

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

ISSN: 2697-5548 (Online)



DRIVEN BY



The Journal of Industrial Technology

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม ปีที่ ๑๙ ฉบับที่ ๓ ประจำปี ๒๕๖๖

VOLUME 19 | ISSUE 3 | 2023 | Focused on engineering and industrial technology

Published by College of Industrial Technology (CIT), KMUTNB

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม ปีที่ ๑๙ ฉบับที่ ๓ ประจำปี ๒๕๖๖

กองบรรณาธิการวารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม

ที่ปรึกษา

ศาสตราจารย์ ดร.สุชาติ เข้ายิ่งจีน
รองศาสตราจารย์ ดร.สมิตร ส่งพิริยะกิจ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

บรรณาธิการ

รองศาสตราจารย์ ดร.อรรถพล แก้ววิลัย

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

รองบรรณาธิการ

รองศาสตราจารย์ ดร.บุญลือ สวัสดิ์มงคล

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

กองบรรณาธิการ

ศาสตราจารย์ ดร.ประยุทธ์ อัครเอกพาลิน
ศาสตราจารย์ ดร.สุทธิศักดิ์ พงศ์ธนาพานิช
ศาสตราจารย์ ดร.นวดล เหล่าศิริพจน์
ศาสตราจารย์ ดร.พิเชษฐ ลิ่มสุวรรณ
ศาสตราจารย์ ดร.สำเร็จ จักรใจ
ศาสตราจารย์ ดร.ประณัฐ โพธิยะราช
ศาสตราจารย์ ดร.หทัยกานต์ มนัสปิยะ
ศาสตราจารย์ ดร.ผดุงศักดิ์ รัตนเดโช
ศาสตราจารย์ ดร.ปริญญา จินดาประเสริฐ
ศาสตราจารย์ นาวาอากาศโท ดร.สรวิชัย สุจิตจร
รองศาสตราจารย์ ดร.ชนัดชัย กุลรวานิชพงษ์
รองศาสตราจารย์ ดร.อภิรัตน์ เล่าห์บุตรี
รองศาสตราจารย์ ดร.สุรรัตน์ 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 ถนนประชาราษฎร์ 1 แขวงวงศ์สว่าง เขตบางซื่อ กรุงเทพฯ 10800 โทร. 02-555-2000 ต่อ 6249, Email: JIT.journal@gmail.com

Objectives

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

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

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

Publishing Schedule

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

Publisher

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

บทบรรณาธิการ

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology, ISSN Online: 2697-5548) ปีที่ 19 ฉบับที่ 3 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 | |
| ศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทนและจลนพลศาสตร์ของการหมักร่วมระหว่างเศษอาหารและผลิตภัณฑ์เยื่อชีวภาพบรรจุอาหาร (Biochemical Methane Potential and Kinetics on Anaerobic Co-digestion of Food Waste and Cellulose-based Food Packaging Product) <i>Nattapon Sawettabut, Daoroonng Sungthong, Nopawan Ratasuk, Umarat Santisukkasaem</i> | 1-15 |
| การพัฒนาฟิล์มบรรจุภัณฑ์จากพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ผสมกรดแทนนิกเพื่อยับยั้งแบคทีเรียในเนื้อปลาชนิด (Development of Packaging Films Based on Polyvinyl Alcohol and a Tannic Acid Blend for Inactivation of Bacteria in Tilapia (<i>Oreochromis niloticus</i>) Fillets) <i>Pattama Naewkanya, Nataporn Sowasod</i> | 16-30 |
| การศึกษาตัวแปรกระบวนการผลิตสายพานตีนตะขาคด้วยโปรแกรม Cast Designer สำหรับแบบหล่ออินเวสต์เมนต์เพื่อลดการหดตัว (The study of Factors in Track Shoe Manufacturing Process with Cast Designer Program for Investment Casting to Reduce Shrinkage) <i>Tinnagorn Swatdisan, Khanittha Wongseedakaew, Patpimol Suwanka</i> | 31-44 |
| การควบคุมความสว่างของท่อนำแสงร่วมกับหลอดแอลอีดีด้วยวิธีโครงข่ายประสาทเทียม (Illuminance Control of Light Pipes and Dimmable LEDs with Artificial Neural Network) <i>Monthol Fak-aim, Kiatchai Banlupholsakul, Piyapong Olanrathichachat, Tharathip Sreesattabud</i> | 45-61 |
| การควบคุมความกว้างของแนวเชื่อมแบบทันทีด้วยวิธีการควบคุมพีไอดีแบบปรับค่าได้โดยใช้การประมวลผลภาพอินฟราเรดในระหว่างการเชื่อมเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำด้วยไฟเบอร์เลเซอร์ (Real-time Feedback Control for Uniform Weld Bead using Adaptive PID Controller with Infrared Image Processing in Fiber Laser Welding of Low Carbon Steel) <i>Sitthichai Sarannat, Naren Chaithanee, Thossaporn Kaewwichit</i> | 62-80 |



สารบัญ (ต่อ)

| บทความวิจัย (ต่อ) | หน้า |
|---|---------|
| อิทธิพลของสภาวะการบ่มต่อกำลังของมอร์ตาร์ที่ใช้วัสดุประสานกระตุ้นด้วยต่างจากเถาผ่านหินแคลเซียมสูงและเถาผ่านหินแคลเซียมต่ำ (Influence of Curing Conditions on Strength of Alkali Activated Mortar Made from High Calcium Fly Ash and Low Calcium Fly Ash) <i>Apiwish Thongraksa, Saofee Dueramae, Sirichai Pethrung, Akkadath Abdulmatin, Tawich Klathae</i> | 81-92 |
| A Study of The Application of Vortex Tube for Temperature Reduction of Heated Volume <i>Seekharin Komonhirun, Warissara Suriyasing, Anuphong No-inkaew, Pongpol Sanjaiwong, Weerayut Jitwiriya</i> | 93-103 |
| การประเมินการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกโดยการคัดแยกขยะรีไซเคิลประเภทกระดาษของวิทยาลัยนวัตกรรมการจัดการ (Evaluation of Greenhouse Gas Emission Reduction by Paper Waste Recycle Sorting from College of Innovative Management) <i>Kamonrat Yodharn</i> | 104-112 |
| การดูดซับสีย้อมแอสิดในคอลัมน์เบดนิ่งด้วยเม็ดอลูมินากัมมันต์ที่เตรียมจากเศษอลูมิเนียม (Fixed-bed Adsorption of Acid Dye using Granular Activated Alumina Prepared from Aluminum Scrap) <i>Patcharee Kamthita, Natthawan Srinam</i> | 113-127 |
| การทำนายพฤติกรรมการดัดของคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่เสื่อมสภาพได้รับการซ่อมและเสริมกำลังด้วยแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์โดยใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Prediction of Flexural Behavior of Degraded Beam Repaired and Strengthened by CFRP Sheets Using Finite Element Method) <i>Supitcharya Areemit, Sayan Sirimontree, Sutthahathai Potinamtong, Chanachai Thongchom</i> | 128-141 |
| การหาสภาวะที่เหมาะสมของการย้อมสีไม้ยางพาราประสานด้วยสีไม้สกัดจากใบชาอัสสัม (Optimized Dyeing Process for Rubber Wood Finger Joint Board by Teak Color of Assam Tea Leaves) <i>Akara, Atipunt Loymuangklang, Supawat Pokhaw, Witthaya Damrongtham, Sirichai Yodwangjai</i> | 142-159 |



สารบัญ (ต่อ)

| บทความวิจัย (ต่อ) | หน้า |
|---|---------|
| การปรับปรุงกระบวนการผลิตเสื้อผ้าสำเร็จรูปเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการผลิต: กรณีศึกษาบริษัท ABC จำกัด (Garment Production Process Improvement to Increase Production Efficiency: A Case Study of ABC Co., Ltd.) <i>Witchayut Ngamsaard, Piyanate Nakseedee, Nutthaphon Ingprasert</i> | 160-176 |
| ข้อมูลสำหรับผู้เขียนและการเตรียมต้นฉบับ (Authors Guideline and Manuscript Preparation) | S1 |
| แบบฟอร์มนำส่งบทความ (Manuscript Submission Form) | S2 |



ศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทนและจลนพลศาสตร์ของการหมักร่วมระหว่าง เศษอาหารและผลิตภัณฑ์เยื่อชีวภาพบรรจุอาหาร

ณัฐพล เสวตบุตร ดาวรุ่ง สังข์ทอง* นภวรรณ รัตสุข และ อุมารัจน์ สันติสุขเกษม

ภาควิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม, คณะวิทยาศาสตร์, มหาวิทยาลัยศิลปากร

* ผู้ประสานงานเผยแพร่ (Corresponding Author), E-mail: sungthong_d@su.ac.th

วันที่รับบทความ: 10 พฤษภาคม 2566; วันที่ทบทวนบทความ: 26 มิถุนายน 2566; วันที่ตอบรับบทความ: 4 กรกฎาคม 2566

