

<http://ojs.kmutnb.ac.th/index.php/joindtech>

ISSN: 2697-5548 (Online)



DRIVEN BY



Indexed In
TCI



The Journal of Industrial Technology

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม ปีที่ ๒๒ ฉบับที่ ๑ ประจำปี ๒๕๖๕

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม ปีที่ ๒๒ ฉบับที่ ๑ ประจำปี ๒๕๖๕

VOLUME 22 | ISSUE 1 | 2026 | Focused on engineering and industrial technology

Published by College of Industrial Technology (CIT), KMUTNB

กองบรรณาธิการวารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม

ที่ปรึกษา

ศาสตราจารย์ ดร.สุชาติ เข้ายิ่งจีน
รองศาสตราจารย์ ดร.สมิตร ส่งพิริยะกิจ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

บรรณาธิการ

รองศาสตราจารย์ ดร.อรรถพล แก้ววิลัย

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

รองบรรณาธิการ

รองศาสตราจารย์ ดร.บุญลือ สวัสดิ์มงคล

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

กองบรรณาธิการ

ศาสตราจารย์ ดร.ประยุทธ์ อัครเอกพาลิน
ศาสตราจารย์ ดร.สุทธิศักดิ์ พงศ์ธนาพานิช
ศาสตราจารย์ ดร.นวดล เหล่าศิริพจน์
ศาสตราจารย์ ดร.พิเชษฐ ลิ่มสุวรรณ
ศาสตราจารย์ ดร.สำเร็จ จักรใจ
ศาสตราจารย์ ดร.ประณัฐ โพธิยะราช
ศาสตราจารย์ ดร.หทัยกานต์ มนัสปิยะ
ศาสตราจารย์ ดร.ผดุงศักดิ์ รัตนเดโช
ศาสตราจารย์ ดร.ปริญญา จินดาประเสริฐ
ศาสตราจารย์ นาวาอากาศโท ดร.สรวิชัย สุจิตจร
รองศาสตราจารย์ ดร.ชนัดชัย กุลรวานิชพงษ์
รองศาสตราจารย์ ดร.อภิรัตน์ เล่าห์บุตรี
รองศาสตราจารย์ ดร.สุรัตน์ ผลศิลป์
รองศาสตราจารย์ ดร.ดวงฤดี นายสุวรรณ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยขอนแก่น
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

กองบรรณาธิการนานาชาติ

Professor Dr.Athanasios Thanos Tsolakis
Professor Dr.Cristina Leonelli
Professor Dr.Greg Heness
Professor Dr.Michiya Matsusaki
Professor Dr.Kannan Venkatramanan

University of Birmingham, United Kingdom
University of Modena and Reggio Emilia, Italy
University of Technology Sydney, Australia
Osaka University, Japan
SCSVMV University, India

หัวหน้าฝ่ายจัดการ

รองศาสตราจารย์ ดร.กัมปนาท เทียนน้อย

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

ฝ่ายจัดการ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ประเสริฐศักดิ์ เตียวงศ์สมบัติ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปานทิพย์ บุญส่ง

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

ผู้จัดการวารสาร

นางสาวชลดา เชื้อประดิษฐ์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

Editorial Board of The Journal of Industrial Technology

Advisory Board

Professor Dr.Ing.Suchart Siengchin	King Mongkut's University of Technology North Bangkok
Associate Professor Dr.Smith Songpiriyakij	King Mongkut's University of Technology North Bangkok

Editor-in-Chief

Associate Professor Dr.Attaphon Kaewvilai	King Mongkut's University of Technology North Bangkok
---	---

Associate Editor

Associate Professor Dr.Boonlue Sawatmongkhon	King Mongkut's University of Technology North Bangkok
--	---

Editorial Board Members

Professor Dr.Prayoot Akkaraekthalin	King Mongkut's University of Technology North Bangkok
Professor Dr.Sutthisak Phongthanapanich	King Mongkut's University of Technology North Bangkok
Professor Dr.Navadol Laosiripojan	King Mongkut's University of Technology Thonburi
Professor Dr.Pichet Limsuwan	King Mongkut's University of Technology Thonburi
Professor Dr.Sumrerng Jugjai	King Mongkut's University of Technology Thonburi
Professor Dr.Pranut Potiyaraj	Chulalongkorn University
Professor Dr.Hathaikarn Manuspiya	Chulalongkorn University
Professor Dr.Phadungsak Ratanadecho	Thammasat University
Professor Dr.Prinya Chindapasirt	Khon Kaen University
Professor Wing Commander Dr.Sarawut Sujitjorn	Suranaree University of Technology
Associate Professor Dr.Thanatchai Kulworawanichpong	Suranaree University of Technology
Associate Professor Dr.Apirat Laobuthee	Kasetsart University
Associate Professor Dr.Sureerat Polsilapa	Kasetsart University
Associate Professor Dr.Duangrudee Chaysuwan	Kasetsart University

International Editors

Professor Dr.Athanasios Thanos Tsolakis	University of Birmingham, United Kingdom
Professor Dr.Cristina Leonelli	University of Modena and Reggio Emilia, Italy
Professor Dr.Greg Heness	University of Technology Sydney, Australia
Professor Dr.Michiya Matsusaki	Osaka University, Japan
Professor Dr.Kannan Venkatramanan	SCSVMV University, India

Head of Administrative Management

Associate Professor Dr.Kampanart Theinnoi	King Mongkut's University of Technology North Bangkok
---	---

Administrative Management

Assistant Professor Dr.Prasertsak Tiawongsombat	King Mongkut's University of Technology North Bangkok
Assistant Professor Dr.Pantip Boonsong	King Mongkut's University of Technology North Bangkok

Journal Manager

Miss Chonlada Chueapradit	King Mongkut's University of Technology North Bangkok
---------------------------	---

วัตถุประสงค์

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรมเป็นวารสารตีพิมพ์เผยแพร่บทความวิจัยและบทความวิชาการ เพื่อเป็นสื่อกลางในการเผยแพร่องค์ความรู้ งานวิจัย สิ่งประดิษฐ์และนวัตกรรม ของภาคการศึกษาและอุตสาหกรรม โดยบทความมีเนื้อหาที่เกี่ยวข้องกับสาขาวิชาทางด้านเทคโนโลยีวิศวกรรมศาสตร์ อาทิเช่น วิศวกรรมเครื่องกล วิศวกรรมโยธา วิศวกรรมเคมี วิศวกรรมไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ วิศวกรรมวัสดุและกระบวนการผลิต วิศวกรรมอุตสาหการ วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม วิศวกรรมพลังงานและพลังงานทดแทน วิศวกรรมคอมพิวเตอร์และแบบจำลอง เป็นต้น

ทั้งนี้ บทความจะผ่านขั้นตอนการประเมินเบื้องต้นถึงคุณภาพและขอบเขตของเนื้อหา ความถูกต้องของรูปแบบการเตรียมบทความ ความซ้ำซ้อน และการคัดลอกวรรณกรรม (Duplication and Plagiarism) โดยกองบรรณาธิการวารสารฯ จากนั้น บทความจะได้รับการประเมินคุณภาพทางวิชาการโดยผู้ทรงคุณวุฒิในสาขาวิชาที่เกี่ยวข้องอย่างน้อย 3 ท่าน ซึ่งเป็นบุคคลภายนอกจากหลากหลายสถาบัน ทั้งนี้ ผู้นิพนธ์ (Author) และผู้ประเมิน (Reviewer) จะไม่ทราบข้อมูลของกันและกัน (Double-Blinded Peer Reviews) และไม่ได้สังกัดหน่วยงานเดียวกัน โดยบทความที่ผ่านการปรับปรุงตามผลการประเมินจะได้รับพิจารณาอนุมัติให้ตีพิมพ์บทความขั้นตอนสุดท้าย กองบรรณาธิการจะดำเนินการตรวจสอบบทความและพิสูจน์อักษรก่อนที่จะเผยแพร่บทความแบบออนไลน์ และจัดพิมพ์บทความทั้งหมดรวมเล่มเพื่อดำเนินการเผยแพร่ต่อไป

อนึ่ง ผลงานวิจัยและผลงานทางวิชาการที่ปรากฏเผยแพร่ในวารสารฯ เป็นความคิดเห็นอิสระของผู้แต่ง โดยผู้แต่งเป็นผู้รับผิดชอบต่อผลทางกฎหมายใด ๆ ที่อาจจะเกิดขึ้นจากบทความเผยแพร่ นั้น ซึ่งกองบรรณาธิการและคณะผู้จัดทำวารสารฯ ไม่จำเป็นต้องเห็นด้วยเสมอไป

กำหนดออกวารสาร

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรมมีกำหนดการออกปีละ 3 ฉบับ โดยฉบับที่ 1 จะจัดพิมพ์ระหว่างเดือนมกราคม – เมษายน ฉบับที่ 2 จะจัดพิมพ์ระหว่างเดือน พฤษภาคม – สิงหาคม และฉบับที่ 3 จะจัดพิมพ์ระหว่างเดือนกันยายน – ธันวาคม ของทุกปี

ผู้จัดพิมพ์

หน่วยวิจัยและส่งเสริมวิชาการ วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ชั้น 3 อาคาร 63 เลขที่ 1518 ถนนประชาราษฎร์ 1 แขวงวงศ์สว่าง เขตบางซื่อ กรุงเทพฯ 10800 โทร. 02-555-2000 ต่อ 6249, Email: JIT.journal@gmail.com

Objectives

The journal of industrial technology is an academic publication which devotes to be a medium to disseminate knowledge, research, invention, and innovation for academics. The article provides and reports of interest to the field of engineering technology such as mechanical engineering, civil engineering, electrical and electronic engineering, chemical engineering, materials engineering, production engineering, industrial engineering, environmental engineering, energy and renewable energy engineering, computational engineering and etc.

For publication, the submitted articles will be reviewed through a preliminary assessment process for the quality and scope of the content, duplication, and plagiarism by the editorial board and then evaluated for an academic quality for academic quality by at least 3 experts in related fields, who are outsiders from various institutions. The authors and reviewers do not know each other's information (double-blinded peer reviews) and are not affiliated with the same institution. The high quality-reviewed manuscript will be considered to be accepted for publication. For the last step, the editorial board will verify and proofread the articles before online publishing and printing out all in the journal for further publication.

In addition, the research and academic works published in this journal are considered the independent opinions of the author. The author is responsible for any legal consequences that may result from the published articles with which editorial members do not always necessarily agree.

Publishing Schedule

The journal of industrial technology is published in 3 issues per year. Issue 1 will be published between January and April of every year. Issue 2 will be published between May and August of every year. Issue 3 will be published between September and December of every year.

Publisher

Research and Academic Supports Division College of Industrial Technology, King Mongkut's University of Technology North Bangkok, Building 63, 3rd Floor, 1518, Pracharat 1 Road, Wongsawang, Bangsue, Bangkok, Thailand, 10800, Tel. +66 2 555-2000 ext. 6249, Email: JIT.journal@gmail.com

บทบรรณาธิการ

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology, ISSN Online: 2697-5548) ปีที่ 22 ฉบับที่ 1 กองบรรณาธิการมีความยินดีเป็นอย่างยิ่งที่จะเรียนให้ทุกท่านได้ทราบว่าวารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรมได้รับการประเมินคุณภาพวารสารจัดอยู่ในฐานข้อมูล TCI กลุ่มที่ 1 ด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี โดยศูนย์ดัชนีการอ้างอิงวารสารไทย (Thai Citation Index: TCI) มีผลรับรองตั้งแต่วันที่ 1 มกราคม พ.ศ. 2568 ถึงวันที่ 31 ธันวาคม พ.ศ. 2572

การดำเนินงานของวารสารฯ ฉบับนี้ ทางกองบรรณาธิการและคณะผู้จัดทำวารสารฯ ได้ดำเนินการพิจารณาและเผยแพร่บทความด้วยระบบ Online Journal Submission (OJS) ทั้งนี้ วารสารฯ ได้ดำเนินการขอเลขรหัสทรัพยากรสารสนเทศดิจิทัล (Digital Object Identifier: DOI) ผ่านระบบ CrossRef และ Digital Object Identifier System ให้กับทุกบทความที่ได้รับการตีพิมพ์ รวมถึงนำเข้าข้อมูลบทความสู่ฐานข้อมูล TCI แบบ Fast Track (Fast-track Indexing System) และฐานข้อมูล Google Scholar ซึ่งทำให้การสืบค้นและการอ้างอิงข้อมูลบทความด้วยระบบออนไลน์นั้นถูกต้องและรวดเร็วยิ่งขึ้น

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม ได้จัดพิมพ์ 3 ฉบับต่อปี คือฉบับที่ 1 เดือนมกราคม - เดือนเมษายน ฉบับที่ 2 เดือนพฤษภาคม - เดือนสิงหาคม และฉบับที่ 3 เดือนกันยายน - เดือนธันวาคม สำหรับการเผยแพร่บทความแบบออนไลน์นั้นได้ดำเนินการผ่านทางเว็บไซต์ ojs.kmutnb.ac.th/index.php/jointtech และ ph01.tci-thaijo.org/index.php/jit_journal ที่อยู่ในระบบ Thai Journals Online (ThaiJO)

ปัจจัยหลายประการที่มีความสำคัญเป็นอย่างยิ่งต่อคุณภาพวารสารคือคุณภาพของบทความที่มีคุณค่าทางวิชาการเป็นที่ยอมรับ กระบวนการคัดกรองและการตรวจสอบที่มีมาตรฐาน โดยผู้ทรงคุณวุฒิเฉพาะสาขาวิชา ขอเสนอแนะที่ทรงคุณค่า รวมทั้ง การจัดการที่มีประสิทธิภาพเพื่อดำเนินการจัดพิมพ์และการเผยแพร่บทความให้เป็นไปตามระยะเวลาที่กำหนด ส่งผลให้วารสารฯ มีความน่าเชื่อถือและผ่านการรับรองโดย TCI

ทางคณะผู้จัดทำวารสารฯ ขอกราบขอบพระคุณที่ปรึกษาวารสารฯ กองบรรณาธิการ ผู้ทรงคุณวุฒิพิจารณาบทความ ที่สละเวลาและใช้ความรู้ความสามารถในการทำให้คุณภาพของวารสารฯ เป็นที่น่าเชื่อถือและมีคุณค่าเป็นประโยชน์ต่อวงการวิชาการ และขอขอบคุณนักวิชาการทุกท่านที่ส่งบทความที่มีคุณค่าทางวิชาการเข้าร่วมทำให้วารสารฯ ดำเนินการสำเร็จตามวัตถุประสงค์ ทางคณะผู้จัดทำวารสารฯ พร้อมทั้งจะรับฟังข้อเสนอแนะจากทุกภาคส่วนเพื่อทำให้วารสารฯ มีการพัฒนามากยิ่งขึ้น และเป็นที่ยอมรับในระดับสากลต่อไป

บรรณาธิการ



สารบัญ

	หน้า
กองบรรณาธิการวารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (Editorial Board of The Journal of Industrial Technology)	A
วัตถุประสงค์ (Objectives)	C
บทบรรณาธิการ	E
บทความวิจัย	
ผลกระทบของเถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียดปริมาณสูงต่อสมบัติของคอนกรีตบล็อก (Effect of High Volume Ground Palm Oil Fuel Ash on Properties of Concrete Blocks) <i>Napadon Sompakdee, Chookiat Choosakul, Suporn Rittipukdee, Prachoom Khamput, Saofee Dueramae, Sasi Duanyai, Tawich Klathae</i>	1-17
กรอบการจัดการข้อมูลและตัวแบบทางคณิตศาสตร์สำหรับการจัดสรรพนักงานที่คำนึงถึงทักษะและการเพิ่มพูนทักษะสำหรับแผนกเย็บในอุตสาหกรรมเครื่องนุ่งห่ม (A Data Management Framework and Mathematical Model for Worker Allocation Considering Skills and Upskilling in the Sewing Department of the Garment Industry) <i>Nopruj Boonserm, Siravit Swangnop</i>	18-32
การพัฒนาอุปกรณ์จับยึดชิ้นงานเพื่อลดเวลาการผลิตในงานเจาะลูกล้อบนเครื่องกัดซีเอ็นซี (Development of Workholding Fixture for Cycle Time Reduction in Flywheel Pulley Drilling on CNC Milling Machine) <i>Nattapat Kanchanaruangrong, Sarinya Prateepchanachai</i>	33-49
ผลกระทบของน้ำทะเลต่อกำลังอัดและโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตผสมเถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียดแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 (Effect of Sea Water on Compressive Strength and Elastic Modulus of Concrete Portland Cement Type V Containing Ground Palm Oil Fuel Ash) <i>Napadon Sompakdee, Chookiat Choosakul, Suporn Rittipukdee, Prachoom Khamput, Mahamasuhaimi Masae, Saofee Dueramae, Tawich Klathae</i>	50-67



สารบัญ (ต่อ)

บทความวิจัย (ต่อ)	หน้า
การเพิ่มประสิทธิภาพการขนส่งบรรจุภัณฑ์ด้วยระบบอัตโนมัติต้นทุนต่ำตามหลักการการาคูริไคเซ็น (Enhancing Packaging Transport Efficiency Using Low-Cost Karakuri Kaizen Automation Mechanism) <i>Siraprapha Deepradit , Apichit Krajangyao , Phanumat Vongchan , Watit Krithat , Nattira Deesungnoen</i>	68-83
QFD-guided design of a Web-Based DSS Prototype for Sustainable Waste Management in Thailand <i>Prin Boonkanit, Kridchai Suthiluck</i>	84-99
การศึกษาการอบแห้งข้าวเปลือกในระบบอบแห้งกระแสนแบบแนวโค้งด้วยพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (Investigation of Paddy Drying in a Curvilinear Impinging Stream Drying System Using Computational Fluid Dynamics) <i>Patiwat Khomwachirakul , Piti Khunpho , Kittti Sathapornprasath</i>	100-115
การพัฒนาเครื่องบันทึกผลการทดสอบการอัดตัวคายน้ำโดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ (Development of a Microcontroller-Based Data Logger for Consolidation Testing) <i>Aniroot Suksan , Cheevin Limsiri</i>	116-128
การทำนายการเกิดไมโครแครกในสายเมน XLPE ของระบบไฟฟ้า อาคารเรียนโดยใช้การวิเคราะห์ข้อมูลกระแสสามเฟสแบบเรียลไทม์ (Predicting Micro-Crack Formation in XLPE Main Cables of Educational Building Power Systems Using Real-Time Three-Phase Current Data Analysis) <i>Sittisak Rojchaya, Santi Karisan</i>	129-143
การศึกษาความเป็นไปได้ทางเทคนิค เศรษฐศาสตร์ และสิ่งแวดล้อมของกระบวนการผลิตดีเซลสังเคราะห์จากก๊าซธรรมชาติตลอดวัฏจักรชีวิต (Feasibility Study on Technical, Economic, and Environmental Aspects of Synthetic Diesel Production from Natural Gas throughout Its Life Cycle) <i>Pinnaree Kohsaman, Paweena Prapainainar, Chaiwat Prapainainar, Suwimol Wongsakulphasatch, Viganda Varabuntoonvit, Kandis Sudsakorn</i>	144-161



สารบัญ (ต่อ)

บทความวิจัย (ต่อ)	หน้า
การออกแบบและศึกษาทดลองเครื่องต้นแบบสำหรับสร้างลมร้อนอุณหภูมิต่ำด้วยพลาสมาบรรยากาศเพื่ออบแห้ง และลดการปนเปื้อน ของเชื้อราบนสมุนไพรไทย (Design and Experimental Study of a Prototype Device for Low-Temperature Hot Air Generation Using Atmospheric Plasma for Drying and Fungal Decontamination of Thai Herbs) <i>Samit Preechayan, Seksid Kamolchai, Ekkawit Wangkanklang</i>	162-177
Natural Heat Convection Analysis on Boundary layer and Apply Utilization to Inclined Solar Collector <i>Sriwichai Susuk, Rachain Visutthipat, Weerayuth Promjan, Natsacha Inchoorun</i>	178-192
การออกแบบและพัฒนาไมโครมิกเซอร์แบบพาสซีฟที่ดีที่สุดสำหรับการรองรับอัตราการไหลที่หลากหลาย (The Design and Development of the Optimal Passive Micromixer to Accommodate a Wide Range of Flow Rates) <i>Tuntita Arrayathiraputtitorn, Chalinee Phiphattanaphiphop, Thanyanan Tipun</i> <i>Kobkit Issarachevavat, Surachai Tumtavitikul, Tavichakon Jomvong</i>	193-210
ข้อมูลสำหรับผู้เขียนและการเตรียมต้นฉบับ (Authors Guideline and Manuscript Preparation)	S1
แบบฟอร์มนำส่งบทความ (Manuscript Submission Form)	S2



ผลกระทบของเถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียดปริมาณสูงต่อสมบัติของคอนกรีตบล็อก

นภดล ศรีภักดี¹ ชูเกียรติ ชูสกุล¹ สุพร ฤทธิภักดี¹ ประชุม คำพุด² เซาฟี่ร์ ดือราแม³
ศศิ ดวนใหญ่⁴ และ ทวิช กล้าแท้^{1*}

¹ สาขาวิศวกรรม, วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรมและการจัดการ, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย

² ภาควิชาวิศวกรรมโยธา, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

³ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ

⁴ ภาควิชาวิศวกรรมโยธาสิ่งแวดล้อมและความยั่งยืน, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยสยาม

* ผู้ประสานงานเผยแพร่ (Corresponding Author), E-mail: Tawich.k@rmutsv.ac.th

วันที่รับบทความ: 3 กรกฎาคม 2568; วันที่ทบทวนบทความ: 22 ธันวาคม 2568; วันที่ตอบรับบทความ: 9 มกราคม 2569

วันที่เผยแพร่ออนไลน์: 17 เมษายน 2569

บทคัดย่อ: งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลกระทบของเถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียดปริมาณสูงต่อสมบัติของคอนกรีตบล็อก ตามมาตรฐาน มอก. 58-2560 เรื่องผลิตภัณฑ์คอนกรีตบล็อกกลวงไม่รับน้ำหนัก โดยกำหนดอัตราส่วนวัสดุประสานต่อมวลรวมละเอียด (ปูนซีเมนต์+เถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียด : หินฝุ่น) เท่ากับ 1 : 6 โดยน้ำหนัก จำนวน 4 อัตราส่วนผสม คือร้อยละ 0, 50, 60, และ 70 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน ทดสอบกำลังรับแรงอัดที่อายุการบ่ม 7, 28 และ 56 วัน ทดสอบการดูดซึมน้ำ และค่าความหนาแน่น ที่อายุการบ่ม 28 วัน นอกจากนี้ ทำการวิเคราะห์ต้นทุนการผลิต และผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมของคอนกรีตบล็อก ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่า การใช้เถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียดแทนที่ปูนซีเมนต์ในปริมาณร้อยละ 70 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน สามารถพัฒนากำลังอัดได้ถึง 5.02 เมกะปาสกาล หรือคิดเป็นร้อยละ 73 ของคอนกรีตบล็อกที่มีปูนซีเมนต์เป็นวัสดุประสานเพียงอย่างเดียวที่อายุ 28 วัน ผ่านมาตรฐาน มอก. 58-2560 เรื่องผลิตภัณฑ์คอนกรีตบล็อกกลวงไม่รับน้ำหนัก ในขณะที่คอนกรีตบล็อกที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียดในปริมาณสูงมีความหนาแน่นเฉลี่ยลดลง ในขณะที่มีค่าการดูดซึมน้ำเพิ่มขึ้น เมื่อมีการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียดในปริมาณที่มากขึ้นตามลำดับ นอกจากนี้ยังพบว่าคอนกรีตบล็อกที่ใช้เถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียดแทนที่ปูนซีเมนต์ในปริมาณสูง สามารถลดต้นทุนวัสดุโดยรวมได้ประมาณร้อยละ 28 ถึง 39 และสามารถลดปริมาณการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในการผลิตได้มากถึงร้อยละ 41 ถึง 62 เมื่อเทียบกับคอนกรีตบล็อกที่ใช้ปูนซีเมนต์เป็นวัสดุประสานเพียงอย่างเดียว

คำสำคัญ: กำลังอัด; คอนกรีตบล็อกที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม; เถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียด; สังคมคาร์บอนต่ำ; เศรษฐกิจหมุนเวียน

Effect of High Volume Ground Palm Oil Fuel Ash on Properties of Concrete Blocks

Napadon Sornpakdee¹, Chookiat Choosakul¹, Suporn Rittipuakdee¹, Prachoom Khamput², Saofee Dueramae³, Sasi duanyai⁴ and Tawich Klathae^{1*}

¹ Department of Engineering, College of Industrial Technology and Management, Rajamangala University of Technology Srivijaya

² Department of Civil Engineering, Rajamangala University of Technology Thanyaburi

³ Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Krungthep

⁴ Department of Civil Environment and Sustainable Engineering, Faculty of Engineering, Siam University

* Corresponding author, E-mail: Tawich.k@rmutsv.ac.th

Received: 3 July 2025; Revised: 22 December 2025; Accepted: 9 January 2026

Online Published: 17 April 2026

Abstract: This research aims to study the effects of high-volume ground palm oil fuel ash (GPOFA) on the properties of concrete blocks, following the TISI 58-2560 standard for hollow non-load-bearing concrete masonry blocks. The binder-to-fine aggregate ratio (cement + GPOFA : stone dust) was set at 1 : 6 by weight, with four different mixtures containing 0, 50, 60, and 70 wt% of binder. Compressive strength tests were at curing ages of 7, 28, and 56 days, while water absorption and dry density were tests at 28 days. Additionally, the study analyzed production costs and the environmental assessment of the concrete blocks. The results indicated that replacing 70% of the cement with ground GPOFA wt% of binder, produced compressive strength up to 5.02 MPa or approximately 73% of the concrete blocks with cement as the binder material at 28 days, met the minimum specification of the standard for hollow non-load-bearing concrete masonry blocks (TISI 58-2560). However, concrete blocks with high volume of GPOFA decrease average density and an increase water absorption as the rate of cement replaced by GPOFA increased. Furthermore, using a high volume of GPOFA in concrete blocks reduced overall material costs by approximately 28 - 39% and decreased carbon dioxide emissions during production by up to 42 - 63% compared to concrete blocks made with cement as the binder.

Keywords: Circular Economy; Compressive strength; Eco-Friendly concrete blocks; Ground palm oil fuel ash; Low carbon society



1. บทนำ

ธุรกิจวัสดุก่อสร้างเป็นอุตสาหกรรมที่สำคัญของภาคอสังหาริมทรัพย์ และมีแนวโน้มขยายตัวเพิ่มขึ้นตามความต้องการทั้งในและต่างประเทศ ส่งผลให้วัสดุก่อสร้างพื้นฐาน มีปริมาณการใช้เพิ่มมากขึ้น จากรายงานของศูนย์วิจัยกรุงศรี พบว่าประเทศไทยมีปริมาณการผลิตและการจำหน่ายคอนกรีตผสมเสร็จประมาณ 18.2 ล้านลูกบาศก์เมตร หรือคิดเป็นปริมาณปูนซีเมนต์มากกว่า 6.42 ล้านตันต่อปี ซึ่งทุก ๆ 1 ตันของการผลิตปูนซีเมนต์ มีการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) สู่บรรยากาศราว ๆ 1 ตัน หรือคิดเป็นร้อยละ 5 ถึง 7 ของปริมาณก๊าซเรือนกระจกทั้งหมดที่ปล่อยออกสู่ชั้นบรรยากาศของโลก ซึ่งเป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้เกิดภาวะโลกร้อน (Global Warming) ในขณะนี้ปัจจุบันผู้ประกอบการปูนซีเมนต์รายใหญ่ของไทย ได้พัฒนากระบวนการผลิตปูนซีเมนต์โดยปรับเปลี่ยนเชื้อเพลิงเดิมที่ใช้ถ่านหิน เป็นการเชื้อเพลิงประเภทชีวมวลต่าง ๆ ซึ่งช่วยลดการปล่อย CO₂ ประมาณ 9 -12 ล้านตันคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่า/ปี เพื่อช่วยลดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ โดยกระทรวงอุตสาหกรรมประเมินว่าการผลิตปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก 1 ตัน สามารถลดการปล่อย CO₂ ได้ 0.05 ตันคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่า เมื่อเทียบกับการผลิตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในปริมาณที่เท่ากัน ซึ่งสามารถช่วยลดก๊าซเรือนกระจกได้รวมทั้งสิ้นประมาณกว่า 3 แสนตัน CO₂ [1]

จากการศึกษาวิจัยที่ผ่านมาพบว่า แก้วปาล์มน้ำมันเป็นวัสดุพลอยได้จากการนำกากของผลปาล์มน้ำมัน เช่น เศษกะลา เส้นใย และทลายปาล์มเปล่า เผาเป็นเชื้อเพลิงให้กับหม้อกำเนิดไอน้ำในการผลิต

กระแสไฟฟ้า เมื่อพิจารณาองค์ประกอบทางเคมีพบว่า แก้วปาล์มน้ำมันมีปริมาณของซิลิกา (SiO₂) เป็นองค์ประกอบหลัก และมีคุณสมบัติเป็นปอซโซลานที่ดีเมื่อมีความละเอียดสูง เมื่อพิจารณาผลรวมของซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO₂), อะลูมิเนียมออกไซด์ (Al₂O₃) และเฟอร์ริกออกไซด์ (Fe₂O₃) ในแก้วปาล์มน้ำมันพบว่าสามารถจัดเป็นวัสดุปอซโซลาน Class N ตามมาตรฐาน ASTM C 618 [2] ในขณะนี้ปัจจุบันประเทศไทยได้มีการกำหนดมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม เรื่องแก้วปาล์มน้ำมันใช้เป็นวัสดุผสมคอนกรีต (มอก. 2888-2561) [3] ซึ่งมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมดังกล่าว ระบุดัชนีกำลังของมอร์ตาร์ (Strength Activity Index, SAI) เมื่อเปรียบเทียบกับมอร์ตาร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 จะต้องมิต่ำกำลังอัดไม่น้อยกว่าร้อยละ 75 สำหรับชั้นคุณภาพที่ 1 และไม่น้อยกว่าร้อยละ 70 สำหรับชั้นคุณภาพที่ 2 ที่อายุการบ่มที่ 7 และ 28 วัน ตามลำดับ ที่ผ่านมาแล้วว่าจะมีงานวิจัยที่ศึกษาเกี่ยวกับการใช้แก้วปาล์มน้ำมันบดละเอียดแทนที่ปูนซีเมนต์ทั้งในประเทศและต่างประเทศแพร่หลาย โดยงานวิจัยจำนวนมากชี้ให้เห็นว่าแก้วปาล์มน้ำมันบดละเอียดเป็นวัสดุปอซโซลานที่มีศักยภาพสูงในการทดแทนปูนซีเมนต์ เนื่องจากประกอบด้วยซิลิกาในรูป Amorphous ปริมาณมาก และสามารถเพิ่มสมบัติด้านดีของคอนกรีตได้อย่างมีนัยสำคัญ เมื่อผ่านกระบวนการปรับปรุงคุณภาพ เช่น การเผาลดคาร์บอนตกค้าง และการบดละเอียดระดับไมโคร หรืออัลตราไฟน์ (Ultrafine POFA) ซึ่งช่วยเพิ่มพื้นที่ผิว กระตุ้นปฏิกิริยาไฮเดรชัน และทำให้เกิดเจล C-S-H มากขึ้น โดยงานวิจัยในปัจจุบันรายงานสอดคล้องกันว่า Ultrafine POFA ช่วย



บทความวิจัย

เพิ่มกำลังอัดระยะปลาย (28–90 วัน) ปรับปรุงความทนทานต่อการซึมน้ำและคลอไรด์ ลดค่าการดูดซึมน้ำและทำให้เนื้อคอนกรีตหนาแน่นขึ้น ในขณะที่ POFA บดหยาบอาจส่งผลกระทบต่อความสามารถและกำลังช่วงต้น นอกจากนี้แนวโน้มปัจจุบันยังมุ่งใช้ POFA ร่วมกับ Fly Ash หรือ Limestone Powder (Ternary Binders) เช่น เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพเชิงกลและความทนทานของคอนกรีต ทำให้ POFA เป็นวัสดุที่ได้รับความสนใจอย่างต่อเนื่องในงานคอนกรีตที่ยั่งยืน และการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกในอุตสาหกรรมก่อสร้าง [4] ในขณะที่งานวิจัยเหล่านั้นส่วนใหญ่พิจารณาถึงคุณสมบัติของมอร์ตาร์ หรือคอนกรีตที่แทนที่ปูนซีเมนต์ในอัตราส่วนไม่เกินร้อยละ 50 เท่านั้น [5-7] อีกทั้งการใช้จริงในอุตสาหกรรมการผลิตคอนกรีตยังไม่แพร่หลายมากนัก ต่างจากการใช้ถ่านหินซึ่งในปัจจุบันเป็นที่ยอมรับและมีการใช้งานกันอย่างแพร่หลาย เช่น ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก (มอก. 2594-2556)

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการนำถ่านหินน้ำมันเหลือทิ้งจากการใช้ถ่านหินน้ำมันเป็นเชื้อเพลิงในการผลิตกระแสไฟฟ้าเพื่อพัฒนาเป็นวัสดุปอซโซลานแทนที่การใช้ปูนซีเมนต์ในปริมาณสูง ในอัตราร้อยละ 50, 60 และ 70 โดยนำน้ำหนักของวัสดุประสานในผลิตภัณฑ์คอนกรีตบล็อก ทดสอบกำลังรับแรงอัด ที่อายุการบ่ม 7, 28 และ 56 วัน ทดสอบการดูดซึมน้ำ และหน่วยน้ำหนักของคอนกรีตบล็อกที่อายุการบ่ม 28 วัน นอกจากนี้ทำการวิเคราะห์ต้นทุนการผลิต และผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม เปรียบเทียบกับคอนกรีตบล็อกตามมาตรฐาน มอก.58-2560 (มาตรฐานอุตสาหกรรม ผลิตภัณฑ์คอนกรีตบล็อกกลวงไม่รับน้ำหนัก) [8] เพื่อเป็นการนำวัสดุเหลือทิ้งมาพัฒนา

เป็นผลิตภัณฑ์วัสดุก่อสร้าง และยังเพิ่มมูลค่าให้แก่ของเหลือทิ้ง ถือเป็นส่วนหนึ่งในการสนับสนุนเศรษฐกิจหมุนเวียน (Circular Economy) อีกทั้งยังเป็นการช่วยจัดการของเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมต่อไป

2. วิธีการดำเนินงานวิจัย/ทดลอง

2.1 วัสดุที่ใช้ในการวิจัย

1. ถ่านปาล์มน้ำมัน (OPOFA) ถ่านปาล์มน้ำมันที่ใช้ในการวิจัยนี้ได้จากโรงงานผลิตน้ำมันปาล์มในจังหวัดสุราษฎร์ธานี โดยคัดเลือกเฉพาะโรงงานที่ใช้เชื้อเพลิงผลิตกระแสไฟฟ้าที่มาจากส่วนประกอบของปาล์มน้ำมันเท่านั้น แสดงในรูปที่ 1

ลักษณะทั่วไปของ OPOFA ก่อนบดมีขนาดอนุภาคเฉลี่ย (Mean Particle Size, d_{50}) เท่ากับ 73.9 ไมโครเมตร มีสีดำปนเทา เนื้อถ่านหยาบ ไม่มีรูปทรงชัดเจน (รูปที่ 2-3) จากนั้นนำไปอบในตู้อบให้แห้งที่อุณหภูมิ 110 ± 5 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ต่อมานำถ่านปาล์มน้ำมันเข้าเครื่องบดแบบตกกระทบ (Los Angeles abrasion machine) เป็นเวลา 6 ชั่วโมง หรือ 12,000 รอบ จนมีขนาดอนุภาคเฉลี่ย (Mean Particle Size, d_{50}) เท่ากับ 7.7 ไมโครเมตร ซึ่งลักษณะทั่วไปของ GPOFA มีสีดำสนิท เนื้อถ่านมีขนาดเล็กละเอียด (รูปที่ 4-5) โดยการกระจายตัวของอนุภาคของ OPOFA และ GPOFA แสดงในรูปที่ 6



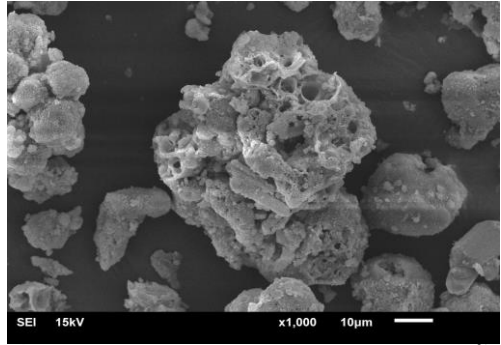
รูปที่ 1 โรงงานผลิตน้ำมันปาล์มในจังหวัดสุราษฎร์ธานี



บทความวิจัย



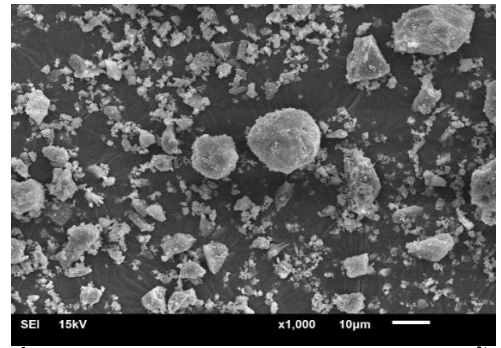
รูปที่ 2 แท่งปาล์มน้ำมันก่อนบด (OPOFA)



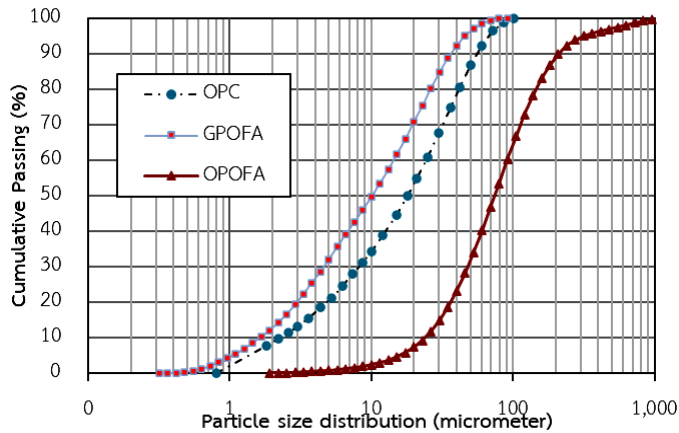
รูปที่ 3 ลักษณะโครงสร้างระดับจุลภาคของแท่งปาล์มน้ำมันก่อนบด (OPOFA) กำลังขยาย 1,000 เท่า



รูปที่ 4 แท่งปาล์มน้ำมันบดละเอียด (GPOFA)



รูปที่ 5 ลักษณะโครงสร้างระดับจุลภาคของแท่งปาล์มน้ำมันบดละเอียด (GPOFA) กำลังขยาย 1,000 เท่า



รูปที่ 6 การกระจายตัวของอนุภาคของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (OPC), แท่งปาล์มน้ำมันก่อนบด (OPOFA) และ แท่งปาล์มน้ำมันบดละเอียด (GPOFA)



เมื่อพิจารณาองค์ประกอบทางเคมีของ GPOFA พบว่า มีองค์ประกอบหลัก คือ ซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2), อะลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) และเฟอร์ริกออกไซด์ (Fe_2O_3) เท่ากับร้อยละ 57.6, 1.2 และ 2.8 ตามลำดับ ซึ่งมีผลรวมทั้ง 3 องค์ประกอบ เท่ากับร้อยละ 61.6 แสดงในตารางที่ 1

เมื่อพิจารณาคูณลักษณะทางเคมีของ GPOFA พบว่าอยู่ในเกณฑ์ชั้นคุณภาพที่ 1 ตามมาตรฐานสำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม เถ้าปาล์ม น้ำมันใช้เป็นตัวผสมคอนกรีต (มอก. 2888-2561) [3] เนื่องจากมีผลรวมขององค์ประกอบหลัก $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ มากกว่าร้อยละ 50 มีแคลเซียมออกไซด์ (CaO) ไม่เกินร้อยละ 10 และมีค่าการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผา (Loss on Ignition, LOI) ไม่เกินร้อยละ 12 นอกจากนี้ เมื่อพิจารณาประเภทของวัสดุปอซโซลานตามมาตรฐาน ASTM C618 พบว่า GPOFA อยู่ในประเภทของวัสดุปอซโซลาน Class C ซึ่งมีผลรวมของ SiO_2 , Al_2O_3 และ Fe_2O_3 ไม่ต่ำกว่าร้อยละ 50 ในขณะที่มีค่า LOI เท่ากับร้อยละ 6.5 ซึ่งเกินร้อยละตามมาตรฐาน ASTM C618 ที่กำหนดค่า LOI ไม่เกินร้อยละ 6 อยู่เล็กน้อย ทั้งนี้ผลรวมของออกไซด์หลักมีผลโดยตรงต่อพฤติกรรมเกิดการเกิดปฏิกิริยา Hydration และ Pozzolanic reaction ของวัสดุผสม โดยทั่วไป GPOFA ที่ผ่านการบดละเอียดจะมีพื้นที่ผิวจำเพาะสูงชัน ทำให้อนุภาคสามารถปฏิกิริยาสำหรับการเกิดเจล C-S-H และเพิ่มความสามารถของ SiO_2 ใน GPOFA ให้ทำปฏิกิริยากับ Ca(OH)_2 ได้อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น ส่งผลให้โครงสร้างเนื้อคอนกรีตมีความหนาแน่นขึ้นในระยะปลาย ซึ่งความละเอียดของ GPOFA เป็นปัจจัยที่กำหนดอัตราการเกิดปฏิกิริยา Hydration โดยตรง โดยสมบัติทางกายภาพ และสมบัติ

ทางเคมีของเถ้าปาล์ม น้ำมันบดละเอียด (GPOFA) แสดงในตารางที่ 1

2. ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (OPC) แสดงใน รูปที่ 7 มีองค์ประกอบทางเคมีที่ตรงตามเกณฑ์มาตรฐาน ASTM C150 โดยมีองค์ประกอบหลักทางเคมี คือ CaO และ SiO_2 มีค่าร้อยละ 62.6 และ 20.0 ตามลำดับ ในขณะที่ค่า LOI ร้อยละ 2.8 โดยทั่วไปไม่มีสีเทาเข้ม เนื้อละเอียด มีลักษณะรูปร่างไม่แน่นอน เป็นเหลี่ยมมุม มีอนุภาคเล็กๆ เกะก้างเป็นก้อนใหญ่ ดังแสดงในรูปที่ 8 ขนาดอนุภาคเฉลี่ย (Mean Particle Size, d_{50}) เท่ากับ 18.1 ไมโครเมตร โดยสมบัติทางกายภาพ สมบัติทางเคมี และการกระจายตัวของอนุภาคของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (OPC) แสดงในตารางที่ 1 [9] และรูปที่ 6 ตามลำดับ

ตารางที่ 1 สมบัติทางกายภาพ และสมบัติทางเคมีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1 (OPC) เถ้าปาล์ม น้ำมันบดละเอียด (GPOFA) [9]

Chemical Compositions (%)	OPC	GPOFA
Silicon Dioxide (SiO_2)	20.0	57.6
Aluminum Oxide (Al_2O_3)	4.6	1.2
Ferric Oxide (Fe_2O_3)	3.4	2.8
Calcium Oxide (CaO)	62.6	9.6
Magnesium Oxide (MgO)	1.2	4.7
Potassium Oxide (K_2O)	2.7	8.7
Sodium Oxide (Na_2O)	0.3	0.1
Sulfur Trioxide (SO_3)	2.4	2.2
Phosphorus Oxide (P_2O_5)	-	5.5
Chlorine (Cl)	-	1.1
Loss on Ignition (LOI)	2.8	6.5
$\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$	-	61.6
Physical Properties		
Specific Gravity	3.16	2.65
Median Particle Size, d_{50} (μm)	18.1	7.7



บทความวิจัย

3. หินฝุ่น (Stone Dust, SD) หินฝุ่นจากโรงโม่หินในจังหวัดนครศรีธรรมราชโดยใช้ขนาดที่ร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 4 ลงมาจนถึงส่วนที่เป็นฝุ่น แสดงในรูปที่ 9 พบว่าหินฝุ่นมีค่าโมดูลัสความละเอียดเท่ากับ 2.78 ค่าความถ่วงจำเพาะอิมมิตัวผิวแห้งเท่ากับ 2.74

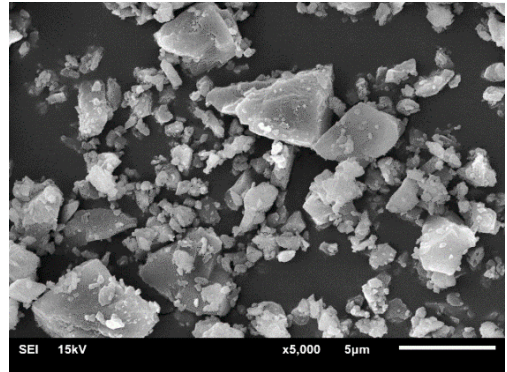
และค่าการดูดซึมน้ำเท่ากับร้อยละ 0.84 โดยมวลรวมละเอียดอยู่ในสภาวะอิมมิตัวผิวแห้ง (SSD) โดยคุณสมบัติทางกายภาพของหินฝุ่น และการกระจายตัวของอนุภาค แสดงในตารางที่ 2 และรูปที่ 10 ตามลำดับ

ตารางที่ 2 สมบัติทางกายภาพของหินฝุ่น

Fine Aggregate	Specific Gravity	Finess Modulus (F.M.)	Water Absorption (%)	Unit Weight (kg/m ³)
Stone Dust	2.74	2.78	0.84	1,670



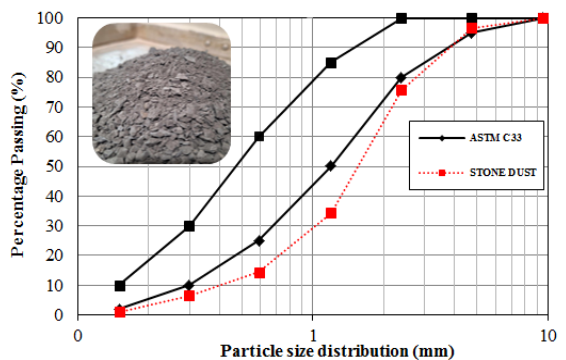
รูปที่ 7 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (OPC)



รูปที่ 8 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (OPC) กำลังขยาย 5,000 เท่า [9]



รูปที่ 9 หินฝุ่น (Stone Dust, SD)



รูปที่ 10 การกระจายตัวของอนุภาคของหินฝุ่น (Stone Dust, SD)



2.2 การเตรียมตัวอย่างทดสอบ

กำหนดอัตราส่วนวัสดุประสานต่อมวลรวมละเอียด (ปูนซีเมนต์+เถ้าป่าลัมน้ำหนักละเอียด : หินฝุ่น) เท่ากับ 1 : 6 โดยน้ำหนัก จำนวน 4 อัตราส่วนผสม คือ ร้อยละ 0, 50, 60, และ 70 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน โดยค่าอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (W/B) ที่ใช้ในการทดสอบของแต่ละอัตราส่วนผสมหาได้จากการทดสอบความชื้นเหลว โดยกำหนดให้ค่าความชื้นเหลวที่ได้จากการออกแบบส่วนผสมคอนกรีตล้วนเป็นตัวควบคุม โดยอัตราส่วนผสมต่อลูกบาศก์เมตร และจำนวนตัวอย่างที่ใช้ในการวิจัยแสดงใน ตารางที่ 3

วัสดุประสานและวัสดุมวลรวม โดยกำหนดอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานซึ่งได้จากการออกแบบส่วนผสมคอนกรีตล้วนเป็นตัวควบคุม (W/B) เท่ากับ 0.40 ของทุกอัตราส่วน โดยการค่อยๆ เติมน้ำลงในไม่ผสม ดังแสดงใน รูปที่ 11 เมื่อมวลรวมกันดีแล้วจึงทำการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์คอนกรีตบล็อกด้วยเครื่องอัดคอนกรีตบล็อกขนาด 70 × 190 × 390 มม. ดังแสดงใน รูปที่ 12 หลังจากทำการอัดบล็อกเรียบร้อยแล้วนำไปเก็บในที่ร่ม พร้อมทั้งทำการผ่านน้ำและห่อหุ้มคอนกรีต



รูปที่ 11 การผสมคอนกรีตบล็อกด้วยเครื่องผสมคอนกรีต

บล็อกด้วยพลาสติกเพื่อทำการบ่มชื้น ซึ่งเป็นไปตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมคอนกรีตบล็อกกลวงไม่รับน้ำหนัก เลขที่มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม 58-2560 [8] เพื่อสำหรับทดสอบการรับแรงอัดที่อายุ 7, 28, และ 56 วัน (รูปที่ 13) และทดสอบการดูดซึมน้ำที่อายุ 28 วัน

นำตัวอย่างคอนกรีตบล็อกที่ได้เตรียมไว้ไปทำการทดสอบหาค่าต่าง ๆ โดยอ้างอิงรายละเอียดการทดสอบ ตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม วิธีสู่มตัวอย่างและการทดสอบวัสดุงานก่อสร้างซึ่งทำด้วยคอนกรีต มอก. 109-2517 และ มอก. 58-2560 [8]

ตารางที่ 3 อัตราส่วนผสมและจำนวนตัวอย่าง

Mixture	Mix Proportion (kg/m ³)				Compressive Strength (Blocks)			Water Absorption (Blocks)	Total (Blocks)
	OPC	GPOFA	SD	Water	7 Days	28 Days	56 Days	28 Days	
CT	156.0	-	936.0	62.4	5	5	5	5	20
50GPOFA	78.0	78.0	936.0	62.4	5	5	5	5	20
60GPOFA	58.5	97.5	936.0	62.4	5	5	5	5	20
70GPOFA	39.0	117.0	936.0	62.4	5	5	5	5	20



รูปที่ 12 เครื่องคัดคอนกรีตบดล็อก



รูปที่ 13 การทดสอบการรับแรงอัดคอนกรีตบดล็อก

การประเมินราคาวัสดุของคอนกรีตบดล็อก ได้จาก ผลคูณระหว่างปริมาณวัสดุที่ใช้ในการผลิตคอนกรีตบดล็อก กับราคาวัสดุที่สืบค้นในท้องตลาด ณ ปัจจุบัน ต่อปริมาณคอนกรีตบดล็อก 1 ลูกบาศก์เมตร ซึ่งราคา ดังกล่าวยังไม่รวมค่าเครื่องจักร ค่าแรง และค่าขนส่ง ผลผลิตภัณฑ์

การประเมินผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมของคอนกรีตบดล็อก โดยใช้ข้อมูลที่รวบรวมจากบัญชีรายการ สิ่งแวดล้อม เพื่อนำมาผลิตเป็นวัสดุที่ใช้ในการก่อสร้าง โดยค่า Emission Factor ของวัสดุที่ใช้ในงานวิจัยแสดง ในตารางที่ 4 ได้ข้อมูลมาจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง [10-13] และพื้นฐานแนวทางการประเมินวัฏจักรชีวิต (Life Cycle Assessment: LCA) โดยอ้างอิงการคำนวณ

ตารางที่ 4 ค่าสัมประสิทธิ์การปล่อยก๊าซเรือนกระจกของวัสดุ (Emission Factor)

Materials	Emission Factor/kg	Ref
Ordinary Portland Cement	0.847	[10]
Ground Palm Oil Fuel Ash	0.106	[11]
Stone Dust	0.008483	[12]
Water	0.0003238	[13]

ปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากข้อกำหนดและแนวทางการคำนวณคาร์บอนฟุตพริ้นท์ของผลิตภัณฑ์ จัดทำโดยองค์การบริหารจัดการก๊าซเรือนกระจก (องค์การมหาชน) โดยปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่า (CO₂) จำนวนได้จากผลคูณระหว่างปริมาณวัสดุที่ใช้ในการผลิตคอนกรีตบดล็อก กับค่าสัมประสิทธิ์การปล่อยก๊าซเรือนกระจกของวัสดุ (Emission Factor) ดังแสดงในสมการที่ 1

$$\text{CO}_2 = \text{ปริมาณวัสดุ} \times \text{Emission Factor} \quad (1)$$

โดยเมื่อพิจารณาค่าการปล่อยก๊าซเรือนกระจกของวัสดุ (Emission Factor) ของ GPOFA ซึ่ง เป็นผลรวมของการปล่อยก๊าซจากกิจกรรมต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับ การเตรียม POFA เช่น การอบ การบด และการขนส่ง ในกรณีนี้ใช้รถบรรทุกขนส่ง POFA จำนวน 1,000 กิโลกรัม จากโรงงานปาล์มน้ำมันที่ใกล้ที่สุดไปยังห้องปฏิบัติการระยะทางประมาณ 50 กม. โดยใช้ อัตราการปล่อยก๊าซจากการขนส่งเท่ากับ 0.192 กก. CO₂/กม. นอกจากนี้การอบแห้ง POFA ใช้เวลา 24 ชั่วโมงในเตาอบ โดยประมาณการการใช้ไฟฟ้าเท่ากับ 1,041.67 วัตต์ต่อชั่วโมง และใช้พลังงาน 149.7 kWh สำหรับการร้อนและการบดละเอียด [11]



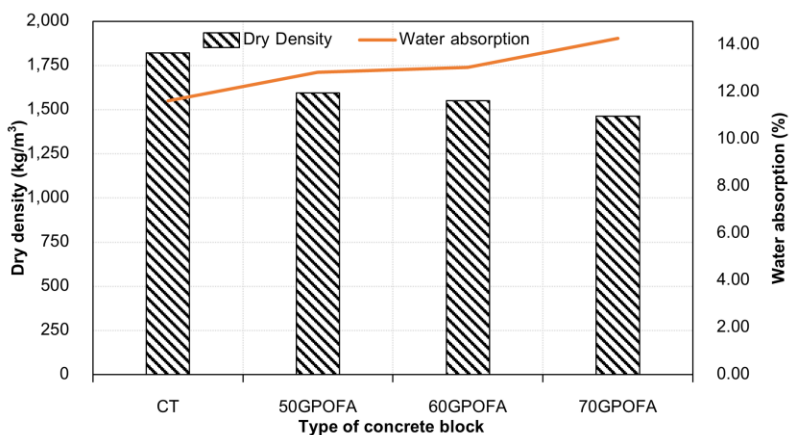
3. ผลการวิจัย

3.1 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นและอัตราการดูดซึมน้ำของคอนกรีตบล็อก

รูปที่ 14 แสดงผลความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นและอัตราการดูดซึมน้ำของคอนกรีตบล็อกที่อายุการบ่ม 28 วัน ผลการทดสอบพบว่า คอนกรีตบล็อกที่ใช้ปูนซีเมนต์เป็นวัสดุประสานเพียงอย่างเดียว (CT) มีค่าความหนาแน่นเฉลี่ยเท่ากับ 1,821 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ในขณะที่คอนกรีตบล็อกผสมเถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียดในปริมาณสูง ในอัตราส่วนร้อยละ 50, 60 และ 70 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน (50GPOFA, 60GPOFA และ 70GPOFA) มีค่าความหนาแน่นเฉลี่ยเท่ากับ 1,595, 1,551 และ 1,464 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร หรือคิดเป็นร้อยละ 88, 85 และ 80 ของคอนกรีตบล็อก CT ตามลำดับ ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าเมื่ออัตราส่วนของเถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียดเพิ่มขึ้น ค่าความหนาแน่นเฉลี่ยของคอนกรีตบล็อกจะลดลง เนื่องจากความถ่วงจำเพาะของเถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียด (GPOFA) ซึ่งมีค่าเท่ากับ 2.65 มีค่าต่ำกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1

(OPC) ซึ่งมีค่าเท่ากับ 3.15 เมื่อนำ GPOFA มาแทนที่ OPC ในปริมาณสูงจึงส่งผลให้ค่าความหนาแน่นของคอนกรีตบล็อกลดลง [5-7]

ในขณะที่เมื่อพิจารณาอัตราการดูดซึมน้ำเฉลี่ยของคอนกรีตบล็อก ผลการทดสอบพบว่าคอนกรีตบล็อก CT, 50GPOFA, 60GPOFA และ 70GPOFA มีอัตราการดูดซึมน้ำเฉลี่ยเท่ากับร้อยละ 11.63, 12.83, 13.04 และ 14.28 ตามลำดับ ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าเมื่ออัตราส่วนของเถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียดเพิ่มขึ้น ค่าอัตราการดูดซึมน้ำเฉลี่ยของคอนกรีตบล็อกมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เนื่องจาก GPOFA เป็นวัสดุปอซโซลานซึ่งมีความพรุนสูง ส่งผลให้มีอัตราการดูดซึมน้ำที่มากกว่า OPC และเมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นเฉลี่ยกับอัตราการดูดซึมน้ำของคอนกรีตบล็อกจะเห็นว่า ความหนาแน่นเฉลี่ยของคอนกรีตบล็อกแปรผกผันกับอัตราการดูดซึมน้ำ กล่าวโดยสรุปคือ เมื่อความหนาแน่นเฉลี่ยของคอนกรีตบล็อกลดลง เนื่องจากปริมาณช่องว่างในคอนกรีตบล็อกมีมากขึ้น ส่งผลให้มีค่าอัตราการดูดซึมน้ำของคอนกรีตบล็อกที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันในปริมาณสูงมีค่าเพิ่มขึ้นตามลำดับ



รูปที่ 14 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นและอัตราการดูดซึมน้ำของคอนกรีตบล็อก



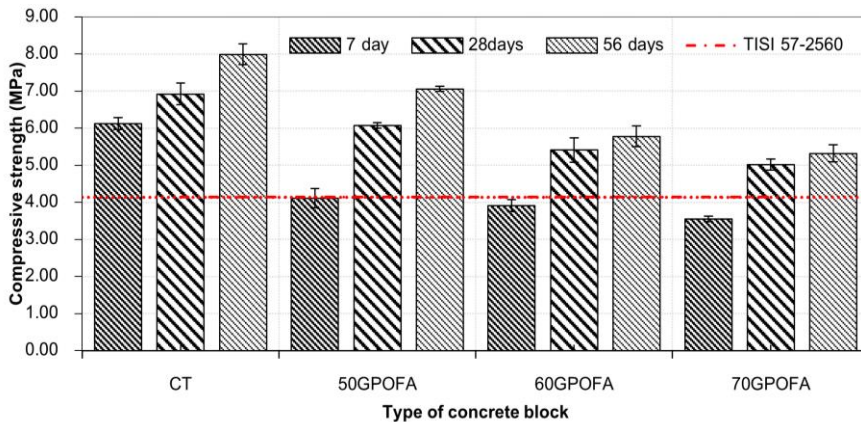
สอดคล้องกับงานวิจัยของ Charoenatkul [7] และงานวิจัยของ Salaemae และคณะ [14] ซึ่งพบว่า การเพิ่มปริมาณของเถาปาล์มน้ำมันส่งผลให้ความหนาแน่นของอิฐบล็อกประสานและคอนกรีตบล็อกมีค่าลดลง และมีค่าลดลงมากขึ้นเมื่ออัตราส่วนของการแทนที่ของเถาปาล์มน้ำมันเพิ่มขึ้นตามลำดับ ส่งผลให้มีการดูดกลืนน้ำที่มากกว่า นอกจากนี้เนื่องจากเถาปาล์มน้ำมันบดละเอียดที่เป็นวัสดุปอซโซลานนั้น ส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาระหว่างน้ำกับปูนซีเมนต์ทำได้อากกว่าอิฐบล็อกประสานที่มีปูนซีเมนต์เป็นวัสดุประสานเพียงอย่างเดียว ส่งผลให้เกิดช่องว่างของอิฐบล็อกประสานมากขึ้น จึงทำให้ความหนาแน่นแห้งเฉลี่ยของอิฐบล็อกประสานลดลงเช่นกัน

เมื่อพิจารณาตามมาตรฐาน มอก. 58-2560 (มาตรฐานอุตสาหกรรม ผลิตภัณฑ์คอนกรีตบล็อกกลวงไม่รับน้ำหนัก) [8] ซึ่งแบ่งประเภทความหนาแน่นคอนกรีตบล็อกกลวงไม่รับน้ำหนัก พบว่าคอนกรีตบล็อก CT มีค่าความหนาแน่นเฉลี่ยเท่ากับ 1,821 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร จัดอยู่ในประเภทน้ำหนักปานกลาง (Medium Weight, M) เนื่องจากมีค่าความหนาแน่นอยู่ระหว่าง 1,680-2,000 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ในขณะที่คอนกรีตบล็อก 50GPOFA, 60GPOFA และ 70GPOFA จัดอยู่ในประเภทน้ำหนักเบา (Light Weight, L) เนื่องจากมีค่าความหนาแน่นน้อยกว่า 1,680 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ในส่วนของอัตราการดูดซึมน้ำของคอนกรีตบล็อกซึ่งใน มาตรฐาน มอก. 58-2560 มีได้กล่าวถึงไว้ นั่น หากพิจารณาคอนกรีตบล็อก CT, 50GPOFA, 60GPOFA และ 70GPOFA พบว่ามีค่าอัตราการดูดซึมน้ำไม่เกิน ร้อยละ 25 ตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม คอนกรีตบล็อกแบบไม่รับน้ำหนัก มอก.58-2533 กำหนด

3.2 กำลังอัดของคอนกรีตบล็อก

รูปที่ 15 แสดงค่ากำลังอัดของคอนกรีตบล็อก ที่อายุการบ่ม 7, 28 และ 56 วัน ผลการทดสอบพบว่าคอนกรีตบล็อกที่ใช้ปูนซีเมนต์เป็นวัสดุประสานเพียงอย่างเดียว (CT) มีค่ากำลังอัดเท่ากับ 6.12, 6.92 และ 7.99 เมกาปาสคาล ตามลำดับ ในขณะที่อายุการบ่ม 7 วัน คอนกรีตบล็อก 50GPOFA, 60GPOFA และ 70GPOFA มีค่ากำลังอัดเท่ากับ 4.11, 3.91 และ 3.55 เมกาปาสคาล ตามลำดับ หรือคิดเป็นร้อยละ 67, 64 และ 58 คอนกรีตบล็อก CT ตามลำดับ

จากผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่า คอนกรีตบล็อกที่ผสมเถาปาล์มน้ำมันบดละเอียดในปริมาณสูง มีปริมาณของ OPC ลดลงอย่างมาก ส่งผลให้การทำปฏิกิริยาปอซโซลานระหว่างแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) จากปฏิกิริยาไฮเดรชันกับซิลิโคนไดออกไซด์ (SiO_2) และอลูมินาไตรออกไซด์ (Al_2O_3) ที่เป็นองค์ประกอบหลักของ GPOFA เกิดขึ้นน้อย ส่งผลให้การพัฒนากำลังอัดในระยะต้นซึ่งเกิดจากปฏิกิริยาปอซโซลานในช่วงอายุ 7 วัน มีค่าน้อยกว่าคอนกรีตบล็อก CT ก่อนข้างมาก [10, 15] เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบกับมาตรฐาน มอก. 58-2560 [8] ซึ่งระบุความต้านแรงอัดสุทธิเฉลี่ยของคอนกรีตบล็อกกลวงไม่รับน้ำหนัก ต้องมีค่าไม่น้อยกว่า 4.14 เมกาปาสคาล นอกจากนี้คอนกรีตบล็อกที่ใช้ระบบอัดแห้งที่มีปริมาณน้ำต่ำ จึงทำให้ปฏิกิริยา Pozzolanic ของวัสดุปอซโซลานเกิดช้าลง การใช้วัสดุ GPOFA ซึ่งเป็นวัสดุปอซโซลานจะยิ่งลดความสามารถในการรับกำลังอัดช่วงต้น จึงต้องการวัสดุปอซโซลานที่มีความละเอียดมาก และกระจายตัวดี ซึ่งจะส่งผลต่อการเกิด Hydration การอัด และความแข็งแรงของคอนกรีตบล็อก



รูปที่ 15 ค่ากำลังอัดของคอนกรีตบล็อก ที่อายุการบ่ม 7, 28 และ 56 วัน

เมื่อพิจารณาที่อายุการบ่ม 28 วัน คอนกรีตบล็อก 50GPOFA, 60GPOFA และ 70GPOFA ซึ่งมีค่ากำลังอัดเท่ากับ 6.07, 5.41 และ 5.02 เมกะปาสกาล หรือคิดเป็นร้อยละ 88, 78 และ 73 คอนกรีตบล็อก CT ตามลำดับ ซึ่งมีค่าสูงกว่ามาตรฐานกำหนด เนื่องจาก GPOFA มีขนาดเล็กกว่าปูนซีเมนต์สามารถแทรกเข้าไปในช่องว่างระหว่างอนุภาคปูนซีเมนต์ ส่งผลให้เนื้อคอนกรีตบล็อกมีความแน่นขึ้น นอกจากนี้ปฏิกิริยาปอซโซลานซึ่งเป็นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นต่อเนื่องจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน ซึ่งได้ผลผลิตของปฏิกิริยาเป็นสารประกอบแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตหรือ C-S-H จากการทำปฏิกิริยา โดย C-S-H มีคุณสมบัติเป็นตัวประสาน สามารถช่วยในการพัฒนากำลังอัดที่อายุ 28 และ 56 วัน ได้มากขึ้น [5-7, 9, 15] เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบผลการทดสอบพบว่า มีแนวโน้มใกล้เคียงกับงานวิจัยของ Sooksatra และ Premkamol [16] ซึ่งศึกษาคอนกรีตบล็อกที่ใช้เถ้าปาล์มน้ำมันมาทดแทนปูนซีเมนต์ในส่วนผสม ร้อยละ 10, 20, 30, 40, 50 และ 60 ของวัสดุประสานโดยน้ำหนัก ผลของการศึกษาพบว่า ค่ากำลังอัดของคอนกรีตบล็อกมีค่าลดลงเมื่อ

ปริมาณของเถ้าปาล์มน้ำมันมีมากขึ้นนอกจากนี้ยังพบว่า ค่ากำลังอัดของคอนกรีตบล็อกที่มีเถ้าปาล์มน้ำมันแทนที่ปูนซีเมนต์มีค่าสูงขึ้นเมื่อระยะเวลาบ่มเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามค่ากำลังอัดของคอนกรีตบล็อกที่มีเถ้าปาล์มน้ำมันมาทดแทนปูนซีเมนต์ในวัสดุประสานของการศึกษามีค่ามากกว่าค่ากำลังอัดของคอนกรีตบล็อกแบบไม่รับน้ำหนัก ที่กำหนดไว้ตามมาตรฐาน มอก. 58-2533.

3.3 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัด ความหนาแน่น และอัตราการดูดซึมน้ำของคอนกรีตบล็อก

ผลการทดลองแสดงให้เห็นความสัมพันธ์ที่สอดคล้องกันระหว่างความหนาแน่น อัตราการดูดซึมน้ำ และกำลังอัดของคอนกรีตบล็อกผสม GPOFA โดยเมื่อเพิ่มปริมาณการแทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 50-70 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน (50GPOFA, 60GPOFA และ 70GPOFA) พบว่าค่าความหนาแน่นของคอนกรีตบล็อกลดลงร้อยละ 88, 85 และ 80 ของคอนกรีตบล็อก CT ตามลำดับ ในขณะที่อัตราการดูดซึมน้ำคอนกรีตบล็อกเพิ่มขึ้นร้อยละ 10-23 สะท้อนถึงโครงสร้างที่มีความ



พูนสูงกว่า ซึ่งสอดคล้องกับค่ากำลังอัดที่ลดลงอย่างมีนัยสำคัญในอายุ 7 วัน (ลดลงร้อยละ 33–42) เนื่องจากระบบอัดแห้งมีน้ำต่ำและมีปริมาณ OPC ลดลง ทำให้ปฏิกิริยา Pozzolanic เกิดขึ้นจำกัดในระยะแรก อย่างไรก็ตาม เมื่อเข้าสู่อายุช่วงปลายที่ 28 และ 56 วัน กำลังอัดของคอนกรีตบล็อกผสม GPOFA มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น โดยให้ค่าประมาณร้อยละ 73–88 ของคอนกรีตบล็อก CT ที่อายุ 28 วัน เนื่องจากอนุภาคที่ละเอียดของ GPOFA สามารถช่วยเติมเต็มช่องว่างและปฏิกิริยา pozzolanic เริ่มส่งผลต่อการสร้าง C–S–H เพิ่มเติม ส่งผลให้โครงสร้างเนื้อคอนกรีตหนาแน่นขึ้น แต่ภาพรวมยังคงสอดคล้องกัน กล่าวคือเมื่อความหนาแน่นลดลง อัตราการดูดซึมน้ำเพิ่มขึ้น และค่ากำลังอัดลดลงตามลำดับ แสดงถึงความสัมพันธ์เชิงลบของสามตัวแปรที่เกิดจากการเพิ่มปริมาณ GPOFA ในส่วนผสม

3.4 การประเมินราคาวัสดุของคอนกรีตบล็อก

รูปที่ 16 แสดงการวิเคราะห์ราคาต้นทุนในการผลิตคอนกรีตบล็อกที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียดในปริมาณสูง โดยราคาวัสดุของการผลิตคอนกรีตบล็อก 1 ลูกบาศก์เมตร ซึ่งประกอบด้วย OPC เท่ากับ 3,300 บาท/ตัน (165 บาท ต่อ ปูนซีเมนต์ 1 กระสอบ) ในขณะที่ GPOFA ซึ่งมีค่าการขนส่ง, ค่าแรงงานขนย้าย (ระยะทางไม่เกิน 200 กิโลเมตร) และค่าพลังงานในการบด ประมาณ 522 บาท/ตัน หินฝุ่น 280 บาท/ตัน และน้ำสะอาด 32 บาท/ตัน [9–10, 15] จากการประเมินราคา พบว่าคอนกรีตบล็อก CT มีราคาเท่ากับ 778.1 บาท/ลูกบาศก์เมตร ในขณะที่คอนกรีตบล็อก 50GPOFA, 60GPOFA และ 70GPOFA มีราคาเท่ากับ 561.6, 518.7 และ 473.9 บาท/ลูกบาศก์เมตร หรือคิดเป็นร้อยละ 72, 67 และ 61 ของคอนกรีตบล็อก CT

ตามลำดับ ผลการวิจัยแสดงให้เห็นว่าราคารวมของคอนกรีตบล็อกลดลงเมื่อปริมาณของ GPOFA เพิ่มขึ้นหรือคอนกรีตบล็อกที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียดในปริมาณสูง สามารถลดต้นทุนในการผลิตได้ประมาณร้อยละ 28–39 เมื่อเทียบกับคอนกรีตบล็อก CT ซึ่งราคาดังกล่าวยังไม่รวมค่าเครื่องจักร ค่าแรง และค่าขนส่งผลิตภัณฑ์

3.5 การประเมินผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมของคอนกรีตบล็อก

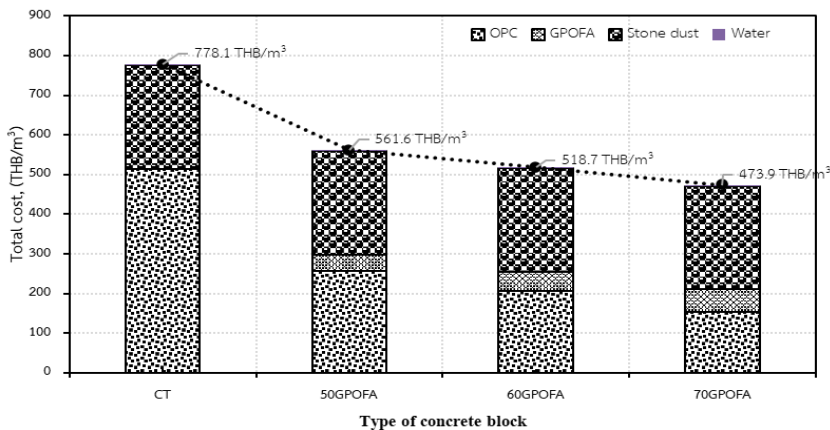
ข้อมูลการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ของผลิตภัณฑ์คอนกรีตบล็อก 1 ลูกบาศก์เมตร แสดงในรูปที่ 17 ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าปริมาณการปล่อย CO_2 ของคอนกรีตบล็อกที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียดในปริมาณสูงลดลง เมื่อปริมาณของ GPOFA เพิ่มขึ้น โดยคอนกรีตบล็อก CT มีปริมาณการปล่อย CO_2 จากวัสดุ เท่ากับ 140.1 กิโลกรัมคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่า/ลูกบาศก์เมตร ในขณะที่คอนกรีตบล็อก 50GPOFA, 60GPOFA และ 70GPOFA มีปริมาณการปล่อย CO_2 เท่ากับ 82.3, 67.8 และ 53.4 กิโลกรัมคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่า/ลูกบาศก์เมตร หรือคิดเป็นร้อยละ 58, 48 และ 38 ของคอนกรีตบล็อก CT ตามลำดับ โดยปริมาณการปล่อย CO_2 ของส่วนประกอบต่าง ๆ ได้แก่ OPC, GPOFA, หินฝุ่น และ น้ำ มีปริมาณเท่ากับ 0.847, 0.1006, 0.008483 และ 0.0003238 กิโลกรัมคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่า/กิโลกรัมตามลำดับ [10–13] จากการวิเคราะห์ปริมาณการปล่อย CO_2 ของผลิตภัณฑ์คอนกรีตบล็อกแต่ละส่วนผสม แสดงให้เห็นว่าหากมีการนำเถ้าปาล์มน้ำมันมาใช้แทนที่ปูนซีเมนต์ในปริมาณสูงในผลิตภัณฑ์



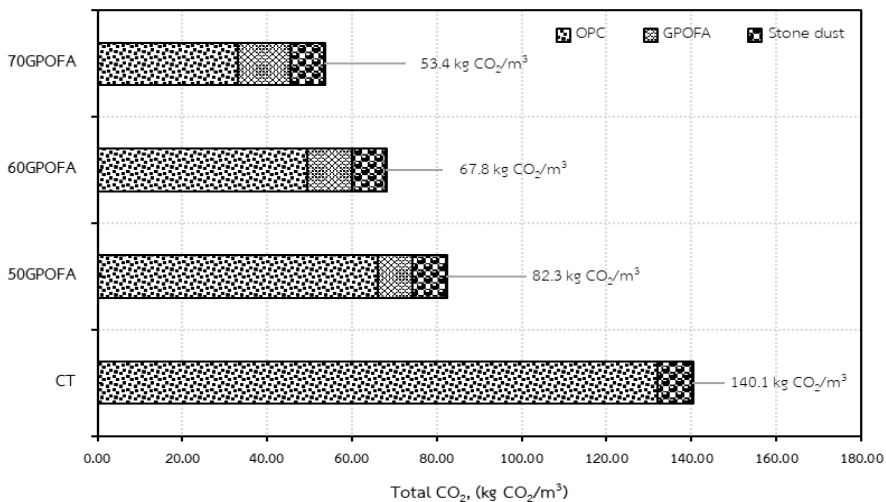
บทความวิจัย

คอนกรีตบล็อกจะสามารถลดปริมาณการปล่อย CO₂ ได้มากถึงร้อยละ 41-62 ในขณะที่มีคุณสมบัติต่าง ๆ ตรงตามมาตรฐาน มอก. 58-2560 (มาตรฐานอุตสาหกรรม ผลิตภัณฑ์คอนกรีตบล็อกกลวงไม่รับน้ำหนัก) กำหนด และจะส่งผลโดยตรงต่อการลดการปล่อย CO₂ ที่เกิดจากอุตสาหกรรมปูนซีเมนต์ ซึ่งเป็น

อุตสาหกรรมที่ปล่อย CO₂ สูงถึงร้อยละ 5-7 ของ CO₂ ทั้งหมดที่ถูกปล่อยออกสู่ชั้นบรรยากาศของโลกให้มีปริมาณลดลง สนับสนุนเศรษฐกิจหมุนเวียน และการต่อสู้กับการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ ซึ่งมีบทบาทสำคัญในการสนับสนุนการพัฒนาที่ยั่งยืน (Sustainable Development Goals -SDGs) [17-19]



รูปที่ 16 การวิเคราะห์ราคาต้นทุนในการผลิตคอนกรีตบล็อก



รูปที่ 17 การปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) ของผลิตภัณฑ์คอนกรีตบล็อก 1 ลูกบาศก์เมตร



4. สรุปผลและอภิปรายผล

การศึกษาผลกระทบของเก่าปาล์มน้ำมันบดละเอียดในปริมาณสูงต่อการรับกำลังอัด หน่วยน้ำหนัก การดูดซึมน้ำ ต้นทุนการผลิต และผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม ในการผลิตคอนกรีตบล็อกที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม สามารถสรุปผลให้สอดคล้องกับวัตถุประสงค์ได้ ดังนี้

1. คอนกรีตบล็อกที่ผสมเก่าปาล์ม น้ำมันบดละเอียดในปริมาณสูงมีความหนาแน่นเฉลี่ยลดลง ในขณะที่มีค่าการดูดซึมน้ำเพิ่มขึ้น เมื่อมีการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเก่าปาล์มน้ำมันบดละเอียดในปริมาณที่มากขึ้นตามลำดับ

2. เก่าปาล์มน้ำมันบดละเอียดสามารถใช้เป็นวัสดุปอชโซลานในปริมาณสูงได้ โดยคอนกรีตบล็อก 50GPOFA, 60GPOFA และ 70GPOFA มีค่ากำลังอัดผ่านตามมาตรฐาน มอก. 58-2560 (มาตรฐานอุตสาหกรรม ผลิตภัณฑ์คอนกรีตบล็อกกลวงไม่รับน้ำหนัก) กำหนด ที่อายุ 28 ในขณะที่มีปริมาณปูนซีเมนต์เพียงร้อยละ 50, 40 และ 30 โดยน้ำหนักของวัสดุประสานเท่านั้น

3. คอนกรีตบล็อกที่ใช้เก่าปาล์มน้ำมันบดละเอียดแทนที่ปูนซีเมนต์ในปริมาณสูง สามารถลดต้นทุนวัสดุโดยรวมของคอนกรีตบล็อก ได้ประมาณร้อยละ 28 ถึง 39 เมื่อเทียบกับคอนกรีตบล็อกที่ใช้ปูนซีเมนต์เป็นวัสดุประสานเพียงอย่างเดียว

4. คอนกรีตบล็อกที่ใช้เก่าปาล์มน้ำมันบดละเอียดแทนที่ปูนซีเมนต์ในปริมาณสูง สามารถลดปริมาณการปล่อย CO₂ ในการผลิต ได้มากถึงร้อยละ 41 ถึง 62 เมื่อเทียบกับคอนกรีตบล็อกที่ใช้ปูนซีเมนต์เป็นวัสดุประสานเพียงอย่างเดียว

5. การใช้เก่าปาล์ม น้ำมันบดละเอียดแทนที่ปูนซีเมนต์ในปริมาณร้อยละ 70 (70GPOFA) สามารถพัฒนากำลังอัดได้ถึง 5.02 เมกะปาสกาล อายุ 28 วัน ผ่านมาตรฐาน มอก. 58-2560 และสามารถลดต้นทุนได้ถึงร้อยละ 39 รวมถึงลดการปล่อย CO₂ ได้ถึงร้อยละ 62 ซึ่งอาจนำไปใช้เป็นวัสดุประสานที่มีต้นทุนต่ำ และเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม

5. ข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้ใช้วัสดุประสานต่อมวลรวมละเอียดเท่ากับ 1 : 6 ซึ่งจัดเป็นอัตราส่วนที่ให้ปริมาณวัสดุประสานสูง ซึ่งทั่วไปอยู่ในช่วง 1:6-1:11 โดยการเพิ่มปริมาณมวลรวม (เช่น 1:8-1:11) อาจทำให้คอนกรีตบล็อกมีความหนาแน่นลดลง ความพรุนเพิ่มขึ้น ส่งผลให้กำลังอัด และความต้านทานการดูดซึมน้ำลดลง ในด้านสิ่งแวดล้อม การใช้วัสดุประสานในปริมาณสูงจะส่งผลต่อปริมาณคาร์บอนฟุตพริ้นท์ของการผลิตสำหรับต้นทุน ของคอนกรีตบล็อกอัตราส่วน 1:6 มีต้นทุนสูงกว่าเพราะใช้ปูนซีเมนต์มาก การเพิ่มอัตราส่วนมวลรวมละเอียด มีราคาถูกที่สุดต่อก่อนและนิยมในงานบล็อกราคาประหยัด แต่คุณภาพต่ำกว่า ดังนั้นอัตรา 1:6 ในงานวิจัยนี้เป็นส่วนผสมที่เน้นความแข็งแรงของผลิตภัณฑ์ ในขณะที่อัตราส่วนวัสดุประสานต่อมวลรวมละเอียดที่สูงกว่าในทางปฏิบัติจะส่งผลต่อคุณสมบัติ สิ่งแวดล้อม และต้นทุนแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ

6. กิตติกรรมประกาศ

การวิจัยครั้งนี้ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยประเภทเงินรายได้ จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2567 คณะผู้วิจัยขอขอบคุณ



บทความวิจัย

หลักสูตรวิศวกรรมโยธา วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรมและการจัดการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย ที่เอื้อเพื่อห้องปฏิบัติการ เครื่องมือและอุปกรณ์ในการทดลองวิจัย และขอขอบพระคุณผู้ทรงคุณวุฒิที่กรุณาให้ข้อเสนอแนะที่เป็นประโยชน์ต่อการศึกษาวิจัยในครั้งนี้

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] <https://www.krungsri.com/th/research/industry/industry-outlook/construction-construction-materials/construction-materials/io/2024> (Accessed on 24 September 2024) (in Thai)
- [2] ASTM C618, Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete, ASTM International, 2017.
- [3] TIS 2888-2561, Standard for Palm Oil Ash for Use as Admixture in Concrete, 2019. (in Thai)
- [4] A.N.B.M. Sufian, M.R. Rahman, K.A.B. M. Said and M.K.B. Bakri, A critical review of various types of palm oil fuel ash (POFA) utilization in enhancing concrete and mortar properties, *Journal of Building Pathology and Rehabilitation*, 2025, 10(2), 124.
- [5] W. Tangchirapat and C. Jaturapitakkul, Strength, drying shrinkage, and water permeability of concrete incorporating ground palm oil fuel ash, *Cement and Concrete Composites*, 2010, 32(10), 767–774.
- [6] W. Tangchirapat, C. Jaturapitakkul and P. Chindaprasirt, Use of palm oil fuel ash as a supplementary cementitious material for producing high-strength concrete, *Construction and Building Materials*, 2009, 23(7), 2641–2646.
- [7] C. Charoennatkul, Interlocking blocks containing oil palm ash and shells waste, *Journal of Community Development and Life Quality*, 2014, 2(1), 103 – 117. (in Thai)
- [8] TIS 58-2560, Standard for Hollow Non-load-Bearing Concrete Masonry Blocks, 2017. (in Thai)
- [9] N. Sompakdee, T. Klathae, C. Choosakul, S. Rittipakdee, P. Khamput and S. Dueramae, Compressive strength of cement mortar containing high volume palm oil fuel ash, *The 28th National Convention on Civil Engineering (NCCE28)*, Proceeding, 2023, MAT35-1–MAT35-7. (in Thai)
- [10] P. Chindaprasirt, W. Kroehong, N. Damrongwiryanupap, W. Suriyo and C. Jaturapitakkul, Mechanical properties, chloride resistance and microstructure of Portland fly ash cement concrete containing high volume bagasse ash, *Journal of Building Engineering*, 2020, 31, 101415.



- [11] M.F. Alnahhal, U.J. Alengaram, M.Z. Jumaat, F. Abutaha, M.A. Alqedra and R.R. Nayaka, Assessment on engineering properties and CO₂ emissions of recycled aggregate concrete incorporating waste products as supplements to Portland cement, *Journal of Cleaner Production*, 2018, 203, 822–835.
- [12] X. Zhu, Y. Zhang, Z. Liu, H. Qiao, F. Ye and Z. Lei, Research on carbon emission reduction of manufactured sand concrete based on compressive strength, *Construction and Building Materials*, 2023, 403, 133101.
- [13] http://thaicarbonlabel.tgo.or.th/admin/uploadfiles/emission/ts_f2e7bb377d.pdf. (Accessed on 14 September 2024) (in Thai)
- [14] P. Salaemae, K. Ongwuttiwat and A. Hawa, Thermal insulation hollow concrete blocks using palm oil clinker containing surgical face masks and KF94 masks as aggregate, *The Journal of Industrial Technology*, 2025, 21(2), 91–106.
- [15] S. Men, W. Tangchirapat, C. Jaturapitakkul and C.C. Ban, Strength, fluid transport and microstructure of high-strength concrete incorporating high-volume ground palm oil fuel ash blended with fly ash and limestone powder, *Journal of Building Engineering*, 2022, 56, 104714.
- [16] V. Sooksatra and N. Premkamol, Usage of palm oil ash in producing non-load concrete block, *Engineering Journal of Siam University*, 2021, 22(1), 1–10.
- [17] M.F. Alnahhal, U.J. Alengaram, M.Z. Jumaat, F. Abutaha, M.A. Alqedra and R.R. Nayaka, Assessment on engineering properties and CO₂ emissions of recycled aggregate concrete incorporating waste products as supplements to Portland cement, *Journal of Cleaner Production*, 2018, 203, 822–835.
- [18] R.V. Leeuwen, The effects of limestone powder particle size on the mechanical properties and the life cycle assessment of concrete, *Journal of Civil Engineering*, 2016, 6(4), 104–113.
- [19] C. Witthayaphirom, N. Nuansawan and C. Chiemchaisri, Assessing waste generation rate from activities in high-rise building construction for achieving sustainable construction goals, *The Journal of Industrial Technology*, 2025, 21(1), 1–14.



กรอบการจัดการข้อมูลและตัวแบบทางคณิตศาสตร์สำหรับการจัดสรรพนักงานที่คำนึงถึงทักษะและการเพิ่มพูนทักษะสำหรับแผนกเย็บในอุตสาหกรรมเครื่องนุ่งห่ม

นพรุจ บุญเสริม และ สิริวิชญ์สว่างนพ*

ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

* ผู้ประสานงานเผยแพร่ (Corresponding Author), E-mail: siravit.s@eng.kmutnb.ac.th

วันที่รับบทความ: 18 กรกฎาคม 2568; วันที่ทบทวนบทความ: 12 มกราคม 2569; วันที่ตอบรับบทความ: 26 มกราคม 2569

วันที่เผยแพร่ออนไลน์: 17 เมษายน 2569

บทคัดย่อ: อุตสาหกรรมเครื่องนุ่งห่มโดยเฉพาะในแผนกเย็บเสื้อผ้าของโรงงานแบบผลิตตามคำสั่ง (Made-to-Order Manufacturing) ต้องเผชิญกับความหลากหลายของรูปแบบผลิตภัณฑ์และการเปลี่ยนแปลงบ่อยครั้ง ผู้ผลิตรายย่อยในอุตสาหกรรมเครื่องนุ่งห่มไทยหลายรายไม่มีเครื่องมือหรือวิธีการจัดสรรงานอย่างเป็นระบบ การตัดสินใจมักขึ้นกับประสบการณ์ของหัวหน้างานเป็นหลัก ส่งผลให้คุณภาพการตัดสินใจขึ้นกับบุคคล การจัดสรรงานสำหรับอุตสาหกรรมนั้นนอกจากจะต้องจัดสรรงานให้ผลิตทันแล้วยังต้องจัดสรรงานโดยคำนึงถึงการหมุนเวียนการทำงานเพื่อให้พนักงานมีทักษะเพิ่มขึ้น ทำงานเร็วขึ้น และทำงานทดแทนกันได้ งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ที่จะพัฒนารอบการจัดการข้อมูลและตัวแบบทางคณิตศาสตร์สำหรับการจัดสรรพนักงานที่คำนึงถึงทักษะและการเพิ่มพูนทักษะสำหรับแผนกเย็บในอุตสาหกรรมเครื่องนุ่งห่ม กรอบการจัดการข้อมูลจะทำให้พนักงานมีแนวทางการจัดเก็บและใช้ข้อมูลอย่างเป็นระบบ และตัวแบบทางคณิตศาสตร์จะถูกนำไปประยุกต์ใช้ร่วมกับชุดเครื่องมือสำหรับหาคำตอบที่ดีที่สุด (Optimization Solver) กรอบการจัดการข้อมูลและตัวแบบทางคณิตศาสตร์ที่พัฒนาขึ้นถูกนำไปทดสอบใช้งานกับข้อมูลจริงของโรงงานและมีการจำลองข้อมูลเพิ่มเติมเพื่อวิเคราะห์ตัวแบบทางคณิตศาสตร์ ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่ากรอบการจัดการข้อมูลให้ข้อมูลที่เพียงพอต่อการตัดสินใจจัดสรรและหมุนเวียนพนักงานและตัวแบบทางคณิตศาสตร์สามารถหาคำตอบที่ดีที่สุดได้ภายในกรอบเวลาการทำงานจริงที่เหมาะสม

คำสำคัญ: ตารางทักษะ; ตัวแบบทางคณิตศาสตร์; ปัญหาการจัดสรรงาน; อุตสาหกรรมเสื้อผ้า

A Data Management Framework and Mathematical Model for Worker Allocation Considering Skills and Upskilling in the Sewing Department of the Garment Industry

Nopruj Boonserm and Siravit Swangnop*

Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's University of Technology North Bangkok

* Corresponding author, E-mail: siravit.s@eng.kmutnb.ac.th

Received: 18 July 2025; Revised: 12 January 2026; Accepted: 26 January 2026

Online Published: 17 April 2026

Abstract: The garment industry, particularly the sewing departments of made-to-order manufacturing factories, faces constant diversity and frequent changes in product designs. Many small-scale garment manufacturers in Thailand lack systematic tools or methods for task assignment; allocations are often made based on the personal experience of supervisors, resulting in subjective and inconsistent outcomes. In this industry, task allocation must not only ensure timely production but also promote task rotation to enhance the worker skills, improve work speed, and enable workforce flexibility through substitution. This study aims to develop a data management framework and mathematical model for skill-based worker assignment and skill enhancement in sewing departments of the garment industry. The data management framework provides a systematic approach for collecting and utilizing worker-related data, while the mathematical model is designed to be implemented with optimization tools for deriving optimal solutions. The proposed framework and model were tested using real-world data collected from a garment factory and supplemented with simulated data to assess the performance of the mathematical model. The experimental results demonstrate that the data framework effectively supports decision-making in worker assignment and rotation, and the mathematical model is capable of solving the optimal solutions within a real working timeframe.

