท่าของกำลังการผลิตจากแรงงานคน เมื่อมองในภาพของผลผลิตที่ได้จากการรีดเส้นกระจุต คือ เส้นกระจุตที่ผ่านการรีดเสร็จเรียบร้อยแล้วนั้นพบว่า ความหนาของเส้นกระจุต

ทั้งเครื่องรีดเส้นกระจูดและแรงงานคน สามารถควบคุมความหนาของเส้นกระจูด และสามารถนำเส้นกระจูดไปใช้ในงานหัตถกรรมจักสานได้ โดยมีค่าเฉลี่ยความหนาเส้นกระจูดที่ 0.31 และ 0.34 มิลลิเมตร ทั้งนี้ยังพบว่า การแตกของเส้นกระจูดที่รีดด้วยเครื่องรีดเส้นกระจูดมีปริมาณที่น้อยกว่าแรงงานคนจำนวน 10 เส้น คิดเป็นร้อยละ 10 ของจำนวนเส้นกระจูดทั้งหมด โดยที่เครื่องรีดเส้นกระจูดมีเส้นกระจูดที่แตกเสียหายจำนวน 2 เส้น คิดเป็นร้อยละ 2 ของจำนวนเส้นกระจูดทั้งหมด ส่วนแรงงานคนมีเส้นกระจูดที่แตกเสียหายจำนวน 12 เส้น คิดเป็นร้อยละ 12 ของจำนวนเส้นกระจูดทั้งหมด ทั้งนี้สามารถแสดงผลการเปรียบเทียบผลการทดสอบการรีดเส้นกระจูด ดังรูปที่ 4



รูปที่ 4 การเปรียบเทียบผลการศึกษาประสิทธิภาพการรีดกระจูด

วิจารณ์ผลการทดลองจากตารางที่ 5 พบว่า เครื่องรีดเส้นกระจูดแบบลูกกลิ้งร่วมความร้อน มีกำลังการผลิตที่มากกว่าคนถึง 2 เท่า และยังลดของเสียที่เกิดจากการรีดกระจูดลงมากกว่า 5 เท่า โดยเมื่อเทียบกับแรงงานก็เกิดของเสียจากการรีดเส้นกระจูดเช่นเดียวกัน ซึ่งถ้าวิเคราะห์ถึงจำนวนในการผลิตเส้นกระจูดที่ผลิตได้จากเครื่องรีดเส้นกระจูดโดยประมาณ 6.9 กิโลกรัม จะมีเส้นกระจูดเสียหายจำนวน 0.2 เส้นต่อกิโลกรัม และจะมีเส้นกระจูดเสียหายจากการรีดด้วยแรงงานคนจำนวน 3 เส้นต่อกิโลกรัม เช่นกัน ซึ่งมีค่าการเสียหายของกระจูดจากการรีดน้อยกว่าด้วยแรงงานคนซึ่งให้ผลการทดลองไปในทิศทางเดียวกัน คือ การทดลองรีดเชือกกล้วยด้วยเครื่องรีดเชือกกล้วยพบว่าจำนวนเปอร์เซ็นต์ของเส้นดีไม่ขาดสภาพสมบูรณ์พร้อมที่จะนำไปจักสานได้จะมีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 97.77 ซึ่งเป็นค่าที่มากพอที่จะยอมรับได้ (Boonrawd et al., 2017)

การศึกษาประสิทธิภาพความหนาของเส้นกระจูดที่ได้หลังจากการรีดพบว่า เส้นกระจูดที่รีดได้จากเครื่องรีดเส้นกระจูดแบบลูกกลิ้งร่วมความร้อนมีความหนาที่น้อยกว่า (บางกว่า) เส้นกระจูดที่รีดได้จากแรงงานคน ซึ่งมีช่วงความหนาห่างกันไม่มากนักเพียง 0.03 มิลลิเมตร ทั้งนี้เนื่องจากการรีดเส้นกระจูดด้วยแรงงานคนเมื่อใช้เวลานานความสามารถในการใช้กำลังของแรงงานคนก็จะลดน้อยลง เกิดความเมื่อย ความล้า และความเบื่อหน่าย ทำให้ความสม่ำเสมอในการรีดเส้นกระจูดลดน้อยลงไปตามลำดับ ซึ่งให้ผลการทดลองไปในทิศทางเดียวกัน คือ ความสามารถของเครื่องจักรมีมากกว่าแรงงานคน อีกทั้งแรงงานคนยังเกิดความเมื่อยล้าสะสมยิ่งส่งผลกระทบต่อคุณภาพของงานที่จะเกิดตามมาด้วย (Inkai and Tungmee, 2007; Madtharak et al., 2013; Inthrayut and Phurahong, 2016; Phopha et al., 2024)

ผลการวิเคราะห์ต้นทุนของการสร้างเครื่องรีดเส้นกระจูดแบบลูกกลิ้งร่วมความร้อนพบว่า กระบวนการรีดเส้นกระจูดมีอัตราค่าจ้างคนงานตามจำนวนกิโลกรัมที่ได้ซึ่งคิดเป็นราคากิโลกรัมละ 40 บาท ค่าไฟฟ้า ประกอบด้วยมอเตอร์ 1 ตัว จำนวน 250 วัตต์ ฮีตเตอร์ 3 ตัว ตัวละ 350 วัตต์ จำนวน 1,050 วัตต์ รวมค่าไฟฟ้าเป็น 855.45 บาท ต่อเดือน ค่าไสหุ่ย ค่ากระจูดประมาณ 1,500 บาทต่อวัน อัตราค่าจ้างแรงงานคนขั้นต่ำประมาณ 350 บาทต่อวัน และค่าเสื่อมราคาของเครื่องซึ่งมีระยะเวลาการใช้งานประมาณ 5 ปี มีมูลค่าซากที่คาดว่าจะได้รับจากการขายเครื่องรีดเส้นกระจูดประมาณ 3,000 บาท และเครื่องรีดเส้นกระจูดแบบลูกกลิ้งร่วมความร้อนมีราคาเท่ากับ 12,500 บาท และจากการวิเคราะห์ผลการดำเนินงานข้างต้น จึงสรุปได้ว่าแรงงานคน 1 คน ทำงานได้วันละ 4 ชั่วโมงต่อวัน สามารถรีดเส้นกระจูดได้ 14.4 กิโลกรัมต่อวัน คิดเป็นจำนวนเงินทั้งหมด 576 บาทต่อวัน และเครื่องรีดเส้นกระจูดแบบลูกกลิ้งร่วม



ความร้อนใช้แรงงานคน 1 คน ทำงานได้วันละ 4 ชั่วโมงต่อวัน ในการควบคุมเครื่องรีดเส้นกระจุตแบบลูกกลิ้งร่วม ความร้อน 27.6 กิโลกรัมต่อวัน คิดเป็นจำนวนเงิน 1,104 บาท หักค่าไฟฟ้า ค่าสื้อหุ้ย ค่าจ้างแรงงานคน และค่าเสื่อมราคาของเครื่องเรียบร้อยแล้ว

คิดระยะเวลาในการคืนทุนของเครื่องรีดเส้นกระจุตแบบลูกกลิ้งร่วมความร้อนมีราคาต้นทุนค่าเครื่อง 30,000 บาท ใช้งานได้ 5 ปี มีมูลค่าซากประมาณ 8,500 บาท รายได้จากการรีดกระจุตหลังจากหักค่าใช้จ่ายคงเหลือ 12,720 บาทต่อเดือน มีอัตราค่าดอกเบี้ยเท่ากับ 4 เปอร์เซ็นต์ต่อปี เปิดค่าตัวประกอบดอกเบี้ยทบต้นที่ 4 % ต่อปีหรือ 0.33 % ต่อเดือน ที่ระยะเวลา 60 เดือน จะได้ (P/F, i%, n) เท่ากับ 0.8227

