



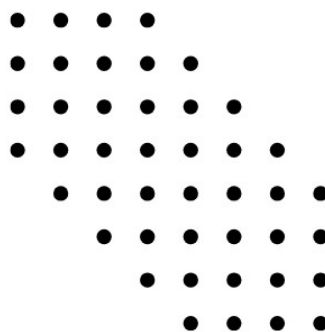
Print ISSN 1906-0874 Online ISSN 2651-2130

วารสารวิจัย มทร.กรุงเทพ

UTK RESEARCH JOURNAL

ปีที่ 19 ฉบับที่ 2 กรกฎาคม - ธันวาคม 2568

Vol. 19 No.2 July - December 2025



วารสารวิจัย มทร.กรุงเทพ

โทรศัพท์ 02 287 9600 ต่อ 3115



<https://ph02.tci-thaijo.org/index.php/rmutk>

วารสารวิจัยมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ

Rajamangala University of Technology Krungthep Research Journal

ปีที่ 19 ฉบับที่ 2 กรกฎาคม - ธันวาคม 2568

Vol 19 No.2 July – December 2025

เจ้าของ สถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ

ที่ปรึกษากองบรรณาธิการ

รองศาสตราจารย์ ดร.พิชัย จันทน์มณี
ศาสตราจารย์ญาณวิทย์ ดร.อลงกลด แทนอมทอง
ศาสตราจารย์ ดร.ชัยยุทธ ชินณะราศรี
ศาสตราจารย์ ดร.สุทัศน์ ทิพย์ปัทมาศ
ดร.สิริเบญจา กอวัฒนา
รองศาสตราจารย์ ดร.สุจิระ ขอจิตต์เมตต์
รองศาสตราจารย์ ดร.สุเทพ บุตรดี
รองศาสตราจารย์ ดร.สายชล ชุตเจื้อจัน
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุธรรม ศิวาภู
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กฤษณ์ สงวนพวก
ดร.ประภาพร ร้อยพรมมา

อธิการบดีมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ
กรรมการสภามหาวิทยาลัยผู้ทรงคุณวุฒิ
กรรมการสภาวิชาการผู้ทรงคุณวุฒิ
กรรมการสภาวิชาการผู้ทรงคุณวุฒิ
กรรมการสภามหาวิทยาลัยผู้ทรงคุณวุฒิ
กรรมการสภามหาวิทยาลัยผู้ทรงคุณวุฒิ
ที่ปรึกษาอาวุโส
รองอธิการบดี
ผู้อำนวยการสถาบันวิจัยและพัฒนา
รองผู้อำนวยการสถาบันวิจัยและพัฒนา
รองผู้อำนวยการสถาบันวิจัยและพัฒนา

บรรณาธิการ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ดิเรก บุญธรรม

รองผู้อำนวยการสถาบันวิจัยและพัฒนา

ผู้ช่วยบรรณาธิการ

รองศาสตราจารย์ ดร.กนกวรรณ จ้าวสุวรรณ

ผู้ช่วยผู้อำนวยการสถาบันวิจัยและพัฒนา

กองบรรณาธิการ

ศาสตราจารย์ ดร.ตรีทศ เหล่าศิริหงษ์ทอง
ศาสตราจารย์ ดร.ประยุทธ์ อัครเอกมาลิน
รองศาสตราจารย์ ดร. ประสาท เนืองเฉลิม
รองศาสตราจารย์ ดร.ศิริชัย ต่อสกุล
รองศาสตราจารย์ ดร.ไพศาล เียนฤดี
รองศาสตราจารย์ ดร.ปราโมทย์ ศรีน้อย
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ฟ้าใส วิวัฒนวงศ์วนา
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วรวงษ์ สว่างศรี
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อุเทน คณะวาปี
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ประยูร สุรินทร์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วีรพัฒน์ พลอัน
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กอบศักดิ์ กาญจนางค์กุล
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิมลมาศ บำรุงเศรษฐพงษ์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วรวิทย์ จันทน์ฉาย
ว่าที่ร้อยตรี ดร.ชาญณรงค์ ตระกูลสรณคมน์

มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีปทุมวัน
สถาบันเทคโนโลยีปทุมวัน
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
สถาบันเทคโนโลยีปทุมวัน
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
มหาวิทยาลัยนราธิวาสราชนครินทร์

เจ้าหน้าที่ประจำวารสาร

นางสาวธัญญ์นรี อุเทน
นางวิไรรัตน์ ราษฎร์สภา
นางนาฏนภา จรเข้
นางจันทนา สังข์อู่

นายณรงค์ศักดิ์ วิสุทธิแพทย์
นางสาวอัจฉรา จินดาจาง
นางสาววันทนา ประณีธานธรรม
นายวีระวัฒน์ ราษฎร์สภา

นางสาวพัชรินทร์ พัฒนโกครัตนา
นางสาวนุชนารถ สิมมาลา
นายวันวิวัติ วันทนา

บทความที่ลงตีพิมพ์ในวารสารเป็นความคิดเห็นของผู้เขียนกองบรรณาธิการ ไม่จำเป็นต้องเห็นด้วยเสมอไป

ความเป็นมา

วารสารวิจัยมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ ISSN 1906 - 0874 เป็นวารสารวิชาการของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ โดยสถาบันวิจัยและพัฒนา ได้มีการจัดทำวารสารอย่างต่อเนื่องตั้งแต่พ.ศ. 2550 จนถึงปัจจุบัน ซึ่งเป็นวารสารที่อยู่ในฐานข้อมูลของศูนย์ดัชนีการอ้างอิงวารไทย (TCI) กลุ่มที่ 2 ด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี โดยเผยแพร่เป็นราย 6 เดือน ซึ่งตีพิมพ์ปีละ 2 ฉบับ (ฉบับละ 8 -12 บทความ) และมีการดำเนินงาน จัดพิมพ์บทความประเภทต่าง ๆ ได้แก่ บทความวิจัย (Research paper) และ บทความวิชาการ (Academic paper)

บทความที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในวารสารวิจัย มทร.กรุงเทพ เป็นบทความที่สร้างองค์ความรู้ และมีคุณภาพในทางวิชาการสามารถนำไปใช้ประโยชน์เพื่อการเอกสารอ้างอิงได้ เพราะผ่านการพิจารณาถ่วงถ่วง และประเมินคุณภาพจากผู้ทรงคุณวุฒิในสาขาวิชาที่เกี่ยวข้อง จากหลากหลายสถาบัน 3 ท่าน ซึ่งเป็นการประเมินแบบไม่แสดงชื่อผู้แต่งและผู้ประเมิน (Double blinded) ก่อนที่จะเผยแพร่สู่สาธารณชน จึงทำให้วารสารวิจัย มทร.กรุงเทพ เป็นวารสารวิชาการที่มีคุณภาพ

กองบรรณาธิการ วารสารวิจัย มทร.กรุงเทพ จัดทำวารสารเป็นรูปแบบฉบับสมบูรณ์และเผยแพร่ให้กับสถาบันการศึกษาต่าง ๆ ทั่วประเทศไทย นอกจากนี้ยังสามารถสืบค้นเพื่อเอกสารอ้างอิงหรืออ่านบทความที่เปี่ยมด้วยองค์ความรู้ได้ที่ <https://www.tci-thaijo.org/index.php/rmutk>

วัตถุประสงค์

1. เพื่อเผยแพร่บทความวิจัย (Research paper) และบทความวิชาการ (Academic paper) ที่มีคุณภาพของอาจารย์นักวิจัย นักวิชาการทั้งภายในและภายนอกมหาวิทยาลัย ในสาขาวิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี สาขาอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้อง และสาขาต่าง ๆ ที่มีการบูรณาการข้ามศาสตร์ที่เกี่ยวข้องกับวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีเพื่อให้เกิดองค์ความรู้ใหม่ที่ทันสมัย ได้แก่
 - 1.1. Environment Chemistry
 - 1.2. General Engineering
 - 1.3. Applied Mathematics
 - 1.4. Renewable Energy, Sustainability and the Environment
 - 1.5. Biomaterials
2. เพื่อส่งเสริมและเป็นกลไกการขับเคลื่อนงานวิจัย ทำให้เกิดผลงานวิจัยที่เข้าสู่การพัฒนาต่อภาคสังคม ชุมชน และนำไปประยุกต์ใช้ในการเรียนการสอนเพื่อต่อยอดและเกิดความเชื่อมโยงระหว่างงานวิจัย งานวิชาการ ซึ่งนำมาสู่การเกิดประโยชน์ต่อมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ และตอบสนองต่อการพัฒนาเทคโนโลยีของประเทศไทย

นโยบายการรับบทความ

กองบรรณาธิการวารสารวิจัย มทร.กรุงเทพ มีความยินดีที่จะรับบทความจากอาจารย์ นักวิจัย นักวิชาการทั้งภายในและภายนอกมหาวิทยาลัย ที่เขียนเป็นภาษาไทยหรือภาษาอังกฤษ ซึ่งผลงานที่ส่งมาขอตีพิมพ์ต้องไม่เคยเผยแพร่ในสิ่งพิมพ์อื่นใดมาก่อน และต้องไม่อยู่ในระหว่างการพิจารณาของวารสารอื่น

การละเมิดลิขสิทธิ์ถือเป็นความรับผิดชอบของผู้ส่งบทความโดยตรง บทความที่ได้รับการตีพิมพ์ต้องผ่านการพิจารณาถ่วงถ่วงจากผู้ทรงคุณวุฒิ และได้รับความเห็นชอบจากกองบรรณาธิการ

ข้อความที่ปรากฏอยู่ในแต่ละบทความที่ตีพิมพ์ในวารสารวิชาการเล่มนี้ เป็นความคิดเห็นส่วนตัวของผู้เขียนแต่ละท่าน ไม่เกี่ยวข้องกับมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพแต่อย่างใด ความรับผิดชอบด้านเนื้อหา และการตรวจร่างบทความแต่ละบทความเป็นของผู้เขียนแต่ละท่าน หากมีความผิดพลาดใด ๆ ผู้เขียน แต่ละท่านจะต้องรับผิดชอบบทความของตนเองแต่ผู้เดียว

กองบรรณาธิการขอสงวนสิทธิ์มีให้นำเนื้อหา หรือข้อคิดเห็นใด ๆ ของบทความในวารสารวิจัย มทร.กรุงเทพ ไปเผยแพร่ก่อนได้รับอนุญาตจากกองบรรณาธิการ อย่างเป็นลายลักษณ์อักษร ผลงานที่ได้รับการตีพิมพ์ถือเป็นลิขสิทธิ์ของวารสาร

ผู้ประสงค์จะส่งบทความกรุณาอ่านรายละเอียดการส่งบทความที่คำแนะนำสำหรับผู้เขียนบทความ ซึ่งได้รับไว้ในเล่มวารสารวิจัย มทร.กรุงเทพ หรือ <https://www.tci-thaijo.org/index.php/rmutk> และสามารถส่ง Online ได้โดยกรอกรายละเอียดให้ครบถ้วนในระบบการส่งบทความ Online หากต้องการสอบถามข้อมูลเพิ่มเติม ติดต่อได้ที่

สถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ
เลขที่ 2 ถนนนางลิ้นจี่ แขวงทุ่งมหาเมฆ เขตสาทร กรุงเทพฯ 10120
โทร. 0 2286 9600 ต่อ 3115
Email: utk_research_journal@mail.rmutk.ac.th
<https://www.rdi.rmutk.ac.th>

กำหนดการเผยแพร่

ปีละ 2 ฉบับ (ทุก 6 เดือนต่อฉบับ)
ฉบับที่ 1 เดือน มกราคม – มิถุนายน
ฉบับที่ 2 เดือน กรกฎาคม – ธันวาคม

การเผยแพร่

เผยแพร่ผ่านระบบออนไลน์
<https://www.tci-thaijo.org/index.php/rmutk>

สารบัญ

หน้า

- 1 การศึกษาการใช้ตัวกรองค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่สำหรับลดการรบกวนสัญญาณข้ามกันของข้อมูล
ระยะจากเซนเซอร์อัลตราโซนิกที่ใช้ในระบบหลบหลีกสิ่งกีดขวางของหุ่นยนต์อัตโนมัติ
ภาคพื้นดิน..... 1 - 10
A study of using a moving average filter for reducing cross-talk in ranging data
from ultrasonic sensors used in obstacle avoidance of autonomous ground
vehicles
คุณากร อนุวัตพานิชย์, มนุศักดิ์ จานทอง และ สุรศักดิ์ ทิมพิทักษ์
- 2 การพัฒนาทำ Glued Laminated Timber (Glulam) จากเศษไม้สักสวนป่า..... 11 - 22
The Development of Glued Laminated Timber (Glulam) from Teak Plantation
ทยา ธีรเชาต่อ, ทรงกลด จารุสมบัติ และ ดำรง พิพัฒน์วัฒนกุล
- 3 กระถางเพาะชำย่อยสลายได้จากขุยมะพร้าวและกากกาแฟที่เสริมธาตุอาหารให้พืชด้วย
กากกาแฟและกากถั่วเหลือง..... 23 - 29
Biodegradable Nursery Pot from Paper Labeling Waste Enriched with Coffee
Grounds and Soybean Meal
สรวิษฐ์ อินทร์จันทร์ และ สิริณารี เงินเจริญ
- 4 การปรับปรุงการมอบหมายงานในสถานีเครื่องจักร CNC โดยใช้แบบจำลอง
ทางคณิตศาสตร์ และกฎการจ่ายงาน กรณีศึกษาโรงงานชิ้นส่วนรถยนต์..... 30 - 41
The improvement of task assignments in a CNC machine station using
mathematical models and job dispatching rules: A case study of an
automotive parts factory
ปานธิธิ เรืองศรี, จิรวัดน์ ณ พัทลุง, นพคุณ แสงเขียว, พีรพงศ์ ภควณิช และ พรนิวัติ ผลทวีชัย
- 5 การวางแผนการผลิตด้วยการประยุกต์โปรแกรมเชิงเส้น กรณีศึกษาโรงงานผลิตโฟม
บรรจุอาหาร..... 42 - 50
Production Planning Optimization Using Linear Programming:
A Case Study of a Packaging Foam Factory
สาวิตรี พิบุลศิลป์, ศุภาวุธ เกษสระ, นพคุณ แสงเขียว และ พีรพงศ์ ภควณิช
- 6 การตรวจสอบการกระจายลมร้อนในเตาอบด้วยการทดลองและพลศาสตร์
ของไหลเชิงคำนวณ..... 51 - 62
Investigation of Hot Air Distribution in an Oven Using Experiments and
Computational Fluid Dynamics (CFD)
ชัยวัฒน์ อุทัยแสน, ยศกร ประทุมวัลย์ และ ทรงวุฒิ มงคลเลิศมณี

สารบัญ

หน้า

7	ประเมินความเสี่ยงก๊าซเรดอนภายในอาคาร มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตปัตตานี.....	63 - 69
	Risk Assessment of Radon gas indoor Buildings at Prince of Songkla University, Pattani Campus	
	ปาณิธิ เรืองศรี, จิรวัดน์ ณ พัทลุง, นพคุณ แสงเขียว, พีรพงศ์ ภควณิช และ พรนิวัติ ผลทวีชัย	
8	ผลกระทบของระยะเวลาการอบอ่อนหลังกระบวนการที่ส่งผลต่อโครงสร้างจุลภาคและสมบัติ ทางกลของเหล็กกล้าความแข็งแรงสูงชนิดเฟสคู่เกรด DP980.....	70 - 76
	Effect of Process Annealing Time on The Microstructure and Mechanical Properties of High Strength Dual Phase Steel DP980	
	ณัฐศักดิ์ พรพุดศิริ, พงศกร หลีตระกูล, พิสิทธิ์ เมื่อน้อย, จินกมล ลุยจันทร์ และ พลากร ประคำทอง	
9	การผสมกาวยูเรียฟอร์มาดีไฮด์ในการคงรูปของกากกาแฟเพื่อการออกแบบผลิตภัณฑ์.....	77 - 83
	The Mixing of Urea-Formaldehyde Adhesive for Shape Retention of Coffee Grounds for Product Design	
	สุริยา สงค์อินทร์, ภัทรา คุ่มเขต และ กฤษณา คงเลิศยศ	
10	เปรียบเทียบพฤติกรรมของคานคอนกรีตเสริมเหล็กภายใต้ภาระใช้งานจริงและ ภาระออกแบบตามวิธีการออกแบบโดยวิธีกำลังและวิธีหน่วยแรงใช้งาน.....	84 - 93
	Comparison of the Behavior of Reinforced Concrete Beams under Actual and Design Loads according to the Strength Design Method and the Working Stress Design Method	
	ชำนาญ น้อยพิทักษ์, สันธยา ทองอรุณศรี และ จุฑา เจริญเนตรกุล	

การศึกษาการใช้ตัวกรองค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่สำหรับลดการรบกวนสัญญาณข้ามกันของข้อมูลระยะจากเซนเซอร์อัลตราโซนิกที่ใช้ในระบบหลบหลีกสิ่งกีดขวางของหุ่นยนต์อัตโนมัติภาคพื้นดิน

A study of using a moving average filter for reducing cross-talk in ranging data from ultrasonic sensors used in obstacle avoidance of autonomous ground vehicles

คุณากร อนุวัตพานิช¹, มนุศักดิ์ จานทอง², และ สุรศักดิ์ ทิมพิทักษ์^{3*}
Khunakon Anuwatpanich¹, Manusak Janthong², and Surasak Timpitak^{3*}

¹ ภาควิชาครุศาสตร์อุตสาหกรรม คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

^{2,3*} ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

¹ Department of Technical Education, Faculty of Technical Education, Rajamangala University of Technology Thanyaburi

^{2,3} Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Thanyaburi

*Corresponding Author : Tel. 02 549 3430, E-mail: surasak.t@en.rmutt.ac.th

Received: 11-06-2024 Revised: 24-07-2025 Accepted: 30-07-2025

บทคัดย่อ

บทความวิจัยนี้ได้ศึกษาวิธีการลดปัญหาการรบกวนสัญญาณข้ามกัน (Cross-Talk) จากการใช้เซนเซอร์อัลตราโซนิกชนิดเดียวกัน จำนวน 2 ตัว ด้วยการออกแบบโปรแกรมควบคุมสลับการทำงานด้านละ 50 ms ร่วมกับการใช้กระบวนการกรองสัญญาณแบบค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่ที่ใช้สมาชิกตัวกรอง 5 และ 10 ค่า ที่ใช้สำหรับตรวจวัดวัตถุกีดขวางด้านหน้าของหุ่นยนต์ AGV ลำดับการขึ้นวิจัยแบ่งออกเป็น 1) การทดลองเซนเซอร์อัลตราโซนิกทั้งสองอยู่กันที่ทำงานวัดระยะไปยังผนังพร้อมกันโดยไม่ใช้โปรแกรมสลับการทำงาน พบว่าข้อมูลระยะการตรวจวัดมีความผิดพลาดจากปัญหาการรบกวนสัญญาณข้ามกัน ทุกๆ 18-19 วินาที การใช้ตัวกรองค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่จะสามารถช่วยลดความผันผวนของข้อมูลระยะลงได้แต่ยังไม่มีประสิทธิภาพเพียงพอที่จะนำข้อมูลระยะไปใช้งาน 2) การทดลองกรณีที่เซนเซอร์อัลตราโซนิกตรวจพบวัตถุทันทีที่หันใดโดยเซนเซอร์จะเคลื่อนไปพร้อมกับชุดรางเลื่อนเคลื่อนที่ตัดผ่านวัตถุภายใต้ระยะ 40, 70 และ 100 เซนติเมตร ผลการทดลองพบว่าข้อมูลระยะจริงจะมีความผันผวนเฉลี่ยสูงสุดที่ระยะวัตถุ 100 เซนติเมตร ที่ 48.06 เซนติเมตร การกำหนดสมาชิกตัวกรองค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่ที่ 5 และ 10 ค่า จะสามารถช่วยลดความผันผวนลงได้ 80.25% และ 88.24% ตามลำดับ และ 3) การทดลองหุ่นยนต์ AGV เคลื่อนที่และหยุดแบบอัตโนมัติเมื่อเซนเซอร์อัลตราโซนิกพบสิ่งกีดขวางที่กำหนดระยะ 40, 70 และ 100 เซนติเมตร พบว่าการกำหนดสมาชิกตัวกรอง 5 และ 10 ค่า จะใช้ระยะหยุดเฉลี่ย 22.7 และ 37.1 เซนติเมตร ตามลำดับ และในกรณีที่หยุดระยะ 40 เซนติเมตร ที่ใช้สมาชิกตัวกรอง 10 ค่า หุ่นยนต์จะประมวลผลหยุดไม่ทันและชนเข้ากับวัตถุ

คำสำคัญ : หุ่นยนต์อัตโนมัติภาคพื้นดิน, เซนเซอร์อัลตราโซนิก, ตัวกรองค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่

ABSTRACT

This research article investigates a method to mitigate cross-talk interference between two identical ultrasonic sensors used for obstacle detection in front of an Automated Guided Vehicle (AGV). The proposed approach involves alternating the operation of each sensor at 50 ms intervals, combined with the application of a moving average filter using 5 and 10 data points. The study is divided into 1) The experiment with both ultrasonic sensors simultaneously measuring distance to a wall without using the alternating control program showed that the sensors exhibited measurement errors due to interference occurring every 18–19 seconds. The moving average filter helped smoothly the distance data in the time domain but was not sufficiently effective. 2) Both ultrasonic sensors are set to detect objects immediately. The sensors are mounted on a cart and move along a rail that moves across the front of a target object located at distances ranging from 40, 70 and 100 centimeters. The result that shown in raw data of distance measurements occurred greatest mean deviation of 100 centimeters at 48.06 centimeters. Applying a moving average filter with 5 and 10 can reduced fluctuations by 80.25% and 88.24%, respectively. 3) The AGV robot automatically stops when the ultrasonic sensors detect object at distances of 40, 70, and 100 centimeters. The resulting is shown moving average filter coefficients of 5 and 10 are stop away from 22.7 and 37.1 centimeters, respectively. In case of 40 centimeters and defined filter coefficients 10, the robot cannot process the stop command and collides with an object.

Keyword: Autonomous Ground Vehicle (AGVs) , Ultrasonics sensor , Moving average filtering.

1. บทนำ

ยานพาหนะนำทางอัตโนมัติ (Automated Guided Vehicles , AGVs) เป็นยานพาหนะที่ถูกออกแบบมาเพื่อเคลื่อนที่และขนส่งสิ่งของอัตโนมัติภายในสภาพแวดล้อมที่ควบคุม เช่น คลังสินค้า สายการผลิตในโรงงาน หรือศูนย์กระจายสินค้า ซึ่งในปัจจุบันนี้ AGV นั้นได้รับความนิยมอย่างมากในอุตสาหกรรมเนื่องจากสามารถเพิ่มประสิทธิภาพในกระบวนการทำงานขนย้ายวัตถุที่ซับซ้อนและใช้แรงงานมาก [1],[2],[3] ในการปฏิบัติการกิจของยานพาหนะเคลื่อนที่อัตโนมัติจะสำเร็จลุล่วงจนกระทั่งเข้าสู่เป้าหมายที่กำหนดไว้จะต้องทำการวางแผนเส้นทางให้ AGVs ประมวลผลด้วยอัลกอริธึมนำทางและหลบหลีกสิ่งกีดขวาง ณ ขณะเวลาจริง [4] โดยอาศัยข้อมูลจากเซนเซอร์ที่มีความสามารถตรวจหาวัตถุกีดขวางแบบไม่สัมผัสที่ถูกติดตั้งไว้บน AGVs ซึ่งโดยทั่วไปจะใช้เซนเซอร์แสง LiDAR หรือเซนเซอร์คลื่นเสียงอัลตราโซนิก (Ultrasonic) [5] เป็นต้น โดยจากการศึกษาเปรียบเทียบระหว่างเซนเซอร์ทั้งสองพบว่าเซนเซอร์อัลตราโซนิกมีความแม่นยำที่ดียิ่งกว่า LiDAR อันเนื่องมาจากสัญญาณรบกวนและความชื้นสัมพัทธ์รวมทั้งปัจจัยอื่นๆจากสภาพแวดล้อมที่ไม่สามารถควบคุมได้ แต่ก็มีข้อดีในแง่ของขนาดที่เล็กกระทัดรัดและมีราคาที่ถูกกว่า LiDAR นอกจากนี้สามารถตรวจวัดวัตถุโปร่งแสงได้ [6] จึงสามารถติดตั้งเข้ากับ AGV ได้หลากหลายวิธีและสามารถนำมาประยุกต์ใช้ใน AGVs ในรูปแบบต่างๆ เช่น รถโฟล์คคลิฟท์หรือหุ่นยนต์ลำเลียงได้ [7] , [8] เป็นต้น

การตรวจวัดระยะด้วยเซนเซอร์อัลตราโซนิกชนิดเดียวกันที่ทำงานพร้อมกันหลายตัวในพื้นที่เดียวกันอาจก่อให้เกิดปัญหาการรบกวนสัญญาณข้ามกัน (Cross-Talk) ซึ่งส่งผลให้ข้อมูลการวัดระยะผิดพลาด [9] เป็นผลให้ AGVs ตัดสินใจหยุดหรือออกนอกเส้นทางที่วางแผนไว้ รวมถึงสัญญาณรบกวนจากแหล่งอื่นๆที่ไม่สามารถควบคุมได้ ดังนั้น [10] , [11] ได้นำเสนอแนวแก้ไขด้วยการประมวลผลสัญญาณดิจิทัลของข้อมูลที่ได้รับก่อนนำไปใช้งานและ [12] ได้เสนอการศึกษาการใช้ตัวกรองค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่ (Moving average filter) เพื่อกรองสัญญาณรบกวนออกจากข้อมูลระยะที่ตรวจวัดจากเซนเซอร์อัลตราโซนิก จากผลการศึกษาพบว่า ตัวกรองค่าเฉลี่ยจะสามารถช่วยให้ข้อมูลมีความต่อเนื่องราบเรียบในโดเมนเวลามากยิ่งขึ้น สามารถช่วยลดสัญญาณรบกวนที่มีความถี่สูงให้ลดได้

ดังนั้น ในบทความวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์ในการศึกษาปัญหาการทำงานทับซ้อนจากการตรวจวัดโดยใช้เซนเซอร์อัลตราโซนิกสองตัวที่ทำงานพร้อมกันในทิศทางเดียวกันด้วยการออกแบบโปรแกรมจัดลำดับการทำงานของเซนเซอร์อัลตราโซนิกแต่ละตัวและร่วมกับตัวกรองค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่ และ ศึกษาผลกระทบต่อข้อมูลการตรวจวัดความไวของข้อมูลระยะทาง ณ

เวลาจริงเมื่อเปลี่ยนแปลงจำนวนสมาชิกตัวกรองค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่ที่สัมพันธ์ต่อการออกแบบระบบตรวจวัด

2. วิธีดำเนินการวิจัย

2.1 การออกแบบเครื่องมือวิจัย

2.1.1 วัสดุอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

2.1.1.1 เซนเซอร์อัลตราโซนิก เป็นเครื่องมือตรวจวัดระยะทางแบบไม่สัมผัสที่มีข้อดีกว่าเทคนิคการวัดระยะทางประเภทอื่น ๆ ที่สามารถตรวจวัดกายภาพวัตถุได้หลากหลายรวมถึงวัตถุโปร่งแสง รวมทั้งไม่ได้รับผลกระทบจากสี มีความความทนทานในสภาพแวดล้อมที่หลากหลาย ใช้พลังงานต่ำและราคาถูกกว่าเซนเซอร์วัดระยะทางแบบอื่นๆ สามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้หลากหลาย เช่น การวัดระยะทาง [13] หรือการระบุตำแหน่ง [14] เป็นต้น ซึ่งมีหลักการทำงานจากทรานสดิวเซอร์ส่งคลื่นเสียงอัลตราโซนิกที่เป็นคลื่นเสียงที่มีความถี่สูงกว่า 20 kHz ส่งออกไปกระทบยังวัตถุและสะท้อนกลับมายังเซนเซอร์ จากนั้นประเมินเทียบระยะเวลาตั้งแต่เริ่มส่งจนกระทั่งสะท้อนกลับมาได้เปรียบเทียบกับความเร็วเสียงที่ผ่านตัวกลางนั้นๆ โดยมีหลักคำนวณจากสมการที่ 1 [15]

$$V = 331.4 + (0.606T) + (0.0124H) \quad (1)$$

เมื่อ V คือ ความเร็วของคลื่นเสียงที่เดินทางผ่านในอากาศ (m/s) , 331.4 คือ ค่าคงที่ความเร็วของคลื่นเสียงที่เคลื่อนผ่านอากาศในหน่วย (m/s) ที่ 0°C และความชื้นสัมพัทธ์ที่ 0% , T คือ อุณหภูมิในหน่วยองศาเซลเซียส °C , H คือ เปอร์เซนต์ความชื้นสัมพัทธ์

ในงานวิจัยนี้เลือกใช้เซนเซอร์อัลตราโซนิก LV-MaxSonar EZ3 รุ่น MB1030 จำนวน 2 ตัว โดยมีคุณสมบัติดังตารางที่ 1

2.1.1.2 โซลิดสเตทรีเลย์ (Solid-State Relay) รุ่น G3MB-202P แบบชนิด 2 ช่อง [17] ทำหน้าที่เป็นสวิตช์ตัดต่อวงจรโดยใช้อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ทำหน้าที่แทนหน้าสัมผัสในการตัดต่อวงจร เนื่องจากไม่มีส่วนทางกลเคลื่อนที่ ส่งผลให้ทำงานได้เร็ว สามารถตอบสนองความไวสูงภายใน 1 ms และไม่มีเสียงในขณะเวลาตัด-ต่อของหน้าสัมผัส

2.1.1.3 หน่วยประมวลผลและอ่านค่าในงานวิจัยนี้เลือกใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino Uno R3 ที่ความสามารถเขียนโปรแกรม ควบคุมจังหวะการทำงานของโซลิดสเตทรีเลย์ รวมทั้งอ่านค่าสัญญาณไฟฟ้าสัญญาณไฟฟ้าที่ได้รับเซนเซอร์อัลตราโซนิกและแปลงเป็นค่าระยะทาง

ตารางที่ 1 รายละเอียดคุณสมบัติของเซนเซอร์อัลตราโซนิกส์ LV-MaxSonar EZ3 รุ่น MB1030 [16]

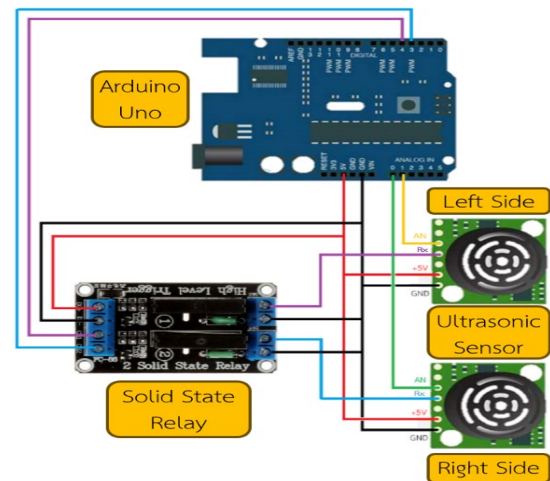
ลำดับ	รายการ	ค่า	หน่วย
1	ขอบเขตการวัด		
	- ด้านหน้า	0 - 6.45	m
	- ด้านข้าง	0.6	m
2	ระดับความละเอียด	0.025	m
3	ความถี่การทำงานต่อเนื่อง	20	Hz
4	ช่วงอุณหภูมิทำงาน	0 - 65	°C
5	การใช้พลังงาน		
	- Voltage	5	VDC
	- Current	20	mA
5	รูปแบบการสื่อสาร		
	- Analog	0 - 5	V
6	รูปแบบการควบคุม	Rx / Tx	

2.1.2 การต่อวงจรของแต่ละอุปกรณ์โดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino Uno เพื่อควบคุมการทำงานของโซลิตสเตทรีเลย์และอ่านค่าระยะทางจากเซนเซอร์อัลตราโซนิกส์ทั้งสองสามารถแสดงในภาพที่ 1

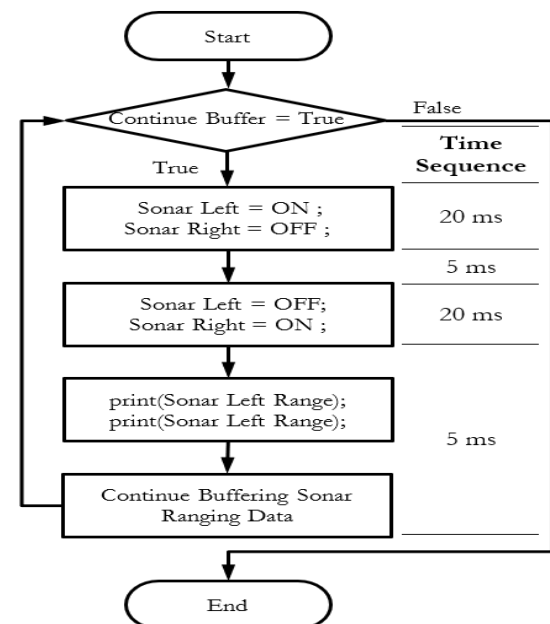
2.1.3 การออกแบบโปรแกรม

2.1.3.1 การออกแบบโปรแกรมอ่านค่าระยะทางจะใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino Uno จะเป็นแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง 5 โวลต์ ให้กับเซนเซอร์อัลตราโซนิกส์ทำงานอ่านค่าระยะทางที่วัดไปยังวัตถุและแปลงข้อมูลระยะทางเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงในช่วง 0 – 5 โวลต์ ส่งกลับไปยังไมโครคอนโทรลเลอร์เพื่อทำการอ่านค่าสัญญาณอนาล็อกที่เป็นระบบเวลาไม่ต่อเนื่อง (Discrete- time signal) ซึ่งสัญญาณที่อ่านได้นั้นจะเป็นระยะทางที่แท้จริงร่วมกับสัญญาณที่มีความผิดพลาดรวมถึงสัญญาณรบกวน (White Noise) จากสภาพแวดล้อมที่ไม่สามารถควบคุมได้

2.1.3.2 การออกแบบควบคุมสลับการทำงานสามารถแสดงในภาพที่ 2 เมื่อเริ่มทำงาน เซนเซอร์อัลตราโซนิกส์ทั้งสองจะต้องรอคำสั่งจากไมโครคอนโทรลเลอร์ เมื่อไมโครคอนโทรลเลอร์เปิดใช้โซลิตสเตทรีเลย์ช่อง 1 ทำงานเซนเซอร์อัลตราโซนิกส์ฝั่งซ้ายทำงานส่งคลื่นเสียงไปตรวจวัดระยะวัตถุและอ่านค่าภายในเวลาที่กำหนดไว้ภายใน 20 ms และหยุดทำงาน 5 ms จากนั้น ไมโครคอนโทรลเลอร์เปิดใช้โซลิตสเตทรีเลย์ช่องที่ 2 ทำงาน ทำให้เซนเซอร์อัลตราโซนิกส์ฝั่งขวาทำงานส่งคลื่นเสียงไปตรวจวัดระยะวัตถุและอ่านค่าภายในเวลาที่กำหนดไว้ 20 ms และหยุดทำงาน 5 ms เช่นเดียวกันพร้อมทั้งรายงานผลการตรวจวัดระยะทางจากเซนเซอร์อัลตราโซนิกส์ทั้งสองด้านรวมระยะเวลาในการตรวจวัดและรายงานผลทั้งสิ้น 50 ms ต่อรอบ



ภาพที่ 1 แผนผังการต่อวงจรควบคุมเซนเซอร์อัลตราโซนิกส์สองตัวโดยใช้รีเลย์แบบโซลิตสเตท



ภาพที่ 2 ผังงานโปรแกรมจัดลำดับควบคุมการทำงานเซนเซอร์อัลตราโซนิกส์สองตัวแบบสลับกัน

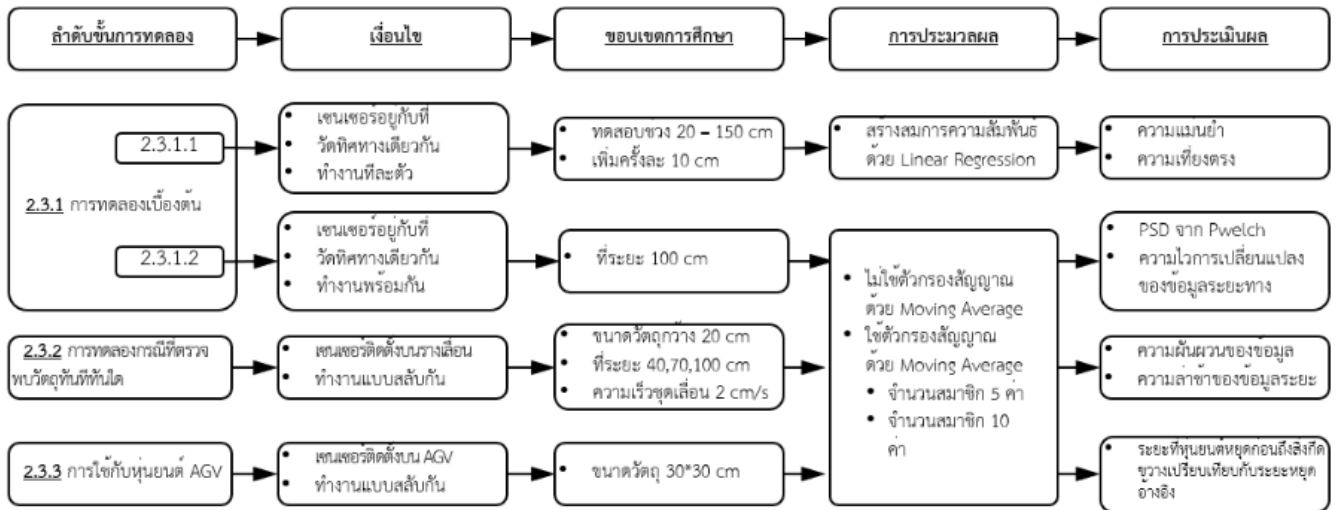
2.1.4 การออกแบบกระบวนการกรองสัญญาณรบกวนและสัญญาณผิดพลาดของข้อมูลระยะทางด้วยการใช้เทคนิคตัวกรองแบบค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่ (Moving Average) [18] ซึ่งเป็นการเฉลี่ยจุดสมาชิกข้อมูลแต่ละชุดภายในกรอบเวลาแบบคงที่ที่กำหนดไว้ เมื่อได้รับข้อมูลตัวใหม่เข้ามาจะถูกนำเข้ามาแทนที่ข้อมูลเก่าสุดภายในกรอบเวลาที่กำหนด ผลจากการกรองจะทำให้ได้รับเส้นค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่ของแต่ละกรอบเวลาย่อยๆ ส่งผลให้ข้อมูลมีความต่อเนื่องราบเรียบยิ่งขึ้น เทคนิคตัวกรองแบบค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่ที่สามารถแสดงได้ดังสมการที่ 2

$$y[i] = \frac{1}{M} \sum_{j=0}^{M-1} x[i+j] \quad (2)$$

เมื่อ $y[n]$ คือ ข้อมูลปัจจุบันหลังผ่านตัวกรอง , M คือ ค่าจำนวนสมาชิกตัวกรอง , $x[n]$ คือ ข้อมูลจริง ณ เวลาปัจจุบัน และ $x[j]$ คือ ข้อมูลตัวก่อนหน้าซึ่งประกอบไปด้วยจำนวนสมาชิกข้อมูลคือ $j = M - 1$

2.1.5 การประเมินด้านสัญญาณรบกวนที่ปะปนในข้อมูลระยะทางด้วยการประมาณค่ากำลังสเปกตรัมวิธี Welch

[19] ซึ่งเป็นวิเคราะห์และนำเสนอข้อมูลสัญญาณที่อยู่ในอนุกรมเวลาแบบไม่ต่อเนื่องที่มีความถี่ซับซ้อนให้อยู่ในรูปกำลังสเปกตรัมของความถี่แต่ละค่า การประมาณค่ากำลังสเปกตรัมจะใช้ฟังก์ชันสำเร็จรูปของโปรแกรม MATLAB [20] ที่ตั้งค่าส่วนทับซ้อนเท่ากับครึ่งหนึ่งของความยาวชุดข้อมูลที่ทำการวิเคราะห์และรายงานผลออกมาเป็นกำลังสเปกตรัมแต่ละช่วงค่าความถี่ที่ตรวจพบ



ภาพที่ 3 แผนลำดับขั้นการศึกษาวิจัย

2.2 ตัวแปรที่ทำการศึกษา

2.2.1 ข้อมูลระยะทาง ณ ขณะเวลาจริงที่ตรวจวัดได้จากเซนเซอร์ทั้งสองตัว

2.2.2 ข้อมูลระยะทางที่ผ่านกระบวนการกรองสัญญาณรบกวนค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่

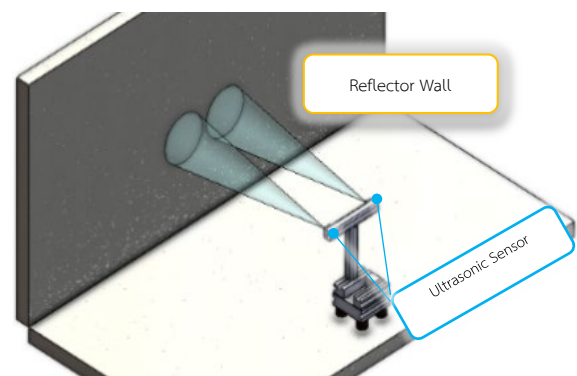
2.2.3 จำนวนสมาชิกที่ใช้ในกระบวนการกรองสัญญาณรบกวนค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่

2.3 ขั้นตอนการทดลองและประเมินผล

2.3.1 ในการทดลองเบื้องต้น ผู้วิจัยกำหนดให้เซนเซอร์อัลตราโซนิกทั้งสองตัววัดระยะในทิศทางเดียวกันไปยังผนังเรียบและเก็บข้อมูลในรูปแบบสัญญาณไฟฟ้ารูปแบบอนาล็อกโดยติดตั้งเซนเซอร์ทั้งสองตัวสูงจากพื้น 30 cm และ ห่างกัน 30 cm ทำการตรวจวัดระยะในทิศทางเดียวกันไปยังผนังคอนกรีตเรียบขนาด 5*5 เมตร ซึ่งสามารถแบ่งขั้นตอนการทดลองออกเป็น ส่วนๆ ได้ดังนี้

2.3.1.1 การทดลองใช้เซนเซอร์อัลตราโซนิกส์อ่านค่าระยะแบบทีละตัว ทำการเก็บผลข้อมูลที่ทำกรวัดระยะผนังช่วงใกล้แบบละเอียดตั้งแต่ 20 - 150 cm ที่เพิ่มขึ้นทีละ 10 cm ขึ้นละ 60 วินาที จากนั้นทำการหาสมการเชิงเส้นของความสัมพันธ์ค่าสัญญาณอนาล็อกที่แปรผันกับระยะทางที่วัดได้ด้วยเทคนิคการวิเคราะห์ถดถอยเชิงเส้น (Linear Regression Analysis) และประเมินผลความแม่นยำและเที่ยงตรงของเซนเซอร์อัลตราโซนิกส์แต่ละตัวด้วยวิธีทางสถิติ

2.3.1.2 การทดลองใช้เซนเซอร์อัลตราโซนิกส์อ่านค่าระยะวัดคู่พร้อมกันตรวจวัดไปยังผนังที่ระยะ 100 cm ดังภาพที่ 4 และใช้ตัวกรองค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่กับชุดข้อมูลระยะทาง จากนั้นประเมินผลสเปกตรัมกำลังของชุดข้อมูลระยะทางด้วยวิธี Welch โดยประเมินความสามารถในการลดสัญญาณรบกวนที่ความถี่สูงเปรียบเทียบกับชุดข้อมูล ณ ขณะเวลาจริงก่อนผ่านกระบวนการกรองค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่



ภาพที่ 4 การทดลองใช้เซนเซอร์อัลตราโซนิกส์ทำงานพร้อมกัน

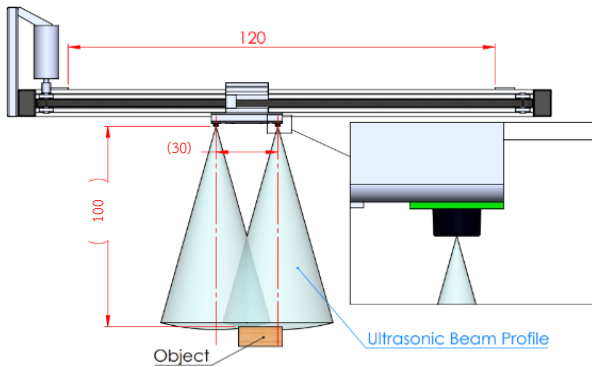
สองตัวขณะตรวจวัดระยะทางไปยังผนังคอนกรีตเรียบ

2.3.2 การทดลองกรณีเซนเซอร์อัลตราโซนิกส์ตรวจพบวัตถุทันทีทันใด ดังแสดงในภาพที่ 5 โดยการติดตั้งเซนเซอร์อัลตราโซนิกส์ทั้งสองเข้ากับรางเลื่อนในแนวภาคตัดขวางและตั้งวัตถุฉากรับขนาดกว้าง 20 cm สูง 100 cm ห่างจากเซนเซอร์ที่ระยะ 40, 70 และ 100 cm และด้านหลังเป็นผนังคอนกรีตห่างจาก

เซนเซอร์ที่ 350 cm โดยที่ชุดรางเลื่อนเคลื่อนที่ด้วยความเร็ว 2 cm/s จากนั้นนำชุดข้อมูลระยะทางที่ตรวจวัดได้เข้าสู่กระบวนการกรองค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่ที่กำหนดสมาชิก 5 และ 10 ค่า ประเมินผลในด้านค่าเฉลี่ยความล่าช้าการเปลี่ยนแปลงของข้อมูลระยะ (T_{lag}) เปรียบเทียบกับค่าเฉลี่ยความต่อเนื่องของข้อมูลระยะตรวจวัด ($\bar{C}$) จากสมการที่ (3)

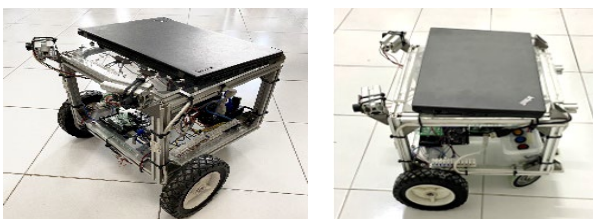
$$\bar{C} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (x_n - x_{n-1}) \quad (3)$$

เมื่อ $\bar{C}$ คือ ค่าเฉลี่ยความต่อเนื่องของข้อมูลระยะจากการตรวจวัด, $x_{n+1} - x_n$ คือ ผลต่างของข้อมูลระยะที่ตรวจวัดได้ ณ ปัจจุบันเปรียบเทียบกับข้อมูลก่อนหน้า และ N คือ จำนวนสมาชิกชุดข้อมูลระยะการตรวจวัดที่นำมาใช้วิเคราะห์ระยะทาง ณ ขณะเวลาจริง

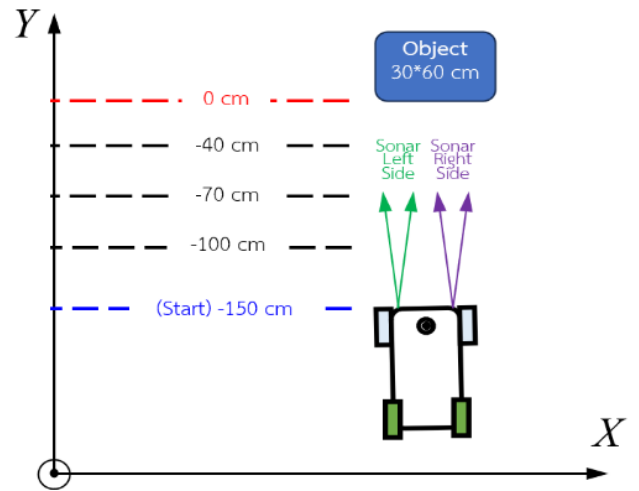


ภาพที่ 5 การทดลองกรณีเซนเซอร์อัลตราโซนิกส์ตรวจพบวัตถุทันทีทันใด

2.3.3 การทดลองออกแบบตัวกรองค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่กับหุ่นยนต์อัตโนมัติภาคพื้นดินหรือ AGVs เคลื่อนที่อัตโนมัติตามจุดกำหนดที่มีรูปแบบขับเคลื่อนสองล้อแบบ Differential Drive ด้วยผลต่างความเร็วรอบล้อทั้งสองด้าน ดังภาพที่ 6 โดยล้อหน้าทั้งสองด้านมีระยะห่าง 35.5 cm ขนาดความโตเส้นผ่านศูนย์กลาง 15 cm ใช้มอเตอร์กระแสตรงต่อชุดเกียร์ขับที่ล้อโดยตรงและติดตั้งเซนเซอร์อัลตราโซนิกส์ติดตั้งเข้ากับ AGVs ในตำแหน่งความสูง 30 cm ห่างกัน 30 cm เซนเซอร์ทั้งสองวางแนวตรวจวัดไปทางด้านหน้าของหุ่นยนต์ และใช้โปรแกรมควบคุมให้เซนเซอร์ทั้งสองสลับกันทำงาน ระบบประมวลผลหลักของหุ่นยนต์มีรอบการประมวลผลเฉลี่ยที่ 5 Hz



ภาพที่ 6 การติดตั้งเซนเซอร์อัลตราโซนิกส์ทั้งสองตัวเข้ากับหุ่นยนต์ภาคพื้นดิน



ภาพที่ 7 แผนการทดลองกรองสัญญาณรบกวนขณะหุ่นยนต์ AGV เคลื่อนที่อัตโนมัติและหยุดขณะพบสิ่งกีดขวางภายในอาคาร

ในการทดลอง กำหนดพื้นที่ภายในอาคารที่มีขนาด 300*400 cm โดยกำหนดให้ AGVs มีตำแหน่งเริ่มต้นที่ $[X_0, Y_0] = [0, -150]$ cm ทิศทางเริ่มต้นมีทิศทางไปยังแกน +Y จากนั้นวางวัตถุขนาด 30 * 60 cm เพื่อเป็นตัวอย่างสิ่งกีดขวางการทดลองที่ตำแหน่ง $[X, Y] = [0, 0]$ cm เมื่อป้อนคำสั่งให้ AGVs เริ่มเคลื่อนที่ไปข้างหน้าด้วยความเร็ว 1 cm/s เซนเซอร์ อัลตราโซนิกส์ก็จะตรวจวัดระยะสิ่งกีดขวางภายในขอบเขตและรายงานไปยังส่วนประมวลผลควบคุมการเคลื่อนที่ของ AGVs หากตรวจพบระยะวัตถุน้อยกว่าระยะที่กำหนด AGVs ก็จะหยุดเคลื่อนที่ตามระยะห่างจากวัตถุที่กำหนดไว้ที่ 40,70,100 cm ดังแสดงในภาพที่ 7 โดยเปรียบเทียบผลระยะทางที่ AGVs หยุดเมื่อไม่ใช้ตัวกรองค่าเฉลี่ย และใช้ตัวกรองค่าเฉลี่ยกำหนดค่าสมาชิก 5 และ 10 ค่า

3. ผลการทดลองและอภิปรายผล

3.1 การประเมินผลความแม่นยำและเที่ยงตรงของเซนเซอร์อัลตราโซนิกส์แต่ละตัว

จากการทดลองใน 2.3.1.1 ทำให้ได้รับข้อมูลสัญญาณอนาล็อกเปรียบเทียบกับระยะทางอ้างอิงที่ตรวจวัดระยะผนัง จากการวิเคราะห์การลดถอยเชิงเส้นอันดับ 1 เพื่อหาสมการเชิงเส้นสำหรับแปลงค่าแรงดันไฟฟ้าเป็นระยะทางที่วัดได้จริง ดังนี้

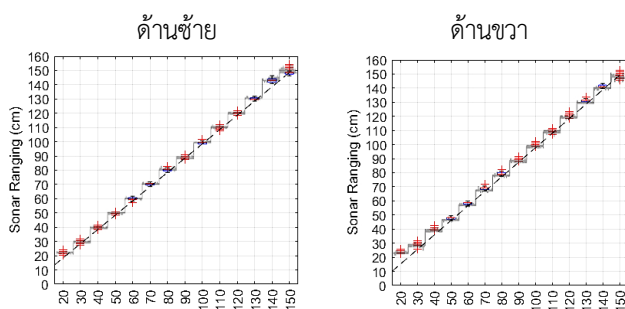
$$\text{ด้านซ้าย} : x_L = 11.129a_L + 83.503 \quad (4)$$

$$\text{ด้านขวา} : x_R = 11.734a_R + 47.997 \quad (5)$$

เมื่อ a_L, a_R คือ ค่าสัญญาณอนาล็อกในรูปแบบไฟฟ้ากระแสตรงที่เซนเซอร์อัลตราโซนิกส์ด้านซ้ายและขวาตรวจวัดระยะวัตถุและรายงานผลที่ 11.8 Hz เป็นค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าในช่วง $(0 < x < 5)$ และ x_L, x_R คือ ระยะที่ตรวจวัดไปยังผนังจากเซนเซอร์ฝั่งซ้ายและขวาตามลำดับ โดยจากการวิเคราะห์เซนเซอร์

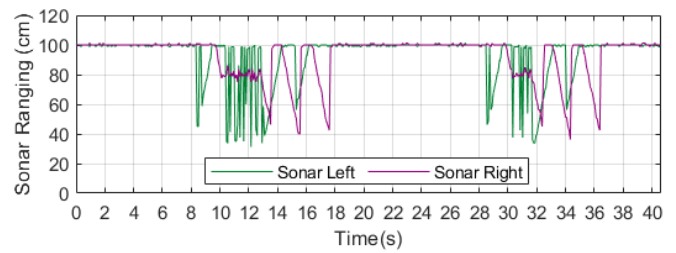
ด้านซ้ายมีค่าความผิดพลาดเฉลี่ยของขอบเขตบนและล่างเมื่อเทียบกับระยะอ้างอิงเท่ากับ 2.48% และ 1.81% ตามลำดับ และเซนเซอร์ด้านขวามีค่าความผิดพลาดเฉลี่ยของขอบเขตบนและล่างเทียบกับระยะอ้างอิงเท่ากับ 4.01 % และ 3.24% ตามลำดับ

และจากการทดลอง 2.3.1.2 ซึ่งแสดงด้วยชุดข้อมูลตัวอย่างจากตรวจวัดไปยังระยะ 100 cm (เส้นสีเทา) พบว่าเมื่อเซนเซอร์อัลตราโซนิกทั้งสองตัวขณะทำงานพร้อมกันจะมีบางช่วงเวลาที่สามารถวัดข้อมูลได้อย่างถูกต้องและบางช่วงจะได้รับข้อมูลระยะทางผิดพลาดในรูปแบบเดียวกัน โดยจะเกิดขึ้นเป็นบางช่วงเวลาทุกๆ 18-19 วินาที ดังแสดงในภาพที่ 9 อันเนื่องมาจากปัญหาการรบกวนสัญญาณข้ามกันหรือ Cross Talk จึงส่งผลให้เซนเซอร์ทั้งสองตรวจวัดค่าได้ผิดพลาด เมื่อผู้วิจัยทดลองใช้ตัวกรองค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่ที่จำนวนสมาชิก 5 และ 10 ค่า กับชุดข้อมูลดังกล่าว พบว่าสามารถช่วยลดผลกระทบจากปัญหาสัญญาณทับซ้อนลงได้แต่อย่างไรก็ตาม ยังไม่มีประสิทธิภาพเพียงพอที่จะนำข้อมูลไปใช้งานได้ และในด้านการประเมินความหนาแน่นของสเปกตรัมกำลังพบว่า การใช้ตัวกรองค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่ที่สามารถลดสัญญาณรบกวนที่มีความถี่สูงกว่า 1 Hz ลงได้ อย่างไรก็ดี ในแง่การระบุความถี่จากปัญหาการทับซ้อนกันของสัญญาณนี้ยังไม่สามารถระบุได้อย่างชัดเจน ดังนั้น จากผลการทดลองนี้แสดงให้เห็นว่า การใช้ตัวกรองค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่นั้นยังไม่มีประสิทธิภาพเพียงพอที่จะนำข้อมูลจากการตรวจวัดระยะทางด้วยเซนเซอร์อัลตราโซนิกส์แบบทำงานพร้อมกันสองตัวไปใช้ประมวลผลหลัก สิ่งกีดขวางให้กับหุ่นยนต์ AGV ได้ และในแง่การประเมินความหนาแน่นของสเปกตรัมกำลังของแต่ละช่วงความถี่นั้น

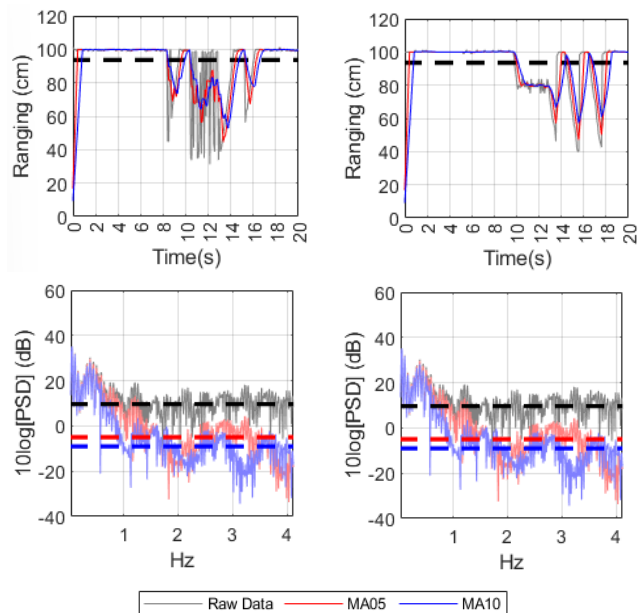


ภาพที่ 8 ผลการประเมินความแม่นยำและเที่ยงตรงของเซนเซอร์อัลตราโซนิกส์ทั้งสองตัวแบบทำงานทีละตัว

ไม่สามารถแสดงให้เห็นถึงความถี่ในช่วงที่เกิดสัญญาณผิดพลาดได้อย่างชัดเจนที่จะสามารถนำไปออกแบบตัวกรองเพื่อลดผลกระทบจากสัญญาณผิดพลาดนั้นๆ ได้ ดังนั้น จึงจำเป็นต้องออกแบบโปรแกรมควบคุมให้เซนเซอร์อัลตราโซนิกส์ทั้งสองให้สลับกันทำงานตามช่วงระยะเวลาที่กำหนดไว้



ภาพที่ 9 ผลการทดลองการใช้เซนเซอร์อัลตราโซนิกส์แบบทำงานพร้อมกันทั้งสองตัวที่วัดไปยังผนังคอนกรีตที่ระยะ 100 cm



ภาพที่ 10 ผลการกรองสัญญาณและการประเมินความหนาแน่นสเปกตรัมกำลังของชุดข้อมูลระยะทางจริง (สีเทา) หลังผ่านตัวกรองแบบค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่ที่ใช้สมาชิกจำนวน 5 ค่า (สีแดง) และ 10 ค่า (สีน้ำเงิน) และค่าเฉลี่ยแต่ละกรณี (เส้นประ)

3.2 การประเมินผลการทดลองกรณีเซนเซอร์อัลตราโซนิกส์ตรวจพบวัตถุทันทีทันใด

จากผลการทดลองแสดงให้เห็นถึงผลกระทบของการใช้ตัวกรองค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่ (Moving Average Filter) ที่มีจำนวนสมาชิกต่างกันต่อประสิทธิภาพของเซนเซอร์อัลตราโซนิกส์ในการตรวจจับวัตถุ โดยทำการประเมินที่ระยะ 40, 70 และ 100 cm และเปรียบเทียบข้อมูลระยะวัดจริง (Raw, สีเทา) กับข้อมูลที่ผ่านการกรองด้วยจำนวนสมาชิก 5 ค่า (MA05, สีแดง) และ 10 ค่า (MA10, สีน้ำเงิน) ดังแสดงในภาพที่ 11 และภาพที่ 12 และสามารถสรุปผลข้อมูลดังแสดงในตารางที่ 2

เมื่อพิจารณาในด้านความต่อเนื่องของข้อมูล ($\bar{C}$) พบว่าในทุกการทดลองทุกๆกรณี พฤติกรรมของชุดข้อมูลระยะการตรวจวัดจริงจะมีความผันผวนในช่วงเริ่มจะพบวัตถุที่วินาทีที่ 0 โดยเฉพาะอย่างยิ่งในกรณีที่ระยะวัตถุ 100 cm ที่จะพบความผันผวนสูงสุดที่ $\bar{C}_{Raw@100\text{ cm}} = 48.06\text{ cm}$ และผลการใช้ตัวกรองค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่ที่จะช่วยลดความผันผวนเฉลี่ยของชุดข้อมูลระยะการตรวจวัดลงได้ โดยที่การกำหนดสมาชิก 5 ค่า (สีแดง) $\bar{C}_{MA05@100\text{ cm}} = 9.49\text{ cm}$ และที่ 10 ค่า (สีน้ำเงิน)

$\bar{C}_{MA10@100cm} = 5.65$ cm คิดเป็นสัดส่วนที่สามารถลดความผันผวนของสัญญาณลงได้ 80.25% และ 88.24% ตามลำดับ

และเมื่อพิจารณาในด้านค่าความล่าช้าในการตอบสนองต่อการตรวจพบวัตถุ (T_{lag}) ที่เพิ่มขึ้นตามจำนวนสมาชิกของตัวกรองที่ใช้พบว่า ข้อมูลระยะจริงจากการตรวจวัดจะให้ผลลัพธ์การตอบสนองเร็วที่สุดเฉลี่ยในช่วง 0.09–1.44 วินาที ในขณะที่การใช้ตัวกรองค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่ที่กำหนดสมาชิก 5 ค่า ส่งผลให้เกิดความล่าช้าในช่วง (0.51–1.83 วินาที) และการกำหนดสมาชิก 10 ค่า ก่อให้เกิดความล่าช้าสูงสุด ที่ 0.94–2.26 วินาที

3.3 การทดลองออกแบบตัวกรองค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่กับหุ่นยนต์อัตโนมัติภาคพื้นดิน

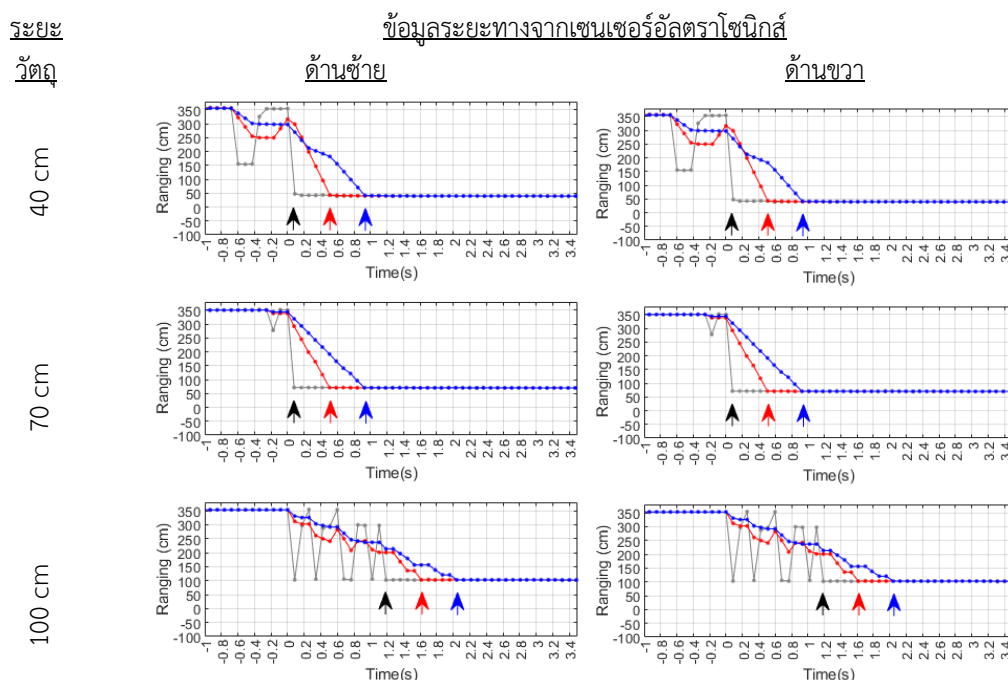
ผลการทดลองกับหุ่นยนต์ AGV ขณะปฏิบัติการเคลื่อนที่แบบอัตโนมัติที่ความเร็วไม่เกิน 100 cm/s และหยุดเคลื่อนที่เมื่อเซนเซอร์อัลตราโซนิกสพบสิ่งกีดขวางในระยะที่กำหนด 40 , 70 และ 100 cm ในกรณีที่ผู้ใช้ตัวกรองค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่เปรียบเทียบกับกรณีที่ผู้ใช้ตัวกรองค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่ที่กำหนดสมาชิก 5 และ 10 ค่าโดยทำการศึกษาแต่ละกรณีจากข้อมูลความคลาดเคลื่อนของระยะที่หุ่นยนต์ AGV หยุดเคลื่อนที่ไปยังสิ่งกีดขวางนั้นๆ จำนวน 5 ครั้งต่อกรณีดังแสดงในตารางที่ 3 และสรุปผลดังภาพที่ 14 โดยสามารถอภิปรายผลได้ดังต่อไปนี้

ในกรณีที่ผู้ใช้ตัวกรองค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่กับข้อมูลระยะสิ่งกีดขวาง พบว่าหุ่นยนต์ AGV สามารถหยุดทำงานคลาดเคลื่อนไปจากระยะที่กำหนดเฉลี่ยทั้ง 3 ระยะเท่ากับ -5.4 cm นอกจากนี้ยังพบว่า เซนเซอร์อัลตราโซนิกทั้งสองตรวจวัดระยะสิ่งกีดขวาง

ผิดพลาด ส่งผลให้หุ่นยนต์ AGV ขณะเคลื่อนที่ที่จะหยุดและเคลื่อนที่ต่อจนถึงระยะที่กำหนดไว้ จึงทำงานไม่ต่อเนื่อง

ในกรณีที่กำหนดค่าตัวกรองค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่ที่ใช้สมาชิก 5 ค่ากับข้อมูลระยะสิ่งกีดขวาง พบว่าหุ่นยนต์ AGV สามารถหยุดทำงานคลาดเคลื่อนไปจากระยะที่กำหนดเฉลี่ยทั้ง 3 ระยะเท่ากับ -26.3 cm นอกจากนี้ยังพบว่า ที่ระยะหยุด 40 cm หุ่นยนต์ AGV ประมวลผลให้หยุดห่างจากสิ่งกีดขวางเฉลี่ย 5.4 cm จากกรณีดังกล่าวมีสาเหตุมาจากกรณีที่วัตถุอยู่ใกล้กว่า 30 cm ซึ่งเป็นระยะต่ำสุดที่เซนเซอร์จะตรวจวัดได้ เซนเซอร์จะส่งค่าระยะที่ 30 cm ดังนั้น กระบวนการกรองจึงล่าช้ากว่าเนื่องจากค่าถ่วงน้ำหนักข้อมูลระยะทางน้อยกว่าวัตถุระยะจริง ในกรณีที่กำหนดค่าตัวกรองค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่ที่ใช้สมาชิก 10 ค่ากับข้อมูลระยะสิ่งกีดขวาง พบว่าหุ่นยนต์ AGV สามารถหยุดทำงานคลาดเคลื่อนไปจากระยะที่กำหนดเฉลี่ยทั้ง 3 ระยะเท่ากับ -35.4 cm นอกจากนี้ยังพบว่าที่ระยะหยุด 40 cm หุ่นยนต์ AGV ขนเข้าใกล้สิ่งกีดขวางเป็นผลมาจาก AGVs เข้าใกล้วัตถุต่ำกว่า 30 cm เช่นเดียวกับกรณีก่อนหน้านี้ และข้อมูลหลังผ่านกระบวนการกรองเฉลี่ยเข้าค่าจริงได้ล่าช้ากว่ากรณีอื่นๆจึงส่งผลให้หุ่นยนต์ AGV ไม่สามารถหยุดได้ทัน

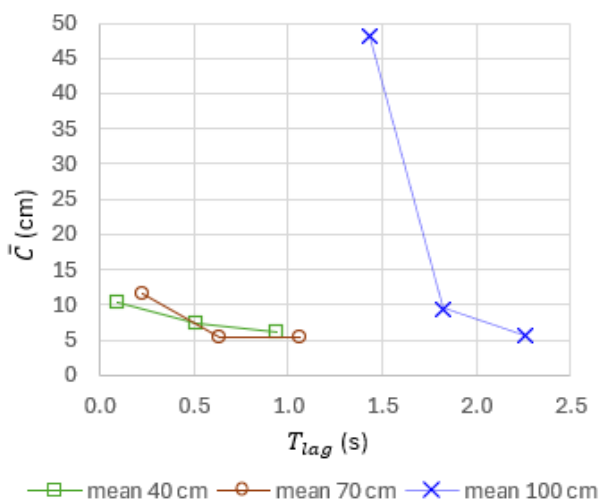
จากผลการทดลองนี้แสดงให้เห็นว่า กรณีที่ไม่ใช้ตัวกรองค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่ หุ่นยนต์ AGV สามารถหยุดได้ใกล้เคียงกับระยะอ้างอิงได้ใกล้เคียงกว่ากรณีอื่นๆที่ใช้ตัวกรองค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่ และในกรณีที่ผู้ใช้ตัวกรองค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่ที่มีสมาชิก 10 ค่า ผลการทดลองพบว่าจะต้องใช้ระยะหยุดที่ 34.6 - 37.1 cm ส่งผลให้กรณีที่ระยะหยุดก่อนถึงวัตถุ 40 cm หุ่นยนต์ AGV จะไม่สามารถหยุดได้ทันและอาจชนเข้ากับวัตถุ



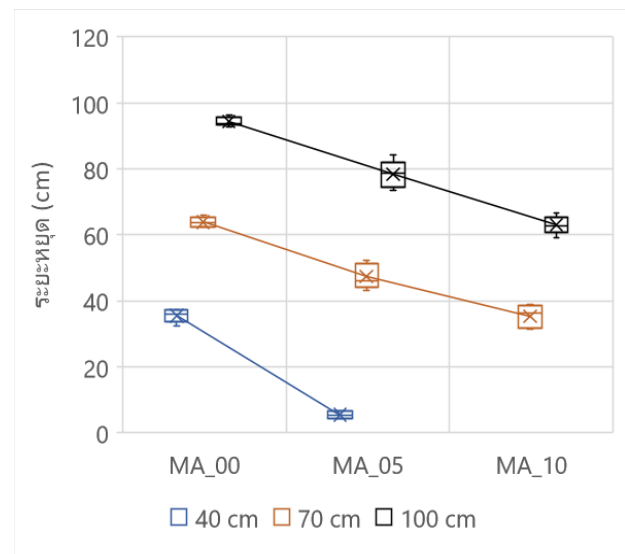
ภาพที่ 11 ผลการทดลองกรณีเซนเซอร์อัลตราโซนิกตรวจพบวัตถุเมื่อตรวจพบวัตถุที่ระยะ 40,70 และ 100 cm โดยที่ชุดข้อมูลระยะจริง (สีเทา), การใช้ตัวกรองค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่ที่กำหนดสมาชิก 5 ค่า (สีแดง) และ 10 ค่า (สีน้ำเงิน)

ตารางที่ 2 ผลการวิเคราะห์การทดลองกรณีเซนเซอร์อัลตราโซนิกส์ตรวจพบวัตถุเมื่อตรวจพบฉากรับที่ระยะ 40,70 และ 100 cm ในด้านค่าเฉลี่ยความล่าช้าการเปลี่ยนแปลงของข้อมูลระยะ (T_{lag}) เปรียบเทียบกับค่าเฉลี่ยความต่อเนื่องของข้อมูลระยะตรวจวัด ($\bar{C}$) จากชุดข้อมูลระยะจริง, การใช้ตัวกรองค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่สมาชิก 5 ค่า และ 10 ค่า

ระยะวัตถุ	ตัวแปรศึกษา	ข้อมูลระยะจริง			การใช้สมาชิกตัวกรองค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่สมาชิก 5 ค่า			การใช้สมาชิกตัวกรองค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่สมาชิก 10 ค่า		
		ด้านซ้าย	ด้านขวา	เฉลี่ย	ด้านซ้าย	ด้านขวา	เฉลี่ย	ด้านซ้าย	ด้านขวา	เฉลี่ย
40	$\bar{C}$ (cm)	14.28	6.32	10.30	8.72	6.15	7.43	6.11	6.13	6.12
	T_{lag} (s)	0.09	0.09	0.09	0.51	0.51	0.51	0.93	0.94	0.94
70	$\bar{C}$ (cm)	8.61	14.46	11.53	5.47	5.45	5.46	5.43	5.41	5.42
	T_{lag} (s)	0.08	0.37	0.23	0.51	0.76	0.64	0.93	1.19	1.06
100	$\bar{C}$ (cm)	39.38	56.75	48.06	7.79	11.19	9.49	4.86	6.43	5.65
	T_{lag} (s)	1.19	1.68	1.44	1.61	2.04	1.83	2.04	2.47	2.26



ภาพที่ 12 การประเมินผลการทดลองกรณีเซนเซอร์อัลตราโซนิกส์ตรวจพบวัตถุที่ระยะ 40,70 และ 100 cm ในด้านค่าเฉลี่ยความล่าช้าการเปลี่ยนแปลงของข้อมูลระยะ (T_{lag}) เปรียบเทียบกับค่าเฉลี่ยความต่อเนื่องของข้อมูลระยะตรวจวัด ($\bar{C}$)



ภาพที่ 13 สรุปการประเมินผลการทดลองกับการไม่ใช้และใช้ตัวกรองค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่สำหรับหุ่นยนต์ AGV ขณะเคลื่อนที่แบบอัตโนมัติและระยะหยุดเคลื่อนที่เมื่อตรวจพบสิ่งกีดขวางในระยะหยุดอ้างอิงที่กำหนด

ตารางที่ 3 การประเมินผลการทดลองกับหุ่นยนต์ AGV ขณะเคลื่อนที่แบบอัตโนมัติและหยุดเคลื่อนที่เมื่อตรวจพบสิ่งกีดขวางในระยะหยุดอ้างอิงที่กำหนด

กรณีศึกษา	ครั้งที่	ระยะหยุดอ้างอิงที่ 40 cm		ระยะหยุดอ้างอิงที่ 70 cm		ระยะหยุดอ้างอิงที่ 100 cm	
		ระยะหยุดก่อนถึงวัตถุ	ผลต่างจากระยะหยุดอ้างอิง	ระยะหยุดก่อนถึงวัตถุ	ผลต่างจากระยะหยุดอ้างอิง	ระยะหยุดก่อนถึงวัตถุ	ผลต่างจากระยะหยุดอ้างอิง
ไม่ใช้ตัวกรองค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่ (MA_00)	1	37.2	-2.8	62.5	-7.5	92.6	-7.4
	2	34.8	-5.2	63.7	-6.3	93.8	-6.2
	3	36	-4	64.5	-5.5	96.3	-3.7
	4	37.2	-2.8	66.1	-3.9	95.1	-4.9
	5	32.4	-7.6	62.5	-7.5	93.8	-6.2
	เฉลี่ย	35.5	-4.48	63.8	-6.14	94.3	-5.68
ใช้ตัวกรองค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่ 5 ค่า (MA_05)	1	6.7	-33.3	44.7	-25.3	73.3	-26.7
	2	4.2	-35.8	43.2	-26.8	84.2	-15.8
	3	5.2	-34.8	50.2	-19.8	75.6	-24.4
	4	4.5	-35.5	46.1	-23.9	78.8	-21.2
	5	6.5	-33.5	52.3	-17.7	79.9	-20.1
	เฉลี่ย	5.4	-34.58	47.3	-22.7	78.4	-21.6
ใช้ตัวกรองค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่ 10 ค่า (MA_10)	1	ชนวัตถุ	ชนวัตถุ	38.8	-31.2	62.6	-37.4
	2	ชนวัตถุ	ชนวัตถุ	31.3	-38.7	59.1	-40.9
	3	ชนวัตถุ	ชนวัตถุ	38.4	-31.6	63.7	-36.3
	4	ชนวัตถุ	ชนวัตถุ	36.2	-33.8	62.7	-37.3
	5	ชนวัตถุ	ชนวัตถุ	32.2	-37.8	66.6	-33.4
	เฉลี่ย	-	=	35.4	-34.6	62.9	-37.1

