



Research on Modern science and Utilizing Technological Innovation Journal

RMUTI Journal

(RMUTI Journal)

Vol. 19 No. 1 January–April 2026

2026



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 บทความทุกบทความจะต้องผ่านการพิจารณาโดยผู้ทรงคุณวุฒิที่เกี่ยวข้องแบบผู้ทรงคุณวุฒิและผู้แต่งไม่ทราบชื่อกันและกัน (double-blind review)

เจ้าของ

สถาบันวิจัยและพัฒนา

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน

744 ถ.สุนทรารายณ์ 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.โมชิต	ศรีภูธร	อธิการบดีมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
รองศาสตราจารย์ ดร.ศักดิ์ระวี	ระวิกุล	ผู้อำนวยการสถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
รองศาสตราจารย์ ดร.วีรชัย	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	ชุติมา	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ศาสตราจารย์ ดร.พิเชษฐ	ลิ้มสุวรรณ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ศาสตราจารย์ ดร.มนัส	ชัยจันทร์	มหาวิทยาลัยวลัยลักษณ์
ศาสตราจารย์ ดร.วินัย	ประหลัมภาญจน์	มหาวิทยาลัยวลัยลักษณ์
ศาสตราจารย์ ดร.ศุภชัย	ปทุมนากุล	มหาวิทยาลัยขอนแก่น
ศาสตราจารย์ ดร.ศุภชัย	สิงห์ยะบุศย์	มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
ศาสตราจารย์ ดร.สำเริง	จักรใจ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ศาสตราจารย์ ดร.สุชาติ	ลิ้มกตัญญู	มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
ศาสตราจารย์ ดร.สมชาติ	โสภณธรรณฤทธิ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ศาสตราจารย์ ดร.สุทธวัฒน์	เบญจกุล	มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
ศาสตราจารย์ ดร.สรวุฒิ	สุจิตจร	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ศาสตราจารย์ ดร.อรอนงค์	นัยวิกุล	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
รองศาสตราจารย์ ดร.กนกอร	อินทราพิเชฐ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
รองศาสตราจารย์ ดร.กนต์ธร	ชำนาญประศาสน์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
รองศาสตราจารย์ ดร.คงศักดิ์	ธาตุทอง	มหาวิทยาลัยขอนแก่น
รองศาสตราจารย์ ดร.คณิต	มุกดาใส	มหาวิทยาลัยขอนแก่น
รองศาสตราจารย์ ดร.จักรี	ศรีนันท์ฉัตร	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.สรายุธ
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.ไกรสิทธิ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จักษดา
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชาคริต
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ณัฐพล
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เดียนเพ็ญ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.รัฐพล
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศศิพันธ์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อดิศักดิ์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์อนุชา
ดร.จารุพงษ์
ดร.ฉันทพิชญ์
ดร.เยาวพา
ดร.รักษาดิ
ดร.วัชรินทร์
ดร.สุกัญญา

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

สุขศิลป์ มหาวิทยาลัยนครพนม
นิติกัญจนธาร 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
กลั่นกล้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
ชาติบุปผาพันธ์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
คำหล้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน

บรรณาธิการ

รองศาสตราจารย์ ดร.ณรงค์ศักดิ์

โยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน

ฝ่ายจัดการและธุรการ

นางสาวรัตนา
นางสาววลีรักษ์

ยี่จ่อหอ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
ศรีศิลป์ไชย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน

สารบัญ Table of Contents

บทความวิจัย (Research Articles)

การออกแบบและพัฒนาเครื่องบดมูลแพะเพื่อการผลิตปุ๋ยหมัก Design and Development of a Goat Manure Grinding Machine for Compost Production สุห์ดี นิเซ็ง, สุชาครี ศรีสุข, อุดุลย์ บัวแหม่มช้อย และทศพิธ วิสมิตนันท์ <i>Suhdee Niseng, Suchakree Srisuk, Adul Baochaemchoi, and Thossapit Wissamitanan</i>	1
การใช้วิศวกรรมข้อความร่วมกับปัญญาประดิษฐ์เชิงสร้างสรรค์เพื่อการวิเคราะห์ข้อมูล ภาพถ่ายเทียมเซนทิเนล-2 บนแพลตฟอร์มกูเกิลเอิร์ธเอนจิน Using Prompt Engineering with Generative AI for the Analysis of Sentinel-2 Satellite Imagery on Google Earth Engine Platform ศุภกร เอี่ยมสุนทรกุล, ชาติชาย ไวยสุระสิงห์ และชุตินา ไวยสุระสิงห์ <i>Suphakorn Iamsuntornkul, Chattichai Waisurasingha, and Chutima Waisurasingha</i>	13
การประเมินแพลตฟอร์มดิจิทัลเพื่อส่งเสริมการค้าสินค้าเกษตรสีเขียวสู่เป้าหมาย Carbon Neutrality และ Net-Zero ของประเทศไทย Digital Platform for Green Agriculture: Driving Low-Carbon Economy toward Net-Zero in Thailand ปณณรัตน์ วงศ์พัฒนานิภาส, อุทัย สำรวมจิตร์ และเศรษฐพงศ์ วงษ์อินทร์ <i>Pannarat Wongpattananipas, Uthai Samruamjit, and Sethapong Wong-In</i>	27
อิทธิพลของการใช้เศษเหล็กออกไซด์แทนที่ทรายในจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์จากเถ้าลอย ต่อสมบัติทางกายภาพ เเชิงกล และพฤติกรรมหลังสัมผัสอุณหภูมิสูง Influence of Mill Scale Waste as Sand Replacement in Fly Ash-Based Geopolymer Mortar on Physical, Mechanical, and Post-Fire Behaviors อภิณันท์ ศิริวัฒนกาญจน์, อำพล วงศ์ษา, ไพฑูรย์ นาแซง, วันชัย สะตะ และปริญญ์า จินดาประเสริฐ <i>Apinun Siriwattanakarn, Ampol Wongsas, Phaithun Nasaeng, Vanchai Sata, and Prinya Chindaprasit</i>	44
ระบบมอนิเตอร์พลังงานและควบคุมอุณหภูมิในบ่อเลี้ยงจิ้งหรีดแบบบูรณาการสำหรับฟาร์ม ระดับชุมชนผ่าน Home Assistant An Integrated Energy and Environmental Monitoring System for Community-Scale Cricket Farming via Home Assistant ภาณุวิชญ์ พุทธิรักษา, สราวุธ พลวงษ์ศรี, ธัญลักษณ์ สันเดช, ชวโรจน์ ใจสิน และสุลักษณา มงคล <i>Panuwit Puttaraksa, Sarawut Polwongsri, Thanyaluck Sundach, Chawaroj Jaisin, and Sulucksana Mongkong</i>	56
ฤทธิ์ของพืชสมุนไพรในการควบคุมหอยทากยักษ์แอฟริกา (<i>Achatina fulica</i>) Toxicological Effects of Medicinal Plants for Controlling the Giant African Snail (<i>Achatina fulica</i>) เดือนเพ็ญ วงศ์สอน, พรลภัส บอกลันเทียะ และจิรวินัย เย็นทรวง <i>Duanpen Wongsorn, Pornlapat Boksanthia, and Jirawit Yensuang</i>	74
ผลเฉลยเชิงวิเคราะห์สำหรับแบบจำลองเภสัชจลนศาสตร์แบบห้าช่องที่พัฒนาขึ้น Analytical Solutions for the Developed Five-Compartment Pharmacokinetic Model ธนาโชค มหาหงส์ และธีระพล สลีวงศ์ <i>Thanachok Mahahong and Teerapol Saleewong</i>	84

สารบัญ (ต่อ) Table of Contents (Cont.)

บทความวิชาการ (Academic Articles)

การประยุกต์ใช้เทคโนโลยีสามมิติเพื่อเก็บข้อมูลโบราณสถาน กรณีศึกษาวัดเชตวัน (กาเผือก)	99
Application 3D Scanner for Heritage Building Data : Chetawan (Ka Pheuak)	
ณพล ศรีศักดิ์, ฤทธิยุทธ์ ก้อนทอง, ณรงค์ เหลืองบุตธนา, อภิชาติ บัวกล้า, อนูจิตร ภูมิพันธ์ และพรปวีณ์ ชัยแก้ว	
Napol Srisalda, Rittayut Gonthong, Narong Luengbootnak, Apichat Buakla, Anujit Phumipan	
and Pornpawee Chaikaew	

การออกแบบและพัฒนาเครื่องบดมูลแพะเพื่อการผลิตปุ๋ยหมัก

Design and Development of a Goat Manure Grinding Machine for Compost Production

สุหดี นิเซ่ง¹ สุชาครี ศรีสุข¹ อดุลย์ บ่าวเข้มซอย¹ และทศพิธ วิสมิตนันท์^{1*}

Suhdee Niseng¹ Suchakree Srisuk¹ Adul Baochaemchoi¹ and Thossapit Wissamitanan^{1*}

Received: August 7, 2025; Revised: October 3, 2025; Accepted: October 8, 2025

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อออกแบบและสร้างเครื่องบดมูลแพะ พร้อมศึกษาสภาวะการทำงานที่เหมาะสมเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตปุ๋ยหมัก เนื่องจากแพะเป็นสัตว์เศรษฐกิจที่ก่อให้เกิดมูลจำนวนมาก การบดย่อยให้มีขนาดเล็ก ช่วยเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัส เร่งการย่อยสลายของจุลินทรีย์ และทำให้พืชดูดซับธาตุอาหารได้ดีขึ้น การทดลองศึกษาผลของความเร็วยรอบ 3 ระดับ คือ 904 1,201 และ 1,827 รอบต่อนาที พบว่ากำลังการผลิตเพิ่มขึ้นตามรอบที่สูงขึ้น โดยที่ 1,827 รอบต่อนาที (มูเล่ย์ขับ 2 นิ้ว) ให้กำลังการผลิตสูงสุด 163.19 ± 23.34 กิโลกรัมต่อชั่วโมง จึงถือเป็นสภาวะที่เหมาะสมที่สุด มูลแพะที่บดด้วยสภาวะดังกล่าวถูกนำไปทดลองหมัก พบว่าสามารถลดระยะเวลาการหมักจาก 15 วัน เหลือเพียง 11 วัน ซึ่งเกิดจากพื้นที่ผิวของมูลแพะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานของจุลินทรีย์ ปุ๋ยที่ได้เมื่อนำไปใช้จริง ช่วยให้ดินร่วนซุย ย่อยสลายเร็ว และพืชดูดซับธาตุอาหารได้ดีขึ้น ด้านเศรษฐศาสตร์ เครื่องบดมูลแพะมีจุดคุ้มทุนเมื่อผลิตครบ 8,304.35 กิโลกรัม หรือประมาณ 51 ชั่วโมงการทำงาน แสดงให้เห็นว่าเครื่องที่พัฒนานี้ช่วยเพิ่มมูลค่า ลดเวลา และยกระดับประสิทธิภาพการทำปุ๋ยหมักได้อย่างชัดเจน

คำสำคัญ : เครื่องบด; มูลแพะ; ปุ๋ยหมัก

¹ วิทยาลัยรัตภูมิ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย

¹ Rattaphum College, Rajamangala University of Technology Srivijaya

* Corresponding Author, Tel. 08 4056 3278, E - mail: thossapit.w@rmutsv.ac.th

Abstract

This study aimed to design and construct a goat manure grinding machine and to investigate its optimal operating conditions for enhancing composting efficiency. Goat farming generates substantial amounts of manure, and reducing particle size prior to composting increases surface area, accelerates microbial activity, and improves nutrient uptake by plants. Experiments were conducted at three operating speeds 904, 1,201, and 1,827 rpm. The results showed that production capacity increased with higher speeds, with the maximum output of 163.19 ± 23.34 kg/h achieved at 1,827 rpm using a 2-inch drive pulley. Ground manure at this condition was subsequently composted, and the composting period was reduced from 15 to 11 days, as the increase of surface area enhanced microbial degradation. The resulting compost improved soil friability, decomposition rate, and nutrient absorption by plants. An economic evaluation indicated a break-even point at 8,304.35 kg of processed manure, equivalent to approximately 51 operating hours. These findings demonstrate that the developed grinder adds value to goat manure, reduces composting time, and significantly improves both production efficiency and economic feasibility.

Keywords: Grinding Machine; Goat Manure; Compost

บทนำ

แพะเป็นสัตว์เศรษฐกิจที่มีความสำคัญและได้รับความนิยมสูงในปัจจุบัน โดยเฉพาะในพื้นที่ภาคใต้ของประเทศไทย ซึ่งมีประชากรมุสลิมจำนวนมาก เนื่องจากการเลี้ยงและการบริโภคแพะมีความเชื่อมโยงกับวัฒนธรรมและพิธีกรรมทางศาสนา ประเทศไทยมีจำนวนแพะทั้งหมด 1,523,148 ตัว โดยกว่าร้อยละ 29.12 หรือ 443,622 ตัวกระจายอยู่ใน 14 จังหวัดภาคใต้ (Department of Livestock Development, 2024) แพะเป็นสัตว์ที่เลี้ยงง่าย ทนทานต่อสภาพแวดล้อม และมีต้นทุนการเลี้ยงต่ำ เนื่องจากสามารถบริโภคหญ้าและเศษวัสดุทางการเกษตรได้ ผลผลิตหลักจากการเลี้ยงแพะ ได้แก่ เนื้อ นม หนัง และขน ขณะเดียวกันยังก่อให้เกิดผลพลอยได้ที่สำคัญคือ มูลแพะ ซึ่งสามารถนำไปใช้ประโยชน์ต่อไปได้ตามแนวคิดการผลิตแบบไร้ของเสีย (Zero Waste Production) แพะโตเต็มวัยหนึ่งตัวสามารถผลิตมูลแห้งได้ประมาณร้อยละ 1.58 ของน้ำหนักตัว หรือราว 0.34 กิโลกรัมต่อวัน หากไม่มีการจัดการที่เหมาะสมอาจก่อให้เกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม มูลแพะประกอบด้วยธาตุอาหารหลักที่จำเป็นต่อพืช ได้แก่ ไนโตรเจน (N) 2.8 % ฟอสฟอรัส (P) 0.42 % และโพแทสเซียม (K) 0.93 % (Osuhor et al., 2002; Kaewmorakot et al., 2013) ซึ่งสอดคล้องกับกระบวนการทำเกษตรอินทรีย์และการใส่ใจต่อคุณภาพชีวิตที่เพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตาม การนำมูลแพะไปใช้เป็นปุ๋ยคอกโดยตรงยังไม่มีประสิทธิภาพเพียงพอ เนื่องจากจุลินทรีย์ในดินต้องดึงไนโตรเจนมาใช้ในการย่อยสลาย ส่งผลให้พืชเกิดภาวะขาดไนโตรเจน (Department of Agricultural Extension, 2014) เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการใช้ประโยชน์ มูลแพะมักถูกนำมาผสมกับเศษวัสดุการเกษตรในการทำปุ๋ยหมัก (Duangsrikaew and Lijuan, 2024) หรือใช้เป็นปุ๋ยเสริมธาตุอาหารโดยตรง (Awodun, 2007) ทั้งนี้ การหมักมูลแพะให้สมบูรณ์จะทำให้ธาตุอาหารในมูลถูกปลดปล่อยออกมาในรูปที่พืชสามารถนำไปใช้ได้รวดเร็วขึ้น การนำมูลแพะแห้งมาบดย่อยให้มีขนาดเล็กช่วยเพิ่มพื้นที่ผิว ทำให้จุลินทรีย์ทำงานได้เต็มประสิทธิภาพ ช่วยลดระยะเวลาและเพิ่มคุณภาพของปุ๋ยหมัก (Ngamphongsai et al., 2009) เดิมการบดมูลสัตว์เพื่อใช้เป็นปุ๋ยอาศัยแรงงานคนเป็นหลัก ต่อมามีการออกแบบเครื่องบดเพื่อช่วยย่อยมูลสัตว์ให้ละเอียดขึ้นและลดเวลาในการทำงาน (Nuengnoi et al., 2022) การลดขนาดมูลสัตว์ที่มีความแข็งด้วยเครื่องแบบตีบด (Hammer Crusher) ผ่านตะแกรงขนาด 2 มิลลิเมตร พบว่ามูลสัตว์ที่ผ่านการบดย่อยและกลับกองบ่อยครั้งสามารถลดระยะเวลาการหมักลงได้อย่างมีนัยสำคัญ (Cai et al., 2023) ขณะที่การศึกษาการหมักเศษวัสดุผ่านการสับย่อยด้วยเครื่องสับ (Shredder Machine) พบว่า

ขนาดอนุภาคที่เหมาะสมที่สุดคือ 1.5 - 3 เซนติเมตร ซึ่งช่วยส่งเสริมการย่อยสลายได้อย่างมีประสิทธิภาพ (Mishra and Yadav, 2022) นอกจากนี้ยังมีการออกแบบและพัฒนาเครื่องสับใบไม้สำหรับการทำปุ๋ยหมัก โดยใช้ระบบควบคุมอัตโนมัติร่วมกับพลังงานแสงอาทิตย์ ซึ่งสามารถสับย่อยวัสดุได้อย่างมีประสิทธิภาพ ใช้งานง่าย ต้นทุนต่ำ และได้อนุภาคที่เหมาะสมต่อกระบวนการหมัก (Ashwini et al., 2020) การพัฒนาเครื่องย่อยวัสดุทางการเกษตรสำหรับทำปุ๋ย ยังมีการทดสอบที่ความเร็วรอบ 300 600 900 1,200 และ 1,500 รอบต่อนาที ร่วมกับระยะเวลา 0.5 1 1.5 2 และ 2.5 ชั่วโมง ผลการทดลองพบว่า ที่ความเร็ว 1,500 รอบต่อนาที และเวลา 1.5 ชั่วโมง เครื่องสามารถให้ประสิทธิภาพการสับย่อยสูงสุด 91 % และมีอัตราการผลิตสูงถึง 585 กิโลกรัมต่อชั่วโมง (Busari et al., 2024) การลดขนาดอนุภาคด้วยการสับหรือบดจึงเป็นปัจจัยสำคัญต่อประสิทธิภาพการหมักปุ๋ย เพราะช่วยเพิ่มพื้นที่ผิวให้จุลินทรีย์ทำงานได้รวดเร็วขึ้น ส่งผลให้ได้ปุ๋ยหมักที่มีคุณภาพสม่ำเสมอ (Texas A&M AgriLife Extension Service, 2009) จากงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง เห็นได้ว่า เครื่องบดย่อยวัสดุและมูลสัตว์สำหรับการทำปุ๋ยหมักมักใช้กลไกการสับย่อยกับเศษวัสดุทางการเกษตร เช่น ใบไม้ ขณะที่การย่อยมูลสัตว์ซึ่งมีความแข็งกว่านิยมใช้กลไกการตีบด อย่างไรก็ตาม เครื่องย่อยที่มีจำหน่ายทั่วไปไม่ได้ออกแบบมาสำหรับบดย่อยมูลสัตว์โดยเฉพาะ จึงยังใช้งานได้ไม่เต็มประสิทธิภาพ

ดังนั้น งานวิจัยครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อออกแบบและสร้างเครื่องบดมูลแพะสำหรับการผลิตปุ๋ยหมัก รวมทั้งศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการบดเพื่อทดสอบสมรรถนะของเครื่อง ให้สามารถใช้งานได้อย่างเหมาะสมในระดับอุตสาหกรรมครัวเรือน และช่วยยกระดับประสิทธิภาพการผลิตของชุมชนต่อไป

วัสดุ อุปกรณ์ และวิธีดำเนินการวิจัย

1. วัสดุ

มูลแพะที่นำมาทดสอบได้รับจากเกษตรกรผู้เลี้ยงแพะในหมู่บ้านเขารักเกียรติ ตำบลกำแพงเพชร อำเภอรัตนบุรี จังหวัดสงขลา เนื่องจากกลุ่มเกษตรกรผู้เลี้ยงแพะในหมู่บ้านเขารักเกียรติเป็นแหล่งเลี้ยงแพะที่สำคัญในพื้นที่ ทำให้สามารถจัดหามูลแพะได้อย่างสะดวกและต่อเนื่อง ซึ่งเอื้อต่อการนำผลการวิจัยไปประยุกต์ใช้ ดังรูปที่ 1

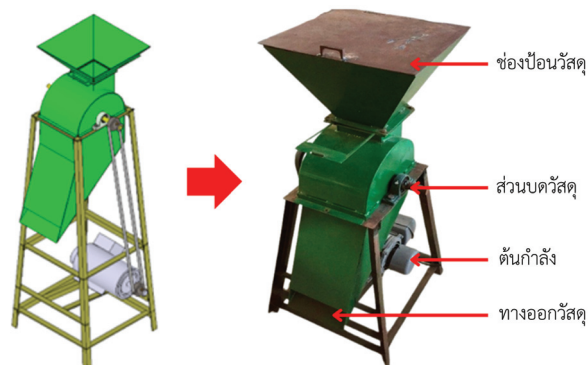


รูปที่ 1 กระบวนการตากแห้งมูลแพะสด

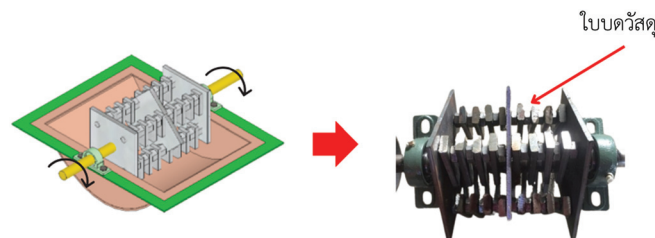
2. การออกแบบเครื่องบดมูลแพะ

เครื่องบดมูลแพะที่พัฒนาขึ้น โดยมีโครงสร้างประกอบด้วย โครงสร้างเหล็กรองรับอุปกรณ์ ช่องป้อนวัสดุ (Hopper) ส่วนบดวัสดุ (Grinding) มอเตอร์ต้นกำลัง ทางออกของวัสดุ ดังรูปที่ 2 การออกแบบการบดมูลแพะโดยอาศัยหลักการตีบดติดตั้งใบมีดแบบอิสระบนเพลาลำดับ 32 ใบ ดังรูปที่ 3 (Nuengnoi et al., 2022) ซึ่งแตกต่างจากเครื่องบดแบบใบมีดอยู่กับที่ (Cai et al., 2023) ต้นกำลังขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์ขนาด 2 แรงม้า (1.5 กิโลวัตต์) อัตราทดสายพานที่เพลาลำดับ 2.5 นิ้ว และเพลาลำดับ 2 3 และ 4 นิ้ว ตามลำดับ เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการบดมูลแพะ ขนาดเพลาลำดับและเพลาลำดับ 24 มิลลิเมตร ขนาดของตลับลูกปืนตักดาเท่ากับ 25.40 มิลลิเมตร

วัสดุอุปกรณ์เลือกใช้ตามท้องตลาดเพื่อคำนึงถึงการนำไปใช้งานและซ่อมบำรุงโดยทั่วไป การออกแบบกำลังการผลิต ออกแบบช่องสำหรับป้อนวัสดุความจุ 5 กิโลกรัมต่อครั้ง ความละเอียดของมูลแพะจะขึ้นอยู่กับตะแกรงที่ติดตั้งเข้ากับ เครื่องบดมีขนาดรู 3 มิลลิเมตร ติดตั้งส่วนล่างของชุดบดเพื่อคัดกรองมูลแพะที่มีขนาดใหญ่และขนาดเล็กออกจากกัน



รูปที่ 2 การออกแบบเครื่องบดมูลแพะ



รูปที่ 3 การออกแบบกลไกบดย่อยเครื่องบดมูลแพะ

3. การหาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับเครื่องบดมูลแพะ

การเตรียมมูลแพะเพื่อบดจะต้องผ่านการตากแดดเพื่อลดความชื้น การทดสอบหาสภาวะที่เหมาะสม สำหรับเครื่องบดมูลแพะที่ความเร็วในการบดมูลแพะตามอัตราทดของมู่เล่ย์ของเพลาชับขนาด 2.5 นิ้ว มีความเร็ว ของเพลาชับเท่ากับ 1,440 รอบต่อนาที และขนาดมู่เล่ย์ของเพลาดตามขนาด 4 3 และ 2 นิ้ว ความเร็วรอบของเพลาดตาม จากการคำนวณตามสมการที่ (1) เท่ากับ 900 1,200 และ 1,800 รอบต่อนาที ตามลำดับ ในสภาวะการทดสอบจริง ความเร็วถูกวัดโดยเครื่องวัดรอบแบบสัมผัส (Tachometer) ความเร็วของเพลาดตามที่วัดได้จริงเท่ากับ 904 1,201 และ 1,827 รอบต่อนาที ซึ่งมีความคลาดเคลื่อนไม่เกิน 1.5 % ดังตารางที่ 1 เพลาดตามจะเชื่อมต่อกับชุดบดมูลปุ๋ยดังรูปที่ 3 การทดสอบบดมูลแพะในแต่ละความเร็วใช้มูลแพะปริมาณ 5 กิโลกรัม การทดสอบจับเวลาในการบด วัดปริมาณของ มูลแพะหลังจากการบดและปริมาณของมูลแพะที่เหลือหลังจากการบดภายในเครื่องในแต่ละความเร็วการทดสอบ การทดสอบทำซ้ำจำนวน 3 ครั้ง เพื่อนำข้อมูลในแต่ละความเร็วในการบดมาเปรียบเทียบเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสม สำหรับเครื่องบดมูลแพะ ดังรูปที่ 4

$$n_1 d_1 = n_2 d_2 \quad (1)$$

เมื่อ d_1 = ขนาดมู่เล่ย์ของเพลาชับ (นิ้ว)
 d_2 = ขนาดมู่เล่ย์ของเพลาดตาม (นิ้ว)
 n_1 = ความเร็วของเพลาชับ (รอบต่อนาที)
 n_2 = ความเร็วของเพลาดตาม (รอบต่อนาที)

ตารางที่ 1 ความเร็วในการทดสอบเครื่องบดมูลแพะ

ขนาดมูเลย์ ของเพลาชับ (นิ้ว)	ขนาดมูเลย์ ของเพลาดาม (นิ้ว)	ความเร็วของ เพลาชับ (รอบต่อนาที)	ความเร็วของ เพลาดาม (รอบต่อนาที)	ความเร็วของ เพลาดามจากการวัด (รอบต่อนาที)
2.50	4	1,440	900	904
2.50	3	1,440	1,200	1,201
2.50	2	1,440	1,800	1,827



รูปที่ 4 การทดลองบดมูลแพะด้วยเครื่องบดมูลแพะ

4. การหมักปุ๋ยมูลแพะ

เพื่อเปรียบเทียบปุ๋ยหมักจากมูลแพะที่ผ่านการบดและไม่ผ่านการบด กระบวนการหมักเริ่มต้นจากการผสมส่วนผสมตามสัดส่วน วัสดุที่ใช้สำหรับกระบวนการหมัก ได้แก่ มูลแพะบดที่ได้จากการทดลองเครื่องบดมูลแพะที่สภาวะที่ดีที่สุด กากน้ำตาลทำหน้าที่เป็นแหล่งพลังงานของจุลินทรีย์ช่วยในกระบวนการย่อยสลาย น้ำหมักชีวภาพทำหน้าที่เพิ่มชนิดและปริมาณของจุลินทรีย์เป็นตัวเร่งให้กระบวนการหมักและการย่อยสลาย สารเร่ง (พด1) ช่วยการย่อยสลายวัสดุเหลือใช้จากการเกษตรที่ย่อยได้ยากด้วยจุลินทรีย์เพื่อลดระยะเวลาในการทำปุ๋ยหมัก น้ำเปล่าช่วยรักษาระดับความชื้น 40 - 60 % เป็นสภาวะที่เหมาะสมแก่การทำงานของจุลินทรีย์ในการย่อยสลาย (Phangnga Provincial Agriculture and Cooperatives Office, 2023; Ang Thong Provincial Agriculture and Cooperatives Office, 2010) อัตราส่วนผสมที่ใช้ในการทำปุ๋ยมูลแพะหมักดังตารางที่ 2 อ้างอิงจากเกษตรกรผู้เลี้ยงแพะ เพื่อทดสอบที่อัตราส่วนเดียวกันกับมูลแพะที่ไม่ผ่านการบดกระบวนการหมักนำมูลแพะที่ผ่านการหมักถูกนำไปวางแผ่เป็นกองเท่ากันจำนวน 3 กอง กองละ 10 กิโลกรัม ใช้ระยะเวลาในการหมัก 15 วัน และกลับด้านปุ๋ยทุก ๆ 7 วัน ในระหว่างการหมักมีการติดตามและบันทึกค่า เช่น อุณหภูมิ กลิ่น สี ลักษณะทางกายภาพ รวมถึงวัดค่าความอุดมสมบูรณ์ของดิน

ตารางที่ 2 อัตราส่วนของส่วนผสมที่ใช้ในการทำปุ๋ยมูลแพะหมัก

ส่วนผสม	ปริมาณ
มูลแพะ	10 กิโลกรัม
กากน้ำตาล	200 มิลลิลิตร
น้ำหมักชีวภาพ	120 มิลลิลิตร
สารเร่ง (พด1)	10 กรัม
น้ำเปล่า	5 ลิตร

5. การวิเคราะห์ผลการทดลองการหาสภาวะที่เหมาะสมในการบดมูลแพะและการหมักปุ๋ยหมักมูลแพะ

การวิเคราะห์ผลการทดลองเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการบดมูลแพะ ดำเนินการโดยการเปรียบเทียบมวลของมูลแพะก่อนบดและหลังบดจากการชั่งน้ำหนัก เพื่อประเมินประสิทธิภาพการผลิต นอกจากนี้ยังคำนวณกำลังการผลิตต่อชั่วโมง โดยใช้มวลของมูลแพะหลังการบดและระยะเวลาในการบดเป็นตัวแปรอ้างอิง การวิเคราะห์คุณภาพของปุ๋ยหมักมูลแพะเพิ่มเติมประกอบด้วยการทดสอบดังนี้ การวิเคราะห์อุณหภูมิในกองปุ๋ยหมักด้วยเทอร์โมมิเตอร์แบบเข็ม การวิเคราะห์สี กลิ่น และลักษณะการเกิดเชื้อสีขาว รวมถึงวัดค่าความอุดมสมบูรณ์ของดิน ดังรูปที่ 5 เพื่อจำแนกความสมบูรณ์ของดินตามมาตรวัดของเครื่องมือดังตารางที่ 3 เพื่อเป็นเกณฑ์การประเมินเบื้องต้น การบันทึกข้อมูลวันละ 1 ครั้ง เป็นเวลา 12 วัน การวิเคราะห์ข้อมูลเชิงคุณภาพ ได้แก่ สี กลิ่น และการเกิดเชื้อสีขาว รวมถึงวัดค่าความอุดมสมบูรณ์ของดิน โดยแบ่งหลักเกณฑ์คะแนนการประเมินดังตารางที่ 4



รูปที่ 5 เครื่องมือทดสอบความอุดมสมบูรณ์ของดิน

ตารางที่ 3 ความสมบูรณ์ของดินตามมาตรวัดของเครื่องมือ

มาตรวัด	ความเข้มข้น (parts per million, ppm)			เกณฑ์ในการประเมิน
	ไนโตรเจน (N)	ฟอสฟอรัส (P)	โพแทสเซียม (K)	
None	-	-	-	น้อยมาก
Lack (Too Little)	<50	<4	<50	น้อย
Ideal	50 - 200	4 - 14	50 - 200	ดี
Too Much (Excessive)	>200	>14	>200	มากเกินไป

ตารางที่ 4 เกณฑ์การประเมินสี กลิ่น และการเกิดเชื้อสีขาว รวมถึงวัดค่าความอุดมสมบูรณ์ของดิน

เกณฑ์การประเมิน	ค่าการประเมิน	คะแนน
สีของกองปุ๋ย	ดำ	1
	น้ำตาลเข้ม	2
กลิ่น	มีกลิ่นมูลแพะ	1
	มีกลิ่นกากน้ำตาล	2
	มีกลิ่นเปรี้ยว	3
	ไม่มีกลิ่น	4
เชื้อสีขาวบนกองปุ๋ย	ไม่มี	1
	มีเล็กน้อย	2
	มี	3
ความสมบูรณ์ของดิน	น้อยมาก	1
	น้อย	2
	ดี	3

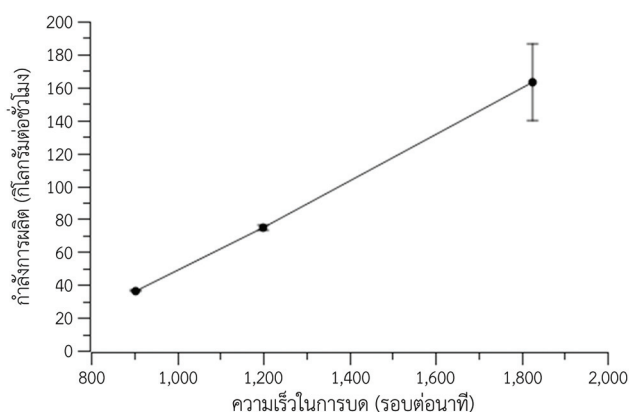
ผลการทดลองและวิจารณ์

1. ผลการทดลองหาความเร็วรอบที่เหมาะสมการทดลอง

จากผลการทดลองเพื่อหาความเร็วรอบที่เหมาะสมของเครื่องบดมูลแพะ พบว่าเมื่อเพิ่มความเร็วรอบจาก 904 เป็น 1,201 และ 1,827 รอบต่อนาที มวลเฉลี่ยหลังการบดเพิ่มขึ้นจาก 4.70 ± 0.10 กิโลกรัม เป็น 4.77 ± 0.06 และ 4.90 ± 0.00 กิโลกรัม ขณะเดียวกันอัตราการสูญเสียลดลงจากร้อยละ 6 เป็นร้อยละ 4.67 และร้อยละ 2 ตามลำดับ ระยะเวลาในการบดเฉลี่ยลดลงอย่างมีนัยสำคัญจาก 6 นาที 46 วินาที เป็น 3 นาที 50 วินาที และ 1 นาที 50 วินาที แสดงให้เห็นว่าความเร็วรอบที่สูงขึ้นช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการย่อยสลายวัสดุ ทำให้ได้ผลผลิตที่มีมวลใกล้เคียงกับน้ำหนักตั้งต้น และลดการสูญเสียลง เมื่อคำนวณกำลังการผลิต พบว่าที่ความเร็วรอบ 904 1,201 และ 1,827 รอบต่อนาที เครื่องบดมูลแพะสามารถผลิตได้ 36.34 ± 0.30 74.74 ± 1.35 และ 163.19 ± 23.34 กิโลกรัมต่อชั่วโมง ตามลำดับ ดังตารางที่ 5 โดยที่ความเร็วรอบ 1,201 และ 1,827 รอบต่อนาที มีกำลังการผลิตมากกว่า 206 % และ 449 % ของความเร็วรอบต่ำสุด แสดงถึงแนวโน้มการเพิ่มขึ้นเกือบหนึ่งเท่าตัวต่อการเพิ่มขึ้นทุก 300 รอบต่อนาที ซึ่งให้เห็นถึงความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงระหว่างความเร็วรอบและกำลังการผลิตดังรูปที่ 6 จากการทดลองพบว่าที่ความเร็วรอบสูง วัสดุถูกบดด้วยแรงเฉือนและแรงกระแทกมากขึ้น ส่งผลให้มูลแพะถูกย่อยสลายได้อย่างรวดเร็วและมีการสูญเสียน้อยลง การเลือกใช้ความเร็วรอบ 1,827 รอบต่อนาที (มูลแพะขนาด 2 นิ้ว) เป็นสภาวะที่เหมาะสม เนื่องจากให้ค่ากำลังการผลิตสูงสุดถึง 163.19 ± 23.34 กิโลกรัมต่อชั่วโมง โดยยังคงคุณภาพของวัสดุหลังการบดอยู่ในเกณฑ์ที่ดี ลักษณะของมูลแพะที่ผ่านการบดในแต่ละความเร็วมีขนาดน้อยกว่า 3 มิลลิเมตร และมีความแตกต่างกันเล็กน้อยดังรูปที่ 7 ผลการทดลองนี้สะท้อนว่า ความเร็วรอบเป็นปัจจัยสำคัญที่มีผลโดยตรงต่อทั้งประสิทธิภาพในการบด และศักยภาพในการผลิตของเครื่องบดมูลแพะ และการดำเนินการที่ความเร็วสูงสุดยังสามารถลดระยะเวลาในการผลิตได้อย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งเป็นข้อได้เปรียบเชิงเศรษฐศาสตร์และการประยุกต์ใช้จริงในระดับวิสาหกิจชุมชน

ตารางที่ 5 ผลการทดสอบความเร็วในการบดมูลแพะต่อกำลังการผลิต

ความเร็วในการบด (รอบต่อนาที)	มวลก่อนบด (กิโลกรัม)	มวลหลังบด (กิโลกรัม)	ระยะเวลาบด (นาที)	ปริมาณเศษวัสดุตกค้าง (กรัม)	กำลังการผลิต (กิโลกรัมต่อชั่วโมง)
904	5.00 ± 0.00	4.70 ± 0.10	6.46 ± 0.13	1.33 ± 0.58	36.34 ± 0.30
1,201	5.00 ± 0.00	4.77 ± 0.06	3.50 ± 0.06	1.17 ± 0.29	74.74 ± 1.35
1,827	5.00 ± 0.00	4.90 ± 0.00	1.50 ± 0.17	0.50 ± 0.00	163.19 ± 23.34



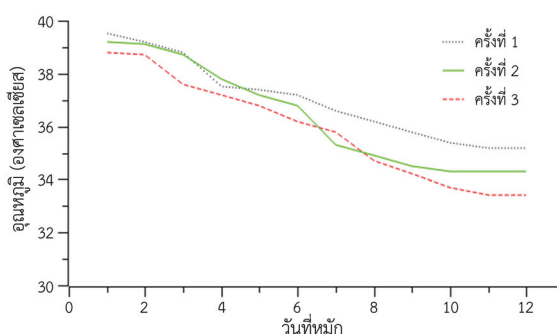
รูปที่ 6 ผลของความเร็วในการบดมูลแพะต่อกำลังการผลิต



รูปที่ 7 มูลแพะที่ผ่านการบด

2. ผลการทดลองการหมักปุ๋ยมูลแพะ

มูลแพะที่ผ่านการบดด้วยความเร็วรอบ 1,827 รอบต่อนาที ถูกนำมาทดสอบการหมักจำนวน 3 ครั้ง (ครั้งละ 10 กิโลกรัม) ผลการบันทึกอุณหภูมิในกองปุ๋ยแต่ละวันพบว่าอุณหภูมิมีแนวโน้มลดลงอย่างต่อเนื่อง (รูปที่ 8) โดยมีค่าเฉลี่ยการลดลงประมาณ 0.48 องศาเซลเซียสต่อวัน การลดลงของอุณหภูมิในช่วงท้ายสะท้อนถึงการสิ้นสุดของกระบวนการย่อยสลายหลักและการเข้าสู่ระยะ Maturation Stage ซึ่งบ่งชี้ว่ากระบวนการหมักใกล้เสร็จสมบูรณ์ การเปลี่ยนแปลงทางกายภาพของกองปุ๋ยหมักยังเป็นตัวชี้วัดที่สำคัญ ได้แก่ สีที่เปลี่ยนจากดำเป็นน้ำตาลปนดำ กลิ่นเฉพาะของมูลสัตว์และกากน้ำตาลที่หายไป รวมทั้งการปรากฏของเส้นใยสีขาวของจุลินทรีย์ในช่วงปลายการหมัก ซึ่งเป็นจุลินทรีย์ที่สร้างสปอร์และช่วยให้ปุ๋ยเก็บรักษาได้นาน (Phangnga Provincial Agriculture and Cooperatives Office, 2023) นอกจากนี้ค่าความสมบูรณ์ของดินที่ทดสอบจากปุ๋ยหมักยังพบว่าเพิ่มขึ้นจากระดับน้อยมาก ไปสู่น้อย และดี ตามลำดับจากตัวชี้วัดทั้งหมด ได้แก่ อุณหภูมิที่คงที่ สีที่เปลี่ยนเป็นน้ำตาลเข้ม ไม่มีกลิ่น และการปรากฏของเชื้อสีขาว ร่วมกับค่าความสมบูรณ์ของดินที่อยู่ในเกณฑ์ดี พิจารณาตามเกณฑ์การให้คะแนนดังตารางที่ 4 จึงสามารถระบุได้ว่ากระบวนการหมักที่เหมาะสมอยู่ที่วันที่ 11 ของการหมัก จากผลคะแนนเต็มในแต่ละเกณฑ์ ซึ่งให้ผลสอดคล้องกันทั้ง 3 ครั้ง ดังตารางที่ 6 ผลดังกล่าวแสดงให้เห็นว่า ความละเอียดของมูลแพะที่ผ่านการบดมีผลโดยตรงต่อการเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสของวัตถุดิบ ทำให้จุลินทรีย์ทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับมูลที่ไม่ผ่านการบด ส่งผลให้สามารถลดระยะเวลาการหมักลงเหลือเพียง 11 วัน จากปกติประมาณ 15 วัน ดังตารางที่ 7 อันสะท้อนถึงข้อได้เปรียบเชิงเทคนิคของการใช้เครื่องบดมูลแพะในการผลิตปุ๋ยหมักเพื่อการเกษตรกรรม



รูปที่ 8 ผลของอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงไปตามเวลาในการหมัก

ตารางที่ 6 ผลการทดลองการหมักปุ๋ยหมักจากมูลแพะบดด้วยความเร็วในการบดเท่ากับ 1,827 รอบต่อนาที

วันที่	อุณหภูมิ (°C)	สี	กลิ่น	เชื้อสีขาวบนกองปุ๋ย	ความสมบูรณ์ของดิน
1	39.17±0.35	1.00±0.00	1.00±0.00	1.00±0.00	1.00±0.00
2	39.00±0.26	1.00±0.00	1.67±0.58	1.00±0.00	1.00±0.00

ตารางที่ 6 ผลการทดลองการหมักปุ๋ยหมักจากมูลแพะบดที่ความเร็วในการบดเท่ากับ 1,827 รอบต่อนาที (ต่อ)

วันที่	อุณหภูมิ (°C)	สี	กลิ่น	เชื้อสีขาวบนกองปุ๋ย	ความสมบูรณ์ของดิน
3	38.37±0.67	1.00±0.00	2.00±0.00	1.00±0.00	1.00±0.00
4	37.50±0.30	1.00±0.00	2.00±0.00	1.00±0.00	1.33±0.58
5	37.13±0.31	1.33±0.58	2.33±0.58	1.00±0.00	1.33±0.58
6	36.73±0.50	1.67±0.58	3.00±0.00	1.00±0.00	1.67±0.58
7	35.90±0.66	1.67±0.58	3.00±0.00	1.00±0.00	2.00±0.00
8	35.27±0.81	1.00±0.00	3.33±0.58	1.00±0.00	2.00±0.00
9	34.83±0.85	2.00±0.00	4.00±0.00	1.33±0.58	2.67±0.58
10	34.47±0.86	2.00±0.00	4.00±0.00	2.67±0.58	3.00±0.00
11	34.30±0.90	2.00±0.00	4.00±0.00	3.00±0.00	3.00±0.00

ตารางที่ 7 ลักษณะของปุ๋ยหมักมูลแพะที่ไม่ผ่านและผ่านการบด

สูตร	ก่อนหมักปุ๋ย	หลังหมักปุ๋ย
ปุ๋ยหมักมูลแพะที่ไม่ผ่านการบด		
ปุ๋ยหมักมูลแพะที่ผ่านการบด		

3. กำลังประมาณการผลิตที่ต้นทุน

การวิเคราะห์กำลังการผลิตที่จุดคุ้มทุน ทำโดยพิจารณาอัตราส่วนระหว่างต้นทุนเครื่องจักร และกำไรส่วนเกินต่อหน่วย กำไรส่วนเกินต่อหน่วยคำนวณจากส่วนต่างระหว่างราคาขายต่อหน่วยและต้นทุนผันแปรต่อหน่วย ซึ่งต้นทุนผันแปรในที่นี้ประกอบด้วยค่าวัตถุดิบ ค่าไฟฟ้า และค่าแรงต่อหน่วย จากผลการทดลองพบว่า มูลแพะบดมีราคาขายเฉลี่ย 8.33 บาทต่อกิโลกรัม ขณะที่ต้นทุนผันแปรเท่ากับ 2.31 บาทต่อกิโลกรัม ส่งผลให้กำไรส่วนเกินต่อหน่วยเท่ากับ 6.02 บาทต่อกิโลกรัม เมื่อเปรียบเทียบกับต้นทุนการลงทุนเครื่องจักร 50,000 บาท คำนวณว่าปริมาณการผลิตที่จุดคุ้มทุนเท่ากับ 8,304.35 กิโลกรัม ภายใต้สภาวะที่เหมาะสมในการใช้งาน (รอบการบด 1,827 รอบต่อนาที) เครื่องบดสามารถทำงานด้วยกำลังการผลิตเฉลี่ย 163.19 ± 23.34 กิโลกรัมต่อชั่วโมง ดังนั้น ระยะเวลาในการเดินเครื่องจักรจนถึงจุดคุ้มทุนจะเท่ากับประมาณ 51 ชั่วโมง ผลการวิเคราะห์นี้สะท้อนว่าเครื่องบดมูลแพะมีศักยภาพในการคืนทุนได้ในระยะเวลาอันสั้น หากมีการเดินเครื่องอย่างต่อเนื่องภายใต้สภาวะที่เหมาะสม ทั้งนี้ยังแสดงให้เห็นถึงความคุ้มค่าเชิงเศรษฐศาสตร์ในการลงทุน โดยจุดคุ้มทุนที่ต่ำกว่า 10,000 กิโลกรัมถือว่าอยู่ในระดับที่เอื้อต่อการนำไปใช้จริงในระดับชุมชน นอกจากนี้การที่สามารถคืนทุนได้ภายในระยะเวลาการใช้งานไม่เกิน 51 ชั่วโมง บ่งชี้ว่ามีศักยภาพสูงในการสร้างผลตอบแทนเกินจุดคุ้มทุน ได้อย่างรวดเร็วเมื่อขยายการผลิตต่อเนื่อง ดังตารางที่ 8

ตารางที่ 8 กำลังการผลิตที่ต้นทุน

รายการ	หน่วย
ต้นทุนคงที่	
ต้นทุนเครื่องจักร (บาท)	50,000.00
ต้นทุนผันแปรต่อหน่วย	
ค่าวัตถุดิบต่อหน่วย (บาท/กก.)	2.00
ค่าไฟต่อหน่วย (บาท/กก.)	0.04
ค่าแรงต่อหน่วย (บาท/กก.)	0.27
รวม	2.31
ราคาขายต่อหน่วย (บาท/กก.)	8.33
กำไรส่วนเกินต่อหน่วย (บาท/กก.)	6.02
กำลังการผลิตที่ต้นทุน (กก.)	8,304.35

- * ค่าแรง 44 บาทต่อชั่วโมง คิดจาก 8 ชั่วโมงทำงานต่อวัน จากค่าแรงขั้นต่ำจังหวัดสงขลา 352 บาทต่อวัน ณ วันที่ 1 กรกฎาคม 2568
- * ค่าไฟฟ้าเฉลี่ย 4.29 บาทต่อหน่วย คิดจากหน่วยการใช้เครื่องจักร 300 หน่วยต่อเดือนจากระบบประมาณการค่าไฟฟ้า การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค ณ วันที่ 1 กรกฎาคม 2568

สรุปผลและการอภิปรายผล

ผลการศึกษาพบว่า ความเร็วในการบดมีผลโดยตรงต่อกำลังการผลิตของเครื่องบดมูลแพะ โดยที่ความเร็วการหมุน 904 1,201 และ 1,827 รอบต่อนาที ให้กำลังการผลิตเฉลี่ย 36.34 ± 0.30 74.74 ± 1.35 และ 163.19 ± 23.34 กิโลกรัมต่อชั่วโมง ตามลำดับ แสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบและกำลังการผลิต ทั้งนี้ที่ความเร็ว 1,827 รอบต่อนาที กำลังการผลิตสูงสุดเท่ากับ 163.19 ± 23.34 กิโลกรัมต่อชั่วโมง จึงสามารถระบุได้ว่าเป็นสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการใช้งานเครื่องบดมูลแพะในเชิงประสิทธิภาพการผลิต เมื่อนำมูลแพะที่ผ่านการบดที่ความเร็วสูงสุดเข้าสู่กระบวนการหมักพบว่าคุณภาพของปุ๋ยหมักอยู่ในระดับที่น่าพึงพอใจ โดยตัวชี้วัด ได้แก่ อุณหภูมิ กลิ่น สี การเกิดเชื้อสีขาว และค่าความอุดมสมบูรณ์ของดิน บ่งชี้ถึงความสมบูรณ์ของกระบวนการหมัก อีกทั้งระยะเวลาในการหมักลดลงเหลือเพียง 11 วัน จากปกติที่ต้องใช้เวลาประมาณ 15 วัน แสดงให้เห็นว่า การบดมูลแพะช่วยเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัส ซึ่งส่งผลให้จุลินทรีย์สามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพมากกว่ามูลแพะที่ไม่ผ่านการบด ผลการทดสอบในเชิงการใช้ประโยชน์จริงกับพืชยังแสดงว่า ปุ๋ยหมักจากมูลแพะบดสามารถย่อยสลายได้รวดเร็วกว่า ทำให้ดินมีความร่วนซุยและพร้อมต่อการนำไปใช้ประโยชน์ทางการเกษตรได้ในระยะเวลาอันสั้น ซึ่งสอดคล้องกับแนวคิดการเพิ่มการดูดซับของสารอาหารในดินผ่านการปรับปรุงโครงสร้างวัตถุดิบตั้งแต่ขั้นตอนก่อนการหมักในด้านการประเมินความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ พบว่าจุดคุ้มทุนของการลงทุนเครื่องจักรเกิดขึ้นที่ปริมาณการผลิต 8,304.35 กิโลกรัม หรือคิดเป็นเวลาเดินเครื่องประมาณ 51 ชั่วโมง ภายใต้สภาวะที่เหมาะสมดังสะท้อนถึงศักยภาพของเครื่องบดในการคืนทุนในระยะสั้น และยังสนับสนุนความเป็นไปได้เชิงเศรษฐศาสตร์สำหรับการประยุกต์ใช้ในระดับชุมชนหรือวิสาหกิจชุมชน ทั้งนี้ ข้อจำกัดของเครื่องบดมูลแพะ คือ จำเป็นต้องเดินเครื่องต่อเนื่องเพื่อให้เกิดความคุ้มค่าด้านพลังงาน การออกแบบเครื่องบดมูลแพะใช้วัสดุที่หาได้ง่ายตามท้องตลาด ทำให้สะดวกต่อการซ่อมบำรุง และสามารถต่อยอดสู่การประยุกต์ใช้จริงในระดับอุตสาหกรรมได้

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยใคร่ขอขอบคุณ วิทยาลัยรัตภูมิ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย ที่ให้ความอนุเคราะห์สถานที่ อุปกรณ์ และเครื่องมือต่าง ๆ สนับสนุนงานวิจัย ที่ให้ความช่วยเหลือในการทำวิจัยในครั้งนี้

References

- Ang Thong Provincial Agriculture and Cooperatives Office. (2020, 10 March). *Making your own composted manure*. https://www.opsmoac.go.th/angthong-local_wisdom-preview-421091791839 (in Thai)
- Ashwini, M.V., Robinson, P., Nithin, P.S. and Seella Charan. (2020). Design of Automatic Organic Waste Shredder for Composting. *International Journal of Recent Technology and Engineering (IJRTE)*, 8(6), 899-902. <https://doi.org/10.35940/ijrte.F7406.038620>
- Awodun, M.A. (2007). Effect of Goat Manure and Urea Fertilizer on Soil, Growth and Yield of Okra (*Abelmoschus esculentus* (L.) Moench). *International Journal of Agricultural Research*, 2(7), 632-636. <https://doi.org/10.3923/ijar.2007.632.636>
- Busari, R., Alabi, K., Adebayo, R. and Dada, J. (2024). Rapid Composting using a Novel Agricultural Waste Shredder. *FUOYE Journal of Engineering and Technology*, 9(1), 1-6. <https://doi.org/10.4314/fuoyejt.v9i1.1>
- Cai, R., Cui, X., Cao, X., Jiang, X., Wang, R. and Xu, C. (2023). Crushing Combined with High-Frequency Turning Can Promote Material Degradation of Sheep Manure Compost on the Qinghai-Tibet Plateau by Improving the Microbial Metabolic Function. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 11(2). <https://doi.org/10.1016/j.jece.2023.109535>
- Department of Agricultural Extension. (2014, 28 November). *Livestock Career Paths: Small Animal Farming Career Paths*. https://esc.doe.go.th/wp-content/uploads/2018/08/small_animals.pdf
- Department of Livestock Development. (2024, 2 September). *Livestock Population Data in Thailand for the Year 2024*. https://ict.dld.go.th/webnew/images/stories/stat_web/yearly/2565/province/T8-1-Goat.pdf (in Thai)
- Duangrikaew, K. and Lijuan, W. (2024). Development of Composted Goat Manure Products for Ban Khok Thale Community Enterprise Khao Samo Khon Subdistrict, Tha Wung District, Lopburi Province. *Journal of Roi Kaensam Academi*, 9(8), 1099-1109. <https://so02.tci-thaijo.org/index.php/JRKSA/article/view/272032/181701>
- Kaewmorakot, T., Onthong, J. and Pengnoo, A. (2013). Nutrient Compositions and Release of Shallot Waste, Goat Dung and Bone Meal. *Journal of Yala Rajabhat University*, 8(2), 130-145. https://so04.tci-thaijo.org/index.php/yrh_human/article/view/152006/111023
- Mishra, S.K. and Yadav, K. (2022). Assessment of the Effect of Particle Size and Selected Physico-chemical and Biological Parameters on the Efficiency and Quality of Composting of Garden Waste. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 10(3). <https://doi.org/10.1016/j.jece.2022.107925>
- Ngamphongsai, A., Khuprasert, S., Ngamphongsai, W., Lorpet, A., Srisai, U. and Khachathong, S. (2009). *Use of Goat Feces as Organic Fertilizer in Chili Production* [Research Report, Prince of Songkla University]. KB PSU Knowledge Bank. <https://kb.psu.ac.th/psukb/handle/2010/8219> (in Thai)

- Nuengnoi, A., Chuemark, C., Sensupa, P., Lekkamphut, W., Wongkaew, D. and Praneetpolkrang, P. (2022). The Development of Animal Manure Grinder for Ban Sai Nong Fertilizer Product Community Enterprise Group, Tha Mai District, Chanthaburi Province. *The Journal of Industrial Technology Thepsatri Rajabhat University*, 17(1), 59-68. <https://itechjournal.tru.ac.th/ojs/index.php/tru-i-tech/article/view/156/122>
- Osuhor, C.U., Alawa, J.P. and Akpa, G.N. (2002). Research note: Manure Production by Goats Grazing Native Pasture in Nigeria. *Tropical Grasslands*, 36, 123-125. https://www.tropicalgrasslands.info/public/journals/4/Historic/Tropical%20Grasslands%20Journal%20archive/PDFs/Vol_36_2002/Vol_36_02_02_pp123_125.pdf
- Phangnga Provincial Agriculture and Cooperatives Office. (2023, 23 November). *PD. Microorganisms (Department of Land Development), each type, which type should be used to be beneficial.* https://www.opsmoac.go.th/phangnga-local_wisdom-preview-452891791842 (in Thai)
- Texas A&M AgriLife Extension Service. (2009, February). *Chapter 2, Composting Fundamentals drawing of man with a compost pileRaw material quantity and composition.* Earth-Kind Landscaping. <https://aggie-horticulture.tamu.edu/earthkind/landscape/dont-bag-it/chapter-2-composting-fundamentals/>

การใช้วิศวกรรมข้อความร่วมกับปัญญาประดิษฐ์เชิงสร้างสรรค์เพื่อการวิเคราะห์ ข้อมูลภาพถ่ายเทียมเซนทิเนล-2 บนแพลตฟอร์มกูเกิลเอิร์ธเอนจิน Using Prompt Engineering with Generative AI for the Analysis of Sentinel-2 Satellite Imagery on Google Earth Engine Platform

ศุภกร เอี่ยมสุนทรกุล¹ ชาติชาย ไวยสุระสิงห์^{2*} และชุตินา ไวยสุระสิงห์³

Suphakorn Iamsuntornkul¹ Chattichai Waisurasingha^{2*} and Chutima Waisurasingha³

Received: September 29, 2025; Revised: December 9, 2025; Accepted: December 9, 2025

บทคัดย่อ

การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินศักยภาพของวิศวกรรมข้อความ (Prompt Engineering) ร่วมกับปัญญาประดิษฐ์เชิงสร้างสรรค์ (Generative AI) ในการแปลงภาษาธรรมชาติให้เป็นซอร์สโค้ดภาษาจาวาสคริปต์ (JavaScript) สำหรับใช้งานกูเกิลเอิร์ธเอนจิน (Google Earth Engine: GEE) เพื่อวิเคราะห์ข้อมูลภาพถ่ายเทียมเซนทิเนล-2 (Sentinel-2) สำหรับการจำแนกประเภทการใช้ที่ดินในพื้นที่อำเภอเมืองขอนแก่น โดยใช้ตัวจำแนกแบบซัพพอร์ตเวกเตอร์แมชชีน (Support Vector Machine: SVM) ซึ่งผลลัพธ์จากการศึกษาครั้งนี้พบว่า ซอร์สโค้ดที่ได้จากการทำงานร่วมกันระหว่างวิศวกรรมข้อความร่วมกับ Generative AI นั้นสามารถนำมาใช้งานประมวลผลข้อมูลภูมิสารสนเทศขนาดใหญ่บน GEE ได้เป็นอย่างดี โดยมีค่าความถูกต้องโดยรวม (Overall Accuracy) ร้อยละ 87 และค่าสัมประสิทธิ์แคปป่า (Kappa Coefficient) เป็น 0.84 จากการศึกษานี้พบว่า ประสิทธิภาพของผลลัพธ์จะออกมาดีได้นั้นส่วนหนึ่งขึ้นอยู่กับคุณภาพข้อมูลที่ใช้สอนตัวจำแนกแบบ SVM และอีกส่วนหนึ่งขึ้นอยู่กับคุณภาพของข้อความ (Prompt) ที่จัดเป็นภาษาธรรมชาติที่ใช้ในการทำงานร่วมกับจาก Generative AI ในการผลิตซอร์สโค้ดภาษา JavaScript และองค์ความรู้ของผู้ใช้ในด้านภูมิสารสนเทศซึ่งมีความสำคัญอย่างยิ่งในการออกแบบคำสั่ง การเลือกดัชนี การเลือกตัวอย่างซอร์สโค้ด และการตีความผลลัพธ์ ดังนั้น การวิจัยครั้งนี้แสดงศักยภาพของ Generative AI ร่วมกับเทคนิค Prompt Engineering เป็นเครื่องมือสนับสนุนการสร้างซอร์สโค้ดสำหรับวิเคราะห์ข้อมูลเชิงพื้นที่บน GEE ทำให้ลดภาระด้านเทคนิคและขยายโอกาสในการเข้าถึงเทคโนโลยีการวิเคราะห์ข้อมูลเชิงพื้นที่ให้แก่ผู้ใช้งานทั่วไปผ่านการใช้ภาษาธรรมชาติได้อย่างมีประสิทธิภาพ

คำสำคัญ : ภาษาธรรมชาติ; วิศวกรรมข้อความ; ฐานข้อมูลภูมิสารสนเทศขนาดใหญ่; กูเกิลเอิร์ธเอนจิน

¹ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

² ศูนย์วิจัยและพัฒนาโครงสร้างพื้นฐานอย่างยั่งยืน มหาวิทยาลัยขอนแก่น

³ คณะศิลปศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

¹ Faculty of Engineering, Khon Kaen University

² Sustainable Infrastructure Research and Development Center, Khon Kaen University

³ School of Liberal Arts, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang

* Corresponding Author, Tel. 06 5145 1994, E - mail: fcecws@kku.ac.th

Abstract

This study aims to evaluate the potential of prompt engineering combined with generative AI to translate natural language into JavaScript code for Google Earth Engine (GEE), enabling land use classification of Sentinel-2 imagery in Mueang Khon Kaen District using a Support Vector Machine (SVM) classifier. The results demonstrated that code generated through prompt engineering and Generative AI could be effectively utilized for processing large-scale geospatial data on GEE, achieving 87 % overall accuracy and a Kappa coefficient of 0.84. The effectiveness of the results depended on two primary factors: (1) the quality of training data for the SVM classifier, and (2) the quality of natural language prompts used with Generative AI. Additionally, the user's geospatial expertise proved essential for optimizing command design, selecting appropriate indices, sampling code examples, and interpreting results. This research demonstrates that Generative AI combined with prompt engineering can serve as a valuable tool for supporting code generation for spatial data analysis on GEE, reducing technical barriers and expanding access to spatial data analysis technology for general users through effective natural language interaction.