ใช้วิธีมูลค่าปัจจุบัน

$$\begin{aligned}
 0 &= \sum PW \\
 &= -P + A(P/A, i\%, n) + F(P/F, i\%, n) \\
 &= -30,000 + 12,737 (P/A, 0.33\%, n) + 8,500 (P/F, 0.33\%, 60)
 \end{aligned}$$

ใช้วิธีการแทนค่า n กว่าจะได้ค่าเท่ากับ 0 หรือใกล้เคียง

แทนค่า n เท่ากับ 1 เดือน

จะได้

$$\begin{aligned}
 0 &= -30,000 + 12,737 (P/A, 0.33\%, 4) + 8,500 (P/F, 0.33\%, 60) \\
 0 &= -30,000 + 12,737 (0.9967) + 8,500 (0.8227) \\
 0 &\neq -10,312.08
 \end{aligned}$$

แทนค่า n เท่ากับ 2 เดือน

จะได้

$$\begin{aligned}
 0 &= -30,000 + 12,737 (P/A, 0.33\%, 5) + 8,500 (P/F, 0.33\%, 60) \\
 0 &= -30,000 + 12,737 (1.9901) + 8,500 (0.8227) \\
 0 &\neq 2,340.85
 \end{aligned}$$

ได้ค่า PW เป็นค่าบวกและค่าลบ ดังนั้น Interpolate ที่ n = 1 เดือน และ n = 2 เดือน

$$\frac{"n - 1"}{"2 - 1"} = \frac{"0 - (-10,312.08)"}{"2,340.85 - (-10,312.08)}$$

จะได้ n = 1.82 เดือน

ดังนั้นระยะเวลาในการคืนทุนของการรีดเส้นกระจุต 1 เดือน 25 วัน

ผลการประเมินประสิทธิภาพเครื่องรีดเส้นกระจุตแบบลูกกลิ้งร่วมความร้อนโดยกลุ่มผู้ผลิตผลิตภัณฑ์กระจุตวิสาหกิจชุมชนของกลุ่มผู้ผลิตกระจุตสตรีสหกรณ์ศุภนิมิตชะอวด อำเภอชะอวด จังหวัดนครศรีธรรมราช จำนวน 60 คน ตอบแบบสอบถามความพึงพอใจในการใช้งานเครื่อง ภายหลังจากการได้ทดลองใช้และรวบรวมการแสดงความความคิดเห็นเกี่ยวกับลักษณะการทำงานของเครื่องรีดเส้นกระจุตแบบลูกกลิ้งร่วมความร้อน ดังตารางที่ 6

ตารางที่ 6 ผลการประเมินความพึงพอใจจากการใช้เครื่องจักร

ลำดับ	หัวข้อการประเมิน	ค่าเฉลี่ย	ลำดับที่
1	ความสามารถในการรีดเส้นกระจุตของเครื่องได้อย่างต่อเนื่อง	5.00	1
2	ความหนาของเส้นกระจุตที่ได้จากการรีดด้วยเครื่อง	4.30	6
3	ความปลอดภัยในการใช้เครื่องรีดเส้นกระจุต	4.50	4
4	ความสามารถในการรีดเส้นกระจุตของเครื่อง	4.45	5
5	การควบคุมการทำงานของเครื่อง	4.70	3
6	ความสะดวกในการใช้งานเครื่อง	4.85	2
ค่าเฉลี่ย		4.63	

จากตารางที่ 6 สามารถสรุปได้ว่า ลำดับที่ 1 ความสามารถในการรีดกระดาษของเครื่องได้อย่างต่อเนื่องค่าเฉลี่ย 5 ลำดับที่ 2 ความสะดวกในการใช้งานของเครื่องค่าเฉลี่ย 4.85 ลำดับที่ 3 การควบคุมการทำงานของเครื่องค่าเฉลี่ย 4.70 ลำดับที่ 4 ความปลอดภัยในการใช้งานรีดกระดาษของเครื่องค่าเฉลี่ย 4.50 ลำดับที่ 5 ความสามารถในการรีดกระดาษของเครื่องค่าเฉลี่ย 4.45 ลำดับที่ 6 ขนาดความหนาของกระดาษที่ได้จากการรีดด้วยเครื่องค่าเฉลี่ย 4.30 และความพึงพอใจในประสิทธิภาพการทำงานของเครื่องรีดเส้นกระดาษแบบลูกกลิ้งร่วมความร้อน โดยรวมเฉลี่ย 4.63 อยู่ในความพอใจมากที่สุด

วิจารณ์ผลการประเมินประสิทธิภาพเครื่องรีดเส้นกระดาษแบบลูกกลิ้งร่วมความร้อนโดยกลุ่มผู้ผลิตผลิตภัณฑ์กระดาษ พบว่า ลำดับ 1 คือ ความสามารถในการรีดกระดาษของเครื่องได้อย่างต่อเนื่อง ซึ่งแสดงให้เห็นว่า กลุ่มผู้ผลิตมีความต้องการที่จะผลิตผลิตภัณฑ์จากกระดาษรีดอย่างต่อเนื่อง แต่เนื่องด้วยที่ผ่านมาใช้แรงงานคนเป็นหลักซึ่งอาจทำให้กำลังการผลิตไม่เพียงพอต่อความต้องการของผู้บริโภค ซึ่งเมื่อได้ทดลองใช้เครื่องยิ่งส่งผลให้เกิดแรงกระตุ้นในการสร้างผลิตภัณฑ์อย่างต่อเนื่อง ซึ่งให้ผลการทดลองไปในทิศทางเดียวกัน คือ การส่งเสริมกระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์ของชุมชนต่าง ๆ ให้มีประสิทธิภาพเพิ่มมากขึ้น สามารถนำแนวคิดไปพัฒนาใช้กับการแก้ไขปัญหากระบวนการผลิตต่าง ๆ ของกลุ่มชุมชนอื่น ๆ ได้ โดยมีต้นทุนที่ต่ำ (Srirattanamongkol et al., 2020)

สรุปผลและการอภิปรายผล

เครื่องรีดเส้นกระดาษแบบลูกกลิ้งร่วมความร้อนมีขนาดความกว้าง 450 มิลลิเมตร ความยาว 850 มิลลิเมตร และความสูง 700 มิลลิเมตร ใช้มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงขนาดแรงดันไฟฟ้า 24 โวลต์ กำลังไฟฟ้า 350 วัตต์ เป็นต้น กำลัง ลูกกลิ้งรีดกระดาษมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 76 มิลลิเมตร ส่งกำลังขับไปยังลูกกลิ้งชุดแรกเชื่อมต่อไปยังลูกกลิ้งชุดที่สอง และขับเคลื่อนต่อไปยังลูกกลิ้งชุดที่ 3 4 5 และ 6 ตามลำดับ ซึ่งจะมีชุดรีดกระดาษด้วยลูกกลิ้งจำนวน 6 ชุด ระบบให้ความร้อน ใช้ความร้อนจากฮีตเตอร์แห่งแรงดันไฟฟ้า 220 โวลต์ กำลังไฟฟ้า 650 วัตต์ พร้อมติดตั้งเซนเซอร์สำหรับวัดระดับความร้อน สำหรับควบคุมอุณหภูมิให้มีความร้อนอยู่ในระดับตามที่กำหนด

เครื่องรีดเส้นกระดาษแบบลูกกลิ้งร่วมความร้อนใช้ความเร็วรอบ 10 รอบต่อนาที และอุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส มาดำเนินการทดลองหาสมรรถนะการรีดเส้นกระดาษของเครื่องรีดเส้นกระดาษแบบลูกกลิ้งร้อน เนื่องจากไม่มีอัตราการแตกของเส้นกระดาษ และมีค่าความหนาของเส้นกระดาษที่ต้องการ

