

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

ISSN: 1686-9869 (Print), ISSN: 2697-5548 (Online)



DRIVEN BY



The Journal of Industrial Technology

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม ปีที่ ๑๙ ฉบับที่ ๒ ประจำปี ๒๕๖๖

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม ปีที่ ๑๙ ฉบับที่ ๒ ประจำปี ๒๕๖๖

VOLUME 19 | ISSUE 2 | 2023 | 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 โปธิยะราช
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 ของภาคการศึกษาและ อุตสาหกรรม โดยบทความมีเนื้อหาที่เกี่ยวข้องกับสาขาวิชาทางด้านเทคโนโลยีวิศวกรรมศาสตร์ อาทิเช่น วิศวกรรมเครื่องกล วิศวกรรมโยธา วิศวกรรมเคมี วิศวกรรมไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ วิศวกรรมวัสดุและ กระบวนการผลิต วิศวกรรมอุตสาหกรรม วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม วิศวกรรมพลังงานและพลังงานทดแทน วิศวกรรม คอมพิวเตอร์และแบบจำลอง เป็นต้น

ทั้งนี้ บทความจะผ่านขั้นตอนการประเมินเบื้องต้นถึงคุณภาพและขอบเขตของเนื้อหา ความถูกต้อง ของรูปแบบการเตรียมบทความ ความซ้ำซ้อน และการคัดลอกวรรณกรรม (Duplication and Plagiarism) โดย กองบรรณาธิการวารสารฯ จากนั้น บทความจะได้รับการประเมินคุณภาพทางวิชาการโดยผู้ทรงคุณวุฒิใน สาขาวิชาที่เกี่ยวข้องอย่างน้อย 3 ท่าน ซึ่งเป็นบุคคลภายนอกจากหลากหลายสถาบัน ทั้งนี้ ผู้นิพนธ์ (Author) และ ผู้ประเมิน (Reviewer) จะไม่ทราบข้อมูลของกันและกัน (Double-Blinded Peer Reviews) และไม่ได้สังกัด หน่วยงานเดียวกัน โดยบทความที่ผ่านการปรับปรุงตามผลการประเมินจะได้รับพิจารณาอนุมัติให้ตีพิมพ์บทความ ขั้นต้นสุดท้าย กองบรรณาธิการจะดำเนินการตรวจสอบบทความและพิสูจน์อักษรก่อนที่จะเผยแพร่บทความแบบ ออนไลน์ และจัดพิมพ์บทความทั้งหมดรวมเล่มเพื่อดำเนินการเผยแพร่ต่อไป

อนึ่ง ผลงานวิจัยและผลงานทางวิชาการที่ปรากฏเผยแพร่ในวารสารฯ เป็นความคิดเห็นอิสระของผู้แต่ง โดยผู้แต่งเป็นผู้รับผิดชอบต่อผลทางกฎหมายใด ๆ ที่อาจจะเกิดขึ้นจากบทความเผยแพร่ นั้น ซึ่งกองบรรณาธิการ และคณะผู้จัดทำวารสารฯ ไม่จำเป็นต้องเห็นด้วยเสมอไป

กำหนดออกวารสาร

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรมมีกำหนดการออกปีละ 3 ฉบับ โดยฉบับที่ 1 จะจัดพิมพ์ ระหว่างเดือนมกราคม – เมษายน ฉบับที่ 2 จะจัดพิมพ์ระหว่างเดือน พฤษภาคม – สิงหาคม และฉบับที่ 3 จะ จัดพิมพ์ระหว่างเดือนกันยายน – ธันวาคม ของทุกปี

ผู้จัดพิมพ์

หน่วยวิจัยและส่งเสริมวิชาการ วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้า พระนครเหนือ ชั้น 3 อาคาร 63 เลขที่ 1518 ถนนประชากรราษฎร์ 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 Print: 1686-9869, ISSN Online: 2697-5548) ปีที่ 19 ฉบับที่ 2 กองบรรณาธิการมีความยินดีเป็นอย่างยิ่งที่จะเรียนให้ทุกท่านได้ทราบว่าวารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรมได้รับการประเมินคุณภาพวารสารจัดอยู่ในฐานข้อมูล TCI กลุ่มที่ 1 ด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี โดยศูนย์ดัชนีการอ้างอิงวารสารไทย (Thai Citation Index: TCI) มีผลรับรองตั้งแต่วันที่ 1 มกราคม พ.ศ. 2564 ถึงวันที่ 31 ธันวาคม พ.ศ. 2567

การดำเนินงานของวารสารฯ ฉบับนี้ ทางกองบรรณาธิการและคณะผู้จัดทำวารสารฯ ได้ดำเนินการพิจารณาและเผยแพร่บทความด้วยระบบ Online Journal Submission (OJS) ร่วมกับการเผยแพร่บทความแบบรูปเล่ม 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 ข้อเสนอแนะที่ทรงคุณค่า 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	
การวิเคราะห์การกระจายตัวของอุณหภูมิและค่าการนำความร้อนของยางคอมปาวด์ในระหว่างกระบวนการอัดขึ้นรูป (Analysis of Temperature Distribution and Thermal Conductivity of Rubber Compound during Compression Molding Process) <i>Rutchadaporn Sudto, Somjate Patcharaphun</i>	1-12
ผลของกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมต่อความต้านทานการสึกหรอที่อุณหภูมิสูงของรอยเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิติก AWS A5.9 ER420 ด้วยกระบวนการเชื่อม GMAW (Effect of Post Weld Heat Treatment on High-temperature Wear Resistance of Martensitic Stainless Steel AWS A5.9 ER420 Weldment by GMAW Process) <i>Pisak Lertvijitpun, Nutta Bourmiew</i>	13-30
สมบัติทางวิศวกรรมของมอร์ตาร์ผสมเส้นใยแปรรูปใหม่จากขยะแผงวงจรพิมพ์ (Engineering Properties of Mortars Incorporating Recycled Fibers from Waste Printed Circuit Boards) <i>Dhitivajra Siriwattanasanon, Burachat Chatweera, Gritsada Sua-iam, Nirat Yamoat</i>	31-46
การเพิ่มผลผลิตไก่แช่แข็งในกระบวนการผลิตเครื่องปรุงโรยหน้าอาหารสัตว์เลี้ยง (Increasing Frozen Chicken Yields in the Pet Food Topping Process) <i>Treelarisa Ngamwong, Darat Dechampai, Koson Numbang, Nattakan Jakkranuhwat</i>	47-60
Biogas for the use as Fuel in Sour Tamarind Cube Manufacture of OTOP in Duang Thong District, Phetchabun Province <i>Sermsak Thipwong, Suwicha Phuttarat, Nisit Ong-art</i>	61-69



สารบัญ (ต่อ)

บทความวิจัย (ต่อ)	หน้า
การออกแบบระบบชดเชยแสงสำหรับการเกษตรใต้เซลล์แสงอาทิตย์ (Design of Light Compensation System for Agriculture under Solar Panel) <i>Piyapong Olanthichachat, Monthol Fak-aim, Tharathip Sreesattabud</i>	70-84
การศึกษา ออกแบบ และจำลองการทำงานตัวปรับปรุงค่าประกอบกำลังแบบบริดจ์เลสส์โทเทมโพล (Study, Design, and Simulation of Bridgeless Totem-pole Power Factor Correction) <i>Peerapon Chanhom, Natchpong Hatti</i>	85-97
กาวชีวภาพจากการปรับแต่งแป้งมันสำปะหลังที่เป็นของเสีย/พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ที่เชื่อมขวางด้วยกรดแทนนิกสำหรับการประยุกต์ใช้งานในไม้ (Bio-adhesive based Modified Cassava Starch Waste/polyvinyl Alcohol Crosslinked with Tannic Acid for Wood Application) <i>Chaloton Jarensungnen, Natnaree Sr Chiangsa, Pornnapa Kasemsiri</i>	98-108
ผลกระทบของดินขาวเผาต่อสมบัติทางกลของเถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์เสริมเส้นใยเหล็ก (Influence of Metakaolin on Mechanical Properties of Fly Ash Geopolymer Mortar Reinforced with Steel Fibers) <i>Peem Nuaklong, Chanachai Thongchom</i>	109-122
การพัฒนาอุปกรณ์สร้างอักษรเบรลล์บนฉลากยาด้วยเครื่องพิมพ์ 3 มิติ (Development of Braille-making Devices on Pharmaceutical Labels using 3D Printers) <i>Anan Tanwilaisiri, Phichit Kajondecha</i>	123-135
การประยุกต์โหมดความล้มเหลวและการวิเคราะห์ผลกระทบของอุตสาหกรรมพลาสติกด้วยวิธีการตัดสินใจหลายเกณฑ์แบบฟัซซีกรณีศึกษา: ผู้ผลิตเม็ดพลาสติกในประเทศไทย (Application of Failure Mode and Effect Analysis of Plastics Industry with Fuzzy Multi-Criteria Decision Making a Case Study: Plastic Resin Manufacturing in Thailand) <i>Jirawat Keeratibhubordee, Detcharat Sumrit</i>	136-158



สารบัญ (ต่อ)

บทความวิจัย (ต่อ)	หน้า
Effect of Injection Pressure and Timing of the Ternary Blends (Ethanol-Biodiesel-Diesel) on Combustion Characteristics <i>Sakda Thongchai, Ob Nilaphai, Manida Tongroon</i>	159-174
การบำบัดฟอสฟอรัสในน้ำทิ้งโดยการตกตะกอนทางเคมีของน้ำด้วยอลูมิเนียมซัลเฟต (Treatment of Phosphorus in Wastewater by Coagulation with Aluminum Sulfate) <i>Chadaphom Boonsaenyot, Sitthihcai Chaikhan, Siraprapa Suwannatrai, Supawadee Phuangsanthia, Nukul Mongkol</i>	175-187
การพัฒนาส่วนผสมของเนื้อดินด่านเกวียนและกากกาแฟผงมะไฟเพื่อสร้างฟิลเตอร์เซรามิกส์สำหรับดริปกาแฟผงมะไฟ (Development of a Mixture of Dan Kwian Clay Body and Dong Ma Fai Coffee Grounds to Create a Ceramic Filter for Dong Ma Fai Coffee Drip) <i>Onlamee Kamon-in</i>	188-203
แบบจำลองทางคณิตศาสตร์การรุกตัวของน้ำเค็มของแม่น้ำจันทบุรี (Mathematical Model for Salinity Intrusion Measurement of Chanthaburi River) <i>Kamonpad Mansilp, Nopparat Pochai, Sompoom Meechowna, Witsarut Klaychang</i>	204-217
ข้อมูลสำหรับผู้เขียนและการเตรียมต้นฉบับ (Authors Guideline and Manuscript Preparation)	S1
แบบฟอร์มนำส่งบทความ (Manuscript Submission Form)	S2



การวิเคราะห์การกระจายตัวของอุณหภูมิและค่าการนำความร้อนของยางคอมปาวด์ในระหว่างกระบวนการอัดขึ้นรูป

รัชดาภรณ์ สุคติ และ สมเจตน์ พัทธพันธ์ *

ภาควิชาวิศวกรรมวัสดุ, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

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

วันที่รับบทความ: 14 กุมภาพันธ์ 2566; วันที่ทบทวนบทความ: 3 เมษายน 2566; วันที่ตอบรับบทความ: 19 เมษายน 2566

วันที่เผยแพร่ออนไลน์: 31 พฤษภาคม 2566

บทคัดย่อ: กระบวนการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ที่มีความหนา มักประสบปัญหาเรื่องการสุกตัวที่ไม่สม่ำเสมอตลอดความหนาของชิ้นงาน ซึ่งมีสาเหตุมาจากการกระจายตัวของอุณหภูมิและค่าการนำความร้อนของสารประกอบยางที่เปลี่ยนแปลงไปในระหว่างกระบวนการคงรูป ซึ่งส่งผลกระทบต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์ที่ได้ งานวิจัยนี้ได้ศึกษาอิทธิพลของระบบการคงรูป ชนิดและปริมาณสารตัวเติมที่มีต่อการกระจายตัวของอุณหภูมิและค่าการนำความร้อนของยางคอมปาวด์ในระหว่างกระบวนการอัดขึ้นรูปโดยใช้แม่พิมพ์ทดสอบที่ได้ออกแบบและจัดสร้างขึ้น จากผลการทดลองพบว่า ยางคอมปาวด์ที่ใช้ระบบการคงรูปแบบประสิทธิภาพ (Efficient Vulcanization: EV) มีการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิที่สูงกว่าที่ใช้ระบบการคงรูปแบบดั้งเดิม (Conventional Vulcanization: CV) และเมื่อนำผลการกระจายตัวของอุณหภูมิไปวิเคราะห์ค่าการนำความร้อนของยางคอมปาวด์และยางคงรูป พบว่า ยางที่ผ่านกระบวนการคงรูปแล้วมีค่าการนำความร้อนที่ลดลงอย่างมากเมื่อเทียบกับยางคอมปาวด์ โดยค่าการนำความร้อนของยางคงรูปและยางคอมปาวด์มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณสารตัวเติม จากผลศึกษาการกระจายตัวของอุณหภูมิและค่าการนำความร้อนภายในยางคอมปาวด์ที่ผสมเขม่าดำ แสดงให้เห็นว่า ค่าการนำความร้อนของยางคอมปาวด์มีแนวโน้มลดลงอย่างมากเมื่อถึงอุณหภูมิที่ยางคอมปาวด์เริ่มเกิดปฏิกิริยาการคงรูป โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อผสมเขม่าดำในปริมาณสูงและชิ้นงานมีความหนามาก ส่งผลให้ชิ้นงานยางมีระดับการคงรูปที่ไม่สม่ำเสมอตลอดความหนาชิ้นงาน งานวิจัยนี้ได้นำเสนอวิธีการคงรูปแบบลำดับขั้น ซึ่งจากการทดสอบแสดงให้เห็นว่า วิธีการคงรูปแบบลำดับขั้นทำให้มีการกระจายอุณหภูมิภายในเนื้อยางคอมปาวด์ที่ดีขึ้น ส่งผลให้ชิ้นงานที่ได้มีระดับการคงรูปที่สม่ำเสมอกว่าวิธีการคงรูปแบบดั้งเดิม

คำสำคัญ: กระบวนการอัดขึ้นรูป; ยางคอมปาวด์; การกระจายตัวของอุณหภูมิ; ค่าการนำความร้อน; ชนิดและปริมาณสารตัวเติม; ระบบการคงรูป

Analysis of Temperature Distribution and Thermal Conductivity of Rubber Compound during Compression Molding Process

Rutchadaporn Sudto and Somjate Patcharaphun*

Department of Material Engineering, Faculty of Engineering, Kasetsart University

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

Received: 14 February 2023; Revised: 3 April 2023; Accepted: 19 April 2023

Online Published: 31 May 2023

Abstract: Uneven cure of thick-wall rubber products is regarded as one of the most undesirable phenomena since it results in a significant loss of mechanical properties. The primary objective of this study was to investigate the effect of the curing system, filler type, and content on the temperature distribution and thermal conductivity of rubber compounds during the compression molding process. A special compression mold was designed and constructed to measure the temperature distribution across the thickness of rubber parts. The measured results indicated that the efficient vulcanizing system (EV) gave a better temperature distribution across the thickness than conventional vulcanization (CV). Concerning the thermal conductivity of rubber compounds and vulcanizates, it was found that the thermal conductivity increased with the increase of filler content. In addition, the thermal conductivity of cured rubber dramatically decreased as compared to uncured rubber. Furthermore, it should be noted that the decreasing thermal conductivity of rubber compounds, especially for high carbon black loading and thick-wall moldings, directly affected the uneven cure of rubber products. In this work, the step cure was proposed to enhance the temperature distribution across the thickness of rubber compounds. The results obtained in this measurement showed that the step cure could improve the vulcanization efficiency as compared to the conventional method.

Keywords: Compression molding; Rubber Compound; Temperature distribution; Thermal Conductivity; Filler type and content; Vulcanizing system



1. บทนำ

ปัจจุบันอุตสาหกรรมการผลิตผลิตภัณฑ์ยางนับเป็นอุตสาหกรรมที่มีความสำคัญมากในประเทศไทย เนื่องจากประเทศไทยมีความสามารถในการผลิตยางธรรมชาติในรูปของยางดิบได้มากที่สุดในโลก อย่างไรก็ตามการแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์เพื่อเพิ่มมูลค่าให้แก่ยางธรรมชาติยังเป็นสัดส่วนที่น้อยมากเมื่อเทียบกับปริมาณการส่งออกในรูปของยางดิบ ทั้งนี้เนื่องจากการขาดองค์ความรู้ในการผลิตผลิตภัณฑ์ยางที่มีคุณภาพ โดยทั่วไปแล้วกระบวนการแปรรูปจากยางดิบเป็นผลิตภัณฑ์ยางนิยมนำขึ้นรูปด้วยแม่พิมพ์ ซึ่งสามารถแบ่งได้เป็นกระบวนการอัดขึ้นรูป (Compression Molding) และกระบวนการฉีดขึ้นรูป (Injection Molding) [1, 2] สำหรับในประเทศไทยกระบวนการอัดขึ้นรูปเป็นกระบวนการที่นิยมมากที่สุด เนื่องมาจากการลงทุนต่ำทั้งในส่วนแม่พิมพ์และเครื่องจักรที่ใช้ อย่างไรก็ตามกระบวนการอัดขึ้นรูปเป็นกระบวนการที่มีกพบปัญหาในระหว่างกระบวนการผลิต ยกตัวอย่างเช่น การเกิดครีบ (Flash) ที่ไม่สามารถหลีกเลี่ยงได้ รอบเวลาการผลิต (Cycle Time) ที่ยาวนานกว่ากระบวนการอื่น [3] นอกจากนี้ปัญหาการสุกตัว (Cure) ที่ไม่สม่ำเสมอ (Uneven cure) ของผลิตภัณฑ์ยางที่มีผิวนูนหรือมีความซับซ้อนมาก ซึ่งส่งผลต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์ที่ได้ [4, 5] โดยทั่วไปการหาเวลาการสุกตัว (Cure time) ของยางคอมปาวด์ สามารถหาได้จากการทดสอบโดยใช้เครื่อง Oscillating Disc Rheometer (ODR) หรือการใช้เครื่อง Moving Die Rheometer (MDR) [6, 7] อย่างไรก็ตามมาตรฐานของชิ้นงานที่ใช้ในการทดสอบมีความหนาประมาณ 2 มม. ซึ่งในทางปฏิบัติจริงอาจไม่แม่นยำในกรณีผลิตภัณฑ์ยางที่มีความหนามาก [8]

คุณภาพของผลิตภัณฑ์ยางที่ได้จากกระบวนการอัดขึ้นรูปโดยใช้แม่พิมพ์ มักพบปัญหาการสุกตัวของยางที่ไม่สม่ำเสมอตลอดความหนา เนื่องจากสมบัติการนำความร้อนของยางเปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิและสภาวะการคงรูป (State of Cure) [9-11] ซึ่งเป็นกระบวนการทางเคมีที่มีความซับซ้อนสูง ที่ขึ้นอยู่กับชนิดของยาง สารตัวเติม และสารเคมีอื่นๆ จากเหตุผลดังกล่าวทำให้นักวิจัยหลายคนได้ศึกษาถึงพฤติกรรมการนำความร้อนของยาง โดย Barnett [4] แสดงให้เห็นว่าซิงค์ออกไซด์ไม่ส่งผลต่อค่าการนำความร้อนของยางคอมปาวด์ และค่าการนำความร้อนขึ้นอยู่กับรูปร่างและทิศทางการจัดเรียงตัวของสารตัวเติมภายในยางคอมปาวด์ และจากงานวิจัยของ Walker [12] ได้ศึกษาค่าการนำความร้อนของยางคงรูป โดยแสดงให้เห็นว่าค่าการนำความร้อนไม่ขึ้นอยู่กับความหนาแน่นการเชื่อมโยง (Crosslink Density) Saxena et al. [13] และ Refei et al. [14] พบว่าค่าการนำความร้อนเปลี่ยนแปลงไปตามสภาวะการคงรูป โดยค่าการนำความร้อนของยางมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างมากเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น

จากที่กล่าวมาแล้วข้างต้นทางผู้วิจัยจึงได้ศึกษาปัจจัยที่อาจส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงหรือการกระจายตัวอุณหภูมิ (Temperature Distribution) ของยางคอมปาวด์ภายในแม่พิมพ์ในระหว่างกระบวนการอัดขึ้นรูป ปัจจัยหลักที่ศึกษา ได้แก่ ระบบการคงรูป ชนิดและปริมาณสารตัวเติม รวมถึงการใช้เทคนิคการคงรูปแบบลำดับขั้น (Step Cure) โดยใช้อุปกรณ์ชุดทดสอบที่ออกแบบและจัดสร้างขึ้น ซึ่งผลที่ได้จากงานวิจัยนี้จะเป็นข้อมูลพื้นฐานที่สำคัญแก่ภาคอุตสาหกรรมผลิตในการกำหนดอุณหภูมิและระยะเวลาการคงรูปที่เหมาะสมสำหรับผลิตภัณฑ์ยางที่มีความหนามากได้



นอกจากนี้ยังสามารถนำข้อมูลที่ได้ไปใช้ในการวิเคราะห์ โดยโปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อให้ได้ผลการวิเคราะห์ที่มีความแม่นยำมากยิ่งขึ้น

2. วัสดุ อุปกรณ์ และวิธีการวิจัย

งานวิจัยนี้ใช้ยางธรรมชาติเกรด STR5L โดยได้ทำการเตรียมสูตรยางคอมปาวด์ในระบบการคงรูปแบบดั้งเดิม (Conventional Vulcanization: CV) ระบบการคงรูปแบบกึ่งประสิทธิภาพ (Semi-Efficient Vulcanization: SEV) และระบบการคงรูปแบบประสิทธิภาพ (Efficient Vulcanization: EV) [1] ที่ผสมสารตัวเติมในปริมาณต่างๆ กัน ได้แก่ เขม่าดำ (Carbon Black: CB), ซิลิกา (Silica: SiO₂) และแคลเซียมคาร์บอเนต (Calcium Carbonate: CaCO₃) สูตรยางคอมปาวด์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้แสดงในตารางที่ 1 โดยขั้นตอนการบดผสมยางคอมปาวด์ เริ่มจากนำยางธรรมชาติมาบดด้วยเครื่องบดผสมระบบปิด (Internal Mixer) ที่อุณหภูมิ 70°C เป็นเวลา 3 นาที เติมซิงค์ออกไซด์ (ZnO) และกรดสเตียริก (Stearic Acid) จากนั้นผสมสารตัวเติมและสารกระตุ้น ครั้งละ 1/3 ของทั้งหมด ใช้เวลาในการบด

ผสม 1 นาที ใส่ทั้งหมด 3 ครั้ง บดผสมต่อไปจนครบเวลา 11 นาที แล้วนำยางคอมปาวด์บดต่อด้วยเครื่องบดผสมระบบเปิดแบบสองลูกกลิ้ง (Two-roll mill) เติมนสารตัวเร่งแล้วบดผสมเป็นเวลา 1 นาที และเติมนกำมะถันและบดผสมเป็นเวลา 3 นาที สุดท้ายปรับช่องว่างระหว่างลูกกลิ้งให้ได้แผ่นยางคอมปาวด์ที่มีความหนาประมาณ 10 มม. และนำยางคอมปาวด์ที่ได้เหลื้ตัดเป็นแผ่นกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4.8 ซม. เพื่อเตรียมเป็นชิ้นงานทดสอบตามที่ได้ออกแบบไว้

แม่พิมพ์สำหรับทดสอบการกระจายตัวอุณหภูมิของยางคอมปาวด์แสดงในรูปที่ 1 โดยสามารถวัดอุณหภูมิที่ตำแหน่งต่างๆ ภายในแม่พิมพ์ได้ และสามารถปรับเปลี่ยนความหนาได้ การเตรียมการทดสอบเริ่มจากนำยางคอมปาวด์ที่เตรียมเป็นแผ่นกลมวางลงในแม่พิมพ์ และวางเทอร์โมคัปเปิล (Thermocouple) ให้ปลายหัววัดอุณหภูมิอยู่บริเวณตรงกลางของยางคอมปาวด์ ดังแสดงในรูปที่ 2 (ก) วางยางคอมปาวด์และชุดตรวจวัดอุณหภูมิในแต่ละชั้นจนได้ความหนาตามต้องการจากนั้นนำแม่พิมพ์ทดสอบประกอบเข้ากับ

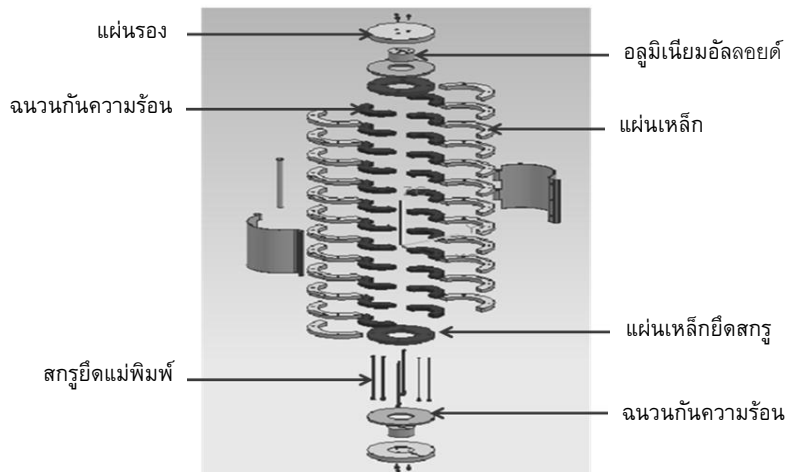
ตารางที่ 1 สูตรยางที่ใช้ในการทดลอง

ส่วนประกอบ	ปริมาณ (phr)						
	nonS	CV	SEV	EV	CB	Si	Ca
NR(STR5L)	100	100	100	100	100	100	100
ZnO	4	4	4	4	4	4	4
Stearic Acid	2	2	2	2	2	2	2
Carbon Black	-	-	-	-	0, 30, 45, 60	-	-
SiO ₂	-	-	-	-	-	30, 60	-
CaCO ₃	-	-	-	-	-	-	30, 60
Sulphur	-	2.4	1.6	0.8	-	2.4	2.4
PEG	-	-	-	-	-	1.44, 3.6	-
CBS	1.6	0.8	1.6	2.4	-	0.8	0.8
Aromatic Oil	-	-	-	-	0, 2, 3, 4	-	-

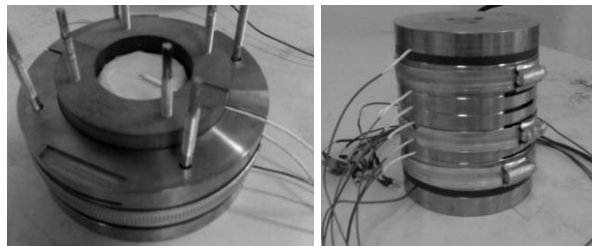
NOTE: phr = part per hundred of rubber by weight

ชุดให้ความร้อนจากภายนอกที่มีลักษณะแบบเข็มขัดรัด (Heater band) ที่บริเวณผิวนอกของแม่พิมพ์ ดังแสดงในรูปที่ 2 (ข) และเชื่อมต่อเข้ากับชุดจัดเก็บข้อมูลแบบความเร็วสูง (Data Logging System) ซึ่ง

ติดตั้งร่วมกับคอมพิวเตอร์เพื่อเก็บข้อมูลการทดลองต่อไป ซึ่งตำแหน่งการตรวจวัดอุณหภูมิภายในเนื้อยางและที่บริเวณผิวแม่พิมพ์ แสดงในรูปที่ 3



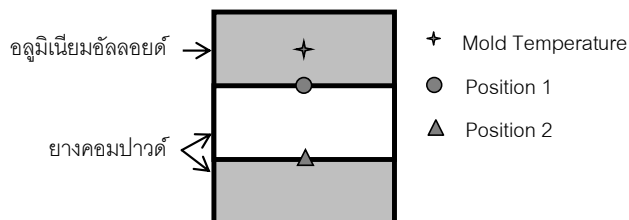
รูปที่ 1 ส่วนประกอบของแม่พิมพ์ทดสอบที่ออกแบบและจัดสร้างขึ้น



ก.

ข.

รูปที่ 2 การประกอบแม่พิมพ์ทดสอบ (ก) ตำแหน่งการวัดอุณหภูมิและ (ข) แม่พิมพ์ที่ประกอบแล้ว



รูปที่ 3 ตำแหน่งที่ใช้ในการตรวจวัดอุณหภูมิ



3. การวิเคราะห์ค่าการนำความร้อน

อัตราการนำความร้อนจากแม่พิมพ์เข้าสู่ชิ้นงาน
ยางสามารถคำนวณได้ดังสมการที่ 1

$$\dot{Q}_{in} = K_c A (T_m - T_r) \quad (1)$$

เมื่อ \dot{Q}_{in} = อัตราการถ่ายเทความร้อนจากแม่พิมพ์
เข้าสู่ชิ้นงานยาง (W)

K_c = สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน (Heat
Transfer Coefficient) ระหว่างแม่พิมพ์และยาง
(W/m²·K)

A = พื้นที่ที่ตั้งฉากกับทิศทางการไหลของ
ความร้อน (m²)

T_m = อุณหภูมิแม่พิมพ์ (K)

T_r = อุณหภูมิยางคอมปาวด์ (K)

อัตราการถ่ายเทความร้อนจากแม่พิมพ์สู่
สิ่งแวดล้อม (Heat Loss) สามารถคำนวณได้ดัง
สมการที่ 2

$$\dot{Q}_{outside} = \frac{T_2 - T_1}{R_{tot}} \quad (2)$$

โดย $\dot{Q}_{outside}$ = อัตราการถ่ายเทความร้อนจาก
แม่พิมพ์สู่สิ่งแวดล้อม (W)

T_1 = อุณหภูมิที่ผิวแม่พิมพ์ด้านนอก (K)

T_2 = อุณหภูมิภายในเนื้อยาง (K)

R_{tot} = ความต้านทานการนำความร้อนรวมผ่าน

ผนังทรงกระบอก (K/W) สามารถคำนวณได้
จากสมการที่ 3

$$R_{tot} = \frac{\ln \frac{r_2}{r_3}}{2\pi L K_1} + \frac{\ln \frac{r_1}{r_2}}{2\pi L K_2} \quad (3)$$

เมื่อ R_{tot} = ความต้านทานการนำความร้อนรวมผ่าน
ผนังทรงกระบอก (K/W)

r_1 = รัศมีของแม่พิมพ์ (m)

r_2 = รัศมีของฉนวนใยหิน (m)

r_3 = รัศมีของชิ้นงานยาง (m)

L = ความหนาของชิ้นงานยาง (m)

K_1 = ค่าการนำความร้อนของเหล็กแม่พิมพ์ S50C
(W/m.K)

K_2 = ค่าการนำความร้อนของฉนวนใยหิน (W/m.K)

ดังนั้นสามารถคำนวณอัตราการถ่ายเทความร้อน
จากชิ้นงานยางสู่ชิ้นงานยางในความลึกถัดไป ได้ดัง
สมการที่ 4

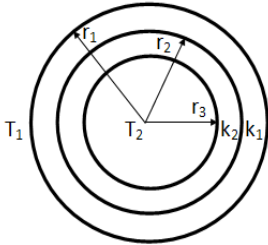
$$\dot{Q}_{out} = \dot{Q}_{in} - \dot{Q}_{outside} \quad (4)$$

เมื่อ \dot{Q}_{out} = อัตราการถ่ายเทความร้อนจากชิ้นงาน
ยางสู่ชิ้นงานยางในความลึกถัดไป (W) ใช้เป็นอัตรา
การถ่ายเทความร้อนสำหรับคำนวณค่าการนำความ
ร้อนของยางคอมปาวด์ที่ความหนาต่างๆ โดยค่าการ
นำความร้อนของยางที่ความหนาต่างๆสามารถ
คำนวณได้จากสมการที่ 5

$$K_r = \frac{\dot{Q}_{out}}{A} \left(\frac{\Delta X}{\Delta T} \right) \quad (5)$$

เมื่อ K_r = ค่าการนำความร้อนของยางคอมปาวด์
(W/m.K)

สำหรับตัวแปรในการคำนวณค่าการนำความร้อน
แสดงดังรูปที่ 4



รูปที่ 4 ตัวแปรต่างๆ ในการคำนวณค่าการนำความร้อน

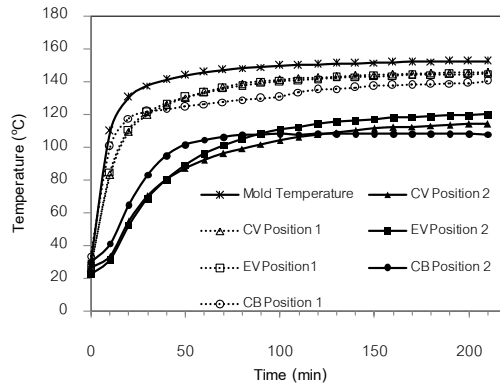
4. ผลการวิเคราะห์

4.1 อิทธิพลของระบบการคงรูปที่มีต่อการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในเนื้อยางคอมปาวด์

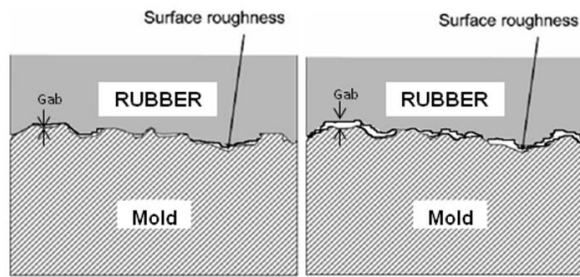
รูปที่ 5 แสดงผลการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในเนื้อยางคอมปาวด์ จากผลการตรวจวัดพบว่าเมื่อยางคอมปาวด์ได้รับความร้อนจากแม่พิมพ์ (Mold Temperature) ในช่วง 30 นาทีแรกยางคอมปาวด์ในระบบ CV ที่ผสมเขม่าดำในปริมาณ 60 phr มีอุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นอย่างรวดเร็วทั้งตำแหน่งที่ 1 (CB Position 1) และตำแหน่งที่ 2 (CB Position 2) หลังจากนั้นเริ่มมีการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิที่น้อยกว่ายางคอมปาวด์ที่ไม่ผสมเขม่าดำที่ใช้ระบบ CV และ EV โดยหากพิจารณาในตำแหน่งที่ 2 พบว่าอุณหภูมิของยางคอมปาวด์ที่ผสมเขม่าดำเริ่มมีค่าคงที่ภายหลังจากเวลา 50 นาที ทั้งนี้เนื่องจากยางคอมปาวด์ที่ผสมเขม่าดำสามารถแพร่กระจายความร้อนได้รวดเร็วส่งผลให้สามารถเกิดปฏิกิริยาการคงรูปเร็วขึ้น (โดยเฉพาะอย่างยิ่งที่บริเวณผิวสัมผัสระหว่างยางและแม่พิมพ์) เป็นผลให้ที่บริเวณสัมผัสระหว่างผิวยางและผิวแม่พิมพ์เกิดช่องว่างเล็กๆ เนื่องจากการหดตัว (Shrinkage) ของยางคอมปาวด์ที่เริ่มเกิดปฏิกิริยาการคงรูป ดังแสดงในรูปที่ 6 (ข) ส่งผลโดยตรงต่อประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนจากผิวแม่พิมพ์ที่ลดลง [14] และหากพิจารณาอิทธิพลของ

ระบบการคงรูปพบว่า ที่บริเวณผิวสัมผัสระหว่างยางและแม่พิมพ์ (ตำแหน่งที่ 1) การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิมีค่าไม่แตกต่างกัน ในขณะที่หากพิจารณาในตำแหน่งที่ 2 พบว่ายางคอมปาวด์ที่ใช้ระบบการคงรูปแบบ EV มีการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิที่สูงกว่ายางที่ใช้ระบบการคงรูปแบบ CV ทั้งนี้มีสาเหตุมาจากยางคอมปาวด์ที่ใช้ระบบการคงรูปแบบ CV ซึ่งมีส่วนผสมของกำมะถันในปริมาณมาก [1] สามารถเริ่มเกิดปฏิกิริยาการคงรูปที่บริเวณผิวสัมผัสกับแม่พิมพ์ได้รวดเร็วกว่ายางคอมปาวด์ที่ใช้ระบบการคงรูปแบบ EV จึงเกิดการหดตัวออกจากผิวของแม่พิมพ์ ซึ่งส่งผลต่อประสิทธิภาพในการถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้น

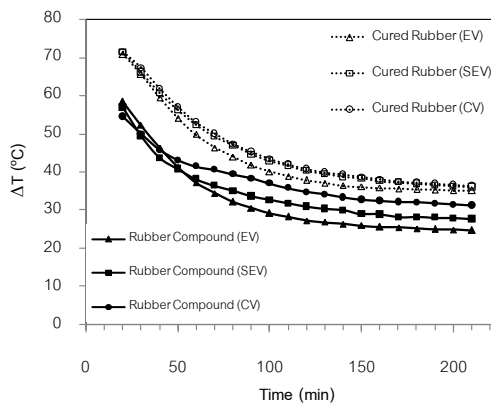
รูปที่ 7 แสดงผลต่างอุณหภูมิ (Temperature Difference: ΔT) ระหว่างบริเวณที่ยางสัมผัสผิวแม่พิมพ์ (Position 1) และอุณหภูมิภายในเนื้อยาง (Position 2) ของยางคอมปาวด์และยางที่คงรูปแล้ว (Cured Rubber) ที่ความหนา 10 mm จากผลการวิเคราะห์พบว่าในกรณีของยางที่คงรูปแล้วทั้ง 3 ระบบคือ CV, EV และ SEV มีค่าผลต่างของอุณหภูมิต่างกันเล็กน้อย อย่างไรก็ตาม หากพิจารณาผลการวิเคราะห์ที่ได้จากยางคอมปาวด์ในแต่ละสูตร พบว่ายางคอมปาวด์ที่ใช้ระบบการคงรูปแบบ CV มีความแตกต่างของอุณหภูมิมากที่สุด รองลงมาคือยางคอมปาวด์ที่ใช้ระบบการคงรูปแบบ SEV และ EV ตามลำดับ และเมื่อนำข้อมูลผลต่างของอุณหภูมิที่ได้ไปวิเคราะห์ค่าการนำความร้อนดังแสดงในรูปที่ 8 พบว่า ค่าการนำความร้อนของยางคงรูปทั้ง 3 ระบบ มีค่าไม่แตกต่างกัน ในขณะที่ยางคอมปาวด์ที่ใช้ระบบการคงรูปแบบ EV มีค่าการนำความร้อนสูงที่สุด รองลงมาคือยางคอมปาวด์ที่ใช้ระบบการคงรูปแบบ SEV และ CV ตามลำดับ



รูปที่ 5 การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิในตำแหน่งที่ 1 และ 2 ของยางคอมปาวด์ที่ผสมเขม่าดำและยางคอมปาวด์ที่ใช้ระบบการคงรูปแบบ CV และ EV



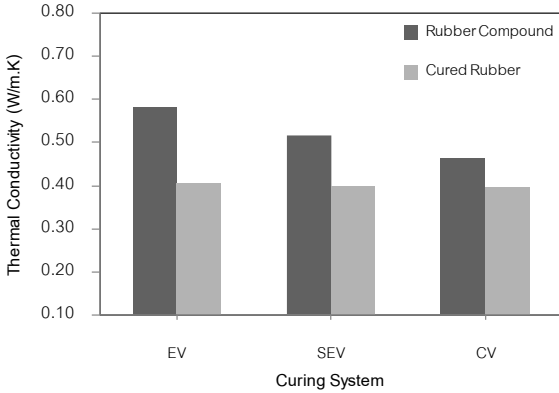
รูปที่ 6 การเกิดช่องว่างขนาดเล็กระหว่างบริเวณผิวแม่พิมพ์และยางคอมปาวด์ (ก) ก่อนการเกิดปฏิกิริยาการรูป และ (ข) ขนาดช่องว่างที่เพิ่มขึ้นจากการหดตัวของยางคอมปาวด์ในขณะที่เริ่มเกิดปฏิกิริยาการรูป



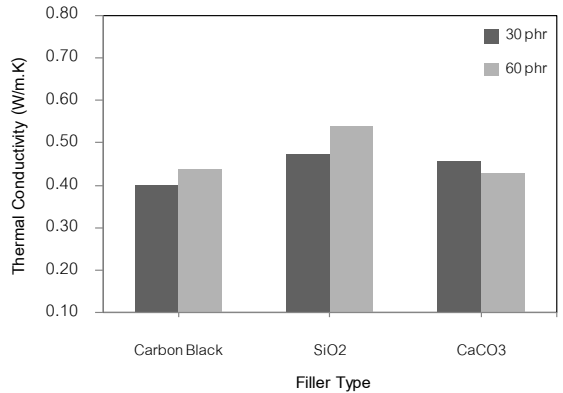
รูปที่ 7 ผลต่างระหว่างอุณหภูมิที่ผิวแม่พิมพ์และอุณหภูมิภายในเนื้อยาง ของยางคงรูปและยางคอมปาวด์ที่ใช้ระบบการคงรูปแบบ CV, EV และ SEV



บทความวิจัย



รูปที่ 8 ค่าการนำความร้อนของยางคงรูปและคอมปาวด์ที่ระบบการคงรูปแบบ CV, EV และ SEV



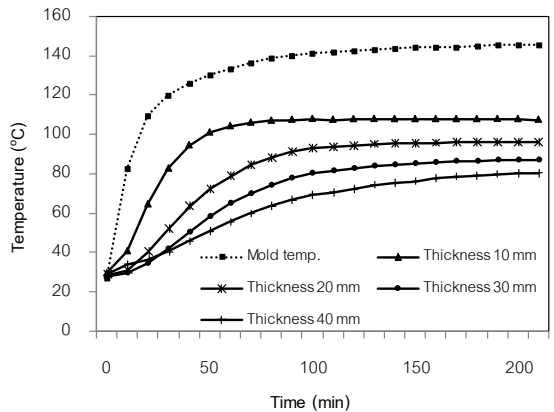
รูปที่ 9 ค่าการนำความร้อนของยางคอมปาวด์ที่ผสมสารตัวเติม CB, SiO₂ และ CaCO₃ ปริมาณ 30 และ 60 phr

4.2 อิทธิพลของชนิดและปริมาณสารตัวเติมที่มีต่อค่าการนำความร้อนของยางคอมปาวด์

หากพิจารณาอิทธิพลของชนิดและปริมาณสารตัวเติมได้แก่ เขม่าดำ (CB) ซิลิกา (SiO₂) และแคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO₃) ที่ผสมในยางคอมปาวด์ปริมาณ 30 และ 60 phr ที่มีต่อค่าการนำความร้อนที่วิเคราะห์ได้ดังรูปที่ 9 พบว่า ค่าการนำความร้อนของยางคอมปาวด์ที่ผสม CB และ SiO₂ มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณผสม ในขณะที่การเพิ่มปริมาณ CaCO₃ ส่งผลให้ค่าการนำความร้อนลดต่ำลง ทั้งนี้การที่ค่า Thermal Conductivity ของยางคอมปาวด์ที่ผสมเขม่าดำมีค่าต่ำกว่ายางคอมปาวด์ที่ผสมซิลิกา อาจเนื่องมาจากการหดตัวที่มากกว่าซึ่งก่อให้เกิดการลดลงของผิวสัมผัสระหว่างยางคอมปาวด์กับผิวโลหะของแม่พิมพ์

4.3 เทคนิคการเพิ่มประสิทธิภาพการกระจายตัวของอนุกรมุภายในยางคอมปาวด์

รูปที่ 10 แสดงการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิภายในเนื้อยางคอมปาวด์ที่ผสมเขม่าดำในปริมาณ 60 phr ที่ความหนาต่างๆ กัน จากผลการตรวจวัดพบว่าเมื่อ



รูปที่ 10 อุณหภูมิของยางที่ระดับความหนาต่างๆ ที่ส่งผลต่อพฤติกรรมกรนำความร้อนของยางคอมปาวด์

อุณหภูมิแม่พิมพ์เพิ่มขึ้นในช่วงแรก (0-100 นาที) อุณหภูมิภายในยางคอมปาวด์มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น แต่หลังจากนั้น ถึงแม้ว่าอุณหภูมิแม่พิมพ์เพิ่มขึ้นก็ไม่สามารถทำให้อุณหภูมิของยางคอมปาวด์ที่บริเวณผิวแม่พิมพ์เพิ่มขึ้นได้ เนื่องจากบริเวณที่ยางคอมปาวด์สัมผัสกับผิวแม่พิมพ์ เกิดปฏิกิริยาการคงรูปที่ชั้นผิว จึงเกิดการแยกตัวออกจากผิวแม่พิมพ์ ทำให้ประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนจากผิวแม่พิมพ์ลดลง



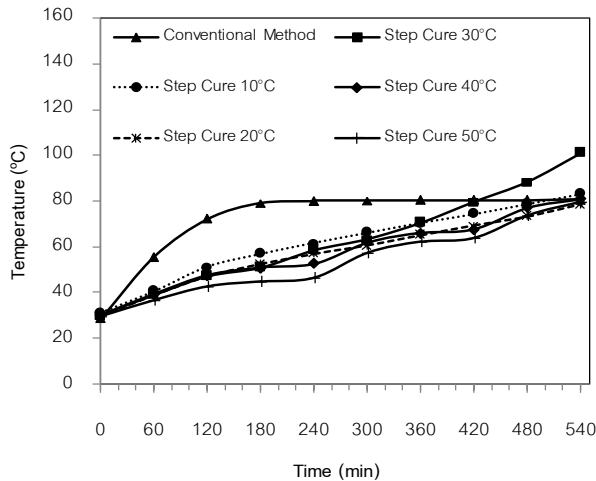
จากปรากฏการณ์ดังกล่าวทำให้อุณหภูมิของยางคอมปาวด์ที่อยู่ในระดับลึกลงจากผิวตามความหนาไม่มีแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงที่เพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นสาเหตุของการที่ยางคอมปาวด์ไม่สามารถเกิดปฏิกิริยาของรูปที่สมบูรณ์ได้ทั่วถึงตลอดความหนาของชิ้นงาน

จากผลการทดลองที่ผ่านมาแสดงให้เห็นว่าเทคนิคที่ใช้ในกระบวนการอัดขึ้นรูปแบบปกติ (Conventional Method) ไม่สามารถใช้ในการอัดขึ้นรูปยางที่มีความหนาหรือส่วนผสมของเคมีจำนวนมากได้อย่างมีประสิทธิภาพ ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงใช้ทดลองใช้เทคนิคการคงรูปแบบลำดับขั้น (Step Cure) โดยมีหลักการ คือ การเพิ่มอุณหภูมิแม่พิมพ์ตามลำดับขั้น เพื่อไม่ให้ยางคอมปาวด์ที่บริเวณผิวเริ่มเกิดปฏิกิริยาของรูป โดยมีวิธีการที่ใช้ในการทดลองดัง

แสดงในตารางที่ 2 ซึ่งผลที่ได้พบว่าอุณหภูมิภายในยางคอมปาวด์มีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น เมื่อเวลาผ่านไป 9 ชั่วโมง ดังแสดงในรูปที่ 11 และเมื่อเปรียบเทียบกับยางคอมปาวด์ที่คงรูปด้วยวิธีปกติ พบว่ากระบวนการคงรูปแบบปกติที่ช่วงเริ่มต้นมีอัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิก่อนข้างสูง แต่เมื่อเวลาผ่านไปอัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิลดลงอย่างรวดเร็วจนในช่วงสุดท้ายไม่สามารถเพิ่มอุณหภูมิให้แก่ยางคอมปาวด์ได้อีก (อัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิเท่ากับศูนย์) ในขณะที่ยางที่ผ่านกระบวนการคงรูปแบบลำดับขั้นยังคงมีอัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิเช่นเดียวกันตลอดทั้งกระบวนการ ซึ่งแสดงให้เห็นว่า กระบวนการคงรูปแบบลำดับขั้น สามารถทำให้ผลิตภัณฑ์มีการสุกตัวที่สม่ำเสมอ และมีสมบัติทางกลและกายภาพที่ดีขึ้น

ตารางที่ 2 วิธีการที่ใช้ในการอบคงรูปแบบลำดับขั้น

Step Cured	วิธีการ
10°C	กำหนดอุณหภูมิที่ชุดให้ความร้อนในช่วงเริ่มต้น 100°C (อุณหภูมิแม่พิมพ์ประมาณ 80°C) เป็นระยะเวลา 1 ชั่วโมง จากนั้นเพิ่มอุณหภูมิครั้งละ 10°C ทุกๆ 1 ชั่วโมง จนอุณหภูมิเป็น 180°C รวมเวลาทั้งสิ้น 9 ชั่วโมง
20°C	กำหนดอุณหภูมิที่ชุดให้ความร้อนในช่วงเริ่มต้น 100°C (อุณหภูมิแม่พิมพ์ประมาณ 80°C) เป็นระยะเวลา 1 ชั่วโมง 48 นาที จากนั้นเพิ่มอุณหภูมิครั้งละ 20°C ทุกๆ 1 ชั่วโมง 48 นาที จนถึงอุณหภูมิเป็น 180°C รวมเวลาทั้งสิ้น 9 ชั่วโมง
30°C	กำหนดอุณหภูมิที่ชุดให้ความร้อนในช่วงเริ่มต้น 90°C (อุณหภูมิแม่พิมพ์ประมาณ 70°C) เป็นระยะเวลา 2 ชั่วโมง 15 นาที จากนั้นเพิ่มอุณหภูมิครั้งละ 30°C ทุกๆ 2 ชั่วโมง 15 นาที จนถึงอุณหภูมิเป็น 180°C รวมเวลาทั้งสิ้น 9 ชั่วโมง
40°C	กำหนดอุณหภูมิที่ชุดให้ความร้อนในช่วงเริ่มต้น 100°C (อุณหภูมิแม่พิมพ์ประมาณ 80°C) เป็นระยะเวลา 3 ชั่วโมง จากนั้นเพิ่มอุณหภูมิครั้งละ 40°C ทุกๆ 3 ชั่วโมง จนถึงอุณหภูมิเป็น 180°C รวมเวลาทั้งสิ้น 9 ชั่วโมง
50°C	กำหนดอุณหภูมิที่ชุดให้ความร้อนในช่วงเริ่มต้น 80°C (อุณหภูมิแม่พิมพ์ประมาณ 60°C) เป็นระยะเวลา 3 ชั่วโมง จากนั้นเพิ่มอุณหภูมิครั้งละ 50°C ทุกๆ 3 ชั่วโมง จนถึงอุณหภูมิเป็น 180°C รวมเวลาทั้งสิ้น 9 ชั่วโมง



รูปที่ 11 การคงรูปแบบปกติและการคงรูปแบบลำดับขั้น

5. สรุปผลการทดลอง

จากผลการศึกษาการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในยางคอมปาวด์ซึ่งสามารถนำไปวิเคราะห์ค่าการนำความร้อนของยางคอมปาวด์และยางคงรูป พบว่ายางคงรูปมีค่าการนำความร้อนที่ลดลงอย่างมากเมื่อเทียบกับยางคอมปาวด์ โดยค่าการนำความร้อนของยางคงรูปและยางคอมปาวด์มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณสารตัวเติม จากผลศึกษาการกระจายตัวของอุณหภูมิและค่าการนำความร้อนภายในยางคอมปาวด์ที่เติมเขม่าดำ แสดงให้เห็นว่า ค่าการนำความร้อนของยางคอมปาวด์มีแนวโน้มลดลงอย่างมากเมื่อถึงอุณหภูมิที่ยางคอมปาวด์เริ่มเกิดปฏิกิริยาคงรูป โดยเฉพาะอย่างยิ่งที่การเติมเขม่าดำในปริมาณสูงและชิ้นงานที่มีความหนามาก ส่งผลให้ชิ้นงานยางมีระดับการคงรูปที่ไม่สม่ำเสมอตลอดความหนาชิ้นงาน งานวิจัยนี้ได้นำเสนอวิธีการคงรูปแบบลำดับขั้น ซึ่งจากผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่า วิธีการคงรูปแบบลำดับขั้น สามารถทำให้มีการแพร่กระจายอุณหภูมิภายในสารประกอบได้ดีขึ้น

ส่งผลให้ชิ้นงานที่ได้มีระดับการคงรูปที่สม่ำเสมอกว่าวิธีการคงรูปแบบดั้งเดิม

6. กิตติกรรมประกาศ

ทางผู้วิจัยขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ สำหรับอุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัยนี้

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] W. Hofmann, Rubber technology handbook, Hanser Publishers, NY, USA, 1989.
- [2] S.P. Johnson, Rubber processing and introduction, Hanser Gardner Publications Inc., OH, USA, 2001.
- [3] D.M. Park, W.H. Hong, S.G. Kim and H.J. Kim, Heat generation of filled rubber vulcanizates and its relationship with vulcanizate network structures, European Polymer Journal, 2000, 36(11), 2429-2436.



- [4] R.L. Fan, Y. Zhang, F. Li, Y.X. Zhang, K. Sun and Y.Z. Fan, Effect of high-temperature curing on the crosslink structures and dynamic mechanical properties of gum and N330-filled natural rubber vulcanizates, *Polymer Testing*, 2001, 20(8), 925–936.
- [5] A. Arrillaga, A.M. Zaldua, R.M. Atxurra, and A.S. Farid, Techniques used for determining cure kinetics of rubber compounds, *European Polymer Journal*, 2007, 43(11), 4783-4799.
- [6] J.E. Mark, B. Erman and F.R. Eirich, *Science and technology of rubber*, Elsevier, Inc., VT, USA, 2005.
- [7] J.G. Sommer, *Elastomer molding technology*, Bookmasters Inc., OH, USA, 2003.
- [8] J.G. Sommer, *Materials, process, and design factor” in Troubleshooting rubber problems*, Hanser Publications, OH, USA, 2014.
- [9] W. Amaro, L. Diviani, D. Montorfano, E. Oberrauch, G. Depinto, S. Segalini, M. Levi and S. Turri, Controlling the shrinkage of polymers for customized shoe sole manufacturing, *International Journal of Computer Intergrated Manufacturing*, 2004, 17(7), 633-644.
- [10] M.H.R. Ghoreshy and G. Naderi, A new method for the determination of the thermal conductivity of rubber compound, *Iranian Polymer Journal*, 2001, 10(5), 315-320.
- [11] M. Rafei, M.H.R. Ghoreshy, and G. Naderi, Development of an advanced computer simulation technique for the modeling of rubber curing process, *Computational Materials Science*, 2009, 47(2), 539-547.
- [12] C.E. Barnett, *Thermal properties of rubber compounds*, *Industrial and Engineering Chemistry*, 1934, 26(3), 303-306.
- [13] R.J.W. Walker, *The effect of crosslink density on the thermal conductivity of rubber*, Thesis, University of Lancaster, United Kingdom, 1982.
- [14] N.S. Saxena, P. Pradeep, G. Mathew, S. Thomas, M. Gustafsson and S.E. Gustafsson, Thermal conductivity of styrene butadiene rubber compound with natural rubber prophylactics waste as filler, *European Polymer Journal*, 1999, 35(9), 1687-1693.
- [15] N.C. Tham, G. Juttner, C. Loser, T. Pham and M. Gehde, Determination of the heat transfer coefficient from short-shots studies and precise simulation of microinjection molding, *Polymer Engineering and Science*, 2010, 50(1), 165-173.

ผลของกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมต่อความต้านทานการสึกหรอที่อุณหภูมิสูงของรอยเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิติค AWS A5.9 ER420 ด้วยกระบวนการเชื่อม GMAW

ภิสัก เลิศวิจิตรพันธุ์* และ ณิชฐา บัวเหี้ยว

ภาควิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมกรรมการเชื่อม, วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม,
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

* ผู้ประสานงานเผยแพร่ (Corresponding Author), E-mail: pisak.l@cit.kmutnb.ac.th

วันที่รับบทความ: 8 กุมภาพันธ์ 2566; วันที่ทบทวนบทความ: 19 เมษายน 2566; วันที่ตอบรับบทความ: 24 เมษายน 2566

วันที่เผยแพร่ออนไลน์: 2 มิถุนายน 2566

บทคัดย่อ: งานวิจัยนี้ศึกษาผลจากกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อม (Post Weld Heat Treatment: PWHT) ต่อโครงสร้างจุลภาค สมบัติเชิงกล และความต้านทานการสึกหรอที่อุณหภูมิสูงของรอยเชื่อมพอกผิวด้วยลวดเชื่อม AWS A5.9 ER420 ดำเนินการโดยใช้กระบวนการเชื่อมอาร์คโลหะแก๊สปกคลุม (Gas Metal Arc Welding: GMAW) พารามิเตอร์ในการเชื่อมใช้กระแสไฟ 190-230 แอมแปร์ แรงดันอาร์ก 21.5±1 โวลต์ และความเร็วในการเชื่อม 6.4 มิลลิเมตรต่อวินาที หลังการเชื่อมนำชิ้นงานไปผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมที่อุณหภูมิ 500°C, 700°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง จากนั้นทดสอบการสึกหรอแบบขัดสี (Abrasive Wear Test) ตามมาตรฐาน ASTM G99 ที่อุณหภูมิ 30°C, 100°C, 200°C, และ 300°C ตามลำดับ ผลการทดลองพบว่าเมื่อใช้อุณหภูมิกรรมวิธีทางความร้อนหลังจากการเชื่อม 500°C ส่งผลให้ค่าความแข็งของรอยเชื่อมพอกผิวสูงขึ้นเล็กน้อย ทำให้อัตราการสึกหรอลดลง และในกรณีที่ใช้อุณหภูมิกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อม 700°C ค่าความแข็งของรอยเชื่อมพอกผิวลดลงอย่างมาก ทำให้อัตราการสึกหรอของรอยเชื่อมสูงขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่าเมื่ออุณหภูมิในการทดสอบการสึกหรอสูงขึ้นมีผลทำให้อัตราการสึกหรอของรอยเชื่อมลดลง เนื่องจากอิทธิพลของสมบัติเชิงกลที่เปลี่ยนแปลงไปรวมถึงการเกิดสารประกอบออกไซด์ของเหล็กและโครเมียมบริเวณรอยเชื่อมพอกผิว

คำสำคัญ: การเชื่อมพอกผิว; ER420; กระบวนการทางความร้อนหลังการเชื่อม; ความต้านทานการสึกหรอ

Effect of Post Weld Heat Treatment on High-temperature Wear Resistance of Martensitic Stainless Steel AWS A5.9 ER420 Weldment by GMAW Process

Pisak Lertvijitpun* and Nutta Bourniew

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

* Corresponding author, E-mail: pisak.l@cit.kmutnb.ac.th

Received: 8 February 2023; Revised: 19 April 2023; Accepted: 24 April 2023

Online Published: 2 June 2023

Abstract: This research studies the effect of post weld heat treatment (PWHT) on microstructure, mechanical properties, and high-temperature wear resistance of AWS A5.9 ER420 deposited filler metal. The gas metal arc welding process (GMAW) was performed by using the welding parameters: current range 190-230 A., Arc voltage 21.5 V, and welding speed 6.4 mm/s. After welding, the specimens were carried out into the PWHT at 500 °C and 700 °C for 2 hrs. According to ASTM G99, the abrasive wear test was performed at room temperature, 100°C, 200°C, and 300°C respectively. The experimental result shows that the hardness of weld metal increased when the PWHT at 500°C was performed, conducting a decrease in wear rate. On the contrary, the wear rate increases when the hardness of deposited metal reduces caused by PWHT at 700°C. However, it was found that the high-temperature wear rate decreases when the test temperature increase due to the modification of mechanical properties and oxide formation of iron and chromium on the deposited metal surface.

Keywords: Hardfacing; ER420; Post Weld Heat Treatment; Wear Resistance



1. บทนำ

การสึกหรอของชิ้นส่วนเครื่องจักรกลเป็นสิ่งที่สามารถเกิดขึ้นได้เสมอสำหรับภาคอุตสาหกรรมการผลิต ชิ้นส่วนทางวิศวกรรมต่างๆ เช่น โรเตอร์ประคองล้อในอุตสาหกรรมการผลิตเหล็กรูปพรรณ เหล็กข้อเหวี่ยง และเพลาลูกเบี้ยวในเครื่องยนต์สันดาปภายใน รวมถึงเพลาลูกกรีดในอุตสาหกรรมขึ้นรูปโลหะต่างๆ โดยชิ้นส่วนเหล่านี้จะต้องรับภาระการสึกหรอทั้งที่อุณหภูมิห้องตลอดจนอุณหภูมิที่สูงขึ้นขณะเครื่องยนต์หรือเครื่องจักรนั้นๆ กำลังทำงาน นอกจากนี้ต้องมีความต้านทานการกัดกร่อนที่ดี [1] วัสดุที่ได้รับความนิยมในการผลิตชิ้นส่วนดังกล่าวคือเหล็กกล้าผสมต่ำ AISI 8620 เนื่องจากมีสมบัติเชิงกลที่ดีเช่น สามารถชุบแข็งได้ (ค่าความแข็งหลังชุบแข็งสามารถทำได้สูงถึง 62HRC) ทำให้มีความต้านทานการสึกหรอที่ผิวนอก และมีความเหนียวในแกนกลางของตัววัสดุ [2-3] อย่างไรก็ตามเมื่อการสึกหรอเกิดขึ้นสิ่งหนึ่งที่สามารถแก้ปัญหาแทนการเปลี่ยนใหม่ทั้งชิ้น คือการซ่อมแซมให้ชิ้นส่วนดังกล่าวสามารถนำกลับมาใช้งานได้ดังเดิมกรรมวิธีการซ่อมบำรุงแบบหนึ่งซึ่งเป็นที่นิยมคือการเชื่อมซ่อมด้วยการพอกผิว เนื่องจากสามารถทำให้ชิ้นส่วนดังกล่าวกลับมามีขนาดและมิติตามต้องการ และยังสามารถกำหนดสมบัติเชิงกลให้สามารถต้านทานการสึกหรอได้ดียิ่งขึ้น [4]

เหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิติก มีสมบัติความแข็งแรง และความต้านทานการสึกหรอที่ดี รวมถึงมีความต้านทานการกัดกร่อนในระดับปานกลาง หากนำไปใช้งานที่อุณหภูมิไม่สูงเกินกำหนดจะสามารถควบคุมสมบัติเชิงกลที่ดีไว้ได้ [5] การประยุกต์ใช้วัสดุกลุ่มนี้ในงานพอกผิวแข็งเพื่อทำการซ่อมบำรุงสามารถ

ทำได้หลากหลายกระบวนการเช่น การพ่นเคลือบด้วยความร้อน (Thermal Spray) การพ่นเคลือบด้วยกระบวนการเลเซอร์ (Laser Cladding) หรือการเชื่อมพอกผิวด้วยกระบวนการเชื่อมอาร์ค (Arc Welding) อย่างไรก็ตามจากตัวอย่างของกระบวนการพอกผิวที่กล่าวถึง กระบวนการเชื่อมอาร์คโลหะแก๊สปกคลุม (Gas Metal Arc Welding: GMAW) เป็นกระบวนการเชื่อมพอกประเภทหนึ่งที่ยอมรับใช้ในภาคอุตสาหกรรม เพราะมีจุดเด่นด้านความรวดเร็วในการหลอมเติมเนื้อโลหะพอกผิว รวมถึงมีต้นทุนต่ำกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับกระบวนการพอกผิวประเภทอื่นๆ [6] อย่างไรก็ตามวัสดุกลุ่มเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิติก โดยปกติจะมีข้อกำหนดให้นำชิ้นงานที่ถูกเชื่อมมาผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อม (Post Weld Heat Treatment: PWHT) เพื่อลดปริมาณความเค้นตกค้างจากการเชื่อม เนื่องจากมีโครงสร้างจุลภาคพื้นฐานเป็นโครงสร้างมาร์เทนไซด์ (Martensite) ซึ่งเป็นโครงสร้างที่มีความแข็งสูง มีโอกาสเกิดการแตกร้าวในการใช้งาน [7]

งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมต่อความแข็งแรงและความต้านทานการสึกหรอที่อุณหภูมิสูงของรอยเชื่อม AWS A5.9 ER420 รวมถึงความต้านทานการสึกหรอของรอยเชื่อมในสภาวะการทดสอบที่มีอุณหภูมิสูง เพื่อจำลองสภาวะการใช้งานที่ใกล้เคียงกับอุตสาหกรรมการผลิตที่เกี่ยวข้อง

2. วัสดุและขั้นตอนในการวิจัย

2.1 วัสดุที่ใช้ในการวิจัย

วัสดุโลหะงานที่ใช้ในงานวิจัยนี้คือเหล็กกล้า AISI 8620 เพลากลม ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 70 มิลลิเมตร ตัดให้ได้ความหนา 20 มิลลิเมตร เชื่อมพอกผิวแข็ง



ด้วยกระบวนการเชื่อมอาร์คโลหะแก๊สปกคลุม (Gas Metal Arc Welding: GMAW) โดยใช้ลวดเชื่อมพอกผิว AWS A5.9 ER420 เส้นผ่านศูนย์กลาง 1.2 มิลลิเมตร องค์กรประกอบทางเคมี และสมบัติทางกลของวัสดุโลหะงานและลวดเชื่อม ดังตารางที่ 1 ถึง 2

ตารางที่ 1 ส่วนผสมทางเคมีของวัสดุและลวดเชื่อม

Chemical Composition of Base Material and Filler Metal (%)		
Elements	AISI 8620	AWS A5.9 ER420
C	0.25	0.33
Si	0.22	0.39
Mn	0.73	0.40
P	0.013	-
S	0.016	-
Ni	0.57	0.16
Cr	0.50	12.56
Mo	0.16	-
Fe	97.11	Bal.

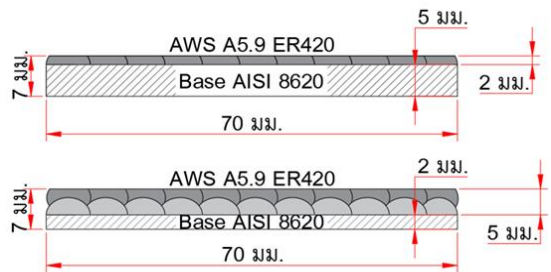
ตารางที่ 2 สมบัติทางกลของวัสดุและลวดเชื่อม

Material Grade and Filler Metal Grade	AISI 8620 (UNS G86200) (Annealed)		AWS A5.9 ER420 (As-weld)	
	Yield strength	MPa	385	874
Tensile strength	MPa	530	1,000	
Elongation	%	≥17	45	
Hardness	HV	155	458-513	

ตารางที่ 3 พารามิเตอร์ในการเชื่อมพอกผิวแข็ง

กระแสไฟเชื่อม (Amp)	แรงดันอาร์ก (Volt)	ความเร็วในการเชื่อม (mm/s)	แก๊สปกคลุม 98% Ar + 2% O ₂ (L/min)
190-230	21.5	6.4	18

ก่อนการเชื่อมจะนำชิ้นงานมาให้ความร้อนก่อนเชื่อม (Preheat) ที่ 250-350°C (ตามคำแนะนำของบริษัทผู้ผลิตลวดเชื่อม) เป็นเวลา 20 นาที ต่อจากนั้นจะดำเนินการเชื่อมพอกผิว ด้วยกระบวนการเชื่อมอาร์คโลหะแก๊สปกคลุม (Gas Metal Arc Welding) ด้วยเครื่องเชื่อม Thermatech NB-350 ชิ้นงานจะถูกเชื่อมให้มีแนวเชื่อม 1 ชั้น และ 2 ชั้น เชื่อมซ้อนแนวทั้งหมด 11 แนวเชื่อม ดังรูปที่ 1 พารามิเตอร์ในการเชื่อมแสดงดังตารางที่ 3



รูปที่ 1 ชิ้นงานเชื่อมพอกผิว แนวเชื่อม 1 ชั้น และ ชิ้นงานเชื่อมแนวเชื่อม 2 ชั้น

เมื่อเชื่อมเสร็จจะนำชิ้นงานมาปรับปรุงสมบัติด้วยกรรมวิธีทางความร้อนหลังจากการเชื่อม (Post Weld Heat Treatment: PWHT) ที่ อุณหภูมิ 500°C (มีอัตราการเย็นตัวเฉลี่ยจากอุณหภูมิ 500-140°C ที่ 18°C/h) และ 700°C (มีอัตราการเย็นตัวเฉลี่ยจากอุณหภูมิ 700-140°C ที่ 25.6°C/h) เป็นเวลา 2 ชั่วโมง โดยปล่อยให้เย็นตัวในเตา รายละเอียดของชิ้นงานที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมแสดงดังตารางที่ 4 จากนั้นนำชิ้นงานมากลึงปาดหน้าและเจียรระโนราบให้มีความหนา 7 มิลลิเมตร โดยกำหนดขนาดชิ้นงานเชื่อม 1 ชั้น ให้แนวเชื่อมสูงจากผิววัสดุ 2 มิลลิเมตร ส่วนชิ้นงานเชื่อม 2 ชั้น ให้แนวเชื่อมสูงจากผิววัสดุ 5 มิลลิเมตร



ตารางที่ 4 การปรับปรุงสมบัติด้วยกรรมวิธีทางความร้อนหลังจากการเชื่อม

ER420	As Weld 1 Layer 6 pieces
Filler Metal	As Weld 2 Layers 6 pieces
Hardfacing	PWHT 500°C 1 Layer 6 pieces
by GMAW	PWHT 500°C 2 Layers 6 pieces
98%Ar +2%O ₂	PWHT 700°C 1 Layer 6 pieces
	PWHT 700°C 2 Layers 6 pieces

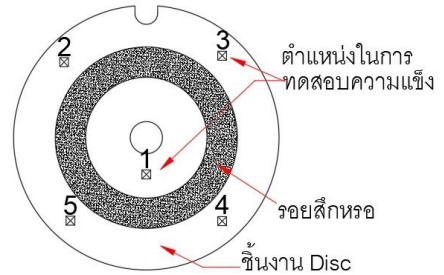
2.2 การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค (Micro Structure Examination)

การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาครอยเชื่อมพอกผิวแข็ง AWS A5.9 ER 420 บนเหล็กกล้าผสมต่ำ AISI 8620 ทำโดยขัดชิ้นงานด้วยกระดาษทรายเบอร์ 180 จนถึง 1200 จากนั้นขัดมันด้วยผ้าสักหลาด ร่วมกับการใช้ผงขัดอะลูมิน่า ทำการกัดผิวหน้าชิ้นงานด้วยเทคนิคเคมีไฟฟ้าในสารละลายกรดออกซาลิก 10 กรัม ละลายในน้ำกลั่น 100 มิลลิลิตร ตรวจสอบบริเวณรอยเชื่อมพอกผิว ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง (Optical Microscope: OM) รุ่น Nikon Eclipse MA200 เพื่อประเมินโครงสร้างพื้นฐานของรอยเชื่อม

2.3 การทดสอบความแข็ง (Hardness Test)

การทดสอบความแข็ง ทำโดยนำชิ้นงานทั้งก่อนและหลังผ่านการทดสอบการสึกหรอ มาทดสอบความแข็งแบบวิกเกอร์ (Vickers) ด้วยเครื่องทดสอบรุ่น Microhardness Tester FM-310e ใช้หัวกดเพชรทรงปิรามิดฐานสี่เหลี่ยมจัตุรัส มีองศาของปลายแหลม 136 องศา ใช้แรงกด 1000 กรัม บริเวณรอยเชื่อมพอกผิว โดยจะทดสอบหาค่าความแข็งทั้งหมด 5 ตำแหน่ง บริเวณผิวหน้าของรอยเชื่อมหลังจากผ่าน

การขัดผิวด้วยกระดาษทรายถึงเบอร์ 1200 กรัดตั้งรูปที่ 2 จากนั้น คำนวณค่าเฉลี่ยจากผลการทดสอบความแข็ง



รูปที่ 2 ภาพ Top View ตำแหน่งในการทดสอบค่าความแข็ง

2.4 การทดสอบการสึกหรอแบบพินออนดิสก์ (Pin on Disc)

ทดสอบความต้านทานการสึกหรอแบบขัดสี (Abrasive Wear) แบบพินออนดิสก์ โดยเป็นอุปกรณ์ที่ที่ผู้วิจัยได้สร้างขึ้นตามมาตรฐาน ASTM G99 มีพารามิเตอร์ในการทดสอบดังตารางที่ 5

ตารางที่ 5 ตัวแปรในการทดสอบการสึกหรอ

วัสดุพิน	JIS S45C
ตำแหน่งพินถึงศูนย์กลางดิสก์ (mm)	20
ความเร็ว (rpm)	60
จำนวนรอบ (Round)	1500
ระยะทาง (m)	188
แรงกด (kg)	15
อุณหภูมิที่ใช้ในการทดสอบ (°C)	30, 100, 200, 300
ค่าความแข็งพิน (HB)	160-220



การประเมินอัตราการสึกหรอแบ่งออกเป็น 3 วิธี ดังนี้
2.4.1 ซึ่งนำหนักเปรียบเทียบหาอัตราการสึกหรอ โดยการชั่งน้ำหนักก่อน และหลังการทดสอบ ด้วยเครื่องชั่งความละเอียด 0.0001 กรัม จากนั้นนำค่าน้ำหนักก่อน และหลังการทดสอบมาหาผลต่างเพื่อบ่งชี้ถึงปริมาณการสึกหรอที่เกิดขึ้น

2.4.2 คำนวณหาพื้นที่หน้าตัดของรอยทดสอบการสึกหรอแบบพินออนดิสก์ โดยใช้เครื่องวัดความหยาบผิวแบบสัมผัส (Surface Roughness) และหาพื้นที่หน้าตัดรอยสึกหรอด้วยโปรแกรมวิเคราะห์ภาพถ่าย

2.4.3 ประเมินลักษณะของรอยแผลที่เกิดขึ้นหลังการทดสอบการสึกหรอ (Wear Scar Morphology) ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง (Optical Microscope: OM) และกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope: SEM) รวมถึงเทคนิคการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีแบบสเปกโทรเมตรีรังสีเอกซ์แบบกระจายพลังงาน (Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy: EDS)

3. ผลการวิจัยและอภิปรายผล

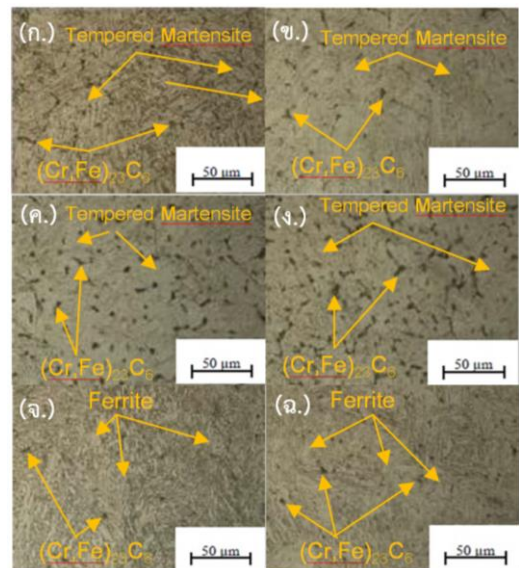
3.1 ผลการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค (Micro Structure Examination Result)

ผลการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาครอยเชื่อมพอกผิวแข็งด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสงก่อนการทดสอบการสึกหรอ แสดงดังรูปที่ 3

ผลการทดลอง ในเงื่อนไข As-weld ทั้งกรณีเชื่อมพอกผิว 1 Layer และ 2 Layers ดังรูปที่ 3 (ก) และ (ข) พบว่ามีโครงสร้างจุลภาคเนื้อพื้นเป็นเทมเปอร์มาเทนไซต์ (Tempered Martensite) และมีสารประกอบคาร์ไบด์ ((Cr,Fe)₂₃C₆) (บริเวณที่มีสีดำ) [8] กระจายตัวอยู่ตามตำแหน่งต่างๆ ปริมาณเล็กน้อย

กรณีชิ้นงานในเงื่อนไข PWHT ที่ 500 °C ทั้งกรณีเชื่อมพอกผิว 1 Layer และ 2 Layers ดังรูปที่ 3 (ค) และ (ง) พบว่าโครงสร้างจุลภาคเป็นเทมเปอร์มาเทนไซต์ และมีสารประกอบคาร์ไบด์((Cr,Fe)₂₃C₆ และ M₇C₃) [8-9] กระจายตัวอยู่ในปริมาณสูงขึ้นไปเมื่อเปรียบเทียบกับชิ้นงานที่ไม่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อม

ส่วนชิ้นงานในเงื่อนไข PWHT ที่ 700 °C ทั้งกรณีเชื่อมพอกผิว 1 Layer และ 2 Layers ดังรูปที่ 3 (จ) และ (ฉ) พบว่าการใช้อุณหภูมิที่สูงขึ้นในกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อม ก่อให้เกิดการเปลี่ยนโครงสร้างของมาร์เทนไซต์จำนวนมากไปเป็นโครงสร้างเฟอร์ไรต์ (Ferrite) และสารประกอบคาร์ไบด์ ((Cr,Fe)₂₃C₆) [8]



รูปที่ 3 ผลการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคที่กำลังขยาย 500 เท่า (ก.) As-weld 1 Layer (ข.) As-weld 2 Layers (ค.) PWHT 500°C 1 Layer (ง.) PWHT 500°C 2 Layers (จ.) PWHT 700°C 1 Layer และ (ฉ.) PWHT 700°C 2 Layers

3.2 ผลการทดสอบความแข็ง (Hardness Test)

ผลจากการทดสอบหาค่าความแข็งแบบวิกเกอร์ (Vickers) โดยทดสอบหาค่าความแข็งทั้งหมด 5 ตำแหน่ง จากนั้น นำผลการทดสอบความแข็งทั้งหมดมาหาค่าเฉลี่ย ซึ่งสามารถแสดงผลการทดสอบความแข็งก่อนและหลังการทดสอบการสึกหรอได้ ดังรูปที่ 4 และ รูปที่ 5 ตามลำดับ

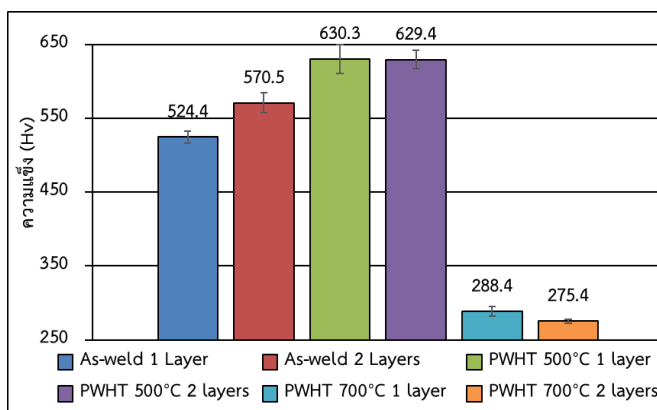
จากรูปที่ 4 พบว่ากลุ่มชิ้นงานที่ให้ความร้อนหลังจากการเชื่อมที่ 500°C มีค่าความแข็งมากที่สุด เนื่องจากเกิดปรากฏการณ์ Secondary Hardening [5] ซึ่งเป็นปรากฏการณ์ที่มีการตกตะกอนสารประกอบคาร์ไบด์ของธาตุจำพวก โครเมียม (M_7C_3) [9] โดยพบว่าค่าความความแข็ง ขอรอยเชื่อมพอกผิวแข็งชนิด 1 ชั้น และ 2 ชั้น ของแต่ละเงื่อนไขการทดลองมีค่าใกล้เคียงกัน ส่วนชิ้นทดสอบที่ไม่ผ่านกระบวนการทางความร้อน (As-weld) มีความแข็งน้อยกว่าชิ้นงานที่ให้ความร้อนหลังจากการเชื่อมที่ 500°C และชิ้นทดสอบที่ผ่านกระบวนการทางความร้อนหลังการเชื่อมที่ 700°C มีค่าความแข็งต่ำที่สุด นอกจากนี้เมื่อชิ้นงานผ่านการทดสอบการสึกหรอที่

อุณหภูมิต่างๆ ดังรูปที่ 5 แสดงให้เห็นว่าเมื่อใช้อุณหภูมิการทดสอบการสึกหรอสูงขึ้นส่งผลให้ค่าความแข็งของชั้นพอกผิวมีแนวโน้มลดลง

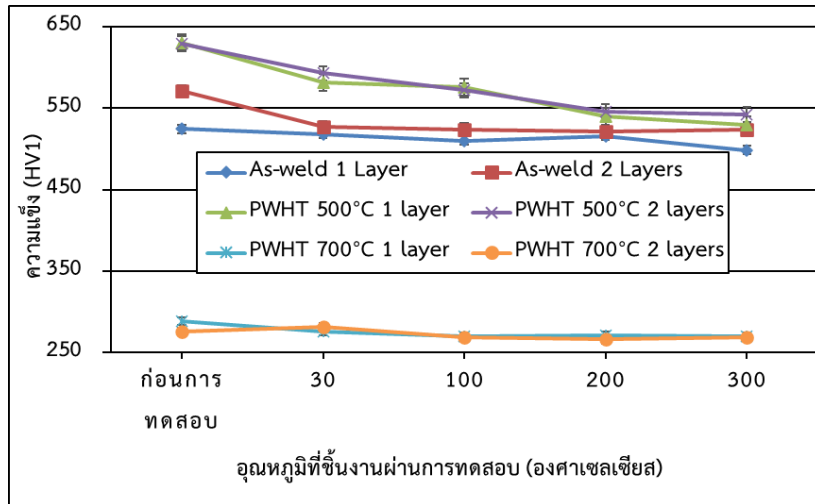
3.3 ผลการทดสอบการสึกหรอแบบพินออดิสก์ (Pin on Disc)

3.3.1 ผลการทดสอบหาอัตราการสึกหรอ โดยการชั่งน้ำหนักก่อน และหลังการทดสอบ ด้วยเครื่องความละเอียด 0.0001 กรัม จากนั้นนำมาหาผลต่าง ซึ่งสามารถแสดงความสัมพันธ์ของน้ำหนักที่สูญเสียไปของชิ้นทดสอบจากการสึกหรอที่อุณหภูมิต่างๆ ดังรูปที่ 6

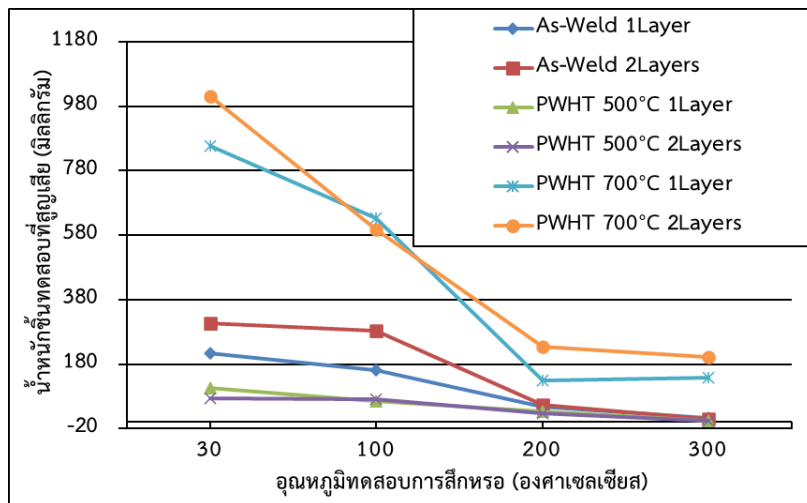
สำหรับรอยเชื่อมพอกผิวแข็ง (Disc) พบว่ากลุ่มชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการทางความร้อนหลังการเชื่อมที่อุณหภูมิ 500°C เกิดการสึกหรอต่ำที่สุด กลุ่มชิ้นงานที่ไม่ผ่านกระบวนการทางความร้อนหลังการเชื่อมเกิดการสึกหรอเกิดการสึกหรอในระดับปานกลาง และกลุ่มชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการทางความร้อนหลังการเชื่อมที่อุณหภูมิ 700°C เกิดการสึกหรอสูงที่สุด ทั้งนี้สำหรับชิ้นงานทุกกลุ่มมีแนวโน้มเกิดการสึกหรอลดลงเมื่ออุณหภูมิการทดสอบเพิ่มขึ้น



รูปที่ 4 ค่าความแข็งก่อนการทดสอบการสึกหรอ



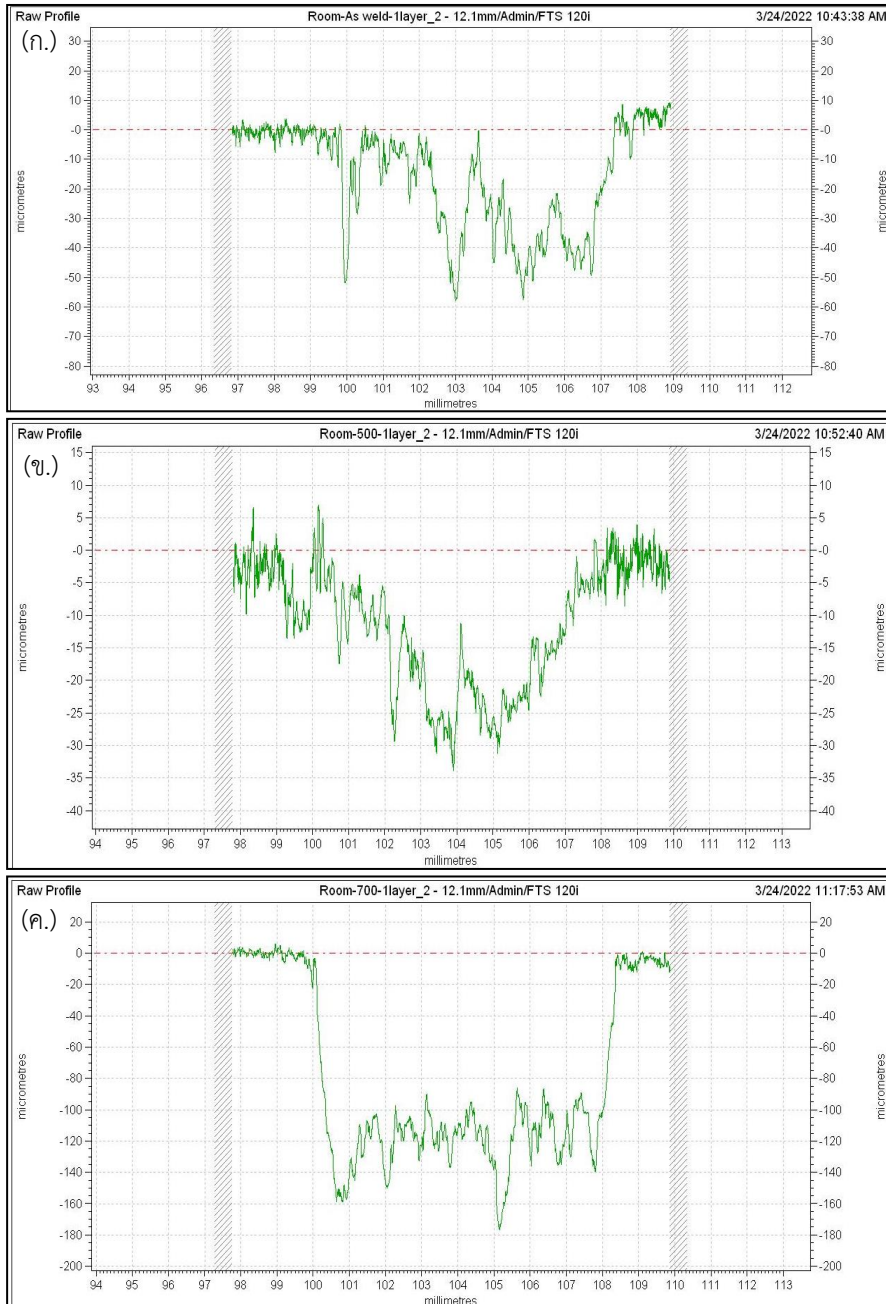
รูปที่ 5 ผลการทดสอบความแข็งก่อนและหลังการทดสอบการสีกหรือ



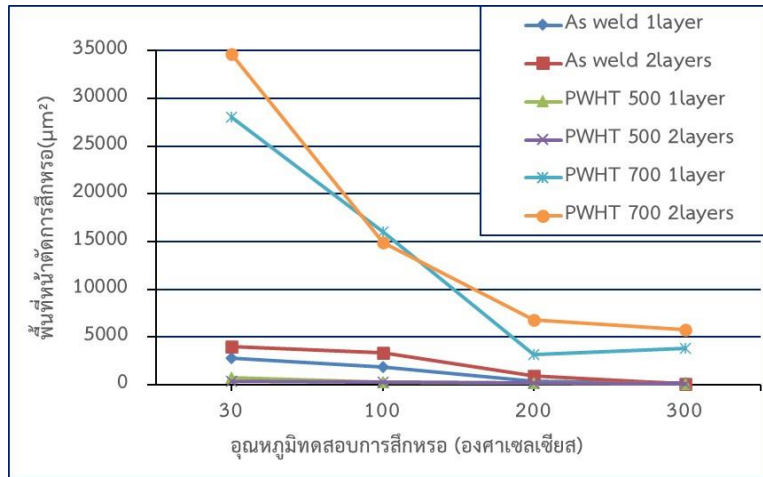
รูปที่ 6 ผลการซ่งนำหน้าห้กห้อัรการสีกหรือดิสก์

3.3.2 ผลการคำนวณหาพื้นที่หน้าตัดของรอยทดสอบการสีกหรือแบบพินออนดิสก์ โดยใช้เครื่องวัดความหยาบผิวแบบสัมผัส (Surface Roughness) และหาพื้นที่รอยสีกหรือด้วยโปรแกรมวิเคราะห์ภาพถ่าย

ตัวอย่างการตรวจสอบรูปทรงของพื้นผิวบริเวณทดสอบการสีกหรือที่อุณหภูมิ 30°C และผลการวัดพื้นที่หน้าตัดรอยแผลการสีกหรือแสดงดังรูปที่ 7 และ 8 ตามลำดับ



รูปที่ 7 ผลการตรวจสอบรูปทรงของพื้นผิวบริเวณรอยแผลหลังการทดสอบการลึกรที่อุณหภูมิ 30°C
(ก.) As-weld, (ข.) PWHT 500°C 1 Layer และ (ค.) PWHT 700°C 1 Layer

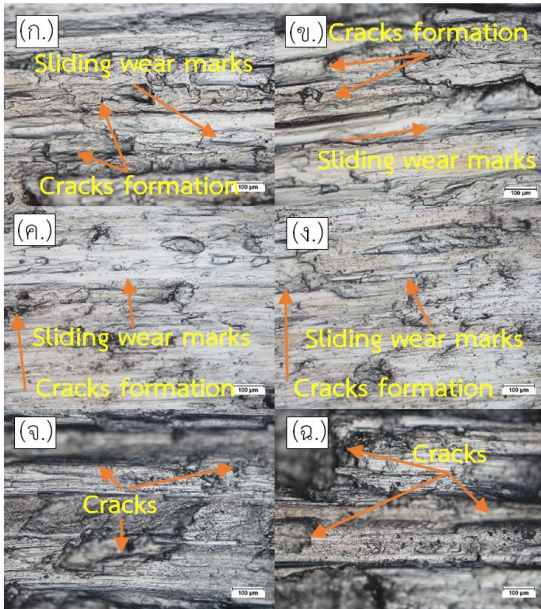


รูปที่ 8 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิในการทดสอบต่อพื้นที่หน้าตัดของรอยแผลจากสึกหรอ

จากรูปที่ 8 พบว่าที่อุณหภูมิทดสอบการสึกหรอเดียวกัน กลุ่มชั้นทดสอบที่ผ่านกระบวนการทางความร้อนหลังจากการเชื่อมที่ 500°C มีพื้นที่หน้าตัดของรอยแผลจากการสึกหรอต่ำกว่ากลุ่มชั้นทดสอบที่ไม่ผ่านกระบวนการทางความร้อนหลังการเชื่อม และกลุ่มชั้นทดสอบที่ผ่านกระบวนการทางความร้อนหลังการเชื่อมที่ 700°C โดยจากรูปที่ 7 (ข.) สังเกตได้ว่าชั้นงานที่ผ่านกระบวนการทางความร้อนหลังการเชื่อมที่ 500°C มีลักษณะรอยแผลการสึกหรอที่แคบและตื้น ส่วนชั้นทดสอบที่ไม่ผ่านกระบวนการทางความร้อนหลังจากการเชื่อม (รูปที่ 7 (ก.)) มีลักษณะรอยแผลการสึกหรอที่กว้าง และลึกมากขึ้น และชั้นทดสอบที่ผ่านกระบวนการทางความร้อนหลังจากการเชื่อมที่ 700 °C มีลักษณะรอยแผลการสึกหรอที่กว้าง และลึกมากที่สุดดังรูปที่ 7 (ค.) ซึ่งการวัดพื้นที่หน้าตัดของรอยการทดสอบการสึกหรอมีความสอดคล้องกับผลการประเมินอัตราการสึกหรอด้วยวิธีการชั่งน้ำหนัก

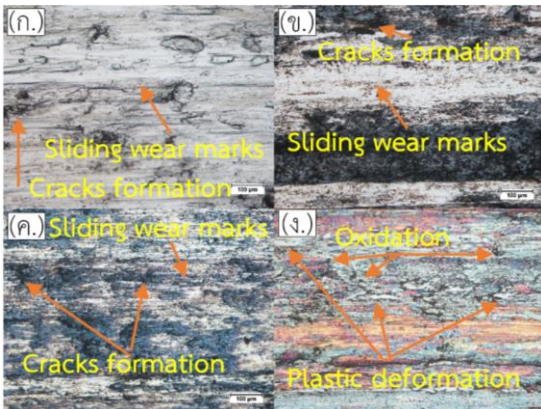
3.3.3 ผลการวิเคราะห์รอยแผลการสึกหรอรอยเชื่อม (Wear Scar) ที่อุณหภูมิ 30°C ซึ่งเป็นอุณหภูมิทดสอบที่เกิดการสึกหรอสูงสุด ทำโดยถ่ายภาพรอยแผลการสึกหรอของเนื้อเชื่อมพอกผิว ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสงที่กำลังขยาย 200 เท่า ดังรูปที่ 9

จากรูปที่ 9 (ก.) As-weld 1 Layer และ (ข.) As-weld 2 Layers บริเวณรอยแผลหลังการทดสอบการสึกหรอมีลักษณะเกิดการหลุดร่อนของเนื้อเชื่อมพอกผิวและพบรอยร้าวขนาดเล็กบางส่วน ส่วนรูปที่ 9 (ค.) PWHT at 500°C 1 Layer และ (ง.) PWHT at 500°C 2 Layers มีลักษณะการหลุดร่อนของเนื้อเชื่อมที่รุนแรงน้อยที่สุด โดยพบรอยร้าวจำนวนน้อยและมีขนาดเล็กกว่าชั้นงานที่ไม่ผ่านกระบวนการทางความร้อนหลังการเชื่อมและผ่านกระบวนการทางความร้อนหลังการเชื่อมที่ 700°C และในรูปที่ 9 (จ.) PWHT at 700°C 1 Layer และ (ฉ.) PWHT at 700°C 2 Layers มีลักษณะการหลุดร่อนของเนื้อเชื่อมที่รุนแรงมากที่สุดโดยสังเกตได้จากรอยร้าวที่มีขนาดใหญ่กว่ากรณีอื่นๆ



รูปที่ 9 รอยแผลการสึกหรอทดสอบที่อุณหภูมิ 30°C

- (ก.) As-weld 1 Layer (ข.) As-weld 2 Layers
- (ค.) PWHT 500°C 1 Layer (ง.) PWHT 500°C 2 Layers
- (จ.) PWHT 700°C 1 Layer (ฉ.) PWHT 700°C 2 Layers



รูปที่ 10 รอยแผลการสึกหรอของชิ้นงาน

- PWHT 500°C ทดสอบการสึกหรอที่อุณหภูมิ
- (ก.) 30°C, (ข.) 100°C, (ค.) 200°C, (ง.) 300°C

นอกจากนี้ผลการตรวจสอบรอยแผลการสึกหรอรอยเชื่อมในชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการทางความร้อนที่อุณหภูมิ 500°C 1 Layer ณ อุณหภูมิทดสอบการสึกหรอที่ 100°C, 200°C, และ 300°C ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง กำลังขยาย 200 เท่า แสดงดังรูปที่ 10

จากรูปที่ 10 แสดงให้เห็นถึงผลของอุณหภูมิทดสอบการสึกหรอต่อลักษณะรอยแผลที่เกิดขึ้น พบว่าที่ทุกอุณหภูมิการทดสอบรอยแผลการสึกหรอจะปรากฏรอยการลื่นไถล (Sliding Wear Mark) และรอยร้าว (Crack) ขนาดเล็ก รวมถึงสังเกตเห็นกลุ่มออกไซด์ที่เกิดขึ้นในการทดสอบการสึกหรอ (บริเวณสีดำ) ที่เพิ่มปริมาณเมื่ออุณหภูมิในการทดสอบสูงขึ้น ดังรูปที่ 10 (ก.), (ข.), (ค.) และ (ง.) ตามลำดับ

ผลการตรวจสอบรอยแผลการสึกหรอของแนวเชื่อมพอกผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (Scanning Electron Microscope: SEM) ที่กำลังขยาย 2000 เท่า แสดงดังรูปที่ 11

จากรูปที่ 11 (ก.) พบว่ามีลักษณะการสึกหรอแบบแปรรูปถาวรของรอยเชื่อม (Plastic Deformation) ที่เกิดการยกตัวขึ้นเมื่อสัมผัสกับพื้นอย่างต่อเนื่องในการทดสอบและพบรอยร้าว (Crack) บางตำแหน่งของรอยแผลจากการสึกหรอ ทำให้รอยเชื่อมหลุดร่อนตามทิศทางที่เกิดการแปรรูปแบบถาวร

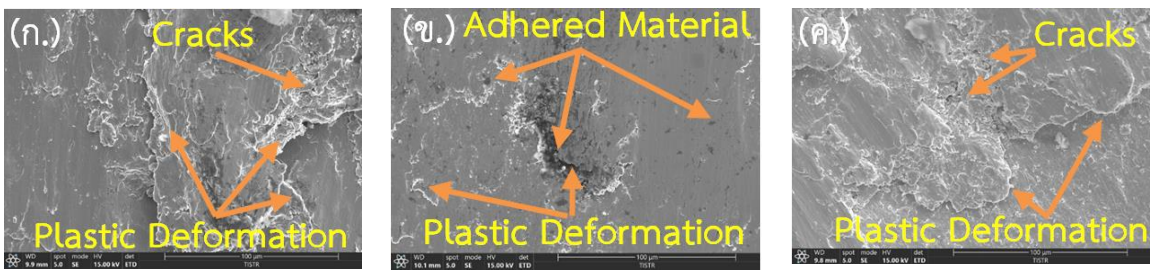
ส่วนรูปที่ 11 (ข.) มีรูปแบบการแปรรูปถาวรของรอยเชื่อมต่ำและไม่พบรอยร้าวบริเวณรอยแผลการทดสอบการสึกหรอ จึงมีแนวโน้มที่รอยเชื่อมจะหลุดร่อนต่ำกว่ากรณีอื่นๆ นอกจากนี้ยังพบว่ามีลักษณะของวัสดุต่างชนิดที่ยึดติด ผังตัว (Adhered Material) อยู่บนพื้นผิวของรอยแผลการสึกหรอ



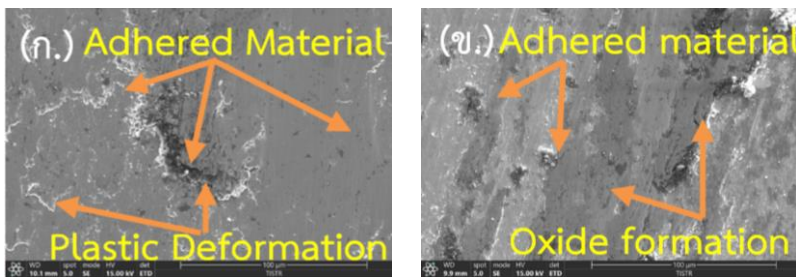
ส่วนรูปที่ 11 (ค.) มีลักษณะการแปรรูปถาวรเป็นบริเวณกว้างมากที่สุดเมื่อเทียบกับทุกเงื่อนไข อีกทั้งยังพบรอยร้าวปรากฏอยู่หลายบริเวณ จึงมีแนวโน้มที่จะเกิดการหลุดร่อนตามทิศทางการแปรรูปถาวรมากกว่าในกรณีอื่นๆ หากพิจารณาบริเวณรอยแผลของชั้นทดสอบการสึกหรอที่อุณหภูมิห้องดังรูปที่ 12 (ก.) จะมีลักษณะการแปรรูปถาวรเกิดขึ้นสูงกว่าเมื่อ

เปรียบเทียบกับ การทดสอบที่อุณหภูมิ 300°C ดังรูปที่ 12 (ข.) ที่สังเกตเห็นว่ามีสารประกอบออกไซด์เกิดขึ้นได้อย่างชัดเจน

ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี แบบสเปกโทรเมตรีรังสีเอกซ์แบบกระจายพลังงาน (Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy: EDS) บริเวณตำแหน่งต่างๆ ของรอยเชื่อมแสดงดังรูปที่ 12 ถึง 16



รูปที่ 11 รอยแผลของรอยเชื่อมพอกผิวหลังการทดสอบการสึกหรอที่อุณหภูมิ 30°C (ก.) As-Weld 1 Layer, (ข.) PWHT 500°C 1 Layer และ (ค.) PWHT 700°C 1 Layer



รูปที่ 12 รอยแผลการสึกหรอของรอยเชื่อมพอกผิวที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมที่ 500°C (ก.) อุณหภูมิทดสอบ 30°C และ (ข.) อุณหภูมิทดสอบ 300°C

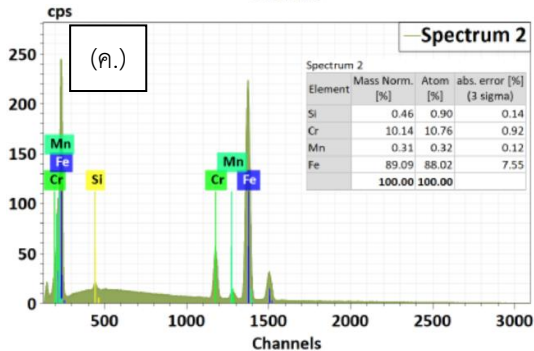
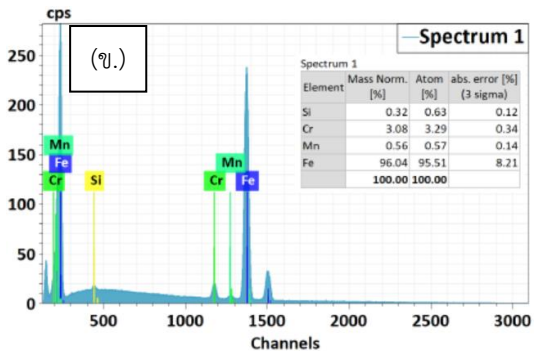
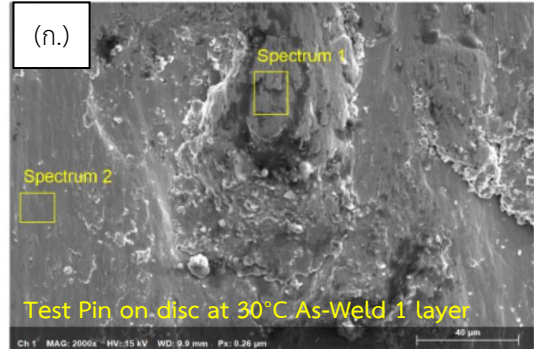
จากการวิเคราะห์ผลการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (Scanning Electron Microscope: SEM) ชั้นงานที่ผ่านการทดสอบ การสึกหรอแบบพินออดิสก์ที่อุณหภูมิ 30°C ของชั้นงาน As-weld 1 Layer ถูกนำมา

วิเคราะห์องค์ประกอบของธาตุ (EDS) ในตำแหน่งสเปกตรัมที่ 1 และ 2 ดังรูปที่ 13 (ก.) ทั้งนี้พบว่าในตำแหน่งสเปกตรัมที่ 1 นั้นมีปริมาณเหล็กสูงถึง 96.04% และโครเมียม 3.08% โดยน้ำหนักดังรูปที่ 13 (ข.) ซึ่งแตกต่างจากองค์ประกอบทางเคมี



พื้นฐานของรอยเชื่อมและวัสดุพินที่มีโครเมียม 12-14% และ 0.4-0.6% ตามลำดับ เนื่องจากการทดสอบการสึกหรอเกิดการขัดสี (Abrasion) และยึดติด (Adhesion) จนเกิดเป็นเศษโลหะ (Wear Debris) ที่ผสมผสานกันระหว่างวัสดุพินและวัสดุรอยเชื่อม ส่วนในตำแหน่งสเปกตรัมที่ 2 สังเกตได้ว่าไม่มีลักษณะการยึดติดของเศษโลหะจากการสึกหรอโดยมีองค์ประกอบทางเคมีใกล้เคียงพื้นฐานของวัสดุรอยเชื่อมดังรูปที่ 13 (ค.)