Keywords: Natural Language; Prompt Engineering; Geospatial Big Data; Google Earth Engine

บทนำ

ยุคแห่งปัญญาประดิษฐ์เชิงสร้างสรรค์ (Generative Artificial Intelligence Era: Generative AI Era) เป็นช่วงเวลา ณ จุดเปลี่ยนสำคัญที่เปลี่ยนผ่านจากยุคอุตสาหกรรม 4.0 สู่ยุคอุตสาหกรรม 5.0 ซึ่งเป็นการเปลี่ยนผ่านจากยุคที่มีการนำปัญญาประดิษฐ์มาใช้เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในกระบวนการผลิตแบบอัตโนมัติ ไปสู่ยุคที่มีการนำ Generative AI มาทำงานร่วมกับมนุษย์ (Human-Centric) เพื่อสร้างนวัตกรรม เพิ่มความยืดหยุ่น และออกแบบแนวทางแก้ปัญหาที่ตอบโจทย์เฉพาะบุคคล โดยจุดเปลี่ยนนี้ได้เริ่มต้นชัดเจนขึ้นบริษัท OpenAI ได้เปิดให้คนทั่วโลกทดลองใช้ Generative AI อย่าง ChatGPT ที่พัฒนาแบบจำลองภาษาขนาดใหญ่ (Large Language Models: LLMs) ให้ทั่วโลกได้ใช้งานแล้วหลังจากนั้นไม่นานได้มีการเปิดตัวในเชิงพาณิชย์อย่างเต็มรูปแบบ ซึ่งได้มีการพัฒนาอย่างต่อเนื่องจนมีความสามารถในการพัฒนาซอร์สโค้ด (Source Code) จากภาษาธรรมชาติ (Natural Language) ที่ให้ผลลัพธ์ที่มีโครงสร้างที่ดี และสามารถทำงานที่ซับซ้อนได้ในระดับหนึ่ง (Denny et al., 2024) ซึ่งขีดความสามารถนี้ได้มีการบรรจุไว้ใน Generative AI อื่น ๆ เช่น Claude AI, Gemini และ Copilot ด้วยเช่นกัน และด้วยขีดความสามารถดังกล่าว Generative AI จึงกลายเป็นเครื่องมือที่มีบทบาทต่อการทำงานของมนุษย์ส่วนใหญ่ในปัจจุบัน จึงเป็นที่น่าสนใจอย่างยิ่งที่จะนำมาเป็นตัวช่วยสำหรับการวิเคราะห์ฐานข้อมูลภูมิสารสนเทศขนาดใหญ่ (Geospatial Big Data) อย่าง Google Earth Engine (GEE) ซึ่งเป็นแพลตฟอร์มคลาวด์ที่กำลังได้รับความนิยมอย่างสูงในปัจจุบัน (Tamiminia et al., 2020)

Google Earth Engine (GEE) เป็นระบบฐานข้อมูลภูมิสารสนเทศขนาดใหญ่ที่เผยแพร่บนแพลตฟอร์มคลาวด์ โดยเป็นการรวมฐานข้อมูลขนาดใหญ่ของภาพถ่ายดาวเทียมและเครื่องมือสำหรับการวิเคราะห์ประมวลผลเข้าไว้ด้วยกัน จึงทำให้การวิเคราะห์ข้อมูลเชิงพื้นที่ ณ ตำแหน่งต่าง ๆ ในโลกนั้นสามารถทำได้อย่างมีประสิทธิภาพ ส่งผลให้ GEE ได้กลายเป็นเครื่องมือสำคัญในการศึกษาการเปลี่ยนแปลงสิ่งแวดล้อม การจัดการทรัพยากรธรรมชาติ และการวางแผนการใช้ประโยชน์ที่ดิน (Tamiminia et al., 2020) อีกทั้งงานในหลายด้านอย่างเช่นงานของ Sainarntip et al. (2021) ที่เป็นการศึกษาเกี่ยวกับข้อมูลจากดาวเทียมในช่วงคลื่นอินฟราเรดความร้อนมาประมาณค่าอุณหภูมิพื้นผิวก็สามารถนำเอา GEE มาประยุกต์ใช้งานได้เช่นกัน อย่างไรก็ตาม การเริ่มต้นใช้งาน GEE ต้องอาศัยความรู้ในการเขียนซอร์สโค้ดด้วยภาษา JavaScript ซึ่งนับเป็นอุปสรรคสำคัญสำหรับนักวิจัยและผู้เชี่ยวชาญในสาขาที่เกี่ยวข้องกับภูมิสารสนเทศ

และการรับรู้ระยะไกล (Remote Sensing) ที่มีพื้นฐานด้านการเขียนซอร์สโค้ดภาษา JavaScript ไม่แข็งแกร่งด้วยข้อจำกัดนี้ ผู้สนใจจำนวนหนึ่งซึ่งแม้จะมีความเชี่ยวชาญทางด้านภูมิสารสนเทศและการรับรู้ระยะไกลไม่สามารถเข้าถึงศักยภาพอันยิ่งใหญ่ของ GEE ได้ เพื่อแก้ไขข้อจำกัดดังกล่าวในยุคที่การพัฒนา Generative AI มีความก้าวหน้าอย่างรวดเร็วและได้เข้ามามีบทบาทสำคัญในการสร้างซอร์สโค้ดจากภาษาธรรมชาติ (Natural Language to Code: NL2C) ซึ่งช่วยลดข้อจำกัดในการเข้าถึงระบบวิเคราะห์ข้อมูลภูมิสารสนเทศขนาดใหญ่อย่าง GEE (Jhonnerie et al., 2024; Osco et al., 2023; Tao and Xu, 2023) โดยเหตุนี้ การศึกษาถึงการประยุกต์ใช้วิศวกรรมข้อความ (Prompt Engineering) กับ Generative AI โดยการแปลงภาษาธรรมชาติให้เป็นการสร้างซอร์สโค้ดที่สามารถทำงานได้จริงบน GEE ในบริบทของการวิเคราะห์การใช้ประโยชน์ที่ดิน (Land Use Classification) จึงเป็นประเด็นที่น่าสนใจ

วัตถุประสงค์การวิจัย

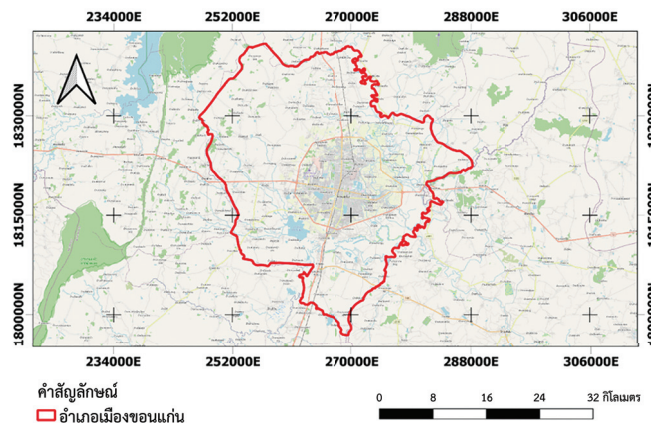
เพื่อประยุกต์ใช้ Prompt Engineering กับ Generative AI ในการแปลงภาษาธรรมชาติเป็นซอร์สโค้ดภาษา JavaScript สำหรับ GEE Code Editor ที่สามารถทำการวิเคราะห์และจำแนกประเภทการใช้ที่ดิน โดยไม่มีการปรับแก้ซอร์สโค้ดเพิ่มเติมภายหลัง และเลือกพื้นที่อำเภอเมืองขอนแก่นเป็นกรณีศึกษา

พื้นที่ในการศึกษา

พื้นที่ศึกษาอยู่ในเขตอำเภอเมืองขอนแก่น ซึ่งเป็นเขตเมืองหลักของจังหวัดและมีความหลากหลายด้านการใช้ประโยชน์ที่ดิน ทั้งพื้นที่ชุมชน พื้นที่แหล่งน้ำ พื้นที่ป่าไม้ พณิชยกรรม เกษตรกรรม และพื้นที่ว่างเปล่า โดยตั้งอยู่ในภูมิประเทศที่เป็นที่ราบสูงตอนกลางของภาคตะวันออกเฉียงเหนือและอยู่ห่างจากกรุงเทพมหานคร ประมาณ 445 กิโลเมตร มีพื้นที่ประมาณ 960 ตารางกิโลเมตร โดยมีขอบเขตพื้นที่ใช้ในการศึกษาดังรูปที่ 1

การแปลงคำสั่งจากภาษาธรรมชาติไปสู่ซอร์สโค้ด (NL2C)

การประมวลผลภาษาธรรมชาติ (Natural Language Processing: NLP) เป็นฐานคิดสำคัญของ LLMs ในการแปลงคำสั่งจากภาษาธรรมชาติไปสู่ซอร์สโค้ด (NL2C) โดยการประยุกต์ใช้ Prompt Engineering ที่เป็นการออกแบบชุดข้อความ (Prompt) อย่างมีระบบนั้นสามารถช่วยเพิ่มความแม่นยำของ NL2C ได้อย่างมีนัยสำคัญ กล่าวคือ การให้ตัวอย่างการทำงานหรือซอร์สโค้ดเพียง 2 - 5 ตัวอย่าง หรือที่เรียกว่า Few-Shot Prompting จะมีส่วนช่วยในการปรับปรุงคุณภาพของผลลัพธ์ให้มีความแม่นยำและตรงตามความต้องการ ทั้งนี้หลักการดังกล่าวมีรากฐานจากแนวคิด Meta-Learning ที่เน้นการให้โมเดลเรียนรู้จากตัวอย่างเพียงเล็กน้อย โดยอาศัยความรู้จากการฝึกก่อนหน้า (Pre-Training) ในกรณีของ LLMs ความสามารถนี้เกิดขึ้นผ่านกลไก In-Context Learning ซึ่งเทคนิคนี้สามารถปรับใช้ในการปรับแต่งโมเดลให้เหมาะสมกับข้อมูลเชิงภูมิสารสนเทศได้เป็นอย่างดี (Brown et al., 2020; Li and Ning, 2023) ทั้งนี้การออกแบบคำสั่งที่มีโครงสร้างและบริบทชัดเจนจะช่วยให้การสร้างซอร์สโค้ดจาก NL2C เป็นไปอย่างถูกต้อง (Garg et al., 2025) หลักการ NL2C สามารถนำมาใช้ในการสร้างซอร์สโค้ดสำหรับ GEE ดังเช่นงานของ Jhonnerie et al. (2024) และ Hou et al. (2025) อย่างไรก็ตาม งานวิจัยเหล่านี้เป็นการใช้ LLMs ที่พัฒนาขึ้นมาเฉพาะกิจสำหรับการวิเคราะห์ข้อมูลภูมิสารสนเทศเท่านั้นซึ่งยังไม่มีเผยแพร่อย่างกว้างขวาง ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นไปที่การใช้งาน LLMs ที่กำลังเป็นที่นิยมอย่าง Claude AI ทั้งนี้เพราะงานศึกษาวิจัยในอดีตของ Hochmair et al. (2024) ได้มีการศึกษาเปรียบเทียบ Generative AI พบว่า Claude AI มีขีดความสามารถสูงกว่า LLMs ตัวอื่น ๆ ในการสร้างซอร์สโค้ดภาษา Python สำหรับการวิเคราะห์ข้อมูลภูมิสารสนเทศ โดยเหตุนี้ การศึกษาวิจัยนี้จึงได้นำเอา Claude AI มาใช้เป็นเครื่องมือ LLMs ในการแปลงภาษาธรรมชาติให้เป็นซอร์สโค้ดภาษา JavaScript สำหรับ GEE



รูปที่ 1 พื้นที่ศึกษาวิจัยตั้งอยู่ในกรอบสีแดง ตั้งอยู่ ณ เขตอำเภอเมือง จังหวัดขอนแก่น

เครื่องมือและข้อมูลที่ใช้ในการวิเคราะห์

เครื่องมือหลักสำหรับการศึกษานี้ประกอบด้วย 2 ส่วนหลักคือ (1) แบบจำลอง LLMs ซึ่งในที่นี้ใช้ Claude AI รุ่น Sonnet 4.0 สำหรับใช้ในการแปลงภาษาธรรมชาติให้เป็นซอร์สโค้ดภาษา JavaScript สำหรับในงาน (2) แพลตฟอร์ม GEE Code Editor ซึ่งเป็นแพลตฟอร์มระบบภูมิสารสนเทศขนาดใหญ่ที่มีขีดความสามารถในการวิเคราะห์สภาพการใช้ที่ดินและสิ่งปกคลุมดิน (Land Use/Cover) โดยใช้ข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียม Sentinel-2 ในพื้นที่เขตอำเภอเมือง จังหวัดขอนแก่น มาทำการวิเคราะห์ด้วยวิธีการจำแนกประเภทการใช้ที่ดินแบบควบคุม (Supervised Classification) โดยการแปลตีความจากข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียมความละเอียดสูง (High-Resolution Satellite Image) ของปีเดียวกัน ที่มีใน Google Earth เพื่อกำหนดจุดตัวอย่าง (Sample Data) ในแต่ละคลาสรายละเอียดดังตารางที่ 1 สำหรับใช้งานใน GEE เพื่อใช้เป็นข้อมูลฝึกสอน (Training) และตรวจสอบผล (Validation)

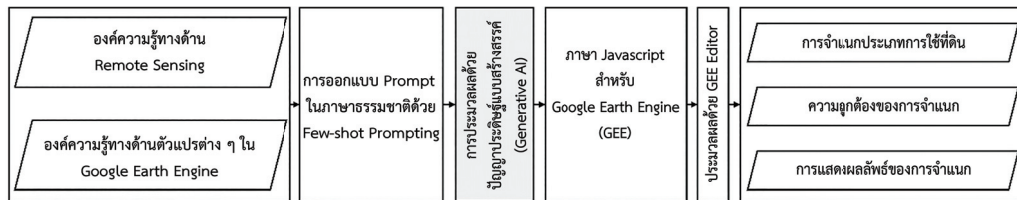
ตารางที่ 1 รายละเอียดข้อมูลและเครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์

ประเภทข้อมูล	รายละเอียด
ภาพถ่ายดาวเทียม	Sentinel-2
ช่วงเวลา	มกราคม - เมษายน 2567
ขอบเขตพื้นที่ศึกษา	อำเภอเมือง จังหวัดขอนแก่น
เครื่องมือวิเคราะห์	Claude AI (Sonnet 4.0), Google Earth Engine Code Editor

วิธีการดำเนินงานวิจัย

การศึกษานี้มีกรอบแนวคิดในการทำงานที่เริ่มต้นจากการสกัดองค์ความรู้ทางด้านการสำรวจระยะไกล (Remote Sensing) และความรู้เกี่ยวกับตัวแปรต่าง ๆ ของ GEE ที่ต้องใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียม Sentinel-2 บน GEE แล้วนำมาเป็นฐานคิดในการออกแบบภาษาธรรมชาติในรูปแบบของ Prompt Engineering บนกรอบการทำงานแบบ Few-Shot Prompting ที่มีการแสดงตัวอย่างซอร์สโค้ด JavaScript สำหรับ GEE ที่เกี่ยวข้องในลักษณะประโยคสั้น ๆ เท่าที่จำเป็น เพื่อสอนให้ Generative AI เข้าใจถึงระบบการทำงานของ GEE เช่น การจัดเก็บข้อมูลใน GEE รูปแบบของชั้นข้อมูล และรูปแบบการเขียนโค้ดต่าง ๆ ของผลลัพธ์ ทั้งนี้เพื่อสร้างซอร์สโค้ดที่ตรงกับการทำงานของ GEE รวมถึงเพิ่มความสามารถของ Generative AI ในการแปลงคำสั่งจากภาษาธรรมชาติที่มีโครงสร้างเป็นซอร์สโค้ดสำหรับการวิเคราะห์เชิงพื้นที่ได้อย่างครบถ้วน โดยมีชุดข้อความ (Prompt) ที่ใช้ประกอบด้วย ชุดข้อความที่ 1: การเตรียมข้อมูล (Data Preparation) และชุดข้อความที่ 2: การประมวลผลข้อมูลและการประเมินความถูกต้อง (Data Processing

and Accuracy Assessment) ซึ่งมีลำดับการทำงานดังรูปที่ 2 โดยหลังจากได้ซอร์สโค้ดจากการแปลงภาษาธรรมชาติแล้วจะนำซอร์สโค้ดที่ได้ไปใช้งานใน GEE เพื่อตรวจสอบศักยภาพของ NL2C ที่มีโครงสร้างเป็นซอร์สโค้ดว่าได้ผลลัพธ์ตามที่ต้องการ อย่างการจำแนกที่ดินด้วยโดยใช้ตัวจำแนกแบบ Support Vector Machine (SVM) พร้อมด้วยการประเมินผลลัพธ์ด้วย Accuracy และ Kappa และการแสดงผลในส่วนต่อประสานกับผู้ใช้ (User Interface)



รูปที่ 2 กรอบแนวคิดในการทำงานวิจัย

ผลการศึกษาและอภิปรายผล

เนื่องจากการศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อประยุกต์ใช้ Prompt Engineering กับ Generative AI ในการแปลงภาษาธรรมชาติเป็นซอร์สโค้ดภาษา JavaScript สำหรับ GEE Code Editor โดยไม่มีการปรับแก้ซอร์สโค้ดเพิ่มเติมภายหลัง อันจะแสดงให้เห็นถึงศักยภาพของ Generative AI ในการสร้างซอร์สโค้ดวิเคราะห์เชิงพื้นที่บนแพลตฟอร์ม GEE ผ่านการสื่อสารด้วยภาษาธรรมชาติแบบมีโครงสร้างในการสร้างชุดข้อความที่เป็นภาษาธรรมชาติที่เหมาะสม แล้วนำเข้าสู่ Generative AI ในการสร้างคำสั่งเชิงโปรแกรมที่ถูกต้อง ครบคลุม และสามารถรันได้จริงในสภาพแวดล้อมจริงบน GEE โดยแบ่งผลลัพธ์ที่ได้จากการประมวลผลภาษาธรรมชาติเป็นซอร์สโค้ดภาษา JavaScript สำหรับ GEE Code Editor ออกเป็น 2 ส่วนหลัก คือ ผลลัพธ์ส่วนที่ 1 ซอร์สโค้ดการเตรียมข้อมูล และผลลัพธ์ส่วนที่ 2 ซอร์สโค้ดการประมวลผลข้อมูลและการประเมินความถูกต้อง ซึ่งได้จากชุดข้อความที่ 1 และ 2 มีรายละเอียดดังนี้

ผลลัพธ์ส่วนที่ 1 ซอร์สโค้ดการเตรียมข้อมูล (Data Preparation)

ชุดข้อความและซอร์สโค้ดในส่วนนี้จัดเป็นพื้นฐานที่จำเป็นต่อการสร้างชุดข้อความในรูปแบบของภาษาธรรมชาติในการเตรียมข้อมูลพื้นฐานที่จำเป็นต่อการวิเคราะห์ข้อมูล ซึ่งจัดเป็นขั้นตอนสำคัญในการนำมาวิเคราะห์การใช้ประโยชน์ที่ดินอำเภอขอนแก่นด้วย GEE ผ่านการสร้างชุดข้อความตามหลักการ Prompt Engineering ด้วยเทคนิค Few-Shot Prompting ผ่านการให้ตัวอย่างที่ชัดเจนและเฉพาะเจาะจง โครงสร้างของชุดข้อความดังตารางที่ 2 สามารถแยกการอธิบายออกเป็น 3 ส่วนสำคัญ ดังนี้

ส่วนที่ 1 การกำหนดพื้นที่ศึกษา ชุดข้อความและซอร์สโค้ดในส่วนนี้ มีข้อมูลพื้นฐานที่จำเป็นต่อการวิเคราะห์ คือ ข้อมูลขอบเขตการปกครอง (Administrative Boundary Dataset) ซึ่งชุดข้อมูลที่ได้จากองค์กร FAO เพื่อแสดงขอบเขตการปกครอง ทั้งในระดับจังหวัดและอำเภอ

ส่วนที่ 2 การเตรียมข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียม ชุดข้อความและซอร์สโค้ดที่กำหนดให้คัดเอาชุดข้อมูล (Dataset) ของข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียม Sentinel-2 ที่กวาดข้อมูลระหว่าง 1 มกราคม - 30 เมษายน พ.ศ. 2567 กำหนดให้ไม่ซ้ำกลุ่มไม่เกิน 20 % และมีการสร้างภาพแบบ Composite ด้วยวิธี Median ซึ่งเป็นการเลือกค่าของจุดภาพของแต่ละจุดภาพด้วยการ Median ค่าจากชุดภาพหลาย ๆ ภาพ ณ ตำแหน่งเดียวกัน ซึ่งมีจุดเด่นในการกำจัดเมฆและเงาเมฆได้ออกจากข้อมูล

ส่วนที่ 3 การคำนวณดัชนีต่าง ๆ ชุดข้อความและซอร์สโค้ดนี้เป็นการคำนวณดัชนีสำหรับใช้ประกอบการวิเคราะห์การใช้ประโยชน์ที่ดิน โดยในการศึกษานี้ได้เลือกใช้ค่าดัชนีต่าง ๆ อันประกอบด้วย ค่าดัชนี Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) คือ ดัชนีวัดความหนาแน่นและสุขภาพของพืชพรรณค่าดัชนี ค่าดัชนี Modified Normalized Difference Water Index (MNDWI) คือ ดัชนีตรวจสอบและติดตามการเปลี่ยนแปลงของแหล่งน้ำ ค่าดัชนี Normalized Difference Built-up Index (NDBI) คือ ดัชนีวิเคราะห์การขยายตัวของเขตเมือง Urban Index (UI) คือ ดัชนีประเมินระดับการพัฒนาเมือง และค่าดัชนี Bare Soil Index (BSI) คือ ดัชนีระบุพื้นที่ดินเปลือยเปล่า (Bare Land)

ตารางที่ 2 ชุดข้อความภาษาธรรมชาติสำหรับสร้างพอร์สโค้ดสำหรับขั้นตอนการเตรียมข้อมูล

ชุดข้อความภาษาธรรมชาติ	พอร์สโค้ดภาษา JavaScript สำหรับ GEE ที่สร้างขึ้นจาก Prompt Engineering และ Generative AI
ส่วนที่ 1 การกำหนดพื้นที่ศึกษา	
พรมท 1: การตั้งค่าโครงการและการเตรียมข้อมูลสำหรับการวิเคราะห์การใช้ประโยชน์ที่ดิน โจทย์: การวิเคราะห์การใช้ประโยชน์ที่ดินอำเภอขอนแก่นด้วย Google Earth Engine 1. การกำหนดพื้นที่ศึกษา (Study Area) - ชุดข้อมูลที่ใช้: FAO/GAUL/2015/level2 (Global Administrative Unit Layers) - การเลือกพื้นที่: อำเภอเมืองขอนแก่น (ระดับ ADM2, ADM2_NAME = "Muang Khon Kaen") ต้องใช้ฟิลเตอร์แบบ AND เพื่อกรองทั้ง ADM1_NAME และ ADM2_NAME - การตรวจสอบข้อมูล: แสดงข้อมูลของทั้งอำเภอในคอนโซลด้วย print(), แสดงพื้นที่ (ตร.กม.) ของทั้งอำเภอในคอนโซล, จดวางตำแหน่งแผนที่ให้แสดงอำเภอขอนแก่นด้วย Map.centerObject()	<pre>// การวิเคราะห์การใช้ประโยชน์ที่ดินอำเภอเมืองขอนแก่นด้วย Google Earth Engine // 1. การกำหนดพื้นที่ศึกษา (Study Area) // โหลดชุดข้อมูลขอบเขตการปกครองจาก FAO/GAUL var level2 = ee.FeatureCollection("FAO/GAUL/2015/level2"); // เลือกอำเภอเมืองขอนแก่น (ระดับ ADM2) โดยใช้ฟิลเตอร์แบบ AND var muangKhonkaen = level2.filter(ee.Filter.and(ee.Filter.eq('ADM1_NAME', 'Khon Kaen'), ee.Filter.eq('ADM2_NAME', 'Muang Khon Kaen'))); // แสดงข้อมูลในคอนโซล print('ข้อมูลอำเภอเมืองขอนแก่น:', muangKhonkaen); // คำนวณและแสดงพื้นที่ (ตารางกิโลเมตร) var districtArea = muangKhonkaen.geometry().area().divide(1000000); print('พื้นที่อำเภอเมืองขอนแก่น (ตร.กม.):', districtArea); // จดวางตำแหน่งแผนที่ Map.centerObject(muangKhonkaen, 11);</pre>
ส่วนที่ 2 การเตรียมข้อมูล Sentinel-2	
2. การเตรียมข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียม Sentinel-2 - ชุดข้อมูลที่ใช้: COPERNICUS/S2_SR_HARMONIZED - การกรองข้อมูล: ช่วงเวลา: 1 มกราคม - 30 เมษายน 2567 (ใช้ filterDate('2024-01-01', '2024-04-30')), พื้นที่: อำเภอขอนแก่น (ใช้ filterBounds()), เมฆปกคลุม: น้อยกว่าหรือเท่ากับ 20% (ใช้ filter(ee.Filter.lt('CLOUDY_PIXEL_PERCENTAGE', 20))) - การประมวลผลข้อมูล: สร้างฟังก์ชัน scaleS2 สำหรับปรับค่าการสะท้อนแสงโดยหารด้วย 10,000, รักษาคุณสมบัติ 'system:time_start' ด้วย copyProperties, สร้างภาพรวม (composite) ด้วยวิธี median() - การตรวจสอบข้อมูล: แสดงจำนวนภาพใน collection (ใช้ size()) แสดงข้อมูลเมตาเดต้าและแบนด์ของภาพแรก (ใช้ first())	<pre>// 2. การเตรียมข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียม Sentinel-2 // ฟังก์ชันสำหรับปรับค่าการสะท้อนแสง Sentinel-2 function scaleS2(image) { return image.multiply(0.0001).copyProperties(image, ['system:time_start']); } // หารด้วย 10,000 เหมือนกับการคูณด้วย 0.0001 // โหลดและกรองข้อมูล Sentinel-2 var sentinel2 = ee.ImageCollection("COPERNICUS/S2_SR_HARMONIZED") .filterDate('2024-01-01', '2024-04-30').filterBounds(muangKhonkaen).filter((ee.Filter.lt('CLOUDY_PIXEL_PERCENTAGE', 20)).map(scaleS2); // เมฆปกคลุมน้อยกว่า 20% // ช่วงเวลา 1 ม.ค. - 30 เม.ย. 2024 // พื้นที่อำเภอเมืองขอนแก่น // ปรับค่าการสะท้อนแสง // สร้างภาพรวมด้วยวิธี median var s2Composite = sentinel2.median(); // แสดงข้อมูลในคอนโซล print('จำนวนภาพ Sentinel-2:', sentinel2.size()); print('ข้อมูลเมตาเดต้าภาพแรก:', sentinel2.first()); print('ข้อมูลแบนด์ของภาพ composite:', s2Composite.bandNames());</pre>

ตารางที่ 2 ชุดข้อความภาษาธรรมชาติสำหรับสร้างซอร์สโค้ดสำหรับขั้นตอนการเตรียมข้อมูล (ต่อ)

ส่วนที่ 3 การคำนวณดัชนี	
3. การคำนวณดัชนีพืชพรรณและดัชนีพื้นที่เมือง - ดัชนีที่ต้องคำนวณ: NDVI (ดัชนีพืชพรรณ): $(B8 - B4)/(B8 + B4)$ ใช้ฟังก์ชัน <code>normalizedDifference(['B8', 'B4'])</code> ตั้งชื่อเป็น 'NDVI', MNDWI (ดัชนีน้ำ): $(B3 - B11)/(B3 + B11)$ ใช้ฟังก์ชัน <code>normalizedDifference(['B3', 'B11'])</code> ตั้งชื่อเป็น 'MNDWI', NDBI (ดัชนีพื้นที่สิ่งปลูกสร้าง): $(B11 - B8)/(B11 + B8)$ ใช้ฟังก์ชัน <code>normalizedDifference(['B11', 'B8'])</code> ตั้งชื่อเป็น 'NDBI', BSI (ดัชนีพื้นที่ว่างเปล่า): $((B11+B4)-(B8+B2))/((B11+B4)+(B8+B2))$ ใช้ฟังก์ชัน <code>expression()</code> กับสูตรที่กำหนด ตั้งชื่อเป็น 'BSI', Urban Index (UI): $(B11 - B8)/(B11 + B8)$ เหมือนกับ NDBI แต่เปลี่ยนชื่อเป็น 'UI' โปรดเขียนโค้ด JavaScript สำหรับ Google Earth Engine ตามขั้นตอนข้างต้น โดยจัดโครงสร้างให้เป็นระเบียบและมีคำอธิบายประกอบในแต่ละส่วน	<pre>// 3. การคำนวณดัชนีพืชพรรณและดัชนีพื้นที่เมือง // คำนวณ NDVI (ดัชนีพืชพรรณ) var ndvi = s2Composite.normalizedDifference(['B8', 'B4']).rename('NDVI'); // คำนวณ MNDWI (ดัชนีน้ำ) var mndwi = s2Composite.normalizedDifference(['B3', 'B11']).rename('MNDWI'); // คำนวณ NDBI (ดัชนีพื้นที่สิ่งปลูกสร้าง) var ndbi = s2Composite.normalizedDifference(['B11', 'B8']).rename('NDBI'); // คำนวณ BSI (ดัชนีพื้นที่ว่างเปล่า) var bsi = s2Composite.expression('((B11 + B4) - (B8 + B2)) / ((B11 + B4) + (B8 + B2))', { 'B11':s2Composite.select('B11'), 'B8': s2Composite.select('B8'), 'B4': s2Composite.select('B4'), 'B2':s2Composite.select('B2') }).rename('BSI'); // คำนวณ Urban Index (UI) var UI = s2Composite.normalizedDifference(['B11', 'B8']).rename('UI'); // รวมดัชนีทั้งหมดเข้ากับภาพหลัก var indices = s2Composite.addBands([ndvi, mndwi, ndbi, bsi, UI]); print('ข้อมูลดัชนีทั้งหมด:', indices.bandNames());</pre>

ซอร์สโค้ดการประมวลผลข้อมูลและการประเมินความถูกต้อง (Data Processing and Accuracy Assessment)

ชุดข้อความและซอร์สโค้ดที่ได้ในส่วนนี้ใช้สำหรับประมวลผลข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียม Sentinel-2 ควบคู่กับการวิเคราะห์ดัชนีต่าง ๆ และตามด้วยการประเมินความถูกต้อง โดยแบ่งโครงสร้างของชุดข้อความเป็น 9 ส่วนสำคัญ ดังตารางที่ 3 ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

ส่วนที่ 1 การนำเข้าและตรวจสอบข้อมูลฝึกสอน ชุดข้อความและซอร์สโค้ดสำหรับการนำเข้าข้อมูลฝึกสอนจากแหล่งข้อมูลส่วนตัวที่ระบุตำแหน่งเก็บข้อมูลบน GEE Platform สำหรับการใช้งาน GEE กับข้อมูลฝึกสอนสำหรับการกำหนดการจำแนกประเภทการใช้ประโยชน์ที่ดินแต่ละประเภท ซึ่งในการศึกษาวิจัยนี้ได้แบ่งออกเป็น 5 ประเภทหลักได้แก่

- ก. พื้นที่แหล่งน้ำ (Water: WA) คือ บริเวณที่เป็นน้ำ เช่น แม่น้ำ อ่างเก็บน้ำ หนอง บึง หรือน้ำท่วมขัง
- ข. พื้นที่พืชพรรณ (Forest: FA) คือ บริเวณที่มีการกระจายของต้นไม้ เช่น ป่าดิบ ป่าโปร่ง และป่าละเมาะ
- ค. พื้นที่การเกษตร (Agriculture: AG) คือ บริเวณที่เพาะปลูกการเกษตร เช่น ข้าว อ้อย และมันสำปะหลัง
- ง. พื้นที่ว่างเปล่า (Barren: BA) คือ บริเวณพื้นที่โล่งหรือพื้นที่ว่างเปล่าที่อาจมีหญ้าปกคลุมบางส่วน
- จ. พื้นที่แหล่งชุมชน (Urban: UR) คือ บริเวณที่มนุษย์สร้างขึ้น เช่น ที่พักอาศัย อาคารและสิ่งปลูกสร้าง

ส่วนที่ 2 การกำหนดแบนด์สำหรับการจำแนกประเภทการใช้ประโยชน์ที่ดิน ชุดข้อความและซอร์สโค้ดสำหรับการเลือกแบนด์ที่เหมาะสมสำหรับการจำแนกประเภทการใช้ประโยชน์ที่ดิน โดยผสมผสานระหว่างแบนด์พื้นฐานของ Sentinel-2 และดัชนีเชิงคลื่นที่คำนวณไว้ในพรมตแรก การเลือกแบนด์ครอบคลุมช่วงคลื่นที่สำคัญทั้งในช่วงแสงที่ตามองเห็นและอินฟราเรดใกล้ ประกอบด้วย B2 B3 B4 B8 B11 และ B12 และการรวมดัชนีที่ใช้ในการวิเคราะห์ (NDVI MNDWI NDBI BSI และ UI) เข้าด้วยกัน เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการจำแนกประเภทการใช้ที่ดิน

ส่วนที่ 3 การสร้างข้อมูลฝึกสอน ชุดข้อความและซอร์สโค้ดสำหรับการสร้างชุดข้อมูลฝึกสอนที่มีประสิทธิภาพสำหรับการเรียนรู้ของเครื่อง (Machine Learning)

ส่วนที่ 4 การแบ่งข้อมูล Train-Test Split ชุดข้อความและซอร์สโค้ดสำหรับแบ่งชุดข้อมูลฝึกสอนออกเป็น 2 ส่วนคือ ส่วนสำหรับฝึกสอน (Training Dataset) และส่วนสำหรับการทดสอบเพื่อยืนยันผล (Testing Dataset) โดยจุดตัวอย่างฝึกสอนสำหรับการใช้ที่ดินทั้งหมด 5 ประเภท (UR AG FA BA WA) อย่างละ 53 จุด รวม 265 จุด และจุดตรวจสอบอย่างละ 53 จุด รวม 265 จุด

ส่วนที่ 5 การฝึกสอนโมเดล ชุดข้อความและซอร์สโค้ดสำหรับการเลือกและกำหนดค่าพารามิเตอร์ของตัวจำแนก Support Vector Machine (SVM) โดยในที่นี้ได้เลือกใช้ Kernel แบบ RBF (Radial Basis Function) สำหรับการจำแนกประเภทการใช้ประโยชน์ที่ดินเนื่องจากสามารถจัดการกับข้อมูลที่มีความซับซ้อนและไม่เป็นเชิงเส้น

ส่วนที่ 6 การจำแนกพื้นที่ ชุดข้อความและซอร์สโค้ดสำหรับการนำโมเดลที่ฝึกสอนแล้วมาใช้งานจริงในขั้นตอนการจำแนกประเภทการใช้ประโยชน์ที่ดินออกเป็น 5 ประเภทหลักดังที่กล่าวไว้ข้างต้น

ส่วนที่ 7 การประเมินประสิทธิภาพ ชุดข้อความและซอร์สโค้ดสำหรับการทดสอบที่แยกไว้แล้วในส่วนที่ 4 ซึ่งจะทำการวิเคราะห์ Error Matrix, Overall Accuracy และ Kappa Coefficient Confusion Matrix

ส่วนที่ 8 การแสดงบนแผนที่ ชุดข้อความและซอร์สโค้ดสำหรับการแสดงผลข้อมูลการจำแนกประเภทอย่างมีประสิทธิภาพและเหมาะสม โดยการกำหนดสีสำหรับการแสดงผลที่สื่อความหมายชัดเจนตามธรรมชาติของแต่ละประเภทการใช้ประโยชน์ที่ดิน

ส่วนที่ 9 คำอธิบายสัญลักษณ์ ชุดข้อความและซอร์สโค้ดสำหรับการออกแบบคำสัญลักษณ์ (Legend) ที่มีประสิทธิภาพสำหรับการแสดงผลข้อมูลใน GEE

ตารางที่ 3 ชุดข้อความภาษาธรรมชาติสำหรับสร้างซอร์สโค้ดเพื่อการจำแนกการใช้ที่ดินและการตรวจสอบ

ชุดข้อความภาษาธรรมชาติ	ซอร์สโค้ดภาษา JavaScript สำหรับ GEE ที่สร้างขึ้นจาก Prompt Engineering และ Generative AI
ส่วนที่ 1 การนำเข้าและตรวจสอบข้อมูลฝึกสอน	
พรอมต์ 2: การฝึกสอนโมเดลจำแนกประเภทการใช้ประโยชน์ที่ดิน โจทย์: การสร้างและฝึกสอนโมเดลจำแนกประเภทการใช้ประโยชน์ที่ดินอำเภอขอนแก่น สร้างโค้ด Google Earth Engine JavaScript ที่ช่วยฝึกสอนโมเดลจำแนกประเภทการใช้ประโยชน์ที่ดิน โดยเริ่มบทใหม่ต่อจากพรอมต์ 1 โดยมีขั้นตอนดังนี้ 1. การนำเข้าชุดข้อมูลฝึกสอน (Training Data) - ข้อมูลที่ต้องนำเข้า: ข้อมูลจุดตัวอย่างของอำเภอเมืองขอนแก่น: 'projects/ee-gramsm32/assets/PointMuangKK24' -การตรวจสอบข้อมูล: แสดงจำนวนฟีเจอร์ในแต่ละชุดข้อมูลด้วยฟังก์ชัน size() เก็บตัวแปรเป็น districtPoints - ข้อมูลคลาสในชุดข้อมูล: คลาส 0: พื้นที่แหล่งน้ำ (Water), คลาส 1: พื้นที่ป่าไม้ (Forest), คลาส 2: พื้นที่เกษตรกรรม (Agriculture), คลาส 3: พื้นที่ว่างเปล่า (Barren), คลาส 4: พื้นที่เมือง (Urban)	<pre>// การฝึกสอนโมเดลจำแนกประเภทการใช้ประโยชน์ที่ดินอำเภอเมืองขอนแก่น // หมายเหตุ: ต้องรันโค้ดจากพรอมต์ 1 ก่อนเพื่อให้มีตัวแปรพื้นฐาน // 1. การนำเข้าชุดข้อมูลฝึกสอน (Training Data) // นำเข้าข้อมูลจุดตัวอย่าง var districtPoints = ee.FeatureCollection('projects/ee-gramsm32/assets/PointMuangKK24'); // ตรวจสอบจำนวนฟีเจอร์ในแต่ละชุดข้อมูล print('จำนวนจุดตัวอย่างในอำเภอเมืองขอนแก่น:', districtPoints.size()); // แสดงข้อมูลตัวอย่างของฟีเจอร์แรกในแต่ละชุดข้อมูล print('ตัวอย่างข้อมูลจุดตัวอย่างอำเภอ:', districtPoints.first()); // ข้อมูลคลาสที่มีในชุดข้อมูล: // คลาส 0: Water // คลาส 1: Forest // คลาส 2: Agriculture // คลาส 3: Barren // คลาส 4: Urban</pre>

ตารางที่ 3 ชุดข้อความภาษาธรรมชาติสำหรับสร้างซอร์สโค้ดเพื่อการจำแนกการใช้ที่ดินและการตรวจสอบ (ต่อ)

ส่วนที่ 2 การกำหนดแบนด์สำหรับการจำแนก	
2. การกำหนดแบนด์สำหรับการจำแนกประเภท (Band Selection) - แบนด์ที่ต้องใช้:แบนด์พื้นฐาน: 'B2', 'B3', 'B4', 'B8', 'B11', 'B12', ดัชนีที่คำนวณไว้ในพรมท 1: 'NDVI', 'MNDWI', 'NDBI', 'BSI', 'UrbanIndex' - การกำหนดตัวแปร:สร้างตัวแปร bands เป็น array เพื่อเก็บรายชื่อแบนด์ที่ต้องการใช้ทั้งหมด, สร้างภาพรวม classificationImage	<pre>// 2. การกำหนดแบนด์สำหรับการจำแนกประเภท (Band Selection) // กำหนดแบนด์ที่ต้องการใช้ var bands = ['B2', 'B3', 'B4', 'B8', 'B11', 'B12', 'NDVI', 'MNDWI', 'NDBI', 'BSI', 'UI']; // สร้างภาพรวมที่ประกอบด้วยแบนด์ทั้งหมดที่ต้องการใช้ (จากพรมท 1) var classificationImage = indices.select(bands); print('แบนด์ที่ใช้สำหรับการจำแนก:', classificationImage.bandNames());</pre>
ส่วนที่ 3 การสร้างข้อมูลฝึกสอน	
3. การสร้างชุดข้อมูลฝึกสอน (Training Sample Generation) - การสุ่มตัวอย่างจากภาพดาวเทียม: ใช้ฟังก์ชัน sampleRegions() เพื่อสุ่มตัวอย่างข้อมูลจากภาพในตำแหน่งของจุดตัวอย่าง กำหนดพารามิเตอร์ ดังนี้: collection: ชุดข้อมูลจุดตัวอย่าง , properties: ['class'] (คอลัมน์ที่เก็บค่าคลาส), scale: 30 (ใช้ scale ที่ใหญ่พอเพื่อลดการใช้หน่วยความจำ), tileSize: 4 (เพิ่มประสิทธิภาพการประมวลผลเมื่อมีข้อมูลจำนวนมาก), geometries: false , เก็บผลลัพธ์ในตัวแปร sampledDistrict	<pre>// 3. การสร้างชุดข้อมูลฝึกสอน (Training Sample Generation) // สุ่มตัวอย่างข้อมูลจากภาพในระดับอำเภอ var sampledDistrict = classificationImage.sampleRegions({ collection: districtPoints, properties: ['class'], scale: 30, tileSize: 4, geometries: false}); print('จำนวนตัวอย่างที่สุ่มได้ (อำเภอ):', sampledDistrict.size());</pre>
ส่วนที่ 4 การแบ่งข้อมูล Train-Test Split	
4. การแบ่งข้อมูลเป็นชุดฝึกสอนและชุดทดสอบ (Train-Test Split) - แบ่งข้อมูลในระดับอำเภอ:สร้างคอลัมน์สุ่มด้วยฟังก์ชัน randomColumn(): seed 42, เรียงลำดับข้อมูลตามค่าสุ่มด้วย sort('random'), แปลงเป็น List และรับจำนวนข้อมูลด้วย toList() และ size().getInfo(), คำนวณจำนวนครึ่งหนึ่งของข้อมูลด้วย Math.floor(count / 2), แบ่งข้อมูลออกเป็นสองส่วนเท่า ๆ กันด้วย slice() แปลงกลับเป็น FeatureCollection ด้วย ee.FeatureCollection(), เก็บในตัวแปร trainingDistrict และ testingDistrict - ตรวจสอบผลลัพธ์: แสดงจำนวนข้อมูลในแต่ละชุดด้วย print() และ size()	<pre>// 4. การแบ่งข้อมูลเป็นชุดฝึกสอนและชุดทดสอบ (Train-Test Split) // แบ่งข้อมูลในระดับอำเภอ var sampledDistrictWithRandom = sampledDistrict.randomColumn('random', 42); var sortedDistrict = sampledDistrictWithRandom.sort('random'); var districtList = sortedDistrict.toList(sortedDistrict.size()); var districtCount = districtList.size().getInfo(); var halfDistrictCount = Math.floor(districtCount / 2); var trainingDistrict = ee.FeatureCollection(districtList.slice(0, halfDistrictCount)); var testingDistrict = ee.FeatureCollection(districtList.slice(halfDistrictCount)); // ตรวจสอบผลลัพธ์การแบ่งข้อมูล print('การแบ่งข้อมูลฝึกสอนและทดสอบ'); print('ข้อมูลฝึกสอนอำเภอ:', trainingDistrict.size()); print('ข้อมูลทดสอบอำเภอ:', testingDistrict.size());</pre>

ตารางที่ 3 ชุดข้อความภาษาธรรมชาติสำหรับสร้างซอร์สโค้ดเพื่อการจำแนกการใช้ที่ดินและการตรวจสอบ (ต่อ)

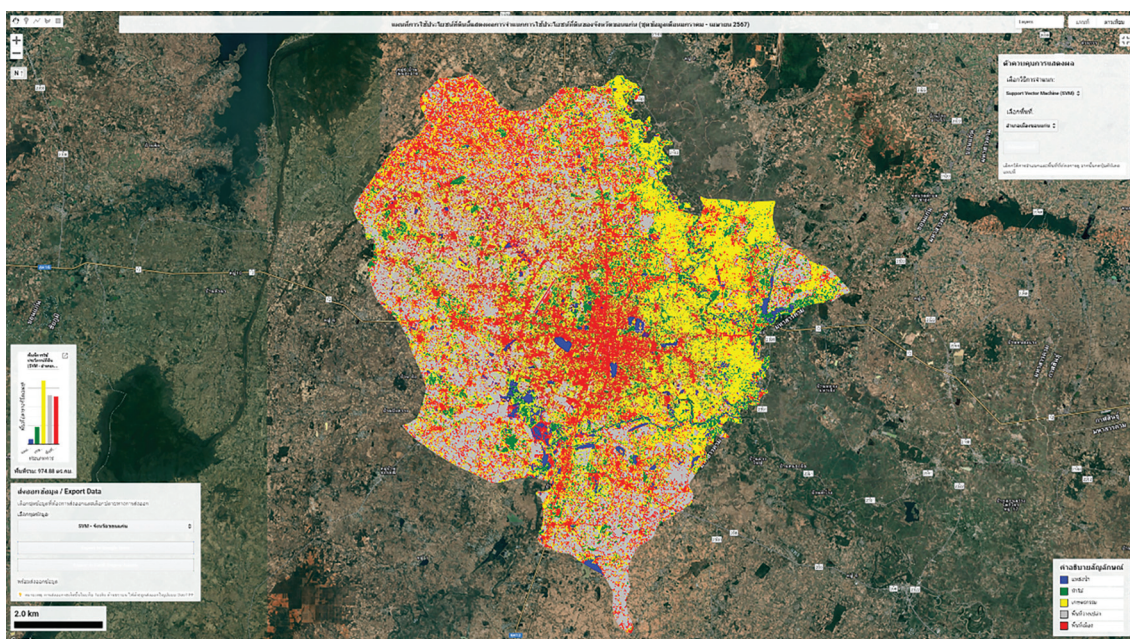
ส่วนที่ 5 การฝึกสอนโมเดล	
5. การฝึกสอนโมเดล (Model Training) - โมเดล SVM แบบ RBF: ใช้ ee.Classifier.libsvm() พร้อมกำหนด พารามิเตอร์: kernelType: 'RBF', gamma: 0.5, cost: 10 เก็บใน svmClassifierDistrict	// 5. การฝึกสอนโมเดล (Model Training) // โมเดล SVM แบบ RBF สำหรับอำเภอ var svmClassifierDistrict = ee.Classifier.libsvm({ kernelType: 'RBF', gamma: 0.5, cost: 10 }).train({ features: trainingDistrict, classProperty: 'class', inputProperties: bands}); print('การฝึกสอนโมเดลเสร็จสิ้น'); print('- SVM RBF (อำเภอ)');
ส่วนที่ 6 การจำแนกพื้นที่	
6. การจำแนกพื้นที่ (Area Classification) - จำแนกพื้นที่แต่ละโมเดล: ทำการจำแนกโดยใช้ classify() กับ classificationImage ,ใช้ clip() เพื่อตัดภาพตามขอบเขตพื้นที่ (อำเภอ), เก็บ ผลลัพธ์ในตัวแปรระดับพื้นที่ เช่น: svmClassificationDistrict เป็นต้น	// 6. การจำแนกพื้นที่ (Area Classification) // การจำแนกพื้นที่ ระดับอำเภอ var svmClassificationDistrict = classificationImage.classify(svmClassifierDistrict) .clip(muangKhonkaen); print('การจำแนกพื้นที่เสร็จสิ้น');
ส่วนที่ 7 การประเมินประสิทธิภาพ	
7. การประเมินประสิทธิภาพของโมเดล (Model Evaluation) - คำนวณค่าสถิติสำคัญ: ใช้ชุดข้อมูลทดสอบที่ แยกไว้, จำแนกชุดข้อมูลทดสอบด้วยโมเดลที่ ฝึกสอนแล้ว, สร้าง Confusion Matrix ด้วย errorMatrix(), คำนวณ Overall Accuracy ด้วย accuracy(), คำนวณ Kappa Coefficient ด้วย kappa() - แสดงผลการประเมิน: แสดงผลลัพธ์ทั้งหมดใน คอนโซลด้วย print(), แยกการประเมินสำหรับ แต่ละโมเดลและแต่ละระดับพื้นที่	// 7. การประเมินประสิทธิภาพของโมเดล (Model Evaluation) // ฟังก์ชันประเมินโมเดล function evaluateModel(classifier, testData, modelName, region) { var validated = testData.classify(classifier); var matrix = validated.errorMatrix('class', 'classification'); var accuracy = matrix.accuracy(); var kappa = matrix.kappa(); print('การ ประเมิน ' + modelName + ' (' + region + ')'); print('Overall Accuracy:', accuracy); print('Kappa Coefficient:', kappa); print('Confusion Matrix:', matrix); return { accuracy: accuracy, kappa: kappa, matrix: matrix }; // ประเมินโมเดล ทั้งหมด var svmDistrictEval = evaluateModel(svmClassifierDistrict, testingDistrict, 'SVM RBF', 'อำเภอ');
ส่วนที่ 8 การแสดงผลบนแผนที่	
8. การแสดงผลบนแผนที่ (Map Visualization) - กำหนดพารามิเตอร์การแสดงผล: กำหนด min: 0 และ max: 4 ตามจำนวนคลาส, กำหนด พาเลตสีดังนี้: คลาส 0 (Water): '#0000FF' (สีน้ำ เงิน), คลาส 1 (Forest): '#008000' (สีเขียว), คลาส 2 (Agriculture): '#FFFF00' (สีเหลือง), คลาส 3 (Barren): '#C0C0C0' (สีเทา), คลาส 4 (Urban): '#FF0000' (สีแดง) - แสดงผลการจำแนก: ใช้ Map.addLayer() เพื่อ แสดงผลลัพธ์ของแต่ละโมเดล, ตั้งค่าให้ซ่อนเริ่มต้น ด้วย visible: true	// 8. การแสดงผลบนแผนที่ (Map Visualization) // กำหนด พารามิเตอร์การแสดงผล var classificationVis = { min: 0, max: 4, palette: ['#0000FF', '#008000', '#FFFF00', '#C0C0C0', '#FF0000'] }; // แสดงผลการจำแนกระดับอำเภอ Map.addLayer(svmClassificationDistrict, classificationVis, 'SVM Classification (อำเภอ)', true);

ตารางที่ 3 ชุดข้อความภาษาธรรมชาติสำหรับสร้างซอร์สโค้ดเพื่อการจำแนกการใช้ที่ดินและการตรวจสอบ (ต่อ)

ส่วนที่ 9 คำอธิบายสัญลักษณ์	
9. สร้างคำอธิบายสัญลักษณ์ (Legend): สร้างด้วยui.Panel และกำหนดตำแหน่งที่มุมขวาล่าง, เพิ่มหัวข้อและรายการสำหรับแต่ละคลาสแสดงทั้งสีและคำอธิบายพร้อมค่าคลาส (0-4)	<pre>// สร้างคำอธิบายสัญลักษณ์ (Legend) // สร้างแผงคำอธิบาย สัญลักษณ์ var legend = ui.Panel({ style: { position: 'bottom-right', padding: '8px 15px' }}); // หัวข้อคำอธิบาย var legendTitle = ui.Label({ value: 'การใช้ประโยชน์ที่ดิน', style: {fontWeight: 'bold', fontSize: '18px', margin: '0 0 4px 0', padding: '0' }}); legend.add(legendTitle); // ข้อมูลคลาสและสี var classNames = ['Water (น้ำ)', 'Forest (ป่า)', 'Agriculture (เกษตร)', 'Barren (ว่างเปล่า)', 'Urban (เมือง)']; var classColors = ['#0000FF', '#008000', '#FFFF00', '#C0C0C0', '#FF0000']; // สร้างรายการสำหรับแต่ละคลาส for (var i = 0; i < classNames.length; i++) {var colorBox = ui.Label({style: {backgroundColor: classColors[i], padding: '8px', margin: '0 0 4px 0'}}); var className = ui.Label({value: i + ' : ' + classNames[i], style:{margin: '0 0 4px 6px' }}); var legendRow = ui.Panel({widgets: [colorBox, className], layout: ui.Panel.Layout.Flow('horizontal')}); legend.add(legendRow); // เพิ่มคำอธิบายลงในแผนที่ Map.add(legend);</pre>

อภิปรายผลการจำแนกประเภทการใช้ที่ดิน (Land Use Classification)

จากผลลัพธ์ดังรูปที่ 3 ได้อยู่ในรูปแบบ User Interface ที่ได้จากซอร์สโค้ดภาษา JavaScript ทำงานบน GEE ที่พัฒนาขึ้นจากภาษาธรรมชาติด้วยเทคนิค Prompt Engineering แบบ Few-Shot Prompting ซึ่งสามารถบันทึกผลลัพธ์ในรูปแบบของ Earth Engine Assets ที่สามารถส่งออกเป็นไฟล์ผลลัพธ์ให้อยู่ในระบบจัดเก็บข้อมูลอย่าง Google Drive ได้



รูปที่ 3 ผลลัพธ์การจำแนกประเภทการใช้ประโยชน์ที่ดินด้วยตัวจำแนกแบบ SVM ระดับอำเภอเมืองขอนแก่น

ทั้งนี้ผลลัพธ์ที่ได้จากการจำแนกการใช้ที่ดินของอำเภอเมืองขอนแก่นด้วยตัวจำแนกแบบ SVM โดยให้ค่า Overall Accuracy และ Kappa Coefficient (Van Ninh and Waisurasinha, 2018) ที่ 87 % และ 0.84 ดังตารางที่ 4 ซึ่งสูงกว่าเกณฑ์มาตรฐานทางวิชาการ (มากกว่า 80 %) และเทียบเท่าหรือดีกว่างานวิจัยก่อนหน้าในพื้นที่เดียวกัน อย่างเช่นผลงานของ Van Ninh and Waisurasinha (2018) ที่ได้ Overall Accuracy เพียง 82 % และงานของ Biswas et al. (2023) ที่ได้ 85 % ในพื้นที่ที่มีลักษณะคล้ายคลึงกัน ทั้งนี้เนื่องจากความครบถ้วนของชุดข้อมูลฝึกสอน ที่มีอยู่กระจายอยู่ทั่วทั้งพื้นที่ที่มีคุณภาพสูง นอกจากนี้เมื่อพิจารณาในเชิงลึกยังพบว่า ตัวจำแนก SVM ให้ค่าความถูกต้อง ในการจำแนกการใช้ที่ดินแต่ละประเภทนั้นมีแทบทุกประเภทมีค่า Producer's Accuracy สูงกว่า 85 % ยกเว้นการจำแนก การใช้ที่ดินประเภทป่าไม้ที่มีค่าความถูกต้องประมาณ 70 % และเมื่อพิจารณาในรายละเอียดพบว่า มีพื้นที่จำนวนหนึ่ง ที่ถูกจำแนกเป็นการใช้ที่ดินเป็นแบบเกษตรกรรม ในขณะที่ User's Accuracy ของการใช้ที่ดินแทบทุกประเภทมีค่าสูงกว่า 85 % ยกเว้นการจำแนกการใช้ที่ดินในพื้นที่เกษตรกรรมที่มีความถูกต้องในระดับไม่สูงมากเช่นกันโดยมีค่าประมาณ 65 % โดยมีพื้นที่จำนวนหนึ่งที่ถูกจำแนกเป็นการใช้ที่ดินเป็นแบบป่าไม้ ที่เป็นดังนี้เพราะความคล้ายคลึงของลายเซ็นเชิงคลื่น ระหว่างพื้นที่เกษตรกรรมกับพื้นที่ป่าไม้โดยต่างเป็นพื้นที่พืชพรรณที่มีการสะท้อนของคลอโรฟิลล์ทั้งคู่ อย่างไรก็ตาม การเปลี่ยนแปลงฤดูกาลที่อาจมีผลต่อภาพ Sentinel-2 นั้นหมายถึงการศึกษาต่อยอดเรื่องการขยายตัวของเมืองขอนแก่น ในอนาคตควรเลือกช่วงเวลาเดียวกันกับที่ใช้ในการศึกษานี้เพื่อที่จะสามารถเปรียบเทียบหรืออ้างอิงการขยายตัว กับการศึกษานี้ จากที่กล่าวมาทั้งหมดนี้จะเห็นว่า Generative AI นั้นมีขีดความสามารถในการสร้างซอร์สโค้ดที่ให้ ผลลัพธ์ออกมาอย่างเป็นรูปธรรมและสามารถทำงานได้อย่างเต็มประสิทธิภาพ โดยจะเห็นว่าเทคนิค Prompt Engineering แบบ Few-Shot Prompting นั้นเป็นสะพานเชื่อมระหว่างผู้ใช้งานระบบ GEE ในการจำแนกภาพถ่ายดาวเทียมและซอร์สโค้ด ภาษา JavaScript เพื่อการเขียนโปรแกรมจากเดิมที่ต้องจดจำวิธีการเขียนโปรแกรมมาเป็นการสร้างข้อความในภาษา ธรรมชาติที่มีการผสมผสานเอาเฉพาะคำสำคัญที่เกี่ยวข้อง เช่น การแบ่งขอบเขตการปกครอง การจัดเก็บข้อมูล และ การกำหนดสี เป็นต้น ทั้งนี้เพื่อป้องกันการเกิดการหลอนของ AI (AI Hallucination) ที่อาจจะทำให้เกิดการสร้างซอร์สโค้ด ที่ไม่สามารถทำงานได้บน GEE ซึ่งเป็นข้อจำกัดของ Generative AI

ตารางที่ 4 ผลการประเมินความถูกต้องของการจำแนกประเภทการใช้ที่ดินของอำเภอเมือง จังหวัดขอนแก่น

ประเภทการใช้ที่ดิน	WA	FA	AG	BA	UR	Total	User's Accuracy (%)
WA	54	0	0	0	1	55	98
FA	0	44	2	0	0	46	96
AG	0	19	42	1	3	65	65
BA	0	0	0	43	1	44	98
UR	0	0	1	6	48	55	87
Producer's Accuracy (%)	100	70	93	86	91	265	

หมายเหตุ : WA = Water (พื้นที่แหล่งน้ำ), FA = Forest (พื้นที่พืชพรรณ), AG = Agriculture (พื้นที่การเกษตร), BA = Barren (พื้นที่ว่างเปล่า), UR = Urban (พื้นที่แหล่งชุมชน)

สรุปผลการวิจัย

การศึกษานี้ได้แสดงให้เห็นถึงศักยภาพของการประยุกต์ใช้ปัญญาประดิษฐ์เชิงสร้างสรรค์ (Generative AI) ร่วมกับ เทคนิควิศวกรรมข้อความ (Prompt Engineering) บนกรอบการทำงานแบบ Few-Shot Prompting ที่แสดงตัวอย่าง ซอร์สโค้ดเฉพาะส่วนที่จำเป็นสำหรับ Google Earth Engine (GEE) ผสมผสานกับองค์ความรู้ด้านภูมิสารสนเทศ เพื่อใช้ประกอบกันในการสร้างข้อความที่เป็นภาษาธรรมชาติ เพื่อสั่งให้ Generative AI ทำการสร้างซอร์สโค้ดภาษา JavaScript สำหรับ GEE ในการประมวลผลข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียมร่วมกับข้อมูลฝึกสอน (Training Samples) ให้กับ

ตัวจำแนกแบบ Support Vector Machine (SVM) ซึ่งให้ผลลัพธ์ที่มีความถูกต้องของการจำแนกการใช้ที่ดินในภาพรวม (Overall Accuracy) ในระดับที่ค่อนข้างสูง โดยผลลัพธ์ของการศึกษานี้ได้แสดงให้เห็นว่า ซอร์สโค้ดภาษา JavaScript สำหรับ GEE ที่สร้างขึ้นจากภาษาธรรมชาติด้วย Generative AI นี้ สามารถนำมาใช้งานได้จริง และสามารถที่จะเติมเต็มช่องว่างให้กับผู้สนใจในการใช้งาน GEE สำหรับการวิเคราะห์ข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียมบนฐานข้อมูลภูมิสารสนเทศขนาดใหญ่ แต่ยังคงขาดความเชี่ยวชาญในการเขียนโปรแกรมภาษา JavaScript สำหรับ GEE สิ่งนี้เน้นเป็นการลดอุปสรรคทางเทคนิคและเพิ่มความเร็วในการพัฒนาโปรแกรม อย่างไรก็ตามยังต้องอาศัยความรู้พื้นฐานของ JavaScript สำหรับ GEE ในการออกแบบคำสั่งในภาษาธรรมชาติอยู่บ้าง โดยเป็นระดับ Low-Code Programming ทั้งนี้เพื่อป้องกันการเกิดปรากฏการณ์ที่ Generative AI ที่พัฒนาบนฐาน LLMs แล้วเกิดการสร้างข้อมูลที่ไม่ถูกต้องหรือที่เราเรียกว่า การหลอนของ Generative AI (AI Hallucination) โดยการป้องกันนี้จะช่วยให้ Generative AI ทำการประมวลผลภาษาธรรมชาติให้ออกมาเป็นซอร์สโค้ด JavaScript สำหรับ GEE ที่สมบูรณ์และใช้งานได้จริง และการสร้างซอร์สโค้ดนี้สามารถทำได้อย่างครอบคลุมตั้งแต่การเตรียมข้อมูล การคำนวณดัชนีเชิงคลื่นต่าง ๆ การฝึกสอนการเรียนรู้ของเครื่อง ไปจนถึงการประเมินประสิทธิภาพและการสร้างส่วนต่อประสานกับผู้ใช้ (User Interface) ซึ่งผลการวิจัยนับเป็นตัวอย่างสำคัญที่แสดงให้เห็นถึงการเปิดโอกาสให้เทคโนโลยีการวิเคราะห์ข้อมูลเชิงพื้นที่ด้วย GEE เข้าถึงได้ง่ายขึ้น ซึ่งจะนำไปสู่การเพิ่มขึ้นของงานวิจัยด้านการจัดการทรัพยากรธรรมชาติและการติดตามสิ่งแวดล้อมต่อไปในอนาคต อนึ่งการศึกษาต่อยอดในอนาคตควรเพิ่มเปรียบเทียบกับเทคนิคอื่นเพิ่มเติมโดยการเปรียบเทียบ SVM กับวิธีอื่น เช่น Random Forest และ CART เป็นต้น ทั้งนี้เพื่อยืนยันความสามารถในการแปลงภาษาธรรมชาติเป็นซอร์สโค้ดภาษา JavaScript สำหรับ GEE Code Editor ที่สามารถทำการวิเคราะห์และจำแนกประเภทการใช้ที่ดิน โดยไม่มีการปรับแก้ซอร์สโค้ดเพิ่มเติมภายหลัง

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณทุนอุดหนุนงานวิทยานิพนธ์จากคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น และขอกราบขอบพระคุณทุนอุดหนุนงานวิจัยจากศูนย์วิจัยพัฒนามูลฐานอย่างยั่งยืน คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

References

- Biswas, J., Jobaer, M.A., Haque, S.F., Islam Shozib, M.S. and Limon, Z.A. (2023). Mapping and Monitoring Land use Land Cover Dynamics Employing Google Earth Engine and Machine Learning Algorithms on Chattogram, Bangladesh. *Heliyon*, 9(11), 1-23. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e21245>
- Brown, T.B., Mann, B., Ryder, N., Subbiah, M., Kaplan, J., Dhariwal, P., Neelakantan, A., Shyam, P., Sastry, G., Askell, A., Agarwal, S., Herbert-Voss, A., Krueger, G., Henighan, T., Child, R., Ramesh, A., Ziegler, D.M., Wu, J., Winter, C., ... Amodei, D. (2020). *Language Models are Few-Shot Learners* [Preprint]. arXiv. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2005.14165>
- Denny, P., Leinonen, J., Prather, J., Luxton-Reilly, A., Amarouche, T., Becker, B.A. and Reeves, B. N. (2024). *Prompt Problems: A New Programming Exercise for the Generative AI Era*. In Ben Stephenson & Jeffrey A. (Eds.), *The 55th ACM Technical Symposium on Computer Science Education* (pp. 296-302). <https://doi.org/10.1145/3626252.3630909>
- Garg, A., Nisumba Soodhani, K. and Rajendran, R. (2025). Enhancing Data Analysis and Programming Skills Through Structured Prompt Training: The Impact of Generative AI in Engineering Education. *Computers and Education: Artificial Intelligence*, 8. <https://doi.org/10.1016/j.caeai.2025.100380>
- Hochmair, H.H., Juhász, L. and Kemp, T. (2024). Correctness Comparison of ChatGPT-4, Gemini, Claude-3, and Copilot for Spatial Tasks. *Transactions in GIS*, 28(7), 2219-2231. <https://doi.org/10.1111/tgis.13233>

- Hou, S., Shen, Z., Zhao, A., Liang, J., Gui, Z., Guan, X., Li, R. and Wu, H. (2025). GeoCode-GPT: A Large Language Model for Geospatial Code Generation. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 138. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2025.104456>
- Jhonnerie, R., Oktorini, Y., Volcherina Darlis, V., Pebriandi, P., Prianto, E., Fatmawati, R., Nofrizal, N., Ramses, R., Miswadi, M. and Rahmatdillah, R. (2024). Integration of Generative Artificial Intelligence and Google Earth Engine for Mangrove Land Cover Mapping. *BIO Web of Conferences*, 136. <https://doi.org/10.1051/bioconf/202413603002>
- Li, Z. and Ning, H. (2023). Autonomous GIS: The Next-Generation AI-Powered GIS. *International Journal of Digital Earth*, 16(2), 4668-4686. <https://doi.org/10.1080/17538947.2023.2278895>
- Oscó, L.P., Lemos, E.L., Gonçalves, W.N., Ramos, A.P.M. and Junior, J.M. (2023). The Potential of Visual ChatGPT for Remote Sensing. *Remote Sensing*, 15(13). <https://doi.org/10.3390/rs15133232>
- Sainarmtip, R., Wetchayont, P. and Chenrai, P. (2021). Development of Geothermal Potential Resources Map using Land Surface Temperature from MODIS in Northern Thailand. *RMUTI Journal of Science and Technology*, 14(1), 68-82. <https://ph01.tci-thaijo.org/index.php/rmutijo/article/view/241847/166073> (in Thai)
- Tamiminia, H., Salehi, B., Mahdianpari, M., Quackenbush, L., Adeli, S. and Brisco, B. (2020). Google Earth Engine for Geospatial Big Data Applications: A Meta-Analysis and Systematic Review. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 164, 152-170. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2020.04.001>
- Tao, R. and Xu, J. (2023). Mapping with ChatGPT. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 12(7). <https://doi.org/10.3390/ijgi12070284>
- Van Ninh, T. and Waisurasingha, C. (2018). Land Use/Cover Change and Landscape Fragmentation Analyses in Khon Kaen City, Northeastern Thailand. *International Journal of GEOMATE*, 15(47), 201-208. <https://doi.org/10.21660/2018.47.SGI174>

การประเมินแพลตฟอร์มดิจิทัลเพื่อส่งเสริมการค้าสินค้าเกษตรสีเขียวสู่เป้าหมาย Carbon Neutrality และ Net-Zero ของประเทศไทย

Digital Platform for Green Agriculture: Driving Low-Carbon Economy toward Net-Zero in Thailand

ปณณรัตน์ วงศ์พัฒนานิภาส^{1*} อุทัย สำรวมจิตร์¹ และเศรษฐพงศ์ วงษ์อินทร์¹

Pannarat Wongpattananipas^{1*} Uthai Samruamjit¹ and Sethapong Wong-In¹

Received: November 8, 2025; Revised: January 14, 2026; Accepted: January 19, 2026

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาและประเมินแพลตฟอร์มตลาดออนไลน์สำหรับสินค้าเกษตรสีเขียว ซึ่งเป็นกลไกสำคัญในการลดรอยเท้าคาร์บอน (Carbon Footprint) และขับเคลื่อนภาคเกษตรสู่เป้าหมาย Net-Zero ของประเทศไทย การวิจัยใช้ระเบียบวิธีวิจัยแบบผสมผสาน (Mixed-Methods) โดยเริ่มต้นจากการออกแบบเชิงสร้างสรรค์ (Design Thinking) และเก็บข้อมูลเชิงปริมาณจากกลุ่มตัวอย่าง 400 คน (เกษตรกรและผู้บริโภค) และการทดสอบต้นแบบ (Prototype Testing) ผลการวิเคราะห์ยืนยันว่าแพลตฟอร์มที่พัฒนาขึ้นสามารถบูรณาการฟังก์ชันการแสดงผล Carbon Footprint และระบบตรวจสอบย้อนกลับ (Traceability) ได้อย่างมีประสิทธิภาพ การวิเคราะห์การถดถอยพหุคูณ (Multiple Regression) แสดงให้เห็นว่า ความชัดเจนของข้อมูล Carbon Footprint เป็นปัจจัยที่มีอิทธิพลเชิงบวกและสูงที่สุด ต่อความตั้งใจในการใช้แพลตฟอร์มอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($\beta = 0.402$, $p < 0.001$) โดยความพึงพอใจโดยรวมของกลุ่มผู้ใช้ต่อแพลตฟอร์มอยู่ในระดับสูง ($\bar{X} = 4.35$) งานวิจัยนี้สรุปได้ว่าแพลตฟอร์มดิจิทัลทำหน้าที่เป็นโครงสร้างพื้นฐานสำคัญในการสร้างความเชื่อมั่นทางด้านสิ่งแวดล้อม (Environmental Trust) และเป็นกลไกเชิงกลยุทธ์ในการเปลี่ยนผ่านภาคเกษตรกรรมเข้าสู่เศรษฐกิจคาร์บอนต่ำ (Green Economy) และสนับสนุนนโยบาย Net-Zero ของประเทศอย่างเป็นรูปธรรม

คำสำคัญ : แพลตฟอร์มดิจิทัล; รอยเท้าคาร์บอน; การปล่อยก๊าซเรือนกระจกสุทธิเป็นศูนย์; สินค้าเกษตรสีเขียว; เศรษฐกิจคาร์บอนต่ำ

¹ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏวไลยอลงกรณ์ในพระบรมราชูปถัมภ์

¹ Faculty of Science and Technology, Valaya Alongkorn Rajabhat University under the Royal Patronage

* Corresponding Author, Tel. 08 5593 5525, E - mail: sethapon@vru.ac.th

Abstract

This research aimed to develop and evaluate a specialized digital platform for green agricultural products, serving as a critical mechanism to reduce the Carbon Footprint (CFP) and propel the farm sector towards Thailand's national Net-Zero goal. The study employed a mixed-methods research design, beginning with a user-centered approach inspired by Design Thinking to develop a functional prototype. Quantitative data were collected from a sample of 400 participants —200 farmers and 200 consumers —alongside qualitative insights from prototype testing. The results confirm that the developed platform successfully integrates essential functions, including the clear display of product Carbon Footprint information and a robust traceability system. Multiple Regression analysis indicated that the clarity of Carbon Footprint information had the most significant influence on user trust and purchasing intention ($\beta=0.402$, $p<0.001$). Furthermore, overall user satisfaction with the platform was high ($\bar{X} = 4.35$, out of 5.00). In conclusion, this digital platform is a vital infrastructure component for establishing environmental trust between producers and consumers, providing transparent data on low-carbon products, and accelerating Thailand's agricultural economy's transition towards a sustainable, Net-Zero future. The findings underscore the importance of integrating verifiable environmental metrics into e-commerce for green commodities.