4. สรุปผล

ในการปฏิบัติงานของหุ่นยนต์เคลื่อนที่อัตโนมัติภาคพื้นดิน หุ่นยนต์จะต้องมีความสามารถเดินทางเข้าสู่เป้าหมายที่กำหนดได้พร้อม ๆ กับหลบหลีกสิ่งกีดขวางได้เองแบบอัตโนมัติด้วยข้อมูลจากเซนเซอร์ตรวจวัดระยะแบบไม่สัมผัส สำหรับการตรวจวัดระยะด้วยเซนเซอร์อัลตราโซนิกที่มีชนิดเดียวกันทำงานในทิศทางเดียวกันพร้อม ๆ กันนั้นมักจะพบชุดข้อมูลที่ผิดพลาดจากการรบกวนสัญญาณข้ามกัน (Cross-Talk) ระหว่างเซนเซอร์อัลตราโซนิกทั้งสองและยังรวมถึงสัญญาณรบกวน (Noise) จากสภาพแวดล้อมภายนอกที่ไม่สามารถควบคุมได้ ดังนั้น บทความวิจัยนี้จึงนำเสนอการออกแบบโปรแกรมสลับการทำงานเพื่อแก้ไขปัญหาการทำงานทับซ้อนด้วยการออกแบบโปรแกรมกำหนดให้สลับทำงานด้านละ 50 ms ร่วมกับการใช้กระบวนการกรองสัญญาณรบกวนแบบค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่ โดยศึกษาในกรณีที่ใช้สมาชิกตัวกรอง 5 และ 10 ค่า

ลำดับการศึกษาวิจัยสามารถแบ่งออกได้เป็น 1) การทดลองเบื้องต้นที่เซนเซอร์ทั้งสองขณะอยู่กับที่ตรวจวัดระยะไปยังผนังแบบที่ละด้านพร้อมๆกัน ร่วมกับการใช้ตัวกรองเฉลี่ยเคลื่อนที่ ผลการศึกษาพบว่าตัวกรองค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่ที่สามารถช่วยให้ข้อมูลมีความต่อเนื่องราบเรียบมากยิ่งขึ้นแต่ไม่สามารถขจัดปัญหาการรบกวนสัญญาณข้ามกันระหว่างเซนเซอร์ได้ จึงจำเป็นต้องมีการออกแบบโปรแกรมควบคุมสลับการทำงานของเซนเซอร์แต่ละตัว และ 2) การทดลองกรณีที่เซนเซอร์อัลตราโซนิกตรวจพบวัตถุทันทีที่ทันใดเมื่อระยะการตรวจวัดเคลื่อนที่ผ่านวัตถุฉากที่ที่กำหนดระยะห่าง 40, 70 และ 100 cm ผลการทดลองพบว่าชุดข้อมูลระยะการตรวจวัดจริงจะเกิดความผันผวนอย่างมากขณะวัตถุเข้ามาในระยะขอบเขตการตรวจวัด โดยมีค่าเฉลี่ยความผันผวนสูงสุดในกรณีที่ระยะวัตถุ 100

cm ที่ 48.06 cm การใช้ตัวกรองค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่ที่กำหนดสมาชิก 5 ค่า และที่ 10 ค่า จะสามารถช่วยลดค่าเฉลี่ยความผันผวนลงได้โดยคิดเป็นสัดส่วนที่ 80.25% และ 88.24% ตามลำดับ และ 3) การทดลองในหุ่นยนต์ AGV เคลื่อนที่และหยุดแบบอัตโนมัติเมื่อเซนเซอร์อัลตราโซนิกสปีดสิ่งกีดขวางในระยะที่กำหนด 40 , 70 และ 100 cm โดยกรณีที่ 1 ไม่ใช้ตัวกรองค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่พบว่าการใช้ตัวกรองค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่พบว่า หุ่นยนต์ AGV จะหยุดเคลื่อนที่ใกล้เคียงกับระยะหยุดที่กำหนดไว้มากกว่ากรณีอื่นๆแต่พบว่าหุ่นยนต์ AGV ทำงานแบบไม่ต่อเนื่องเพราะได้รับผลกระทบจากสัญญาณรบกวนอื่นๆปะปนเข้ามาในข้อมูลระยะ และในกรณีที่การใช้ตัวกรองค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่ที่กำหนดสมาชิก 10 ค่า พบว่าข้อมูลระยะวัตถุมีความเปลี่ยนแปลงล่าช้ามากกว่ากรณีอื่นๆ ส่งผลให้หุ่นยนต์ AGV จะต้องใช้ระยะหยุดที่เพิ่มขึ้น การกำหนดระยะหยุดก่อนถึงวัตถุที่ 40 cm จึงไม่สามารถหยุดได้ทันและชนเข้ากับวัตถุ

ดังนั้น จากผลการศึกษาทดลองในงานวิจัยนี้แสดงให้เห็นว่าการออกแบบโปรแกรมสลับการทำงานของเซนเซอร์อัลตราโซนิกที่ 50 ms ร่วมกับการประมวลผลสัญญาณรบกวนด้วยตัวกรองค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่ที่กำหนดสมาชิก 5 ค่า นั้นจะมีความเหมาะสมที่สุดที่สามารถช่วยให้หุ่นยนต์ AGV สามารถบรรลุเงื่อนไขการหยุดภายใต้เงื่อนไขที่ระยะก่อนถึงวัตถุกีดขวางน้อยสุดที่ 40 cm

5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนงานวิจัยจากกองทุนส่งเสริมงานวิจัย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ชื่อทุน “ทุนนักวิจัยรุ่นใหม่” ประจำปีงบประมาณ 2564 สัญญาเลขที่ NRF64RMUTT

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Aizat M, Qistina N, Rahiman W. A comprehensive review of recent advances in automated guided vehicle technologies: Dynamic obstacle avoidance in complex environment toward autonomous capability. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*. 2024;73:1-25.
- [2] Moshayedi AJ, Jinsong L, Liao L. AGV (automated guided vehicle) robot: Mission and obstacles in design and performance. *J Simul Anal Novel Technol Mech Eng*. 2019;12(4):5-18.
- [3] Zhou X, Chen T, Zhang Y. Research on intelligent AGV control system. In: 2018 Chinese Automation Congress (CAC); 2018 Nov 30-Dec 2; Xi'an, China. IEEE; 2018. p. 58-61.
- [4] Wang C, Mao J. Summary of AGV path planning. In: 2019 3rd International Conference on Electronic Information Technology and Computer Engineering (EITCE); 2019 Oct 18-20; Xiamen, China. IEEE; 2019. p. 332-335.
- [5] AGV Network. Mobile robot sensors - The eyes and ears of AGVs and AMRs. Available from: <https://www.agvnetwork.com/mobile-robot-sensors-agv-amr>. Accessed June 19, 2024.
- [6] A. B. R. Tonmoy, M. D. S. Zinan, S. Sultan and A. Sarker, "A comparative study on LIDAR and Ultrasonic Sensor for Obstacle Avoidance Robot Car," in *Proc. 2023 Int. Conf. Adv. Electron., Commun., Comput. Intell. Inf. Syst. (ICAECIS)*, Bangalore, India, 2023, pp. 582–587.
- [7] Li C, Guo S, Guo J. Study on obstacle avoidance strategy using multiple ultrasonic sensors for spherical underwater robots. *IEEE Sens J*. 2022;22(24):24458-24470.
- [8] Zhang Y, Hsiung-Cheng L, Zhao J, Zewen M, Ye Z, Sun H. A multi-DoF ultrasonic receiving device for indoor positioning of AGV system. In: 2018 International Symposium on Computer, Consumer and Control (IS3C); 2018 Jun 6-8; Taichung, Taiwan. IEEE; 2018. p. 97-100.
- [9] Park G-R, Park S-H, Baek K-R. Improved frequency sweep keying CDMA using faster R-CNN for extended ultrasonic crosstalk reduction. *Sensors*. 2023;23: 9550.
- [10] M. Kubinyi and R. Smid, "Ultrasonic denoising with a modified wavelet filter," *Proceedings of the 6th IEEE International Conference on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems*, Prague, Czech Republic, 2011, pp. 479-482
- [11] Shankar P, Bencharit U, Bilgutay N, Saniie J. Grain noise suppression through bandpass filtering. *J Mater Eval*. 1988;46(8):1100-1104.
- [12] Prasetyono AP, Adiyasa IW, Yudianto A, Agit SNK. Multiple sensing method using moving average filter for automotive ultrasonic sensor. *J Phys Conf Ser*. 2020;1700(1):012075.
- [13] Kelemen M, Virgala I, Kelemenová T, Miková L', Frankovský P, Lipták T, Lörinc M. Distance measurement via using of ultrasonic sensor. *J Autom Control*. 2015;3(3):71-74.
- [14] Zhmud VA, Kondratiev NO, Kuznetsov KA, Trubin VG, Dimitrov LV. Application of ultrasonic sensor for measuring distances in robotics. *J Phys Conf Ser*. 2018; 1015(3):032189
- [15] Narumol A. การวัดระยะทางของวัตถุด้วยการใช้คลื่นความถี่สูง (Ultrasonic). Available from: <https://medium.com/@narumol.aomam/การวัดระยะทางของวัตถุด้วยการใช้คลื่นความถี่สูง-ultrasonic-db35883a17f>. Accessed June 28, 2024.
- [16] MaxBotix. LV-MaxSonar-EZ datasheet. Available from: <https://maxbotix.com/pages/lv-maxsonar-ez-datasheet>. Accessed June 28, 2024.
- [17] Micontech Lab. โซลิตสเตรเลอร์ 4 ช่อง G3MB-202P 240VAC 2A. Available from: <http://www.micontechlab.com/product/774/1x-โซลิตสเตรเลอร์-4-ช่อง-g3mb-202p-240vac-2a>. Accessed June 26, 2024.
- [18] Smith SW. *The Scientist and Engineer's Guide to Digital Signal Processing*. 2nd ed. San Diego, CA: California Technical Publishing; 1999. Chapter 15, Moving Average Filters; p. 277-285.
- [19] Welch PD. The use of fast Fourier transform for the estimation of power spectra: a method based on time averaging over short, modified periodograms. *IEEE Trans Audio Electroacoust*. 1967;15(2):70-73.
- [20] MathWorks. pwelch. Available from: <https://www.mathworks.com/help/signal/ref/pwelch.html>. Accessed June 26, 2024

การพัฒนาทำ Glued Laminated Timber (Glulam) จากเศษไม้สักสวนป่า The Development of Glued Laminated Timber (Glulam) from Teak Plantation

ทยิดา ถิ่นเขาค้อ^{1,*} ทรงกลด จารุสมบัติ¹ ดำรง พิพัฒน์วัฒนกุล¹
Tayida Thinkowtor^{1,2}, Songklod Jarusombuti¹, Damrong Pipatwattanukul¹

¹สาขาวิชาการบริหารทรัพยากรป่าไม้และสิ่งแวดล้อม คณะวนศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ จตุจักร กรุงเทพฯ 10900

¹Department of Forest Management, Faculty of Forestry, Kasetsart University, Chatuchak, Bangkok 10900, Thailand

*Corresponding Author E-mail: tayida.th@ku.th

Received: 16-11-2024 Revised: 16-11-2025 Accepted: 17-11-2025

บทคัดย่อ

การศึกษาครั้งนี้เป็นการพัฒนาทำ Glued Laminated Timber (Glulam) จากเศษไม้สักสวนป่าที่เหลือจากองค์การอุตสาหกรรมป่าไม้ของกระบวนการผลิตไม้สักสวนป่าแปรรูป อายุประมาณ 25-30 ปี ที่ไม่สามารถนำมาแปรรูปได้ตามที่ต้องการ ทำให้เศษไม้ที่เหลือกลายเป็นของเสียที่เกิดจากกระบวนการผลิต โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการพัฒนาทำ Glulam จากเศษไม้สักสวนป่าและคุณสมบัติเชิงกลของ Glulam รวมทั้งการเพิ่มมูลค่าของเศษไม้สักสวนป่าแปรรูปในการนำไปใช้ประโยชน์ทางด้านอุตสาหกรรมไม้ เพื่อให้การพัฒนาทำ Glulam จากเศษไม้สักสวนป่าเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพ โดยมีการทดสอบ 4 วิธีการ คือ การทดสอบแรงเฉือน (Shear tests) การทดสอบความต้านแรงดัด (Modulus of Rupture หรือ MOR) โมดูลัสยืดหยุ่น (Modulus of Elasticity หรือ MOE) ตามมาตรฐาน ISO/TR 19623:2019 และการทดสอบการติดกาว (Adhesive tests) ตามมาตรฐาน EN 204:2001 ในกรรมวิธีการอัดประสานเศษไม้สักได้มีการเลือกใช้กาวโพลียูรีเทน (Polyurethane Adhesives; PU) มีคุณสมบัติความเหนียว ความหนาแน่นและยืดหยุ่นแต่ไม่หดตัว มีประสิทธิภาพในการยึดติดสูง แลกาวอีพอกซีโพลีเมอร์ไอโซไซยาเนต (Emulsion polymer isocyanate; EPI) มีคุณสมบัติการแข็งตัวที่รวดเร็วแม้อยู่ในสภาวะอุณหภูมิปกติ มีแรงยึดเกาะและทนทานสูง ซึ่งกาวทั้ง 2 ชนิด เป็นกาวที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในภาคอุตสาหกรรม การแปรรูปไม้สำหรับงานที่ใช้ภายนอกได้ เนื่องจากทนความร้อนได้ดี มีความทนทานต่อน้ำและความชื้น รวมทั้งเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม ผลการทดสอบ พบว่า ค่าแรงเฉือน มีค่า 7.94 MPa และ 8.12 MPa ตามลำดับ ค่าความต้านแรงดัด มีค่า 53.03 MPa และ 64.44 MPa ตามลำดับ ค่าโมดูลัสยืดหยุ่น มีค่า 9,476.41 MPa และ 9,659.61 MPa ตามลำดับ และการทดสอบการติดของกาว ไม่มีการเปลี่ยนแปลงสภาพไปจากเดิม ซึ่งค่าการทดสอบทั้ง 4 วิธีการ เป็นไปตามค่ามาตรฐาน จากผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่า เศษไม้สักที่เหลือจากกระบวนการผลิตสามารถนำไปสู่การพัฒนาทำ Glued Laminated Timber (Glulam) ในการใช้ประโยชน์ด้านผลิตภัณฑ์ก่อสร้างสำหรับใช้เป็นงานโครงสร้างต่างๆ เพื่อเพิ่มมูลค่า และนำองค์ความรู้ที่ได้จากการวิจัยไปประยุกต์ หรือปรับปรุงผลิตภัณฑ์ในภาคอุตสาหกรรมไม้ในประเทศไทย เพื่อยกระดับการใช้ทรัพยากรอย่างคุ้มค่าต่อไป

คำสำคัญ : Glued Laminated Timber (Glulam), ไม้สักสวนป่า, กาวโพลียูรีเทน, กาวอีพอกซีโพลีเมอร์ไอโซไซยาเนต, มาตรฐาน ISO/TR 19623:2019, มาตรฐาน EN 204:2001

ABSTRACT

This study focuses on the development of Glued Laminated Timber (Glulam) made from teak wood scraps sourced from a teak plantation forest. These are by-products left over from the teak processing operations of the Forest Industry Organization, which the wood, approximately 25-30 years old, that cannot be sawn into commercially required dimensions, constitute a significant waste stream within the production process. The objectives were to develop Glulam from teak wood scraps, evaluate the mechanical properties of the resulting products, and explore opportunities for value enhancement within the wood-processing industry. The study referred to four testing methods: shear tests, Modulus of Rupture (MOR) tests, Modulus of Elasticity (MOE) tests (according to ISO/TR 19623:2019 standard), and adhesive tests (according to EN 204:2001 standard). Polyurethane adhesives; PU, which demonstrates high toughness, dimensional stability, flexibility, and superior bonding performance, and Emulsion polymer isocyanate (EPI) adhesive, recognized for its rapid curing behavior at ambient temperature as well as its high bond strength and durability, were employed in the lamination process. Both adhesive systems are extensively utilized in exterior-grade wood-product

manufacturing due to their excellent thermal resistance, strong durability under water and moisture exposure, and environmentally benign attributes. The results showed shear strengths were 7.94 MPa and 8.12 MPa, Modulus of Rupture were 53.03 MPa and 64.44 MPa, and Modulus of Elasticity were 9,476.41 MPa and 9,659.61 MPa, respectively. Additionally, the result provide compelling evidence that teak residues, typically regarded as low-value waste materials, can be effectively transformed into structurally reliable Glulam products suitable for various construction applications. This valorization pathway not only enhances the economic utility of teak processing residues but also offers a scientifically grounded framework that can inform industrial practice and support the advancement of sustainable and resource-efficient wood-product manufacturing in Thailand.

Keyword: Glued Laminated Timber (Glulam), Teak wood plantation, Polyurethane adhesives (PU), Emulsion polymer isocyanate (EPI), ISO/TR 19623:2019 standard, EN 204:2001 standard.

1. บทนำ

ปัจจุบันไม้สักในประเทศไทยที่ตัดมาใช้ประโยชน์ล้วนเป็นไม้สักจากสวนป่าปลูกทั้งสิ้น สวนป่าหรืออุตสาหกรรมปลูกสร้างสวนป่า (Forest plantation) เป็นแนวทางสำคัญในการเพิ่มพื้นที่ป่าที่เป็นพื้นที่ป่าเสื่อมโทรม ถูกทำลาย หรือถูกทิ้งให้ว่างเปล่าเพื่อปลูกสร้างสวนป่าที่มีคุณค่าทางเศรษฐกิจ ทั้งไม้ทองถิ่นและไม้ต่างถิ่นหลากหลายชนิด อีกทั้งลดปัญหาการขาดแคลนไม้ใช้สอยของประเทศ และชนิดไม้ที่มีบทบาทสูงมากในสังคมไทยมาตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน คือ ไม้สัก จึงเริ่มมีการปลูกมาตั้งแต่ปี พ.ศ. 2449 ซึ่งถือเป็นการปลูกสร้างสวนป่าครั้งแรกของประเทศไทยสำหรับสวนป่าเศรษฐกิจส่วนใหญ่อยู่ภายใต้การดูแลขององค์การอุตสาหกรรมป่าไม้ (ออป.) ซึ่งเป็นภาครัฐวิสาหกิจ สังกัดกระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม ร่วมกับภาคเอกชน โดยมีภารกิจหลักในการปลูกสร้างสวนป่าเศรษฐกิจ และสนองนโยบายของรัฐในด้านการอนุรักษ์ การฟื้นฟูป่า และการส่งเสริมด้านการปลูกป่า นอกจากนี้ยังมีวัตถุประสงค์ของการปลูกสร้างสวนป่าไม้สัก เพื่อเป็นแหล่งวัตถุดิบไม้ในภาคอุตสาหกรรมและเพื่อผลตอบแทนทางเศรษฐกิจ [1] และในกระบวนการผลิตไม้สักสวนป่าแปรรูปนั้น พบว่า การใช้ประโยชน์จากไม้สักยังไม่คุ้มค่าเนื่องจากมีปริมาณเศษไม้เหลือทิ้งที่ไม่สามารถนำมาแปรรูปได้ตามที่ต้องการจากกระบวนการผลิต ทำให้เศษไม้ที่เหลือกลายเป็นของเสียที่เกิดจากกระบวนการผลิต [2] ซึ่งองค์การอุตสาหกรรมป่าไม้ (ออป.) ได้ให้ข้อกำหนดสำหรับไม้สักสวนป่าแปรรูปกล่าวคือ เศษไม้สักสวนป่าแปรรูป คือ เศษไม้แปรรูปที่มีขนาดเล็กที่เหลือจากการตัดแต่ง ซ่อมรอยตามปกติ หรือเศษไม้แปรรูปที่เหลือจากการซ่อมรอยไม้แปรรูปที่มีตำหนิที่ตัด แต่ง ซ่อมแซมปรับปรุงคุณภาพต่อไม่ได้ และไม่สามารถจัดให้เป็นไม้แปรรูปได้ [3]

ไม้สัก หรือเรียกกันทั่วไปว่า Teak มีชื่อวิทยาศาสตร์ว่า *Tactona grandis* Linn.f. จัดอยู่ในวงศ์ Family Lamiaceae อันดับ Laminales ไม้สักเป็นไม้ที่รู้จักกันอย่างแพร่หลายทั่วโลกเนื่องจากเป็นไม้ที่มีค่าทางเศรษฐกิจสูง เนื้อไม้มีคุณสมบัติเฉพาะจัดได้ว่าเป็นไม้ที่มีคุณภาพดีที่สุด เป็นไม้ที่มีสีสน้ำตาลทองและลวดลายธรรมชาติที่งดงามสีของเนื้อไม้จะเป็นสีน้ำตาลทองและมีลวดลาย

สีดำ จัดอยู่ในประเภทเนื้อไม้แข็งปานกลาง มีความหนาแน่น 642-650 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร เนื้อของไม้สักค่อนข้างละเอียด มีเส้นตรง น้ำหนักเบา ทำให้ง่ายต่อการเลื่อย ไส ตบแต่ง และชักเงาได้ดี มีการนำไปใช้ประโยชน์มากมายหลายด้าน เช่น งานก่อสร้างหรือโครงสร้างบ้านเรือน หรือเฟอร์นิเจอร์ ประตู หน้าต่าง เฟอร์นิเจอร์และสลัก อีกประการหนึ่งที่เป็นจุดเด่นของไม้สักคือ เนื้อไม้สักจะมีน้ำมันหรือสารแทรกพิเศษ คือ สารเทคโตควิโนน (Tectoquinone) เป็นองค์ประกอบทางเคมีที่สำคัญที่ทำให้ไม้สักมีความทนทานตามธรรมชาติ มีความทนทานต่อการเข้าทำลายของปลวก มอด แมลง และมีฤทธิ์ต่อเชื้อราทำลายไม้ [4, 5]

กาวโพลียูรีเทน เป็นสารประกอบอินทรีย์ ซึ่งประกอบด้วยไนโตรเจน คาร์บอน และออกซิเจนเป็นองค์ประกอบหลัก จึงทนรังสีอัลตราไวโอเลตจากแสงอาทิตย์ เป็นโพลีเมอร์ที่มีความหลากหลายมากที่สุด เนื่องจากมีความเหนียว ความหนาแน่นและยืดหยุ่นแต่ไม่หดตัว (Non-shrinking) มีประสิทธิภาพในการยึดติดสูงถูกนำมาใช้เพื่อยึดติดกับพื้นผิววัสดุเกือบทุกชนิดในอุตสาหกรรมก่อสร้าง หรือวัสดุหลายประเภท ทั้งไม้ โลหะ แก้ว ไฟเบอร์กลาสและพลาสติก เหมาะสำหรับงานที่รับแรงสูง โดยเฉพาะโครงสร้างอาคาร โรงงาน ทั้งภายนอกและภายใน มีคุณสมบัติการยึดติดที่แข็งแรง ทนต่ออุณหภูมิสูง มีความทนทานต่อน้ำสูง จึงสามารถใช้สำหรับงานที่ใช้ภายนอกได้ ทนต่อสารเคมีไม่ทำให้เกิดการกัดกร่อน อีกทั้ง สามารถแข็งตัวในอุณหภูมิห้องไม่จำเป็นต้องใช้ความร้อน และใช้เวลาในการแข็งตัวได้อย่างรวดเร็ว ปัจจุบันกาวโพลียูรีเทนได้รับความสำคัญมากขึ้นและถูกนำมาใช้อย่างกว้างขวาง ถูกนำมาใช้แทนกาวจากปิโตรเคมีเนื่องจากกาวโพลียูรีเทนเกิดจากการสังเคราะห์จากชีวภาพ ทำให้มีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมน้อย จำหน่ายง่าย ต้นทุนต่ำ และสามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพ เป็นการลดมลพิษให้น้อยที่สุดและกาวที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม [6, 7, 8]

กาวอิมัลชันโพลีเมอร์ไอโซไซยานาต (Emulsion polymer isocyanate; EPI) ได้รับการพัฒนาขึ้นครั้งแรกในประเทศญี่ปุ่นในช่วงต้นทศวรรษ 1970 และเป็นการพัฒนาการติดไม้ที่ปราศจากสารฟอร์มัลดีไฮด์ (Formaldehyde; CH₂O) จึงได้รับความนิยมและมีการใช้กันอย่างแพร่หลายในทวีปยุโรป สหรัฐอเมริกา และ

เอเชีย ในตลาดอุตสาหกรรมไม้ [9] กาวอีพ็อกซีโพลีเมอร์ไอโซไซยาเนต เป็นระบบกาวไอโซไซยาเนตที่มีการกระจายตัวแบบสององค์ประกอบ (Two part) ประกอบด้วย อีพ็อกซีสูตรน้ำ ซึ่งเป็นโพลีเมอร์กลุ่มไฮดรอกซิล เช่น โพลีไวนิลแอลกอฮอล์ (PVA), โพลีไวนิลอะซิเตต (PVAc), เอทิลีนไวนิลแอลกอฮอล์ (EVA), ไวนิลอะซิเตต-อะครีเลตโคพอลิเมอร์ไรซ์อีพ็อกซี (VAAC), อะคริลิก-สไตรีนอีพ็อกซี (AcSt) หรือสไตรีนบิวทาไดอีนลาเท็กซ์ (SBR) และไอโซไซยาเนตเป็นสารทำให้แข็ง หรือเป็นสารเร่ง เพื่อทำให้กาวแข็งตัว ซึ่งทำให้กาว EPI มีคุณลักษณะที่โดดเด่น คือ แรงยึดเกาะและทนทานสูง การแข็งตัวที่รวดเร็วแม้อยู่ในอุณหภูมิห้อง ทนความร้อนได้ดี มีความทนทานต่อน้ำและความชื้นได้ดี และเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม จึงทำให้กาว EPI เป็นที่สนใจอย่างมากในอุตสาหกรรม การแปรรูปไม้และใช้กันอย่างแพร่หลาย เช่น ประตู หน้าต่าง แผ่นไม้อัด ไม้อัดแปรรูป โครงสร้างอาคาร เสา หรือสะพานไม้ สามารถทนทานต่อสภาพอากาศกลางแจ้งและชื้นได้ดี เหมาะสำหรับไม้ทุกประเภท ทั้งไม้แข็งและไม้อ่อน นอกจากนี้ยังเหมาะสำหรับไม้ที่มีความชื้นสูงอีกด้วย [10, 11, 12]

Glued Laminated Timber (Glulam) ภาษาไทยเรียกว่า โครงสร้างไม้ประกับหรือไม้ประสาน ได้รับการจดสิทธิบัตรครั้งแรกโดย Otto Hetzer วิศวกรชาวเยอรมันในปี ค.ศ. 1906 เป็นผลิตภัณฑ์ไม้ที่ผ่านกระบวนการเทคโนโลยีทางวิศวกรรมขั้นสูง มีกรรมวิธีการผลิตที่เป็นเอกลักษณ์ ซึ่งเกิดจากการนำไม้แปรรูปหลายๆ ชิ้น ที่ผ่านการอบไม้ให้มีความชื้นของเนื้อไม้ที่เหมาะสมมาอัดติดกันสนิทตามยาวหรือแนวเส้นของไม้ด้วยกาวที่มีแรงยึดสูงภายใต้แรงกด เพื่อให้เกิดเป็นไม้ประกอบขนาดใหญ่ จึงทำให้คุณสมบัติของ Glulam มีความหนาแน่นและความแข็งแรงทนทานกว่าผลิตภัณฑ์จากไม้ทั่วไป มีความสามารถด้านแรงดึงและแรงอัดสูง สามารถแปรรูปขึ้นในรูปแบบที่เป็นลักษณะโครงสร้างตรงหรือโค้งได้เกือบทุกรูปแบบ ใช้เป็นวัสดุก่อสร้างในส่วนประกอบของอาคารที่รับน้ำหนักโครงสร้างต่างๆ เช่น คานเสา ไม้พื้น ประตู และบันได แต่น้ำหนักเบากว่าวัสดุชนิดอื่นๆ เช่น เหล็ก และคอนกรีต และ Glulam เป็นวัสดุก่อสร้างที่สามารถปรับขนาดได้ตามต้องการ มีขั้นตอนการติดตั้งที่ไม่ยุ่งยากประหยัดเวลาในการติดตั้ง เนื่องจากไม่ต้องผ่านกระบวนการมากเหมือนอุตสาหกรรมก่อสร้างประเภทคอนกรีตเสริมเหล็ก มีคุณสมบัติทนต่อความชื้น ป้องกันและลดการทำลายของปลวกได้ดี เป็นวัสดุก่อสร้างที่เป็นฉนวนกันไฟได้ เนื่องจากในกระบวนการแปรรูปไม้มีกรรมวิธีช่วยยืดอายุการใช้งาน หรือการป้องกันรักษาเนื้อไม้ด้วยน้ำยาต่างๆ ได้อย่างดีเยี่ยม รวมถึงมีคุณสมบัติเฉพาะตัวในการดูดซับคาร์บอนตามธรรมชาติได้ ซึ่งต่างจากอุตสาหกรรมเหล็กและคอนกรีตที่มักจะปล่อยก๊าซคาร์บอนออกสู่ชั้นบรรยากาศ นอกจากนี้ Glulam เป็นผลิตภัณฑ์ก่อสร้างที่คงความงดงามดั้งเดิมของสีและลวดลายจากไม้ อีกทั้งยังเป็นผลิตภัณฑ์ก่อสร้างที่สามารถปลูกทดแทนใหม่ได้ จึงทำให้ Glulam กลายเป็นผลิตภัณฑ์ที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม [13, 14, 15, 16]

ไม้ ถือเป็นหนึ่งทางเลือกที่สำคัญในวัสดุก่อสร้างสถาปัตยกรรมที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม เนื่องจากกระบวนการผลิตวัสดุที่มีขั้นตอนไม่ซับซ้อน ใช้พลังงานในการแปรรูปน้อยกว่าวัสดุก่อสร้างอื่น มีจัดการอย่างเหมาะสมในเรื่องของการปลูกและตัดทอน ทำให้ไม้เป็นวัสดุหมุนเวียนทางธรรมชาติ มีความสามารถในการกักเก็บคาร์บอน และเป็นวัสดุก่อสร้างชนิดเดียวที่สามารถนำมารีไซเคิลใช้ประโยชน์ใหม่ได้ ย่อยสลายได้ตามธรรมชาติ อย่างไรก็ตามการนำไม้มาใช้งานอุตสาหกรรมไม้จำเป็นต้องคำนึงถึงคุณสมบัติทางกลศาสตร์ของไม้ที่จะนำมาก่อสร้างเพื่อให้โครงสร้างนั้นมีความปลอดภัยมากที่สุด รวมไปถึงกระบวนการป้องกันและรักษาเนื้อไม้ โดยการควบคุมความชื้นในเนื้อไม้ให้เหมาะสมอยู่ที่ประมาณร้อยละ 12 - 20 สำหรับในประเทศไทยบริเวณพื้นที่เปิดโล่งหรือมีอากาศถ่ายเทได้ดี จะมีอุณหภูมิประมาณ 28 - 29 องศาเซลเซียส และความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 77 - 78 ดังนั้น ปริมาณความชื้นในเนื้อไม้ที่เหมาะสมสำหรับนำไปแปรรูปในไทยจึงอยู่ที่ ร้อยละ 15 [17]

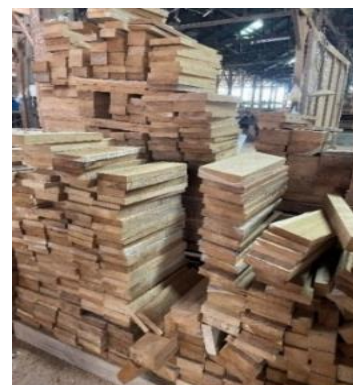
การศึกษาครั้งนี้เพื่อมุ่งวัตถุประสงค์ การศึกษาการพัฒนาทำ Glued Laminated Timber (Glulam) จากเศษไม้สักสวนป่าที่เหลือจากกระบวนการผลิตไม้แปรรูปของภาคอุตสาหกรรมไม้ที่ไม่สามารถนำมาแปรรูปได้ตามที่ต้องการ จากประกอบกับวัตถุดิบที่เป็นไม้ซุงหรือไม้ท่อนเกิดการขาดแคลนและลดน้อยลงเรื่อยๆ เพื่อเป็นการยกระดับการใช้ทรัพยากรอย่างคุ้มค่า และเพื่อการเพิ่มมูลค่าของเศษไม้สักสวนป่าในการนำไปผลิตเป็น Glulam รวมถึงการศึกษาคุณสมบัติเชิงกลของ Glulam จากเศษไม้สักสวนป่า โดยใช้เทคโนโลยีมาช่วยในการสร้างงานนวัตกรรมจากเศษไม้ได้อย่างมีประสิทธิภาพ ถือเป็นอีกทางเลือกหนึ่ง เพื่อให้เกิดประโยชน์ในภาคอุตสาหกรรมไม้ของประเทศไทยและนำไปสู่การพัฒนาที่ยั่งยืนต่อไป

2. วิธีดำเนินการวิจัย

2.1 อุปกรณ์

2.1.1 เศษไม้สักสวนป่า

เศษไม้สักแปรรูปจากองค์การอุตสาหกรรมป่าไม้จากกระบวนการผลิตไม้สักสวนป่าแปรรูป อายุประมาณ 25-30 ปี โดยมีความยาวประมาณ 300 มิลลิเมตร ความกว้างประมาณ 100 มิลลิเมตร และความหนาขนาด 20 มิลลิเมตร ดังภาพที่ 1



ภาพที่ 1 เศษไม้สักสวนป่า

2.1.2 สารเคมี

1. กาวโพลียูรีเทน (Polyurethane adhesives; PU)
2. กาวอีพ็อกซีโพลีเมอร์ไอโซไซยาเนต (Emulsion

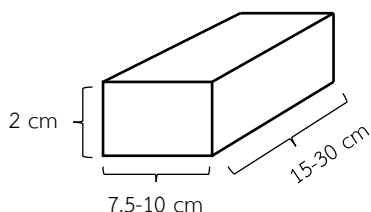
polymer isocyanate; EPI)

2.1.3 วัสดุและอุปกรณ์

1. โต๊ะเลื่อยอาร์มซอร์ว (Arm saw)
2. โต๊ะเลื่อยไฟฟ้า (Table saw)
3. เครื่องขัดไม้ (Wide belt sanding machine)
4. เครื่องไสไม้ (Planer Machine)
5. เครื่องอัดเย็น (Cold press machine)
6. ปากกาอัดไม้ (T-Bar Clamp)
7. เครื่องทดสอบสากล (Universal testing machine)
8. เครื่องทดสอบแรงเฉือน (Shear Tests Machines)
9. เครื่องต้ม (Boiling machine)

2.2 วิธีการ**2.2.1 วิธีการทำ Glued Laminated Timber (Glulam)**

1. เตรียมเศษไม้สักสวนป่าจากกระบวนการผลิตไม้สักสวนป่าแปรรูป อายุประมาณ 25-30 ปี โดยตัดให้ความยาว (Cross section) ขนาด 300 มิลลิเมตร ด้วยโต๊ะเลื่อยอาร์มซอร์ว (Arm saw) ความกว้าง (Radial section) ขนาด 100 มิลลิเมตร และความหนา (Tangential section) ขนาด 20 มิลลิเมตร ดังภาพที่ 2 ด้วยโต๊ะเลื่อยไฟฟ้า (Table saw) ตามมาตรฐาน ASTM Standard D143



ภาพที่ 2 ชิ้นไม้สักสวนป่า

2. นำชิ้นไม้สักทั้งหมด เข้าเครื่องขัดไม้ (Wide belt sanding machine) เพื่อปรับระดับผิวของชิ้นไม้สักให้มีลักษณะเรียบสม่ำเสมอ ดังภาพที่ 3



ภาพที่ 3 เครื่องขัดไม้ (Wide belt sanding machine)

3. วัดความชื้นของชิ้นไม้สัก ให้มีค่าความชื้นอยู่ที่ 8 - 15%

4. ใช้เครื่องเป่าลมทำความสะอาดเศษฝุ่นไม้ที่ชิ้นไม้สักให้เรียบร้อย โดยใช้กาวโพลียูรีเทน และกาวอีพ็อกซีโพลีเมอร์ไอโซไซยาเนต ทากาวที่หัวและท้ายของชิ้นไม้สัก ปริมาณกาวที่ใช้อย่างละ 0.4 กรัม แล้วประสานชิ้นไม้สักในทิศทางตามยาวให้มีความยาวอยู่ที่ 1,000 มิลลิเมตร (1 เมตร) ด้วยปากกาอัดไม้ (T-Bar Clamp) ทิ้งไว้ให้กาวเซ็ตตัวที่สภาวะอุณหภูมิปกติประมาณ 28 - 30 องศาเซลเซียส และมีอากาศถ่ายเทได้ดี เป็นเวลา 30 นาที และนำออกจากปากกาอัดไม้ ทิ้งไว้ที่สภาวะอุณหภูมิปกติ ประมาณ 28 - 30 องศาเซลเซียส และมีอากาศถ่ายเทได้ดี เป็นเวลาอีก 24 ชั่วโมง ดังภาพที่ 4

สูตรในการคำนวณ ปริมาณกาวที่ใช้ตามเอกสารของบริษัทจำหน่ายกาว

$$\frac{\text{พื้นที่ของชิ้นไม้สัก ตารางเมตร}}{\text{พื้นที่ 1 ตารางเมตร}} \times 200 \text{ กรัม (g)} = \text{ปริมาณกาวที่ใช้ กรัม (g)}$$

$$\text{โดย } \frac{(0.02 \times 0.1) \text{ ตารางเมตร}}{1 \text{ ตารางเมตร}} \times 200 \text{ กรัม (g)} = 0.4 \text{ กรัม (g)}$$

เมื่อ ความกว้างชิ้นไม้สัก = 20 มิลลิเมตร (mm)
ความยาวชิ้นไม้สัก = 100 มิลลิเมตร (mm)



ภาพที่ 4 ปากกาอัดไม้ (T-Bar Clamp)

5. เข้าเครื่องไสไม้ (Planer Machine) เพื่อขัดและปรับขนาดแผ่นไม้สักให้มีขนาดความกว้างประมาณ 100 มิลลิเมตร และความหนาประมาณ 20 มิลลิเมตร ดังภาพที่ 5



ภาพที่ 5 เครื่องไสไม้ (Planer Machine)

6. นำแผ่นไม้สักที่ต่อประสานตามยาวที่ขัดผิวและปรับขนาดตามขนาดที่ต้องการเสร็จเรียบร้อยแล้ว ใช้เครื่องเป่าลมทำความสะอาดเศษฝุ่นไม้ที่แผ่นไม้สัก แล้วนำมาประกบซ้อนทับกันลักษณะทิศทางตามยาวของไม้ จำนวน 3 ชั้น โดยใช้กาวโพลียูรีเทน และกาวอีพ็อกซีโพลีเมอร์ไอโซไซยาเนต ปริมาณกาวที่ใช้อยู่ที่ 20 กรัมต่อชั้น ด้วยเครื่องอัดเย็น (Cold press machine) ที่กำลังแรงอัด 10 โกลกรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร เวลา 30 นาที ดังภาพที่ 6-7 จากนั้นนำ Glued Laminated Timber ออกจากเครื่องอัดเย็นทิ้งไว้ให้กาวเซตตัวที่สภาวะอุณหภูมิปกติ ประมาณ 28 - 30 องศาเซลเซียส และมีอากาศถ่ายเทได้ดี เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ดังภาพที่ 8

สูตรในการคำนวณ ปริมาณกาวที่ใช้ตามเอกสารของบริษัทจำหน่ายกาว

$$\frac{\text{พื้นที่ของชิ้นไม้สัก ตารางเมตร}}{\text{พื้นที่ 1 ตารางเมตร}} \times 200 \text{ กรัม (g)} = \text{ปริมาณกาวที่ใช้ กรัม (g)}$$

$$\text{โดย } \frac{(0.1 \times 1) \text{ ตารางเมตร}}{1 \text{ ตารางเมตร}} \times 200 \text{ กรัม (g)} = 0.4 \text{ กรัม (g)}$$

เมื่อ ความกว้างชิ้นไม้สัก = 100 มิลลิเมตร (mm)
ความยาวชิ้นไม้สัก = 1,000 มิลลิเมตร (mm)



ภาพที่ 6 เครื่องอัดเย็น (Cold press machine)



ภาพที่ 7 Glued Laminated Timber (Glulam) จากเศษไม้สักสวนป่า ที่ใช้กาวโพลียูรีเทน (PU) และกาวอีพ็อกซีโพลีเมอร์ไอโซไซยาเนต (EPI)



ภาพที่ 8 Glued Laminated Timber (Glulam)

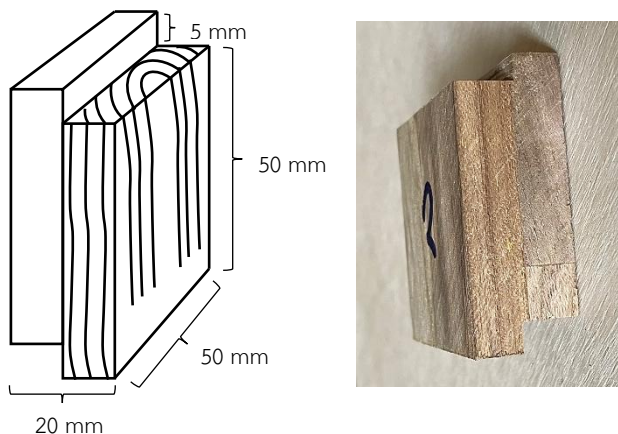
2.2.2 วิธีการทดสอบ

เตรียม Glued Laminated Timber (Glulam) ตัดชิ้นไม้ทดสอบแบบสุ่มจำนวน 3 ชั้น รวมทั้งสิ้น 18 ชิ้น และ 4 วิธีการทดสอบ โดยวิธีการทดสอบตามมาตรฐาน ISO/TR 19623:2019 และมาตรฐาน EN 204:2001 ภายในห้องควบคุมอุณหภูมิ 20±2 องศาเซลเซียส ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 วิธีการทดสอบและจำนวนตัวอย่างชิ้นไม้ทดสอบ

TEST	TREATMENT (Sample)	
	Polyurethane adhesives (PU)	Emulsion polymer isocyanate (EPI)
Shear tests	3	3
MOR and MOE tests	3	3
Adhesive tests	3	3
Total	18	

2.2.2.1. การทดสอบแรงเฉือน (Shear tests) ซึ่งแสดงความสามารถของไม้ในการต้านทานแรงที่จะทำให้ส่วนของหน้าตัดไม้ที่อยู่ในระนาบเดียวกับแนวแรงเลื่อนออกจากกัน ด้วยเครื่องทดสอบแรงเฉือน (Shear Tests Machines) และต้องอยู่ในห้องควบคุมอุณหภูมิ 20±2 องศาเซลเซียส ตามมาตรฐาน ISO/TR 19623:2019 ดังภาพที่ 9-11



ภาพที่ 9 ตัวอย่างชิ้นไม้ทดสอบเพื่อทดสอบแรงเฉือน (Shear tests)



ภาพที่ 10 เครื่องทดสอบแรงเฉือน (Shear Tests Machines)



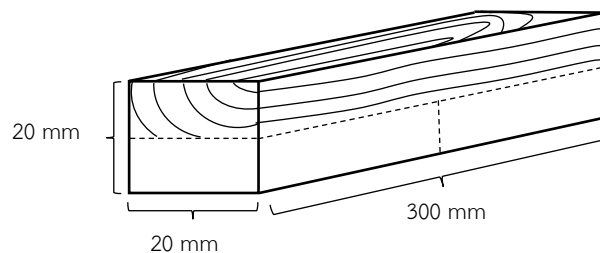
ภาพที่ 11 การเสียรูปหลังจากทดสอบแรงเฉือน (Shear tests)

2.2.2.2 การทดสอบความต้านแรงดัดและมอดุลัสยืดหยุ่น

1. ความต้านแรงดัด (Modulus of Rupture หรือ MOR) ซึ่งแสดงถึงความสามารถในการต้านการแตกหัก หรือความ

แข็งแรง (Strength) ของไม้ โดยนำชิ้นไม้ทดสอบเข้าเครื่องทดสอบสากล (Universal testing machine) และต้องอยู่ในห้องควบคุมอุณหภูมิ 20 ± 2 องศาเซลเซียส ตามมาตรฐาน ISO/TR 19623:2019 ดังภาพที่ 12-14

2. มอดุลัสยืดหยุ่น (Modulus of Elasticity หรือ MOE) ซึ่งแสดงถึงความสามารถในการต้านการโก่ง หรือความแข็งตึง (Stiffness) ของไม้ โดยนำชิ้นไม้ทดสอบเข้าเครื่องทดสอบสากล (Universal testing machine) และต้องอยู่ในห้องควบคุมอุณหภูมิ 20 ± 2 องศาเซลเซียส ตามมาตรฐาน ISO/TR 19623:2019 ดังภาพที่ 12-14



ภาพที่ 12 ตัวอย่างชิ้นไม้ทดสอบเพื่อทดสอบความต้านแรงดัดและมอดุลัสยืดหยุ่น



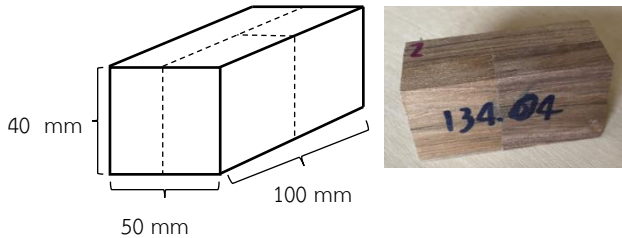
ภาพที่ 13 เครื่องทดสอบสากล (Universal testing machine)



ภาพที่ 14 การเสียรูปหลังจากทดสอบความต้านแรงดัดและมอดุลัสยืดหยุ่น

2.2.2.3 การทดสอบการติดของกาว (Adhesive tests)

ซึ่งแสดงประสิทธิภาพในการยึดติดของกาววัสดุ ทำการทดสอบโดยนำชิ้นไม้ทดสอบที่อยู่ในสภาวะอุณหภูมิปกติเป็นเวลา 7 วันหลังจากแปรรูปเสร็จแล้ว ภาพที่ 15 จากนั้นนำไปต้มในน้ำร้อน อุณหภูมิอยู่ที่ 100 ± 3 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6 ชั่วโมง ดังภาพที่ 16 ต่อมานำไปแช่น้ำที่อุณหภูมิห้อง อุณหภูมิอยู่ที่ 23 ± 2 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ดังภาพที่ 17 และนำชิ้นไม้ทดสอบขึ้นมาเพื่อสังเกตผล ตามมาตรฐาน EN 204:2001 ดังภาพที่ 18



ภาพที่ 15 ตัวอย่างชิ้นไม้ทดสอบเพื่อทดสอบการติดของกาว



ภาพที่ 16 ตัวอย่างชิ้นไม้ทดสอบต้มในน้ำร้อน อุณหภูมิอยู่ที่ 100 ± 3 °C.



ภาพที่ 17 ตัวอย่างชิ้นไม้ทดสอบแช่น้ำอุณหภูมิอยู่ที่ 23 ± 2 °C.



ภาพที่ 18 ลักษณะชิ้นไม้สักรวนป่าหลังจากทดสอบการติดของกาว

3. ผลการวิจัย

3.1 การทดสอบแรงเฉือน (Shear tests)

ผลการทดสอบแรงเฉือน (Shear tests) ของ Glued Laminated Timber (Glulam) จากเศษไม้สักรวนป่า เพื่อแสดงความสามารถของไม้ในการต้านทานแรงที่จะทำให้ส่วนของหน้าตัดไม้ที่อยู่ในระนาบเดียวกับแนวแรงเลื่อนออกจากกัน โดยแบ่งการทดสอบเป็น 2 กลุ่ม คือ Glued Laminated Timber (Glulam) จากเศษไม้สักรวนป่าที่ใช้กาวโพลียูรีเทน (Polyurethane Adhesives; PU) และ Glued Laminated Timber (Glulam) จากเศษไม้สักรวนป่าที่ใช้กาวอีพ็อกซีโพลีเมอร์ไอโซไซยาเนต (Emulsion polymer isocyanate; EPI) ตามมาตรฐาน ISO/TR 19623:2019 ดังตารางที่

ตารางที่ 2 ผลการทดสอบแรงเฉือนของ Glued Laminated Timber (Glulam) จากเศษไม้สักรวนป่าที่ใช้กาวโพลียูรีเทน (PU) และกาวอีพ็อกซีโพลีเมอร์ไอโซไซยาเนต (EPI)

Condition	Sample No.	Size (mm.)		F_{max} (N)	Shear tests (MPa)	Average
		Width	Length			
Glulam using Polyurethane Adhesives (PU)	1	48.26	44.68	1720	7.82	7.94
	2	48.78	43.96	1510	6.90	
	3	49.48	46.50	2140	9.19	
Glulam using Emulsion polymer isocyanate (EPI)	1	49.48	41.46	1540	7.36	8.12
	2	49.16	45.24	2150	9.47	
	3	49.62	42.26	1610	7.52	

F_{max} = แรงกดสูงสุดที่วัดได้ หน่วยเป็น นิวตัน (N)

จาก ตารางที่ 2 ผลการทดสอบแรงเฉือน (Shear tests) ของ Glued Laminated Timber (Glulam) จากเศษไม้สักสวนป่าที่ใช้กาวโพลียูรีเทน (Polyurethane Adhesives; PU) พบว่า ค่าทดสอบแรงเฉือน มีค่าเฉลี่ย เท่ากับ 7.94 MPa และ Glulam จากเศษไม้สักสวนป่าที่ใช้กาวอีพ็อกซีโพลีเมอร์ไอโซไซยาเนต (Emulsion polymer isocyanate; EPI) พบว่า ค่าทดสอบแรงเฉือน มีค่าเฉลี่ย เท่ากับ 8.12 MPa

จากการเปรียบเทียบผลการทดสอบแรงเฉือน (Shear tests) ระหว่าง Glued Laminated Timber (Glulam) จากเศษไม้สักสวนป่าที่ใช้กาวโพลียูรีเทน (Polyurethane Adhesives; PU) และ Glulam จากเศษไม้สักสวนป่าที่ใช้กาวอีพ็อกซีโพลีเมอร์ไอโซไซยาเนต (Emulsion polymer isocyanate; EPI) พบว่า Glulam จากเศษไม้สักสวนป่าที่ใช้กาวอีพ็อกซีโพลีเมอร์ไอโซไซยาเนต (Emulsion polymer isocyanate; EPI) มีค่าการทดสอบแรงเฉือน (Shear tests) มากกว่าหรือมีความสามารถในการต้านทานแรงที่จะทำให้อ่อนของหน้าตัดไม้ที่อยู่ในระนาบเดียวกับแนวแรงเฉือนออกจากกันได้มากกว่า Glulam จากเศษไม้สักสวนป่าที่ใช้กาวโพลียูรีเทน (Polyurethane Adhesives; PU) และ ลักษณะความเสียหาย (Failure) ที่เกิดขึ้นของ Glulam ทั้ง 2 ชนิด โดยการยึดติดของกาวทำให้เนื้อไม้ฉีกติดมากับกาวเฉลี่ย

ประมาณ 80 เปอร์เซ็นต์ของพื้นที่ซึ่งไม้ทดสอบที่ถูกกาวติดเนื้อไม้ ทั้งนี้ ผลการทดสอบของกาวทั้ง 2 ชนิด ผ่านค่าการทดสอบตามมาตรฐาน ISO/TR 19623:2019

3.2 การทดสอบความต้านแรงดัด (Modulus of Rupture หรือ MOR) และมอดุลัสยืดหยุ่น (Modulus of Elasticity หรือ MOE)

ผลการทดสอบความต้านแรงดัด (Modulus of Rupture หรือ MOR) ของ Glued Laminated Timber (Glulam) จากเศษไม้สักสวนป่า เพื่อแสดงถึงความสามารถในการต้านการแตกหัก หรือความแข็งแรง (Strength) ของไม้ และผลการทดสอบมอดุลัสยืดหยุ่น (Modulus of Elasticity หรือ MOE) ของ Glued Laminated Timber (Glulam) จากเศษไม้สักสวนป่า เพื่อแสดงถึงความสามารถในการต้านการโก่ง หรือความแข็งตึง (Stiffness) โดยแบ่งการทดสอบเป็น 2 กลุ่ม คือ Glued Laminated Timber (Glulam) จากเศษไม้สักสวนป่าที่ใช้กาวโพลียูรีเทน (Polyurethane Adhesives; PU) และ Glued Laminated Timber (Glulam) จากเศษไม้สักสวนป่าที่ใช้กาวอีพ็อกซีโพลีเมอร์ไอโซไซยาเนต (Emulsion polymer isocyanate; EPI) ตามมาตรฐาน ISO/TR 19623:2019 ดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ผลการทดสอบความต้านแรงดัด (MOR) และมอดุลัสยืดหยุ่น (MOE) ของ Glued Laminated Timber (Glulam) จากเศษไม้สักสวนป่าที่ใช้กาวโพลียูรีเทน (PU) และกาวอีพ็อกซีโพลีเมอร์ไอโซไซยาเนต (EPI)

Condition	Sample No.	Size (mm.)			F _{max} (kN)	MOR (MPa)	Average	MOE (MPa)	Average
		Width	Thickness	Length					
Glulam using Polyurethane Adhesives (PU)	1	20.34	20.30	284.20	1.26	64.34	53.03	9947.31	9476.41
	2	20.40	20.54	287.56	0.84	42.10		8271.47	
	3	20.46	20.54	287.56	1.05	52.66		10270.44	
Glulam using Emulsion polymer isocyanate (EPI)	1	20.36	20.64	288.96	1.29	64.63	64.44	10587.63	9659.61
	2	20.22	20.40	285.80	1.45	73.82		9428.88	
	3	20.40	20.34	284.76	1.08	54.86		8962.32	

F_{max} = แรงกดสูงสุดที่วัดได้ หน่วยเป็น กิโลนิวตัน (kN)

จาก ตารางที่ 3 ผลการทดสอบความต้านแรงดัด (Modulus of Rupture หรือ MOR) และมอดุลัสยืดหยุ่น (Modulus of Elasticity หรือ MOE) ของ Glued Laminated Timber (Glulam) จากเศษไม้สักสวนป่าที่ใช้กาวโพลียูรีเทน (Polyurethane Adhesives; PU) พบว่า ค่าการทดสอบความต้านแรงดัด (Modulus of Rupture หรือ MOR) มีค่าเฉลี่ย เท่ากับ 53.03 MPa และค่าการทดสอบมอดุลัส

ยืดหยุ่น (Modulus of Elasticity หรือ MOE) มีค่าเฉลี่ย เท่ากับ 9476.41 MPa

ผลการทดสอบความต้านแรงดัด (Modulus of Rupture หรือ MOR) และมอดุลัสยืดหยุ่น (Modulus of Elasticity หรือ MOE) ของ Glued Laminated Timber (Glulam) จากเศษไม้สักสวนป่าที่ใช้กาวอีพ็อกซีโพลีเมอร์ไอโซไซยาเนต (Emulsion polymer isocyanate; EPI) พบว่า ค่าการทดสอบความต้านแรงดัด (Modulus of Rupture หรือ MOR) มีค่าเฉลี่ย เท่ากับ 64.44 MPa และค่าการทดสอบ

มอดุลัสยืดหยุ่น (Modulus of Elasticity หรือ MOE) มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 9659.61 MPa

จากการเปรียบเทียบผลการทดสอบความต้านแรงดัด (Modulus of Rupture หรือ MOR) และมอดุลัสยืดหยุ่น (Modulus of Elasticity หรือ MOE) ระหว่าง Glued Laminated Timber (Glulam) จากเศษไม้สักสวนป่าที่ใช้กาวโพลียูรีเทน (Polyurethane Adhesives; PU) และ Glulam จากเศษไม้สักสวนป่าที่ใช้กาวอีพ็อกซีโพลีเมอร์ไอโซไซยาเนต (Emulsion polymer isocyanate; EPI) พบว่า Glulam จากเศษไม้สักสวนป่าที่ใช้กาวอีพ็อกซีโพลีเมอร์ไอโซไซยาเนต (Emulsion polymer isocyanate; EPI) มีค่าการทดสอบความต้านแรงดัด (Modulus of Rupture หรือ MOR) หรือมีความสามารถในการต้านการแตกหัก (ความแข็งแรง) มากกว่า Glulam จากเศษไม้สักสวนป่าที่ใช้กาวโพลียูรีเทน (Polyurethane Adhesives; PU) และค่าการทดสอบมอดุลัสยืดหยุ่น (Modulus of Elasticity หรือ MOE) หรือมีความสามารถในการ

การต้านการโก่ง (ความแข็งตึง) ของ Glulam จากเศษไม้สักสวนป่าที่ใช้กาวโพลียูรีเทน (Polyurethane Adhesives; PU) มากกว่า Glulam จากเศษไม้สักสวนป่าที่ใช้กาวอีพ็อกซีโพลีเมอร์ไอโซไซยาเนต (Emulsion polymer isocyanate; EPI) ทั้งนี้ ผลการทดสอบของกาวทั้ง 2 ชนิด ผ่านค่าการทดสอบตามมาตรฐาน ISO/TR 19623:2019

3.3 การทดสอบการติดของกาว (Adhesive tests)

ผลการทดสอบการติดของกาว เพื่อแสดงประสิทธิภาพในการยึดติดของกาวกับวัสดุ โดยแบ่งการทดสอบเป็น 2 กลุ่ม คือ Glued Laminated Timber (Glulam) จากเศษไม้สักสวนป่าที่ใช้กาวโพลียูรีเทน (Polyurethane Adhesives; PU) และ Glued Laminated Timber (Glulam) จากเศษไม้สักสวนป่าที่ใช้กาวอีพ็อกซีโพลีเมอร์ไอโซไซยาเนต (Emulsion polymer isocyanate; EPI) ตามมาตรฐาน EN 204:2001 ดังตารางที่ 4

ตารางที่ 4 ผลการทดสอบการติดของกาวของ Glued Laminated Timber (Glulam) จากเศษไม้สักสวนป่าที่ใช้กาวโพลียูรีเทน (PU) และกาวอีพ็อกซีโพลีเมอร์ไอโซไซยาเนต (EPI)

Condition	Sample No.	Size (mm.)			Adhesive tests
		Width	Thickness	Length	
Glulam using Polyurethane Adhesives (PU)	1	49.56	38.76	95.36	ไม่หลุด
	2	49.06	39.00	97.14	ไม่หลุด
	3	49.70	39.02	98.90	ไม่หลุด
Glulam using Emulsion polymer isocyanate (EPI)	1	48.86	39.84	96.48	ไม่หลุด
	2	49.46	39.74	95.96	ไม่หลุด
	3	49.38	39.48	97.08	ไม่หลุด

จาก ตารางที่ 4 ผลการทดสอบการติดของกาวของ Glued Laminated Timber (Glulam) จากเศษไม้สักสวนป่าที่ใช้กาวอีพ็อกซีโพลีเมอร์ไอโซไซยาเนต (Emulsion polymer isocyanate; EPI) พบว่า Glulam ไม่มีการเปลี่ยนแปลงสภาพไปจากเดิม และชั้นไม้กับชั้นกาวไม่แยกหลุดออกจากกัน

จากการเปรียบเทียบผลการทดสอบการติดของกาวระหว่าง Glued Laminated Timber (Glulam) จากเศษไม้สักสวนป่าที่ใช้กาวโพลียูรีเทน (Polyurethane Adhesives; PU) และ Glulam จากเศษไม้สักสวนป่าที่ใช้กาวอีพ็อกซีโพลีเมอร์ไอโซไซยาเนต (Emulsion polymer isocyanate; EPI) พบว่า Glulam ทั้ง 2 วิธีการ ไม่มีการเปลี่ยนแปลงสภาพไปจากเดิม และชั้นไม้กับชั้นกาวไม่แยกหลุดออกจากกัน แสดงว่า กาวทั้ง 2 ชนิด มีประสิทธิภาพในการยึดติดของกาว และไม่สำหรับกระบวนการผลิต Glulam ได้เป็นอย่างดี

3.4 ผลการทดสอบคุณสมบัติเชิงกลของ Glued Laminated Timber (Glulam) จากเศษไม้สักสวนป่า

ผลการทดสอบคุณสมบัติเชิงกลของ Glued Laminated Timber (Glulam) จากเศษไม้สักสวนป่า ตามมาตรฐาน ISO/TR

19623:2019 เพื่อแสดง ที่จะนำมาใช้ประโยชน์ โดยมีการทดสอบ 3 วิธีการ คือ การทดสอบแรงเฉือน (Shear tests) การทดสอบความต้านแรงดัด (Modulus of Rupture หรือ MOR) มอดุลัสยืดหยุ่น (Modulus of Elasticity หรือ MOE) ดังตารางที่ 5

จาก ตารางที่ 5 การทดสอบคุณสมบัติเชิงกลของ Glued Laminated Timber (Glulam) จากเศษไม้สักสวนป่า พบว่า

ค่าแรงเฉือน (Shear tests) ของ Glued Laminated Timber (Glulam) จากเศษไม้สักสวนป่าที่ใช้กาวอีพ็อกซีโพลีเมอร์ไอโซไซยาเนต (Emulsion polymer isocyanate; EPI) มีค่าแรงเฉือนสูงกว่า Glued Laminated Timber (Glulam) จากเศษไม้สักสวนป่าที่ใช้กาวโพลียูรีเทน (Polyurethane Adhesives; PU) และค่าแรงเฉือนของ Glulam ที่ใช้กาวทั้ง 2 ชนิด เป็นไปตามมาตรฐาน ISO/TR 19623:2019 ทำให้มีความสามารถในการต้านทานแรงได้ดีที่จะทำให้ ส่วนของหน้าตัดไม้และกาวที่อยู่ในระนาบเดียวกับแนวแรงเฉือนออกจากกัน หรือทนต่อการรับภาระงานที่เป็นแรงเฉือนในการใช้งานที่เกิดขึ้น

ค่าความต้านแรงดัด (Modulus of Rupture หรือ MOR) ของ Glued Laminated Timber (Glulam) จากเศษไม้สักสวนป่าที่ใช้กาวอีพ็อกซีโพลีเมอร์ไอโซไซยาเนต (Emulsion polymer isocyanate; EPI) มีค่าความต้านแรงดัดสูงกว่า Glued Laminated Timber (Glulam) จากเศษไม้สักสวนป่าที่ใช้กาวโพลียูรีเทน (Polyurethane Adhesives; PU) และค่าความต้านแรงดัดของ Glulam ที่ใช้กาวทั้ง 2 ชนิด เป็นไปตามมาตรฐาน ISO/TR 19623:2019 ทำให้มีความสามารถในการต้านการแตกหักได้ดี และมีความแข็งแรง (Strength) ของไม้ในการนำไปใช้ประโยชน์

ค่ามอดูลัสยืดหยุ่น (Modulus of Elasticity หรือ MOE) ของ Glued Laminated Timber (Glulam) จากเศษไม้สักสวนป่าที่ใช้กาวอีพ็อกซีโพลีเมอร์ไอโซไซยาเนต (Emulsion polymer isocyanate; EPI) มีค่ามอดูลัสยืดหยุ่นสูงกว่า Glued Laminated Timber (Glulam) จากเศษไม้สักสวนป่าที่ใช้กาวโพลียูรีเทน (Polyurethane Adhesives; PU) และค่ามอดูลัสยืดหยุ่นของ Glulam ที่ใช้กาวทั้ง 2 ชนิด เป็นไปตามมาตรฐาน ISO/TR 19623:2019 ทำให้มีความสามารถในการต้านการโก่ง หรือ

ความแข็งดิ่งได้ดี เนื่องจากคุณสมบัติของกาว EPI มีความหนาแน่น ทนทานสูง และมีความเหนียวให้การยืดหยุ่นได้ดีไม่หดตัว (Non-shrinking)

ผลการทดสอบการติดของกาว ของ Glued Laminated Timber (Glulam) จากเศษไม้สักสวนป่าที่ใช้กาวอีพ็อกซีโพลีเมอร์ไอโซไซยาเนต (Emulsion polymer isocyanate; EPI) พบว่า Glulam ไม่มีการเปลี่ยนแปลงสภาพไปจากเดิม และชั้นไม้กับชั้นกาวไม่แยกหลุดออกจากกัน แสดงว่า กาวทั้ง 2 ชนิดมีประสิทธิภาพในการยึดติดของกาวและไม้สำหรับกระบวนการผลิต Glulam ได้เป็นอย่างดี เป็นไปตามมาตรฐาน EN 204:2001 โดยมีระดับความทนทานอยู่ที่ D4 คือ สำหรับใช้งานภายในอาคารที่ต้องสัมผัสกับน้ำหรือสามารถถูกน้ำได้เป็นระยะเวลานานและบ่อยครั้ง ส่วนในการใช้งานภายนอกอาคารสามารถอยู่ในสภาพอากาศภายนอกได้ แต่ควรได้รับการป้องกันด้วยการเคลือบพื้นผิวไม้ที่เพียงพอด้วย

ตารางที่ 5 ผลการทดสอบคุณสมบัติเชิงกลของ Glued Laminated Timber (Glulam) จากเศษไม้สักสวนป่าตามมาตรฐาน ISO/TR 19623:2019 และมาตรฐาน EN 204:2001

Properties	Standard	Glulam strength class	Condition	
			Glulam using PU	Glulam using EPI
Shear tests (MPa)	ISO/TR 19623:2019	≥ 3.5	7.94	8.12
Modulus of Rupture; MOR (MPa)		≥ 20	53.03	64.44
Modulus of Elasticity; MOE (MPa)		$\geq 8,600$	9,476.41	9,659.61
Adhesive tests	EN 204:2001	D4	ไม่หลุด	ไม่หลุด

4. สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ

การศึกษาการพัฒนาทำ Glued Laminated Timber (Glulam) จากเศษไม้สักสวนป่า แสดงให้เห็นว่า เศษไม้สักสวนป่าสามารถนำไปสู่การพัฒนาไปใช้ประโยชน์ผลิตเป็น Glulam ได้ โดยการทดสอบคุณสมบัติเชิงกลของ Glued Laminated Timber (Glulam) จากเศษไม้สักสวนป่า 4 วิธีการทดสอบ พบว่า ค่าแรงเฉือน (Shear tests) ที่ใช้กาวอีพ็อกซีโพลีเมอร์ไอโซไซยาเนต (Emulsion polymer isocyanate; EPI) และกาวโพลียูรีเทน (Polyurethane Adhesives; PU) มีค่า 8.12 และ 7.94 ตามลำดับ ค่าความต้านแรงดัด (Modulus of Rupture หรือ MOR) ที่ใช้กาวอีพ็อกซีโพลีเมอร์ไอโซไซยาเนต (Emulsion polymer isocyanate; EPI) และกาวโพลียูรีเทน (Polyurethane Adhesives; PU) มีค่า 64.44 และ 53.03 ตามลำดับ ค่ามอดูลัสยืดหยุ่น (Modulus of Elasticity หรือ MOE) ใช้กาวอีพ็อกซีโพลี

เมอร์ไอโซไซยาเนต (Emulsion polymer isocyanate; EPI) และกาวโพลียูรีเทน (Polyurethane Adhesives; PU) มีค่า 9,659.61 และ 9,476.41 ตามลำดับ ซึ่งผลการทดสอบทั้ง 3 วิธีการทดสอบ เป็นไปตามมาตรฐาน ISO/TR 19623:2019 และการทดสอบการติดของกาวที่ใช้กาวอีพ็อกซีโพลีเมอร์ไอโซไซยาเนต (Emulsion polymer isocyanate; EPI) และกาวโพลียูรีเทน (Polyurethane Adhesives; PU) พบว่า Glulam ไม่มีการเปลี่ยนแปลงสภาพไปจากเดิม และชั้นไม้กับชั้นกาวไม่แยกหลุดออกจากกัน ซึ่งผลการทดสอบ เป็นไปตามมาตรฐาน EN 204:2001 เป็นการเพิ่มมูลค่าให้กับเศษไม้สักสวนป่าจากกระบวนการผลิตไม้สักแปรรูปที่เหลือทิ้งจากการตัดความยาวส่วนเกิน หรือไม้ที่มีตำหนิของไม้สักแปรรูป และการนำไปใช้ประโยชน์ทางด้านอุตสาหกรรมไม้โดยเฉพาะสำหรับงานโครงสร้างต่างๆ ในการรับแรง เพื่อยกระดับการใช้ทรัพยากรอย่างคุ้มค่า รวมไปถึงสามารถการนำผลวิจัยไปประยุกต์

ปรับปรุงผลิตภัณฑ์ไม้ หรือมาประกอบการพิจารณาเลือกวัสดุที่เหมาะสมในการผลิต Glulam ต่อไป

ข้อเสนอแนะในการนำผลการวิจัยไปใช้ประโยชน์

1. การนำเศษไม้สักสวนป่าที่เหลือจากองค์การอุตสาหกรรมป่าไม้ของกระบวนการผลิตไม้สักสวนป่าแปรรูป มาพัฒนาไปใช้ประโยชน์ผลิตเป็น Glulam ได้ เป็นการเพิ่มมูลค่าและใช้ทรัพยากรอย่างคุ้มค่า สามารถนำงานวิจัยไปประยุกต์และพัฒนาผลิตภัณฑ์ไม้ประเภทอื่นที่มีความเหมาะสมและเกิดประโยชน์ต่อไปได้ แต่มีข้อจำกัดในคุณภาพและความแข็งแรงของเศษไม้สักที่ต่ำกว่าไม้สักแปรรูปทั่วไป

2. การทดสอบคุณสมบัติเชิงกล Glulam จากเศษไม้สักสวนป่า เพื่อทดสอบความแข็งแรง ความทนทาน และความเหมาะสมในนำไปใช้ประโยชน์ โดยผลการทดสอบผ่านค่ามาตรฐาน ISO/TR 19623:2019 และ EN 204:2001 สามารถนำไปประยุกต์ใช้ประโยชน์ทางด้านอุตสาหกรรมแปรรูปไม้ได้เป็นอย่างดี

3. การเลือกนำมาใช้ในกระบวนการผลิต Glulam สามารถมาประกอบการพิจารณาเลือกวัสดุที่เหมาะสมในการผลิต Glulam หรือไม้ประเภทอื่นต่อไปได้

ข้อเสนอแนะในการทำวิจัยในครั้งต่อไป

การศึกษาต่อเกี่ยวกับความต้องการในตลาดของ Glulam รวมไปถึงต้นทุนการผลิต หรือเพิ่มเติมการเปรียบเทียบ Glulam จากเศษไม้ชนิดอื่น เพื่อเปรียบเทียบความแข็งแรง ความคุ้มค่า และความเหมาะสมในแง่ของการใช้ประโยชน์จากเศษไม้ให้สูงสุดต่อไป

5. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณคณะวนศาสตร์ (ภาควิชาวนผลิตภัณฑ์) มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ สนับสนุนเครื่องมือในการดำเนินการวิจัย

6. อ้างอิง

- [1] กันตพงศ์ เครือมา. การเจริญเติบโต ผลผลิต และความหลากหลายของชนิดไม้ต้นของสวนป่าไม้สักภายใต้อายุที่แตกต่างกันบริเวณสวนป่าขุนแม่คำมี จังหวัดแพร่ [วิทยานิพนธ์ วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาการจัดการป่าไม้]. มหาวิทยาลัยแม่โจ้; 2564.
- [2] Chanpor Yiachongthor. การเพิ่มมูลค่าชี เลื่อยไม้สักจากโรงเลื่อยในเมืองเชียงใหม่ แขวงหลวงพระบาง เป็นแผ่นปาร์ติเกิลเพื่อการผลิตเป็นเฟอร์นิเจอร์. [วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีสิ่งแวดลอม]. มหาวิทยาลัยแม่โจ้; 2564.
- [3] องค์การอุตสาหกรรมป่าไม้. หลักเกณฑ์การจำหน่ายไม้สักสวนป่าแปรรูปองค์การอุตสาหกรรมป่าไม้ พ.ศ. 2563. [อินเทอร์เน็ต]. 2563. [สืบค้นเมื่อวันที่ 7 สิงหาคม 2567]. จาก <http://www.fio.co.th/fioWebdoc63/P630113-1.pdf>.

- [4] กรมป่าไม้. องค์ความรู้ไม้สักไทย. [อินเทอร์เน็ต]. 2556. [สืบค้นเมื่อวันที่ 5 กุมภาพันธ์ 2566]. จาก <http://forprod.forest.go.th/forprod/KM/PDF/teak.pdf>.
- [5] ทรรศนีย์ พัฒนเสรี. 2015. เทคโนโลยีโนนและลาปาคอลในไม้สักจากสวนป่าจังหวัดลพบุรี กาญจนบุรีและ สุโขทัย. [อินเทอร์เน็ต]. 2558. [สืบค้นเมื่อวันที่ 19 มกราคม 2567]. จาก http://forprod.forest.go.th/forprod/frsresearch/research_file_folder/Full_PDF_t1453694564.pdf.
- [6] Mishra D and Sinha VK. Eco-economical polyurethane wood adhesives from cellulosic waste: Synthesis, characterization and adhesion study. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2010;30(1):47-54.
- [7] Gadhave RV, Mahanwar PA and Gaddekar PT. Bio-Renewable Sources for Synthesis of Eco-Friendly Polyurethane Adhesives — Review. Polymer Chemistry, 2017;7(4):57-75.
- [8] Worabhorn Pathanatecha. A Study of Various Parameters Affecting Adhesion of Coatings to Metal Substrates. [Master's thesis, Department of Fibre and Polymer Technology]. KTH Royal Institute of Technology; 2019.
- [9] Grøstad K and Pedersen A. Emulsion Polymer Isocyanates as Wood Adhesive: A Review. Journal of Adhesion Science and Technology, 2010;24(8-10):235-236.
- [10] Mills C. Determining the Resistance to Delamination of Wood Adhesives using a Vacuum Pressure Impregnation Method. [Bachelor's Thesis, Department of Laboratory Science] Tampere University of Applied Sciences; 2013.
- [11] Guo J, Hu H, Kefeng Z, et al. Revealing the Mechanical Properties of Emulsion Polymer Isocyanate Film in Humid Environments. Polymers 2018, 2018;10(652):1-3.
- [12] Özparpucu M, Sánchez-Ferrer A, Schuh M, et al. Acidic wood extractives accelerate the curing process of emulsion polymer isocyanate adhesives. Applied Polymer Science, 2022; 139(21):2.
- [13] Muraleedharan A and Reiterer SM. Combined glued laminated timber using hardwood and softwood lamellas. [Master's thesis, Faculty of Technology] Linnaeus University; 2016.
- [14] Hayder A, Haider A. and Haider Al-T. Experimental and theoretical investigation of the structural behavior of reinforced glulam wooden members by NSM steel bars and shear reinforcement CFRP sheet. [Internet]. 2023. [cited 2024 April 8]. Available from: <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-2505091/v1>.

- [15] Jacob J. Flexural Strengthening of Glued Laminated Timber Beams with Steel and Carbon Fiber Reinforced Polymers. [Master's thesis, Faculty of Structural Engineering] Chalmers university of technology; 2007
- [16] อาติล นียมเดชา, นันทชัย ชูศิลป์ และจรูญ เจริญเนตรกุล. พฤติกรรมการวิบัติของคานไม้ยางพาราประกอบติดกาวยเสริมกำลังด้วยเส้นใยพอลิเมอร์. การประชุมวิชาการระดับชาติสหวิทยาการเอเชียอาคเนย์ 2563 ครั้งที่ 7; วันที่ 29-30 พฤษภาคม 2563; มหาวิทยาลัยเอเชียอาคเนย์. กรุงเทพฯ: 2563; น.3.
- [17] วุฒิพงศ์ ลิ้มปิติศิลป์. การศึกษาการประยุกต์ใช้เศษไม้จากการแปรรูปกับสถาปัตยกรรมที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม. [วิทยานิพนธ์สถาปัตยกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาสถาปัตยกรรม]. มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์; 2562.