Keywords: Skill matrix; Mathematical model; Assignment problem; Garment industry



1. บทนำ

อุตสาหกรรมเครื่องนุ่งห่มถือเป็นภาคการผลิตที่มีความซับซ้อนสูง โดยเฉพาะในกระบวนการเย็บประกอบเสื้อผ้า ซึ่งจำเป็นต้องอาศัยทักษะเฉพาะทางจากแรงงานฝีมือ อีกทั้งยังต้องเผชิญกับความหลากหลายของผลิตภัณฑ์และรูปแบบเสื้อผ้าที่มีการเปลี่ยนแปลงอยู่เสมอ การจัดสรรงานให้พนักงานจึงมีหลายมิติที่ต้องพิจารณาทั้งด้านความสามารถและทักษะแรงงานที่ส่งผลให้ความเร็วการผลิตของพนักงานแต่ละคนไม่เท่ากัน เวลาส่งมอบที่ถูกระบุโดยลูกค้า ความต่อเนื่องของขั้นตอนการผลิตที่มีลำดับที่ซับซ้อน และความสมดุลของสายการผลิตหลังจากจัดสรรงานไปแล้ว ทุกประเด็นดังกล่าวจะต้องถูกนำไปพิจารณาพร้อมกัน นอกจากนี้ สำหรับอุตสาหกรรมเครื่องนุ่งห่ม การพัฒนาทักษะของพนักงานให้สามารถปฏิบัติงานได้หลากหลายขั้นตอนและทำได้รวดเร็วมีความจำเป็นอย่างยิ่ง ไม่เพียงเพื่อทดแทนแรงงานที่ลาออก แต่ยังช่วยเสริมสร้างความรู้ที่ยั่งยืนและประสิทธิภาพการผลิตในระยะยาว [1-3]

ผู้ผลิตรายย่อยในอุตสาหกรรมเครื่องนุ่งห่มไทยหลายรายไม่มีเครื่องมือหรือวิธีการจัดสรรงานอย่างเป็นระบบมากนัก มักขึ้นกับประสบการณ์ของหัวหน้างานเป็นหลัก ส่งผลให้คุณภาพการตัดสินใจขึ้นกับบุคคล การจัดสรรงานสำหรับอุตสาหกรรมนี้นอกจากจะต้องจัดสรรงานให้ผลิตทันแล้ว ยังต้องจัดสรรงานโดยคำนึงถึงการหมุนเวียนการทำงานเพื่อให้พนักงานมีทักษะเพิ่มขึ้นทำงานเร็วขึ้น และทำงานทดแทนกันได้

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ที่จะพัฒนากรอบการจัดการข้อมูลและตัวแบบทางคณิตศาสตร์สำหรับการจัดสรรงานที่คำนึงถึงทักษะและการเพิ่มพูนทักษะ

สำหรับแผนกเย็บในอุตสาหกรรมเครื่องนุ่งห่ม การจัดการข้อมูลจะทำให้พนักงานมีแนวทางการจัดเก็บและใช้ข้อมูลอย่างเป็นระบบ และตัวแบบทางคณิตศาสตร์จะถูกนำไปประยุกต์ใช้กับชุดเครื่องมือสำหรับหาค่าตอบที่ดีที่สุด (Optimization Solver) เพื่อให้ได้ผลลัพธ์การจัดสรรงานที่สามารถผลิตงานได้ทันตามกำหนดโดยมีการหมุนเวียนพนักงานเพื่อให้เกิดการพัฒนาทักษะได้อย่างที่คาดหวังไว้ องค์ประกอบทั้งสองส่วนจะต้องทำงานร่วมกัน จะขาดส่วนใดส่วนหนึ่งไม่ได้ ถ้ามีเพียงข้อมูลแต่ไม่มีตัวแบบทางคณิตศาสตร์พนักงานจะต้องใช้ประสบการณ์ในการจัดสรรงาน ถ้ามีตัวแบบทางคณิตศาสตร์แต่ไม่มีข้อมูลชุดเครื่องมือก็จะไม่สามารถหาค่าตอบได้เช่นกัน ทั้งกรอบการจัดการข้อมูลและตัวแบบทางคณิตศาสตร์ที่พัฒนาขึ้นถูกนำไปทดสอบใช้กับข้อมูลการผลิตจริงของโรงงานและมีการทำการทดลองเพิ่มเติมเพื่อวิเคราะห์ตัวแบบทางคณิตศาสตร์

2. การทบทวนวรรณกรรม

ปัญหาการจัดสรรกำลังคน (Worker Assignment Problem: WAP) เป็นหนึ่งในปัญหาหลักที่ภาคอุตสาหกรรมต้องเผชิญอย่างต่อเนื่อง โดยจัดอยู่ในกลุ่มของปัญหาการหาค่าเหมาะสมแบบไม่ต่อเนื่อง (Discrete Optimization Problems) ซึ่งเป็นรูปแบบหนึ่งของการหาค่าเหมาะสมแบบเชิงผสม (Combinatorial Optimization) [4, 5] ทั้งนี้จุดมุ่งหมายของการจัดสรรกำลังคนอาจอยู่ในรูปแบบของสมการฟังก์ชันวัตถุประสงค์เพียงหนึ่งหรือหลายเป้าหมาย เช่น การลดรอบเวลาการผลิตให้ต่ำที่สุด การลดเวลานำส่ง (Lead Time) การลดระยะทางการเดินทางของพนักงานระหว่างสถานีงาน หรือการลดค่าใช้จ่ายในการฝึกอบรมพนักงาน



หนึ่งในแนวทางที่ได้รับการพัฒนาขึ้นเพื่อสนับสนุนการตัดสินใจในการจัดสรรทรัพยากร คือแบบจำลองคณิตศาสตร์กำหนดการเชิงเส้นจำนวนเต็มผสม (Mixed - Integer Linear Programming: MILP) ซึ่งเป็นเครื่องมือทางคณิตศาสตร์ที่ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการจัดสรรทรัพยากรให้เหมาะสมกับลักษณะงานเฉพาะด้าน MILP ได้ถูกประยุกต์ใช้งานอย่างกว้างขวาง เช่น งานวิจัยของ Mitiku [6] ศึกษาโรงงานผลิตเครื่องโลหะ ทำการจัดสรรงานเข้ากับพนักงาน โดยวางแผนเป้าหมายกำไรของโรงงานสูงสุด Katirae และคณะ [7] ทำการจัดสรรพนักงานและวางแผนเป้าหมายลดรอบเวลาการผลิตและลดจำนวนสถานีนงาน Durmaz และ Koyuncu [8] ทำการจัดสรรพนักงานเข้าสู่สถานีนงานให้เหมาะสมกับทักษะของพนักงาน Yilmaz [9] จัดสรรพนักงานเข้าสู่สายการผลิตรูปตัวยู เพื่อปรับสมดุลสายการผลิตและลดจำนวนสถานีนงานรวม

ในขณะที่การศึกษาเพิ่มเติม นอกจากให้ความสำคัญในการจัดสรรพนักงานเข้าสู่สายการประกอบแล้ว ยังคำนึงถึงความสามารถหรือทักษะการเรียนรู้ของมนุษย์ด้วย แล้วพยายามสร้างแบบจำลองที่คำนึงถึงความเป็นจริงของมนุษย์ โดยการเพิ่มเงื่อนไขการเรียนรู้ ความชำนาญ ตัวอย่างงานวิจัยเช่น งานของ Han และ Park [10] พัฒนาอัลกอริทึมการจัดสมดุลงานให้กับพนักงานในสายการผลิตเสื้อผ้าสั่งตัด โดยคำนึงถึงระยะเวลาผลิตงาน ความซับซ้อนของงานและทักษะของผู้ปฏิบัติงาน Abdelsalam และคณะ [11] ศึกษาโรงงานผลิตเครื่องนุ่งห่มแล้ว พบว่าการวางแผนการผลิตในปัจจุบันล่าช้า ส่งมอบสินค้าไม่ทันกำหนดเวลา จึงได้สร้างตัวแบบคณิตศาสตร์โดยวางแผนเป้าหมายลดเวลาว่างของ

เครื่องจักร ทำให้ใช้งานกำลังการผลิตที่เหลือให้เต็มประสิทธิภาพ งานของ Bao และ คณะ [12] และงานของ Xie และคณะ [13] สนใจทักษะที่แตกต่างของพนักงานแล้วทำการสมดุลสายการผลิตเสื้อผ้า และลำดับการผลิตงาน ใช้วิธีการหาค่าตอบด้วยวิธีฮิวริสติก Kong และ คณะ [14] สร้างแบบจำลองคณิตศาสตร์โดยเพื่อจัดสมดุลสายการผลิตเสื้อเชิ้ตวางแผนเป้าหมายลดค่าใช้จ่ายพนักงานรวม หาค่าตอบของ MILP ด้วยโปรแกรม IBM ILOG CPLEX Chen และคณะ [15] สนใจฝีมือและทักษะของพนักงานในสายการประกอบเย็บผ้าแล้วทำการจัดสรรพนักงานให้รอบเวลาในการผลิตลดลง พร้อมเปรียบเทียบการทำงานเดียวกับการทำงานหลายงานภายในสถานีนงาน

งานวิจัยก่อนหน้า [6-15] ได้มุ่งเป้าหมายที่การจัดสมดุลสายการผลิต ลดรอบเวลาการผลิต ลดต้นทุนการผลิต หรือจัดสรรพนักงานตามทักษะ แต่ไม่ได้ให้ความสำคัญกับการหมุนเวียนการทำงานเพื่อเพิ่มพูนพัฒนาทักษะของตัวพนักงาน

สำหรับงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนารอบการจัดเก็บข้อมูลและแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับการจัดสรรพนักงานในโรงงานผลิตเสื้อผ้าแบบผลิตตามคำสั่ง (Made-to-Order Manufacturing) โดยอิงจากข้อมูลทักษะและเวลาการปฏิบัติงานจริงของพนักงานผ่านตารางเมทริกซ์เวลาการทำงาน (Skill Matrix) เข้ากับกลไกการเรียนรู้ของพนักงานผ่านการหมุนเวียนงานอย่างเป็นระบบ แบบจำลองคณิตศาสตร์ถูกออกแบบให้รองรับสภาพแวดล้อมการผลิตแบบตามคำสั่ง ปรับเปลี่ยนรูปแบบผลิตภัณฑ์สม่ำเสมอสนับสนุนการวางแผนจัดสรรพนักงาน โดยยังคงความสามารถในการผลิตให้ทันตามกำหนดส่งมอบ



3. กรอบการจัดเก็บข้อมูลและตัวแบบทางคณิตศาสตร์

กรอบการจัดเก็บข้อมูลที่น่าเสนอเริ่มจากการพิจารณาข้อมูลที่เป็นต่อการจัดสรรพนักงาน รวมถึงเสนอแนะแนวทางการจัดเก็บข้อมูลหรือการคำนวณ หลังจากนั้นนำข้อมูลดังกล่าวไปใช้กับตัวแบบทางคณิตศาสตร์ที่พัฒนาขึ้น รายละเอียดแสดงดัง

รูปที่ 1

3.1 ข้อมูลที่ใช้ในการผลิตและวิธีการจัดเก็บและคำนวณ

ข้อมูลเพื่อสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ สำหรับการจัดสรรพนักงานในสายการผลิต ใช้ข้อมูล 3 กลุ่ม ได้แก่ (1) รอบเวลาการทำงานและค่าแท็คไทม์ (2) ตารางเมทริกซ์เวลาการทำงานของพนักงาน (Skill Matrix) และ (3) ตารางระบุทักษะที่จำเป็นต้องใช้ในสถานีนงาน

3.1.1 ข้อมูลรอบเวลาการผลิตและค่าแท็คไทม์

รอบเวลาการทำงานในแต่ละสถานีนงาน เป็นผลรวมของงานย่อยทุกงานในสถานีนงานนั้นๆ โดยสามารถเก็บข้อมูลได้จากการศึกษางาน (Time Study) แล้วนำมาสร้างแผนภูมียามาซุมิ (Yamazumi Chart) หรือข้อมูลบันทึกขั้นตอนและรอบเวลามาตรฐานของโรงงานที่มีอยู่แล้ว

ค่าแท็คไทม์ เป็นค่าจังหวะในการผลิตที่ตรงกับความ ต้องการของลูกค้าในแต่ละรอบเวลา ในอุตสาหกรรมเครื่องนุ่งห่มสำหรับธุรกิจขนาดกลางและขนาดเล็ก คำสั่งซื้อมักจะหลากหลายและสั่งในปริมาณไม่มาก หัวหน้าฝ่ายผลิตจะเป็นผู้กำหนดระยะเวลา

สำหรับแต่ละลีดเพื่อนำมาคำนวณค่าแท็คไทม์ ซึ่งค่าแท็คไทม์คำนวณได้จากสมการที่ 1

$$\text{แท็คไทม์} = \frac{\text{เวลาที่มีในการผลิต}}{\text{ปริมาณความต้องการ}} \quad (1)$$

รูปแบบตารางเก็บข้อมูลได้แสดงในตารางที่ 1 กำหนดให้แถวแนวนอนเป็นผลิตภัณฑ์แต่ละแบบที่ต้องผลิต ส่วนคอลัมน์แนวตั้งเป็นสถานีนงานและค่าแท็คไทม์และจุดตัดของตารางเป็นค่าเวลา

ตารางที่ 1 รูปแบบตารางรอบเวลาสถานีนงานและค่าแท็คไทม์ตามแต่ละผลิตภัณฑ์

Station	Station	Station	...	Station	Takt
Product	1	2	...	S	Time
P.1	2.21	2.00	...	1.39	2.70
P.2	2.30	1.80	...	1.45	2.50
...
P.n	CT ₁	CT ₂	...	CT _S	TT _P

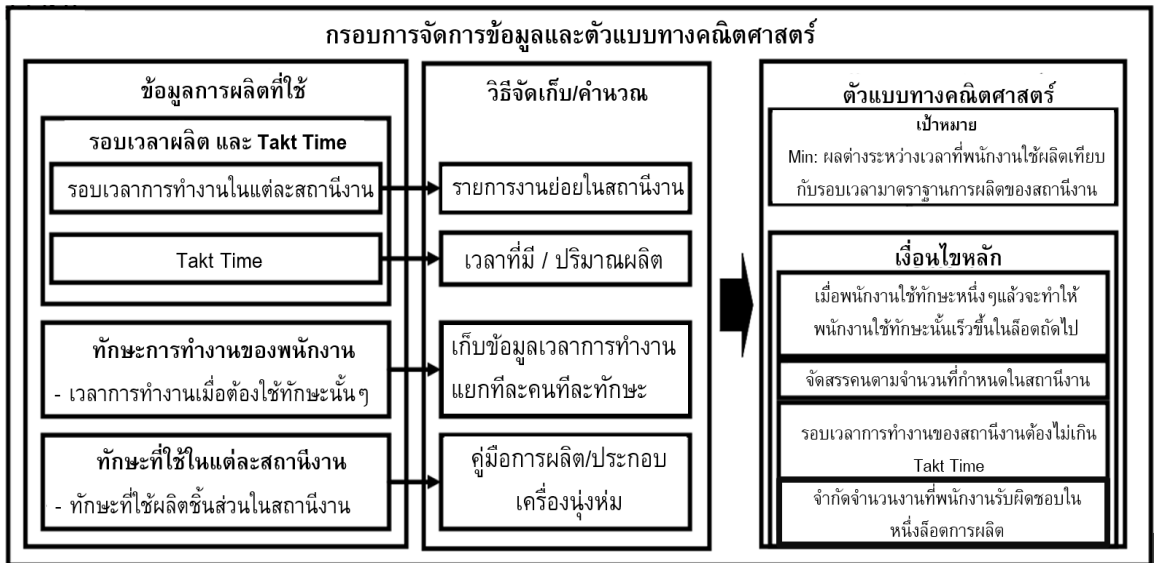
หน่วยเวลาในตารางเป็นค่าตัวอย่างและมีหน่วยเป็นนาที

3.1.2 ข้อมูลเมทริกซ์เวลาการทำงานของพนักงาน

ตารางเมทริกซ์เวลาการทำงาน เป็นข้อมูลสำคัญที่ใช้พิจารณาความแตกต่างของความสามารถรายบุคคล เพื่อจับคู่พนักงานกับงานอย่างมีประสิทธิภาพ

วิธีการรวบรวมข้อมูลมีหลายวิธี วิธีที่ผู้วิจัยเลือกใช้สำหรับงานวิจัยนี้คือการสัมภาษณ์หัวหน้าแผนกเย็บผ้าเพื่อให้ทราบว่าทักษะที่จำเป็นในการผลิตแตกต่างกันที่ทักษะในเบื้องต้นก่อน หลังจากนั้นใช้วิธีเก็บข้อมูลเวลาการทำงาน โดยการใช้การทดลองทำ

ชิ้นงานที่ใช้ทักษะนั้น ๆ 10 ชิ้นงาน แยกกัน แต่ละทักษะ แล้วบันทึกวิดีโอเพื่อหาเวลาในการทำงาน



รูปที่ 1 กรอบการนำเข้าข้อมูล การจัดเก็บข้อมูลและตัวแบบทางคณิตศาสตร์

จากนั้นเฉลี่ยเวลาเพื่อให้ได้เวลาการทำงาน ข้อดีของวิธีนี้คือจะได้ค่าเวลาที่มีความแปรปรวนน้อยและระหว่างเก็บข้อมูลจะได้แนวทางในการปรับปรุงท่าทางในการทำงานอีกด้วย

รูปแบบตารางเก็บข้อมูลของเมทริกซ์เวลาการทำงาน ได้แสดงในตารางที่ 2 โดยให้แถวแนวนอนรายชื่อของพนักงาน และคอลัมน์แนวตั้งเป็นเป็นรายการทักษะในขณะที่ยึดติดเป็นค่าเวลาการทำงาน

3.1.3 ข้อมูลตารางทักษะที่จำเป็นในแต่ละสถานีงาน

ตารางนี้เป็นเมทริกซ์ข้อมูลแบบ Boolean ระบุทักษะที่ต้องใช้ในสถานีงาน วิธีการเก็บข้อมูล พิจารณาจากคู่มือการผลิตหรือการประกอบของผลิตภัณฑ์ รวมถึงการสอบถามวิธีการทำงานจากหัวหน้าแผนกเย็บผ้า รูปแบบตารางทักษะที่จำเป็นในแต่ละสถานีงานแสดงในตารางที่ 3 โดยกำหนดให้แถวแนวนอน

ตารางที่ 2 รูปแบบตารางเมทริกซ์เวลาการทำงานของพนักงาน

Skill	Skill	Skill	Skill	...	Skill
Operator	1	2	3	...	k
A	1.97	2.25	0.66	...	A_k
B	1.05	1.75	0.71	...	B_k
C	1.92	2.77	0.38	...	C_k
...
X	X_{k1}	X_{k2}	X_k

หน่วยเวลาในตารางเป็นค่าตัวอย่างและมีหน่วยเป็นนาที

เป็นรายการสถานีงานซึ่งจะเชื่อมโยงกับรายการรอบเวลามาตรฐานในแต่ละสถานีงาน และแถวคอลัมน์เป็นรายการทักษะซึ่งจะเชื่อมโยงกับรายการทักษะในตารางเมทริกซ์เวลาการทำงานจุดตัดภายในตารางเป็นข้อมูลแบบ True หรือ False



ตารางที่ 3 รูปแบบตารางทักษะที่จำเป็นในแต่ละสถานีนงาน

Station \ Skill	Skill 1	Skill 2	Skill 3	...	Skill k
S1	0	0	1	...	1
S2	1	0	0	...	0
S3	0	1	0	...	1
...
S	S _{k1}	S _{k2}	S _k

รูปแบบตารางทั้งหมดนี้จะเป็นแนวทางสำหรับหัวหน้างานในการนำข้อมูลมารอก และข้อมูลดังกล่าวจะถูกนำไปใช้ต่อในตัวแบบทางคณิตศาสตร์

4. ตัวแบบทางคณิตศาสตร์

ปัญหาการจัดสรรพนักงานตามทักษะการทำงานในแต่ละสถานีนงานเป็นการตัดสินใจว่าพนักงานคนใดควรถูกมอบหมายไปยังสถานีนงานใด ภายใต้ข้อจำกัดของทักษะ เวลาในการทำงาน และรอบการผลิตในแต่ละลือดผลิตภันท์

เป้าหมายของการจัดสรรคือเพื่อให้เกิดการหมุนเวียนการทำงานของพนักงานแล้วพนักงานมีการเรียนรู้เกิดขึ้น ส่งเสริมให้เกิดการเรียนรู้จากการทำงานซ้ำๆ ซึ่งจะทำให้เวลาทำงานของพนักงานเข้าใกล้รอบเวลามาตรฐานที่โรงงานกำหนด ในขณะที่เดียวกันยังคงต้องอยู่ภายใต้เงื่อนไขการผลิตที่ไม่เกินค่าแก็คไทม์ของแต่ละลือด โดยพนักงานจะสามารถถูกจัดสรรไปที่สถานีนงานเฉพาะที่ตนเองมีทักษะที่สามารถทำงานได้เท่านั้น

ปัญหาการจัดสรรพนักงานที่พิจารณาในบทความนี้ตั้งอยู่บนสมมุติฐานดังต่อไปนี้

1. ต้องจัดสรรจำนวนพนักงานให้ครบตามจำนวนที่แต่ละสถานีนงานต้องการ

2. ผังการผลิต จำนวนสถานีนงาน ทักษะที่ต้องใช้ใน แต่ละสถานีนงานและจำนวนพนักงานที่ต้องทำงานด้วยทักษะนั้นๆ ในแต่ละสถานีนงานจะถูกวางแผนและทราบล่วงหน้า

3. สถานีนงานและทักษะที่ต้องใช้งาน กำหนดแบบหนึ่งต่อหนึ่ง กล่าวคือ หนึ่งสถานีนงาน หนึ่งทักษะที่ต้องใช้ในการผลิต

4. ในกรณีที่พนักงานคนใดไม่เคยทำงานทักษะนั้นๆ มาก่อน ให้สมมุติฐานว่า หากพนักงานคนนั้นทำงานครั้งแรกจะใช้ระยะเวลาในการทำงานเทียบเท่ากับพนักงานที่ทำงานได้ซ้ำที่สุดเป็นค่าตั้งต้น

5. ในแต่ละลือดการผลิตที่เพิ่มขึ้น ไม่มีการเปลี่ยนแปลงภันท์ ไม่มีการเปลี่ยนทักษะที่ใช้ในสถานีน

6. พนักงานแต่ละคนสามารถทำงานซ้ำได้ไม่เกิน 3 สถานีนงานต่อหนึ่งรอบลือดการผลิต

7. อัตราการเรียนรู้ คิดเป็น 5 เปอร์เซ็นต์ นับจากเวลาผลิตตั้งต้น เมื่อมีการทำงานซ้ำ เป็นค่าคงที่และพิจารณาเพียงความชำนาญ ไม่ได้พิจารณากรณีหลงลืม (Forgetting)

(สมมุติฐานข้อที่ 6 และข้อที่ 7 สามารถแก้ไขได้จากในแบบจำลองคณิตศาสตร์ ค่าดังกล่าวเป็นเพียงการกำหนดตัวเลขของโรงงานกรณีศึกษา)

ตัวแบบทางคณิตศาสตร์มีรายละเอียดดังนี้ (Index)

i = ดัชนีจำนวนพนักงาน; $i \in \{1,2,3,\dots,I\}$

k = ดัชนีจำนวนทักษะ; $k \in \{1,2,3,\dots,K\}$

s = ดัชนีจำนวนสถานีนงาน; $s \in \{1,2,3,\dots,S\}$

p = ดัชนีจำนวนลือดผลิตภันท์; $p \in \{1,2,3,\dots,P\}$

พารามิเตอร์ (Parameters)

TT_p = ค่าแก็คไทม์ของลือดผลิตภันท์ p



T_{ik} = เวลาการทำงานของพนักงาน i ของทักษะ k
 STD_{sp} = รอบเวลาการผลิตของสถานีงาน s ของผลิตภัณฑ์ p

$N_{ksp} \in \{0,1\}$
 $= 1$ เมื่อผลิตผลิตภัณฑ์ p ในสถานีงาน s ใช้ทักษะ k
 $= 0$ อื่น ๆ

M_{sp} = จำนวนพนักงานที่จำเป็นในสถานีงาน s ในการผลิตผลิตภัณฑ์ p

LR = อัตราการเรียนรู้ (Learning Rate) โรงงานที่อยู่ในกรณีศึกษามีสมมุติฐานการเรียนรู้อยู่ที่ 5 เปอร์เซ็นต์

ตัวแปรตัดสินใจ (Decision Variables)

$X_{ips} \in \{0,1\}$;
 $= 1$ เมื่อให้พนักงาน i ผลิตผลิตภัณฑ์ p ในสถานีงาน s
 $= 0$ อื่น ๆ

D_{ikps} = ผลต่างระหว่างเวลาการทำงานที่พนักงาน i ใช้ทักษะ k ในการผลิตผลิตภัณฑ์ p เทียบกับรอบเวลามาตรฐานการผลิตของแต่ละสถานีงาน s

$Z_{ikp} \in \{0,1\}$;
 $= 1$ เมื่อพนักงาน i ใช้ทักษะ k ในผลิตผลิตภัณฑ์ p
 $= 0$ อื่น ๆ

ET_{ikp} = เวลาการทำงาน ที่พนักงาน i ใช้ทักษะ k ในการผลิตผลิตภัณฑ์ p

RT_{ikp} = เวลาการทำงานที่ลดลงจากการเรียนรู้ เมื่อพนักงาน i ใช้ทักษะ k ในการผลิตผลิตภัณฑ์ p

ETZ_{ikp} = ตัวแปรช่วยในกระบวนการแปลงเชิงเส้นระหว่างตัวแปร ET_{ikp} กับ Z_{ikp}

AT_{ips} = รอบเวลาการทำงานในสถานีงาน ที่พนักงาน i

ในการผลิตผลิตภัณฑ์ p ตามแต่ละสถานีงาน s
 สมการเป้าหมาย (Objective Function)

$$\text{Minimize } \sum_{i=1}^I \sum_{k=1}^K \sum_{p=1}^P \sum_{s=1}^S D_{ikps} \quad (2)$$

สมการเงื่อนไข (Constraints)

สมการเงื่อนไขกลุ่มที่ 1: บังคับผลต่างรอบเวลาการทำงานในแต่ละสถานีงานเป็นค่าสัมบูรณ์;

$$D_{ikp} \geq STD_{sp} - ET_{ikp} \quad \forall i \in I, k \in K, p \in P, s \in S \quad (3)$$

$$D_{ikp} \geq -(STD_{sp} - ET_{ikp}) \quad \forall i \in I, k \in K, p \in P, s \in S \quad (4)$$

สมการเงื่อนไขกลุ่มที่ 2: กลไกการใช้งานทักษะและการเรียนรู้;

การทริกเกอร์การเรียนรู้

$$\sum_{s \in S | N_{ksp}=1} X_{ips} \geq Z_{ikp} \quad \forall i \in I, k \in K, p \in P \quad (5)$$

$$\sum_{s \in S | N_{ksp}=1} X_{ips} \leq 3 \cdot Z_{ikp} \quad \forall i \in I, k \in K, p \in P \quad (6)$$

การตั้งค่าเวลาเริ่มต้น ($p=1$)

$$ET_{ik(p=1)} = T_{ik} \quad \forall i \in I, k \in K \quad (7)$$

การแปลงตัวแปร Boolean ให้อยู่ในรูปเชิงเส้นและคำนวณค่าเวลาการทำงานที่ลดลง

$$ETZ_{ikp} \leq M_{skilltime} \cdot Z_{ikp} \quad \forall i \in I, k \in K, p \in P \quad (8)$$

$$ETZ_{ikp} \leq ET_{ikp} \quad \forall i \in I, k \in K, p \in P \quad (9)$$

$$ETZ_{ikp} \geq ET_{ikp} - M_{skilltime} \cdot (1 - Z_{ikp}) \quad \forall i \in I, k \in K, p \in P \quad (10)$$

$$RT_{ikp} \leq ETZ_{ikp} \cdot LR \quad \forall i \in I, k \in K, p \in P \quad (11)$$

$$RT_{ikp} \geq ETZ_{ikp} \cdot LR - M_{skilltime} \cdot (1 - Z_{ikp}) \quad \forall i \in I, k \in K, p \in P \quad (12)$$

การปรับปรุงค่าเวลาการทำงานที่ $P>1$

$$ET_{ikp} = ET_{ik(p-1)} - RT_{ik(p-1)} \quad \forall i \in I, k \in K, p \in P : p>1 \quad (13)$$

สมการเงื่อนไขกลุ่มที่ 3: การจัดสรรคนตามจำนวนที่ต้องการในสถานีงาน;



$$\sum_{i=1}^I X_{ips} = M_{sp} \quad \forall s \in S, p \in P \quad (14)$$

สมการเงื่อนไขกลุ่มที่ 4: รอบเวลาการทำงานจริงจะต้องไม่เกินค่าแท็คไทม์;

$$AT_{ips} \leq M_{skilltime} \cdot X_{ips} \quad \forall i \in I, p \in P, s \in S \quad (15)$$

$$AT_{ips} \geq \sum_{k \in K | N_{sp}=1} ET_{ikp} - M_{skilltime} \cdot (1 - X_{ips}) \quad \forall i \in I, p \in P, s \in S \quad (16)$$

$$AT_{ips} \leq TT_p \quad \forall i \in I, p \in P, s \in S \quad (17)$$

$$\sum_{i \in I} AT_{ips} \leq TT_p \cdot M_{ps} \quad \forall p \in P, s \in S \quad (18)$$

สมการเงื่อนไขกลุ่มที่ 5: พนักงานสามารถเปลี่ยนไปทำงานซ้ำสถานีนงานภายในสายการผลิตได้;

$$\sum_{s \in S} X_{ips} \leq 3 \quad \forall i \in I, p \in P \quad (19)$$

สมการเป้าหมาย (2) เพื่อจัดสรรพนักงานให้ได้ผลรวมของค่าผลต่างระหว่างรอบเวลาของพนักงานในการผลิตล็อตผลิตภัณฑ์สุดท้าย กับรอบเวลายามาตรฐานของแต่ละสถานีนงานต่ำที่สุด โดยค่าของผลต่าง D_{ikp} ได้มาจากสมการเงื่อนไข (3) และ (4) สมการเงื่อนไข (3) และ (4) เป็นการหาผลต่างระหว่างรอบเวลาการทำงานของพนักงานกับรอบเวลายามาตรฐานของแต่ละสถานี และบังคับให้ผลต่างดังกล่าวเป็นค่าสัมบูรณ์ สมการเงื่อนไข (5) และ (6) เป็นการหาทักษะที่ต้องใช้และเช็คจำนวนพนักงานที่เรียนรู้แล้วทริกเกอร์การเรียนรู้ สมการเงื่อนไข (7) ตั้งค่าเริ่มต้นของเวลาการทำงาน ณ ล็อตผลิตภัณฑ์เริ่มต้น สมการเงื่อนไข (8) - (10) เป็นการใช้นิพจน์ Big-M กับตัวแปร Boolean สมการเงื่อนไข (11) และ (12) ทำการหาค่าเวลาการทำงานที่ลดลงไป เมื่อมีการเรียนรู้เกิดขึ้น สมการเงื่อนไข (13) ปรับปรุงและลดค่าเวลาการทำงานของพนักงานลง สมการเงื่อนไข (14) กำหนดว่าต้องจัดสรรพนักงานให้ครบตามจำนวนพนักงานที่สถานี

งานนั้น ๆ ต้องการ สมการเงื่อนไข (15) และ (16) ใช้ตัวแปรการจัดสรรพนักงานซึ่งเป็น Boolean ดึงค่าเวลาการทำงานของพนักงานออกมา สมการเงื่อนไข (17) เป็นการเทียบว่ารอบเวลาการทำงานจะต้องไม่เกินค่าแท็คไทม์ ในกรณีที่สถานีนงานนั้นเป็นสถานีนงานเดียว สมการเงื่อนไข (18) ทำการเทียบว่ารอบเวลาการทำงานจะต้องไม่เกินค่าแท็คไทม์ กรณีที่สถานีนงานนั้นเป็นสถานีนงานขนาน สมการเงื่อนไข (19) เป็นการอนุญาตให้พนักงานสามารถเวียนทำงานซ้ำสถานีนงานได้ไม่เกิน 3 สถานีนงาน

5. การทดสอบแบบจำลองคณิตศาสตร์กับข้อมูลจริงและการจำลองเพื่อวิเคราะห์ตัวแบบทางคณิตศาสตร์

การศึกษานี้อาศัยข้อมูลจริงที่ได้ทำการเก็บรวบรวมจากโรงงานผลิตเสื้อผ้าแห่งหนึ่ง ซึ่งดำเนินการผลิตเสื้อผ้าตามคำสั่งซื้อ (Made-to-Order) โดยผลิตภัณฑ์ที่เลือกนำมาศึกษาคือผลิตภัณฑ์ในกลุ่มเสื้อแขนสั้น ข้อมูลทั้งหมดถูกจัดเก็บตามกรอบการจัดการข้อมูล โดยข้อมูลรอบเวลายามาตรฐานของสถานีนงานเก็บจากเวลาการทำงานมาตรฐานของแต่ละขั้นตอนการทำงาน ข้อมูลแท็คไทม์คำนวณจากปริมาณคำสั่งซื้อและกำหนดเวลาแล้วเสร็จ จากข้อมูลทั้งหมดประกอบกันนำไปสู่การคำนวณจำนวนพนักงานที่ต้องการในแต่ละสถานีนงานได้ สำหรับเวลาการทำงานของพนักงานแต่ละคน โรงงานจัดเตรียมชิ้นงานตัวอย่างเพื่อให้พนักงานที่มีทักษะในการทำงานดังกล่าวทำงานซ้ำจำนวน 10 ชิ้นงานต่อทักษะ จากนั้นบันทึกวีดีโอการทำงานเพื่อศึกษาเวลาการทำงานแล้วนำมาหาค่าเฉลี่ย



โรงงานผลิตเสื้อผ้าที่ใช้ในการเก็บข้อมูลมีจำนวนประเภททักษะการทำงานทั้งหมด 17 ทักษะที่แตกต่างกัน พนักงานในแผนกเย็บจำนวน 17 คน และสถานีงานในการผลิตเสื้อแขนสั้นจำนวน 10 สถานีงาน ข้อมูลเวลาการทำงานแต่ละทักษะจะถูกนำไปหาค่าต่ำสุด (Minimum: Min) ค่าเฉลี่ย (Average) และค่าสูงสุด (Maximum: Max) โดยค่าต่ำสุดคือเวลาทำงานของพนักงานที่เร็วที่สุดในทักษะนั้น ๆ ค่าสูงสุดคือเวลาทำงานของพนักงานที่ช้าที่สุดในทักษะนั้น ๆ และค่าเฉลี่ยคือเวลาทำงานเฉลี่ยของพนักงานทุกคนในทักษะนั้น ข้อมูลทั้ง 3 ค่าถูกนำไปใช้เพื่อประกอบการจำลองเพื่อวิเคราะห์ตัวแบบทางคณิตศาสตร์

การทดลองแบ่งได้เป็น 4 การทดลอง การทดลองที่ 1 เป็นการทดลองที่ใช้ค่าเวลาจริงของพนักงานแต่ละคน และอีก 3 การทดลองที่เหลือเป็นการจำลองข้อมูลเพื่อวิเคราะห์ตัวแบบทางคณิตศาสตร์

1. การทดลองโดยใช้เวลาการทำงานจริงของพนักงานในแต่ละทักษะ

2. การทดลองโดยกำหนดให้สัดส่วนพนักงานมีทักษะการทำงานสูงและต่ำ = 50:50 คือพนักงานครึ่งหนึ่งมีทักษะการทำงานสูง (สุ่มค่าเวลาการทำงานจาก Minimum ถึง Average) และอีกครึ่งหนึ่งมีทักษะการทำงานต่ำ (สุ่มค่าเวลาการทำงานจาก Average ถึง Maximum)

3. การทดลองโดยกำหนดให้สัดส่วนพนักงานมีทักษะการทำงานสูงและต่ำ = 75:25

4. การทดลองโดยกำหนดให้สัดส่วนพนักงานมีทักษะการทำงานสูงและต่ำ = 25:75

ในการประเมินประสิทธิภาพการประมวลผลของตัวแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ งานวิจัยนี้ได้กำหนดปัจจัยที่ส่งผลต่อขนาดของปัญหาออกเป็น 2 ส่วนหลัก ได้แก่:

1. จำนวนพนักงาน: ทดลอง 3 ขนาด คือ 17 คน (เท่ากับของจำนวนพนักงานจริง), 34 คน (2 เท่าของข้อมูลจริง) และ 68 (4 เท่าของข้อมูลจริง) คน เพื่อรองรับกรณีการขยายกำลังการผลิตในอนาคต

2. ขอบเขตการวางแผนการผลิต: ทดลองตั้งแต่ 3, 6 ถึง 9 ล็อตการผลิต (เพิ่มขึ้นช่วงละ 3 ล็อต) โดยมาจากข้อเท็จจริงในสายการผลิตที่แผนกเย็บสามารถผลิตได้สูงสุด 9 ล็อตต่อสัปดาห์ การกำหนดขอบเขตเช่นนี้จะช่วยให้ทราบถึงขีดจำกัดของตัวแบบจำลองเมื่อต้องวางแผนการผลิตล่วงหน้าในระยะเวลาอันยาวนานที่สุด

ตัวแบบทางคณิตศาสตร์ถูกนำไปหาผลเฉลยโดยใช้โปรแกรม IBM ILOG CPLEX เวอร์ชัน 22.1.0.0 บนคอมพิวเตอร์โน้ตบุ๊ก ASUS TUF โมเดล A15 FA507NUR และหน่วยประมวลผลกลาง AMD Ryzen 7-7435HS และหน่วยประมวลผลกราฟิก NVidia GTX 4050 ประมวลผล Branch and Cut พร้อมกัน 16 Threads และตั้งค่าช่องว่าง (Optimal Gap) ของ MILP อยู่ที่ 0.01 เปอร์เซ็นต์

5.1 ผลการหาคำตอบการจัดสรรพนักงาน 17 คน จากข้อมูลจริงที่เก็บมา

การหาผลเฉลยแบบจำลองการจัดสรรพนักงานโดยใช้ข้อมูลเวลาการทำงานจริงที่เก็บรวบรวมมาจัดสรรพนักงานในสายการผลิตเสื้อ จำนวนพนักงาน 17 คนได้ทำการทดสอบหาผลลัพธ์การจัดสรรพนักงาน เพื่อประเมินการทำงานและกลไกสมการเงื่อนไขของตัวแบบจำลองคณิตศาสตร์



ตารางที่ 4 แสดงรอบเวลาทักกะของพนักงานที่ถูกจัดสรรเข้าสู่สถานีงานในลีดการผลิตที่หนึ่ง

Product Lot	Station	Worker	STD Time	EffTime	Takt Time	Slack Time
1	Station 1	Worker 12	2.21	2.63	2.7	0.07
1	Station 2	Worker 2	2.00	0.19	2.7	2.51
1	Station 3	Worker 3	1.73	0.48	2.7	2.22
1	Station 4	Worker 2	2.32	0.19	2.7	2.51
1	Station 5	Worker 3	2.55	0.48	2.7	2.22
1	Station 6	Worker 3	2.33	0.48	2.7	2.22
1	Station 7	Worker 6	1.93	0.48	2.7	2.22
1	Station 7	Worker 14	1.93	0.44	2.7	2.26
1	Station 8	Worker 1	2.12	2.53	2.7	0.17
1	Station 8	Worker 11	2.12	2.60	2.7	0.10
1	Station 9	Worker 16	1.96	2.61	2.7	0.09
1	Station 10	Worker 7	1.39	2.50	2.7	0.20
1	Station 10	Worker 8	1.39	2.50	2.7	0.20

ตารางที่ 4 แสดงเวลาทักกะของพนักงานที่ถูกจัดสรรเข้าสู่สถานีงาน ในลีดการผลิตที่ 1 พบว่าค่าเวลาทักกะการทำงาน (EffTime) ไม่ได้เกินค่า แท็คไทม์ที่กำหนด สามารถดูได้จากผลต่างของ Slack Time ที่เป็นค่าบวกทั้งหมด ซึ่งเป็นไปตามสมการเงื่อนไขที่ (17) สำหรับกรณีจัดสรรพนักงานเดี่ยวและสมการเงื่อนไขที่ (18) สำหรับกรณีจัดสรรพนักงานขนานกัน

ตารางที่ 5 แสดงการเปลี่ยนแปลงของเวลาทักกะในแต่ละทักกะที่ใช้งาน โดยเทียบระหว่างเวลาทักกะเมื่อเริ่มต้นกับเวลาทักกะสุดท้าย เมื่อสิ้นสุดลีดการผลิต โดยพนักงานที่ได้รับการจัดสรรให้ปฏิบัติงานซ้ำในทักกะเดิมจะมีเวลาทักกะที่ลดลงตามจำนวนครั้งที่มีการเรียนรู้สะสม เช่น W2, W6 และ W11 แสดงการลดลง

ของเวลาทักกะเฉลี่ยในระดับมากกว่า 20เปอร์เซ็นต์ ขณะที่บางพนักงาน เช่น W13 และ W15 ไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงของเวลา เนื่องจากไม่ได้รับการจัดสรรงาน โดยแต่ละทักกะได้มีเวลาทักกะลดลงเฉลี่ย 19.25 เปอร์เซ็นต์ และแต่ละพนักงานมีเวลาทักกะลดลงเฉลี่ย 13.55 เปอร์เซ็นต์

ผลลัพธ์จากการทดลองปรับสัดส่วนทักกะของพนักงานนำเสนอในรูปที่ 2 ถึงรูปที่ 4 และในตารางที่ 6 แสดงกราฟระยะเวลาที่ใช้ในการคำนวณหาผลเฉลี่ยที่ดีที่สุด โดยแต่ละเส้นภายในกราฟแทนกลุ่มพนักงานมีองค์ประกอบทักกะแตกต่างกัน แต่ละจุดข้อมูลเป็นค่าเฉลี่ยของระยะเวลาการคำนวณหาผลเฉลี่ย 10 ครั้ง



ตารางที่ 5 การเปลี่ยนแปลงของเวลาทักษะการทำงานโดยเทียบเวลาดั้งต้นกับเวลาผลิตลือตสุดท้าย
(แสดงเฉพาะพนักงานที่ถูกจัดสรรและทักษะที่ได้ใช้งานเท่านั้น กำหนดลือตการผลิต 9 ลือตการผลิต)

Worker	Skill	K1	K8	K10	K12	K13	K15	K17	Worker Average
W1		0%	0%	0%	0%	-18.55%	0%	0%	-18.55%
W2		0%	0%	0%	0%	-18.55%	-33.66%	0%	-26.11%
W3		0%	0%	0%	-30.17%	0%	0%	-5%	-17.59%
W4		0%	0%	-5%	0%	0%	0%	0%	-5.00%
W5		-5%	0%	-9.75%	-5%	0%	0%	0%	-6.58%
W6		0%	0%	0%	0%	-18.55%	0%	-30.17%	-24.36%
W7		0%	-22.62%	0%	0%	0%	0%	0%	-22.62%
W8		0%	-22.62%	0%	0%	0%	0%	0%	-22.62%
W9		0%	0%	-5%	0%	0%	0%	0%	-5.00%
W10		0%	0%	-5%	0%	0%	0%	0%	5.00%
W11		0%	-26.49%	0%	0%	-18.55%	0%	0%	-22.52%
W12		0%	0%	-5%	0%	0%	0%	0%	-5.00%
W13		0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0.00%
W14		0%	0%	-5%	0%	0%	0%	-33.66%	-19.33%
W15		0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0.00%
W16		-22.62%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	-22.62%
W17		-9.75%	0%	-5%	0%	0%	0%	0%	-7.38%
Skill Average		-12.46%	-23.91%	-5.68%	-17.59%	-18.55%	-33.66%	-22.94%	-13.55% -19.25%

จากการทดลองพบว่าเมื่อจำนวนพนักงานเพิ่มจาก 17 คน เป็น 34 คน และ 68 คน เวลาในการประมวลผลเพิ่มสูงขึ้นอย่างชัดเจน ซึ่งสอดคล้องกับลักษณะปัญหาการจัดสรรที่มีความซับซ้อน (Combinatorial Complexity) ในกรณีที่ลือตการผลิตจำนวนต่ำ เช่น 3 ลือต แบบจำลองคณิตศาสตร์สามารถหาผลเฉลยได้ในระดับวินาที สำหรับทุกสัดส่วนของทักษะ ขณะที่ลือตการผลิตมีจำนวนมากขึ้น ความซับซ้อนเพิ่มมากขึ้น จึงใช้เวลาในการคำนวณ

อย่างมาก โดยเฉพาะในกลุ่มพนักงาน 68 คน ในกรณีผลิต 9 ลือตการผลิต ไม่สามารถหาผลเฉลยได้ แสดงถึงข้อจำกัดของตัวแบบจำลองเมื่อการจัดสรรมีขนาดใหญ่เกินไป

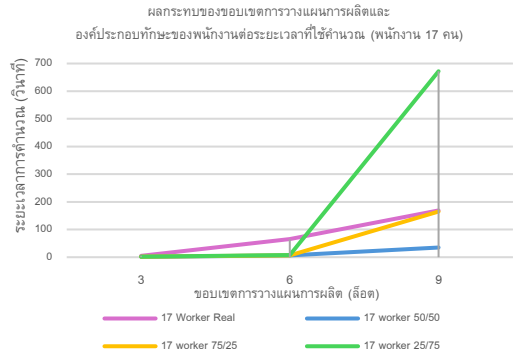
ในมุมมองสัดส่วนของทักษะพนักงาน เมื่อจำนวนพนักงานน้อย เช่น พนักงาน 17 คน 9 ลือตการผลิต สัดส่วนพนักงานส่วนใหญ่มีระดับทักษะสูง (75:25) แบบจำลองสามารถหาผลเฉลยได้เร็วกว่า เมื่อเทียบกับสัดส่วนพนักงานส่วนใหญ่มีระดับทักษะต่ำ (25:75)



แสดงว่าพนักงานที่มีระดับทักษะสูง เมื่อพนักงานทำงานได้เร็วแล้ว พนักงานคนนั้นจึงเข้าเงื่อนไขของข้อจำกัดของแท็คไทม์ ตัวแบบจำลองจึงทำการจัดสรรได้เร็วกว่า เมื่อเพิ่มจำนวนพนักงานเป็น 34 คน พบว่าสัดส่วนพนักงานส่วนใหญ่มีระดับทักษะต่ำ (25:75) แบบจำลองสามารถหาผลเฉลยได้เร็วกว่า เมื่อเทียบกับสัดส่วนพนักงานส่วนใหญ่มีระดับทักษะสูง (75:25) เพราะกลุ่มสัดส่วนพนักงานส่วนใหญ่มีระดับทักษะต่ำจำนวนมากที่เวลาทักษะเกินกว่าเงื่อนไขแท็คไทม์แบบจำลองจึงตัดพนักงานที่ไม่เข้าเงื่อนไขออกลดระดับของความซับซ้อนของตัวเลือกปัญหาจนส่งผลให้หาผลเฉลยได้เร็ว

6. สรุปและอภิปรายผลการวิจัย

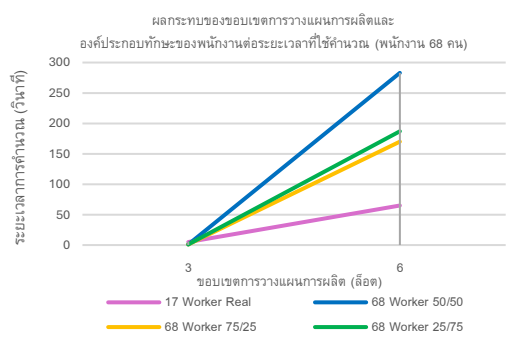
งานวิจัยนี้นำเสนอกรอบการจัดการข้อมูลและตัวแบบจำลองทางคณิตศาสตร์แบบเชิงเส้นจำนวนเต็มผสม (MILP) สำหรับสนับสนุนการจัดสรรกำลังคนตามทักษะในโรงงานผลิตเสื้อผ้าแบบผลิตตามคำสั่ง (Made-to-Order) กรอบการจัดการข้อมูลที่พัฒนาขึ้นช่วยกำหนดรูปแบบการรวบรวมและจัดเก็บข้อมูลทักษะ เวลาในการปฏิบัติงาน และข้อมูลผลิตภัณฑ์อย่างเป็นระบบ ทำให้หัวหน้างานสามารถจัดเตรียมข้อมูลสำหรับการวางแผนกำลังคนได้อย่างถูกต้องและมีมาตรฐานมากขึ้น ตัวแบบจำลองคณิตศาสตร์ซึ่งออกแบบมาเพื่อจัดสรรพนักงานให้เหมาะสมกับทักษะที่สถานงานต้องการ พร้อมรองรับการหมุนเวียนงาน (Job Rotation) ในขณะเดียวกันสามารถรักษาความสามารถในการผลิตให้เป็นไปตามกำหนดจัดส่ง



รูปที่ 2 ระยะเวลาที่ใช้ในการคำนวณ กรณีพนักงาน 17 คน



รูปที่ 3 ระยะเวลาที่ใช้ในการคำนวณ กรณีพนักงาน 34 คน



รูปที่ 4 ระยะเวลาที่ใช้ในการคำนวณ กรณีพนักงาน 68 คน

**ตารางที่ 6** สรุปเวลาเฉลี่ยผลการหาผลเฉลยในแต่ละการทดลอง

ลีดการ ผลิต	พนักงาน 17 คน				พนักงาน 34 คน			พนักงาน 68 คน		
	ข้อมูลจริง	50:50	75:25	25:75	50:50	75:25	25:75	50:50	75:25	25:75
3	5 sec.	1 sec.	2 sec.	2 sec.	2 sec.	2 sec.	1 sec.	1 sec.	1 sec.	1 sec.
6	65 sec.	6 sec.	7 sec.	8 sec.	17 sec.	18 sec.	13 sec.	283 sec.	170 sec.	187 sec.
9	169 sec.	35 sec.	165. sec.	672 sec.	368 sec.	706 sec.	39 sec.	Unsolved	Unsolved	Unsolved

ผลการทดสอบแบบจำลองด้วยข้อมูลจริงจากโรงงานจำนวนพนักงาน 17 คน และการจำลองเพิ่มเติมในกรณีขยายกำลังการผลิตเป็น 34 และ 68 คน พบว่าแบบจำลองสามารถให้คำตอบได้อย่างมีประสิทธิภาพในกรณีปัญหาที่มีขนาดเล็กถึงปานกลาง อย่างไรก็ตามเมื่อจำนวนพนักงานและจำนวนลีดการผลิตเพิ่มสูงขึ้น เช่น กรณี 68 คนและการผลิต 9 ลีด ความซับซ้อนของปัญหาเพิ่มแบบทวีคูณ ทำให้เวลาในการแก้ปัญหาเพิ่มขึ้นและไม่สามารถหาคำตอบได้ ซึ่งสะท้อนข้อจำกัดเชิงคำนวณของแบบจำลอง MILP เมื่อใช้กับปัญหาที่มีความใหญ่โต อาจต้องเปลี่ยนไปใช้วิธีหาคำตอบแบบฮิวริสติก

ในการใช้งานภาคปฏิบัติสามารถนำกรอบการจัดการข้อมูลที่พัฒนาขึ้นและตัวแบบจำลองคณิตศาสตร์นี้ ไปใส่ในโปรแกรมหาค่าเหมาะสม (Optimizer Solver) เช่น Excel solver หรือ IBM ILOG CPLEX ลดการพึ่งพาประสบการณ์ส่วนบุคคลของหัวหน้างาน เพิ่มความเชื่อมั่นว่าการจัดสรรงานยังคงผลิตได้ตามกำหนด และเพิ่มศักยภาพในการพัฒนาทักษะของพนักงานผ่านการหมุนเวียนงาน นอกจากนี้แบบจำลองยังสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมที่พึ่งพาทักษะแรงงานมนุษย์ เช่น การผลิตต่อัญมณีหรือเครื่องประดับ การผลิตเฟอร์นิเจอร์ และอุตสาหกรรมอาหารแปรรูป เป็นต้น ซึ่งจะทำให้การจัดสรรพนักงานมีความยืดหยุ่นมากขึ้น

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] D. Hettiachchi, V. Kostakos and J. Goncalves, A survey on task assignment in crowdsourcing, *ACM Computing Surveys*, 2022, 55(3), 49.
- [2] M. Calzavara, D. Battini, D. Bogataj, F. Sgarbossa and I. Zennaro, Ageing workforce management in manufacturing systems: State of the art and future research agenda, *International Journal of Production Research*, 2019, 58(3), 729–747.
- [3] S.E. Hashemi-Petroodi, A. Dolgui, S. Kovalev, M.Y. Kovalyov and S. Thevenin, Workforce reconfiguration strategies in manufacturing systems: A state of the art, *International Journal of Production Research*, 2021, 59(22), 6721–6744.
- [4] M. Aksoy, S. Yanik and M.F. Amasyali, Reviewer assignment problem: A systematic review of the literature, *Journal of Artificial Intelligence Research*, 2023, 76, 761–827.
- [5] L.A. Wolsey, *Integer Programming*, John Wiley & Sons, 2020.



- [6] G.A. Mitiku, Optimizing resource utilization using an assignment model in case of metal workshop operation, *Journal of Applied Research on Industrial Engineering*, 2025, 12(2), 194–210.
- [7] N. Katirae, M. Calzavara, S. Finco and D. Battini, Consideration of workforce differences in assembly line balancing and worker assignment problem, *IFAC-PapersOnLine*, 2021, 54(1), 13–18.
- [8] H. Durmaz and M. Koyuncu, Optimization of assignment problems in production lines with different skilled labor levels, *International Advanced Researches and Engineering Journal*, 2019, 3(2), 123–136.
- [9] O.F. Yılmaz, Robust optimization for U-shaped assembly line worker assignment and balancing problem with uncertain task times, *Croatian Operational Research Review*, 2020, 11(1), 229–239.
- [10] H.S. Han and C.K. Park, An optimized production assignment algorithm for custom-made garments, *Advances in Production Engineering and Management*, 2025, 20(2), 239–253.
- [11] N. Abdelsalam, F. Mohammoud, H. Eder, A.W.E. Abuyoussef, Ö. Kaya, A.C. Kilic and I. Ulku, A production line assignment problem for a textile industry, *Journal of Engineering Sciences and Design*, 2023, 11(1), 22–32.
- [12] N. Bao, X. Zheng, Y. Fan, A. Simeone and R. Bao, Enhancing garment manufacturing efficiency through human-centered scheduling, *Production Engineering*, 2025, 19, 885–898.
- [13] Z. Xie, J. Du, Q. Chen and X. Wang, Enhancing the labor division in the balancing of apparel assembly lines with parallel workstation through an improved ant colony algorithm, *Journal of Engineered Fibers and Fabrics*, 2021, 16.
- [14] R.W.M. Kong, D. Ning and T.H.T. Kong, Mixed-integer linear programming (MILP) for garment line balancing, *International Journal of Scientific Research and Modern Technology*, 2025, 4(2), 64–77.
- [15] G.Y.H. Chen, P.S. Chen, J.F. Dang, S.L. Kang and L.J. Cheng, Applying meta-heuristics algorithm to solve assembly line balancing problem with labor skill level in garment industry, *International Journal of Computational Intelligence Systems*, 2021, 14(1), 1438–1450.



การพัฒนาอุปกรณ์จับยึดชิ้นงานเพื่อลดเวลาการผลิตในงานเจาะลูกลับบนเครื่องกัดซีเอ็นซี

ณัฐภัทร กาญจนเรืองรอง และ ศรีนยา ประทีปชนะชัย*

สาขาวิชาวิศวกรรมการจัดการอุตสาหกรรม, คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม, มหาวิทยาลัยราชภัฏราชนครินทร์

* ผู้ประสานงานเผยแพร่ (Corresponding Author), E-mail: sarinya@techno.rru.ac.th

วันที่รับบทความ: 2 ตุลาคม 2568; วันที่ทบทวนบทความ: 8 ธันวาคม 2568; วันที่ตอบรับบทความ: 26 มกราคม 2569

วันที่เผยแพร่ออนไลน์: 17 เมษายน 2569

บทคัดย่อ: งานวิจัยครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อออกแบบและพัฒนาอุปกรณ์จับยึดที่เหมาะสมกับชิ้นงานลูกลับในกระบวนการเจาะด้วยเครื่องกัด CNC โดยมุ่งเน้นการลดรอบเวลาในการทำงานและเพิ่มอัตราการผลิตของบริษัทกรณีศึกษา การดำเนินงานวิจัยใช้การวิเคราะห์ปัญหาจากแผนภาพทำไม-ทำไม แผนภูมิมือซ้าย-มือขวา เพื่อนำไปสู่การปรับปรุงกระบวนการตามหลักการ ECRS ผลการศึกษาพบว่า ปัญหาเกิดขึ้นจากการใช้หัวจับสามปากซึ่งสามารถจับยึดชิ้นงานได้ครั้งละหนึ่งชิ้นต่อรอบการทำงาน จึงได้มีการออกแบบและสร้างอุปกรณ์จับยึดชิ้นงานที่สามารถรองรับการผลิตได้ครั้งละ 9, 12 และ 16 ชิ้นต่อรอบการทำงาน หลังการทดสอบการผลิตลูกลับ 12 ชิ้นพบว่าค่าความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งรูเจาะไม่เกิน 0.02 มิลลิเมตร พิกัดขนาดรูเจาะเท่ากับ +0.020 มิลลิเมตร และพิกัดเพลาท่ากับ -0.004 มิลลิเมตร และไม่พบชิ้นงานเสีย รอบเวลาการทำงานเฉลี่ยลดลงจาก 43.55 วินาทีต่อชิ้น เหลือ 42.53 วินาทีต่อชิ้น ส่งผลให้อัตราการผลิตเพิ่มขึ้นจาก 82.66 ชิ้นต่อชั่วโมง เป็น 84.65 ชิ้นต่อชั่วโมง คิดเป็นการเพิ่มขึ้นร้อยละ 2.40 การวิเคราะห์ต้นทุนพบว่า ปริมาณการผลิตขั้นต่ำที่ทำให้กระบวนการเจาะรูชิ้นงานลูกลับคุ้มทุนคือ 257 ชุดต่อปี

คำสำคัญ: อุปกรณ์จับยึดชิ้นงาน; เครื่องกัดซีเอ็นซี; รอบเวลาการผลิต; แผนภาพทำไม-ทำไม; แผนภูมิการทำงานมือซ้าย-มือขวา; อีซีอาร์เอส; การศึกษาการทำงาน

Development of Workholding Fixture for Cycle Time Reduction in Flywheel Pulley Drilling on CNC Milling Machine

Nattapat Kanchanaruangrong and Sarinya Prateepchanachai*

Department of Industrial Management Engineering, Faculty of Industrial Technology,
Rajabhat Rajanagarindra University

* Corresponding author, E-mail: sarinya@techno.rru.ac.th

Received: 2 October 2025; Revised: 8 December 2025; Accepted: 26 January 2026

Online Published: 17 April 2026

Abstract: This research sought to develop and construct a suitable fixture for flywheel workpieces during the drilling process using a CNC milling machine, focusing on reducing cycle time and enhancing the manufacturing productivity of the case organization of the study. The research technique employed problem analysis with Why-Why Analysis and Left and Right Hand Charts to facilitate process enhancement grounded in the ECRS principle. The research found that the present problem resulted from the use of a three-jaw chuck, which could hold only a single workpiece every cycle. A new fixture was designed and manufactured to accommodate 9, 12, and 16 workpieces each cycle. Experimental findings from drilling 12 flywheel workpieces indicated that the hole position tolerance did not surpass 0.02 millimeters, the hole size tolerance is +0.020 millimeters, and the shaft tolerance is -0.004 millimeters, and no defective workpieces were detected. The average cycle time decreased from 43.55 seconds per piece to 42.53 seconds per piece, leading to an increase in the manufacturing productivity from 82.66 pieces per hour to 84.65 pieces per hour, representing an enhancement of 2.40%. The break-even analysis indicated that the minimum production volume required for the flywheel drilling process to be cost-effective is 257 sets per year.

Keywords: Fixture; CNC Milling Machine; Cycle Time; Why-Why Analysis; Left and Right Hand Chart; ECRS; Work Study



1. บทนำ

อุตสาหกรรมยานยนต์และชิ้นส่วนเครื่องจักรกลในปัจจุบันมีการขยายตัวอย่างต่อเนื่อง ส่งผลให้ความต้องการผลิตภัณฑ์โลหะที่มีความแข็งแรง ความเที่ยงตรง และคุณภาพมาตรฐานเพิ่มสูงขึ้น โดยเฉพาะชิ้นส่วนสำคัญประเภทลูกล้อ (Flywheel Pulley) ผลิตจากเหล็กกล้าเครื่องมือชนิด SKS3 ซึ่งเป็นวัสดุที่สามารถชุบแข็งด้วยน้ำมันได้ง่าย หลังการอบชุบมีค่าความแข็งประมาณ 58-62 HRC เหมาะสมสำหรับงานที่ต้องการความทนทานต่อการสึกหรอในระดับปานกลาง ลักษณะของชิ้นงานเป็นทรงกระบอก ซึ่งชิ้นงานลูกล้อนำหน้าที่เป็นชิ้นส่วนถ่ายทอดกำลังและสร้างความสมดุลจะอยู่ในระบบเครื่องยนต์หรือตัวส่งกำลัง เช่น เครื่องยนต์สันดาปภายใน เครื่องจักรกล หรือเครื่องยนต์ของรถยนต์ กระบวนการผลิตชิ้นงานดังกล่าวจึงจำเป็นต้องอาศัยเทคโนโลยีการผลิตที่มีความแม่นยำสูง มีความต้องการให้ใช้เวลาในการผลิตที่น้อยลงได้ปริมาณมาก และมีความจำเป็นที่ต้องตอบสนองความต้องการของลูกค้าโดยมุ่งที่ผลิตสินค้าที่มีคุณภาพ ซึ่งเป็นหัวใจสำคัญในการแข่งขันทางด้านธุรกิจ [1]

บริษัท ตรีศึกษา เป็นบริษัทผู้ผลิตชิ้นส่วนที่ใช้ในอุตสาหกรรมยานยนต์ เครื่องจักรกล และอุตสาหกรรมทั่วไป ประกอบธุรกิจด้านการบริการขึ้นรูปโลหะทุกชนิด โดยมีกระบวนการผลิตที่หลากหลาย เช่น การตีโลหะ การอัดขึ้นรูป งานเจาะ การตอกพิมพ์ และการรีด รวมถึงการผลิตด้วยเทคโนโลยีการผสมโลหะผง เพื่อตอบสนองต่อความต้องการของอุตสาหกรรมการผลิตชิ้นส่วนโลหะที่ต้องการทั้งความแข็งแรง ความเที่ยงตรง และคุณภาพมาตรฐาน จากการศึกษาข้อมูลของบริษัท ตรีศึกษา การผลิตในกระบวนการเจาะลูกล้อด้วย

เครื่องกัดอัตโนมัติ (Computer Numerical Control: CNC) ที่ผ่านมาของโรงงานพบว่า การเจาะชิ้นงานลูกล้อนั้นเกิดความล่าช้า โดยใช้หัวจับสามปากจับยึดชิ้นงานลูกล้อเพื่อทำการเจาะรูชิ้นงาน แม้ว่าวิธีการดังกล่าวจะช่วยเพิ่มความรวดเร็วในการปฏิบัติงาน และสะดวกต่อการจับยึดชิ้นงานที่มีลักษณะเป็นทรงกระบอก แต่ความเที่ยงตรงในการปรับศูนย์ของหัวจับชนิดดังกล่าวยังน้อยกว่าหัวจับสี่ปาก แต่ก็ยังคงมีข้อจำกัดบางประการที่ส่งผลต่อความล่าช้าในการปฏิบัติงานผลิต นอกจากนี้ในขั้นตอนการติดตั้งชิ้นงานจำเป็นต้องใช้แรงงานในการจัดวางชิ้นงานลูกล้อนลงในหัวจับสามปากและขัน สกรูเพื่อยึดให้อยู่กับที่ จากนั้นจึงทำการเจาะรูลูกล้อด้วยเครื่องกัด CNC วิธีการดังกล่าวสามารถดำเนินการได้เพียงครั้งละหนึ่งชิ้นต่อรอบการทำงาน ซึ่งเป็นข้อจำกัดที่ส่งผลให้รอบเวลาการผลิต (Cycle Time) ยาวนานและมีอัตราการผลิตต่ำ ด้วยเหตุนี้ จึงควรหาแนวทางในการปรับปรุงกระบวนการเจาะลูกล้อ ซึ่งในปัจจุบันดำเนินการได้เพียงครั้งละหนึ่งชิ้นต่อรอบการทำงานเพื่อแก้ไขข้อจำกัดดังกล่าว

จากการทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องพบว่า ปัญญา และคณะ [2] ได้ศึกษาการปรับปรุงประสิทธิภาพในการผลิตสินค้าตามฤดูกาลด้วยการศึกษาการเคลื่อนไหวและเวลา ร่วมกับออกแบบอุปกรณ์จับยึดในการลดความสูญเปล่าในการทำงานงานวิจัยดังกล่าวมีวัตถุประสงค์เพื่อเพิ่มผลผลิตของชิ้นส่วนสปริงเกอร์ ผ่านการเปรียบเทียบผลก่อนและหลังปรับปรุง โดยใช้แผนภูมิฝีมือชายและมือขวา ซึ่งเป็นเครื่องมือการวิเคราะห์การเคลื่อนไหวและเวลา เพื่อช่วยประเมินและปรับปรุงวิธีการทำงาน การใช้หลักการ ECRS ในการออกแบบจัดการของมือซ้ายและมือขวา



ใหม่ทั้งสองข้าง ซึ่งเป็นแนวทางสำคัญในการปรับปรุงกระบวนการทำงานเพื่อลดขั้นตอน ลดเวลา และใช้ทรัพยากรอย่างเหมาะสม แสดงให้เห็นว่างานวิจัยก่อนหน้านี้ได้ใช้การวิเคราะห์การเคลื่อนไหวและเวลา รวมถึงการออกแบบอุปกรณ์จับยึดเป็นแนวทางหลักในการเพิ่มผลผลิต นอกจากนี้ งานวิจัยของชิตชณู และศุภชัย [3] ได้ศึกษาการเพิ่มอัตราการทำงานของเครื่องจักรบีบโลหะแผ่นด้วยหลักการ ECRS ในการจัดเรียงวิธีการทำงานใหม่รวมไปถึงการออกแบบพื้นที่วางแผ่นเหล็กเพื่อลดเวลาในการจัดเตรียมวัสดุตัด และจัดเตรียมแผ่นเหล็กก่อนการผลิตเพื่อเพิ่มอัตราการทำงานของเครื่องจักรบีบโลหะแผ่น ในขณะที่เดียวกัน งานวิจัยของรพจน์ และคณะ [4] ได้ศึกษาการปรับปรุงกระบวนการประกอบชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ด้วยเทคนิค ECRS ซึ่งช่วยยกระดับประสิทธิภาพการทำงานของกระบวนการผลิตได้อย่างชัดเจน จะเห็นได้ว่า งานวิจัยที่ผ่านมาได้แสดงให้เห็นถึงบทบาทสำคัญของการประยุกต์ใช้หลักการ ECRS ในการปรับปรุงกระบวนการทำงานเพื่อลดเวลา ลดขั้นตอน และช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของกระบวนการผลิต

งานวิจัยนี้เป็นการออกแบบและสร้างอุปกรณ์จับยึดที่มีความเหมาะสมกับลักษณะชิ้นงานลูกกล้อเพื่อลดรอบเวลาการทำงานในกระบวนการเจาะด้วยเครื่องกัด CNC จากการศึกษางานวิจัยที่ผ่านมา พบว่าสามารถประยุกต์ใช้หลักการศึกษาค้นคว้าเคลื่อนไหวและเวลา ร่วมกับออกแบบอุปกรณ์จับยึด และหลักการ ECRS เพื่อใช้ในการลดความสูญเปล่าในการทำงานส่งผลให้สามารถเพิ่มอัตราการผลิตได้มากขึ้น อีกทั้งยัง

เป็นการยกระดับขีดความสามารถในการแข่งขันของสถานประกอบการ ตลอดจนรองรับการขยายอัตราการผลิตในอนาคตได้อย่างมีประสิทธิภาพ

2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 การบันทึกวิธีการทำงาน

ในขั้นตอนการศึกษาวิธีการทำงาน ผู้วิจัยเลือกงานที่จะศึกษาจากปัญหาความล่าช้าเกี่ยวกับวิธีการทำงานของพนักงานที่ปฏิบัติงานเจาะรูชิ้นงานลูกกล้อด้วยเครื่องกัด CNC ซึ่งมีลักษณะเป็นการทำงานที่ทำซ้ำรูปแบบเดิม มีผลกระทบต่อคุณภาพและระยะเวลาการจัดส่งสินค้า การศึกษาเพื่อปรับปรุงงานให้เหมาะสมตามหลักเศรษฐศาสตร์แห่งการเคลื่อนไหวจะช่วยให้พนักงานทำงานอย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น ดำเนินการวิเคราะห์การปฏิบัติงานโดยใช้แผนภูมิมือซ้ายและมือขวา (Left and Right Hand Chart) เป็นแผนภูมิที่ใช้บันทึกการทำงานของมือทั้งสองที่ได้จากตารางที่ 1 การวิเคราะห์การทำงานของพนักงานในการศึกษาขั้นตอนของการปฏิบัติงาน ณ จุดต่างๆ ซึ่งใช้สัญลักษณ์ในการวิเคราะห์ชุดเดียวกันกับสัญลักษณ์ที่ใช้ในการวิเคราะห์กระบวนการ แต่มีความหมายที่เปลี่ยนไปเพื่อให้เหมาะสมกับการทำงานของมือโดยมีเพียง 4 สัญลักษณ์ [5] ได้แก่ การปฏิบัติงาน การเคลื่อนไหวมือ มือว่าง และการถือ ซึ่งแต่ละสัญลักษณ์มีความหมายการปฏิบัติงานด้วยมือซ้ายและมือขวาที่แตกต่างกัน ดังนี้



ตารางที่ 1 สัญลักษณ์ที่ใช้บันทึกและคำจำกัดความของแผนภูมิ Left and Right Hand Chart

สัญลักษณ์	ชื่อเรียก	ความหมาย
□	การปฏิบัติงาน (Operation)	การใช้มือหยิบจับชิ้นงานหรือสิ่งของ การจัดตั้งการปล่อยวัตถุออกจากมือ
⇒	การเคลื่อนมือ (Transportation)	การเคลื่อนของมือจากจุดหนึ่ง ไปยังอีกจุดหนึ่ง
D	มือว่าง (Delay)	ช่วงเวลาที่มืออยู่ว่าง โดยไม่ได้ทำงานอะไรเลย
▽	การถือ (Hold)	กำลังถือของอยู่ในมือเพื่อให้อีกมือหนึ่งทำงานบนวัตถุนั้นหรือรองาน

2.2 เทคนิค Why-Why Analysis

การวิเคราะห์ทำไม-ทำไม (Why-Why Analysis) คือ แผนภาพแสดงความสัมพันธ์ของข้อมูลโดยใช้การตั้งชุดคำถามเพื่อทำการวิเคราะห์หาสาเหตุของปัญหาที่เกิดขึ้น ในแต่ละคำถามจะช่วยให้ผู้สนใจค้นหาปัญหาหลักหรือสาเหตุหลักของปัญหาได้ ประกอบด้วยกระบวนการถามทำไม (Why) จนสามารถพบปัญหาที่แท้จริงได้โดยทั่วไปนิยมถามทำไมประมาณ 3-5 ครั้ง โครงสร้างของการประยุกต์ใช้เทคนิค การวิเคราะห์ทำไม-ทำไม ประกอบไปด้วยส่วนท้ายสุดจะเป็นการกำหนดหัวข้อปัญหาหรือปรากฏการณ์ที่ต้องการแก้ไข หลังจากนั้นจะทำการถามคำถามทำไม จนกว่าจะพบสาเหตุรากเหง้าของปัญหา [6]

2.3 การปรับปรุงกระบวนการทำงานตามหลักการ ECRS

หลักการลดความสูญเปล่า (ECRS) ประกอบด้วย การกำจัด (Eliminate) การรวมกัน (Combine) การ จัดใหม่ (Rearrange) และการทำให้ง่าย (Simplify) ซึ่งเป็นแนวทางที่มีประสิทธิภาพในการเริ่มลดความสูญเปล่าอย่างมีประสิทธิภาพ โดยแนวทางการลดความสูญเปล่าลงสามารถทำได้โดยอาศัย 4 หลักการที่เรียกสั้น ๆ ว่า ECRS ดังนี้

1. การกำจัด (Eliminate) หมายถึง การวิเคราะห์กระบวนการปัจจุบันและการขจัดความสูญเปล่าทั้ง 7 ประการที่มีอยู่ในกระบวนการผลิต
2. การรวมกัน (Combine) สามารถลดการทำงานที่ไม่จำเป็นโดยการพิจารณาว่าสามารถลดขั้นตอนการทำงานได้หรือไม่
3. การจัดใหม่ (Rearrange) หมายถึง การปรับเปลี่ยนขั้นตอนการผลิตเพื่อให้ลดการเคลื่อนไหวที่ไม่จำเป็นหรือการรอคอย
4. การทำให้ง่าย (Simplify) หมายถึง การปรับปรุงกระบวนการทำงานให้มีความสะดวกและง่ายตายยิ่งขึ้น โดยอาจออกแบบจิ๊ก (Jig) หรืออุปกรณ์จับยึด (Fixture) เพื่อเพิ่มความ สะดวกและความแม่นยำในการดำเนินงาน [1]

3. วิธีการวิจัย

การศึกษาค้นคว้าครั้งนี้มุ่งเน้นการสำรวจและรวบรวมข้อมูลพื้นฐานของโรงงานอุตสาหกรรม รวมถึงสภาพการทำงานจริงในขั้นตอนการเจาะรูชิ้นงานลูกล้อ เพื่อนำข้อมูลดังกล่าวมาวิเคราะห์หาสาเหตุของการสูญเสียเวลาในกระบวนการผลิต จากนั้นจึงกำหนดแนวทางแก้ไขที่สามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้จริง พร้อมทั้ง



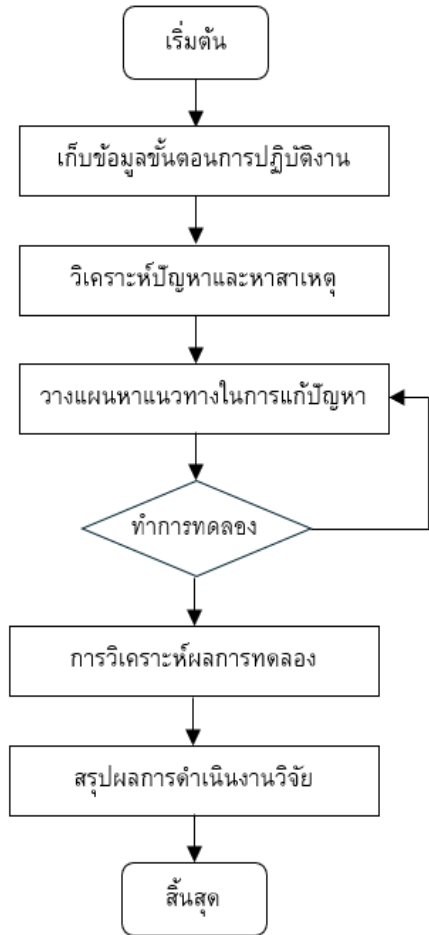
ประเมินผลลัพธ์อย่างเป็นระบบและตรวจสอบได้ ซึ่งวิธีการดำเนินงานในครั้งนี้ มีขั้นตอนดังแสดงในรูปที่ 1

3.1 ศึกษาสภาพปัจจุบัน

จากการศึกษาการใช้งานเครื่องจักรในงานวิจัยคือ CNC Milling Dahlih MCV-1450 แบบ Vertical Machining Center สำหรับงานกัดและเจาะที่ต้องการความแม่นยำสูง ควบคุมด้วยระบบ FANUC OI-MC รองรับการทำงานหลายแกน มีระยะเคลื่อนที่แกน Z สูงสุด 750 มิลลิเมตร พร้อมโต๊ะเจาะแบบหมุน (แกนที่ 4) สำหรับปรับมุมชิ้นงาน โต๊ะงานขนาด 1,600 × 880 มิลลิเมตร รองรับชิ้นงานขนาดใหญ่

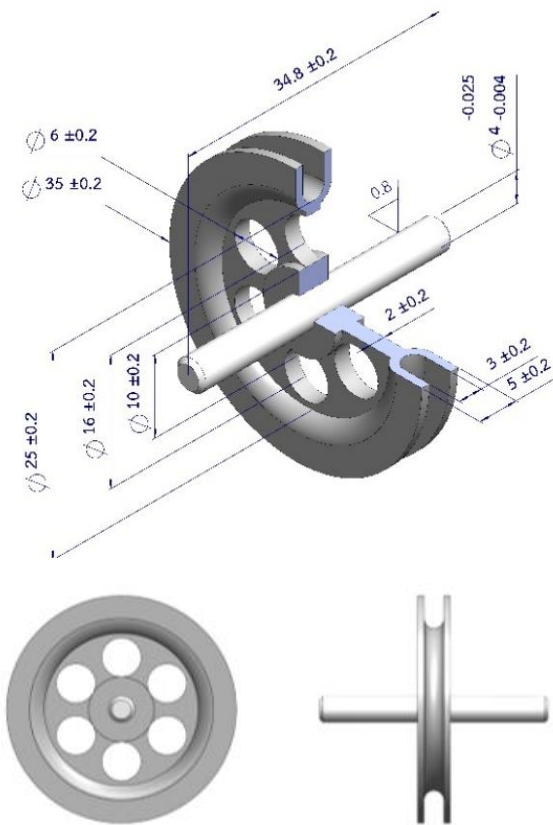
โครงสร้างแข็งแรง ลดการสั่นสะเทือน และเหมาะสำหรับใช้งานร่วมกับอุปกรณ์จับยึดที่ออกแบบเฉพาะเพื่อช่วยลดเวลาและเพิ่มประสิทธิภาพในการเจาะรู ชิ้นงานลูกกล้อ การทดลองเจาะรูชิ้นงานด้วยเครื่องกัด CNC ใช้เงื่อนไขการเจาะที่กำหนดไว้ ได้แก่ ความเร็วรอบ (Drilling Speed) 1,500 รอบต่อนาที และอัตราป้อน (Feed Rate) 200 มิลลิเมตรต่อนาที ซึ่งถูกกำหนดให้เป็นค่ามาตรฐานในการดำเนินการทดลอง กระบวนการผลิตในส่วนของการละเอียดชิ้นงาน ลูกกล้อทำจากเหล็กกล้าเครื่องมือชนิด SKS3 ซึ่งเป็นเหล็กกล้าคาร์บอนที่สามารถชุบแข็งด้วยน้ำมันได้ง่าย หลังการอบชุบจะมีค่าความแข็งประมาณ 58-62 HRC ซึ่งเหมาะสมสำหรับงานที่ต้องการความทนทานต่อการสึกหรอในระดับปานกลาง

ในรูปที่ 2 แสดงลักษณะของชิ้นงานเป็นทรงกระบอกกลม มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 มิลลิเมตร และความหนา 34.80 มิลลิเมตร บริเวณรูด้านในมีระยะระหว่างรู 16 มิลลิเมตร ($\varnothing 16 H7$) โดยกำหนดค่าความคลาดเคลื่อนไว้ที่ $+0/+0.015$ มิลลิเมตร



รูปที่ 1 ขั้นตอนการดำเนินงาน

ด้านปากรูมีการเจาะร่องขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 24.5 มิลลิเมตร รูรอบวงกำหนดจำนวน 6 รู ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 มิลลิเมตร เจาะทะลุทั้งหมด และกำหนดบนวงกลมพิกัด (Pitch Circle Diameter: PCD) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 35 มิลลิเมตร นอกจากนี้ยังมีการลบคมที่ขอบชิ้นงานด้วยขนาด $0.50 \times 45^\circ$ เพื่อป้องกันอันตรายจากคมเหล็กและเพิ่มความเรียบร้อยให้กับชิ้นงาน



รูปที่ 2 แบบภาพเขียนชิ้นงานลูกล้อ 3 มิติ

3.2 การเก็บข้อมูลขั้นตอนการปฏิบัติงาน

ผู้วิจัยได้เก็บข้อมูลกระบวนการเจาะลูกล้อบนเครื่องกัด CNC ก่อนปรับปรุง โดยเริ่มจากการเตรียมชิ้นงานและหัวจับสามปาก ตรวจสอบขนาด รูปร่าง และคุณภาพของชิ้นงานให้ตรงตามที่กำหนด รวมทั้งตรวจสอบหัวจับสามปากมาตรฐานให้อยู่ในสภาพพร้อมใช้งาน จากนั้นนำชิ้นงานลูกล้อใส่ในหัวจับสามปาก จัดแนวให้ใกล้ตำแหน่งกึ่งกลางมากที่สุด เพื่อให้การเจาะรูเป็นไปตามแบบที่กำหนด จากนั้นทำ

การขันหัวจับทั้งสามปากให้แน่นและเท่ากัน เพื่อให้แรงกดกระจายสม่ำเสมอและชิ้นงานอยู่ในตำแหน่งที่มั่นคง ขั้นตอนการเปิดและตั้งค่าเครื่อง CNC เมื่อชิ้นงานถูกยึดไว้แน่นหนาแล้วจึงทำการเปิดเครื่องกัด CNC และตรวจสอบระบบที่เกี่ยวข้อง เช่น ระบบหล่อเย็นและการหล่อลื่น จากนั้นเรียกใช้โปรแกรมที่เกี่ยวข้องกับการเจาะ ตั้งค่าพารามิเตอร์การทำงาน เช่น ความเร็วรอบ อัตราป้อน ความลึกในการเจาะ และตำแหน่งรูเจาะที่ต้องการ ตามรหัส G-code/M-code ของโปรแกรมเครื่องกัด CNC ที่เตรียมไว้ เพื่อให้การทำงานเป็นไปตามที่กำหนด

ในขั้นตอนการดำเนินงานโดยการเจาะรูบนชิ้นงานลูกล้อ 1 ขั้นตอนรอบการทำงาน กระบวนการเจาะจะดำเนินการตามโปรแกรม CNC โดยเจาะรูตามจำนวนและตำแหน่งที่กำหนด จำนวน 6 รู จะได้ชิ้นงานลูกล้อหลังเจาะรู 1 ขั้นตอนรอบการทำงาน มีรอบเวลาการทำงานต่อชิ้นในสภาพก่อนการปรับปรุง เท่ากับ 43.55 วินาที ดังรูปที่ 3 ในระหว่างการเจาะต้องควบคุมการทำงานของระบบหล่อเย็นและตรวจสอบสภาพการตัดเพื่อป้องกันปัญหาดอกสว่านหักหรือเกิดการไหม้ของชิ้นงานและขั้นตอนการหยุดการทำงานและนำชิ้นงานออก เมื่อการเจาะเสร็จสิ้นจะทำการหยุดการทำงานของเครื่อง ปิดโปรแกรม และปล่อยให้ดอกสว่านหยุดหมุนอย่างสมบูรณ์ จากนั้นคลายหัวจับทั้งสามปากออกจากเครื่อง เพื่อนำชิ้นงานออกและทำการตรวจสอบรูเจาะว่ามีตำแหน่งและขนาดตรงตามแบบหรือไม่ โดยปกติชิ้นงานมีอัตราความเสียหายน้อยมากหรือไม่มีเลยสามารถส่งมอบงานได้ตามกำหนด และหากมีคมเหลื่ออยู่จะต้องทำการลบคม เพื่อความเรียบร้อยและความปลอดภัยในการใช้งาน



3.3 การวิเคราะห์

3.3.1 เทคนิค Why-Why Analysis

จากการศึกษาเบื้องต้นเกี่ยวกับกระบวนการเจาะรูชิ้นงานลูกล้อด้วยเครื่องกัด CNC ในตารางที่ 2 ดำเนินการระบุปัญหากระบวนการเจาะรูชิ้นงานลูกล้อด้วยเครื่องกัด CNC ที่ต้องการแก้ไข พบว่าปัญหาหลักที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการผลิต คือ ความล่าช้าจากการเจาะรูบนชิ้นงานในแต่ละรอบการทำงาน ลูกล้อ 1 ชิ้น จำนวนเจาะ 6 รู สามารถผลิตได้ครั้งละ 1 ชิ้นต่อรอบการทำงานเท่านั้น ปัญหาดังกล่าวส่งผลกระทบต่อโดยตรงต่อความสามารถในการจัดส่งให้ทันตามกำหนดเวลา และอาจสร้างความไม่พึงพอใจต่อลูกค้าหรือผู้รับบริการ

การวิเคราะห์สาเหตุหลักของความล่าช้ากระบวนการเจาะรูชิ้นงานลูกล้อด้วยเครื่องกัด CNC ใช้เทคนิค Why-Why Analysis เพื่อทำความเข้าใจปัญหาเชิงระบบ โดยอาศัยการตั้งคำถามเชิงเหตุผลอย่างต่อเนื่อง เพื่อวิเคราะห์หารากของปัญหาต่อกระบวนการทำงาน ปัญหาหลักที่พบ คือ พนักงานใช้เวลานานในการเจาะรูชิ้นงานลูกล้อด้วยเครื่องกัด CNC เมื่อทำการวิเคราะห์ด้วยขั้นตอนการตั้งคำถามจะได้คำตอบ ดังตารางที่ 3 แสดงให้เห็นว่าสาเหตุความล่าช้าจากกระบวนการเจาะรูชิ้นงานลูกล้อด้วยเครื่องกัด CNC นั้น เกิดปัญหาจากกระบวนการใช้หัวจับสามปากซึ่งถูกออกแบบให้จับชิ้นงานได้ครั้งละ 1 ชิ้นต่อรอบการทำงาน ซึ่งโรงงานยังไม่มีอุปกรณ์จับยึดชิ้นงานแบบหลายชั้น ส่งผลกระทบต่อรอบเวลาในการผลิตสูง และอัตราการผลิตต่ำ ดังนั้น ผู้วิจัยจึงดำเนินการศึกษา และพัฒนาแนวทางแก้ไขปัญหาดังกล่าว โดยออกแบบและพัฒนาอุปกรณ์จับยึดเฉพาะงานให้รองรับ



ก) ชิ้นงานลูกล้อก่อนเจาะรู



ข) ชิ้นงานลูกล้อใส่ในหัวจับสามปาก



ค) เจาะรูบนชิ้นงานลูกล้อ 1 ชิ้นต่อรอบการทำงาน



ง) ชิ้นงานลูกล้อหลังเจาะรู 1 ชิ้นต่อรอบการทำงาน

รูปที่ 3 ขั้นตอนการเจาะรูชิ้นงานลูกล้อบนเครื่องเจาะ CNC ก่อนปรับปรุง

การเจาะหลายชั้นต่อรอบ เพื่อช่วยลดเวลาในการทำงานสอดคล้องกับงานวิจัยของ สุชาติ และ สมชาย [7] ใช้หลักการ Why-Why Analysis เพื่อวิเคราะห์ถึงปัญหาที่เกิดขึ้นพร้อมทั้งการหาแนวทางแก้ไข โดยหลังการปรับปรุงแก้ไขไม่พบปัญหาของเสีย ลดรอบเวลาในการทำงาน สามารถบรรลุวัตถุประสงค์ที่กำหนดไว้ และผลจากการวิเคราะห์ยังพบว่า ปัญหาจากดอกสว่านเจาะรูชิ้นงานที่มีการใช้ดอกสว่านเหล็กกล้าความเร็วสูง เกิดแรงเสียดทานสูงและความร้อน ทำให้คมกัดสึกเร็วจึงไม่สามารถรองรับอัตราการผลิตได้ จำเป็นต้องถอดดอกสว่านออกมาลับคมดอกสว่านบ่อย เมื่อลูกค้าเพิ่มยอด



การสั่งซื้อมากขึ้นต้องเปลี่ยนไปใช้ดอกสว่านคาร์ไบด์ มีความแข็งแรงและทนต่อการสึกหรอมากกว่าเพื่อเพิ่มอายุการใช้งาน ลดความถี่ในการเปลี่ยนหรือลับคม ปรับความเร็วรอบและอัตราป้อนในการเจาะ และใช้น้ำหล่อ

เย็นลดความร้อน และการสึกหรอเพื่อรักษาประสิทธิภาพการผลิตให้สอดคล้องกับความต้องการของตลาด

ตารางที่ 2 การระบุปัญหากระบวนการเจาะรูชิ้นงานลูกล้อด้วยเครื่องกัด CNC ที่ต้องการแก้ไข

ประเด็น	รายละเอียด
1. ลักษณะธุรกิจ	บริษัทผู้ผลิตชิ้นส่วนโลหะสำหรับอุตสาหกรรมยานยนต์ โดยเฉพาะงานแปรรูปและการขึ้นรูปชิ้นงานลูกล้อ
2. ปัญหาที่เกิดขึ้น	การเจาะรูบนชิ้นงานลูกล้อ 1 ชิ้นซึ่งมีจำนวน 6 รู สามารถทำได้ครั้งละ 1 ชิ้นต่อรอบการทำงาน ทำให้เกิดความล่าช้า (ความต้องการผลิต จำนวนเฉลี่ย 120 ชิ้นต่อปี ซึ่งเป็นไปตามความต้องการ แต่ใช้เวลานาน)
3. ผลกระทบที่เกิดขึ้น	รอบเวลาในการผลิตต่อชิ้นงานสูง โดยการเจาะจำนวน 6 รู จะได้ชิ้นงานลูกล้อหลังเจาะรู 1 ชิ้นต่อรอบการทำงาน ที่มีรอบเวลาการทำงานต่อชิ้นเท่ากับ 43.55 วินาที ส่งผลให้อัตราการผลิตลดลง
4. แนวทางที่จะแก้ไข	ออกแบบและพัฒนาอุปกรณ์จับยึดชิ้นงานสำหรับเครื่องกัด CNC ที่สามารถจัดเรียง และเจาะชิ้นงานลูกล้อได้หลายชิ้นใน 1 รอบการทำงาน เพื่อลดเวลาการผลิตและเพิ่มความสะดวกในการทำงาน
5. ตัวชี้วัดความสำเร็จของการแก้ไข	รอบเวลาในการผลิตต่อชิ้นลดลงเพื่อเปรียบเทียบกับกระบวนการเดิม อัตราการผลิตเพิ่มขึ้น และคุณภาพชิ้นงานอยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน

ตารางที่ 3 การวิเคราะห์ Why-Why Analysis

What	Why	Why	Why	Why
กระบวนการ เจาะรูชิ้นงาน ลูกล้อด้วย เครื่องกัด CNC เกิด ความล่าช้า	1. ปัญหาจาก กระบวนการเจาะ ผลิตได้ครั้งละ 1 ชิ้นต่อรอบการ ทำงาน	- ใช้หัวจับสาม ปากสามารถจับ ยึดชิ้นงานได้ครั้ง ละ 1 ชิ้นเท่านั้น	- การออกแบบวิธีการ ทำงานมีเพียงการเลือกใช้ หัวจับสามปากจับยึดได้ เพียงครั้งละ 1 ชิ้น	- โรงงานยังไม่มี การออกแบบและพัฒนา อุปกรณ์จับยึด เฉพาะงานเจาะหลายชิ้น ในรอบเดียว
	2. ปัญหาจากดอก สว่านสึกเร็ว	- ใช้ดอกสว่าน เหล็กกล้า ความเร็วสูง	- ตั้งความเร็วรอบ และ อัตราป้อนไม่เหมาะสมกับ วัสดุชิ้นงานและดอกสว่าน	- เกิดแรงเสียดทานสูง และความร้อน ทำให้คม กัดสึกเร็ว



3.3.2 การวิเคราะห์กระบวนการโดยใช้แผนภูมิ

Left and Right Hand Chart

จากแผนภูมิปฏิบัติงาน Left and Right Hand Chart ของพนักงาน 1 คน บันทึกการทำงานของมือทั้งสองก่อนปรับปรุงมีขั้นตอนการผลิตลูกล้อ 1 ชิ้น เจาะ 6 รู รวมทั้งสิ้น 32 ขั้นตอน ระยะทางมือซ้ายรวม 2.70 เมตร และระยะทางมือขวารวม 3.85 เมตร ดังแสดงไว้ในรูปที่ 4 ถ้าใช้ค่ามาตรฐานความเร็วมือเฉลี่ย 0.30 เมตรต่อวินาที จะสามารถหาเวลาที่ได้จากระยะทางเคลื่อนที่มือซ้ายและมือขวา ดังสมการที่ (1)

$$T_{hand} = \frac{D}{V} \quad (1)$$

โดยที่ T_{hand} = เวลาเคลื่อนที่มือ (วินาที)

D = ระยะทางที่มือเคลื่อนที่ (เมตร)

V = ความเร็วเฉลี่ยของมือ (เมตรต่อวินาที)

กำหนดให้ ค่ามาตรฐานความเร็วเฉลี่ยในการเคลื่อนที่ของมืออยู่ในช่วง 0.25-0.35 เมตรต่อวินาที แทนค่าในสมการที่ (1) [8]

$$T_{left\ hand} = \frac{2.70}{0.30} = 9.0 \text{ วินาที}$$

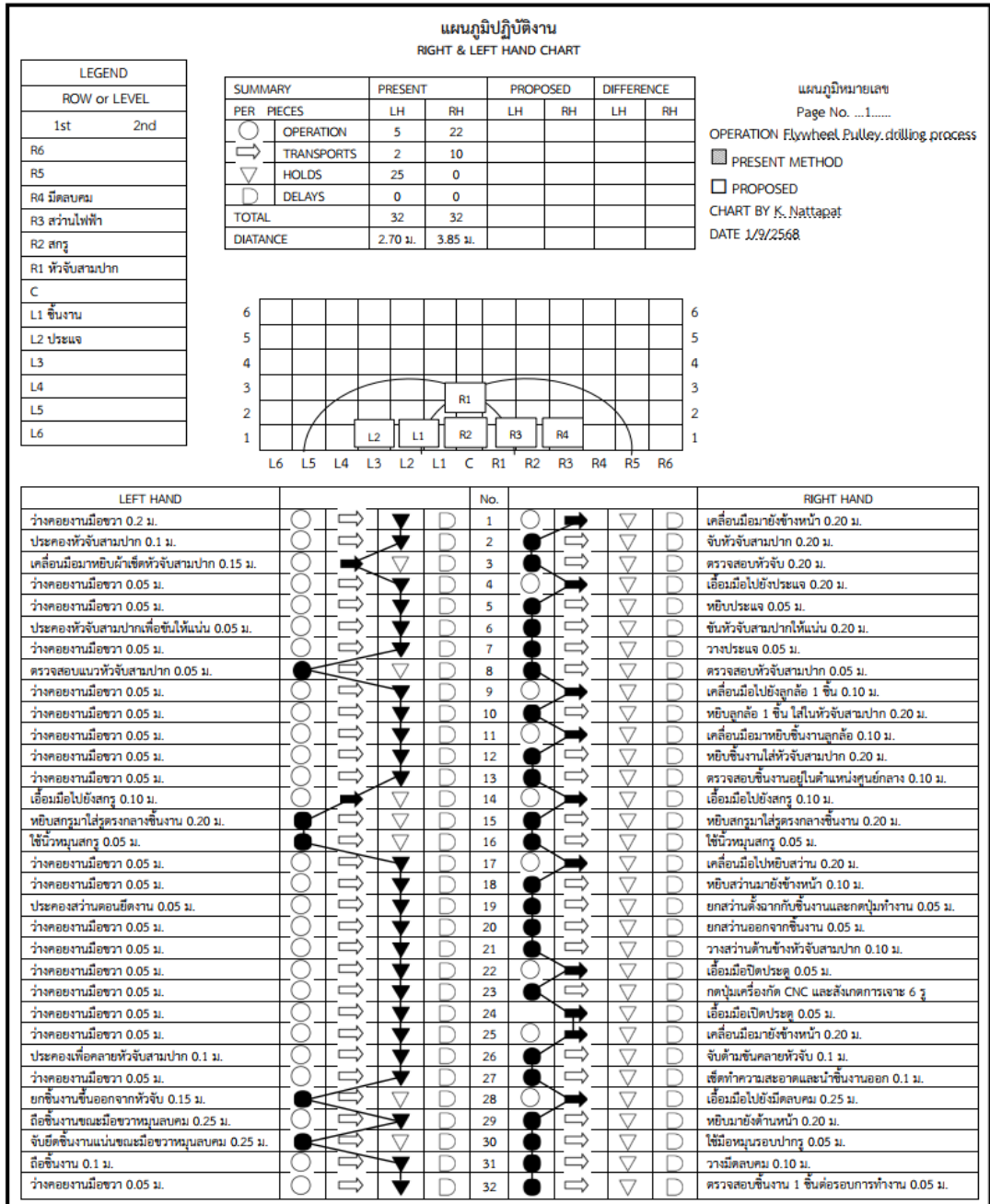
$$T_{right\ hand} = \frac{3.85}{0.30} = 12.8 \text{ วินาที}$$

ดังนั้น เวลาเคลื่อนที่มือซ้าย เท่ากับ 9.0 วินาที และเวลาเคลื่อนที่มือขวา เท่ากับ 12.8 วินาที (รูปที่ 4) ซึ่งมือขวาเป็นมือที่ใช้เวลามากที่สุด (Critical Hand) จะเป็นตัวกำหนดเวลาในการผลิต 1 ชิ้นงาน

ผลการเก็บข้อมูลในกระบวนการผลิตชิ้นงานลูกล้อ 1 ชิ้น เจาะ 6 รู โดยการจับเวลาการทำงานตั้งแต่เริ่มต้นจนเสร็จสิ้น ดังตารางที่ 4 จะแสดงให้เห็นว่ารอบเวลาในการผลิตก่อนปรับปรุง มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 43.55 วินาทีต่อชิ้น ดังนั้น รอบเวลาเครื่องเจาะ CNC ทำงาน จะมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 30.7 วินาที และอัตราการผลิต เท่ากับ 82.66 ชิ้นต่อชั่วโมง

ตารางที่ 4 ข้อมูลเวลาในกระบวนการผลิตชิ้นงานลูกล้อ 1 ชิ้น เจาะ 6 รู ด้วยเครื่องกัด CNC

ชิ้นงาน	เวลาการเจาะชิ้นงาน (ก่อนปรับปรุง)						เวลารวม (วินาที)	เฉลี่ย/จุดเจาะ (วินาที)
	เจาะรูที่ 1	เจาะรูที่ 2	เจาะรูที่ 3	เจาะรูที่ 4	เจาะรูที่ 5	เจาะรูที่ 6		
	1	2	3	4	5	6		
1	7.25	7.26	7.25	7.27	7.26	7.26	43.55	7.26
2	7.26	7.27	7.26	7.25	7.27	7.25	43.56	7.26
3	7.25	7.25	7.27	7.26	7.26	7.25	43.54	7.26
เวลารวม (เฉลี่ย)							43.55 ± 0.01	7.26 ± 0.00



รูปที่ 4 แผนภูมิ Left and Right Hand Chart ก่อนการปรับปรุง



4. ผลการวิจัย

4.1 ผลการออกแบบและสร้างอุปกรณ์จับยึดชิ้นงาน

การออกแบบและสร้างอุปกรณ์จับยึดชิ้นงาน ใช้หลักการออกแบบทางวิศวกรรม โดยคำนึงถึงความแม่นยำ ความแข็งแรง และความสามารถในการผลิตซ้ำเป็นสิ่งสำคัญ ใช้เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกและตำแหน่งรูของชิ้นงานเป็นข้อมูลตั้งต้น พร้อมกำหนดร่องหรือปลอกนำศูนย์ที่มีระยะเผื่อประมาณ 0.02–0.05 มิลลิเมตร เพื่อให้วางชิ้นงานได้สะดวกและคงตำแหน่งเดิมทุกครั้ง โครงสร้างอุปกรณ์ได้รับการออกแบบให้ต้านแรงจากกระบวนการเจาะได้เพียงพอ โดยจัดวางแคลมป์หรือสกรูจับยึดในทิศทางตรงข้ามกับแรงตัด และกำหนดความหนาฐานให้เหมาะสมเพื่อลดการโก่งตัวและการสั่นสะเทือน อีกทั้งสามารถจัดวางชิ้นงานได้ 9, 12 และ 16 ชิ้นต่อรอบการทำงาน ช่วยลดการตั้งงานซ้ำและเพิ่มความต่อเนื่องของการผลิต เมื่อเปรียบเทียบกับวิธีเดิมที่ใช้หัวจับสามปากซึ่งจับยึดได้เพียง 1 ชิ้นต่อรอบ อุปกรณ์ที่พัฒนาขึ้นช่วยเพิ่มจำนวนชิ้นงานต่อรอบ ลดรอบเวลาในการทำงาน และเพิ่มความสม่ำเสมอของตำแหน่งรูเจาะได้อย่างชัดเจน

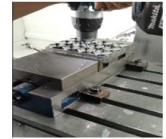
จากรูปที่ 5 แสดงการทดลองตั้งศูนย์อุปกรณ์จับยึดชิ้นงานและตรวจสอบคุณภาพของชิ้นงาน จำนวน 12 ชิ้น พบว่าค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยของตำแหน่งจุดศูนย์กลางรูเจาะจากระยะที่กำหนดอยู่ในระดับต่ำ โดยมีค่าไม่เกิน 0.02 มิลลิเมตร ซึ่งอยู่ภายในค่าความเผื่อที่กำหนด ค่าความเผื่อเท่ากับ 0.020 มิลลิเมตร นอกจากนี้ ยังไม่พบชิ้นงานของเสียในช่วงการทดลองผลิต ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของเผธิญ และคณะ [9]



ก) การเตรียมชิ้นงานและหัวจับ



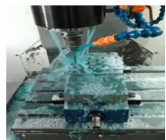
ข) ใส่ชิ้นงานลงในหัวจับ



ค) ชิ้นหัวจับให้แน่น



ง) ตั้งค่าในเครื่องกัด CNC



จ) เจาะรูชิ้นงาน



ง) ตรวจสอบขนาดชิ้นงาน

รูปที่ 5 ขั้นตอนการเจาะรูชิ้นงานลูกกลั่นบนเครื่องกัด CNC หลังปรับปรุง

ได้พัฒนาอุปกรณ์จับยึดชิ้นงานจับชิ้นงานให้ได้ศูนย์ดีขึ้นกว่าอุปกรณ์จับยึดชิ้นงานเดิม ดังนั้น อุปกรณ์จับยึดชิ้นงานที่พัฒนาขึ้นจึงมีศักยภาพในการนำไปใช้งานได้จริงในสายการผลิต

4.2 ผลการวิเคราะห์กระบวนการโดยใช้แผนภูมิ Left and Right Hand Chart หลังปรับปรุง

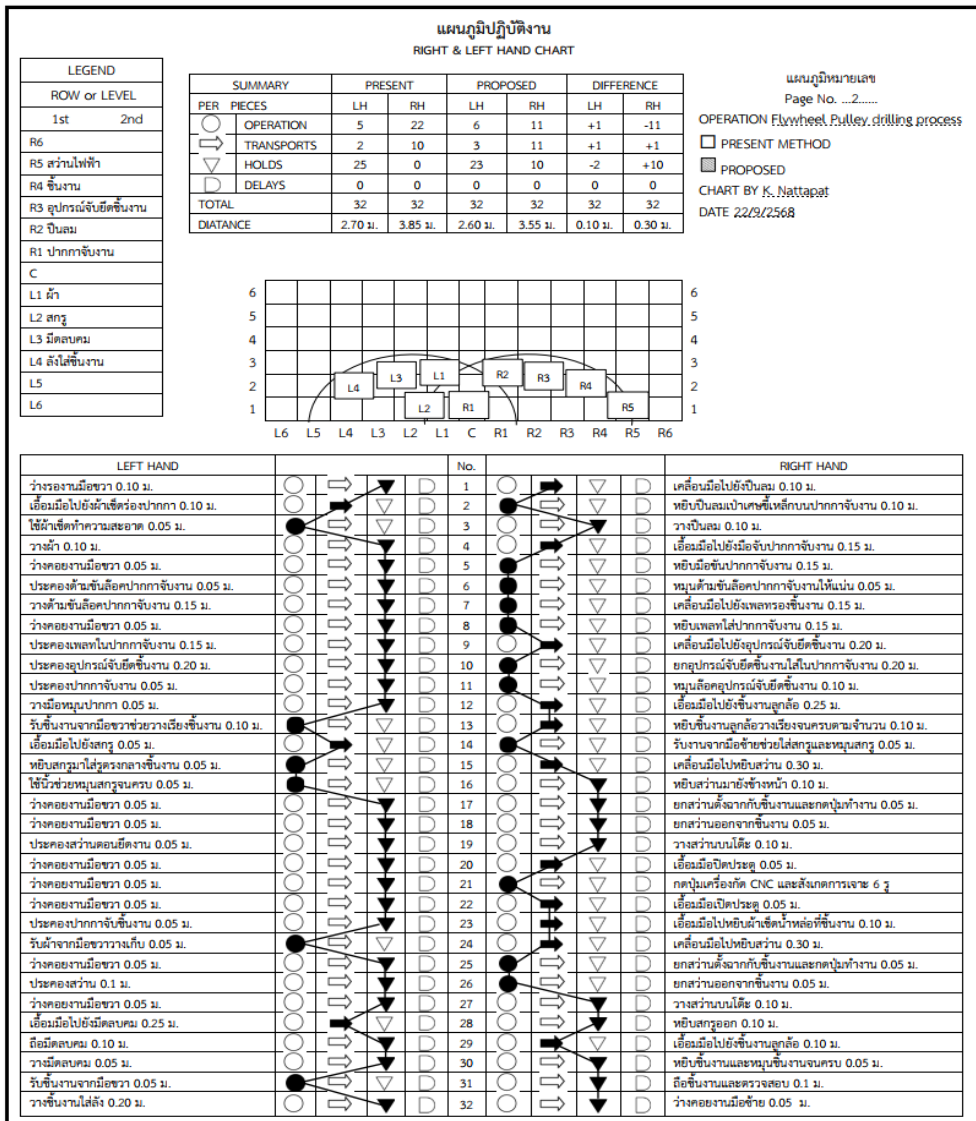
ผลการวิเคราะห์กระบวนการหลังการปรับปรุงพบว่า ในการผลิตชิ้นงานลูกกลั่นด้วยเครื่องกัด CNC โดยใช้ อุปกรณ์จับยึดชิ้นงานใหม่มาใช้แทนหัวจับสามปากสามารถจัดเรียงและผลิตได้ครั้งละ 12 ชิ้นต่อรอบการทำงานจากการวัดจริงภายหลังการปรับปรุงพบว่า รอบเวลาการทำงานเฉลี่ยลดลงจาก 43.55 วินาทีต่อชิ้น เหลือ 42.53 วินาทีต่อชิ้น คิดเป็นผลลดร้อยละ 2.34 ส่งผลให้อัตราผลิตเพิ่มขึ้นจาก 82.66 ชิ้นต่อชั่วโมง เป็น 84.65 ชิ้นต่อชั่วโมง คิดเป็นการเพิ่มขึ้นร้อยละ 2.40 การทดสอบชิ้นงานก่อนและหลังปรับปรุงพบว่า เวลารวมเฉลี่ยในกระบวนการเจาะ



บทความวิจัย

ชิ้นงานไม่แตกต่างกัน โดยในขั้นตอนการตั้งค่าโปรแกรมการเจาะไม่จำเป็นต้องตั้งค่าครั้งละ 1 ชิ้นงาน การปรับตั้งอุปกรณ์จับยึดช่วยลดเวลาการทำงานลง เนื่องจากการจัดเรียงชิ้นงานความหน่วงระหว่างการเจาะและช่วงพักผู้ปฏิบัติงานส่งผลให้รอบ

เวลาการทำงานเฉลี่ยมีค่าลดลง ซึ่งสะท้อนให้เห็นว่าประสิทธิภาพการผลิตเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน เมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการก่อนปรับปรุงที่ทำได้เพียง 1 ขั้นตอนรอบการทำงาน



รูปที่ 6 แผนภูมิ Left and Right Hand Chart หลังปรับปรุง



ตารางที่ 5 แนวทางการปรับปรุงการทำงานในขั้นตอนที่ 2 และ 10

ขั้นตอน ที่	รายละเอียด	รูปภาพตัวอย่าง		เทคนิค ECRS
		ก่อนการปรับปรุง	หลังการปรับปรุง	
2	ก่อนการปรับปรุงใช้หัวจับสามปากจับยึด ลูกกลิ้งได้ครั้งละ 1 ชิ้น หลังการปรับปรุงได้พัฒนาอุปกรณ์จับยึด (Fixture) และใช้ปากจับยึดชิ้นงานสำหรับเจาะรูลูกกลิ้งได้ครั้งละ 9, 12 และ 16 ชิ้นต่อรอบการทำงาน ใช้งานได้ทั้งด้านหน้าและด้านหลัง ออกแบบให้เหมาะกับรูปทรงกระบอกและตำแหน่งรูเจาะ ช่วยให้ทำงานสะดวกและรวดเร็วขึ้น			Simplify; S
10	ก่อนการปรับปรุงใช้หัวจับสามปากยึดลูกกลิ้งได้ครั้งละ 1 ชิ้น ส่งผลให้อัตราการผลิตต่ำ จึงได้ปรับปรุงโดยรวมขั้นตอนการเจาะจากที่ละ 1 ชิ้น ให้สามารถเจาะได้หลายชิ้นต่อรอบการทำงาน			Combine; C

4.3 ผลการปรับปรุงกระบวนการทำงานตามหลักการ ECRS

ผู้วิจัยดำเนินการแก้ปัญหากระบวนการผลิตในขั้นตอนที่ 2 และขั้นตอนที่ 10 ดังตารางที่ 5 โดยนำเทคนิค ECRS มาใช้เพื่อปรับปรุงกระบวนการผลิตและเพิ่มประสิทธิภาพการเจาะชิ้นงานลูกกลิ้งเพื่อลดความสูญเปล่าที่เกิดขึ้น โดยในขั้นตอนที่ 2 ได้ออกแบบและพัฒนาอุปกรณ์จับยึดชิ้นงาน โดยใช้หลักการทำให้่งาย (Simplify) เพื่อให้การทำงานง่ายขึ้น อุปกรณ์จับยึดชิ้นงานสามารถช่วยในกระบวนการเจาะรูลูกกลิ้งได้ครั้ง

ละ 9, 12 และ 16 ชิ้นต่อรอบการทำงาน และใช้งานได้ทั้งด้านหน้าและด้านหลังของอุปกรณ์ โดยออกแบบให้เหมาะกับรูปทรงกระบอกและตำแหน่งรูเจาะชิ้นงาน ส่งผลให้ทำงานสะดวกและรวดเร็วขึ้น และในขั้นตอนที่ 10 ใช้หลักการรวมงาน (Combine) มาประยุกต์ใช้โดยรวมขั้นตอนการเจาะวิธีการเดิม เมื่อใช้หัวจับสามปากจับยึดชิ้นงานลูกกลิ้งทำได้ครั้งละ 1 ชิ้น ให้สามารถเจาะได้หลายชิ้นต่อรอบการทำงาน ซึ่งสามารถช่วยเพิ่มอัตราการผลิตได้



4.4 การหาจุดคุ้มทุน

การหาจุดคุ้มทุนของจำนวนการผลิตในการเจาะรูชิ้นงานลูกกลีบบนเครื่องกัด CNC หลังการปรับปรุงเพื่อใช้เป็นข้อมูลในการตัดสินใจถึงความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ [10, 11] ดังนี้

จากสมการที่ (2)

$$N^* = \frac{F}{(p-v)} \quad (2)$$

กำหนดให้

N^* คือ จำนวนการผลิตที่จุดคุ้มทุน

F คือ ต้นทุนคงที่

v คือ ต้นทุนแปรผันต่อชิ้น

p คือ ราคาขาย

โดยที่

ต้นทุนคงที่ = 360,000 บาท/ปี มีรายละเอียดดังนี้

- ค่าเสื่อมราคาเครื่อง CNC เท่ากับ 120,000 บาทต่อปี
- ค่าบำรุงรักษา เท่ากับ 24,000 บาทต่อปี
- ค่าแรงงานประจำ เท่ากับ 180,000 บาทต่อปี
- ค่าไฟฟ้าคงที่ เท่ากับ 36,000 บาทต่อปี
- ต้นทุนแปรผัน = 1,000 บาทต่อชุด
- ราคาขาย = 2,400 บาทต่อชุด

แทนค่าในสมการที่ 2

$$N^* = \frac{360,000}{(2,400-1,000)} = 257 \text{ ชุด}$$

ดังนั้น จำนวนการผลิตที่คุ้มทุนในการเจาะรูชิ้นงานลูกกลีบหลังปรับปรุง โรงงานต้องผลิตอย่างน้อย 257 ชุดต่อปี จึงจะเริ่มคุ้มทุน

5. สรุปผลการวิจัย

การวิจัยครั้งนี้มุ่งเน้นการพัฒนาอุปกรณ์จับยึดชิ้นงานเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตชิ้นงานลูกกลีบบนเครื่องกัด CNC โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อลดรอบเวลาในการผลิตและเพิ่มอัตราการผลิตของบริษัทกรณีศึกษา การดำเนินงานเริ่มจากการสำรวจและวิเคราะห์สภาพปัญหาปัจจุบัน โดยใช้เทคนิค Why-Why Analysis และแผนภูมิ Left and Right Hand Chart เพื่อตรวจสอบขั้นตอนการทำงานที่เป็นข้อจำกัด จากผลการวิเคราะห์พบว่า ความล่าช้าในกระบวนการผลิตเกิดจากการใช้หัวจับสามปากซึ่งสามารถจับยึดได้เพียงหนึ่งชิ้นต่อรอบการทำงาน และโรงงานยังไม่มี การพัฒนาอุปกรณ์จับยึดงานแบบหลายชิ้น ส่งผลให้รอบเวลาในการผลิตสูงและอัตราการผลิตต่ำ ผลการวิเคราะห์ก่อนปรับปรุงพบว่า การผลิตชิ้นงานลูกกลีบ 1 ชิ้น จำนวนรูเจาะ 6 รู มีรอบเวลาการผลิตเฉลี่ย 43.55 วินาทีต่อชิ้น โดยรอบเวลาเครื่อง CNC ทำงานเฉลี่ย 30.7 วินาที และอัตราการผลิตเฉลี่ย 82.66 ชิ้นต่อชั่วโมง ภายหลังการพัฒนาอุปกรณ์จับยึดชิ้นงานพบว่าสามารถรองรับการผลิตได้ครั้งละ 9 ชิ้น 12 ชิ้น และ 16 ชิ้นต่อรอบการทำงาน ซึ่งจากการทดลองผลิตชิ้นงาน 12 ชิ้น พบว่าค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยของตำแหน่งจุดศูนย์กลางรูเจาะไม่เกิน 0.02 มิลลิเมตร อยู่ในเกณฑ์ค่าความเผื่อที่กำหนด และไม่พบชิ้นงานที่เป็นของเสียในช่วงการทดลอง การวิเคราะห์ด้วยแผนภูมิ Left and right hand chart หลังปรับปรุงแสดงให้เห็นว่า รอบเวลาการผลิตเฉลี่ยลดลงเหลือ 42.53 วินาทีต่อชิ้น ส่งผลให้อัตราการผลิตเพิ่มขึ้นเป็น 84.65 ชิ้นต่อชั่วโมง เมื่อเปรียบเทียบกับก่อนและหลังปรับปรุงพบว่า รอบเวลาต่อชิ้นลดลงร้อยละ 2.34



และอัตราการผลิตเพิ่มขึ้นร้อยละ 2.40 และการประยุกต์ใช้หลักการ ECRS ในการปรับปรุงกระบวนการผลิตช่วยลดความสูญเปล่าได้ โดยในขั้นตอนที่ 2 มีการใช้หลักการทำให้ง่ายในการออกแบบและสร้างอุปกรณ์จับยึดชิ้นงาน ซึ่งสามารถเจาะชิ้นงานได้ครั้งละ 12 ชิ้นต่อรอบ และใช้งานได้ทั้งสองด้านของอุปกรณ์ ส่วนในขั้นตอนที่ 10 มีการนำหลักการรวมงานมาประยุกต์ใช้ โดยรวมขั้นตอนการเจาะแบบเดิมที่ทำได้เพียงหนึ่งชิ้น ให้สามารถเจาะได้หลายชิ้นต่อรอบ ส่งผลให้อัตราการผลิตโดยรวมเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน นอกจากนี้ จากการคำนวณจุดคุ้มทุนของการผลิต พบว่าโรงงานต้องผลิตไม่น้อยกว่า 257 ชุดต่อปี จึงจะเริ่มถึงจุดคุ้มทุน แสดงให้เห็นว่าอุปกรณ์จับยึดที่พัฒนาขึ้นมีความเหมาะสมต่อการนำไปใช้จริงในสายการผลิต โดยช่วยทั้งในด้านการลดรอบเวลาเพิ่มอัตราการผลิต และรักษาคุณภาพชิ้นงานให้อยู่ในมาตรฐาน

6. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยฉบับนี้สำเร็จลงได้ด้วยความรู้ณาและการเอื้อเฟื้อจากสถานประกอบการที่ให้ข้อมูลและคำปรึกษาอันเป็นประโยชน์ต่อการศึกษางานวิจัย ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณผู้บริหาร หัวหน้างาน ฝ่ายผลิต หัวหน้าพนักงาน ตลอดจนผู้ปฏิบัติงานที่เกี่ยวข้องทุกท่าน รวมถึงมหาวิทยาลัยราชภัฏราชนครินทร์ ที่ได้ให้การสนับสนุนและเอื้ออำนวยความสะดวกดำเนินงานวิจัยจนสำเร็จเรียบร้อย

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] T. Pengchandee, C. Inthamane, A. Thongbaisri, K. Thamwichit and C. Rasami, Reducing waste in manufacturing process of the motorcycle seat lock, The Journal of Industrial Technology: Suan Sunandha Rajabhat University, 2016, 4(2), 73–82. (in Thai)
- [2] P. Sumranhun, N. Saisuwan, S. Rungcharoen, B. Damrongwatthanayothin, S. Puinun, W. Ruamsup and P. Virayasiri, The improving productivity in seasonal product manufacturing by motion and time study and jig design, Thai Industrial Engineering Network Journal, 2024, 10(1), 51–59. (in Thai)
- [3] C. Pakdeewanich and S. Veeradech, Increasing the operation rate of punching machine by using ECRS, PBRU Science Journal, 2021, 18(2), 86 – 97. (in Thai)
- [4] W. Sirirak, T. Nanthamajcha, W. Saengbunrueang, A. Pinchaimoon and C. Seeta, Process improvement of electronic part assembly with ECRS technique, Journal of Manufacturing and Management, 2023, 2(1), 1–12. (in Thai)
- [5] R. Kanjanapanyakom, Industrial work study, TOP Publishing Co., Ltd., Bangkok, Thailand, 2019.