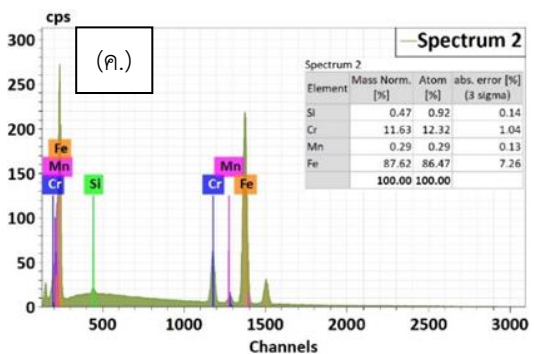
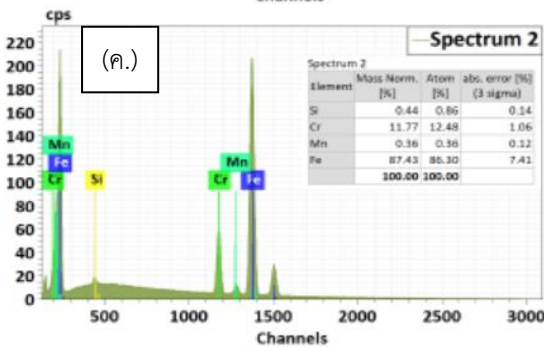
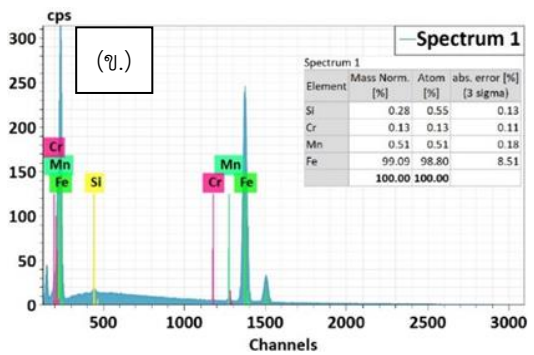
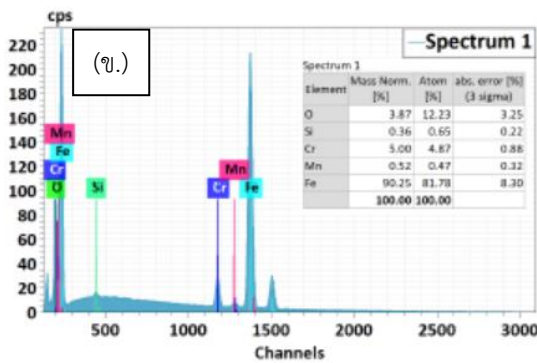
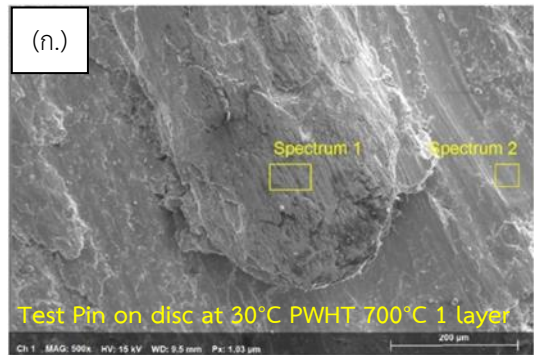
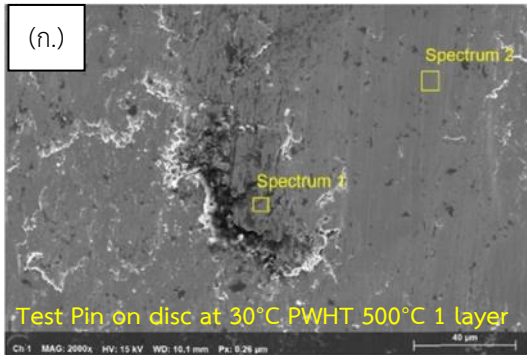
กรณีชิ้นงานทดสอบที่อุณหภูมิ 30°C PWHT 500°C 1 Layer แสดงตำแหน่งการวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุดังรูปที่ 14 (ก.) โดยในตำแหน่งสเปกตรัมที่ 1 พบธาตุเหล็ก 90.25% โครเมียม 5% และออกซิเจน 3.87% โดยน้ำหนัก โดยมีจำนวนอะตอมของเหล็ก, โครเมียม และออกซิเจนคือ 81.78, 4.87, และ 12.23 ตามลำดับ ดังรูปที่ 14 (ข.) ซึ่งแตกต่างจากองค์ประกอบทางเคมีพื้นฐานของวัสดุรอยเชื่อมและวัสดุพิน อย่างไรก็ตามเนื่องจากตรวจพบออกซิเจนในบริเวณนี้จึงมีแนวโน้มที่จะเกิดเป็นสารประกอบออกไซด์ของเหล็กและโครเมียมที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวสัมผัสบริเวณที่เกิดการสึกหรอ ส่วนในตำแหน่งสเปกตรัมที่ 2 พบว่ามีองค์ประกอบทางเคมีใกล้เคียงพื้นฐานของวัสดุรอยเชื่อมดังรูปที่ 14 (ค.) และมีลักษณะพื้นผิวที่มีร่องการสึกหรอแบบขัดสีตามทิศทางการเคลื่อนที่ของพิน



รูปที่ 13 การวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุ ชิ้นงานที่ผ่านการทดสอบ พินออนดิสก์ ที่อุณหภูมิ 30°C As-Weld 1 Layer ภาพ (ก.) แสดงตำแหน่งการวิเคราะห์, (ข.) สเปกตรัม 1 และ (ค.) สเปกตรัม 2

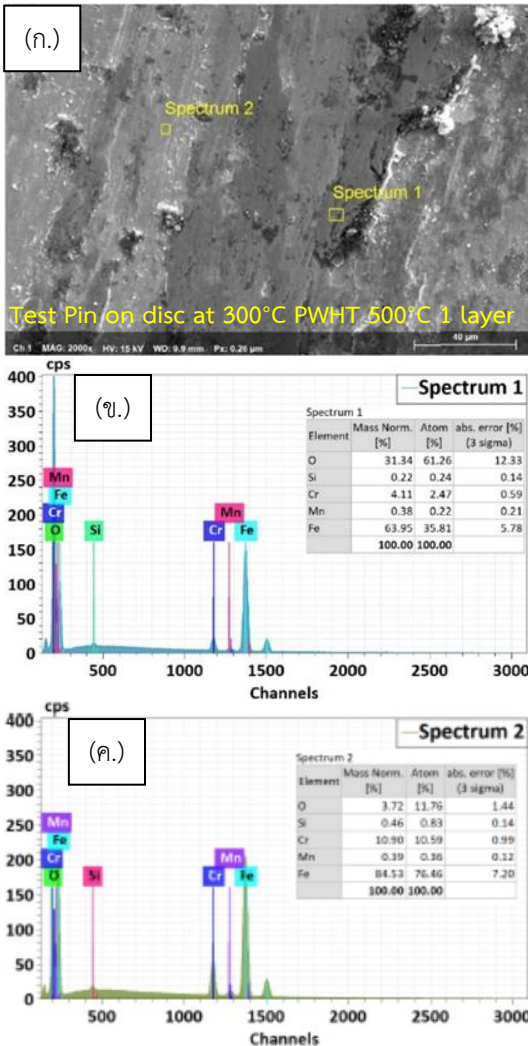


บทความวิจัย



รูปที่ 14 การวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุ ชิ้นงานที่ผ่านการทดสอบ พิน ออน ดิสก์ (Pin on Disc) ที่อุณหภูมิ 30°C PWHT 500°C 1 Layer (ก.) แสดงตำแหน่งการวิเคราะห์, (ข.) สเปกตรัม 1, และ (ค.) สเปกตรัม 2

รูปที่ 15 การวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุ ชิ้นงานที่ผ่านการทดสอบ พิน ออน ดิสก์ (Pin on Disc) ที่อุณหภูมิ 30°C PWHT 700°C 1 Layer (ก.) แสดงตำแหน่งการวิเคราะห์, (ข.) สเปกตรัม 1, และ (ค.) สเปกตรัม 2



รูปที่ 16 การวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุชิ้นงานที่ผ่านการทดสอบ พิน ออน ดิสก์ (Pin on Disc) ที่อุณหภูมิ 300°C PWHT 500°C 1 Layer (ก.) แสดงตำแหน่งการวิเคราะห์, (ข.) สเปกตรัม 1, และ (ค.) สเปกตรัม 2

สำหรับชิ้นงานทดสอบที่อุณหภูมิ 300°C PWHT 700°C 1 Layer แสดงตำแหน่งการวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุตั้งรูปที่ 15 (ก.) โดยในตำแหน่งสเปกตรัมที่ 1 พบธาตุเหล็กในปริมาณสูงถึง 99.05% โครเมียม 0.13% ซิลิกอน 0.28% และแมงกานีส 0.51% โดยน้ำหนัก ตั้งรูปที่ 15 (ข.) โดยเป็นตำแหน่งที่ตรวจพบปริมาณโครเมียมค่อนข้างต่ำจึงมีแนวโน้มที่จะเป็นเนื้อวัสดุของพินเกิดการสึกหรอบนยึดติดกับพื้นผิวของรอยเชื่อม ส่วนในตำแหน่งสเปกตรัมที่ 2 พบว่ามีองค์ประกอบทางเคมีใกล้เคียงพื้นฐานของวัสดุรอยเชื่อมตั้งรูปที่ 15 (ค.) และมีลักษณะพื้นผิวที่เกิดการแปรรูปถาวรสูงตามทิศทางการเคลื่อนที่ของพิน

ส่วนชิ้นงานทดสอบที่อุณหภูมิ 300°C PWHT 500°C 1 Layer แสดงตำแหน่งการวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุตั้งรูปที่ 16 (ก.) โดยในตำแหน่งสเปกตรัมที่ 1 พบธาตุเหล็ก 31.34% โครเมียม 4.11% และออกซิเจน 63.95% โดยน้ำหนัก โดยมีจำนวนอะตอมของเหล็ก, โครเมียม และออกซิเจน คือ 35.81, 2.47, และ 61.26 ตามลำดับ ตั้งรูปที่ 16 (ข.) จึงมีความเป็นไปได้ที่จะเกิดสารประกอบออกไซด์ของเหล็กและโครเมียมบริเวณผิวสัมผัสระหว่างดิสก์และพินที่เกิดการสึกหรอ นอกจากนี้ในตำแหน่งสเปกตรัมที่ 2 ตั้งรูปที่ 16 (ค.) ยังตรวจพบจำนวนอะตอมของเหล็ก, โครเมียม และออกซิเจน คือ 76.46, 10.59, และ 11.76 ตามลำดับ จึงมีโอกาสเกิดเป็นสารประกอบออกไซด์ของเหล็กและโครเมียมได้เช่นกันแม้จะมีปริมาณออกซิเจนต่ำกว่าตำแหน่งสเปกตรัมที่ 1



4. อภิปรายผลการวิจัย

จากการศึกษาผลของกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมของรอยเชื่อม AWS A5.9 ER 420 บนเหล็กกล้าผสมต่ำ AISI 8620 ต่อความต้านทานการสึกหรอที่อุณหภูมิสูงพบว่าเมื่อนำชิ้นทดสอบมาผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 500°C จะส่งผลให้เกิดโครงสร้างจุลภาคเป็นเทมเปอร์มาร์เทนไซต์ (Tempered Martensite) ทั้งนี้ช่วงอุณหภูมิเทมเปอร์ริงทำให้เกิดปรากฏการณ์ Secondary Hardening ซึ่งจะทำให้เกิดการตกตะกอนสารประกอบคาร์ไบด์จำพวก ((Cr,Fe)₂₃C₆ และ M₇C₃) ที่มีปริมาณสูงขึ้นอย่างมีนัยสำคัญส่งผลให้ค่าความแข็งสูงขึ้นซึ่งเป็นพฤติกรรมของวัสดุกลุ่มเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิติก [8-10] แต่เมื่อเพิ่มอุณหภูมิของกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมไปที่ 700°C มีผลทำให้เกิดการสลายตัวของโครงสร้างมาร์เทนไซต์จำนวนมากไปเป็นโครงสร้างเฟอร์ไรต์และสารประกอบคาร์ไบด์ ((Cr,Fe)₂₃C₆) ซึ่งสอดคล้องกับค่าความแข็งที่ลดลงในช่วงดังกล่าว [11] โดยค่าความแข็งมีผลโดยตรงต่อความต้านทานการสึกหรอแบบขัดสี ซึ่งหากวัสดุมีความแข็งที่ผิวสูง โดยปกติจะมีความต้านทานการสึกหรอแบบขัดสีที่ดีกว่าวัสดุที่ผิวมีความแข็งต่ำ [12] จากผลการทดสอบการสึกหรอที่อุณหภูมิ 30°C นั้น พบว่าความแข็งสูงสุดเกิดขึ้นกับชิ้นทดสอบที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมอุณหภูมิ 500°C ซึ่งมีความต้านทานการสึกหรอสูงสุด โดยมีค่าความแข็งสูงกว่าชิ้นทดสอบที่ไม่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมเล็กน้อย ส่วนชิ้นงานที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมอุณหภูมิ 700°C มีค่าความแข็งต่ำสุดจึงส่งผลให้มีความต้านทานการสึกหรอต่ำสุด อย่างไรก็ตามไม่มีความแตกต่างของ

ความต้านทานการสึกหรออย่างมีนัยสำคัญกรณีเชื่อมพอกผิว 1 หรือ 2 ชั้นสำหรับงานวิจัยนี้

ส่วนกระบวนการทดสอบการสึกหรอที่อุณหภูมิสูงพบว่า การเพิ่มอุณหภูมิการทดสอบจาก 30 - 300°C นั้นมีแนวโน้มทำให้ค่าความแข็งของผิววัสดุบริเวณคู่สัมผัสลดลงเนื่องจากการให้ความร้อนระหว่างการทดสอบเปรียบได้กับการนำวัสดุไปทำการอบในช่วงเวลาหนึ่งที่ทำให้วัสดุมีความอ่อนตัวมากยิ่งขึ้น [13] อย่างไรก็ตามอุณหภูมิทดสอบการสึกหรอที่เพิ่มขึ้นมีแนวโน้มให้อัตราการสึกหรอของรอยเชื่อมลดลงเนื่องจากเนื้อรอยเชื่อมมีพฤติกรรมแปรรูปถาวรต่ำลงเมื่อเปรียบเทียบกับ การทดสอบการสึกหรอที่อุณหภูมิ 30°C ทั้งยังก่อให้เกิดสารประกอบออกไซด์ของเหล็กและโครเมียมที่มีบทบาทในการต้านทานการสึกหรออย่างมีนัยสำคัญ [13-14]

5. สรุปผลการวิจัย

1. การใช้กรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมที่อุณหภูมิ 500°C ส่งผลให้ค่าความแข็งของรอยเชื่อม AWS A5.9 ER420 มีค่าความแข็งสูงสุดเนื่องจากปรากฏการณ์ Secondary Hardening ส่วนที่อุณหภูมิ 700°C ทำให้ค่าความแข็งของรอยเชื่อมต่ำสุด
2. ค่าความแข็งส่งผลต่อความต้านทานการสึกหรอของรอยเชื่อมพอกผิว โดยหากค่าความแข็งสูงจะมีผลทำให้ความต้านทานการสึกหรอสูง
3. เมื่ออุณหภูมิทดสอบการสึกหรอสูงขึ้น อัตราการสึกหรอมีแนวโน้มลดลงเนื่องจากปริมาณการแปรรูปถาวรบริเวณผิวคู่สัมผัสลดลง
4. เมื่ออุณหภูมิทดสอบการสึกหรอสูงขึ้น จะทำให้เกิดสารประกอบออกไซด์ของเหล็กและโครเมียมที่ส่งผลอย่างมีนัยสำคัญต่อความต้านทานการสึกหรอของรอยเชื่อมพอกผิว



5. ค่าความแข็งของรอยเชื่อมพอกผิวมีแนวโน้มลดลงต่ำลงเมื่อเพิ่มอุณหภูมิที่ใช้ในการทดสอบการสึกหรอ

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] A. Calik and M.S. Karaka, Effect of heat treatment on the microstructure and mechanical properties of martensitic stainless-steel joints welded with austenitic stainless-steel fillers, *Materials and Technology*, 2013, 47, 403-407.
- [2] R. Kumar, P.K. Ghosh and S. Kumar, Thermal and metallurgical characteristics of surface modification of AISI 8620 steel produced by TIG arcing process, *Journal of Materials Processing Technology*, 2017, 240, 420-431.
- [3] Y. Shen, S.M. Moghadam, F. Sadeghi, K. Paulson and R.W. Trice, Effect of retained austenite – Compressive residual stresses on rolling contact fatigue life of carburized AISI 8620 steel, *International Journal of Fatigue*, 2015, 75, 135-144.
- [4] A. Ray, K.S. Arora, S. Lester and M. Shome, Laser cladding of continuous caster lateral rolls: Microstructure, wear and corrosion characterisation and on-field performance evaluation, *Journal of Materials Processing Technology*, 2014, 214(8), 1566-1575.
- [5] J.C. Lippold and D.J. Kottecki, *Welding metallurgy and weldability of stainless steels*, John Wiley & Sons Inc., NJ, USA, 2005.
- [6] K. Yang, Z. Zhang, W. Hu, Y. Bao and Y. Jiang, A new type of submerged-Arc flux-cored wire used for hardfacing continuous casting rolls, *Journal of Iron and Steel Research International*, 2011, 18(11), 74-79.
- [7] A.V. Nemani, M. Ghaffari, S. Salahi, and A. Nasiri, Effects of post-printing heat treatment on the microstructure and mechanical properties of a wire arc additive manufactured 420 martensitic stainless steel part, *Materials Science and Engineering: A*, 2021, 813, 141167.
- [8] A.N. de Moura, C.M. de Alcântara, E.A. Vieira, W.S. Labiapari, M.A. da Cunha, T.R. de Oliveira and M.T.D. Orlando, Microstructure, crystallographic aspects and mechanical properties of AISI 420 martensitic stainless steel after different thermomechanical process routes, *Materials Chemistry and Physics*, 2023, 305, 127723.
- [9] A.N. Isfahany, H. Saghafian and G. Borhani, The effect of heat treatment on mechanical properties and corrosion behavior of AISI420 martensitic stainless steel, *Journal of Alloys and Compounds*, 2011, 509, 3931-3936.



- [10] K. Lokesh, M.M. Gandhi, S.R. Sekhar, N. Sateesh and Ram Subbiah, Wear behavior analysis of AISI440 martensitic steel by annealing and tempering process, International Journal of Engineering and Advanced Technology, 2019, 9, 1012-1017.
- [11] E.O. Correa, N.G. Alcântara, L.C. Valeriano, N.D. Barbedo and R.R. Chaves, The effect of microstructure on abrasive wear of a Fe–Cr–C–Nb hardfacing alloy deposited by the open arc welding process, Surface and Coatings Technology, 2015, 276, 479-484.
- [12] A. Bain, K. Reddy, S. Jagadeesan, A.A. Lakshmi, N. Sateesh, S.K. Singh and R. Subbiah, Wear and microstructure analysis on AISI420 stainless steel by annealing & tempering process under dry sliding conditions, Advances in Materials and Processing Technologies, 2022, 8, 445-455.
- [13] J. Kuan, Effects of heat treatment on microstructure and wear resistance of stainless steels and superalloys, Thesis, University of Ottawa, Canada, 2013.
- [14] D.A. Ahmed and M.M. Mulapeer, Differentiation of specific wear rates of AISI 304 austenitic and AISI 2205 duplex stainless steels at room and high temperatures, Heliyon, 2022, 8(11), e11807.

สมบัติทางวิศวกรรมของมอร์ตาร์ผสมเส้นใยแปรใช้ใหม่จากขยะ แผงวงจรพิมพ์

ธิดิวัชร ศิริวัฒนศานนท์¹ บุรฉัตร ฉัตรวีระ^{1*} กฤษดา เสือเอี่ยม² และ นිරัฒน์ แยมโอบธุวิ³

¹ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

² สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

³ ภาควิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมโยธาและสิ่งแวดล้อม, วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม,
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

* ผู้ประสานงานเผยแพร่ (Corresponding Author), E-mail: cburacha@engr.tu.ac.th

วันที่รับบทความ: 13 กุมภาพันธ์ 2566; วันที่ทบทวนบทความ: 7 เมษายน 2566; วันที่ตอบรับบทความ: 21 เมษายน 2566

วันที่เผยแพร่ออนไลน์: 29 มิถุนายน 2566

บทคัดย่อ: งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาสมบัติทางวิศวกรรมของมอร์ตาร์ผสมเส้นใยแปรใช้ใหม่จากขยะแผงวงจรพิมพ์โดยนำมาใช้เป็นสารผสมเพิ่ม (Admixture) ในอัตราส่วนที่ต่างกัน ทำศึกษาองค์ประกอบทางเคมีและสมบัติทางกายภาพ ได้แก่ ขนาดคละ และลักษณะอนุภาคและพื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด สมบัติของมอร์ตาร์ในสภาวะเหลวและแข็งตัว ได้แก่ การไหลแผ่ เวลาก่อตัว กำลังอัด กำลังตัด สมบัติทางความร้อนและการวิเคราะห์ปริมาณโลหะหนักที่ปะปนอยู่ในมอร์ตาร์ ผลการศึกษาพบว่า เส้นใยแปรใช้ใหม่จากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ส่วนใหญ่มีลักษณะเป็นแท่งทรงกระบอกขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 12-15 μm มีความยาวตั้งแต่ 30 - 200 μm มอร์ตาร์มีแนวโน้มการไหลแผ่และเวลาการก่อตัวเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณเส้นใยแปรใช้ใหม่จากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์เพิ่มขึ้น ในขณะที่กำลังอัด กำลังตัดและสัมประสิทธิ์การนำความร้อนมีแนวโน้มลดลง เมื่อพิจารณา มอร์ตาร์ผสมเส้นใยแปรใช้ใหม่จากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ร้อยละ 20 พบว่า มีกำลังอัดและกำลังตัดสูงสุด เท่ากับ 36.35 MPa และ 15.66 MPa ที่อายุ 28 วัน ตามลำดับ นอกจากนี้ปริมาณโลหะหนักที่ปะปนอยู่ในมอร์ตาร์ผสมเส้นใยแปรใช้ใหม่จากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ มีค่าอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานที่กำหนดตามประกาศของคณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ

คำสำคัญ: มอร์ตาร์; เส้นใยแปรใช้ใหม่; ขยะแผงวงจรพิมพ์; สมบัติทางวิศวกรรม; การนำความร้อน

Engineering Properties of Mortars Incorporating Recycled Fibers from Waste Printed Circuit Boards

Dhitivajra Siriwattanasanon¹, Burachat Chatveera^{1*}, Gritsada Sua-iam² and Nirat Yamoat³

¹ Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Thammasat University

² Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology
Phra Nakhon

³ Department of Civil and Environmental Engineering Technology, College of Industrial Technology,
King Mongkut's University of Technology North Bangkok

* Corresponding author, E-mail: cburacha@engr.tu.ac.th

Received: 13 February 2023; Revised: 7 April 2023; Accepted: 21 April 2023

Online Published: 29 June 2023

Abstract: The purpose of this research was to investigate the engineering properties of mortar incorporating recycled fibers from waste-printed circuit boards used as admixtures at varying ratios. The study examined the chemical composition and physical characteristics of the fibers, including particle size gradation, shape, and surface properties, using scanning electron microscopy. Additionally, the study evaluated the fresh and hardened properties of the mortar, such as initial flow, setting time, compressive strength, flexural strength, thermal properties, and heavy metal concentration. The results showed that the majority of recycled fibers from waste electronic circuit boards were cylindrical rods with a diameter of approximately 12-15 μm and lengths ranging from 30 to 200 μm . As the number of recycled fibers from waste printed circuit boards increased in the mortar, the initial flow and setting time increased, while the compressive strength, flexural strength, and thermal conductivity coefficient decreased. Mortars containing 20% recycled fibers from waste electronic circuit boards exhibited the highest compressive strength and flexural strength of 36.35 MPa and 15.66 MPa, respectively, after 28 days. Furthermore, the concentration of heavy metals in the mortar was within the standard specified by the National Environmental Board's notification.

Keywords: Mortars; Recycled fiber; Waste printed circuit board; Engineering properties; Thermal conductivity



1. บทนำ

ขยะอิเล็กทรอนิกส์ หรือ Electronic Waste (E-Waste) หมายถึงเครื่องใช้ไฟฟ้าหรืออุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ทั้งหลายที่ชำรุดหรือไม่ได้ใช้งานแล้ว ซึ่งขยะเหล่านี้จะย่อยสลายเองไม่ได้ เป็นมลพิษต่อสิ่งแวดล้อมหากจัดการอย่างไม่เหมาะสม เช่น การนำไปเผาหรือฝังกลบจะก่อให้เกิดสารพิษจากโลหะหนักและสารหน่วงไฟประเภทโบรมีนปนเปื้อนไปกับอากาศและน้ำปัจจุบันปริมาณ E-Waste ทั่วโลกได้พุ่งทะยานสูงขึ้นถึง 20 - 50 ล้านตันต่อปี ใกล้เคียงกับปริมาณขยะพลาสติกทั่วโลก แต่ E-Waste จะมีอันตรายกว่าขยะพลาสติกเป็นอย่างมาก ในขณะที่ประเทศไทยมี E-Waste มากกว่า 380,000 ตัน/ปี แต่ขยะเหล่านี้กลับถูกส่งเข้าสู่กระบวนการรีไซเคิลอย่างถูกวิธีเพียงร้อยละ 7.1 [1] โดยส่วนที่เหลือจะถูกนำไปกองรวมกับขยะมูลฝอยประเภทอื่นๆ เพื่อรอการฝังกลบ ทั้งนี้พบว่ามีทางเลือกหนึ่งที่สามารถนำ E-Waste กลับมาแปรใช้ใหม่ได้ อาทิเช่น การนำมาใช้เป็นส่วนผสมในวัสดุก่อสร้าง เป็นต้น

การนำ E-Waste กลับมาแปรใช้ใหม่ในงานวัสดุก่อสร้างนั้น ส่วนหนึ่งสามารถนำซากแผงวงจรพิมพ์ (Printed Circuit Board: PCB) ซึ่งเป็นแผ่นบอร์ดสำหรับติดตั้งวงจรพิมพ์ที่ประกอบด้วยอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ต่างๆ เช่น ไอซี แอลอีดี ไดโอด ทรานซิสเตอร์ ตัวต้านทาน รวมถึงหัวแจ็ค และเทอร์มินอลพินต่างๆ ที่ถอดออกหมดแล้วมาประยุกต์ใช้เป็นวัสดุผสมรวมในการผลิตคอนกรีต [2, 3] รวมถึงคอนกรีตชนิดพิเศษ อาทิเช่น คอนกรีตมวลเบาเซลลูลาร์ [4] คอนกรีตพูน [5] และ คอนกรีตชนิดไหลอัดแน่นได้ด้วยตัวเอง (Self-Compacting Concrete) [6] เป็นต้น ซึ่งจาก

การศึกษาพบว่าสามารถนำ E-Waste มาประยุกต์ใช้โดยที่สมบัติด้านกำลังยังอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้

ทั้งนี้ ซากแผงวงจรพิมพ์เมื่อทำการบดย่อยจะมีลักษณะเป็นเส้นใย โดยวัสดุดังกล่าวยังมีสมบัติเป็นฉนวนกันเสียงและความร้อนได้อีกด้วย โดยมีค่าการนำความร้อนที่ต่ำ (0.046 W/m.K ที่อุณหภูมิ 25°C) เมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุฉนวนบางประเภท เช่น แผ่นเวอร์มิคูไลท์ (Vermiculite) แผ่นเพอร์ไลต์ (Perlite) และฉนวนใยหิน เป็นต้น นอกจากนี้ยังต่ำกว่าวัสดุแปรใช้ใหม่บางชนิด เช่น โพลียูรีเทนโฟม (Polyurethane Foam) และเศษยางรถยนต์ เป็นต้น ซึ่งโดยทั่วไปวัสดุที่มีค่าการนำความร้อนต่ำกว่า 0.12 W/m.K ถือว่ามีสมบัติความเป็นฉนวนกันความร้อนในระดับค่อนข้างดี เนื่องจากโครงสร้างภายในของซากแผงวงจรพิมพ์ที่มีความพรุนสูงส่งผลทำให้มีคุณสมบัติการนำความร้อนที่ต่ำ [7] ดังนั้น หากนำเส้นใยแปรใช้ใหม่จากซากแผงวงจรพิมพ์มาเป็นวัสดุผสมในวัสดุก่อสร้างจะช่วยปรับปรุงคุณสมบัติการเป็นฉนวนกันความร้อนและไฟฟ้าได้ดียิ่งขึ้นอีกด้วย

มอร์ตาร์เป็นวัสดุผสมของปูนซีเมนต์ มวลรวมละเอียดและ ซึ่งแนวคิดของการศึกษาเพื่อนำเอาเส้นใยจากขยะแผงวงจรพิมพ์มาแปรใช้ใหม่ในการศึกษาครั้งนี้เป็นการนำมาใช้ผสมเพิ่มในการผลิตมอร์ตาร์ปรับระดับ (Self Levelling Mortar) ซึ่งจะมีความชันเหลวที่มีสมรรถนะสูงในการไหล สามารถใช้งานปรับระดับได้เป็นอย่างดี โดยไม่เกิดการแยกตัวและทนทานต่อการเกิดการแตกร้าวจากการหดตัวพลาสติกได้ดีกว่าวัสดุปรับระดับทั่วไป สามารถนำไปใช้งานได้สะดวกเหมาะสำหรับการปรับระดับพื้นทั่วไป หรือใช้ในการปรับปรุงความระดับและความเรียบของพื้นผิวเดิม



ที่ใช้งานอยู่ โดยอาจใช้งานในลักษณะการทรงพื้นหรือทับหน้าก็ได้ [8] โดย Mahdi [9] ได้ศึกษาผลกระทบของการผสมเส้นใยในมอร์ตาร์ ทำการทดสอบกำลังตัดพบว่ามอร์ตาร์ที่มีส่วนผสมของเส้นใยช่วยปรับปรุงค่าโมดูลัสของการแตกหักได้อย่างมีนัยสำคัญ โดยเฉพาะในตัวอย่างมอร์ตาร์ที่ผสมเส้นใยร้อยละ 1 โดยน้ำหนักปูนซีเมนต์ มีค่ากำลังตัดอยู่ระหว่าง 3.10 - 4.45 MPa เมื่อเทียบกับมอร์ตาร์ควบคุมที่มีค่ากำลังตัดเท่ากับ 2.25 MPa ในทางตรงกันข้ามหากเพิ่มปริมาณเส้นใยในส่วนผสมมอร์ตาร์มากขึ้นจะส่งผลต่อกำลังอัดและค่าโมดูลัสของการแตกหักลดลง

Ferrari et al. [10] ได้ศึกษาผลกระทบของการนำขยะจากซากแผงวงจรพิมพ์มาทำการทดแทนทรายในส่วนผสมมอร์ตาร์อัตราส่วนร้อยละ 5-10 (โดยปริมาตร) ทำการทดสอบกำลังอัด การดูดซึมน้ำ ปริมาณช่องว่าง ความหนาแน่น การวิเคราะห์โครงสร้างภายในด้วยกล้องอิเล็กตรอนแบบส่องกราด และการชะละลายของโลหะหนัก พบว่า การใช้ขยะจากซากแผงวงจรพิมพ์ในส่วนผสมมอร์ตาร์ส่งผลกระทบต่อการใช้งานเปลี่ยนแปลงสมบัติของมอร์ตาร์เพียงเล็กน้อย สามารถนำมาใช้งานร่วมการการผลิตมอร์ตาร์ได้แต่จำเป็นต้องควบคุมการใช้งาน เนื่องจากอาจมีผลกระทบทางด้านสิ่งแวดล้อมเกิดขึ้นในระยะยาว [10] ในด้านการทดสอบการชะละลายโลหะหนักจากการใช้ ขยะจากซากแผงวงจรพิมพ์ไม่พบว่ามีไอออนของโลหะหนักชะละลายออกมาหรือพบในปริมาณที่น้อยมาก [11]

ดังนั้น ผู้วิจัยจึงมีแนวคิดในการนำเส้นใยจากขยะแผงวงจรพิมพ์มาแปรใช้ใหม่ โดยการนำมาใช้เป็นสารผสมเพิ่มในส่วนผสมของมอร์ตาร์ ทำการทดสอบสมบัติทางวิศวกรรมเพื่อศึกษาความเป็นไปได้และเป็นข้อมูลพื้นฐานในการศึกษาวิจัยระดับสูงต่อไป

2. วิธีการดำเนินงานวิจัย

2.1 วัสดุที่ใช้ในการทดสอบ

ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ตามมาตรฐาน มอก. เลขที่ 15 หรือ ASTM C150 [12] มวลรวมละเอียด ได้แก่ ทรายแม่น้ำที่มีขนาดละเอียดเป็นไปตามมาตรฐาน ASTM C778 [13] สารเคมีผสมเพิ่มประเภทลดน้ำพิเศษ (High Range Water Reducing Admixtures) ตามมาตรฐาน ASTM C494 Type F [14] ซึ่งมีสารประกอบหลักประเภท Modified Polycarboxylate

เส้นใยจากขยะแผงวงจรพิมพ์นำมาแปรใช้ใหม่ได้มาจากกระบวนการแปรใช้ใหม่ซากแผงวงจรพิมพ์จากผู้ประกอบการในจังหวัดนครปฐม ภายหลังจากการคัดแยกส่วนที่เป็นโลหะโดยวิธีการทางกายภาพ ซากแผงวงจรพิมพ์ ดังรูปที่ 1 จะถูกนำไปบดย่อยและแยกโลหะทองแดงออกจนเหลือเป็นซากแผงวงจรพิมพ์ที่มีขนาดเล็กและมีลักษณะเป็นเส้นใย ดังรูปที่ 2 น้ำที่ใช้ในการผสมและบ่มมอร์ตาร์เป็นน้ำประปาที่สะอาด มีค่า pH ในช่วง 6-7



รูปที่ 1 ซากแผงวงจรพิมพ์



รูปที่ 2 เส้นใยแปรใช้ใหม่จากการบดย่อย

2.2 การเตรียมตัวอย่างมอร์ตาร์

2.2.1 อัตราส่วนผสม

ในการศึกษาครั้งนี้กำหนดอัตราส่วนของมอร์ตาร์ โดยใช้สัดส่วนระหว่างปูนซีเมนต์และทรายเท่ากับ 1:2.75 คงที่ทุกส่วนผสม ตามคำแนะนำโดยมาตรฐาน ASTM C109 [15] จากนั้นนำเส้นใยแปรใช้ใหม่จากแผงวงจรพิมพ์มาใช้เป็นวัสดุผสมเพิ่มในปริมาณร้อยละ 20, 40, 60, 80 และ 100 โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์ ซึ่งพัฒนาต่อยอดจากแนวคิดของ Wang et al. [16] ซึ่งได้นำผงฝุ่นซึ่งมีส่วนผสมของเส้นใยแปรใช้ใหม่มาใช้เป็นวัสดุผสมเพิ่มในปริมาณสูงสุดร้อยละ 25 ดังนั้น แนวคิดในการศึกษาครั้งนี้เพื่อให้เห็นแนวโน้มถึงการนำเส้นใยแปรใช้ใหม่มาทำการผสมเพิ่มจนถึงปริมาณสูงสุดร้อยละ 100 (ทั้งนี้จากการทดสอบเบื้องต้นสัดส่วนผสมเพิ่มมากกว่า 100% มอร์ตาร์ไม่สามารถขึ้นรูป) ในขณะที่เดียวกันทำการเพิ่มความสามารถในการไหลด้วยการผสมสารเคมีผสมเพิ่มประเภทลดน้ำพิเศษ อัตราส่วนร้อยละ 3 สรุปอัตราส่วนผสมได้ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 อัตราส่วนผสมของมอร์ตาร์

MIX ID	Cement (g)	Sand (g)	Fiber (g)
M0	500	1,375	0
M20	500	1,375	100
M40	500	1,375	200
M60	500	1,375	300
M80	500	1,375	400
M100	500	1,375	500

2.2.2 การเตรียมตัวอย่าง

ผสมปูนซีเมนต์ ทราย น้ำและสารเคมีผสมเพิ่มเข้าด้วยกันด้วยเครื่องผสมมอร์ตาร์ จนส่วนผสมทั้งหมดเข้ากันเป็นอย่างดีแล้ว ทำการทดสอบบัตติของมอร์ตาร์ในสภาวะเหลว จากนั้นทำการเทส่วนผสมมอร์ตาร์ลงแบบหล่อที่กำหนดในแต่ละการทดสอบ กระทุ้งแน่นและทำการปาดหน้าให้เรียบ พร้อมทั้งหุ้มด้วยพลาสติกพอลิเอทิลีนเป็นเวลา 24 ชั่วโมง จึงทำการถอดแบบหล่อ แล้วนำตัวอย่างมอร์ตาร์เฉพาะการทดสอบกำลังอัดไปบ่มน้ำและบ่มอากาศ รอจนครบ



ระยะเวลาการบ่มที่กำหนด 3, 7, 14, 21 และ 28 วัน จึงนำตัวอย่างขึ้นมาเตรียมทำการทดสอบสมบัติของ มอร์ตาร์ในสภาวะแข็งตัวและสมบัติเฉพาะของมอร์ตาร์ เพื่อหาค่าเฉลี่ยจากจำนวน 3 ก้อน สรุปลักษณะ ตัวอย่างมอร์ตาร์ในแต่ละการทดสอบดังตารางที่ 2

2.3 วิธีการทดลอง

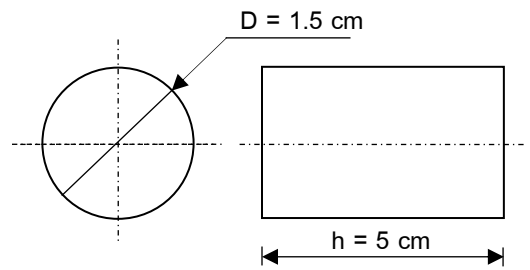
2.3.1 สมบัติของมอร์ตาร์ในสภาวะเหลว

การทดสอบการไหลเริ่มต้น (Initial Flow) เป็นการทดสอบระยะเวลาการไหลแผ่ของมอร์ตาร์โดยใช้อุปกรณ์ Flow Ring ที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน 3 cm และความสูง 5 cm ดังรูปที่ 3 โดยการนำตัวอย่างมอร์ตาร์ผสมเส้นใยแปรใช้ใหม่จากขยะแผงวงจรพิมพ์ที่ผสมจนเป็นเนื้อเดียวกันแล้วมาเติมลงใน Flow Ring จนเต็ม จากนั้นทำการยก Flow Ring ขึ้นในแนวตั้ง เพื่อปล่อยให้มอร์ตาร์ไหลแผ่ออกอย่างอิสระใน เวลา 240 ± 10 วินาที จากนั้นทำการวัดขนาด เส้นผ่าศูนย์กลางเฉลี่ยของมอร์ตาร์ โดยขั้นตอนการ ทดลองเป็นไปตามมาตรฐาน ASTM C1708 [17] และ มอก. 3057-2563 [8] ที่กำหนดให้ค่าการไหลเริ่มต้น อยู่ในช่วง 125 – 150 mm

การทดสอบระยะเวลาการก่อตัว (Setting Time) โดยใช้อุปกรณ์เข็มไวแคตขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 1 mm วางแตะที่ผิวด้านบนของมอร์ตาร์ที่บรรจุอยู่ใน กรวยตัด จากนั้นบันทึกระยะเวลาที่ระยะเวลาที่เข็มจมลง อย่างอิสระลงในมอร์ตาร์ โดยระยะเวลาที่เข็มจมลงใน มอร์ตาร์ที่ระยะ 25 mm เรียกว่าการก่อตัวเริ่มต้น (Initial Setting Time) ในขณะที่ระยะเวลาที่เข็มไม่ สามารถจมลงในมอร์ตาร์ เรียกว่าการก่อตัวสุดท้าย (Final Setting Time)

ตารางที่ 2 จำนวนตัวอย่างมอร์ตาร์ในแต่ละการทดสอบ

การทดสอบ	ขนาด (mm)	จำนวน
กำลังอัด		
- บ่มน้ำ	50 x 50 x 50	90
- บ่มอากาศ	50 x 50 x 50	90
กำลังตัด	40 x 40 x 160	18
สมบัติทางความร้อน	300 x 300 x 36	3



รูปที่ 3 Flow Ring

2.3.2 สมบัติของมอร์ตาร์ในสภาวะแข็งตัว

การทดสอบกำลังอัดของมอร์ตาร์ ตาม มาตรฐาน ASTM C109 [15] โดยใช้แบบหล่อ 50 x 50 x 50 mm ที่ทำการบ่มทั้งในน้ำและในอากาศที่อายุ 3, 7, 14, 21 และ 28 วัน ตามลำดับ เมื่อครบอายุการ ทดสอบนำตัวอย่างมอร์ตาร์มาทำการกดด้วยน้ำหนัก จนวิบัติ ดังรูปที่ 4 จากนั้นทำการคำนวณหาลำดับกำลังอัด จากค่าเฉลี่ยการทดสอบจำนวน 3 ตัวอย่าง

การทดสอบกำลังตัดของมอร์ตาร์ ตามมาตรฐาน ASTM C348 [18] โดยใช้แบบปริซึมขนาด 40 x 40 x 160 มม. กำหนดตำแหน่งน้ำหนักทดสอบแบบ Center-Point Loading ทำการปล่อยน้ำหนักกระทำ จนกระทั่งจนตัวอย่างเกิดการวิบัติ ดังรูปที่ 5



รูปที่ 4 การทดสอบกำลังอัดของมอร์ตาร์



รูปที่ 5 การทดสอบกำลังอัดของมอร์ตาร์

2.3.3 สมบัติเฉพาะของมอร์ตาร์

สัมประสิทธิ์การนำความร้อน (K-value) และการทดสอบความต้านทานความร้อน (R-value) โดยใช้ตัวอย่างมอร์ตาร์ขนาด 300 x 300 x 36 mm ทดสอบด้วยเครื่องมือวัดการไหลมวลความร้อน (Heat flow meter) NETZSCH รุ่น HFM 436 Lambda

ทดสอบหาปริมาณโลหะหนักที่ปะปนอยู่ในมอร์ตาร์ โดยทำการเลือกบดละเอียดตัวอย่างมอร์ตาร์ที่มีสมบัติด้านกำลังที่ดีที่สุด เพื่อนำไปย่อยสลายด้วย

เครื่องย่อยสลายตัวอย่างด้วยระบบไมโครเวฟ (Microwave Digestion) ของ PerkinElmer รุ่น Titan MPS จากนั้นนำไปวิเคราะห์หาปริมาณธาตุและโลหะด้วยเทคนิค Inductively Coupled Plasma Optical Emission Spectroscopy (ICP - OES) และ Inductively Coupled Mass Emission Spectroscopy (ICP - MS)

3. ผลการวิจัยและการอภิปรายผล

3.1 สมบัติของวัสดุ

องค์ประกอบทางเคมี (Chemical compositions) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 มีแคลเซียมออกไซด์ (CaO) เป็นออกไซด์หลัก ปริมาณร้อยละ 65.56 ส่วนเส้นใยแปรใช้ใหม่จากซากแผงวงจรพิมพ์ มีซิลิคอนไดออกไซด์ (SiO₂) เป็นออกไซด์หลัก ปริมาณร้อยละ 24.08

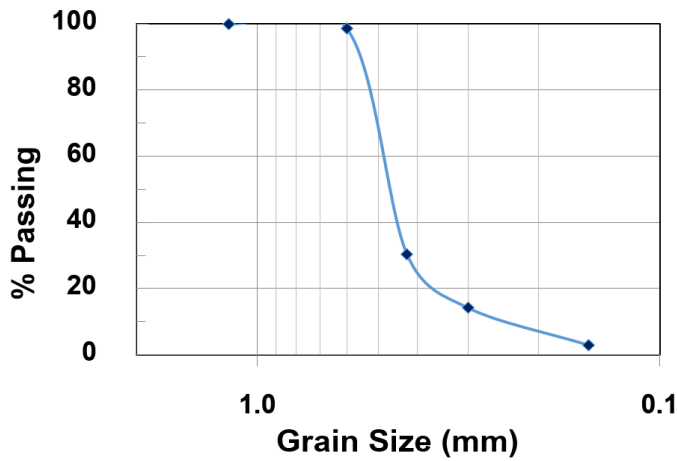
สมบัติทางกายภาพ (Physical properties) เส้นใยแปรใช้ใหม่จากซากแผงวงจรพิมพ์ มีความถ่วงจำเพาะ 0.69 ความหนาแน่น 0.36 kg/l ปริมาณความชื้นร้อยละ 1.07 ส่วนขนาดคละของเส้นใยแปรใช้ใหม่จากขยะแผงวงจรพิมพ์ ดังแสดงในรูปที่ 6

ส่วนมวลรวมละเอียดซึ่งมีค่าโมดูลัสความละเอียดเท่ากับ 3.05 ความถ่วงจำเพาะ 2.56 ความหนาแน่น 1.32 kg/l ปริมาณความชื้นร้อยละ 2.79 และมีค่าการกระจายตัวอยู่ในช่วงมาตรฐานกำหนด ดังรูปที่ 7 ลักษณะอนุภาคและพื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด พบว่าเส้นใยแปรใช้ใหม่จากขยะแผงวงจรพิมพ์โดยส่วนใหญ่ร้อยละ 95 - 98 โดยประมาณ มีลักษณะเป็นแท่งทรงกระบอกยาว และมีหน้าตัดรูปร่างกลมขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 12-15 μm ซึ่งบางหน้าตัดอาจจะมีลักษณะ

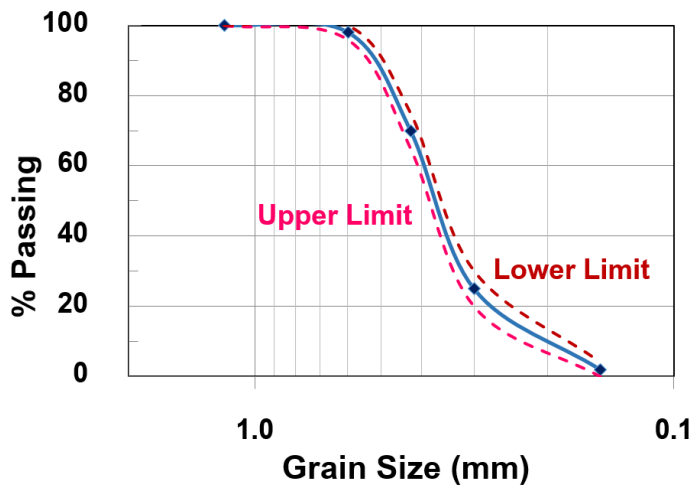


ไม่เรียบเนียน ขึ้นอยู่กับกระบวนการย่อยซากแผงวงจรพิมพ์ ส่วนความยาวของเส้นใยทรงกระบอก มีความยาวตั้งแต่ 30 - 200 μm นอกจากนี้ยังพบว่า มีรูปทรงหลายเหลี่ยมปะปนมาในปริมาณเล็กน้อย ร้อยละ 2 - 5 โดยประมาณ มีขนาด 30 - 50 μm ที่กำลังขยาย 1,000 เท่า จะพบว่าองค์ประกอบของเส้นใยแปรใช้ใหม่จากขยะแผงวงจรพิมพ์ ซึ่งมีลักษณะรูปร่างเป็นแท่ง

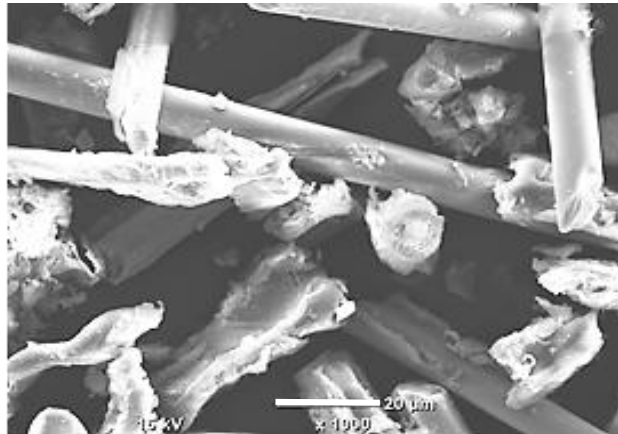
ทรงกระบอกยาวจะอยู่แบบกระจายตัว ไม่ยึดติดกัน พื้นผิวเส้นใยมีความเรียบเนียน ดังรูปที่ 8 เมื่อพิจารณาพื้นผิวของมอร์ตาร์ผสมเส้นใยแปรใช้ใหม่จากขยะแผงวงจรพิมพ์ที่กำลังขยาย 300 เท่า จะพบว่าพื้นผิวของมอร์ตาร์มีพื้นผิวเรียบเนียนซึ่งส่งผลดีสมบัติทางด้านกำลังของมอร์ตาร์ ดังรูปที่ 9



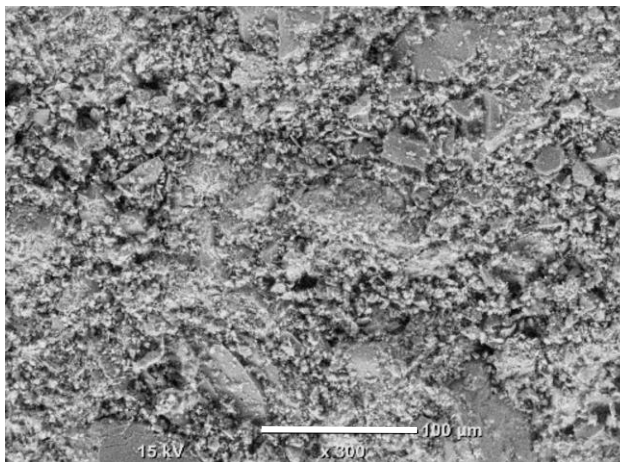
รูปที่ 6 ขนาดคละของเส้นใย



รูปที่ 7 ขนาดคละของมวลรวมละเอียด



รูปที่ 8 รูปขยายของเส้นใย



รูปที่ 9 รูปขยายของมอร์ตาร์ผสมเส้นใย

3.2 สมบัติของมอร์ตาร์ในสภาวะเหลว

3.2.1 อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์

อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ (w/c Ratio) ที่เหมาะสมสำหรับการไหลควบคุมเริ่มต้นพบว่าอยู่ในช่วง 0.79-1.65 โดยมอร์ตาร์ควบคุม (M0) มีอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ต่ำที่สุดเท่ากับ 0.79 ทั้งนี้เพื่อให้ค่าการไหลเริ่มต้นอยู่ในช่วงที่กำหนดตาม

มาตรฐานนั้น เมื่อปริมาณผสมเพิ่มเส้นใยมากขึ้น อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์จะมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นตามไปด้วย ดังแสดงในรูปที่ 10 เนื่องจากลักษณะอนุภาคของเส้นใยที่ละเอียดรวมถึงอาจมีฝุ่นหรือโลหะปะปนมาจากการกระบวนการบดย่อย สอดคล้องกับการศึกษาก่อนหน้านี้ [4, 6, 19]

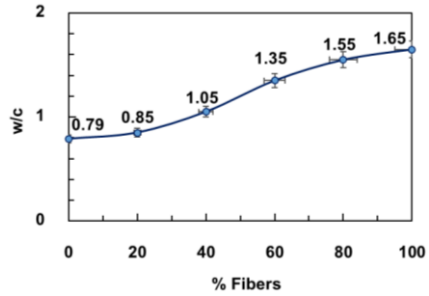


3.2.2 ระยะการไหลเริ่มต้น

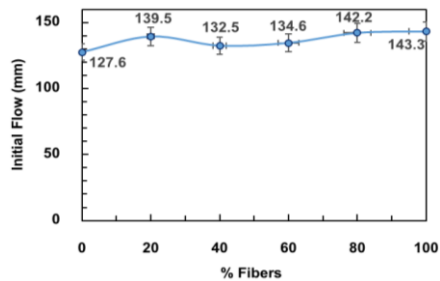
ระยะการไหลเริ่มต้นของมอร์ตาร์ผสมเส้นใยแปรใช้ใหม่จากขยะแผงวงจรพิมพ์สำหรับเวลา 240 ±10 วินาที โดยเส้นผ่าศูนย์กลางของมอร์ตาร์ควบคุม (M0) วัดได้ 127.76 mm เมื่อผสมเส้นใยในปริมาณร้อยละ 20 - 100 ค่าการไหลเริ่มต้นจะอยู่ในช่วง 128.24 – 133.35 mm ดังแสดงในรูปที่ 11 พบว่าระยะการไหลเริ่มต้นของมอร์ตาร์เป็นไปตามเกณฑ์มาตรฐาน ASTM C1708 [17] และ มอก. 3057-2563 [8] กำหนดค่าการไหลเริ่มต้นอยู่ในช่วง 125 - 150 mm จากผลการทดสอบระยะการไหลเริ่มต้นของมอร์ตาร์ผสมเส้นใยแปรใช้ใหม่จากขยะแผงวงจรพิมพ์ มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณผสมเส้นใยเพิ่มขึ้น เป็นผลจากการการเพิ่มปริมาณน้ำในส่วนผสมมากขึ้นซึ่งมอร์ตาร์มีแนวโน้มไม่เป็นเนื้อเดียวกัน [3] นอกจากนี้ความเสียดทานในระหว่างการไหลและคุณลักษณะที่เบาของเส้นใยทำให้ความหนาแน่นของมอร์ตาร์ลดลง ส่งผลให้ระยะของการไหลเพิ่มขึ้นตามไปด้วย [6, 19, 20]

3.2.3 ระยะเวลาการก่อตัว (Setting Time)

จากผลการทดสอบระยะเวลาการก่อตัวของมอร์ตาร์ผสมเส้นใยแปรใช้ใหม่จากขยะแผงวงจรพิมพ์สำหรับมอร์ตาร์ควบคุม (M0) ซึ่งไม่ผสมเส้นใย มีระยะเวลาการก่อตัวเริ่มต้น (Initial Setting Time) 255 นาที และระยะเวลาการก่อตัวสุดท้าย (Final Setting Time) 375 นาที เมื่อผสมเส้นใยในปริมาณร้อยละ 20 – 100 โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์ มอร์ตาร์มีแนวโน้มใช้เวลาในการก่อตัวลดลง โดยระยะเวลาในการก่อตัวเริ่มต้นอยู่ในช่วง 265 – 386 นาที เพิ่มขึ้นร้อยละ 3.92 – 51.37 เมื่อเปรียบเทียบกับมอร์ตาร์ควบคุม ในขณะที่ระยะเวลาการก่อตัวสุดท้ายอยู่



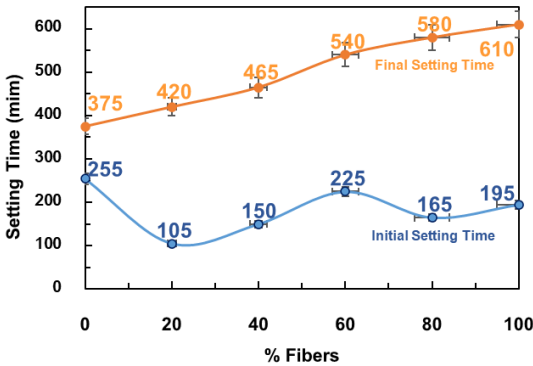
รูปที่ 10 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณเส้นใยกับอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ของมอร์ตาร์



รูปที่ 11 ค่าการไหลเริ่มต้นของมอร์ตาร์ผสมเส้นใย

ในช่วง 420 - 610 นาที เพิ่มขึ้นร้อยละ 12.00 – 62.67 เมื่อเปรียบเทียบกับมอร์ตาร์ควบคุม ดังรูปที่ 12 เนื่องจากผลของความต้องการปริมาณน้ำในส่วนผสมมอร์ตาร์เพิ่มมากเกินไปจนความต้องการ ทำให้เหลือน้ำส่วนเกิน (Free Water) จากการทำปฏิกิริยาไฮเดรชันส่งผลต่อระยะการก่อตัวเพิ่มขึ้น [19]

ทั้งนี้ ตามมาตรฐาน ASTM C1708 [17]และ มอก. 3057-2563 [8] กำหนดระยะเวลาการก่อตัวเริ่มต้นไม่น้อยกว่า 45 นาที และระยะเวลาการก่อตัวสุดท้ายไม่มากกว่า 1,440 นาที เมื่อเปรียบเทียบกับผลการศึกษาในครั้งนี้ พบว่ามอร์ตาร์ผสมเส้นใยแปรใช้ใหม่จากขยะแผงวงจรพิมพ์ในทุกอัตราส่วนผสมมีระยะเวลาการก่อตัวทั้งในช่วงต้นและระยะปลายอยู่ในช่วงมาตรฐานกำหนด



รูปที่ 12 ระยะเวลาการก่อตัวของมอร์ตาร์ผสมเส้นใย

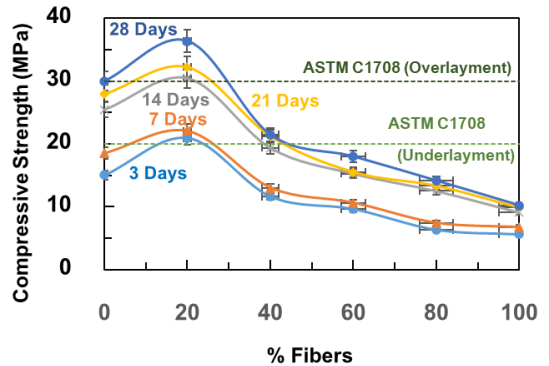
3.3 สมบัติของมอร์ตาร์ในสภาวะแข็งตัว

3.3.1 กำลังอัด

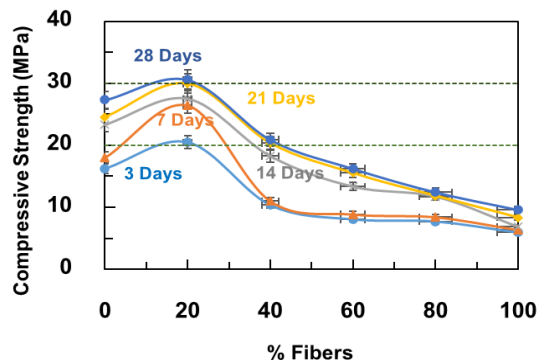
ผลทดสอบกำลังอัดของมอร์ตาร์ผสมเส้นใยแปรไซ้ใหม่จากขยะแผงวงจรพิมพ์ทั้งการบ่มในน้ำและบ่มในอากาศที่อายุ 3, 7, 14, 21 และ 28 วัน ดังแสดงในรูปที่ 13 และ 14 สำหรับมอร์ตาร์เมื่อบ่มในน้ำ กำลังอัดของมอร์ตาร์ควบคุม (M0) มีค่าอยู่ในช่วง 15.04-29.98 MPa ที่อายุการบ่มในช่วง 3-28 วัน เมื่อพิจารณากำลังอัดของมอร์ตาร์ที่อายุ 28 วัน พบว่ามอร์ตาร์ผสมเส้นใยแปรไซ้ใหม่จากขยะแผงวงจรพิมพ์ปริมาณร้อยละ 20 (M20) มีค่ากำลังอัดสูงสุดเท่ากับ 36.35 MPa ซึ่งสูงกว่ามอร์ตาร์ควบคุมร้อยละ 21.24 ในขณะเดียวกันเมื่อผสมเส้นใยมากกว่าร้อยละ 20 เห็นได้ว่ากำลังอัดของมอร์ตาร์มีแนวโน้มลดลง โดยมอร์ตาร์ผสมเส้นใยแปรไซ้ใหม่จากขยะแผงวงจรพิมพ์ปริมาณร้อยละ 100 (M100) มีค่ากำลังอัดต่ำสุดเท่ากับ 10.21 MPa ซึ่งต่ำกว่ามอร์ตาร์ควบคุมร้อยละ 34.05

สำหรับมอร์ตาร์เมื่อบ่มในอากาศ กำลังอัดของมอร์ตาร์ควบคุม (M0) มีค่าอยู่ในช่วง 16.24- 27.32 MPa ที่อายุการบ่มในช่วง 3-28 วัน เมื่อพิจารณากำลัง

อัดของมอร์ตาร์ที่อายุ 28 วัน พบว่ามอร์ตาร์ผสมเส้นใยแปรไซ้ใหม่จากขยะแผงวงจรพิมพ์ปริมาณร้อยละ 20 (M20) มีค่ากำลังอัดสูงสุดเท่ากับ 30.58 MPa ซึ่งสูงกว่ามอร์ตาร์ควบคุมร้อยละ 11.93 ในขณะที่เดียวกันเมื่อผสมเส้นใยมากกว่าร้อยละ 20 เห็นได้ว่ากำลังอัดของมอร์ตาร์มีแนวโน้มลดลง โดยมอร์ตาร์ผสมเส้นใยแปรไซ้ใหม่จากขยะแผงวงจรพิมพ์ปริมาณร้อยละ 100 (M100) มีค่ากำลังอัดต่ำสุดเท่ากับ 9.59 MPa ซึ่งต่ำกว่ามอร์ตาร์ควบคุมร้อยละ 35.10



รูปที่ 13 กำลังอัดของมอร์ตาร์ที่ช่วงอายุ 3, 7, 14, 21 และ 28 วัน เมื่อบ่มในน้ำ



รูปที่ 14 กำลังอัดของมอร์ตาร์ที่ช่วงอายุ 3, 7, 14, 21 และ 28 วัน เมื่อบ่มในอากาศ

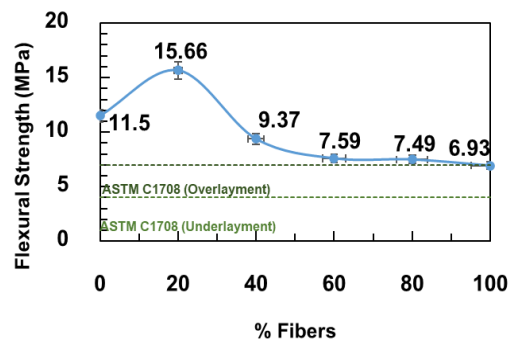
เมื่อผสมเส้นใยร้อยละ 20 ซึ่งเป็นสัดส่วนที่เหมาะสม เนื่องจากผลของเส้นใยที่มีขนาดเล็กกว่าทรายทำให้สามารถเข้าไปเติมแทรกโพรงช่องว่างระหว่างอนุภาคส่วนผสมได้ดีที่สุด ทำให้มีความทึบแน่นและลดปริมาณโพรงในเนื้อmortarส่งผลให้สมบัติทางด้านกำลังจะสูงขึ้น [3-5, 10] ในขณะที่เดียวกันเมื่อเพิ่มผสมเพิ่มปริมาณเส้นใยมากขึ้นจนเกินกว่าปริมาณโพรงช่องว่างที่มี ซึ่งปริมาณเส้นใยเหล่านี้จะเข้ามาเพิ่มปริมาณน้ำในส่วนผสมเพิ่มมากขึ้น ดังจะเห็นได้จากผลในหัวข้อ 3.2.1 ซึ่งส่งผลให้กำลังอัดมีแนวโน้มลดลงรวมถึงลักษณะพื้นผิวเส้นใยที่เรียบทำให้กำลังยึดเกาะระหว่างอนุภาคลดลง ตลอดจนปริมาณน้ำในส่วนผสมเพิ่มขึ้นแปรผันตามปริมาณที่เพิ่มของเส้นใย ส่งผลให้มีน้ำส่วนเกินที่เหลือจากปฏิกิริยาไฮเดรชันระหว่างซีเมนต์กับน้ำระเหยออกไป เมื่อmortarแข็งตัวจะทำให้เกิดรูพรุนในช่องว่างภายในmortarมากขึ้น ส่งผลให้mortarมีสมบัติด้านกำลังลดลง [4-6, 16, 19]

ทั้งนี้ กำลังอัดของmortarตามมาตรฐาน ASTM C1708 [17] และ มอก. 3057-2563 [8] กำหนดกำลังอัดของmortarสำหรับใช้ในงานรองพื้น (Underlayment) และงานเทพื้นหน้า (Overlayment) ต้องไม่น้อยกว่า 20 และ 30 MPa ตามลำดับ เมื่อนำผลการทดสอบมาเปรียบเทียบกับมาตรฐานกำหนด พบว่า mortarmผสมเส้นใยแปรใช้ใหม่จากขยะแผงวงจรพิมพ์ร้อยละ 20 (M20) มีกำลังอัดเป็นไปตามเกณฑ์ที่กำหนด สามารถนำไปใช้งานได้ทั้งการรองพื้นและเทพื้นหน้า ในขณะที่ mortarmผสมเส้นใยแปรใช้ใหม่จากขยะแผงวงจรพิมพ์ร้อยละ 40 (M40) มีกำลังอัดเป็นไปตามเกณฑ์ที่สามารถนำไปใช้ได้เฉพาะงานรองพื้นเท่านั้น ส่วน mortarmผสมเส้นใยแปรใช้ใหม่จากขยะแผงวงจรพิมพ์

มากกว่าร้อยละ 40 ขึ้นไป ไม่สามารถนำไปใช้ในงานเทพื้นระดับได้เนื่องจากมีค่ากำลังอัดต่ำกว่าเกณฑ์มาตรฐานกำหนด

3.3.2 กำลังตัด

ผลการทดสอบกำลังตัดของmortarเมื่อบ่มในน้ำอายุ 28 วัน สำหรับmortarควบคุม (M0) มีค่ากำลังตัดเท่ากับ 11.50 MPa เมื่อผสมเส้นใยในปริมาณร้อยละ 20 - 100 ค่ากำลังตัดจะอยู่ในช่วง 6.93 - 15.66 MPa ดังแสดงในรูปที่ 15 โดยพบว่า mortarmผสมเส้นใยแปรใช้ใหม่จากขยะแผงวงจรพิมพ์ปริมาณร้อยละ 20 (M20) มีค่ากำลังตัดสูงสุดเท่ากับ 15.66 MPa ซึ่งสูงกว่า mortarmควบคุมร้อยละ 36.17 เนื่องจากขนาดของเส้นใยแปรใช้ใหม่จากขยะแผงวงจรพิมพ์ที่มีขนาดเล็กกว่าทำให้เข้าไปอุดช่องว่างภายใน mortarmส่งผลให้มีความทึบแน่นมากขึ้น [3-5] ในขณะที่เดียวกันเมื่อผสมเส้นใยมากกว่าร้อยละ 20 เห็นได้ว่าการอัดของmortarมีแนวโน้มลดลง โดย mortarmผสมเส้นใยแปรใช้ใหม่จากขยะแผงวงจรพิมพ์ปริมาณร้อยละ 100 (M100) มีค่ากำลังอัดต่ำสุดเท่ากับ 6.93 MPa ซึ่งต่ำกว่า mortarmควบคุมร้อยละ 39.74 ทั้งนี้ ผลการศึกษาที่ได้มีแนวโน้มไปในแนวทางเดียวกับผลการทดสอบกำลังอัด [6, 16, 19]



รูปที่ 15 กำลังตัดของmortarmผสมเส้นใย

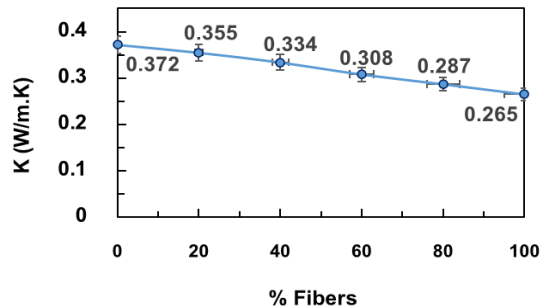


ทั้งนี้ กำลังอัดของมอร์ตาร์ตามมาตรฐาน ASTM C1708 [17] และ มอก. 3057-2563 [8] กำหนดกำลังอัดของมอร์ตาร์สำหรับใช้ในงานเทรองพื้น (Underlayment) และงานเทพื้นหน้า (Overlayment) ต้องไม่น้อยกว่า 4 และ 7 MPa ตามลำดับ เมื่อนำผลการทดสอบมาเปรียบเทียบกับมาตรฐานกำหนด พบว่า มอร์ตาร์ผสมเส้นใยแปรไซ้ใหม่จากขยะแผงวงจรพิมพ์ทุกอัตราส่วนผสม มีค่ากำลังอัดเป็นไปตามเกณฑ์ที่กำหนดสามารถนำไปใช้งานได้ทั้งการเทรองพื้นและเทพื้นหน้า

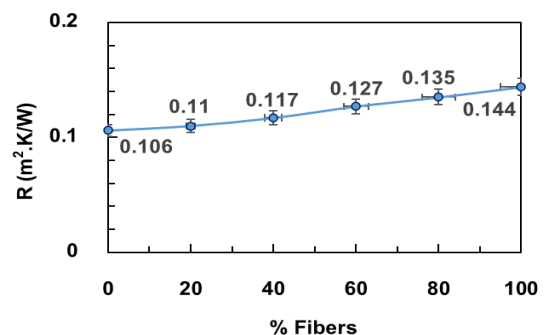
3.4 สมบัติทางด้านความร้อน

ผลการทดสอบสมบัติทางด้านความร้อนของมอร์ตาร์ สำหรับค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน (K value) ของมอร์ตาร์ควบคุม (M0) มีค่า 0.372 W/m.K เมื่อนำมอร์ตาร์ผสมเส้นใยแปรไซ้ใหม่จากขยะแผงวงจรพิมพ์เพิ่มขึ้นจากร้อยละ 20 (M20) ถึง 100 (M100) ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนลดลงอยู่ในช่วง 0.265 - 0.355 W/m.K หรือลดลงร้อยละ 4.56-29.03 เมื่อเปรียบเทียบกับมอร์ตาร์ควบคุมดังแสดงในรูปที่ 16

สำหรับผลการทดสอบการต้านทานความร้อน (R-value) ของมอร์ตาร์ พบว่า มอร์ตาร์ควบคุม (M0) มีค่าการต้านทานความร้อนเท่ากับ 0.106 m².KW เมื่อนำมอร์ตาร์ผสมเส้นใยแปรไซ้ใหม่จากขยะแผงวงจรพิมพ์เพิ่มขึ้นจากร้อยละ 20 (M20) ถึง 100 (M100) ค่าการต้านทานความร้อนเพิ่มขึ้นอยู่ในช่วง 0.110 - 0.144 m².KW หรือเพิ่มขึ้นร้อยละ 3.77-35.85 เมื่อเปรียบเทียบกับมอร์ตาร์ควบคุม ดังแสดงในรูปที่ 17 สอดคล้องกับผลการศึกษาก่อนหน้าที่พบว่า การนำขยะจากแผงวงจรพิมพ์มาผสมรวมในซีเมนต์เพสต์ส่งผลต่อสมบัติทางด้านความร้อนที่ดีขึ้น [19]



รูปที่ 16 สัมประสิทธิ์การนำความร้อนของมอร์ตาร์



รูปที่ 17 ค่าการต้านทานความร้อนของมอร์ตาร์

3.5 การตรวจหาปริมาณโลหะหนักในมอร์ตาร์

สำหรับผลการวิเคราะห์ตรวจหาปริมาณโลหะหนักในมอร์ตาร์นั้น ได้ทำการเลือกมอร์ตาร์ที่มีสมบัติที่ดีที่สุดหรือที่มีค่ากำลังอัดสูงสุดซึ่งได้แก่ มอร์ตาร์ผสมเส้นใยแปรไซ้ใหม่จากขยะแผงวงจรพิมพ์ร้อยละ 20 (M20) โดยทำการตรวจหาปริมาณโลหะหนักที่จำนวน 8 ธาตุ เกณฑ์มาตรฐานที่กำหนดตามประกาศของคณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ (พ.ศ. 2564) เรื่อง กำหนดมาตรฐานคุณภาพดิน [20] ได้แก่ สารหนู (As), แคดเมียม (Cd), โครเมียม (Cr), ทองแดง (Cu), ปรอท (Hg), ตะกั่ว (Pb), แมงกานีส (Mn), และนิกเกิล (Ni) พบว่า มอร์ตาร์ผสมเส้นใยแปรไซ้ใหม่จากขยะแผงวงจรพิมพ์ร้อยละ 20 มีปริมาณโลหะหนักตรวจพบโดยเรียง



จากมากไปหาน้อย ได้แก่ ทองแดง (Cu) จำนวน 279.50 mg/kg, แมงกานีส (Mn) จำนวน 220.83 mg/kg, และปรอท (Hg) จำนวน 0.08 mg/kg ตามลำดับ ส่วนโลหะหนักชนิดอื่นตรวจพบในปริมาณที่น้อยมาก สอดคล้องกับการศึกษาของ Ban et al. [11] พบว่าไม่มีไอออนของโลหะหนักชะละลายออกมาเนื่องจากการถูกยึดตรึงไว้โดยซีเมนต์ไฮเดรต

เมื่อทำการเปรียบเทียบกับผลการวิเคราะห์ปริมาณโลหะหนักกับเกณฑ์มาตรฐานที่กำหนดตามประกาศของคณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ (พ.ศ. 2564) เรื่อง กำหนดมาตรฐานคุณภาพดิน [20] นั้น พบว่ามอร์ตาร์ผสมเส้นใยแปรใช้ใหม่จากขยะแผงวงจรพิมพ์มีปริมาณโลหะหนักอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานที่กำหนดดังแสดงในตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ผลการวิเคราะห์ปริมาณโลหะหนัก

Heavy Metal	Criteria [20] (mg/kg)	In Mortar (mg/kg)	Remark
As	6	LOD	✓
Cd	67	LOD	✓
Cr	17.5	LOD	✓
Cu	2,920	279.50	✓
Hg	22	0.08	✓
Pb	400	LOD	✓
Mn	1,710	220.83	✓
Ni	436.5	LOD	✓

Remark: LOD = Limit of Detection
 ✓ = Lower than the criteria

4. บทสรุป

1. มอร์ตาร์ผสมเส้นใยแปรใช้ใหม่จากขยะแผงวงจรพิมพ์มีความต้องการน้ำในส่วนผสมเพิ่มขึ้นเพื่อคงระยะเวลาไหลเริ่มต้นตามมาตรฐานกำหนด เมื่อปริมาณเส้นใยในส่วนผสมเพิ่มขึ้น โดยระยะเวลาการก่อตัวของมอร์ตาร์มีแนวโน้มเป็นไปในทิศทางเดียวกัน

2. การนำเส้นใยแปรใช้ใหม่จากขยะแผงวงจรพิมพ์มาเป็นส่วนผสมเพิ่มในมอร์ตาร์ ส่งผลให้กำลังอัดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น และมีค่ากำลังอัดสูงสุดเมื่ออัตราส่วนผสมเส้นใยร้อยละ 20 เท่ากับ 35.61 MPa เมื่อบ่มในน้ำที่อายุ 28 วัน หลังจากนั้นกำลังอัดมีแนวโน้มลดลงเมื่ออัตราส่วนผสมเส้นใยมากกว่าร้อยละ 20

3. มอร์ตาร์ผสมเส้นใยแปรใช้ใหม่จากขยะแผงวงจรพิมพ์มีแนวโน้มทางด้านสมบัติความเป็นฉนวนเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณอัตราส่วนผสมเส้นใยเพิ่มขึ้น

4. ปริมาณโลหะหนักส่วนใหญ่ที่ปะปนอยู่ในมอร์ตาร์ผสมเส้นใยแปรใช้ใหม่จากขยะแผงวงจรพิมพ์ร้อยละ 20 นั้น มีค่าเป็นไปเกณฑ์มาตรฐานกำหนดตามประกาศของคณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ

5. อัตราส่วนที่เหมาะสมในการนำเส้นใยแปรใช้ใหม่จากขยะแผงวงจรพิมพ์มาเป็นส่วนผสมเพิ่มในงานมอร์ตาร์ปรับระดับนั้น พบว่าอัตราส่วนผสมเพิ่มไม่เกินร้อยละ 40 สำหรับงานเทรองพื้น (Underlayment) และอัตราส่วนผสมเพิ่มไม่เกินร้อยละ 20 สำหรับงานทับหน้า (Overlayment)

6. ข้อเสนอแนะสำหรับการศึกษาเพิ่มเติมในอนาคต พิจารณาจากอัตราส่วนที่เหมาะสมสามารถนำไปประยุกต์ทำผลิตภัณฑ์คอนกรีต อาทิเช่น อิฐบล็อกซีเมนต์หรือปูนฉาบ เนื่องจากสมบัติทางด้าน



การต้านความร้อนที่ดี และน้ำหนักของวัสดุที่เบาช่วยลดน้ำหนักโดยรวมของโครงสร้างได้อีกด้วย

5. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.ศรัณญา พรหมโคตร อาจารย์ประจำภาควิชาเทคโนโลยีฯ คณะเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยขอนแก่น อาจารย์พงศกร พรหมสวัสดิ์ อาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยรามคำแหง ที่ให้ความอนุเคราะห์ห้องปฏิบัติการ อุปกรณ์เครื่องมือในการทดสอบรวมถึงคำแนะนำวิธีการและขั้นตอนในการทดสอบ ขอขอบคุณบริษัท เจียฮง อินเตอร์ จำกัด คุณวุฒินันท์ หนูทอง และบริษัท มาย คอนกรีต จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์เส้นใย สารเคมีผสมเพิ่ม และสารผสมเพิ่ม ตามลำดับ ตลอดระยะเวลาการทดลอง และผู้สนับสนุนทุกท่านที่ให้ความช่วยเหลือทางด้านข้อมูลและการทดสอบ จนทำให้งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] <https://www.testtech.co.th/th/news/41>. (Accessed on 30 October 2022)
- [2] A. Khymam, Effect of waste printed circuit boards (WPCBs) powder on engineering properties of cement paste, Thesis, Thammasart University, Thailand, 2018. (in Thai)
- [3] V. Marimuthu and A. Ramasamy, Investigation of the mechanical properties of M40-grade concrete with PCB fiber from recycled electronic waste, Journal of Hazardous, Toxic, and Radioactive Waste, 2023, 27(1), 04022034.
- [4] K. Panyawee, S. Kwongpongsagoon, P. Kanjanapiya and C. Tuakta, Study on the properties of cellular lightweight concrete with nonmetallic parts from the process of recycling the remains of electrical circuit boards as an ingredient, The 25th National Civil Engineering Symposium, Proceeding, 2020, STR06, (in Thai)
- [5] K. Sriwatanakul, S. Kwongpongsagoon, P. Kanjanapiya and C. Tuakta, Development of pervious concrete with non-metallic part from recycling of printed circuit boards as constituent, The 25th National Civil Engineering Symposium, Proceeding, 2020, STR08. (in Thai)
- [6] G. Sau-iam and B. Chatveera, Effect of printed circuit board dust on the workability and mechanical properties of self-compacting concrete: A preliminary study, Case Studies in Construction Materials, 2022, 16, e00862.
- [7] Z. Sun, Z. Shen, S. Ma and X. Zhang, Novel application of glass fibers recovered from waste printed circuit boards as sound and thermal insulation material, Journal of Materials Engineering and Performance, 2013, 22, 3140–3146.
- [8] TIS 3057-2563, Standard Specification for Self-Leveling Mortar, 2020. (in Thai)



- [9] R.S. Mahdi, Experimental study effect of using glass fiber on cement mortar, *Journal of Babylon University for Engineering Sciences*, 2014, 22(1), 162-181.
- [10] J.R. Ferrari, R.V. Silva, D.M. Louzada and I.M. Tinti, Reuse of printed circuit boards substrate in the production of mortars, *Technology in Metallurgy, Materials and Mining*, 2022, 19, e2656.
- [11] B.C. Ban, J.Y. Song, J.Y. Lim, S.K. Wang, K.G. An and D.S. Kim, Studies on the reuse of waste printed circuit board as an additive for cement mortar, *Journal of Environmental Science and Health, Part A*, 2005, 40(3), ESE-200046618, 645-656.
- [12] ASTM C150, Standard Specification for Portland Cement, 2012.
- [13] ASTM C778, Standard Specification for Standard Sand, 2002.
- [14] ASTM C494, Standard Specification for Chemical Admixtures for Concrete, 2017.
- [15] ASTM C109, Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in. or [50-mm] Cube Specimens), 2007.
- [16] R. Wang, T.F. Zhang, and P.M Wang, Waste printed circuit boards nonmetallic powder as admixture in cement mortar, *Journal of Materials and Structures*, 2012, 45, 1439–1455.
- [17] ASTM C1708, Standard Test Method for Self-Leveling Mortars Containing Hydraulic Cements, 2016
- [18] ASTM C348, Standard Test Method for Flexural Strength of Hydraulic-Cement Mortars, 2002.
- [19] G. Sau-iam, A. Khymarn, B. Chatveera and N. Makul Cementitious properties of cement paste mixed with laminated powder from electronic waste, *Rajamangala University of Technology Srivijaya Research Journal*, 2021, 13(3), 676-691. (in Thai)
- [20] Quality Standard for Soil, Ministry of Natural Resources and Environment, 2021. (in Thai)

การเพิ่มผลผลิตไก่แช่แข็งในกระบวนการผลิตเครื่องปรุงโรยหน้าอาหารสัตว์เลี้ยง

ทริสิริษา งามวงศ์ ดารัตน์ เดชอำไพ* โกศล น่วมบาง และ นาฎกาญจน์ จักรหาวัณห์

ภาควิชาเทคโนโลยีอุตสาหกรรมเกษตรและการจัดการ, คณะอุตสาหกรรมเกษตร,
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

* ผู้ประสานงานเผยแพร่ (Corresponding Author), E-mail: darat.d@agro.kmutnb.ac.th

วันที่รับบทความ: 10 กรกฎาคม 2565; วันที่ทบทวนบทความ: 22 มีนาคม 2566; วันที่ตอบรับบทความ: 21 เมษายน 2566
วันที่เผยแพร่ออนไลน์: 1 กรกฎาคม 2566

บทคัดย่อ: ออกไก่และสันในไก่ เป็นวัตถุดิบหลักที่ใช้ในการผลิตเครื่องปรุงโรยหน้า (Topping) ในอาหารสัตว์เลี้ยง ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์หลักของบริษัทที่มีกำลังการผลิตเพิ่มขึ้นทุกปี นั้นพบว่าการผลิต Topping ซึ่งประกอบไปด้วย การรับวัตถุดิบมาจากห้องแช่แข็งมาละลายแล้วนำไปต้มหลังจากนั้นก็ทำให้เย็นและนำเข้าเครื่องผลิตไก่เส้น (Flake) เกิดความสูญเสียน้ำหนักของวัตถุดิบหลัก (Drip Loss) เป็นสัดส่วนที่สูง ส่งผลให้ต้นทุนวัตถุดิบสูงขึ้นและทำให้ร้อยละผลผลิต (%Yield) ไม่ได้ตามเป้าหมายที่กำหนด ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อเพิ่มผลผลิตไก่แช่แข็งในกระบวนการผลิตเครื่องปรุงโรยหน้าอาหารสัตว์เลี้ยง โดยนำหลักการ DMAIC มาประยุกต์ใช้และได้นำเสนอวิธีการแก้ปัญหา 3 แนวทาง คือ (1) เปลี่ยนวิธีการละลายไก่จากเดิมเป็นการแช่น้ำในถังละลายปกติ เปลี่ยนเป็นการละลายด้วยไฟฟ้าร่วมกับน้ำและลม (2) จัดทำเวลามาตรฐานในการต้มไก่ให้เหมาะสมกับขนาดของออกไก่และสันในไก่ และ (3) ออกแบบถาดรองเศษเนื้อไก่ใต้เครื่อง Flake แบบใหม่ให้มีขนาดสูงขึ้น ผลการศึกษาพบว่าในการต้มแบบปกติสามารถเพิ่มร้อยละผลผลิตของออกไก่และสันในไก่ได้ 8.55% และ 7.55% ตามลำดับ และสำหรับการต้มแบบแห้งไก่สามารถเพิ่มร้อยละผลผลิตของออกไก่และสันในไก่ได้ 1.70% และ 5.30 % ตามลำดับ

คำสำคัญ: เพิ่มผลผลิต; ประสิทธิภาพ; DMAIC; อาหารสัตว์เลี้ยง; ไก่แช่แข็ง

Increasing Frozen Chicken Yields in the Pet Food Topping Process

Treelarisa Ngamwong, Darat Dechumpai*, Koson Numbang and Nattakan Jakkranuhwat

Department of Agro-Industry Technology and Management, Faculty of Agro-Industry,
King Mongkut's University of Technology North Bangkok

* Corresponding author, E-mail: cburacha@engr.tu.ac.th

Received: 10 July 2022; Revised: 22 March 2023; Accepted: 21 April 2023

Online Published: 1 July 2023

Abstract: Chicken breast and chicken tenderloin are the main raw material used in the topping production of pet food products, which is the core product of the company and also increased production capacity every year. But it was also found in the topping production including chicken thawing, chicken boiling, and flake production, occurring a high percentage of the weight loss of the main raw material (Drip loss). As a result, the cost of raw materials is increased and the percentage yield (%Yield) of the production target cannot be achieved. Therefore, this research aims to increase the yield of frozen chicken in the pet food topping process by applying DMAIC principles. The 3 solutions are proposed; (1) to change the method of thawing the chicken from set up immersion in a normal-water thawing tank change to electric defrosting with water and air, (2) the standard time for the chicken boiling process as the size of chicken breast and chicken tenderloin, and (3) to re-design a tray under the flaking machine. The results showed that in normal boiling, the yield of chicken breasts and tenderloin increased by 8.55% and 7.55%, respectively. In dry-boiling, the yield of chicken breasts and tenderloin increased by 1.70%. and 5.30%, respectively.