กระถางเพาะชำย่อยสลายได้จากขุยมลกากกระดาษที่เสริมธาตุอาหารให้พืชด้วยกากกาแฟ และกากถั่วเหลือง

Biodegradable Nursery Pot from Paper Labeling Waste Enriched with Coffee Grounds and Soybean Meal

สรวิษฐ์ อินทร์จันทร์¹ และ สิรินารี เงินเจริญ^{1,*}
Sorawit Injan¹, Sirinaree Ngencharoen^{1,*}

¹ หลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์และสังคมศาสตร์, มหาวิทยาลัยบูรพา วิทยาเขตสระแก้ว

¹ Bachelor of Science Program in Natural Resources and Environment, Faculty of Science and Social Science, Burapha University, Sakaeo Campus

*Corresponding author: Sirinaree.th@gmail.com

Received: 27-12-2024 Revised: 31-08-2025 Accepted: 05-09-2025

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนากระถางเพาะชำที่ย่อยสลายได้จากขุยมลกากกระดาษ (LW) เสริมธาตุอาหารให้กับพืชด้วยกากกาแฟ (CG) และกากถั่วเหลือง (SM) ขึ้นรูปกระถางเพาะชำโดยใช้กาวแป้งเปียกจากแป้งมันสำปะหลัง ผลการวิจัยพบว่าอัตราส่วนของวัสดุที่เหมาะสมต่อการขึ้นรูป คือ LW:CG เท่ากับ 50:50 LW:CG เท่ากับ 75:25 และ LW:SM เท่ากับ 75:25 ปริมาณและชนิดของวัสดุที่ผลิตเป็นกระถางเพาะชำมีผลต่อคุณสมบัติทางกายภาพ กระถางเพาะชำทุกอัตราส่วนดังกล่าวคงสภาพและความแข็งแรง กล่าวคือ ดัชนีแตกร่วน 0.99-1.00 อย่างไรก็ตาม LW:SM เท่ากับ 75:25 ดูดซึมน้ำได้มากที่สุด เมื่อดูดซึมน้ำให้ความคงตัวต่ำสุดและย่อยสลายได้เร็วที่สุด กากกาแฟและกากถั่วเหลืองสามารถเพิ่มธาตุอาหารให้กับพืชได้ ทั้งนี้กระถางเพาะชำจาก LW:SM เสริมธาตุอาหารให้กับพืชได้ดีกว่ากระถางเพาะชำจาก LW:CG เนื่องจากกากถั่วเหลืองเสริมไนโตรเจนได้สูงกว่ากากกาแฟ เมื่อทดสอบการใช้งานเพาะชำพืช ได้แก่ ต้นพริกชี้หนูพบว่าต้นพริกชี้หนูเจริญเติบโตได้สูงสุดใน LW:SM เท่ากับ 75:25 คือ มีน้ำหนักสด 4.45 ± 1.76 กรัม น้ำหนักแห้ง 0.44 ± 0.17 กรัม ความยาวลำต้นและความยาวราก เท่ากับ 2.12 ± 3.26 เซนติเมตร (ซม.) และ 4.42 ± 0.84 ซม. ตามลำดับ แตกต่างกับต้นพริกชี้หนูที่เพาะในกระถางเพาะชำประเภทอื่นอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) สำหรับจำนวนและขนาดของใบ สังเกตผลด้วยสายตา พบว่า ต้นพริกชี้หนูจากกระถางเพาะชำ LW:SM เท่ากับ 75:25 มีจำนวนใบมากที่สุดและขนาดของใบใหญ่ที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับต้นพริกชี้หนูจากกระถางเพาะชำประเภทอื่น เป็นผลเกี่ยวข้องกับคุณสมบัติทางกายภาพของกากถั่วเหลืองที่ย่อยสลายได้ดีทำให้ความพรุนของวัสดุในกระถางเพิ่มขึ้นมีอิทธิพลโดยตรงกับการเจริญเติบโตของรากต้นพริกชี้หนูที่เพิ่มสูงขึ้น อีกทั้งยังเกี่ยวข้องกับคุณสมบัติทางเคมีซึ่งพบว่า LW:SM เท่ากับ 75:25 นั้นมีแอมโมเนียม-ไนโตรเจน และไนเตรต-ไนโตรเจน 2% ยูเรีย-ไนโตรเจน 15% ฟอสฟอรัส 5% และโพแทสเซียม 16% ด้วย จึงสรุปได้ว่ากระถางเพาะชำจาก LW:SM เท่ากับ 75:25 ไม่เพียงย่อยสลายได้อย่างมีประสิทธิภาพ แต่ยังช่วยเพิ่มธาตุอาหารและการเจริญเติบโตของพืช จึงเป็นทางเลือกที่ยั่งยืนสำหรับการเพาะปลูกและสิ่งแวดล้อม

คำสำคัญ : กระถางเพาะชำ กากกาแฟ กากถั่วเหลือง ขุยมลกากกระดาษ

ABSTRACT

This research aimed to develop biodegradable nursery pots from labeling waste (LW) enriched with nutrients by incorporating coffee grounds (CG) and soybean meal (SM), molded with cassava starch glue. The results revealed that the suitable material ratios for pot formation were LW:CG at 50:50, LW:CG at 75:25, and LW:SM at 75:25. Both the quantity and type of raw materials influenced the physical properties of the pots. All formulations demonstrated structural stability with a friability index of 0.99–1.00. However, LW:SM at 75:25 exhibited the highest water absorption, leading to the lowest stability and the fastest biodegradation. Both CG and SM contributed additional nutrients to plants, while LW:SM at 75:25 provided superior nutrient enrichment compared to LW:CG, as soybean meal supplied a higher nitrogen content. When tested with chili seedlings (*Capsicum frutescens* L.), the LW:SM (75:25) pots supported the greatest growth performance, yielding a fresh weight of 4.45 ± 1.76 g, dry weight of 0.44 ± 0.17 g, stem length of 2.12 ± 3.26 cm, and root length of 4.42 ± 0.84 cm, which were significantly higher than other formulations ($p < 0.05$). Visual observations further confirmed that plants grown in LW:SM (75:25) pots had the highest leaf number and largest

leaf size. These effects were attributed to the favorable physical properties of soybean meal, which enhanced porosity after biodegradation and directly promoted root development, as well as its chemical composition, containing ammonium-nitrogen and nitrate-nitrogen (2%), urea-nitrogen (15%), phosphorus (5%), and potassium (16%). In conclusion, nursery pots produced from LW:SM at 75:25 not only degraded efficiently but also enhanced nutrient availability and plant growth, offering a sustainable alternative for cultivation and environment.

Keywords: Nursery pot, Coffee ground, Soybean meal, Paper labeling waste

1. บทนำ

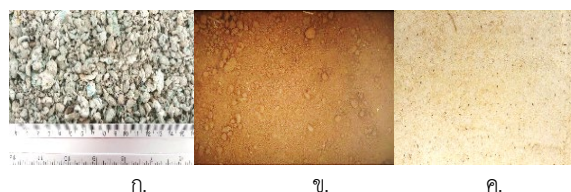
ปัจจุบันการเพาะปลูกพืชผักใช้กระถางเพาะชำที่ทำจากพลาสติก ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมทั้งในด้านมลพิษจากกระบวนการผลิตและปัญหาขยะ การใช้กระถางเพาะชำพลาสติกจึงนับเป็นประเด็นสำคัญที่ไม่อาจมองข้าม หากไม่ปรับเปลี่ยนย่อมเพิ่มปัญหาสิ่งแวดล้อมให้ทวีความรุนแรงมากขึ้น การเปลี่ยนมาใช้กระถางที่ผลิตจากวัสดุธรรมชาติหรือวัสดุย่อยสลายได้ จึงเป็นแนวทางหนึ่งในการลดปริมาณขยะพลาสติกและยังช่วยลดการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากการผลิตพลาสติก อันเป็นประโยชน์ต่อสิ่งแวดล้อมโดยตรง [1] จากแนวคิดดังกล่าว ผู้วิจัยพบว่า อุตสาหกรรมการผลิตสุราขาวมีขั้นตอนล้างขวดเพื่อนำขวดกลับมาใช้ซ้ำที่ก่อให้เกิดขยะพลาสติกซึ่งเป็นกากอุตสาหกรรมไม่อันตรายจำนวนมาก มีความเป็นไปได้ในการนำมาใช้ประโยชน์ กล่าวคือ นำมาใช้เป็นวัสดุหลักในการพัฒนาเป็นกระถางเพาะชำได้ นอกจากนี้ผู้วิจัยได้ทดสอบการเสริมธาตุอาหารให้แก่กระถางเพาะชำดังกล่าวจากวัสดุเหลือใช้เพิ่มเติม ได้แก่ กากถั่วเหลืองจากอุตสาหกรรมผลิตนมถั่วเหลืองและกากกาแฟจากร้านจำหน่ายเครื่องดื่ม เนื่องจากการศึกษาข้อมูลทุติยภูมิ พบว่าวัตถุดิบทั้งสองชนิดมีสารอาหารสำคัญที่เอื้อต่อการเจริญเติบโตของพืช [2],[3] สำหรับการขึ้นรูปกระถางเพาะชำในงานวิจัยนี้ใช้กาบแปงเปียกเป็นวัสดุประสานและได้มีการทดสอบเพื่อหาสัดส่วนที่เหมาะสมสำหรับการขึ้นรูป ศึกษาประสิทธิภาพการย่อยสลาย ตลอดจนติดตามการเจริญเติบโตของพืชเมื่อได้รับธาตุอาหารจากวัสดุเหล่านี้โดยใช้พริกชี้หนู (*Capsicum frutescens* L.) [3],[4] การวิจัยนี้จึงมุ่งศึกษาเพื่อหาแนวทางในการพัฒนากระถางเพาะชำที่ย่อยสลายได้และอุดมด้วยธาตุอาหารต่อพืช อีกทั้งยังสะท้อนถึงศักยภาพของวัสดุเหลือใช้ท้องถิ่นในการทดแทนพลาสติกอย่างยั่งยืน ลดปริมาณขยะและการปล่อยก๊าซเรือนกระจก สร้างคุณค่าเชิงสิ่งแวดล้อม เพิ่มมูลค่าทางเศรษฐกิจให้แก่กากอุตสาหกรรม และเป็นแนวทางสร้างรายได้ให้เกษตรกรหรือชุมชนได้อย่างต่อเนื่องในอนาคต

2. วัสดุ อุปกรณ์ และวิธีการ

2.1 เตรียมกากอุตสาหกรรมหรือวัสดุหลัก

เตรียมวัสดุต่างๆ ได้แก่ (1) ขุยมลกากกระดาษ โดยแช่ขุยมลกากกระดาษในน้ำ 1 วัน จากนั้นนำมาผึ่ง 6 ชั่วโมง (ชม.) จนกระทั่งไม่พบน้ำหยดจากขุยมลกากกระดาษ (2) กากกาแฟ จากร้านจำหน่ายกาแฟและตากแดดให้แห้ง และ (3) กากถั่วเหลือง ได้มาจากอุตสาหกรรมการ

ผลิตนมถั่วเหลือง ผ่านกระบวนการอบแห้งมาแล้ว สามารถนำมาใช้ได้โดยไม่ต้องนำไปตากแห้ง



ภาพที่ 1 วัสดุสำหรับผลิตกระถางเพาะชำ

ก.ขุยมลกากกระดาษ ข.กากกาแฟ ค.กากถั่วเหลือง

2.2 เตรียมกาบแปงเปียกหรือวัสดุประสาน

ผสมแป้งมันสำปะหลัง 500 กรัม ต่อน้ำ 2 ลิตร ให้เข้ากัน นำไปต้มจนเดือดที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส (°C) จากนั้นคนส่วนผสมด้วยความเร็วอย่างต่อเนื่องจนกระทั่งความหนืดเป็นกาบแปงเปียก ตั้งทิ้งไว้ในอุณหภูมิห้องให้เย็น

2.3 ศึกษาอัตราส่วนระหว่างขุยมลกากกระดาษ กากกาแฟ และกากถั่วเหลืองที่เหมาะสมต่อการขึ้นรูปเป็นชิ้นงานแบบแผ่น และแบบกระถางเพาะชำ และวิเคราะห์อัตราส่วนที่เหมาะสมต่อการขึ้นรูปเป็นกระถางเพาะชำ

ขึ้นรูปชิ้นงานเป็นแบบแผ่นและกระถางเพาะชำอัตราส่วนระหว่างขุยมลกากกระดาษ (Paper labeling waste : LW) กากกาแฟ (Coffee ground : CG) และกากถั่วเหลือง (Soybean meal : SM) ต่างกัน กำหนดให้แต่ละอัตราส่วนใช้วัสดุเพิ่มหรือลดเป็นสัดส่วนโดยปริมาตรที่เท่าๆ กัน และทำให้ปริมาตรรวมเท่ากัน จึงใช้อัตราส่วนต่างๆ ดังนี้ อัตราส่วน LW:CG และ LW:SM เท่ากับ 100:0, 75:25, 50:50 และ 25:75 พิจารณาความเป็นไปได้และความเหมาะสมของการขึ้นรูปและการคงสภาพของรูปทรง

2.4 เตรียมและทดสอบคุณสมบัติขึ้นงานแบบแผ่น

ขึ้นรูปตัวอย่างชิ้นงานแบบแผ่นด้วยอัตราส่วนขุยมลกากกระดาษ กากกาแฟ และกากถั่วเหลืองที่เหมาะสมซึ่งได้มาจากผลข้อ 2.3 แต่ละประเภทขึ้นรูปเชิงปริมาตร โดยใช้แม่พิมพ์ทรงสี่เหลี่ยมขนาดกว้าง 9 ซม. ยาว 11 ซม. และสูง 1.5 ซม. โดยบรรจุวัสดุให้เต็มปริมาตรแม่พิมพ์ ตากแดดจนแห้งสนิท ทดสอบจากการชั่งน้ำหนัก น้ำหนักของชิ้นงานจะคงที่ จากนั้นทดสอบคุณสมบัติต่างๆ ของตัวอย่าง ดังข้อ 1) - 5) ตัวอย่างละ 5 ซ้ำ ด้วยวิธีต่างๆ [4] บันทึกผลและวิเคราะห์ผลทางสถิติ ระหว่างประเภทกระถางเพาะชำด้วย One-

way ANOVA กรณีวิเคราะห์และเปรียบเทียบระหว่างชิ้นงานตัวอย่างแบบแผ่นและแบบกระถาง วิเคราะห์ด้วย t-Test

1) น้ำหนัก เปรียบเทียบน้ำหนักของตัวอย่างชิ้นงานแบบแผ่นในแต่ละอัตราส่วน ชั่งน้ำหนักโดยใช้เครื่องชั่งทศนิยม 2 ตำแหน่ง หาค่าเฉลี่ยของน้ำหนักและบันทึกผล

2) ความหนาแน่น ชั่งน้ำหนักชิ้นงานด้วยเครื่องชั่งดิจิทัล นำค่าที่ได้ไปคำนวณค่าหนาแน่นจากสมการที่ (1)

$$D = M / V \quad (1)$$

เมื่อ D คือ ความหนาแน่น (กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร)

M คือ มวล (กรัม)

V คือ ปริมาตร (ลูกบาศก์เซนติเมตร)

3) การดูดซึมน้ำ อบตัวอย่างชิ้นงานที่อุณหภูมิ 120 °C 1 ชม. หลังอบชั่งตัวอย่างก่อนการดูดซึมน้ำ (W_d) จากนั้นรดน้ำให้ตัวอย่างชิ้นงานอิ่มตัวด้วยน้ำ ตั้งทิ้งไว้ให้น้ำส่วนเกินที่ชิ้นงานดูดซึมน้ำหมด ชั่งน้ำหนักและบันทึกค่าที่ได้เป็นน้ำหนักของตัวอย่างชิ้นงานที่อิ่มน้ำ (W_s) นำค่าที่ได้มาคำนวณค่าร้อยละ (%) ของการดูดซึมน้ำ (W) ตามสมการที่ (2)

$$W = [(W_s - W_d) / W_d] \times 100 \quad (2)$$

เมื่อ W คือ ร้อยละของการดูดซึมน้ำ (%)

W_s คือ น้ำหนักของตัวอย่างที่อิ่มน้ำ (กรัม)

W_d คือ น้ำหนักของตัวอย่างที่แห้ง (กรัม)

4) การย่อยสลายชิ้นงานแบบแผ่น อบตัวอย่างชิ้นงานที่อุณหภูมิ 120 °C 1 ชม. ชั่งน้ำหนักตั้งต้น จากนั้นจำแนกตัวอย่างชิ้นงานเป็น 2 กลุ่ม กลุ่มที่ 1 นำชิ้นงานไปต้่วางกลางแจ้ง และกลุ่มที่ 2 นำชิ้นงานไปใส่ในกระถางที่บรรจุดิน ตั้งวางกลางแจ้ง รดน้ำและตั้งทิ้งไว้ภายใต้อุณหภูมิและความดันบรรยากาศ โดยรดน้ำวันละ 1 ครั้ง ใช้ปริมาตรการรดน้ำครั้งละ 250 มิลลิลิตร (มล.) เมื่อครบ 45 วัน สังเกตและบันทึกลักษณะทางกายภาพ จากนั้นนำชิ้นงานแบบแผ่นไปอบที่อุณหภูมิ 120 °C 1 ชม. ชั่งน้ำหนักหลังอบ เพื่อคำนวณหาน้ำหนักที่ย่อยสลายไป

5) ดัชนีการแตกร่วน (Shatter index) นำตัวอย่างชิ้นงานแบบแผ่นปล่อยจากที่สูง 1.80 ม. ลงสู่พื้นซีเมนต์ 4 ครั้ง [5] และบันทึกผล กรณีที่มีการแตกร่วนให้นำชิ้นงานไปร่อนด้วยตะแกรงร่อนดิน (Sieve) ขนาดช่องผ่านตะแกรง 20 มม. นำส่วนที่เหลือของชิ้นงานจากการร่อนไปชั่งน้ำหนัก คำนวณหาดัชนีการแตกร่วน ได้จากสมการที่ (3)

$$\text{ค่าดัชนีการแตกร่วน } R = W_f / W_i \quad (3)$$

เมื่อ R คือ ดัชนีการแตกร่วน

W_f คือ น้ำหนักของตัวอย่างชิ้นงานแบบแผ่นหลังการทดสอบ (กรัม)

W_i คือ น้ำหนักของตัวอย่างชิ้นงานแบบแผ่นก่อนการทดสอบ (กรัม)

6) ทดสอบคุณสมบัติทางเคมีของตัวอย่างชิ้นงาน ย่อยตัวอย่างแบบแผ่นในแต่ละอัตราส่วนเพื่อนำไปวิเคราะห์หาปริมาณไนโตรเจนในรูปยูเรีย-ไนโตรเจน (Urea-N) แอมโมเนียม-ไนโตรเจน (NH_4^+ -N) ไนเตรต-ไนโตรเจน (NO_3^- -N) ฟอสฟอรัส (P_2O_5) และโพแทสเซียม (K_2O) [3] โดยใช้ชุดทดสอบปุ๋ย มก.5 มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ตามวิธีที่ระบุในชุดทดสอบดังกล่าว และรายงานผลเป็นค่าการวิเคราะห์จากการกำหนดค่าของชุดทดสอบปุ๋ย มก.5 ซึ่งมีค่าแสดงได้ดัง ตารางที่ 1 [6]

ตารางที่ 1 การแปลผลการเทียบสีจากการวิเคราะห์เป็นค่าการวิเคราะห์จากชุดทดสอบปุ๋ย มก.5

NH_4^+ -N	NO_3^- -N	Urea-N	P_2O_5	K_2O
0 %	0 %	0 %	0 %	0 %
2 %	2 %	5 %	5 %	8 %
4 %	4 %	10 %	10 %	16 %
8 %	8 %	15 %	15 %	24 %
16 %	16 %	20 %	20 %	-

2.5 เตรียมตัวอย่างและทดสอบการใช้งานกระถางเพาะชำ

นำผลอัตราส่วนการทำกระถางเพาะชำที่เหมาะสมจากข้อ 2.4 มาขึ้นรูปกระถางเพาะชำเพื่อทดสอบการนำไปใช้งานเพาะชำพริกชี้หนู (*Capsicum frutescens* L.) ตามลำดับขั้นตอน ดังนี้

1) ขึ้นรูปกระถางเพาะชำ ใช้แม่พิมพ์กระถาง 2 อัน ได้แก่ (1) กระถางขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (ศก.) ฐาน 7 ซม. ปากกระถาง 10 ซม. สูง 7.5 ซม. เป็นแม่พิมพ์ภายนอก (2) กระถาง ศก.ฐาน 5.8 ซม. ปากกระถาง 7.8 ซม. สูง 6 ซม. เป็นแม่พิมพ์ภายใน วางแม่พิมพ์ทั้ง 2 ขนาดซ้อนกัน จากนั้นบรรจุวัสดุที่ใช้พัฒนาเป็นกระถางเพาะชำในอัตราส่วนที่ได้เตรียมไว้ ในพื้นที่ว่างระหว่างแม่พิมพ์ทั้งสองขนาด กดให้แน่นด้วยมือ เคาะกระถางที่ขึ้นรูปได้ออกจากแม่พิมพ์ ผึ่งชิ้นงานตัวอย่างกระถางเพาะชำที่เตรียมได้ในพื้นที่อากาศถ่ายเทจนแห้งสนิท

2) เพาะต้นกล้าพริกชี้หนูจากเมล็ดพริก โดยเพาะชำในตัวอย่างกระถางเพาะชำที่เตรียมไว้จากข้อ 1) และกระถางพลาสติก (Control group) สำหรับการเพาะกล้าพริกชี้หนู เป็นระยะเวลา 15 วัน

3) เตรียมกระถางพลาสติกทรงสี่เหลี่ยม ขนาดความยาวที่ฐาน กว้าง 12 ซม. ยาว 12 ซม. ความยาวปากกระถาง กว้าง 16 ซม. ยาว 16 ซม. สูง 12 ซม. ซึ่งเป็นกระถางที่สามารถบรรจุกระถางเพาะชำที่พัฒนาจากชุดผลากกระต่าย กากกาแฟ และกากถั่วเหลืองที่ได้เพาะกล้าพริกชี้หนูจากข้อ 2) ได้

4) นำตัวอย่างกระถางเพาะชำที่เพาะชำกล้าพริกชี้หนูจากข้อ 2) มาปลูกลงในกระถางพลาสติกในข้อ 3) และบรรจุดินลงไปให้ได้ความสูงดิน 9.5 ซม. เพื่อเป็นการจำลองสภาวะการปลูกกล้าพริกชี้หนูซึ่งเพาะในกระถางเพาะชำลงดิน

5) รดน้ำ 500 มล./วัน/ครั้ง/กระถาง เป็นเวลา 60 วัน

6) เมื่อครบกำหนดระยะเวลา เก็บเกี่ยวและวัดผลการเจริญเติบโตของต้นพริก ประกอบด้วยน้ำหนักสด (กรัม) น้ำหนักแห้ง (กรัม) ความยาวลำต้น (ซม.) ความยาวราก (ซม.) จำนวนใบ (ใบ) และอัตราการรอดชีวิต (%) บันทึกผลและวิเคราะห์ผลทางสถิติระหว่างประเภทกระถางเพาะชำด้วย One-way ANOVA กรณีวิเคราะห์และเปรียบเทียบระหว่างชิ้นงานตัวอย่างแบบแผ่นและแบบกระถาง วิเคราะห์ด้วย t-Test

3. ผลการทดลองและอภิปรายผล

อัตราส่วนที่เหมาะสมสำหรับการขึ้นรูปจากวัสดุขุยมะลาคกระต่าย (Labeling waste : LW) กากกาแฟ (Coffee ground : CG) และกากถั่วเหลือง (Soybean meal : SM)

พิจารณาจากชิ้นงานแบบแผ่นและกระถางที่ขึ้นรูปโดยอัตราส่วน LW:CG และ LW:SM เท่ากับ 100:0, 75:25, 50:50 และ 25:75 พบว่าอัตราส่วนที่ขึ้นรูปได้ง่าย สามารถคงสภาพได้เหมาะสมต่อการขึ้นรูปเป็นกระถางเพาะชำ LW:CG มีอัตราส่วนเท่ากับ 75:25 และ 50:50 ส่วน LW:SM ที่เหมาะสมต่อการขึ้นรูปมีอัตราส่วนเท่ากับ 75:25 สำหรับอัตราส่วนอื่นๆ นั้นไม่เหมาะสมต่อการขึ้นรูป เนื่องจากพบว่าไม่สามารถขึ้นรูปได้ กล่าวคือ เมื่อผสมวัสดุประสานหรือกาบแปงเปียกแล้ว วัสดุมีความหนืด ดิบเมื่อขึ้นรูปจนไม่สามารถขึ้นรูปได้ หรือเมื่อขึ้นรูปแล้วไม่คงสภาพ ไม่ได้รูปทรงกระถางเพาะชำที่กำหนด

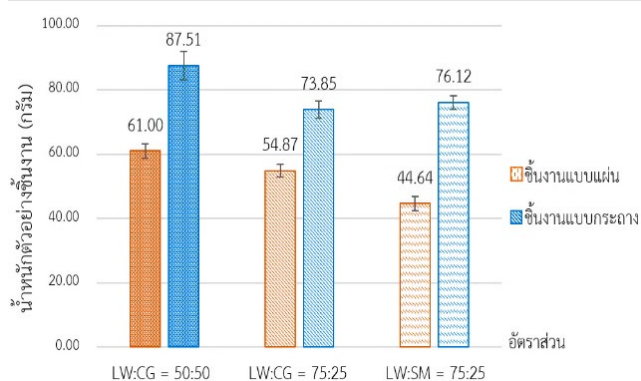


ก. ข. ค.

ภาพที่ 1 อัตราส่วนที่เหมาะสมต่อการขึ้นรูปกระถางเพาะชำ

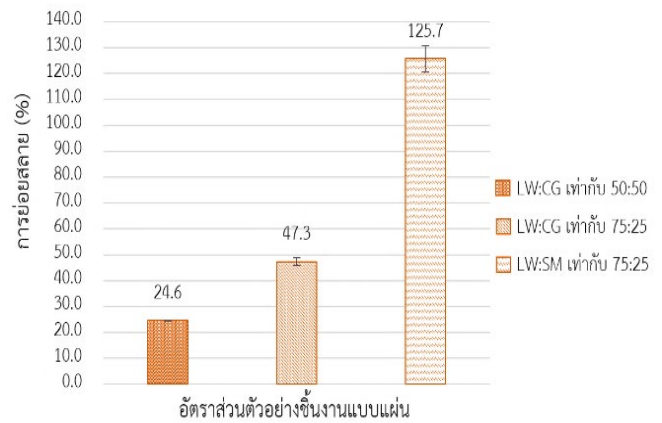
ก. LW:SM=75:25 ข. LW:CG=75:25 ค. LW:CG=50:50

น้ำหนักของชิ้นงานทั้งแบบแผ่นและแบบกระถางต่างมีแนวโน้มเดียวกัน คือ กระถางเพาะชำ LW:CG อัตราส่วน 50:50 มีน้ำหนัก 61.00 ± 2.29 กรัม ซึ่งมากกว่ากระถางเพาะชำ LW:CG อัตราส่วน 75:25 และ LW:SM อัตราส่วน 75:25 โดยมีน้ำหนัก 54.87 ± 1.96 กรัม และ 44.64 ± 2.12 กรัม ตามลำดับ ($p < 0.05$) เป็นผลสัมพันธ์กับน้ำหนักวัสดุหรือวัตถุดิบที่นำมาขึ้นรูป ขุยมะพร้าวซึ่งเป็นกระดาศมีน้ำหนักมากกว่ากากกาแฟที่มีลักษณะเป็นผงแห้งขนาดใหญ่ และกากแก้วเหลืองมีน้ำหนักเบาที่สุด เนื่องจากเป็นผงที่ผ่านกระบวนการอบแห้งจากเครื่องจักร



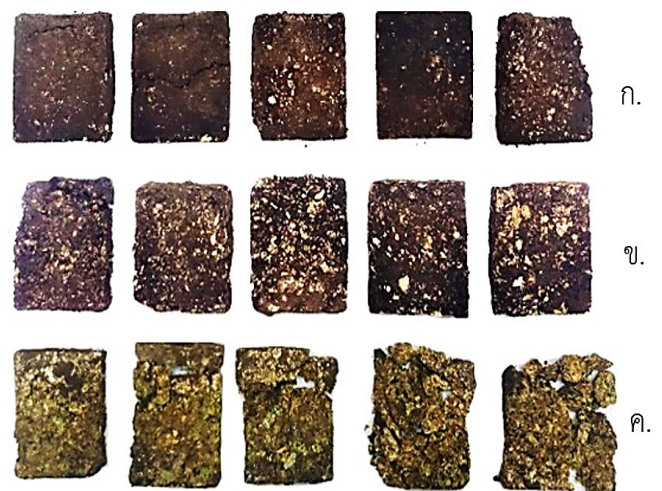
ภาพที่ 2 น้ำหนักตัวอย่างชิ้นงาน

เมื่อวิเคราะห์ค่าการดูดซึมน้ำของตัวอย่างชิ้นงาน พบว่า ค่าการดูดซึมน้ำของชิ้นงาน LW:SM เท่ากับ 75:25 มีค่าการดูดซึมน้ำมากที่สุด คือ 69.24 ± 4.08 % สำหรับ LW:CG พบว่าไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p > 0.05$) เมื่อนำตัวอย่างไปทดสอบการย่อยสลาย 2 แบบ ตามระบุไว้ในข้อ 2.4 ผลการย่อยสลายของชิ้นงานแสดงดังภาพที่ 3



ภาพที่ 3 การย่อยสลายของตัวอย่างชิ้นงานแบบแผ่น

ชิ้นงานตัวอย่างทั้งแบบแผ่นและกระถางเพาะชำที่ขึ้นรูปโดยใช้กากแก้วเหลืองย่อยสลายสูงกว่าการใช้กากกาแฟอย่างชัดเจน อย่างไรก็ตามชิ้นงานแบบกระถางนั้น ไม่สามารถชั่งน้ำหนักเพื่อวิเคราะห์ % การย่อยสลายได้ เนื่องจากมีดินแทรกในวัสดุที่ประกอบกันเป็นกระถางเพาะชำแต่ละประเภท ทุกชิ้นงาน ไม่สามารถแยกเม็ดดินออกจากชิ้นงานกระถางเพาะชำได้ อีกทั้งการจำแนกกากกาแฟและดินทำได้ยาก ดังนั้นจึงวิเคราะห์ผลการย่อยสลายชิ้นงานแบบกระถางเพาะชำโดยการสังเกตและรายงานผลเป็นลักษณะทางกายภาพภายนอก แสดงผลดังภาพที่ 4



ภาพที่ 4 ผลทดสอบการย่อยสลายด้วยวิธีใส่ชิ้นงานแบบแผ่นลงในกระถางบรรจุดิน

ก. LW:CG=50:50 ข. LW:CG=75:25 ค. LW:SM=75:25

สำหรับดัชนีการแตกร่วนและความคงตัวของตัวอย่างชิ้นงานแบบแผ่นนั้น พบว่า ตัวอย่างชิ้นงาน LW:CG แข็งแรงมากกว่าชิ้นงาน LW:SM เล็กน้อย ดังตารางที่ 2 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p > 0.05$) อนุภาคขนาดเล็กของขุยมะพร้าว กระดาศ กากกาแฟ และกากแก้วเหลือง ทำให้เกิดแรงยึดเกาะระหว่างอนุภาคได้ดี [7]

ตารางที่ 2 ดัชนีการแตกร่วนของตัวอย่างชิ้นงานแบบแผ่น

อัตราส่วน ของชิ้นงาน	ดัชนี การแตกร่วน	ลักษณะ การแตกร่วน
LW:CG = 50:50	0.99±0.01	แตกร่วนเล็กน้อย
LW:CG = 75:25	1.00±0.00	ไม่แตกร่วน
LW:SM = 75:25	1.00±0.00	ไม่แตกร่วน

ความคงตัวของชิ้นงานตัวอย่างกระถางเพาะชำสอดคล้องกับดัชนีการแตกร่วน กล่าวคือ ชิ้นงานตัวอย่าง LW:CG อัตราส่วนเท่ากับ 75:25 คงตัวมากที่สุด คือ 9.56 นาที ส่วนตัวอย่างชิ้นงานแบบแผ่นที่มีค่าความคงตัวน้อยที่สุด คือ LW:SM เท่ากับ 75:25 มีค่าความคงตัว 1.84 นาที เมื่อนำชิ้นงานตัวอย่างทดสอบคุณสมบัติทางเคมี แสดงผลได้ดังตารางที่ 3

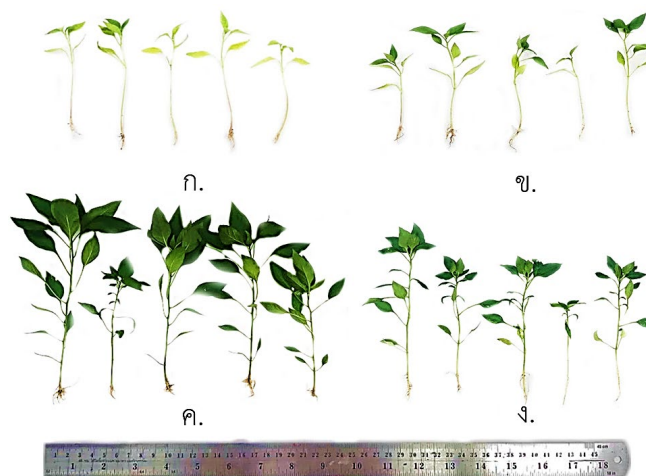
ตารางที่ 3 คุณสมบัติทางเคมีของวัสดุและตัวอย่างชิ้นงาน

องค์ประกอบ	NH ₄ ⁺ -N	NO ₃ ⁻ -N	Urea-N	P ₂ O ₅	K ₂ O
LW	2%	0%	0%	5%	8%
CG	2%	4%	5%	10%	8%
SM	2%	2%	15%	10%	16%
LW:SM 75:25	2%	2%	10%	5%	16%
LW:CG 75:25	2%	2%	5%	5%	8%
LW:CG 50:50	2%	2%	5%	10%	8%

ผลวิเคราะห์พบว่าชุดผลลากกระดาศซึ่งเป็นวัสดุประเภทกระดาศมีไนโตรเจน 0-2% ฟอสฟอรัส 5% และโพแทสเซียม 8% แม้ว่าไม่พบการนำชุดผลลากกระดาศมาใช้ประโยชน์เพื่อการทำกระถางเพาะชำหรือวัสดุเพาะโดยตรง แต่การสำรวจข้อมูลพบงานวิจัยที่ได้วิเคราะห์ไนโตรเจน ฟอสฟอรัสและโพแทสเซียมในกากตะกอนเยื่อกระดาษที่มีผลต่อการเจริญเติบโตของไส้เดือนดินที่มีผลต่อปุ๋ยหมักมูลไส้เดือน [8] กากตะกอนเยื่อกระดาษดังกล่าวมีลักษณะทางกายภาพใกล้เคียงกับชุดผลลากกระดาศนี้ผลวิเคราะห์กากตะกอนเยื่อกระดาษดังกล่าว พบว่า มีไนโตรเจน ฟอสฟอรัส และโพแทสเซียมเช่นเดียวกัน โดยมีไนโตรเจนใกล้เคียงกัน กล่าวคือ กากตะกอนเยื่อกระดาษมีไนโตรเจน 1.64% ซึ่งมาจากการบำบัดแบบชีววิทยา สำหรับฟอสฟอรัสและโพแทสเซียมในกากตะกอนเยื่อกระดาษนั้น พบเพียง 0.32% และ 0.11% ตามลำดับซึ่งมีปริมาณน้อยกว่าชุดผลลากกระดาศ

อย่างไรก็ตามในงานวิจัยนี้ได้ทดสอบการเสริมธาตุอาหาร
ในกระถางเพาะชำด้วยกากถั่วเหลือง ผลทดสอบเมื่อวิเคราะห์จาก
ตารางที่ 3 พบว่ากากถั่วเหลืองเสริมยูเรียไนโตรเจนได้ สอดคล้อง
กับงานวิจัยที่ระบุว่าเมล็ดถั่วเหลืองใช้ทดแทนปุ๋ยเคมีที่มีธาตุ
ไนโตรเจนสูง และเมื่อพัฒนาปุ๋ยน้ำหมักจากถั่วเหลืองและ

สับปะรด พบว่าปุ๋ยน้ำหมักดังกล่าวสามารถทดแทนการใช้ปุ๋ยยูเรียได้ [9] ในส่วนของกากกาแฟนั้น พบการศึกษาวิจัยในการพัฒนากากกาแฟเพื่อเป็นปุ๋ยหรือวัสดุเสริมธาตุอาหารให้พืชหลายลักษณะต่างให้ผลสอดคล้องกันว่ากากกาแฟมีธาตุอาหารที่จำเป็น ได้แก่ ไนโตรเจน ฟอสฟอรัส และโพแทสเซียมที่พืชสามารถนำมาใช้ประโยชน์เพื่อการเจริญเติบโตได้ [10],[11],[12] สอดคล้องกับผลการวิเคราะห์คุณสมบัติทางเคมีของกากกาแฟจากงานวิจัยนี้เช่นกัน ทั้งนี้ควรต้องผสมกับวัสดุปลูกอื่นหรือหมักเพื่อผลิตเป็นปุ๋ยอินทรีย์เพื่อลดความเป็นพิษของกากกาแฟ [13] เมื่อทดสอบใช้งานกระถางเพาะชำโดยการปลูกพืช คือ ต้นพริกชี้หูในกระถางเพาะชำ จากนั้นเก็บเกี่ยวและบันทึกผล น้ำหนักสด น้ำหนักแห้ง ความยาวลำต้น ยาวความราก จำนวนใบ และอัตราการรอดชีวิตของต้นพืช ให้ผลการทดสอบดังภาพที่ 5



ภาพที่ 5 การเจริญเติบโตของต้นพริกชี้ฟ้า
ในกระถางเพาะชำ

ก. LW:CG เท่ากับ 50:50 ข. LW:CG เท่ากับ 75:25

ค. LW:SM เท่ากับ 75:25 ง. กระจกเพาะชำพลาสติก

พบว่าน้ำหนักสดของต้นพริกที่เพาะในกระถางเพาะชำแต่ละประเภทมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) โดยน้ำหนักสดของพืชที่ทดสอบปลูกจริงในกระถางเพาะชำจาก LW:SM อัตราส่วน 75:25 มีน้ำหนักสดมากที่สุด เท่ากับ 4.45 ± 1.76 กรัม รองลงมา คือ ต้นพริกที่ปลูกในกระถางเพาะชำพลาสติก เท่ากับ 1.36 ± 0.54 กรัม LW:CG อัตราส่วนเท่ากับ 75:25 เท่ากับ 0.40 ± 0.11 กรัม และ น้ำหนักสดของพริกที่เพาะในกระถางเพาะชำจาก LW:CG อัตราส่วนเท่ากับ 50:50 เท่ากับ 0.24 ± 0.04 กรัม ตามลำดับ

น้ำหนักแห้งของต้นพริกที่ทดสอบปลูกในกระถางเพาะชำ จาก LW:SM อัตราส่วนเท่ากับ 75:25 มีน้ำหนักสดมากที่สุด เท่ากับ 0.44 ± 0.17 กรัม รองลงมา คือ ต้นพริกที่ปลูกในกระถางเพาะชำพลาสติคที่บรรจุดิน มีน้ำหนักแห้งเท่ากับ 0.13 ± 0.05 กรัม ต้นพริกที่เพาะในกระถางเพาะชำ LW:CG นั้นมีน้ำหนักแห้งใกล้เคียงกัน คือ 0.03-0.04 กรัม ซึ่งไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p > 0.05$)

สำหรับความยาวลำต้น ความยาวราก และจำนวนใบของ
ต้นพริกที่เพาะในกระถางเพาะชำตัวอย่างนั้น พบว่า ต้นพริกที่

เพาะในกระถางเพาะชำจาก LW:SM อัตราส่วน เท่ากับ 75:25 มีความยาวของลำต้นมากที่สุด เท่ากับ 22.12 ± 3.26 ซม. รองลงมา คือ ต้นพริกที่เพาะในกระถางเพาะชำพลาสติกบรรจุดินปลูก พบว่ามีความยาว เท่ากับ 15.61 ± 2.95 ซม. ต้นพริกที่เพาะในกระถางเพาะชำแต่ละประเภทมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) แต่ต้นพริกที่เพาะในกระถางเพาะชำจากขุยมะลาคกระดาศและกากกาแฟนั้นพบว่ามีความไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p > 0.05$)

รากของต้นพริกที่เพาะในกระถางเพาะชำประเภทต่างๆ มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) โดยต้นพริกที่เพาะในกระถางเพาะชำพลาสติกบรรจุดินปลูก มีความยาวของรากมากที่สุด เท่ากับ 5.00 ± 0.96 ซม. รองลงมา คือ ต้นพริกที่เพาะในกระถางเพาะชำอัตราส่วน LW:SM เท่ากับ 75:25 มีความยาวราก 4.42 ± 0.84 ซม. LW:CG เท่ากับ 75:25 มีความยาวราก เท่ากับ 3.21 ± 1.00 ซม. และต้นพริกที่เพาะในกระถางเพาะชำจาก LW:CG อัตราส่วน เท่ากับ 50:50 เท่ากับ 2.10 ± 0.53 ซม. ตามลำดับ

ผลการวิจัยแสดงให้เห็นว่าวัสดุต่างมีผลต่อการเจริญเติบโตของราก กล่าวคือ ดินปลูกมีช่องว่างในดินมากกว่าการใช้กระถางเพาะชำที่เมื่อย่อยสลายแล้วจะมีผลกับช่องว่างในกระถางเพาะชำ กล่าวคือ อาจเป็นอุปสรรคต่อการเจริญของรากพืช อย่างไรก็ตาม เมื่อพิจารณากรณีเฉพาะที่ใช้กระถางเพาะชำจากขุยมะลาคกระดาศ กากกาแฟ และกากถั่วเหลือง พบว่า รากพืชเจริญเติบโตได้ดีกว่าในกระถางเพาะชำจากกากถั่วเหลือง ทั้งนี้เนื่องมาจากกากถั่วเหลืองสามารถย่อยสลายได้รวดเร็วที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุชนิดอื่น เมื่อย่อยสลายแล้ว ลักษณะของกากถั่วเหลืองแปรสภาพได้ง่ายกว่า ส่งผลให้ช่องว่างหรือความพรุนของวัสดุในกระถางเพาะชำเพิ่มขึ้น แปรผันตรงกับการเจริญเติบโตของรากพืช สอดคล้องกับงานวิจัยที่พบว่า การเกิดไรโซมและรากจากการปักชำของใบแก้วมรกตนั้นเกี่ยวข้องกับสัดส่วนช่องว่างที่มีผลกับการระบายน้ำและอากาศอันเป็นปัจจัยสำคัญต่อการเจริญเติบโตของรากพืช [14] ซึ่งเมื่อรากเจริญเติบโตได้ไม่เหมาะสมจึงมีผลต่อจำนวนและขนาดของใบ

การเจริญเติบโตของต้นพริกที่เพาะในกระถางเพาะชำดังกล่าว สัมพันธ์กับคุณสมบัติทางเคมีของวัสดุต่างๆ เป็นสำคัญ กล่าวคือ ต้นพริกจาก LW:SM อัตราส่วนเท่ากับ 75:25 มีจำนวนใบของพืชมากที่สุด เท่ากับ 17 ± 2 ใบ ทั้งยังมีขนาดใหญ่มากที่สุด เมื่อสังเกตด้วยสายตา รองลงมา คือ ต้นพริกที่เพาะในกระถางเพาะชำที่เป็นตัวอย่างควบคุม พบจำนวนใบ เท่ากับ 14 ± 3 ใบ และ LW:CG อัตราส่วนเท่ากับ 75:25 มีจำนวนใบ 8 ± 1 ใบ และกระถางเพาะชำจาก LW:CG อัตราส่วนเท่ากับ 50:50 มีใบเพียง 5 ± 1 ใบ อีกทั้งใบยังมีขนาดเล็กที่สุดอย่างชัดเจน แสดงให้เห็นว่าการใช้กากถั่วเหลืองเสริมธาตุอาหารในกระถางเพาะชำให้ผลดีกว่าการใช้กากกาแฟ เนื่องจากเมื่อใช้กากถั่วเหลืองเป็นวัสดุเสริมธาตุอาหารในชั้นงานจากขุยมะลาคกระดาศ พบว่า กากถั่วเหลืองสามารถเพิ่มระดับไนโตรเจนจากไม่พบไนโตรเจน

หรือ 0% เป็น 2% เพิ่มระดับยูเรีย-ไนโตรเจนจาก 0% เป็น 10% และเพิ่มระดับโพแทสเซียมจาก 10% เป็น 15% สำหรับกากกาแฟนั้น พบว่า การใช้กากกาแฟผสมกับขุยมะลาคกระดาศสามารถเพิ่มไนโตรเจน-ไนโตรเจน จาก 0% เป็น 2% เพิ่มระดับยูเรีย-ไนโตรเจนจาก 0% เป็น 5% และเพิ่มระดับฟอสฟอรัสจาก 5% เป็น 10% สำหรับกระถางเพาะชำจาก LW:CG อัตราส่วนต่างกัน คือ 75:25 และ 50:50 ให้ปริมาณธาตุอาหารใกล้เคียงกันมาก แตกต่างกันเพียงฟอสฟอรัสเท่านั้น ซึ่งพบว่าชั้นงานที่มีปริมาณกากกาแฟมากกว่าจะมีฟอสฟอรัสสูงกว่า

อย่างไรก็ตามเมื่อเปรียบเทียบระหว่างกระถางเพาะชำจาก LW:CG กับกระถางเพาะชำจาก LW:SM ที่ใช้อัตราส่วนเท่ากัน คือ 75:25 พบว่า ธาตุอาหารในกระถางเพาะชำจากกากถั่วเหลือง ได้แก่ ยูเรีย-ไนโตรเจนและโพแทสเซียมสูงกว่า แสดงให้เห็นว่ากากถั่วเหลืองเสริมไนโตรเจนในรูปยูเรีย และเสริมโพแทสเซียมได้มากกว่าเมื่อใช้ปริมาณเท่ากับกากกาแฟ จึงเพิ่มการเจริญเติบโตของต้นพริกขึ้นซึ่งเป็นพืชที่ต้องการธาตุอาหารจำพวกไนโตรเจนและโพแทสเซียมต่อการเจริญเติบโต [15] อย่างไรก็ตามจากงานวิจัยที่ระบุว่า พริกเป็นพืชที่ต้องการธาตุอาหารสำหรับใช้ในการเจริญเติบโตและสร้างผลผลิตโดยเฉพาะธาตุไนโตรเจนที่มีบทบาทสำคัญอย่างยิ่งต่อการเจริญเติบโตและเพิ่มผลผลิต [16] อีกทั้งไนโตรเจนมักเป็นตัวแปรของค่าผลผลิตพริกที่ได้ [17],[18] การเพาะชำพริกขึ้นในกระถางเพาะชำที่ทำจากขุยมะลาคกระดาศและกากถั่วเหลืองจึงให้ผลต่อการเสริมธาตุอาหารเพื่อการเจริญเติบโตของพริกขึ้นได้มากที่สุด

4. สรุปผลการวิจัย

ขุยมะลาคกระดาศ กากกาแฟและกากถั่วเหลือง สามารถใช้ทำกระถางเพาะชำที่ย่อยสลายได้ทั้งยังช่วยเสริมธาตุอาหารให้กับพริกขึ้นที่นำมาเพาะชำได้ ทั้งนี้เมื่อพิจารณาจากคุณสมบัติทางกายภาพและคุณสมบัติทางเคมีที่ส่งผลต่อการเจริญเติบโตของพริกขึ้นเป็นสิ่งสำคัญแล้ว พบว่า กระถางเพาะชำที่ทำมาจากขุยมะลาคกระดาศ (LW) และกากถั่วเหลือง (SM) อัตราส่วนระหว่าง LW:SM เท่ากับ 75:25 เป็นกระถางเพาะชำที่เหมาะสมต่อการใช้งานและมีประสิทธิภาพดีที่สุดในการเสริมธาตุอาหารให้กับต้นพริกขึ้น อย่างไรก็ตามเพื่อประสิทธิภาพที่ดีและเหมาะสมมากขึ้นเสนอแนะให้พัฒนาต่อไปโดยการใช้อัตราส่วนที่แตกต่างกันมากขึ้นและควรทดสอบการใช้ประโยชน์ต่อพืชชนิดอื่นประกอบกัน

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณบริษัทแลคตาซอย จำกัด (โรงงานปราจีนบุรี) ให้ความอนุเคราะห์กากถั่วเหลือง

6. อ้างอิง

- [1] จินตนา แสงวงศ์. การศึกษาการลดก๊าซเรือนกระจกจากการคัดแยกขยะครัวเรือนเพื่อการรีไซเคิลภายใต้โครงการสนับสนุนกิจกรรมลดก๊าซเรือนกระจก กรณีศึกษา: โรงเรียน

- นายร้อยพระจุลจอมเกล้า. วารสารวิชาการโรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้า 2564; 19(1): 57-64.
- [2] อัญชลี อุษณาสวรรณกุล, กัญญ์วรา ทองกระจ่าง. การใช้ประโยชน์จากกากถั่วเหลือง. อาหาร 2565; 52(1): 24-36.
- [3] สุปราณี อบเทียน, สิริณารี เงินเจริญ, ประทีป อุปแก้ว. การศึกษาความเป็นไปได้ในการผลิตวัสดุปลูกจากกากขนอ้อยและกากตะกอนระบบบำบัดน้ำเสีย. วารสารวิจัยและพัฒนานวโลยอลงกรณ์ในพระบรมราชูปถัมภ์ 2560; 12(1): 79-92.
- [4] ปิ่นประภา โสมากุล และสิรินารี เงินเจริญ. กระถางเพาะชำที่ย่อยสลายได้จากขุยมะพร้าวและขุยมะพร้าว. การประชุมวิชาการ ครั้งที่ 4 มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตศรีราชา; 28 สิงหาคม 2563; มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตศรีราชา ชลบุรี. 36-45.
- [5] กิตติชัย โสพันนา, วิชชุดา ภาโส, กนกวรรณ วรดง, อนันต์ สิทธิ ไชยวังราช. การประดิษฐ์และสมบัติของกระถางชีวภาพ. SNRU Journal of Science and Technology 2558; 7(2): 1-7.
- [6] โครงการพัฒนาวิชาการ ดิน ปุ๋ย และสิ่งแวดล้อม, ภาควิชาปฐพีวิทยา มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. ชุดตรวจสอบปุ๋ย มก. 5. กรุงเทพฯ: มหาวิทยาลัย เกษตรศาสตร์; ม.ป.ป.
- [7] ลัดดา ทองชูช่วย, วรรัตน์ ปัตตประกร, แวบุญ แยมแสงสังข์. การศึกษาสมบัติของเชื้อเพลิงอัดแท่งจากกากกาแฟและกากมะพร้าว. วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยสุโขทัยธรรมาธิราช 2565; 2(2): 55-65.
- [8] วันวิสาข์ วัฒนะพันธ์ศักดิ์, ธรรมธวัช แสงงาม, ไยไหม ช่วยหนู, ปฐมา แทนนาค, ทศพล วัฒนะพันธ์ศักดิ์. ผลของกากตะกอนเยื่อกระดาษที่มีต่อการเจริญเติบโตของไส้เดือนดินและคุณภาพปุ๋ยหมักมูลไส้เดือนดิน. วิทยาศาสตร์เกษตรและการจัดการ 2566; 6(1): 79-86.
- [9] ยาวพล ชุมพล. ประสิทธิภาพของปุ๋ยน้ำหมักชีวภาพจากเมล็ดถั่วเหลืองและสับปะรดในการเพิ่มผลผลิตค่น้ำ. วารสารเกษตรพระวรุณ 2564; 18(1): 34-40.
- [10] มัทนภรณ์ ใหม่คามิ. ผลของดินผสมกากกาแฟต่อการออกและเจริญเติบโตของผักบุ้งจีน. วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี 2564; 4(2): 155-163.
- [11] นุสลาชาติ จูมิง, รุสนิดา ดอเลาะ, ภาณุ คชนอง และจุฑามาศ แก้วมณี. การผลิตกระถางต้นไม้ที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมจากกากกาแฟ ผักตบชวาและ ขุยมะพร้าว. งานประชุมวิชาการระดับชาติ ด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี เครือข่ายสถาบันอุดมศึกษาภาคใต้ ครั้งที่ 7 (NSCIC2022); 10-11 มีนาคม 2565; คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏสุราษฎร์ธานี. 1592-1600.
- [12] ปริยานุช จุลกะพิจิตร้า แก้วสอน และปณิดา จีนประสม. ผลของการใช้วัสดุปลูกที่มีส่วนผสมของกากกาแฟต่อการงอกและการเจริญเติบโตของต้นกล้ามะเขือเทศ. วารสารวิทยาศาสตร์เกษตร 2557; 45(2)(พิเศษ): 349-352.
- [13] สุชุมาล หวานแก้ว. ปฐดินด้วยกาแฟ ปลูกกระแสดการเกษตรที่ยั่งยืน. คลังความรู้ [อินเทอร์เน็ต]. พัทลุง: 2564 [เข้าถึงเมื่อ 11 สิงหาคม 2567]. เข้าถึงได้จาก https://tcd.tsu.ac.th/upload/files/1678854996_5%20สค64%20ปฐดินด้วยกากกาแฟ%20ปลูกกระแสดการเกษตรที่ยั่งยืน.pdf
- [14] รชต สีนทนะโยธิน, กฤษรา กฤษณพุกต์, ลพ ภาภูตานนท์. ผลของวัสดุปลูกต่อการเกิดไรโซมและรากจากการปักชำแผ่นใบแก้วมรกต. วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี 2557; 3(1): 17-25.
- [15] ศูนย์วิจัยและพัฒนาการเกษตรกาญจนบุรี. ปฏิสัมพันธ์ของธาตุไนโตรเจนและโพแทสเซียมต่อการเจริญเติบโตและผลผลิตของพริกชี้หูผลใหญ่ในจังหวัดกาญจนบุรี. [อินเทอร์เน็ต]. กาญจนบุรี: 2557 [เข้าถึงเมื่อ 8 สิงหาคม 2567]. เข้าถึงได้จาก <https://www.doa.go.th/research/attachment.php?aid=2422>
- [16] จุฬารรณ และกาสินธ์, เสาวนุช ถาวรพฤษ, ณัฐพล จิตมาตย์. การคาดคะเนอัตราปุ๋ยไนโตรเจนสำหรับพริกชี้หูเม็ดใหญ่ (*Capsicum frutescens* Linn.) โดยใช้ DSSAT. วารสารวิทยาศาสตร์เกษตร 2560; 48(3): 389-402.
- [17] จักรชัยวัฒน์ กาวังค์, เมธี วรรณชัย, จำเนียร มีสำลี. การตอบสนองต่อปุ๋ยไนโตรเจนของพริกที่ปลูกในดินเนื้อปานกลาง. วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี 2562; 27(4): 717-725.
- [18] Mahmud K, Hossain T, Mou TH, Ali A, Islam M. Effect of nitrogen on growth and yield of chili (*Capsicum annum* L.) in roof top garden. Turkish Journal of Agriculture-Food Science and Technology 2020;8(1): 246-51.

การปรับปรุงการมอบหมายงานในสถานีเครื่องจักร CNC โดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ และกฎการจ่ายงาน กรณีศึกษาโรงงานชิ้นส่วนรถยนต์

The improvement of task assignments in a CNC machine station using mathematical models and job dispatching rules: A case study of an automotive parts factory

ปานธิธี เรืองศรี¹, จิรวัดน์ ณ พัทลุง^{1*}, นพคุณ แสงเขียว², พีรพงศ์ ภควณิช² และ พรนิวัติ ผลทวีชัย²

Panithee Rungsri¹, Chirawat Na-Badalung^{1*}, Noppakun Sangkhiew², Peerapong Pakawanich² and Pornniwat Pontawechai²

¹สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการและโลจิสติกส์ สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์และนวัตกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก

¹Department of Industrial Engineering and Logistics, School of Engineering and Innovation, Rajamangala University of Technology Tawan-ok

²ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการและการจัดการ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร

²Department of Industrial Engineering and Management, Faculty of Engineering and Industrial Technology, Silpakorn University

*Corresponding author, E-mail: chirawat_na@rmutto.ac.th

Received: 19-06-2024 Revised: 19-03-2025 Accepted: 17-07-2025

บทคัดย่อ

การศึกษานี้มุ่งเน้นการปรับปรุงกระบวนการมอบหมายงานในสถานีงานเครื่องจักร CNC เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการผลิตชิ้นส่วนยานยนต์ เช่น ชุ้มล้อรถยนต์ และตัวโครงสร้างรถยนต์ โดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ และการจัดลำดับการทำงานด้วยกฎการจ่ายงาน Shortest Processing Time (SPT) ซึ่งจะพิจารณาเวลาในการทำงาน โดยงานที่ใช้เวลาน้อยที่สุดจะได้รับมอบหมายให้ทำก่อน การใช้กฎ SPT นี้จะช่วยลดค่าเฉลี่ยของเวลาที่งานค้างอยู่ในระบบ การศึกษานี้ได้ทำการจำลองการผลิตโดยใช้โปรแกรม Excel Solver นำข้อมูลระยะเวลา และเงื่อนไขเกี่ยวกับขนาดของงานในการผลิตที่ได้จากเครื่อง CNC จำนวน 3 เครื่อง มาคำนวณเพื่อเปรียบเทียบระหว่างวิธีเดิมกับวิธีที่มีการมอบหมายงานแบบมีระบบ ผลการทดลองพบว่า การใช้กฎ SPT ช่วยลดเวลาปิดงานของระบบจาก 70 วันในวิธีการเดิมเหลือเพียง 52 วันในวิธีใหม่ ซึ่งคิดเป็นการลดลง 25.71% และลดเวลารวมในการทำงานจาก 1,254 วันเหลือ 1,048 วัน หรือ 16.43% นอกจากนี้ การมอบหมายงานด้วยวิธีนี้ยังช่วยให้สามารถกระจายภาระงานให้กับเครื่องจักรได้อย่างเท่าเทียม และเพิ่มประสิทธิภาพในการใช้งานเครื่องจักร โดยที่เครื่องจักรทุกเครื่องจะมีการทำงานเต็มประสิทธิภาพได้อย่างสมดุล และช่วยในการกำหนดเวลาส่งมอบงานให้กับลูกค้าได้อย่างแม่นยำและเป็นระบบมากยิ่งขึ้น

คำสำคัญ ปัญหาการมอบหมายงาน, โปรแกรมเชิงเส้น, กฎการจ่ายงาน, ชุ้มล้อรถยนต์

ABSTRACT

This study focuses on improving the task assignment process in CNC machine workstations to enhance the efficiency of producing automotive parts, such as wheel arches and vehicle chassis. It employs a mathematical model and task sequencing using the Shortest Processing Time, which prioritizes tasks based on their processing time, with the shortest tasks being assigned first. The use of the SPT helps reduce the average time that tasks remain in the system. This study simulates the production process using Excel Solver, incorporating production time data from three CNC machines for comparison between the traditional method and the method with systematic task assignment. The results show that using the SPT reduced the system's job completion time from 70 days under the traditional method to just 52 days with the new approach, representing a 25.71% decrease. Additionally, the total work time was reduced from 1,254 days to 1,048 days, or 16.43%. Furthermore, this task assignment method contributes to a more balanced distribution of workloads across machines, improving machine utilization and allowing for more accurate and systematic scheduling of job deliveries to customers.

Keyword: Assignment problem, Linear programming, Shortest Processing Time, Wheel arch

1. บทนำ

โรงงานกรณีศึกษาเป็นโรงงานผลิตสินค้าตามแบบ (Make to order) แห่งหนึ่งในจังหวัดชลบุรี ที่ผลิตสินค้าตามความ

ต้องการของลูกค้า เพื่อตอบสนองความต้องการของลูกค้า โรงงานกรณีศึกษาต้องการเพิ่มขีดจำกัดในการแข่งขันในตลาดเดียวกัน จึงให้ความสำคัญในการพัฒนากระบวนการผลิต โดยมีการวิเคราะห์

ปัญหาภายในกระบวนการผลิตสินค้าอย่างต่อเนื่อง เพื่อลดความล่าช้าในการส่งงานแก่ลูกค้า

ปัจจุบันโรงงานกรณีศึกษา มีปัญหาในการส่งงานที่ล่าช้า วิศวกรภายในโรงงานกรณีศึกษาได้วิเคราะห์สาเหตุในการเกิดความล่าช้า โดยใช้หลักการ 5 Why analysis ซึ่งเป็นหลักการที่มีความน่าเชื่อถือ และนิยมใช้วิเคราะห์ปัญหาที่มุ่งเน้นการค้นหาสาเหตุที่เป็นต้นตอของปัญหา เพื่อหาแนวทางป้องกันปัญหาที่เกิดขึ้นซ้ำในอนาคต จากการวิเคราะห์พบว่าสาเหตุของปัญหาอยู่ในขั้นตอนการผลิตในสถานีนางเครื่อง CNC (Computer Numerical Control) ซึ่งมีลักษณะคอขวดของกระบวนการ และเป็นสถานีนางที่สำคัญ เนื่องจากทุกชิ้นส่วนต้องดำเนินการผ่านเครื่องจักร CNC ที่มีจำนวนเพียง 3 เครื่อง ภายในโรงงานกรณีศึกษา ทำให้เกิดการสะสมของงาน นอกจากนี้ยังพบว่าการมอบหมายงานในสถานีนางเครื่อง CNC ยังไม่มีประสิทธิภาพเพียงพอ ส่งผลให้งานเกิดความล่าช้าไม่สามารถส่งมอบงานให้ไปทำตามกำหนดที่นัดหมาย ทำให้เกิดการเสียค่าปรับในการส่งงานล่าช้า มีต้นทุนเพิ่มในการจ้างพนักงานทำงานนอกเวลาทำงาน และส่งผลเสียภาพลักษณ์ของโรงงาน มีความเชื่อมั่นของลูกค้าที่มีโรงงานลดลงจนอาจสูญเสียลูกค้าไปได้

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาวิธีการมอบหมายงานให้แก่เครื่องจักร CNC โดยการ [1] นำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์มาเป็นตัวแทนสถานการณ์หรือโจทย์เพื่อนำไปแก้ไขปัญหาคือต้องการคำตอบ และนำมาพัฒนากระบวนการมอบหมายงานอย่างเหมาะสม โดยมุ่งเน้นในการเพิ่มประสิทธิภาพในการกระจายภาระงานให้กับเครื่องจักรต่าง ๆ เพื่อให้กระบวนการผลิตมีความสอดคล้องและสามารถใช้งานเครื่องจักรได้อย่างเต็มประสิทธิภาพงานวิจัยนี้จึงมีการนำเสนอแนวทางในการวางแผนการผลิตโดยใช้การมอบหมายงานที่คำนึงถึงเวลาการผลิตที่แม่นยำ การกระจายภาระงานอย่างเท่าเทียมระหว่างเครื่องจักรต่าง ๆ และการบริหารทรัพยากรในกระบวนการผลิต ซึ่งทั้งหมดนี้จะช่วยให้การผลิตมีความสมดุล และสามารถเพิ่มประสิทธิภาพสูงสุดได้ในระยะเวลาที่กำหนด

2. วิธีดำเนินการวิจัย

2.1 ศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

สาวิตรี สิงห์ปาน [2] ศึกษาการจัดตารางการผลิตเครื่องพิมพ์สีในพลาสติกบรรจุภัณฑ์โดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในการกำหนดงานให้เครื่องพิมพ์สีและจัดลำดับการผลิตงานด้วยหลักเวลาผลิตสั้นที่สุดท้ายก่อน (SPT) เปรียบเทียบกับการจัดงานที่มีเวลามากสุดท้ายก่อน (LPT)

อภันตรี สาหร่าย [3] ศึกษาการจัดตารางการผลิตเลนส์ในกระบวนการ Anti-Reflection เพื่อให้ปริมาณงานล่าช้าโดยเฉลี่ยต่ำสุด และประสิทธิภาพการใช้เครื่องจักรมีค่าสูงขึ้น จึงนำหลักการทางฮิวริสติกส์มาประยุกต์ใช้โดยใช้หลักการจัดตาม EDD และ SPT เพื่อจัดตารางการผลิต

พงษ์ธาดา คุรุกิจจักร [4] ศึกษาวิธีการจัดตารางการผลิตของโรงงานสี และเพิ่มประสิทธิภาพการวางแผนผลิตเครื่องจักรแบบขนานและงานเป็นอิสระต่อกัน เพื่อลดความล่าช้า, จำนวนงานสายน้อยที่สุด, ลดเวลาปิดงานของระบบ และลดเวลาไหลของงานทั้งหมดที่ถูกถ่วงน้ำหนัก โดยใช้ 2 วิธีในการจัดตารางการผลิต 1.ใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์จัดตารางการผลิตด้วยวิธีการกระจายงาน (Dispatching Rules) 5 แบบ คือ Minimum Slack, FCFS, LPT และ SPT 2.การจัดตารางการผลิตโดยมองปัญหาเป็น Assignment Problem สร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์แล้วใช้โปรแกรมกูโรบิโซลเวอร์ (Gurobi Solver) เพื่อมอบหมายงานให้เครื่องจักร

พรชัย ยินดี [5] ศึกษาปัญหาการจัดตารางการเรียนการสอน โดยมีการนำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์มาใช้ในการจัดตารางสอน เพื่อให้ภาระงานของครูสอนมีความสมดุลมากที่สุด โดยการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จะใช้โปรแกรม Excel Premium Solver ในการหาคำตอบที่ดีที่สุด จากผลพบว่าภาระงานของครูผู้สอนมีความสมดุลมากขึ้น 65 % การสอนล่วงเวลาลดลง 91 % และสามารถลดเวลาในการจัดตารางเรียนตารางสอนได้ถึง 60 % จากการจัดตารางเรียนตารางสอนแบบเดิม

จักรวาล และระดาธร [6] นำเสนอวิธีการวางแผนการผลิตรายวันสำหรับเครื่องปั๊มขึ้นรูปชิ้นส่วนโครงรถยนต์ โดยใช้แบบจำลองคณิตศาสตร์ 1.หาค่าเวลาสายสูงสุดให้มีค่าน้อยที่สุด 2.หาผลรวมของเวลาสายแบบถ่วงน้ำหนักให้น้อยที่สุด 3.คำนวณหาเวลาผลิตเสร็จก่อนส่งมอบโดยเฉลี่ยให้มากที่สุด นำมาการวางแผนการผลิตจริงในช่วง 20 วัน พบว่าแบบจำลองสามารถหาผลลัพธ์ที่ดีที่สุดในการลดต้นทุนและเวลาผลิตเสร็จได้ตามที่กำหนด โดยต้นทุนจากการจัดเก็บชิ้นส่วนคงคลังและการปรับตั้งเครื่องจักรลดลง 1.58% และเวลาผลิตเสร็จเฉลี่ยของทุกกะทำงานและสองกะแรกมีค่าไม่ต่ำกว่า 6 ชั่วโมงตามเกณฑ์ของโรงงานกรณีศึกษา

ปาณิสี เรืองศรี [7] ศึกษาวิธีการจัดตารางการบำรุงรักษาแม่พิมพ์ในโรงงานผลิตวาล์วสเปรย์และปั๊มพลาสติก เพื่อลดความล่าช้าในการส่งมอบ โดย 1.ทำการมอบหมายงานให้พนักงานผ่านแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ 2.จัดลำดับการทำงาน EDD +SPT+งานที่สำคัญกว่าทำก่อน พบว่าวิธีการจัดตารางการทำงานที่ศึกษาทำให้เวลาในการบำรุงรักษาแม่พิมพ์ที่มีการพัฒนาขึ้น 0.55%เวลาที่เกิดงานล่าช้าทั้งหมดลดลง 66.67% เวลาล่าช้าที่มากที่สุดที่ลดลง 50% และจำนวนงานล่าช้าลดลง 33.33%

ยอดดวงใจ นาคปทุม [8] ศึกษาและหาวิธีการจัดตารางการผลิตสำหรับการผลิตแบบตามสั่งในโรงงานย้อมผ้า จากการกำหนดตารางการผลิตแบบไหล โดยวิธีการทางฮิวริสติกส์ เพื่อลดจำนวนงานล่าช้า และเวลาในการปรับตั้งเครื่องจักร ซึ่งแบ่งเป็น 2 ส่วน 1.ศึกษาการจัดลำดับงานในแต่ละเครื่อง โดยใช้วิธี FCFS, FDD, SPT, LPT, MST, EDD+LPT และ EDD+MST และ 2.ศึกษาการย้ายงานระหว่างเครื่องย้อม เพื่อเพิ่มโอกาสในการผลิตให้ทันกำหนดส่ง จากการศึกษพบว่าการจัดตารางการผลิต EDD+LPT

โดยให้จำนวนงานล่าช้าลดลงจาก 166 งานเป็น 78 งาน คิดเป็น 53.01% และจำนวนครั้งในการทำความสะอาดเครื่องย้อมลดลงจาก 117 ครั้ง เหลือ 98 ครั้ง คิดเป็น 16.24%

วิมล ธารณาและคณะ [9] ศึกษาการจัดการตารางการผลิตของเครื่องพิมพ์บรรจุภัณฑ์ที่มีการจัดการตารางการผลิตซับซ้อน ผลผลิตสินค้าที่ไม่ทันตามกำหนดส่งสินค้า การแก้ปัญหา 1. จัดกลุ่มงานเข้าเครื่องพิมพ์ โดยใช้ตัวแบบทางคณิตศาสตร์เพื่อให้เวลาทำงานรวมน้อยที่สุด 2. นำผลการมอบหมายมาจัดลำดับงาน ด้วยการประยุกต์ใช้กฎการทำงาน EDD และ SPT ทำการเปรียบเทียบเวลารอในระบบเฉลี่ยต่ำที่สุด, ค่าเฉลี่ยเวลาในระบบ, งานที่เสร็จไม่ตรงเวลา, จำนวนของงานที่ล่าช้า, เวลาที่ช้ามากที่สุด และงานที่ค้างในระบบ และจำนวนครั้งในการทำความสะอาดเครื่องย้อมลดลง จาก 117 ครั้ง เหลือ 98 ครั้ง คิดเป็น 16.24%

นมิดา ศรีผล [10] ศึกษาการจัดการตารางการผลิตเพื่อปรับปรุงปริมาณงานล่าช้าในโรงงานผลิตเลนส์แว่นตา เนื่องจากทางโรงงานไม่มีการกำหนดหลักเกณฑ์การจัดลำดับทำให้เกิดงานล่าช้า ร้อยละ 36.86 ต่อเดือน โดยเริ่มจากการ EDD และ LPT จัดงานที่อยู่ภายในวันเดียวกันของทั้งเครื่องจักรเดียวและเครื่องจักรแบบขนานเพื่อให้เวลาการผลิตรวมน้อย หลังจากการทดลองปรับปรุงทำให้จำนวนงานที่เกิดความล่าช้าลดลง 22 % เวลาการผลิตรวมลดลง 8.79 วัน ระยะเวลาล่าช้าสูงสุดลดลง 3 วัน และประโยชน์ของการใช้เครื่องจักรเพิ่มมากขึ้นเฉลี่ย 11.5%

2.2 ศึกษาสภาพปัญหา

โรงงานผลิตสินค้าตามแบบลูกค้าแห่งหนึ่งในจังหวัดชลบุรี ซึ่งสินค้าส่วนใหญ่จะเป็นสินค้าประเภทชิ้นส่วนยานยนต์ เช่น ตัวโครงสร้างรถยนต์ หรือซุ้มล้อรถยนต์ เป็นต้น โดยมีประเภทเครื่องจักร ดังภาพที่ 1-3 และตารางที่ 1 ส่วนชิ้นงานที่นำมาศึกษาเป็นชิ้นงาน ซุ้มล้อรถยนต์ Rear Seat Reinforcement ดังภาพที่ 5-8



ภาพที่ 1 เครื่อง CNC เครื่องที่ 1

เนื่องจากเมื่อนำยอดการผลิตชิ้นงานทั้งหมดภายในโรงงานกรณีศึกษา มาทำแผนภูมิพาเรโต ดังภาพที่ 4 พบว่าชิ้นงานซุ้มล้อรถยนต์ เป็นชิ้นงานที่มีมูลค่าสร้างผลกำไรให้กับโรงงานมาก

ที่สุด มียอดการผลิตมากที่สุด และเป็นชิ้นงานที่มีการส่งงานล่าช้าที่สุดด้วย โดยชิ้นงานซุ้มล้อรถยนต์ ประกอบด้วย 8 ส่วน ได้แก่ Base upper, Base lower, Structure upper, Structure lower, Column dies, Upper die, Lower die และ Heater system

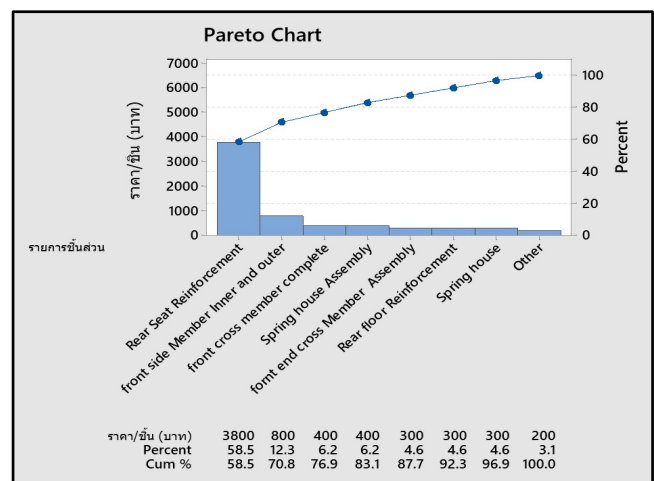


ภาพที่ 2 เครื่อง CNC เครื่องที่ 2



ภาพที่ 3 เครื่อง CNC เครื่องที่ 3

ซึ่งชิ้นส่วนทั้งหมดต้องมีการดำเนินงานผ่านสถานีงาน เครื่องจักร CNC มีรายละเอียดเวลาในการผลิตชิ้นส่วนต่าง ๆ ของซุ้มล้อรถยนต์ โดยใช้เครื่องจักร CNC เป็นไป ดังตารางที่ 2



ภาพที่ 4 แผนภูมิพาเรโตยอดการผลิตชิ้นงานทั้งหมดภายในโรงงานกรณีศึกษา

ตารางที่ 1 เครื่องจักรภายในโรงงานกรณีศึกษา

ลำดับที่	เครื่องจักร	จำนวน	
1	เครื่องกลึง CNC	3	เครื่อง
2	เครื่องกัด CNC	3	เครื่อง
3	เครื่องไส	3	เครื่อง
4	เครื่องเจาะ	5	เครื่อง
5	เครื่องลับเครื่องมือ	1	เครื่อง
6	เครื่องเชื่อมไฟฟ้า	5	ชุด
7	เครื่องปั๊มไฮดรอลิกส์	1	เครื่อง
8	ปากกาจับงาน	10	ชุด
9	เครื่องเลื่อยกล	4	เครื่อง

ตารางที่ 2 รายละเอียดเวลาในการผลิตชิ้นส่วนของขั้วล้อ โดยใช้เครื่องจักร CNC

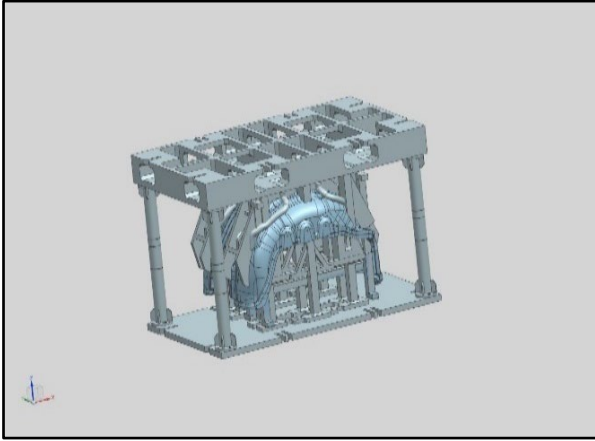
ชิ้นงาน	ชื่อชิ้นส่วน	จำนวน	หน่วย	เวลาการผลิตบนเครื่อง CNC (วัน)
ขั้วล้อรถยนต์	Base upper	1	Set	3
	base lower	1	Set	3
	Structure upper	1	Set	4
	Structure lower	1	Set	4
	Column die	1	Set	2
	Upper die	1	Set	7
	Lower die	1	Set	4
	Heater system	1	Set	4