เครื่องรีดเส้นกระดาษแบบลูกกลิ้งร่วมความร้อนมีกำลังการผลิต 6.9 กิโลกรัมต่อชั่วโมง มากกว่าแรงงานคนที่มีกำลังการผลิต 3.6 กิโลกรัมต่อชั่วโมง คิดเป็น 2 เท่าของแรงงานคน ความหนาของเส้นกระดาษ ทั้งเครื่องรีดเส้นกระดาษและแรงงานคน สามารถควบคุมความหนาของเส้นกระดาษ และสามารถนำเส้นกระดาษไปใช้ในงานหัตถกรรมจักสานได้ โดยมีค่าเฉลี่ยความหนาเส้นกระดาษที่ 0.31 และ 0.34 มิลลิเมตร

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการจัดสรรจัดงบประมาณผ่านกองทุนส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม (ววน.) ประจำปี พ.ศ. 2566 ภายใต้แผนงานยุทธศาสตร์ การวิจัยและพัฒนานวัตกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย

References

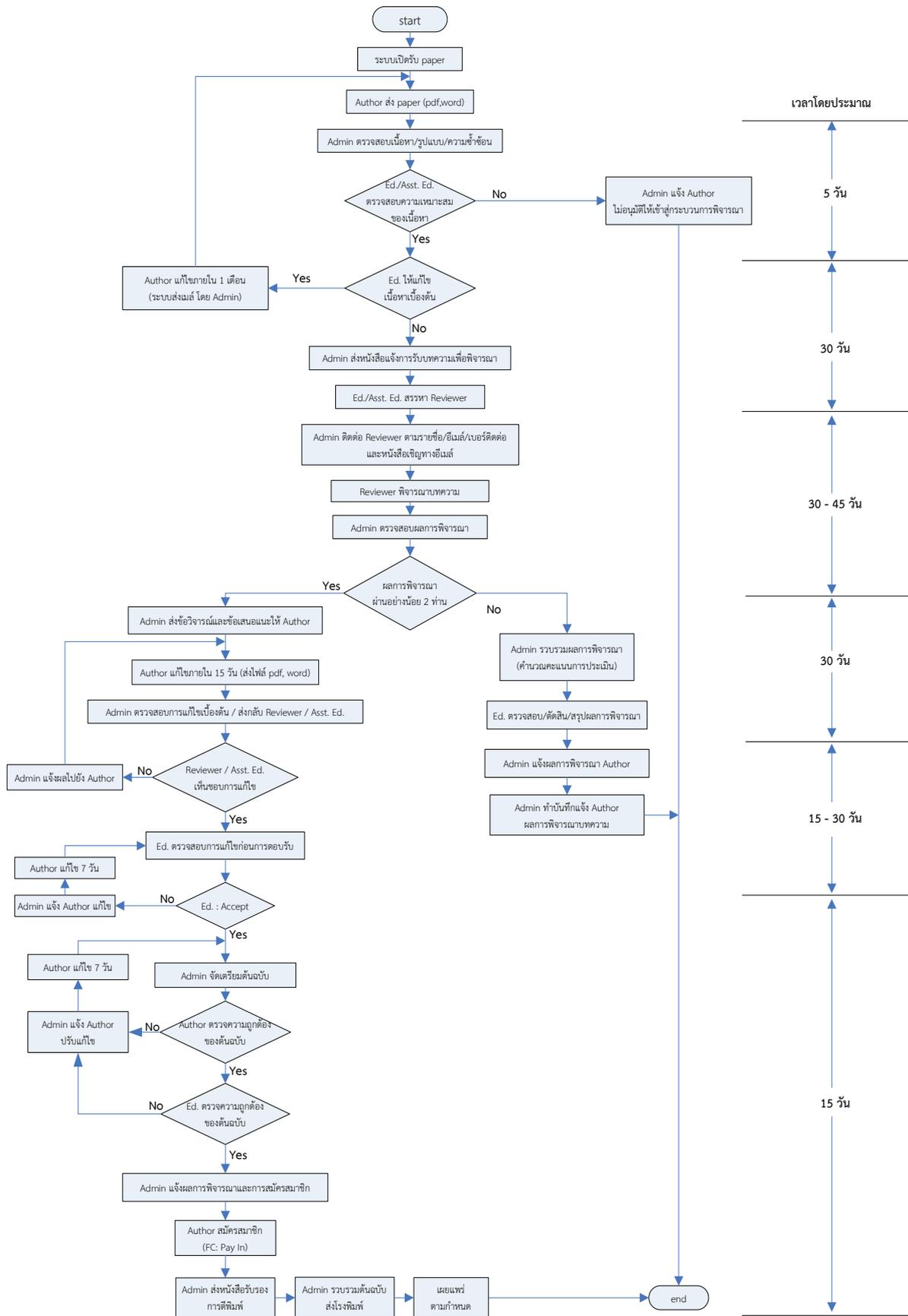
Boonchouytan, W. and Rangwangwong, S. (2023). *Automatic Krajoed Ironing Machine*. (Thailand Petty Patent No. 2303002415).

- Boonrawd, W., Rattanaporn, N. and Boonsong, W. (2017). *Design and Creation of Rolling Machine for Banana Tree Fiber*. Proceedings of the 55th Kasetsart University Annual Conference: Architecture and Engineering (pp. 361-369). Bangkok: Thailand Research Fund (TRF). https://kukr.lib.ku.ac.th/kukr_es/index.php?/BKN/search_detail/result/366148 (in Thai)
- Inkai, D. and Tungmee, R. (2007). *Design and Development of Water Hyacinth Rolling and Cutting Machine for Handicraft Work* [Bachelor's Thesis, Naresuan University]. <https://nuir.lib.nu.ac.th/dspace/handle/123456789/3713> (in Thai)
- Inthrayut, S. and Phurahong, T. (2016). *Development Squeezer Machine for Reed Organ Using Controller Arduino*. Proceedings of the 9th National Conference on Technical Education, (pp. 172-176). Bangkok: King Mongkut's University of Technology North Bangkok. <http://ncteched.fte.kmutnb.ac.th/nc9/NCTechEd09/NCTechEd09TME11.pdf> (in Thai)
- Jaito, K., Treamnuk, T. and Treamnuk, K. (2013). *Water Hyacinth Slitting and Cutting Machine*. Proceedings of the 14th TSAE International Conference & 22nd TSAE National Conference, (pp. 266-270). Prachuap Khiri Khan: Hua Hin Grand Hotel & Plaza. <http://www.repository.rmutt.ac.th/dspace/handle/123456789/1785> (in Thai)
- Kaewjang, P., Thongwicchan, T. and Sangkhavasi, K. (2014). *The Development Machine of Handicrafts Interlace a Exquisitely Line Krajoood*. Rattaphum College, Rajamankala University of Technology Srivijaya. <https://www.repository.rmutsv.ac.th/handle/123456789/1524?show=full> (in Thai)
- Madtharak, W., Tuktian, P. and Maneecho, N. (2013). Assessment of Design and Construction of the Bulrush Plants Fleecing Machine by Ergonomics Method. *Engineering Journal Chiang Mai University*, 20(2), 42-55. <https://ird.skru.ac.th/RMS/file/58466.pdf> (in Thai)
- Malisuwan, Ch. (2018). *The Identity of Saltmarsh Bulrush at Narathiwat Province*. Faculty of Management Science, Yala Rajabhat University. <https://wb.yru.ac.th/bitstream/yr/4718/1/10.pdf> (in Thai)
- Phopha, S., Sasen, C. and Saenpong, A. (2024). Study the Appropriate Value of the Roller Clearance in a 4-Roll Raw Rubber Sheet Rolling Machine. *Research on Modern science and Utilizing Technological Innovation Journal (RMUTI Journal)*, 17(3), 40-50. <https://ph01.tci-thaijo.org/index.php/rmutijo/article/view/257152/173483> (in Thai)
- Srirattanamongkol, S., Plengjaroensirichai, N. and Jassadapakorn, B. (2020). Production of Water Hyacinth Slicer by 3D Printer Technology. *Christian University Journal*, 26(2), 125-137. <https://he01.tci-thaijo.org/index.php/CUTJ/article/view/241789/166173> (in Thai)
- Sustainable Arts and Crafts Institute of Thailand. (2019). *Krajoood Basketry Arts and Crafts*. Bangkok: SACIT.
- Treamnuk, K. and Treamnuk, T. (2013). Development and Testing of Water Hyacinth Rolling and Splitting Machine for Handicraft. *Thai Society of Agricultural Engineering Journal*, 19(1), 25-30. <https://li01.tci-thaijo.org/index.php/TSAEJ/article/view/64173/52650> (in Thai)
- Treamnuk, K., Treamnuk, T., Jaito, K., Wanmanee, B. and Prangpru, N. (2017). *A Development of Internal Surface Infrared Drum Dryer*. Faculty of Engineering, Suranaree University of Technology. <http://sutir.sut.ac.th:8080/jspui/bitstream/123456789/7107/2/Fulltext.pdf>