- [6] J. Meemak and J. Choomlucksana, Reducing downtime loss in the automotive parts stamping process using why-why analysis: A case study, *Engineering and Technology Horizons*, 41(3), 41(3), 410308. (in Thai)
- [7] S. Tumrongsuk and S. Preangprom, Applying the lean concept to improve the oil pipelines processing for tractor: A case study of ABC company ltd., *The Journal of Industrial Technology*, 2021, 17(3), 56-78. (in Thai)
- [8] A. Greig Michael and W. Patrick Neumann, Testing of a workstation efficiency evaluator tool, *International Journal of Industrial Ergonomics*, 2015, 48, 60–69.
- [9] P. Jansa, N. Panrak and A. pattanapukdee, An improvement of a jig for a frame of submersible pump production with CNC turning machine, *The 15th National and International Sripatum University Conference, Proceeding*, 2020, 1–10. (in Thai)
- [10] K. Wirotrattanaphaphisan, C. Woarawichai, U. Thanasuptawee and S. Pitjarnit, Design and development of drill pit in drilling of aluminum part with cnc milling: A case study of motorcycle part production company, *Kasem Bundit Engineering Journal*, 2022, 12(3), 1–21. (in Thai)
- [11] S. Tongklin, Design and development a fixture prototype of lathe machine for keyway milling, *Naresuan University Engineering Journal*, 2015, 10(2), 9–15. (in Thai)



ผลกระทบของน้ำทะเลตอกำลังอัด และโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตผสม เถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียดแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5

หมกตล ศรภักดี¹ ชูเกียรติ ชูสกุล¹ สุพร ฤทธิภักดี¹ ประชุม คำพุ่ม² มหาหะสุโฮมิ มะแซ³
เซาฟีร์ ดีอราแม⁴ และ ทวิช กล้าแท้^{1*}

¹ สาขาวิศวกรรม, วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรมและการจัดการ, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย

² ภาควิชาวิศวกรรมโยธา, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

³ สาขาวิศวกรรมอุตสาหกรรม, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย

⁴ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ

* ผู้ประสานงานเผยแพร่ (Corresponding Author), E-mail: Tawich.k@rmutsv.ac.th

วันที่รับบทความ: 8 ตุลาคม 2568; วันที่ทบทวนบทความ: 28 มกราคม 2569; วันที่ตอบรับบทความ: 5 กุมภาพันธ์ 2569

วันที่เผยแพร่ออนไลน์: 20 เมษายน 2569

บทคัดย่อ: งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลกระทบของน้ำทะเลตอกำลังอัด และโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตผสมเถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียด (GPOFA) แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 (SRC) ในอัตราส่วนการแทนที่ร้อยละ 30 40 และ 50 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน (30GPOFA, 40GPOFA และ 50GPOFA) โดยแช่น้ำทะเลหลังจากถอดแบบ 24 ชั่วโมง เพื่อให้สอดคล้องกับสภาวะแวดล้อมทะเลจริง กำหนดปริมาณวัสดุประสานเท่ากับ 560 กก./ม.³ และควบคุมอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (W/B) เท่ากับ 0.28 ทดสอบกำลังรับแรงอัด ที่อายุ 7 28 และ 60 วัน ทดสอบโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต ที่อายุ 28 และ 60 วัน และวิเคราะห์ผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมของคอนกรีต ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่า คอนกรีต 30GPOFA สามารถพัฒนากำลังอัดที่อายุ 60 วันเท่ากับ 459.61 กก./ซม.² หรือร้อยละ 88 ของคอนกรีตควบคุมที่ใช้ SRC เป็นวัสดุประสานเพียงอย่างเดียว (คอนกรีต CT-SRC) นอกจากนี้พบว่าคอนกรีตที่ใช้ GPOFA แทนที่ SRC ไม่ส่งผลกระทบต่อโมดูลัสยืดหยุ่น และสามารถช่วยลดปริมาณการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ร้อยละ 24-40 เมื่อเทียบกับคอนกรีต CT-SRC สามารถสรุปได้ว่า GPOFA มีศักยภาพในการเป็นวัสดุปอชโซลานที่ดีในสภาวะแวดล้อมทะเล อย่างไรก็ตามอัตราส่วนที่เหมาะสมไม่ควรเกินร้อยละ 30-40 เพื่อรักษาความแข็งแรง และส่งเสริมความยั่งยืนด้านสิ่งแวดล้อม

คำสำคัญ: คอนกรีตที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม; เถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียด; เศรษฐกิจหมุนเวียน; สภาวะแวดล้อมทะเล; สิ่งคมคาร์บอนต่ำ

Effect of Sea Water on Compressive Strength and Elastic Modulus of Concrete Portland Cement Type V Containing Ground Palm Oil Fuel Ash

Napadon Sornpakdee¹, Chookiat Choosakul¹, Suporn Rittipuakdee¹, Prachoom Khamput², Mahamasuhaimi Masae³, Saofee Dueramae⁴ and Tawich Klathae^{1*}

¹ Department of Engineering, College of Industrial Technology and Management, Rajamangala University of Technology Srivijaya

² Department of Civil Engineering, Rajamangala University of Technology Thanyaburi

³ Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Srivijaya

⁴ Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Krungthep

* Corresponding author, E-mail: Tawich.k@rmutsv.ac.th

Received: 8 October 2025; Revised: 28 January 2026; Accepted: 5 February 2026

Online Published: 20 April 2026

Abstract: This study investigates the effects of seawater exposure on the compressive strength and elastic modulus of concrete incorporating ground palm oil fuel ash (GPOFA) as a partial replacement for Type V Portland cement (SRC). GPOFA was used at 30%, 40%, and 50% by weight of binder. All specimens were cured in seawater 24 hours after demolding to simulate marine conditions. The binder content was fixed at 560 kg/m³ with a constant water-to-binder ratio of 0.28. Compressive strength was tested at 7, 28, and 60 days, and elastic modulus at 28 and 60 days. Results showed that 30% GPOFA replacement achieved 459.61 kg/cm² compressive strength at 60 days (approximately 88% of the control), with minimal impact on elastic modulus. Additionally, GPOFA use reduced CO₂ emissions by 24–40% compared to the control mix. GPOFA shows promise as a sustainable pozzolanic material for concrete in marine environments, with an optimal replacement level of 30–40% to balance performance and environmental benefits.

Keywords: Eco-Friendly concrete; Ground palm oil fuel ash; Circular Economy; Marine environment; Low carbon society



1. บทนำ

ประเทศไทยมีสภาพทางภูมิศาสตร์เป็นคาบสมุทรแบ่งทะเลออกเป็น 2 ผัง คือฝั่งทะเลอ่าวไทย (Gulf of Thailand) ครอบคลุมพื้นที่ 17 จังหวัด มีความยาวชายฝั่งทั้งสิ้นประมาณ 2,055 กิโลเมตร และฝั่งทะเลอันดามัน (Andaman Sea) ครอบคลุมพื้นที่ 6 จังหวัด มีความยาวชายฝั่งประมาณ 1,093 กิโลเมตร รวมระยะทางตามแนวชายฝั่งทั้ง 2 ผังประมาณ 3,148 กิโลเมตร มีท่าเรือที่ตั้งอยู่บนชายฝั่งจำนวนทั้งสิ้นประมาณ 449 ท่า ประกอบด้วยท่าเรือสินค้า 157 ท่า ท่าเรือประมง 235 ท่า และท่าเรือโดยสาร 57 ท่า [1] อาคารหรือสิ่งปลูกสร้างที่ใช้วัสดุคอนกรีตเสริมเหล็กเป็นวัสดุหลัก (Reinforced Concrete) ที่ตั้งอยู่ในสภาพแวดล้อมทะเลมักพบปัญหามากกว่าสิ่งปลูกสร้างทั่วไป เนื่องจากต้องเผชิญกับการกัดกร่อนจากไอเกลือ และสารเคมี เช่น คลอไรด์ หรือซัลเฟต ซึ่งสารประกอบเหล่านี้เป็นปัจจัยหลักที่เร่งปฏิกิริยาทำให้เหล็กเสริมเกิดสนิม ส่งผลให้หน้าตัดเหล็กลดลงและเกิดรอยแตกร้าวในคอนกรีต การแก้ปัญหาดังกล่าวอาจจะใช้วิธีเพิ่มระยะหุ้มเหล็กเสริมให้มากขึ้น หรือ ใช้วัสดุปอซโซลานปรับปรุงคุณภาพของเนื้อคอนกรีตให้มีความทึบน้ำมากขึ้น โดยโครงสร้างดังกล่าวอาจเกิดการเสื่อมสภาพได้จากหลายสาเหตุ เช่น การกัดเซาะ การชะล้าง แม้โครงสร้างอยู่ห่างชายฝั่งหลายกิโลเมตรก็ยังจัดว่าเป็นโครงสร้างที่ต้องคำนึงถึงความต้านทานต่อน้ำทะเลเช่นกัน โดยคลอไรด์นั้นเป็นสาเหตุหลักที่ทำให้เหล็กเสริมเกิดสนิม ซึ่งในทางการป้องกันสามารถกระทำได้โดยการปรับปรุงคุณภาพของคอนกรีตและเหล็กเสริมเพื่อให้ได้คอนกรีตที่มีคุณสมบัติกำลังอัดและความต้านทานการซึมของคลอไรด์ที่มากขึ้น การออกแบบ

ส่วนผสมของคอนกรีตให้ได้คอนกรีตที่มีโครงสร้างภายในแน่นมากขึ้นส่งผลให้คอนกรีตมีความหนาแน่นและมีความพรุนน้อยลง จากการศึกษาวิจัยที่ผ่านมาพบว่า การใช้วัสดุปอซโซลานซึ่งเป็นวัสดุพลอยได้จากโรงงานอุตสาหกรรม เช่น ถ้ำถ่านหิน ถ้ำเกลือ และถ้ำเปลือกไม้ เพื่อปรับปรุงความคงทนของคอนกรีตภายใต้สิ่งแวดล้อมทะเลในสภาพเปียกสลับแห้งสามารถทำให้คอนกรีตมีสมบัติด้านความคงทนที่ดีขึ้นสอดคล้องกับงานวิจัยของ Chalee และคณะ [2] ซึ่งศึกษาการใช้ถ้ำเกลือ-เปลือกไม้เป็นวัสดุปอซโซลานทดแทนบางส่วนของปูนซีเมนต์ เพื่อเพิ่มความทนทานต่อการกัดกร่อนของคอนกรีตในสภาพแวดล้อมทางทะเล โดยทดสอบภายใต้การสัมผัสจริงเป็นระยะเวลา 5 ปี ผลการศึกษาพบว่า คอนกรีตที่ผสมถ้ำเกลือ-เปลือกไม้มีการซึมผ่านของคลอไรด์ลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ส่งผลให้อัตราการกัดกร่อนของเหล็กเสริมลดลง และมีสมรรถนะด้านความทนทานสูงกว่าคอนกรีตทั่วไป เหมาะสำหรับงานโครงสร้างในสภาพแวดล้อมรุนแรง นอกจากนี้ Ho และคณะ [3] ซึ่งทบทวนงานวิจัยเกี่ยวกับความทนทานของมอร์ตาร์และคอนกรีตที่ใช้วัสดุปอซโซลาน ทดแทนปูนซีเมนต์บางส่วน ในสภาพแวดล้อมทางทะเล โดยพิจารณาผลต่อการซึมผ่านของคลอไรด์ การกัดกร่อนของเหล็กเสริม และความต้านทานต่อการเสื่อมสภาพระยะยาว ผลการทบทวนสรุปว่า การใช้วัสดุปอซโซลาน เช่น ถ้ำเกลือ และวัสดุเหลือทิ้งทางอุตสาหกรรม สามารถปรับปรุงโครงสร้างเนื้อคอนกรีตให้หนาแน่นขึ้น ลดการซึมผ่านของคลอไรด์ และเพิ่มอายุการใช้งานของโครงสร้างในสภาพแวดล้อมทางทะเลได้อย่างมีประสิทธิภาพ อีกทั้งยังป้องกันการทำลายเนื่องจาก



สารละลายซัลเฟต และป้องกันการเสียหายที่ก่อให้เกิดกับเหล็กเสริมได้ ตลอดจนปฏิบัติการยาปอซโซลานที่เกิดขึ้นในช่วงหลัง ส่งผลให้กำลังอัดคอนกรีตมีการพัฒนาต่อเนื่อง และลดการสูญเสียกำลังอัดเนื่องจากสิ่งแวดล้อมทะเลได้ แต่งานวิจัยส่วนใหญ่ที่ปรากฏมีการทดลองในต่างประเทศ และพื้นที่ภาคตะวันออกเฉียงของประเทศไทย เท่านั้น มากไปกว่านั้นทั้งหมดมีการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และมีการนำไปแช่น้ำทะเลหลังจากบ่มน้ำประปา 28 วัน [4-5] เมื่อพิจารณาวัสดุเหลือทิ้งข้างต้นพบว่าเถาปาล์มน้ำมันเป็นวัสดุที่มีศักยภาพ ซึ่งส่วนใหญ่ยังไม่ได้รับการนำไปใช้ประโยชน์อย่างเหมาะสม ส่งผลให้เกิดปัญหาด้านสิ่งแวดล้อม หากผ่านการปรับปรุงคุณสมบัติ เช่น การบดละเอียด สามารถแสดงสมบัติปอซโซลาน และนำมาใช้เป็นวัสดุทดแทนปูนซีเมนต์บางส่วนในคอนกรีตได้ ช่วยลดการใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์และการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากอุตสาหกรรมก่อสร้าง อย่างไรก็ตาม งานวิจัยส่วนใหญ่ที่เกี่ยวข้องกับการใช้เถาปาล์มน้ำมัน มักมุ่งเน้นการศึกษากำลังรับแรงอัดและสมบัติเชิงกลของคอนกรีตภายใต้สภาวะบ่มปกติหรือการบ่มในน้ำจืด

ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลกระทบของน้ำทะเลต่อกำลังอัด และโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตผสมเถาปาล์มน้ำมันบดละเอียด (GPOFA) แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 (SRC) ที่แช่น้ำทะเลหลังจากถอดแบบ 24 ชั่วโมง เพื่อให้สอดคล้องกับการทำงานโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กในสภาวะแวดล้อมทะเลจริง โดยใช้ GPOFA แทนที่ SRC เพื่อผลิตคอนกรีต ในอัตราร้อยละ 30, 40 และ 50 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน (30GPOFA, 40GPOFA และ

50GPOFA) เปรียบเทียบกับคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 (CT-SRC) และคอนกรีตปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก (HLC) เป็นวัสดุประสานเพียงอย่างเดียว ทดสอบกำลังรับแรงอัด ของคอนกรีตที่อายุการบ่ม 7 28 และ 60 วัน ทดสอบโมดูลัสยืดหยุ่นที่อายุการบ่ม 28 และ 60 วัน นอกจากนี้ทำการวิเคราะห์ผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม เพื่อเพิ่มมูลค่าให้กับวัสดุเหลือทิ้ง และลดผลกระทบสิ่งแวดล้อมจากอุตสาหกรรมปูนซีเมนต์อย่างยั่งยืน การศึกษานี้จึงมีความสำคัญอย่างยิ่งต่อการพัฒนาอุตสาหกรรมก่อสร้างของไทยให้สอดคล้องกับนโยบายเศรษฐกิจ BCG (Bio-Circular-Green Economy) และเป้าหมายความเป็นกลางทางคาร์บอนภายในปี 2593 (ค.ศ. 2050)

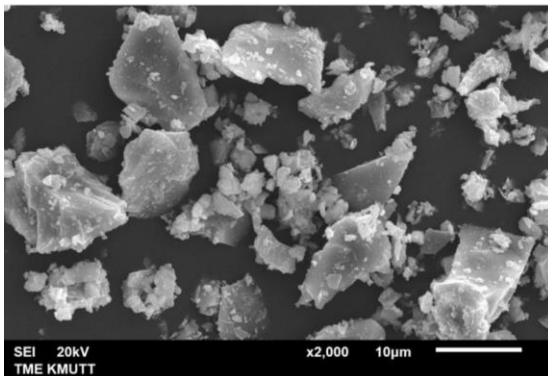
2. วิธีการดำเนินงานวิจัย/ทดลอง

2.1 วัสดุที่ใช้ในการวิจัย

1. ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 (Sulphate Resistance Portland Cement, SRC) ตามมาตรฐาน ASTM C 150 แสดงในรูปที่ 1 โดยสมบัติทางกายภาพ และสมบัติทางเคมีของ SRC แสดงในตารางที่ 1 มีความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 3.17 สอดคล้องกับ มอก. 15-2562 ซึ่งระบุว่าความถ่วงจำเพาะของ SRC มีค่าระหว่าง 3.09 - 3.22 ม็องค์ประกอบหลัก คือ แคลเซียมออกไซด์ (CaO) และซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO₂) มีค่าร้อยละ 66.7 และ 21.5 ตามลำดับ ในขณะที่ค่า LOI ร้อยละ 1.7 โดยทั่วไปมีลักษณะเป็นผงสีเทาอ่อนจนถึงเทาเข้ม เนื้อละเอียด มีรูปร่างไม่แน่นอน เป็นเหลี่ยมมุม มีอนุภาคเล็ก ๆ เกะกั๊กเป็นก้อนใหญ่ ดังแสดงในรูปที่ 2 มีขนาดอนุภาคเฉลี่ย (Mean Particle Size, d₅₀) เท่ากับ 20.4 ไมโครเมตร



รูปที่ 1 ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 (SRC)



รูปที่ 2 ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 (SRC)

กำลังขยาย 2,000 เท่า

2. ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกประเภทใช้ทั่วไปในงานโครงสร้าง (Hydraulic Cement Type G, HLC) ตามมาตรฐาน ASTM C1157 แสดงในรูปที่ 3 มีความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 3.14 สอดคล้องกับมาตรฐาน API Spec 10A ซึ่งระบุว่าความถ่วงจำเพาะของปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกมีค่าระหว่าง 3.10 - 3.25 โดยสมบัติทางกายภาพ และสมบัติทางเคมีของ HLC แสดงใน ตารางที่ 1 มีลักษณะ เป็นฝุ่นผง เนื้อละเอียด มีสีเทาเข้ม มีองค์ประกอบหลัก คือ แคลเซียมออกไซด์ (CaO) เท่ากับร้อยละ 57.4 และ LOI เท่ากับ

ตารางที่ 1 สมบัติทางกายภาพ และสมบัติทางเคมีของปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกประเภท G (HLC) ประเภทที่ 5 (SRC) และ เถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียด (GPOFA)

Materials		SRC	HLC	GPOFA
Physical Properties	Specific gravity	3.17	3.14	2.62
	Median particle size, d_{50} (μm)	20.4	18.1	7.7
Chemical Composition (%)	SiO ₂	21.5	26.5	57.6
	Al ₂ O ₃	3.6	5.0	1.2
	Fe ₂ O ₃	4.5	4.0	2.8
	CaO	66.7	57.4	9.6
	MgO	1.2	2.5	4.7
	K ₂ O	0.2	0.5	8.7
	Na ₂ O	0.1	0.0	0.1
	SO ₃	2.1	2.8	2.2
	P ₂ O ₅	-	-	5.5
	Cl	-	-	1.1
	LOI	1.7	1.4	6.5
	SiO ₂ + Al ₂ O ₃ + Fe ₂ O ₃	-	-	61.6

1.4 โดยภาพถ่ายกำลังสูงด้วยเครื่อง Scanning Electron Microscope ของ HLC แสดงในรูปที่ 4 พบว่ามีลักษณะรูปร่างเป็นเหลี่ยมมุม รูปร่างไม่แน่นอน มีเนื้อแน่น มีขนาดอนุภาคเฉลี่ย (Mean Particle Size, d_{50}) เท่ากับ 18.1 ไมโครเมตร

3. เถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียด (GPOFA) ได้มาจากโรงงานผลิตน้ำมันปาล์มในจังหวัดสุราษฎร์ธานี โดยนำไปทำให้แห้งโดยใช้ตู้อบที่อุณหภูมิ 110±5 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นนำเถ้าปาล์มน้ำมันที่แห้งแล้วมาบดด้วยตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 16 เพื่อแยกเอาสิ่งเจือปนอื่นๆ ออก และนำมา



ผ่านการบดละเอียดด้วยเครื่องบดแบบตกรกระทบ (Los Angeles abrasion machine) โดยใช้ลูกเหล็ก ๕๐ กิโลกรัม เป็นเวลา ๘ ชั่วโมง [6] จะได้ GPOFA ที่มีขนาดอนุภาคเฉลี่ย (Mean Particle Size, d_{50}) เท่ากับ 7.7 ไมโครเมตร (รูปที่ 5) ซึ่งลักษณะทั่วไปของ GPOFA มีสี่ด้านสี่เหลี่ยม เนื้อเต็มมีขนาดเล็กละเอียด (รูปที่ 6) มีองค์ประกอบทางเคมี คือ ซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) อะลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) และเฟอร์ริกออกไซด์ (Fe_2O_3) เท่ากับร้อยละ 57.6 1.2 และ 2.8 ตามลำดับ ซึ่งมีผลรวมทั้ง 3 องค์ประกอบ เท่ากับร้อยละ 61.6 เมื่อพิจารณาคุณลักษณะทางเคมี ตามมาตรฐาน ASTM C618 [7] พบว่าจัดอยู่ในประเภทของวัสดุปอซโซลาน Class C ซึ่งมีผลรวมของ SiO_2 , Al_2O_3 และ Fe_2O_3 ไม่ต่ำกว่าร้อยละ 50 ในขณะที่มีค่า LOI เกินร้อยละ ตามมาตรฐาน ASTM C618 อยู่เล็กน้อย โดยสมบัติทางกายภาพ และสมบัติทางเคมีของ GPOFA แสดงในตารางที่ 1 การกระจายตัวของอนุภาคของเถ้าปาล์ม น้ำมันจากโรงงาน (OPOFA) และ GPOFA แสดงในรูปที่ 7 ตามลำดับ

4. มวลรวมละเอียด (Fine Aggregate) เป็นทรายแม่น้ำที่ได้จากจังหวัดนครศรีธรรมราช ซึ่งอยู่ในสภาวะอิ่มตัวผิวแห้ง พบว่ามีค่าความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.65 ค่าความถ่วงจำเพาะนี้เป็นตัวบ่งชี้ถึงความหนาแน่นสัมพัทธ์ของทรายเมื่อเทียบกับน้ำบริสุทธิ์

โดยทั่วไปแล้วทรายที่มีค่าความถ่วงจำเพาะอยู่ในช่วง 2.6 - 2.7 สำหรับการทดสอบค่าความละเอียด (Fineness Modulus) พบว่ามีค่าเท่ากับ 2.79 และมีค่าการดูดซึมน้ำ (Water Absorption) เท่ากับร้อยละ 1.34 (ตารางที่ 2) ซึ่งแสดงให้เห็นถึงปริมาณน้ำที่ทรายสามารถดูดซับไว้ได้เมื่ออยู่ในสภาวะอิ่มตัว ค่าที่ได้นี้ค่อนข้างต่ำ ซึ่งบ่งชี้ว่าทรายแม่น้ำที่นำมาทดสอบมีการดูดซึมน้ำน้อย ซึ่งเป็นคุณสมบัติที่ดีสำหรับวัสดุผสมคอนกรีต เนื่องจากจะช่วยลดปริมาณน้ำที่ต้องใช้ในการผสมคอนกรีตโดยรวม และส่งผลต่อความแข็งแรงและคุณสมบัติอื่นๆ ของคอนกรีตที่ได้ ผลการทดสอบคุณสมบัติของทรายแม่น้ำที่ได้นี้ แสดงให้เห็นว่าทรายดังกล่าวมีค่าความถ่วงจำเพาะ และค่าความละเอียดอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานของมวลรวมตามมาตรฐาน ASTM C33/C33M

5. มวลรวมหยาบ (Coarse Aggregate) เป็นหินปูนย่อยที่ได้จากอำเภอขนอม จังหวัดนครศรีธรรมราช ซึ่งมวลรวมหยาบมีค่าความถ่วงจำเพาะ (Specific Gravity) ในสภาวะอิ่มตัวผิวแห้ง เท่ากับ 2.76 สำหรับการทดสอบค่าความละเอียด (Fineness Modulus) พบว่ามีค่าเท่ากับ 7.31 นอกจากนี้ ยังได้มีการทดสอบ การดูดซึมน้ำ (Water Absorption) ของหิน ซึ่งมีค่าเท่ากับร้อยละ 0.91 (ตารางที่ 2) ค่าการดูดซึมน้ำนี้แสดงให้เห็นถึงปริมาณน้ำที่หินสามารถดูดซับไว้ได้เมื่ออยู่ในสภาวะอิ่มตัว

ตารางที่ 2 สมบัติทางกายภาพของมวลรวม

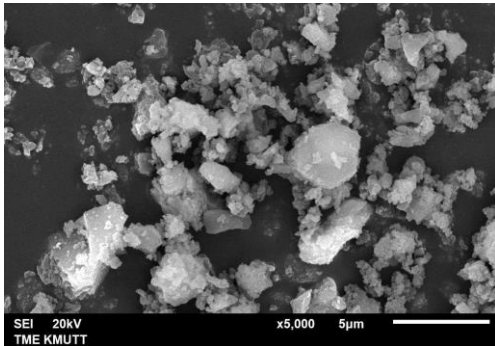
Fine Aggregate	Specific Gravity	Fineness Modulus (F.M.)	Water Absorption (%)	Unit weight (kg/m ³)
River Sand	2.60	3.09	0.96	1,670
Stone	2.76	7.31	0.91	1,450



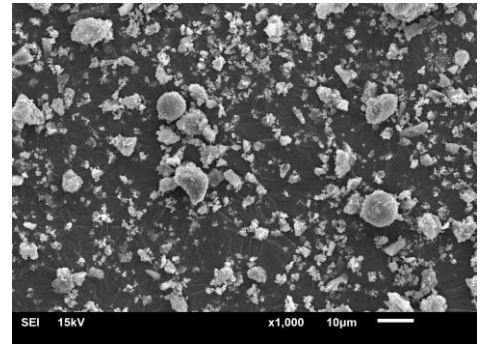
รูปที่ 3 ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกประเภทใช้ทั่วไปในงานโครงสร้าง (HLC)



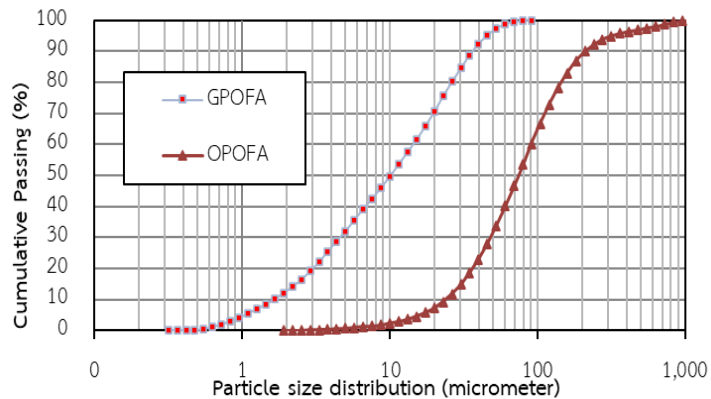
รูปที่ 5 ถ้ำปาล์มน้ำมันบดละเอียด (GPOFA)



รูปที่ 4 ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกประเภทใช้ทั่วไปในงานโครงสร้าง (HLC) กำลังขยาย 5,000 เท่า



รูปที่ 6 ถ้ำปาล์มน้ำมันบดละเอียด (GPOFA) กำลังขยาย 1,000 เท่า



รูปที่ 7 การกระจายตัวของอนุภาคของถ้ำปาล์มน้ำมันบดละเอียด (GPOFA) และถ้ำปาล์มน้ำมันจากโรงงาน (OPOFA)



6. น้ำผสมคอนกรีต (Water) ใช้น้ำสะอาดปราศจากกรด ต่าง น้ำมัน และอินทรีย์สารอื่น ๆ ในปริมาณที่จะเป็นอันตรายต่อคอนกรีต

7. สารลดน้ำพิเศษประเภท F (High Range Water-Reducing Admixtures Type F, Super P) มาตรฐาน ASTM C 494

2.2 การเตรียมตัวอย่างทดสอบ

กำหนดปริมาณวัสดุประสานเท่ากับ 560 กก./ม.³ แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ด้วยเถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียดในอัตราส่วนร้อยละ 0 30 40 และ 50 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน (30GPOFA 40GPOFA และ 50GPOFA) และเปรียบเทียบกับคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 (CT-SRC) และคอนกรีตปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก (HLC) เป็นวัสดุประสานเพียงอย่างเดียว กำหนดอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานคงที่เท่ากับ 0.28 และใช้สารลดน้ำพิเศษเพื่อควบคุมค่าการยุบตัวของคอนกรีตให้อยู่ในช่วง 100±20 มม. โดยปฏิบัติการผสม และสัญลักษณ์ส่วนผสมของคอนกรีตแสดงในตารางที่ 3 ใช้ตัวอย่างคอนกรีตรูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 100 มม. สูง 200 มม. หลังจากถอดแบบคอนกรีตที่มีอายุครบ 24 ชั่วโมง นำตัวอย่างคอนกรีตไปแช่น้ำทะเลบริเวณท่าเรือเก่าชายหาดแขวงเก่า อำเภอชนอม จังหวัดนครศรีธรรมราช ในสภาวะเปียกสลบแห้ง สำหรับการทดสอบหาค่ากำลังอัดของคอนกรีตตามมาตรฐาน ASTM C39 ที่อายุ 7 28 และ 60 วัน การทดสอบค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตตามมาตรฐาน ASTM C469 ที่อายุ 28 และ 60 วัน โดยค่ากำลังอัดและค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตได้มาจากค่าเฉลี่ยของคอนกรีต 3 ตัวอย่าง

2.2.1 การทดสอบคุณสมบัติของคอนกรีตสด

1. การทดสอบการยุบตัวของคอนกรีต (Slump Test) ตามมาตรฐาน ASTM C143 การทดสอบนี้มีความสำคัญในการกำหนดความสามารถในการทำงาน (Workability) หรือความชื้นเหลวของคอนกรีตสด ซึ่งเป็นคุณสมบัติที่สำคัญในการเท และตกแต่งคอนกรีต การยุบตัวที่เหมาะสมจะช่วยให้คอนกรีตสามารถเทลงแบบหล่อได้อย่างทั่วถึง และง่ายต่อการตกแต่ง

2. การบ่มตัวอย่างคอนกรีต เมื่อหล่อตัวอย่างคอนกรีตมีอายุครบ 24 ชม. จะนำคอนกรีตตัวอย่างไปแช่น้ำทะเลบริเวณท่าเรือชนอมเบทมารีน ซึ่งมีสภาวะเปียกสลบแห้ง ดังรูปที่ 8 เพื่อศึกษาผลกระทบจากน้ำทะเลที่ส่งผลกระทบต่อคุณสมบัติของคอนกรีตในด้านกำลังรับแรงอัด และโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต

2.2.2 การทดสอบคุณสมบัติของคอนกรีตที่แข็งตัว

1. การทดสอบกำลังอัดของคอนกรีต (Compressive Strength Test of Concrete) ตามมาตรฐาน ASTM C39 การทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตเป็นวิธีมาตรฐานที่ใช้ในการประเมินความสามารถของคอนกรีตในการรับแรงอัด ซึ่งเป็น



รูปที่ 8 คอนกรีตตัวอย่างที่บ่มในสภาวะเปียกสลบแห้ง



คุณสมบัติที่สำคัญที่สุดของคอนกรีต โดยจะทำการทดสอบที่อายุ 7 28 และ 60 วัน ของอายุคอนกรีต โดยจะทดสอบครั้งละ 3 ตัวอย่าง

2. การทดสอบโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต (Modulus of Elasticity) ตามมาตรฐาน ASTM C469 โมดูลัสยืดหยุ่นเป็นคุณสมบัติทางกลที่สำคัญของคอนกรีต ซึ่งแสดงถึงความสามารถของวัสดุในการเปลี่ยนรูปภายใต้แรงกระทำโดยไม่เกิดการเสียรูปถาวร การวิเคราะห์โมดูลัสยืดหยุ่นช่วยให้สามารถคาดการณ์พฤติกรรมการรับน้ำหนัก และการเสียรูปของโครงสร้างคอนกรีต โดยจะทำการทดสอบที่อายุ 28 และ 60 วัน ของอายุคอนกรีต โดยจะทดสอบครั้งละ 3 ตัวอย่าง

2.2.3 การประเมินผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมของคอนกรีต

ตารางที่ 4 แสดงค่า Emission factor ของวัสดุที่ใช้ในงานวิจัย จัดทำโดยองค์การบริหารจัดการก๊าซเรือนกระจก (องค์การมหาชน) และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง โดยปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่า (CO₂) คำนวณได้จากผลคูณระหว่างปริมาณวัสดุที่ใช้ในการ

ผลิตคอนกรีต กับค่าสัมประสิทธิ์การปล่อยก๊าซเรือนกระจกของวัสดุ (Emission Factor) ดังสมการที่ 1

$$CO_2 = \text{ปริมาณวัสดุ} \times \text{Emission Factor} \quad (1)$$

3. ผลการวิจัยและอภิปรายผล

3.1 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการยุบตัว และปริมาณการใช้สารลดน้ำพิเศษ

รูปที่ 9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการยุบตัวของคอนกรีต และปริมาณการใช้สารลดน้ำพิเศษ (Super P) ผลการทดสอบพบว่าคอนกรีต CT-SRC มีค่าการยุบตัวเท่ากับ 101 มม. ซึ่งอยู่ในช่วงเป้าหมายของการออกแบบที่ 100±20 มม. และมีการใช้ Super P ในปริมาณต่ำเท่ากับร้อยละ 2.1 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน แสดงให้เห็นว่าคอนกรีต CT-SRC มีความสามารถในการไหลตัวที่ดีในระดับหนึ่ง โดยไม่ต้องพึ่งพา Super P ในปริมาณมากนัก ในขณะที่คอนกรีต HLC มีค่าการยุบตัวที่ต่ำที่สุดเท่ากับ 86 มม. ซึ่งยังคงอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ แต่ค่อนข้างต่ำกว่าค่าเป้าหมาย และมีการใช้ Super P ในปริมาณที่

ตารางที่ 3 ปฏิภาคส่วนผสมของคอนกรีต

MIX	Mix Proportion (kg./m. ³)						W/B	Super P	Slump (mm.)
	HLC	SRC	GPOFA	Sand	Stone	Water			
CT-SRC	-	560	-	764	986	156.8	0.28	2.1	101
HLC	560	-	-	764	986	156.8	0.28	2.0	86
30GPOFA	-	392	168	751	970	156.8	0.28	3.5	95
40GPOFA	-	336	224	747	964	156.8	0.28	4.2	83
50GPOFA	-	280	280	742	960	156.8	0.28	6.1	98

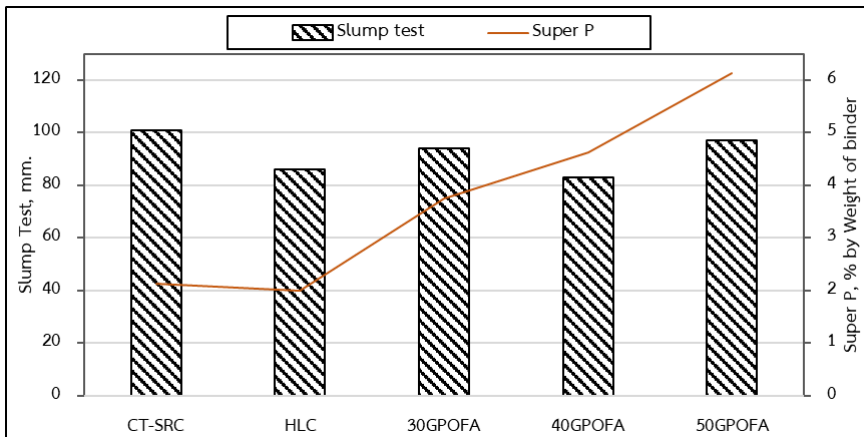


ตารางที่ 4 ค่าสัมประสิทธิ์การปล่อยก๊าซเรือนกระจกของวัสดุ (Emission Factor)

Materials	Emission factor/kg
HLC	0.847 [6]
SRC	0.910 [6]
GPOFA	0.106 [9]
River sand	0.028 [10]
Stone	0.039 [10]
Water	0.0003238 [10]
Super P	0.772 [10]

ใกล้เคียงกับคอนกรีต CT-SRC ซึ่งอาจบ่งชี้ได้ว่า ส่วนผสมของ คอนกรีต HLC อาจมีความต้องการน้ำที่สูงกว่า หรือมีลักษณะของวัสดุที่ทำให้คอนกรีตมีความหนืดมากกว่า สำหรับคอนกรีตที่มีส่วนผสมของ GPOFA ในอัตราส่วนต่าง ๆ พบว่า คอนกรีต 30GPOFA มีค่าการยุบตัวเท่ากับ 95 มม. ซึ่งใกล้เคียงกับค่าเป้าหมาย และมีการใช้ Super P เท่ากับร้อยละ 3.5 โดยน้ำหนักของวัสดุประสานซึ่ง

เพิ่มขึ้นเล็กน้อย จากนั้นเมื่อทำการเพิ่มปริมาณ GPOFA เป็นร้อยละ 40 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน (40GPOFA) พบว่าค่าการยุบตัวลดลงเท่ากับ 83 มม. ซึ่งต่ำกว่าค่าเป้าหมายอย่างชัดเจน แม้ว่าจะมีการเพิ่มปริมาณ Super P ขึ้นเป็นร้อยละ 4.2 โดยน้ำหนักของวัสดุประสานก็ตาม การลดลงของค่าการยุบตัวนี้อาจเป็นผลมาจากลักษณะทางกายภาพของ GPOFA ที่มีความต้องการน้ำในส่วนผสมที่เพิ่มมากขึ้น อย่างไรก็ตาม เมื่อเพิ่มปริมาณ GPOFA สูงสุดร้อยละ 50 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน (50GPOFA) กลับพบว่าค่าการยุบตัวเพิ่มขึ้นเท่ากับ 98 มม. ซึ่งใกล้เคียงกับค่าเป้าหมายอีกครั้ง ในขณะที่มีการใช้ Super P ในปริมาณสูงที่สุดเท่ากับร้อยละ 6.1 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน จากผลการทดสอบในแต่ละส่วนผสมแสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ระหว่างชนิดของอัตราส่วนผสมคอนกรีต ปริมาณ Super P และความสามารถในการไหลตัว หรือความสามารถในการเทได้ของคอนกรีต ซึ่งเป็นคุณสมบัติที่สำคัญต่อการทำงานคอนกรีต [6, 11-12]



รูปที่ 9 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการยุบตัวของคอนกรีต และปริมาณการใช้สารลดน้ำพิเศษ

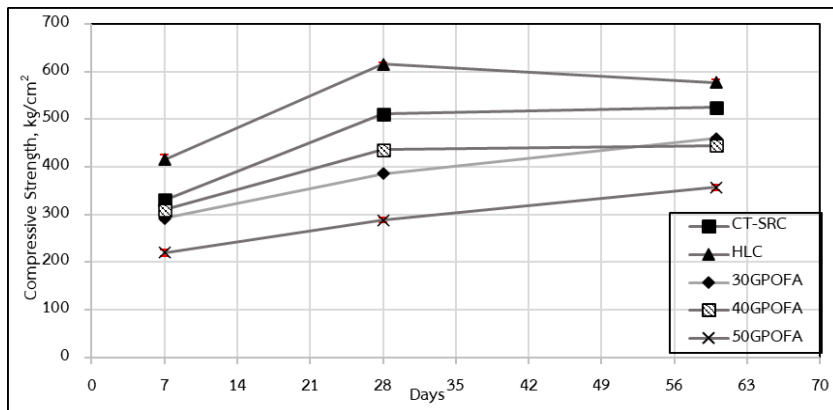


จากผลการทดสอบนี้แสดงให้เห็นว่าชนิดของ ส่วนผสมในคอนกรีตมีผลอย่างมากต่อค่าการยุบตัว และความต้องการ Super P โดยคอนกรีต HLC และ คอนกรีต CT-SRC มีความสามารถในการไหลตัวที่ดี โดยธรรมชาติ ในขณะที่คอนกรีตที่ใช้ GPOFA แทนที่ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 มีความต้องการ ปริมาณ Super P ในปริมาณที่มากขึ้น เพื่อให้ได้ค่าการ ยุบตัวที่เหมาะสม นอกจากนี้ ปริมาณการใช้ GPOFA แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ที่เพิ่มขึ้น ส่งผลต่อความต้องการ Super P ในปริมาณที่สูงขึ้นตาม ไปด้วย โดยเฉพาะอย่างยิ่ง คอนกรีต 50GPOFA ซึ่ง ต้องการสารลดน้ำพิเศษที่สูงที่สุดเพื่อให้ได้ค่าการยุบตัว ที่ใกล้เคียงกับคอนกรีต CT-SRC เนื่องจาก GPOFA มี ขนาดอนุภาคที่เล็ก และมีความเป็นรูพรุนมากกว่า ปูนซีเมนต์ส่งผลให้มีความต้องการน้ำสูงขึ้น ส่งผลให้มีความสามารถในการเทได้ที่ต่ำกว่าคอนกรีตที่ทำจาก ปูนซีเมนต์เป็นวัสดุประสาน ทำให้มีการดูดซับน้ำมากขึ้นในระหว่างการผสมคอนกรีตซึ่งสอดคล้องกับ การศึกษาของเทพฤทธิ์ เจริญสุข ที่ศึกษาผลของ ปริมาณการใช้ Super P ของคอนกรีตที่ใช้เถ้าปาล์ม

น้ำมันบดละเอียดแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (OPC) ในปริมาณสูงในคอนกรีตกำลังสูง [12]

3.2 กำลังอัดของคอนกรีต

รูปที่ 10 แสดงผลการทดสอบกำลังอัดของ คอนกรีตที่อายุการบ่ม 7 28 และ 60 วัน พบว่า คอนกรีตควบคุม (CT-SRC) มีกำลังอัดเฉลี่ยที่อายุ 7 28 และ 60 วัน เท่ากับ 330.75 511.16 และ 524.98 กก./ชม.² ตามลำดับ ซึ่งถูกปรับให้เป็นค่าร้อยละ 100 ในทุกช่วงอายุ แสดงให้เห็นถึงพัฒนาการกำลังอัดของ คอนกรีตทั่วไป โดยมีการเพิ่มขึ้นของกำลังอัดอย่าง ต่อเนื่องในช่วงแรก และอัตราการเพิ่มขึ้นจะลดลงเมื่อ อายุมากขึ้น ในขณะที่คอนกรีต HLC แสดงค่ากำลังอัด ที่สูงกว่าคอนกรีต CT-SRC อย่างชัดเจนในทุกช่วง อายุ โดยคอนกรีต HLC โดยมีกำลังอัดที่อายุ 7 วัน สูง ถึง 415.13 กก./ชม.² หรือร้อยละ 126 เมื่อเทียบกับ คอนกรีต CT-SRC และยังคงมีกำลังอัดสูงกว่าที่อายุ 28 วัน เท่ากับ 615.15 กก./ชม.² หรือร้อยละ 120 ของคอนกรีต CT-SRC จากนั้นเมื่อระยะเวลาการบ่ม ครบ 60 วันมีค่ากำลังอัด 577.15 กก./ชม.² หรือ



รูปที่ 10 ผลทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตในช่วงอายุ 7, 28 และ 60 วัน

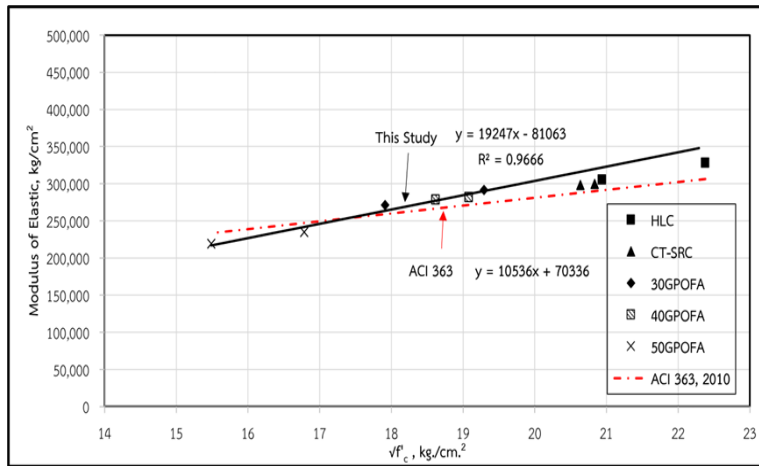


ร้อยละ 110 ของคอนกรีต CT-SRC ผลการทดสอบนี้แสดงให้เห็นว่าส่วนผสมของคอนกรีต HLC มีสัดส่วนของวัสดุ หรือชนิดของซีเมนต์ที่ส่งเสริมให้เกิดการพัฒนากำลังอัดที่รวดเร็ว และสูงกว่าคอนกรีต CT-SRC ในสภาวะแวดล้อมทะเล [2, 13-14] อย่างไรก็ตามอัตราส่วนกำลังอัดสัมพัทธ์มีแนวโน้มลดลงเมื่ออายุเพิ่มมากขึ้น ซึ่งอาจเกิดจากผลกระทบของสภาวะน้ำทะเล เมื่อพิจารณาคอนกรีตที่มี GPOFA ในอัตราส่วนร้อยละ 30 40 และ 50 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน แสดงแนวโน้มของกำลังอัดที่ลดลงเมื่อเทียบกับคอนกรีตควบคุมในทุกช่วงอายุ และมีแนวโน้มลดลงตามปริมาณการใช้ GPOFA ที่เพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน โดยคอนกรีต 30GPOFA มีกำลังอัดที่อายุ 7 28 และ 60 วัน เท่ากับ 292.03 385.56 และ 459.61 กก./ cm^2 หรือร้อยละ 88 75 และ 88 ตามลำดับ จะเห็นได้ว่ากำลังอัดสัมพัทธ์ค่อนข้างต่ำในช่วงต้น แต่มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่ออายุมากขึ้น ซึ่งเป็นลักษณะที่มักพบในคอนกรีตที่มีส่วนผสมของวัสดุปอซโซลานเนื่องจากปฏิกิริยาปอซโซลานของ GPOFA จะเกิดขึ้นอย่างช้าๆ และส่งผลต่อการพัฒนา กำลังอัดในระยะยาว โดยคอนกรีต 40GPOFA แสดงกำลังอัดที่สูงกว่าคอนกรีต 30GPOFA ในช่วงอายุ 7 และ 28 วัน โดยมีค่าเท่ากับ 309.29 และ 435.51 กก./ cm^2 หรือร้อยละ 94 และ 85 ของคอนกรีต CT-SRC ที่อายุ 7 และ 28 วัน ตามลำดับ ในขณะที่คอนกรีต 50GPOFA ซึ่งมีกำลังอัดต่ำที่สุดในกลุ่มคอนกรีตที่มีส่วนผสมของ GPOFA โดยมีค่ากำลังอัดเพียง 219.99 287.90 และ 356.95 กก./ cm^2 หรือร้อยละ 67 56 และ 68 ของคอนกรีต CT-SRC ที่อายุ 7 28 และ 60 วัน ตามลำดับ จากผลการทดสอบสอดคล้องกับงานวิจัย

ของวิเชียร ชาลี ที่ศึกษาการใช้เถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียดแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ซึ่งระบุว่า การใช้ GPOFA ในปริมาณที่มากอาจส่งผลต่อการพัฒนา กำลังอัดในช่วงต้น [13-14] อย่างไรก็ตามที่อายุ 60 วัน จะเห็นได้ว่าคอนกรีตผสมเถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียดที่ร้อยละ 30 40 และ 50 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน มีกำลังอัดสัมพัทธ์ร้อยละ 119 99 และ 124 ตามลำดับ เมื่อเทียบกับคอนกรีตที่อายุ 28 วัน ซึ่งบ่งชี้ว่าเถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียดเริ่มทำปฏิกิริยาปอซโซลาน ในช่วงอายุที่มากขึ้นทำให้กำลังอัดพัฒนาขึ้นได้ซึ่งแตกต่างกับคอนกรีต HLC ที่มีกำลังอัดสัมพัทธ์ที่ 60 วัน เท่ากับร้อยละ 94 เมื่อเทียบกับอายุ 28 วัน ดังรูปที่ 9 ซึ่งบ่งชี้ว่าการบ่มคอนกรีตในสภาวะน้ำทะเล ส่งผลให้กำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกมีกำลังอัดลดลง [13-16]

3.3 การทดสอบโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต

รูปที่ 11 แสดงความสัมพันธ์ของรากลที่สองของกำลังอัด และโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต ที่อายุ 28 และ 60 วัน พบว่าคอนกรีตที่มีส่วนผสมของวัสดุประสานที่แตกต่างกัน มีค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นที่แตกต่างกัน และมีความสัมพันธ์กับรากลที่สองของกำลังอัด คอนกรีตที่พัฒนาขึ้นตามอายุการบ่มคอนกรีต CT-SRC ที่อายุ 28 วัน มีค่าโมดูลัสยืดหยุ่นเท่ากับ 298,181 กก./ cm^2 ควบคู่กับรากลที่สองกำลังอัดเท่ากับ 20.64 กก./ cm^2 เมื่ออายุเพิ่มขึ้นเป็น 60 วัน ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเท่ากับ 299,756 กก./ cm^2 พร้อมกับรากลที่สองกำลังอัดที่เพิ่มขึ้นเท่ากับ 20.83 กก./ cm^2 แนวโน้มนี้แสดงให้เห็นว่าคอนกรีต CT-SRC มีการพัฒนาของกำลังอัดส่งผลให้ค่าความ



รูปที่ 11 ความสัมพันธ์ของรากที่สองของกำลังอัด และโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต

ยืดหยุ่นเพิ่มขึ้นตามไปด้วย เมื่อพิจารณาคอนกรีต HLC ที่อายุ 28 วัน มีค่าโมดูลัสยืดหยุ่นสูงที่สุดในกลุ่มเท่ากับ 327,926 กก./ชม.² และมีรากที่สองของกำลังอัดเท่ากับ 22.38 กก./ชม.² อย่างไรก็ตาม เมื่ออายุถึง 60 วัน ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นลดลงเล็กน้อยเท่ากับ 305,277 กก./ชม.² ในขณะที่รากที่สองของกำลังอัดลดลงเท่ากับ 20.94 กก./ชม.² การเปลี่ยนแปลงนี้อาจบ่งชี้ถึงปัจจัยภายในคอนกรีตที่ส่งผลต่อความสัมพันธ์ระหว่างความโมดูลัสยืดหยุ่น และรากที่สองของกำลังอัดในระยะยาว โดยคอนกรีต 30GPOFA ที่อายุ 28 วัน มีค่าโมดูลัสยืดหยุ่นเท่ากับ 271,342 กก./ชม.² (รากที่สองของกำลังอัดเท่ากับ 17.91 กก./ชม.²) และเพิ่มขึ้นเป็น 291,371 กก./ชม.² (รากที่สองของกำลังอัดเท่ากับ 19.29 กก./ชม.²) ที่อายุ 60 วัน แสดงให้เห็นว่าการเพิ่มขึ้นของกำลังอัดส่งผลให้โมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตเพิ่มขึ้น ในขณะที่คอนกรีต 40GPOFA มีค่าโมดูลัสยืดหยุ่นเท่ากับ 278,201 กก./ชม.² (รากที่สองของกำลังอัดเท่ากับ 18.62 กก./ชม.²) ที่อายุ

28 วัน และเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเท่ากับ 281,641 กก./ชม.² (รากที่สองของกำลังอัดเท่ากับ 19.08 กก./ชม.²) ที่อายุ 60 วัน การเปลี่ยนแปลงที่ไม่มากนักนี้อาจบ่งชี้ว่าการเพิ่มขึ้นของกำลังอัดในช่วงนี้มีผลต่อโมดูลัสยืดหยุ่นไม่มากเท่าที่ควร เมื่อพิจารณาคอนกรีต 50GPOFA มีค่าโมดูลัสยืดหยุ่นต่ำที่สุดในกลุ่มเท่ากับ 219,145 กก./ชม.² (รากที่สองของกำลังอัดเท่ากับ 15.49 กก./ชม.²) ที่อายุ 28 วัน และเพิ่มขึ้นเท่ากับ 234,619 กก./ชม.² (รากที่สองของกำลังอัดเท่ากับ 16.78 กก./ชม.²) ที่อายุ 60 วัน แม้ว่าค่าจะยังต่ำที่สุด แต่การเพิ่มขึ้นของทั้งโมดูลัสยืดหยุ่นและกำลังอัดอย่างชัดเจน แสดงให้เห็นถึงพัฒนาการของคอนกรีตเมื่ออายุมากขึ้น [6, 11, 12]

ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าการใช้เถ้าปาล์ม น้ำมันบดละเอียดแทนที่ปูนซีเมนต์ในอัตราส่วนต่างๆ สามารถช่วยลดผลต่อกระทบต่อกำลังอัด และโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตในสภาวะน้ำทะเล ยกเว้นคอนกรีตที่ใช้ปูนไฮดรอลิกซีเมนต์ เนื่องจากกำลังอัด



และโมดูลัสยืดหยุ่นมีค่าลดลง หลังจากอายุบ่มในสภาวะน้ำทะเล 60 วัน ซึ่งอาจเป็นผลมาจากผลกระทบที่เกิดจากน้ำทะเลที่มีผลต่อการใช้ปูนไฮดรอลิกซีเมนต์ โดยคอนกรีต HLC แสดงค่าโมดูลัสยืดหยุ่นสูงสุดที่อายุ 28 วัน แต่กลับมีค่าลดลง เมื่ออายุถึง 60 วัน ในขณะที่กำลังอัดประลัยลดลงเล็กน้อย เมื่อพิจารณาคอนกรีต CT-SRC แสดงแนวโน้มการเพิ่มขึ้นของทั้งโมดูลัสยืดหยุ่น และกำลังอัดประลัยเมื่ออายุการบ่มเพิ่มขึ้น

ในส่วนของคอนกรีตที่มี GPOFA ในอัตราส่วนร้อยละ 30 40 และ 50 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่า ค่าโมดูลัสยืดหยุ่น และกำลังอัดประลัยมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามอายุการบ่ม อย่างไรก็ตามผลการทดสอบมีความแตกต่างกันโดยขึ้นอยู่กับอัตราส่วนของ GPOFA การที่โมดูลัสยืดหยุ่นมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามอายุการบ่มเป็นผลมาจากกระบวนการไฮเดรชันของซีเมนต์ที่ดำเนินไปอย่างต่อเนื่อง ทำให้โครงสร้างซีเมนต์เพสต์มีความหนาแน่น และแข็งแรงมากขึ้น ส่งผลให้คอนกรีตมีความต้านทานต่อการรับแรงภายใต้แรงกระทำสูงขึ้น

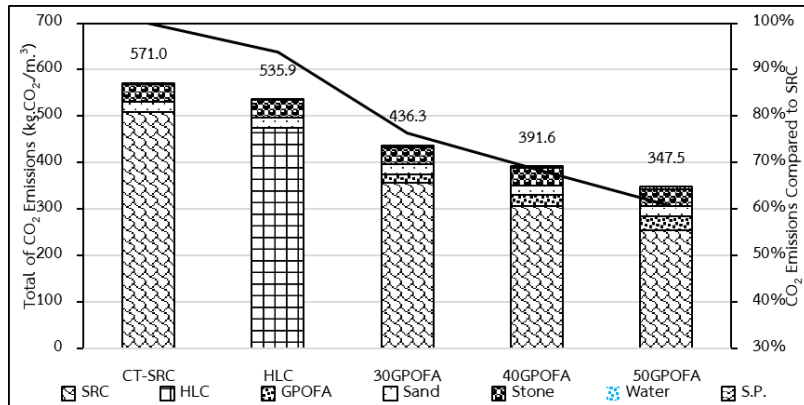
อย่างไรก็ตาม กรณีของคอนกรีต HLC ที่โมดูลัสยืดหยุ่นลดลงที่อายุ 60 วัน ซึ่งอาจบ่งชี้ถึงผลกระทบจากสภาวะน้ำทะเล โดยกรณีของคอนกรีต HLC ไม่เหมาะสำหรับใช้ในสภาวะน้ำทะเล ที่มีซัลเฟตและคลอไรด์สูง แสดงว่าถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียดแทนที่ปูนซีเมนต์ในอัตราส่วนต่าง ๆ สามารถช่วยลดผลกระทบที่เกิดจากการต้านทานซัลเฟต และคลอไรด์สูงกว่าปูนไฮดรอลิกซีเมนต์ ทั้งยังช่วยพัฒนากำลังอัดในระยะยาว การใช้ถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียดแทนที่

ปูนซีเมนต์ในคอนกรีตมีผลต่อโมดูลัสยืดหยุ่นแตกต่างกันไปตามปริมาณที่ใช้

เมื่อพิจารณาผลการทดสอบจากรูปที่ 10 แสดงให้เห็นว่าคอนกรีต 40GPOFA มีแนวโน้มให้ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นสูงที่สุดเมื่ออายุ 60 วัน เมื่อเปรียบเทียบกับส่วนผสมอื่นที่ใช้ GPOFA ในปริมาณที่แตกต่างกัน ซึ่งอาจบ่งชี้ว่าการใช้ GPOFA ในอัตราส่วนที่เหมาะสมสามารถช่วยปรับปรุงความยืดหยุ่นของคอนกรีตได้ อย่างไรก็ตามการใช้ GPOFA ในปริมาณที่สูง อาจส่งผลให้ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นลดลง ซึ่งอาจเกี่ยวข้องกับปริมาณซีเมนต์ที่ลดลง และผลกระทบต่อการก่อตัวของโครงสร้างซีเมนต์เพสต์ ซึ่งส่งผลต่อกลไกการพัฒนาความแข็งแรง และความยืดหยุ่นในระยะยาว [11-14]

3.4 การประเมินผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมของคอนกรีต

รูปที่ 12 แสดงปริมาณการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของคอนกรีต ที่ใช้ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก (HLC) และคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 5 (CT-SRC) และถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียด (GPOFA) แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ในอัตราส่วนร้อยละ 30 40 และ 50 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ต่อปริมาตร 1 ม.³ โดยปริมาณการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของคอนกรีตประกอบด้วยปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก ปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ต่อกิโลกรัมวัสดุ (kg.CO₂/kg) จากกระบวนการผลิต การขนส่ง และปริมาณการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์อื่น ๆ รวมเท่ากับ 0.847 kg.CO₂/kg. ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ประมาณ 0.910 kg.CO₂/kg. [8]



รูปที่ 12 ปริมาณการปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์ของคอนกรีต

ในขณะที่เก่าปาล์มน้ำมันบดละเอียด มีการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากกระบวนการผลิต การขนส่ง การใช้พลังงานในการบด และปริมาณการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์อื่น ๆ รวมเท่ากับ 0.106 kg.CO₂/kg. [9] มวลรวมละเอียด (ทรายหยาบ) เท่ากับ 0.028 kg.CO₂/kg. มวลรวมหยาบ (หิน3/4) เท่ากับ 0.039 kg.CO₂/kg. สารลดน้ำพิเศษประเภท F (Super P) ปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากกระบวนการผลิตเท่ากับ 0.772 kg.CO₂/kg. และน้ำสะอาด ปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เท่ากับ 0.0003238 kg.CO₂/kg. [10]

ผลการประเมินแสดงให้เห็นว่าคอนกรีต HLC และคอนกรีต CT-SRC มีปริมาณการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เท่ากับ 535.9 และ 571.0 kg.CO₂/m³ ตามลำดับ เนื่องจากทั้งสองส่วนผสมนี้ใช้วัสดุประสานหลักในปริมาณที่เท่ากัน (560 กก./ม.³) และมีค่าการปล่อย CO₂ ต่อหน่วยการผลิตที่ใกล้เคียงกัน แต่ปริมาณการปล่อย CO₂ ใกล้เคียงกัน บ่งชี้ถึงสัดส่วนการปล่อยที่คล้ายคลึงกันจากวัสดุประสานหลัก เมื่อเทียบกับส่วนผสมอื่นๆ ในคอนกรีต เช่น ทราย

หิน และน้ำ ซึ่งมีปริมาณการปล่อย CO₂ ต่อหน่วยที่ต่ำกว่ามาก เมื่อพิจารณาถึงค่าการปล่อย CO₂ ต่อหน่วยการผลิตของวัสดุต่างๆ พบว่า HLC และ SRC มีค่าการปล่อย CO₂ ต่อหน่วยการผลิตที่สูงมาก (0.847 และ 0.910 kg.CO₂/kg.) ซึ่งเป็นสาเหตุหลักที่ทำให้คอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์มีการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์รวมที่สูง ในทางตรงกันข้าม GPOFA มีค่าการปล่อย CO₂ ต่อหน่วยการผลิตที่ต่ำกว่ามาก (0.106 kg.CO₂/kg.) ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญที่ทำให้การนำ GPOFA มาใช้ทดแทนปูนซีเมนต์สามารถลดปริมาณการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของคอนกรีตได้อย่างมีประสิทธิภาพ สำหรับวัสดุผสมอื่นๆ เช่น ทราย หิน น้ำ และ Super P มีค่าการปล่อย CO₂ ต่อหน่วยการผลิตที่ต่ำมาก (0.028, 0.039, 0.0003238 และ 0.772 kg.CO₂/kg. ตามลำดับ) และถึงแม้จะใช้ในปริมาณมากในส่วนผสมคอนกรีต แต่มีสัดส่วนในการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์รวมที่ค่อนข้างน้อยเมื่อเทียบกับวัสดุประสาน โดยสามารถกล่าวได้ว่า การนำ GPOFA มาใช้เป็นส่วนผสมทดแทน SRC ในการผลิตคอนกรีต เป็นแนวทางที่มี



ประสิทธิภาพในการลดปริมาณการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้อย่างชัดเจน โดยอัตราส่วนการทดแทนที่สูงขึ้นจะส่งผลให้ปริมาณการปล่อย CO₂ รวมของคอนกรีตลดลงมากขึ้น โดยรวมพบว่าการใช้ GPOFA แทนที่ SRC ในอัตราส่วนร้อยละ 30, 40 และ 50 โดยน้ำหนักของวัสดุประสานสามารถลดปริมาณการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากการผลิตคอนกรีตลงได้ร้อยละ 24 31 และ 39 ตามลำดับ [9-11]

4. สรุปผลการวิจัย

1. คอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก (HLC) และคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 (CT-SRC) ให้กำลังอัดสูงสุดที่อายุ 28 วัน แต่กำลังอัดของคอนกรีต HLC ลดลงเมื่อปมในน้ำทะเลมากขึ้น เนื่องจากผลกระทบจากซัลเฟตและคลอไรด์

2. การใช้ เถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียด (GPOFA) แทนที่ SRC ในอัตราส่วนร้อยละ 30, 40, และ 50 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน ทำให้กำลังอัดลดลงตามสัดส่วนการแทนที่ โดยคอนกรีต 30GPOFA ให้กำลังอัดใกล้เคียงกับคอนกรีต CT-SRC ในระยะยาว เนื่องจากปฏิกิริยาปอซโซลานมีการพัฒนากำลังอัดที่ช้ากว่าปฏิกิริยาไฮเดรชันของ HLC และ SRC แต่มีการพัฒนากำลังในระยะยาวที่สูงกว่า และสามารถช่วยลดผลกระทบต่อกำลังอัดของคอนกรีตที่ได้รับผลกระทบจากสภาวะน้ำทะเล

3. ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตผสม GPOFA พัฒนาขึ้นตามอายุการปม โดยคอนกรีต 40GPOFA มีค่าสูงสุด ซึ่งพบว่าคอนกรีตที่ใช้ GPOFA แทนที่ SRC มีค่าโมดูลัสยืดหยุ่นใกล้เคียงกับมาตรฐาน ACI 363 ซึ่งบ่งชี้ว่าการใช้ GPOFA สามารถให้คุณสมบัติ

ใกล้เคียงกับคอนกรีตที่ใช้ HLC และ SRC การใช้ GPOFA ไม่ส่งผลเสียต่อโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต

4. การใช้ GPOFA แทนที่ SRC ในอัตราส่วนร้อยละ 30, 40 และ 50 โดยน้ำหนักของวัสดุประสานสามารถช่วยลดปริมาณการปล่อย CO₂ จากการผลิตคอนกรีตสู่ชั้นบรรยากาศลดลงร้อยละ 22, 29, และ 37 สำหรับอัตราส่วนการแทนที่เดียวกัน เนื่องจากกระบวนการผลิต GPOFA ปล่อยคาร์บอนน้อยกว่า HLC และ SRC ทั้งยังช่วยลดมลภาวะที่เกิดจากการกองเก็บ และทิ้งเถ้าปาล์มน้ำมันที่เหลือจากกระบวนการผลิตน้ำมันปาล์มที่มีปริมาณมาก

5. การใช้ GPOFA แทนที่ SRC ในอัตราส่วนที่เหมาะสม คือไม่เกินร้อยละ 30 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน เพื่อรักษากำลังอัดของคอนกรีตในสภาวะแวดล้อมทะเล สำหรับงานที่ไม่ต้องการกำลังอัดสูงหรืองานที่ต้องการรับกำลังอัดในระยะยาว อาจพิจารณาใช้ GPOFA ในอัตราส่วนร้อยละ 30 และ 40 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน เนื่องจากคอนกรีตที่ใช้ GPOFA มีการพัฒนากำลังอัดในระยะยาวที่ดีกว่า ทั้งยังสามารถลดผลกระทบจากสภาวะน้ำทะเลที่ส่งผลต่อกำลังอัดของคอนกรีตได้ดีว่า เพื่อลดต้นทุนและปริมาณการปล่อยคาร์บอน

การศึกษานี้แสดงให้เห็นว่า GPOFA มีศักยภาพในการเป็นวัสดุทดแทนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 สำหรับคอนกรีตในสภาพแวดล้อมทะเล โดยไม่เพียงช่วยลดการปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์ ใดๆ ก็ดี การใช้ GPOFA ควรอยู่ในอัตราส่วนที่เหมาะสม (ไม่เกินร้อยละ 30) เพื่อรักษาสมดุลระหว่างกำลังอัดและความคุ้มค่าของผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม ผลการศึกษานี้เป็นแนวทางสำคัญสำหรับการพัฒนา



คอนกรีตอย่างยั่งยืน โดยการนำวัสดุเหลือทิ้งจากอุตสาหกรรมปาล์มน้ำมันมาใช้ประโยชน์สูงสุด

5. กิตติกรรมประกาศ

โครงการวิจัยได้รับการสนับสนุนงบประมาณจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัยงบประมาณเพื่อสนับสนุนงานมูลฐาน (Fundamental Fund) ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2567 จากกองทุนส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม (ววน) คณะผู้วิจัยขอขอบคุณ หลักสูตรวิชาวิศวกรรมโยธา วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรมและการจัดการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย ที่เอื้อเพื่อห้องปฏิบัติการเครื่องมือ และอุปกรณ์ในการทดลองวิจัย และขอขอบพระคุณผู้ทรงคุณวุฒิที่กรุณาให้ข้อเสนอแนะที่เป็นประโยชน์ต่อการศึกษาวิจัยในครั้งนี้

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] <http://www.cuti.chula.ac.th/articles/482/>. (Accessed on 24 February 2025) (in Thai)
- [2] W. Chalee, T. Sasakul, P. Suwanmaneechot and C. Jaturapitakkul, Utilization of rice husk–bark ash to improve the corrosion resistance of concrete under 5-year exposure in a marine environment, *Cement and Concrete Composites*, 2013, 37, 47–53.
- [3] L.S. Ho, H.T.T. Ngo, H.T. Vu, S.T. Nguyen, V.N. Chau and V.Q. Dang, Durability of mortar and concrete containing pozzolans as a partial cement replacement in the marine environment: a review, *Journal of Science and Transport Technology*, 2023, 3, 13–25.
- [4] N. Yokawat and A. Rattanadilok Na Phuket, Chloride binding and chloride penetration of fly ash concrete under 15-year exposure in marine environment, Thesis, Burapha University, Thailand. 2013 (in Thai)
- [5] https://thaitca.or.th/wp-content/uploads/2022/09/TCA_M-020206_Marine-concrete.pdf. (Accessed on 4 February 2025) (in Thai)
- [6] W. Tangchirapat, C. Jaturapitakkul and P. Chindaprasirt, Use of palm oil fuel ash as a supplementary cementitious material for producing high-strength concrete, *Construction and Building Materials*, 2009, 23(7), 2641–2646.
- [7] ASTM C618, Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete, 2017.
- [8] <https://www.thaicma.or.th/upfiles/Environmentally/Environmentally%20Friendly%20Cement%20Products/TCMA-Handbook-HydraulicCement%20w-coverV.21-R.1-As-of-Dec-2-2022.pdf>. (Accessed on 14 February 2025) (in Thai)
- [9] N. Sompakdee, T. Klathae, C. Choosakul, S. Rittipakdee, P. Khamput and S. Dueramae, Compressive strength of cement mortar containing high volume palm oil fuel ash, The 28th National Convention on Civil Engineering (NCCE28), Proceeding, 2023, MAT35-1–MAT35-7. (in Thai)



- [10] P. Chindaprasirt, W. Kroehong, N. Damrongwiriyapap, W. Suriyo and C. Jaturapitakkul, Mechanical properties, chloride resistance and microstructure of Portland fly ash cement concrete containing high volume bagasse ash, *Journal of Building Engineering*, 2020, 31, 101415.
- [11] S. Men, W. Tangchirapat, C. Jaturapitakkul and C.C. Ban, Strength, fluid transport and microstructure of high-strength concrete incorporating high-volume ground palm oil fuel ash blended with fly ash and limestone powder, *Journal of Building Engineering*, 2022, 56, 104714.
- [12] T. Charoensuk, W. Tangchirapat and C. Jaturapitakkul, High-strength concrete containing high volume ground palm oil fuel ash. The 25th National Convention on Civil Engineering (NCCE25), Proceeding, 2020, STR44-1– STR44-6. (in Thai)
- [13] W. Chalee, A. Jaiyong, T. Cheewaket and C. Jaturapitakkul, An empirical model to predict chloride penetrations in concrete containing palm oil fuel ash based on 10-year exposure under marine environment, *International Journal of Concrete Structures and Materials*, 2023, 17(1), 53.
- [14] W. Chalee, T. Cheewaket and C. Jaturapitakkul, Enhanced durability of concrete with palm oil fuel ash in a marine environment, *Journal of Materials Research and Technology*, 2021, 13, 128-137.
- [15] H.M. Hamada, G.A. Jokhio, F.M. Yahaya, A.M. Humada and Y. Gul, The present state of the use of palm oil fuel ash (POFA) in concrete. *Construction and Building Material*, 2018, 175, 26–40.
- [16] T.U. Mohammed, H. Hamada and T. Yamaji, Marine durability of 30-year old concrete made with different cements. *Journal of Advanced Concrete Technology*, 2003, 1(1), 63–75.



การเพิ่มประสิทธิภาพการขนส่งบรรจุภัณฑ์ด้วยระบบอัตโนมัติต้นทุนต่ำตามหลักการคาราคูริไคเซ็น

ศิรประภา ดิประดิษฐ์¹ อภิชาติ กระจ่างเย่า^{2*} ภาณุมาศ วงษ์ชาญ² วาทิต ไกรทัต² และ
ณัฐริรา ดีสูงเนิน²

¹ สาขาวิชาวิศวกรรมการจัดการ, คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี, มหาวิทยาลัยราชภัฏพระนครศรีอยุธยา

² สาขาวิชาเทคโนโลยีอุตสาหกรรม, คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี, มหาวิทยาลัยราชภัฏพระนครศรีอยุธยา

* ผู้ประสานงานเผยแพร่ (Corresponding Author), E-mail: apichit@aru.ac.th

วันที่รับบทความ: 17 กันยายน 2568; วันที่ทบทวนบทความ: 6 มกราคม 2569; วันที่ตอบรับบทความ: 10 กุมภาพันธ์ 2569

วันที่เผยแพร่ออนไลน์: 20 เมษายน 2569

บทคัดย่อ: งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อออกแบบและพัฒนาระบบขนส่งบรรจุภัณฑ์อัตโนมัติต้นทุนต่ำตามหลักการคาราคูริไคเซ็น (Karakuri Kaizen) (แนวคิดการผลิตแบบลื่นตามต้นแบบญี่ปุ่น) เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการผลิต และวิเคราะห์ความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์สำหรับวิสาหกิจขนาดกลางและขนาดย่อม (SMEs) โดยดำเนินการทดลองเพื่อหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุดจากการปรับเปลี่ยนองศาความลาดเอียงของรางเลื่อนที่ระดับ 9, 11 และ 13 องศา ผลการศึกษาพบว่าที่ระดับความลาดเอียง 9 องศา ให้ประสิทธิภาพการทำงานสูงสุดเมื่อนำระบบต้นแบบที่พัฒนาขึ้นไปประยุกต์ใช้จริง พบว่าสามารถเพิ่มอัตราการผลิตในกระบวนการทำงานจาก 102.20 แพ็คต่อชั่วโมง เป็น 275.00 แพ็คต่อชั่วโมง คิดเป็นประสิทธิภาพการผลิตที่เพิ่มขึ้น 1.69 เท่า อีกทั้งผลการทดสอบทางสถิติยังยืนยันว่าประสิทธิภาพการทำงานระหว่างระบบเดิมและระบบที่พัฒนาขึ้นมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) นอกจากนี้ การวิเคราะห์ความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์พบว่ามีจุดคุ้มทุนอยู่ที่ 50 วันทำงาน ซึ่งแสดงให้เห็นว่าระบบที่นำเสนอนี้เป็นแนวทางที่คุ้มค่าต่อการลงทุนเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพด้านโลจิสติกส์ในอุตสาหกรรมการผลิต

คำสำคัญ: คาราคูริไคเซ็น; ระบบขนส่งบรรจุภัณฑ์อัตโนมัติ; ผลผลิตภาพการผลิต; ระบบแรงโน้มถ่วงไร้พลังงาน

Enhancing Packaging Transport Efficiency Using Low-Cost Karakuri Kaizen Automation Mechanism

Siraprapha Deepradit¹, Apichit Krajangyao^{2*}, Phanumat Vongchan², Watit Krithat² and Nattira Deesungnoen²

¹ Department of Engineering Management, Faculty of Science and Technology, Phranakhon Si Ayutthaya Rajabhat University

² Department of Industrial Technology, Faculty of Science and Technology, Phranakhon Si Ayutthaya Rajabhat University

* Corresponding author, E-mail: apichit@aru.ac.th

Received: 17 September 2025; Revised: 6 January 2026; Accepted: 10 February 2026

Online Published: 20 April 2026

Abstract: The objective of this research was to design and develop a low-cost automated packaging transport system based on Karakuri Kaizen principles (a Japanese lean manufacturing approach) to enhance production efficiency and to analyze the economic feasibility for Small and Medium-sized Enterprises (SMEs). The experimental design involved determining the optimal parameter by varying the inclination angles of the gravity conveyor at 9, 11, and 13 degrees. The results indicated that the 9-degree inclination yielded the highest operational performance. The implementation of the developed prototype significantly increased the production rate from 102.20 packs per hour to 275.00 packs per hour, representing a 1.69-fold increase in productivity. Furthermore, statistical analysis confirmed a significant difference in operational performance between the traditional and the developed systems ($p < 0.05$). Additionally, the economic feasibility analysis revealed a break-even point of 50 working days, demonstrating that the proposed system is a cost-effective investment for enhancing logistics efficiency in the manufacturing industry.