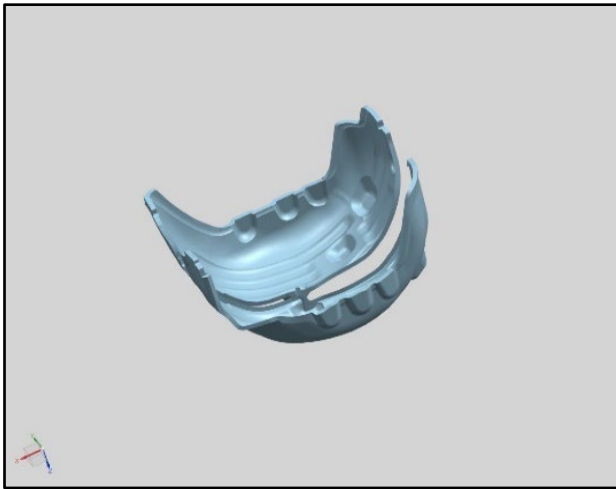
ภาพที่ 5 ชิ้นส่วน Base upper ของขั้วล้อรถยนต์



ภาพที่ 6 ชิ้นส่วน Structure lower ของขั้วล้อรถยนต์



ภาพที่ 7 ชิ้นส่วน Structure upper ของซุ้มล้อรถยนต์



ภาพที่ 8 ซุ้มล้อรถยนต์ Rear Seat Reinforcement

ดังนั้นจึงได้มีการนำข้อมูลการทำงานบนเครื่องจักร CNC ของชิ้นงานซุ้มล้อรถยนต์มาวิเคราะห์แก้ไขปัญหาลดความล่าช้าในการผลิต โดยทำการมอบหมายงานในสถานีนงานเครื่องจักร CNC มีการนำมาสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ เพื่อจำลองจำนวนรอบการผลิตซุ้มล้อรถยนต์ จำนวน 5 คำสั่งผลิต โดยมีการจำลองทั้งหมดจำนวน 40 คำสั่งผลิต

2.3 การมอบหมายงาน

การมอบหมายงานให้แก่เครื่องจักร CNC โดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์เป็นเครื่องมือในการมอบหมายงาน โดยมีการกำหนดแบบจำลองดังนี้

ดัชนี (Index)

ให้ i แทนเครื่องจักร CNC โดยที่ $i \in \{1, 2, 3\}$

j คือ งานการผลิตชิ้นส่วนต่าง ๆ ของซุ้มล้อรถยนต์ บนเครื่องจักร CNC โดยที่ $j \in \{1, 2, \dots, 40\}$

m คือ ประเภทของชิ้นส่วน โดยที่ $m \in \{1, 2, \dots, 8\}$

k คือ ประเภทของชิ้นส่วน โดยที่ $k \in \{1, 2, 3, 4, 5\}$

โดยที่ j สามารถคำนวณจากประเภทชิ้นส่วน m และลำดับคำสั่งผลิต k ดังสมการ 1

$$j = (m - 1) \times 5 + k \quad (1)$$

ตารางที่ 3 ประเภทชิ้นส่วนและช่วงค่าของตัวแปร j และ m

ประเภทชิ้นส่วน	ช่วงของ j	ค่าของ m
Base upper	$j = 1$ ถึง 5	$m = 1$
Base lower	$j = 6$ ถึง 10	$m = 2$
Structure upper	$j = 11$ ถึง 15	$m = 3$
Structure lower	$j = 16$ ถึง 20	$m = 4$
Column die	$j = 21$ ถึง 25	$m = 5$
Upper die	$j = 26$ ถึง 30	$m = 6$
Lower die	$j = 31$ ถึง 35	$m = 7$
Heater system	$j = 36$ ถึง 40	$m = 8$

t_{ij} = เวลาผลิตงานที่ j บนเครื่องจักร CNC ที่ i (ชั่วโมง)

ตัวแปรตัดสินใจ (Decision Variables)

กำหนดให้ x_{ij} เป็นตัวแปร Binary โดยที่

$$x_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{เครื่องจักร CNC ที่ } i \text{ ผลิตงานที่ } j \\ 0 & \text{อื่นๆ} \end{cases} \quad (2)$$

สมการเป้าหมาย (Objective function)

$$\text{minimize } C_{max} \quad (3)$$

โดยที่ C_{max} = เวลาปิดงานของระบบ

$$C_{maxi} = \max(C_i | i = 1, 2, 3)$$

C_i = เวลาทั้งหมดในการผลิตงานของเครื่องจักร CNC ที่ i

$$C_i = \sum_{j=1}^{40} t_{ij} x_{ij} \quad (4)$$

สมการข้อจำกัด (Constraints)

ข้อจำกัดที่ 1 งานแต่ละงานต้องผลิตบนเครื่องจักร CNC เพียงหนึ่งเครื่อง

$$\sum_{i=1}^3 x_{ij} = 1 ; \forall j \quad (5)$$

ข้อจำกัดที่ 2 เวลาทั้งหมดในการผลิตงานบนเครื่องจักร CNC แต่ละเครื่องต้องน้อยกว่าหรือเท่ากับเวลาปิดงานของระบบ

$$C_i \leq C_{maxi} ; \forall i \quad (6)$$

ข้อจำกัดที่ 3 ชิ้นส่วนที่เป็น base ไม่สามารถมอบหมายให้กับเครื่องจักร CNC ที่ 2 เนื่องจากชิ้นส่วนมีขนาดใหญ่เกิดโต๊ะงานของเครื่องจักร

$$X_{2j} = 0 \text{ โดยที่ } j \in \{1, \dots, 10\} \quad (7)$$

ข้อจำกัดที่ 4 ชิ้นส่วนที่เป็น Structure ไม่สามารถมอบหมายให้กับเครื่องจักร CNC ที่ 2 เนื่องจากชิ้นส่วนมีขนาดใหญ่เกินโต๊ะงานของเครื่องจักร

$$X_{2j} = 0 \text{ โดยที่ } j \in \{11, \dots, 20\} \quad (8)$$

ข้อจำกัดที่ 5 ตัวแปรตัดสินใจต้องเป็น 0 กับ 1 เท่านั้น

$$X_{ij} \in \{0, 1\} ; \forall i, j \quad (9)$$

จากนั้นนำเวลาผลิตของงานชิ้นส่วนแต่ละชิ้นมาพิจารณาและมอบหมายงานให้กับเครื่อง CNC โดยการใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ซับซ้อน เพื่อคำนวณหาลำดับการทำงานที่สามารถลดระยะเวลาในการผลิตให้เหลือน้อยที่สุด แบบจำลองนี้จะช่วยในการจัดลำดับงานอย่างมีประสิทธิภาพ โดยพิจารณาถึงเวลาผลิตและความสำคัญของแต่ละชิ้นส่วน ทำให้สามารถกำหนดลำดับการผลิตที่เหมาะสมที่สุด

3. ผลทดลองและอภิปราย

3.1 การมอบหมายงานให้กับเครื่องจักร

หลังจากการเก็บข้อมูลเกี่ยวกับระยะเวลาในการผลิตของชิ้นส่วนต่าง ๆ และนำค่าระยะเวลาผลิตที่ได้แทนในแบบจำลองสมการทางคณิตศาสตร์ เพื่อหาคำตอบที่เหมาะสมที่สุดในการมอบหมายงานให้กับเครื่องจักรแต่ละตัว โดยทำการใช้โปรแกรม Excel Solver เพื่อหาค่าที่ดีที่สุดภายใต้ข้อจำกัดที่กำหนด จากผลลัพธ์พบว่า เครื่อง CNC เครื่องที่ 1 สามารถผลิต

ชิ้นงานทั้งหมดได้ภายในระยะเวลา 51 วัน ดังแสดงในตารางที่ 4 ซึ่งหมายความว่าเครื่อง CNC เครื่องนี้สามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพสูงสุดในการผลิตชิ้นส่วนต่าง ๆ ตามลำดับเวลาที่สั้นที่สุด ในขณะที่เครื่อง CNC เครื่องที่ 2 ซึ่งทำการผลิตชิ้นงานตามลำดับที่ได้จากหลักการ SPT พบว่าใช้ระยะเวลาในการผลิตรวม 52 วัน แสดงดังตารางที่ 5 พบว่าเครื่องจักรใช้เวลามากกว่าเครื่องที่ 1 เล็กน้อยในการผลิตชิ้นส่วนทั้งหมด ซึ่งอาจเกิดจากลักษณะของชิ้นส่วนหรือกระบวนการผลิตที่ต้องใช้เวลาในการดำเนินงานที่มากขึ้นในบางส่วนของกระบวนการ เครื่องที่ 3 ใช้เวลาในการผลิตรวม 52 วัน แสดงดังตารางที่ 6 เช่นเดียวกับเครื่องที่ 2 แสดงให้เห็นว่าเครื่องจักรนี้มีระยะเวลาในการผลิตเท่ากับเครื่องจักรเครื่องที่ 2 แม้จะมีลำดับการมอบหมายงานที่ต่างกัน แต่ผลลัพธ์ที่ได้ยังคงมีระยะเวลาในการผลิตที่ใกล้เคียงกัน การเปรียบเทียบระยะเวลาในการผลิตของเครื่องจักรทั้งสามเครื่องสามารถสรุปได้ในตารางที่ 7

ตารางที่ 4 ผลวิเคราะห์จากการจำลองสมการทางคณิตศาสตร์ของเครื่อง CNC เครื่องที่ 1

เครื่องจักร CNC เครื่องที่ 1		
งาน j	ชื่อชิ้นส่วน	เวลาในการผลิตบนเครื่อง CNC (วัน)
5	base upper	3
6	base lower	3
7	base lower	3
8	base lower	3
9	base lower	3
10	base lower	3
11	structure upper	4
12	structure upper	4
21	column die	2
22	column die	2
23	column die	2
24	column die	2
25	column die	2
30	upper die	7
31	lower die	4
32	lower die	4
เวลารวมในการผลิต		51

ตารางที่ 5 ผลวิเคราะห์จากการจำลองสมการทางคณิตศาสตร์ของเครื่อง CNC เครื่องที่ 2

เครื่องจักร CNC เครื่องที่ 2		
งาน <i>j</i>	ชื่อชิ้นส่วน	เวลาในการผลิตบนเครื่อง CNC (วัน)
26	upper die	7
27	upper die	7
28	upper die	7
29	upper die	7
33	lower die	4
34	lower die	4
35	lower die	4
37	heater system	4
39	heater system	4
40	heater system	4
เวลารวมในการผลิต		52

ตารางที่ 6 ผลวิเคราะห์จากการจำลองสมการทางคณิตศาสตร์ของเครื่อง CNC เครื่องที่ 3

เครื่องจักร CNC เครื่องที่ 3		
งาน <i>j</i>	ชื่อชิ้นส่วน	เวลาในการผลิตบนเครื่อง CNC (วัน)
1	base upper	3
2	base upper	3
3	base upper	3
4	base upper	3
13	structure upper	4
14	structure upper	4
15	structure upper	4
16	structure Lower	4
17	structure Lower	4
18	structure Lower	4
19	structure Lower	4
20	structure Lower	4
36	heater system	4
38	heater system	4
เวลารวมในการผลิต		52

ตารางที่ 7 สรุปเวลาในการผลิตของเครื่องจักร CNC

เครื่องจักร CNC	จำนวนงานที่ได้รับมอบหมาย	เวลาในการผลิตงาน (วัน)
1	16	51
2	10	52
3	14	52
เวลาปิดงานของระบบ		52

3.2 การปรับปรุงกฎการจ่ายงาน

การจัดลำดับงานที่ได้รับมอบหมายแก่เครื่องจักรโดยใช้กฎ Shortest Processing Time (SPT) จะพิจารณาจากระยะเวลาในการทำงาน โดยงานที่ใช้เวลาในการทำงานน้อยที่สุด

จะได้รับการผลิตก่อน พิจารณาจากประเภทของงาน โดยให้ความสำคัญกับการทำงานที่เป็นประเภทเดียวกับงานก่อนหน้าเป็นลำดับแรก งานที่แตกต่างประเภทกันแต่ใช้เวลาเท่ากันจะถูกผลิตทีหลัง โดยผลลัพธ์แสดงดังตารางที่ 8 -10

ตารางที่ 8 ลำดับการทำงานของเครื่องจักรที่ 1 เมื่อจัดตามกฎ SPT

ลำดับ	งาน j	ชื่อชิ้นส่วน	เวลาในการผลิตบนเครื่อง CNC (วัน)
1	21	Column die	2
2	22	column die	2
3	23	column die	2
4	24	column die	2
5	25	column die	2
6	5	base upper	3
7	6	base lower	3
8	7	base lower	3
9	8	base lower	3
10	9	base lower	3
11	10	base lower	3
12	11	structure upper	4
13	12	structure upper	4
14	31	lower die	4
15	32	lower die	4
16	30	upper die	7

จากตารางที่ 8 ความแตกต่างในเวลาการผลิต ตามลักษณะและประเภทของชิ้นส่วน โดยการจัดกลุ่มเวลาที่คล้ายคลึงกันทำให้การผลิตสามารถวางแผนได้ง่ายขึ้นและช่วยในการจัดการการใช้เครื่อง CNC อย่างมีประสิทธิภาพ ชิ้นส่วนที่ผลิตส่วนใหญ่จะใช้เวลาในการผลิตระหว่าง 2 - 7 วัน ขึ้นอยู่กับชนิดของชิ้นส่วน การผลิตชิ้นส่วน column die ทั้งหมด 5 งาน โดยใช้เวลาในการผลิตต่อชิ้นในระยะเวลาเท่ากัน โดยใช้เวลาในการผลิต 2 วันต่อชิ้น ในชิ้นส่วน base upper จำนวน 1 งาน และ base lower จำนวน 5 งาน ใช้เวลาในการผลิตเท่ากันโดยใช้เวลาในการผลิตจำนวน 3

วันต่อชิ้น การผลิตชิ้นส่วน structure upper ทั้งหมด 3 งาน และ lower die ทั้งหมด 2 ชิ้นงาน ใช้เวลาในการผลิตเท่ากันที่ 4 วันต่อชิ้น การผลิตชิ้นส่วน upper die สามารถผลิตได้เพียง 1 ชิ้นงาน จะเห็นได้ว่าชิ้นงานนี้ ใช้เวลาในการผลิตเวลามากที่สุดอยู่ที่ 7 วัน ต่อชิ้น การจัดการการผลิตตามตารางนี้ช่วยให้สามารถวางแผนการใช้เครื่อง CNC ได้อย่างมีประสิทธิภาพ เนื่องจากมีการกำหนดเวลาในการผลิตที่ชัดเจนตามลักษณะและประเภทของชิ้นส่วนแต่ละประเภท ทั้งนี้ยังช่วยในการควบคุมทรัพยากรและจัดลำดับการทำงานได้อย่างเป็นระเบียบ

ตารางที่ 9 ลำดับการทำงานของเครื่องจักรที่ 2 เมื่อจัดตามกฎ SPT

ลำดับ	งาน j	ชื่อชิ้นส่วน	เวลาในการผลิตบนเครื่อง CNC (วัน)
1	33	lower die	4
2	34	lower die	4
3	35	lower die	4
4	37	heater system	4
5	38	heater system	4
6	40	heater system	4
7	26	upper die	7
8	27	upper die	7
9	28	upper die	7
10	29	upper die	7

จากตารางที่ 9 จะเห็นได้ว่า การผลิตชิ้นส่วน lower die และ heater system มีจำนวนงานและระยะเวลาในการดำเนินงานเท่ากัน โดยแต่ละประเภทจะใช้เวลาในการผลิต 4 วัน ต่อชิ้น และมีทั้งหมด 3 งาน ซึ่งหมายความว่า กระบวนการผลิตทั้งสองประเภทนี้อาจใช้เครื่องมือหรือเทคนิคการผลิตที่คล้ายกัน อาจมีขั้นตอนการทำงานที่ไม่ซับซ้อนเกินไป และสามารถดำเนินการได้ในช่วงเวลาสั้น ๆ โดยไม่ต้องมีการตั้งค่าหรือการปรับแต่งที่ซับซ้อนมาก ในขณะที่ upper die ต้องการเวลาในการผลิตที่ยาวนานถึง 7 วัน ต่อชิ้น ซึ่งแสดงให้เห็นถึงความซับซ้อนหรือความละเอียดในการผลิตของชิ้นส่วนนี้ อาจเป็นเพราะกระบวนการผลิตต้องการการตั้งค่าเครื่องจักรที่ซับซ้อนหรือการปรับแต่งหลายขั้นตอน หรืออาจเกี่ยวข้องกับการตรวจสอบคุณภาพที่ละเอียดและแม่นยำมากขึ้น ซึ่งเป็นเหตุผลที่ทำให้เวลาการผลิตยาวนานกว่าชิ้นส่วนอื่น

จากภาพรวมของข้อมูลในตารางนี้ การกำหนดเวลาผลิตที่มีความสม่ำเสมอ สำหรับชิ้นส่วน lower die และ heater

system จะช่วยให้การวางแผนการผลิตเป็นไปได้อย่างมีประสิทธิภาพ เนื่องจากมีความคาดเดาได้และไม่ซับซ้อนจนเกินไป ทำให้สามารถจัดสรรทรัพยากรและเครื่องมือได้ดีขึ้น ในทางตรงกันข้าม upper die ที่ต้องใช้เวลาในการผลิต 7 วัน ต่อชิ้นนั้นสะท้อนถึงระดับความซับซ้อนสูงในกระบวนการผลิต โดยอาจมีความต้องการการปรับแต่งที่ละเอียดหรือการตรวจสอบคุณภาพที่เข้มงวด ทำให้การวางแผนการใช้เครื่อง CNC และการจัดการทรัพยากรสำหรับการผลิตชิ้นส่วนนี้ต้องคำนึงถึงความแตกต่างในระยะเวลาในการผลิตอย่างรอบคอบ การวางแผนและการจัดการที่ดีสำหรับแต่ละประเภทชิ้นส่วนช่วยให้กระบวนการผลิตเป็นไปตามแผนที่กำหนดได้อย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งสามารถทำให้กระบวนการผลิตในโรงงานเกิดความสมดุลและมีการจัดสรรทรัพยากรได้อย่างเหมาะสม

ตารางที่ 10 ลำดับการทำงานของเครื่องจักรที่ 3 เมื่อจัดตามกฎ SPT

ลำดับ	งาน <i>j</i>	ชื่อชิ้นส่วน	เวลาในการผลิตบนเครื่อง CNC (วัน)
1	1	base upper	3
2	2	base upper	3
3	3	base upper	3
4	4	base upper	3
5	13	structure upper	4
6	14	structure upper	4
7	15	structure upper	4
8	16	structure Lower	4
9	17	structure Lower	4
10	18	structure Lower	4
11	19	structure Lower	4
12	20	structure Lower	4
13	36	heater system	4
14	38	heater system	4

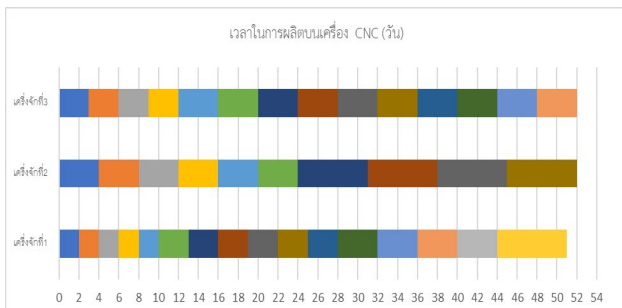
จากตารางที่ 10 นำเสนอเกี่ยวกับการผลิตชิ้นส่วนต่าง ๆ โดยใช้เครื่อง CNC จะเห็นได้ว่า ชิ้นส่วน base upper มีทั้งหมด 4 งาน ที่ใช้เวลาในการผลิต 3 วันต่อชิ้น ซึ่งเป็นระยะเวลาที่ค่อนข้างสั้นเมื่อเทียบกับชิ้นส่วนประเภทอื่น ๆ ในตารางนี้ การผลิตที่ใช้เวลาเท่ากันในทุกชิ้นส่วนสะท้อนถึงกระบวนการที่ไม่ซับซ้อนมากนักและอาจเกี่ยวข้องกับการตั้งค่าเครื่องจักรที่ง่ายกว่า ทำให้การวางแผนการผลิตและการจัดสรรทรัพยากรเป็นไปได้อย่างมีประสิทธิภาพ นอกจากนี้การผลิตที่ใช้เวลา 3 วัน ยังสามารถคำนวณได้ง่ายและเหมาะสมสำหรับการผลิตจำนวนมากในระยะเวลา

สั้น ๆ ในขณะที่ structure upper และ structure lower ซึ่งมีจำนวนงานต่างกัน 3 งานและ 5 งานตามลำดับ ทั้งสองประเภทนี้ใช้เวลาในการผลิต 4 วันต่อชิ้น ซึ่งแสดงถึงระดับความซับซ้อนที่สูงขึ้นเมื่อเทียบกับ base upper โดยการใช้เวลาในการผลิตเท่ากันในชิ้นส่วนเหล่านี้จะหมายความว่ากระบวนการผลิตมีความคล้ายคลึงกัน ไม่ว่าจะเป็นการตั้งค่าเครื่องจักร การตรวจสอบคุณภาพ หรือขั้นตอนการผลิตที่มีความละเอียดและซับซ้อนมากขึ้น อย่างไรก็ตาม structure lower มีจำนวนงานมากกว่า structure upper ทำให้การจัดการทรัพยากรและการ

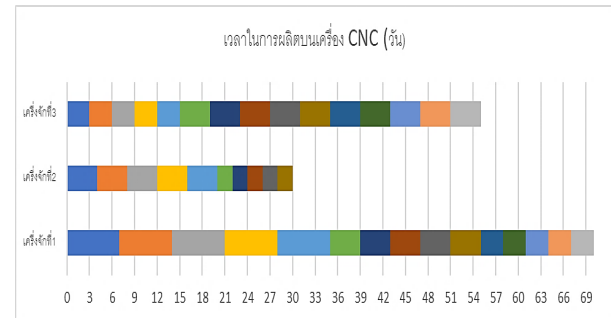
วางแผนการผลิตในส่วนนี้อาจต้องใช้เวลาครอบคลุมมากขึ้น เนื่องจากจำนวนงานที่มากขึ้นอาจทำให้การกระจายงานระหว่างเครื่อง CNC อาจส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพในการผลิตโดยรวม ส่วนของ heater system ซึ่งมีทั้งหมด 2 งาน และใช้เวลาในการผลิต 4 วันต่อชิ้น ก็มีลักษณะการผลิตที่คล้ายกับ structure upper และ structure lower โดยใช้เวลาในการผลิตเท่ากัน การผลิตชิ้นส่วนเหล่านี้มีระยะเวลาในการดำเนินงานที่สม่ำเสมอ แต่อาจมีข้อพิจารณาในด้านการใช้เครื่อง CNC ที่ต้องคำนึงถึงการวางแผนทรัพยากรให้เหมาะสม โดยไม่ให้เกิดการขัดแย้งหรือแออัดในกระบวนการผลิต เนื่องจากมีการใช้เวลาในการผลิตที่ค่อนข้างใกล้เคียงกัน โดยรวมแล้ว ตารางนี้แสดงให้เห็นถึง การบริหารจัดการเวลาการผลิต ที่มีความสม่ำเสมอในบางประเภทของชิ้นส่วน เช่น base upper ที่ใช้เวลา 3 วัน และชิ้นส่วนอื่น ๆ ที่ใช้เวลา 4 วัน สำหรับ structure upper, structure lower, และ heater system ซึ่งการตั้งเวลาในการผลิตที่เท่ากันในหลายชิ้นส่วนช่วยให้สามารถวางแผนและจัดสรรทรัพยากรได้ง่ายขึ้น ทั้งนี้การใช้เวลาผลิตที่สม่ำเสมอช่วยให้การผลิตเป็นไปตามแผนที่กำหนด แต่ในขณะเดียวกันก็ต้องพิจารณาถึงความแตกต่างในจำนวนงานที่มีผลต่อการจัดสรรเครื่อง CNC และการบริหารทรัพยากร การตัดสินใจเหล่านี้มีผลกระทบต่อประสิทธิภาพและผลลัพธ์สุดท้ายของกระบวนการผลิตในโรงงานอย่างมาก

4. ผลการทดลองและเสนอแนะ

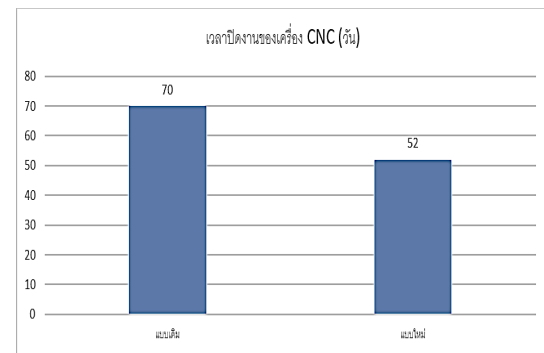
เปรียบเทียบการผลิตแบบเดิมกับแบบที่มีการผลิตที่มีการมอบหมายงาน เมื่อนำวิธีการผลิตแบบเดิมที่ไม่มีมอบหมายงานที่เป็นระบบ ใช้ประสบการณ์และความเคยชินของพนักงานเป็นผู้ตัดสินใจมาเปรียบกับการใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์และการกระจายงาน STP มาจัดลำดับการทำงาน โดยเป็นการผลิตงาน 5 คำสั่งซื้อเท่ากันพบว่า การผลิตที่มีการมอบหมายงานจะมีวันปิดงานของระบบอยู่ที่ 52 วัน ดังภาพที่ 9 ในขณะที่การมอบหมายงานแบบเดิมจะมีวันปิดงานของระบบอยู่ที่ 70 วัน ดังภาพที่ 10 และแสดงผลการเปรียบเทียบการปิดงานของเครื่อง CNC วิธีเดิมกับวิธีใหม่ ดังภาพที่ 11 แสดงผลการเปรียบเทียบเวลารวมในการทำงานของเครื่อง CNC ดังภาพที่ 12 รวมถึงการเปรียบเทียบต้นทุนแรงงานในการผลิตแบบเดิม กับการผลิตแบบใหม่ ดังภาพที่ 13



ภาพที่ 9 เวลาในการผลิตแบบดั้งเดิม

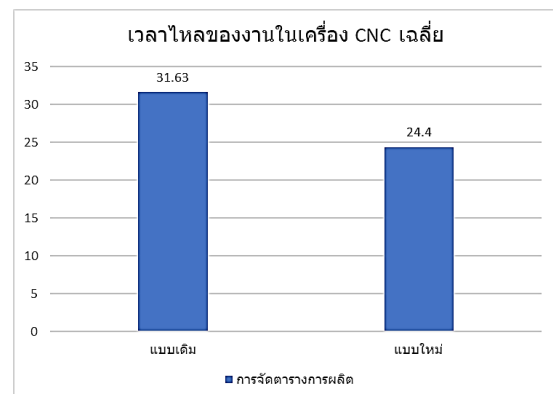


ภาพที่ 10 เวลาในการผลิตแบบใหม่



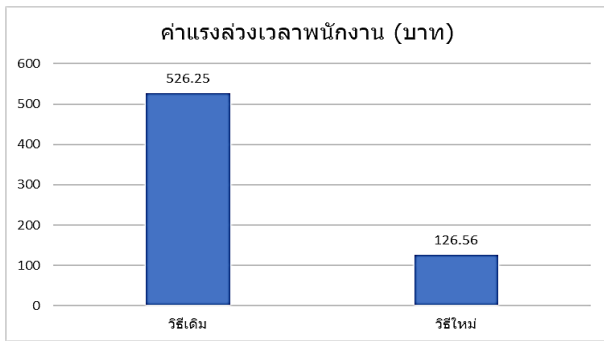
ภาพที่ 11 กราฟแสดงการเปรียบเทียบระหว่างเวลาการปิดงานของการผลิตแบบเดิมกับเวลาในการผลิตแบบใหม่

จากภาพที่ 11 เมื่อเปรียบเทียบระยะเวลาปิดงานแบบดั้งเดิมกับแบบใหม่ที่น่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์มาประยุกต์ใช้พบว่าเวลาแตกต่างกัน 18 วัน คิดเป็นร้อยละ 25.71



ภาพที่ 12 กราฟแสดงการเปรียบเทียบเวลาไหลของงานในเครื่อง CNC เฉลี่ยระหว่างการผลิตแบบเดิมกับแบบใหม่

จากภาพที่ 12 พบว่าเวลาไหลของงานในเครื่อง CNC เฉลี่ยของการทำงานแบบใหม่มีเวลาไหล 24.4 วัน และเวลาไหลของงานในเครื่อง CNC เฉลี่ยของการทำงานแบบเดิมมีเวลาไหล 31.63 วันแตกต่างกัน 7.23 วัน คิดเป็นร้อยละ 22.85



ภาพที่ 13 กราฟแสดงการเปรียบเทียบระหว่างต้นทุนการทำงาน
ล่วงเวลาแรงงานการผลิตแบบเดิมกับการผลิตแบบใหม่

จากภาพที่ 13 เมื่อเปรียบเทียบต้นทุนการทำงาน
ล่วงเวลาของแรงงานจากการผลิตแบบเดิม พบว่ามีการทำงาน
ล่วงเวลาของพนักงาน 2 คน เกินจากเวลาทำงานปกติ 3 ชั่วโมงต่อ
คน โดยค่าล่วงเวลาคิดเป็น 1.5 เท่าต่อชั่วโมง ของค่าแรงพนักงาน
ในปัจจุบัน ซึ่งมีค่าเท่ากับ 506.25 บาท ในส่วนต้นทุนแรงงานจาก
การผลิตแบบใหม่ พบว่ามีการทำงานล่วงเวลาของพนักงาน 1 คน
เกินจากเวลาทำงานปกติ 1 ชั่วโมง 30 นาที คิดเป็น 126.56 มี
ความแตกต่าง 379.69 บาท คิดเป็นร้อยละ 75 ดังนั้นเมื่อ
เปรียบเทียบกันระหว่างการจัดตารางการผลิตแบบใหม่ที่มีการ
มอบหมายงานด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และกฎการ
จ่ายงาน STP มาจัดลำดับการทำงานจะมีเวลาปิดงานที่เร็วกว่า
การจัดตารางการผลิตแบบเดิม โดยคิดเป็นร้อยละ 25.71 เวลา
ไหลของงานในเครื่อง CNC เฉลี่ยที่น้อยกว่า โดยคิดเป็นร้อยละ
22.85 และค่าแรงล่วงเวลาพนักงานจากการจัดตารางการผลิต
แบบวิธีใหม่น้อยกว่าวิธีเดิมร้อยละ 75 ดังตารางที่ 11

ตารางที่ 11 การเปรียบเทียบเวลาวิธีเดิมกับวิธีใหม่

การเปรียบเทียบ	วิธีเดิม	วิธีใหม่	เปรียบเทียบ (%)
เวลาปิดงาน (วัน)	70	52	25.71
เวลาไหลของงาน (วัน)	31.63	24.4	22.85
ค่าแรงล่วงเวลา พนักงาน (บาท)	526.25	379.69	75.00

การจัดตารางการผลิตแบบใหม่ยังช่วยให้ทราบ เวลา
เสร็จสิ้นงานอย่างชัดเจน ซึ่งเป็นสิ่งสำคัญในการวางแผนการส่ง
มอบงานให้แก่ลูกค้า โดยการทราบเวลาที่แน่นอนจะช่วยให้
สามารถ กำหนดเวลาการส่งมอบงานได้อย่างแม่นยำและเป็น
ระเบียบ ส่งผลให้มีการจัดการที่ดีขึ้นในด้านการตอบสนองต่อ
ความต้องการของลูกค้า และสามารถ วางแผนการผลิต ได้ตาม
ความต้องการของลูกค้าในแต่ละรอบได้อย่างมีประสิทธิภาพ การ
ที่สามารถกำหนดเวลาส่งมอบงานได้อย่างแน่นอนยังช่วยลดความ
เสี่ยงในการเกิดความล่าช้าในการส่งมอบ ซึ่งเป็นสิ่งที่มีความสำคัญ
ในการรักษาความสัมพันธ์ที่ดีระหว่างผู้ผลิตและลูกค้า อีกทั้งการ
จัดตารางการผลิตในลักษณะนี้ยังเป็นการ กระจายภาระงาน
ให้กับเครื่องจักรอย่างเท่าเทียมและสมดุล มากยิ่งขึ้น เมื่อสามารถ

กำหนดเวลาในการผลิตที่ชัดเจนได้แล้ว ทำให้สามารถ จัดสรรการ
ใช้เครื่อง CNC ให้เกิดการใช้งานอย่างมีประสิทธิภาพสูงสุด โดย
ไม่ให้เครื่องจักรทำงานหนักเกินไป หรือเกิดการว่างงานไปโดย
เปล่าประโยชน์ การกระจายภาระงานให้กับเครื่องจักรอย่าง
เหมาะสมจะช่วยให้เครื่องจักรทุกตัวทำงานได้อย่างเต็มศักยภาพ
เพิ่มประสิทธิภาพในการผลิต และลดระยะเวลาการผลิตโดยรวม
การใช้ตารางการผลิตที่มีการจัดการเวลาอย่างรอบคอบและมีการ
กระจายงานให้เหมาะสมยังก่อให้เกิดการลดต้นทุนในการผลิต
เพราะเมื่อเครื่องจักรทำงานเต็มประสิทธิภาพและไม่เกิดช่วงเวลา
หยุดทำงานหรือ ขาดการใช้งานจะช่วยลดค่าใช้จ่ายที่ไม่จำเป็นลง
ได้ นอกจากนี้ยังช่วยในการคาดการณ์ปริมาณการผลิตในแต่ละ
ช่วงเวลา ซึ่งทำให้ผู้บริหารสามารถตัดสินใจในการจัดการ
ทรัพยากรและการวางแผนการผลิตในรอบถัดไปได้้อย่างมี
ประสิทธิภาพ โดยรวมแล้วการจัดตารางการผลิตแบบใหม่ทำให้
การผลิตมีความเป็นระเบียบมากขึ้น สามารถควบคุมเวลาในการ
ผลิตได้ดีขึ้น ช่วยให้การบริหารทรัพยากร และการควบคุม
เครื่องจักร เป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพเกิดผลดีทั้งในด้านการลด
ต้นทุนการผลิต และการตอบสนองความต้องการของลูกค้าได้
อย่างตรงเวลาและมีคุณภาพให้กับเครื่องจักรได้เท่าเทียมมาก
ยิ่งขึ้นเกิดการใช้งานเครื่องจักรอย่างมีประสิทธิภาพ

ข้อเสนอแนะในงานวิจัย

1. การมอบหมายงานโดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ด้วย
สมการและเงื่อนไขอาจจะยังไม่ใช่วิธีที่ดีที่สุดผู้นำไปใช้ควร
ทดลองหาวิธีการใหม่ที่เหมาะสมมากกว่านี้ มีการนำเอา
เทคโนโลยี Artificial Intelligence (AI) หรือ Machine
Learning มาใช้ในการจัดตารางการผลิต
2. ควรมีผลการทดลองทางด้านเศรษฐศาสตร์เพิ่มเติม เช่น การ
ลดต้นทุน หรือผลกระทบต่อกำลังคน เป็นต้น
3. การควรมีเปรียบเทียบการจัดลำดับการผลิตด้วยวิธีอื่น
เพิ่มเติม เช่น LPT (Longest Processing Time), EDD
(Earliest Due Date) เป็นต้น

5. เอกสารอ้างอิง

- [1] ภควัต เลาหมนต์. การหาต้นทุนการเก็บเกี่ยวที่ต่ำที่สุด
สำหรับปัญหาการเดินรถเก็บเกี่ยวข้าว. ปริญญาวิศวกรรม
ศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการและ
ระบบการผลิต, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัย
เทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี; 2565.
- [2] สาวิตรี สิงห์ปาน. การจัดตารางการผลิตเครื่องพิมพ์สีใน
พลาสติกบรรจุภัณฑ์. ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมระบบการผลิต, คณะวิศวกรรมศาสตร์,
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี; 2556.
- [3] อภันตรี สาหร่าย, การจัดตารางการผลิตเลนส์ใน
กระบวนการ Anti-Reflection. ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหา
บัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมระบบการผลิต, คณะ

- วิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี; 2552.
- [4] พงษ์ธาดา ศุภกิจจักร. การเปรียบเทียบการจัดตารางการผลิตเครื่องจักรแบบขนานที่ไม่สัมพันธ์กันโดยใช้โปรแกรมการจัดตารางการผลิต และการใช้แบบจำลองมอบหมายงาน. ปรินญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาการจัดการงานวิศวกรรม, ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการและการจัดการ, มหาวิทยาลัยศิลปากร; 2556.
- [5] พรชัย ยินดี. แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับปัญหาการจัดตารางการเรียนการสอนที่มีการจัดสมดุลภาระงาน. ปรินญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมระบบการผลิต, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี; 2557.
- [6] จักรวาล คุณะดิลก และรดาธร กิตติญาณนนท์. วารสารช่างงานวิศวกรรมอุตสาหการไทย. 2564 ; 7(2) : หน้า 75 - 89.
- [7] ปาณิธี เรืองศรี. การจัดตารางการบำรุงรักษาแม่พิมพ์พลาสติกเพื่อลดความล่าช้าในการส่งมอบ. ปรินญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการและระบบการผลิต, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี; 2565.
- [8] ยอดดวงใจ นาคปฐม. การจัดตารางการผลิตแบบตามสั่งสำหรับอุตสาหกรรมสิ่งทอ,วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาการจัดการงานวิศวกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร, 2553.
- [9] วิสพล ธารณา, ฐิติมา ชูกิจรุ่งโรจน์, มธรรดา วิริยะพงษ์, เตือนใจ สมบูรณ์วิวัฒน์, ช่อแก้ว จตุรานนท์, เจริญชัย โขมพัตรภรณ์, การจัดตารางการผลิตของเครื่องพิมพ์บรรจุภัณฑ์กล่องกระดาษลูกฟูก, การประชุมวิชาการช่างงานวิศวกรรมอุตสาหการ, 2555:หน้า 339-345
- [10] นมิตา ศรีผล, การจัดตารางการผลิตเพื่อปรับปรุงปริมาณงานล่าช้า: กรณีศึกษา, การค้นคว้าอิสระปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาการพัฒนางานอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์, 2560

การวางแผนการผลิตด้วยการประยุกต์โปรแกรมเชิงเส้น กรณีศึกษาโรงงานผลิตโฟมบรรจุอาหาร

Production Planning Optimization Using Linear Programming: A Case Study of a Packaging Foam Factory

สาวิตรี พิบูลศิลป์^{1*} คทาวิธ เกษสระ² นพคุณ แสงเขียว² และพีรพงศ์ ภควณิช²
Sawitree Phieboolsilapa^{1*} Kathawuth Kessara² Noppakun Sangkhiew² Peerapong Pakawanich²

¹สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีปทุมวัน

²สาขาวิชาการจัดการงานวิศวกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร

^{1*}Division of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Pathumwan Institute of Technology

²Engineering Management Program, Department of Industrial Engineering and Management, Faculty of Engineering and Industrial Technology, Silpakorn University

* Corresponding Author. E-mail: Sawitree.p@pit.ac.th

Received: 24-02-2025 Revised: 14-11-2025 Accepted: 20-11-2025

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาแนวทางการวางแผนการผลิตที่เหมาะสมสำหรับโรงงานผลิตโฟมและพลาสติกบรรจุภัณฑ์ โดยใช้แบบจำลองโปรแกรมเชิงเส้น (Linear Programming: LP) ร่วมกับการวิเคราะห์สินค้าคงคลังแบบเอบีซี (ABC Analysis) เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการจัดการสินค้าคงคลังและลดต้นทุนการผลิต การศึกษานี้ใช้ข้อมูลย้อนหลัง 1 ปี ประกอบด้วยข้อมูลด้านต้นทุนการผลิต กำลังการผลิต และต้นทุนคงคลัง จากการวิเคราะห์พบว่าแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นสามารถลดต้นทุนสินค้าคงคลังได้ร้อยละ 86.71 เมื่อเทียบกับวิธีเดิม ผลการวิจัยแสดงให้เห็นว่า การบูรณาการ ABC Analysis กับแบบจำลองเชิงเส้นที่ออกแบบเฉพาะบริบทของอุตสาหกรรมโฟมบรรจุอาหาร ช่วยให้การจัดการคลังสินค้ามีประสิทธิภาพมากขึ้นและสามารถประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมที่มีลักษณะการผลิตตามคำสั่งซื้อได้ อย่างไรก็ตาม การวิจัยนี้ยังมีข้อจำกัดในด้านการใช้ข้อมูลย้อนหลังที่ไม่ครอบคลุมความผันผวนของความต้องการลูกค้าในอนาคต ดังนั้นงานวิจัยต่อไปควรพิจารณาเพิ่มการพยากรณ์ความต้องการ (Demand Forecasting) และการวิเคราะห์แบบหลายเป้าหมาย (Multi-objective Optimization) เพื่อเพิ่มความยืดหยุ่นในการวางแผนการผลิต

คำสำคัญ การวางแผนการผลิต, แบบจำลองโปรแกรมเชิงเส้น, การวิเคราะห์แบบเอบีซี

ABSTRACT

This research aims to develop an appropriate production planning approach for a foam and plastic packaging manufacturing company by integrating Linear Programming (LP) with ABC Analysis to enhance inventory management efficiency and reduce production costs. The study utilized one-year historical data, including production costs, production capacity, and inventory holding costs. The results revealed that the proposed model could reduce inventory costs by 86.71% compared with the company's previous planning method. The integration of ABC Analysis with the Linear Programming model tailored to the specific context of the food packaging foam industry significantly improved warehouse management and production planning efficiency. Moreover, this approach can be applied to other make-to-order industries with similar production characteristics. However, this study is limited by the use of historical data that do not fully capture the fluctuations in future customer demand. Therefore, future research should consider incorporating Demand Forecasting and Multi-Objective Optimization approaches to enhance the flexibility and accuracy of production planning under real-world conditions.

Keyword: Production Planning, Linear Programming, ABC Analysis.

1. บทนำ

อุตสาหกรรมปิโตรเคมีเป็นอุตสาหกรรมขนาดใหญ่ที่มีความซับซ้อนในกระบวนการผลิต ผลิตภัณฑ์ปิโตรเคมีชั้นปลายหรือปิโตรเคมีขั้นที่ 4 ซึ่งเป็นวัตถุดิบสำคัญในอุตสาหกรรมอื่น ๆ

สามารถแบ่งออกได้เป็น 4 ประเภทหลัก ได้แก่ เม็ดพลาสติก เส้นใยสังเคราะห์ ยางสังเคราะห์ และสารเคลือบผิวและกาว [1] ทั้งนี้แนวโน้มเศรษฐกิจโลกในช่วงปี 2567–2569 ตามการคาดการณ์ของกองทุนการเงินระหว่างประเทศ (IMF) จะขยายตัวเฉลี่ยเพียงร้อยละ 3.2 ต่อปี ขณะที่ประเทศจีน ซึ่งเป็นผู้บริโภคมลิตภัณฑ์ปี

โตรเคมีรายใหญ่ที่สุดของโลก คาดว่าจะเติบโตเฉลี่ยเพียงร้อยละ 4.2 ต่อปี ลดลงจากค่าเฉลี่ยร้อยละ 7.7 ต่อปีในช่วงปี 2553–2562 [2] ปัจจัยดังกล่าวส่งผลให้อุตสาหกรรมปิโตรเคมีและอุตสาหกรรมต่อเนื่อง เช่น อุตสาหกรรมบรรจุภัณฑ์พลาสติก ต้องเผชิญแรงกดดันจากกำลังการผลิตส่วนเกิน ขณะที่อุปสงค์ฟื้นตัวช้า การบริหารจัดการสินค้าคงคลังและการควบคุมต้นทุนการผลิตจึงเป็นปัจจัยสำคัญในการรักษาความสามารถในการแข่งขันของผู้ประกอบการ

บริษัทกรณีศึกษาซึ่งดำเนินธุรกิจผลิตบรรจุภัณฑ์โฟมและพลาสติก ได้มุ่งเน้นการพัฒนากระบวนการผลิตเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพและตอบสนองความต้องการของลูกค้า อย่างไรก็ตาม ปัญหาที่พบคือ ต้นทุนสินค้าคงคลังของสินค้าสำเร็จรูปมีค่าสูงและขาดระบบบริหารจัดการสินค้าคงคลังที่เชื่อมโยงกับแผนการผลิตอย่างเป็นระบบ ผู้วิจัยจึงมีความสนใจในการศึกษาวิธีลดต้นทุนการจัดเก็บสินค้า เพื่อใช้เป็นแนวทางปรับปรุงกระบวนการวางแผนการผลิตให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น

อุตสาหกรรมบรรจุภัณฑ์โฟมและพลาสติกเป็นอุตสาหกรรมที่มีการแข่งขันสูงและต้องการการจัดการทรัพยากรอย่างมีประสิทธิภาพ การลดต้นทุนสินค้าคงคลังและการเพิ่มความแม่นยำของแผนการผลิตจึงเป็นหัวใจสำคัญในการดำเนินธุรกิจงานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นการประยุกต์ใช้แบบจำลองโปรแกรมเชิงเส้น (Linear Programming: LP) ร่วมกับการวิเคราะห์สินค้าคงคลังแบบเอบีซี (ABC Analysis) เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการบริหารสินค้าคงคลังและวางแผนการผลิตให้เหมาะสมกับทรัพยากรที่มีอยู่

จากการทบทวนวรรณกรรมที่ผ่านมา พบว่ามีการประยุกต์ใช้ ABC Analysis และ Linear Programming ในหลากหลายบริษัท เช่น งานของ วรุฒน์ และคณะ [3] ที่นำ ABC Analysis และโปรแกรมเชิงเส้นจำนวนเต็มแบบทวิภาค (Binary Integer Linear Programming) มาปรับปรุงตำแหน่งจัดเก็บสินค้าในคลังสินค้า ช่วยลดเวลาเคลื่อนย้ายสินค้าได้อย่างมีนัยสำคัญ งานของ จีราดา [4] ที่เปรียบเทียบการวางแผนการผลิตระหว่างวิธี Heijunka และแบบจำลองเชิงเส้น พบว่าแบบจำลองเชิงเส้นสามารถลดต้นทุนรวมได้ร้อยละ 15 ขณะที่ Heijunka ให้ความผันผวนของแผนการผลิตต่ำกว่า นอกจากนี้ อรรถเดช และคณะ [5] ได้ใช้หลักการ Association Rules ร่วมกับโปรแกรมเชิงเส้น เพื่อหาตำแหน่งจัดวางสินค้าที่เหมาะสมที่สุดภายในคลังสินค้า ส่วน ปุณณวิทย์ และคณะ [6] ใช้แบบจำลองเชิงเส้นจำนวนเต็มแบบผสม (Mixed Integer Linear Programming) ในการปรับเส้นทางการขนส่งอาหารสัตว์ให้เกิดต้นทุนต่ำสุด ชาริตาร์ และคณะ [7] ประยุกต์กำหนดการเชิงเส้นจำนวนเต็มในการจัดตารางการทำงานของพนักงานเพื่อลดจำนวนพนักงานและต้นทุนค่าจ้าง ขณะที่ จินตพร และคณะ [8] ศึกษาวิธีการพยากรณ์โดยใช้การปรับเรียบเอ็กซ์โปเนนเชียลแบบ Holt–Winter เพื่อหาช่วงเวลาการพยากรณ์ที่เหมาะสมที่สุดในกระบวนการผลิต และ อาทร [9] ศึกษาการจัดการสินค้าคงคลังในโรงงานผลิตผ้าเบรก พบว่า

สามารถลดเวลาในการทำงานลงได้มากกว่า 60% สุดท้าย Shek Ahmed et al. [10] ได้เสนอการใช้การวิเคราะห์ความไว

(Sensitivity Analysis) เพื่อปรับการตัดสินใจในการผลิตหรือจัดซื้อชิ้นส่วน โดยมุ่งลดต้นทุนรวมของกระบวนการผลิต

จากการทบทวนวรรณกรรม [3]–[10] จะเห็นได้ว่าการใช้โปรแกรมเชิงเส้นถูกนำไปประยุกต์ในอุตสาหกรรมหลายประเภท เช่น สิ่งทอ ยานยนต์ และอาหารสัตว์ แต่ยังไม่มีการวิจัยที่ศึกษาการประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมโพลิเมอร์อาหาร ซึ่งมีข้อจำกัดเฉพาะด้านพื้นที่จัดเก็บ ความหลากหลายของผลิตภัณฑ์และความผันผวนตามฤดูกาล งานวิจัยนี้จึงมุ่งเติมเต็มช่องว่างดังกล่าว โดยเสนอแบบจำลองการวางแผนการผลิตที่เหมาะสมกับบริบทของอุตสาหกรรมโพลิเมอร์อาหาร เพื่อให้ผลลัพธ์ของแบบจำลองมีความน่าเชื่อถือและสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในทางปฏิบัติ ผู้วิจัยจึงเพิ่มการวิเคราะห์ความไวของแบบจำลองเพื่อประเมินการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรที่มีผลต่อต้นทุนรวมของระบบการผลิต โดยมีสมมติฐานการวิจัยว่า การใช้แบบจำลองโปรแกรมเชิงเส้นร่วมกับการวิเคราะห์แบบเอบีซี (ABC Analysis) จะช่วยลดต้นทุนสินค้าคงคลังได้อย่างมีนัยสำคัญ ไม่น้อยกว่าร้อยละ 30 เมื่อเทียบกับวิธีการวางแผนการผลิตแบบเดิมของบริษัทกรณีศึกษา

2. วัตถุประสงค์การวิจัย

การวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ดังต่อไปนี้

2.1 เพื่อศึกษาสภาพปัญหาและปัจจัยที่ส่งผลต่อต้นทุนสินค้าคงคลัง และความไม่แม่นยำของการวางแผนการผลิตในโรงงานผลิตโฟมและพลาสติกบรรจุภัณฑ์

2.2 เพื่อพัฒนาแนวทางการวางแผนการผลิตที่เหมาะสมโดยบูรณาการแบบจำลองโปรแกรมเชิงเส้นร่วมกับการวิเคราะห์สินค้าคงคลังแบบเอบีซี เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการจัดการสินค้าคงคลังและลดต้นทุนการผลิต

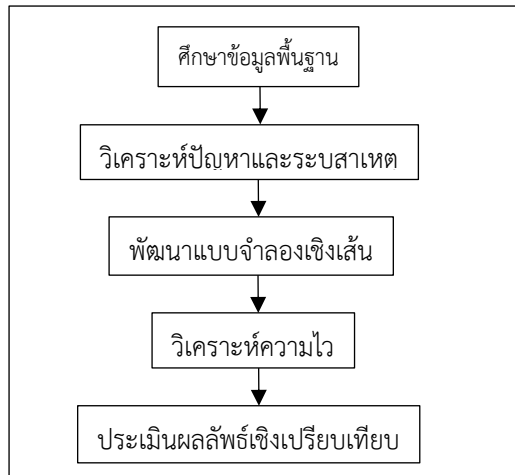
2.3 เพื่อประเมินผลการประยุกต์ใช้แนวทางดังกล่าวผ่านการเปรียบเทียบต้นทุนการผลิตและต้นทุนสินค้าคงคลัง ก่อนและหลังการนำแบบจำลองไปใช้

2.4 เพื่อเสนอแนวทางการจัดการสินค้าคงคลังและการวางแผนการผลิตที่สามารถนำไปประยุกต์ใช้กับผลิตภัณฑ์หรือสายการผลิตอื่นในองค์กรได้

3. วิธีการดำเนินงานวิจัย

การดำเนินงานวิจัยแบ่งออกเป็น 5 ขั้นตอนหลัก ได้แก่ 1) ศึกษาข้อมูลพื้นฐานของบริษัทกรณีศึกษา 2) วิเคราะห์ปัญหาและระบุสาเหตุที่ทำให้เกิดต้นทุนสินค้าคงคลังสูง 3) พัฒนาแบบจำลองเชิงเส้นเพื่อกำหนดปริมาณการผลิตที่เหมาะสม 4) เปรียบเทียบก่อนและหลังการปรับปรุง กระบวนการทั้งหมดแสดง

ดังภาพที่ 1 ขั้นตอนวิเคราะห์ความไวของแบบจำลอง 5) ประเมินผลลัพธ์เชิงการดำเนินงานวิจัย



ภาพที่ 1 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

3.1 ศึกษาข้อมูลพื้นฐานของบริษัทกรณีศึกษา

บริษัทกรณีศึกษาผลิตบรรจุภัณฑ์โฟมและถ้วยน้ำพลาสติกเป็นผลิตภัณฑ์หลัก ซึ่งทั้งสองผลิตภัณฑ์มีลำดับขั้นตอนการผลิตที่มีโครงสร้างคล้ายคลึงกัน โดยสามารถสรุปกระบวนการโดยรวมได้ในภาพที่ 2 แผนผังการไหลของกระบวนการผลิต

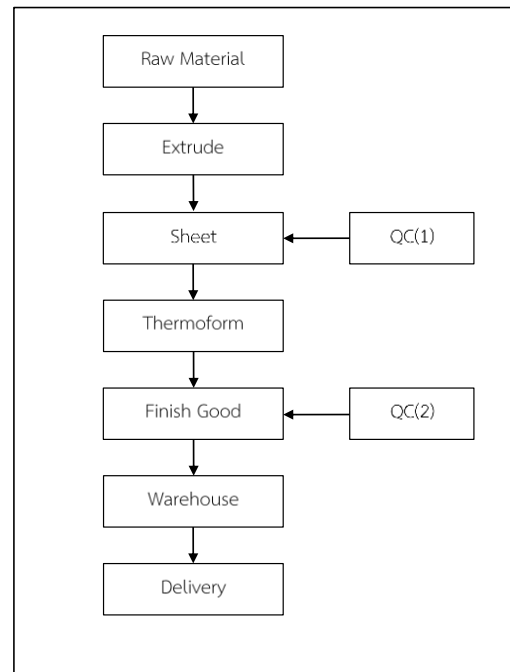
กระบวนการผลิตโฟมบรรจุภัณฑ์

เมื่อบริษัทได้รับคำสั่งซื้อ ฝ่ายวางแผนการผลิตจะจัดทำแผนการผลิตให้เพียงพอต่อการผลิตต่อวัน รวมทั้งเผื่อเวลาในการเปลี่ยนแม่พิมพ์ (mold) และปรับตั้งเครื่องจักร กระบวนการเริ่มจากการเปิดวัตถุดิบลักษณะเป็นผง มาหลอมและฉีดขึ้นเป็นแผ่นโฟม จากนั้นม้วนเป็นม้วนตามความหนาที่ต้องการ ก่อนขึ้นน้ำหนักและตรวจสอบคุณภาพ โดยมีการสุ่มตัวอย่างเพื่อตรวจสอบความหนาตามคำสั่งซื้อ จากนั้นจึงนำไปจัดเก็บในคลังสินค้ากึ่งสำเร็จรูป หากมีการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ ฝ่ายผลิตจะเบิกม้วนโฟมดังกล่าวมาป้อนขึ้นรูป ตรวจสอบคุณภาพอีกครั้ง แล้วบรรจุลงหีบห่อก่อนนำส่งเข้าคลังสินค้าสำเร็จรูปเพื่อรอการจัดส่งกระบวนการผลิตแก้วน้ำพลาสติก

กระบวนการผลิตเริ่มจากการผสมวัตถุดิบตามสูตร ผ่านขั้นตอนการรีด ตัดขอบ และรีดออกมาเป็นแผ่นพลาสติก จากนั้นตรวจสอบความหนาและน้ำหนักของแผ่นงานตามมาตรฐานการผลิต เมื่อเข้าสู่กระบวนการขึ้นรูป จะมีการป้อนขึ้นรูป ตรวจสอบคุณภาพบรรจุภัณฑ์ และในกรณีที่มีการพิมพ์ลาย จะตรวจสอบความคมชัดของสี ก่อนบรรจุลงหีบห่อและนำส่งเข้าคลังสินค้าสำเร็จรูป

3.2 รวบรวมและวิเคราะห์สภาพปัญหาปัจจุบัน จากการสำรวจพบปัญหาหลัก 2 ประเด็น ได้แก่ 1) ปริมาณสินค้าคงคลังสูง ส่งผลให้ต้นทุนจัดเก็บเพิ่มขึ้นและสูญเสียพื้นที่จัดเก็บผลิตภัณฑ์ใหม่ 2) การวางแผนการผลิตยังอาศัยการพยากรณ์ยอดขายย้อนหลัง และการวางแผนตามฤดูกาล (Seasonal Planning) ซึ่ง

ยังขาดการตรวจสอบความสอดคล้องระหว่างข้อมูลพยากรณ์กับการผลิตจริง



ภาพที่ 2 แผนผังการไหลของกระบวนการผลิต

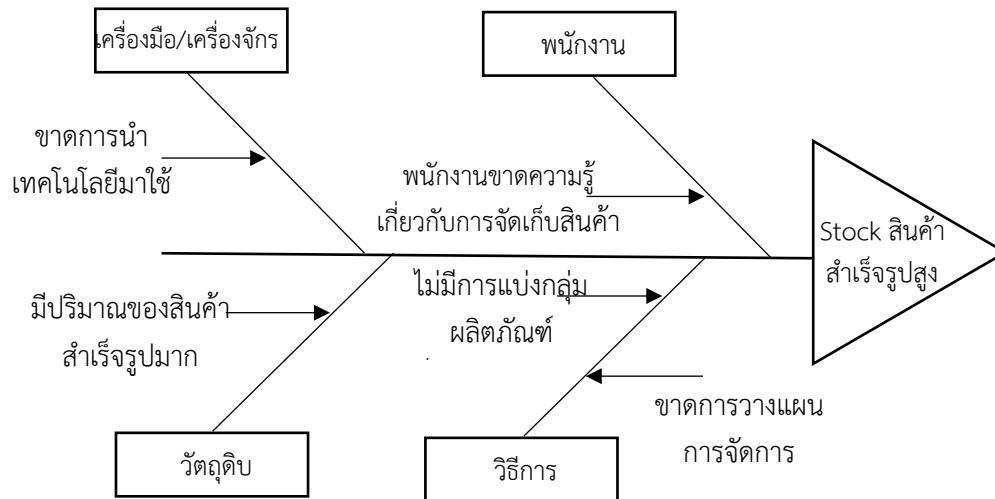
3.3 วิเคราะห์สาเหตุของปัญหา 1) ปัญหาด้านปริมาณการจัดเก็บสินค้าคงคลัง เกิดจากความหลากหลายของผลิตภัณฑ์ และการขาดระบบจัดกลุ่มสินค้าตามความถี่ในการหมุนเวียน ทำให้พื้นที่จัดเก็บไม่ถูกใช้ประโยชน์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ ดังนั้นผู้วิจัยได้เสนอให้ใช้ ABC Analysis เพื่อจัดกลุ่มสินค้าสำเร็จรูปและวัตถุดิบตามความถี่ในการหมุนเวียน พร้อมกำหนดปริมาณสินค้าคงคลังขั้นต่ำ (Safety Stock) ที่เหมาะสมสำหรับแต่ละกลุ่ม เพื่อป้องกันการเกิดสินค้าคงค้าง (Dead Stock) 2) ปัญหาด้านการวางแผนการผลิต จากการวิเคราะห์ผังก้างปลา ดังภาพที่ 3 และ 4 (Fishbone Diagram) พบว่า การพยากรณ์ยอดขายในปัจจุบันยังไม่ถูกนำไปเปรียบเทียบกับข้อมูลการผลิตจริง ทำให้ไม่สามารถประเมินความแม่นยำของการพยากรณ์ได้อย่างแท้จริง เพื่อแก้ไขปัญหานี้ ผู้วิจัยได้นำเสนอการใช้ โปรแกรมเชิงเส้นร่วมกับเครื่องมือ Solver ใน Microsoft Excel เพื่อหาปริมาณการผลิตที่เหมาะสมภายใต้ข้อจำกัดของบริษัท

3.4 การเก็บและวิเคราะห์ข้อมูลเพื่อพัฒนาแบบจำลอง ซึ่งการศึกษาครั้งนี้ใช้ข้อมูลยอดขายย้อนหลัง 12 เดือน (ปี 2565) เพื่อวิเคราะห์แนวโน้มการผลิตจริงและกำหนดแผนการผลิต โดยเน้นการแก้ไขปัญหาลหลัก 3 ประเด็น ได้แก่ 1) การลดสินค้าคงค้าง (Dead Stock) โดยจำหน่ายสินค้าหมุนเวียนช้าหรือไม่มีการเคลื่อนไหวเกิน 1 ปีให้กับผู้รับซื้อของเก่า 2) การจัดทำระบบ ABC Analysis เพื่อจัดกลุ่มสินค้าสำเร็จรูปและวัตถุดิบตามความถี่ในการหมุนเวียน 3) การนำข้อมูลจากสินค้ากลุ่ม A ซึ่งมีมูลค่าและการ

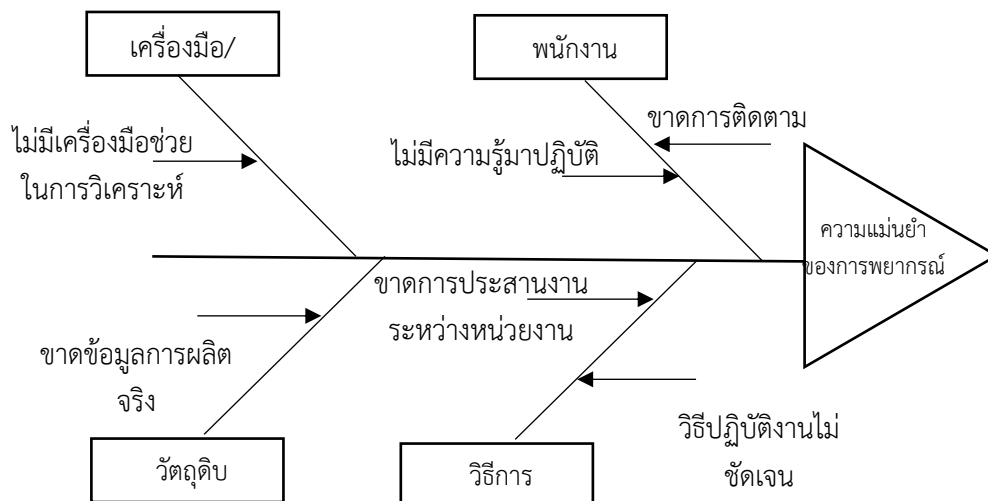
หมุนเวียนสูง มาพัฒนาแบบจำลองเชิงเส้นเพื่อวางแผนการผลิตที่เหมาะสม

3.5 การสร้างและวิเคราะห์แบบจำลองเชิงเส้น (Linear Programming Model) แบบจำลองเชิงเส้นที่พัฒนาขึ้นมีวัตถุประสงค์เพื่อลดต้นทุนรวมของการผลิตและการจัดเก็บสินค้าภายใต้ข้อจำกัดด้านกำลังการผลิต พื้นที่จัดเก็บ และปริมาณความต้องการของลูกค้า ข้อมูลต้นทุนและปริมาณการผลิตได้รับการตรวจสอบความถูกต้องจากฝ่ายบัญชีต้นทุนและฝ่ายผลิต เพื่อให้

แน่ใจว่าข้อมูลนำเข้ามีความถูกต้องและเป็นปัจจุบัน การคำนวณใช้ Microsoft Excel Solver เพื่อหาคำตอบที่เหมาะสมที่สุด พร้อมทั้งทำ การวิเคราะห์ความไว (Sensitivity Analysis) เพื่อประเมินผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงตัวแปรต่อผลลัพธ์ของแบบจำลอง



ภาพที่ 3 การวิเคราะห์ก้างปลาของปัญหาคลังสินค้า สินค้าสำเร็จรูปสูง



ภาพที่ 4 การวิเคราะห์ก้างปลาของปัญหา ความแม่นยำของการพยากรณ์

4.ผลการวิจัยและอภิปรายผล

จากข้อมูลที่เก็บรวบรวมและวิเคราะห์ย้อนหลัง 1 ปี พบแนวทางการปรับปรุงกระบวนการบริหารสินค้าคงคลังของบริษัทกรณีศึกษาได้ 3 แนวทางหลัก ดังนี้

4.1 การจัดการสินค้าคงคลัง บริษัทกรณีศึกษามีสินค้าสำเร็จรูปและวัตถุดิบบางส่วนที่ไม่มีการหมุนเวียนหรือหมุนเวียนช้า รวม 58 รายการ จากสินค้าทั้งหมด 127 รายการ แสดงดัง

ตารางที่ 1 ซึ่งคิดเป็นมูลค่า 1,980,257.25 บาท จากมูลค่าสินค้าคงคลังรวม 5,490,887.36 บาท หรือคิดเป็นร้อยละ 36.06 ของมูลค่าสินค้าคงคลังทั้งหมด ผู้วิจัยจึงเสนอให้บริษัทจำหน่ายสินค้ากลุ่มดังกล่าวให้กับผู้รับซื้อของเก่าหรือบริษัทอื่นๆ ในราคาต่ำ เพื่อลดปริมาณสินค้าคงคลังในคลัง การดำเนินการดังกล่าวช่วยลดทั้งพื้นที่จัดเก็บและต้นทุนการบริหารคลังสินค้า ทำให้คลังสินค้าสามารถจัดสรรพื้นที่ได้อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น

4.2 การวิเคราะห์สินค้าคงคลังด้วยวิธี ABC Analysis ภายหลังการกำจัดสินค้าคงคลังแล้ว ผู้วิจัยได้เสนอให้บริษัทจัดทำระบบบริหารสินค้าคงคลังเชิงปริมาณโดยใช้หลักการวิเคราะห์สินค้าคงคลังด้วย ABC Analysis เพื่อจำแนกความสำคัญของสินค้าตามมูลค่าการขายและปริมาณการหมุนเวียนต่อปี บริษัทได้เลือกผลิตภัณฑ์ ถ้วยน้ำพลาสติก เป็นกรณีศึกษา เนื่องจากเป็นสินค้าหลักของบริษัท มีปริมาณคงคลังสูงถึง 1,102,547.36 บาท หรือ 14,700.63 กิโลกรัม และใช้พื้นที่จัดเก็บมากที่สุด ผลการวิเคราะห์สามารถจำแนกสินค้าออกเป็น 3 กลุ่ม ได้แก่ กลุ่ม A 99 รายการ (มูลค่ารวม 80,656,212.93 บาท คิดเป็น 80% ของมูลค่าสินค้าคงคลังทั้งหมด) กลุ่ม B 96 รายการ และกลุ่ม C 56 รายการ ดังแสดงในตารางที่ 2 ตัวอย่างผลการวิเคราะห์สอคล้อง

กับหลักการ Pareto 50:30:20 ซึ่งชี้ว่าการจัดการสินค้าจำนวนน้อยแต่มีมูลค่ารวมสูงจะให้ผลลัพธ์เชิงประสิทธิภาพสูงสุด

4.3 การวางแผนการผลิตด้วยโปรแกรมเชิงเส้น จากข้อมูลในปี 2565 ผู้วิจัยได้นำข้อมูลของสินค้ากลุ่ม A ทั้ง 99 รายการ มาวิเคราะห์และจัดทำแบบจำลองโปรแกรมเชิงเส้นเพื่อวางแผนการผลิต โดยใช้ข้อมูลข้อจำกัดหลัก เช่น พื้นที่จัดเก็บ ต้นทุนคงคลัง ราคาต่อหน่วย (บาท/กิโลกรัม) และกำลังการผลิต เพื่อหาค่าใช้จ่ายรวมต่ำสุดและปริมาณการผลิตที่เหมาะสมในแต่ละช่วงเวลา โดยมีสมมติฐานการวิจัยว่า การใช้แบบจำลองโปรแกรมเชิงเส้นร่วมกับการวิเคราะห์แบบ ABC Analysis จะช่วยลดต้นทุนสินค้าคงคลังได้อย่างมีนัยสำคัญ ไม่น้อยกว่าร้อยละ 30 เมื่อเทียบกับวิธีการวางแผนการผลิตแบบเดิมของบริษัทกรณีศึกษา

ตารางที่ 1 ตัวอย่างรายการสินค้าคงคลัง

รหัสสินค้า	รายละเอียดสินค้า
PE 301	Sample ALUROLL (1030 mmx200m) KGS
PE 302	Sample METALROLL (910 mmx200m) KGS
G01 DIN 16 OZ	แก้วใส 16 OZ
G02 DIN 22 OZ	แก้วใส 22 OZ
G03 1 OZ	ถ้วยจืด 1 OZ สีชมพู
FO-01-L-20	โฟมตาข่ายเส้นใหญ่ 20 ซม
FO-02-L-17	โฟมตาข่ายเส้นใหญ่ 17 ซม
FO-03-L-13	โฟมตาข่ายเส้นเล็ก 13 ซม
FO-01-M13	โฟมตาข่ายเส้นกลาง 13 ซม
FO-01-S22	โฟมตาข่ายเส้นเล็ก 22 ซม
FO-01-S24	โฟมตาข่ายเส้นเล็ก 24 ซม

ตารางที่ 2 ตัวอย่างการจัดการรายการถ้วยน้ำสำหรับสินค้าความสำคัญกลุ่ม A

รายการ	ปริมาณการจัดเก็บ	ราคาต่อหน่วย (บาท/กก.)	จำนวนเงิน	สะสม	ร้อยละ	ร้อยละสะสม	กลุ่ม
6-02-1-PP-065-685	11933	98.64707907	1,177,155.59	1,177,155.59	0.938188504	0.938188504	A
4-01-PS-302	11895	98.33224631	1,169,662.07	2,346,817.66	0.932216194	1.870404698	A
Z-02-BBLA-13	11822	97.73005168	1,155,364.67	3,502,182.34	0.920821222	2.79122592	A
4-01-PS-104	11795	95.16479888	1,122,468.80	4,624,651.14	0.894603341	3.68582926	A
5-08-K-103	11238	98.29034157	1,104,586.86	5,729,238.00	0.880351499	4.56618076	A
C-02-PP-21	11946	92.13143418	1,100,602.11	6,829,840.11	0.877175672	5.443356432	A
Z-02-BBLA-28	11312	96.91161177	1,096,264.15	7,926,104.26	0.873718334	6.317074767	A
B-01-PS-26	10966	94.43926829	1,035,621.02	8,961,725.28	0.825385987	7.142460754	A
C-03-PP017	10815	95.39618768	1,031,709.77	9,993,435.05	0.822268739	7.964729492	A
Z-02-BBLA-25	11871	85.16031603	1,010,938.11	11,004,373.16	0.805713807	8.770443299	A
5-02-C3.5 OZ NO	10929	91.60440533	1,001,144.55	12,005,517.70	0.797908372	9.568351671	A

รูปแบบทางคณิตศาสตร์ของแบบจำลอง [4]

กำหนดให้

P_i คือ ปริมาณการผลิตของผลิตภัณฑ์ i

D_i คือ ปริมาณความต้องการของผลิตภัณฑ์ i

M_i คือ กำลังการผลิตสูงสุดของผลิตภัณฑ์ i

P_i^{in} คือ ปริมาณสินค้าคงคลังสำหรับผลิตภัณฑ์ i

C_i คือ ต้นทุนการผลิตของผลิตภัณฑ์ i

C_i^{in} คือ ต้นทุนการจัดเก็บสินค้าต่อหน่วยของผลิตภัณฑ์ i

ตัวแปรตัดสินใจ คือ

P_i คือ ปริมาณการผลิตสำหรับผลิตภัณฑ์ i

P_i^{in} คือ ปริมาณสินค้าคงคลังสำหรับผลิตภัณฑ์ i

สมการเป้าหมาย (Objective function) ประกอบด้วย ต้นทุนในการผลิตและต้นทุนในการจัดเก็บสินค้า

$$\min z = \sum_{i=1}^N C_i P_i + C_i^{in} P_i^{in} \quad (1)$$

สมการข้อจำกัด (Constraints)

-ปริมาณการผลิตต้องไม่เกินกำลังการผลิตสูงสุด

$$\sum_{i=1}^N P_i \leq m_i; \forall i$$

-ปริมาณสินค้าคงคลังต้องไม่เกินพื้นที่จัดเก็บสูงสุด

$$\sum_{i=1}^N P_i^{in} \leq 25,000; \forall i$$

-ตัวแปรตัดสินใจเป็นจำนวนเต็มบวก

$$P_i, P_i^{in} \geq 0; \forall i$$

-การตอบสนองความต้องการ

$$P_i^{in} = P_{i(i-1)}^{in} + P_i - D_i; \forall i$$

-ปริมาณสินค้าคงคลังคงเหลือปลายงวด

$$P_i^{in} = 5,000$$

ผลลัพธ์ของแบบจำลอง

การคำนวณด้วย Excel Solver แสดงดังภาพที่ 5 แสดงให้เห็นว่า แบบจำลองที่พัฒนาขึ้นสามารถลดค่าใช้จ่ายรวมเหลือ

142,616,570.24 บาทต่อปี และลดมูลค่าสินค้าคงคลังเหลือ 586,962.00 บาทต่อปี จากเดิม 4,418,334.00 บาทต่อปี หรือลดลงร้อยละ 86.71 เมื่อเทียบกับวิธีเดิม ผลลัพธ์ดังกล่าวแสดงในตารางที่ 3 ซึ่งชี้ให้เห็นว่าการใช้แนวทางบริหารคลังสินค้าด้วยแบบจำลองเชิงปริมาณ สามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการจัดการสินค้าคงคลังและลดต้นทุนได้อย่างมีนัยสำคัญ

การวิเคราะห์ความไว (Sensitivity Analysis)

จากรายงานผลของ Excel Solver Sensitivity Report พบว่า สินค้าบางรายการมีความไวต่อการเปลี่ยนแปลงต้นทุนการจัดเก็บในระดับต่างกัน ผู้วิจัยยกตัวอย่างผลการวิเคราะห์บางส่วนแสดงดังภาพที่ 6 ดังนี้

สินค้าที่ควรผลิตแต่ไม่ควรเก็บคงคลัง คือ

สินค้านำเข้า 6-02-1-PP-065-685 (18,792 กก.) สินค้ารหัส 4-01-PS-302 (12,229 กก.) สินค้ารหัส Z-02-BBLA-13 (16,054 กก.) สินค้ารหัส 5-08-K-103 (10,349 กก.) สินค้ารหัส Z-02-BBLA-28 (7,246 กก.) และสินค้ารหัส B-01-PS-26 (15,920 กก.)

สินค้าที่ควรผลิตและเก็บคงคลัง คือ

สินค้านำเข้า 4-01-PS-104 ผลิต 24,806 กก. เก็บคงคลัง 5,000 กก. สินค้ารหัส C-02-PP-21 ผลิต 25,000 หน่วย เก็บคงคลัง 4,986 กก.