วันที่เผยแพร่ออนไลน์: 1 พฤศจิกายน 2566

บทคัดย่อ: การย่อยสลายภายใต้สภาวะไร้อากาศโดยการหมักร่วมได้รับการพิสูจน์แล้วว่าเป็นอีกเทคโนโลยีหนึ่งที่จะช่วยเพิ่มปริมาณการผลิตก๊าซมีเทนให้สูงขึ้นได้ การศึกษานี้จึงทำการตรวจสอบถึงศักยภาพในการผลิตก๊าซมีเทนโดยการหมักร่วมระหว่างเศษอาหาร (Food Waste, FW) และผลิตภัณฑ์เยื่อชีวภาพบรรจุอาหาร (Cellulose-based Food Packaging Product, CFPP) ที่อุณหภูมิระดับปานกลาง (35 ± 2 องศาเซลเซียส) ในรูปแบบกะ (Batch Experiment) เป็นระยะเวลา 45 วัน โดยอัตราส่วนระหว่างวัสดุตั้งต้นทั้ง 2 ชนิดที่ทำการศึกษามี 3 อัตราส่วน (FW/CFPP 100:0, 40:60 และ 0:100 (โดยน้ำหนักของแข็งระเหยง่าย)) และมีการใช้อัตราส่วนระหว่างวัสดุตั้งต้นและหัวเชื้อจุลินทรีย์เท่ากับ 0.5 รวมทั้งมีการเติมโซเดียมไบคาร์บอเนต (NaHCO_3) เพื่อให้กระบวนการย่อยสลายภายใต้สภาวะไร้อากาศอยู่ในสภาวะสมดุล นอกจากนี้ได้มีการนำโมเดลทางคณิตศาสตร์ จำนวน 4 โมเดล (Modified Gompertz Model, First-order Model, Monod Model และ Cone Model) มาใช้ในการประเมินความเหมาะสมของการทำนายผลผลิตก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้นจากวัสดุตั้งต้นอัตราส่วนต่าง ๆ ด้วย ผลการศึกษา พบว่า อัตราส่วน FW/CFPP 100:0 ให้ผลผลิตก๊าซมีเทนสะสมสูงที่สุด รองลงมาคือ 40:60 และ 0:100 โดยมีค่าผลผลิตก๊าซมีเทนเท่ากับ 459.15, 381.79 และ 355.60 มิลลิลิตรมาตรฐานต่อกรัมของแข็งระเหยง่าย ตามลำดับ และจากโมเดลทางคณิตศาสตร์ที่ทำการศึกษาทั้งหมด พบว่า Modified Gompertz Model เป็นโมเดลที่มีความแม่นยำและเหมาะสมมากที่สุดในการใช้ทำนายผลผลิตก๊าซมีเทนของอัตราส่วน FW/CFPP 100:0 และ 0:100 แต่สำหรับอัตราส่วน FW/CFPP 40:60 พบว่า First-order Model เป็นโมเดลที่มีความแม่นยำและเหมาะสมมากกว่า Modified Gompertz Model นอกจากนี้ พารามิเตอร์ทางจลนพลศาสตร์ ได้แสดงให้เห็นว่า การหมักร่วมระหว่างเศษอาหารและผลิตภัณฑ์เยื่อชีวภาพบรรจุอาหาร (FW/CFPP 40:60) มีการผลิตก๊าซมีเทนในอัตราที่เร็วกว่าการหมักโดยใช้เศษอาหารหรือผลิตภัณฑ์เยื่อชีวภาพบรรจุอาหารเพียงอย่างเดียว

คำสำคัญ: ศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทน; เศษอาหาร; ผลิตภัณฑ์เยื่อชีวภาพบรรจุอาหาร; การหมักร่วม; จลนพลศาสตร์

Biochemical Methane Potential and Kinetics on Anaerobic Co-digestion of Food Waste and Cellulose-based Food Packaging Product

Nattapon Sawettabut, Daoroong Sungthong^{*}, Nopawan Ratasuk and Umarat Santisukkasaem

Department of Environmental Science, Faculty of Science, Silpakorn University

^{*} Corresponding author, E-mail: sungthong_d@su.ac.th

Received: 10 May 2023; Revised: 26 June 2023; Accepted: 4 July 2023

Online Published: 1 November 2023

Abstract: Anaerobic co-digestion is proven to be a promising technology for enhancing the production of methane. In this study, the biochemical methane potential (BMP) from anaerobic co-digestion of food waste (FW) and cellulose-based food packaging product (CFPP) was carried out under mesophilic ($35 \pm 2^\circ\text{C}$) condition in a batch mode for 45 days. Three mixing ratios of these two substrates (FW/CFPP 100:0, 40:60, and 0:100 based on volatile solids (VS)) were studied with a substrate-to-inoculum ratio of 0.5. Sodium bicarbonate (NaHCO_3) was also added to establish a stable anaerobic digestion process. In addition, four mathematical models (Modified Gompertz model, First-order model, Monod model, and Cone model) were employed to evaluate their suitability for predicting the methane production of the examined substrates. Based on the obtained results, it is found that the maximum cumulative methane yield was observed in FW/CFPP 100:0, followed by 40:60 and 0:100 with the values of 459.15, 381.79, and 355.60 NmL/gVS, respectively. Among all the studied kinetic models, it can be seen that the Modified Gompertz model was the most accurate and appropriate in predicting the methane production of FW/CFPP 100:0 and 0:100. However, in the case of FW/CFPP 40:60, the First-order model was found to be a better fit than the Modified Gompertz model. Besides, their kinetic parameters reveal that the co-digestion of FW/CFPP 40:60 had a faster methane production rate than the mono-digestion of FW or CFPP.

Keywords: Biochemical methane potential; Food waste; Cellulose-based food packaging product; Co-digestion; Kinetics



1. บทนำ

ปัจจุบันกระบวนการย่อยสลายภายใต้สภาวะไร้อากาศ (Anaerobic Digestion) ได้รับการพัฒนาขึ้นมากจนสามารถแข่งขันกับกระบวนการย่อยสลายแบบใช้อากาศได้เป็นอย่างดี โดยได้รับความนิยมในการนำไปใช้บำบัดน้ำเสียอุตสาหกรรมและขยะอินทรีย์ที่มีภาระบรรทุกสารอินทรีย์สูง ทั้งนี้การย่อยสลายภายใต้สภาวะไร้อากาศเป็นกระบวนการย่อยสลายทางชีวภาพที่อาศัยกลุ่มจุลินทรีย์ที่มีความจำเพาะ ทำหน้าที่ย่อยสลายวัสดุตั้งต้นที่สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพโดยไม่ใช้ออกซิเจน เกิดผลพลอยได้เป็นก๊าซชีวภาพที่มีองค์ประกอบหลักเป็นก๊าซมีเทน ซึ่งสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ ส่งผลให้กระบวนการย่อยสลายภายใต้สภาวะไร้อากาศเพื่อการบำบัดของเสียได้รับความนิยมเป็นอย่างมาก แต่อย่างไรก็ตาม การย่อยสลายภายใต้สภาวะไร้อากาศโดยใช้วัสดุตั้งต้นเพียงชนิดเดียว มักมีอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน (Carbon to Nitrogen Ratio, C/N ratio) ที่ไม่สมดุลต่อการทำงานของระบบส่งผลให้ระบบมีอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพลดลง และอาจทำให้ระบบการย่อยสลายล้มเหลว

จากรายงานการวิจัยเมื่อไม่นานมานี้ของ Yang, et al. [1] พบว่า การศึกษาเกี่ยวกับกระบวนการย่อยสลายภายใต้สภาวะไร้อากาศโดยการหมักร่วม (Anaerobic Co-digestion) มีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นทุกปี ทั้งนี้การย่อยสลายภายใต้สภาวะไร้อากาศโดยการหมักร่วมเป็นกระบวนการย่อยสลายของวัสดุตั้งต้นตั้งแต่ 2 ชนิดขึ้นไป ซึ่งมีลักษณะส่งเสริมซึ่งกันและกันและเป็นประโยชน์ต่อกระบวนการย่อยสลาย นอกจากนี้ยังทำให้ค่าใช้จ่ายในการเดินระบบลดลงและทำให้กระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพมีประสิทธิภาพสูงขึ้นได้อย่างมีนัยสำคัญ [2]

ด้วยเหตุและผลดังที่กล่าวมาข้างต้น คณะผู้วิจัยจึงให้ความสนใจในการศึกษาถึงการใช้องค์ประกอบเศษอาหารซึ่งจัดเป็นองค์ประกอบหลักของขยะมูลฝอยชุมชน โดยนำมาหมักร่วมกับผลิตภัณฑ์เยื่อชีวภาพบรรจุอาหารที่ผลิตจากเยื่อชานอ้อยผสมกับเยื่อไผ่ ซึ่งในปัจจุบันจัดเป็นขยะมูลฝอยอีกประเภทหนึ่งซึ่งมีแนวโน้มจะมีปริมาณมากขึ้นในอนาคต เนื่องจากได้รับการณรงค์ให้นำมาใช้แทนบรรจุภัณฑ์พลาสติกประเภทต่าง ๆ ทั้งนี้ผลิตภัณฑ์เยื่อชีวภาพบรรจุอาหารเป็นวัสดุชีวโพลีเมอร์ มีอัตราส่วนระหว่างคาร์บอนต่อไนโตรเจนสูง จัดเป็นวัสดุที่มีศักยภาพในการผลิตก๊าซมีเทน แต่อย่างไรก็ตาม หากนำมาใช้เป็นวัสดุตั้งต้นเพียงชนิดเดียวในการผลิตก๊าซมีเทน ก็จะส่งผลให้มีอัตราการผลิตก๊าซมีเทนในระดับต่ำ ดังนั้น การหมักร่วมระหว่างเศษอาหารและผลิตภัณฑ์เยื่อชีวภาพบรรจุอาหารจึงเป็นทางเลือกที่ดีทั้งในด้านการเพิ่มประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซมีเทนเพื่อผลิตพลังงานทดแทนและการแก้ไขปัญหาสิ่งแวดล้อมโดยการลดปริมาณขยะมูลฝอยที่นำไปกำจัดในหลุมฝังกลบ การวิจัยนี้จึงได้ดำเนินการศึกษาถึงศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทน (Biochemical Methane Potential, BMP) โดยการหมักร่วมระหว่างเศษอาหารและผลิตภัณฑ์เยื่อชีวภาพบรรจุอาหาร และศึกษาพารามิเตอร์ทางจลนพลศาสตร์ของการผลิตก๊าซมีเทนที่เกิดจากการหมักร่วมของวัสดุตั้งต้นทั้ง 2 ชนิดดังกล่าว ซึ่งผลที่ได้จากการศึกษานี้สามารถนำไปใช้เป็นข้อมูลสนับสนุนการเพิ่มประสิทธิภาพและการควบคุมการดำเนินงานที่เหมาะสมของกระบวนการย่อยสลายภายใต้สภาวะไร้อากาศโดยการหมักร่วมระหว่างเศษอาหารและ