Keywords: Karakuri Kaizen; Automated material handling system; Productivity improvement; Gravity-driven zero-energy system



1. บทนำ

สถานการณ์ปัจจุบันของอุตสาหกรรมการผลิตในเรื่องการขนส่งบรรจุภัณฑ์กำลังเผชิญกับการเปลี่ยนแปลงครั้งใหญ่ โดยมีการเติบโตของตลาดที่แข็งแกร่งแต่ต้องเผชิญกับความท้าทายด้านแรงงาน ต้นทุน และความซับซ้อนทางเทคโนโลยี การพัฒนาระบบอัตโนมัติต้นทุนต่ำด้วยหลักการการคาราคูริไคเซ็นจึงเป็นโอกาสสำคัญในการแก้ไขปัญหาเหล่านี้ [1] การเติบโตของตลาดระบบอัตโนมัติบรรจุภัณฑ์ขับเคลื่อนโดยความต้องการที่เพิ่มขึ้นสำหรับประสิทธิภาพการดำเนินงาน การลดต้นทุนแรงงาน และการปรับปรุงความสม่ำเสมอของบรรจุภัณฑ์ในทุกอุตสาหกรรม การนำเทคโนโลยีหุ่นยนต์ขั้นสูง ระบบอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง (The Internet of Things (IoT)) และเทคโนโลยีบรรจุภัณฑ์อัจฉริยะมาใช้กำลังเพิ่มขึ้นอีกด้วย [2] โดยเฉพาะสำหรับตลาดเกิดใหม่อย่างประเทศไทย ปัญหาการใช้แรงงานคน ในการเคลื่อนย้ายสินค้าเริ่มส่งผลกระทบต่อต้นทุนการผลิตมากขึ้น เนื่องจากการปรับตัวสูงขึ้นของอัตราค่าจ้างขั้นต่ำในประเทศไทยที่มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง [3] ประกอบกับข้อจำกัดด้านโครงสร้างที่ก่อให้เกิดความเมื่อยล้าสะสมและความเสี่ยงต่อการบาดเจ็บ ซึ่งส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพการทำงานลดลงและเกิดต้นทุนแฝงจากการหยุดงาน แม้ระบบขนส่งอัตโนมัติด้วยไฟฟ้า (Motorized Conveyor) จะช่วยแก้ปัญหาแรงงานได้ แต่ผู้ประกอบการ SMEs มักเผชิญอุปสรรคด้านเงินลงทุนเริ่มต้น (Initial Investment) ที่สูง และภาระค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาประจำปี (Maintenance Cost) ที่อาจสูงถึงร้อยละ 2-5 ของมูลค่าทรัพย์สิน [4] ซึ่งแตกต่างจากระบบการคาราคูริไคเซ็นที่เน้นการใช้กลไกทางกล และแรงโน้มถ่วง ทำให้มีต้นทุนต่ำกว่าอย่างมีนัยสำคัญ

ในบริบทของอุตสาหกรรมสมัยใหม่ ความท้าทายของผู้ประกอบการไม่ได้จำกัดอยู่เพียงการเพิ่มประสิทธิภาพตามแนวคิดการผลิตแบบลีน (Lean Manufacturing) เพื่อขจัดความสูญเปล่า (Waste) [5,6] ในกระบวนการทำงานเท่านั้น แต่ยังต้องคำนึงถึงการผลิตรที่ยั่งยืน (Sustainable Production) ที่มุ่งเน้นการประหยัดพลังงานและการใช้ทรัพยากรอย่างคุ้มค่า [7,8] อย่างไรก็ตาม ระบบอัตโนมัติทั่วไปมักพึ่งพาพลังงานไฟฟ้าและมีต้นทุนการบำรุงรักษาที่สูง ซึ่งอาจกลายเป็นภาระต้นทุนแฝงที่ขัดแย้งกับหลักการความยั่งยืนสำหรับวิสาหกิจขนาดกลางและขนาดย่อม (SMEs) ในการปรับปรุงกระบวนการผลิตโดยการนำระบบอัตโนมัติเต็มรูปแบบมาใช้อาจมีข้อจำกัดด้านงบประมาณและความซับซ้อนในการบำรุงรักษา ด้วยเหตุนี้แนวคิดระบบอัตโนมัติต้นทุนต่ำ (Low-Cost Automation: LCA) จึงได้รับความสนใจมากขึ้นในระดับสากล โดย Seifermann et al. [9] ได้อธิบายว่า LCA เป็นกลยุทธ์แบบ Lean Automation ที่ช่วยสร้างสมดุลระหว่างการทำงานด้วยมือและการใช้เครื่องจักร ซึ่งช่วยลดความสูญเปล่าโดยไม่ต้องลงทุนสูงเกินความจำเป็น สอดคล้องกับงานวิจัยของ Fast-Berglund et al. [10] ที่ชี้ให้เห็นว่า LCA ไม่เพียงแต่ช่วยลดต้นทุนแรงงาน แต่ยังเป็นกลยุทธ์สำคัญที่ช่วยเพิ่มความยืดหยุ่นให้กับสายการผลิต ทำให้ผู้ประกอบการสามารถปรับตัวต่อการเปลี่ยนแปลงของตลาดได้ดีกว่าการใช้เครื่องจักรขนาดใหญ่ที่มีโครงสร้างตายตัว ซึ่งหนึ่งในเทคนิคสำคัญ ของระบบอัตโนมัติต้นทุนต่ำที่ได้รับการยอมรับอย่างแพร่หลายคือ หลักการการคาราคูริไคเซ็น

การคาราคูริไคเซ็นเป็นคำศัพท์ภาษาญี่ปุ่นที่หมายถึงวิธีการแบบลีนที่เกี่ยวข้องกับอุปกรณ์ขนถ่ายวัสดุเชิงกลที่เรียบง่ายซึ่งอาศัยแรงโน้มถ่วงและความเฉื่อยในการ



เคลื่อนย้ายผลิตภัณฑ์ข้ามโรงงาน แทนที่การใช้คอมพิวเตอรืไฮดรอลิกส์ แก๊ส หรือแหล่งพลังงานราคาแพงอื่นๆ คาราคุรีโคเซ็นใช้กลไกต้นทุนต่ำ เช่น สปริงคั่นโยก เกียร์ และลูกตุ้มในการทำงาน [11] ข้อดีของคาราคุรีโคเซ็น คือ ใช้พลังงานน้อย ต้นทุนต่ำ บำรุงรักษาง่าย และมีการประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมต่างๆ ทั่วโลก คาราคุรีโคเซ็นได้รับความสนใจเพิ่มขึ้นในช่วงไม่กี่ปีที่ผ่านมา และยังคงเปลี่ยนวิธีที่เราใช้ประโยชน์จากองค์ประกอบทางธรรมชาติเพื่อให้เกิดการผลิตแบบสิ้นและเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม สำหรับหลายๆ บริษัท คาราคุรีโคเสนนำเสนอวิธีใหม่ๆ ในการเพิ่มผลผลิตภาพแรงงานและบรรลुरुบบอัตโนมัติด้วยวิธีที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม ความก้าวหน้าของเซ็นเซอร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม 4.0 ไม่เพียงแต่ช่วยลดต้นทุนการผลิต แต่ยังตอบสนองต่อนโยบายการผลิตสุทธิเป็นศูนย์ (Net Zero Manufacturing) โดยการตัดลดการใช้พลังงานไฟฟ้าในกระบวนการลำเลียงสินค้า ซึ่งสอดคล้องกับทิศทางของอุตสาหกรรมโลกยุคใหม่ที่มุ่งเน้น Green Factory [12]

การประยุกต์ใช้คาราคุรีโคเซ็นในอุตสาหกรรมพบในงานวิจัยหลายฉบับ เช่น Pichawadee *et. al.* (2024) [13] ได้พัฒนาระบบเคลื่อนย้ายวัสดุในโรงงานผลิตสีตามหลักคาราคุรีโคเซ็น โดยมีข้อจำกัดในเรื่องน้ำหนักของวัสดุที่เคลื่อนย้ายถูกกำหนดให้เป็นค่าคงที่ ถ้ามีการเปลี่ยนแปลงไม่สามารถใช้การเคลื่อนที่ด้วยคาราคุรีโคเซ็นได้ Kittidecha *et. al.* (2024) [14] การเพิ่มประสิทธิภาพการขนย้ายวัสดุด้วยรถเข็นคาราคุรีโคเซ็นวิสาหกิจชุมชนภูเวียงวารี ซึ่งสามารถลดความเมื่อยล้าในการขนย้ายถังสินค้าลงอย่างมาก ลดเวลาในการขนย้ายต่อครั้งคิดเป็นร้อยละ 9 สำหรับผลการประเมินความเมื่อยล้า พบอาการปวดเมื่อยสูงสุดลดลง

จากระดับรู้สึกปวดเมื่อยหรือล้ามากเหลือเป็นระดับรู้สึกปวดเมื่อยปานกลาง Madisa *et. al.* (2019) [15] นำเสนอแนวคิดคาราคุรีโคเซ็นไปใช้ เพื่อปรับปรุงการออกแบบสถานีงานในโรงงานผลิตลวดสลิง มีการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างคาราคุรีโคเซ็นกับผลผลิตและการยศาสตร์ Pogowonto and Amrina (2020) [16] ศึกษาสายการประกอบเครื่องยนต์รถยนต์สำหรับผลิตภัณฑ์บล็อกกระบอกสูบ มีวัตถุประสงค์เพื่อระบุกิจกรรมที่ไม่ใช่มูลค่าเพิ่ม (NVA) และลดให้เหลือน้อยที่สุดด้วยคาราคุรีโคเซ็น ผลวิจัยพบว่าสามารถเร่งรอบเวลาที่สถานีงานเป็น 180 วินาที และกิจกรรมที่มีประสิทธิภาพของวงจรการผลิตเป็น 80% จากการทบทวนวรรณกรรมข้างต้น แม้ว่างานวิจัยในอดีตจะประสบความสำเร็จในการประยุกต์ใช้หลักการคาราคุรีโคเซ็นเพื่อเพิ่มผลผลิตและปรับปรุงการยศาสตร์ในอุตสาหกรรมเฉพาะทาง ดังเช่น การผลิตสี [13], ลวดสลิง [15], และยานยนต์ [16] แต่ส่วนใหญ่มุ่งเน้นผลลัพธ์เชิงเทคนิค (Technical Performance) เพียงด้านเดียว เช่น การลดเวลา (Cycle Time) หรือการลดความเมื่อยล้าของผู้ปฏิบัติงาน โดยยังขาดการวิเคราะห์ความคุ้มค่าเชิงเศรษฐศาสตร์ (Economic Feasibility) ที่เป็นรูปธรรม โดยเฉพาะอย่างยิ่งข้อจำกัดในงานของ Pichawadee *et al.* [13] ที่พบความไม่ยืดหยุ่นต่อ การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักวัสดุ สะท้อนให้เห็นถึงความท้าทายในการนำไปใช้จริงในบริบทที่หลากหลาย นอกจากนี้ งานวิจัยส่วนใหญ่ดังที่กล่าวมามักดำเนินการในบริบทของโรงงานอุตสาหกรรมขนาดใหญ่ที่มีความพร้อมด้านทรัพยากร ซึ่งอาจไม่สามารถนำมาปรับใช้ได้ โดยตรงกับผู้ประกอบการขนาดกลางและขนาดย่อม (SMEs) ที่มีข้อจำกัดด้านงบประมาณลงทุน ดังที่ Zhang และ U-on [17] ได้ชี้ให้เห็นถึงความสำคัญของ



กลยุทธ์ที่เหมาะสมกับบริบทของ SMEs ในไทย ดังนั้นงานวิจัยฉบับนี้มีจุดเน้นที่แตกต่างจากงานวิจัยก่อนหน้าโดยมุ่งวิเคราะห์หองศาการลาดเอียงของรางวัลและการวิเคราะห์จุดคุ้มทุน (Break-even Analysis) ซึ่งยังไม่ได้รับการศึกษาอย่างครอบคลุมในงานที่ผ่านมา อีกทั้งยังขยายขอบเขตการพิจารณาไปสู่องค์ความรู้ใหม่ที่ช่วยยืนยันความได้เปรียบทั้งในเชิงประสิทธิภาพการผลิตและเชิงต้นทุนไปพร้อมกัน เพื่อพิสูจน์ความเป็นไปได้ในการลงทุนสำหรับระบบขนส่งอัตโนมัติต้นทุ่น

การศึกษาหลักการการครุไรโคเซ็นที่เหมาะสมในการออกแบบและพัฒนาระบบขนส่งบรรจุภัณฑ์อัตโนมัติ การประเมินประสิทธิภาพของระบบ คือ ความสามารถของระบบขนส่งบรรจุภัณฑ์แบบรางวัลที่พัฒนาขึ้นตามหลักการการครุไรโคเซ็น ในการลำเลียงบรรจุภัณฑ์จากจุดเริ่มต้นไปยังจุดหมายปลายทาง ในรูปแบบประสิทธิภาพเชิงเวลา (Time Efficiency) ประสิทธิภาพเชิงผลิตภาพ (Productivity Efficiency) และ ประสิทธิภาพเชิงเศรษฐศาสตร์ (Economic Efficiency) โดยเปรียบเทียบกับระบบเดิม ซึ่งกระบวนการขนย้ายบรรจุภัณฑ์ในปัจจุบันยังคงอาศัยแรงงานพนักงานเป็นหลัก ซึ่งก่อให้เกิดปัญหาความเมื่อยล้าและความล่าช้าในขั้นตอนการนำส่งสินค้าไปยังคลังจัดเก็บส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพการผลิตโดยรวม จากปัญหาดังกล่าวจึงเล็งเห็นความสำคัญของการออกแบบและพัฒนาระบบขนส่งบรรจุภัณฑ์อัตโนมัติต้นทุ่นต่ำโดยประยุกต์ใช้หลักการการครุไรโคเซ็น ระบบที่พัฒนาขึ้นนี้มีเป้าหมายเพื่อลดภาระของพนักงาน ลดระยะเวลาในกระบวนการขนย้าย และเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม เนื่องจากเป็นระบบกลไกที่ไม่ต้องอาศัยพลังงานไฟฟ้า แต่ใช้ประโยชน์จากแรงโน้มถ่วงและแรงผลึกจากมนุษย์ในการขับเคลื่อนรถเข็นลำเลียงบรรจุภัณฑ์ไปยังพื้นที่จัดเก็บใน

คลังสินค้าได้อย่างต่อเนื่องและมีประสิทธิภาพยิ่งขึ้น ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์หลักดังนี้ 1) เพื่อออกแบบและพัฒนาระบบขนส่งบรรจุภัณฑ์อัตโนมัติต้นทุ่นต่ำด้วยหลักการการครุไรโคเซ็น 2) เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการทำงานระหว่างระบบที่พัฒนาขึ้นกับกระบวนการขนย้ายรูปแบบเดิม ที่อาศัยแรงงานพนักงาน โดยมีขอบเขตการวิจัย คือ ประเภทของบรรจุภัณฑ์ที่ศึกษา ซึ่งเป็นบรรจุภัณฑ์น้ำหนัก 600 มิลลิกรัม จำนวน 8 ขวด หองระบบผลิตน้ำดื่มที่ผ่านกระบวนการออสโมซิสย้อนกลับ (Reverse Osmosis water) ณ อาคารเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏพระนครศรีอยุธยา โดยทำการทดลองระยะทางและความเร็วในการขนส่ง

2. วิธีดำเนินงานวิจัย

2.1 ออกแบบและพัฒนาระบบการเคลื่อนย้ายบรรจุภัณฑ์อัตโนมัติ

การออกแบบระบบทำได้โดยการศึกษากระบวนการเคลื่อนย้ายบรรจุภัณฑ์อัตโนมัติต้นทุ่นต่ำโดยใช้หลักการการครุไรโคเซ็น จากเอกสารวิชาการต่าง ๆ และสถานประกอบการที่ได้ทำการใช้ระบบดังกล่าว แล้วนำมาประยุกต์ใช้กับการออกแบบในงานวิจัยครั้งนี้ โดยพิจารณาถึงปัญหาที่เกิดขึ้นจากโรงงานตัวอย่าง ตำแหน่งของการติดตั้ง เส้นทางไหลของบรรจุภัณฑ์ขนาดและน้ำหนักของบรรจุภัณฑ์ ข้อจำกัดของการติดตั้ง การออกแบบองค์ประกอบหลักของระบบการเคลื่อนย้าย ประกอบด้วย ระบบลำเลียง ระบบการไหลในการออกแบบใช้หลักการการครุไรโคเซ็นซึ่งอาศัยแรงโน้มถ่วง ระบบควบคุมการไหล ทางลาดสำหรับรับและส่งบรรจุภัณฑ์ ซึ่งพื้นที่การทำงานที่จะติดตั้งระบบการเคลื่อนย้ายบรรจุภัณฑ์อัตโนมัติ คือ หองระบบผลิตน้ำ



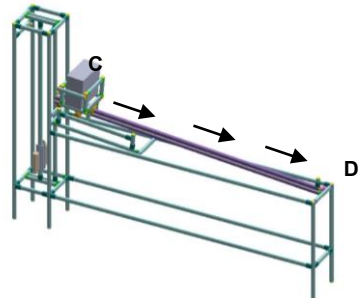
บทความวิจัย

ดื่มที่ผ่านกระบวนการออสโมซิสย้อนกลับ ณ อาคารเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏพระนครศรีอยุธยา ขนาดพื้นที่ 2.20 x 2.20 ตารางเมตร แสดงดังรูปที่ 1 โดยระบบเดิมจะใช้พนักงาน 3 คน พนักงานคนที่ 1 อยู่ที่จุด A ระบบผลิตน้ำ RO พนักงานคนที่ 2 ทำหน้าที่ขนย้ายบรรจุภัณฑ์ไปยังจุด B จากนั้นพนักงานคนที่ 3 ทำการย้ายบรรจุภัณฑ์ไปวางบนพาเลตที่จุด B ซึ่งการออกแบบและพัฒนาระบบ และมีโครงสร้างระบบการเคลื่อนย้ายบรรจุภัณฑ์ ดังรูปที่ 2 – 6 โดยระบบใหม่กลไกการทำงานของระบบ (รูปที่ 2) เริ่มจากพนักงานคนที่ 1 ขนย้ายบรรจุภัณฑ์มาไว้ที่เครื่องขนย้ายอัตโนมัติ จากนั้นวางบรรจุภัณฑ์ในช่องวางบรรจุภัณฑ์ (จุด C) จะไหลตามแรงโน้มถ่วงจนมาถึงจุดสิ้นสุด (จุด D) และพนักงานคนที่ 2 นำบรรจุภัณฑ์ไปไว้ที่จุดวางบรรจุภัณฑ์ ตัวถ่วงน้ำหนักทำหน้าที่ดึงรางเลื่อนของระบบกลับเพื่อไปรอรับบรรจุภัณฑ์ใหม่ การออกแบบมีการหาค่าที่เหมาะสมสำหรับความลาดเอียงของรางเลื่อน ซึ่งความยาวรางเลื่อนบรรจุภัณฑ์ที่มีความยาว 2 เมตร ข้อจำกัดในการทดลองคือจะทดสอบองศาจากการเคลื่อนย้ายบรรจุภัณฑ์ขนาด 600 มล. จำนวน แพ็คละ 12 ขวดเท่านั้น โดยทำการทดสอบความเร็วในการไหลของบรรจุภัณฑ์ และผลจากความเร็วในการไหล โดยการทดลองจะใช้ค่าความลาดเอียงของรางเลื่อนบรรจุภัณฑ์ เท่ากับ 9, 11, และ 13 องศา ตามลำดับ โดยแต่ละองศาทำการทดลอง 5 ครั้ง ทำการจับเวลาในการไหลของบรรจุภัณฑ์ทั้งการเลื่อนไปและการเคลื่อนกลับ การเลือกทดลองมุมลาดเอียงที่ 9, 11 และ 13 องศาสำหรับการทดลองนี้เป็นการเลือกที่ตั้งอยู่บนหลักการทางฟิสิกส์และการออกแบบการทดลองโดยเกณฑ์ในการเลือกองศา คือ อัตราเร็วและความรุนแรงของการกระแทก เพื่อค้นหาจุดที่

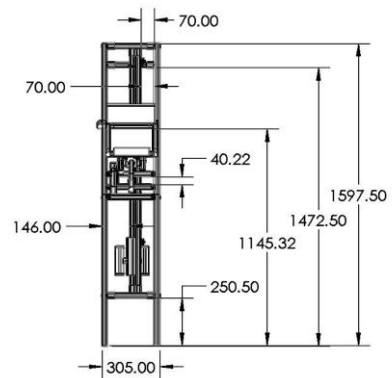
เหมาะสมที่สุด มุม 9 องศา เป็น ความเร็วต่ำสุดที่ยอมรับได้ และมุม 13 องศา เป็นความเร็วสูงสุดที่ยอมรับได้ โดยพิจารณาเกณฑ์กา ทำให้การไหลจะรวดเร็วและต่อเนื่อง แต่มีความเสี่ยงสูงที่บรรจุภัณฑ์จะเสียหายจากการกระแทก และอาจทำให้กลไกการเคลื่อนกลับทำงานผิดพลาดได้



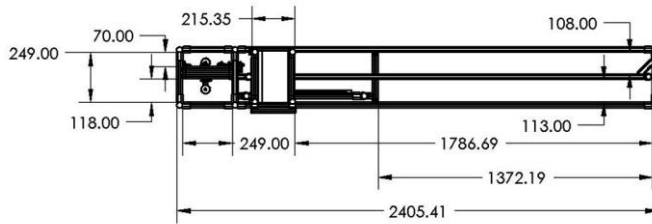
รูปที่ 1 พื้นที่ภายในห้องที่ทำการทดลอง



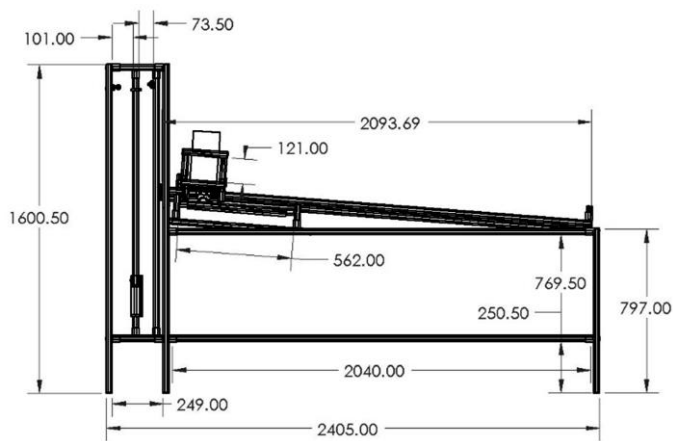
รูปที่ 2 ระบบการเคลื่อนย้ายบรรจุภัณฑ์



รูปที่ 3 โครงสร้างมุมมองด้านหน้า



รูปที่ 4 โครงสร้างมุมมอง



รูปที่ 5 โครงสร้างมุมมอง



รูปที่ 6 ระบบเคลื่อนย้ายบรรจุภัณฑ์อัตโนมัติต้นทุนต่ำโดยใช้หลักการการควาคุรีโคเซ็น



การเลือกองศาในการลาดเอียงของรางเลื่อนโดย การกำหนดเกณฑ์ความเร็วมีความเร็วต่ำสุด ต้องมีค่า มากกว่า 0 เพื่อให้เอาชนะแรงเสียดทานสถิต (Static Friction) ได้ตลอดเส้นทาง และต้องเร็วพอที่จะทันกับ เวลาการผลิต (Takt Time) พิจารณาจากสัมประสิทธิ์ แรงเสียดทาน $\tan \theta > \mu_s$

ความเร็วสูงสุดมีเกณฑ์ในการเลือกคือต้องไม่ ก่อให้เกิดแรงกระแทกที่ปลายรางเกินกว่าที่บรรจุ ภัณฑ์จะรับได้ (ไม่บุบ/ไม่แตก) พิจารณาจากพลังงาน จลน์ ต้องไม่เกินค่าความทนทานของขวด PET ซึ่ง ต้องน้อยกว่า Yield Strength ของวัสดุ

2.2 เปรียบเทียบประสิทธิภาพของระบบบรรจุ ภัณฑ์เครื่องอัตโนมัติ

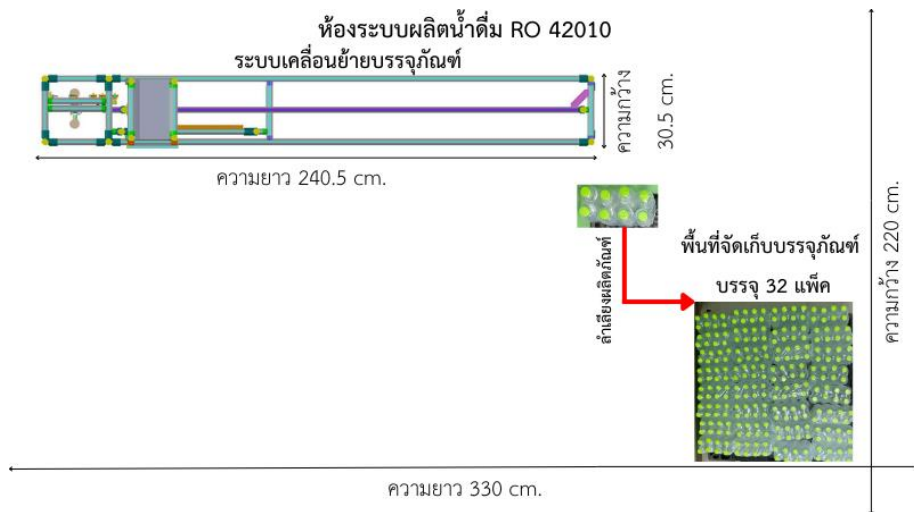
การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการทำงานของ ระบบการเคลื่อนย้ายบรรจุภัณฑ์อัตโนมัติต้นทูลต่ำ โดยใช้หลักการการาคูรีโคเซ็นและประสิทธิภาพ การทำงานของระบบการเคลื่อนย้ายบรรจุภัณฑ์โดยใช้ การทำงานด้วยพนักงานขนย้ายจำนวน 3 คน

2.2.1 การเปรียบเทียบเวลาการทำงานของระบบ เคลื่อนย้ายบรรจุภัณฑ์อัตโนมัติต้นทูลต่ำโดยใช้ หลักการการาคูรีโคเซ็นกับเวลาการทำงานของ พนักงาน

การทดลองจะวางแพ็คน้ำ 32 แพ็คต่อชั้นโดยที่ ฐานวางแพ็คน้ำมีขนาด 1.1 x 1.1 ตารางเมตร ดังรูปที่ 7 โดยทำการทดลองครั้งละ 1 ชั่วโมง

2.2.2 การหาระยะทางการเคลื่อนที่ขณะทำงาน ของระบบเคลื่อนย้ายบรรจุภัณฑ์อัตโนมัติต้นทูลต่ำโดยใช้หลักการการาคูรีโคเซ็น และระยะทาง การเคลื่อนที่ขณะทำงานของพนักงาน

พื้นที่ในการทำงาน เท่ากับ 2.20 x 3.30 เมตร การวางแพ็คน้ำ 8 แพ็ค 4 แถวรวมทั้งหมดเป็น 32 แพ็คต่อชั้น เปรียบเทียบระยะทางเคลื่อนที่ขณะ ทำงาน ของพนักงานและระบบเคลื่อนย้ายบรรจุภัณฑ์ อัตโนมัติต้นทูลต่ำ



รูปที่ 7 ขั้นตอนการวางแพ็คน้ำในการทดลอง



2.2.3 การเปรียบเทียบค่าใช้จ่ายในการทำงานของระบบเคลื่อนย้ายบรรจุภัณฑ์อัตโนมัติต้นทุนต่ำโดยใช้หลักการการาคูรีโคเซิน และการทำงานของพนักงาน

การเปรียบเทียบค่าใช้จ่ายในการปฏิบัติงานของระบบเคลื่อนย้ายบรรจุภัณฑ์อัตโนมัติต้นทุนต่ำโดยใช้หลักการการาคูรีโคเซิน ซึ่งมีพนักงานในการควบคุมระบบและการทำงานของพนักงาน ดังตารางที่ 1 โดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ประกอบด้วย ดัชนีและเซต ข้อมูลค่าคงที่ ตัวแปรตัดสินใจ ข้อจำกัดและสมการวัตถุประสงค์ ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

ดัชนีและเซต (Indices and Sets)

i = การปฏิบัติงานของพนักงาน

j = ระบบเคลื่อนย้ายบรรจุภัณฑ์อัตโนมัติต้นทุนต่ำ

I = จำนวนพนักงาน, $i = \{1...I\}$

J = จำนวนพนักงานของระบบเคลื่อนย้ายบรรจุภัณฑ์อัตโนมัติต้นทุนต่ำ, $j = \{1...J\}$

ข้อมูลค่าคงที่ (Parameters)

S = ค่าระบบเคลื่อนย้ายบรรจุภัณฑ์อัตโนมัติต้นทุนต่ำ (บาทต่อเครื่อง)

L_i = ค่าจ้างพนักงานในระบบเดิม (บาทต่อวันต่อคน)

L_j = ค่าจ้างพนักงานในระบบใหม่ (บาทต่อวันต่อคน)

N = จำนวนพนักงาน (คน)

ตัวแปรตัดสินใจ (Decision Variables)

X = จำนวนวันในการผลิต (วัน), $x = \text{int}$

โดยที่ X เป็นตัวแปรอิสระ (Independent Variable) ที่ใช้กำหนดระยะเวลาต้นทุนของโครงการ

ตารางที่ 1 รายการในการคำนวณต้นทุน

รายการ	พนักงาน	ระบบ
1. ค่าระบบเคลื่อนย้ายบรรจุภัณฑ์อัตโนมัติต้นทุนต่ำ (บาท)	-	15,000
2. ค่าจ้างพนักงาน (บาทต่อวันต่อคน)	300	300
3. จำนวนพนักงาน (คน)	3	2
4. จำนวนแพ็คเกจที่ขนได้ (แพ็คเกจต่อวัน)	795	2,208
5. จำนวนชั่วโมงทำงาน (ชั่วโมงต่อวัน)	8	8

ข้อจำกัด (Constraints)

ข้อจำกัดพิจารณาจากค่าใช้จ่ายในการดำเนินการของการปฏิบัติงานของพนักงานมากกว่าหรือเท่ากับค่าใช้จ่ายที่เกิดจากการใช้ระบบเคลื่อนย้ายบรรจุภัณฑ์อัตโนมัติต้นทุนต่ำ ดังสมการ (1)

$$L_i N_i X \geq S + L_j N_j X, i \in I, j \in J \quad (1)$$

สมการวัตถุประสงค์ (Objective Function)

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อให้ระบบขนส่งบรรจุภัณฑ์อัตโนมัติต้นทุนต่ำด้วยหลักการการาคูรีโคเซิน มีต้นทุนการดำเนินการรวมต่ำที่สุด โดยพิจารณาจากค่าแรงพนักงานของระบบใหม่ และค่าระบบขนส่งการาคูรีโคเซินที่สร้างขึ้น โดยในสมการวัตถุประสงค์นี้กำหนดให้ X (จำนวนวันในการผลิต) เป็นตัวแปรหลักที่สนใจ (Decision Variable) เพื่อใช้ในการวิเคราะห์หาจุดคุ้มทุน โดยเปรียบเทียบค่าใช้จ่ายรวมระหว่างระบบเดิมและระบบใหม่ที่มีความสัมพันธ์แปรผันตามระยะเวลาการใช้งาน

$$\text{Minimize } S + L_j N_j X \quad (2)$$



3. ผลการวิจัย

การทดลองเพื่อศึกษาและพัฒนาระบบขนส่งบรรจุภัณฑ์อัตโนมัติต้นทุนต่ำด้วยหลักการการครีโเคชัน โดยการทดลองมุ่งเน้นการประเมินประสิทธิภาพใน 3 ด้านหลัก ได้แก่ การหาองศาความลาดเอียงที่เหมาะสมที่สุดของระบบ การเปรียบเทียบระยะเวลาที่ใช้ในการปฏิบัติงาน และการเปรียบเทียบระยะทางการเคลื่อนที่ของผู้ปฏิบัติงาน ระหว่างการใช้ระบบที่พัฒนาขึ้นกับกระบวนการทำงานแบบเดิมที่อาศัยแรงงานพนักงาน เพื่อนำผลมาวิเคราะห์ และสรุปประสิทธิภาพของระบบดังกล่าว

3.1 การหาองศาที่เหมาะสมของระบบเคลื่อนย้ายบรรจุภัณฑ์อัตโนมัติต้นทุนต่ำโดยใช้หลักการการครีโเคชัน

ผลทดสอบปรับองศาความลาดเอียงของรางเลื่อนบรรจุภัณฑ์ ดังตารางที่ 2 พบว่า ความลาดเอียงที่ 9 องศา มีค่าเฉลี่ยความเร็วในการไหลของบรรจุภัณฑ์ 6.58 วินาทีต่อแพ็ค เกิดการกระแทกจากการไหลของบรรจุภัณฑ์เล็กน้อย ความลาดเอียงที่ 11 องศา มีค่าเฉลี่ยความเร็วในการไหลของบรรจุภัณฑ์ 6.23 วินาทีต่อแพ็ค เกิดการกระแทกจากการไหลของบรรจุภัณฑ์มาก ความลาดเอียงที่ 13 องศา มีค่าเฉลี่ยความเร็วในการไหลของบรรจุภัณฑ์ 7.90 วินาทีต่อแพ็ค เกิดการกระแทกจากการไหลของบรรจุภัณฑ์รุนแรงมาก จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนทางเดียว (One-way ANOVA) ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ดังตารางที่ 3 และรูปที่ 8 พบว่าระดับความลาดเอียงของรางเลื่อนมีผลต่อเวลาในการเคลื่อนที่ของบรรจุภัณฑ์อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ โดยที่ระดับ 11 องศา ใช้เวลาเฉลี่ยต่ำที่สุด (6.23 วินาที) ซึ่งแตกต่างจากระดับ 13 องศาอย่าง

ชัดเจน ที่อาจเกิดปัญหาการกระแทกหรือการเสียดทานที่เพิ่มขึ้นเมื่อมีความชันมากเกินไป ทำให้เวลาในการเคลื่อนที่ช้าลง

จากการทดลองพบว่า การปรับองศาความลาดเอียง แม้การเพิ่มมุมลาดเอียงจะช่วยเพิ่มความเร็วในการลำเลียงเข้าไป (Forward Stroke) แต่กลับส่งผลกระทบต่อรอบเวลาโดยรวม (Total Cycle Time) เนื่องจากความล่าช้าในช่วงขากลับ (Return Stroke) ซึ่งสามารถอธิบายสาเหตุที่แท้จริงได้ด้วยหลักการสมดุลแรง คือ ในช่วงขากลับ กลไกขับเคลื่อนอาศัยแรงดึงจากตุ้มถ่วงน้ำหนัก (W_{cw}) เพียงอย่างเดียวในการดึงถาดเปล่าขึ้นสู่ที่สูง โดยต้องเอาชนะแรงต้านจากแรงโน้มถ่วงของถาด ($W_{cart} \sin \theta$) และแรงเสียดทาน (f) ตามสมการที่ (3)

$$F_{net} = W_{cw} - (W_{cart} \sin \theta + f) \quad (3)$$

ตารางที่ 2 ผลทดสอบปรับองศาความลาดเอียงของรางเลื่อนบรรจุภัณฑ์

ครั้งที่	ความเร็วในการไหลของบรรจุภัณฑ์ (วินาทีต่อแพ็ค)		
	9 องศา	11 องศา	13 องศา
1	7.28	6.25	7.91
2	6.99	6.63	8.35
3	6.12	6.20	8.09
4	6.18	5.89	7.29
5	6.35	6.21	7.88
ค่าเฉลี่ย	6.58	6.23	7.90
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	0.52	0.26	0.40
การกระแทก	เล็กน้อย	มาก	รุนแรงมาก



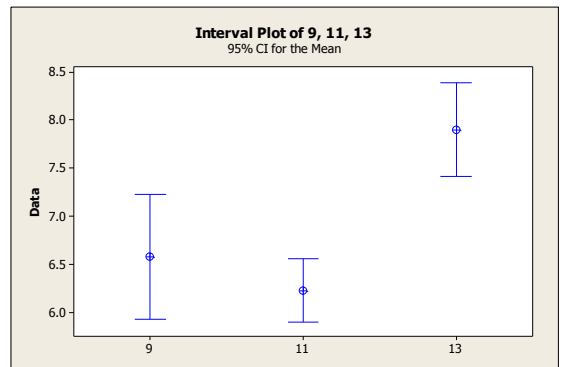
สาเหตุที่แท้จริงที่ทำให้มุม 13 องศา มีประสิทธิภาพการไหลกลับต่ำกว่ามุม 9 องศา ไม่ใช่เพียงเพราะความชัน แต่เป็นเพราะแรงลัพท์ที่ใช้เร่งความเร็วขากลับมีค่าลดลงอย่างมีนัยสำคัญ เมื่อมุมชันขึ้น ในขณะที่น้ำหนักตุ้มถ่วงเท่าเดิม ส่งผลให้ความเร่งลดลงและใช้เวลาในการดึงกลับนานขึ้น ดังนั้นการใช้มุม 9 องศา จึงเป็นจุดเหมาะสมที่สุด (Optimum Point) ที่ทำให้แรงส่งขาไปเพียงพอต่อการใช้งาน และแรงต้านขากลับไม่สูงจนเกินกำลังของตุ้มถ่วงน้ำหนัก

3.2 ผลการเปรียบเทียบระยะเวลาที่ใช้ในการปฏิบัติงาน

การเปรียบเทียบระยะเวลาที่ใช้ในการปฏิบัติงานระหว่างการใช้ระบบที่พัฒนาขึ้นกับกระบวนการทำงานแบบเดิมที่อาศัยแรงงานพนักงาน พบว่าจำนวนแพ็คน้ำในการทำงานของพนักงานมีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 102.20 แพ็คต่อชั่วโมง (คำนวณจากจำนวนแพ็คน้ำในการทำงานรวมหารด้วยจำนวนครั้ง) และระบบเคลื่อนย้ายบรรจุภัณฑ์อัตโนมัติต้นทุนต่ำโดยใช้หลักการการาคูรีโคเซ็น มีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 275.00 แพ็คต่อชั่วโมง ดังตารางที่ 4 จะเห็นได้ว่าระบบเคลื่อนย้ายบรรจุภัณฑ์อัตโนมัติต้นทุนต่ำโดยใช้หลักการการาคูรีโคเซ็นมีประสิทธิภาพมากกว่าการใช้แรงงานพนักงานเพียงอย่างเดียว ในการใช้แรงงานเพียงอย่างเดียวจะมีการแปรผันตามความเหนื่อยล้า ซึ่งพบว่าในชั่วโมงแรกมีอัตราการผลิตอยู่ที่ 113 แพ็คต่อชั่วโมง และลดลงมาเรื่อยๆ จนครั้งที่ 10 อัตราการผลิตอยู่ที่ 80 แพ็คต่อชั่วโมง เมื่อวิเคราะห์สมการถดถอยเชิงเส้นพบว่า ความสัมพันธ์อัตราการผลิตกับจำนวนชั่วโมงในการผลิต คือ $Y_i = \alpha + \beta X_i$ จะได้สมการ (4)

ตารางที่ 3 การทดสอบความแปรปรวน

Source	DF	SS	MS	F	P
Factor	2	7.743	3.871	23.57	0.000
Error	12	1.971	0.164		
Total	14	9.714			



รูปที่ 8 ช่วงความเชื่อมั่น 95% ของข้อมูลความเร็วในการไหล

$$Y_i = 121.87 - 3.58 X_i \quad (4)$$

และได้ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ เท่ากับ 0.9323 แสดงให้เห็นความสัมพันธ์เชิงเส้นสูง ในขณะที่ระบบเคลื่อนย้ายบรรจุภัณฑ์อัตโนมัติต้นทุนต่ำโดยใช้หลักการการาคูรีโคเซ็น จะมีอัตราการผลิตค่อนข้างคงที่ ซึ่งประสิทธิภาพของระบบเคลื่อนย้ายบรรจุภัณฑ์อัตโนมัติต้นทุนต่ำโดยใช้หลักการการาคูรีโคเซ็นสูงกว่าการทำงานของพนักงาน

จากการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการทำงานระหว่างการใช้แรงงานคนและระบบขนส่งอัตโนมัติที่พัฒนาขึ้น โดยใช้การทดสอบทางสถิติแบบ Independent Two-Sample t-test ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% พบว่า ระบบอัตโนมัติมีกำลังการผลิต



บทความวิจัย

เฉลี่ยอยู่ที่ 275.00 แพ็คต่อชั่วโมง (SD = 1.15) ในขณะที่การใช้แรงงานคนทำได้เฉลี่ยเพียง 102.20 แพ็คต่อชั่วโมง (SD = 11.61) ผลการทดสอบทางสถิติแสดงค่า P-value < 0.001 ซึ่งยืนยันว่า ระบบอัตโนมัติสามารถเพิ่มปริมาณการผลิตได้สูงกว่าการใช้แรงงานคนอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ โดยมีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้นประมาณ 1.69 เท่า

ตารางที่ 4 ระยะเวลาที่ใช้ในการปฏิบัติงาน

ครั้งที่	จำนวนแพ็คเกจ (แพ็คต่อชั่วโมง)	
	พนักงาน	ระบบ
1	113	276
2	113	276
3	111	276
4	110	275
5	107	276
6	105	273
7	100	275
8	98	275
9	85	273
10	80	275
ค่าเฉลี่ย	102.20	275.00
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	11.61	1.15

3.3 ผลการเปรียบเทียบอัตราเร็วที่ใช้ในการปฏิบัติงานระหว่างการใช้ระบบที่พัฒนาขึ้นกับกระบวนการทำงานแบบเดิมที่อาศัยพนักงานขนย้าย

ระบบเคลื่อนย้ายบรรจุภัณฑ์อัตโนมัติต้นทุนต่ำโดยใช้หลักการการเคลื่อนที่ด้วยล้อ มีค่าเฉลี่ยอัตราเร็วในการปฏิบัติงาน เท่ากับ 16.43 เมตรต่อนาที และอัตราเร็วของพนักงาน เท่ากับ 19.84 เมตรต่อนาที แสดงให้เห็นว่าระบบเคลื่อนย้ายบรรจุภัณฑ์อัตโนมัติต้นทุนต่ำโดยใช้หลักการการเคลื่อนที่ด้วยล้อ มีการเคลื่อนที่ขณะทำงานที่น้อยกว่าและใช้ระยะเวลาในการปฏิบัติงานที่น้อยกว่าอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งสามารถเพิ่มอัตราเร็วในการปฏิบัติงานได้ 17.19% ดังตารางที่ 5

สำหรับการวิเคราะห์ระยะทางการปฏิบัติงานในตารางที่ 5 ใช้วิธีการคำนวณระยะทางการเคลื่อนที่รวม (D_{total}) โดยอ้างอิงจากตำแหน่งการวางเครื่องจักรจริงคำนวณตามสมการ (5)

$$D_{total} = \sum_{i=1}^n (d_i \times N_i) \quad (5)$$

โดยที่ d_i คือ ระยะทางในการเดินต่อรอบการทำงาน (เมตร/รอบ) ซึ่งได้จากการวัดระยะจริงในพื้นที่ปฏิบัติงานจากจุดรับไปยังจุดส่ง

N_i คือ จำนวนรอบของการขนย้ายสินค้าต่อชั่วโมง (รอบ/ชั่วโมง)

การเปรียบเทียบระยะทางทำโดยวัดจากจุดเริ่มต้นกระบวนการแพ็คสินค้าจนถึงจุดจัดเก็บ โดยในระบบเดิมพนักงานต้องเดินไป-กลับ (Round Trip) เพื่อขนย้าย ในขณะที่ระบบการเคลื่อนที่ด้วยล้อช่วยลดระยะทางดังกล่าวด้วยการลัดเลียดอัตโนมัติ



บทความวิจัย

ตารางที่ 5 การเปรียบเทียบอัตราเร็วที่ได้ในการปฏิบัติงาน

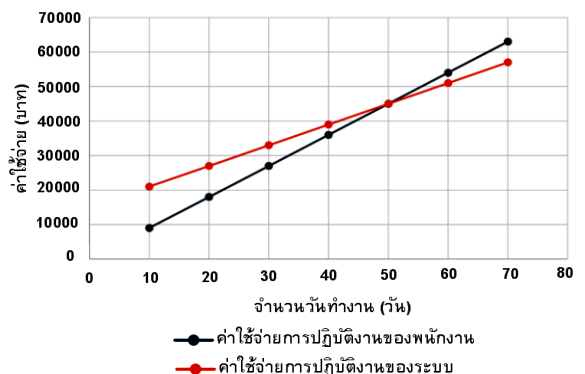
แพ็คหน้า แถวที่	การปฏิบัติงานของพนักงาน			การปฏิบัติงานของระบบ		
	ระยะทาง (เมตร)	เวลา (นาที)	อัตราเร็ว	ระยะทาง (เมตร)	เวลา (นาที)	อัตราเร็ว
1	63.93	3.23	19.79	35.22	2.19	16.08
2	63.91	3.20	19.97	35.19	2.10	16.76
3	63.89	3.25	19.66	35.16	2.15	16.35
4	63.87	3.21	19.90	35.13	2.12	16.57
ค่าเฉลี่ย	63.90	3.22	19.84	35.17	2.14	16.43

ตารางที่ 6 การเปรียบเทียบอัตราเร็วที่ได้ในการปฏิบัติงาน

จำนวนวัน	10	20	30	40	50	60	70
ค่าใช้จ่ายการปฏิบัติงานของพนักงาน	9000	18000	27000	36000	45000	54000	63000
ค่าใช้จ่ายการปฏิบัติงานของระบบ	21000	27000	33000	39000	45000	51000	57000

3.4 ผลการเปรียบเทียบค่าใช้จ่ายในการปฏิบัติงานของระบบเคลื่อนย้ายบรรจุภัณฑ์อัตโนมัติต้นทุนต่ำโดยใช้หลักการคาราคูริไคเซ็น และการปฏิบัติงานของพนักงาน

จากการคำนวณหาค่าที่ดีที่สุดโดยใช้สมการวัตถุประสงค์ที่ (2) และพิจารณาข้อจำกัดจากสมการที่ (1) เมื่อเปรียบเทียบค่าใช้จ่ายที่เกิดขึ้น การปฏิบัติงานระยะเวลา 50 วัน เป็นจุดที่ค่าใช้จ่ายของการปฏิบัติงานของระบบเท่ากับการปฏิบัติงานของพนักงาน พบว่า การปฏิบัติงานของพนักงานมีค่าใช้จ่ายเท่ากับ 45,000 บาท จำนวนแพ็คหน้าที่ขนได้ 39,750 แพ็ค สำหรับการปฏิบัติงานของระบบ 45,000 บาท จำนวนแพ็คหน้าที่ขนได้ 110,440 แพ็ค ซึ่งจำนวนแพ็คหน้าเคลื่อนย้ายได้มากกว่าระบบเดิมถึง 177.84% ดังนั้นเมื่อผลิตมากกว่า 50 วัน ค่าใช้จ่ายของการปฏิบัติงานของระบบจะน้อยกว่าการปฏิบัติงานของพนักงาน ดังรูปที่ 9



รูปที่ 9 ผลการวิเคราะห์ค่าใช้จ่ายในการปฏิบัติงาน

จากตารางที่ 6 พิจารณาจากค่าใช้จ่ายในการดำเนินการของการปฏิบัติงานของพนักงานมากกว่าหรือเท่ากับค่าใช้จ่ายที่เกิดจากการใช้ระบบเคลื่อนย้ายบรรจุภัณฑ์อัตโนมัติต้นทุนต่ำ จากสมการ (1)

4. สรุปผล

งานวิจัยเรื่องการเพิ่มประสิทธิภาพการขนส่งบรรจุภัณฑ์ด้วยระบบอัตโนมัติต้นทุนต่ำตามหลักการ



บทความวิจัย

การาคูรีโคเซ็น มีวัตถุประสงค์เพื่อออกแบบและพัฒนา ระบบขนส่งบรรจุภัณฑ์อัตโนมัติต้นทนต์ด้วยหลักการ การาคูรีโคเซ็นและเปรียบเทียบประสิทธิภาพ การ ทำงานระหว่างระบบที่พัฒนาขึ้นกับกระบวนการขนย้าย รูปแบบเดิมที่อาศัยแรงงานพนักงานซึ่งเมื่อทำงานเป็น เวลานานจะเกิดการเมื่อยล้า ทำให้ประสิทธิภาพการ ทำงานลดลง

งานวิจัยนี้ออกแบบโดยคำนึงถึงความลาดเอียงของ รางเลื่อนบรรจุภัณฑ์ซึ่งใช้ 9 องศา เนื่องจากมีความ เหมาะสมในเรื่องระยะเวลาในการขนย้ายและความ ปลดปล่อยของบรรจุภัณฑ์ที่ได้รับแรงกระแทกมากที่สุด ความลาดเอียงของรางเลื่อนบรรจุภัณฑ์ 9 องศา มี ค่าเฉลี่ยความเร็วในการไหลของบรรจุภัณฑ์ 6.58 วินาที ต่อแพ็ค สำหรับการเปรียบเทียบระยะเวลาที่ใช้ในการ ปฏิบัติงานระหว่างการใช้ระบบที่พัฒนาขึ้นกับ กระบวนการทำงานแบบเดิมที่อาศัยพนักงานขนย้าย พบว่า ค่าเฉลี่ยจำนวนแพ็คน้ำในการทำงานของ พนักงาน เท่ากับ 102.20 แพ็คต่อชั่วโมง ส่วนค่าเฉลี่ย จำนวนแพ็คน้ำในการทำงานของระบบ เท่ากับ 275.00 แพ็คต่อชั่วโมง ซึ่งประสิทธิภาพของระบบเคลื่อนย้าย บรรจุภัณฑ์อัตโนมัติต้นทนต์โดยใช้หลักการการาคูรีโค เซ็นสูงกว่าการทำงานของพนักงาน 1.69 เท่า เมื่อ เปรียบเทียบค่าใช้จ่ายในการปฏิบัติงานของระบบ เคลื่อนย้ายบรรจุภัณฑ์อัตโนมัติต้นทนต์โดยใช้ หลักการการาคูรีโคเซ็นและการปฏิบัติงานของพนักงาน พบว่าเมื่อผลิตมากกว่า 50 วัน ค่าใช้จ่ายของการ ปฏิบัติงานของระบบน้อยกว่าการปฏิบัติงานของ พนักงาน แต่สามารถขนย้ายได้มากกว่าถึง 1.78 เท่า งานวิจัยนี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมที่มี ระบบขนส่งบรรจุภัณฑ์อัตโนมัติโดยใช้หลักการ

การาคูรีโคเซ็นไปใช้ได้เพื่อลดต้นทุน การขนส่งและเพิ่ม ประสิทธิภาพการขนส่งที่มากขึ้น

แม้งานวิจัยนี้จะประสบความสำเร็จในการสร้างระบบ ต้นแบบที่มีต้นทุนต่ำและประสิทธิภาพสูง แต่การขยาย ผลสู่การใช้งานจริงในสายการผลิตอุตสาหกรรม (Scale-up) ผู้ประกอบการควรพิจารณาปัจจัยสำคัญ 3 ประการ เพื่อให้เกิดความคุ้มค่าสูงสุด ดังนี้ 1) การประเมินพื้นที่ และการไหลของวัสดุ หลักการการาคูรีโคเซ็นอาศัยแรง ไน้มถ่วงเป็นหลัก ดังนั้น ระดับความสูง (Vertical Drop) คือต้นทุนพลังงานที่สำคัญที่สุด โรงงานที่เหมาะสมควรมีการจัดวางผังแบบต่างระดับ หรือมีการลำเลียงจาก กระบวนการผลิต (Upstream) ที่อยู่สูงกว่าจุดบรรจุ ภัณฑ์ (Downstream) จากผลการทดลองที่พบว่ามุม เอียง 9 องศาให้ผลดีที่สุด ผู้ประกอบการสามารถใช้ค่านี้ เป็น ค่ามาตรฐานตั้งต้น (Baseline Standard) ในการ ออกแบบราง โดยไม่ต้องเสียเวลาลองผิดลองถูก (Trial and Error) ในเบื้องต้น 2) การออกแบบระบบแบบ ไฮบริด ในทางปฏิบัติการใช้ระบบแรงโน้มถ่วงเพียง อย่างเดียวอาจไม่เพียงพอสำหรับไลน์การผลิตที่มีความ ยาวมาก ข้อเสนอแนะคือการใช้ระบบไฮบริด คือใช้ มอเตอร์ไฟฟ้าเฉพาะจุดที่ต้องยกชิ้นงานขึ้นที่สูง (Lift unit) และปล่อยไหลตามรางการาคูรีโคเซ็นในระยะทาง ราบ เพื่อลดการใช้พลังงานไฟฟ้าลง 40-60% เมื่อเทียบกับ ระบบสายพานลำเลียงแบบเต็มรูปแบบ (Full Conveyor System) และ 3) การซ่อมบำรุงและความ ยืดหยุ่น เนื่องจากกลไกการาคูรีโคเซ็นใช้สปริง รอก และน้ำหนักถ่วง (Counterweight) แทนเซนเซอร์และ มอเตอร์ การบำรุงรักษาจึงทำได้ง่ายโดยช่างเทคนิค ทั่วไป ไม่จำเป็นต้องใช้โปรแกรมเมอร์หรือผู้เชี่ยวชาญ ด้านระบบอัตโนมัติซึ่งช่วยแก้ปัญหาการขาดแคลน แรงงานทักษะสูงในกลุ่ม SMEs และควรออกแบบ



โครงสร้างให้เป็นแบบ Modular Design ที่สามารถถอดประกอบหรือต่อขยายความยาววางได้ง่าย เพื่อรองรับการเปลี่ยนแปลง Layout ในอนาคต ตามหลักการใด เช่นที่ต้องมีการปรับปรุงอย่างต่อเนื่อง

5. เอกสารอ้างอิง

- [1] <https://www.jacobwhite.com/news/packaging-machinery-sector-trends-2025>. (Accessed on 05 September 2025)
- [2] <https://www.toyota-europe.com/news/2023/karakuri>. (Accessed on 05 September 2025)
- [3] <https://www.mol.go.th/Minimum Wage Rates>. (Accessed on 30 January 2026)
- [4] M. Martignago, N. Katirae, M. Calzavara, D. Battini, and A. Das, Investigating labor shortages and automation opportunities in logistics: A simulation case study, *IFAC-PapersOnLine*, 2025, 59(10), 2575–2580.
- [5] J.R. Diaz-Reza, J.L. Garcia-Alcaraz, A.J. Gil-Lopez, and A. Realyvasquez-Vargas, Lean manufacturing tools as drivers of social sustainability in the Mexican maquiladora industry, *Computers and Industrial Engineering*, 2024, 196, 110516.
- [6] F. Costa, N. Alemsan, A. Bilancia, G.L. Tortorella, and A. Portioli Staudacher, Integrating industry 4.0 and lean manufacturing for a sustainable green transition: A comprehensive model, *Journal of Cleaner Production*, 2024, 465, 142728.
- [7] S.B.S. Metla, C.-H. Huang, I. Stachiv, and Y.-R. Jeng, Opportunities and challenges of minimum quantity lubrication as pathways to sustainable manufacturing, *Results in Engineering*, 2025, 28, 108272.
- [8] D.G. Huong, M. Azmat, and R. Hadeed, Exploring big data analytics adoption for sustainable manufacturing supply chains: Insights from a TOE-guided systematic review, *Cleaner Logistics and Supply Chain*, 2025, 16, 100256.
- [9] S. Seifermann, J. Bollhoff, J. Metternich, and A. Bellaghnach, Evaluation of work measurement concepts for a cellular manufacturing reference line to enable low cost automation for lean machining, *Procedia CIRP*, 2014, 17, 588–593.
- [10] A. Fast-Berglund, O. Salunkhe, and M. Akerman, Low-cost automation - changing the traditional view on automation strategies using collaborative applications, *IFAC-PapersOnLine*, 2020, 53(2), 10285–10290.
- [11] <https://geoleanusa.com/what-is-karakuri/>. (Accessed on 05 September 2025)
- [12] K.H. Tan, H. Katayama, and S. Manickavasagam, What is karakuri kaizen and how does it work?, *The 11th International Conference on Production Research – Americas (ICPR 2022), Proceeding*, 2023, 25–32.



- [13] P. Kittipanya-ngam, P. Puangphan, P. Chaiyasit, V. Ochitpong, and K. Sirikasemsuk, Development of material handling equipment in a paint factory with karakuri kaizen, The Journal of King Mongkut's University of Technology North Bangkok, 2024, 34(3), 1–17. (in Thai)
- [14] C. Kittidecha, A. Chaiklang, S. Saramath, P. Narapinij, J. Phimoolchat, W. Hwanseang, S. Chaowakamkool, W. Panyarach, R. Sanlad, and K. Lamkam, Productivity improvement of material handling using Karakuri Kaizen hand truck: A case study of Phuwiangwari community enterprise, RMUTSB Academic Journal, 2024, 12(1), 80 – 92. (in Thai)
- [15] I.M. Madisa, M. Firdaus, M. Taib, and N.A. Reza, Implementation of Karakuri Kaizen to improve productivity and ergonomics in wire rope industry, The International Conference on Industrial Engineering and Operations Management Bangkok, Proceeding, 2019, 2765–2775.
- [16] A. Pogowonto, and U. Amrina, Reduction of cycle time in vehicle engine assembly line using Karakuri Kaizen, International Journal of Engineering Research and Advanced Technology, 2020, 6(10), 49–57.
- [17] C. Zhang and V. U-on, A study on the international management strategy of small and medium enterprises in Thailand, International Journal of Economics, Finance and Management Sciences, 12(5), 329–335.

QFD-guided design of a Web-Based DSS Prototype for Sustainable Waste Management in Thailand

Prin Boonkanit and Kridchai Suthiluck*

Department of Sustainable Industrial Management Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Phra Nakhon, Bangkok

* Corresponding author, E-mail: kridchai-s@rmutp.ac.th

Received: 4 November 2025; Revised: 16 February 2026; Accepted: 18 February 2026

Online Published: 20 April 2026

Abstract: This study applied the Quality Function Deployment (QFD) method to translate stakeholder opinions and needs into technical features for developing a prototype web-based Decision Support System (DSS). In Thailand, municipal solid waste (MSW) and construction and demolition (C&D) waste are still difficult to manage, because the rapid growth of cities keeps increasing waste volume and straining local systems. The Decision Support System was created mainly to support local government organizations (LGOs) in making decisions that are more transparent and practical for real operation. Accessibility and usability were carefully checked under WCAG 2.1 standards by using the WAVE tool. The test results showed full compliance with accessibility criteria. A satisfaction survey among 25 experts reported an average score of 4.35 (SD = 0.56) and a satisfaction index of 87 % and 0 accessibility errors, showing strong acceptance. The results indicate that user involvement and simple design are important for future system adoption and for promoting Thailand's Bio-Circular-Green (BCG) economy toward circular and sustainable waste management.

Keywords: Municipal Solid Waste (MSW) Management; Construction and Demolition (C&D) Waste; Decision Support System (DSS); Quality Function Deployment (QFD); Local Government Organizations (LGOs); Circular Economy



1. Introduction

Municipal solid waste (MSW) management remains a major challenge in developing countries such as Thailand, where rising waste generation strains local decision-making and service delivery [1]. Increasing MSW volumes, combined with growing construction and demolition (C&D) waste, have exceeded management capacity. In 2023, Thailand generated 26.95 million tons of MSW (1.12 kg per capita per day) [2], intensifying operational pressures on Local Government Organizations (LGOs).

This situation reveals a clear gap: Thai LGOs still lack decision-support tools that systematically translate stakeholder needs (Voice of the Customer: VOC) into implementable DSS design features. Although DSS applications exist in waste management, many do not sufficiently incorporate VOC, reducing operational relevance and long-term adoption [3].

This study responds to that gap by applying Quality Function Deployment (QFD), originally proposed by Akao [4], to translate stakeholder needs into measurable technical characteristics for designing a web-based DSS tailored to the operational context of Thai LGOs.

The prototype is evaluated using (i) automated accessibility testing with WAVE [5] for WCAG 2.1 compliance and (ii) stakeholder surveys to assess usability and satisfaction [6].

This research focuses on developing and evaluating a prototype DSS, rather than full-scale deployment. The findings therefore validate requirement translation, prototype design soundness, and early usability/accessibility performance. The research objectives are as follows:

1. To identify and analyze key challenges in MSW and C&D waste management within Thai LGOs.
2. To translate stakeholder requirements (VOC) into measurable technical specifications using QFD.
3. To design and develop a prototype web-based DSS that integrates international web standards and stakeholder-driven requirements.
4. To evaluate the prototype using a dual-assessment approach: WAVE-based accessibility testing and structured user surveys assessing satisfaction, usability, and alignment with operational needs.

This paper is structured as follows: the introduction presents the research context and objectives, followed by the research methodology, results and discussion, and concluding remarks with limitations and future research directions.



2. Research methodology

2.1 Research framework

The research framework adopted in this study (Fig. 1) presents a structured process integrating stakeholder input and methodological design. The process begins with a literature review to identify preliminary Customer Requirements (CRs), followed by the development and validation of research instruments through expert review. CR importance was assessed using a 5-point Likert scale and aggregated using the geometric mean to derive normalized weights. Quality Function Deployment (QFD) was then applied to translate CRs into Technical Characteristics (TCs), using weighted relationships and Pareto prioritization to guide system design. The prioritized TCs were used to support prototype web-based DSS development. Finally, the prototype was evaluated to verify compliance with technical standards and stakeholder expectations.

2.2 Instrument Development and Validation

2.2.1 Literature Review

A systematic literature review was conducted to identify Customer Requirements (CRs) for web-based Decision Support Systems (DSS) in municipal solid waste (MSW) and construction and demolition (C&D) waste management. The review integrated three evidence streams: (i) international web usability standards, (ii) prior DSS and MCDA studies, and (iii) public sector digital service

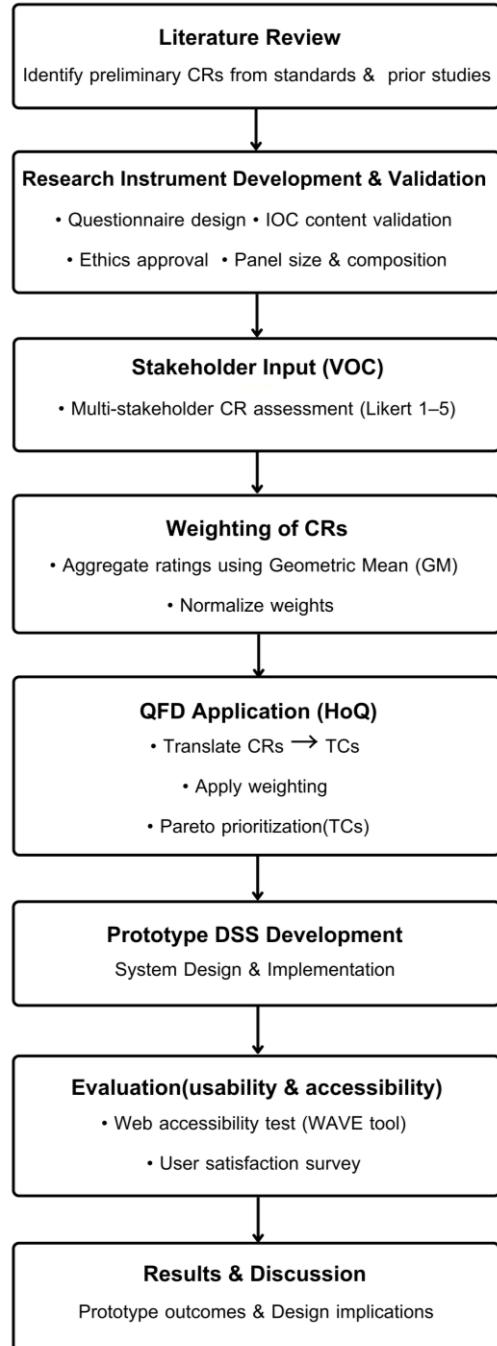


Fig. 1 Research framework



guidelines relevant to Thailand. An initial set of 30 CRs was identified. To improve analytical clarity and reduce redundancy, overlapping CRs were consolidated based on thematic similarity and relevance to Local Government Organization (LGO) decision-making. This process yielded 15 key CRs (Table 1), later applied in the QFD analysis.

2.2.2 Questionnaire Design

A structured questionnaire was developed based on literature to collect data on Customer Requirements (CRs) and Technical Characteristics (TCs). The instrument employed a Likert-scale format for quantitative analysis, complemented by open-ended questions qualitatively used to support interpretation and contextual understanding. The detailed questionnaire items and full CR list are provided in the Supplementary Data.

2.2.3 IOC Validation

Content validity was evaluated using the Item Objective Congruence (IOC) method. Five experts independently assessed item relevance, resulting in an average IOC value of 0.88, indicating satisfactory content validity [14]. The reported IOC value of 0.88 represents the average of item-level content validity assessments provided by five experts, as IOC is evaluated per item rather than as a single global score.

2.2.4 Ethics Approval

The study received ethical approval from the Research Ethics Review Committee for Research Involving Human Subjects at Rajamangala University of Technology Tawan-ok, Thailand, in December 2024.

2.2.5 Panel Size and Composition

Expert panels were structured to ensure methodological rigor across research stages. IOC validation involved five experts, consistent with content validity guidelines [12]. CR identification and evaluation engaged 25 stakeholders, including local government officers and industry representatives, aligning with recommended stakeholder sample sizes [13]. A technical panel of seven experts with QFD and DSS experience determined TCs and evaluated CR–TC relationships. The same 25 stakeholders also participated in CR weighting and user satisfaction assessment, ensuring consistency and meeting recommended usability sample ranges of 20–30 users [13].

2.2.6 Refinement of Customer Requirements (CRs)

An initial set of 30 CRs was derived from the literature (Section 2.2.1). To avoid redundancy and improve HoQ interpretability, a structured refinement was conducted. The process retained CRs aligned with international usability and accessibility standards, screened items using stakeholder ratings ($n = 25$) with Geometric Mean scores, consolidated

**Table 1** Overview of 15 key customer requirements (CRs)

No.	Customer Requirement (CR)	Reference
1	Effectiveness & Efficiency	[8][16]
2	Learnability & Memorability	[8][10][16]
3	Satisfaction & Emotional Impact	[8][10]
4	Accessibility & Standards Compliance	[8][9][16]
5	Content Quality	[10][16]
6	Presentation Design	[10][16]
7	Motivation & Engagement	[10]
8	Feedback & Adaptation	[8][10][16]
9	Transparency of DSS Results	[7][16]
10	Local Language & Cultural Adaptability	[8,9]
11	Data Security & Privacy	[16][18]
12	System Integration & Interoperability	[7][9][15]
13	Environmental Impact Integration	[7][16,17]
14	User Training & Ease of Adoption	[8][10]
15	Multi-Stakeholder Collaboration Portal	[7][15]

overlapping requirements, and reduced the set to 15 CRs for manageable prototyping. The refined CRs were subsequently used for weighting (Section 2.3) and CR–TC analysis (Section 2.5).

2.3 Weighting of Customer Requirements (CRs)

Experts evaluated the finalized 15 CRs using a five-point Likert scale. Geometric mean (GM) aggregation combined judgments and limited outlier effects. Normalized GM values yielded relative importance weights incorporated into the QFD matrix. GM computation followed Eq. (1) based on n experts.

$$G.M. = \sqrt[n]{N_1 \times N_2 \times N_3 \times \dots \times N_n} \quad (1)$$

Where: N_i represents the rating value provided by each expert respondent, and n denotes the number of respondents. In this study, $n = 25$.

For illustration purposes, if Customer Requirement 1 (CR1) is rated by five experts as 5, 4, 4, 3, and 5, the geometric mean (GM) is calculated as:

$$GM_{CR1} = (5 \times 4 \times 4 \times 3 \times 5)^{1/5} = (1200)^{1/5} = 4.13$$

Normalized weights were then derived by dividing each GM value by the sum of all GM values. For example, if the GM values of three CRs are 4.13,



3.80, and 3.20, the corresponding normalized weights are 0.37, 0.34, and 0.29, respectively.

This example illustrates the calculation procedure; the complete analysis applied all 15 CRs using the Excel GEOMEAN function.

2.4 Determination of Technical Characteristics (TCs)

A set of Technical Characteristics (TCs) was identified through literature review, system analysis, and expert brainstorming to define key functional requirements for the proposed web-based DSS. Most TCs follow standard DSS design terminology and address usability, interoperability, reliability, data security, and environmental impact considerations. TC4 and TC12 were further clarified to avoid conceptual overlap and to ensure accurate representation of system architecture. The finalized list of TCs is summarized in Table 2.

2.5 Transformation of Qualitative Requirements Using QFD

The House of Quality (HoQ), illustrated in Fig. 2, was used to translate validated Customer Requirements (CRs) into measurable Technical Characteristics (TCs). This approach links qualitative stakeholder needs with quantitative design parameters in a structured manner. The complete CR–TC relationship evaluation form used in the QFD process is presented in the Supplementary Data.

Table 2 A list of technical characteristics (TCs)

No.	TCs	Reference
1	User Interface & Visualization	[8][10][16]
2	Methodology Documentation	[8][15]
3	Customization Module	[8][16]
4	System Responsiveness	[8]
5	Comprehensive Criteria Integration	[7]
6	Data Security Protocols	[16]
7	Multi-User Collaboration	[10][16]
8	Update & Maintenance	[19]
9	Real-time Data Updating	[7][16]
10	Algorithm Accuracy & Reliability	[16]
11	Environmental Impact Assessment	[11][17]
12	Cross-Device Compatibility	[9][16]

Note: TC4 (System Responsiveness) and TC12 (Cross-device Compatibility) represent different system layers: backend performance and frontend adaptability, respectively and were therefore evaluated separately in the QFD matrix.

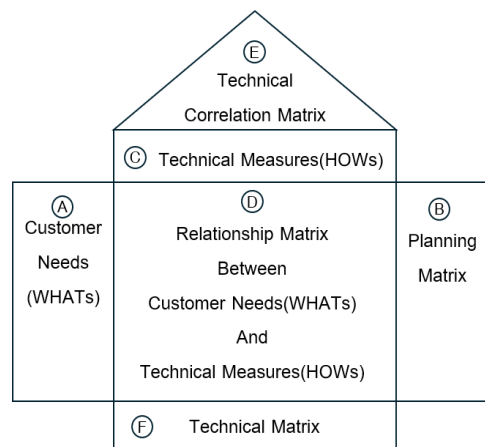


Fig. 2. Conceptual structure of the House of Quality (HoQ), adapted from Akao [4]

In the HoQ, CRs (WHATs) were mapped to TCs (HOWs) using a standard relationship matrix and the relationship scale defined in Table 3. Based on these relationships, the absolute importance (AI_j) of each TC was calculated and subsequently normalized to obtain Relative Importance (RI_j) which was used to prioritize technical design elements for the prototype DSS.

The Absolute Importance (AI_j)

$$AI_j = \sum_{i=1}^m (CR_i \times R_{ij}) \quad (2)$$

Where:

CR_i = Importance weight of Customer Requirement i (derived from expert weight or normalized CR weight)

R_{ij} = Relationship score (e.g., 9, 3, 1, 0) between Customer Requirement i and Technical Characteristic j in the HoQ

AI_j = represents the weighted sum of the relationship strengths between CRs and the corresponding TC.

$$RI_j = \frac{AI_j}{\sum_{j=1}^n AI_j} \times 100 \quad (3)$$

Where:

RI_j used to convert the absolute importance (AI_j) into a percentage scale. The total sum of RI_j across all TCs equals 100%

Table 3 Standardized relationship scale for QFD analysis (Relationship symbols)

Relationship	Symbol	Score
No relationship		0
Weak relationship	△	1
Moderate relationship	○	3
Strong relationship	●	9

Source: Adapted from Akao [4]

2.6 Design and Development of the Prototype Web-Based DSS

The prototype DSS was developed using a modular architecture to support usability, scalability, and system expansion. It comprises four functional layers: user interface, data handling, application logic, and system integration, enhancing maintainability and transparent decision-making. System development followed the generic DSS framework proposed by Aql et al. [20], consisting of data, model, knowledge, and user interface subsystems (Fig. 3).

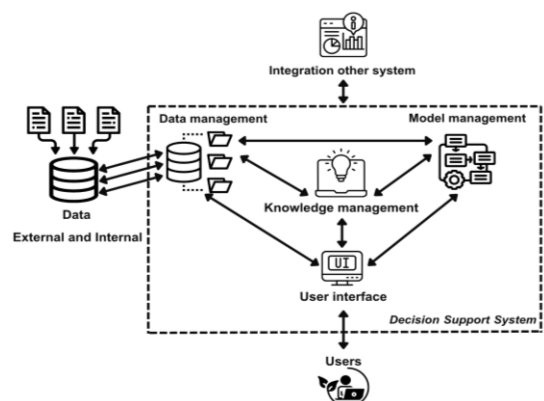


Fig. 3 Generic architecture of a Decision Support System, adapted from Aql et al. [20]



2.7 MCDA Algorithm Specification for the Prototype DSS

To ensure transparent and reproducible decision-making, the Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution (TOPSIS) was implemented as the sole MCDA method for ranking waste management alternatives in the prototype DSS. Criteria weights were treated as predefined external inputs and directly applied within the TOPSIS procedure.

Step 1: Decision Matrix Normalization

The decision matrix was normalized using vector normalization, as shown in Eq. (4):

$$r_{ij} = x_{ij} / \sqrt{\sum_{i=1}^m x_{ij}^2} \quad (4)$$

Where x_{ij} represents the performance value of alternative i under criterion j , $i=1, 2, \dots, m$; $j=1, 2, \dots, n$; m denotes the number of alternatives, and n denotes the number of criteria.

Step 2: Weighted Normalized Decision Matrix (Predefined Criteria Weights)

The normalized decision matrix was multiplied by predefined normalized criteria weights to obtain the weighted normalized matrix, as expressed in Eq. (5):

$$v_{ij} = w_j r_{ij} \quad (5)$$

where w_j is the normalized weight of criterion j , and $\sum_{j=1}^n w_j = 1$.

Step 3: Determination of Ideal Solutions

The positive ideal solution (PIS) and negative ideal solution (NIS) were defined as:

$$A^+ = \{v_1^+, v_2^+, \dots, v_n^+\} \quad (6)$$

$$A^- = \{v_1^-, v_2^-, \dots, v_n^-\} \quad (7)$$

Where:

$$v_j^+ = \begin{cases} \max_i(v_{ij}), & j \in J \text{ (benefit criteria)} \\ \min_i(v_{ij}), & j \in J' \text{ (cost criteria)} \end{cases}$$

$$v_j^- = \begin{cases} \min_i(v_{ij}), & j \in J \text{ (benefit criteria)} \\ \max_i(v_{ij}), & j \in J' \text{ (cost criteria)} \end{cases}$$

Step 4: Separation Measures

The separation distances from the PIS and NIS were calculated using Euclidean distance, as shown in Eqs. (8) and (9):

$$S_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^n (v_{ij} - v_j^+)^2} \quad (8)$$

$$S_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^n (v_{ij} - v_j^-)^2} \quad (9)$$

where S_i^+ and S_i^- represent the distances of alternative i from the PIS and NIS, respectively.

Step 5: Ranking Using Closeness Coefficient (θ_i)

The relative closeness to the ideal solution was calculated using Eq. (10):

$$\theta_i = S_i^- / (S_i^+ + S_i^-), \quad 0 < \theta_i < 1 \quad (10)$$

Where θ_i denotes the closeness coefficient of alternative i .



Alternatives were ranked according to (θ_j) , with higher values indicating closer proximity to the ideal solution. Accordingly, TOPSIS was the only MCDA algorithm implemented in the prototype DSS, with predefined criteria weights applied as external inputs to ensure transparent and reproducible ranking results.

2.8 System Evaluation

The prototype web-based DSS was evaluated from technical and stakeholder perspectives. Technical compliance was assessed using the WAVE tool to verify adherence to WCAG 2.1 guidelines. Stakeholder validation followed ISO 9241-11 principles, focusing on effectiveness, efficiency, and satisfaction. A five-point Likert-scale survey was administered to 25 stakeholders, and descriptive statistics (mean, SD, and Satisfaction Index: SI%) were calculated. The SI%, derived from normalized mean ratings, supports comparative interpretation of satisfaction levels (Table 4).

Table 4 Interpretation criteria of satisfaction index

No	Index value (100%)	Criteria
1	80% < SI < 100%	Very Satisfied
2	60% < SI < 80%	Satisfied
3	40% < SI < 60%	Satisfied Enough
4	20% < SI < 40%	Less Satisfied
5	0% < SI < 20%	Not Satisfied

Source: Adapted from Praseptiawan et al. [6]

The detailed questionnaire items and CR–TC evaluation instruments used in this study are provided in the Supplementary Data.

3. Results and Discussion

3.1 House of Quality (QFD Results)

The HoQ results (Fig. 4) illustrate relationships between 15 Customer Requirements (CRs) and 12 Technical Characteristics (TCs). The most influential CRs were Data Security & Privacy, Effectiveness & Efficiency, Accessibility & Standards, Transparency of DSS Results, and System Integration & Interoperability, reflecting priorities for secure and efficient system operation. Among TCs, User Interface & Visualization, Methodology Documentation, and Data Security Protocols ranked highest, underscoring the importance of interface design, methodological clarity, and data protection. Correlation analysis indicated positive design synergies across technical elements.

Pareto analysis (Fig. 5) shows that the first eight TCs account for 79.1% of cumulative importance, defining the primary focus for early-stage implementation, while the remaining TCs are scheduled for subsequent development phases.

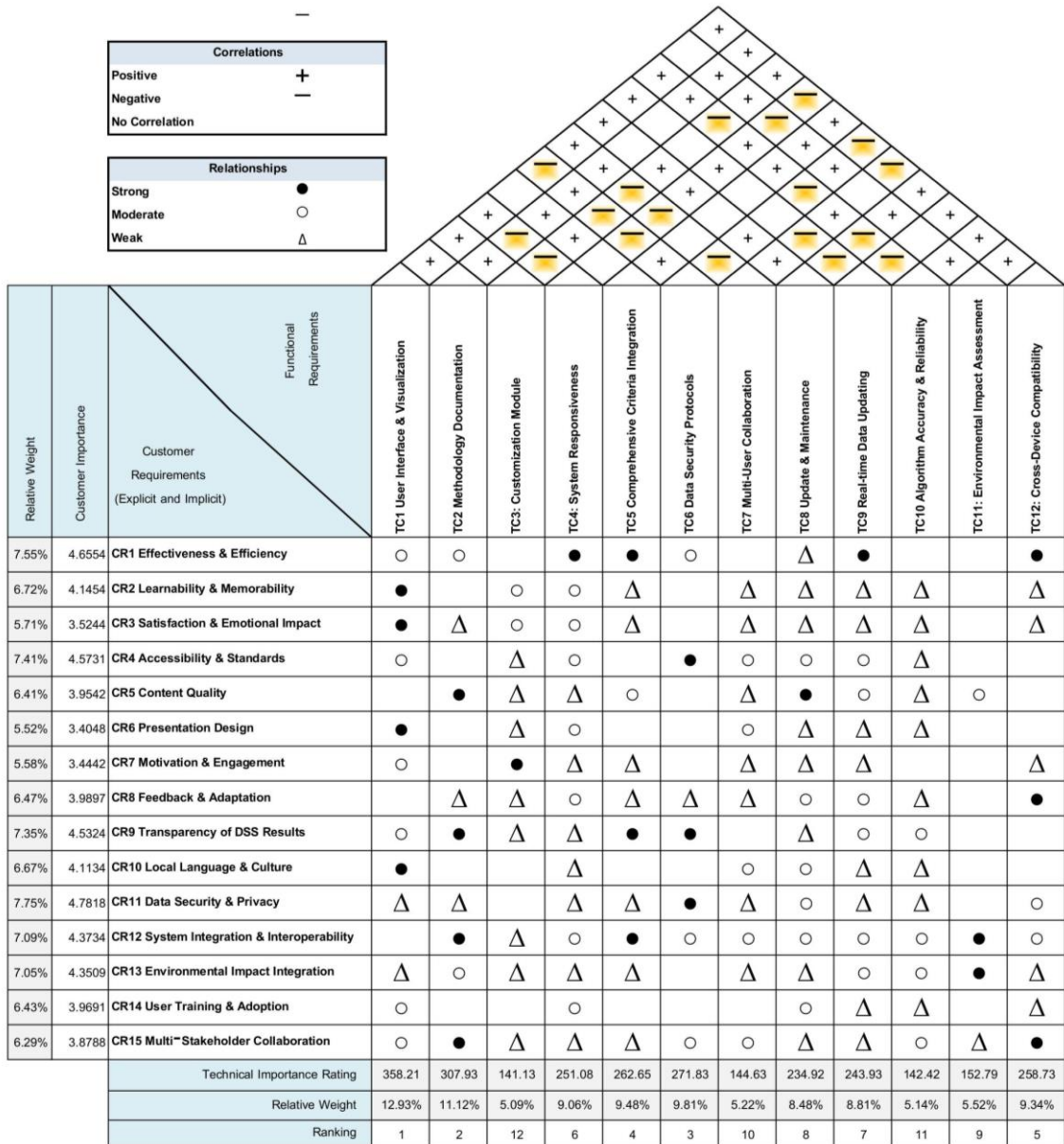


Fig. 4 HoQ illustrates the relationship between 15 CRs and 12 TCs

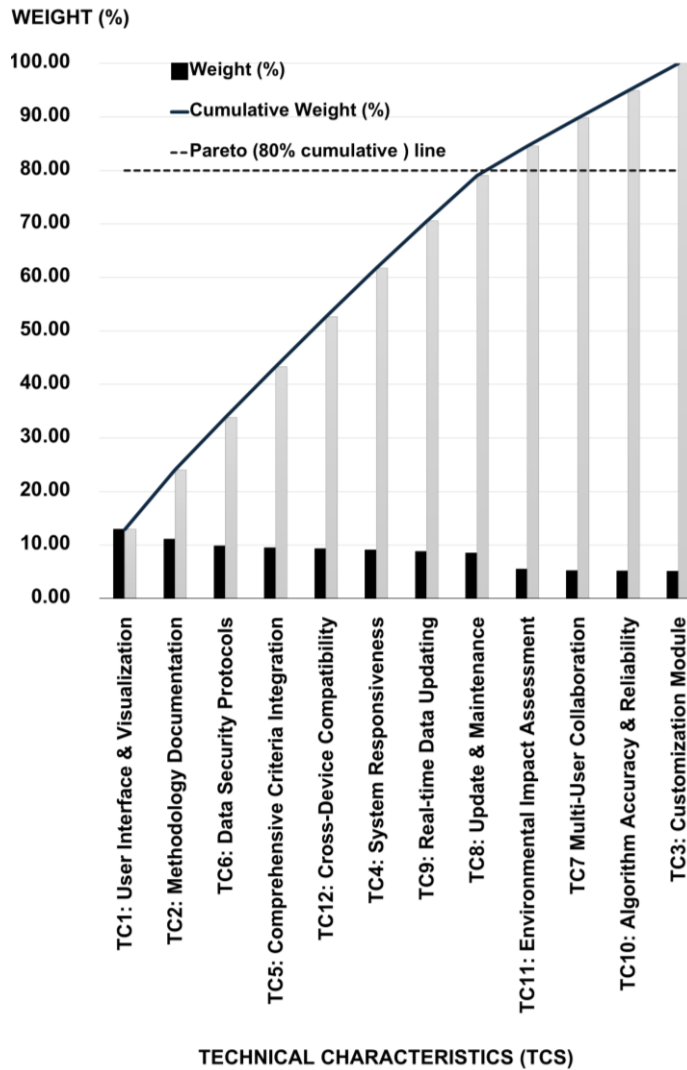


Fig. 5 Pareto analysis of TCs

3.2 DSS Prototype Development Results

3.2.1 System Architecture Overview

The prototype web-based DSS comprises four interconnected subsystems (Fig. 6). The data management subsystem stores user inputs and results to ensure consistency. The model

management subsystem applies the MCDA algorithm for ranking alternatives. The knowledge management subsystem governs decision logic, while the user interface supports data input and visualization with external data integration.

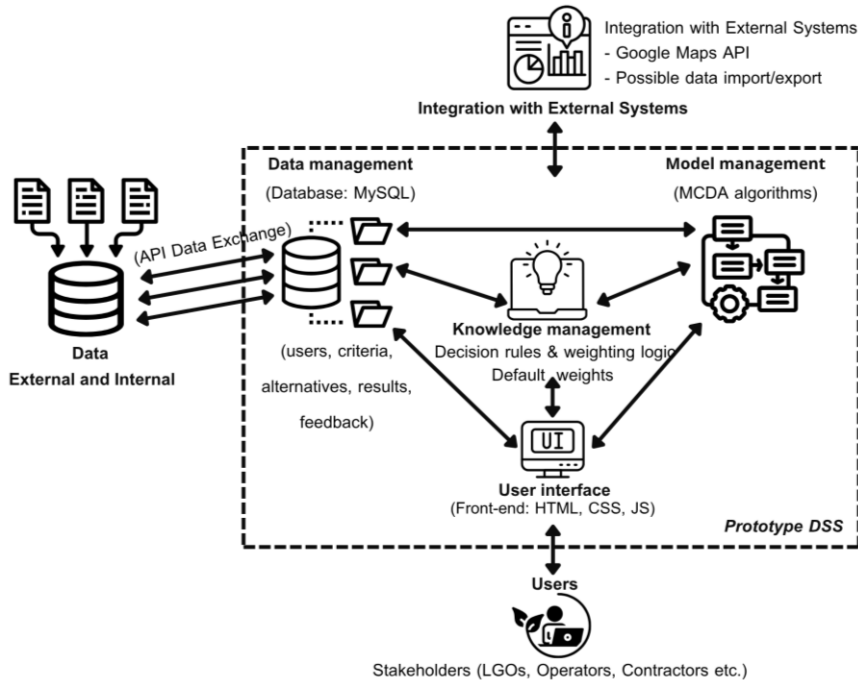


Fig. 6 Architecture of the prototype web-based DSS (developed in this study)

3.2.2 Functional Module Design

The functional workflow of the prototype web-based DSS (Fig. 7) supports collaboration between waste generators and operators through an automated process. Users register, select roles, and submit project data. The system applies an MCDA algorithm to recommend operators based on sustainability criteria, enabling automated notification, confirmation, and transparent project coordination. The prototype includes Waste Generator and Waste Operator modules enabling structured decision-related data aligned with QFD-derived priorities.

The system was deployed on a live server for demonstration and evaluation at <https://www.dss-municipal-waste.com/>, and representative user interface screens are presented in Fig. 8.

3.3 Evaluation (usability & accessibility)

3.3.1 Web Accessibility Evaluation Result

Automated testing using WAVE reported zero detected errors and contrast errors, which indicates strong alignment with WCAG 2.1 checks in the automated scan. In addition, the system incorporated six accessibility features, ten structural elements, and eleven ARIA elements, reflecting a high level of adherence to WCAG 2.1 principles and international web accessibility best practices.

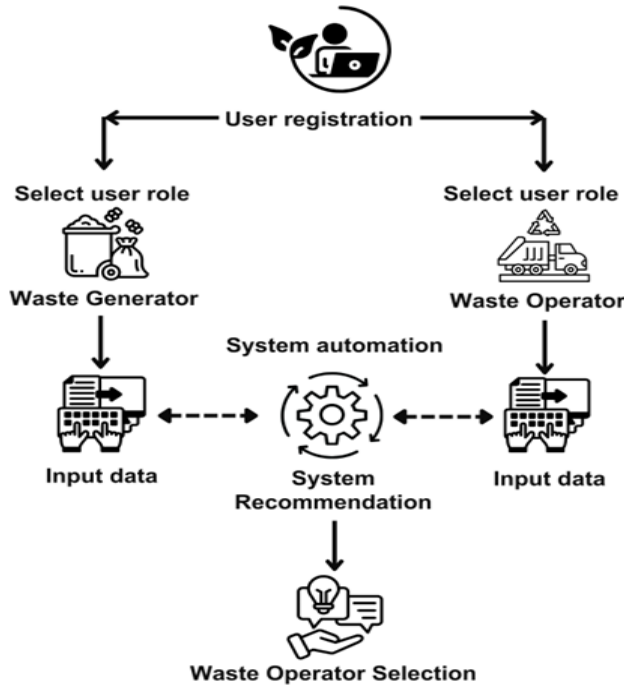


Fig. 7 Functional workflow of the prototype web-based DSS

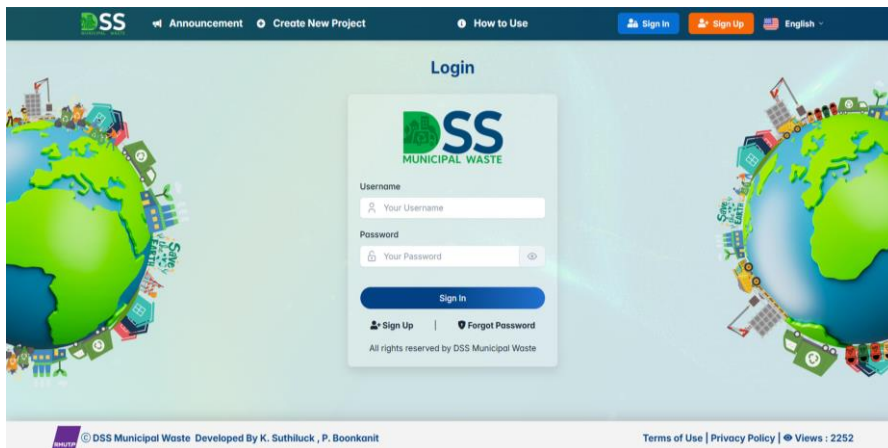


Fig. 8 Representative user interface screens of the prototype DSS

3.3.2 User Satisfaction Evaluation Results

User satisfaction was assessed through a structured survey of 25 participants using a five-

point Likert scale. The mean score was 4.35 (SD = 0.56), corresponding to a Satisfaction Index of 87.00%, indicating high satisfaction. Strong ratings



were observed for efficiency, functional performance, and effectiveness. Usability and information quality were also rated highly, while learnability and reliability, though slightly lower, remained within the high range. Detailed results are presented in Table 5.

3.4 Sensitivity Analysis of QFD Results

Sensitivity analysis was conducted by varying the weights of the three most influential customer requirements (CR11, CR9, and CR13) by $\pm 10\%$ while maintaining weight normalization. The recalculated HoQ results showed that the top-ranked technical characteristics remained unchanged, with only minor shifts among lower-ranked items.

3.5 Comparison with existing DSS applications

Existing DSS applications in developing regions primarily address policy-level analysis, landfill site selection, or technology comparison. Although they provide strategic insights, stakeholder requirements are seldom integrated into system architecture and decision algorithms, limiting operational relevance. In contrast, the proposed web-based DSS embeds stakeholder Voice of the Customer (VOC) through a structured QFD process and links QFD-derived priorities with a TOPSIS-based ranking mechanism. This integration enables transparent operator-level evaluation beyond macro-level policy analysis, strengthening the practical applicability of DSS in local government contexts.

Table 5 User satisfaction evaluation results

Dimension	(\bar{X})	SD	SI (%)	Interpretation
Usability	4.36	0.76	87.20	Very High
Information Quality	4.40	0.50	88.00	Very High
Learnability	3.92	0.64	78.40	High
Satisfaction (Functions)	4.56	0.51	91.20	Very High
Reliability	3.88	0.53	77.60	High
Efficiency	4.68	0.48	93.60	Very High
Effectiveness	4.52	0.51	90.40	Very High
Overall Satisfaction	4.48	0.59	89.60	Very High
Overall Mean	4.35	0.56	87.00%	Very High

Source: Research study

4. Conclusions and Recommendations

4.1 Conclusions

This study developed a QFD-guided web-based DSS prototype to address municipal and construction waste management challenges in Thailand. The framework translated stakeholder Voice of the Customer (VOC) into measurable technical characteristics, ensuring alignment between user requirements and system architecture.

By integrating QFD with a TOPSIS-based ranking mechanism, the system delivers transparent, operator-level decision support beyond conventional policy-oriented analyses. Accessibility testing and stakeholder evaluation



confirmed its technical feasibility and usability. Overall, the findings position QFD as an effective architectural bridge for stakeholder-driven, data-based sustainable waste management.

4.2 Recommendations

To enhance system effectiveness and practical implementation, the DSS should incorporate additional analytical functions, including GIS-based visualization and environmental-economic assessment tools. User training and guidance are also recommended to improve learnability and long-term usability.

4.3 Limitations and Future Research

This study developed and validated a prototype using a limited participant sample. Full-scale deployment, large-scale data testing, and high-concurrency evaluation were beyond its scope. Future research should implement wider pilot applications across multiple local governments and examine long-term performance, scalability, and operational integration.

5. Acknowledgments

The authors thank the experts who contributed to the IOC validation, CR weighting, and system evaluation, and the Rajamangala University of Technology Phra Nakhon, for their academic and organizational support.

6. Reference

- [1] N. Yukalang, B. Clarke and K. Ross, Barriers to effective municipal solid waste management in a rapidly urbanizing area in Thailand, *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2017, 14(9), 1013.
- [2] National Statistical Office (NSO), Thailand Environment Statistics 2024, Statistical Forecasting and Policy Innovation Division, Ministry of Digital Economy and Society, Bangkok, Thailand, 2024. (in Thai)
- [3] A.V. de Souza Melaré, S.M. González, K. Faceli and V. Casadei, Technologies and decision support systems to aid solid-waste management: A systematic review, *Waste Management*, 2017, 59, 567–584.
- [4] Y. Akao, *Quality Function Deployment: Integrating Customer Requirements into Product Design*, Productivity Press, Cambridge, MA, USA, 1990.
- [5] K. Boyalakuntla, A.S.M. Venigalla and S. Chimalakonda, Waccess -- A web accessibility tool based on WCAG 2.2, 2.1 and 2.0 guidelines, arXiv, 2021, Preprint, arXiv:2107.06799.
- [6] M. Praseptiawan, M. O. N. Gultom and M.C. Untoro, The evaluation of e-commerce using the customer satisfaction index and importance performance analysis, *Jurnal Sisfokom*, 2022, 11(1), 60–65.



- [7] B. Ubaldi and T. Okubo, OECD digital government index (DGI): Methodology and 2019 results, OECD Publishing, Paris, France, 2020.
- [8] ISO 9241-11:2018, Ergonomics of human-system interaction, Part 11: Usability: Definitions and concepts, 2018.
- [9] <https://www.w3.org/International/> (Accessed on 2 November 2025).
- [10] J.C. Nesbit, K. Belfer and T. Leacock, Learning object review instrument (LORI), E-learning Research and Assessment Network, 2003, 33–68.
- [11] S. García-Orozco, G. Vargas-Gutiérrez, S. Ordóñez-Sánchez and R. Silva, Using multi-criteria decision making in quality function deployment for offshore renewable energies, *Energies*, 2023, 16(18), 6533.
- [12] R.J. Rovinelli and R.K. Hambleton, On the use of content specialists in the assessment of content validity of objective tests, *Journal of Educational Measurement*, 1977, 14(2), 49–60.
- [13] K. Vasileiou, J. Barnett, S. Thorpe and T. Young, Characterizing and justifying sample size sufficiency in interview-based studies: Systematic analysis of qualitative health research over a 15-year period, *BMC Medical Research Methodology*, 2018, 18.
- [14] R.C. Turner and L. Carlson, Indexes of item-objective congruence for multidimensional items, *International Journal of Testing*, 2003, 3(2), 163–171.
- [15] ISO/IEC/IEEE 42010:2011, Systems and Software Engineering – Architecture Description, 2011.
- [16] ISO/IEC 25010:2011, Systems and Software Engineering – Systems and Software Quality Requirements and Evaluation (SQuaRE) – System and Software Quality Models, 2011.
- [17] M. Finkbeiner, A. Inaba, R. Tan, K. Christiansen and H.J. Klüppel, The new international standards for life cycle assessment: ISO 14040 and ISO 14044, *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 2006, 11(2), 80–85.
- [18] G. Disterer, ISO/IEC 27000, 27001 and 27002 for information security management, *Journal of Information Security*, 2013, 92–100.
- [19] ISO/IEC 14764:2006, Software Engineering – Software Life Cycle Processes – Maintenance, 2006.
- [20] M.J. Aqel, O.A. Nakshabandi and A.A. Adeniyi, Decision support systems classification in industry, *Periodicals of Engineering and Natural Sciences*, 2019, 7(2), 774-785.

การศึกษาการอบแห้งข้าวเปลือกในระบบอบแห้งกระแสแบบแนวโค้งด้วยพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ

ปฏิวดี คมวชิรกุล^{1*} ปิติ ชันโพธิ์¹ และ กิตติ สถาพรประสาธน์²

¹ สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

² ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

* ผู้ประสานงานเผยแพร่ (Corresponding Author), E-mail: patiwat.k@rmutp.ac.th

วันที่รับบทความ: 31 สิงหาคม 2568; วันที่ทบทวนบทความ: 23 กุมภาพันธ์ 2569; วันที่ตอบรับบทความ: 9 มีนาคม 2569

วันที่เผยแพร่ออนไลน์: 20 เมษายน 2569

บทคัดย่อ: งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการจำลองการอบแห้งข้าวเปลือกในระบบอบแห้งกระแสแบบแนวโค้ง ทั้งนี้อาศัยวิธีพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ ในการศึกษานี้แบบจำลอง 3 มิติที่สภาวะคงตัวถูกใช้คำนวณคุณลักษณะการอบแห้งในเครื่องอบแห้งกระแสแบบแนวโค้ง การแก้สมการในเฟสของแก๊สและของแข็งใช้ระเบียบวิธี Eulerian และ Lagrangian ตามลำดับ ซึ่งแบบจำลองใช้ทำนายผลกระทบของตัวแปรต่างๆ ได้แก่ ความเร็วของแก๊สขาเข้าที่ 25 m/s อุณหภูมิของแก๊สขาเข้าที่ 70 90 และ 110 °C และอัตราการป้อนของข้าวเปลือกที่ 20 35 และ 56 kg/h ที่ส่งผลต่อค่าเวลาเฉลี่ยที่ข้าวเปลือกอยู่ในระบบ ความชื้นเฉลี่ยของข้าวเปลือกและอัตราการระเหยน้ำเชิงปริมาตร โดยผลการจำลองถูกนำมาเปรียบเทียบกับข้อมูลการทดลอง จากการศึกษาพบว่า แบบจำลองสามารถให้ผลการทำนายค่าเวลาเฉลี่ยที่ข้าวเปลือกอยู่ในระบบ และค่าความชื้นเฉลี่ยสุดท้ายใกล้เคียงกับผลการทดลองที่มีความคลาดเคลื่อนไม่เกิน $\pm 6\%$ การลดลงของความชื้นของข้าวเปลือกขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของแก๊สและอัตราการป้อนข้าวเปลือก อัตราการระเหยน้ำเชิงปริมาตรสูงสุดมีค่าเท่ากับ $62.72 \text{ kg}_{\text{water}}/\text{m}^3\text{h}$ ที่ความเร็วของแก๊สขาเข้า 25 m/s อุณหภูมิของแก๊สขาเข้า 110 °C และอัตราการป้อนของข้าวเปลือก 56 kg/h และจากผลการจำลองพบว่า อัตราการป้อนข้าวเปลือกที่เหมาะสมกับระบบอบแห้งกระแสแบบแนวโค้งนี้มีค่าประมาณ 80 kg/h.

คำสำคัญ: กระแส; ข้าวเปลือก; ความชื้น; อบแห้ง; อัตราการระเหยน้ำเชิงปริมาตร

Investigation of Paddy Drying in a Curvilinear Impinging Stream Drying System Using Computational Fluid Dynamics

Patiwat Khomwachirakul^{1*}, Piti Khunpho¹ and Kitti Sathapornprasath²

¹ Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering,
Rajamangala University of Technology Phra Nakhon

² Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Srinakharinwirot University

* Corresponding author, E-mail: patiwat.k@rmutp.ac.th

Received: 31 August 2025; Revised: 23 February 2026; Accepted: 9 March 2026

Online Published: 20 April 2026

Abstract: This research was to investigate the simulation of paddy drying in a curvilinear impinging stream drying system by computational fluid dynamics. In this study, a three-dimensional steady-state model was used to calculate the drying characteristics in a curvilinear impinging stream dryer. The gas and solid phase equations were solved using the Eulerian and Lagrangian methods, respectively. The model was used to simulate the effects of various parameters including inlet air velocity of 25 m/s, inlet drying air temperatures of 70, 90 and 110 °C, paddy feed rate of 25, 35 and 56 kg/h on the paddy mean residence time, paddy mean moisture content and volumetric evaporation rate. Simulated results were compared with experimental data. The results showed that the model could predict the paddy mean residence time and paddy mean moisture content were close to the experimental results within $\pm 6\%$. The simulated results revealed that the moisture reduction rate of the paddy depended both on the inlet drying air temperature and paddy feed rate. The maximum volumetric water evaporation rate was 62.72 $\text{kg}_{\text{water}}/\text{m}^3\text{h}$ when using inlet air velocity of 25 m/s, inlet drying air temperatures of 110 °C and paddy feed rate of 56 kg/h. Based on the simulated results, the optimum paddy feed rate of this curvilinear impinging stream drying system was around 80 kg/h.