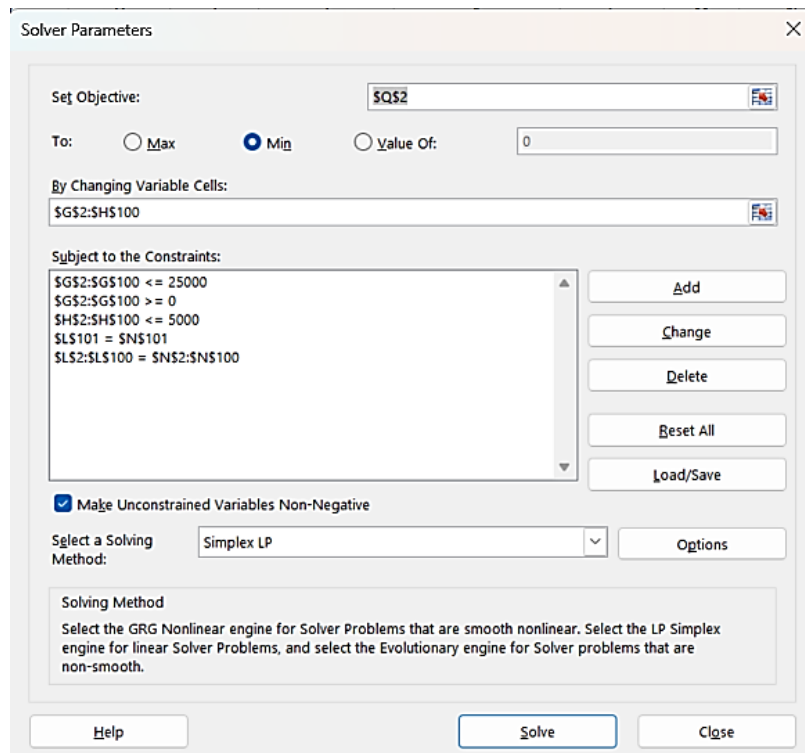
การวิเคราะห์ความไวของต้นทุนการจัดเก็บ

สินค้านำเข้า 4-01-PS-104 มี Objective Coefficient เท่ากับ 3 บาท Allowable Increase เท่ากับ 0.126 บาท และไม่มีขีดจำกัดการลดลง แสดงว่าสินค้านี้มีความไวต่อการเพิ่มต้นทุนเพียงเล็กน้อย

สินค้านำเข้า C-02-PP-21 มี Objective Coefficient เท่ากับ 92.13 บาท/หน่วย Allowable Increase เท่ากับ 1.78 บาท และไม่มีขีดจำกัดการลดลง แสดงว่าสินค้าทนต่อการเปลี่ยนแปลงต้นทุนได้ดี

สินค้านำเข้า 5-08-K-103 ต้องลดต้นทุนการจัดเก็บลงอย่างน้อย 7.38 บาท (เหลือติดลบ -4.38 บาท/กก.) จึงจะเหมาะสมในการเก็บคงคลัง ซึ่งในทางปฏิบัติไม่สามารถทำได้

ดังนั้น ผลการวิเคราะห์ความไวชี้ให้เห็นว่า แบบจำลองสามารถช่วยระบุรายการสินค้าที่ควรผลิตและเก็บคงคลังได้อย่างแม่นยำภายใต้ข้อจำกัดด้านต้นทุนและพื้นที่จัดเก็บ



ภาพที่ 5 หน้าต่าง Excel Solver

Variable Cells

Cell	Name	Final Value	Reduced Cost	Objective Coefficient	Allowable Increase	Allowable Decrease
\$G\$2	6-02-1-PP-065-685 pm ผลิต	18792	0	98.6470791	1E+30	3.31483276
\$H\$2	6-02-1-PP-065-685 im คงคลัง	0	3.31483276	3	1E+30	3.31483276
\$G\$3	4-01-PS-302 pm ผลิต	12229	0	98.3322463	3.31483276	3.60219463
\$H\$3	4-01-PS-302 im คงคลัง	0	3.60219463	3	1E+30	3.60219463
\$G\$4	Z-02-BBLA-13 pm ผลิต	16054	0	97.7300517	3.60219463	5.56525279
\$H\$4	Z-02-BBLA-13 im คงคลัง	0	5.56525279	3	1E+30	5.56525279
\$G\$5	4-01-PS-104 pm ผลิต	24806	0	95.1647989	0.125542687	1E+30
\$H\$5	4-01-PS-104 im คงคลัง	5000	-0.12554269	3	0.125542687	1E+30
\$G\$6	5-08-K-103 pm ผลิต	10349	0	98.2903416	1E+30	0.12554269
\$H\$6	5-08-K-103 im คงคลัง	0	7.37872981	3	1E+30	7.37872981
\$G\$7	C-02-PP-21 pm ผลิต	25000	-1.78017759	92.1314342	1.780177588	1E+30
\$H\$7	C-02-PP-21 im คงคลัง	4986	0	3	1.780177588	7.37872981
\$G\$8	Z-02-BBLA-28 pm ผลิต	7246	0	96.9116118	7.378729805	1.78017759
\$H\$8	Z-02-BBLA-28 im คงคลัง	0	5.47234348	3	1E+30	5.47234348
\$G\$9	B-01-PS-26 pm ผลิต	15920	0	94.4392683	5.472343481	2.0430806

ภาพที่ 6 ตัวอย่างของผลการวิเคราะห์ความไว

ตารางที่ 3 ผลการเปรียบเทียบต้นทุนก่อนและหลังใช้แบบจำลองโปรแกรมเชิงเส้น

รายละเอียดตัวชี้วัด	ก่อนปรับปรุง	หลังปรับปรุง	ผลต่าง	การเปลี่ยนแปลง(ร้อยละ)
1.ต้นทุนรวมในการผลิตต่อปี (บาท)	146,000,000.00	142,616,570.24	3,383,429.76	ลดลง 2.32
2.มูลค่าสินค้าคงคลังเฉลี่ยต่อปี (บาท)	4,418,334.00	586,962.00	3,831,372.00	ลดลง 86.71
3.จำนวนสินค้าค้างคลัง (รายการ)	127	69	58	ลดลง 45.67
4.มูลค่าสินค้าค้างคลัง (บาท)	5,490,887.36	3,510,630.11	1,980,257.25	ลดลง 36.06

5. สรุปผลการวิจัย และขอเสนอแนะ

การศึกษาการปรับปรุงระบบบริหารคลังสินค้าและกระบวนการวางแผนการผลิตของบริษัทกรณีศึกษา ซึ่งมีผลิตภัณฑ์หลักเป็นโฟมและพลาสติกบรรจุภัณฑ์ โดยประยุกต์ใช้แบบจำลองโปรแกรมเชิงเส้น พบว่า การดำเนินการจำหน่ายสินค้าคงคลังที่ไม่มีการหมุนเวียนสามารถลดปริมาณสินค้าคงคลังได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยมูลค่าสินค้าคงคลังที่สามารถระบายออกได้ลดลงร้อยละ 36.06 แสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพของแนวทางดังกล่าวในการลดภาระค่าใช้จ่ายด้านพื้นที่จัดเก็บ นอกจากนี้ การนำระบบการจัดการสินค้าคงคลังแบบ ABC Analysis มาใช้ช่วยเพิ่มความชัดเจนในการจำแนกประเภทสินค้าและการจัดลำดับความสำคัญ ทำให้พนักงานสามารถบริหารจัดการสินค้าคงคลังได้มีประสิทธิภาพมากขึ้น เมื่อผนวกรวมกับการวางแผนการผลิตของสินค้ากลุ่ม A ด้วยเทคนิคโปรแกรมเชิงเส้น พบว่าสามารถลดมูลค่าสินค้าคงคลังลงได้ถึงร้อยละ 86.71 เมื่อเทียบกับวิธีการวางแผนแบบเดิม ซึ่งสะท้อนให้เห็นถึงศักยภาพของการบูรณาการ LP และ ABC Analysis ในการเพิ่มประสิทธิภาพด้านต้นทุน จากการวิเคราะห์ค่า Objective Coefficient และ Reduced Cost ยังพบว่าสามารถระบุได้ว่าสินค้ารายการใดควรเก็บคงคลังหรือไม่ควรเก็บ ตัวอย่างเช่น สินค้ารหัส 4-01-PS-104 มีค่า Allowable Increase ต่ำ แสดงถึงความอ่อนไหวต่อการเปลี่ยนแปลงต้นทุน จึงควรมีการควบคุมต้นทุนอย่างใกล้ชิด ขณะที่สินค้ารหัส B-01-PS-26 มีค่า Reduced Cost ใกล้ 0 คือ 2.04 บาท บ่งชี้ว่าหากมีการปรับต้นทุนให้ต่ำลงเล็กน้อย จะสามารถพิจารณาเก็บคงคลังในอนาคตได้อย่างคุ้มค่า และผลการวิจัยโดยรวมชี้ให้เห็นว่า การใช้กลยุทธ์จำหน่ายสินค้าคงคลังควบคู่กับ ABC Analysis การประยุกต์แบบจำลอง Linear Programming และการวิเคราะห์ความไว ช่วยให้การจัดการสินค้าคงคลังมีประสิทธิภาพมากขึ้น ลดต้นทุนการดำเนินงาน และสนับสนุนการตัดสินใจด้านการผลิตได้แม่นยำขึ้น ทั้งยังสามารถประยุกต์ใช้เป็นแนวทางพัฒนาระบบคลังสินค้าในระยะยาว สอดคล้องกับแนวคิดการบริหารสินค้าคงคลังเชิงปริมาณ (Quantitative Inventory Control) ที่มุ่งเน้นการจัดสรรทรัพยากรให้เหมาะสมภายใต้ข้อจำกัดขององค์กร ซึ่งผลลัพธ์ของงานวิจัยนั้นสอดคล้องกับงานของ Shek Ahmed et al. (2021) ที่ชี้ให้เห็นว่าการใช้ Sensitivity Analysis สามารถช่วยให้การตัดสินใจด้านการผลิตมีความแม่นยำยิ่งขึ้น และเมื่อเปรียบเทียบกับงานของจิราดา (2565) ที่ลดต้นทุนได้ร้อยละ 15 แบบจำลองในงานวิจัยนี้สามารถลดต้นทุนได้มากกว่าร้อยละ 80 เนื่องจากได้รับการปรับให้สอดคล้องกับบริบทเฉพาะของอุตสาหกรรมโฟมบรรจุอาหาร

อย่างไรก็ตาม แบบจำลองยังมีข้อจำกัดด้านข้อมูลความต้องการของลูกค้าที่ไม่แน่นอน รวมทั้งข้อสมมติที่กำหนดให้ต้นทุนคงคลังคงที่ ซึ่งอาจไม่สะท้อนสภาพแวดล้อมการผลิตจริงในระยะยาว จึงควรมีการพัฒนาแบบจำลองในอนาคตเพื่อให้มีความยืดหยุ่นสูงขึ้น และรองรับความผันผวนของตลาดได้ดียิ่งขึ้น จากการวิเคราะห์การวางแผนการผลิตของสินค้ากลุ่ม A พบว่า

โปรแกรม Excel Solver มีข้อจำกัดด้านจำนวนตัวแปรตัดสินใจ ซึ่งอาจทำให้ไม่สามารถวางแผนการผลิตได้ครอบคลุมทุกสถานการณ์ โดยเฉพาะช่วงที่ความต้องการมีความผันผวนสูง ดังนั้น ควรนำหลักการพยากรณ์ความต้องการ เข้ามาสนับสนุนเพื่อเพิ่มความแม่นยำของการวางแผนการผลิต และลดความเสี่ยงจากการผลิตที่เกินหรือขาดกว่าความต้องการจริง อีกทั้งควรพัฒนาแบบจำลองให้มีความซับซ้อนมากขึ้น โดยพิจารณาใช้การเพิ่มประสิทธิภาพแบบหลายวัตถุประสงค์ (Multi-objective Optimization) เพื่อพิจารณาปัจจัยหลายมิติ เช่น ต้นทุนการผลิต ระยะเวลาการทำงานของพนักงาน กำลังการผลิต และระดับสินค้าคงคลัง ซึ่งจะช่วยให้ผลการวางแผนการผลิตสอดคล้องกับสภาวะการดำเนินงานจริงมากยิ่งขึ้น ในเชิงปฏิบัติ แม้ว่าต้นทุนการเก็บรักษาในคลังสินค้าของบริษัทกรณีศึกษาจะอยู่ในระดับต่ำ คือ ประมาณ 3 บาทต่อหน่วย แต่เมื่อพิจารณาร่วมกับต้นทุนรวมของกระบวนการผลิต พบว่าไม่คุ้มค่าในบางกรณี โดยเฉพาะภายใต้ข้อจำกัดด้านพื้นที่จัดเก็บ กำลังการผลิต และความเร่งด่วนของคำสั่งซื้อ ปัจจัยเหล่านี้ควรถูกผนวกรวมในการวิเคราะห์เพื่อให้การวางแผนการผลิตมีความสมจริงและแม่นยำมากขึ้น

ข้อเสนอแนะในการนำผลการวิจัยไปใช้ประโยชน์

1. บริษัทควรจัดระบบตรวจสอบสินค้าคงคลังประจำเดือน พร้อมระบุสินค้าคงสต็อก และสินค้าที่มีอัตราหมุนเวียนต่ำ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการใช้พื้นที่จัดเก็บ
2. ควรนำระบบ ABC Analysis ไปประยุกต์ใช้กับสินค้าทุกประเภท เพื่อให้การจัดลำดับความสำคัญของสินค้าคงคลังเป็นระบบมากขึ้น
3. ควรใช้แบบจำลองโปรแกรมเชิงเส้น ในการกำหนดปริมาณการผลิตรายเดือน โดยพิจารณาร่วมกับข้อจำกัดด้านกำลังการผลิตจริง เพื่อควบคุมต้นทุนและลดความเสี่ยงจากการผลิตเกินความจำเป็น
4. ควรนำผลลัพธ์จากการวิเคราะห์ความไวมาใช้ควบคุมต้นทุนของสินค้าที่มีความอ่อนไหว เช่น รายการที่มีค่า Allowable Increase ต่ำ

ข้อเสนอแนะสำหรับการทำวิจัยครั้งต่อไป

1. ควรศึกษาวิธีการพยากรณ์ความต้องการ เช่น ARIMA, Holt-Winters หรือวิธี Machine Learning เพื่อสะท้อนความผันผวนของตลาดได้แม่นยำขึ้น
2. ควรประยุกต์แบบจำลองเพิ่มประสิทธิภาพแบบหลายวัตถุประสงค์ เพื่อพิจารณาปัจจัยอื่นนอกเหนือจากต้นทุน เช่น ระยะเวลาการผลิต การใช้แรงงาน หรือระดับบริการลูกค้า
3. ควรขยายผลการวิจัยไปยังสินค้ากลุ่มอื่น เช่น ผลิตภัณฑ์โฟมรูปพิเศษหรือสินค้าที่มีความต้องการไม่สม่ำเสมอ เพื่อทดสอบความสอดคล้องของแบบจำลองกับสภาพการผลิตจริง
4. ควรพัฒนาแบบจำลองบนซอฟต์แวร์หรือแพลตฟอร์มที่รองรับจำนวนตัวแปรมากกว่า Excel Solver เช่น LINGO, Gurobi หรือ Python-PuLP เพื่อเพิ่มศักยภาพของการวางแผนการผลิตในสถานการณ์จริง

6.กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณพนักงาน และสถานประกอบการที่เอื้อเฟื้อสถานที่ในการศึกษา และเก็บข้อมูล และให้ความช่วยเหลือร่วมมือเป็นอย่างดี

7.เอกสารอ้างอิง

- [1] สำนักงานเศรษฐกิจอุตสาหกรรม. รายงานแนวโน้มอุตสาหกรรมปีไตรมาส. กระทรวงอุตสาหกรรม; 2566. เข้าถึงเมื่อ 4 มกราคม 2568. เข้าถึงได้จาก https://www.oie.go.th/assets/portals/1/files/monthly_report/annual_report_2022_for2023.pdf
- [2] International Monetary Fund. World Economic Outlook: Global Prospects and Policies. IMF; 2024. เข้าถึงเมื่อ 4 มกราคม 2568. เข้าถึงได้จาก: <https://www.imf.org/-/media/Files/Publications/WEO/2024/October/English/text.ashx>
- [3] วรุตม์ บุญภักดี, ดวงรัตน์ หิรัญญะสิริ, ราชานนท์ ลั่นซ้าย, วิศัลยา เกียรติคุณรัตน์, ปฐมพงษ์ สังข์ทอง. การปรับปรุงตำแหน่งการจัดเก็บของคลังสินค้าสำเร็จรูป: กรณีศึกษา บริษัทผลิตเสื้อผ้ากีฬา. วิศวกรรมลาดกระบัง. 2565;39(2):113–124.
- [4] จีราดา อนุชิตนันทน์. การประยุกต์แบบจำลองโปรแกรมเชิงเส้นสำหรับการวางแผนการผลิต: กรณีศึกษาบริษัทผลิตชิ้นส่วนยานยนต์. วารสารวิศวกรรมศาสตร์และนวัตกรรม. 2565;15(3):46–56.
- [5] อรรถเดช อุบลไทร, อัครนันท์ พงศธรวิวัฒน์. การประยุกต์ใช้กฎความสัมพันธ์เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการจัดวางตำแหน่งสินค้าภายในคลังสินค้า: กรณีศึกษา บริษัทจัดจำหน่ายสินค้าบรรจุภัณฑ์ขนมและอาหารแห่งหนึ่ง. Thai Journal of Operations Research (TJOR). 2021;9 (2):21–35.
- [6] ปุณณวิทย์ เศรษฐสมบูรณ์, กาญจนา เศรษฐนันท์, กฤษณรัช นิตสิริ. การจัดเส้นทางเดินรถแบบผสมผสานระหว่างภารกิจ การรับและส่งร่วมกับการให้บริการรถเช่า: กรณีศึกษาอุตสาหกรรมอาหารสัตว์. Engineering and Technology Horizons. 2024;41(3): Article 410304. doi:10.55003/ETH.410304.
- [7] ชาริตาร์ งามเจ๊ะ, กิตติศักดิ์ ถิ่นพันธุ์. การจัดตารางการทำงานเพื่อลดต้นทุนแรงงานของบริษัทผลิตภัณฑ์ปลากระป๋องสยาม จำกัด จังหวัดสตูล ประเทศไทย. วารสารวิชาการชาชนนเทศ มรภ.ภูเก็ต. 2564;5(2):31–41.
- [8] จินตพร หนัวินปิ่น, บุญอ้อม โฉมทิ, ประสิทธิ์ พยัคฆพงษ์. การเปรียบเทียบวิธีการพยากรณ์ 4 วิธี สำหรับความต้องการพลังงานไฟฟ้าสูงสุดในภาคกลางของประเทศไทย. ใน: การประชุมวิจัยบัณฑิตศึกษา มหาวิทยาลัยขอนแก่น; 2555. หน้า 281–290.
- [9] อาทร จิตสุนทรชัยกุล. การเพิ่มประสิทธิภาพการจัดการสินค้าคงคลังและคลังสินค้าของอุตสาหกรรมผ้าเบรคในประเทศไทย: กรณีศึกษา บริษัท เอส.ซี.เอช. อินดัสตรี จำกัด. สุทธิปริทัศน์. 2561;32(102):45–57.
- [10] Ahmed S, Sultana J, Nilu TY, Islam S. Sensitivity analysis of linear programming in decision making model. International Journal of Theoretical and Applied Mathematics. 2021;7(3):92–99.

การตรวจสอบการกระจายลมร้อนในเตาอบด้วยการทดลองและพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ

Investigation of Hot Air Distribution in an Oven Using Experiments and Computational Fluid Dynamics (CFD)

ชัยวัฒน์ อุทัยแสน¹, ยศกร ประทุมวัลย์² และ ทรงวุฒิ มงคลเลิศมณี^{1*}
Chaiwat Uthaisan¹, Yotsakorn Pratumwal² and Songwut Mongkonlerdmanee^{1*}

¹ สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร 1381 ถนนประชากรราษฎร์ 1 แขวงวงศ์สว่าง เขตบางซื่อ กรุงเทพฯ 10800

² ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ (เอ็มเทค) สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ (สวทช.) 111 ถนนพหลโยธิน คลองหนึ่ง อำเภอคลองหลวง ปทุมธานี 12120

¹ Department of Mechanical, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Phra- Nakhon 1381 Pracharat Road 1, Wong Sawang Subdistrict, Bang Sue District, Bangkok 10800

² National Metal and Materials Technology Center (MTEC), National Science and Technology Development Agency (NSTDA) 111 Phahonyothin Road, Khlong Nueng, Khlong Luang District, Pathum Thani 12120

*Corresponding Author: E-mail: songwut.m@rmutp.ac.th

Received: 28-02-2025 Revised: 01-12-2025 Accepted: 01-12-2025

บทคัดย่อ

การวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการกระจายลมร้อนในตู้อบโดยใช้การทดลองและการวิเคราะห์พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (CFD) โดยจำลองพฤติกรรมของการกระจายลมร้อนภายในตู้อบที่มีฮีตเตอร์จำนวน 3 แท่ง และพัดลมเป่าลมร้อนให้การกระจายความร้อนภายในตู้อบขนาด 0.100x0.885x0.200 m ที่อุณหภูมิ 80°C ซึ่งการทดสอบและจำลองนี้ไม่มีผลิตภัณฑ์สำหรับการอบจึงไม่พิจารณาความชื้น การทดลองใช้ระบบบันทึกอุณหภูมิ GTF2-IM28 Temp Controller และเซนเซอร์วัดอุณหภูมิ PT100 จำนวน 12 ช่องสัญญาณ โดยเชื่อมต่อกับเครื่องควบคุมและอ่านค่าผ่าน Modbus-RTU ลมร้อนคืออากาศที่ไหลในตู้อบมีปริมาตรเท่ากับ 1.52 m³ ของไหลเกิดการถ่ายเทและพาความร้อนภายใต้ความเร่ง เนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก (g) เลือกใช้รูปแบบการไหลทั้งแบบราบเรียบและปั่นป่วน สภาพผิวของผนังเป็นผิวราบเรียบกำหนดเป็น Adiabatic wall และกำหนดความดันอากาศที่ 101,325 Pa พร้อมทั้งอุณหภูมิเริ่มต้นของอากาศและตู้อบที่ 28°C ผลการศึกษาพบว่า การวิเคราะห์ด้วย CFD และการทดลองสอดคล้องกันมีความแตกต่างอยู่ในช่วงร้อยละ 6-10 จึงสรุปได้ว่าแบบจำลอง CFD สามารถจำลองการกระจายลมร้อนได้ใกล้เคียงกับผลการทดลองจริง จากนั้นทำการวิเคราะห์การกระจายลมร้อนในตู้อบทั้งแบบที่มีภาคเต็มตู้และแบบไม่มีภาค พบว่า มีการกระจายของลมร้อนเป็นแบบปั่นป่วน ลมร้อนในแต่ละตำแหน่งแตกต่างกัน ซึ่งส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพการอบ การศึกษานี้สามารถนำไปใช้ในการปรับปรุงการออกแบบตู้อบให้มีการกระจายความร้อนที่สมดุลและมีประสิทธิภาพสูงที่สุดในการทำงาน โดยต้องพิจารณาตัวแปรสำคัญประกอบด้วย ทิศทางและตำแหน่งการเข้าของลมร้อน ความเร็วของลมร้อน อัตราการไหลของลมร้อน กำลังของฮีตเตอร์ การควบคุมการสูญเสียของลมร้อนด้วยการติดตั้งฉนวนกันความร้อน และการสร้างช่องทางเข้าของลมร้อนหลายตำแหน่ง

คำสำคัญ : การกระจายลมร้อน, ตู้อบลมร้อน, พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ

ABSTRACT

The objective of this research is to investigate the hot-air distribution in a drying oven by using experimental testing and Computational Fluid Dynamics (CFD) analysis. The study simulates the behavior of hot-air distribution inside an oven equipped with three heater rods and a hot-air circulation fan, in order to distribute heat within an oven of dimensions 0.100 × 0.885 × 0.200 meters at a temperature of 80°C. In this testing and simulation, no product is placed in the oven; therefore, moisture is not considered. The experiment uses a GTF2-IM28 Temp Controller data-logging system and twelve PT100 temperature-measurement sensors, which are connected to the controller and read through Modbus-RTU. The hot air refers to the air flowing inside the oven with a volume of 1.52 m³. The fluid undergoes heat conduction and convection under the gravitational acceleration. Both laminar and turbulent flow models are applied. The wall surfaces are defined as smooth surfaces with an adiabatic-wall boundary condition, and

the air pressure is set at 101,325 Pa, with the initial temperature of both the air and the oven at 28°C. The results indicate that the CFD analysis and the experimental results are in agreement, showing a deviation in the range of 6–10%. Therefore, it can be concluded that the CFD model can simulate the hot-air distribution with high similarity to the actual experimental results. Subsequently, the hot-air distribution in the oven is analyzed under two conditions: with full trays and without trays. The findings show that the hot-air distribution exhibits turbulent behavior, and the airflow varies at different positions, which affects drying performance. This study can be used to improve oven design to achieve balanced and efficient heat distribution by considering key variables, including the direction and position of hot-air inlets, hot-air velocity, hot-air flow rate, heater power, control of heat loss through the installation of thermal insulation, and the creation of multiple hot-air inlet paths.

Keyword: Hot Air Distribution, Hot Air Oven, Computational Fluid Dynamics (CFD)

1. บทนำ

การพัฒนาประเทศให้ก้าวหน้าด้วยนโยบายของทางภาครัฐสู่ไทยแลนด์ 4.0 นั้นเป็นการเปลี่ยนการขับเคลื่อนประเทศด้วยภาคอุตสาหกรรมไปเป็นการขับเคลื่อนด้วยเทคโนโลยี นวัตกรรม และความคิดสร้างสรรค์ ซึ่งต้องมีการปฏิรูปการพัฒนาประเทศในทุกภาคส่วนงาน เพื่อให้ประเทศมีความเจริญสามารถรับมือการเปลี่ยนแปลงจากภัยคุกคามแบบใหม่และโอกาสต่าง ๆ ที่จะเกิดขึ้นให้พร้อมที่จะก้าวสู่การตลาดโลกอย่างมั่นคง มั่งคั่ง และยั่งยืน อาทิ เช่น ในส่วนงานทางด้านการเกษตรนั้นจะเปลี่ยนจากการเกษตรแบบดั้งเดิมเป็นการบริหารจัดการการเกษตรด้วยเทคโนโลยีและนวัตกรรม (Smart Farm) เป็นต้น ดังนั้นในส่วนสินค้า OTOP ควรต้องมีการพัฒนาเปลี่ยนการบริหารจัดการแบบดั้งเดิมด้วยแรงงานคนหรือเครื่องจักรดั้งเดิมเป็นการดำเนินการผลิตด้วยเครื่องจักรและอุปกรณ์ที่มีนวัตกรรมเหมาะสมกับผลิตภัณฑ์นั้นๆ จากการสำรวจสภาพการทำงานของกระบวนการผลิตขนมหวานพื้นเมืองของร้านขนมไทยต่างๆ ในจังหวัดเพชรบุรี และโรงงานอบขนมหลายแห่ง พบว่า มีเครื่องมือหรือเครื่องจักรที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการผลิตจำนวนมาก และการผลิตขนมหวานพื้นเมืองเพชรบุรีนั้น มีเครื่องจักรที่เกี่ยวข้องกับการอบขนมด้วยความร้อน เช่น อ้าว วั่นกรอบ หม้อแกง ขนมโสมนัส และอื่นๆ และจะพบปัญหาในการอบ คือ การกระจายของความร้อนไม่ทั่วถึง ในบางตำแหน่งหรือบางพื้นที่มีอุณหภูมิที่แตกต่างกันมาก ส่งผลให้ผลิตภัณฑ์ที่ออกมาจากการอบนั้นมีคุณภาพไม่เท่ากัน โดยเฉพาะในบางพื้นที่ที่ใกล้กับช่องทางลมร้อนที่เข้ามาในตู้อบจะมีอุณหภูมิสูง และพื้นที่ไกลออกไปจะมีอุณหภูมิต่ำกว่า

P.S. Mirade et. al. [1] ศึกษาลักษณะเฉพาะและการสร้างแบบจำลอง CFD ของโปรไฟล์อุณหภูมิอากาศและความเร็วในเตาอบอุโมงค์อบขนมบิสกิตอุตสาหกรรม และกล่าวถึงการประยุกต์ใช้แนวทางของ CFD เพื่อทำนายโปรไฟล์อุณหภูมิของอากาศและความเร็วลมภายในห้องอบของเตาอบอุโมงค์เผาด้วยก๊าซอุตสาหกรรมที่ใช้อบขนมบิสกิต เลือกใช้แบบจำลอง CFD สามมิติ การเปรียบเทียบผลลัพธ์เชิงตัวเลขกับการวัดในเชิงทดลองแสดงให้เห็นว่ามีความสอดคล้องกันค่อนข้างใกล้เคียงกันในการคาดการณ์เชิงคุณภาพ เช่นเดียวกับ Nantawan Therdthai et. al. [2] ที่ศึกษาการสร้างแบบจำลอง CFD และการจำลองเตาอบ

ขนมปังต่อเนื่องในอุตสาหกรรมโดยใช้แบบจำลองสองมิติ พารามิเตอร์สำคัญของเตาอบ คือปริมาณความร้อนและปริมาณพัดลม ทำให้สามารถจำลองแนวโน้มการกระจายความร้อนในเตาอบได้อย่างน่าพอใจ Andrew Lee [3] ศึกษาวิจัยเรื่อง การตรวจสอบเชิงตัวเลขของการกระจายอุณหภูมิในเตาอบอุตสาหกรรม การตรวจสอบเชิงตัวเลขดำเนินการกับเตาอบอุตสาหกรรมโดยใช้เทคนิคพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ พิสูจน์ได้ว่าเตาอบมีการกระจายอุณหภูมิที่สม่ำเสมอเป็นส่วนใหญ่ในช่วงระหว่าง 314 ถึง 348°C การกระจายอุณหภูมิภายในเตาอบนั้นสัมพันธ์กับความเร็ว การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิจะเป็นไปตามเส้นโค้งของความเร็ว จากผลที่ได้ พบว่าบริเวณที่มีปัญหภายในเตาอบอุตสาหกรรมนั้นสามารถระบุได้ เช่น การไหลของอากาศผ่านรูพรุน และโซนพื้นที่การหมุนเวียนที่ไม่ดี

Pragati Kaushal and Sharma HK [4] ได้ศึกษาและใช้ CFD และการประยุกต์ใช้ในการออกแบบอุปกรณ์แปรรูปอาหารระยะเบสิวิธี CFD สามารถใช้เป็นเครื่องมือในการออกแบบอุปกรณ์แปรรูปอาหารได้ การประยุกต์ใช้รวมถึงกระบวนการต่างๆ เช่น การทำความสะอาดถังเก็บ การตกผลึก ไซโคลนแบบธรรมดา การอบแห้ง การฆ่าเชื้อ การตกผลึก การผสม และการแช่เย็น การหมัก การอบ ฯลฯ

Zinedine Khatiret et al. [5] ได้ศึกษาการประยุกต์ใช้พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (CFD) และการเพิ่มประสิทธิภาพการออกแบบเตาอบในอุตสาหกรรมการอบขนมปังโดยเลือกรูปแบบการไหลที่เหมาะสมจะช่วยให้ใช้ทรัพยากรการคำนวณได้อย่างมีประสิทธิภาพ Verboven et al. [6] นำเสนอการตรวจสอบความถูกต้องของการไหลของอากาศภายในเตาอบไฟฟ้าแบบพาความร้อนบังคับ บทความนี้กล่าวถึงแบบจำลอง 3 มิติ โดยใช้แบบจำลองความปั่นป่วน M. Rokni and B. Sunden [7] อภิปรายเกี่ยวกับการไหลปั่นป่วนที่พัฒนาเต็มที่ในท่อในช่วงของเรย์โนลด์ที่กว้าง กระบวนการนี้ผสมผสานแบบจำลองความหนืดเพื่อให้ได้แบบจำลองฟลักซ์เชิงพีชคณิตที่มีค่าการแพร่ที่แปรผัน A. Jones and D. Ingham [8] นำเสนอหัวข้อที่เกี่ยวข้องกับการไหลของการพาความร้อนในผนังขนานแนวตั้ง คำตอบเชิงตัวเลขสำหรับสถานการณ์ดังกล่าว และให้ผลลัพธ์สำหรับโปรไฟล์ความเร็วภายในผนัง อุณหภูมิเฉลี่ย ปัจจัยแรงเสียดทาน และพื้นที่

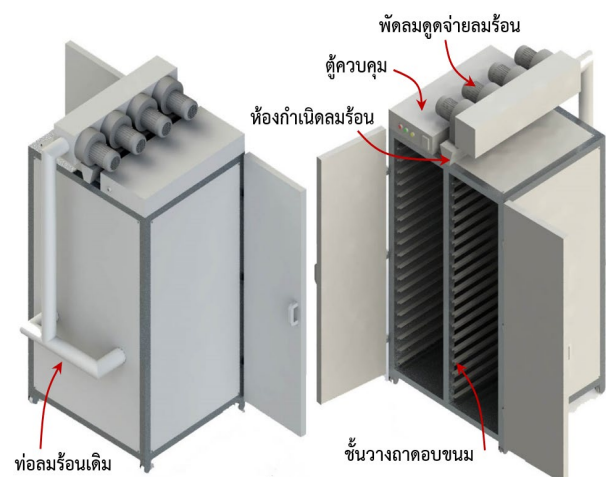
การไหลเวียนที่เกิดขึ้น E. Sparrow and M. Ortiz [9] เสนอการตรวจสอบเชิงทดลองเกี่ยวกับค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนที่อยู่เหนือแผ่นที่มีรูพรุน เอกสารนี้สามารถแสดงการไหลของของไหลที่อยู่ติดกับพื้นผิวของแผ่นได้

แนวทางแบบจำลอง Reynolds Averaged Navier-Stokes: RANS ถือเป็นเทคนิคการจัดการความปั่นป่วนที่ใช้งานได้จริงที่สุดสำหรับปัญหาพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณทางอุตสาหกรรม ด้วยทรัพยากรการคำนวณที่มีอยู่ในปัจจุบันแบบจำลองความปั่นป่วนของความหนืดของกระแสของไหลวนสองสมการได้ทำหน้าที่เป็นรากฐานสำหรับการวิจัยความปั่นป่วนมาหลายปี แบบจำลองเหล่านี้ช่วยให้เกิดความแม่นยำ [10]-[12] แม้จะมีตัวเลือกการสร้างแบบจำลองความปั่นป่วนมากมาย แต่แบบจำลอง $k-\epsilon$ ก็เป็นแบบจำลองสองสมการที่ใช้กันอย่างแพร่หลายและได้รับการตรวจสอบแล้วสำหรับพลศาสตร์ของไหลเชิงปั่นป่วนจนถึงปัจจุบัน สำหรับการไหลของอุตสาหกรรม เช่น การไหลในเตาอบ การกระจายของ k และ ϵ มักไม่ค่อยเป็นที่รู้จักล่วงหน้า และมักประมาณจากสูตรที่เชื่อมโยงความเร็วของทางเข้าและมาตราส่วนความยาวกับการเกิดความปั่นป่วน การใช้แบบจำลอง $k-\epsilon$ อย่างแพร่หลายได้นั้นยังถึงทั้งความสามารถและข้อบกพร่องของแบบจำลอง [13]-[15] แม้จะได้รับความนิยม แต่ข้อจำกัดที่ทราบบางประการของแบบจำลอง $k-\epsilon$ เช่น พลังงานจลน์ของการปั่นป่วนถูกคาดการณ์ไว้เกินจริงในบริเวณที่การไหลกระทบและต่อกลับ ส่งผลให้คาดการณ์การพัฒนาของการไหลรอบขอบนำและวัตถุที่มีลักษณะเป็นหน้าผาลาดชันได้ไม่ดี การแยกตัวของการไหลจากพื้นผิวภายใต้การกระทำของการไล่ระดับความดันที่ไม่พึงประสงค์นั้นคาดการณ์ได้ไม่ดี อัตราการแพร่กระจายของกระแสผ่านและเจ็ตตรงกลมนั้นคาดการณ์ได้ไม่ดี ถูกต้อง ไม่สามารถสร้างแบบจำลองการไหลแบบลามินาร์และแบบเปลี่ยนผ่านด้วยแบบจำลอง $k-\epsilon$ มาตราฐานได้ จึงเป็นพื้นที่การวิจัยที่ดำเนินการอย่างต่อเนื่องในการสร้างแบบจำลองความปั่นป่วน [11], [16]

นอกเหนือจากการใช้หลักการพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณในการวิเคราะห์แล้วยังมีการศึกษาการอบแห้งด้วยเครื่องอบที่น่าสนใจ เครื่องอบแห้งด้วยหลักการฟลูอิดไคซ์เบด (Fluidized Bed Principle) เป็นอีกประเภทหนึ่งที่ได้รับการนิยมนิยม เช่น การศึกษาการอบแห้งขุยมะพร้าวโดยใช้ลมร้อนจากฮีตเตอร์ทำความร้อนขนาด 6,000 Watt ทำการทดลองกับขุยมะพร้าวน้ำหนัก 2, 4 และ 6 kg ที่อุณหภูมิการอบแห้ง 40 และ 50°C ผลจากการทดลองพบว่า การอบแห้งที่อุณหภูมิ 50°C ทำให้ขุยมะพร้าวมีการคายความชื้นที่ดีจึงใช้เวลาในการอบแห้งที่สั้นและสามารถลดความชื้นมาตรฐานแห้ง [17] การอบแห้งผลิตภัณฑ์ทางการเกษตรด้วยวิธีการฟลูอิดไคซ์เบด สามารถดำเนินการได้ ซึ่งจะต้องใช้อุณหภูมิและเวลาที่เหมาะสมควบคู่กับการตรวจสอบความชื้น และการใช้กำลังของฮีตเตอร์ที่สูงเกินไปหรือใช้ระยะเวลาสั้นในการอบแห้งนั้นอาจส่งผลกระทบต่อคุณภาพผลิตภัณฑ์ที่ออกมา การกำหนดอัตราการไหลที่สูงหรือต่ำเกินไปส่งผลต่อคุณภาพในการอบ

เช่นกัน การให้อัตราการไหลสูงจะทำให้ผลิตภัณฑ์เสียหายทางกายภาพ และสูญเสียค่าใช้จ่ายเกินความจำเป็น ดังนั้นการรอบด้วยหลักการนี้จึงต้องพิจารณาตัวแปรในการอบที่เหมาะสมของแต่ละผลิตภัณฑ์ [18]-[21]

จากการทบทวนวรรณกรรมจึงพิจารณาลักษณะของตู้อบขนมลมร้อนของงานวิจัยนี้ที่มีการพาความร้อนจากแท่งฮีตเตอร์ไหลไปสู่ห้องอบด้านในแสดงดังภาพที่ 1 ด้านบนตรงกลางของตู้อบจะเป็นห้องสร้างลมร้อนด้วยแท่งฮีตเตอร์ และมีพัดลมทำหน้าที่ดูดจ่ายลมร้อนไปยังท่อทางที่อยู่ด้านหลังของตู้อบ ลมร้อนไหลตามท่อและแยกออกเป็นสองทาง คือ ทางด้านขวาและทางด้านซ้าย และทั้งสองทางต่อเข้าไปยังห้องอบด้านใน ที่ด้านในตัวเครื่องอบจะมีช่องทางลมร้อนเข้ามาสองท่อ ซึ่งเมื่อนำอากาศอบขนมมาใส่แล้วจะทำให้อากาศไหลเวียนได้ไม่ดี โดยเฉพาะอากาศขนมที่อยู่ใกล้ท่อลมร้อนจะได้รับความร้อนมากกว่าแล้วเกิดการเสียหายของผลิตภัณฑ์ที่นำมาอบได้ ดังนั้นบทความนี้จึงวิเคราะห์การกระจายของลมร้อน ด้วยพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณโดยการปรับเปลี่ยนตัวแปรหลัก คือ ตำแหน่งการติดตั้งท่อส่งลมร้อนภายใต้กำลังของแท่งฮีตเตอร์และอุณหภูมิการอบคงที่



ภาพที่ 1 เครื่องอบลมร้อนแบบอากาศหมุนเวียน 3 มิติ

2. ระเบียบวิธีวิจัย

2.1 สมการควบคุม (Governing Equations)

สมการอนุพันธ์มวลหรือสมการความต่อเนื่อง

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

สมการโมเมนตัมใน 3 มิติ

$$\rho \left(u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) + f_x \quad (2)$$

$$\rho \left(u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \mu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) + f_y \quad (3)$$

$$\rho \left(u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} \right) = - \frac{\partial p}{\partial z} + \mu \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) + f_z \quad (4)$$

$$\frac{\rho c}{k} \left(u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} + w \frac{\partial T}{\partial z} \right) = \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) \quad (5)$$

สมการเรโนลด์นัมเบอร์

$$Re = \frac{\rho V D_n}{\mu} \quad (6)$$

เมื่อ

ρ คือ ความหนาแน่นของอากาศร้อน

V คือ ความเร็วของอากาศในท่อ

D_n คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของท่อที่อากาศไหลผ่าน

μ คือ ค่าความหนืดของอากาศร้อน

สมการนัสเซลนัมเบอร์สำหรับการพาความร้อนแบบบังคับที่มีการไหลแบบภายในและมีความปั่นป่วนบนวัสดุแผ่นเรียบ

$$Nu = \frac{0.0296 Re^{0.8} Pr}{1 + B Re^{-0.1} (Pr - 1)} \quad (7)$$

เมื่อ Pr คือ Prandtl number และ B เป็นฟังก์ชันของ Pr โดยถ้า $0.5 < Pr < 5$ ค่า B จะเท่ากับ $1.58 Pr^{-1/53}$

สมการนัสเซลนัมเบอร์สำหรับการพาความร้อนแบบบังคับที่มีการไหลแบบภายในท่อทรงกระบอกและมีความปั่นป่วน โดยไม่พิจารณาความหนืดของอากาศ

$$Nu = 0.023 Re_d^{0.8} Pr^{1/3} \quad (8)$$

เมื่อ $10^4 < Re_d < 1.2 \times 10^5$ และ $0.7 < Pr < 120$

ตัวแปรต้นที่กำหนดให้เปลี่ยนแปลง คือ ตำแหน่งการติดตั้งท่อส่งลมร้อนซึ่งส่งผลต่อความเร็วของลมร้อนในช่องทางขาเข้า ตู้อบฝัγγ้ายและฝัγγขาว และตัวแปรตามคือผลการกระจายของอุณหภูมิในตู้อบ

2.2 วัสดุเครื่องมือและอุปกรณ์

- ตู้อบความร้อนขนาด กว้างxยาวxสูง เท่ากับ $1.00 \times 0.88 \times 2.00$ m ที่มีกำลังของฮีตเตอร์ไฟฟ้า 3 แท่งเท่ากับ 4,500 Watt มีพัดลมพาความร้อนจำนวน 4 ตัว หมุนด้วยความเร็วรอบคงที่ 2,700 rpm ภายในสามารถบรรจุถาดอบที่มีขนาดกว้าง x ยาวเท่ากับ 0.40×0.80 m ได้สองด้านคือด้านซ้ายและด้านขวา และแต่ละด้านจะมีฐานรองยื่นออกมาไว้สำหรับวางถาดฝัγγละ 19 ฐานรอง รวมเป็น 38 ฐานรอง รองรับถาดจำนวน 38 ถาด ดังภาพที่ 1

- เซนเซอร์วัดอุณหภูมิ PT100 ที่มีความต้านทาน 100Ω ที่ 0°C เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ความต้านทานของเซนเซอร์จะเพิ่มขึ้น ทำให้ได้ผลลัพธ์ที่แม่นยำและเป็นเส้นตรงซึ่งแปรผันตามอุณหภูมิ

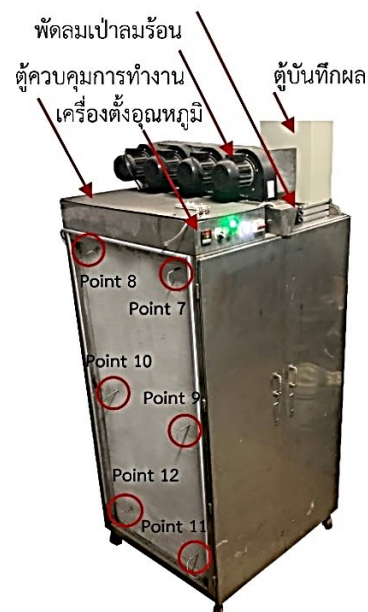
- เครื่องมือวัดความเร็วลม (Lutron AM 4201 Digital Anemometer) อ่านค่าที่ความเร็วต่ำสุด 0.1 เมตรต่อวินาที และความแม่นยำ $\pm 2\% + 1$ d ตามมาตรฐาน ISO-9001, CE, IEC1010

- เครื่องควบคุมและอ่านค่าอุณหภูมิ เลือกใช้ GTF2-IM28 Temp Controller แสดงผลการวัด ควบคุมสัญญาณขาออก สัญญาณเตือน ออกแบบระบบอะนาล็อกด้วยการสื่อสารผ่านสัญญาณ RS485



a) ติดตั้ง PT100 ด้านขวา

ห้องสร้างลมร้อน (ฮีตเตอร์)



b) ติดตั้ง PT100 ด้านซ้าย

ภาพที่ 2 ตู้อบความร้อนและตำแหน่งการติดตั้งเซนเซอร์ PT100

- เครื่องบันทึกข้อมูลอุณหภูมิ เลือกใช้ EMKO Proop.black-7L เชื่อมต่อ Ethernet, Ethernet + Wi-Fi, Wi-Fi และเชื่อมต่อกับเครื่องควบคุมและอ่านค่าอุณหภูมิผ่าน Modbus-RTU

- โปรแกรม SolidWorks Flow Simulation

- ชุด Timer ควบคุมอุณหภูมิการทำงานตู้อบ

2.3 การเตรียมการทดลองและการดำเนินงาน

2.3.1 ติดตั้งฉนวนกันความร้อนที่ผนังของตู้อบลมร้อน ด้านซ้าย ด้านขวา และด้านหลัง เพื่อป้องกันการสูญเสียความร้อน

2.3.2 ติดตั้งเซนเซอร์วัดอุณหภูมิ PT100 จำนวน 12 จุด ไว้ที่ด้านข้างของตู้อบ ให้หัววัดอุณหภูมิยื่นเข้าไปในตู้อบ ดังภาพที่ 2

2.3.3 ประกอบตู้บันทึกผลและอุปกรณ์ต่างๆ ไว้บนตู้อบและทำการสอบเทียบเครื่องมือวัดอุณหภูมิ ดังภาพที่ 3

2.3.4 ติดตั้งตู้บันทึกผลไว้ด้านบนของตู้อบลมร้อน ไม่ให้ได้รับความร้อนจากตู้อบ ดังภาพที่ 4

2.3.5 ติดตั้งสายอินเทอร์เน็ตเพื่อเก็บข้อมูลการบันทึกลงระบบ Cloud แบบเรียลไทม์ ดังภาพที่ 3

2.3.6 ทดสอบการทำงานของอุปกรณ์ ประกอบด้วย การทำงานของเครื่องควบคุมอุณหภูมิ (ตั้งอุณหภูมิสำหรับการอบที่ 80°C) การทำงานของ Datalogger การทำงานของพัดลมและฮีตเตอร์ และการทำงานของอุปกรณ์ในตู้ควบคุมการทำงาน

2.3.7 ทดลองและเก็บข้อมูลอุณหภูมิโดยแยกเป็นรายกรณีศึกษาต่างๆ ดังนี้

- กรณีที่ 1 ไม่มีฉนวนในตู้อบ เพื่อตรวจสอบการกระจายความร้อนเบื้องต้น โดยใช้กำลังฮีตเตอร์สูงสุด ที่ความเร็วลมขาออกจากห้องพัดลมทั้ง 4 ตัว เท่ากับ 10 m/s

- กรณีที่ 2 ใส่ฉนวนในตู้อบจำนวน 38 ชาติ เพื่อตรวจสอบการกระจายความร้อน โดยใช้กำลังฮีตเตอร์สูงสุด และความเร็วลมสูงสุดที่พัดลมทั้ง 4 ตัว ทำงานร่วมกันทำให้ได้ความเร็วของกระแสลมร้อน 10 m/s

ทั้งนี้ช่องทางเติมอากาศจะอยู่ด้านบนตู้ ในส่วนด้านหน้าพัดลมเพื่อให้พัดลมช่วยในการเติมอากาศใหม่เข้ามา และช่องทางระบายอากาศออก ในกรณีมีผลิตภัณฑ์จะเป็นช่องทางปล่อยความชื้นออกไปจากตู้



ภาพที่ 3 ตู้บันทึกผลและอุปกรณ์



a) GTF2-IM28 Temp Controller



b) EMKO Proop.black-7L Datalogger

ภาพที่ 4 อุปกรณ์ประกอบเครื่องมือวัดค่าอุณหภูมิ

ในการทำงานของตู้อบลมร้อนนี้จะดำเนินการภายใต้การพิจารณาการกระจายของลมร้อน โดยไม่มีการใส่ผลิตภัณฑ์สำหรับการอบใดๆ จึงไม่ต้องคำนึงถึงการควบคุมความชื้น อุณหภูมิสำหรับการทดสอบและจำลองอยู่ที่ 80°C แบ่งฮีตเตอร์แต่ละแห่งมีกำลัง 1,500 Watt จำนวน 3 แห่ง พัดลมดูดจ่ายลมร้อนจำนวน 4 ตัว ละ 250 Watt หมุนด้วยความเร็ว 2,700 rpm สามารถให้อัตราการไหลรวมได้เท่ากับ 0.046 m³/s และจ่ายออกไปยังทางออกเข้าตู้อบจำนวน 2 ช่องทางด้วยท่อที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากัน คือ 100 mm โดยจ่ายไปทางด้านขวาและด้านซ้ายด้วยอัตราการไหล 0.026 และ 0.021 m³/s ตามลำดับ มีช่องปล่อยลมร้อนออกจำนวน 4 รูที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 25 mm แต่ละรูมีอัตราการปล่อยความร้อนออกที่ 0.001 m³/s รวมทั้ง 4 รูเท่ากับ 0.004 m³/s มีช่องเติมอากาศใหม่เข้าไปที่ช่องทางดูดของพัดลมด้วยอัตราการไหลเข้า 0.004 m³/s การทดลองจะดำเนินการจนกระทั่งถึงสภาวะคงตัว (Steady state) ซึ่งตั้งอุณหภูมิห้องอบไว้ที่ 80°C

2.4 แบบจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ

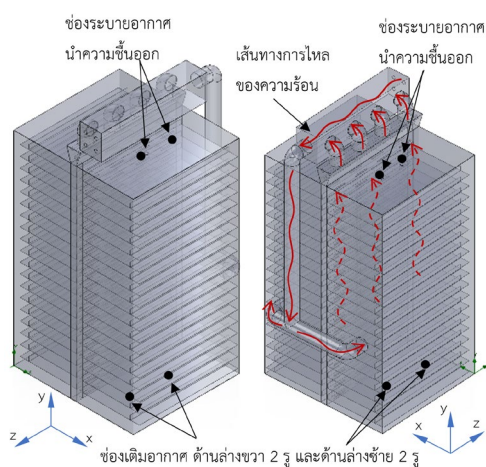
การวิจัยนี้วิเคราะห์พลศาสตร์ของไหลภายใต้สภาวะคงตัว (Steady state) สมการควบคุม (Governing equation) ที่เลือกใช้เป็นโมเดลการไหลแบบปั่นป่วน ตามแบบจำลอง $k-\epsilon$ เปรียบเทียบผลของค่าอุณหภูมิที่ได้จากการทดลองจริง โดยกำหนดเงื่อนไข พลังงานไฟฟ้าที่ป้อนเข้าฮีตเตอร์ต้องรักษาอุณหภูมิของระบบให้อยู่ที่ 80°C ความเร็วลม 10, 15 และ 20 m/s เปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการทำนายผลของอุณหภูมิจากโปรแกรม CFD และการทดลองเพื่อยืนยันความถูกต้องของแบบจำลอง

จากภาพที่ 5 เป็นแบบจำลอง 3D ถูกสร้างขึ้นด้วยโปรแกรม SolidWorks ซึ่งภาพที่ 5a และ 5b เป็นแบบจำลอง

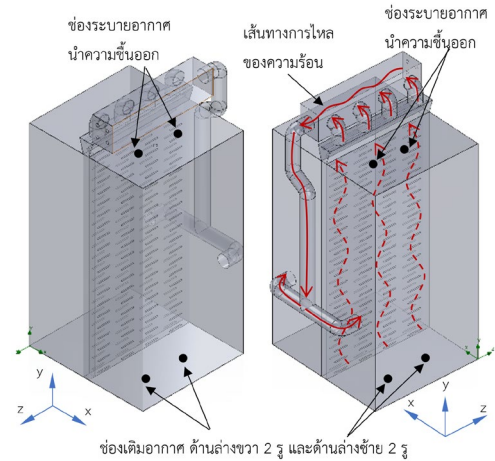
ของตู้แบบเดิมก่อนการปรับปรุง มีท่อทางลมร้อนหลักที่เชื่อมต่อระหว่างห้องพัดลมและห้องอบขนม การวางท่อทางนี้จะไม่สมมาตร ส่งผลให้ลมร้อนที่ออกจากห้องพัดลมทั้ง 4 ตัว เข้าไปยังห้องอบขนมฝั่งซ้ายและฝั่งขวาไม่เท่ากัน สำหรับภาพที่ 5c และ 5d เป็นแบบจำลองที่ปรับปรุงใหม่ให้เกิดความสมมาตรในการวางท่อทางลมหลัก ส่งผลให้ลมร้อนเข้าไปยังห้องอบขนมฝั่งซ้ายและฝั่งขวาเท่ากัน

แบบจำลองในภาพที่ 5a-5d ให้กำหนดการไหลเป็นแบบไหลภายใน (Internal Flow) มีปริมาตรของของไหลที่วิเคราะห์ (Fluid volume) เท่ากับ 1.52 m^3 ของไหลเกิดการถ่ายเทความร้อนและพาความร้อน กำหนดค่า Gravity ในทิศทางแกน -y เท่ากับ 9.81 m/s^2 กำหนดของไหลเป็นอากาศ (Air) มีความหนาแน่นอากาศ 1.168 kg/m^3 (ที่อุณหภูมิประมาณ 20°C และที่ความดันบรรยากาศมาตรฐาน) ค่าความหนืดจลน์เท่ากับ $0.00001855 \text{ kg/m s}$ สำหรับสมบัติของวัสดุที่ใช้ในการสร้างตู้เป็น Stainless Steel 321 มีความหนาแน่น $8,100 \text{ kg/m}^3$ ผลิตจากวัสดุ Aluminum 6061 มีค่าการนำความร้อนและค่าความร้อนจำเพาะเป็นไปตามภาพที่ 6 และ 7 ซึ่งมีแกนตั้งเป็นค่าการนำความร้อนในหน่วย W/m K และแกนนอนเป็นค่าอุณหภูมิในหน่วยเคลวิน (K) ทำการเลือกรูปแบบการไหลเป็นราบเรียบและแบบปั่นป่วน กำหนดสภาวะทางความร้อนของผนัง (Wall thermal condition) เป็น Adiabatic wall และผิวเป็นแบบราบเรียบ กำหนดความดันอากาศเป็น $101,325 \text{ Pa}$ อุณหภูมิของอากาศเริ่มต้น 28°C และอุณหภูมิของวัสดุตัวตู้เริ่มต้นเป็น 28°C เช่นกัน การกำหนดเงื่อนไขขอบ (Boundary Conditions) ดังต่อไปนี้

1. ที่ช่องทางอากาศภายนอกเข้ามาเติม (Inlet) ด้วยอัตราการไหลเข้าของอากาศ (Q_{in}) เท่ากับ $0.000393 \text{ m}^3/\text{s}$ (เป็นค่าความเร็วลมที่วัดได้จากการทดลอง)
2. ช่องทางอากาศออกสู่ภายนอกกำหนดเป็นความดันบรรยากาศเท่ากับ $101,325 \text{ Pa}$

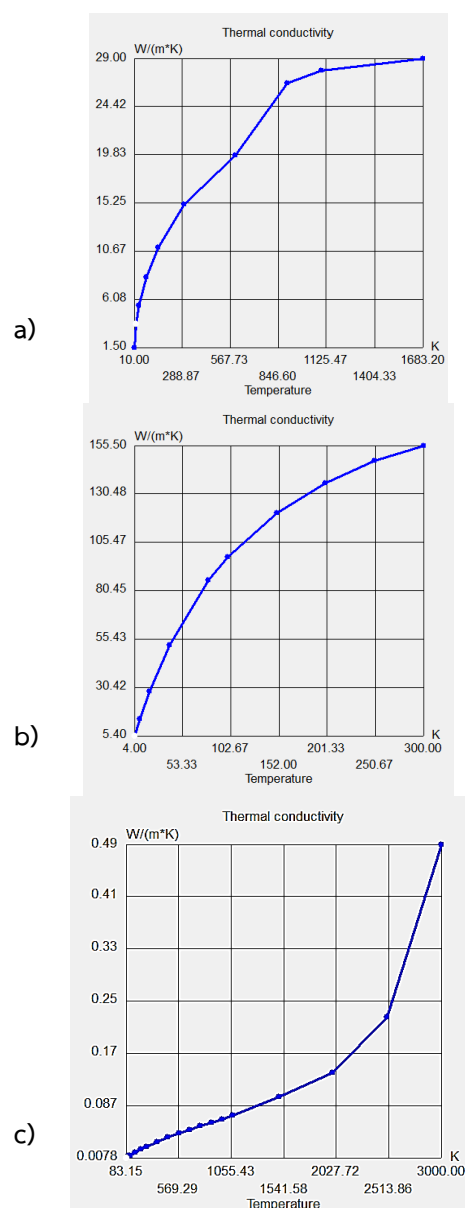


a) มุมมองด้านหน้าใส่ถาด b) มุมมองด้านหลังใส่ถาด

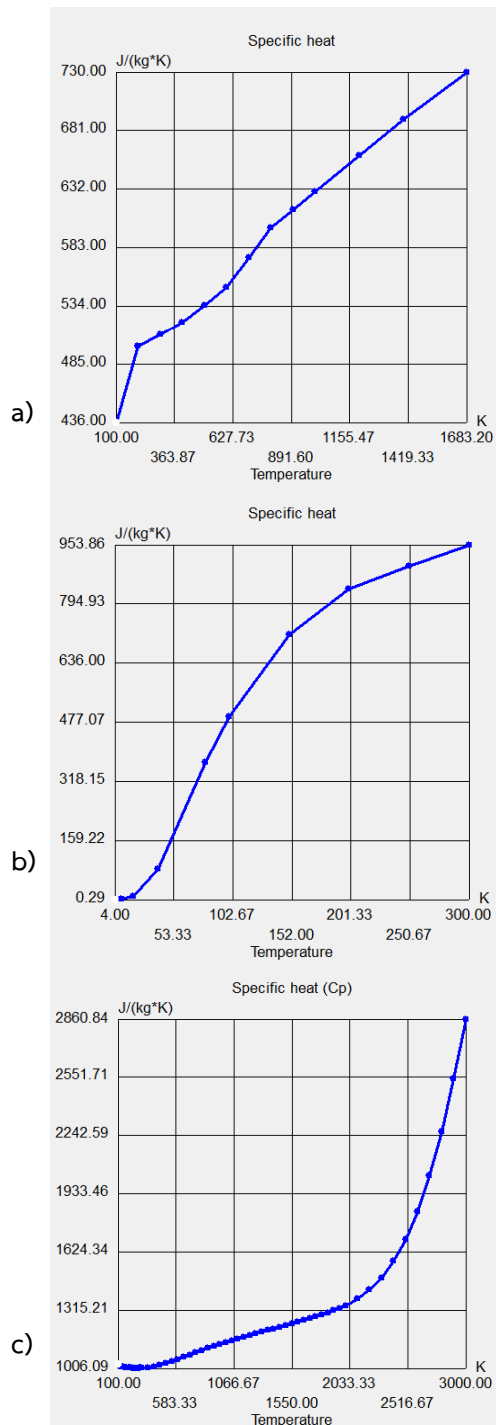


c) มุมมองด้านหน้า d) ใส่ท่อลมร้อนด้านหลังให้สมมาตร

ภาพที่ 5 แบบจำลองตู้สำหรับการวิเคราะห์ CFD



ภาพที่ 6 ค่าการนำความร้อน a) Stainless Steel 321 b) Aluminum 6061 และ c) อากาศ



ภาพที่ 7 ค่าความร้อนจำเพาะ a) Stainless Steel 321 b) Aluminum 6061 และ c) อากาศ

3. กำหนดความเร็วของพัดลมเป็นแบบภายใน (Internal fan) ด้วยความเร็วเชิงมุม 282 rad/s โดยพัดลมทั้ง 4 ตัวสามารถส่งผ่านลมร้อนออกไปยังช่องทางขาออกของห้องพัดลม ความเร็วลมที่ช่องทางขาออกนี้เท่ากับ 10 m/s (วัดได้จากการทดลอง) เงื่อนไขขอบเป็นทางเข้าที่มีอัตราการไหลจ่ายไปยังตู้อบเท่ากับผนังท่อเป็นแบบ No Slip Wall และ Adiabatic จากการติดตั้งฉนวน

4. แท่งฮีตเตอร์จำนวน 3 แท่ง ที่สามารถจ่ายความร้อนได้สูงสุดถึง 4,500 Watt และสามารถปรับลดกำลังไฟลงได้ตามกรณีศึกษานั้นๆ

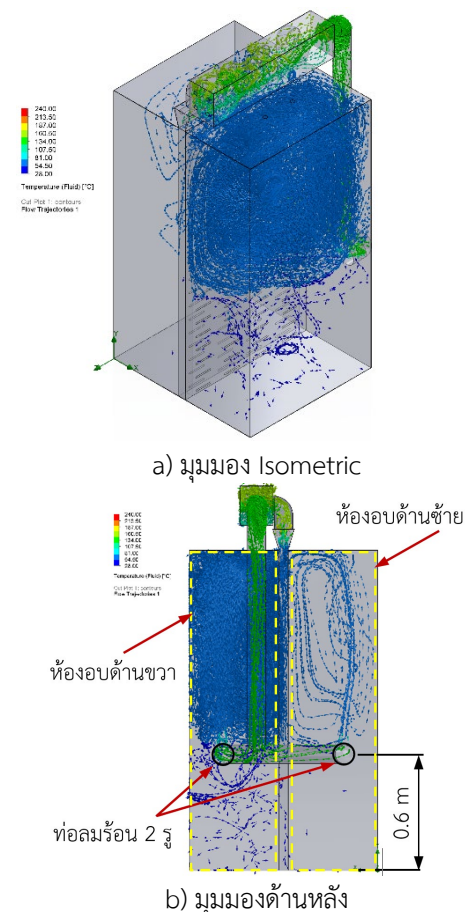
3. ผลการวิจัย

3.1 ผลการวิเคราะห์ด้วย CFD

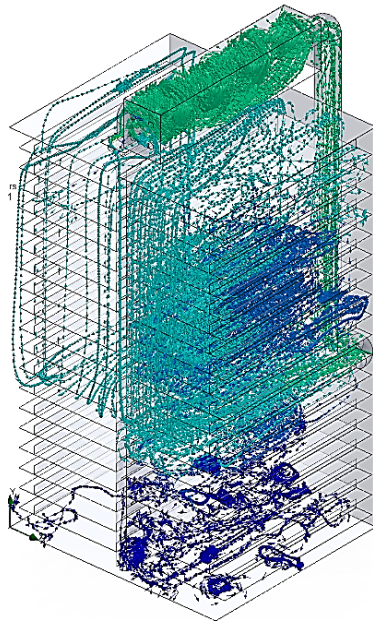
การวิเคราะห์ผลในช่วงสภาวะไม่คงตัว (Transient State) ถูกนำมาใช้พิจารณาการกระจายลมร้อนในตู้อบขนาดดังภาพที่ 8 ซึ่งจะไม่มีการบรรจุกา

เป็นการศึกษาการกระจายของลมร้อนในสภาวะไร้ภาต เนื่องด้วยท่อนำส่งลมร้อนซึ่งอยู่ด้านหลังตู้อบมีการจัดวางตำแหน่งไม่อยู่ตรงกลาง (ไม่สมมาตร) ส่งผลให้ท่อทางขวาของตู้มีระยะทางที่สั้นกว่าลมร้อนจึงไหลไปตามท่อที่สะดวกกว่า ส่งผลให้ลมร้อนกระจายไม่ทั่วกันทั้งตู้อบ ตำแหน่งรูท่อ 2 รูขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 100 mm ที่ถูกเจาะเข้าไปยังตู้อบนั้นอยู่สูงจากพื้นเป็นระยะทาง 0.6 m จึงทำให้พื้นที่ด้านล่างนั้นมีการกระจายของลมร้อนที่ต่ำกว่าด้านบนและด้วยเหตุที่ลมร้อนจะลอยตัวขึ้นจึงส่งผลให้ความร้อนในด้านบนจะสูงกว่าด้านล่าง

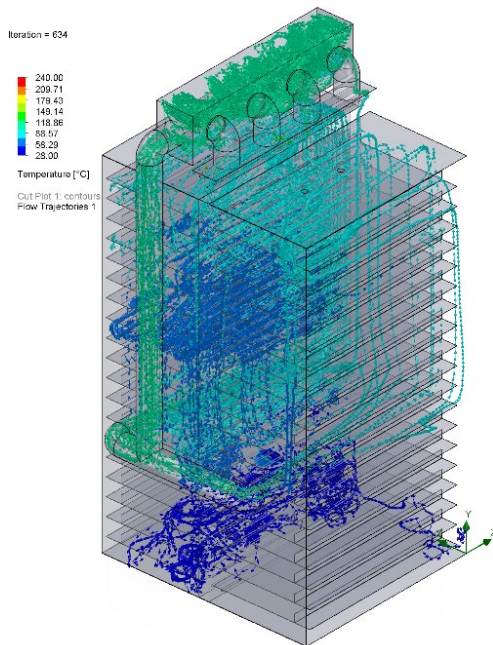
จากภาพที่ 8 จะมีโซนห้องอบด้านขวาและโซนห้องอบด้านซ้ายซึ่งมีความชัดเจนว่าการกระจายของลมร้อนนั้นไม่ดีสำหรับลักษณะของตู้อบแบบเดิมที่มีปัญหาอยู่ โดยเฉพาะพื้นที่ด้านล่างทางซ้ายและขวาซึ่งอยู่สูงจากพื้น 0.6 m จะมีการกระจายลมร้อนที่ต่ำมาก ทั้งหมดนี้เป็นการอธิบายในช่วงของสภาวะไม่คงตัว แต่หากปล่อยเวลาให้นานขึ้นมากกว่า 2 ชั่วโมงขึ้นไป พบว่าการกระจายของลมร้อนทั่วทั้งตู้อบนั้นจะเข้าสู่สภาวะคงตัว นั่นคืออุณหภูมิหากตั้งไว้ที่ 80°C ก็จะมีอุณหภูมิทั่วทั้งตู้ทั้งด้านซ้ายและด้านขวา ด้านบนและด้านล่างใกล้เคียงกันอยู่ที่ 80°C



ภาพที่ 8 การกระจายลมร้อนในตู้อบซึ่งไม่บรรจุกา

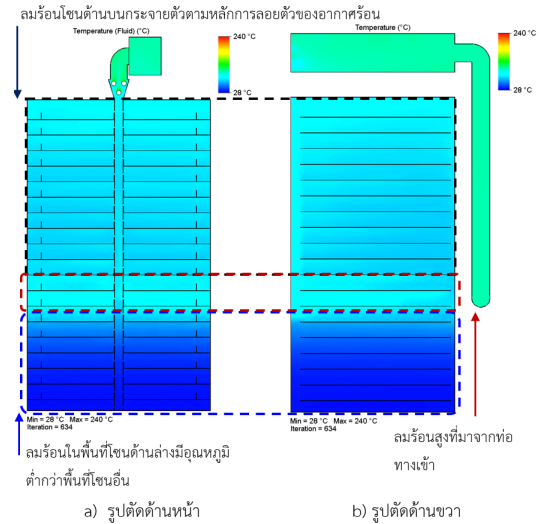


a) มุมมอง Isometric



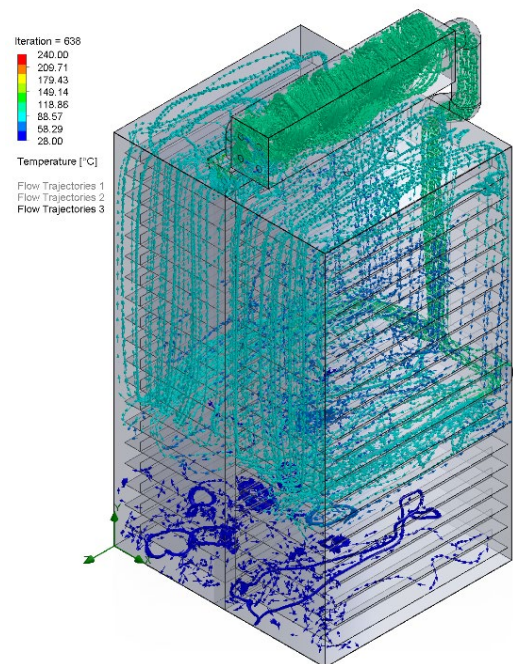
b) มุมมองด้านหลัง

ภาพที่ 9 การกระจายความร้อนในตู้อบซึ่งบรรจุภาต
พื้นที่ด้านล่างของตู้อบก็ยังคงมีการกระจายที่ไม่ดีพอในช่วงสภาวะ
ไม่คงตัว

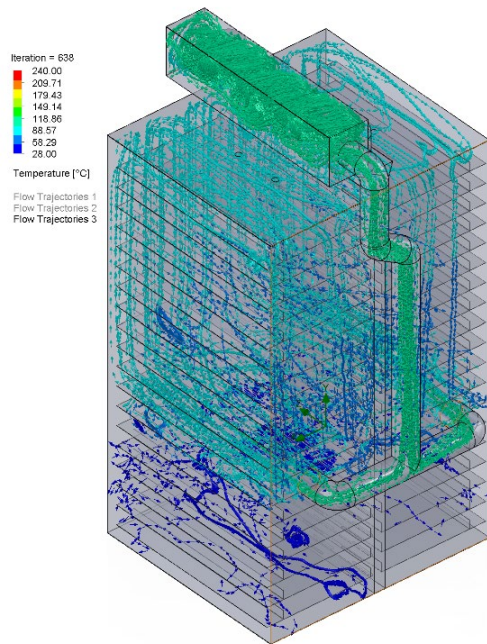


ภาพที่ 10 การกระจายอุณหภูมิของลมร้อนด้วยภาคตัดด้านหน้า
และด้านขวาของตู้อบ

จากภาพที่ 9 เป็นการศึกษาในกรณีที่มีการบรรจุภาต
จำนวน 38 ภาต แบ่งเป็นห้องอบด้านขวา 19 ภาต และห้องอบ
ด้านซ้าย 19 ภาต ลมร้อนจะถูกบังคับให้ไหลไปตามท่อทาง
เช่นเดียวกับผลการวิเคราะห์ในภาพที่ 8 เพียงแต่มลร้อนที่กระจาย
เข้าสู่ห้องอบนั้นจะมีภาตเป็นตัวบังคับไม่ให้ลมร้อนกระจายขึ้นสู่
ด้านบนได้อย่างรวดเร็ว ความร้อนจะต้องแพร่กระจายไปยังโซน
ด้านขวาและโซนด้านซ้าย สังเกตเห็นได้ว่าการกั้นห้องทั้งสองห้อง
ด้วยภาตนั้นจะส่งผลให้มีการกระจายลมที่ดีขึ้นและอุณหภูมิจะ
เพิ่มขึ้นอย่างช้าๆ ภาพที่ 10 คือการกระจายของอุณหภูมิด้วยการ
ใช้ภาคตัดด้านหน้าและด้านขวา ซึ่งทำให้เห็นภาพการกระจายของ
อุณหภูมิได้ชัดเจน โดยเฉพาะอย่างยิ่งพื้นที่โซนใต้ท่อทางลมร้อน
เข้าตู้อบที่เวลาการทำงานของตู้อบที่ 20 นาที พบว่าอุณหภูมิมี
ค่าประมาณ 32-43°C แต่ในพื้นที่ด้านบนเหนือท่อทางลมร้อนเข้า
ตู้อบจะมีอุณหภูมิประมาณ 66-72°C

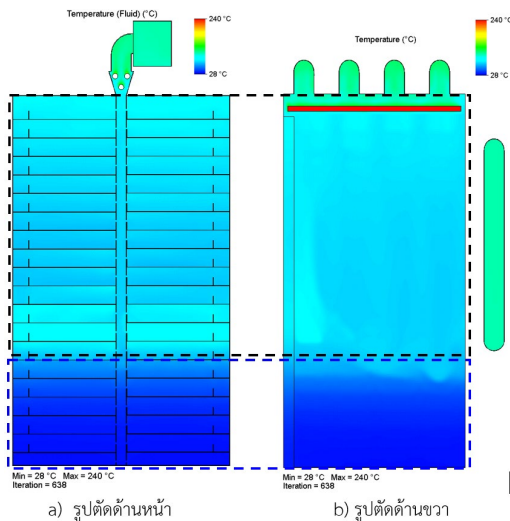


a) มุมมอง Isometric



b) มุมมองด้านหลัง

ภาพที่ 11 การกระจายความร้อนในตู้อบที่ปรับปรุงท่อลม



a) รูปตัดด้านหน้า

b) รูปตัดด้านขวา

ภาพที่ 12 การกระจายอุณหภูมิของลมร้อนด้วยภาคตัดด้านหน้า
และด้านขวาของตู้อบ

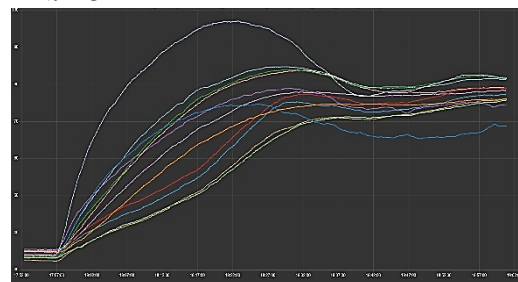
จากผลการกระจายความร้อนของตู้อบในภาพที่ 8-10 ซึ่งเกิดจากความไม่สมมาตรของท่อลมร้อนได้ถูกปรับปรุงใหม่ให้ท่อลมร้อนมีความสมมาตรวิ่งตรงและแยกออกไปยังห้องอบด้านขวาและห้องอบด้านซ้ายในปริมาณที่ใกล้เคียงกัน ซึ่งท่อลมร้อน 2 รู มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 100 mm จะยังคงอยู่สูงจากฐานของตู้ที่ระยะ 0.6 m ดำเนินการวิเคราะห์ใหม่โดยใช้เงื่อนไขขอบและรูปแบบเดิมได้ผลดังภาพที่ 11-12 พบว่าความร้อนกระจายตัวไปยังห้องอบทางด้านซ้ายและด้านขวาใกล้เคียงกันมีการกระจายของลมร้อนในลักษณะปั่นป่วนทำให้เกิดข้อดีในด้านของการกระจายลมร้อน การใช้ระยะเวลาการกระจายลมร้อนจากสถานะไม่คงตัวสู่เข้า

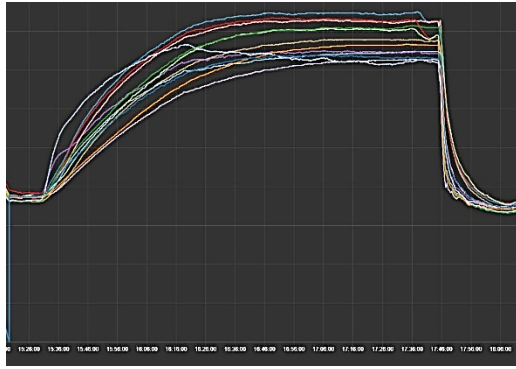
สู่ช่วงสภาวะคงตัวมากถึง 1 ชั่วโมง ซึ่งส่งผลไม่ดีทั้งการสิ้นเปลืองพลังงานและเวลา การออกแบบที่ตู้อบพร้อมโดยมีอุณหภูมิในตู้อบที่เข้าสู่สภาวะคงตัวเป็นสิ่งที่ดีต่อขนม ซึ่งการวิเคราะห์ในช่วงสภาวะไม่คงตัวในภาพที่ 11-12 นี้ถือว่าเป็นแนวโน้มและแนวทางที่น่าพอใจ ทั้งนี้หากสามารถปรับท่อทางเข้าของลมร้อนให้เคลื่อนตัวมาอยู่ที่ด้านล่างของตู้อบจะทำให้การกระจายของลมร้อนนั้นดีมากยิ่งขึ้นและกระจายทั่วทั้งตู้อบ

3.2 ผลการทดลอง

ผลการทดลองแสดงดังภาพที่ 13-15 โดยแกนแนวนอนเป็นระยะเวลา (t) ในหน่วยนาที่ และแกนแนวตั้งเป็นอุณหภูมิ (T) ในหน่วยองศาเซลเซียส จากการทดลองให้ความร้อนกับตู้อบที่ใส่ถาดจำนวน 38 ถาด ได้ผลดังภาพที่ 13 แสดงให้เห็นถึงการกระจายลมร้อนซึ่งวัดด้วยเซนเซอร์อุณหภูมิ PT100 จำนวน 12 ช่องสัญญาณ (เซนเซอร์วัดอุณหภูมิ 12 จุดแทนด้วยเส้นกราฟ 12 เส้น) ในช่วงเริ่มต้นที่อุณหภูมิของตู้อบจะเท่ากับอุณหภูมิของสิ่งแวดล้อมที่ 28°C เมื่อทำการป้อนกำลังไฟไปยังฮีตเตอร์ทำให้เกิดการกระจายของลมร้อนโดยใช้พัดลมเป่าอากาศเพื่อนำพาความร้อนกระจายไปยังส่วนต่างๆ ของตู้อบด้วยความเร็วลมที่ 10 m/s จะเห็นได้อย่างชัดเจนว่าตู้อบเดิมซึ่งยังไม่มีมีการปรับปรุงนั้นจะมีช่วงของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในแต่ละตำแหน่งแตกต่างกันอย่างมาก (Transient State) พิจารณาได้จากเส้นกราฟเกิดการกระจายตัว แต่เมื่อเวลาผ่านไปเป็นระยะเวลามากกว่า 2 ชั่วโมง พบว่าแนวโน้มของเส้นกราฟจะใกล้เคียงกัน มีความแตกต่างกันไม่มากนัก เหตุผลนี้เองจึงส่งผลให้ผลิตภัณฑ์ที่จะนำมาอบนั้นอาจเกิดความเสียหายได้ในช่วงที่เกิดการเปลี่ยนแปลงของลมร้อนที่ไม่เท่ากันก็คือช่วงสภาวะไม่คงตัว ในการปรับปรุงตู้อบนั้นจะต้องทำให้ช่วงสภาวะไม่คงตัวนี้มีการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิแต่ละตำแหน่งให้ใกล้เคียงกัน