RMUTI Journal

วารสารงานวิจัยด้านวิทยาศาสตร์สมัยใหม่ และการใช้ประโยชน์นวัตกรรมเทคโนโลยี (RMUTI Journal)



วารสารงานวิจัยด้านวิทยาศาสตร์สมัยใหม่ และการใช้ประโยชน์นวัตกรรมเทคโนโลยี
(RMUTI Journal)
Research on Modern science and Utilizing Technological
Innovation Journal (RMUTI Journal)

1. ประเภทของบทความที่ตีพิมพ์

1.1 บทความวิจัย (Research article) เป็นบทความที่ได้จากงานวิจัย

1.2 บทความวิชาการ (Academic article) เป็นบทความที่มีลักษณะดังนี้

1. เป็นบทความจากการทบทวนเอกสาร ซึ่งเป็นผลมาจากการวิจัยหลาย ๆ ครั้ง ถือเป็นบทความที่มีความสำคัญเป็นอย่างยิ่ง
2. เป็นบทความนำเสนอกระบวนการในการพัฒนาผลิตภัณฑ์ การทดสอบภาคสนาม รวมไปถึงเทคนิคการวิเคราะห์ใหม่ ๆ
3. เป็นบทความที่มาจากประสบการณ์ หรือความชำนาญของผู้เขียน
4. เป็นบทความเกี่ยวกับนโยบายด้านต่าง ๆ ของหน่วยงาน

2. รูปแบบการพิมพ์บทความ

การตั้งค่านำกระดาษ

- ระยะขอบ
ขอบบน (Top Margin) 2.5 ซม. ขอบล่าง (Bottom Margin) 2.5 ซม.
ขอบขวา (Right Margin) 2.5 ซม. ขอบซ้าย (Left Margin) 2.5 ซม.
- ระยะห่างบรรทัด 1 เท่า
- รูปแบบตัวอักษร ใช้ตัวอักษร TH SarabunPSK ทั้งบทความภาษาไทยและภาษาอังกฤษ
- การย่อหน้า 7 ตัวอักษร พิมพ์ตัวที่ 8
- จำนวนหน้า 12 หน้า แต่ไม่ควรเกิน 15 หน้าขนาด A4
- ชื่อบทความ จัดชิดซ้ายหน้ากระดาษ ขนาดตัวอักษร 22 ตัวหนา
- ชื่อผู้เขียน จัดชิดซ้ายหน้ากระดาษ ขนาดตัวอักษร 16 ตัวหนา
- ที่อยู่ จัดชิดซ้ายหน้ากระดาษ ขนาดตัวอักษร 14 ตัวปกติ
- ชื่อหัวเรื่องหลักในบทความ เช่น “บทคัดย่อ” “คำสำคัญ” “วิธีดำเนินการ” “ผลการวิจัย” “สรุปผลการวิจัย” “กิตติกรรมประกาศ” “เอกสารอ้างอิง” จัดชิดซ้ายหน้ากระดาษ ขนาดตัวอักษร 20 ตัวหนา
- ชื่อหัวเรื่องรอง จัดชิดซ้ายหน้ากระดาษ ขนาดตัวอักษร 15 ตัวหนา
- เนื้อหาในส่วนต่าง ๆ และคำสำคัญ จัดชิดซ้ายหน้ากระดาษ ขนาดตัวอักษร 15 ตัวปกติ
- คำสำคัญ จัดชิดซ้ายหน้ากระดาษ ขนาดตัวอักษร 14 ตัวปกติ
- ชื่อตาราง
บทความภาษาไทย ใช้คำว่า “ตารางที่...” และบทความภาษาอังกฤษ ใช้คำว่า “Table...” ขนาดตัวอักษร 15 ตัวหนา จัดชิดซ้ายหน้ากระดาษไว้เหนือตาราง ตามด้วยคำอธิบายชื่อตารางที่เป็นตัวอักษรขนาด 15 ตัวปกติ
- ชื่อรูปภาพ
บทความภาษาไทย ใช้คำว่า “รูปที่...” และบทความภาษาอังกฤษ ใช้คำว่า “Figure...” ขนาดตัวอักษร 15 ตัวหนา ชิดซ้ายหน้ากระดาษไว้ด้านล่างรูปภาพ ตามด้วยคำอธิบายชื่อรูปที่เป็นตัวอักษรขนาด 15 ตัวปกติ

3. ส่วนประกอบของบทความแต่ละประเภท

3.1 บทความวิจัย จะประกอบไปด้วย

ก. ส่วนปก

1. **ชื่อบทความ (Title)** ภาษาไทยและภาษาอังกฤษ ควรสั้นกระชับรัด ไม่ยาวเกินไป และสื่อความหมายของเรื่องที่ทำได้อย่างชัดเจน บทความภาษาไทยชื่อเรื่องต้องมีทั้งภาษาไทยและภาษาอังกฤษ บทความภาษาอังกฤษชื่อเรื่องไม่ต้องมีภาษาไทย

2. **ชื่อผู้เขียน (Authors)** ชื่อเต็ม - นามสกุลเต็ม ของผู้เขียนทุกคน โดยให้รายละเอียดต้นสังกัดของผู้เขียนไว้ที่บรรทัดล่างสุดของหน้าแรก พร้อมทั้งระบุชื่อผู้เขียนประสานงาน (Corresponding Author) ด้วยการระบุเบอร์โทรศัพท์ และ E-mail Address ที่สามารถติดต่อได้ และให้ใส่เครื่องหมายดอกจันตรงตัวกำกับไว้ต่อท้ายนามสกุล และตัวเลขยก ให้เขียนไว้ต่อท้ายนามสกุล เพื่อระบุที่อยู่ของผู้เขียน

3. **บทคัดย่อ (Abstract)** ภาษาไทยและภาษาอังกฤษ ควรสั้น ตรงประเด็น ครอบคลุมสาระสำคัญของการศึกษา ประกอบไปด้วย วัตถุประสงค์ วิธีการ ผลการวิจัย และการอภิปรายผล เป็นต้น โดยเขียนลงใน 1 ย่อหน้า ถ้าบทความเป็นภาษาไทย จะต้องมีบทคัดย่อภาษาไทย 1 ย่อหน้า และภาษาอังกฤษ 1 ย่อหน้า โดยให้ภาษาไทยขึ้นก่อน เนื้อความในบทคัดย่อภาษาไทยและภาษาอังกฤษต้องมีความหมายเดียวกัน ความยาวของบทคัดย่อภาษาอังกฤษ กำหนดให้มีความยาวได้ไม่เกิน 300 คำ และไม่มีการใส่เอกสารอ้างอิงในบทคัดย่อ