Keywords: Impinging stream; Paddy; Moisture content; Drying; Volumetric evaporation rate



1. บทนำ

เครื่องอบแห้งแบบกระแสน้ำ (Impinging Stream Dryer) ถือว่าเป็นเครื่องอบแห้งที่มีสมรรถนะสูงและเป็นอีกทางเลือกหนึ่งในเรื่องของการลดความชื้นของข้าวเปลือก เนื่องจากมีความสามารถในการดึงเอาความชื้นให้ออกจากบริเวณผิวของข้าวเปลือกได้อย่างรวดเร็ว ทั้งยังเป็นเทคนิคที่ไม่ซับซ้อน และมีอัตราการอบแห้งข้าวเปลือกสูง [1, 2] สำหรับการอบแห้งแบบกระแสน้ำมีหลักการพื้นฐานคือ การนำกระแสของไอลงของตัวกลางการอบแห้งสองกระแสหรือมากกว่า ซึ่งมีอุณหภูมิและความเร็วสูงโดยมีทิศทางตรงกันข้ามมาชนกัน ผลของการชนกันของกระแสของไอลงทำให้เกิดความปั่นป่วนในบริเวณการชนสูง ซึ่งเป็นบริเวณที่มีอัตราการถ่ายเทมวล ความร้อนและโมเมนตัมสูง ทั้งนี้เนื่องจากผลของแรงเฉื่อยและความปั่นป่วนของกระแสการไหลที่มีค่าสูงในบริเวณดังกล่าว สำหรับวัสดุอนุภาคที่ต้องการจะอบแห้งสามารถป้อนเข้าสู่ห้องอบแห้งไปพร้อมกับกระแสของไอลงกระแสใดกระแสหนึ่งหรือทุกกระแสของไอลงก็ได้ ในบริเวณการชนของตัวกลางการอบแห้ง วัสดุอนุภาคจะเกิดการเคลื่อนที่สวนกระแสตรงกันข้ามและมีการเคลื่อนที่กลับไป-มา (Oscillatory Motion) ซึ่งการเคลื่อนที่ของวัสดุอนุภาคจะเป็นเช่นนี้ไปเรื่อย ๆ จนกระทั่งความเร็วของวัสดุอนุภาคลดลงถึงค่า ๆ หนึ่งก็จะถูกกระแสการไหลของตัวกลางการอบแห้งนำออกจากระบบอบแห้ง ซึ่งการเคลื่อนที่ลักษณะนี้ทำให้วัสดุอนุภาคอยู่ในระบบได้นานขึ้นซึ่งเป็นการเพิ่มระยะเวลาในการถ่ายเทมวลและความร้อนจากตัวกลางที่ใช้ในการอบแห้ง ส่งผลให้เกิดการแลกเปลี่ยนความร้อนและการถ่ายเทมวลในอัตราที่สูง ทำให้สมรรถนะของเครื่องอบแห้งสูงขึ้น [3] ที่ผ่าน

มาได้มีงานวิจัยที่ทำการศึกษารอบแห้งข้าวเปลือกด้วยเครื่องอบแห้งแบบกระแสน้ำ และพบว่าเครื่องอบแห้งแบบกระแสน้ำสามารถลดความชื้นของข้าวเปลือกได้อย่างรวดเร็ว ข้าวเปลือกใช้เวลาอยู่ในระบบด้วยเวลาอันสั้น และมีอัตราการอบแห้งข้าวเปลือกสูงกว่าเครื่องอบแห้งแบบอื่น [1-2] ต่อมา P. Kumklam et al. [4] ได้ทำการศึกษาผลกระทบของตัวแปรต่างๆ ที่มีต่อการอบแห้งข้าวเปลือกหนึ่งด้วยระบบอบแห้งแบบกระแสน้ำ จากการศึกษาพบว่าระบบอบแห้งแบบกระแสน้ำสามารถลดความชื้นข้าวเปลือกหนึ่งได้อย่างรวดเร็ว คุณภาพของข้าวเปลือกหนึ่งหลังการอบแห้งอยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน

อย่างไรก็ตามการศึกษารากฏการณ์ต่างๆ ในระบบกระแสน้ำด้วยการทดลองนั้น ทำได้ค่อนข้างยาก เนื่องจากเป็นระบบปิดและเวลาที่อนุภาคอยู่ในระบบสั้น ตลอดจนมีตัวแปรหลายตัวที่ส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพของระบบ ด้วยเหตุนี้การศึกษาแบบจำลองการไหลและปรากฏการณ์ด้วยระเบียบวิธีคำนวณเชิงตัวเลขของการไหลในระบบอบแห้งแบบกระแสน้ำนับว่ามีความจำเป็น ทั้งนี้เพื่อศึกษาและทำนายพฤติกรรมการเคลื่อนที่ของอนุภาคและของไหลสำหรับนำไปออกแบบให้ระบบการอบแห้งมีประสิทธิภาพสูงสุด จากรายงานวิจัยจำนวนหนึ่งได้ใช้ระเบียบวิธีพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณมาอธิบายปรากฏการณ์ต่างๆ ในระบบกระแสน้ำ ซึ่งส่วนใหญ่เป็นการศึกษาในระบบกระแสน้ำแบบแนวแกน (Coaxial Impinging Stream) เช่น การศึกษาพฤติกรรมเคลื่อนที่ของอนุภาคและของไหลในระบบอบแห้ง [5] การศึกษาคุณลักษณะการอบแห้งในระบบอบแห้งกระแสน้ำ [6-9] ซึ่งจากงานวิจัยดังกล่าวพบว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สามารถ

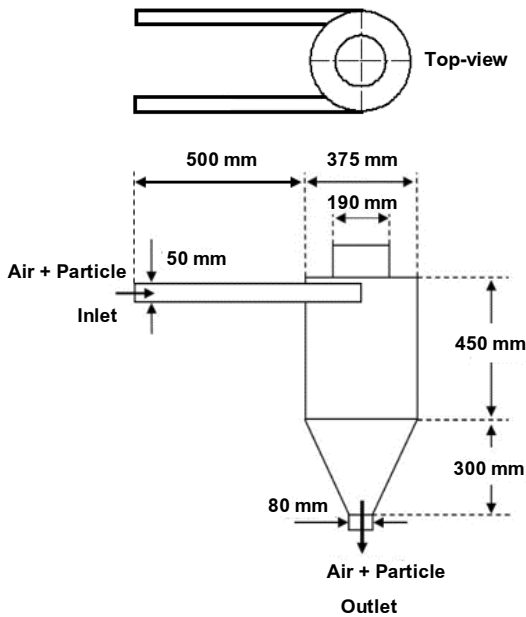


ทำนายและอธิบายปรากฏการณ์ต่างๆ ในระบบกระแสชนได้ดีและผลของการจำลองใกล้เคียงกับผลการทดลอง สำหรับการศึกษาระบบกระแสชนแบบแนวโค้ง (Curvilinear Impinging Stream) ยังมีไม่มากนัก ระบบกระแสชนแบบแนวโค้งนี้มีหลักการพื้นฐานเช่นเดียวกันกับระบบกระแสชนแบบแนวแกน จะต่างกันที่กระแสน้ำไหลของตัวกลางการอบแห้งสองกระแสหรือมากกว่าเคลื่อนที่ตามแนวโค้งของห้องอบแห้งและเกิดการชนกันของกระแสการไหลของตัวกลางการอบแห้งซึ่งเกิดขึ้นที่บริเวณการชน การเคลื่อนที่ลักษณะดังกล่าวทำให้มีข้อได้เปรียบระบบกระแสชนแบบแนวแกน กล่าวคือเพิ่มระยะห่างระหว่างการชนของกระแสของการไหลของตัวกลางการอบแห้งและพื้นที่บริเวณการชน ทำให้วัสดุอนุภาคมีโอกาสที่จะอยู่ในบริเวณการชนได้เพิ่มมากขึ้น ซึ่งบริเวณการชนเป็นบริเวณที่มีอัตราการถ่ายเทมวล ความร้อนและโมเมนตัมสูง [3] โดย Ghasemi et al. [10] ได้แสดงแบบจำลองการไหลและปรากฏการณ์สำหรับของแข็งและของเหลวในระบบอบแห้งแบบกระแสชนแบบโค้งด้วยวิธีพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ ผลจากการจำลองได้อธิบายคุณลักษณะของการไหลของอนุภาคในระบบอบแห้ง รวมทั้งเวลาเฉลี่ยที่วัสดุอยู่ในระบบและปริมาณการคงอยู่ของวัสดุในระบบได้เป็นอย่างดีเมื่อเปรียบเทียบกับผลการทดลอง การจำลองโดยใช้วิธีพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณสามารถที่จะอธิบายถึงปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นของของไหล ทั้งยังสามารถที่จะกำหนดตัวแปรต่างๆ ที่มีผลกระทบต่อสมรรถนะของห้องอบแห้ง และการจำลองยังสามารถช่วยในเรื่องของการลดระยะเวลาในการทดลอง และค่าใช้จ่ายอีกด้วย [11-13] ด้วยเหตุนี้การจำลองอบแห้งข้าวเปลือกด้วย

ระบบกระแสชนจึงมีความน่าสนใจและเพื่อเป็นแนวทางในการออกแบบระบบอบแห้งข้าวเปลือกโดยเฉพาะระบบกระแสชนแบบแนวโค้งซึ่งมีข้อมูลอยู่จำกัด ดังนั้นในการศึกษานี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการจำลองคุณลักษณะการอบแห้งในระบบอบแห้งกระแสชนแบบแนวโค้งด้วยวิธีพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ การจำลองพิจารณาเป็นแบบ 3 มิติ ขณะที่การแก้สมการในเฟสของแก๊สใช้ระเบียบวิธี Eulerian และเฟสของแข็งใช้ระเบียบวิธี Lagrangian ซึ่งแบบจำลองทำการศึกษาผลของอุณหภูมิ แก๊สเข้า และอัตราการป้อนข้าวเปลือก ที่มีต่อค่าความชื้นของข้าวเปลือก เวลาเฉลี่ยที่ข้าวเปลือกอยู่ในระบบ (Residence Time) และอัตราการเหยน้ำเชิงปริมาตรของเครื่องอบแห้ง โดยผลของการจำลองถูกเปรียบเทียบกับผลการทดลอง

2. วิธีการดำเนินงานวิจัย

ในการสร้างแบบจำลองการอบแห้งข้าวเปลือกในระบบกระแสชนแบบโค้งได้นำผลการจำลองมาเปรียบเทียบกับผลการทดลองของ Buatum [14] ซึ่งขนาดของห้องอบแห้ง (รูปที่ 1) มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 375 mm ท่อทางเข้าห้องอบแห้งขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 mm ความสูงของห้องอบแห้งแบ่งเป็น 2 ส่วน คือส่วนด้านบนเป็นทรงกระบอกมีความสูง 450 mm และส่วนด้านล่างเป็นทรงกรวยมีความสูง 300 mm ที่ทางออกห้องอบแห้งมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 80 mm เงื่อนไขที่ใช้ในการศึกษาได้แก่ อุณหภูมิแก๊สที่ใช้ในการอบแห้ง 70 90 และ 110 °C ความเร็วแก๊สที่ท่อทางเข้าห้องอบแห้ง 25 m/s และอัตราการป้อนข้าวเปลือก 20 35 และ 56 kg/h



รูปที่ 1 ขนาดห้องอบแห้งกระแสนแบบโค้ง [14]

การจำลองจะพิจารณาข้าวเปลือกจากรูปทรงรีเป็นรูปทรงกลม [15] ข้าวเปลือกที่ทำกรวิจัยทำการวัดขนาดความกว้าง (W) ความยาว (L) และความหนา (T) ด้วยเวอร์เนียร์คาลิเปอร์จำนวน 100 ซ้ำแล้วคำนวณค่าเฉลี่ยเส้นผ่านศูนย์กลางเทียบเท่า (Effective Diameter, D_e) จากสมการที่ (1) [16]

$$D_e = (LWT)^{\frac{1}{3}} \quad (1)$$

2.1 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

ในการศึกษาที่ใช้พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณในการจำลองพฤติกรรมเคลื่อนที่ของข้าวเปลือกและแก๊ส รวมทั้งทำนายความชื้นของข้าวเปลือกในระบบอบแห้งแบบกระแสนแบบโค้ง

2.1.1 สมการควบคุมในเฟสแก๊ส

สมการควบคุมสำหรับการไหลในเฟสแก๊สถูกพิจารณาด้วยสมการความต่อเนื่อง สมการอนุรักษ์โมเมนตัม สมการอนุรักษ์พลังงาน สมการอนุรักษ์มวลย่อย และแบบจำลองความปั่นป่วน แสดงดังนี้ สมการความต่อเนื่อง

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i) = M_m \quad (2)$$

เมื่อ ρ คือ ความหนาแน่นของแก๊ส (kg/m^3) t คือ เวลา (s) และ M_m คือเทอมของการถ่ายโอนมวลสารจากเฟสของอนุภาคไปสู่เฟสของแก๊ส หาได้จากสมการที่ (3) [6]

$$M_m = \frac{\Delta m_p}{m_{p,0}} \frac{dm_{p,0}}{dt} \quad (3)$$

เมื่อ Δm_p คือ มวลของอนุภาคที่เปลี่ยนแปลงในปริมาตรควบคุม (kg) $m_{p,0}$ คือ มวลเริ่มต้นของอนุภาค (kg) และ $\frac{dm_{p,0}}{dt}$ คือ อัตราการระเหยความชื้นของอนุภาคเริ่มต้น (kg/s)

สมการอนุรักษ์โมเมนตัม

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u_j) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i u_j) = -\frac{\partial P}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left[(\mu + \mu_t) \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] + \rho g + M_F \quad (4)$$

เมื่อ u_i, u_j คือความเร็วของแก๊ส (m/s) P คือความดัน (N/m^2) μ คือความหนืดสัมบูรณ์ ($\text{kg/m}\cdot\text{s}$) μ_t คือความหนืดของความปั่นป่วน ($\text{kg/m}\cdot\text{s}$) g คือค่าแรงโน้มถ่วง (m/s^2) และ M_F คือเทอมของการถ่ายโอนโมเมนตัมจากเฟสของแก๊สไปยังเฟสของอนุภาค หาได้จากสมการที่ (5) [6]



$$M_F = \sum \left(\frac{18\mu C_D Re}{\rho_p d_p^2 24} (u_p - u_g) \right) \frac{dm_p}{dt} \Delta t \quad (5)$$

เมื่อ C_D คือสัมประสิทธิ์แรงจุดลาก Re คือตัวเลขเรย์โนลด์ ρ_p คือความหนาแน่นของอนุภาค (kg/m^3) d_p คือเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาค (m) u_p, u_g คือความเร็วของอนุภาคและแก๊ส (m/s) ตามลำดับ

สมการอนุรักษ์พลังงาน

กลไกสำคัญในกระบวนการถ่ายเทความร้อนระหว่างแก๊สและอนุภาคในเครื่องอบแห้งแบบกระแสนคือการพาความร้อน สมการอนุรักษ์พลังงานสำหรับเฟสแก๊สสามารถพิจารณาได้ดังนี้

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho c_p T) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho c_p u_i T) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(k \frac{\partial T}{\partial x_i} \right) + M_h \quad (6)$$

เมื่อ c_p คือค่าความจุความร้อนของแก๊ส ($\text{J/kg}\cdot\text{K}$) T คือ อุณหภูมิของแก๊ส (K) k คือค่าการนำความร้อนของแก๊ส ($\text{W/m}\cdot\text{K}$) และ M_h คือเทอมของการถ่ายโอนความร้อนจากเฟสของแก๊สไปยังเฟสของอนุภาค หาได้จากสมการที่ (7) [6]

$$M_h = \left[\frac{\dot{m}_p}{m_{p,0}} c_p \Delta T_p + \frac{\Delta m_p}{m_{p,0}} \left(-h_{fg} + \int_{T_{ref}}^{T_p} c_{p,i} dT \right) \right] \frac{dm_{p,0}}{dt} \quad (7)$$

เมื่อ T_p คือ อุณหภูมิของอนุภาค (K) h_{fg} คือ ความร้อนแฝงของการระเหยน้ำออกจากอนุภาค (J/kg)

สมการอนุรักษ์มวลย่อย

สมการอนุรักษ์มวลย่อยสำหรับเฟสแก๊สสามารถเขียนได้ดังนี้

$$\frac{\partial(\rho C)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i C)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\left(\rho D + \frac{\mu_t}{Sc_t} \right) \frac{\partial C}{\partial x_i} \right) + M_m \quad (8)$$

เมื่อ D คือ สัมประสิทธิ์การแพร่ของไอในเฟสแก๊ส (m^2/s) และ Sc_t คือ ตัวเลขชมิทธ์ของความปั่นป่วน

แบบจำลองความปั่นป่วน

แบบจำลองความปั่นป่วน Realizable $k - \varepsilon$ ถูกนำมาใช้ในการคำนวณสำหรับความปั่นป่วนในเฟสแก๊ส ซึ่งแสดงดังสมการที่ (9) และ (10) [6]

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M \quad (9)$$

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \varepsilon u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] - \rho C_2 \frac{\varepsilon^2}{k + \sqrt{\nu \varepsilon}} + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} C_{3\varepsilon} G_b \quad (10)$$

โดยค่าคงที่ของแบบจำลองความปั่นป่วน สามารถสืบค้นจาก Choicharoen et al. [6]

2.1.2 สมการควบคุมในเฟสอนุภาค

สมการที่ใช้สำหรับการทำนายการเคลื่อนที่ของอนุภาคจะพิจารณาสมดุลแรงที่กระทำกับอนุภาคซึ่งถูกพิจารณาด้วยแรงจุด และแรงโน้มถ่วง พิจารณาได้ดังสมการที่ (11) [6]

$$\frac{du_p}{dt} = \frac{18\mu C_D Re}{\rho_p d_p^2 24} (u_g - u_p) + g_i \frac{\rho_p - \rho_g}{\rho_p} \quad (11)$$



เมื่อ u_g, u_p คือความเร็วของแก๊สและอนุภาค (m/s) ρ_g, ρ_p คือความหนาแน่นของแก๊สและอนุภาค (kg/m^3) Re คือตัวเลขเรย์โนลด์ และ C_D คือสัมประสิทธิ์ของแรงจุด การคำนวณค่าตัวเลขเรย์โนลด์ และสัมประสิทธิ์ของแรงจุด ใช้สมการที่พิจารณาอนุภาคเป็นทรงกลม [17] โดยค่าตัวเลขเรย์โนลด์ และสัมประสิทธิ์ของแรงจุด สามารถพิจารณาได้ตามสมการที่ (12) และ (13) ตามลำดับ [17]

$$Re = \frac{\rho d_p |u_p - u_g|}{\mu} \quad (12)$$

$$C_D = a_1 + \frac{a_2}{Re} + \frac{a_3}{Re} \quad (13)$$

เมื่อ a_1, a_2, a_3 เป็นค่าคงที่และมีค่าขึ้นอยู่กับตัวเลขเรย์โนลด์ ซึ่งสามารถสืบค้นจาก Jakobsen [18]

2.1.3 สมการถ่ายโอนความร้อนและมวลระหว่างแก๊สและอนุภาค

การถ่ายโอนความร้อนจะถ่ายโอนจากกระแสของแก๊สไปยังผิวของอนุภาค ทำให้ความร้อนส่วนใหญ่ถูกใช้เพื่อการระเหยความชื้นของอนุภาค ในกรณีที่อุณหภูมิของอนุภาคต่ำกว่าอุณหภูมิการระเหยความชื้น ซึ่งในช่วงนี้จะไม่เกิดการระเหยความชื้นจากอนุภาค ซึ่งสมการสมดุลความร้อนพิจารณาจากสมการที่ (14) [6]

$$m_p c_p \frac{dT_p}{dt} = h A_p (T_g - T_p) \quad (14)$$

สำหรับการหาค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนสำหรับการไหลผ่านอนุภาคจะพิจารณาตามความสัมพันธ์ของ Ranz และ Marshall [6-7]

$$Nu = \frac{h d_p}{k_g} = 2 + 0.6 Re^{1/2} Pr^{1/3} \quad (15)$$

โดยที่ Nu, Re, Pr คือตัวเลขนัสเซลท์ ตัวเลขเรย์โนลด์ และตัวเลขพรนด์เทิล ตามลำดับ c_p คือค่าความจุความร้อนของอนุภาค ($\text{J/kg}\cdot\text{K}$) T_p คืออุณหภูมิของอนุภาค (K) T_g คืออุณหภูมิของแก๊ส (K) h คือสัมประสิทธิ์ของการพาความร้อน ($\text{W/m}^2\cdot\text{K}$) และ k_g คือสภาพนำความร้อนของแก๊ส ($\text{W/m}\cdot\text{K}$) สำหรับกระบวนการถ่ายโอนมวลสาร เมื่ออุณหภูมิของอนุภาคมีค่าถึงอุณหภูมิของการระเหยความชื้น และอนุภาคมีการระเหยความชื้นเกิดขึ้น อัตราการระเหยความชื้นที่ผิวของอนุภาคจะพิจารณาจากผลของความแตกต่างระหว่างความเข้มข้นไอที่ผิวของอนุภาคและในเฟสแก๊สดังนี้ [6, 7]

$$N_i = k_c (C_{i,s} - C_{i,g}) \quad (16)$$

ซึ่ง $C_{i,s}, C_{i,g}$ คือเข้มข้นไอที่ผิวของอนุภาคและในเฟสแก๊สตามลำดับ สำหรับสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวล (k_c) พิจารณาจากความสัมพันธ์ของตัวเลขเชอร์วูด [6, 7]

$$Sh = \frac{k_c d_p}{D} = 2.0 + 0.6 Re^{1/2} Sc^{1/3} \quad (17)$$

เมื่อ Sc คือ ตัวเลขชmidt และสมการถ่ายโอนมวลระหว่างแก๊สและอนุภาคสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (18) [6, 7]

$$\frac{dm_p}{dt} = -N_i A_p M_{w,i} \quad (18)$$

เมื่อ $M_{w,i}$ คือมวลโมเลกุลของไอน้ำ (kg/kmol) ดังนั้นสมการถ่ายโอนความร้อนระหว่างอนุภาคและแก๊ส



สามารถพิจารณาได้จากสมการสมดุลความร้อนดังนี้ [6, 7]

$$m_p c_p \frac{dT_p}{dt} = hA_p (T_g - T_p) + \frac{dm_p}{dt} h_{fg} \quad (19)$$

สำหรับสมรรถนะของเครื่องอบแห้งแบบกระแสน้ำ สามารถประเมินได้ในเทอมของอัตราการเหยน้ำเชิงปริมาตร (Volumetric water evaporation rate) ดังสมการที่ (20) [1-3]

$$N_v = \frac{W_p (X_i - X_o)}{V_r} \quad (20)$$

เมื่อ N_v คืออัตราการเหยน้ำเชิงปริมาตร ($\text{kg}_{\text{water}}/\text{m}^3\text{h}$) W_p คืออัตราการป้อนข้าวเปลือก $X_i - X_o$ คือผลต่างของความชื้นของข้าวเปลือกก่อนและหลังการอบแห้ง และ V_r คือปริมาตรของห้องอบแห้ง

2.2 สมมติฐานของแบบจำลองและเงื่อนไข

2.2.1 สมมติฐานที่ใช้ในการจำลอง

ในการศึกษานี้การจำลองการไหลถูกพิจารณาให้ อยู่ในสภาวะคงที่ (Steady State) สำหรับอนุภาค (ข้าวเปลือก) ถูกพิจารณาให้เป็นลักษณะทรงกลม [15] มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางจากการคำนวณตามสมการที่ 1 เท่ากับ 0.0036 m และไม่มีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างตลอดการอบแห้ง ไม่พิจารณาการชนกันของอนุภาคกับอนุภาค และไม่มีการถ่ายเทความร้อนระหว่างอนุภาคกับผนังห้องอบแห้ง สำหรับแก๊สกำหนดให้เป็น Ideal gas และไม่พิจารณาความร้อนสูญเสียผ่านผนังห้องอบแห้ง คุณสมบัติของแก๊สและอนุภาค (ข้าวเปลือก) แสดงดังตารางที่ 1 และ 2 ตามลำดับ การจำลองการ

ไหลถูกจำลองผ่านโปรแกรม ANSYS FLUENT (Version 21.0) ด้วยระเบียบวิธีปริมาตรสี่เหลี่ยม (Finite Volume Method) รูปร่างของห้องอบแห้งแบบกระแสน้ำแบบแนวโค้ง [14] แสดงดังรูปที่ 1 การทดสอบความเหมาะสมของจำนวนกริด (Grid Independent) ด้วยการศึกษาค่าผลของการป้อนความเร็วแก๊สที่แตกต่างกันและอุณหภูมิของแก๊สที่แตกต่างกันที่ทางเข้าห้องอบแห้ง แล้วดูผลการจำลองความเร็วแก๊สและอุณหภูมิของแก๊สที่ทางออกห้องอบแห้ง กริดที่สร้างขึ้นเป็นกริดแบบสามเหลี่ยม (tetrahedral) โดยทดสอบที่จำนวนกริดได้แก่ 257284 305250 351675 404279 และ 45991 เอลิเมนต์ตามลำดับ จากการจำลองพบว่า ที่จำนวนกริด 351675 404279 และ 45991 เอลิเมนต์ ให้ผลความแตกต่างของความเร็วแก๊สและอุณหภูมิแก๊สที่ทางออกห้องอบแห้งต่ำกว่า 5% [7] ดังนั้นจึงเลือกจำนวนกริด 351675 เอลิเมนต์ (รูปที่ 2)



รูปที่ 2 รูปร่างห้องอบแห้งและกริดที่ใช้ในการจำลอง



ตารางที่ 1 คุณสมบัติของแก๊ส [7, 9]

คุณสมบัติ	ค่าที่ใช้ในการจำลอง
ความจุความร้อน (kJ/kg-K)	$0.99-1.77 \times 10^{-5} T_g$ $+1.91 \times 10^{-7} T_g^2$
การนำความร้อน (W/m-K)	$1.3 \times 10^{-3} + 9.11 \times 10^{-5} T_g$ $-2.52 \times 10^{-8} T_g^2$
ความหนืด (Pa-s)	$3.55 \times 10^{-6} + 5.54 \times 10^{-8} T_g$ $-1.7 \times 10^{-11} T_g^2$

ตารางที่ 2 คุณสมบัติของข้าวเปลือก [19]

คุณสมบัติ	ค่าที่ใช้ในการจำลอง
ความจุความร้อน (J/kg-K)	$1110 + 44.8M_w$
การนำความร้อน (W/m-K)	$0.0863 + 0.00134M_w$
ความหนาแน่น (kg/m ³)	$\frac{552 + 282M_d}{1 - (0.623 - 0.25M_d)}$

เมื่อ M_d และ M_w คือปริมาณความชื้นของข้าวเปลือกตามมาตรฐานแห้ง (d.b) และมาตรฐานเปียก (w.b) ตามลำดับ

ตารางที่ 3 ตัวแปรที่ใช้ในการจำลอง

ตัวแปร	ค่าในแบบจำลอง
อุณหภูมิแก๊สขาเข้า (°C)	70, 90, 110
ความเร็วแก๊สขาเข้า (m/s)	25
อัตราการป้อนข้าวเปลือก (kg/h)	20, 35, 56
สัมประสิทธิ์การคืนตัว [9] (coefficient of restitution) (ข้าวเปลือก-ผนังห้องอบแห้ง)	0.6

2.2.2 เงื่อนไขการจำลอง

บริเวณท่อทางเข้า แก๊สมีความเร็วเท่ากันทั้งสองข้างและมีค่าความเข้มของความปั่นป่วน (Turbulence Intensity) เท่ากับ 5% [6-7] ข้าวเปลือกมีความชื้นเริ่มต้น 28% (d.b) มีอุณหภูมิเริ่มต้น 30 °C ความเร็วเริ่มต้นของข้าวเปลือกที่ทางเข้าห้องอบแห้งกำหนดให้เป็นศูนย์ และข้าวเปลือกจะถูกป้อนเข้าสู่ห้องอบแห้งที่ทางเข้าเพียงข้างเดียวเท่านั้น บริเวณผนังห้องอบแห้งพิจารณาเป็นแบบไม่ลื่น (No Slip Condition) และไม่มีการถ่ายเทความร้อนผ่านผนังห้องอบแห้ง ขณะที่บริเวณทางออกห้องอบแห้งแก๊สมีค่าความดันเท่ากับความดันบรรยากาศ (0.1013 MPa) สำหรับตัวแปรที่ใช้ในการจำลอง ดูได้ตามตารางที่ 3

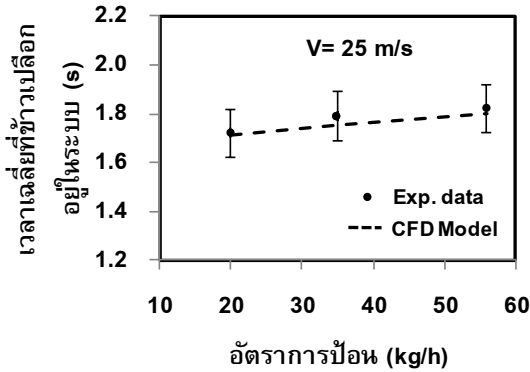
3. ผลการวิจัยและอภิปรายผล

ค่าเวลาเฉลี่ยที่ข้าวเปลือกอยู่ในระบบ (Residence Time) ความชื้นของข้าวเปลือก พฤติกรรมการเคลื่อนที่ของอนุภาคและแก๊ส รวมทั้งอัตราการเหวี่ยงน้ำซึ่งปริมาตรของเครื่องอบแห้งกระแสนแบบแนวโค้งถูกศึกษาด้วยการจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (CFD)

3.1 ผลการจำลองในเครื่องอบแห้ง

3.1.1 ค่าเวลาเฉลี่ยที่ข้าวเปลือกอยู่ในระบบ

รูปที่ 3 แสดงการเปรียบเทียบค่าเวลาเฉลี่ยที่ข้าวเปลือกอยู่ในระบบระหว่างการจำลองและการทดลอง สำหรับค่าเวลาเฉลี่ยที่ข้าวเปลือกอยู่ในระบบอบแห้งกระแสนแบบแนวโค้งพิจารณาจากอัตราส่วนระหว่างปริมาณคงเหลือของข้าวเปลือกที่อยู่ในระบบอบแห้งต่ออัตราการป้อนข้าวเปลือก [10] โดยพบว่า

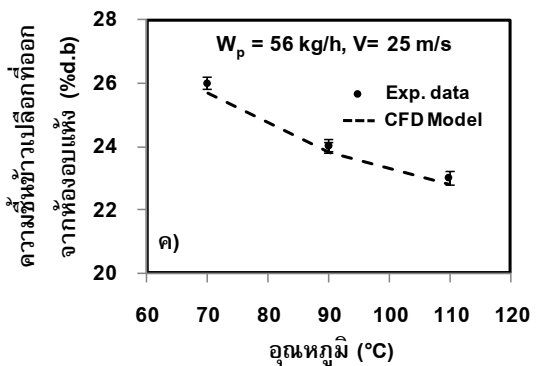
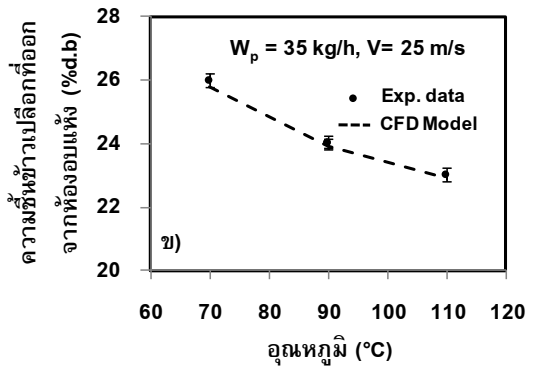
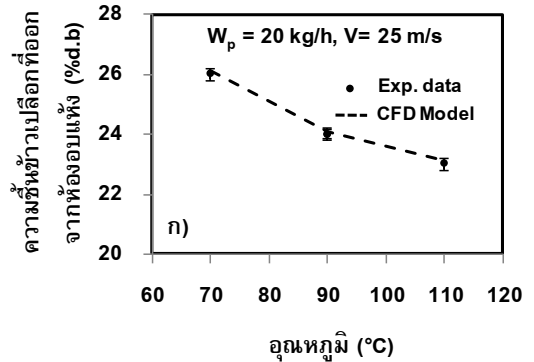


รูปที่ 3 การเปรียบเทียบค่าเวลาเฉลี่ยที่ข้าวเปลือกอยู่ในระบบระหว่างการจำลองและการทดลอง [14]

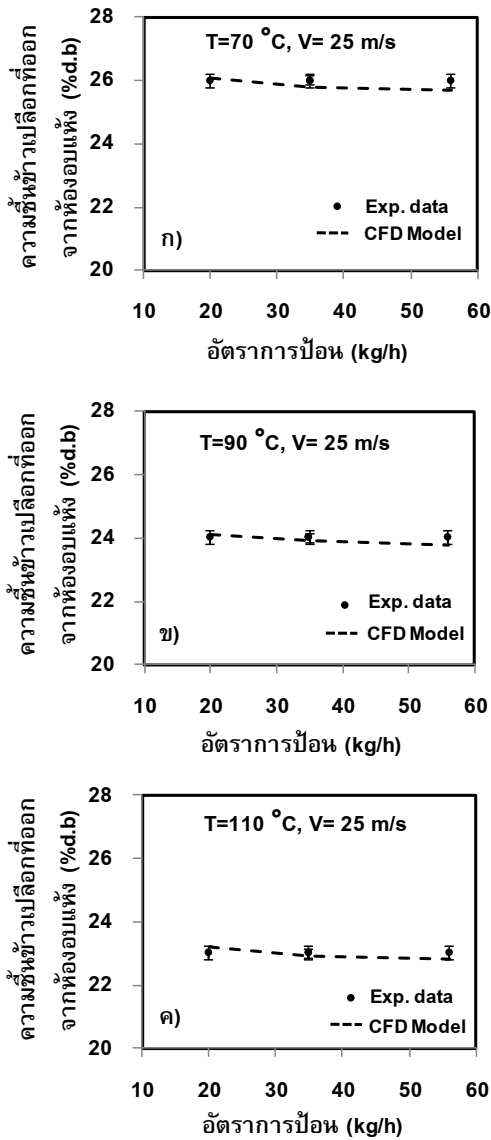
เมื่อความเร็วของแก๊สคงที่ อัตราการป้อนข้าวเปลือกที่เพิ่มขึ้น ทำให้ปริมาณของข้าวเปลือกคงอยู่ในระบบเพิ่มมากขึ้นส่งผลให้ค่าเวลาเฉลี่ยที่ข้าวเปลือกอยู่ในระบบมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น และแบบจำลองให้ผลการจำลองใกล้เคียงกับการทดลอง [14] ซึ่งมีความคลาดเคลื่อนไม่เกิน $\pm 5\%$

3.1.2 ค่าความชื้นของข้าวเปลือก

รูปที่ 4 และ 5 แสดงการเปรียบเทียบค่าความชื้นของข้าวเปลือกที่ออกจากห้องอบแห้งระหว่างการจำลองและการทดลอง โดยรูปที่ 4(ก)-(ค) พบว่าเมื่ออัตราการป้อนข้าวเปลือกและความเร็วแก๊สมีค่าคงที่ อัตราการลดความชื้นของข้าวเปลือกมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิแก๊สสูงขึ้น ทั้งนี้เนื่องมาจากอุณหภูมิตัวกลาง การอบแห้งที่สูงขึ้นทำให้ความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิของแก๊สกับอุณหภูมิผิวของข้าวเปลือกเพิ่มมากขึ้นทำให้อัตราการถ่ายเทความร้อนและมวลสารมีค่าเพิ่มขึ้นส่งผลให้เกิดการระเหยน้ำที่ผิวข้าวเปลือกเพิ่มมากขึ้น ขณะที่



รูปที่ 4 การเปรียบเทียบผลของอุณหภูมิมอบแห้งที่มีต่อค่าความชื้นของข้าวเปลือกระหว่างการจำลองและการทดลอง [14]



รูปที่ 5 การเปรียบเทียบผลของอัตราการป้อนข้าวเปลือกที่มีต่อค่าความชื้นของข้าวเปลือกระหว่างการจำลองและการทดลอง [14]

รูปที่ 5(ก)-(ค) เมื่ออุณหภูมิการอบแห้งและความเร็วแก๊สมี ค่าคงที่ พบว่าเมื่ออัตราการป้อนข้าวเปลือกเพิ่มมากขึ้น การลดลงของค่าความชื้นของข้าวเปลือกมีแนวโน้มลดลง ทั้งนี้เนื่องจากข้าวเปลือกมีค่าเวลาเฉลี่ยอยู่ในระบบอบแห้งเพิ่มขึ้นตามอัตราการป้อนข้าวเปลือก (ดูรูปที่ 3) และแบบจำลองให้ผลการจำลองใกล้เคียงกับผลการทดลอง [14] ซึ่งมีความคลาดเคลื่อนไม่เกิน $\pm 6\%$

3.1.3 พฤติกรรมการเคลื่อนที่ของเฟสแก๊ส

รูปที่ 6 แสดงผลการจำลองพฤติกรรมการเคลื่อนที่ของเฟสแก๊สในห้องอบแห้งกระแสนแบบแนวโค้งจากการจำลอง พบว่าเมื่อนำกระแสของการไหลของแก๊สสองกระแส ซึ่งมีความเร็วสูงป้อนเข้าสู่ห้องอบแห้ง กระแสการไหลของแก๊สทั้งสองจะเคลื่อนที่ตามเส้นขอบส่วนโค้งรัศมีของห้องอบแห้งและมาชนกัน ผลการชนกันของกระแสการไหลของแก๊สทั้งสองคือ การเกิดบริเวณการชน และมีความปั่นป่วนของกระแสการไหลของแก๊สสูงขึ้น ทำให้มีอัตราการถ่ายเทความร้อน มวลสารและโมเมนตัมสูง [3, 6, 10]

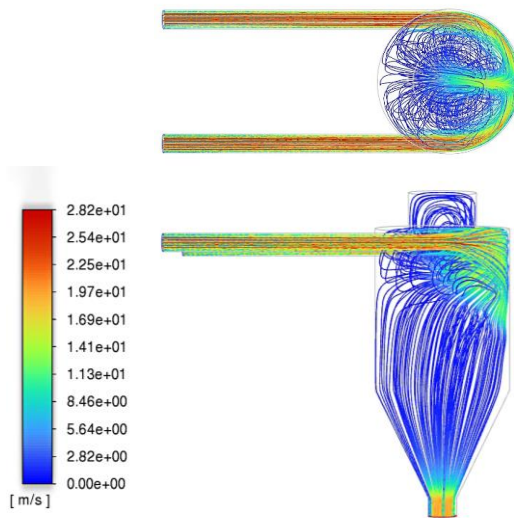
3.1.4 พฤติกรรมการเคลื่อนที่ของอนุภาค

รูปที่ 7 แสดงผลการจำลองการติดตามพฤติกรรมการเคลื่อนที่ของอนุภาคเดี่ยว (ข้าวเปลือก) ในห้องอบแห้งกระแสนแบบแนวโค้ง เนื่องจากค่าเวลาคงอยู่ของอนุภาคในระบบกระแสนสั้น การติดตามพฤติกรรมการเคลื่อนที่ของอนุภาคเดี่ยวนับว่ามีความสำคัญต่อการศึกษาและพัฒนาระบบอบแห้งกระแสน [9] ซึ่งการจำลองได้ติดตามทิศทางการเคลื่อนที่ของอนุภาคเดี่ยว (ข้าวเปลือก) ตั้งแต่ถูกป้อนเข้าสู่

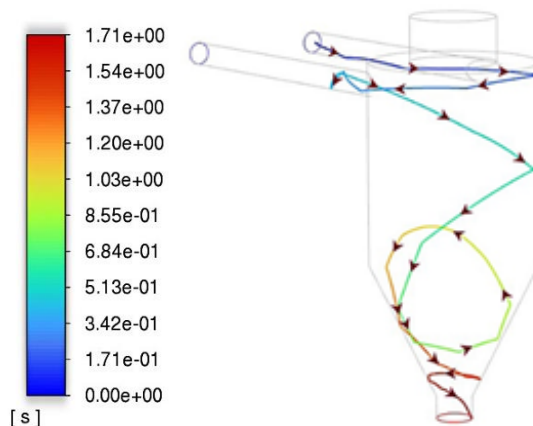


ระบบอบแห้งจนกระทั่งออกจากห้องอบแห้ง จากการจำลองพบว่าข้าวเปลือกเคลื่อนที่ตามแนวส่วนโค้งของห้องอบแห้งและเคลื่อนที่สวนเข้าไปในกระแสการไหลตรงกันข้ามและเคลื่อนที่กลับจนกระทั่งถูกกระแสการไหลของแก๊สพาออกไปจากห้องอบแห้งซึ่งสอดคล้องกับ

Tamir [3] ด้วยลักษณะการเคลื่อนที่แบบดังกล่าวถือว่าเป็นลักษณะพิเศษของเครื่องอบแห้งแบบกระแสนซึ่งจะทำให้อนุภาคอยู่ในระบบอบแห้งได้นานเพิ่มมากขึ้นซึ่งทำให้การแลกเปลี่ยนความร้อนและมวลสารสูงตามไปด้วย [3, 6]



รูปที่ 6 ผลการจำลองการเคลื่อนที่ของเฟสแก๊สในห้องอบแห้งกระแสนแบบโค้ง



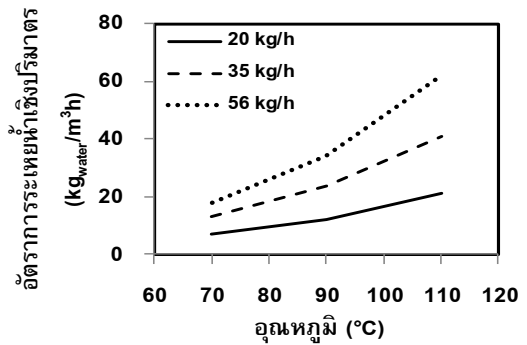
รูปที่ 7 ผลการจำลองการติดตามพฤติกรรมเคลื่อนที่ของอนุภาคเดี่ยว (ข้าวเปลือก) ในห้องอบแห้งกระแสนแบบโค้ง



3.1.5 อัตราการระเหยน้ำเชิงปริมาตร

รูปที่ 8 แสดงผลการจำลองอิทธิพลของอุณหภูมิของแก๊สขาเข้าและอัตราการป้อนข้าวเปลือก ที่มีผลต่อสมรรถนะของระบบอบแห้งในรูปของค่าอัตราการระเหยน้ำเชิงปริมาตรในห้องอบแห้งกระแสนแบบโค้ง โดยพิจารณาจากสมการที่ 20 พบว่าเมื่อความเร็วของแก๊สขาเข้าคงที่ การเปลี่ยนแปลงค่าอัตราการระเหยน้ำเชิงปริมาตรเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิของแก๊ส ทั้งนี้เนื่องจากอุณหภูมิของแก๊สขาเข้าที่เพิ่มสูงขึ้น จึงเกิดความแตกต่างของอุณหภูมิของแก๊สและอุณหภูมิที่ผิวของข้าวเปลือกมากขึ้น ส่งผลให้เกิดการถ่ายเทความร้อนและมวลสารมีค่ามากขึ้น ทำให้เกิดการระเหยน้ำที่ผิวของข้าวเปลือกเพิ่มมากขึ้น

ในกรณีของอัตราการป้อนข้าวเปลือก พบว่าเมื่ออัตราการป้อนข้าวเปลือกเพิ่มขึ้นอัตราการระเหยน้ำเชิงปริมาตรมีค่าเพิ่มขึ้นด้วย ทั้งนี้เนื่องจากเมื่ออัตราการป้อนข้าวเปลือกเพิ่มมากขึ้น การระเหยความชื้นของข้าวเปลือกมีค่าเพิ่มขึ้นดังได้กล่าวมาแล้ว (รูปที่ 5) ค่าอัตราการระเหยน้ำเชิงปริมาตรจึงเพิ่มขึ้นไปด้วย โดยอัตราการระเหยน้ำเชิงปริมาตรสูงสุดมีค่าเท่ากับ $62.72 \text{ kg}_{\text{water}}/\text{m}^3\text{h}$ ที่ความเร็วอากาศขาเข้า 25 m/s อุณหภูมิของแก๊สขาเข้า $110 \text{ }^\circ\text{C}$ และอัตราการป้อนข้าวเปลือก 56 kg/h หากพิจารณาตามรูปที่ 8 อัตราการระเหยน้ำเชิงปริมาตรมีแนวโน้มที่จะเพิ่มขึ้นได้อีกเมื่อมีการป้อนข้าวเปลือกมากกว่า 56 kg/h นั้นบ่งบอกว่าเครื่องอบแห้งยังคงมีขีดความสามารถเพียงพอที่จะระเหยน้ำออกจากข้าวเปลือกได้ จนกระทั่งถึงค่าค่าหนึ่งที่ระบบอบแห้งไม่สามารถที่จะเพิ่มการระเหยความชื้นได้อีก และค่านี้จะเป็นค่าอัตราการป้อนข้าวเปลือกสูงสุดที่เหมาะสมสำหรับระบบอบแห้งกระแสนแบบแนวโค้งนี้ [20]



รูปที่ 8 แสดงผลการจำลองอิทธิพลของอุณหภูมิของแก๊สขาเข้าและอัตราการป้อนข้าวเปลือกที่มีผลต่อค่าอัตราการระเหยน้ำเชิงปริมาตรในห้องอบแห้งกระแสนแบบโค้ง

ตารางที่ 4 ผลการจำลองอิทธิพลของอัตราการป้อนข้าวเปลือกที่มีต่ออัตราการระเหยความชื้นของข้าวเปลือกที่อุณหภูมิ $110 \text{ }^\circ\text{C}$

อัตราการป้อนข้าวเปลือก (kg/h)	อัตราการระเหยความชื้น (kg/s)
20	6.81×10^{-7}
40	7.06×10^{-7}
60	7.22×10^{-7}
80	7.38×10^{-7}
100	6.80×10^{-7}
120	6.34×10^{-7}

จากตารางที่ 4 ผลการจำลอง พบว่า เมื่ออัตราการป้อนข้าวเปลือกเพิ่มมากขึ้น อัตราการระเหยความชื้นของข้าวเปลือกมีค่าเพิ่มขึ้นจนกระทั่งอัตราการป้อนข้าวเปลือกมีค่า 80 kg/h หลังจากนั้นอัตราการระเหยความชื้นของข้าวเปลือกจะลดลง ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากที่อัตราการป้อนดังกล่าว ระบบอบแห้งอยู่ภายใต้



สภาวะอัน (Choking Point) [6, 20] ซึ่งคือสภาวะที่อากาศไม่สามารถรับความชื้นจากอนุภาคเพิ่มได้อีก เนื่องจากอากาศในห้องอบแห้งมีความชื้นสัมพัทธ์สูงจนถึงจุดอิ่มตัว ส่งผลให้กระบวนการดึงน้ำออกจากอนุภาคหยุดชะงัก นั่นแสดงว่าเครื่องอบแห้งนี้มีขีดความสามารถที่จะระเหยน้ำออกจากข้าวเปลือกได้สูงสุดที่อัตราการป้อนข้าวเปลือกประมาณ 80 kg/h ดังนั้นอัตราการป้อนข้าวเปลือกสูงสุดที่เหมาะสมกับระบบอบแห้งกระแสนแบบแนวโค้งที่ศึกษานี้มีค่าประมาณ 80 kg/h

4. สรุปผล

ในงานวิจัยนี้ได้ใช้พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณจำลองการอบแห้งข้าวเปลือกสำหรับทำนายผลของปัจจัยต่างๆ ที่มีต่อค่าเวลาเฉลี่ยที่ข้าวเปลือกอยู่ในระบบ ความชื้นของข้าวเปลือก พฤติกรรมการเคลื่อนที่ของอนุภาค (ข้าวเปลือก) และแก๊ส รวมทั้งอัตราการระเหยน้ำเชิงปริมาตร ซึ่งพบว่า แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ให้ผลการจำลองใกล้เคียงกับผลการทดลอง เมื่ออัตราการป้อนข้าวเปลือกเพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่าเวลาเฉลี่ยที่ข้าวเปลือกอยู่ในระบบเพิ่มขึ้น และการลดลงของความชื้นของข้าวเปลือกขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของแก๊สและอัตราการป้อนข้าวเปลือก โดยพฤติกรรมการเคลื่อนที่ของแก๊สและอนุภาคในระบบอบแห้งกระแสนแบบแนวโค้งช่วยสนับสนุนให้การลดความชื้นของข้าวเปลือกเพิ่มขึ้น ขณะที่อัตราการระเหยน้ำเชิงปริมาตรสูงสุดมีค่าเท่ากับ $62.72 \text{ kg}_{\text{water}}/\text{m}^3\text{h}$ ที่ความเร็วอากาศขาเข้า 25 m/s อุณหภูมิของแก๊สขาเข้า $110 \text{ }^{\circ}\text{C}$ และอัตราการป้อนข้าวเปลือก 56 kg/h นอกจากนี้จากผลการจำลองพบว่าอัตราการป้อนข้าวเปลือกสูงสุดที่เหมาะสมกับระบบอบแห้งกระแสนแบบแนวโค้งนี้มีค่าประมาณ 80 kg/h

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร และภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ สำหรับเครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการศึกษานานาชาติ

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] C. Nimmol and S. Devahastin, Evaluation of performance and energy consumption of an impinging stream dryer for paddy, *Applied Thermal Engineering*, 2010, 30, 2204–2212.
- [2] C. Nimmol, K. Sathapomprasath and S. Devahastin, Drying of high-moisture paddy using a combined impinging stream drying and pneumatic drying system, *Drying Technology*, 2012, 30, 1854–1862.
- [3] A. Tamir, *Impinging stream-reactor*, Elsevier, Amsterdam, Netherlands, 1994.
- [4] P. Kumklam, S. Prachayawarakom, S. Devahastin and S. Soponronnarit, Effects of operating parameters of impinging stream dryer on parboiled rice quality and energy consumption, *Drying Technology*, 2020, 38, 634–645.
- [5] X. Liu, S. Yue, L. Lu, W. Gao and J. Li, Simulations of an asymmetric gas–solid two-phase impinging stream reactor, *Numerical Heat Transfer, Part A: Applications*, 2018, 74, 1032-1051.



- [6] K. Choicharoen, S. Devahastin, and S. Soponronnarit, Numerical simulation of multiphase transport phenomena during impinging stream drying of a particulate material, *Drying Technology*, 2012, 30, 1227–1237.
- [7] P. Khomwachirakul, S. Devahastin, T. Swasdisevi and S. Soponronnarit, Simulation of flow and drying characteristics of high-moisture particles in an impinging stream dryer via CFD-DEM, *Drying Technology*, 2016, 34, 403- 419.
- [8] C. Li, S. Yue and M. Li, Numerical simulation of the drying characteristics of a high-moisture particle in dynamic asymmetry impinging stream reactor, *Chemical Papers*, 2022, 76, 41-56.
- [9] T. Swasdisevi, W. Thianngoen and S. Prachayawarakorn, Mathematical modeling and design of parboiled paddy-impinging stream dryer using the CFD-DEM model, *Foods*, 2024, 13, 1559.
- [10] N. Ghasemi, M. Sohrabi, M. Khosravi, A.S. Mujumdar and M. Goodarzi, CFD simulation of solid-liquid flow in a two impinging streams cyclone reactor: Prediction of mean residence time and holdup of solid particles, *Chemical Engineering and Processing*, 2010, 49, 1277-1283.
- [11] J. He, B. Meng, H. Li, B. Tian and J. Li, Heterogeneous detonation in gas-particle mixtures with full pattern flow: Numerical model, method and verification, *Computer Physics Communications*, 2025, 316, 109797.
- [12] M.E. Gamal, A. Mohammad, B. Abu-Jdayil and I.B. Salem, Computational study of gas-solid: Two-phase interaction system and particle kinetics establishing 3D analysis, *Results in Engineering*, 2024, 24, 103562.
- [13] C. Korkmaz and I. Kacar, XDEM simulation of an industrial-scale rotary drum dryer for organo-mineral fertiliser, *Biosystems Engineering*, 2026, 261, 104320.
- [14] P. Buatam, Paddy dehydration process using tangential-horizontal impinging stream dryer, Thesis, Srinakharinwirot University, Thailand, 2012.
- [15] P. Prakotmak, CFD-DEM simulation of the gas-solid flow dynamics in a continuous fluidize bed, *Research and Development Journal of The Engineering Institute of Thailand*, 2019, 30(3), 73-89. (in Thai)
- [16] A.R.A. Adebawale, L.O. Sanni, H.O. Owo and O.R. Karim, Effect of variety and moisture content on some engineering properties of paddy rice, *Journal of Food Science and Technology*, 2011, 48(5), 551-559.



- [17] P. Khomwachirakul and W. Ritthong, Numerical study of high-moisture parboiled paddy drying in an impinging stream dryer, The 10th International Conference on Science, Technology and Innovation for Sustainable Well-Being (STISWB 2018), Proceeding, 2018, 328-333.
- [18] H.A. Jakobsen, Chemical reactor modeling, Springer, Berlin, Germany, 2008.
- [19] N. Meeso, A. Nathakaranakule, T. Madhiyanon and S. Soponronnarit, Modelling of far infrared irradiation in paddy drying process, Journal of Food Engineering, 2007, 78, 1248-1258.
- [20] A. Kitron, R. Buchmann, K. Luzzatto and A. Tamir, Drying and mixing of solids and particles residence time distribution in four impinging streams and multistage two impinging streams reactor, Industrial and Engineering Chemistry Research, 1987, 26, 2454-2461.



การพัฒนาเครื่องบันทึกผลการทดสอบการอัดตัวคายน้ำโดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์

อนิรุทธิ์ สุขแสน และ ชีวินทร์ ลิ้มศิริ*

สาขาวิศวกรรมโยธา, คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยวงษ์ชวลิตกุล

* ผู้ประสานงานเผยแพร่ (Corresponding Author) Email: Cheevin_lim@vu.ac.th

วันที่รับบทความ: 29 กรกฎาคม 2568; วันที่ทบทวนบทความ: 26 กุมภาพันธ์ 2569; วันที่ตอบรับบทความ: 9 มีนาคม 2569

วันที่เผยแพร่ออนไลน์: 20 เมษายน 2569

บทคัดย่อ : การศึกษานี้เป็นการศึกษาพัฒนาเครื่องบันทึกผลการทดสอบการอัดตัวคายน้ำของดินเหนียวในห้องปฏิบัติการ เช่นเซอร์วัดระยะที่ใช้ในงานในอุตสาหกรรมถูกนำมาใช้เพื่อวัดระยะที่รูตัดตัวของดินขณะทำการทดสอบการอัดตัวคายน้ำ สัญญาณแอนะล็อกที่ได้จากเซ็นเซอร์วัดระยะในรูปของแรงดันไฟฟ้าจะถูกปรับปรุงและแปลงเป็นสัญญาณดิจิทัลด้วยวงจรปรับปรุงสัญญาณราคาถูก ไมโครคอนโทรลเลอร์และวงจรอิเล็กทรอนิกส์ทำงานร่วมกับคำสั่งภาษา C++ ใช้สำหรับการประมวลผลเพื่อแสดงและบันทึกผลจากการทดสอบ ความแม่นยำของการวัดด้วยเซ็นเซอร์ถูกสอบเทียบก่อนใช้งาน การทดสอบอัดตัวคายน้ำหนึ่งมิติของดินเหนียวรุ่นใหม่แบบการเพิ่มน้ำหนักกดทับถูกใช้เพื่อการเปรียบเทียบความน่าเชื่อถือของผลการทดลอง การหลุดตัวในระหว่างการทดสอบที่ได้จากอุปกรณ์มาตรฐานและเครื่องบันทึกที่พัฒนาในการศึกษาค้างถูกนำมาเปรียบเทียบกัน คุณสมบัติเอกภคณณ์ของดินเหนียวถูกใช้เพื่อเปรียบเทียบผลการทดสอบทั้งสอง ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าการพัฒนาเครื่องมือตรวจวัดจากอุปกรณ์ที่มีราคาถูกสามารถให้ผลการทดสอบที่น่าพอใจ มีความน่าเชื่อถือของข้อมูลสำหรับใช้ในการนำไปวิเคราะห์คุณสมบัติการอัดตัวคายน้ำของดินได้

คำสำคัญ: ไมโครคอนโทรลเลอร์; การอัดตัวคายน้ำ; ดินเหนียวรุ่นใหม่

Development of a Microcontroller-Based Data Logger for Consolidation Testing

Aniroot Suksan and Cheevin Limsiri*

Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering and Architecture, Vongchavalitkul University

* Corresponding Author, Email: Cheevin_lim@vu.ac.th

Received: 29 July 2025; Revised 26 February 2026; Accepted: 9 March 2026

Online Published: 20 April 2026

Abstract: This study aims to develop a data logger for consolidation testing of clay soil in the laboratory. During the test, an industrial-grade displacement transducer was employed to measure the settlement of the soil sample. Analog signals from sensors were amplified and converted into digital signals using a low-cost conditioning module. Microcontroller-Based System programmed in C++ were developed to indicate and acquire the testing data. The sensor was calibrated with reference dial gauge before use. The one-dimensional consolidation testing by incremental loading was carried out on reconstituted clay using both dial gauge and the developed sensor. The settlement of clay measured during each test was compared. The unique consolidation properties of clay were used to validate the result. The results showed that the data logger developed in this study provides reliable and useful data for analyzing the consolidation characteristic of soil.

Keyword: Microcontroller; Consolidation; Reconstituted clay



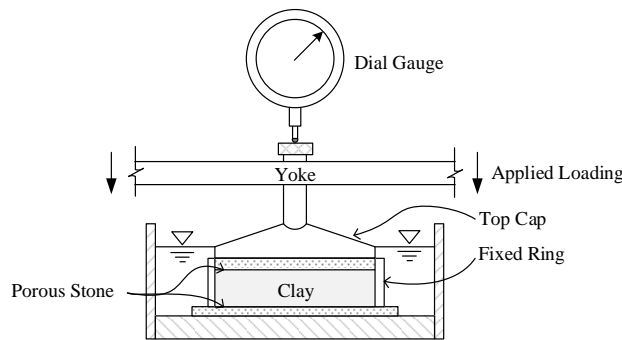
1. บทนำ

การอัดตัวคายน้ (Consolidation) เป็นพฤติกรรมที่เกิดขึ้นในดิน ภายใต้สมมติฐานว่าดินอิ่มตัวด้วยน้ำและมีความเป็นเนื้อเดียว เมื่อมีแรงภายนอกกระทำจะทำให้เกิดความดันน้ำส่วนเกินต้านทานในช่วงแรก ความดันน้ำส่วนเกินนี้จะพยายามทำให้น้ำไหลออกไปตามเส้นทางระบายน้ำที่เป็นรูพรองภายในเนื้อดิน และเมื่อน้ำไหลออกจากรูพรองก็จะทำให้ดินเกิดการทรุดตัว (Settlement) กระบวนการทรุดตัวคายน้จะเกิดขึ้นเร็วหรือช้าขึ้นอยู่กับชนิดของดิน หากเป็นในดินเม็ดหยาบที่มีสัมประสิทธิ์การซึมผ่านที่สูงจะทำให้กระบวนการอัดตัวคายน้เกิดขึ้นและสิ้นสุดในเวลาอันสั้น ในทางกลับกันหากเกิดในดินเม็ดละเอียดอย่างเช่น ดินเหนียว กระบวนการดังกล่าวอาจกินเวลานานหลายวันหรืออาจจะหลายปีขึ้นอยู่กับระดับความเค้นที่กดทับและคุณสมบัติการอัดตัวคายน้ของดิน กระบวนการอัดตัวคายน้ที่ยาวนานของดินนี้เป็นสิ่งที่วิศวกรให้ความสำคัญเป็นอย่างยิ่งเมื่อต้องพิจารณาเสถียรภาพของอาคาร ในทางปฏิบัติมีการทดสอบการอัดตัวคายน้ (Consolidation Test) เพื่อประเมินคุณสมบัติการอัดตัวคายน้ของดิน ซึ่งจะเป็นข้อมูลที่สำคัญสำหรับวิศวกรในการคำนวณเพื่อทำนายปริมาณการทรุดตัวรวมและระยะเวลาการทรุดตัวคายน้ การทดสอบการอัดตัวคายน้

น้ำมีหลักการทดสอบคือวางน้ำหนักด้านบนของตัวอย่าง ขณะเดียวกันมีการวัดการทรุดตัวของตัวอย่างเทียบกับเวลาเพื่อจำลองการเกิดกระบวนการอัดตัวคายน้ดังรูปที่ 1

การทดสอบตามมาตรฐานมีการกำหนดให้บันทึกค่าการทรุดตัวตลอดช่วงเวลา 24 ชั่วโมงของการทดสอบเพื่อให้แน่ใจว่าความดันน้ำส่วนเกินไหลออกจากตัวอย่างจนหมด หรือไม่เกิดการทรุดตัวเพิ่ม [1] ซึ่งเป็นการยืนยันว่าดินมีระดับการอัดตัวคายน้เข้าใกล้ร้อยละ 100 ขณะทดสอบมีการอ่านค่าการทรุดตัวจากไอดีลเกจ (Dial Gauge) ที่เวลาแบบทวิคูณ (เวลาอ่านครั้งถัดไปมีค่าเป็นหนึ่งเท่าของเวลาก่อนหน้า) ทำให้ผู้ทดสอบจะต้องอ่านค่าและบันทึกผลการทดสอบเช่นนี้ ทุกค่าระดับน้ำหนักกดทับ ในบางกรณีเวลาในการทดสอบรวมทั้งสิ้นอาจใช้เวลา 7-14 วัน [2]

ระยะเวลาการทดลองที่นานนี้จะมีค่าใช้จ่ายในการดำเนินการที่สูง จึงทำให้มีนักวิจัยพยายามหาวิธีการทดสอบที่ใช้เวลาน้อยลงเพื่อลดเวลาในการทดลอง มีการศึกษาที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติพื้นฐานของดินเหนียวเทียบคุณสมบัติการอัดตัวคายน้ เช่น ชีตจำกัดเหลว ชีตจำกัดพลาสติก เป็นต้น แต่ความแม่นยำสามารถนำไปใช้ประเมินคุณสมบัติเบื้องต้นของดินเท่านั้น [3]



รูปที่ 1 แผนภาพการทดสอบการอัดตัวคายน้ของดิน



การทดลองแบบเร็วถูกนำเสนอโดย Sridharan et. al. [4] เพื่อให้ระยะเวลาการทดสอบสั้นลง หลักการคือการทดสอบเช่นเดียวกับการทดสอบมาตรฐานแตกต่างกันเพียงเวลาการทดสอบ โดยจะใช้วิธีการคำนวณสัมประสิทธิ์การอัดตัวคายน้ำแบบวิธี Hyperbolic method เพื่อประเมินอัตราการทดสอบอัดตัวคายน้ำ ร่วมกับการบันทึกค่าความดันน้ำส่วนเกินระหว่างการทดสอบเพื่อประเมินระดับความเค้นประสิทธิภาพ การทดสอบจะทำการทดสอบในแต่ละช่วงประมาณ 25-40 นาที ซึ่งเมื่อรวมเวลาทดสอบทั้งหมดจะใช้เวลาเพียง 3-4 ชั่วโมง ซึ่งน้อยกว่าเวลาที่ใช้ในการทดสอบแบบมาตรฐานมาก แต่การทดสอบดังกล่าวยังไม่เป็นที่แพร่หลาย

จนกระทั่งมีมาตรฐานการทดสอบแบบอัตราความเครียดในแนวตั้งคงที่ (Constant Rate of Strain) ซึ่งเป็นการทดสอบการอัดตัวคายน้ำที่พัฒนาจากการทดสอบแบบการใส่หน้าหนักแบบเป็นขั้น หลักการคล้ายการทดสอบแบบใส่หน้าหนักแต่แตกต่างกันที่มีการกดตัวอย่างด้วยความเครียดคงที่คล้ายการทดสอบกำลังอัด แต่ดินที่จะทดสอบอยู่ในวงแหวนอัดตัวคายน้ำ นอกจากนี้ยังมีระบบความดันกลับ (Back Pressure) เพื่อให้ตัวอย่างอิมิตัวด้วยน้ำ และการวัดความดันน้ำส่วนเกินขณะการทดสอบ การกดตัวอย่างจะทำให้ความเค้นรวม (Total Stress) เพิ่มขึ้น ขณะที่ความดันน้ำส่วนเกินจะถูกวัดเพื่อนำมาคำนวณความเค้นประสิทธิภาพ การทรุดตัว แรงดันน้ำส่วนเกินและแรงกดใช้เครื่องมือตรวจวัดแบบอิเล็กทรอนิกส์และโปรแกรมคอมพิวเตอร์ควบคุมระบบการทำงานอัตโนมัติ [5] เนื่องจากราคาของอุปกรณ์ที่สูงจึงยังไม่เป็นที่นิยมในประเทศไทยนัก

S. Rojmosik, and S. Sonlamp [6] พัฒนาการทดสอบการอัดตัวคายน้ำอัตโนมัติสำหรับดินเหนียวโดยใช้เครื่องมือตรวจวัดอิเล็กทรอนิกส์เพื่อบันทึกผลการทรุดตัวในแนวตั้งด้วย Linear Variable Displacement Transducer (LVDT) ร่วมกับการวัดแรงที่ด้านบนของตัวอย่างด้วย load cell ให้แรงกดทับด้วยกระบอกนิวเมตริกตลอดระยะเวลาทดสอบ พร้อมทั้งควบคุมด้วยโปรแกรมและอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ โดยมีกระบวนการทำงานคือเมื่อน้ำหนักกดทับและตรวจวัดการทรุดตัวของตัวอย่างพร้อมทั้งรักษาระดับความเค้นไว้คงที่ จนการทรุดตัวมีค่าคงที่ระบบจะมีการสั่งการให้กระบอกนิวเมติกส์ (Pneumatics) เคลื่อนที่กดตัวอย่างในแนวตั้งเพื่อให้หน่วยความเค้นรวมมีค่าที่เพิ่มขึ้นเป็นหนึ่งเท่าของค่าก่อนหน้า ทุกกระบวนการจะทำงานอัตโนมัตินับตั้งแต่เริ่มจนถึงสิ้นสุดการทดสอบ จากผลการทดลองเป็นผลที่น่าพอใจและใช้งบประมาณไม่สูงมาก เมื่อเทียบกับเครื่องมือที่จัดหาจากต่างประเทศ

ในปัจจุบันประเทศไทยยังคงนิยมใช้การทดสอบแบบมาตรฐานที่ใช้การขึ้นน้ำหนักแบบขั้นและใช้เวลาการทดสอบที่ 24 ชั่วโมงเป็นอย่างน้อยสำหรับทุกช่วงน้ำหนักกดทับ อ่านค่าโดยผู้ทดสอบและจดบันทึกข้อมูลลงกระดาษ อาจมีการใช้อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์มาใช้ตรวจวัดและบันทึกผลด้วยคอมพิวเตอร์ แต่เครื่องมือที่ใช้เป็นอุปกรณ์ที่มีราคาแพงจึงมีใช้งานอย่างจำกัด

ปัจจุบันมีเทคโนโลยีไมโครคอนโทรลเลอร์ (Microcontroller) ทำหน้าที่ประมวลผลระบบที่ไม่ซับซ้อนมาก มีราคาถูกและยังเป็นการเปิดให้นักพัฒนาสามารถใช้งานได้แบบอิสระ (Open Source) สามารถนำไปประยุกต์สร้างนวัตกรรมได้อย่างหลากหลายด้านโดยที่ราคาที่ไม่สูงมาก มีภาษาในการ



บทความวิจัย

สั่งการที่นิยมแพร่หลายเช่น C++ ทำให้ราคาอุปกรณ์ต่าง ๆ ถูกลง และสามารถนำไปใช้งานในหลากหลายด้าน [7] การศึกษาในอดีตได้นำไมโครคอนโทรลเลอร์มาประยุกต์ใช้เป็นเครื่องมือสำหรับแปลงผลจากเซ็นเซอร์เพื่อวัดผลการโก่งตัวและการวัดแรงในวัสดุ [8] ซึ่งได้ผลการทดสอบเป็นที่น่าพอใจ สามารถนำข้อมูลนำไปใช้งานได้ มีการนำไมโครคอนโทรลเลอร์และวงจรขยายสัญญาณราคาถูกเพื่อวัดการเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้าจากสเตรนเกจ และแปลงไปเป็นความเค้นหรือแรงในวัสดุ ซึ่งสามารถให้ผลการสอบที่เทียบเท่ากับเครื่องมือวัดได้อย่างถูกต้องและสามารถทำงานได้ นอกจากนี้ยังมีความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ในการใช้แทนเครื่องมือที่มีราคาแพง [9] อย่างไรก็ตามการเปรียบเทียบผลการทดสอบระหว่างการแปลงผลด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์กับการทดสอบตามมาตรฐานด้านวิศวกรรมโยธายังไม่เป็นที่แพร่หลายนัก

ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงได้มุ่งเน้นในการพัฒนาระบบการตรวจวัดการทรุดตัวของตัวอย่างดินสำหรับการทดสอบการอัดตัวของดิน โดยใช้เซ็นเซอร์วัดการทรุดตัวเทียบกับเวลา และส่งการด้วยเก็บข้อมูลการทดสอบด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์บันทึกลง Micro SD Card ผลการทดสอบจากเครื่องมือที่พัฒนาขึ้นในการศึกษานี้จะถูกนำมาเปรียบเทียบประสิทธิภาพกับการทดสอบแบบดั้งเดิมที่ใช้ไอตัลเกจและนาฬิกาจับเวลา

2. วิธีการดำเนินงานทดลอง

2.1 การพัฒนาเครื่องบันทึกผลการทดลอง

เซ็นเซอร์อิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้ในการวัดระยะการทรุดตัวในแนวดิ่งของตัวอย่าง (Displacement Transducer) โครงสร้างภายในจะเป็นคานยื่นที่มีสเตรนเกจ (Strain Gauge) ติดทั้งด้านบนและล่าง เมื่อมีการเคลื่อนตัวจะ

ทำให้คานยื่นเกิดการโก่งตัวของคาน ส่งผลให้ความต้านทานไฟฟ้าจากสเตรนเกจเปลี่ยนไป การเปลี่ยนแปลงความต้านทานจะมีความอ่อนไหวต่อสภาพแวดล้อมอย่างมาก ทำให้จะต้องมีวงจรที่ลดผลกระทบดังกล่าว โดยทั่วไปผู้ผลิตมักนิยมต่อวงจรแบบ Wheatstone Bridge โดยนำตัวต้านทานมาต่อขนาน 4 ตัว เมื่อมีการจ่ายแรงดันไฟเข้าวงจร และวัดแรงดันไฟที่ออกจากวงจรจะพบว่าเมื่อความต้านทานที่เปลี่ยนไปจะทำให้แรงดันไฟฟ้าเปลี่ยนไปด้วย [8] แรงดันไฟฟ้านี้สามารถเปลี่ยนแปลงเป็นระยะทาง

เช่น เซอร์ที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้เป็น Displacement Transducer (รูปที่ 2) ต่อวงจรสเตรนเกจแบบ Full bridge กล่าวคือมีการใช้สเตรนเกจเป็นตัวต้านทานทั้ง 4 ตัว รุ่น TLDT10MM มีช่วงระยะยุบ 10 มิลลิเมตร สำหรับสัญญาณที่ส่งออกจากเซ็นเซอร์เป็นแบบแอนะล็อก 2mV/V

ไมโครคอนโทรลเลอร์ในการศึกษาครั้งนี้จะใช้บอร์ด Arduino Uno version 3 (รูปที่ 3) ซึ่งเป็นไมโครคอนโทรลเลอร์ที่ได้รับความนิยมอย่างมากเนื่องจากมีราคาถูกใช้งานง่ายกินกระแสไฟฟ้าต่ำ ใช้แรงดันไฟฟ้า 7-12 v ภายในมีชิพ ATmega328 ทำงานที่ความถี่ 16 MHz และมีขาเชื่อมต่อแบบ UART และ I²C เพียงพอสำหรับต่อกับอุปกรณ์เสริมหรือเซ็นเซอร์ที่ต้องการใช้งานในการศึกษา



รูปที่ 2 เซ็นเซอร์วัดการทรุดตัว



รูปที่ 3 บอร์ด Arduino UNO version 3 [7]

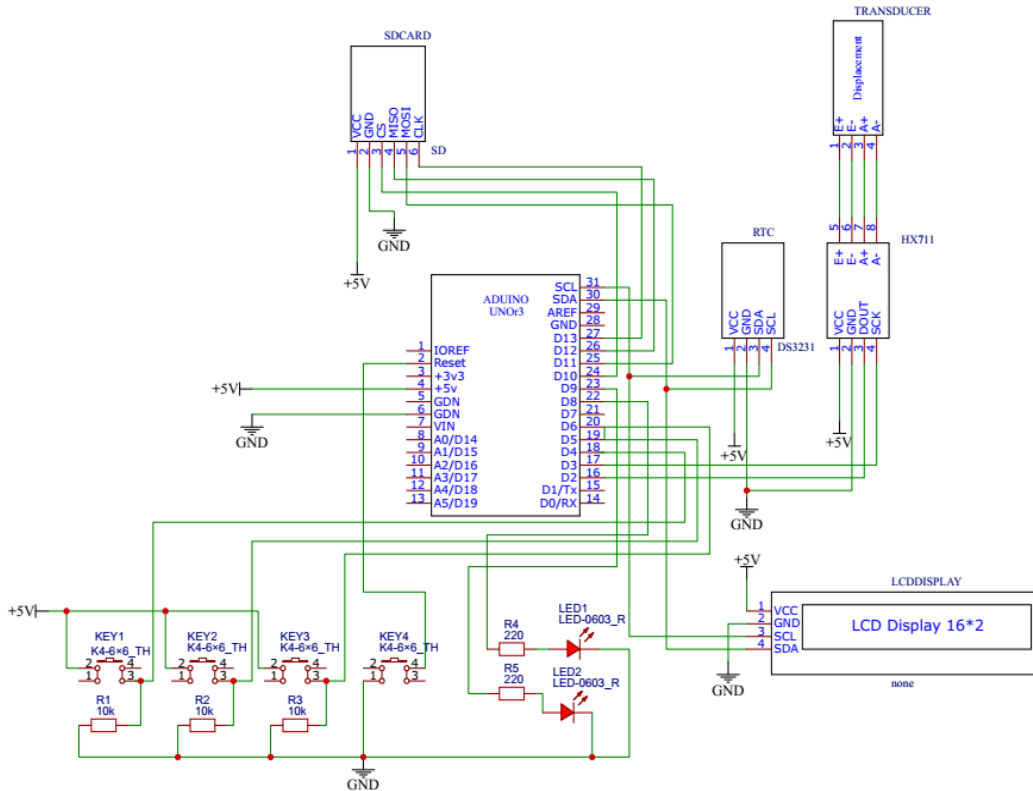
ในการรับสัญญาณจากเซ็นเซอร์วัดระยะที่มีแรงดันไฟฟ้าออกมามีค่าน้อยมากจำเป็นต้องมีการปรับปรุงสัญญาณให้มีความเสถียรโดยใช้บอร์ด HX711 ที่มีหน้าที่แปลงสัญญาณแอนะล็อกไปเป็นสัญญาณดิจิทัล (Analog to Digital Converter, ADC) ขนาด 24 บิต ใช้สายสัญญาณเพียง 2 สาย คือ Clock และ Data มักนิยมใช้แปลงสัญญาณจากอุปกรณ์ Load Cell ที่ใช้สเตรนเกจ

การต่อวงจรและการทำงาน จะเริ่มจากเซ็นเซอร์วัดระยะต่อเข้ากับบอร์ดขยายสัญญาณและทำหน้าที่แปลงสัญญาณจากอนาล็อกเป็นสัญญาณดิจิทัล จากนั้นต่อเข้ากับบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino R3 การเก็บข้อมูลจะใช้ Micro SD Card ปุ่มควบคุมการทำงานจะถูกออกแบบให้มีทั้งสิ้น 4 ปุ่ม คือ ปุ่ม Tare ตั้งค่าที่วัดได้ให้เป็นศูนย์ ปุ่ม Start สำหรับเริ่มการบันทึกผล และ ปุ่ม Stop เพื่อหยุดการบันทึกผล มีการใช้วงจรแบบ Pull-down Resistance เพื่อป้องกันการรบกวนสัญญาณที่อาจทำให้เกิดการสั่งงานที่ไม่พึงประสงค์

การจับเวลาสำหรับการทดสอบการอัดตัวคายน้ำในการศึกษาครั้งนี้จะใช้โมดูล Real Time Clock (RTC) เพื่อจับเวลา การแสดงข้อความโต้ตอบกับผู้ใช้งาน พร้อมทั้งแสดงและค่าระยะยุบ และเวลาที่เปลี่ยนไปจะใช้จอ LCD ที่สื่อสารกับไมโครคอนโทรลเลอร์แบบ I²C ขนาด 16 x 2 การต่อวงจรของไมโครคอนโทรลเลอร์เชื่อมต่อกับเซ็นเซอร์และบอร์ดต่าง ๆ แสดงดังรูปที่ 4

2.2 การเตรียมทดสอบการอัดตัวคายน้ำ

ดินตัวอย่างที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้เป็นดินเหนียวมีค่าความถ่วงจำเพาะ 2.65 มีขีดจำกัดเหลว (Liquid Limit) และดัชนีความเป็นพลาสติก (Plasticity Index) เท่ากับ 50% และ 30% ตามลำดับ เมื่อจำแนกดินด้วยระบบ Unified Soil Classification System (USCS) พบว่าเป็นดินเหนียวที่มีความพลาสติกต่ำ (CL) ตัวอย่างดินเหนียวบ้นใหม่จะเตรียมโดยนำตัวอย่างดินอบด้วยอุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 3 วัน และนำมาทุบให้เป็นเม็ด ร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 40 จากนั้น เติมน้ำกลั่นที่ปริมาณใกล้เคียงกับปริมาณความชื้นที่ขีดจำกัดเหลวและคนให้เข้ากัน ดินเหนียวบ้นใหม่จะเก็บไว้ในภาชนะที่เก็บความชื้นอย่างน้อย 3 วันก่อนทดสอบ จากนั้นดินเหนียวจะถูกนำมาใส่วงแหวนอัดตัวคายน้ำ แบบยึดแน่น (Fixing Ring) และประกอบอุปกรณ์การทดสอบ การทดสอบจะทดสอบภายใต้มาตรฐานของกรมทางหลวงชนบท มขท.(ท) 305-254 [1] การวัดการทรุดตัวเทียบกับเวลาจะอ่านค่าทรุดตัวจากไดอัลเกจร่วมกับนาฬิกาจับเวลา



รูปที่ 4 แสดงการต่อวงจรสำหรับอุปกรณ์ตรวจวัดการทรุดของดินเทียบกับเวลา

ในขณะที่การทดสอบอีกครั้งจะใช้เซ็นเซอร์ร่วมกับเครื่องบันทึกที่พัฒนาในการศึกษารั้งนี้ ทั้งสองการทดสอบจะดำเนินการภายใต้เงื่อนไขเดียวกันคือ อัตราส่วนการเพิ่มขึ้นของน้ำหนักกดทับจะมีค่าเป็น 2.0 เท่าของค่าน้ำหนักกดทับก่อนหน้า เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดดินวิบัติเมื่อมีความชื้นสูง ความเค้นในการทดสอบครั้งนี้คือ 5, 12, 25, 50, 100, 200, และ 400 kPa เพื่อใช้พฤติกรรมอัดตัวคายน้ำที่เป็นเอกลักษณ์ของดินเหนียวร่วมด้วยในการตรวจสอบผลการทดสอบ ดังนั้นปริมาณความชื้นเริ่มต้นของดินเหนียวทั้งสองการทดสอบจะมีค่าแตกต่างกัน

การอ่านค่าการทรุดตัวจะอ่านที่เวลา 0, 0.25, 0.5, 1, 2, 4, 8, 15 และ 30 นาที และ 1, 2, 4, 8, 16, และ

24 ชั่วโมง หากการทรุดตัวที่ 24 ชั่วโมงยังไม่สามารถแสดงการเปลี่ยนความชันของความสัมพันธ์ระหว่างการทรุดตัวและเวลาได้ จะทำการขยายเวลาทดสอบออกไปอีกคราวละ 24 ชั่วโมง จนกระทั่งกราฟการทรุดตัวเทียบกับเวลาจะบ่งชี้ว่าสิ้นสุดกระบวนการอัดตัวคายน้ำสำหรับการวัดด้วยเครื่องบันทึกที่กำหนดเวลาการบันทึกให้ใกล้เคียงกับเวลาการวัดมาตรฐาน กล่าวคือเครื่องจะทำการบันทึกที่ระยะทรุดตัวเมื่อเวลาผ่านไป (Elapsed-Time) มีค่าเป็นหนึ่งเท่าของค่าก่อนหน้า และเมื่อเวลาผ่านไปมากกว่า 24 ชั่วโมงจะบันทึกค่าทุก ๆ 2 ชั่วโมง และจะบันทึกที่เวลากดปุ่มหยุดการบันทึกเพื่อความสมบูรณ์ของข้อมูล การติดตั้งเครื่องมือเพื่อเครื่องบันทึกการทดสอบแสดงดังรูปที่ 5



(ก)



(ข)

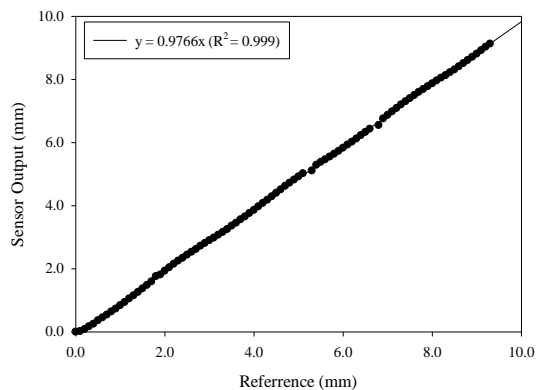
รูปที่ 5 การติดตั้งอุปกรณ์วัดการทรุดตัว (ก) นาฬิกาวัด (ข) เซ็นเซอร์และเครื่องบันทึก

3. ผลการทดลองและอภิปรายผล

3.1 การสอบเทียบเซ็นเซอร์

ก่อนนำเซ็นเซอร์ไปใช้งานจะต้องใช้ Calibration Factor เป็นตัวเลขเพื่อแปลงแรงดันไฟฟ้าให้เป็นระยะ มีหลักการคือนำเซ็นเซอร์วัดระยะที่ทราบค่าเทียบกับแรงดันไฟฟ้าที่วัดได้ และเพื่อความสะดวกจะใช้ไลบรารี (Library) ในการสอบเทียบสำหรับ Load Cell [10] ดำเนินการผ่านโปรแกรม Arduino IDE ในการศึกษารั้งนี้ค่า Calibration Factor เฉลี่ยตลอดช่วงการวัดของเซ็นเซอร์มีค่าเท่ากับ 439500 จากนั้นจะนำเซ็นเซอร์ไปสอบเทียบค่าระยะกับไดอัลเกจที่มีความละเอียดเท่ากับ 0.01 มิลลิเมตร ซึ่งเป็นความละเอียดตามมาตรฐานการทดสอบการอัดตัวของกรวมทางหลวงชนบท [1] เพื่อตรวจสอบความแม่นยำในการวัด การสอบเทียบได้ดำเนินการสามครั้งเพื่อยืนยันผลการสอบเทียบ รูปที่ 6 แสดงความสัมพันธ์ของค่าระยะจาก

การวัดของทั้งสองอุปกรณ์ โดยความสัมพันธ์มีค่า R^2 สูงถึง 0.999 ซึ่งยืนยันถึงความเป็นเชิงเส้นของข้อมูล และจะพบว่าค่าระยะที่อ่านได้จากเซ็นเซอร์มีค่าน้อยกว่าค่าที่อ่านได้จากมาตรวัดเล็กน้อย เมื่อวิเคราะห์ความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์จากการสอบเทียบพบว่ามีค่าอยู่ราว 2-5%



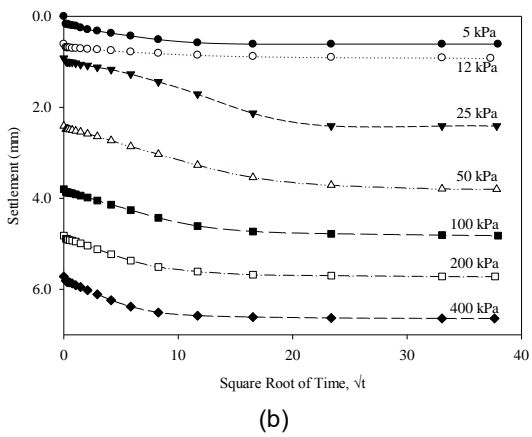
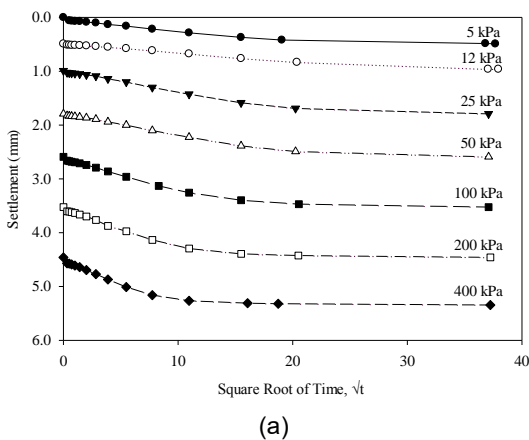
รูปที่ 6 การสอบเทียบเซ็นเซอร์และมาตรวัดอ้างอิง



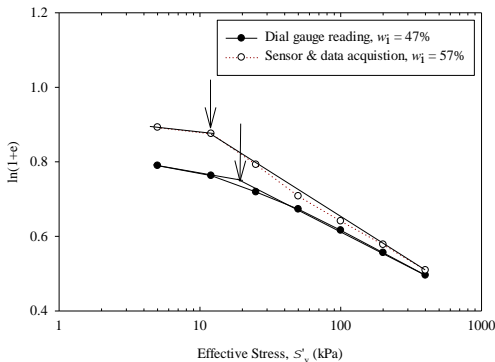
3.2 ผลการทดสอบการอัดตัวคายน้ำ

ผลการทดสอบการอัดตัวคายน้ำที่ดำเนินการทดสอบตามมาตรฐานภายใต้ความเค้นในแนวตั้งประสิทธิผลตั้งแต่ 5-400 kPa ของทั้งสองการทดสอบแสดงดังรูปที่ 7 จากรูปพบว่าดินตัวอย่างทั้งสองการทดลองมีการทรุดตัวอย่างรวดเร็วจนกระทั่งเวลาประมาณ 100 นาที การทรุดตัวเทียบกับเวลาจึงลดลงและมีค่าค่อนข้างคงที่จนกระทั่งครบระยะเวลาการทดสอบที่ 24 ชั่วโมง นอกจากนี้จะพบว่าที่ตำแหน่งเวลาการบันทึกค่าการทรุดตัวของสองวิธีมีค่าต่างกันเล็กน้อยเนื่องจากการกำหนดให้ไมโครคอนโทรลเลอร์มีเก็บข้อมูลที่ Elapsed Time มีค่าเป็น 2 เท่าของค่าก่อนหน้า ซึ่งใช้เพียงเป็นคำสั่งที่สั้นและง่ายกว่าการกำหนดเวลาที่เวลาตามมาตรฐานซึ่งเป็นข้อจำกัดของเครื่องบันทึกนี้ พฤติกรรมทรุดตัวของดินเทียบกับเวลาที่ได้จาก การทดสอบจากการอ่านไอดีลเกจและที่ได้จากเครื่อง

บันทึกก็มีลักษณะคล้ายกัน แตกต่างเพียงระดับของการทรุดตัว ทั้งนี้อาจเป็นเพราะปริมาณความชื้นของตัวอย่างทั้งสองมีค่าแตกต่างกันซึ่งจะอธิบายในหัวข้อถัดไป การตีความพฤติกรรมอัดตัวคายน้ำของดินมักแสดงในรูปของความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนโพรง (Void Ratio, e) และลอการิทึมของความเค้นประสิทธิผล มักจะได้รับความสัมพันธ์เส้นโค้งรูปตัว S อย่างไรก็ตามก็ดีเพื่อการนำเสนอความสัมพันธ์ที่เป็นเส้นตรง การศึกษานี้แสดงความสัมพันธ์ระหว่างลอการิทึมฐานธรรมชาติของดัชนีอัตราส่วนโพรง ($\ln(1+e)$) และลอการิทึมของความเค้นประสิทธิผล (รูปที่ 8) โดยที่อัตราส่วนโพรงจะพิจารณาจากระดับการทรุดตัวสุดท้าย ณ ระดับความเค้นประสิทธิผลนั้น จากรูปพบว่าอัตราส่วนโพรงลดลงตามการเพิ่มขึ้นของระดับความเค้นประสิทธิผล โดยจะสังเกตเห็นเส้นตรงสองเส้นที่มีความชันต่างกัน



รูปที่ 7 ผลการทดสอบการอัดตัวคายน้ำของดินเหนียวปั้นใหม่ (a) ผลการทดสอบจากการบันทึกโดยไอดีลเกจ (b) ผลการทดสอบที่บันทึกจากเครื่องบันทึก



รูปที่ 8 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนโพรงและความเค้นประสิทธิผล

ผลจากการทดสอบจากทั้งสองครั้งมีความคล้ายกัน แต่ผลการทดสอบจากเครื่องบันทึกจะพบว่า มีดัชนีอัตราส่วนโพรงเริ่มต้นที่สูงกว่า ซึ่งอาจเกิดการเตรียมตัวอย่างที่มีความชื้นเริ่มต้นสูงกว่า คือ 57% ในขณะที่ตัวอย่างที่ทดสอบและบันทึกผลโดยไดอัลเกจ ตัวอย่างมีความชื้นเริ่มต้นเพียง 47% จึงมีอัตราส่วนโพรงเริ่มต้นที่ต่ำกว่า ความแตกต่างของเส้นอัตราตัวคายน้ำของดินเหนียวบั้นใหม่ ที่มีปริมาณความชื้นเริ่มต้นแตกต่างกันในการศึกษาครั้งนี้สอดคล้องกับผลการศึกษาของ HONG *et. al.* [11] โดยระบุว่าความเค้นที่จุดตัดของเส้นตรงทั้งสองคือความเค้นดูด (Suction Pressure) ที่ต้านทานการทรุดตัว และจะมีค่าลดลงเมื่อปริมาณความชื้นสูงขึ้น เมื่อความเค้นมีค่าสูงเกินค่าความเค้นดูด ความชันของเส้นความสัมพันธ์จะนิยามเป็นดัชนีการอัดตัว (Compression Index, C_c) ซึ่งพบว่าดินที่ทดสอบโดยใช้เซ็นเซอร์และเครื่องบันทึกจะมีดัชนีการอัดตัวที่สูงกว่าเล็กน้อย

สัมประสิทธิ์การอัดตัวคายน้ำ (Coefficient of Consolidation, c_v) เป็นอีกคุณสมบัติการอัดตัวคายน้ำของดินที่วิศวกรให้ความสนใจ โดยบ่งบอกถึงอัตรา

ความเร็วในการเกิดกระบวนการคายน้ำ ในการศึกษาครั้งนี้ใช้เทคนิคการหาสัมประสิทธิ์การอัดตัวคายน้ำด้วยวิธีรากที่สองของเวลา (Square Root of Time Method) สัมประสิทธิ์การอัดตัวคายน้ำมีความสัมพันธ์กับระยะเวลาการอัดตัวคายน้ำที่ร้อยละ 90 (t_{90}) เขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$C_v = \frac{0.848 \bar{H}^2}{t_{90}} \quad (1)$$

โดยที่ C_v คือสัมประสิทธิ์การอัดตัวคายน้ำ (mm^2/min)
 \bar{H} ระยะทางระบายน้ำของตัวอย่าง

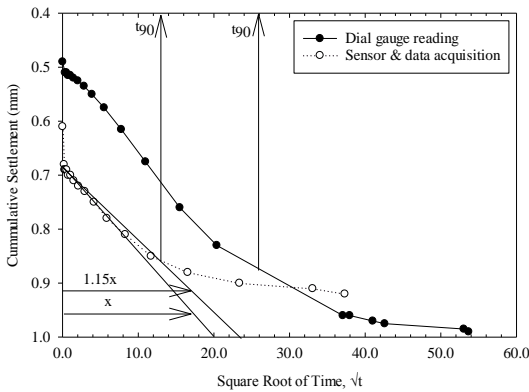
การคำนวณหา t_{90} สามารถดำเนินการได้จากความสัมพันธ์ระหว่างรากที่สองของเวลาและการทรุดตัวแสดงดังรูปที่ 9 การเปรียบเทียบสัมประสิทธิ์การอัดตัวคายน้ำจากทั้งสองการทดสอบแสดงดังรูปที่ 10 จากรูปพบว่าสัมประสิทธิ์การอัดตัวคายน้ำที่ได้จากการทดสอบทั้งสองครั้ง มีค่าแตกต่างกันสูงในช่วงแรกที่มีระดับความเค้นประสิทธิผลไม่เกิน 50 kPa จากนั้นความแตกต่างระหว่างการทดสอบทั้งสองครั้งลดลง เนื่องจาก t_{90} มีผลโดยตรงจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างการทรุดตัวและเวลา ดังจะสังเกตเห็นได้จากการเปรียบเทียบ t_{90} ของการทดสอบทั้งสองครั้งที่ระดับความเค้นประสิทธิผลที่เท่ากัน การเปลี่ยนแปลงการทรุดตัวเทียบกับเวลาเพียงเล็กน้อยก็ส่งผลต่อค่า t_{90} อย่างมีนัยยะสำคัญ เมื่อความเค้นมีค่าสูงกว่า 50 kPa สัมประสิทธิ์การอัดตัวคายน้ำของทั้งสองการทดสอบมีแนวโน้มที่จะมีค่าเพิ่มขึ้นตามระดับความเค้นที่เพิ่มขึ้น ผลการทดสอบดังกล่าวสอดคล้องกับการศึกษาในอดีต ที่ระบุว่าดินเหนียวที่มีค่าสัมประสิทธิ์การอัดตัวคายน้ำเพิ่มขึ้นตามระดับความเค้น พฤติกรรมการอัดตัวคายน้ำของดินเหนียวเหล่านั้นถูกควบคุมโดยปัจจัยด้านกลไก



บทความวิจัย

(Mechanical Factor) ที่ขึ้นอยู่กับกายภาพของดิน

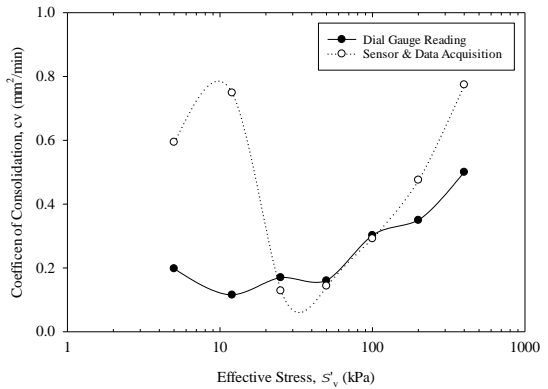
โดยตรง [12-13]



รูปที่ 9 ระยะเวลาการอัดตัวคายน้ำที่ร้อยละ 90 (t_{90}) โดยวิธีรากที่สองของเวลา

การเตรียมตัวอย่างทดสอบของดินชนิดเดียวกันแต่มีความชื้นเริ่มต้นที่แตกต่างกันในการศึกษาครั้งนี้ ทำให้การเปรียบเทียบการทรุดตัวเทียบกับเวลาของทั้งสองการทดสอบโดยตรงอาจทำให้เห็นถึงความแตกต่างของข้อมูล ซึ่งไม่สามารถแบ่งแยกว่าเกิดจากคุณสมบัติของดินเองหรือเกิดจากความแม่นยำของเครื่องทดสอบ อย่างไรก็ตามดินเหนียวมีคุณสมบัติการอัดตัวคายน้ำที่จำเพาะเป็นเอกลักษณ์

Burland [14] ได้เสนอเส้นความสัมพันธ์เนื้อแท้ (Intrinsic Compression Line, ICL) ของดินเหนียวบั้นใหม่ที่มีความชื้นใกล้เคียงกับความชื้นที่ขีดจำกัดเหลว โดยมีพารามิเตอร์ที่สำคัญคืออัตราส่วนโพรงที่ระดับความเค้น 100 และ 1000 kPa เขียนเป็นสัญลักษณ์คือ e_{100^*} และ e_{1000^*} ตามลำดับ ดัชนีช่องว่าง (Void Index, I_v) เป็นฟังก์ชันของระดับความเค้นประสิทธิภาพและเขียนเป็นสมการได้ดังนี้



รูปที่ 10 ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การอัดตัวคายน้ำและความเค้นประสิทธิภาพ

$$I_v = \frac{e - e_{100^*}}{C_c} \quad (2)$$

โดยที่ $C_c = e_{1000^*} - e_{100^*}$ หมายถึง : ในการศึกษาครั้งนี้ใช้ e_{1000^*} เป็นค่าประมาณที่จุดตัดกราฟ เนื่องจากความเค้นที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้มีค่ามากที่สุดเพียง 400 kPa

สถานะของดินเหนียวบั้นใหม่ทุกชนิดจะอยู่เป็นเส้นความสัมพันธ์เนื้อแท้ที่เขียนเป็นสมการดังนี้ [14]

$$I_v = 2.45 - 1.85 \log \sigma'_v + 0.015 \log \sigma_v^3 \quad (3)$$

เพื่อใช้ยืนยันผลการทดสอบการอัดตัวคายน้ำที่มีความชื้นเริ่มต้นต่างกันจากการศึกษาครั้งนี้ ดัชนีช่องว่างที่คำนวณจากสองการทดสอบถูกนำมาเปรียบเทียบกับเส้นเนื้อแท้ของดินเหนียวดังแสดงในรูปที่ 11 จากรูปพบว่าเส้นดัชนีช่องว่างจากทั้งสองการทดสอบในช่วงที่มีความเค้นต่ำกว่า 50 kPa จะมีค่าแตกต่างจากเส้นเนื้อแท้ และเมื่อความเค้นมีค่ามากกว่า 50 kPa พบว่าดัชนีช่องว่างของการทดสอบ



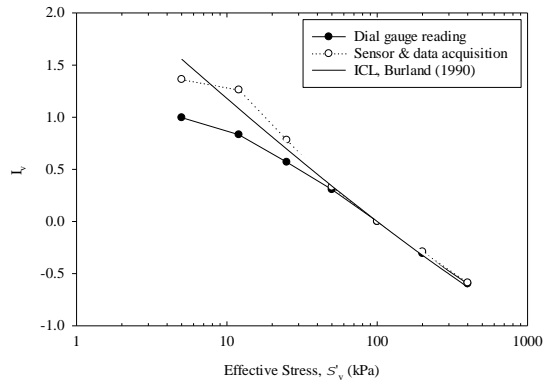
บทความวิจัย

ทั้งสองสอดคล้องกับเส้นสถานะเนื้อแท้ แม้ว่าจะมีอัตราส่วนโพรงเริ่มต้นต่างกันและเซ็นเซอร์มีความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์ 2.5-5.0% ซึ่งผลดังกล่าวสามารถยืนยันความแม่นยำของผลการทดสอบที่ได้จากเครื่องทดสอบ โดยอาศัยคุณสมบัติของดินเหนียวเป็นสิ่งยืนยันร่วมกับการเปรียบเทียบค่าระยะยุบเทียบกับเวลา แม้ว่าผลในช่วงแรกของการทดสอบดัชนีช่องว่างจะมีค่าสูงและต่ำกว่าเส้นเนื้อแท้ ทั้งนี้อาจเกิดจากความเค้นเริ่มต้นที่ใช้ทดสอบค่าน้อยกว่าค่าความเค้นที่แนะนำสำหรับสมการที่ (3) ซึ่งระบุว่าเหมาะสมในการทำนายผลที่ทดสอบด้วยความเค้นตั้งแต่ 10-4000 kPa

4. บทสรุป

การเปรียบเทียบผลการทดสอบการอัดตัวคายน้ำของดินเหนียวปั้นใหม่ที่มีความชื้นเริ่มต้นต่างกันแสดงให้เห็นว่าเครื่องบันทึกที่ใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ร่วมกับวงจรขยายสัญญาณที่มีราคาถูก ให้ผลการทดสอบที่สามารถเปรียบเทียบได้กับผลการทดสอบที่ตรวจวัดโดยใช้ไอดัลเกจร่วมกับนาฬิกาจับเวลา โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อพิจารณาคุณสมบัติการอัดตัวคายน้ำของดินที่เป็นเอกลักษณ์ ซึ่งยืนยันได้ว่าเครื่องบันทึกผลนี้สามารถนำมาใช้เพื่อทดสอบการอัดตัวคายน้ำของดินตามมาตรฐาน มีความน่าเชื่อถือของผลทดสอบ นอกจากนี้เครื่องบันทึกยังสามารถทำงานได้ต่อเนื่อง ลดข้อผิดพลาดที่อาจเกิดขึ้นจากผู้ปฏิบัติงานที่จะต้องอ่านข้อมูล ต่อเนื่องเป็นเวลานานรวมทั้งเป็นทางเลือกแทนการใช้เครื่องมือราคาแพงที่ต้องนำเข้าจากต่างประเทศ ระบบการตรวจวัดนี้ในอนาคตยังสามารถนำไปต่อยอดพัฒนาร่วมกับระบบอินเทอร์เน็ตทุกสรรพสิ่ง (Internet of Thing, IOT) ที่จะทำให้การตรวจวัดสามารถแสดงผลแบบทันที และ

ยังบูรณาการกับการทดสอบได้หลากหลาย ซึ่งจะทำให้การทดสอบมีความแม่นยำและน่าเชื่อถือมากยิ่งขึ้น นอกจากนี้การวิจัยครั้งนี้ได้ดำเนินการเพียงเฉพาะดิน



รูปที่ 11 เส้นเนื้อแท้ของดินเหนียวปั้นใหม่

เหนียวปั้นใหม่ที่มีคุณสมบัติการอัดตัวคายน้ำที่เป็นเอกลักษณ์ งานวิจัยต่อยอดในอนาคตอาจทดสอบกับเดี่ยวธรรมชาติเพื่อยืนยันความแม่นยำของเครื่องบันทึกมากยิ่งขึ้น

5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนทุนวิจัยจากมหาวิทยาลัยวงษ์ชวลิตกุล สัญญาทุนวิจัยเลขที่ 4/61 (10)

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] DRR 305-2545, Standard Test Method for Consolidation Characteristic, 2002. (in Thai)
- [2] K.H. Head, Manual of soil laboratory testing: Permeability, shear strength and compressibility tests, Pentech Press, London, UK, 1994.
- [3] A. Sridharan, and H.B. Nagaraj, Compressibility behaviour of remoulded, fine-grained soils and correlation with index



- properties, Canadian Geotechnical Journal, 2000, 37(3), 712-722.
- [4] A. Sridharan, H.B. Nagaraj, and N. Srinivas, Rapid method of consolidation testing, Canadian Geotechnical Journal, 1999, 36(2), 392-400.
- [5] ASTM D4186-89, Standard Test Method for One-Dimensional Consolidation Properties of Soils Using Controlled-Strain Loading, 2017.
- [6] S. Rojmosik and S. Sonlamp, Development of automatic consolidation testing system, The 18th National Convention on Civil Engineering, Proceeding, 2013, GTE351-GTE354. (in Thai).
- [7] <https://store.arduino.cc/products/arduino-uno-rev3> (Accessed on 23 June 2025)
- [8] M. Agüero, D. Maharjan, M.P. Rodríguez, D.D.L. Mascarenas and F. Moreu, Design and implementation of a connection between augmented reality and sensors, Robotics, 2020, 9(3).
- [9] C.C. Suciú, V. Stoica, M. Ilie, I. Ionel, and R. Ionel, A low-cost IoT-based bidirectional torque measurement system with strain gauge technology, Applied Sciences, 2025, 15(15), 8158.
- [10] <https://github.com/bogde/HX711> (Accessed on 13 February 2026)
- [11] Z. Hong, J. Yin and Y. Cui, Compression behaviour of reconstituted soils at high initial water contents, Geotechnique, 2010, 60(9), 691-700.
- [12] R. Robinson, M. Allam, Effect of clay mineralogy on coefficient of consolidation, Clays and Clay Minerals, 1998, 46(5), 596-600.
- [13] F. Habibbeygi and H. Nikaz, Variation of consolidation coefficient of expansive clays at high water content, Journal of Engineering Science and Technology, 2018, 13(9), 2644–2654.
- [14] J.B. Burland, On the compressibility and shear strength of natural clays, Geotechnique, 1990, 40(3), 329-378.

การทำนายการเกิดไมโครแครกในสายเมน XLPE ของระบบไฟฟ้า อาคารเรียนโดยใช้การวิเคราะห์ข้อมูลกระแสสามเฟสแบบเรียลไทม์

สันติ การิสันต์¹ และ สิทธิศักดิ์ โรจชยะ^{2*}

¹ วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรมและการจัดการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย

² คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย

* ผู้ประสานงานเผยแพร่ (Corresponding Author), E-mail: sittisak.r@rmutsv.ac.th

วันที่รับบทความ: 25 ตุลาคม 2568; วันที่ทบทวนบทความ: 27 มกราคม 2569; วันที่ตอบรับบทความ: 10 กุมภาพันธ์ 2569

วันที่เผยแพร่ออนไลน์: 21 เมษายน 2569

บทคัดย่อ: งานวิจัยนี้มุ่งทำนายการเกิดไมโครแครก (Micro-Crack) ในสายเมนหลักชนิด XLPE ของระบบไฟฟ้าอาคารเรียนข้างอุตสาหกรรม มทร.ศรีวิชัย โดยใช้การวิเคราะห์ข้อมูลกระแสไฟฟ้าแบบเรียลไทม์สามเฟส (A, B, C) ระยะเวลา 7 เดือน รวมกว่า 60,000 จุดข้อมูล จากระบบ IoT Monitoring เพื่อประเมินความสัมพันธ์ระหว่างพฤติกรรมโหลด ความไม่สมดุล และการเสื่อมสภาพของสายเมนหลัก การเตรียมข้อมูลประกอบด้วย การทำความสะอาด การปรับช่วงเวลาให้เท่ากันทุก 5 นาที และการสร้างหน้าต่างเวลารายวันและรายสัปดาห์สำหรับการคำนวณเชิงสถิติ ผลการวิเคราะห์พบว่า Phase B มีค่ากระแสเฉลี่ยสูงสุดที่ $7.41 \pm 2.28A$ (มกราคม 2568) และเป็นเฟสเด่นต่อเนื่องตลอดการวัด ส่วนดัชนีความไม่สมดุลโหลด (LUI) เพิ่มขึ้นจาก 8.45% ในเดือนธันวาคม 2567 เป็น 13.05% ในเดือนกุมภาพันธ์ 2568 แสดงถึงภาวะไม่สมดุลระดับปานกลางถึงสูง พลังงานสะสม I^2 เพิ่มขึ้นจาก 1.82×10^3 เป็น $3.71 \times 10^3 A^2 \cdot day$ (+104%) ในช่วงเดือนแรกแสดงการเร่งของความเค้นทางความร้อน ผลการวิเคราะห์สหสัมพันธ์พบความสัมพันธ์สูงระหว่าง LUI และ I^2 ($r = 0.89$) บ่งชี้ถึงความเชื่อมโยงของความไม่สมดุลและความร้อนสะสม การสร้างแบบจำลองทำนายใช้ Logistic Regression และ LSTM เพื่อคำนวณค่าความน่าจะเป็นของการเกิดไมโครแครก $P_{micro}(t)$ ในช่วงเวลา t พบช่วงความเสี่ยงสูงในเฟส B ช่วงวันที่ 1-10 มกราคม 2568 ซึ่งสอดคล้องกับการเพิ่มขึ้นของโหลดเฉลี่ย +9.7% ตามจุดเปลี่ยน CP1 ผลลัพธ์ยืนยันว่าการวิเคราะห์กระแสสามเฟสแบบเรียลไทม์สามารถสะท้อนการเสื่อมของฉนวน XLPE ได้อย่างมีประสิทธิภาพ และสามารถพัฒนาเป็นระบบบำรุงรักษาเชิงคาดการณ์ (Predictive Maintenance) เพื่อยืดอายุการใช้งานสายเมนหลัก ลดความเสี่ยงการล้มเหลว และเพิ่มประสิทธิภาพการจัดการพลังงานในระยะยาว

คำสำคัญ: การทำนายไมโครแครก; สายเมนหลัก XLPE; ความไม่สมดุลโหลด; การวิเคราะห์ข้อมูลแบบเรียลไทม์; การบำรุงรักษาเชิงพยากรณ์

Predicting Micro-Crack Formation in XLPE Main Cables of Educational Building Power Systems Using Real-Time Three-Phase Current Data Analysis

Santi Karisan¹ and Sittisak Rojchaya^{2*}

¹ College of industrial technology and management, Rajamangala University of Technology Srivijaya

² Faculty of engineering and technology, Rajamangala University of Technology Srivijaya

* Corresponding author, E-mail: sittisak.r@rmutsv.ac.th

Received: 25 October 2025; Revised: 27 January 2026; Accepted: 10 February 2026

Online Published: 21 April 2026

Abstract: This study presents a predictive approach for detecting micro-crack formation in XLPE main cables of an educational building power system using real-time three-phase current data collected over seven months (>60,000 samples) via an IoT monitoring system. After data cleaning and 5-minute resampling, statistical and temporal analyses revealed that Phase B consistently carried the highest load (7.41 ± 2.28 A in January 2025), while the Load Unbalance Index (LUI) rose from 8.45% to 13.05%, reflecting moderate imbalance. Cumulative thermal energy (I^2) increased by 104%, with a strong correlation to LUI ($r = 0.89$). Logistic Regression and LSTM models estimated the probability of micro-crack occurrence $P_{\text{micro}}(t)$, identifying a high-risk period in early January 2025 corresponding to a +9.7% current surge. The results confirm that real-time current analysis effectively indicates early XLPE insulation degradation and supports predictive maintenance for improved system reliability and energy management.