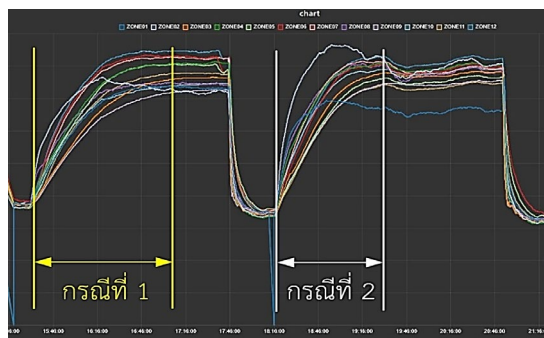
จากการทดลองด้วยการใช้กำลังไฟสูงสุดและรักษาอุณหภูมิห้องอบให้อยู่ที่ 80°C ด้วยความเร็วลม 10 m/s ได้ผลดังภาพที่ 8 นั้น จึงทำการปรับเปลี่ยนค่ากำลังไฟให้ลดลง 34% และลดกำลังของลมเป่าลง 25% จึงได้ผลดังภาพที่ 14 พบว่าการกระจายของลมร้อนในตู้อบของแต่ละตำแหน่งที่วัดอุณหภูมิในช่วงสภาวะไม่คงตัวมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นไปในทิศทางเดียวกัน อัตราการกระจายลมร้อนเพิ่มขึ้นอย่างมีสัดส่วนและเข้าสู่ช่วงสภาวะคงตัวแต่จะเห็นได้ว่าทั้งกรณีของผลในภาพที่ 13 และผลในภาพที่ 14 นั้น อุณหภูมิที่สภาวะคงตัวในแต่ละตำแหน่งของตู้อบก็ยังคงมีความแตกต่างกัน 1-5°C

ภาพที่ 13 การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิแต่ละตำแหน่งในช่วงสภาวะ
ไม่คงตัว จำนวน 12 จุด



ภาพที่ 14 ลักษณะการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิเมื่อทำการลดกำลังไฟของฮีตเตอร์ 1/3 เท่า

ซึ่งจากภาพที่ 15 คือการเปรียบเทียบการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิ ในช่วงเวลาของสภาวะไม่คงตัว กรณีที่ 1 ในรูปด้านซ้าย เป็นกรณีที่ใช้ค่ากำลังไฟให้ลดลง 33% และใช้กำลังของลมเป่าที่ 66% จะต้องใช้เวลาในการเข้าสู่สภาวะคงตัวเท่ากับ 100 นาที แต่สำหรับกรณีที่ 2 รูปด้านขวาคือการทดลองที่ใช้ค่ากำลังไฟให้ลดลง 33% และกำลังของลมเป่า 100% จะใช้เวลาในการเข้าสู่สภาวะคงตัวเพียง 74 นาที



ภาพที่ 15 การเปรียบเทียบการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิ

3.3 การวิเคราะห์ผลการเปรียบเทียบ

ผลการเปรียบเทียบการจำลองด้วย CFD และการทดลอง ได้ผลในช่วงสภาวะไม่คงตัวดังตารางที่ 1 เป็นตัวอย่างผลการทดลองและวิเคราะห์ที่เงื่อนไขเดียวกันโดยมีค่าความคลาดเคลื่อนกันระหว่าง 6-10% ซึ่งยอมรับได้ในการวิเคราะห์นี้ เป็นที่น่าสังเกตในตำแหน่งการวัดที่ 5, 6, 11 และ 12 ซึ่งเป็นตำแหน่งด้านล่างของตู้อบมีค่าความแตกต่างของอุณหภูมิ อันเนื่องมาจากการส่งจ่ายความร้อนเข้ามายังห้องอบขนมนี้ไม่ได้จ่ายเข้ามายังด้านล่างของตู้อบขนม และความร้อนจะมีพฤติกรรมลอยตัวสูงขึ้นสู่ด้านบน จึงส่งผลให้อุณหภูมิด้านล่างต่ำกว่าอุณหภูมิที่ตำแหน่งอื่นๆ สำหรับความเร็วของกระแสลมร้อนที่เข้ามายังห้องอบขนม หากมีความเร็วลมเข้าห้องอบลดลงจะส่งผลให้การกระจายอุณหภูมิไม่ทั่วถึงและเกิดเป็นความแตกต่างของอุณหภูมิอย่างมาก

ตารางที่ 1 ผลการเปรียบเทียบอุณหภูมิด้วยการทดลองและ CFD

Point	Exp. Results	CFD Results	% Difference
1	68.7	65.2	5.09
2	81.6	79.8	2.20
3	76	72.5	4.60
4	81.8	77.8	4.88
5	75.6	68.8	8.99
6	79	72.6	8.10
7	79	75.4	4.55
8	74.3	71.2	4.17
9	78.3	75.2	3.95
1	81.3	77.8	4.30
11	75.9	68.5	9.74
12	77.3	69.7	9.83

เนื่องด้วยกรณีศึกษาทั้งการทดลองและการจำลองการไหลด้วย CFD นั้นมีผลการทดลองและการวิเคราะห์เป็นจำนวนมาก ดังนั้นในตารางที่ 1 จึงเป็นการเลือกข้อมูลเพียงบางส่วนเพื่อนำมาใช้ในการพิสูจน์แบบจำลอง ซึ่งในทุกโมเดลของการจำลองนั้นเมื่อเปรียบเทียบกับผลการทดลองก็ให้ผลมีความสอดคล้องกันในทุกกรณีศึกษา ดังนั้นจึงยกผลการเปรียบเทียบมาเพียงเงื่อนไขใดเงื่อนไขหนึ่งเท่านั้น

4. สรุปผลการวิจัย

จากการทดลองและวิเคราะห์ด้วยหลักพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณด้วยโปรแกรมพบว่าให้ผลที่สอดคล้องกันซึ่งมีความแตกต่างอยู่ในช่วง 6-10% ซึ่งเนื่องมาจากเกิดการสูญเสียความร้อนในการทดลองแต่ในกรณีวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมไม่มีการสูญเสียความร้อน และพื้นผิวของตู้อบและพื้นที่ภายในไม่ได้ราบเรียบแต่ในโปรแกรมเป็นแบบราบเรียบ ผลการทดลองพบว่าการกระจายของลมร้อนในช่วงของสภาวะไม่คงตัวจะมีความแตกต่างกันไปและแต่ละตำแหน่งจะมีอุณหภูมิที่แตกต่างกันมาก ซึ่งเป็นปัญหาหลักของการกระจายลมร้อน เนื่องด้วยอากาศร้อนจะต้องเคลื่อนตัวขึ้นสู่ที่สูง ดังนั้นการจ่ายลมร้อนจากห้องสร้างลมร้อนจะต้องใช้พัดลมอากาศบังคับให้อากาศไหลผ่านลงมายังด้านล่างของตู้และลมร้อนจะกระจายขึ้นไปด้านบนของตู้โดยธรรมชาติ ดังนั้นการออกแบบจะต้องพิจารณาทางเข้าของลมร้อน ตัวแปรหนึ่งที่มีความสำคัญคือการทำให้เกิดความสมมาตรของลักษณะทางกายภาพของตู้ การเข้าของลมร้อนไหลไปตามท่อทางเดิมมันไม่สมมาตร แม้ว่าจะปรับให้ท่อทางสมมาตรอาจยังไม่เพียงพอ จำเป็นต้องให้ปลายทางออกทางนั้นนำพาลมร้อนไปสู่ด้านล่างของตู้อบด้วย หรืออีกแนวทางหนึ่งคือการสร้างห้องสะสมความร้อนให้อยู่ด้านหลังตู้อบ และใช้ห้องสะสมลมร้อนนี้ เป็นห้องกระจายลมร้อนเข้าไปยังถาดตามชั้นต่างๆ

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร และศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ (MTEC) สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ (สวทช.) สำหรับเครื่องมือ อุปกรณ์ และโปรแกรมช่วยในการดำเนินงานวิจัยและการวิเคราะห์

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Mirade P. S., Daudin J. D., Ducept F., and Trystram G., Characterization and CFD modeling of air temperature and velocity profiles in an industrial biscuit baking tunnel oven. J. Clement./ Food Research International. 2004; 37: 1031–1039.
- [2] Nantawan T., Weibiao Z., and Thomas A., Two-dimensional CFD modeling and simulation of an industrial continuous bread baking oven. Journal of Food Engineering. 2003; 60: 211–217.
- [3] Andrew L., Numerical Investigation of the Temperature Distribution in an Industrial Oven. University of Southern Queensland.
- [4] Pragati K. and Sharma H.K., Concept of Computational Fluid Dynamics (CFD) and its Applications in Food Processing Equipment Design. Journal of Food Process Technology. 2012; 3(1).
- [5] Khatir Z. et. al., The Application of Computational Fluid Dynamics (CFD) And Oven Design Optimization in the British Bread-baking Industry. In: International Conference on CFD in Oil & Gas, Metallurgical and Process Industries SINTEF/NTNU, Trondheim Norway; 2011. P. 21-23.
- [6] Verboven P., et. al., “Computational fluid dynamics modelling and validation of the temperature distribution in a forced convection oven. Journal of Food Engineering. 2000; 43(2): 61-73.
- [7] Rokni M. and Sunden B., Investigation of a Two-Equation Turbulent Heat Transfer Model Applied to Ducts. Journal of Heat Transfer. 2003; 125(1): 194-200.
- [8] Jones A. and Ingham D., Combined convection flow in a vertical duct with wall temperatures that vary linearly with depth. International Journal of Heat and Fluid Flow. 1993; 14(1); 37-47.
- [9] Sparrow E. and Ortiz M., “Heat transfer coefficients for the upstream face of a perforated plate positioned normal to an oncoming flow. International Journal of Heat Mass Transfer. 1981; 25(1); 127-135.
- [10] Subrata R., Sagar K. and Heidmann J., Film Cooling Analysis Using DES Turbulence Model. In *ASME TurboExpo*, 2003.
- [11] Mark F. et. al., Use of computational fluid dynamics in domestic oven design. Int. Jnl. of Multiphysics. 2008; 2(1).
- [12] ANSYS Inc. CFX-5.7.1 Theory Manual. ANSYS. 2005.
- [13] Wilcox D. C., Basic Fluid Mechanics, D C W Industries, La Canada, 1998.
- [14] Menter F. R., Two-Equation Eddy-Viscosity Turbulence Models for Engineering Applications. AIAA Journal. 1994; 1598–1605.
- [15] Dhinsa K. K., Bailey C. J. and Pericleous K. A., Turbulence Modelling and its Impact on CFD Predictions for Cooling of Electronic Components. In: Inter Society Conference on Thermal Phenomena. 2004.
- [16] Atkins W.S., Consultants, Best Practice Guidelines for Marine Applications of Computational Fluid Dynamics. 2002.
- [17] Tinprabath P., et al., A Study of Drying Coconut Coir Dust with a Fluidized Bed Type. In: PCRUSCI CONFERENCE 2022, Faculty of Science and Technology, Phetchabun Rajabhat University, 2022. P. 465-475.
- [18] Tinprabath P., et. al. “The study of kumquats drying using a fluidized bed dryer,” In: Rajamangala Manufacturing & Management of Technology Conference; 9th RMTTC, 1–3 May 2024 at The Heritage Chiang Rai Hotel and Convention. Chiang Rai. P. 1325-1330.
- [19] Lertlaokul K., et al., Drying of Andrographis Paniculate with Fluidized Bed. In: 13 th Proceeding of Sustainable Industrial Innovation and Management Conferenc. BITEC Exhibition and Convention Center. Bangkok. 2024.
- [20] Chindaprasert N. and Tinprabath P., A Study of Drying Behavior of Home Agricultural Products. In: Proceeding of the 38Th Conference on Mechanical Engineering Network of Thailand: ME-NETT 32, 3–6 July 2018 Mukdahan Province.
- [21] Chindaprasert N., Boonmee P. and Tinprabath P., A Study of Drying Roses Using Hot Air from Air Conditioner Condenser and Electric Heater Coils. In:

Proceeding of the 38th Conference on Mechanical
Engineering Network of Thailand: ME-NETT 32, 3–6
July 2018. Mukdahan Province

ประเมินความเสี่ยงก๊าซเรดอนภายในอาคาร มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตปัตตานี

Risk Assessment of Radon gas indoor Buildings at Prince of Songkla University, Pattani Campus

ปริยาภรณ์ เนื่อนัย¹ พงทิพย์ แก้วทับทิม^{1*}
Preeyaporn Nuanui¹ and Pungtip Kaewtubtim¹

¹สาขาวิทยาศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตปัตตานี

¹Department of Science, Faculty of Science and Technology, Prince of Songkla University, Pattani Province

*Corresponding author, E-mail: preeyaporn.n1999@gmail.com

Received: 02-06-2024 Revised: 15-11-2025 Accepted: 11-12-2025

บทคัดย่อ

วัตถุประสงค์งานวิจัยเพื่อประเมินความเสี่ยงก๊าซเรดอนภายในอาคาร มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขต ปัตตานี ก๊าซเรดอนเป็นสารก่อมะเร็ง กระจายอยู่ทั่วไปในสิ่งแวดล้อม รวมทั้งวัสดุก่อสร้าง สำหรับ การวิจัยในครั้งนี้ ได้ทำการวิเคราะห์ ก๊าซเรดอนในห้องเรียน และห้องสำนักงาน จำนวน 56 ตำแหน่ง ด้วยเทคนิค การกัตรอยนิวเคลียร์ โดยวัดรอยรังสีแอลฟาชนิดแผ่นฟิล์ม CR-39 เป็นเวลา 1 เดือน จากนั้นนำมากัดขยายรอย ด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ความเข้มข้น 6.25 mol/L ที่อุณหภูมิ 60 °C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง ตรวจนับค่าความหนาแน่นรอยรังสีแอลฟาที่เกิดขึ้นด้วยกล้องจุลทรรศน์ และปรับเทียบรอยแผ่งเป็นค่า ความเข้มข้นของเรดอน พบว่าความเข้มข้นของก๊าซเรดอนมีค่าอยู่ระหว่าง 4.89 ± 1.82 ถึง 61.76 ± 56.92 Bq/m³ เฉลี่ย 21.99 ± 8.69 Bq/m³ ซึ่งมีค่าต่ำกว่ามาตรฐานที่ US EPA กำหนดที่ 148 Bq/m³ สำหรับปริมาณ รังสีสมมูลที่ได้รับต่อปี มีค่าอยู่ระหว่าง 0.12 ± 0.05 ถึง 1.56 ± 1.44 mSv/y เฉลี่ย 0.55 ± 0.22 mSv/y ซึ่ง ต่ำกว่ามาตรฐานที่ ICRP กำหนดที่ 3-10 mSv/y นอกจากนี้ ผลการประเมิน ความเสี่ยงในการก่อให้เกิดมะเร็ง ตลอดช่วงชีวิต มีค่าอยู่ระหว่าง $(0.47 \pm 0.18) \times 10^{-3}$ ถึง $(6.00 \pm 5.53) \times 10^{-3}$ เฉลี่ย $(2.14 \pm 0.84) \times 10^{-3}$ ซึ่งมีค่า สูงกว่ามาตรฐาน UNSCEAR กำหนด 0.29×10^{-3} ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่า นักศึกษา และบุคลากร ของ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตปัตตานี ได้รับก๊าซเรดอนในระดับที่ต่ำ จึงมีความปลอดภัยต่อความเสี่ยง จากการเป็นโรคมะเร็งปอด

คำสำคัญ ก๊าซเรดอน, เทคนิคการกัตรอยนิวเคลียร์, โรคมะเร็งปอด

ABSTRACT

The objective of this research was to assess the risk of indoor radon gas in buildings at Prince of Songkla University, Pattani Campus. Radon is a carcinogenic gas that is ubiquitous in the environment, including in building materials. A total of 56 classrooms and offices were randomly selected for radon measurement using the nuclear track etching technique. CR-39 detectors were exposed for one month to measure alpha radiation, then etched with a 6.25 mol/L sodium hydroxide (NaOH) solution at 60 °C for 4 hours. The track density was counted under a microscope and converted to radon concentration. The results showed that radon concentrations ranged from 4.87 ± 3.16 to 61.76 ± 56.92 Bq/m³, with an average of 21.99 ± 8.69 Bq/m³, which is lower than the U.S. EPA guideline of 148 Bq/m³. The annual effective dose ranged from 0.12 ± 0.05 to 1.56 ± 1.44 mSv/y, with an average of 0.55 ± 0.22 mSv/y, below the ICRP recommended range of 3–10 mSv/y. The excess lifetime cancer risk ranged from $(0.47 \pm 0.18) \times 10^{-3}$ to $(6.00 \pm 5.53) \times 10^{-3}$, with an average of $(2.14 \pm 0.84) \times 10^{-3}$, which is higher than the UNSCEAR reference value of 0.29×10^{-3} . The study concludes that students and staff at Prince of Songkla University, Pattani Campus are exposed to low levels of radon gas and are therefore considered safe with regard to radon-induced lung cancer risk.

Keyword: Radon Gas, Nuclear Track Etching Technique, Lung Cancer

1. บทนำ

ก๊าซเรดอน (Radon gas) คือ กัมมันตรังสี ที่ไม่มีสี ไม่มีกลิ่น ไม่มีรส และไม่สามารถรับรู้ได้ โดยประสาทสัมผัสของมนุษย์ [1] และการที่ก๊าซ เรดอนมีสถานะเป็นก๊าซจึงสามารถเข้าสู่ร่างกาย ได้โดยระบบทางเดินหายใจ (Respiration) [2] และไป

สะสมในบริเวณเนื้อเยื่อปอด (Lung tissue) เมื่อเวลาผ่านไปก็จะสลายตัวไปเป็น โพลONIUMโดยการปลดปล่อยอนุภาคแอลฟา (Alpha particle) ออกมา [1] โดยที่อนุภาค แอลฟานี้มีประจุบวกสอง สามารถทำให้อะตอม ที่แอลฟาเคลื่อนที่ผ่านแตกตัวเป็นไอออนได้ดี และนอกจากนี้โพลONIUMซึ่งเป็นนิวไคลด์

กัมมันตรังสีจะฝังตัวอยู่ในเนื้อเยื่อแล้วสลายตัวต่อไปจนกว่าจะเสถียร ทำให้เนื้อเยื่อบริเวณนั้น เสียหาย [3] ก๊าซเรดอนเกิดจากการสลายตัวของ เรเดียม ($Ra-226$) ซึ่งมียูเรเนียม ($U-238$) เป็นกัมมันตรังสีตั้งต้น [4] พบทั่วไปในดิน หิน น้ำ และอากาศซึ่งมีอยู่ตามธรรมชาติ บนพื้นโลก [5] ดังนั้นในบรรยากาศทั่วไปจึงมีก๊าซเรดอนปะปน อยู่จะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับปริมาณสารกัมมันตรังสี ยูเรเนียม และเรเดียมในบริเวณ ดังกล่าว [6,7,8] เมื่อมนุษย์นำดิน หิน หรือทราย ซึ่งเป็นวัสดุก่อสร้างอาคารบ้านเรือนที่มีแร่ เรเดียมเจือปนมาใช้ วัสดุก่อสร้างโดยส่วนใหญ่มี การปลดปล่อยก๊าซเรดอนออกมาอยู่แล้ว โดยจะมีปริมาณความเข้มข้นของก๊าซเรดอนที่ปล่อย ออกมาขึ้นอยู่กับแหล่งที่มาของวัสดุก่อสร้าง เช่น วัสดุก่อสร้างประเภทหิน ถึงแม้ว่าปกติแล้ว ในอุตสาหกรรมก่อสร้างจะใช้หินปูนที่มี การปลดปล่อยแก๊สเรดอนในปริมาณต่ำกว่า หินแกรนิตมาก แต่จากงานวิจัยพบว่า หินปูนในบางพื้นที่ที่มีการปลดปล่อยแก๊สเรดอนออกมาสูง เหมือนกัน ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับแหล่งที่มาของหินที่ นำมาใช้เป็นวัสดุก่อสร้างด้วย เพราะหินปูนที่ใช้ ก่อสร้างถูกนำมาจากภูเขาหินปูนซึ่งอาจมี หินแกรนิตแทรกตัวอยู่ภายใต้ภูเขาหินปูนนี้ ส่งผลให้หินปูนมีการปลดปล่อยแก๊สเรดอน ออกมาในปริมาณสูงด้วย [9] วัสดุก่อสร้างชนิดคอนกรีตให้ก๊าซเรดอนสูงเช่นกัน [10] วัสดุ เหล่านั้นจะปลดปล่อยก๊าซเรดอนออกมาตาม ปริมาณสารตั้งต้นที่ปะปนอยู่ หากกระบวนการ ก่อสร้างอาคารไม่มีการระบายอากาศที่ดีก็จะ เป็นแหล่งสะสมของก๊าซเรดอนในปริมาณที่สูง จนอาจเป็นอันตรายต่อผู้อยู่อาศัยได้ โดยได้ กำหนดให้ความเข้มข้นของก๊าซเรดอนในอาคารบ้านเรือนไม่ควรเกิน 148 Bq/m^3 [11] สำหรับ ค่าปริมาณรังสีสมมูลที่ได้รับต่อปีไม่ควรเกิน $3-10 \text{ mSv/y}$ [12] และค่าความเสี่ยงใน การก่อให้เกิดมะเร็งในตลอดช่วงชีวิตไม่ควรเกิน 0.29×10^{-3} [12]

การได้รับสารกัมมันตรังสีจากเรเดียม และ เรดอนเข้าสู่ร่างกายในปริมาณที่มากเกินไป ซึ่ง อาจจะได้รับจาก น้ำ อากาศ อาหาร หรือแม้แต่ การสัมผัสสิ่งของที่มีการปนเปื้อนของสารกัมมันตรังสี สามารถส่งผลกระทบต่อร่างกายได้ เช่นกัน เมื่อก๊าซเรดอนเข้าสู่ทางเดินหายใจจะ เกิดการสลายตัวให้รังสีแอลฟาและเกิดเป็นธาตุกัมมันตรังสีตัวใหม่ขึ้น ซึ่งธาตุกัมมันตรังสีตัวใหม่ ที่เกิดขึ้นมีสถานะเป็นของแข็งซึ่งสลายตัวให้ธาตุ กัมมันตรังสีลูกหลานต่อไปเรื่อย ๆ จนกลายเป็น ธาตุตะกั่วซึ่งเป็นธาตุเสถียรและสะสมอยู่ใน อวัยวะปอด ไม่สามารถกำจัดออกจากปอดได้ เป็นผลให้เซลล์ที่ปอดจะได้รับอันตรายจากทั้ง รังสีแอลฟาและพิษตะกั่ว ซึ่งจะนำไปสู่การทำให้ มีโอกาสเสี่ยงต่อการเกิดโรคมะเร็งปอด ซึ่ง องค์ การอนามัยโลก (World Health Organization, WHO) ได้ประกาศให้ก๊าซเรดอน เป็นสาเหตุอันดับที่สองของมะเร็งปอดรองจาก บุหรี่ [13] สำหรับประเทศไทยโรคมะเร็งเป็น สาเหตุการตาย อันดับต้น ๆ ของคนไทยมาเป็น โดยเฉพาะอย่างยิ่งพบ แนวโน้ม การเป็น โรคมะเร็งสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง [14] จากสถิติมะเร็งปอดเป็นสาเหตุการตายอันดับสองรอง จากมะเร็งตับ ถือได้ว่าอยู่ในอันดับต้น ๆ ของโลก คิดเป็น 37.4 ต่อประชากรแสนคน

[15] โรคมะเร็งปอดเป็นโรคมะเร็งที่พบได้บ่อย โดย ทะเบียนมะเร็งระดับประชากรในประเทศไทย พบอุบัติการณ์โรคมะเร็งปอดบ่อยเป็นอันดับ 2 ในเพศชาย รองจากโรคมะเร็งตับ มีอุบัติการณ์ เป็น 22.8 ต่อประชากรแสนคน และพบบ่อย เป็นอันดับ 4 ในเพศหญิง รองจากโรคมะเร็งเต้านม มะเร็งปากมดลูก และ มะเร็งตับ คิดเป็น อุตการณ์ 11.5 ต่อประชากรแสนคน [16] แม้จะทราบกันดีว่าการสูบบุหรี่ ซึ่งเป็นสาเหตุ หลักของการเสียชีวิตจากมะเร็งปอด แต่ในปี ค.ศ. 1988 องค์การระหว่างประเทศเพื่อการวิจัย มะเร็ง (International Agency of Research on Cancer: IARC) แห่งองค์การอนามัยโลก ได้มีการจัดประชุมผู้เชี่ยวชาญทั่วโลก ได้ข้อสรุปเป็นเอกฉันท์ว่า ก๊าซเรดอนเป็นสารก่อมะเร็งใน มนุษย์ และสัตว์ เช่นเดียวกับการประชุม นักวิทยาศาสตร์ชั้นนำทั่วโลก ซึ่งจัดโดย National Academic of Sciences, International Commission on Radiological Protection (ICRP) และ National Council on Radiation Protection and Measurement (NCRP) ได้สรุปว่า ก๊าซเรดอนเป็นสาเหตุของ โรคมะเร็งปอดในมนุษย์ และอ้างอิงด้วยจาก การศึกษาความสัมพันธ์ของก๊าซเรดอนในอาคาร กับการก่อให้เกิดโรคมะเร็งปอดทั่วโลกพบว่า 3-20 % ของการเสียชีวิตจากการเป็นโรคมะเร็ง ปอดเกิดจากการได้รับสัมผัสก๊าซเรดอนในอาคาร [17]

ดังนั้นการวิเคราะห์ปริมาณความเข้มข้น ของก๊าซเรดอนภายในอาคารจึงมีความจำเป็น อย่างยิ่งสำหรับการ ประเมินความเสี่ยงต่อการ เป็นโรคมะเร็งในบริเวณที่อยู่อาศัย โดยเฉพาะ ภายในมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ซึ่งมีอาคาร ต่าง ๆ ที่ถูกสร้างโดยใช้วัสดุที่มาจากหิน ดิน ทราย อิฐ ปูน และเป็นอาคารแบบปิดไม่ค่อยเปิดประตูหน้าต่าง ซึ่งอาจจะมีสารกัมมันตรังสี ปนเปื้อน เพื่อทำให้ทราบปริมาณความเข้มข้น ของก๊าซเรดอนอันจะนำไปสู่มาตรการ การ จัดการวางแผนป้องกันและควบคุมโรคมะเร็ง ต่อไป

2. วิธีดำเนินการวิจัย

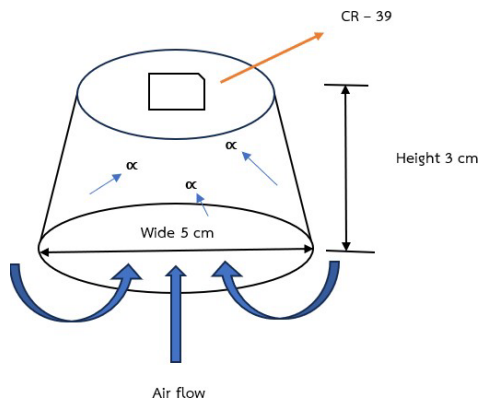
2.1 ขั้นตอนเก็บตัวอย่างก๊าซเรดอน ภายในอาคาร มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตปัตตานี

2.1.1 ศึกษาพื้นที่ วางแผนการลง พื้นที่ เพื่อเลือกอาคาร และตำแหน่งที่จะติดตั้งชุด ตรวจวัดก๊าซเรดอนภายในอาคารต่างๆ ของ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตปัตตานี

2.1.2 สร้างความเข้าใจและ ความร่วมมือกับเจ้าหน้าที่และบุคลากร ในการลง พื้นที่พบปะพูดคุยสร้างความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับความ เสี่ยงทางสุขภาพสำหรับก๊าซเรดอนให้กับเจ้าหน้าที่และบุคลากร รวมถึงนักเรียนนักศึกษา ในการขอ ความร่วมมือสำหรับติดตั้งชุดตรวจวัดก๊าซเรดอน ภายในอาคาร

2.1.3 นำแผ่นฟิล์มพลาสติก CR-39 ของบริษัท Application define ใช้เป็น หัววัดความเข้มข้นของก๊าซเรดอนภายในอาคาร บ้านเรือน ขนาด 1.0 cm^2 จำนวน 56 แผ่น แล้วนำไปประกอบเป็นชุดตรวจวัดก๊าซเรดอนในอาคาร ด้วยเทคนิคการถอยนิวเคลียร์ เนื่องจากสามารถ วัดปริมาณก๊าซเรดอนใน

ระยะยาวได้ ทำให้ผลการวัด ที่ได้แม่นยำสูง สามารถติดตั้งอุปกรณ์ได้ง่าย และมี ราคาไม่แพงมากนักเมื่อเทียบกับเครื่องมือวัดแบบอื่น



ภาพที่ 1 ชุดตรวจวัดก๊าซเรดอน

2.1.4 นำชุดตรวจวัดก๊าซเรดอน ไปติดตั้งภายในอาคารเรียน และสำนักงาน ของ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตปัตตานี 20 อาคาร รวม 56 ตำแหน่ง ในบริเวณชั้นหนึ่งของอาคาร เนื่องจากแหล่งของก๊าซเรดอนมาจากดิน และ หินใต้พื้น ซึ่งสามารถซึมผ่านรอยแตก และรอยแยก จากพื้นได้ ชั้นหนึ่งจึงเป็นชั้นที่มีการสะสมของก๊าซ เรดอนมากกว่าชั้นอื่น ๆ [18] ได้แก่ ห้องสำนักงาน ห้องพักอาจารย์ หรือห้องอื่นที่ผู้อยู่อาศัยใช้ชีวิตทำกิจกรรมต่าง ๆ อยู่เป็นเวลานานในแต่ละวัน เพื่อหา ค่าเฉลี่ยของแต่ละอาคาร โดยติดตั้งชุดตรวจวัดอยู่สูง

2.2 ขั้นตอนการวิเคราะห์ผลการวิจัยในห้องปฏิบัติการ

2.2.1 นำแผ่นฟิล์มพลาสติก CR-39 ที่วางทิ้งไว้ครบ 30 วัน มากัดขยายรอยของ อนุภาครังสีแอลฟาตามเงื่อนไขที่เหมาะสม คือ ใช้ สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ความเข้มข้น 6.25 mol/L ที่อุณหภูมิ 60 °C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง [20] ในอ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิ (Water bath)

2.2.2 ตรวจนับค่าความหนาแน่น รอยรังสีแอลฟาที่เกิดขึ้นบนแผ่นฟิล์มพลาสติก CR-39 ด้วยกล้องจุลทรรศน์กำลังขยาย 100 เท่า ภายใต้กรอบกำหนดพื้นที่ 120,000 (μm)²

2.2.3 เปรียบเทียบความหนาแน่น รอยรังสีแอลฟาเป็นค่าความเข้มข้นของก๊าซเรดอน (Concentration of Radon, C) โดยสถาบันเทคโนโลยีนิวเคลียร์แห่งชาติ (องค์การมหาชน) ซึ่ง วิธีการเปรียบเทียบนี้ผ่านการเปรียบเทียบกับ ห้องปฏิบัติการวัดเรดอนของ National Institute of Radiological Science (NIRS) ประเทศญี่ปุ่น ดังสมการที่ (1) โดยค่าความเข้มข้นของก๊าซเรดอนมาตรฐานในอาคารบ้านเรือนไม่ควรเกิน 148 Bq/m³ [11]

$$C = \frac{\rho}{kt} \quad (1)$$

เมื่อ C คือ ความเข้มข้นรังสีแอลฟาของก๊าซเรดอน 3 ρ คือ อัตราส่วนของรอยอนุภาคแอลฟาต่อพื้นที่ 120,000 (μm)² (Bq/m) (track/(μm)²) โดยที่ $\rho = \frac{Track}{Area}$ และ k คือ ค่า calibration factor เท่ากับ 1.63985 × 10⁻⁶ Track·(μm)² ·m³ ·kBq·hr)⁻¹ t คือ เวลา (hr)

2.2.4 คำนวณปริมาณสมมูลที่ได้รับต่อปี (Annual Effective Dose, DT) ปริมาณ รังสีสมมูลจากการได้รับรังสีจากก๊าซเรดอน (The Exposure to Radon Daughters) หรือไอโซโทป รังสีที่เป็นลูกหลานเรดอนที่เรียกว่า Radon Daughters โดยที่การสัมผัสกับเรดอนหรือไอโซโทป ลูกหลานภายในที่อยู่อาศัยนั้น สามารถคำนวณได้ดัง สมการที่ (2) สำหรับค่าปริมาณรังสีสมมูลที่ได้รับต่อปีไม่ควรเกิน 3-10 mSv/y [12]

$$DT = C \times D \times H \times F \times T \quad (2)$$

เมื่อ DT คือ ปริมาณรังสีสมมูลที่ได้รับต่อปี (mSv/y) C คือ ค่าความเข้มข้นของก๊าซเรดอน (Bq/m³) D คือ แฟกเตอร์การเปลี่ยนแปลง (Dose Conversion Factor = 9 × 10⁻⁶ mSv/hr per Bq/m³) H คือ แฟกเตอร์ในการอยู่อาศัย (Indoor Occupancy Factor = 0.8) F คือ แฟกเตอร์สมดุล สำหรับเรดอนในบ้านเรือน (Equilibrium Factor = 0.4) T คือ เวลาใน 1 ปี (24 hr × 365 days = 8760 hr/y)

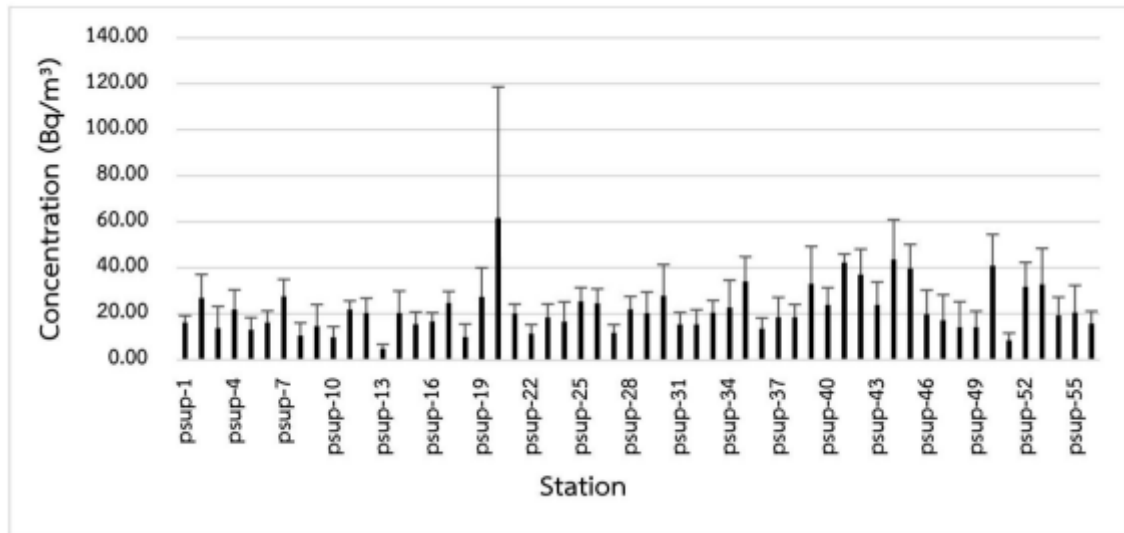
2.2.5 คำนวณค่าความเสี่ยงใน การก่อให้เกิดมะเร็งตลอดช่วงชีวิต (Excess lifetime cancer risk, ELCR) สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (3) และค่าความเสี่ยงในการก่อให้เกิดมะเร็งในตลอดช่วงชีวิตไม่ควรเกิน 0.29×10⁻³ [12,21]

$$ELCR = DT \times DL \times RFELCR \quad (3)$$

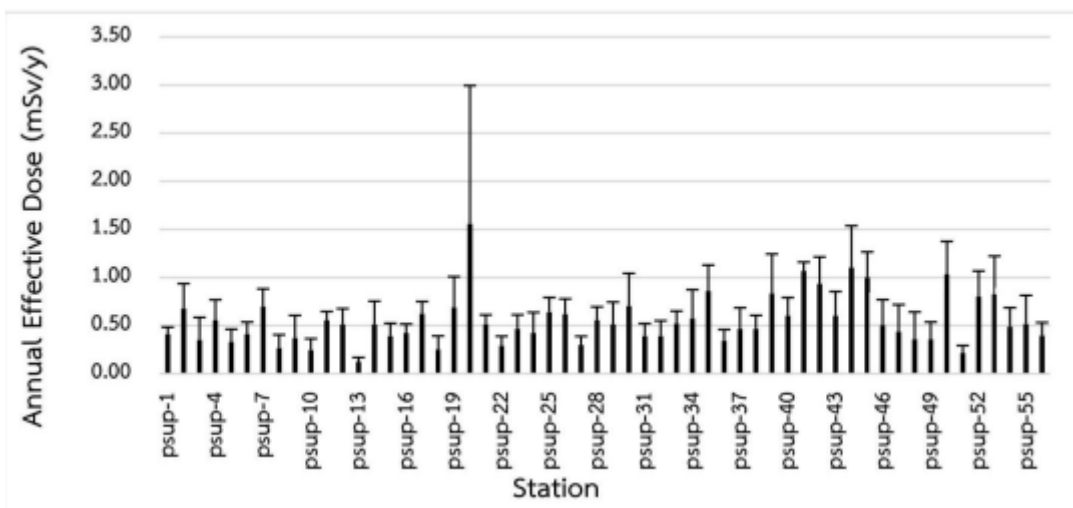
เมื่อ DT คือ ปริมาณรังสีสมมูลที่ได้รับต่อปี (mSv/y) DL คือ อายุขัยเฉลี่ยของมนุษย์ (ประมาณ 70 ปี) RF คือ ปัจจัยเสี่ยงเป็นความเสี่ยงมะเร็ง (Risk Factor = 5.5 × 10⁻² Sv-

จากภาพที่ 2 กราฟแสดงความเข้มข้นของก๊าซเรดอนในอาคารมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขต ปัตตานี ทั้งหมด 56 ตำแหน่ง มีค่าอยู่ ระหว่าง 4.89 ± 1.82 ถึง 61.76 ± 56.92 Bq/m³ และมีค่าความเข้มข้นก๊าซเรดอนเฉลี่ยเท่ากับ 21.99 ± 8.69 Bq/m³ ซึ่งมีค่าต่ำกว่า มาตรฐานที่ US EPA กำหนดคือ 148 Bq/m³ โดยมีค่าสูงสุด อยู่ที่ห้องสำนักงาน ของอาคารสำนักส่งเสริมและบริหาร วิชาการ (PSUP-20) และมีค่าต่ำสุดอยู่ที่ห้องพักครู ชีววิทยา ของอาคาร 51 (PSUP-13)

3. ผลการวิจัยและอภิปราย



ภาพที่ 2 ค่าความเข้มข้นของก๊าซเรดอนภายในอาคารของมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตปัตตานี



ภาพที่ 3 ปริมาณรังสีสะสมที่ได้รับต่อปีของก๊าซเรดอนภายในอาคารของมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

จากภาพที่ 3 แสดงผลการวัดปริมาณรังสี สมมูลที่ของก๊าซเรดอนได้รับต่อปีภายในอาคาร มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตปัตตานี ทั้งหมด 56 ตำแหน่ง มีค่าอยู่ระหว่าง 0.12 ± 0.05 ถึง 1.56 ± 1.44 mSv/y และมีปริมาณรังสีสมมูลที่ได้รับต่อปีเฉลี่ยเท่ากับ 0.55 ± 0.22 mSv/y ซึ่งต่ำกว่ามาตรฐานที่ ICRP กำหนด 3-10 mSv/y โดย ค่ารังสีสมมูลที่ได้รับต่อปีมีค่าสูงสุดที่ตำแหน่ง ห้อง สำนักงาน อาคารสำนักส่งเสริมและบริการวิชาการ (PSUP-20) และมีค่าต่ำสุดตำแหน่ง ที่ห้องพักครู ชีววิทยา อาคาร 51 (PSUP-13)

จากภาพที่ 4 ผลการประเมินความเสี่ยงในการก่อให้เกิด มะเร็งตลอดช่วงชีวิตภายในอาคาร อาคารมหาวิทยาลัย สงขลานครินทร์ วิทยาเขต ปัตตานี ทั้งหมด 56 ตำแหน่ง มีค่าอยู่ระหว่าง $(0.47 \pm 0.18) \times 10^{-3}$ ถึง $(6.00 \pm 5.53) \times 10^{-3}$ และมีค่าความเสี่ยงในการก่อให้เกิดมะเร็งตลอดช่วงชีวิตเฉลี่ยเท่ากับ 2.14 ± 0.84 ซึ่งมีค่าสูงกว่ามาตรฐานที่ UNSCEAR

0.29×10^{-3} [12,21] กำหนด โดยมีความ เสี่ยงสูงสุดอยู่ที่ ห้องสำนักงาน ของอาคารสำนัก ส่งเสริมและบริการวิชาการ (PSUP-20) และมีค่า ต่ำสุดอยู่ที่ ห้องพักครูชีววิทยาของ อาคาร 51 (PSUP-13)

จากการศึกษาความเข้มข้นของก๊าซเรดอน ภายในอาคารเพื่อประเมินความเสี่ยงของ มหาวิทยาลัย สงขลานครินทร์ วิทยาเขตปัตตานี ทั้งหมด 56 ตำแหน่ง ค่าเฉลี่ย 21.99 ± 8.69 Bq/m³ ซึ่งมีค่าต่ำกว่ามาตรฐานที่ US EPA กำหนดคือ 148 Bq/m³ สำหรับปริมาณรังสีสมมูลที่ได้รับต่อปีมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0.55 ± 0.22 mSv/y ซึ่งต่ำกว่า มาตรฐานที่ ICRP กำหนด 3-10 mSv/y และผลการ ประเมินความเสี่ยงในการก่อให้เกิดมะเร็งตลอด ช่วงชีวิต มี ค่าเฉลี่ยเท่ากับ 2.14 ± 0.84 ซึ่งที่ค่าสูง กว่ามาตรฐาน

UNSCEAR กำหนด 0.29×10^{-3} [22] และเมื่อเทียบค่าความเข้มข้นของก๊าซเรดอนในบ้านเรือน ปริมาณรังสีสมมูลที่ได้รับต่อปี และผลการประเมินความเสี่ยงในการก่อให้เกิดมะเร็งตลอด ช่วงชีวิต พบว่ามีค่าใกล้เคียงกับการศึกษาก๊าซเรดอน ภายในบ้านเรือน บริเวณพื้นที่อำเภอ

[24] จากการศึกษาค่าความเข้มข้นของก๊าซเรดอนภายในอาคารของมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตปัตตานี และวิเคราะห์ความเสี่ยงในการก่อให้เกิด มะเร็งในตลอดช่วงชีวิต พบว่าห้องที่มีความเสี่ยงใน การก่อให้เกิด มะเร็งในตลอดช่วงชีวิตสูงสุดคือ ห้อง สำนักงานของอาคารสำนักส่งเสริมและบริการ วิชาการ (PSUP-20) ลักษณะของห้องดังกล่าวอยู่ใน อาคารเก่าที่สร้างพร้อม ๆ กับการริเริ่มก่อตั้ง มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตปัตตานี และเป็นอาคารชั้น 1 ดังนั้นก๊าซเรดอนอาจจะเข้ามาตาม พื้นที่มีรอยแตก รอยต่อระหว่างท่อระบายน้ำ ท่อ ปะปา หรือพื้นที่ที่เจาะรูไว้ ทำให้ก๊าซเรดอนสามารถ แพร่แทรกเข้ามาได้ และอาจจะเป็นเพราะว่าวัสดุ ก่อสร้างที่ใช้ในการทำอาคารดังกล่าวมีสาร กัมมันตรังสีปะปนอยู่สูง จึงทำให้มีการปล่อยสาร กัมมันตรังสีออกมาในปริมาณสูงเช่นกัน รองลงมา เป็นห้องพักอาจารย์ อาคาร 58 (PSUP-44) ห้องเรียน อาคารวิทยากรสื่อสาร (PSUP-41) ห้องสำนักงาน เจ้าหน้าที่นั่งทำงาน ของคณะรัฐศาสตร์ (PSUP-50) ห้องเจ้าหน้าที่อาคาร 58 (PSUP-45) ลักษณะของ

ห้องเหล่านี้เป็นห้องที่ไม่มีหน้าต่าง และไม่ค่อยเปิด ประตู อย่างไรก็ตามภายในอาคารเดียวกันอาจจะม

4. บทสรุป

ความเข้มข้นของก๊าซเรดอนภายในอาคารมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตปัตตานี ทั้งหมด 56 ตำแหน่ง มีค่าอยู่ระหว่าง 8.47 ± 3.16

ถึง $61.76 \pm 56.92 \text{ Bq/m}^3$ เฉลี่ยเท่ากับ $21.99 \pm$

8.69 Bq/m^3 ซึ่งมีค่าต่ำกว่ามาตรฐานที่ US EPA กำหนดคือ 148 Bq/m^3 สำหรับปริมาณรังสีสมมูลที่ได้รับต่อปี มีค่าอยู่ระหว่าง 0.12 ± 0.05 ถึง $1.56 \pm$

1.44 mSv/y เฉลี่ยเท่ากับ $0.55 \pm 0.22 \text{ mSv/y}$

5. กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณมหาวิทยาลัย สงขลานครินทร์ วิทยาเขตปัตตานี ในการสนับสนุน ทุนอุดหนุนการวิจัยเพื่อวิทยานิพนธ์ ประจำปี งบประมาณ 2567 ขอขอบคุณคณะ วิทยาศาสตร์และ เทคโนโลยีมหาวิทยาลัย สงขลานครินทร์ วิทยาเขต ปัตตานี ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้เครื่องมือ สิ่งอำนวยความสะดวกที่เอื้ออำนวยในการบรรล วัตถุประสงค์การวิจัยในครั้งนี้ ขอแสดงความขอบคุณ บุคลากรของมหาวิทยาลัยสงขลา นครินทร์ วิทยาเขต

เมืองยะลา จังหวัดยะลา [23] แต่มีค่าต่ำกว่าเมื่อเทียบกับ ความเข้มข้นก๊าซเรดอนภายในอาคารของคณะ วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีมหาวิทยาลัยราชภัฏวราชนครินทร์ซึ่งมีค่าเฉลี่ย $121.2 \pm 54.1 \text{ Bq/m}^3$

ความเข้มข้นของก๊าซเรดอนต่างกันเนื่องจากความหนาแน่นของอากาศต่างกัน ส่งผลต่อการถ่ายเทก๊าซ เรดอน นอกจากนี้ฤดูที่ต่างกันความเข้มข้นของก๊าซ เรดอนจะต่างกัน โดยฤดูร้อนความเข้มข้นของก๊าซ เรดอนในอาคารสูงกว่าฤดูหนาว เนื่องจากฤดูหนาวมี การระบายอากาศตามธรรมชาติที่สูง [25] และ ลักษณะของอาคารแถวจะมีความเสี่ยงในการ ก่อให้เกิดมะเร็งในตลอดช่วงชีวิตต่ำกว่าเมื่อเทียบกับ อาคารเดี่ยว [26] สำหรับการศึกษาในครั้งนี้เป็น ลักษณะอาคารแถว ซึ่งทำให้ความเสี่ยงใน การก่อให้เกิด มะเร็งในตลอดช่วงชีวิตต่ำ อย่างไรก็ตามเนื่องจากก๊าซเรดอนมีอยู่ทั่วไปทุกหนแห่ง เช่น เดียวกันกับก๊าซพิษอื่น ๆ การทำให้อาคารใด ๆ ปราศจากก๊าซเรดอนโดยสิ้นเชิง จึงไม่สามารถที่จะ กระทำได้แต่การควบคุมปริมาณก๊าซเรดอนให้อยู่ใน ระดับที่เหมาะสม เป็นสิ่งที่สามารถกระทำได้ซึ่ง หนทางที่ดีที่สุดคือ การนำเทคนิควิธีการป้องกันก๊าซ เรดอนไปประยุกต์ใช้ในกระบวนการออกแบบอาคาร ตั้งแต่ต้น จะ ก่อให้เกิดประสิทธิภาพและประหยัด กว่า การป้องกันก๊าซเรดอนในภายหลัง และควรใช้ กระเบื้องเพื่อให้พื้นสะอาด และปลอดภัยยิ่งขึ้น [27]

ซึ่ง ต่ำกว่ามาตรฐานที่ ICRP กำหนด $3-10 \text{ mSv/y}$ และ ผลการประเมินความเสี่ยงในการก่อให้เกิดมะเร็ง ตลอดช่วงชีวิต มีค่าอยู่ระหว่าง $(0.47 \pm 0.18) \times 10^{-3}$

ถึง $(6.00 \pm 5.53) \times 10^{-3}$ เฉลี่ยเท่ากับ 2.14 ± 0.84 ซึ่งค่าสูงกว่ามาตรฐาน UNSCEAR กำหนด

0.29×10^{-3} สรุปได้ว่าบุคลากร และนักศึกษา ของมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตปัตตานี ยังมี ความปลอดภัยจากการเป็นโรคมะเร็งปอดจากสาเหตุ การสูดดม ก๊าซเรดอน สามารถลดปริมาณก๊าซเรดอน ลงได้โดยการเปิดประตู หน้าต่างบ่อย ๆ เพื่อให้ อากาศถ่ายเท ปัตตานี ที่ให้ความร่วมมือและการช่วยเหลือในการ เก็บ ข้อมูล

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Belete GD, Anteneh YA. General Overview of Radon Studies in Health Hazard Perspectives. Journal of Oncology. 2021;1;1-7.
- [2] Stanley FKT, Irvine JL, Jacques WR, et al. Radon exposure is rising steadily within the modern North American residential environment, and

- is increasingly uniform across seasons. *Scientific Reports*. 2019;9: 1-17.
- [3] Borylo A, Skwarzec B, Wieczorek J. Sources of Polonium 210Po and Radio-Lead 210Pb in Human Body in Poland. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2022;19(4):1-9.
- [4] Pantelic G, Celikovic I, Živanovic M, et al. Qualitative overview of indoor radon surveys in Europe. *Journal of Environmental Radioactivity*. 2019;204:163-174.
- [5] ประชุม คำพูน, สมพิศ ตันตวรนาท, เกียรติสุตา สมนา. ผลกระทบของปริมาณก๊าซเรดอนและแนวทางแก้ไขของผลิตภัณฑ์วัสดุก่อสร้างประเภทวัสดุ เปลือกอาคาร. *วารสารคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี*. 2565;20(1):93-104.
- [6] Chen J, Rahman MN, Atiya IA. Radon exhalation from building materials for decorative use. *Journal of Environmental Radioactivity*. 2010;101:317-22.
- [7] Sakoda A, Hanamoto K, Ishimori Y, et al. Radioactivity and radon emanation fraction of the granites sampled at Misasa and Badgastein. *Applied Radiation and Isotopes*. 2008;66:648-52.
- [8] Kapdan E, Altinsoy N. A comparative study of indoor radon concentrations between dwellings and schools. *Radiation Physics and Chemistry*. 2012;81(4).
- [9] Gillmorea GK, Phillipsb PS, Denmanc AR, etbal. Radon in the Creswell Crags Permian limestone caves. *Journal of Environmental Radioactivity*. 2002;62:165-179.
- [10] Bulut HA, & Şahin R. Radon, Concrete, Buildings and Human Health—A Review Study. *Buildings*. 2024;14(2):510. doi:10.3390/buildings14020510.
- [11] United States Environmental Protection Agency (US EPA). (1992). National Emission Standards for Hazardous Air Pollutants; National Emission Standard for Radon Emissions From Phosphogypsum Stacks, Federal Register. 1994;59(57).
- [12] Tirmarche M, Harrison JD, Laurier D, et al. Lung Cancer Risk from Rodon and Progeny and Statement on Rodon. *Annals of the ICRP*. 2010;40(1):1-64.
- [13] อธิพงศ์ ศรีสุวรรณ, ไพฑูรย์ วรรณพงษ์, เฉลิม วัฒนต้นตสวัสดิ์. อิทธิพลของวัสดุผิวปิดที่มีต่อการปล่อยก๊าซเรดอนจากวัสดุก่อสร้างประเภทคอนกรีต ซึ่งมีฟอสโฟอิมปซึมเป็นส่วนผสม. *วารสารวิจัยและ สาธิตสถาปัตยกรรม/การผังเมือง*. 2555;9(2): 105-111.
- [14] ปัทมา พลอยสว่าง, อมรรัตน์ จุฬสวัสดิ์, ปภาวิน แจ่มศรี. การประเมินความรู้ด้านโรคมะเร็งของ เจ้าหน้าที่กรมการแพทย์. *วารสารโรคมะเร็ง*. 2565;41(1):12-23.
- [15] Vatanasapt V, Martin N, Sriplung H, et al. Cancer incidence in Thailand, 1988-1991. *Cancer Epidemiol Biomarkers Prev*. 1995;4:475-483.
- [16] National center institute, Medical Record and Databased Cancer Unit. *Cancer in Thailand*. 10. Bangkok:. 2021.
- [17] Kim SH, Hwang WJ, Cho IS, et al. Attributable risk of lung cancer deaths due indoor radon exposure. *Annals of Occupational and Environmental Medicine*. 2016;28(8):1-7.
- [18] Senitkova IJ, Kraus I. Seasonal and Floor Variations of Indoor Radon Concentration. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2019;221:1-7.
- [19] Ivanova K, Stojanovska Z, Djunakova D, et al. Analysis of the spatial distribution of the indoor radon concentration in school's buildings in Plovdiv province, Bulgaria. *Building and Environment*. 2021;204:1-10.
- [20] Salim DA, Ebrahiem SA. Measurement of Radon concentration in College of Education, Ibn Al-Haitham buildings using Rad-7 and CR-39 detector. *Energy Procedia*. 019;157: 918-925.
- [21] Sherafat S, Mansour SN, Moaferi M, et al. First indoor radon mapping and assessment excess lifetime cancer risk in Iran. *MethodsX*. 2019;6:2205-2216.
- [22] United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (UNSCEAR). *Sources and effects of atomic radiation*. New York:2002.
- [23] ปัทมา พิศภักดิ์. การประเมินการได้รับก๊าซ เรดอนภายในอาคารที่มีผลต่อการเกิดโรคมะเร็งปอดในบริเวณพื้นที่อำเภอเมือง จังหวัดยะลา. *วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏยะลา*. 2565;7(2):43-52.
- [24] ณัฐชยา จันทรวิไชย, อุดินันท์ เจ๊ะชู, และฮัมดัม แลหะ.

ปริมาณนิวไคลด์กัมมันตรังสี ในดินบริเวณ เหมืองแร่
ทองคำเก่า ตำบล ภูเขาทอง อำเภอสุคิริน จังหวัด
นราธิวาส. วารสาร มหาวิทยาลัยนราธิวาสราชนครินทร์. 2559;8(3):121-128.

- [25] Baltrenas P, Grubliauskas R, Danila, V. Seasonal Variation of Indoor Radon Concentration Levels in Different Premises of a University Building. Sustainability. 2020;12; 1-15.

- [26] Lee SY, Lim SH, Kim HS. Assessing the Radon Exposure Variability and Lifetime Health Effects across Indoor Microenvironments and Sub-Populations. Atmosphere. 2024;5(8):1-11.
- [27] Ravikumar P, Somashekar RK. Estimates of the dose of radon and its progeny inhaled inside buildings. European journal of Environmental Science. 2013;3(2):88-94

ผลกระทบของระยะเวลาการอบอ่อนหลังกระบวนการที่ส่งผลต่อโครงสร้างจุลภาคและสมบัติทางกล
ของเหล็กกล้าความแข็งแรงสูงชนิดเฟสคู่เกรด DP980

Effect of Process Annealing Time on The Microstructure and Mechanical Properties of High
Strength Dual Phase Steel DP980

ณัฐศักดิ์ พรพุดศิริ^{1*}, พงศกร หลีตระกูล¹, พิสิทธิ์ เมืองน้อย¹, จินกมล ลุยจันทร์¹, และ พลากร ประคำทอง¹

Natthasak Pornputsiri*, Pongsakorn Leetrakul, Phisit Muangnoi, Jinkamon Luijan, and
Phalakorn Prakhomthong

¹สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการและการผลิต คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์ ตำบลหนองแก
อำเภอหัวหิน จังหวัดประจวบคีรีขันธ์

¹Department of Industrial and Production Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Rattanakosin,
Nhong Kea, Hua Hin, Prachubkirkhan, Thailand

*Corresponding author. Tel.: 086-6676802 E-mail: natthasak.por@rmutr.ac.th

Received: 12-03-2025 Revised: 31-07-2025 Accepted: 19-08-2025

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาคและสมบัติทางกลจากผลการอบอ่อนหลังกระบวนการที่อุณหภูมิ 600 °C ด้วยระยะเวลาที่แตกต่างกัน 4 ระดับคือ 5 นาที 30 นาที 60 นาที และ 180 นาที ตามลำดับ ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าเมื่อระยะเวลาการอบอ่อนเพิ่มมากขึ้นจะส่งผลให้เฟสแข็งชนิดมาร์เทนไซต์มีแนวโน้มลดลงอย่างต่อเนื่องด้วยการเปลี่ยนรูปไปเป็นโครงสร้างฟีนเฟอร์ไรท์ อีกทั้งปริมาณธาตุคาร์บอนในเฟสมาร์เทนไซต์ก็จะมีแนวโน้มลดลงเช่นกัน ดังนั้นเมื่อระยะเวลาการอบอ่อนเพิ่มขึ้นในช่วงระยะเวลา 5-60 นาที ค่าความเค้นครากและค่าความแข็งแรงดึงสูงสุดของชิ้นทดสอบจึงมีแนวโน้มลดลงอย่างเห็นได้ชัด ในขณะที่อัตราการยืดตัวจะมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง เมื่อระยะเวลาในการอบอ่อนเพิ่มขึ้นเป็น 180 นาที อัตราส่วนของเฟสมาร์เทนไซต์จะลดลงอย่างชัดเจน มีพฤติกรรมการเติบโตของเฟสเกิดขึ้นและมีการตกตะกอนของคาร์ไบด์บริเวณขอบเกรนของเฟสมาร์เทนไซต์ที่เพิ่มมากขึ้นรวมทั้งมีผลึกใหม่เกิดขึ้นบางส่วน จึงส่งผลโดยตรงต่อสมบัติทางกลของวัสดุชิ้นทดสอบ ซึ่งพบว่าที่ระยะเวลาการอบอ่อน 180 นาที จะได้สมบัติทางกลโดยรวมที่เหมาะสมที่สุด โดยมีค่าความเค้นครากที่ 853.97 N/mm² ค่าความแข็งแรงดึงสูงสุดที่ 929.37 N/mm² การยืดตัวสม่ำเสมอที่ร้อยละ 13.37 และการยืดตัวโดยรวมที่ร้อยละ 17.25

คำสำคัญ การอบอ่อนหลังกระบวนการ ระยะเวลาการอบอ่อน โครงสร้างจุลภาค สมบัติทางกล เหล็กกล้าความแข็งแรงสูง

ABSTRACT

The aim of this research was to study the microstructural evolution and mechanical properties of DP980 high-strength steel sheets subjected to process annealing at 600 °C, with holding times of 5, 30, 60, and 180 minutes. The results show that increasing the annealing holding time leads to a continuous decrease in the martensite phase, which gradually transforms into a ferrite matrix, accompanied by a reduction in the carbon content within the martensite. As the annealing holding time increases from 5 to 60 minutes, the yield stress and tensile strength of the sample gradually decrease, while both uniform elongation and total elongation tend to increase continuously. When the annealing time exceeds 180 minutes, the proportion of the martensite phase gradually decreases, grain growth occurs, and there is increased precipitation of carbides at the grain boundaries of the martensite phase, accompanied by some recrystallization. Excellent overall mechanical properties were achieved at an annealing time of 180 minutes. The yield stress was 853.97 N/mm², the tensile strength was 929.37 N/mm², the uniform elongation was 13.37%, and the total elongation was 17.25%

Keyword: Process annealing, Annealing time, Microstructure, Mechanical property, High strength steel.

1. บทนำ

ด้วยการพัฒนาอย่างรวดเร็วของอุตสาหกรรมยานยนต์ โลหะแผ่นเหล็กกล้าความแข็งแรงสูงเฟสคู่ชนิดรีดเย็นเกรดต่างๆ จำนวนมากถูกนำไปใช้อย่างแพร่หลายในการผลิตชิ้นส่วน โครงสร้าง ชิ้นส่วนเสริมแรง และชิ้นส่วนป้องกันการชน เช่น คานเสา และตัวถังของรถยนต์ เป็นต้น โดยให้ความสำคัญและมุ่งเน้นให้รถยนต์มีน้ำหนักที่เบาลง เพื่อการประหยัดพลังงาน และปกป้องสิ่งแวดล้อม รวมถึงเพิ่มความปลอดภัยจากการชนกระแทก [1] เหล็กกล้าชนิดเฟสคู่ (DP) มีโครงสร้างจุลภาคประกอบด้วย โครงสร้างพื้นเฟอร์ไรต์ซึ่งมีสมบัติอ่อนเหนียวและเฟสมาร์เทนไซต์ที่มีความแข็งแรงสูง ส่งผลให้สมบัติทางกลของเหล็กกล้าชนิดนี้มีความสมดุลย์ที่ดีระหว่างความแข็งแรงและความเหนียว [2] ทั้งนี้หากเปรียบเทียบกับเหล็กกล้าที่มีความแข็งแรงสูงทั่วไปชนิดอื่นๆ จะพบว่าเหล็กกล้าความแข็งแรงสูงชนิดเฟสคู่จะมีคุณสมบัติพิเศษที่แตกต่างบางประการซึ่งเป็นผลดีต่อการขึ้นรูป เช่น มีอัตราความเครียดเชิงสูง มีอัตราส่วนการครากตัวต่ำ (อัตราส่วนระหว่างความเค้นครากและความแข็งแรงดึง) และความต่อเนื่องในการครากตัวหรือการเปลี่ยนรูปถาวร [3] เพื่ออธิบายเหตุผลของคุณสมบัติทางกลที่เหนือกว่าในเหล็กกล้าความแข็งแรงสูงชนิดเฟสคู่ จากการศึกษาวิจัยที่ผ่านมาพบว่าปัจจัยที่ส่งผลต่อสมบัติทางกลมีหลายประการ เช่น ขนาดเกรน [4-5] อัตราส่วนระหว่างความเครียดในเฟสมาร์เทนไซต์และเฟอร์ไรต์ [6] อัตราส่วนพื้นที่ของเฟสมาร์เทนไซต์ [7] และลักษณะขององค์ประกอบเฟสภายในโครงสร้างจุลภาค [8] อย่างไรก็ตามความแตกต่างของค่าความแข็งแรงในเฟสมาร์เทนไซต์และเฟอร์ไรต์ ยังเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อสมบัติเชิงกลของเหล็กกล้าชนิดเฟสคู่เช่นกัน อย่างไรก็ตามเมื่อสมบัติทางกลเพิ่มสูงขึ้น มักจะส่งผลโดยตรงทำให้ค่าความสามารถในการขึ้นรูปของวัสดุลดลง และสำหรับผู้ผลิตชิ้นส่วนยานยนต์ค่าความแข็งแรงของวัสดุที่เพิ่มสูงขึ้นทำให้ยากต่อการขึ้นรูป ส่งผลต่ออัตราการสึกหรอของแม่พิมพ์และค่าการติดตัวกลับของวัสดุขึ้นงานหลังการขึ้นรูปเพิ่มมากขึ้น [9]

การปรับปรุงค่าความแข็งแรงและความสามารถในการขึ้นรูปของเหล็กกล้าเฟสคู่ชนิดรีดเย็นให้ดียิ่งขึ้น สามารถดำเนินการได้ด้วยเทคโนโลยีสมัยใหม่ เช่น การปรับปรุงองค์ประกอบทางเคมี กระบวนการผลิต และโครงสร้างจุลภาคเป็นต้น [10] การรีดเย็นเป็นกระบวนการขึ้นรูปวัสดุที่อุณหภูมิปกติโดยใช้แรงกดของลูกรีดเพื่อเปลี่ยนแปลงรูปร่าง โดยหลังการขึ้นรูปจะส่งผลให้วัสดุมีค่าความแข็งแรงเพิ่มมากขึ้น ทั้งนี้กระบวนการรีดเย็นจะส่งผลต่อโครงสร้างจุลภาคและสมบัติของทางกลของโลหะและโลหะผสมอย่างเห็นได้ชัด โดยการขึ้นรูปในลักษณะนี้จะไม่ส่งผลต่อการเกิดผลึกใหม่แต่จะทำให้ค่าความหนาแน่นและการเคลื่อนตัวของภายในโครงสร้างจุลภาคของโลหะเพิ่มมากขึ้น ส่งผลต่อสมบัติทางกลของโลหะ โดยจะทำให้สมบัติด้านความแข็งแรงเพิ่มสูงขึ้นส่วนสมบัติด้านความสามารถในการเปลี่ยนรูปถาวรจะมีแนวโน้มลดลง [11] ทั้งนี้การรีดเย็นเป็นรูปแบบหนึ่งของการขึ้นรูปเย็นสำหรับวัสดุประเภทโลหะและโลหะผสม ซึ่งจะส่งผลทำให้ค่า

ความหนาแน่นของการเคลื่อนตัวเพิ่มขึ้นได้หลายเท่า การเคลื่อนตัวของผลึก (Dislocations) เกิดจากจุดบกพร่อง (Defects) ภายในโครงสร้างจุลภาค จากผลกระทบของแรงกระทำหรือค่าความเค้นจากการขึ้นรูป ค่าความหนาแน่นของการเคลื่อนตัวที่เพิ่มมากขึ้นทำให้เกิดการสะสมของค่าความเค้นภายใน (Internal stresses) ของวัสดุ [12] ซึ่งจะส่งผลโดยตรงทำให้ค่าความแข็งแรงดึงและความเค้นครากเพิ่มมากขึ้น ส่วนความสามารถในการยืดตัวจะมีค่าลดลง การเปลี่ยนแปลงของเกรนโครงสร้างจุลภาคจะเกิดในลักษณะของการยืดตัวไปในทิศทางของการรีด ทั้งนี้การนำวัสดุไปผ่านกระบวนการทางความร้อนซึ่งต่ำกว่าอุณหภูมิการเกิดผลึกใหม่ จะช่วยบรรเทาการเปลี่ยนแปลงทั้งหมดนี้ โดยเรียกกระบวนการดังกล่าวนี้ว่า การอบอ่อนหลังกระบวนการ [13]

การอบอ่อนหลังกระบวนการ (Process annealing) คือ กระบวนการอบอ่อนที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิวิกฤต (Subcritical annealing) เป็นวิธีพื้นฐานของกระบวนการทางความร้อนซึ่งเป็นลักษณะของการอบอ่อนที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิการเกิดผลึกใหม่ของวัสดุประเภทเหล็กกล้าที่ผ่านกระบวนการขึ้นรูปเย็นซึ่งไม่มีการเปลี่ยนแปลงเฟส โดยจะควบคุมอุณหภูมิให้ต่ำกว่าอุณหภูมิวิกฤตหรือเส้น Ac_1 เล็กน้อย [14] ด้วยระยะเวลาที่เหมาะสม ก่อนจะค่อยๆ ปล่อยให้เย็นตัวลงจนถึงอุณหภูมิห้อง มีวัตถุประสงค์เพื่อปรับปรุงโครงสร้างจุลภาคและสมบัติทางกลของวัสดุหลังกระบวนการขึ้นรูปเย็น โดยทั่วไประหว่างกระบวนการอบอ่อนจะมีพฤติกรรมภายในโครงสร้างจุลภาคแบ่งเป็น 3 ขั้นตอนซึ่งประกอบด้วย การคืนรูป (Recovery) การเกิดผลึกใหม่ (Recrystallization) และการเติบโตของเกรน (Grain growth) ในขั้นตอนการคืนรูปของกระบวนการอบอ่อนจะเกิดขึ้นที่อุณหภูมิต่ำ ซึ่งขั้นตอนนี้สมบัติทางกายภาพและสมบัติทางกลจะมีแนวโน้มที่จะฟื้นตัวโดยสมบัติเหล่านี้จะมีการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อย เป็นลักษณะค่อยเป็นค่อยไปเมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้น โดยโครงสร้างจุลภาคจะไม่เปลี่ยนแปลงมากนัก ในกรณีนี้การคืนรูปเป็นลักษณะของการกำจัดเคลื่อนตัวที่มากเกินไป การกำจัดดังกล่าวอาจเกิดขึ้นได้จากการรวมตัวของส่วนที่เคลื่อนตัวให้มีทิศทางที่ตรงข้ามกัน ในขั้นตอนนี้ความต้านทานภายในจะกลับคืนมาเกือบสมบูรณ์ ก่อนถึงสถานะการเกิดผลึกใหม่ การเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติด้านความแข็งแรงจะเกิดขึ้นเล็กน้อยแบบค่อยเป็นค่อยไปจึงต้องใช้ความร้อนที่เพิ่มสูงขึ้นซึ่งจะเรียกว่าการเกิดผลึกใหม่ของโครงสร้างพื้น [1,3,4] เมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นจะส่งผลให้เกิดเกรนใหม่ซึ่งปราศจากความเครียด ส่วนเกรนเก่าที่เสียรูปจะเกิดการแตกตัวและเติบโตขึ้น โดยพฤติกรรมเหล่านี้จะเกิดขึ้นในบริเวณที่มีพลังงานสูง เช่น บริเวณขอบเกรนและส่วนที่มีความหนาแน่นของการเคลื่อนตัวสูง เกรนใหม่เหล่านี้เกิดขึ้นเพื่อทดแทนเกรนเก่าที่เสียรูปซึ่งก่อให้เกิดความเครียดแข็ง เป็นการส่งเสริมพฤติกรรมการเกิดผลึกใหม่จากผลของพลังงานซึ่งได้จากการขึ้นรูปแบบเย็น ทั้งนี้ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่ออุณหภูมิการตกผลึกใหม่ของวัสดุจะประกอบไปด้วย องค์ประกอบทางเคมี โครงสร้างจุลภาค ธาตุโลหะผสม ความบริสุทธิ์ อัตราการขึ้นรูปแบบเย็น และรูปแบบการอบอ่อน

[14] เมื่อการเกิดผลึกใหม่เสร็จสมบูรณ์ ขั้นตอนที่สามของกระบวนการอบอ่อนก็จะเริ่มต้นขึ้นคือ เมื่อการเกิดผลึกใหม่เสร็จสิ้นจะส่งผลต่อเนื่องให้เกิดการเติบโตของเกรนซึ่งขึ้นอยู่กับพลังงานบนพื้นผิว เมื่อการขยายตัวในเชิงขนาดที่เพิ่มขึ้นและจำนวนของเกรนที่ลดลงจึงส่งผลให้พื้นที่ของขอบเกรนลดลงและพลังงานพื้นผิวทั้งหมดจะลดลงตามไปด้วย ในขั้นตอนนี้สมบัติทางกลจะไม่เปลี่ยนแปลงมากนักเนื่องจากพลังงานที่เก็บไว้ทั้งหมดได้ถูกปลดปล่อยออกไปก่อนแล้ว [4]

โดยบทความนี้จะทำการศึกษาอิทธิพลของระยะเวลาการอบอ่อนที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิวิกฤตของเหล็กกล้าความแข็งแรงสูงชนิดเฟสคู่ DP980 ที่มีต่อการเปลี่ยนแปลงของเฟสมาร์เทนไซต์และโครงสร้างพื้นเฟอร์ไรต์ภายในโครงสร้างจุลภาค และสมบัติทางกล ซึ่งสามารถใช้เป็นตัวชี้วัดค่าความสามารถในการขึ้นรูปของโลหะแผ่นดังกล่าว โดยการกำหนดอุณหภูมิการอบอ่อนที่ 600 °C ด้วยระยะเวลา 4 ระดับคือ 5 นาที 30 นาที 60 นาที และ 180 นาที ตามลำดับ ทั้งนี้ภายหลังจากดำเนินการทดลองและวิเคราะห์ผล จะสามารถอธิบายถึงผลการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างจุลภาคภายใต้ผลกระทบของระยะเวลาในการอบอ่อนที่ส่งผลต่อสมบัติทางกล และเพื่อกำหนดระยะเวลาในการอบอ่อนที่เหมาะสมสำหรับการปรับปรุงสมบัติทางกลและเพิ่มความสามารถในการขึ้นรูปของโลหะแผ่น ซึ่งมีความสำคัญต่อการนำไปผลิตเป็นชิ้นส่วนอุตสาหกรรม โดยจะทำการเก็บข้อมูลเพื่อการประเมินผลและวิเคราะห์ผลจากลักษณะการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างจุลภาค และสมบัติทางกลจากการทดสอบแรงดึง เพื่อนำผลที่ได้จากการวิจัยไปใช้ประโยชน์ในอุตสาหกรรมการผลิตชิ้นอุตสาหกรรมและสามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้ทั้งในทางปฏิบัติต่อไป

2. วิธีดำเนินการวิจัย

2.1 วัสดุการทดลอง

งานวิจัยนี้ทำการศึกษาผลกระทบเกี่ยวกับเงื่อนไขของระยะเวลาการอบอ่อนหลังกระบวนการของวัสดุโลหะแผ่นเหล็กกล้าความแข็งแรงสูงชนิดเฟสคู่ DP980 ขนาดความหนา 1 มิลลิเมตร โดยการตรวจสอบสมบัติทางกลจะดำเนินการโดยการทดสอบแรงดึงซึ่งแสดงผลดังตารางที่ 1 และองค์ประกอบทางเคมีจะดำเนินการตรวจสอบด้วยเครื่องวิเคราะห์ส่วนประกอบทางเคมี (Optical Emission Spectrometer-OES) ยี่ห้อ HITACHI รุ่น UH1450 ซึ่งผลการตรวจสอบแสดงดังตารางที่ 2

2.2 การทดสอบแรงดึง

นำชิ้นทดสอบโลหะแผ่นเหล็กกล้าความแข็งแรงสูง DP980 ที่ผ่านกระบวนการอบอ่อนไปทำการตรวจสอบสมบัติทางกล ด้วยวิธีการทดสอบแรงดึงตามมาตรฐาน ASTM E8 [15] ซึ่งใช้สำหรับการทดสอบแรงดึงโลหะแผ่นบาง ทำการตัดเตรียมชิ้นทดสอบตามมาตรฐานดังรายละเอียดภาพที่ 1 โดยผลการทดสอบจะแสดงผลในรูปของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้น-ความเครียด ซึ่งระบุสมบัติทางกลที่สำคัญประกอบด้วย ค่าความเค้นคราก (Yield strength), ค่าความแข็งแรงสูงสุด (Ultimate

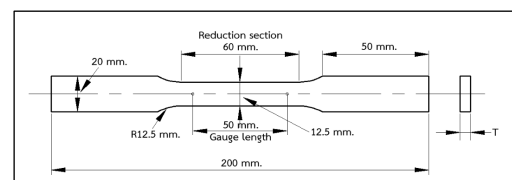
tensile strength) เปอร์เซ็นต์การยืดตัวแบบสม่ำเสมอ (Uniform Elongation) และเปอร์เซ็นต์การยืดตัวโดยรวม (Total elongation)

ตารางที่ 1 คุณสมบัติทางกลของเหล็กกล้าความแข็งแรงสูง DP980

วัสดุ	สมบัติทางกล			
	Ys (N/mm ²)	UTS (N/mm ²)	UE (%)	TE (%)
DP980	764.44	996.98	11.89	15.02

ตารางที่ 2 องค์ประกอบทางเคมีของเหล็กกล้าความแข็งแรงสูงชนิดเฟสคู่เกรด DP980 (Wt%)

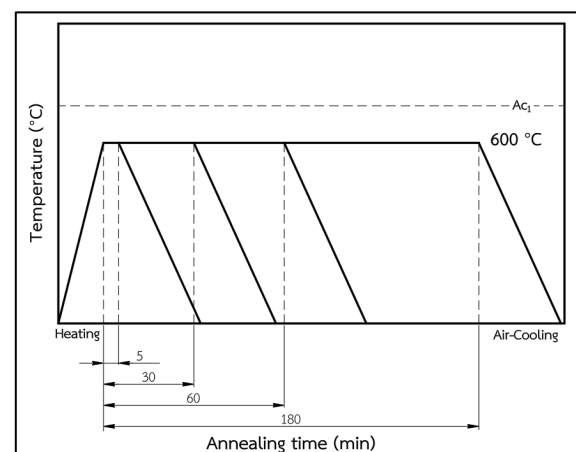
C	Mn	Si	P	Cr	Fe
0.1766	1.823	1.4262	0.0190	0.0306	Bal.