Keywords: productivity; efficiency; DMAIC; pet food; frozen chicken



1. บทนำ

การละลายออกไก่อและสันในไก่อแช่แข็งเป็นขั้นตอนการเตรียมวัตถุดิบที่มีความสำคัญอย่างยิ่งก่อนที่จะเข้าสู่กระบวนการแปรรูปเครื่องปรุงโรยหน้าอาหารสัตว์เลี้ยง โดยในปัจจุบันวิธีการละลายไก่อแช่แข็งของกรณีศึกษาคือวิธีการละลายแบบการแช่น้ำเพื่อให้น้ำเป็นตัวกลางในการถ่ายเทความร้อน เนื่องจากเป็นวิธีที่ประหยัดค่าใช้จ่ายและง่ายต่อการดำเนินการ แต่วิธีดังกล่าวต้องใช้เวลาและใช้พื้นที่มาก อีกทั้งเกิดการสูญเสียน้ำหนักของวัตถุดิบระหว่างการละลายเป็นสัดส่วนที่สูง เนื่องจากในระหว่างการละลายผลึกน้ำแข็งขนาดเล็กที่อยู่รอบวัตถุดิบนั้นโครงสร้างเซลล์ในอาหารจะรวมตัวกันเป็นผลึกน้ำแข็งขนาดใหญ่ซึ่งแทรกอยู่ระหว่างโครงสร้างเซลล์และคมของผลึกน้ำแข็งที่เกิดขึ้นจะทำลายผนังโครงสร้างเซลล์ในอาหาร ส่งผลทำให้ของเหลวภายในเซลล์เกิดการสูญเสียน้ำหนักในระหว่างการละลาย (Drip Loss) มากยิ่งขึ้น [1]

สำหรับกระบวนการต้มออกไก่อและสันในปัจจุบันกรณีศึกษามีการต้ม 3 แบบ คือ การต้มแบบปกติ การต้มแบบปานกลาง และการต้มแบบแห้ง โดยการต้มแบบปกติจะมีอุณหภูมิกลางขึ้นไก่อหลังต้มประมาณ 60-65 องศาเซลเซียส สำหรับการต้มแบบปานกลางจะมีอุณหภูมิกลางขึ้นไก่อหลังต้มประมาณ 65-70 องศาเซลเซียส ซึ่งทั้งการต้มแบบปกติและการต้มแบบปานกลางนั้นทางบริษัทกรณีศึกษาได้เปลี่ยนเครื่องต้มจากเดิมเป็นเครื่องต้มแบบ Manual มาเป็นเครื่องต้มแบบ Auto ซึ่งสามารถควบคุมผลผลิตไก่อได้ตามเป้าหมาย แต่สำหรับการต้มแบบแห้งที่มีปริมาณการผลิตที่ไม่คงที่และใช้เวลาต้มนานกว่า โดยเวลาที่ใช้ในการต้มไก่อ

นานเกินไปนี้จะทำให้เนื้อไก่อสูญเสียน้ำหนักเป็นปริมาณมาก บริษัทกรณีศึกษาจึงใช้เครื่องต้มแบบ Manual สำหรับการต้มแบบแห้งเพื่อไม่ให้เกิดความล่าช้าในการผลิต โดยพบอุณหภูมิกลางขึ้นไก่อหลังต้มแบบแห้ง ประมาณ 70-75 องศาเซลเซียส จากนั้นออกไก่อและสันในไก่อที่ผ่านการต้มจะเข้าสู่กระบวนการผลิตไก่อเส้น นอกจากนี้ยังพบว่าเนื้อไก่อที่ตกลงบนถาดใต้เครื่องบดไก่อ หรือที่เรียกกันว่าเครื่อง Flake ซึ่งไม่สามารถนำกลับมาเข้าสู่กระบวนการผลิตใหม่อีกรอบได้ เนื่องจากเนื้อไก่อเหล่านั้นปนเปื้อนจากน้ำล้างพื้นที่กระเด็นขึ้นมา จึงเกิดความสูญเสียที่ต้องทิ้งเนื้อไก่อเหล่านี้

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อเพิ่มผลผลิตไก่อแช่แข็งในกระบวนการผลิตอาหารสัตว์เลี้ยง โดยประยุกต์ใช้หลักการ DMAIC เพื่อทำการศึกษาเปรียบเทียบผลกระทบของวิธีการละลายเนื้อไก่อแช่แข็งด้วยวิธีการละลายแบบใช้น้ำเป็นตัวกลางในการแลกเปลี่ยนความร้อนกับวิธีการละลายโดยใช้กระแสไฟฟ้าร่วมกับน้ำและลม จากนั้นทำการศึกษาวิจัยที่มีผลกระทบต่อ การเปลี่ยนแปลงคุณภาพของเนื้อไก่อในระหว่างการละลาย ซึ่งวิธีการละลายไก่อด้วยไฟฟ้าเป็นวิธีที่สามารถลดการสูญเสียน้ำหนักในระหว่างการละลายได้ อีกทั้งทำการศึกษาการเปลี่ยนแปลงด้านคุณภาพของเนื้อไก่อระหว่างการต้มเพื่อศึกษาเวลาที่เหมาะสมในการต้มไก่อให้เหมาะสมกับขนาดของชิ้นไก่อ และได้ทำการออกแบบถาดรองเศษเนื้อไก่อได้เครื่อง Flake เพื่อป้องกันไม่ให้เนื้อไก่อถูกปนเปื้อนจากน้ำที่อาจจะกระเด็นมาสัมผัสเนื้อไก่อได้ เหล่านี้สามารถลด %Drip loss และส่งผลให้เพิ่ม %Yield ได้อีกด้วย โดยรายละเอียดจะนำเสนอในส่วนถัดไป



2. วิธีการดำเนินงานวิจัย

สำหรับเทคนิคที่ประยุกต์ใช้ในงานวิจัยนี้ งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง และขั้นตอนการดำเนินงาน มีรายละเอียดดังนี้

2.1 การวิเคราะห์ปัญหาด้วย DMAIC

ในปัจจุบันไม่ว่าจะอุตสาหกรรมประเภทใดก็มุ่งที่จะปรับปรุงคุณภาพและพัฒนาเทคโนโลยีทางการผลิตอยู่เสมอ โดยเครื่องมือซิกซ์ซิกม่า (Six sigma) ก็เป็นหนึ่งในเครื่องมือที่เป็นที่นิยมและยอมรับว่ามีประสิทธิภาพในการแก้ปัญหาทางคุณภาพได้อย่างมีประสิทธิภาพ [2-4] โดยการบริหารแบบซิกซ์ซิกม่าจะมุ่งเน้นผลกำไรที่มาจาก การลดต้นทุนความไม่มีคุณภาพ (Cost of Poor Quality) ทั้งเป็นการลดข้อบกพร่อง ลดรอบเวลา ลดความสูญเปล่าและลดต้นทุนการใช้ทรัพยากร โดยมีขั้นตอนการวิเคราะห์ปัญหา เรียกว่า DMAIC ซึ่งเป็นวิธีวิเคราะห์ที่ใช้เทคนิคการคัดกรองตัวแปรในกระบวนการ ทั้งที่เป็นปัจจัยควบคุมได้และควบคุมไม่ได้ จนกระทั่งสามารถสรุปได้ว่าปัจจัยใดเป็นปัจจัยวิกฤตที่ส่งผลกระทบต่อคุณภาพและความพึงพอใจของลูกค้า โดยคัดเลือกหัวข้อปัญหาที่สำคัญและเร่งด่วนที่มีความเชื่อมโยงกับเป้าหมายทางธุรกิจ อีกทั้งเป็นปัญหาที่สามารถทำเสร็จได้โดยไม่ต้องใช้เงินลงทุนมากนักมาแก้ไขก่อน ซึ่งขั้นตอนการวิเคราะห์ปัญหาแบบ DMAIC [5-6] มีรายละเอียด ดังนี้

2.1.1 กำหนดขอบเขตปัญหา (D: Define)

การกำหนดขอบเขตปัญหาคือขั้นตอนการระบุปัญหาและสิ่งที่จำเป็นในการแก้ปัญหาให้สำเร็จ ขั้นตอนนี้จะ เป็นระยะที่จะระบุปัญหาอย่างชัดเจน เป้าหมายสุดท้าย และขอบเขตที่ต้องใช้เพื่อให้บรรลุผลสำเร็จ ซึ่ง

จะช่วยให้เข้าใจกระบวนการอย่างครบถ้วน และทราบว่าปัจจัยใดบ้างที่เป็นจุดวิกฤตต่อคุณภาพ

2.1.2 วัดผลกระบวนการ (M: Measure)

ขั้นตอนวัดผลกระบวนการบอกถึงกระบวนการทำงานทั้งหมดที่เกี่ยวข้องของกับกระบวนการ โดยจะมีเครื่องมือที่ใช้ในการแสดง คือ Macro process map, SIPOC, Detailed process map, และ Measurement System Analysis (MSA) ที่ จะ ช่วย ให้ เข้าใจกระบวนการต่าง ๆ และเห็นภาพได้ชัดเจนยิ่งขึ้น รวมถึงแสดงที่มาของข้อมูลที่ใช้ในการคำนวณตัวชี้วัดของกระบวนการ

2.1.3 วิเคราะห์ (A: Analyze)

ขั้นตอนการวิเคราะห์ควรมีข้อมูลพื้นฐานที่จะสามารถใช้เพื่อเริ่มตัดสินใจเกี่ยวกับกระบวนการได้จากข้อมูลในการสร้างแผนผังของกระบวนการปัจจุบัน เพื่อทำความเข้าใจว่าปัญหาของกระบวนการเริ่มต้นจากที่ใด อาจจะใช่แผนผังก้างปลาและแผนภูมิพาเรโต มาช่วยในการวิเคราะห์ต้นเหตุของปัญหา เมื่อวิเคราะห์สาเหตุมาของปัญหาได้จะมีการพิสูจน์สาเหตุทั้งหมดว่าเป็นจริงหรือไม่ มีผลต่อกระบวนการที่สนใจจริงหรือไม่ เพื่อคัดเลือกสาเหตุไปทำการแก้ไขต่อไป

2.1.4 ปรับปรุง (I: Improve)

ในขั้นตอนการปรับปรุงจะมีการค้นหาวิธีการแก้ปัญหาที่ดีที่สุด การวางแผนในการปรับปรุงเพื่อกำหนดระยะเวลาการดำเนินงาน การปรับปรุงสาเหตุทำได้หลากหลาย บางครั้งการปรับปรุงเพียงอย่างเดียวอาจจะทำให้สามารถแก้สาเหตุของปัญหาได้มากกว่า 1 สาเหตุก็ได้



2.1.5 ควบคุม (C: Control)

การควบคุมคือขั้นตอนสุดท้ายในระเบียบวิธี DMAIC เพื่อให้การแก้ปัญหาที่มีประสิทธิภาพในระยะยาว และไม่ก่อให้เกิดปัญหาเดิมขึ้นอีกซ้ำๆ

2.2 เครื่องมือควบคุมคุณภาพ 7 อย่าง (7 QC Tools)

เครื่องมือควบคุมคุณภาพ (Quality Control Tools) เป็นเครื่องมือทางสถิติที่สำคัญ สามารถนำไปใช้ควบคุมคุณภาพของกระบวนการผลิตได้ ทั้งกรณีคุณสมบัติของผลิตภัณฑ์เป็นค่าวัดเชิงปริมาณและเชิงคุณลักษณะ โดยคุณสมบัติของผลิตภัณฑ์เชิงปริมาณได้จากการชั่ง ตวง วัด เช่น น้ำหนัก ความยาว ปริมาณการ บรรจุ เป็นต้น ส่วนคุณสมบัติของผลิตภัณฑ์เชิงคุณลักษณะได้จากการแบ่งคุณลักษณะของข้อมูลเป็นกลุ่มๆ เช่น มีหรือไม่มีรอยตำหนิ ดีหรือเสีย เป็นต้น โดยเครื่องมือควบคุมคุณภาพ 7 อย่าง ประกอบไปด้วย ใบตรวจสอบกราฟ ฮิสโตแกรม แผนภูมิพาเรโต แผนภาพก้างปลา แผนภาพการกระจาย และแผนภูมิควบคุม เครื่องมือควบคุมคุณภาพแต่ละชนิดหากมีการนำไปใช้ตามความเหมาะสม จะทำให้ผลิตภัณฑ์มีคุณภาพและมีคุณสมบัติตามเกณฑ์มาตรฐานที่กำหนดไว้ [7]

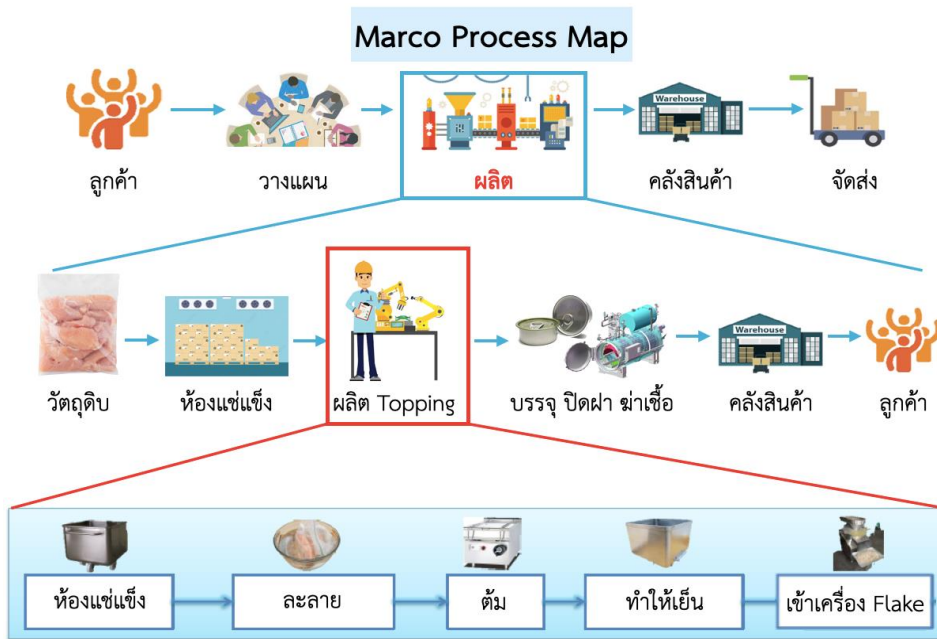
2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

สำหรับการนำหลักการ DMAIC และเครื่องมือ 7 QC tool นั้นพบว่าถูกนำมาใช้เพื่อปรับปรุงและพัฒนากระบวนการผลิตอย่างแพร่หลายไม่ว่าจะในประเทศอย่างในงานวิจัยของ [8] นำ 7 QC Tool ร่วมกับกระบวนการลำดับขั้นเชิงวิเคราะห์ (Analytic Hierarchy Process: AHP) มาใช้เพื่อลดของเสียในกระบวนการผลิตถังบรรจุอากาศสำหรับรถบรรทุก และ [9] ก็ได้นำหลักการ DMAIC มาใช้เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพ

กระบวนการผลิตสินค้า Filament IQF Jumbo Stick ขนาด 500 กรัม ต่อมา[10] ได้ทำการศึกษาการลดความสูญเสียเปล่าที่เกิดจากความล่าช้าในกระบวนการไหลผลิตสินค้าสำเร็จรูปด้วยการประยุกต์ใช้วิธีการ DMAIC ในกรณีศึกษาเครื่องดื่มสำเร็จรูปชนิดผง พบว่าสามารถลดต้นทุนได้ถึง 290,000 บาทต่อปี นอกจากนี้ในงานวิจัยของต่างประเทศก็พบว่า [11] ได้นำหลักการ DMAIC มาประยุกต์ใช้ในการเพิ่มผลผลิตของอุตสาหกรรมแปรรูปอาหารทางตอนใต้ของอินเดีย เช่นกัน อีกทั้งในงานของ [12] ก็ได้นำหลักการ DMAIC มาใช้ในการควบคุมคุณภาพและลดของเสียที่เกิดขึ้นในกระบวนการผลิตมันฝรั่งทอดทำให้บริษัทสามารถเพิ่มผลผลิตได้มากขึ้น ส่งผลต่อต้นทุนวัตถุดิบ แรงงาน และเวลาลดลงอย่างเห็นได้ชัดเจน อีกทั้งมีการปรับปรุงวิธีการทำงานที่ได้มาตรฐานและมีระเบียบแบบแผนมากขึ้นอีกด้วย

2.4 ขั้นตอนการศึกษาและปรับปรุงการผลิต

กรณีศึกษาในงานวิจัยนี้ เป็นบริษัทผู้ผลิตและผู้ส่งออกทูน่ากระป๋อง อาหารทะเลแปรรูป และอาหารสัตว์เลี้ยงชั้นนำของประเทศไทย โดยจะมุ่งเน้นการศึกษาในส่วนของกระบวนการผลิตเครื่องปรุงโรยหน้าอาหารสัตว์เลี้ยง ซึ่งมีขั้นตอนเริ่มต้นตั้งแต่การรับวัตถุดิบเข้ามาเก็บที่ห้องแช่แข็ง (Cold Storage) ก่อนที่จะนำมาผลิต Topping และส่งต่อไปยังแผนกบรรจุ (Filling Can & Pouch) หลังจากนั้นจะทำการปิดฝา (Seaming) และตามด้วยการฆ่าเชื้อ (Retort) จนกระทั่งได้เป็นผลิตภัณฑ์สำเร็จรูปที่จะถูกจัดเก็บไว้ที่คลังสินค้า (Storage) เพื่อรอส่งมอบไปยังลูกค้าต่อไป แสดงรายละเอียดดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 กระบวนการผลิตของโรงงานกรณีศึกษา

อย่างไรก็ตาม ในงานวิจัยนี้กำหนดขอบเขตของการศึกษา คือ ทำการศึกษากระบวนการผลิตอาหารสัตว์เลี้ยงที่แผนกผลิต Topping และใช้เครื่องมือ DMAIC ซึ่งเป็นที่นิยมในการแก้ปัญหาคุณภาพการผลิต [8-12] มาใช้ในการปรับปรุงและเพิ่มผลผลิตไก่แช่แข็ง โดยมีรายละเอียด ดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 D: Define เป็นการศึกษาสภาพปัจจุบันก่อนการปรับปรุงและกำหนดขอบเขตการศึกษา ของกระบวนการผลิตตั้งแต่การรับวัตถุดิบจนถึงส่งมอบวัตถุดิบให้กับฝ่ายบรรจุ โดยตรวจสอบจากร้อยละผลผลิตของอกไก่และสันในไก่ในปัจจุบันมีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 70% ซึ่งยังไม่ได้ตามเป้าหมายที่กำหนดไว้คือ 75%

ขั้นตอนที่ 2 M: Measure ตรวจสอบที่มาของตัวชี้วัดกระบวนการผลิตที่ใช้ในงานวิจัยนี้ ประกอบไปด้วยการรับวัตถุดิบมาจากห้องแช่แข็ง นำมาละลายแล้วนำไปต้ม ทำให้เย็นและนำเข้าเครื่อง Flake โดยสังเกตการทำงานของพนักงานและทำการเก็บข้อมูลน้ำหนักไก่ในแต่ละกระบวนการ เพื่อนำมาคำนวณหาค่าร้อยละ Drip Loss เพื่อวิเคราะห์ประเมินการสูญเสียน้ำหนักของแต่ละขั้นตอนการผลิต และหาแนวทางในการปรับปรุง

ขั้นตอนที่ 3 A: Analyze นำข้อมูลที่ได้มาทำการวิเคราะห์โดยใช้แผนผังก้างปลาเพื่อหาสาเหตุที่แท้จริงของปัญหา จากนั้นทำการพิสูจน์สาเหตุที่เกี่ยวข้องและหามาตรการแก้ไขปรับปรุงต่อไป



ขั้นตอนที่ 4 I: Improve การปรับปรุงกระบวนการ จากผลการพิสูจน์ในขั้นตอน Analyze โดยเน้นการแก้ไข ที่รากของปัญหา

ขั้นตอนที่ 5 C: Control จัดทำมาตรฐานการปฏิบัติงานเพื่อป้องกันการเกิดปัญหาซ้ำในอนาคต โดยให้พนักงานปฏิบัติตามรายละเอียดคู่มือที่กำหนดให้ อย่างเคร่งครัด

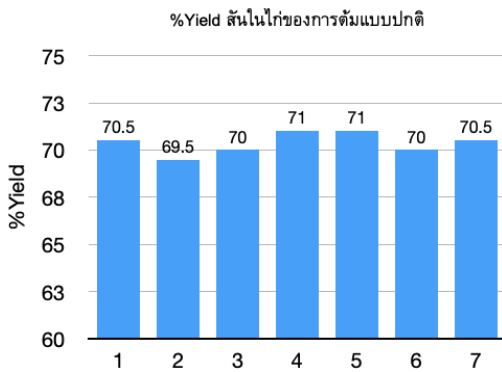
3. ผลการวิจัย/ทดลองและการอภิปรายผล

จากการศึกษาปัญหาของกระบวนการผลิตอกไก่และสันในไก่โดยใช้หลักการ DMAIC ซึ่งเป็นระบบที่เน้น

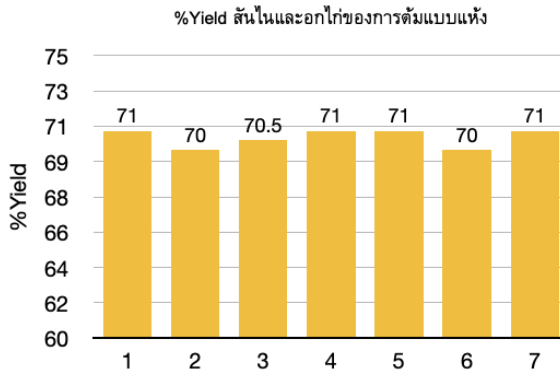
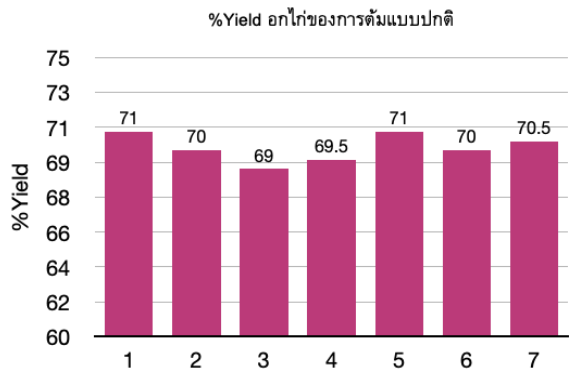
ช่วยแก้ปัญหาลดความผิดพลาดและความสูญเปล่า ซึ่งมีรายละเอียดผลการดำเนินงาน ดังนี้

3.1 ผลผลิตของโรงงานกรณีศึกษา

จากการเก็บข้อมูลร้อยละผลผลิตของอกไก่และสันในไก่ตั้งแต่เดือนพฤศจิกายน 2563 ถึงเดือนพฤษภาคม 2564 พบว่ามี %Yield ของอกไก่และสันในไก่สำหรับการต้มแบบปกติและการต้มแบบแห้งมีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 70% ซึ่งยังไม่ได้ตามเป้าหมายที่กำหนดไว้คือ 75% สรุปว่าควรทำการปรับปรุงกระบวนการผลิตอกไก่และสันในไก่เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานให้สูงขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 2-3



รูปที่ 2 กราฟแท่งแสดง %Yield สันในและอกไก่ของการต้มแบบปกติ (ก่อนปรับปรุง)



รูปที่ 3 กราฟแท่งแสดง %Yield สันในและอกไก่ของการต้มแบบแห้ง (ก่อนปรับปรุง)



3.2 ปัญหาที่ควรปรับปรุงแก้ไข

จากการศึกษาและรวบรวมข้อมูลการผลิตอกไก่และสันในไก่อย่างละเอียด พบว่าขั้นตอนที่ทำให้เกิดการสูญเสียน้ำหนักเกิดจากกระบวนการละลาย โดยการแช่เนื้อไก่ในบ่อน้ำนานเกินไป เนื่องจากไม่มีมาตรฐานกำหนดไว้มาก่อน สำหรับอกไก่ถูกแช่น้ำทิ้งไว้มากกว่า 2 ชั่วโมง และสันในไก่มากกว่า 1 ชั่วโมง กระบวนการต้มที่เกิดจากขั้นตอนในการปรับเวลาการต้มไก่ให้เหมาะสมกับขนาดชิ้นของไก่ และกระบวนการ Flake ในช่วงที่ไก่ถูกกล้าเสี่ยงผ่านสายพานและผ่านเครื่องตรวจจับโลหะ ซึ่งช่วงนี้จะเป็นช่วงที่มีเนื้อไก่ตกในถาดใต้เครื่อง Flake โดยมีรายละเอียดของกระบวนการแปรรูปไก่แช่แข็ง แสดงดังรูปที่ 4

3.3 การวิเคราะห์ปัญหาและแนวทางการแก้ไข

นำข้อมูลที่เก็บได้ทั้งหมดจากกระบวนการผลิตมาทำการวิเคราะห์หาสาเหตุของปัญหาด้วยเครื่องมือแผนผังก้างปลา แสดงดังรูปที่ 5

จากการวิเคราะห์แผนผังก้างปลา พบว่าในกระบวนการผลิตอกไก่และสันในไก่ มีสาเหตุที่ทำให้เกิดการสูญเสียน้ำหนักอยู่ 3 สาเหตุ คือ เกิดจากกระบวนการละลายไก่ กระบวนการต้มไก่ และกระบวนการ Flake ไก่ ซึ่งทุกสาเหตุจะถูกนำมาพิสูจน์สมมติฐาน โดยมีรายละเอียดในการศึกษาวิจัยที่เกี่ยวข้องและการพิสูจน์ ดังนี้

สาเหตุที่ 1: การสูญเสีย น้ำหนักระหว่างกระบวนการละลายไก่ ศึกษา 2 ปัจจัยคือ ปัจจัยเวลาที่ใช้ในการละลายอกไก่ > 2 ชั่วโมง, สันในไก่ > 1 ชั่วโมง โดยใช้เครื่องมือทางสถิติ 1-Sample t-Test ในการทดสอบ ซึ่งกำหนดสมมติฐานในการศึกษาและได้ผลการทดสอบสมมติฐาน ดังนี้

สมมติฐานของอกไก่

H_0 : ใช้เวลาในการละลายอกไก่ ≤ 2 ชั่วโมง

H_A : ใช้เวลาในการละลายอกไก่ > 2 ชั่วโมง

ผลการทดสอบสมมติฐานพบว่า มีค่า P-Value เท่ากับ 0.023 ซึ่งน้อยกว่า 0.05 จึงสรุปว่าสมมติฐานเป็นจริง

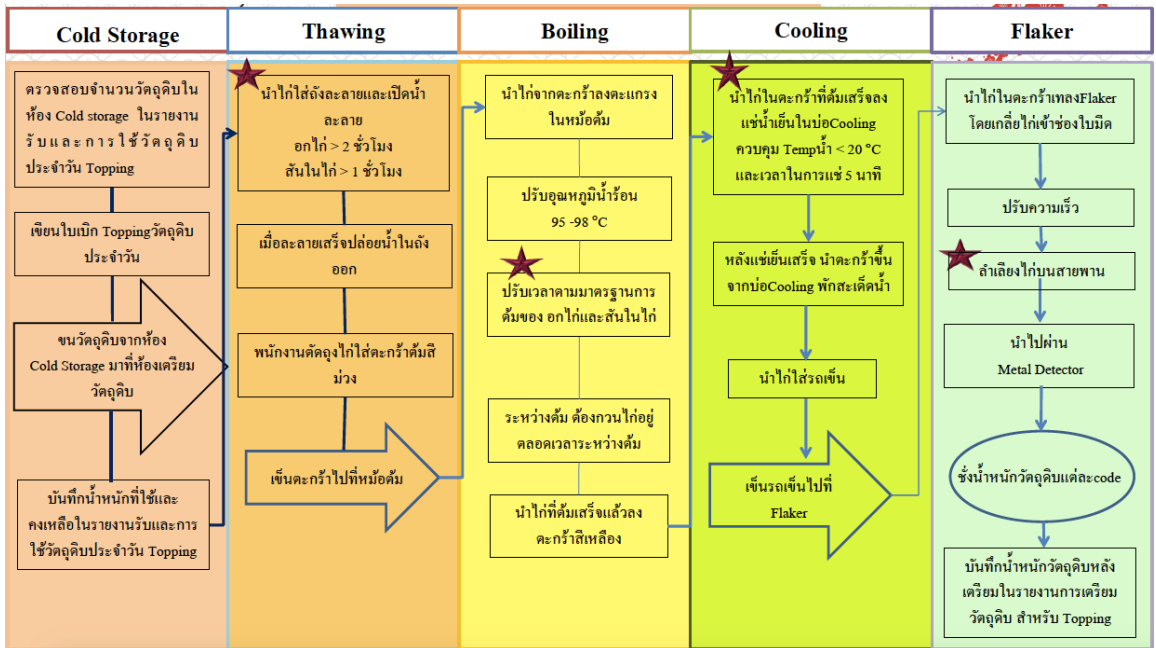
สมมติฐานของสันในไก่

H_0 : ใช้เวลาในการละลายสันในไก่ ≤ 1 ชั่วโมง

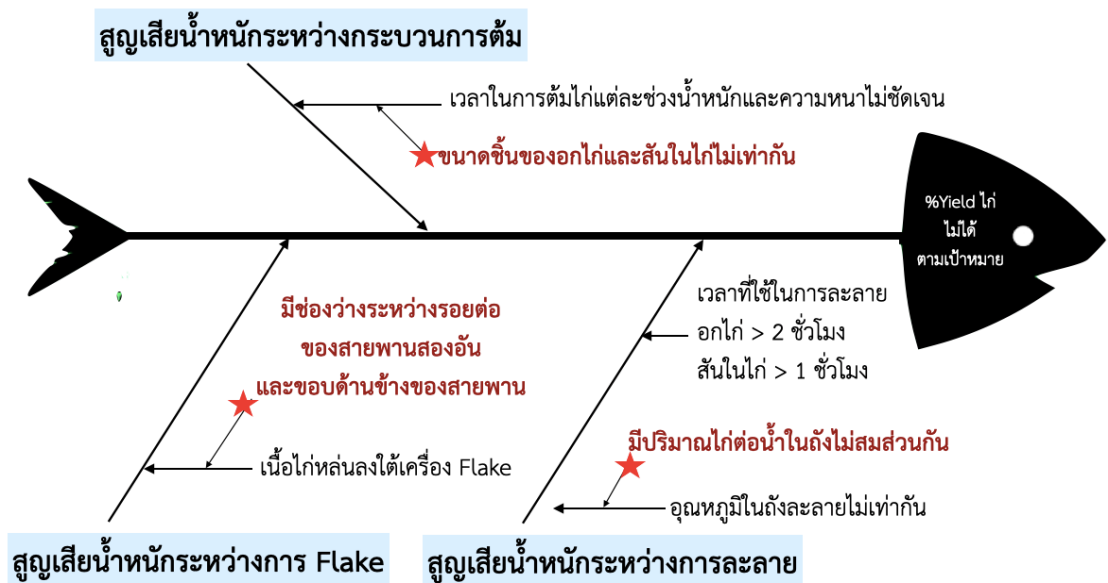
H_A : ใช้เวลาในการละลายสันในไก่ > 1 ชั่วโมง

ผลการทดสอบสมมติฐานพบว่า มีค่า P-Value เท่ากับ 0.008 ซึ่งน้อยกว่า 0.05 จึงสรุปว่าสมมติฐานเป็นจริง

ปัจจัยที่ 2 ทำการศึกษาว่ามีปริมาณไก่ต่อน้ำในถังละลายไม่สมส่วนกัน ทดสอบโดยการสังเกตและเก็บข้อมูล (Observation) โดยตั้งสมมติฐานในการทดสอบเป็นปริมาณไก่ในถังละลายกับน้ำไม่สมดุลกันจริงหรือไม่ จากข้อมูลพบว่าปริมาณไก่ต่อน้ำในถังละลายไม่สมดุลกันจริง สรุปว่าสมมติฐานเป็นจริง จึงเปลี่ยนวิธีการละลายจากแบบแช่ในอ่างน้ำเป็นการใช้การละลายด้วยไฟฟ้าแทน (Thermoacoustic Thawing) เพราะการละลายไฟฟ้าจะเร่งการเปลี่ยนเฟสของน้ำแข็งให้มีระเบียบมากขึ้นและเร่งการถ่ายเทความร้อนจากภายในเนื้อไก่ ส่งผลให้เกิดการสูญเสีย น้ำหนักระหว่างการละลายลดลง กลไกละลายด้วยไฟฟ้าเมื่อเทียบกับกลไกการถ่ายเทความร้อนแบบธรรมชาติ พบว่าการประยุกต์ใช้ระบบไฟฟ้าเพื่อการละลายมาใช้ในการละลายอาหารแช่แข็งจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการละลายได้ [13]



รูปที่ 4 รายละเอียดกระบวนการแปรรูปไก่แช่แข็ง



รูปที่ 5 การวิเคราะห์แผนผังก้างปลา



สาเหตุที่ 2: เกิดการสูญเสียน้ำหนักในระหว่างกระบวนการต้มไก่ ปัจจัยที่ศึกษาคือ ขนาดชิ้นของอกไก่และสันในไก่ที่ขนาดไม่เท่ากันของแต่ละ Supplier ส่งผลทำให้เวลาที่ใช้ในการต้มไก่ไม่สม่ำเสมอ ทำให้การทดลองโดยสุ่มซึ่งน้ำหนักและวัดขนาดของไก่แต่ละ Supplier และน้ำหนักไก่หลังละลายมาวิเคราะห์ในโปรแกรม Minitab โดยใช้วิธีเปรียบเทียบหาความแตกต่างโดย One Way Anova

กำหนดสมมติฐาน

$H_0: \mu_A = \mu_B = \mu_C = \mu_D = \mu_E$

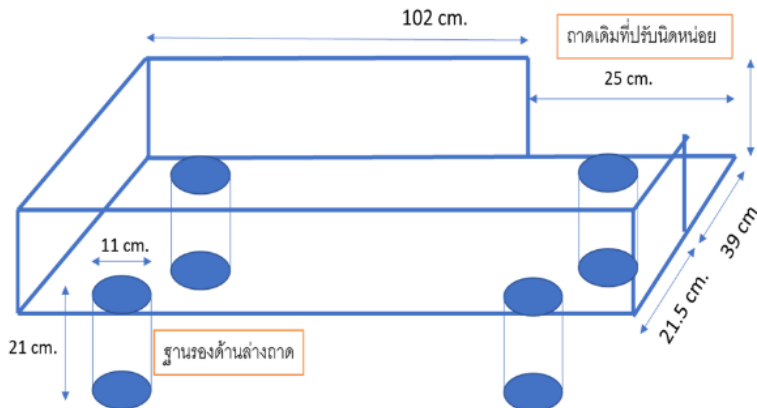
H_A : มีอย่างน้อย 1 คู่ที่แตกต่างกัน

โดยกำหนดให้ A,B,C,D และ E คืออกไก่และสันในไก่ที่มีขนาดไม่เท่ากันของแต่ละ Supplier สำหรับการทดสอบสมมติฐานเปรียบเทียบความแตกต่าง โดยใช้โปรแกรม Minitab พบว่ามีค่า P-Value เท่ากับ 0.000 ซึ่งน้อยกว่า 0.05 จึงปฏิเสธ H_0 คือขนาดชิ้นและน้ำหนักของอกไก่และสันในไก่ของแต่ละ Supplier มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05 ทำให้ใช้เวลาในการต้มไก่ไม่สม่ำเสมอซึ่งส่งผลให้ %Drip Loss เกิดขึ้นมากตามไปด้วย

สาเหตุที่ 3: การสูญเสียน้ำหนักระหว่างกระบวนการ Flake ไก่ พบเนื้อไก่หล่นลงบนถาดได้เครื่อง Flake และมีการปนเปื้อน ทดสอบสมมติฐานโดยใช้ Observation สมมติฐานในการทดสอบคือมีเศษเนื้อไก่ตกลงใต้เครื่อง Flake ที่ได้รับการปนเปื้อนจากน้ำชะล้างพื้นจริงหรือไม่ ผลการทดสอบพบว่ามีเศษเนื้อไก่ตกใต้เครื่อง Flake และปนเปื้อนจริง แสดงว่าสมมติฐานเป็นจริง จึงทำการแก้ไขโดยออกแบบถาดรองเศษเนื้อไก่ใต้เครื่อง Flake แบบใหม่ให้มีขนาดสูงขึ้นจากเดิมอีก 10 เซนติเมตร ซึ่งจะสูงชิดกับด้านล่างของเครื่อง Flake พอดี แสดงดังรูปที่ 6 จากการพิสูจน์ทั้ง 3 สาเหตุสามารถสรุปมาตรการแก้ไข ได้ดังแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 สรุปมาตรการแก้ไขปัญหา

ปัญหา	การวิเคราะห์ทางสถิติ	มาตรการแก้ไข
1. สูญเสียน้ำหนักในกระบวนการละลายไก่	1-Sample t-Test	เปลี่ยนการละลายเป็นแบบการละลายด้วยไฟฟ้าร่วมกับน้ำและลม
2. สูญเสียน้ำหนักในการต้มไก่	One Way Anova	สร้างมาตรฐานเวลาในการต้มไก่แบบแห้ง
3. สูญเสียน้ำหนักในการ Flake ไก่	Observation	ทำอุปกรณ์รองเศษเนื้อไก่ในชั้นตอน Flake ขึ้นมาใหม่



รูปที่ 6 ถาดรองเศษเนื้อไก่หลังปรับปรุง



3.4 ผลการปรับปรุง

ผลการปรับปรุงแก้ไขและข้อมูลเปรียบเทียบทั้งก่อนและหลังการดำเนินการของทั้ง 3 มาตรการ ดังนี้

มาตรการที่ 1: การละลายด้วยไฟฟ้าร่วมกับน้ำและลม การเปลี่ยนวิธีในการละลายจากแบบละลายไก่อด้วยการแช่น้ำเป็นการละลายไก่อด้วยไฟฟ้าร่วมกับน้ำและลม ทำให้ลด %Drip Loss หลังละลายลงจากเดิมคิดเป็น 19% เพราะการละลายแบบใช้ไฟฟ้าร่วมกับน้ำและลมมีหลักการทำงานคือ ไก่อแห้งแข็งหรือผลึกน้ำแข็งที่อยู่ด้านในและรอบนอกของไก่อจะมีพันธะที่เชื่อมระหว่างโมเลกุลคือพันธะไฮโดรเจน เมื่อได้รับความร้อนที่มาจากน้ำที่เติมเข้าไปในถังละลายจะทำให้พันธะไฮโดรเจนถูกทำลาย ผลึกน้ำแข็งจึงยุบตัวเกิดการเปลี่ยนสถานะจากของแข็งเป็นของเหลว ซึ่งช่วงนี้จะมีการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากเยื่อหุ้มเซลล์ของไก่อฉีกขาดเมื่อตอนที่ยังคงสถานะเป็นน้ำแข็ง เมื่อละลายจะทำให้หน้าที่อยู่ในเนื้อไก่อละลายออกมาด้วยหากยิ่งใช้เวลานานไก่อจะสูญเสียน้ำหนักมากตามไปด้วย

แต่การละลายโดยใช้ไฟฟ้าร่วมกับน้ำและลมจะทำให้เมื่อไก่อเริ่มละลายนั้นในขณะเดียวกันโปรตีนที่อยู่ในเนื้อไก่อเมื่อเจอกับน้ำจะเกิดการแตกตัวเป็นกรดอะมิโนซึ่งในโครงสร้างของกรดอะมิโนจะมีประจุอยู่ เมื่อมาเจอกับกระแสไฟฟ้าที่ปล่อยประจุออกมาโดยประจุลบจากขั้วไฟฟ้าจะไปจับกับประจุบวกของไก่อและประจุบวกจะไปจับกับประจุลบ เมื่อเป็นเช่นนั้นจะเกิดแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอนุภาคของไก่อกับไฟฟ้าทำให้เกิดพลังงานความร้อนและไก่อก็จะดูดพลังงานความร้อนนี้เข้าไป ส่งผลให้ไก่อเกิดการละลายได้เร็วกว่าการละลายโดยแช่น้ำเพียงอย่างเดียว โดยผลที่ได้จากการเปลี่ยนวิธีการละลายเป็นการละลายแบบไฟฟ้า พบว่า สามารถลด %Drip Loss

ของอวกไก่อจากเดิมมีค่าเฉลี่ย คือ 2.00% ลดเหลือ 0.89% และสำหรับสันในไก่อมีค่าเฉลี่ย %Drip Loss จากเดิม 0.57% ลดลงเหลือ 0.01% หรือสามารถคิดเป็นร้อยละการลดลงของ %Drip Loss สำหรับอวกไก่อและสันในไก่อคือ 55.50% และ 98.25% ตามลำดับ ดังตารางที่ 2

มาตรการที่ 2: การสร้างมาตรฐานเวลาในการต้มให้เหมาะสมกับความหนาและน้ำหนักของไก่อ สำหรับการต้มแบบแห้งทำการปรับปรุงโดยปรับลดเวลาในการต้มไก่อลงจากข้อมูลปัจจุบันทำการต้มสันใน 5 นาที สำหรับอวกไก่อที่มีน้ำหนัก 190–355 กรัม/ชิ้น จะใช้เวลาต้ม 18 นาที และอวกไก่อที่มีน้ำหนัก 356–500 กรัม/ชิ้น ใช้เวลาต้ม 24 นาที และไม่มีการ Cooling ไก่อทุกประเภทหลังต้มทำให้น้ำหนักไก่อสูญเสียหลังการต้มเป็นปริมาณมาก

ดังนั้น จึงทำการปรับปรุงโดยทดลองลดเวลาต้มไก่อลงและตรวจสอบความสุกของชิ้นไก่อโดยวัดอุณหภูมิใจกลางชิ้นไก่อว่าอยู่ในระดับที่ตั้งไว้คือ 70-75% แล้วหรือไม่ร่วมกับเพิ่มการ Cooling ไก่อทุกประเภท หลังต้ม 2 นาที เพื่อยับยั้งความร้อนในชิ้นไก่อป้องกันไม่ให้ชิ้นไก่อสุกจนเกินไป (Overcook) จะช่วยทำให้เส้นใยกล้ามเนื้อไก่อถูกทำลายน้อยลง ส่งผลให้เนื้อไก่อมีความสามารถในการอุ้มน้ำเพิ่มมากขึ้น [14-15] ทำให้ได้เวลามาตรฐานในการต้มไก่อขึ้นมาใหม่ โดยมีเวลาสำหรับการต้มสันในไก่อ อยู่ที่ 4 นาที อวกไก่อที่มีน้ำหนักอยู่ในช่วง 190-250 กรัม/ชิ้น ทำการต้ม 14 นาที และขนาด 251-355 กรัม/ชิ้น ต้ม 15 นาที และขนาด 356-500 กรัม/ชิ้น คงเวลาการต้มเท่าเดิมที่เวลา 24 นาที เนื่องจากเป็นเวลาดต้มไก่อที่ทำให้ชิ้นไก่อสุกพอดีที่วัดอุณหภูมิใจกลางไก่อได้ 70-75 องศาเซลเซียสแล้ว จึงทำให้มีร้อยละการสูญเสียน้ำหนักไก่อลดน้อยลง ส่งผลให้ %Yield เพิ่มมากขึ้น สำหรับไก่อทุกประเภทดังตารางที่ 3



ตารางที่ 2 การเปรียบเทียบ %Drip Loss

ข้อมูล	การเกิด Drip Loss		
	ก่อน	หลัง	%การปรับปรุง
อกไก่	2.00%	0.89%	55.50%
สันในไก่	0.57%	0.01%	98.25%

ตารางที่ 3 เปรียบเทียบการปรับปรุงเรื่องเวลาการต้ม

น้ำหนัก (กรัม)	ก่อนปรับปรุง			หลังปรับปรุง		
	เวลาต้มไก่ (นาที)	เวลา Cooling (นาที)	%Yield	เวลาต้มไก่ (นาที)	เวลา Cooling (นาที)	%Yield
40-70	5	-	69	4	2	76
190-250	18	-	67	14	2	77
251-355	18	-	67	15	2	78
356-500	24	-	72	24	2	75

มาตรการที่ 3: ออกแบบถาดรองเศษเนื้อไก่ให้สูงขึ้น ผลที่ได้คือเมื่อถาดรองสูงขึ้นน้ำจะไม่กระเด็นโดนไก่ซึ่งสามารถยืดอายุการเสื่อมเสียของไก่ลงได้ เมื่อนักงานมาตรวจเช็คไก่ก็พบว่ากลิ่นของไก่จะอยู่ในสภาพที่ดีและสามารถนำกลับไปต้มใหม่ได้ ทำให้เศษเนื้อไก่ที่ไม่สามารถนำกลับไปต้มใหม่ลดลงเหลือเพียง 0.08 กิโลกรัมต่อวัน หรือคิดเป็นร้อยละการลดลง 94.63% แสดงดังตารางที่ 4

ตารางที่ 4 เปรียบเทียบเศษเนื้อไก่ได้เครื่อง Flake ก่อนและหลังปรับปรุง

เศษเนื้อไก่ที่ต้องทิ้ง (กิโลกรัมต่อวัน)		
ก่อนปรับปรุง	หลังปรับปรุง	ร้อยละการลดลง
1.49	0.08	94.63%

4. บทสรุป

จากการศึกษากระบวนการผลิตเครื่องปรุงโรยหน้าอาหารสัตว์เลี้ยง อันประกอบไปด้วยกระบวนการรับวัตถุดิบจากห้องแช่แข็ง นำมาละลาย แล้วนำไปต้มทำให้เย็นและนำเข้าเครื่อง Flake เพื่อเพิ่ม %Yield ของไก่แช่แข็ง โดยนำหลักการ DMAIC มาประยุกต์ใช้และได้นำเสนอวิธีการแก้ปัญหา 3 แนวทาง คือ (1) เปลี่ยนวิธีการละลายไก่จากเดิมเป็นการแช่น้ำในถังละลายปกติ เปลี่ยนเป็นการละลายด้วยไฟฟ้าร่วมกับน้ำและลม (2) จัดทำเวลามาตรฐานในการต้มไก่ให้เหมาะสมกับขนาดของอกไก่และสันในไก่ และ (3) ออกแบบถาดรองเศษเนื้อไก่ได้เครื่อง Flake แบบใหม่ให้มีขนาดสูงขึ้นสำหรับการต้มแบบปกติ ผลการศึกษาพบว่าสามารถเพิ่มร้อยละผลผลิตของอกไก่และสันในไก่ได้ 8.55% และ 7.55% ตามลำดับ และสำหรับการต้มแบบแห้งไก่สามารถเพิ่มร้อยละผลผลิตของอกไก่และสันในไก่ได้ 1.70% และ 5.30% ตามลำดับ

อย่างไรก็ตาม สำหรับกระบวนการผลิตเครื่องปรุงโรยหน้าอาหารสัตว์เลี้ยงของบริษัทกรณีศึกษาที่พบว่ามี ความสูญเสียเกิดขึ้นอยู่บ้าง นั่นก็หมายความว่ายังมีโอกาสที่จะสามารถพัฒนาและปรับปรุงให้ดีขึ้นได้ หากเพียงแต่ผู้ที่มีส่วนเกี่ยวข้องมองเห็นความสำคัญในการที่จะพัฒนาให้กระบวนการผลิตมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น จัดตั้งทีมงานเพื่อทำความเข้าใจปัญหาที่เกิดขึ้น ทำการศึกษากระบวนการและเลือกเครื่องมือที่เหมาะสม เพื่อนำมาใช้แก้ปัญหาอย่างจริงจัง ก็จะส่งผลให้เกิดผลลัพท์อย่างเป็นรูปธรรมได้ อย่างไรก็ตามสำหรับแนวทางที่นำเสนอไปทั้งหมดนั้นต้องมีการควบคุมและติดตามผลอย่างสม่ำเสมอร่วมด้วย เนื่องจากเมื่อเวลาผ่านไปปัจจัยที่เกี่ยวข้องอาจจะมีการเปลี่ยนแปลงได้



5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณกรณีศึกษาที่ให้โอกาสนักศึกษาปฏิบัติสหกิจศึกษาในครั้งนี้ และขอขอบคุณคณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ วิทยาเขตปราจีนบุรี ที่ให้ความช่วยเหลือในการปฏิบัติสหกิจศึกษาในครั้งนี้จนสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] J.S. Roberts, O. Balaban, R. Zimmerman and D. Luzuriaga, Design and testing of a prototype ohmic thawing unit, *Journal Computers and Electronics in Agriculture*, 1998, 19, 211–222.
- [2] P.S. Pande, R. Neuman and R.R. Cavanagh, *The six sigma way: How GE, motorola and other top companies are honing their Performance*, McGraw-Hill, NY, 2000.
- [3] J. Antony, Six sigma in the UK service organizations: Results from a pilot survey, *Managerial Auditing Journal*, 2004, 19(8), 1006-1013.
- [4] D.A. Edward and J. Maleyeff, The integration of lean management and Six Sigma. *The TQM Magazine*, 2005, 17(1), 5-18.
- [5] J. Antony and R. Banuelas, Key ingredients for effective implementation of six sigma program. *Measuring Business Excellence*, 2002, 6(4), 20-27.
- [6] J. Antony and C. Fergusson, Six sigma in the software industry: Results from a pilot study. *Managerial Auditing Journal*, 2004, 19(8), 9-11.
- [7] N. Supphachai, *Quality control, Se-education Public company Limited*, Bangkok, 2008. (in Thai).
- [8] K. Mongkol, Application of analytic hierarchy process to select quality improvement for defect reduction projects: A case study of air tank manufacturer, *Journal of Engineering, RMUTT, Rajamangala University of Technology Thanyaburi*, 2018, 16(2), 71-83. (in Thai).
- [9] P. Sripuwong, Increasing efficiency productivity of filament IQF jumbo stick packing size 500 g., Thesis, Siam University, Thailand, 2018. (in Thai).
- [10] R. Pakkanan and R. Puntaporn, Reduce waste of delayed on process powder beverage loading by apply DMAIC case study of powder beverage industry, *Journal of Marketing and Management*, 2019, 6(2), 67-81. (in Thai).
- [11] N. Nikhil, P.G. Saleeshyab and H. Priya, Bottleneck Identification and Process improvement by lean Six Sigma DMAIC methodology, *Journal Materials Today: Proceedings*, 2020, 24, 1217–1224.



- [12] M.H.F. Arifin, S.A Mustaniroh and S. Sucipto, Application of the Six Sigma DMAIC in quality control of potato chips to reduce production defects, *Earth and Environmental Science*, 2021, 924, 012056.
- [13] T.J. Mason, L. Paniwnyk, J.P. Lorimer. The uses of ultrasound in food technology, *Ultrasonics Sonochemistry*, 1996, 3, 253-260.
- [14] R.Y. Murphy and B.P. Marks, Effect of meat temperature on properties, texture, and cook loss for ground chicken breast patties, *Poultry Science*, 2000, 79(1), 99-104.
- [15] S. Wattanachant, S. Benjakul and D. A. Ledward, Effect of heat treatment on changes in texture, structure, and properties of Thai indigenous chicken muscle, *Food Chemistry*, 2005, 93(2), 337-348.

Biogas for the use as Fuel in Sour Tamarind Cube Manufacture of OTOP in Duang Thong District, Phetchabun Province

Sermsak Thipwong*, Suwicha Phuttarat, Nisit Ong-art

Program in Industrial Electrical Technology, Faculty of Agricultural and Industrial Technology, Phetchabun Rajabhat University

* Corresponding author, E-mail: sermsak.thi@pcru.ac.th

Received: 22 September 2022; Revised: 21 March 2023; Accepted: 25 April 2023

Online Published: 3 July 2023

Abstract: The goal of this project is to design and construct a gas purification system and a gas compressing unit for biogas, an eco-friendly fuel used to produce sour tamarind at the OTOP manufacturing facility in Duang Thong District, Phetchabun Province. The first aim is to study and build purifying scrubbing equipment. A scrubbing device is a type of gas purification system used to separate raw biogas and remove pollutants as it exits the digester. Its filter parts are made of carbon dioxide (CO₂), water vapour (H₂O), and hydrogen sulfide (H₂S). The second step is to build and test a machine for compressing pure biogas into a gas tank. This machine includes a compressor and a metering system controlled by an electric device. The last step is to conduct a scrubbing test and an examination of the proper biogas output. The results of the test and analysis found that up to 98.0% of the biogas produced by the scrubber is Methane (CH₄) gas. The remaining 2 percent is other impurities or compounds from raw biogas, which could potentially be removed. The average test result of filling the gas tank with the gas each time revealed that it could hold 0.2 kilograms of gas, consumed 0.037 kWh of electricity, took 12 minutes and 23 seconds to fill, and could bake 125 kilograms of tamarinds in 1 hour and 20 minutes. The result of low-cost solar radiation protection drying technology transfer at Duang Thong Community Enterprise Group in Phetchabun Province is based on the demonstration of baking at the enterprise group and the delivery of knowledge about the bakers to 20 group members. All three aspects of the assessment had an average of 4.7 out of 5. which shows satisfaction at the highest level.

Keywords: Raw Biogas; Biogas Scrubbing; Sour Tamarind Cube manufacturing



1. Introduction

The sour tamarind cube product has been the best of OTOP (One Tambon One Product) in Duang Thong district, Phetchabun Province, from 2019 to 2021. One of the important processes for sour tamarind cube manufacturing is the tamarind boiling process. Normally, the tamarind boiling process in OTOP Duang Thong would require a 15-kilogram LPG gas tank for every 1000 kilograms of sour tamarind per day. The use of LPG gas is the cause of the rising cost of OTOP Duang Thong manufacturing. Currently, biogas technology is one of the alternative energy sources and is becoming the best choice of fuel for cooking, such as boiling, burning, and drying, in rural or developing communities. Biogas can be produced through a process called biogas digester by collecting organic wastes in rural areas [1].



Fig. 1 Elastic balloon containing raw biogas

The pig farmers in villages nearby the tamarind processing group have been collecting pig biogas by covering pig manure pits with PE plastics, which create elastic balloons containing raw biogas, as shown in Fig. 1. These farmers could only use the pig biogas for household cooking; any unused biogas would be discarded. Therefore, the research team proposed the idea of reserving the unused biogas in gas tanks, which is later used for steam heating the tamarind in Doung Thong Group manufacturing.

The process of biogas production is a simple and low-cost technology that encourages a circular economy and healthy cooking. It can also be used in household cooking applications since biogas is a clean-burning fuel [2]. However, the disadvantage of biogas fuel is the need for a pre-purification process to remove impurities such as carbon dioxide, nitrogen, water vapour, and hydrogen sulfide that came along with the digester gas, as shown in Table-1, including sulfide (H_2S), nitrogen (N_2), carbon dioxide (CO_2), and water vapour (H_2O). These impurities are caused by reducing heat and increasing the capacity of the biogas tank [3].

As a result, the goal of this research is to create purer CH_4 gas filtration before filling it into gas tanks and using the gas as fuel in the tamarind baking process to reduce the cost of tamarind production for the Duang Thong Community Enterprise Group.

**Table 1** Substances of raw biogas from anaerobic digestion processes [4]

Substance of Biogas	Percentage of Biogas (%)
Methane (CH ₄)	50-60
Carbon Dioxide (CO ₂)	34-38
Nitrogen (N ₂)	0-5
Water Vapour (H ₂ O)	6
Hydrogen Sulfide (H ₂ S)	trace

2. Methods and Materials

2.1 Methods of Purifying and Compressing Biogas

The conceptual design of the purifying and compressing biogas system for use as fuel in the OTOP Duang Thong district is shown in Fig. 2. First, starting at the elastic balloon on the right, this corrects raw biogas and connects to the scrubbing system via PVC pipe outlets. The scrubbing system consists of three filter parts to separate and remove impurities, which are the input part or carbon dioxide filter, followed by a water vapour filter for water vapour removal, and the final part the hydrogen sulfide filter is the output part of the scrubbing system. Second, set up the gas compressing unit, which consists of a compressor, pressure switch, and pressure gate, then connect it to the output pipe of the hydrogen sulfide filter part. Finally, compress pure biogas into an LPG gas tank for use as fuel [5].

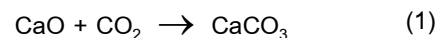
2.2 Materials of Impurities and Biogas Compressing System

2.2.1 Scrubbing System

The scrubbing system was designed for raw biogas purification to separate the substance of raw biogas and remove impurities produced by the digester. The scrubbing system is made up of three major components, which are as follows [3]: (1) Part of the carbon dioxide (CO₂) filter (2) Water vapor (H₂O) filter component and (3) Filter for hydrogen sulfide (H₂S). The materials of scrubbing in each part are as follows:

2.2.1.1 Carbon Dioxide (CO₂) Filter Part

This part is an input to a scrubbing system made from an enclosed PVC pipe, with a diameter of 10.24 cm and a length of 70 cm, which contains calcium carbonate and water at the site shown in Fig. 3. It is used to transform the carbon dioxide in raw biogas into calcium carbonate (CaCO₃) form. Calcium carbonate reacts with carbon dioxide into calcium carbonate form. The chemical reactions are as follows: (1) [6].



2.2.1.2 Water Vapour Filter Part

The water vapour or moisture filter is the second scrubbing part made of metal enclosed in a cylinder with a tube shown in Fig. 4. The inside of the Drier filter contains substances with hygroscopic properties such as silica gel, calcium sulfate, and alumina gel [7].

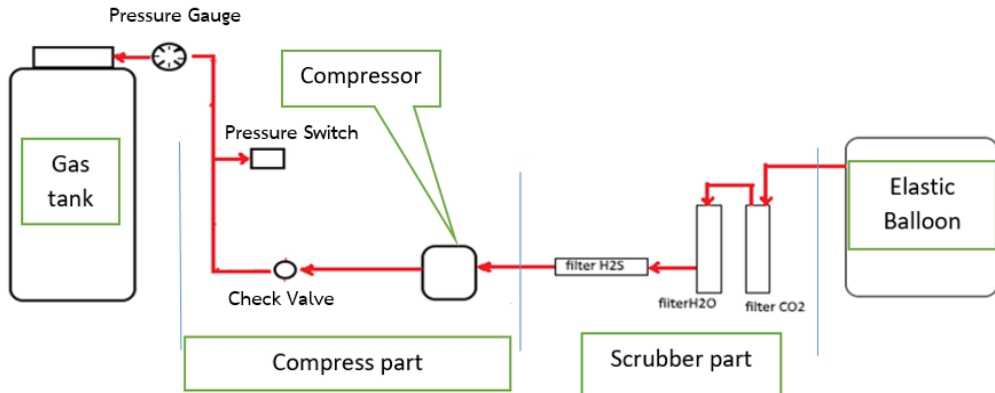


Fig. 2 Conceptual of scrubbing and compressing biogas system

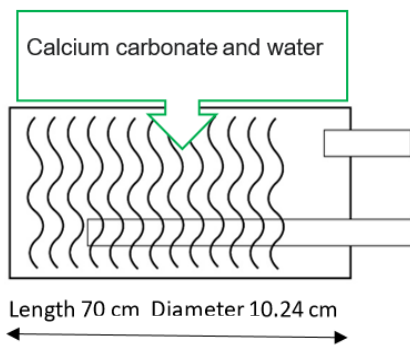


Fig. 3 CO₂ filter

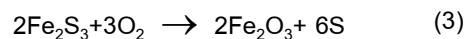
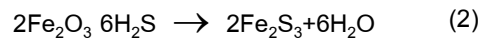


Fig. 4 Water vapour filter

2.2.1.3 Hydrogen Sulfide (H₂S) Filter Part

This part is the final part of the scrubbing system, in which hydrogen sulphide in raw biogas will be removed with catalyst iron oxide in the form of oxidized steel wool inside this

device, made from PVC pipes of 5.12 cm in diameter and 50 cm in length. The biogas from the second part will flow past and make contact with this steel wool and iron oxide, then be converted to elemental Sulphur. The chemical equation is as follows [4]: (2) and (3).



The H₂S scrubbing design includes a transparent fiber container filled with steel wool to act as an H₂S scrubber, as shown in Fig. 5. The container has two passages, one for the inlet tube and the other for the outlet tube. Both of these two passages are sealed with a sealing agent. The biogas will flow through these passages before entering the compression system, and the pump will act as the driving force to move the gas through the steel wool.

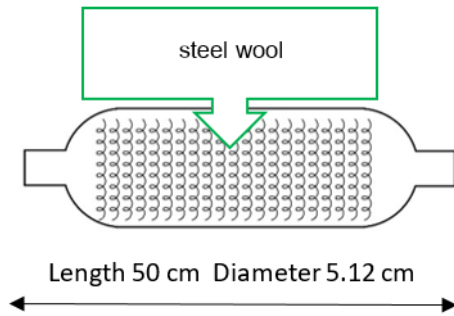


Fig. 5 H₂S filter

2.2.2 Compressing System

The air compressor in refrigerators has been selected as a part of the compressing system, along with an electrical control device, shown as a single-line diagram in Fig. 6 and 7 [8]. The scrubbing and gas compressor for biogas in OTOP Duang Thong District was shown in Fig. 8.

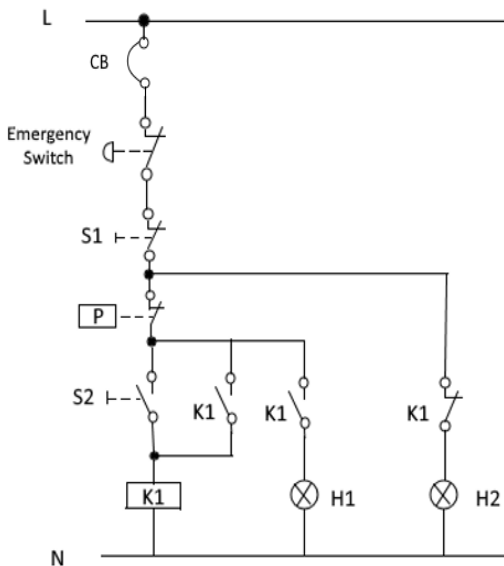


Fig. 6 Single line circuit of the compressor control system [9]

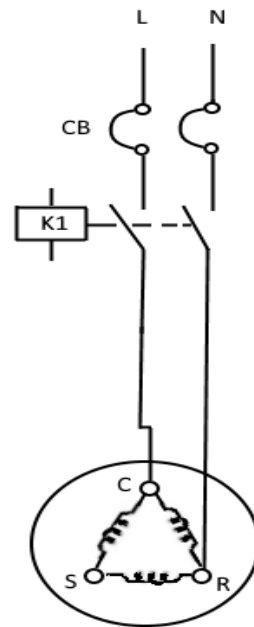


Fig. 7 Power Circuit of compressor biogas [10]



Fig. 8 Complete scrubbing and gas compressor for biogas in OTOP Duang Thong District



3. Result and Discussion

3.1 The Result of Compressing System Test

In this experiment, raw biogas will be fed into the 15-kilogram gas tank via the compressing system with the air compressor. It is done through a system device consisting of a check valve to protect the gas return, a pressure switch, and a pressure gauge before being compressed into the gas tank. After the gas tank was filled, it could be used to boil water for steaming the sour tamarind. The 200-liter baking tank, which weighs 125 kilograms, has a capacity of 20 liters of water each time. In comparison, LPG gas is normally used with a 5-inch gas burner as fuel to boil water for heating the tamarind. The result of the test is shown in Table 2.

Table 2 The result of the gas compressing unit test for 5.0 times

Descriptions	Result
Average Weight of gas contained in the gas tank	0.2 kg.
Average Energy of gas compressor	0.037 kWh
Average total time for compressing gas contained in the gas tank	12 mins and 23 sec
Average total time for boiling 125 kg. of tamarind.	1 hour and 20 mins

Based on the data from Table 2, the average time of compressing gas into the gas tank is about 12 minutes for a 15-kilogram gas tank. The average electrical power consumption for compressing is only 0.03 kilowatts per hour, which is very little for this system. The average weight of biogas contained in the gas tank each time is 0.2 kilograms, which can be used as fuel for boiling 125 kilograms of tamarind in 1 hour and 20 minutes.

3.2 Result of Scrubbing Test

The results of all 5 gas measurement tests are shown in Fig. 9. The results of technology transfer for biogas for use as fuel in the tamarind processing industry of Phetchabun province are based on an assessment by 20 members of the Duang Thong group. The evaluation was done in three aspects. The results of satisfaction are shown in Table 4.

3.2 Discussion

Twenty members from the Duang Thong Community Enterprise in Phetchabun Province participated in the knowledge and technology transfer project. These participants have three to eight years of experience in tamarind drying. The evaluation was done in three aspects, and the results of satisfaction are shown in Table 4.

Results of scrubbing test for raw biogas purify 5.0 times

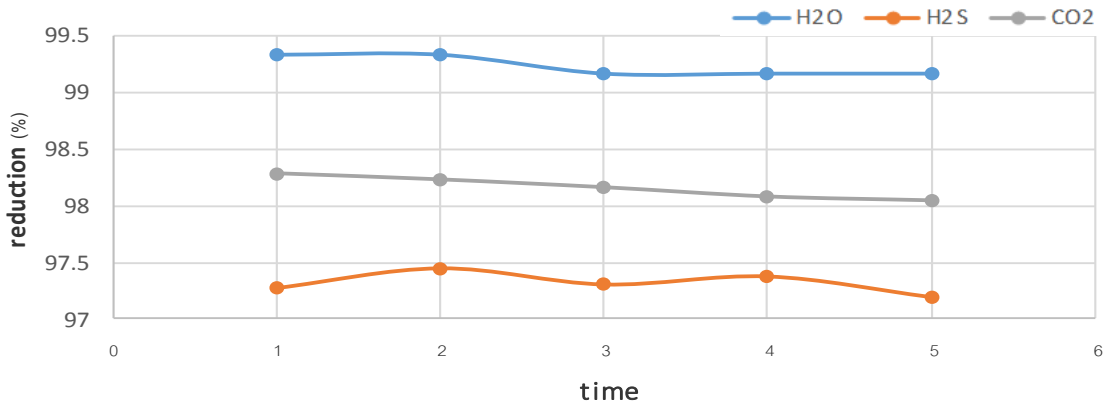


Fig. 9 The result of the gas compressing unit test for 5.0 times

Table 4 Results of satisfaction questionnaire.

Assessment Details	Mean	S.D	Conclusion
Knowledge transfer process			
Trainers have knowledge and the ability to convey.	4.58	0.52	very
Trainers have easy-to-understand techniques and methods for transferring knowledge	4.54	0.58	very
Trainers can answer questions covering questions	4.28	0.64	very
Trainers have a variety of media to transfer knowledge	4.38	0.58	very
Trainers used the time for training and demonstration appropriately	4.35	0.53	very
Average	4.44	0.57	very
Usefulness			
Bring knowledge and technology to apply in daily life.	4.48	0.55	very
Biogas for the use as fuel used for increasing productivity.	4.05	0.78	very
Average	4.25	0.67	very
Satisfaction			
Satisfaction for Biogas for the use as fuel.	4.58	0.57	very
Satisfaction for transfer of knowledge and technology	4.38	0.60	very
Average	4.46	0.55	very
Total average	4.38	0.60	very



It was found that the overall satisfaction was 4.38, and the standard deviation was 0.60. The scores were at a high level. When all three aspects are considered, satisfaction has the highest score with 4.46 for Mean and 0.55 for standard deviation, which is considered at a high level. Moreover, when summarizing the overall assessment of knowledge transfer for biogas for use as fuel, there were no points that were below the standard indicators (Key Results, or KR) of the project. It shows that biogas for use as fuel in the manufacture of sour tamarind cubes meets the needs of the target audiences effectively.

However, in terms of biogas used as fuel to increase productivity, the mean was 4.05 and the standard deviation was 0.78, which was the lowest mean and the highest standard deviation in each assessment. It is possible that there was a different assessment weight score for this topic than for all other topics. According to the satisfaction findings, the sample population at Level 3 comprised 5 people with 5-8 years of work experience. It's conceivable that these samples are already dependent on commonplace devices [10].

4. Conclusion

This research aims to design and construct a gas purifying system and a gas compressing unit for the biogas used for eco-friendly fuel in sour tamarind cube manufacturing in OTOP Duang Thong district, Phetchabun Province. The result of

the test shows that the mechanism used in this project could purify raw biogas and turn it into pure biogas (97% of Methane gas), which could be fed into the 15-kilogram gas tank by compressing the pure biogas, which weighs 0.2 kilograms, into the 15-kilogram gas tank in 12 minutes and 23 seconds. Electrical power consumption for compressing pure gas into the 15-kilogram gas tank has an average power consumption of only 0.03 kilowatts per hour each time, considered very little for this process. The average weight of biogas that could be contained in the gas tank each time is about 0.2 kilograms, which could be used as fuel for boiling 125 kilograms of tamarind in about 1 hour.

5. Acknowledgement

The research team would like to thank the Science Research and Innovation Fund through Thailand Science Research and Innovation (TSRI) under the research and innovation strategy of Phetchabun Rajabhat University, which provides funding for the implementation of this research project in creating this potential knowledge. Moreover, we cordially thank the students majoring in Industrial Electronic Technology in the faculties of Agricultural Technology and Industrial Technology for their support in researching tools and equipment. We would like to thank Duang Thong Community Enterprise in Nong Phai District of Phetchabun Province for providing data to complete this project, and for applying the electric oven with solar energy



to enhance quality in producing seasoned sour tamarind. In the end, the research team would like to thank everyone for their beneficial advice and support towards achieving the purpose of this research.

6. References

- [1] Department of Alternative Energy Development and Efficiency, Biogas production from ranch waste and industrial plant, Ministry of Energy, Bangkok, Thailand, 2020. (in Thai)
- [2] Department of Industrial Works, Operations related to design production quality control and the use of biogas for industrial plants manual, Ministry of Energy, Bangkok, Thailand, 2020. (in Thai)
- [3] N.H.S. Ray, M.K. Mohanty and R.C. Mohanty, Biogas compression and storage system for cooking applications in rural households, International Journal of Renewable Energy Research, 2016, 6(2), 32-38.
- [4] V.R. Gaikwad and P.K. Katti, Bottled biogas: A future source of renewable energy, Project, Dr. Babasaheb Ambedkar Technological University, Maharashtra, India, 2018, 90-101.
- [5] V.R. Gaikwad and P.K. Katti, Design of Biogas Scrubbing, Compression and storage system, IOSR Journal of Electrical and Electronics Engineering, 2014, 1(2), 58-63.
- [6] V.K. Vijay, R. Chandra, P.M.V. Subbarao and S.S. Kapdi, Biogas purification and bottling into CNG cylinders: producing bio CNG from biomass for rural automotive applications, The 2nd Joint International Conference on Sustainable Energy and Environment (SEE 2006), Proceeding, 2006, 1-6.
- [7] D. Pananont, Acid in the cooling system with filter driers, ASHRAE Journal, 2004-2005, 2005, 11-16. (in Thai)
- [8] P. Kanpee, Electric motor control, Book Center Company, Bangkok, Thailand, 1992.
- [9] W. Boonton, Cooling, Chulalongkorn University Press, Bangkok, Thailand, 2007.
- [10] L. Saiyot and A. Saiyot, Educational Research Techniques, Suriyasan Company, Bangkok, Thailand, 1992.

การออกแบบระบบชดเชยแสงสำหรับการเกษตรใต้เซลล์แสงอาทิตย์

ปิยะพงษ์ โอฬารทิชาชาติ^{1*} มณฑล พักเอม¹ และ ธาราทิพย์ ศรีสัตตบุตร²

¹ สาขาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์, คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม, มหาวิทยาลัยราชภัฏพิบูลสงคราม

² สาขาวิชาครุศาสตร์อุตสาหกรรม, คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม, มหาวิทยาลัยราชภัฏพิบูลสงคราม

* ผู้ประสานงานเผยแพร่ (Corresponding Author), E-mail: piyapong@psru.ac.th

วันที่รับบทความ: 25 มีนาคม 2565; วันที่ทบทวนบทความ: 20 มีนาคม 2566; วันที่ตอบรับบทความ: 27 เมษายน 2566

วันที่เผยแพร่ออนไลน์: 28 กรกฎาคม 2566

บทคัดย่อ: งานวิจัยนี้ทำการออกแบบระบบชดเชยแสง (Light Compensation System) ใต้ฟาร์มเซลล์แสงอาทิตย์ โดยพื้นที่เงาใต้แผงจะได้รับการชดเชยแสงจากระบบชดเชยแสงที่สร้างขึ้นในงานวิจัยนี้ จากการศึกษาพื้นที่เงาที่เกิดใต้แผงเซลล์แสงอาทิตย์ และประสิทธิภาพของระบบชดเชยแสงที่สร้างขึ้น พบว่าพื้นที่ของเงาใต้แผงเซลล์แสงอาทิตย์จะมีพื้นที่เงาเพิ่มขึ้นตั้งแต่ช่วงเช้าจนถึงเที่ยงวัน (9.00 – 13.00 น.) จากนั้นพื้นที่เงาจะลดลงไปจนเวลาเย็น (13.00 – 16.00 น.) และพื้นที่เงาสูงสุดเท่ากับ 66.30% ของบริเวณใต้แผงที่ทำการศึกษ อย่างไรก็ตาม พื้นที่ประมาณ 97.88% ของเงาดังกล่าว จะได้รับการชดเชยจากระบบชดเชยแสง โดยการปรับมุมก้มเงย และระยะการกวาดของกระจกเงา ทุกจุดใต้แผงเซลล์แสงอาทิตย์จะได้รับการชดเชยแสงเป็นเวลาประมาณ 21.83 นาทีต่อชั่วโมง โดยใช้พลังงานหลักในการทำงานของระบบประมาณ 0.42 วัตต์ การศึกษาดังกล่าวสามารถเป็นแนวทางในการใช้พื้นที่ฟาร์มเซลล์แสงอาทิตย์ร่วมกับการเกษตรอย่างมีประสิทธิภาพ สำหรับการปลูกพืชต้องการแสงต่อวันสั้น (Short Day Plant) ได้

คำสำคัญ: ฟาร์มเซลล์แสงอาทิตย์; การชดเชยแสง; การใช้พื้นที่ร่วม

Design of Light Compensation System for Agriculture under Solar Panel

Piyapong Olanthichachat^{1*} Monthol Fak-aim¹ and Tharathip Sreesattabud²

¹ Division of Electronic Engineering, Faculty of Industrial Technology, Pibulsongkram Rajabhat University

² Division of Industrial Education, Faculty of Industrial Technology, Pibulsongkram Rajabhat University

* Corresponding author, E-mail: piyapong@psru.ac.th

Received: 25 March 2022; Revised: 20 March 2023; Accepted: 27 April 2023

Online Published: 28 July 2023

Abstract: In this research, a controller was designed for a light compensation system under a solar panel. The shadowed areas under the panels are compensated by the light compensation system created for the research. The shadowed areas under the panels and the efficiency of the light compensation system were studied as well. It was found that the shadowed area increased from morning until noon (9.00 A.M. – 1.00 P.M.) and then decreased until evening (1.00 P.M. – 4.00 P.M.). The largest shadowed area, amounting to approximately 66.30%, was achieved at noon. However, 97.88% of the shadow could be compensated by adjusting the tilt angle and the sweep distance of the mirror; every single shadowed area was compensated for approximately 21.83 minutes per hour. The primary energy consumed by the system was approximately 0.42 watts. These results could be useful for dual land use to achieve good efficiency, especially for a short-day plant.

Keywords: solar farm; light compensation; dual land use



1. บทนำ

สืบเนื่องจากความจำเป็นต่อการใช้พลังงานในปัจจุบัน ประกอบกับปัญหาวิกฤติพลังงาน [1, 2] ที่ต้องพึ่งพาพลังงานหลักจากแหล่งพลังงานสิ้นเปลืองหรือพลังงานที่ใช้แล้วหมดไป ทำให้ปัจจุบันมีความจำเป็นต้องหาแหล่งพลังงานทดแทนพลังงานสิ้นเปลือง เช่น ถ่านหิน น้ำมัน หรือแม้แต่ก๊าซธรรมชาติซึ่งมีปริมาณน้อยลงไปทุกวัน โดยพลังงานทดแทน อาทิเช่น พลังงานลม, น้ำ, แสงอาทิตย์ ก็มีข้อจำกัดในเรื่องของที่ตั้งเพราะมีแค่บางแห่งเท่านั้น ซึ่งพลังงานแสงอาทิตย์มีศักยภาพมากในประเทศไทย [3] ดังนั้นจะเห็นได้ว่าหลายพื้นที่ในประเทศไทยเริ่มมีการสร้างฟาร์มผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์มากขึ้น อาทิเช่น ฟาร์มเซลล์แสงอาทิตย์ (Solar Farm) ของบริษัท พลังงานบริสุทธิ์ จำกัด ซึ่งเป็นฟาร์มผลิตพลังงานทดแทนจากพลังงานแสงอาทิตย์หรือฟาร์มเซลล์แสงอาทิตย์มีขนาดพื้นที่ 2354 ไร่ ในจังหวัดลำปาง ในจังหวัดนครสวรรค์ มีขนาดพื้นที่ 1852 ไร่ ในจังหวัดพิษณุโลก มีพื้นที่ 2200 ไร่ เป็นต้น [4] เนื่องจากประเทศไทยนั้นมีความศักยภาพในการผลิตกระแสไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์เป็นอย่างดี [5] และแม้ว่าพลังงานไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์นั้นเป็นพลังงานสะอาดและสามารถหมุนเวียนกลับมาใช้ได้เรื่อยๆ แต่เนื่องจากจำเป็นต้องใช้พื้นที่ว่างเปล่าจำนวนมากในการสร้างฟาร์มเซลล์แสงอาทิตย์และมีแนวโน้มที่จะมีความต้องการใช้พื้นที่เพิ่มขึ้น [6] เนื่องจากความต้องการใช้พลังงานที่เพิ่มขึ้นทุกปี ดังเช่น ประเทศจีนหันมาผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์มากกว่า 40 GW ในปี 2015 และในประเทศอินเดีย [2] ที่มีการคาดการณ์จากการเติบโตของ GDP ภายในประเทศว่าจะมีความต้องการใช้

พลังงานไฟฟ้าสูงถึง 1207 GW ภายในปี 2031 และแม้ปัจจุบัน 69% ของกระแสไฟฟ้ามาจากพลังงานสิ้นเปลืองหรือใช้แล้วหมดไป เช่น ถ่านหินและน้ำมัน ซึ่งจำเป็นต้องนำเข้าจากต่างประเทศ และมีเพียง 31% เท่านั้นที่มาจากพลังงานหมุนเวียน ทำให้ประเทศอินเดียมีแผนที่จะผลิตกระแสไฟฟ้าจากพลังงานหมุนเวียน 100% ซึ่งโดยเฉลี่ยพื้นที่ 5 เอเคอร์จะสามารถผลิตกระแสไฟฟ้าได้ 1 MW และประมาณการว่าพื้นที่ทั้งหมดของอินเดียมีศักยภาพในการผลิตไฟฟ้าได้ประมาณ 32,499 GW และต้องใช้พื้นที่ถึง 1/27 ของอินเดียในการผลิตกระแสไฟฟ้าให้เพียงพอต่อการใช้งานในประเทศในปี 2031 ดังนั้นคาดว่าประเทศอินเดียจะต้องใช้พื้นที่ถึง 6 ล้านเอเคอร์ ซึ่งพื้นที่ว่างเปล่าจำนวนมากนั้นไม่สามารถหาได้ และพื้นที่โล่งที่สามารถรับแสงอาทิตย์ได้เต็มที่นั้นมักจะถูกใช้ในการเกษตร ดังนั้นคงหลีกเลี่ยงไม่ได้ที่จะต้องมีการเบียดเบียนพื้นที่ทางการเกษตรเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้า [7-8] ดังนั้นความจำเป็นในการใช้พื้นที่ว่างเปล่าที่มากขึ้นอาจจะกระทบกับการเกษตรในที่สุด การศึกษาความเป็นไปได้ในการใช้พื้นที่ร่วมกัน (Dual Land Use) ระหว่างการเกษตรและฟาร์มเซลล์แสงอาทิตย์ [9-11] โดยทำการปลูกพืชภายใต้แผงเซลล์แสงอาทิตย์ พบว่าสัดส่วนของเงาจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่พืชสามารถเจริญเติบโตได้นั้นประมาณ 30% [9, 12] ดังนั้นจึงมีความจำเป็นที่จะต้องเว้นระยะห่างระหว่างแผงเซลล์แสงอาทิตย์ให้มากพอ [13-14] อีกทั้งในความเป็นจริงนั้นจะต้องทำการเว้นระยะห่างระหว่างแผงเซลล์แสงอาทิตย์ให้มีสัดส่วนของเงาเพียงแค่ครึ่งหนึ่งของพื้นที่เพาะปลูก และแผงเซลล์แสงอาทิตย์ติดตั้งที่ความสูงอย่างน้อย 5 เมตร [15] เพื่อความสะดวกต่อการใช้งานเครื่องจักร/อุปกรณ์ทาง



การเกษตรในการเพาะปลูกและเก็บเกี่ยว รวมถึงเพิ่มโอกาสที่แสงจะผ่านใต้แผงเซลล์แสงอาทิตย์ลงมาถึงพืชผลทางการเกษตรมากขึ้นอีกด้วย

ดังนั้น ในบทความวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาและออกแบบระบบชดเชยแสงสำหรับพื้นที่เงาใต้แผงเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยหลักการสะท้อนแสง โดยระบบสามารถปรับมุมสะท้อนตามการโคจรของดวงอาทิตย์ได้ และชุดสะท้อนยังเพิ่มพื้นที่การชดเชยแสงด้วยการหมุนกวาดเพื่อกระจายแสงสะท้อนได้ จากการชดเชยแสงสำหรับพื้นที่เงาใต้แผงนั้นทำให้สามารถย่อยอดปลูกพืชใต้แผงเซลล์แสงอาทิตย์ได้ เพื่อเป็นแนวทางสำหรับเพิ่มศักยภาพการใช้พื้นที่ร่วมระหว่างการผลิตไฟฟ้าและเกษตรได้อย่างเต็มประสิทธิภาพในอนาคต

2. วิธีการดำเนินงานวิจัย

2.1 การจำลองชุดฟาร์มเซลล์แสงอาทิตย์ และศึกษาข้อมูลเรื่องปริมาณแสงใต้เซลล์แสงอาทิตย์

การจำลองฟาร์มเซลล์แสงอาทิตย์ ในงานวิจัยนี้ได้ออกแบบให้มีความสูงด้านที่ต่ำที่สุดเท่ากับ 1.5 เมตร โดยมีความสูงไม่มาก สำหรับการศึกษาเรื่องการสะท้อนแสงจากภายนอกเพื่อไปใช้งานใต้เซลล์แสงอาทิตย์ เพื่อให้สอดคล้องกับการวิจัยครั้งนี้ บทความนี้ได้เลือกขนาดความสูงของฟาร์มเซลล์แสงอาทิตย์เพียงพอต่อการเข้าไปทำการเกษตรใต้แผงและสามารถทดสอบประสิทธิภาพการชดเชยแสงสว่างใต้แผงที่ออกแบบขึ้นมา

ในการเก็บข้อมูลเรื่องเงาใต้แผงและการออกแบบระบบชดเชยแสง โดยได้ทำการออกแบบสำหรับการเปรียบเทียบแบบจำลองฟาร์มเซลล์แสงอาทิตย์ขนาดเล็ก ดังแสดงในรูปที่ 1 (ก) โครงสร้างสำหรับเก็บข้อมูลเรื่องเงาใต้แผงของแต่ละชุดมีพื้นที่ 8 ตารางเมตร โดยมี

การวางตำแหน่งการติดตั้งแผงเซลล์แสงอาทิตย์แต่ละชุดดังแสดงแบบโครงสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ในรูปที่ 1 (ข)

2.2 การออกแบบระบบชดเชยแสงใต้แผงเซลล์แสงอาทิตย์

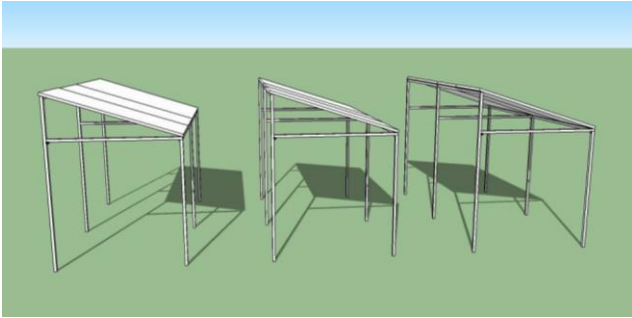
การออกแบบระบบชดเชยแสงจากดวงอาทิตย์สะท้อนแสงเข้าไปยังพื้นที่ใต้แผงเซลล์แสงอาทิตย์ ในบทความนี้ได้นำเสนอการออกแบบระบบชดเชยแสงให้อยู่ในตำแหน่งพื้นที่ด้านข้างโครงสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ จากมุมในการรับแสงอาทิตย์ เมื่อพิจารณาแสงอาทิตย์ที่หามุม (θ) กับพื้นโลกดังรูปที่ 2 (ก) และในกรณีที่ระบบชดเชยแสงอยู่ในระนาบตามการโคจรจากทิศตะวันออก-ทิศตะวันตก (East-West orientation : $\varphi = 0^\circ$) [16] ดังแสดงในรูปที่ 2 (ข) พบว่ามุมในการสะท้อนแสงไปยังพื้นที่ใต้แผงมีความสัมพันธ์ตามการปรับองศาของระนาบแผ่นสะท้อน (α) ตามมุมอัลติจูด (Altitude) ดังนี้

$$\theta - \alpha = \beta \quad (1)$$

เมื่อ β คือ มุมการสะท้อนของแสงอาทิตย์บนระนาบกระจก จากการออกแบบระบบชดเชยแสงนี้สามารถสะท้อนแสงอาทิตย์จากภายนอกเข้าไปยังพื้นที่ใต้แผงเซลล์อาทิตย์ โดยพิจารณาจากจุดกึ่งกลางของแผ่นกระจกสะท้อนดังรูปที่ 2 (ข) ระยะของแสงสะท้อนจากตำแหน่งติดตั้งระบบชดเชยแสงไปยังตำแหน่งใต้แผงมีระยะการสะท้อนแสงโดยเฉลี่ยสัมพันธ์กับความสูงของระบบสะท้อนแสง (H) และระยะห่างของระบบชดเชยไปยังใต้แผงเซลล์แสงอาทิตย์ (L_{av}) ดังนี้

$$L_{av} = H \tan\left(\alpha + \frac{180 - 2\beta}{2}\right)$$

$$L_{av} = H \tan(90^\circ + \alpha - \beta) \quad (2)$$

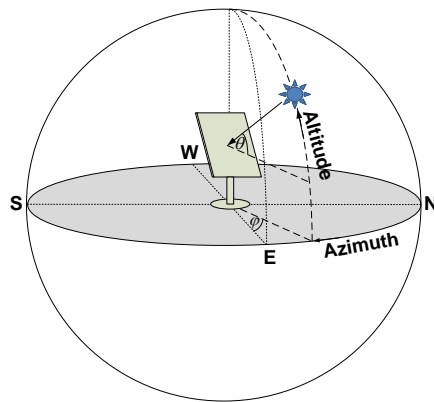


(ก)

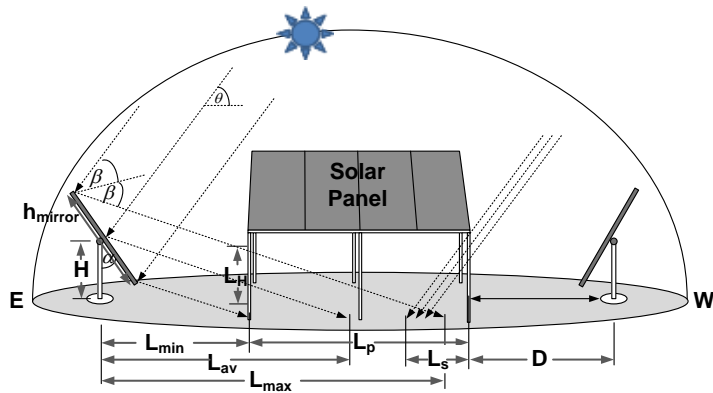


(ข)

รูปที่ 1 ฟาร์มเซลล์แสงอาทิตย์ขนาดเล็ก (ก) แบบจำลอง (ข) โครงสร้างที่ใช้สำหรับเก็บผลเรือนเงาได้แมง



(ก)



(ข)

รูปที่ 2 ระบบขดเขยแสงใต้เซลล์แสงอาทิตย์

(ก) ระบบขดเขยแสง (ข) ระยะสะท้อนแสงไปยังพื้นที่เงาได้แมง กรณี $\varphi = 0^\circ$



โดยระยะสะท้อนของขอบบน-ล่างของกระจกสะท้อน ทำให้ได้ระยะของแสงสะท้อนใกล้ที่สุด (L_{min}) และไกลที่สุด (L_{max}) ไปยังใต้แผงเซลล์แสงอาทิตย์เท่ากับ สมการที่ (3) และ (4) ตามลำดับ

$$L_{min} = (H - \frac{h_{mirror}}{2} \cos \alpha) \tan(90 + \alpha - \beta) + \frac{h_{mirror}}{2} \sin(\alpha) \quad (3)$$

$$L_{max} = (H + \frac{h_{mirror}}{2} \cos \alpha) \tan(90 + \alpha - \beta) - \frac{h_{mirror}}{2} \sin(\alpha) \quad (4)$$

เมื่อ h_{mirror} คือ ความสูงของกระจกที่ใช้สะท้อน (m) และระยะที่ต้องการการชดเชยแสงใต้แผงเซลล์แสงอาทิตย์ (L_p)

จากรูปที่ 2 (ข) ได้ทำการออกแบบจำลอง โครงสร้างเซลล์แสงอาทิตย์หันไปทางทิศใต้ และระบบ ชดเชยแสงที่ออกแบบขึ้นในงานวิจัยนี้จะมี 2 ชุดโดยวางใน ตำแหน่งทิศตะวันตกของชุดเซลล์แสงอาทิตย์ สำหรับ สะท้อนแสงพระอาทิตย์เวลาเช้า จนถึงเวลาประมาณ 12.00 น. และชุดชดเชยแสงในตำแหน่งทิศตะวันออก ทำหน้าที่สะท้อนแสง ในช่วงเวลา 12.00 น. เป็นต้นไป ถึงเวลาเย็น โดยช่วงเวลาประมาณ 12.00 น. หรือ ช่วงเวลาแสงพระอาทิตย์ทำมุมประมาณ 90 องศา ระบบชดเชยแสงใต้แผงเซลล์แสงอาทิตย์ทั้งสองด้าน จะทำงานพร้อมกันในช่วงเวลาสั้นๆ และจะหยุด ทำงานเมื่อมีแสงอาทิตย์ทำมุมมากกว่า 90 องศา ใน การทำงานของระบบชดเชยแสงแต่ละชุดจะทำงาน สัมพันธ์กับมุมของแสงอาทิตย์ที่ตกกระทบกับพื้นโลก (θ) โดยสามารถปรับมุมสะท้อนองศาของระนาบแผ่น สะท้อน (α) ทำให้ได้ระยะการสะท้อนของแสงชดเชย ไปยังใต้แผง จากแบบจำลองที่กำหนดให้แสงอาทิตย์ ทำมุม (θ) เท่ากับ 45 องศา กับพื้นโลก ดังแสดงใน

รูปที่ 3 (ก) ระยะสะท้อนจากแกนของระบบชดเชยแสง ที่ออกแบบขึ้นเพื่อหาระยะ L_{min} , L_{max} และระยะ สะท้อนเฉลี่ย (L_{av}) จากผลการจำลองเมื่อมีการปรับ มุมสะท้อนจาก 0 – 22 องศา และกำหนดให้ความสูง ของระบบชดเชยแสง (H) เท่ากับ 1 เมตร ความสูง ของกระจก (h_{mirror}) เท่ากับ 1 เมตร พบว่าการปรับมุม ของระนาบสะท้อนให้ได้ระยะ ΔL ($L_{max} - L_{min}$) มากขึ้นแปรผันตามมุมสะท้อน α แต่ระยะ ΔL ที่ มากขึ้นต้องมีการเพิ่มระยะทางการติดตั้งชุดชดเชย แสง (D) มากตามไปด้วย

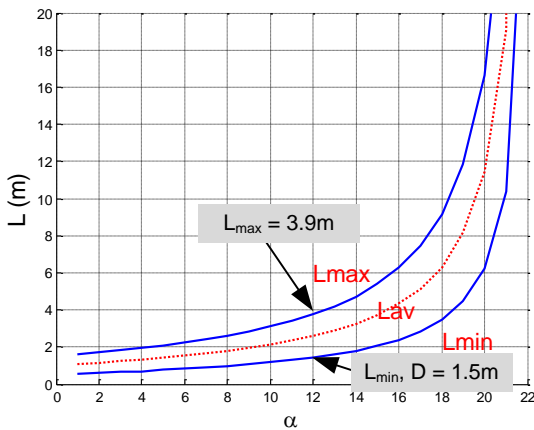
ในบทความนี้ได้ทำการเว้นระยะห่างระบบชดเชย แสงกับโครงสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ (D) ประมาณ 1.5 เมตร ซึ่งควรต้องเท่ากับ L_{min} ที่ได้จากระบบชดเชย และระยะที่ต้องการชดเชยแสงใต้แผงเซลล์แสงอาทิตย์ (L_p) มีระยะเท่ากับ 4 เมตร จากแบบจำลองในรูปที่ 2 (ข) มีระยะแสงอาทิตย์ที่ตกไปยังแปลงทดสอบ (L_s) ซึ่งจากแบบจำลองที่มุมแสงอาทิตย์ θ เท่ากับ 45 องศา ระบบชดเชยแสงทำมุม α ที่เหมาะสมเท่ากับ 12 องศา ดังรูปที่ 3 (ก) ทำให้ได้ L_{min} และ L_{max} เท่ากับ 1.5 เมตร และ 3.9 เมตร ตามลำดับ เมื่อความ สูงโครงสร้างเซลล์แสงอาทิตย์เท่ากับ 1.5 เมตร จะได้ ระยะแสงอาทิตย์ที่ตกกระทบแปลงทดสอบ L_s เท่ากับ 1.5 เมตร เมื่อพิจารณาระยะแสงที่ตกกระทบ ใต้แผง ($\Delta L + L_s$) พบว่ามีระยะเท่ากับ 3.9 เมตร ซึ่งเป็นระยะใกล้เคียงกับ L_p ที่ออกแบบไว้ข้างต้น และจากข้อมูลดังกล่าวสามารถหาพื้นที่สะท้อนแสงได้ จากผลคูณ ΔL กับขนาดความกว้างของกระจก ที่ ออกแบบไว้เท่ากับ 0.4 เมตร ทำให้ได้พื้นที่สะท้อน

ของแสงในกรณี ($\varphi = 0^\circ$) สำหรับชดเชยแสง (Light Compensation Area) เท่ากับ 0.96 ตารางเมตร

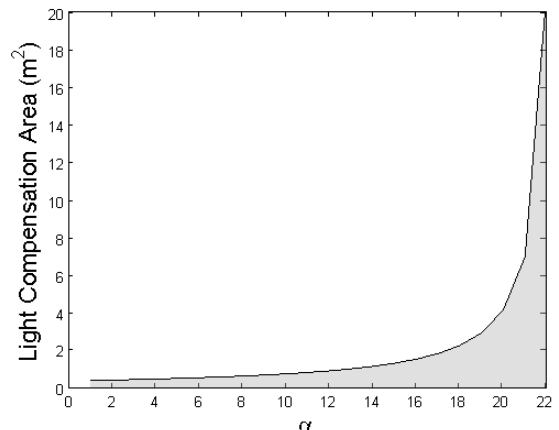
ในกรณีที่ต้องการหาขนาดความสูงของกระจกที่เหมาะสมหรือครอบคลุมระยะที่ต้องการการชดเชยแสงใต้แผงเซลล์แสงอาทิตย์ (L_p) มากที่สุด พบว่าต้องพิจารณาจากช่วงแสงอาทิตย์ทำมุม (θ) ประมาณ 80 องศา กับพื้นโลกที่ทำให้เกิดเงาใต้แผงค่อนข้างมาก และเป็นช่วงที่ระบบชดเชยแสงทำงานเพียงชุดเดียว โดยที่ระยะ L_s ที่ได้มีระยะเท่ากับ 0.26 เมตร และการชดเชยแสง ΔL ควรจะมีระยะประมาณ 5.2 เมตร เพื่อครอบคลุมระยะ L_p ได้ จากการพิจารณาความสัมพันธ์ L_{min} และ L_{max} ระบบที่สามารถครอบคลุมเงาดังกล่าว ควรปรับความสูงของกระจก (h_{mirror}) เท่ากับ 1.6 เมตร ปรับมุมสะท้อน α เท่ากับ 31.7 องศา จากการปรับดังกล่าวทำให้ได้แสงสะท้อนจากขอบด้านบนผ่านใต้เซลล์แสงอาทิตย์ได้

(L_H) เท่ากับ 1.1 เมตร และกรณีที่ปรับมุมสะท้อนที่เหมาะสมในช่วงแสงอาทิตย์ทำมุม θ เท่ากับ 45 องศา มีความสูงของแสงสะท้อนขอบด้านบน L_H เท่ากับ 1.4 เมตร ซึ่งสามารถใช้ระบบการสะท้อนแสงกับโครงสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ได้

จากแบบการจำลองพื้นที่การสะท้อนแสงไปยังพื้นที่เงาใต้แผงเซลล์แสงอาทิตย์ กรณี $\varphi = 0^\circ$ จากรูปที่ 3 พบว่าปริมาณพื้นที่แสงจากการชดเชยมีความสัมพันธ์กับมุมสะท้อน (α) เพื่อเป็นการเพิ่มพื้นที่แสงสะท้อนในบทความนี้ได้ออกแบบให้ชุดสะท้อนหมุนปรับมุมอาซิมุท (Azimuth : φ) ดังแสดงในรูปที่ 4 ให้มีการสะท้อนแบบ $\varphi \neq 0^\circ$ เพื่อเป็นการกวาดแสงให้กระจายไปยังพื้นที่ต่างๆ ด้านข้างได้ โดยมีความสูงรวมของโครงสร้างระบบชดเชยแสงเท่ากับ 1.5 เมตร ส่วนชุดกระจกสะท้อนมีความกว้างเท่ากับ 0.4 เมตร และความสูงกระจกเท่ากับ 1 เมตร



(ก)



(ข)

รูปที่ 3 ระยะแสงสะท้อนต่ำที่สุดและสูงที่สุด จากชุดสะท้อน กรณี $\varphi = 0^\circ$

(ก) ระยะแสงสะท้อนไปยังพื้นที่ใต้แผง (ข) พื้นที่ของแสงสะท้อน

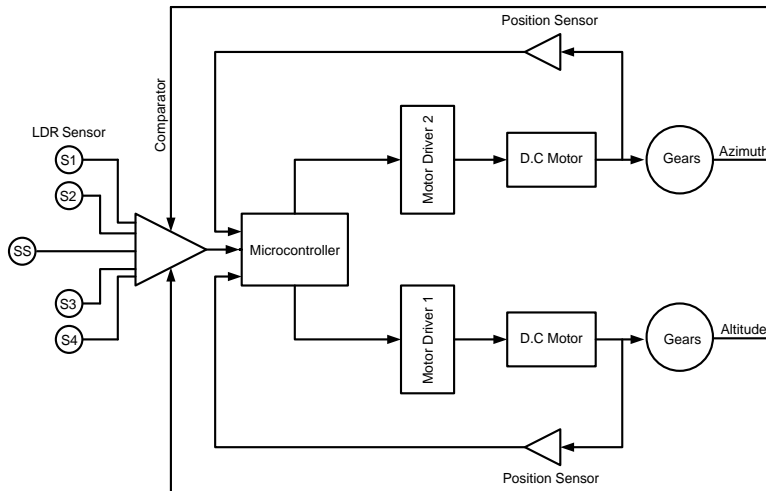


รูปที่ 4 โครงสร้างของระบบชดเชยแสงใต้เซลล์แสงอาทิตย์

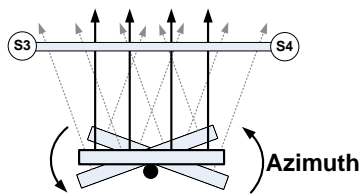
การควบคุมการปรับมุม α และ φ ในบทความนี้ได้ใช้ชุดเซนเซอร์ตรวจจับแสง ดังแสดงในรูปที่ 5 (ก) เพื่อกำหนดมุม α ในการติดตามโคจรของดวงอาทิตย์ และมุม φ เพื่อกำหนดพื้นที่การกวาดแสง ในบทความนี้ได้ติดตั้งเซนเซอร์จำนวน 4 ตำแหน่ง ได้แก่ เซนเซอร์วัดแสง (LDR Sensor) ด้านบน (S1) – ด้านล่าง (S2) เพื่อควบคุมการหมุนมอเตอร์ควบคุมการสะท้อนแสงตามการเคลื่อนที่ของดวงอาทิตย์ ดังแสดงในรูปที่ 5 (ข) ทำให้ได้แสงสะท้อนไปยังพื้นที่ที่ต้องการได้ และเพื่อเป็นการเพิ่มพื้นที่แสงสะท้อนจากมุม φ ได้ติดตั้งเซนเซอร์แสงด้านซ้าย (S3) – ขวา (S4) เพื่อเป็นการกำหนดการหมุนมอเตอร์เพื่อเพิ่มบริเวณการกวาดแสง ดังแสดงในรูปที่ 5 (ค) ทำให้ได้แสงชดเชยจากการควบคุมการสะท้อนไปยังพื้นที่เงาใต้แผงได้มากที่สุดในการควบคุมการปรับมุม φ

ในบทความนี้ได้ใช้สัญญาณควบคุมแบบพัลส์วิดิธมอดูเลชัน (PWM) เพื่อควบคุมการหมุนกวาดแสงไปยังพื้นที่เงาในบริเวณต่างๆ จากการหมุนลักษณะนี้สามารถกำหนดความถี่ในการแสงสะท้อนของได้ ในการติดตั้งชุดสะท้อนแสงที่ออกแบบขึ้นมาในงานวิจัยนี้ ดังแสดงในรูปที่ 5 (ง) ได้ทำการเว้นระยะจากโครงสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ 1.5 เมตร และห่างจากชุดเซนเซอร์ควบคุมการหมุนเท่ากับ 1 เมตร

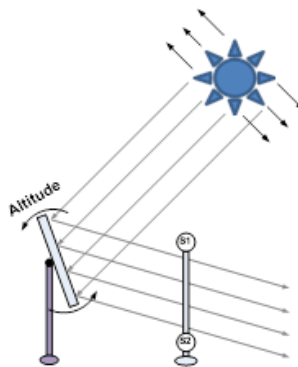
จากเทคนิคที่นำเสนอในบทความนี้ เพื่อควบคุมการทำงานของระบบชดเชยแสงใต้เซลล์แสงอาทิตย์ ดังแผนภาพในรูปที่ 6 ที่มีเซนเซอร์ในการวัดแสง S1-S4 สำหรับกำหนดมุมมองในการหมุนของมอเตอร์แกนต่างๆ ในการทำงานของระบบจะเริ่มทำการปรับมุมสะท้อน จากการเปรียบเทียบความเข้มแสงจากเซนเซอร์ S3 และ S4 ก่อน เพื่อให้แสงสะท้อนอยู่ในพื้นที่ที่ต้องการ จากนั้นระบบปรับมุมติดตามดวงอาทิตย์ จากเซนเซอร์ S1 และ S2 เพื่อกำหนดองศาในการสะท้อน จากนั้นจะทำการหมุนกวาดแสง โดยการหมุนกวาดให้แสงสะท้อนไปตกกระทบเซนเซอร์ S3 และหมุนกวาดย้อนกลับมาให้แสงตกกระทบ S4 เพื่อเป็นการกระจายแสงในมุม φ และในระบบที่ออกแบบขึ้นมาได้มีการติดตั้งเซนเซอร์แสงที่ระบบชดเชยแสง สำหรับกรณีที่ไม่มีแสงจากดวงอาทิตย์จากปัจจัยต่างๆ อาทิเช่น มีก้อนเมฆบัง หรือถึงช่วงเวลาต่ำ โดยมีการกำหนดค่าความเข้มแสงจากเซนเซอร์วัดแสง SS จากสภาพแวดล้อมภายนอก (K_{re}) ถ้ามีความเข้มแสงน้อยกว่า 1000 LUX ระบบจะทำการหยุดการทำงาน และพร้อมเริ่มทำงานใหม่เมื่อมีแสงจากดวงอาทิตย์ปริมาณเพียงพอต่อการสะท้อนแสง



(ก)

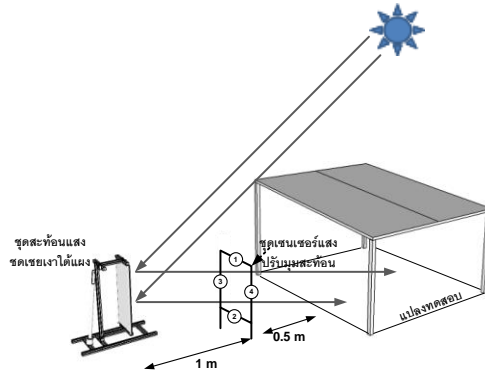


(ข)



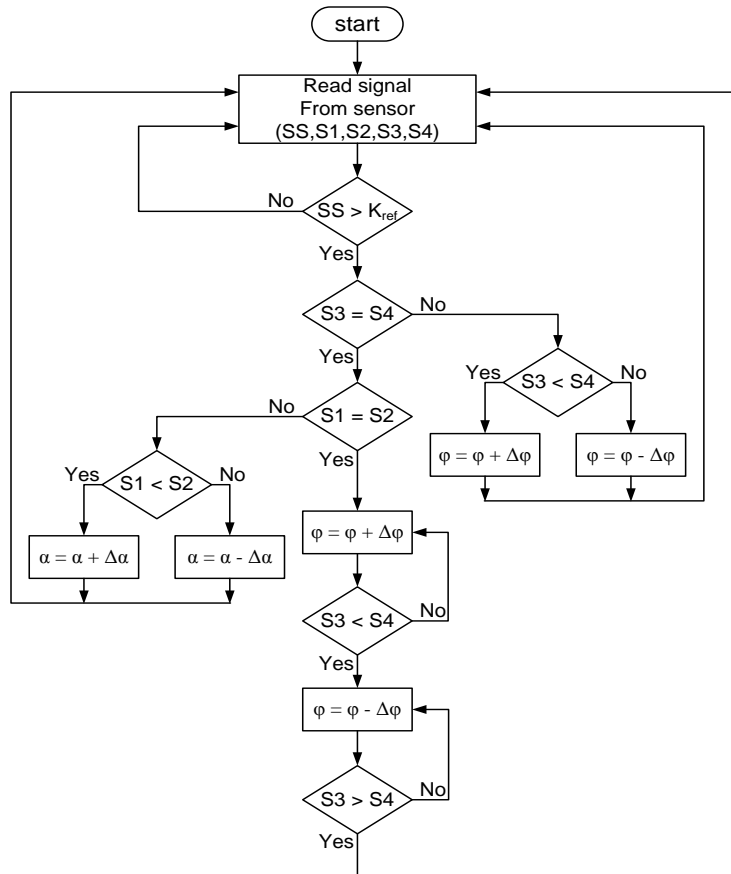
(ค)

รูปที่ 5 แสดงแบบจำลองของระบบชดเชยแสงใต้เซลล์แสงอาทิตย์ (ก) ชุดควบคุมการหมุนของระบบชดเชยแสงที่ใช้เซ็นเซอร์แสงกำหนดระยะในการหมุน (ข) การควบคุมการปรับมุม α ด้วยเซ็นเซอร์ S1-S2 (ค) การควบคุมการปรับมุม φ ด้วยเซ็นเซอร์ S3-S



(จ)

รูปที่ 5 ต่อ (จ) การติดตั้งระบบชดเชยแสงกับโครงสร้างเซลล์แสงอาทิตย์



รูปที่ 6 แสดงแผนภาพการทำงานของระบบชดเชยแสง



(ก)



(ข)



(ค)

รูปที่ 7 ตัวอย่างการสะท้อนแสงไปซดเซยเงาใต้แผงเซลล์แสงอาทิตย์ จากระบบที่ออกแบบขึ้นมา โดยที่แสงสะท้อนจะเคลื่อนที่จากตำแหน่ง (ก) ทางด้านซ้าย (ข) กึ่งกลาง และ (ค) ทางด้านขวา ของพื้นที่เงาใต้แผงตามลำดับ

3. ผลการวิจัยและการอภิปรายผล

แสงสะท้อนจากระบบซดเซยแสงที่ออกแบบขึ้นในบทความนี้ ทำการเก็บผลการซดเซยเงาใต้แผงเซลล์แสงอาทิตย์ช่วงเดือนพฤศจิกายน 2562 พิกัดละติจูด 16.835817 ลองจิจูด 100.213140 ดังแสดงในรูปที่ 7 (ก) ระบบซดเซยแสงจะเริ่มหมุนเพื่อปรับมุมแสงสะท้อนไปยังตำแหน่งพื้นที่เงาด้านข้างดังแสดงในรูปที่ 7 (ข) และจะหมุนเพื่อปรับมุมสะท้อนไปยังตำแหน่งถัดไป ดังตัวอย่างในรูปที่ 7 (ค) เป็นต้น พบว่าระบบจะทำการปรับมุมสะท้อน (α) ตามตำแหน่งของดวงอาทิตย์ในแต่ละช่วงเวลา ซึ่งมุมดังกล่าวจะเปลี่ยนไปตามการโคจรของดวงอาทิตย์ จากนั้นระบบจะทำการหมุนตามมุม (φ) เพื่อเป็นการกระจายแสงไปยังพื้นที่ต่างๆ ที่มีการปรับมุมดังรูปที่ 5 (ค) ในการกวาดแสงตามมุม φ สามารถกำหนดองศาตามขนาดพื้นที่เงาที่ต้องการให้ระบบสะท้อนแสงซดเซยได้ โดยเทคนิคนี้สามารถปรับความถี่ในการรับแสงแต่ละพื้นที่ได้โดยกำหนดความเร็วในการหมุนด้วยสัญญาณ PWM โดยพื้นที่แสงกวาดไปตามมุมต่างๆ ได้คำนวณเป็นอัตราส่วนพื้นที่ที่ได้รับแสงสะท้อนรวมต่อพื้นที่เงาทั้งหมด เพื่อหาสมรรถนะของระบบซดเซยแสงที่ออกแบบขึ้น

จากผลการทดสอบโดยการวัดพื้นที่ใต้แผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ได้รับการซดเซยแสงนั้น ได้ทำการเปรียบเทียบพื้นที่ที่ได้รับการซดเซยแสงต่อพื้นที่เงาใต้แผงทั้งหมด $(Area_L / Area_S) \times 100$ เพื่อทำการคำนวณเป็นร้อยละ ของการซดเซยแสงที่ระบบสามารถทำงานได้ ดังตารางที่ 1 พบว่าพื้นที่เงาใต้แผงได้รับการซดเซยแสงจากระบบสะท้อนแสงมากถึงร้อยละ 97.88



ตารางที่ 1 แสดงพื้นที่ที่ได้รับแสงใต้แผงเซลล์แสงอาทิตย์ในแปลงทดสอบ (ตัวอย่างวันที่ 7 พฤศจิกายน 2562)

ช่วงเวลา	พื้นที่เงาใต้เซลล์แสงอาทิตย์ : $Area_s$ (ตร.ม.)	พื้นที่แสงสะท้อนของระบบ ที่ชดเชย : $Area_r$ (ตร.ม.)	ปริมาณการชดเชย แสงร้อยละ
09.00	5.16	4.96	96.12
10.00	5.44	5.14	94.48
11.00	5.67	5.24	92.41
12.00	5.84	5.26	90.06
13.00	5.89	5.34	90.66
14.00	5.43	5.05	93.00
15.00	4.76	4.55	95.58
16.00	2.84	2.78	97.88

ในช่วงเวลา 16.00 น. โดยมีพื้นที่เงาไม่ได้รับแสงชดเชยประมาณ 0.06 ตารางเมตร ซึ่งช่วงระยะเวลาต่างๆ ของวันนั้นมีผลต่อพื้นที่ที่ถูกชดเชยแสง แต่อย่างไรก็ตามสามารถปรับให้พื้นที่ใต้แผงเซลล์แสงอาทิตย์ได้รับการชดเชยได้มากกว่า 90% ของพื้นที่โดยการปรับมุม α และ φ ของกระจก ในส่วนของความถี่ในการรับแสงสะท้อน จากการหมุนกระจกสะท้อน ในการคำนวณความถี่ในการรับแสงของพื้นที่เงา ผู้วิจัยได้ทำการใช้เซนเซอร์วัดแสงไปวางในตำแหน่งตัวอย่างของพื้นที่เงาใต้แผงเพื่อคำนวณหาความถี่ของแสงสะท้อนที่ตกกระทบพื้นที่เงา จากตัวอย่างในกรณีช่วงเวลา 13.00 น. พบว่าการรับแสงของพื้นที่เงาโดยเฉลี่ยเท่ากับ 21.83 นาฬิกาต่อชั่วโมง ซึ่งความเร็วในการหมุนด้วยความเร็วหมุนต่างๆ นั้นส่งผลกระทบต่อความถี่ในการรับแสงแต่ละตำแหน่งเท่านั้น แต่เวลาเฉลี่ยการรับแสงแต่ละพื้นที่จะมีค่าเท่ากัน นอกจากนั้นผลการทดลองความกว้างของเงาใต้แผงนั้นจะสัมพันธ์กับขนาดความกว้างของกระจกที่ใช้สะท้อนแสง จากตัวอย่างการทดลองพบว่าความกว้างของเงาใต้แผงมีความกว้าง โดยเฉลี่ยประมาณ 3 – 4 เท่าของกระจกสะท้อนแสง ทำให้ได้

ความสัมพันธ์กับช่วงเวลาความถี่การรับแสงประมาณ 15-20 นาฬิกาต่อชั่วโมง ในการเพิ่มความถี่การรับแสงสามารถเพิ่มความกว้างของกระจก ประมาณครึ่งหนึ่งของความกว้างเงาใต้แผง สามารถเป็นแนวทางในการเพิ่มความถี่การรับแสงได้มากถึง 30 นาฬิกาต่อชั่วโมงได้ ซึ่งตรงนี้เป็นกรณีที่ต้องศึกษาความต้องการแสงของพืชที่คาดว่าจะนำมาปลูกในอนาคต เพื่อเป็นการกำหนดความเหมาะสมในการออกแบบขนาดระบบสะท้อนแสง

ในการพิจารณาพลังงานที่ใช้กับมอเตอร์ทั้งสองแกนในระบบสะท้อนแสงที่ออกแบบขึ้นมาในงานวิจัยนี้ที่ใช้ระบบไฟกระแสตรง 12 โวลต์ในการขับเคลื่อนมอเตอร์นั้น พบว่าในแกนที่ปรับมุม φ สำหรับการกวาดแสงนั้นใช้พลังงานประมาณ 0.42 วัตต์ ในส่วนนี้จะมีการขับเคลื่อนมอเตอร์เพื่อกวาดแสงไปยังบริเวณต่างๆ ตลอดเวลาที่มีแสงอาทิตย์ ส่วนมอเตอร์สำหรับควบคุมการปรับมุม α นั้นใช้พลังงาน 7.2 วัตต์ ซึ่งในส่วนนี้ระบบจะมีการปรับทุกช่วงเวลาประมาณ 10 นาที และใช้เวลาในการขับเคลื่อนในแต่ละครั้งประมาณ 1-2 วินาที เพื่อให้ได้องศาของแสงสะท้อนไปยังพื้นที่ที่ต้องการ



4. บทสรุป

จากผลการศึกษาเรื่องการชดเชยแสงใต้เซลล์แสงอาทิตย์ ด้วยการเพิ่มปริมาณแสงสะท้อนเพื่อชดเชยแสงใต้แผง โดยบทความนี้ได้เสนอการเพิ่มแสงชดเชยพื้นที่เงาใต้แผงด้วยการสะท้อนแสงของกระจกที่สามารถการปรับมุมสะท้อน (α) ตามตำแหน่งของดวงอาทิตย์ในแต่ละช่วงเวลา และมุมกวาด (φ) เพื่อลดขนาดพื้นที่ของกระจกสะท้อนแสงและลดขนาดโครงสร้างของระบบสะท้อนแสง สำหรับกระจายแสงสะท้อนจากดวงอาทิตย์ไปยังพื้นที่เงาใต้แผงเซลล์แสงอาทิตย์ ด้วยการใช้ชุดเซ็นเซอร์ตรวจจับแสงสะท้อน 4 ตำแหน่งเพื่อกำหนดทิศทางของแสงสะท้อนให้ลงไปยังพื้นที่ที่ต้องการมากที่สุด ผลการทดลองพบว่าแสงสะท้อนสำหรับชดเชยเงาใต้แผงตลอดทั้งวันมีมากกว่าร้อยละ 90 ของพื้นที่เงาใต้แผง และมีปริมาณการชดเชยแสงเฉลี่ยสูงสุด 97.88 ในช่วงเวลา 16.00 น. ของตัวอย่างวันทดสอบ และมุมกวาดของระบบเพื่อให้การกระจายแสงสะท้อนให้ครอบคลุมพื้นที่เงาทำให้ได้ความถี่ในการรับแสงแต่ละตำแหน่งมีค่าเท่ากับ 21.83 นาที่ต่อชั่วโมง ซึ่งในเรื่องของความถี่ในการรับแสงสะท้อน และพื้นที่เงาใต้แผงที่มีขนาดใหญ่ นั้นสามารถพัฒนากระจกสะท้อนให้มีขนาดใหญ่ขึ้น และออกแบบการปรับมุมสะท้อนองศาของระนาบแผ่นสะท้อน (α) ให้มีความเหมาะสมกับโครงสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ ดังแบบจำลองในรูปที่ 3 เรื่องมุมสะท้อนนั้นจะมีความสัมพันธ์แปรผันตรงกับปริมาณพื้นที่การสะท้อนแสง เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการกระจายแสงสะท้อนให้ดียิ่งขึ้นได้

ในเทคนิคที่นำเสนอในบทความนี้เป็นการชดเชยปริมาณแสงให้กับพื้นที่เงาใต้แผงเซลล์แสงอาทิตย์ระบบที่ออกแบบขึ้นมาที่มีการใช้พลังงานหลักสำหรับมอเตอร์หมุนเพื่อการกวาดแสงเพียง 0.42 วัตต์ ทำให้พื้นที่ใต้แผงเซลล์แสงอาทิตย์มีปริมาณแสงเพียงพอที่จะทำการปลูกพืชที่ต้องการแสงต่อวันสั้น (Short Day Plant) และเหมาะสมสำหรับพืชที่ต้องการความเข้มแสงไม่มากหรือพืชที่ปลูกในโรงเรือน เนื่องจากแสงสะท้อนที่ออกแบบขึ้นมาี้มีความเข้มแสงน้อยกว่าการรับแสงจากดวงอาทิตย์โดยตรง และพืชที่เพาะปลูกควรมีความสูงไม่มากเพื่อไม่ให้เกิดการบังเงาของพืชที่อยู่ด้านหน้า แต่ถ้าโครงสร้างเซลล์แสงอาทิตย์มีขนาดสูงมากๆ สามารถออกแบบระบบชดเชยแสงให้มีความสูง (H) ที่สูงมากขึ้น และมุม (α) ลดลงทำให้ลดโอกาสการบังเงาของพืชได้ นอกจากนี้ยังเป็นแนวทางที่ผู้วิจัยทำทดสอบการปลูกพืชใต้แผงเซลล์อาทิตย์จากแสงสะท้อนที่ชดเชยขึ้นมา ซึ่งการมีพืชในบริเวณฟาร์มเซลล์แสงอาทิตย์นั้น มีแนวโน้มที่จะลดอุณหภูมิในพื้นที่ดังกล่าว ส่งผลเซลล์แสงอาทิตย์มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น ทำให้เป็นแนวโน้มเรื่องการทำเกษตรใต้เซลล์แสงอาทิตย์มีความสนใจต่อยอดงานวิจัยในอนาคต

5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ประสบความสำเร็จได้ด้วยการสนับสนุนทุนในการวิจัยจากสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ และคณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏพิบูลสงคราม สำหรับเครื่องมือและสถานที่ในการทดสอบ



6. เอกสารอ้างอิง

- [1] D. Goswami, India's solar sunrise, *Renewable Energy Focus*, 2012, 13(2), 28-30.
- [2] T. Harinarayana and K.S.V. Vasavi, Solar energy generation using agriculture cultivated lands, *Smart Grid and Renewable Energy*, 2014, 5, 31-42.
- [3] K. Borah, S. Roy and T. Harinarayana, Optimization in site selection of wind turbine for energy using fuzzy logic system and GIS— A case study for Gujarat, *Open Journal of Optimization*, 2013, 2(4), 116-122.
- [4] <https://www.set.or.th/set/pdfnews.do?newsId=14592937857961&sequence=2016026039> (Accessed on 19 December 2021)
- [5] S. Janjai, Electricity generation potential by using photovoltaic solar cell panels, *Research Project, Department of Alternative Energy Development, Thailand*, 2017.
- [6] J. Owley and A.W. Morris, The new agriculture: from food farms to solar farms, *Columbia Journal of Environmental Law*, 2019, 44(2), 409–77.
- [7] J. Xue, Photovoltaic agriculture-New opportunity for photovoltaic applications in China, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2017, 73, 1-9.
- [8] R.H.E. Hassanien, M. Li and W.D. Lin, Advanced applications of solar energy in agricultural greenhouses, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2016, 54, 989-1001.
- [9] <http://www.renewableenergyworld.com/renewableenergyworld.com/news/article/2013/10/japan-next-generation-farmers-cultivate-agriculture-and-solar-energy>. (Accessed on 19 December 2021)
- [10] C. Dupraz, H. Marrou, G. Talbot, L. Dufour, A. Nogier and Y. Ferard, Combining solar photovoltaic panels and food crops for optimising land use: Towards new agrivoltaic schemes, *Renewable Energy*, 2011, 36, 2725-2762.
- [11] S. Schindele, M. Trommsdorff, A. Schlaak, T. Obergfell, G. Bopp, C. Reise, C. Braun, A. Weselek, A. Bauerle, P. Högy, A. Goetzberger and E. Weber, Implementation of agrophotovoltaics: Techno-economic analysis of the price-performance ratio and its policy implications, *Applied Energy*, 2020, 265, 114737.
- [12] J. Cho, S.M. Park, A.R. Park, O.C. Lee, G. Nam and In-Ho Ra, Application of photovoltaic systems for agriculture: A study on the relationship between power generation and farming for the improvement of photovoltaic applications in agriculture, *Energies*, 2020, 13(18), 4815.