ผลิตภัณฑ์เยื่อชีวภาพบรรจุอาหารในระบบที่มีขนาดใหญ่ต่อไปได้

2. วัสดุ อุปกรณ์ และวิธีการวิจัย

2.1 การเตรียมวัสดุตั้งต้น

2.1.1 เศษอาหาร

เศษอาหารที่ใช้ในการศึกษาเป็นเศษอาหารที่สังเคราะห์ขึ้น (Synthetic food waste, FW) โดยเตรียมให้มีองค์ประกอบต่าง ๆ เช่นเดียวกับที่ปรากฏในการศึกษาของ Abbas, et al. [3], Radu, et al. [4], Wang, et al. [5] และ Ariunbaatar, et al. [6] ทั้งนี้มีรายละเอียดของสูตรอาหารและสัดส่วนการเตรียมดังตารางที่ S1 (Supplementary) สำหรับการเตรียมเศษอาหารสังเคราะห์นั้น ดำเนินการโดยนำวัสดุชนิดต่าง ๆ ตามสัดส่วนที่ระบุไว้มาบดให้ละเอียดด้วยเครื่องบดอาหาร แล้วบรรจุลงในถุงพลาสติก และนำไปเก็บรักษาในตู้แช่แข็งที่อุณหภูมิต่ำกว่า -20 องศาเซลเซียส และนำออกมาวางทิ้งไว้ข้ามคืนที่อุณหภูมิห้องเพื่อให้น้ำแข็งละลายก่อนเริ่มใช้งาน สำหรับลักษณะทางกายภาพและทางเคมีที่สำคัญของเศษอาหารสังเคราะห์ มีรายละเอียดแสดงดังตารางที่ S2 (Supplementary)

2.1.2 ผลิตภัณฑ์เยื่อชีวภาพบรรจุอาหาร

ผลิตภัณฑ์เยื่อชีวภาพบรรจุอาหาร (Cellulose-based Food Packaging Product, CFPP) ที่นำมาใช้ในการศึกษาวิจัยเป็นภาชนะรองรับอาหารที่ผลิตจากเยื่อชานอ้อยผสมเยื่อไผ่ไม่เคลือบพลาสติก มีชื่อเรียกทางการค้าว่า เกรซ ซิมเปิล (Grac simple) ผ่านการเตรียมโดยนำมาตัดให้มีขนาดประมาณ 5 x 5 มิลลิเมตร และนำไปอบที่อุณหภูมิ 105 ± 2 องศาเซลเซียส เพื่อกำจัดความชื้น และเก็บรักษาไว้ในถุงพลาสติก

ณ อุณหภูมิห้อง ก่อนใช้งาน ทั้งนี้ผลิตภัณฑ์เยื่อชีวภาพบรรจุอาหารมีลักษณะทางกายภาพและทางเคมีที่สำคัญแสดงดังตารางที่ S2 (Supplementary)

2.2 หัวเชื้อจุลินทรีย์

หัวเชื้อจุลินทรีย์ (Inoculum) ที่ใช้ในการศึกษาเป็นตะกอนจุลินทรีย์ที่เก็บมาจากระบบบำบัดน้ำเสียแบบชั้นตะกอนจุลินทรีย์ไร้อากาศแบบไหลขึ้น (Up-flow Anaerobic Sludge Blanket, UASB) ของบริษัท เสริมสุข จำกัด (มหาชน) โรงงานปทุมธานี ตะกอนจุลินทรีย์มีลักษณะเป็นเม็ด (Granule) สีดำ มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 0.5 – 2 มิลลิเมตร ก่อนนำมาใช้เป็นหัวเชื้อจุลินทรีย์ ได้มีการล้างตะกอนด้วยสารละลายอาหารสำหรับหัวเชื้อจุลินทรีย์ที่ปราศจากออกซิเจนและนำไปบ่มเบื้องต้นในถังปฏิกรณ์แบบไม่ใช้ออกซิเจนที่อุณหภูมิ 35 ± 2 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 7 วัน เพื่อลดปริมาณสารอินทรีย์ย่อยสลายได้ทางชีวภาพที่อาจตกค้างอยู่ในตะกอนจุลินทรีย์ [7] สำหรับหัวเชื้อจุลินทรีย์ที่เตรียมได้ มีลักษณะทางกายภาพและทางเคมีที่สำคัญแสดงดังตารางที่ S2 (Supplementary)

2.3 การศึกษาศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทนโดยการหมักร่วมระหว่างเศษอาหารและผลิตภัณฑ์เยื่อชีวภาพบรรจุอาหาร

ในการศึกษาศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทนโดยการหมักร่วมระหว่างวัสดุตั้งต้นทั้ง 2 ชนิดดังกล่าวได้ดำเนินการตามวิธีที่ระบุไว้ใน Angelidaki, et al. [7] และ Hansen, et al. [8] มีการทดลองเป็นแบบกะ (Batch Experiment) และมีการดัดแปลงวิธีดำเนินการทดลองบางส่วน เพื่อให้มีความเหมาะสมกับการศึกษานี้

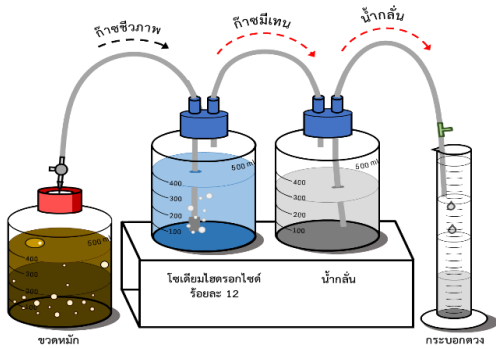


อัตราส่วนระหว่างเศษอาหารและผลิตภัณฑ์เยื่อชีวภาพบรรจุอาหาร (FW/CFPP) ที่ทำการศึกษามี 3 อัตราส่วน ได้แก่ 100:0, 40:60 และ 0:100 (โดยน้ำหนักของแข็งระเหยง่าย) การทดลองดำเนินการในขวดแก้วขนาด 500 มิลลิลิตร โดยในแต่ละอัตราส่วน (ชุดทดลอง) เมื่อเริ่มต้นการหมักได้ใส่วัสดุตั้งต้นที่มีความเข้มข้นของของแข็งระเหยง่ายเท่ากับ 5 กรัม ลงในขวดหมัก จากนั้นเติมหัวเชื้อจุลินทรีย์โดยกำหนดให้มีอัตราส่วนระหว่างหัวเชื้อจุลินทรีย์ต่อวัสดุตั้งต้นเท่ากับ 2 (10 กรัมของแข็งระเหยง่าย) และเติมโซเดียมไบคาร์บอเนต จำนวน 2.69 กรัม เพื่อให้ของผสมภายในขวดหมักมีปริมาณความเป็นด่าง (Alkalinity) เริ่มต้นประมาณ 4,000 มิลลิกรัมแคลเซียมคาร์บอเนตต่อลิตร [9] ต่อมาเติมน้ำกลั่นปราศจากออกซิเจนลงในขวดหมักจนของผสมภายในขวดหมักมีปริมาตร 400 มิลลิลิตร ปิดปากขวดหมักด้วยจุกยางและรัดให้แน่นด้วยฝาพลาสติกชนิดเกลียวมีรู ทางเข็มฉีดยาซึ่งต่ออยู่กับวาล์วสามทางผ่านจุกยางที่ปิดขวดหมัก เพื่อใช้เป็นอุปกรณ์ระบายก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นในขวดหมักไปยังอุปกรณ์วัดปริมาณก๊าซมีเทน หลังจากนั้นนำขวดหมักไปวางไว้ในตู้บ่มที่ควบคุมอุณหภูมิให้อยู่ที่ 35 ± 2 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 45 วัน และตลอดระยะเวลาของการหมัก มีการเขย่าขวดหมักเป็นครั้งคราว สัปดาห์แรกของการหมัก ทำการตรวจวัดปริมาณก๊าซมีเทนทุกวัน หลังจากนั้นตรวจวัดเป็นครั้งคราว และเมื่อเริ่มต้นและสิ้นสุดกระบวนการย่อยสลายมีการตรวจวัดพารามิเตอร์สำคัญที่ละลายอยู่ในส่วนที่เป็นของเหลวเพื่อนำมาใช้ประเมินความผิดปกติที่เกิดขึ้นในระบบ ได้แก่ พีเอช กรดไขมันระเหยง่าย ความเป็นด่าง

และแอมโมเนียในโตรเจนทั้งหมด นอกจากนี้ได้ทำขวดหมักที่ไม่ใส่วัสดุตั้งต้น แต่ใส่หัวเชื้อจุลินทรีย์เพียงอย่างเดียว (ชุดควบคุม) และดำเนินการตามขั้นตอนต่าง ๆ ในสภาวะเดียวกันกับที่กล่าวมาข้างต้นด้วย ทั้งนี้ในชุดทดสอบ (ชุดทดลองและชุดควบคุม) มีการดำเนินการ 3 ซ้ำ