ภาพที่ 1 ชิ้นทดสอบแรงดึงตามมาตรฐาน ASTM E8 ที่ใช้ในการทดสอบแรงดึง [15]

2.3 เงื่อนไขการอบอ่อนหลังกระบวนการ

นำโลหะแผ่นเหล็กกล้าความแข็งแรงสูง ซึ่งถูกตัดเตรียมเป็นชิ้นทดสอบแรงดึงตามมาตรฐาน ไปอบให้ความร้อนภายในเตาอบไฟฟ้าด้วยอัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิที่ 10 °C/sec จนถึงอุณหภูมิ 600 °C และคงอุณหภูมิดังกล่าวไว้ภายในเตาด้วยระยะเวลาที่แตกต่างกัน 4 ระดับ คือ 5 นาที 30 นาที 60 นาที และ 180 นาที ตามลำดับ จากนั้นจะปล่อยให้เย็นตัวภายในเตาจนถึงอุณหภูมิห้องด้วยอัตราการการลดลงของอุณหภูมิที่ 5 °C/sec ทั้งนี้แผนภาพการควบคุมอุณหภูมิและระยะเวลาอบอ่อนสำหรับการทดลองนี้แสดงดังภาพที่ 2



ภาพที่ 2 แผนภาพการอบอ่อนหลังกระบวนการของชิ้นทดสอบที่อุณหภูมิ 600 °C ด้วยระยะเวลาที่แตกต่างกัน

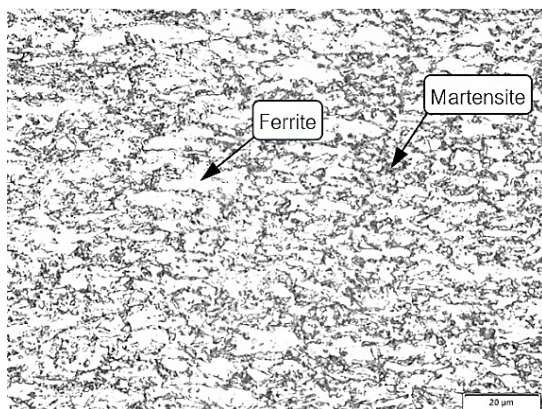
2.4 การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค

ตัดเตรียมวัสดุโลหะแผ่นขึ้นทดสอบที่ผ่านกระบวนการอบอ่อนไปหล่อด้วยเรซิน ทำการขัดผิวเรียบด้วยเครื่องขัดขึ้นทดสอบแบบจานหมุนโดยใช้กระดาษทรายตั้งแต่เบอร์ 240, 360, 400, 500, 600, 800, 900, 1,000 และ 1,200 ตามลำดับ ในขั้นตอนสุดท้ายจะถูกนำไปขัดด้วยผงอลูมินาขนาด 1 ไมโครเมตร เพื่อให้ผิวชิ้นงานมีความเรียบเงา และนำชิ้นทดสอบไปจุ่มในกรดไนตริกร้อยละ 3 (3% Nitric acid) ที่ผสมกับเอทานอลแอลกอฮอล์ (Ethanol alcohol) และล้างชำระด้วยน้ำเปล่า เพื่อนำไปตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง (Light Optical Microscope; LOM)

3. ผลทดลอง

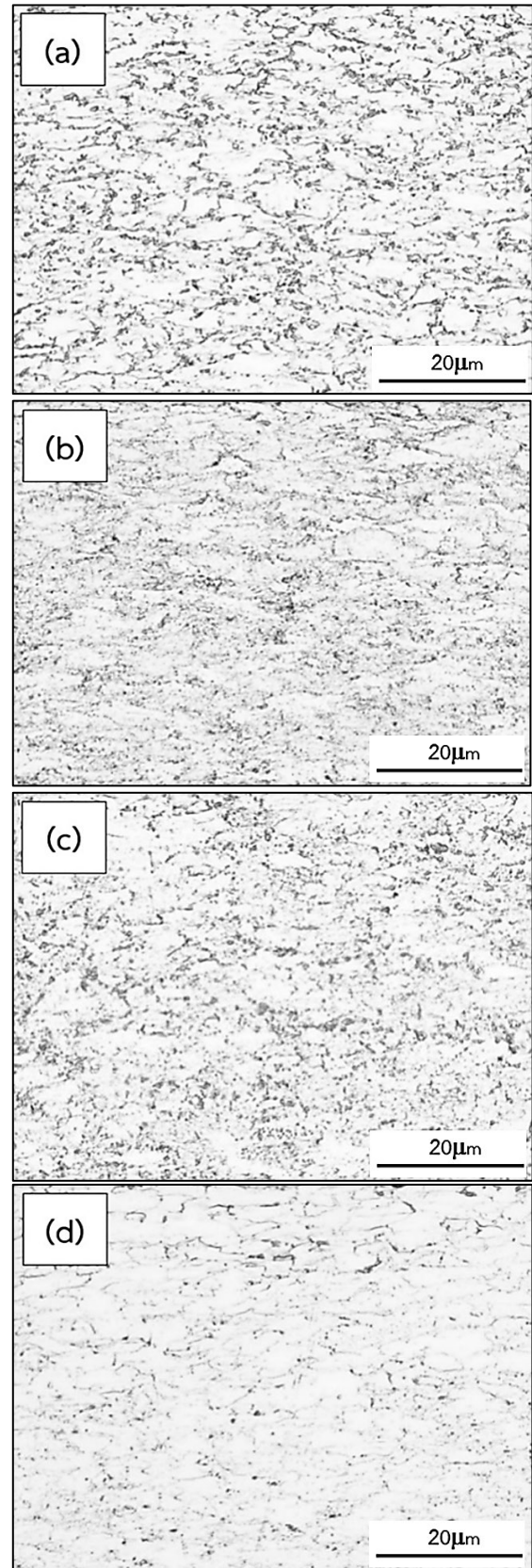
3.1 ผลกระทบของระยะเวลาการอบอ่อนที่ส่งผลต่อโครงสร้างจุลภาค

ภาพที่ 3 แสดงลักษณะโครงสร้างจุลภาคทางโลหะวิทยาจากกล้องจุลทรรศน์แบบแสงของวัสดุเหล็กกล้า DP980 ซึ่งไม่ผ่านการอบอ่อนพบว่าโครงสร้างจุลภาคประกอบไปด้วยเฟสหลักสองชนิดคือเฟสชนิดแข็งมาร์เทนไซต์และเฟอร์ไรต์ที่มีขนาดเกรนต่างกัน ซึ่งส่วนใหญ่เกิดจากขั้นตอนการก่อตัวที่แตกต่างกัน โดยจากผลการเปรียบเทียบพื้นที่ของเฟสโดยใช้โปรแกรม ImageJ ดังภาพที่ 5 จะพบว่ามียอดอัตราส่วนพื้นที่ของเฟสมาร์เทนไซต์ที่ร้อยละ 48.106 และมีพื้นที่ของโครงสร้างพื้นเฟอร์ไรต์ที่ร้อยละ 51.894

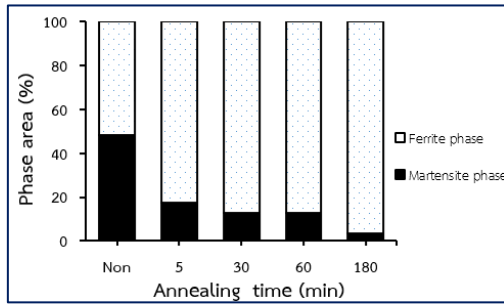


ภาพที่ 3 ลักษณะโครงสร้างจุลภาคของวัสดุ DP980 ที่ไม่ผ่านการอบอ่อน

โครงสร้างจุลภาคของเหล็กกล้าความแข็งแรงสูงชนิดเฟสคู่ประกอบด้วยเฟสหลัก 2 ชนิดคือเฟสมาร์เทนไซต์ (Martensite phase) ส่วนพื้นผิวสีดำ และโครงสร้างพื้นเฟอร์ไรต์ (Ferrite matrix) ส่วนพื้นผิวสีขาวซึ่งมีขนาดเกรนต่างกัน สาเหตุหลักเกิดจากความแตกต่างของรูปแบบการก่อตัวจากกระบวนการทางความร้อน [16]



ภาพที่ 4 ลักษณะของโครงสร้างจุลภาคทางโลหะวิทยาหลังการอบอ่อนที่อุณหภูมิ 600 °C (a) 5 นาที (b) 30 นาที (c) 60 นาที และ (d) 180 นาที



ภาพที่ 5 อัตราส่วนพื้นที่เฟสของชิ้นทดสอบจากการอบอ่อนด้วยระยะเวลาที่แตกต่างกัน

หลังกระบวนการอบอ่อนพบว่าโครงสร้างจุลภาคโดยส่วนใหญ่จะประกอบด้วยโครงสร้างพื้นเฟอร์ไรต์ขนาดใหญ่ซึ่งเกิดขึ้นภายหลังการรีดเย็นและกระบวนการอบอ่อน ส่วนเฟสมาร์เทนไซต์ซึ่งมีความแข็งสูงจะเกิดจากการก่อตัวในระหว่างการเย็นตัวภายหลังการอบอ่อน ซึ่งเฟสนี้จะมีขนาดเล็กและเกิดกระจายตัวอยู่ในโครงสร้างพื้นเฟอร์ไรต์จากผลการทดลองพบว่าเมื่อระยะเวลาการอบอ่อนเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้เฟสมาร์เทนไซต์ในโครงสร้างมีพื้นที่ลดลงและมีขนาดเล็ก ทั้งนี้ขนาดและอัตราส่วนของพื้นที่เฟสภายในโครงสร้างจุลภาคจะส่งผลโดยตรงต่อสมบัติทางกล ซึ่งมีความสำคัญมากในการปรับปรุงค่าความแข็งแรงและความสามารถในการขึ้นรูปของเหล็กกล้าความแข็งแรงสูงชนิดเฟสคู่ ดังภาพที่ 4 ซึ่งแสดงภาพถ่ายลักษณะโครงสร้างจุลภาคของชิ้นทดสอบเหล็กกล้า DP980 ซึ่งผ่านการอบอ่อนที่อุณหภูมิ 600 °C ด้วยระยะเวลาที่แตกต่างกัน 4 ระดับคือ 5 นาที 30 นาที 60 นาที และ 180 นาที ตามลำดับ โดยลักษณะโครงสร้างจุลภาคของชิ้นทดสอบที่ผ่านการอบอ่อนเป็นระยะเวลา 5 นาที (ภาพที่ 4(a)) พบว่าเฟสมาร์เทนไซต์ในโครงสร้างจุลภาคจะมีพื้นที่น้อยลง โดยมีพื้นที่ของเฟสมาร์เทนไซต์คิดเป็นร้อยละ 17.525 หรือลดลงร้อยละ 30.581 เมื่อเปรียบเทียบกับชิ้นทดสอบที่ไม่ผ่านการอบอ่อน ส่วนพื้นที่ของโครงสร้างพื้นเฟอร์ไรต์มีอัตราส่วนพื้นที่คิดเป็นร้อยละ 82.475 ส่วนชิ้นทดสอบที่ผ่านการอบอ่อนเป็นระยะเวลา 30 นาที (ภาพที่ 4(b)) พบว่าเฟสมาร์เทนไซต์ในโครงสร้างจุลภาคจะมีพื้นที่ลดลงเล็กน้อย โดยมีพื้นที่ของเฟสมาร์เทนไซต์คิดเป็นร้อยละ 12.679 หรือลดลงร้อยละ 35.427 เมื่อเปรียบเทียบกับชิ้นทดสอบที่ไม่ผ่านการอบอ่อน ส่วนพื้นที่ของโครงสร้างพื้นเฟอร์ไรต์มีอัตราส่วนพื้นที่คิดเป็นร้อยละ 87.321 เมื่อระยะเวลาการอบอ่อนเพิ่มมากขึ้นที่ 60 นาที (ภาพที่ 4(c)) พบว่าพื้นที่ของเฟสมาร์เทนไซต์เพิ่มขึ้นเล็กน้อยหากเปรียบเทียบกับชิ้นทดสอบที่ผ่านการอบอ่อนเป็นระยะเวลา 30 นาที โดยมีพื้นที่ของเฟสมาร์เทนไซต์คิดเป็นร้อยละ 12.822 หรือเพิ่มขึ้นร้อยละ 0.143 ส่วนพื้นที่ของโครงสร้างพื้นเฟอร์ไรต์มีอัตราส่วนพื้นที่คิดเป็นร้อยละ 87.178 และเมื่อระยะเวลาการอบอ่อนเพิ่มมากขึ้นเป็น 180 นาที (ภาพที่ 4(d)) พบว่าพื้นที่ของเฟสมาร์เทนไซต์จะลดลงมากที่สุด โดยมีพื้นที่ของเฟสมาร์เทนไซต์คิดเป็นร้อยละ 3.625 หรือลดลงร้อยละ 44.481 เมื่อเปรียบเทียบกับชิ้นทดสอบที่ไม่ผ่านการอบอ่อน ส่วน

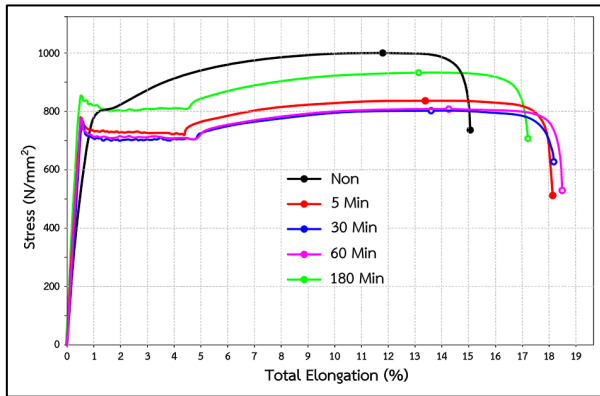
พื้นที่ของโครงสร้างพื้นเฟอร์ไรต์มีอัตราส่วนพื้นที่คิดเป็นร้อยละ 96.375

3.2 ผลกระทบของระยะเวลาการอบอ่อนที่ส่งผลต่อสมบัติทางกล

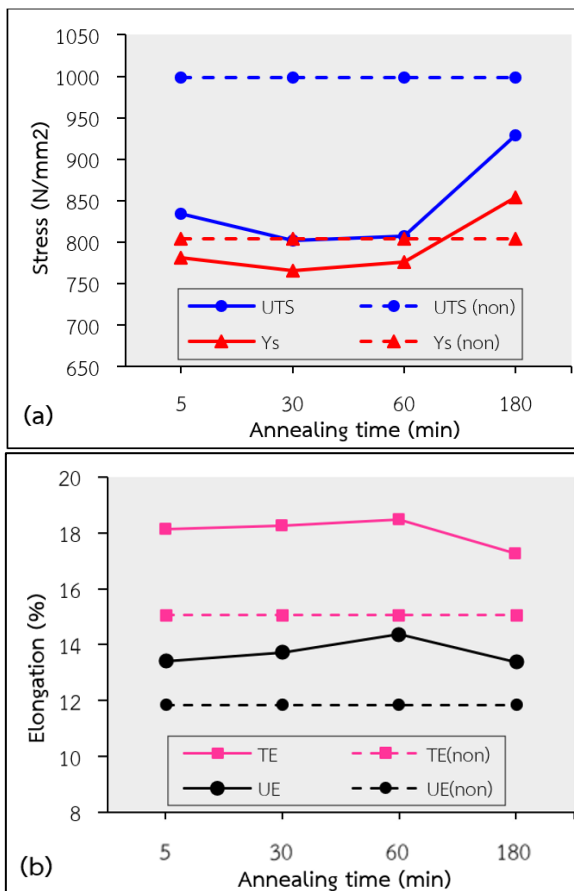
หลังการอบอ่อนจะนำชิ้นทดสอบโลหะแผ่นเหล็กกล้าความแข็งแรงสูงไปทำการทดสอบแรงดึงโดยลักษณะของชิ้นทดสอบที่ผ่านการทดสอบแสดงดังภาพที่ 6 ส่วนกราฟสมบัติทางกลจากการทดสอบแรงดึงของชิ้นทดสอบที่ผ่านการอบอ่อนภายใต้อุณหภูมิวิกฤติ (600 °C) ด้วยระยะเวลาการอบอ่อนที่แตกต่างกันแสดงดังภาพที่ 7 ซึ่งเห็นได้ชัดว่าเมื่อระยะเวลาในการอบอ่อนเพิ่มมากขึ้นในช่วง 5-60 นาที ค่าความเค้นครากและค่าความแข็งแรงดึงจะมีแนวโน้มลดลง ส่วนอัตราการยืดตัวจะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับการลดลงของพื้นที่เฟสมาร์เทนไซต์ในโครงสร้างจุลภาค อย่างไรก็ตามเมื่อระยะเวลาในการอบอ่อนเพิ่มขึ้นที่ 180 นาที ค่าความเค้นครากและค่าความแข็งแรงดึงสูงสุดจะเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัดเนื่องจากการเกิดขึ้นของเฟสเฟสซีเมนต์ไธต์ (Cementite) บริเวณขอบเกรน ส่วนอัตราการยืดตัวโดยรวมของชิ้นทดสอบจะลดลงเล็กน้อย



ภาพที่ 6 ลักษณะชิ้นทดสอบแรงดึง (a) ไม่ผ่านการอบอ่อน (b) อบอ่อน 5 นาที (c) อบอ่อน 30 นาที (d) อบอ่อน 60 นาที และ (e) อบอ่อน 180 นาที



ภาพที่ 7 สมบัติทางกลจากการทดสอบแรงดึงของเหล็กกล้าชนิด เฟสคู่ DP980



ภาพที่ 8 กราฟแสดงสมบัติทางกลของเหล็กกล้าชนิดเฟสคู่ DP980 (a) ความเค้นครากและความแข็งแรงดึง (b) อัตราการยืดตัว

ภาพที่ 8(a) เป็นกราฟแสดงผลสรุปการเปลี่ยนแปลงค่าความแข็งแรงของวัสดุชิ้นทดสอบ (ความแข็งแรงดึงสูงสุด (UTS) และค่าความเค้นคราก (Ys) ตามฟังก์ชันของระยะเวลาการอบอ่อน ซึ่งพบว่าความแข็งแรงดึงสูงสุดและค่าความเค้นครากจะลดลงอย่างเห็นได้ชัดเมื่อเปรียบเทียบกับชิ้นทดสอบก่อนการอบอ่อน ดังผลการทดลองของชิ้นทดสอบที่ผ่านการอบอ่อนเป็นระยะเวลา 5 นาที จะพบว่าค่าความแข็งแรงดึงสูงสุดจะลดลงจาก 998.79 N/mm² เป็น 833.94 N/mm² ซึ่งคิดเป็นร้อยละ 16.50 ส่วนค่าความเค้นครากจะลดลงเล็กน้อยจาก 804.02 N/mm² เป็น 781.24 N/mm² ซึ่งคิดเป็นร้อยละ 2.83 ทั้งนี้พบว่าค่าความเค้น

ครากและค่าความแข็งแรงดึงสูงสุดของวัสดุชิ้นทดสอบจะมีแนวโน้มลดลงเมื่อระยะเวลาการอบอ่อนเพิ่มขึ้นในช่วง 5-30 นาที เมื่อระยะเวลาการอบอ่อนเพิ่มขึ้นเป็น 60 นาที ค่าความเค้นดังกล่าวจะเพิ่มสูงขึ้นเล็กน้อย และเมื่อระยะเวลาการอบอ่อนเพิ่มขึ้นเป็น 180 นาที พบว่าค่าความเค้นทั้งสองจะเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัด โดยเฉพาะค่าความเค้นครากของชิ้นทดสอบดังกล่าวจะเพิ่มขึ้นและมีค่าสูงกว่าค่าความเค้นครากของชิ้นทดสอบที่ไม่ผ่านการอบอ่อน ทั้งนี้เป็นเพราะคาร์ไบด์ที่ตกตะกอนบริเวณขอบเกรนของเฟสมาร์เทนไซต์ที่เพิ่มมากขึ้น [17-18] ซึ่งจะส่งผลให้เฟสหรือเกรนภายในโครงสร้างจุลภาคเคลื่อนตัวได้ยากขึ้น ส่วนภาพที่ 8(b) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงของอัตราการยืดตัวแบบสม่ำเสมอและอัตราการยืดตัวโดยรวมของวัสดุกับระยะเวลาการอบอ่อน ซึ่งพบว่าอัตราการยืดตัวของชิ้นทดสอบหลังการอบอ่อนจะมีค่าเพิ่มสูงขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับชิ้นทดสอบที่ไม่ผ่านการอบอ่อน ดังผลการทดลองของชิ้นทดสอบที่ผ่านการอบอ่อนเป็นระยะเวลา 5 นาที จะพบว่าอัตราการยืดตัวโดยรวมจะเพิ่มสูงขึ้นจากร้อยละ 15.05 เป็น 18.13 หรือเพิ่มขึ้นร้อยละ 3.08 ทั้งนี้พบว่าอัตราการยืดตัวโดยรวมจะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่อระยะเวลาการอบอ่อนเพิ่มขึ้นในช่วง 5-60 นาที และพบว่าอัตราการยืดตัวโดยรวมจะมีค่าลดลงเมื่อระยะเวลาการอบอ่อนเพิ่มขึ้นเป็น 180 นาที

4. สรุปผลการทดลอง

จากการทดลองเพื่อศึกษาวิวัฒนาการหรือการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างจุลภาคและสมบัติเชิงกลของเหล็กกล้าความแข็งแรงสูงชนิดเฟสคู่เกรด DP980 ภายหลังจากการอบอ่อนหลังกระบวนการที่อุณหภูมิ 600 °C ด้วยระยะเวลาการอบที่แตกต่างกัน สามารถสรุปผลได้ดังนี้

1. เมื่อระยะเวลาการอบอ่อนเพิ่มมากขึ้น จะส่งผลให้ปริมาณเฟสมาเทนไซต์มีแนวโน้มลดลงและเปลี่ยนเป็นเฟสเฟอร์ไรต์ขนาดใหญ่
2. เมื่อระยะเวลาการอบอ่อนเพิ่มมากขึ้น จะส่งผลให้ค่าความแข็งแรงของชิ้นทดสอบมีแนวโน้มลดลง เมื่อระยะเวลาการอบอ่อนเพิ่มขึ้นเกิน 30 นาที อัตราส่วนความยาวและความกว้างของเฟสมาเทนไซต์จะลดลง เกิดเป็นลักษณะทรงกลมมากขึ้นและมีอัตราส่วนเชิงปริมาณลดลงอย่างรวดเร็ว
3. การอบอ่อนที่ระยะเวลา 180 นาทีจะส่งผลให้วัสดุชิ้นทดสอบมีสมบัติทางกลในภาพรวมที่ดีที่สุด โดยมีค่าความแข็งแรงดึงอยู่ที่ 929.37 MPa การยืดตัวโดยรวมอยู่ที่ร้อยละ 17.25 และค่าความเค้นครากอยู่ที่ 853.97 MPa

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณอาจารย์และเจ้าหน้าที่สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการและการผลิต คณะวิศวกรรมศาสตร์ พื้นที่วิทยาเขตวังไกลกังวล ที่อนุเคราะห์เครื่องมือ เครื่องจักร และอุปกรณ์ในการดำเนินการวิจัย รวมทั้งขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล

มงคลรัตน์โกสินทร์ที่ให้การสนับสนุนงบประมาณในการดำเนินการวิจัยงานวิจัยฉบับนี้ดำเนินการสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Zhanga W., Xua X., Liua Y., Yub C., Liua X., Xie Z. High-strength cold-formed steel framed shear wall with steel sheet sheathing, *Thin-Walled Struct.* 2021;162: 107584.
- [2] Singh A.K., Bhattacharya B., Biswas S. High strength, ductility and sheet formability by normalizing and quenching of low carbon micro alloyed dual-phase steel., *Materials Science & Engineering A.* 2024; 890: 145848.
- [3] Zhang T., Jia F., Liu H., Pan D., Xie H., Wu H., Liu J., Yang T., Zhang X., Huo M., Wang Z., Li L., Linton V., Jiang F., Jiang Z. Microstructure-based modelling of formability for advanced high strength dual-phase steels, *Materials Science & Engineering A.* 2024; 915: 147227.
- [4] Bhargavaa M. , Chakrabartyb S. , Barnwala V. K. , Tewaria A. , Mishra S.K. Effect of microstructure evolution during plastic deformation on the formability of Transformation Induced Plasticity and Quenched & Partitioned AHSS, *Materials & Design.* 2018; 152: 65–77.
- [5] He Z., Liang J., Ruan X., Wang X., Ning J., Gao Q., Guo E., Du W. Tailoring the microstructure and mechanical properties of laser metal deposited Hastelloy X superalloy via heat treatment and subsequent hot plastic deformation, *J. Mater. Process. Technol.* 2025; 336: 118678.
- [6] Li Q., Zhang H., Chen F., Xu D., Sui D., Cui Z. Study on the plastic anisotropy of advanced high strength steel sheet: Experiments and microstructure-based crystal plasticity modeling, *Int. J. Mech. Sci.* 2020; 176: 105569.
- [7] Zhang, F., Ruimi, A., Wo, P. C., & Field, D. P. Morphology and distribution of martensite in dual phase (DP980) steel and its relation to the multiscale mechanical behavior. *Materials Science & Engineering A.* 2016; 659: 93–103.
- [8] Skowronek, A., Grajcar, A. & Petrov, R.H. Dependence of mechanical properties on the phase composition of intercritically annealed medium-Mn steel as the main competitor of high-strength DP steels. *Sci. Rep.* 2024; 14: 9567.
- [9] Srinivasan T., Ramu P., Suresh G., Govardhan Y.S, Srinivasan S. Impact of mechanical properties on sheet metal forming processes by using single-point incremental shaping method, *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering.* 2020; 954: 012028.
- [10] Mazaheri Y, Jahanara A.H., Sheikhi M., Ghassemali E. On the Simultaneous Improving of Strength and Elongation in Dual Phase Steels via Cold Rolling, *Metals.* 2020; 10: 1676.
- [11] Bassini E., Marchese G., Ugues D. Effect of Cold Rolling on Microstructural and Mechanical Properties of a Dual-Phase Steel for Automotive Field, *Materials.* 2022; 15: 7482.
- [12] Radwanski K., Kuziak R., Rozmus R. Structure and mechanical properties of dual-phase steel following heat treatment simulations reproducing a continuous annealing line, *Arch. Civ. Mech. Eng.* 2019; 19(2): 453-468.
- [13] Alzreedy A.M. Effect of Process Annealing Temperature on Some Tensile Properties and Microstructure of Cold Rolled 1010 Steel, *Int. J. Acad. Res. Appl. Sci.* 2022; 22: 12-16.
- [14] Ueki M., Horie S., Nakamura T. Factors affecting dynamic recrystallization of metals and alloys, *Mater. Sci. Technol.* 1987; 3(5): 329-337.
- [15] ASTM International. ASTM E8/E8M: Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials. ASTM International United State, PA 19428-2959; Last previous edition approved 2021.
- [16] Krajewski S., Nowacki J. Dual-phase steels microstructure and properties consideration based on artificial intelligence techniques, *Arch. Civ. Mech. Eng.* 2014; 4: 278-286.
- [17] Uscinowicz R. Effect of Elevated Temperature and Annealing Time on Mechanical Properties of Ti/Cu Bimetal, *Materials.* 2022; 15: 8707.
- [18] Lian X.K., Li y., Ren F.Z., Xiong Y., Wu Y.L., Han S., He T.T., Wang C.X. Effect of annealing time on microstructure and mechanical properties of cryorolled AISI 310S stainless steel, *J. Iron Steel Res. Int.* 2023; 30: 548-556.

การผสมกาวยูเรียฟอร์มาดิไฮต์ในการคงรูปของกากกาแฟเพื่อการออกแบบผลิตภัณฑ์ The Mixing of Urea-Formaldehyde Adhesive for Shape Retention of Coffee Grounds for Product Design

สุริยา สงค์อินทร์^{1*}, ปัทรา คุ่มเขต², และ กฤษณา คงเลิศยศ²
Suriya Song-inn^{1*}, Pattra Kumkhet², and Krishna Konglertyot³

^{1*} สาขาวิชาเทคโนโลยีเครื่องเรือนและการออกแบบ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ

² สาขาวิชาการออกแบบแฟชั่น คณะเทคโนโลยีคหกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ

^{1*}Department of Furniture Technology and Design . Faculty of Science and Technology, Rajamangala University of Technology
Krungthep, Bangkok Thailand

² Department of Fashion Design Program. Home Economic Technology, Rajamangala University of Technology
Krungthep, Bangkok Thailand

* Corresponding Author. E-mail: suriya.s@mail.rmuk.ac.th

Received: 07-08-2025 Revised: 27-09-2025 Accepted: 28-09-2025

บทคัดย่อ

วิจัยนี้มีจุดประสงค์เพื่อศึกษาหาสูตรส่วนผสมที่เหมาะสมสำหรับความคงรูปทรงของกากกาแฟผสมกับกาวยูเรียฟอร์มาดิไฮต์ด้วยการขึ้นรูปขึ้นงานในแม่พิมพ์ตามรูปแบบการออกแบบของผลิตภัณฑ์ โดยประยุกต์ใช้การเสริมความคงรูปทรงของกากกาแฟ เพื่อการแก้ปัญหาการจัดการขยะและพัฒนาสร้างสรรค์วัสดุทางเลือกสำหรับงานออกแบบผลิตภัณฑ์ วิธีการทดลองส่วนแรก หาอัตราส่วนที่เหมาะสมจากการทดสอบเบื้องต้นที่ความคงรูปทรงของกากกาแฟผสมกับกาวยูเรียฟอร์มาดิไฮต์ด้วยน้ำที่ อัตราส่วนผสมของน้ำ 46 % ซึ่งปริมาณน้ำต่ำกว่านี้กากกาแฟจะไม่คงรูป โดยแบ่งทดสอบจำนวน 4 ตัวอย่าง วิธีแบบอัดเย็นในแบบแม่พิมพ์โดยควบคุมอุณหภูมิห้องที่ 27–37 องศาเซลเซียส คืออัตราส่วนที่ 37:17:46, 32:22:46, 27:27:46 และ 22:32:46 ตามลำดับ พบว่าอัตราส่วนที่ 3 กากกาแฟ 27% กาวผงยูเรียฟอร์มาดิไฮต์ 27% และน้ำ 46 % มีความคงรูปทรงดีที่สุดของรูปทรงผลิตภัณฑ์ ใช้เวลาในการขึ้นรูป 2 วัน 2 ชั่วโมง เมื่อนำอัตราส่วนผสมที่ 3 ทดสอบการทดสอบแรงดัดงอ โดยการเสริมแรงด้วยไม้ขนาดหนา 2 มิลลิเมตร 6 ความหนาของวัสดุแผ่นเรียบ คือ 6,8,10 ,12,14,16 มิลลิเมตร พบว่าความหนา 6 มิลลิเมตรมีค่าการทดสอบที่ดีที่สุดคือ 1.35 MPa และการหลอมตัวของวัสดุผสมของการคงรูปที่ดีที่สุดคือความหนา 6 มิลลิเมตร จากอัตราส่วนผสมสำหรับความคงรูปทรงของกากกาแฟของการวิจัยนี้ เป็นการต่อยอดผลิตภัณฑ์ที่ช่วยในการทดแทนวัสดุประเภทไม้ของชิ้นส่วนงานตกแต่งผิวเฟอร์นิเจอร์และผลิตภัณฑ์ได้และช่วยส่งเสริมงานออกแบบของร้านกาแฟ

คำสำคัญ กากกาแฟ, คงรูปของกากกาแฟ, การออกแบบผลิตภัณฑ์

ABSTRACT

This research aims to study and find the appropriate mixing formula for shape stability of coffee grounds mixed with urea-formaldehyde adhesive through molding workpieces in molds according to product design patterns. The adhesive is applied to enhance the shape stability of coffee grounds in order to solve waste management problems and develop alternative materials for product design work. The first experimental method involved finding the appropriate ratio from preliminary testing of shape stability of coffee grounds mixed with urea-formaldehyde adhesive with water at a mixing ratio of 46% water, below which the coffee grounds would not maintain their shape. Four samples were tested using cold pressing in molds while controlling room temperature at 27-37 degrees Celsius. The ratios were 37:17:46, 32:22:46, 27:27:46, and 22:32:46 respectively. It was found that ratio 3 - coffee grounds 27%, urea-formaldehyde powder adhesive 27%, and water 46% - had the best shape stability for the product form, requiring 2 days and 2 hours for molding. When ratio 3 was tested for bending strength with wooden reinforcement of 2 millimeters thickness, testing 6 different thicknesses of flat sheet material: 6, 8, 10, 12, 14, 16 millimeters, it was found that 6 millimeters thickness had the best test value of 1.35 MPa, and the material fusion of the mixed material with the best shape stability was at 6 millimeters thickness. From the mixing ratio for coffee ground shape stability in this

research, this represents a product extension that helps substitute wood-type materials for furniture surface decoration components and products, and helps promote design work for coffee shops

Keyword: Coffee grounds, Shape retention of coffee grounds, Product design.

1. บทนำ

ปัญหาขยะจากกากกาแฟมีแนวโน้มทั่วโลกมีการผลิตกากกาแฟเป็นของเสียอย่างน้อย 6-8 ล้านตันต่อปี ซึ่งในปัจจุบันได้มีวิธีที่สร้างสรรค์ในการแก้ปัญหาการจัดการขยะและการอนุรักษ์ทรัพยากร การนำวัสดุกลับมาใช้ใหม่ที่มีศักยภาพของการนำกากกาแฟมาใช้ประโยชน์งานด้าน ศิลปหัตถกรรม [1,2] กากกาแฟมีอิทธิพลอย่างมากต่อพฤติกรรมการณ์แนบตัว คุณสมบัติทางเทคโนโลยี และโครงสร้างจุลภาคหลังการเผา นอกจากนี้ยังพบว่าขึ้นอยู่กับปริมาณกากกาแฟที่ใช้ [3] การพัฒนาผลิตภัณฑ์แบบอัดแท่งจากเศษวัสดุธรรมชาติ ใช้วิธีการอัดที่ยังไม่ได้รับการพัฒนา ออกแบบผลิตภัณฑ์[4] กาวยูเรีย-ฟอร์มาลดีไฮด์ ที่ปริมาณกาวยูเรียเท่ากัน การผลิตวัสดุทดแทนไม้ธรรมชาติในการผลิตแผ่นใยอัดต้องกำหนดอัตราส่วนที่เหมาะสม กับวัสดุประสานในการผลิตแผ่นใยอัด โดยใช้กาวยูเรียฟอร์มาลดีไฮด์เป็นวัสดุประสาน การทดสอบคุณสมบัติเชิงกายภาพและเชิงกล [5] ซึ่งในปัจจุบันการออกแบบผลิตภัณฑ์เชิงอนุรักษ์ได้ออกแบบรูปทรงทั้งการผลิตแบบอัดเย็นและแบบอัดร้อน เพื่อใช้สำหรับการใช้งานในอาคารที่เป็นนวัตกรรมใหม่การก่อสร้างและช่วยประหยัดพลังงาน เป็นการส่งเสริมการออกแบบสถาปัตยกรรมแบบบูรณาการกับการออกแบบชิ้นส่วนผลิตภัณฑ์ ทั้งนี้ในการนำขยะมาผลิตเพื่อขึ้นรูปทรงให้มีการคงรูปทรงของกากกาแฟได้ทั้งการอัดแน่นและการปั่นเป็นรูปทรงต่าง ๆ โดยพิจารณาเหมาะสมสำหรับการสร้างผลิตภัณฑ์จากคุณสมบัติทางกายภาพ ปริมาณอัตราส่วนผสม การคงรูป ระหว่างวัสดุหลักและวัสดุผสม ด้วยกาวยูเรียหรือวัสดุประสานที่มีพัฒนาการด้านเทคโนโลยีที่ทันสมัยของส่วนผสม ทั้งของเหลวหรือวัสดุแข็งของเหลวที่สามารถเชื่อมติด หรือประสานวัสดุสองชิ้นเข้าด้วยกัน ซึ่งกาวยูเรียอยู่หลากหลายรูปแบบทั้งมาจากธรรมชาติและสารเคมีสังเคราะห์ ในการใช้งานมักจะขึ้นอยู่กับวัสดุที่จะนำมาติดกัน [6] การประยุกต์ใช้วัฏจักรสำหรับกากกาแฟเพื่อผลิตสีต่อรูปทรงกระเบื้องปูพื้น กากกาแฟเป็นวัสดุสร้างรูปทรง การผลิตกระเบื้องสองชั้นประกอบด้วยการเตรียมผงโดยกระบวนการกดแท่งและเผา ทำการทดสอบเพื่อหาคุณสมบัติทางกายภาพและเชิงกล พบว่าการดูดซึมน้ำ ขึ้นอยู่กับปริมาณกากกาแฟโดยทั่วไปในการผลิตงานเครื่องเรือนนิยมเป็นกาวยูเรียที่เหมาะสมต่อการใช้งานเพียงพอนทนต่อความชื้นแต่ไม่ด้านทานน้ำ โดยใช้กาวยูเรียผสมกับซีเมนต์เพื่ออุดตาหนีของชิ้นงานหรือข้อต่องานไม้ กาวยูเรียฟอร์มาลดีไฮด์เป็นกาวยูเรียที่ใช้กันโดยทั่วไปซึ่งมักจะนำมาผสมกับน้ำและสีโป๊วงานเฟอร์นิเจอร์ ซึ่งกาวยูเรียสามารถเชื่อมตัวได้ดีที่อุณหภูมิห้อง ดังนั้นการขึ้นรูปของกากกาแฟกับกาวยูเรียใช้หลักการของการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์จากผงส่วนใหญ่ใช้การอัดผงถ่านด้วยเครื่องอัด โดยพิจารณาจากอัตราส่วนผสมที่มีความ

เหมาะสม เพื่อหาประสิทธิภาพการใช้งานจากความแห้งของชิ้นงานและความแข็งแรงตัวของวัสดุชิ้นงาน [4] ในการดำเนินการออกแบบงานสร้างสรรค์นั้น จากวัสดุผสม (Composites) ระหว่างวัสดุหลัก (Matrix) กับวัสดุเสริมแรง (Reinforcement) โดยพิจารณาจากคุณสมบัติทางด้านกายภาพของแผ่นวัสดุผสม [6] ทั้งนี้การนำเอากากกาแฟมีน้ำหนักเบาและมีช่องว่างระหว่างเม็ดเยื่อจึงต้องหาวัสดุกาวยูเรียเป็นวัสดุผสมที่นำมาเป็นตัวยึดเกาะให้กากกาแฟจับตัวคงรูปในแบบบอกลักษณะพิมพ์อย่างชัดเจน[7] ดังนั้นการคงรูปของกากกาแฟสำหรับการออกแบบผลิตภัณฑ์ จากลักษณะการหดตัวเมื่อแห้ง

การเสริมความแข็งแรง การศึกษาคุณสมบัติที่ต้องการสำหรับการพัฒนาแผ่นไม้สำหรับวัสดุทางเลือกที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมและยั่งยืน ด้วยของเสียทางการเกษตร เพื่อผลิตวัสดุประกอบที่เป็นมิตรต่อเศรษฐกิจและเทคโนโลยี ซึ่งการประยุกต์ใช้คุณสมบัติทางกลและสมบัติทางกายภาพกากกาแฟ ที่เดิมสารช่วยผสม ในการนำไปสร้างเป็นผลิตภัณฑ์ใหม่ช่วยลดรูปทรง กากกาแฟ จากปริมาณกากกาแฟ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีการศึกษาเพิ่มเติมเพื่อแก้ไขช่องว่างทางความรู้และข้อมูลในหัวข้อนี้ในหัวข้อวัสดุกากกาแฟถือเป็นทางเลือกที่มีศักยภาพสำหรับวัสดุที่สร้างสีทางธรรมชาติในงานก่อสร้าง โดยศึกษาอัตราส่วนที่เหมาะสมของกากกาแฟเป็นวัสดุที่ยั่งยืน หมดเวียนได้ และราคาไม่แพง อีกทั้งมีอยู่เป็นจำนวนมาก ทำให้การใช้ขยะจากกากกาแฟจะช่วยให้การพัฒนาผลิตภัณฑ์และเป็นประโยชน์ต่อสิ่งแวดล้อม [8,9,10]

แต่อย่างไรก็ตามการพัฒนาตัวเชื่อมประสานที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมสำหรับกากกาแฟสำหรับงานผลิตงานเฟอร์นิเจอร์และงานผลิตภัณฑ์ที่มีการใช้กาวยูเรียเป็นส่วนผสมในการผลิตไม้ยังขาดผู้ศึกษาวิจัยจึงสนใจในการใช้กาวยูเรียฟอร์มาลดีไฮด์ด้วยการขึ้นรูปชิ้นงานในแม่พิมพ์ตามรูปแบบการออกแบบของผลิตภัณฑ์ โดยประยุกต์ใช้กาวยูเรียในการเสริมความคงรูปทรงของกากกาแฟกรณีนำไปออกแบบและผลิต

2. วัสดุ อุปกรณ์ และวิธีการทดลอง

2.1 วัสดุ อุปกรณ์

- กระดาษกากกาแฟ เพื่อตากแสงแดดหรือภายในอาคารควร มีลักษณะที่กว้างและมีระนาบแบนเพื่อลดการยับขึ้น
- กากกาแฟ เป็นวัสดุหลัก โดยการนำมาพองอากาศในบรรยากาศอุณหภูมิห้องหรือตากแสงแดดเวลาประมาณ 2 สัปดาห์จึงนำมาใช้ผสมเนื่องจากกากกาแฟมีความชื้น
- ผงกาวยูเรียฟอร์มาลดีไฮด์ สำหรับเป็นวัสดุตัวประสานที่สามารถหาซื้อได้ตามร้านวัสดุทั่วไป
- ขอนกกาแฟ สำหรับตัดกากกาแฟและวัสดุประสานและคนส่วนผสมควรมีขนาดเล็กเพื่อสะดวกต่อการตักใส่แบบแม่พิมพ์

- ปีกเกอร์สำหรับวัดตวงปริมาตรหน่วยวัดเป็นแบบ มิลลิลิตร
- เครื่องชั่ง Digital สำหรับชั่งตวงน้ำหนักหน่วยวัดเป็นหน่วยกรัม
- ภาชนะสำหรับผสม สามารถใช้วัสดุกล่องที่ทิ้งจากการใช้งาน
- แบบแม่พิมพ์สำหรับขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ประดิษฐ์ขึ้นเองหรือซื้อแบบสำเร็จรูป

2.2 วิธีการทดลอง

2.2.1 ลักษณะทางกายภาพการคงรูป

กำหนดอัตราส่วนผสม [5,7] ลักษณะทางกายภาพการคงรูประหว่างวัสดุหลักกากกาแฟกับวัสดุผสมผงยูเรียฟอสเฟอไรต์ และน้ำ โดยขึ้นรูปขึ้นงานวัสดุผสมโดยการผลิตด้วย วิธีแบบอัดเย็นด้วยบอกลีแม่พิมพ์ยางซิลิโคนและขึ้นงานแห้งให้แข็งตัวตามสภาพอากาศของอุณหภูมิห้องที่ 27 – 37 องศาเซลเซียส

จากการทดลองเบื้องต้น ผู้วิจัยได้ดำเนินการทดลองโดยแบ่งอัตราส่วนผสม กากกาแฟกับกาบ ส่วนน้ำควบคุมที่ 46 % เนื่องจากการทดลองที่ปริมาณน้ำต่ำกว่าจะทำให้ความคงรูป แตก ไม่เรียบผิว ขรุขระ ปริมาณน้ำที่มากจะทำให้ผลิตภัณฑ์แห้งช้าทำให้ถอดแบบได้ช้า แต่ถ้าน้ำเกิน 50% จะทำให้ผลิตภัณฑ์แตกร้าว ผู้วิจัยจึงกำหนดการทดลองโดยแบ่งเป็น 4 วิธีการทดลอง เนื่องจากการทดลองผู้วิจัยได้ทดสอบเบื้องต้นกำหนดการทดลองเป็นแบบ ร้อยละเพื่อการวัดตวงที่มีตัวชี้วัด

- วิธีที่ 1 กากกาแฟ 37% ต่อ กาบ 17% น้ำ ต่อ 46%
- วิธีที่ 2 กากกาแฟ 32% ต่อ กาบ 22% น้ำ ต่อ 46%
- วิธีที่ 3 กากกาแฟ 27% ต่อ กาบ 27% น้ำ ต่อ 46%
- วิธีที่ 4 กากกาแฟ 22% ต่อ กาบ 32% น้ำ ต่อ 46%

ขั้นตอนการทดลอง

- 1.วัดตวงกากกาแฟ กาบ และน้ำ โดยวัดตวง ได้น้ำหนักต่อผลิตภัณฑ์ 1 ชิ้นเท่า 36 กรัม
- 2.นำกากกาแฟผสมกับกาบ แบ่งการทดสอบโดยแบ่งอัตราส่วนผสม



ภาพที่ 1 แสดงการวัดตวงกากกาแฟ กาบ และน้ำ



ภาพที่ 2 แสดงการผสมระหว่าง กากกาแฟกับกาบ

- 3.นำกากกาแฟผสมกับกาบ ผสมกับ น้ำ



ภาพที่ 3 แสดงการผสมระหว่าง กากกาแฟกับกาบ และน้ำ

- 4.นำไปอัดเป็นผลิตภัณฑ์ด้วยแบบแม่พิมพ์ โดยจะทำการทดสอบพิจารณา



ภาพที่ 4 แสดงการอัดเป็นผลิตภัณฑ์ด้วยแบบแม่พิมพ์

- 5.ถอดแบบเพื่อพียงอากาศอุณหภูมิห้อง พิจารณาการแห้งตัวของผลิตภัณฑ์



ภาพที่ 5 แสดงผลิตภัณฑ์

2.2.2 ทดสอบความแข็งแรงดัดงอ

ตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมแผ่นใยไม้อัดราบ มอก. 876-2547 ด้วยเครื่อง Electromechanical Universal Testing Machine: WDW-S Series

2.2.3 การตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์ Leica รุ่น DM2500 และ DM2500 LED เพื่อดูการหลอมตัวของกากกาแฟและกาบ

3. ผลการทดลองและอภิปรายผล

การวิจัยโดยศึกษาความเป็นไปได้ในการเลือกใช้วัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร แบ่งเป็น 2 ส่วน คือการพิจารณา คุณสมบัติทางกายภาพ และความแข็งแรง มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาและทดลองการผลิตวัสดุผสมระหว่างวัสดุหลัก คือ กากกาแฟ กับ วัสดุเสริมแรง คือ เศษแผ่นไม้ เพื่อการผลิตไม้จากกากกาแฟ [6]

3.1 อัตราส่วนผสมวัสดุประสาน การคงรูป

ผลการศึกษาหาอัตราส่วนที่เหมาะสมของวัสดุประสานจากสารธรรมชาติ ความหนืด ระหว่างวัสดุหลักกากกาแฟกับวัสดุผสม คือ กาวผงยูเรียฟอร์มาดีไฮด์ และน้ำ โดยการขึ้นรูปขึ้นงานวัสดุผสมด้วยวิธีแบบอัดเย็นด้วยบอลลักแม่พิมพ์ยางซิลิโคน โดยเทวัสดุผสมลงในแม่พิมพ์ ใช้การวิเคราะห์ข้อมูลสูตรของ [7] ร้อยละของการหดตัวเมื่อแห้ง = $\frac{\text{เปียก}-\text{แห้ง}}{\text{เปียก}} \times 100$ ดังตารางที่ 1 ดังนี้

ตารางที่ 1 สัดส่วนอัตราผสมของ กากกาแฟ กาว และน้ำ

อัตราส่วนผสม กากกาแฟ + กาว + น้ำ(ร้อยละ 100 %)				
สัดส่วน (ร้อยละ)	37/17/46	32/22/46	27/27/46	22/32/46
น้ำหนัก รวม 36 (กรัม)	13.32+6.12+16.56	11.52+7.92+16.56	9.72+9.72+16.56	7.97+11.52+16.56
เวลาการแข็งตัว(วัน)	3.5	3	2.5	2
การขึ้นรูป	ขึ้นรูปได้	ขึ้นรูปได้	ขึ้นรูปได้	ขึ้นรูปได้
ลักษณะพื้นผิว	แตกร้าว / ขรุขระ	แตกร้าว / ผิวเรียบ	ผิวเรียบ	ผิวเรียบ
สีของพื้นผิว	กาแฟเข้ม	กาแฟอ่อน	กาแฟอ่อน	กาแฟเกือบขาว

จากการตารางที่ 1 ทดลองหาอัตราส่วนของกากกาแฟและวัสดุประสานกาวและน้ำที่เหมาะสมพบว่าอัตราส่วน 27 : 27 : 46 เป็นสัดส่วนที่เหมาะสมแต่ขึ้นงาน ผลการทดลองผลิตภัณฑ์มีลักษณะของเป็นสีกาแฟอ่อน พื้นผิวเรียบไม่แตกร้าว ใช้เวลาในการคงรูป 2.5 วัน ซึ่งแตกต่างจากการใช้เวลาในการคงรูป 2 วัน ขึ้นงานมีสีกาแฟออกขาวไม่คงสีกาแฟ

ตารางที่ 2 วิธีการทดลอง ที่ 1 กากกาแฟ 37% ต่อ กาว 17% น้ำ ต่อ 46%

น้ำหนักต่อผลิตภัณฑ์ 1 ชิ้นเท่า 36 กรัม	ร้อยละ 100 %	36 กรัม
กากกาแฟ	37%	13.32
กาว	17%	6.12
น้ำ	46%	16.56
ระยะเวลาแข็งตัว	3.5 วัน	
ลักษณะทางกายภาพ และสีของผลิตภัณฑ์	- ขึ้นงานมีสีกาแฟเข้ม - ผิวลักษณะแตกร้าว ขรุขระ - เสียรูทรงจากการหดตัวเมื่อแห้ง	
รูปผลิตภัณฑ์ เมื่อแห้งสนิทน้ำหนักเหลือ 19.44 กรัม		

จากการตารางที่ 2 ทดลองหาอัตราส่วนของกากกาแฟและวัสดุประสานกาวและน้ำที่เหมาะสมพบว่าอัตราส่วน 37 : 17 : 46 ผลการทดลองผลิตภัณฑ์มีลักษณะของเป็นสีกาแฟเข้ม พื้นผิวเรียบแตกร้าว ใช้เวลาในการคงรูป 3.5 วัน

ตารางที่ 3 วิธีการทดลอง ที่ 2 กากกาแฟ 32% ต่อ กาว 22% น้ำ ต่อ 46%

น้ำหนักต่อผลิตภัณฑ์ 1 ชิ้นเท่า 36 กรัม	ร้อยละ 100 %	36 กรัม
กากกาแฟ	32%	11.52
กาว	22%	7.92
น้ำ	46%	16.56
ระยะเวลาแข็งตัว	3 วัน	
ลักษณะทางกายภาพ และสีของผลิตภัณฑ์	- ขึ้นงานมีสีกาแฟอ่อน - ผิวลักษณะแตกร้าว ผิวเรียบ - เสียรูทรงจากการหดตัวเมื่อแห้ง	
รูปผลิตภัณฑ์ เมื่อแห้งสนิทน้ำหนักเหลือ 19.44 กรัม		

จากการตารางที่ 3 ทดลองหาอัตราส่วนของกากกาแฟและวัสดุประสานกาวและน้ำที่เหมาะสมพบว่าอัตราส่วน 32 : 22 : 46 ผลการทดลองผลิตภัณฑ์มีลักษณะของเป็นสีกาแฟอ่อน พื้นผิวเรียบแตกร้าว ใช้เวลาในการคงรูป 3 วัน

ตารางที่ 4 วิธีการทดลอง ที่ 3 กากกาแฟ 27% ต่อ กาว 27% น้ำ ต่อ 46%

น้ำหนักต่อผลิตภัณฑ์ 1 ชิ้นเท่า 36 กรัม	ร้อยละ 100 %	36 กรัม
กากกาแฟ	27%	9.72
กาว	27%	9.72
น้ำ	46%	16.56
ระยะเวลาแข็งตัว	2.5 วัน	
ลักษณะทางกายภาพ และสีของผลิตภัณฑ์	- ขึ้นงานมีสีกาแฟอ่อน - ผิวลักษณะไม่แตกร้าว ผิวเรียบเงาสวย - รูปร่างคงรูปแบบ เมื่อแห้ง	
รูปผลิตภัณฑ์ เมื่อแห้งสนิทน้ำหนักเหลือ 19.44 กรัม		

จากการตารางที่ 4 ทดลองหาอัตราส่วนของกากกาแฟและวัสดุประสานกาวและน้ำที่เหมาะสมพบว่าอัตราส่วน 27 : 27 : 46 ผลการทดลองผลิตภัณฑ์มีลักษณะของเป็นสีกาแฟอ่อน พื้นผิวเรียบไม่แตกร้าว ใช้เวลาในการคงรูป 2.5 วัน

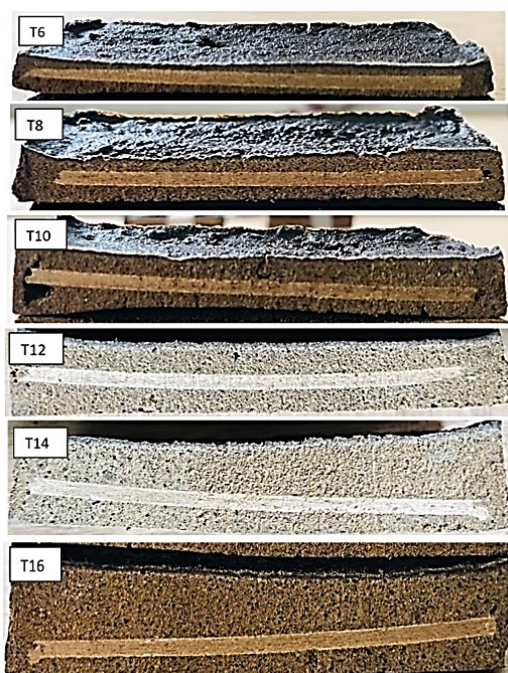
ตารางที่ 5 วิธีการทดลอง ที่ 4 22% ต่อ กาว 32% น้ำ ต่อ 46%

น้ำหนักต่อผลิตภัณฑ์ 1 ชิ้นเท่า 36 กรัม	ร้อยละ 100 %	36 กรัม
22%	7.97	22%
32%	11.52	32%
46%	16.56	46%
ระยะเวลาแข็งตัว	2 วัน	
ลักษณะทางกายภาพ และ สีของผลิตภัณฑ์	- ชิ้นงานมีสี กาแฟออกขาว - ผิวมีลักษณะไม่แตกร้าว ผิวเรียบ - รูปทรงคงรูปแบบ เมื่อแห้ง	
รูปผลิตภัณฑ์ เมื่อแห้งสนิท น้ำหนักเหลือ 19.44 กรัม		

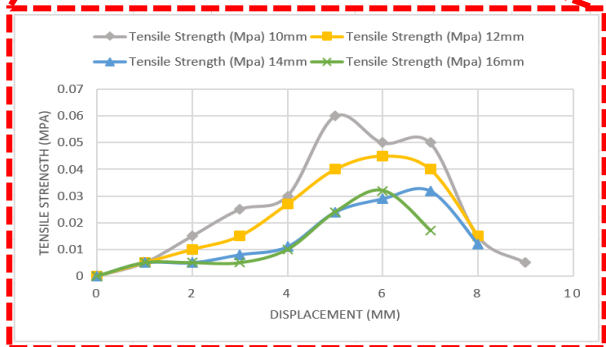
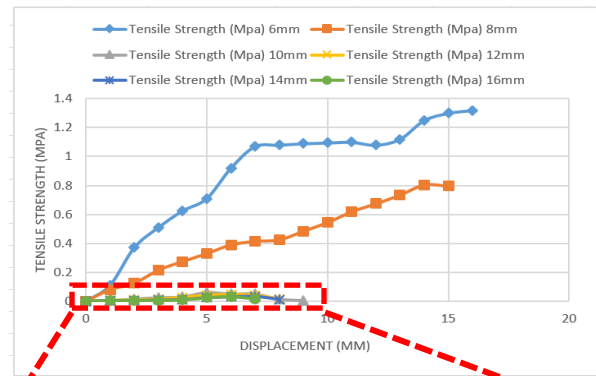
จากการตารางที่ 5 ทดลองหาอัตราส่วนของกากกาแฟและวัสดุประสานกาวและน้ำที่เหมาะสมพบว่าอัตราส่วน 22 : 32 : 46 ผลการทดลองผลิตภัณฑ์มีลักษณะของเป็นสีกาแฟออกขาว พื้นผิวเรียบไม่แตกร้าว ใช้เวลาในการคงรูป 2 วัน

3.2 ผลการทดสอบแรงดัด

ผลการศึกษาสมบัติเชิงกายภาพของแผ่นไม้อัดสลับชั้นจากกากกาแฟ เป็นการทดสอบหาค่าความหนาแน่น ทดสอบแรงดัดงอ โดยทดสอบตามมาตรฐานอุตสาหกรรมแผ่นขึ้นไม้อัดชนิดราบ มอก. 876 – 2547 จากกากกาแฟและ ด้วยวัสดุผสม ระหว่างวัสดุหลักกากกาแฟกับวัสดุผสม คือ กาวผงยูเรียฟอร์มาดีไฮด์ น้ำ และแผ่นไม้บางเป็นแผ่นสลับชั้น โดยการผลิตด้วยวิธีแบบอัดเย็น ด้วยบอลลี่แม่พิมพ์ยางซิลิโคนเป็นกรรมวิธีขึ้นรูปชิ้นงานโดยเทวัสดุผสมลงในแม่พิมพ์ ขนาด ความกว้าง 15 x 15 เซนติเมตร ความหนาแบ่งเป็น 6 ความหนา(ตามความหนาของวัสดุแผ่นเรียบ) คือ 6,8,10 ,12,14,16 มิลลิเมตรดังภาพที่ 4.1 และ 4.2 ดังนี้



ภาพที่ 6 ภาพตัดของชิ้นงานทดสอบ ที่ความหนาการผลิต 6, 8, 10, 12, 14 และ 16 มิลลิเมตร (เมื่อ T เท่ากับ ความหนา)



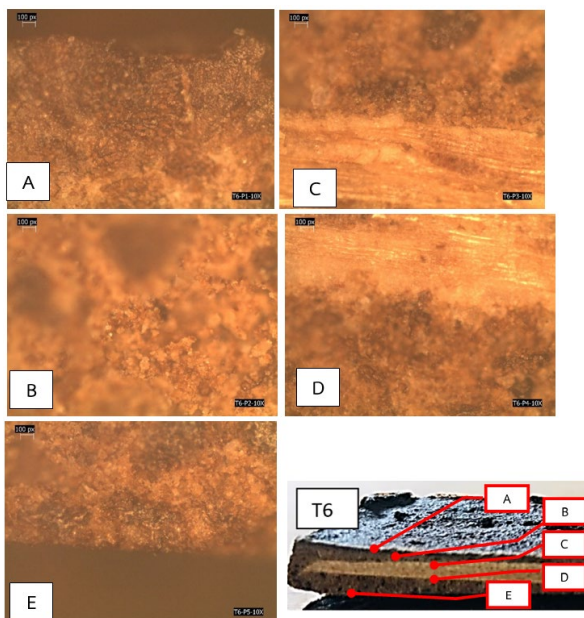
ภาพที่ 7 กราฟเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่าง แรงกด และระยะที่เปลี่ยนแปลง ของชิ้นงานทดสอบที่ความหนาการผลิต 6, 8, 10, 12, 14 และ 16 มิลลิเมตร กราฟเปรียบเทียบเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่าง แรงกด และระยะที่เปลี่ยนแปลง ของชิ้นงานทดสอบที่ความหนาการผลิต 10, 12, 14 และ 16 มิลลิเมตร

ตารางที่ 6 ตารางเปรียบเทียบสมบัติเชิงกายภาพตามมาตรฐานอุตสาหกรรม มอก. 876 – 2547

แรงกด และระยะที่เปลี่ยนแปลง ของชิ้นงานทดสอบที่ความหนา			
ความหนา	ค่าการทดสอบ Mpa	เกณฑ์มาตรฐาน Mpa	ผ่าน – ไม่ผ่านเกณฑ์
6 มิลลิเมตร	1.35	14	×
8 มิลลิเมตร	0.8	14	×
10 มิลลิเมตร	0.6	14	×
12 มิลลิเมตร	0.45	14	×
14 มิลลิเมตร	0.35	13	×
16 มิลลิเมตร	0.35	13	×

3.3 การตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์ การหลอมตัวของกากกาแฟและกาว

ภาพที่ 8 ภาพกำลังขยายที่ 100 เท่า ของพื้นผิวแนวขวางของชิ้นงานทดสอบที่ความหนาการผลิต โดยแสดงตำแหน่งขยายจำนวน 5 ตำแหน่ง พบว่าการหลอมตัวของกาวและกากกาแฟที่ความหนา 6 มิลลิเมตร มีโพรงน้อยกว่า และสีกากกาแฟมีความเข้มกว่า ความหนา 8, 10, 12, 14 และ 16 มิลลิเมตร



ภาพที่ 8 ตัวอย่างชิ้น ภาพกำลังขยายที่ 100 เท่า ของพื้นผิวแนวขวาง ของชิ้นงานทดสอบที่ความหนาการผลิต 6 มิลลิเมตร โดยแสดงตำแหน่งขยาย จำนวน 5 ตำแหน่ง

4. สรุปผลการทดลอง

4.1 สรุปผลการทดลองหาอัตราส่วนผสมวัสดุประสาน

ลักษณะทางกายภาพ การคงรูป ชิ้นงานโดยการผลิตด้วยวิธีแบบอัดเย็นด้วยบอลลักแม่พิมพ์ยางซิลิโคนและชิ้นงานแห้งให้แข็งตัวตามสภาพอากาศของอุณหภูมิห้องที่ 27 – 37 องศาเซลเซียสระหว่างวัสดุหลักกากกาแฟกับ กาวผงยูเรียฟอร์มาดีไฮด์ และน้ำ ลักษณะการหดตัวเมื่อแห้งของผลิตภัณฑ์ พบว่าการทดลองชิ้นงานผลิตภัณฑ์จากกากกาแฟ 27% ต่อ กาว 27% น้ำ 46% ลักษณะความแข็งแรงของผลิตภัณฑ์มีลักษณะ สีของผลิตภัณฑ์เป็นสีกาแฟอ่อนยังคงเอกลักษณ์ของสีกาแฟ พื้นผิวเรียบไม่แตกร้าวใช้เวลาในการขึ้นรูป 2.5 วัน โดยผลที่แตกต่างกันของ 4 วิธีการทดลองนั้น จากวิธีแบบอัดเย็นด้วยบอลลักแม่พิมพ์ยางซิลิโคนเป็นกรรมวิธีโดยอ้างอิงจาก การวิเคราะห์ข้อมูลสูตรของ (วิมล ทองดอนกลิ้ง 2561) ร้อยละของการหดตัวเมื่อแห้ง = $\frac{\text{เปียก-แห้ง}}{\text{เปียก}} \times 100$ สีผลิตภัณฑ์แตกต่างกันมากหรือน้อยนั้นมาจากการผสมน้ำมากหรือน้อย [7] ทั้งนี้สีของกากกาแฟในแม่พิมพ์เกิดการลอยตัวทำให้เกิดการแยกตัวของสี ซึ่งอัตราส่วน 22:32:46 ใช้เวลาในการขึ้นรูปเพียง 2 วัน แต่สีของผลิตภัณฑ์จากกากกาแฟเป็นสีขาวทำให้ขาดเอกลักษณ์ของกากกาแฟ จากปัจจัยทางสภาพอากาศอุณหภูมิห้องเป็นแบบปิดแต่อุณหภูมิ 27 – 37 องศาเซลเซียสแต่อุณหภูมิมีการเปลี่ยนแปลงทั้งวันอาจส่งผลต่อสีผิวและการหดตัวของชิ้นงานเมื่อแห้งสนิท ตามที่ศึกษาอัตราส่วนผสมที่มีความเหมาะสม เพื่อหาประสิทธิภาพการใช้งานจากความแห้งของชิ้นงานและความแข็งตัวของวัสดุชิ้นงานในรูปแบบการอัดร้อนเป็นแนวทางศึกษาต่อไป

4.2 สรุปผลการทดสอบสมบัติเชิงกายภาพ

กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง แรงกด และระยะที่เปลี่ยนแปลง ของชิ้นงานทดสอบที่ความหนาการผลิต 6, 8, 10,

12, 14 และ 16 มิลลิเมตร พบว่าความหนาที่ 6, 8, 10, 12, 14 และ 16 มิลลิเมตร ไม่ผ่านเกณฑ์มาตรฐานที่กำหนด เมื่อผลการเปรียบเทียบสมบัติของแผ่นที่ผ่านมาตรฐานตามสมบัติเชิงกายภาพและเชิงกล ตามมาตรฐานอุตสาหกรรมแผ่นขึ้นไม้อัดชนิดราบ มอก. 876 – 2547 เนื่องจากขนาดความหนาของแผ่นยังมีความหนาคุณลักษณะแผ่น ยังมีความนุ่มทำให้แรงต้านการดัดน้อยลง การทดสอบแรงดัดจึงไม่ผ่านเกณฑ์สมบัติเชิงกายภาพตามมาตรฐานอุตสาหกรรม เป็นเพราะกากกาแฟไม่มีเส้นใยและความหนาแน่นน้อยเนื่องจากเป็นการเทแบบ เป็นการอัดเย็นที่ไม่ควบคุมความหนาแน่น

4.3 การตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์ การหลอมตัวของกากกาแฟและกาว

ภาพกำลังขยายที่ 100 เท่า ของพื้นผิวแนวขวาง ของชิ้นงานทดสอบที่ความหนาการผลิต โดยแสดงตำแหน่งขยายจำนวน 5 ตำแหน่ง พบว่าการหลอมตัวของกาวและกากกาแฟ ที่ความหนา 6 มิลลิเมตร มีโพรงน้อยกว่า และสีกากกาแฟมีความเข้มกว่า ความหนา 8, 10, 12, 14 และ 16 มิลลิเมตร เป็นเพราะความหนาแน่นน้อยเนื่องจากเป็นการเทแบบ เป็นการอัดเย็นที่ไม่ควบคุมความหนาแน่น ทำให้กาวลอยตัว ควรใช้วิธีที่ระดับความหนา 6 มิลลิเมตรดีที่สุด

พบว่าวัสดุทดลองที่มีคุณสมบัติเหมาะสมตามเกณฑ์ที่กำหนดคือความหนา 6 มิลลิเมตร โดยมีคุณสมบัติเชิงกายภาพตามเกณฑ์ที่มาตรฐานอุตสาหกรรม มอก. 876 – 2547 ดีที่สุด

4.3 แนวทางเพื่อการผลิตภัณฑ์

ชิ้นงานสร้างสรรค์ด้านการออกแบบพวงกุญแจและผลิตชิ้นส่วนของเฟอร์นิเจอร์ การนำแผ่นที่มีความหนา 6 มิลลิเมตรมาออกแบบปิดทับผิวหน้าพื้นบนของพื้นเก้าอี้



ภาพที่ 9 ภาพแสดงชิ้นงานสร้างสรรค์ด้านการออกแบบ

5. อภิปรายผล

จากวิธีแบบอัดเย็น ด้วยบอลลักแม่พิมพ์ยางซิลิโคนเป็นกรรมวิธีโดยอ้างอิงจาก การวิเคราะห์ข้อมูลสูตร ร้อยละของการหดตัวเมื่อแห้ง = $\frac{\text{เปียก-แห้ง}}{\text{เปียก}} \times 100$ สีผลิตภัณฑ์แตกต่างกันมากหรือน้อยนั้นมาจากการผสมน้ำมากหรือน้อย [7] ซึ่งจะช่วยลดต้นทุนในแต่ละขั้นตอนของการพัฒนาผลิตภัณฑ์และลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมไปพร้อมๆ กันทำให้ส่งผลดีต่อธุรกิจ ชุมชน และสิ่งแวดล้อม ซึ่งเป็นแนวทางไปสู่การพัฒนาอย่างยั่งยืน [1] การเสริมแรงด้วยเศษไม้ที่มีความหนา 2 มิลลิเมตรอยู่ตรงกลางระหว่าง

กากกาแฟและทดสอบแรงดัดงอ ด้วยเครื่องทดสอบตามมาตรฐานอุตสาหกรรมแผ่นขึ้นไม้อัดชนิดราบ มอก. 876-2547 แบ่งเป็น 6 ความหนาของวัสดุแผ่นเรียบ คือ 6,8,10 ,12,14,16 มิลลิเมตร เพื่อหาผลการเปรียบเทียบสมบัติของแผ่นที่ผ่านมาตรฐานตามสมบัติเชิงกายภาพและเชิงกลว่าผ่านเกณฑ์หรือไม่ [8,9,10] พบว่าความหนาที่ดีที่สุด คือ 6 มิลลิเมตร เนื่องจากการหดตัวมีน้อยกว่าความหนาอื่นๆ การหลอมตัวผสมกันระหว่างกากกาแฟและกาวจากการอัดเย็นที่ไม่ควบคุมความหนาแน่น ทำให้กาวลอยตัวแยกชั้นและทำให้การแข็งตัวจึงขึ้นอยู่กับสภาพอากาศภายนอก จึงทำให้คุณสมบัติทางกายภาพของวัสดุหลักที่นำมาทดลอง เป็นที่สังเกตว่าการทดลองอัดขึ้นรูปวิธีนี้อาจเหมาะกับการอัดขึ้นรูปที่มีขนาดเล็กเพื่อลดเวลาในการแข็งตัวของวัสดุทดลองและตัวประสาน ซึ่งจากการทดลองทั้ง 3 ลำดับนั้น การผสมกาวยูเรียฟอรัมาดีไฮต์ในการคงรูปของกากกาแฟ สามารถนำไปออกแบบชิ้นส่วนงานตกแต่งผิวเฟอร์นิเจอร์และผลิตภัณฑ์ที่ได้แบบต้นทุนต่ำได้

6. กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพที่ให้สถานที่ในการทดลองและสนับสนุนทุนวิจัย

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] Ingrao C, Platnieks O, Siracusa V, Gaidukova G, Paiano A, Gaidukovs S. Spent-coffee grounds as a zero-burden material blended with bio-based poly(butylene succinate) for production of bio-composites: Findings from a Life Cycle Assessment application experience. *Environmental Impact Assessment Review*. 2022;97:106919.
- [2] P. F. Busch and J. N. França Holanda, "Potential use of coffee grounds waste to produce dense/porous bi-layered red floor tiles," *Open Ceramics*, vol. 9, p. 100204, 2022.
- [3] Dari DN, da Silva LF, Júnior AMBL, Freitas IS, da Silva Aires FI, dos Santos JCS. Spent coffee grounds: Insights and future prospects for bioenergy and

- circular economy applications. *Green Technologies and Sustainability*. 2025;3(4):100213.
- [4] Busch PF, França Holanda JN. Potential use of coffee grounds waste to produce dense/porous bi-layered red floor tiles. *Open Ceramics*. 2022;9:100204.
- [5] ธนิรัตน์ ยอดดำเนิน และเสาวลักษณ์ ยอดวิญญูวงศ์ . การพัฒนาผลิตภัณฑ์ถ่านอัดแท่งจากใบอ้อยและขานอ้อยสู่วิสาหกิจชุมชน. วารสารวิชาการเทคโนโลยีพลังงานและสิ่งแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย วิทยาลัยเทคโนโลยีสยาม ปีที่ 7 ฉบับที่ 2 กรกฎาคม – ธันวาคม 2563:12-24.
- [6] ตระกูลพันธ์ พัทธเมธา. การศึกษาและทดลองวัสดุผสมซีเมนต์ไม้อย่างพาราเพื่อใช้ในแกะสลักทดแทนไม้. วารสารมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ (สาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี) ปีที่ 8 ฉบับที่ 15 มกราคม - มิถุนายน 2559:6-7.
- [7] วิมล ทองดอนกลิ้ง. การพัฒนาสูตรเนื้อดินปั้นสำหรับผลิตภัณฑ์สโตนแวร์ จากดินบ้านปลักแรด อำเภอบางระกำ จังหวัดพิษณุโลก วารสารวิชาการ ศิลปะสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร ปีที่ 9 ฉบับที่ 2 กรกฎาคม - ธันวาคม 2561:118 -136.
- [8] Lyu Q, Wang B, Zhao Z, Guo Z. Damage and failure analysis of hybrid laminates with different ply-stacking sequences under low-velocity impact and post-impact compression. *Thin-Walled Structures*. 2022;180.
- [9] Tang K, Jiang Y, Chen L, Li X, Qi J, Chen Q, et al. Fabrication of laminated bamboo composites from small diameter bamboo (*Neosinocalamus affinis*) by sand blasting surface modification. *Industrial Crops and Products*. 2022;187.
- [10] Zhuang W, Chen S, Yang X, Liu Y. Meso/ macroscale study on the shear failure of CFRP laminates considering fibre rotation. *Thin-Walled Structures*. 2022;181.