Keywords: Digital Platform; Carbon Footprint; Net-Zero; Green Agricultural Products; Low-Carbon Economy

บทนำ

การเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ (Climate Change) ได้กลายเป็นความท้าทายเชิงโครงสร้างในระดับโลกที่ส่งผลกระทบต่อเสถียรภาพทางเศรษฐกิจ สภาพแวดล้อม และความมั่นคงด้านอาหารอย่างรุนแรง โดยเฉพาะอย่างยิ่ง ภาคเกษตรกรรม ซึ่งเป็นภาคส่วนที่มีความเปราะบางต่อความผันผวนของสภาพอากาศ และยังเป็นแหล่งสำคัญของการปล่อยก๊าซเรือนกระจกทั่วโลก ภายใต้ฉันทามติระดับโลกของความตกลงปารีส (Paris Agreement) ประเทศไทยได้แสดงเจตนารมณ์อันแน่วแน่ในการกำหนดเป้าหมายความเป็นกลางทางคาร์บอน (Carbon Neutrality) และการปล่อยก๊าซเรือนกระจกสุทธิเป็นศูนย์ (Net-Zero Emissions) ภายในกลางศตวรรษ การบรรลุเป้าหมายเหล่านี้จึงเรียกร้องให้เกิดการปรับเปลี่ยนกระบวนทัศน์ทางเศรษฐกิจครั้งใหญ่ โดย Rogelj (2023) ได้เน้นย้ำถึงความจำเป็นของการบูรณาการเป้าหมาย Net-Zero เข้ากับนโยบายและการปฏิบัติการในทุกภาคส่วนอย่างเร่งด่วน การเปลี่ยนผ่านสู่เศรษฐกิจคาร์บอนต่ำ (Low-Carbon Economy) จึงเป็นกลยุทธ์สำคัญในการสร้างความสมดุลระหว่างการเติบโตทางเศรษฐกิจกับการอนุรักษ์สิ่งแวดล้อมตามที่ United Nations Environment Programme (UNEP, 2011) ได้นำเสนอแนวคิด เศรษฐกิจสีเขียว (Green Economy) ไว้ โดยมุ่งเน้นการส่งเสริมการผลิตและการค้าสินค้าเกษตรสีเขียว (Green Agricultural Products) ซึ่งมีการลดการใช้สารเคมีและการลดการปล่อยคาร์บอนตลอดห่วงโซ่อุปทาน

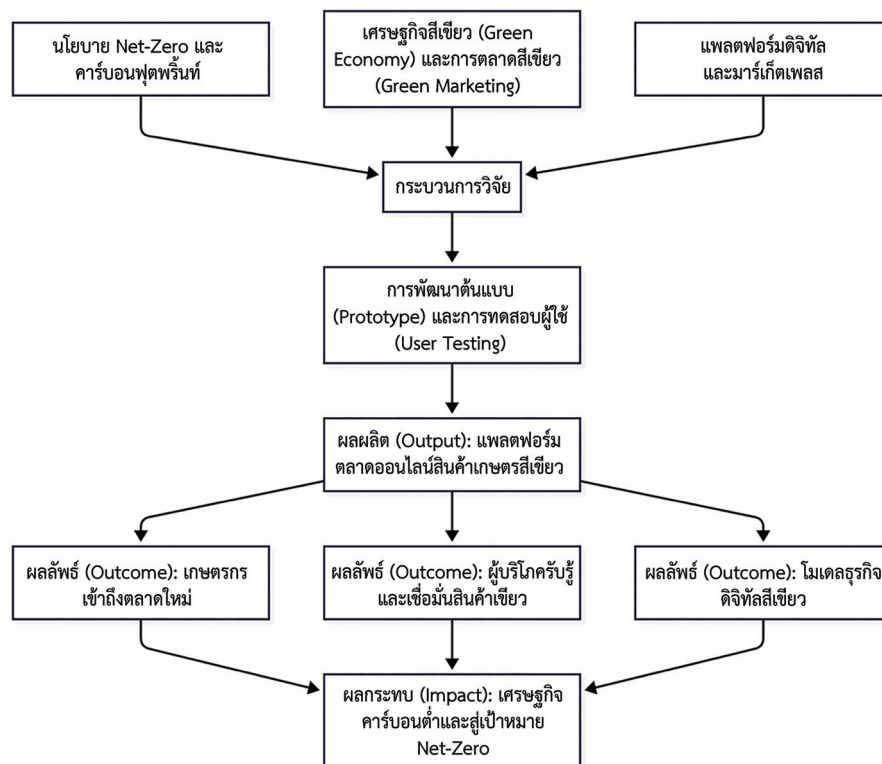
ในบริบทของการวัดผลและการจัดการด้านสิ่งแวดล้อม รอยเท้าคาร์บอน (Carbon Footprint: CFP) ได้รับการยอมรับในระดับสากลว่าเป็นตัวชี้วัดเชิงปริมาณที่จำเป็นในการประเมินปริมาณก๊าซเรือนกระจกทั้งหมดที่ปล่อยออกมาโดยตรงและโดยอ้อมจากผลิตภัณฑ์หรืองานบริการ งานวิจัยในช่วงที่ผ่านมาจึงมุ่งเน้นการตรวจสอบบทบาทของเทคโนโลยีดิจิทัลในการสนับสนุนความยั่งยืน งานวิจัยของ Yao et al. (2025) แสดงให้เห็นอย่างชัดเจนว่าการประยุกต์ใช้การปฏิบัติการเกษตรดิจิทัล (Digital Agriculture Practices) มีส่วนสำคัญในการขับเคลื่อนการลดการปล่อยคาร์บอนในภาคเกษตรกรรมอย่างมีนัยสำคัญ นอกจากนี้ Yang and Wang (2025) ยังได้ตอกย้ำถึงความสำคัญของการพัฒนาเศรษฐกิจดิจิทัลในพื้นที่ชนบท ในการเป็นเครื่องมือที่มีประสิทธิภาพสำหรับการลดการปล่อยคาร์บอนในภาคเกษตร

โดยเฉพาะอย่างยิ่งในประเทศที่มีโครงสร้างพื้นฐานดิจิทัลที่กำลังเติบโต อย่างไรก็ตาม ในทางปฏิบัติการนำข้อมูล CFP ไปใช้ในเชิงการตลาดยังคงเผชิญกับข้อจำกัดหลัก คือ ปัญหาความไม่สมมาตรของข้อมูลด้านสิ่งแวดล้อม (Environmental Information Asymmetry) โดย Chen (2015) ได้เน้นย้ำว่า ความเชื่อมั่นด้านสิ่งแวดล้อม (Environmental Trust) เป็นตัวแปรสำคัญที่มีอิทธิพลต่อความตั้งใจซื้อสินค้าสีเขียวของผู้บริโภค เนื่องจากผู้บริโภคไม่สามารถตรวจสอบการกล่าวอ้างความเป็นสีเขียวได้ด้วยตนเอง ทำให้ผู้ผลิตที่ลงทุนในการลดคาร์บอนไม่ได้รับผลตอบแทนที่คุ้มค่า ซึ่งเป็นการบั่นทอนแรงจูงใจในการปรับตัว

ด้วยเหตุนี้ แพลตฟอร์มดิจิทัล (Digital Platform) และตลาดดิจิทัล (Digital Marketplace) จึงได้เข้ามา มีบทบาทเชิงกลยุทธ์ในการเป็นโครงสร้างพื้นฐานใหม่ที่สามารถแก้ไขปัญหาค่าความไม่สมมาตรของข้อมูลดังกล่าวได้ แพลตฟอร์มเหล่านี้ทำหน้าที่เป็นกลไกสำคัญในการปรับเปลี่ยนห่วงโซ่อุปทาน โดยทำหน้าที่เป็นเครือข่ายความร่วมมือที่ช่วยให้ผู้มีส่วนร่วมนสามารถบูรณาการทรัพยากรเข้าด้วยกันเพื่อสร้างมูลค่าร่วม (Value Co-Creation) โดยเฉพาะอย่างยิ่ง การสร้างแพลตฟอร์มสีเขียว (Green Digital Platform) ที่รวมฟังก์ชัน ตรวจสอบย้อนกลับ (Traceability) ฉลากสิ่งแวดล้อม และข้อมูล CFP เข้าด้วยกัน ซึ่ง Wang et al. (2025) ได้ดำเนินการวิจัยเชิงประจักษ์ถึงสองชั้นและชี้ให้เห็นว่า การแสดงข้อมูลสิ่งแวดล้อมของผลิตภัณฑ์บนแพลตฟอร์ม E-Commerce เป็นกลไกสำคัญในการเปลี่ยนความตั้งใจของผู้บริโภคให้เป็นพฤติกรรมการซื้อสินค้าสีเขียวที่เกิดขึ้นจริง ซึ่งเป็นการลดช่องว่างระหว่างความตั้งใจและพฤติกรรม (Intention-Behavior Gap) อย่างมีประสิทธิภาพ โดยอาศัยหลักการของทฤษฎีคุณค่าที่รับรู้ (Perceived Value Theory) ที่ผู้บริโภคสมัยใหม่จะประเมินคุณค่าด้านสิ่งแวดล้อมควบคู่ไปกับคุณค่าเชิงหน้าที่ของผลิตภัณฑ์

อย่างไรก็ตาม ในบริบทของประเทศไทย การนำแพลตฟอร์มดิจิทัลมาใช้อย่างมีประสิทธิภาพ โดย Amornkitvikai et al. (2022) ได้ทำการวิเคราะห์และระบุปัจจัยและอุปสรรคที่ส่งผลกระทบต่อความยั่งยืนของการค้าออนไลน์ (E-Commerce Sustainability) ในกลุ่มวิสาหกิจขนาดกลางและขนาดย่อม (MSMEs) ของไทย โดยเฉพาะอย่างยิ่ง ปัญหาด้านการขาดแคลนทรัพยากร การขาดทักษะด้านดิจิทัล (Digital Literacy) และความรู้ด้านการตลาดออนไลน์ ที่ยังไม่เพียงพอ อุปสรรคเหล่านี้เป็นตัวชี้ให้เห็นถึงช่องว่างทางวิชาการและปฏิบัติการ (Research and Practical Gap) ที่สำคัญ กล่าวคือ แม้ว่าจะมีงานวิจัยจำนวนมากที่ยืนยันถึงความสำคัญของข้อมูล CFP และแพลตฟอร์มดิจิทัล แต่ยังคงขาดการพัฒนาและการประเมิน แพลตฟอร์มดิจิทัลแบบบูรณาการ ที่ได้รับการออกแบบด้วยแนวคิดที่ยืดหยุ่นอย่าง Low-Code/No-Code (LCNC) และ Design Thinking เพื่อลดอุปสรรคทางเทคนิคและเร่งรัดการสร้างต้นแบบ (Rapid Prototyping) ให้สามารถตอบสนองต่อความต้องการที่แท้จริงของเกษตรกรและผู้บริโภคในประเทศ งานวิจัยนี้ จึงมุ่งเน้นการพัฒนาแพลตฟอร์มตลาดออนไลน์สินค้าเกษตรสีเขียวที่ผนวกข้อมูลด้านสิ่งแวดล้อมและระบบ Traceability เข้ากับแนวทางการพัฒนาแบบ LCNC โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อ (1) พัฒนาและนำเสนอแพลตฟอร์มตลาดออนไลน์สำหรับสินค้าเกษตรสีเขียวที่บูรณาการฟังก์ชันการแสดงผล Carbon Footprint และระบบตรวจสอบย้อนกลับ (2) ประเมินคุณภาพแพลตฟอร์มในด้านการสนับสนุนเศรษฐกิจคาร์บอนต่ำและเป้าหมาย Net-Zero และ (3) ศึกษาความพึงพอใจและปัจจัยที่มีอิทธิพลเชิงสถิติต่อความตั้งใจในการใช้แพลตฟอร์มของผู้มีส่วนได้ส่วนเสีย ซึ่งจะเป็นการสร้างกลไกที่โปร่งใสและนำไปสู่การขับเคลื่อนภาคเกษตรไทยให้บรรลุเป้าหมาย Carbon Neutrality และ Net-Zero ได้อย่างเป็นรูปธรรมต่อไป

รูปที่ 1 กรอบการวิจัยแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยนำเข้า ได้แก่ นโยบาย Net-Zero และการจัดการรอยเท้าคาร์บอน แนวคิดเศรษฐกิจสีเขียวและการตลาดสีเขียว และแพลตฟอร์มดิจิทัลและมาร์เก็ตเพลส ซึ่งถูกนำเข้าสู่กระบวนการวิจัยเพื่อพัฒนาและทดสอบต้นแบบแพลตฟอร์มตลาดออนไลน์สินค้าเกษตรสีเขียว ผลลัพธ์ที่ได้ประกอบด้วย การสร้างแพลตฟอร์มออนไลน์ (Output) ที่นำไปสู่ผลลัพธ์ (Outcome) ในสามมิติ คือ เกษตรกรสามารถเข้าถึงตลาดใหม่ ผู้บริโภคมีการรับรู้และเชื่อมั่นในสินค้าเขียว และเกิดโมเดลธุรกิจดิจิทัลสีเขียวที่ยั่งยืน สุดท้ายส่งผลกระทบต่อ การขับเคลื่อนเศรษฐกิจคาร์บอนต่ำและสนับสนุนเป้าหมาย Net-Zero ของประเทศ



รูปที่ 1 กรอบการวิจัย

วิธีดำเนินการวิจัย

การวิจัยครั้งนี้เป็นการวิจัยเชิงประยุกต์ (Applied Research) ที่ใช้ระเบียบวิธีวิจัยแบบผสมผสาน (Mixed-Methods) เพื่อให้ได้ข้อมูลที่รอบด้านและสมบูรณ์ โดยผสมการวิจัยเชิงคุณภาพ (Qualitative Research) ในขั้นตอนการออกแบบเชิงผู้ใช้ (User-Centered Design) และกรอบการคิดเชิงออกแบบ (Design Thinking) เพื่อพัฒนาและสร้างต้นแบบแพลตฟอร์มตลาดออนไลน์สินค้าเกษตรสีเขียว ที่สามารถบูรณาการการแสดงผลรอยเท้าคาร์บอนและระบบตรวจสอบย้อนกลับได้อย่างมีประสิทธิภาพ จากนั้นจึงใช้การวิจัยเชิงปริมาณ (Quantitative Research) ผ่านการสำรวจ (Survey) และการทดสอบต้นแบบ (Prototype Testing) กับกลุ่มตัวอย่างรวม 400 คน เพื่อประเมินความพึงพอใจและตรวจสอบปัจจัยที่มีอิทธิพลเชิงสถิติ (Multiple Regression) ต่อความตั้งใจในการใช้แพลตฟอร์ม การดำเนินการวิจัยแบ่งออกเป็นสองระยะหลัก ได้แก่ การพัฒนาต้นแบบแพลตฟอร์มและการประเมินผล เพื่อนำผลลัพธ์มาวิเคราะห์และสังเคราะห์เป็นข้อเสนอแนะที่สามารถสนับสนุนเศรษฐกิจคาร์บอนต่ำและเป้าหมาย Net-Zero ของประเทศอย่างเป็นรูปธรรม

1. การออกแบบและระเบียบวิธีวิจัย (Research Design and Methodology)

งานวิจัยนี้ถูกกำหนดให้อยู่ในกรอบของการวิจัยแบบผสมผสาน (Mixed-Methods Research) โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อบูรณาการการพัฒนาทางเทคโนโลยีและการประเมินผลเชิงประจักษ์เข้าด้วยกันอย่างเป็นระบบ การเลือกใช้ระเบียบวิธีนี้มีความเหมาะสมอย่างยิ่งกับการวิจัยเชิงประยุกต์ (Applied Research) ที่มุ่งเน้นการสร้างนวัตกรรมดิจิทัลเพื่อแก้ไขปัญหาความยั่งยืนในห่วงโซ่อุปทานเกษตรกรรม โดยในระยะแรกของการวิจัย (Exploratory/Qualitative Phase) ได้ประยุกต์ใช้กรอบการคิดเชิงออกแบบ (Design Thinking) เป็นแนวทางหลักในการรวบรวมข้อมูลเชิงคุณภาพและทำความเข้าใจความต้องการของผู้ใช้งาน (User-Centered) อย่างลึกซึ้ง ซึ่งครอบคลุมตั้งแต่ขั้นตอนการสร้าง empathy การกำหนดปัญหา (Define) การระดมความคิด (Ideate) การสร้างต้นแบบ (Prototype) และการทดสอบ (Test) เพื่อให้มั่นใจว่าแพลตฟอร์มที่พัฒนาขึ้นด้วยเทคโนโลยี Low-Code/No-Code นั้นสามารถบูรณาการการแสดงผลรอยเท้าคาร์บอนและระบบตรวจสอบย้อนกลับได้อย่างสอดคล้องกับพฤติกรรมและ

ความคาดหวังของเกษตรกรและผู้บริโภคได้อย่างแท้จริง ส่วนในระยะเวลาที่สอง (Quantitative Phase) ได้ใช้ระเบียบวิธีเชิงปริมาณ ผ่านการสำรวจและการทดลองภาคสนามกับกลุ่มตัวอย่างรวม 400 คน โดยมุ่งเน้นการประเมินประสิทธิภาพของแพลตฟอร์มและตรวจสอบความสัมพันธ์เชิงสถิติระหว่างตัวแปรที่สำคัญ เช่น ความชัดเจนของข้อมูล CFP และความน่าเชื่อถือของ Traceability ต่อความพึงพอใจและความเชื่อมั่นของผู้ใช้งาน ด้วยการวิเคราะห์การถดถอยพหุคูณ (Multiple Regression Analysis) การออกแบบวิจัยแบบสองระยะนี้จึงรับประกันได้ว่าผลลัพธ์ที่ได้จะไม่เพียงแต่ให้ความเข้าใจเชิงลึกในกลไกการยอมรับเทคโนโลยีเท่านั้น แต่ยังสร้างเครื่องมือที่มีความน่าเชื่อถือและตอบโจทย์การเปลี่ยนผ่านสู่เศรษฐกิจคาร์บอนต่ำของประเทศได้อย่างยั่งยืน

ประชากรเป้าหมายในการวิจัยครั้งนี้แบ่งออกเป็นสองกลุ่มหลักเพื่อให้ครอบคลุมมิติของห่วงโซ่คุณค่าสินค้าเกษตรสีเขียว คือ กลุ่มเกษตรกรผู้ผลิตสินค้าเกษตรสีเขียวที่มีการรับรองมาตรฐานด้านความยั่งยืน และกลุ่มผู้บริโภคสินค้าเกษตรสีเขียวในเขตพื้นที่จังหวัดปทุมธานี ซึ่งถูกคัดเลือกเนื่องจากเป็นพื้นที่วิจัยที่สะท้อนทั้งภาคการผลิตและการบริโภคสินค้าเกษตรสีเขียวอย่างมีนัยสำคัญ สำหรับการวิจัยเชิงปริมาณ ผู้วิจัยได้กำหนดขนาดกลุ่มตัวอย่างรวมทั้งสิ้น 400 คน โดยแบ่งเป็นกลุ่มเกษตรกรผู้ผลิต เช่น ผู้ผลิตข้าวอินทรีย์ ผักปลอดสาร และผลไม้ที่ได้รับการรับรองมาตรฐาน GAP หรือ Carbon Footprint จำนวน 200 คน และกลุ่มผู้บริโภคสินค้าเกษตรสีเขียว โดยเฉพาะกลุ่มที่อาศัยอยู่ในเขตเมืองและมีความตระหนักด้านสิ่งแวดล้อม จำนวน 200 คน การกำหนดขนาดกลุ่มตัวอย่าง 400 คนนี้ถือว่าเพียงพอสำหรับการวิเคราะห์เชิงสถิติ ตามเกณฑ์ของ Krejcie และ Morgan (1970) และถูกคัดเลือกด้วยวิธีการสุ่มแบบเจาะจง (Purposive Sampling) ควบคู่กับการสุ่มแบบแบ่งชั้น (Stratified Sampling) เพื่อให้ได้ตัวแทนที่สะท้อนความหลากหลายของทั้งพื้นที่และประเภทสินค้าอย่างเหมาะสมและเพิ่มความเที่ยงตรงของข้อมูล นอกจากนี้ในส่วนของการวิจัยเชิงคุณภาพได้มีการเลือกกลุ่มผู้ให้ข้อมูลแบบเจาะจง (Purposive Sampling) จำนวน 15 - 20 คน ประกอบด้วยเกษตรกรผู้ผลิตสินค้าสีเขียว ผู้นำกลุ่มวิสาหกิจชุมชน และผู้เชี่ยวชาญด้านสิ่งแวดล้อมและดิจิทัลแพลตฟอร์ม เพื่อให้ได้ข้อมูลเชิงลึกที่จำเป็นในการอธิบายรายละเอียดและสังเคราะห์แนวทางการพัฒนาแพลตฟอร์มต่อไป

การเก็บรวบรวมข้อมูลในการวิจัยนี้ดำเนินการตามแนวทาง Sequential Mixed-Methods Design เพื่อให้ได้ข้อมูลที่ครอบคลุมทั้งเชิงกว้างและเชิงลึก โดยเริ่มต้นจากขั้นตอนเชิงปริมาณ ด้วยการใช้แบบสอบถามเชิงสำรวจ (Survey Questionnaire) กับกลุ่มตัวอย่างรวม 400 ชุด (เกษตรกร 200 คน และผู้บริโภค 200 คน) ซึ่งดำเนินการผ่านการแจกในพื้นที่และช่องทางออนไลน์ (Google Form) ข้อมูลที่ได้ถูกนำมาวิเคราะห์ด้วยสถิติเชิงพรรณนา (Descriptive Statistics) เพื่ออธิบายลักษณะทั่วไปและพฤติกรรม และใช้สถิติเชิงอนุมาน โดยเฉพาะการวิเคราะห์การถดถอยพหุคูณ (Multiple Regression Analysis) เพื่อตรวจสอบอิทธิพลของปัจจัยด้านสิ่งแวดล้อมและดิจิทัลที่มีต่อความตั้งใจในการใช้แพลตฟอร์มอย่างมีนัยสำคัญ ควบคู่กันไป ขั้นตอนเชิงคุณภาพ ได้ใช้แบบสัมภาษณ์กึ่งโครงสร้าง (Semi-Structured Interview) กับผู้มีส่วนได้ส่วนเสียรวม 20 คน (เกษตรกร ผู้นำกลุ่ม และผู้เชี่ยวชาญ) ข้อมูลจากการสัมภาษณ์ถูกนำมาถอดความและวิเคราะห์เชิงเนื้อหา (Content Analysis) เพื่อสังเคราะห์ประเด็นหลักและใช้ในการอธิบายผลเชิงปริมาณให้มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น ในขั้นตอนสุดท้ายการพัฒนาและทดสอบต้นแบบ (Prototype Testing) ดำเนินการโดยนำต้นแบบ High-fidelity ที่พัฒนาขึ้นไปทดสอบกับผู้ใช้งานจริง 30 คน เพื่อเก็บข้อมูลความพึงพอใจและความสะดวกในการใช้งาน (Usability) ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้ถูกนำมาวิเคราะห์ทั้งเชิงปริมาณ (Post-test Questionnaire) และเชิงคุณภาพ (สัมภาษณ์สั้น ๆ) เพื่อปรับปรุงต้นแบบและจัดทำดัชนีประเมินความพึงพอใจ (Satisfaction Index) ก่อนสรุปผลการวิจัยทั้งหมด

2. ขั้นตอนการพัฒนาแพลตฟอร์มดิจิทัล

การพัฒนาแพลตฟอร์มตลาดออนไลน์สินค้าเกษตรสีเขียวดำเนินการภายใต้กรอบแนวคิด Design Thinking และ User-Centered Design (UCD) ซึ่งเป็นกระบวนการทำซ้ำ (Iterative Process) ที่เริ่มต้นจากขั้นตอน Empathize และ Define โดยการรวบรวมและสรุปความต้องการที่แท้จริงของผู้ใช้งาน (เกษตรกรและผู้บริโภค) และกำหนดโจทย์วิจัยที่เน้นการแก้ปัญหาการขาดช่องทางที่น่าเชื่อถือในการสื่อสารคุณค่าด้านสิ่งแวดล้อม จากนั้นในขั้นตอน Ideate ทีมวิจัยได้ร่วมกันระดมความคิดเพื่อกำหนดฟีเจอร์หลักที่สำคัญ เช่น ระบบแสดงข้อมูล รอยเท้าคาร์บอน (CFP) ระบบตรวจสอบย้อนกลับ (Traceability) และฟังก์ชันตลาดออนไลน์ที่รองรับผู้ใช้งานสามกลุ่มหลัก (เกษตรกร/ผู้ขาย ผู้บริโภค/ผู้ซื้อ

และผู้ดูแลระบบ) การสร้างต้นแบบ (Prototype) ดำเนินการในสองระดับ คือ Low-Fidelity (ผ่านเครื่องมือ เช่น Figma) และ High-Fidelity Prototype ซึ่งถูกพัฒนาโดยใช้ Low-Code Framework เช่น Laravel + Vue.js กลยุทธ์การพัฒนาแบบ Low-Code/No-Code นี้ถือเป็นนวัตกรรมเชิงกระบวนการที่สำคัญในการเร่งรัดการสร้างต้นแบบ (Rapid Prototyping) และเพิ่มความยืดหยุ่นในการพัฒนาต่อยอด ต้นแบบที่พัฒนาขึ้นได้ถูกนำไปผ่านขั้นตอน Test & Iterate โดยการทดสอบกับผู้ใช้จริง 30 คน เพื่อประเมินความสะดวกในการใช้งาน (Usability) และความพึงพอใจ ก่อนที่จะถูกนำไปใช้ในการเก็บข้อมูลเชิงปริมาณเพื่อการประเมินผลขั้นสุดท้าย โดยมีขั้นตอนดังนี้

2.1 แนวคิดการออกแบบ (Design Thinking)

แนวคิดการออกแบบถูกนิยามว่าเป็นระเบียบวินัยที่ใช้ความรู้สึกรู้สึกนึกคิดและวิธีการของนักออกแบบ เพื่อตอบสนองความต้องการของผู้คนด้วยสิ่งที่สามารถทำได้ในทางเทคโนโลยี และมีความเป็นไปได้ในเชิงกลยุทธ์ทางธุรกิจ เพื่อสร้างคุณค่าให้กับลูกค้าและโอกาสทางการตลาด โดยเป็นแนวทางนวัตกรรมที่มีมนุษย์เป็นศูนย์กลาง (Human-Centered) ซึ่งบูรณาการความต้องการของผู้คน ความเป็นไปได้ทางเทคโนโลยี และความอยู่รอดทางธุรกิจเข้าด้วยกันอย่างลงตัว

Brown (2008) อธิบายว่ากระบวนการออกแบบไม่ใช่ขั้นตอนที่เรียงลำดับเป็นเส้นตรง แต่เป็นระบบของพื้นที่ (Spaces) ที่ทับซ้อนกัน ประกอบด้วย

- พื้นที่แห่งแรงบันดาลใจ (Inspiration) คือสถานการณ์หรือปัญหาที่กระตุ้นให้เกิดการแสวงหาทางออก

- พื้นที่แห่งการสร้างสรรค์ไอเดีย (Ideation) คือกระบวนการสร้าง พัฒนา และทดสอบแนวคิด
- พื้นที่แห่งการนำไปปฏิบัติ (Implementation) คือการกำหนดเส้นทางเพื่อนำนวัตกรรมไปสู่ตลาด

กระบวนการนี้ขับเคลื่อนด้วยการทำความเข้าใจความต้องการของผู้คนอย่างถ่องแท้ผ่านการสังเกตโดยตรง และอาศัยวงจรการทำงานที่ทำซ้ำ (Iterative Cycles) ของการสร้างต้นแบบ การทดสอบ และการปรับปรุง โดยการสร้างต้นแบบ (Prototyping) มีเป้าหมายสำคัญเพื่อเรียนรู้จุดแข็งและจุดอ่อนของแนวคิดมากกว่าการทำให้เสร็จสมบูรณ์

ในบริบทของการเปลี่ยนผ่านสู่ดิจิทัล (Digital Transformation) Cherepanov and Popov (2024) เน้นย้ำว่าแนวคิดการออกแบบช่วยให้เกิดแนวทางปฏิบัติใหม่ ๆ ในบริบททางธุรกิจที่เปลี่ยนแปลงไป โดยอาศัยความเห็นอกเห็นใจ (Empathy) และการวิเคราะห์ความต้องการของผู้ใช้ การออกแบบถูกมองว่าเป็นแนวปฏิบัติทางการจัดการที่สำคัญในการสร้างกระบวนการใหม่ที่ได้รับการสนับสนุนทางดิจิทัล นอกจากนี้ข้อมูล (Data) ยังถือเป็นส่วนประกอบที่มีค่าที่สุดประการหนึ่งในกระบวนการออกแบบและนวัตกรรมสมัยใหม่ ซึ่งช่วยในการแก้ปัญหาที่นิยามได้ยาก และต้องใช้ความคิดสร้างสรรค์ ทำให้การออกแบบมีความเชื่อมโยงอย่างใกล้ชิดกับการเปลี่ยนผ่านสู่ดิจิทัล

2.2 กลไกการทำงานและองค์ประกอบของแพลตฟอร์ม (Platform Mechanism)

แพลตฟอร์มที่พัฒนาขึ้นมีวัตถุประสงค์เพื่อเป็นเครื่องมือเชิงกลยุทธ์ในการลดความไม่สมมาตรของข้อมูลด้านสิ่งแวดล้อม (Environmental Information Asymmetry) โดยเปลี่ยนจากการใช้ข้อมูลแบบคงที่ (Static) เป็นการจัดการข้อมูลดิจิทัลที่พลวัต (Dynamic) เพื่อสนับสนุนเป้าหมาย Net-Zero กลไกการทำงานของแพลตฟอร์มประกอบด้วย 3 ส่วนสำคัญ ดังนี้

- 1) สถาปัตยกรรมระบบและกลุ่มผู้ใช้งาน (System Architecture and User Roles) แพลตฟอร์มถูกพัฒนาด้วยเฟรมเวิร์ก Laravel และ Vue.js ภายใต้แนวคิด Low-Code/No-Code (LCNC) เพื่อความยืดหยุ่นในการพัฒนาต่อยอดและลดอุปสรรคทางเทคนิคสำหรับผู้ใช้ในชุมชน โดยแบ่งผู้ใช้งานออกเป็น 3 กลุ่มหลัก ได้แก่

- เกษตรกร (Farmer/Seller) ผู้ป้อนข้อมูลกิจกรรมการผลิตและจัดการหน้าร้าน
- ผู้บริโภค (Consumer/Buyer) ผู้เข้าถึงข้อมูลสิ่งแวดล้อมเพื่อประกอบการตัดสินใจซื้อ
- ผู้ดูแลระบบ (Admin) ผู้ตรวจสอบความถูกต้องของข้อมูลและมาตรฐานการรับรอง

- 2) กลไกการจัดการข้อมูลสิ่งแวดล้อม (Environmental Data Management) เพื่อให้ระบบมีความน่าเชื่อถือ แพลตฟอร์มได้กำหนดกระบวนการจัดการข้อมูล (Data Workflow) ไว้ดังนี้

- การป้อนข้อมูล (Data Inputting) เกษตรกรจะป้อนข้อมูลกิจกรรมการผลิต (Activity Data) ผ่านระบบ Dashboard ได้แก่ วันที่เพาะปลูก ระยะเวลาใส่ปุ๋ย และวันเก็บเกี่ยว รวมถึงระบุข้อมูลแหล่งน้ำ และประเภทของปุ๋ยที่ใช้ (ปุ๋ยหมัก หรือปุ๋ยชีวภาพ) ข้อมูลเหล่านี้จะถูกนำไปคำนวณเป็นค่าคาร์บอนฟุตพริ้นท์ (Carbon Footprint) โดยอัตโนมัติ

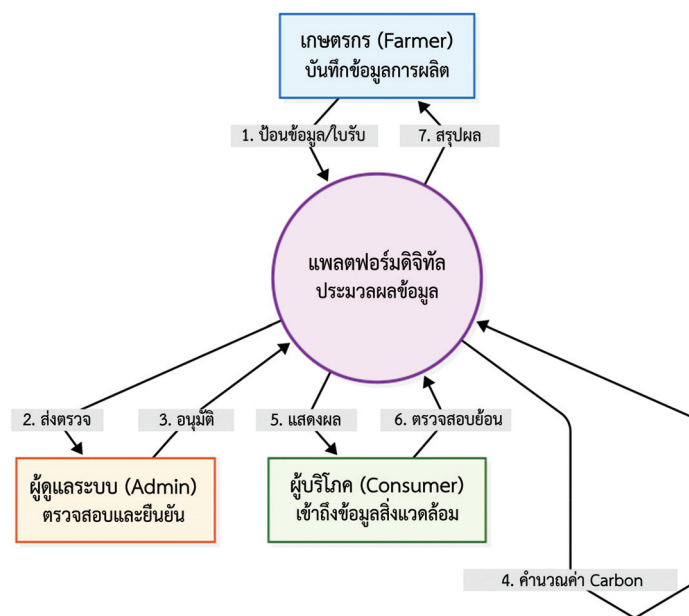
- การอัปเดตข้อมูล (Data Updating) ระบบรองรับการอัปเดตสถานะการผลิตตามเวลาจริง (Real-Time Update) และมีการแจ้งเตือนเมื่อใบรับรองมาตรฐานสิ่งแวดล้อมใกล้หมดอายุ เพื่อให้มั่นใจว่าข้อมูลความเป็นสีเขียวของสินค้าเป็นปัจจุบันอยู่เสมอ

- การตรวจสอบความถูกต้อง (Data Verification) ข้อมูลจะถูกตรวจสอบผ่านระบบการตรวจสอบย้อนกลับ (Traceability) ซึ่งแสดงหลักฐานเชิงประจักษ์ในแต่ละขั้นตอนการผลิต และผู้ดูแลระบบจะทำหน้าที่ยืนยันเอกสารรับรองมาตรฐานสิ่งแวดล้อม (Certification) ก่อนที่สัญลักษณ์การตรวจสอบจะปรากฏบนหน้าจอผู้บริโภค

3) ฟังก์ชันการสื่อสารค่าคาร์บอนและผลลัพธ์ (Front-End Display) ข้อมูลที่ผ่านการตรวจสอบจะถูกแสดงผลในรูปแบบที่เข้าใจง่ายเพื่อสร้างความเชื่อมั่นด้านสิ่งแวดล้อม (Environmental Trust)

- การแสดงผลค่าคาร์บอนฟุตพริ้นท์ (CFP Display) แสดงตัวเลขปริมาณก๊าซเรือนกระจกที่ปล่อยออกมาต่อหน่วยผลิตภัณฑ์อย่างชัดเจนบนหน้าจอรายละเอียดสินค้า

- ดัชนีชี้วัดความสำเร็จ (KPI Dashboard) สำหรับเกษตรกร ระบบจะสรุปผลกระทบเชิงบวก เช่น ปริมาณคาร์บอนที่ลดหรือชดเชยได้ เพื่อเป็นแรงจูงใจในการปรับปรุงกระบวนการผลิตให้เข้าสู่เศรษฐกิจคาร์บอนต่ำ



รูปที่ 2 กลไกการทำงานบูรณาการของแพลตฟอร์ม

จากรูปที่ 2 แสดงให้เห็นถึงกลไกการทำงานบูรณาการของแพลตฟอร์ม ซึ่งถูกออกแบบมาเพื่อลดปัญหาความไม่สมมาตรของข้อมูลด้านสิ่งแวดล้อม (Environmental Information Asymmetry) และสร้างความเชื่อมั่นระหว่างผู้ผลิตและผู้บริโภคผ่านกระบวนการหลัก 7 ขั้นตอน ดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 เกษตรกร (Farmer) บันทึกข้อมูลกิจกรรมการผลิต (Activity Data) เช่น วันที่เพาะปลูก ประเภทปุ๋ย และแหล่งน้ำ พร้อมแนบใบรับรองมาตรฐานสิ่งแวดล้อมเข้าสู่ระบบ

ขั้นตอนที่ 2 - 3 แพลตฟอร์มส่งต่อข้อมูลให้ผู้ดูแลระบบ (Admin) ตรวจสอบความถูกต้องและสถานะของใบรับรองมาตรฐาน (GAP หรือ Organic Thailand) เพื่ออนุมัติสถานะการรับรองก่อนนำเสนอสู่สาธารณะ

ขั้นตอนที่ 4 แพลตฟอร์มดำเนินการคำนวณปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจก (Carbon Footprint) โดยอัตโนมัติจากข้อมูลกิจกรรมที่ได้รับ ซึ่งเป็นขั้นตอนสำคัญในการเปลี่ยนกระบวนการที่เคยอาศัยมนุษย์ (Analog) ให้เป็นกระบวนการดิจิทัลที่มีประสิทธิภาพสูง

ขั้นตอนที่ 5 - 6 ระบบแสดงผลค่า Carbon Footprint (CFP) และข้อมูลการตรวจสอบย้อนกลับ (Traceability) ไปยังผู้บริโภค (Consumer) ช่วยให้ผู้บริโภคสามารถตรวจสอบแหล่งที่มาและประวัติผลิตภัณฑ์ได้โดยตรง เพื่อสร้างความเชื่อมั่นด้านสิ่งแวดล้อม (Environmental Trust)

ขั้นตอนที่ 7 ระบบประมวลผลสรุปตัวชี้วัดความสำเร็จ (KPIs) เช่น ปริมาณคาร์บอนที่ลดหรือชดเชยได้ ส่งกลับไปยังหน้าแดชบอร์ดของเกษตรกร เพื่อเป็นแรงจูงใจเชิงบวก (Positive Incentive) ในการปรับปรุงกระบวนการผลิตตามแนวทางเศรษฐกิจสีเขียว (Green Economy) และเป้าหมาย Net-Zero

2.3 การสร้างต้นแบบ (Prototyping)

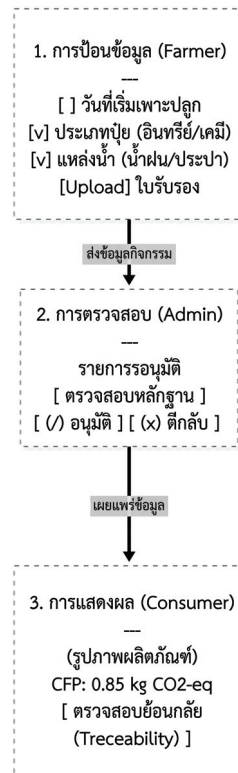
การสร้างต้นแบบในการวิจัยนี้ดำเนินการตามกระบวนการทำซ้ำ (Iterative Process) ภายใต้แนวคิดการออกแบบที่ผู้ใช้เป็นศูนย์กลาง (User-Centered Design) โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อเปลี่ยนกรอบแนวคิดเชิงนามธรรมให้เป็นนวัตกรรมดิจิทัลที่จับต้องได้และทดสอบได้จริง ผู้วิจัยได้พัฒนาโครงร่างต้นแบบความละเอียดต่ำ (Low-Fidelity Wireframe) ดังรูปที่ 3 เพื่อกำหนดลำดับขั้นตอนการทำงาน (Workflow) และสถาปัตยกรรมข้อมูลก่อนการพัฒนาเป็นระบบจริง โดยกลไกการทำงานของต้นแบบประกอบด้วยสาระสำคัญ 3 ส่วน ดังนี้

1) กลไกการป้อนข้อมูลและจัดการสถานะ (Farmer Input & Data Updating) ต้นแบบส่วนที่ 1 ถูกออกแบบให้เป็นหน้าจอจัดการสินค้าสำหรับเกษตรกร ซึ่งรองรับการป้อนข้อมูลกิจกรรมการผลิต (Data Inputting) ที่จำเป็นต่อการคำนวณคาร์บอนฟุตพริ้นท์ ได้แก่ วันที่เพาะปลูก/เก็บเกี่ยว ประเภทปุ๋ย (อินทรีย์/เคมี) และแหล่งน้ำ (น้ำฝน/ชลประทาน) นอกจากนี้ระบบยังเปิดให้มีการอัปเดตใบรับรองมาตรฐาน (GAP หรือ Organic Thailand) เพื่อเป็นหลักฐานประกอบ สำหรับการอัปเดตข้อมูล (Data Updating) ระบบถูกออกแบบให้เกษตรกรสามารถแก้ไขข้อมูลกิจกรรมการผลิตได้ตลอดวงจรการเพาะปลูก เพื่อให้สถานะคาร์บอนฟุตพริ้นท์บนหน้าจอเป็นปัจจุบัน (Real-Time Update) และรองรับการแก้ไขข้อมูลในกรณีที่มีการแจ้งเตือนจากผู้ดูแลระบบ

2) กลไกการตรวจสอบความถูกต้อง (Admin Verification) ต้นแบบส่วนที่ 2 คือหน้าจอสำหรับผู้ดูแลระบบที่ทำหน้าที่เป็นหน่วยกำกับดูแลข้อมูล (Data Governance) กลไกสำคัญคือ การตรวจสอบความถูกต้องของข้อมูล (Data Verification) โดยผู้ดูแลระบบจะทำการตรวจสอบหลักฐานใบรับรองที่เกษตรกรอัปโหลดเข้าสู่ระบบ เทียบกับฐานข้อมูลของหน่วยงานผู้ออกใบรับรอง ระบบมีฟังก์ชันการพิจารณา อนุมัติ เพื่อเผยแพร่ข้อมูลสู่สาธารณะ หรือตีกลับ พร้อมระบุเหตุผลเพื่อให้เกษตรกรดำเนินการอัปเดตข้อมูลให้ถูกต้อง ซึ่งเป็นกลไกสำคัญในการป้องกันการฟอกเขียว (Greenwashing) และสร้างความโปร่งใส

3) กลไกการแสดงผลและตรวจสอบย้อนกลับ (Consumer Display & Traceability) ต้นแบบส่วนที่ 3 คือส่วนการแสดงผลสำหรับผู้บริโภคที่บูรณาการค่าคาร์บอนฟุตพริ้นท์ (0.85 kg CO₂-eq) เข้ากับฉลากผลิตภัณฑ์ โดยมีปุ่มตรวจสอบย้อนกลับ (Traceability Button) เป็นฟังก์ชันหลักที่เชื่อมโยงผู้บริโภคกลับไปยังหน้าจอประวัติการผลิตและหลักฐานการตรวจสอบความถูกต้อง กลไกนี้ทำหน้าที่เป็น การส่งสัญญาณด้านสิ่งแวดล้อม (Environmental Signaling) เพื่อลดปัญหาความไม่สมมาตรของข้อมูลและสร้างความเชื่อมั่นให้กับผู้บริโภค

ในขั้นตอนการพัฒนาจากโครงร่างต้นแบบสู่ระบบที่ใช้งานได้จริง (High-Fidelity Prototype) ผู้วิจัยได้ใช้เฟรมเวิร์กประเภท Low-Code/No-Code (LCNC) ได้แก่ Laravel และ Vue.js ซึ่งช่วยให้เกิดการสร้างต้นแบบที่รวดเร็ว (Rapid Prototyping) และมีความยืดหยุ่นสูงในการปรับปรุงฟังก์ชันตามข้อเสนอแนะจากการทดสอบกับผู้ใช้จริง 30 คน เพื่อให้มั่นใจว่าแพลตฟอร์มสามารถขับเคลื่อนเป้าหมาย Net-Zero ของประเทศได้อย่างมีประสิทธิภาพ



รูปที่ 3 โครงร่างต้นแบบความละเอียดต่ำ (Low-Fidelity Wireframe)

3. ขั้นตอนการประเมินผลและการเก็บรวบรวมข้อมูล

การศึกษานี้ดำเนินการตามระเบียบวิธีวิจัยแบบผสมผสานลำดับก่อน-หลัง (Sequential Mixed-Methods Design) เพื่อให้ได้ข้อมูลที่ครอบคลุมและสามารถอธิบายปรากฏการณ์ได้อย่างลึกซึ้ง โดยแบ่งกระบวนการดำเนินงานออกเป็น 3 ระยะหลัก ดังนี้

ระยะที่ 1 การเก็บข้อมูลเชิงปริมาณ (Quantitative Phase) ผู้วิจัยเริ่มต้นจากการสำรวจความคิดเห็นด้วยแบบสอบถามเชิงสำรวจ (Survey Questionnaire) จากกลุ่มตัวอย่างรวม 400 คน แบ่งเป็นกลุ่มเกษตรกรสินค้าเกษตรสีเขียว 200 คน และกลุ่มผู้บริโภคที่มีความตระหนักด้านสิ่งแวดล้อม 200 คน เครื่องมือที่ใช้เป็นแบบสอบถามมาตรฐานประมาณค่า 5 ระดับ (5-Point Likert Scale) ตั้งแต่ระดับน้อยที่สุด (1) ถึงมากที่สุด (5) โดยมุ่งเน้นการเก็บข้อมูลเพื่อทดสอบสมมติฐานเกี่ยวกับปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อความตั้งใจใช้งานแพลตฟอร์ม ตัวอย่างข้อคำถามสำคัญในแบบสอบถาม ได้แก่

- ด้านความชัดเจนของข้อมูล การแสดงผลคาร์รอยเท้าคาร์บอน (Carbon Footprint) บนหน้าจอผลิตภัณฑ์มีความชัดเจนและช่วยให้ท่านเปรียบเทียบคุณค่าด้านสิ่งแวดล้อมได้ง่ายขึ้น
- ด้านความเชื่อมั่นด้านสิ่งแวดล้อม ระบบตรวจสอบย้อนกลับ (Traceability) ของแพลตฟอร์มช่วยให้ท่านมั่นใจว่าข้อมูลแหล่งที่มาของสินค้ามีความถูกต้องและเชื่อถือได้
- ด้านความตั้งใจในการใช้งาน ท่านมีความตั้งใจที่จะใช้แพลตฟอร์มนี้เป็นช่องทางหลักในการซื้อหรือขายสินค้าเกษตรสีเขียวในอนาคต

ระยะที่ 2 การเก็บข้อมูลเชิงคุณภาพ (Qualitative Phase) ภายหลังจากเสร็จสิ้นการวิเคราะห์ข้อมูลเชิงปริมาณ ผู้วิจัยได้ดำเนินการเก็บข้อมูลเชิงคุณภาพผ่านการสัมภาษณ์เชิงลึก (In-Depth Interview) โดยใช้แบบสัมภาษณ์กึ่งโครงสร้าง (Semi-Structured Interview) กับผู้เชี่ยวชาญด้านสิ่งแวดล้อม ผู้แทนกลุ่มเกษตรกร และผู้มีส่วนได้ส่วนเสียรวม 20 คน วัตถุประสงค์เพื่อนำข้อมูลเชิงลึกมาใช้ในการตีความและขยายความผลการวิเคราะห์ทางสถิติ โดยเฉพาะประเด็นเรื่องอุปสรรคเชิงโครงสร้างและแรงจูงใจในการเข้าสู่เศรษฐกิจคาร์บอนต่ำ ตัวอย่างประเด็นคำถามในการสัมภาษณ์ ได้แก่

- กลุ่มผู้บริโภค ข้อมูลดิจิทัลเรื่องรอยเท้าคาร์บอนบนแพลตฟอร์ม มีส่วนช่วยลดความกังวลใจเรื่องการฟอกเขียว (Greenwashing) และส่งผลต่อการตัดสินใจซื้อของท่านอย่างไร?

- กลุ่มเกษตรกร ปัจจัยใดคือแรงจูงใจสำคัญที่ทำให้ท่านยอมปรับเปลี่ยนกระบวนการผลิตดั้งเดิมไปสู่แนวทางเกษตรคาร์บอนต่ำผ่านการใช้งานแพลตฟอร์มนี้?

ระยะที่ 3 การทดสอบและประเมินต้นแบบ (Prototype Testing Phase) ในระยะสุดท้าย ผู้วิจัยได้นำต้นแบบแพลตฟอร์มระดับสูง (High-Fidelity Prototype) ที่พัฒนาขึ้นไปทดสอบกับกลุ่มผู้ใช้งานจริง 30 คน โดยใช้วิธีการสังเกตพฤติกรรมการใช้งานจริงร่วมกับการใช้แบบสอบถามสั้นและการสัมภาษณ์หลังการทดสอบ เพื่อประเมินประสบการณ์การใช้งาน (User Experience: UX) และคำนวณดัชนีความสะดวกในการใช้งาน (Usability Index) ตัวอย่างประเด็นการประเมิน ได้แก่

- ดัชนีการสนับสนุน Net-Zero ฟังก์ชันระบบรายงานผลสรุปคาร์บอน (Carbon Dashboard) สามารถกระตุ้นให้ท่านเกิดพฤติกรรมการผลิตหรือการบริโภคที่ยั่งยืนได้จริง

- ความสะดวกในการใช้งาน ขั้นตอนการป้อนและอัปเดตข้อมูลกิจกรรมการผลิตสำหรับเกษตรกรมีความซับซ้อนน้อยและสามารถดำเนินการได้ด้วยตนเองอย่างราบรื่น

ผลการวิจัย

หัวข้อนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อนำเสนอผลการวิเคราะห์ข้อมูลที่เก็บรวบรวมได้จากระเบียบวิธีวิจัยแบบผสมผสาน โดยจะรายงานผลลัพธ์ในส่วนหลักตามลำดับ ได้แก่ ผลการวิเคราะห์เชิงปริมาณ ซึ่งรวมถึงการวิเคราะห์ข้อมูลพื้นฐานทัศนคติของผู้มีส่วนได้ส่วนเสีย และผลการทดสอบสมมติฐานหลักด้วยการวิเคราะห์การถดถอยพหุคูณ (Multiple Regression) เพื่อระบุปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อความตั้งใจใช้แพลตฟอร์ม ตามด้วยผลการวิเคราะห์เชิงคุณภาพ ที่ได้จากการสัมภาษณ์เชิงลึก และปิดท้ายด้วยผลการพัฒนาและทดสอบต้นแบบแพลตฟอร์ม เพื่อประเมินคุณภาพในการสนับสนุนเป้าหมาย Net-Zero และความพึงพอใจในการใช้งาน ผลการวิจัยทั้งหมดจะถูกนำเสนออย่างชัดเจน ตรงประเด็น พร้อมการตีความ การวิเคราะห์ และการเปรียบเทียบกับผลงานของผู้วิจัยอื่น เพื่อตอบวัตถุประสงค์ของงานวิจัยอย่างสมบูรณ์ตามข้อกำหนดของวารสาร

1. ผลการพัฒนาและทดสอบต้นแบบแพลตฟอร์ม (Prototype Testing Results)

ส่วนนี้จะนำเสนอผลลัพธ์จากการพัฒนาและนำเสนอแพลตฟอร์มต้นแบบ ซึ่งเป็นผลผลิตที่ได้จากการประยุกต์ใช้กรอบแนวคิด Design Thinking ในการบูรณาการฟังก์ชัน Carbon Footprint และ Traceability จากนั้นจึงนำเสนอผลการประเมินเชิงประจักษ์จากการทดสอบต้นแบบ เพื่อตรวจสอบการประเมินคุณภาพแพลตฟอร์มในการสนับสนุนเศรษฐกิจคาร์บอนต่ำ และผลความพึงพอใจต่อการใช้งานแพลตฟอร์มเพื่อยืนยันความเหมาะสมในการนำไปใช้ในเชิงปฏิบัติการ

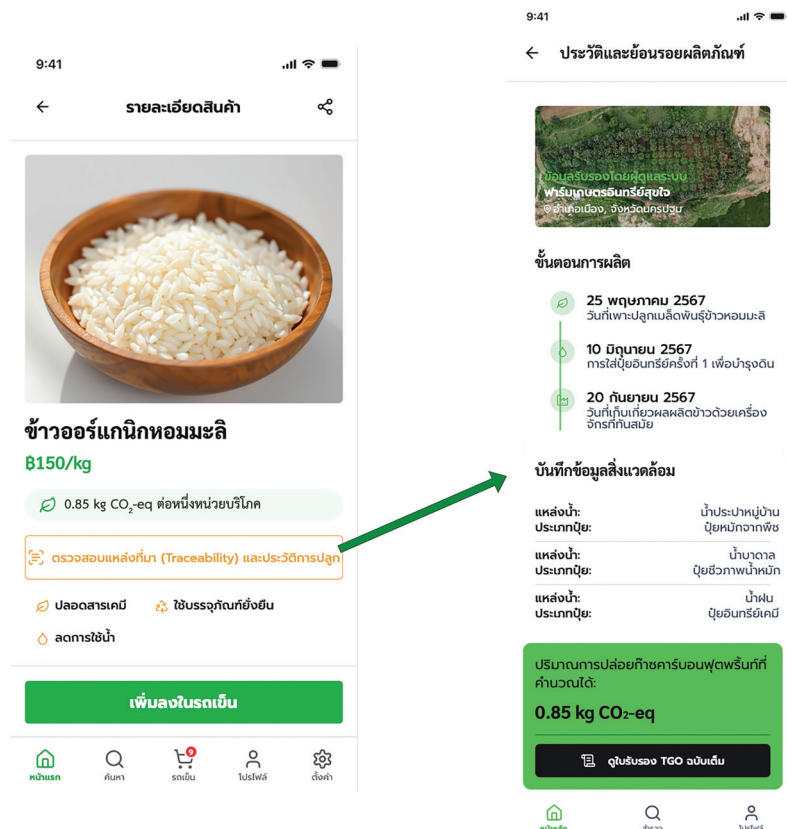
1) การพัฒนาต้นแบบแพลตฟอร์มตลาดออนไลน์สินค้าเกษตรสีเขียวดำเนินการภายใต้กรอบแนวคิด Design Thinking และ User-Centered Design (UCD) โดยมีเป้าหมายเชิงกลยุทธ์เพื่อสร้างช่องทางการค้าที่ยั่งยืนและบูรณาการข้อมูลสิ่งแวดล้อมอย่างเป็นระบบ กระบวนการพัฒนานั้นหลักการซ้ำ (Iterative) เพื่อให้มั่นใจว่าฟังก์ชันที่ซับซ้อน เช่น การแสดงผลรอยเท้าคาร์บอน เป็นไปตามความต้องการที่แท้จริงของผู้ใช้งาน การตัดสินใจใช้ Low-Code/No-Code (NC/LC) Framework เช่น Laravel + Vue.js ในการพัฒนา High-fidelity Prototype ถือเป็นกลยุทธ์สำคัญ ซึ่งเป็นนวัตกรรมเชิงกระบวนการที่ช่วยเร่งรัดการสร้างแอปพลิเคชันต้นแบบได้อย่างรวดเร็ว (Rapid Prototyping) และยังให้ความยืดหยุ่นสูงในการทดสอบและปรับปรุงซ้ำตามหลักการ Design Thinking การใช้ LCNC ยังช่วยลดอุปสรรคทางเทคนิคในการบำรุงรักษาในระยะยาว โดยเฉพาะในบริบทของวิสาหกิจชุมชนที่มีข้อจำกัดด้านทักษะเชิงเทคนิค

แพลตฟอร์มต้นแบบถูกออกแบบให้รองรับผู้ใช้งานหลัก 3 กลุ่ม เกษตรกร/ผู้ขาย ผู้บริโภค/ผู้ซื้อ และผู้ดูแลระบบ และประกอบด้วยฟังก์ชันสำคัญที่ตอบโจทย์การลดรอยเท้าคาร์บอนตามที่ระบุในขอบเขตงานวิจัย ดังนี้

- ระบบแสดงข้อมูลสิ่งแวดล้อม แพลตฟอร์มสามารถแสดงผล รอยเท้าคาร์บอน (Carbon Footprint)

และฉลากสิ่งแวดล้อมของสินค้าบนหน้าจอรายละเอียดผลิตภัณฑ์อย่างชัดเจน ดังรูปที่ 1 การแสดงผลนี้ทำหน้าที่เป็นกลไกการส่งสัญญาณ (Signaling Mechanism) ที่โปร่งใสในการขับเคลื่อนตลาดสีเขียว

- ระบบตรวจสอบย้อนกลับ (Traceability) อนุญาตให้ผู้บริโภคเข้าถึงข้อมูลแหล่งที่มา กระบวนการผลิต และมาตรฐานที่เกี่ยวข้อง ซึ่งเป็นกลไกสำคัญในการสร้างความเชื่อมั่นด้านสิ่งแวดล้อม (Environmental Trust)
- ระบบบริหารจัดการผู้ขาย (Farmer/Seller Dashboard) ช่วยให้เกษตรกรสามารถลงทะเบียนสินค้าบริหารจัดการคำสั่งซื้อ และที่สำคัญคือ การบันทึกและบริหารจัดการข้อมูลสิ่งแวดล้อมและข้อมูลรอยเท้าคาร์บอนได้สะดวก หน้าจอแนะนำเสนอตัวชี้วัดความสำเร็จหลัก (KPIs) ด้านสิ่งแวดล้อม เช่น คาร์บอนลด/ชดเชย ดังรูปที่ 2 เพื่อเป็นแรงจูงใจเชิงบวกให้เกษตรกรปรับปรุงการผลิตตามแนวทาง Green Economy

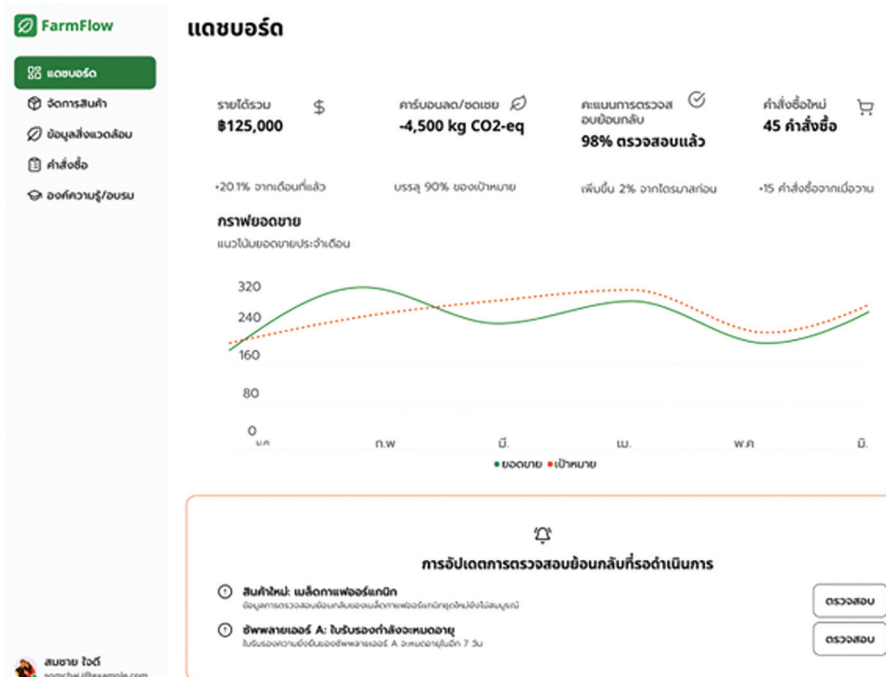


(ก) รายละเอียดสินค้า

(ข) ประวัติและย้อนรอยผลิตภัณฑ์

รูปที่ 4 ระบบแสดงข้อมูลสิ่งแวดล้อมและระบบตรวจสอบย้อนกลับ (Traceability)

รูปที่ 4 แสดงถึง High-fidelity Prototype ของระบบการสื่อสารข้อมูลสิ่งแวดล้อมแก่ผู้บริโภค ซึ่งเป็นผลผลิตที่ได้จากการพัฒนาภายใต้แนวคิด User-Centered Design ทำหน้าที่เป็นจุดตัดสินใจซื้อ โดยมีการแสดงผลค่า Carbon Footprint (0.85 kg CO₂ -eq) อย่างชัดเจนในตำแหน่งที่โดดเด่น ซึ่งสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ที่พบว่าความชัดเจนของข้อมูลรอยเท้าคาร์บอนมีอิทธิพลเชิงบวกสูงสุดต่อความตั้งใจใช้แพลตฟอร์ม นอกจากนี้ ปุ่ม ตรวจสอบแหล่งที่มา (Traceability) ยังเป็นกลไกสำคัญในการสร้างความเชื่อมั่นด้านสิ่งแวดล้อม (Environmental Trust) ซึ่งแสดงรายละเอียดการดำเนินงานที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม เช่น การใช้ปุ๋ยชีวภาพ และสรุปการคำนวณปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจก ทำให้แพลตฟอร์มทำหน้าที่เป็นกลไกการส่งสัญญาณ (Signaling Mechanism) ที่โปร่งใสในการขับเคลื่อนตลาดสินค้าเกษตรสีเขียวสู่เป้าหมาย Net-Zero



รูปที่ 5 ระบบบริหารจัดการผู้ขาย (Farmer/Seller)

รูปที่ 5 แสดงถึง High-Fidelity Prototype ของระบบบริหารจัดการผู้ขาย (Farmer/Seller Dashboard) ซึ่งถูกพัฒนาขึ้นเพื่อสนับสนุนการเปลี่ยนผ่านสู่เศรษฐกิจคาร์บอนต่ำ หน้าจอนี้นำเสนอ ตัวชี้วัดความสำเร็จหลัก (Key Performance Indicators: KPIs) ที่เน้นความสมดุลระหว่างมิติทางธุรกิจและสิ่งแวดล้อม (1) รายได้รวม (2) คาร์บอนลด/ชดเชย (-4,500 kg CO₂-eq) และ (3) คะแนนการตรวจสอบย้อนกลับ (Traceability Score: 98 % ตรวจสอบแล้ว) การแสดงผล KPI ด้านสิ่งแวดล้อมที่โดดเด่นนี้ทำหน้าที่เป็นแรงจูงใจเชิงบวก ให้เกษตรกรปรับปรุงการผลิตตามแนวทาง Green Economy และตอกย้ำคุณค่าของสินค้าเกษตรสีเขียว นอกจากนี้ส่วนแจ้งเตือนการอัปเดตการตรวจสอบย้อนกลับยังแสดงถึงฟังก์ชันการกำกับดูแลตนเองที่สำคัญของแพลตฟอร์ม เพื่อรักษาความโปร่งใสของข้อมูล ซึ่งเป็นหัวใจของการสร้าง Environmental Trust และสนับสนุนให้เกิดโมเดลธุรกิจดิจิทัลสีเขียวที่ยั่งยืน

2) การประเมินคุณภาพแพลตฟอร์มในการสนับสนุนเศรษฐกิจคาร์บอนต่ำ การประเมินคุณภาพแพลตฟอร์มต้นแบบ (Prototype Testing, N = 30) ได้ดำเนินการเพื่อให้มั่นใจว่าแพลตฟอร์มที่พัฒนาขึ้นสามารถตอบสนองต่อความต้องการที่มุ่งเน้นการเปลี่ยนผ่านสู่เศรษฐกิจคาร์บอนต่ำและเป้าหมาย Net-Zero ได้ตามวัตถุประสงค์การวิจัย ผลการประเมินดังตารางที่ 1 ยืนยันว่าแพลตฟอร์มมีศักยภาพในการเป็นเครื่องมือสนับสนุนการลดการปล่อยคาร์บอนในห่วงโซ่มูลค่าของสินค้าเกษตร

ตารางที่ 1 ดัชนีการประเมินคุณภาพแพลตฟอร์มต้นแบบ

มิติการประเมิน (หลังการใช้งาน)	($\bar{X}$)	S.D.	การตีความ (ระดับ)
การสนับสนุนเป้าหมาย Net-Zero (Quality Index)	4.29	0.61	ดี
ความน่าเชื่อถือของข้อมูลสิ่งแวดล้อม (Trustworthiness)	4.35	0.58	ดีมาก

ผลการประเมินสรุปได้ว่าดัชนีการสนับสนุนเป้าหมาย Net-Zero อยู่ที่ $\bar{X} = 4.29$ ซึ่งอยู่ในระดับดี และที่สำคัญ ความน่าเชื่อถือของข้อมูลสิ่งแวดล้อมได้รับการประเมินในระดับดีมาก ($\bar{X} = 4.35$) ซึ่งยืนยันว่าแพลตฟอร์มสามารถสร้างความเชื่อมั่นให้กับผู้ใช้งานในการใช้ข้อมูลสิ่งแวดล้อมได้อย่างมีประสิทธิภาพ

3) ความพึงพอใจต่อการใช้งานแพลตฟอร์ม (Prototype Testing, N = 30) ได้ดำเนินการเพื่อตรวจสอบว่าแพลตฟอร์มที่พัฒนาขึ้นด้วยแนวคิด Design Thinking นั้น มีความสะดวกในการใช้งานและได้รับการยอมรับจากผู้ใช้งาน ดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ดัชนีความพึงพอใจและความสะดวกในการใช้งานแพลตฟอร์ม

มิติการประเมิน (หลังการใช้งาน)	($\bar{X}$)	S.D.	การตีความ (ระดับ)
ความพึงพอใจโดยรวม (Overall Satisfaction)	4.35	0.58	ดีมาก
ความสะดวกในการใช้งาน (Usability Index)	4.2	0.65	ดี

ผลการประเมินยืนยันว่าผู้ใช้งานมีความพึงพอใจโดยรวมต่อแพลตฟอร์มในระดับดีมาก ($\bar{X} = 4.35$) และความสะดวกในการใช้งานอยู่ในระดับดี ($\bar{X} = 4.20$)

2. ข้อมูลพื้นฐานและพฤติกรรมผู้บริโภค/การผลิต

ผลการวิเคราะห์ในส่วนนี้มุ่งเน้นการตรวจสอบคุณลักษณะทั่วไปของกลุ่มตัวอย่าง รวมถึงพฤติกรรมในการเข้าถึงและใช้งานช่องทางดิจิทัลในการซื้อขายสินค้าเกษตรสีเขียว ซึ่งเป็นพื้นฐานสำคัญในการประเมินความพร้อมในการยอมรับแพลตฟอร์มใหม่ โดยเฉพาะอย่างยิ่งการสำรวจความถี่และความคุ้นเคยในการใช้โมบายแอปพลิเคชันเพื่อแสดงให้เห็นถึงศักยภาพของเศรษฐกิจดิจิทัลในการขับเคลื่อนการตลาดสินค้าเกษตรสีเขียว ดังตารางที่ 3 จึงสะท้อนถึงบริบทพื้นฐานของผู้มีส่วนได้ส่วนเสียในพื้นที่วิจัย

ตารางที่ 3 พฤติกรรมการซื้อ/ขายสินค้าเกษตรสีเขียวผ่านช่องทางออนไลน์

N = 200

ข้อมูลพื้นฐาน/พฤติกรรม	กลุ่มเกษตรกร	กลุ่มผู้บริโภค
สัดส่วนผู้ใช้โมบายแอปพลิเคชันในการทำงาน/ซื้อสินค้า	78.50 %	91 %
สัดส่วนผู้ที่เคยขาย/ซื้อสินค้าเกษตรสีเขียวผ่านออนไลน์	65 %	75.50 %
ค่าเฉลี่ยความถี่ในการซื้อ (ต่อเดือน)	-	$\bar{X} = 3.2$ ครั้ง