4. **คำสำคัญ (Key Words)** เป็นการกำหนดคำสำคัญที่สามารถไปใช้เป็นส่วนสืบค้นในระบบฐานข้อมูล หากเป็นบทความภาษาไทยต้องมีคำสำคัญ 2 ภาษา คือภาษาไทยและภาษาอังกฤษที่มีความหมายตรงกัน ส่วนกรณีของบทความภาษาอังกฤษให้มีเพียงคำสำคัญในรูปแบบภาษาอังกฤษเท่านั้น จำนวนคำสำคัญที่กำหนดให้มีคำสำคัญได้ อย่างน้อย 3 คำ แต่ไม่เกิน 5 คำ

****หมายเหตุ :** เนื้อหาส่วนปกจะต้องเขียนให้อยู่ในกระดาษจำนวน 1 หน้า เท่านั้น

ข. ส่วนเนื้อหา

1. **บทนำ (Introduction)** เพื่ออธิบายถึงความสำคัญของปัญหา และวัตถุประสงค์ของการวิจัย รวมถึงการทบทวนวรรณกรรม และเอกสารที่เกี่ยวข้อง

2. **วัสดุ อุปกรณ์ และวิธีการ (Materials and Methods) / วิธีดำเนินการวิจัย (Research Methodology)** อธิบายเครื่องมือและวิธีการดำเนินการวิจัยให้ชัดเจน มีรายละเอียดมากพอที่จะทำให้ผู้อ่านสามารถเข้าใจการทดลอง ควรมีการบรรยายวิเคราะห์สถิติหากมีผลการทดลองที่เกี่ยวข้อง

3. **ผลการวิจัย (Results)** เสนอผลการทดลองอย่างชัดเจน ตรงประเด็น มีรายละเอียดครบถ้วน เป็นการประเมินการตีความ การวิเคราะห์ในแง่มุมต่าง ๆ ของผลที่ได้ว่าเป็นไปตามวัตถุประสงค์หรือไม่ มีความสอดคล้องหรือขัดแย้งกับผลงานของผู้อื่นอย่างไร ควรมีรูปภาพและ/หรือตารางประกอบการอธิบายผลในตารางและรูปภาพ ต้องไม่ซ้ำซ้อนกัน รูปภาพและตารางของบทความที่เป็นภาษาไทยให้บรรยายเป็นภาษาไทย รูปภาพและตารางของบทความที่เป็นภาษาอังกฤษ ให้บรรยายเป็นภาษาอังกฤษ

4. **การอภิปรายผล (Discussion)** เป็นการอภิปรายผลการวิจัย เพื่อให้ผู้อ่านมีความเห็นคล้อยตาม เพื่อเปรียบเทียบกับผลการวิจัยของผู้อื่น พร้อมทั้งเสนอแนวทางที่จะนำไปใช้ประโยชน์ผลการวิจัยและการอภิปรายผล (Results and Discussion) อาจนำมาเขียนตอนเดียวกันได้

5. **บทสรุป (Conclusion)** สรุปประเด็น และสาระสำคัญของการวิจัย เป็นเนื้อหาที่ไม่ซ้ำกับบทคัดย่อ อาจมีข้อเสนอแนะหรือการนำผลวิจัยไปใช้ประโยชน์

6. **กิตติกรรมประกาศ (Acknowledgements)** เพื่อแสดงความขอบคุณแก่ผู้ให้ความช่วยเหลือในการวิจัย และได้รับการสนับสนุนทุนวิจัย อาจมีหรือไม่ก็ได้

7. **เอกสารอ้างอิง (References)** เป็นรายการเอกสารที่ถูกอ้างไว้ในส่วนของเนื้อเรื่อง เพื่อใช้เป็นหลักในการค้นคว้าวิจัยจำนวนเอกสารที่นำมาอ้างอิงตอนท้ายต้องมีจำนวนตรงกับที่ถูกอ้างอิงไว้ในส่วนของเนื้อเรื่องที่ปรากฏในบทความเท่านั้น โดยให้ยึดถือรูปแบบการเขียนเอกสารอ้างอิงตามที่ทางวารสาร มทร.อีสาน กำหนด และต้องเขียนในรูปแบบภาษาอังกฤษเท่านั้น

3.2 บทความวิชาการ จะประกอบไปด้วย

ก. ส่วนปก

มีส่วนประกอบเหมือนบทความวิจัย และเขียนให้อยู่ในกระดาษ จำนวน 1 หน้า เท่านั้น

ข. ส่วนเนื้อหา

1. บทนำ (Introduction) เป็นส่วนที่มาจากมูลเหตุของการเขียนบทความ
2. วิธีการศึกษา/วิธีดำเนินการ (Method) (ถ้ามี) เป็นการอธิบายวิธีการศึกษา หรือการดำเนินการตามประเภทของบทความวิชาการ
3. ผลการศึกษา/ผลการดำเนินการ (Results) เป็นการเสนอผลอย่างชัดเจน ตามประเด็นโดยลำดับตามหัวข้อที่ศึกษาหรือดำเนินการ
4. สรุป (Conclusion) สรุปประเด็น และสาระสำคัญที่ได้จากการศึกษา
5. เอกสารอ้างอิง (References) ใช้รูปแบบที่วารสารกำหนด รายการอ้างอิงต้องเขียนในรูปแบบภาษาอังกฤษเท่านั้น

4. การอ้างอิงเอกสารในเนื้อเรื่องของบทความ (In-text Citations)

การอ้างอิงเอกสารในเนื้อเรื่องของบทความให้ใช้ระบบนามปี (Name-year System) เท่านั้น การอ้างอิงส่วนท้ายบทความใช้รูปแบบ APA 7th ตามมาตรฐานสากล การอ้างอิงในเนื้อเรื่องหน้าข้อความ เช่น งานวิจัยของ Vitsanusat (2015) ... การอ้างอิงในเนื้อเรื่องหลังข้อความ เช่น (Vitsanusat, 2015) ในกรณีที่มีผู้แต่ง 2 คน ให้ใส่คำเชื่อม “and” เช่น (Vitsanusat and Phachirarat, 2016) ถ้าผู้แต่งมากกว่า 2 คน ให้ใส่เฉพาะชื่อคนแรกแล้วตามด้วย “et al.” คั่นด้วยเครื่องหมายจุลภาค (,) เช่น (Sadrmomtazi et al., 2009) และถ้ามีการอ้างอิงในเนื้อเรื่องมากกว่า 1 รายการ ให้เรียงลำดับปีที่พิมพ์จากน้อยไปหามากและคั่นแต่ละชุดด้วยเครื่องหมาย (;) เช่น (Sadrmomtazi et al., 2009; Vitsanusat, 2015; Vitsanusat and Phachirarat, 2016)

5. การเขียนรายการเอกสารอ้างอิง (Reference List)

การเขียนรายการเอกสารอ้างอิงทั้งหมดที่ได้มีการอ้างอิงในเนื้อหาให้เรียงตามลำดับตัวอักษร โดยรายการเอกสารอ้างอิงท้ายบทความให้จัดชิดซ้ายหน้ากระดาษ กรณีชื่อผู้แต่งในบทความมีมากกว่า 3 คน ให้ใส่ชื่อผู้แต่งให้ครบทุกคนคั่นด้วยเครื่องหมายจุลภาค (,) คนสุดท้ายให้เชื่อมด้วย “and” กรณีเอกสารอ้างอิงที่มีการแปลจากภาษาไทยเป็นภาษาอังกฤษ ให้เขียนวงเล็บไว้ด้านหลังเอกสารอ้างอิงรายการนั้นเป็น (in Thai)

1) หนังสือ

ชื่อผู้แต่ง./ (ปีที่พิมพ์)./ชื่อหนังสือ/(พิมพ์ครั้งที่)./สำนักพิมพ์.

Author./ (Year)./Title of the book/(Edition ed.)/Publisher.

ชื่อผู้แต่ง./ (ปีที่พิมพ์)./ชื่อบทหรือชื่อบทความ./ใน/ชื่อบรรณาธิการ/(บ.ก.)/ชื่อหนังสือ/(น./เลขหน้า)./สำนักพิมพ์.