สำหรับการวัดปริมาณก๊าซมีเทนในก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นในขวดหมักใช้วิธีการผ่านก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นไปยังสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้นร้อยละ 12 เพื่อดักจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ ทำให้คงเหลือไว้เพียงก๊าซมีเทนซึ่งสามารถทราบปริมาณได้โดยการแทนที่น้ำ (รูปที่ 1) ทั้งนี้ปริมาณก๊าซมีเทนที่วัดได้จากขวดหมักของชุดทดลองเป็นผลรวมของก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้นจากการย่อยสลายของวัสดุตั้งต้นและการย่อยสลายตัวเองของหัวเชื้อจุลินทรีย์ ส่วนปริมาณก๊าซมีเทนที่วัดได้จากขวดหมักชุดควบคุมเป็นปริมาณก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้นจากการย่อยสลายตัวเองของหัวเชื้อจุลินทรีย์เพียงอย่างเดียว

ทั้งนี้ ข้อมูลปริมาณก๊าซมีเทนที่ได้จากการติดตามระบบการย่อยสลายของทุกชุดทดสอบ (ผลต่างระหว่างปริมาณก๊าซมีเทนของชุดทดลองและชุดควบคุม) ได้นำมาคำนวณเป็นปริมาณก๊าซมีเทนที่สภาวะมาตรฐาน (Standard Temperature and Pressure, STP) นั่นคือที่ อุณหภูมิ 0 องศาเซลเซียส และความดัน 1 บรรยากาศ จากนั้นได้นำข้อมูลปริมาณก๊าซมีเทนที่สภาวะมาตรฐานมาคำนวณเป็นผลผลิตก๊าซมีเทน (Methane Yield, Y) ซึ่งสามารถแสดงให้เห็นถึงศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้นจากกระบวนการย่อยสลายวัสดุตั้งต้นตลอดระยะเวลา 45 วันได้



รูปที่ 1 การวัดปริมาณก๊าซมีเทนจากก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นในขวดหมัก

2.4 วิธีวิเคราะห์

การวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพและทางเคมีบางประการของวัสดุตั้งต้นและหัวเชื้อจุลินทรีย์ (ตารางที่ 1) ใช้วิธีตามที่จะระบุอยู่ในวิธีการมาตรฐานสำหรับการวิเคราะห์น้ำและน้ำเสียของ APHA, et al. [10] และตามวิธีที่จะระบุอยู่ใน USEPA [11] หรือที่อื่น เช่น Nelson and Sommers [12], Fagbenro and Oyeleye [13], ASTM International [14] เป็นต้น ส่วนการวิเคราะห์พารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ละลายอยู่ในส่วนที่เป็นของเหลวเมื่อเริ่มต้นและสิ้นสุดกระบวนการย่อยสลาย ใช้วิธีตามที่จะระบุอยู่ในวิธีการมาตรฐานสำหรับการวิเคราะห์น้ำและน้ำเสียของ APHA, et al. [10]

2.5 จลนพลศาสตร์ของการหมักร่วม

โมเดลทางคณิตศาสตร์ที่นำมาศึกษา จำนวน 4 โมเดล ซึ่งได้แก่ Modified Gompertz Model, First-order Model, Monod Model และ Cone Model [15] มีรูปแบบของสมการเชิงคณิตศาสตร์แสดงดังสมการที่ (1) – (4) ตามลำดับ

สำหรับการประมาณค่าพารามิเตอร์ทางจลนพลศาสตร์ในสมการตัวแบบของโมเดลต่าง ๆ ใช้

รูปแบบการวิเคราะห์ถดถอยที่ไม่ใช่เชิงเส้น (Nonlinear Regression) ด้วยวิธีกำลังสองน้อยที่สุด (Method of Least Squares) และประเมินความแม่นยำในการทำนายผลผลิตก๊าซมีเทนของแต่ละโมเดลโดยพิจารณาสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (Coefficient of Determination, R^2) ร้อยละความแตกต่างระหว่างผลผลิตก๊าซมีเทนจากการทำนายและผลผลิตก๊าซมีเทนจากการทดลอง (%Error) และรากที่สองของค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนกำลังสอง (Root Mean Square Error, RMSE)

$$Y_t = Y_0 \cdot \exp \left\{ -\exp \left[\frac{\mu_m}{Y_0} \cdot \exp(\lambda \cdot t) + 1 \right] \right\} \quad (1)$$

$$Y_t = Y_0 \cdot [1 - \exp(-k \cdot t)] \quad (2)$$

$$Y_t = Y_0 \cdot \left[\frac{(k \cdot t)}{1 + (k \cdot t)} \right] \quad (3)$$

$$Y_t = \frac{Y_0}{1 + (k \cdot t)^{-n}} \quad (4)$$

เมื่อ Y_t คือ ผลผลิตก๊าซมีเทนจากการทำนาย (มิลลิลิตรมาตรฐานต่อกรัมของแข็งระเหยง่าย) ตลอดระยะเวลาการหมัก t

Y_0 คือ ผลผลิตก๊าซมีเทนสูงสุดจากการทำนาย (มิลลิลิตรมาตรฐานต่อกรัมของแข็งระเหยง่าย)

μ_m คือ อัตราการผลิตก๊าซมีเทนสูงสุด (มิลลิลิตรมาตรฐานต่อกรัมของแข็งระเหยง่าย-วัน)

λ คือ ระยะเวลาปรับตัว (วัน)

t คือ ระยะเวลาการในการหมัก (วัน)

k คือ ค่าคงที่ของปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง (สำหรับ First-order Model) หรือ ค่าคงที่ของอัตรา

(สำหรับ Monod Model และ Cone Model ต่อวัน)

n คือ แฟกเตอร์รูปร่าง (Shape Factor)



3. ผลการทดลองและการอภิปรายผล

3.1 ลักษณะของวัสดุตั้งต้นและหัวเชื้อจุลินทรีย์

เศษอาหาร มี TS ร้อยละ 16.37 ส่วนผลิตภัณฑ์เยื่อชีวภาพบรรจุอาหาร มี TS ร้อยละ 98.47 และใน TS มี VS เป็นองค์ประกอบสูงถึงร้อยละ 96.35 และ 99.51 ตามลำดับ เมื่อพิจารณาค่า VS ซึ่งมีค่าค่อนข้างสูง รวมทั้งค่า OC ซึ่งมีปริมาณมากกว่าร้อยละ 50 แสดงให้เห็นว่า เศษอาหาร และผลิตภัณฑ์เยื่อชีวภาพบรรจุอาหารอุดมไปด้วยสารอินทรีย์ แสดงว่ามีศักยภาพในการนำไปใช้เป็นวัสดุตั้งต้นในกระบวนการย่อยสลายภายใต้สภาวะไร้อากาศเพื่อผลิตก๊าซมีเทนได้ แม้ว่าเศษอาหารและผลิตภัณฑ์เยื่อชีวภาพบรรจุอาหารจะมีปริมาณ OC ที่ไม่แตกต่างกันมากนัก แต่เศษอาหารมี TKN ในปริมาณที่สูงกว่ามาก ส่งผลให้เศษอาหารมีอัตราส่วน C/N เท่ากับ 12 ซึ่งต่ำกว่าค่าที่เหมาะสม (20 – 30) สำหรับกระบวนการย่อยสลาย [16] จึงมีความเป็นไปได้ว่า หากนำไปใช้ในกระบวนการหมักภายใต้สภาวะไร้อากาศเพื่อผลิตก๊าซชีวภาพ อาจทำให้ระบบขาดประสิทธิภาพอันเนื่องมาจากการขาดแคลนคาร์บอน ส่วนผลิตภัณฑ์เยื่อชีวภาพบรรจุอาหาร แม้ว่าอุดมไปด้วยสารอินทรีย์ และประกอบด้วยส่วนที่ย่อยสลายได้ง่ายถึงร้อยละ 80 (เซลลูโลส) แต่ก็มีส่วนที่ย่อยสลายได้ยากถึงร้อยละ 20 (เฮมิเซลลูโลสและลิกนิน) นอกจากนี้ยังมี TKN ต่ำมาก จึงส่งผลให้มีค่าอัตราส่วน C/N สูงถึง 460 แสดงให้เห็นว่า ผลิตภัณฑ์เยื่อชีวภาพบรรจุอาหารเป็นสารอินทรีย์ที่เกิดการย่อยสลายได้ค่อนข้างยากและเกิดการย่อยสลายได้ช้ามากเนื่องจากการขาดแคลนไนโตรเจนซึ่งเป็นสารอาหารสำหรับการเจริญเติบโต

ของจุลินทรีย์ที่ทำหน้าที่ในการย่อยสลายสารอินทรีย์ภายใต้สภาวะไร้อากาศ

หัวเชื้อจุลินทรีย์มีค่า pH เท่ากับ 6.94 ซึ่งมีค่าที่ค่อนข้างเป็นกลาง มีความเหมาะสมกับการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ นอกจากนี้ยังมี VS สูงถึงร้อยละ 91.22 แสดงให้เห็นว่า หัวเชื้อจุลินทรีย์มีองค์ประกอบส่วนใหญ่เป็นมวลชีวภาพของจุลินทรีย์

3.2 ศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทน

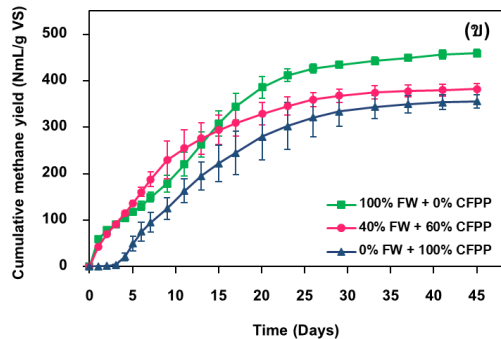
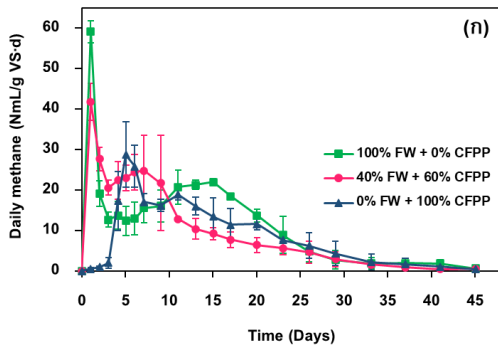
3.2.1 ก๊าซมีเทนรายวันและผลผลิตก๊าซมีเทน