Keywords: micro-crack prediction, XLPE cable, load unbalance, real-time analysis, predictive maintenance



1. บทนำ

ระบบไฟฟ้าในอาคารเรียนขนาดใหญ่มีแนวโน้มเผชิญปัญหาความไม่สมดุลของโหลดและการสะสมความร้อน ซึ่งถือเป็นปัจจัยสำคัญที่เร่งให้เกิดความเสื่อมสภาพของสายเมนหลักชนิด XLPE (Cross-Linked Polyethylene) แม้ว่าสาย XLPE จะมีคุณสมบัติด้านความทนทานทางความร้อนและฉนวนไฟฟ้าที่ดี แต่การทำงานภายใต้ภาวะกระแสเกินพิกัดหรือโหลดที่ผันผวนอย่างต่อเนื่องสามารถก่อให้เกิดรอยแตกระดับจุลภาค (Micro-Crack) ภายในฉนวน และเพิ่มความเสี่ยงต่อความล้มเหลวของระบบในระยะยาว [1-7] การประเมินสภาพสายไฟ XLPE ในปัจจุบันมักอาศัยการตรวจวัดการคายประจุบางส่วน (Partial Discharge: PD) และการวิเคราะห์คุณลักษณะไดอิเล็กทริกหรือการแก้ตัวทางความร้อนและไฟฟ้า ซึ่งให้ความแม่นยำสูงแต่ต้องใช้อุปกรณ์เฉพาะทาง มีต้นทุนสูง และไม่เหมาะกับการติดตามสถานะการทำงานแบบต่อเนื่องหรือแบบเรียลไทม์ [8-10] งานวิจัยล่าสุดชี้ให้เห็นว่าการสะสมความเสียหายของฉนวน XLPE ภายใต้การใช้งานจริงมักเกิดจากผลรวมของความไม่สมดุลและความร้อนสะสม ซึ่งไม่สามารถตรวจจับได้จากการทดสอบเป็นช่วงเวลาเพียงอย่างเดียว [2, 10] ในช่วงหลังการประยุกต์ใช้ข้อมูลจากระบบตรวจวัดพลังงานและ IoT เพื่อวิเคราะห์กระแสไฟฟ้าสามเฟสได้รับความสนใจเพิ่มขึ้น เนื่องจากสามารถสะท้อนพฤติกรรมของโหลดความไม่สมดุล และผลกระทบเชิงความร้อนในสายเมนหลักได้โดยตรง โดยไม่ต้องติดตั้งอุปกรณ์เพิ่มเติม งานวิจัยหลายฉบับรายงานว่า การวิเคราะห์ข้อมูลกระแสไฟฟ้าและอิมพีแดนซ์สามารถใช้เป็น

ตัวบ่งชี้ทางอ้อมของการเสื่อมสภาพสายไฟฟ้าแรงดันสูง และมีศักยภาพต่อการพัฒนาระบบเฝ้าระวังแบบเรียลไทม์ [1, 9-12]

ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงมุ่งทำนายการเกิดไมโครแคร็กในสายเมนหลักชนิด XLPE ของระบบไฟฟ้าอาคารเรียนช่วงอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย โดยใช้ข้อมูลกระแสไฟฟ้าสามเฟสที่เก็บแบบเรียลไทม์ต่อเนื่องเป็นเวลา 7 เดือน เพื่อวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างพฤติกรรมโหลด ความไม่สมดุล และการสะสมความร้อน ผ่านการวิเคราะห์เชิงสถิติและแบบจำลองเชิงฟิสิกส์ร่วมกับเทคนิคการเรียนรู้ของเครื่อง เพื่อสนับสนุนการบำรุงรักษาเชิงคาดการณ์และเพิ่มความเชื่อถือได้ของระบบไฟฟ้าในระยะยาว [1-12]

2. วิธีการดำเนินงานวิจัย

การวิจัยนี้ใช้ข้อมูลกระแสไฟฟ้าแบบเรียลไทม์ของระบบไฟฟ้าอาคารเรียนช่วงอุตสาหกรรม มทร.ศรีวิชัย ซึ่งเก็บจากระบบ IoT Monitoring เป็นระยะเวลา 7 เดือน ครอบคลุมเฟส A, B และ C โดยค่าที่บันทึกมีหน่วยเป็นแอมแปร์ (A) และบันทึกต่อเนื่องในช่วงเวลาเท่ากันทุกช่วง เพื่อใช้วิเคราะห์พฤติกรรมของโหลดไฟฟ้าและภาวะความไม่สมดุลเรื้อรังของระบบ

2.1 การเตรียมและประมวลผลข้อมูล

ดำเนินการทำความสะอาดข้อมูล (Data Cleaning) โดยตรวจสอบและปรับค่าที่หายไป ค่าผิดปกติ และค่าที่อยู่นอกช่วงให้เป็นมาตรฐาน จากนั้นปรับช่วงเวลา (Resampling) ให้มีความถี่คงที่ทุก 5 นาที เพื่อความสม่ำเสมอของข้อมูลแบบอนุกรมเวลา (Time Series)



และสร้างหน้าต่างเวลา (Windowing) รายวันและรายสัปดาห์ เพื่อคำนวณค่าทางสถิติของแต่ละเฟส

ข้อมูลหลักประกอบด้วยค่ากระแสไฟฟ้าสามเฟส (Phase A, B, C) รวมประมาณ 60,000 จุดข้อมูล พร้อมข้อมูลแรงดันไฟฟ้า อุณหภูมิแวดล้อม และบันทึกการซ่อมบำรุง เพื่อใช้วิเคราะห์พฤติกรรมโหลดและสภาวะการทำงานของระบบ สายเมนหลักที่ศึกษาเป็นชนิด XLPE ขนาด 240mm² ทองแดง โดยอ้างอิงคุณลักษณะทางไฟฟ้าและความร้อนตามมาตรฐานผู้ผลิตในการประเมินเชิงเทคนิค

รูปที่ 1 แสดงโครงสร้างการติดตั้งระบบ IoT Monitoring สำหรับวัดกระแสไฟฟ้าแรงดันต่ำแบบสามเฟส พร้อมการเทียบความแม่นยำกับเครื่องมือมาตรฐาน พบว่าค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยไม่เกิน ±2% ซึ่งอยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน IEC 61000-4-30 ระดับ

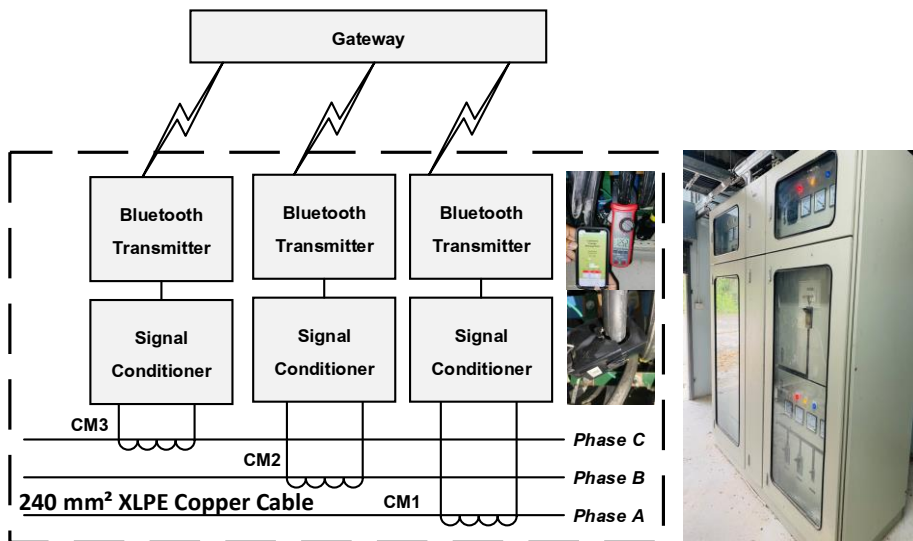
Class A แสดงถึงความน่าเชื่อถือของข้อมูลที่ใช้ในการวิเคราะห์เชิงสถิติและ Machine Learning ภายหลัง

2.2 การวิเคราะห์เชิงคุณลักษณะ (Feature Extraction)

จากข้อมูลกระแสไฟฟ้าสามเฟส ได้ทำการคำนวณและสกัดคุณลักษณะที่สำคัญทางไฟฟ้าและความร้อน เช่น ค่ากระแสเฉลี่ย กระแสสูงสุด ค่าความแปรปรวน อุณหภูมิเฉลี่ย และอัตราการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ เพื่อใช้เป็นตัวแปรอินพุตในการวิเคราะห์และสร้างแบบจำลองเชิงพยากรณ์

กระแสเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานได้จากสมการ (1)

$$\bar{I} = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n I(t), \quad \sigma_I = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{t=1}^n (I(t) - \bar{I})^2} \quad (1)$$



Main Distribution Board

รูปที่ 1 การติดตั้งระบบตรวจวัดพลังงานแบบเรียลไทม์และเปรียบเทียบความแม่นยำกับเครื่องมือวัดมาตรฐาน



ดัชนีโหลดไม่สมดุล (Load Unbalance Index) ได้จากสมการ (2)

$$LUI = \frac{\max(I_A, I_B, I_C) - \min(I_A, I_B, I_C)}{\left(\frac{I_A + I_B + I_C}{3}\right)} \times 100\% \quad (2)$$

กำลังสูญเสียเนื่องจากความร้อนในตัวนำ (Joule Loss) ได้จากสมการ (3)

$$P_{\text{loss}}(t) = I(t)^2 \times R(T) \quad (3)$$

อุณหภูมิของตัวนำ (Cable Temperature Model) ได้จากสมการ (4)

$$C \frac{dT}{dt} + \frac{T - T_{\text{amb}}}{R_{\text{th}}} = I^2 R(T) \quad (4)$$

ใช้เพื่อประเมินความร้อนสะสมและผลกระทบต่ออายุการใช้งานของฉนวน

2.3 การคำนวณดัชนีความเสียหายสะสม (Cumulative Damage Index)

ดัชนีความเสียหายสะสมใช้ประเมินการเสื่อมสภาพของสายเมนหลัก โดยอ้างอิงทฤษฎีความล้า (Fatigue) และการเสื่อมของฉนวนจากความร้อน (Thermal Aging) การสะสมพลังงานความร้อนคำนวณจากสมการอุณหพลศาสตร์ เพื่อสะท้อนระดับความเสียหายและใช้เป็นตัวบ่งชี้สำหรับการบำรุงรักษาเชิงพยากรณ์ (Predictive Maintenance)

การสะสมพลังงานความร้อน ได้จากสมการ (5)

$$E_{\text{cum}} = \int_0^t I(\tau)^2 R(T) dt \quad (5)$$

สมการการเสื่อมตามกฎ Arrhenius ได้จากสมการ (6)

$$\text{Life} \propto \exp\left(-\frac{E_a}{kT}\right) \quad (6)$$

การคำนวณดัชนีความเสียหายสะสมแบบ Miner's Rule ได้จากสมการ (7)

$$D(t) = \sum_j \left(\frac{A_j}{A_{\text{ref}}}\right)^\beta \quad (7)$$

เมื่อ $D(t) > 1$ ถือว่าเข้าสู่ช่วงความเสี่ยงสูงต่อการเกิด Micro-crack

2.4 การสร้างแบบจำลองการทำนาย (Prediction Model)

ในขั้นตอนการสร้างแบบจำลองการทำนาย ได้เตรียมข้อมูลสำหรับการเรียนรู้โดยกำหนดค่า Label จากค่าดัชนี $D(t)$ หรือ E_{cum} ที่เกินค่าขีดจำกัด (Threshold) จากนั้นแบ่งข้อมูลออกเป็นชุดฝึก (Training Set) และชุดทดสอบ (Testing Set) แบบจำลองที่ใช้คือ Logistic Regression ซึ่งสามารถอธิบายความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรคุณลักษณะกับความน่าจะเป็นของการเกิดความเสียหายได้จากสมการพื้นฐานของลอจิสติกเรกเรชัน

$$P(Y = 1|x) = \sigma(w^T x + b) \quad (8)$$

หรือแบบจำลองเชิงลึก (LSTM) สำหรับข้อมูลตามเวลา (Time-Series) ผลลัพธ์ที่ได้คือค่าความน่าจะเป็น $P_{\text{micro}}(t) \in [0, 1]$ ซึ่งสะท้อนระดับความเสี่ยงของการเกิด Micro-crack ในแต่ละช่วงเวลา

2.5 การตรวจสอบและประเมินประสิทธิภาพแบบจำลอง

การตีความและการนำผลไปใช้ วิเคราะห์ช่วงเวลาที่มีค่าความน่าจะเป็น $P_{\text{micro}}(t)$ สูงกว่าค่ากำหนด เพื่อระบุสายเฟสหรือช่วงเวลาที่มีความเสี่ยงสูง เปรียบเทียบกับข้อมูลอุณหภูมิและพฤติกรรมโหลดจริง เพื่อยืนยันผลการทำนายและเสนอแนวทางปรับปรุง เช่น การบาลานซ์โหลด หรือการติดตั้งระบบตรวจวัด PD เพื่อป้องกันความเสียหายก่อนเกิดขึ้นจริง

2.6 การตีความและการนำผลไปใช้

วิเคราะห์ช่วงเวลาที่มีความน่าจะเป็นการเกิด Micro-crack $P_{\text{micro}}(t)$ สูงกว่าค่ากำหนด เพื่อระบุสายเฟสหรือช่วงเวลาที่มีความเสี่ยงสูง เปรียบเทียบผลทำนายกับข้อมูลอุณหภูมิและพฤติกรรมโหลดจริง เพื่อยืนยันความถูกต้อง พร้อมเสนอแนวทางปรับปรุง เช่น การบาลานซ์โหลดหรือการติดตั้งระบบตรวจวัด Partial Discharge (PD) เพื่อป้องกันความเสียหายก่อนเกิดขึ้น นอกจากนี้ยังสามารถประเมินความเสี่ยงแบบเรียลไทม์โดยเชื่อมโยงข้อมูลกระแสไฟฟ้ากับพฤติกรรมความร้อนและอายุการใช้งานของสาย XLPE พัฒนาเป็นระบบ “Predictive Maintenance” สำหรับอาคารเรียนช่างอุตสาหกรรม มทร.ศรีวิชัย

3. ผลการวิจัย/ทดลองและการอภิปรายผล

ข้อมูลกระแสไฟฟ้าทั้งสามเฟส (Phase A, B, C) จากระบบไฟฟ้าอาคารเรียนช่างอุตสาหกรรม มทร.ศรีวิชัย ระยะเวลา 7 เดือน ถูกนำมาผ่านกระบวนการวิเคราะห์เพื่อประเมินพฤติกรรมโหลดความไม่สมดุล และสัญญาณเบื้องต้นของการเสื่อมสภาพในสายเมน XLPE โดยดำเนินการเป็นลำดับขั้นตอนเชิงวิเคราะห์ดังนี้

3.1 การวิเคราะห์อนุกรมเวลารายวันและค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่ (Daily Time Series & Rolling Mean)

ได้ทำการสร้างกราฟอนุกรมเวลาของค่ากระแสในแต่ละเฟส พร้อมคำนวณค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่ 7 วัน เพื่อสังเกตแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของโหลดในระยะยาว และตรวจจับพฤติกรรมการเพิ่มขึ้นของโหลด (Load Growth) ที่อาจส่งผลต่อความเสถียรของระบบไฟฟ้า

3.2 การวิเคราะห์สัดส่วนของแต่ละเฟสต่อกระแสรวม (Stacked Area Analysis)

ได้ทำการคำนวณสัดส่วนของกระแสแต่ละเฟสเมื่อเทียบกับกระแสรวมในแต่ละวัน เพื่อระบุเฟสที่รับโหลดสูงสุด (Dominant Phase) และใช้ประเมินความไม่สมดุลของโหลดระหว่างเฟส ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญต่อประสิทธิภาพและความเสถียรของระบบไฟฟ้า

3.3 การกระจายค่ากระแสรายเดือน (Monthly Boxplot)

การสร้างกราฟ Boxplot แยกตามเดือนสำหรับกระแสแต่ละเฟสเพื่อประเมินการกระจายและความแปรปรวนของข้อมูล พร้อมตรวจจับค่าผิดปกติ (Outliers) ข้อมูลนี้ช่วยระบุพฤติกรรมโหลดตาม



ฤดูกาล เดือนที่มีความผันผวนสูง และสนับสนุนการวางแผนบำรุงรักษาและการบาลานซ์โหลด

3.4 การคำนวณดัชนีความไม่สมดุลโหลด (Load Unbalance Index: LUI)

ใช้สูตรมาตรฐานของ IEC 61000-4-30 ในการคำนวณดัชนี LUI เพื่อวัดความแตกต่างของกระแสทั้งสามเฟส ณ เวลา t

3.5 การคำนวณดัชนีความเสียหายเชิงพลังงาน (Daily I² and Cumulative I²)

คำนวณค่ากระแสยกกำลังสองรายวัน (I²) เพื่อแทนค่าพลังงานความร้อนสะสมในสายไฟ และรวมผลลัพธ์เป็นค่า Cumulative I² เพื่อวิเคราะห์ระดับการสะสมพลังงานและความเสี่ยงต่อความเสียหายของสาย การใช้

ดัชนีนี้ช่วยให้ประเมินความเสี่ยงสภาพเชิงพยากรณ์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

กราฟรูปที่ 2 พบว่า Phase B มีค่าเฉลี่ยสูงสุดอย่างต่อเนื่อง ($7.41 \pm 2.28A$ ในเดือนมกราคม 2568) และมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามเส้นค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่ โดยเฉพาะช่วงเดือนมีนาคม-พฤษภาคม 2568 สะท้อนพฤติกรรมการเพิ่มของภาระโหลดตามฤดูกาล (เช่น การใช้งานเครื่องปรับอากาศ) ซึ่งเป็นสาเหตุให้เกิดการสะสมความร้อนภายในสายเมน XLPE

กราฟรูปที่ 3 พบว่า Phase B มีสัดส่วนเฉลี่ย 46.4% ตลอดช่วงเวลาที่ศึกษา สูงกว่า Phase A (23.0%) และ Phase C (30.6%) อย่างมีนัยสำคัญ สะท้อนภาวะ "Phase Dominance" ซึ่งทำให้เกิดการกระจายกระแสไม่สมดุลและเพิ่มความร้อนเฉพาะจุด (Localized Heating) ในเฟสที่มีภาระสูงสุด

ตารางที่ 1 สรุปข้อมูลกระแสไฟฟ้า 3 เฟสรายวัน

Date Range	Phase A (A)	Phase B (A)	Phase C (A)	Total Current (A)	Daily Avg (A)
Dec 1–31, 2024	3.12 ± 1.25	6.94 ± 2.15	4.21 ± 1.58	14.27	4.76
Jan 1–31, 2025	3.55 ± 1.31	7.41 ± 2.28	4.72 ± 1.63	15.68	5.23
Feb–Jun 2025	3.47 ± 1.19	7.05 ± 1.97	4.55 ± 1.52	15.07	5.02
Overall (7 months)	3.38 ± 1.25	7.13 ± 2.12	4.49 ± 1.58	14.99	5.00

Note: แสดงค่าเฉลี่ยกระแสไฟฟ้ารายวันในระดับช่วงเวลา (long-term daily average) ซึ่งสรุปพฤติกรรมโหลดภาพรวมในระยะยาวรวมทั้งช่วงที่มีโหลดต่ำและวันหยุด

ตารางที่ 2 ค่า Rolling Mean และแนวโน้มฤดูกาล

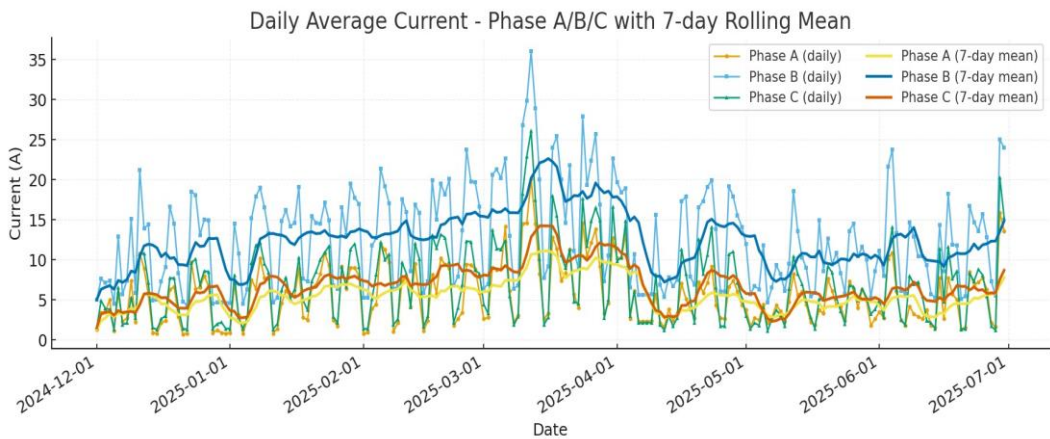
Period	Rolling Window	Mean A (A)	Mean B (A)	Mean C (A)	Trend Slope ($\Delta A/day$)
Week 1–4	7 days	3.25	6.82	4.10	+0.015
Week 5–8	7 days	3.41	7.12	4.39	+0.018
Week 9–12	7 days	3.62	7.36	4.62	+0.021

Note: แสดงค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่ด้วยหน้าต่างเวลา 7 วัน (rolling mean) และแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของโหลดในระยะสั้น

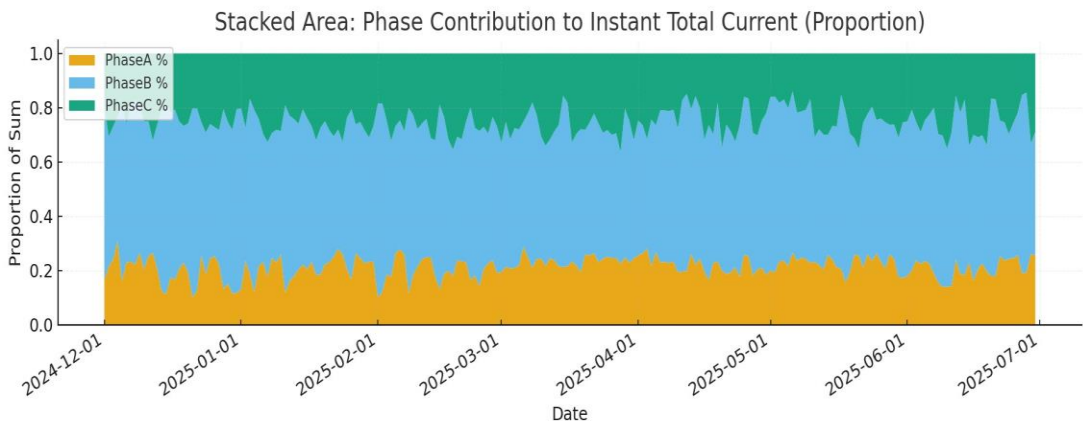


ตารางที่ 3 สัดส่วนการมีส่วนร่วมของกระแสแต่ละเฟส

Month	Phase A (%)	Phase B (%)	Phase C (%)	Dominant Phase
Dec 2024	21.8	48.7	29.5	B
Jan 2025	22.6	47.3	30.1	B
Feb 2025	23.0	46.1	30.9	B
Mar 2025	23.3	45.5	31.2	B
Apr–Jun 2025	22.9	46.4	30.7	B



รูปที่ 2 ค่าเฉลี่ยกระแสไฟฟ้ารายวันของเฟส A/B/C พร้อมค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่ 7 วัน



รูปที่ 3 สัดส่วนกระแสไฟฟ้าแต่ละเฟสต่อกระแสรวม (แบบ Stacked Area)

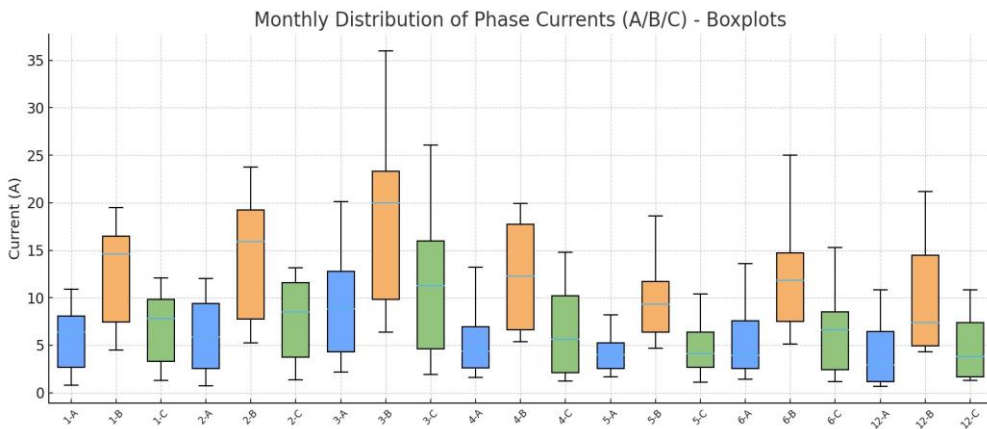


จากกราฟรูปที่ 4 พบว่า Phase B มีค่า median สูงสุดและมีช่วงค่ากระจาย (IQR) กว้างที่สุด สะท้อนความผันผวนของโหลดและการทำงานใกล้ขีดจำกัดทางความร้อน ส่วน Phase C มีการกระจายตัวแคบแสดงถึงโหลดคงที่ การปรากฏของ outlier ในช่วงเดือนเมษายน-พฤษภาคม 2568 บ่งชี้ถึงเหตุการณ์โหลดเกินพิกัด (Overload Event) ชั่วขณะ

จากกราฟรูปที่ 5 พบว่า ค่าเฉลี่ยเพิ่มจาก 8.45% (ธันวาคม 2567) เป็น 13.05% (กุมภาพันธ์ 2568) ก่อนลดลงสู่ระดับ 10.43% ในเดือนมิถุนายน 2568 ระดับ LUI ที่เกิน 10% จัดอยู่ในช่วง “Moderate-High

Unbalance” ซึ่งเป็นสัญญาณเตือนการเกิดกระแสหมุนเวียนในระบบ (Negative Sequence Current) และเพิ่มความเค้นทางความร้อนในฉนวน XLPE

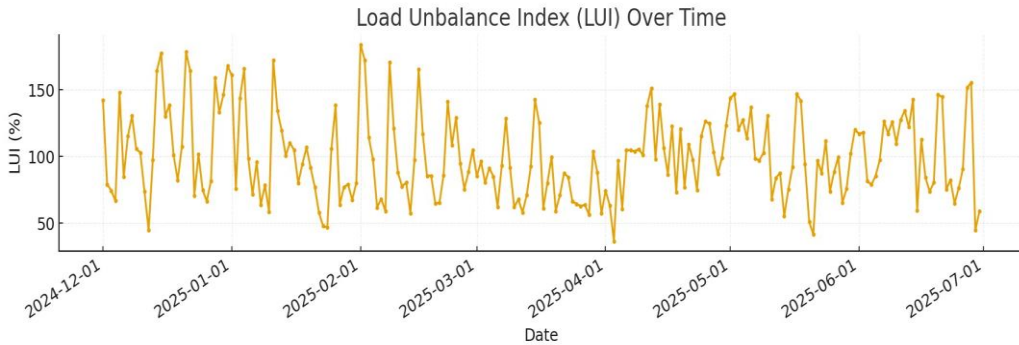
จากกราฟรูปที่ 6 พบว่า ค่า Cumulative I² เพิ่มจาก 1.82×10³ เป็น 3.71×10³A²·day ภายในสองเดือนแรก (+104%) โดยเฉพาะใน Phase B ซึ่งมีอัตราเพิ่มต่อเดือนสูงสุด การสะสมพลังงานนี้สัมพันธ์โดยตรงกับความเค้นทางความร้อนในตัวนำ (Joule Heating) ซึ่งเป็นกลไกหลักของการเกิดไมโครแครกภายในฉนวน



รูปที่ 4 การกระจายกระแสไฟฟ้ายเดือนของเฟส A/B/C

ตารางที่ 4 ดัชนีความไม่สมดุลของโหลด (LUI)

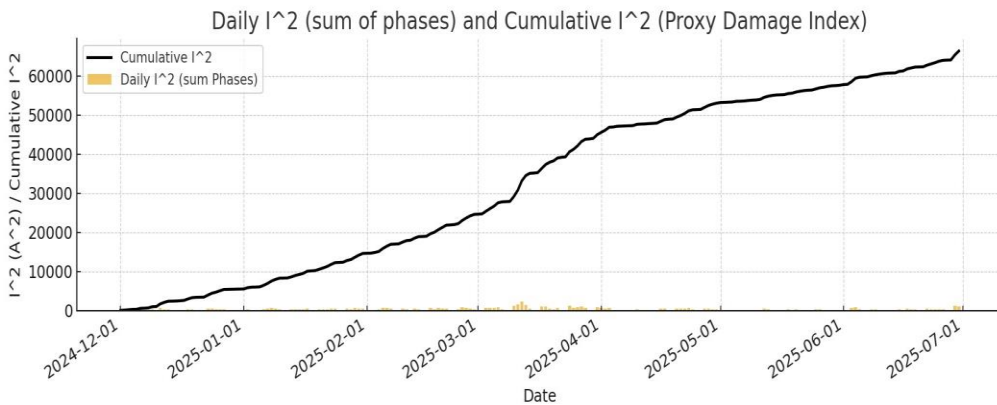
Period	LUI (%)	Interpretation
Dec 2024	8.45	Acceptable (Mild Unbalance)
Jan 2025	11.72	Moderate Unbalance
Feb 2025	13.05	Moderate-High
Mar 2025	12.64	Moderate
Apr-Jun 2025	10.43	Acceptable



รูปที่ 5 ค่าดัชนีความไม่สมดุลของภาระโหลดไฟฟ้าตามเวลา

ตารางที่ 5 ดัชนีความเครียดทางไฟฟ้า (I^2 -based Damage Proxy)

Month	Mean I^2 (A^2)	Cumulative I^2 (A^2 -day)	Damage Growth (%)
Dec 2024	58.7	1.82×10^3	-
Jan 2025	63.4	3.71×10^3	+104
Feb 2025	61.8	5.55×10^3	+49
Mar 2025	60.2	7.37×10^3	+33
Apr-Jun 2025	59.9	1.27×10^4	+72



รูปที่ 6 ค่าพลังงานความร้อนรายวัน (I^2) และค่าสะสมเพื่อประเมินความเสียหาย



ตารางที่ 6 เมทริกซ์ความสัมพันธ์ระหว่างพารามิเตอร์ไฟฟ้า

Variable	Phase A	Phase B	Phase C	Temp (°C)	LUI	I ² Index
Phase A	1.00	0.86	0.79	0.64	0.72	0.83
Phase B	0.86	1.00	0.82	0.68	0.80	0.91
Phase C	0.79	0.82	1.00	0.63	0.69	0.84
Temp (°C)	0.64	0.68	0.63	1.00	0.59	0.77
LUI	0.72	0.80	0.69	0.59	1.00	0.89
I ² Index	0.83	0.91	0.84	0.77	0.89	1.00

3.6 การวิเคราะห์การกระจายความน่าจะเป็นของกระแส (Histogram Distribution)

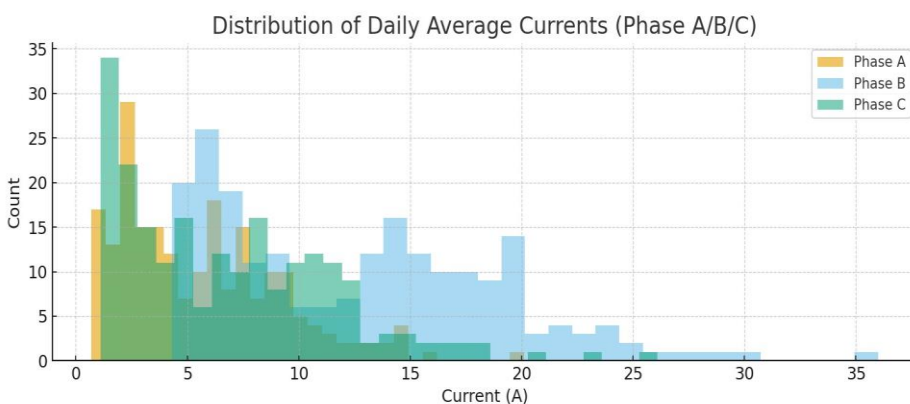
การสร้างกราฟฮิสโตแกรมสำหรับกระแสแต่ละเฟส เพื่อประเมินลักษณะการกระจายของข้อมูล เช่น ความปกติ (Normality), ความเบ้ (Skewness) และความสูงของยอด (Kurtosis) พร้อมตรวจสอบค่าที่เกิดขึ้นบ่อยผิดปกติ ซึ่งสะท้อนถึงพฤติกรรมโหลดเกินพิกัดและความเสี่ยงต่อระบบไฟฟ้า

จากกราฟรูปที่ 7 พบว่า ทั้งสามเฟสมีลักษณะใกล้เคียงการกระจายแบบปกติ (Normal Distribution) แต่ Phase B มี skew ด้านขวา (Positive Skewness $\approx +0.45$) แสดงถึงจำนวนวันที่มีกระแสสูงกว่าค่าเฉลี่ย

มาก ซึ่งเป็นลักษณะของโหลดที่ไม่คงที่และมีการทำงานแบบพีคเป็นช่วง ๆ (Peak Intermittent Load)

3.7 การวิเคราะห์สหสัมพันธ์ระหว่างตัวแปร (Correlation Heatmap)

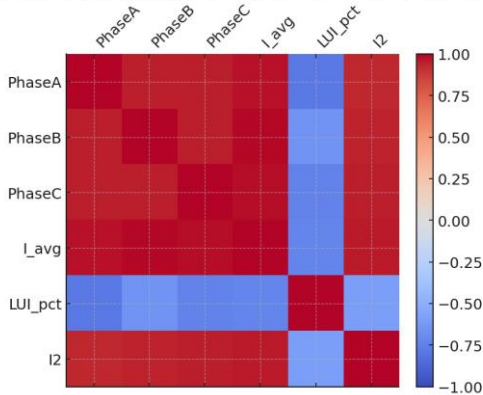
จัดทำ heatmap แสดงค่าสหสัมพันธ์แบบเพียร์สัน (Pearson's r) ระหว่างตัวแปรหลัก ได้แก่ กระแสแต่ละเฟส, ดัชนีความไม่สมดุลโหลด (LUI) และดัชนีความเสียหายเชิงพลังงาน (I²) เพื่อวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างความไม่สมดุลและการสะสมพลังงานในระบบ ช่วยในการระบุปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อความเสี่ยงต่อสายเมน



รูปที่ 7 การกระจายความถี่ของกระแสไฟฟ้าเฉลี่ยรายวัน (Phase A/B/C)



Correlation Matrix (Phase Currents & Derived Metrics)



รูปที่ 8 เมทริกซ์ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างพารามิเตอร์ไฟฟ้า

จากกราฟรูปที่ 8 พบว่า ความสัมพันธ์ระหว่าง LUI และ I^2 สูงมาก ($r = 0.89$) และ Phase B มีความสัมพันธ์กับ I^2 สูงสุด ($r = 0.91$) ยืนยันว่าเฟสนี้มีบทบาทหลักในการควบคุมพลวัตของระบบและเป็นจุดกำเนิดของความเสียหายสะสม (Cumulative Damage Zone)

3.8 การแยกองค์ประกอบเชิงเวลา (STL Decomposition)

การวิเคราะห์ STL แยกข้อมูลกระแสเฉลี่ยรายวัน (I_{avg}) ออกเป็นสามองค์ประกอบ ได้แก่ Trend แนวโน้มการเปลี่ยนแปลงระยะยาว Seasonal รูปแบบซ้ำรายสัปดาห์ Residual ส่วนที่เหลือจากการลบ Trend และ Seasonal การวิเคราะห์นี้ใช้เพื่อแยกสัญญาณพื้นฐานของการเปลี่ยนแปลงโหลดออกจากความผันผวนระยะสั้น

จากกราฟรูปที่ 9 พบว่า การแยกสัญญาณกระแสเฉลี่ยรายวันของ Phase B ออกเป็น 3 ส่วน ได้แก่ (1) Trend แนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง (+0.019 A/day)

ตารางที่ 7 องค์ประกอบการแยก STL (ตัวอย่าง Phase B)

Component	Mean (A)	Std Dev (A)	Seasonal Amplitude	Trend Slope
Trend	7.05	0.82	-	+0.019
Seasonal	0.00	0.47	0.94	-
Residual	0.00	0.29	-	-

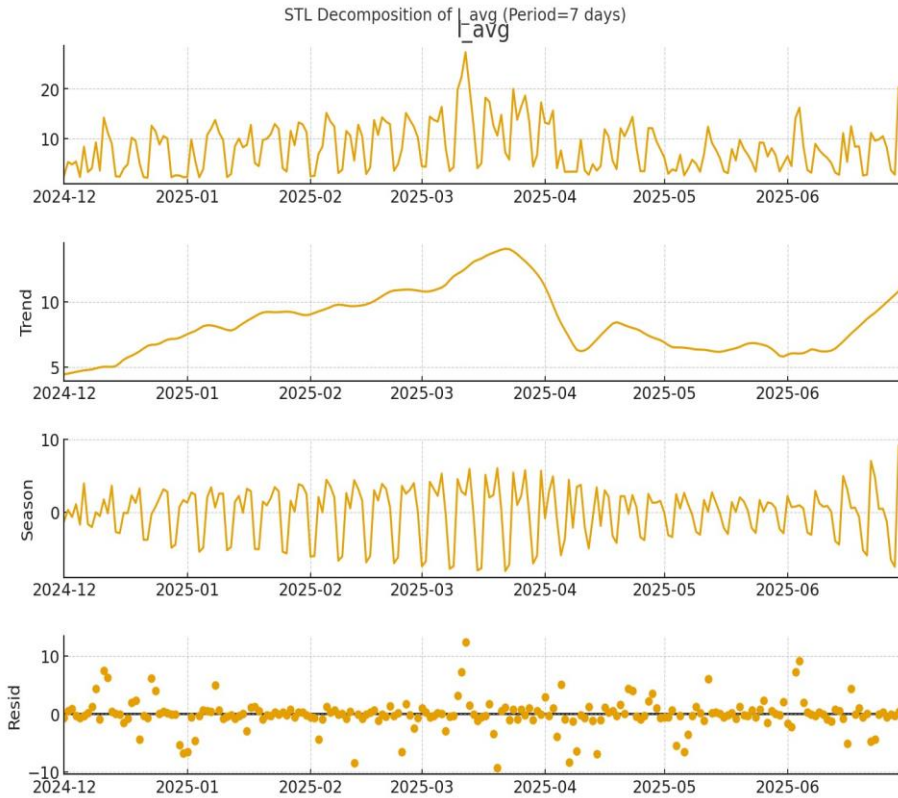
สะท้อนการสะสมโหลดระยะยาว (2) Seasonal การแกว่งซ้ำรายสัปดาห์ (Amplitude ≈ 0.94 A) จากพฤติกรรมการใช้งานในวันทำงาน (3) Residual สัญญาณสั้น (Spike) ที่เกิดเป็นช่วง ๆ สอดคล้องกับเหตุการณ์ผิดปกติ (Anomaly) รูปแบบดังกล่าวชี้ให้เห็นกระบวนการเกิด Thermal Accumulation และ Repetitive Stress ซึ่งสัมพันธ์โดยตรงกับการเริ่มเกิด Micro-crack ภายในโครงสร้าง XLPE

3.9 การตรวจจับจุดเปลี่ยนเชิงพลวัต (Change-Point Detection)

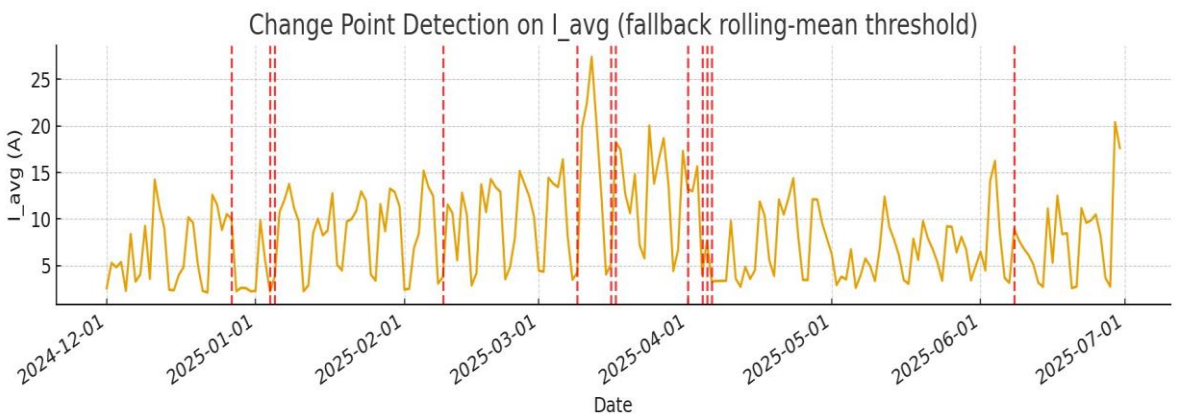
ใช้เทคนิค Rolling Mean Threshold เพื่อตรวจจับจุดที่ค่าเฉลี่ยของกระแสเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญ โดยกำหนดเกณฑ์การเปลี่ยนแปลงที่ชัดเจนสำหรับแต่ละเฟส จุดเปลี่ยนเหล่านี้ช่วยระบุช่วงเวลาที่มีแนวโน้มการเพิ่มขึ้นหรือลดลงอย่างรวดเร็ว ซึ่งมีผลต่อความเสถียรและความปลอดภัยของระบบไฟฟ้า

ตารางที่ 8 สรุปผลการตรวจจับ Change-Point

CP	Date	Before (A)	After (A)	Δ (%)	Note
1	2025-01-08	6.82	7.48	+9.7	Equip.
2	2025-03-17	7.41	6.95	-6.2	Load ↓
3	2025-05-09	7.02	7.57	+7.8	Peak ↑



รูปที่ 9 การวิเคราะห์แยกส่วนประกอบอนุกรมเวลา (STL) ของกระแสเฉลี่ย



รูปที่ 10 การตรวจจับการเปลี่ยนแปลงอย่างกะทันหันในกระแสไฟฟ้า



จากกราฟรูปที่ 10 พบว่า การตรวจจับจุดเปลี่ยนแปลง (Change-Point, CP) ของค่าเฉลี่ยกระแสไฟฟ้าโดยใช้วิธี Rolling Mean Threshold พบจุดเปลี่ยนสำคัญ 3 ช่วง ได้แก่ CP1 (8 มกราคม 2568) กระแสเพิ่มขึ้น +9.7% สะท้อนการเพิ่มโหลดจากอุปกรณ์ใหม่ (Load Surge) CP2 (17 มีนาคม 2568) กระแสลดลง -6.2% เนื่องจากภาระบางส่วนหยุดใช้งาน (Load Reduction) CP3 (9 พฤษภาคม 2568) กระแสเพิ่มขึ้นอีกครั้ง +7.8% (Peak Seasonal Load) ช่วง CP1 สอดคล้องกับการที่แบบจำลอง LSTM ทำนายความน่าจะเป็นการเกิด Micro-crack ($P_{\text{micro}}(t) > 0.75$) จึงถือเป็นช่วงเสี่ยงสูงสุดต่อการเสื่อมของฉนวน

4. บทสรุป

งานวิจัยนี้แสดงให้เห็นว่าการวิเคราะห์ข้อมูลกระแสไฟฟ้าสามเฟสแบบเรียลไทม์สามารถใช้เป็นตัวชี้วัดเชิงคาดการณ์สำหรับการเกิดไมโครแครกและการเสื่อมสภาพของฉนวนสายเมนหลักชนิด XLPE ได้อย่างมีประสิทธิภาพ จากข้อมูลที่เก็บด้วยระบบ IoT Monitoring ต่อเนื่องเป็นระยะเวลากว่า 7 เดือนรวมมากกว่า 60,000 จุดข้อมูล พบว่าเฟส B มีภาระกระแสเฉลี่ยสูงสุด ($7.41 \pm 2.28A$) และมีค่าส่วนเบี่ยงเบนสูงกว่าเฟสอื่นประมาณ 18% ส่งผลให้ดัชนีความไม่สมดุลโหลด (LUI) เพิ่มขึ้นจาก 8.45% ในเดือนธันวาคม 2567 เป็น 13.05% ในเดือนกุมภาพันธ์ 2568 และค่าพลังงานความร้อนสะสม (I^2 cumulative) เพิ่มขึ้นกว่า 104% ($r = 0.89$)

ทั้งนี้ งานวิจัยไม่ได้มุ่งเสนอให้คงไว้ซึ่งสภาวะโหลดไม่สมดุล แต่ใช้เป็นกรณีศึกษาเชิงสังเกตการณ์เพื่อแสดงบทบาทของระบบตรวจวัดแบบเรียลไทม์ในการเฝ้าระวังและเตือนล่วงหน้า โดยการวิเคราะห์จุด

เปลี่ยนเชิงเวลา (Change-Point Analysis) พบช่วงสำคัญในวันที่ 8 มกราคม 2568 ซึ่งกระแสของเฟส B เพิ่มขึ้น 9.7% สอดคล้องกับช่วงที่แบบจำลอง LSTM ทำนายความน่าจะเป็นการเกิดไมโครแครกสูงกว่า 0.75 ผลลัพธ์ดังกล่าวยืนยันว่าการบูรณาการดัชนี LUI และพลังงานความร้อน I^2 เข้ากับแบบจำลองปัญญาประดิษฐ์สามารถตรวจจับสัญญาณการเสื่อมสภาพได้ล่วงหน้า และสนับสนุนการตัดสินใจเชิงวิศวกรรม ข้อเสนอแนะเชิงปฏิบัติ ได้แก่ (1) ควรปรับสมดุลโหลด (Re-balancing load) เพื่อลดค่า LUI ให้ต่ำกว่า 10% (2) เลือกใช้สายตัวนำที่มีสมบัติการระบายความร้อนที่เหมาะสม (3) ติดตั้งระบบตรวจจับ Partial Discharge และอุณหภูมิแบบ IoT และ (4) ใช้แบบจำลองการทำนายเพื่อวางแผนบำรุงรักษาเชิงคาดการณ์ ซึ่งจะช่วยลดความเสี่ยงการล้มเหลว เพิ่มความเชื่อถือได้ และยืดอายุการใช้งานของสายเมน XLPE ในอาคารเรียนอย่างยั่งยืน

5. กิตติกรรมประกาศ

คณะกรรมการผู้วิจัยขอขอบคุณวิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรมและการจัดการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย สำหรับการสนับสนุนทุนวิจัยและอนุญาตให้ใช้พื้นที่และอุปกรณ์ ขอขอบคุณทีมงานวิจัยคณาจารย์ บุคลากร และครอบครัวที่ให้คำแนะนำและกำลังใจตลอดกระบวนการวิจัย

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] A. Ansari, S.Y. Nia, A. Afshari and S. Mishra, Estimating the insulation health index of XLPE cables using machine learning, Scientific Reports, 2025, 15, 41230,



- [2] X. Dai, J. Hao, M. El Moursi, R. Chen, R. Liao and C.L. Bak, Dielectric mechanisms and health state estimation for high-voltage XLPE cable insulation under nonuniform thermal aging, *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 2025, 32(5), 2868-2876.
- [3] G. He, W. Zhang, K. Sun, J. Qi, J. Zhao, J. Han and X. Zhu, The impact of XLPE surface defects on electric field and breakdown voltage, *Frontiers in Energy Research*, 2024, 12, 1476046.
- [4] Y. Li, Z. Peng, D. Xu, S. Huang, Y. Gao and Y. Li, Research on the thermal aging characteristics of crosslinked polyethylene cables based on polarization and depolarization current measurement, *Energies*, 2024, 17(10), 2274,
- [5] J. Tao, S.U. Rehman, R. Ali and S.A. Raza, Advancement and challenges: A review of power cable aging monitoring and diagnostic techniques, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2025, 222, 115970.
- [6] L. Zou, Z. Liu, Z. Han, S. Han, G. Li and Q. Liu, Aging mechanisms and performance degradation of XLPE submarine cable insulation under marine major anion effects, *Polymers*, 2025, 17(18), 2450.
- [7] IEEE Standard 400-2023, *IEEE Guide for Field Testing and Evaluation of the Insulation of Shielded Power Cable Systems*, 2012.
- [8] A.A. Yurov, I.N. Zubkov, A.V. Lukonin, O.Y. Kaun, A.E. Bogachev and V.A. Klushin, XLPE and beyond: A review of recent progress in polymer nanocomposites for dielectric insulation in high-voltage cables, *Materials*, 2025, 18(24), 5553.
- [9] J. Yang, R. Li, L. Hu and W. Wang, Influence of thermal aging on space charge characteristics and electrical conduction behavior of cross-linked polyethylene cable insulation, *Polymers*, 2024, 16(11), 1600.
- [10] Y. Wang, M. Zhou, R. Chen, Q. Meng and P. Li, Research progress in aging state assessment of high-voltage XLPE power cables insulation, *The 5th Management Science Informatization and Economic Innovation Development Conference (MSIEID 2023)*, *Proceeding*, 2024, 128–136.
- [11] F. Wang, Z. Tang, Z. Song, E. Zhou, M. Li and X. Zhang, Insulation condition assessment of high-voltage single-core cables via zero-crossing frequency analysis of impedance phase angle, *Energies*, 2025, 18(15), 3985.
- [12] IEC 61000-4-30, *Electromagnetic Compatibility (EMC) – Part 4-30: Testing and Measurement Techniques – Power Quality Measurement Methods*, 2022.



การศึกษาความเป็นไปได้ทางเทคนิค เศรษฐศาสตร์ และสิ่งแวดล้อมของกระบวนการผลิตดีเซลสังเคราะห์จากก๊าซธรรมชาติตลอดวัฏจักรชีวิต

ปิ่นนรี เกาะสมัน¹ ปวีณา ประไพหยง¹ ชัยวัฒน์ ประไพหยง² สุวิมล วงศ์สกุลเกส²
วิภาดา วราร์บัตูวิทย์¹ และ กานติส สุตสาคร^{1*}

¹ ภาควิชาวิศวกรรมเคมี, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

² ภาควิชาวิศวกรรมเคมี, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

* ผู้ประสานงานเผยแพร่ (Corresponding Author), E-mail: fengkdsk@ku.ac.th

วันที่รับบทความ: 30 สิงหาคม 2568; วันที่ทบทวนบทความ: 24 มีนาคม 2569; วันที่ตอบรับบทความ: 30 มีนาคม 2569

วันที่เผยแพร่ออนไลน์: 21 เมษายน 2569

บทคัดย่อ: งานวิจัยนี้ศึกษาความเป็นไปได้ทางเทคนิค เศรษฐศาสตร์ และสิ่งแวดล้อมของการผลิตดีเซลสังเคราะห์ 2,500 bb/d โดยใช้กระบวนการออโตเทอร์มัลรีฟอร์มมิงควบคู่กับฟิชเชอร์-โทรปส์ โดยเปรียบเทียบสองแนวทางการจัดการพลังงาน (1) ปลดปล่อยพลังงานส่วนเกินทิ้ง และ (2) นำพลังงานส่วนเกินกลับมาใช้ ผลการวิเคราะห์พบว่ากรณีที่ 2 ลดการใช้ทรัพยากรอย่างมีนัยสำคัญ ได้แก่ น้ำหล่อเย็น 8,948,042 kg/d ความร้อน 2,241 MMBtu/d และไฟฟ้า 784,662 kWh/d เมื่อเทียบกับกรณีแรก ซึ่งต้องพึ่งพาพลังงานภายนอกสูงกว่า นอกจากนี้ กรณีที่สองให้ผลตอบแทนทางเศรษฐศาสตร์สูงกว่า โดยมี ROI 13.66%, IRR 13.81% ต่อปี, NPV 65 ล้านดอลลาร์สหรัฐ และระยะคืนทุนสั้นกว่าที่ 6 ปี 10 เดือน การจัดการพลังงานอย่างมีประสิทธิภาพยังช่วยลดผลกระทบสิ่งแวดล้อม เช่น ความเป็นพิษต่อมนุษย์ ความขาดแคลนทรัพยากรฟอสซิล และภาวะโลกร้อน งานวิจัยนี้ชี้ให้เห็นถึงศักยภาพของการพัฒนากระบวนการผลิตเชื้อเพลิงสะอาด เพื่อสนับสนุนเป้าหมายพลังงานยั่งยืนและลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกของประเทศไทย

คำสำคัญ: ฟิชเชอร์-โทรปส์; ก๊าซสังเคราะห์; ดีเซลสังเคราะห์; การประเมินวัฏจักรชีวิต; การประเมินเทคโนโลยีเศรษฐกิจ

Feasibility Study on Technical, Economic, and Environmental Aspects of Synthetic Diesel Production from Natural Gas throughout Its Life Cycle

Pinnaree Kohsaman¹, Paweena Prapainainar¹, Chaiwat Prapainainar²,
Suwimol Wongsakulphasatch², Viganda Varabuntoonvit¹ and Kandis Sudsakorn^{1*}

¹ Department of Chemical Engineering, Faculty of Engineering, Kasetsart University

² Department of Chemical Engineering, Faculty of Engineering,
King Mongkut's University of Technology North Bangkok

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

Received: 30 August 2025; Revised: 24 March 2026; Accepted: 30 March 2026

Online Published: 21 April 2026

Abstract: This study evaluates the technical, economic, and environmental feasibility of producing 2,500 bbl/d of synthetic diesel from natural gas via autothermal reforming coupled with the Fischer–Tropsch process. Two energy management approaches were compared: (1) releasing excess energy and (2) recovering excess energy for reuse. Results show that the second strategy significantly reduces resource consumption, including cooling water (8,948,042 kg/d), heat (2,241 MMBtu/d), and electricity (784,662 kWh/d), compared with the first strategy, which relies heavily on external energy. Moreover, the recovery strategy delivers superior economic performance, with a ROI of 13.66%, IRR of 13.81% per year, NPV of USD 65 million, and a payback period of 6 years and 10 months. Efficient energy management also mitigates environmental impacts, particularly human toxicity, fossil resource scarcity, and global warming. The study highlights the potential of clean fuel production processes to support sustainable energy goals and reduce greenhouse gas emissions in Thailand.

Keywords: Fischer-Tropsch; Syngas; Synthesis diesel; Life cycle assessment; Techno-economic analysis



1. บทนำ

ประเทศไทยมีทรัพยากรก๊าซธรรมชาติทั้งแหล่งบนบกและในทะเล รวมถึงมีการนำเข้าก๊าซธรรมชาติเหลว (LNG) เพื่อส่งเสริมความมั่นคงด้านพลังงาน ทรัพยากรเหล่านี้ถือเป็นฐานสำคัญในการส่งเสริมการพัฒนาอุตสาหกรรมและเศรษฐกิจของประเทศ หนึ่งในแนวทางที่ได้รับความนิยมคือการแปรรูปก๊าซธรรมชาติเป็นก๊าซสังเคราะห์ (Syngas) และเข้าสู่กระบวนการ FT (Fischer-Tropsch) เพื่อผลิตดีเซลสังเคราะห์ที่ปราศจากซัลเฟอร์และสารประกอบอะโรมาติกส์ ซึ่งช่วยลดมลพิษจากการเผาไหม้เมื่อเทียบกับดีเซลจากการกลั่นน้ำมันดิบ กระบวนการ Gas to Liquid (GTL) เป็นเทคโนโลยีในการแปรรูปก๊าซธรรมชาติให้เป็นเชื้อเพลิงเหลวที่ได้รับการพัฒนาและใช้จริงในระดับอุตสาหกรรม ตัวอย่างเชิงพาณิชย์ที่สำคัญคือโรงงาน Shell Middle Distillate Synthesis (SMDS) ประเทศมาเลเซีย ซึ่งดำเนินการมากกว่า 30 ปี ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีปริมาณกำมะถันต่ำ ปราศจากกลิ่นและอะโรมาติกส์ มีค่าออกเทนและซีเทนสูง ทำให้ปล่อยมลพิษต่ำกว่าเชื้อเพลิงจากการกลั่นปิโตรเลียม

การผลิตก๊าซสังเคราะห์จากก๊าซธรรมชาติสามารถดำเนินการได้หลายวิธี แต่กระบวนการ ATR (Autothermal Reforming) มีข้อได้เปรียบจากการผสมข้อดีของกระบวนการ SR (Steam Reforming) ซึ่งสามารถผลิตก๊าซไฮโดรเจนและกระบวนการ PO (Partial Oxidation) ทำให้กระบวนการสามารถสร้างความร้อนได้เองจึงช่วยลดความต้องการพลังงานจากภายนอกได้ นอกจากนี้ยังสามารถผลิตก๊าซสังเคราะห์ที่มีอัตราส่วนโดยโมล H_2/CO ใกล้เคียง 2:1 ซึ่งเหมาะสมสำหรับการนำไปใช้ในกระบวนการ FT

โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา Co/Al_2O_3 เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการผลิต

การศึกษากระบวนการ FT ได้รับความสนใจและมีการศึกษาอย่างแพร่หลายในระดับสากล ตัวอย่างเช่น Choi et al. [1] จำลองโรงงานต้นแบบสำหรับผลิตเชื้อเพลิงเหลวผ่านกระบวนการ ATR และ FT ร่วมกับการผลิตไฟฟ้า โดยมีอัตราส่วนโดยโมล H_2/CO เท่ากับ 2 กำลังการผลิตดีเซล 5,736 bbl/d และผลิตไฟฟ้าได้ 84.1 MW จากการใช้ก๊าซธรรมชาติ 2,831,680 m^3/d ต้นทุนการลงทุนรวมประมาณ \$415,000,000 ผลการวิเคราะห์เศรษฐศาสตร์ พบว่าความคุ้มค่าของโครงการขึ้นอยู่กับราคาวัตถุดิบก๊าซธรรมชาติและราคาขายไฟฟ้าเป็นหลัก โดยในกรณีราคาก๊าซ \$0.50/MMBtu และราคาขายไฟฟ้า 3 ϕ/kWh Er-rbib et al. [2] ศึกษากระบวนการผลิตเชื้อเพลิงสังเคราะห์ FT จากก๊าซธรรมชาติผ่านกระบวนการ DR (Dry Reforming) และ SR ควบคู่กับกระบวนการ FT โดยใช้ก๊าซธรรมชาติ 2,433 ton/d ผลิตเชื้อเพลิง ได้แก่ ดีเซลได้ 1,610 ton/d (ประมาณ 11,900 bbl/d), ก๊าซโซลีน 609 ton/d (ประมาณ 4,500 bbl/d), ก๊าซปิโตรเลียมเหลว 7.2 ton/d (ประมาณ 82 bbl/d) Sudiro and Bertucco [3] จำลองและวิเคราะห์กระบวนการผลิตเชื้อเพลิงเหลวสังเคราะห์ 3 รูปแบบ ได้แก่ กระบวนการแปรสภาพก๊าซธรรมชาติเป็นของเหลว (GTL), กระบวนการแปรสภาพถ่านหินเป็นของเหลว (CTL) และกระบวนการแบบผสม (Hybrid Process) โดยใช้วัตถุดิบคือก๊าซธรรมชาติและถ่านหิน เพื่อผลิตเชื้อเพลิง 100 ตันต่อชั่วโมง ผลการจำลองพบว่า GTL ให้ผลิตภัณฑ์ 66.7 wt%, CTL 32.5 wt% และกระบวนการแบบผสม



44.4 wt% โดยมีการปล่อย CO_2 เท่ากับ 0.63, 4.66 และ 2.45 kg/kg ของเชื้อเพลิง ตามลำดับ การวิเคราะห์พลังงานความร้อนของกระบวนการแบบผสมพบว่าสามารถผลิตไอน้ำและไฟฟ้าที่ใช้ในกระบวนการได้ทั้งหมด โดยมีไฟฟ้าส่วนเกิน 18.9 MW และประสิทธิภาพเชิงความร้อน (Thermal Efficiency) อยู่ที่ 54.2% หรือ 56.4% หากรวมไฟฟ้าส่วนเกินที่ผลิตได้ Katiyo et al. [4] ศึกษาการผลิตเชื้อเพลิงเหลวจากก๊าซชีวภาพที่ได้จากน้ำเสียชุมชนผ่านกระบวนการ FT กำลังการผลิตดีเซล 320,000 L/d (ประมาณ 2,013 bbl/d) โดยจำลองกระบวนการด้วยโปรแกรม Aspen Plus ผลการวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์ พบว่ามีอัตราผลตอบแทน ROI สูงถึง 20% และสามารถคืนทุนได้ภายในระยะเวลา 5 ปี Campanario and Gutiérrez Ortiz [5] ศึกษากระบวนการผลิตเชื้อเพลิงสังเคราะห์ผ่านกระบวนการ SCWR (Supercritical Water Reforming) ร่วมกับกระบวนการ FT โดยใช้เฟสที่ละลายน้ำได้ที่แยกได้จากไบโอยล์ (Bio-Oil Aqueous Phase) ซึ่งเป็นผลพลอยได้จากกระบวนการไพโรไลซิสของชีวมวล เป็นวัตถุดิบในการผลิตก๊าซสังเคราะห์ ในงานวิจัยนี้กำหนดให้วัตถุดิบมีองค์ประกอบของสารอินทรีย์ละลายน้ำได้ 35wt และน้ำ 65% wt โดยทำปฏิกิริยาที่ 220 °C, 40bar, $\text{H}_2/\text{CO} = 1.70$ อัตราป้อนเข้าวัตถุดิบ 60 ton/hr ผลลัพธ์จากกระบวนการผลิตเชื้อเพลิงรวมได้ 887 bbl/d (ดีเซล 536 bbl/d, น้ำมันอากาศยาน 290 bbl/d, ก๊าซโซลีน 61 bbl/d) โดยคาร์บอนจากวัตถุดิบจะถูกแปรรูปเป็นเชื้อเพลิงชีวภาพได้ประมาณ 4.6 ton/hr และสามารถผลิตไฟฟ้าได้ 5.3 MW โดยมีปริมาณ

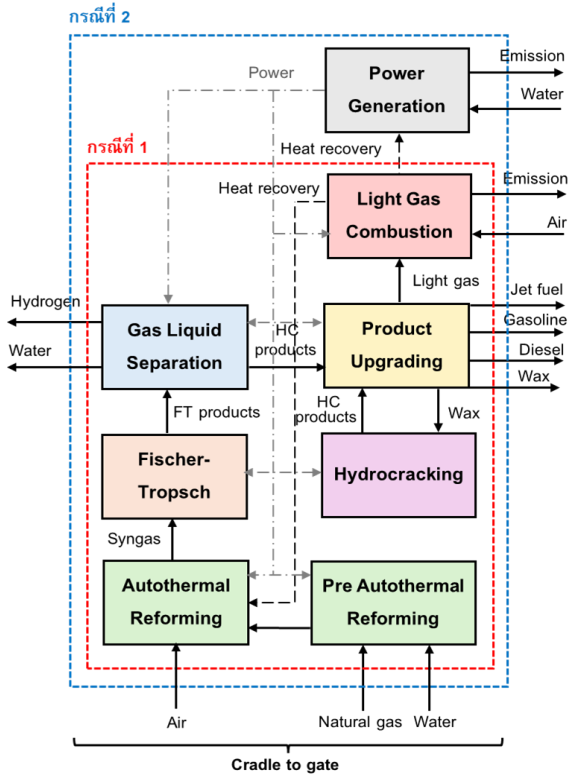
CO_2 ที่การกักเก็บเท่ากับ 0.5 kg/ kg ของสารอินทรีย์ที่ป้อนเข้า

จากการทบทวนงานวิจัยที่ผ่านมา พบว่า ยังขาดการศึกษาที่พิจารณาบทบาทของการบูรณาการพลังงาน (Energy Integration) และการนำพลังงานความร้อนส่วนเกินกลับมาใช้ใหม่ต่อต้นทุนการดำเนินงานและผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมภายใต้บริบทของประเทศไทย ซึ่งมีความพร้อมด้านทรัพยากรก๊าซธรรมชาติและโครงสร้างพื้นฐานด้าน LNG ที่เอื้อต่อการพัฒนาเทคโนโลยี GTL ในระดับอุตสาหกรรม ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงมุ่งศึกษาความเป็นไปได้เชิงเทคนิคและเศรษฐศาสตร์ (TEA) ควบคู่กับการวิเคราะห์ผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมตลอดวัฏจักรชีวิต (LCA) ในระดับขั้นกลาง (Midpoint Impact) ของกระบวนการผลิตดีเซลสังเคราะห์จากก๊าซธรรมชาติ โดยเปรียบเทียบกรณีที่มีการจัดการพลังงานส่วนเกิน และกรณีที่ไม่มีการจัดการพลังงานส่วนเกิน เพื่อสนับสนุนการตัดสินใจเชิงนโยบายและการพัฒนาเทคโนโลยีในระดับอุตสาหกรรม

2. วิธีการดำเนินงาน

2.1 สร้างแบบจำลองของกระบวนการผลิตเชื้อเพลิงดีเซลสังเคราะห์

กระบวนการผลิตเชื้อเพลิงดีเซลสังเคราะห์ได้รับการออกแบบและจำลองด้วยโปรแกรม Aspen Plus Version 12 โดยใช้แบบจำลองทางอุณหพลศาสตร์ Peng–Robinson Equation of State (PENG-ROB) เพื่อคำนวณสมมูลเฟสของก๊าซสังเคราะห์และไฮโดรคาร์บอนภายใต้สภาวะแรงดันสูง ดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 Block Flow Diagram ของ การผลิตเชื้อเพลิงดีเซลสังเคราะห์

กระบวนการเริ่มต้นจากการอัดก๊าซธรรมชาติและน้ำด้วยคอมเพรสเซอร์และบีบตามลำดับ จากนั้นปรับอุณหภูมิผ่านเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนก่อนเข้าสู่เครื่องปฏิกรณ์ Pre-ATR ผลิตภัณฑ์ที่ได้จาก Pre-ATR จะถูกรวมกับอากาศที่อัดแรงดันจนเหมาะสม และส่งเข้าสู่เครื่องปฏิกรณ์ ATR เพื่อผลิตก๊าซสังเคราะห์ที่สำหรับนำไปเป็นสารตั้งต้นในกระบวนการ FT ซึ่งประกอบด้วย 4 กระบวนการย่อย ได้แก่ (1) กระบวนการ FT เพื่อเปลี่ยนก๊าซสังเคราะห์ให้เป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอน

(2) กระบวนการแยกก๊าซเบาและน้ำ โดยใช้เครื่องแยก 3 สถานะเพื่อเพิ่มความบริสุทธิ์ของผลิตภัณฑ์ (3) กระบวนการปรับปรุงคุณภาพผลิตภัณฑ์ (4) กระบวนการ HC เพื่อเปลี่ยนแวกซ์ให้กลายเป็นดีเซลผ่านเครื่องปฏิกรณ์ HC งานวิจัยนี้ออกแบบจำลองกำลังการผลิตเชื้อเพลิงดีเซลสังเคราะห์กำลังการผลิต 2,500 bbl/d ภายใต้สมมติฐานดังแสดงในตารางที่ 1 โดยออกแบบให้มีการเผาไหม้ที่เกิดขึ้นจากกระบวนการผลิตแทนการปล่อยทิ้งโดยตรงเพื่อลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมทำให้มีพลังงานความร้อนส่วนหนึ่งที่เหลือจากกระบวนการ นอกจากนี้ ยังมีพลังงานความร้อนจากการลดอุณหภูมิของก๊าซสังเคราะห์ที่จากกระบวนการ ATR และกระบวนการ FT จึงออกแบบให้มีการนำพลังงานความร้อนส่วนเกินนี้กลับมาภายในกระบวนการทดแทนการใช้พลังงานจากแหล่งภายนอก

ตารางที่ 1 สมมติฐานในการออกแบบจำลองกระบวนการ

เครื่องปฏิกรณ์	ประเภทแบบจำลอง	สภาวะดำเนินการ	ตัวเร่งปฏิกิริยา
- Pre-ATR [8]	RGibbs	500°C 25 bar	Ni/Al ₂ O ₃
- ATR [8]	RGibbs	1,000°C 25 bar	Ni/Al ₂ O ₃
- FT [5] ($\alpha = 0.9$)	RStoic	220 °C 20 bar	Co ₃ O ₄ / Al ₂ O ₃
- HC [5]	RStoic	360 °C 35 bar	Pt/SiO ₂ - Al ₂ O ₃



ค่า α (Chain Growth Probability) กำหนดไว้ที่ 0.9 เนื่องจากเป็นช่วงจำนวนคาร์บอนที่เหมาะสมสำหรับผลิตภัณฑ์ดีเซลช่วง C₁₄-C₂₀ ในงานวิจัยนี้ และได้กำหนดให้มีค่าการสูญเสียน้ำหล่อเย็นอยู่ที่ 3% ของปริมาณน้ำหมุนเวียน การสูญเสียน้ำหล่อเย็นดังกล่าวอาจเกิดจากการระเหย หรือการระบายทิ้งเพื่อลดการสะสมของแร่ธาตุและสารเคมีในระบบซึ่งจำเป็นต้องเติมน้ำใหม่อย่างต่อเนื่องเพื่อรักษาระดับน้ำและประสิทธิภาพการแลกเปลี่ยนความร้อน

2.2 สมมติฐานของการประเมินทางเศรษฐศาสตร์

พิจารณาภายใต้สมมติฐานโรงงานจะดำเนินงานต่อเนื่องตลอด 24 ชั่วโมงต่อวัน เป็นเวลา 330 วัน ตลอดอายุโครงการ 20 ปี กำหนดอัตราผลตอบแทนขั้นต่ำที่ยอมรับได้ (MARR) ไว้ที่ 10% ต่อปี ใช้สำหรับคำนวณมูลค่าปัจจุบัน ภายใต้อัตราภาษีเงินได้นิติบุคคล 20% และมูลค่าซากโรงงานเมื่อสิ้นสุดโครงการเท่ากับ 10% ของเงินลงทุนในสินทรัพย์ถาวร (FCI) ตัวเร่งปฏิกิริยาจะถูกเปลี่ยนทุก 5 ปี ภาษีที่ดินและสิ่งปลูกสร้าง 0.7% ของเงินลงทุนในสินทรัพย์ถาวรเนื่องจากไม่พิจารณาต้นทุนในการจัดซื้อที่ดิน และใช้อัตราการแลกเปลี่ยน 34.09 บาทต่อดอลลาร์สหรัฐ อ้างอิงจากธนาคารแห่งประเทศไทย เดือนธันวาคม พ.ศ. 2567 ซึ่งรายละเอียดราคาวัตถุดิบค่าสาธารณูปโภค และราคาผลิตภัณฑ์ที่ใช้ในการวิเคราะห์แสดงไว้ในตารางที่ 2 ทั้งนี้ ได้ดำเนินการวิเคราะห์ความคุ้มค่าทางการเงินของโครงการโดยคำนวณมูลค่าปัจจุบันสุทธิ (NPV) อัตราผลตอบแทนภายใน (IRR) อัตราผลตอบแทนจากการลงทุน (ROI) และระยะเวลาคืนทุน (Payback Period) เพื่อประเมินศักยภาพและความเหมาะสมของการลงทุนภายใต้สมมติฐานที่กำหนด

ตารางที่ 2 รายละเอียดราคาต้นทุนวัตถุดิบ ตัวเร่งปฏิกิริยา สาธารณูปโภค และราคาขายผลิตภัณฑ์

ประเภท	รายการ	ราคาต่อหน่วย
วัตถุดิบ	ก๊าซธรรมชาติ	\$0.575/kg
	น้ำ DI	\$0.011/kg
ตัวเร่ง	นิกเกิล	\$35.360/kg
	โคบอลต์	\$56.290/kg
ปฏิกิริยา	แพลทินัม	\$35.360/kg
	น้ำหล่อเย็น	\$0.00001/kg
สาธารณูปโภค	ไฟฟ้า	\$0.091/kW
	ไฮโดรเจน	\$2.700/kg
ราคาขาย	ก๊าซโซลีน	\$1.310/L
	ดีเซล	\$0.970/L
	น้ำมันอากาศยาน	\$0.550/L
	แก๊ซ	\$1.060/L

2.2.1 การปันส่วนทางเศรษฐศาสตร์ (Economic Allocation)

งานวิจัยนี้ใช้วิธีการปันส่วนต้นทุนตามมูลค่าทางเศรษฐกิจหรือมูลค่ายอดขายของผลิตภัณฑ์เป็นเกณฑ์ในการจัดสรร เนื่องจากกระบวนการผลิตให้ผลิตภัณฑ์หลายประเภท ดังนั้น ผลิตภัณฑ์ที่มีมูลค่าสูงจึงถูกจัดสรรภาระผลกระทบในสัดส่วนที่สูงกว่าผลิตภัณฑ์ที่มีมูลค่าต่ำ [6]

2.3 การประเมินวัฏจักรชีวิต

2.3.1 กำหนดเป้าหมายและขอบเขต

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อประเมิน TEA และ LCA ในระดับขั้นกลาง (Midpoint Impact) ของกระบวนการผลิตดีเซลสังเคราะห์จากก๊าซธรรมชาติ เปรียบเทียบระหว่างกรณีที่มีการจัด



การพลังงานส่วนเกิน และกรณีที่ไม่มีการจัดการพลังงานส่วนเกิน โดยพิจารณาในขอบเขต Cradle to Gate ดังรูปที่ 1 โดยกรณีที่ 1 แสดงด้วยขอบเขตสีแดง และกรณีที่ 2 แสดงด้วยขอบเขตสีน้ำเงิน ซึ่งครอบคลุมตั้งแต่การได้มาของวัตถุดิบไปจนถึงการผลิตเป็นผลิตภัณฑ์ที่พร้อมสำหรับจำหน่าย ภายใต้สมมุติฐานไม่พิจารณาการขนส่งผลิตภัณฑ์

2.3.2 การปันส่วนตามพลังงาน (Energy Allocation)

งานวิจัยนี้ใช้วิธีการปันส่วนตามพลังงาน โดยกำหนดหน่วยหน้าที่ (Functional Unit) เป็น 1 MJ ของดีเซลสังเคราะห์ FT เนื่องจากกระบวนการผลิตเชื้อเพลิงประกอบด้วยทั้งผลิตภัณฑ์หลัก และผลิตภัณฑ์ร่วมอื่น ๆ ที่มีค่าพลังงานความร้อน (Heating Value) และปริมาณแตกต่างกัน และมีวัตถุประสงค์หลักในการนำไปใช้เป็นแหล่งพลังงานผ่านการเผาไหม้ [7]

2.3.3 การจัดทำบัญชีรายการ

รวบรวมข้อมูลและคำนวณหาปริมาณของสารขาเข้าและสารขาออก รวมถึงสารอนุภาคที่ใช้ ซึ่งได้จากการออกแบบและจำลองกระบวนการด้วยโปรแกรม Aspen Plus

2.3.4 การประเมินผลกระทบสิ่งแวดล้อม

ประเมินผลกระทบสิ่งแวดล้อมด้วยโปรแกรม SimaPro Version 9.6.0 โดยใช้ฐานข้อมูล Ecoinvent โดยวิเคราะห์ครอบคลุมหมวดหมู่ของผลกระทบในระดับชั้นกลาง (Midpoint) ตามวิธีการประเมิน ReCiPe 2016 ทั้งนี้ ค่า Emission Factor ของวัตถุดิบและพลังงานที่ใช้ในการประเมิน โดยอ้างอิงฐานข้อมูลจากโปรแกรม SimaPro Version 9.6.0

ดังนี้ 1) ก๊าซธรรมชาติ: Natural Gas, High Pressure {TH}| Market for Natural Gas, High Pressure 2) น้ำ: Water, Deionised {CH}| Market for Water, Deionised 3) ไฟฟ้า: Electricity, High Voltage {TH}| Electricity Production, Natural Gas, Combined Cycle Power Plant 4) ความร้อน: Heat, District or Industrial, Natural Gas {CH}| Market for Heat, District or Industrial, Natural Gas 5) น้ำหล่อเย็น: Water, Complexly Softened {RoW}| Market for Water, Completely Softened

2.3.5 การแปรผลและประเมินผล

วิเคราะห์ข้อมูลจากผลการศึกษาเพื่อนำไปสู่ข้อสรุป และพิจารณาศักยภาพในการปรับปรุงกระบวนการผลิตโดยอิงตามผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมที่ประเมินจากการวิเคราะห์ LCA โดยจะแสดงผลกระทบชั้นกลาง 18 หมวดหมู่

3. ผลการดำเนินงาน

3.1 การจำลองกระบวนการผลิตเชื้อเพลิงดีเซลสังเคราะห์

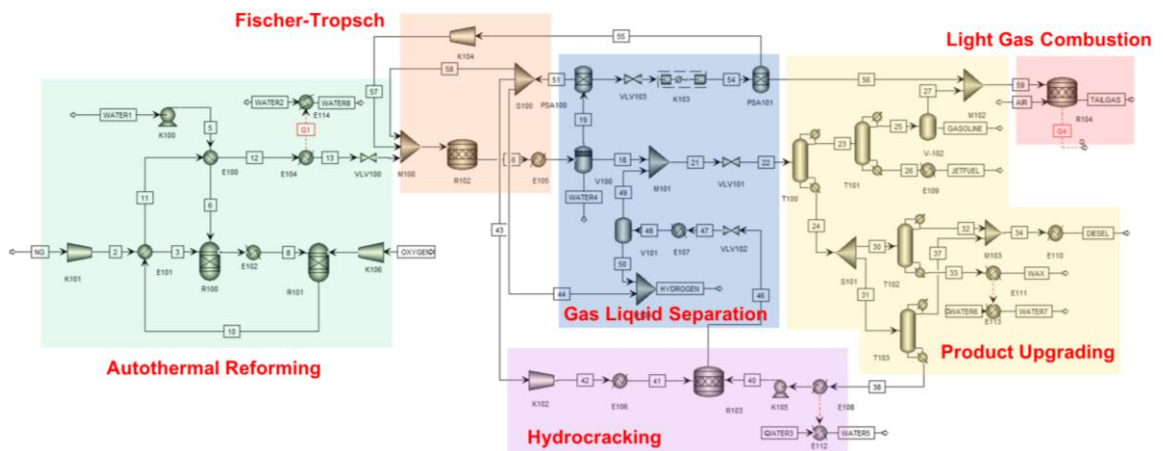
ผลการจำลองกระบวนการผลิตเชื้อเพลิงดีเซลสังเคราะห์ของกรณีศึกษา 1 และ 2 แสดงไว้ในรูปที่ 2 และ 3 ตามลำดับ โดยแบบจำลองได้รับการทดสอบและตรวจสอบความถูกต้อง (Model Validation) โดยกระบวนการ ATR ได้เปรียบเทียบกับองค์ประกอบของก๊าซสังเคราะห์กับงานวิจัย Kenkel et al. [8] พบว่าค่า R^2 เท่ากับ 0.9999 และ CH_4 Conversion เท่ากับ 97% สำหรับกระบวนการ FT ได้เปรียบเทียบการกระจายตัวของผลิตภัณฑ์ไฮโดรคาร์บอนตามจำนวนอะตอมกับข้อมูล



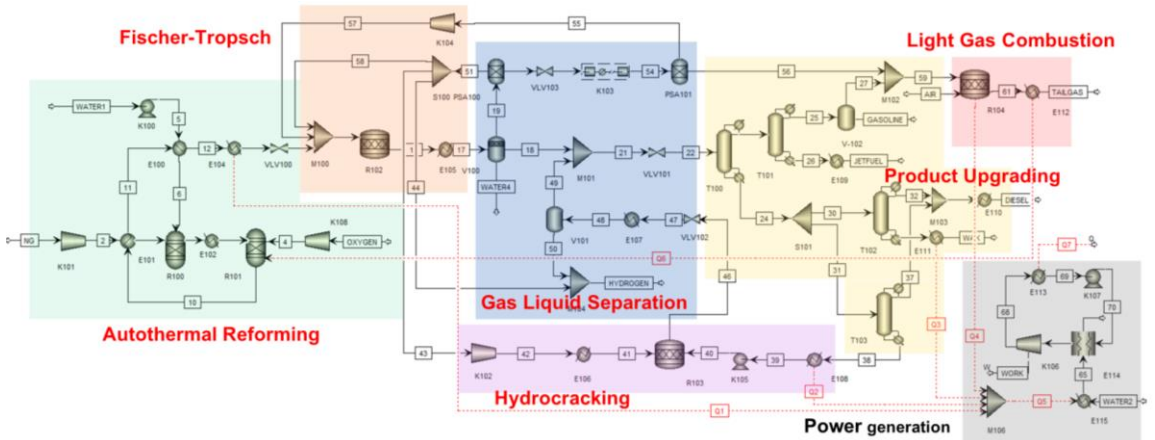
บทความวิจัย

จาก Campanario and Gutiérrez Ortiz [5] พบว่า R² เท่ากับ 0.9870 CO conversion เท่ากับ 50% สำหรับ Single Pass และ 88% สำหรับ Overall Process ซึ่งใกล้เคียงกับรายงาน Campanario and Gutiérrez Ortiz [5] ที่รายงานค่า CO conversion เท่ากับ 87% และข้อมูลจากโรงงานผลิตเชื้อเพลิง FT เซิงพาณิชย์

ของบริษัท Shell ซึ่งมีค่า CO conversion ประมาณ 94% [9] ผลการจำลองแสดงให้เห็นว่าแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นมีความน่าเชื่อถือ นอกจากนี้ กระบวนการยังให้ผลิตภัณฑ์รองที่มีมูลค่า ได้แก่ ก๊าซโซลีน 892 bbl/d น้ำมันอากาศยาน 2,092 bbl/d แวกซ์ 996 bbl/d และก๊าซไฮโดรเจน 69,180 kg/d



รูปที่ 2 Process Flow Diagram ของการผลิตเชื้อเพลิงดีเซลสังเคราะห์ กรณีที่ 1



รูปที่ 3 Process Flow Diagram ของการผลิตเชื้อเพลิงดีเซลสังเคราะห์ กรณีที่ 2



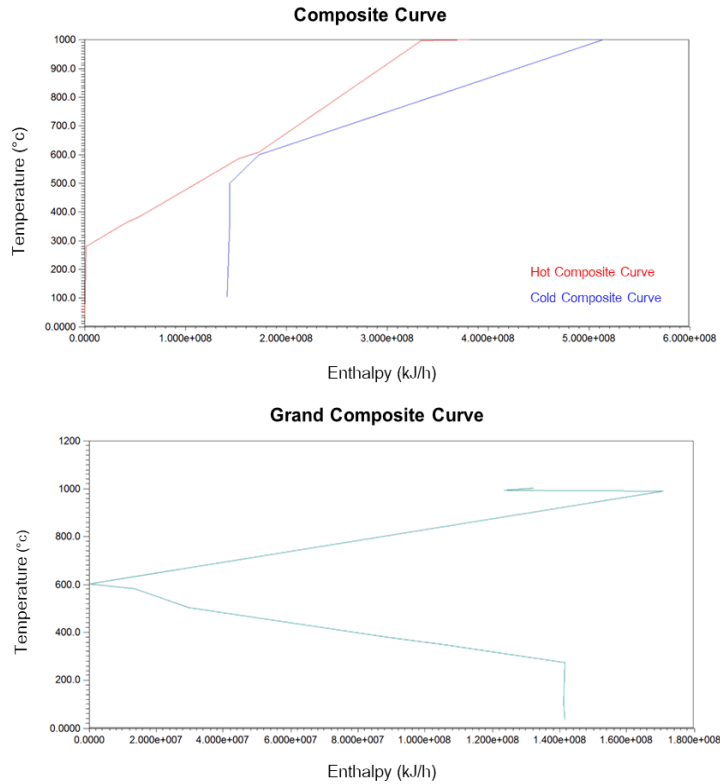
ผลการจำลอง พบว่า กระบวนการใช้วัตุถุดิบก๊าซธรรมชาติประมาณ 1,192 ตันต่อวัน หรือ 0.477 ตันต่อบาร์เรล ทั้ง 2 กรณี ซึ่งสูงกว่าค่าที่รายงานโดย Er-rbib et al. [2] ใช้เพียง 0.204 ตันต่อบาร์เรล ภาเหตุสำคัญมาจากสัดส่วนการผลิตดีเซลที่แตกต่างกัน โดยงานวิจัย Er-rbib et al. [2] รายงานสัดส่วนดีเซล 72% ของผลิตภัณฑ์ไฮโดรคาร์บอนทั้งหมด ขณะที่งานวิจัยนี้มีสัดส่วนเพียง 38% ส่งผลให้ประสิทธิภาพในการเปลี่ยนก๊าซธรรมชาติเป็นดีเซลต่ำกว่า เมื่อเปรียบเทียบกับอัตราการใช้ก๊าซสังเคราะห์ พบว่างานวิจัย Campanario and Gutiérrez Ortiz [5] ใช้ก๊าซสังเคราะห์เพียง 28 กิโลโมลต่อบาร์เรล โดยได้ดีเซลคิดเป็น 60% ของผลิตภัณฑ์ไฮโดรคาร์บอน ในขณะที่งานวิจัยนี้ต้องใช้ก๊าซสังเคราะห์ถึง 79 กิโลโมลต่อบาร์เรล เนื่องจากกระบวนการผลิตในงานนี้มีผลิตภัณฑ์รองหลายประเภท ซึ่งทำให้ต้องกระจายก๊าซสังเคราะห์ไปยังการผลิตผลิตภัณฑ์อื่น ๆ ส่งผลให้อัตราการใช้ก๊าซสังเคราะห์ต่อการผลิตดีเซลสูงขึ้น ทั้งนี้ เนื่องจากกรณีที่ 2 มีการกู้คืนความร้อนส่วนเกิน โดยประยุกต์ใช้เทคนิค Pinch Analysis วิเคราะห์ผ่านโปรแกรม Aspen Energy Analyzer ดังรูปที่ 4 ซึ่งผลการวิเคราะห์ พบว่า กระบวนการมี Pinch Point ที่อุณหภูมิ 600 °C โดยบริเวณเหนือ Pinch Point เป็นเขตที่มีพลังงานความร้อนส่วนเกินของกระบวนการ ดังนั้น จึงออกแบบให้นำพลังงานความร้อนส่วนเกินในโซนดังกล่าวมาใช้ในหน่วย ATR สำหรับปรับสถานะสารป้อนเข้า นอกจากนี้ พลังงานความร้อนส่วนเกินอีกส่วนหนึ่งถูกนำไปผลิตไฟฟ้าผ่านระบบ Organic Rankine Cycle (ORC)

เพื่อนำมาใช้ภายในกระบวนการ ซึ่งช่วยลดความต้องการใช้พลังงานจากแหล่งภายนอก ส่งผลให้ประสิทธิภาพพลังงานรวมของกระบวนการเพิ่มสูงขึ้น โดยรายละเอียดปริมาณการใช้สาธารณูปโภคแสดงไว้ในตารางที่ 3

จากตารางที่ 3 พบว่า ปริมาณการใช้น้ำหล่อเย็นของทั้งสองกรณีมีค่าใกล้เคียงกัน โดยมีความแตกต่างเพียง 0.43% ในด้านพลังงานความร้อน กรณีที่ 1 ใช้พลังงานความร้อนมากกว่ากรณีที่ 2 ถึง 62.35% เนื่องจากใช้เป็นแหล่งพลังงานหลักในกระบวนการ ATR ขณะที่กรณีที่ 2 สามารถกู้คืนความร้อนส่วนเกินจากระบบและนำกลับมาใช้ภายในกระบวนการเพื่อทดแทนพลังงานจากภายนอก สำหรับการใช้ไฟฟ้า กรณีที่ 1 มีความต้องการสูงกว่ากรณีที่ 2 ถึง 22.92% โดยไฟฟ้าส่วนใหญ่ใช้ในหน่วยบี้มและคอมเพรสเซอร์ ขณะที่กรณีที่ 2 สามารถนำพลังงานความร้อนส่วนเกินมาแปลงเป็นไฟฟ้า และนำกลับมาใช้ภายในกระบวนการ ส่งผลให้ลดการพึ่งพาไฟฟ้าจากแหล่งภายนอกได้อย่างมีประสิทธิภาพ

ตารางที่ 3 ปริมาณการใช้สาธารณูปโภคต่อการผลิตดีเซล 1 บาร์เรล

สาธารณูปโภค	กรณีที่ 1	กรณีที่ 2	[% ความแตกต่าง]
น้ำหล่อเย็น (kg/d)	3,594.72	3,579.22	0.43
ความร้อนจากก๊าซธรรมชาติ (MMBtu/d)	2.38	0.90	62.35
ไฟฟ้า(kWh/d)	407.20	313.86	22.92



รูปที่ 4 การวิเคราะห์ Pinch Analysis

3.2 การประเมินทางเศรษฐศาสตร์

3.2.1 ผลการประเมินมูลค่าการลงทุนของโรงงาน ต้นทุนรวมของผลิตภัณฑ์ และต้นทุนต่อหน่วย และตัวชี้วัดความสามารถในการทำกำไร

การประเมินมูลค่าการลงทุน ดังตารางที่ 4 ประเมินตามสัดส่วนจากราคาของอุปกรณ์หลักในกระบวนการผลิตโรงงานประเภท Fluid Processing Plant โดยการคำนวณต้นทุนในการก่อสร้างโรงงานทั้งหมด (TCI) ประกอบด้วยเงินลงทุนในสินทรัพย์ถาวร (FCI) และเงินทุนหมุนเวียนในการดำเนินงาน (WC) กำหนดให้เท่ากับ 15% ของ FCI

ตารางที่ 4 มูลค่าการลงทุนของโรงงาน

ค่าใช้จ่าย	กรณีที่ 1 (USD)	กรณีที่ 2 (USD)
Direct Cost	106,596,128	139,059,764
Indirect Cost	42,638,451	55,623,905
FCI	149,234,580	194,683,669
WC	26,335,514	34,355,942
TCI	175,570,094	229,039,611



จากตารางที่ 4 พบว่า กรณีที่ 2 มี TCI สูงกว่า กรณีที่ 1 ถึง 53 ล้านดอลลาร์สหรัฐ เนื่องจากมีการลงทุนเพิ่มเติมในระบบกักเก็บพลังงาน ได้แก่ เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน บั๊ม และเทอร์ไบน์ อย่างไรก็ตาม การลงทุนที่เพิ่มขึ้นดังกล่าวส่งผลให้ต้นทุนผันแปร (Variable Costs) กรณีที่ 2 ต่ำกว่า กรณีที่ 1 ประมาณ 11.82 ล้านดอลลาร์สหรัฐ เนื่องจากสามารถลดการใช้สาธารณูปโภคความร้อนจากก๊าซธรรมชาติและไฟฟ้าที่ต้องซื้อจากภายนอกสำหรับค่าใช้จ่ายคงที่ซึ่งยังไม่รวมค่าเสื่อมราคา (Fixed Charges) กรณีที่ 2 สูงกว่ากรณีที่ 1 ประมาณ 1.53 ล้านดอลลาร์สหรัฐ จากมูลค่า FCI ที่เพิ่มขึ้นซึ่งทำให้ค่าภาษีที่ดินและสิ่งปลูกสร้าง และค่าประกันภัยสูงขึ้น ขณะที่ค่าโสหุ้ยโรงงาน (Plant Overhead Costs) กรณีที่ 2 สูงกว่ากรณีที่ 1 ประมาณ 1.91 ล้านดอลลาร์สหรัฐ เนื่องจากระบบกักเก็บพลังงานที่มีความซับซ้อน ต้องบำรุงรักษา และตรวจสอบประสิทธิภาพมากขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับค่าใช้จ่ายทั่วไป (General Expense) ที่สูงกว่ากรณีที่ 1 ประมาณ 0.31 ล้านดอลลาร์สหรัฐ โดยผลการเปรียบเทียบต้นทุนรวมของผลิตภัณฑ์ (TPC) แสดงในตารางที่ 5

จากภาระค่าใช้จ่ายด้านการจัดการ การควบคุมระบบ และการซ่อมบำรุงอุปกรณ์ที่เพิ่มขึ้น แม้ว่าจะมีค่าใช้จ่ายบางส่วนสูงขึ้น แต่โดยรวมแล้ว ต้นทุนรวมของผลิตภัณฑ์ในกรณีที่ 2 ยังต่ำกว่ากรณีที่ 1 ซึ่งข้อมูลนี้สามารถนำไปใช้ประเมินต้นทุนต่อหน่วยผลิตภัณฑ์ได้ตามตารางที่ 6

จากข้อมูลในตารางที่ 6 สำหรับกระบวนการที่มีผลิตภัณฑ์หลายชนิด การปันส่วนต้นทุนตามมูลค่าทางเศรษฐกิจหรือยอดขายถือเป็นแนวทางที่สะท้อนต้นทุนของผลิตภัณฑ์แต่ละชนิดได้อย่างเหมาะสม

ตารางที่ 5 ต้นทุนรวมของผลิตภัณฑ์

ค่าใช้จ่าย	กรณีที่ 1 (USD)	กรณีที่ 2 (USD)
Variable Costs	297,329,691	285,502,650
Fixed Charges	2,536,988	3,309,622
Plant Overhead Costs	6,450,199	8,359,061
General Expense	36,424,171	36,114,986
Depreciation	6,715,556	8,760,765
Total Product Costs	342,741,050	333,286,319

ตารางที่ 6 ต้นทุนต่อหน่วยของผลิตภัณฑ์

ผลิตภัณฑ์	ต้นทุนต่อหน่วย กรณีที่ 1	ต้นทุนต่อหน่วย กรณีที่ 2
ก๊าซโซลีน	\$1.228/L	\$1.194/L
น้ำมันอากาศยาน	\$0.514/L	\$0.500/L
ดีเซล	\$0.908/L	\$0.883/L
แวกซ์	\$0.992/L	\$0.965/L
ไฮโดรเจน	\$2.537/kg	\$2.467/kg

โดยในกรณีที่ 2 มีการใช้ค่าสัดส่วนการปันส่วน (Allocation Factor) เท่ากับ 0.17, 0.16, 0.35, 0.15 และ 0.17 สำหรับผลิตภัณฑ์ก๊าซโซลีน น้ำมันอากาศยาน ดีเซล แวกซ์ และไฮโดรเจน ตามลำดับ

ผลการวิเคราะห์แสดงให้เห็นว่าในกรณีที่ 2 มีต้นทุนต่อหน่วยต่ำกว่าเมื่อเทียบกับกรณีที่ 1 เนื่องจากการใช้พลังงานส่วนเกินภายในกระบวนการ



บทความวิจัย

ช่วยลดค่าใช้จ่ายด้านสาธารณูปโภค แม้จะต้องลงทุนเพิ่มเติมในการก่อสร้างโรงงาน แต่สามารถสร้างความคุ้มค่าในระยะยาวได้และเมื่อเปรียบเทียบกับผลการศึกษาของ Campanario and Gutiérrez Ortiz [10] ซึ่งใช้เฟสที่ละลายน้ำได้ที่แยกได้จากไบโอออยล์ ซึ่งมีองค์ประกอบของสารอินทรีย์ที่ละลายน้ำเป็นวัตถุดิบ พบว่า กระบวนการดังกล่าวมีกำลังการผลิตดีเซล 536 bbl/d โดยมีต้นทุนต่อหน่วยของดีเซล \$0.92/L, ก๊าซโซลีน \$0.83/L และน้ำมันอากาศยาน \$0.22/L ซึ่งงานวิจัยนี้มีต้นทุนที่ต่ำกว่าในกรณีที่ 2 อันเนื่องมาจากข้อดีด้านการจัดการพลังงานของกระบวนการ ความแตกต่างของวัตถุดิบ ความแตกต่างด้านสัดส่วนผลิตภัณฑ์ โดยงานวิจัยนี้มีสัดส่วนของดีเซล 37%, ก๊าซโซลีน 15%, น้ำมันอากาศยาน 32% และแวกซ์ 15% ขณะที่ Campanario and Gutiérrez Ortiz [10] มีสัดส่วนของดีเซล 60%, ก๊าซโซลีน 7% และน้ำมันอากาศยาน 33% ซึ่งอาจส่งผลต่อโครงสร้างต้นทุนโดยรวม และผลการประเมินความสามารถในการทำกำไร แสดงดังตารางที่ 7

ตารางที่ 7 ตัวชี้วัดความสามารถในการทำกำไร

ความสามารถในการทำกำไร	กรณีที่ 1	กรณีที่ 2
ผลตอบแทนจากการลงทุน (ROI)	12.44%	13.66%
อัตราผลตอบแทนภายใน (IRR)	12.69% ต่อปี	13.81% ต่อปี
มูลค่าปัจจุบันสุทธิ (NPV, \$)	35,287,021	65,495,749
ระยะเวลาคืนทุน	7 ปี 4 เดือน	6 ปี 10 เดือน

จากข้อมูลในตารางที่ 7 พบว่า ทั้ง 2 กรณีมีตัวชี้วัดด้านความสามารถในการทำกำไร ได้แก่ ROI, IRR NPV และระยะคืนทุน อยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ทางเศรษฐกิจ โดยกรณีที่ 2 ให้ผลตอบแทนที่ดีกว่ากรณีที่ 1 เนื่องจากสามารถนำพลังงานส่วนเกินภายในกระบวนการกลับมาใช้เพื่อลดค่าใช้จ่ายด้านสาธารณูปโภค ส่งผลให้ต้นทุนการดำเนินงานต่อหน่วยต่ำลง แม้ว่าจะมีต้นทุนการลงทุนเริ่มต้นที่สูงกว่า แต่สามารถสร้างความคุ้มค่าในระยะยาว ทำให้ ROI, IRR และ NPV สูงกว่า อีกทั้งยังมีระยะเวลาคืนทุนสั้นกว่า และเมื่อเปรียบเทียบกับผลการศึกษาของ Katiyo et al. [4] มีอัตราผลตอบแทน ROI สูงถึง 20% และมีระยะเวลาคืนทุนเพียง 5 ปี แสดงให้เห็นว่าการศึกษาของ Katiyo et al. [4] มีศักยภาพในการสร้างผลตอบแทนที่ดีกว่าทั้งสองกรณีในงานวิจัยนี้ อันเนื่องมาจากต้นทุนวัตถุดิบที่ใช้เป็นก๊าซชีวภาพซึ่งต่ำกว่าก๊าซธรรมชาติที่ใช้ในงานวิจัยนี้

ทั้งนี้ เนื่องจากก๊าซธรรมชาติเป็นวัตถุดิบหลักของกระบวนการและเป็นปัจจัยที่มีความอ่อนไหว (Sensitivity) ต่อการเปลี่ยนแปลงของต้นทุนการดำเนินงาน จึงได้ทำการวิเคราะห์ความอ่อนไหวของราคาก๊าซธรรมชาติต่อ ROI โดยแสดงผลการวิเคราะห์ดังตารางที่ 8

จากการวิเคราะห์ความอ่อนไหวของราคาก๊าซธรรมชาติ พบว่า การเปลี่ยนแปลงของราคาก๊าซธรรมชาติมีผลกระทบอย่างมีนัยสำคัญต่อ ROI ของทั้งสองกรณี แต่อย่างไรก็ตาม กรณีที่ 2 มีความอ่อนไหวของ ROI น้อยกว่ากรณีที่ 1 เนื่องจากกระบวนการมีประสิทธิภาพการใช้พลังงานสูงกว่า จึงลดผลกระทบจากความผันผวนของราคาก๊าซธรรมชาติได้ดีกว่า



บทความวิจัย

ตารางที่ 8 วิเคราะห์ความอ่อนไหวของราคา ก๊าซธรรมชาติ

ความสามารถ ในการทำกำไร	ผลตอบแทน จากการลงทุน (ROI)	
กรณีที่ 1	+20%	-16.44%
	0	12.44%
	-20%	41.31%
กรณีที่ 2	+20%	-7.65%
	0	13.66%
	-20%	34.97%