ผลการวิเคราะห์แสดงให้เห็นว่ากลุ่มผู้บริโภคมีการใช้โมบายแอปพลิเคชันในชีวิตประจำวันและมีประสบการณ์ในการซื้อสินค้าเกษตรสีเขียวผ่านช่องทางออนไลน์ในสัดส่วนที่สูง (91 % และ 75.5 %) สำหรับกลุ่มเกษตรกร แม้สัดส่วนการใช้ดิจิทัลแพลตฟอร์มจะต่ำกว่า แต่ก็มีประสบการณ์ในการใช้ช่องทางออนไลน์แล้วถึงร้อยละ 65 ซึ่งบ่งชี้ว่ากลุ่มตัวอย่างมีความพร้อมพื้นฐานในการยอมรับแพลตฟอร์มใหม่

3. ทศคติและการรับรู้ต่อ Carbon Footprint และ Net-Zero

ส่วนนี้เป็นการนำเสนอผลการวิเคราะห์เพื่อประเมินระดับความตระหนักและทัศนคติของผู้มีส่วนได้ส่วนเสียต่อประเด็นสิ่งแวดล้อมที่เกี่ยวข้องกับเป้าหมาย Net-Zero และ Carbon Footprint ซึ่งเป็นปัจจัยเชิงจิตวิทยาที่สำคัญในการขับเคลื่อนพฤติกรรมผู้บริโภคที่ยั่งยืน ดังตารางที่ 4 จึงสะท้อนให้เห็นถึงระดับความพร้อมเชิงทัศนคติ (Attitudinal Readiness) ในการยอมรับข้อมูลสิ่งแวดล้อมในกระบวนการตัดสินใจซื้อขายสินค้าเกษตร โดยเฉพาะอย่างยิ่งการวัดความเชื่อมั่นต่อฉลากรอยเท้าคาร์บอน ซึ่งเป็นตัวบ่งชี้ความจำเป็นในการสร้างความน่าเชื่อถือผ่านแพลตฟอร์มดิจิทัล

ตารางที่ 4 ระดับทัศนคติและความเชื่อมั่นต่อคุณค่าสิ่งแวดล้อม

มิติการประเมิน	กลุ่มเกษตรกร ($\bar{X}$, S.D.)	กลุ่มผู้บริโภค ($\bar{X}$, S.D.)
ความตระหนักต่อเป้าหมาย Net-Zero ของประเทศ	4.38 (0.61)	4.41 (0.58)
ความเชื่อมั่นต่อฉลาก Carbon Footprint Label	3.82 (0.78)	3.95 (0.80)
คุณค่าที่รับรู้ด้านสิ่งแวดล้อม (Perceived Environmental Value)	4.25 (0.69)	4.30 (0.65)

จากตารางที่ 4 แสดงให้เห็นว่าทั้งเกษตรกรและผู้บริโภคมีความตระหนักต่อเป้าหมาย Net-Zero และรับรู้คุณค่าด้านสิ่งแวดล้อมในระดับสูงมาก ($\bar{X}$ อยู่ในช่วง 4.25 - 4.41) อย่างไรก็ตาม ค่าเฉลี่ยความเชื่อมั่นต่อฉลากรอยเท้าคาร์บอน ยังคงอยู่ในระดับที่ต้องสร้างความโปร่งใสของข้อมูลให้มากขึ้น ($\bar{X}$ ประมาณ 3.9) การตีความ คือ แม้จะมีความตระหนักสูง แต่การขาดความไว้วางใจในข้อมูลการกล่าวอ้างด้านสิ่งแวดล้อมเป็นปัญหาที่ต้องได้รับการแก้ไขด้วยกลไกการสื่อสารที่โปร่งใส

4. ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อความตั้งใจใช้แพลตฟอร์ม

การวิเคราะห์ในส่วนนี้เป็นการใช้สถิติเชิงอนุมาน เพื่อทดสอบสมมติฐานหลักของงานวิจัย โดยเฉพาะอย่างยิ่งการวิเคราะห์การถดถอยพหุคูณ (Multiple Regression Analysis) เพื่อตรวจสอบอิทธิพลของปัจจัยด้านสิ่งแวดล้อมและดิจิทัลที่มีผลต่อความตั้งใจของเกษตรกรและผู้บริโภคในการใช้งานแพลตฟอร์มตลาดออนไลน์สินค้าเกษตรสีเขียว ผลลัพธ์ที่ได้จะยืนยันว่าการบูรณาการข้อมูลรอยเท้าคาร์บอนเข้ากับโครงสร้างแพลตฟอร์มดิจิทัลสามารถเป็นกลไกสำคัญในการส่งเสริมการค้าสีเขียวและสนับสนุนเป้าหมายเศรษฐกิจคาร์บอนต่ำได้หรือไม่

ตารางที่ 5 ผลการวิเคราะห์การถดถอยพหุคูณ

ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อความตั้งใจใช้ (Intention to Use)	ค่าสัมประสิทธิ์ β (Standardized)	ค่า p-value
ความชัดเจนของข้อมูล Carbon Footprint	0.402*	<0.001
ความสะดวกในการใช้งาน (Usability)	0.320**	0.003
ข้อมูลตรวจสอบย้อนกลับ (Traceability)	0.185*	0.021

***p<0.001, **p<0.01, *p<0.05

ผลการวิเคราะห์การถดถอยพหุคูณยืนยันว่า ตัวแปรอิสระที่ใช้ในการวิจัยทั้งหมดมีอิทธิพลเชิงบวกต่อความตั้งใจใช้แพลตฟอร์มตลาดออนไลน์สินค้าเกษตรสีเขียวอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ โดยแบบจำลองมีความสามารถในการทำนายความผันแปรของความตั้งใจใช้แพลตฟอร์มได้สูง (ค่าสัมประสิทธิ์การทำนายรวม $R^2 \approx 0.65$) ซึ่งแสดงว่าปัจจัยที่ศึกษาสามารถอธิบายความตั้งใจได้ถึงประมาณ 65 % ในบรรดาปัจจัยทั้งหมด ความชัดเจนของข้อมูล Carbon Footprint เป็นปัจจัยที่มีอิทธิพลเชิงบวกและสูงสุดต่อความตั้งใจในการใช้แพลตฟอร์ม ($\beta = 0.402$, $p < 0.001$) โดยข้อค้นพบนี้เป็นหลักฐานเชิงประจักษ์ที่สนับสนุน ทฤษฎีการส่งสัญญาณ (Signaling Theory) ในการตลาดสีเขียว โดยชี้ให้เห็นว่าในตลาดที่มีความไม่สมมาตรของข้อมูลด้านสิ่งแวดล้อม ข้อมูล CFP ที่นำเสนออย่างชัดเจนบนแพลตฟอร์มจะทำหน้าที่เป็นกลไกการสื่อสารที่มีความน่าเชื่อถือ เพื่อลดความคลางแคลงใจของผู้บริโภค ปัจจัยสำคัญลำดับถัดมาคือความสะดวกในการใช้งาน (Usability) ($\beta = 0.320$, $p = 0.003$) ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยด้านการยอมรับเทคโนโลยี (TAM) และแสดงถึงความสำเร็จของการออกแบบแพลตฟอร์มที่ใช้งานง่าย และสุดท้ายคือ ข้อมูลตรวจสอบย้อนกลับ (Traceability) ที่มีอิทธิพลเชิงบวกอย่างมีนัยสำคัญ ($\beta = 0.185$, $p = 0.021$) ซึ่งตอกย้ำถึงความต้องการของผู้ใช้งานในการตรวจสอบแหล่งที่มาเพื่อสร้างความเชื่อมั่นด้านสิ่งแวดล้อม (Environmental Trust) ข้อสรุปจากการวิเคราะห์นี้จึงยืนยันว่าการบูรณาการข้อมูลสิ่งแวดล้อมที่ชัดเจนเข้ากับโครงสร้างดิจิทัลที่ใช้งานง่ายเป็นกุญแจสำคัญในการส่งเสริมการค้าสีเขียว

ทฤษฎี Perceived Value Theory ในการตลาดสีเขียว (Green Marketing) ซึ่งชี้ให้เห็นว่าผู้บริโภคสมัยใหม่ไม่ได้ตัดสินใจซื้อจากคุณค่าเชิงฟังก์ชัน (Functionality) หรือราคาเพียงอย่างเดียว แต่ยังให้ความสำคัญกับคุณค่าทางจิตสังคมและสิ่งแวดล้อม (Socio-environmental Value)

การเชื่อมโยงเชิงวิชาการ การที่ผู้ใช้ประเมินความเชื่อมั่นของข้อมูลสิ่งแวดล้อมในระดับสูง ($\bar{X} = 4.35$) แสดงให้เห็นว่าแพลตฟอร์มดิจิทัลทำหน้าที่เป็นกลไกการส่งสัญญาณ (Signaling Mechanism) ที่มีประสิทธิภาพในการลดความไม่สมมาตรของข้อมูล (Information Asymmetry) ระหว่างผู้ผลิตและผู้บริโภค ซึ่งเป็นปัญหาหลักของการค้าสินค้าสีเขียวในอดีต (Duan et al., 2023)

2) บทบาทเชิงกลยุทธ์ของแพลตฟอร์มในการเปลี่ยนผ่านสู่ Net-Zero

แพลตฟอร์มดิจิทัลที่พัฒนาขึ้นนี้มีบทบาทเชิงกลยุทธ์ที่สำคัญและหลากหลายในการขับเคลื่อนภาคเกษตรกรรมของไทยสู่เป้าหมาย Net-Zero โดยเฉพาะอย่างยิ่งในฐานะกลไกการส่งสัญญาณ (Signaling Mechanism) ที่มีความโปร่งใสและน่าเชื่อถือ ผลการวิจัยยืนยันว่า ความชัดเจนของข้อมูล Carbon Footprint ซึ่งมีอิทธิพลสูงสุดต่อความตั้งใจใช้แพลตฟอร์มนั้น เป็นกุญแจสำคัญในการลดความไม่สมมาตรของข้อมูล (Information Asymmetry) ในตลาดสินค้าเกษตรสีเขียว โดยกลไกนี้จะส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงพฤติกรรมตลอดห่วงโซ่อุปทาน สำหรับเกษตรกร ข้อมูล CFP และ KPI ด้านสิ่งแวดล้อมที่แสดงบนแพลตฟอร์มทำหน้าที่เป็นแรงจูงใจเชิงบวก (Positive Incentive) ที่เชื่อมโยงการลดการปล่อยคาร์บอนกับการเข้าถึงตลาดที่พร้อมจ่ายในราคาที่ยุติธรรม ขณะที่สำหรับผู้บริโภคแพลตฟอร์มช่วยให้การตัดสินใจซื้อสอดคล้องกับความตระหนักด้านสิ่งแวดล้อมที่สูงอยู่แล้ว ($\bar{X} \approx 4.40$) นอกจากนี้การที่แพลตฟอร์มถูกพัฒนาด้วยกลยุทธ์ Low-Code/No-Code (LCNC) และได้รับการประเมินความสะดวกในการใช้งานในระดับสูง ถือเป็นความได้เปรียบเชิงกลยุทธ์ที่ทำให้เทคโนโลยีนี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้อย่างรวดเร็วและยืดหยุ่นในกลุ่มผู้ประกอบการขนาดกลางและขนาดย่อม (MSMEs) ซึ่งท้ายที่สุดแล้ว บทบาทเชิงกลยุทธ์ของแพลตฟอร์มนี้คือการเป็นเครื่องมือที่ช่วยให้ต้นทุนในการปฏิบัติตามข้อกำหนดด้านสิ่งแวดล้อมกลายเป็นโอกาสทางการตลาดและเป็นรากฐานสำคัญในการบรรลุเป้าหมายด้านความยั่งยืนของประเทศ

3) คุุณูปการต่อองค์ความรู้และนโยบาย (Academic and Policy Contributions)

งานวิจัยนี้มีคุุณูปการทางวิชาการโดยตรงในการเติมเต็มช่องว่างด้านการประยุกต์ใช้ (Applied Research Gap) ในบริบทของประเทศไทย โดยเป็นหนึ่งในงานวิจัยแรก ๆ ที่ทำการศึกษาแบบผสมผสาน (Mixed-Methods) ครอบคลุมทั้งการออกแบบ (Design Thinking) การทดสอบพฤติกรรมผู้ใช้เชิงปริมาณ (Multiple Regression) และการยืนยันผลลัพธ์ด้วยการทดสอบต้นแบบในด้านการบูรณาการ Carbon Footprint

References

- Amornkitvikai, Y., Tham, S.Y., Harvie, C. and Buachoom, W.W. (2022). Barriers and Factors Affecting the E-Commerce Sustainability of Thai Micro-, Small- and Medium-Sized Enterprises (MSMEs). *Sustainability*, 14(14). <https://doi.org/10.3390/su14148476>
- Brown, T. (2008). *Design Thinking*. <https://hbr.org/2008/06/design-thinking>
- Duan, J., Zhang, M. and Cheng, B. (2023). Study on Consumers' Purchase Intentions for Carbon-Labeled Products. *Sustainability*, 15(2). <https://doi.org/10.3390/su15021116>
- Chen, Y.-S., Lin, C.-Y. and Weng, C.-S. (2015). The Influence of Environmental Friendliness on Green Trust: The Mediation Effects of Green Satisfaction and Green Perceived Quality. *Sustainability*, 7(8), 10135-10152. <https://doi.org/10.3390/su70810135>
- Cherepanov, V. and Popov, E. (2024). Design and Design Thinking Role in a Digital Transformation. *E3S Web of Conferences*, 474. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202447401028>

- Rogelj, J. (2023). Net Zero Targets in Science and Policy. *Environmental Research Letters*, 18(2). <http://doi.org/10.1088/1748-9326/acb4ae>
- Krejcie, R. and Morgan, D. (1970). Determining Sample Sizes for Research Activities. *Educational and Psychological Measurement*, 30(3), 607-610. <https://doi.org/10.1177/001316447003000308>
- United Nations Environment Programme (UNEP). (2011). *Towards a Green Economy: Pathways to Sustainable Development and Poverty Eradication*. United Nations Environment Programme.
- Wang, X., Peng, M., Li, Y., Ren, M., Ma, T., Zhao, W. and Xu, J. (2025). How E-commerce Product Environmental Information Influences Green Consumption: Intention-Behavior Gap Perspective. *Sustainability*, 17(6). <https://doi.org/10.3390/su17062337>
- Yang, Y. and Wang, P. (2025). The Impact of Rural Digital Economy Development on Agricultural Carbon Emissions: A Study Based on Prefecture-Level Cities in China. *Resources, Conservation & Recycling Advances*, 28. <http://doi.org/10.1016/j.rcradv.2025.200290>
- Yao, W., Li, C. and Lin, F. (2025). Digital Agriculture Drives Carbon Emission Reduction in China. *Frontiers in Environmental Science*, 13. <http://doi.org/10.3389/fenvs.2025.1600884>

อิทธิพลของการใช้เศษเหล็กออกไซด์แทนที่ทรายในจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์จาก เถ้าลอยต่อสมบัติทางกายภาพ เชิงกล และพฤติกรรมหลังสัมผัสอุณหภูมิสูง Influence of Mill Scale Waste as Sand Replacement in Fly Ash-Based Geopolymer Mortar on Physical, Mechanical, and Post-Fire Behaviors

อภิณัฐ ศิริวัฒนกาญจน์¹ อำพล วงศ์ษา¹ ไพฑูรย์ นาแซง² วันชัย สะตะ^{1*} และปริญญา จินดาประเสริฐ^{1,3}
Apinun Siriwanakarn¹ Ampol Wongsas¹ Phaithun Nasaeng² Vanchai Sata^{1*} and
Prinya Chindaprasirt^{1,3}

Received: January 13, 2026; Revised: March 23, 2026; Accepted: March 24, 2026

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาการใช้เศษเหล็กออกไซด์ (Mill Scale Waste; MS) แทนที่ทรายแม่น้ำ (River Sand; RS) ในจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์จากเถ้าลอย โดยศึกษาการแทนที่ร้อยละ 0 5 10 15 และ 20 โดยปริมาตร ร่วมกับการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนของสารละลายต่างต่อเถ้าลอยที่ 0.55 0.60 และ 0.65 เพื่อศึกษาความสามารถในการทำงานได้ กำลังรับแรงอัด ค่าความหนาแน่น ร้อยละความพรุนและการดูดซึมน้ำ และพฤติกรรมหลังสัมผัสอุณหภูมิสูงที่ 400 700 และ 1,000 °C ผลการทดสอบพบว่า เมื่อการแทนที่ด้วย MS เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ค่าการไหลแผ่ลดลง กำลังรับแรงอัดที่การแทนที่ในช่วงร้อยละ 5 ถึง 15 พบว่ามีค่ามากกว่าการใช้ RS เพียงอย่างเดียว โดยเพิ่มขึ้นตั้งแต่ร้อยละ 1.1 ถึง 19.8 นอกจากนี้ยังพบว่าความหนาแน่นเพิ่มขึ้นตามปริมาตร MS ที่เพิ่มขึ้น การเพิ่มปริมาตร MS ในส่วนผสมมีค่าการดูดซึมน้ำลดลงเล็กน้อย แม้ความพรุนจะเพิ่มขึ้นก็ตาม จีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์หลังสัมผัสอุณหภูมิสูงมีกำลังรับแรงอัดลดลงทุกช่วงอุณหภูมิ แต่การแทนที่ด้วย MS แสดงแนวโน้มการสูญเสียน้ำหนักที่ลดลงและร้อยละกำลังรับแรงอัดคงเหลือเพิ่มขึ้น โดยเฉพาะที่อุณหภูมิ 1,000 °C การใช้ RS ร้อยละ 20 มีค่ากำลังรับแรงอัดคงเหลือสูงสุดที่ร้อยละ 90 เมื่อเทียบกับก่อนได้รับความร้อน จากผลการวิจัยแสดงให้เห็นว่า MS สามารถใช้เป็นมวลรวมทางเลือกที่มีประสิทธิภาพในการพัฒนากำลังและเพิ่มความสามารถในการทนทานต่ออุณหภูมิสูงได้ นอกจากนี้ยังส่งเสริมการหมุนเวียนวัสดุเหลือทิ้งในอุตสาหกรรมกลับมาใช้ประโยชน์ได้อีกทางหนึ่ง

คำสำคัญ : จีโอโพลิเมอร์; มอร์ตาร์; เศษเหล็กออกไซด์; เถ้าลอย

¹ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

² คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยภาคตะวันออกเฉียงเหนือ

³ ภาควิชาเคมี ราชบัณฑิตยสถาน สานมเลื้อป่า เขตดุสิต กรุงเทพมหานคร

¹ Faculty of Engineering, Khon Kaen University

² Faculty of Engineering, Northeastern University

³ The Academy of Science, The Royal Society of Thailand, Dusit, Bangkok

* Corresponding Author, Tel. 08 1592 8191, E - mail: vancsa@kku.ac.th

Abstract

This research investigated the use of mill scale waste (MS) to replace river sand (RS) in fly ash-based geopolymer mortar. The replacement at 0, 5, 10, 15, and 20 % by volume was studied, along with variations in the alkaline solution-to-fly ash ratio (L/FA) at 0.55, 0.60, and 0.65. The workability, compressive strength, density, porosity, water absorption, and post-fire behavior at 400, 700, and 1,000 °C were analyzed. The results showed that increasing MS decreased the flow value. Compressive strength at 5 - 15 % replacement was significantly higher than that of only RS using, with about 1.1 to 19.8 %. Furthermore, density increased with increasing volume of MS. Increasing MS volume in the mixture resulted in a slight decrease in water absorption despite an increase in porosity. After being exposed to high temperatures, the compressive strength of the geopolymer mortar decreased across all temperature ranges. However, the replacement with MS showed a tendency to reduce weight loss and increased normalized residual compressive strength, specifically, at 1,000 °C, using 20 % RS, the residual compressive strength achieves a maximum at 90 % compared to before heating. The research results demonstrate that MS can be used as an effective alternative aggregate for improving strength and enhancing high-temperature resistance. Furthermore, it promotes the recycling of industrial waste materials.

Keywords: Geopolymer; Mortar; Mill Scale Waste; Fly Ash

บทนำ

จีโอโพลิเมอร์ (Geopolymers) เป็นสารยึดเกาะอนินทรีย์ประเภทอะลูมิโนซิลิเกตที่เกิดจากปฏิกิริยาโพลิเมอร์ไรเซชันระหว่างวัสดุตั้งต้น เช่น ดินขาวเผาหรือเถ้าลอย ร่วมกับสารละลายต่างเข้มข้น วัสดุชนิดนี้ได้รับความสนใจอย่างกว้างขวางในฐานะทางเลือกที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมทดแทนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ เนื่องจากมีคุณสมบัติทางกลและความทนทานที่เทียบเคียงได้ แต่ใช้พลังงานในกระบวนการผลิตต่ำกว่าและลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกได้ (Rashad, 2013)

อุตสาหกรรมการผลิตเหล็กเป็นภาคส่วนที่ใช้ทรัพยากรธรรมชาติสูงและก่อให้เกิดวัสดุเหลือทิ้งในปริมาณมาก โดยเฉลี่ยมีของเสียเกิดขึ้นประมาณ 600 kg ต่อการผลิตเหล็กดิบ 1 ton (Fröhling and Rentz, 2010) หนึ่งในของเสียสำคัญคือ เศษเหล็กออกไซด์ (Mill Scale Waste; MS) ซึ่งเป็นชั้นออกไซด์ของเหล็กที่เกิดขึ้นระหว่างกระบวนการรีดที่อุณหภูมิสูง โดยมีปริมาณการเกิดประมาณ 10 - 20 kg ต่อเหล็ก 1 ton (Bagatini et al., 2020) MS ประกอบด้วยออกไซด์ของเหล็กหลายชนิด ได้แก่ วูสไทต์ (FeO) เฮมาไทต์ (Fe₂O₃) และแมกเนไทต์ (Fe₃O₄) มีลักษณะทางกายภาพเป็นแผ่นและมีพื้นที่ผิวจำเพาะต่ำ แม้ MS จะมีความสามารถในการนำกลับมาใช้ใหม่ได้ แต่ปัจจุบันส่วนใหญ่ยังถูกกำจัดโดยวิธีการฝังกลบ (Furlani and Maschio, 2016) การนำเศษวัสดุจากเหล็กมากลับมาใช้ในการคอนกรีตมีการศึกษาอย่างต่อเนื่อง โดย Chousidis et al. (2016) พบว่าการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเศษออกไซด์ของเหล็กที่ร้อยละ 5 และ 10 โดยน้ำหนัก ช่วยเพิ่มกำลังรับแรงอัดและความทนทานต่อการซึมผ่านของคลอไรด์ในคอนกรีต

การศึกษานี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพและเชิงกลของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ที่ใช้ MS เป็นมวลรวมละเอียดแทนที่ทรายแม่น้ำ โดยศึกษาสมบัติของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ ได้แก่ ความสามารถในการทำงานได้ กำลังรับแรงอัดที่อายุ 7 28 และ 90 วัน ความหนาแน่น ความพรุน และการดูดซึมน้ำ นอกจากนี้ ยังรวมถึงการศึกษาสมบัติของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์หลังการสัมผัสอุณหภูมิสูง เพื่อส่งเสริมการจัดการของเสียอุตสาหกรรมอย่างยั่งยืนผ่านการผลิตวัสดุก่อสร้างที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม

วิธีดำเนินการวิจัย

1. วัสดุที่ใช้ในงานวิจัย

1) สารตั้งต้นและสารละลายต่าง

เถ้าลอย (Fly Ash; FA) ที่ใช้ในงานวิจัยนี้มาจากผลพลอยได้จากการใช้ถ่านหินลิกไนต์เป็นเชื้อเพลิงในโรงงานผลิตไฟฟ้า ณ โรงไฟฟ้าแม่เมาะ จังหวัดลำปาง ผลรวมของ SiO_2 , Al_2O_3 และ Fe_2O_3 ใน FA เท่ากับร้อยละ 60.58 และปริมาณ CaO เท่ากับร้อยละ 27.10 ดังตารางที่ 1 ซึ่งจัดเป็นวัสดุปอซโซลานประเภท C ตามข้อกำหนดของมาตรฐาน ASTM C618-19 (2019)

ตารางที่ 1 องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุที่ใช้ในงานวิจัย

Chemical composition (%wt.)	FA	MS
SiO_2	31.58	0.21
Al_2O_3	15.30	<0.01
CaO	27.10	<0.01
Fe_2O_3	13.07	99.19
MgO	3.22	<0.01
SO_3	3.55	<0.01
Na_2O	2.06	<0.01
K_2O	1.88	<0.01
P_2O_3	0.33	<0.01

สารละลายต่างที่ใช้ในงานวิจัย ได้แก่ สารละลายโซเดียมซิลิเกต (Na_2SiO_3 ; NS) เกรดอุตสาหกรรมที่มีองค์ประกอบโดยน้ำหนักเป็น Na_2O ร้อยละ 12.44 ส่วน SiO_2 ร้อยละ 29.96 และ H_2O ร้อยละ 57.60 และสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH ; NH) ที่เตรียมโดยใช้เกล็ดโซเดียมไฮดรอกไซด์เกรดห้องปฏิบัติการละลายในน้ำปราศจากไอออน (Deionized Water; DI) เพื่อเตรียมสารละลายความเข้มข้น 10 M ก่อนนำไปใช้งาน

2) มวลรวมละเอียด

มวลรวมละเอียดที่ใช้ในงานวิจัย ได้แก่ ทรายแม่น้ำ (River Sand; RS) และเศษเหล็กออกไซด์ (Mill Scale Waste; MS) ดังรูปที่ 1 มวลรวมทั้งสองชนิดจะถูกนำมาล้างให้สะอาดแล้วทำการร่อนผ่านตะแกรงมาตรฐานขนาด 4.75 mm ก่อนนำไปใช้งาน โดย MS ที่ใช้ในงานวิจัยเป็นวัสดุเหลือทิ้งได้จากการกระบวนการผลิตเหล็กรีดร้อน ซึ่งได้รับการรวบรวมจากโรงงานในจังหวัดขอนแก่น องค์ประกอบทางเคมีของ MS ดังตารางที่ 1 พบว่า MS มีองค์ประกอบของ Fe_2O_3 ในปริมาณสูงถึงร้อยละ 99.19 ทั้ง RS และ MS ถูกเตรียมให้อยู่ในสภาวะอิมมัวแห้งก่อนนำไปผสม การทดสอบค่าความถ่วงจำเพาะและการดูดซึมน้ำของมวลรวมตามมาตรฐาน ASTM C128-22 (2022) พบว่าค่าการดูดซึมน้ำของ RS และ MS มีค่าเท่ากับ 1.09 และ 0.04 สำหรับความถ่วงจำเพาะของ MS มีค่าเท่ากับ 5.52 ซึ่งสูงกว่า RS ที่มีค่าเท่ากับ 2.60 อย่างไรก็ตามค่าหน่วยน้ำหนักแบบหลวมที่ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C29/C29M-09 (2009) ของ MS และ RS มีค่าใกล้เคียงกันคือ 1,670 และ 1,636 kg/m^3 เป็นผลมาจากลักษณะทางกายภาพของ MS ที่มีรูปร่างแบนบางเป็นเกล็ดแข็ง มีความอัดแน่นได้ยาก ลักษณะทางกายภาพเช่นนี้จึงทำให้ค่าหน่วยน้ำหนักโดยรวมไม่สูง นอกจากนี้ยังพบว่าการกระจายขนาดของอนุภาคมวลรวมละเอียด (Particle Size Distribution) ทดสอบโดยใช้วิธีการวิเคราะห์ด้วยการร่อนผ่านตะแกรง ตามมาตรฐาน ASTM C136-06 (2006) ดังรูปที่ 2 พบว่า RS มีการกระจายขนาดละเอียดที่ใกล้เคียงกับขีดจำกัดล่างที่กำหนดโดยมาตรฐาน ASTM C33/C33M-11 (2011) ในขณะที่ MS แสดงขนาดละเอียดที่อยู่นอกช่วงเส้นขอบเขตนี้ไปทางขนาดที่เล็กกว่า RS ซึ่งแสดงให้เห็นว่า RS มีการกระจายขนาดที่หยาบกว่า MS โดยค่าโมดูลัสความละเอียดของ RS และ MS มีค่าเท่ากับ 3.2 และ 1.1

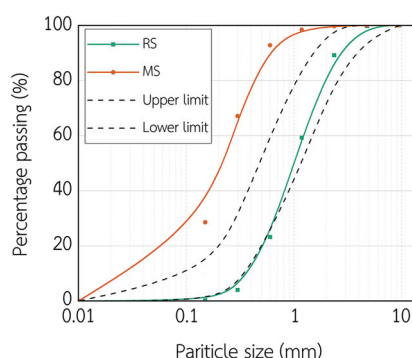


(ก) ทรายแม่น้ำ (RS)



(ข) เศษเหล็กออกไซด์ (MS)

รูปที่ 1 มวลรวมละเอียดที่ใช้ในงานวิจัย



รูปที่ 2 การกระจายขนาดคละของมวลรวมละเอียด

2. สัดส่วนผสมและการเตรียมตัวอย่าง

สัดส่วนผสมของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ในการศึกษานี้ได้ทำการแบ่งออกเป็นสองส่วน ได้แก่ ส่วนแรกศึกษาผลกระทบการแทนที่ RS ด้วย MS โดยทำการแทนที่ในอัตราส่วนร้อยละ 0 5 10 15 และ 20 โดยปริมาตร ส่วนที่สองศึกษาผลกระทบการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนของสารละลายต่างต่อแก้วลอย (Liquid-to-Fly Ash Ratio; L/FA) ที่แตกต่างกัน 3 ค่า คือ 0.55 0.60 และ 0.65 ในขณะที่อัตราส่วนโดยมวลของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อสารละลายโซเดียมซิลิเกตถูกกำหนดให้คงที่ 1.0 และอัตราส่วนโดยมวลของมวลรวมละเอียดทั้งหมดต่อแก้วลอยคงที่ 2.75 สำหรับตัวอย่างสูตรและชื่อเรียก เช่น 0.60-GM10 หมายถึง จีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ที่มีค่า L/FA เท่า 0.60 และแทนที่ RS ด้วย MS โดยปริมาตรร้อยละ 10 รายละเอียดสำหรับสัดส่วนผสมทั้งหมด ดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 สัดส่วนผสมของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ (g)

Mixture	FA	NH	NS	RS	MS
0.55-GM00	1000	275	275	2750	-
0.55-GM05	1000	275	275	2613	292
0.55-GM10	1000	275	275	2475	584
0.55-GM15	1000	275	275	2338	876
0.55-GM20	1000	275	275	2200	1168
0.60-GM00	1000	300	300	2750	-
0.60-GM05	1000	300	300	2613	292
0.60-GM10	1000	300	300	2475	584
0.60-GM15	1000	300	300	2338	876
0.60-GM20	1000	300	300	2200	1168

ตารางที่ 2 สัดส่วนผสมของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ (g) (ต่อ)

Mixture	FA	NH	NS	RS	MS
0.65-GM00	1000	325	325	2750	-
0.65-GM05	1000	325	325	2613	292
0.65-GM10	1000	325	325	2475	584
0.65-GM15	1000	325	325	2338	876
0.65-GM20	1000	325	325	2200	1168

กระบวนการขึ้นรูปจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์เริ่มต้นด้วยการผสมเกล็ดลอยร่วมกับสารละลาย NH เป็นเวลา 5 นาที ตามด้วยการเติมมวลรวมละเอียดทั้งหมดและผสมต่ออีก 5 นาที จากนั้นจึงเติมสารละลาย NS ในขั้นตอนสุดท้าย และผสมต่ออีกเป็นเวลา 5 นาที เพื่อให้ส่วนผสมเข้ากันเป็นอย่างดี จีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์สดที่ได้ถูกนำไปเทลงในแบบหล่อ สำหรับการทดสอบตามวิธีมาตรฐานต่าง ๆ ตัวอย่างที่ขึ้นรูปในแบบหล่อและเขย่าด้วยโต๊ะเขย่าเพื่อให้สามารถขึ้นรูปได้ เหมือนกันทุกส่วนผสม แล้วจะถูกห่อหุ้มด้วยแผ่นพลาสติกเพื่อป้องกันการสูญเสียความชื้นและพักไว้ที่อุณหภูมิ 25 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ก่อนที่จะนำไปบ่มด้วยตู้อบที่อุณหภูมิ 60 °C เป็นเวลา 48 ชั่วโมง ภายหลังการแกะแบบหล่อ ตัวอย่างทั้งหมดจะถูกเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 25 °C และความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 55 - 65 จนกว่าจะถึงอายุการทดสอบ

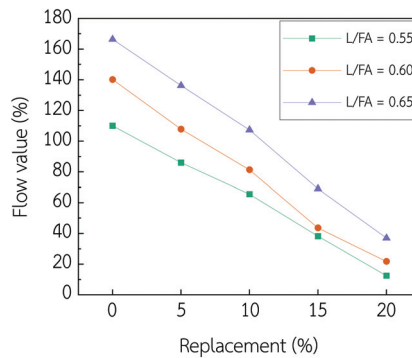
3. วิธีการทดสอบ

ความสามารถในการทำงานได้ของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์สดทดสอบโดยใช้โต๊ะการไหลตามมาตรฐาน ASTM C1437-07 (2007) การทดสอบกำลังรับแรงอัดใช้ตัวอย่างทรงลูกบาศก์ขนาด 5 x 5 x 5 cm³ ตามมาตรฐาน ASTM C109/C109M-13 (2013) ตัวอย่างขนาดเดียวกันนี้ยังถูกใช้เพื่อทดสอบความหนาแน่น ความพรุน และการดูดซึมน้ำ ตามมาตรฐาน ASTM C642-13 (2013) นอกจากนี้เพื่อศึกษาพฤติกรรมหลังการสัมผัสอุณหภูมิสูง ในการทดสอบนี้ ใช้จีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ที่มีอัตราส่วน L/FA เท่ากับ 0.60 เท่านั้น โดยใช้ตัวอย่างทรงลูกบาศก์ขนาด 5 x 5 x 5 cm³ นำไปอบให้ความร้อนในเตาไฟฟ้า โดยเพิ่มอุณหภูมิในอัตรา 3 -5 °C ต่อนาที (Nuaklong et al., 2021) เมื่อถึงอุณหภูมิเป้าหมายที่ 400 700 และ 1,000 °C ตัวอย่างจะถูกคงอุณหภูมิไว้เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ก่อนที่จะปล่อยให้เย็นตัวลงภายในเตาไฟฟ้า จากนั้นจึงทำการทดสอบร้อยละการสูญเสียน้ำหนัก กำลังรับแรงอัดและกำลังรับแรงอัดคงเหลือ

ผลการศึกษา

1. ค่าการไหลแม่ (Flow Value)

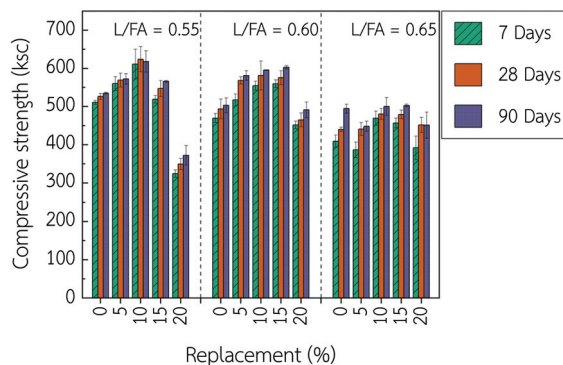
ค่าการไหลแม่ของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์สดที่ทำการทดสอบโต๊ะการไหลดังรูปที่ 3 ผลการทดสอบพบว่า การเพิ่มปริมาตร MS ส่งผลให้ค่าการไหลในทุกสัดส่วนผสมลดลง ตัวอย่างเช่น จีโอโพลิเมอร์ มอร์ตาร์ที่มีอัตราส่วน L/FA เท่ากับ 0.60 เมื่อแทนที่ RS ด้วย MS ที่ร้อยละ 0 5 10 15 และ 20 โดยปริมาตร มีค่าการไหลแม่เท่ากับร้อยละ 140 108 81 44 และ 22 ตามลำดับ พฤติกรรมนี้สอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมาของ Hebbache et al. (2024) ที่พบว่าการแทนที่มวลรวมด้วยอนุภาคที่มีความละเอียดสูงส่งผลเสียต่อความสามารถในการทำงานได้ เนื่องจากอนุภาค MS ที่มีรูปร่างแบน เป็นเกล็ด และมีขนาดเล็กซึ่งมีพื้นที่ผิวสูงกว่า RS ทำให้ต้องการปริมาณของเหลวมากขึ้นเพื่อหล่อลื่น และเคลือบผิวอนุภาคให้เกิดการไหลตัว (Estephane et al., 2019) นอกจากนั้นเมื่อเพิ่มปริมาณของเหลวส่งผลโดยตรงต่อการเพิ่มขึ้นของค่าการไหลแม่ โดยในสัดส่วนการแทนที่ด้วย MS ร้อยละ 10 เมื่อเพิ่มอัตราส่วน L/FA จาก 0.55 เป็น 0.60 และ 0.65 พบค่าการไหลเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 66 เป็น 81 และ 107 ซึ่งเป็นผลมาจากปริมาณของเหลวที่เพิ่มช่วยลดความหนืดของระบบและเพิ่มระยะห่างระหว่างอนุภาคทำให้มวลรวมสามารถเคลื่อนตัวได้สะดวกยิ่งขึ้น (Nath and Sarker, 2014)



รูปที่ 3 ค่าการไหลแผ่ของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์

2. กำลังรับแรงอัด (Compressive Strength)

รูปที่ 4 แสดงกำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ที่อายุทดสอบ 7 28 และ 90 วัน พบว่าการแทนที่ RS ด้วย MS ในปริมาณที่เหมาะสมส่งผลให้กำลังรับแรงอัดเพิ่มขึ้น ตัวอย่างเช่น ที่อัตราส่วน L/FA เท่ากับ 0.60 ที่อายุทดสอบ 28 วัน การแทนที่ MS ที่ร้อยละ 0 5 10 15 และ 20 ให้ค่ากำลังรับแรงอัดเท่ากับ 494 569 582 575 และ 465 ksc ตามลำดับ ซึ่งแนวโน้มดังกล่าวปรากฏคล้ายคลึงกันสำหรับอัตราส่วน L/FA ที่ 0.55 และ 0.65 การเพิ่มขึ้นของกำลังรับแรงอัดจากการแทนที่ MS ในช่วงร้อยละ 5 ถึง 15 เกิดจากความสามารถในการเพิ่มความหนาแน่นและสัดส่วนผสมที่มีความเป็นเนื้อเดียวกันมากขึ้น ซึ่งช่วยลดโอกาสการเกิดการแยกตัวของมวลรวม พฤติกรรมนี้สอดคล้องกับงานวิจัยก่อนหน้าของ Ozturk et al. (2020) ที่ระบุว่าการใช้ MS ในปริมาณร้อยละ 5 ถึง 15 ในซีเมนต์มอร์ตาร์ส่งผลให้กำลังรับแรงอัดสูงกว่าหรือเทียบเท่ากับส่วนผสมควบคุม นอกจากนี้ Kumar et al. (2016) ยังพบว่าปริมาณธาตุเหล็กสูงในเถ้าลอยสามารถเข้าร่วมในกระบวนการจีโอโพลิเมอไรเซชันได้โดยตรง โดยก่อให้เกิดระบบสารยึดเกาะบนพื้นฐานของเฟอร์โรไซเลตจีโอโพลิเมอร์ ซึ่งในกระบวนการนี้ไอออนของเหล็กจะถูกรวมเข้าสู่โครงข่ายอะลูมิโนซิลิเกตผ่านกลไกการแทนที่อะลูมิเนียมบางส่วนซึ่งส่งผลด้านเพิ่มกำลังของจีโอโพลิเมอร์ อย่างไรก็ตามเมื่อปริมาณ Fe_2O_3 ที่มากเกินไปอาจเกิดการรบกวนปฏิกิริยาจีโอโพลิเมอไรเซชันทำให้กำลังอัดลดลงได้ (Choi and Lee, 2012) เช่น เมื่อเพิ่มปริมาณการแทนที่ถึงร้อยละ 20 กำลังรับแรงอัดมีค่าลดลง ซึ่งนอกจากปริมาณที่มากเกินไปของ MS แล้วอาจเป็นผลมาจากค่าการไหลแผ่ที่ต่ำส่งผลให้เกิดการอัดตัวที่ไม่สมบูรณ์เกิดความไม่ต่อเนื่องของสารยึดเกาะด้วย นอกจากนี้ปัจจัยด้านการแทนที่มวลรวมแล้วอัตราส่วน L/FA ยังส่งผลกระทบโดยตรงต่อความแข็งแรง เมื่อพิจารณาส่วนผสมที่มีการแทนที่ด้วย MS ร้อยละ 10 ที่อายุทดสอบ 90 วัน พบว่าที่ L/FA เท่ากับ 0.55 0.60 และ 0.65 มีกำลังรับแรงอัดเท่ากับ 618 596 และ 500 ksc ตามลำดับ กำลังรับแรงอัดที่ลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณของเหลวนี้สามารถอธิบายได้ด้วยลักษณะของโครงสร้างทางจุลภาคของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ โดยระบบที่มีปริมาณของเหลวสูงจะทิ้งช่องว่างขนาดเล็กไว้ภายในเมทริกซ์หลังจากของเหลวที่ไม่ได้ทำปฏิกิริยาระเหยออกไป เครือข่ายช่องว่างที่เพิ่มขึ้นนี้ส่งผลโดยตรงต่อการลดความสมบูรณ์และความแข็งแรงเชิงกลของสารยึดเกาะจีโอโพลิเมอร์ (Zhang and Wang, 2015) เมื่อพิจารณาการพัฒนา กำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ที่อายุการบ่ม 7 28 และ 90 วัน ในทุกสัดส่วนผสมของ L/FA ทั้งสามระดับ ได้แก่ 0.55 0.60 และ 0.65 พบว่ากำลังรับแรงอัดแนวโน้มพัฒนาเพิ่มขึ้นตามอายุการบ่มที่เพิ่มขึ้นในเกือบทุกสัดส่วนผสม อย่างเช่น L/FA = 0.60 ที่อายุการบ่ม 7 วัน การแทนที่ MS ที่ร้อยละ 0 5 10 15 และ 20 ให้ค่ากำลังรับแรงอัดเท่ากับ 470 517 555 560 และ 452 ksc ตามลำดับ ส่วนที่อายุการบ่ม 90 วัน ให้ค่ากำลังรับแรงอัดเท่ากับ 503 581 595 603 และ 491 ksc จะเห็นได้ว่าการพัฒนากำลังรับแรงอัดเพิ่มขึ้นในช่วงร้อยละ 7.1 ถึง 12.3 พฤติกรรมดังกล่าวสอดคล้องกับกลไกการเกิดปฏิกิริยาจีโอโพลิเมอไรเซชันซึ่งทำให้โครงข่าย N-A-S-H gel มีความสมบูรณ์และหนาแน่นยิ่งขึ้นตามเวลา (Duxson et al., 2007)



รูปที่ 4 กำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์

3. ความหนาแน่น ความพรุนและการดูดซึมน้ำ (Density, Porosity, and Water Absorption)

ตารางที่ 3 ผลการทดสอบความหนาแน่น ความพรุน และการดูดซึมน้ำเมื่อพิจารณาอัตราส่วน L/FA เท่ากับ 0.60 พบว่ามีค่าความหนาแน่นเท่ากับ 2,110 2,124 2,179 2,283 และ 2,287 kg/m^3 เมื่อทำการแทนที่ร้อยละ 0 5 10 15 และ 20 ตามลำดับ แนวโน้มนี้เป็นเช่นเดียวกับอัตราส่วน L/FA เท่ากับ 0.55 และ 0.65 ซึ่งมีค่าความหนาแน่นอยู่ในช่วง 2,134 ถึง 2,429 kg/m^3 และ 2,045 ถึง 2,260 kg/m^3 ตามลำดับ การเพิ่มขึ้นของค่าความหนาแน่นเป็นผลมาจากการแทนที่ร้อยละโดยปริมาตรเนื่องจาก MS มีค่าความถ่วงจำเพาะที่มากกว่า RS การแทนที่ในปริมาตรที่เท่ากันจึงทำให้ความหนาแน่นของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์เพิ่มขึ้นตามปริมาตร MS ที่เพิ่มขึ้น

ส่วนการเพิ่มอัตราส่วน L/FA ทำให้ความหนาแน่นของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ลดลงเล็กน้อยซึ่งเป็นผลจากค่าความพรุนที่มากขึ้น สำหรับผลของความพรุนกลับพบว่ามีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อยแม้ว่าจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์จะมีค่าความหนาแน่นสูงขึ้นก็ตาม ซึ่งอาจเป็นเพราะอนุภาคของ MS มีลักษณะแบนบางและรูปร่าง ไม่สม่ำเสมอเมื่อเทียบกับ RS ส่งผลให้ความสามารถในการทำงานได้ลดลงการอัดตัวขึ้นรูปทำได้ยากอาจนำไปสู่การเพิ่มขึ้นของความพรุน เช่น อัตราส่วน L/FA เท่ากับ 0.55 เมื่อทำการแทนที่ RS ด้วย MS จากร้อยละ 0 เป็นร้อยละ 20 มีความพรุนเท่ากับ ร้อยละ 16.35 และ 18.62 ซึ่งเพิ่มขึ้นเพียงร้อยละ 2.27 โดยเป็นแนวโน้มเดียวกันกับทั้งอัตราส่วน L/FA เท่ากับ 0.60 และ 0.65 ที่ปริมาณโพรงเพิ่มขึ้นร้อยละ 1.57 และ 2.12 อย่างไรก็ตามเมื่อมีปริมาตรการแทนที่ที่เท่ากัน เช่น การแทนที่ร้อยละ 20 การเพิ่มอัตราส่วน L/FA จาก 0.55 เป็น 0.60 และ 0.65 มีปริมาณโพรงเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 18.62 เป็น 20.97 และ 22.54 ตามลำดับ เป็นผลจากของเหลวที่หลงเหลือจากการทำปฏิกิริยาเมื่อระเหยออกไป จึงทิ้งช่องว่างหรือความพรุน ยิ่งปริมาณของเหลวมากขึ้นความพรุนที่หลงเหลือนี้จึงเพิ่มตามไปด้วยดังที่กล่าวมาในหัวข้อก่อนหน้า ในทางกลับกันผลของการดูดซึมน้ำไม่ได้เพิ่มตามความพรุนที่สูงขึ้น เนื่องจากค่าการดูดซึมน้ำของ MS มีค่าต่ำมาก ดังนั้นจึงส่งผลโดยรวมต่อค่าการดูดซึมน้ำของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์มากกว่าความพรุนที่เพิ่มขึ้น นอกจากนั้นอนุภาคที่ละเอียดของ MS อาจไปช่วยลดการเชื่อมของรูพรุน (Interconnected Porosity) ทำให้เกิดเป็นรูพรุนอิสระ (Isolated Pores) ที่ไม่ได้เชื่อมต่อกันในเมทริกซ์จีโอโพลิเมอร์ทำให้การส่งผ่านน้ำไปยังรูพรุนขนาดเล็กเกิดขึ้นได้ยากจึงทำให้การดูดซึมน้ำลดลง โดยการเพิ่มปริมาตร MS ที่ร้อยละ 0 ถึง 20 ส่งผลให้ค่าการดูดซึมน้ำลดลงเพียงเล็กน้อยเท่านั้นซึ่งอยู่ในช่วงร้อยละ 0.77 0.80 และ 0.97 เท่านั้น เมื่อมีอัตราส่วน L/FA เท่ากับ 0.55 0.60 และ 0.65 ตามลำดับ นอกจากนี้เมื่อเพิ่มอัตราส่วน L/FA พบการดูดซึมน้ำเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยเมื่อพิจารณาที่ปริมาตรการแทนที่เท่ากัน การเพิ่มขึ้นเล็กน้อยนี้เป็นผลมาจากความพรุนที่เพิ่มขึ้น

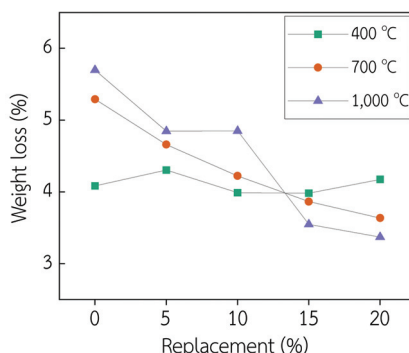
ตารางที่ 3 ความหนาแน่น ความพรุนและการดูดซึมน้ำ

Mixture	Density (kg/m ³)	Porosity (%)	Water Absorption (%)
0.55-GM00	2134	16.35	5.92
0.55-GM05	2224	16.50	5.63
0.55-GM10	2274	16.79	5.42
0.55-GM15	2322	17.38	5.30
0.55-GM20	2429	18.62	5.15
0.60-GM00	2110	19.40	6.91
0.60-GM05	2124	19.94	6.74
0.60-GM10	2179	20.22	6.53
0.60-GM15	2283	20.27	6.28
0.60-GM20	2287	20.97	6.11
0.65-GM00	2045	20.42	7.07
0.65-GM05	2111	20.96	6.83
0.65-GM10	2167	21.66	6.67
0.65-GM15	2206	22.15	6.38
0.65-GM20	2260	22.54	6.10

4. พฤติกรรมหลังการสัมผัสอุณหภูมิสูง (Post-Fire Behaviors)

1) ร้อยละการสูญเสียน้ำหนัก (Weight Loss)

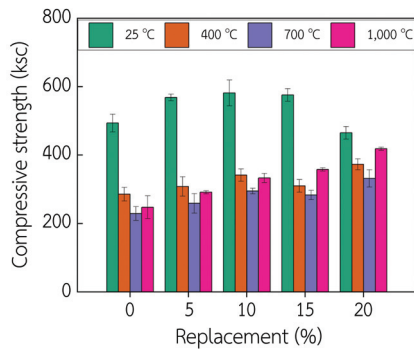
รูปที่ 5 ร้อยละการสูญเสียน้ำหนักของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์เมื่อสัมผัสอุณหภูมิสูงที่ 400 700 และ 1,000 °C ของอัตราส่วน L/FA เท่ากับ 0.60 ที่อัตราส่วนการแทนที่ด้วย MS ร้อยละ 0 ถึง 20 พบว่าการสูญเสีย น้ำหนักเพิ่มขึ้นตามระดับความร้อนที่สูงขึ้น สาเหตุหลักเกิดจากการระเหยของความชื้นภายในเมทริกซ์จีโอโพลิเมอร์ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Chindaprasirt et al. (2022) ที่ยืนยันว่าการสูญเสียน้ำหนักในวัสดุจีโอโพลิเมอร์จาก แก้วลอยจะเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิที่ได้รับ เมื่อจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์สัมผัสอุณหภูมิสูงที่ 400 °C พบว่าร้อยละการสูญเสีย น้ำหนักในทุกส่วนผสมมีค่าอยู่ในช่วงที่ใกล้เคียงกัน โดยส่วนผสมที่แทนที่ RS ด้วย MS ร้อยละ 0 มีร้อยละการสูญเสีย น้ำหนักเท่ากับร้อยละ 4.08 เมื่อแทนที่ RS ด้วย MS ร้อยละ 5 พบว่ามีค่าร้อยละการสูญเสีย น้ำหนักเพิ่มขึ้นอยู่ที่ร้อยละ 4.31 ก่อนที่จะลดลงต่ำสุดเมื่อแทนที่ RS ด้วย MS ร้อยละ 10 และ 15 ซึ่งมีค่าร้อยละการสูญเสีย น้ำหนักเท่ากับร้อยละ 3.98 และ 3.98 และกลับเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่อแทนที่ RS ด้วย MS ร้อยละ 20 ที่มีค่าร้อยละการสูญเสีย น้ำหนักเท่ากับร้อยละ 4.18 บ่งชี้ว่าที่อุณหภูมิ 400 °C กลไกการสูญเสีย น้ำหนักยังคงถูกกำหนดโดยการระเหยของน้ำที่อยู่ในโครงข่าย N-A-S-H gel เป็นหลัก อย่างไรก็ตามการเพิ่มปริมาณ MS จะเริ่มส่งผลให้แนวโน้มการสูญเสีย น้ำหนักรวมของ จีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ลดลงอย่างชัดเจน เมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นถึง 700 °C โดยส่วนผสมที่แทนที่ RS ด้วย MS ร้อยละ 0 มีค่าร้อยละการสูญเสีย น้ำหนักร้อยละ 5.29 จากนั้นร้อยละการสูญเสีย น้ำหนักจากมีค่าลดลงเมื่อมีการแทนที่ด้วย MS ร้อยละ 5 10 15 และ 20 โดยมีค่าร้อยละการสูญเสีย น้ำหนักเท่ากับร้อยละ 4.66 4.22 3.86 และ 3.63 ตามลำดับ ซึ่งเป็นแนวโน้มเดียวกันเมื่อเพิ่มอุณหภูมิสูงขึ้นถึง 1,000 °C พบว่าร้อยละการสูญเสีย น้ำหนักลดลงเท่ากับร้อยละ 5.70 4.85 4.85 3.55 และ 3.37 ตามการแทนที่ด้วย MS ร้อยละ 0 5 10 15 และ 20 ตามลำดับ พฤติกรรมนี้อาจเป็นเพราะ อิทธิพลจากการเพิ่มน้ำหนักของ MS ภายใต้สภาวะความร้อนสูง ซึ่ง Bautista-Marín et al. (2021) ได้รายงานไว้ว่า MS ที่ได้รับความร้อนในช่วง 250 ถึง 936 °C จะมีอัตราการเพิ่มน้ำหนักสูงขึ้น เนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน ของแมกนีไทต์ (Fe₃O₄) เป็นเฮมาไทต์ (Fe₂O₃) การเปลี่ยนสถานะทางเคมีนี้ช่วยชดเชยการสูญเสีย น้ำหนักจากการ ระเหยของน้ำในส่วนผสม ส่งผลให้จีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ที่มีการแทนที่ MS ร้อยละ 20 ที่อุณหภูมิสัมผัส 1,000 °C มีค่าการสูญเสีย น้ำหนักต่ำที่สุด



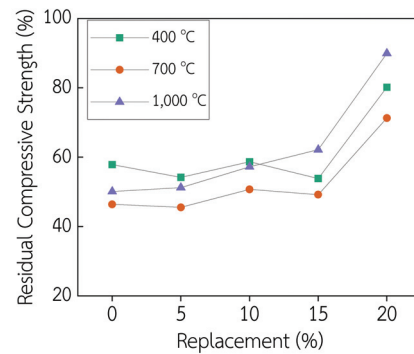
รูปที่ 5 ร้อยละการสูญเสียน้ำหนักของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์หลังการสัมผัสอุณหภูมิสูง

2) กำลังรับแรงอัดและกำลังรับแรงอัดคงเหลือหลังการสัมผัสอุณหภูมิสูง (Compressive Strength and Residual Strength)

รูปที่ 6(ก) กำลังรับแรงอัด และรูปที่ 6(ข) กำลังรับแรงอัดคงเหลือของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์หลังการสัมผัสอุณหภูมิสูง ผลการทดสอบพบว่าเมื่อจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์สัมผัสอุณหภูมิสูงที่ 400 700 และ 1,000 °C ส่งผลให้กำลังรับแรงอัดลดลงในทุกสัดส่วนผสมเมื่อเทียบกับอุณหภูมิห้องที่ 25 °C ดังรูปที่ 6(ก) พฤติกรรมนี้มีสาเหตุหลักมาจากความไม่เข้ากันของการขยายตัวทางความร้อน ระหว่างเมทริกซ์จีโอโพลิเมอร์และมวลรวมธรรมชาติ ซึ่งก่อให้เกิดความเค้นภายในและรอยแตกร้าว (Wongsa et al., 2018) เมื่อพิจารณาแนวโน้มของกำลังรับแรงอัดคงเหลือที่อุณหภูมิสูง 400 และ 700 °C พบว่ามีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกันกล่าวคือในช่วงการแทนที่ RS ด้วย MS ร้อยละ 0 ถึง 15 มีค่ากำลังรับแรงอัดคงเหลือในช่วงร้อยละ 54 ถึง 59 และ 46 ถึง 51 สำหรับอุณหภูมิสูง 400 และ 700 °C ดังรูปที่ 6(ข) จะเห็นได้ว่าผลของกำลังรับแรงอัดคงเหลือยังไม่แสดงแนวโน้มที่ชัดเจน แต่กำลังรับแรงอัดคงเหลือจะมีค่ามากขึ้นเมื่อแทนที่ RS ด้วย MS ร้อยละ 20 ซึ่งมีค่ากำลังรับแรงอัดคงเหลือร้อยละ 80 และ 71 สำหรับอุณหภูมิสูง 400 และ 700 °C ซึ่งบ่งชี้ว่าการแทนที่ RS ด้วย MS ร้อยละ 20 ส่งผลเชิงบวกต่อสองช่วงอุณหภูมิดังกล่าว โดยผลของการเปลี่ยนแปลงร้อยละการแทนที่ RS ด้วย MS จะเด่นชัดขึ้นเมื่อเพิ่มอุณหภูมิสูงขึ้นถึง 1,000 °C ซึ่งพบว่ากำลังรับแรงอัดคงเหลือมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณการแทนที่ด้วย MS โดยการแทนที่ RS ด้วย MS ร้อยละ 0 5 10 15 และ 20 แสดงค่ากำลังรับแรงอัดคงเหลือเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 50 เป็นร้อยละ 51 57 62 และ 90 ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับกำลังรับแรงอัดก่อนได้รับความร้อนดังรูปที่ 6(ข) การเพิ่มขึ้นของกำลังรับแรงอัดที่อุณหภูมิสูงนี้อธิบายได้จากสองปัจจัยหลัก ประการแรกคือปรากฏการณ์การหลอมละลายบางส่วนของ MS ที่อุณหภูมิ 1,000 °C ซึ่งช่วยประสานและเติมเต็มโครงสร้างภายในและประการที่สองคือ ลักษณะรูพรุนขนาดเล็กภายใน MS ที่ทำหน้าที่เป็นช่องระบายแรงดันไอน้ำ ช่วยลดความเสียหายจากแรงดันภายในได้ (Sedaghatdoost and Behfarnia, 2018) การวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ดังรูปที่ 7 ช่วยยืนยันพฤติกรรมดังกล่าว โดยในตัวอย่างที่ไม่ผสม MS (0.60-GM00) ดังรูปที่ 7(ก) พบการสูญเสียความสมบูรณ์ของโครงสร้างเมทริกซ์และรอยแตกร้าวขนาดใหญ่อย่างชัดเจน ในทางตรงกันข้ามตัวอย่างที่แทนที่ด้วย MS ร้อยละ 20 (0.60-GM20) ดังรูปที่ 7(ข) แสดงเมทริกซ์จีโอโพลิเมอร์ที่หนาแน่นขึ้นอย่างเห็นได้ชัด เนื่องจากการหลอมละลายของ MS ร่วมกับผลิตภัณฑ์ของจีโอโพลิเมอร์ (N-A-S-H gel) ก่อให้เกิดโครงสร้างที่มีความแข็งแรงสูงขึ้นและสามารถทนทานต่ออุณหภูมิสูงได้ดีกว่าการใช้ RS เพียงอย่างเดียว

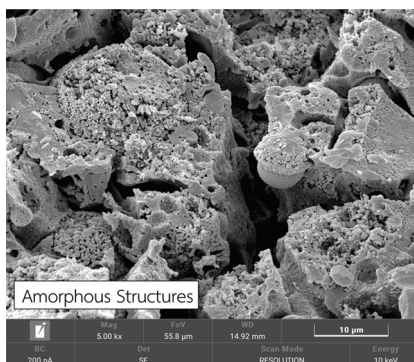


(ก) กำลังรับแรงอัด

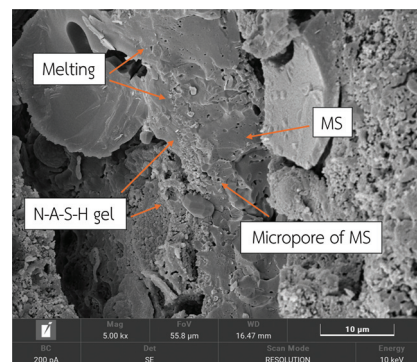


(ข) กำลังรับแรงอัดคงเหลือ

รูปที่ 6 กำลังรับแรงอัดและกำลังรับแรงอัดคงเหลือของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์หลังการสัมผัสอุณหภูมิสูง



(ก) ส่วนผสม 0.60-GM00



(ข) ส่วนผสม 0.60-GM20

รูปที่ 7 ภาพถ่าย SEM ของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์หลังการสัมผัสอุณหภูมิสูงที่อุณหภูมิ 1,000 °C

สรุปผลการศึกษา

1. การใช้เศษเหล็กออกไซด์แทนที่ทรายแม่น้ำส่งผลให้ค่าการไหลแผ่ลดลง โดยการแทนที่ร้อยละ 20 มีค่าการไหลต่ำสุดที่ร้อยละ 12.5 ที่อัตราส่วนของสารละลายต่างต่อเกล็ดลอยเท่ากับ 0.55
2. การแทนที่ทรายแม่น้ำด้วยเศษเหล็กออกไซด์ทำให้ความพรุนของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์เพิ่มขึ้นแต่การดูดซึมน้ำลดลงเล็กน้อยเป็นผลมาจากค่าการดูดซึมน้ำของเศษเหล็กออกไซด์ต่ำกว่าทรายแม่น้ำมาก อย่างไรก็ตามความหนาแน่นปรากฏว่ามีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณเศษเหล็กออกไซด์ โดยมีค่าความหนาแน่นมีค่าอยู่ในช่วง 2,045 ถึง 2,429 kg/m³
3. การแทนที่ทรายแม่น้ำด้วยเศษเหล็กออกไซด์ในปริมาตรร้อยละ 5 ถึง 15 ให้ค่ากำลังรับแรงอัดสูงกว่าตัวอย่างที่ไม่ใช้เศษเหล็กออกไซด์ การแทนที่ร้อยละ 10 สำหรับอัตราส่วนของสารละลายต่างต่อเกล็ดลอย 0.55 พบค่ากำลังรับแรงอัดสูงถึง 630 ksc ที่การบ่มอายุ 28 วัน
4. การใช้เศษเหล็กออกไซด์ช่วยชะลอการสูญเสียน้ำหนักของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์เมื่อได้รับความร้อนสูงส่งผลให้ตัวอย่างที่มีเศษเหล็กออกไซด์ในปริมาตรที่เพิ่มขึ้นมีร้อยละการสูญเสียน้ำหนักลดลง แม้ว่ากำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์เมื่อสัมผัสอุณหภูมิสูงโดยรวมลดลงเมื่อเทียบกับอุณหภูมิห้อง แต่จีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ที่ผสมเศษเหล็กออกไซด์แสดงความสามารถในการคงสภาพความแข็งแรงภายใต้อุณหภูมิสูงได้ โดยเฉพาะที่อุณหภูมิ 1,000 °C ซึ่งมีค่ากำลังรับแรงอัดเพิ่มขึ้นตามปริมาณเศษเหล็กออกไซด์ โดยมีค่ากำลังรับแรงอัดคงเหลือตั้งแต่ร้อยละ 51 ถึง 90

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนจาก ศูนย์วิจัยและพัฒนาโครงสร้างมูลฐานอย่างยั่งยืน สาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

References

- American Society for Testing and Materials. (2006). *ASTM C136-06 Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates*. ASTM International.
- American Society for Testing and Materials. (2007). *ASTM C1437-07 Standard Test Method for Flow of Hydraulic Cement Mortar*. In *ASTM International*. ASTM International.
- American Society for Testing and Materials. (2009). *ASTM C29/C29M-09 Standard Test Method for Bulk Density (" Unit Weight ") and Voids in Aggregate*. ASTM International.
- American Society for Testing and Materials. (2011). *ASTM C33/C33M-11 Standard Specification for Concrete Aggregates*. ASTM International.
- American Society for Testing and Materials. (2013). *ASTM C109/C109M-13 Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in. or [50-mm] Cube Specimens)*. ASTM International.
- American Society for Testing and Materials. (2013). *ASTM C642-13 Standard Test Method for Density, Absorption, and Voids in Hardened Concrete*. ASTM International.
- American Society for Testing and Materials. (2019). *ASTM C618-19 Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete*. ASTM International.
- American Society for Testing and Materials. (2022). *ASTM C128-22 Standard Test Method for Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Fine Aggregate*. ASTM International.
- Bagatini, M.C., Fernandes, T., Silva, R., Galvão, D.F. and Flores, I.V. (2020). Mill Scale and Flue Dust Briquettes as Alternative Burden to Low Height Blast Furnaces. *Journal of Cleaner Production*, 276. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124332>
- Bautista-Marín, J.D., Esguerra-Arce, A. and Esguerra-Arce, J. (2021). Use of an Industrial Solid Waste as a Pigment in Clay Bricks and its Effects on the Mechanical Properties. *Construction and Building Materials*, 306. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.124848>
- Chindaprasirt, P., Lao-un, J., Zaetang, Y., Wongkvanklom, A., Phoo-ngernkham, T., Wongsas, A. and Sata, V. (2022). Thermal Insulating and Fire Resistance Performances of Geopolymer Mortar Containing Auto Glass Waste as Fine Aggregate. *Journal of Building Engineering*, 60. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2022.105178>
- Choi, S.C. and Lee, W.K. (2012). Effect of Fe₂O₃ on the Physical Property of Geopolymer Paste. *Advanced Materials Research*, 586, 126-129. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.586.126>
- Chousidis, N., Rakanta, E., Ioannou, I. and Batis, G. (2016). Influence of Iron Mill Scale Additive on the Physico-Mechanical Properties and Chloride Penetration Resistance of Concrete. *Advances in Cement Research*, 28(6), 389-402. <https://doi.org/10.1680/jadcr.15.00129>

- Duxson, P., Fernández-Jiménez, A., Provis, J.L., Lukey, G.C., Palomo, A. and Van Deventer, J.S.J. (2007). Geopolymer Technology: The Current State of the Art. *Journal of Materials Science*, 42, 2917-2933. <https://doi.org/10.1007/s10853-006-0637-z>
- Estephane, P., Garboczi, E.J., Bullard, J.W. and Wallevik, O.H. (2019). Three-Dimensional Shape Characterization of Fine Sands and the Influence of Particle Shape on the Packing and Workability of Mortars. *Cement and Concrete Composites*, 97, 125-142. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2018.12.018>
- Fröhling, M. and Rentz, O. (2010). A Case Study on Raw Material Blending for the Recycling of Ferrous Wastes in a Blast Furnace. *Journal of Cleaner Production*, 18(2), 161-173. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2009.08.002>
- Furlani, E. and Maschio, S. (2016). Steel Scale Waste as Component in Mortars Production: An Experimental Study. *Case Studies in Construction Materials*, 4, 93-101. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2016.02.001>
- Hebbache, K., Boutlikht, M., Douadi, A., Belebchouche, C., Benrebouh, I., Hammouche, R., Moretti, L., Chajec, A. and Czarnecki, S. (2024). Integrated Techno-Environmental Analysis of Finely Ground Silica Sand in Sustainable Mortar Production. *Buildings*, 14(10). <https://doi.org/10.3390/buildings14103295>
- Kumar, S., Yankwa Djobo, J.N., Kumar, A. and Kumar, S. (2016). Geopolymerization Behavior of Fine Iron-Rich Fraction of Brown Fly Ash. *Journal of Building Engineering*, 8, 172-178. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2016.08.005>
- Nath, P. and Sarker, P.K. (2014). Effect of GGBFS on Setting, Workability and Early Strength Properties of Fly Ash Geopolymer Concrete Cured in Ambient Condition. *Construction and Building Materials*, 66, 163-171. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.05.080>
- Nuaklong, P., Boonchoo, N., Jongvivatsakul, P., Charinpanitkul, T. and Sukontasukkul, P. (2021). Hybrid Effect of Carbon Nanotubes and Polypropylene Fibers on Mechanical Properties and Fire Resistance of Cement Mortar. *Construction and Building Materials*, 275. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.122189>
- Ozturk, M., Depci, T., Karaaslan, M., Sevim, U.K., Akgol, O. and Ozdemir Hacıoglu, S. (2020). Synergetic Effect of Waste Tire Rubber and Mil Scale on Electromagnetic Wave Attenuation Properties of New Generation Mortar. *Journal of Building Engineering*, 30. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2020.101249>
- Rashad, A.M. (2013). Metakaolin as Cementitious Material: History, Scours, Production and Composition - A Comprehensive Overview. *Construction and Building Materials*, 41, 303-318. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.12.001>
- Sedaghatdoost, A. and Behfarnia, K. (2018). Mechanical Properties of Portland Cement Mortar Containing Multi-Walled Carbon Nanotubes at Elevated Temperatures. *Construction and Building Materials*, 176, 482-489. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.05.095>
- Wongsa, A., Sata, V., Nuaklong, P. and Chindaprasit, P. (2018). Use of Crushed Clay Brick and Pumice Aggregates in Lightweight Geopolymer Concrete. *Construction and Building Materials*, 188, 1025-1034. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.08.176>
- Zhang, Z. and Wang, H. (2015). 9 - Analysing the Relation Between Pore Structure and Permeability of Alkali-Activated Concrete Binders. *Handbook of Alkali-Activated Cements, Mortars and Concretes*, 235-264. <https://doi.org/10.1533/9781782422884.2.235>

ระบบมอนิเตอร์พลังงานและควบคุมอุณหภูมิในบ่อเลี้ยงจิ้งหรีดแบบบูรณาการ สำหรับฟาร์มระดับชุมชนผ่าน Home Assistant An Integrated Energy and Environmental Monitoring System for Community-Scale Cricket Farming via Home Assistant

พานูวิชญ์ พุทธรักษา¹ สราวุธ พลวงษ์ศรี^{1*} ธัญลักษณ์ สันเดช¹ ชวโรจน์ ใจสิน¹ และสุลักษณา มงคล¹
Panuwit Puttaraksa¹ Sarawut Polvongsri^{1*} Thanyaluck Sundach¹ Chawaroj Jaisin¹ and
Sulucksana Mongkong¹

Received: July 22, 2025; Revised: October 2, 2025; Accepted: October 3, 2025

บทคัดย่อ

การเพาะเลี้ยงจิ้งหรีดในระบบฟาร์มกึ่งปิดจำเป็นต้องควบคุมอุณหภูมิให้อยู่ในช่วงเหมาะสม ซึ่งมักใช้พลังงานไฟฟ้าสูง ส่งผลให้ต้นทุนการผลิตเพิ่มขึ้น อีกทั้งระบบมอนิเตอร์ที่ใช้เซนเซอร์ราคาต่ำยังไม่เคยมีการสอบเทียบกับเครื่องมือมาตรฐาน และยังไม่มีการบูรณาการพลังงานหมุนเวียนร่วมกับระบบควบคุมอัจฉริยะในฟาร์มแมลงเศรษฐกิจ งานวิจัยนี้ได้นำเสนอระบบมอนิเตอร์และควบคุมอุณหภูมิสำหรับฟาร์มจิ้งหรีด โดยใช้พลังงานจากระบบผลิตไฟฟ้าและความร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ (Solar PVT) ขนาด 4.40 kW_p ร่วมกับปั๊มความร้อนขนาด 10.80 kW_{th} เพื่อรักษาอุณหภูมิระหว่าง 28 - 30 °C ในบ่อเลี้ยงจำนวน 20 บ่อ ระบบควบคุมพัฒนาบนแพลตฟอร์ม Home Assistant โดยใช้โมดูล Tuya IoT ซึ่งควบคุมอุณหภูมิได้อย่างมีประสิทธิภาพตามเงื่อนไขที่กำหนดไว้ และช่วยให้มั่นใจได้ถึงการดำเนินงานที่เสถียรตลอดกระบวนการเลี้ยง ผลการทดสอบพบว่าเซนเซอร์ Tuya IoT มีความแม่นยำสูง ($R^2 > 0.99$, RMSE 0.496 °C, 0.0295 kW และ MAPE <2%) แสดงถึงความน่าเชื่อถือของระบบ ทั้งยังช่วยลดการใช้พลังงานจากโครงข่ายได้ 41.50 % การวิเคราะห์เพิ่มเติมชี้ว่าระบบสามารถผลิตไฟฟ้าได้ 7,570.63 kWh/ปี ลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจก 3,784.56 kgCO₂e/ปี และมีระยะเวลาคืนทุน 5.50 ปี สะท้อนถึงความเหมาะสมด้านเทคนิค เศรษฐศาสตร์ และสิ่งแวดล้อมในการประยุกต์ใช้กับฟาร์มชุมชน

คำสำคัญ : ฟาร์มเลี้ยงจิ้งหรีด; Tuya IoT; Home Assistant; ระบบผลิตไฟฟ้าและความร้อนพลังงานแสงอาทิตย์; ปั๊มความร้อน

¹ วิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยแม่โจ้

¹ School of Renewable Energy, Maejo University

* Corresponding Author, Tel. 09 0330 2479, E - mail: sarawut_p@mju.ac.th

Abstract

Cricket farming in semi-closed systems requires maintaining an optimal temperature range, which typically demands high electricity consumption and increases production costs. Moreover, low-cost monitoring sensors used in agriculture have rarely been calibrated against standard instruments, and the integration of renewable energy with intelligent control systems for insect farming remains limited. This study presents a temperature monitoring and control system for cricket farms powered by a 4.4 kW_p solar photovoltaic-thermal hybrid system (Solar PVT) and 10.8 kW_{th} heat pump, designed to maintain the temperature of 20 rearing bins within 28 - 30 °C. The control system was developed on the Home Assistant platform with a Tuya IoT module, which effectively regulates the temperature according to predefined conditions, ensuring stable operation throughout the rearing process. Experimental results demonstrated that the Tuya IoT sensors achieved high accuracy ($R^2 > 0.99$, RMSE 0.496 °C, 0.0295 kW, and MAPE <2%), confirming the system's reliability. Furthermore, the system reduced grid electricity consumption by 41.5 %. Additional analysis indicated an annual electricity generation of 7,570.63 kWh, a reduction in greenhouse gas emissions of 3,784.56 kgCO₂eq/year, and a payback period of 5.5 years. These findings highlight the system's technical, economic, and environmental feasibility for adoption in community-scale cricket farms.