เมื่อพิจารณาปริมาณก๊าซมีเทนรายวัน (Daily Methane) จากรูปที่ 2 (ก) จะเห็นว่า FW/CFPP 100:0 และ 40:60 มีก๊าซมีเทนเกิดขึ้นตั้งแต่วันแรกของการหมัก และเกิดขึ้นเป็นปริมาณสูงสุด ส่วน FW/CFPP 0:100 เริ่มสังเกตเห็นก๊าซมีเทนเกิดขึ้นในวันที่ 3 และมีปริมาณสูงสุดในวันที่ 5 แสดงให้เห็นได้อย่างชัดเจนว่าเศษอาหารเป็นสารอินทรีย์ที่มีความสามารถในการย่อยสลายสูงจึงเกิดการย่อยสลายกลายเป็นก๊าซมีเทนได้อย่างรวดเร็ว ส่วนผลิตภัณฑ์เยื่อชีวภาพบรรจุอาหารมีความสามารถในการย่อยสลายต่ำ ระบบต้องอาศัยการปรับตัวเป็นระยะเวลาหนึ่ง จึงสามารถสร้างก๊าซมีเทนได้

เมื่อพิจารณาลักษณะการเติบโตของเส้นกราฟผลผลิตก๊าซมีเทนสะสมของทั้ง 3 อัตราส่วน (รูปที่ 2 (ข)) ได้แก่ FW/CFPP 100:0, 40:60 และ 0:100 ซึ่งมีอัตราส่วน C/N เท่ากับ 12, 25 และ 460 ตามลำดับ จะเห็นว่า การย่อยสลายของทั้ง 3 อัตราส่วน มีลักษณะที่เป็นปกติ สอดคล้องกับลักษณะทางเคมีกายภาพของตัววัสดุตั้งต้น กล่าวคือ FW/CFPP 100:0 และ 40:60 เป็นวัสดุตั้งต้นที่ย่อยสลายได้ง่าย จึงสามารถผลิตก๊าซมีเทนได้ทันที ส่วน FW/CFPP 0:100 เป็นวัสดุตั้งต้นที่



บทความวิจัย



รูปที่ 2 (ก) ปริมาณก๊าซมีเทนรายวัน และ (ข) ผลผลิตก๊าซมีเทนสะสม ของกระบวนการย่อยสลายระหว่างเศษอาหาร และผลิตภัณฑ์เชื้อชีวภาพบรรจุอาหารที่สภาวะมาตรฐาน

ย่อยสลายได้ยากกว่า จึงต้องการระยะเวลาในการปรับตัวก่อนการผลิตก๊าซมีเทน นอกจากนี้ก็ไม่พบว่าการยับยั้งการผลิตก๊าซมีเทนที่รุนแรงเกิดขึ้นระหว่างกระบวนการย่อยสลายของทั้ง 3 อัตราส่วน โดยเฉพาะอย่างยิ่งกับ FW/CFPP 100:0 ที่มีอัตราส่วน C/N ต่ำกว่าอัตราส่วนที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการย่อยสลาย ซึ่งเป็นสาเหตุที่จะทำให้เกิดการสะสมของ VFAs และแอมโมเนียในปริมาณมากจนส่งผลกระทบต่อเสถียรภาพของระบบหรือเกิดการยับยั้งการผลิตก๊าซมีเทนได้ ทั้งนี้การไม่เกิดการยับยั้ง จากผลกระทบดังกล่าวมาในระบบการย่อยสลายของ FW/CFPP 100:0 ก็เป็นเพราะการมีอยู่ของโซเดียมไบคาร์บอเนตที่ช่วยรักษาความเป็นด่างของระบบให้คงอยู่ในระดับที่เหมาะสม (1,000 – 5,000 มิลลิกรัมแคลเซียมคาร์บอเนตต่อลิตร) ตลอดระยะเวลาการย่อยสลาย [9] จึงสามารถป้องกันความล้มเหลวในการผลิตก๊าซมีเทนไม่ให้เกิดขึ้นได้

เมื่อพิจารณาผลผลิตก๊าซมีเทนสะสม ตลอดระยะเวลาการย่อยสลาย 45 วัน พบว่า FW/CFPP 100:0, 40:60 และ 0:100 ให้ผลผลิตก๊าซมีเทนสะสมเท่ากับ 459.15 ± 8.57 , 381.79 ± 11.48 และ $355.60 \pm$

14.03 มิลลิลิตรมาตรฐานต่อกรัมของแข็งระเหยง่ายตามลำดับ และในแต่ละอัตราส่วนมีผลผลิตก๊าซมีเทนสะสมถึงระดับร้อยละ 80 ภายในระยะเวลา 20, 17 และ 20 วัน ตามลำดับ

เมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการผลิตก๊าซมีเทนของ FW/CFPP 40:60 กับ FW/CFPP 0:100 จะเห็นว่า FW/CFPP 40:60 มีอัตราเร็วในการผลิตก๊าซมีเทนสูงกว่าตลอดระยะเวลาของการย่อยสลายทั้ง 45 วัน ให้ผลผลิตก๊าซมีเทนสูงมากกว่า คิดเป็นร้อยละ 7.4 และมีผลผลิตก๊าซมีเทนสะสมถึงระดับร้อยละ 80 เร็วกว่าเป็นระยะเวลา 3 วัน นอกจากนี้ระบบไม่ต้องการระยะเวลาปรับตัวสำหรับการย่อยสลาย ซึ่งแสดงให้เห็นว่า การหมักร่วมระหว่างเศษอาหารและผลิตภัณฑ์เชื้อชีวภาพบรรจุอาหาร อัตราส่วน 40:60 ซึ่งมีอัตราส่วน C/N เท่ากับ 25 ส่งผลดีต่อการผลิตก๊าซมีเทนทั้งในด้านอัตราเร็วและปริมาณการผลิตที่สูงกว่า การหมักโดยใช้ผลิตภัณฑ์เชื้อชีวภาพบรรจุอาหารเพียงอย่างเดียวซึ่งมีอัตราส่วน C/N สูงถึง 460

เมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการผลิตก๊าซมีเทนของ FW/CFPP 100:0 กับ FW/CFPP 40:60 โดย



มองข้ามผลผลิตก๊าซมีเทนสะสมของ FW/CFPP 100:0 ที่สูงมากกว่า FW/CFPP 40:60 ซึ่งคิดเป็นร้อยละ 20 ก็ จะเห็นว่า FW/CFPP 40:60 ให้ผลผลิตก๊าซมีเทนสะสม ถึงระดับร้อยละ 80 เร็วกว่า เป็นระยะเวลา 3 วัน นอกจากนี้ จะเห็นได้ว่า ในช่วงวันที่ 1 – 13 อัตราส่วน FW/CFPP 40:60 มีเส้นกราฟที่ชันมากกว่า แสดงให้ เห็นว่า FW/CFPP 40:60 มีอัตราเร็วในการผลิตก๊าซ มีเทนที่สูงมากกว่า ซึ่งบ่งชี้ได้ว่า การหมักร่วมระหว่าง เศษอาหารและผลิตภัณฑ์เยื่อชีวภาพบรรจุอาหาร มีลักษณะส่งเสริมซึ่งกันและกันในทางบวกต่อ กระบวนการย่อยสลาย และทำให้ระบบมีเสถียรภาพ ที่ดีกว่า

3.2.2 การตรวจติดตามพารามิเตอร์ควบคุม กระบวนการย่อยสลายภายใต้สภาวะไร้อากาศ

ตารางที่ 1 แสดงการเปลี่ยนแปลงของ pH, VFAs, Alk และ TAN ที่ละลายอยู่ในส่วนที่เป็นของเหลวในขวด หมักเมื่อเริ่มต้น (Initial Stage) และสิ้นสุด (Final Stage) กระบวนการย่อยสลายของทุกอัตราส่วน

ค่า pH เริ่มต้นของทุกอัตราส่วน มีค่าตั้งแต่ 6.99 – 8.07 ซึ่งเป็นค่าที่ใกล้เคียงหรืออยู่ในช่วง pH ที่ เหมาะสมสำหรับการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์กลุ่มอาร์ เดียที่ทำหน้าที่สร้างมีเทน (7.0 – 8.5) และเมื่อสิ้นสุด กระบวนการย่อยสลาย พบว่า ทุกอัตราส่วนมีค่า pH ลดลงจากเมื่อเริ่มต้น แต่ยังคงอยู่ในช่วงที่เหมาะสมสำหรับ ระบบการย่อยสลายภายใต้สภาวะไร้อากาศ

เนื่องจากมีการเติม Alk ในรูปของไบคาร์บอเนต ลงในขวดหมัก จึงเป็นสาเหตุทำให้เมื่อเริ่มต้นและสิ้นสุด กระบวนการย่อยสลาย ในทุกอัตราส่วนมี Alk เป็น ปริมาณมากกว่า 3,000 มิลลิกรัมแคลเซียมคาร์บอเนต ต่อลิตร ทำให้มีความเป็นด่างที่เพียงพอสำหรับสะเทิน

กรดไขมันระเหยง่ายชนิดต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นระหว่าง กระบวนการย่อยสลาย ส่งผลให้ระบบมีความสามารถในการ ต้านทานต่อการเปลี่ยนแปลงค่าความเป็นกรดต่าง