ตารางที่ 9 บัญชีรายการสารขาเข้า สารขาออก และสารอนุรูปโคคต่อ 1 MJ ของดีเซล FT

บัญชีรายการ สารขาเข้า		บัญชีรายการ สารขาออก	
วัตถุดิบ		การปล่อยมลพิษ (Emissions)	
- ก๊าซธรรมชาติ (kg)	0.103	- คาร์บอนไดออกไซด์ (kg)	0.112
- อากาศ (kg)	0.777	- ไนโตรเจน (kg)	0.597
- น้ำปราศจากไอออน (kg)	0.104	- ออกซิเจน (kg)	0.021
สารอนุรูปโคค (จากแหล่งภายนอก)		- น้ำ (kg)	0.189
- ไฟฟ้าจากโรงไฟฟ้า	กรณีที่ 1: 97,422,487	ผลิตภัณฑ์	
พลังงานความร้อนรวม (kWh)	กรณีที่ 2: 75,092,179	- ไฮโดรเจน (MJ)	0.234
- ความร้อนจากก๊าซ	กรณีที่ 1: 569,626	- ก๊าซโซลีน (MJ)	0.111
ธรรมชาติ (MMBtu)	กรณีที่ 2: 214,450	- ดีเซล (MJ)	1.000
- น้ำหล่อเย็น (kg)	กรณีที่ 1: 860,037,926	- แวกซ์ (MJ)	0.107
	กรณีที่ 2: 856,327,606	- น้ำมันอากาศยาน (MJ)	0.256
สารอนุรูปโคค (ผลิตจากความร้อนของระบบ)			
- ไฟฟ้า (kWh)		กรณีที่ 2: 22,368,535	
- ความร้อนจากก๊าซธรรมชาติ (MMBtu)		กรณีที่ 2: 356,004	

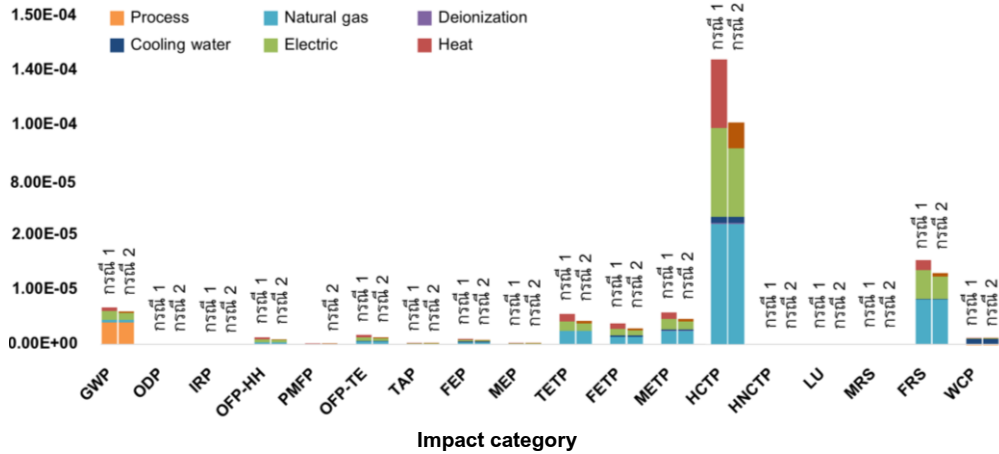
3.3 การประเมินวัฏจักรชีวิต

3.3.1 บัญชีรายการ

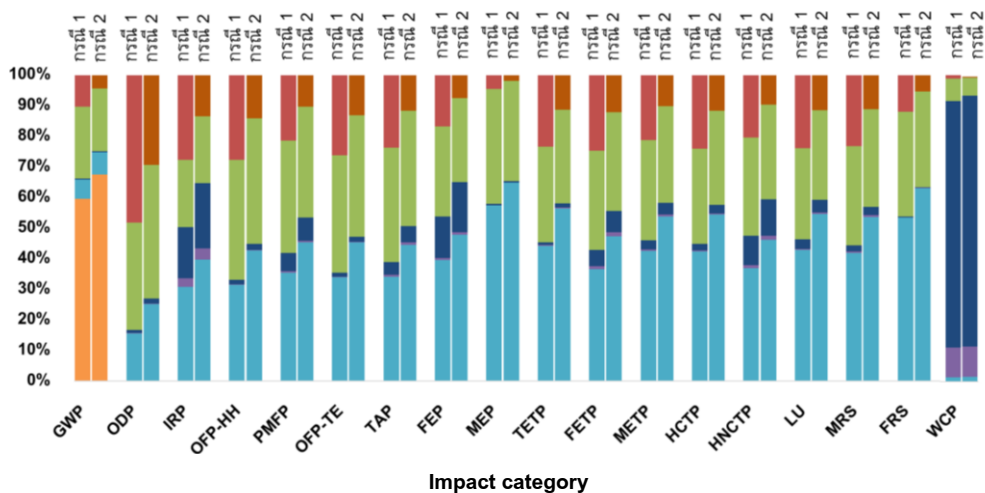
บัญชีรายการสารขาเข้า และสารขาออก แสดงดังตารางที่ 9 อ้างอิงหน่วยหน้าที่ 1 MJ ดีเซล FT ทั้งนี้ บัญชีรายการดังกล่าวได้มาจากการปันส่วนตามสัดส่วนค่าพลังงานของผลิตภัณฑ์แต่ละชนิดต่อพลังงานรวมของกระบวนการ เพื่อจัดสรรการใช้ทรัพยากรและผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม ซึ่งค่า Allocation Factor ของดีเซล FT เท่ากับ 0.29



3.3.2 ผลการประเมินวัฏจักรชีวิต พิจารณาขอบเขต Cradle to Gate



รูปที่ 5 ผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม Normalization กรณีที่ 1 และกรณีที่ 2



รูปที่ 6 การกระจายตัวของผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม กรณีที่ 1 และกรณีที่ 2

รูปที่ 5 และ 6 แสดงผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมกรณี ที่ 1 และกรณีที่ 2 ต่อหน่วยพลังงาน 1 MJ ของดีเซล FT ซึ่งพบว่า ที่ 1 มีผลกระทบสูงกว่ากรณีที่ 2 ในทุก หมวดหมู่ ความแตกต่างที่สำคัญซึ่งทำให้กรณีที่ 1 มีผลกระทบสูงกว่ากรณีที่ 2 จากการใช้ความร้อน และ

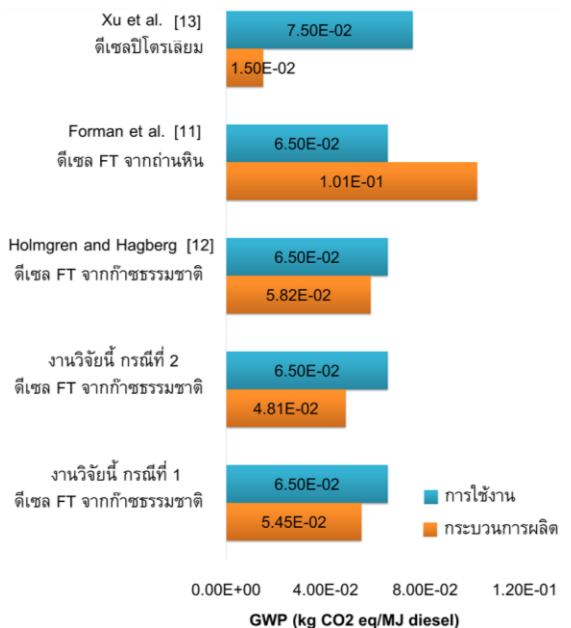
ไฟฟ้าจากแหล่งภายนอกทั้งหมด ในขณะที่กรณีที่ 2 สามารถนำพลังงานความร้อนส่วนเกินทดแทนความร้อนจากภายนอกได้ 62% ของความต้องการพลังงาน ความร้อนทั้งหมด และทดแทนไฟฟ้าจากแหล่ง ภายนอกได้ 23% ของความต้องการไฟฟ้าทั้งหมด



บทความวิจัย

ทั้งนี้ พลังงานที่ได้จากการกู้คืนดังกล่าวถือเป็นการใช้ประโยชน์จากพลังงานเดิมที่เกิดขึ้นภายในกระบวนการ จึงไม่นำมาพิจารณาเป็นภาระสิ่งแวดล้อมเพิ่มเติมจากแหล่งพลังงานต้นทางในการประเมินวัฏจักรชีวิต อย่างไรก็ตาม การประเมินยังคงพิจารณาผลกระทบที่เกิดจากหน่วยแปลงพลังงานและการใช้พลังงานในหน่วยที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการกู้คืนความร้อนและผลิตพลังงานไฟฟ้าโดยหมวดหมู่ที่มีค่าผลกระทบสูงที่สุดคือ ความเป็นพิษก่อมะเร็งต่อสุขภาพมนุษย์ (HCTP) มีสาเหตุหลักจากการใช้วัตถุดิบก๊าซธรรมชาติ 0.103 kg/1 MJ ดีเซล FT และ การใช้ความร้อนจากก๊าซธรรมชาติ ในกรณีที่ 1 และกรณีที่ 2 เท่ากับ 569,626 และ 214,450 MMBtu/1 MJ ดีเซล FT ตามลำดับ เนื่องจากขั้นตอนการได้มาของก๊าซธรรมชาติ ตั้งแต่การแปรรูป การขนส่งผ่านท่อแรงดันสูง ไปจนถึงการเผาไหม้เพื่อผลิตความร้อนและไฟฟ้า มีการปล่อยสารก่อมะเร็ง รวมถึงโลหะหนัก เช่น นิกเกิลและแคดเมียม ซึ่งเป็นตัวการสำคัญที่ก่อให้เกิดผลกระทบในหมวดหมู่นี้ สำหรับหมวดหมู่ผลกระทบที่มีค่าสูงรองลงมาคือ ความขาดแคลนทรัพยากรฟอสซิล (FRS) ซึ่งสะท้อนถึงการใช้ก๊าซธรรมชาติในปริมาณมาก ทั้งในกระบวนการสังเคราะห์เชื้อเพลิงและการผลิตสารอนุพันธ์ ทำให้เกิดการลดลงของทรัพยากรเชื้อเพลิงฟอสซิล ในลำดับถัดมาคือ ภาวะโลกร้อน (GWP) อันเนื่องมาจากขั้นตอนการผลิตหลังจากการนำก๊าซบางส่วนเกินจากกระบวนการไปเผาไหม้เพื่อลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจก ส่งผลเกิดการปล่อย CO₂ จากการเผาไหม้ดังกล่าว ซึ่งสอดคล้องกับบัญชีรายการสารขาออกที่แสดงในตารางที่ 9 โดยการปล่อย CO₂ นี้เป็นปัจจัยสำคัญที่ก่อให้เกิดปรากฏการณ์เรือนกระจกซึ่งเป็นสาเหตุ

สำคัญของภาวะโลกร้อนและการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ และเมื่อพิจารณาผลกระทบด้านภาวะโลกร้อน Characterization ของงานวิจัยนี้เปรียบเทียบกับงานวิจัยอื่น ๆ ดังแสดงในรูปที่ 7 โดยแสดงปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจกต่อ 1 MJ ของดีเซลสังเคราะห์ FT ระหว่างกระบวนการผลิตของดีเซล FT จากก๊าซธรรมชาติทั้ง 2 กรณีในงานวิจัยนี้กับดีเซล FT จากก๊าซธรรมชาติจากผลการศึกษาของ Forman et al. [11] ดีเซล FT จากถ่านหินจากผลการศึกษาของ Holmgren and Hagberg [12] รวมถึงดีเซลจากกระบวนการกลั่นปิโตรเลียมจากผลการศึกษาของ Xu et al. [11] และปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจกในช่วงของการใช้งานสำหรับดีเซล FT [14]



รูปที่ 7 ผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม Characterization ด้านภาวะโลกร้อนต่อ 1 MJ ดีเซล



จากรูปที่ 7 แสดงความแตกต่างของดีเซลแต่ละประเภท เมื่อพิจารณาปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากกระบวนการผลิต (สีส้ม) พบว่าดีเซล FT ที่ผลิตจากก๊าซธรรมชาติทั้ง 2 กรณีในงานวิจัยนี้มีปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจกใกล้เคียงกับผลการศึกษาของ Forman et al. [11] ในขณะที่ดีเซล FT จากถ่านหินจากผลการศึกษาของ Holmgren and Hagberg [12] มีค่าการปล่อยก๊าซเรือนกระจกที่สูงที่สุด เนื่องจากถ่านหินมีคาร์บอนและไฮโดรเจนสูง เมื่อเผาไหม้จะก่อให้เกิดก๊าซ CO₂ สูงเช่นกัน สอดคล้องกับผลการศึกษา Edwards et al. [15] ที่ระบุว่า การใช้ก๊าซธรรมชาติเป็นวัตถุดิบตั้งต้นปล่อยก๊าซเรือนกระจกน้อยกว่าการใช้ถ่านหิน และเมื่อเปรียบเทียบปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากกระบวนการผลิตระหว่างดีเซล FT กับดีเซลจากการกลั่นปิโตรเลียม จากผลการศึกษาของ Xu et al. [13] พบว่า ดีเซลจากการกลั่นปิโตรเลียม ปล่อยก๊าซเรือนกระจกต่ำกว่าดีเซล FT เนื่องจากกระบวนการกลั่นปิโตรเลียมมีความซับซ้อนน้อยกว่าและใช้พลังงานในปริมาณที่ต่ำกว่า

เมื่อพิจารณาปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจกช่วงการใช้งาน (สีฟ้า) พบว่า ดีเซล FT มีปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจกอยู่ที่ 6.50E-02 kg CO₂ eq./1 MJ ดีเซล FT ขณะที่ดีเซลจากการกลั่นปิโตรเลียมปล่อยก๊าซเรือนกระจก 7.50 E-02 kg CO₂ eq./1 MJ ดีเซล ซึ่งสอดคล้องกับรายงาน [14,15] ที่ระบุว่าดีเซล FT แม้ใช้พลังงานระหว่างกระบวนการผลิตสูง แต่มีข้อดีด้านการเผาไหม้ ปราศจากซัลเฟอร์และอะโรมาติก ช่วยลดเขม่าและการปล่อยก๊าซเมื่อใช้งานจริง กรณีที่ 2 ในงานวิจัยนี้ปล่อยก๊าซเรือนกระจกต่ำกว่า

กรณีที่ 1 ในทุกหมวดหมู่ผลกระทบ เนื่องจากมีการนำพลังงานส่วนเกินกลับมาใช้ ลดการพึ่งพาพลังงานจากภายนอก และลดผลกระทบโดยรวมของกระบวนการ จึงเป็นทางเลือกที่เหมาะสมในการลดผลกระทบสิ่งแวดล้อม อย่างไรก็ตาม การพึ่งพาก๊าซธรรมชาติยังมีข้อจำกัดด้านความยั่งยืน จึงควรพัฒนาเชื้อเพลิงจากชีวมวลหรือก๊าซชีวภาพร่วมกับการใช้พลังงานหมุนเวียนเพื่อให้เกิดความยั่งยืนในระยะยาว

4. สรุปผล

การศึกษาเปรียบเทียบการผลิตดีเซลผ่านกระบวนการ ATR ควบคู่กับกระบวนการ FT พบว่าการกู้คืนพลังงานส่วนเกินช่วยเพิ่มความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ ลดต้นทุนและระยะเวลาคืนทุน พร้อมทั้งลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม และยังเป็นแนวทางสำคัญในการพัฒนาเชื้อเพลิงทางเลือกที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมในอนาคต ซึ่งสอดคล้องกับทิศทางการพัฒนาพลังงานของประเทศไทยภายใต้กรอบ Thailand's Nationally Determined Contribution (NDC 3.0) ซึ่งมุ่งลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกควบคู่กับการเสริมสร้างความมั่นคงทางพลังงาน เพื่อสนับสนุนการเปลี่ยนผ่านสู่ระบบพลังงานคาร์บอนต่ำในระยะยาว

5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนทุนการศึกษาระดับบัณฑิตศึกษาจากมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ และทุนวิจัยเทคโนโลยีสีเขียวสำหรับยานยนต์จากหน่วยบริหารและจัดการทุนด้านการเพิ่มความสามารถในการแข่งขันของประเทศ (บพข.) ปี 2567



6. เอกสารอ้างอิง

- [1] G.N. Choi, S.J. Kramer and S. S. Tam, Design/economics of a once-through natural gas fischer-tropsch plant with power co-production, Fischer-Tropsch, 2009, 1-7.
- [2] H. Er-rbib, C. Bouallou and F. Werkoff, Production of synthetic gasoline and diesel fuel from dry reforming of methane, Energy Procedia, 2012, 29, 156-165.
- [3] M. Sudiro and A. Bertucco, Production of synthetic gasoline and diesel fuel by alternative processes using natural gas and coal: Process simulation and optimization, 2009, 34(12), 2206-2214.
- [4] M. Katiyo, L. Gdukeya, M. Kanganga and N. I. Sukdeo, Techno-economic assessment of biogas to liquid fuel conversion via Fischer-Tropsch synthesis: A case Study of biogas generated from municipal sewage, Manufacturing Driving Circular Economy, 2023, 729-737.
- [5] F.J. Campanario and F.J. Gutiérrez Ortiz, Fischer-Tropsch biofuels production from syngas obtained by supercritical water reforming of the bio-oil aqueous phase, 2017, 150, 599-613.
- [6] Ardente, F. and M. Cellura, Economic allocation in life cycle assessment, Journal of Industrial Ecology, 2012. 16(3), 387-398.
- [7] C. van der Giesen, C., R. Kleijn, and G.J. Kramer, Energy and climate impacts of producing synthetic hydrocarbon fuels from CO₂, Environmental Science and Technology, 2014, 48(12), 7111-21.
- [8] P. Kenkel, T. Wassermann and E. Zondervan, Biogas reforming as a precursor for integrated algae biorefineries: Simulation and Techno-Economic Analysis, Processes, 2021, 9(8), 1348.
- [9] M. Senden, F. Martens, W. Steeng, R.K. Nagelvoort, Shell's GTL: It's technology and design, Its operation and products, International Petroleum Technology Conference (IPTC2005), Proceeding, 2005, IPTC-10683-MS.
- [11] F.J. Campanario and F.J.G. Ortiz, Techno-economic assessment of bio-oil aqueous phase-to-liquids via Fischer Tropsch synthesis and based on supercritical water reforming, Energy Conversion and Management, 2017, 154, 591-602.
- [11] G.S. Forman, T.E. Hahn and S.D. Jensen, Greenhouse gas emission evaluation of the GTL pathway, Environmental Science and Technology, 2011, 45(20), 9084-9092.
- [12] K. Holmgren and L. Hagberg, Life cycle assessment of climate impact of FischerTropsch diesel based on peat and biomass, Swedish Environmental Research Institute, Report, Stockholm, Sweden, 2009.



- [13] H. Xu, L. Ou, Y. Li, T. R. Hawkins and M. Wang, Life cycle greenhouse gas emissions of biodiesel and renewable diesel Production in the United States, *environmental Science and Technology*, 2022, 56(12), 7512-7521.
- [14] <https://biomassmagazine.com/articles/pathways-for-carbon-negative-biomass-fuels>. (Accessed on 15 August 2025)
- [15] R. Edwards, J.-F. Larivé, V. Mahieu and P. Rouveiolles, Well-to-wheels analysis of future automotive fuels and powertrains in the European context, JRC Scientific and Technical Report, European Commission, Italy, 2006.



การออกแบบและศึกษาทดลองเครื่องต้นแบบสำหรับสร้างลมร้อนอุณหภูมิต่ำด้วยพลาสมาบรรยากาศเพื่ออบแห้ง และลดการปนเปื้อนของเชื้อราบนสมุนไพรไทย

สมิทธิ์ ปรีชาญาณ¹ เสกสิทธิ์ กมลชัย² และ เอกวิทย์ หวังกันกลาง^{2*}

¹ หลักสูตรวิศวกรรมไฟฟ้าอุตสาหกรรม, คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม, มหาวิทยาลัยราชภัฏนครราชสีมา

² หลักสูตรวิศวกรรมยานยนต์ไฟฟ้า(ต่อเนื่อง), คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม, มหาวิทยาลัยราชภัฏนครราชสีมา

* ผู้ประสานงานเผยแพร่ (Corresponding Author), E-mail: ekkawit.w@nrru.ac.th

วันที่รับบทความ: 16 พฤศจิกายน 2568; วันที่ทบทวนบทความ: 24 มีนาคม 2569; วันที่ตอบรับบทความ: 10 เมษายน 2569

วันที่เผยแพร่ออนไลน์: 22 เมษายน 2569

บทคัดย่อ: งานวิจัยนี้นำเสนอการพัฒนาเครื่องต้นแบบสำหรับสร้างลมร้อนอุณหภูมิต่ำที่มีฤทธิ์ต้านเชื้อจุลินทรีย์ ด้วยกระบวนการดิสชาร์จพลาสมาที่ความดันบรรยากาศ เพื่อใช้ในการอบแห้งสมุนไพรควบคู่กับการลดการปนเปื้อนของเชื้อราในขั้นตอนเดียว ระบบประกอบด้วยชุดสร้างความร้อนพร้อมด้วยอนุภาคออกฤทธิ์จากแผ่นอิเล็กโทรดผลิตพลาสมา ร่วมกับระบบการหมุนเวียนลมร้อน ผลทดสอบพบว่าเครื่องต้นแบบเพิ่มอุณหภูมิในระบบจาก 24 °C เป็น 34 °C ด้วยการใช้อิเล็กโทรดเพียงแผ่นเดียว โดยมีอุณหภูมิบนพื้นผิวอิเล็กโทรดประมาณ 53 °C ผลการใช้งานลดความชื้นในสมุนไพรกระชายแห้งได้ 16.6% ใน 40 นาที และลดความชื้นในขิงแห้งได้ 10.53% ใน 60 นาที ในด้านประสิทธิภาพลดเชื้อราบนพื้นผิวกระชาย ลดจำนวนเชื้อรารวมจากระดับเริ่มต้นเหลือ 0.8% ถึง 7.5% ซึ่งแสดงศักยภาพของระบบในการผานอบแห้งและลดปนเปื้อนเชื้อจุลินทรีย์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ ผลวิจัยชี้ว่าเครื่องต้นแบบเหมาะสำหรับสมุนไพรหรือเมล็ดพันธุ์มูลค่าสูงที่ต้องการวิธีอบแห้งด้วยลมร้อนอุณหภูมิต่ำควบคู่กับการรักษาความปลอดภัยด้านจุลินทรีย์ ซึ่งสามารถช่วยเพิ่มมูลค่าและยกระดับคุณภาพผลิตภัณฑ์สมุนไพรของไทย

คำสำคัญ: ดิสชาร์จพลาสมาความดันบรรยากาศ; ลมร้อนอบแห้งอุณหภูมิต่ำ; การอบแห้งสมุนไพร; การลดปนเปื้อนจุลินทรีย์; เชื้อรารวม

Design and Experimental Study of a Prototype Device for Low-Temperature Hot Air Generation Using Atmospheric Plasma for Drying and Fungal Decontamination of Thai Herbs

Samit Preechayan¹, Seksid Kamolchai² and Ekkawit Wangkanklang^{2*}

¹ Industrial Electrical Engineering Programs, Faculty of Industrial Technology,
Nakhonratchasima Rajabhat University

² Electric Vehicle Engineering (Continuing Program), Faculty of Industrial Technology,
Nakhonratchasima Rajabhat University

* Corresponding author, E-mail: ekkawit.w@nrru.ac.th

Received: 16 November 2025; Revised: 24 March 2026; Accepted: 10 April 2026

Online Published: 22 April 2026

Abstract: This study presents the design and experimental evaluation of a prototype system for generating low-temperature hot air integrated with atmospheric-pressure plasma for simultaneous herbal drying and fungal decontamination. The system combines a heat generation module with plasma-induced reactive species and a controlled hot-air circulation mechanism. Experimental results demonstrate that the prototype increased the internal air temperature from 24 °C to 34 °C using a single electrode, with an electrode surface temperature of approximately 53 °C. Drying experiments indicate that the system reduced the moisture content of sliced fingerroot by 16.6% within 40 minutes and sliced ginger by 10.53% within 60 minutes. In terms of antifungal performance, the total mold count on fingerroot surfaces was reduced to 0.8-7.5% of the initial contamination level. These results confirm the capability of the proposed system to simultaneously achieve moisture reduction and microbial decontamination within a single process. The developed prototype is particularly suitable for high-value herbs or seeds requiring low-temperature drying to preserve bioactive compounds while ensuring microbial safety, indicating strong potential for value-added processing in Thai herbal applications.

Keywords: Atmospheric Discharge Plasma; Low-Temperature Hot Air Drying; Herbal Drying; Microbial Decontamination; Total Molds.



1. บทนำ

สมุนไพรมีหลายชนิดที่มีมูลค่าทางเศรษฐกิจสูงและเป็นมรดกภูมิปัญญาท้องถิ่น อย่างไรก็ตาม ขั้นตอนหลังการเก็บเกี่ยวยังเสี่ยงต่อการปนเปื้อนของเชื้อรา ซึ่งกระทบต่อคุณภาพและความปลอดภัยของผลผลิต การอบแห้งแบบใช้อุณหภูมิต่ำเป็นวิธีที่ช่วยคงคุณค่าทางชีวภาพของสมุนไพรมี แต่ยังไม่สามารถป้องกันเชื้อราได้อย่างสมบูรณ์

เทคโนโลยีพลาสมาบรรยากาศ (Atmospheric Pressure Plasma) เป็นทางเลือกที่มีศักยภาพในการลดจุลินทรีย์บนพื้นผิวได้อย่างรวดเร็ว ไม่ทิ้งสารตกค้างและไม่ทำลายวัตถุดิบ ในช่วงสองทศวรรษที่ผ่านมา เทคโนโลยีพลาสมาที่ระดับความดันบรรยากาศ ได้รับความสนใจอย่างมากในงานด้านการเกษตรและแปรรูปอาหาร เนื่องจากสามารถยับยั้งจุลินทรีย์ได้อย่างมีประสิทธิภาพโดยไม่ใช้สารเคมีหรือความร้อน ในยุคเริ่มแรก Roth *et al.* [1] ศึกษาผลของ O AUGDP ที่สามารถทำงานในอากาศที่ความดันบรรยากาศ โดยผลิตอนุภาคที่มีฤทธิ์ต้านจุลชีพ ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า O AUGDP สามารถลดจำนวนแบคทีเรียแกรมลบและแกรมบวก สปอร์ของแบคทีเรีย ยีสต์ และไวรัสบนพื้นผิววัสดุต่าง ๆ ได้อย่างมีประสิทธิภาพ เมื่อไม่นานมานี้ Nalwa และ Thakur [2] ซึ่งให้เห็นว่าพลาสมาเย็นช่วยเพิ่มอัตราการงอกของเมล็ดพืช พร่อมลดเชื้อราและแบคทีเรียบนผิวเมล็ดได้อย่างมีนัยสำคัญ ขณะที่ Guo [3] รายงานว่าพลาสมาเย็นสามารถลดเชื้อราและสารพิษจากเมล็ดข้าวได้กว่า 50% โดยไม่กระทบคุณค่าทางโภชนาการ ในด้านสมุนไพรมีและเครื่องเทศ Abdi [4] พบว่าการใช้พลาสมาเย็นสามารถกำจัดจุลินทรีย์ในผงพริกแดงและสมุนไพรมีได้โดยไม่เปลี่ยนแปลง

คุณสมบัติทางประสาทสัมผัสหรือสารสำคัญในผลิตภัณฑ์ Thiyam P, [5] ได้ศึกษาการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีพลาสมาเย็นที่ความดันบรรยากาศ (Atmospheric Cold Plasma: ACP) ในการยับยั้งจุลินทรีย์และรักษาคุณภาพของเครื่องเทศและสมุนไพรมี โดยพบว่า ACP สามารถลดจำนวนจุลินทรีย์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ ทั้งนี้ประสิทธิภาพของกระบวนการขึ้นอยู่กับพารามิเตอร์สำคัญ เช่น ความถี่ แรงดันไฟฟ้า ระยะเวลาในการประมวลผล และสรุปว่าเทคโนโลยีพลาสมาเย็นที่ความดันบรรยากาศเป็นแนวทางใหม่ที่มีศักยภาพสูงในการยับยั้งจุลินทรีย์บนสมุนไพรมีและเครื่องเทศ โดยไม่ส่งผลกระทบต่อคุณภาพของวัตถุดิบอย่างมีนัยสำคัญ Misra *et al.* [6] แสดงให้เห็นว่าเทคโนโลยี Atmospheric Cold Plasma (ACP) สามารถลดจำนวนจุลินทรีย์บนผิวของสตอร์เบอร์รี่สดได้อย่างมีประสิทธิภาพภายในบรรจุภัณฑ์ปิดสนิท โดยไม่กระทบต่อคุณภาพทางกายภาพ Rashid *et al.* [7] แสดงให้เห็นว่า high voltage atmospheric cold plasma ที่แรงดัน 80 kV ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการสกัดกัลกัตโตแมนแนนจากเมล็ดลูกชด โดยไม่เปลี่ยนแปลงโครงสร้างโมเลกุล เหมาะสำหรับการประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมอาหารและพอลิเมอร์ Durcanyova *et al.* [8] ได้เปรียบเทียบประสิทธิภาพของพลาสมาสามประเภทในการปรับปรุงคุณสมบัติของเมล็ดถั่วเหลือง พบว่าพลาสมา DCSBD ให้ผลดีที่สุดในการเพิ่มอัตราการงอกและการดูดซึมน้ำของเมล็ดโดยไม่ทำลายโครงสร้างผิวเหมาะสำหรับการปรับปรุงคุณภาพเมล็ดพันธุ์ในกระบวนการเกษตรสมัยใหม่ Yanco *et al.* [9] และ Bai *et al.* [10] รายงานว่าการใช้พลาสมาเป็นขั้นตอนเตรียมก่อนอบแห้งสามารถลดเวลาอบ เพิ่มค่าการแพร่



ของความชื้น และคงคุณภาพทางกายภาพและเคมีของผลผลิต เช่น มะม่วงและถั่วลิ้นเต่า ได้อย่างมีประสิทธิภาพ นอกจากนี้ Loureiro *et al.* [11] รายงานว่า ความถี่ของพลาสมาเย็นมีผลต่อประสิทธิภาพการอบและการเพิ่มสารต้านอนุมูลอิสระในผลไม้ *tucuma* ส่วน Thakur และ Vasudevan [12] ทบทวนการใช้เทคโนโลยีพลาสมาในการบำบัดเมล็ดพันธุ์ เพื่อเพิ่มคุณภาพและประสิทธิภาพการงอกของเมล็ด ลดการปนเปื้อนของเชื้อจุลินทรีย์ ส่งผลให้การเพาะปลูกมีผลผลิตสูงขึ้นและลดการใช้สารเคมีได้อย่างมีประสิทธิภาพ Kumar *et al.* [13] ศึกษาการบำบัดด้วยพลาสมาที่อุณหภูมิต่ำสามารถช่วยเพิ่มคุณภาพเมล็ด กระตุ้นการงอก และกำจัดเชื้อโรคที่ติดอยู่บนเปลือกเมล็ด มีศักยภาพสูงในการเพิ่มผลผลิตพืชและลดการปนเปื้อนจากเชื้อราหรือแบคทีเรีย Durek *et al.* [14] ศึกษาการใช้ Plasma Processed Air (PPA) กับสมุนไพรแห้ง เช่น เปปเปอร์มินต์และตะไคร้ พบว่าสามารถลดจุลินทรีย์ได้ แม้อาจมีผลต่อสีและสารต้านอนุมูลอิสระบ้าง Zahoranova *et al.* [15] ชี้ให้เห็นว่า Cold Atmospheric Pressure Plasma สามารถปรับปรุงคุณสมบัติของเมล็ดข้าวโพด เช่น ความชุ่มชื้นและการดูดซึมน้ำ โดยไม่ทำลายพื้นผิวเมล็ด และสามารถกระตุ้นการตอบสนองของยีนที่เกี่ยวข้องกับความเครียดจากความร้อนได้อย่างมีประสิทธิภาพ

ในประเทศไทย งานของสมิทธิ์ [16-17] ได้ศึกษาการผลิตพลาสมาที่ความดันบรรยากาศ โดยใช้แหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงสูงกระแสสลับ 30 กิโลโวลต์ เพื่อสร้างพลาสมาในอากาศสำหรับประยุกต์ใช้ในการลดการปนเปื้อนของเชื้อราบนพื้นผิวพืชผลทางการเกษตร ได้แก่ ถั่วลิสง ข้าวโพด กระเทียม และหอมแดง ซึ่งจัดอยู่ในกลุ่มพืชที่มีความเสี่ยงสูงต่อการปนเปื้อนของ

เชื้อรา *Aspergillus flavus* ซึ่งสามารถผลิตสารพิษอะฟลาทอกซิน (Aflatoxin) ที่เป็นอันตรายต่อสุขภาพ ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าพลาสมาที่ผลิตได้มีประสิทธิภาพในการยับยั้งเชื้อราตามธรรมชาติบนพื้นผิวพืชเหล่านี้อย่างชัดเจน โดยเฉพาะในกรณีของพืชที่มีชั้นผิวบางซึ่งพลาสมาสามารถแทรกซึมและออกฤทธิ์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

จากแนวโน้มดังกล่าว งานวิจัยนี้มุ่งเน้นการศึกษาและพัฒนาเครื่องต้นแบบสำหรับสร้างลมร้อนอุณหภูมิต่ำที่ประกอบด้วยอนุภาคที่มีฤทธิ์ยับยั้งและทำลายเชื้อจุลินทรีย์ (Reactive Species) จากกระบวนการดิสซาร์จระดับความดันบรรยากาศในอากาศ เพื่อใช้ในกระบวนการอบแห้งที่สามารถลดการปนเปื้อนของเชื้อราไปพร้อมกัน โดยสามารถนำไปต่อยอดสู่กระบวนการอบแห้งสมุนไพรหรือเมล็ดพันธุ์ท้องถิ่นมูลค่าสูง ที่ต้องการการอบแห้งแบบอุณหภูมิต่ำควบคู่กับการควบคุมจุลินทรีย์ในขั้นตอนเดียว งานวิจัยนี้จึงมีศักยภาพสูงในการพัฒนาเป็นนวัตกรรมที่สามารถนำไปใช้จริงในระดับชุมชนเกษตรกรรม เพื่อส่งเสริมการแปรรูปพืชสมุนไพรท้องถิ่นให้ได้มาตรฐานและเพิ่มมูลค่าทางเศรษฐกิจในบริบทของประเทศไทย

2. วิธีการดำเนินงานวิจัย

จากสมมุติฐานและกรอบแนวคิดของงานวิจัยเชิงทดลองและนวัตกรรมนี้ ได้มีการกำหนดขั้นตอนและแบ่งการดำเนินงานวิจัยอย่างเป็นระบบ ด้วยการผสมผสานการออกแบบสร้างกระบวนการดิสซาร์จพลาสมา ในอากาศ เข้ากับโครงสร้างที่ควบคุมทิศทางการหมุนเวียนของลมร้อนอุณหภูมิต่ำภายในระบบ โดยครอบคลุมตั้งแต่การออกแบบเครื่องต้นแบบ ออกแบบระบบการหมุนเวียนลมร้อน การประกอบโครงสร้างจริง การ



กำหนดพารามิเตอร์ทางไฟฟ้าสำหรับวงจรกำเนิดพลาสมา พร้อมทั้งทดสอบสมรรถนะในด้านการอบแห้งและประสิทธิภาพในการลดเชื้อราตามธรรมชาติบนผิวสมุนไพรที่มีความเสี่ยงต่อการปนเปื้อนมีรายละเอียดดังนี้

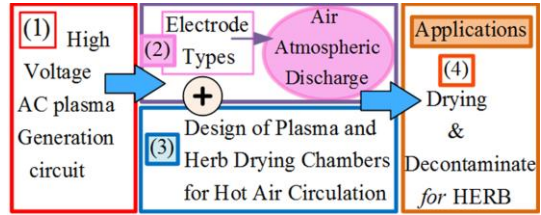
2.1 การออกแบบ-สร้างระบบต้นแบบ

งานวิจัยนี้มุ่งพัฒนาเครื่องต้นแบบระดับห้องปฏิบัติการที่สามารถสร้างลมร้อนอนุกรมมิติต่ำพร้อมอนุภาคออกฤทธิ์จากดิสชาร์จพลาสมา (Plasma Reactive Species) สำหรับใช้ประโยชน์ในการอบแห้งร่วมกับการลดเชื้อรารวมบนวัตถุพืชสมุนไพรภายในขั้นตอนเดียว ระบบประกอบด้วย 3 องค์ประกอบหลักแสดงในรูปที่ 1

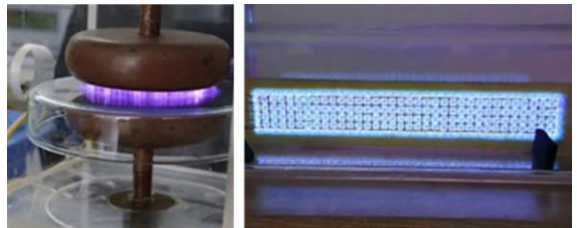
องค์ประกอบหลักของระบบต้นแบบประกอบด้วย

(1) การออกแบบ-สร้างวงจรกำเนิดไฟฟ้าแรงดันสูงกระแสสลับ ใช้เพื่อสร้างสนามไฟฟ้าแรงดันสูงให้ตกคร่อมอิเล็กโทรดจนสามารถเกิดการดิสชาร์จในอากาศที่ระดับความดันบรรยากาศขึ้นได้ โดยผลจากการออกแบบวงจรสามารถสร้างแรงดันไฟฟ้าใช้งานระหว่างสองขั้วแรงสูงให้อยู่ในช่วง 15-30 กิโลโวลต์ พีคทูพีค (kVp-p) ที่ความถี่ในช่วง 0.5-2.5 kHz ไฟฟ้าแรงดันสูงกระแสสลับที่ผลิตจากเครื่องต้นแบบนี้ เมื่อนำไปป้อนให้รูปแบบต่างๆของอิเล็กโทรด จะมีลักษณะการเกิดดิสชาร์จที่ขึ้นกับลักษณะและโครงสร้างของอิเล็กโทรด

(2) การออกแบบลักษณะของอิเล็กโทรด เพื่อประเมินความเหมาะสมในการใช้งานกับระบบต้นแบบในด้านประสิทธิภาพการสร้างลมร้อนและการลดการปนเปื้อนของเชื้อรา



รูปที่ 1 การออกแบบลำดับขั้นตอนการทำงานของระบบเครื่องต้นแบบ



รูปที่ 2 ลักษณะของอิเล็กโทรดที่ต่างกันเป็นผลให้เกิดรูปแบบของการดิสชาร์จที่ต่างกัน

จากการเปรียบเทียบอิเล็กโทรดทั้งสองชนิดได้แก่ คู่อิเล็กโทรดขนาบ และอิเล็กโทรดแบบแผ่นแบน (รูปที่ 2) โดยใช้งานร่วมกับวงจรที่ออกแบบและสร้างขึ้น พบว่า แม้อิเล็กโทรดขนาบจะสามารถสร้างการดิสชาร์จในรูปแบบไดอิเล็กทริกบาเรียร์ดิสชาร์จ (Dielectric Barrier Discharge: DBD) ขึ้นได้ โดยมีลักษณะของลำกระแสดิสชาร์จแบบพัลส์ ไม่ต่อเนื่องและไหลพุ่งตรงรุนแรง ความสัมพันธ์ระหว่าง V-I แบบ Hysteresis มีความหนาแน่นของกระแส DBD ได้จากสมการของ Kogelschatz, U. ในสมการที่ (1)

$$I(t) = C_d \frac{dV(t)}{dt} + I_{Discharge}(t) \tag{1}$$

เมื่อ
$$I_{Discharge}(t) \approx I_0 \exp \frac{(t-t_0)^2}{2\sigma^2} \tag{2}$$



อย่างไรก็ตาม ลักษณะของ DBD ได้พบปัญหาเรื่องความร้อนสะสมในวงจรและเสี่ยงต่อความเสียหายของอุปกรณ์ จึงอาจไม่เหมาะสมกับลักษณะงานที่ต้องการใช้งานต่อเนื่องเป็นเวลานาน เช่น กระบวนการอบแห้งสมุนไพรควบคุมอุณหภูมิการปนเปื้อนของเชื้อรา

ในทางตรงกันข้าม อิเล็กโทรดแบบแผ่นแบนที่ออกแบบให้ลักษณะพลาสมาแบบเรืองแสง, มีกระแสที่ต่อเนื่อง, สม่าเสมอและคงที่ ลักษณะคล้ายกับการโกลดิสชาร์จ (Glow Discharge) ที่ใช้กระบวนการ Charge Trapping ซึ่งมีความสัมพันธ์ระหว่าง V-I เป็นเชิงเส้น โดยความหนาแน่นของกระแสโกลดิสชาร์จคือ

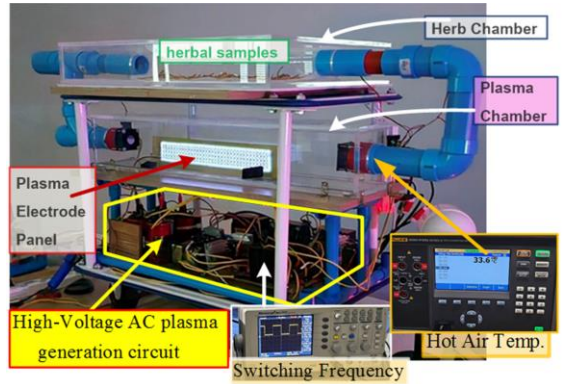
$$J = \sigma E \quad (3)$$

โดยมีการเคลื่อนที่แบบไหลเลื่อน และจากสมการ Drift motion ของ Roth, J. R. ในสมการที่ (4)

$$\frac{d^2x}{dt^2} = \frac{q_i}{m_i} E_0 \cos(\omega t) \quad (4)$$

โดยที่ผลการเกิดเรืองแสงพลาสมาสีน้ำเงิน-ม่วงในอากาศรูปแบบนี้ มีความเสถียรภาพสูงกว่า และมีพื้นที่ผิวเกิดการดิสชาร์จมากกว่าเมื่อเทียบกับ DBD ส่งผลให้สามารถผลิตอนุภาคพลาสมาที่มีฤทธิ์ต้านเชื้อจุลินทรีย์ได้มากขึ้น จึงมีความเหมาะสมกว่าสำหรับกระบวนการที่ต้องการระยะเวลาและความต่อเนื่องในการใช้งาน

(3) การออกแบบโครงสร้าง (รูปที่3) ให้เชื่อมต่อระบบการไหลเวียนของลมร้อนที่มีอนุภาคออกฤทธิ์ของพลาสมา ระหว่างห้องพลาสมา (Plasma Chamber) และห้องอบสมุนไพร (Herb Chamber) เพื่อให้กระบวนการถ่ายเทความร้อนและจำนวนของ



รูปที่ 3 การออกแบบโครงสร้างเครื่องต้นแบบ

อนุภาคออกฤทธิ์ทำงานร่วมกันอย่างมีประสิทธิภาพ โดยโครงสร้างแบ่งออกเป็น 3 ชั้น ได้แก่ ชั้นล่าง: สำหรับติดตั้งวงจรไฟฟ้าแรงดันสูงกำเนิดพลาสมา, ชั้นกลาง: สำหรับติดตั้งห้องพลาสมาพร้อมแผ่นอิเล็กโทรดภายในที่เกิดดิสชาร์จที่ความดันบรรยากาศ และชั้นบน: สำหรับวางห้องอบสมุนไพร

ลมร้อนที่ประกอบด้วยอนุภาคออกฤทธิ์ (Reactive Species) เช่น UV, O₃ และ Oxygen Radicals ที่มีฤทธิ์ทำลายจุลินทรีย์ซึ่งเกิดจากพลาสมาอากาศจะถูกควบคุมให้ไหลผ่านจากห้องพลาสมาเข้าสู่ห้องอบสมุนไพรผ่านพัดลมและท่อลมหมุนเวียน โดยไม่ให้เกิดอุบัติเหตุสัมผัสกับสนามไฟฟ้าโดยตรง อุณหภูมิและความเข้มข้นของอนุภาคออกฤทธิ์ ถูกควบคุมให้อยู่ในระดับที่มีประสิทธิภาพ โดยออกแบบปริมาตรภายในห้องอบสมุนไพรไม่เกิน 5 เท่าของห้องพลาสมา เพื่อให้การถ่ายเทความร้อนและการยับยั้งจุลินทรีย์เกิดขึ้นพร้อมกันในกระบวนการเดียว

จากผลการออกแบบ ได้ดำเนินการสร้างเครื่องต้นแบบจนแล้วเสร็จ พร้อมทั้งทดสอบเบื้องต้นเพื่อยืนยันสมรรถนะการทำงานตามที่ออกแบบไว้



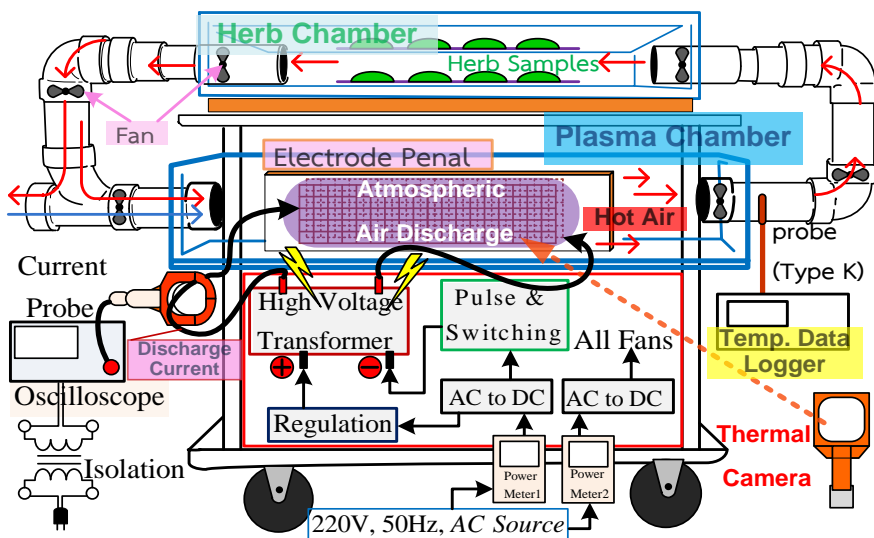
ทั้งในส่วนของวงจรจ่ายแรงดันไฟฟ้า การเกิดดิซชาร์จที่อิเล็กโทรด และระบบควบคุมการไหลเวียนของอากาศ จากนั้นจึงเข้าสู่ขั้นตอนการทดลอง ซึ่งประกอบด้วย 3 ประเด็นหลัก ได้แก่ (1) การทดสอบการทำงานของระบบโดยรวมและการวัดพารามิเตอร์ทางไฟฟ้า (2) การทดสอบการอบแห้งตัวอย่างสมุนไพรด้วยลมร้อนรีแอกทีฟสปีชีส์จากเครื่องต้นแบบ และ (3) การทดสอบประสิทธิภาพในการลดการปนเปื้อนของจุลินทรีย์บนพื้นผิวสมุนไพร

2.2 อุปกรณ์ และวิธีการทดลอง

การทดลองเริ่มต้นด้วยการจัดวางเครื่องต้นแบบตามแผนผังในรูปที่ 4 โดยตั้งค่าพารามิเตอร์แรงดันไฟฟ้าและความถี่ของสัญญาณ เพื่อให้เกิดการดิซชาร์จพลาสมา ที่ระดับความดันบรรยากาศในอากาศ จากนั้นตรวจสอบค่าความถี่และรูปคลื่นของสัญญาณด้วยออสซิลโลสโคป เพื่อปรับตั้งให้การ

ดิซชาร์จบนแผ่นอิเล็กโทรดเกิดการเรืองแสงอย่างชัดเจนสูงสุด ทั้งนี้ เพื่อประยุกต์ใช้ในการสร้างลมร้อนที่ประกอบด้วยอนุภาครีแอกทีฟสปีชีส์สำหรับกระบวนการอบแห้งสมุนไพร

ตัวอย่างสมุนไพรแต่ละชุดถูกชั่งน้ำหนักก่อนเข้าสู่กระบวนการอบแห้ง โดยกำหนดระยะเวลาอบแห้งคงที่สำหรับแต่ละชุดทดลอง ในระหว่างกระบวนการอุณหภูมิภายในระบบถูกวัดที่ตำแหน่งสำคัญ โดยใช้เซนเซอร์ Thermocouple Type K เชื่อมต่อกับเครื่องบันทึกข้อมูล Fluke 2638A ซึ่งทำการวัดและบันทึกค่าอุณหภูมิในทุก 1 นาที ตลอดระยะเวลาการทดลอง นอกจากนี้ อุณหภูมิพื้นผิวของแผ่นอิเล็กโทรดยังถูกบันทึกด้วยกล้องถ่ายภาพความร้อน ทำการวัดค่ากระแสดิซชาร์จด้วยโพรบวัดกระแสผ่านออสซิลโลสโคปที่ถูกต่อผ่านหม้อแปลงแยกจากทางไฟฟ้า และวัดกำลังไฟฟ้าใช้งานโดยแยกระหว่างวงจรดิซชาร์จและระบบพัดลมหมุนเวียนอากาศ



รูปที่ 4 การจัดวางการทดลองของระบบรวม



ภายหลังการอบแห้ง ตัวอย่างสมุนไพรจะถูกชั่งน้ำหนักอีกครั้งเพื่อประเมินอัตราการลดความชื้น พร้อมทั้งประเมินประสิทธิภาพในการลดการปนเปื้อนของจุลินทรีย์บนพื้นผิวสมุนไพร ภายในกระบวนการเดียวกัน

3. ผลการทดลอง และการอภิปรายผล

ภายหลังการออกแบบและสร้างเครื่องต้นแบบจนแล้วเสร็จ ได้ดำเนินการทดสอบประสิทธิภาพการทำงานของระบบตามขั้นตอนที่วางไว้ โดยผลการทดลองแบ่งเป็น 3 ประเด็นหลัก ดังนี้

3.1 ผลการทดสอบระบบโดยรวม

จากการทดลองโดยใช้วงจรไฟฟ้าแรงดันสูง กระแสสลับที่ออกแบบขึ้นเฉพาะสำหรับงานวิจัยนี้ สามารถสร้างการดิสชาร์จบนแผ่นอิเล็กโทรดแบนได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยเกิดการดิสชาร์จของพลาสมาอย่างชัดเจนในช่วงความถี่ประมาณ 1 kHz ซึ่งเห็นการเรืองแสงสีน้ำเงิน-ม่วงของดิสชาร์จพลาสมาปรากฏอย่างเด่นชัดเกิดขึ้นคลุมพื้นผิวทั้งสองด้านบนแผ่นอิเล็กโทรดแบน โดยทดสอบกับแผ่นอิเล็กโทรดที่มีลายเส้นทองแดงตัดกัน ให้เกิดเป็นช่องสี่เหลี่ยมจัตุรัสจำนวน 410 ช่อง ขนาดช่องละ 1 ตร.ซม. โดยมีรูปร่างของสัญญาณกระแสการดิสชาร์จจากพีคถึงพีค (ลักษณะสัญญาณ Spikes สูงสุด) ในอยู่ในช่วง 3 แอมแปร์ (ขึ้นกับสภาพพื้นผิวอิเล็กโทรด) ดังรูปที่ 5 (a)

จากการแยกวัดการใช้พลังงานของแต่ละส่วนด้วย Power Wattmeter พบว่าระบบทั้งหมดใช้พลังงานรวมประมาณ 150 วัตต์ โดยมีกระแสไฟฟ้าวรวมประมาณ 0.851 แอมแปร์ เมื่อพิจารณาเฉพาะระบบพัดลมหมุนเวียนอากาศ ซึ่งประกอบด้วยพัดลมขนาดเล็ก

หลายตัว ใช้พลังงานประมาณ 24 วัตต์ และมีกระแสไฟฟ้า 0.205 แอมแปร์

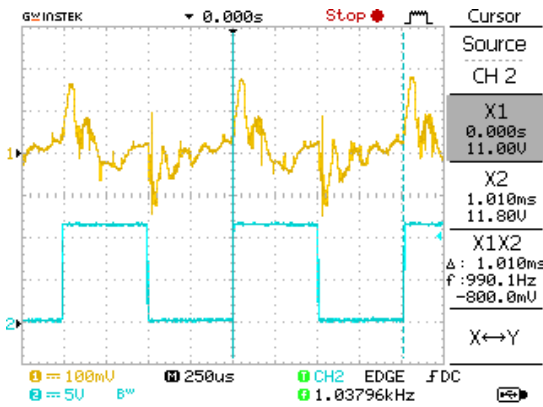
ในขณะที่วงจรสร้างพลาสมามีการใช้พลังงานสูงถึง 123 วัตต์ และมีกระแสไฟฟ้า 0.68 แอมแปร์ ข้อมูลดังกล่าวสะท้อนว่าการใช้พลังงานส่วนใหญ่ของระบบเกิดจากกระบวนการสร้างพลาสมา ซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักในการผลิตลมร้อนอุณหภูมิต่ำที่ประกอบด้วยแอกทีฟซีเอส ตามวัตถุประสงค์ของการออกแบบผลการทดลองวัดอุณหภูมิบนพื้นผิวแผ่นอิเล็กโทรด (แผ่นอิเล็กโทรดไม่ได้อยู่ในพื้นที่ปิดภายในตู้พลาสมา) ด้วยกล้องถ่ายภาพความร้อน พบว่า อุณหภูมิพื้นผิวของแผ่นอิเล็กโทรด ซึ่งเป็นแหล่งกำเนิดความร้อนจากกระบวนการดิสชาร์จพลาสมา มีค่าประมาณ 51-54 °C ขณะที่ภาพถ่ายความร้อนที่ทอหมุนเวียนลม ซึ่งลมถูกพัดพาให้ไหลผ่านจากแผ่นอิเล็กโทรดเข้าสู่ห้องอบแห้ง มีค่าผันแปรอยู่ในช่วง 41-49 °C โดยความแตกต่างของอุณหภูมิในแต่ละตำแหน่งขึ้นอยู่กับระยะห่างจากแหล่งความร้อนและทิศทางการไหลของอากาศภายในระบบ ดังรูปที่ 5 (b)

3.2 ผลทดสอบสมรรถนะการลดความชื้น และประสิทธิภาพในการลดการปนเปื้อนของเชื้อราบนพื้นผิวสมุนไพร

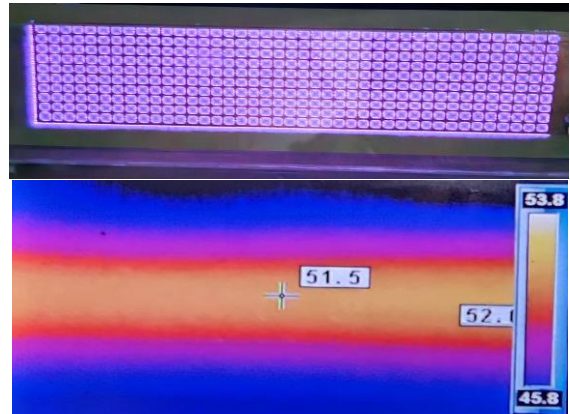
จากผลการทดลองในขั้นตอนแรก ซึ่งยืนยันว่าเครื่องต้นแบบสามารถสร้างการดิสชาร์จบนแผ่นอิเล็กโทรดและเพิ่มอุณหภูมิภายในระบบได้ จึงได้นำไปสู่การทดลองผลการนำลมร้อนรีแอกทีฟซีเอสจากเครื่องต้นแบบมาทดสอบอบแห้งเบื้องต้นกับตัวอย่างสมุนไพรภายในห้องปฏิบัติการ เพื่อประเมินสมรรถนะของระบบในการอบแห้งสมุนไพรและศึกษาความเหมาะสมในการใช้งานจริง



บทความวิจัย

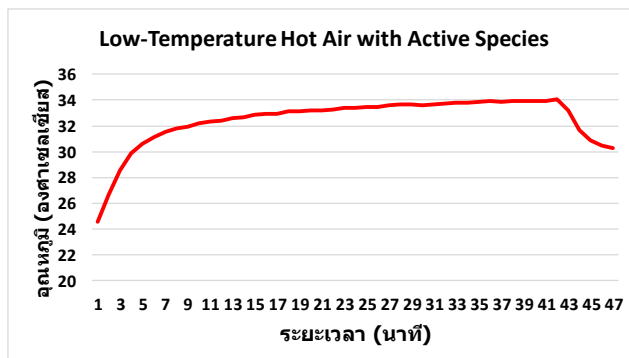


(a)



(b)

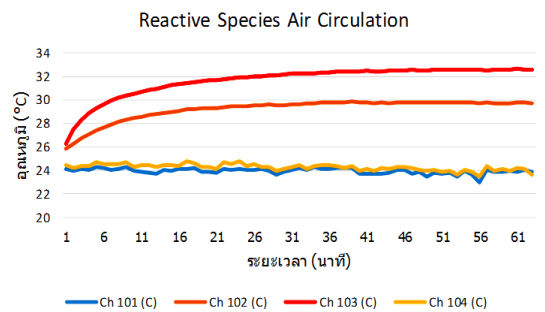
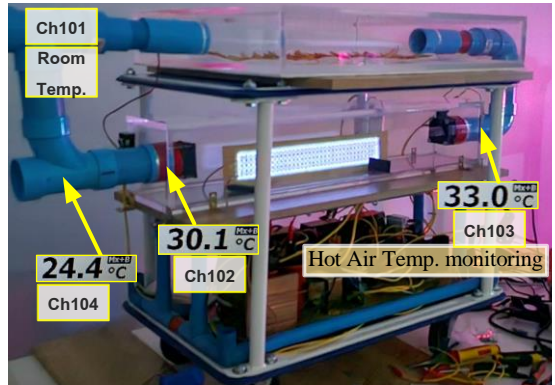
รูปที่ 5 (a) ตัวอย่างรูปร่างสัญญาณของกระแสชาร์จพลาสมานบนแผ่นอิเล็กทรอนิกส์แบน และ (b) ตัวอย่างการใช้กล้องภาพถ่ายความร้อนวัดอุณหภูมิที่แผ่นอิเล็กทรอนิกส์



รูปที่ 6 ตัวอย่างการทดลองอบแห้งกระชายแห้งด้วยระยะเวลา 40 นาที



ผลการทดสอบจากกราฟในรูปที่ 6 แสดงให้เห็นการวัดอุณหภูมิบริเวณต้นทางที่ลมไหลผ่านแผ่นอิเล็กโทรด (ตำแหน่งสร้างลมร้อน) มีการเพิ่มขึ้นจากอุณหภูมิเริ่มต้นที่ต่ำระดับ 24 °C ไปจนถึงสูงสุดที่ 34 °C ด้วยความรวดเร็ว แม้ใช้เพียงแผ่นอิเล็กโทรดหนึ่งแผ่นก็สามารถเพิ่มอุณหภูมิของลมได้ราว 10 °C ทั้งนี้ หากต้องการเพิ่มอุณหภูมิให้สูงขึ้น อาจทำได้โดยการเพิ่มจำนวนหรือขนาดของแผ่นอิเล็กโทรด ร่วมกับการติดตั้งวงจรรขยายกระแสแบบขนานเพื่อรองรับกระแสดีสชาร์จที่สูงขึ้น และเมื่อนำลมร้อนแอกทีฟสปีชีส์นี้ซึ่งร่วมกับระบบหมุนเวียนอากาศ มาทดสอบการอบแห้งเบื้องต้น (รูปที่ 7) พบว่า ภายในระยะเวลาเพียง 40 นาที สามารถอบแห้งตัวอย่างสมุนไพรกระชายแห้ง ที่มีน้ำหนักจาก 100.02 กรัม ลดลงเหลือ 83.42 กรัม หรือคิดเป็นการลดน้ำหนักประมาณ 16.6% โดยผลจากการทดลองนี้ได้แสดงว่าระบบของเครื่องต้นแบบสามารถนำมาใช้อบแห้งสมุนไพรได้จริง โดยที่สามารถผลิตลมร้อนอุณหภูมิต่ำบริเวณหลังผ่านแผ่นอิเล็กโทรดในช่วงประมาณ 34 °C แม้ว่าอุณหภูมิที่ได้จะยังไม่สูงมาก แต่เพียงพอสำหรับกระบวนการที่ต้องการรักษาคุณภาพของสารสำคัญ หรือในสมุนไพรที่มีความบอบบางทางกายภาพ อีกทั้งในกระบวนการเดียวกันนี้ ยังมีการปล่อยแอกทีฟสปีชีส์จากพลาสมาออกมา จึงทำให้ระบบนี้มีศักยภาพในการประยุกต์ใช้เพื่อการอบแห้งสมุนไพรควบคู่กับการลดการปนเปื้อนของเชื้อราได้ภายในขั้นตอนเดียว อย่างไรก็ตามอุณหภูมิของลมร้อนที่สร้างขึ้นได้รับอิทธิพลอย่างมากจากอุณหภูมิแวดล้อม ซึ่งส่งผลโดยตรงต่อการเพิ่มระดับอุณหภูมิภายในระบบ



รูปที่ 7 ตำแหน่งและกราฟแสดงอุณหภูมิลม Reactive Species ที่หมุนเวียนในระบบ

สำหรับการทดสอบสมรรถนะการลดความชื้นพร้อมทั้งประสิทธิภาพในการลดการปนเปื้อนของเชื้อราบนพื้นผิวสมุนไพร ได้ทำการติดตั้งเซนเซอร์วัดอุณหภูมิภายในระบบ 4 ตำแหน่งสำคัญ เพื่อสังเกตพฤติกรรมของอุณหภูมิลมแอกทีฟสปีชีส์ที่หมุนเวียนภายในได้แก่ Ch101: อุณหภูมิห้อง, Ch103: จุดรวมอากาศหมุนเวียนเข้ากับอากาศใหม่, Ch104: จุดสร้างลมร้อนบริเวณหลังผ่านพลาสมา ก่อนเข้าสู่ตู้อบสมุนไพร, Ch105: จุดรับอากาศเข้าใหม่



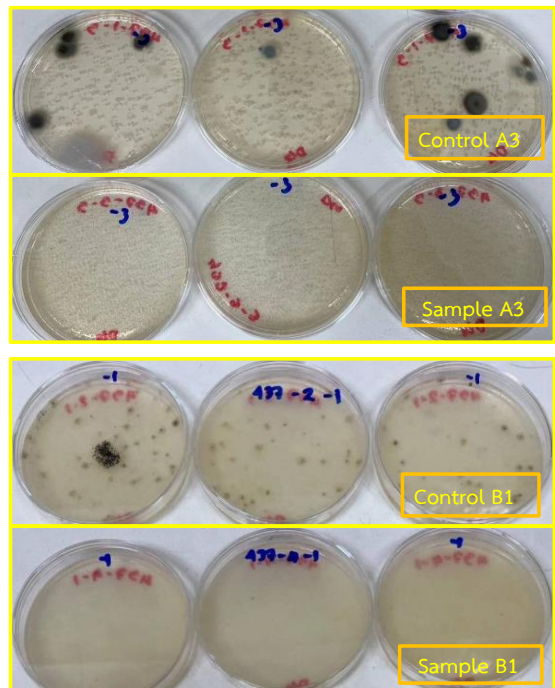
ผลการทดสอบกับตัวอย่างซิงหั่นชิ้น ได้ผลการวัดอุณหภูมิทั้ง 4 ตำแหน่ง พบว่าระบบสามารถสร้างลมร้อนแอกทีฟฮีตส์ได้อย่างชัดเจน โดยอุณหภูมิของลมเพิ่มขึ้นจากอุณหภูมิห้อง 24 °C เป็นประมาณ 33 °C หรือเพิ่มขึ้นประมาณ 10 °C จากอุณหภูมิแวดล้อม (ซึ่งอาจมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามสภาวะแวดล้อมขณะทำการทดลอง) จากการนำลมร้อนดังกล่าวมาใช้ในกระบวนการอบแห้งพบว่าน้ำหนักเริ่มต้นของตัวอย่างซิงหั่น 100.868 กรัม ลดลงเหลือ 90.25 กรัม ภายหลังจากอบด้วยระยะเวลา 60 นาที คิดเป็นการลดน้ำหนักรวม 10.618 กรัม หรือคิดเป็น 10.53% ของน้ำหนักตั้งต้น โดยสีพื้นผิวซิงมีความซีดลงเล็กน้อยหลังการอบ

สำหรับผลการตรวจวิเคราะห์เชื้อราบนตัวอย่างซิงหั่น (รูปที่ 9) โดยดำเนินการตามวิธีมาตรฐาน Bacteriological Analytical Manual (BAM) ภายใต้อุณหภูมิแวดล้อมและตัวอย่างปกติ พบว่าไม่ตรวจพบเชื้อรา (Total Molds) ทั้งในกลุ่มควบคุม (Controls) และกลุ่มตัวอย่างทดลอง (Sample)

การทดลองอบแห้งพร้อมประเมินประสิทธิภาพในการลดเชื้อราบนเป็อนบนพื้นผิวกระชายหั่นชิ้น ซึ่งใช้น้ำหนักทั้งหมด 200 กรัม โดยแบ่งเป็น กลุ่มควบคุม (Controls) และกลุ่มตัวอย่าง (Samples) โดยทำการอบแห้งเฉพาะกลุ่มตัวอย่างด้วยระยะเวลา 120 นาที พบว่า น้ำหนักของกลุ่มตัวอย่างก่อนอบอยู่ที่ 100.294 กรัม ลดลงเหลือ 90.25 กรัม ภายหลังจากอบ คิดเป็นการสูญเสียน้ำหนัก 10.044 กรัม หรือคิดเป็นร้อยละ 10.01 ของน้ำหนักเริ่มต้น



รูปที่ 8 การเปรียบเทียบสีของซิงก่อน-หลังการอบแห้ง



รูปที่ 9 เปรียบเทียบ Total Molds ระหว่างกระชาย Controls กับ Samples บนเพลทเพาะเชื้อ



จากนั้น นำตัวอย่างบรรจุในถุงปลอดเชื้อเพื่อนำไปตรวจวิเคราะห์เชื้อรารวม (Total Molds) พบว่าเครื่องต้นแบบสามารถลดจำนวนเชื้อรารวมบนพื้นผิวกระชายหั่นได้อย่างชัดเจนทั้งในเชิงปริมาณและลักษณะภาพถ่าย โดยผลการทดสอบเชิงปริมาณดำเนินการตามวิธีมาตรฐาน พบว่า กระชายกลุ่มควบคุม A (Controls A) ซึ่งไม่ได้ผ่านกระบวนการลดการปนเปื้อน ตรวจพบเชื้อราปริมาณ 2,000 cfu/g เทียบกับ กระชายกลุ่มตัวอย่าง A (Samples A) ที่ผ่านกระบวนการด้วยเครื่องต้นแบบ ตรวจพบเชื้อราเพียง 16 cfu/g คิดเป็นอัตราการลดเหลือ 0.8% ของค่าเริ่มต้น ส่วนกระชายกลุ่มควบคุม B (Controls B) ตรวจพบเชื้อรา 1,100 cfu/g เทียบกับ กระชายกลุ่มตัวอย่าง B (Samples B) ตรวจพบเชื้อรา 83 cfu/g คิดเป็นอัตราการลดเหลือ 7.5% ของค่าเริ่มต้น การเปรียบเทียบลักษณะเชิงภาพจากเฟลทเพาเชื่อแสดงให้เห็นความแตกต่างอย่างชัดเจนระหว่างกลุ่มควบคุมซึ่งพบเชื้อราบนพื้นผิวกระชายอย่างชัดเจน กับกลุ่มตัวอย่างที่ผ่านกระบวนการลดการปนเปื้อนด้วยเครื่องต้นแบบ ซึ่งมีจำนวนโคโลนีเชื้อราลดลงอย่างมาก ดังแสดงในรูปที่ 9

อย่างไรก็ตาม การที่ยังคงตรวจพบเชื้อราหลงเหลือบางส่วนหลังการทดลอง อาจมีสาเหตุมาจากการที่เชื้อราเหล่านั้นไม่ได้สัมผัสกับอนุพันธ์ออกฤทธิ์ (Reactive Species) ซึ่งอาจเกิดจากการวางตัวอย่างในลักษณะที่ซ้อนทับกัน กล่าวคือ ประสิทธิภาพในการทำลายเชื้อของลมรีแอคทีฟสูงสุดเมื่อสามารถสัมผัสกับเชื้อราบนพื้นผิววัตถุได้อย่างทั่วถึง นอกจากนี้ การเพิ่มพื้นที่สัมผัสระหว่างลมกับพื้นผิววัตถุ ยังช่วยส่งเสริมสมรรถนะของกระบวนการลด

ความชื้นได้ดียิ่งขึ้นอีกด้วย ผลลัพธ์นี้จึงชี้ให้เห็นว่าการเป่าลมร้อนร่วมกับพลาสมาช่วยเร่งการระเหยความชื้นได้ดี แม้ที่อุณหภูมิต่ำ ซึ่งมีข้อดีในการรักษาสารสำคัญของพืชสมุนไพร ควบคู่ไปกับการยับยั้งเชื้อราในขั้นตอนเดียว ในด้านการใช้พลังงานของระบบเครื่องต้นแบบ พบว่ามีอัตราการใช้กำลังไฟฟ้ารวมอยู่ที่ 150 วัตต์ เมื่อประเมินค่าพลังงานไฟฟ้า ในหน่วยกิโลวัตต์-ชั่วโมง (kWh) ตามสมการ $E = P \times t$ พบว่าการอบแห้งกระชายด้วยระยะเวลา 40 นาที มีการใช้พลังงานไฟฟ้า 0.10 kWh ต่อรอบการทำงาน ในขณะที่การอบแห้งซึ่งด้วยระยะเวลา 60 นาที จะใช้พลังงานไฟฟ้า 0.15 kWh ต่อรอบการทำงาน

3.3 อภิปรายผล

จากผลการทดลองด้วยเครื่องต้นแบบซึ่งผลิตลมร้อนอุณหภูมิต่ำพร้อมปล่อยรีแอคทีฟสปีชีส์สำหรับกระบวนการอบแห้งและลดการปนเปื้อนในขั้นตอนเดียว เมื่อทดสอบกับตัวอย่างขิงและกระชายหั่นพบว่า น้ำหนักวัตถุบิดลงประมาณ 10% ภายในเวลา 60 นาที ซึ่งสูงกว่าการตากแดดในสภาพอากาศทั่วไปของประเทศไทย (ในช่วงอุณหภูมิ 33–37°C ความชื้นสัมพัทธ์ 50-60%) ที่ลดน้ำหนักได้เพียง 3-6% สำหรับขิง และ 2-5 % สำหรับกระชายในระยะเวลาเดียวกันอย่างชัดเจน แสดงถึงประสิทธิภาพในการถ่ายเทความร้อนและลดความชื้นที่เหนือกว่าวิธีตากแดด ทั้งยังสามารถควบคุมสภาพแวดล้อมภายในได้ดีกว่า ส่งผลต่อคุณภาพและความปลอดภัยของผลิตภัณฑ์สมุนไพร อีกทั้งข้อได้เปรียบสำคัญของระบบต้นแบบนี้คือ สามารถลดการปนเปื้อนของเชื้อราบนพื้นผิววัตถุได้พร้อมกันในขั้นตอนเดียว โดยผลการตรวจเชื้อรารวม (Total Mold) พบว่าสามารถลด



จำนวนเชื้อราบนพื้นผิววัตถุได้มากกว่า 90% เมื่อเปรียบเทียบกับกลุ่มควบคุม สะท้อนศักยภาพของระบบในการลดความชื้นและควบคุมความปลอดภัยทางจุลินทรีย์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

แนวทางการพัฒนาเพิ่มเติม: จากข้อจำกัดด้านขนาดของเครื่องต้นแบบในปัจจุบัน การพัฒนาในขั้นต่อไปอาจพิจารณาการเพิ่มจำนวนแผ่นอิเล็กโทรด โดยแผ่นอิเล็กโทรดหนึ่งแผ่นสามารถวัดความร้อนบนพื้นผิวได้ประมาณ 55°C การเพิ่มจำนวนแผ่นจะช่วยเพิ่มทั้งอุณหภูมิของลมร้อนภายในระบบและปริมาณของอนุภาคออกฤทธิ์ (Reactive Species) จากพลาสมา ซึ่งส่งผลโดยตรงต่อสมรรถนะในการทำลายเชื้อจุลินทรีย์ อย่างไรก็ตาม การเพิ่มจำนวนแผ่นอิเล็กโทรดจะทำให้ความต้องการกระแสไฟฟ้าเพิ่มขึ้นตามไปด้วย จึงจำเป็นต้องออกแบบวงจรไฟฟ้าให้เหมาะสมกับข้อจำกัดด้านพลังงานและความปลอดภัยจากระบบไฟฟ้าแรงสูง นอกจากนี้ การผสมการทำงานระหว่างระบบพลาสมากับแหล่งให้ความร้อนอื่น เช่น ระบบบีบความร้อน หรือขดลวดความร้อน อาจช่วยเพิ่มระดับอุณหภูมิลมร้อนให้สูงขึ้น และขยายขอบเขตการประยุกต์ใช้งานไปยังวัตถุประเภทอื่น ๆ เช่น ผลไม้หรือเนื้อสัตว์ ที่ต้องการอุณหภูมิอบแห้งสูงกว่ากลุ่มสมุนไพร

การสูญเสียความร้อนระหว่างกระบวนการเป็นปัจจัยสำคัญที่กระทบต่อประสิทธิภาพการผลิตลมร้อน จากผลการทดลองพบว่า การนำลมร้อนผ่านท่อส่งและห้องอบมีการสูญเสียความร้อนในระดับที่มีนัยสำคัญ ส่งผลให้อุณหภูมิของลมร้อนลดลงก่อนเข้าสู่ตัววัตถุ นอกจากนั้น อุณหภูมิแวดล้อมภายนอกยังส่งผลกระทบโดยตรงต่ออุณหภูมิของลมร้อน

โดยเฉพาะในกรณีที่อุณหภูมิภายนอกต่ำ จะทำให้อุณหภูมิของลมร้อนที่ผลิตได้ลดลงตามไปด้วย ดังนั้น เพื่อเพิ่มสมรรถนะของระบบอาจปรับปรุงโครงสร้างห้องด้วยวัสดุฉนวนกันความร้อน หรือเพิ่มชั้นฉนวนรอบท่อส่งลม

การเพิ่มประสิทธิภาพการอบแห้งและลดการปนเปื้อนจุลินทรีย์ ในกรณีที่ต้องการลดความชื้นของสมุนไพรให้มากขึ้น รวมถึงเพิ่มประสิทธิภาพในการทำลายเชื้อราและจุลินทรีย์ต่าง ๆ การอบซ้ำเป็นรอบ ๆ ถือเป็นทางเลือกที่เหมาะสม โดยควรเปลี่ยนตำแหน่งวางสมุนไพรในแต่ละรอบ เพื่อให้วัตถุได้รับความร้อนและสัมผัสกับรีแอกทีฟสปีชีส์จากพลาสมาอย่างทั่วถึง นอกจากนี้ การออกแบบลักษณะส่วนวางวัตถุให้กระจายตัวสม่ำเสมอและไม่ซ้อนทับกัน จะช่วยให้การแลกเปลี่ยนความร้อนและการสัมผัสกับลมร้อนแอกทีฟสปีชีส์มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น

นอกจากนี้ เมื่อเปรียบเทียบสมรรถนะของระบบกับการอบแห้งซึ่งด้วยตู้อบลมร้อนแบบดั้งเดิม ที่อุณหภูมิ 50 - 60 °C ใช้ระยะเวลาการอบแห้งยาวนานถึง 12-24 ชั่วโมง[18] เพื่อลดความชื้นให้ได้ตามมาตรฐาน ซึ่งการใช้อุณหภูมิสูงเป็นเวลานานส่งผลเสียต่อการสูญเสียสารสำคัญ ในสมุนไพร ในขณะที่เครื่องต้นแบบที่นำเสนอในงานวิจัยนี้ สามารถลดน้ำหนักของขิงลงได้ 10.53% ภายในเวลาเพียง 60 นาที และลดน้ำหนักกระชายลงได้ 16.6% ภายใน 40 นาที ด้วยระดับอุณหภูมิที่ต่ำเพียง 34 °C ผลลัพธ์นี้ชี้ให้เห็นว่าการหมุนเวียนอากาศร่วมกับพลาสมาช่วยเร่งการแพร่ความชื้นได้ดี เทคโนโลยีนี้จึงมีข้อได้เปรียบสำคัญในการรักษาสารสำคัญควบคู่ไปกับการยับยั้งเชื้อราในขั้นตอนเดียว



4. บทสรุป

งานวิจัยนี้ออกแบบและพัฒนาเครื่องต้นแบบสำหรับสร้างลมร้อนอุณหภูมิต่ำร่วมกับอนุภาคออกฤทธิ์ของพลาสมาบรรยากาศ เพื่อนำไปใช้ใน กระบวนการอบแห้ง โดยมุ่งเน้นทดสอบผลการอบแห้งด้วยลมร้อนอุณหภูมิต่ำ และการลดการปนเปื้อนของเชื้อรารวมบนสมุนไพร ระบบต้นแบบประกอบด้วยวงจรสร้างสนามไฟฟ้าแรงสูงกระแสสลับให้ตกคร่อมอิเล็กโทรดรูปแบบแผ่นแบน โดยมีโครงสร้าง และระบบหมุนเวียนอากาศ ซึ่งได้รับการออกแบบให้เหมาะสมสำหรับการทดสอบในระดับห้องปฏิบัติการ

ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าเครื่องต้นแบบสามารถผลิตลมร้อนอุณหภูมิต่ำที่สามารถใช้อบแห้งพร้อมกับการปล่อยอนุภาครีแอกทีฟสปีสี่จากพลาสมา ซึ่งช่วยลดการปนเปื้อนของจุลินทรีย์บนผิวสมุนไพรอย่างมีประสิทธิภาพ

นวัตกรรมเครื่องต้นแบบนี้เหมาะสมสำหรับการใช้ งานกับสมุนไพรสำคัญและเมล็ดพันธุ์มูลค่าสูงที่ต้องการลมร้อนอุณหภูมิต่ำอบแห้งเพื่อรักษาคุณภาพวัตถุดิบ และควบคุมความปลอดภัยอย่างเข้มงวด ในขั้นตอนเดียว เทคโนโลยีนี้จึงมีศักยภาพในการยกระดับคุณภาพ ความปลอดภัย และมาตรฐานของผลิตภัณฑ์สมุนไพรท้องถิ่น ตลอดจนส่งเสริมการพัฒนาเศรษฐกิจชุมชนได้ในระยะยาว งานวิจัยในอนาคต จะขยายผลการทดสอบสมรรถนะของเครื่องต้นแบบกับพืชสมุนไพรไทยชนิดอื่น ๆ ที่มีความหลากหลายทางโครงสร้าง เช่น กลุ่มใบ หรือกลุ่มดอก ไม่น้อยกว่า 3 ชนิด เพื่อประเมินพารามิเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับสมุนไพรแต่ละประเภท และยืนยันความครอบคลุมในการใช้งานเชิงอุตสาหกรรม

5. เอกสารอ้างอิง

- [1] J.R. Roth, S. Nourgostar, T.A. Bonds, The one atmosphere uniform glow discharge plasma (OAUGDP)-A platform technology for the 21st century, IEEE Transactions on Plasma Science, 2007, 35(2), 233-250.
- [2] C. Nalwa, A.K. Thakur, Seed quality enhancement through plasma treatment: A review, Indian Journal of Ecology, 2018, 45(3), 472-480.
- [3] J. Guo, Z. He, C. Ma, W. Li, J. Wang, F. Lin, X. Liu, L. Li, Evaluation of cold plasma for decontamination of molds and mycotoxins in rice grain, Food Chemistry, 2023, 402, 134159.
- [4] S. Abdi, A. Hosseini, M. Moslehisad, D. Dorrnian, Decontamination of red pepper using cold atmospheric pressure plasma as alternative technique, Applied Food Biotechnology, 2019, 6(3), 247-254.
- [5] B. Thiyam, A. Sharma, R. Pandiselvam, Atmospheric cold plasma: A novel technique for microbial inactivation and quality preservation of spices and herbs, Plant Science Today, 2024, 11, 1-9.
- [6] N.N. Misra, S. Patil, T. Moiseev, P. Bourke, J.P. Mosnier, K.M. Keener, P.J. Cullen, In-package atmospheric pressure cold plasma treatment of strawberries, Journal of Food Engineering, 2014, 125, 131-138.



- [7] F. Rashid, Y. Bao, Z. Ahmed, J.-Y. Huang, Effect of high voltage atmospheric cold plasma on extraction of fenugreek galactomannan and its physicochemical properties, *Food Research International*, 2020, 138(Part A), 109764.
- [8] S. Durcanyova, L. Slovakova, M. Klas, J. Tomekova, P. Durina, M. Stupavska, D. Kovacik and A. Zahoranova, Efficacy comparison of three atmospheric pressure plasma sources for soybean seed treatment: Plasma characteristics, seed properties, germination, *Plasma Chemistry and Plasma Processing*, 2023, 43, 1863-1885.
- [9] L.A. Yanclo, G. Sigge, Z.A. Belay, A.B. Oyenih, F. October, O.J. Caleb, Effects of Cold Plasma Pretreatment and Cultivar on the Drying Characteristics, Biochemical, and Bioactive Compounds of Tropica' and Keitt Mangoes, *Journal of Biosystems Engineering*, 2024, 43, 135-155.
- [10] J.-W. Bai, D.-D. Li, R. Abulaiti, M. Wang, X. Wu, Z. Feng, Y. Zhu, and J. Cai, Cold plasma as a novel pretreatment to improve the drying kinetics and quality of green peas, *Foods*, 2025, 14, 84.
- [11] A.C. Loureiro, F.C.A. Souza, E.A. Sanches, J.A. Bezerra, C.V. Lamarão, S. Rodrigues, F.A. Fernandes, P. Campelo, Cold plasma technique as a pretreatment for drying fruits: Evaluation of the excitation frequency on drying process and bioactive compounds, *Food Research International*, 2021, 147, 110462.
- [12] N. Thakur, S. N. Vasudevan, Plasma treatment and seed quality advancement: A review, *Agricultural Reviews*, 2021, 42(2), 197-202.
- [13] R. Kumar, P. Singh, S. Kumar, Plasma treatment – A tool to improve seed quality – A review, *Advances in Research*, 2017, 12(4), 1–6.
- [14] J. Durek, A. Fröhling, S. Bußler, A. Hase, J. Ehlbeck, O.K. Schlüter, Pilot-scale generation of plasma processed air and its influence on microbial count, microbial diversity, and selected quality parameters of dried herbs, *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 2022, 75, 102890.



- [15] A. Zahoranova, L. Hoppanova, J. Simoncicova, Z. Tucekova, V. Medvecka, D. Hudecova, B. Kalinakova, D. Kovacik, M. Cernak, Effect of cold atmospheric pressure plasma on maize seeds: Enhancement of seedlings growth and surface microorganisms inactivation, *Plasma Chemistry and Plasma Processing*, 2018, 38, 969-988.
- [16] S. Preechayan, K. Tonmitr, A. Suksri, P. Siriputthaiwan, Application of atmospheric plasma : Fungal decontamination on grains, *KKU Research Journal*, 2009, 14(2), 213-223. (in Thai)
- [17] S. Preechayan, K. Tonmitr, A. Suksri, P. Siriputthaiwan, Decontaminate of aflatoxin producing fungi on agriculture products by atmospheric discharge plasma, *KKU Research Journal*, 2010, 15(3), 202-213. (in Thai)
- [18] J. Adeniyi Depiver, S. Sabui, An empirical study on convective drying of ginger rhizomes leveraging environmental stress chambers and linear heat conduction methodology, *Agriculture*, 2023, 13(7), 1322.

Natural Heat Convection Analysis on Boundary layer and Apply Utilization to Inclined Solar Collector

Sriwichai Susuk^{1*}, Rachain Visutthipat¹, Weerayuth Promjan² and Natsacha Inchoorrun²

¹ Biodiversity Research Center, Research and Development Group for Bio-Industries, Thailand Institute of Scientific and Technological Research (TISTR) 12120

² Expert Center of Innovative Health Food, [Inno-Food], Research and Development Group for Bio-Industries, Thailand Institute of Scientific and Technological Research (TISTR) 12120

* Corresponding author, E-mail: sriwichai@tistr.or.th

Received: 7 August 2025; Revised: 4 February 2026; Accepted: 9 March 2026

Online Published: 22 April 2026

Abstract: Natural convection heat transfer driven by solar energy is a sustainable and environmentally friendly method for drying agricultural products, representing a critical mechanism in various solar dryer applications (free energy). This study experimentally investigates the laminar natural convection heat flow along an inclined solar collector under conditions approximating steady-state operation during peak sunlight hours. The research evaluates the velocity and temperature distributions on an inclined glass plate based on the development of thermal boundary layers. In addition to the limiting cases of flow adjacent to surfaces. Results indicate that the natural convection heat transfer coefficient ranges from 5.2 to 6.6 $W/m^2\text{C}$, while the collected heat energy ranges from 150 to 610 J/s, achieving a collector efficiency between 23.9% and 38.3%. The dry air flow rate was observed to be between 0.016 and 0.024 m^3/s during daylight hours (local time). Under a fixed solar collector tilt angle of 25° and solar irradiation ranging from 217.8 W/m^2 to 552.7 W/m^2 , the average Nusselt and Rayleigh numbers were determined to be 221.7 and 6.7×10^9 , respectively. Finally, load tests demonstrated a drying rate ranging from 0.07 to 1.45 kg/hr, which varied significantly based on local climatic conditions and the time of day.

Keywords: Natural convection heat transfer; Sustainable renewable energy; Laminar natural convection heat; Heat transfer coefficient; Nusselt number; Rayleigh number



1. Introduction

Solar radiation is a sustainable energy source that is both abundant and environmentally friendly. Solar drying is a superior alternative to traditional open-air drying, as it protects products from contaminants like dust and insects while maintaining higher nutrient levels and accelerating the dehydration process. Drying involves the reduction of moisture through vaporization, a process often driven by buoyancy-induced fluid flow known as natural convection. In solar collectors, heat transfer occurs between the solid absorber surface and the surrounding air, resulting in the development of a thermal boundary layer. Natural convection heat transfer is driven by non-uniform density distributions within a fluid caused by temperature gradients [1-3]. For an inclined plate, the laminar flow region can be analyzed by modifying the gravitational terms in dimensionless governing equations. Key dimensionless quantities used to correlate heat transfer coefficients include the Nusselt number (Nu), Rayleigh number (Ra), Grashof number (Gr), Reynolds number (Re), and Prandtl number (Pr). Specifically, the Pohlhausen equation is utilized to solve for air velocity within the boundary layer of laminar flow on inclined surfaces. Literature Review, previous studies have analyzed these dynamics extensively. Deghani et al. [4], Alzwayi and Paul [7] demonstrated that temperature variations significantly affect air transition on

isothermal plates, particularly below 60°C. Hollands et al. [8] found that for tilt angles up to 70°, heat transfer rates can be predicted by replacing Ra with $Ra \cdot (\cos \omega)$. Furthermore, researchers like González-Bárcena et. al., [9] Mehrtash and Tari [10] have utilized computational fluid dynamics (CFD) to refine air flow rate and temperature field models for inclined sinks. Mustafa and Neama [11] observed that absorber plate temperatures are directly proportional to solar radiation, noting a peak temperature of 82°C at a 30° tilt angle. Despite these findings, there remains a need for a comprehensive evaluation of natural convection correlations specifically tailored for inclined glass solar collectors under specific tropical climatic conditions like those in Thailand.

Objectives and Significance, this research performs a systematic evaluation of natural convection correlations and heat transfer coefficients. This study assumes steady, incompressible laminar flow to simplify the boundary layer analysis for the intended application. While natural convection can be unsteady, the steady-state assumption is applied here to predict the mean performance of the collector under constant solar irradiance. The primary objective is to examine dimensionless correlations (Nu, Ra, Gr, Re, Pr) and the Pohlhausen equation to optimize heat and mass flow rates. Unlike previous studies that examine various angles, this work focuses on the

performance at a fixed tilt angle of 25° (with the peak thermal output, comparative of 20° and 30°) to determine the effectiveness of the collector for agricultural drying at standard pressure.

2. Experimental detail; material and method

2.1 Description of solar collector inclined plate

Figure 1 illustrates the schematic cross-sectional view of the inclined solar collector and the development of the boundary layer. The geometric model features a glass plate with dimensions of 2.4 m in length, 1.2 m in width, and 6 mm in thickness. Supported by a mild steel frame, the structure is designed to maximize solar gain during daylight hours to evaluate the buoyancy-driven boundary layer and air mass flow rate under natural convection at constant pressure. The collector was oriented at a fixed tilt angle of 25° from the horizontal. This specific angle was selected based on a preliminary empirical study comparing tilt angles of 20° , 25° and 30° at the experimental site. The results demonstrated that the 25° inclination yielded the highest surface plate temperature (T_p) and maximum heat energy absorption for Pathum Thani, Thailand. This increased surface temperature is directly proportional to the heat energy absorbed, which effectively drives the natural buoyancy mechanism required for analyzing the laminar boundary layer.

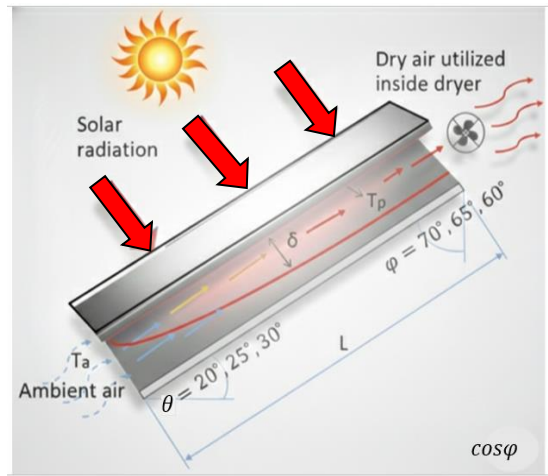


Fig. 1 Schematic of inclined solar collector

2.2 Experimental Setup and Instrumentation

The measurement were carried out at Pathum Thani, Thailand a latitude of $14^\circ 0' 48.46''$ North and longitude of $100^\circ 31' 49.76''$ East. from January 2022 to December 2024. Testing was carried out under no-load conditions between 8 a.m. and 4 p.m. daily. Air temperatures were measured along the interior surface of the glass plate using five designated points positioned along a central axis (red line), each spaced approximately 20 cm apart, as shown in the schematic diagram in Figure 2. The thermal profile was established by recording parameters hourly using a solar power meter (SM206-SOLAR, uncertainty $\pm 5\%$) for Solar Radiation and an Infrared thermometer (TM 1803, accuracy $\pm 2\%$) for Ambient (T_a) and Surface (T_p) Temperatures. Air velocity was monitored using an anemometer (CBzSGHJ001)



with an accuracy of $\pm 3\%$, ensuring precise data on convective cooling effects. Humidity levels were tracked via a temperature & humidity meter (L563A) with a $\pm 5\%$ RH margin, while Moisture Content was determined using an OHAUS MB23 Moisture meter (repeatability $\pm 0.05\%$), all detail according to Table 2. These high-precision instruments ensure the reliability of the collected data across varying environmental conditions throughout the study period. All measurements were conducted in accordance with the manufacturer's calibration standards to minimize potential systematic errors in the thermal analysis.

3. Equations and mathematics analysis

3.1 Analysis mechanism heat solar energy

To comprehensively understand the natural buoyancy mechanism of a heated plate, a coupling between energy and mass transfer must be established (according to Figure 3). These coefficients are parameterized as functions of dimensionless quantities. Similar to the ideal gas law, the density of dry air is a critical factor in the absorption of surrounding moisture [5, 12-15].

3.2 Thermophysical Properties and Reference

Temperature

The thermo-physical properties of gas are significantly influenced by variations in temperature and pressure. In this study, natural convection heat transfer occurs between the collector surfaces

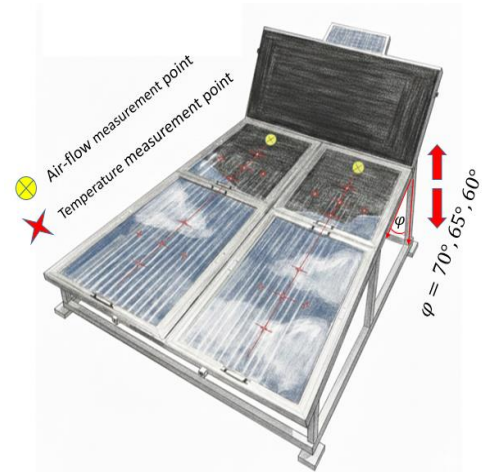


Fig. 2 Experimental setup solar collector plate

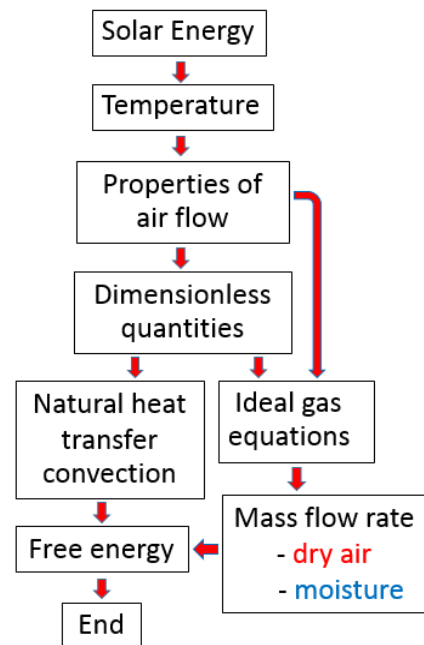


Fig. 3 Schematic chart of analysis

and the ambient air. This process induces a flow of dry air, driven by density gradients within the boundary layer. To simplify the numerical



analysis, the air is assumed to be a steady, laminar, and incompressible fluid [9]. The relevant physical properties are calculated using equations (1-6) evaluated at the reference temperature.

$$\text{Pr}(T) = 0.804 - 3.25 \times 10^{-4} T_f \quad (1)$$

$$\mu(T) = \frac{1.458 \times 10^{-6} \times T_f^{3/2}}{T_f + 110.4} \quad (2)$$

$$k(T) = \frac{2.68151 \times 10^{-3} T_f^{3/2}}{T_f + 245.4 \times 10^{-12/T_f}} \quad (3)$$

$$C_p = \frac{\text{Pr} \cdot k}{\mu} \quad (4)$$

$$\rho_a = \frac{P_A}{R_A \times T_f}; \text{ Considering the air as an ideal gas} \quad (5)$$

$$T_f = \frac{T_p + T_a}{2} \quad (6)$$

The boundary-layer thickness for laminar free convection and the mean flow velocity can be determined using Equations (7) and (8), respectively [7].

$$\frac{\delta}{L} = 3.93 \text{Pr}^{-1/2} (0.92 + \text{Pr})^{1/4} \left(\frac{Ra}{\text{Pr}} \right)^{-1/4} \quad (7)$$

$$v = \frac{\mu \cdot Gr^{1/2}}{\rho \cdot L} \quad (8)$$

3.3 Governing Equations for Dimensionless Quantities

The heat transfer characteristics and flow behavior are evaluated using dimensionless parameters. According to established correlations [5,13,14], these quantities are defined as follows:

Nusselt Number (Nu), Represents the ratio of convective to conductive heat transfer across a fluid boundary layer. Specifically, it characterizes the enhancement of heat transfer due to fluid motion compared to the heat transfer that would occur through pure conduction in a stationary fluid layer of the same thickness.

$$\bar{N}_u^{1/2} = \left[0.825 + \frac{0.387 Ra^{1/16}}{\left[1 + (0.492 / \text{Pr})^{9/16} \right]^{8/27}} \right] \quad (9)$$

Rayleigh Number (Ra), Characterizes the flow regime and the strength of buoyancy-driven flow in free convection.

$$R_a \cos \varphi = P_r \times G_r \cos \varphi \quad (10)$$

Grashof Number (Gr), Relates the buoyancy force to the viscous force acting on the fluid

$$G_r = \frac{L^3 g \beta \rho^2 (T_p - T_a)}{\mu^2} \quad (11)$$

$$\beta = \frac{1}{(T_f + 273.15)} \quad (12)$$



Reynolds Number (Re), Defined for internal or forced flow components within the system.

$$Re = \left(\frac{\bar{N}_u}{0.664 Pr^{1/3}} \right)^2 \quad (13)$$

Convective heat transfer coefficient (hc), derived from the Nusselt number.

$$h_c = \frac{k\bar{N}_u}{L} \quad (14)$$

3.4 Solar Collector Design and Energy Analysis

The intensity of solar radiation, natural convection characteristics, and required thermal energy are evaluated using Equations (15-18). Previous research by Ayad et al. suggested that a tilt angle of 30° maximizes thermal energy gain. However, empirical results from the present study conducted at a latitude of 14°0'48.46" N demonstrate that a tilt angle of 25° yields superior thermal performance. This experimental finding aligns with the theoretical calculations derived from Equation (16). Furthermore, the correlation was validated by modifying the Rayleigh number (Ra) in Equation (10) to account for the inclination, substituting it with $Ra \cdot \cos(65^\circ)$. This adjustment accounts for the reduction in the buoyancy force component

$$\theta = 10^\circ + Lat\phi \quad (15)$$

$$E_i = I \times A \quad (16)$$

$$\eta_c = \frac{\dot{q}_c}{E_i} \times 100 \quad (17)$$

$$\dot{q}_c = h_c \times A \times (\Delta T) \quad (18)$$

3.5 Pressure Analysis

The total vapor pressure of water at the operating temperature, along with the air properties derived from the ideal gas law, can be evaluated using Equations (19-23) [15,16]. These equations are essential for determining the humidity ratio and the thermodynamic behavior of the moist air within the drying system.

$$P_s(T) = \exp \left[25.317 - \frac{5144}{T_f + 273.15} \right] \quad (19)$$

$$P_A V_A = m_a R_A (T_f + 273.15) \quad (20)$$

$$P_s V_w = m_w R_w (T_v + 273.15) \quad (21)$$

$$\frac{m_w}{m_a} = 0.622 P_s / (P_{atm} - P_s) \quad (22)$$

$$\frac{m_w}{m_a} = \frac{\frac{P_s V}{R_w (T_f + 273.15)}}{\frac{P_A V}{R_A (T_f + 273.15)}} \quad (23)$$

4. Results and Discussions

4.1 Solar Radiation and Thermal Performance

Table 1 and Figure 4 present the comprehensive hourly performance of the solar collector under varying tilt angles 20°, 25°, 30°. The incident solar irradiance intensified from 218 W/m² in the early morning to a peak of 553 W/m² at 1 p.m., this peak irradiance directly influenced the absorber's thermal gain, with the 25° tilt angle consistently yielding the highest glass plate temperatures (T_p) throughout the day. Specifically, at the solar noon peak, the 25° configuration achieved a maximum T_p of 72.4°C, surpassing the 20° (71.8°C) and 30° (71.3°C) orientations. This variance confirms that a 25° inclination optimizes the angle of incidence, thereby maximizing the capture of beam radiation

and minimizing reflective losses during the highest flux periods. Psychrometric analysis and drying Potential, the internal microclimate of the collector showed a superior drying potential compared to ambient conditions. As the solar intensity peaked, the internal relative humidity (RH) plummeted from an initial 32.3% to a minimum of 21.3%, whereas the ambient RH remained significantly higher at 36.7%. Engineering Insight, the observed inverse relationship between T_p and internal RH validates the system's capability to drastically lower the air's partial vapor pressure. This increases the humidity ratio differential between the drying air and the product surface, which is the primary driving force for accelerated mass transfer in solar drying applications.