Keywords: Cricket Farming; Tuya IoT; Home Assistant; Solar Photovoltaic-Thermal (Solar PVT) Hybrid System; Heat Pump

บทนำ

ภาคการเกษตรในปัจจุบันได้พัฒนาไปสู่รูปแบบที่พึ่งพาเทคโนโลยีมากขึ้น ไม่ว่าจะเป็นด้านการจัดการแหล่งน้ำ การควบคุมสภาพแวดล้อม หรือการเพิ่มประสิทธิภาพการผลิต หนึ่งในแนวทางที่ได้รับความสนใจคือการเพาะเลี้ยงแมลงเศรษฐกิจ เช่น จิ้งหรีด ซึ่งเป็นแหล่งโปรตีนทางเลือกที่ใช้ทรัพยากรอย่างมีประสิทธิภาพ อย่างไรก็ตาม การเลี้ยงจิ้งหรีดในโรงเรือนแบบกึ่งปิด โดยเฉพาะช่วงฤดูหนาวหรือในพื้นที่ที่มีความแปรปรวนของอากาศ จำเป็นต้องมีระบบควบคุมอุณหภูมิที่เหมาะสมซึ่งมักใช้พลังงานไฟฟ้าสูง ส่งผลให้ต้นทุนการผลิตเพิ่มขึ้น การตรวจวัดและวิเคราะห์การใช้พลังงานในระดับฟาร์มยังคงประสบปัญหา เช่น ขาดเครื่องมือวัดที่มีความแม่นยำและสามารถเข้าถึงได้แบบต้นทุนต่ำ หรือขาดระบบติดตามผลที่ใช้งานได้ต่อเนื่อง จึงทำให้ขาดข้อมูลเชิงประจักษ์ที่นำมาใช้ปรับปรุงการจัดการพลังงานได้อย่างเป็นระบบ ระบบมอนิเตอร์จึงเป็นทางเลือกสำคัญ โดยมีการประยุกต์ใช้หลากหลายระดับ เช่น (Thaipreecha and Puntusavase, 2023) ใช้ Google Data Studio และ Power BI เพื่อบริหารจัดการข้อมูลในโรงงาน (Maity et al., 2024; Anal and Kaur, 2024) พัฒนาเครื่องมือมอนิเตอร์สภาพการทำงานของเครื่องจักรเพื่อลดการหยุดชะงัก (Suwannahong, 2018; Bar-Gill et al., 2024) พัฒนาแดชบอร์ดสำหรับวิสาหกิจขนาดกลางและขนาดย่อม (Small and Medium Enterprises: SME) เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพธุรกิจ ในระดับครัวเรือนก็มีการนำมาใช้เพื่อลดค่าใช้จ่ายด้านพลังงาน เช่น (Mansattha et al., 2023; Naidu et al., 2024; G et al., 2024) ในภาคเกษตรกรรมเองมีการนำระบบมอนิเตอร์มาใช้ เช่น การตรวจวัดอุณหภูมิ ความชื้นในดิน การเคลื่อนไหวของสัตว์ (Naidu et al., 2024) การใช้เทคโนโลยีการสำรวจระยะไกลเพื่อประเมินผลผลิต (Verma et al., 2024; Omia et al., 2023; Hassan et al., 2021) และในประเทศไทยเองก็มีการพัฒนา เช่น ระบบติดตามโคเนื้อ (Suwannapong and Chaibong, 2015) และการตรวจวัดพลังงานในกระบวนการผลิตผัก (Salee et al., 2020) ซึ่งแสดงให้เห็นถึงความสำคัญของระบบมอนิเตอร์ต่อการบริหารจัดการต้นทุน พลังงาน และสิ่งแวดล้อมในภาคการเกษตร เทคโนโลยี Home Assistant ซึ่งเป็นแพลตฟอร์มโอเพนซอร์สสำหรับควบคุมอุปกรณ์

อัจฉริยะในบ้าน เริ่มได้รับความนิยมในงานวิจัย เช่น (Huang et al., 2023; Aavild et al., 2024; Islam et al., 2022) ด้วยข้อดีด้านต้นทุนต่ำ ความสามารถในการเชื่อมต่อกับ IoT และการแสดงผลที่เข้าใจง่าย จึงมีศักยภาพสูงในการประยุกต์ใช้กับฟาร์มระดับชุมชน โดยเฉพาะด้านการมอนิเตอร์พลังงานและสิ่งแวดล้อม จากการทบทวนวรรณกรรม พบว่ายังไม่มีรายงานการประยุกต์ใช้แพลตฟอร์ม Home Assistant สำหรับฟาร์มแมลงเศรษฐกิจโดยตรง อีกทั้งการใช้เซนเซอร์ IoT ราคาต่ำเพื่อมอนิเตอร์พลังงานและสภาพแวดล้อมยังไม่เคยมีการสอบเทียบกับเครื่องมือมาตรฐานในภาคเกษตรอย่างเป็นระบบ รวมถึงยังไม่ปรากฏงานวิจัยที่บูรณาการระบบผลิตไฟฟ้าและความร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ (Solar PVT) ร่วมกับปั๊มความร้อนและ IoT เพื่อควบคุมอุณหภูมิในฟาร์มจิ้งหรีดอย่างครบวงจร

ดังนั้นงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาระบบมอนิเตอร์พลังงานและสิ่งแวดล้อมสำหรับฟาร์มจิ้งหรีดระดับชุมชน โดยใช้แพลตฟอร์ม Home Assistant ร่วมกับอุปกรณ์ตรวจวัดต้นทุนต่ำ เพื่อประเมินความแม่นยำของเซนเซอร์ที่ใช้ตรวจวัดแรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า พลังงาน และอุณหภูมิเมื่อเปรียบเทียบกับเครื่องมือมาตรฐาน และเพื่อวิเคราะห์ศักยภาพของระบบในการช่วยเกษตรกรติดตามการทำงานของอุปกรณ์แบบเรียลไทม์และปรับปรุงการจัดการพลังงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ

ทั้งนี้งานวิจัยตั้งสมมติฐานว่า (1) ระบบมอนิเตอร์ที่พัฒนาขึ้นสามารถตรวจวัดและบันทึกค่าพลังงานและอุณหภูมิได้อย่างต่อเนื่องและเสถียร (2) เซนเซอร์ที่ใช้มีความแม่นยำไม่แตกต่างจากเครื่องมือมาตรฐาน โดยมีค่า RMSE ต่ำกว่า 1°C สำหรับอุณหภูมิ และ MAPE ต่ำกว่า 5 % สำหรับพลังงานไฟฟ้า และ (3) ระบบสามารถรักษาอุณหภูมิในบ่อเลี้ยงจิ้งหรีดให้อยู่ในช่วง $28 - 30^{\circ}\text{C}$ ได้ตามเงื่อนไขที่กำหนด

วิธีการดำเนินงานวิจัย

1. การออกแบบระบบตรวจวัดและควบคุมอุณหภูมิ

ระบบตรวจวัดและควบคุมอุณหภูมิภายในบ่อเลี้ยงจิ้งหรีดได้รับการออกแบบให้ใช้แหล่งพลังงานจากแผงผลิตไฟฟ้าและความร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ (Solar PVT) ร่วมกับปั๊มความร้อน หลักการทำงานเริ่มจากแผงผลิตไฟฟ้าและความร้อนดูดกลืนความร้อนจากรังสีอาทิตย์ถ่ายเทความร้อนให้กับน้ำโดยการหมุนเวียนด้วยปั๊มน้ำร้อนที่ 1 (Hot Water Pump-1) สำหรับผลิตน้ำร้อนไว้ในถังเก็บน้ำร้อนที่ 1 (Hot Water Tank-1) ขณะเดียวกันแผงเปลี่ยนแสงเป็นพลังงานไฟฟ้ากระแสตรงเข้าสู่อินเวอร์เตอร์ (Inverter) เปลี่ยนเป็นไฟฟ้ากระแสสลับจ่ายให้กับปั๊มความร้อนสำหรับผลิตน้ำร้อนไว้ในถังเก็บน้ำร้อนที่ 2 (Hot Water Tank-2) เมื่ออุณหภูมิอากาศในบ่อเลี้ยงจิ้งหรีด (Cricket Container) ต่ำกว่าเงื่อนไขที่กำหนดปั๊มน้ำที่ 3 (Hot Water Pump-3) ทำหน้าที่จ่ายน้ำร้อนจากถังเก็บน้ำร้อนที่ 1 เข้าสู่เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน (Heat Exchanger) ขณะเดียวกันพัดลม (Blower) ทำหน้าที่ดูดอากาศในบ่อเลี้ยงมารับความร้อนที่เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนเพื่อรักษาอุณหภูมิไว้ที่ $28 - 30^{\circ}\text{C}$ และเมื่อความร้อนในถังที่ 1 ไม่เพียงพอระบบควบคุมสมาร์ตสวิตช์ (SmartRelay Switch) จะสลับมาใช้ความร้อนในถังเก็บน้ำร้อนทันทีผ่านการทำงานของ (Solenoid Valves: SV) ผังการทำงานโดยรวมของระบบดังรูปที่ 1

การทำงานของระบบทั้งหมดถูกกำหนดเงื่อนไขตามอุณหภูมิและช่วงเวลา เพื่อให้สามารถใช้พลังงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ รายละเอียดเงื่อนไขการทำงานของอุปกรณ์แต่ละชนิดดังตารางที่ 1 และรายละเอียดของแหล่งผลิตและการเก็บน้ำร้อนดังตารางที่ 2

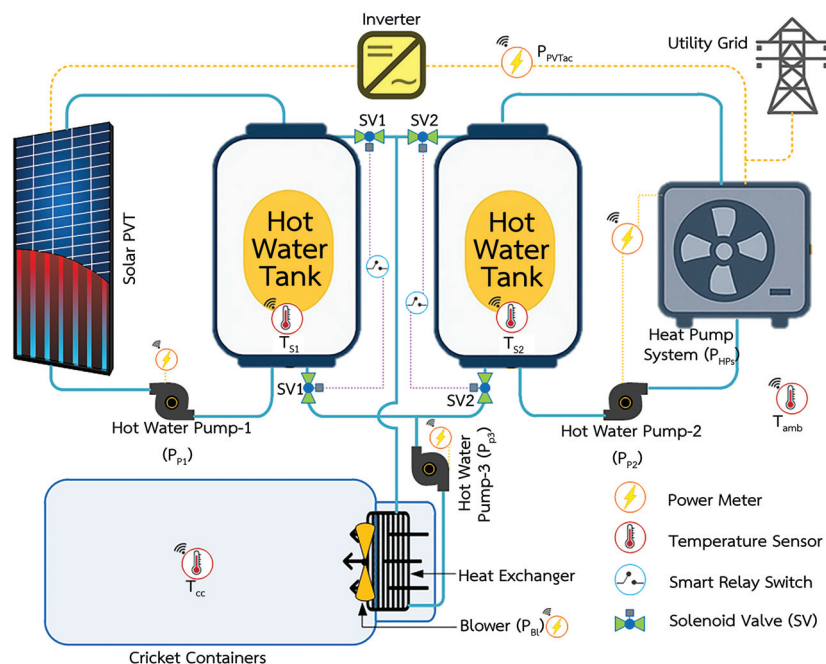
ตารางที่ 1 เงื่อนไขการทำงานของอุปกรณ์

อุปกรณ์	เงื่อนไขการทำงาน		ช่วงเวลา/กำลังไฟฟ้า
	ทำงาน	หยุดทำงาน	
Hot Water Pump-1 (P_{P1})	-	-	10.30 - 15.30 น. (0.374 kW) 09.30 - 15.30 น. และ 02.30 - 05.30 น. (ความร้อน 10.8 kWth) (กำลังไฟฟ้าของระบบ 3 - 3.9 kW)
Heat Pump (P_{HPs})	$T_{S2} < 45\text{ }^{\circ}\text{C}$	$T_{S2} > 55\text{ }^{\circ}\text{C}$	
Hot Water Pump-3 (P_{P3})	$T_{cc} < 28\text{ }^{\circ}\text{C}$	$T_{cc} > 30\text{ }^{\circ}\text{C}$	0.374 kW
Blower (P_{Bl})	$T_{cc} < 28\text{ }^{\circ}\text{C}$	$T_{cc} > 30\text{ }^{\circ}\text{C}$	22 W $\times$ 3 ตัว/บ่อ (รวม 1.32 kW)
SV1 : (Hot Water Tank-1)	$T_{S1} > 32\text{ }^{\circ}\text{C}$	$T_{S1} < 32\text{ }^{\circ}\text{C}$	-
SV2 : (Hot Water Tank-2)	$T_{S1} < 32\text{ }^{\circ}\text{C}$ และ $T_{S2} > 32\text{ }^{\circ}\text{C}$	$T_{S2} < 32\text{ }^{\circ}\text{C}$	-

ตารางที่ 2 แหล่งผลิตและเก็บน้ำร้อน

องค์ประกอบ	รายละเอียด
ถังน้ำร้อน 1 (Hot Water Tank-1)	ความจุ 1,000 L รับน้ำร้อนจาก Solar PVT
ถังน้ำร้อน 2 (Hot Water Tank-2)	ความจุ 2,500 L รับน้ำร้อนจากปั๊มความร้อน
แผง Solar PVT	8 แผง ขนาด 550 W (รวม 4.4 kWp) พื้นที่ 2.57 m ² /แผง
การใช้น้ำร้อน	ใช้ถังที่ 1 ก่อน หากต่ำกว่า 32 °C จึงสลับใช้ถังที่ 2

ระบบตรวจวัดพลังงานและสิ่งแวดล้อม ประกอบด้วย วัดพลังงานไฟฟ้า วัดอุณหภูมิน้ำร้อน และวัดอุณหภูมิอากาศ ณ จุดต่าง ๆ อาศัย Tuya IoT Module ที่มีองค์ประกอบเป็นไมโครคอนโทรลเลอร์ (Microcontroller: MCU) เชื่อมต่อกับเซนเซอร์ตัววัดอุณหภูมิ DS18B20 เซนเซอร์วัดพลังงานไฟฟ้า 1 เฟส รุ่น ATMS1603 และรีเลย์ เป็นต้น ระบบมอนิเตอร์พลังงานและสิ่งแวดล้อมที่พัฒนาขึ้นในงานวิจัยนี้ มีเป้าหมายเพื่อตรวจสอบและบันทึกค่าพลังงานไฟฟ้าในระบบไฟฟ้าของอาคารและระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ และสภาพแวดล้อมภายในฟาร์มจิ้งหรีด โดยใช้แพลตฟอร์ม Home Assistant เป็นศูนย์กลางในการเชื่อมโยงและแสดงผลข้อมูลทั้งหมดผ่านแดชบอร์ดที่ผู้ใช้งานสามารถปรับแต่งเองได้

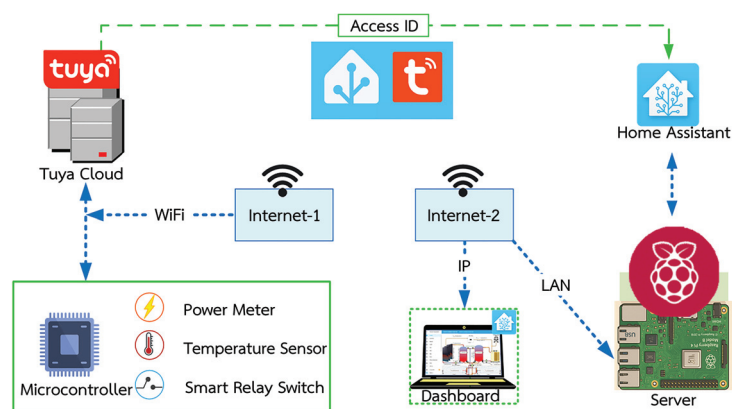


รูปที่ 1 ระบบควบคุมอุณหภูมิอากาศด้วยแหล่งความร้อนจากระบบผลิตไฟฟ้าและความร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับปั๊มความร้อน

2. การออกแบบระบบมอนิเตอร์และบันทึกข้อมูลบนแพลตฟอร์ม Home Assistant

หลักการทำงานของระบบมอนิเตอร์และบันทึกข้อมูลบนแพลตฟอร์ม Home Assistant ดังรูปที่ 2 การรับข้อมูลจากเซนเซอร์ผ่านระบบ Tuya: ระบบ Tuya เชื่อมต่อกับ Tuya Cloud ผ่านอินเทอร์เน็ต โดยทำหน้าที่เป็นศูนย์กลางในการจัดการข้อมูลและควบคุมอุปกรณ์ เมื่อผู้ใช้เรียกดูหรือสั่งงานผ่าน Home Assistant คำขอจะถูกส่งไปยัง Tuya Cloud ผ่าน Tuya Integration ซึ่งใช้ API ในการสื่อสาร หลังจากนั้น Tuya Cloud จะตอบกลับด้วยข้อมูลล่าสุด หรือส่งคำสั่งไปยังอุปกรณ์ปลายทาง และส่งสถานะกลับมาให้แสดงผลแบบเรียลไทม์ ผู้ใช้ต้องเชื่อมบัญชี Tuya กับ Home Assistant ด้วย Access ID เพื่อเปิดสิทธิ์เข้าถึงข้อมูล

การแสดงผลและควบคุมอุปกรณ์ผ่าน Home Assistant: Raspberry Pi 4 ทำหน้าที่เป็นเซิร์ฟเวอร์หลักที่ติดตั้ง Home Assistant พร้อมแดชบอร์ดสำหรับควบคุมและตรวจสอบอุปกรณ์ต่าง ๆ ภายในเครือข่าย โดยเชื่อมต่อผ่านเราเตอร์ที่กำหนด IP อัตโนมัติด้วย DHCP (เช่น <http://192.168.1.123:8123>) ผู้ใช้สามารถเข้าถึงระบบผ่านอุปกรณ์ที่อยู่ในเครือข่ายเดียวกัน เพื่อดูข้อมูลแบบเรียลไทม์ ทั้งนี้ควรกำหนด IP ให้คงที่ผ่าน Static IP หรือ DHCP Reservation เพื่อเสถียรภาพของระบบ



รูปที่ 2 ระบบมอนิเตอร์และบันทึกข้อมูลบนแพลตฟอร์ม Home Assistant

3. การหาความคลาดเคลื่อนของเซนเซอร์ตรวจวัดพลังงานและสิ่งแวดล้อม

3.1) ค่าความผิดพลาดสัมบูรณ์เฉลี่ย (Mean Absolute Error: MAE)

การหาค่าเฉลี่ยของข้อผิดพลาดในชุดค่าทำนายโดยไม่คำนึงถึงทิศทางของข้อผิดพลาด โดยวัดเป็นความแตกต่างสัมบูรณ์เฉลี่ยระหว่างค่าที่ของอุปกรณ์ที่เลือกใช้ประโยชน์กับค่าที่ได้จากเครื่องมือที่มีการทดสอบมาตรฐานสามารถหาได้จากสมการที่ (1)

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i - x_i| \quad (1)$$

3.2) เปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์ (Mean Absolute Percent Error: MAPE)

วิธีนี้จะคำนวณจากผลรวมของค่าสัมบูรณ์ของค่าที่เกิดขึ้นจริงจากเครื่องมือที่มีการทดสอบมาตรฐาน ลบด้วยค่าอุปกรณ์ที่นำมาใช้ประโยชน์หารด้วยค่าที่เกิดขึ้นจริงจากเครื่องมือที่มีการทดสอบมาตรฐาน คูณร้อยและหารด้วยจำนวนข้อมูลทั้งหมด สามารถหาได้จากสมการที่ (2)

$$MAPE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{|y_i - x_i|}{y_i} \times 100 \quad (2)$$

เมื่อ

n	คือ	จำนวนข้อมูลทั้งหมด
y_i	คือ	พารามิเตอร์จากเซนเซอร์
x_i	คือ	พารามิเตอร์จากเครื่องมือที่ได้มาตรฐานการทดสอบ

3.3) รากที่สองของค่าความผิดพลาดเฉลี่ย (Root Mean Squared Error: RMSE)

เป็นตัววัดความแตกต่างระหว่างค่าที่คาดการณ์ไว้และค่าที่สังเกตได้ โดยทั่วไปใช้เพื่อประเมินประสิทธิภาพของการสอบเทียบของอุปกรณ์ ค่ารากที่สองของค่าความผิดพลาดเฉลี่ยยิ่งน้อย แสดงว่าอุปกรณ์ที่เลือกใช้มีความถูกต้องและแม่นยำ สามารถหาได้จากสมการที่ (3)

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - x_i)^2}{n}} \quad (3)$$

4. การเก็บข้อมูล

4.1) การสอบเทียบอุณหภูมิทำการทดสอบโดยใช้น้ำเป็นตัวกลาง เริ่มต้นที่อุณหภูมิ 8.3 °C และเพิ่มอุณหภูมิจนถึง 83.7 °C โดยทำการบันทึกข้อมูลจากเซนเซอร์ Tuya IoT Module สอบเทียบค่าอุณหภูมิใช้เทอร์โมคัปเปิลชนิดเค (Thermocouple Type K) เชื่อมต่อกับเครื่องบันทึกอุณหภูมิ Lutron TM-1947SD ผ่านการทดสอบคุณภาพมาตรฐาน ISO 9001 ทุก ๆ 1 นาที โดยทำการทดสอบซ้ำจำนวน 3 ครั้ง เพื่อนำผลมาเปรียบเทียบและวิเคราะห์ค่าความคลาดเคลื่อน

4.2) การสอบเทียบทางไฟฟ้าทำการตรวจวัดค่ากำลังไฟฟ้าของอุปกรณ์ไฟฟ้าหลากหลายชนิด โดยมีช่วงกำลังไฟฟ้าตั้งแต่ 0.19 - 3.22 kW ข้อมูลจากเซนเซอร์ Tuya ถูกเปรียบเทียบกับค่าที่วัดได้จากเครื่องบันทึกและวิเคราะห์ HIOKI PQ3100 Series Power Quality Analyzer ซึ่งมีความน่าเชื่อถือเนื่องจากมีมาตรฐานระดับ Class S (IEC61000-4-30) ทุก ๆ 1 นาที โดยทำการทดสอบซ้ำจำนวน 3 ครั้ง เพื่อประเมินความแม่นยำของการตรวจวัดพลังงานไฟฟ้า

4.3) การทดลองดำเนินการในฟาร์มเลี้ยงจิ้งหรีดระดับชุมชน ณ กวินธิดาฟาร์ม อำเภอสนักำแพง จังหวัดเชียงใหม่ โดยนำเสนอตัวอย่างข้อมูลจำนวน 3 วัน ในช่วงฤดูหนาว เพื่อประเมินระบบควบคุมสภาพอากาศในบ่อเลี้ยงจิ้งหรีด ข้อมูลที่เก็บประกอบด้วย อุณหภูมิภายในบ่อเลี้ยงจิ้งหรีด (T_{cc}) อุณหภูมิน้ำในถังเก็บน้ำร้อน (T_{s1} และ T_{s2})

อุณหภูมิอากาศแวดล้อม (T_{amb}) และกำลังไฟฟ้าของอุปกรณ์ ซึ่งตรวจวัดด้วยเซนเซอร์ของระบบ Tuya IoT เชื่อมต่อกับแพลตฟอร์ม Home Assistant ข้อมูลถูกบันทึกแบบเรียลไทม์ทุก 5 นาที และจัดเก็บในรูปแบบไฟล์ .csv เพื่อนำไปวิเคราะห์หาค่าพลังงานไฟฟ้า พลังงานความร้อน และการควบคุมอุณหภูมิในบ่อเลี้ยงจิ้งหรีด

5. การวิเคราะห์ด้านพลังงาน

การวิเคราะห์พลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้จากระบบผลิตไฟฟ้าและความร้อนพลังงานแสงอาทิตย์และพลังงานไฟฟ้าจากภาระโหลดที่ใช้ในระบบ สามารถหาได้จากสมการที่ (4)

$$E = P \times t_{OP} \quad (4)$$

เมื่อ

E	คือ	พลังงานไฟฟ้า (kWh)
P	คือ	กำลังไฟฟ้า (kW)
t_{OP}	คือ	เวลาในการทำงานของระบบหรืออุปกรณ์ (h)

การวิเคราะห์การผลิตและใช้ประโยชน์พลังงานความร้อนในถังเก็บน้ำร้อนที่ 1 ที่ผลิตจากระบบพลังงานแสงอาทิตย์สามารถหาได้จากสมการที่ (5) และการผลิตและใช้ประโยชน์พลังงานความร้อนของปั๊มความร้อนสามารถหาได้จากสมการที่ (6)

$$Q_{SI} = M_1 C_{p_w} (T_{SI}^{t+\Delta t} - T_{SI}^t) \quad (5)$$

$$Q_{S2} = M_2 C_{p_w} (T_{S2}^{t+\Delta t} - T_{S2}^t) \quad (6)$$

เมื่อ

Q_{SI}, Q_{S2}	คือ	พลังงานความร้อนของถังเก็บน้ำร้อนที่ 1 และถังเก็บน้ำร้อนที่ 2 (KJ)
M_1, M_2	คือ	ขนาดของถังเก็บน้ำร้อนที่ 1 และถังเก็บน้ำร้อนที่ 2 (kg)
C_{p_w}	คือ	ค่าความจุความร้อนจำเพาะของน้ำ (kJ/kg · K)
$T_{SI}^{t+\Delta t}, T_{S2}^{t+\Delta t}$	คือ	อุณหภูมิในถังเก็บน้ำร้อนที่ 1 และถังเก็บน้ำร้อนที่ 2 ที่เวลาเปลี่ยนไป (K)
T_{SI}^t, T_{S2}^t	คือ	อุณหภูมิในถังที่ 1 และถังเก็บน้ำร้อนที่ 2 ณ เวลาเริ่มต้น (K)

6. การประเมินพลังงานไฟฟ้า การลดปริมาณความเข้มข้นของคาร์บอน และการประเมินผลทางเศรษฐศาสตร์

การศึกษานี้ได้ประเมินผลการลดการใช้ไฟฟ้าจากโครงข่ายการไฟฟ้า (Grid Electricity) ภายหลังจากติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าและความร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ (Solar PVT) ซึ่งเป็นพลังงานทดแทน โดยพิจารณาจากปริมาณพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้จริงจากระบบตลอดทั้งปี $E_{PV/T, annual}$ ดังสมการที่ (7) การประเมินใช้ค่าประสิทธิภาพของระบบเฉลี่ยจากการทดสอบจริง ($Eff_{sys} = 19.97\%$) และใช้ค่าความเข้มรังสีอาทิตย์จาก RETScreen Expert ที่ละติจูด 18.8° และลองจิจูด 99.1°

$$E_{PV/T, annual} = Eff_{sys} \times A_{PV/T} \times N_{PV/T} \times G \quad (7)$$

เมื่อ

$A_{PV/T}$	คือ	พื้นแผง Solar PVT (m^2)
$N_{PV/T}$	คือ	จำนวนแผง Solar PVT (panel)
G	คือ	ความเข้มรังสีอาทิตย์ (kWh/m^2)

จากสมการที่ (7) สามารถประเมินการลดปริมาณความเข้มข้นของคาร์บอนได้ดังสมการที่ (8) โดยใช้ค่า Emission factor (EF_{Elc}) ของการประเมินคาร์บอนระดับองค์กร (Carbon Footprint for Organization: CFO) ที่มีค่าของการใช้พลังงานไฟฟ้าจากโครงข่ายการไฟฟ้าเท่ากับ $0.4999 \text{ kgeqCO}_2/\text{kWh}$ อ้างอิงจากองค์การบริหารจัดการก๊าซเรือนกระจกแห่งประเทศไทย (อบก.) และสามารถหาผลประหยัดของค่าใช้จ่ายด้านพลังงานในสมการที่ (9) โดยใช้ค่าเฉลี่ยค่าไฟฟ้าของฟาร์มเลี้ยงจิ้งหรีด (C_{Elc}) มีค่าเท่ากับ 4.97 บาท/kWh

$$CO_2 = E_{PV/T,annual} \times EF_{Elc} \quad (8)$$

$$E_{Savi} = E_{PV/T,annual} \times C_{Elc} \quad (9)$$

เมื่อ E_{Savi} คือ ผลประหยัดของค่าใช้จ่ายด้านพลังงาน (บาท)

การประเมินผลทางเศรษฐศาสตร์ในงานวิจัยนี้เสนอผลการวิเคราะห์ระยะเวลาคืนทุน (Payback Period: PB) ดังสมการที่ (10)

$$PB = Inv / E_{Savi} \quad (10)$$

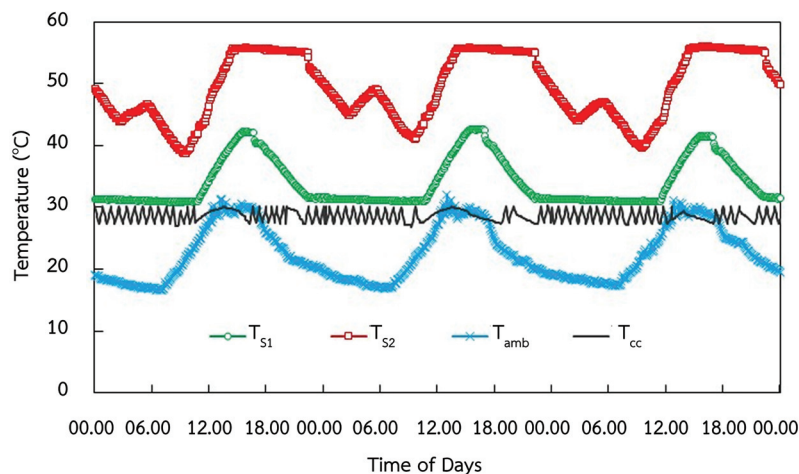
เมื่อ Inv คือ เงินลงทุนติดตั้งระบบ (บาท)

ผลการศึกษา

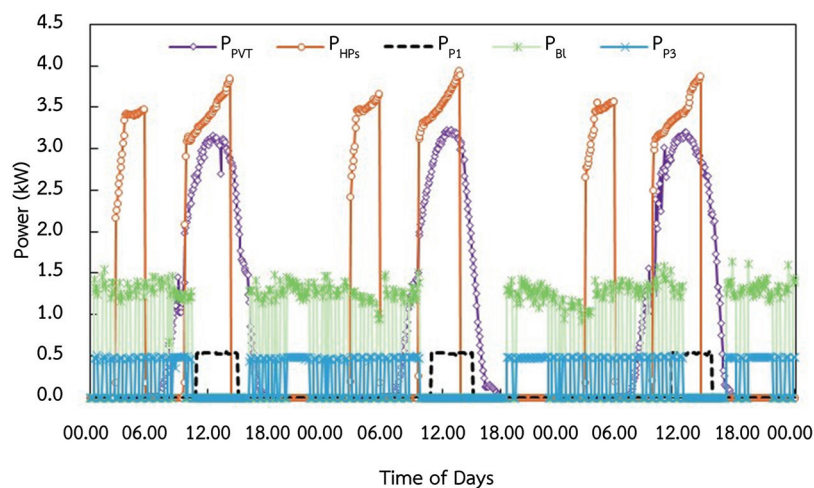
1. ผลของการตรวจวัดค่าอุณหภูมิและค่าทางไฟฟ้า

รูปที่ 3 แสดงผลการตรวจวัดค่าอุณหภูมิในถังเก็บน้ำร้อนที่ 1, 2 (T_{s1} , T_{s2}) อุณหภูมิอากาศแวดล้อม (T_{amb}) และอุณหภูมิในบ่อเลี้ยงจิ้งหรีด (T_{cc}) พบว่าอุณหภูมิอากาศแวดล้อมมีค่าระหว่าง $16.6 - 32.1 \text{ }^{\circ}\text{C}$ และมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ $22.5 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ระบบผลิตน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ (Solar PVT) เริ่มผลิตน้ำร้อนตั้งแต่เวลา 10.30 - 15.30 น. สามารถเพิ่มอุณหภูมิของน้ำร้อนได้ $42 - 43 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ขึ้นอยู่กับความเข้มรังสีอาทิตย์ในแต่ละวัน น้ำร้อนจากถังที่ 1 ถูกส่งผ่านเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนร่วมกับพัดลมดูดลมจากภายในบ่อเลี้ยงจิ้งหรีดเพื่อนำมาปรับความร้อน เพื่อรักษาอุณหภูมิที่ $28 - 30 \text{ }^{\circ}\text{C}$ สามารถดำเนินต่อเนื่องได้จนถึงเวลาประมาณ 22.00 น. หลังจากนั้นอุณหภูมิในถังลดลงจนไม่เพียงพอต่อการรักษาอุณหภูมิที่ต้องการ จึงต้องเปลี่ยนไปใช้ความร้อนจากระบบปั๊มความร้อนแทน

ระบบปั๊มความร้อนจะทำงานในสองช่วงเวลา ช่วงที่ 1 เวลา 09.30 - 14.20 น. ผลิตน้ำร้อนเก็บไว้ในถังที่ 2 ที่อุณหภูมิ $55.5 - 56 \text{ }^{\circ}\text{C}$ โดยใช้พลังงานไฟฟ้าจากระบบ Solar PVT เป็นหลัก น้ำร้อนในถังเก็บน้ำร้อนที่ 2 ถูกใช้งานต่อจากถังเก็บน้ำร้อนที่ 1 จนอุณหภูมิต่ำกว่า $45 \text{ }^{\circ}\text{C}$ จากนั้นถูกปั๊มความร้อนเสริมอุณหภูมิให้กับน้ำร้อน ช่วงที่ 2 เวลา 02.30 - 05.30 น. ผลิตน้ำร้อนที่อุณหภูมิ $44.8 - 49.1 \text{ }^{\circ}\text{C}$ เนื่องจากอุณหภูมิอากาศแวดล้อมที่ลดลงทำให้เกิดการสูญเสียความร้อนในบ่อเลี้ยงจิ้งหรีด พลังงานความร้อนในการรักษาอุณหภูมิต้องใช้เพิ่มขึ้นเพื่อให้เพียงพอตลอดทั้งคืนและในช่วงเช้าของวันถัดไป โดยการป้อนความร้อนให้กับเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่เพียงพอทำให้สามารถรักษาอุณหภูมิได้ตามเงื่อนไขที่ต้องการ และจากการสังเกตพฤติกรรมของระบบพบว่า ในช่วงเวลา 10.30 - 16.00 น. ระบบไม่มีความจำเป็นต้องจ่ายความร้อนเข้าสู่บ่อเลี้ยงจิ้งหรีด เนื่องจากอุณหภูมิอากาศแวดล้อมสูงกว่า $28 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ซึ่งอยู่ในช่วงอุณหภูมิที่เหมาะสมทำให้ไม่มีการสูญเสียความร้อนออกจากบ่อเลี้ยง ส่งผลให้ระบบไม่ต้องเสริมพลังงานความร้อนเพิ่มเติมในช่วงเวลานี้ อย่างไรก็ตาม ในช่วงเวลาอื่น ๆ โดยเฉพาะกลางคืนและเช้ามืด ระบบมีการจ่ายน้ำร้อนเข้าสู่เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนอย่างต่อเนื่องเพื่อชดเชยความร้อนที่สูญเสียไป และรักษาอุณหภูมิภายในให้อยู่ในเงื่อนไขที่ต้องการ ซึ่งผลการใช้งานดังกล่าวสอดคล้องกับพฤติกรรมของการใช้กำลังไฟฟ้างดังรูปที่ 4



รูปที่ 3 ผลของการเปลี่ยนแปลงค่าอุณหภูมิน้ำร้อนและอุณหภูมิอากาศ



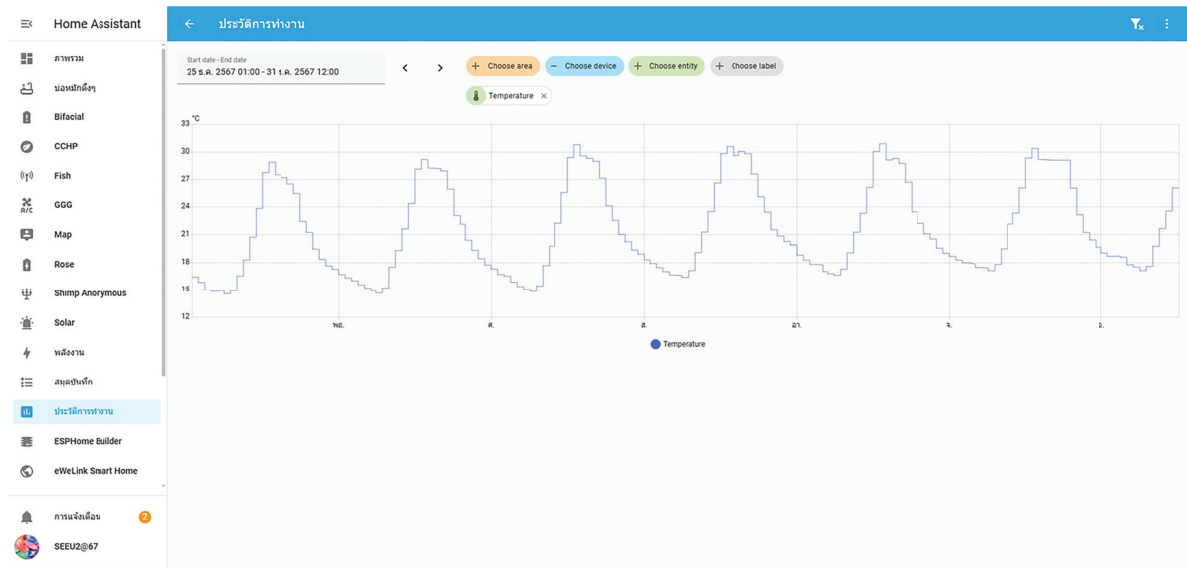
รูปที่ 4 พฤติกรรมกำลังไฟฟ้าของการผลิตไฟฟ้าและการะโหลดทางไฟฟ้า

รูปที่ 4 พฤติกรรมการผลิตและการใช้กำลังไฟฟ้าของระบบในแต่ละวัน โดยระบบผลิตไฟฟ้าจากแผง Solar PVT เริ่มจ่ายไฟระหว่างเวลา 07.15 - 17.40 น. และมีกำลังไฟฟ้าสูงสุด 3.1 - 3.2 kW ช่วง 12.30 - 12.40 น. สำหรับปั๊มความร้อน (P_{HP5}) ซึ่งประกอบด้วยคอมเพรสเซอร์ พัดลม และปั๊มน้ำร้อนที่ 2 แสดงพฤติกรรมการใช้ไฟฟ้าเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิในถังเก็บน้ำร้อนเนื่องจากคอมเพรสเซอร์ทำงานหนักขึ้น สำหรับอัดสารทำงานให้ความดันสูงขึ้นเพื่อให้สามารถควบแน่นและถ่ายเทความร้อนออกมาได้ในระดับอุณหภูมิที่สูงพอจึงมีการใช้กำลังไฟฟ้าเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิที่สูงขึ้น สอดคล้องกับงานของ Moon et al. (2024), Natale et al. (2025), Wanchupela and Polvongsri (2021) โดยกำลังไฟฟ้าสูงสุดอยู่ที่ 3.8 - 3.9 kW ในช่วงที่ 1 และ 3.5 - 3.7 kW ในช่วงที่ 2 ขึ้นอยู่กับลักษณะการทำงานรายวัน ปั๊มน้ำร้อนที่ 1 (P_{P1}) ใช้กำลังไฟฟ้าคงที่เฉลี่ย 0.53 kW จนถึงเวลา 15.30 น. ขณะที่ปั๊มน้ำร้อนที่ 3 (P_{P3}) และพัดลมหมุนเวียนอากาศ (P_{BI}) ทำงานตามเงื่อนไขอุณหภูมิภายในบ่อเลี้ยง กล่าวคือ เริ่มทำงานเมื่ออุณหภูมิต่ำกว่า 28 °C และหยุดเมื่อเกิน 30 °C โดยใช้กำลังไฟฟ้าเฉลี่ย 0.49 kW และ 1.3 kW ข้อมูลเหล่านี้สามารถใช้ในการวิเคราะห์การใช้พลังงานไฟฟ้าเชิงลึกได้ดังรูปที่ 7

2. ผลการตรวจวัดค่าพารามิเตอร์บนแพลตฟอร์ม

รูปที่ 5 ตัวอย่างการตรวจวัดค่าพารามิเตอร์ในระบบควบคุมอุณหภูมิภายในฟาร์มเลี้ยงจิ้งหรีด โดยใช้แพลตฟอร์ม Home Assistant สำหรับการติดตามค่าต่าง ๆ แบบเรียลไทม์ ประกอบด้วย รูปที่ 5(ก) ผลการตรวจวัดอุณหภูมิอากาศแวดล้อม แสดงให้เห็นความผันแปรของอุณหภูมิในแต่ละวัน โดยมีค่าสูงสุดและต่ำสุดที่เปลี่ยนแปลง

ตามช่วงเวลากลางวันและกลางคืน รูปที่ 5(ข) ผลการตรวจวัดอุณหภูมิน้ำในถังที่ 1 ซึ่งเป็นตัวแทนของแหล่งความร้อนที่เก็บสะสมไว้ โดยพบว่าอุณหภูมิน้ำมีลักษณะขึ้นลงตามช่วงเวลาการทำงานของระบบผลิตความร้อนจากระบบผลิตไฟฟ้าและความร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ รูปที่ 5(ค) ผลการตรวจวัดกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากระบบ Solar PVT ซึ่งแสดงการผลิตไฟฟ้าที่ใช้ในแต่ละวัน โดยมีกำลังการผลิตสูงสุดในช่วงเที่ยงถึงบ่ายของวัน ดังรูปที่ 3(ง) ผลการตรวจวัดกำลังไฟฟ้าที่ปั้มน้ำร้อนที่ 1 แสดงพฤติกรรมการใช้กำลังไฟฟ้าของระบบหมุนเวียนน้ำสำหรับผลิตน้ำร้อน

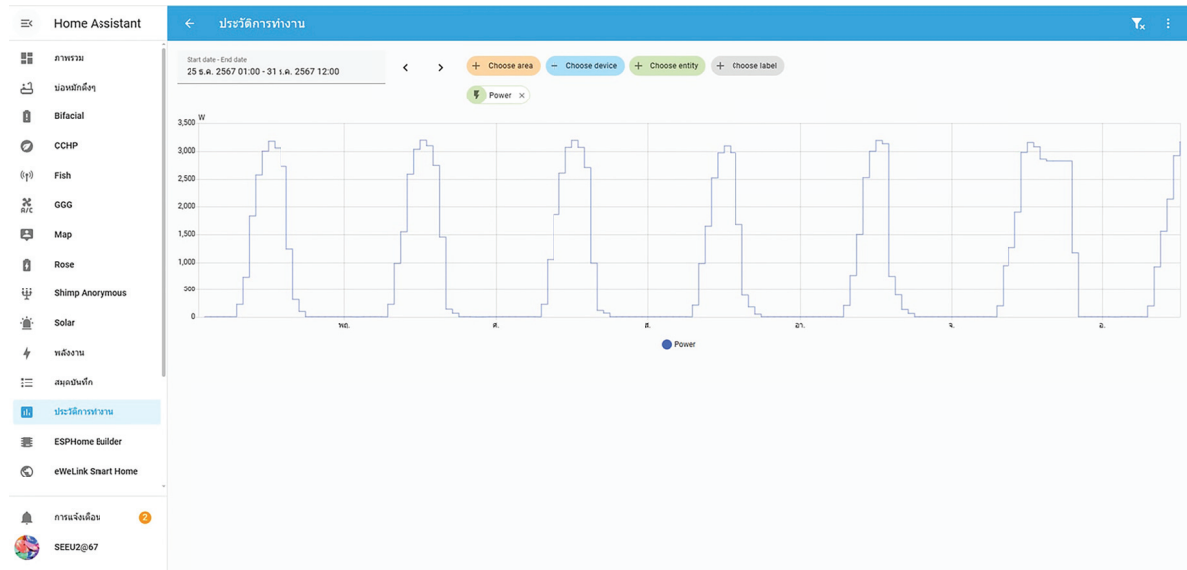


(ก) ผลการตรวจวัดอุณหภูมิอากาศแวดล้อม



(ข) ผลการตรวจวัดอุณหภูมิน้ำในถังที่ 1

รูปที่ 5 ตัวอย่างผลการตรวจวัดค่าพารามิเตอร์บนแพลตฟอร์ม



(ค) ผลการตรวจวัดกำลังไฟฟ้าจาก Solar PVT

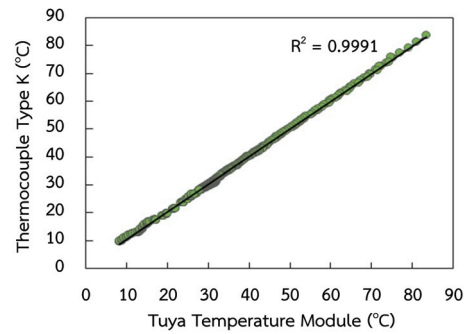
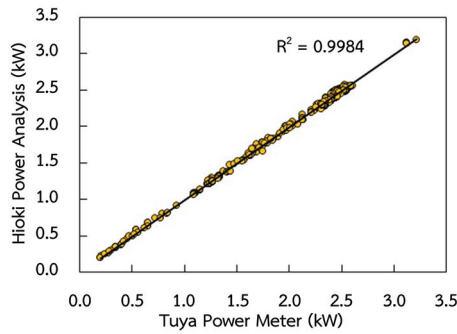


(ง) ผลการตรวจวัดกำลังไฟฟ้าของปั้มน้ำร้อนที่ 1

รูปที่ 5 ตัวอย่างผลการตรวจวัดค่าพารามิเตอร์บนแพลตฟอร์ม (ต่อ)

3. ผลการตรวจสอบความถูกต้องและความคลาดเคลื่อนของเซนเซอร์

การตรวจสอบความถูกต้องและความคลาดเคลื่อนของการสอบเทียบข้อมูลของเซนเซอร์ตรวจวัดกำลังไฟฟ้า และตรวจวัดอุณหภูมิได้ทำการวิเคราะห์การถดถอยของข้อมูล (Regression Analysis) เป็นการหาความสัมพันธ์ระหว่างข้อมูลที่ได้จากเซนเซอร์ (Tuya Sensor) และข้อมูลที่ได้จากเครื่องมือที่ได้ทดสอบตามมาตรฐานที่ได้รับการยอมรับ เพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2 หรือ r-squared) ดังรูปที่ 6



(ก) การถดถอยแบบเชิงเส้นของค่ากำลังไฟฟ้า

(ข) การถดถอยแบบเชิงเส้นของค่าอุณหภูมิ

รูปที่ 6 การวิเคราะห์การถดถอยแบบเชิงเส้นของข้อมูล

จากผลการวิเคราะห์ความสอดคล้องของข้อมูลระหว่างโมดูล Tuya และอุปกรณ์มาตรฐาน พบว่าความสัมพันธ์ระหว่างค่าที่อ่านจาก Tuya Power Meter และเครื่องวัดกำลังไฟฟ้าของ Hioki มีความสอดคล้องกันสูง โดยมีค่า $R^2 = 0.9984$ ดังรูปที่ 6(ก) ในทำนองเดียวกันค่าที่ได้จาก Tuya Temperature Module เปรียบเทียบกับ Thermocouple Type K ให้ค่า R^2 ที่สูงมากเช่นกันเท่ากับ 0.9991 ดังรูปที่ 6(ข) ผลดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าอุปกรณ์ของระบบที่ใช้โมดูล Tuya มีความน่าเชื่อถือ ซึ่งสอดคล้องกับงานของ Araújo et al. (2020) นอกจากนี้ยังยืนยันความแม่นยำด้วยการหาค่าความคลาดเคลื่อนของข้อมูลดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ค่าความคลาดเคลื่อนของข้อมูล

Error	MAE	RMSE	MAPE
Power (kW)	0.0258	0.0295	1.45 %
Temperature (°C)	0.357	0.496	1.67 %

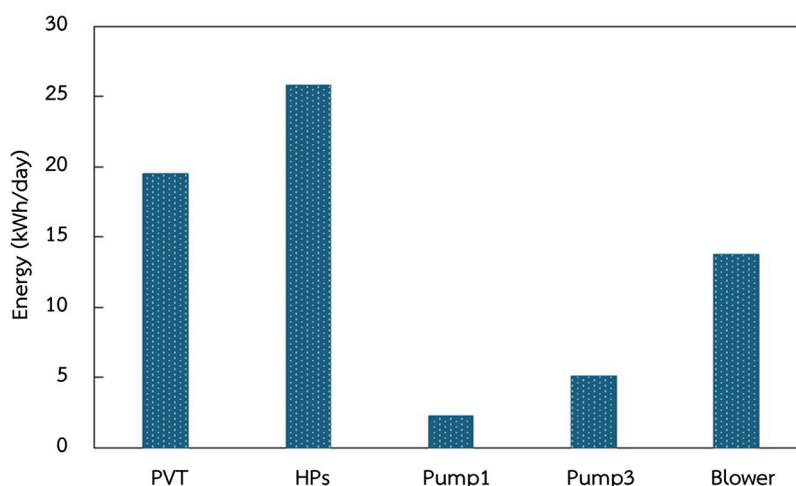
จากการประเมินความแม่นยำของเซนเซอร์ Tuya เทียบกับเครื่องมือที่ได้มาตรฐาน โดยใช้ตัวชี้วัดค่าความคลาดเคลื่อน ได้แก่ ค่าความผิดพลาดสัมบูรณ์เฉลี่ย (MAE) รากที่สองของค่าความผิดพลาดเฉลี่ย (RMSE) และเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์ (MAPE) ของค่ากำลังไฟฟ้าและอุณหภูมิพบว่า มีค่า MAE = 0.0258 kW และ 0.357 °C ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับงานของ Siswoyo (2025) ค่า RMSE = 0.0295 kW และ 0.496 °C และค่า MAPE = 1.45 % และ 1.67 % ค่าความคลาดเคลื่อนที่อยู่ในระดับต่ำดังกล่าว แสดงถึงความแม่นยำที่ดีของเครื่องมือซึ่งมีความเหมาะสมต่อการนำไปประยุกต์ใช้ในการควบคุมพลังงานและอุณหภูมิในระบบต่าง ๆ ความคลาดเคลื่อนดังกล่าวมีความนิยมใช้เป็นอย่างมาดงานวิจัยของ Phaphan and Phutthamat (2023), Koponen et al. (2020), Zhang et al. (2014) นอกจากการพัฒนากระบวนการควบคุมด้วย Tuya และ Home Assistant แล้ว งานวิจัยนี้ยังได้ทำการเปรียบเทียบกับระบบควบคุมและแพลตฟอร์มอื่นที่นิยมนำมาใช้ในงานสมาร์ทฟาร์ม เพื่อประเมินความแตกต่างด้านราคา ความง่ายในการใช้งาน ความยืดหยุ่นในการขยายระบบ รวมถึงความสามารถในการบำรุงรักษาโดยเกษตรกร ดังตารางที่ 4 พบว่า Tuya ร่วมกับ Home Assistant มีความเหมาะสมที่สุดสำหรับฟาร์มชุมชน เนื่องจากมีต้นทุนอุปกรณ์ต่ำ ใช้งานง่าย ไม่จำเป็นต้องมีทักษะการเขียนโปรแกรม และเกษตรกรสามารถบำรุงรักษาหรือเปลี่ยนอุปกรณ์ได้ด้วยตนเอง ต่างจากระบบอื่นที่มักต้องอาศัยผู้เชี่ยวชาญด้านเทคนิค ทำให้ระบบที่พัฒนาขึ้นมีความยั่งยืนมากกว่าในระยะยาว

ตารางที่ 4 การเปรียบเทียบระบบควบคุมและมอนิเตอร์

ระบบควบคุม	ราคาอุปกรณ์ (เบื้องต้น)	ความง่ายในการใช้งาน	การบำรุงรักษาโดยเกษตรกร	ความเหมาะสมกับฟาร์มชุมชน
Tuya + Home Assistant	ต่ำ-ปานกลาง (อุปกรณ์ Tuya หาซื้อง่าย ราคาถูก เริ่มต้นหลักร้อย)	ง่าย (Dashboard พร้อมใช้, Integration อัตโนมัติ)	☒ เกษตรกรสามารถเปลี่ยน/เพิ่มอุปกรณ์ได้เอง	เหมาะสมที่สุด: ต้นทุนคุ้มค่า ใช้งาน-ดูแลได้เอง
Blynk IoT Platform	ต่ำ-ปานกลาง (ESP8266/ESP32 + แอป Blynk, Subscription บางส่วน)	ง่ายในส่วน การดูข้อมูลผ่านแอป แต่ ต้องเขียนโค้ด สำหรับอุปกรณ์	☒ เกษตรกรทั่วไป บำรุงรักษาเองไม่ได้ ต้องพึ่งผู้ที่มีทักษะเขียนโปรแกรม	เหมาะกับฟาร์มทดลอง/งานวิจัย ไม่เหมาะเกษตรกรชุมชนโดยตรง
Node-RED + MQTT	ต่ำ-ปานกลาง (ขึ้นกับ Server/Hardware)	ปานกลาง-ยาก (ต้องออกแบบ Flow เอง)	☒ เกษตรกรบำรุงรักษาเองไม่ได้ ต้องพึ่งนักพัฒนา	เหมาะกับงานวิจัย/ระบบทดลองเชิงวิศวกรรม
SCADA ขนาดเล็ก	สูง (หลายหมื่น-แสนบาท)	ปานกลาง (มี HMI สำเร็จรูป แต่ต้องฝึกใช้งาน)	☒ เกษตรกรดูแลเองไม่ได้ ต้องพึ่งวิศวกร/ช่างเทคนิค	ไม่เหมาะกับฟาร์มชุมชน ต้นทุนสูงเกิน

4. ผลการวิเคราะห์ด้านพลังงาน

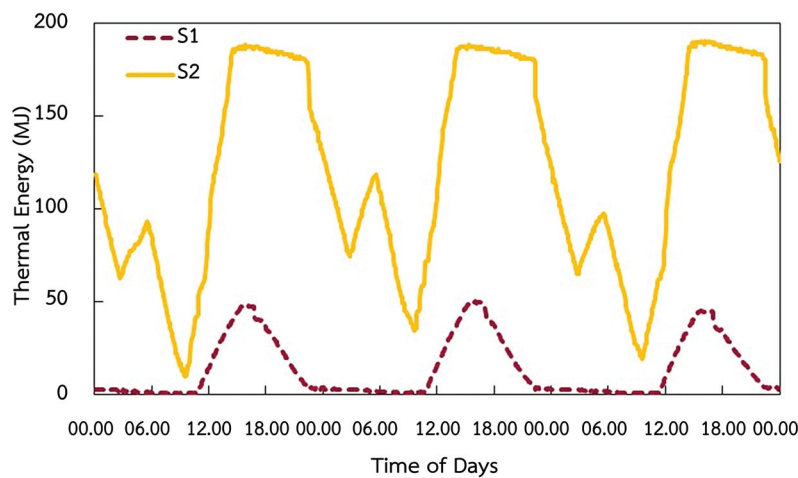
การวิเคราะห์ผลด้านพลังงานนำเสนอข้อมูลทางด้านพลังงานไฟฟ้าและความร้อนของทั้ง 3 วัน ดังรูปที่ 7 และ 8 โดยรูปที่ 7 แสดงปริมาณพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้จากระบบผลิตไฟฟ้าและความร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ (PVT) เฉลี่ย 19.5 kWh/day ขณะที่การใช้พลังงานไฟฟ้ารวมของอุปกรณ์ภายในระบบเฉลี่ย 46.97 kWh/day แบ่งเป็น ปั๊มความร้อน (HP) ปั๊มน้ำร้อนที่ 1 (Pump₁) ปั๊มน้ำร้อนที่ 3 (Pump₃) และพัดลมหมุนเวียนอากาศ (Blower) มีค่า 28.5 2.3 5.1 และ 13.8 kWh/day ตามลำดับ อุปกรณ์ที่ใช้พลังงานสูงสุดคือ ปั๊มความร้อน ซึ่งสอดคล้องกับรูปที่ 4 ที่แสดงให้เห็นถึงค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดในระบบ ขณะที่พัดลมหมุนเวียนอากาศ แม้จะใช้กำลังไฟฟ้าน้อยกว่าประมาณหนึ่งในสามของปั๊มความร้อน แต่ทำงานต่อเนื่องยาวนานจึงมีการใช้พลังงานรวมค่อนข้างสูง โดยรวมระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์สามารถช่วยลดการใช้พลังงานได้ประมาณ 41.5 % แต่เมื่อใช้นอกฤดูหนาวและจะสามารถช่วยลดการใช้พลังงานไฟฟ้าภายในฟาร์มได้มากกว่า 90 % เนื่องจากไม่ภาระโหลดที่สูงเช่นปั๊มความร้อนสามารถแสดงรายละเอียดการผลิตไฟฟ้าจากระบบพลังงานแสงอาทิตย์ตลอดทั้งปีดังรูปที่ 9



รูปที่ 7 พลังงานไฟฟ้าของการผลิตไฟฟ้าและการะโหลดทางไฟฟ้า

รูปที่ 8 พฤติกรรมความร้อนในถังเก็บน้ำร้อนทั้งสองถัง โดยถังเก็บน้ำร้อนที่ 1 (S1) ได้รับความร้อนจากระบบผลิตไฟฟ้าและความร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ ซึ่งเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องจนถึงเวลาประมาณ 15:30 น. โดยมีพลังงานความร้อนอยู่ที่ 44.4 - 48.6 MJ ขึ้นอยู่กับความเข้มรังสีอาทิตย์และสภาพอากาศของแต่ละวัน หลังจากนั้น