- [13] S. Amaducci, X. Yin and M. Colauzzi, Agrivoltaic systems to optimise land use for electric energy production, *Applied Energy*, 2018, 220, 545-561.
- [14] A. Marucci, I. Zambon, A. Colantoni and D. Monarca, A combination of agricultural and energy purposes: Evaluation of a prototype of photovoltaic greenhouse tunnel, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2018, 82, 1178-1186.
- [15] W. Liu, L. Liu, C. Guan, F. Zhang, M. Li, H. Lv, P. Yao and J. Ingenhoff, A novel agricultural photovoltaic system based on solar spectrum separation, *Solar Energy*, 2018, 162, 84-94.
- [16] A. Peña-García, L.M. Gil-Martín and E. Hernández-Montes, Use of sunlight in road tunnels: An approach to the improvement of light-pipes' efficacy through heliostats, *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2016, 60, 135-140.
- [17] C. Jamroen, P. Komkum, S. Kohsri, W. Himananto, S. Panupintu, S. Unkat, A low-cost dual-axis solar tracking system based on digital logic design: Design and implementation, *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 2020, 37, 100618.

การศึกษา ออกแบบ และจำลองการทำงานตัวปรับปรุงค่าประกอบกำลังแบบบริดจ์เลสส์โทเทมโพล

พีรพล จันทร์หอม^{1*} และ ณัชพงศ์ หัตถิ²

¹ หน่วยวิจัยระบบอัจฉริยะและการแปลงผันพลังงาน, สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ (ศูนย์นนทบุรี)

² ทีมวิจัยมอเตอร์และการแปลงผันพลังงาน, หน่วยวิจัยระบบอัจฉริยะ, ศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ

* ผู้ประสานงานเผยแพร่ (Corresponding Author), E-mail: peerapon.c@rmutsb.ac.th

วันที่รับบทความ: 3 ธันวาคม 2565; วันที่ทบทวนบทความ: 20 มีนาคม 2566; วันที่ตอบรับบทความ: 11 พฤษภาคม 2566

วันที่เผยแพร่ออนไลน์: 29 กรกฎาคม 2566

บทคัดย่อ: งานวิจัยนี้มีจุดประสงค์เพื่อศึกษาหลักการทำงาน เทคนิคการควบคุม การออกแบบ และการจำลองการทำงานของตัวปรับปรุงค่าประกอบกำลังแบบบริดจ์เลสส์โทเทมโพล ซึ่งเป็นตัวปรับปรุงค่าประกอบกำลังที่มีประสิทธิภาพการทำงานสูงในปัจจุบัน ตัวปรับปรุงค่าประกอบกำลังชนิดนี้มีจุดเด่นคือ รูปแบบวงจรแบบโทเทมโพลซึ่งเป็นการแบ่งการทำงานของอุปกรณ์สวิตซ์ความถี่สูงและไดโอดในวงจรบริดจ์ออกจากกัน จึงทำให้การไหลของกระแสสวิตซ์ซึ่งความถี่สูงและกระแสหลักมูลความถี่ต่ำแยกออกจากกัน ทำให้ความสูญเสียจากกระแสรีเวิร์สรีฟเฟกต์ของไดโอดลดลง ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงเน้นศึกษาหลักการทำงานและเทคนิคการควบคุมของตัวปรับปรุงค่าประกอบกำลังดังกล่าวเพื่อสร้างแบบจำลองสำหรับจำลองการทำงาน สำหรับใช้ประโยชน์เป็นเครื่องมือในการออกแบบต้นแบบจริงรวมถึงจำลองการทำงานร่วมกับระบบอิเล็กทรอนิกส์กำลังสมัยใหม่อื่นๆ และเพื่อยืนยันความถูกต้องของแบบจำลองที่สร้างขึ้น งานวิจัยนี้ได้ทำการจำลองการทำงานเพื่อพิจารณารูปคลื่นแรงดันและกระแส พร้อมทั้งเปรียบเทียบประสิทธิภาพและการรบกวนฮาร์มอนิกส์ของตัวปรับปรุงค่าประกอบกำลัง 3 แบบ ประกอบด้วย แบบบูสต์ แบบบริดจ์เลสส์ และแบบบริดจ์เลสส์โทเทมโพล ซึ่งผลการจำลองการทำงานแสดงให้เห็นว่า แบบจำลองและเทคนิคการควบคุมที่นำเสนอในงานวิจัยนี้สามารถทำงานได้เป็นอย่างดี โดยตัวปรับปรุงค่าประกอบกำลังแบบบริดจ์เลสส์โทเทมโพลมีค่าประสิทธิภาพการทำงานสูงสุด

คำสำคัญ: ตัวปรับปรุงค่าประกอบกำลัง; บริดจ์เลสส์โทเทมโพล; แบบจำลองสวิตซ์; คอนเวอร์เตอร์

Study, Design, and Simulation of Bridgeless Totem-pole Power Factor Correction

Peerapon Chanhom^{1*} and Natchpong Hatti²

¹ Smart System and Smart Energy Conversion Research Unit, Department of Electrical Engineering, Faculty of Industrial Education, Rajamangala University of Technology Suvarnabhumi (Nonthaburi Campus)

² Machines and Power Conversions Research Team, Intelligent System Research Group, Thailand's National Electronics and Computer Technology Center

* Corresponding author, E-mail: peerapon.c@rmutsb.ac.th

Received: 3 December 2022; Revised: 20 March 2023; Accepted: 11 May 2023

Online Published: 29 July 2023

Abstract: This research proposes a study on operating modes, control technique, design, and simulation of the bridgeless totem-pole power factor correction (PFC). This PFC has high efficiency and the advantage of the totem-pole circuit where two high-frequency switches for boosting and two diodes for conducting current at line frequency. This results in the loss of the diode's reverse recovery current has been reduced. As this advantage, this research will focus on the study of operating modes and control techniques of bridgeless totem-pole PFC, where this PFC has been modeled and simulated. This model will be adopted for prototype designs and used as one component in various modern power electronics systems simulations. To confirm the validity of the study, three types of PFCs including boost, bridgeless, and bridgeless totem-pole have been simulated for discussion of current and voltage waveform and comparing the efficiency and total harmonic distortion. The simulation results show the model and control technique presented in this research can be worked very well and the bridgeless totem-pole PFC has the highest efficiency.

Keywords: Power factor correction; Bridgeless totem-pole; Switching modeling; Converter

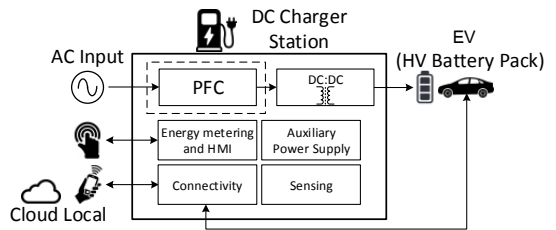


1. บทนำ

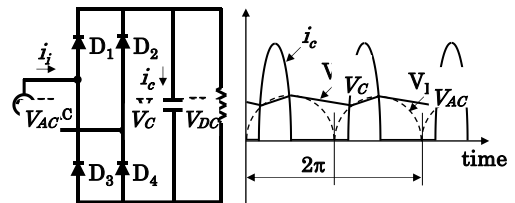
ตัวปรับปรุงค่าประกอบกำลัง (Power Factor Correction (PFC)) เป็นส่วนประกอบสำคัญในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังสมัยใหม่ เช่น แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง (Direct Current (DC) Power Supply) และ ชาร์จเจอร์สำหรับยานยนต์ไฟฟ้า (Electric Vehicle (EV) Charger) ที่ทำหน้าที่อัดประจุแบตเตอรี่แพคแรงดันสูง (High Voltage (HV) Battery Pack) ดังแสดงในรูปที่ 1 [1, 2] เป็นต้น ตัวปรับปรุงค่าประกอบกำลังให้สูงขึ้น โดยควบคุมรูปคลื่นของกระแสอินพุตให้มีลักษณะใกล้เคียงกับรูปคลื่นแรงดันกระแสสลับ (ที่มีลักษณะเป็นคลื่นไซน์ (Sine Wave)) วงจรแปลงต้นกระแสสลับ (Alternating Current (AC)) ไปเป็นแรงดันกระแสตรงที่ไม่มีตัวปรับปรุงค่าประกอบกำลัง เช่น วงจรเรียงกระแสแบบเต็มคลื่น (Full-bridge Rectifier) จะใช้บริดจ์ไดโอดเรียงกระแสแสดงในรูปที่ 2 (ก) ทำให้รูปคลื่นกระแสสลับหลักมูล (i_i) มีความผิดเพี้ยน ส่งผลให้ค่าประกอบกำลังมีค่าต่ำ และกระแสฮาร์มอนิกส์ที่เกิดขึ้นจะทำให้เกิดสัญญาณรบกวนและเกิดความร้อนในตัวนำ [3, 4] โดยรูปคลื่นของกระแสสลับ i_i จะมีลักษณะดังรูปที่ 2 (ข) เนื่องจากกระแสสลับ i_i จะไหลเฉพาะช่วงเวลาที่แรงดันกระแสสลับ V_{AC} สูงกว่าแรงดันที่ตัวเก็บประจุ V_C

ตัวปรับปรุงค่าประกอบกำลังแบบบูสต์ (Boost) ดังรูปที่ 3 (ก) เป็นเทคนิคที่พัฒนาขึ้นในช่วงแรกและได้รับความนิยมมาจนถึงปัจจุบัน ดังเห็นได้จากวงจรรวม (Integrated Circuit (IC)) ที่มีจำหน่ายในเชิงพาณิชย์อย่างแพร่หลาย ต่อมาจึงพัฒนาเป็นแบบบริดจ์เลสส์ (Bridgeless) ดังรูปที่ 3 (ข) เพื่อเพิ่ม

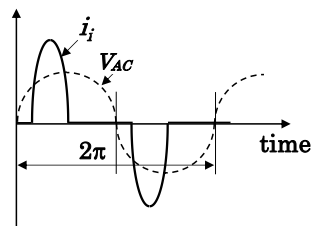
ประสิทธิภาพ (Efficiency) ให้สูงขึ้น โดยลดจำนวนอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ (Semiconductor Device) ลงเพื่อลดความสูญเสีย [5] ปัจจุบัน เทคนิคดังกล่าวได้รับการพัฒนาเป็นแบบบริดจ์เลสส์โทเทมโพล (Bridgeless Totem-Pole) โดยปรับปรุงโครงสร้างและเทคนิคการควบคุมแบบใหม่ ที่สามารถลดความสูญเสียในไดโอด (Diode) จากวงจรแบบบริดจ์เลสส์เดิมได้ ทำให้สามารถทำงานที่ความถี่สวิตซิ่งสูงขึ้น และมีการรบกวนฮาร์มอนิกส์ต่ำ รวมถึงทำให้วงจรมีขนาดเล็กลง [6, 7]



รูปที่ 1 วงจรตัวปรับปรุงค่าประกอบกำลังในอุปกรณ์ชาร์จเจอร์สำหรับยานยนต์ไฟฟ้า



(ก) วงจรเรียงกระแสแบบเต็มคลื่น



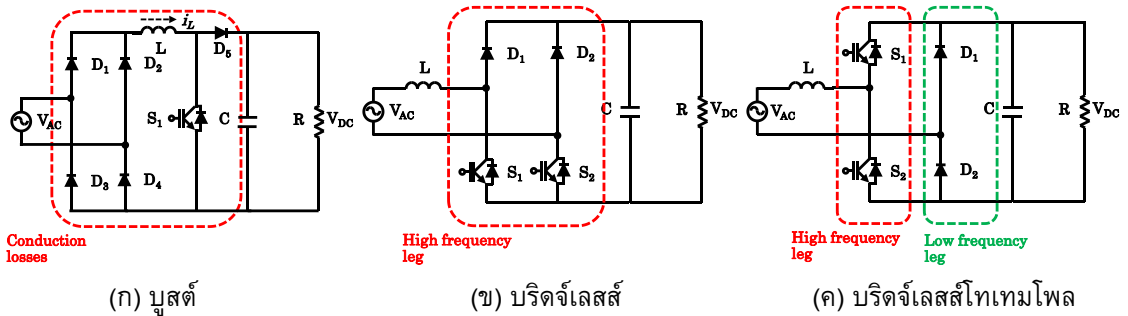
(ข) กระแสสลับหลักมูล

รูปที่ 2 รูปคลื่นแรงดันและกระแสของวงจรเรียงกระแส



จากที่อธิบายข้างต้น สามารถสรุปโครงสร้างวงจรภาพรวมการทำงาน และกำลังไฟฟ้าสูญเสียจากการนำกระแสในอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำของวงจรตัวปรับปรุุงค่าประกอบกำลังแบบต่างๆ ได้ดังตารางที่ 1 ซึ่งแสดงให้เห็นถึงข้อดีของวงจรแบบบริดจ์เลสส์โทเทมโพล ที่เหนือกว่าวงจรตัวปรับปรุุงค่าประกอบกำลังแบบอื่นๆ ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงมุ่งทำการศึกษาวงจรแบบบริดจ์เลสส์โทเทมโพล โดยศึกษาหลักการทํางาน เทคนิคการควบคุม การออกแบบค่าพารามิเตอร์ การสร้างแบบจำลองและการจำลองการทำงาน เพื่อใช้เป็น

เครื่องมือในการออกแบบและพัฒนาต้นแบบจริง ซึ่งจะเป็นประโยชน์ในการวิจัยและพัฒนา การปรับปรุงเทคนิคการควบคุม รวมถึงการจำลองการทำงานร่วมกับระบบอื่นๆ เช่น สถานีอัดประจุแบตเตอรี่สำหรับยานยนต์ไฟฟ้า เป็นต้น โดยงานวิจัยจะทำการสร้างแบบจำลองการทำงานของวงจรแบบสวิตซิ่งและเทคนิคการควบคุมด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อพิจารณารูปคลื่นกระแส แรงดัน รวมถึงเปรียบเทียบประสิทธิภาพที่ได้จากการทํางานของตัวปรับปรุุงค่าประกอบกำลัง 3 แบบ



รูปที่ 3 โครงสร้างวงจรตัวปรับปรุุงค่าประกอบกำลัง

ตารางที่ 1 กำลังไฟฟ้าสูญเสียในอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำของวงจรตัวปรับปรุุงค่าประกอบกำลังแบบต่างๆ

แบบของวงจร	รอบทํางาน	สวิตช์	ไดโอด	ความสูญเสียระหว่างการนำกระแส
บูลสต์	ครึ่งบวกและลบ	$S_1(\text{on})$	D_1, D_4	$2 \times V_F, V_{DS}(\text{on})$ (high frequency)
		$S_1(\text{off})$	D_1, D_4, D_5	$3 \times V_F$
บริดจ์เลสส์	ครึ่งบวก	$S_1(\text{on}), S_2(\text{off})$	$S_2(D)$	$V_F, V_{DS}(\text{on})$ (high frequency)
		$S_1(\text{off}), S_2(\text{on})$	D_1	$V_F, V_{DS}(\text{on})$ (high frequency)
	ครึ่งลบ	$S_2(\text{on}), S_1(\text{off})$	$S_1(D)$	$V_F, V_{DS}(\text{on})$ (high frequency)
		$S_2(\text{off}), S_1(\text{on})$	D_2	$V_F, V_{DS}(\text{on})$ (high frequency)
บริดจ์เลสส์โทเทมโพล	ครึ่งรอบบวก	$S_2(\text{on}), S_1(\text{off})$	D_2	$V_F, V_{DS}(\text{on})$ (low frequency)
		$S_2(\text{off}), S_1(\text{on})$	D_2	$V_F, V_{DS}(\text{on})$ (low frequency)
		ครึ่งรอบลบ	$S_1(\text{on}), S_2(\text{off})$	D_1
$S_1(\text{off}), S_2(\text{on})$	D_1		$V_F, V_{DS}(\text{on})$ (low frequency)	



2. วิธีการดำเนินงานวิจัย/การทดลอง

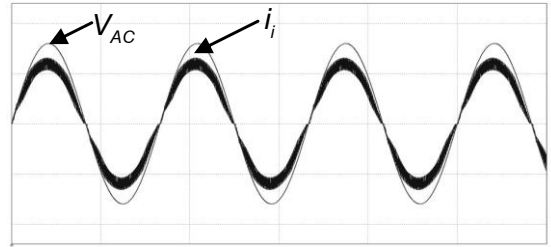
ในส่วนนี้เป็นการวิเคราะห์หลักการการทำงานของวงจรตัวปรับปรุค่าประกอบกำลังแบบต่าง ๆ และวิธีการควบคุมกระแสของวงจร เพื่อทำการสร้างแบบจำลองโดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

2.1 หลักการทำงานของวงจรแบบบัสต์

วงจรแบบบัสต์มีลักษณะดังแสดงในรูปที่ 3 (ก) เป็นการทำงานร่วมกันระหว่างวงจรเรียงกระแสแบบเต็มคลื่นกับวงจรบัสต์คอนเวอร์เตอร์ (Boost Converter) โดยวงจรเรียงกระแสจะเป็นตัวแปลงแรงดันกระแสสลับไปเป็นกระแสตรง ส่วนวงจรบัสต์จะทำหน้าที่แปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงไปเป็นกระแสตรงเพื่อรักษาระดับแรงดันทางด้านเอาต์พุตตามที่กำหนดไว้ ในส่วนของการควบคุมรูปคลื่นกระแสหลักมูล i_i วงจรบัสต์จะถูกควบคุมให้มีการทำงานในลักษณะซิงโครนัส (Synchronous) คือมีการควบคุมจังหวะการ เปิด-ปิด อุปกรณ์สวิตช์ S_1 ให้ตรงกับขนาด มุมเฟส และขั้วของแรงดันในช่วงครึ่งรอบบวก (Positive Half Cycle) และครึ่งรอบลบ (Negative Half Cycle) ของแรงดันกระแสสลับอินพุต จึงทำให้สามารถควบคุมมุมเฟสและรูปคลื่นของกระแสหลักมูล i_i ให้มีลักษณะใกล้เคียงกับแรงดันกระแสสลับ V_{AC} ดังแสดงในรูปที่ 4 ทำให้ค่าประกอบกำลังมีค่าสูง

2.2 หลักการทำงานของวงจรแบบบริดจ์เลสส์

วงจรแบบบริดจ์เลสส์มีลักษณะดังรูปที่ 3 (ข) พัฒนาขึ้นเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานให้ดีกว่าวงจรแบบบัสต์ โดยลดจำนวนอุปกรณ์ลง ทำให้สามารถลดความสูญเสียที่เกิดขึ้นระหว่างการนำกระแส (Conduction Loss) ของอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำในวงจรลงได้วงจรแบบ



รูปที่ 4 กระแส i_i และแรงดันกระแสสลับอินพุต V_{AC}

บริดจ์เลสส์มีลักษณะคล้ายกับวงจรบัสต์คอนเวอร์เตอร์ 2 วงจรขนานกัน วงจรแรกจะทำงานในช่วงครึ่งรอบบวก โดยในช่วงนี้ S_1 จะถูกควบคุมจังหวะ เปิด-ปิด เพื่อ อดคาย พลังงานให้ตัวเหนี่ยวนำ L ส่วน S_2 จะหยุดทำงาน (Off-switch) และไดโอด D_1 จะทำหน้าที่ป้องกันไม่ให้เกิดกระแสไหลย้อนกลับจากด้านเอาต์พุต สำหรับการ ทำงานในช่วงครึ่งรอบลบ ตัว S_2 ถูกควบคุมจังหวะ เปิด-ปิด ส่วน S_1 จะหยุดทำงาน และไดโอด D_2 จะทำหน้าที่ป้องกันไม่ให้เกิดกระแสไหลย้อนกลับจากเอาต์พุต

2.3 หลักการทำงานของวงจรแบบบริดจ์เลสส์โทเทมโพล

วงจรแบบบริดจ์เลสส์โทเทมโพลแสดงในรูป 3 (ค) เป็นเทคโนโลยีใหม่ที่ได้รับความนิยมในปัจจุบัน เนื่องจากมีประสิทธิภาพสูงเมื่อเทียบกับวงจรตัวปรับปรุค่าประกอบกำลังแบบอื่นๆ ที่กล่าวมา วงจรตัวปรับปรุค่าประกอบกำลังนี้มีลักษณะการทำงานที่โดดเด่นคือ การไหลของกระแสซึ่งความถี่สูงและกระแสหลักมูล (ที่ความถี่ไลน์ของแรงดันกระแสสลับอินพุต) จะแยกออกจากกัน เนื่องจาก S_1 และ S_2 ต่อร่วมกันแบบโทเทมโพล ประกอบกับเทคนิคการควบคุมแบบใหม่ ทำให้สามารถควบคุมกระแสสวิตซ์ซึ่งให้ไหลผ่านสวิตซ์ S_1 และ S_2 ส่วนกระแสหลักมูลนั้นจะไหลผ่านไดโอด D_1 และ D_2 ซึ่งการไหลของกระแสลักษณะนี้มีข้อดีคือ สามารถเพิ่มความถี่



ของอุปกรณ์สวิตช์ได้สูงขึ้น ลดความสูญเสียในไดโอดลง และสามารถลดจำนวนอุปกรณ์สวิตช์ในวงจรลงได้

หลักการทำงานของวงจรแบบบริดจ์เลสส์โท-เทมโพล ประกอบด้วย 4 โหมดการทำงาน (Operation mode) ดังแสดงในรูปที่ 5 โดย 4 โหมดการทำงานนี้จะแบ่งออกเป็นการทำงานในช่วงครึ่งรอบบวกและครึ่งรอบลบ ตามการเปลี่ยนแปลงขั้วของแรงดันกระแสสลับอินพุต V_{AC}

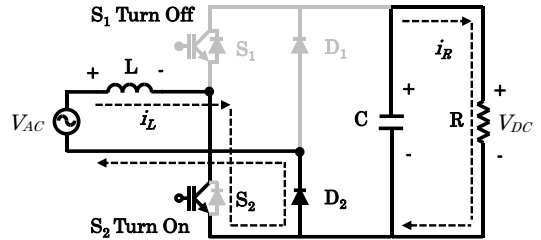
ในช่วงครึ่งรอบบวก เริ่มต้น S_2 จะถูกควบคุมให้เปิดสวิตช์เพื่อทำการอัดพลังงานให้กับตัวเหนี่ยวนำ L และ S_1 จะหยุดทำงาน ส่วนไดโอด D_1 จะทำหน้าที่ป้องกันไม่ให้กระแส i_R ไหลย้อนกลับจากเอาต์พุตดังแสดงในรูปที่ 5 (ก) จากนั้น S_2 จะถูกควบคุมให้เปิดสวิตช์ (ในขณะที่ S_1 ยังหยุดทำงาน) พลังงานไฟฟ้าที่อัดอยู่ใน L จะคายไปยังเอาต์พุตเพื่อทำหน้าที่ขยายแรงดันและรักษาระดับแรงดันกระแสตรง V_{DC} ดังแสดงในรูปที่ 5 (ข)

สำหรับการทำงานในช่วงครึ่งรอบลบ S_1 จะถูกควบคุมให้เปิดสวิตช์เพื่อทำการอัดพลังงานให้กับตัวเหนี่ยวนำ L และ S_2 จะหยุดทำงาน ส่วนไดโอด D_2 จะป้องกันไม่ให้กระแสไหลย้อนกลับจากเอาต์พุตดังแสดงในรูปที่ 5 (ค) จากนั้น S_1 จะถูกควบคุมให้เปิดสวิตช์ (ในขณะที่ S_2 ยังหยุดทำงาน) พลังงานไฟฟ้าที่อัดอยู่ใน L จะคายไปยังเอาต์พุตเพื่อทำหน้าที่ขยายแรงดันและรักษาระดับแรงดันกระแสตรง V_{DC} ดังแสดงในรูปที่ 5 (ง)

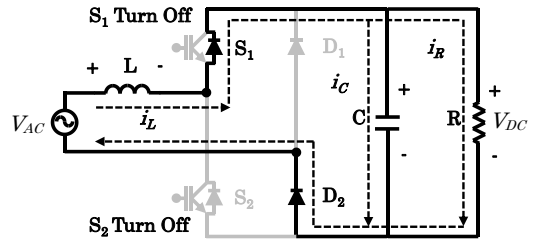
2.4 เทคนิคการควบคุมวงจรแบบบริดจ์เลสส์โท-เทมโพล

ตัวควบคุมของวงจรแบบบริดจ์เลสส์โท-เทมโพล แสดงในรูปที่ 6 เป็นตัวควบคุมแบบวงปิด (Closed-Loop) ที่มีการป้อนกลับของสัญญาณควบคุม (Feedback Control) โดยควบคุมแบบพีไอ (Proportional

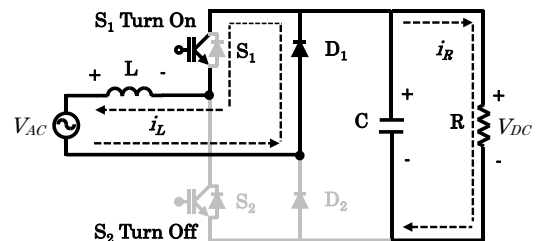
Integral (PI)) ซึ่งเป็นเทคนิคที่เป็นที่นิยมใช้ในงานควบคุมทางวิศวกรรม เนื่องจากประยุกต์ใช้งานได้ง่าย และมีเสถียรภาพสูง [7]



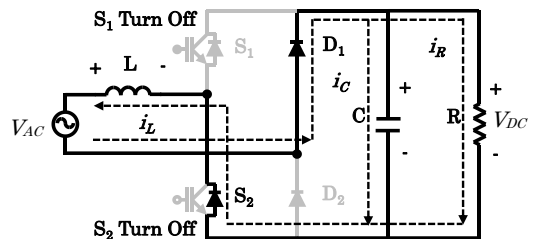
(ก) โหมดอัด (ครึ่งรอบบวก)



(ข) โหมดคาย (ครึ่งรอบบวก)



(ค) โหมดอัด (ครึ่งรอบลบ)

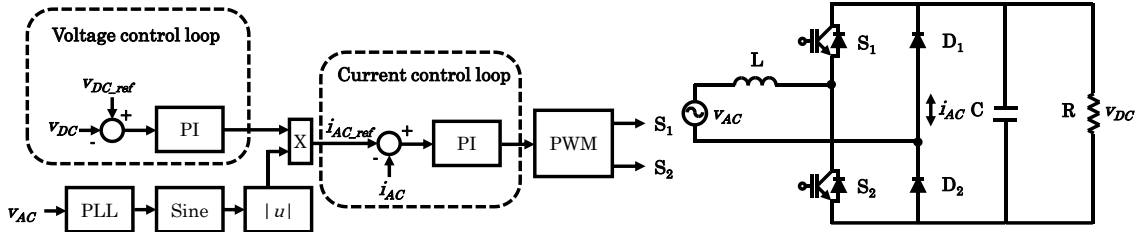


(ง) โหมดคาย (ครึ่งรอบลบ)

รูปที่ 5 โหมดการทำงานของวงจรแบบบริดจ์เลสส์โท-เทมโพล



บทความวิจัย



รูปที่ 6 ตัวควบคุมแบบพีไอของวงจรแบบบริดจ์เลสส์โทเทมโพลที่นำเสนอในงานวิจัย

รูปที่ 6 แสดงตัวควบคุมประกอบด้วยวงจรถวลคุมแรงดัน (Voltage Control Loop) และวงจรถวลคุมกระแส (Current Control Loop) เพื่อควบคุมขนาดของแรงดันกระแสตรงเอาต์พุตและขนาดของกระแสสลับหลักมูลให้เป็นไปตามที่กำหนด โดยวงจรถวลคุมแรงดันจะอยู่วงนอกและสร้างสัญญาณกระแสสลับอ้างอิง i_{AC_ref} ให้กับวงจรถวลคุมกระแสที่อยู่วงใน และสำหรับสัญญาณที่ใช้ควบคุม S_1 และ S_2 นั้นจะได้จากสัญญาณเอาต์พุตจากวงจรถวลคุมกระแสที่ผ่านการมอดูเลตความกว้างพัลส์ (Pulse-width Modulation (PWM))

ในส่วนของการควบคุมกระแสสลับให้มีรูปคลื่นใกล้เคียงกับแรงดันกระแสสลับอินพุตนั้น ตัวควบคุม

จะปรับสัญญาณกระแสสลับอ้างอิงโดยนำเอารูปคลื่นของแรงดันกระแสสลับอินพุต v_{AC} เข้ามาพิจารณาด้วย

3. ผลการทดลอง

ในส่วนนี้เป็นการจำลองการทำงานวงจรตัวปรับปรุ่ค่าประกอบกำลังด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์โดยใช้แบบจำลองแบบสวิตซ์ซึ่งและเปรียบเทียบประสิทธิภาพของวงจรตัวปรับปรุ่ค่าประกอบกำลังทั้ง 3 แบบตามที่ได้อธิบายมาก่อนหน้านี้ โดยวงจรตัวปรับปรุ่ค่าประกอบกำลังทั้ง 3 แบบจะมีพิกัดทางไฟฟ้าและพารามิเตอร์ของอุปกรณ์รายละเอียดสรุปตามตารางที่ 2 ซึ่งทั้ง 3 แบบที่นำมาเปรียบเทียบจะกำหนดให้มีพิกัดทางไฟฟ้าเท่ากันเพื่อให้สามารถเปรียบเทียบประสิทธิภาพได้อย่างถูกต้อง

ตารางที่ 2 พิกัดทางไฟฟ้าและพารามิเตอร์ของอุปกรณ์ที่ใช้ในการจำลองการทำงาน

	พิกัดและพารามิเตอร์ของอุปกรณ์	ค่าปกติ	หน่วย
V_{AC}	แรงดันอินพุต (กระแสสลับ)	150-260	โวลต์ (Vrms)
V_{DC}	แรงดันเอาต์พุต (กระแสตรง)	385	โวลต์ (V)
f_{LINE}	ความถี่แรงดันอินพุต	50	เฮิร์ตซ์ (Hz)
f_{SW}	ความถี่สวิตซ์ซิ่ง	65	กิโลเฮิร์ตซ์ (kHz)
P_{OUT}	กำลังเอาต์พุต	4500	วัตต์ (W)
C_{DC}	ขนาดตัวเก็บประจุเอาต์พุต	2	มิลลิฟารัด (mF)
L	ขนาดตัวเหนี่ยวนำ	34	ไมโครเฮนรี่ (uH)



3.1 พิกัดวงจรตัวปรับปรุงค่าประกอบกำลัง ที่ใช้ในการจำลองการทำงาน

ตารางที่ 2 แสดงพารามิเตอร์ของอุปกรณ์ของวงจรตัวปรับปรุงค่าประกอบกำลังที่ใช้ในการจำลองการทำงาน โดยกำหนดให้ความถี่สวิตซ์เท่ากับ 65 กิโล-เฮิร์ตซ์ ซึ่งเป็นความถี่ที่ทำให้ขนาดของตัวเหนี่ยวนำไม่ใหญ่จนเกินไป และกำหนดกระแสรีปเปิ้ลมีค่าไม่เกิน 15% ในส่วนของขนาดตัวเก็บประจุเอาต์พุต C_{DC} และตัวเหนี่ยวนำ L สามารถคำนวณได้ตาม [7] ในการจำลองการทำงาน ตัวควบคุมจะต้องสามารถรักษาระดับแรงดันกระแสตรงเอาต์พุต V_{DC} ได้ตามที่กำหนด ซึ่งแรงดันกระแสสลับอินพุต V_{AC} จะมีค่าต่ำสุด-สูงสุดอยู่ในช่วงไม่เกิน 150-260 โวลต์ (อาร์เอ็มเอส)

3.2 แบบจำลองสวิตซ์ของวงจรแบบบริดจ์เลสส์โทเทมโพลที่ใช้ในงานวิจัย

แบบจำลองที่ใช้ในงานวิจัยพัฒนาขึ้นตามที่ได้อธิบายในหลักการทำงานและเทคนิคการควบคุมวงจรตัวปรับปรุงค่าประกอบกำลังในส่วนที่ 2 โดยใช้บล็อกของ MATLAB & Simulink ซึ่งเป็นโปรแกรมจำลองการทำงานที่ได้รับความนิยมในทางวิศวกรรม [8, 9] เพื่อสร้างแบบจำลองแบบสวิตซ์ซึ่งสามารถจำลองการทำงานที่สามารถพิจารณาความสูญเสียที่เกิดขึ้นในอุปกรณ์ต่างๆ ในวงจรได้

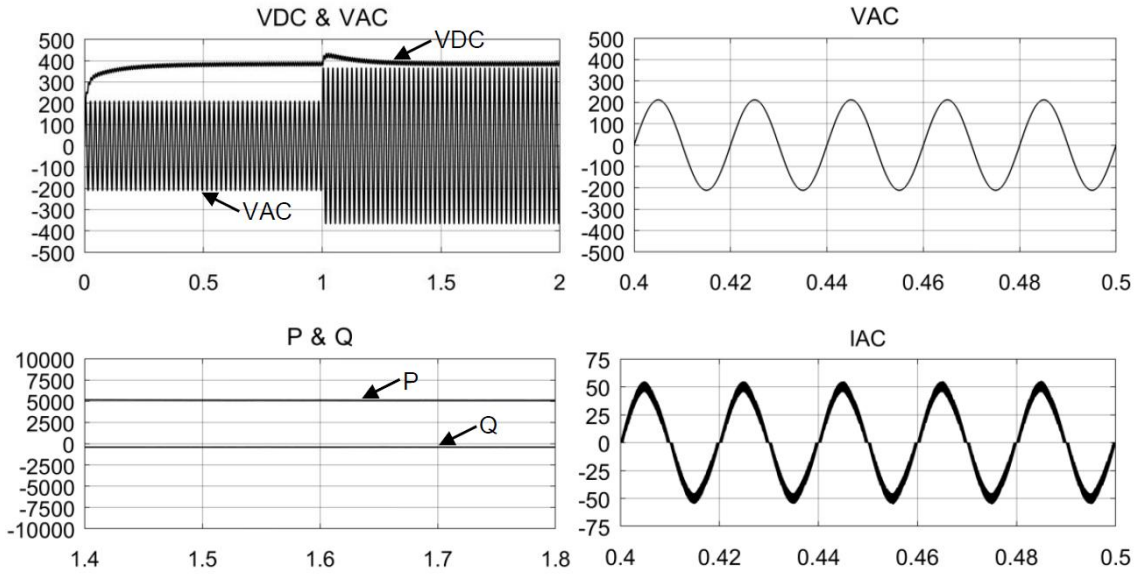
3.3 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการทำงาน

ผลการจำลองการทำงานในรูปที่ 7 แสดงรูปคลื่นแรงดันและกระแสของวงจรแบบอินเวอร์ตีฟิวส์ โดยตัวควบคุมสามารถรักษาระดับแรงดันกระแสตรงเอาต์พุต V_{DC} ได้ตามพิกัดที่กำหนด แม้มีการเปลี่ยนแปลงแรงดันกระแสสลับเอาต์พุต V_{AC} และสามารถควบคุมรูปคลื่นของกระแสหลักมูล i_L ให้ใกล้เคียงกับรูปคลื่นของแรงดันกระแสสลับเอาต์พุต V_{AC} จึงทำให้ค่าประกอบกำลังมีค่าสูง ดังเห็นได้จากสัดส่วนระหว่างกำลังไฟฟ้าจริง P และกำลังไฟฟ้าเสมือน Q ซึ่งกำลังไฟฟ้าเสมือนมีค่าเข้าใกล้ศูนย์ ข้อดีของวงจรแบบอินเวอร์ตีฟิวส์คือ มีกระแสรีปเปิ้ล (ripple current) ที่ต่ำ เนื่องจากวงจรมีการทำงานแบบอินเวอร์ตีฟิวส์ทำให้กระแสรีปเปิ้ลระหว่างเฟสที่ 1 i_{L1} และเฟสที่ 2 i_{L2} เกิดการหักล้างกันภายในวงจร และทำให้สามารถลดขนาดของตัวเหนี่ยวนำลงได้

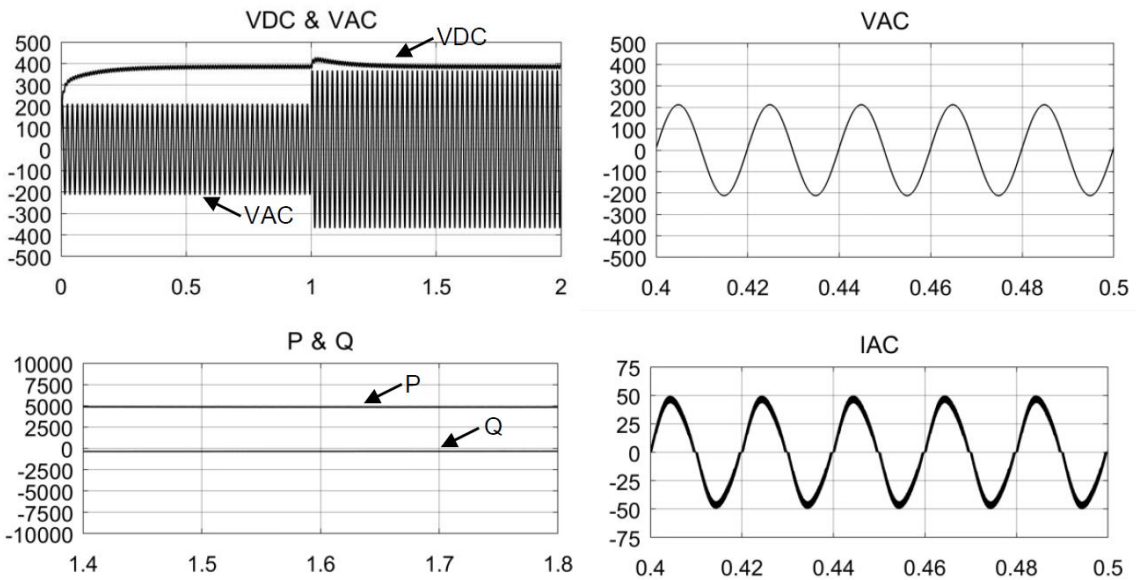
รูปที่ 8 แสดงรูปคลื่นแรงดันและกระแสของวงจรแบบบริดจ์เลสส์ การรักษาระดับแรงดันกระแสตรงเอาต์พุต V_{DC} การควบคุมรูปคลื่นกระแส i_L ระดับกระแสรีปเปิ้ล และกำลังไฟฟ้าเอาต์พุต เป็นไปตามพิกัดที่กำหนด ข้อดีของวงจรที่เห็นได้ชัดเมื่อเทียบกับวงจรแบบอินเวอร์ตีฟิวส์คือ กำลังไฟฟ้าสูญเสียที่ลดลง ซึ่งเป็นผลมาจากการลดจำนวนอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำลง ทำให้สามารถลดความสูญเสียที่เกิดระหว่างการนำกระแสของอุปกรณ์ในวงจรลงได้ ดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 เปรียบเทียบประสิทธิภาพสูงสุดในการทำงานและการรบกวนกระแสฮาร์มอนิกส์

วงจร	ประสิทธิภาพสูงสุด	การรบกวนฮาร์มอนิกส์รวมสูงสุด
อินเวอร์ตีฟิวส์	88%	14%
บริดจ์เลสส์	92%	11%
บริดจ์เลสส์โทเทมโพล	95%	11%



รูปที่ 7 ภาพรวมการทำงานของวงจรแบบอินเตอร์รีฟลูสดี



รูปที่ 8 ภาพรวมการทำงานของวงจรแบบบริดจ์เลสส์

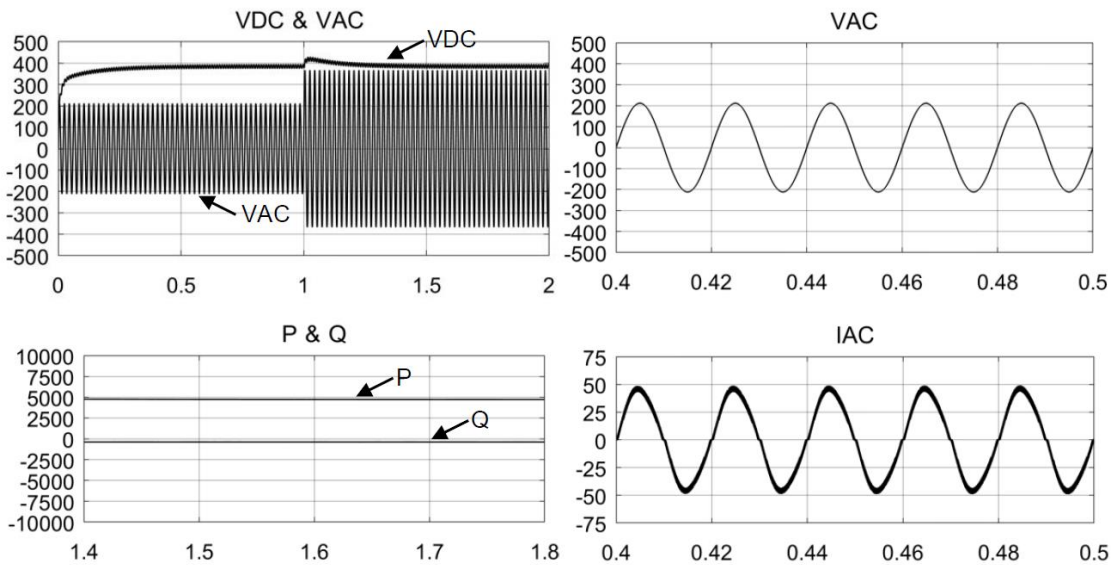


สำหรับผลการจำลองการทำงานของวงจรแบบบริดจ์เลสส์โทเทมโพล จะคล้ายกับวงจรแบบบริดจ์เลสส์ ดังแสดงในรูปที่ 9 ซึ่งการทำงานเป็นไปตามพิกัดที่กำหนดเช่นเดียวกัน แต่มีข้อแตกต่างกันในเรื่องของรูปคลื่นของกระแสที่ไหลผ่าน S_1 , S_2 , D_1 และ D_2 ทั้งนี้เนื่องจากการที่ S_1 และ S_2 ต่อรวมกันแบบโทเทมโพล ทำให้เส้นทางการไหลของกระแสสวิตซ์ซึ่งความถี่สูงและกระแสหลักมูล (ความถี่ไลน์ของแรงดันกระแสสลับ V_{AC}) แยกออกจากกันดังแสดงในรูปที่ 10 โดยกระแสสวิตซ์ซึ่งจะไหลผ่านสวิตซ์ S_1 และ S_2 ส่วนกระแสหลักมูล i_L จะไหลผ่านไดโอด D_1 และ D_2 ซึ่งการไหลลักษณะนี้จะทำให้ความสูญเสียจากกระแสรีเวิร์สรีคัพเวอรี (Reverse Recovery) ที่ไหลผ่านไดโอดลดลงได้ โดยเมื่อเทียบกับ

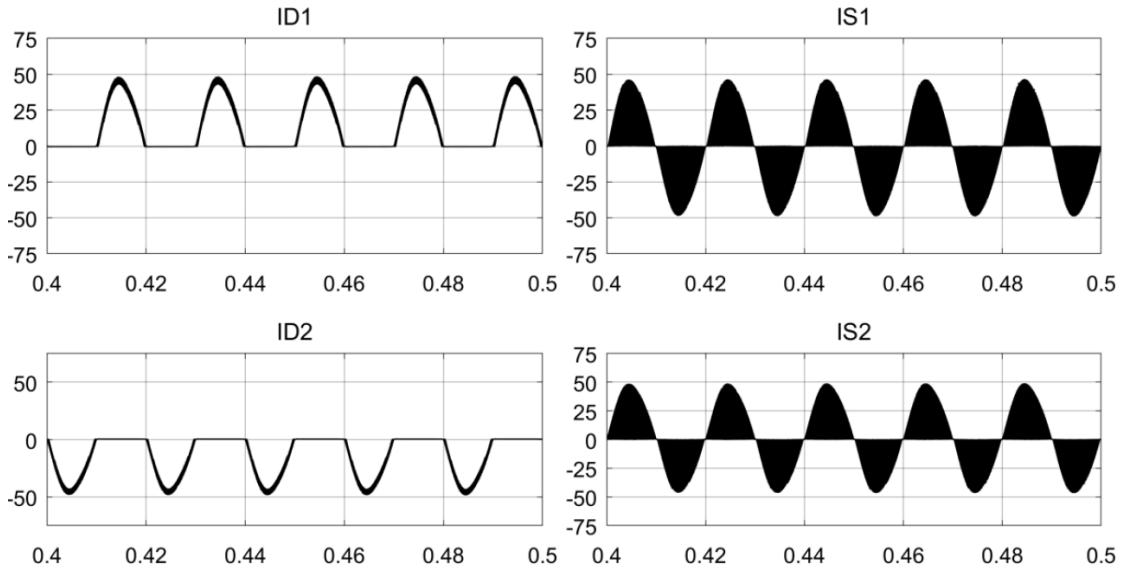
วงจรแบบบริดจ์เลสส์ กระแสที่ไหลผ่าน S_1 , S_2 , D_1 และ D_2 ดังแสดงในรูปที่ 11 จะเห็นว่า กระแสที่ไหลผ่านไดโอดจะมีส่วนที่เป็นสวิตซ์ซึ่ง จึงเกิดความสูญเสียจากกระแสรีเวิร์สรีคัพเวอรี ทำให้ประสิทธิภาพของวงจรแบบบริดจ์เลสส์น้อยกว่าวงจรแบบบริดจ์เลสส์โทเทมโพล ดังสรุปในตารางที่ 3 โดยค่าประสิทธิภาพจะคำนวณจากสมการ (1)

$$\text{ประสิทธิภาพ(\%)} = \frac{\text{กำลังไฟฟ้าจริงกระแสตรง (} P_{DC} \text{)}}{\text{กำลังไฟฟ้าจริงกระแสสลับ (} P_{AC} \text{)}} \times 100 \text{ \%} \quad (1)$$

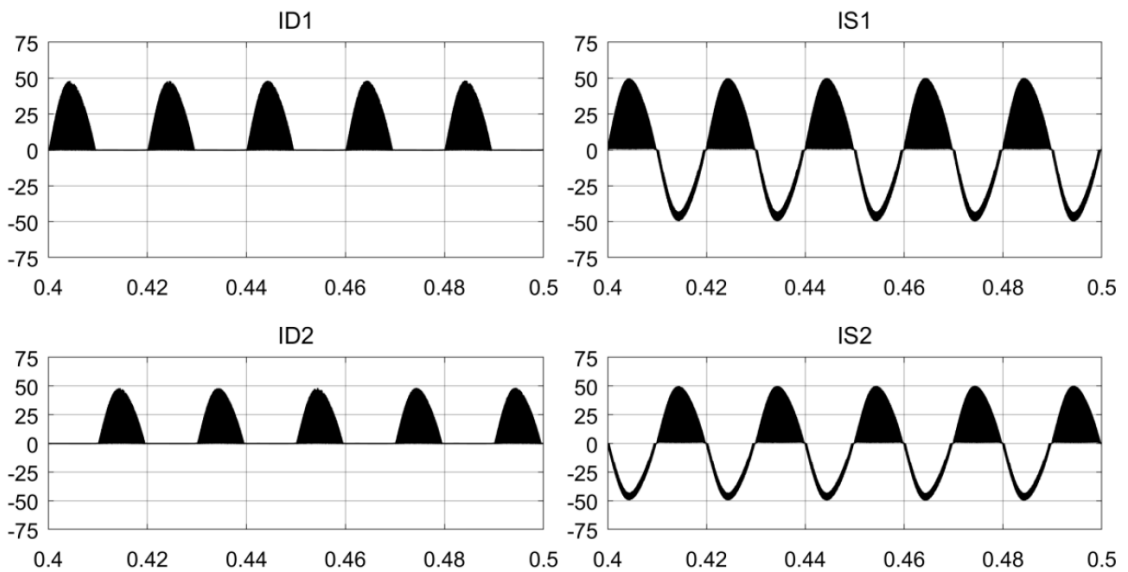
ซึ่งจะวัดขณะวงจรทำงานที่พิกัดกำลังไฟฟ้าสูงสุด ส่วนการรบกวนฮาร์มอนิกส์จะใช้บล็อกวัดสัญญาณการรบกวนฮาร์มอนิกภายในโปรแกรมคอมพิวเตอร์



รูปที่ 9 ภาพรวมการทำงานของวงจรแบบบริดจ์เลสส์โทเทมโพล



รูปที่ 10 กระแสที่ไหลผ่าน D_1 , D_2 , S_1 และ S_2 ของวงจรแบบบริดจ์เลสส์โทเทมโพล



รูปที่ 11 กระแสที่ไหลผ่าน D_1 , D_2 , S_1 และ S_2 ของวงจรแบบบริดจ์เลสส์



4. สรุปผลการทดลอง

งานวิจัยได้ศึกษาหลักการทํางาน เทคนิคการควบคุม การออกแบบ และจําลองการทํางานของตัวปรับปรุ่ค่าประกอบกําลังแบบบริดจ์เลสส์โทเทมโพล ซึ่งมีประสิทธิภาพการทํางานสูงสุดเมื่อเทียบกับประเภทอื่น ๆ เนื่องจากตัวปรับปรุ่ค่าประกอบกําลังชนิดนี้ มีจํานวนอุปกรณ์น้อย และมีโครงสร้างวงจรและวิธีการควบคุมที่ทําให้กรไหลของกระแสวิตซ์ซึ่งความถี่สูงและกระแสหลักมูลความถี่ต่ำแยกออกจากกัน ทําให้ความสูญเสียจากกระแสรีเวิร์สรีคัพเวอร์ของไดโอดลดลง ซึ่งเป็นความสูญเสียหลักของอุปกรณ์ประเภทนี้ ดังเห็นได้จากการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของการจําลองการทํางานของตัวปรับปรุ่ค่าประกอบกําลัง 3 แบบประกอบด้วย แบบบัสต์ แบบบริดจ์เลสส์ และแบบบริดจ์เลสส์โทเทมโพล ซึ่งผลการจําลองการทํางานแสดงให้เห็นว่า ตัวปรับปรุ่ค่าประกอบกําลังแบบบริดจ์เลสส์โทเทมโพลมีค่าประสิทธิภาพการทํางานสูงที่สุด ซึ่งแบบจําลองและเทคนิคการควบคุมที่นำเสนอในงานวิจัยนี้สามารถทํางานได้เป็นอย่างดี โดยแบบจําลองและเทคนิคการควบคุมในงานวิจัยนี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้เป็นเครื่องมือในการออกแบบและพัฒนาต้นแบบจริง ซึ่งจะเป็นประโยชน์ในการวิจัยและพัฒนาการปรับปรุ่เทคนิคการควบคุม รวมถึงการใช้เป็นส่วนหนึ่งในการจําลองการทํางานร่วมกับระบบอิเล็กทรอนิกส์กําลังสมัยใหม่ เช่น แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง และซาร์จเจอร์สำหรับยานยนต์ไฟฟ้า เป็นต้น

5. เอกสารอ้างอิง

- [1] S. S. Sayed and A.M. Massoud, Review on state-of-the-art unidirectional non-isolated power factor correction converters for short-/long-distance Electric Vehicles, IEEE Access, 2022, 10(1), 11308-11340.
- [2] S. Inamdar, A. Thosar and S. Mante, Literature review of 3.3kW on board charger topologies, The 3rd International Conference on Electronics, Communication and Aerospace Technology (ICECA 2019), Proceeding, 2019, 276-281.
- [3] Z. Chen, B. Liu, Y. Yang, P. Davari and H. Wang, Bridgeless PFC topology simplification and design for performance benchmarking, IEEE Transactions on Power Electronics, 2021, 36(5), 5398-5414.
- [4] Application Note, Power Factor Correction (PFC) Circuits, 2019.
- [5] User Guide, TDTTP4000W065AN_0V1: 4kW Analog Bridge-less Totem-pole PFC Evaluation Board, 2021.
- [6] SLUA479B, Application Report, UCC28070 300-W Interleaved PFC Pre-Regulator Design Review, 2008.
- [7] SLUSBQ5D, UCC28180 Programmable Frequency, Continuous Conduction Mode (CCM), Boost Power Factor Correction (PFC) Controller, 2016.



- [8] W.H. Liao, S.C. Wang and Y.H. Liu, Generalized simulation model for a switched-mode power supply design course using MATLAB/SIMULINK, IEEE Transactions on Education, 2012, 55(1), 36-47.
- [9] J.H. Su, J.J. Chen and D.S. Wu, Learning feedback controller design of switching converters via MATLAB/SIMULINK, IEEE Transactions on Education, 2002, 45(4), 307-315.

ภาวะชีวภาพจากการปรับแต่งแป้งมันสำปะหลังที่เป็นของเสีย/พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ที่เชื่อมขวางด้วยกรดแทนนิกสำหรับการประยุกต์ใช้งานในไม้

ชโลธร เจริญสูงเนิน ฅัญฐ์นรี ศรีเชียงสา และ พรนภา เกษมศิริ *

สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยขอนแก่น

* ผู้ประสานงานเผยแพร่ (Corresponding Author), E-mail: pornkas@kku.ac.th

วันที่รับบทความ: 10 ตุลาคม 2565; วันที่ทบทวนบทความ: 28 มีนาคม 2566; วันที่ตอบรับบทความ: 11 พฤษภาคม 2566

วันที่เผยแพร่ออนไลน์: 29 กรกฎาคม 2566

บทคัดย่อ: ในงานวิจัยนี้มุ่งเน้นที่การเพิ่มมูลค่าให้กับแป้งที่เป็นของเสียจากโรงงานแป้งมันสำปะหลังโดยการนำมาสังเคราะห์เป็นแป้งคาร์บอกซิเมทิล (CMS) เพื่อใช้เป็นสารตั้งต้นในการสังเคราะห์ภาวะชีวภาพ และใช้กรดแทนนิก (TA) เป็นสารเชื่อมขวาง การเชื่อมขวางของภาวะชีวภาพสามารถยืนยันผลได้จากการพบพีคของพันธะเอสเทอร์ ปริมาณภาวะที่เหมาะสมในการนำไปใช้งานคือ 500 กรัมต่อตารางเมตร มีค่าความต้านทานแรงเฉือนระยะเวลาการเก็บรักษา 7 วัน เท่ากับ 2.35 เมกะปาสคาล เมื่อใช้งานภายในอาคารที่อุณหภูมิห้อง อย่างไรก็ตาม ค่าต้านทานแรงเฉือนลดลงเมื่อนำไปใช้งานในสภาวะที่มีความชื้นสูง และภายนอกอาคาร เนื่องจากทั้งสองสภาวะทำให้โครงสร้างของภาวะชีวภาพมีปริมาตรอิสระ (Free Volume) ที่มากขึ้นส่งผลให้สายโซ่พอลิเมอร์เคลื่อนตัวได้ง่าย ภาวะชีวภาพที่สังเคราะห์มาจากแป้งที่เป็นของเสียแสดงให้เห็นถึงความสามารถที่ดีในการนำไปใช้ในอุตสาหกรรมไม้ได้ เพื่อเพิ่มมูลค่าให้กับแป้งที่เป็นของเสีย และยังสามารถลดการใช้งานภาวะที่ได้จากปิโตรเคมี

คำสำคัญ: ภาวะชีวภาพ; แป้งเสีย; แป้งคาร์บอกซิเมทิล; พอลิไวนิลแอลกอฮอล์; กรดแทนนิก

Bio-adhesive based Modified Cassava Starch Waste/polyvinyl Alcohol Crosslinked with Tannic Acid for Wood Application

Chaloton Jarensungnen, Natnaree Srichiangsa and Pornnapa Kasemsiri*

Division of Chemical Engineering, Faculty of Engineering, Khon Kaen University

* Corresponding author, E-mail: peerapon.c@rmutsb.ac.th

Received: 10 October 2022; Revised: 28 March 2023; Accepted: 11 May 2023

Online Published: 29 July 2023

Abstract: This research aimed to add value to the waste cassava starch from the starch factory by synthesizing it as a carboxymethyl starch (CMS) and then using it as a raw material to prepare bio-adhesive and using tannic acid (TA) as a crosslinking agent. The cross-linking of the bio-adhesive was confirmed by the presence of ester bond peaks. The optimum amount of adhesive for use was 500 g/m². The stable shear strength over 7 days was 2.35 MPa when used indoors at room temperature. However, the shear strength was decreased when used in high humidity conditions and outdoors due to both conditions increased free volume in the bio-adhesive structure, the polymer chains are easy to move. Bio-adhesives synthesized from waste cassava starch showed excellent properties to be applied in the wood industry for the added value to the waste cassava starch and also reduce the use of adhesives from petrochemicals.

Keywords: Bio-adhesive; Starch waste; Sodium carboxymethyl starch; Polyvinyl alcohol; Tannic acid



1. บทนำ

อุตสาหกรรมไม้ส่วนใหญ่ในปัจจุบันใช้เป็นสารยึดเหนี่ยวหรือกาวที่ผลิตจากจากปิโตรเคมี เช่น ยูเรียฟอร์มัลดีไฮด์ (Urea-formaldehyde) ฟีนอลิกฟอร์มัลดีไฮด์ (Phenolic-formaldehyde) และเมลามีนฟอร์มัลดีไฮด์ (Melamine-formaldehyde) เป็นต้น เนื่องจากมีความสามารถในการยึดเหนี่ยวที่ดี มีความทนทานต่อความร้อนและความชื้นในระหว่างการใช้งาน [1] อย่างไรก็ตามกาวที่มีฟอร์มัลดีไฮด์เป็นองค์ประกอบจะปลดปล่อยก๊าซฟอร์มัลดีไฮด์ ตั้งแต่กระบวนการผลิตตลอดจนสิ้นอายุการใช้งานของกาว ซึ่งองค์การอนามัยโลก (World Health Organization, WHO) ได้จัดให้ก๊าซฟอร์มัลดีไฮด์ที่ปลดปล่อยออกมามากกว่า 0.1 มิลลิกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ในระยะเวลา 30 นาที จากกาวมีความเป็นพิษต่อร่างกายมนุษย์ และสิ่งแวดล้อม [2] ดังนั้นในปัจจุบันจึงมีการศึกษาการสังเคราะห์กาวจากผลิตภัณฑ์ธรรมชาติอย่างกว้างขวาง เช่น โพรตีน [3] ไคโตซาน (Chitosan) [4] แป้ง [5] เนื่องจากวัตถุดิบตั้งต้นที่หาได้จากธรรมชาติมีอยู่เป็นจำนวนมากและไม่ก่อให้เกิดความเป็นพิษ [6] แป้งเป็นวัสดุธรรมชาติที่ได้รับความนิยมเป็นอย่างมากที่นำมาสังเคราะห์กาว เช่น แป้งสาลี แป้งข้าวโพด และแป้งมันสำปะหลัง [7] ซึ่งแป้งแต่ละชนิดมีองค์ประกอบของอะไมโลส (Amylose) และอะไมโลเพกทิน (Amylopectin) ที่แตกต่างกัน ส่งผลให้มีสมบัติแตกต่างกันไปด้วยแป้งมันสำปะหลังมีองค์ประกอบของอะไมโลเพกทินร้อยละ 83 [8] ทำให้มีคุณสมบัติในการเกิดเจลที่ต่ำ นอกจากนี้ แป้งมันสำปะหลังยังมีโรงงานผลิตหลายแห่ง ซึ่งในระหว่างกระบวนการผลิตแป้งจะมีแป้งที่ปะปนกับน้ำที่ใช้ในการทำความสะดวกระบบการผลิต เมื่อนำน้ำแป้ง

ไปผ่านกระบวนการทำแห้งแล้ว แป้งที่ได้จะเป็นแป้งที่ไม่ผ่านมาตรฐาน มีมูลค่าต่ำ จากงานวิจัยที่ผ่านมา มีแนวทางในการเพิ่มมูลค่าให้กับแป้งที่ไม่ผ่านมาตรฐาน เช่น การนำมาผลิตเป็นน้ำตาลรีดิวซ์ (Reducing Sugar) [9] และผลิตเอทานอล (Ethanol) [10] นอกจากนี้แป้งยังสามารถนำมาผลิตเป็นกาวได้ด้วย อย่างไรก็ตามกาวที่สังเคราะห์จากแป้งที่ไม่ได้ปรับแต่งโครงสร้างยังคงพบปัญหาเนื่องจากมีความหนืดที่ต่ำ และละลายน้ำได้ยาก [11] ได้มีนักวิจัยพบว่าแป้งคาร์บอกซิเมทิล (Carboxymethyl Starch: CMS) เป็นแป้งที่ได้มีการปรับแต่งโครงสร้าง หมู่คาร์บอกซิเมทิลที่อยู่ในโครงสร้างของ CMS จะช่วยให้กาวที่สังเคราะห์ขึ้นมีความหนืดสูงขึ้นเมื่อเทียบกับแป้งที่ไม่ปรับแต่ง [12] ในงานวิจัยของ Junidah Lamaming และคณะ [1] ได้สังเคราะห์กาวจาก CMS และ พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ (Polyvinyl Alcohol: PVA) พบว่าการเติม PVA ทำให้มีความคงตัวระหว่างการรักษาที่ดีขึ้น ความแข็งแรงในการยึดเกาะเพิ่มสูงขึ้นจาก 9.04 เมกะปาสคาล เป็น 16.9 เมกะปาสคาล และมีสมบัติป้องกันน้ำที่ดี ทั้งนี้ PVA ได้รับความนิยมในการนำมาประยุกต์ใช้เป็นกาวเนื่องจากด้วยมีราคาถูก ทนต่อสารเคมี มีความเข้ากันได้ดีระหว่าง CMS และ PVA [1]

กรดแทนนิก (Tannic Acid: TA) เป็นกรดอ่อนที่ประกอบไปด้วยพอลิฟีนอลิก (Polyphenolic) มีคุณสมบัติตกตะกอน โพรตีน พอลิแซ็กคาไรด์ (Polysaccharide) และ แอลคาลอยด์ (Alkaloid) นอกจากนี้ TA ยังนิยมใช้เป็นตัวเชื่อมขวางเพื่อเพิ่มความแข็งแรงให้กับวัสดุ ในงานวิจัยของ Saman Ghahri และคณะ [13] ได้ใช้ TA มาเป็นตัวเชื่อมขวางในโครงสร้างของกาวที่สังเคราะห์มาจากถั่วเหลือง



พบว่า การเติม TA นั้นช่วยเพิ่มความสามารถในการยึดเกาะร้อยละ 11.3 และลดอัตราการดูดซึมน้ำของไม้ได้ เนื่องจากหมู่ฟีนอลิกในโครงสร้างของ TA ทำปฏิกิริยากับหมู่อะมิโนในโครงสร้างของถั่วเหลือง

ไม้ถูกนำมาใช้ในหลากหลายสภาวะทั้งภายใน และภายนอก ดังนั้นการทดสอบความคงทนของกาวสำหรับไม้ในสภาวะต่างๆจึงเป็นสิ่งสำคัญ ในงานวิจัยของ Eirik Raknes [14] ได้ทำการนำกาวจากโรงงานมาทำการทดสอบความแข็งแรงของกาวสำหรับไม้ภายใน และภายนอกอาคารเมื่อเวลาผ่านไป 30 ปี พบว่าไม้ที่วางทิ้งไว้ภายนอกอาคารเกิดการลอกชั้นวัสดุ (Delamination) และมีค่าความแข็งแรงลดลง นอกจากนี้ในงานวิจัยของ Li li และ Cai wang [15] ได้ทำการสังเคราะห์กาวจากพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต (Polyethylene Terephthalate) และทดสอบความคงทนของกาวโดยการนำไม้ที่ทา กาวไปวางไว้ในสภาวะความชื้นสูง (98-100%RH) พบว่าเมื่อเวลาในการสัมผัสความชื้นเพิ่มมากขึ้น ค่าอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (T_g) ของกาวลดลง เนื่องจากมีโมเลกุลของน้ำจำนวนมากแพร่เข้าไปในโครงสร้างของกาว ซึ่งค่าอุณหภูมิคล้ายแก้วเป็นค่าที่สายโซ่พอลิเมอร์เริ่มเคลื่อนที่เมื่อได้รับความร้อน [16]

ในงานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นที่จะเพิ่มมูลค่าให้กับแป้งเสียจากโรงงานโดยการนำมาใช้เป็นสารตั้งต้นในการสังเคราะห์เป็นกาวชีวภาพ และใช้ TA เป็นสารเชื่อมขวางเพื่อเพิ่มความแข็งแรงของกาวชีวภาพ โดยทำการวิเคราะห์ลักษณะทางจุลภาคของกาวชีวภาพ และหาปริมาณกาวที่เหมาะสมรวมถึงวิเคราะห์ความคงทนของกาวชีวภาพ

2. วิธีการวิจัย

2.1 วัสดุอุปกรณ์

แป้งมันสำปะหลังที่เป็นของเสียจากบริษัท แก่นเจริญ จำกัด พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ (Polyvinyl Alcohol: PVA) ที่มีระดับการเกิดพอลิเมอร์ไซเทชัน 1,700-1,800 ความหนืด 25-32 เซนติพอยซ์ การไฮโดรไลซิสร้อยละ 98-99 โดยโมล ผลิตจาก Laboratory Reagents & Fine Chemical กรดแทนนิก (Tannic Acid: TA) กรดแทนนิก (TA) มวลโมเลกุล 1701.20 กรัมต่อโมล จากบริษัท Sigma-Aldrich โซเดียมโมโนคลอโรอะซิเตท (Sodium Mono Chloroacetate: $C_2H_2ClNaO_2$) ความบริสุทธิ์ 98% มวลโมเลกุล 116.48 กรัมต่อโมล จากบริษัท Acros Organics ไอโซโพรพานอล (Isopropanol: C_3H_8O) ความบริสุทธิ์ 99.9% จากบริษัท RCI Labscan กรดไฮโดรคลอริก (Hydrochloric Acid: HCl) 37% จากบริษัท RCI Labscan Limited เอทานอล (Ethanol: C_2H_5OH) ความบริสุทธิ์ 99.8% จากบริษัท RCI Labscan โซเดียมคาร์บอเนต (Sodium Carbonate: Na_2CO_3) ความบริสุทธิ์ 99.8% มวลโมเลกุล 105.99 กรัมต่อโมล จากบริษัท Ajax Fine Chemicals โซเดียมไฮดรอกไซด์ (Sodium Hydroxide: NaOH) จากบริษัท RCI Labscan Limited และน้ำปราศจากประจุ (Deionized Water: DI)

2.2 วิธีทดลอง

2.2.1 การเตรียมแป้งคาร์บอกซีเมทิล (Carboxymethyl Starch: CMS) โดยนำแป้งมันสำปะหลังที่เป็นของเสียจากโรงงาน 20 กรัม ผสมกับ Isopropanol 162 มิลลิลิตร แล้วปรับให้มี pH เท่ากับ 11 ด้วย 30 มิลลิโมลาร์ NaOH บ่ม 30 นาที หลังจากนั้นใส่สาร Sodium Mono Chloroacetate 14.38 กรัม ลงในแป้งที่



เตรียมไว้แล้วปั้น 1 ชั่วโมง เมื่อครบเวลาทำการกรองสารละลายออกแล้วนำตะกอนที่ได้ไปล้างด้วย 95% Ethanol ปรับ pH ให้อยู่ในช่วง 5.5 – 6.5 ด้วย HCl ทำการล้างด้วย 85% ethanol จนมีค่า pH เป็นกลาง แล้วนำไปอบที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส 12 ชั่วโมง

2.2.2 การสังเคราะห์กาว ทำการละลาย PVA 5 กรัม ในน้ำ DI 80 มิลลิลิตร ที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส หลังจากละลายเข้ากันแล้วลดอุณหภูมิให้เหลือ 60 องศาเซลเซียส นำ CMS ที่สังเคราะห์ได้ 10 กรัม ใส่ลงไปในการละลาย PVA ที่เตรียมไว้ แล้วนำมาพักที่อุณหภูมิห้อง เมื่อสารละลายมีอุณหภูมิเท่ากับอุณหภูมิห้องแล้ว ทำการใส่สารละลาย TA ความเข้มข้น 0.25% (โดยน้ำหนักเทียบกับปริมาตร) 12 มิลลิลิตร

2.3 การวิเคราะห์ลักษณะทางเคมีของกาว

วิเคราะห์ลักษณะทางเคมีโดยใช้ ฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรสโคปี (Fourier Transform Infrared Spectroscopy: FT-IR) ยี่ห้อ Bruker รุ่น Alpha II ที่เลขคลื่น 500 – 4000 เซนติเมตร⁻¹

2.4 การวิเคราะห์หาอุณหภูมิเปลี่ยนแปลงสถานะคล้ายแก้ว (Tg)

ศึกษาอุณหภูมิเปลี่ยนแปลงสถานะคล้ายแก้ว ด้วยเครื่อง Differential Scanning Calorimeter (DSC) รุ่น Polyma 214 Netzsch อัตราการให้ความร้อน 10 องศาเซลเซียส ต่อนาที จากอุณหภูมิ 10 ถึง 100 องศาเซลเซียส ภายใต้สภาวะบรรยากาศไนโตรเจน

2.5 การวิเคราะห์หาปริมาณของกาวที่เหมาะสมสำหรับประยุกต์ใช้งานร่วมกับไม้

ทำการเตรียมไม้ขนาด 2.5 x 8 ตารางเซนติเมตร แล้วทา กาวลงบนแผ่นไม้โดยใช้พื้นที่ 2.5 x 3 ตาราง-

เซนติเมตร โดยใช้ปริมาณกาว 350, 400, 450, 500 และ 550 กรัมต่อตารางเมตร หลังจากนั้นทำการเกลี่ยกาวให้ทั่วพื้นที่ที่ได้จำกัดไว้แล้วนำไปอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ทำการถ่ายรูปเพื่อดูปริมาณกาวที่ล้นออกมาและนำไปวัดค่าความแข็งแรงด้วยเครื่อง Universal Testing Machine (UTM) ยี่ห้อ Shimadzu รุ่น EHF-EG10-20L ทำการทดลองซ้ำเป็นจำนวน 6 รอบ

2.6 การวิเคราะห์ความคงทนของกาว

ทำการเตรียมไม้ขนาด 2.5 x 8 ตารางเซนติเมตร แล้วทา กาวลงบนแผ่นไม้ที่จำกัดพื้นที่ 2.5 x 3 ตารางเซนติเมตร โดยใช้ปริมาณกาวที่เหมาะสมจากการวิเคราะห์หาปริมาณกาวที่เหมาะสม หลังจากนั้นนำแผ่นไม้ที่ได้ทา กาวแล้วไปวางไว้ในสภาวะ 3 สภาวะ ได้แก่ สภาวะอุณหภูมิห้อง สภาวะความชื้นสัมพัทธ์ 75% และที่สภาวะท่ามกลางแสงแดด (9 ชั่วโมงต่อวัน ทดลองในเดือนมิถุนายน) เป็นเวลา 7 วัน เมื่อครบเวลาที่กำหนดนำไปวัดค่าความแข็งแรงด้วยเครื่อง UTM ยี่ห้อ Shimadzu รุ่น EHF-EG10-20L เพื่อวิเคราะห์ความคงทนของกาวต่อสภาวะต่างๆ ทำการทดลองซ้ำเป็นจำนวน 6 รอบ

3. ผลการวิจัย

3.1 ผลการวิเคราะห์ลักษณะทางเคมีของกาว

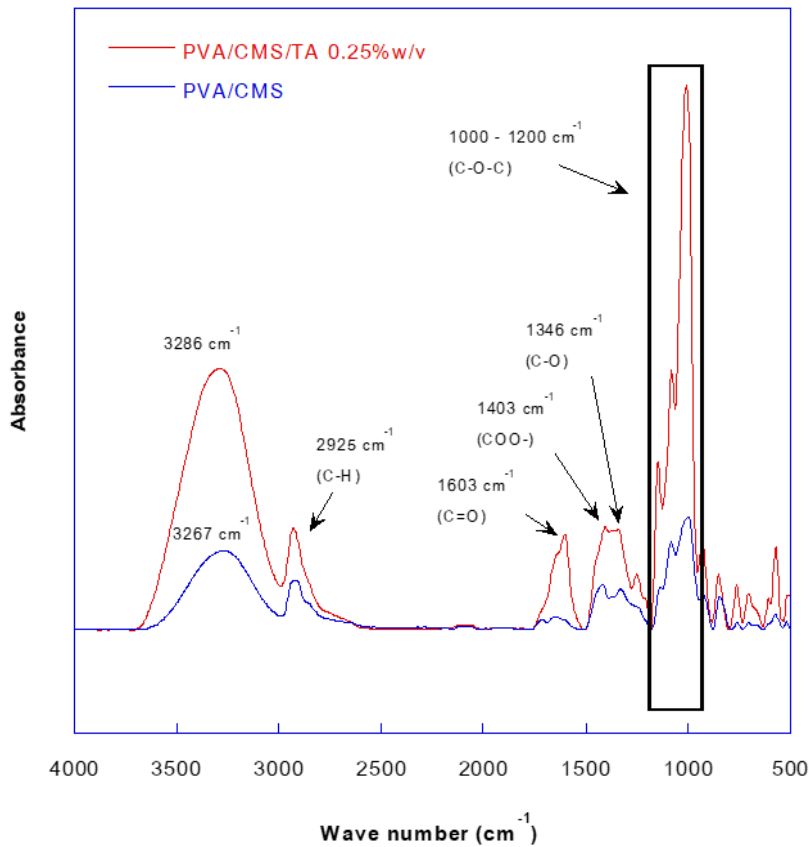
ทำการวิเคราะห์ลักษณะทางเคมีของกาวด้วยเทคนิค FT-IR จากรูปที่ 1 ลักษณะของพอลิเมอร์ผสม CMS/PVA พบพีคที่ 1430 เซนติเมตร⁻¹ แสดงถึงหมู่คาร์บอกซิล (COO⁻) พีคที่ 1346 เซนติเมตร⁻¹ แสดงถึงหมู่คาร์บอนิล (C=O) พีคที่ 1000-1200 เซนติเมตร⁻¹ แสดงถึงหมู่อีเทอร์ (C-O-C) พีคที่ 2925 เซนติเมตร⁻¹



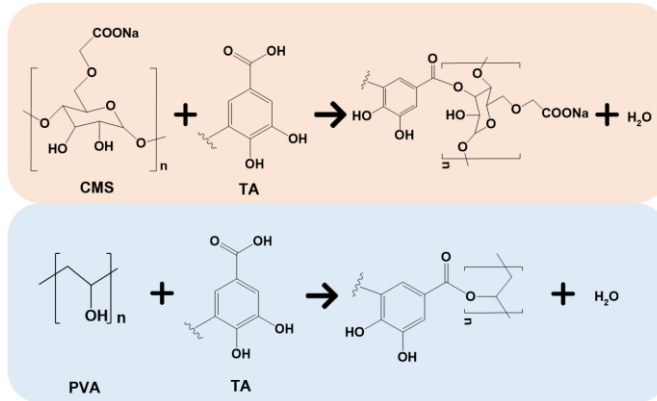
แสดงถึงหมู่แอลเคน (C-H) เมื่อมีการเติม TA จะเห็นลักษณะเฉพาะฟีดที่ตำแหน่ง 1603 เซนติเมตร⁻¹ ซึ่งแสดงถึงพันธะเอสเทอร์ (C=O) ระหว่าง TA CMS และ PVA และฟีดที่ตำแหน่ง 1000-1200 เซนติเมตร⁻¹ มีความชัดเจนมากขึ้นเนื่องจากการมีอยู่ของหมู่เอเทอร์ภายในโครงสร้างของกรดแทนนิก [17] นอกจากนี้พบการเลื่อนของฟีดในช่วง 3100-3700 เซนติเมตร⁻¹ สอดคล้องกับหมู่ไฮดรอกซิล (OH) แสดงให้เห็นถึงการเกิดการเชื่อมขวางภายในโครงสร้างของกาว โดยกระบวนการเชื่อมขวางของกาวแสดงในรูปที่ 2

3.2 การวิเคราะห์หาอุณหภูมิเปลี่ยนแปลงสถานะคล้ายแก้ว (T_g)

การวิเคราะห์อุณหภูมิเปลี่ยนแปลงสถานะคล้ายแก้วด้วยเครื่อง Differential Scanning Calorimeter (DSC) พบว่ากาว CMS/PVA มีค่า T_g อยู่ที่อุณหภูมิ 51 องศาเซลเซียส และเมื่อมีการเติม TA เข้าไปในโครงสร้างกาวพบว่า T_g มีค่าสูงขึ้นเป็น 63 องศาเซลเซียส ดังแสดงในรูปที่ 3 เนื่องจากการเกิดการเชื่อมขวางทางเคมีภายในโครงสร้างกาว ทำให้สายโซ่พอลิเมอร์เคลื่อนที่ได้ยากขึ้น [18]



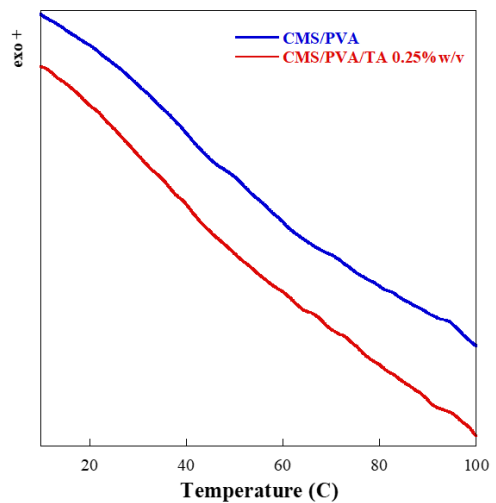
รูปที่ 1 กราฟ FT-IR ของกาวชีวภาพ CMS/PVA และ CMS/PVA/TA



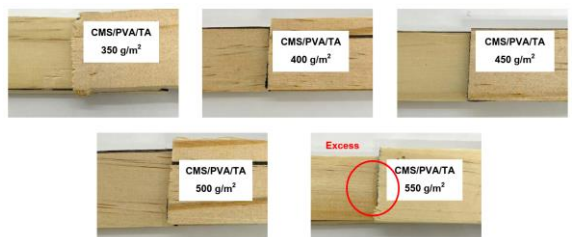
รูปที่ 2 กระบวนการเชื่อมขวางของกาว

3.3 ผลการวิเคราะห์หาปริมาณที่เหมาะสมของกาว

จากการทดลองหาปริมาณกาวที่เหมาะสมในช่วง 350-550 กรัมต่อตารางเมตร พบว่าเมื่อใช้กาวในปริมาณที่ 550 กรัมต่อตารางเมตร จะทำให้มีกาวบางส่วนล้นออกมา ดังแสดงในรูปที่ 4 เมื่อนำตัวอย่างไปทำการทดสอบค่าความต้านทานแรงเฉือนโดยใช้เครื่อง UTM ในการวิเคราะห์พบว่ามีความต้านทานแรงเฉือนเพิ่มมากขึ้นตั้งแต่ 0.946 ถึง 2.357 เมกะปาสคาล เมื่อปริมาณกาวเพิ่มขึ้น ดังแสดงในตารางที่ 1 ทั้งนี้ เนื่องจากเมื่อปริมาณกาวเพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้ความแข็งแรงของพันธะไฮโดรเจนสูงขึ้น [19] อย่างไรก็ตาม การใช้ปริมาณกาวที่ 550 กรัมต่อตารางเมตร ทำให้ค่าความต้านทานแรงเฉือนลดลง เนื่องจากมีการล้นออกมาของกาวซึ่งแสดงถึงปริมาณกาวที่ไม่จำเป็น นอกจากนี้เมื่อเปรียบเทียบค่าด้านทานแรงเฉือนที่สูงที่สุดกับงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่ามีความใกล้เคียงกัน ดังแสดงในตารางที่ 2



รูปที่ 3 กราฟ DSC ของกาวชีวภาพ CMS/PVA และ CMS/PVA/TA



รูปที่ 4 ปริมาณกาวที่ทาลงบนแผ่นไม้



ตารางที่ 1 ค่าความแข็งแรงของกาวที่ปริมาณต่างๆ

ปริมาณกาว (กรัมต่อตารางเมตร)	ค่าความแข็งแรงเฉลี่ย (เมกะปาสคาล)
350	0.946 ± 0.09
400	2.018 ± 0.13
450	2.096 ± 0.12
500	2.357 ± 0.11
550	2.140 ± 0.14

ตารางที่ 2 ค่าความแข็งแรงของกาวจากงานวิจัยต่างๆ

กาว	ค่าความแข็งแรง (เมกะปาสคาล)
CMS/PVA/TA (งานวิจัยนี้)	2.36
PVA/Tannin/Boric Acid	2.8 [20]
PVA/Starch/Sodium Metabisulphite	2.4 [21]
MCC/PVA/Boric Acid	2.4 [22]
SP/Br/PTGE/TA/Zn ²⁺	2.57 [23]

ตารางที่ 3 ค่าความแข็งแรงของกาวในสภาวะต่างๆ
หลังผ่านไป 7 วัน

สภาวะ	ค่าความแข็งแรงเฉลี่ย (เมกะปาสคาล)
ค่าเริ่มต้น	2.358 ± 0.11
อุณหภูมิห้อง	2.357 ± 0.20
ความชื้น 75 %	1.568 ± 0.14
แสงแดด	1.726 ± 0.14

3.3 ผลการวิเคราะห์ความคงทนของกาว

เนื่องจากปริมาณที่เหมาะสมในการนำไปใช้งานของกาว คือ 500 กรัมต่อตารางเมตร จึงได้นำปริมาณกาวที่เหมาะสมนี้มาทดสอบความคงทนในสภาวะการใช้งานที่แตกต่างกัน 3 สภาวะ ได้แก่ การใช้งานภายในอาคารที่อุณหภูมิห้อง บริเวณที่มีความชื้น 75% และภายนอกอาคารที่ได้รับแสงแดด เป็นเวลา 7 วัน จากนั้นจึงทำการทดสอบความต้านทานแรงฉีก ดึงแสดงในตารางที่ 3 พบว่าไม้ที่ถูกติดด้วยกาวแล้ววางไว้ภายในอาคารที่อุณหภูมิห้องมีค่าความต้านทานแรงฉีกเท่ากับ 2.35 เมกะปาสคาล ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับค่าเริ่มต้น อย่างไรก็ตามในสภาวะที่มีความชื้นสูงและภายนอกอาคารที่ได้รับแสงแดด ค่าความต้านทานแรงฉีกของกาวมีค่าลดลงโดยมีค่าเท่ากับ 1.57 และ 1.73 เมกะปาสคาล ตามลำดับ เนื่องจากโมเลกุลของน้ำสามารถแพร่เข้าไปภายในโครงสร้างของพอลิ-เมอร์เมทริกซ์ส่งผลให้มีปริมาตรอิสระภายในโครงสร้างเพิ่มมากขึ้น ในกรณีที่ได้รับแสงแดด การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิเพิ่มและลดลงเป็นวัฏจักรทำให้สายโซ่พอลิเมอร์ยืดและหดตัวสลับไปมา [24] ทำให้สายโซ่พอลิเมอร์เกิดการแยกตัวและเคลื่อนที่ได้ง่ายขึ้นส่งผลให้ความแข็งแรงลดลง

4. บทสรุป

ในงานวิจัยนี้สามารถนำแบงเสียดจากโรงงานมาใช้เป็นสารตั้งต้นในการสังเคราะห์กาวชีวภาพ โดยการนำแบงเสียดจากโรงงานมาสังเคราะห์ CMS เพื่อใช้เป็นพอลิเมอร์เมทริกซ์ร่วมกับ PVA และใช้ TA เป็นสารเชื่อมขวาง จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค FT-IR พบพีคของพันธะเอสเทอร์เกิดขึ้น แสดงให้เห็นถึงการเกิด



การเชื่อมขวางขึ้นภายในโครงสร้างของกาวชีวภาพ นอกจากนี้ เมื่อทดสอบหาคุณสมบัติเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว พบว่าอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วมีค่าสูงขึ้นเมื่อเติม TA และจากการทดสอบหาปริมาณกาวที่เหมาะสมพบว่าปริมาณ 500 กรัมต่อตารางเมตร เป็นปริมาณที่ดีที่สุด เมื่อนำกาวชีวภาพมาใช้กับไม้ในสภาวะต่างๆ เป็นเวลา 7 วัน พบว่า การใช้งานภายในอาคารที่อุณหภูมิห้องมีค่าความต้านแรงเฉือนที่เสถียรตลอดระยะเวลาใช้งาน โดยมีค่าประมาณ 2.35 เมกะปาสคาล สำหรับบริเวณที่มีความชื้นสูง และภายนอกอาคารที่มีแสงแดด พบว่าค่าความต้านทานแรงเฉือนของกาวชีวภาพมีค่าลดลงอย่างเห็นได้ชัด จากผลการทดลองกาวชีวภาพที่สังเคราะห์มาจากแป้งที่เป็นของเสียจากโรงงานจึงน่าจะสามารถนำมาใช้เป็นกาวทางเลือกทดแทนกาวจากปิโตรเคมีได้ เพื่อแก้ปัญหาการปลดปล่อยแก๊สฟอร์มัลดีไฮด์ และยังเป็นแนวทางการเพิ่มมูลค่าของเสียได้อีกด้วย อย่างไรก็ตาม เพื่อให้ครอบคลุมการใช้งานของกาวให้มากขึ้นควรมีการวัดค่าอื่นเพิ่ม เช่น ความหนืดของกาว และความคงทนของกาวต่อสภาวะอื่นๆ เป็นต้น

5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับงบประมาณสนับสนุนจากทุนวิจัยเพื่อส่งเสริมศักยภาพการผลิตบัณฑิตระดับปริญญาโท โดยคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น สัญญาเลขที่ M-Eng.-CHEM-001/2564

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] J. Lamaming, N.B. Heng, A.A. Owodunni, S.Z. Lamaming, N.K.A. Khadir, R. Hashim, O. Sulaiman, M.H.M. Kassim, M.H. Hussin, Y. Bustami, M.H.M. Amini and S. Hiziroglu, Characterization of rubberwood particleboard made using carboxymethyl starch mixed with polyvinyl alcohol as adhesive, *Composites Part B: Engineering*, 2020, 183, 107731.
- [2] M.N. Islam, A.A. Liza, M.O. Faruk, M.A. Habib, and S. Hiziroglu, Formulation and characterization of tamarind (*Tamarindus indica* L.) seed kernel powder (TKP) as green adhesive for lignocellulosic composite industry, *International Journal of Biological Macromolecules*, 2020, 142, 879–888.
- [3] S. Chen, H. Chen, S. Yang and D.Fan, Developing an antifungal and high-strength soy protein-based adhesive modified by lignin-based polymer, *Industrial Crops and Products*, 2021, 170, 113795.
- [4] N. Mati-Baouche, C. Delattre, H. de Baynast, M. Grédiac, J.D. Mathias, A.V. Ursu, J. Desbrières and P. Michaud, Alkyl-chitosan-based adhesive: water resistance improvement, *Molecules*, 2019, 24(10), 1987.