เปรียบเทียบพฤติกรรมของคานคอนกรีตเสริมเหล็กภายใต้ภาระใช้งานจริงและการออกแบบตามวิธีการออกแบบโดยวิธีกำลังและวิธีหน่วยแรงใช้งาน

Comparison of the Behavior of Reinforced Concrete Beams under Actual and Design Loads according to the Strength Design Method and the Working Stress Design Method

ชำนาญ น้อยพิทักษ์^{1,*}, สอนยา ทองอรุณศรี², และ จรรณู เจริญเนตรกุล³
Chumnahn Noipitak^{1,*}, Sontaya Tongaroonsri², and Charoon Charoennatkul³

¹สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ สาทรร กรุงเทพฯ 10120

²สาขาวิศวกรรมโยธาและสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี เมือง ดาก 63000

³สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย เมือง สงขลา 90000

¹Civil Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Krungthep, Sathon, Bangkok 10120, Thailand

²Civil and Environmental Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Lanna Tak, Muang, Tak 63000, Thailand

³Civil Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Srivijaya, Muang, Songkhla 90000, Thailand

*Corresponding author. Tel. 0992691442 E-mail address: chumnahn.n@mail.rmutk.ac.th

Received: 06-09-2025 Revised: 15-10-2025 Accepted: 30-07-2025

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาความสามารถในการรับแรงดัดของคานคอนกรีตเสริมเหล็กภายใต้การออกแบบตามแนวทาง Strength Design Method (SDM) อ้างอิงกฎกระทรวง พ.ศ. 2566 โดยวิเคราะห์จากน้ำหนักบรรทุกที่เกิดขึ้นจริง (DL + LL) เปรียบเทียบกับน้ำหนักบรรทุกออกแบบ (1.4DL + 1.7LL) และ (1.2DL + 1.6LL) เพื่อหาค่าร้อยละของแรงดัดที่ใช้งานจริงเมื่อเทียบกับค่ากำลังรับสูงสุดของคาน ในการศึกษาได้กำหนดช่วงความยาวของคานที่ 4–8 เมตร (m) และน้ำหนักบรรทุกจรตั้งแต่ 50–800 กิโลกรัมต่อตารางเมตร (kg/m²) ซึ่งเป็นค่าที่พบได้ทั่วไปในอาคารพักอาศัยและพาณิชยกรรม ผลการวิเคราะห์พบว่าคานที่ออกแบบตาม SDM ใช้งานจริงเพียง 54–67% ของกำลังรับโมเมนต์ดัดที่ออกแบบไว้สะท้อนให้เห็นถึงระดับความปลอดภัยที่เพียงพอต่อการใช้งานโครงสร้าง โดยค่าร้อยละดังกล่าวมีแนวโน้มลดลงเมื่อ น้ำหนักบรรทุกจรเพิ่มขึ้น แต่ไม่ขึ้นกับความยาวช่วงอย่างมีนัยสำคัญ ทั้งนี้ แบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์ที่ใช้แสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกจรกับค่าความยอมให้ใช้งาน (Allowable Percentage) มีความแม่นยำสูง ($R^2 = 0.9860$) ส่งผลให้สามารถประเมินพฤติกรรมการรับแรงดัดของคานได้อย่างแม่นยำและปลอดภัยภายใต้การใช้งานจริง นอกจากนี้ยังพบอีกว่า เมื่อเปรียบเทียบการออกแบบด้วยวิธี SDM และ WSD พบว่าค่าความสามารถในการรับโมเมนต์ดัดจากวิธี SDM สูงกว่าวิธี WSD อย่างมีนัยสำคัญ แม้จะใช้หน้าตัดและเงื่อนไขเดียวกันในการออกแบบก็ตาม

คำสำคัญ: คานคอนกรีตเสริมเหล็ก แรงดัด วิธีการออกแบบโดยใช้กำลัง วิธีการออกแบบโดยใช้หน่วยแรงใช้งาน

ABSTRACT

This research investigates the flexural capacity of reinforced concrete beams designed using the Strength Design Method (SDM), based on the Ministerial Regulation B.E. 2566. The analysis compares actual service loads (DL + LL) with design load combinations (1.4DL + 1.7LL) and (1.2DL + 1.6LL), in order to determine the percentage of the actual bending moment in relation to the ultimate flexural strength of the beam. The study considers beam spans ranging from 4 to 8 meters and live loads from 50 to 800 kg/m², which are typical for residential and commercial buildings. The results indicate that beams designed under SDM are utilized at only 54–67% of their design moment capacity under actual loading, reflecting an appropriate level of safety margin in structural design. The utilization percentage tends to decrease as live load increases, while span length does not significantly affect it. A mathematical model was developed to describe the relationship between live load and allowable usage percentage, demonstrating high accuracy ($R^2 = 0.9860$). This enables reliable and safe prediction of beam flexural performance under real service conditions. Additionally, when comparing SDM and Working Stress Design (WSD), it was found that SDM provides a significantly higher flexural capacity, despite using the same cross-sections and design conditions.

Keywords: Reinforced Concrete Beam, Bending Moment, Strength Design Method, Working Stress Design

1. บทนำ

ปัจจุบันกฎกระทรวงได้กำหนดหลักเกณฑ์ในการออกแบบโครงสร้างอาคาร รวมถึงลักษณะและคุณสมบัติของวัสดุที่ใช้ในงานโครงสร้างอาคาร ตามกฎกระทรวง พ.ศ. 2566 โดยกำหนดให้การออกแบบและคำนวณส่วนต่าง ๆ ของอาคารต้องเป็นไปตาม วิธีคำนวณความต้านทานและน้ำหนักบรรทุกทุก (Strength Design Method - SDM) ซึ่งการวิเคราะห์โครงสร้างต้องใช้ค่าของแรงกระทำสูงสุดที่ได้จากการคำนวณชุดตัวคูลน้ำหนักบรรทุกทุก (กฎกระทรวง, 2566) ทั้งนี้ น้ำหนักบรรทุกจร (Live Load) ที่ใช้ในการออกแบบมีหลายระดับ ขึ้นอยู่กับประเภทการใช้งานของพื้นที่แต่ละส่วน โดยมีค่าดังนี้ 50, 100, 200, 250, 300, 400, 500, 600 และ 800 กิโลกรัมต่อตารางเมตร (kg/m^2) [1] และในการทำนายขนาดหน้าตัดคานเบื้องต้น สามารถเริ่มจากการทราบระยะช่วงพาดของคาน (L) ซึ่งโดยทั่วไปมักอยู่ในช่วงประมาณ 4–8 เมตร (m) จากนั้นประมาณความลึกของคาน (D) โดยใช้อัตราส่วน $L/(12-18)$ ซึ่งเป็นเกณฑ์ที่นิยมใช้ในงานออกแบบเบื้องต้น เพื่อควบคุมความโก่งตัวของคานให้อยู่ในเกณฑ์ยอมรับได้ [2][3] เมื่อได้ค่าความลึกแล้ว จึงกำหนดความกว้างของคาน (b) โดยทั่วไปเลือกอยู่ในช่วงประมาณ 0.4–0.5 เท่าของความลึก D [3] ทั้งนี้เพื่อให้ได้สัดส่วนหน้าตัดที่เหมาะสมกับพฤติกรรมรับแรงดัดและง่ายต่อการก่อสร้าง อย่างไรก็ตาม ในงานสถาปัตยกรรมเพื่อเน้นความสวยงามและความรู้สึกของผู้ใช้งานในประเทศไทย นิยมใช้เกณฑ์การแอมตัวของโครงสร้างที่ประมาณ $L/10$ เพื่อควบคุมการโก่งตัวของส่วนต่าง ๆ ให้ไม่ส่งผลกระทบต่อความงามและความพึงพอใจทางสายตา แม้ว่าจะเป็นค่าที่มากกว่าเกณฑ์มาตรฐานทางวิศวกรรมทั่วไปก็ตาม โดยจากประสบการณ์งานก่อสร้างที่ผ่านมา เช่น อาคารสำนักงานและห้างสรรพสินค้า การใช้เกณฑ์นี้ช่วยให้โครงสร้างมีความสมดุลระหว่างความแข็งแรงและความงาม โดยเฉพาะในพื้นที่ใช้งานหนาแน่น เช่น ห้องโถงหรือห้องประชุม อย่างไรก็ตาม เพื่อความเหมาะสมและปลอดภัย ควรพิจารณาเกณฑ์การแอมตัวตามมาตรฐานสากล เช่น AISC Design Guide No.3 ที่แนะนำการใช้ค่าประมาณ $L/240 - L/480$ สำหรับการควบคุมแอมตัวในส่วนที่มีความสำคัญต่อโครงสร้างและการใช้งาน โดยควรปรึกษาผู้เชี่ยวชาญด้านวิศวกรรมและสถาปัตยกรรมเพื่อเลือกเกณฑ์ที่เหมาะสมกับลักษณะโครงการแต่ละประเภท [4][1] ส่วนความหนาของพื้นที่ใช้งานในการออกแบบโครงสร้าง ควรพิจารณาตามประเภทการใช้งานและน้ำหนักบรรทุกจร เช่น พื้นที่อยู่อาศัยทั่วไปใช้ความหนาประมาณ 100–150 มิลลิเมตร (mm) ส่วนพื้นที่รับน้ำหนักสูง เช่น ห้องประชุม ควรเพิ่มความหนาให้เหมาะสม ความหนาพื้นสัมพันธ์กับแรงดัดและการโก่งตัว โดยต้องออกแบบให้สมดุลทั้งความแข็งแรงและความปลอดภัย รวมถึงความสะดวกในการก่อสร้างและต้นทุน [1][3] โดยทั่วไปนิยมใช้ความหนา 120–150 มิลลิเมตร (mm) สำหรับพื้นที่ใช้งานปกติ จากข้อมูลการทำ

นายหน้าตัดในการศึกษาค้นคว้าครั้งนี้ จะถูกนำมาใช้เป็นฐานข้อมูลสำหรับการวิเคราะห์ค่าร้อยละของหน่วยแรงดัดที่สามารถใช้งานได้อย่างปลอดภัย (Allowable percentage of bending stress) ภายใต้กรณีการออกแบบตามแนวทางของ Strength Design Method (SDM) โดยคำนวณจากการเพิ่มน้ำหนักบรรทุกทุกผ่านการใช้ ตัวคูณความต้านทานและน้ำหนักบรรทุกทุก (Load and Resistance Factor Design: LRFD) เพื่อรักษาแนวคิดด้านความปลอดภัยในการออกแบบ (Design Safety Concept) ตามมาตรฐานที่กำหนด [1][2] ถึงแม้ว่าวิธีหน่วยแรงใช้งาน WSD จะไม่ใช่วิธีหลักในการออกแบบโครงสร้างใหม่ในปัจจุบัน แต่ WSD ยังคงมีบทบาทสำคัญในบางกรณี โดยเฉพาะในการวิเคราะห์พฤติกรรมของโครงสร้างขณะใช้งานจริง (Serviceability Analysis) เช่น การคำนวณการโก่งตัว (Deflection) ของคานหรือพื้นภายใต้ น้ำหนักบรรทุกทุกใช้งาน เพื่อควบคุมไม่ให้โครงสร้างโก่งตัวเกินเกณฑ์ที่ยอมรับได้ ซึ่งอาจส่งผลกระทบต่อองค์ประกอบอื่นของอาคารหรือสร้างความไม่สบายแก่ผู้ใช้งาน การประเมินการแตกร้าว (Cracking) ของคอนกรีตเพื่อควบคุมความกว้างของรอยร้าวให้อยู่ในระดับที่ไม่กระทบต่อความทนทานหรือความสวยงาม และการวิเคราะห์การสั่นสะเทือน (Vibration) ที่มีความสำคัญในอาคารที่ต้องการความนิ่งสูง เช่น โรงพยาบาล อาคารสำนักงาน หรือสถานที่ที่มีอุปกรณ์ไวต่อการเคลื่อนไหว นอกจากนี้ WSD ยังเหมาะสมสำหรับการประเมินโครงสร้างเก่าที่เดิมถูกออกแบบด้วยวิธีเดียวกัน โดยสามารถนำมาใช้ในการตรวจสอบความสามารถในการรับน้ำหนักเพิ่มเติมจากการต่อเติม การเปรียบเทียบกับเงื่อนไขการใช้งานใหม่ หรือการวิเคราะห์เพื่อพิจารณาการซ่อมแซมหรือเสริมกำลัง ซึ่งให้ผลลัพธ์ที่สอดคล้องกับแนวคิดดั้งเดิม ช่วยให้การประเมินมีความต่อเนื่อง น่าเชื่อถือ และไม่ก่อให้เกิดความเสียหายเชิงโครงสร้างหรือกระทบต่อความสามารถในการใช้งานของอาคาร

2. วิธีดำเนินการวิจัย

2.1 ขนาดหน้าตัดคานและพื้นที่ตามช่วงความยาว

งานวิจัยนี้มุ่งเน้นการศึกษาค่าความปลอดภัยด้านแรงดัดจากการใช้งานจริง โดยวิเคราะห์จากผลการออกแบบตามแนวทางของวิธีหน่วยแรงใช้งานสูงสุด (Strength Design Method: SDM) อ้างอิงตามข้อกำหนดใน กฎกระทรวง กำหนดหลักเกณฑ์ในการออกแบบโครงสร้างอาคาร และลักษณะและคุณสมบัติของวัสดุที่ใช้ในงานโครงสร้างอาคาร พ.ศ. 2566 ซึ่งประกาศตามพระราชบัญญัติควบคุมอาคาร โดยมีพื้นฐานจากมาตรฐานสากล เช่น ACI 318 [1][2] การศึกษานี้พิจารณาปัจจัยที่ส่งผลต่อค่าความปลอดภัย ได้แก่ ช่วงความยาวของคาน และน้ำหนักบรรทุกจรที่ระบุในกฎกระทรวงฉบับดังกล่าว พร้อมทั้งกำหนดขนาดและสัดส่วนหน้าตัดของคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่เหมาะสมกับการใช้งานจริง โดยกำหนดตัวแปรในการศึกษาประกอบด้วย ช่วงความยาวของคาน (L) ได้แก่ 4, 5, 6, 7 และ 8 เมตร (m) ซึ่งเป็นช่วง

ความยาวที่พบได้บ่อยในงานก่อสร้างอาคารพักอาศัยและอาคารพาณิชย์ทั่วไป โดยรายละเอียดสามารถดูได้ในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 การกำหนดหน้าตัดโครงสร้างคานและพื้นตามความยาวต่าง ๆ

ช่วงความยาวคาน (L) (m)	ความลึกคาน (D = L/10) (cm)	ความกว้างคาน (b = 0.5D) (cm)	ความหนาพื้น (cm)
4	40	20	10
5	50	25	12
6	60	30	15
7	70	35	15
8	80	40	15

2.2 คำนำน้หนักบรรทุกในการออกแบบ ในการออกแบบโครงสร้างตามวิธีหน่วยแรงใช้งานสูงสุด (Strength Design Method: SDM) การพิจารณาค่าของน้ำหนักบรรทุกที่กระทำต่อโครงสร้างต้องดำเนินการโดยใช้สมการรวมของน้ำหนักบรรทุกที่ครอบคลุมทั้งน้ำหนักบรรทุกถาวร (Dead Load: DL) และน้ำหนักบรรทุกจร (Live Load: LL) โดยทั่วไปในการออกแบบจะใช้ ชุดตัวคูณ

น้ำหนักบรรทุก ตามสูตร $1.4DL + 1.7LL$ (อ้างอิงจาก มยพ.1101-57) และ $1.2DL + 1.6LL$ (อ้างอิงจาก ACI 318-19 และ ACI 318-14) เพื่อให้โครงสร้างมีความปลอดภัยเพียงพอต่อสถานการณ์วิกฤตที่อาจเกิดขึ้น โดยมีน้ำหนัก DL ที่มักใช้ในการออกแบบแสดงตามตารางที่ 2

ตารางที่ 2 น้ำหนัก DL ที่มักใช้ในการออกแบบ

รายการ	รายละเอียดการคำนวณ x น้ำหนักจำเพาะของวัสดุ	น้ำหนักใช้งานวิจัย
น้ำหนักพื้นคอนกรีต	ความหนาพื้น x ($\approx 2,400 \text{ kg/m}^3$)	$2,400 \text{ kg/m}^3$
น้ำหนักคานคอนกรีต	หน้าตัดคาน x ($\approx 2,400 \text{ kg/m}^3$)	$2,400 \text{ kg/m}^3$
วัสดุปูพื้น	แล้วแต่ประเภทวัสดุ ($30\text{--}150 \text{ kg/m}^2$)	120 kg/m^2
ฝ้าเพดาน/โครงคร่าว	ฝ้าแขวน, ยิปซัม, โครงอลูมิเนียม ($15\text{--}30 \text{ kg/m}^2$)	30 kg/m^2
ท่อระบบต่าง ๆ	ระบบไฟฟ้า, ประปา, ปรับอากาศ ($5\text{--}20 \text{ kg/m}^2$)	20 kg/m^2
ผนังก่ออิฐ/ผนังเบา	เฉพาแนว ($150\text{--}200 \text{ kg/m}^2$)	180 kg/m^2

ในการกำหนดน้ำหนักบรรทุกที่กระทำต่อคานสำหรับกรณีพื้นแบบสองทางที่รับน้ำหนักตลอดช่วงความยาวของคาน โดยคำนึงถึงกรณีสูงสุดที่มีผนังความสูง 3 เมตรพาดเต็มความยาวคาน สามารถเริ่มต้นโดยพิจารณาน้ำหนักบรรทุกคงที่ (Dead Load: D) ของพื้นที่ต่อตารางเมตร (kg/m^2) ประกอบด้วย (น้ำหนักพื้นคอนกรีต + วัสดุปูพื้น + ฝ้าเพดานและโครงคร่าว + ท่อ

ระบบต่าง ๆ) และได้ดำเนินการถ่ายภาระน้ำหนักลงคานต่อเมตรกรณี DL พื้นถ้ำลงคานต่อเมตร โดยใช้สูตรพื้นสองทาง (WS/3) แสดงน้ำหนัก DL ของพื้นถ้ำลงคานต่อเมตร (kg/m) ตามตารางที่ 3 และน้ำหนัก DL ของคานต่อเมตร (kg/m) ตามตารางที่ 4 และน้ำหนัก DL ของผนังลงคานต่อเมตร (kg/m) ตามตารางที่ 5

ตารางที่ 3 น้ำหนัก DL ของพื้นถ้ำลงคานต่อเมตร (kg/m) คัดกรณีพื้นต่อเนื่อง (คัตน้ำหนักสองฝั่งคาน)

ความหนาพื้น (cm)	S = ช่วงพื้น (m)	W = DL (kg/m^2)	W = $2 \times (\text{WS}/3)$ (kg/m)
10	4	410	1093
12	5	458	1527
15	6	530	2120
15	7	530	2473
15	8	530	2827

ตารางที่ 4 น้ำหนัก DL ของคานต่อเมตร (kg/m)

ความลึกคาน ($D = L/10$) (cm)	ความกว้างคาน ($b = 0.5D$) (cm)	$W = DL$ (kg/m)
40	20	192
50	25	300
60	30	432
70	35	588
80	40	768

ตารางที่ 5 น้ำหนัก DL ของผนังก่ออิฐมวลรวม (180 kg/m²) ลงคานต่อเมตร (kg/m)

ความสูงของผนังก่ออิฐ (m)	$W = DL$ (kg/m)
3	540

ในการวิเคราะห์แรงที่กระทำต่อคาน จำเป็นต้องพิจารณาน้ำหนักบรรทุกคงที่ (Dead Load: DL) โดยการรวม น้ำหนักของพื้น คอนกรีต วัสดุตกแต่งพื้นและฝ้า น้ำหนักของผนังที่พาดผ่านบนคาน รวมถึงน้ำหนักของตัวคานเอง ในที่นี้จะอ้างอิงต่อความยาว 1 เมตรของคาน เพื่อให้สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการออกแบบ

และวิเคราะห์พฤติกรรมโครงสร้างได้อย่างสะดวก แสดงตามตารางที่ 6 ส่วนน้ำหนักบรรทุกจร (Live Load: LL) กระทำต่อคานสำหรับกรณีพื้นแบบสองทางที่รับน้ำหนักตลอดช่วงความยาวของคาน โดยใช้สูตรพื้นสองทาง ($WS/3$) แสดงน้ำหนัก LL ของพื้นถ่ายลงคานต่อเมตร (kg/m) แสดงตารางที่ 7

ตารางที่ 6 รวมน้ำหนักบรรทุกคงที่ลงคานต่อเมตร (Dead Load: DL)

ช่วงคาน (m)	พื้นลงคานต่อเมตร (kg/m)	คานลงคานต่อเมตร (kg/m)	ผนังก่ออิฐลงคานต่อเมตร (kg/m)	รวมน้ำหนักบรรทุกคงที่ลงคานต่อเมตร (kg/m)
4	1093	192	540	1825
5	1527	300	540	2367
6	2120	432	540	3092
7	2473	588	540	3601
8	2827	768	540	4135

ตารางที่ 7 น้ำหนัก LL ของพื้นถ่ายลงคานต่อเมตร (kg/m) คัดกรณีพื้นต่อเนื่อง (คิदनํ้าหนักสองฝั่งคาน)

LL (kg/m ²)	50	100	200	250	300	400	500	600	800
ช่วงคาน (m)	LL ของพื้นถ่ายลงคานต่อเมตร $W = 2 \times (WS/3)$ (kg/m)								
4	133	267	533	667	800	1067	1333	1600	2133
5	167	333	667	833	1000	1333	1667	2000	2667
6	200	400	800	1000	1200	1600	2000	2400	3200
7	233	467	933	1167	1400	1867	2333	2800	3733
8	267	533	1067	1333	1600	2133	2667	3200	4267

2.3 การเปรียบเทียบน้ำหนักบรรทุก DL+LL และ 1.4DL+1.7LL และ 1.2DL+1.6LL ที่กระทำต่อคาน เพื่อให้การออกแบบโครงสร้างคานมีความถูกต้องและปลอดภัย จำเป็นต้องพิจารณาทั้งน้ำหนักบรรทุกคงที่ (Dead Load: DL) ซึ่งได้แก่ น้ำหนักถาวรของโครงสร้าง เช่น พื้นคอนกรีต วัสดุปูพื้น ฝ้าเพดาน และองค์ประกอบถาวรอื่น ๆ ตลอดจน น้ำหนักบรรทุกจร (Live Load:

LL) ซึ่งเกิดจากการใช้งานจริงตามประเภทพื้นที่ เช่น การเคลื่อนย้ายของผู้ใช้งาน เฟอร์นิเจอร์ หรืออุปกรณ์ภายในอาคาร ในหัวข้อนี้จะนำเสนอการเปรียบเทียบน้ำหนักทั้งสองประเภทที่กระทำต่อคาน เพื่อประเมินผลกระทบต่อการออกแบบและความสามารถในการรับน้ำหนักของหน้าตัดคานในแต่ละช่วงความยาว โดยรายละเอียดแสดงไว้ในตารางที่ 8 - ตารางที่ 11

ตารางที่ 8 น้ำหนักบรรทุก DL และ LL ที่กระทำต่อคาน (ไม่รวมตัวคูณ)

LL (kg/m ²)	50	100	200	250	300	400	500	600	800
ช่วงคาน (m)	DL+LL ถ่ายลงคานต่อเมตร (kg/m)								
4	1958	2092	2358	2492	2625	2892	3158	3425	3958
5	2534	2700	3034	3200	3367	3700	4034	4367	5034
6	3292	3492	3892	4092	4292	4692	5092	5492	6292
7	3834	4068	4534	4768	5001	5468	5934	6401	7334
8	4402	4668	5202	5468	5735	6268	6802	7335	8402

ตารางที่ 9 น้ำหนักบรรทุก DL และ LL ที่กระทำต่อคาน (รวมตัวคูณ $U = 1.4DL + 1.7LL$) มาตรฐานไทย

LL (kg/m ²)	50	100	200	250	300	400	500	600	800
ช่วงคาน (m)	1.4DL+1.7LL ถ่ายลงคานต่อเมตร (kg/m)								
4	5844	6031	6404	6591	6778	7151	7524	7898	8644
5	7571	7804	8271	8504	8738	9204	9671	10138	11071
6	9865	10145	10705	10985	11265	11825	12385	12945	14065
7	11490	11816	12470	12796	13123	13776	14430	15083	16390
8	13192	13565	14312	14685	15059	15805	16552	17299	18792

ตารางที่ 10 น้ำหนักบรรทุก DL และ LL ที่กระทำต่อคาน (รวมตัวคูณ $U = 1.2DL + 1.6LL$) มาตรฐานสากล

LL (kg/m ²)	50	100	200	250	300	400	500	600	800
ช่วงคาน (m)	1.2DL+1.6LL ถ่ายลงคานต่อเมตร (kg/m)								
4	5270	5430	5750	5910	6070	6390	6710	7030	7670
5	6828	7028	7428	7628	7828	8228	8628	9028	9828
6	8898	9138	9618	9858	10098	10578	11058	11538	12498
7	10363	10643	11203	11483	11763	12323	12883	13443	14563
8	11898	12218	12858	13178	13498	14138	14778	15418	16698

ตามกฎกระทรวง พ.ศ. 2566 [1][2] แนวทางการออกแบบโครงสร้างคานในประเทศไทยให้ใช้วิธีหน่วยแรงใช้งานสูงสุด (Strength Design Method: SDM) โดยใช้น้ำหนักบรรทุกประลัย เช่น $1.4DL + 1.7LL$ เพื่อเพิ่มความปลอดภัยในการรองรับสภาวะวิกฤตที่อาจเกิดขึ้นจริง อย่างไรก็ตาม จากการเปรียบเทียบกับน้ำหนักใช้งานจริง ($DL + LL$) พบว่าในสถานการณ์ใช้งานจริง น้ำหนักที่กระทำต่อคานมักต่ำกว่าค่าที่ออกแบบไว้ โดยตารางที่

11 แสดงว่าแรงดัดใช้งานจริงมีค่าน้อยกว่ากำลังรับสูงสุดที่ออกแบบ และเมื่อนำสูตร $1.2DL + 1.6LL$ ตามมาตรฐาน ACI มาเปรียบเทียบ (ตารางที่ 12) พบว่ามีระดับความปลอดภัยที่ใกล้เคียงกัน ซึ่งสะท้อนให้เห็นถึงความแตกต่างในแนวทางการเลือกค่าสัมประสิทธิ์ความปลอดภัยระหว่างมาตรฐานไทยและสากล

ตารางที่ 11 การเปรียบเทียบน้ำหนักบรรทุก DL+LL กับ 1.4DL+1.7LL ที่กระทำต่อคาน มาตรฐานไทย

LL (kg/m ²)	50	100	200	250	300	400	500	600	800
ช่วงคาน (m)	ร้อยละยอมให้ใช้งานจากการออกแบบด้วยวิธี SDM								
4	0.66	0.65	0.63	0.62	0.61	0.60	0.58	0.57	0.54
5	0.67	0.65	0.63	0.62	0.61	0.60	0.58	0.57	0.55
6	0.67	0.66	0.64	0.63	0.62	0.60	0.59	0.58	0.55
7	0.67	0.66	0.64	0.63	0.62	0.60	0.59	0.58	0.55
8	0.67	0.66	0.64	0.63	0.62	0.60	0.59	0.58	0.55

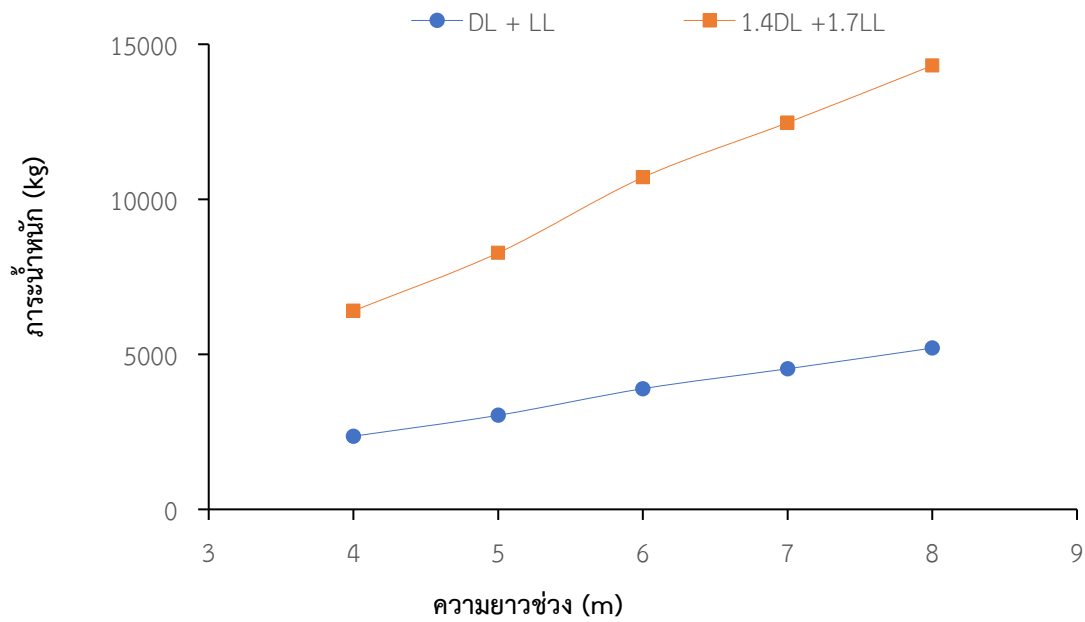
ตารางที่ 12 การเปรียบเทียบน้ำหนักบรรทุก DL+LL กับ 1.2DL+1.6LL ที่กระทำต่อคาน มาตรฐานสากล

LL (kg/m ²)	50	100	200	250	300	400	500	600	800
ช่วงคาน (m)	ร้อยละยอมให้ใช้งานจากการออกแบบด้วยวิธี SDM								
4	0.63	0.61	0.59	0.58	0.57	0.55	0.53	0.51	0.48
5	0.63	0.62	0.59	0.58	0.57	0.55	0.53	0.52	0.49
6	0.63	0.62	0.60	0.58	0.57	0.56	0.54	0.52	0.50
7	0.63	0.62	0.60	0.58	0.57	0.56	0.54	0.52	0.50
8	0.63	0.62	0.60	0.59	0.58	0.56	0.54	0.52	0.50

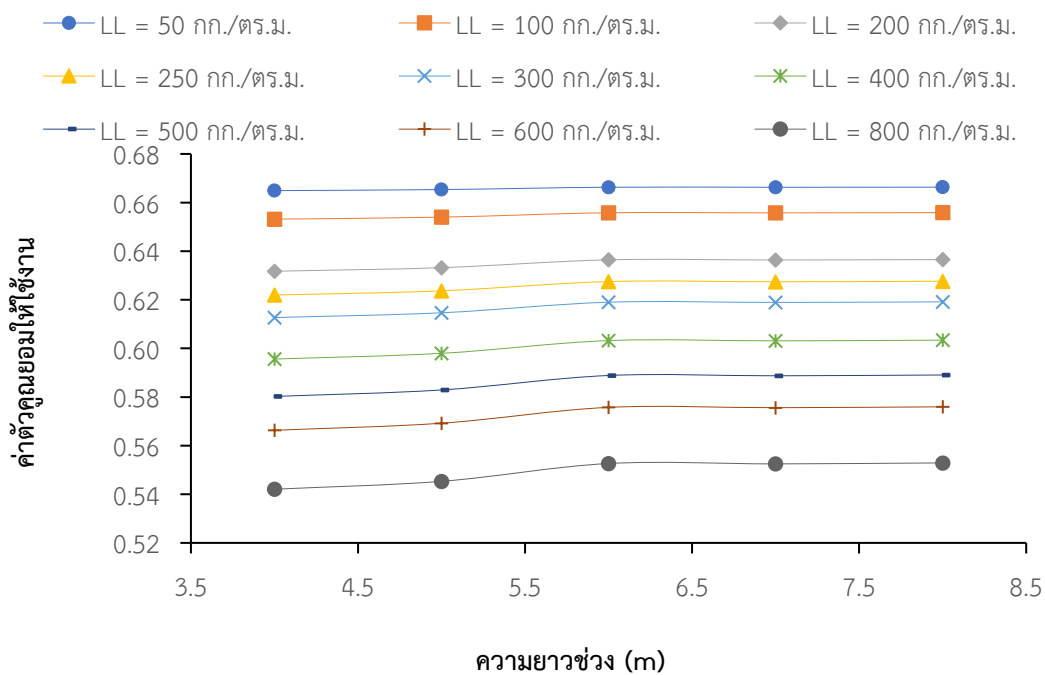
3. ผลการวิจัยและอภิปรายผล

จากตารางที่ 11 แสดง สัดส่วนหรือร้อยละของแรงดัดที่เกิดขึ้นจริงจาก DL + LL เทียบกับกำลังที่ออกแบบไว้ตามวิธี SDM โดยค่าร้อยละเหล่านี้แสดงให้เห็นว่า ในความเป็นจริง หน้าตัดคานที่ออกแบบไว้สามารถรองรับน้ำหนักบรรทุกจริงได้เพียงบางส่วน ของกำลังทั้งหมด ที่ออกแบบไว้ เช่น คานช่วง 4 เมตร และน้ำหนักบรรทุกจร 200 กิโลกรัมต่อตารางเมตร (kg/m²) ใช้กำลังดัดจริงเพียง 63% ของค่าที่ออกแบบไว้ และคานช่วง 8 เมตร (m) และน้ำหนักบรรทุกจรสูงถึง 800 กิโลกรัมต่อตารางเมตร (kg/m²) ยังใช้กำลังเพียง 55% แสดงให้เห็นว่าร้อยละของหน่วยแรงดัดใช้งานจริง เมื่อเทียบกับค่ากำลังรับสูงสุดจากการออกแบบ ซึ่งอยู่ในช่วงประมาณ 54–67% สำหรับคานที่มีความยาวตั้งแต่ 4 ถึง 8 เมตร (m) และน้ำหนักบรรทุกจรระหว่าง 50–800 กิโลกรัมต่อตารางเมตร (kg/m²) ผลลัพธ์นี้ชี้ให้เห็นถึงระดับความเผื่อด้านความปลอดภัยที่มีอยู่ในการออกแบบ และช่วยให้นักออกแบบสามารถใช้ข้อมูลดังกล่าวในการประเมินประสิทธิภาพของหน้าตัดได้อย่างเหมาะสม เพื่อความมั่นคงแข็งแรงและความปลอดภัยในการใช้

งานระยะยาว เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างช่วงความยาวช่วงกับร้อยละยอมให้ใช้งานจากการออกแบบด้วยวิธี SDM จากภาพที่ 1 แสดงให้เห็นความสัมพันธ์ระหว่างความยาวช่วง (Span Length) กับน้ำหนักบรรทุกที่กระทำต่อโครงสร้าง โดยเมื่อช่วงยาวขึ้น น้ำหนักบรรทุกทั้งในกรณีใช้งาน (DL + LL) และกรณีออกแบบ (1.4DL + 1.7LL) ก็เพิ่มขึ้นตาม ซึ่งส่งผลโดยตรงต่อขนาดของโครงสร้างให้ใหญ่ขึ้น รวมถึงเพิ่มปริมาณเหล็กเสริมเพื่อให้โครงสร้างสามารถรับแรงได้อย่างปลอดภัย โดยค่าสัมประสิทธิ์ 1.4DL และ 1.7LL ที่ใช้ตามมาตรฐาน มยผ. 1301/1302 มีจุดประสงค์เพื่อเผื่อความไม่แน่นอนของน้ำหนักบรรทุกและพฤติกรรมวัสดุจริงในการใช้งาน ช่วยให้โครงสร้างมีความมั่นคงในสภาวะวิกฤติ นอกจากนี้ การแยกและเปรียบเทียบน้ำหนักในรูปแบบต่าง ๆ ยังช่วยให้วิศวกรสามารถออกแบบระบบรับน้ำหนักและกำหนดขนาดหน้าตัดได้อย่างแม่นยำ สอดคล้องกับความต้องการใช้งานจริง โดยจากข้อมูลในกราฟ พบว่า น้ำหนักออกแบบสูงกว่าน้ำหนักใช้งานถึงประมาณ 1.8 เท่า ซึ่งเป็นข้อมูลพื้นฐานที่สำคัญในการเลือกวัสดุและกำหนดขนาดโครงสร้างให้มีทั้งความปลอดภัยและประสิทธิภาพสูงสุด



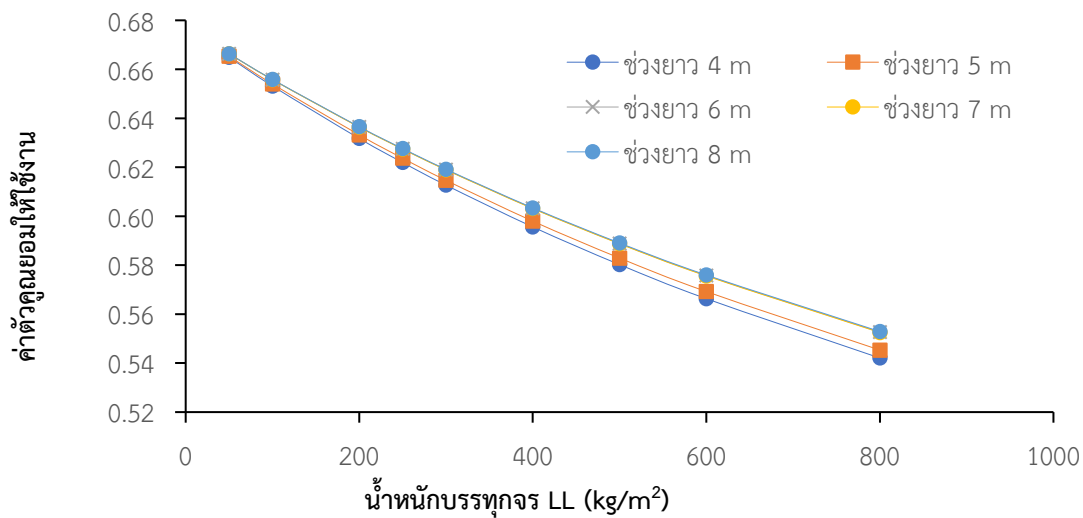
ภาพที่ 1 แสดงความแตกต่างของภาระน้ำหนักสำหรับออกแบบกับน้ำหนักที่ยอมให้ใช้งาน



ภาพที่ 2 แสดงความสัมพันธ์ของค่าตัวคูณยอมให้ใช้งานกับความยาวช่วง

จากภาพที่ 2 แสดงความสัมพันธ์ของค่าตัวคูณยอมให้ใช้งานกับความยาวช่วงและน้ำหนักบรรทุกจร (LL) พบว่าเมื่อค่า LL เพิ่มขึ้น ค่าตัวคูณยอมให้ใช้งานจะลดลงอย่างชัดเจน ซึ่งสะท้อนถึงความสามารถในการรับน้ำหนักของโครงสร้างที่ลดลงตามภาระที่เพิ่มขึ้น ในขณะที่ความยาวช่วงมีผลกระทบน้อยมากต่อค่าดังกล่าว

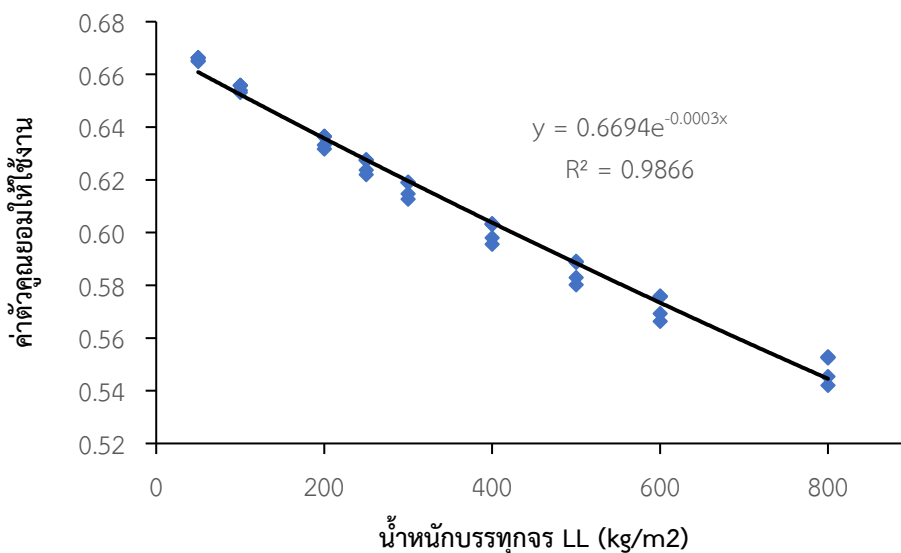
โดยค่าตัวคูณแทบไม่เปลี่ยนแปลงตลอดช่วง 4–8 เมตร (m) แสดงว่าโครงสร้างถูกออกแบบให้สามารถรองรับช่วงที่ยาวขึ้นได้อย่างมีประสิทธิภาพ ทำให้กราฟนี้เหมาะสำหรับการใช้ประเมินพฤติกรรมโครงสร้างเบื้องต้นในสภาวะโหลดที่ต่างกัน



ภาพที่ 3 แสดงความสัมพันธ์ของค่าตัวคูณยอมให้ใช้งานกับน้ำหนักรรทุกจร

จากภาพที่ 3 แสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์เชิงลบระหว่างน้ำหนักรรทุกจร (LL) กับค่าตัวคูณยอมให้ใช้งานในองค์อาคารที่มีช่วงยาวต่างกัน ซึ่งในเชิงวิศวกรรมหมายความว่า เมื่อ LL เพิ่มขึ้น โครงสร้างจะต้องรับแรงมากขึ้น ส่งผลให้ค่าตัวคูณซึ่งสะท้อนถึงความสามารถในการใช้งานอย่างปลอดภัยต้องลดลงเพื่อลดความเสี่ยงต่อการเสียรูปหรือการวิบัติ โดยค่าตัวคูณนี้จะยิ่งลดลงมากขึ้นในกรณีที่ช่วงยาวขององค์อาคารเพิ่มขึ้น เนื่องจาก

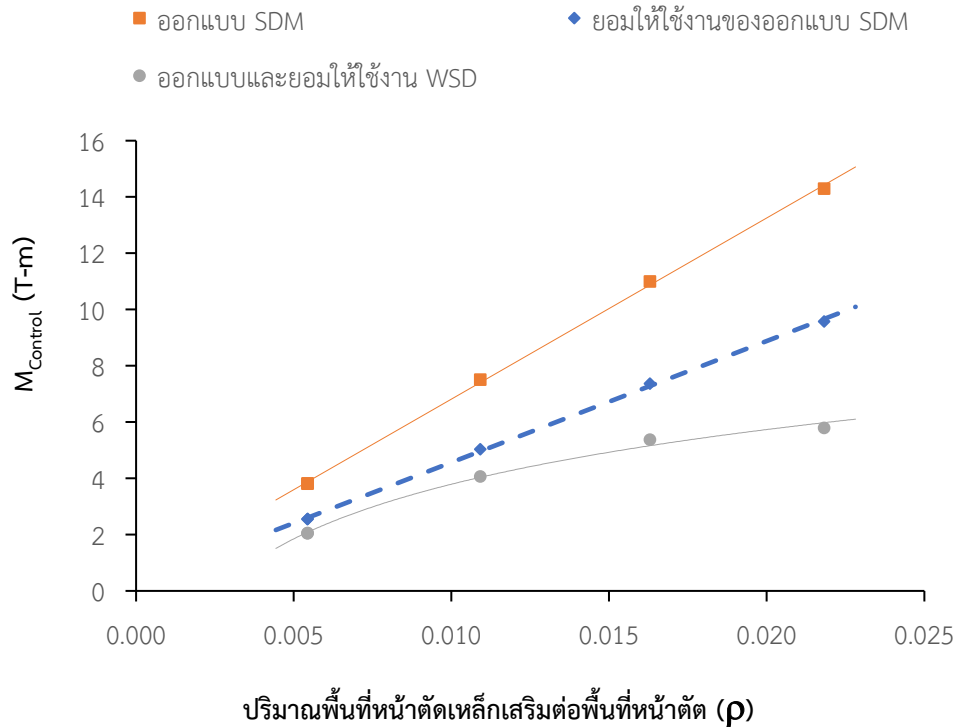
แรงดัดในโครงสร้างจะแปรผันตามกำลังสองของช่วงยาว ทำให้โครงสร้างที่ยาวกว่าอ่อนไหวต่อภาระโหลดมากกว่า การวิเคราะห์กราฟลักษณะนี้จึงมีความสำคัญต่อการออกแบบโครงสร้างที่ปลอดภัยและเหมาะสมกับสภาพการใช้งานจริง ทั้งในแง่การเลือกวัสดุ ขนาดหน้าตัด และข้อกำหนดการรับน้ำหนักรรทุกจรในโครงการต่าง ๆ



ภาพที่ 4 แสดงเส้นแนวโน้มของความสัมพันธ์ระหว่างค่าตัวคูณยอมให้ใช้งานกับน้ำหนักรรทุกจร

จากภาพที่ 4 แสดงเส้นแนวโน้มของความสัมพันธ์ระหว่างค่าตัวคูณยอมให้ใช้งานกับน้ำหนักรรทุกจร โดยใช้สมการแบบเอ็กซ์โพเนนเชียล $y = 0.6694e^{-0.0003x}$ ซึ่งมีค่า $R^2 = 0.9860$ แสดงถึงความแม่นยำของแบบจำลองที่สูงมาก ในเชิงวิศวกรรมหมายความว่า เมื่อน้ำหนักรรทุกจรเพิ่มขึ้น ค่าตัวคูณที่ยอมให้ใช้งานจะลดลงอย่างต่อเนื่อง โดยลดลงเร็วในช่วงต้นและช้าลงเมื่อโหลดสูงขึ้น ซึ่งสะท้อนพฤติกรรมของโครงสร้างที่ตอบสนองต่อภาระ

รรทุกในลักษณะไม่เป็นเชิงเส้น ตัวอย่างเช่น ที่น้ำหนักรรทุกจรเท่ากับ 200 กิโลกรัมต่อตารางเมตร (kg/m²)จะได้ค่าตัวคูณยอมให้ใช้งานประมาณ 0.6298 (หรือยอมให้ใช้งานได้ร้อยละ 62.98 ของภาระน้ำหนักออกแบบ) ซึ่งช่วยให้สามารถประเมินความสามารถในการใช้งานของโครงสร้างได้อย่างแม่นยำและปลอดภัยภายใต้สภาพการใช้งานจริงที่อาจมีการเปลี่ยนแปลงของภาระโหลดตามลักษณะการใช้งานจริง.



ภาพที่ 5 แสดงการเปรียบเทียบผลการคำนวณการรับโมเมนต์ดัดสูงสุดของคานคอนกรีตเสริมเหล็ก

จากภาพที่ 5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์ดัดสูงสุดที่สามารถควบคุมได้ ($M_{Control}$) กับอัตราส่วนของพื้นที่เหล็กเสริมต่อพื้นที่หน้าตัดของคาน (p) สำหรับคานขนาดหน้าตัด 20x40 เซนติเมตร (cm) โดยใช้น้ำหนักบรรทุกจรเท่ากับ 200 กิโลกรัมต่อตารางเมตร (kg/m^2) ใช้ค่ากำลังอัดประลัยของคอนกรีต (f_c') เท่ากับ 180 กิโลกรัมต่อตารางเมตร (kg/m^2) และค่ากำลังครากของเหล็กเสริม (f_y) เท่ากับ 3,000 กิโลกรัมต่อตารางเมตร (kg/m^2) พบว่า การออกแบบตามแนวทางของวิธีหน่วยแรงดัดสูงสุด หรือ Strength Design Method (SDM) ให้ค่าความสามารถในการรับโมเมนต์ดัดสูงกว่าวิธีหน่วยแรงใช้งาน (Working Stress Design: WSD) อย่างชัดเจน ทั้งนี้ เนื่องจาก SDM เป็นแนวทางที่ใช้ค่าภาระโหลดที่เพิ่มขึ้นจากค่าจริงโดยการคูณด้วยตัวคูณโหลด (Load Factor) เพื่อเพิ่มระดับความปลอดภัยในการออกแบบ [2][10] ส่งผลให้ค่าความสามารถในการรับโมเมนต์ดัดที่อนุญาตให้ใช้งานจริง (แสดงในเส้น “ค่าที่อนุญาตให้ใช้งานจากการออกแบบ SDM”) มีค่าน้อยกว่าค่าที่ออกแบบไว้ แต่ยังคงสูงกว่าค่าที่ได้จากการออกแบบและยอมใช้งานตามแนวทางของวิธี WSD อย่างมีนัยสำคัญ [3][5][6] ซึ่งแสดงให้เห็นถึงความแตกต่างของระดับความปลอดภัยที่ได้จากทั้งสองแนวทาง แม้จะใช้เงื่อนไขหน้าตัดเดียวกันในการออกแบบก็ตาม ดังนั้น ผลการศึกษานี้จึงชี้ให้เห็นถึงความจำเป็นในการศึกษาต่อเนื่องเกี่ยวกับค่าตัวคูณของวัสดุ ปัจจัยด้านความปลอดภัย หรือเกณฑ์การออกแบบที่เหมาะสม เพื่อพัฒนาแนวทางการออกแบบที่สามารถให้ระดับความปลอดภัยที่ใกล้เคียงหรือเทียบเท่ากันได้ในอนาคต [1][4][7][8][9] นอกจากนี้จากการเปรียบเทียบตารางที่

11 และ 12 ซึ่งแสดงสัดส่วนของแรงดัดใช้งานจริง (DL+LL) เทียบกับกำลังรับแรงดัดที่ออกแบบตามวิธี SDM พบว่า ตารางที่ 11 ซึ่งอิงตามมาตรฐานไทย (1.4DL + 1.7LL) ให้ค่าสัดส่วนสูงกว่าตารางที่ 12 ที่อิงตามมาตรฐานสากล (1.2DL + 1.6LL) โดยเฉลี่ยค่าร้อยละในตารางที่ 11 อยู่ในช่วงประมาณ 54–67% ขณะที่ตารางที่ 12 อยู่ที่ประมาณ 48–63% สะท้อนให้เห็นถึงระดับความเผื่อด้านความปลอดภัยที่แตกต่างกัน ซึ่งมาตรฐานไทยมีค่าความเผื่อสูงกว่า ส่งผลให้โครงสร้างมีความมั่นคงมากขึ้นแต่ใช้วัสดุมากขึ้นตามไปด้วย ขณะที่มาตรฐานสากลแม้จะมีค่าความเผื่อน้อยกว่า แต่ก็ยังอยู่ในระดับที่ปลอดภัยและมีประสิทธิภาพทางเศรษฐกิจมากกว่า การเลือกใช้มาตรฐานใดจึงควรพิจารณาตามลักษณะโครงการ ความเสี่ยง และข้อกำหนดด้านวิศวกรรมของพื้นที่ก่อสร้าง

4. สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้มุ่งศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่าตัวคูณที่ยอมให้ใช้งานได้จริง (Allowable Factor) กับน้ำหนักบรรทุกทุกภายใต้การออกแบบโครงสร้างด้วยวิธีหน่วยแรงใช้งานสูงสุด (Strength Design Method: SDM) ตามแนวทางที่กำหนดในกฎกระทรวง พ.ศ. 2566 การศึกษานี้วิเคราะห์พฤติกรรมของคานคอนกรีตเสริมเหล็กโดยพิจารณาค่าร้อยละของหน่วยแรงดัดที่เกิดขึ้นจริงเมื่อเทียบกับค่ากำลังดัดที่ออกแบบไว้ เพื่อประเมินระดับความปลอดภัยและความเหมาะสมของค่าหน้าตัดในสถานะใช้งานจริง ผลการวิเคราะห์หลักสามารถสรุปได้ดังนี้

- 1) พบว่าร้อยละของหน่วยแรงดัดที่ใช้งานจริง (DL + LL) เมื่อเทียบกับค่ากำลังดัดที่ออกแบบไว้ ($1.4DL + 1.7LL$) อยู่ในช่วงประมาณ 54%–67% ขึ้นอยู่กับขนาดช่วงคานและค่าของ LL ซึ่งชี้ให้เห็นว่า มีระดับความเผื่อด้านความปลอดภัย (Safety Margin) ที่ค่อนข้างสูง
- 2) พบว่าค่าตัวคูณยอมให้ใช้งานกับน้ำหนักบรรทุกจรสามารถแทนด้วยสมการเอ็กซ์โพเนนเชียล $y=0.6694e^{-0.0003x}$ โดยมีค่า $R^2=0.9860$ เมื่อแทนค่า x หรือแทนค่า LL ในสมการ พบว่าค่า LL เพิ่มขึ้น ค่าตัวคูณจะลดลงในลักษณะไม่เป็นเชิงเส้น โดยลดลงเร็วในช่วงแรกและช้าลงเมื่อ LL สูงขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับพฤติกรรมของโครงสร้างที่ตอบสนองต่อโหลดแบบ non-linear
- 3) พบว่าผลกระทบของช่วงความยาวคาน ค่าตัวคูณยอมให้ใช้งานเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อย
- 4) เปรียบเทียบระหว่างวิธี SDM และ WSD พบว่า ค่าการออกแบบในการรับโมเมนต์ดัดที่ออกแบบตาม SDM มีค่ามากกว่าวิธี WSD อย่างมีนัยสำคัญ แม้จะใช้หน้าตัดเดียวกัน
- 5) เปรียบเทียบตารางที่ 11 และ 12 ซึ่งใช้สูตรตัวคูณโหลดต่างกัน พบว่าตารางที่ 11 (ตามมาตรฐานไทย) ให้ค่าแรงดัดใช้งานจริงเทียบกับกำลังออกแบบสูงกว่าตารางที่ 12 (ตามมาตรฐานสากล) โดยอยู่ที่ประมาณ 54–67% และ 48–63% ตามลำดับ แสดงว่ามาตรฐานไทยเน้นความปลอดภัยมากกว่า ขณะที่มาตรฐานสากลแม้จะเน้นความคุ้มค่าในการใช้วัสดุ แต่ก็ยังอยู่ในระดับที่ปลอดภัย การเลือกใช้งานจึงควรพิจารณาตามลักษณะงานและความเหมาะสมของแต่ละพื้นที่

ข้อเสนอแนะจากผลการวิจัย

- 1) นำข้อมูลร้อยละของค่าตัวคูณที่ยอมให้ใช้งาน สามารถนำมาใช้เป็น ดัชนีสำหรับประเมินประสิทธิภาพของหน้าตัดในสภาวะใช้งานจริง เพื่อการออกแบบอย่างประหยัดและปลอดภัย
- 2) ควรมีการศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับค่าความไม่แน่นอนของน้ำหนักบรรทุก และพฤติกรรมวัสดุในสภาวะการใช้งานจริง เพื่อปรับปรุงค่าตัวคูณความปลอดภัยให้เหมาะสมยิ่งขึ้น

5. กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณสาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ ที่สนับสนุนการดำเนินงานวิจัย

6. อ้างอิง

- [1] กฎกระทรวง กำหนดหลักเกณฑ์ในการออกแบบโครงสร้างอาคาร และลักษณะและคุณสมบัติของวัสดุที่ใช้ในงานโครงสร้างอาคาร พ.ศ. 2566, ราชกิจจานุเบกษา เล่ม 140 ตอนที่ 54 ก, วันที่ 6 กันยายน 2566, หน้า 11–14.
- [2] ACI Committee 318. (2019). Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-19) and Commentary. American Concrete Institute.
- [3] Nilson, A. H., Darwin, D., & Dolan, C. W. (2010). Design of Concrete Structures (14th ed.). McGraw-Hill.
- [4] American Institute of Steel Construction (AISC). (2017). Design Guide 3: Serviceability Design Considerations for Steel Buildings. AISC.
- [5] เทอดศักดิ์ สายสุทธ. การเปรียบเทียบอาคารพักอาศัยสองชั้นระหว่างวิธีการออกแบบหน่วยแรงใช้งานกับวิธีกำลัง. กรุงเทพฯ: มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์; 2551.
- [6] กฤติน เมฆอรุณกุล, ทรงศักดิ์ ประสิทธิ์วิริยะกุล, วัฒนชัย สมิทธาการ. การเปรียบเทียบการคำนวณออกแบบโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กด้วยวิธีหน่วยแรงใช้งาน และวิธีกำลัง. กรุงเทพฯ: จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย; 2545: 55–60.
- [7] วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ในพระบรมราชูปถัมภ์ (วสท.). มาตรฐานการออกแบบโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก. กรุงเทพฯ: วสท.; 2550.
- [8] กรมโยธาธิการและผังเมือง. มยผ. 1301-50: มาตรฐานการออกแบบโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก. กรุงเทพฯ: กรมโยธาธิการและผังเมือง; 2550.
- [9] สำนักงานควบคุมอาคาร กรุงเทพมหานคร. ข้อบัญญัติกรุงเทพมหานคร เรื่องควบคุมอาคาร พ.ศ. 2544 และกฎกระทรวง ฉบับที่ 55 (พ.ศ. 2543) ออกตามความในพระราชบัญญัติควบคุมอาคาร พ.ศ. 2522; 2543.
- [10] MacGregor, J. G., & Wight, J. K. (2005). Reinforced Concrete: Mechanics and Design (4th ed.). Pearson Prentice Hall.

คำแนะนำสำหรับผู้เขียน

วารสารวิจัย มทร.กรุงเทพ รับบทความทั้งภาษาไทยและภาษาอังกฤษ ต้องเป็นต้นฉบับ ไม่เคยตีพิมพ์หรือเผยแพร่ที่ไหนมาก่อน มีจุดประสงค์เพื่อเผยแพร่ความรู้ และผลงานวิชาการทางวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี และมีการตรวจสอบคุณภาพอย่างเคร่งครัด

1. หลักเกณฑ์การส่งบทความ

1.1 บทความเปิดรับทั้งจากบุคคลภายในและภายนอกมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ

1.2 บทความมีรูปแบบการเขียนตามที่กำหนดไว้

1.3 บทความวิชาการต้องมีความยาวประมาณ 8-15 หน้า ในรูปแบบ 1 หรือ 2 คอลัมน์

บทความวิจัย ต้องมีความยาวประมาณ 8-15 หน้า ในรูปแบบ 1 หรือ 2 คอลัมน์

1.4 การส่งบทความ เพื่อผ่านการพิจารณาการกรองและประเมินคุณภาพจากผู้ทรงคุณวุฒิ ในสาขาวิชาที่เกี่ยวข้องผ่านรูปแบบ Online

โดยจัดส่งไฟล์อิเล็กทรอนิกส์ผ่าน <https://www.tci-thaijo.org/index.php/rmutk> เริ่มจาก การกรอกข้อมูลตามแบบฟอร์มส่งบทความเพื่อพิจารณาให้สมบูรณ์ บทความจะได้รับการพิจารณาการกรองจากผู้ทรงคุณวุฒิ และเมื่อบทความได้รับการแก้ไข (หากมี) อย่างเหมาะสม ผู้เขียนจะต้องส่งบทความเข้ามายัง <https://www.tci-thaijo.org/index.php/rmutk> เพื่อดำเนินการในส่วนต่อไป

2. ประเภทของบทความที่ตีพิมพ์

บทความที่ตีพิมพ์ในวารสารมี 2 ประเภท คือ

2.1 บทความวิจัย (Research Paper) เป็นบทความที่มีลักษณะและรูปแบบการวิจัยตามหลักวิชาการ เช่น ตั้งสมมติฐาน โดยระบุวัตถุประสงค์ที่ชัดเจน ได้ค้นคว้าทดลองอย่างมีระบบ และสรุปผลการวิจัยที่นำไปใช้ประโยชน์ต่อไป

2.2 บทความวิชาการ (Academic Paper) เป็นบทความที่มีลักษณะเชิงวิเคราะห์หรือวิจารณ์ จากการทบทวนเอกสาร จากประสบการณ์หรือความชำนาญของผู้เขียน และเสนอแนวคิดใหม่บนพื้นฐานวิชาการ อันก่อให้เกิดองค์ความรู้หรือสามารถประยุกต์ใช้ประโยชน์

3. รูปแบบการพิมพ์บทความ

3.1 ระยะขอบ

ขอบบน (Top Margin) 0.7 นิ้ว หรือ 2 ซม.

ขอบล่าง (Bottom Margin) 0.7 นิ้ว หรือ 2 ซม.

ขอบขวา (Right Margin) 0.7 นิ้ว หรือ 2 ซม.

ขอบซ้าย (Left Margin) 0.7 นิ้ว หรือ 2 ซม.

3.2 กระดาษ

ขนาด A4 ขนาด 8.3 x 11.7 นิ้ว หรือ 21 X 29.7 ซม.

3.3 รูปแบบตัวอักษร

บทความภาษาไทย ใช้ TH SarabunPSK

บทความภาษาอังกฤษ ใช้ TH SarabunPSK

3.4 ชื่อเรื่อง

บทความภาษาไทย ใช้ชื่อเรื่องทั้งภาษาไทยและภาษาอังกฤษ ขนาด 16 ตัวหนา (พิมพ์กลางหน้ากระดาษควรเป็นชื่อที่สั้น กระชับ ได้ใจความตรงกับวัตถุประสงค์และเนื้อเรื่อง)

บทความภาษาอังกฤษ ใช้ชื่อเรื่อง ขนาด 16 ตัวหนา (พิมพ์กลางหน้ากระดาษ)

3.5 ชื่อผู้เขียนและชื่อผู้ร่วมงาน

บทความภาษาไทย ใช้ขนาด 14 ตัวปกติ (พิมพ์กลางหน้ากระดาษ)

บทความภาษาอังกฤษ ใช้ขนาด 14 ตัวปกติ (พิมพ์กลางหน้ากระดาษ)

3.6 สถานที่ทำงาน และ Email

บทความภาษาไทย ใช้ขนาด 12 ตัวปกติ (พิมพ์กลางหน้ากระดาษ)

บทความภาษาอังกฤษ ใช้ขนาด 12 ตัวปกติ (พิมพ์กลางหน้ากระดาษ)

3.7 คำว่า บทคัดย่อ/Abstract

บทความภาษาไทย ใช้ขนาด 16 ตัวหนา

บทความภาษาอังกฤษ ใช้ขนาด 16 ตัวหนา

3.8 เนื้อความใน บทคัดย่อ/Abstract

บทความภาษาไทย ใช้ขนาด 14 ตัวปกติ (พิมพ์แบบเต็มขอบ)

บทความภาษาอังกฤษ ใช้ขนาด 14 ตัวปกติ (พิมพ์แบบเต็มขอบ)

3.9 เนื้อความทั้งหมด (แบ่งเป็น 2 คอลัมน์ ระยะห่างระหว่างคอลัมน์ 0.3 นิ้ว หรือ 0.7 ซม.)

บทความภาษาไทย ใช้ขนาด 14 ตัวปกติ

บทความภาษาอังกฤษ ใช้ขนาด 14 ตัวปกติ

3.10 ชื่อหัวเรื่องใหญ่

บทความภาษาไทย ใช้ขนาด 16 ตัวหนา (พิมพ์แบบชิดซ้าย)

บทความภาษาอังกฤษ ใช้ขนาด 16 ตัวหนา (พิมพ์แบบชิดซ้าย)

3.11 ชื่อหัวเรื่องย่อย

บทความภาษาไทย ใช้ขนาด 14 ตัวหนา (พิมพ์แบบชิดซ้าย)

บทความภาษาอังกฤษ ใช้ขนาด 14 ตัวหนา (พิมพ์แบบชิดซ้าย)

3.12 คำว่า กิตติกรรมประกาศ/Acknowledgement และคำว่า เอกสารเอกสารอ้างอิง/Reference (ใส่หมายเลขลำดับหัวเรื่องด้วย)

บทความภาษาไทย ใช้ขนาด 14 ตัวหนา

บทความภาษาอังกฤษ ใช้ขนาด 14 ตัวหนา

3.13 สมการหรือพจน์ทางคณิตศาสตร์ที่ซับซ้อน

ควรเขียนโดยใช้ Equation Editor โดยจัดแยกบรรทัด และมีเลขกำกับอยู่ในวงเล็บเล็กจัดพิมพ์ด้วย Microsoft Word

4. ส่วนประกอบของบทความแต่ละประเภท**4.1 บทความวิจัย****A. ส่วนปก**

- 1. ชื่อบทความ (Title)** ภาษาไทยและภาษาอังกฤษ ควรกะทัดรัด ไม่ยาวเกินไป ชื่อเรื่องต้องมีทั้งภาษาไทยและภาษาอังกฤษ
- 2. ชื่อผู้เขียน (Authors)** ชื่อเต็ม นามสกุลเต็ม ของผู้เขียนทุกคน สำหรับผู้เขียนประสานงานให้ใส่ที่อยู่ให้ละเอียด พร้อมทั้งหมายเลขโทรศัพท์/โทรสาร และ Email address ที่สามารถติดต่อได้
- 3. ตัวเลขยก** ให้เขียนไว้บนนามสกุล เพื่อระบุที่อยู่ของผู้เขียน
- 4. บทคัดย่อ (ABSTRACT)** ควรจัดทำเป็นร้อยแก้วย่อหน้าเดียว สั้น ตรงประเด็น ครอบคลุมสาระสำคัญของการศึกษา ได้แก่ วัตถุประสงค์ วิธีการ ผลการวิจัยและการอภิปรายผล เป็นต้น ถ้าบทความเป็นภาษาไทยจะต้องมีบทคัดย่อทั้งภาษาไทยและภาษาอังกฤษ โดยให้ภาษาไทยขึ้นก่อน มีความยาวไม่เกิน 1,000 คำ
- 5. คำสำคัญ (keywords)** ภาษาไทยและภาษาอังกฤษ เป็นคำสำคัญที่สามารถใช้ในการสืบค้น ในระบบฐานข้อมูลหมายเหตุ : เนื้อหาส่วนปกจะต้องเขียนให้อยู่ในกระดาษ จำนวน 1 หน้า เท่านั้น

B. ส่วนเนื้อหา

- 1. บทนำ (INTRODUCTION)** เพื่ออธิบายถึงความสำคัญของปัญหา และวัตถุประสงค์ของการวิจัย รวมถึงการทบทวนวรรณกรรม และเอกสารที่เกี่ยวข้อง
- 2. วัตถุประสงค์การวิจัย** ข้อความที่แสดงให้เห็น ถึงสิ่งที่นักวิจัยต้องการศึกษา ที่มีลักษณะเฉพาะเจาะจง สามารถเขียนแสดงเป็นข้อ ๆ
- 3. วัสดุ อุปกรณ์ และวิธีการ (MATERIALS AND METHODS)/วิธีดำเนินการวิจัย (RESEARCH METHODOLOGY)** อธิบายเครื่องมือและวิธีการดำเนินการวิจัยให้ชัดเจน บทความวิจัยด้านวิทยาศาสตร์ ควรอธิบายเกี่ยวกับเครื่องมือ อุปกรณ์ สารเคมี และวิธีการที่ใช้ในการวิจัย
- 4. ผลการวิจัยและอภิปรายผล/ ผลการทดลองและอภิปรายผล (RESULT AND DISCUSSION)** เสนอผลการทดลอง อย่างชัดเจน และตรงประเด็น ควรมีรูปภาพ/หรือตารางประกอบ การอธิบายผลในตารางและรูปภาพ ต้องไม่ซ้ำซ้อนกัน รูปภาพและตารางของบทความที่เป็นภาษาไทย ให้บรรยายเป็นภาษาไทย รูปภาพและตารางของบทความที่เป็นภาษาอังกฤษ ให้บรรยายเป็นภาษาอังกฤษ
เป็นการอภิปรายผลการวิจัยว่าเป็นไปตามสมมติฐานที่ตั้งไว้หรือไม่เพียงใด และควรเอกสารอ้างอิงทฤษฎีหรือเปรียบเทียบการทดลองของผู้อื่นที่เกี่ยวข้องประกอบ เพื่อให้ผู้อ่านเห็นด้วยตามหลักการหรือคัดค้านทฤษฎีที่มีอยู่เดิม รวมทั้งแสดงให้เห็นถึงการนำผลไปใช้ประโยชน์ และการให้ข้อเสนอแนะสำหรับการวิจัยในอนาคต

รูปภาพ/กราฟ ให้อยู่ในเนื้อเรื่องของบทความ ขนาดตัวอักษรสามารถอ่านได้ชัดเจนเหมาะสมกับขนาดของรูปภาพ/กราฟ โดยบันทึกเป็นไฟล์ที่มีนามสกุล JPG มีความละเอียดไม่ต่ำกว่า 300 dpi เท่านั้น ถ้าเป็นภาพถ่ายกรุณาส่งภาพต้นฉบับ และในกรณีที่ป็นรูปถ่ายเส้นให้วาดโดยใช้หมึกสีดำที่มีความคมชัด หมายเลข รูปภาพ/กราฟให้เป็นเลขอารบิก และอยู่ด้านล่างของรูปภาพ/กราฟ จัดแบบตรงกลาง

ตาราง ให้อยู่ในเนื้อเรื่องของบทความ หมายเลขตารางให้เป็นเลขอารบิก และอยู่ด้านบนของตาราง

5. **สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ (CONCLUSION)** สรุปประเด็น และสาระสำคัญที่ได้จากการวิจัย
6. **กิตติกรรมประกาศ (Acknowledgements)** เป็นการแสดงความขอบคุณแก่ผู้ให้ความช่วยเหลือให้การวิจัยสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี เพียงสั้นๆ (อาจมีหรือไม่มีก็ได้)
7. **เอกสารเอกสารอ้างอิง (REFERENCES)** เป็นรายการเอกสารเอกสารอ้างอิงที่ใช้เป็นหลักในการค้นคว้าวิจัยที่ได้รับการตรวจสอบเพื่อนำมาเตรียมรายงาน และมีการเอกสารอ้างอิงถึงเฉพาะเอกสารที่ปรากฏในบทความเท่านั้น การเอกสารอ้างอิงให้จัดเรียงตามลำดับที่เอกสารอ้างอิงเป็นตัวเลขในเครื่องหมาย [x] และให้เริ่มต้นเรียงลำดับเอกสารจากที่พบในเนื้อหาหาก่อนเป็น [1] หากผู้เขียนมีมากกว่า 3 คน ให้ใส่ชื่อ 3 คนแรก แล้วตามด้วยและคณะหรือ et al.
8. **การเอกสารอ้างอิงเอกสารในเนื้อเรื่องของบทความ (In-text Citations)** การเอกสารอ้างอิงเอกสารในเนื้อเรื่อง ให้ใช้ระบบแวนคูเวอร์ (Vancouver style) สามารถดูรายละเอียดเพิ่มเติมได้ที่ <http://library.md.chula.ac.th/guide/vancouver> 2011.pdf

ตัวอย่างการเขียนเอกสารเอกสารอ้างอิง

หนังสือหรือตำรา

รูปแบบพื้นฐาน ชื่อผู้แต่ง(Author)./ชื่อหนังสือ(Title of the book)./ครั้งที่พิมพ์(Edition)./เมืองที่พิมพ์(Place of Publication):สำนักพิมพ์(Publisher);ปี(Year).

- Janeway CA, Travers P, Walport M, Shlomchik M. Immunobiology. 5th ed. New York: Garland Publishing; 2001.
- รังสรรค์ ปัญญาญญะ. โรคติดเชื้อของระบบประสาทกลางในประเทศไทย. กรุงเทพฯ: เรือนแก้วการพิมพ์; 2536.

บทความจากวารสาร (Articles in Journals)

รูปแบบพื้นฐาน ชื่อผู้แต่ง(Author)./ชื่อบทความ(Title of the article)./ชื่อวารสาร(Title of the Journal)./ปีที่พิมพ์(Year);เล่มที่ของวารสาร(Volume):หน้า(Pages).

- ชนิตรา ดำรงกิจ, ใหม่ น้อยพิทักษ์, วิบุญ ตั้งวโรตมนกุล และคณะ.การศึกษาสมบัติทางกลและส่วนผสมทางเคมีของรอยเชื่อมเหล็กกรางรถไฟ. วารสารวิจัย มทร.กรุงเทพ. 2561;12(1):119-31.
- White AR, Treenate D, Kiatgungwalgrai A, et al. The effects of accent familiarity on English as a foreign language students' word recognition and comprehension of the English language. UTK Res J. 2559;10(2):21-30.

เอกสารอิเล็กทรอนิกส์ (Electronic Material)

รูปแบบพื้นฐาน ชื่อผู้แต่ง (Author)./ชื่อบทความ (Title of the article) [ประเภทของสื่อ/วัสดุ]./สถานที่พิมพ์: สำนักพิมพ์; ปีพิมพ์ (Year) [เข้าถึงเมื่อ/cited ปี เดือน วันที่]./จาก (Available from): <http://.....>

- Foley KM, Gelband H, editors. Improving palliative care for cancer [Internet]. Washington: National Academy Press; 2001 [cited 2002 Jul 9]. Available from: <https://www.nap.edu/catalog/10149/improving-palliative-care-for-cancer>.

- “กำเนิด” ระบบหลักประกันสุขภาพถ้วนหน้า มิติใหม่แห่งการบริการด้านสาธารณสุขเพื่อคุณภาพชีวิตที่ดีขึ้นของคนไทย [อินเทอร์เน็ต]. นนทบุรี: สปสช.; 2552. [เข้าถึงเมื่อ 25 มีนาคม 2554]. จาก: www.localfund.in.th/files/NHSO-intro1-6.pdf

การเอกสารอ้างอิงบทความที่นำเสนอในการประชุม หรือสรุปผลการประชุม (Conference paper)

รูปแบบพื้นฐาน ชื่อผู้เขียน./ชื่อเรื่อง./ใน(In):/ชื่อบรรณาธิการ./บรรณาธิการ./ชื่อหนังสือ./ชื่อการประชุม./วัน เดือน ปีที่ประชุม./สถานที่จัดประชุม./สถานที่พิมพ์./สำนักพิมพ์./ปีที่พิมพ์./น./เลขหน้าเริ่มต้น-เลขหน้าสุดท้ายของบทที่อ้าง.

- อีระ ฤชตระกูล. Coagulopathy in liver diseases. ใน: ปิยะวัฒน์ โกมลมิศร์, ทวีศักดิ์ แทนวันดี, อนุชิต จุฑะพุทธิ, บรรณาธิการ. Vascular diseases of the liver. การประชุมวิชาการประจำปี ครั้งที่ 4 Vascular diseases of the liver; วันที่ 12-14 มีนาคม 2552; เพชรบุรี.กรุงเทพฯ: สมาคมโรคตับ (ประเทศไทย); 2552. น.1-13.

บทความวิชาการ

A. ส่วนปก

มีส่วนประกอบเหมือนบทความวิจัย

B. ส่วนเนื้อหา

1. บทนำ (INTRODUCTION) เป็นส่วนของที่มาของมูลเหตุของการเขียนบทความ
2. วิธีการศึกษา/วิธีดำเนินการ (METHOD) (ถ้ามี) เป็นการอธิบายวิธีการศึกษา หรือการดำเนินการตามประเภทของบทความวิชาการ
3. ผลการศึกษา/ผลการดำเนินการ (RESULT AND DISCUSSION) เป็นการเสนอผลอย่างชัดเจน ตามประเด็นโดยลำดับตามหัวข้อที่ศึกษาหรือดำเนินการ
4. สรุป (CONCLUSION) สรุปประเด็น และสาระสำคัญที่ได้จากการศึกษา
5. เอกสารเอกสารอ้างอิง (REFERENCES) ใช้ตามที่วารสารกำหนด

แบบฟอร์มส่งบทความเพื่อพิจารณาตีพิมพ์ลงในวารสารวิจัย มทร.กรุงเทพ

วันที่.....เดือน.....พ.ศ.....

ข้าพเจ้า (นาย/นาง/นางสาว)..... นามสกุล.....

ขอส่ง ☐ บทความวิจัย ☐ บทความวิชาการ

เรื่อง (ภาษาไทย).....

เรื่อง (ภาษาอังกฤษ).....

ชื่อผู้เขียนร่วม (ภาษาไทย)

1.
2.
3.

ชื่อผู้เขียนร่วม (ภาษาอังกฤษ)

1.
2.
3.

ที่อยู่ที่สามารถติดต่อได้สะดวก..... หมู่ที่..... ซอย..... ถนน.....

ตำบล/แขวง..... อำเภอ/เขต..... จังหวัด..... รหัสไปรษณีย์.....

Email..... โทรศัพท์..... โทรสาร..... โทรศัพท์ (มือถือ).....

ข้าพเจ้าขอรับรองว่าบทความนี้ ☐ เป็นผลงานของข้าพเจ้าแต่เพียงผู้เดียว☐ เป็นผลงานของข้าพเจ้าและผู้ร่วมงานตามชื่อที่ระบุในบทความจริง

โดยขอรับรองว่ารูปภาพและข้อความทั้งหมดในบทความนี้ ไม่ละเมิดลิขสิทธิ์ใด ๆ และบทความนี้ไม่เคยลงตีพิมพ์ในวารสารใดมาก่อน และจะไม่นำบทความนี้ส่งไปเพื่อพิจารณาตีพิมพ์ในวารสารอื่นอีกเป็น การเข้าช้อนการละเมิดลิขสิทธิ์ถือเป็นความรับผิดชอบของผู้เขียนบทความโดยตรง ทั้งนี้ผู้เขียนเข้าใจนโยบายการรับบทความของวารสารวิจัย มทร.กรุงเทพแล้ว และยินยอมว่าบทความที่ตีพิมพ์ลงในวารสารวิจัย มทร. กรุงเทพ ถือเป็นลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ

ลงชื่อ.....

(.....)



หนังสือรับรองการตีพิมพ์บทความ
วารสารวิจัย มทร.กรุงเทพ
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ

ขอรับรองว่าบทความ.....

เรื่อง

โดย

บทความของท่านได้ผ่านขั้นตอนการตรวจสอบคุณภาพของบทความโดยผู้ทรงคุณวุฒิตรวจสอบบทความ
(peer Reviewer) จำนวน 3 ท่าน จากสถาบันภายนอก หลายหลายสถาบัน และหลากหลายสาขาวิชา
ซึ่งเป็นผู้เชี่ยวชาญในสาขาวิชาที่เกี่ยวข้อง และท่านได้แก้ไขตามคำแนะนำของผู้ทรงคุณวุฒิเป็นที่เรียบร้อยแล้ว
โดย ตีพิมพ์ในวารสารวิจัย มทร.กรุงเทพ

ปีที่..... ฉบับที่ พ.ศ.

(.....)

บรรณาธิการวารสารวิจัย มทร.กรุงเทพ
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ

ขั้นตอนการจัดทำวารสารวิจัย มทร.กรุงเทพ