ความร้อนจะถูกใช้งานต่อเนื่องจนลดลงใกล้ศูนย์ในเวลาประมาณ 22.30 น. และเริ่มผลิตใหม่ในวันถัดไป สำหรับถังเก็บน้ำร้อนที่ 2 (S2) ได้รับความร้อนจากปั๊มความร้อน ซึ่งเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องเช่นกันจนถึงเวลา 15.00 น. โดยมีพลังงานความร้อนสูงสุดประมาณ 187.2 MJ จากนั้นความร้อนลดลงจากการสูญเสียประมาณ 7.1 MJ และถูกนำไปใช้งานต่อจากถังเก็บน้ำร้อนที่ 1 ทำให้เหลืออยู่ประมาณ 62.2 - 74.1 MJ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับความถี่ในการใช้งานและอุณหภูมิอากาศในแต่ละวัน ในช่วงเวลา 02.30 - 05.30 น. ถังปั๊มความร้อนเสริมพลังงานเข้าอีกครั้ง ทำให้ความร้อนเพิ่มขึ้นประมาณ 92 - 117 MJ ก่อนจะลดลงอีกเนื่องจากการใช้งานอย่างต่อเนื่อง โดยเฉพาะช่วงเวลา 04.00 - 08.00 น. ซึ่งมีความถี่ในการใช้ความร้อนสูง เพื่อรักษาอุณหภูมิในบ่อเลี้ยง ประกอบกับการสูญเสียความร้อนที่มากขึ้น ส่งผลให้ความร้อนคงเหลือเพียง 9.2 - 34.4 MJ และถูกเสริมด้วยปั๊มความร้อนอีกครั้งในช่วง 09.30 น. โดยความร้อนที่แสดงมีการประเมินดังตารางที่ 5



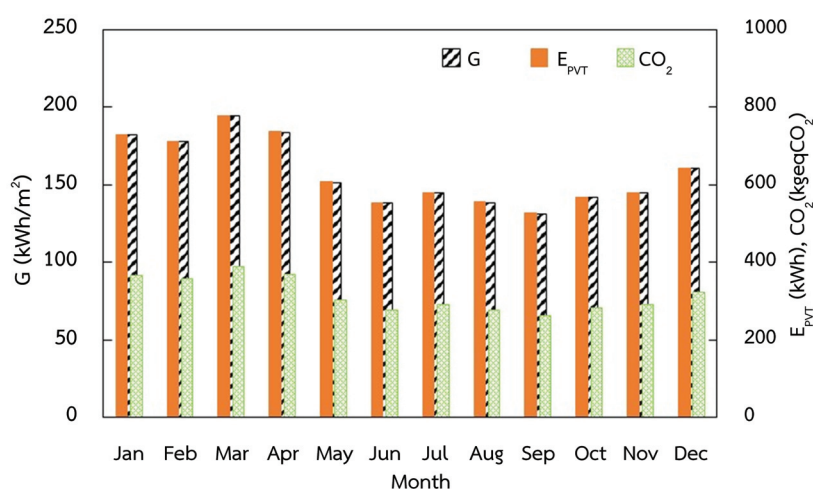
รูปที่ 8 พลังงานความร้อนที่ผลิตและใช้ประโยชน์ของระบบ

ตารางที่ 5 ค่าพารามิเตอร์และผลการคำนวณพลังงานความร้อน (ใช้ข้อมูลของวันที่ 1)

คุณสมบัติ	ค่า	หน่วย
<u>ปริมาณความร้อนในถังเก็บน้ำร้อนที่ 1 (ช่วงเวลาที่ผลิตความร้อนตั้งแต่ 10.50 - 15.30 น.)</u>		
ขนาดของถังเก็บน้ำร้อนที่ 1 (M_1)	1,000	kg
ค่าความจุความร้อนจำเพาะของน้ำ (C_{pw})	4.187	kJ/kg·K
อุณหภูมิในถังเก็บน้ำร้อนที่ 1 ที่เวลาเปลี่ยนไป ($T_{S1}^{t+\Delta t}$): ณ 15.30 น.	315.35	K
อุณหภูมิในถังที่ 1 ณ เวลาเริ่มต้น (T_{S1}^t): ณ 10.50 น.	304.15	K
พลังงานความร้อนของถังเก็บน้ำร้อนที่ 1 (Q_{S1})	46,894.4 / 1,000	MJ
<u>ปริมาณความร้อนในถังเก็บน้ำร้อนที่ 2 (ช่วงเวลาที่ผลิตความร้อนตั้งแต่ 09.30 - 14.30 น.)</u>		
ขนาดของถังเก็บน้ำร้อนที่ 2 (M_2)	2,500	kg
ค่าความจุความร้อนจำเพาะของน้ำ (C_{pw})	4.187	kJ/kg·K
อุณหภูมิในถังเก็บน้ำร้อนที่ 2 ที่เวลาเปลี่ยนไป ($T_{S2}^{t+\Delta t}$): ณ 14.30 น.	328.75	K
อุณหภูมิในถังที่ 2 ณ เวลาเริ่มต้น (T_{S2}^t): ณ 09.30 น.	311.85	K
พลังงานความร้อนของถังเก็บน้ำร้อนที่ 2 (Q_{S2})	176,900.8 / 1,000	MJ

5. ผลการประเมินพลังงาน ความเข้มข้นทางคาร์บอนรายปี และประเมินเศรษฐศาสตร์

ผลการวิเคราะห์ดังรูปที่ 9 แสดงให้เห็นว่าช่วงที่รังสีอาทิตย์มีค่าสูงเกิดขึ้นในเดือนมีนาคมมีค่าเท่ากับ 194.4 kWh/m^2 เป็นช่วงที่ท้องฟ้าโปร่งใสทำให้ความเข้มข้นรังสีอาทิตย์มีค่าสูง ขณะที่ค่าต่ำสุดเกิดขึ้นในเดือนกันยายนเท่ากับ 131.4 kWh/m^2 และมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 157.51 kWh/m^2 จากค่าเฉลี่ยความเข้มข้นรังสีอาทิตย์ของจังหวัดเชียงใหม่ นำมาคำนวณพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้จากระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ และปริมาณการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจก ปริมาณพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้มีความสัมพันธ์โดยตรงกับค่าความเข้มข้นรังสีอาทิตย์ที่ตกกระทบ โดยเดือนมีนาคมให้ค่าพลังงานไฟฟ้าสูงที่ 778.52 kWh สามารถลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกได้มากที่สุด $389.18 \text{ kgCO}_2\text{eq}$ ขณะที่เดือนกันยายนซึ่งเป็นช่วงฤดูฝนมีค่าต่ำสุดอยู่ที่ 526.30 kWh และ $263.10 \text{ kgCO}_2\text{eq}$ และมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 630.89 kWh และ $377.65 \text{ kgCO}_2\text{eq}$ คิดตลอดทั้งปีระบบสามารถผลิตไฟฟ้าได้รวม $7,570.63 \text{ kWh/ปี}$ และลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกได้รวม $3,784.56 \text{ kgCO}_2\text{eq/ปี}$



รูปที่ 9 ค่าความเข้มข้นรังสีอาทิตย์ พลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้ และการลดความเข้มข้นของปริมาณคาร์บอน

ตารางที่ 6 ผลการประเมินความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์

รายละเอียด	เงินลงทุน (บาท)	ผลประโยชน์ของค่าใช้จ่าย ด้านพลังงาน : E_{savi} (บาท/ปี)	ระยะเวลา คืนทุน : PB (ปี)
1. แผง Solar PVT จำนวน 8 แผง	80,000		
2. ค่าอินเวอร์เตอร์และค่าติดตั้งระบบทางไฟฟ้า	60,800		
3. ค่าติดตั้งระบบทางความร้อน ประกอบด้วย ถังน้ำร้อนพร้อมฉนวน บิ๊มน้ำร้อน ระบบควบคุม ระบบท่อน้ำร้อน และค่าติดตั้งระบบ	66,080	37,626.1	5.50
รวมเงินลงทุนทั้งหมด (Inv)	206,880		

จากตารางที่ 6 แสดงรายละเอียดการลงทุนในการติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าและความร้อนด้วยแผง Solar PVT จำนวน 8 แผง พร้อมด้วยอุปกรณ์ประกอบ ได้แก่ อินเวอร์เตอร์และอุปกรณ์ติดตั้งระบบไฟฟ้า รวมถึงระบบควบคุมความร้อน ซึ่งประกอบด้วยถังเก็บน้ำร้อน และอุปกรณ์ควบคุมระบบการทำงานต่าง ๆ โดยมีมูลค่าการลงทุนรวมทั้งหมด 206,880 บาท ผลการคำนวณพบว่า ระบบดังกล่าวสามารถช่วยประหยัดค่าใช้จ่ายด้านพลังงานได้ประมาณ 37,626.1 บาทต่อปี มีระยะเวลาคืนทุนเท่ากับ 5.50 ปี

สรุปผลการศึกษา

ระบบควบคุมและมอเตอร์อุณหภูมิในบ่อเลี้ยงจิ้งหรีดที่พัฒนาขึ้น ใช้พลังงานจากระบบผลิตไฟฟ้าและความร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ขนาด 550 W จำนวน 8 panel มีพื้นที่รับแสง $2.57 \text{ m}^2/\text{panel}$ ร่วมกับถังเก็บน้ำร้อนขนาด 1,000 L และปั๊มความร้อนขนาด $10.8 \text{ kW}_{\text{th}}$ ซึ่งเชื่อมต่อกับถังเก็บน้ำร้อนขนาด 2,500 L เพื่อจ่ายน้ำร้อนไปยังเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่ติดตั้งในบ่อเลี้ยงจิ้งหรีดจำนวน 20 บ่อ โดยมีเป้าหมายเพื่อควบคุมอุณหภูมิให้อยู่ในช่วง $28 - 30^\circ\text{C}$ พบว่าระบบพลังงานแสงอาทิตย์สามารถผลิตพลังงานความร้อน 48.6 MJ/day และผลิตพลังงานไฟฟ้า 19.5 kWh/day ซึ่งช่วยลดการใช้พลังงานรวมลงได้ 41.5 % ขณะที่ปั๊มความร้อนสามารถผลิตความร้อนสูงสุด 187.2 MJ/day ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่ใช้พลังงานมากที่สุดในระบบ

ระบบควบคุมอุปกรณ์ทั้งหมดทำงานผ่านโมดูล Tuya ที่เชื่อมต่อกับแพลตฟอร์ม Home Assistant เพื่อรวบรวมและแสดงผลข้อมูลแบบเรียลไทม์ในแดชบอร์ดเดียว สามารถตรวจสอบสถานะอุปกรณ์และพลังงานได้อย่างต่อเนื่อง ผลการสอบเทียบเซนเซอร์ Tuya แสดงความแม่นยำสูงเมื่อเทียบกับเครื่องมือมาตรฐาน ($R^2 > 0.99$) โดยมีค่า RMSE 0.496°C และ MAPE 1.67 % สำหรับอุณหภูมิ และ RMSE 0.0295 kW และ MAPE 1.45 % สำหรับพลังงานไฟฟ้า สะท้อนถึงความน่าเชื่อถือของระบบที่พัฒนาและสอดคล้องกับสมมติฐานการวิจัย

เมื่อเปรียบเทียบแพลตฟอร์มควบคุมพบว่า Tuya ร่วมกับ Home Assistant เหมาะสมที่สุดสำหรับฟาร์มชุมชน เนื่องจากมีต้นทุนต่ำ ใช้งานง่าย และเกษตรกรสามารถบำรุงรักษาได้เอง ผลการวิเคราะห์ศักยภาพการผลิตไฟฟ้าในพื้นที่เชียงใหม่พบว่าระบบสามารถผลิตไฟฟ้าได้ $7,570.63 \text{ kWh/ปี}$ ลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกได้ $3,784.56 \text{ kgCO}_2\text{eq}$ และมีระยะเวลาคืนทุน 5.5 ปี สะท้อนถึงความเป็นไปได้ทั้งด้านเทคนิค เศรษฐศาสตร์ และสิ่งแวดล้อม

นอกจากนั้น งานวิจัยนี้ยังสามารถต่อยอดได้ในอนาคต โดยเฉพาะการขยายระบบไปยังฟาร์มขนาดใหญ่ที่มีจำนวนบ่อมากกว่า 20 บ่อ ซึ่งเป็นโอกาสในการพัฒนาให้ระบบควบคุมทำงานแบบสมาร์ตฟาร์มเต็มรูปแบบ เช่น การแบ่งโซนควบคุมหรือการใช้การพยากรณ์อากาศร่วมกับการควบคุมอุณหภูมิ เพื่อเพิ่มความแม่นยำ ประสิทธิภาพการใช้พลังงาน และความสะดวกต่อการใช้งานของเกษตรกรในระดับเชิงพาณิชย์

กิตติกรรมประกาศ

คณะวิจัยขอขอบคุณ ทูสนับสนุนการศึกษาระดับบัณฑิตศึกษา ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2566 วิทยาลัยพลังงานทดแทนมหาวิทยาลัยแม่โจ้ ขอขอบคุณ สำนักงานพัฒนาการวิจัยการเกษตร (องค์การมหาชน) ที่สนับสนุนทุนวิจัย ปีงบประมาณ พ.ศ. 2567 ภายใต้โครงการระบบควบคุมอุณหภูมิและสภาพอากาศเพื่อเพิ่มผลผลิตในโรงเรือนเลี้ยงจิ้งหรีดด้วยเทคโนโลยีผลิตน้ำร้อนและไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับปั๊มความร้อน ขอขอบคุณ ฟาร์มจิ้งหรีดกวินิดา อำเภอสันกำแพง จังหวัดเชียงใหม่ ที่เอื้อเฟื้อสถานที่ในการศึกษา ขอขอบคุณหน่วยวิจัยด้านพลังงานและสิ่งแวดล้อมอัจฉริยะ วิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยแม่โจ้ ที่สนับสนุนอุปกรณ์ที่ใช้การทำวิจัยในครั้งนี้

References

- Aavild, A.P., Rosenkrantz de Lasson, A., Moesgaard Andersen, C., Christensen, E., Moreschini, S., Hästbacka, D., Taibi, D. and Albano, M. (2024). *Distributed Home Automation with Home Assistant*. In Peltonen, E., Hyrynsalmi, S., Wagner, I., Rellermeyer, J. and Mohan, N. (Eds.), *IoT '24: Proceedings of the 14th International Conference on the Internet of Things* (pp. 206-212). <https://doi.org/10.1145/3703790.3703828>
- Anal, S. and Kaur, S. (2024). Live Data Monitoring in Industry. *International Journal for Research in Applied Science and Engineering Technology (IJRASET)*, 12(VI), 304-313. <https://doi.org/10.22214/ijraset.2024.63080>

- Araújo, T., Silva, L. and Moreira, A. (2020). Evaluation of Low-Cost Sensors for Weather and Carbon Dioxide Monitoring in Internet of Things Context. *IoT*, 1(2), 286-308. <https://doi.org/10.3390/iot1020017>
- Bar-Gill, S., Brynjolfsson, E. and Hak, N. (2024). Helping Small Businesses Become More Data-Driven: A FieldExperiment on eBay. *Management Science*, 70(11), 7345-7372. <http://doi.org/10.2139/ssrn.4400425>
- G, K., Ediga, P., S, A., P, A., T, S., Mittal, A., Rajvanshi, S. and Habelalmateen, M.I. (2024). Smart Energy Management: Real-Time Prediction and Optimization for IoT-Enabled Smart Homes. *Cogent Engineering*, 11(1). <https://doi.org/10.1080/23311916.2024.2390674>
- Hassan, S.I., Alam, M.M., Illahi, U., Al Ghamdi, M.A., Almotiri, S.H., and Su'ud, M.M. (2021). A Systematic Review on Monitoring and Advanced Control Strategies in Smart Agriculture. *IEEE Access*, 9, 32517-32548. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3057865>
- Huang, H., Yi, J., Gao, J., Liu, P., Meng, L., and Zou, H. (2023). Design of Smart Laboratory System Based on Home Assistant. *14th International Conference on Mechanical and Aerospace Engineering (ICMAE)*, 575-580. <https://doi.org/10.1109/ICMAE59650.2023.10424532>.
- Islam, M.T., Azad, M.S., Ahammed, M.S., Rahman, M.W., Azad, M.M., Nasir, M.K. (2022). *IoT Enabled Virtual Home Assistant Using Raspberry Pi*. In Majhi, S., Prado, R.P.d., Dasanapura Nanjundaiah, C. (Eds.), *Distributed Computing and Optimization Techniques. Lecture Notes in Electrical Engineering*, Vol. 903. Springer, Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-19-2281-7_52
- Koponen, P., Ikäheimo, J., Koskela, J., Brester, C. and Niska, H. (2020). Assessing and Comparing Short Term Load Forecasting Performance. *Energies*, 13(8), <https://doi.org/10.3390/en13082054>
- Maity, A.K., Darshan, D. and Chauhan, K. (2024, November). IoT-Based Industrial Equipment Monitoring System: Revolutionizing Maintenance through Smart Data Analytics. *3rd International Conference on Optimization Techniques in the Field of Engineering (ICOFE-2024)*. <https://doi.org/10.2139/ssrn.5065523>
- Mansattha, M., Dao, H. and Jikaraji, A. (2023). Smart Meter Design for Energy Consumption Monitoring of Residential Premises. *Journal of Applied Research on Science and Technology (JARST)*, 22(2), 250745-250745. <https://ph01.tci-thaijo.org/index.php/rmutt-journal/article/view/250745/170681>
- Moon, K.A., Kim, S.B., Choi, H.U. and Choi, K.H. (2024). Experimental Study on the Heat Pump Performance Combined with Dual-Purpose Solar Collector. *Energies*, 17(12). <https://doi.org/10.3390/en17123038>
- Naidu, G.G.S., Patnaik, R.K., Kumar, R.Y. and Viswas, N. (2024). An Analysis of Energy Monitoring Solutions for Smart Home Applications. *International Research Journal of Modernization in Engineering Technology and Science*, 6(11), 5581-5588. https://www.irjmets.com/uploadedfiles/paper/issue_11_november_2024/64692/final/fin_irjmets1732986336.pdf
- Natale, C., Dongellini, M., Naldi, C. and Morini, G.L. (2025). Evaluation of the Seasonal Energy Performance of a Dual-Source Heat Pump Through Dynamic Experimental Tests. *Energies*, 18(10). <https://doi.org/10.3390/en18102532>
- Omia, E., Bae, H., Park, E., Kim, M.S., Baek, I., Kabenge, I. and Cho, B.K. (2023). Remote Sensing in Field Crop Monitoring: A Comprehensive Review of Sensor Systems, Data Analyses and Recent Advances. *Remote Sensing*, 15(2). <https://doi.org/10.3390/rs15020354>

- Phaphan, W. and Phutthamat, W. (2023). The Comparison of Forecasting Models for Total Premiums of Life Insurance Companies in Thailand. *Huachiew Chalermprakiet Science and Technology Journal*, 9(2), 64-74. <https://ph02.tci-thaijo.org/index.php/scihcu/article/view/249738/169825>
- Salee, S., Wannaphrom, W., Ngandee, A., Krudngern, S., Thongpron, J. and Maungjai, W. (2020). The Monitoring for Control and Analysis of Electrical Energy used in Agricultural Production. Case Study of Product Building, Thung Luang Royal Project Foundation. *Journal of Agricultural Technology Research*, 3(1), 77-90. <https://so04.tci-thaijo.org/index.php/JIT/article/view/242010>
- Siswoyo, A. (2025). Optimization of Temperature Sensor Selection for Incubators: Real-Time Accuracy Analysis of DHT22, LM35, and DS18B20 in Controlled Environment Simulations. *Internet of Things and Artificial Intelligence Journal*, 5(1). <https://doi.org/10.31763/iota.v5i1.877>
- Suwannapong, C. and Chaiyong, W. (2015). The Application of Wireless Sensor Network to Monitor and Identify the Position of Beef Cattle in the Livestock Production. *Farm Engineering and Automation Technology Journal*, 1(1), 15-21. <https://ph02.tci-thaijo.org/index.php/featkku/article/view/175993>
- Suwannahong, P. (2018). *Dashboard Design for Data Analysis of Sale Promotion: A Case Study of a Commercial Bank* [Doctoral dissertation, Thammasat University]. Thammasat University Library. https://ethesisarchive.library.tu.ac.th/thesis/2018/TU_2018_6023036137_9545_10069.pdf
- Thaipreecha, W. and Puntusavase, K. (2023). Applying Dashboards for Manufacturing by Comparing Programs Used Between Google Data Studio and Microsoft Power BI. *Journal of Management Science Research, Surindra Rajabhat University*, 7(3), 39-53. <https://so02.tci-thaijo.org/index.php/jmsr/article/view/258426>
- Verma, Y., Verma, A., Chatterjee, S. and Sagar, P. (2024). *Remote Sensing Applications in Agriculture*. In Doggalli, G., Modi, R., Mistry, D.Y., Rathwa, M.K., and Mali, P.D. (Eds.), *Recent Trends in Agriculture* Vol. 13. (pp. 159-180). Integrated Publications.
- Wanchupela, N. and Polvongsri, S. (2021). Size and Type Optimization of Solar Photovoltaic Thermal Hybrid Assisted Heat Pump in Slaughterhouse. *Engineering Journal of Chiang Mai University*, 28(1), 127-140. <https://ph01.tci-thaijo.org/index.php/EngJCMU/article/view/244072/166124>
- Zhang, X., Zhang, T., Young, A.A. and Li, X. (2014). Applications and Comparisons of Four Time Series Models in Epidemiological Surveillance Data. *Plos one*, 9(2). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0088075>

ฤทธิ์ของพืชสมุนไพรในการควบคุมหอยทากยักษ์แอฟริกา (*Achatina fulica*) Toxicological Effects of Medicinal Plants for Controlling the Giant African Snail (*Achatina fulica*)

เดือนเพ็ญ วงศ์สอน^{1*} พรลภัส บอกสันเทียะ¹ และจิรวิทย์ เย็นทรวง¹

Duanpen Wongsorn^{1*} Pornlapat Boksanthia¹ and Jirawit Yensuang¹

Received: July 6, 2025; Revised: November 29, 2025; Accepted: December 1, 2025

บทคัดย่อ

หอยทากยักษ์แอฟริกา (Giant African Snail, GAS) เป็นศัตรูพืชที่ทำลายพืชเศรษฐกิจหลายชนิด การวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาประสิทธิภาพของสมุนไพรในการควบคุมหอยทากยักษ์แอฟริกา ดำเนินการในสภาพห้องปฏิบัติการ โดยการนำสมุนไพร จำนวน 9 ชนิด ได้แก่ กากชา (*Camellia oleifera*) กากกาแฟ (*Coffea* spp.) มะคำดีควาย (*Sapindus rarak*) เมล็ดสะเดา (*Azadirachta indica*) ใบหมี่ (*Litsea glutinosa*) ฝักส้มป่อย (*Acacia concinna*) เมล็ดสบู่ดำ (*Jatropha curcas*) ยาสูบ (*Nicotiana tabacum*) และชะเอมเทศ (*Glycyrrhiza glabra*) มาทดสอบควบคุมหอยทากยักษ์แอฟริกา ด้วยการใส่รูปแบบผงและสารสกัด (10%w/v) วางแผนการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ (Completely Randomized Design, CRD) หลังการทดสอบ 48 ชั่วโมง พบว่าการใช้มะคำดีควายทั้งแบบผงและสารสกัดมีการตายของหอยทากยักษ์แอฟริกามากที่สุดเท่ากับ 73.33 % และ 80 % รองลงมาและไม่แตกต่างทางสถิติ ($p>0.05$) กับการใช้กากชา (70 % สำหรับการใส่แบบผง และ 76.67 % สำหรับการใส่แบบสารสกัด) และยาสูบที่มีการตาย 70 % ทั้งการใส่แบบผงและสารสกัด ส่วนในกลุ่มควบคุม กากกาแฟ และเมล็ดสบู่ดำ ไม่พบการตายของหอยทาก จากการศึกษาสรุปได้ว่า มะคำดีควาย กากชา และยาสูบ สามารถนำไปใช้ในการควบคุมหอยทากยักษ์แอฟริกาได้ ซึ่งเป็นอีกทางเลือกในการกำจัดหอยศัตรูพืชต่อไป

คำสำคัญ : หอยทาก; สมุนไพร; มะคำดีควาย; กากชา; ยาสูบ

¹ คณะนวัตกรรมและเทคโนโลยีการเกษตร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน

¹ Faculty of Agricultural Innovation and Technology, Rajamangala University of Technology Isan

* Corresponding Author, Tel. 06 4541 4151, E - mail: duanpen.wo@rmuti.ac.th

Abstract

The Giant African Snail (GAS, *Lissachatina fulica*) is a plant pest that damages various economic crops. This study evaluated the molluscicidal efficacy of nine medicinal plant derivatives against GAS under controlled laboratory conditions. The tested materials included: tea seed cake (*Camellia oleifera*), ground coffee (*Coffea* spp.), soap berry (*Sapindus rarak*), neem seed (*Azadirachta indica*), Indian laurel leaf (*Litsea glutinosa*), soap pod (*Acacia concinna*), physic nut seed (*Jatropha curcas*), tobacco (*Nicotiana tabacum*), and licorice root (*Glycyrrhiza glabra*). A Completely Randomized Design (CRD) was employed to assess two application methods: dry powdered formulations and 10% (w/v) ethanol extracts. After a 48-hour exposure period, soap berry exhibited the highest mortality rates, achieving 73.33 % (powder) and 80 % (extract). However, these values did not differ significantly ($p>0.05$) from the efficacy of tea seed cake (70 % powder, 76.67 % extract) or tobacco (70 % for both formulations). In contrast, no significant molluscicidal activity was detected in the negative control, ground coffee, or physic nut seed treatments. These results demonstrate that soap berry, tea seed cake, and tobacco exhibit promising molluscicidal properties against GAS, suggesting their potential as eco-friendly alternatives for integrated pest management (IPM) strategies.

Keywords: Giant African Snail; Medicinal Plants; Soap Berry; Tea Seed Cake; Tobacco

บทนำ

หอยทากยักษ์แอฟริกา (Giant African Snail, *Achatina fulica* Bowdich) เป็นหอยทากบกที่มีขนาดใหญ่ เป็นศัตรูพืชอันตรายที่นำเข้ามาจากต่างประเทศ หอยทากยักษ์แอฟริกากินอาหารทั้งพืชที่มีชีวิตและพืชที่เน่าเสีย และสามารถกินพืชอาหารได้มากกว่า 500 ชนิด ประกอบด้วย พืชผักต่าง ๆ ผลไม้ พืชไร่ พืชสวน และพืชสมุนไพร (Mohansingh, 2019; Choubisa, 2025) มักพบการระบาดของหอยทากยักษ์แอฟริกาในสภาพพื้นที่ที่มีความชื้นสูง หรือมีน้ำขังแฉะ พบระบาดมากในช่วงหน้าฝน หอยทากเข้าทำลายพืชโดยการกัดกินใบอ่อน หน่อ ดอก ราก และลำต้น หอยทากยักษ์แอฟริกาออกหากินในเวลากลางคืน ส่วนตอนกลางวันจะหลบซ่อนอยู่ในซอกที่ชื้นและเย็น อีกทั้งยังสามารถปรับตัวให้อยู่ในถิ่นอาศัยได้ดี และแพร่กระจายได้รวดเร็ว (St. John's, 2022) นอกจากจะก่อให้เกิดความสูญเสียทางด้านความหลากหลายทางชีวภาพ และด้านเกษตรกรรมแล้ว หอยทากยักษ์แอฟริกายังเป็นโฮสต์ตัวกลางของหนอนพยาธิตัวกลมกว่า 11 ชนิด ซึ่งก่อให้เกิดโรคทั้งในคนและสัตว์ เช่น เป็นโฮสต์ตัวกลางของพยาธิปอดหนู (*Angiostrongylus cantonensis*) หรือโรคพยาธิหอยโข่ง (Angiostrongyliasis) เมื่อเชื้อถ่ายทอดมาสู่คนก่อให้เกิดโรคเยื่อหุ้มสมองอักเสบ (Eosinophilic Meningitis) (Silva et al., 2022)

การป้องกันกำจัดหอยทากยักษ์แอฟริกามีการใช้หลาย ๆ วิธี เช่น การใช้ล่อด้วยมะละกอล่อหอยทากแล้วเก็บตัวหอยทากมาแช่ในน้ำเกลือความเข้มข้น 25 % การไถพรวนที่ลึกเพื่อทำลายไข่ของหอยทาก และการหลีกเลี่ยงการปลูกไม้เลื้อยทรงพุ่มที่เป็นที่หลบซ่อนของหอยทาก ตลอดจนการใช้สารเคมี (2.5 % Metaldehyde) เป็นต้น (Sreenivasa et al., 2019) และการใช้ Metaldehyde มาผสมกับรำข้าวสาลีและไซรัป แล้วนำไปเป็นเหยื่อล่อหอยทาก ส่งผลให้หอยทากตายสูงสุดถึง 86.66 % (Gadekar et al., 2024) ซึ่ง Paul et al. (2016) ได้รายงานว่านอกจาก Metaldehyde แล้ว Crystal Salt และ Bleaching Powder ก็สามารถนำมากำจัดหอยทากยักษ์แอฟริกาที่อยู่บริเวณแปลงพริกได้ และยังส่งผลให้พริกมีผลผลิตเพิ่มขึ้นมากกว่าการใช้สารเคมี อย่างไรก็ตาม ถึงแม้ว่า Metaldehyde จะเป็นสารเคมีที่มีประสิทธิภาพในการกำจัดหอยทากก็ตาม สารนี้ยังเป็นพิษเฉียบพลันกับเด็กที่อายุต่ำกว่า 3 ขวบ และสัตว์เลี้ยง โดยเริ่มแรกจะมีอาการทางระบบทางเดินอาหาร จากนั้นจะมีอาการทางระบบประสาท อาเจียน ท้องเสีย

อาการเดินเซ ตัวสั่น ชัก และอุณหภูมิร่างกายสูง เป็นต้น (Ruiz-Suárez et al., 2014) การใช้พืชสมุนไพรจึงเป็นทางเลือกหนึ่งที่ปลอดภัยต่อสภาพแวดล้อมและสิ่งมีชีวิต ซึ่งสมุนไพรบางชนิดนอกจากจะมีฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ และยังมีสารฟลาโวนอยด์ที่เป็นสารประกอบในกลุ่มฟีนอลิกที่มีคุณสมบัติในการต้านออกซิเดชัน (Rattanahemboot et al., 2022) และยังมีสมุนไพรหลายชนิดที่มีฤทธิ์ในการกำจัดหอยทากยักษ์แอฟริกา มีการศึกษาอย่างต่อเนื่องในต่างประเทศ ตัวอย่างเช่น Koysap et al. (2022) รายงานว่าสารสกัดจากมะคำดีควาย (*Sapindus rarak*) ออกฤทธิ์ต่อหอยทากยักษ์แอฟริกาได้ภายใน 4 ชั่วโมง และทำให้หอยทากตายได้ถึง 90 % ภายในเวลา 72 ชั่วโมง อีกทั้ง Pallavi et al. (2018) ยังพบว่าการใช้เกลือดิบผสมกับผงฝักส้มป่อย อัตราส่วน 8:1 สามารถป้องกันหอยทากยักษ์แอฟริกาเข้าทำลายพืชได้แต่ไม่สามารถกำจัดหอยทากแอฟริกาได้ ในขณะที่ Selvi et al. (2015) รายงานว่าอนุภาคซิลิกาที่เคลือบด้วยสารสกัดและผงสะเดา (*Azadirachta indica*) มีฤทธิ์ในการควบคุมหอยทากยักษ์แอฟริกาได้สูงที่สุด รองลงมาคือ ยาสูบ (*Nicotiana tabacum*) และหยีน้ำ (*Pongamia pinnata*) ตามลำดับ ส่วนสารสกัดจากพืชสมุนไพรและผงแห้งที่ไม่มีซิลิกามีผลในการขับไล่หอยทากยักษ์แอฟริกาเท่านั้น นอกจากนี้ Fajar and Beny (2020) รายงานว่าสารสกัดจากใบหนาด (*Blumea balsamifera*) หัวกลอย (*Discorea hispida*) ทางไหล (*Derris eliptica*) และหมากสง (*Areca catechu*) มีฤทธิ์ในการกำจัดหอยทากยักษ์แอฟริกา โดยสารสกัดจากหัวกลอยมีการตายของหอยทากยักษ์แอฟริกาสูงที่สุด (75 %) และมีค่า LC₉₅ ต่ำที่สุด (80.63 กรัม/ลิตร) ในขณะที่หมากสงมีการตายของหอยทากน้อยที่สุด (49.75 %) จากข้อมูลข้างต้นจะเห็นว่าสมุนไพรหลายชนิดมีฤทธิ์ในการกำจัดหอยทากศัตรูพืช และยังปลอดภัยต่อผู้ใช้และผู้บริโภค สมุนไพรส่วนใหญ่มีกลไกการออกฤทธิ์ที่ซับซ้อน ทั้งการฆ่า การขับไล่ การยับยั้งการกินอาหาร และมีผลต่อกระบวนการเจริญเติบโตของศัตรูพืช จึงทำให้ศัตรูพืชปรับตัวและดื้อยาได้ยากกว่าสารเคมี ซึ่งออกฤทธิ์เฉพาะจุด (Joseph and Sujatha, 2012) งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาประสิทธิภาพของสมุนไพรที่มีฤทธิ์ในการกำจัดหอยทากยักษ์แอฟริกาในสภาพห้องปฏิบัติการ เพื่อเป็นแนวทางในการนำไปประยุกต์ใช้ในสภาพแปลงทดลองและใช้กำจัดหอยศัตรูพืชชนิดอื่นต่อไป

วัสดุ อุปกรณ์ และวิธีการ

1. การเตรียมสมุนไพร รวบรวมสมุนไพรที่มีรายงานถึงฤทธิ์ในการกำจัดหอย (ตารางที่ 1) จากนั้นนำมาผึ่งในที่ร่ม 48 ชั่วโมง และนำไปอบในตู้อบลมร้อน (Hot Air Oven) อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 48 ชั่วโมง หรือจนกว่าสมุนไพรจะแห้ง นำมาบดให้ละเอียดด้วยเครื่องบด กรองผ่านตะแกรง เบอร์ 20 เมส ผงสมุนไพรส่วนหนึ่งนำมาสกัดด้วยเอทิลแอลกอฮอล์ (ความเข้มข้น 70 %) โดยใช้ผงสมุนไพร 10 กรัมต่อเอทิลแอลกอฮอล์ 100 มิลลิลิตร (10:100 น้ำหนัก/ปริมาตร) กวนให้เข้ากันทิ้งไว้ 24 ชั่วโมง นำสารสกัดมากรองด้วยเครื่องกรองสุญญากาศ นำสารสกัดสมุนไพรที่ได้ไปทำการระเหยตัวทำละลายออกด้วยเครื่องระเหยแบบลดความดันภายใต้สุญญากาศ (Rotary Evaporator) ภายใต้ความดัน 70 มิลลิบาร์ ที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส สารสกัดสมุนไพรที่ได้นำมาเก็บในขวดสีชา ก่อนนำไปใช้ทดสอบนำมาปรับความเข้มข้นให้ได้ 10% (v/v) โดยนำสารสกัด 10 มิลลิลิตร มาละลายในน้ำกลั่นนิ่งฆ่าเชื้อ 100 มิลลิลิตร

ตารางที่ 1 รายละเอียดสมุนไพร และส่วนที่นำมาใช้ในการทดสอบ

ชนิดสมุนไพร	ชื่อวิทยาศาสตร์	ส่วนที่นำมาใช้
กากชา (Tea Seed Cake)	<i>Camellia oleifera</i>	กาก (ส่วนที่เหลือจากการสกัดน้ำมัน)
กากกาแฟ (Gound Coffee)	<i>Coffea</i> spp.	กาก (ส่วนที่เหลือจากเมล็ดกาแฟที่ผ่านการสกัดน้ำกาแฟออกมาแล้ว)
มะคำดีควาย (Soap Berry)	<i>Sapindus rarak</i>	ผลแก่
สะเดา (Neem)	<i>Azadirachta indica</i>	เมล็ด
หมี/หมีเหม็น (Indian Laurel)	<i>Litsea glutinosa</i>	ใบ

ตารางที่ 1 รายละเอียดสมุนไพร และส่วนที่นำมาใช้ในการทดสอบ (ต่อ)

ชนิดสมุนไพร	ชื่อวิทยาศาสตร์	ส่วนที่นำมาใช้
สับป่อย (Soap Pod)	<i>Acacia concinna</i>	ฝัก
สบู่ดำ (Physic Nut)	<i>Jatropha curcas</i>	เมล็ด
ยาสูบ (Tobacco)	<i>Nicotiana tabacum</i>	ใบ
ชะเอมเทศ (Licorice)	<i>Glycyrrhiza glabra</i>	ราก

2. การเตรียมหอยทากยักษ์แอฟริกา เก็บรวบรวมหอยทากยักษ์แอฟริกาจากแหล่งต่าง ๆ นำมาเลี้ยงในบ่อซีเมนต์ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางปากบ่อ 80 เซนติเมตร ที่รองบ่อด้วยดินปลูกที่นึ่งฆ่าเชื้อแล้ว ความหนา 10 เซนติเมตร เพื่อเป็นที่หลบซ่อนของหอยทาก ให้อาหารด้วยเศษผัก ผลไม้ และใบมะละกอเป็นหลัก ปิดปากบ่อด้วยตาข่ายไนลอน เพื่อป้องกันการหลบหนีของหอยทาก ดำเนินการเพาะเลี้ยงเป็นเวลา 10 วัน ก่อนนำมาทดสอบ

3. การทดสอบฤทธิ์ของผงสมุนไพรในการกำจัดหอยทากยักษ์แอฟริกา นำกล่องพลาสติกขนาด 15 x 30 x 10 เซนติเมตร ที่มีดินปลูกปลอดเชื้อที่มีความชื้น 70 % เป็นวัสดุรองกล่อง จากนั้นนำผงสมุนไพรแต่ละชนิดจำนวน 20 กรัม มาโรยลงในกล่องให้สม่ำเสมอ นำหอยทากยักษ์แอฟริกาที่มีขนาดตัวสม่ำเสมอ มาแยกใส่ในกล่องจำนวน 10 ตัว/กล่อง ให้อาหารด้วยแตงกวาผ่าครึ่ง ปิดปากกล่องด้วยฝากล่องที่มีรูระบายอากาศ วางแผนการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ (Completely Randomized Design, CRD) ประกอบด้วย 10 กรรมวิธี ได้แก่ ผงสมุนไพรทั้ง 9 ชนิด (กากชา กากกาแฟ มะคำดีควาย เมล็ดสะเดา ใบหมี่ ฝักสับป่อย เมล็ดสบู่ดำ ยาสูบ และชะเอมเทศ) เปรียบเทียบกับชุดควบคุมที่ไม่ใช้สมุนไพรใด ๆ ทำการทดสอบกรรมวิธีละ 3 ซ้ำ แต่ละซ้ำใช้หอยทากจำนวน 10 ตัว หลังการทดสอบ 60 นาที สังเกตอาการของหอยทาก และตรวจสอบการตายของหอยทาก หลังการทดสอบ 24 และ 48 ชั่วโมง และนำมาคำนวณหาค่าเปอร์เซ็นต์การตายจากสูตร

$$\% \text{ การตาย} = \frac{\text{จำนวนหอยทากที่ตาย} \times 100}{\text{จำนวนหอยทากที่ทดสอบ}}$$

4. การทดสอบฤทธิ์ของสารสกัดสมุนไพรในการกำจัดหอยทากยักษ์แอฟริกา นำกล่องพลาสติกขนาด 15 x 30 x 10 เซนติเมตร ที่มีดินปลูกปลอดเชื้อที่มีความชื้น 70 % เป็นวัสดุรองกล่อง จากนั้นนำหอยทากยักษ์แอฟริกามาปล่อยลงในกล่องพลาสติก จำนวน 10 ตัว/กล่อง ให้อาหารด้วยแตงกวาผ่าครึ่ง ปิดปากกล่องด้วยฝากล่องที่มีรูระบายอากาศทิ้งไว้ประมาณ 60 นาที เพื่อให้หอยทากออกจากเปลือกเพื่อออกมาหาอาหาร จากนั้นนำสารสกัดจากพืชสมุนไพรแต่ละชนิดมาพ่นลงในกล่องพลาสติกให้ทั่วด้วยกระบอกฉีด (Foggy) ปริมาณ 50 มิลลิลิตร/กล่อง วางแผนการทดลองแบบ CRD ประกอบด้วย 10 กรรมวิธี ได้แก่ สารสกัดสมุนไพรทั้ง 9 ชนิด (กากชา กากกาแฟ มะคำดีควาย เมล็ดสะเดา ใบหมี่ ฝักสับป่อย เมล็ดสบู่ดำ ยาสูบ และชะเอมเทศ) เปรียบเทียบกับชุดควบคุมที่ไม่ใช้สมุนไพรใด ๆ ทำการทดสอบกรรมวิธีละ 3 ซ้ำ แต่ละซ้ำใช้หอยทากจำนวน 10 ตัว หลังการทดสอบ 60 นาที สังเกตอาการของหอยทาก และตรวจสอบการตายของหอยทากหลังการทดสอบ 24 และ 48 ชั่วโมง และนำมาคำนวณหาค่าเปอร์เซ็นต์การตายเช่นเดียวกับการทดสอบโดยใช้ผงสมุนไพร

5. การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ วิเคราะห์ความแปรปรวนทางสถิติ (Analysis of Variance) และเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยแต่ละกรรมวิธี โดยใช้ LSD (Least Significant Difference) ด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป SAS (Statistical Analysis System) Version 9.00 (SAS Institute Inc, 2006)

ผลการศึกษา

จากการทดสอบสมุนไพรในการควบคุมหอยทากยักษ์แอฟริกาโดยใช้ผงสมุนไพรโรยในกล่องทดสอบก่อนการปล่อยหอยทากลงในกล่องนั้น (ตารางที่ 2) จะสังเกตเห็นว่าในชุดควบคุม กากกาแฟ และเมล็ดสบู่ดำ หอยทากยังคงเดินได้ตามกล่องและกินอาหารปกติ ในขณะที่ในกล่องที่มีผงกากชาและมะคำดีควาย หอยทากจะมีการกระวนกระวายไต่หนีจากผงสมุนไพรขึ้นไปบนฝากล่องอย่างรวดเร็ว และปล่อยเมือกออกมาจำนวนมาก หอยทากหล่นจากฝากล่อง หยุดนิ่ง และหดตัวเข้าไปอยู่ในเปลือกหอย เมื่อเวลาผ่านไป 24 ชั่วโมง พบว่าหอยมีลักษณะแห้งเนื่องจากการสูญเสียน้ำออกมามาก ส่วนสมุนไพรชนิดอื่นหอยทากมีการปล่อยเมือกออกมาท่วมฝาและตายในที่สุด ส่วนการทดสอบด้วยการพ่นนั้นจะพบว่าหอยทากมีการตอบสนองเร็ว หอยทากคายเมือกออกมาท่วมฝาหอย หดตัว และตายในที่สุด

ตารางที่ 2 ลักษณะอาการของหอยทากยักษ์แอฟริกาหลังการทดสอบด้วยผงสมุนไพร

สมุนไพร	ลักษณะอาการของหอยทากหลังการทดสอบ
ชุดควบคุม	หอยทากไต่ตามข้างกล่องและฝากล่อง และกินอาหารปกติ
กากกาแฟ	หอยทากไต่ขึ้นฝากล่องอย่างรวดเร็ว ไม่กินอาหาร ปล่อยเมือกออกมาท่วมฝาหอย ตัวหอยหดเข้าไปในเปลือก
กากกาแฟ	หอยทากไต่ตามข้างกล่องและฝากล่อง และกินอาหารปกติ
มะคำดีควาย	หอยทากไต่ขึ้นฝากล่องอย่างรวดเร็ว ไม่กินอาหาร ปล่อยเมือกออกมาท่วมฝาหอย ตัวหอยหดเข้าไปในเปลือก และแห้งตาย
เมล็ดสะเดา	หอยทากไต่ขึ้นฝากล่องอย่างรวดเร็ว ไม่กินอาหาร ปล่อยเมือกออกมาท่วมฝาหอย ตัวหอยหดเข้าไปในเปลือก
ใบหมี	หอยทากไต่ขึ้นฝากล่องอย่างรวดเร็ว ไม่กินอาหาร ปล่อยเมือกออกมาท่วมฝาหอย ตัวหอยหดเข้าไปในเปลือก
ฝักส้มป่อย	หอยทากไต่ขึ้นฝากล่องอย่างรวดเร็ว ไม่กินอาหาร ปล่อยเมือกออกมาท่วมฝาหอย ตัวหอยหดเข้าไปในเปลือก
เมล็ดสบู่ดำ	หอยทากไต่ตามข้างกล่องและฝากล่อง และกินอาหารปกติ
ยาสูบ	หอยทากไต่ขึ้นฝากล่องอย่างรวดเร็ว ไม่กินอาหาร ปล่อยเมือกออกมาท่วมฝาหอย ตัวหอยหดเข้าไปในเปลือก
ชะเอมเทศ	หอยทากไต่ขึ้นฝากล่องอย่างรวดเร็ว ไม่กินอาหาร ปล่อยเมือกออกมาท่วมฝาหอย ตัวหอยหดเข้าไปในเปลือก และแห้งตาย

เมื่อนำผงสมุนไพรชนิดต่าง ๆ มาทดสอบในการกำจัดหอยทากยักษ์แอฟริกา (ตารางที่ 3) พบว่า หลังการทดสอบ 24 ชั่วโมง การใช้ผงยาสูบมีการตายของหอยทากยักษ์มากที่สุด (53.33 %) โดยไม่แตกต่างทางสถิติ ($p>0.05$) กับกากชา และมะคำดีควาย ที่มีการตายของหอยทากเท่ากับ 43.33 % และ 36.67 % ในขณะที่ชะเอมเทศมีการตายของหอยทากเพียง 16.67 % ส่วนสมุนไพรชนิดอื่น ๆ ไม่พบการตายของหอยทากยักษ์แอฟริกา หลังการทดสอบ 48 ชั่วโมง การใช้ลูกมะคำดีควาย ส่งผลให้หอยทากยักษ์มีการตายสูงที่สุด (36.67 %) แต่ไม่แตกต่างทางสถิติ ($p>0.05$) กับกากชา (26.67 %) และชะเอมเทศ (30 %) แต่แตกต่างทางสถิติ ($p<0.05$) กับเมล็ดสะเดา (6.67 %) ใบหมี (6.67 %) ฝักส้มป่อย (16.67 %) และยาสูบ (16.67 %) และเมื่อพิจารณาจากการตายสะสมจะเห็นว่า ลูกมะคำดีควายมีการตายสะสมของหอยทากยักษ์แอฟริกาสูงที่สุดเท่ากับ 73.33 % รองลงมาและไม่แตกต่างทางสถิติ ($p>0.05$) กับกากชา และยาสูบ ที่มีการตายของหอยทากยักษ์เท่ากัน (70 %) ส่วนในชุดควบคุมและการใช้กากกาแฟและเมล็ดสบู่ดำ ไม่พบการตายของหอยทากยักษ์ (0 %)

ตารางที่ 3 ฤทธิ์ของผงสมุนไพรต่อหอยทากยักษ์แอฟริกา

สมุนไพร	%การตาย (%±sd)		
	24 ชั่วโมง	48 ชั่วโมง	การตายสะสม
ชุดควบคุม (ไม่ใช้สารใด ๆ)	0.00±0.00 ^b	0.00±0.00 ^c	0.00±0.00 ^d
กากชา	43.33±25.17 ^a	26.67±20.82 ^{ab}	70.00±10.00 ^a
กากกาแฟ	0.00±0.00 ^b	0.00±0.00 ^c	0.00±0.00 ^d
มะค้ำดีควาย	36.67±20.82 ^a	36.67±20.82^a	73.33±11.55^a
เมล็ดสะเดา	0.00±0.00 ^b	6.67±5.77 ^c	6.67±5.77 ^{cd}
ใบหมี่	0.00±0.00 ^b	6.67±5.77 ^c	6.67±5.77 ^{cd}
ฝักส้มป่อย	0.00±0.00 ^b	16.67±5.77 ^{bc}	16.67±5.77 ^c
เมล็ดสบู่ดำ	0.00±0.00 ^b	0.00±0.00 ^c	0.00±0.00 ^d
ยาสูบ	53.33±15.28^a	16.67±15.28 ^{bc}	70.00±10.00 ^a
ชะเอมเทศ	16.67±5.77 ^b	30.00±10.00 ^{ab}	46.67±11.55 ^b
<i>P-value</i>	<0.0001	0.0036	<0.0001

หมายเหตุ: ตัวเลขที่มีตัวอักษรกำกับต่างกันในแต่ละแถวมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (LSD, $P < 0.05$)

sd = standard deviation

ในด้านการทดสอบสารสกัดจากสมุนไพรในการควบคุมหอยทากยักษ์แอฟริกันนั้น (ตารางที่ 4) หลังการทดสอบ 24 ชั่วโมง พบว่าการใช้สารสกัดจากกากชา ส่งผลให้มีการตายของหอยทากยักษ์สูงที่สุดเท่ากับ 66.67 % แต่ไม่แตกต่างทางสถิติ ($p > 0.05$) กับสารสกัดจากมะค้ำดีควาย (60 %) และสารสกัดจากยาสูบ (56.67 %) แต่แตกต่างทางสถิติ ($p < 0.05$) กับสารสกัดชะเอมเทศที่มีการตาย 26.67 % หลังการทดสอบ 48 ชั่วโมง สารสกัดจากชะเอมเทศมีการตายมากที่สุด (26.67 %) รองลงมาคือ สารสกัดจากมะค้ำดีควาย (20 %) ส่วนการตายสะสมการใช้สารสกัดจากมะค้ำดีควายมีค่าสูงที่สุดเท่ากับ 80 % รองลงมาและไม่แตกต่างกันทางสถิติ ($p > 0.05$) กับสารสกัดจากกากชา (76.67 %) และสารสกัดจากยาสูบ (70 %) แต่แตกต่างทางสถิติ ($p < 0.05$) กับสารสกัดสมุนไพรชนิดอื่น ๆ ในขณะที่ชุดควบคุม สารสกัดจากกากกาแฟ และสารสกัดจากเมล็ดสบู่ดำ ไม่พบการตายของหอยทากยักษ์แอฟริกา (0 %)

ตารางที่ 4 ฤทธิ์ของสารสกัดสมุนไพรต่อหอยทากยักษ์แอฟริกา

สมุนไพร	%การตาย (%±sd)		
	24 ชั่วโมง	48 ชั่วโมง	การตายสะสม
ชุดควบคุม (ไม่ใช้สารใด ๆ)	0.00±0.00 ^d	0.00±0.00 ^c	0.00±0.00 ^c
กากชา	66.67±5.77^a	10.00±0.00 ^{bc}	76.67±5.77 ^a
กากกาแฟ	0.00±0.00 ^d	0.00±0.00 ^c	0.00±0.00 ^c
มะค้ำดีควาย	60.00±10.00 ^a	20.00±10.00 ^{ab}	80.00±10.00^a
เมล็ดสะเดา	0.00±0.00 ^d	3.33±5.77 ^c	3.33±5.77 ^c
ใบหมี่	0.00±0.00 ^d	3.33±5.77 ^c	3.33±5.77 ^c
ฝักส้มป่อย	0.00±0.00 ^d	6.67±5.77 ^{bc}	6.67±5.77 ^c
เมล็ดสบู่ดำ	0.00±0.00 ^d	0.00±0.00 ^c	0.00±0.00 ^c
ยาสูบ	56.67±11.55 ^a	13.33±5.77 ^{abc}	70.00±10.00 ^a

ตารางที่ 4ฤทธิ์ของสารสกัดสมุนไพรต่อหอยทากยักษ์แอฟริกา (ต่อ)

สมุนไพร	%การตาย (%±sd)		
	24 ชั่วโมง	48 ชั่วโมง	การตายสะสม
ชะเอมเทศ	26.67±15.28 ^c	26.67±20.28 ^a	53.33±11.55 ^b
<i>P-value</i>	<0.0001	0.0061	<0.0001

หมายเหตุ: ตัวเลขที่มีตัวอักษรกำกับต่างกันในแนวดิ่งมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (LSD, $P < 0.05$)
 sd = standard deviation

สรุปและการอภิปรายผล

จากการทดสอบประสิทธิภาพของสมุนไพรในการกำจัดหอยทากยักษ์แอฟริกาในสภาพห้องปฏิบัติการ ทั้งการใช้รูปแบบผงและรูปแบบสารสกัดจะเห็นว่ามะคำดีควายมีฤทธิ์ในการกำจัดหอยทากยักษ์แอฟริกาได้ดีที่สุด รองลงมาคือ กากชาและยาสูบ สอดคล้องกับงานทดลองของ Koysap et al. (2022) ที่รายงานว่าสารสกัดจากมะคำดีควายมีฤทธิ์ในการฆ่าหอยทากยักษ์แอฟริกา ภายใน 4 ชั่วโมง และการใช้สารสกัดที่ความเข้มข้น 30 % มีผลให้หอยทากยักษ์ตายถึง 90 % ภายใน 72 ชั่วโมง เช่นเดียวกับ Huang et al. (2003) ได้รายงานว่าสารสกัดจากมะคำดีควายมีสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพที่มีผลต่อหอยเชอรี่ (*Pomacea canaliculata*) โดยสารสกัดความเข้มข้น 10 ppm สามารถกำจัดหอยเชอรี่ได้ 70 - 100 % และมีค่า LC_{50} (Lethal Concentration 50 % หรือความเข้มข้นที่ทำให้สัตว์ทดลองตาย 50 %) เท่ากับ 85 22 และ 17 ppm หลังการทดสอบ 24 48 และ 72 ชั่วโมง ตามลำดับ

นอกจากมะคำดีควายแล้ว กากชาที่จัดว่ามีประสิทธิภาพในการกำจัดหอยทากยักษ์แอฟริกาได้ดีเช่นกัน กากชาเป็นส่วนที่เหลือจากการสกัดน้ำมันออกแล้วและอุดมไปด้วยสารซาโปนิน (Saponin) ที่มีฤทธิ์ในการฆ่าหอยและสัตว์น้ำ Kijprayoon et al. (2014) รายงานว่าเมล็ดชาอุดมไปด้วยสาร Saponin เมื่อนำมาสกัดด้วยเมทานอลและนำไปทดสอบในการควบคุมหอยเชอรี่ (*P. canaliculata*) จะเห็นว่าสารสกัดมีฤทธิ์ในการฆ่าหอยเชอรี่ที่เข้าทำลายข้าวได้ โดยมีค่า LC_{50} เท่ากับ 0.66 ppm และการใช้สารสกัดที่ความเข้มข้น 12.50 15.63 และ 18.75 กิโลกรัม/เฮกตาร์ พบการตายของหอยเชอรี่ 100 % หลังการใช้เพียง 24 ชั่วโมง เช่นเดียวกับ Laymanivong et al. (2017) ที่พบว่าหลังการใช้สารสกัดจากเมล็ดชา 24 ชั่วโมง สามารถกำจัดหอยเชอรี่ได้ถึง 50 % โดยมีค่า LC_{50} เท่ากับ 0.001 มิลลิกรัม/ลิตร และค่า LC_{90} เท่ากับ 0.073 มิลลิกรัม/ลิตร นอกจากนั้น Wongsiri et al. (2023) รายงานว่าสารสกัดจากชา (*C. oleifera*) มีฤทธิ์ในการฆ่าหอยเชอรี่ได้สูงที่สุดเมื่อเทียบกับสารสกัดจากพืชชนิดอื่น เช่น รำเพย ดอกกรัก ผกากรอง แมงลักคา และพันชาด โดยมีค่า LC_{50} ต่ำสุดเท่ากับ 6.21 ppm อีกทั้ง Ibrahim et al. (2023) พบว่าสาร Saponin ที่สกัดจากเปลือกของต้น *Quillaja saponaria* สามารถกำจัดหอยทาก *Biomphalaria alexandrina* ได้ โดยมีค่า LC_{50} เท่ากับ 70.05 มิลลิกรัม/ลิตร

จากที่กล่าวมาข้างต้นจะเห็นว่าทั้งมะคำดีควายและกากชามีฤทธิ์ในการควบคุมหอยเชอรี่ได้ดี ทั้งนี้เนื่องจากสมุนไพรทั้งสองชนิดนี้มีสาร Saponin ที่เป็นสารออกฤทธิ์หลักในการฆ่าหอยทากยักษ์ สาร Saponins เป็นสาร Secondary Metabolite ที่สามารถซึมเข้าไปในเซลล์ของสิ่งมีชีวิตได้ ส่งผลให้เม็ดเลือดแดงแข็งตัว (Bissinger et al., 2014; Asgharian and Ojani, 2017) เมื่อสาร Saponin ซึมเข้าไปในเซลล์ของหอยส่งผลให้ปริมาณโปรตีนอัลบูมินและไขมันรวมในเนื้อเยื่อหอยลดลงอย่างมีนัยสำคัญเมื่อเปรียบเทียบกับหอยทากในกลุ่มควบคุม นอกจากนั้นสาร Saponin ยังไปทำลายเยื่อหุ้มเซลล์ ทำให้เซลล์มีการซึมผ่านได้มากขึ้น ส่งผลให้การไหลเวียนของน้ำและไอออนผิดปกติ (Augustin et al., 2011) อีกทั้งสาร Saponin นี้ยังส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงในเยื่อผิวของระบบย่อยอาหารต่อมย่อยอาหาร เหงือก และเท้าของหอย เกิดการสูญเสียเซลล์ การเสื่อมของเซลล์เยื่อผิว เกิดเซลล์ผลิตเมือกเพิ่มขึ้นในระบบย่อยอาหารและพบการเพิ่มขึ้นของจำนวนเม็ดเลือดดำใน Basophilic Cells เกิดการขยายตัวของเซลล์ย่อยอาหาร

เซลล์กล้ามเนื้อของเท้ามีการสูญเสียเนื้อสัมผัส ด้วยคุณสมบัติของสาร Saponin ทำให้เกิดฟอง เมื่อหอยสัมผัสกับสารนี้จะทำให้หอยสร้างเมือกส่วนเกินออกมามากขึ้น เมือกจะถูกปล่อยออกมาเพื่อป้องกันการสัมผัสโดยตรงระหว่างสารระคายเคืองและเยื่อผิวของหอยทาก ซึ่งทำหน้าที่เป็นการตอบสนองต่อความเครียด (Francis et al., 2002) ดังนั้นเมื่อหอยทากยักษ์แอฟริกาสัมผัสกับกากชาและมะคำดีควาย และสมุนไพรรชนิดอื่นจึงปล่อยเมือกออกมาท่วมตัว ส่งผลให้ปริมาณน้ำ ไอออน และคาร์โบไฮเดรตสูญเสียไปพร้อมกับเมือกที่ไหลออกมา ทำให้เกิดภาวะขาดน้ำและสูญเสียพลังงาน ซึ่งนำไปสู่การเสียชีวิตของหอยได้ (Triebkorn et al., 1998)

นอกจากมะคำดีควายและกากชาแล้ว ยาสูบก็จัดได้ว่ามีประสิทธิภาพสูงในการกำจัดหอยทากแอฟริกา ในยาสูบมีสารออกฤทธิ์สำคัญคือ นิโคติน (Nicotine) นิยมนำมาใช้กำจัดแมลง โดยมีกลไกการออกฤทธิ์ที่ส่งผลต่อระบบประสาทของแมลง ทำให้แมลงเกิดอาการชักและเสียชีวิตได้ สารนิโคตินยับยั้ง Acetylcholine (ACh) ในแมลง ซึ่งเป็นสารสื่อประสาทที่สำคัญในการทำงานของระบบประสาทส่วนกลางและกล้ามเนื้อ นิโคตินจะไปจับกับตัวรับ ACh ทำให้เกิดการกระตุ้นระบบประสาทอย่างต่อเนื่อง นำไปสู่ภาวะกล้ามเนื้อกระตุก ชัก และเสียชีวิตในที่สุด (Human et al., 2014; Perry et al., 2015) เมื่อไม่นานมานี้ Guo et al. (2023) พบว่าสารสกัดจากใบยาสูบ ความเข้มข้น 1 กรัม/ลิตร ทำให้หอยเชอรี่ (*P. canaliculata*) ตายได้มากกว่า 90 % ในระยะเวลา 4 วัน โดยการอยู่รอดของหอยขึ้นอยู่กับขนาดของหอย ความเข้มข้นของสารสกัด ระยะเวลาที่หอยเชอรี่สัมผัสกับสารสกัด หอยเพศผู้อ่อนแอต่อสารสกัดมากกว่าหอยเพศเมีย และเมื่อใช้ความเข้มข้น 0.5 กรัม/ลิตร มีผลให้การผสมพันธุ์และการกินอาหารของหอยลดลง และที่ความเข้มข้น 0.2 กรัม/ลิตร มีผลยับยั้งการเจริญของตัวอ่อนหอยด้วย เช่นเดียวกับ Tangkoonboribun and Sassanarakkit (2009) ที่พบว่าการใช้ยาสูบ 1,562.5 กิโลกรัม/เฮกตาร์ ในนาข้าวสามารถกำจัดหอยเชอรี่ได้ 100 % ในระยะเวลา 2 วัน นอกจากนี้ยังพบว่าการใช้ยาสูบยังช่วยเพิ่มค่า การนำไฟฟ้า (Electrical Conductivity) Biological Oxygen Demand ความต้องการออกซิเจนทางชีวเคมี (Chemical Oxygen Demand) ในน้ำ และช่วยเพิ่มค่า Organic Matter, Available Phosphorus, Exchangeable Potassium, Calcium และ Magnesium รวมทั้งส่งเสริมการเจริญเติบโตของข้าวโดยสารนิโคตินไม่ส่งผลเสียต่อข้าว ในส่วนของชะเอมเทศนั้นจะเห็นว่าสามารถควบคุมหอยทากยักษ์แอฟริกาได้ สอดคล้องกับ Jiang and Li (2015) ที่พบว่าชะเอมเทศสามารถควบคุมหอยทากน้ำจืด (*Oncomelania hupensis*) โดยไปมีผลให้เกิดการยับยั้งการหดตัวและลดความถี่การหดตัวของกล้ามเนื้อเรียบของ Vola Pedis ของหอยทากได้ และการใช้ชะเอมเทศร่วมกับ Niclosamide สามารถลดระดับโปรตีนและไกลโคเจนในตับของหอยทาก ส่งผลให้หอยทากตายได้เร็วขึ้น

จากการศึกษาค้นคว้านี้จะเห็นว่าทั้งมะคำดีควาย กากชา และยาสูบ มีประสิทธิภาพในการนำมาควบคุมหอยทากยักษ์แอฟริกาสูงกว่าสมุนไพรรชนิดอื่น ๆ โดยสามารถใช้ทั้งในรูปแบบผงและสารสกัด อย่างไรก็ตามการวิจัยนี้เป็นเพียงการทดสอบในห้องปฏิบัติการเท่านั้น ซึ่งต้องศึกษาในสภาพแปลงปลูกต่อไป

References

- Asgharian, A. and Ojani, S. (2017). *In vitro* Antioxidant Activity and Phytochemical Screening of Flowers and Leaves of *Hypericum perforatum* L. Ethanolic Extracts from Tonekabon, Iran. *Journal of Phytochemistry and Biochemistry*, 1(1), 1-5.
- Augustin, J.M., Kuzina, V., Andersen, S.B. and Bak, S. (2011). Molecular Activities, Biosynthesis and Evolution of Triterpenoid Saponins. *Phytochemistry*, 72(6), 435-457. <https://doi.org/10.1016/j.phytochem.2011.01.015>
- Bissinger, R., Modicano, P., Alzoubi, K., Honisch, S., Faggio, C., Abed, M. and Lang, F. (2014). Effect of Saponin on Erythrocytes. *International Journal of Hematology*, 100, 51-59. <https://doi.org/10.1007/s12185-014-1605-z>

- Choubisa, S.L. (2025). Invasion of Giant African Snail Species (*Achatina fulica*) in Scheduled Area of Rajasthan, India: Threat to Forestry, Agriculture and Horticulture. *Clinical Research in Animal Sciences*, 3(5), 1-6. <https://doi.org/10.31031/CRAS.2025.03.000571>
- Fajar, F.L. and Beny, B.R. (2020). The Plants Extract Toxicity Against *Achatina fulica* (Ferussac, 1821) in Nyawai *Ficus variegata* (Blume). *Jurnal Wasian*, 7(1), 39-50. <https://doi.org/10.62142/1ewcvx39>
- Francis, G., Kerem, Z., Makkar, H.P.S. and Becker, K. (2002). The Biological Action of Saponins in Animal Systems: A Review. *British Journal of Nutrition*, 88(6), 587-605. <https://doi.org/10.1079/BJN2002725>
- Gadekar, M.P., Zanwar, P.R., Patait, D.D., Bhondave, M.M. and Kale, A.S. (2024). Evaluation of Different Ready-Mix Insecticides Against Giant African Snail. *International Journal of Advanced Biochemistry Research*, 8(10S), 1080-1084. <https://doi.org/10.33545/26174693.2024.v8.i10Sm.2651>
- Guo, J., Zhang, S., Zeng, J., Chen, Y., Guo, Y., Liu, J. and He, A. (2023). Molluscicidal Activity of *Nicotiana tabacum* Extracts on the Invasive Snail *Pomacea canaliculata*. *Scientific Reports*, 13. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-38141-6>
- Huang, H.C., Liao, S.C., Chang, F.R., Kuo, Y.H. and Wu, Y.C. (2003). Molluscicidal Saponins from *Sapindus mukorossi*, Inhibitory Agents of Golden Apple Snails, *Pomacea canaliculata*. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 51(17), 4916-4919. <https://doi.org/10.1021/jf0301910>
- Human, H., Archer, C.R., du Rand, E.E., Pirk, C.W.W. and Nicolson, S.W. (2014). Resistance of Developing Honeybee Larvae During Chronic Exposure to Dietary Nicotine. *Journal of Insect Physiology*, 69, 74-79. <https://doi.org/10.1016/j.jinsphys.2014.03.012>
- Ibrahim, A.M., El-Karim, R.M.G., Ali, R.E. and Nasr, S.M. (2023). Toxicological Effects of Saponin on the Free Larval Stages of *Schistosoma mansoni*, Infection Rate, Some Biochemical and Molecular Parameters of *Biomphalaria alexandrina* Snails. *Pesticide Biochemistry and Physiology*, 191. <https://doi.org/10.1016/j.pestbp.2023.105357>
- Jiang, D.Z. and Li, H.M. (2015). Molluscicidal Mechanism of Combining use of Extract of *Glycyrrhiza uralensis* and Niclosamide. *Zhongguo Xue Xi Chong Bing Fang Zhi Za Zhi*, 27(6), 608-611.
- Joseph, B., Sowmya, M. and Sujatha, S. (2012). Insight of Botanical Based Biopesticides Against Economically Important Pest. *International Journal of Pharmacy and Life Sciences*, 3(11), 2138-2148.
- Kijprayoon, S., Tolieng, V., Petsom, A. and Chaicharoenpong, C. (2014). Molluscicidal Activity of *Camellia oleifera* Seed Meal. *ScienceAsia*, 40(4), 393-399. https://www.scienceasia.org/2014.40.n6/scias40_393.pdf
- Koysap, L., Ruangsittichai, J., Ampawong, S., Kongkiatpaiboon, S., Worakhunpiset, S., Thaenkham, U., Chusongsang, Y., Lv, Z., Mongkolthanawat, S. and Limpanont, Y. (2022). Assessing the Efficacy of Soapberry (*Sapindus rarak*) Crude Extract for Controlling Giant African Land Snail (*Lissachatina fulica*). *Management of Biological Invasions*, 13(4), 690-704. <https://doi.org/10.3391/mbi.2022.13.4.07>
- Laymanivong, S., Aukkanimart, R., Boonmars, T., Vanisaveth, V. and Senephansiri, P. (2017). Histopathological Effects of *Camellia oleifera* Seed and *Garcinia mangostana* Pericarp Extracts on *Pomacea canaliculata* Snails, an Intermediate Host for *Angiostrongylus cantonesis*. *Asia-Pacific Journal of Science and Technology*, 21(4), 1-7. <https://so01.tci-thaijo.org/index.php/APST/article/view/84839/78244>
- Mohansingh, R. (2019). *Managing Giant African Snail (GAS) in the Field and Around the Home*. Extension Training and Information Services Division, Ministry of Agriculture, Land and Fisheries, Trinidad and Tobago.