- [5] M.I. Maulana, M.A.R. Lubis, F. Febrianto, L.S. Hua, A.H. Iswanto, P. Antov, L. Kristak, E. Mardawati, R.K. Sari, L.H. Zaini, W. Hidayat, V.L. Giudice and L. Todaro, Environmentally friendly starch-based adhesives for bonding high-performance wood composites: A review, *Forests*, 2022, 13, 1614.
- [6] C. Yu, X. Tang, S. Liu, Y. Yang, X. Shen and C. Gao, Laponite crosslinked starch/polyvinyl alcohol hydrogels by freezing/thawing process and studying their cadmium ion absorption, *International Journal of Biological Macromolecules*, 2018, 117, 1–6.
- [7] A. Emblem and M. Hardwidge, Adhesives for packaging, *Packaging Technology*, 2012, 12, 381–394.
- [8] S. Sisang, Starch properties for fisheries products, Fisheries Industrial Technology Research and Development Division, 2020. (in Thai)
- [9] I. Prasertsung, K. Aroonraj, K. Kamwilaisak, N. Saito and S. Damrongsakkul, Production of reducing sugar from cassava starch waste (CSW) using solution plasma process (SPP), *Carbohydrate Polymers*, 2019, 205, 472–479.
- [10] P. Rawaengsungnoen P, S. Leklai and S. Tantipaibulvut, Ethanol production from cellulosic cassava waste, *The Journal of Applied Science*, 2018, 17, 37–46.
- [11] S. Tantiwatcharothai and J. Prachayawarakorn, Property improvement of antibacterial wound dressing from basil seed (*O. basilicum* L.) mucilage- ZnO nanocomposite by borax crosslinking, *Carbohydrate Polymers*, 2020, 227, 115360.
- [12] S. Jin, K. Li, J. Li and H. Chen, A low-cost, formaldehyde-free and high flame retardancy wood adhesive from inorganic adhesives: properties and performance, *Polymers*, 2017, 9(10), 513.
- [13] S. Ghahri, B. Mohebbi, A. Pizzi, A. Mirshokraie and H.R. Mansouri, Improving water resistance of soy-based adhesive by vegetable tannin, *Journal of Polymers and Environment*, 2017, 265, 1881–1890.
- [14] E. Raknes, Durability of structural wood adhesives after 30 years ageing, *Holz als Roh- und Werkstoff*, 1997, 55, 83–90.
- [15] L. Li and C. Wang, The adhesive and durability of adhesive-poly (ethylene terephthalate) film joints, *Pigment & Resin Technology*, 2009, 38, 310–314.
- [16] N.R. Jadhav, V.L. Gaikwad, K.J. Nair and H.M. Kadam, Glass transition temperature: basics and application in pharmaceutical sector, *Asian Journal of Pharmaceutics*, 2009, 3(2), 82–89.



- [17] M.A. Pantoja-Castroa and H. González-Rodrígueza, Study by infrared spectroscopy and thermogravimetric analysis of tannins and tannic acid, *Revista Latinoamericana de Química*, 2012, 39(3), 107–112
- [18] J. Stejny, The effect of crosslinking on the glass transition temperature and the density of diethylene glycol bis(allylcarbonate) polymer networks, *Polymer Bulletin*, 1996, 36, 617–621.
- [19] O.Y. Ogunsanwo, A.O. Adenaiya and C.A. Adedeji, Effect of adhesive quantity on selected physico-mechanical properties of bamboo glulam, *Maderas: Ciencia y Tecnologia*, 2019, 21, 113–122.
- [20] R.V. Gadhave, S.K. Vineeth, P.V. Dhawale and P.T. Gadekar, Effect of boric acid on poly vinyl alcohol-tannin blend and its application as water-based wood adhesive, *Designed Monomers and Polymers*, 2020, 23, 188–196.
- [21] S.K. Vineeth, R.V. Gadhave and P.T. Gadekar, Investigation of crosslinking ability of sodium metabisulphite with polyvinyl alcohol–corn starch blend and its applicability as wood adhesive, *Indian Chemical Engineer*, 2022, 64, 197–207
- [22] R.V. Gadhave, S.K. Vineeth, P.A. Mahanwar and P.T. Gadekar, Effect of addition of boric acid on thermomechanical properties of microcrystalline cellulose/polyvinyl alcohol blend and applicability as wood adhesive, *Journal of Adhesion Science and Technology*, 2020, 35, 1072–1086.
- [23] Y. Xu, Y. Han, M. Chen, J. Luo, S.Q. Shi, J. Li and Q. Gao, Constructing a triple net work structure to prepare strong, tough, and mildew resistant soy protein adhesive, *Composites Part B*, 2021, 211, 108677.
- [24] S.M.R. Khalili, M. Najafi, R. Eslami-Farsani, Effect of Thermal Cycling on the Tensile Behavior of Polymer Composites Reinforced by Basalt and Carbon Fibers, *Mechanics of composite materials*, 2017, 52, 807–816.

ผลกระทบของดินขาวเผาต่อสมบัติทางกลของเถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์เสริมเส้นใยเหล็ก

ณัฐชา พงษ์ธาสาริกกร กิม เหนือคลอง* และ ชนะชัย ทองโฉม

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต

* ผู้ประสานงานเผยแพร่ (Corresponding Author), E-mail: npeem@engr.tu.ac.th

วันที่รับบทความ: 26 มกราคม 2566; วันที่ทบทวนบทความ: 29 พฤษภาคม 2566; วันที่ตอบรับบทความ: 29 พฤษภาคม 2566

วันที่เผยแพร่ออนไลน์: 31 กรกฎาคม 2566

บทคัดย่อ: งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาอิทธิพลของดินขาวเผาต่อคุณสมบัติของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ที่ทำจากเถ้าลอยเสริมเส้นใยเหล็ก โดยดินขาวเผานำมาใช้เพื่อทดแทนเถ้าลอยแคลเซียมสูงที่ร้อยละ 0, 10, 20 และ 30 โดยน้ำหนัก ได้ทำการศึกษาผลกระทบของปริมาณเส้นใยเหล็กต่อสมบัติของมอร์ตาร์ ประกอบด้วย การทดสอบหาค่าการแผ่ไหล หน่วยน้ำหนัก กำลังรับแรงอัด และกำลังรับแรงดัด ผลทดสอบพบว่าการใช้ดินขาวเผาร้อยละ 10 และ 30 มีความสามารถในการรับกำลังอัดและกำลังดัดสูงสุดเท่ากับ 4.21 และ 5.06 MPa ตามลำดับ และการเสริมเส้นใยเหล็กสามารถใช้เพื่อเพิ่มกำลังรับแรงอัดและแรงดัดได้ อย่างไรก็ตามการแผ่ไหลลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณดินขาวเผาและเส้นใยเหล็กในส่วนผสมปริมาณร้อยละ 7.47 ถึง 25.67 และ 6.34 ถึง 30.27 ตามลำดับ และหน่วยน้ำหนักของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ลดลงมากที่สุดปริมาณร้อยละ 4.29 เมื่อปริมาณดินขาวเผาเพิ่มขึ้น แต่หน่วยน้ำหนักของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์เพิ่มขึ้นสูงสุดปริมาณร้อยละ 6.06 เมื่อใส่เส้นใยเหล็ก

คำสำคัญ: เถ้าลอยแคลเซียมสูง; ดินขาวเผา; จีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์; เส้นใยเหล็ก

Influence of Metakaolin on Mechanical Properties of Fly Ash Geopolymer Mortar Reinforced with Steel Fibers

Natcha Phudtisarigorn, Peem Nuaklong* and Chanachai Thongchom

Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Thammasat University

* Corresponding author, E-mail: npeem@engr.tu.ac.th

Received: 26 January 2023; Revised: 29 May 2023; Accepted: 29 May 2023

Online Published: 31 July 2023

Abstract: This research aimed to study the influence of metakaolin on the properties of fly ash geopolymer mortar mixed with steel fibers. The metakaolin was used to replace high calcium fly ash at the percentages of 0, 10, 20, and 30 by weight. The effect of fiber content on the properties of the mortar was also studied. The slump flow, unit weight, compressive strength, and flexural strength were investigated. The results showed that the use of metakaolin at the percentages 10 and 30 have the highest value of compressive strength and flexural strength 4.21 and 5.06 MPa, respectively. Steel fibers can be used to increase compressive strength and flexural strength. However, the slump flow was decreased when the metakaolin and the fiber were added at the percentages 7.47 to 25.67 and 6.34 to 30.27, respectively. In addition, the unit weight of geopolymer mortar decreased at the percentage of 4.29 when metakaolin was increased. In contrast, the unit weight of geopolymer mortar was increased at the percentage of 6.06 by the addition of steel fiber.

Keywords: High calcium fly ash; Metakaolin; Geopolymer mortar; Steel fiber



1. บทนำ

การขยายตัวของอุตสาหกรรมการผลิตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เพื่อใช้ในการก่อสร้าง ช่วยส่งผลต่อการเติบโตของระบบเศรษฐกิจ แต่กิจกรรมต่าง ๆ ที่ผลิตได้ปูนซีเมนต์ ก็ส่งผลเสียต่อสิ่งแวดล้อม และการพัฒนาที่ยั่งยืน เนื่องจากในกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ 1,000 กิโลกรัมจะก่อให้เกิดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ 730 ถึง 850 กิโลกรัม [1] ที่ส่งผลกระทบต่อสภาพแวดล้อมเป็นอย่างมาก โดยปริมาณการใช้ปูนซีเมนต์ทั่วโลกมีปริมาณมากถึง 4 พันล้านตันต่อปี และมีแนวโน้มว่าจะเพิ่มมากขึ้น [2]

วัสดุซีเมนต์เสริม (Supplementary Cementitious Materials, SCMs) ถูกนำมาใช้ทดแทนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ไม่ว่าจะเป็น ตะกรันเตาถลุงเหล็ก เถ้าถ่านหิน เถ้าถ่าน และซิลิกาฟูม ฯลฯ โดยการนำ SCM มาใช้นอกจากจะช่วยลดปัญหาสิ่งแวดล้อมแล้ว ยังช่วยลดค่าใช้จ่ายในการก่อสร้างได้อีกด้วย เนื่องจากมีราคาที่ต่ำกว่าปูนซีเมนต์ แต่การใช้ SCM ก็ไม่สามารถใช้แทนที่ปูนซีเมนต์ได้ทั้งหมด จึงมีการพัฒนาวัสดุประสานสำหรับผลิตวัสดุซีเมนต์ที่ไม่มีการใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ซึ่งเรียกว่า จีโอโพลิเมอร์ (Geopolymer) ซึ่งเกิดจากการนำวัสดุอลูมิโนซิลิเกตมาทำปฏิกิริยากับสารละลายไฮดรอกไซด์และซิลิเกต ซึ่งมีความเข้มข้นเหมือนกันกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ อีกทั้งยังรับกำลังได้ดีภายหลังการก่อตัว โดยเกิดจากการทำปฏิกิริยาจีโอโพลิเมอร์ไรเซชัน (Geopolymerization) [3]

วัสดุจีโอโพลิเมอร์ที่ทำการสังเคราะห์จากเถ้าลอยสามารถลดการใช้ปูนซีเมนต์ในการผลิตคอนกรีตได้ และยังช่วยลดปริมาณเถ้าลอย ซึ่งก่อให้เกิดมลพิษทางอากาศได้อีกด้วย เนื่องจากเถ้าลอยเกิดจากการเผาไหม้

ไม่สมบูรณ์ของเชื้อเพลิงในกระบวนการผลิตไฟฟ้า โดยมีปริมาณมากกว่า 500 ล้านตันต่อปี แต่เถ้าลอยกลับถูกนำมาใช้ในวัสดุ SCM เพียงร้อยละ 20 ถึง 30 เท่านั้น [4] อย่างไรก็ตาม ปริมาณซิลิกาและอลูมินาที่ช่วยในการพัฒนากำลังในเถ้าลอยมีปริมาณน้อยกว่าในดินขาวเผา โดยเฉพาะในเถ้าลอยแคลเซียมสูงมีซิลิกาปริมาณร้อยละ 15 ถึง 45 และอลูมินาปริมาณร้อยละ 10 ถึง 25 โดยน้ำหนัก [4] ในขณะที่ดินขาวเผามีซิลิกาประมาณร้อยละ 49 ถึง 52 และอลูมินาประมาณร้อยละ 40 ถึง 43 โดยน้ำหนัก [5] ดังนั้นจึงมีความเป็นไปได้ที่จะใช้ดินขาวเผาแทนที่เถ้าลอยบางส่วน สำหรับการผลิตจีโอโพลิเมอร์ที่รับกำลังสูงกว่าการสังเคราะห์ด้วยเถ้าลอยเพียงอย่างเดียว

ปัจจุบันเส้นใย (Fibers) มีบทบาทอย่างมากในการพัฒนาสมบัติทางกล การยึดหดตัว และความทนทานในซีเมนต์เพสต์ มอร์ตาร์ และคอนกรีต [6] โดยเฉพาะการเสริมเส้นใยเหล็กได้รับความนิยมอย่างมากในวัสดุซีเมนต์ เนื่องจากช่วยลดรอยแตกร้าวในวัสดุแข็งเปราะทนทานต่อแรงกระทำซ้ำ (Fatigue) ได้ดี [7] อีกทั้งยังเพิ่มกำลังตัด ความเหนียว และกำลังรับแรงเฉือน ให้แก่วัสดุซีเมนต์ [8] รวมไปถึงลดการหดตัว การคืบ (Creep) และความซึมผ่านได้ของน้ำ [9] ตลอดจนช่วยเสริมการรับกระแทกและต้านทานแรงระเบิดได้เป็นอย่างดี [10]

ดังนั้น ในงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการผลิตจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์เสริมเส้นใยเหล็กที่ทำจากเถ้าลอย และมีการแทนที่ด้วยดินขาวเผา โดยทดสอบหาสมบัติทางกล ได้แก่ ค่าการแผ่ไหล กำลังอัด กำลังตัด และพฤติกรรมรับแรงตัดและการโก่งตัวของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์



2. วัสดุและวิธีการทดลอง

2.1 วัสดุ

2.1.1 วัสดุตั้งต้น

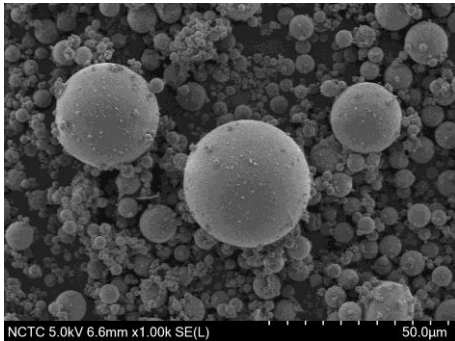
ในการศึกษานี้จะใช้ถ้ำลอยจากการเผา ถ่านหินที่โรงงานไฟฟ้าแม่เมาะ อ. แม่เมาะ จ. ลำปาง ส่วนดินขาวเผาได้จากการนำดินขาวไปเผาที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง และบดใน เครื่องบดถ้ำเป็นระยะเวลา 5 ชั่วโมง เพื่อเพิ่มความ ละเอียด ซึ่งเป็นไปตามคำแนะนำของ Provis และ คณะ [11] โดยรายละเอียดทางเคมีและทางกายภาพ ของถ้ำลอยและดินขาวเผา แสดงในตารางที่ 1 จะ เห็นได้ว่าดินขาวเผาและถ้ำลอยมีค่าความละเอียด เท่ากับ 14,900 และ 2,250 cm^2/g ตามลำดับ แสดง ว่าดินขาวเผามีความละเอียดมากกว่าถ้ำลอย ถ้ำลอยและดินขาวเผาที่มีประมาณซิลิกาและอลูมินา เป็นหลัก โดยถ้ำลอยมีปริมาณซิลิกา (SiO_2) และ อลูมินา (Al_2O_3) ร้อยละ 23.5 และ 10.1 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ ส่วนดินขาวเผาที่มีปริมาณซิลิกา (SiO_2) และอลูมินา (Al_2O_3) ร้อยละ 57.2 และ 28.5 โดย น้ำหนัก ตามลำดับ แต่ในถ้ำลอยจะพบปริมาณ แคลเซียม (CaO) ร้อยละ 31.8 โดยน้ำหนัก จัดเป็น ถ้ำลอยแคลเซียมสูงตามมาตรฐาน ASTM C618-19 [12] เนื่องจากมีปริมาณร้อยละของแคลเซียมมากกว่า 18.0 และโครงสร้างระดับจุลภาค (Scanning Electron Microscope, SEM) ของถ้ำลอยและดิน ขาวเผาในรูปแบบที่ 1(ก) และ 1(ข) แสดงให้เห็นว่าถ้ำ ลอยมีลักษณะอนุภาคกลมมน ในขณะที่ดินขาวเผา มี ลักษณะอนุภาคเป็นเหลี่ยมมุม

ตารางที่ 1 รายละเอียดทางเคมีและทางกายภาพของ วัสดุตั้งต้น

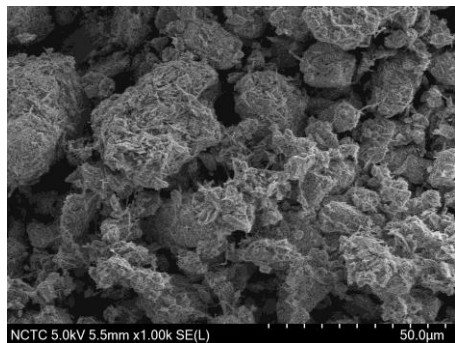
องค์ประกอบ (wt.%)	ถ้ำลอย แคลเซียมสูง (HCF)	ดินขาว (MK)
SiO_2	23.5	57.2
Al_2O_3	10.1	28.5
CaO	31.8	3.70
FeO_3	22.4	4.66
Na_2O	1.15	-
TiO_2	0.68	-
MgO	1.68	0.76
K_2O	3.49	5.35
SO_3	5.08	-
LOI	0.40	5.40
Retained in sieve No.325 (%)	34.8	2.0
Blain fineness (cm^2/g)	2,250	14,900

2.1.2 ตัวเร่งปฏิกิริยา

งานวิจัยนี้ใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH , NH) ที่มีความเข้มข้น 10 โมลาร์ (M) ซึ่งต้อง เตรียมก่อนการผสมมอร์ตาร์เป็นเวลา 1 วัน เนื่องจาก ลดผลกระทบจากความร้อนที่จะส่งผลกระทบต่อ การทำ ปฏิกิริยาจีโอโพลิเมอร์ไรเซชัน โดยทำการละลายเกล็ด โซเดียมไฮดรอกไซด์ ปริมาณ 400 กรัม ในน้ำ 1 ลิตร และสารละลายโซเดียมซิลิเกต (Na_2SiO_3 , NS) เกรด การค้า ที่มีปริมาณร้อยละของ Na_2O H_2O และ SiO_2 เท่ากับ 9.8 61.5 และ 28.7 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ สารละลายประเภทนี้จะถูกใช้ควบคู่ไปกับสารละลาย โซเดียมไฮดรอกไซด์เพื่อผลิตวัสดุจีโอโพลิเมอร์



(ก) เถ้าลอย



(ข) ดินขาวเผา

รูปที่ 1 โครงสร้างจุลภาคของเถ้าลอยและดินขาวเผา

2.1.3 มวลรวมละเอียด

งานวิจัยนี้ใช้ทรายแม่น้ำที่หาได้ทั่วไปเป็นมวลรวมละเอียด โดยทรายตัวอย่างที่ใช้ในการผสมอยู่ในสถานะอิ่มตัวผิวแห้ง (Saturated Surface Dry, SSD) ซึ่งจากการทดสอบสมบัติพื้นฐานตามมาตรฐาน ASTM [13-15] แสดงในตารางที่ 2

2.1.4 เส้นใยเหล็ก

เส้นใยเหล็กที่ใช้เป็นโลหะทองเหลือง (Brass Coated Steel Fibres) ซึ่งมีคุณสมบัติของเส้นใยเหล็กที่ใช้ในงานวิจัยนี้ได้ข้อมูลจากผู้จัดจำหน่าย โดยลักษณะทางกายภาพและสมบัติต่าง ๆ ของวัสดุเส้นใยเหล็ก แสดงดังรูปที่ 2 และตารางที่ 3



รูปที่ 2 เส้นใยเหล็ก

ตารางที่ 2 สมบัติพื้นฐานของทรายแม่น้ำ

สมบัติพื้นฐานของทราย	มาตรฐานการทดสอบ	ผลการทดสอบ
ความถ่วงจำเพาะที่สถานะอิ่มตัวผิวแห้ง	ASTM C128	2.68
โมดูลัสความละเอียด	ASTM C136	2.62
ร้อยละการดูดซึมน้ำ (%)	ASTM C128	0.58
หน่วยน้ำหนักแห้ง (kg/m ³)	ASTM C29	1,778

ตารางที่ 3 สมบัติของเส้นใยเหล็ก

สมบัติของเส้นใยเหล็ก (ข้อมูลจากผู้จัดจำหน่าย)	
ความยาว (l_f)	13 mm
เส้นผ่านศูนย์กลาง (d_f)	0.2 mm
กำลังรับแรงดึง	2,750 MPa
โมดูลัสความยืดหยุ่น	200 GPa
ความถ่วงจำเพาะ	7.85



2.2 ส่วนผสม วิธีการผลิต และรายละเอียดในการทดสอบ

2.2.1 ส่วนผสม

ในงานวิจัยนี้สามารถแบ่งส่วนผสมออกได้เป็น 3 กลุ่ม ดังแสดงในตารางที่ 4 อัตราส่วนผสมละลายต่าง (NH+NS) ต่อวัสดุตั้งต้น (เถ้าลอยแคลเซียมสูง, HCF ผสมกับดินขาวเผา, MK) มีค่าเท่ากับ 0.6 โดยน้ำหนัก ในขณะที่อัตราส่วน NS ต่อ NH มีค่าเท่ากับ 1 โดยน้ำหนัก ปริมาณทรายต่อวัสดุตั้งต้นมีค่าเท่ากับ 2.75 โดยน้ำหนัก โดยงานวิจัยนี้จะใช้เถ้าลอย

แคลเซียมสูงเป็นวัสดุตั้งต้นหลัก และแทนที่ด้วยดินขาวเผาร้อยละ 0, 10, 20 และ 30 โดยน้ำหนัก ซึ่งงานวิจัยนี้มีสัญลักษณ์ย่อเป็น 0MK, 10MK, 20MK และ 30MK ตามลำดับ ในขณะที่ตัวเลขที่กำกับอยู่ด้านหลังจะบ่งบอกถึงปริมาณเส้นใยเหล็กที่ใส่เพิ่มโดยปริมาตรของส่วนผสม ยกตัวอย่างเช่น ส่วนผสม 30MK-1 และ 30MK-2 คือ ส่วนผสมที่ใช้ดินขาวเผาแทนที่เถ้าลอยร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก พร้อมทั้งใส่เส้นใยเหล็กร้อยละ 1 และ 2 โดยปริมาตร มอร์ตาร์ [16] ตามลำดับ

ตารางที่ 4 ส่วนผสมของเถ้าลอยซีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์เสริมเส้นใยเหล็ก

กลุ่มที่	ส่วนผสม	โซเดียมซิลิเกต (g)	โซเดียมไฮดรอกไซด์ (g)	ทราย (g)	เถ้าลอยแคลเซียมสูง (g)	ดินขาวเผา (g)	เส้นใยเหล็ก (% โดยปริมาตร)
1	0MK	30	30	275	100	0	-
	10MK	30	30	275	90	10	-
	20MK	30	30	275	80	20	-
	30MK	30	30	275	70	30	-
2	0MK-1	30	30	275	100	0	1
	10MK-1	30	30	275	90	10	1
	20MK-1	30	30	275	80	20	1
	30MK-1	30	30	275	70	30	1
3	0MK-2	30	30	275	100	0	2
	10MK-2	30	30	275	90	10	2
	20MK-2	30	30	275	80	20	2
	30MK-2	30	30	275	70	30	2



2.2.2 วิธีการผสม

การผสมจีโอโพลีเมอร์มอร์ตาร์จะใช้ระยะเวลาประมาณ 9 นาที วิธีการผสมจะเริ่มจากการคลุกเคล้า HCF และ MK ให้เข้ากันโดยใช้เครื่องในโม่ผสม จากนั้นจึงใส่ NH และเดินเครื่องผสมเป็นเวลา 3 นาที จากนั้นจึงใส่ทรายและเส้นใยเหล็ก (ในขณะที่เครื่องผสมยังทำงานอยู่) แล้วผสมต่อไปอีก 3 นาที แล้วจึงใส่ NS ในขั้นตอนสุดท้ายโดยใช้เวลาผสมเพิ่มอีก 3 นาที หลังจากนั้นทำการเก็บตัวอย่างโดยเทตัวอย่างลงในแบบหล่อที่มีขนาดต่าง ๆ ทำการอัดแน่นตัวอย่างโดยใช้วิธีการทุ้งแล้วห่อตัวอย่างด้วยพลาสติก นำตัวอย่างเข้าเตาอบ หลังจากการผสมมอร์ตาร์เสร็จสิ้นเป็นระยะเวลา 1 ชั่วโมง บ่มตัวอย่างในเตาอบที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง (บ่มทั้งแบบหล่อที่ห่อหุ้มด้วยพลาสติกฟิล์ม) ทำการแกะแบบและห่อหุ้มตัวอย่างด้วยแผ่นพลาสติกอีกครั้ง เก็บตัวอย่างไว้ที่อุณหภูมิห้องจนกระทั่งตัวอย่างมีอายุครบ 7 วัน แล้วจึงนำไปทดสอบสมบัติต่าง ๆ ต่อไป

2.2.3 รายละเอียดในการทดสอบ

รายละเอียดการทดสอบแสดงในตารางที่ 5 โดยระบุถึงสมบัติของมอร์ตาร์และขนาดที่ต้องการทดสอบ ซึ่งได้แก่ ค่าการแผ่ไหล กำลังอัด และกำลังตัด โดยทำการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C1611 [17] ASTM C39 [18] และ ASTM C1609 [19] ตามลำดับ

3. ผลการทดสอบและการอภิปรายผล

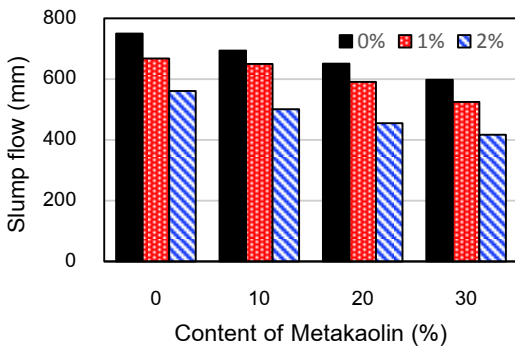
3.1 ค่าการแผ่ไหล (Slump flow)

จีโอโพลีเมอร์มอร์ตาร์มีค่าการแผ่ไหลแสดงดังรูปที่ 3 โดยจีโอโพลีเมอร์มอร์ตาร์ที่ใช้ถั่วลันเตาแล้วแทนที่ด้วยดินขาวเผาร้อยละ 0, 10, 20 และ 30 มีค่าการ

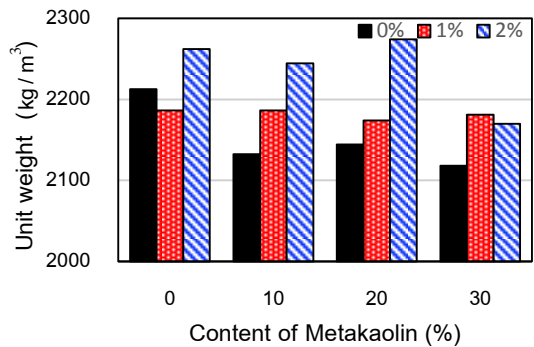
แผ่ไหลเท่ากับ 750, 694, 651 และ 598 mm ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าเมื่อใส่ดินขาวเผาเพิ่มขึ้น ค่าการแผ่ไหลจะมีค่าลดลง เนื่องจากดินขาวเผามีความละเอียดสูง และมีอนุภาคแบบเหลี่ยม ดังนั้นการใส่ดินขาวเผาเพิ่มขึ้นจะลดความสามารถในการแผ่ไหลลงอย่างมีนัยสำคัญ โดยเป็นไปตามงานวิจัยของ Kong และคณะ [20] กล่าวว่าถั่วลันเตามีความสามารถในการแผ่ไหลที่ดีกว่าดินขาวเผา และ Brooks และ Johari [21] พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณดินขาวเผา ทำให้ความสามารถในการไหลแผ่ลดลง ส่วนตัวอย่างที่ใช้ถั่วลันเตาแล้วแทนที่ด้วยดินขาวเผาร้อยละ 0, 10, 20 และ 30 และเสริมด้วยเส้นใยเหล็กร้อยละ 1 มีค่าการไหลแผ่เท่ากับ 668, 650, 591 และ 525 mm ตามลำดับ ส่วนตัวอย่างที่ใช้ปริมาณดินขาวเผาเท่ากัน แต่ใส่เส้นใยเหล็กร้อยละ 2 มีค่าการไหลแผ่เท่ากับ 561, 501, 455 และ 417 mm ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าตัวอย่างที่ใส่เส้นใยเหล็กมากขึ้นจะมีค่าการไหลแผ่ลดลง เนื่องจากเส้นใยเหล็กเป็นตัวเชื่อมจีโอโพลีเมอร์มอร์ตาร์ให้จับตัวกันมากขึ้น โดยเป็นไปตามงานวิจัยของ Sayyad และ Patankar [22] และ Ranjbar และ Zhang [23] ที่สรุปว่าการใส่ปริมาณเส้นใยเหล็กที่เพิ่มขึ้น ทำให้ความสามารถในการแผ่ไหลลดลงอย่างมีนัยสำคัญ

ตารางที่ 5 รายละเอียดการทดสอบสมบัติของจีโอโพลีเมอร์มอร์ตาร์

สมบัติ	ขนาดตัวอย่าง (cm ³)	มาตรฐาน การทดสอบ
ค่าการแผ่ไหล	-	ASTM C1611
กำลังอัด	Ø10 x 20	ASTM C39
กำลังตัด	10 x 10 x 35	ASTM C1609



รูปที่ 3 การแผ่ไหลของตัวอย่างทดสอบ



รูปที่ 4 หน่วยน้ำหนักของตัวอย่างทดสอบ

3.2 หน่วยน้ำหนัก (Unit Weight)

รูปที่ 4 แสดงผลการทดสอบหน่วยน้ำหนักของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ โดยพบว่าจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ที่ใช้ถั่วลอยและแทนที่ด้วยดินขาวเผาร้อยละ 0, 10, 20 และ 30 มีหน่วยน้ำหนักเท่ากับ 2,213, 2,132, 2,144 และ 2,118 kg/m³ ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าเมื่อเพิ่มปริมาณร้อยละของดินขาวเผาจะส่งผลให้ตัวอย่างมีหน่วยน้ำหนักลดลง เนื่องมาจากความหนาแน่นรวมของดินขาวนั้นต่ำ เพราะดินขาวมีความละเอียดมาก ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Nuaklong และ Chindapasirt [24] และ Cheng และ Chiu [25] กล่าวว่าตัวอย่างที่มีปริมาณดินขาวเผาเพิ่มขึ้นเป็นผลให้หน่วยน้ำหนักของตัวอย่างลดลง ส่วนตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ที่ใส่ถั่วลอยและแทนที่ด้วยดินขาวเผาร้อยละ 0, 10, 20 และ 30 โดยเสริมเส้นใยเหล็กร้อยละ 1 มีหน่วยน้ำหนักเท่ากับ 2,186, 2,186, 2,174 และ 2,181 ตามลำดับ และที่ปริมาณดินขาวเผาเท่ากันเมื่อเสริมเส้นใยเหล็กร้อยละ 2 มีค่าหน่วยน้ำหนักเท่ากับ 2,262, 2,245, 2,274 และ 2,170 kg/m³ ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าเมื่อเพิ่มปริมาณเส้นใยเหล็กจะทำให้หน่วย

น้ำหนักมีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากเส้นใยจะไปลดปริมาตรรูพรุนภายในมอร์ตาร์ ทำให้ความหนาแน่นของตัวอย่างมีค่าเพิ่มขึ้น จากผลการทดสอบของ Sayyad และ Patankar [22] พบว่าหน่วยน้ำหนักเพิ่มขึ้น เมื่อใส่ปริมาณเส้นใยเหล็กเพิ่มขึ้น เพราะเส้นใยเหล็กทำให้ตัวอย่างประสานเป็นเนื้อเดียวกัน จึงลดโพรงอากาศภายในตัวอย่างได้ แต่ตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ที่แทนที่ถั่วลอยด้วยดินขาวเผาร้อยละ 30 และเสริมเส้นใยเหล็กร้อยละ 2 พบว่าหน่วยน้ำหนักลดลง เนื่องจากสัดส่วนปริมาณการแทนที่ถั่วลอยด้วยดินขาวเผาที่เยอะทำให้หน่วยน้ำหนักลดลง รวมไปถึงการใส่เส้นใยเหล็กในสัดส่วนที่มากอาจทำให้ตัวอย่างเกิดรูพรุนภายในเพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมา [23]

3.3 กำลังอัด (Compressive Strength)

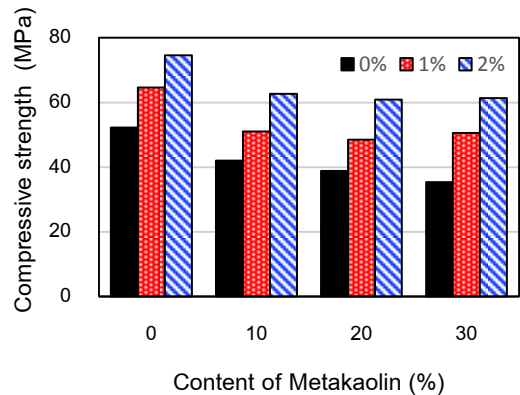
รูปที่ 5 แสดงผลการทดลองกำลังรับแรงอัดของตัวอย่างทดสอบ จากผลการทดสอบจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ที่ใช้ถั่วลอยแล้วถูกแทนที่ด้วยดินขาวในปริมาณร้อยละ 0, 10, 20 และ 30 พบว่ามีกำลังรับแรงอัดเท่ากับ 52.3, 42.1, 38.8 และ 35.4 MPa ตามลำดับ ดังนั้นตัวอย่างที่มีการแทนที่ดินขาวเผาเพิ่ม



มากขึ้นจะส่งผลให้กำลังรับแรงอัดของตัวอย่างมีค่าลดลง โดยถ้าต้องการแทนที่เถ้าลอยด้วยดินขาวเผา ปริมาณร้อยละดินขาวเผาที่เหมาะสมคือ 10 โดยน้ำหนักของเถ้าลอย เนื่องจาก Hodhod และคณะ [26] กล่าวว่า ตัวอย่างที่มีปริมาณร้อยละของเถ้าลอยมาก ส่งผลให้รูปร่างและขนาดของช่องว่างภายในตัวอย่างลดลง และสรุปไว้ว่าการแทนที่เถ้าลอยด้วยดินขาวเผา 10% มีความสามารถในการรับกำลังอัดที่ดีกว่าการแทนที่ด้วยดินขาวเผา 50% และเมื่อดูผลของตัวอย่างที่มีการเสริมเส้นใยเหล็กพบว่า จีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ที่ใช้เถ้าลอยและแทนที่ด้วยดินขาวเผา 0%, 10%, 20% และ 30% โดยใส่เส้นใยเหล็ก 1% มีกำลังรับแรงอัดเท่ากับ 64.7, 51.0, 48.5 และ 50.5 MPa ตามลำดับ ส่วนตัวอย่างที่เสริมเส้นใยเหล็ก 2% ที่แทนที่ด้วยดินขาวเผาเท่ากันพบว่าสามารถรับ กำลังอัดได้เท่ากับ 74.6, 62.7, 60.9 และ 61.4 MPa ตามลำดับ นั่นคือตัวอย่างที่มีการเสริมเส้นใยเหล็กมากขึ้น ก็จะมีความสามารถในการรับแรงอัดมากขึ้น เนื่องจากการใส่เส้นใยเหล็กมีค่าโมดูลัสยืดหยุ่นที่สูง รวมไปถึงการใส่เส้นใยจะช่วยลดช่องว่างที่เกิดขึ้นในตัวอย่างได้ ดังนั้นจึงมีกำลังรับแรงอัดที่ดีขึ้น ซึ่งเป็นไปตามงานวิจัยของ Sayyad และ Patankar [22], Ranjbar และ Zhang [23] และ Guo และ Pan [27] ที่สรุปไว้ว่าปริมาณเส้นใยเหล็กที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ความสามารถในการรับกำลังอัดเพิ่มขึ้น

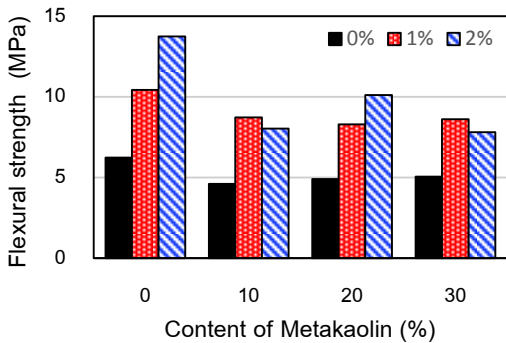
3.4 กำลังดัด (Flexural Strength)

ผลการทดสอบกำลังรับแรงดัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ที่ใช้เถ้าลอยและถูกแทนที่ด้วยดินขาวเผาร้อยละ 0, 10, 20 และ 30 โดยน้ำหนักของเถ้าลอยพบว่ามีความรับแรงดัดเท่ากับ 6.23, 4.60, 4.91 และ



รูปที่ 5 กำลังอัดของตัวอย่างทดสอบ

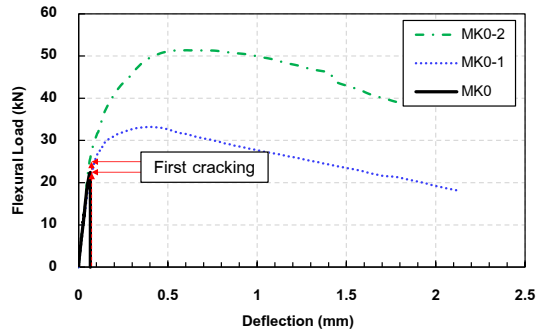
5.06 MPa ตามลำดับ จากผลการทดสอบตัวอย่างที่แทนที่เถ้าลอยด้วยดินขาวเผาที่มีกำลังรับแรงดัดน้อยกว่าตัวอย่างที่ไม่มีการแทนที่ด้วยดินขาว ส่วนตัวอย่างที่มีการเสริมเส้นใยเหล็กร้อยละ 1 ที่แทนที่ด้วยดินขาวเผาร้อยละ 0, 10, 20 และ 30 มีกำลังรับแรงดัดเท่ากับ 10.44, 8.73, 8.29 และ 8.62 MPa ตามลำดับ และการเสริมเส้นใยเหล็กร้อยละ 2 ที่มีปริมาณดินขาวเผาเท่ากันพบว่ามีความรับแรงดัดเท่ากับ 13.75, 8.04, 10.12 และ 7.82 MPa ตามลำดับ ดังนั้นการเสริมเส้นใยเหล็กในตัวอย่างจะช่วยให้ความสามารถในการรับกำลังดัดเพิ่มขึ้น เนื่องจีโอโพลิเมอร์มีพฤติกรรมแบบเปราะ แต่เมื่อใส่เส้นใยจะทำให้เกิดพฤติกรรมแบบเหนียว [22-23] ดังนั้นการเสริมเส้นใยเหล็กจึงเพิ่มกำลังรับแรงดัดได้ แต่ปริมาณการเสริมเส้นใยที่มาก อาจทำให้ตัวอย่างเกิดช่องว่างภายในมากขึ้น ซึ่งส่งผลต่อความสามารถในการรับแรงดัดได้ ซึ่งสอดคล้องกับงานของ Younis [28] โดยรูปที่ 6 แสดงผลการทดสอบกำลังรับแรงดัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์



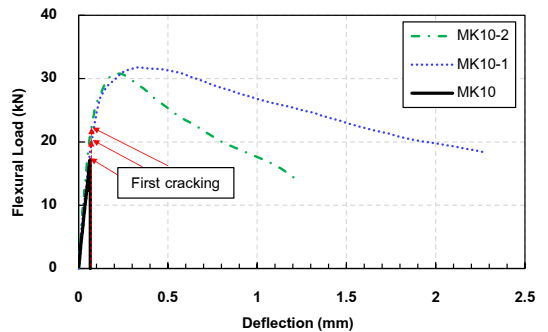
รูปที่ 6 กำลังดัดของตัวอย่างทดสอบ

3.5 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงและการโก่งตัว

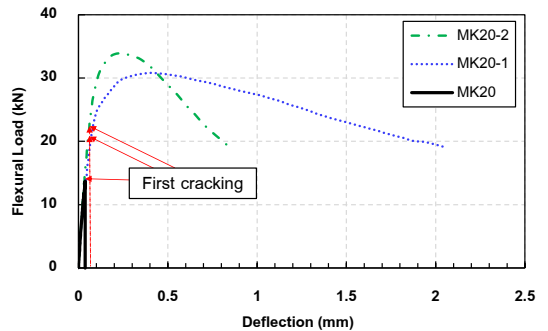
จากรูปที่ 7(ก) ถึง 7(ง) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำและการโก่งตัวของจีโอโพลีเมอร์มอร์ตาร์เสริมด้วยเส้นใยเหล็กที่ทำจากถั่วลันเตาและดินขาวเผา จากผลการทดสอบพบว่าจีโอโพลีเมอร์ที่ไม่เสริมเส้นใยเหล็กและแทนที่ถั่วลันเตาด้วยดินขาวเผาในปริมาณร้อยละ 0, 10, 20 และ 30 พบว่าทุกตัวอย่างมีความสัมพันธ์แบบเชิงเส้นจนกระทั่งตัวอย่างเกิดการวิบัติ แสดงว่าพฤติกรรมของจีโอโพลีเมอร์มอร์ตาร์มี พฤติกรรมแบบเปราะ [29] และตัวอย่างที่มีการแทนที่ด้วยดินขาวเผาในปริมาณที่เท่ากัน โดยมีการเสริมเส้นใยเหล็กร้อยละ 1 และ 2 พบว่าเมื่อเกิดการแตกร้าวแรกเริ่มของตัวอย่าง (First Cracking Strength) ตัวอย่างสามารถรับกำลังได้ต่อจนกระทั่งตัวอย่างเกิดการวิบัติ ซึ่งอาจจะมากกว่าหรือเท่ากับกำลังที่รับได้ ณ การแตกร้าวครั้งแรก จากนั้นตัวอย่างจะรับกำลังได้ลดลงอย่างช้า ๆ ซึ่งเกิดจากการอ่อนตัวของความเครียด (Strain Softening) ดังนั้นตัวอย่างที่มีการเสริมเส้นใยเหล็กจะเกิดพฤติกรรมแบบกึ่งเปราะ (Quasi Brittle) [29] โดยการใส่ปริมาณเส้นใยเหล็กเพิ่มขึ้น ส่งผลให้การรับแรงไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ



(ก) ปริมาณดินขาวเผาร้อยละ 0

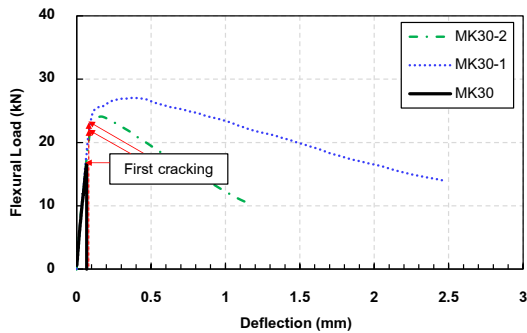


(ข) ปริมาณดินขาวเผาร้อยละ 10



(ค) ปริมาณดินขาวเผาร้อยละ 20

รูปที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดัดและการโก่งตัว



(ง) ปริมาณดินขาวเผาร้อยละ 30

รูปที่ 7 ต่อ

4. สรุปผลการทดลอง

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาสมบัติของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์เสริมเส้นใยเหล็กที่ใช้แก้รอย และแทนที่ด้วยดินขาวเผา โดยต้องการหาปริมาณที่เหมาะสมสำหรับการแทนที่แก้รอยด้วยดินขาวเผาปริมาณร้อยละ 0, 10, 20 และ 30 และปริมาณการเสริมเส้นใยเหล็ก ร้อยละ 0, 1 และ 2 โดยจะทดสอบคุณสมบัติของตัวอย่างได้แก่ การแผ่ไหล หน่วยน้ำหนัก กำลังอัด และกำลังดัด รวมไปถึงพฤติกรรมระหว่างแรงดัดและการโก่งตัวของตัวอย่าง ซึ่งสามารถสรุปได้ดังนี้

1. การแผ่ไหลของจีโอโพลิเมอร์พบว่าตัวอย่างที่ใส่ปริมาณดินขาวเผาเพิ่มขึ้น จะทำให้การแผ่ไหลลดลงอย่างมีนัยสำคัญ และตัวอย่างที่เสริมเส้นใยเหล็ก โดยแทนที่แก้รอยด้วยดินขาวเผาในปริมาณเท่ากันพบว่าการแผ่ไหลลดลงเมื่อปริมาณเส้นใยเหล็กเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ

2. หน่วยน้ำหนักของจีโอโพลิเมอร์พบว่าตัวอย่างที่ใส่ปริมาณดินขาวเผาเพิ่มขึ้น จะทำให้การหน่วยน้ำหนักมีค่าลดลง และตัวอย่างที่เสริมเส้นใยเหล็ก โดยแทนที่แก้รอยด้วยดินขาวเผาในปริมาณเท่ากันพบว่า

หน่วยน้ำหนักเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณเส้นใยเหล็กเพิ่มขึ้น และการใส่เส้นใยเหล็กในสัดส่วนที่มากขึ้น อาจส่งผลให้หน่วยน้ำหนักลดลงด้วยเช่นกัน

3. จีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ที่แทนที่แก้รอยด้วยดินขาวเผาบางส่วน พบว่าการแทนที่ด้วยดินขาวเผา มีกำลังรับแรงอัดลดลง และการแทนที่แก้รอยด้วยดินขาวเผาร้อยละ 10 มีกำลังรับแรงอัดมากที่สุด และเมื่อปริมาณเส้นใยเหล็กเพิ่มขึ้นกำลังอัดก็เพิ่มขึ้น

4. กำลังรับแรงดัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ที่ทำจากแก้รอยมากกว่าจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ที่แก้รอยด้วยดินขาวเผาบางส่วน แต่การแทนที่แก้รอยด้วยดินขาวเผาร้อยละ 30 มีกำลังรับแรงดัดมากที่สุด และเมื่อตัวอย่างที่แทนที่ดินขาวเผาในปริมาณเท่ากันแต่เสริมเส้นใยเพิ่มขึ้น ส่งผลให้กำลังรับแรงดัดเพิ่มขึ้นด้วย แต่ปริมาณการเสริมเส้นใยที่มากเกินไป อาจทำให้ตัวอย่างเกิดช่องว่างภายในมากขึ้น ซึ่งส่งผลต่อความสามารถในการรับแรงดัดได้

5. จากความสัมพันธ์ระหว่างแรงดัดและการโก่งตัวพบว่าจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ที่ทำจากแก้รอยแล้วแทนที่ด้วยดินขาวเผา มีพฤติกรรมแบบเปราะทั้งหมด และเมื่อเสริมเส้นใยเหล็กปริมาณร้อยละ 1 และ 2 ส่งผลให้จีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์มีพฤติกรรมแบบกึ่งเปราะ โดยปริมาณการเสริมเส้นใยเหล็กที่มากขึ้นรับแรงสูงสุดไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ

5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนการศึกษาจากคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ และได้รับทุนสนับสนุนการวิจัยจากคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์



6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Z. He, X. Zhu, J. Wang, M. Mu and Y. Wang, Comparison of CO₂ emissions from OPC and recycled cement production, *Construction and Building Materials*, 2019, 211, 965-973.
- [2] 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.
- [3] J. Davidovits, Geopolymers: Inorganic polymeric new materials, *Journal of Thermal Analysis and calorimetry*, 1991, 37(8), 1633-1656.
- [4] M. Ahmaruzzaman, A review on the utilization of fly ash, *Progress in Energy and Combustion Science*, 2010, 36(3), 327-363.
- [5] C. Li, H. Sun and L. Li, A review: The comparison between alkali-activated slag (Si+ Ca) and metakaolin (Si+ Al) cements, *Cement and Concrete Research*, 2010, 40(9), 1341-1349.
- [6] A.A. Ahmed and Y. Jia, Effect of using hybrid polypropylene and glass fibre on the mechanical properties and permeability of concrete, *Materials*, 2019, 12(22), 3786.
- [7] W. Kaufmann, A. Amin, A. Beck and M. Lee, Shear transfer across cracks in steel fibre reinforced concrete, *Engineering Structures*, 2019, 186, 508-524.
- [8] R.I. Gilbert and E.S. Bernard, Post-cracking ductility of fibre reinforced concrete linings in combined bending and compression, *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2018, 76, 1-9.
- [9] J.S. Lawler, D. Zampini and S.P. Shah, Permeability of cracked hybrid fiber-reinforced mortar under load, *Materials Journal*, 2002, 99(4), 379-385.
- [10] M.G. Chorzepa, M. Masud, A. Yaghoobi and H. Jiang, Impact test: Multiscale fiber-reinforced concrete including polypropylene and steel fibers, *ACI Structural Journal*, 2017, 114(6), 1429-1444.
- [11] J.L. Provis, P. Duxson and J.S. van Deventer, The role of particle technology in developing sustainable construction materials, *Advanced Powder Technology*, 2010, 21(1), 2-7.
- [12] ASTM C618, Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete, 2019.
- [13] ASTM C128, Standard Test Method for Density, Relative Density (Specific Gravity), and Absorption of Fine Aggregate, 2015.



- [14] ASTM C136, Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates, 2006.
- [15] ASTM C29/C29M, Standard Test Method for Bulk Density ("Unit Weight") and Voids in Aggregate, 2017.
- [16] P. Nuaklong, J. Chittanurak, P. Jongvivatsakul, W. Pansuk, A. Lenwari and S. Likitlersuang Effect of hybrid polypropylene-steel fibres on strength characteristics of UHPFRC, *Advances in Concrete Construction*, 2020, 10(1), 1-11.
- [17] ASTM C1611/C1611M, Standard Test Method for Slump Flow Of Self-Consolidating Concrete, 2018.
- [18] ASTM C39/C39M, Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens, 2021.
- [19] ASTM C1609, Standard Test Method for Flexural Performance of Fiber-Reinforced Concrete (Using Beam With Third-Point Loading), 2019.
- [20] D.L. Kong, J.G. Sanjayan and K. Sagoe-Crentsil, Comparative performance of geopolymers made with metakaolin and fly ash after exposure to elevated temperatures, *Cement and Concrete Research*, 2007, 37(12), 1583-1589.
- [21] J.J. Brooks and M.M. Johari, Effect of metakaolin on creep and shrinkage of concrete, *Cement and Concrete Composites*, 2021, 23(6), 495-502.
- [22] A.S. Sayyad and S.V. Patankar, Effect of steel fibres and low calcium fly ash on mechanical and elastic properties of geopolymer concrete composites, *Indian Journal of Materials Science*, 2013.
- [23] N. Ranjbar and M. Zhang, Fiber-reinforced geopolymer composites: A review, *Cement and Concrete Composites*, 2020, 107, 103498.
- [24] P. Nuaklong, V. Sata and P. Chindaprasirt, Properties of metakaolin-high calcium fly ash geopolymer concrete containing recycled aggregate from crushed concrete specimens, *Construction and Building Materials*, 2018, 161, 365-373.
- [25] T.W. Cheng, J.P. Chiu, Fire-resistant geopolymer produced by granulated blast furnace slag, *Minerals Engineering*, 2003, 16(3), 205-210.
- [26] O.A. Hodhod, S.E. Alharthy and S.M. Bakr, Physical and mechanical properties for metakaolin geopolymer bricks, *Construction and Building Materials*, 2020, 265, 120217.



- [27] X. Guo and X. Pan, Mechanical properties and mechanisms of fiber reinforced fly ash–steel slag based geopolymer mortar, *Construction and Building Materials*, 2018, 179, 633-641.
- [28] K.H. Younis, Mechanical performance of concrete reinforced with steel fibres extracted from post-consumer tyres, *The second International Engineering Conference on Developments in Civil and Computer Engineering Applications 2016 (IEC2016)*, Proceeding, 2016, 162-169.
- [29] T. Matsumoto and H. Mihashi, JCI-DFRCC summary report on DFRCC terminologies and application concepts, *The JCI International Workshop on Ductile Fiber Reinforced Cementitious Composites Application and Evaluation (DFRCC 2002)*, Proceeding, 2002, 59-66.

การพัฒนาอุปกรณ์สร้างอักษรเบรลล์บนฉลากยาด้วยเครื่องพิมพ์ 3 มิติ

อหันท์ ดันวิไลศิริ¹ และ พิชิต ขจรเดชะ^{2*}

¹ สาขาวิชาเทคโนโลยีการพิมพ์และสื่อสารมวลชน, คณะเทคโนโลยีสื่อสารมวลชน,
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

² ภาควิชาเทคโนโลยีการพิมพ์และบรรจุภัณฑ์, คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรมและเทคโนโลยี,
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

* ผู้ประสานงานเผยแพร่ (Corresponding Author), E-mail: pichit.kaj@kmutt.ac.th

วันที่รับบทความ: 17 มกราคม 2566; วันที่ทบทวนบทความ: 8 พฤษภาคม 2566; วันที่ตอบรับบทความ: 11 พฤษภาคม 2566

วันที่เผยแพร่ออนไลน์: 25 สิงหาคม 2566

บทคัดย่อ: งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาอุปกรณ์สร้างอักษรเบรลล์สำหรับการพิมพ์อักษรเบรลล์ลงบนฉลากยา โดยใช้เครื่องพิมพ์ 3 มิติแบบฉีดเส้นพลาสติก (Fused Deposition Modelling, FDM) เพื่อให้เกษตรกรสามารถใช้อุปกรณ์นี้สร้างอักษรเบรลล์ได้ทันทีในขั้นตอนการจ่ายยาให้กับผู้ที่บกพร่องทางการมองเห็น ในงานวิจัยนี้กำหนดจำนวนคำที่ใช้ในการพิมพ์ทั้งหมด 8 คำ ประกอบด้วยคำว่า เข้า วัน เย็น ก่อน หลัง นอน 1 และ 2 ซึ่งเป็นกลุ่มคำเพื่อใช้อธิบายวิธีการรับประทานยา หลังจากนั้นได้ทำการออกแบบอุปกรณ์สร้างอักษรเบรลล์โดยใช้โปรแกรม 3D CAD SolidWorks และนำไปสร้างด้วยเครื่องพิมพ์ 3 มิติ หลังจากนั้นนำอุปกรณ์สร้างอักษรเบรลล์มาทำการพิมพ์ลงบนฉลากยา และทำการประเมินความสูงของตัวอักษรเบรลล์ ประเมินความสามารถในการรับรู้ของผู้ที่บกพร่องทางการมองเห็น และการแปลความหมายของตัวอักษรเบรลล์ที่ถูกพิมพ์ด้วยอุปกรณ์ต้นแบบ รวมถึงการประเมินต้นทุนของอุปกรณ์ที่ได้สร้างขึ้น ผลการวิจัยพบว่า ความสูงของตัวอักษรเบรลล์บนฉลากยาที่ทำจากกระดาษอยู่ที่ 200.12 ไมครอน และความสูงตัวอักษรเบรลล์บนฉลากยาบนซองยาพลาสติก อยู่ที่ 296.67 ไมครอน ผ่านมาตรฐาน ECMA Euro Braille จาก European Carton Makers Association การประเมินความสามารถในการรับรู้ของผู้ที่บกพร่องทางการมองเห็นและการแปลความหมายของตัวอักษรเบรลล์ โดยใช้เวลาในการอ่านตัวอักษรเบรลล์บนฉลากยาทั้ง 8 คำ ที่ทำจากกระดาษและแปลผลเฉลี่ย 12.8 วินาที และ 14.80 วินาที สำหรับฉลากยาบนซองยาพลาสติก โดยต้นทุนการพัฒนาอุปกรณ์สร้างอักษรเบรลล์บนฉลากบรรจุภัณฑ์ยาด้วยเครื่องพิมพ์ 3 มิติ อยู่ที่ประมาณ 160 บาทต่อ 1 ตัวอักษรเบรลล์ สรุปได้ว่า อุปกรณ์สร้างอักษรเบรลล์บนฉลากยาด้วยเครื่องพิมพ์ 3 มิติสามารถนำไปใช้ในการพิมพ์อักษรเบรลล์บนฉลากยาได้

คำสำคัญ: อักษรเบรลล์; ฉลากยา; เครื่องพิมพ์ 3 มิติ

Development of Braille-making Devices on Pharmaceutical Labels using 3D Printers

Anan Tanwilaisiri¹ and Phichit Kajondecha^{2*}

¹ Department of Printing Technology and Communication, Faculty of Mass Communication Technology Rajamangala University of Technology Thanyaburi

² Department of Printing and Packaging Technology, Faculty of Industrial Education and Technology, King Mongkut's University of Technology Thonburi

* Corresponding author, E-mail: phichit.kaj@kmutt.ac.th

Received: 17 January 2023; Revised: 8 May 2023; Accepted: 11 May 2023

Online Published: 25 July 2023

Abstract: The research aims to develop braille-making devices for braille printing on drug labels, using fused deposition modeling (FDM) printers. This device enables pharmacists to create braille immediately in the process of dispensing medicines to the visually impaired. In this research the eight words were determined, consisting of morning, daytime, evening, before, after, bedtime, 1 and 2, a group of words applied to describe how to take the drug. After that, the braille creation device was designed using 3D CAD SolidWorks and manufactured using a 3D printer, then used the braille creation device to print on the drug label and assess the height of the braille letter. Evaluates the ability to recognize and interpret braille letters printed with a nudge device. This includes estimating the cost of the equipment that has been created. The results showed that the braille letter height on the drug paper label is 200.12 microns, and the braille height on the drug label on the plastic envelope is 296.67 microns which is satisfactory according to the ECMA Euro Braille standard from the European Carton Makers Association. The ability to read and translate braille on sticker paper is around 12.8 seconds and 14.80 seconds on a drug plastic bag. The cost of developing a braille device on a 3D printer drug label was approximately 160 baht per braille. These results implied that braille-based equipment on drug labels using a 3D printer can be used to create braille on pharmaceutical labels

Keywords: braille; drug labels; 3D printing



1. บทนำ

จากรายงานของกรมส่งเสริมและพัฒนาคุณภาพชีวิตคนพิการ กระทรวงการพัฒนาสังคมและความมั่นคงของมนุษย์ ปี 2559 ประเทศไทยมีจำนวนคนพิการทั้งหมด 1,657,438 คน คิดเป็นร้อยละ 2.52 ของประชากรทั้งประเทศ มีคนที่บกพร่องทางการมองเห็นจำนวน 175,692 คน [1] ทั้งนี้ในทางการแพทย์ คนที่บกพร่องทางการมองเห็นหรือที่เรียกว่า คนตาบอด หมายถึงผู้ที่มองไม่เห็น หรือ พอเห็นแสง เห็นเลือนลาง และมีความบกพร่องทางสายตาทั้งสองข้าง โดยมีความสามารถในการมองเห็นได้ไม่ถึง 1/10 ของคนปกติ โดยสามารถแบ่งเป็นได้ 2 ประเภทคือ ตาบอดสนิท และ ตาบอดไม่สนิทหรือบอดเพียงบางส่วน สายตาเลือนราง จากรายงานของสมาคมคนตาบอดแห่งประเทศไทย พบว่าปัญหาที่แท้จริงของคนที่บกพร่องทางการมองเห็นคือความเข้าใจที่ผิดพลาดและการขาดข้อมูลที่ถูกต้อง หากคนที่บกพร่องทางการมองเห็นได้รับโอกาสที่เท่าเทียมบุคคลทั่วไปแล้ว การมองไม่เห็นก็เป็นเพียงความไม่สะดวก หรือความน่ารำคาญทางกายภาพเท่านั้น ทั้งนี้คนที่บกพร่องทางการมองเห็นที่ได้รับการสอนให้ใช้อักษรเบรลล์ จะสามารถอ่าน เขียนหนังสือ และเรียนรู้ผ่านสื่ออื่น ๆ เช่น สื่ออิเล็กทรอนิกส์ หรือคอมพิวเตอร์ อักษรขยายใหญ่ สำหรับคนที่เห็นเลือนราง [2] คนที่บกพร่องทางการมองเห็นจะมีการรับรู้ข้อมูลข่าวสารต่าง ๆ ผ่านเสียง การรับรู้ รูปร่าง รูปทรง พื้นผิว ขนาดสัมผัส โดยอาศัยปลายนิ้วมือ สื่อที่ใช้ในการรับรู้ข้อมูลต่าง ๆ จะมีลักษณะพื้นผิวเป็นพื้นนูน หรือมีมิติที่สูงขึ้นมาจากระนาบ เพื่อให้คนที่บกพร่องทางการมองเห็นสามารถ

รับรู้ผ่านการสัมผัส จับ หรือคลำ สามารถแปลความหมาย ข้อมูลต่าง ๆ ได้ด้วยตนเอง

จากงานวิจัยโดยธิดิมา [3] และอมรรัตน์ [4] พบว่าคนที่บกพร่องทางการมองเห็นส่วนมากมีความกลัวว่าจะใช้ยาผิด เนื่องจากไม่สามารถอ่านฉลากยาเองได้ และชอบที่จะใช้ยาทาภายนอกมากกว่ายาชนิดอื่น ๆ เพราะคิดว่าผลเสียของการใช้ยาผิดจะน้อยกว่า เมื่อถามถึงการรับรู้ข้อมูลบนฉลากยา คนกลุ่มนี้ยังมีความรู้สึกว่าคุณไม่ได้รับข้อมูลที่เพียงพอ และส่วนมากรับรู้ข้อมูลโดยให้คนอื่นอ่านให้ฟัง โดยข้อมูลที่อยากให้มีเรียงจากมากที่สุดไปหาน้อยคือ ชื่อยา (ชื่อสามัญ) วิธีการใช้ยา สรรพคุณของยา ข้อห้าม/คำเตือน วิธีการเก็บยา วันเดือนปีที่ผลิตและหมดอายุ ประเภทยา แบ่งตามกฎหมาย เลขทะเบียนตำรับยา เลขที่หรืออักษรแสดงครั้งที่ผลิตหรือวิเคราะห์ ชื่อและที่ตั้งของผู้ผลิต ปริมาณ หรือขนาดบรรจุ ชื่อยา (ชื่อการค้า) ส่วนประกอบของยา ทั้งนี้ในปี 2005 สหภาพยุโรป โดย European Union Directive ได้ออกข้อบังคับให้บรรจุภัณฑ์ยาจะต้องมีการใช้อักษรเบรลล์ในการสื่อสารข้อมูลของยา โดยจะต้องบอกชื่อยา และความแรงของยา รวมทั้งบอกว่ายานี้ใช้กับเด็กทารก เด็กหรือใช้กับผู้ใหญ่เท่านั้น โดยประกาศให้ใช้กับยาที่ออกใหม่ก่อน ส่วนยาที่มีอยู่ในท้องตลาดเริ่มบังคับใช้เดือนตุลาคม พ.ศ. 2553 ส่วนในประเทศอื่น ๆ รวมทั้งประเทศไทย นั้นยังไม่มี การบังคับใช้ในเรื่องอักษรเบรลล์ [3]

ในประเทศไทย ได้มีการวิจัยและพัฒนาด้านการผลิตฉลากยาอักษรเบรลล์สำหรับผู้ที่บกพร่องทางการมองเห็นด้วยวิธีต่าง ๆ โดยมีการเปรียบเทียบการผลิต



ฉลากยาอักษรเบรลล์ด้วยการระบบการพิมพ์สกรีนลงบนวัสดุที่แตกต่างกัน เช่น กระดาษแข็ง อาร์ทมัน อาร์ทการ์มัน สติกเกอร์ เป็นต้น ผลที่ได้พบว่าความหนาแตกต่างของอักษรเบรลล์จะแตกต่างกันขึ้นอยู่กับขนาดจุดของอักษรเบรลล์ และเมื่อผ่านการขัดถูจำนวน 100 ครั้ง จะมีความหนาลดลง 4.6 ไมครอน [4] และพบว่าชนิดของกระดาษและน้ำหนักมาตรฐานของกระดาษ ระบบการพิมพ์ มีผลต่อความหนาและความทนทานของอักษรเบรลล์ [5] ปัจจัยที่มีผลต่อการอ่านและแปลความหมายตัวอักษรเบรลล์ พบว่าความหนูนของตัวอักษรที่สม่ำเสมอจะช่วยให้การสัมผัสและรับรู้ได้ดีกว่า ความหนูนของตัวอักษรที่ไม่สม่ำเสมอ และพบว่าอักษรเบรลล์บนวัสดุผิวด้านอ่านได้ง่ายกว่าวัสดุผิวมัน เพราะวัสดุผิวมันจะมีความหนืดเมื่อสัมผัสและเป็นอุปสรรคในการรับรู้และแปลความหมาย [6] สำหรับเทคนิคการพิมพ์ที่ใช้ในการสร้างตัวอักษรบนให้กับสิ่งพิมพ์ คือ เทคนิคการดุนหนูน ซึ่งจะใช้ระบบการพิมพ์เลเซอร์เพรสส์ในการสร้าง โดยแม่พิมพ์จะประกอบด้วยแม่พิมพ์ตัวผู้และตัวเมียซึ่งทำจากโลหะในการกดบ่มเพื่อสร้างตัวอักษรให้หนูนขึ้นมา [7] แต่ในปัจจุบันด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ (3D Printing Technology) ที่มีการนำเข้ามาใช้อย่างแพร่หลายในหลายอุตสาหกรรม เช่น ใช้ในการสร้างแบบจำลองในกระบวนการออกแบบก่อสร้าง ใช้ในสร้างแม่พิมพ์ในกระบวนการฉีดขึ้นรูปพลาสติก และการนำมาประยุกต์ใช้ทางการแพทย์ [8] การพิมพ์ 3 มิตินี้ยังสามารถนำมาใช้ในการสร้างแม่พิมพ์สำหรับการดุนหนูนในต้นทูนที่ถูกลง เนื่องจากใช้พลาสติกในการสร้าง

จากปัญหาดังกล่าว ผู้วิจัยจึงได้พัฒนาอุปกรณ์สร้างอักษรเบรลล์บนฉลากยาด้วยเครื่องพิมพ์ 3 มิติ และทำการประเมินผลที่ได้จากอุปกรณ์ดังกล่าวในด้าน ต้นทุนการผลิต ระยะเวลาการผลิต ระยะเวลาการอ่านและความถูกต้องในการแปลความหมาย เป็นการนำเอาประโยชน์จากเครื่องพิมพ์ 3 มิติ มาช่วยพัฒนาการสร้างอักษรเบรลล์ ตัวอักษรเบรลล์ที่ได้จะถูกสร้างลงบนฉลากสติ๊กเกอร์เพื่อนำไปติดกับซองหรือขวดยา โดยมีข้อมูลที่จำเป็นสำหรับการบริโภคยาต่าง ๆ เช่น เวลาในการรับประทาน เช้า กลางวัน เย็น ก่อนหรือหลังอาหาร จำนวนเม็ดยาที่รับประทาน ซึ่งเภสัชกรหรือร้านขายยาสามารถสร้างได้โดยใช้อุปกรณ์สร้างอักษรเบรลล์ที่ได้สร้างขึ้นจากเครื่องพิมพ์ 3 มิติ พิมพ์อักษรเบรลล์ลงบนฉลากยาแล้วนำไปติดบนซองหรือขวดยาได้ด้วยตนเอง และเป็นการอำนวยความสะดวกให้ผู้ที่บกพร่องทางการมองเห็น เพิ่มช่องทางสื่อสารและการรับข้อมูล ส่งเสริมการพึ่งพาตนเอง ลดความเสี่ยงการรับประทานยาผิดเวลา เป็นต้น เป็นการช่วยพัฒนาคุณภาพชีวิตของผู้ที่บกพร่องทางการมองเห็นได้อีกหนึ่งแนวทาง อีกทั้งราคาของอุปกรณ์สร้างอักษรเบรลล์ที่พิมพ์จากเครื่องพิมพ์ 3 มิติ ยังมีราคาไม่แพงสามารถผลิตใหม่ได้ด้วยตนเอง ดังนั้น การพัฒนาอุปกรณ์สร้างอักษรเบรลล์สำหรับการพิมพ์อักษรเบรลล์ลงบนฉลากยา โดยใช้เครื่องพิมพ์ 3 มิติแบบฉีดเส้นพลาสติก (Fused Deposition Modelling, FDM) จะทำให้เภสัชกรสามารถใช้อุปกรณ์นี้สร้างอักษรเบรลล์ได้ทันทีในขั้นตอนการจ่ายยาให้กับผู้ที่บกพร่องทางการมองเห็น มีต้นทุนต่ำ และสะดวกรวดเร็วในการผลิตอักษรเบรลล์



2. ระเบียบวิธีวิจัย

การพัฒนาอุปกรณ์สร้างอักษรเบรลล์บนฉลากบรรจุภัณฑ์ยาด้วยเครื่องพิมพ์ 3 มิติ จะมีขั้นตอนการพัฒนาดังต่อไปนี้

2.1 การออกแบบข้อความและตัวอักษรบนฉลากยา

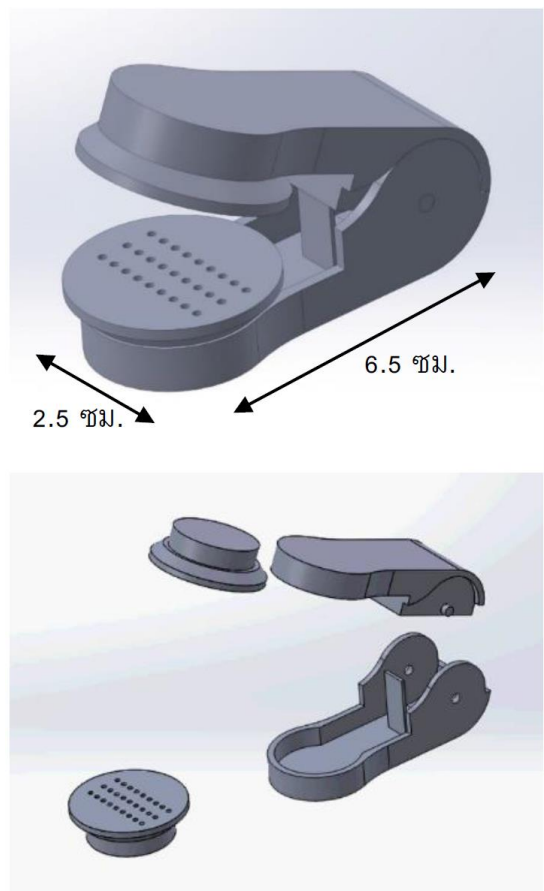
ในการสร้างอักษรเบรลล์บนฉลากยา จำเป็นต้องมีการศึกษาไปที่คำสำคัญที่ใช้ในการอธิบายในการรับประทานยา และข้อมูลที่เป็นอื่น ๆ สำหรับให้ผู้ป่วยรื่องทางสายตา โดยสำรวจจากเภสัชกรจำนวน 20 คน และสามารถสรุปคำสำคัญที่ใช้ในการรับประทานยา ดังแสดงตามตารางที่ 1 จากนั้นทำการแปลคำตามที่กำหนดให้กลายเป็นอักษรเบรลล์

2.2 การออกแบบและพิมพ์อุปกรณ์สร้างอักษรเบรลล์ด้วยเครื่องพิมพ์ 3 มิติ

ทำการออกแบบอุปกรณ์สร้างอักษรเบรลล์บนฉลากยาด้วยโปรแกรม 3D CAD SolidWorks โดยการออกแบบได้กำหนดตัวอุปกรณ์จะประกอบไปด้วย 2 ส่วน คือ ส่วนตัวกดด้านบนและตัวกดด้านล่าง และส่วนแม่แบบ

สร้างอักษรเบรลล์ด้านบนและด้านล่าง ที่เมื่อนำแม่แบบขมกเข้าหากัน โดยมีกระดาษที่มีความหนาไม่น้อยกว่า 0.10 มิลลิเมตรอยู่ระหว่างแม่แบบขมกทั้งสอง จะทำให้ได้ตัวนูนขึ้นมาตามแบบของแม่แบบขมก ความสูงของแบบที่กดขึ้นมา จะมาจากความสูงของแม่แบบขมก ด้านบนและความลึกของหลุมของแม่แบบขมกด้านล่าง ในการสร้างอักษรเบรลล์ด้วยอุปกรณ์นี้ ได้ออกแบบความสูงของตัวอักษรตามมาตรฐาน European Carton Makers Association (ECMA Euro Braille) ที่กำหนดความสูงของตัวอักษรเบรลล์ว่าควรมี

ขนาดประมาณ 2 มิลลิเมตร เส้นผ่าศูนย์กลางของอักษรเบรลล์มีขนาด 1.6 มิลลิเมตร [9] ดังแสดงในรูปที่ 1 สำหรับการออกแบบตัวกดได้ศึกษาจากโครงสร้างของตัวกดเจาะรูกระดาษที่ใช้ในสำนักงานทั่วไป และนำมาปรับปรุงให้มีขนาดที่สามารถใช้มือเพียงข้างเดียวในการกดเพื่อสร้างอักษรเบรลล์ได้ และตัวกดนี้สามารถติดตั้งส่วนแม่แบบอักษรเบรลล์ด้านบนและด้านล่างที่เป็นคำต่าง ๆ ได้



รูปที่ 1 การออกแบบอุปกรณ์สร้างอักษรเบรลล์

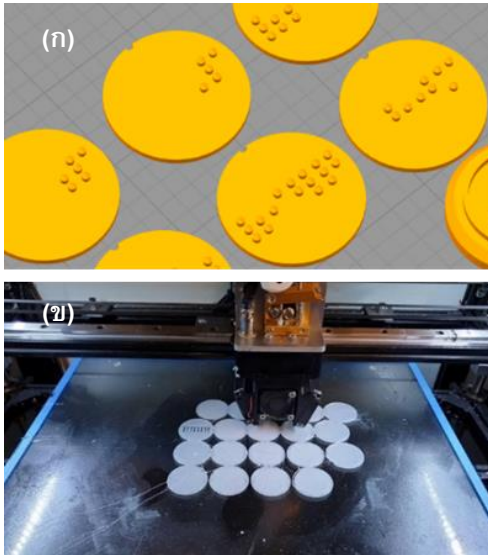


หลังจากออกแบบส่วนตัวกดด้านบนและตัวกดด้านล่าง และส่วนแม่แบบสร้างอักษรเบรลล์ด้านบนและด้านล่างเป็นค่าต่าง ๆ ตามตารางที่ 1 ด้วยโปรแกรม 3D CAD SolidWorks เป็นที่เรียบร้อยแล้วทำการบันทึกไฟล์ให้อยู่ในรูปแบบนามสกุล .STL และนำมาเข้าโปรแกรม CHITUBOX เพื่อแปลงไฟล์ให้เป็นชั้น (Layer) สำหรับการพิมพ์ด้วยเครื่องพิมพ์ 3 มิติ โดยใช้เครื่องพิมพ์แบบฉีดเส้นพลาสติก (FDM) จากนั้นพิมพ์อุปกรณ์สร้างอักษรเบรลล์ โดยเครื่องพิมพ์ 3 มิติ ซึ่งสามารถใช้วัสดุได้ 2 ชนิด คือ Acrylonitrile Butadiene Styrene, ABS และ Poly-lactic Acid, PLA ในการพิมพ์งานสำหรับการทดลองนี้ ได้เลือกใช้ PLA เป็นวัสดุทางการพิมพ์ เนื่องจากเป็น

วัสดุที่สร้างมาจากธรรมชาติ เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม มีการพัฒนาและปรับปรุงสมบัติเชิงกลเพื่อเพิ่มความแข็งแรงในการใช้งาน [10] ในการพิมพ์เส้น PLA จะถูกป้อนผ่านหัวพิมพ์ที่มีการปรับตั้งความร้อนที่อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส เพื่อหลอมให้กลายเป็นของเหลวและถูกฉีดออกมาเป็นรูปร่างต่างๆ ตามที่กำหนด ความเร็วในการพิมพ์กำหนดที่ 50 มิลลิเมตรต่อวินาที ความร้อนที่ฐานพิมพ์ 40 องศาเซลเซียส ความหนาแน่นของชั้นงาน (Infill Density) 60% รูปร่างในการพิมพ์ (Infill Pattern) ใช้รูปร่างแบบ Grid Pattern ความหนาของชั้นในการพิมพ์ (Layer Thickness) 0.5 มม. ดังแสดงในรูปที่ 2 (ก) และ (ข)

ตารางที่ 1 ลักษณะกลุ่มคำ การตัดคำและลักษณะอักษรเบรลล์

ลักษณะกลุ่มคำ	การตัดคำ	ลักษณะอักษรเบรลล์		
กลุ่มคำแสดงเวลาในการรับประทานยา (เช้า กลางวัน และเย็น)	เช้า	เช้า	วัน	เย็น
	เย็น	● ● ● ● ● ● ● ●	● ● ● ● ● ● ● ●	● ● ● ● ● ● ● ●
กลุ่มคำแสดงช่วงเวลาในการรับประทานยา (ก่อนอาหาร หลังอาหาร และก่อนนอน)	ก่อน	ก่อน	หลัง	นอน
	หลัง	● ● ● ● ● ● ● ●	● ● ● ● ● ● ● ●	● ● ● ● ● ● ● ●
กลุ่มคำแสดงปริมาณยา (1 เม็ด และ 2 เม็ด)	1 , 2	1 เม็ด	2 เม็ด	
		○ ● ● ● ● ● ● ●	○ ● ● ● ● ● ● ●	

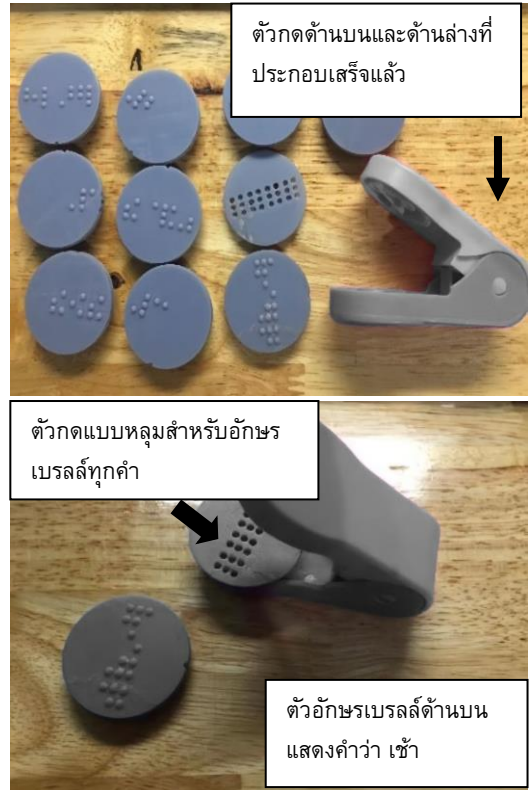


รูปที่ 2 (ก) ภาพอักษรเบรลล์ แบบ 2 มิติ และ (ข) การพิมพ์อุปกรณ์สร้างอักษรเบรลล์ด้วยเครื่องพิมพ์ 3 มิติ

หลังจากที่เครื่องพิมพ์ 3 มิติได้ทำการพิมพ์ส่วนตัวกดด้านบนและตัวกดด้านล่าง และส่วนแม่แบบสร้างอักษรเบรลล์ด้านบนและด้านล่าง เป็นที่เรียบร้อยแล้ว การประกอบอุปกรณ์สร้างอักษรเบรลล์ จะเริ่มจากการนำส่วนตัวกดด้านบนและตัวกดด้านล่าง มาประกอบตามแบบ และนำสปริงเข้ามาติดตั้งตรงด้านท้ายของตัวกด หลังจากนั้นนำแม่แบบอักษรเบรลล์ด้านบนมาติดตั้งที่ตัวกดด้านบน และแม่แบบตัวอักษรเบรลล์ด้านล่างมาติดตั้งที่ตัวกดด้านล่าง อุปกรณ์สร้างอักษรเบรลล์สำหรับฉายาก็พร้อมที่ใช้งาน ดังแสดงในรูปที่ 3

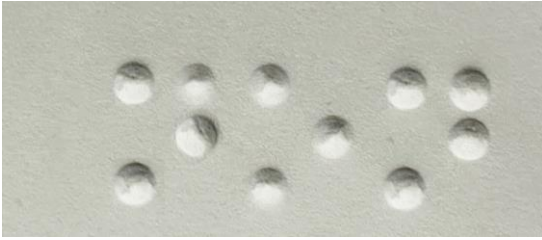
2.3 การทดลองสร้างและวัดความสูงของตัวอักษรเบรลล์

อักษรเบรลล์ถูกสร้างบนกระดาษที่มีความหนาประมาณ 0.10 มิลลิเมตร และสร้างอักษรเบรลล์บนของพลาสติก ด้วยอุปกรณ์สร้างอักษรเบรลล์ที่ได้รับ



รูปที่ 3 การประกอบอุปกรณ์สร้างอักษรเบรลล์

การพัฒนาขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 4 และรูปที่ 5 ตามลำดับ โดยพิมพ์ทั้งหมด 8 กลุ่มคำตามตารางที่ 1 คำละ 5 ตัวอย่าง การสร้างอักษรเบรลล์ทำได้จากการกดอุปกรณ์สร้างอักษรเบรลล์ด้านบนและด้านล่างเข้าหากัน โดยใช้แรงกดพอสมควร (เทียบเคียงแรงกดที่ 0.52-0.62 กิโลกรัม/น้ำหนักตัว ตามเกณฑ์มาตรฐานสมรรถภาพทางร่างกาย เพศชาย อายุ 40-44 ปี ระดับแรงกดปานกลาง) [11] จากนั้นนำอักษรเบรลล์ที่สร้างบนกระดาษและของพลาสติก อย่างละ 40 ตัวอย่างไปวัดความสูงด้วยเครื่องวัดความหนาวัสดุแบบไม่สัมผัส ยี่ห้อ Zygo รุ่น NewView 8300



รูปที่ 4 อักษรเบรลล์ที่สร้างขึ้นบนกระดาษ



รูปที่ 5 อักษรเบรลล์ที่สร้างขึ้นบนซองพลาสติก

2.4 การทดลองอ่านอักษรเบรลล์ที่สร้างขึ้น

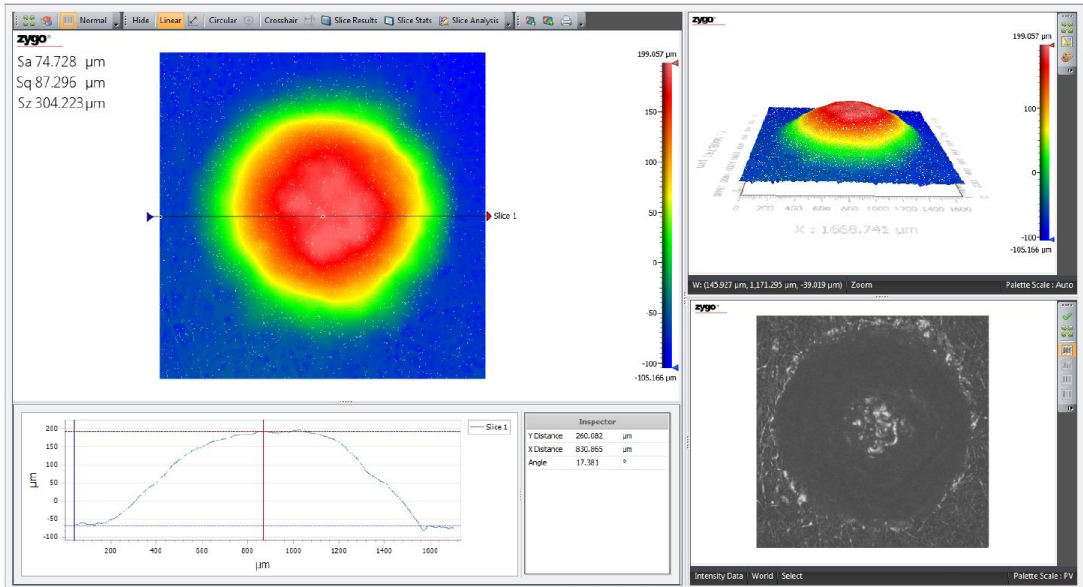
ทำการทดลองนำอักษรเบรลล์ที่สร้างขึ้น ไปการทดลองกับผู้ที่มีความบกพร่องทางสายตา ที่มีระดับของการบกพร่องทางการมองเห็นระดับ 5 ที่ได้รับการสอนและมีความสามารถในการอ่านอักษรเบรลล์ จากโรงเรียนสอนคนตาบอดกรุงเทพฯ จำนวน 10 คน อายุ 15-20 ปี ที่สามารถสื่อสารและแปลความหมายของคำพื้นฐานที่จำเป็นต้องใช้ในชีวิตประจำวัน ทำการสัมผัสและอ่านฉลากยาครั้งละ 1 คนในพื้นที่ที่กำหนด โดยนำฉลากยาที่สร้างอักษรเบรลล์ 3 ตัวอย่าง ดังแสดงในตารางที่ 2 ให้ผู้ที่บกพร่องทางการมองเห็นอ่านและแปลความหมายทั้ง 3 ตัวอย่าง โดยทำการสลับตัวอย่างและอ่านทั้งหมด 5 ครั้ง

3. ผลการทดลอง

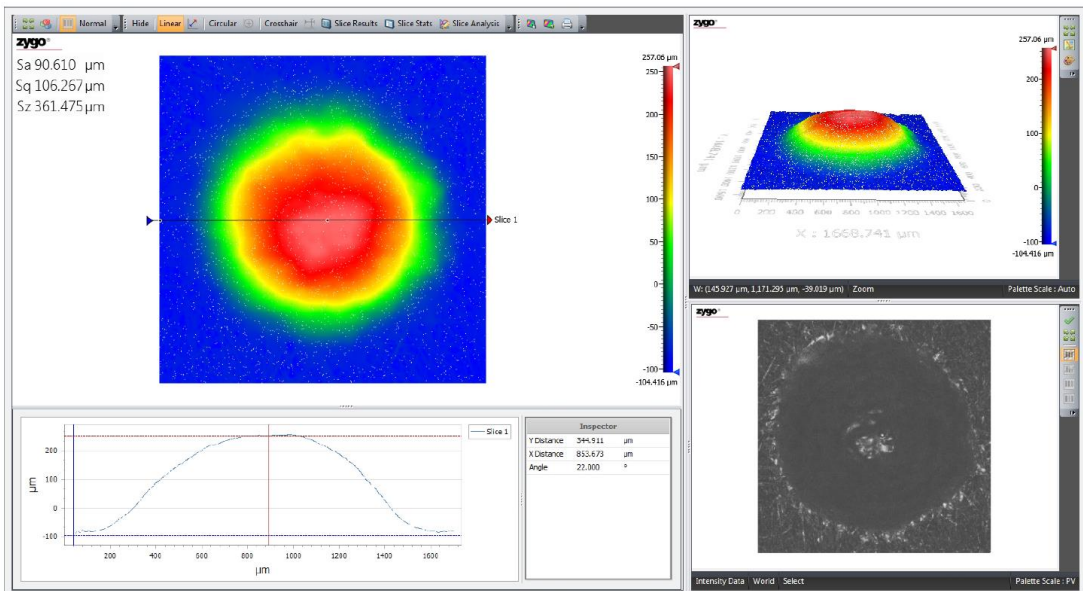
การสร้างอุปกรณ์สร้างอักษรเบรลล์บนฉลากยา ด้วยเครื่องพิมพ์ 3 มิติ ที่ได้สร้างขึ้นมีผลการทดลองดังต่อไปนี้

3.1 การวัดความหนาของอักษรเบรลล์บนฉลากยา

นำอักษรเบรลล์จำนวน 8 ตัวอักษรที่ถูกสร้างขึ้นบนกระดาษและซองยาพลาสติก ไปทำการวัดความสูงด้วยเครื่องวัดความหนาและพื้นผิวของวัสดุแบบไม่สัมผัส (Laser Scanning Confocal Microscope) หลักการทำงานของเครื่องจะมีการใช้แสงเลเซอร์ที่มีความยาวคลื่น 405 นาโนเมตรในการส่องมายังวัสดุที่นำมาศึกษาและทำการวัดแสงสะท้อนกลับ โดยแสงเลเซอร์ที่ใช้จะเป็นแสงเลเซอร์ที่ส่องผ่านเลนส์เพื่อปรับระยะโฟกัสของแสง ทำให้แสงสามารถส่องผ่านไปวัสดุที่นำมาศึกษาได้ เพื่อนำมาใช้ในการคำนวณความสูงของวัสดุที่นำมาศึกษา ดังแสดงในรูปที่ 6 สำหรับความสูงของอักษรเบรลล์ที่วัดได้จะแสดงในตารางที่ 3 ค่าเฉลี่ยความสูงตัวอักษรเบรลล์บนกระดาษอยู่ที่ 200.12 ไมครอน และค่าเฉลี่ยความสูงตัวอักษรเบรลล์บนซองยาพลาสติก อยู่ที่ 296.67 ไมครอน เมื่อเปรียบเทียบกับค่ามาตรฐาน European Carton Makers Association (ECMA Euro Braille) ที่กำหนดความสูงของตัวอักษรเบรลล์ว่าควรมีความสูงอย่างน้อย 2 มิลลิเมตร หรือ 200 ไมครอน [12, 13] พบว่าความสูงของอักษรเบรลล์ที่สร้างจากอุปกรณ์สร้างอักษรเบรลล์ด้วยเครื่องพิมพ์ 3 มิติ ผ่านค่ามาตรฐานสามารถนำไปใช้ให้ผู้ที่บกพร่องทางการมองเห็นสามารถอ่านและแปลความหมายได้



(ก)



(ข)

รูปที่ 6 ตัวอย่างการวัดความสูงจากเครื่องวัดความหนาแบบวัสดุแบบไม่สัมผัส

(ก) กระดาษ และ (ข) ซองยาพลาสติก

**ตารางที่ 2 ตัวอย่างฉลาก และคำบนฉลาก**

ตัวอย่าง	คำบนฉลาก
ตัวอย่างที่ 1	เช้า ก่อน หนึ่ง
ตัวอย่างที่ 2	วัน หลัง สอง
ตัวอย่างที่ 3	เย็น นอน หนึ่ง

3.2 ผลการทดลองอ่านอักษรเบรลล์ที่สร้างขึ้น

กลุ่มตัวอย่าง 10 คนสามารถอ่านและแปลความหมายบนฉลากยาบนกระดาษและซองยาพลาสติกจำนวน 8 กลุ่มคำได้ถูกต้องทั้งหมด โดยใช้เวลาในการอ่านและแปลผลเฉลี่ย 12.8 วินาที และ 14.80 วินาทีตามลำดับ (เฉลี่ยคำละ 1.6 วินาทีและ 1.85 วินาทีตามลำดับ) สาเหตุที่การอ่านและแปลผลซองยาพลาสติกใช้เวลามากกว่าเล็กน้อย เนื่องจากการอ่านซองยาวัสดุประเภทพลาสติก เป็นวัสดุผิวมันจะมีความเหนียวเมื่อสัมผัสและเป็นอุปสรรคในการรับรู้และแปลความหมาย [6] และเป็นผิวสัมผัสที่แตกต่างจากวัสดุประเภทกระดาษ ซึ่งเป็นวัสดุผิวด้านที่นักเรียนเคยสัมผัสและใช้อ่านหนังสือในชีวิตประจำวัน และทำการวิเคราะห์ข้อมูลเปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างอักษรเบรลล์บนกระดาษกับซองยาพลาสติกกับความสามารถในการอ่านและแปลความหมายด้วยวิธี t-Test: Two Sample Assuming Equal Variances [14] โดยเปรียบเทียบความแตกต่างของวัสดุกับการอ่านและแปลความหมายอักษรเบรลล์บนฉลากบรรจุภัณฑ์ยา พบว่าการสร้างอักษรเบรลล์บนวัสดุที่แตกต่างกันด้วยเครื่องพิมพ์ 3 มิติ มีความแตกต่างกันในการอ่านและแปลความหมายอย่างน้อยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05

ตารางที่ 3 ค่าความสูงของอักษรเบรลล์

กลุ่ม	ความสูงของอักษรเบรลล์บนกระดาษ (ไมครอน)	ความสูงของอักษรเบรลล์บนซองยาพลาสติก (ไมครอน)
เช้า	199	296
วัน	201	300
เย็น	205	297
ก่อน	195	298
หลัง	203	295
นอน	198	286
1	201	299
2	199	298
ค่าเฉลี่ย	200.12	297.37

ระยะเวลาในการอ่านภาษาอังกฤษสำหรับผู้บกพร่องทางการมองเห็น ของวัยผู้ใหญ่ในประเทศสหรัฐอเมริกา มีค่าเฉลี่ยจะอยู่ที่ 136 คำต่อนาที (มีค่าอยู่ในช่วงระหว่าง 65 ถึง 185 คำต่อนาที หรือ คำละ 0.92 ถึง 0.32 วินาที) [15] และผลระยะเวลาเฉลี่ยในการอ่านภาษาไทยของนักเรียนผู้บกพร่องทางการมองเห็น ระดับมัธยมศึกษาตอนต้นประเทศไทยอยู่ที่ 51.82 คำต่อนาที (คำละ 1.15 คำต่อวินาที) [16] จากข้อมูลดังกล่าว พบว่าอักษรเบรลล์ที่สร้างขึ้น ใช้เวลาในการอ่านมากกว่าผลการอ่านภาษาอังกฤษและผลการอ่านภาษาไทยประมาณ 0.5-1 คำต่อวินาที โดยผู้บกพร่องทางการมองเห็น สามารถแปลผลข้อมูลได้ถูกต้องทั้ง 8 กลุ่มคำ



3.3 การคำนวณต้นทุนการผลิตอุปกรณ์สร้างอักษรเบรลล์

ผลที่ได้พบว่า อุปกรณ์สร้างอักษรเบรลล์บนฉลากยา ด้วยเครื่องพิมพ์ 3 มิติ แบบ FDM ด้วยเส้น PLA โดยประกอบ ด้วยส่วนตัวกดด้านบนและด้านล่าง และส่วนแม่แบบสร้างอักษรเบรลล์ด้านบนและด้านล่าง ทั้งหมด 8 คำ ประกอบ ด้วยคำว่า เข้า วัน เย็น ก่อน หลัง นอน ตัวเลข 1 และ 2 ผลพบว่า อุปกรณ์สร้างอักษรเบรลล์ที่ผลิตขึ้น สามารถใช้สร้างอักษรเบรลล์ บนกระดาษ สติกเกอร์และฉลากยาที่ติดไว้บนซองยาแบบพลาสติก ได้ โดยใช้เวลาในการพิมพ์อุปกรณ์สร้างอักษรเบรลล์ 1 อักษร เป็นเวลา 23 นาที และใช้เส้น PLA ประมาณ 15 กรัม ส่วนตัวกดด้านบนและด้านล่าง 1 ชุด ใช้เวลาพิมพ์ 5 ชั่วโมง ใช้เส้น PLA ประมาณ 50 กรัม ต้นทุนเฉลี่ยของอุปกรณ์สร้างอักษรเบรลล์บนฉลากยาด้วยเครื่องพิมพ์ 3 มิติ แสดงได้ดังตารางที่ 4

4. อภิปรายและสรุปผล

การพัฒนาอุปกรณ์สร้างอักษรเบรลล์บนฉลากยา ด้วยเครื่องพิมพ์ 3 มิติ อุปกรณ์นี้จะประกอบไปด้วย ส่วนตัวกดด้านบนและด้านล่าง และส่วนตัวอักษรเบรลล์ด้านบนและด้านล่าง มีจำนวน 8 ตัวอักษรที่ใช้บ่อยครั้งบนฉลากยา ในการออกแบบโครงสร้างของอุปกรณ์ ต้องคำนึงถึงความสามารถของเครื่องพิมพ์ 3 มิติ เนื่องจากการออกแบบจากโปรแกรม 3D CAD SolidWorks สามารถทำการออกแบบขนาดได้ตรงตามคุณลักษณะที่ต้องการ แต่การนำแบบที่ได้มาสร้างด้วยเครื่องพิมพ์ 3 มิตินั้น เครื่องพิมพ์ 3 มิติแบบ FDM จะมีความสามารถในการสร้างชิ้นงานให้ตรงกับขนาดของงานที่ออกแบบอยู่ในช่วง ± 0.5 มิลลิเมตรในมิติกว้างและยาว ทำให้

ตารางที่ 4 ต้นทุนอุปกรณ์สร้างอักษรเบรลล์

ชนิด	ต้นทุน (บาท)
อักษรเบรลล์ (1 ตัวอักษร)	10
ตัวกด:ด้านบนและล่าง	150
รวม	160

ต้องมีการทดสอบขนาดของชิ้นงานที่พิมพ์ได้ก่อนพิมพ์ ชิ้นงานจริง เพื่อนำมาทำการปรับปรุงการออกแบบ ในมิติความสูง มีการวัดความสูงของอักษรเบรลล์ด้วยเครื่องวัดความหนาวัสดุแบบไม่สัมผัส วัสดุผิวมันจะมีความหนืดเมื่อสัมผัสและเป็นอุปสรรคในการรับรู้และแปลความหมาย [6] ผลที่ได้พบว่าความสูงของอักษรเบรลล์ที่ผลิตมีความสูงตามมาตรฐาน ECMA ความสูงของตัวอักษรเบรลล์บนกระดาษอยู่ที่ 200.12 ไมครอน และความสูงตัวอักษรเบรลล์บนซองยาพลาสติก อยู่ที่ 296.67 ไมครอนผ่านมาตรฐาน ECMA Euro Braille ใช้เวลาในการอ่านและแปลผลเฉลี่ยของอักษรเบรลล์บนกระดาษ 12.8 วินาที และ 14.80 วินาที สำหรับอักษรเบรลล์บนซองพลาสติก ใช้เวลาในการอ่านมากกว่า ค่าเฉลี่ยประมาณ 0.5-1 คำต่อวินาที โดยผู้ที่บกพร่องทางการมองเห็น สามารถแปลผลข้อมูลได้ถูกต้องทั้ง 8 กลุ่มคำ ในการอ่านอักษรเบรลล์ของผู้ที่บกพร่องทางการมองเห็น การออกแบบและสร้างอุปกรณ์สร้างอักษรเบรลล์นี้ มีวัตถุประสงค์เพื่อให้เกษตรกรสามารถใช้อุปกรณ์นี้ในการกดพิมพ์เพื่อสร้างอักษรเบรลล์เป็นคำต่างๆ ที่ตรงกับวิธีการรับประทานยา เช่น ก่อนเข้า 1 เม็ด มีความหมายว่า ก่อนอาหาร ตอนเช้า จำนวน 1 เม็ด เพื่อให้ผู้ที่บกพร่องทางการมองเห็น สามารถรับรู้วิธีการรับประทานยาได้ด้วยตนเอง โดยเกษตรกรสามารถสร้างอักษรเบรลล์บนฉลากยาที่พิมพ์มาติดกับ



ชองยา หรือบนชองยาโดยตรง ขึ้นอยู่กับปัจจัยที่เกี่ยวข้องต่างๆ เช่น ถ้าผู้ที่บกพร่องทางการมองเห็น มีผู้ดูแลตลอดเวลา การใช้ฉลากยาตามปกติที่ควบคู่กับอักษรเบรลล์ก็มีความเหมาะสมที่ใช้ในการสื่อสารสำหรับผู้ดูแลและผู้ทีบกพร่องทางการมองเห็น ในการใช้งานของเภสัชกรจำเป็นต้องมีอุปกรณ์สร้างอักษรเบรลล์อย่างน้อย 8 กลุ่มคำ เพื่อครอบคลุมการพิมพ์อักษรเบรลล์เป็นคำต่างๆ ที่ใช้ในการบอกวิธีรับประทานยา และต้องมีการฝึกการใช้งานในการกดปุ่มเพื่อให้ตัวอักษรเบรลล์มีการเรียงตัวเป็นแนวที่สามารถทำให้ผู้ที่บกพร่องทางการมองเห็นสามารถอ่านได้ง่ายมากยิ่งขึ้น เป็นการพัฒนาอุปกรณ์สร้างอักษรเบรลล์ด้วยการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีใหม่ ๆ เช่นเครื่องพิมพ์ 3 มิติ มาพัฒนาและทดแทนการสร้างอักษรเบรลล์แบบเดิม อักษรเบรลล์ที่สร้างขึ้น สามารถใช้งานได้จริง ความสูงของอักษรเบรลล์ที่ผลิตมีความสูงตามมาตรฐาน ECMA ช่วยประหยัดต้นทุน เวลา ค่าใช้จ่าย สามารถผลิตอุปกรณ์ดังกล่าวเพื่อใช้ในห้องยาของโรงพยาบาล คลินิก ร้านขายยา อนามัย ฯลฯ ลดปัญหาความเข้าใจที่ผิดพลาดและการขาดข้อมูลที่ถูกต้องในการใช้ยา ช่วยเพิ่มคุณภาพชีวิตของผู้ทีบกพร่องทางการมองเห็น ส่งเสริมสวัสดิภาพ และลดความไม่เสมอภาคตามเป้าหมายการพัฒนาที่ยั่งยืน (Sustainable Development Goals) เป้าหมายที่ 3 สร้างหลักประกันว่าคนมีชีวิตที่มีสุขภาพดีและส่งเสริมสวัสดิภาพสำหรับทุกคนในทุกวัย ในด้านการเข้าถึงการบริการสาธารณสุขจำเป็นที่มีคุณภาพ และเข้าถึงยาและวัคซีนจำเป็นที่ปลอดภัยและมีประสิทธิภาพ และเป้าหมายที่ 10: ลดความไม่เสมอภาคภายในประเทศและระหว่างประเทศ ในด้านการสร้างหลักประกันว่าจะมีโอกาสที่เท่าเทียมและ

ลดความไม่เสมอภาคของผลลัพธ์ [17] ในการศึกษาครั้งนี้ต่อไปจะทำการศึกษาระบบการพิมพ์ดิจิทัลที่สามารถสร้างอักษรเบรลล์ได้บนกระดาษและชองยาเพื่อให้เภสัชกรสามารถพิมพ์ฉลากยาและอักษรเบรลล์ได้ในเวลาเดียวกัน

5. เอกสารอ้างอิง

- [1] <http://web1.dep.go.th/?q=th/node/446> (Accessed on 20 December 2019)
- [2] <https://cfbt.or.th/dsc/index.php/article/14-living-and-talking-to-the-blind> (Accessed on 15 June 2018)
- [3] K. Thitima, Production of braille to be used on packaging for visually impaired person by screen printing technique, Thesis, King Mongkut's University of Technology Thonburi, Thailand, 2010.
- [4] T. Krittika, Braille character printing on pharmaceutical packaging label to improve information access for visual impaired person, Research Reports, King Mongkut's University of Technology Thonburi, Thailand, 2018.
- [5] A. Kongsuksawat, Study of factors affecting design of carton with braille embossing, Thesis, King Mongkut's University of Technology Thonburi, Thailand, 2013.
- [6] P. Khanenugnij and A. Amomrat, The production of Medicine label with Braille for the blind by Embossing System, Research Project, King Mongkut's University of Technology Thonburi, Thailand, 2013.