Author./ (Year)./Title of the chapter./In/Editor/(Eds.)/Title of the book/(pp./xx-xxx)./สำนักพิมพ์.

ตัวอย่างเช่น

Suksawat, M. (2004). *Handbook of Flower Agriculture and Media for Ornamental Plants*. House and Garden, Bangkok.

Johnson, R.A. and Wichern, D.W. (1998). *Applied Multivariate Statistical Analysis* (4thed). Englewood Cliffs, Prentice Hall, Inc., New Jersey.

World Health Organization. (2013). *The World Health Report 2013: Research for Universal Health Coverage*. WHO.

Jacobbeer, L.F. and Rand, A.G. (1982). Biochemical of seafood. In Martin, R.E., Flick, F.J., Hebard, C.E. and Ward, D.R. (Eds.), *Chemistry and Biochemistry of Marine Food Products* (pp. 347-365). AVI Inc, Westport.

2) หนังสืออิเล็กทรอนิกส์

ชื่อผู้แต่ง./ (ปีที่พิมพ์)./ชื่อหนังสือ/(พิมพ์ครั้งที่)./URL

Author./ (Year)./Title of the book/(Edition ed.)./URL

ชื่อผู้แต่ง./ (ปีที่พิมพ์)./ชื่อบทหรือชื่อบทความ./ใน/ชื่อบรรณาธิการ/(บ.ก.)./ชื่อหนังสือ/(น./เลขหน้า)./URL

Author./ (Year)./Title of the chapter./In Editor/(Eds.)./Title of the book/(Edition ed.,/pp./xx-xxx)./URL

ชื่อ นามสกุล./ (ปีที่พิมพ์)./ชื่อหนังสือ/(พิมพ์ครั้งที่)./https://doi.org/xxxxxxx

Author, A.A./ (Year)./Title of the book/(Edition ed.)./https://doi.org/xxxxxxx

ตัวอย่างเช่น

Starke, J.R. (2011). Tuberculosis: Mycobacterium tuberculosis. In R.M. Khegman, B.F. Stanton, J.W. Geme, N.F. Schor, R.E. Behrman (Eds). *Nelson textbook of pediatrics* (9th ed., pp. 996-1011). <http://www.clinicalkey.com>

Chu, Z. (2022). People-Oriented Education Transformation. <https://doi.org/10.1007/978-981-16-6353-6>

3) บทความในวารสาร

ชื่อผู้แต่ง (ให้นำนามสกุลขึ้นก่อน ตามด้วยตัวอักษรย่อตัวแรกของชื่อตัว ชื่อกลาง ตามลำดับ)./ (ปีที่พิมพ์)./ชื่อบทความ./ชื่อวารสาร (ให้ใช้ชื่อเต็ม)./ปีที่(ฉบับที่)./หน้าแรก-หน้าสุดท้าย.

ชื่อผู้แต่ง (ให้นำนามสกุลขึ้นก่อน ตามด้วยตัวอักษรย่อตัวแรกของชื่อตัว ชื่อกลาง ตามลำดับ)./ (ปีที่พิมพ์)./ชื่อบทความ./ชื่อวารสาร (ให้ใช้ชื่อเต็ม)./ปีที่(ฉบับที่)./หน้าแรก-หน้าสุดท้าย./URL

ชื่อผู้แต่ง (ให้นำนามสกุลขึ้นก่อน ตามด้วยตัวอักษรย่อตัวแรกของชื่อตัว ชื่อกลาง ตามลำดับ)./ปีที่พิมพ์./ชื่อบทความ./ชื่อวารสาร (ให้ใช้ชื่อเต็ม)./ปีที่(ฉบับที่)./หน้าแรก-หน้าสุดท้าย./http://doi.org/เลข doi

ตัวอย่างเช่น

Komhom, S. (2018). Comparison of Dye-Sensitized Solar Cells Performance using Natural Dye Sensitizer Extracted from Zingiber cassumunar and Clitoria tematea. *RMUTI Journal Science and Technology*, 11(3), 1-16.

Saptamongkol, A., Nasaeng, P., Wongsas, A., Kroehong, W., Sata, V. and Chindapasirt, P. (2024). Mechanical and Microstructural Properties of Geopolymer Paste from High Calcium Fly Ash Containing Basalt Fiber Powder from Waste Insulation. *Research on Modern Science and Utilizing Technological Innovation Journal (RMUTI Journal)*, 17(3), 70-83. <https://ph01.tci-thaijo.org/index.php/rmutijo/article/view/257472/173486>

Somna, K., Jaturapitakkul, C., Kajitvichyanukul, P. and Chindapasirt, P. (2011). NaOH-activated Ground Fly Ash Geopolymer Cured at Ambient Temperature. *Fuel*, 90(6), 2118-2124. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2011.01.018>

4) รายงานการประชุมเชิงวิชาการ

ชื่อผู้แต่ง./ (ปี)./ชื่อบทความ./ใน/ชื่อบรรณาธิการ/(บ.ก.)./ชื่อหัวข้อการประชุม./ชื่อการประชุม/(น./เลขหน้า)./ฐานข้อมูล.

Author./ (Year)./Title./In/Editor/(Eds.)./Title of conference./Title of Conference/(pp./xx-xxx)./database.

กรณีมีเลข DOI หรือ URL ให้เติมต่อท้ายจากฐานข้อมูล ตัวอย่าง ชื่อฐานข้อมูล./https://doi.org/xxxx

ชื่อผู้แต่ง./ (ปี)./ชื่อเรื่อง./ชื่อเรื่องย่อ./ชื่อวารสาร./ปีที่(ฉบับที่)./หน้าแรก-หน้าสุดท้าย./URL

Author, A. and Author, B./ (Year)./Title:/Sub-title./Journal./ปีที่(ฉบับที่)./หน้าแรก-หน้าสุดท้าย./URL

ตัวอย่างเช่น

Bedenel, A.-L., Jourdan, L. and Biernacki, C. (2019). *Probability estimation by an adapted genetic algorithm in web insurance*. In R. Battiti, M. Brunato, I. Kotsireas, & P. Pardalos (Eds.), *Lecture notes in computer science: Vol. 11353. Learning and intelligent optimization* (pp. 225-240). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-030-05348-2_21

Herculano-Houzel, S., Collins, C.E., Wong, P., Kaas, J.H. and Lent, R. (2008). The basic nonuniformity of the cerebral cortex. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 105(34), 12593-12598. <https://www.pnas.org/doi/full/10.1073/pnas.0805417105>

5) วิทยานิพนธ์

ชื่อผู้แต่ง./ (ปีที่เผยแพร่)./ชื่อวิทยานิพนธ์/[วิทยานิพนธ์ปริญญาดุษฎีบัณฑิต ไม่ได้ตีพิมพ์หรือวิทยานิพนธ์ปริญญา
มหาบัณฑิต ไม่ได้ตีพิมพ์]/ชื่อมหาวิทยาลัย.

Author, A.A./ (Year)./Thesis Title/[Unpublished doctoral or master's thesis]/Name of the Institution
awarding the degree.

ชื่อผู้แต่ง./ (ปีที่เผยแพร่)./ชื่อวิทยานิพนธ์/[วิทยานิพนธ์ปริญญาดุษฎีบัณฑิต หรือวิทยานิพนธ์ปริญญา
มหาบัณฑิต]/ชื่อมหาวิทยาลัย./ชื่อเว็บไซต์./URL

ชื่อผู้แต่ง./ (ปีที่เผยแพร่)./ชื่อวิทยานิพนธ์/(หมายเลข UMI หรือ เลขลำดับอื่น ๆ)/[วิทยานิพนธ์ปริญญา
ดุษฎีบัณฑิต หรือ วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต]/ชื่อมหาวิทยาลัย./ชื่อฐานข้อมูล.