เมื่อพิจารณาค่า VFAs เมื่อเริ่มต้นกระบวนการ ย่อยสลาย พบว่า FW/CFPP 100:0 มีปริมาณ VFAs ที่ พร้อมจะถูกย่อยสลายกลายเป็นก๊าซมีเทนสูงที่สุด (~1,300 มิลลิกรัมกรดอะซิติกต่อลิตร) รองลงมาคือ FW/CFPP 40:60 (~530 มิลลิกรัมกรดอะซิติกต่อลิตร) และ FW/CFPP 0:100 (~110 มิลลิกรัมกรดอะซิติกต่อ ลิตร) ซึ่งสอดคล้องกับการย่อยสลายของวัสดุตั้งต้นซึ่ง เป็นเศษอาหารซึ่งอุดมด้วยคาร์โบไฮเดรต ไขมัน และ โปรตีน ที่มีความสามารถในการย่อยสลายสูง และมี สัดส่วนสูงที่สุดใน FW/CFPP 100:0 และรองลงมาใน FW/CFPP 40:60 และ 0:100 ตามลำดับ และมีความสัมพันธ์กับปริมาณก๊าซมีเทนรายวันที่เกิดขึ้นใน วันที่ 1 (รูปที่ 2) ที่พบว่า FW/CFPP 100:0 มีปริมาณ ก๊าซมีเทนเกิดขึ้นสูงที่สุด (~330 มิลลิตร) รองลงมาคือ FW/CFPP 40:60 (~223 มิลลิตร) และ FW/CFPP 0:100 (~3 มิลลิตร) ตามลำดับ และเมื่อสิ้นสุด กระบวนการย่อยสลาย พบว่า FW/CFPP 100:0 และ 40:60 มี VFAs น้อยกว่าเมื่อเริ่มต้น เติ ระบบค่อนข้างมาก แสดงให้เห็นว่า การย่อยสลายมีอัตราที่ ลดลงอย่างมาก โดย FW/CFPP 40:60 ซึ่งมีสัดส่วนของ เศษอาหารน้อยกว่า FW/CFPP 100:0 มีอัตราการลดลง ของ VFAs คิดเป็นร้อยละ 89 ซึ่งสูงกว่า FW/CFPP 100:0 ที่มีอัตราการลดลงของ VFAs คิดเป็นร้อยละ 66 ส่วน FW/CFPP 0:100 มี VFAs มากกว่าเมื่อเริ่มต้น เติระบบ คิดเป็นร้อยละ 69 แสดงให้เห็นว่า ผลิตภัณฑ์ เยื่อชีวภาพบรรจุอาหาร มีความสามารถในการ ย่อยสลายต่ำ ใช้ระยะเวลาในการไฮโดรไลซิสที่ยาวนาน



ตารางที่ 1 การเปลี่ยนแปลงของ pH, VFAs, Alk, VFAs/Alk และ TAN ที่ละลายอยู่ในส่วนที่เป็นของเหลวในขวดหมักเมื่อเริ่มต้น (Initial Stage) และสิ้นสุด (Final Stage) กระบวนการย่อยสลาย

| Parameters | | FW/CFPP Ratios | | |
|----------------------------------|---------|-------------------|------------------|------------------|
| | | 100:0 | 40:60 | 0:100 |
| pH | Initial | 6.99 | 7.71 | 8.07 |
| | Final | 7.51 | 7.36 | 7.16 |
| VFAs (mg CH ₃ COOH/L) | Initial | 1,273.04 ± 41.23 | 528.59 ± 13.25 | 106.89 ± 0.00 |
| | Final | 437.13 ± 14.43 | 60.62 ± 8.60 | 180.94 ± 18.76 |
| Alk (mg CaCO ₃ /L) | Initial | 4,227.60 ± 6.59 | 4,325.49 ± 13.18 | 4,465.32 ± 13.18 |
| | Final | 7,893.87 ± 119.90 | 5,184.36 ± 10.49 | 5,133.84 ± 0.00 |
| TAN (mg N/L) | Initial | 97.88 ± 5.54 | 90.05 ± 0.00 | 82.22 ± 0.00 |
| | Final | 1,066.24 ± 11.19 | 414.30 ± 13.22 | 219.58 ± 5.60 |

ก่อนเข้าสู่กระบวนการสร้างกรดและการสร้างมีเทน ส่งผลให้มี VFAs ในระบบสูงกว่าเมื่อเริ่มต้น และมีอัตราการผลิตก๊าซมีเทนช้ากว่า FW/CFPP 100:0 และ 40:60 อย่างเห็นได้ชัด (รูปที่ 2) ทั้งนี้ปริมาณ VFAs เมื่อเริ่มต้นและสิ้นสุดกระบวนการย่อยสลายของทุกอัตราส่วนมีค่าน้อยกว่า 1,500 มิลลิกรัมกรดอะซิติกต่อลิตร ซึ่งเป็นค่าที่ไม่ส่งผลยับยั้งการเจริญเติบโตของอาร์เคียที่ทำหน้าที่ในการสร้างมีเทน

โดยทั่วไป การย่อยสลายภายใต้สภาวะไร้อากาศมักมี TAN เกิดขึ้นเป็นปกติ ซึ่งเป็นผลมาจากการย่อยสลายวัสดุตั้งต้นที่อุดมไปด้วยโปรตีนสำหรับ TAN ที่เกิดขึ้นในระบบนอกจากจะถูกใช้เป็นแหล่งอาหารของจุลินทรีย์กลุ่มอาร์เคียที่ทำหน้าที่สร้างมีเทนแล้วยังช่วยต้านทานการเปลี่ยนแปลงค่าความเป็นกรดต่างของระบบอีกด้วย แต่หากในระบบมีความเข้มข้นของ TAN อยู่ในระดับสูง ก็จะทำให้เกิดความเป็นพิษกับอาร์เคียที่ทำหน้าที่ในการสร้างมีเทนได้ ทั้งนี้ปริมาณ TAN ภายในระบบควรมีค่าไม่เกิน 1,500 มิลลิกรัมไนโตรเจนต่อลิตร [9] และเมื่อพิจารณา

ปริมาณ TAN ในช่วงเริ่มต้นและสิ้นสุดการเดินระบบของทุกอัตราส่วน ดังแสดงในตารางที่ 1 พบว่า มีค่าตั้งแต่ 82.22 – 1,066.24 มิลลิกรัมไนโตรเจนต่อลิตร ซึ่งเป็นระดับที่ไม่ส่งผลกระทบต่อกระบวนการย่อยสลาย

3.3 จลนพลศาสตร์ของการผลิตก๊าซมีเทน

ความสัมพันธ์ระหว่างผลผลิตก๊าซมีเทนที่ได้จากการทดลอง (Experimental) ของอัตราส่วน FW/CFPP 100:0, 40:60 และ 0:100 กับผลผลิตก๊าซมีเทนที่ได้จากการทำนาย (Predicted) โดยใช้ Modified Gompertz Model, First-order Model, Monod Model และ Cone Model แสดงดังรูปที่ S1 – S4 (Supplementary) ส่วนพารามิเตอร์ทางจลนพลศาสตร์ของตัวแบบทางคณิตศาสตร์โมเดลต่าง ๆ ตลอดจนสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R²) ร้อยละความแตกต่างระหว่างผลผลิตก๊าซมีเทนจากการทำนายและผลผลิตก๊าซมีเทนจากการทดลอง (%Error) และรากที่สองของค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนกำลังสอง (RMSE) มีรายละเอียดแสดงดังตารางที่ 2



อัตราส่วน FW/CFPP 100:0 เมื่อพิจารณารูปที่ S1 (ก) รูปที่ S2 (Supplementary) และตารางที่ 2 จะเห็นได้อย่างชัดเจนว่า Modified Gompertz Model ทำนายผลผลิตก๊าซมีเทนได้อย่างแม่นยำมากกว่า First-order Model, Monod Model และ Cone Model โดยมีค่า R^2 สูงที่สุด (0.9947) และมีค่า RMSE ต่ำที่สุด (10.70) ส่วน First-order Model, Monod Model และ Cone Model แม้จะมีค่า R^2 ที่เข้าใกล้ 1 (0.9743 – 0.9814) แต่ไม่สามารถทำนายผลผลิตก๊าซมีเทนได้อย่างแม่นยำ เพราะเมื่อสิ้นสุดกระบวนการหมักเส้นการทำนายยังคงแสดงให้เห็นถึงการเพิ่มขึ้นของผลผลิตก๊าซมีเทน แสดงให้เห็นว่า โมเดลเหล่านี้ไม่เหมาะสมสำหรับนำมาใช้ในการทำนายผลผลิตก๊าซมีเทนของ FW/CFPP 100:0

อัตราส่วน FW/CFPP 40:60 เมื่อพิจารณารูปที่ S1 (ข) รูปที่ S3 (Supplementary) และตารางที่ 2 จะเห็นว่า Modified Gompertz Model, First-order Model, Monod Model และ Cone Model ให้ค่า R^2 ที่สูงมากกว่า 0.99 แต่เมื่อพิจารณา %Error ของทั้ง 4 โมเดล จะเห็นว่า First-order Model เป็นโมเดลที่แม่นยำและเหมาะสมมากที่สุดสำหรับนำมาใช้ในการทำนายผลผลิตก๊าซมีเทนของ FW/CFPP 40:60 รองลงมาคือ Modified Gompertz Model ส่วน Monod Model และ Cone Model มี %Error สูงกว่าร้อยละ 10 แสดงว่า แม้ทั้ง 2 โมเดลมีความแม่นยำในการทำนายสูง แต่ก็มีความผิดพลาดสูงเช่นกัน ดังนั้น Monod Model และ Cone Model จึงเป็นโมเดลที่ไม่เหมาะสมสำหรับนำมาใช้ในการทำนายผลผลิตก๊าซมีเทนของ FW/CFPP 40:60