- Pallavi, H.S., Basavaraju, B.S., Umashankar, N., Shivashankar, T. and Rajegowda. (2018). Evaluation of Eco-Friendly and Chemical Pesticides, and Attractant Solutions Against Giant African Snail, *Achatina fulica* Bowdich on mulberry. *Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry*, 7(3), 666-671. <https://www.phytojournal.com/archives/view-pdf/4251/7-2-572>
- Paul, P., Rafee, C.M. and Balikai, R.A. (2016). Management of Giant African Snail, *Achatina fulica* Ferussac Under Protected Cultivation of Capsicum. *Journal of Experimental Zoology India*, 19(2), 1181-1184. https://connectjournals.com/file_full_text/2542502H_1181-1184.pdf
- Perry, T., Somers, J., Yang, Y.T. and Batterham, P. (2015). Expression of Insect $\alpha 6$ -like Nicotinic Acetylcholine Receptors in *Drosophila melanogaster* Highlights a High Level of Conservation of the Receptor: Spinosyn Interaction. *Insect Biochemistry and Molecular Biology*, 64, 106-115. <https://doi.org/10.1016/j.ibmb.2015.01.017>
- Ruiz-Suárez, N., Rial, C., Boada, L.D., Henríquez-Hernández, L.A., Valerón, P.F., Camacho, M., Zumbado, M. and Rumbelha, W.K. (2014). Metaldehyde. In P. Wexler (Eds.), *Encyclopedia of toxicology* (3rd ed., pp. 227-229). Academic Press.
- Rattanahemboot, W., Tubklang, R., Charoensuk, K. and Nonmuang, W. (2022). Effect of Herbal Species on Antioxidant Activities and Sensory Quality of Cardamom (*Amomum krervanh* Pierre) Mixed Herbs Tea. *RMUTI JOURNAL Science and Technology*, 15(3), 96-106. <https://ph01.tci-thaijo.org/index.php/rmutijo/article/view/248886/170149>
- SAS Institute Inc.. (2006). *SAS user's guide: Statistics*. SAS Institute Inc.
- Selvi, V.A., Ram, L.C. and Mastro, R.E. (2015). Molluscicidal Effect of Biogenic Silica and Botanical Pesticides for the Control of *Achatina fulica* (Giant African Land Snail) and *Laevicaulis alte* (Garden Slug). *Journal of Phytopathology and Disease Management*, 2(1), 12-21. <https://ppmj.net/index.php/ppdj/article/view/18/2.1.2>
- Silva, G.M., Thiengo, S.C., Sierpe Jeraldo, V.L., Rego M.I.F., Silva, A.B.P., Rodrigues, P.S., Gomes, S.R. (2022). The Invasive Giant African Land Snail, *Achatina fulica* (Gastropoda: Pulmonata): Global Geographical Distribution of this Species as Host of Nematodes of Medical and Veterinary Importance. *Journal of Helminthology*, 96. <https://doi.org/10.1017/S0022149X22000761>
- Sreenivasa, B.T., Divya, S.H., Kumar, J.B.N. and Sivaprasa, V. (2019). Damage and Management of Giant African Snail, *Achatina fulica* Bowdich in Mulberry Eco-System. *Journal of Emerging Technologies and Innovative Research*, 6(3), 459-467. <https://www.jetir.org/papers/JETIR1903365.pdf>
- St. John's, A. (2022). *Eradication of the giant African snail in Antigua and Barbuda (2008-2021)*. The Plant Protection Unit, Ministry of Agriculture, Fisheries & Barbuda Affairs.
- Tangkoonboribun, R. and Sassanarakkit, S. (2009). Molluscicide from Tobacco Waste. *Journal of Agricultural Science*, 1(1), 76-81. <https://doi.org/10.5539/jas.v1n1p76>
- Triebkorn, R., Christensen, K. and Heim, G. (1998). Effects of Orally and Dermally Applied Metaldehyde on Mucus Cells of Slugs (*Deroceras reticulatum*) Depending on Temperature and Duration of Exposure. *Journal of Molluscan Studies*, 64(4), 467-487. <https://doi.org/10.1093/mollus/64.4.467>
- Wongsiri, T., Chotiyano, A. and Benchawattananon, R. (2023). The Efficiency of Molluscicidal Plant Extracts for Controlling of Golden Apple Snails (*Pomacea canaliculata*). *Prawarun Agricultural Journal*, 20(2), 167-176. <https://li01.tci-thaijo.org/index.php/pajrmu/article/view/259008/177424>

ผลเฉลยเชิงวิเคราะห์สำหรับแบบจำลองเภสัชจลนศาสตร์แบบห้าช่องที่พัฒนาขึ้น Analytical Solutions for the Developed Five-Compartment Pharmacokinetic Model

ธนาโชค มหาหงส์^{1*} และธีระพล สลีวงศ์²

Thanachok Mahahong^{1*} and Teerapol Saleewong²

Received: January 26, 2026; Revised: March 16, 2026; Accepted: March 17, 2026

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้นำเสนอผลเฉลยเชิงวิเคราะห์ของแบบจำลองเภสัชจลนศาสตร์แบบแบ่งช่องที่พัฒนาขึ้น โดยพิจารณาแบบจำลองเชิงเส้นที่ประกอบด้วยห้าช่อง ได้แก่ ช่องการดูดซึม ช่องส่วนกลางซึ่งแทนระบบไหลเวียนโลหิต ช่องเนื้อเยื่อที่ความเข้มข้นเข้าสู่สมดุลเร็ว ช่องเนื้อเยื่อที่ความเข้มข้นเข้าสู่สมดุลช้า และช่องตำแหน่งออกฤทธิ์ของยา แบบจำลองถูกกำหนดในรูปของระบบสมการเชิงอนุพันธ์สามัญซึ่งอธิบายการถ่ายโอนยาและการกำจัดยาระหว่างช่องต่าง ๆ การหาผลเฉลยเชิงวิเคราะห์แบ่งออกเป็นสามขั้นตอน ได้แก่ (1) การหาผลเฉลยของสมการในช่องการดูดซึมด้วยวิธีแยกตัวแปร (2) การวิเคราะห์ระบบสมการในช่องส่วนกลางและช่องเนื้อเยื่อโดยอาศัยการวิเคราะห์ค่าเอกลักษณ์ร่วมกับการแปลงลาปลาซ และ (3) การหาผลเฉลยของสมการในช่องตำแหน่งออกฤทธิ์ด้วยวิธีสัมประสิทธิ์ไม่ทราบค่า ผลการศึกษาพบว่าเมื่อประยุกต์ใช้เงื่อนไขเริ่มต้น สามารถได้ผลเฉลยเชิงวิเคราะห์ในรูปแบบปิดสำหรับความเข้มข้นของยาในทุกช่อง แม้ว่าผลเฉลยบางส่วนจะเกี่ยวข้องกับค่าเอกลักษณ์เชิงซ้อน แต่ยังสามารถอธิบายพฤติกรรมเชิงพลวัตของระบบได้อย่างมีประสิทธิภาพ นอกจากนี้ในงานวิจัยนี้ได้นำเสนอตัวอย่างการประยุกต์ใช้แบบจำลองโดยกำหนดค่าพารามิเตอร์อัตราคงที่ที่สอดคล้องกับช่วงค่าที่พบในวรรณกรรมทางเภสัชจลนศาสตร์ และแสดงกราฟความเข้มข้นของยาในแต่ละช่องตามเวลา โดยใช้ผลเฉลยเชิงวิเคราะห์ในรูปแบบปิด ซึ่งแสดงให้เห็นพฤติกรรมของยาในแต่ละช่องได้อย่างชัดเจนและสอดคล้องกับทฤษฎีเภสัชจลนศาสตร์ ผลเฉลยที่ได้ใช้เป็นกรอบพื้นฐานในการตรวจสอบผลเฉลยเชิงตัวเลขและการพัฒนาแบบจำลองเภสัชจลนศาสตร์ในอนาคต

คำสำคัญ : ผลเฉลยเชิงวิเคราะห์; ค่าเอกลักษณ์; แบบจำลองเภสัชจลนศาสตร์แบบแบ่งช่อง; การแปลงลาปลาซ

¹ คณะครุศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏนครสวรรค์

² คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

¹ Faculty of Education, Nakhon Sawan Rajabhat University

² Faculty of Science, King Mongkut's University of Technology Thonburi

* Corresponding Author, Tel. 08 4376 3832, E - mail: thanachok.m@nsru.ac.th

Abstract

This study presents analytical solutions for a developed compartment pharmacokinetic model consisting of five compartments to describe the dynamics of drug concentration in the body, namely the absorption compartment, the central compartment representing the blood circulation system, the rapidly equilibrating tissue compartment, the slowly equilibrating tissue compartment, and the effect-site compartment. The model is formulated as a system of ordinary differential equations describing drug transfer and elimination between compartments. The analytical solution process is divided into three stages: (1) deriving the solution for the absorption compartment using the method of separation of variables, (2) analyzing the system of equations for the central and tissue compartments using eigenvalue analysis combined with the Laplace transform, and (3) obtaining the solution for the effect-site compartment using the method of undetermined coefficients. The results show that, upon applying the initial conditions, closed-form analytical solutions for drug concentrations in all compartments can be obtained. Although some solutions involve complex eigenvalues, they effectively characterize the dynamic behavior of the system. Furthermore, a numerical example is presented using rate constant parameters consistent with ranges reported in the pharmacokinetic literature, and the concentration-time profiles for all compartments are illustrated using the derived closed-form solutions, demonstrating drug behavior that is consistent with pharmacokinetic theory. These analytical solutions serve as a fundamental framework for validating numerical solutions and supporting future pharmacokinetic model development.

Keywords: Analytical Solutions; Eigenvalues; Compartment Pharmacokinetic Model; Laplace Transform

บทนำ

เภสัชจลนศาสตร์ (Pharmacokinetics: PK) เป็นสาขาหนึ่งของเภสัชวิทยาที่มุ่งศึกษากระบวนการดูดซึม การกระจายตัว การเผาผลาญ และการขับออกของยาจากร่างกาย ซึ่งเรียกรวมกันว่า ADME (Absorption, Distribution, Metabolism, and Excretion) (Rowland and Tozer, 2011) ความเข้าใจในกระบวนการเหล่านี้มีความสำคัญอย่างยิ่งต่อการกำหนดขนาดยาและรูปแบบการให้ยาที่เหมาะสม ตลอดจนการพยากรณ์ผลการรักษา โดยทั่วไปพารามิเตอร์ทางเภสัชจลนศาสตร์มักประมาณค่าจากข้อมูลการทดลองทางคลินิก อย่างไรก็ตาม การทดลองดังกล่าวมักใช้เวลานาน มีค่าใช้จ่ายสูง และอาจไม่สามารถสะท้อนปฏิสัมพันธ์ที่ซับซ้อนระหว่างระบบสรีรวิทยาภายในร่างกายได้อย่างครบถ้วน นอกจากนี้ข้อจำกัดด้านจริยธรรมและความแปรปรวนระหว่างบุคคลยังส่งผลให้ขอบเขตของการศึกษาในลักษณะนี้มีความจำกัด (Gabrielsson and Weiner, 2016)

เพื่อลดทอนข้อจำกัดดังกล่าว จึงได้มีการพัฒนาแบบจำลองเภสัชจลนศาสตร์แบบแบ่งช่องขึ้น โดยแนวคิดของแบบจำลองนี้คือ การลดความซับซ้อนของร่างกายมนุษย์ให้เป็นช่องที่เชื่อมโยงกัน ซึ่งแต่ละช่องแทนกลุ่มเนื้อเยื่อหรืออวัยวะที่มีลักษณะการกระจายของยาที่คล้ายคลึงกัน (Shargel et al., 2012) จากนั้นแบบจำลองจะถูกกำหนดในรูปของสมการเชิงอนุพันธ์เพื่ออธิบายการเคลื่อนที่ของยาระหว่างช่องต่าง ๆ ทำให้นักวิจัยสามารถจำลองและพยากรณ์การเปลี่ยนแปลงของความเข้มข้นของยาในช่วงเวลาต่าง ๆ ได้อย่างเป็นระบบ แบบจำลองเภสัชจลนศาสตร์แบบแบ่งช่องจึงมีบทบาทสำคัญในการอธิบายพฤติกรรมของยาในเนื้อเยื่อต่าง ๆ คาดการณ์ผลของกลไกการให้ยาที่แตกต่างกัน และประเมินผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงทางสรีรวิทยาหรือภาวะโรคต่อการกระจายตัวของยา รวมถึงสนับสนุนการออกแบบการให้ยาเฉพาะบุคคลเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการรักษา

ตลอดช่วงเวลาที่ผ่านมา แบบจำลองเภสัชจลนศาสตร์ได้มีการพัฒนาอย่างต่อเนื่องเพื่อเพิ่มความสามารถในการอธิบายการกระจายตัวของยาในร่างกาย แบบจำลองแบบหนึ่งช่อง (One-Compartment Model) ตั้งสมมติฐานว่าร่างกายเป็นช่องเดียวที่มีความเป็นเนื้อเดียวกัน ซึ่งเหมาะสำหรับยาที่มีการกระจายตัวอย่างรวดเร็ว (Gabrielsson and Weiner, 2016) ขณะที่แบบจำลองแบบสองช่อง (Two-Compartment Model) แบ่งโครงสร้างของร่างกายออกเป็นสองส่วน ได้แก่ ช่องส่วนกลาง ซึ่งประกอบด้วยเลือดและอวัยวะที่มีการไหลเวียนของเลือดสูง และช่องส่วนปลาย ซึ่งแทนเนื้อเยื่อที่มีการไหลเวียนของเลือดต่ำกว่า เพื่อสะท้อนรูปแบบการกระจายตัวของยาที่มีความซับซ้อนมากขึ้น (Shargel et al., 2012) นอกจากนี้ยังได้มีการพัฒนาแบบจำลองแบบหลายช่อง (Multi-Compartment Models) เช่น แบบจำลองสามช่องและมากกว่านั้น เพื่อแทนอวัยวะและเนื้อเยื่อเพิ่มเติม ซึ่งช่วยให้เกิดความเข้าใจเชิงลึกยิ่งขึ้นเกี่ยวกับกระบวนการกระจายตัวและการกำจัดยา (Browning et al., 2021; Yakubu et al., 2023; Jan et al., 2025) แบบจำลองเภสัชจลนศาสตร์แบบแบ่งช่องเหล่านี้ถูกนำไปประยุกต์ใช้อย่างแพร่หลายในงานวิจัยที่ศึกษาพฤติกรรมทางเภสัชจลนศาสตร์ของยาหลากหลายชนิด อาทิ อีโอฟิลลีน (Theophylline) (Rowland and Tozer, 2011) ฟีนีโทอิน (Phenytoin) (Kunderu and Reddy, 2018) ดิจอกซิน (Digoxin) (Reddy and Narayan, 2019) เรมิฟันทานิล (Remifentanyl) (Cascone et al., 2013) และทาลาโพรฟินโซเดียม (Talaporfin Sodium) (Uno et al., 2018) ซึ่งสะท้อนให้เห็นถึงประสิทธิภาพของแบบจำลองดังกล่าวในการจำลองและพยากรณ์พฤติกรรมของยาในสภาวะทางสรีรวิทยาที่แตกต่างกัน

แม้ว่าแบบจำลองเหล่านี้จะแสดงให้เห็นถึงศักยภาพในการอธิบายพฤติกรรมของยาได้เป็นอย่างดี อย่างไรก็ตาม เมื่อจำนวนช่องในแบบจำลองเพิ่มขึ้น การหาผลเฉลยเชิงวิเคราะห์ย่อมมีความซับซ้อนมากขึ้น และในบางกรณีอาจไม่สามารถดำเนินการได้ ด้วยเหตุนี้วิธีเชิงตัวเลขจึงมักถูกนำมาใช้เพื่อหาผลเฉลยเชิงประมาณค่า แต่แนวทางดังกล่าวมีข้อจำกัดโดยธรรมชาติในด้านเสถียรภาพและความแม่นยำ ในทางตรงกันข้าม ผลเฉลยเชิงวิเคราะห์สามารถให้ความเข้าใจเชิงลึกเกี่ยวกับพลศาสตร์ของยา ช่วยตรวจสอบความถูกต้องของการจำลองเชิงตัวเลข และทำหน้าที่เป็นเกณฑ์อ้างอิงที่น่าเชื่อถือสำหรับการพัฒนาแบบจำลองในอนาคต (Browning et al., 2021)

ด้วยเหตุนี้การพัฒนาแบบจำลองที่มีจำนวนช่องเพิ่มขึ้นพร้อมกับผลเฉลยเชิงวิเคราะห์จึงมีความสำคัญยิ่งในบริบทนี้ แบบจำลองแบบแบ่งห้าช่องที่พัฒนาขึ้นในงานวิจัยนี้มีจุดแข็งที่เหนือกว่าแบบจำลองที่มีจำนวนช่องน้อยกว่าในสองประการสำคัญ ได้แก่ การรวมช่องตำแหน่งออกฤทธิ์ (Effect-Site Compartment) ซึ่งทำให้สามารถอธิบายความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของยาในพลาสมากับผลทางเภสัชพลศาสตร์ได้โดยตรง และการแยกช่องเนื้อเยื่อออกเป็นช่องที่เข้าสู่สมดุลเร็วและช้า ซึ่งช่วยให้จำลองพฤติกรรมการกระจายตัวของยาได้สมจริงยิ่งขึ้น อย่างไรก็ตาม ความซับซ้อนที่เพิ่มขึ้นนี้นำมาซึ่งข้อจำกัดด้านจำนวนพารามิเตอร์ที่ต้องประมาณค่า ความยากในการระบุเอกลักษณ์ของแบบจำลอง (Model Identifiability) และความเป็นไปได้ที่ค่าเอกลักษณ์ของระบบจะเป็นจำนวนเชิงซ้อน (Świątaszczyk and Jødal, 2024)

ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงมุ่งพัฒนาแบบจำลองเภสัชจลนศาสตร์แบบแบ่งช่องสำหรับการให้ยาทางปาก โดยพิจารณาในร่างกายเป็นห้าส่วน ซึ่งเป็นการต่อยอดจากการศึกษาของ Reddy and Narayan (2019) ที่ใช้แบบจำลองแบบสองช่องและการศึกษาของ Sivasubramaniam (2014) ที่ใช้แบบจำลองแบบแบ่งสี่ช่อง ทั้งนี้เพื่อมุ่งเน้นการหาผลเฉลยเชิงวิเคราะห์ของแบบจำลองเภสัชจลนศาสตร์เชิงเส้นแบบแบ่งช่องจำนวนห้าช่องสำหรับอธิบายลักษณะการเปลี่ยนแปลงของความเข้มข้นของยาตามเวลา ผลเฉลยที่ได้คาดว่าจะช่วยสนับสนุนการจำลองผลลัพธ์ในสถานการณ์จริง ใช้เป็นข้อมูลอ้างอิงในการเปรียบเทียบกับผลเฉลยเชิงตัวเลข และเป็นกรอบพื้นฐานสำหรับการพัฒนาแบบจำลองเภสัชจลนศาสตร์ในอนาคต

วิธีดำเนินการ

งานวิจัยนี้เริ่มต้นด้วยการพัฒนาแบบจำลองเภสัชจลนศาสตร์แบบแบ่งช่อง โดยพิจารณาความเข้มข้นของยาในร่างกายออกเป็นห้าช่อง ได้แก่ (1) ช่องการดูดซึม $C_a(t)$ ซึ่งแทนความเข้มข้นของยาในระบบทางเดินอาหาร (2) ช่องส่วนกลาง $C_l(t)$ ซึ่งแทนความเข้มข้นของยาในพลาสมาและระบบไหลเวียนโลหิต (3) ช่องเนื้อเยื่อที่ความเข้มข้นของยาเข้าสู่สมดุล

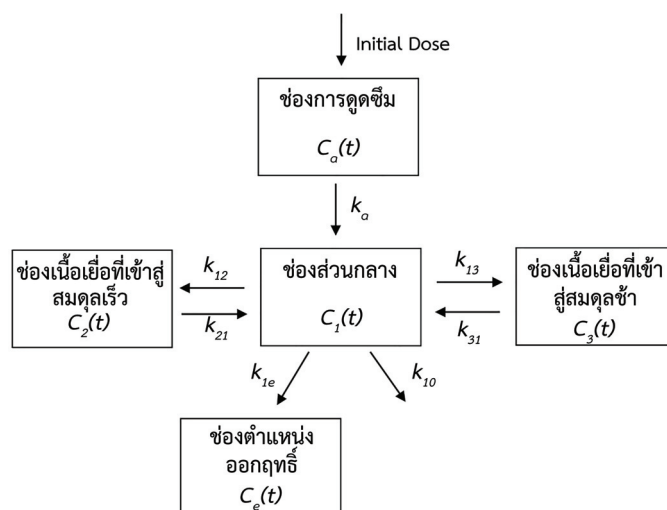
อย่างรวดเร็ว $C_2(t)$ (4) ช่องเนื้อเยื่อที่ความเข้มข้นของยาเข้าสู่สมดุอย่างช้า $C_3(t)$ และ (5) ช่องตำแหน่งออกฤทธิ์ $C_e(t)$ ซึ่งแทนความเข้มข้นของยา ณ ตำแหน่งที่ยาออกฤทธิ์

ในแบบจำลองนี้ ยาจะถูกดูดซึมจากการดูดซึมเข้าสู่ช่องส่วนกลางด้วยอัตราคงที่ k_a จากนั้นยาจะกระจายจากช่องส่วนกลางไปยังช่องเนื้อเยื่อต่าง ๆ ผ่านกระบวนการถ่ายโอนแบบไปและกลับ โดยมีค่าอัตราการกระจายคงที่ $k_{12}, k_{21}, k_{13}, k_{31}$ ตามลำดับ การกำจัดยาออกจากร่างกายเกิดขึ้นที่ช่องส่วนกลางด้วยอัตราคงที่ k_{10} นอกจากนี้ช่องส่วนกลางยังเชื่อมต่อกับช่องตำแหน่งออกฤทธิ์ผ่านอัตราคงที่ k_{1e} ขณะที่การกำจัดยาออกจากช่องตำแหน่งออกฤทธิ์เกิดขึ้นด้วยอัตราคงที่ k_{e0} รายละเอียดของตัวแปรและพารามิเตอร์ทั้งหมดดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 สัญลักษณ์และความหมายของตัวแปรและพารามิเตอร์ในแบบจำลองเภสัชจลนศาสตร์แบบห้าช่อง

สัญลักษณ์	ความหมาย
$C_a(t)$	ความเข้มข้นของยาในช่องการดูดซึม (mg/L)
$C_1(t)$	ความเข้มข้นของยาในช่องส่วนกลาง (mg/L)
$C_2(t)$	ความเข้มข้นของยาในช่องเนื้อเยื่อที่เข้าสู่สมดุเร็ว (mg/L)
$C_3(t)$	ความเข้มข้นของยาในช่องเนื้อเยื่อที่เข้าสู่สมดุช้า (mg/L)
$C_e(t)$	ความเข้มข้นของยาในช่องตำแหน่งออกฤทธิ์ (mg/L)
C_0	ความเข้มข้นเริ่มต้นของยา (mg/L)
k_a	อัตราคงที่การดูดซึมจากทางเดินอาหารเข้าสู่ช่องส่วนกลาง (min^{-1})
k_{10}	อัตราคงที่การกำจัดยาออกจากช่องส่วนกลาง (min^{-1})
k_{12}, k_{21}	อัตราคงที่การถ่ายโอนระหว่างช่องส่วนกลางและช่องเนื้อเยื่อที่เข้าสู่สมดุเร็ว (min^{-1})
k_{13}, k_{31}	อัตราคงที่การถ่ายโอนระหว่างช่องส่วนกลางและช่องเนื้อเยื่อที่เข้าสู่สมดุช้า (min^{-1})
k_{1e}	อัตราคงที่การถ่ายโอนจากช่องส่วนกลางไปยังช่องตำแหน่งออกฤทธิ์ (min^{-1})
k_{e0}	อัตราคงที่การกำจัดยาออกจากช่องตำแหน่งออกฤทธิ์ (min^{-1})

แบบจำลองที่พัฒนาขึ้นนี้เป็นการขยายกรอบแนวคิดของแบบจำลองเภสัชจลนศาสตร์แบบแบ่งช่องเดิม โดยเฉพาะแบบจำลองสองช่องของ Reddy and Narayan (2019) และแบบจำลองสี่ช่องของ Sivasubramaniam (2014) เพื่อให้สามารถอธิบายทั้งกระบวนการดูดซึมของยาและพลวัตของตำแหน่งออกฤทธิ์ได้อย่างครอบคลุมภายใต้โครงสร้างแบบแบ่งช่องจำนวนห้าช่องในลักษณะบูรณาการ ดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 แบบจำลองเภสัชจลนศาสตร์แบบแบ่งห้าช่อง

ดังนี้

จากแบบจำลองในรูปที่ 1 โดยการประยุกต์กฎการกระทำมวล (Law of Mass Action) จะได้สมการเชิงอนุพันธ์สามัญ

$$\frac{dC_a(t)}{dt} = -k_a C_a(t), \quad C_a(0) = C_0, \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \frac{dC_1(t)}{dt} = & k_a C_a(t) - (k_{10} + k_{12} + k_{13} + k_{1e}) C_1(t) \\ & + k_{21} C_2(t) + k_{31} C_3(t), \end{aligned} \quad C_1(0) = 0, \quad (2)$$

$$\frac{dC_2(t)}{dt} = k_{12} C_1(t) - k_{21} C_2(t), \quad C_2(0) = 0, \quad (3)$$

$$\frac{dC_3(t)}{dt} = k_{13} C_1(t) - k_{31} C_3(t), \quad C_3(0) = 0, \quad (4)$$

$$\frac{dC_e(t)}{dt} = k_{1e} C_1(t) - k_{e0} C_e(t), \quad C_e(0) = 0. \quad (5)$$

โดยที่ C_0 คือ ความเข้มข้นเริ่มต้นของยา

จากสมการที่ (1) - (5) การวิเคราะห์จะถูกแบ่งออกเป็น 3 ขั้นตอนหลัก ในการหาผลเฉลยเชิงวิเคราะห์ ได้แก่
 (i) การพิจารณาความเข้มข้นของยาในช่องการดูดซึม ซึ่งจะหาผลเฉลยโดยใช้วิธีแยกตัวแปร (Separation of Variables)
 (ii) การวิเคราะห์ความเข้มข้นของยาในช่องส่วนกลางและช่องเนื้อเยื่อ จะพิจารณาระบบสมการเชิงอนุพันธ์ และใช้การวิเคราะห์ค่าเอกลักษณะ (Eigenvalue Analysis) ร่วมกับการแปลงลาปลาซ (Laplace Transform) เพื่อหาผลเฉลยเชิงวิเคราะห์ และ (iii) การพิจารณาความเข้มข้นของยาในช่องตำแหน่งออกฤทธิ์ จะหาผลเฉลยของสมการเชิงอนุพันธ์เชิงเส้นอันดับหนึ่งโดยใช้วิธีสัมประสิทธิ์ไม่ทราบค่า (Method of Undetermined Coefficients)

(i) หาผลเฉลยเชิงวิเคราะห์ของ $C_a(t)$ (ความเข้มข้นของยาในช่องการดูดซึม)

พิจารณาสมการที่ (1) ซึ่งอธิบายการเปลี่ยนแปลงของความเข้มข้นของยาในช่องการดูดซึม ดังนี้

$$\frac{dC_a(t)}{dt} = -k_a C_a(t),$$

เมื่อหารสมการทั้งสองข้างด้วย $C_a(t)$ จะได้

$$\frac{1}{C_a(t)} \frac{dC_a(t)}{dt} = -k_a, \quad (6)$$

จากนั้นทำการอินทิเกรตสมการที่ (6) เทียบกับตัวแปร t จะได้

$$\int \frac{1}{C_a(t)} dC_a(t) = -k_a \int dt,$$

ดังนั้น ผลเฉลยของสมการ คือ

$$\ln|C_a(t)| = -k_a t + K.$$

โดยที่ K เป็นค่าคงที่ของการอินทิเกรต และสามารถเขียนใหม่ได้เป็นสมการที่ (7)

$$C_a(t) = e^{-k_a t + K}, \quad (7)$$

จากเงื่อนไขเริ่มต้น $C_a(0) = C_0$ จะได้

$$C_0 = e^K,$$

ดังนั้น

เมื่อนำ $C_0 = e^K$ แทนค่าในสมการที่ (7) จะได้ผลเฉลยสุดท้าย คือ สมการที่ (8)

$$C_a(t) = C_0 e^{-k_a t}. \quad (8)$$

(ii): หาผลเฉลยเชิงวิเคราะห์ของ $C_1(t)$, $C_2(t)$ และ $C_3(t)$ (ความเข้มข้นของยาในช่องกลางและช่องเนื้อเยื่อ) ต่อไปพิจารณาสมการที่ (2) - (4) ดังนี้

$$\frac{dC_1(t)}{dt} = k_a C_a(t) - (k_{10} + k_{12} + k_{13} + k_{1e})C_1(t) + k_{21}C_2(t) - k_{31}C_3(t), \quad C_1(0) = 0,$$

$$\frac{dC_2(t)}{dt} = k_{12}C_1(t) - k_{21}C_2(t), \quad C_2(0) = 0,$$

$$\frac{dC_3(t)}{dt} = k_{13}C_1(t) - k_{31}C_3(t), \quad C_3(0) = 0.$$

เมื่อแทนค่า $C_a(t) = C_0 e^{-k_a t}$ ลงในสมการที่ (2) ระบบสมการจะอยู่ในสมการที่ (9) - (11)

$$\begin{aligned} \frac{dC_1(t)}{dt} &= k_a C_0 e^{-k_a t} - (k_{10} + k_{12} + k_{13} + k_{1e})C_1(t) \\ &\quad + k_{21}C_2(t) - k_{31}C_3(t), \end{aligned} \quad C_1(0) = 0, \quad (9)$$

$$\frac{dC_2(t)}{dt} = k_{12}C_1(t) - k_{21}C_2(t), \quad C_2(0) = 0, \quad (10)$$

$$\frac{dC_3(t)}{dt} = k_{13}C_1(t) - k_{31}C_3(t), \quad C_3(0) = 0. \quad (11)$$

ในการวิเคราะห์ส่วนที่ (ii) นี้ ขั้นตอนการหาผลเฉลยแบ่งออกเป็น 3 ขั้นตอนย่อย ดังนี้

1. การหาค่าเอกลักษณะ (Eigenvalues) จากส่วนเอกพันธ์ของระบบ
2. การประยุกต์ใช้การแปลงลาปลาซ
3. การใช้การแปลงลาปลาซผกผันเพื่อหาผลเฉลยในโดเมนเวลา

1. หาค่าเอกลักษณะ (Eigenvalues)

เพื่อหาค่าเอกลักษณะ พิจารณาเฉพาะส่วนเอกพันธ์ของสมการที่ (9) - (11) โดยกำหนดให้ $k_a C_0 e^{-k_a t} = 0$ จะได้ระบบสมการเชิงเส้นในรูปเมทริกซ์ดังสมการที่ (12)

$$\frac{dC(t)}{dt} = BC(t). \quad (12)$$

ซึ่งเป็นระบบสมการเชิงอนุพันธ์เชิงเส้น (Strang, 2016) โดยที่

$$C(t) = \begin{pmatrix} C_1(t) \\ C_2(t) \\ C_3(t) \end{pmatrix}, \quad B = \begin{pmatrix} -(k_{10} + k_{12} + k_{13} + k_{1e}) & k_{21} & k_{31} \\ k_{12} & -k_{21} & 0 \\ k_{13} & 0 & -k_{31} \end{pmatrix},$$

จากนั้นคำนวณค่าเอกลักษณ์ (λ) จากสมการลักษณะเฉพาะ (Characteristic Equation) ของเมทริกซ์ B ซึ่งได้จากสมการที่ (13)

$$\det(B - \lambda I) = 0, \quad (13)$$

โดยอาศัยทฤษฎีพีชคณิตเชิงเส้น (Anton and Rorres, 2013) เมื่อขยายสมการที่ (13) จะได้

$$\begin{vmatrix} -(k_{10} + k_{12} + k_{13} + k_{1e}) - \lambda & k_{21} & k_{31} \\ k_{12} & -k_{21} - \lambda & 0 \\ k_{13} & 0 & -k_{31} - \lambda \end{vmatrix} = 0,$$

ซึ่งสามารถจัดรูปเป็น

$$-(k_{10} + k_{12} + k_{13} + k_{1e} + \lambda)(k_{21} + \lambda)(k_{31} + \lambda) + k_{13}k_{31}(k_{21} + \lambda) + k_{12}k_{21}(k_{31} + \lambda) = 0,$$

ดังนั้น จะได้สมการพหุนามดีกรีสามสำหรับค่าเอกลักษณ์ λ ดังสมการที่ (14)

$$\lambda^3 + (k_{10} + k_{12} + k_{13} + k_{1e} + k_{21} + k_{31})\lambda^2 + (k_{10}k_{21} + k_{10}k_{31} + k_{12}k_{31} + k_{13}k_{21} + k_{1e}k_{21} + k_{1e}k_{31} + k_{21}k_{31})\lambda + (k_{10}k_{21}k_{31} + k_{1e}k_{21}k_{31}) = 0. \quad (14)$$

จากสมการที่ (14) เราจะได้สมการลักษณะเฉพาะกำลังสาม (Cubic Characteristic Equation) เป็นสมการที่ (15) - (18)

$$\lambda^3 + p\lambda^2 + q\lambda + r = 0, \quad (15)$$

$$\text{โดยที่ } p = k_{10} + k_{12} + k_{13} + k_{1e} + k_{21} + k_{31}, \quad (16)$$

$$q = k_{10}k_{21} + k_{10}k_{31} + k_{12}k_{31} + k_{13}k_{21} + k_{1e}k_{21} + k_{1e}k_{31} + k_{21}k_{31}, \quad (17)$$

$$\text{และ } r = k_{10}k_{21}k_{31} + k_{1e}k_{21}k_{31}. \quad (18)$$

โดยการประยุกต์ใช้สูตรของคาร์ดาโน (Cardano's Formula) (Nickalls, 1993) จะได้ว่ารากของสมการที่ (15) ดังสมการที่ (19) - (21)

$$\lambda_1 = M + N - \frac{p}{3}, \quad (19)$$

$$\lambda_2 = -\frac{M+N}{2} + \frac{M-N}{2}i\sqrt{3} - \frac{p}{3}, \quad (20)$$

$$\lambda_3 = -\frac{M+N}{2} - \frac{M-N}{2}i\sqrt{3} - \frac{p}{3}. \quad (21)$$

$$\text{โดยที่ } M = \sqrt[3]{-\frac{n}{2} + \sqrt{\frac{n^2}{4} + \frac{m^3}{27}}}, \quad N = \sqrt[3]{-\frac{n}{2} - \sqrt{\frac{n^2}{4} + \frac{m^3}{27}}},$$

$$m = \frac{I}{3}(3q - p^2), \quad n = \frac{I}{27}(2p^3 - 9pq + 27r).$$

2. ประยุกต์ใช้การแปลงลาปลาซ

ต่อไปประยุกต์ใช้การแปลงลาปลาซ (Kreyszig, 2011) สำหรับสมการที่ (9) - (11) ได้เป็นสมการที่ (22) - (24)

$$\mathcal{L}\left[\frac{dC_1(t)}{dt}\right] = k_a C_0 \mathcal{L}[e^{-k_a t}] - (k_{10} + k_{12} + k_{13} + k_{1e}) \mathcal{L}[C_1(t)] + k_{21} \mathcal{L}[C_2(t)] + k_{31} \mathcal{L}[C_3(t)], \quad (22)$$

$$\mathcal{L}\left[\frac{dC_2(t)}{dt}\right] = k_{12} \mathcal{L}[C_1(t)] - k_{21} \mathcal{L}[C_2(t)], \quad (23)$$

$$\mathcal{L}\left[\frac{dC_3(t)}{dt}\right] = k_{13} \mathcal{L}[C_1(t)] - k_{31} \mathcal{L}[C_3(t)]. \quad (24)$$

จากสมการที่ (22) - (24) และสมบัติของการแปลงลาปลาซ จะได้

$$s \mathcal{L}[C_1(t)] - C_1(0) = \frac{k_a C_0}{s + k_a} - (k_{10} + k_{12} + k_{13} + k_{1e}) \mathcal{L}[C_1(t)] + k_{21} \mathcal{L}[C_2(t)] + k_{31} \mathcal{L}[C_3(t)],$$

$$s \mathcal{L}[C_2(t)] - C_2(0) = k_{12} \mathcal{L}[C_1(t)] - k_{21} \mathcal{L}[C_2(t)],$$

$$s \mathcal{L}[C_3(t)] - C_3(0) = k_{13} \mathcal{L}[C_1(t)] - k_{31} \mathcal{L}[C_3(t)].$$

หรือเขียนในรูปสมการที่ (25) - (27)

$$(s + k_{10} + k_{12} + k_{13} + k_{1e}) Q_1 - k_{21} Q_2 - k_{31} Q_3 = \frac{k_a C_0}{s + k_a}, \quad (25)$$

$$-k_{12} Q_1 + (s + k_{21}) Q_2 = 0, \quad (26)$$

$$-k_{13} Q_1 + (s + k_{31}) Q_3 = 0. \quad (27)$$

โดยที่ $Q_1 = \mathcal{L}[C_1(t)]$, $Q_2 = \mathcal{L}[C_2(t)]$ และ $Q_3 = \mathcal{L}[C_3(t)]$

สมการข้างต้นสามารถเขียนในรูปเมทริกซ์ได้เป็นสมการที่ (28)

$$\begin{pmatrix} s + k_{10} + k_{12} + k_{13} + k_{1e} & -k_{21} & -k_{31} \\ -k_{12} & s + k_{21} & 0 \\ -k_{13} & 0 & s + k_{31} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} Q_1 \\ Q_2 \\ Q_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{k_a C_0}{s + k_a} \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}, \quad (28)$$

โดยใช้กฎของครเมอร์ (Cramer's Rule) เพื่อแก้สมการที่ (28) จะได้ตัวกำหนด

$$\begin{aligned}
 D &= \begin{vmatrix} s+k_{10}+k_{12}+k_{13}+k_{1e} & -k_{21} & -k_{31} \\ -k_{12} & s+k_{21} & 0 \\ -k_{13} & 0 & s+k_{31} \end{vmatrix}, \\
 &= (s+k_{10}+k_{12}+k_{13}+k_{1e})(s+k_{21})(s+k_{31}) - k_{13}k_{31}(s+k_{21}) - k_{12}k_{21}(s+k_{31}), \\
 &= (s+k_{10}+k_{12}+k_{13}+k_{1e})(s^2 + (k_{21}+k_{31})s + k_{21}k_{31}) - k_{13}k_{31}s - k_{13}k_{21}k_{31} \\
 &\quad - k_{12}k_{21} - k_{12}k_{21}k_{31}, \\
 &= s^3 + ps^2 + qs + r.
 \end{aligned}$$

โดยที่ p, q และ r กำหนดตามสมการที่ (16) - (18) หรือเขียนได้ว่า

$$D = s^3 + ps^2 + qs + r = (s - \lambda_1)(s - \lambda_2)(s - \lambda_3),$$

ซึ่ง λ_1, λ_2 และ λ_3 กำหนดตามสมการที่ (19) - (21)

จากนั้นคำนวณได้ว่า

$$\begin{aligned}
 DQ_1 &= \begin{vmatrix} s & -k_{21} & -k_{31} \\ 0 & s+k_{21} & 0 \\ 0 & 0 & s+k_{31} \end{vmatrix} = \frac{k_a C_0 (s+k_{21})(s+k_{31})}{s+k_a}, \\
 DQ_2 &= \begin{vmatrix} s+k_{10}+k_{12}+k_{13}+k_{1e} & \frac{k_a C_0}{s+k_a} & -k_{31} \\ -k_{12} & 0 & 0 \\ -k_{13} & 0 & s+k_{31} \end{vmatrix} = \frac{k_a k_{12} C_0 (s+k_{31})}{s+k_a}, \\
 DQ_3 &= \begin{vmatrix} s+k_{10}+k_{12}+k_{13}+k_{1e} & -k_{21} & \frac{k_a C_0}{s+k_a} \\ -k_{12} & s+k_{21} & 0 \\ -k_{13} & 0 & 0 \end{vmatrix} = \frac{k_a k_{13} C_0 (s+k_{21})}{s+k_a}.
 \end{aligned}$$

ดังนั้น จะได้สมการที่ (29) - (31)

$$Q_1(s) = \frac{DQ_1}{D} = \frac{k_a C_0 (s+k_{21})(s+k_{31})}{(s+k_a)(s-\lambda_1)(s-\lambda_2)(s-\lambda_3)}, \quad (29)$$

$$Q_2(s) = \frac{DQ_2}{D} = \frac{k_a k_{12} C_0 (s+k_{31})}{(s+k_a)(s-\lambda_1)(s-\lambda_2)(s-\lambda_3)}, \quad (30)$$

$$Q_3(s) = \frac{DQ_3}{D} = \frac{k_a k_{13} C_0 (s+k_{21})}{(s+k_a)(s-\lambda_1)(s-\lambda_2)(s-\lambda_3)}. \quad (31)$$

3. ประยุกต์ใช้การแปลงลาปลาซผกผัน

เมื่อทำการแปลงลาปลาซผกผันของสมการที่ (29) - (31) จะได้สมการที่ (32) - (34)

$$C_1(t) = \mathcal{L}^{-1}[Q_1(s)] = k_a C_0 \mathcal{L}^{-1} \left[\frac{(s+k_{2I})(s+k_{3I})}{(s+k_a)(s-\lambda_1)(s-\lambda_2)(s-\lambda_3)} \right], \quad (32)$$

$$C_2(t) = \mathcal{L}^{-1}[Q_2(s)] = k_a C_0 \mathcal{L}^{-1} \left[\frac{k_{12}(s+k_{3I})}{(s+k_a)(s-\lambda_1)(s-\lambda_2)(s-\lambda_3)} \right], \quad (33)$$

$$C_3(t) = \mathcal{L}^{-1}[Q_3(s)] = k_a C_0 \mathcal{L}^{-1} \left[\frac{k_{13}(s+k_{2I})}{(s+k_a)(s-\lambda_1)(s-\lambda_2)(s-\lambda_3)} \right]. \quad (34)$$

จากสมการที่ (32) กำหนดให้

$$\frac{(s+k_{2I})(s+k_{3I})}{(s+k_a)(s-\lambda_1)(s-\lambda_2)(s-\lambda_3)} = \frac{A}{s+k_a} + \frac{B}{s-\lambda_1} + \frac{C}{s-\lambda_2} + \frac{D}{s-\lambda_3}, \quad (35)$$

โดยที่ A, B, C และ D เป็นค่าคงที่

คูณสมการที่ (35) ตลอดทั้งสมการด้วย $(s+k_a)(s-\lambda_1)(s-\lambda_2)(s-\lambda_3)$ จะได้

$$\begin{aligned} (s+k_{2I})(s+k_{3I}) &= (s-\lambda_1)(s-\lambda_2)(s-\lambda_3)A + (s+k_a)(s-\lambda_2)(s-\lambda_3)B \\ &\quad + (s+k_a)(s-\lambda_1)(s-\lambda_3)C + (s+k_a)(s-\lambda_1)(s-\lambda_2)D. \end{aligned} \quad (36)$$

จากสมการที่ (36) คำนวณค่าคงที่ได้ดังนี้

$$\text{ที่ } s = -k_a, \quad A = -\frac{(k_a - k_{2I})(k_a - k_{3I})}{(k_a + \lambda_1)(k_a + \lambda_2)(k_a + \lambda_3)},$$

$$\text{ที่ } s = \lambda_1, \quad B = -\frac{(\lambda_1 + k_{2I})(\lambda_1 + k_{3I})}{(\lambda_1 + k_a)(\lambda_1 - \lambda_2)(\lambda_1 - \lambda_3)},$$

$$\text{ที่ } s = \lambda_2, \quad C = -\frac{(\lambda_2 + k_{2I})(\lambda_2 + k_{3I})}{(\lambda_2 + k_a)(\lambda_2 - \lambda_1)(\lambda_2 - \lambda_3)},$$

$$\text{และที่ } s = \lambda_3, \quad D = -\frac{(\lambda_3 + k_{2I})(\lambda_3 + k_{3I})}{(\lambda_3 + k_a)(\lambda_3 - \lambda_1)(\lambda_3 - \lambda_2)}.$$

ดังนั้น จะได้สมการที่ (37)

$$\begin{aligned} C_1(t) &= k_a C_0 \left(\frac{-(k_a - k_{2I})(k_a - k_{3I})}{(k_a + \lambda_1)(k_a + \lambda_2)(k_a + \lambda_3)} e^{-k_a t} + \frac{(\lambda_1 + k_{2I})(\lambda_1 + k_{3I})}{(\lambda_1 + k_a)(\lambda_1 - \lambda_2)(\lambda_1 - \lambda_3)} e^{\lambda_1 t} \right. \\ &\quad \left. + \frac{(\lambda_2 + k_{2I})(\lambda_2 + k_{3I})}{(\lambda_2 + k_a)(\lambda_2 - \lambda_1)(\lambda_2 - \lambda_3)} e^{\lambda_2 t} + \frac{(\lambda_3 + k_{2I})(\lambda_3 + k_{3I})}{(\lambda_3 + k_a)(\lambda_3 - \lambda_1)(\lambda_3 - \lambda_2)} e^{\lambda_3 t} \right). \end{aligned} \quad (37)$$

ในการทำงานเดียวกัน สำหรับสมการที่ (33) และ (34) จะได้สมการที่ (38) - (39)

$$\begin{aligned}
 C_2(t) = k_a k_{12} C_0 & \left(\frac{k_a - k_{31}}{(k_a + \lambda_1)(k_a + \lambda_2)(k_a + \lambda_3)} e^{-k_a t} + \frac{\lambda_1 + k_{31}}{(\lambda_1 + k_a)(\lambda_1 - \lambda_2)(\lambda_1 - \lambda_3)} e^{\lambda_1 t} \right. \\
 & \left. + \frac{\lambda_2 + k_{31}}{(\lambda_2 + k_a)(\lambda_2 - \lambda_1)(\lambda_2 - \lambda_3)} e^{\lambda_2 t} + \frac{\lambda_3 + k_{31}}{(\lambda_3 + k_a)(\lambda_3 - \lambda_1)(\lambda_3 - \lambda_2)} e^{\lambda_3 t} \right), \quad (38)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 C_3(t) = k_a k_{13} C_0 & \left(\frac{k_a - k_{21}}{(k_a + \lambda_1)(k_a + \lambda_2)(k_a + \lambda_3)} e^{-k_a t} + \frac{\lambda_1 + k_{21}}{(\lambda_1 + k_a)(\lambda_1 - \lambda_2)(\lambda_1 - \lambda_3)} e^{\lambda_1 t} \right. \\
 & \left. + \frac{\lambda_2 + k_{21}}{(\lambda_2 + k_a)(\lambda_2 - \lambda_1)(\lambda_2 - \lambda_3)} e^{\lambda_2 t} + \frac{\lambda_3 + k_{21}}{(\lambda_3 + k_a)(\lambda_3 - \lambda_1)(\lambda_3 - \lambda_2)} e^{\lambda_3 t} \right). \quad (39)
 \end{aligned}$$

ซึ่ง λ_1, λ_2 และ λ_3 กำหนดตามสมการที่ (19) - (21)

(iii): หาผลเฉลยเชิงวิเคราะห์ของ $C_e(t)$ (ความเข้มข้นของยาที่ตำแหน่งยาออกฤทธิ์) พิจารณาความเข้มข้นของยาที่ตำแหน่งยาออกฤทธิ์ซึ่งอธิบายได้ด้วยสมการที่ (40)

$$\frac{dC_e(t)}{dt} = k_{1e} C_1(t) - k_{e0} C_e(t), \quad C_e(0) = 0, \quad (40)$$

โดยที่ $C_1(t)$ เป็นฟังก์ชันของเวลา ซึ่งคำนวณได้จากสมการที่ (37) จากสมการที่ (40) สามารถเขียนใหม่ได้เป็นสมการที่ (41)

$$\frac{dC_e(t)}{dt} + k_{e0} C_e(t) = k_{1e} C_1(t), \quad C_e(0) = 0, \quad (41)$$

ซึ่งเป็นสมการเชิงอนุพันธ์ไม่เอกพันธ์ (Non-Homogeneous Differential Equation) จากสมการที่ (41) ใช้ตัวประกอบอินทิเกรต (Integrating Factor)

$$\mu(t) = e^{k_{e0} t}.$$

คูณทั้งสองข้างของสมการที่ (41) ด้วย $\mu(t)$ จะได้สมการที่ (42)

$$e^{k_{e0} t} \frac{dC_e(t)}{dt} + k_{e0} e^{k_{e0} t} C_e(t) = k_{1e} e^{k_{e0} t} C_1(t),$$

ซึ่งสามารถเขียนในรูปอนุพันธ์ได้เป็น

$$\frac{d}{dt} (e^{k_{e0} t} C_e(t)) = k_{1e} e^{k_{e0} t} C_1(t). \quad (42)$$

จากนั้นอินทิเกรตทั้งสองข้างจาก 0 ถึง t จะได้

$$e^{k_{e0} t} C_e(t) - e^{k_{e0} (0)} C_e(0) = k_{1e} \int_0^t e^{k_{e0} t} C_1(t) dt,$$

เมื่อใช้เงื่อนไขเริ่มต้น $C_e(0) = 0$ จะได้สมการที่ (43)

$$C_e(t) = k_{1e} e^{-k_{e0} t} \int_0^t e^{k_{e0} t} C_1(t) dt. \quad (43)$$

จากสมการที่ (37) สามารถเขียน $C_I(t)$ ในรูปผลรวมของพจน์เอ็กซีโปเนนเชียลได้เป็น

$$C_I(t) = \sum_{i=0}^3 a_i e^{\beta_i t}.$$

โดยที่ $\beta_0 = -k_a$, $\beta_1 = \lambda_1$, $\beta_2 = \lambda_2$, $\beta_3 = \lambda_3$ (44)

และ a_i คือสัมประสิทธิ์ของแต่ละพจน์ ซึ่งได้จากสมการที่ (37) แทนค่า $C_I(t)$ ในสมการที่ (43) จะได้

$$C_e(t) = k_{le} e^{-k_{e0}t} \sum_{i=0}^3 a_i \int_0^t e^{(k_{e0} + \beta_i)t} dt,$$

$$\text{จะได้} \int_0^t e^{(k_{e0} + \beta_i)t} dt = \frac{e^{(k_{e0} + \beta_i)t} - 1}{k_{e0} + \beta_i}, \quad k_{e0} + \beta_i \neq 0,$$

ดังนั้น

$$C_e(t) = k_{le} \sum_{i=0}^3 \frac{a_i}{k_{e0} + \beta_i} (e^{\beta_i t} - e^{-k_{e0}t}).$$

ผลการศึกษา

จากเงื่อนไขพื้นฐาน ดังสมการที่ (1) - (5) โดยใช้วิธีการทางคณิตศาสตร์ เราได้ผลเฉลยเชิงวิเคราะห์ในรูปแบบปิด ดังนี้

$$C_a(t) = C_0 e^{-k_a t},$$

$$C_I(t) = k_a C_0 \left(\frac{-(k_a - k_{2I})(k_a - k_{3I})}{(k_a + \lambda_1)(k_a + \lambda_2)(k_a + \lambda_3)} e^{-k_a t} + \frac{(\lambda_1 + k_{2I})(\lambda_1 + k_{3I})}{(\lambda_1 + k_a)(\lambda_1 - \lambda_2)(\lambda_1 - \lambda_3)} e^{\lambda_1 t}, \right. \\ \left. + \frac{(\lambda_2 + k_{2I})(\lambda_2 + k_{3I})}{(\lambda_2 + k_a)(\lambda_2 - \lambda_1)(\lambda_2 - \lambda_3)} e^{\lambda_2 t} + \frac{(\lambda_3 + k_{2I})(\lambda_3 + k_{3I})}{(\lambda_3 + k_a)(\lambda_3 - \lambda_1)(\lambda_3 - \lambda_2)} e^{\lambda_3 t} \right),$$

$$C_2(t) = k_a k_{I2} C_0 \left(\frac{k_a - k_{3I}}{(k_a + \lambda_1)(k_a + \lambda_2)(k_a + \lambda_3)} e^{-k_a t} + \frac{\lambda_1 + k_{3I}}{(\lambda_1 + k_a)(\lambda_1 - \lambda_2)(\lambda_1 - \lambda_3)} e^{\lambda_1 t}, \right. \\ \left. + \frac{\lambda_2 + k_{3I}}{(\lambda_2 + k_a)(\lambda_2 - \lambda_1)(\lambda_2 - \lambda_3)} e^{\lambda_2 t} + \frac{\lambda_3 + k_{3I}}{(\lambda_3 + k_a)(\lambda_3 - \lambda_1)(\lambda_3 - \lambda_2)} e^{\lambda_3 t} \right),$$

$$C_3(t) = k_a k_{I3} C_0 \left(\frac{k_a - k_{2I}}{(k_a + \lambda_1)(k_a + \lambda_2)(k_a + \lambda_3)} e^{-k_a t} + \frac{\lambda_1 + k_{2I}}{(\lambda_1 + k_a)(\lambda_1 - \lambda_2)(\lambda_1 - \lambda_3)} e^{\lambda_1 t}, \right. \\ \left. + \frac{\lambda_2 + k_{2I}}{(\lambda_2 + k_a)(\lambda_2 - \lambda_1)(\lambda_2 - \lambda_3)} e^{\lambda_2 t} + \frac{\lambda_3 + k_{2I}}{(\lambda_3 + k_a)(\lambda_3 - \lambda_1)(\lambda_3 - \lambda_2)} e^{\lambda_3 t} \right),$$

$$C_e(t) = k_{le} \sum_{i=0}^3 \frac{a_i}{k_{e0} + \beta_i} (e^{\beta_i t} - e^{-k_{e0}t}).$$

โดยที่ λ_1, λ_2 และ λ_3 เป็นค่าที่ได้จากสมการที่ (19) - (21) และ β_i ดังสมการที่ (44)

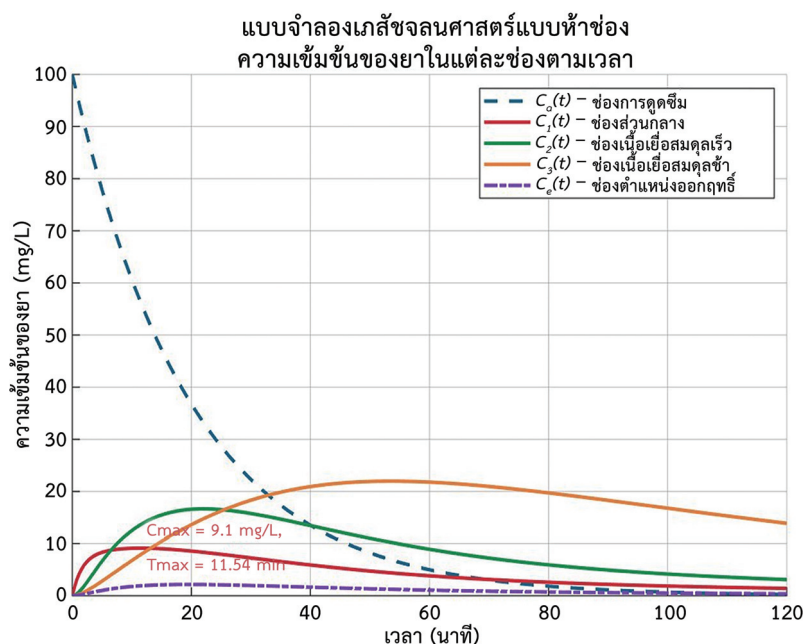
ตัวอย่างการประยุกต์ใช้แบบจำลอง

เพื่อแสดงให้เห็นพฤติกรรมของผลเฉลยเชิงวิเคราะห์ที่ได้ ในงานวิจัยนี้ได้กำหนดค่าพารามิเตอร์อัตราคงที่สมมติที่สอดคล้องกับช่วงค่าที่พบในวรรณกรรมทางเภสัชจลนศาสตร์ของยาที่มีการกระจายตัวแบบหลายช่อง (Cascone et al., 2013; Gabrielsson and Weiner, 2016) โดยพิจารณาการให้ยาทางปากที่ความเข้มข้นเริ่มต้น $C_0 = 100$ mg/L ดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ค่าพารามิเตอร์อัตราคงที่ที่ใช้ในตัวอย่างการประยุกต์ใช้แบบจำลอง

พารามิเตอร์	ค่า (min^{-1})	พารามิเตอร์	ค่า (min^{-1})
k_a	0.05	k_{13}	0.10
k_{10}	0.10	k_{31}	0.02
k_{12}	0.30	k_{1e}	0.05
k_{21}	0.15	k_{e0}	0.20

เมื่อแทนค่าพารามิเตอร์ในตารางที่ 2 ลงในสมการที่ (16) - (18) จะได้สัมประสิทธิ์ของสมการลักษณะเฉพาะ ดังนี้ $p=0.7200$, $q=0.0495$ และ $r=0.0005$ เมื่อคำนวณค่า m และ n ตามขั้นตอนในสมการที่ (19) - (21) จะได้ $m=-0.1233$ และ $n=0.0162$ โดยที่ค่าตัวแบ่งแยก (Discriminant) คือ $\frac{n^2}{4} + \frac{m^3}{27} = -3.67 \times 10^{-6} < 0$ ซึ่งบ่งชี้ว่าสมการลักษณะเฉพาะมีรากจริงสามตัวที่แตกต่างกัน ได้แก่ $\lambda_1 = -0.6443 \text{ min}^{-1}$, $\lambda_2 = -0.0650 \text{ min}^{-1}$ และ $\lambda_3 = -0.0107 \text{ min}^{-1}$ เมื่อนำค่าเอกลักษณ์ทั้งสามแทนลงในผลเฉลยเชิงวิเคราะห์ที่ได้ในหัวข้อผลการศึกษา และคำนวณด้วยโปรแกรม MATLAB จะได้กราฟความเข้มข้นของยาในแต่ละช่องตามเวลาของยาในทุกช่องในช่วงเวลา 0 ถึง 120 นาที ดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 กราฟความเข้มข้นของยาในแต่ละช่องตามเวลาของแบบจำลองเภสัชจลนศาสตร์แบบห้าช่องที่ได้จากผลเฉลยเชิงวิเคราะห์โดยใช้ค่าพารามิเตอร์ในตารางที่ 2

จากรูปที่ 2 พบว่าความเข้มข้นของยาในแต่ละช่องมีพฤติกรรมสอดคล้องกับทฤษฎีเภสัชจลนศาสตร์ ดังนี้ ช่องการดูดซึม $C_a(t)$ ลดลงแบบเอ็กซ์โปเนนเชียลอย่างต่อเนื่องตั้งแต่เวลาเริ่มต้น สะท้อนการถ่ายโอนยาจากระบบทางเดินอาหารเข้าสู่ระบบไหลเวียนโลหิต ช่องส่วนกลาง $C_1(t)$ มีความเข้มข้นสูงสุดที่ประมาณ 9.10 mg/L ที่เวลา 11.54 นาที จากนั้นลดลงตามการกระจายตัวของยาไปยังช่องเนื้อเยื่อและการกำจัดยา ช่องเนื้อเยื่อที่เข้าสู่สมดุลเร็ว $C_2(t)$ มีความเข้มข้นสูงสุดที่ประมาณ 16.67 mg/L ที่เวลา 21.97 นาที ซึ่งช้ากว่าช่องส่วนกลางเนื่องจากต้องรอรับยาจากช่องส่วนกลางก่อน และลดลงเร็วกว่าช่องเนื้อเยื่อที่เข้าสู่สมดุลช้า สอดคล้องกับค่า $k_{21} > k_{31}$ ที่กำหนด ช่องเนื้อเยื่อที่เข้าสู่สมดุลช้า $C_3(t)$ มีความเข้มข้นสูงสุดที่ประมาณ 21.98 mg/L ที่เวลา 53.43 นาที และยังคงมีการสะสมของ

ยาอยู่ในระดับ 13.90 mg/L เมื่อสิ้นสุดการจำลองที่เวลา 120 นาที สะท้อนถึงลักษณะการกระจายตัวที่ช้าและการคืนตัวของยากลับสู่ช่องส่วนกลางอย่างช้า ๆ ช่องตำแหน่งออกฤทธิ์ $C_e(t)$ มีความเข้มข้นสูงสุดที่ประมาณ 2.16 mg/L ที่เวลา 19.45 นาที ซึ่งช้ากว่าช่องส่วนกลาง สะท้อนให้เห็นถึงความล่าช้าในการถ่ายโอนยาไปยังตำแหน่งออกฤทธิ์ (Effect-Site Equilibration Delay) ซึ่งเป็นลักษณะสำคัญของแบบจำลองเภสัชจลนศาสตร์-เภสัชพลศาสตร์ (Gabrielsson and Weiner, 2016)

ผลดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าผลเฉลยเชิงวิเคราะห์ในรูปแบบปิดที่ได้สามารถอธิบายพลวัตของความเข้มข้นของยาในทุกช่องได้อย่างสมบูรณ์และสอดคล้องกับพฤติกรรมทางเภสัชจลนศาสตร์ที่คาดหวัง

สรุปและอภิปรายผลการศึกษา

การศึกษานี้มุ่งเน้นการหาผลเฉลยเชิงวิเคราะห์ของแบบจำลองเภสัชจลนศาสตร์แบบห้าช่องที่พัฒนาขึ้น เพื่ออธิบายพลวัตของยาในระบบชีวภาพอย่างครอบคลุม ทั้งช่องการดูดซึม ช่องส่วนกลาง ช่องเนื้อเยื่อ และช่องตำแหน่งออกฤทธิ์ แบบจำลองดังกล่าวถูกนิยามในรูปของระบบสมการเชิงอนุพันธ์สามัญ และทำการหาผลเฉลยด้วยเทคนิคทางคณิตศาสตร์ที่เป็นที่ยอมรับ ได้แก่ วิธีแยกตัวแปร การวิเคราะห์ค่าเอกลักษณะร่วมกับการแปลงลาปลาซ และวิธีสัมประสิทธิ์ไม่ทราบค่า ผลการศึกษาพบว่าสามารถหาผลเฉลยเชิงวิเคราะห์ได้ในรูปแบบปิดสำหรับความเข้มข้นของยาในทุกช่อง ซึ่งช่วยให้เห็นโครงสร้างของระบบและความสัมพันธ์ระหว่างพารามิเตอร์ของแบบจำลองได้อย่างชัดเจน อย่างไรก็ตาม ผลเฉลยบางส่วนเกี่ยวข้องกับค่าเอกลักษณะเชิงซ้อน ทั้งนี้แม้จะมีข้อจำกัดดังกล่าว ผลเฉลยเชิงวิเคราะห์ที่ได้ยังมีบทบาทสำคัญในการช่วยทำความเข้าใจพลวัตของระบบเภสัชจลนศาสตร์ในเชิงทฤษฎี

นอกจากนี้ในงานวิจัยนี้ได้นำเสนอตัวอย่างการประยุกต์ใช้แบบจำลองโดยกำหนดค่าพารามิเตอร์อัตราคงที่ที่สอดคล้องกับช่วงค่าที่พบในวรรณกรรมทางเภสัชจลนศาสตร์ (Cascone et al., 2013; Gabrielsson and Weiner, 2016) และแสดงกราฟความเข้มข้นของยาในแต่ละช่องตามเวลาโดยใช้ผลเฉลยเชิงวิเคราะห์ในรูปแบบปิดที่ได้ ผลที่ได้แสดงให้เห็นว่าความเข้มข้นของยาในแต่ละช่องมีพฤติกรรมสอดคล้องกับทฤษฎีเภสัชจลนศาสตร์ กล่าวคือ ช่องส่วนกลางมีความเข้มข้นสูงสุดก่อนและลดลงตามการกระจายตัวของยา ช่องเนื้อเยื่อที่เข้าสู่สมดุลช้ามีการสะสมยาในระยะยาวสูงกว่าช่องเนื้อเยื่อที่เข้าสู่สมดุลเร็ว และช่องตำแหน่งออกฤทธิ์แสดงให้เห็นความล่าช้าของความเข้มข้นเมื่อเทียบกับช่องส่วนกลาง ซึ่งเป็นลักษณะสำคัญของแบบจำลองแบบหลายช่อง

แบบจำลองห้าช่องที่พัฒนาขึ้นในงานวิจัยนี้มีความสามารถในการอธิบายพลวัตของยาได้ครอบคลุมกว่าแบบจำลองสองช่อง (Reddy and Narayan, 2019) และสี่ช่อง (Sivasubramaniam, 2014) เนื่องจากมีการรวมช่องตำแหน่งออกฤทธิ์ไว้ในโครงสร้างเดียวกัน ทำให้สามารถอธิบายความล่าช้าของความเข้มข้นที่ตำแหน่งออกฤทธิ์ได้โดยตรง ซึ่งแบบจำลองที่มีจำนวนช่องน้อยกว่าไม่สามารถทำได้ อย่างไรก็ตาม เมื่อจำนวนช่องเพิ่มขึ้น การหาผลเฉลยเชิงวิเคราะห์มีความซับซ้อนมากขึ้น โดยเฉพาะสมการลักษณะเฉพาะที่มีดีกรีสูงขึ้น ซึ่งอาจต้องอาศัยวิธีเชิงตัวเลขเพิ่มเติมในการประมาณค่าพารามิเตอร์