ตัวอย่างเช่น

Stewart, Y. (2000). *Dressing the tarot* [Unpublished master's thesis]. Auckland University of Technology.

Miller, T. (2019). *Enhancing readiness: An exploration of the New Zealand Qualified Firefighter* [Master's
thesis, Auckland University of Technology]. Tuwhera. <https://openrepository.aut.ac.nz/handle/10292/12338>

Becker, J.C. (2013). *Landscape-level influences on community composition and ecosystem function
in a large river ecosystem* (Publication No. 3577776) [Doctoral dissertation, Graduate Council
of Texas State University - San Marcos]. ProQuest Dissertations and Theses Global.

6) เว็บไซต์

ชื่อ-สกุล./ (ปี./วัน/เดือนที่เผยแพร่)./ชื่อบทความ./ชื่อเว็บไซต์./URL

Author/(Year,/Date/Month)./Title of the work: Subtitle./Website name./URL

ตัวอย่างเช่น

Tomoyuki, Ohe. (2019, 29 August). *The chemical structure of drugs affects their toxicity*. Keio Research
Highlights. <https://research-highlights.keio.ac.jp/2019/08/b.html>

6. รูปแบบการใส่รูปภาพในเนื้อหาบทความ

- 1) ชื่อรูปภาพห้ามขึ้นต้นด้วยคำว่า “แสดง”
- 2) รูปภาพ ให้ระบุลำดับที่ของรูปโดยใช้คำว่า “รูปที่...” และต้องมีคำอธิบายใส่ไว้ใต้รูปและอยู่ในเนื้อหาบทความเรียงลำดับรูปภาพในการอ้างอิง เช่น รูปที่ 1 รูปที่ 1-3
- 3) จัดรูปภาพไว้กึ่งกลางหน้ากระดาษใกล้ตำแหน่งที่มีการระบุถึงรูปภาพ และคำอธิบายจัดชิดซ้ายหน้ากระดาษ ดังรูปที่ 1
- 4) ไฟล์ของรูปภาพต้องเป็นไฟล์ที่มีนามสกุล .jpg, .png, .tiff หรือ .eps เท่านั้น ความละเอียดไม่ต่ำกว่า 300 dpi
- 5) ลายเส้นที่ปรากฏบนรูปภาพต้องมีความคมชัด กรณีที่เป็นรูปภาพ ต้องระบุชื่อแกนต่าง ๆ ให้ครบถ้วน
- 6) กรณีที่มีรูปภาพย่อย ควรจัดให้รูปภาพย่อยทั้งหมดอยู่ในหน้าเดียวกัน สำหรับบทความภาษาไทย ให้เขียนคำบรรยายใต้ชื่อรูปย่อยแต่ละรูป และกำหนดลำดับของรูปภาพด้วยตัวอักษร ตัวอย่างเช่น



(ก) รูปย่อยที่ 1



(ข) รูปย่อยที่ 2

รูปที่ 1 ตัวอย่างการเขียนคำอธิบายรูปภาพ

สำหรับบทความภาษาอังกฤษ ใช้คำว่า “Figure...” และรูปภาพย่อยให้ใช้อักษร (a), (b),... แทนการกำหนดรูปภาพย่อย

- 7) การเว้นระยะบรรทัด ก่อนรูปภาพ ให้เว้น 1 บรรทัด และหลังจากชื่อรูปภาพ ให้เว้น 1 บรรทัด
- 8) การใช้ภาพสี อาจทำให้เกิดความสวยงาม แต่ให้คำนึงถึงการสื่อความหมายกรณีที่มีการจัดพิมพ์เอกสารแบบขาวดำเพื่อให้ผู้อ่านสามารถเข้าใจได้ กรณีที่เป็นกราฟควรกำหนดลักษณะเส้นที่แตกต่างกัน เพื่อให้สามารถเข้าใจได้ เมื่อมีการจัดพิมพ์แบบขาว - ดำ
- 9) ขนาดของรูปต้องไม่ใหญ่เกินกว่าความกว้างของหน้ากระดาษที่กำหนดไว้
- 10) หากเป็นการคัดลอกรูปภาพมาจากที่อื่น ผู้เขียนควรมีการอ้างอิงแหล่งที่มาให้ถูกต้อง

7. รูปแบบการใส่ตารางในเนื้อหาบทความ

- 1) ชื่อตารางห้ามขึ้นต้นด้วยคำว่า “แสดง”
- 2) ตาราง ให้ระบุลำดับที่ของตารางโดยใช้คำว่า “ตารางที่...” และต้องมีคำอธิบายใส่ไว้เหนือตารางและอยู่ในเนื้อหาบทความเรียงลำดับตารางในการอ้างอิง เช่น ตารางที่ 1 ตารางที่ 1-3
- 3) จัดคำอธิบายไว้ชิดขอบด้านซ้ายของหน้ากระดาษใกล้ตำแหน่งที่มีการระบุถึงตาราง และตารางอยู่กึ่งกลางหน้ากระดาษ ควรจัดเนื้อหาตารางให้อยู่บนหน้าเดียวกัน ดังตารางที่ 1 กรณีที่ตารางมีความยาวเกินหน้ากระดาษ ให้ใส่ชื่อตาราง “ตารางที่...” ไว้ที่ด้านบนของตารางในหน้าแรก และใส่ชื่อตาราง “ตารางที่... คำอธิบายตาราง (ต่อ)” ไว้ที่ด้านบนของตารางในหน้าถัดไป
- 4) ขนาดของตารางต้องไม่ใหญ่เกินกว่าความกว้างของหน้ากระดาษที่กำหนดไว้
- 5) การเว้นระยะบรรทัด ก่อนชื่อตาราง ให้เว้น 1 บรรทัด และหลังสิ้นสุดตาราง ให้เว้น 1 บรรทัด
- 6) การกำหนดเส้นขอบตาราง ให้กำหนดเฉพาะเส้นด้านบน และด้านล่างของบรรทัด ดังตัวอย่าง

ตารางที่ 1 ตัวอย่างการนำเสนอตาราง

Table Head	Table Column Head	
	Subhead (unit)	Subhead (unit)
xxx	123	456
xxx	321	654

8. รูปแบบการใส่สมการในเนื้อหาบทความ

- 1) จัดตำแหน่งของสมการไว้กึ่งกลางหน้ากระดาษ
- 2) พิมพ์สมการด้วยโปรแกรม MathType โดยใช้รูปแบบตัวอักษร Times New Roman ขนาด 11
- 3) ระบุเลขลำดับสมการโดยเขียนไว้ในวงเล็บ () จัดตำแหน่งเลขสมการชิดขวาของหน้ากระดาษ เช่น

$$y = ax + b \quad (1)$$

- 4) ทุกสมการต้องมีการอ้างถึงในเนื้อหา ให้เรียงลำดับสมการโดยการเขียนไว้ในวงเล็บ () เช่นเดียวกับที่ปรากฏในสมการ
- 5) การเว้นระยะบรรทัด ก่อนสมการ ให้เว้น 1 บรรทัด และหลังสมการ ให้เว้น 1 บรรทัด