- [7] K. Udom ,Post - press techniques, 1st ed., Sukhothai Thammathirat University Printing Press, Nonthaburi , Thailand, 1998.
- [8] N. Shahrubudin, T.C. Lee and R. Ramlan, An overview on 3D printing technology: Technological, materials, and applications, *Procedia Manufacturing*, 2019, 35, 1286-1296.
- [9] http://www.iadd.org/docs/IADD_BANA_Braille_Standards.pdf (Accessed on 28 November 2019)
- [10] L.P. Muthe, K. Pickering and C. Gauss, A review of 3D/4D printing of poly-lactic acid composites with bio-derived reinforcements, *Composites Part C* ,2022,8,100271.
- [11] <https://www.dpe.go.th/manual-preview-411291791796> (Accessed on 10 January 2022)
- [12] <https://www.ecma.org/publications/ecma-braille-guidelines.html> (Accessed on 5 December 2019)
- [13] R. Mohamed, Braille readability in packaging design of Egyptian pharmaceutical packaging for visually impaired, *International Design Journal*, 2016, 6(1), 119-126.
- [14] <http://www.thaiail.com/spss/ttest/> (Accessed on 10 January 2022)
- [15] G.E. Legge, C.M. Madison and J.S. Mansfield, Measuring braille reading speed with the MNREAD test, *Visual Impairment Research*, 1999, 1(3), 131-145.
- [16] P. Jitsodsaiikul,W. Niyomphol and I. Sirirungruang, A comparative study of reading speed between visually impaired and sighted students, *Journal of Ratchasuda College for Research and Development of Persons with Disabilities*, 2015, 11(14), 85-98.
- [17] <https://thailand.un.org/th/sdgs> (Accessed on 10 January 2022)

การประยุกต์ใหม่ลดความล้มเหลวและการวิเคราะห์ผลกระทบของอุตสาหกรรมพลาสติกด้วยวิธีการตัดสินใจหลายเกณฑ์แบบฟัซซีกรณีศึกษา: ผู้ผลิตเม็ดพลาสติกในประเทศไทย

จิรวัฒน์ กิรติภูบดี และ เดชรัตน์ สัมฤทธิ์*

กลุ่มสาขาโลจิสติกส์และระบบขนส่งทางราง, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยมหิดล, ประเทศไทย

* ผู้ประสานงานเผยแพร่ (Corresponding Author), E-mail: dettoy999@gmail.com

วันที่รับบทความ: 19 ตุลาคม 2565; วันที่ทบทวนบทความ: 26 พฤษภาคม 2566; วันที่ตอบรับบทความ: 13 มิถุนายน 2566

วันที่เผยแพร่ออนไลน์: 26 สิงหาคม 2566

บทคัดย่อ: การศึกษานี้เสนอกรอบการตัดสินใจหลายเกณฑ์แบบฟัซซี (Fuzzy MCDM) โดยอ้างอิงจากวิธีใหม่ลดความล้มเหลวและการวิเคราะห์ผลกระทบ (FMEA) สำหรับการจัดลำดับความสำคัญของกลยุทธ์การบรรเทาความเสี่ยงด้านโลจิสติกส์ย้อนกลับในอุตสาหกรรมพลาสติก ขั้นตอนกรอบงานที่เสนอสามารถแบ่งออกเป็นหกขั้นตอน ดังนี้ (i) FMEA ของความเสี่ยงด้านโลจิสติกส์ย้อนกลับและกลยุทธ์การลดความเสี่ยงได้รับการระบุผ่านการทบทวนวรรณกรรมที่ครอบคลุมและตรวจสอบโดยกลุ่มผู้เชี่ยวชาญ (ii) กำหนดมาตราส่วนที่สามารถวัดได้สำหรับเกณฑ์ต่าง ๆ รวมไปถึงความรุนแรง (S) โอกาสในการเกิด (O) ความสามารถในการตรวจจับ (D), ต้นทุน (C) ระดับความยากในการแก้ไขปัญหา (F) และเวลา (T), (iii) คำนวณน้ำหนักเชิงอัตวิสัยของเกณฑ์โดยการปรับใช้กระบวนการลำดับชั้นเชิงวิเคราะห์แบบฟัซซี (Fuzzy AHP) (iv) คำนวณน้ำหนักเชิงภววิสัยของเกณฑ์โดยใช้วิธี Entropy (v) ให้น้ำหนักของเกณฑ์รวมกัน และ (vi) จัดลำดับความสำคัญของใหม่ลดความล้มเหลวโดยใช้ Fuzzy CODAS ผู้ผลิตเม็ดพลาสติกในประเทศไทยถูกใช้เป็นกรณีศึกษา ผลการศึกษาพบว่าลำดับความสำคัญ ความเสี่ยงด้านสินค้าคงคลัง (FM7) มีความสำคัญมากที่สุด ผลการศึกษานี้อาจจะเป็นประโยชน์ต่อนักวิชาการและปฏิบัติงานที่เกี่ยวข้องกับอุตสาหกรรมพลาสติก เพื่อการลดความเสี่ยงโลจิสติกส์ย้อนกลับ

คำสำคัญ: โลจิสติกส์ย้อนกลับ; โลจิสติกส์ย้อนกลับในอุตสาหกรรมพลาสติก; การบรรเทาความเสี่ยง

Application of Failure Mode and Effect Analysis of Plastics Industry with Fuzzy Multi-Criteria Decision Making a Case Study: Plastic Resin Manufacturing in Thailand

Jirawat Keeratibhubordee and Detcharat Sumrit*

The Cluster of Logistics and Engineering, Faculty of Engineering, Mahidol University, Thailand

* Corresponding author, E-mail: dettoy999@gmail.com

Received: 19 October 2023; Revised: 26 May 2023; Accepted: 13 June 2023

Online Published: 26 August 2023

Abstract: This study proposes a fuzzy multi-criteria decision-making framework (Fuzzy MCDM) based on failure mode effect analysis (FMEA) for prioritizing mitigation strategies for reverse logistics risks in the recycled plastic industry. The proposed framework steps can be divided into six phases as follows; (i) FMEA of reverse logistics risks and risk mitigation strategies are identified through extensive literature review and validated by a group of experts, (ii) defined the measurable scales for criteria including severity (S), occurrence (O), detectability (D), cost (C), degree of difficult to solve problems (F), and time (T), (iii) calculate the subjective weights of criteria by deploying Fuzzy AHP, (iv) compute the objective weights of criteria by utilizing Entropy method, (v) obtain the combined weights of criteria, (vi) prioritize the failure modes by applying Fuzzy CODAS. The results showed that the priority Inventory risk (FM7) is the most important. Plastic resin manufacturers in Thailand are used as a case study. The results of this study may benefit scholars and practitioners involved in the plastic industry to mitigate reverse logistics risks.

Keywords: Reverse logistics; Reverse logistics in the plastic industry; Risk mitigation



1. บทนำ

การเติบโตของประชากรที่มีปริมาณเพิ่มมากขึ้น มีการพัฒนาและเปลี่ยนแปลงเทคโนโลยีใหม่ ๆ ทำให้มีการเติบโตของบรรจุกฎภัณฑ์เพิ่มขึ้น การใช้งานบรรจุกฎภัณฑ์พลาสติกเพิ่มมากขึ้นเกินไป ทำให้เกิดขยะจำนวนมาก ขยะพลาสติกเป็นปัญหาสำคัญสำหรับโลก โดยขยะมูลฝอยทั้งหมดจะมีปริมาณขยะพลาสติกอยู่ถึง 3-4% [1] รวมถึงปัญหาที่เกิดจากการทำลายหรือฝังกลบขยะ และการผลิตพลาสติกที่ไม่เป็นระบบทำให้เกิดภาวะเรือนกระจก ขยะพลาสติกมีปริมาณ 400 ตันต่อปี และการย่อยสลายของพลาสติกจะมีอายุถึง 300 ปี ทำให้พลาสติกที่อยู่ในดินจะค่อย ๆ ปล่อยก๊าซมีเทน [1] ผลกระทบจากขยะจำนวนมากนั้นส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงและพัฒนาจากเศรษฐกิจแบบเชิงเส้นเป็นเศรษฐกิจแบบหมุนเวียน โดยเน้นการใช้ทรัพยากรที่ใช้งานแล้ว นำกลับมาใช้ประโยชน์แทนการทิ้งให้เป็นขยะ แต่สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ในระบบเศรษฐกิจแบบหมุนเวียน [2] เศรษฐกิจแบบหมุนเวียนเป็นหนึ่งในแนวคิด BCG Model ที่มี 3 ส่วนหลัก ๆ คือ เศรษฐกิจชีวภาพ (Bioeconomy) เศรษฐกิจหมุนเวียน (Circular Economy) และเศรษฐกิจสีเขียว (Green Economy)

การดำเนินการโลจิสติกส์ย้อนกลับเป็นการดำเนินการอย่างเป็นระบบในห่วงโซ่อุปทานอย่างเหมาะสม ซึ่งโลจิสติกส์ย้อนกลับเป็นกระบวนการหนึ่งของห่วงโซ่อุปทาน เป็นการวางแผนและควบคุมกระบวนการไหลเวียนของสินค้าในทิศทางย้อนกลับ การจัดเก็บสินค้าคงคลัง เพื่อจุดประสงค์ในการส่งคืนสินค้า หรือเพื่อการกำจัดของเสียอย่างเป็นระบบ รวมไปถึงการย้อนกลับของวัสดุคิป์ในการรีไซเคิล

เพื่อผลิตเป็นผลิตภัณฑ์ใหม่ อย่างมีประสิทธิภาพ ผลประโยชน์ของเศรษฐกิจและการรับผิดชอบต่อสังคมเป็นตัวผลักดันสำคัญในการขับเคลื่อนกระบวนการโลจิสติกส์ย้อนกลับของบริษัทต่าง ๆ ในบางประเทศเริ่มมีการบังคับใช้กฎหมายในการกระตุ้นให้เกิดการใช้กระบวนการโลจิสติกส์ย้อนกลับในวงกว้าง ทำให้ผู้ผลิตขาดประสิทธิภาพที่มีต่อกระบวนการโลจิสติกส์ย้อนกลับที่มีความซับซ้อน อย่างไรก็ตาม โลจิสติกส์ย้อนกลับอาจมีปัจจัยเสี่ยงที่ส่งผลกระทบต่อกระบวนการต่าง ๆ จึงต้องมีการบริหารความเสี่ยง โดยการบริหารความเสี่ยงในโลจิสติกส์ย้อนกลับนั้นมุ่งเน้นไปที่การเพิ่มมูลค่าให้กับห่วงโซ่อุปทานในทิศทางย้อนกลับ และมุ่งเน้นการลดผลกระทบที่มีต่อสิ่งแวดล้อม นักวิจัยส่วนใหญ่จะศึกษาในส่วนของจัดการ ความเสี่ยงในห่วงโซ่อุปทาน (Supply Chain Risk Management: SCRM) แต่ยังมีการศึกษาด้านการจัดการความเสี่ยงโลจิสติกส์ย้อนกลับ (Reverse Logistics Risk Management: RLRM) ที่จำกัด [3]

ดังนั้น งานวิจัยนี้จะศึกษาในส่วนของจัดการ ความเสี่ยงโลจิสติกส์ย้อนกลับในอุตสาหกรรมพลาสติก โดยแบ่งออกเป็น 6 ระยะ ระยะที่ 1 จะระบุความเสี่ยงโลจิสติกส์ย้อนกลับ มีปัจจัยเสี่ยง 11 ความเสี่ยง (Failure Modes: FMs) ถูกระบุด้วยการทบทวนวรรณกรรมและการสำรวจอย่างละเอียด และให้ผู้เชี่ยวชาญตรวจสอบปัจจัยเสี่ยงที่ระบุเพื่อวิเคราะห์และระบุปัจจัยเสี่ยงที่เกิดขึ้นในโลจิสติกส์ย้อนกลับ ระยะที่ 2 เป็นการกำหนดเกณฑ์ความเสี่ยงและมาตราส่วนการวัดเพื่อให้ผู้เชี่ยวชาญประเมินความเสี่ยงตามเกณฑ์คะแนนที่ถูกระบุผ่านการทบทวนวรรณกรรม ระยะที่ 3 นำปัจจัยเสี่ยงมาวิเคราะห์ด้วยการหาหน้าหนักเกณฑ์ภายใต้วิธี



โหมดความล้มเหลวและการวิเคราะห์ผลกระทบ (Failure Mode and Effect Analysis: FMEA) ด้วยวิธีลำดับชั้นเชิงวิเคราะห์แบบฟัซซี (Fuzzy Analytic Hierarchy Process: Fuzzy: AHP) เพื่อหาน้ำหนักอัตวิสัย (Subjective Weight) เหตุผลที่ใช้การวิเคราะห์แบบ Fuzzy AHP เนื่องจากวิธีลำดับชั้นเชิงวิเคราะห์ (Analytic Hierarchy Process: AHP) ยังมีข้อบกพร่องและข้อเสียที่เกี่ยวกับมุมมองและความคิดของมนุษย์ รวมถึงการตัดสินใจจะขึ้นอยู่กับผู้มีอำนาจตัดสินใจในการพิจารณา มีความไม่แน่นอนสูง อาจส่งผลให้ค่าตัวเลขเกิดความผิดพลาด จึงได้มีการนำทฤษฎีเซตคลุมเครือ (Fuzzy Set Theory: FST) มาช่วยในการวิเคราะห์ในกระบวนการตัดสินใจแบบ AHP เป็นกระบวนการเลือกและการตัดสินใจที่ซับซ้อน ลดความคลุมเครือ ช่วยให้ข้อมูลเที่ยงตรงมีความน่าเชื่อถือเพิ่มมากขึ้น [4] ระยะที่ 4 หาน้ำหนักภววิสัย (Objective Weight) ด้วยวิธีเอนโทรปี (Entropy Method) ข้อดีของการใช้วิธีเอนโทรปีคือการให้คะแนนประสิทธิภาพของ FMs ที่เกี่ยวข้องกับเกณฑ์ความเสี่ยงจะรวมอยู่ในการคำนวณน้ำหนัก ระยะที่ 5 ทำการหาน้ำหนักโดยรวมระหว่างน้ำหนักอัตวิสัยและน้ำหนักภววิสัย เนื่องจากน้ำหนักอัตวิสัยและน้ำหนักภววิสัยมีข้อดีและข้อเสียในตัวเอง น้ำหนักอัตวิสัยจะพิจารณาน้ำหนักโดยอาศัยความชอบ ความรู้ และประสบการณ์ในโดเมนที่ศึกษาของผู้เชี่ยวชาญในการตัดสินใจกรณีที่ความรู้และประสบการณ์ของผู้เชี่ยวชาญไม่เพียงพออาจนำไปสู่ผลลัพธ์ที่ไม่ถูกต้อง ในทางกลับกันวิธีการให้น้ำหนักภววิสัย จะไม่สนใจความความชอบ ความรู้ และประสบการณ์ของผู้เชี่ยวชาญ การวิเคราะห์และคำนวณการหาน้ำหนักแบบผสมผสานนี้จะช่วยชดเชยข้อเสีย

ของทั้ง 2 วิธีนี้ได้ [5] ระยะที่ 6 จัดลำดับความสำคัญของปัจจัยเสี่ยง ด้วยวิธีการประเมินระยะทางผสมผสานแบบฟัซซี (Combinative Distance-based Assessment: Fuzzy Codas) เพื่อพิจารณาและทำการวิเคราะห์ปัจจัยเสี่ยงที่มีผลกระทบและมีความสำคัญมากที่สุด จากการใช้เครื่องมือเหล่านี้เพื่อตอบคำถามงานวิจัยว่า RQ1: อะไรคือปัจจัยเสี่ยงการปฏิบัติการของโลจิสติกส์ย้อนกลับของอุตสาหกรรมพลาสติกในประเทศไทย RQ2: น้ำหนักของเกณฑ์ความเสี่ยงใดมีความสำคัญกว่ากัน RQ3: ลำดับปัจจัยเสี่ยงการปฏิบัติการใดมีความสำคัญมากที่สุด ในโลจิสติกส์ย้อนกลับในอุตสาหกรรมพลาสติก

โดยส่วนใหญ่แล้วจะมีงานวิจัยที่ศึกษาโลจิสติกส์ย้อนกลับในส่วนของอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ แต่ยังมีการศึกษาโลจิสติกส์ย้อนกลับของอุตสาหกรรมพลาสติกที่จำกัด งานวิจัยนี้จึงศึกษาในส่วนของโลจิสติกส์ย้อนกลับในอุตสาหกรรมพลาสติก โดยมีการวิเคราะห์เกณฑ์ของความเสี่ยงที่พิจารณาจากวิธี FMEA ซึ่งเกณฑ์พิจารณาความเสี่ยงของ FMEA แบบดั้งเดิมมีทั้งหมด 3 เกณฑ์คือ โอกาสในการเกิด (Occurrence: O) ความรุนแรง (Severity: S) และการตรวจจับ (Detection: D) ซึ่งเป็นเกณฑ์ที่มีการใช้ของวิธี FMEA ดั้งเดิมอย่างแพร่หลาย ซึ่งอาจไม่เพียงพอที่จะสะท้อนถึงสถานการณ์เสี่ยง การศึกษาและการวิจัยก่อนหน้านี้ได้มีการรวมเกณฑ์ความเสี่ยงเพิ่มเติมในการวิเคราะห์ FMEA ตัวอย่างเช่น Lo และคณะ [6] ที่เพิ่มเกณฑ์ “ความยากในการบำรุงรักษา” สำหรับการประเมินความเสี่ยงของเครื่องมือเครื่องจักร รวมถึง Jin และคณะ [7] ที่เพิ่มเกณฑ์ “ต้นทุน” สำหรับการประเมินความเสี่ยงของกระบวนการเปลี่ยนเครื่องมือ ในงานวิจัยนี้จะ



วิเคราะห์เกณฑ์เพิ่มเติมนอกเหนือจากเกณฑ์ดั้งเดิมของวิธี FMEA ในการจัดการกับความเสี่ย เกณฑ์ที่จะวิเคราะห์เพิ่มมี 3 เกณฑ์คือ ความเสียหายของต้นทุน (Cost: C) จะมีมากแค่ไหนเมื่อเกิดความเสี่ย เกณฑ์ต่อมาคือความยากง่ายในการแก้ไขความเสี่ย (Degree of Difficulty to Fixed Problem: F) และเวลาที่ใช้ในการแก้ไขปัญหาความเสี่ย (Time: T) รวมเกณฑ์ที่จะใช้วิเคราะห์ทั้งหมด 6 เกณฑ์คือ S, O, D, C, F, T เพื่อให้การวิเคราะห์ได้หลายมิติ และมีความชัดเจนของผลลัพธ์มากยิ่งขึ้นนอกเหนือจากเกณฑ์ FMEA แบบดั้งเดิมเนื่องจากการวิเคราะห์ FMEA แบบดั้งเดิมเป็นการใช้ค่าหมายเลขความสำคัญของความเสี่ย (Risk Priority Number: RPN) เพื่อวัดระดับความสำคัญของความเสี่ยโดยการคูณคะแนนของเกณฑ์ S, O, D แต่ยังเป็นที่ยกเถียงกันอยู่เนื่องจากค่า RPN มีความแปรผันของผลลัพธ์สูง และเนื่องจากการคูณคะแนนของเกณฑ์ S, O, D ไม่มีการคำนวณด้วยพื้นฐานทางคณิตศาสตร์ที่เข้มงวดทำให้ผลลัพธ์ที่ได้จากเกณฑ์ S, O, D อาจให้ค่า RPN ที่เท่ากันแต่ความเสี่ยที่แตกต่างกันอาจมีระดับความสำคัญของความเสี่ยต่างกัน ตัวอย่างเช่นความเสี่ย A คำนวณค่า RPN = 8 ความเสี่ย B คำนวณค่า RPN = 8 ทั้งสองความเสี่ยคำนวณค่า RPN ได้เท่ากันแต่ความจริงแล้วความเสี่ย A อาจมีความสำคัญของความเสี่ยมากกว่าความเสี่ย B เป็นต้น การประยุกต์ใช้แนวทางการตัดสินใจหลายเกณฑ์แบบฟัซซี่ (Fuzzy Multi-Criteria Decision-Making: MCDM) สามารถแก้ไขจุดอ่อนของ FMEA แบบดั้งเดิมได้ [6] โดยพื้นฐานการตัดสินใจในบริบทของ FMEA มักจะเกี่ยวข้องกับความไม่แน่นอนและความกำกวมของการตัดสินใจของมนุษย์ ทฤษฎีเซตคลุมเครือ

(Fuzzy Set Theory: FST) เป็นหนึ่งในแนวทางที่มีประสิทธิภาพในการจัดการกับความกำกวมดังกล่าว [8] อีกทั้งงานวิจัยทั่วไปยังคำนึงถึงการวิเคราะห์น้ำหนักนักอัตวิสัย (Subjective Weight) เพียงอย่างเดียวทำให้งานวิจัยนี้คำนวณและวิเคราะห์น้ำหนักโดยรวมระหว่างน้ำหนักนักอัตวิสัย (Subjective Weight) ด้วยวิธี Fuzzy AHP และ น้ำหนักนักวิสัย (Objective Weight) ด้วยวิธี Entropy เข้าด้วยกัน

2. วิธีการดำเนินงานวิจัย/ทดลอง

2.1 ขอบเขตการวิจัย

2.1.1 ขอบเขตด้านเนื้อหา

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาและหาปัจจัยเสี่ยงด้วยการทบทวนวรรณกรรม และการสำรวจปัจจัยเสี่ยงการปฏิบัติการ ที่มีผลกระทบต่อกระบวนการโลจิสติกส์ย้อนกลับในอุตสาหกรรมพลาสติก โดยมีขอบเขตดังนี้ (1) ศึกษาปัจจัยเสี่ยงของโลจิสติกส์ย้อนกลับในระดับปฏิบัติการ (2) ศึกษาและเก็บข้อมูลจากบริษัทที่ทำธุรกิจผลิตเม็ดพลาสติกรีไซเคิล ในประเทศไทย และ (3) เกณฑ์ความเสี่ยงที่ศึกษาเป็นอิสระต่อกัน

2.1.2 ขอบเขตด้านประชากร และกลุ่มตัวอย่าง

ทำการคัดเลือกผู้เชี่ยวชาญจากประสบการณ์ที่เกี่ยวข้องกับโลจิสติกส์ย้อนกลับอย่างน้อย 3 ปี จำนวนผู้เชี่ยวชาญจะอยู่ระหว่าง 5-10 ท่าน เพื่อใช้วิเคราะห์ด้วยวิธี MCDM [9] และจัดทำแบบสอบถามเพื่อประเมินปัจจัยเสี่ยงที่มีผลกับโลจิสติกส์ย้อนกลับ ดังนั้นงานวิจัยนี้จะจัดตั้งผู้เชี่ยวชาญเพื่อทำการประเมินหาน้ำหนักเกณฑ์แต่ละความเสี่ยและเพื่อประเมิน FMs โดยแบ่งเป็นผู้เชี่ยวชาญดังนี้ (1) ผู้เชี่ยวชาญระดับผู้บริหารในอุตสาหกรรมพลาสติกจำนวนจำนวน 7 คน



(Focus Group) โดยคัดเลือกผู้เชี่ยวชาญที่มีความรู้และประสบการณ์เกี่ยวกับโลจิสติกส์ย้อนกลับ ในบริบทของการรีไซเคิลพลาสติกเพื่อประเมินเกณฑ์ความเสี่ยงตามเกณฑ์วิธี FMEA มีรายละเอียด ดังตารางที่ 2.1 และ (2) ผู้เชี่ยวชาญบริษัทกรณีศึกษาจำนวน 5 คน/บริษัท (Focus Group) เพื่อประเมิน FMs ซึ่งผู้เชี่ยวชาญทั้งหมดมีความรู้และประสบการณ์ด้าน การรีไซเคิลพลาสติกของบริษัทกรณีศึกษา ดังตารางที่ 2.2

2.2 วิธีดำเนินงานวิจัย

การวิจัยประกอบด้วย 6 ขั้นตอนหลัก ดังรูปที่ 2.1

2.2.1 ระยะที่ 1 (Phase I) ระบุความเสี่ยงโลจิสติกส์ย้อนกลับที่เกิดขึ้นในอุตสาหกรรมพลาสติกโดยพิจารณาจาก FMEA การศึกษาค้นคว้าหาข้อมูล จะทำการทบทวนวรรณกรรมและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องเกี่ยวกับความเสี่ยงโลจิสติกส์ย้อนกลับ รวมไปถึงความเสี่ยงที่เกิดขึ้นในห่วงโซ่อุปทาน และการจัดการขยะพลาสติก จากนั้นทำการวิเคราะห์เพื่อยืนยันความเสี่ยงโดยผู้เชี่ยวชาญ และระบุความเสี่ยงที่มีความสำคัญกับโลจิสติกส์ย้อนกลับในอุตสาหกรรมพลาสติก ได้ปัจจัยเสี่ยงจากการทบทวนวรรณกรรมอย่างครอบคลุมจากฐานข้อมูลทางวิชาการที่เป็นที่ยอมรับ เช่น Web of Science, ScienceDirect, Emerald Insight เป็นต้น ความเสี่ยงที่ระบุได้จากการทบทวนวรรณกรรมซึ่งมีความถี่ในการกล่าวซ้ำมากที่สุด ในอุตสาหกรรมและในบทความวิจัย โดยระบุความเสี่ยงได้หลายประการเช่น ความเสี่ยงด้านสิ่งแวดล้อม [1, 3, 10] ความเสี่ยงด้านปริมาณและความต้องการ [1, 3] ความเสี่ยงด้านเทคโนโลยี [1, 3] ความเสี่ยงด้านการ

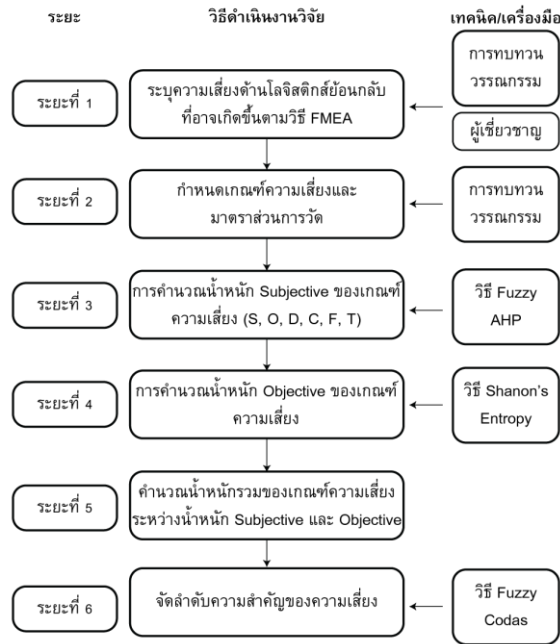
ตารางที่ 2.1 ผู้เชี่ยวชาญ ระดับ ผู้บริหารในอุตสาหกรรมพลาสติก

ตำแหน่ง	ประสบการณ์
ผู้จัดการฝ่ายผลิต	8 ปี
ผู้จัดการฝ่ายผลิต	8 ปี
ผู้จัดการฝ่ายโลจิสติกส์	7 ปี
ผู้จัดการโรงงาน	10 ปี
ผู้จัดการโรงงาน	9 ปี
ผู้จัดการฝ่ายผลิต	10 ปี
ผู้จัดการฝ่ายผลิต	12 ปี

ตารางที่ 2.2 ผู้เชี่ยวชาญบริษัทกรณีศึกษา

ตำแหน่ง	ประสบการณ์
พัฒนาธุรกิจรีไซเคิล	4 ปี
หัวหน้าฝ่ายพัฒนาธุรกิจรีไซเคิล	25 ปี
ผู้จัดการโรงงาน	20 ปี
ผู้จัดการฝ่ายผลิต	15 ปี
ผู้จัดการฝ่ายวางแผน	10 ปี

จัดการข้อมูล [1, 10, 11] ความเสี่ยงของความสัมพันธ์กับผู้มีส่วนได้ส่วนเสีย [1, 3, 10] ความเสี่ยงด้านการขนส่ง [3, 10] ความเสี่ยงด้านสินค้าคงคลัง [3, 10, 12] ความเสี่ยงด้านการปฏิบัติการ [13, 14] ความเสี่ยงด้านชีวอนามัยและความปลอดภัย [15, 16] ความเสี่ยงด้านความรู้และประสบการณ์ [3, 10, 14] และความเสี่ยงด้านซัพพลายเออร์ [3, 12] ได้ทำการตรวจสอบและยืนยันความเสี่ยงกับผู้เชี่ยวชาญ โดยระบุความเสี่ยง ออกเป็น 11 ความเสี่ยง (FM1-FM11) ดังตารางที่ 2.3



รูปที่ 2.1 วิธีดำเนินงานวิจัย

2.2.2 ระยะที่ 2 (Phase II) กำหนดเกณฑ์ความเสี่ยงและมาตรฐานการวัด การศึกษาค้นคว้าหาข้อมูลจากการทบทวนวรรณกรรม เกณฑ์จากวิธี FMEA คือ S (Severity), O (Occurrence), D (Detection) และเกณฑ์ที่ผู้วิจัยนำมาใช้ในการวิเคราะห์เพิ่มจากวิธี FMEA แบบดั้งเดิมเนื่องจากโลจิสติกส์ย้อนกลับของการรีไซเคิลพลาสติกเป็นกระบวนการที่ซับซ้อน ซึ่งครอบคลุมกิจกรรมที่หลากหลายรวมถึง การรวบรวม การขนส่ง การคัดแยกคลังสินค้า และการรีไซเคิล โดยใช้เกณฑ์พิจารณาความเสี่ยงตาม FMEA แบบดั้งเดิมเพื่อวัดระดับความเสี่ยงสำหรับแต่ละ FMs ซึ่งอาจไม่เพียงพอที่จะสะท้อนสถานการณ์เสี่ยง นอกจากนี้เกณฑ์ความเสี่ยงดั้งเดิมยังมีลักษณะทั่วไปสูงทำให้ผู้เชี่ยวชาญไม่สามารถประเมินได้อย่างแม่นยำ [7] งานวิจัยนี้จึงได้เพิ่มเกณฑ์พิจารณา

ความเสี่ยงขึ้น 3 เกณฑ์คือเกณฑ์ C (Cost), F (Degree of Difficulty to Eliminate Risks), และ T (Time) [7, 17] จากการทบทวนวรรณกรรมมีการเพิ่มเกณฑ์ความเสี่ยงเพื่อวัดระดับความเสี่ยงให้มีความแม่นยำในการประเมินความเสี่ยงมากยิ่งขึ้น [6, 7] เกณฑ์พิจารณาความเสี่ยงที่เพิ่มทั้ง 3 เกณฑ์นี้สามารถอธิบายผลกระทบของปัจจัยเสี่ยงให้มีความแม่นยำจากเกณฑ์พิจารณา FMEA แบบดั้งเดิม และได้ปรึกษา รวมถึงพิจารณาเกณฑ์ทั้ง 6 เกณฑ์ ร่วมกับผู้เชี่ยวชาญและผู้เชี่ยวชาญได้ยืนยันเกณฑ์พิจารณาทั้ง 6 เกณฑ์คือ S, O, D, C, F, T โดยมีมาตรฐานเกณฑ์การวัดน้ำหนักอ้อมติวิสัย ของเกณฑ์ความเสี่ยง [18] และเกณฑ์การวัดน้ำหนักสำหรับการประเมิน FMs ดังตารางที่ 2.4 และ ตารางที่ 2.5 ตามลำดับ



ตารางที่ 2.3 โหมตความล้มเหลวและผลกระทบ

โหมตความล้มเหลว	อธิบาย	ผลกระทบ	ที่มา
ความเสี่ยงด้านสภาพแวดล้อม (FM1)	ความเสียหายที่มีผลกระทบต่อสภาพแวดล้อมและการต่อต้านของคนในพื้นที่ชุมชน รวมถึงภัยพิบัติที่มนุษย์สร้างขึ้น เช่น ขยะปนเปื้อนลงแหล่งน้ำ การปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ การปล่อยน้ำเสียลงแหล่งน้ำ การใช้พลังงานมากเกินไปจนเกิดความจำเป็น	- ทำลายสิ่งแวดล้อม - ความเสี่ยงทางสังคม - การประท้วงของชุมชน	[1, 3, 10]
ความเสี่ยงด้านปริมาณและความต้องการ (FM2)	ภัยคุกคามที่เกิดจากความไม่แน่นอนและความผันผวนของวัตถุดิบที่เข้ามา ซึ่งอาจเพิ่มต้นทุนโลจิสติกส์ย้อนกลับ และขัดขวางการดำเนินการโลจิสติกส์ย้อนกลับ	- ค่าใช้จ่ายในการดำเนินการเพิ่มขึ้น - ความล่าช้าในการส่งมอบสินค้าสำเร็จรูป - โรงงานหยุดชะงัก - ขัดขวางการดำเนินงาน - โลจิสติกส์ย้อนกลับ	[1, 3]
ความเสี่ยงด้านเทคโนโลยี (FM3)	การเปลี่ยนแปลงของเทคโนโลยีอันเนื่องมาจากเทคโนโลยีมีการเปลี่ยนแปลงบ่อย ผู้ผลิตไม่สามารถตามการเปลี่ยนแปลงของเทคโนโลยีได้ทัน	- เทคโนโลยีล้าสมัย - ขัดขวางการดำเนินงาน - โลจิสติกส์ย้อนกลับ - เสียเปรียบทางการแข่งขัน	[1, 3]
ความเสี่ยงด้านการจัดการข้อมูล (FM4)	ความถูกต้องของข้อมูล ในส่วนของข้อมูลความปลอดภัย การติดต่อสื่อสารข้อมูลที่ผิดพลาด ขาดข้อมูลการมีอยู่ของทรัพยากร และข้อมูลความถูกต้องของวัตถุดิบ การให้ข้อมูลที่เป็นเท็จ บิดเบือนข้อมูลความจริง รวมไปถึงการเข้าถึงข้อมูลยาก	- เพิ่มค่าใช้จ่ายในการดำเนินการ - ขัดขวางการดำเนินงาน - โลจิสติกส์ย้อนกลับ	[1, 10, 11]



ตารางที่ 2.3 (ต่อ)

โหมตความ ล้มเหลว	อธิบาย	ผลกระทบ	ที่มา
ความเสี่ยงของ ความสัมพันธ์ กับผู้มีส่วนได้ ส่วนเสีย (FM5)	ภัยคุกคามที่เกิดจากความร่วมมือในการจัดการที่ไม่เหมาะสมระหว่างผู้มีส่วนได้ส่วนเสียในโลจิสติกส์ย้อนกลับ เช่น ขาดการแบ่งปันข้อมูล ผลประโยชน์ทับซ้อน ขาดการประสานงานของกระบวนการ	- เพิ่มค่าใช้จ่ายในการดำเนินการ - การดำเนินงานเกิดความผิดพลาด - ความไม่พอใจของลูกค้า	[1, 3, 10]
ความเสี่ยงด้าน การขนส่ง (FM6)	ภัยคุกคามที่เกิดจากการจัดการขนส่งที่ไม่เหมาะสมเกี่ยวกับความสมบูรณ์และความปลอดภัยของยานพาหนะ ความปลอดภัยและการปฏิบัติงานของคนขับ และปัญหาการปฏิบัติงานตามกฎระเบียบ	- อุบัติเหตุในการขนส่งเพิ่มขึ้น - เพิ่มต้นทุนในส่วนของประกันภัย - เกิดการหยุดชะงักในการดำเนินงาน	[3, 10]
ความเสี่ยงด้าน สินค้าคงคลัง (FM7)	ภัยคุกคามที่เกิดจากความล้มเหลวในการวางแผนและควบคุมสินค้าคงคลังเช่น การคาดการณ์ที่ไม่ถูกต้อง ซัพพลายเออร์ที่ไม่น่าเชื่อถือ การโจรกรรม และความเสียหายที่เกิดจากการจัดเก็บ ฯลฯ	- ต้นทุนสินค้าคงคลังเพิ่มสูงขึ้น - ขาดแคลนวัตถุดิบ - การหยุดชะงักของโรงงาน	[3, 10, 12]
ความเสี่ยง ด้านการ ปฏิบัติการ (FM8)	เกิดความผิดพลาดของคนกำลังทรัพยากรบุคคลไม่เพียงพอ และเครื่องจักรมีการทำงานที่ผิดพลาด เครื่องจักรเสีย ชำรุด การวางแผนซ่อมบำรุงเครื่องจักรไม่เป็นระบบ	- ปริมาณและกำลังการผลิตไม่เพียงพอ - เกิดการหยุดชะงักในการดำเนินงาน - ความไม่พอใจของลูกค้า	[13, 14]



ตารางที่ 2.3 (ต่อ)

โหมตความ ล้มเหลว	อธิบาย	ผลกระทบ	ที่มา
ความเสี่ยงด้าน ชีวอนามัย และ ความปลอดภัย (FM9)	พนักงานได้รับอันตรายจากเครื่องจักร และโรคที่เกิด จากทางเดินหายใจ การติดเชื้อในปอด การติดเชื้อ จาก สิ่งสกปรกอันเนื่องมาจากวัตถุ ดิบ ที่มี การปนเปื้อน ขยะติดเชื้อ ที่มีเชื้อไวรัส แบคทีเรีย หรือสัตว์พาหะนำโรค เช่น หนู แมลงสาบ	- แรงจูงใจในการทำงาน ของผู้ปฏิบัติงานลดลง - อุบัติเหตุเพิ่มมากขึ้น - อัตราการลาออกของ พนักงานสูง	[15, 16]
ความเสี่ยงด้าน ความรู้และ ประสบการณ์ (FM10)	ความเสี่ยงด้านความรู้และประสบการณ์การทำงาน การวางแผน และการเสนอกกลยุทธ์ในการจัดการ เพื่อพัฒนาองค์กร และในกระบวนการผลิตเกิดความ ล้มเหลว พนักงานขาดการอบรม	- เกิดการหยุดชะงักใน การดำเนินงาน - ค่าใช้จ่ายในการ ดำเนินการเพิ่มขึ้น - การทำงานผิดพลาด	[3, 10, 14]
ความเสี่ยงด้าน ซัพพลายเออร์ (FM11)	ความเสี่ยงด้าน Supplier น้อยราย หรือการผูกขาด กับ Supplier รวมไปถึงการเลือก Supplier ผิดพลาด ทำให้มีความเสี่ยงต่อปริมาณวัตถุดิบ Supplier ไม่ สามารถหาวัตถุดิบให้ได้ตามที่กำหนด วัตถุดิบที่ซื้อ จาก Supplier ไม่มีคุณภาพ สถานที่ตั้งของ Supplier อยู่ไกล	- ค่าใช้จ่ายในการ ดำเนินการเพิ่มขึ้น - ได้สินค้าไม่ตรงตาม คุณภาพ - วัตถุดิบขาดเข้าเกิด ความล่าช้า	[3, 12]

ตารางที่ 2.4 เกณฑ์การวัดน้ำหนักอัตรวิสัย

ตัวเลข พืซซี่	ตัวเลขพืซซี่แบบ สามเหลี่ยม (TFN)	ระดับ ความสำคัญ
1	(1, 1, 1)	มีความสำคัญเท่ากัน (EI)
2	(1, 2, 3)	มีความสำคัญเท่ากันถึงปานกลาง (ME)
3	(1, 3, 5)	มีความสำคัญปานกลาง (MI)
4	(2, 4, 6)	มีความสำคัญปานกลางค่อนข้างมาก (MS)
5	(3, 5, 7)	มีความสำคัญค่อนข้างมาก (SI)
6	(4, 6, 8)	มีความสำคัญค่อนข้างมากถึงมากกว่า (SV)
7	(5, 7, 9)	มีความสำคัญมากกว่า (VS)
8	(6, 8, 9)	มีความสำคัญมากกว่าถึงมากที่สุด (VE)
9	(7, 9, 9)	มีความสำคัญมากที่สุด (ET)



ตารางที่ 2.5 เกณฑ์การวัดน้ำหนักการประเมิน FMs

ความรุนแรง	โอกาสในการเกิด	ความสามารถในกาตรวจจับ	ต้นทุน	ความยากง่ายในการแก้ไขความเสี่ยง	เวลา	ตัวเลขพีชชีบบแบบสามเหลี่ยม	ระดับ
(S)	(O)	(D)	(C)	(F)	(T)	(TFN)	
ไม่มีผลกระทบ	แทบเป็นไปไม่ได้	เกือบจะแน่นอน	เกือบไม่มีค่าใช้จ่าย (AC)	แทบไม่มีปัญหา (N)	แก้ไขได้ทันที (SI)	(0, 1, 2)	1
(N)	(AN)	(AC)					
ผลกระทบทางอ้อมน้อยมาก	เป็นไปไม่ได้	สูงมาก	น้อยมาก	มีปัญหา (R)	ใช้เวลา น้อยมาก (VS)	(1, 2, 3)	2
(VS)	(RS)	(VH)	(VM)	(R)	(VS)		
ผลกระทบทางอ้อม	น้อยมาก	สูง	น้อย	ต่ำ (L)	ใช้เวลา น้อย (ST)	(2, 3, 4)	3
(S)	(VS)	(H)	(MC)	(L)	(ST)		
ต่ำมาก	น้อย	สูงปานกลาง	ต่ำ (LC)	ค่อนข้างต่ำ (RL)	ใช้เวลา น้อยถึงปานกลาง (MI)	(3, 4, 5)	4
(M)	(S)	(MH)	(LC)	(RL)	(MI)		
ต่ำ (MO)	ต่ำ (L)	ปานกลาง (M)	ปานกลาง (M)	ปานกลาง (M)	ปานกลาง (M)	(4, 5, 6)	5
(MO)	(L)	(M)	(M)	(M)	(M)		
ปานกลาง (SI)	ปานกลาง (M)	ต่ำ (L)	ต่ำ (ML)	สูง (MH)	ใช้เวลา น้อยปานกลาง (MS)	(5, 6, 7)	6
(SI)	(M)	(L)	(ML)	(MH)	(MS)		
สูง (MA)	สูงปานกลาง (MH)	น้อย (S)	สูงปานกลาง (MH)	สูง (H)	ใช้เวลานานปานกลาง (ML)	(6, 7, 8)	7
(MA)	(MH)	(S)	(MH)	(H)	(ML)		
สูงมาก (E)	สูง (H)	น้อยมาก (VS)	สูง (HC)	สูงมาก (VH)	ใช้เวลานาน (LT)	(7, 8, 9)	8
(E)	(H)	(VS)	(HC)	(VH)	(LT)		
อันตรายที่มี การเตือน (SE)	สูงมาก (VH)	เป็นไปไม่ได้ (R)	สูงมาก (VH)	สูงมากที่สุด (EH)	ใช้เวลา นานมาก (VL)	(8, 9, 10)	9
(SE)	(VH)	(R)	(VH)	(EH)	(VL)		
อันตรายที่ไม่มีการเตือน (H)	เกือบแน่นอน (AC)	เกือบเป็นไปไม่ได้ (AI)	ค่าใช้จ่ายสูงมาก (EC)	เกือบเป็นไปไม่ได้ (AI)	แทบจะแก้ไขไม่ได้ (AU)	(9, 10, 10)	10
(H)	(AC)	(AI)	(EC)	(AI)	(AU)		



2.2.3 ระยะเวลาที่ 3 (Phase III) คำนวณน้ำหนักอัตรวิสัยของเกณฑ์ความเสี่ยง

Step 1 ในการคำนวณน้ำหนักอัตรวิสัยของเกณฑ์ความเสี่ยงจะเป็นการประยุกต์ใช้วิธี Fuzzy กับวิธี AHP โดยจะใช้รูปแบบการแยกปัญหาด้วยโครงสร้างลำดับชั้นในการตัดสินใจ โดยวิธีการใช้ตัวเลขฟัซซี่แบบสามเหลี่ยม (Triangular Fuzzy Numbers: TFN) ในวิธี Fuzzy AHP [18] สำหรับการเปรียบเทียบเชิงคู่และการวิเคราะห์ขอบเขตสำหรับค่าขอบเขตสังเคราะห์ฟัซซี่ของการเปรียบเทียบเชิงคู่ การประเมินค่าน้ำหนักความสำคัญโดยเปรียบเทียบปัจจัยเสี่ยง ด้วยวิธี Fuzzy AHP โดยมีเกณฑ์ตัดสินใจภายใต้กรอบวิธีของ FMEA คือ S, O, D, C, F, T โดยให้ผู้เชี่ยวชาญทำการประเมินตามเกณฑ์การวัดน้ำหนัก อัตรวิสัยของเกณฑ์ความเสี่ยงดังตารางที่ 2.4

Step 2 การแทนค่าด้วยตัวเลขฟัซซี่แบบสามเหลี่ยม (Triangular Fuzzy Numbers: TFNs) นำด้วยอรรถะดับความสำคัญ ในตารางที่ 2.4 มาแทนค่าแบบ AHP จากการประเมินคะแนนการเปรียบเทียบระดับความสำคัญ

Step 3 การวิเคราะห์หาค่าน้ำหนักความสำคัญโดยเปรียบเทียบกำหนดให้ $X = x_1, x_2, \dots, x_n$ เป็นเกณฑ์ที่กำหนดและ $G = \{g_1, g_2, \dots, g_m\}$ เป็นตัวกำหนดวัตถุประสงค์ในวิธีนี้ คือดำเนินการและวิเคราะห์ขอบเขตสำหรับแต่ละวัตถุประสงค์ ดังนั้นค่า m ขอบเขต สำหรับในแต่ละทางเลือกสามารถกำหนดได้เป็น $M_{gi}^1, M_{gi}^2, \dots, M_{gi}^m$ โดยที่ $i = 1, 2, \dots, n$ เมื่อ M_{gi}^j ($j = 1, 2, \dots, m$) เป็นตัวเลขฟัซซี่แบบสามเหลี่ยม (TFNs) โดยมีขั้นตอนการคำนวณดังนี้ [19]

1. การคำนวณค่าขอบเขตสังเคราะห์ฟัซซี่สำหรับวัตถุ i จากสมการที่ (1)-(4)

$$S_i = \sum_{j=1}^m M_{gi}^j \otimes \left[\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m M_{gi}^j \right]^{-1} \quad (1)$$

โดย

$$\sum_{j=1}^m M_{gi}^j = \left[\sum_{j=1}^m l_j, \sum_{j=1}^m m_j, \sum_{j=1}^m u_j \right]^{-1} \quad (2)$$

และ

$$\left[\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m M_{gi}^j \right]^{-1} = \frac{1}{\sum_{i=1}^n u_i}, \frac{1}{\sum_{i=1}^n m_i}, \frac{1}{\sum_{i=1}^n l_i} \quad (3)$$

เมื่อ

$$\left[\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m M_{gi}^j \right]^{-1} = \frac{1}{\sum_{i=1}^n u_i}, \frac{1}{\sum_{i=1}^n m_i}, \frac{1}{\sum_{i=1}^n l_i} \quad (4)$$

2. การคำนวณหาระดับความเป็นไปได้ของ $S_i \geq S_j$ เมื่อ $S_i = (l_i, m_i, u_i)$, $S_j = (l_j, m_j, u_j)$ จากสมการที่ (5)

$$V_{S_i \geq S_j} = \begin{cases} 1 & m_i \geq m_j \\ 0 & l_j \geq u_i \\ \frac{l_j - u_i}{m_i - u_i - m_j - l_j} & \text{other} \end{cases} \quad (5)$$

3. การคำนวณหาระดับของความเป็นไปได้ของ $S_i \geq S_j$ เมื่อ $i \neq j$ จากสมการที่ (6)

$$\left(S_i \geq S_j \mid j = 1, 2, \dots, m; i \neq j \right) \quad (6)$$

4. การคำนวณหาเวกเตอร์ความสำคัญจากสมการที่ (7) จากนั้นจะได้เวกเตอร์ความสำคัญ W' ของเมทริกซ์ตั้งสมการที่ (8)

$$W'_i = \min V \left(S_i \geq S_j \mid j = 1, 2, \dots, m; i \neq j \right) \quad (7)$$

$$W' = (W'_1, W'_2, \dots, W'_n)^T \quad (8)$$

จากนั้น ทำการ Normalization ด้วยสมการที่(9) จะได้เวกเตอร์ความสำคัญใหม่ดังสมการที่ (10)

$$W_i = \frac{W'_i}{\sum_{i=1}^n W'_i} \quad (9)$$

$$W = (W_1, W_2, \dots, W_n)^T \quad (10)$$

โดยที่ W_1, W_2, \dots, W_n คือ น้ำหนักความสำคัญเปรียบเทียบที่ต้องการ

2.2.4 ระยะเวลาที่ 4 (Phase IV) คำนวณน้ำหนักภววิสัยของเกณฑ์ความเสี่ยงด้วยวิธี Entropy วิธีหาน้ำหนักของ Entropy ถูกนำมาใช้ครั้งแรกกับ Thermodynamics จนไปถึงระบบสารสนเทศ [20] งานวิจัยนี้จะใช้เพื่อหาน้ำหนักของเกณฑ์ โดยมีเกณฑ์ตัดสินใจภายใต้กรอบวิธีของ FMEA คือ S, O, D, C, F, T และมีทางเลือกเป็นความเสี่ยงโลจิสติกส์ย้อนกลับในอุตสาหกรรมพลาสติก (FMs) โดยใช้เกณฑ์ประเมิน FMs ดังตารางที่ 2.5 มีวิธีดังนี้ [20]

1. ปรับเมทริกซ์การตัดสินใจให้เป็นมาตรฐานดังสมการที่ (11)
2. คำนวณ Entropy ในแต่ละคอลัมน์ดังสมการที่ (12)
3. คำนวณเวกเตอร์ Normalized Weight ดังสมการที่ (13)

$$P_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sum_{j=1}^n x_{ij}} \quad (11)$$

$$E_i = \frac{\sum_{j=1}^n P_{ij} \cdot \ln P_{ij}}{\ln n} \quad (12)$$

$$W_i = \frac{1 - E_i}{\sum_{i=1}^m (1 - E_i)} \quad (13)$$

2.2.5 ระยะเวลาที่ 5 (Phase V)

คำนวณน้ำหนักรวมระหว่างน้ำหนักอภวิสัยและน้ำหนักภววิสัย ดังสมการที่ (14)

$$W_{combine} = aW_{sub} + (1 - a)W_{obj} \quad (14)$$

2.2.6 ระยะเวลาที่ 6 (Phase VI) จัดลำดับความสำคัญของความเสี่ยง ในส่วนนี้จะเป็นการจัดลำดับความเสี่ยงที่มีผลกระทบต่อโลจิสติกส์ย้อนกลับในอุตสาหกรรมพลาสติก โดยจะใช้วิธี Fuzzy Codas วิธีนี้เป็นแนวคิดที่แนะนำโดย Keshavarz Ghorabae ซึ่งเป็นวิธีการประเมินระยะทางแบบผสมผสาน เป็นวิธีที่ใช้ในการแก้ปัญหา MCDM ที่มีประสิทธิภาพการจัดการความคลุมเครือและความไม่แน่นอนในการตัดสินใจเลือก จะใช้ตัวแปรทางภาษาและตัวเลขฟัซซีมาใช้ในวิธี Fuzzy Codas โดยมีขั้นตอนดังนี้ [21]

1. สร้างเมทริกซ์การตัดสินใจที่คลุมเครือเป็น \tilde{X}_I ของผู้มีอำนาจในการตัดสินใจแต่ละคน และการคำนวณเมทริกซ์การตัดสินใจคลุมเครือเฉลี่ย \tilde{X} ดังสมการที่ (15)-(17)

$$\tilde{X}_I = \left[\tilde{x}_{ijl} \right]_{n \times m} = \begin{bmatrix} \tilde{x}_{11l} & \tilde{x}_{12l} & \dots & \tilde{x}_{1ml} \\ \tilde{x}_{21l} & \tilde{x}_{22l} & \dots & \tilde{x}_{2ml} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \tilde{x}_{n1l} & \tilde{x}_{n2l} & \dots & \tilde{x}_{nml} \end{bmatrix}; \quad (15)$$

$$\tilde{X} = [\tilde{x}_{ij}]_{n \times m} = \begin{bmatrix} \tilde{x}_{11} & \tilde{x}_{12} & \dots & \tilde{x}_{1m} \\ \tilde{x}_{21} & \tilde{x}_{22} & \dots & \tilde{x}_{2m} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \tilde{x}_{n1} & \tilde{x}_{n2} & \dots & \tilde{x}_{nm} \end{bmatrix}; \quad (16)$$

$$\tilde{x}_{ij} = \oplus_{l=1}^q \tilde{x}_{ijl}, \quad (17)$$

โดยที่ \tilde{x}_{ij} คือค่าประสิทธิภาพที่คลุมเครือของ ith $i \in 1, 2, \dots, n$ ทางเลือกตามเกณฑ์ jth $j \in 1, 2, \dots, m$ และ ith $l \in 1, 2, \dots, q$ และ \tilde{x}_{ij} แสดงค่าประสิทธิภาพคลุมเครือเฉลี่ยของเกณฑ์ทางเลือก ith เทียบกับ jth

2. หาน้ำหนักคลุมเครือของแต่ละเกณฑ์จากผู้มีอำนาจในการตัดสินใจแต่ละราย และคำนวณหาน้ำหนักคลุมเครือเฉลี่ยดังสมการที่ (18)-(20)

$$\tilde{W}_1 = [\tilde{w}_{jl}]_{1 \times m}; \quad (18)$$

$$\tilde{W} = [\tilde{w}_j]_{1 \times m}; \quad (19)$$

$$\tilde{w}_j = \oplus_{l=1}^q \tilde{w}_{jl}, \quad (20)$$

โดยที่ \tilde{w}_{jl} หมายถึงน้ำหนักคลุมเครือของเกณฑ์ jth $j \in 1, 2, \dots, m$ เทียบกับ ith $l \in 1, 2, \dots, q$ ผู้มีอำนาจตัดสินใจ และ \tilde{w}_j แสดงน้ำหนักคลุมเครือเฉลี่ยของเกณฑ์ jth

3. กำหนดเมตริกซ์การตัดสินใจที่ทำให้เป็นมาตรฐานแบบคลุมเครือตามแต่ละเกณฑ์โดยใช้สมการ ดังสมการที่ (21)-(22)

$$\tilde{N} = [\tilde{n}_{ij}]_{n \times m}; \quad (21)$$

$$\tilde{n}_{ij} = f \cdot x = \begin{cases} \tilde{x}_{ij} / \max_i \mathfrak{S}(\tilde{x}_{ij}), & \text{if } j \notin B \\ \min_i / \tilde{x}_{ij} \cdot \mathfrak{S}(\tilde{x}_{ij}), & \text{if } j \notin C \end{cases} \quad (22)$$

โดยที่ B และ C แสดงถึงชุดของเกณฑ์ Benefit และ Cost ตามลำดับ และ \tilde{n}_{ij} หมายถึงค่าประสิทธิภาพฟัซซี่ที่ทำให้เป็นมาตรฐาน

4. คำนวณเมตริกซ์การตัดสินใจปกติถ่วงน้ำหนัก แบบคลุมเครือ ค่าประสิทธิภาพการทำให้เป็นมาตรฐานถ่วงน้ำหนักแบบคลุมเครือ \tilde{r}_{ij} คำนวณได้จากสมการ ดังสมการที่ (23)-(24)

$$\tilde{R} = [\tilde{r}_{ij}]_{n \times m}; \quad (23)$$

$$\tilde{r}_{ij} = \tilde{w}_j \otimes \tilde{n}_{ij}, \quad (24)$$

โดยที่ \tilde{w}_j หมายถึงน้ำหนักคลุมเครือของเกณฑ์ jth

$$\text{และ } 0 < \mathfrak{S}(\tilde{w}_j) < 11$$

5. กำหนดวิธีแก้ปัญหาเชิงลบในอุดมคติแบบคลุมเครือ ดังสมการที่ (25)-(26)

$$NS = [ns_j]_{1 \times m}; \quad (25)$$

$$ns_j = \min_i \tilde{r}_{ij}, \quad (26)$$

$$\text{โดยที่ } \min_i \tilde{r}_{ij} = \left\{ \tilde{r}_{kj} \mid \mathfrak{S}(\tilde{r}_{kj}) = \min_i \left(\mathfrak{S}(\tilde{r}_{ij}) \right), k \in 1, 2, \dots, n \right\}$$

6. คำนวณ Euclidean (E_i) และ Taxicab (T_i) ระยะทางของทางเลือกวิธีอื่นจากวิธีแก้ปัญหาเชิงลบในอุดมคติแบบคลุมเครือ ดังสมการที่ (27)-(28)

$$E_i = \sqrt{\sum_{j=1}^m (r_{ij} - ns_j)^2} \quad (27)$$

$$T_i = \sum_{j=1}^m |r_{ij} - ns_j| \quad (28)$$

7. กำหนดเมทริกซ์การประเมินสัมพัทธ์ (RA)

ตั้งสมการที่ (29)-(30)

$$RA = [h_{ik}]_{n \times n}; \quad (29)$$

$$h_{ik} = E_i - E_k + t E_i - E_k \times T_i - T_k \quad (30)$$

โดยที่ $k \in 1, 2, \dots, n$ และ t คือ ฟังก์ชันขีดจำกัดที่กำหนดไว้ดังต่อไปนี้

$$t x = \begin{cases} 1 & \text{if } |x| \geq \theta \\ 0 & \text{if } |x| < \theta \end{cases}$$

พารามิเตอร์ขีดจำกัด (q) ของฟังก์ชันนี้สามารถกำหนดได้โดยผู้ที่มีอำนาจตัดสินใจ

8. คำนวณคะแนนการประเมิน (AS_i) ของแต่ละทางเลือก ตั้งสมการที่ (31)

$$AS_i = \sum_{k=1}^n h_{ik} \quad (31)$$

9. จัดอันดับทางเลือกตามค่าที่ลดลงของ AS_i โดยทางเลือกที่มีคะแนนประเมินสูงสุดคือความเสี่ยงที่ส่งผลกระทบที่สุดกับโลจิสติกส์ย้อนกลับในอุตสาหกรรมพลาสติก

3. ผลการวิจัย/ทดลองและการอภิปรายผล

3.1 ความสำคัญของเกณฑ์ความเสี่ยงอัตวิสัย

3.1.1 ผู้เชี่ยวชาญระดับผู้บริหารในอุตสาหกรรมพลาสติกจำนวน 7 คน (Focus Group) ดังตารางที่ 2.1 ได้ระดมความคิดและทำการประเมินความสำคัญของเกณฑ์ความเสี่ยงตามการเปรียบเทียบเชิงคู่ด้วยแบบสอบถามตามเกณฑ์คะแนน ดังตารางที่ 2.4 และผลลัพธ์แสดงดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 การเปรียบเทียบเชิงคู่เกณฑ์ความเสี่ยงตามเกณฑ์คะแนน

	S	O	D	C	F	T
S		MI	VS	MI	ME	ME
O	-		MS	VS	MS	SI
D	-	-		VS	ME	MI
C	-	-	-		ME	SI
F	-	-	-	-		MI
T	-	-	-	-	-	

หมายเหตุ ความหมายของเกณฑ์คะแนนสามารถดูได้ดังตารางที่ 2.4 ตัวอย่างเช่น เกณฑ์ S มีความสำคัญปานกลาง (MI) ต่อเกณฑ์ O และมีความสำคัญมากกว่า (VS) เกณฑ์ D

3.1.2 การคำนวณค่าขอบเขตสังเคราะห์ฟัชซี ตั้งสมการที่ (1)-(4) ได้ผลลัพธ์ ดังตารางที่ 3.2 ตัวอย่างการคำนวณขอบเขตสังเคราะห์ฟัชซีของเกณฑ์ความเสี่ยง S ดังนี้

$$S_i = 10, 18, 26 \otimes \left[\frac{1}{101.260}, \frac{1}{69.640}, \frac{1}{42.064} \right] = 0.099, 0.258, 0.618$$

ตารางที่ 3.2 ผลลัพธ์ขอบเขตสังเคราะห์ฟัชซี

	l	m	u
S	0.099	0.258	0.618
O	0.130	0.306	0.713
D	0.082	0.192	0.445
C	0.054	0.124	0.295
F	0.031	0.083	0.226
T	0.020	0.037	0.111

หมายเหตุ ค่า l คือ ค่าล่างของขอบเขต ค่า m คือค่ากลางของขอบเขต และค่า u คือค่าบนของขอบเขต



3.1.3 การคำนวณหาระดับความเป็นไปได้ของ $S_i \geq S_j$ ดังสมการที่ (5) ได้ผลลัพธ์ ดังตารางที่ 3.3 ตัวอย่างการคำนวณความเป็นไปได้ของ $S_i \geq S_j$ เมื่อ

$$V(S > O) = \frac{(0.130 - 0.618)}{(0.258 - 0.618) - (0.306 - 0.130)} = 0.911$$

ตารางที่ 3.3 ผลลัพธ์ความเป็นไปได้ของ $S_i \geq S_j$

V(S>O, D, C, F, T)				
V(S>O)	V(S>D)	V(S>C)	V(S>F)	V(S>T)
0.911	1.000	1.000	1.000	1.000
V(O>S, D, C, F, T)				
V(O>S)	V(O>D)	V(O>C)	V(O>F)	V(O>T)
1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
⋮				
V(T>S, O, D, C, F)				
V(T>S)	V(T>O)	V(T>D)	V(T>C)	V(T>F)
0.051	0.000	0.158	0.397	0.635

3.1.4 หาเวกเตอร์ความสำคัญและ Normalization ดังสมการที่ (9) จะได้น้ำหนักของเกณฑ์ความเสี่ยง ดังตารางที่ 3.4

ตารางที่ 3.4 น้ำหนักความสำคัญของเกณฑ์ความเสี่ยงอัตวิสัย

เกณฑ์ความเสี่ยง	น้ำหนัก (W_{sub})
S	0.266
O	0.293
D	0.215
C	0.139
F	0.088
T	0.000

ในการวิเคราะห์น้ำหนักของเกณฑ์ความเสี่ยงด้วยวิธี Fuzzy AHP จากการประเมินตามเกณฑ์น้ำหนักอัตวิสัย ดังตารางที่ 2.4 พบว่าโอกาสในการเกิด (O) มีความสำคัญมากที่สุด $W_{sub} = 0.293$

3.2 ความสำคัญของเกณฑ์ความเสี่ยงภาวิสัย

3.2.1 ผู้เชี่ยวชาญ บริษัท ทรู คอร์ปอเรชั่น จำกัด 5 คน/บริษัท (Focus Group) ดังตารางที่ 2.2 ได้ระดมความคิดและทำการประเมินแบบสอบถามตามเกณฑ์การประเมิน ดังตารางที่ 2.5 ได้ผลลัพธ์แสดงดังตารางที่ 3.5

ตารางที่ 3.5 ผลลัพธ์การประเมินน้ำหนักภาวิสัย

	S	O	D	C	F	T
FM1	SE	S	AC	VM	M	LT
FM2	M	M	H	MC	MH	M
FM3	SE	RS	H	VH	VH	LT
FM4	SE	VS	H	VH	VH	LT
FM5	M	VS	MH	ML	H	ST
FM6	SE	MH	H	MH	H	MS
FM7	MO	RS	H	MH	MH	ML
FM8	SE	H	H	VH	H	ML
FM9	SE	MH	MH	MH	VH	LT
FM10	MO	MH	M	MC	M	M
FM11	M	M	M	ML	M	M

หมายเหตุ ความหมายของเกณฑ์คะแนนสามารถดูได้ดังตารางที่ 2.5 ตัวอย่างเช่น ความเสี่ยงด้านสภาพแวดล้อม (FM1) มีความรุนแรง (S) ระดับอันตรายที่มีการเตือน (SE) มีโอกาสในการเกิด (O) ระดับน้อย (S) และความเสียหายของต้นทุน (C) อยู่ในระดับน้อยมาก (VM)



3.2.2 ปรับเมทริกซ์การตัดสินใจให้เป็นมาตรฐาน ดังสมการที่ (11) จะได้ผลลัพธ์ ดังตารางที่ 3.6

ตารางที่ 3.6 ผลลัพธ์เมทริกซ์ที่เป็นมาตรฐาน

	S	O	D	C	F	T
FM1	0.118	0.074	0.027	0.029	0.069	0.114
FM2	0.053	0.111	0.081	0.044	0.083	0.071
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
FM11	0.053	0.111	0.135	0.088	0.069	0.071

3.2.3 ทำการคำนวณ Entropy และ Normalized Weight ดังสมการที่ (12)-(13) จะได้ผลลัพธ์ ดังตารางที่ 3.7 ตัวอย่างการคำนวณ Entropy ของเกณฑ์ความเสี่ยง S และ Normalized Weight ดังนี้

$$E_i = \frac{(0.118 \times \ln(0.118) + 0.053 \times \ln(0.053) + \dots + 0.053 \times \ln(0.053))}{\ln 11}$$

$$= 0.97539$$

$$W_i = \frac{1 - 0.97539}{0.14423} = 0.171$$

ในการวิเคราะห์น้ำหนักการประเมินเกณฑ์ความเสี่ยง (FMs) ด้วยวิธี Entropy ที่ประเมินตามเกณฑ์วัดน้ำหนักภววิสัย ดังตารางที่ 2.5 พบว่าโอกาสในการเกิด (O) มีความสำคัญมากที่สุด $W_{obj} = 0.274$

ตารางที่ 3.7 น้ำหนักความสำคัญของเกณฑ์ความเสี่ยงภววิสัย

เกณฑ์ความเสี่ยง	น้ำหนัก (W_{obj})
S	0.171
O	0.274
D	0.162
C	0.247
F	0.046
T	0.100

3.3 น้ำหนักรวมระหว่างน้ำหนักอติวิสัยและน้ำหนักภววิสัย

3.3.1 จากการวิเคราะห์น้ำหนักของเกณฑ์ความเสี่ยงระหว่างน้ำหนักอติวิสัย ดังตารางที่ 3.4 และน้ำหนักภววิสัย ดังตารางที่ 3.7 จะทำการรวมน้ำหนักของเกณฑ์ความเสี่ยง จากสมการที่ (14) จะได้น้ำหนักรวมของเกณฑ์ความเสี่ยง ดังตารางที่ 3.8 ตัวอย่างการคำนวณน้ำหนักรวมของเกณฑ์ความเสี่ยงของเกณฑ์ความเสี่ยง S ดังนี้

$$W_{combine} = (0.5)0.266 + (1 - 0.5)0.171 = 0.219$$

ตารางที่ 3.8 น้ำหนักรวมของเกณฑ์ความเสี่ยงระหว่างน้ำหนักอติวิสัย และน้ำหนักภววิสัย

เกณฑ์ความเสี่ยง	น้ำหนัก ($W_{combine}$)
S	0.219
O	0.283
D	0.189
C	0.193
F	0.067
T	0.050

3.4 ลำดับความสำคัญของความเสี่ยง

เมื่อวิเคราะห์น้ำหนักของเกณฑ์ระหว่าง น้ำหนักอติวิสัย และน้ำหนักภววิสัย ด้วยวิธี Fuzzy AHP และ Entropy แล้ว จะทำการวิเคราะห์หาลำดับความสำคัญของปัจจัยเสี่ยงด้วยวิธี Fuzzy Codas

3.4.1 กำหนดเมทริกซ์การตัดสินใจที่ทำให้เป็นมาตรฐานแบบคลุมเครือตามแต่ละเกณฑ์โดยใช้สมการที่ (21)-(22) ได้ผลลัพธ์ ดังตารางที่ 3.9



ตารางที่ 3.9 ผลลัพธ์การตัดสินใจแบบมาตรฐาน

	S	O	D	C	F	T
FM1	0.444	0.500	0.200	1.000	1.000	0.375
FM2	1.000	0.333	0.600	0.667	0.833	0.600
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
FM11	1.000	0.333	1.000	0.333	1.000	0.600

3.4.2 จำนวนเมตริกซ์การตัดสินใจปกติถ่วงน้ำหนัก ดังสมการที่ (23)-(24) ได้ผลลัพธ์ดังตารางที่ 3.10 ตัวอย่างการคำนวณเมตริกซ์การตัดสินใจปกติถ่วงน้ำหนัก ดังนี้ $\tilde{r}_{ij} = 0.219 \times 0.444 = 0.097$

3.4.3 จำนวน Euclidean (E_i) และ Taxicab (T_i) ระยะทางของทางเลือกวิธีอื่นจากวิธีแก้ปัญหาเชิงลบในอุดมคติแบบคลุมเครือ ดังสมการที่ (27)-(28) ได้ผลลัพธ์ดังตารางที่ 3.11 ตัวอย่างการคำนวณ Euclidean (E_i) และ Taxicab (T_i) ดังนี้

$$E_i = \sqrt{(0.097 - 0.097)^2 + (0.142 - 0.071)^2 + \dots + (0.019 - 0.091)^2} = 0.168$$

$$T_i = |0.097 - 0.097| + |0.142 - 0.071| + \dots + |0.019 - 0.019| = 0.246$$

3.4.4 กำหนดเมตริกซ์การประเมินสัมพัทธ์ (RA) ดังสมการที่ (29)-(30) ได้ผลลัพธ์ดังตารางที่ 3.12 ตัวอย่างการคำนวณการประเมินสัมพัทธ์ (RA) FM1 เทียบ FM1 และ FM1 เทียบ FM2 ตามลำดับ ดังนี้

$$h_{ik} = 0.168 - 0.168 + 0.02 \cdot 0.168 - 0.168 \times 0.246 - 0.246 = 0.000$$

$$h_{ik} = 0.168 - 0.169 + 0.02 \cdot 0.168 - 0.169 \times 0.246 - 0.331 = -0.002$$

ตารางที่ 3.10 ผลลัพธ์การตัดสินใจแบบถ่วงน้ำหนัก

	S	O	D	C	F	T
FM1	0.097	0.142	0.038	0.193	0.067	0.019
FM2	0.219	0.094	0.113	0.128	0.056	0.030
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
FM11	0.219	0.094	0.189	0.064	0.067	0.030

ตารางที่ 3.11 ผลลัพธ์ของ (E_i) และ (T_i)

	E_i	T_i
FM1	0.168	0.246
FM2	0.169	0.331
⋮	⋮	⋮
FM11	0.198	0.354

ตารางที่ 3.12 เมตริกซ์การประเมินสัมพัทธ์

	FM1	FM2	...	FM11
FM1	0.000	-0.002	...	-0.030
FM2	0.002	0.000	...	-0.029
FM3	0.058	0.056	...	0.027
FM4	-0.027	-0.029	...	-0.058
FM5	0.040	0.038	...	0.009
FM6	-0.087	-0.088	...	-0.117
FM7	0.072	0.070	...	0.041
FM8	-0.092	-0.093	...	-0.122
FM9	-0.053	-0.055	...	-0.084
FM10	0.025	0.023	...	-0.006
FM11	0.031	0.029	...	0.000



3.4.5 คำนวณคะแนนการประเมิน (AS_i) ของแต่ละทางเลือก ดังสมการที่ (31) ได้ผลลัพธ์ดังตารางที่ 3.13 ตัวอย่างการคำนวณคะแนนการประเมินของ FM1 ดังนี้

$$AS_i = (0.000) + (-0.002) + (-0.058) + \dots + (-0.030) = 0.035$$

สามารถจัดอันดับความเสี่ยง FMs ตามคะแนนประเมิน AS_i โดยเรียงลำดับจากมากไปน้อย ได้ดังตารางที่ 3.13 อันดับความเสี่ยงสามารถกำหนดได้ดังนี้ $FM7 > FM3 > FM5 > FM11 > FM10 > FM2 > FM1 > FM4 > FM9 > FM6 > FM8$ จากการวิเคราะห์ลำดับความสำคัญของความเสี่ยง พบว่าความเสี่ยงด้านสินค้าคงคลัง (FM7) มีความสำคัญมากที่สุด

ตารางที่ 3.13 ลำดับความสำคัญของปัจจัยเสี่ยง

ปัจจัยเสี่ยง	AS_i	ลำดับ
ความเสี่ยงด้านสิ่งแวดล้อม FM1	0.035	7
ความเสี่ยงด้านปริมาณและความต้องการ FM2	0.053	6
ความเสี่ยงด้านเทคโนโลยี FM3	0.673	2
ความเสี่ยงด้านการจัดการ ข้อมูล FM4	-0.267	8
ความเสี่ยงของความสัมพันธ์กับผู้มีส่วนได้ส่วนเสีย FM5	0.473	3
ความเสี่ยงด้านการขนส่ง FM6	-0.921	10
ความเสี่ยงด้านสินค้าคงคลัง FM7	0.826	1
ความเสี่ยงด้านการปฏิบัติการ FM8	-0.972	11
ความเสี่ยงด้านชีวอนามัยและความปลอดภัย FM9	-0.551	9
ความเสี่ยงด้านความรู้และประสบการณ์ FM10	0.307	5
ความเสี่ยงด้านซัพพลายเออร์ FM11	0.372	4

3.4.6 การคำนวณ FMEA แบบดั้งเดิม ด้วยการหาค่า RPN โดยนำค่า $S \cdot O \cdot D$ และเกณฑ์เพิ่มเติมคือ $C \cdot F \cdot T$ นำมาคูณรวมกันทั้ง 6 เกณฑ์ จากคะแนนการประเมินตารางที่ 3.5 เพื่อเปรียบเทียบกับวิธีการคำนวณด้วยวิธี MCDM ในการลำดับความสำคัญของปัจจัยเสี่ยงได้ผลลัพธ์ดังตารางที่ 3.14

ตารางที่ 3.14 ลำดับความสำคัญของปัจจัยเสี่ยงด้วย FMEA แบบดั้งเดิม เทียบกับลำดับความสำคัญของปัจจัยเสี่ยงด้วยวิธี MCDM

ปัจจัยเสี่ยง	RPN	ลำดับ FMEA ดั้งเดิม	ลำดับวิธี MCDM
FM1	2880	11	7
FM2	6480	8	6
FM3	31104	5	2
FM4	46656	3	8
FM5	6048	9	3
FM6	55566	2	10
FM7	8820	7	1
FM8	35721	4	11
FM9	64512	1	9
FM10	6000	10	5
FM11	14400	6	4

สามารถจัดอันดับความเสี่ยง FMs ตามค่า RPN ที่ได้จากการคำนวณด้วยวิธี FMEA แบบดั้งเดิม โดยเรียงลำดับจากมากไปน้อย ได้ดังตารางที่ 3.14 และการจัดอันดับความเสี่ยงสามารถกำหนดได้ดังนี้ $FM9 > FM6 > FM4 > FM8 > FM3 > FM11 > FM7 > FM2 > FM5 > FM10 > FM1$ พบว่า ความเสี่ยงด้านชีวอนามัยและความปลอดภัย (FM9) มีความสำคัญมากที่สุด แต่เนื่องจากการคำนวณด้วยวิธี FMEA แบบดั้งเดิมไม่มี การคำนวณด้วยวิธีและตรรกะทางคณิตศาสตร์ที่



ซับซ้อน ซึ่งเป็นการคูณกันระหว่างเกณฑ์ความเสี่ยง ทั้ง 6 เกณฑ์ S*O*D*C*F*T เท่านั้น อาจมีความคลาดเคลื่อนและได้ผลลัพธ์ที่แม่นยำน้อยกว่าการคำนวณและลำดับความเสี่ยงด้วยวิธี MCDM ที่ได้เสนอในบทความวิจัยนี้

4. บทสรุป

งานวิจัยได้มีการระบุปัจจัยเสี่ยงออกมาเป็น 11 ความเสี่ยง (FM1)-(FM11) จากการวิเคราะห์ความเสี่ยง พบว่าความเสี่ยงด้านสินค้าคงคลัง (FM7) มีความสำคัญมากที่สุด อันดับสองคือความเสี่ยงด้านเทคโนโลยี (FM3) และอันดับสามคือความเสี่ยงของความสัมพันธ์กับผู้มีส่วนได้ส่วนเสีย (FM5) แสดงให้เห็นว่าความเสี่ยงทั้ง 3 อันดับแรกมีความสำคัญมากที่สุดตามลำดับ ที่จะต้องมีการวางแผนและมีกลยุทธ์เพื่อรับมือ รวมถึงจัดการกับความเสี่ยงทั้ง 3 ความเสี่ยงนี้เป็นอันดับต้นๆ ก่อนที่จะส่งผลกระทบต่อระบบโรงงาน เสียเปรียบด้านการแข่งขันทางการค้า การดำเนินการเกิดความผิดพลาด และอาจส่งผลกระทบต่อความไม่พอใจของลูกค้า เหมือนกับงานวิจัยของ Sumrit และ Srisawad [16] ที่เสนอและจัดลำดับความสำคัญของความเสี่ยงในอุตสาหกรรมปลาทุ่นากระป๋องภายใต้วิธี FMEA แบบใหม่ด้วยการใช้เครื่องมือ MCDM ในการคำนวณ การศึกษานี้พบว่าความเสี่ยงที่มีสำคัญที่สุด 3 ประการแรกคือ ความเสี่ยงของการเสื่อมสภาพของผลิตภัณฑ์ ความเสี่ยงความผันผวนของวัตถุดิบที่จัดหา และความเสี่ยงของความปลอดภัยของกระบวนการผลิต ตามลำดับ

ประโยชน์ของงานวิจัยในเชิงวิชาการมีดังนี้ ประการแรกงานวิจัยนี้ได้นำเกณฑ์ความเสี่ยงนอกเหนือจากเกณฑ์ความเสี่ยง FMEA แบบดั้งเดิม (S, O, D) มีการเพิ่มเกณฑ์ความเสี่ยงเพิ่มเติม 3 เกณฑ์ ได้แก่ ต้นทุน (C) ระดับความยากง่ายในการแก้ไขความเสี่ยง (F) และเวลาในการแก้ไขความเสี่ยง (T) ถูกรวมอยู่ในการประเมินความเสี่ยง เกณฑ์ที่ถูกเพิ่มเติมเหล่านี้สามารถช่วยระบุลักษณะความเสี่ยงของโลจิสติกส์ย้อนกลับในอุตสาหกรรมพลาสติกให้มีความแม่นยำมากยิ่งขึ้น ประการที่ 2 มีการพิจารณาเกณฑ์ความเสี่ยงของ FMEA (S, O, D, C, F, T) ร่วมกับการพิจารณาความเสี่ยง (FMs) สิ่งเหล่านี้ช่วยให้ให้นักวิชาการและผู้ปฏิบัติงานมีความเข้าใจมากยิ่งขึ้นเกี่ยวกับความสัมพันธ์ที่ซับซ้อนระหว่าง เกณฑ์ความเสี่ยงของ FMEA (S, O, D, C, F, T) และความเสี่ยง (FMs) ซึ่งนำไปสู่การประเมินความเสี่ยงอย่างมีเหตุผลได้ดีมากยิ่งขึ้น ประการที่ 3 การคำนวณน้ำหนักระหว่างน้ำหนักอัตรวิสัย และน้ำหนักกาววิสัยถูกรวมเข้าด้วยกันส่งผลให้มีความแม่นยำในการคำนวณ น้ำหนักที่ขึ้นประการสุดท้าย งานวิจัยนี้ใช้อุตสาหกรรมพลาสติกรีไซเคิลในประเทศไทยเป็นกรณีศึกษา ที่สามารถเป็นตัวแทนให้กับประเทศอื่นๆ ที่กำลังพัฒนาได้ ประโยชน์ของงานวิจัยในเชิงการปฏิบัติงาน งานวิจัยนี้จะสามารถช่วยให้ผู้ปฏิบัติงานทราบถึงความสำคัญของความเสี่ยงที่เกิดขึ้นในบริบทของการรีไซเคิลพลาสติกว่าความเสี่ยงไหนมีความสำคัญมากที่สุดที่จะต้องวางแผนรับมือ และมีแผนด้านกลยุทธ์ในการแก้ไขปัญหาเกี่ยวกับความเสี่ยงนั้นๆ เพื่อลดผลกระทบและความรุนแรงที่อาจจะเกิดขึ้น ก่อนที่จะส่งผลกระทบต่อความเสียหาย และนำไปสู่การหยุดชะงักต่อการปฏิบัติงาน การจัดลำดับ



ความเสี่ยงจึงมีความสำคัญ และช่วยให้ผู้ปฏิบัติงานมีแนวทางในการแก้ไขปัญหาเหล่านี้ได้อย่างเป็นระบบและมีประสิทธิภาพ แนวทางของงานวิจัยนี้อาจเป็นทางเลือกให้กับนักวิจัยในอนาคต เพื่อการประเมินความเสี่ยงและเก็บข้อมูลในบริบทอื่น ๆ เพื่อลำดับความสำคัญของความเสี่ยง เนื่องจากในทุกบริบทมีความเสี่ยงที่แตกต่างกันออกไป และความเสี่ยงที่แตกต่างกันนี้ ก็ยังมีกลยุทธ์ และการบรรเทาความเสี่ยงที่แตกต่างกันออกไปด้วยเช่นกัน

5. เอกสารอ้างอิง

- [1] W. Tesfaye and D. Kitaw, Conceptualizing revers logistics to plastics recycling system, *Social Responsibility Journal*, 2020, 17(5), 686-702.
- [2] E. Macarthur, Delivering the circular economy: A toolkit for policymakers, Ellen MacArthur Foundation Publishing, Isle of Wight, UK, 2015.
- [3] H. Panjehfouladgaran and S.F.W. Lim, Reverse logistics risk management: identification, clustering and risk mitigation strategies, *Management Decision*, 2020, 58(7), 1449-1474.
- [4] K.T. Atanassov, Circular intuitionistic fuzzy sets, *Journal of Intelligent and Fuzzy Systems*, 2020, 39(5), 5981-5986.
- [5] Y. Wu, Z. Deng, Y. Tao, L. Wang, F. Liu, and J. Zhou, Site selection decision framework for photovoltaic hydrogen production project using BWM-CRITICMABAC: A case study in Zhangjiakou, *Journal of Cleaner Production*, 2021, 324, 129233.
- [6] H.W. Lo, J.J. Liou, C.N. Huang and Y.C. Chuang, A novel failure mode and effect analysis model for machine tool risk analysis, *Reliability Engineering and System Safety*, 2019, 183, 173-183.
- [7] C. Jin, Y. Ran and G. Zhang, Interval-valued q-rung orthopair fuzzy FMEA application to improve risk evaluation process of tool changing manipulator, *Applied Soft Computing*, 2021, 104, 107192.
- [8] L. Ouyang, W. Zheng, Y. Zhu and X. Zhou, An interval probability-based FMEA model for risk assessment: a real-world case, *Quality and Reliability Engineering International*, 2020, 36(1), 125-143.
- [9] R. Jaidee, D. Sumrit and A. Vanichchinchai, Identifying sustainable roll-on/roll-off seaport assessment criteria using the fuzzy delphi method: A case study of thailand, 10th International Conference on Traffic and Logistic Engineering (ICTLE), Proceeding, 2022, 101-106.



- [10] S. Senthil, K. Murugananthan and A. Ramesh, Analysis and prioritisation of risks in a reverse logistics network using hybrid multi-criteria decision-making methods, *Journal of Cleaner Production*, 2018, 179, 716-730.
- [11] M. Abdel-Basset, M. Gunasekaran, M. Mohamed and N. Chilamkurti, A framework for risk assessment, management and evaluation: Economic tool for quantifying risks in supply chain, *Future Generation Computer Systems*, 2019, 90(1), 489-502.
- [12] H. Rogers, M. Srivastava, K.S. Pawar and J. Shah, Supply chain risk management in India—practical insights, *International Journal of Logistics Research and Applications*, 2016, 19(4), 278-299.
- [13] T. Noguchi, W.J. Park and R. Kitagaki, Risk evaluation for recycled aggregate according to deleterious impurity content considering deconstruction scenarios and production methods, *Resources, Conservation and Recycling*, 2015, 104, 405-416.
- [14] F. Badurdeen, M. Shuaib, K. Wijekoon, A. Brown, W. Faulkner, J. Amundson, I.S. Jawahir, T.J. Goldsby, D. Iyengar and B. Boden, Quantitative modeling and analysis of supply chain risks using Bayesian theory, *Journal of Manufacturing Technology Management*, 2014, 25(5), 631-654.
- [15] H.O. Addo, E.J. Dun-Dery, E. Afoakwa, A. Elizabeth, A. Ellen and M. Rebecca, Correlates of domestic waste management and related health outcomes in Sunyani, Ghana: A protocol towards enhancing policy, *BMC Public Health*, 2017, 17, 1-10.
- [16] P.V. Patil and R. Kamble, Occupational health hazards in municipal solid waste collecting workers of Chandrapur city, Central India, *International Journal of Environment*, 2017, 6(1), 46-57.
- [17] D. Sumrit and S. Srisawad, Fuzzy failure mode and effect analysis model for operational supply chain risks assessment: An application in canned tuna manufacturer in Thailand, *LogForum*, 2022, 18(1), 77-96
- [18] M. Subramani and V.B. Kumaravelu, A fuzzy based vertical handover network selection scheme, *Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science*, 2020, 17(1), 324-330.



- [19] B. Karatop, B. Taskin, E. Adar and C. Kubat, Decision analysis related to the renewable energy investments in Turkey based on a Fuzzy AHP- EDAS-Fuzzy FMEA approach, *Computers and Industrial Engineering*, 2021, 151, 106958.
- [20] S.K. Saraswat and A.K. Digalwar, Evaluation of energy alternatives for sustainable development of energy sector in India: An integrated Shannon's entropy fuzzy multi-criteria decision approach, *Renewable Energy*, 2021, 171, 58-74.
- [21] J.L. Aro, E. Selerio Jr, S.S. Evangelista, F. Maturan, N.M. Atibing and L. Ocampo, Fermatean fuzzy CRITIC-CODAS-SORT for characterizing the challenges of circular public sector supply chains, *Operations Research Perspectives*, 2022, 9, 100246.

Effect of Injection Pressure and Timing of the Ternary Blends (Ethanol-Biodiesel-Diesel) on Combustion Characteristics

Sakda Thongchai, Ob Nilaphai and Manida Tongroon*

ATAE Research Unit, Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering at Sriracha, Kasetsart University, Thailand

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

Received: 7 May 2023; Revised: 13 June 2023; Accepted: 15 June 2023

Online Published: 26 August 2023

Abstract: This research studies the combustion characteristics of a compression ignition engine when using ternary blends (ethanol-biodiesel-diesel). Because ethanol is renewable energy and can lower exhaust emissions, it is interesting to use in a diesel engine. With less effort to prepare the fuel and apply it in the engine, the blending technique is used in this research. However, phase separation readily occurs as the percentage of ethanol increases and at the low ambient temperature. Fortunately, biodiesel has been used commercially as a blend and can act as a surfactant to keep the phase stable. To comply with the market, the blend ratio used is B3E5, B7E5, and B10E10, where B stands for biodiesel, E is ethanol, and the numeric presents the percent of each fuel by volume. In addition, diesel adding 3 percent biodiesel as a lubricity enhancer is used as the reference. Combustion features such as heat release rate, ignition delay, and mass fraction burned derived from in-cylinder pressure are experimented with through a single-cylinder common-rail diesel engine. The injection pressure varies from 500, 700, and 1000 bar, while injection timing adjusts from 335, 340, 345, 350, and 355°CA. With ethanol concentration, the ignition commences earlier than diesel B3 due to the puffing phenomena. However, adding more biodiesel content results in later ignition because of the difficulty of the fuel-air mixing process. The high content of ethanol and biodiesel yields the lengthiest ignition delay.

Keywords: Ethanol; Biodiesel; Ternary blends; Diesohol



1. Introduction

Due to energy depletion and security problems, renewable fuels have been extensively investigated. Ethanol has successfully been applied in a spark ignition (SI) engine up to 85% blended with gasoline, even used in the neat form in Brazil [1]. On the other hand, biodiesel has been used in compression ignition (CI) engines as the commercial fuel in some countries but a limitation to 10-20% blended with diesel [2, 3]. Moreover, the air pollution problems specifically emit from a CI engine with high smoke and NO_x concentration. Alternative fuel is increasingly demanding, especially ethanol which can significantly reduce smoke emissions [4, 5].

However, applying ethanol in a CI engine requires tremendous effort than in SI because its properties significantly differ from diesel, such as cetane number. The promising approach to use in CI engines is the blending method. Nevertheless, ethanol could not be miscible into diesel without the solubility enhancer. Therefore, many additives have been studied such as Sorbitan Monooleate, polyoxymethylene dimethyl ethers, and n-butanol [6-8]. Biodiesel is a renewable fuel and already mixes with diesel in some countries. Moreover, the biodiesel amount could improve the solubility of ethanol-diesel blends and compensate for the blends' low density, viscosity, and lubricity properties [9-11]. Therefore, using biodiesel as a surfactant is interesting.

Due to the low heating value, previous researches found that fuel consumption increases when using ethanol-biodiesel-diesel blends [12, 13]. However, the tri-blends present an advantage over diesel in terms of thermal efficiency [14, 15]. Depending on the test condition, CO and HC emitted from ternary blends demonstrate inconclusive correlation compared to that of neat diesel fuel [16, 17]. The blends are likely to increase the NO_x concentration [18]. However, many researchers have proved that the smoke/particulate matter (PM) significantly decreases with the blends of ethanol/biodiesel [19-21]. For combustion characteristics, ethanol tends to retard the ignition, thus lengthening the ignition delay [22, 23]. Consequently, the heat release rate is high.

Although there is considerable research on ternary blends, the effect of injection pressure and timing on the Ethanol-Biodiesel-Diesel blend used in the common rail diesel engine at medium operating condition is limited. Moreover, the ratio of ethanol and biodiesel in this research is highly promising because the amount of biodiesel blended is commercially used in many countries. This paper has also compared the effect of ethanol and biodiesel solely. In the meantime, the combined influence has been evaluated. The effect of injection timing is presented first, followed by the injection pressure. The influence of fuel properties has been demonstrated in the last section.



2. Apparatus

2.1 Engine

An agricultural base single cylinder four stroke diesel engine with a naturally aspirated intake system and water cooling was used throughout this study. The fuel is injected directly into the combustion chamber via a high-pressure common rail system. An in-house electronic injection system controls the injection timing and duration. The engine specification is detailed in Table 1.

2.2 Test Fuel

The ternary blends were prepared in two steps, shown in Fig. 1. Firstly, biodiesel was mixed with diesel called BX, where X is the percentage of biodiesel. This study chose B3, B7 and B10 to imitate commercial use. Then, ethanol was blended into BX, named BXEY, where Y is the percentage of ethanol in BX. Only 5% and 10% ethanol were selected to blend to prevent phase separation.

Therefore, the final blends include B3E5, B7E5, and B10E10. Also, B3 was tested as the reference. The fuel properties and the amount of biodiesel and ethanol are presented in Table 2.

Table 1 Engine specification

Specification	
Engine type	A horizontally single-cylinder four- stroke engine
Displacement volume	709 cm ³
Bore x Stroke	97 x 96 mm.
Compression ratio	18:1
No. intake valve	1
No. exhaust valve	1
Injection system	Electronic common rail
Cooling system	Liquid-cooled
Max power	10.3 kW at 2400 rpm
Max torque	49 Nm at 1600 rpm

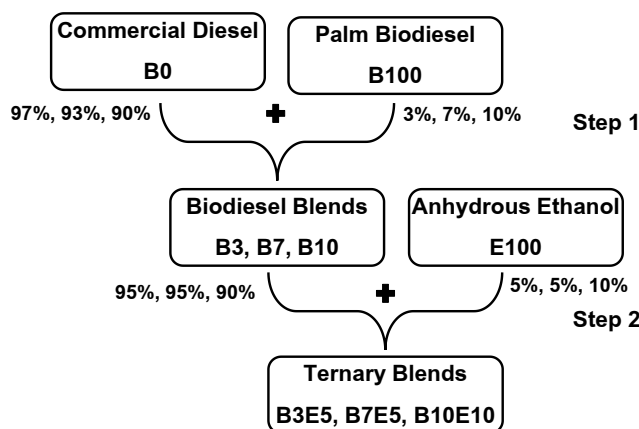


Fig. 1 Procedure of fuel preparation

**Table 2 Fuel Properties**

Properties	B3E5	B7E5	B10E10	Diesel (B3)	Ethanol	Biodiesel
Ethanol (%)	5	5	10	0	100	0
Biodiesel (%)	2.85	6.65	9	3	0	100
Diesel (%)	92.15	88.35	81	100	0	0
Density (g/cm ³)	0.814	0.816	0.815	0.832	0.786	0.868
Viscosity (cSt)	3.0	3.0	2.8	3.9	1.2	4.5
Heating value (MJ/kg)	43.9	42.9	41.7	45.05	27.6	40.1
Cetane number	56.5	56.7	53.6	-	-	67.9
Heat of vaporization (kJ/kg)				254 [25]	904 [25]	254 [25]
Enthalpy of vaporization (kJ/g)				0.250 [26]	0.846 [27]	0.245 [26]
Specific heat capacity (J g ⁻¹ K ⁻¹) @298 K				1.87-1.92 [27]	2.44 [28]	2.12 [29]

2.3 Combustion analysis

The engine speed was controlled at 1600 rpm and load at brake mean effective pressure (BMEP) of 5 bar by a prony brake dynamometer, measured the loading force by S-type tension/ compression load cell with the capability of 1961 N from Minebea, model U3B1-200K-B. The schematic diagram of the experimental system is presented in Fig. 2. The combustion behaviors were analyzed through in-cylinder pressure data acquired by a Kistler model 6052C piezoelectric pressure transducer. One hundred consecutive cycles triggered every 0.1-degree crank angle by an Autonics model E40HB6-3600-3-T-24 encoder were amplified by a Kistler model 5108 charge amplifier before being recorded by an in-house LabVIEW base program. The average in-cylinder pressure

value was used to calculate the heat release rate in Eq. (1), specified by Heywood [30].

$$\frac{dQ}{d\theta} = \frac{\gamma}{\gamma - 1} p \frac{dV}{d\theta} + \frac{1}{\gamma - 1} V \frac{dp}{d\theta} \quad (1)$$

Where V is cylinder volume, p is averaged in-cylinder pressure, and γ is the ratio of specific heat, equal to 1.3 for this study.

The engine was warmup until the lubricant and coolant water reached 80°C before the test started. The injection timings were varied from 335°CA to 355°CA with the 5°CA increment at the fixed injection pressure of 700 bar. On the other hand, the injection pressure was tested at 500, 700 and 1000 bar when the injection timing was controlled at 345°CA. All test fuels were tested and compared with the same conditions.

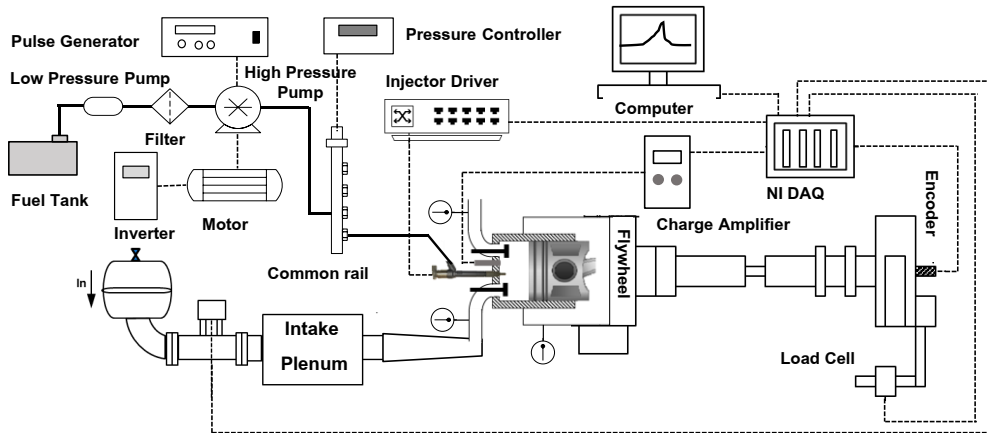


Fig. 2 Schematic diagram of experimental setup

3. Result and Discussion

3.1 Effect of Injection Timing

Fig. 3 presents the effect of injection timing on the heat release rate of (a) B3, (b) B3E5, (c) B7E5, and (d) B10E10, respectively. The start of combustion is defined as the crank angle where the percentage of fuel burnt is 5%. The ignition delay is the interval between the injection timing and the start of combustion. Fundamentally, when the fuel injection commences early, the liquid fuel can atomize, vaporize, and mix with air, preparing for ignition early. Therefore, all test fuels exhibited the same trend where the earlier the injection, the auto-ignition started earlier.

The ignition timing retardation is not at the same interval as injection timing retardation at the very early injection. For example, at the injection timing of 335°CA, the ignition occurred at 349°CA for B3; when the injection was delayed to 340°CA, the ignition retarded about 2.8°CA less than 5°CA of the

delayed injection. However, the ignition timing intervals extended and were equivalent to the injection retardation intervals when the injection timing closed to the top dead center for all test fuels, shown in Fig.4.