Table 1 Variation of solar radiation, average film temperature and relative humidity

Time	8 a.m.	9 a.m.	10 a.m.	11 a.m.	12 a.m.	1 p.m.	2 p.m.	3 p.m.	4 p.m.
Solar radiation (W/m ²)	218	298	361	430	486	553	487	406	292
Ambien temperature; T_a (°C)	31.4	34.4	37.0	39.6	40.9	42.6	41.4	39.3	35.6
Avg. glass plate temperature; T_p (°C) at 20°	37.2	45.9	52.5	59.7	65.1	71.8	66.0	57.2	47.5
Avg. glass plate temperature; T_p (°C) at 25°	37.8	46.7	53.8	60.2	65.3	72.4	66.3	57.5	47.6
Avg. glass plate temperature; T_p (°C) at 30°	36.8	45.5	52.3	59.5	64.8	71.3	65.7	56.8	47.2
%R.H. ambient air	52.8	46.5	43.3	39.2	38.9	36.7	38.4	40.6	43.5
%R.H. inside solar collector	32.3	28.4	26.7	23.8	23.4	21.3	22.4	23.5	25.7

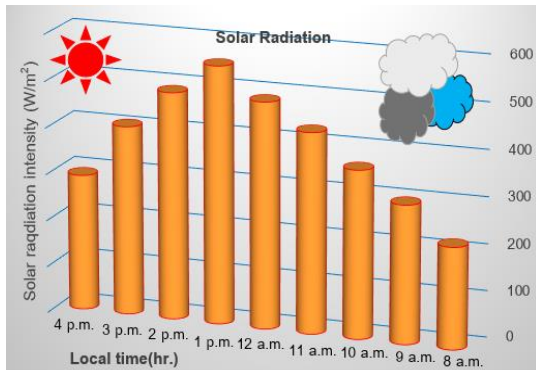


Fig. 4 Variation of mean solar radiation

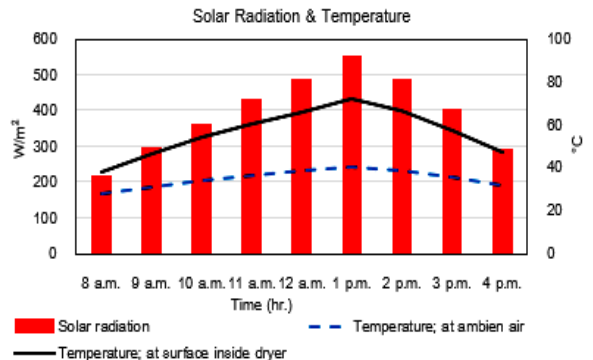


Fig. 5 Variation of solar radiation and Temp.

4.2 Dimensionless Parameters and Flow Characteristics

The correlation between mean temperature and solar radiation is illustrated in Figure 5, both parameters reached their peak at 1 p.m. aligning with the solar noon period where solar irradiance intensity is at its maximum. Throughout the observation period (8 a.m. to 4 p.m.), the temperature of the absorber plate (T_p) consistently exceeded the ambient air temperature (T_a), establishing a sustained thermal gradient (ΔT) that serves as the primary driver for the system's efficiency.

Fluid dynamics and buoyancy, the significant temperature differential creates a localized air density gradient within the collector. According to the principles of fluid mechanics, the reduction in air density near the absorber surface induces a buoyancy force, governed by the Grashof number, which overcomes internal viscous drag.

Passive flow generation, this buoyancy effect establishes a steady-state flow field, where heated air rises via natural convection. This mechanism ensures a continuous mass flow rate of heated air into the drying chamber without the requirement for external mechanical work or parasitic energy consumption.

Energy balance and heat transfer, the synchronized rise of solar radiation and surface temperature validates the high spectral absorptivity of the collector material and the effective minimization of convective and radiative heat losses.

Natural draft optimization, the establishment of a robust natural draft through these density gradients demonstrates that the system is optimized for passive solar thermal gain, utilizing the stack effect to maintain the required velocity for effective moisture removal in drying processes.

The relationship between the Rayleigh number (Ra) and the Nusselt number (Nu) is illustrated in Figure 6. As dimensionless quantities, they characterize the free convection flow resulting from air density gradients within the collector. This analysis characterizes the transition and effectiveness of convective heat transfer within the solar collector system.

Rayleigh number (Ra) and Buoyancy forces, the Rayleigh number, represented by the red bars, quantifies the ratio of buoyancy-driven forces to viscous and thermal diffusive forces. As the temperature increases from 33°C to a peak of 56°C, Ra increases significantly, reaching values in the range of 8×10^9 . This high magnitude confirms that the flow within the collector is dominated by natural convection and has likely entered the turbulent regime, which is essential for maximizing air mixing and heat uptake.

Nusselt number (Nu) and Convective efficiency, the Nusselt number, indicated by the black line, represents the ratio of convective to conductive heat transfer across the boundary layer. The graph shows Nu rising in tandem with temperature and Ra, peaking at approximately 230. This peak validates that the convective heat transfer is most efficient when the absorber plate reaches its maximum operating temperature, directly correlating with the period of peak solar irradiance identified previously.

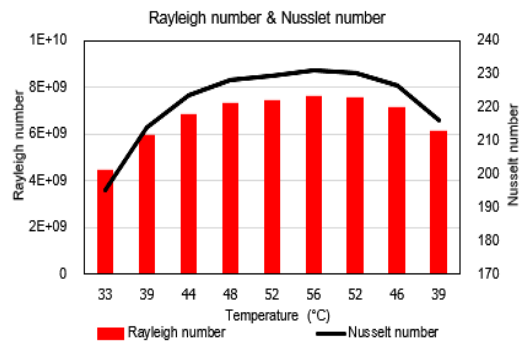


Fig. 6 Variation of Rayleigh and Nusselt number

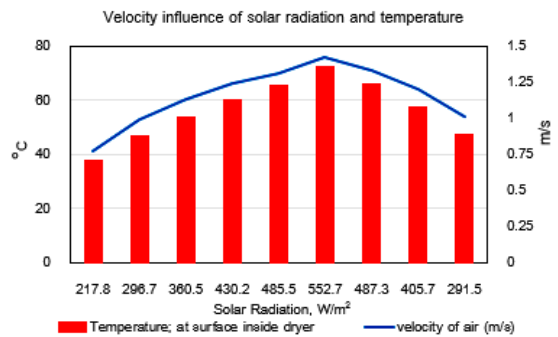


Fig. 7 Variation of velocity

Figure 7 illustrates the velocity influence of solar radiation and temperature shows a direct correlation between solar irradiance and air velocity as solar radiation peaks at 552.7 W/m², the absorber plate temperature reaches its maximum. This creates a significant temperature difference between the air inside the collector and the ambient air. This temperature rise decreases the air density, creating a pressure head that drives the natural draft. The resulting velocity (peaking at 1.4 m/s) is the physical manifestation



of the system's ability to maintain a continuous flow for moisture displacement without mechanical assistance.

Figure 8 illustrates the mean convective heat transfer coefficient (h_c) and the resulting convective heat transfer rate. The heat transfer coefficient fluctuated between 5.2 and 6.5 $W/m^2\text{C}$, while the convective heat rate ranged from 150 to 610 J/s. This heat exchange occurs at the glass surface, driven by the buoyancy-induced motion of air (natural convection). These processes are significantly influenced by the film temperature (T_f), which ranged between 33°C and 56°C. The results indicate that the convective rate peaks at the maximum film temperature, reflecting the increased buoyancy forces. The most significant thermal activity was observed at 1 p.m., where the performance is governed by the peak incident heat flux. During this period, the intensified temperature gradient enhances the convective flow, leading to the maximum observed heat transfer rates.

Figure 9 illustrates the relationship between the component volumetric flow rates and the film temperature (T_f) within the solar thermal system. The observed airflow is a direct consequence of buoyancy-driven flow fields induced by temperature-dependent density gradients, a process fundamental to natural convection. As the solar-heated film temperature increased from 33°C to 56°C, the resulting convective heat rate

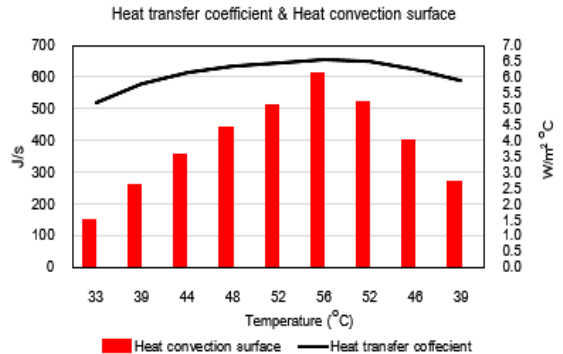


Fig. 8 Variation of heat transfer coefficient and heat convection surface

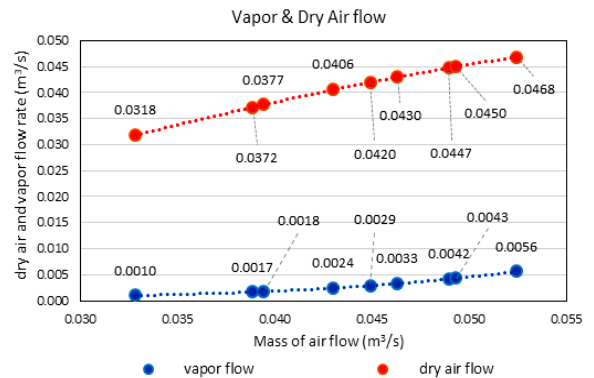


Fig. 9 Variation of volumetric flow rate characterization of moist air components

rose significantly from 150 to 610 J/s. Concurrently, the total volumetric flow rate representing the system's ventilation or drying capacity ranged from 0.033 to 0.052 m^3/s . This total flow is comprised of both dry air and water vapor components, where the mass transfer is strictly governed by the buoyancy regime established by the solar thermal gradient.

4.2 Performance Evaluation with Product Load

Figure 10 illustrates the transient response of the solar collector under actual loading conditions from 8 a.m. to 4 p.m., the analysis focuses on the correlation between solar irradiance, theoretical mass flow rates derived from the equations, and the measured drying rate.

The solar radiation (red line) peaked at approximately 550 W/m^2 around 1 p.m. This peak directly correlates with the maximum mass flow rate, validating that the natural convection mechanism is highly sensitive to the thermal gradient established by the solar flux. The analytical mass flow rate (black line) and the actual drying test with load (blue line) exhibit a high degree of synchronization. The theoretical model, utilizing dimensionless groups (Gr and Ra), effectively predicts the trend of the air movement, though the experimental drying rate is lower due to the latent heat of vaporization and the internal resistance of the product load. The data confirms that the fixed tilt angle of 25° successfully concentrated solar energy to achieve a peak mass flow rate of approximately 2.2 kg/hr (analytical) and 1.5 kg/hr (experimental) during solar noon. This reinforces the maximizing buoyancy.

Figure 11 illustrates experimental results demonstrate a high level of synergy between the collector's thermal performance and the drying of the banana 10 kg initial load (flattening them to a uniform thickness of approximately 1 cm). By

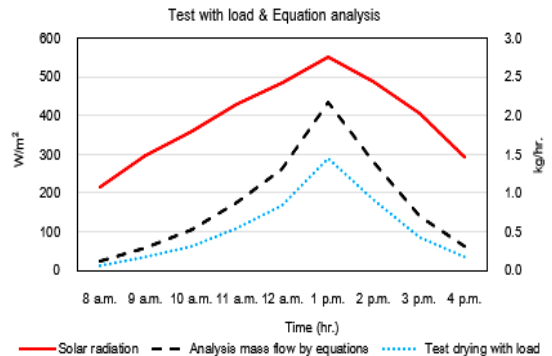


Fig. 10 Variation of solar radiation, analytical mass flow, and experimental drying rate

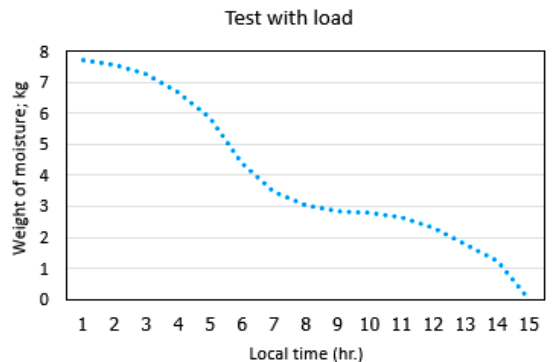


Fig. 11 Variation of moisture loss under natural convection solar drying

utilizing an optimized 25° tilt angle, the system effectively managed the transition of the product from an initial 80% to a final 12% moisture content (w.b.) over a cumulative around 15-hour period.

First day: The acceleration phase (hours 1–8). The system experienced the peak solar radiation of 550 W/m^2 . As the experimental mass flow reached 1.5 kg/hr at 1 p.m., this high airflow effectively stripped the free moisture from the

banana surfaces, this is reflected by the sharp drop, where the drying rate was at its maximum due to optimal buoyancy and thermal gain.

Second day: The diffusion phase (hours 9–15). As the process entered the second day, the moisture removal rate slowed down. This is the falling rate period. At this stage, the remaining moisture is bound moisture trapped deep within the banana tissues. Even with a high mass flow, the drying is now limited by internal diffusion rather than external convection.

5. Conclusions

This study demonstrates that a 25° tilt angle is the critical design parameter for maximizing solar absorption and natural convection. The system achieved a high efficiency thermal regime, characterized by a Rayleigh number (Ra) approximately 8×10^9 and a peak Nusselt number (Nu) of 230. These values confirm that buoyancy forces effectively overcame viscous resistance, maintaining a consistent mass flow rate of 0.024 m³/s without external assistance. Thermodynamic analysis showed a peak thermal efficiency of 38.3% and a maximum heat transfer coefficient (h_c) of 6.6 W/m²°C, converting incident radiation (up to 610 J/s) into useful thermal energy while minimizing heat losses. In practical load tests with 10 kg of agricultural product, the collector successfully reduced moisture content

Table 2 Detailed specifications of experimental instrumentation

Measurement Parameter	Measurement Range	Accuracy
Solar Radiation	0.1–399.9 W/m ²	± 5%
Ambient (T _a) & Surface (T _p)	-50°C-500°C	± 2%
Air Velocity	0.3–30.0 m/s	± 3%
Relative Humidity	10%–95% RH	± 5% RH
Moisture Content	0.00%–100%	± 0.05%

from 80% to 12%. This process followed a distinct two-stage drying characteristic, an initial acceleration phase (air velocity up to 1.4 m/s) followed by a stable diffusion phase.

Ultimately, the results validate this inclined solar collector as a high-performance, zero-emission solution, offering a technologically viable and sustainable pathway for renewable energy based agriculture. Beyond thermal performance, this system represents a significant in energy conservation. By utilizing passive natural convection, the collector eliminates the need for electricity. This translates into a sustainable and technologically viable pathway for low-carbon agriculture, aligning with global energy conservation mandates and the transition toward a circular bio-economy.



6. Nomenclature

Nu	dimensionless	Nusselt number	m_a	g	Mass of air
Ra	dimensionless	Rayleigh number	P_{atm}	Pa	Pressure of ambient, 1 atm
Pr	dimensionless	Prandtl number			
Gr	dimensionless	Grashof number	P_A	Pa	Pressure of air
Re	dimensionless	Reynolds Number	P_s	Pa	Pressure of steam (moisture)
g	m/s^2	Acceleration due to gravity	R_A	$J/kg^\circ K$	Gas constant = 287.1
ϕ	$^\circ N$	Latitude of collector location	R_w	$J/kg^\circ K$	Moisture constant = 461.5
β	$1/^\circ K$	Coefficient of thermal expansion	h_c	$W/m^2^\circ C$	Convective heat transfer coefficient
ρ	kg/m^3	Density	\dot{q}	J/s	Heat transfer rate
ΔT	$^\circ C$	Temperature difference; ($T_p - T_a$)	C_p	$kJ/kg^\circ C$	Specific heat of dry air
T_a	$^\circ C$	Temperature ambient air	k	$W/m^\circ C$	Thermal conductivity
T_p	$^\circ C$	Surface plate's temperature	E_i	W	Solar energy
			μ	$kg/m.s$	Dynamic viscosity
			L	m	Length
T_v	$^\circ C$	Vapor temperature			
T_f	$^\circ C$	Film temperature			
v	m/s	Velocity of air			
δ	m	Boundary-layer thickness			
A	m^2	Total collector area			
η_c	%	Efficiency Thermal collector			
m_w	g	Mass of vapor removed (moisture)			
V	m^3	Volume of air			

7. Acknowledgements

The authors would like to express their sincere gratitude to the Biodiversity Research Center and the Research and Development Group for Bio-Industries at the Thailand Institute of Scientific and Technological Research (TISTR) for providing the research facilities, equipment, and technical support that made this work possible.



8. References

- [1] T.A. Yassen, M.S.M. Al-Jethelah and H.S. Dheyab, Experiment study of innovative indirect solar dryer, *International Journal of Heat and Technology*, 2021, 39(4), 1313–1320.
- [2] M.C. Ndukwu, E.O. Diemuodeke, F.I. Abam, U.C. Abada, N. Eke-emezie and M. Simo-Tagne, Development and modelling of heat and mass transfer analysis of a low-cost solar dryer integrated with biomass heater: Application for West African Region, 2020, *Scientific African*, 10, e00615.
- [3] G. Habtay, J. Buzas and I. Farkas, Heat transfer analysis in the chimney of the indirect solar dryer under natural convection mode, *FME Transactions*, 2020, 48, 701–706.
- [4] P. Deghani, D.H. Chaudhari and M.J. DiDomizio, Natural convection on a vertical surface: Direct numerical simulation versus empirical correlations, *Journal of Physics: Conference Series*, 2024, 2885, 012056.
- [5] A. Jaffer, Natural convection heat transfer from an isothermal plate, *Thermo*, 2023, 3, 148–175.
- [6] T. Fujii, H. Imura, Natural convection heat transfer from a plate with arbitrary inclination, *Heat and Mass Transfer*, 1972, 15(4), 755–767.
- [7] A.S. Alzwayi and M.C. Paul, An analytical Investigation of the Physical Dimensions of Natural Convection Flow on a Vertical Heated Plate, *Proceedings of the World Congress on Engineering*, 2010, 1404–1408.
- [8] K.G.T. Hollands, T.E. Unny, G.D. Raithby and L. Konicek, Free convective heat transfer across inclined air layers, *Journal of Heat Transfer*, 1976, 98(2), 189–193.
- [9] D. González-Bárcena, N. Martínez-Figueira, A. Fernández-Soler, I. Torralbo, M. Bayón, J. Piqueras, I. Pérez-Grande, Experimental correlation of natural convection in low Rayleigh atmospheres for vertical plates and comparison between CFD and lumped parameter analysis, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2024, 222, 125140.
- [10] M. Mehrtash, I. Tari, A correlation for natural convection heat transfer from inclined plate-finned heat sinks, *Applied Thermal Engineering*, 2013, 51(1-2), 1067–1075.
- [11] A.T. Mustafa and M.A. Neama, Natural convection heat transfer on an inclined unglazed solar absorber-plate: Experimental investigation, *Conference: AIP Conference Proceedings*, 2023, 2530, 090002.



- [12] J.B. Hussein, M.A. Hassan, S.A. Kareem and K.B. Filli, , Design, construction and testing of a hybrid photovoltaic (PV) solar dryer, International Journal of Engineering Research and Science, 2017, 3(5), 1-14.
- [13] S.W. Churchill and H.H.S. Chu, Correlating equations for laminar and turbulent free convection from a vertical plate, International Journal of Heat and Mass Transfer, 1975, 18(11), 1323–1329.
- [14] Mehmet Daş, E. Aliç and E.K. Akpınar, Numerical and experimental analysis of heat and mass transfer in the drying process of solar drying system, Engineering Science and Technology, an International Journal, 2021, 24, 236–246.
- [15] K.N. Çerç, D.B. Saydam and E. Hürdoğan, Estimation of experimental drying performance parameters using polynomial SVM and ANN models, european mechanical science, 2020, 4(3), 123–130.
- [16] I.J.G. Berry, Psychometry: Use of standard charts for non-standard air pressure, Building Services Engineering Research and Technology, 1990, 11(2), 73–75.



การออกแบบและพัฒนาไมโครมิกเซอร์แบบพาสซีฟที่ดีที่สุดสำหรับการ รองรับอัตราการไหลที่หลากหลาย

ธัญญฐิตา อารยาธิระพุฒิธร^{1,2} ชาลิณี พิพัฒน์พิภพ^{1,2*} ธัญนันท์ ธิบัน³ สุรัชย์ ธรรมทวีธิกุล³
กอบกิจ อิศรชีวะวัฒน์³ และ ทวีชากรณ์ จอมวงศ์³

¹ สาขาวิศวกรรมเทคโนโลยีพลาสมาและระบบกลไฟฟ้าจุลภาค, ศูนย์การศึกษาสหวิทยาการสาขา,
คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

² ศูนย์วิจัยเทคโนโลยีระบบจุลภาคอัจฉริยะ, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

³ สาขาวิชาเทคโนโลยีการจัดการอุตสาหกรรม, คณะวิศวกรรมศาสตร์,
มหาวิทยาลัยธนบุรี วิทยาเขตภาคเหนือ จังหวัดลำพูน

* ผู้ประสานงานเผยแพร่ (Corresponding Author), E-mail: chalineem@cmu.ac.th

วันที่รับบทความ: 16 มิถุนายน 2568; วันที่ทบทวนบทความ: 29 มกราคม 2569; วันที่ตอบรับบทความ: 10 กุมภาพันธ์ 2569

วันที่เผยแพร่ออนไลน์: 22 เมษายน 2569

บทคัดย่อ: งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการออกแบบและพัฒนาอุปกรณ์ไมโครมิกเซอร์แบบพาสซีฟ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการผสมของไหลในระดับไมโครลิตรและนาโนลิตร โดยมุ่งเน้นการปรับปรุงโครงสร้างช่องทางไหลให้สามารถรองรับอัตราการไหลที่หลากหลาย โดยไม่ทำให้ประสิทธิภาพการผสมลดลง โดยได้ทำการออกแบบและสร้างไมโครมิกเซอร์แบบช่องทางคดเคี้ยวที่มีร่องเสริมโดยใช้หลักการการออกแบบและการทดลอง เพื่อหาวิธีการสร้างลวดลายที่ดีที่สุด กำหนดปัจจัยที่ส่งผลกับความคมชัดของลวดลายโครงสร้างบนสารไวแสง Photoresist ค่าพลังงาน (Dose), ระยะเวลาสูง Stage Z และเวลาในการล้างสารไวแสง (Develop) พบว่าปัจจัยที่ส่งผลต่อการสร้างโครงสร้างมากที่สุดคือ ระยะเวลาสูง Stage Z โดยมีความน่าเชื่อถือของข้อมูลที่ 99.82 % จากนั้นทำการทดสอบและเปรียบเทียบประสิทธิภาพการผสมของอุปกรณ์ไมโครมิกเซอร์แบบเดิม โดยทำการทดลองจริงที่สามารถทำการทดสอบอัตราการไหลได้มากที่สุดที่ 50 $\mu\text{L}/\text{min}$ โดยพบว่าไมโครมิกเซอร์ที่พัฒนาขึ้นนี้มีประสิทธิภาพการผสมสูงสุดที่ 99.80% ที่อัตราการไหลต่ำสุด 1 $\mu\text{L}/\text{min}$ โดยอัตราการไหลที่สูงขึ้นได้แก่ 10, 25 และ 50 $\mu\text{L}/\text{min}$ จะทำให้ประสิทธิภาพการผสมลดลงเล็กน้อย แต่ยังคงอยู่ในระดับสูงกว่า 80% แสดงให้เห็นว่าอุปกรณ์ที่พัฒนาขึ้นสามารถทำงานได้ที่อัตราการไหลที่หลากหลาย ผลการศึกษานี้มีศักยภาพในการนำไปประยุกต์ใช้ในงานวิเคราะห์ทางเคมี ซึ่งต้องการการผสมของไหลที่รวดเร็วและแม่นยำ

คำสำคัญ: อุปกรณ์ของไหลจุลภาค; ไมโครมิกเซอร์; การออกแบบและการทดลอง

The Design and Development of the Optimal Passive Micromixer to Accommodate a Wide Range of Flow Rates

Tuntita Arrayathiraputtitorn^{1,2}, Chalinee Phiphattanaphiphop^{1,2*}, Thanyanan Tipun³
Kobkit Issarachevavat³, Surachai Tumtavitikul³ and Tavichakon Jomvong³

¹ Department of Plasma Technology and Micromechanical Engineering, Multidisciplinary Center, Faculty of Engineering, Chiang Mai University

² Smart Microsystems Technology Research Center, Faculty of Engineering, Chiang Mai University

³ Department of Industrial Management Technology Engineering, Thonburi University Northern Campus, Lamphun

* Corresponding author, E-mail: chalinee.m@cmu.ac.th

Received: 16 June 2025; Revised: 29 January 2026; Accepted: 10 February 2026

Online Published: 22 April 2026

Abstract: This research focuses on the design and development of a passive micromixer to enhance fluid mixing efficiency at microliter and nanoliter scales. The study aims to optimize the microchannel structure to accommodate a wide range of flow rates without compromising mixing performance. A serpentine microchannel design with grooves was fabricated using experimental design methodologies to identify the optimal parameters for achieving high-resolution patterns on photoresist. Key factors affecting pattern clarity were investigated, including UV dose, stage Z height, and development time. Results revealed that stage Z height had the most significant impact, with data reliability reaching 99.82%. The performance of the developed micromixer was then evaluated through physical experiments and compared with conventional designs at flow rates up to 50 $\mu\text{L}/\text{min}$. Experimental results demonstrated that the new micromixer achieved Maximum mixing efficiency of 99.80% at the lowest flow rate (1 $\mu\text{L}/\text{min}$). Consistently high efficiency (>80%) across higher flow rates (10, 25 and 50 $\mu\text{L}/\text{min}$), though with a slight decline compared to lower flow rates. These findings confirm the device's versatility across a broad flow rate range while maintaining robust mixing performance. The study highlights the potential for applications in chemical analysis and lab-on-a-chip systems requiring rapid and precise fluid mixing.

Keywords: Microfluidic devices; Micromixer; Design and experiments



1. บทนำ

ในยุคปัจจุบัน เทคโนโลยีไมโครฟลูอิดิกส์ (Microfluidics) ได้รับความสนใจอย่างกว้างขวางในการประยุกต์ใช้ในหลายสาขา ทั้งทางด้านวิศวกรรม เคมี ชีววิทยา และการแพทย์ เนื่องจากความสามารถในการจัดการของไหลในระดับไมโครลิตรและนาโนลิตร ซึ่งช่วยลดต้นทุนและเวลาในการทดลอง อีกทั้งยังเพิ่มความแม่นยำ [1] และประสิทธิภาพในการวิเคราะห์ หนึ่งในอุปกรณ์สำคัญในระบบไมโครฟลูอิดิกส์คือไมโครมิกเซอร์ (Micromixer) ซึ่งทำหน้าที่ผสมของไหลตั้งแต่สองชนิดขึ้นไปให้เข้ากันอย่างสมบูรณ์ โดยเฉพาะในกระบวนการที่ต้องการการผสมอย่างรวดเร็วและมีประสิทธิภาพสูง [2] เช่น การสังเคราะห์สารเคมี การวิเคราะห์ทางชีวภาพ และการพัฒนาอุปกรณ์ตรวจวินิจฉัยโรค (Lab-on-a-Chip)

อย่างไรก็ตาม เนื่องจากการไหลของของไหลในช่องทางขนาดเล็กมักอยู่ในรูปแบบลามินาร์ (Laminar Flow) ซึ่งทำให้การผสมของไหลเป็นไปได้ยากจากของไหลเคลื่อนที่ในชั้นขนานกันโดยไม่เกิดการปะปนกันเองตามธรรมชาติ [3] ดังนั้นการออกแบบไมโครมิกเซอร์ที่มีประสิทธิภาพจึงเป็นความท้าทายสำคัญสำหรับนักวิจัยในสาขานี้ ไมโครมิกเซอร์แบบพาสซีฟได้รับความนิยมมากเนื่องจากไม่ต้องการพลังงานจากภายนอกและมีกระบวนการผลิตที่ง่าย [4] อย่างไรก็ตาม การออกแบบที่สามารถรองรับอัตราการไหลที่หลากหลายโดยยังคงประสิทธิภาพการผสมสูงยังเป็นปัญหาในการวิจัย ปัจจุบัน Mondal et al. (2024) ได้ออกแบบไมโครมิกเซอร์แบบช่องทางคดเคี้ยวที่มีคลื่นเหลี่ยมสำหรับการผสมของไหลชนิดสูง โดยมีการใส่สิ่งกีดขวางหรืออุปสรรค (Obstacles) รูปทรงต่าง ๆ ลงไป และยังคง

รักษาประสิทธิภาพได้สูงถึงประมาณ 94% [5] Hossain et al. ระบุว่าช่องทางแบบ square-wave เป็นตัวเลือกที่ดีที่สุดในแง่ประสิทธิภาพการผสมสำหรับค่า Re สูง อย่างไรก็ตามช่องทางแบบ โค้ง (Curved) จะมีการสูญเสียแรงดัน (Pressure Drop) น้อยที่สุดเมื่อเทียบกับมิกเซอร์รูปแบบอื่น ๆ [6] การใช้สิ่งกีดขวางในห้องผสม (Mixing Chamber) มีวัตถุประสงค์เพื่อสร้างกระแสไหลวน ระยะทาง 15 mm สำหรับอัตราการไหลระดับ $\mu\text{L}/\text{min}$ การใช้โครงสร้างโค้งต่อเนื่องใน Spiral สามารถสร้าง Chaotic Advection ที่ช่วยให้เกิดการผสมสมบูรณ์ (Mixing Quality > 90%) ภายในระยะทางสั้น ๆ เมื่อเทียบกับช่องทางตรง เมื่อคุณเพิ่มอัตราการไหลจาก 1-30 $\mu\text{L}/\text{min}$ แรงดันตกคร่อมจะเพิ่มขึ้นอย่างมากตามกฎของ Hagen-Poiseuille [7] Mondal et al. (2024) การใส่สิ่งกีดขวางลงในช่องทางไหลเป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพในการสร้าง Disordered Advection ซึ่งช่วยลดระยะทางที่ใช้ในการผสมให้สั้นลงอย่างมากในตัวผสมแบบพาสซีฟ การใส่สิ่งกีดขวางรูปทรงต่าง ๆ ช่วยลดความยาวการผสมลงได้ประมาณ 29% ถึง 31% [8] Yuan, S. และคณะ (2022) ใช้การจำลอง CFD เพื่อออกแบบช่องทางแบบ zigzag ที่ปรับปรุงแล้ว สามารถรักษาประสิทธิภาพการผสม >90% ในช่วง 1-40 $\mu\text{L}/\text{min}$ [9] ไมโครมิกเซอร์แบบ hybrid passive-active ที่สามารถปรับได้ตามอัตราการไหล โดยแสดงให้เห็นถึงศักยภาพในการทำงานที่หลากหลายสำหรับการประยุกต์ใช้ทางชีวการแพทย์ ช่วงอัตราการไหลต่ำมาก $\text{Re} < 10$ การผสมจะเกิดขึ้นผ่าน Molecular Diffusion เป็นหลัก [2,10]

โดยเฉพาะอย่างยิ่งในกรณีของไหลที่มีความหนืดสูงหรือมีอัตราการแพร่ (Diffusivity) ต่ำ ซึ่งทำให้การผสม



เป็นไปได้มากยิ่งขึ้น จึงมีได้เสนอวิธีการต่างๆ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการผสมในไมโครมิกเซอร์ โดยแบ่งออกเป็นสองประเภทหลักคือ ไมโครมิกเซอร์แบบแอคทีฟ (Active Micromixer) ที่ต้องการพลังงานจากภายนอกเพื่อกระตุ้นการผสม เช่น การใช้สนามแม่เหล็กหรือคลื่นเสียง และ ไมโครมิกเซอร์แบบพาสซีฟ (Passive Micromixer) ที่อาศัยการออกแบบโครงสร้างช่องทางเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการผสมโดยไม่ต้องใช้พลังงานจากภายนอก [2,11] ไมโครมิกเซอร์แบบพาสซีฟได้รับความสนใจมากเนื่องจากมีกระบวนการผลิตที่ง่ายและต้นทุนต่ำ

ในการศึกษางานวิจัยด้านไมโครมิกเซอร์พบว่าได้มีการออกแบบและทดสอบไมโครมิกเซอร์แบบพาสซีฟสามรูปแบบ [4] ได้แก่ ไมโครมิกเซอร์แบบช่องทางตรง (Straight Channel Micromixer) ไมโครมิกเซอร์แบบช่องทางคดเคี้ยว (Serpentine Channel Micromixer) และไมโครมิกเซอร์แบบช่องทางคดเคี้ยวที่มีร่อง (Serpentine Channel Micromixer with Grooves) ผลการศึกษาพบว่า ไมโครมิกเซอร์แบบช่องทางคดเคี้ยวที่มีร่องให้ประสิทธิภาพการผสมที่ดีที่สุดที่อัตราการไหลต่ำ ($1 \mu\text{L}/\text{min}$) โดยสามารถผสมของไหลได้อย่างสมบูรณ์ที่ระยะทางเพียง 2.5 มิลลิเมตร (mm) อย่างไรก็ตาม ข้อจำกัดของไมโครมิกเซอร์นี้คืออัตราการไหลที่ยอมให้ได้ (Permissible Flow Rate) ต่ำเพียง $10 \mu\text{L}/\text{min}$ เท่านั้น ซึ่งอาจไม่เพียงพอสำหรับบางแอปพลิเคชันที่ต้องการอัตราการไหลที่สูงขึ้น

จากปัญหาดังกล่าวทางทีมวิจัยจึงได้ทำการออกแบบและสร้างอุปกรณ์ไมโครมิกเซอร์แบบพาสซีฟโดยใช้หลักการออกแบบและการทดลองเพื่อสร้างโครงสร้างที่ดีที่สุดสำหรับการสร้างอุปกรณ์ไมโคร-

มิกเซอร์แบบพาสซีฟ และทำการปรับปรุงประสิทธิภาพของไมโครมิกเซอร์แบบพาสซีฟโดยทำการศึกษาอัตราการไหลที่ยอมให้ผ่านได้โดยไม่ทำให้ประสิทธิภาพการผสมลดลง และไม่ทำลายความแข็งแรงของการเชื่อมต่อระหว่างช่องทางไมโครมิกเซอร์กับพื้นผิวแก้ว (Bonding Stability) อีกทั้งไม่เกิดความเสียหายของอุปกรณ์ไมโครมิกเซอร์แบบพาสซีฟ โดยมีการศึกษาและทำการทดลองการสร้างโครงสร้างในช่องทางใหม่ ๆ รวมถึงการปรับปรุงกระบวนการผลิตที่ดีที่สุดและการเชื่อมต่อเพื่อเพิ่มความทนทานของอุปกรณ์

ดังนั้น การพัฒนาอุปกรณ์ไมโครมิกเซอร์ที่มีประสิทธิภาพสูงและสามารถทำงานที่อัตราการไหลที่หลากหลายจะช่วยขยายขอบเขตการใช้งานในด้านต่างๆ เช่น การวิเคราะห์ทางชีวเคมี การตรวจวินิจฉัยโรค และการพัฒนาอุปกรณ์ชีวการแพทย์ ซึ่งจะส่งผลกระทบต่อวงการวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีในอนาคต

2. วิธีการ (Method)

2.1 เทคโนโลยีระบบของไหลจุลภาค

เทคโนโลยีระบบของไหลจุลภาค (Microfluidics) คือ เทคโนโลยีที่เกี่ยวข้องกับการจัดการของเหลวในระดับไมโครลิตร โดยจะมีช่องทางไหลจุลภาค (Microchannel) ซึ่งเป็นช่องทางไหลขนาดเล็กสำหรับของเหลวหรือสารละลายประเภทต่าง ๆ ทั้งทางเข้าและทางออก ซึ่งช่องเหล่านี้สามารถมีขนาดและรูปร่างที่แตกต่างกันขึ้นอยู่กับกระบวนการออกแบบและการใช้งาน กระบวนการทำงานเริ่มต้นจากการนำของเหลวเข้าผ่านทางเข้าเพื่อทำปฏิกิริยาในช่องทางไหลจุลภาค (Microchannel) และระบายของเหลวส่วนเกินออกทางออก โดยถูกประยุกต์ใช้ร่วมกับห้องปฏิบัติการ



บนชิพ (Lab-on-a-chip: LOC) ซึ่งเป็นระบบวิเคราะห์รวมระดับไมโคร โดยจะมีส่วนประกอบต่าง ๆ มากมาย และมีช่องทางไหลจุลภาค (Microchannel) ที่ของเหลวไหลผ่านรูที่มีขนาดตั้งแต่สิบถึงหนึ่งร้อยไมโครเมตรเป็นส่วนเชื่อมต่อให้ทั่วถึงกัน

2.1.1 ไมโครมิกเซอร์

ไมโครมิกเซอร์ (Micromixer) เป็นหนึ่งในอุปกรณ์ของเทคโนโลยีระบบของไหลจุลภาค ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับการผสมของไหลตั้งแต่สองชนิดขึ้นไปในระดับไมโครและนาโนลิตร โดยอาศัยหลักการทางฟิสิกส์และเคมีในการทำให้ของไหลผสมกันอย่างสมบูรณ์ เนื่องจากของไหลในช่องทางขนาดเล็กมักมีการไหลแบบลามินาร์ (Laminar Flow) ซึ่งทำให้การผสมเป็นไปได้ยาก ไมโครมิกเซอร์จึงถูกออกแบบมาเพื่อเพิ่มการปะปนกันของของไหลผ่านการเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสหรือการสร้างกระแสปั่นป่วน (Turbulent Flow) ในระดับไมโคร [1]

ของไหลในไมโครมิกเซอร์สำหรับช่องทางการไหลสามารถอธิบายได้ด้วยสมการ Navier-Stokes และสมการความต่อเนื่อง (Continuity Equation) ซึ่งเป็นสมการพื้นฐานทางกลศาสตร์ของไหล โดยสมการ Navier-Stokes อธิบายการอนุรักษ์โมเมนตัม ของของไหล โดยพิจารณาแรงที่กระทำกับของไหล เช่น แรงดัน แรงหนืด และแรงภายนอก (เช่น แรงโน้มถ่วง) ดังสมการที่ (1)

สมการความต่อเนื่อง (Continuity Equation) อธิบายการเคลื่อนที่ของของไหลในสภาวะต่าง ๆ ในขณะที่สมการความต่อเนื่องอธิบายการอนุรักษ์มวลของของไหล [8] ดังสมการที่ (2)

$$\rho \left(\frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + (\vec{v} \cdot \nabla) \vec{v} \right) = -\nabla p + \mu \nabla^2 \vec{v} + \vec{f} \quad (1)$$

โดยที่

ρ = ความหนาแน่นของของไหล

\vec{v} = เวกเตอร์ความเร็ว

p = ความดัน

μ = ความหนืด (dynamic viscosity)

$\nabla^2 \vec{v}$ = ลาปลาซเซียนของความเร็ว (อธิบายการกระจายของแรงหนืด)

\vec{f} = แรงภายนอก เช่น แรงโน้มถ่วง

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mu) = 0 \quad (2)$$

โดยที่

ρ = ความหนาแน่นของของไหล

\vec{v} = เวกเตอร์ความเร็วของของไหล

t = เวลา

$\nabla \cdot (\rho \mu)$ = การลู่เข้าหรือแผ่กระจายของการไหล

2.1.2 ทฤษฎีของ Reynolds Number

Reynolds Number (Re) เป็นตัวเลขไร้มิติที่ใช้ในการวิเคราะห์ลักษณะการไหลของของไหลในระบบไหล เช่น ท่อหรือช่องไหลขนาดเล็ก โดยค่านี้เป็นตัวบ่งชี้ว่าการไหลของของไหลเป็นแบบ ลามินาร์ (Laminar Flow) หรือ ปั่นป่วน (Turbulent Flow) ซึ่งมีผลโดยตรงต่อประสิทธิภาพการผสมของไหลในไมโครฟลูอิดิกและไมโครมิกเซอร์ ค่า Reynolds Number ถูกคำนวณจากสมการที่ (3)

$$Re = \frac{\rho v D}{\mu} \quad (3)$$

โดยที่

Re = Reynolds Number (ไม่มีหน่วย)

ρ = ความหนาแน่นของของไหล (kg/m³)

v = ความเร็วเฉลี่ยของของไหล (m/s)

D = เส้นผ่านศูนย์กลางไฮดรอลิก (Hydraulic Diameter) ของช่องไหลหรือท่อ (m)

μ = ความหนืดจลน์ (Dynamic Viscosity) ของของไหล (Pa·s หรือ kg/m·s)

สำหรับกรณีที่เป็นช่องไหลที่มีพื้นที่หน้าตัดเป็นสี่เหลี่ยม เส้นผ่านศูนย์กลางไฮดรอลิก D สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (4)

$$D = \frac{4A}{P} \quad (4)$$

โดยที่

A = พื้นที่หน้าตัดของช่องไหล (m²)

P = ความยาวเส้นรอบรูปของหน้าตัด (m)

โดยทั่วไป ค่า Re สามารถใช้แบ่งลักษณะการไหลของของไหลออกเป็น 3 ประเภทหลัก ได้แก่ Laminar Flow (การไหลแบบลามินาร์) เกิดขึ้นเมื่อ $Re < 2000$ (ในท่อหรือช่องไหลทั่วไป) ของไหลไหลเป็นชั้น ไม่มีการผสมกันมากนัก แรงหนืด (Viscous Force) มีอิทธิพลมากกว่าแรงเฉื่อย (Inertial Force) พบได้บ่อยในไมโครฟลูอิดิก เนื่องจากช่องไหลมีขนาดเล็ก Transitional Flow (การไหลแบบเปลี่ยนผ่าน) เกิดขึ้นเมื่อ $2000 < Re < 4000$ ของไหลเริ่มมีการเปลี่ยนแปลงจากลามินาร์ไปสู่ปั่นป่วน Turbulent Flow (การไหลแบบปั่นป่วน) เกิดขึ้นเมื่อ $Re > 4000$

ของไหลเกิดการเคลื่อนที่แบบสุ่มและมีการผสมสูงแรงเฉื่อยของของไหลมีอิทธิพลสูงกว่าความหนืด

ในระบบไมโครฟลูอิดิกและไมโครมิกเซอร์ ค่า Re มักจะอยู่ในช่วง ต่ำกว่า 100 ซึ่งหมายความว่า การไหลเป็น ลามินาร์เกือบตลอดเวลา ส่งผลให้การผสมของของไหลเกิดขึ้นได้ช้า เนื่องจากการไหลลามินาร์อาศัยเพียงการแพร่ (Diffusion) เป็นหลัก

ดังนั้น ในการออกแบบ ไมโครมิกเซอร์แบบพาสซีฟ จึงต้องมีการใช้เทคนิคต่างๆ เช่น การเพิ่มโครงสร้างก่อกวนในช่องไหล (Obstacles) การออกแบบช่องไหลให้มีลักษณะซิกแซก (Serpentine Channels) หรือการเพิ่มร่องภายในช่องไหล (Grooves) เพื่อช่วยสร้างการไหลแบบปั่นป่วนในระดับจุลภาค (Chaotic Advection) ซึ่งจะช่วยให้ประสิทธิภาพในการผสมของไหล [9]

2.1.3 การเชื่อมต่อไมโครมิกเซอร์กับพื้นผิวแก้ว

การเชื่อมต่อระหว่างช่องทางไมโครมิกเซอร์กับพื้นผิวแก้วเป็นขั้นตอนสำคัญในกระบวนการผลิต โดยทั่วไปจะใช้เทคนิค Plasma Bonding ซึ่งมีต้นทุนสูงและต้องการสภาพแวดล้อมที่สะอาด [9,12] ได้เสนอเทคนิค Thin Film PDMS Bonding ซึ่งมีต้นทุนต่ำและง่ายต่อการใช้งาน [4]

2.1.4 กระบวนการโฟโตลิโธกราฟี

โฟโตลิโธกราฟี (Photolithography) คือ กระบวนการสำคัญในเทคโนโลยีไมโครแฟบริเคชัน (Microfabrication) ที่ใช้ในการสร้างลวดลายขนาดเล็กบนพื้นผิววัสดุ เช่น แผ่นซิลิคอน (Silicon Wafer) หรือแผ่นแก้ว (Glass Slide) โดยอาศัยการใช้แสงอัลตราไวโอเล็ต (UV Light) เพื่อถ่ายโอนลวดลายจาก

หน้ากาก (Photomask) ลงบนฟิล์มไวแสง (Photoresist) ที่เคลือบบนพื้นผิวนั้น

ขั้นตอนพื้นฐานของกระบวนการโฟโตลิโธกราฟี ดังแสดงในรูปที่ 1 ประกอบด้วย

1. การเตรียมพื้นผิว (Substrate Preparation)

ทำความสะอาดพื้นผิวเพื่อจัดสิ่งปนเปื้อนและเพิ่มการยึดเกาะของสารไวแสง

2. การเคลือบสารไวแสง (Spin Coating) เคลือบฟิล์มสารไวแสง (Photoresist) บนพื้นผิวให้ได้ชั้นบางและสม่ำเสมอ โดยใช้เทคนิคหมุนเหวี่ยง

3. การฉายรังสี UV (UV Exposure) ฉายแสง UV ผ่านหน้ากากลวดลาย เพื่อเปลี่ยนคุณสมบัติของสารไวแสงในบริเวณที่สัมผัสแสง โดยสามารถคำนวณค่าพลังงานแสงได้จากสมการที่ (5)

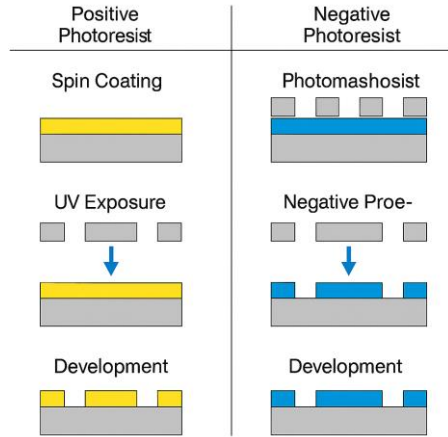
$$D = I \times T \quad (5)$$

4. กำหนดให้ D คือ พลังงานในการฉายแสง (J/cm^2) T คือ เวลาในการฉายแสง (วินาที) และ I คือ ค่ากำลังในการฉายแสง (W/cm^2)

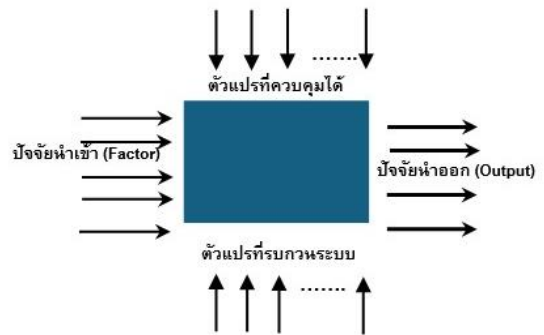
5. การล้างลวดลาย (Development) ใช้น้ำยาล้างเพื่อละลายสารไวแสงในบริเวณที่ต้องการสร้างลวดลาย [4]

2.2 การออกแบบการทดลอง

การออกแบบการทดลองเชิงวิศวกรรม (Design of Experiment: DOE) เป็นการทดสอบครั้งเดียวหรือต่อเนื่อง โดยเปลี่ยนแปลงค่าตัวแปรนำเข้า (Input Variables) ในระบบหรือกระบวนการที่สนใจศึกษา เพื่อที่จะทำให้สามารถสังเกตและชี้ถึงสาเหตุต่าง ๆ ที่ก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของผลลัพธ์ที่ได้ (Outputs or Responses) จากกระบวนการ หรือระบบนั้น ดังรูปที่ 2



รูปที่ 1 แสดงผลกระบวนการโฟโตลิโธกราฟีสำหรับสารไวแสงชนิดบวกและชนิดลบ



รูปที่ 2 การออกแบบการทดลอง (Design of Experiment: DOE)

โดยตัวแปรนำเข้าจะถูกจัดแบ่งเป็น 2 กลุ่มคือ กลุ่มที่ควบคุมได้ เรียกว่า ตัวแปรที่ควบคุมได้ (Controllable Variables or Factors) หรือตัวแปรที่สามารถออกแบบได้ (Design Variables or Factors) และกลุ่มที่ไม่สามารถควบคุมได้ เรียกว่า ตัวแปรที่รบกวนระบบ (Uncontrollable or Noise Variables)

การออกแบบการทดลอง (Design of Experiment: DOE) มีหลักสำคัญอย่างยิ่งเพื่อช่วยให้การทดลองมีความถูกต้อง เทียบตรง และแม่นยำมากขึ้น ได้แก่



1. หลักการสุ่มตัวอย่าง (Randomization) โดยจัดลำดับที่เกี่ยวข้องในการทดลองให้เป็นแบบสุ่ม ซึ่งหลักการสุ่มจะช่วยสมดุลความผิดพลาดที่เกิดจากปัจจัยรบกวนที่ไม่สามารถควบคุมได้หรือไม่สามารถหลีกเลี่ยงได้

2. การทดลองซ้ำ (Replication) คือการทดลองภายใต้เงื่อนไขเดียวกันมากกว่าหนึ่งครั้งเพื่อยืนยันและเพิ่มความถูกต้องของผลการทดลอง

3. การบล็อก (Blocking) คือ เทคนิคที่ใช้ในการลดหรือกำจัดความผันแปรของตัวแปรรบกวน (Noise Variables) หรือเรียกว่าปัจจัยบล็อก ซึ่งการบล็อกจะไม

สนใจศึกษาผลกระทบปัจจัยบล็อกแม้ว่าจะส่งผลต่อสิ่งที่สนใจ โดยทั่วไปคือการจัดแบ่งชุดเงื่อนไขที่เหมือนกันในการทดลอง

3. การทดลอง

3.1 การออกแบบแบบแฟกทอเรียล (Experiment of Factorial Design)

การออกแบบการทดลองสำหรับการศึกษาในครั้งนี้ได้ทำการออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบเต็มจำนวน 2^k โดยมีการศึกษาทั้งหมด 3 ปัจจัย ทำการทดลองซ้ำจำนวน 2 ครั้งทำให้สามารถคำนวณความแปรปรวนภายในกลุ่ม (Within-Run Variability) ได้ แม้จำนวนการทำซ้ำจะน้อย แต่เมื่อรวมกับ Center Point (ช่วยตรวจสอบความไม่เป็นเชิงเส้น) ก็เพียงพอสำหรับการวิเคราะห์ทางสถิติเบื้องต้น และค่ากึ่งกลาง 1 ครั้งทำการทดลองทั้งหมด 17 ครั้ง โดยมีการกำหนดให้บล็อกเท่ากับ 1 ครั้ง ดังแสดงในตารางการออกแบบค่าต่ำสุดและค่าสูงสุดของแต่ละปัจจัยในตารางที่ 1 และตารางการออกแบบการทดลองในตารางที่ 2

ตารางที่ 1 ปัจจัยที่นำมาทดลอง ค่าต่ำสุดและค่าสูงสุดของแต่ละปัจจัย

ปัจจัย (Factor)	สัญลักษณ์	ระดับ	
		ต่ำ	สูง
ค่าพลังงาน (Dose) ในการฉายแสง UV Lithography	A	18	25
ระยะเวลาสูงตำแหน่งในการวางชิ้นงานบน Stage Z ที่วางชิ้นงาน	B	11.47	13.18
เวลาในการล้างสารไวแสง (Develop)	C	35	50

ตารางที่ 2 การออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบเต็มจำนวน

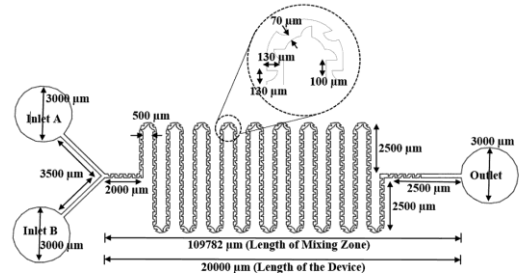
No.	Dose Time	Stage Z	Dev. Time
1	25	13.18	35
2	21.5	12.33	42.5
3	25	11.47	35
4	18	13.18	35
5	18	13.18	50
6	18	13.18	50
7	25	13.18	50
8	25	13.18	50
9	18	11.47	35
10	25	11.47	35
11	18	11.47	50
12	25	11.47	50
13	18	13.18	35
14	25	13.18	35
15	25	11.47	50
16	18	11.47	35
17	18	11.47	50



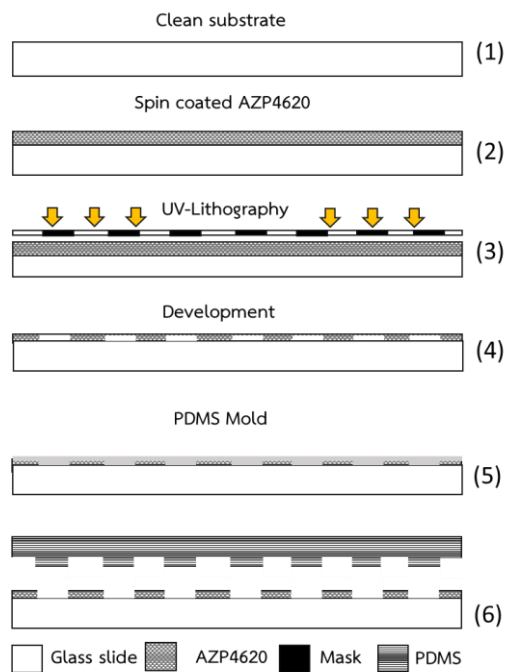
3.2 การสร้างอุปกรณ์สำหรับการไหลแบบผสม

การออกแบบและสร้างช่องทางการไหลจุลภาค (Microfluidic Channel Structure) โดยเริ่มต้นจากการออกแบบลวดลายด้วยโปรแกรม Layout Editor และนำลวดลายดังกล่าวไปพิมพ์เป็นโฟโตมาสก์ (Photomask) เพื่อใช้ในกระบวนการสร้างลวดลายด้วยแสง (Photolithography) ดังแสดงในรูปที่ 3 โครงสร้างช่องทางการไหลถูกออกแบบเป็นรูปขดช่องทางไหลแบบคดเคี้ยว เพื่อให้เกิดการผสมกันระหว่างสารสองสาร โดยช่องทางมีขนาดกว้าง x ยาว เท่ากับ 5,000 x 20,000 ไมโครเมตร(ไม่รวมขด) เมื่อทำการคิดความยาวทั้งหมดเมื่อรวมขดทั้งหมด โครงสร้างนี้มีความยาว 103,500 ไมโครเมตร การสร้างโครงสร้างดำเนินการด้วยเทคนิค Soft Lithography โดยเริ่มจากการทำความสะอาดแผ่นแก้ว (ตั้งขั้นตอนที่ 1) จากนั้นทำการเคลือบสารไวแสงชนิดลบ AZ P4620 ด้วยการหมุนที่ความเร็วรอบครั้งที่ 1 500 rpm ใช้เวลา 5 วินาที และความเร็วรอบครั้งที่ 2 1000 rpm 30 วินาที (ตั้งขั้นตอนที่ 2) เพื่อให้ได้ชั้นฟิล์มหนาประมาณ 30 ไมโครเมตรจากนั้นทำการฉายแสง UV ด้วยเครื่อง Mask Aligner เป็นเวลา 35 วินาที และอบที่ 95°C (ตั้งขั้นตอนที่ 3) ก่อนนำไปล้างด้วย AZ Development โดยใช้สารละลาย Boric acid : KOH : DI water ในอัตราส่วน 2 : 4 : 200 เป็นเวลา 5 นาที เพื่อให้ได้แม่พิมพ์โครงสร้างช่องทาง (ตั้งขั้นตอนที่ 4) ดังแสดงในรูปที่ 4

จากนั้นจะดำเนินการทำสำเนาโครงสร้างช่องทางการไหลดำเนินการโดยการเท PDMS (Polydimethylsiloxane) ที่เตรียมในอัตราส่วน 10:1 ลงบนแม่พิมพ์ (ตั้งขั้นตอนที่ 5) และอบที่ 70°C เป็น

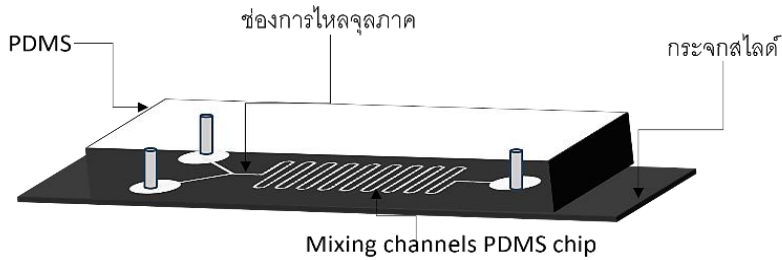


รูปที่ 3 โครงสร้างช่องทางการไหลแบบผสม

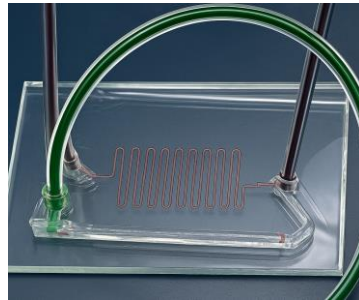


รูปที่ 4 กระบวนการลิโทกราฟี (Lithography Process) ซึ่งใช้ในการผลิตโครงสร้างไมโครชาแนล

เวลา 60 นาที จากนั้นลอกชิ้นงาน PDMS ออกจากแม่พิมพ์ (ตั้งขั้นตอนที่ 6) และสุดท้ายดำเนินการเจาะรูสำหรับทางเข้า-ออก แล้วประกอบเข้ากับกระจกสไลด์ ดังแสดงในรูปที่ 5



(ก)



(ข)

รูปที่ 5 แสดงอุปกรณ์สำหรับการไหลแบบผสม:

(ก) แสดงองค์ประกอบของอุปกรณ์ไมโครฟลูอิดิก และ (ข) แสดงอุปกรณ์จริงในการทดลอง

3.3 ศึกษา Reynolds Number และพฤติกรรมการไหลของของไหลภายในช่องไหล

การศึกษา Reynolds Number และพฤติกรรมการไหลของของไหลภายในช่องไหล สำหรับการตรวจสอบประสิทธิภาพการผสม คือ ค่าความหนาแน่นของของไหล โดยให้ปริมาตรของน้ำ เท่ากับ 1×10^{-6} ลูกบาศก์เมตร (m^3) และมวล (m) เท่ากับ 0.001 กิโลกรัม (kg) ดังนั้นสามารถคำนวณความหนาแน่นของของไหลได้จากสมการที่ (6)

$$\rho = \frac{m \text{ (kg)}}{V \text{ (m}^3\text{)}} \quad (6)$$

$$\rho = \frac{0.001 \text{ (kg)}}{0.000001 \text{ (m}^3\text{)}} = 1000 \text{ kg/m}^3$$

จากสมการที่ 6 เมื่อ v คือความเร็วเชิงลักษณะของของไหล ซึ่งถูกกำหนดให้เป็น 2 มิลลิเมตรต่อวินาที (mm/s) ซึ่งคำนวณจากอัตราการไหลของของไหลตัวกลางผสม D คือ เส้นผ่านศูนย์กลางลักษณะเฉพาะของช่องทางไหล (Characteristic Device Channel Diameter) ซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.2 มิลลิเมตร (mm) μ คือ ความหนืดของของไหล (Fluid Viscosity) มีค่าเท่ากับ 0.00089 กิโลกรัมต่อเมตร-วินาที ($kg \cdot m^{-1} \cdot s^{-1}$) ดังนั้นค่า Re ในสมการที่ (1) แสดงได้ดังต่อไปนี้ $Re = 8.9 \times 10^{-4}$ เนื่องจากค่า $Re < 1$ จึงสามารถใช้สมมติฐาน การไหลแบบคลีปปีงโฟลว์ (Creeping Flow Interface) ได้ กล่าวคือของไหลมีลักษณะการไหลแบบลามินาร์สูงมาก โดยอาศัย

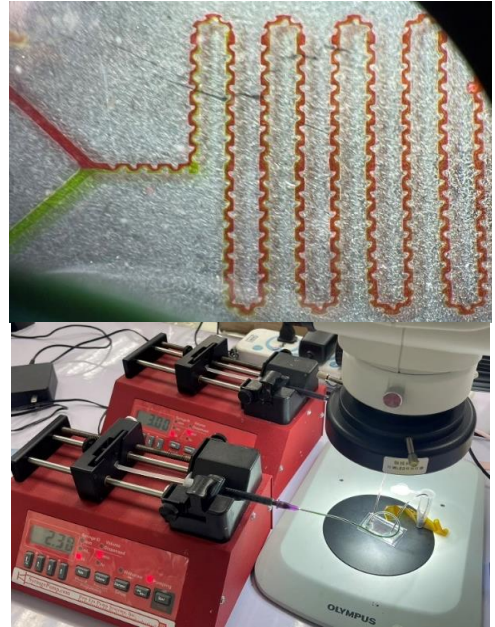


แรงเหวี่ยงเป็นปัจจัยหลักในการควบคุมการเคลื่อนที่ของของไหล ทดสอบโครงสร้างช่องไหลซิกแซกที่มีร่องเสริม เพื่อวิเคราะห์ผลกระทบของโครงสร้างต่อการผสมแสดงได้ดังรูปที่ 6

4. ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผล

4.1 ทดสอบหาการสักรูปอุปกรณ์ไมโครมิกเซอร์แบบพาสซีฟที่เหมาะสม

ทำการทดลองการสักรูปอุปกรณ์ไมโครมิกเซอร์แบบพาสซีฟที่เหมาะสมที่ทำให้สารตัวอย่างสองสารสามารถทำการผสมกันได้อย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งได้ทำการทดลองสักรูปอุปกรณ์ไมโครมิกเซอร์แบบพาสซีฟที่ดีที่สุด โดยการวัดผลจากความคมชัดโครงสร้างลดลาย มุม 90 องศา (Aspect Ratio) แสดงให้เห็นดังรูปที่ 7 โดยพบว่าโครงสร้างที่เหมาะสมขึ้นอยู่กับค่าพลังงานในการฉายแสง UV , ระยะความสูงตำแหน่งในการวางชิ้นงานแกน Stage Z, เวลาในการล้างสารไวแสง โดยผลการทดสอบแสดงให้เห็นดังรูปที่ 8 และ 9 แสดงว่าค่า Residuals มีการกระจายตัวตามปกติ Versus Fits จากกราฟพบว่ากระจายตัวแบบสุ่มรอบแกนนอน (แกน Residuals) โดยไม่มีรูปแบบเฉพาะ แสดงว่าความแปรปรวนสม่ำเสมอ Histogram จากกราฟมีรูปร่างคล้ายระฆังคว่ำ แสดงว่าค่า Residuals มีการกระจายตัวใกล้เคียงปกติ จากกราฟ Residual Plots ที่ให้มา ค่า Residuals มีการกระจายตัวใกล้เคียงปกติ ความแปรปรวนสม่ำเสมอ และไม่มีรูปแบบเฉพาะในค่า Residuals ตามลำดับการทดลองแสดงว่าแบบจำลองที่ใช้ในการวิเคราะห์มีความเหมาะสมและเชื่อถือได้ (แสดงให้เห็นดังรูปที่ 8)

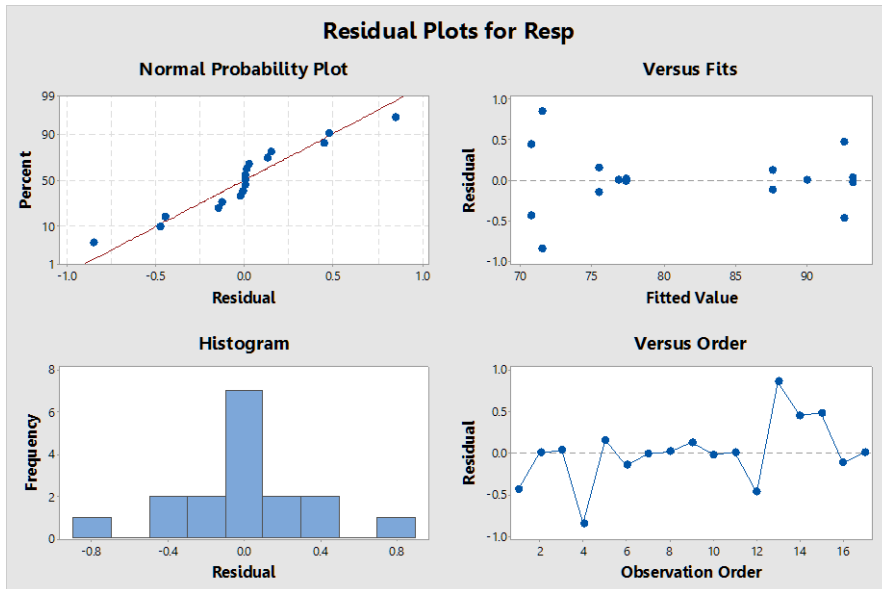


รูปที่ 6 แสดงการทดสอบโครงสร้างช่องไหลซิกแซกที่มีร่องเสริม



รูปที่ 7 แสดงความคมชัดโครงสร้างลดลายมุม 90 องศา

กราฟการกระจายตัว Residual Plots ที่แสดงในภาพ สามารถวิเคราะห์ได้ดังนี้ Normal Probability Plot จากกราฟพบว่าจุดข้อมูลเรียงตัวใกล้เคียงเส้นตรง Factorial Regression



รูปที่ 8 กราฟแสดงปัจจัยที่มีผลต่อการทดลองทั้งหมด

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	8	1302.17	162.77	549.44	0.000
Linear	3	1233.68	411.23	1388.11	0.000
Dose time	1	21.39	21.39	72.20	0.000
Stage Z	1	1174.78	1174.78	3965.49	0.000
Dev. time	1	37.52	37.52	126.64	0.000
2-Way Interactions	3	31.98	10.66	35.99	0.000
Dose time*Stage Z	1	12.60	12.60	42.54	0.000
Dose time*Dev. time	1	0.02	0.02	0.08	0.790
Stage Z*Dev. time	1	19.36	19.36	65.35	0.000
3-Way Interactions	1	8.27	8.27	27.90	0.001
Dose time*Stage Z*Dev. time	1	8.27	8.27	27.90	0.001
Curvature	1	28.24	28.24	95.32	0.000
Error	8	2.37	0.30		
Total	16	1304.54			

Model Summary

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
0.544289	99.82%	99.64%	*

รูปที่ 9 ผลแสดงสมการถดถอยของปัจจัยที่มีผลต่อการทดลอง



ปัจจัยที่มีผลต่อการทดลองปัจจัย B (ระยะความสูงตำแหน่งวางชิ้นงานแกน Z) มีผลกระทบสูงสุดต่อความคมชัดของลวดลาย ($p < 0.05$) แสดงอิทธิพลสูงสุดต่อความคมชัดของลวดลาย เนื่องจากควบคุมระยะนาบโฟกัสของแสง UV ต่อผิวสารไวแสง ซึ่งส่งผลโดยตรงต่อความละเอียดและความลึกของการเกิดโครงสร้างในกระบวนการโฟโตลิโทกราฟี การปรับตำแหน่งแกน Z ส่งผลโดยตรงต่อความแม่นยำของการเกิดลวดลาย ปัจจัย C (เวลาในการล้างสารไวแสง) มีผลกระทบเป็นอันดับสอง ($p < 0.05$) ระยะเวลาการล้างที่เหมาะสมช่วยเพิ่มความคมชัดและลดการตกค้างของสาร ปัจจัย A (ค่าพลังงานในการฉายแสง UV) มีผลกระทบเป็นอันดับสาม ($p < 0.05$) พลังงาน UV สูงอาจทำให้ลวดลายชัดเจนขึ้น แต่ผลกระทบน้อยกว่าปัจจัย B และ C (แสดงให้เห็นดังรูปที่ 9) ปฏิสัมพันธ์ระหว่างตัวแปร A (Dose time) และ C (Dev. time) ให้ค่า p-value > 0.05 ซึ่งหมายความว่าปฏิสัมพันธ์นี้ ไม่มีนัยสำคัญทางสถิติต่อผลลัพธ์ (ความคมชัดของลวดลาย) ที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

โมเดล Factorial Regression ที่พัฒนาขึ้นมีความน่าเชื่อถือสูง ($R^2 = 99.82\%$, Adjusted $R^2 = 99.75\%$) และผ่านการตรวจสอบสมมติฐานทางสถิติ จึงสามารถใช้ทำนายค่าพารามิเตอร์การผลิตที่เหมาะสมได้อย่างแม่นยำ

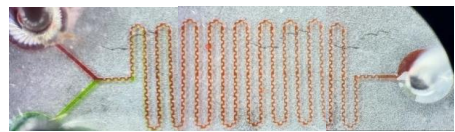
4.2 การทดสอบอุปกรณ์ไมโครมิกเซอร์เพื่อหาประสิทธิภาพการผสม

ในการทดสอบไมโครมิกเซอร์ ได้ใช้ Syringe Pumps เพื่อควบคุมอัตราการไหลของของไหล และใช้ Color Indicators (สารบ่งชี้สี) เพื่อประเมินประสิทธิภาพ



(a) (b) (c)

รูปที่ 10 ภาพจากกล้องจุลทรรศน์ของไมโครมิกเซอร์แบบช่องทางตรงที่อัตราการไหลต่ำ ($1 \mu\text{L}/\text{min}$) ระดับการผสมที่ความยาวต่างกัน: (a) 0.5 mm, (b) 5.0 mm และ (c) 20.0 mm



รูปที่ 11 ภาพจากกล้องจุลทรรศน์ของไมโครมิกเซอร์แบบช่องทางตรงที่อัตราการไหลที่ $1 \mu\text{L}/\text{min}$

การผสมด้วยการสังเกตด้วยตาเปล่า โดยภาพที่ 10 (a) แสดงช่องทางการไหลขาเข้าระหว่างสารทั้ง 2 ระดับการผสมที่ความยาว 0.5 mm (b) แสดงช่องทางคดเคี้ยวที่มีความยาว 5 mm (c) แสดงช่องทางขาออกของสาร ระดับการผสมที่ความยาว 103.5 mm ทั้งนี้ประสิทธิภาพการผสม (Mixing Efficiency) ถูกวัดที่อัตราการไหลต่างๆ กัน โดยทำการทดสอบที่อัตราการไหลที่ต่ำที่สุดคือ $1 \mu\text{L}/\text{min}$ ดังแสดงในรูปที่ 11 และอัตราการไหลสูงสุดที่ $50 \mu\text{L}/\text{min}$ ที่อัตราการไหลสูงกว่า $50 \mu\text{L}/\text{min}$ เกิดแรงดันภายในช่องทางที่เพิ่มขึ้น ส่งผลให้โครงสร้างไมโครมิกเซอร์ไม่สามารถทนทานต่อแรงดันได้เพียงพอทำให้เกิดการรั่วไหลภายใน ถือเป็นข้อจำกัดที่สำคัญในการใช้งาน ไมโครมิกเซอร์แบบคดเคี้ยวที่มีร่องเสริมที่อัตราการไหลสูง สำหรับวัสดุ PDMS กับ Glass ปัญหาการรั่วมักจะเกิดขึ้นเมื่อแรงดันภายในสูงเกินกว่าพันธะ



เคมีจะรับไหว ซึ่งปกติแล้วขีดจำกัดสูงสุดของ PDMS-Glass bonding ที่ผ่าน Oxygen Plasma และการอบ (Baking) อย่างสมบูรณ์จะทนแรงดันได้ประมาณ 300-500 kPa (หรือประมาณ 43-72 psi) ซึ่งโครงสร้างที่ได้ทำการออกแบบนี้มีความดันภายในช่องมากถึง 211.6 kPa (หรือ 30.7 psi) และเมื่อรวมผลจาก Grooves และ Serpentine ซึ่งเพิ่มความต้านทาน R_H อีกประมาณ 1.5-2 เท่า ทำให้แรงดันจริงภายในชิปจะพุ่งสูงถึง 317-423 kPa ซึ่งการคำนวณค่าแรงดันภายใน (Fluid Mechanics) สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (7) และ (8) ดังนี้ [13]

$$\Delta P = R_H \cdot Q \quad (7)$$

โดยที่ P คือ อัตราการไหล (Flow Rate) = 50 $\mu\text{L}/\text{min}$ ($\approx 8.33 \times 10^{-10} \text{m}^3/\text{s}$)

R_H คือ ความต้านทานไฮดรอลิก (Hydraulic Resistance)

สำหรับช่องสัญญาณสี่เหลี่ยม ($w > h$)

$$R_H \approx \frac{12\mu L}{wh^2(1-0.63\frac{h}{w})} \quad (8)$$

$$R_H = \frac{170.5}{0.9055} = 188.3 \text{ kPa}$$

จากสมการที่ (8) μ คือความหนืดของของไหล (Fluid Viscosity) มีค่าเท่ากับ 0.00089 กิโลกรัมต่อเมตร-วินาที ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$) L คือความยาวของช่องทาง มีค่าเท่ากับ 103,500 ไมโครเมตร (μm) Q คืออัตราการไหลเชิงปริมาตร ซึ่งมีค่า 50 ไมโครลิตร/นาที ($\mu\text{L}/\text{min}$) หรือเท่ากับ $8.33 \times 10^{-10} \text{m}^3/\text{s}$ มีความกว้างของช่องทาง 200 ไมโครเมตร (μm) และชั้นฟิล์มหนาประมาณ 30 ไมโครเมตร (μm) ดังนั้นค่า R_H ในสมการที่ (8) มีค่าแรงดันที่ 188.3 kPa จะเห็นได้ว่าที่แรงดัน $> 300 \text{ kPa}$ การใช้งานของชิปจึงเป็น "ขีดจำกัดสูงสุด" (Limit) ของการ Bonding ระหว่าง PDMS และ Glass โดยแสดงตารางเปรียบเทียบแรงดันที่ Flow Rate ต่างกัน ดังตารางที่ 3

จากผลการวิเคราะห์การผสมกันของช่องทางการไหลจากค่าความเข้มของสี Grayscale โดยใช้โปรแกรม ImageJ ดังแสดงในรูปที่ 12 เพื่อหาเปอร์เซ็นต์ Mixing Efficiency โดยค่าที่ได้แสดงในตารางที่ 4 ค่าเปอร์เซ็นต์ Mixing Efficiency ที่อัตราการไหล 1 $\mu\text{L}/\text{min}$, 10 $\mu\text{L}/\text{min}$, 25 $\mu\text{L}/\text{min}$ และ 50 $\mu\text{L}/\text{min}$ ซึ่งพบว่าในช่วงแรก (0-5 mm) เป็นช่วงที่การผสมเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วเนื่องจากโครงสร้างร่องเสริมและช่องทางคดเคี้ยวส่งเสริมให้เกิด chaotic advection อย่างรุนแรงของไหลมีการปะทะและเปลี่ยนทิศทางบ่อยครั้ง ก่อให้เกิดการผสมแบบ Forced Mixing

ตารางที่ 3 ตารางเปรียบเทียบแรงดันเมื่อมีการเปลี่ยน Flow Rate

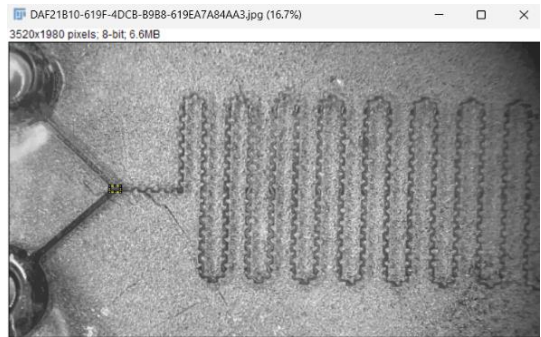
Flow Rate ($\mu\text{L}/\text{min}$)	แรงดันทางทฤษฎี (kPa)	แรงดันจริงโดยประมาณ (รวม Grooves/Mixer)	สถานะของ Bonding
10	42.3	63-85	ปลอดภัย
30	127.0	190-254	เริ่มมีความเสี่ยง
50	211.6	317-423	รำซึม (Critical Point)
100	423.2	635-846	ล้มเหลวทันที



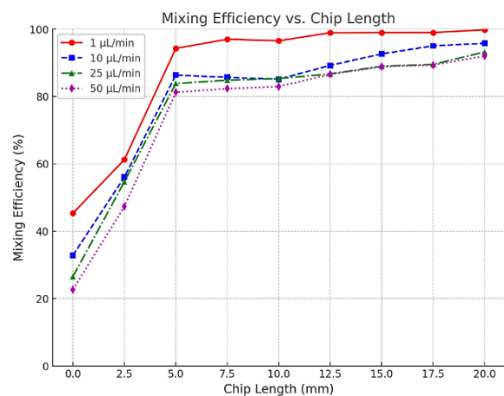
ซึ่งส่งผลให้ประสิทธิภาพเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญจากการเพิ่มระยะทางเพียงเล็กน้อย โดยที่อัตราการไหล 1 $\mu\text{L}/\text{min}$ ประสิทธิภาพเพิ่มขึ้นจากประมาณ 45% เป็นกว่า 94% ภายในช่วงความยาว 5 mm นี้ หลังจากนั้นในช่วงที่สอง (5-20 mm) การผสมเข้าสู่ภาวะคงตัว เนื่องจากส่วนใหญ่เกิดขึ้นแล้ว (>90%) การเพิ่มความยาวชิปอีกให้ผลตอบแทนที่ลดลง (diminishing return) เช่น ที่อัตราการไหล 1 $\mu\text{L}/\text{min}$ การเพิ่ม Chip Length จาก 5 mm เป็น 20 mm ทำให้ประสิทธิภาพเพิ่มขึ้นเพียง 5.53% ขณะที่ต้องใช้ระยะทางเพิ่มถึง 15 mm แสดงให้เห็นว่าการออกแบบอาจพิจารณาลดความยาวลงในช่วงหลังเพื่อประหยัดพื้นที่และวัสดุ โดยยังคงได้ประสิทธิภาพการผสมในระดับที่ยอมรับได้ และเมื่อนำมาพล็อตกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Mixing Efficiency และ Chip Length ดังแสดงในรูปที่ 13 พบว่าแนวโน้มของค่า Efficiency เพิ่มขึ้นตามความยาวของชิปและลดลงตามอัตราการไหลอย่างมีนัยสำคัญ กล่าวคือ ประสิทธิภาพการผสมที่ 99.80%, 95.80%, 93.20% และ 92.00% ตามลำดับ ที่บริเวณตำแหน่ง 20 mm ในไมโครมิกเซอร์แบบคดเคี้ยวมีร่อง (Serpentine Channel Micromixer) ตามอัตราการไหล 1, 10, 25 และ 50 $\mu\text{L}/\text{min}$ ตามลำดับพบว่าประสิทธิภาพการผสมในไมโครมิกเซอร์เซอร์แบบคดเคี้ยวมีร่องลดลงตามลำดับ และจะมีประสิทธิภาพการผสมสูงสุดที่ 99.80% เกิดขึ้นที่อัตราการไหลต่ำสุด 1 $\mu\text{L}/\text{min}$ เมื่อเพิ่มอัตราการไหล ประสิทธิภาพการผสมลดลงเล็กน้อยในระดับเศษส่วน (Fractional Point) แต่ยังคงรักษาค่าประสิทธิภาพในระดับที่สูงกว่า 80%

ตารางที่ 4 ค่า Mixing Efficiency (%) ที่ 1 $\mu\text{L}/\text{min}$, 10 $\mu\text{L}/\text{min}$, 25 $\mu\text{L}/\text{min}$ และ 50 $\mu\text{L}/\text{min}$

Chip Length (mm)	1 $\mu\text{L}/\text{min}$	10 $\mu\text{L}/\text{min}$	25 $\mu\text{L}/\text{min}$	50 $\mu\text{L}/\text{min}$
0	45.33	32.85	26.51	22.69
2.5	61.24	56.03	54.69	47.30
5	94.27	86.37	83.87	81.24
7.5	96.99	85.68	84.82	82.34
10	96.54	85.12	85.31	82.91
12.5	98.91	89.23	86.72	86.55
15	98.97	92.64	88.97	88.85
17.5	98.98	95.03	89.52	89.32
20	99.80	95.80	93.20	92.00



รูปที่ 12 แสดงค่าผลของค่าความเข้มของสี (โปรแกรม ImageJ)



รูปที่ 13 แสดงค่า Mixing Efficiency และ Chip Length



5. สรุปงานวิจัย

งานวิจัยนี้ประสบความสำเร็จในการออกแบบและสร้างอุปกรณ์ไมโครมิกเซอร์แบบพาสซีฟที่มีโครงสร้างช่องทางคดเคี้ยวเสริมร่อง เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการผสมของไหลในย่านอัตราการไหลที่กว้าง โดยสามารถทำการทดลองจริงได้มากที่สุดที่ 50 $\mu\text{L}/\text{min}$ ซึ่งไม่ใช่ผลจากการจำลองผลการทดลอง โดยพบว่าการสร้างอุปกรณ์ไมโครมิกเซอร์นี้สามารถทำการสร้างลวดลายที่คมชัดมากที่สุดบนสารไวแสงชนิดบวก AZ P4620 ภายใต้ปัจจัยหลัก (Main Factor) 3 ประการ ได้แก่ พลังงาน UV, ระยะเวลาสูง, เวลาล้าง และปฏิสัมพันธ์ (Interaction Factor) BC, AB มีผลกระทบอย่างมีนัยสำคัญต่อความคมชัด ทำนายพลังงานในการฉายแสงยูวี ระยะเวลาสูงตำแหน่งในการวางชิ้นงานบนแกน Stage Z และเวลาในการล้างสารไวแสงที่ดีที่สุด เท่ากับ 18 วินาที 11.47 มิลลิเมตร และ 35 นาที ตามลำดับ พบว่าสภาวะดังกล่าวให้ ค่าความพึงพอใจสูงสุด 87.99% และ ความน่าเชื่อถือของข้อมูล 99.82% ซึ่งยืนยันความแม่นยำของแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นที่อัตราการไหลต่ำสุด (1 $\mu\text{L}/\text{min}$) ไมโครมิกเซอร์ที่พัฒนาขึ้นมีประสิทธิภาพการผสมสูงสุดที่ 99.80% ซึ่งใกล้เคียงกับไมโครมิกเซอร์แบบเดิมที่มีค่าประสิทธิภาพสูงสุดที่ 99.75% สำหรับอัตราการไหลที่สูงขึ้น พบว่าประสิทธิภาพการผสมลดลงเล็กน้อยในช่วงยาวกว่า 10 μL คือ 95.80%, 93.20% และ 92.00% ขึ้นอยู่กับอัตราการไหล ซึ่งช่วงอัตราการไหลที่ทดสอบได้จริง (1-50 $\mu\text{L}/\text{min}$) เท่านั้น เนื่องจากระดับอัตราการไหลที่สูงกว่า 50 $\mu\text{L}/\text{min}$ ถือเป็นจุด Critical Point ของโครงสร้างที่ถูกออกแบบไว้ในการศึกษาครั้งนี้ ซึ่งแนวทางในการปรับปรุงโครงสร้างเพื่อรองรับอัตราการไหลที่สูงกว่า

50 $\mu\text{L}/\text{min}$ ต้องดำเนินการดังต่อไปนี้ ซึ่งจะถูกนำไปใช้ปรับใช้ในโครงสร้างในอนาคต

1. Chemical Modification (APTES) การทำ Surface Treatment ด้วยสาร Silane (เช่น APTES) ก่อนการ Bonding จะช่วยเพิ่มแรงยึดเกาะได้มากกว่า Plasma ปกติถึง 2-3 เท่า ทำให้ทนแรงดันได้ถึง 600-800 kPa

2. Mechanical Clamping System: ออกแบบตัวประกบชิป (Holder) โดยใช้ CNC หรือ 3D Printing ผลิตแผ่นอะคริลิกใสมาประกบหน้า-หลังชิป วิธีนี้เป็นมาตรฐานสากลในงานวิจัย Microfluidics ที่ต้องใช้ความเร็วสูง เพื่อป้องกันไม่ให้ PDMS บวมหรือแยกออกจากกระจก

3. Optimize Channel Height: หากประสิทธิภาพการผสม (Mixing efficiency) ยังดีอยู่ สามารถทำการเพิ่มความสูง (h) เป็น 40-50 μm เพื่อให้แรงดันลดลงเหลือเพียง 1/3 ของค่าปัจจุบันทันที ซึ่งจะทำให้ระบบเสถียรขึ้นมาก

นอกจากนี้ยังพบว่าไมโครมิกเซอร์ที่พัฒนาขึ้นยังคงมีประสิทธิภาพการผสมมากกว่า 80% ในทุกช่วงอัตราการไหลที่ทำการทดสอบจริง ที่อัตราการไหลสูง ประสิทธิภาพลดลงมากกว่าแบบเดิม เนื่องจาก การออกแบบช่องไหลยังไม่สร้างกระแสปั่นป่วนได้เต็มที่

ดังนั้นในด้านสมรรถนะของอุปกรณ์ ผลการทดลองเชิงทดลอง (Experimental results) ยืนยันว่าไมโครมิกเซอร์ที่พัฒนาขึ้นสามารถยกระดับประสิทธิภาพการผสมได้อย่างมีนัยสำคัญเมื่อเปรียบเทียบกับโครงสร้างแบบเดิม โดยสามารถทำประสิทธิภาพการผสมสูงสุดได้



ถึง 99.80% ที่อัตราการไหล ซึ่งเป็นผลมาจากกระแสไหลวน (Vortex) และการแปรที่เพิ่มขึ้นอย่างสมบูรณ์ภายในโครงสร้างร่องเสริม แม้ว่าในเชิงทฤษฎีจะบ่งชี้ถึงขีดความสามารถในการรองรับแรงดันได้สูง แต่จากการทดสอบจริงพบว่าข้อจำกัดของอุปกรณ์อยู่ที่อัตราการไหล 50 $\mu\text{L}/\text{min}$ เนื่องจากเป็นจุดวิกฤตที่เริ่มเกิดการรั่วซึมของของไหล ซึ่งแสดงว่าไมโครมิกเซอร์ที่น่าเสนอนี้มีสมรรถนะในการผสมที่ยอดเยี่ยมและใช้งานได้จริงในช่วงอัตราการไหลที่กำหนด ซึ่งผลการทดลองเชิงประจักษ์นี้ได้พิสูจน์ถึงประสิทธิภาพของรูปแบบโครงสร้างที่ออกแบบมา และสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในระบบ Lab-on-a-Chip สำหรับการวิเคราะห์ทางชีวการแพทย์และเคมีที่ต้องการความแม่นยำสูงได้อย่างมีประสิทธิภาพ

การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างช่องทางการไหลทำให้ประสิทธิภาพการผสมลดลงเล็กน้อยที่อัตราการไหลสูง โดยเฉพาะเมื่อเปรียบเทียบกับไมโครมิกเซอร์แบบเดิม จำเป็นต้องมีการพัฒนาเพิ่มเติมโดยเพิ่มองค์ประกอบที่ช่วยสร้างการไหลปั่นป่วนภายในช่อง เช่น การเพิ่มร่อง (Grooves) หรือสิ่งกีดขวาง (Obstacles) เพื่อกระตุ้นการผสมของของไหล

แนวทางการพัฒนางานวิจัยนี้เพื่อต่อยอดในอนาคต ได้แก่ การปรับปรุงโครงสร้างช่องทางไหลโดยเพิ่มองค์ประกอบกีดขวาง เพื่อเพิ่มการไหลปั่นป่วน การปรับโครงสร้างที่สามารถทดลองที่อัตราการไหลสูงขึ้นกว่า 50 $\mu\text{L}/\text{min}$ เพื่อลดขีดจำกัดของอุปกรณ์ และการพัฒนาทางเข้าของสารจาก 2 ทาง เป็น 3 ทาง เพื่อเพิ่มความซับซ้อนของการไหลและทางเลือกการผสมสารมากกว่า 2 สารขึ้นไป อีกทั้งเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพการผสมให้ดียิ่งขึ้น

6. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้เป็นส่วนหนึ่งของการได้รับการสนับสนุนจากทุนส่งเสริมศักยภาพนักวิจัยรุ่นใหม่ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ ประจำปี 2567

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] G. M. Whitesides, The origins and the future of microfluidics, *Nature*, 2006, 442, 368-373.
- [2] C.Y. Lee, CL. Chang, Y.N. Wang and L.M. Fu, Microfluidic mixing: A review, *International Journal of Molecular Sciences*, 2011, 12(5), 3263-3287.
- [3] T.M. Squires and S.R. Quake, Microfluidics: Fluid physics at the nanoliter scale, *Reviews of Modern Physics*, 77(3), 977-1026, 2005.
- [4] K. Karthikeyan and S. Sujatha, Study of permissible flow rate and mixing efficiency in serpentine channel micromixer, *International Journal of Microfluidics*, 2018, 12(3), 45-58.
- [5] M.U. Javid, T.A. Cheema and C.W. Park, Analysis of passive mixing in a serpentine microchannel with sinusoidal side walls, *Micromachines*, 2018, 9(1), 8.
- [6] P. Borgohain, D. Choudhary, A. Dalal, and G. Natarajan, Numerical investigation of mixing enhancement for multi-species flows in wavy channels, *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 2018, 127, 191-205.



- [7] H. Jalili, M. Raad and D. A. Fallah, Numerical study on the mixing quality of an electroosmotic micromixer under periodic potential, *Journal of Mechanical Engineering Science*, 2020, 234, 11, 2113-2125.
- [8] B. Mondal, P.K. Patowari and S. Pati, Numerical and experimental investigations of mixing length in square wave serpentine micromixer with obstacles, *Microsystem Technologies*, 2024, 30(2), 365–375.
- [9] B. Yuan, S. Yuan and H. Wang, Numerical and experimental investigation of mixing enhancement in a zigzag passive micromixer with D-shaped obstacles, *Micromachines*, 2021, 12(11), 1362.
- [10] C. Wu, K. Tang, B. Gu, and Z. Wu, Concentration-dependent viscous mixing in microfluidics: Modelings and experiments, *Microfluidics and Nanofluidics*, 2016, 20(6), 91.
- [11] T. Okkala, Teaching Handout, Fluid Mechanics, Department of Irrigation Engineering, Faculty of Engineering at Kamphaeng Saen, Kasetsart University Kamphaeng Saen Campus, 2010. (in Thai),
- [12] J. Keawkaew, C. Phiphattanaphiphop, K. Leksakul, R. Phatthanakun and T. Khamlor, The optimal solution of microfluidic device for separating white blood cells in raw milk, *Sensors and Actuators: A. Physical*, 2025, 382, 116124.
- [13] H. Bruus, *Theoretical microfluidics, Chapter 2: Hydraulic resistance*, Oxford University Press, UK, 2008, 34–36.



ข้อมูลสำหรับผู้เขียนและการเตรียมต้นฉบับ

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรมตีพิมพ์ปีละ 3 ฉบับ โดยวิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ บทความที่พิจารณาตีพิมพ์ต้องไม่เคยตีพิมพ์เผยแพร่ในวารสารใดมาก่อน และไม่อยู่ในระหว่างการพิจารณาของวารสารอื่น เรื่องที่ตีพิมพ์จะต้องได้รับการกลั่นกรองจากผู้ทรงคุณวุฒิในสาขาที่เกี่ยวข้อง แบบปกปิดข้อมูล (Double-Blind Peer-Review) และได้รับความเห็นชอบจากบรรณาธิการวารสารฯ

บทความต้องมีความยาวไม่น้อยกว่า 5 หน้ากระดาษ B5 หรือไม่น้อยกว่า 2500 คำ โดยนับคำด้วยคำสั่ง word count ใน MS Word (ไม่ควรเกิน 15 หน้ากระดาษ) บทความประกอบด้วยชื่อเรื่อง ชื่อผู้เขียน สถานที่ทำงาน การติดต่อผู้เขียน บทคัดย่อ และคำสำคัญ (3 - 5 คำ) โดยเนื้อหาตั้งกล่าวทั้งหมดต้องจัดเตรียมในรูปแบบภาษาไทย 1 หน้ากระดาษ และภาษาอังกฤษ 1 หน้ากระดาษ

เนื้อเรื่องของบทความวิจัยประกอบด้วย 5 - 6 ส่วน คือ (1) บทนำ (2) วิธีการดำเนินงานวิจัย/ทดลอง (3) ผลการวิจัย/ทดลองและการอภิปรายผล (4) บทสรุป (5) กิตติกรรมประกาศ (ถ้ามี) และ (6) เอกสารอ้างอิง

สำหรับเนื้อเรื่องของบทความวิชาการให้เตรียมเป็นบทความที่เรียบเรียงเนื้อหาจากหนังสือ งานวิจัย ประสบการณ์ หรือเรื่องแปล เพื่อเผยแพร่ความรู้ในสาขาต่าง ๆ หรือแสดงข้อคิดเห็นที่เป็นประโยชน์มีคุณค่าทางวิชาการ โดยองค์ประกอบของบทความวิชาการอาจคล้ายคลึงกับบทความวิจัย แต่ไม่มีเนื้อหาของการดำเนินงานวิจัยและผลการวิจัย ซึ่งผู้เขียนสามารถกำหนดได้เองตามความเหมาะสมของบทความวิชาการ

ผู้เขียนบทความสามารถดาวน์โหลดรูปแบบบทความสำเร็จรูปและแบบฟอร์มนำส่งบทความได้จากเว็บไซต์: ojs.kmutnb.ac.th/index.php/jointtech

Authors Guideline and Manuscript Preparation

JIT is published tri-annually by College of Industrial Technology, King Mongkut's University of Technology North Bangkok. All considered articles have not been published elsewhere and are not currently submitted for consideration in other journals. All articles are independently assessed by specialist in their relevant fields (Double-Blind Peer Review), and must be approved by the editor.

The length of the manuscript is not less than 5 pages in B5 paper size or not less than 2500 words using a word count of MS Word (should not exceed 15 pages). The first page of the manuscript should contain the full title, author's name(s), affiliation, contact address of correspondence, abstract and keywords (3-5 words).

The content of the research article consists of 5-6 parts, arranged in the following details; (1) introduction (2) experimental procedure (3) results and discussion (4) conclusion (5) acknowledgement (if any) and (6) references.

For review or academic article, the contents may prepare from text book, research experiences, or translation for publishing knowledge in various fields or provide useful and valuable comments. The main contents may contain a similar section to the research article but without sections of the experimental and results. The topic and content can be specified by the author as appropriate for the article.

The author can download manuscript templates and submission form in the journal's website: ojs.kmutnb.ac.th/index.php/jointtech.



แบบฟอร์มนำส่งบทความ

1. ชื่อบทความวิจัย/บทความวิชาการ

ภาษาไทย

ภาษาอังกฤษ

2. ประเภทบทความ บทความวิจัย บทความวิชาการ

3. ชื่อ-สกุลเจ้าของบทความ หรือผู้แทนส่งบทความ

4. สถานที่ติดต่อเจ้าของบทความหรือผู้แทนส่งบทความ

ที่อยู่

โทรศัพท์

โทรสาร

E-mail

5. รายชื่อและที่อยู่ของผู้ร่วมบทความ (สามารถเพิ่มรายชื่อได้ในเอกสารแนบเพิ่มเติม)

ชื่อ-สกุล (ภาษาไทย ตัวบรรจง)	ชื่อ-สกุล (ภาษาอังกฤษ ตัวบรรจง)	หน่วยงาน	โทรศัพท์	E-mail

6. เสนอรายชื่อผู้ประเมิน

1. โทรศัพท์

E-mail

2. โทรศัพท์

E-mail

3. โทรศัพท์

E-mail

7. การรับรองบทความ

 ขอรับรองว่าบทความต้นฉบับนี้ยังไม่เคยได้รับการเผยแพร่และตีพิมพ์ในวารสารอื่นใดมาก่อน

เจ้าของบทความ (ลงชื่อ)

8. แบบฟอร์มนี้ข้าพเจ้าได้แนบต้นฉบับบทความดังรายการต่อไปนี้ครบถ้วนแล้ว

 ส่งบทความทางระบบออนไลน์ที่เว็บไซต์ <http://ojs.kmutnb.ac.th/index.php/jointech/index> ส่งบทความทางไปรษณีย์อิเล็กทรอนิกส์ ที่ e-mail: JIT.journal@gmail.com ส่งบทความด้วยตัวเอง หรือทางไปรษณีย์

ขอรับรองว่าข้อความดังกล่าวข้างต้นเป็นจริงทุกประการ

ลงชื่อ เจ้าของบทความ หรือผู้แทนส่งบทความ

()

วันที่ เดือน พ.ศ.



Manuscript Submission Form

- 1. Title
2. Type of manuscript [] Research Article [] Academic Article (Review)
3. Corresponding Author Name
4. Affiliation
Tel. Fax E-mail

5. List of co-author(s) and address

Table with 4 columns: Name, Affiliation, Telephone, E-mail

6. Suggested reviews (Author must suggest the reviewer at least three people in the field of research presented in manuscript including name, organization, contact address and e-mail)

- 1. Tel Email
2. Tel Email
3. Tel Email

7. Manuscript's certification

- [] I certify that this manuscript has not been accepted nor submitted for publication elsewhere.
Corresponding's author name (Signature)

8. Together with this form, I (we) have been attached other documents included:

- [] Manuscript submission by system online at http://ojs.kmutnb.ac.th/index.php/joindtech/index
[] Manuscript submission by e-mail: JIT.journal@gmail.com
[] Manuscript submission by self or post-mail

I hereby certify that the information above is true and accurate.

Signature Corresponding author
Date Month Year

The Journal of Industrial Technology

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม ปีที่ ๒๒ ฉบับที่ ๑ ประจำปี ๒๕๖๕

บทความ (Articles)

- Effect of High Volume Ground Palm Oil Fuel Ash on Properties of Concrete Blocks, The Journal of Industrial Technology, 2026, 22(1), 1-17.
- A Data Management Framework and Mathematical Model for Worker Allocation Considering Skills and Upskilling in the Sewing Department of the Garment Industry, The Journal of Industrial Technology, 2026, 22(1), 18-32.
- A Lesson Learned from the UK Rail Project: An Analysis of Critical Success Factors (CSFs) through the Project Life Cycle (PLC), The Journal of Industrial Technology, 2026, 22(1), 33-49.
- Effect of Sea Water on Compressive Strength and Elastic Modulus of Concrete Portland Cement Type V Containing Ground Palm Oil Fuel Ash, The Journal of Industrial Technology, 2026, 22(1), 50-67.
- Enhancing Packaging Transport Efficiency Using Low-Cost Karakui Kaizen Automation Mechanism, The Journal of Industrial Technology, 2026, 22(1), 68-83.
- QFD-guided design of a Web-Based DSS Prototype for Sustainable Waste Management in Thailand, The Journal of Industrial Technology, 2026, 22(1), 84-99.
- Investigation of Paddy Drying in a Curvilinear Impinging Stream Drying System Using Computational Fluid Dynamics, The Journal of Industrial Technology, 2026, 22(1), 100-115.
- Development of a Microcontroller-Based Data Logger for Consolidation Testing, The Journal of Industrial Technology, 2026, 22(1), 116-128.
- Predicting Micro-Crack Formation in XLPE Main Cables of Educational Building Power Systems Using Real-Time Three-Phase Current Data Analysis, The Journal of Industrial Technology, 2026, 22(1), 129-143.
- Feasibility Study on Technical, Economic, and Environmental Aspects of Synthetic Diesel Production from Natural Gas throughout Its Life Cycle, The Journal of Industrial Technology, 2026, 22(1), 144-161.
- Design and Experimental Study of a Prototype Device for Low-Temperature Hot Air Generation Using Atmospheric Plasma for Drying and Fungal Decontamination of Thai Herbs, The Journal of Industrial Technology, 20256, 22(1), 162-177.
- Natural Heat Convection Analysis on Boundary layer and Apply Utilization to Inclined Solar Collector, The Journal of Industrial Technology, 2026, 22(1), 178-192.
- The Design and Development of the Optimal Passive Micromixer to Accommodate a Wide Range of Flow Rates, The Journal of Industrial Technology, 2026, 22(1), 193-210.