9. การดำเนินงานของกองบรรณาธิการ

- 1) บทความที่ส่งเข้าวารสาร ต้องส่งผ่านระบบออนไลน์ที่ <https://ph01.tci-thaijo.org/index.php/rmutjo/index>
- 2) บทความที่ถูกส่งเข้ามาในระบบ กองบรรณาธิการจะพิจารณาบทความเบื้องต้นเกี่ยวกับความถูกต้องของรูปแบบทั่วไป **บทความที่ไม่ดำเนินการตามรูปแบบที่กำหนดจะไม่รับเข้าสู่กระบวนการพิจารณา** โดยผู้ทรงคุณวุฒิ และจะส่งกลับเพื่อทำการแก้ไข ดังนั้น เพื่อให้เกิดความรวดเร็วในเข้าสู่กระบวนการพิจารณาผล ผู้เขียนควรดำเนินการจัดทำวารสารให้ถูกต้องตามรูปแบบที่กำหนดอย่างเคร่งครัด
- 3) เมื่อบทความผ่านการพิจารณาให้ตีพิมพ์ลงในวารสาร และผู้เขียนได้ดำเนินการจัดเตรียมเอกสารต่าง ๆ อย่างถูกต้อง ครบถ้วนตามข้อกำหนดของวารสารเป็นที่เรียบร้อยแล้ว ผู้เขียนจะได้รับหนังสือรับรองการตีพิมพ์บทความเพื่อเป็นการยืนยัน
- 4) หากทางวารสารตรวจพบว่าบทความที่ถูกส่งเข้ามามีการคัดลอก หรือเผยแพร่ในที่อื่น ๆ ก่อนหน้า หรือมีการดำเนินการใด ๆ อันเป็นการกระทำที่ผิดจรรยาบรรณของนักวิจัย ทางวารสารจะดำเนินการทำหนังสือแจ้งไปยังหน่วยงานต้นสังกัด และระงับการพิจารณาและรับบทความจากผู้เขียนบทความนั้นเป็นระยะเวลาอย่างน้อย 5 ปี



หมายเลขบทความ
.....
(สำหรับเจ้าหน้าที่)

แบบฟอร์มการส่งบทความ
วารสารงานวิจัยด้านวิทยาศาสตร์สมัยใหม่ และ การใช้ประโยชน์นวัตกรรมเทคโนโลยี (RMUTI Journal)
Research on Modern science and Utilizing Technological Innovation Journal
(RMUTI Journal)

วันที่

ข้าพเจ้า (นาย/นาง/นางสาว)

ระดับการศึกษาสูงสุด ตำแหน่งทางวิชาการ

หน่วยงาน

ที่อยู่ที่สามารถติดต่อได้สะดวก

โทรศัพท์..... โทรสาร..... โมบาย.....

e-mail.....

ขอส่ง บทความวิจัย บทความวิชาการ

สาขาของบทความ (กรุณาเลือก)

- Chemistry Engineering Materials Science
 Environmental Science Mathematics

ชื่อบทความ (ภาษาไทย)

.....

.....

(ภาษาอังกฤษ)

.....

.....

ชื่อผู้เขียนร่วม (พร้อมคำนำหน้าชื่อ อีเมล และเบอร์โทรศัพท์)

1.
2.
3.
4.
5.

ขอเสนอชื่อผู้ทรงคุณวุฒิที่มีความเชี่ยวชาญในสาขาที่เกี่ยวข้อง

1. ชื่อ-สกุล.....ตำแหน่งทางวิชาการ.....

คุณวุฒิ.....สาขาที่เชี่ยวชาญ.....

หน่วยงานที่สังกัด.....

ที่อยู่สำหรับส่งเอกสาร.....

หมายเลขโทรศัพท์.....Email.....

2. ชื่อ-สกุล.....ตำแหน่งทางวิชาการ.....

คุณวุฒิ.....สาขาที่เชี่ยวชาญ.....

หน่วยงานที่สังกัด.....

ที่อยู่สำหรับส่งเอกสาร.....

หมายเลขโทรศัพท์.....Email.....

หมายเหตุ

1. ผู้ทรงคุณวุฒิต้องมีตำแหน่งทางวิชาการ ระดับผู้ช่วยศาสตราจารย์ขึ้นไป หรือจบการศึกษาระดับปริญญาเอก และต้องไม่สังกัดหน่วยงานเดียวกับผู้นิพนธ์

2. กองบรรณาธิการขอสงวนสิทธิ์ในการเป็นผู้พิจารณาคัดเลือกผู้ทรงคุณวุฒิเพื่อพิจารณาผลงานทางวิชาการ

ข้าพเจ้าได้รับทราบและยินดีปฏิบัติตามเงื่อนไขและข้อกำหนดต่าง ๆ ในแบบฟอร์มแนบท้าย ซึ่งมีรายละเอียดอยู่ใน “คำแนะนำในการเตรียมต้นฉบับบทความ” ที่ทางกองบรรณาธิการวารสาร RMUTI Journal ได้กำหนดขึ้น และยินดีให้กองบรรณาธิการมีสิทธิ์ที่จะไม่รับพิจารณา หากไม่จัดรูปแบบตามที่กำหนด ยินยอมให้มีสิทธิ์ในการเลือกสรรหาผู้กลั่นกรองโดยอิสระเพื่อพิจารณาด้านฉบับที่ข้าพเจ้า (และผู้แต่งร่วม) ส่งมา ยินยอมให้กองบรรณาธิการสามารถตรวจแก้ไขต้นฉบับดังกล่าวได้ตามที่เห็นสมควร และข้าพเจ้า “ขอรับรองว่า บทความนี้ไม่เคยลงตีพิมพ์ในวารสารใดมาก่อน ไม่อยู่ระหว่างการพิจารณาจากวารสารอื่น และยินยอมว่าบทความที่ตีพิมพ์ลงในวารสารวิชาการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน ถือเป็นลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน”

หากข้าพเจ้ามีความประสงค์ในการขอยกเลิกการพิจารณาบทความหลังจากวันที่ได้รับหนังสือยืนยันการรับบทความ ข้าพเจ้ายินดีดำเนินการตามกระบวนการของกองบรรณาธิการวารสาร RMUTI Journal

ลงชื่อ.....

(.....)



หนังสือรับรองการตีพิมพ์บทความ
วารสารงานวิจัยด้านวิทยาศาสตร์สมัยใหม่ และ การใช้ประโยชน์นวัตกรรมเทคโนโลยี
(RMUTI Journal)
Research on Modern science and Utilizing Technological Innovation Journal
(RMUTI Journal)

ขอรับรองว่าบทความ.....

เรื่อง

โดย

ได้ผ่านการประเมินจากคณะกรรมการผู้ทรงคุณวุฒิที่มีความเชี่ยวชาญ
และมาจากหลากหลายสถาบันจำนวน ๓ ท่าน
แบบผู้ทรงคุณวุฒิและผู้แต่งไม่ทราบชื่อกันและกัน (double-blind review)
และตีพิมพ์ในวารสารงานวิจัยด้านวิทยาศาสตร์สมัยใหม่ และ การใช้ประโยชน์นวัตกรรมเทคโนโลยี
(RMUTI Journal)

Research on Modern science and Utilizing Technological Innovation Journal
(RMUTI Journal)

ปีที่..... ฉบับที่.....(.....-..... พ.ศ.....)



(.....)

บรรณาธิการวารสาร RMUTI Journal
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน



หนังสือยืนยันการถอนบทความ
วารสารงานวิจัยด้านวิทยาศาสตร์สมัยใหม่ และการใช้ประโยชน์นวัตกรรมเทคโนโลยี
(RMUTI Journal)
Research on Modern science and Utilizing Technological Innovation Journal
(RMUTI Journal)

ข้าพเจ้า (นาย/นาง/นางสาว).....

สังกัดหน่วยงาน

มีความประสงค์ขอลงการพิจารณาบทความ รหัสบทความเรื่อง

.....

.....

.....

ที่ได้ส่งเข้ามายังวารสารระบบการจัดการวารสารออนไลน์ RMUTI Journal เมื่อวันที่

เนื่องจาก (ระบุเหตุผลในการถอนบทความ).....

.....

.....

ลงชื่อ.....ผู้ถอนบทความ

(.....)



RMUTI Journal



RMUTI Journal

**Research on Modern science and
Utilizing Technological Innovation Journal**

Vol. 18 No. 2 May-August 2025

ISSN: 3027-6756 (Online)



**Institute of Research and Development
Rajamangala University of Technology Isan**

744 Suranarai Road, Meuang, Nakhon Ratchasima 30000, Thailand

Tel. (66) 4423 3063 Fax. (66) 4423 3064

E-mail : rmuti.journai@gmail.com