อัตราส่วน FW/CFPP 0:100 เมื่อพิจารณารูปที่ S1 (ค) รูปที่ S4 (Supplementary) และตารางที่ 2 จะเห็นว่า Modified Gompertz Model เป็นโมเดลที่มีความ

เหมาะสมมากที่สุดในการทำนายผลผลิตก๊าซมีเทน โดย Modified Gompertz Model ให้ค่า λ ซึ่งเป็นพารามิเตอร์ที่ใช้อธิบายถึงระยะเวลาปรับตัวของระบบเท่ากับ 3.00 วัน ซึ่งค่าดังกล่าวสอดคล้องกับผลการทดลองที่แสดงให้เห็นว่า ระยะ 1 – 3 วันแรกของกระบวนการย่อยสลาย ยังไม่มีก๊าซมีเทนเกิดขึ้นหรือเกิดขึ้นน้อยมากในระบบ สำหรับ First-order Model และ Monod Model แม้จะมีค่า R^2 ที่เข้าใกล้ 1 (0.9580 – 0.9638) แต่มีค่า RMSE ค่อนข้างสูง (25.11 – 27.06 มิลลิลิตรมาตรฐานต่อกรัมของแข็งระเหยง่าย) ดังนั้น Cone Model, First-order Model และ Monod Model จึงไม่ใช่โมเดลที่เหมาะสมสำหรับการทำนายผลผลิตก๊าซมีเทนของ FW/CFPP 0:100

สำหรับการศึกษาเกี่ยวกับจลนพลศาสตร์ของการผลิตก๊าซมีเทนในวัสดุตั้งต้นชนิดต่าง ๆ นั้น ได้มีการตีพิมพ์เผยแพร่ในวารสารวิชาการเป็นจำนวนมาก [15] ทั้งนี้พบว่า Modified Gompertz Model เป็นโมเดลที่มีการใช้กันอย่างแพร่หลายมากที่สุด เนื่องจากมีความเหมาะสมในการนำไปใช้อธิบายถึงความสามารถในการย่อยสลายของวัสดุตั้งต้นโดยพิจารณาจากค่า λ และ μ_m [15] ซึ่งสอดคล้องกับการเป็นโมเดลที่เหมาะสมในการนำมาใช้อธิบายการย่อยสลายของอัตราส่วน FW/CFPP 100:0 (เศษอาหารเพียงอย่างเดียว) และ FW/CFPP 0:100 (ผลิตภัณฑ์เชื้อชีวภาพบรรจุอาหารเพียงอย่างเดียว) ที่มีค่า $\lambda = 0.00$ และ 3.00 วัน ตามลำดับ พารามิเตอร์ดังกล่าว แสดงให้เห็นว่า การย่อยสลายของเศษอาหารสามารถเกิดขึ้นได้ทันที ระบบไม่ต้องการการปรับตัว ($\lambda = 0.00$ วัน) ส่วน μ_m ซึ่งเป็นพารามิเตอร์ที่บ่งชี้ถึงอัตราการผลิตก๊าซมีเทนสูงสุดในเศษอาหาร และผลิตภัณฑ์เชื้อชีวภาพบรรจุอาหารและมีค่าเท่ากับ



ตารางที่ 2 พารามิเตอร์ทางจลนพลศาสตร์ที่ได้จากการประมาณค่าโดยใช้โมเดลที่ศึกษา

| FW/CFPP Ratios | Models | Y_0 | | μ_m (NmL gVS ⁻¹ day ⁻¹) | λ (days) | k (day ⁻¹) | n | R ² | %Error | RMSE (NmL/g VS) |
|----------------|-------------------|---------------------------|------------------------|---|---------------------|---------------------------|------|----------------|--------|--------------------|
| | | Experimental (NmL/gVS) | Predicted (NmL/gVS) | | | | | | | |
| 100:0 | Modified Gompertz | 459.15 | 467.73 | 21.45 | 0.00 | - | - | 0.9947 | 1.87 | 10.70 |
| | First-order | | 521.10 | - | - | 0.06 | - | 0.9814 | 13.49 | 20.08 |
| | Monod | | 743.31 | - | - | 0.04 | - | 0.9743 | 61.89 | 23.57 |
| | Cone | | 586.80 | - | - | 0.07 | 1.32 | 0.9792 | 27.80 | 21.20 |
| 40:60 | Modified Gompertz | 381.79 | 369.79 | 24.91 | 0.00 | - | - | 0.9903 | -3.14 | 11.15 |
| | First-order | | 392.02 | - | - | 0.09 | - | 0.9983 | 2.68 | 4.66 |
| | Monod | | 505.72 | - | - | 0.09 | - | 0.9911 | 32.46 | 10.73 |
| | Cone | | 437.40 | - | - | 0.12 | 1.29 | 0.9966 | 14.56 | 6.61 |
| 0:100 | Modified Gompertz | 355.60 | 352.52 | 19.51 | 3.00 | - | - | 0.9955 | -0.87 | 8.81 |
| | First-order | | 462.19 | - | - | 0.04 | - | 0.9638 | 29.98 | 25.11 |
| | Monod | | 732.20 | - | - | 0.03 | - | 0.9580 | 105.91 | 27.06 |
| | Cone | | 383.98 | - | - | 0.08 | 2.15 | 0.9980 | 7.98 | 5.88 |

100:0 คือ เศษอาหารเพียงอย่างเดียว

40:60 คือ เศษอาหารร้อยละ 40 และผลิตภัณฑ์เชื้อชีวภาพบรรจุอาหารร้อยละ 60

0:100 คือ ผลิตภัณฑ์เชื้อชีวภาพบรรจุอาหารเพียงอย่างเดียว

21.45 และ 19.51 มิลลิลิตรมาตรฐานต่อกรัมของแข็งระเหยง่าย-วัน ตามลำดับ นั้นก็แสดงให้เห็นถึงความสามารถในการย่อยสลายของวัสดุตั้งต้นทั้ง 2 ชนิดได้อย่างชัดเจนมากขึ้น นั่นคือแสดงว่า เศษอาหารเกิดการย่อยสลายได้อย่างรวดเร็วกว่าผลิตภัณฑ์เชื้อชีวภาพบรรจุอาหารจากค่า μ_m ที่สูงกว่านั่นเอง นอกจากนี้เมื่อพิจารณาการย่อยสลายของอัตราส่วน FW/CFPP 40:60 (การหมักร่วมระหว่างเศษอาหารและผลิตภัณฑ์เชื้อชีวภาพบรรจุอาหาร)

โดยใช้ Modified Gompertz Model จะเห็นว่า การหมักร่วมของวัสดุตั้งต้นทั้ง 2 ชนิดดังกล่าว แสดงให้เห็นว่า ระบบไม่ต้องการการปรับตัว ($\lambda = 0$) เมื่อเปรียบเทียบกับกรณีหมักโดยใช้ผลิตภัณฑ์เชื้อชีวภาพบรรจุอาหารเพียงอย่างเดียว นอกจากนี้ ยังมีอัตราการผลิตก๊าซมีเทนสูงสุด ($\mu_m = 24.91$) ที่สูงมากกว่าการย่อยสลายโดยใช้เศษอาหารหรือผลิตภัณฑ์เชื้อชีวภาพบรรจุอาหารเพียงอย่างเดียว คิดเป็น 1.16 และ 1.28 เท่า ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าการหมักร่วม



ระหว่างเศษอาหารและผลิตภัณฑ์เนื้อชีวภาพบรรจุอาหารเกิดการย่อยสลายได้อย่างรวดเร็วกว่าและระบบการย่อยสลายมีเสถียรภาพที่ดีกว่าการหมักโดยใช้เศษอาหารหรือผลิตภัณฑ์เนื้อชีวภาพบรรจุอาหารเพียงอย่างเดียว สอดคล้องกับการศึกษาอื่นจำนวนมากที่แสดงให้เห็นถึงผลในเชิงบวกของการหมักร่วม

สำหรับ First-order Model ก็เป็นอีกหนึ่งโมเดลที่มีการนำไปใช้ในการศึกษาจลนพลศาสตร์ของการผลิตก๊าซมีเทนอย่างแพร่หลาย และบางการศึกษาก็พบว่าสามารถทำนายผลผลิตก๊าซมีเทนได้อย่างเหมาะสมมากกว่าการใช้ Modified Gompertz Model [17] ซึ่งสอดคล้องกับการทำนายผลผลิตก๊าซมีเทนได้อย่างแม่นยำของอัตราส่วน FW/CFPP 40:60 ของการศึกษานี้ ทั้งนี้ First-order Model เป็นโมเดลที่ใช้อธิบายรูปแบบการย่อยสลายในระบบที่ไม่มีการยับยั้งเกิดขึ้น และมีขั้นตอนการไฮโดรไลซิสเป็นขั้นตอนที่มากำหนดอัตราเร็วของการสร้างมีเทน ซึ่งอธิบายโดยพารามิเตอร์ทางจลนพลศาสตร์ k หรือเรียกว่า ค่าคงที่อัตราการไฮโดรไลซิส (Hydrolysis Rate Constant) และเมื่อเปรียบเทียบค่า k ของ First-order Model ในทุกอัตราส่วน FW/CFPP จะเห็นว่า FW/CFPP 40:60 (การหมักร่วม) มีค่า k สูงมากกว่า FW/CFPP 100:0 และ 0:100 คิดเป็น 1.50 และ 2.25 เท่า ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่า FW/CFPP 40:60 (การหมักร่วม) มีอัตราการเกิดก๊าซมีเทนที่เร็วกว่า FW/CFPP 100:0 และ 0:100 (การหมักที่ใช้วัสดุตั้งต้นเพียงชนิดเดียว) สอดคล้องกับการอธิบายโดยใช้พารามิเตอร์ทางจลนพลศาสตร์ที่ได้จาก Modified Gompertz Model