งานวิจัยนี้ได้วางรากฐานทางคณิตศาสตร์ที่สำคัญสำหรับการตรวจสอบผลเฉลยเชิงตัวเลข การปรับปรุงแบบจำลองและการขยายผลไปสู่การศึกษาที่ซับซ้อนยิ่งขึ้นในอนาคต ทั้งในเชิงการวิเคราะห์และการประยุกต์ใช้แบบจำลองเภสัชจลนศาสตร์ขั้นสูง

References

- Anton, H. and Dorres, C. (2013). *Elementary Linear Algebra: Applications Version* (11thed). Wiley.
- Browning, A.P., Drovandi, C., Turner, I.W., Jenner, A.L. and Simpson, M.J. (2021). Exact Solutions and Equi-Dosing Regimen Regions for Multi-Dose Pharmacokinetics Models with Transit Compartments. *Journal of Pharmacokinetics and Pharmacodynamics*, 48, 99-131. <https://doi.org/10.1007/s10928-020-09719-8>

- Cascone, S., Lamberti, G., Titomanlio, G. and Piazza, O. (2013). Pharmacokinetics of Remifentanyl: A three-Compartmental Modeling Approach. *Translational Medicine UniSa*, 7, 18-22.
- Gabrielsson, J. and Weiner, D. (2016). *Pharmacokinetic and Pharmacodynamic Data Analysis: Concepts and Applications* (5thed). CRC Press.
- Jan, M., Kubra, K.T., Farooqi, S.H. and Asghar, A. (2025). A Mathematical Approach to Multi-Route Drug Distribution via Compartmental Models. *Modeling Earth Systems and Environment*, 11, 385. <https://doi.org/10.1007/s40808-025-02571-0>
- Kreyszig, E. (2011). *Advanced Engineering Mathematics* (10thed). Wiley.
- Nickalls, R.W.D. (1993). A New Approach to Solving the Cubic: Cardan's Solution Revealed. *The Mathematical Gazette*, 77(480), 354-359. <https://doi.org/10.2307/3619777>
- Kunderu, L.N. and Reddy, S.R. (2018). Administration of Phenytoin in Normal and Uremic Subjects Studied by Two Compartment Mathematical Model. *International Journal of Research*, 7, 2657-2666. https://www.researchgate.net/publication/382493137_Administration_Of_Phenytoin_In_Normal_And_Uremic_Subjects_Studied_By_Two_Compartment_Mathematical_Model
- Reddy, V.S.R.K. and Narayan, K.L. (2019). The Concentration of Digoxin After Intravenous and Oral Administration Studied by a Two-Compartment Model. *Letters in Biomathematics*, 6(2s), 1-15. <https://lettersinbiomath.org/manuscript/index.php/lib/article/view/107/98>
- Rowland, M. and Tozer, T.N. (2011). *Clinical Pharmacokinetics and Pharmacodynamics: Concepts and Applications* (4thed). Lippincott Williams & Wilkins.
- Shargel, L., Wu-Pong, S. and Yu, A.B.C. (2012). *Applied Biopharmaceutics and Pharmacokinetics* (6thed). McGraw-Hill.
- Sivasubramaniam, S. (2014). Review of Pharmacokinetic Models for Target-Controlled Infusions in Anes-Thesia. *International Journal of Basic & Clinical Pharmacology*, 3(3), 417-423. <https://www.ijbcp.com/index.php/ijbcp/article/view/998/895>
- Strang, G. (2016). *Introduction to Linear Algebra* (5thed). Wellesley-Cambridge Press.
- Świątaszczyk, C. and Jødal, L. (2024). First-Order Compartment Model Solutions: Exponential Sums and Beyond. *Journal of Pharmacological and Toxicological Methods*, 128. <https://doi.org/10.1016/j.vascn.2024.107534>
- Uno, Y., Ogawa, E., Aiyoshi, E. and Arai, T. (2018). A Three-Compartment Pharmacokinetic Model to Predict the Interstitial Concentration of Talaporfin Sodium in the Myocardium for Photodynamic Therapy: A Method Combining Measured Fluorescence and Analysis of the Compartmental Origin of the Fluorescence. *Bioengineering*, 6(1). <https://doi.org/10.3390/bioengineering6010001>
- Yakubu, G.D., Abdulhameed, M., Adamu, G.T., Kadas, S.A. and Tukur, S.A. (2023). Accurate Numerical Integration of Highly Stiff Pharmacokinetics Models Using Continuous Block Implicit Hybrid One-Step Collocation Methods. *Journal of Algorithms & Computational Technology*, 17. <https://doi.org/10.1177/17483026231157197>

บทความวิชาการ: การประยุกต์ใช้เทคโนโลยีสามมิติเพื่อเก็บข้อมูลโบราณสถาน กรณีศึกษาวัดเซตวัน (กาเผือก)

Academic Article: Application 3D Scanner for Heritage Building Data: Chetawan (Ka Pheuak)

ณพล ศรีศักดิ์¹ ฤทธิยุทธ ก้อนทอง^{1*} ณรงค์ เหลืองบุตรนาค² อภิชาติ บัวกล้า¹ อนุจิต ภูมิพันธ์¹ และ
พรปวีณ์ ชัยแก้ว¹

Napol Srisalda¹ Rittayut Gonthong^{1*} Narong Luengbootnak² Apichat Buakla¹ Anujit Phumipan¹
and Pornpawee Chaikaew¹

Received: March 28, 2025; Revised: September 25, 2025; Accepted: September 29, 2025

บทคัดย่อ

การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่ออธิบายลักษณะเฉพาะของพื้นที่ศึกษาและเปรียบเทียบประสิทธิภาพการเก็บข้อมูลโบราณสถาน โดยเลือกกรณีศึกษาที่วัดเซตวัน (กาเผือก) จังหวัดพะเยา ซึ่งเป็นโบราณสถานสำคัญของท้องถิ่นล้านนาอายุราว 500 ปี ปัจจุบันเหลือเพียงซากเจดีย์ วิหารฐานอิฐ และแนวกำแพงที่อยู่ในสภาพทรุดโทรม วัดแห่งนี้สะท้อนคุณค่าทางประวัติศาสตร์ สถาปัตยกรรม และภูมิปัญญาชุมชนในอดีต จึงมีความจำเป็นต้องจัดเก็บข้อมูลเชิงกายภาพอย่างละเอียดเพื่อการอนุรักษ์และการศึกษาต่อไป วิธีการวิจัยประกอบด้วย การเก็บข้อมูลด้วยสองแนวทาง ได้แก่ (1) การสำรวจแบบดั้งเดิมโดยใช้กล้อง Total Station และการวัดด้วยแรงคน และ (2) การใช้เครื่องสแกนเลเซอร์สามมิติ Faro Focus M70 เพื่อสร้างชุดข้อมูล Point Cloud และแบบจำลองเชิงดิจิทัล ผลการเปรียบเทียบพบว่าเทคโนโลยีสแกนสามมิติสามารถเก็บข้อมูลได้ด้วยความละเอียดสูงกว่า 2,000 จุดต่อตารางเมตร เข้าถึงพื้นที่ซับซ้อนได้โดยไม่ต้องสัมผัสวัตถุ และใช้เวลาภาคสนามน้อยกว่า ขณะที่การสำรวจแบบดั้งเดิมแม้จะมีต้นทุนต่ำและคุ้นเคยต่อผู้ปฏิบัติงานแต่มีข้อจำกัดด้านความละเอียดและการเข้าถึงพื้นที่บางส่วน โดยสรุป การใช้เทคโนโลยีสแกนสามมิติมีศักยภาพสูงกว่าสำหรับงานอนุรักษ์เชิงดิจิทัล การสร้างแบบจำลอง 3 มิติ เข้าถึงพื้นที่ซับซ้อนได้ และรวดเร็วกว่า ขณะที่วิธีดั้งเดิมมีข้อดีเรื่องความคุ้นเคยและต้นทุนต่ำ การผสมผสานทั้งสองวิธีจะเพิ่มความแม่นยำและศักยภาพของข้อมูล เพื่อนำไปใช้ด้านวิศวกรรมโบราณคดี และการอนุรักษ์วัฒนธรรมอย่างยั่งยืน

คำสำคัญ : การสแกนสามมิติ; การสำรวจโบราณสถาน; เทคโนโลยีการอนุรักษ์; แบบจำลองเชิงดิจิทัล

¹ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยพะเยา

² คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

¹ Faculty of Engineering, University of Phayao

² Faculty of Engineering, Khon Kaen University

* Corresponding Author, Tel. 06 2356 6582, E - mail: rittayut.go@up.ac.th

Abstract

This study aims to describe the distinctive characteristics of the study area and to compare the efficiency of heritage site data collection methods. The case study focuses on Wat Chetawan (Ka Phueak) in Phayao Province, an important Lanna heritage site with an estimated age of around 500 years. At present, only the remains of the stupa, brick temple base, and wall structures remain in deteriorated condition. The site reflects the historical, architectural, and cultural values of the local community, making it necessary to record detailed physical data for conservation and further research. The research methodology consists of two approaches: (1) traditional surveying using a Total Station and manual measurements, and (2) three-dimensional laser scanning with the Faro Focus M70 to generate Point Cloud datasets and digital models. The comparative results show that 3D scanning can capture data with a resolution of more than 2,000 points per square meter, access complex areas without physical contact, and reduce fieldwork time. In contrast, traditional surveying, while cost-effective and familiar to practitioners, is limited in terms of resolution and access to certain areas. In conclusion, 3D scanning demonstrates greater potential for digital conservation, 3D modeling, rapid fieldwork, and non-invasive data acquisition. Traditional methods, however, still offer advantages in terms of familiarity and lower costs. Integrating both methods enhances accuracy and data potential, enabling applications in engineering, archaeology, and sustainable cultural heritage preservation.

Keywords: 3D Scanning; Heritage Site Survey; Conservation Technology; Digital Modeling

บทนำ

การเก็บข้อมูลเชิงกายภาพของโบราณสถานถือเป็นขั้นตอนพื้นฐานที่มีความสำคัญยิ่งในการอนุรักษ์ พื้นฟู และศึกษาทางประวัติศาสตร์และสถาปัตยกรรม โดยเฉพาะอย่างยิ่งในพื้นที่ที่มีความสำคัญทางศิลปวัฒนธรรม (Bouziani et al., 2021) เช่น วัดเชตวัน (กาเผือก) ซึ่งตั้งอยู่ในจังหวัดพะเยา ถือเป็นแหล่งโบราณสถานที่มีคุณค่าทางประวัติศาสตร์ท้องถิ่นและศิลปกรรมล้านนา วัดแห่งนี้มีลักษณะทางสถาปัตยกรรมและโครงสร้างที่สะท้อนถึงรูปแบบและแนวคิดของชุมชนในอดีต การจัดเก็บข้อมูลรายละเอียดขององค์ประกอบต่าง ๆ เช่น เจดีย์ วิหาร ซากกำแพง และฐานราก จึงมีความสำคัญอย่างยิ่งต่อการศึกษาทางวิชาการและการอนุรักษ์อย่างยั่งยืน

เนื่องจากโบราณสถานส่วนใหญ่มีสภาพเสื่อมโทรมตามกาลเวลา การบันทึกข้อมูลในช่วงเวลาปัจจุบันจึงเปรียบได้กับการเก็บ “หลักฐาน” ที่สำคัญก่อนที่จะเกิดการสูญเสีย ทั้งจากการกัดกร่อนทางธรรมชาติและการเปลี่ยนแปลงทางสังคม การจัดทำแผนที่สามมิติหรือแบบจำลองที่แม่นยำช่วยให้สามารถวิเคราะห์โครงสร้างได้โดยไม่กระทบต่อของจริง และยังเปิดโอกาสให้สามารถนำข้อมูลไปใช้ในด้านอื่น ๆ เช่น การสร้างแบบจำลองเพื่อการเรียนรู้ การจัดแสดงในพิพิธภัณฑ์เสมือน หรือแม้แต่การฟื้นฟูโดยใช้เทคโนโลยีทางวิศวกรรม (Bouziani et al., 2021; Tysiac et al., 2023)

วัดเชตวัน หรือที่ชาวบ้านรู้จักในชื่อ “วัดกาเผือก” ตั้งอยู่ในเขตเทศบาลเมืองพะเยา จังหวัดพะเยา เป็นหนึ่งในโบราณสถานที่มีความสำคัญทั้งในด้านประวัติศาสตร์ ศิลปวัฒนธรรม และภูมิปัญญาท้องถิ่นล้านนา จากการสันนิษฐานตามหลักฐานทางโบราณคดีและคำบอกเล่าของชาวบ้าน วัดแห่งนี้มีอายุไม่ต่ำกว่า 500 ปี และเป็นศูนย์กลางของชุมชนในยุคก่อนประวัติศาสตร์เมืองพะเยาจะถูกผนวกกรมเข้าสู่รัชชาติไทยในปัจจุบัน ปัจจุบันวัดเชตวันเหลือเพียงซากโบราณสถาน เช่น เจดีย์ วิหารฐานอิฐ และแนวกำแพงดิน ซึ่งล้วนอยู่ในสภาพทรุดโทรมจากทั้งธรรมชาติและ การแปรเปลี่ยนของพื้นที่โดยรอบ

ในบริบทของการอนุรักษ์และฟื้นฟูโบราณสถาน การจัดเก็บข้อมูลเชิงกายภาพของโบราณสถานในระดับความละเอียดสูงจึงมีความจำเป็นอย่างยิ่ง โดยเฉพาะอย่างยิ่งในช่วงเวลาที่สภาพแวดล้อมและโครงสร้างยังคงพอมิเค้า

รูปเดิมให้ศึกษา การเก็บข้อมูลในเชิงเรขาคณิต (Klapa and Gawronek, 2023; An and Froese, 2023) และเชิงพื้นที่ (Geometric and Spatial Data) ของโบราณสถานแห่งนี้ไม่เพียงเป็นการบันทึกสภาพปัจจุบันของโบราณสถานเท่านั้น แต่ยังเป็นเครื่องมือสำคัญในการวางแผนฟื้นฟูเชิงอนุรักษ์ และสนับสนุนการศึกษาวิจัยข้ามสาขา เช่น ประวัติศาสตร์ สถาปัตยกรรมโบราณ วิศวกรรมโครงสร้าง และการออกแบบดิจิทัล (Alshawabkeh et al., 2021)

ในอดีต การเก็บข้อมูลเชิงกายภาพของโบราณสถานมักอาศัยวิธีการสำรวจแบบดั้งเดิม เช่น การใช้กล้อง Total Station การวัดระยะทางและมุมด้วยแรงคน ซึ่งแม้จะให้ข้อมูลที่มีความแม่นยำระดับหนึ่ง แต่กลับมีข้อจำกัดทั้งในด้านความละเอียด ความรวดเร็ว และการเข้าถึงพื้นที่บางส่วนที่มีความเปราะบางสูง (Martínez-Carricondo et al., 2021; Alshawabkeh and Baik, 2023; Tini et al., 2024) การประยุกต์ใช้เทคโนโลยีสแกนสามมิติ (3D Laser Scanning) (López et al., 2018) เข้ามาแทนที่หรือเสริมกระบวนการดั้งเดิม จึงถือเป็นทางเลือกที่มีศักยภาพสูง ด้วยความสามารถในการเก็บข้อมูลจุด (Point Cloud) ได้อย่างละเอียดและครอบคลุมในเวลาอันสั้นโดยไม่กระทบต่อโบราณสถาน

ดังนั้นงานวิจัยนี้มุ่งเน้นการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีสแกนสามมิติในการสำรวจโบราณสถาน โดยเปรียบเทียบกับวิธีดั้งเดิมในด้านความถูกต้องของข้อมูล ระยะเวลาในการดำเนินการ กำลังคนที่ใช้ และความเป็นไปได้ในการนำไปใช้ในการอนุรักษ์โบราณสถาน ผลการศึกษานี้จะช่วยให้เห็นถึงข้อดีและข้อจำกัดของการใช้เทคโนโลยีสแกนสามมิติ และสนับสนุนแนวทางการบริหารจัดการโบราณสถานที่มีประสิทธิภาพมากขึ้น

วิธีดำเนินการวิจัย

การวิจัยครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพของการเก็บข้อมูลโบราณสถาน โดยเลือกกรณีศึกษาที่วัดเชตวัน (กาเผือก) จังหวัดพะเยา ซึ่งตั้งอยู่ในเขตเทศบาลเมืองพะเยา เป็นโบราณสถานที่มีอายุไม่ต่ำกว่า 500 ปี และมีคุณค่าทางประวัติศาสตร์ สถาปัตยกรรม และภูมิปัญญาท้องถิ่นล้านนา พื้นที่วัดปัจจุบันประกอบด้วยซากเจดีย์ วิหารฐานอิฐ และแนวกำแพงดินที่ทรุดโทรม แต่ยังสะท้อนให้เห็นโครงสร้างดั้งเดิมที่เคยเป็นศูนย์กลางของชุมชนโบราณ พื้นที่โดยรอบวัดอยู่ในเขตเมืองซึ่งมีทั้งการขยายตัวของชุมชนสมัยใหม่และการใช้พื้นที่ร่วมกับวิถีชีวิตท้องถิ่น เช่น ตลาดและย่านการค้า จึงเป็นสภาพแวดล้อมที่มีความท้าทายต่อการอนุรักษ์โบราณสถาน

นอกจากความสำคัญทางกายภาพแล้ว บริบทชุมชนรอบวัดเชตวันยังเป็นแหล่งสืบทอดความทรงจำและประวัติศาสตร์ปากเปล่าของชาวบ้านในพื้นที่ ทำให้การเก็บข้อมูลโบราณสถานแห่งนี้ไม่เพียงแต่เป็นการบันทึกโครงสร้างทางสถาปัตยกรรมเท่านั้น แต่ยังเป็นการเชื่อมโยงกับวิถีชีวิต วัฒนธรรม และอัตลักษณ์ของคนในท้องถิ่น โดยกระบวนการวิจัยแบ่งออกเป็น 3 ขั้นตอนหลัก ได้แก่ 1) การเตรียมความพร้อมและสำรวจภาคสนาม 2) การจัดเก็บและประมวลผลข้อมูล และ 3) การวิเคราะห์เปรียบเทียบผลลัพธ์จากทั้งสองวิธี

1. การเตรียมความพร้อมและสำรวจภาคสนาม

1.1 ทำการสำรวจพื้นที่วัดเชตวัน (กาเผือก) เพื่อกำหนดขอบเขตของโบราณสถานที่ต้องการจัดเก็บข้อมูล เช่น เจดีย์ วิหาร ซากฐานอิฐ และแนวกำแพง ดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 การสำรวจพื้นที่วัดเชตวัน

1.2 วางแผนตำแหน่งจุดตั้งอุปกรณ์สำหรับทั้งกล้อง Total Station และเครื่อง 3D Laser Scanner เพื่อให้สามารถครอบคลุมพื้นที่ได้อย่างครบถ้วน ดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 การวางแผนตำแหน่งการดำเนินงาน

1.3 ใช้การวัดระยะทางจริง (Ground Control) เพื่อเป็นข้อมูลอ้างอิงร่วมในการประมวลผลข้อมูลจากทั้งสองระบบ

2. การจัดเก็บและประมวลผลข้อมูล

2.1 การเก็บข้อมูลด้วยวิธีดั้งเดิม ในส่วนของการเก็บข้อมูลด้วยวิธีการสำรวจแบบดั้งเดิม ใช้วิธีการที่อาศัยแรงงานคนร่วมกับเครื่องมือวัดทางวิศวกรรม คือ กล้อง Total Station โดยมีขั้นตอนหลัก ดังนี้

2.1.1 การใช้กล้อง Total Station เพื่อวัดจุดสำคัญของโบราณสถาน ทำการตั้งกล้อง Total Station ณ ตำแหน่งที่สามารถมองเห็นพื้นที่เป้าหมายอย่างชัดเจน และสามารถเชื่อมโยงระหว่างสถานีได้ (Visibility Network) โดยก่อนเริ่มงานได้มีการปักหมุดควบคุม (Control Points) รอบพื้นที่เพื่อเป็นจุดอ้างอิงในการหาค่าพิกัดในระบบฉาก (Cartesian Coordinates: X, Y, Z) จุดที่ทำการวัดประกอบด้วย

- 1) มุมฐานของเจดีย์
- 2) แนวเสาก่ออิฐ
- 3) ร่องรอยผนังวิหาร
- 4) ขอบเขตแนวกำแพงโบราณ

การวัดทำในลักษณะการยิงพิกัดจากกล้องไปยังปริซึม (Prism) ที่ตั้งอยู่บนจุดที่ต้องการวัด โดยบันทึกค่าระยะทาง (Distance) มุมราบ (Horizontal Angle) และมุมตั้ง (Vertical Angle) แล้วคำนวณเป็นพิกัด X, Y, Z ด้วยซอฟต์แวร์ควบคุมกล้อง ดังรูปที่ 3



รูปที่ 3 การวัด โดยการส่องกล้อง Total Station ไปยังปริซึม

2.1.2 การวัดระยะเชิงเส้นและมุมด้วยแรงคนในบางจุดที่กล้องไม่สามารถเข้าถึงได้ เนื่องจากสภาพพื้นที่ของวัดเขตวันมีบางจุดที่เข้าถึงยาก คือ พื้นที่ด้านหลังเจดีย์ที่มีเศษซากวัสดุกองอยู่ และจุดอับสายตาที่กล้องไม่สามารถยิงระยะได้ จึงจำเป็นต้องใช้การวัดแบบแมนนวล ได้แก่

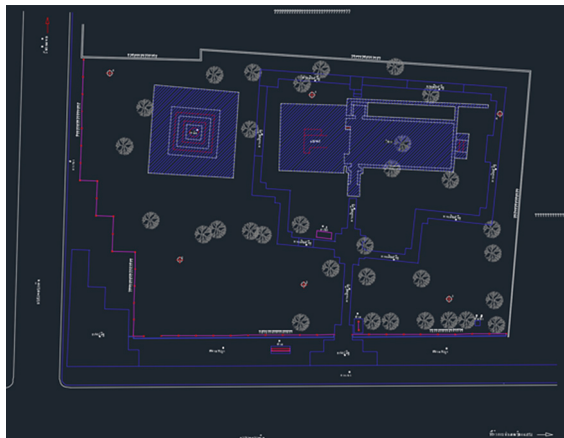
- 1) การวัดระยะทางด้วยสายวัดเหล็ก (Steel Tape)
- 2) การวัดมุมคร่าว ๆ ด้วยโปรแทรกเตอร์หรือเครื่องมือวัดมุมมือถือ
- 3) การคาดคะเนระยะแนวตั้งด้วยลูกดิ่งหรือระดับน้ำ

แม้ว่าข้อมูลจากวิธีนี้จะมีความแม่นยำน้อยกว่าวิธีการวัดด้วยกล้อง แต่ก็สามารถใช้เสริมข้อมูลในจุดที่ขาดหายไปได้ และมีประโยชน์ในแง่ของการประเมินรูปทรงเชิงโครงสร้างเบื้องต้น

2.1.3 การประมวลผลข้อมูลด้วย Autodesk AutoCAD ข้อมูลพิกัด X, Y, Z ที่ได้จากกล้อง Total Station จะถูกนำเข้าสู่ออฟต์แวร์ Autodesk AutoCAD เพื่อดำเนินการร่างแบบโครงสร้างเชิงราบ (2D Drafting) โดยมีขั้นตอนดังนี้

- 1) แปลงค่าพิกัดให้อยู่ในระบบฉากของ AutoCAD (ผ่านการ Import หรือพิมพ์จุดด้วยคำสั่ง LINE, POINT, หรือ POLYLINE)
- 2) สร้างรูปทรงโครงสร้างตามแนวที่ได้จากการวัดในส่วนต่าง ๆ ได้แก่ การสร้างเส้นผนัง ฐานราก เจดีย์ ฯลฯ
- 3) กำหนดชั้นข้อมูล (Layer) แยกตามประเภทองค์ประกอบ ได้แก่ ผนัง พื้น เสา และแนวกำแพง
- 4) ใส่ข้อความและรายละเอียด (Annotation) เพื่อระบุลักษณะของจุดต่าง ๆ ตามที่สังเกตภาคสนาม

ข้อมูลผลลัพธ์ที่ได้ในรูปแบบ 2D Drawing นี้จะนำไปใช้เป็นฐานเปรียบเทียบกับผลการสแกนสามมิติในหัวข้อถัดไป เพื่อประเมินความแตกต่างด้านความละเอียด ความครบถ้วนของข้อมูล และความสะดวกในการประมวลผล ดังรูปที่ 4



รูปที่ 4 การประมวลผลข้อมูลด้วย Autodesk AutoCAD

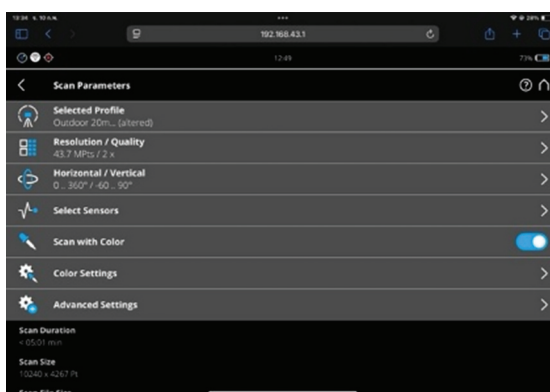
2.2 การเก็บข้อมูลด้วยเทคโนโลยีสแกนสามมิติ การเก็บข้อมูลโบราณสถานด้วยเทคโนโลยีสแกนสามมิติในงานวิจัยนี้ ใช้เครื่อง Faro Focus M70 ซึ่งเป็นเลเซอร์สแกนเนอร์แบบ Time-of-Flight ที่มีความแม่นยำสูงเหมาะสำหรับงานสำรวจภาคสนามในพื้นที่เปิดโล่ง โดยสามารถสแกนระยะไกลได้ถึง 70 เมตรด้วยความละเอียดระดับมิลลิเมตร โดยกระบวนการสำรวจและประมวลผลข้อมูลแบ่งออกเป็น 3 ขั้นตอนหลัก ได้แก่ การเตรียมการสแกน การสแกนในภาคสนาม และการประมวลผลข้อมูล

2.2.1 การเตรียมการสแกน ก่อนเริ่มการสแกน ได้ทำการสำรวจเบื้องต้นเพื่อกำหนดตำแหน่งที่จะตั้งเครื่องสแกน Faro Focus M70 โดยพิจารณาจากปัจจัยต่อไปนี้

- 1) มุมมองของพื้นที่ (Line of Sight) ให้สามารถครอบคลุมพื้นที่เป้าหมาย
- 2) ระยะระหว่างจุดตั้ง (Scan Station) เพื่อให้มีระยะซ้อนทับอย่างน้อย 30 % สำหรับการเชื่อมข้อมูล (Registration)
- 3) พื้นผิวเป้าหมาย ได้แก่ ผนัง เจดีย์ ฐานอิฐ และซากกำแพง ที่สามารถสะท้อนเลเซอร์ได้ดี นอกจากนี้ได้มีการติดตั้ง Target Sphere และ Reference Markers บางจุด เพื่อใช้เป็นจุดควบคุมในการเชื่อมข้อมูลระหว่างหลายสถานีสแกน

2.2.2 การสแกนภาคสนามด้วย Faro Focus M70 ในภาคสนาม มีการตั้งเครื่องสแกนรวมทั้งหมด 10 สถานี เพื่อครอบคลุมพื้นที่รอบโบราณสถานทั้งหมด โดยที่แต่ละสถานีจะทำการสแกน 360 องศา พร้อมเก็บข้อมูลภาพถ่ายจริง (Color Capture) เพื่อสร้าง Point Cloud ที่มีสีสมจริง (RGB Point Cloud) โดยมีรายละเอียดเชิงเทคนิคของการตั้งค่าเครื่องสแกน ดังนี้

- 1) ปรับความละเอียดในระดับกลาง-สูง (1/4 Resolution) เพื่อสมดุลระหว่างเวลาและคุณภาพ
- 2) เลือกกระดับการเก็บข้อมูลสูง Quality 3x เพื่อเพิ่มความแม่นยำของข้อมูลจุด
- 3) เวลาที่ใช้ในการสแกนวัตถุ ประมาณ 6 - 8 นาทีต่อสถานี ขึ้นอยู่กับความละเอียด ดังรูปที่ 5



รูปที่ 5 รายละเอียดการตั้งค่าเครื่องสแกน Faro Focus M70

หลังจากสแกนในแต่ละจุดเสร็จแล้ว จะมีการตรวจสอบความสมบูรณ์ของข้อมูลทันที เพื่อป้องกันการสูญหายของข้อมูลจากแสงแดดจัดหรือเงาวัตถุ ดังรูปที่ 6



รูปที่ 6 การสแกนภาคสนามด้วยเครื่องสแกน Faro Focus M70

2.2.3 การประมวลผลข้อมูลด้วยซอฟต์แวร์ Faro Scene และอื่น ๆ หลังจากเก็บข้อมูลครบถ้วนในภาคสนามแล้ว ได้ทำการถ่ายโอนข้อมูลจากเครื่องสแกนเข้าสู่ซอฟต์แวร์ Faro Scene เพื่อดำเนินการประมวลผล โดยมีขั้นตอนหลัก ดังนี้

- 1) เชื่อมข้อมูลจากแต่ละสถานีให้เป็น Point Cloud เดียวกัน โดยใช้ทั้งวิธีการจับคู่จุด (Target-based) และการจับคู่อัตโนมัติ (Cloud-to-Cloud)
- 2) ตัดข้อมูลส่วนเกิน เช่น ต้นไม้ เสาคน หรือจุดรบกวนในอากาศ (Noise) ออกจากข้อมูลหลัก
- 3) แปลง Point Cloud เป็นผิวตาข่าย (Mesh) หากต้องการใช้งานด้านการนำเสนอ หรือสร้างโมเดล 3D เพื่อเปรียบเทียบกับแบบร่าง 2D ที่ได้จาก AutoCAD
- 4) ส่งออกข้อมูลในรูปแบบ .e57 หรือ .las สำหรับการใช้ในซอฟต์แวร์ Autodesk ReCap Pro การประมวลผลทั้งหมดใช้เวลาประมาณ 2 - 3 วัน ขึ้นอยู่กับปริมาณข้อมูลและระดับรายละเอียดของ Point Cloud ที่เก็บมา ดังรูปที่ 7



รูปที่ 7 การประมวลผลข้อมูลด้วย Autodesk Recap

3. การวิเคราะห์เปรียบเทียบผลลัพธ์

หลังจากดำเนินการเก็บข้อมูลโบราณสถานวัดเซตวัน (กาเผือก) ด้วยทั้งวิธีการสำรวจแบบดั้งเดิมและเทคโนโลยีสแกนสามมิติ Faro Focus M70 แล้ว ได้ทำการวิเคราะห์เปรียบเทียบผลลัพธ์ในเชิงปริมาณและเชิงคุณภาพตามหัวข้อต่อไปนี้

3.1 วิธีการวัดผลและเปรียบเทียบผลลัพธ์ เพื่อประเมินและเปรียบเทียบประสิทธิภาพของการเก็บข้อมูลโบราณสถานระหว่างเทคโนโลยีสแกนสามมิติและวิธีการสำรวจแบบดั้งเดิม งานวิจัยนี้กำหนดตัวชี้วัด 5 ด้านหลัก โดยใช้เกณฑ์การวัดผลที่สามารถเปรียบเทียบได้ในเชิงปริมาณและคุณภาพ ดังนี้

3.1.1 ความละเอียดของข้อมูล วัดโดยการประมวลผลข้อมูลจุด (Point Cloud) จากทั้งสองวิธี และคำนวณ จำนวนจุดที่ได้ต่อพื้นที่ 1 ตารางเมตร ในพื้นที่เดียวกัน (Sampling Area) โดยใช้ซอฟต์แวร์วิเคราะห์ข้อมูล Autodesk ReCap Pro เพื่อหาค่าความหนาแน่นของข้อมูลในระดับพื้นผิว รายละเอียดนี้จะสะท้อนถึงความสามารถในการจับรายละเอียดทางเรขาคณิตของโบราณสถาน

3.1.2 ความแม่นยำเชิงมิติ (เมื่อเทียบกับการตรวจสอบจุดจริงภาคสนาม) เลือกจุดควบคุม (Control Points) ที่สามารถเข้าถึงได้ทั้งสองวิธี และทำการวัดซ้ำโดยใช้วิธีแมนนวล เช่น การวัดระยะด้วยสายวัดเลเซอร์ (Laser Distance Meter) หรือ Total Station แล้วเปรียบเทียบผลจากแต่ละวิธีโดยคำนวณค่าคลาดเคลื่อน (Error) หรือความเบี่ยงเบนเฉลี่ย (Mean Absolute Deviation) จากค่าจริง

3.1.3 ระยะเวลาในการทำงาน (ทั้งภาคสนามและประมวลผล) ทำการจับเวลาในแต่ละขั้นตอนของการเก็บข้อมูลและการประมวลผล ทั้งในภาคสนามและในสำนักงาน โดยแยกเป็น 2 ส่วนหลัก ได้แก่

- 1) เวลาในการเตรียมอุปกรณ์และเก็บข้อมูลในสถานที่จริง
- 2) เวลาในการประมวลผลข้อมูลเพื่อให้ได้ผลลัพธ์ที่พร้อมใช้งานในรูปแบบ 2 มิติ หรือโมเดล 3 มิติ การวัดนี้จะช่วยเปรียบเทียบประสิทธิภาพเชิงเวลาและการบริหารทรัพยากร

3.1.4 ข้อจำกัดด้านการเข้าถึงพื้นที่ ประเมินโดยการบันทึกจำนวนหรือสัดส่วนของพื้นที่ที่แต่ละวิธีไม่สามารถเข้าถึงหรือวัดได้ เช่น มุมอับ พื้นที่สูง พื้นที่เปราะบางที่ไม่สามารถสัมผัสได้ ฯลฯ พร้อมบันทึกวิธีที่ใช้แก้ไขหรือหลีกเลี่ยงข้อจำกัดนั้น ๆ เช่น การใช้กล้องหมอนงศา หรือการขยับตำแหน่งอุปกรณ์ การประเมินจะจัดอยู่ในรูปแบบเชิงคุณภาพและรายงานประกอบด้วยภาพถ่าย

3.1.5 ความเหมาะสมต่อการนำไปใช้ในงานอนุรักษ์/วิจัย/จำลอง ประเมินจากคุณลักษณะของผลลัพธ์ข้อมูลที่ได้จากแต่ละวิธี ว่าสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานด้านต่าง ๆ ได้หรือไม่ เช่น

- 1) การนำไปสร้างโมเดล 3 มิติ
- 2) การนำเข้าในซอฟต์แวร์วิเคราะห์โครงสร้าง
- 3) การนำเสนอแบบเสมือนจริง (AR/VR)
- 4) ความสะดวกในการแบ่งปันหรือจัดเก็บเป็นฐานข้อมูลระยะยาว

ผลการทดลองและวิจารณ์

การศึกษานี้ได้เปรียบเทียบผลลัพธ์ของการเก็บข้อมูลโบราณสถานวัดเขตวัน (กาเผือก) ด้วยสองวิธี คือ การสำรวจแบบดั้งเดิม (ใช้กล้อง Total Station และการวัดด้วยแรงคน) และการใช้เทคโนโลยีสแกนสามมิติด้วยเครื่อง Faro Focus M70 โดยพิจารณาในประเด็นหลัก 5 ด้าน ได้แก่ ความละเอียดของข้อมูล ความแม่นยำเชิงมิติ ระยะเวลาในการทำงาน ข้อจำกัดในการเข้าถึงพื้นที่ และความเหมาะสมต่อการนำไปใช้ต่อยอดในด้านต่าง ๆ

1. ความละเอียดของข้อมูล

จากการเก็บข้อมูลในพื้นที่เดียวกัน พบว่าเทคโนโลยี 3D Laser Scanning สามารถเก็บข้อมูลได้ที่มีความละเอียดประมาณ 2,000 - 5,000 จุดต่อตารางเมตร ขึ้นอยู่กับระยะห่างจากเครื่องสแกนและการตั้งค่าคุณภาพ ในขณะที่การสำรวจแบบดั้งเดิมที่ใช้กล้อง Total Station ให้ข้อมูลในลักษณะ “จุดหลัก” คือ ฐานเจดีย์ที่มีความห่างกันมาก โดยเฉลี่ยอยู่ที่ประมาณ 1 - 3 จุดต่อตารางเมตร จึงกล่าวได้ว่า 3D Scanning มีความสามารถในการจับรายละเอียดพื้นผิวและลักษณะทางเรขาคณิตของโบราณสถานได้ดีกว่าอย่างชัดเจน

2. ความแม่นยำเชิงมิติ (เมื่อเทียบกับการตรวจสอบจุดจริงภาคสนาม)

ได้มีการสุ่มตรวจสอบค่าพิกัดจากจุดควบคุม 10 จุดในภาคสนาม โดยใช้การวัดซ้ำด้วยอุปกรณ์ตรวจสอบมาตรฐานพบว่า ข้อมูลจากกล้อง Total Station มีความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยอยู่ที่ ± 3 มิลลิเมตร และข้อมูลจาก Faro Focus M70 มีความคลาดเคลื่อนอยู่ในช่วง ± 2 ถึง ± 5 มิลลิเมตร ซึ่งจะขึ้นอยู่กับสภาพแวดล้อม เช่น เงา การสะท้อนแสง และพื้นผิวเป้าหมาย แม้ว่าทั้งสองวิธีจะมีความแม่นยำในระดับใกล้เคียงกัน แต่ 3D Scanning มีข้อได้เปรียบที่สามารถตรวจสอบหรือวัดซ้ำในภายหลังจากข้อมูล Point Cloud โดยไม่ต้องกลับไปภาคสนาม

3. ระยะเวลาในการทำงาน (ทั้งภาคสนามและประมวลผล)

เมื่อเทียบระยะเวลาโดยรวมของกระบวนการทั้งภาคสนามและการประมวลผล พบว่าการสำรวจแบบดั้งเดิมใช้เวลาภาคสนามประมาณ 3 วัน และใช้เวลาในการประมวลผล (ร่างแบบ 2 มิติใน AutoCAD) อีก 1 วัน ในส่วนของการใช้ 3D Laser Scanning ใช้เวลาภาคสนามเพียง 1 วัน และใช้เวลาประมวลผลข้อมูล Point Cloud และสร้าง 3D Model ประมาณ 3 วัน ถึงแม้การประมวลผลของ 3D Scanning จะใช้เวลานานกว่า แต่สามารถดำเนินการในสำนักงานได้อย่างสะดวก ลดความจำเป็นในการลงพื้นที่ซ้ำ และลดความเสี่ยงต่อโบราณสถานจากการปฏิบัติงานภาคสนาม

4. ข้อจำกัดด้านการเข้าถึงพื้นที่

วิธีดั้งเดิมพบข้อจำกัดในการวัดพื้นที่ที่เข้าถึงยาก เช่น พื้นที่ด้านหลังเจดีย์ ผนังที่พังทลาย หรือมุมอับสายตา ซึ่งทำให้ไม่สามารถเก็บข้อมูลในจุดเหล่านั้นได้อย่างครบถ้วน ในทางกลับกัน Faro Focus M70 สามารถตั้งเครื่องในตำแหน่งที่เหมาะสมเพื่อสแกนพื้นที่รอบด้านโดยไม่ต้องสัมผัสหรือเข้าไปใกล้วัตถุที่เปราะบาง ทำให้สามารถเก็บข้อมูลจากพื้นที่ที่ยากต่อการเข้าถึงได้อย่างมีประสิทธิภาพ

5. ความเหมาะสมต่อการนำไปใช้ในงานอนุรักษ์/วิจัย/จำลอง

จากผลการศึกษาดังตารางที่ 1 (Comparison Table) พบว่าข้อมูลที่ได้จากการสำรวจทั้งสองวิธีมีความเหมาะสมต่อการใช้งานที่แตกต่างกัน การสำรวจแบบดั้งเดิมมีข้อดีในด้านความคุ้นเคยของผู้ปฏิบัติงานและความแม่นยำเชิงจุด แต่มีข้อจำกัดในการสร้างข้อมูลที่ครบถ้วนต่อการใช้งานขั้นสูง ในขณะที่การใช้เทคโนโลยี 3D Laser Scanning Faro Focus M70 สามารถตอบโจทย์การใช้งานได้กว้างขวางกว่า โดยเฉพาะในด้านการอนุรักษ์เชิงดิจิทัล การวิจัยต่อยอด และการจำลองทางวิศวกรรม

ตารางที่ 1 เปรียบเทียบผลการศึกษา

หัวข้อ	การสำรวจแบบดั้งเดิม	3D Laser Scanning (Faro Focus M70)
ความละเอียดของข้อมูล	1 - 3 จุด/ตร.ม. (เฉพาะจุดหลัก)	2,000 - 5,000 จุด/ตร.ม. ครอบคลุมพื้นที่ทั้งหมด
ความแม่นยำเชิงมิติ	± 3 มม. (จากจุดตรวจสอบ 10 จุด)	$\pm 2 - 5$ มม. (ขึ้นกับผิวและระยะยิงเลเซอร์)
ระยะเวลาในการทำงาน	ภาคสนาม 3 วัน, ประมวลผล 1 วัน	ภาคสนาม 1 วัน, ประมวลผล 3 วัน
ข้อจำกัดด้านการเข้าถึงพื้นที่	เข้าถึงลำบากในมุมอับหรือพื้นที่แคบ	เข้าถึงพื้นที่ซับซ้อนโดยไม่ต้องสัมผัสโครงสร้าง
ความเหมาะสมต่อการใช้งานต่อยอด	เหมาะกับงานร่างแบบ 2D พื้นฐาน	เหมาะกับการสร้าง 3D Model, วิเคราะห์/จำลองโครงสร้าง

เมื่อพิจารณาในแง่ของการต่อยอดเพื่อการอนุรักษ์และการวิจัยระยะยาว การใช้เทคโนโลยี 3D Laser Scanning มีศักยภาพสูงกว่าวิธีดั้งเดิม เนื่องจากสามารถสร้างแบบจำลองที่สมบูรณ์ ครอบคลุม และนำไปใช้งานในรูปแบบหลากหลาย ตั้งแต่การอนุรักษ์เชิงดิจิทัล การบูรณะเชิงวิศวกรรม ไปจนถึงการสร้างสื่อการเรียนรู้เสมือนจริง อย่างไรก็ตาม วิธีการสำรวจดั้งเดิมยังคงมีคุณค่าในฐานะวิธีที่ต้นทุนต่ำ ใช้งานง่าย และสามารถใช้ร่วมกับเทคโนโลยีใหม่เพื่อเพิ่มความแม่นยำและความเชื่อมั่นของข้อมูลได้ดีที่สุด การบูรณาการทั้งสองวิธีจึงเป็นแนวทางที่เหมาะสมที่สุดต่อการจัดเก็บและอนุรักษ์โบราณสถานอย่างยั่งยืน

6. การวิเคราะห์และการตีความข้อมูลจากเครื่องสแกนสามมิติ

นอกเหนือจากการเปรียบเทียบเชิงปริมาณระหว่างความละเอียด ความแม่นยำ ระยะเวลา และข้อจำกัดการเข้าถึงแล้ว งานวิจัยนี้ยังได้ทำการวิเคราะห์เชิงคุณภาพโดยใช้ข้อมูลจากเครื่องสแกนสามมิติ Faro Focus M70 ซึ่งให้ข้อมูล Point Cloud ความละเอียดสูงที่สามารถนำไปสร้างผลลัพธ์เชิงวิเคราะห์เพิ่มเติม ได้แก่

6.1 โมเดลพื้นผิว (Surface Model) ข้อมูล Point Cloud ถูกนำไปสร้างโมเดล Mesh เพื่อวิเคราะห์สภาพผิวขององค์ประกอบโบราณสถาน เช่น ผนังเจดีย์และวิหาร พบว่าสามารถตรวจสอบร่องรอยความเสียหายที่ไม่สามารถระบุได้จากการสำรวจแบบดั้งเดิม เช่น รอยแตกเล็ก ๆ การบิ่นร่วน และความไม่ต่อเนื่องของแนวอิฐ

6.2 การวิเคราะห์ความโค้ง (Curvature Analysis) การประมวลผล Point Cloud ด้วยซอฟต์แวร์ Faro Scene และ Autodesk ReCap สามารถคำนวณค่าความโค้งของพื้นผิวเจดีย์และวิหารได้อย่างละเอียด ผลลัพธ์แสดงให้เห็นการบิดเบี้ยวเล็กน้อยในแนวแกนของเจดีย์ ซึ่งไม่สามารถตรวจจับได้ด้วยวิธีการวัดแบบจุดจากกล้อง Total Station

6.3 การประเมินการทรุดตัวของผิว (Surface Deformation) โดยการเปรียบเทียบตำแหน่งจุดควบคุมและค่าพิกัดที่ได้จาก Point Cloud พบว่าพื้นผิวด้านทิศตะวันตกของเจดีย์มีแนวโน้มการทรุดตัวเฉลี่ย 2 - 3 ซม. เมื่อเทียบกับแนวแกนตั้งฉาก ซึ่งให้ข้อมูลสำคัญสำหรับการประเมินความมั่นคงเชิงโครงสร้าง ข้อมูลเชิงลึกนี้ไม่สามารถได้จากการวัดระยะเชิงเส้นแบบดั้งเดิม

6.4 การคำนวณปริมาตร (Volume Estimation) ข้อมูล 3D Model สามารถใช้คำนวณปริมาตรของซากเจดีย์และฐานวิหาร ซึ่งให้ผลต่างกับการคำนวณจากการวัดแบบดั้งเดิมราว 8 - 12 % เนื่องจากวิธีการดั้งเดิมไม่สามารถครอบคลุมพื้นที่ที่มีความซับซ้อนและร่องรอยการพังทลายได้ทั้งหมด

6.5 การตีความ (Interpretation) ผลการวิเคราะห์เชิงลึกจากข้อมูลสแกนสามมิติช่วยให้เห็นถึงคุณค่าที่เหนือกว่าของเทคโนโลยีนี้ในเชิงการอนุรักษ์ โดยเฉพาะการตรวจจับความผิดปกติที่ตาเปล่ามองไม่เห็นหรือการวัดแบบดั้งเดิมไม่สามารถเก็บได้ การนำผลเหล่านี้มาเปรียบเทียบกับข้อมูลจากการสำรวจแบบดั้งเดิมจึงช่วยให้การประเมินเชิงคุณภาพของโบราณสถานมีมิติที่ลึกยิ่งขึ้น ทั้งในด้านโครงสร้าง สภาพการทรุดตัว และศักยภาพในการใช้เป็นฐานข้อมูลสำหรับการฟื้นฟูเชิงวิศวกรรมในอนาคต

ดังนั้น การผนวกผลการวิเคราะห์เชิงลึกจาก 3D Scanning เข้ากับผลการสำรวจแบบดั้งเดิม ไม่เพียงเพิ่มความน่าเชื่อถือให้กับข้อสรุปของงานวิจัย แต่ยังต่อยอดบทบาทของเทคโนโลยีสแกนสามมิติในฐานะเครื่องมือหลักของการอนุรักษ์โบราณสถานยุคดิจิทัล

สรุปผลและการอภิปรายผล

1. สรุปผล (Conclusion)

การศึกษานี้มุ่งเน้นการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของกระบวนการเก็บข้อมูลโบราณสถานระหว่างวิธีการสำรวจแบบดั้งเดิมและเทคโนโลยีสแกนสามมิติ โดยมีวัดเชตุวัน (กาเผือก) จังหวัดพะเยา เป็นกรณีศึกษา ทั้งนี้การเก็บข้อมูลได้ดำเนินการในสภาพพื้นที่จริง โดยใช้กล้อง Total Station และการวัดด้วยแรงคนในกระบวนการแบบดั้งเดิมเปรียบเทียบกับการใช้เครื่องสแกนเลเซอร์สามมิติ Faro Focus M70 ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่ใช้เทคโนโลยี Time-of-Flight สำหรับสร้างชุดข้อมูล Point Cloud

ผลการเปรียบเทียบพบว่า เทคโนโลยีสแกนสามมิติมีความสามารถในการเก็บข้อมูลที่มีความละเอียดสูงมากกว่า 2,000 จุดต่อตารางเมตร และครอบคลุมลักษณะเชิงเรขาคณิตของวัตถุในทุกมิติ ทำให้สามารถสร้างแบบจำลองสามมิติที่สมจริงและเหมาะสมต่อการนำไปใช้งานต่อได้หลากหลาย ไม่ว่าจะเป็นงานอนุรักษ์ การศึกษาทางวิศวกรรม หรือการจำลองในระบบดิจิทัล ในขณะที่วิธีการสำรวจแบบดั้งเดิมสามารถให้ข้อมูลจุดควบคุมที่มีความแม่นยำสูงในระดับจุด แต่ขาดความต่อเนื่องของรายละเอียดและต้องอาศัยการอนุมานรูปทรงในขั้นตอนการวาดแบบด้วยแรงงานของผู้ปฏิบัติงาน

นอกจากนี้ เทคโนโลยีสแกนสามมิตียังใช้เวลาในภาคสนามน้อยกว่า และสามารถดำเนินการได้โดยไม่ต้องสัมผัสโครงสร้างจริง ซึ่งเหมาะสมอย่างยิ่งกับโบราณสถานที่มีสภาพเปราะบางหรืออยู่ในสภาพทรุดโทรม ขณะที่การสำรวจแบบดั้งเดิมแม้จะใช้เครื่องมือที่คุ้นเคยและมีต้นทุนต่ำกว่า แต่มีข้อจำกัดด้านการเข้าถึงและต้องอาศัยความชำนาญเฉพาะบุคคลอย่างมาก

2. อภิปรายผล (Discussion)

ผลการศึกษาในครั้งนี้แสดงให้เห็นถึงแนวโน้มการเปลี่ยนผ่านจากกระบวนการสำรวจเชิงกลแบบเดิมไปสู่การใช้เทคโนโลยีเชิงดิจิทัลในงานอนุรักษ์โบราณสถาน ซึ่งเป็นการสะท้อนทิศทางการวิจัยทางด้านโบราณคดี วิศวกรรม และสถาปัตยกรรมที่กำลังปรับตัวเข้าสู่ยุคดิจิทัลมากขึ้น

ในมุมมองของความละเอียดและความครบถ้วนของข้อมูล เทคโนโลยีสแกนสามมิติสามารถเก็บข้อมูลจุดในลักษณะ Surface Sampling ได้อย่างต่อเนื่องทั่วทุกด้านของวัตถุ ซึ่งเป็นจุดเด่นที่วิธีการสำรวจแบบดั้งเดิมไม่สามารถเทียบได้ เนื่องจากวิธีดั้งเดิมจำกัดอยู่ที่การเก็บเพียงจุดสำคัญ หรือแนวเส้นของโครงสร้าง โดยผลลัพธ์ของการวัดยังขึ้นอยู่กับทักษะการอนุมานของผู้วาดแบบ จึงมีโอกาสเกิดความคลาดเคลื่อนในเชิงภาพรวมของโมเดลสูงกว่า (Rocha et al., 2020)

ในด้านความแม่นยำเชิงมิติ แม้จะพบว่าทั้งสองวิธีให้ความแม่นยำในระดับมิลลิเมตร ซึ่งถือว่าเหมาะสมกับการใช้งานทางด้านอนุรักษ์และการวิเคราะห์เชิงโครงสร้าง แต่ความสามารถของ 3D Scanning ในการจัดเก็บข้อมูลเชิงปริมาตร (Volumetric Data) และการวัดซ้ำจากจุดเดิมผ่าน Point Cloud ช่วยเพิ่มความยืดหยุ่นและประสิทธิภาพในการตรวจสอบย้อนกลับได้ดีกว่า (Morita and Bilmes, 2018)

ด้านระยะเวลาในการปฏิบัติงาน การใช้ 3D Scanning ช่วยลดเวลาการทำงานภาคสนามลงอย่างมีนัยสำคัญ โดยเฉพาะในกรณีของโบราณสถานที่เข้าถึงยาก หรือมีสภาพภูมิประเทศที่ขรุขระ ในขณะที่เวลาในการประมวลผล

แม้จะนานกว่า แต่สามารถทำได้ในสภาพแวดล้อมที่ควบคุมได้และไม่ขึ้นอยู่กับสภาพอากาศหรือแสงธรรมชาติเหมือนการเก็บข้อมูลภาคสนาม

ในประเด็นของข้อจำกัดด้านพื้นที่ Faro Focus M70 แสดงศักยภาพที่โดดเด่นในการเข้าถึงและสแกนพื้นที่ที่มีความซับซ้อนหรือมีความเสี่ยงสูง เช่น ซากเจดีย์แตกหัก ซอกมุมของแนวกำแพง หรือพื้นที่ที่ไม่สามารถวางปริมิเตอร์หรือเข้าวัดโดยตรงได้ ซึ่งแสดงให้เห็นถึงความเหมาะสมของเทคโนโลยีนี้ต่อการอนุรักษ์เชิงไม่รุกราน (Non-Invasive Conservation)

เมื่อพิจารณาในภาพรวมของการนำข้อมูลไปใช้ต่อยอด การสำรวจแบบดั้งเดิมเหมาะสำหรับงานร่างแบบเบื้องต้น และงานที่ไม่ต้องการระดับความละเอียดสูง ในขณะที่ข้อมูลจาก 3D Scanning มีศักยภาพต่อการนำไปใช้งานด้านการจำลอง (Simulation) การจัดแสดงเสมือน (Virtual Exhibition) หรือการบูรณะเชิงดิจิทัล (Digital Restoration) ได้ในระยะยาว (D'amico and Currà, 2017)

ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงสนับสนุนแนวคิดการบูรณาการระหว่างสองวิธี ซึ่งเป็นแนวทางที่ผสมผสานข้อดีของแต่ละเทคนิคเข้าด้วยกัน โดยเฉพาะการใช้ Total Station สำหรับควบคุมค่าพิกัดร่วมกับ Point Cloud จาก 3D Scanner เพื่อให้ได้ผลลัพธ์ที่ครบถ้วนทั้งในเชิงปริมาณและคุณภาพ อันจะส่งผลให้การเก็บข้อมูลโบราณสถานมีความถูกต้อง ครบถ้วน และสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้หลากหลายในอนาคต

3. ข้อเสนอแนะ

3.1 การบูรณาการทั้งสองวิธี

ควรมีการใช้วิธีสำรวจแบบดั้งเดิมร่วมกับ 3D Scanning โดยเฉพาะการนำค่าพิกัดจาก Total Station มาใช้เป็นจุดควบคุมสำหรับ Point Cloud เพื่อเพิ่มความแม่นยำเชิงตำแหน่งของแบบจำลอง 3 มิติ

3.2 การพัฒนาทักษะบุคลากร

ควรจัดอบรมและส่งเสริมการใช้เทคโนโลยีสแกนสามมิติในหน่วยงานด้านโบราณคดีและอนุรักษ์ เพื่อให้สามารถประมวลผลและนำข้อมูลไปใช้ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

3.3 การจัดทำแนวทางมาตรฐานการสำรวจโบราณสถาน

ภาครัฐและหน่วยงานที่เกี่ยวข้องควรจัดทำคู่มือหรือมาตรฐานกลางสำหรับการสำรวจและเก็บข้อมูลโบราณสถานในยุคดิจิทัล เพื่อให้การดำเนินงานในภาคราชการและวิชาการมีความสอดคล้องและเทียบเคียงกันได้

3.4 การเก็บข้อมูลเชิงอนุรักษ์เชิงรุก

ควรมีการเก็บข้อมูลโบราณสถานในพื้นที่เสี่ยงหรือที่ยังไม่ได้รับการบูรณะโดยเร็ว โดยเฉพาะในพื้นที่ที่อาจได้รับผลกระทบจากภัยธรรมชาติหรือการพัฒนาเมือง เพื่อให้สามารถอนุรักษ์ข้อมูลได้แม้โครงสร้างจริงจะเสื่อมหายไปในอนาคต

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยฉบับนี้เสร็จสมบูรณ์ได้ ด้วยความกรุณาและความช่วยเหลือจากเจ้าหน้าที่จากกรมศิลปากร สำนักศิลปากรที่ 7 เชียงใหม่ นางสาวนงไฉน ทะรักษา ตำแหน่งนักโบราณคดีชำนาญงาน ที่กรุณาเสียสละเวลาอันมีค่าในการลงพื้นที่เพื่อทำการเก็บข้อมูล เอื้อเฟื้อข้อมูลต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับโครงการวิจัยในครั้งนี้

References

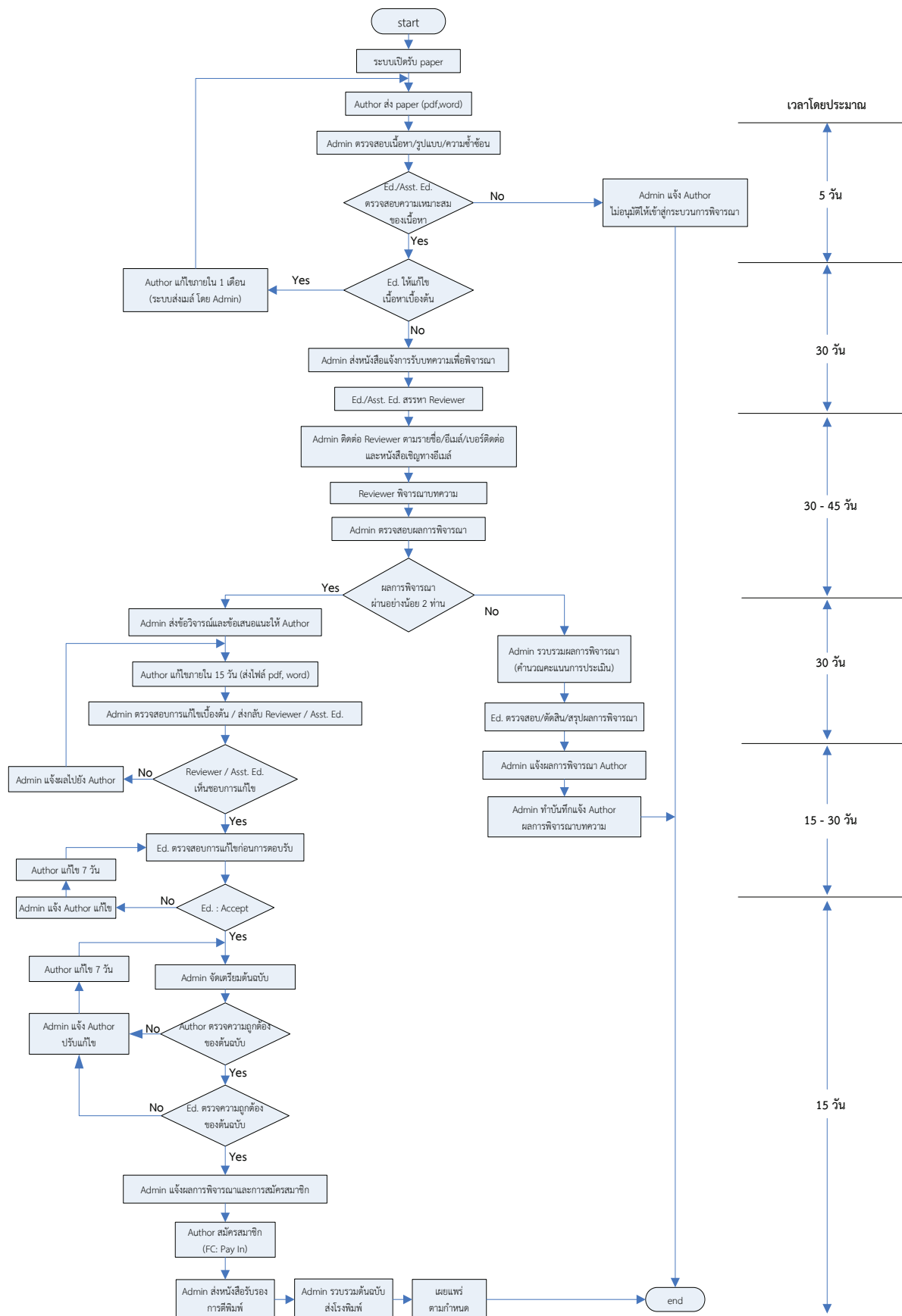
Alshawabkeh, Y., Baik, A. and Miky, Y. (2021). Integration of Laser Scanner and Photogrammetry for Heritage BIM Enhancement. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 10(5). <https://doi.org/10.3390/ijgi10050316>

- Alshawabkeh, Y. and Baik, A. (2023). Integration of Photogrammetry and Laser Scanning for Enhancing Scan-to-HBIM Modeling of Al Ula Heritage Site. *Heritage Science*, 11. <https://doi.org/10.1186/s40494-023-00997-2>
- An, Z. and Froese, R.E. (2023). Tree Stem Volume Estimation from Terrestrial LiDAR Point Cloud by Unwrapping. *Canadian Journal of Forest Research*, 53(2), 60-70. <https://doi.org/10.1139/cjfr-2022-0153>
- Bouziani, M., Chaaba, H. and Ettarid, M. (2021). Evaluation of 3D Building Model using Terrestrial Laser Scanning and Drone Photogrammetry. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 39-42. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLVI-4-W4-2021-39-2021>
- D'amico, A. and Currà, E. (2017). From TSL Survey to HBIM, Issues on Survey and Information Modeling Implementation for the Built Heritage the Case Study of the Temple Di Bacco Ravello. *Proc Int Conf Educ Res Comput Aided Archit Des Eur*, (Vol. 2, pp. 39-48). <https://doi.org/10.52842/conf.ecaade.2017.2.039>
- Klapa, P. and Gawronek, P. (2023). Synergy of Geospatial Data from TLS and UAV for Heritage Building Information Modeling (HBIM). *Remote Sensing*, 15(1), 128. <https://doi.org/10.3390/rs15010128>
- López, F.J., Lerones, P.M., Llamas, J., Gómez-García-Bermejo, J. and Zalama, E. (2018). A Review of Heritage Building Information Modeling (H-BIM). *Multimodal Technologies and Interaction*, 2(2). <https://doi.org/10.3390/mti2020021>
- Martínez-Carricondo, P., Carvajal-Ramírez, F., Yero-Paneque, L. and Agüera-Vega, F. (2021). Combination of HBIM and UAV Photogrammetry for Modelling and Documentation of Forgotten Heritage. Case Study: Isabel II dam in Nijar (Almería, Spain). *Heritage Science*, 9. <https://doi.org/10.1186/s40494-021-00571-8>
- Morita, M. and Bilmes, G. (2018). Applications of Low-Cost 3D Imaging Techniques for the Documentation of Heritage Objects. *Optica Pura Aplicada*, 51, 1-11. <https://doi.org/10.7149/OPA.51.2.50026>
- Rocha, G., Mateus, L., Fernández, J. and Ferreira, V. (2020). A Scan-to-BIM Methodology Applied to Heritage Buildings. *Heritage*, 3(1), 47-67. <https://doi.org/10.3390/heritage3010004>
- Tini, M.A., Forte, A., Girelli, V.A., Lambertini, A., Roggio, D.S., Bitelli, G. and Vittuari, L. (2024). Scan-to-HBIM-to-VR: An Integrated Approach for the Documentation of an Industrial Archaeology Building. *Remote Sensing*, 16(15). <https://doi.org/10.3390/rs16152859>
- Tysiac, P., Sieńska, A., Tarnowska, M., Kędzierski, P. and Jagoda, M. (2023). Combination of Terrestrial Laser Scanning and UAV Photogrammetry for 3D Modelling and Degradation Assessment of Heritage Building Based on a Lighting Analysis: Case Study—St. Adalbert Church in Gdansk, Poland. *Heritage Science*, 11. <https://doi.org/10.1186/s40494-023-00897-5>



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 จัดชิดซ้ายหน้ากระดาษไว้ด้านล่างรูปภาพ 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 และให้ใส่เครื่องหมายดอกจันทน์ด้วยกำกับไว้ต่อท้ายนามสกุล 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)** เป็นการกำหนดคำสำคัญที่สามารถไปใช้เป็นคำสืบค้นในระบบฐานข้อมูล 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 รูปภาพและตารางของบทความที่เป็นภาษาอังกฤษให้บรรยายเป็นภาษาอังกฤษ

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) เป็นส่วนของที่มาของมูลเหตุของการเขียนบทความ

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

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

ชื่อผู้แต่ง (ให้นามสกุลขึ้นก่อน 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 ternatea. *RMUTI Journal Science and Technology*, 11(3), 1-16.

Saptamongkol, A., Nasaeng, P., Wongsas, A., Kroehong, W., Sata, V. and Chindaprasirt, 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 Chindaprasirt, 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 ไม่ได้ตีพิมพ์หรือวิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต 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 หรือวิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต]/ชื่อมหาวิทยาลัย./ชื่อเว็บไซต์./URL

ชื่อผู้แต่ง./ (ปีที่เผยแพร่)./ชื่อวิทยานิพนธ์/(หมายเลข UMI หรือ เลขลำดับอื่น ๆ)/[วิทยานิพนธ์ปริญญาดุษฎีบัณฑิต หรือวิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต]/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...” และต้องมีคำอธิบายใส่ไว้ในเนื้อหาตารางและอยู่ในเนื้อหาบทความเรียงลำดับตารางในการอ้างอิง 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/rmutijo/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 และ การใช้ประโยชน์นวัตกรรมเทคโนโลยี
(RMUTI Journal)
Research on Modern science and Utilizing Technological Innovation Journal
(RMUTI Journal)

ข้าพเจ้า (นาย/นาง/นางสาว).....

สังกัดหน่วยงาน

มีความประสงค์ขออนุญาตพิจารณาบทความ รหัสบทความเรื่อง

.....

.....

.....

ที่ได้ส่งเข้ามายังวารสารระบบการจัดการวารสารออนไลน์ RMUTI Journal เมื่อวันที่

เนื่องจาก (ระบุเหตุผลในการถอนบทความ).....

.....

.....

ลงชื่อ.....ผู้ถอนบทความ

(.....)



RMUTI Journal



RMUTI Journal

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

Vol. 19 No. 1 January–April 2026

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