Not only the ignition happened early with the early injection, but 10% and 50% of mass burnt also (Fig.4). Nevertheless, there is no certain trend of 90% mass burnt (the combustion finished). At injection timing of 340 and 345°CA, the combustion seems to terminate earlier than 335°CA, the earliest injection timing. The low air temperature and pressure at the early injection are the causes. Moreover, the injected fuel hardly vaporizes and oxidizes. Therefore, the ignition delay is the lengthiest at the earliest injection timing and decreases with the retardation, as presented in Fig.5. With the lengthening ignition delay, more fuel accumulates before the oxidation occurs, thus releasing greater heat in Fig. 6.



บทความวิจัย

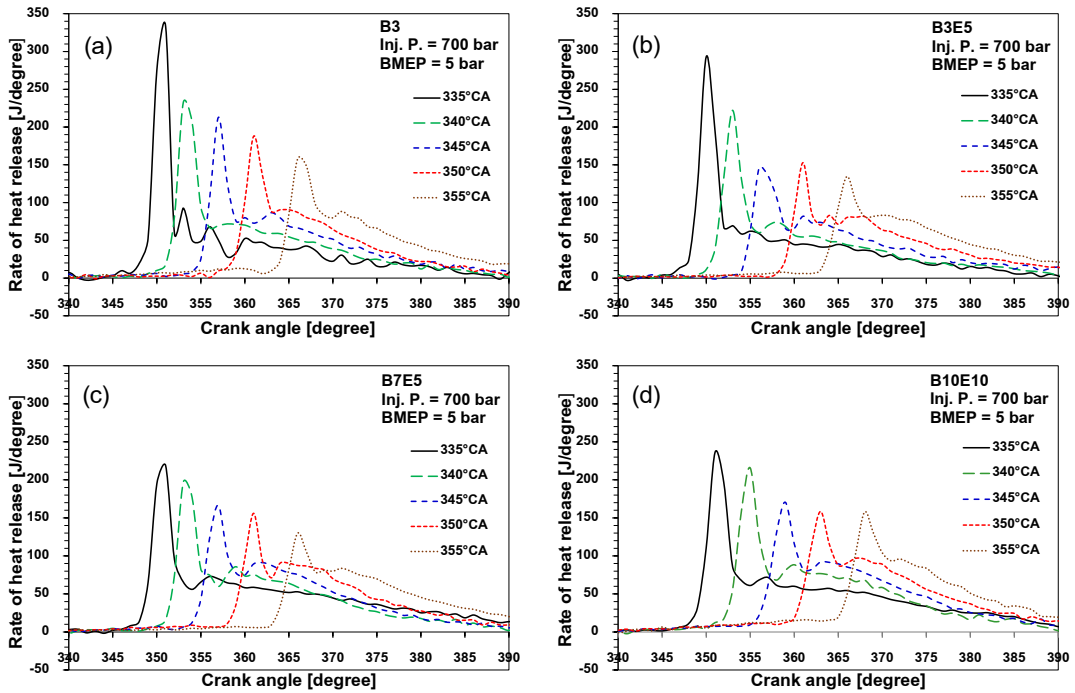


Fig. 3 Heat release rate of (a) B3, (b) B3E5, (c) B7E5, and (d) B10E10 when varying injection timing

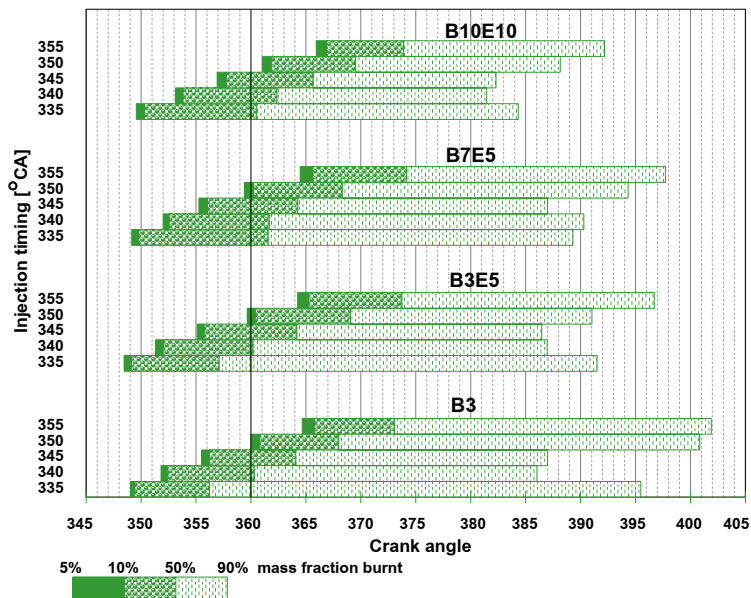


Fig. 4 The effect of injection timing on combustion phasing

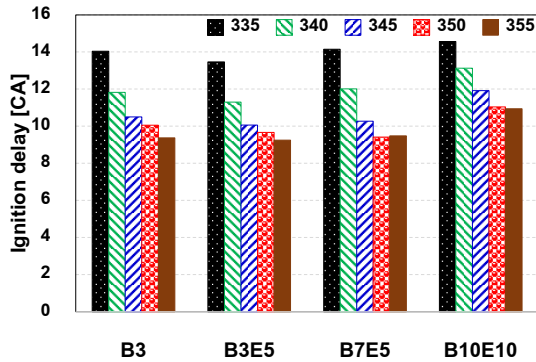


Fig. 5 The effect of varying injection timing on ignition delay

Interestingly, the effect of injection timing on the burning rate during premixed (5-50% mass burnt in Fig.7) is not the same among all test fuels. With the lower amount of oxygenated fuels (B3 and B3E5), the burning rate during premixed combustion decreases when the injection timing retards and vice versa for the higher blended ratio of alternative fuel (B7E5 and B10E10). When injection timing lately happens, the ignition delay decreases, thus reducing the accumulated premixed mixture to combust during the rapid combustion phase [31]. Therefore, the rate of combustion reduces. Although the ignition delay also lessens for the B7E5 and B10E10, high oxygen molecules enhance the air-fuel mixture process. In addition, high air temperature during the late injection accelerates the burning rate. Not shown here, there is no correlation between the diffusion combustion (50-90% mass burnt) with the injection timing.

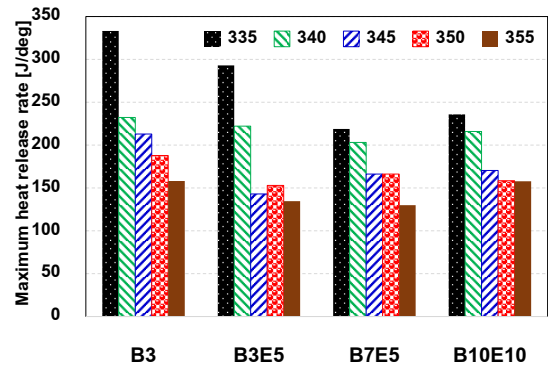


Fig. 6 The effect of varying injection timing on the maximum heat release rate.

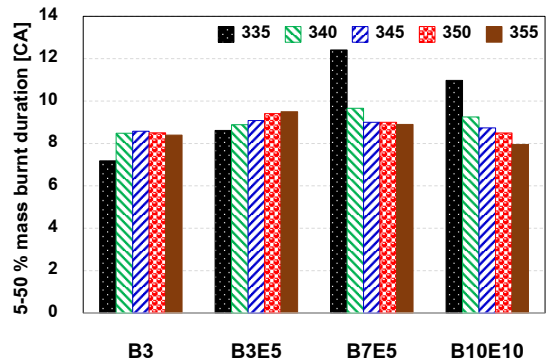


Fig. 7 The duration to burn 5-50% mass when varying injection timing.

3.2 Effect of Injection Pressure

The effect of varying injection pressure at 500, 700, and 1000 bar on the heat release rate when using (a) B3, (b) B3E5, (c) B7E5, and (B10E10) is exhibited in Fig. 8, respectively. It shows that the ignition starts early with a high heat release rate when the injection pressure increases. It indicates that the high injection pressure results in the shortening ignition delay in

Fig. 9 but release high heat even though less time is available for fuel accumulated. The injected fuel readily atomizes into the fine droplet with increased injection pressure [32]. Tiny fuel drops could vaporize and mix with air quickly. Consequently, the auto-ignition is achieved early. Moreover, the mass fuel injection rate increases with the high injection pressure [33]. Therefore, more fuel oxidizes and releases heat during the premixed combustion mode.

Better fuel atomization at the high injection pressure accelerates the ignition and the burning rate during the premixed combustion phase, illustrated in Fig. 10 for all test fuels. Also, for the combustion duration in Fig. 11 (5-90% mass burnt), all test fuels consume lesser time with the increased injection pressure.

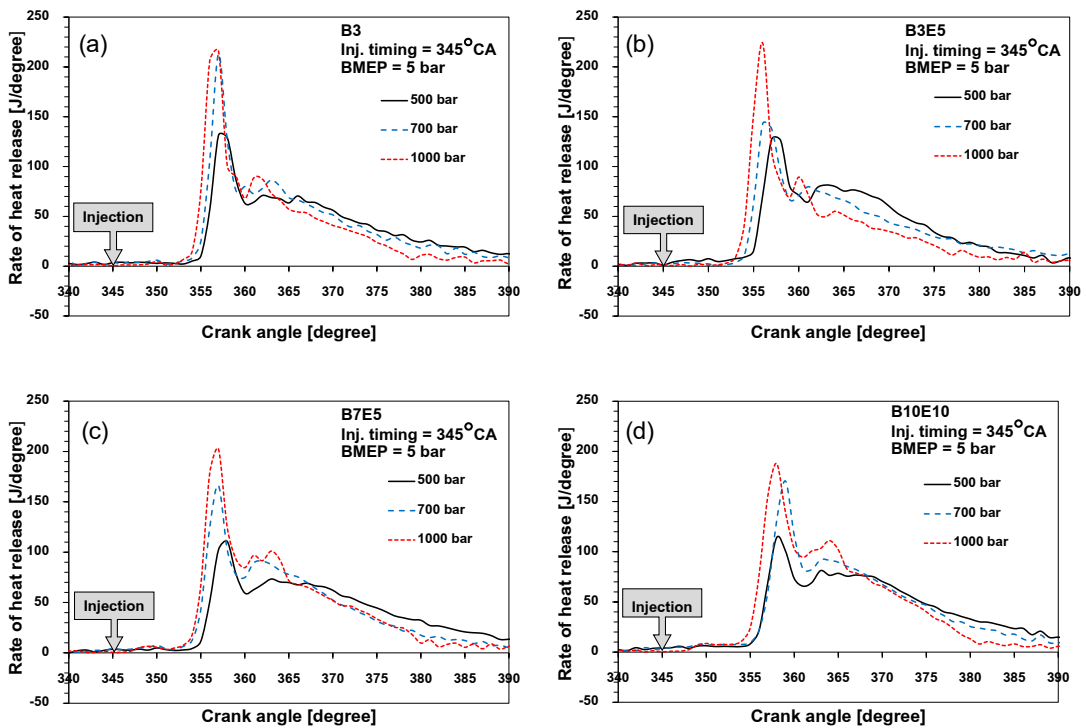


Fig. 8 Heat release rate of (a) B3, (b) B3E5, (c) B7E5, and (d) B10E10 when varying injection pressure

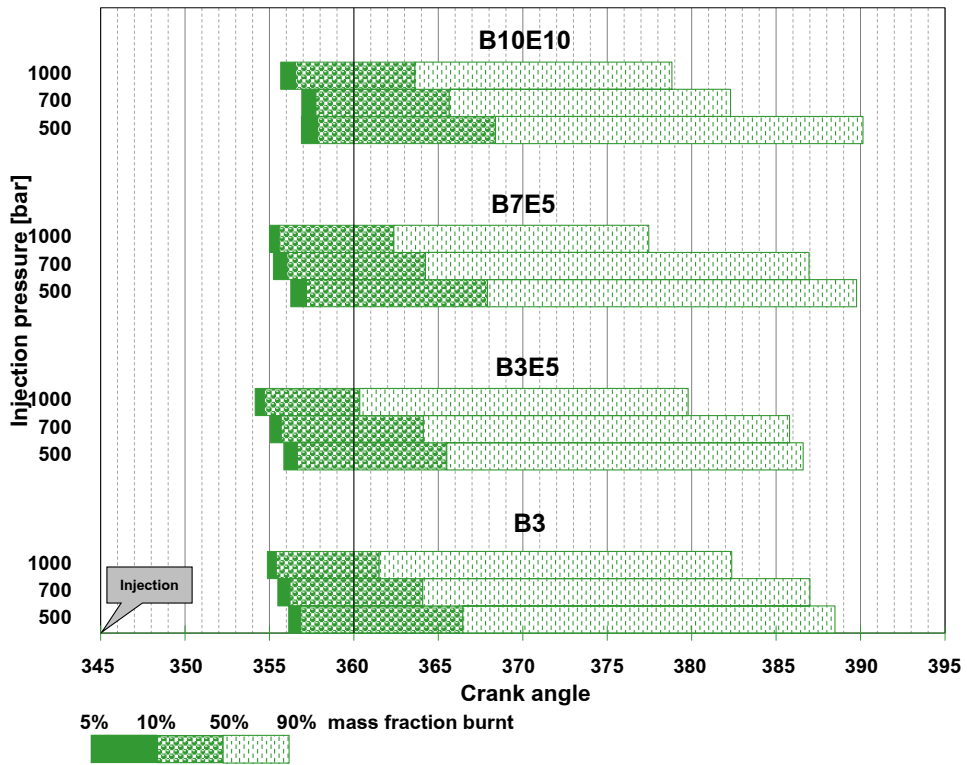


Fig. 9 5, 10, 50 and 90% mass fraction burnt and the location happening when varying injection pressure

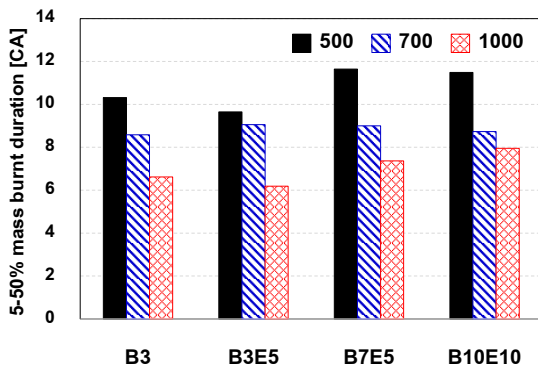


Fig. 10 The duration to burnt 5-50% mass when varying injection pressure

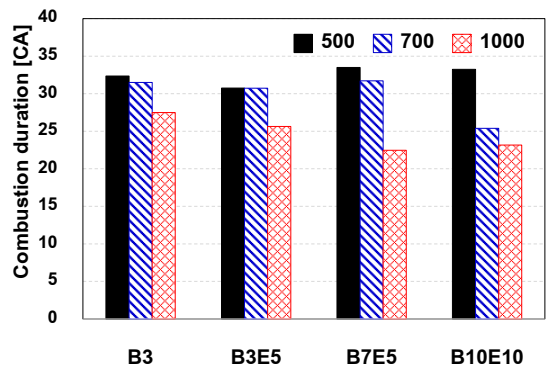


Fig. 11 The combustion duration when varying injection pressure

3.3 Effect of fuel properties

Fig. 12 compares the heat release rate of B3, B3E5, B7E5, and B10E10 at the injection pressure of 700 MPa and the injection timing of 340°CA. Although the results of other test conditions are not shown here, the trend is the same. To characterize the sole effect of ethanol, B3 and B3E5 are considered. The result indicates that increasing 5% ethanol into the blend accelerates self-ignition over B3. The shortening ignition delay is clearly presented in Fig. 13. The results contradict many previous studies where ethanol retard the auto-ignition [22, 23]. The puffing phenomenon is the cause [34]. Although the appearance of the blend is a transparent homogeneous solution, ethanol as sub-droplets is diffused and surrounded by the droplet of diesel and biodiesel. With low boiling temperatures, ethanol first vaporizes and forms a bubble inside the droplets after the atomized fuels are heated. Those bubbles expand outward and drive the surrounding high boiling point droplet, rupturing and pushing the vapor jet. This incident is called the puffing phenomenon and leads to secondary atomization, which could accelerate auto-ignition.

The specific effect of biodiesel in the blend is clarified by comparing B3E5 and B7E5. Adding only 3.8% biodiesel could delay the ignition. The puffing incident is abated with biodiesel content [35]. Secondary atomization barely induces.

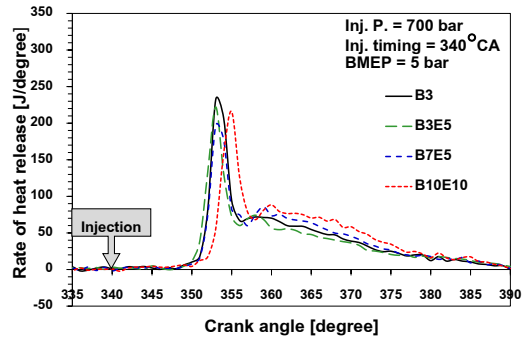


Fig. 12 The effect of fuel properties (B3, B3E5, B7E5, and B10E10) on Heat release rate

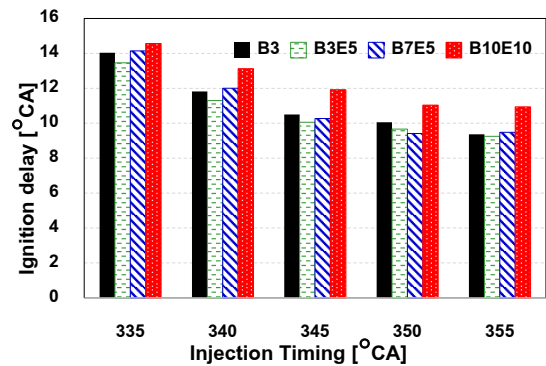


Fig. 13 The effect of test fuel on the ignition delay at any injection timing

Moreover, the atomization of viscous and high-density fuel is difficult. Therefore, the fuel hardly vaporizes. The fuel-air mixing process is hindered. Consequently, the ignition delay is lengthened.

The effect of ethanol combined with biodiesel is investigated through the B10E10 fuel. The high percentage of ethanol and biodiesel prolongs the ignition delay the most among all test fuels. The cooling effect resulted from the high heat of



vaporization and enthalpy of vaporization in Table 2 of high ethanol content dominates in this case. In addition, the difficulty of fuel atomization and vaporization of biodiesel also contribute.

The maximum heat release rate of all test fuels at all injection timings is illustrated in Fig. 14. The peak heat release does not correlate with the ignition delay, where the higher heat happens with the lengthener ignition delay. B3, with the highest heating value, releases the utmost heat, although the ignition delay is short. The maximum heat release rate of all ethanol blends is lower than diesel. The low heating value of ethanol is one vital cause. However, the long ignition delay of B10E10 coupled with the high air-fuel mixing process increases the rate of heat release over B7E5 and even B3E5 sometimes.

The combustion phasing from 5-50% mass burnt (premixed combustion) of all test fuels is presented in Fig. 15. At early injection timing (335-340°C A), B3 combusts the fastest, followed by B3E5, B10E10, and B7E5 during premixed combustion. The rate of oxidation seems to depend on the heating value of fuels. When the heating value is lower, more blend is required to deliver the same BMEP. Therefore, more time is needed to combust, hence slow burning in terms of time scale base. Even though more B10E10 necessitates, the premixed combustion rate looks faster than B7E5. Because of the lengthy ignition

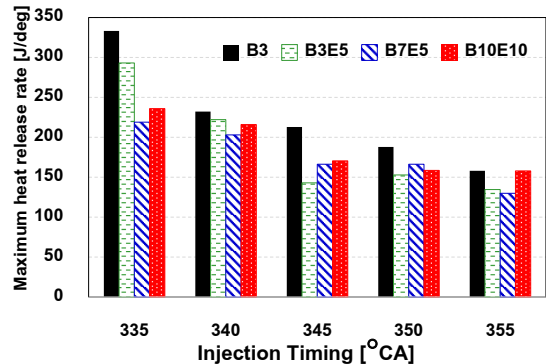


Fig. 14 The effect of test fuel on the maximum heat release rate at any injection timing

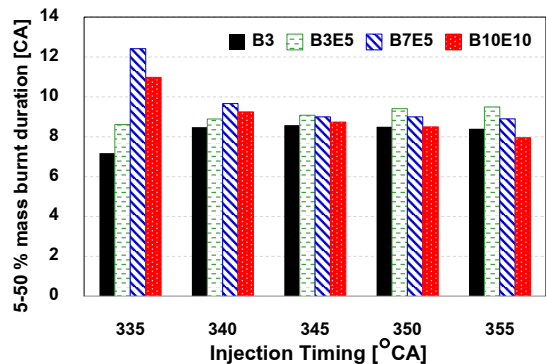


Fig. 15 5-50% mass burnt duration of B3, B3E5, B7E5, and B10E10 at injection pressure of 700 bar and varying injection timing

delay of B10E10, much more accumulated fuel-air mixture oxidizes once the ignition happens. Rapid oxidation, as seen in a higher maximum heat release rate, consumes the charge mixture and results in faster burning than B7E5.

At the late injection, the effect of high oxygen content dominates the burning rate, as previously described. The fuel-air mixing process is enhanced



for B10E10 and B7E5 fuel, leading to faster burn than B3E5. Moreover, B10E10 sometimes indicates more rapid combustion than B3 (at 355°C injection timing).

4. Conclusion

The study investigates the effect of injection timing and pressure on the combustion characteristics of ternary blends (B3, B3E5, B7E5, and B10E10). Moreover, the influence of ethanol and biodiesel concentration is presented separately. The combined effect of ethanol and biodiesel is also exhibited. The conclusions are:

- The effects of injection timing on the combustion characteristics for all blends are the same. With the earlier injection timing, the ignition happens earlier with the extended ignition delay. Only the burning late during the premixed combustion phase differs, where the low-oxygenated blends combust slowly while high-content oxygen fuel oxidizes at the late injection.
- Better fuel atomization resulting from the high injection pressure leads to early ignition timing, shortened ignition delay, and fast burning for all blends.
- Ethanol content in the blends with less biodiesel concentration could induce the puffing phenomena, leading to the second atomization and shortening ignition delay.
- Biodiesel content in the ternary blends could suppress the puffing incident. Moreover, the

difficulty of its atomization and vaporization retards the ignition.

- The high heat of vaporization of ethanol combined with the difficulty of atomization/vaporization of biodiesel significantly delay the ignition. However, with the high oxygen content, the burning rate at the premixed combustion phase is enhanced when the injection commences late.

5. Acknowledgement

This research was financially supported by Kasetsart University Research and Development Institute, KURDI (R-M 50.64), Thailand.

6. References

- [1] J. Mączyńska, M. Krzywonos, A. Kupczyk, K. Tucki, M. Sikora, H. Pińkowska, A. Bączyk and I. Wielewska, Production and use of biofuels for transport in Poland and Brazil – The case of bioethanol, *Fuel*, 2019, 241, 989-996.
- [2] <https://www.eia.gov/energyexplained/biofuels/biodiesel-rd-other-use-supply.php>. (Accessed on 22 April 2023)
- [3] Sahara, A. Dermawan, S. Amaliah, T. Irawan and S. Dilla, Economic impacts of biodiesel policy in Indonesia: A computable general equilibrium approach, *Economic Structures*, 2022, 11, 22.



- [4] X. Wang, C. Geng, J. Dong, X. Li, T. Xu, C. Jin, H. Liu and B. Mao, Effect of diesel/PODE/ethanol blends coupled pilot injection strategy on combustion and emissions of a heavy duty diesel engine, *Fuel*, 2023, 335, 127024.
- [5] J. Lee, S. Lee and S. Lee, Experimental investigation on the performance and emissions characteristics of ethanol/diesel dual-fuel combustion, *Fuel*, 2018, 220, 72-79.
- [6] M.A. Shaikh and V. R. Patel, Experimental studies on ethanol solubility and nanoparticle (NP) stability in diesel fuel, *Chemical Engineering Research and Design*, 2022, 188,105-129.
- [7] C. Jin, X. Zhang, X. Wang et al., Effects of polyoxymethylene dimethyl ethers on the solubility of ethanol/diesel and hydrous ethanol/diesel fuel blends, *Energy Science and Engineering*, 2019, 7, 2855-2865.
- [8] C. Jin, X. Zhang, Z. Geng, X. Pang, X. Wang, J. Ji, G. Wang and H. Liu, Effects of various co-solvents on the solubility between blends of soybean oil with either methanol or ethanol, *Fuel*, 2019, 244, 461-471.
- [9] N. Kumar, R. Koul and R.C. Singh, Comparative analysis of ternary blends of renewable Diesel, diesel and ethanol with diesel, *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 2022, 50, 101828.
- [10] S. Pinzi, I. López, D.E. Leiva-Candia, M.D. Redel-Macías, J.M. Herreros, A. Cubero-Atienza and M.P. Dorado, Castor oil enhanced effect on fuel ethanol-diesel fuel blend properties, *Applied Energy*, 2018, 224, 409-416.
- [11] S. Madiwale, A. Karthikeyan and V. Bhojwani, Properties investigation and performance analysis of a diesel engine fuelled with Jatropa, Soybean, Palm and Cottonseed biodiesel using ethanol as an additive, *Materials Today: Proceedings*, 2018, 5(1), 657–664.
- [12] M. Vergel-Ortega, G. Valencia-Ochoa and J. Duarte-Forero, Experimental study of emissions in single-cylinder diesel engine operating with diesel-biodiesel blends of palm oil-sunflower oil and ethanol, *Case Studies in Thermal Engineering*, 2021, 26, 101190.



- [13] V. Kulanthaivel, A. Jayaraman, T. Rajamanickam and S. Selvam, Impact of diesel-algae biodiesel-anhydrous ethanol blends on the performance of CI engines, *Journal of Cleaner Production*, 2021, 295, 126422.
- [14] M.M. El-Sheekh, M.Y. Bedaiwy, A.A. El-Nagar, M. ElKelawy and H.A. Bastawissi, Ethanol biofuel production and characteristics optimization from wheat straw hydrolysate: Performance and emission study of DI-diesel engine fueled with diesel/biodiesel/ethanol blends, *Renewable Energy*, 2022, 191, 591-607.
- [15] H.V. Srikanth, Sharanappa G, B. Manne and S. Bharath Kumar, Niger seed oil biodiesel as an emulsifier in diesel-ethanol blends for compression ignition engine, *Renewable Energy*, 2021, 163, 1467-1478.
- [16] T. Prakash, V. Edwin Geo, L.J. Martin and B. Nagalingam, Effect of ternary blends of bio-ethanol, diesel and castor oil on performance, emission and combustion in a CI engine, *Renewable Energy*, 2018, 122, 301-309.
- [17] S.N. Bhat, S. Shenoy and P. Dinesha, Effect of bio-ethanol on the performance and emission of a biodiesel fueled compression ignition engine, *MATEC Web of Conferences*, 2018, 144, 04017.
- [18] D. Qi, L. Ma, R. Chen, X. Jin and M. Xie, Effects of EGR rate on the combustion and emission characteristics of diesel-palm oil-ethanol ternary blends used in a CRDI diesel engine with double injection strategy, *Applied Thermal Engineering*, 2021, 199, 117530.
- [19] J. Cong Ge, G. Wu, B. Yoo and N. Jung Choi, Effect of injection timing on combustion, emission and particle, morphology of an old diesel engine fueled with ternary blends at low idling operations, *Energy*, 2022, 253, 124150.
- [20] L. Zuo, J. Wang, D. Mei, S. Dai and D. Adu-Mensah, Experimental investigation on combustion and (regulated and unregulated) emissions performance of a common-rail diesel engine using partially hydrogenated biodiesel-ethanol-diesel ternary blend, *Renewable Energy*, 2022, 185, 1272-1283.
- [21] P. Karin, A. Tripatara, P. Wai, B. Oh, C. Charoenphonphanich, N. Chollacoop and H. Kosaka, Influence of ethanol-biodiesel blends on diesel engines combustion behavior and particulate matter physicochemical characteristics, *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*, 2022, 6, 100249.



- [22] S. Shamun, G. Belgiorno, G.D. Blasio, C. Beatrice and M. Tuner, Performance and emission of diesel-biodiesel-ethanol blends in a light duty compression ignition engine, *Applied Thermal Engineering*, 2018, 145, 444-452.
- [23] M. Mukhtar, F.Y. Hagos, A.R.A. Aziz, A.A. Abdullah and Z.A.A. Karim, Combustion characteristics of tri-fuel (diesel-ethanol-biodiesel) emulsion fuels in CI engine with micro-explosion phenomenon attributes, *Fuel*, 2022, 312, 122933.
- [24] M.J. Troughton, *Handbook of plastics joining: A practical guide*, 2nd Ed., William Andrew Inc., NY, USA, 2018.
- [25] J. Barata, Modelling of biofuel droplets dispersion and evaporation, *Renewable Energy*, 2008, 33, 769-779.
- [26] S. Sundarapandian, Performance and emission analysis of biodiesel operated CI engine, *Journal of Engineering, Computing and Architecture*, 2007, 1(2), 1–22.
- [27] A. Zanier and HW. Jäckle, Heat capacity measurements of petroleum fuels by modulated DSC, *Thermochemica Acta*, 1996, 287(2), 203–212.
- [28] NIST Standard Reference Database Number 69, Chemistry webbook, Standard Reference Data Program, National Institute of Standards and Technology (NIST), 2016.
- [29] W.M. Haynes, *Handbook of chemistry and physics*, Taylor and Francis Group, Boca Raton, FL, USA, 2015–2016, pp. 7-9.
- [30] J.B. Heywood, *Internal combustion engine fundamentals*, McGraw-Hill Inc, NY, USA, 1988.
- [31] Z. Huang, H. Lu, D. Jiang, K. Zeng, B. Liu, J. Zhang and X. Wang, Combustion behaviors of a compression-ignition engine fuelled with diesel/methanol blends under various fuel delivery advance angles, *Bioresource Technology*, 2004, 95, 331-341.
- [32] F. Juric, Z. Petranovic, M. Vujanovic, T. Katrasnik, R. Vihar, X. Wang and N. Duic, Experimental and numerical investigation of injection timing and rail pressure impact on combustion characteristics, *Energy Conversion and Management*, 2019, 185, 730-739.
- [33] R. Payri, G. Bracho, J.A. Soriano, P. Fernández-Yáñez and O. Armas, Nozzle rate of injection estimation from hole to hole momentum flux data with different fossil and renewable fuels, *Fuel*, 2020, 279, 118404.



- [34] Z. Wang, S. Wu, Y. Huang, S. Huang, S. Shi, X. Cheng and R. Huang, Experimental investigation on spray, evaporation and combustion characteristics of ethanol-diesel, water-emulsified diesel and neat diesel fuels, *Fuel*, 2018, 231, 438-448.
- [35] A. M. Faik and Y. Zhang, Multicomponent fuel droplet combustion investigation using magnified high speed backlighting and shadowgraph imaging, *Fuel*, 2018, 221, 89-109.

การบำบัดฟอสฟอรัสในน้ำทิ้งโดยการตกตะกอนทางเคมีของน้ำด้วยอลูมิเนียมซัลเฟต

ชดาภรณ์ บุญแสนยศ¹ สิทธิชัย ใจขาน^{2*} ศิริประภา สุวรรณไตร¹ สุภาวดี พวงสันเทียะ¹ และ
นุกุล มงคล³

¹ วิทยาลัยแพทยศาสตร์และการสาธารณสุข, มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี

² กลุ่มวิชาสาธารณสุขศาสตร์, วิทยาลัยแพทยศาสตร์และการสาธารณสุข, มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี

³ สำนักงานบริหารกายภาพและสิ่งแวดล้อม, มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี

* ผู้ประสานงานเผยแพร่ (Corresponding Author), E-mail: sitthichai.c@ubu.ac.th

วันที่รับบทความ: 13 มกราคม 2566; วันที่ทบทวนบทความ: 29 มีนาคม 2566; วันที่ตอบรับบทความ: 16 มิถุนายน 2566

วันที่เผยแพร่ออนไลน์: 26 สิงหาคม 2566

บทคัดย่อ: งานวิจัยครั้งนี้เป็นงานวิจัยเชิงทดลอง (Experimental Research) มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการลดปริมาณฟอสฟอรัสในน้ำทิ้งของระบบบำบัดน้ำเสียมหาวิทยาลัยอุบลราชธานีโดยตกตะกอนทางเคมีของน้ำด้วยวิธีการจาร์เทสต์ (Jar Test) บรรจุน้ำจากบ่อบำบัดสุดท้ายของระบบบำบัดน้ำเสียแบบระบบเติมอากาศที่มีค่าฟอสฟอรัสเริ่มต้น 0.8 ± 0.0 mg/L สารสร้างตะกอน คือ อลูมิเนียมซัลเฟต (สารส้ม) ความเข้มข้น 20, 40, 60, 80 และ 100 mg/L ในถังปฏิกรณ์ปริมาตรใบละ 1 ลิตรต่อชุดการทดลอง กวนผสมสารเคมีด้วยเครื่องทดสอบการตกตะกอนแบบ 6 ใบกวน (ความเร็ว 100 rpm 1 นาที และ 30 rpm 15 นาที ตามลำดับ) ทดสอบหาความเข้มข้นของฟอสฟอรัสด้วยวิธี Aseorbic Acid Method ผลการศึกษาพบว่า ความเข้มข้นของสารละลายอลูมิเนียมซัลเฟต 80 mg/L สามารถทำให้ความเข้มข้นของฟอสฟอรัสเฉลี่ยหลังบำบัดเหลือ 0.002 ± 0.0 mg/L ประสิทธิภาพในการบำบัดฟอสฟอรัสเฉลี่ย 99.74 ± 0.0 % อาจพิจารณาใช้สารละลายอลูมิเนียมซัลเฟตที่ความเข้มข้น 80 – 100 mg/L เพื่อนำไปบำบัดน้ำเสีย เนื่องจากมีแนวโน้มที่ทำให้ความเข้มข้นของฟอสฟอรัสในแหล่งน้ำต่ำกว่าค่าวิกฤตและมีคุณภาพน้ำด้านการปนเปื้อนธาตุอาหารฟอสฟอรัสในระดับปกติ

คำสำคัญ: การบำบัดน้ำ; การตกตะกอนทางเคมี; ฟอสฟอรัส; ยูโทรฟิเคชัน

Treatment of Phosphorus in Wastewater by Coagulation with Aluminum Sulfate

Chadaphorn Boonsaenyot¹, Sitthichai Chaikhan^{2*}, Siraprapa Suwannatrai¹,
Supawadee Phuangsanthia¹ and Nukul Mongkol³

¹ College of Medicine and Public Health, Ubon Ratchathani University

² Public Health Sub Division, College of Medicine and Public Health, Ubon Ratchathani University

³ Office of Physical and Environmental Administration, Ubon Ratchathani University

* Corresponding author, E-mail: sitthichai.c@ubu.ac.th

Received: 16 January 2023; Revised: 29 March 2023; Accepted: 16 June 2023

Online Published: 26 August 2023

Abstract: This experimental research aimed to evaluate the effectiveness of chemical coagulation using aluminum sulfate (alum) in reducing phosphorus levels in wastewater from final pond of the aeration lagoon at Ubon Ratchathani University's treatment system. The initial phosphorus concentration was 0.8 ± 0.0 mg/L. The jar test method was utilized, with a 1 liter reactor containing 20, 40, 60, 80, and 100 mg/L of alum in each set of experiments. The chemicals were mixed using a 6-bladed jar test apparatus at speeds of 100 rpm for 1 minute and 30 rpm for 15 minutes. The phosphorus concentration was measured using the ascorbic acid method. Statistical analysis of the data included frequency, percentage, mean, and standard deviation. The results showed that an alum concentration of 80 mg/L resulted in an average phosphorus concentration of 0.002 ± 0.0 mg/L after treatment, with an average phosphorus treatment efficiency of $99.74 \pm 0.0\%$. Using an 80-100 mg/L solution of aluminum sulfate for wastewater treatment can reduce the phosphorus concentration to below critical levels, improving water quality by decreasing phosphorus nutrient contamination to normal levels.

Keywords: Wastewater treatment; Coagulation; Phosphorus; Eutrophication



1. บทนำ

แหล่งน้ำผิวดินเป็นแหล่งน้ำที่สามารถพบการเจือปนของฟอสฟอรัสตามธรรมชาติ ฟอสฟอรัสเป็นองค์ประกอบสำคัญที่มีบทบาทสำคัญในกระบวนการทางชีวภาพ รวมถึงการสังเคราะห์ดีเอ็นเอและการผลิตพลังงานในเซลล์ [1, 2] เป็นสารอาหารที่จำเป็นสำหรับพืชและสัตว์ และเป็นส่วนประกอบสำคัญของปุ๋ยที่ใช้ในการส่งเสริมการเจริญเติบโตของพืช [3] ปริมาณฟอสฟอรัสในแหล่งมีความจำเป็นต่อการเจริญเติบโตของสาหร่ายและพืชน้ำซึ่งทำหน้าที่เป็นฐานของห่วงโซ่อาหารในระบบนิเวศทางน้ำ กิจกรรมของมนุษย์ทำให้ฟอสฟอรัสปนเปื้อนในแหล่งน้ำได้ เช่น การใช้ปุ๋ยทางการเกษตร การใช้สารซักล้างที่มีสารโพลีฟอสเฟตเป็นองค์ประกอบในปริมาณสูง

หากระดับฟอสฟอรัสที่มากเกินไปในน้ำเสียอาจทำให้เกิดการบานของสาหร่ายที่เป็นอันตราย ซึ่งอาจนำไปสู่การสูญเสียออกซิเจนและการตายของปลาและสิ่งมีชีวิตในน้ำอื่นๆ [4] ฟอสฟอรัสยังสามารถจะไปกระตุ้นให้พืชสีเขียวในลำน้ำมีการสังเคราะห์แสงได้มากขึ้น และเจริญเติบโตแพร่พันธุ์ได้อย่างรวดเร็ว นำไปสู่กระบวนการยูโทรฟิเคชัน (Eutrophication) คือปรากฏการณ์ที่แหล่งน้ำมีธาตุอาหารอุดมสมบูรณ์ ทำให้สาหร่ายและพืชน้ำเจริญเติบโตอย่างรวดเร็ว [5] หรือการสะสมของแพลงตอนพืชและสาหร่ายในแหล่งน้ำ (Algae Bloom) [6] การสังเกตในกรณีสาหร่ายเกิดการสะสมในแหล่งน้ำ จะพบสีของแหล่งน้ำเปลี่ยนไปจากปกติโดยอาจพบได้หลายสีขึ้นกับชนิดของสาหร่าย เช่น เขียว น้ำตาล เหลืองหรือแดง เป็นต้น ผลกระทบจากแหล่งน้ำอุดมด้วยสารอาหารมากเกินไป ส่งผลให้พืชและสาหร่ายเติบโตมากเกินไปสามารถนำไปสู่ปัญหา

สิ่งแวดล้อมหลายอย่าง เช่น คุณภาพน้ำที่ลดลง การสูญเสียความหลากหลายทางชีวภาพ และเพิ่มความไวต่อการเติบโตของสาหร่ายที่เป็นอันตราย (Harmful Algal Blooms; HABs) เช่น สาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงิน (Cyanobacteria) ที่สร้างสารพิษ ได้แก่ *Microcystis Aeruginosa* *Cylindrospermopsis Raciborskii* *Anabaena* spp. และ *Oscillatoria* spp. เป็นต้น [7, 8]

ประเทศไทยพบการเกิดปรากฏการณ์ยูโทรฟิเคชันในหลายพื้นที่ กรณีตัวอย่างการเกิดยูโทรฟิเคชันในภาคตะวันออกเฉียงเหนือ เช่น อ่างเก็บน้ำเขื่อนลำตะคอง จังหวัดนครราชสีมา ที่พบสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงินเพิ่มปริมาณขึ้นอย่างรวดเร็วจนส่งผลกระทบต่อสัตว์น้ำและน้ำดิบที่ใช้ในการผลิตน้ำประปา หรือ กรณีในจังหวัดขอนแก่นที่มีแหล่งน้ำหลายแห่งที่เกิดปัญหา ยูโทรฟิเคชัน โดยเฉพาะที่หนองซอแง ตำบลศิลาอำเภอมือ จังหวัดขอนแก่น เคยเกิดการสะสมของแพลงก์ตอนพืช (สาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงิน) อย่างมาก โดยมีสาเหตุมาจากน้ำทิ้งชุมชน เนื่องจากการไม่มีระบบบำบัดน้ำเสีย หรือบริเวณแหล่งท่องเที่ยวที่ตกค้างโดนจังหวัดชัยภูมิ มีการพบปัญหาการสะสมของแพลงก์ตอนพืชด้วยเช่นกัน [9] เนื่องจากฟอสฟอรัสมักเป็นปัจจัยจำกัดสำหรับการเกิดยูโทรฟิเคชันในระบบน้ำจืดและไนโตรเจนเป็นปัจจัยจำกัดสำหรับน้ำทะเล [10] การศึกษาแนวโน้มของปรากฏการณ์ยูโทรฟิเคชันที่มีปัจจัยจากฟอสฟอรัสสามารถทำได้หลายวิธี เช่น การวิเคราะห์ฟอสฟอรัสในแหล่งน้ำ หากค่าวิกฤตของการปนเปื้อนฟอสฟอรัสในแหล่งน้ำมีค่า 0.007-0.03 mg/L และแหล่งน้ำธรรมชาติที่มีปริมาณฟอสเฟตสูงกว่า 0.01 mg/L จัดว่าแหล่งน้ำนั้นมีธาตุอาหารมากเกินไป ถ้ามีปริมาณฟอสฟอรัสสูงกว่า 0.6 mg/L แหล่งน้ำนั้นจะ



เป็นแหล่งน้ำที่มีมลภาวะสกปรกจากพื้นที่เกษตร [11, 12] หรือ การวิเคราะห์ปริมาณคลอโรฟิลล์เอ ซึ่งเป็นรงควัตถุสังเคราะห์แสงที่พบได้ในแพลงก์ตอนพืชที่ยังมีชีวิตทุกชนิดในแหล่งน้ำ จัดเป็นตัวชี้ถึงมวลชีวภาพของแพลงก์ตอนพืช หากแหล่งน้ำใดมีปริมาณคลอโรฟิลล์เอมากกว่า 10 ug/L จึงถือว่าเกิดปรากฏการณ์ยูโทรฟิเคชันในแหล่งน้ำ [13] อีกทั้งปริมาณคลอโรฟิลล์เอยังมีความสัมพันธ์ในเชิงบวกกับปริมาณฟอสฟอรัสรวมอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ [6]

ระบบบำบัดน้ำเสียของมหาวิทยาลัยอุบลราชธานี มีลักษณะเป็นระบบบำบัดแบบสระเติมอากาศ จำนวน 2 บ่อ ร่วมกับบ่อปรับเสถียร จำนวน 2 บ่อ ปัจจุบันมักพบปัญหาการเจริญเติบโตของสาหร่ายทำให้น้ำมีสีเขียวในช่วงฤดูร้อน ซึ่งอาจเกิดการการมีธาตุอาหารฟอสฟอรัสปนเปื้อนในน้ำเสียที่เข้าสู่ระบบบำบัดหรือสะสมในระบบบำบัดน้ำเสียแห่งนี้เป็นระยะเวลานาน ผู้วิจัยได้มีการดำเนินการศึกษาสภาพปัญหาเบื้องต้นพบว่า น้ำทิ้งมีสีเขียว ค่าสีของน้ำสูงมากกว่า 1,500 ADMI ความขุ่นสูงถึง 528 NTU และมีตะกอนสีเขียวลอยอยู่เหนือผิวน้ำ แต่ยังไม่ข้อมูลรายงานผลการตรวจวัดค่าปริมาณฟอสฟอรัสในน้ำเสียและน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดของระบบบำบัดน้ำเสียแห่งนี้ หากไม่มีการศึกษาแนวโน้มของการเกิดยูโทรฟิเคชันอาจนำไปสู่การขาดแผนรับมือกับผลกระทบจากน้ำทิ้งที่ระบายออกสู่ภายนอกได้ และการบำบัดน้ำที่ปนเปื้อนฟอสฟอรัสด้วยระบบปรับเสถียรแบบใช้อากาศ ซึ่งหลักการทางชีวภาพเพียงอย่างเดียว อาจไม่เพียงพอต่อการช่วยป้องกันผลกระทบของการปนเปื้อนฟอสฟอรัสในแหล่งน้ำที่อาจเกิดขึ้นได้ [14]

การกำจัดฟอสฟอรัสในน้ำเสียโดยกระบวนการตกตะกอนทางเคมีเป็นกระบวนการที่ใช้ในการกำจัดฟอสฟอรัสออกจากน้ำเสียได้ สารเคมีตกตะกอนหลายประเภทที่สามารถใช้ในการบำบัดฟอสฟอรัสในน้ำเสียได้แก่ อลูมิเนียมซัลเฟต (Aluminium Sulphate) หรือ สารส้ม เฟอริกคลอไรด์ (Ferric Chloride) และ โพลีอลูมิเนียมคลอไรด์ (Poly Aluminum Chloride; PAC) สารตกตะกอนเหล่านี้ทำงานโดยการทำให้ประจุบนอนุภาคในน้ำเสียเป็นกลาง ซึ่งทำให้อนุภาคจับตัวกันเป็นก้อนและเกิดการที่สารแขวนลอยรวมตัวกันเป็นลุ่มก้อนมีขนาดใหญ่ ส่งผลให้ปริมาณฟอสฟอรัสที่ละลายในน้ำลดลง [15-16]

ผู้วิจัยจึงสนใจที่จะศึกษาฟอสฟอรัสทั้งหมดที่อาจปนเปื้อนในน้ำทิ้งและผลการบำบัดฟอสฟอรัสในน้ำทิ้งจากระบบระบบบำบัดน้ำเสียมหาวิทยาลัยอุบลราชธานี โดยการตกตะกอนทางเคมีของน้ำด้วยอลูมิเนียมซัลเฟต เพื่อเป็นแนวทางในการนำไปใช้ประโยชน์ด้านการบำบัดธาตุอาหารที่ปนเปื้อนในน้ำเสียของมหาวิทยาลัยต่อไป

2. วิธีการดำเนินงานวิจัย/ทดลอง

2.1 การเก็บตัวอย่าง

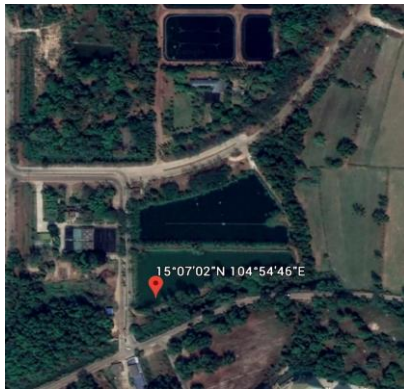
ผู้วิจัยเก็บตัวอย่างน้ำจากบ่อบำบัดน้ำสุดท้ายที่มีความกว้าง 135 m ยาว 50 m ลึก 1.80 m และมีปริมาตรความจุ 5,558 m³ ของระบบบำบัดน้ำเสียมหาวิทยาลัยอุบลราชธานี ใช้วิธีการเก็บตัวอย่างน้ำแบบจ้วง (Grab Sampling) ซึ่งเป็นวิธีตามประกาศกรมควบคุมมลพิษ เรื่อง วิธีการเก็บตัวอย่างน้ำทิ้ง ความถี่และระยะเวลาในการเก็บตัวอย่างน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมและนิคมอุตสาหกรรม พ.ศ. 2539 โดยจะ



เก็บตัวอย่างน้ำจากปากท่อระบายน้ำของบ่อบำบัดน้ำ
สุดท้ายก่อนระบายน้ำทิ้งสู่คลองสาธารณะ จำนวน 1 จุด
เก็บตัวอย่างน้ำในช่วงเวลา 8.00-9.00 น. โดยใช้อุปกรณ์
เก็บตัวอย่างน้ำ (Water sampler) ขนาด 1 ลิตร จนได้
ปริมาตรรวม 20 ลิตร เพื่อให้เพียงพอกับการทดลองใน
ขั้นตอนต่อไป ดังรูปที่ 1

2.2 วิธีการทดสอบ

2.2.1 การทดสอบปริมาณคลอโรฟิลล์เอ (สมการที่ 1)
ในน้ำที่มีชั้นตอนตามคู่มือ Standard Methods for
the Examination of Water and Wastewater Method
10200H Chlorophyll [17]



รูปที่ 1 จุดเก็บตัวอย่างน้ำของการวิจัย

$$\text{Chlorophyll a , (ug/L)} = \frac{26.7 \times (A664b - A665a) \times V_{\text{extract}}}{V_{\text{filtered}} \times L} \quad (1)$$

เมื่อ V_{extract} คือ ปริมาณของสารสกัด (mL) ,
 V_{filtered} คือ ปริมาณตัวอย่างที่กรองได้ (L) , L คือ ความ
ยาวทางเดินแสงหรือความกว้างของคิวเวต (cm) , 664b
คือ ค่าการดูดกลืนแสงของสารสกัดก่อนการทำให้เป็น
กรด และ 665a คือ ค่าการดูดกลืนแสงของสารสกัดหลัง
การทำให้เป็นกรด และการทดสอบคุณภาพน้ำทิ้งใน
พารามิเตอร์อื่น ๆ ด้วยวิธีการดังตารางที่ 1

การควบคุมคุณภาพของการทดสอบด้วยการ
ทดสอบอย่างน้อย 3 ซ้ำ โดยมีค่า Relative Difference
(RPD) ไม่เกินร้อยละ 10 ของทุกตัวอย่างในทุก
พารามิเตอร์ที่มีการทดสอบ

2.2.2 การทดสอบหาปริมาณสารอลูมิเนียมซัลเฟต
(สารส้ม) ที่เหมาะสมในการทดลองโดยใช้วิธีการจาร์
เทสต์ (Jar Test) โดยทำการตวงตัวอย่างน้ำลงใน
บีกเกอร์ขนาด 1000 mL (จำนวน 6 ใบ) โดยแบ่งเป็น 2
ชุดการทดลอง (ชุดการทดลองละ 3 ซ้ำ) ได้แก่ ชุด
ควบคุม (ไม่มีการเติมสารเคมี) จำนวน 1 ใบ และชุด
ทดลองที่มีการเติมสารละลายอลูมิเนียมซัลเฟต
(สารส้ม) ลงในบีกเกอร์ให้มีความเข้มข้น 20, 40, 60, 80
และ 100 mg/L ตามลำดับ (รวม 5 ใบ) แล้วจึงทำการ
ทดลองด้วยเครื่องทดสอบการตกตะกอน (Jar Test)
ยี่ห้อ WiZard รุ่น PLUS 6S แบบ 6 ใบกวน ด้วยอัตรา



การกวนผสมสารเคมีแบบเร็วที่ความเร็วรอบ 100 rpm 1 นาที และกวนกวนผสมสารเคมีแบบช้าที่ความเร็วรอบ 30 rpm 15 นาที และตั้งทิ้งไว้ให้ตกตะกอน 20 นาที

จากนั้นนำน้ำใสที่ได้จากการตกตะกอนไปวิเคราะห์หาค่าพารามิเตอร์ที่ต้องการตรวจวัด รูปที่ 2

ตารางที่ 1 วิธีการทดสอบคุณภาพน้ำทิ้งจำแนกรายพารามิเตอร์

พารามิเตอร์	วิธีการทดสอบ	ค่ามาตรฐาน
1. ความเป็นกรดและด่าง (pH)	Electrometric Method**	5.5 – 9.0
2. ค่าบีโอดี (BOD)	Azide Modification *	ไม่เกิน 20 mg/L
3. ค่าของแข็งละลายน้ำ (TDS)	Dried at 103-105 °C*	ไม่เกิน 500 mg/L
4. ของแข็งแขวนลอย (SS)	Dried at 103-105 °C*	ไม่เกิน 30 mg/L
5. น้ำมันและไขมัน (FOG)	Soxhlet Extraction *	ไม่เกิน 5 mg/L
6. ไนโตรเจน (TKN)	Kjeldahl Method	-
7. ฟอสฟอรัส (TP)	Ascorbic Acid Method*	ไม่เกิน 2 mg/L

* คือ ประยุกต์จากคู่มือ The Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater [17]

** คือ ประยุกต์จากคู่มือมาตรฐานวิธีวิเคราะห์ทดสอบมลพิษน้ำ [19]

ค่ามาตรฐาน คือ ค่ามาตรฐานควบคุมระบายน้ำทิ้งจากระบบน้ำเสียชุมชน [20]



รูปที่ 2 การทดลองด้วยเครื่องทดสอบการตกตะกอนแบบ 6 ใบกวน

2.3 การวิเคราะห์ข้อมูล

2.3.1 ค่าวิกฤตของธาตุอาหารอาหารฟอสฟอรัสต่อ การเกิดยูโทรฟิเคชันในน้ำผิวดิน กำหนดที่ช่วง 0.007-0.03 mg/L [11] และการเกิดยูโทรฟิเคชันในแหล่งน้ำ เทียบได้จากค่าคลอโรฟิลล์เอ > 20 ug/L [13]

2.3.2 ความเข้มข้นของฟอสฟอรัสก่อนและหลังการ บำบัดโดยเก็บตัวอย่างน้ำจากชุดควบคุมและชุดทดลอง ปริมาตร 50 mL เพื่อนำไปทดสอบด้วยวิธี Ascorbic Acid Method (Part 4500-part B,E) ตาม มาตรฐาน วิธี ท ส อ บ ข อ ง ค ู มื อ Standard Methods for the



Examination of Water and Wastewater 23rd edition [17] ความเข้มข้นของฟอสฟอรัสสามารถคำนวณได้ดังสมการที่ 2

$$P = \frac{w}{V} \quad (2)$$

เมื่อ P คือ ค่าความเข้มข้นของฟอสฟอรัส (mg/L) w คือ ปริมาณฟอสฟอรัสในน้ำตัวอย่าง (ug) และ V คือ ปริมาตรตัวอย่างทดสอบ (mL)

2.3.3 ประสิทธิภาพการบำบัดฟอสฟอรัสคำนวณจากความเปลี่ยนแปลงของความเข้มข้นฟอสฟอรัสในตัวอย่างทดสอบ ดังสมการที่ 3

$$Eff = \left(\frac{Pi - Pe}{Pi} \right) \times 100 \quad (3)$$

เมื่อ Eff คือ ประสิทธิภาพการบำบัดฟอสฟอรัส (ร้อยละ) Pi คือ ความเข้มข้นของฟอสฟอรัสก่อนบำบัด (mg/L) และ Pe คือ ความเข้มข้นของฟอสฟอรัสหลังบำบัด (mg/L)

2.3.4 Trophic State Index ที่ ย บ จ า ก Total Phosphorus หรือ TSI (TP) คือ ตัวแปรที่บ่งชี้ถึงสภาวะยูโทรฟิเคชันตามแนวคิดโรเบิร์ต คาร์ลสัน [18] ดังสมการที่ 4

$$TSI(TP) = 14.42 \ln(TP) + 4.15 \quad (4)$$

เมื่อ TP คือ ค่าเฉลี่ยของฟอสฟอรัสทั้งหมดในตัวอย่างน้ำ (ug/L)

3. ผลการวิจัย

3.1 ลักษณะทั่วไปของน้ำทิ้ง

ผลการตรวจวิเคราะห์คุณภาพน้ำจากบ่อบำบัดน้ำสุดท้ายของระบบบำบัดน้ำเสียมหาวิทยาลัยอุบลราชธานี เมื่อเทียบกับมาตรฐานควบคุมระบายน้ำทิ้งจากระบบน้ำเสีรวมชุมชนตามประกาศกระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม พ.ศ. 2535 [20] พบว่า pH, BOD, TDS, SS, FOG และ TKN ผ่านมาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้งน้ำทิ้ง แสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ลักษณะทั่วไปของน้ำทิ้งในบ่อสุดท้ายของระบบบำบัดน้ำเสีย

พารามิเตอร์	หน่วย	ผลทดสอบ	ค่ามาตรฐาน	คุณภาพน้ำ
pH	-	7.85 ± 0.15*	5.5 – 9.0	ผ่าน
BOD	mg/L	3.04 ± 0.75*	ไม่เกิน 20 mg/L	ผ่าน
TDS	mg/L	95.00 ± 7.07*	ไม่เกิน 500 mg/L	ผ่าน
SS	mg/L	52.50 ± 3.54*	ไม่เกิน 30 mg/L	ผ่าน
FOG	mg/L	3.30 ± 0.00*	ไม่เกิน 5 mg/L	ผ่าน
TKN	mg/L	0.64 ± 0.04	-	-
TP	mg/L	0.80 ± 0.00*	ไม่เกิน 2 mg/L	ผ่าน
Chlorophyll a	ug/L	366.67 ± 14.36**	ไม่เกิน 20 ug/L	เกิดยูโทรฟิเคชัน

* คือ ค่ามาตรฐานควบคุมระบายน้ำทิ้งจากระบบน้ำเสีรวมชุมชน [20]

** คือ การเกิดยูโทรฟิเคชันในแหล่งน้ำเทียบได้จากค่าคลอโรฟิลล์เอ [13]



แนวโน้มการเกิดยูโทรฟิเคชันในน้ำทิ้งจากบ่อบำบัดน้ำสุดท้ายของระบบบำบัดน้ำเสียมหาวิทยาลัยอุบลราชธานีเมื่อพิจารณาจากคลอโรฟิลล์เอ พบว่าแหล่งน้ำอาจมีการเกิดปรากฏการณ์ยูโทรฟิเคชันเนื่องจากมีปริมาณคลอโรฟิลล์เอ 366.67 ± 14.36 ug/L ซึ่งมากกว่าค่าวิกฤตของการปนเปื้อนคลอโรฟิลล์เอที่ 20 ug/L (ตารางที่ 2) จากทบทวนผลการศึกษารายงานของ พงศ์ศักดิ์ หนูพันธ์ และ รัชชา ชัยชนะ ที่ได้ประเมินว่าแหล่งน้ำที่มีคลอโรฟิลล์เอสูงกว่า 10 ug/L จะทำให้เกิดปรากฏการณ์ยูโทรฟิเคชันได้ [9] และสอดคล้องกับปัจจัยกำหนดต่อการสะสมของสาหร่ายเซลล์เดียว (ตารางที่ 3) โดยธรรมชาติแล้วแหล่งน้ำต่าง ๆ จะมีการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพ เคมี และชีวภาพตามระยะเวลา ผลจากกิจกรรมของมนุษย์ส่งผลให้ปัญหายูโทรฟิเคชันเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว บ่อยครั้ง รุนแรง และใช้ระยะเวลาในการบำบัดที่มากขึ้น แหล่งน้ำที่เกิดการสะสมของแพลงก์ตอนพืชจะมีปริมาณคลอโรฟิลล์มากกว่า 40 ug/L หากปริมาณคลอโรฟิลล์สูงกว่า 100 ug/L มีโอกาสสูงที่ปลาในแหล่งน้ำจะตายจากการขาดแคลนออกซิเจน [21] น้ำทิ้งของที่เก็บตัวอย่างจากบ่อบำบัดแห่งนี้มีคลอโรฟิลล์เอ 366.67 ± 14.36 ug/L อยู่ในระดับการเกิดยูโทรฟิเคชันที่มีสถานะเป็น Hypertrophic จึงอาจมีผลให้ลักษณะของน้ำเป็นสีเขียวดังที่ปรากฏในบ่อบำบัดสุดท้ายของระบบบำบัดน้ำเสีย (รูปที่ 1)

การปนเปื้อนฟอสฟอรัสในน้ำทิ้งมีค่า 0.802 ± 0.000 mg/L (ตารางที่ 3) ซึ่งอยู่ระดับไม่เกินมาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้งจากระบบบำบัดน้ำเสียรวมของชุมชน ที่กำหนดค่าปริมาณฟอสฟอรัสไว้ไม่เกิน 2.0 mg/L [20] แต่หลายประเทศในทวีปยุโรป

และออสเตรเลียกำหนดค่ามาตรฐานไว้ต่ำกว่า 0.2 mg/L สำหรับสหรัฐอเมริกาได้กำหนดปริมาณขั้นต่ำของธาตุอาหารฟอสฟอรัสและไนโตรเจนในแหล่งน้ำไว้ที่ 0.1 mg/L และ 1.0 mg/L ตามลำดับ [22] ซึ่งเป็นค่าที่สูงกว่าช่วงของค่าวิกฤตของธาตุอาหารต่อการเกิดยูโทรฟิเคชันที่พิจารณาจากปริมาณฟอสฟอรัสในแหล่งน้ำ (เกินค่าวิกฤตที่ 0.007-0.030 mg/L) แหล่งน้ำนี้มีโอกาสที่จะจัดเป็นแหล่งน้ำที่ปนเปื้อนมีธาตุอาหารมากเกินไป เนื่องจากมีความเข้มข้นของฟอสฟอรัสสูงกว่า 0.6 mg/L และมีค่า TSI(TP) มากกว่า 70 จัดว่าคุณภาพน้ำด้านการปนเปื้อนของธาตุอาหารฟอสฟอรัสอยู่ในระดับ Hypereutrophic [10-11] จึงอาจทำให้แหล่งน้ำนี้อยู่ในภาวะของการเกิดยูโทรฟิเคชันดังที่น้ำมีลักษณะสีเขียวปรากฏและมีสาหร่ายขนาดเล็กแขวนลอยอยู่ในน้ำทิ้ง ระบบบำบัดน้ำเสียของมหาวิทยาลัยอุบลราชธานีมีกระบวนการบำบัดหลักที่สำคัญ คือ การบำบัดแบบบ่อเติมอากาศ (Aerated Lagoon) จึงอาจไม่เพียงพอที่จะกำจัดฟอสฟอรัสที่เป็นธาตุอาหารของสาหร่ายเซลล์เดียวที่มีในน้ำทิ้งจากบ่อบำบัดน้ำสุดท้ายได้ ทั้งนี้การสะสมของธาตุอาหารในแหล่งน้ำเป็นระยะเวลาอันอาจนำไปสู่การสูญเสียออกซิเจนและการตายของสิ่งมีชีวิตในน้ำได้ [4]

การควบคุมคุณภาพน้ำทิ้งจึงควรควบคุมสารปนเปื้อนและธาตุอาหารในน้ำให้อยู่ระดับต่ำ โดยจำกัดสัดส่วนธาตุอาหารไนโตรเจนต่อฟอสฟอรัสในแหล่งน้ำ เช่น การกำจัดไนโตรเจนโดยใช้กระบวนการทางกายภาพ/เคมี ได้แก่ การเติมคลอรีน (Chlorination) การแลกเปลี่ยนประจุ (Ion Exchange) และการเป่าอากาศ (Air Stripping) ส่วนการกำจัดฟอสฟอรัสด้วยกระบวนการบำบัดทางเคมีนั้นมีประสิทธิภาพสูงแต่มี



ค่าใช้จ่ายสูงเช่นเดียวกัน สารเคมีที่มีนิยมนำมาใช้โดยทั่วไป ได้แก่ ปูนขาว (CaO) สารประกอบเหล็กคลอไรด์ (FeCl₃) และอลูมิเนียมซัลเฟต (Aluminum Sulfate)

3.2 ประสิทธิภาพการบำบัดฟอสฟอรัส

การทดลองเพื่อลดฟอสฟอรัสในน้ำทิ้งโดยการตกตะกอนทางเคมีของน้ำทิ้งด้วยอลูมิเนียมซัลเฟต (สารส้ม) โดยใช้เครื่องทดสอบการตกตะกอนแบบ 6 ใบ กวน พบว่า ชุดควบคุม (น้ำทิ้งที่ไม่มีการเติมสารเคมี) มีค่าความเข้มข้นฟอสฟอรัสเท่ากับ 0.802 ± 0.000 mg/L ชุดทดลองที่เติมสารละลายอลูมิเนียมซัลเฟต เติมลงในถังให้มีความเข้มข้น 20, 40, 60, 80 และ 100 mg/L มีค่าความเข้มข้นฟอสฟอรัสระหว่าง 0.013 - 0.360 mg/L ตามลำดับ (ตารางที่ 1) ความเข้มข้นสารละลายอลูมิเนียมซัลเฟต 80 mg/L สามารถทำให้ค่าเฉลี่ยความเข้มข้นของฟอสฟอรัสหลังบำบัดมีค่าต่ำที่สุด คือ 0.002 ± 0.00 mg/L (ตารางที่ 3)

การทดลองบำบัดฟอสฟอรัสของน้ำจากบ่อบำบัดน้ำสุดท้ายของมหาวิทยาลัย พบว่า ชุดควบคุมนั้นค่าความเข้มข้นฟอสฟอรัสไม่ลดลง (ไม่มีประสิทธิภาพในการบำบัด) ในขณะที่ชุดทดลองที่บำบัดน้ำโดยเติมสารละลายอลูมิเนียมซัลเฟตความเข้มข้น 20, 40, 60, 80 และ 100 mg/L มีค่าประสิทธิภาพการบำบัดฟอสฟอรัสมีค่าเฉลี่ยระหว่าง 55.12 - 99.74 % ความเข้มข้นของสารละลายอลูมิเนียมซัลเฟต 80 mg/L มีประสิทธิภาพในการบำบัดฟอสฟอรัสสูงที่สุด (รูปที่ 3) สอดคล้องกับงานวิจัยของเอกกัญญา ขวนชวยทรัพย์ ที่ได้ทำการศึกษากำจัดไนโตรเจนและฟอสฟอรัสในน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดจากเติมอากาศของน้ำทิ้งอาคารที่ทำงานกองทัพอากาศดอนเมือง โดยการตกตะกอนทางเคมีโดยเติมสารละลายอลูมิเนียมซัลเฟต พบว่า

มีประสิทธิภาพในการกำจัดฟอสฟอรัสได้มากกว่า 90% (ใช้สารเคมีเข้มข้น 250 มิลลิกรัมต่อลิตร) และยังมีงานวิจัยของกมลชนก กองกุลที่ได้ศึกษาความสามารถของเถ้าลอยลิกไนต์เปรียบเทียบกับสารละลายอลูมิเนียมซัลเฟตต่อการบำบัดน้ำเสียชุมชนด้วยกระบวนการสร้างตะกอนพบว่า สารอลูมิเนียมซัลเฟตความเข้มข้น 1.0 - 12.0 mg/L มีประสิทธิภาพในการกำจัดฟอสฟอรัสได้มากกว่า 80% [23-24] จะเห็นได้ว่าสารอลูมิเนียมซัลเฟตมีประสิทธิภาพในการกำจัดฟอสฟอรัสสูง เมื่อเติมอลูมิเนียมซัลเฟตลงในน้ำแล้วเกิดกระบวนการกวนเพื่อผสมสารเคมี ไอออนประจุบวกของสารจะเกิดการแตกตัวเพื่อไปลดค่าศักยภาพซีต้าที่เป็นลบ ทำให้อนุภาคเกิดการจับตัวกันเป็นตะกอน อาศัยการกวนอย่างแรงและเร็วเพื่อให้สารเคมีกระจายอย่างทั่วถึง และอนุภาคมีโอกาสชนกันมากขึ้น [25] และสามารถจับตัวกับฟอสฟอรัสที่อยู่ในรูปของสารประกอบฟอสเฟต จากนั้นจะทำให้เกิดตะกอนของอลูมิเนียมฟอสเฟตซึ่งเป็นของแข็ง ส่งผลให้ปริมาณฟอสฟอรัสในน้ำลดลง แต่ตะกอนที่รวมตัวกันต้องนำไปบำบัดหรือกำจัดต่อไป [11-12] เมื่อพิจารณาผลการวิเคราะห์ค่า TSI(TP) พบว่า การใช้สารละลายอลูมิเนียมซัลเฟตที่ความเข้มข้น 100 mg/L สามารถลดระดับคุณภาพน้ำด้านการปนเปื้อนจากธาตุอาหารฟอสฟอรัสในน้ำให้อยู่ในระดับปกติ (Mesotrophic) และความเข้มข้น 80 mg/L คือ ปริมาณที่เหมาะสม (Optimum Dose) ที่สามารถทำให้ปริมาณฟอสฟอรัสอยู่ในระดับต่ำ (Oligotrophic) สอดคล้องกับหลักการบำบัดน้ำด้วยการตกตะกอนโดยใช้สารเคมี (Coagulation) ซึ่งจะช่วยลดปัญหาการสะสมของแพลงตอนพืชและสาหร่ายในแหล่งน้ำได้ [21]

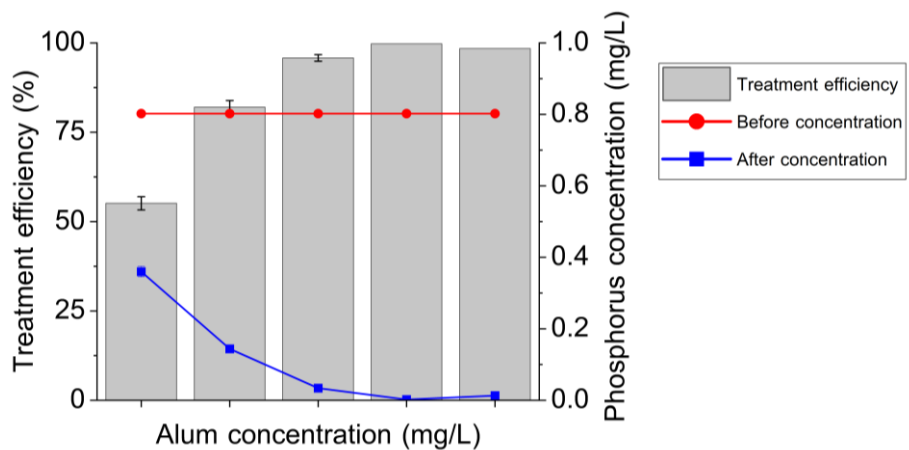


ตารางที่ 3 ปริมาณฟอสฟอรัสของน้ำหลังบำบัดด้วยสารละลายอลูมิเนียมซัลเฟต

Aluminum sulfate (mg/L)	Phosphorus concentration (mg/L)	Removal efficiency (%)	TSI (TP)	Classification
0	0.802 ± 0.000*	-	100.54	Hypereutrophic
20	0.360 ± 0.015*	55.12 ± 1.86	89.03	Hypereutrophic
40	0.144 ± 0.007*	82.02 ± 1.85	75.81	Hypereutrophic
60	0.034 ± 0.000*	95.80 ± 0.93	55.00	Eutrophic
80	0.002 ± 0.000*	99.74 ± 0.00	14.15	Origotrophic
100	0.013 ± 0.000*	98.42 ± 0.00	41.14	Mesotrophic

* คือ ผ่านมาตรฐานควบคุมระบายนํ้าทิ้งจากระบบนํ้าเสียรวมชุมชนที่ 2 mg/L [20]

TSI(TP) คือ Trophic State Index เทียบจาก Total phosphorus [18]



รูปที่ 3 ประสิทธิภาพการบำบัดฟอสฟอรัสด้วยสารละลายอลูมิเนียมซัลเฟต

ผลการศึกษาครั้งนี้สอดคล้องกับหลายจากงานวิจัยข้างต้นที่พบว่าควรใช้ความเข้มข้นของอลูมิเนียมซัลเฟตที่มากขึ้นเมื่อการปนเปื้อนของฟอสฟอรัสในแหล่งน้ำสูงขึ้น อย่างไรก็ตาม ปริมาณสารที่มากเกินไปอาจทำให้ความเข้มข้นของอลูมิเนียมในน้ำที่ผ่านการบำบัดเพิ่มขึ้น ซึ่งอาจส่งผลเสียต่อสิ่งมีชีวิตในน้ำ ดังนั้นจึงเป็นเรื่องสำคัญที่จะต้องควบคุมปริมาณสารเคมีที่ใช้ให้เหมาะสมกับลักษณะของแหล่งน้ำ รวมถึงพิจารณา

การปรับค่าความเป็นกรด-ด่างตามความเข้มข้นของสารเคมี เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการบำบัดให้สูงขึ้น [26]

ข้อจำกัดของการศึกษาในครั้งนี้ คือ การทดสอบปริมาณไนโตรเจนทั้งหมดและคลอโรฟิลล์ เอ ในแหล่งน้ำทั้งก่อนและหลังการบำบัด ผู้วิจัยจึงคาดการณ์สถานการณ์ปนเปื้อนธาตุอาหารและคุณภาพทางโภชนาการของแหล่งน้ำจากค่าฟอสฟอรัสทั้งหมด



4. บทสรุป

น้ำทิ้งจากพื้นที่วิจัยในครั้งนี้มีโอกาสเกิดยูโทรฟิเคชันเนื่องจากปริมาณคลอโรฟิลล์และธาตุอาหารฟอสฟอรัสที่สูงเกินค่าวิกฤต เมื่อทำการบำบัดน้ำทิ้งด้วยการตกตะกอนทางเคมีด้วยการเติมสารอลูมิเนียมซัลเฟตโดยเครื่องทดสอบจาร์เทสต์ พบว่า วิธีการบำบัดนี้สามารถลดปริมาณฟอสฟอรัสในน้ำทิ้งของระบบบำบัดน้ำเสียได้ โดยปริมาณสารละลายอลูมิเนียมซัลเฟตเข้มข้น 80 mg/L ทำให้น้ำทิ้งหลังการบำบัดมีความเข้มข้นของฟอสฟอรัสลดลงจาก 0.802 ± 0.000 mg/L เหลือ 0.002 ± 0.000 mg/L มีประสิทธิภาพในการกำจัดฟอสฟอรัส 99.74 ± 0.00 % และทำให้คุณภาพน้ำอยู่ในระดับ Oligotrophic มีสารอาหารของพีชน้อย ช่วยควบคุมการเพิ่มจำนวนหรือการเจริญเติบโตสาหร่ายในแหล่งน้ำได้ แหล่งน้ำที่ทำการศึกษาในครั้งนี้มีค่าปริมาณฟอสฟอรัสอยู่ในช่วงของค่าวิกฤตและมีโอกาสที่จะจัดเป็นแหล่งน้ำที่ปนเปื้อนมีธาตุอาหารมากเกินไป จึงควรมีการวางแผนเพื่อบำบัดธาตุอาหารฟอสฟอรัส อาจพิจารณาเลือกใช้สารละลายอลูมิเนียมซัลเฟตที่มีความเข้มข้น 80 – 100 mg/L เพื่อนำไปบำบัดน้ำเสียเนื่องจากมีแนวโน้มที่ทำให้ความเข้มข้นของฟอสฟอรัสในแหล่งน้ำให้มีค่าต่ำกว่าค่าวิกฤตและมีคุณภาพน้ำด้านสารอาหารของพีชอยู่ในระดับปกติได้

5. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณสำนักงานบริหารกายภาพและสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี ที่อำนวยความสะดวกในการเก็บตัวอย่างน้ำ และขอขอบคุณวิทยาลัยแพทยศาสตร์และการสาธารณสุข มหาวิทยาลัยอุบลราชธานีที่ได้ให้ความอนุเคราะห์สถานที่และเครื่องมือทดสอบทางห้องปฏิบัติการ

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] <https://www.epa.gov/nps/agriculture>. (Accessed on 7 January 2023)
- [2] P.J. White and P.H. Brown, Plant nutrition for sustainable development and global health, *Annals of Botany*, 2010, 105, 1073-1080.
- [3] <https://www.epa.gov/agriculture/agriculture-nutrient-management-and-fertilizer#Biosolids>. (Accessed on 9 January 2023)
- [4] <https://www.epa.gov/nutrientpollution/effects-dead-zones-and-harmful-algal-blooms>. (Accessed on 9 January 2023)
- [5] M. Zamparas and I. Zacharias, Restoration of eutrophic freshwater by managing internal nutrient loads A review, *Science of the Total Environment*, 2014, 496, 551-562.
- [6] W. Katasaenee, A. Limsakul, A. Kammuang and W. Paengkaew, Test kit development for freshwater eutrophication monitoring, *Thai Environmental Engineering Journal*, 2014, 28(2-3), 41-51. (in Thai)
- [7] <https://www.oceanservice.noaa.gov/facts/eutrophication.html>. (Accessed on 9 January 2023)
- [8] M. Scheffer, S. Rinaldi, A. Gragnani, L.R. Mur and E.H. Nes, On the dominance of filamentous cyanobacteria in shallow, turbid lakes, *Ecology*, 1997, 78, 272-282.



- [9] P. Noophan and R. Chaichana, Effects of nitrogen and phosphorus on eutrophication in water bodies and nitrogen and phosphorus removal, *Kasetsart Engineering Journal*, 2014, 27(88), 57-67. (in Thai)
- [10] R.W. Howarth, R. Marino, J. Lane and J.J. Cole, Nitrogen fixation in freshwater, estuarine, and marine ecosystems. 1. Rates and importance, *Limnology*, 1988, 27(88), 669-687.
- [11] N. Sananawin and J. Toritthi, Eutrophication. *Journal of Faculty of Physical Education*, 2012, 15, 154-159. (in Thai)
- [12] https://www4.fisheries.go.th/local/index.php/main/view_announce/9/8055. (Accessed on 23 March 2023)
- [13] <https://www.epa.gov/sites/default/files/2020-05/documents/draft-ambient-wqc-recommendations-lakes-2020.pdf>. (Accessed on 23 March 2023)
- [14] N. Suna and K. Tungkananuruk, Removal of various phosphorus forms by treatment ponds of stabilization system, The 11th KU-KPS National Conference, Proceeding, 2014, 222-230. (in Thai)
- [15] A.Y.A. Mohamed, A. Siggins, M.G. Healy, D. ÓhUallacháin, O. Fenton and P. Tuohy, Appraisal and ranking of poly-aluminium chloride, ferric chloride and alum for the treatment of dairy soiled water, *Journal of Environmental Management*, 2020, 267, 110567.
- [16] J.-Q. Jiang and N.J.D. Graham, Pre-polymerised inorganic coagulants and phosphorus removal by coagulation - A review. *Water SA*, 1998, 24(3), 237-244.
- [17] APHA, AWWA and WEF, *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*, 23rd Ed., American Public Health Association, Washington DC, USA, 2017.
- [18] G. Gibson, R. Carlson, J. Simpson, E. Smeltzer, J. Gerritson, S. Chapra, S. Heiskary, J. Jones and R. Kennedy, *Nutrient criteria technical guidance manual lakes and reservoirs*, United States Environmental Protection Agency, DC, USA, 2000.
- [19] Department of Industrial Works Ministry of Industry, *Standards for testing analytical methods for water pollution*, 3rd Ed., Department of Industrial Works Ministry of Industry, Bangkok, Thailand, 2017. (in Thai)



- [20] http://cac.pcd.go.th/images/ptechResource/Knowledge/EnvironmentLaw/CommunityTreatmentSystem/3_79_water_std.pdf. (Accessed on 10 January 2023). (in Thai)
- [21] Florida Lake Watch, A beginner's guide to water management - nutrients, University of Florida, Florida, USA, 2000.
- [22] <https://www.epa.gov/sites/production/files/2014-08/documents/criteria-nutrient-ecoregions-sumtable.pdf>. (Accessed on 9 January 2023)
- [23] E. Khonkhaysap, Nitrogen and phosphorus removal from aerated lagoon effluent by chemical precipitation, Thesis, Kasetsart University, Thailand, 1998. (in Thai)
- [24] R. Satetaboon, P. Tantriratna and R. Junggoth, Factors and efficiency of removal phosphorus from washing wastewater by coagulation using alum, *KKU Journal for Public Health Research*, 2020, 13(4), 23-30. (in Thai)
- [25] D. Arrisujaya, N. Ariesta and M. Maslahat, Removal of chromium (VI) from aqueous solutions using *Diospyros discolor* seed activated with nitric acid: Isotherm and kinetic studies, *Water Science and Technology*, 2019, 79(6), 1214–1221.

การพัฒนาส่วนผสมของเนื้อดินต้านเคียวินและกากกาแฟดงมะไฟเพื่อสร้างฟิลเตอร์เซรามิกส์สำหรับดริปปากาแฟดงมะไฟ

อ่อนลมี กมลอินทร์*

สาขาวิชานวัตกรรมเซรามิกส์, คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม, มหาวิทยาลัยราชภัฏนครราชสีมา

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

วันที่รับบทความ: 28 มีนาคม 2566; วันที่ทบทวนบทความ: 13 มิถุนายน 2566; วันที่ตอบรับบทความ: 19 มิถุนายน 2566

วันที่เผยแพร่ออนไลน์: 26 สิงหาคม 2566

บทคัดย่อ: งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาอิทธิพลของการเติมกากกาแฟดงมะไฟต่ออัตราการไหลของน้ำร้อนผ่านฟิลเตอร์เซรามิกส์ ซึ่งในการทดลองจะเติมกากกาแฟในปริมาณ ร้อยละ 20, 30 และ 40 โดยน้ำหนัก (โดยกำหนดให้เป็นตัวอย่าง DKS-3, DKS-4 และ DKS-5 ตามลำดับ) และผสมกับดินเหนียวต้านเคียวิน ดินขาวลำปาง ททราย และเถ้าไม้รวมต้านเคียวิน โดยนำมาขึ้นรูปฟิลเตอร์เซรามิกส์ด้วยเทคนิคการขึ้นรูปด้วยไบมิด (Jigger) และเผาผนึกที่อุณหภูมิ 1,250°C ผลการทดลองพบว่า มีลักษณะทางกายภาพตามนี้: มีค่าความพรุนตัวปรากฏ อยู่ในช่วง ร้อยละ 48.45 - 55.54 การดูดซึมน้ำ อยู่ในช่วง ร้อยละ 36.30 - 48.48 ความหนาแน่น อยู่ในช่วง 1.15 - 1.33 g/cm³ และความถ่วงจำเพาะ อยู่ในช่วง 2.51 - 2.59 ซึ่งตัวอย่าง DKS-4 มีสมบัติทางกายภาพที่มีความเหมาะสมสำหรับนำไปทำฟิลเตอร์ จากนั้นทดสอบสมบัติทางกายภาพด้วยเทคนิค XRD พบว่าเกิดเฟสของ Cristobalite Silica และ Orthorhombic Mullite ในฟิลเตอร์เซรามิกส์ (DKS-4) และวิเคราะห์ลักษณะของรูพรุนที่เกิดขึ้นในฟิลเตอร์เซรามิกส์ด้วย SEM พบว่าเกิดรูพรุนขนาดเล็กจำนวนมากในโครงสร้างจากการเผาไหม้และหายไปของกากกาแฟและส่งผลต่ออัตราการไหลของน้ำร้อนผ่านฟิลเตอร์ เนื่องจากการเติมกากกาแฟเพิ่มขึ้นจะมีผลทำให้อัตราการไหลของน้ำร้อนผ่านฟิลเตอร์สูงขึ้นและมีค่าสูงสุด 2.30 มิลลิลิตรต่อวินาที ซึ่งนำฟิลเตอร์ไปใช้ในการชงกาแฟแบบดริปแทนการใช้กระดาษกรองเป็นการช่วยลดภาวะโลกร้อนได้

คำสำคัญ: ฟิลเตอร์เซรามิกส์; เนื้อดินต้านเคียวิน; กากกาแฟดงมะไฟ; กาแฟแบบดริป; ความพรุนตัว

Development of a Mixture of Dan Kwian Clay Body and Dong Ma Fai Coffee Grounds to Create a Ceramic Filter for Dong Ma Fai Coffee Drip

Onlamee Kamon-in *

School of Innovation Ceramic, Faculty of Industrial Technology, Nakhon Ratchasima Rajabhat University

* Corresponding author, E-mail: onlamee.k@nrru.ac.th

Received: 28 March 2023; Revised: 13 June 2023; Accepted: 19 June 2023

Online Published: 26 August 2023

Abstract: This research aims to study the influence of added Dongmafi coffee grounds on the flow rate of hot water through the ceramic filter. In the experiment, coffee grounds were added in amounts of 20, 30, and 40% by weight (the samples were DKS-3, DKS-4, and DKS-5, respectively) and mixed with Dan Kwian clay, Lampang kaolin clay, sand, and Dan Kwian wood ash. The ceramic filter was formed by the jigger technique and sintered at 1,250°C. The results revealed the following physical characteristics: apparent porosity in the range of 48.45–55.54%, water absorption in the range of 36.30–48.48%, density in the range of 1.15–1.33 g/cm³, and specific gravity in the range of 2.51–2.59. The DKS-4 sample has physical properties that are suitable for filtering. Then, physical properties were examined by the XRD technique. It was found that cristobalite silica and orthorhombic mullite phases were formed in the ceramic filter (DKS-4). The porosity characteristics of the ceramic filters were analyzed by SEM. It was found that many small pores were formed in the structure from the combustion and disappearance of the coffee grounds. And affecting the flow rate of hot water through the filter because the addition of coffee grounds will increase the flow rate of hot water through the filter, which has a maximum value of 2.30 ml/s. Which uses filters to make drip coffee instead of paper filters, helping to reduce global warming.

Keywords: Ceramic Filter; Dan Kwian clay body; Dong Ma Fai coffee grounds; coffee drip; Porosity



1. บทนำ

กาแฟดมะไฟเป็นกาแฟสายพันธุ์อาราบิก้า ปปลูกที่หมู่บ้านดงมะไฟ ตำบลมะเกลือใหม่ อำเภอสูงเนิน จังหวัดนครราชสีมา มีลักษณะเด่นคือเป็นกาแฟที่มีคาเฟอีนต่ำ ไม่เกินร้อยละ 1 ของน้ำหนัก และนิยมนำมาชงกาแฟแบบดริป โดยอุปกรณ์หลักในการดริปคือตัวกรองกาแฟหรือฟิลเตอร์ ซึ่งตัวกรองกาแฟนั้นทำมาจากวัสดุที่หลากหลาย เช่น ตัวกรองแบบโลหะจะมีรูของตัวกรองที่มีขนาดใหญ่ทำให้น้ำมันกาแฟจากกาแฟสามารถสกัดออกมาได้เยอะกว่าวัสดุอื่น แต่จะมีข้อเสียคือ มีผงกาแฟเล็ก ๆ ปนอยู่ในแก้ว กาแฟที่ได้จึงมีรสชาติกลมกล่อม แต่มีความขุ่นมากกว่าแบบตัวกรองกระดาษ ส่วนตัวกรองที่เป็นกระดาษจะมีรูขนาดเล็กกว่าตัวกรองแบบโลหะทำให้สามารถกรองผงกาแฟละเอียดได้ดีกว่า กาแฟที่ได้จึงใสและรสชาติชัดเจนกว่าตัวกรองแบบโลหะ นอกจากนี้ยังมีตัวกรองแบบผ้าซึ่งมีขนาดรูที่เล็กเหมือนกันกับการใช้ตัวกรองแบบกระดาษ จึงทำให้อาหารที่ดีกว่าแบบกระดาษ เพราะจะไม่มีการกรองกระดาษปนเปื้อนกับกาแฟดริป เนื่องจากปัญหาการใช้กระดาษกรองในการดริปกาแฟทำให้เกิดขยะจากการกรองที่ใช้แล้วทิ้ง ซึ่งอาจทำให้นักดริปกาแฟไม่สามารถดริปกาแฟได้เมื่อกระดาษกรองหมด ดังนั้น การสร้างฟิลเตอร์เซรามิกส์จากเนื้อดินด่านเกวียนสำหรับใช้ในการดริปกาแฟซึ่งสามารถใช้ซ้ำได้หลายครั้งจึงเป็นการช่วยลดการใช้กระดาษ และลดภาวะโลกร้อน

เครื่องปั้นดินเผาด่านเกวียน อำเภอโชคชัย จังหวัดนครราชสีมา สามารถสร้างรายได้ให้กับชุมชน เครื่องปั้นดินเผาและชุมชนใกล้เคียงได้เป็นอย่างดี โดยมีการส่งออกทั้งในประเทศและต่างประเทศ อาทิ ญี่ปุ่น อเมริกา และแถบประเทศยุโรป ผลิตภัณฑ์

เครื่องปั้นดินเผาด่านเกวียนมีเอกลักษณ์เฉพาะตัว และไม่สามารถผลิตได้ในที่อื่น ๆ เพราะมีแหล่งวัตถุดิบหลักคือ ดินที่ได้จากริมฝั่งแม่น้ำมูลซึ่งไหลผ่านบริเวณชุมชนบ้านด่านเกวียน ทำให้ลักษณะของดิน ริมฝั่งแม่น้ำจะมีความเหนียวเป็นพิเศษ และเมื่อเผาแล้วจะได้ผลิตภัณฑ์เนื้อละเอียดสีแดงเป็นเอกลักษณ์เฉพาะของดินด่านเกวียน สีแดงของดินด่านเกวียนหลังเผาเกิดจากแร่เหล็กที่มีปริมาณมากอยู่ในดินเมื่อเผาที่อุณหภูมิประมาณ 1,000 องศาเซลเซียส แต่เมื่อเผาที่อุณหภูมิสูงขึ้นประมาณ 1,200 องศาเซลเซียส จะให้สีดำ มีนงาซึ่งเป็นเอกลักษณ์อีกรูปแบบหนึ่งสำหรับผลิตภัณฑ์ด่านเกวียน ผลิตภัณฑ์โดยส่วนใหญ่จะเป็นของใช้ตกแต่งสวน เช่น กระถางต้นไม้ โถงน้ำ ตุ๊กตา และรูปสัตว์ต่างๆ เป็นต้น [1]

เซรามิกพอร์น (Porous Ceramic) เป็นวัสดุที่มีการนำคุณสมบัติความพรุนตัวใช้ประโยชน์อย่างหลากหลาย และมีความสำคัญต่ออุตสาหกรรมหลายชนิด สำหรับเซรามิกพอร์นโดยทั่วไปแบ่งได้เป็น 2 ชนิด ได้แก่ เซรามิกพอร์นชนิดที่รูพรุนเรียงตัวกันใน 2 มิติ หรือที่เรียกกันว่า เซรามิกรวงผึ้ง และชนิดที่มีรูพรุนกระจายใน 3 มิติ หรือเซรามิกโฟม การใช้งานสามารถนำมาเป็นวัสดุก่อสร้าง เช่น อิฐมวลเบา หรือวัสดุสำหรับรับแรงกระแทก เนื่องจากวัสดุประเภทนี้จะมีน้ำหนักเบา เซรามิกพอร์นชนิดโฟมที่มีรูพรุนต่อเนื่อง มีการซึมผ่านสูง มักใช้เป็นตัวกรอง เช่น วัสดุกรองสำหรับผลิตน้ำดื่ม เซรามิกพอร์นที่มีพื้นที่ผิวมากเหมาะกับการนำไปใช้ในการแลกเปลี่ยนไอออนหรือคะตะลิสต์ในอุตสาหกรรมเคมีและยานยนต์ เซรามิกพอร์นยังสามารถใช้ในการเกษตร เนื่องจาก รูพรุนในเนื้อวัสดุมากทำให้สามารถกักเก็บความชื้นได้สูง เมื่อดินมีความชื้นน้อยลง



โมเลกุลของน้ำจะค่อยๆซึมผ่านรูพรุนออกมา ทำให้ดินคงความชุ่มชื้นได้นานขึ้นหรือนำไปใช้เป็นวัสดุดูดซับเสียง ฉนวนความร้อน เป็นต้น เซรามิกส์ที่มีรูพรุนต่อเนื่องและกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอแบบ 3 มิติ จะมีความพรุนตัวสูง มีความหนาแน่นต่ำ นำความร้อนต่ำ และทนต่อการกัดกร่อนต่อสารเคมีสูง จึงสามารถนำไปใช้งานได้ในหลากหลายสาขา [2] สำหรับตัวฟิลเตอร์เซรามิกส์ที่ใช้สำหรับในการกรองน้ำส่วนใหญ่จะทำมาจากดินเหนียวและผสมวัสดุที่ช่วยในการสร้างรูพรุน เพื่อให้เกิดเซรามิกส์ที่มีความพรุนตัวสูง วิธีการที่จะทำให้ได้ เซรามิกส์ที่มีความพรุนตัวสูงจำเป็นจะต้องเติมอินทรีย์วัตถุ เช่น ชี้อัลลอย แกลบ ฟาง ผงถ่าน แบง กากกาแฟ กากชา ลงในสารแขวนลอยหรือผสมลงในเนื้อดิน เมื่อขึ้นรูปเป็นชิ้นงาน อินทรีย์วัตถุดังกล่าวจะกระจายอยู่ในชิ้นงาน และจะสลายตัวไปเมื่อนำชิ้นงานไปเผา ทำให้เกิดรูพรุนขึ้นในชิ้นงาน และชิ้นงานที่ได้จะมีน้ำหนักเบา เช่น การศึกษาสมบัติของซีเถ้ากาบมะพร้าวและซีเถ้าไม้ยางพาราที่มีผลต่อการเกิดรูพรุนของชิ้นตัวอย่างไส้กรองน้ำเซรามิกซึ่งส่งผลต่ออัตราการกรองของน้ำ [3] โดยไส้กรองน้ำเซรามิกประกอบด้วยวัสดุดิบ 4 ชนิด คือ ซีเถ้ากาบมะพร้าว หรือซีเถ้าไม้ยางพารา ดินเหนียว แก้วโซดาไลม์ และโดโลไมต์ พบว่าไส้กรองน้ำที่มีคุณสมบัติทางกายภาพที่เหมาะสมนำมาตรวจวิเคราะห์คุณภาพน้ำคือไส้กรองน้ำจากซีเถ้ากาบมะพร้าวที่มีสัดส่วนปริมาณของซีเถ้ากาบมะพร้าวที่ร้อยละ 50 และไส้กรองน้ำจากซีเถ้าไม้ยางพาราที่มีสัดส่วนปริมาณของซีเถ้าไม้ยางพาราที่ร้อยละ 80 ซึ่งน้ำที่ผ่านการกรองจากไส้กรองน้ำทั้ง 2 ชนิด มีคุณภาพของน้ำตามเกณฑ์มาตรฐาน เหมาะสำหรับนำมาใช้เป็นไส้กรองน้ำสำหรับอุปโภคและบริโภค รวมถึงการพัฒนา

ตัวกรองเซรามิกส์ที่ใช้กันอย่างแพร่หลายสำหรับการบำบัด น้ำเสียด้วยการใช้เส้นใยกระดาษรีไซเคิล (Green Fiber) เปรียบเทียบประสิทธิภาพกับตัวกรองที่ประดิษฐ์ขึ้นโดยใช้แป้งและแกลบ โดยการทดสอบประสิทธิภาพอัตราการไหลตัวและการกำจัดแบคทีเรีย [4] พบว่าตัวกรองเซรามิกส์ ที่ทำขึ้นโดยใช้เส้นใยกระดาษรีไซเคิล ร้อยละ 15 โดยน้ำหนัก สามารถกำจัดแบคทีเรียได้ มากกว่า 4 เท่า และอัตราการไหลตัวเท่ากับ 5.9 ลิตร/ชม. มีค่าสูงกว่าอัตราการไหลของตัวกรองเซรามิกส์ที่ใช้อยู่ในปัจจุบัน นอกจากการใช้กระดาษรีไซเคิลแล้วยังมีงานวิจัยที่น่าสนใจอีกมากมายที่ใช้ในการผลิตเนื้อดินเซรามิกส์ให้มีน้ำหนักเบาเพื่อใช้เป็นตัวเติมในสูตรปุ๋ย [5] งานวิจัยนี้นำเสนอนวัตกรรมการประยุกต์ใช้กากกาแฟที่ใช้แล้ว (Spent Coffee Grounds; SCGs) มาใช้เป็นสารตัวเติมสำหรับสูตรมวลรวมเนื้อดินเซรามิกส์ที่มีน้ำหนักเบา (Lightweight Clay Ceramic Aggregates; LWA) เพื่อทดสอบ การสร้างรูพรุนในดินเหนียวสีแดงบางส่วน โดยในการทดสอบจะแทนที่ดินเหนียวสีแดงด้วยกากกาแฟ ที่ใช้แล้วในปริมาณ ร้อยละ 10, 15 และ 20 โดยน้ำหนัก ซึ่งคุณสมบัติของมวลรวมที่ได้จะมีน้ำหนักเบา การเติมกากกาแฟที่ใช้แล้ว ร้อยละ 15 โดยน้ำหนัก ใช้สำหรับทำเม็ดปุ๋ยได้ดี เนื่องจากมีค่า pH และค่าการนำไฟฟ้าต่ำภายใต้ช่วงความหนาแน่นของดิน ผลลัพธ์ที่ได้แสดงให้เห็นว่าวัสดุมวลรวมน้ำหนักเบาที่ได้มีคุณสมบัติที่น่าสนใจเหมาะสำหรับการใช้งานทางการเกษตร นอกจากนี้ยังมีงานวิจัยเกี่ยวกับการนำกากกาแฟไปผสมกับในดินเหนียวเพื่อผลิตเซรามิกส์ที่มีรูพรุน [6] โดยนำกากกาแฟที่ใช้แล้วมาผสม ร้อยละ 10, 20 และ 30 โดยน้ำหนักกับดินเหนียวในท้องถื่น เพื่อหาเงื่อนไข



สำหรับการผลิต เซรามิกส์น้ำหนักเบาที่มีรูพรุน (Class BIII) ที่มีคุณภาพใกล้เคียงกันกับวัสดุเซรามิกส์ ที่มีลักษณะเป็นฉนวน หลังจากเผาที่อุณหภูมิ 1,150 องศาเซลเซียส พบว่าการเติมกากกาแฟที่ใช้ในส่วนผสมทำให้ความพรุนตัวและการดูดซึมน้ำเพิ่มขึ้น ส่วนความหนาแน่น ความแข็งแรง และการนำความร้อนจะลดลง

จากข้อมูลการสร้างวัสดุเซรามิกส์พรุนด้วยการผสมวัสดุต่างๆ ลงไปในเนื้อดินชนิดต่างๆ เมื่อเผาแล้วจะเหลือรูพรุนไว้ในเนื้อดิน [7] ซึ่งสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานได้หลากหลายสาขาตามความต้องการของผู้ใช้งาน วัสดุหนึ่งที่น่าสนใจนำมาสร้างเซรามิกส์พรุนคือการนำกากกาแฟที่ใช้แล้วซึ่งร้อนผ่านตะแกรงขนาด 35 เมช มาผสมในเนื้อดินขาวเพื่อสร้างแผ่นกรองเซรามิกส์ [8] อีกวิธีหนึ่งของการนำแผ่นกรองเซรามิกส์ไปใช้งานเป็นตัวกรองน้ำสามารถนำมาประยุกต์ใช้งานกับการนำไปใช้เป็นตัวฟิลเตอร์เซรามิกส์สำหรับกรองน้ำกาแฟได้อย่างเหมาะสม ดังนั้นจึงนำมาสู่แนวความคิดในพัฒนาเนื้อดินต้านเกวียนสำหรับทำเป็นเซรามิกพรุนชนิดที่มีรูพรุนกระจายตัวในโครงสร้างแบบ 3 มิติ โดยการเติมกากกาแฟผงมะไฟซึ่งเป็นวัตถุดิบในท้องถิ่นในการพัฒนาสูตรเนื้อดิน ในปริมาณร้อยละ 20, 30 และ 40 โดยน้ำหนัก ในส่วนผสมของเนื้อดินต้านเกวียน และสร้างเป็นฟิลเตอร์เซรามิกส์สำหรับการดริปกาแฟผงมะไฟ

2. วิธีการดำเนินงานวิจัย/ทดลอง

งานวิจัยนี้ใช้วัตถุดิบในการทดลอง ได้แก่ ดินเหนียวต้านเกวียน ถ้ำไม้รวมต้านเกวียน และทรายจากร้าน Riviera Ceramica ซึ่งเป็นผู้ประกอบการ

ในหมู่บ้านด่านเกวียน ดินขาวลำปาง จากบริษัทคอมพาวด์เคลย์ จำกัด และกากกาแฟผงมะไฟ จากกลุ่มวิสาหกิจชุมชนกาแฟผงมะไฟ ตำบลมะเกลือใหม่ อำเภอสูงเนิน จังหวัดนครราชสีมา ผลการวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพของวัตถุดิบแต่ละชนิดแสดงดังตารางที่ 1 โดยงานวิจัยนี้ได้ออกแบบอัตราส่วนผสมเนื้อดินต้านเกวียน ตามคำขออนุสิทธิบัตรเลขที่ 2203002959 โดยเติมกากกาแฟที่ร้อนผ่านตะแกรงขนาด 40 เมช โดยคัดขนาดกากกาแฟด้วยการร่อนผ่านตะแกรงมาตรฐาน (ASTM E11) ขนาดเบอร์ 40 (< 425 μm , ASTM) และ 45 เมช (< 355 μm , ASTM) ตามลำดับ แล้วใช้กากกาแฟที่ค้ำบนตะแกรงขนาด 45 เมช ซึ่งจะเป็นกากกาแฟที่ผ่านตะแกรงขนาด 40 เมช จะมีขนาดเล็กกว่า 0.425 มิลลิเมตร ถึง 0.355 มิลลิเมตร ลงในส่วนผสม ดังนี้ เติมกากกาแฟ ร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก (DKS-3) ร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก (DKS-4) และ ร้อยละ 40 โดยน้ำหนัก (DKS-5) เพื่อเป็นวัสดุเพิ่มเติมสำหรับสร้างรูพรุนให้กับเนื้อดิน ผสมวัตถุดิบตั้งต้นทั้งหมดเข้าด้วยกันโดยวิธีการผสมแบบเปียก (Wet Method) เติมน้ำในอัตราส่วน ร้อยละ 20 ของน้ำหนักวัตถุดิบแห้ง [9] จากนั้นนวดส่วนผสมให้เข้ากันจนกลายเป็นเนื้อดินปั้นสำหรับนำไปใช้สร้างฟิลเตอร์เซรามิกส์ โดยใช้เทคนิคการขึ้นรูปด้วยไรมิต (Jigger) ตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชน 46/2556 ดังแสดงในรูปที่ 1 ซึ่งการออกแบบรูปทรงของฟิลเตอร์ได้แรงบันดาลใจจากเขาควестаในพื้นที่อำเภอสูงเนิน จังหวัดนครราชสีมา ซึ่งเป็นพื้นที่ในการเพาะปลูกกาแฟผงมะไฟ



ตารางที่ 1 ผลการวิเคราะห์ความหนาแน่น (Bulk Density) ความถ่วงจำเพาะ (Specific Gravity) และร้อยละการดูดซึมน้ำ (Water Absorption) ของวัตถุดิบแต่ละชนิดหลังเผาที่อุณหภูมิ 1,250 องศาเซลเซียส

องค์ประกอบทางเคมี	ความหนาแน่น (g/cm ³)	ความถ่วงจำเพาะ	ร้อยละการดูดซึมน้ำ
ดินดานเกวียน	3.34	3.65	2.52
ดินขาวลำปาง	1.80	2.39	15.06
ทราย*	-	-	-
เถ้าไม้รวม*	-	-	-
กากกาแฟ*	-	-	-

* ทราย เถ้าไม้รวม และกากกาแฟ ไม่สามารถวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพได้ เนื่องจากทรายไม่ยึดเกาะกันหลังเผา เถ้าไม้รวมเกิดการหลอมละลายเป็นเคลือบ และกากกาแฟระเหยหายไปหลังเผากลายเป็นเถ้า

หลังจากขึ้นรูปชิ้นงานด้วยเทคนิคการขึ้นรูปด้วยใบมีดแล้ว ให้นำชิ้นงานไปวางผึ่งให้แห้งในอุณหภูมิห้องเพื่อให้ชิ้นงานแห้งก่อนนำไปเผา แสดงดังรูปที่ 2 และนำเข้าเผาในเตาไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 1,250 องศาเซลเซียสในบรรยากาศแบบออกซิเดชั่น

จากนั้นวิเคราะห์หาองค์ประกอบทางเคมีของวัตถุดิบด้วยเทคนิคเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนส์ (XRF) นำวัตถุดิบและฟิลเตอร์เซรามิกส์ไปวิเคราะห์เฟสด้วยเทคนิคเอกซเรย์ดิฟแฟรกชัน (XRD) ยี่ห้อ Rigaku รุ่น Smart Lab ทดสอบทางกายภาพโดยการหา ร้อยละความพรุนตัวปรากฏ (Apparent Porosity) ความหนาแน่น (Bulk Density) ความถ่วงจำเพาะ (Specific Gravity) และร้อยละการดูดซึมน้ำ (Water Absorption) ตามมาตรฐาน ASTM C373-88 ดังสมการที่ (1) - (4)



รูปที่ 1 การขึ้นรูปชิ้นงานฟิลเตอร์เซรามิกส์ด้วยเทคนิคการขึ้นรูปแบบ Jigger



รูปที่ 2 ชิ้นงานฟิลเตอร์เซรามิกส์จากดินดานเกวียนรูปทรงเขาค้อนตาหลังปล่อยให้แห้งในอุณหภูมิห้องและนำเข้าเผาในเตาไฟฟ้า

$$\text{Apparent Porosity} = [(W_s - W_D) / (W_s - W_{SS})] \times 100 \quad (1)$$

$$\text{Bulk density} = W_D / (W_s - W_{SS}) \quad (2)$$

$$\text{Specific Gravity} = W_D / (W_D - W_{SS}) \quad (3)$$

$$\text{Water Absorption} = (W_s - W_D) / W_D \times 100 \quad (4)$$

โดย W_D คือ น้ำหนักชิ้นทดสอบแห้ง W_s คือ น้ำหนักชิ้นทดสอบเปียก W_{SS} คือ น้ำหนักชิ้นทดสอบในน้ำ



ทดสอบอัตราการไหลของน้ำร้อนอุณหภูมิ 98°C ผ่านฟิลเตอร์ด้วยการจำลองการชงกาแฟแบบดริป โดยใช้น้ำร้อนปริมาตร 100 มิลลิลิตร ในการทดสอบการไหลผ่านฟิลเตอร์พร้อมจับเวลาและหาอัตราการไหลของน้ำร้อนผ่านฟิลเตอร์ โดยใช้มาตรฐานการไหลของน้ำร้อนผ่านฟิลเตอร์ตามรูปแบบการใช้กระดาษกรองกับดริปเปอร์รูปทรงกรวย (Hario V60 Paper Filter) แสดงดังรูปที่ 3

ศึกษาขนาดและลักษณะของรูพรุนด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy) ยี่ห้อ TESCAN รุ่น VEGA ที่กำลังขยาย 500x, 1,000x, 2,000x และ 2,500x

3. ผลการวิจัย/ทดลองและการอภิปรายผล

3.1 ผลการวิเคราะห์ XRF และ XRD ของวัตถุดิบ

ผลการวิเคราะห์ XRF และ XRD ของตัวอย่างดินด่านเกวียน พบว่าองค์ประกอบทางเคมีของดินเหนียวด่านเกวียนประกอบด้วยซิลิกา (SiO_2) ร้อยละ 64.28 อะลูมินา (Al_2O_3) ร้อยละ 21.17 และเหล็กออกไซด์ (Fe_2O_3) ร้อยละ 11.24 ดังแสดงในตารางที่ 2 เพราะฉะนั้นองค์ประกอบทางเคมีของดินเหนียวด่านเกวียนส่วนใหญ่จะประกอบด้วยซิลิกา อะลูมินา และเหล็กออกไซด์เป็นหลัก สอดคล้องกับผลการวิเคราะห์เฟสด้วยเทคนิค XRD แสดงดังรูปที่ 4 ซึ่งในดินด่านเกวียนจะประกอบด้วยแร่ควอตซ์ (JCPDS-ICDD, 70-7344) และแร่เคโอลิไนต์ (JCPDS-ICDD, 03-0052) และองค์ประกอบทางเคมีของเถ้าไม้รวมด่านเกวียนจะประกอบด้วยซิลิกา (SiO_2) ร้อยละ 29.95 แคลเซียมออกไซด์ (CaO) ร้อยละ 46.78 แมกนีเซียมออกไซด์ (MgO) ร้อยละ 10.18



รูปที่ 3 ทดสอบหาการไหลตัวของน้ำร้อนผ่านฟิลเตอร์เซรามิกส์จากดินด่านเกวียน

ตารางที่ 2 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี (XRF) ของดินเหนียวด่านเกวียน เถ้าไม้รวมด่านเกวียน และกากกาแฟ

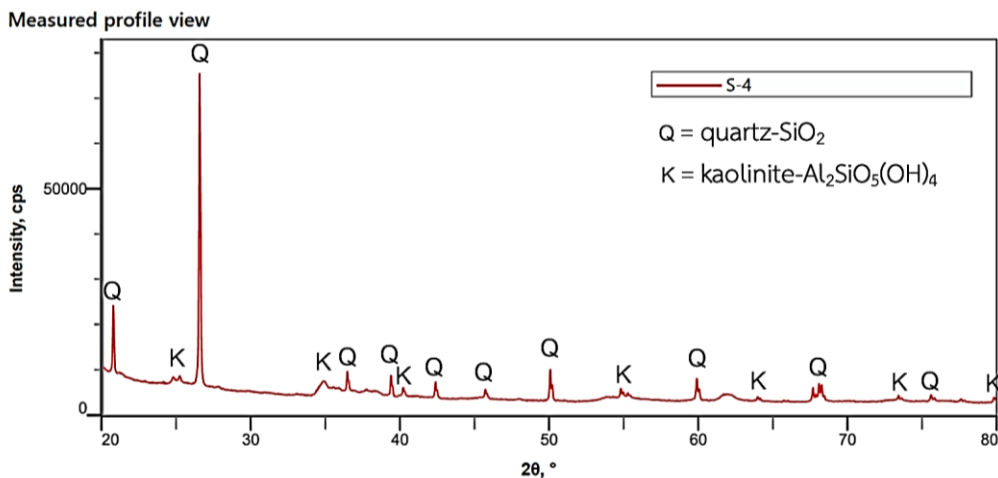
องค์ประกอบทางเคมี	ดินเหนียวด่านเกวียน (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	เถ้าไม้รวมด่านเกวียน (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	กากกาแฟ (ร้อยละโดยน้ำหนัก) [6]
SiO_2	64.28	29.95	-
Al_2O_3	21.17	1.32	-
K_2O	1.23	4.00	-
CaO	0.40	46.78	-
TiO_2	1.45	0.42	-
Fe_2O_3	11.24	1.09	-
MnO_2	0.23	0.41	-
MgO	-	10.18	-
P_2O_5	-	3.27	-
SO_3	-	1.43	-
C	-	-	58.48
H	-	-	7.31
N	-	-	1.05
อื่นๆ	-	1.15	1.50



เพราะฉะนั้นองค์ประกอบทางเคมีของถ้ำไม้รวมด้าน
 เกวียนส่วนใหญ่จะประกอบด้วยแคลเซียมออกไซด์
 ซิลิกา และแมกนีเซียมออกไซด์เป็นหลักสอดคล้องกับ
 ผลการวิเคราะห์เฟสด้วยเทคนิค XRD แสดงดังรูปที่ 5
 ซึ่งในถ้ำไม้รวมด้านเกวียนจะประกอบด้วยแร่ควอตซ์
 (JCPDS-ICDD, 70-7344) และแร่แคลไซต์ (JCPDS-
 ICDD, 72-1937) ส่วนผลการวิเคราะห์เฟสด้วยเทคนิค
 XRD ของกากกาแฟดมะไฟแสดงดังรูปที่ 6 พบว่า
 กากกาแฟดมะไฟนั้นประกอบด้วยผลึกของเซลลูโลส
 Cellulose-C₆H₁₀O₆)_n (JCPDS-ICDD, 06-1501) ซึ่งเป็น
 โครงสร้างแบบกึ่งผลึก (Semi-crystalline) ที่มีทั้งความ
 เป็นผลึก (Crystalline) และอสัณฐาน (Amorphous)
 ดังนั้นเซลลูโลสจึงเป็นองค์ประกอบหลักของโครงสร้าง
 ผลึกที่มีอยู่ในกากกาแฟดมะไฟ [10] ซึ่งตำแหน่งพีคที่
 2θ เท่ากับ 16.5 และ 22 จะแสดงถึงตำแหน่งของเฟสที่
 มีความเป็นผลึกในเซลลูโลส

จากการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของดิน

ด้านเกวียน และถ้ำไม้รวม จะพบว่าดินด้านเกวียนมี
 องค์ประกอบทางเคมีของอะลูมินาและซิลิกาเป็นหลัก
 ซึ่งเป็นออกไซด์ที่จัดอยู่ในกลุ่มวัสดุดิบที่ให้ความ
 เหนียวซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวเพิ่มความแข็งแรงและความ
 ทนไฟให้กับชิ้นงานหลังเผา ซึ่งจะทำให้ชิ้นงานหลังเผา
 ยังคงรูปอยู่ได้ไม่เสียรูปทรง ส่วนถ้ำไม้รวมนั้นม
 องค์ประกอบทางเคมีเป็นแคลเซียมออกไซด์ ซิลิกา
 และแมกนีเซียมออกไซด์เป็นหลัก ซึ่งจัดเป็นวัสดุดิบ
 กลุ่มต่างทำหน้าที่เป็นตัวช่วยหลอม (Flux) เมื่อผสมลง
 ไปในเนื้อดินจะช่วยทำให้เนื้อดินสามารถเผาได้สุกตัวที่
 ดียิ่งขึ้นและจะทำให้ชิ้นงานมีความหนาแน่นเพิ่มขึ้น
 นอกจากนี้ในส่วนผสมของเนื้อดินยังได้เติมกากกาแฟ
 ซึ่งโดยส่วนใหญ่กากกาแฟจะมีองค์ประกอบทางเคมี
 เป็นคาร์บอน [6] โดยจุดประสงค์ของการเติมกากกาแฟ
 เพื่อทำหน้าที่ช่วยในการสร้างรูพรุนให้เกิดขึ้นกับ
 ชิ้นงานหลังเผา เมื่อกากกาแฟถูกเผาไหม้หมดไปจะทำให้
 เกิดช่องว่างหรือรูพรุนจำนวนมากในชิ้นงาน

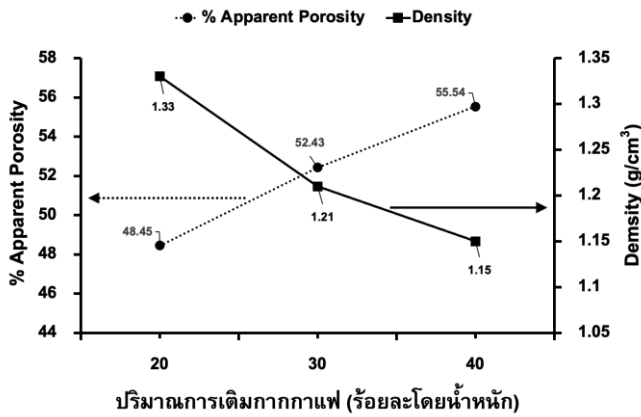


รูปที่ 4 ผลการวิเคราะห์เฟสของดินเหนียวด้านเกวียน

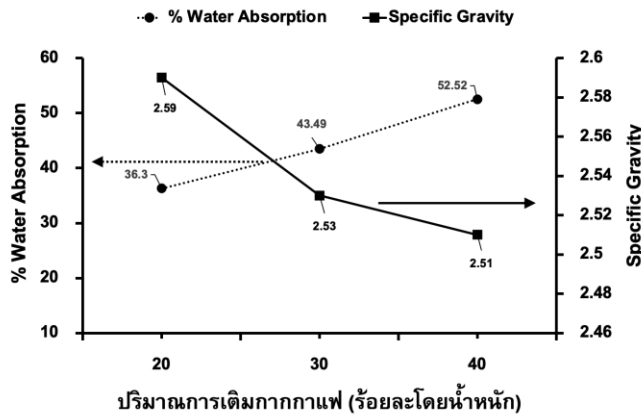


ผลการหาร้อยละการดูดซึมน้ำ (Water Absorption) และความถ่วงจำเพาะ (Specific Gravity) กับปริมาณการเติมกากกาแฟ ร้อยละ 20, 30 และ 40 โดยน้ำหนัก แสดงดังรูปที่ 8 พบว่า ร้อยละการดูดซึมน้ำจะเพิ่มขึ้นตามปริมาณการเติมกากกาแฟที่เพิ่มขึ้น เพราะเกิดการ

สูญเสียมวลเป็นจำนวนมากในระหว่างการเผาอากาศกาแฟ จึงเกิดรูพรุนจำนวนมากในเนื้อดินซึ่งเป็นคุณสมบัติของวัสดุกรองจึงทำให้น้ำสามารถซึมผ่านได้มากขึ้น [5]



รูปที่ 7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความพรุนตัวปรากฏและความหนาแน่นหลังเผากับปริมาณการเติมกากกาแฟ ร้อยละ 20, 30 และ 40 โดยน้ำหนัก



รูปที่ 8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซึมน้ำและความถ่วงจำเพาะกับปริมาณการเติมกากกาแฟ ร้อยละ 20, 30 และ 40 โดยน้ำหนัก



ส่วนความถ่วงจำเพาะกับปริมาณการเติมกากกาแฟพบว่าที่ปริมาณการเติมกากกาแฟ ร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก จะมีค่าเท่ากับ 2.59 ลดลงเมื่อเติมกากกาแฟ ร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก มีค่าเท่ากับ 2.53 และความถ่วงจำเพาะจะต่ำสุดเมื่อเติมกากกาแฟเพิ่มขึ้น ร้อยละ 40 โดยน้ำหนัก มีค่าเท่ากับ 2.51 จะเห็นได้ว่าความถ่วงจำเพาะแปรผันตามความหนาแน่นของวัสดุเมื่อเติมปริมาณกากกาแฟเพิ่มขึ้น เนื่องจากความถ่วงจำเพาะเป็นการเปรียบเทียบความหนาแน่นของวัสดุกับความหนาแน่นของน้ำ หากกำหนดให้ความหนาแน่นของน้ำมีค่าเท่ากับ 1 ซึ่งสอดคล้องกับความพรุนตัวที่มีมากขึ้นในเนื้อของวัสดุ เนื่องจากจะมีปริมาณรูพรุนมากขึ้นเมื่อเติมกากกาแฟเพิ่มขึ้น

3.3 การทดลองหาปริมาณการเติมกากกาแฟที่มีผลต่ออัตราการไหลของน้ำร้อนผ่านฟิลเตอร์

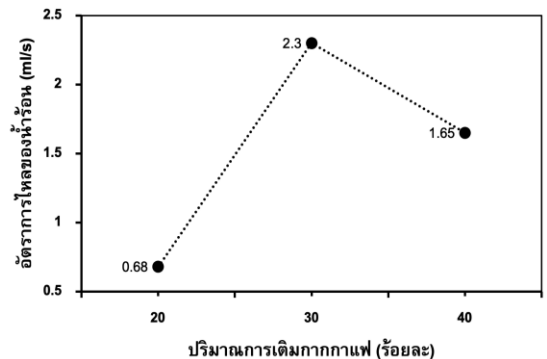
การทดลองและพัฒนาสูตรเนื้อดินด้านเกวียนและกากกาแฟผงมะไฟเพื่อสร้างฟิลเตอร์เซรามิกส์ ซึ่งประกอบด้วยวัตถุดิบที่สามารถสร้างรูพรุนให้กับเนื้อดินหลังเผา ได้แก่ กากกาแฟผงมะไฟ ส่วนถ้าไม้รวมด้านเกวียนที่ได้จากเตาเผาด้านเกวียนจะทำหน้าที่เป็นตัวช่วยหลอมในส่วนผสมเวลาเผาจะทำให้เนื้อดินสุกตัวง่ายขึ้น [12] ทราย และดินขาวลำปาง จะเป็นวัตถุดิบในการช่วยเพิ่มความแข็งแรงให้กับชิ้นงานในระหว่างการขึ้นรูปและหลังเผา จากนั้นนำไปผสมและขึ้นรูปด้วยวิธีการ Jigger และเผาในเตาไฟฟ้าบรรยากาศแบบออกซิเดชันที่อุณหภูมิ 1,250 องศาเซลเซียส จะได้ชิ้นงานแสดงดังรูปที่ 9

จากผลการทดสอบอัตราการไหลของน้ำร้อนผ่านฟิลเตอร์ แสดงดังรูปที่ 10 พบว่าอัตราส่วนผสมที่ปริมาณการเติมกากกาแฟร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก

(DKS-4) มีอัตราการไหลของน้ำร้อนผ่านชิ้นงานตัวฟิลเตอร์มากที่สุด โดยมีอัตราการไหลผ่านของน้ำร้อนที่ 2.30 มิลลิลิตรต่อวินาที สอดคล้องกับภาพถ่ายลักษณะความพรุนตัวของชิ้นงาน ดังรูปที่ 11 ซึ่งมีลักษณะของรูพรุนที่มากที่สุดและส่วนใหญ่จะเป็นรูพรุนประเภทแมคโครพอร์ส (Macro-porous) ที่เชื่อมต่อกันเป็นรูพรุนเปิด (Open Pore) ซึ่งเกิดจากการเติมกากกาแฟลงในเนื้อดินแล้วเผาที่อุณหภูมิ 1,250 องศาเซลเซียส เพื่อให้กากกาแฟเผาไหม้ออกไปจึงเกิดรูพรุนจำนวนมาก ส่งผลให้ น้ำร้อนสามารถไหลผ่านฟิลเตอร์ได้เร็วขึ้น รองลงมาคืออัตราส่วนผสมที่ปริมาณการเติมกากกาแฟ ร้อยละ 40 โดยน้ำหนัก (DKS-5) มีอัตราการไหลผ่านของน้ำร้อนที่ 1.65 มิลลิลิตรต่อวินาที



รูปที่ 9 ชิ้นงานทดสอบจากอัตราส่วนผสมที่ DKS-3 ถึง DKS-5 ขึ้นรูปด้วยวิธีการ Jigger

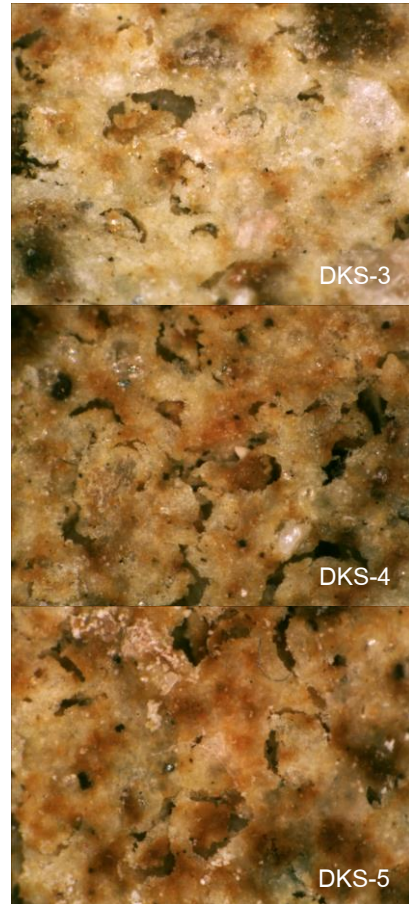


รูปที่ 10 อัตราการไหลของน้ำร้อนผ่านฟิลเตอร์ที่เติมกากกาแฟ ร้อยละ 20, 30 และ 40 โดยน้ำหนัก



เหตุผลที่เมื่อเติมกากกาแฟในส่วนผสมมากเกินไปจะทำให้อัตราการไหลของน้ำร้อนผ่านฟิลเตอร์ลดลงเนื่องจากกากกาแฟมีคุณสมบัติเป็นตัวช่วยหลอมจึงทำให้เนื้อดินหลอมและเกิดรูพรุนเปิดน้อยลง แต่กลับทำให้รูพรุนปิด (Close Pore) เกิดมากขึ้นดังรูปที่ 11 สอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ความพรุนตัวปรากฏที่เพิ่มขึ้น อัตราการไหลของน้ำร้อนผ่านฟิลเตอร์น้อยที่สุดคืออัตราส่วนผสมที่เติมกากกาแฟ ร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก (DKS-3) มีอัตราการไหลผ่านของน้ำร้อนที่ 0.63 มิลลิลิตรต่อวินาที เนื่องจากมีความพรุนตัวของชิ้นงานน้อยที่สุด และมีความหนาแน่นของชิ้นงานมากที่สุด

ดังนั้นจึงได้เลือกอัตราส่วนผสม DKS-4 ไปสร้างเป็นฟิลเตอร์เซรามิกส์สำหรับใช้ทดสอบการทดลองชงกาแฟแบบดริป เนื่องจากให้อัตราการไหลผ่านของน้ำร้อนได้มากที่สุด โดยในการทดสอบนี้ใช้กาแฟ 15 กรัมกับน้ำร้อนอุณหภูมิ 98 องศาเซลเซียส เทน้ำร้อนลงไปทั้งหมด 5 ครั้ง (ครั้งละ 50 มิลลิลิตร) ให้น้ำหนักรวม 250 มิลลิลิตร จะได้กาแฟพร้อมดื่ม 1 แก้ว โดยใช้เวลาทั้งหมด 4 นาที 50 วินาที หรือคิดเป็นอัตราการไหลเท่ากับ 0.86 มิลลิลิตรต่อวินาที ใกล้เคียงกับการใช้กระดาษกรองกับดริปเปอร์รูปทรงกรวย (Hario V60 Paper Filter) ที่ใช้ในการชงกาแฟแบบดริป (V60 dark) ซึ่งมีอัตราการไหลตัวของน้ำกาแฟ เท่ากับ 1.21 มิลลิลิตรต่อวินาที [13] ผลการทดลองพบว่าสามารถกรองน้ำกาแฟที่มีความเข้มข้นระดับเอสเปรสโซ่ได้ ซึ่งกาแฟที่ได้มีรสชาติเข้มข้นและหอมหวาน ละมุน มีความลงตัวในแบบกาแฟดริป อัตราการไหลของน้ำไม่ได้มีแค่อไหลเร็วหรือไหลช้า แต่ลักษณะของการไหลจะแตกต่างกันไปในแต่ละช่วงเวลาและปริมาณน้ำที่อยู่



รูปที่ 11 ภาพถ่ายจากกล้อง Stereo Microscope ที่กำลังขยาย 40 เท่า ของชิ้นงาน DKS-3, DKS-4 และ DKS-5 ตามลำดับ

ในดริปเปอร์ โดยช่วงของการเทน้ำร้อนครั้งที่ 1 ที่ 50 มิลลิลิตร การไหลตัวจะยังคงไหลช้าอยู่ แต่การเทน้ำร้อนครั้งที่ 2-3 (100-150 มิลลิลิตร) จะทำให้การไหลตัวของน้ำร้อนไวขึ้น เนื่องจากปริมาณน้ำที่อยู่ในตัวฟิลเตอร์มีปริมาณมากขึ้น และการเทน้ำร้อนครั้งที่ 4-5 (200-250 มิลลิลิตร) จะทำให้การไหลตัวของน้ำร้อนเร็วที่สุดเนื่องจากมีปริมาณน้ำร้อนในฟิลเตอร์สูงสุด

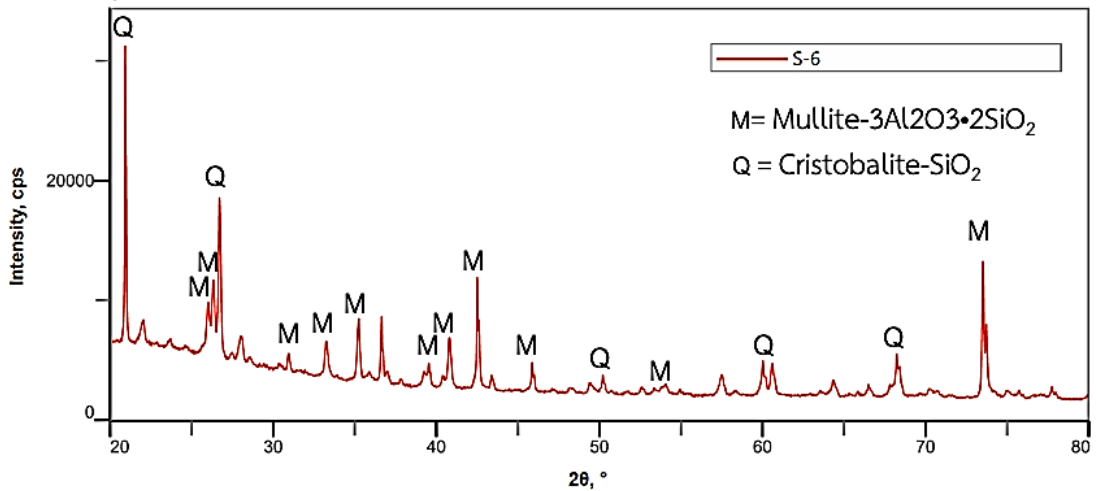


3.4 ผลการวิเคราะห์ XRD และโครงสร้างจุลภาคของฟิลเตอร์เซรามิกส์

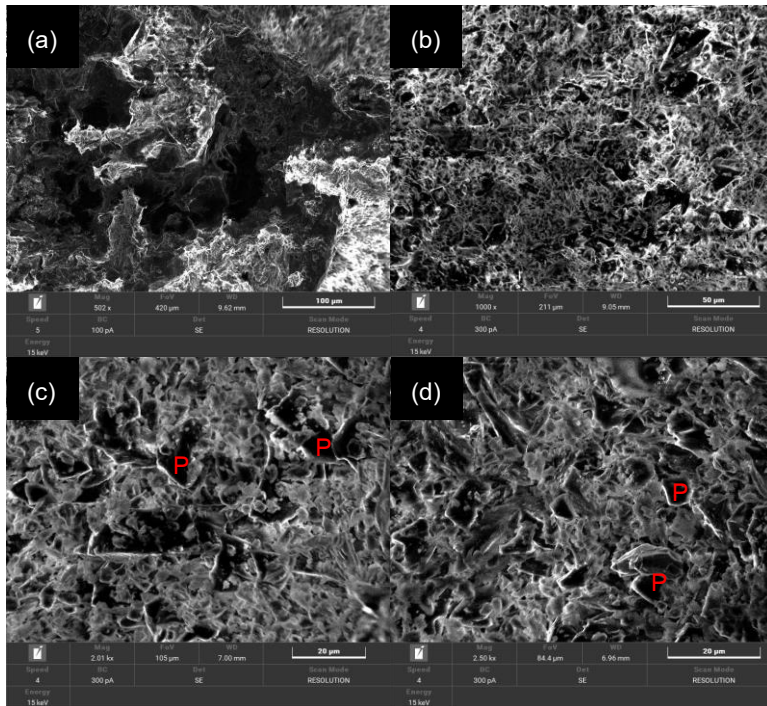
ผลการวิเคราะห์เฟสของตัวอย่างฟิลเตอร์เซรามิกส์ ในอัตราส่วนผสม DKS-4 ที่มีการเติมกากกาแฟในปริมาณ ร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก เเผที่อุณหภูมิ 1,250 องศาเซลเซียส ในบรรยากาศแบบออกซิเดชั่น แสดงดังรูปที่ 12 พบว่าเกิดเฟสของ Cristobalite Silica (JCPDS-ICDD, 03-0270) ซึ่งเกิดจากซิลิกาที่เกินในโครงสร้างเปลี่ยนเฟสที่อุณหภูมิ 1,200 องศาเซลเซียสไปเป็นซิลิกาที่อยู่ในรูปอสัณฐาน (Amorphous Silica) และเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นซิลิกาจะเปลี่ยนไปอยู่ในรูปของผลึก Cristobalite ที่อุณหภูมิ 1,250 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นรูปผลึกที่มีความเสถียร ส่งผลให้ฟิลเตอร์ที่ได้มีความแข็งแรงไม่ผุกร่อนง่ายเมื่อนำไปใช้งานในสภาวะที่

มีการสัมผัสกับน้ำร้อน นอกจากนี้ยังพบเฟสของ Mullite ($3Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$) (JCPDS-ICDD, 15-0776) ที่ตำแหน่ง 2θ เท่ากับ 26 ซึ่งแสดงถึงเฟสของ Orthorhombic Mullite หรือ Amorphous Aluminosilicate [14] ส่วนการวิเคราะห์ ลักษณะของรูพรุนในฟิลเตอร์เซรามิกส์จากอัตราส่วนผสม DKS-4 แสดงดังรูปที่ 13 ซึ่งพบว่าในฟิลเตอร์มีรูพรุนขนาดเล็ก (P) จำนวนมาก โดยรูพรุนขนาดเล็กเหล่านี้เกิดจากกระบวนการเผาไหม้และหายไปของกากกาแฟที่มีอยู่ในส่วนผสมจึงเหลือไว้เป็นรูพรุนขนาดเล็กเชื่อมต่อกันเป็นจำนวนมากจึงส่งผลให้น้ำร้อนสามารถไหลผ่านตัวฟิลเตอร์ได้อย่างรวดเร็ว และสามารถนำไปใช้กรองเพื่อชงกาแฟแบบดริปได้

Measured profile view



รูปที่ 12 ผลการวิเคราะห์ XRD ของฟิลเตอร์เซรามิกส์อัตราส่วนผสม DKS-4



รูปที่ 13 ภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคของฟิลเตอร์อัตราส่วนผสม DKS-4 (a) 500x, (b) 1,000x, (c) 2,000x และ (d) 2,500x เมื่อ P คือ รูพรุนขนาดเล็กในโครงสร้างของฟิลเตอร์

4. บทสรุป

การพัฒนาส่วนผสมของเนื้อดินด้านเกวียนและกากกาแฟตงมะไฟสำหรับสร้างฟิลเตอร์เซรามิกส์พบว่าที่ปริมาณการเติมกากกาแฟ ร้อยละ 20-40 โดยน้ำหนัก ค่าความพรุนตัวปรากฏ (Apparent Porosity) และการดูดซึมน้ำ (Water Absorption) หลังเผาเพิ่มขึ้นตามปริมาณการเติมกากกาแฟที่เพิ่มขึ้น ส่วนค่าความหนาแน่น (Bulk Density) และค่าความถ่วงจำเพาะ (Specific Gravity) หลังเผามีแนวโน้มลดลงตามปริมาณการเติมกากกาแฟที่เพิ่มขึ้น และวิเคราะห์ XRD ของตัวอย่าง DKS-4 (ปริมาณการเติมกากกาแฟ ร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก) หลังเผาที่อุณหภูมิ

1,250 องศาเซลเซียส จะพบว่าเกิดเฟสของ Cristobalite Silica และ Orthorhombic Mullite และมีอัตราการไหลของน้ำร้อนผ่านชิ้นงานตัวฟิลเตอร์มากที่สุด 2.30 มิลลิลิตรต่อวินาที ซึ่งเกิดจากรูพรุนขนาดเล็กจำนวนมากที่มีอยู่ในฟิลเตอร์ โดยรูพรุนขนาดเล็กเหล่านี้เกิดจากกระบวนการเผาไหม้และหายไปของกากกาแฟที่มีอยู่ในส่วนผสมจึงเหลือไว้เป็นรูพรุนขนาดเล็กเชื่อมต่อกันเป็นจำนวนมากยืนยันด้วยภาพถ่ายจาก SEM จึงส่งผลให้น้ำร้อนสามารถไหลผ่านตัวฟิลเตอร์ได้อย่างรวดเร็ว และสามารถนำไปใช้กรองเพื่อชงกาแฟแบบดริปได้



5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนจากกองทุนส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม (ววน.) งบประมาณเพื่อสนับสนุนทุนพื้นฐาน (Fundamental Fund) ปีงบประมาณ 2565 บริหารผ่านสำนักงานคณะกรรมการส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม (สกสว.) และมหาวิทยาลัยราชภัฏนครราชสีมา ตามสัญญาเลขที่ 650055/197-13 และขอขอบคุณคณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม และสถาบันวิจัยและพัฒนา ที่สนับสนุนการทำวิจัยให้แล้วเสร็จตามวัตถุประสงค์

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] D. Raksorn, Evolution and development of dan kwian clay to retain aesthetic identity, Mekong Chi Mun Art and Culture Journal, 2016, 2(2), 109-136. (in Thai)
- [2] Y. Chen, N. Wang, O. Ola, Y. Xia and Y. Zhu, Porous ceramics: Light in weight but heavy in energy and environment technologies, Materials Science and Engineering: R: Reports, 2021, 143, 1 - 65.
- [3] T. Ninwijit, N. Takadi and N. Manee, Ceramic water filter from coconut husk ash and rubber wood ash, The 8th Walailak Research National Conference, Proceeding, 2016, 244-251. (in Thai)
- [4] H. Yang, X. Min, S. Xu, J. Bender and Y. Wang, Development of effective and fast-flow ceramic porous media for point-of-use water treatment: Effect of pore size distribution, ACS Sustainable Chemistry and Engineering, 2020, 8, 1988-1996.
- [5] A. Fernanda , B. Alessandro, P. Simone, A. Giulio , T. Paolo, L. Isabella and B. Luisa, Spent coffee grounds in the production of lightweight clay ceramic aggregates in view of urban and agricultural sustainable development, Materials, 2019, 12, 3581-3591.
- [6] M. Ahmed, E.H. Abdelilah, EA. EH. Iz-Eddine, E.B. Abdeslam and S. Chaouki, Valorization of coffee waste with Moroccan clay to produce a porous red ceramics (class BIII), Boletín De La Sociedad Española De Cerámica y Vidrio, 2019, 58, 211 - 220.
- [7] K.R. Silva, R.R. Menezes, L.F.A. Campos and L.N.L. Santana, A review on the production of porous ceramics using organic and inorganic industrial waste, Cerâmica, 2022, 68, 270-284.
- [8] F.S. Maciel, I.O. Rangel Areias and J.N.F. Holanda, Valorization potential of coffee grounds waste as a renewable pore-forming agent to produce low-cost porous ceramic support, Research, Society and Development, 2023, 12(2), 1-20.



- [9] A. Solomon, D.M. Andoshe, A.M. Abebe, T.T. Terfasa, T. Ganesh, F.G. Hone, N.A. Tegegne, B.B. Tesfamariam, Optimization of preparation parameters of ceramic pot water filters for potential application of microbial and fluoride removal from groundwater, *Heliyon*, 2023, 9(2), 13261-13271.
- [10] S. Boopasiri, P. Sae-Oui, S. Lundee, S. Takaewnoi and C. Siritwong, Reinforcing Efficiency of Pyrolyzed Spent Coffee Ground in Styrene- Butadiene Rubber, *Macromolecular Research*, 2021, 29(9), 597-604.
- [11] P. F. Busch and J.N.F. Holanda, Potential use of coffee grounds waste to produce dense/porous bi-layered red floor tiles, *Open Ceramics*, 2022, 9, 100204-100211.
- [12] O. Kamon-in and C. Luangnaem, Effect of dan kwian wood ash and tapioca waste on insulating firebrick, *KKU Science Journal*, 2016, 44(4), 794-808. (in Thai)
- [13] A. Santanatoglia, G. Caprioli, M. Cespi, D. Ciarlantini, L. Cognigni, L. Fioretti, F. Maggi, A.M. Mustafa, F. Nzekoue, S. Vittori, A comprehensive comparative study among the newly developed Pure Brew method and classical ones for filter coffee production, *LWT*, 2023, 175, 114471-114481.
- [14] P.A. Alves, B. Silva, F.A. Campos, M. Torres, P.S. Dutra and A. Macedo, Preparation of mullite based ceramics from clay-kaolin waste mixtures, *Ceramics International*, 2016, 42(16), 19086-19090.



แบบจำลองทางคณิตศาสตร์การรุกตัวของน้ำเค็มของแม่น้ำจันทบุรี

กมลภัสสร มั่นศิลป์¹ นพรัตน์ โพธิ์ชัย² สมภูมิ มีชานา³ และ วิศรุต คล้ายแจ้ง^{3*}

¹ สาขาวิชาวิศวกรรมบูรณาการ, โครงการจัดตั้งคณะวิศวกรรมศาสตร์บูรณาการและเทคโนโลยี, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก

² ภาควิชาคณิตศาสตร์, คณะวิทยาศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

³ กองการศึกษา, โรงเรียนนายเรืออากาศนวมินทกษัตริยาธิราช

* ผู้ประสานงานเผยแพร่ (Corresponding Author), E-mail: witsarut_popmath@hotmail.com

วันที่รับบทความ: 5 เมษายน 2566; วันที่ทบทวนบทความ: 20 มิถุนายน 2566; วันที่ตอบรับบทความ: 29 มิถุนายน 2566

วันที่เผยแพร่ออนไลน์: 28 สิงหาคม 2566

บทคัดย่อ: งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์การรุกตัวของน้ำเค็มของแม่น้ำจันทบุรี โดยใช้สมการการแพร่และการพา 1 มิติเป็นสมการควบคุมของปัญหา และใช้ระเบียบวิธีเชิงตัวเลข MacCormack ในการแก้ปัญหасмการควบคุมแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อทำนายค่าความเค็มของน้ำบริเวณปากแม่น้ำและตลอดเส้นทางของแม่น้ำจันทบุรี โดยทำการเก็บข้อมูลตัวอย่างที่สถานีสังเกตการณ์และเก็บข้อมูลค่าความเค็มบริเวณปากแม่น้ำจันทบุรีและนำข้อมูลที่ได้ทำการประมาณค่าด้วยวิธีของ Cubic spline interpolation เพื่อให้เป็นข้อมูลที่เหมาะสมสำหรับใช้เป็นค่าขอบและค่าเริ่มต้นสำหรับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ โดยจะแสดงผลลัพธ์ในรูปแบบของกราฟแสดงการเปรียบเทียบและตารางของค่าความเค็มของน้ำแต่ละสถานีสังเกตการณ์ รวมถึงมีการวิเคราะห์กรณีของการเก็บข้อมูลที่มีความถี่ของการเก็บข้อมูลที่ต่างกัน พบว่าสามารถลดต้นทุนการเก็บข้อมูลเพื่อใช้ในการทำนายค่าความเค็มของน้ำโดยค่าที่คำนวณได้มีเปอร์เซ็นต์การคลาดเคลื่อนที่ยอมรับได้เมื่อเทียบกับข้อมูลจริงที่เก็บได้

คำสำคัญ: แบบจำลองทางคณิตศาสตร์; การรุกของน้ำเค็ม; สมการการแพร่-การพา

Mathematical Model for Salinity Intrusion Measurement of Chanthaburi River

Kamonpad Mansilp¹, Nopparat Pochai², Sompoom Meechowna³ and Witsarut Klaychang^{4*}

¹ Department of Integrated Engineering, Establishment Project Faculty of Integrated Engineering and Technology Chanthaburi campus, Rajamangala University of Technology Tawan-Ok, Chanthaburi

² Department of Mathematics, Faculty of Science, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang

³ Faculty of Academy, Navaminda Kasatriyadhiraj Royal Air Force Academy

* Corresponding author, E-mail: witsarut_popmath@hotmail.com

Received: 5 April 2023; Revised: 20 June 2023; Accepted: 29 June 2023

Online Published: 28 August 2023

Abstract: The purpose of this research was to study a mathematical model of saltwater intrusion into the Chanthaburi River using one-dimensional diffusion and convection equations as governing equations for the problem. The MacCormack numerical method was used to solve mathematical model governing equations to predict water salinity in the estuary and along the Chanthaburi River's course. By collecting sample data at the observation stations and salinity data at the mouth of the Chanthaburi River, the approximated values were calculated using the method of cubic spline interpolation to provide boundary and initial values for the mathematical model. The comparison graphs and data tables of the salinity obtained from each observation station were presented. In addition, data collection with different data frequencies was analyzed. It was found that the cost of data collection for predicting water salinity can be reduced by an acceptable percentage compared to the actual data collected.

Keywords: Mathematical Model; Salinity Intrusion; Advection Diffusion Equation

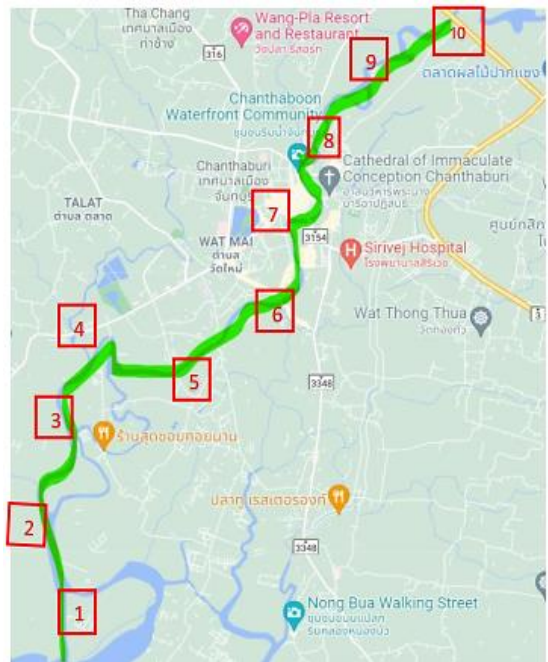


1. บทนำ

ปัจจุบันแนวโน้มการขาดแคลนน้ำจืดสำหรับใช้ในกิจกรรมต่างๆ ของประชากรมีเพิ่มมากขึ้นและมีความต้องการใช้น้ำที่เพิ่มมากขึ้น หรือเกิดจากปัญหาภูมิอากาศของโลกเกิดการเปลี่ยนแปลงทำให้เกิดปรากฏการณ์ภาวะโลกร้อนเกิดส่งผลกระทบต่อการละลายของภูเขาน้ำแข็งและทำให้ระดับน้ำทะเลเพิ่มสูงขึ้น อาจส่งผลกระทบต่อคุณภาพของแหล่งน้ำจืดทั้งบนผิวดินและใต้ดิน การเพิ่มขึ้นของระดับน้ำทะเลที่นับวันยังมีความรุนแรงมากขึ้น โดยผลกระทบดังกล่าวจะมีความรุนแรงแตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับตำแหน่งที่ตั้งถิ่นฐานของประชากรในแต่ละประเทศที่มีแนวโน้มการเพิ่มขึ้นของประชากรที่มีการย้ายถิ่นฐานมายังชายฝั่งสำหรับในประเทศไทยมีปัญหาการรุกตัวของน้ำทะเลในช่วงฤดูแล้ง ซึ่งส่งผลให้บางพื้นที่ไม่เหมาะที่จะนำน้ำมาใช้ประโยชน์สำหรับการเพาะปลูกพืชได้

ในด้านของทรัพยากรน้ำในจังหวัดจันทบุรีแม้ว่าจะอยู่ในพื้นที่ที่มีฝนตกชุก แต่จังหวัดจันทบุรียังคงประสบกับปัญหาภาวะความแห้งแล้งในพื้นที่ของจังหวัดเนื่องจากแม่น้ำทั้งหมดในจังหวัดเป็นแม่น้ำสายที่มีความยาวสั้นและขนาดไม่กว้าง แต่ถือว่าเป็นแม่น้ำที่มีความสำคัญของจังหวัดจันทบุรี โดยแม่น้ำจันทบุรีประกอบด้วยลำน้ำหลายสาขาไหลรวมกับแม่น้ำจันทบุรีไหลออกทางปากแม่น้ำซึ่งมีความยาวประมาณ 123 กิโลเมตร ดังรูปที่ 1 (และสถานีสังเกตการณ์ 1-10) ส่งผลให้น้ำในแม่น้ำไหลลงสู่อ่าวไทยอย่างรวดเร็ว ปัญหาการรุกตัวของน้ำเค็มบริเวณปากแม่น้ำสายหลายสายจะมีความรุนแรงมากกว่าปกติในช่วงฤดูแล้งเนื่องจากอัตราการไหลของน้ำในแม่น้ำมีค่าน้อยและทาง

ต้นน้ำมีการใช้น้ำเพื่อทำการเกษตร การอุปโภคและบริโภคในฤดูแล้งมากขึ้น โดยการวัดคุณภาพของน้ำเพื่อบอกคุณภาพน้ำที่เกี่ยวข้องกับความเค็ม สามารถตรวจวัดได้จากปริมาณเกลือที่ละลายอยู่ในน้ำ ซึ่งน้ำจืดเพื่อการอุปโภคบริโภคค่าความเค็มจะต้องน้อยกว่า 0.25 g/l จากการเก็บข้อมูลภาคสนามจะเห็นได้ว่าปัญหาการรุกตัวของน้ำเค็มจึงมีผลเป็นอย่างมากในแม่น้ำจันทบุรี ซึ่งปัญหาเหล่านี้ส่งผลกระทบต่อเศรษฐกิจพื้นที่ทำการเกษตร การอุปโภคบริโภคของประชาชนบริเวณโดยรอบ การรุกตัวของน้ำเค็มในช่วงฤดูแล้งมักส่งผลให้ในบางพื้นที่ไม่เหมาะที่จะนำน้ำมาใช้ประโยชน์สำหรับการทำการเกษตร



รูปที่ 1 แผนที่แม่น้ำจันทบุรีจากปากอ่าวหาดแหลมสิงห์และจุดสังเกตการณ์ในการเก็บข้อมูลน้ำเค็ม



จากปัญหาดังกล่าวผู้วิจัยได้เห็นถึงปัญหาที่จะมีผลต่อชาวเกษตรกร รวมถึงประชาชนบริเวณใกล้เคียงที่ต้องใช้ประโยชน์จากน้ำในแม่น้ำจันทบุรีในการทำการเกษตร การอุปโภคและบริโภค จึงได้ทำการศึกษา ค้นคว้าองค์ความรู้ทางด้านวิทยาศาสตร์จากงานวิจัยที่เป็นที่ยอมรับในระดับชาติและนานาชาติเพื่อใช้ในการแก้ปัญหา มีงานวิจัย [1] ได้เสนอการใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์เป็นเครื่องมือช่วยในการแก้ปัญหา เฝ้าระวัง สังเกตการณ์ของการลुक้าน้ำเค็มของน้ำทะเลที่ลुक้าเข้ามายังแม่น้ำเจ้าพระยา โดยเริ่มแรกมีการศึกษาตัวสมการที่ใช้ในการหาค่าความเข้มข้นของน้ำเค็ม โดยสมการการแพร่-การพา(Advection Diffusion Equation) ศึกษาค่าพารามิเตอร์สำคัญที่เหมาะสมต่อของสมการของปัญหา เพื่อใช้ในการตรวจสอบประสิทธิภาพของแบบจำลองโดยการเปรียบเทียบกับผลเฉลยแม่นยำที่ได้จากการแก้สมการด้วยวิธีการแม่นยำ (Exact Solution) และได้ทำการนำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์นี้ไปใช้ในการทำนายค่าความเค็มของน้ำในแม่น้ำเจ้าพระยา โดยประกอบกับข้อมูลเบื้องต้นจากหน่วยงานรัฐ ซึ่งข้อมูลเหล่านี้เป็นข้อมูลที่ไม่ต่อเนื่อง (เป็นข้อมูลที่เก็บได้บางช่วงเวลา) หรือมีข้อมูลบางส่วนที่ขาดหาย โดยในงานวิจัยนี้ได้เสนอทำนายค่าความเค็มที่ไม่ต่อเนื่องนี้ไปทำการประมาณค่าในช่วงด้วยวิธีของลากรองจ์ (Lagrange Interpolation) และการประมาณค่าด้วยสไปไลน์กำลังสาม (Cubic Spline Interpolation) เพื่อให้ข้อมูลที่ได้อยู่ในรูปที่ต่อเนื่อง และนำข้อมูลนี้เป็น ข้อมูลของค่าเงื่อนไขค่าขอบและข้อมูลค่าเงื่อนไขค่าเริ่มต้น (Boundary Condition and Initial Condition) ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ต่อไป

ในการแก้ปัญหาสมการควบคุมที่อยู่ในรูปแบบของสมการเชิงอนุพันธ์ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ซึ่งต้องอาศัยการใช้กระบวนการวิเคราะห์เชิงตัวเลข ผู้วิจัยได้ศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับระเบียบวิธีเชิงตัวเลขที่ใช้แก้สมการของปัญหาดังกล่าวงานวิจัย [2-5] ได้ใช้ระเบียบวิธีของ MacCormack ในการประมาณข้อมูลของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ เพื่อคำนวณกระบวนการปรากฏการณ์ทางธรรมชาติควบคู่กับการพัฒนาความก้าวหน้าของเทคโนโลยีคอมพิวเตอร์ โดยประมาณการไหลของกลศาสตร์ของไหลซึ่งช่วยทำให้ประหยัดในการคำนวณและมีความแม่นยำมากขึ้น งานวิจัย [6, 7] ได้ใช้วิธีการของ MacCormack ใช้ในการแก้ปัญหาสมการในรูปแบบของไฮเปอร์โบลิก ในงานวิจัย [8] ใช้ MacCormack ตรวจสอบพฤติกรรมของการไหลแบบไดนามิกผ่านหัวฉีดต่างๆ ต่อมาในงานวิจัย [9-11] ได้ปรับปรุงวิธีการ MacCormack ให้มีความแม่นยำที่มากขึ้นและมีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้นในการคำนวณ

จากปัญหาและการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวิธีการแก้ปัญหา ในงานวิจัยนี้จะใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการทำนายค่าความเข้มข้นของน้ำเค็มที่ลुक้าเข้ามายังลุ่มแม่น้ำจันทบุรี โดยทำการเก็บข้อมูลตัวอย่างที่สถานีสังเกตการณ์ เมื่อเวลาเริ่มต้น และเก็บข้อมูลค่าความเค็มที่บริเวณปากแม่น้ำจันทบุรี เพื่อเป็นข้อมูลสำหรับข้อมูลที่ขอบ และในงานวิจัยนี้จะแบ่งหัวข้อออกเป็น น้ำเค็มบริเวณปากแม่น้ำจันทบุรีแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ระเบียบวิธีเชิงตัวเลข ผลการทดลอง สรุปผล เอกสารอ้างอิง



2. แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงการอธิบายค่าความเข้มข้นของค่าความเค็มของน้ำในแม่น้ำจันทบุรี เมื่อน้ำเค็มจากปากแม่น้ำไหลเข้ามาในบริเวณแม่น้ำจันทบุรี โดยจะแบ่งหัวข้อย่อยคือ ระเบียบวิธีเชิงตัวเลขของการแพร่ ความเค็มของแม่น้ำจันทบุรี โดยแบ่งเป็น สมการควบคุม ปัญหาค่าขอบและค่าเริ่มต้น

2.1 สมการควบคุม

จากรูปที่ 1 จะพิจารณาค่าความเค็มของน้ำในแม่น้ำจันทบุรีเป็นแนวยาว 1 มิติโดยไม่คิดความกว้างและความลึกของแม่น้ำ ในงานวิจัยนี้จะใช้สมการการแพร่และการพา 1 มิติ อธิบายค่าความเค็มของน้ำในแม่น้ำจันทบุรี ดังสมการที่ 1 โดยงานวิจัย [1]

$$\frac{\partial S}{\partial t} + U \frac{\partial S}{\partial x} = D \frac{\partial^2 S}{\partial x^2} \quad (1)$$

สำหรับทุกค่า $x \in [0, L]$ และสำหรับทุกค่า $t \in [0, T]$ โดยที่ $S = S(x, t)$ คือค่าความเข้มข้นของความเค็มของน้ำ (g/l) ที่ตำแหน่ง x ที่เวลา t โดยที่

U คือ ความเร็วของน้ำในแนวแกน x (m/s)

D คือ ค่าสัมประสิทธิ์ของการแพร่ความเค็ม (m^2/s)

L คือ ความยาวของแม่น้ำจันทบุรี

T คือ เวลาของแบบจำลอง

2.2 เงื่อนไขค่าเริ่มต้นและเงื่อนไขค่าขอบ

น้ำเค็มในแม่น้ำจันทบุรีซึ่งได้รับอิทธิพลจากน้ำเค็มที่มาจากบริเวณปากแม่น้ำจันทบุรีด้วยปรากฏการณ์ของน้ำขึ้น-น้ำลง ผนวกกับน้ำเค็มเริ่มต้นที่มีอยู่ในแม่น้ำจันทบุรี แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ใน

งานวิจัยนี้จะใช้ข้อมูลน้ำเค็มจากปากแม่น้ำจันทบุรี โดยทำการนำเครื่องมือไปตรวจวัดเพื่อเก็บข้อมูลน้ำเค็มในช่วง 24 ชั่วโมงบริเวณปากแม่น้ำและนำข้อมูลที่ได้ออกไปทำการประมาณค่าในช่วง ซึ่งจะนำไปเป็นค่าเงื่อนไขค่าขอบและทำการเก็บข้อมูลน้ำเค็มเริ่มต้นของสถานีสังเกตการณ์ เมื่อเวลา 8.00 น. เพื่อนำข้อมูลที่ได้ออกไปประมาณค่าในช่วงโดยข้อมูลที่ได้นี้จะไปเป็นค่าเงื่อนไขค่าเริ่มต้นต่อไป

2.2.1 เงื่อนไขค่าเริ่มต้น

ค่าน้ำเค็มที่ได้จากการเก็บข้อมูล เมื่อเวลา 8.00 น. ซึ่งมีข้อมูลอยู่ในรูปของฟังก์ชันเริ่มต้น $S(x, 0)$ โดยที่ $i = 1, 2, 3, \dots, N$ และ N เป็นจำนวนข้อมูลน้ำเค็มที่ใช้ในการเก็บข้อมูล เมื่อนำข้อมูลที่เก็บได้ทำการประมาณค่าในช่วง จะได้เงื่อนไขค่าเริ่มต้นนั้นคือ $S(x, 0) = F(x)$ สำหรับทุกค่าของ $x \in [0, L]$ ซึ่ง $F(x)$ แทนฟังก์ชันค่าความเค็มของน้ำในแม่น้ำจันทบุรีตลอดทั้งเส้นที่ศึกษาในงานวิจัยนี้

2.2.2 เงื่อนไขค่าขอบ

ข้อมูลน้ำเค็มที่เก็บข้อมูลบริเวณปากแม่น้ำจันทบุรีซึ่งติดกับทะเลในช่วง 24 ชั่วโมง โดยข้อมูลที่เก็บได้คือ $S(0, t_j)$ โดยที่ $j = 1, 2, 3, \dots, M$ และ M เป็นจำนวนข้อมูลน้ำเค็มที่ถูกเก็บในช่วงเวลา เมื่อนำข้อมูลที่เก็บได้ทำการประมาณค่าในช่วง 24 ชั่วโมงจะได้ ค่าเงื่อนไขค่าขอบขวา $S(0, t) = G(t)$ สำหรับทุกค่าของ $t \in [0, T]$ ซึ่ง $G(t)$ แทนฟังก์ชันค่าความเค็มบริเวณปากแม่น้ำจันทบุรีที่ในช่วง 24 ชั่วโมงและที่เงื่อนไขค่าขอบซ้าย ซึ่งมีอัตราการเปลี่ยนแปลงค่าความเค็มที่จุดตรวจสอบตำแหน่งสุดท้ายเท่ากับศูนย์ หรือ $\frac{\partial S}{\partial x}(L, t) = 0$ สำหรับทุกค่าของ $t \in [0, T]$



3. ระเบียบวิธีเชิงตัวเลข

ในหัวนี้จะนำเสนอการใช้ ระเบียบวิธีเชิงตัวเลขในการแก้ปัญหาสมการควบคุมของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในหัวข้อก่อนหน้านี้ โดยแบ่งออกเป็น ค่าเชิงตัวเลขสำหรับแก้สมการ สมการการแพร่-การพา ในงานวิจัยนี้จะใช้วิธีการของ MacCormack รวมไปถึง การประมาณค่าด้วยสไปลน์กำลังสาม ในการประมาณค่าในช่วงของข้อมูลที่ไม่ต่อเนื่องที่เกิดจากการเก็บภาคสนามมาใช้เพื่อให้ได้ข้อมูลขอบและข้อมูลเริ่มต้นของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่อยู่ในรูปฟังก์ชันต่อเนื่อง

3.1 ระเบียบวิธีของ MacCormack

ในงานวิจัยนี้จะใช้ MacCormack Method ในการแก้สมการการแพร่-การพา ซึ่งได้มีการศึกษา [11] พบว่าวิธีการนี้เหมาะสมต่อการแก้สมการดังกล่าว

ในงานวิจัยนี้จะทำการกำหนดค่าของตัวแปร $S(x, t_n) = S_i^n$ โดยที่ $S(x, t)$ ถูกแทนด้วยค่าความเค็มของน้ำในแม่น้ำจันทบุรีที่ตำแหน่ง $x = i\Delta x$ ที่เวลา $t = n\Delta t$ ซึ่ง $0 \leq i \leq M$ และ $0 \leq n \leq N$ โดยที่ i, n, M, N เป็นจำนวนเต็มบวก โดยวิธีการของ MacCormack เป็นวิธีการที่ประกอบด้วย 2 ขั้นตอนดังนี้

ขั้นตอนแรก (ขั้นตอนการคาดคะเน)

ในขั้นตอนนี้จะประมาณค่าสมการควบคุมโดยใช้ Forward Time and Forward Space Scheme (FTFS) ดังนี้

กำหนดให้ $S \cong S^n$, และทำการประมาณค่าเทอมอนุพันธ์อันดับที่ 1 และอนุพันธ์อันดับ 2 ดังนี้

$$\frac{\partial S}{\partial t} \cong \frac{S_i^{n+1} - S_i^n}{\Delta t}, \quad (2)$$

$$\frac{\partial S}{\partial x} \cong \frac{S_{i+1}^n - S_i^n}{\Delta x}, \quad (3)$$

$$\frac{\partial^2 S}{\partial x^2} \cong \frac{S_{i+1}^n - 2S_i^n + S_{i-1}^n}{(\Delta x)^2}, \quad (4)$$

แทนสมการที่ (2) – (4) ลงในสมการที่ (1) จะได้

$$\begin{aligned} & \left(\frac{S_i^{n+1} - S_i^n}{\Delta t} \right) + U \left(\frac{S_{i+1}^n - S_i^n}{\Delta x} \right) \\ & = D \left(\frac{S_{i+1}^n - 2S_i^n + S_{i-1}^n}{\Delta x^2} \right) \end{aligned} \quad (5)$$

สำหรับ $1 \leq i \leq M$ และ $0 \leq n \leq N-1$ จัดรูปสมการที่ (5) ใหม่จะได้

$$\begin{aligned} & \left(\frac{S_i^{n+1} - S_i^n}{\Delta t} \right) \\ & = -U \left(\frac{S_{i+1}^n - S_i^n}{\Delta x} \right) + D \left(\frac{S_{i+1}^n - 2S_i^n + S_{i-1}^n}{\Delta x^2} \right) \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} & = -\frac{U}{\Delta x} S_{i+1}^n + \frac{U}{\Delta x} S_i^n + \frac{D}{\Delta x^2} S_{i+1}^n \\ & \quad - \frac{2D}{\Delta x^2} S_i^n + \frac{D}{\Delta x^2} S_{i-1}^n \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} & = \left(-\frac{U}{\Delta x} + \frac{D}{\Delta x^2} \right) S_{i+1}^n + \left(\frac{U}{\Delta x} - \frac{2D}{\Delta x^2} \right) S_i^n \\ & \quad + \frac{D}{\Delta x^2} S_{i-1}^n \end{aligned} \quad (8)$$

ให้ $\alpha_1 = -\frac{U}{\Delta x} + \frac{D}{\Delta x^2}$, $\alpha_2 = \frac{U}{\Delta x} - \frac{2D}{\Delta x^2}$, $\alpha_3 = \frac{D}{\Delta x^2}$ และ

เทอมทางขวาของสมการ (8) คือ $(\delta_1)_i$ หรือ

$$(\delta_1)_i = \alpha_1 S_{i+1}^n + \alpha_2 S_i^n + \alpha_3 S_{i-1}^n \quad (9)$$

จากสมการที่ (8) จะได้ว่า

$$\frac{S_i^{n+1} - S_i^n}{\Delta t} = (\delta_1)_i \quad (10)$$

$$\text{นั่นคือ } S_i^{n+1} = S_i^n + \Delta t (\delta_1)_i \quad (11)$$



พิจารณาที่ เงื่อนไขค่าขอบซ้าย เมื่อแทน $i=1$ ลงในสมการที่ (9) จะได้ว่า

$$(\delta_1)_1 = \alpha_1 S_2^n + \alpha_2 S_1^n + \alpha_3 S_0^n \quad (12)$$

พิจารณาที่ เงื่อนไขค่าขอบขวา เมื่อแทน $i=M$ ลงในสมการที่ (9) จะได้ว่า

$$(\delta_1)_M = \alpha_1 S_{M+1}^n + \alpha_2 S_M^n + \alpha_3 S_{M-1}^n \quad (13)$$

เนื่องจากที่ เงื่อนไขค่าขอบขวา กำหนดให้เป็นอนุพันธ์อันดับ 1 ของค่าความเค้มเมื่อเทียบกับพื้นที่ นั่นคือ $\frac{\partial S}{\partial x} = 0$ และทำการประมาณเทอมอนุพันธ์

อันดับ 1 ด้วย $\frac{S_{i+1}^n - S_i^n}{\Delta x} = 0$ ที่ $i=M$ จะได้ว่า

$$S_{M+1}^n = S_M^n \text{ และแทนลงใน (13) จะได้}$$

$$(\delta_1)_M = (\alpha_1 + \alpha_2) S_M^n + \alpha_3 S_{M-1}^n \quad (14)$$

เรียกสมการที่ (11) ว่าเป็น ขั้นตอนการคาดคะเนของ MacCormack Method ด้วย เงื่อนไขค่าขอบซ้ายและขวา (12) และ (14)

ขั้นตอนที่สอง (ขั้นตอนการแก้ไข)

ในขั้นตอนนี้จะประมาณค่าเทอมอนุพันธ์อันดับที่ 1 และอนุพันธ์อันดับ 2 ดังนี้

$$\frac{\partial S}{\partial t} \cong \frac{S_i^{n+1} - S_i^n}{\Delta t}, \quad (15)$$

$$\frac{\partial S}{\partial x} \cong \frac{S_i^{n+1} - S_{i-1}^{n+1}}{\Delta x}, \quad (16)$$

$$\frac{\partial^2 S}{\partial x^2} \cong \frac{S_{i+1}^{n+1} - 2S_i^{n+1} + S_{i-1}^{n+1}}{(\Delta x)^2}, \quad (17)$$

แทนสมการที่ (15) – (17) ลงในสมการที่ (1) จะได้

$$\left(\frac{S_i^{n+1} - S_i^n}{\Delta t} \right)$$

$$= -U \left(\frac{S_i^{n+1} - S_{i-1}^{n+1}}{\Delta x} \right) + D \left(\frac{S_{i+1}^{n+1} - 2S_i^{n+1} + S_{i-1}^{n+1}}{\Delta x^2} \right) \quad (18)$$

$$= \frac{D}{\Delta x^2} S_{i+1}^{n+1} + \left(-\frac{U}{\Delta x} - \frac{2D}{\Delta x^2} \right) S_i^{n+1} + \left(\frac{U}{\Delta x} + \frac{D}{\Delta x^2} \right) S_{i-1}^{n+1} \quad (19)$$

ให้ $\beta_1 = \frac{D}{\Delta x^2}$, $\beta_2 = -\frac{U}{\Delta x} - \frac{2D}{\Delta x^2}$, $\beta_3 = \frac{U}{\Delta x} + \frac{D}{\Delta x^2}$ และเทอมทางขวาของสมการ (19) คือ $(\delta_2)_i$ หรือ

$$(\delta_2)_i = \beta_1 S_{i+1}^{n+1} + \beta_2 S_i^{n+1} + \beta_3 S_{i-1}^{n+1} \quad (20)$$

พิจารณาที่ เงื่อนไขค่าขอบซ้าย เมื่อแทน $i=1$

ลงในสมการที่ (20) จะได้ว่า

$$(\delta_2)_1 = \beta_1 S_2^{n+1} + \beta_2 S_1^{n+1} + \beta_3 S_0^{n+1} \quad (21)$$

พิจารณาที่ เงื่อนไขค่าขอบขวา เมื่อแทน $i=M$

ลงในสมการที่ (20) จะได้ว่า

$$(\delta_2)_M = \beta_1 S_{M+1}^{n+1} + \beta_2 S_M^{n+1} + \beta_3 S_{M-1}^{n+1} \quad (22)$$

เนื่องจากที่ เงื่อนไขค่าขอบขวา กำหนดให้เป็น

อนุพันธ์อันดับ 1 ของค่าความเค้มเมื่อเทียบกับพื้นที่ หรือ $\frac{\partial S}{\partial x} = 0$ และประมาณเทอมอนุพันธ์อันดับ 1 ด้วย

$$\frac{S_{i+1}^{n+1} - S_i^{n+1}}{\Delta x} = 0 \text{ ที่ } i=M \text{ จะได้ว่า } S_{M+1}^{n+1} = S_M^{n+1}$$

และแทนลงใน (22) จะได้

$$(\delta_2)_M = (\beta_1 + \beta_2) S_M^{n+1} + \beta_3 S_{M-1}^{n+1} \quad (23)$$

จะได้ Corrector Step ของ MacCormack คือ

$$S_i^{n+1} = S_i^n + \frac{\Delta t}{2} [(\delta_1)_i + (\delta_2)_i] \quad (24)$$

เมื่อ Conditionally Stable for MacCormack Scheme

$$\frac{D\Delta t}{\Delta x^2} < 0.5 \text{ และ } \frac{U\Delta t}{\Delta x} < 0.9$$



3.2 การประมาณค่าด้วย Cubic Spline

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ จำเป็นต้องใช้ข้อมูลค่าน้ำเค็มที่ปากแม่น้ำจันทบุรี สำหรับใช้เป็นข้อมูลของเงื่อนไขค่าขอบ และข้อมูลน้ำเค็มของแต่ละสถานีสังเกตการณ์เมื่อเวลาเริ่มต้น 8.00 น. สำหรับใช้เป็นเงื่อนไขค่าเริ่มต้น โดยข้อมูลเหล่านี้เป็นข้อมูลที่ไม่ต่อเนื่องและทำการนำข้อมูลเหล่านี้มาประมาณค่าให้อยู่ในรูปของฟังก์ชันที่เป็นตัวแทนของจุดทั้งหมดที่เก็บข้อมูลได้ โดยใช้วิธีการประมาณค่าด้วยวิธีการ Cubic Spline Interpolation

จากกระบวนการทั้งหมดนี้รวมถึงเงื่อนไขที่พิจารณา จะได้เส้นโค้งกำลังสามที่เป็นตัวแทนของข้อมูลแบบไม่ต่อเนื่องและนำไปใช้ประยุกต์กับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับงานวิจัยนี้

4. ผลลัพธ์จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

ในงานวิจัยนี้ได้เก็บข้อมูลน้ำเค็มในช่วงเดือนมีนาคมของทุกปี เนื่องจากเป็นช่วงที่มีการลुकน้ำเค็มอย่างมากจากปากแม่น้ำไปยังแม่น้ำจันทบุรีมากกว่า ซึ่งน้ำในแม่น้ำจันทบุรีนี้นำไปใช้ในการเพาะปลูกและการทำน้ำประปา โดยจะใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในการทำนายน้ำเค็มในแม่น้ำจันทบุรีตลอดช่วง 24 ชั่วโมง จะทำการกำหนดระดับน้ำขึ้น-ลงของแต่ละวันตลอดช่วง

เดือนมีนาคมให้มีค่าเท่ากันและทำการวัดค่าน้ำเค็มที่ปากแม่น้ำจันทบุรีตลอดจนค่าน้ำเค็มเริ่มต้นของแต่ละสถานีสังเกตการณ์เพื่อใช้เป็นข้อมูลเบื้องต้นสำหรับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้

ในงานวิจัยนี้จะเก็บข้อมูลเพื่อนำมาใช้เป็นข้อมูลเงื่อนไขค่าเริ่มต้น (Initial Condition) โดยจะเก็บข้อมูลค่าความเค็มของน้ำที่เวลา 8.00 น. ของแต่ละสถานีสังเกตการณ์โดยกำหนด 10 สถานีและเก็บข้อมูลบริเวณปากแม่น้ำทุก ๆ 3 ชั่วโมง เพื่อเป็นข้อมูลสำหรับข้อมูลเงื่อนไขค่าขอบ (Boundary Condition) โดยเริ่มจาก 8.00 น. จนถึง 8.00 น. ในวันถัดไป และ จะแสดงผลช่วงเวลา 24 ชั่วโมง ภายในแม่น้ำจันทบุรีในรูปแบบของกราฟและตารางค่าความเค็มของน้ำ โดยพิจารณาจากสถานีที่ 1 - 10 โดยแต่ละสถานีห่างกันประมาณ 3 กิโลเมตร รวมระยะทางทั้งหมด 27 กิโลเมตร เพื่อคาดคะเนน้ำเค็มในเวลาและจุดใด ๆ ในขอบเขตที่กำหนดโดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์กับข้อมูลบางจุดที่เก็บได้

ในงานวิจัยนี้กำหนดให้สัมประสิทธิ์การแพร่ของน้ำเค็มเป็น 0.1 m²/s อ้างอิง [1] และเก็บข้อมูลความเร็วน้ำเท่ากับ 0.06 m/s และฟังก์ชันที่เงื่อนไขค่าเริ่มต้นและเงื่อนไขค่าขอบดังต่อไปนี้

ตารางที่ 1 ข้อมูลน้ำเค็มที่เก็บเมื่อเวลา 8.00 น. ของแต่ละสถานีสังเกตการณ์ซึ่งเป็นข้อมูลที่ไม่ต่อเนื่องเพื่อใช้ในการ Interpolation สำหรับใช้เป็นข้อมูลเงื่อนไขค่าเริ่มต้นในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

ค่าความเค็มของน้ำที่แต่ละสถานี เมื่อเวลา 8.00 น. (g/l)										
สถานีสังเกตการณ์	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	34.94	32.87	29.64	25.83	23.53	19.59	16.31	15.82	12.93	8.56



ตารางที่ 2 ข้อมูลน้ำเค็มที่เก็บบริเวณปากแม่น้ำจันทบุรี โดยเก็บในช่วง 24 ชั่วโมง เมื่อเวลา 8.00 น. ซึ่งเป็นข้อมูลที่ไม่ต่อเนื่องเพื่อใช้ทำการ Interpolation สำหรับใช้เป็นข้อมูลเงื่อนไขค่าขอบในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

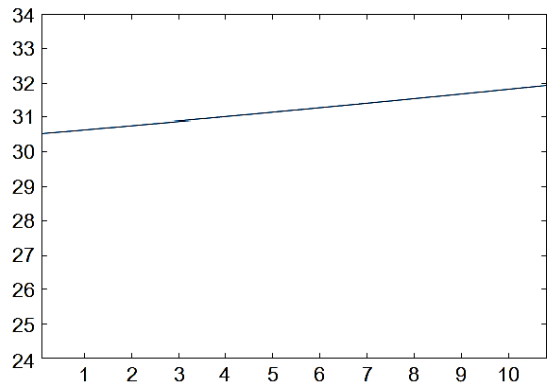
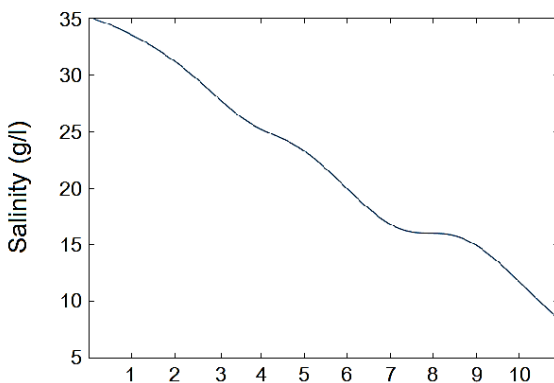
ค่าความเค็มของน้ำที่ปากแม่น้ำจันทบุรี ในช่วง 24 ชั่วโมง (g/l)

ช่วงเวลา	8.00	11.00	14.00	17.00	20.00	23.00	2.00	5.00	8.00
	34.94	30.53	27.93	25.15	20.65	27.16	29.21	30.93	33.64

กรณีที่ 1 แสดงค่าน้ำเค็มตลอดเส้นทางแม่น้ำจันทบุรีที่สถานีที่ 1-10 แต่ละช่วงเวลาทุก ๆ 3 ชั่วโมง ตั้งแต่ 8.00 ถึง 8.00 ของวันถัดไป รูปที่ 2-5 แสดงระดับค่าความเค็มของน้ำ แกนนอนแสดงถึงระยะความยาวของแม่น้ำจันทบุรีที่ประกอบด้วยสถานีสังเกตการณ์ และแกนตั้งแสดงค่าความเค็มของน้ำในหน่วยของ g/l

กรณีที่ 2 แสดงค่าความเค็มของน้ำของสถานีสังเกตการณ์ (จุดที่ 3,5,7,9) ในช่วง 24 ชั่วโมง ตั้งแต่ 8.00 ถึง 8.00 ของวันถัดไป กราฟรูปที่ 6-7 แสดงระดับค่าความเค็มของน้ำ แกนนอนแสดงเวลาช่วง 24 ชั่วโมง สถานีสังเกตการณ์ และแกนตั้งแสดงค่าความเค็มของน้ำในหน่วย g/l

ผลลัพธ์ที่ได้เสนอจะใช้ข้อมูลที่บริเวณปากแม่น้ำจันทบุรี หรือ สถานีที่ 1 ซึ่งเก็บข้อมูลค่าความเค็มของน้ำทุก 3 ชั่วโมง ทำให้เกิดค่าใช้จ่ายและมีความลำบากในการเก็บข้อมูลทุก 3 ชั่วโมง ผลลัพธ์ต่อมานำเสนอการเก็บข้อมูลสถานีที่ 1 โดยเก็บทุก 6 ชั่วโมงและทุก 12 ชั่วโมงและจะนำข้อมูลที่เก็บได้นำไปประมาณค่าให้เป็นฟังก์ชันที่ใช้เป็นข้อมูลที่ขอบของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์นี้ โดยจะแสดงในรูปของกราฟเปรียบเทียบและตารางแสดงค่าเปรียบเทียบ ทั้ง 3 กรณีตั้งรูปที่ 8

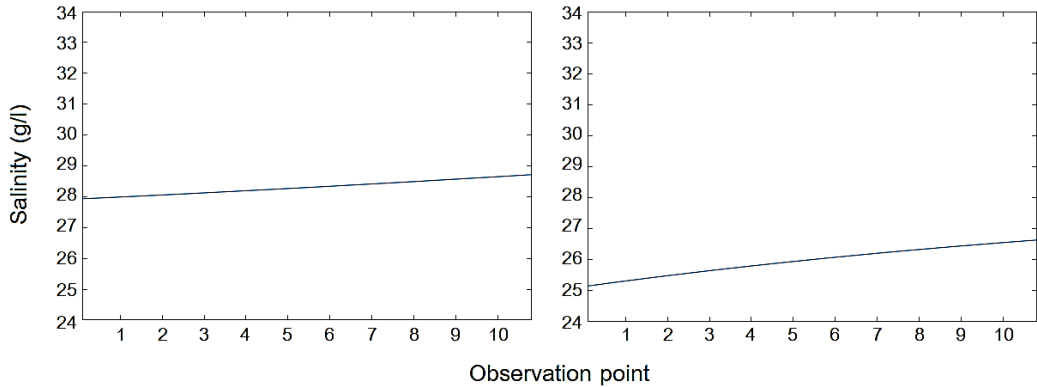


Observation point

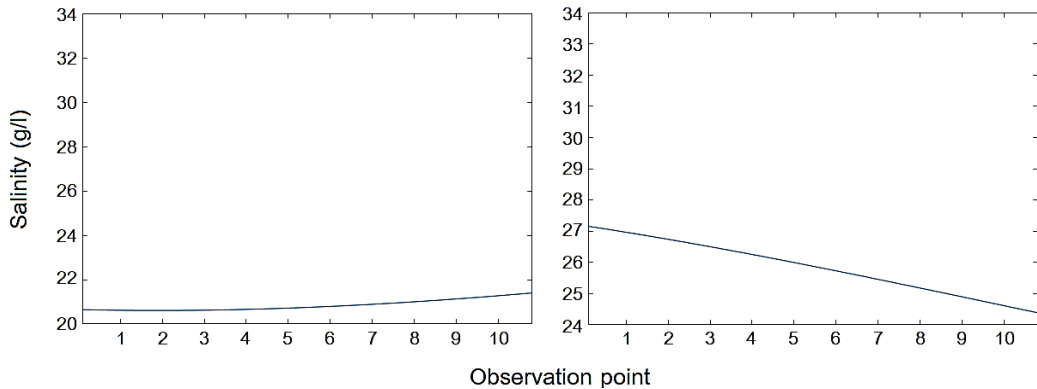
รูปที่ 2 กราฟแสดงค่าความเค็มของน้ำตลอดเส้นทางแม่น้ำจันทบุรีเมื่อเวลา 8.00 น. (ซ้าย) และ 11.00 น. (ขวา)



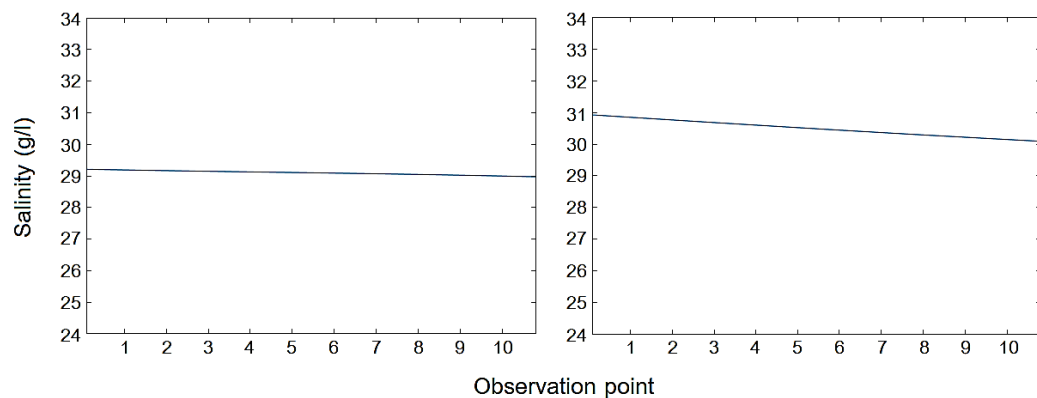
บทความวิจัย



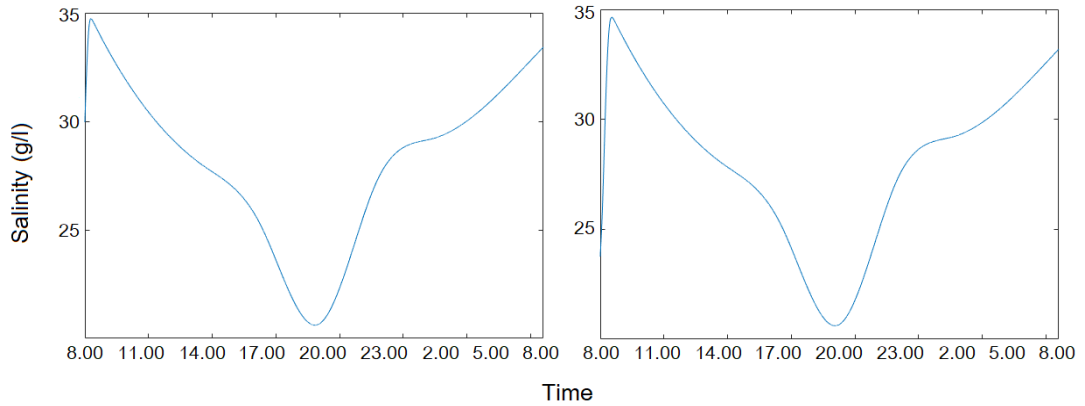
รูปที่ 3 กราฟแสดงค่าความเค็มของน้ำตลอดเส้นทางแม่น้ำจันทบุรีเมื่อเวลา 14.00 น. (ซ้าย) และ 17.00 น. (ขวา)



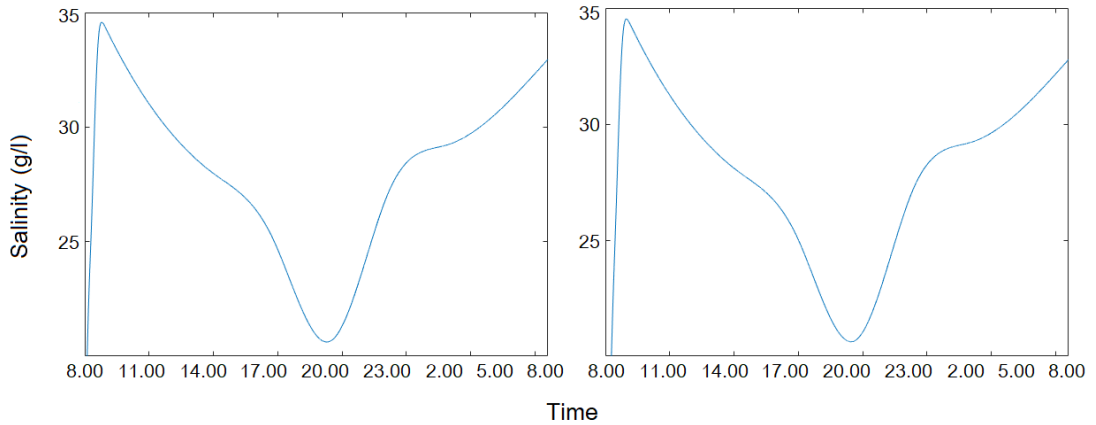
รูปที่ 4 กราฟแสดงค่าความเค็มของน้ำตลอดเส้นทางแม่น้ำจันทบุรีเมื่อเวลา 20.00 น. (ซ้าย) และ 23.00 น. (ขวา)



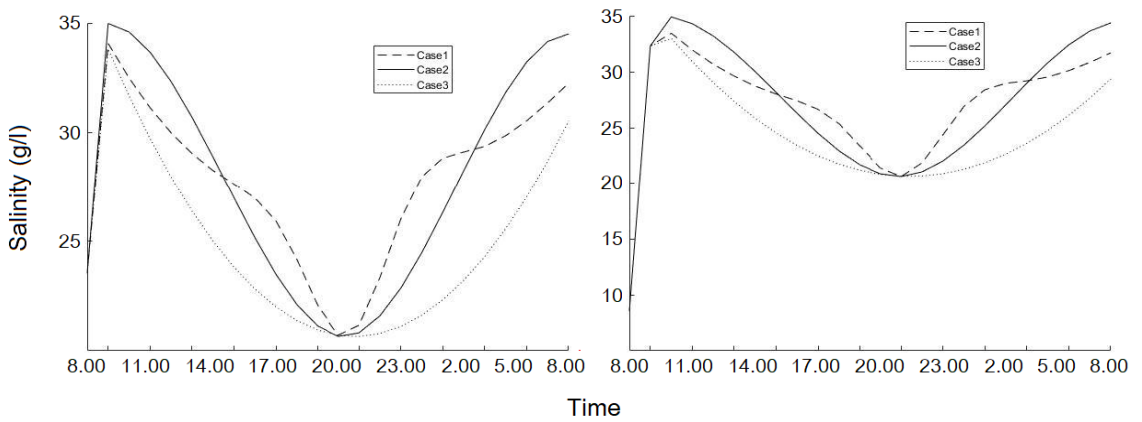
รูปที่ 5 กราฟแสดงค่าความเค็มของน้ำตลอดเส้นทางแม่น้ำจันทบุรีเมื่อเวลา 2.00 น. (ซ้าย) และ 5.00 น. (ขวา)



รูปที่ 6 กราฟแสดงค่าความเค็มของน้ำ ณ สถานีที่ 3 และ สถานีที่ 5



รูปที่ 7 กราฟแสดงค่าความเค็มของน้ำ ณ สถานีที่ 7 และ สถานีที่ 9



รูปที่ 8 กราฟเปรียบเทียบค่าความเค็มที่สถานีที่ 5 (ซ้าย) และ 9 (ขวา) ตลอด 24 ชั่วโมง ใน 3 กรณี



ค่าตัวเลขในตารางที่ 3-4 แสดงการเปรียบเทียบค่าความเค็มของน้ำในแม่ น้ำจันทบุรี ในกรณีที่แตกต่างกันของช่วงเวลาการเก็บข้อมูลที่ปากแม่น้ำจันทบุรี และนำข้อมูลไปทำการประมาณค่าเพื่อได้ฟังก์ชันต่อเนื่องที่เป็นเงื่อนไขสำหรับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ข้อมูลที่ได้เสนอนี้เป็นการใช้เพื่อเป็นแนวทางช่วยตัดสินใจในการทำนายค่าความเค็มของน้ำสำหรับการเก็บข้อมูลที่ปากแม่น้ำทุก 3 ชั่วโมง (กรณี 1) เนื่องจากมีการเก็บข้อมูลถี่ทุก 3 ชั่วโมงทำให้การทำนายน้ำเค็มในแม่ น้ำจันทบุรี มีความแม่นยำมากขึ้นเนื่องจากมีข้อมูลหลายช่วงเวลา ซึ่งข้อเสียคือในการเก็บข้อมูลจริงสำหรับกรณีนี้มีค่าใช้จ่ายมากขึ้นต่อการเก็บข้อมูลที่มากขึ้น

ประกอบกับต้องใช้เวลาในการเก็บข้อมูลนานขึ้น และข้อดีสำหรับสำหรับการเก็บข้อมูลของน้ำเค็มที่บริเวณปากแม่น้ำทุก 6 ชั่วโมง และ 12 ชั่วโมง เป็นการประหยัดค่าใช้จ่ายและลดเวลาในการเก็บข้อมูล แต่อาจจะทำให้ทำนายค่าความเค็มของน้ำในแม่ น้ำจันทบุรี มีความคลาดเคลื่อนออกจากค่าจริงจากตารางที่ 4 ค่าความเค็มของน้ำที่เวลา 14.00 น. ค่าความเค็มของกรณี 2 (29.79 g/l) เมื่อเทียบกับกรณี 1 (28.62 g/l) จะมีค่าคลาดเคลื่อนของค่าความเค็มของน้ำเท่ากับ 4.08 % และค่าความคลาดเคลื่อนของกรณี 3 (25.67 g/l) เมื่อเทียบกับกรณีที่ 1 (28.62 g/l) มีค่าความคลาดเคลื่อนของค่าความเค็มของน้ำเท่ากับ 10.31 %

ตารางที่ 3 ตารางเปรียบเทียบค่าความเค็มของน้ำที่สถานีที่ 5 ทุก 2 ชั่วโมง

ค่าความเค็มของน้ำที่สถานีที่ 5 ในช่วง 24 ชั่วโมง (g/l)													
เวลา	8.00	10.00	12.00	14.00	16.00	18.00	20.00	22.00	24.00	2.00	4.00	6.00	8.00
กรณี 1	23.53	32.48	29.98	28.25	26.97	24.16	20.70	23.33	27.97	29.10	29.85	31.35	33.18
กรณี 2	23.53	34.58	32.32	29.56	25.15	22.10	20.65	21.59	24.47	28.25	31.83	34.15	34.13
กรณี 3	23.53	31.66	27.95	25.00	22.81	21.37	20.70	20.78	21.62	23.21	25.57	28.68	32.55

ตารางที่ 4 ตารางเปรียบเทียบค่าความเค็มของน้ำที่สถานีที่ 9 ทุก 2 ชั่วโมง

ค่าความเค็มของน้ำที่สถานีที่ 9 ในช่วง 24 ชั่วโมง (g/l)													
เวลา	8.00	10.00	12.00	14.00	16.00	18.00	20.00	22.00	24.00	2.00	4.00	6.00	8.00
กรณี 1	12.82	33.24	30.53	28.62	27.33	25.14	21.22	22.11	27.14	39.00	39.58	30.92	32.71
กรณี 2	12.82	34.85	33.03	29.79	26.06	22.75	20.82	21.13	23.63	27.28	31.01	33.74	34.41
กรณี 3	12.82	32.70	28.81	25.67	23.29	21.66	20.80	20.69	21.34	22.74	24.91	27.83	31.51



5. สรุปผล

ปัจจัยหลักของค่าความเค็มของน้ำในแม่น้ำจันทบุรีที่สูงขึ้นมาจากอิทธิพลการรุกคืบของน้ำทะเลบริเวณปากแม่น้ำตามกระแสน้ำขึ้นและน้ำลง การแผ่กระจายการรุกคืบของน้ำเค็มจึงเป็นสิ่งสำคัญที่จะต้องคอยสังเกตการณ์เพราะน้ำในแม่น้ำจันทบุรีเป็นน้ำใช้ทำน้ำประปา ทำการเกษตรของชุมชนบริเวณรอบเนื่องจากตลอดเส้นทางแม่น้ำจันทบุรีมีการตั้งสถานีวัดค่าน้ำเค็มของแม่น้ำมีน้อยประกอบด้วยการวัดค่าน้ำเค็มไม่ได้ครอบคลุมทุกช่วงเวลา ในงานวิจัยนี้จึงเสนอการใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในการคำนวณเพื่อพยากรณ์ค่าความเค็มของน้ำในช่วงเดือนที่มีการรุกคืบน้ำเค็มมากที่สุดและผลลัพธ์ที่ได้สามารถเป็นข้อมูลช่วยในการตัดสินใจได้ว่าเวลาที่เหมาะสมต่อการนำน้ำไปใช้ประโยชน์ของแต่ละช่วงของแม่น้ำจันทบุรี

จากข้อมูลน้ำเค็มที่เก็บข้อมูลจากปากแม่น้ำและนำไปประมาณค่า ที่มีค่าความเค็มมากน้อยสลับกันแต่ละช่วงเวลาเนื่องจากกระแสน้ำขึ้นน้ำลงในแต่ละวันและขนาดของแม่น้ำจันทบุรีที่มีระยะทางที่สั้นส่งผลต่อค่าความเค็มของน้ำบริเวณสถานีสังเกตการณ์ที่กำหนดไว้ โดยจากผลลัพธ์ที่ได้ แนวโน้มของค่าน้ำเค็มที่แสดงในรูปแบบของตารางและกราฟมีทิศทางไปในทิศทางเดียวกันกับค่าน้ำเค็มแต่ละสถานี

จากกรณีศึกษา ตัวอย่างจากกราฟผลลัพธ์หากมีการนำน้ำในแม่น้ำจันทบุรีไปทำน้ำประปาควรเลือกช่วงประมาณ 20.00 น. เนื่องจากค่าความเค็มของน้ำมีค่าต่ำ ทำให้ลดต้นทุนในการทำน้ำประปาที่สามารถใช้ได้

บริเวณแม่น้ำจันทบุรีมีการทำเกษตรกรรม การทำนา กุ้งและส่วนใหญ่จะนำน้ำในแม่น้ำจันทบุรีไปเก็บในบ่อที่ชาวบ้านสร้างเพื่อนำน้ำที่เก็บนี้ไปใช้ประโยชน์ซึ่งการ

นำน้ำเค็มไปเก็บในบ่อดินในระยะเวลาอันนานจะมีผลต่อการที่น้ำเค็มซึมลงดินทำให้ดินบริเวณนั้นมีความเค็มจนทำให้เกิดปัญหาในระยะยาวต่อการทำเพาะปลูกพืชเศรษฐกิจ ในส่วนปัญหานี้จะนำไปสู่งานวิจัยต่อไปในอนาคต

6. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้สามารถดำเนินการวิจัยได้โดยเสร็จสมบูรณ์ ต้องขอขอบพระคุณ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก ที่ได้สนับสนุนทุนศึกษาวิจัย เพื่อเป็นประโยชน์ต่อการศึกษาต่อไป

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] K. Khemisara and P. Nopparat, Numerical simulation for salinity intrusion measurement models using the MacCormack finite difference method with lagrange interpolation, Journal of Interdisciplinary Mathematics, 2020, 23(6), 1157-1185.
- [2] J. Stalaker, A variation on Mac Cormack's method for axisymmetric viscous compressible flows, AIAA Journal, 1983, 21, 1043-1044.
- [3] J. Lawrence, L Tannehill and C. Chaussee, Application of the implicit MacCormack scheme to the parabolized Navier-Stokes equations, Interim Report National Aeronautics and Space Administration, Ames Research Center, CA, USA, 1984.



- [4] M.M. Marcelo, B. José Divo and B. Bressan, Finite volume analysis with the MacCormack method applied to metal flow in forward extrusion, *Journal of Mechanical Engineering*, 2017, 5(1), 1-8.
- [5] F. Gumilar and P.H. Gunawan, Parallel computation of MacCormack method for simulating nozzle gas flow, 7th International Conference on Information and Communication Technology (ICoICT), *Proceeding*, 2019, 1-8.
- [6] K. Hongjoong, Two-step MacCormack method for statistical moments of a stochastic Burger's equation, *Dynamics of Continuous, Discrete and Impulsive Systems Series A: Mathematical Analysis*, 2007, 5(14), 28657-28684.
- [7] P. Nopparat, Numerical treatment of a modified MacCormack scheme in a nondimensional form of the water quality models in a nonuniform flow stream, *Journal of Applied Mathematics*, 2014, 1-8.
- [8] M. S. Rasoul, G. Sarmad, M.F. Majid and A.A. Bidckhti, Numerical solution of the shallow water equations using fourth-order compact MacCormack scheme, *The Journal of the Earth and Space Physics*, 2017, 43(1), 209-228.
- [9] J. Reza and G. Sarmad, Application of the fourth-order compact MacCormack scheme with a four-stage Runge–Kutta time marching for numerical solution of unsteady and non-linear Rossby adjustment problem, *Iranian Journal of Geophysics*, 2017, 11(3), 57-74.
- [10] H. Shufang, Q. Wenlin and C. Hongbin, A predictor–corrector compact finite difference scheme for a nonlinear partial integro-differential equation, *International Journal of Nonlinear Sciences and Numerical Simulation*, 2021, 23(3), 892-898.
- [11] N. Eric , R.T. Alqahtani and N.C. Jean, A MacCormack method for complete shallow water equations with source terms, *Numerical Analysis*, 2019, 1-27.



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 (ไม่เกิน 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 no less than 2500 words using a word count command of MS Word (up to 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

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/jointech/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 ๑๙ ฉบับที่ ๒ ประจำปี ๒๕๖๖

บทความ (Articles)

- Analysis of Temperature Distribution and Thermal Conductivity of Rubber Compound during Compression Molding Process, The Journal of Industrial Technology, 2023, 19(2), 1-12.
- Effect of Post Weld Heat Treatment on High-temperature Wear Resistance of Martensitic Stainless Steel AWS A5.9 ER420 Weldment by GMAW Process, The Journal of Industrial Technology, 2023, 19(2), 13-30.
- Engineering Properties of Mortars Incorporating Recycled Fibers from Waste Printed Circuit Boards, The Journal of Industrial Technology, 2023, 19(2), 31-46.
- Increasing Frozen Chicken Yields in the Pet Food Topping Process, The Journal of Industrial Technology, 2023, 19(2), 47-60.
- Biogas for the use as Fuel in Sour Tamarind Cube Manufacture of OTOP in Duang Thong District, Phetchabun Province, The Journal of Industrial Technology, 2023, 19(2), 61-69.
- Design of Light Compensation System for Agriculture under Solar Panel, The Journal of Industrial Technology, 2023, 19(2), 70-84.
- Study, Design, and Simulation of Bridgeless Totem-pole Power Factor Correction, The Journal of Industrial Technology, 2023, 19(2), 85-97.
- Bio-adhesive based Modified Cassava Starch Waste/polyvinyl Alcohol Crosslinked with Tannic Acid for Wood Application, The Journal of Industrial Technology, 2023, 19(2), 98-108.
- Influence of Metakaolin on Mechanical Properties of Fly Ash Geopolymer Mortar Reinforced with Steel Fibers, The Journal of Industrial Technology, 2023, 19(2), 109-122.
- Development of Braille-making Devices on Pharmaceutical Labels using 3D Printers, The Journal of Industrial Technology, 2023, 19(2), 123-135.
- Application of Failure Mode and Effect Analysis of Plastics Industry with Fuzzy Multi-Criteria Decision Making a Case Study: Plastic Resin Manufacturing in Thailand, The Journal of Industrial Technology, 2023, 19(2), 136-158.
- Effect of Injection Pressure and Timing of the Ternary Blends (Ethanol-Biodiesel-Diesel) on Combustion Characteristics, The Journal of Industrial Technology, 2023, 19(2), 159-174.
- Treatment of Phosphorus in Wastewater by Coagulation with Aluminum Sulfate, The Journal of Industrial Technology, 2023, 19(2), 175-187.
- Development of a Mixture of Dan Kwian Clay Body and Dong Ma Fai Coffee Grounds to Create a Ceramic Filter for Dong Ma Fai Coffee Drip, The Journal of Industrial Technology, 2023, 19(2), 188-203.
- Mathematical Model for Salinity Intrusion Measurement of Chanthaburi River, The Journal of Industrial Technology, 2023, 19(2), 204-217.