4. สรุปผลการศึกษา

ในการศึกษาศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทนภายใต้การควบคุมการย่อยสลายให้อยู่ในสภาวะที่สมดุลโดยการเติมโซเดียมคาร์บอเนตเพื่อรักษาสภาพต่างให้อยู่ในระดับที่เหมาะสมตลอดระยะเวลา 45 วัน พบว่าการหมักโดยใช้วัสดุตั้งต้นเพียงชนิดเดียว ได้แก่ เศษอาหาร (FW/CFPP 100:0) และผลิตภัณฑ์เนื้อชีวภาพบรรจุอาหาร (FW/CFPP 0:100) ซึ่งมีอัตราส่วน C/N เท่ากับ 12 และ 460 ตามลำดับ รวมทั้งการหมักร่วมระหว่างเศษอาหารและผลิตภัณฑ์เนื้อชีวภาพบรรจุอาหาร (FW/CFPP 40:60) ซึ่งมีอัตราส่วน C/N เท่ากับ 25 สามารถผลิตก๊าซมีเทนได้โดยไม่พบว่ามีกรยับยั้งที่รุนแรงเกิดขึ้น และพบว่า FW/CFPP 100:0 ให้ผลผลิตก๊าซมีเทนสะสมสูงที่สุดคือ 459.15 มิลลิลิตรมาตรฐานต่อกรัมของแข็งระเหยง่าย รองลงมาคือ FW/CFPP 40:60 (381.79 มิลลิลิตรมาตรฐานต่อกรัมของแข็งระเหยง่าย) และ FW/CFPP 0:100 (355.60 มิลลิลิตรมาตรฐานต่อกรัมของแข็งระเหยง่าย) ตามลำดับ

ในการศึกษาจลนพลศาสตร์ของการผลิตก๊าซมีเทนโดยใช้โมเดลทางคณิตศาสตร์รูปแบบต่าง ๆ พบว่า Modified Gompertz Model เป็นโมเดลที่มีความแม่นยำและเหมาะสมสำหรับทำนายผลผลิตก๊าซมีเทนของอัตราส่วน FW/CFPP 100:0 และ 0:100 มากที่สุด โดยทำนายผลผลิตก๊าซมีเทนได้เท่ากับ 467.73 และ 352.52 มิลลิลิตรมาตรฐานต่อกรัมของแข็งระเหยง่าย ตามลำดับ แต่สำหรับอัตราส่วน FW/CFPP 40:60 พบว่า First-order Model เป็นโมเดลที่มีความ



แม่นยำและเหมาะสมมากที่สุด รองลงมาคือ Modified Gompertz Model โดยทำนายผลผลิตก๊าซมีเทนได้เท่ากับ 392.02 และ 369.79 มิลลิลิตรมาตรฐานต่อกรัมของแข็งระเหยง่าย ตามลำดับ

5. กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณหน่วยงานในสังกัดมหาวิทยาลัยศิลปากร ได้แก่ ภาควิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์ และบัณฑิตวิทยาลัย ที่ให้การสนับสนุนทุนการวิจัยบางส่วน รวมถึงขอขอบคุณ บริษัท บรรจุก๊าซเพื่อสิ่งแวดล้อม จำกัด (มหาชน) ที่ให้ความอนุเคราะห์ตัวอย่างผลิตภัณฑ์เยื่อชีวภาพบรรจุอาหาร และบริษัท เสริมสุข จำกัด (มหาชน) โรงงานปทุมธานี ที่ให้ความอนุเคราะห์ตัวอย่างตะกอนจุลินทรีย์

6. ข้อมูลเพิ่มเติม (Supplementary)

ข้อมูลเพิ่มเติม (Supplementary) ดาวน์โหลดได้ที่ <http://ojs.kmutnb.ac.th/index.php/jointech/article/download/6890/4831>

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] Q. Yang, B. Wu, F. Yao, L. He, F. Chen, Y. Ma, X. Shu, K. Hou, D. Wang, and X. Li, Biogas production from anaerobic co-digestion of waste activated sludge: co-substrates and influencing parameters, *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*, 2019, 18(4), 771-793.
- [2] K. Hagos, J. Zong, D. Li, C. Liu, and X. Lu, Anaerobic co-digestion process for biogas production: Progress, challenges and perspectives, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2017, 76, 1485-1496.
- [3] R. Abbas, A. Agha, and S. Rahman, Enhancement anaerobic digestion and methane production from kitchen waste by thermal and thermo-chemical pretreatments in batch leach bed reactor with down flow, *Research in Agricultural Engineering*, 2018, 64, 128-135.
- [4] T. Radu, R. Blanchard, V. Smedley, A. Wheatley, P. Abdul Salam, and C. Visvanathan, Community scale, decentralised anaerobic digestion for energy and resource recovery, 2016 International Conference on Cogeneration, Small Power Plants and District Energy, *Proceeding*, 2016.
- [5] J. Wang, M. Gao, Q. Wang, W. Zhang, and Y. Shirai, Pilot-scale Open Fermentation of Food Waste to Produce Lactic Acid without Inoculum Addition, *RSC Advances*, 2016, 6, 104354-104358.
- [6] J. Ariunbaatar, A. Panico, L. Frunzo, G. Esposito, P. N. L. Lens, and F. Pirozzi, Enhanced anaerobic digestion of food waste by thermal and ozonation pretreatment methods, *Journal of Environmental Management*, 2014, 146, 142-149.



- [7] I. Angelidaki, M. Alves, D. Bolzonella, L. Borzacconi, J. L. Campos, A. J. Guwy, S. Kalyuzhnyi, P. Jenicek, and J. B. van Lier, Defining the biomethane potential (BMP) of solid organic wastes and energy crops: a proposed protocol for batch assays, *Water Science and Technology*, 2009, 59(5), 927-34.
- [8] T. L. Hansen, J. E. Schmidt, I. Angelidaki, E. Marca, J. Jansen, H. Mosbaek, and T. H. Christensen, Method for determination of methane potentials of solid organic waste, *Waste Management*, 2004, 24(4), 393-400.
- [9] P. L. McCarty, *Anaerobic Waste Treatment Fundamentals*, Public Work, 1964, 95, 91-126.
- [10] APHA, AWW, and WEF, *Standard methods for the examination of water and wastewater*. American Public Health Association, Washington, D.C., 2017.
- [11] USEPA, *METHOD 1684: Total, Fixed, and Volatile Solids in Water, Solids, and Biosolids*. United States Environment Protection Agency, D.C., USA, 2001.
- [12] D.W. Nelson and L.E. Sommers, *Total carbon, organic carbon, and organic matter: Methods of soil analysis part 3: Chemical Methods (SSSA Book Series 5)*, Soil Science Society of America, American Society of Agronomy, WI, USA, 1996.
- [13] J. Fagbenro and B. Oyeleye, Relationships between four methods of organic carbon determination in leaves of nitrogen-fixing trees and lignite-based organic fertilizers, *Communications in Soil Science & Plant Analysis*, 1999, 30, 2345-2362.
- [14] ASTM E778-87(2004), *Standard Test Methods for Nitrogen in the Analysis Sample of Refuse-Derived Fuel*, ASTM International, PA, USA, 2006.
- [15] R. Bedoić, A. Špehar, J. Puljko, L. Čuček, B. Čosić, T. Pukšec, and N. Duić, Opportunities and challenges: Experimental and kinetic analysis of anaerobic co-digestion of food waste and rendering industry streams for biogas production, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2020, 130, 109951.
- [16] Y. Li, S. Y. Park, and J. Zhu, Solid-state anaerobic digestion for methane production from organic waste, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2011, 15(1), 821-826.
- [17] M. O. L. Yusuf and N. L. Ify, The effect of waste paper on the kinetics of biogas yield from the co-digestion of cow dung and water hyacinth, *Biomass and Bioenergy*, 2011, 35(3), 1345-1351.

การพัฒนาฟิล์มบรรจุภัณฑ์จากพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ผสมกรดแทนนิก เพื่อยับยั้งแบคทีเรียในเนื้อปลาหิล

ปัทมา แหวกัณยา* และ ณัฐพร โสวสด

สาขาวิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมกระบวนการเคมี, คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี,
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ วิทยาเขตระยอง

* ผู้ประสานงานเผยแพร่ (Corresponding Author), E-mail: pattama.n@eat.kmutnb.ac.th

วันที่รับบทความ: 16 มีนาคม 2566; วันที่ทบทวนบทความ: 29 มิถุนายน 2566; วันที่ตอบรับบทความ: 24 กรกฎาคม 2566

วันที่เผยแพร่ออนไลน์: 7 พฤศจิกายน 2566

บทคัดย่อ: งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาฟิล์มบรรจุภัณฑ์โดยใช้แทนนิน (TA) และพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ (PVA) เพื่อยับยั้งแบคทีเรียบนเนื้อปลาหิล โดยแบ่งออกเป็น 3 อัตราส่วนโดยน้ำหนัก ดังนี้ PVA5/TA0 PVA5/TA5 และ PVA5/TA10 ในกรณีของกรดแทนนิกเป็นส่วนผสมจะใช้ร้อยละ 10 ของกลูตาแรลดีไฮด์ (โดยน้ำหนักของ PVA และ TA) เป็นสารเชื่อมขวางจากผลการทดลองพบว่า สีของฟิล์มเข้มขึ้นตามปริมาณกรดแทนนิกที่เพิ่มมากขึ้น เนื่องจากกรดแทนนิกมีสีเหลืองอมน้ำตาล ความหนา ปริมาณความชื้นและอัตราการซึมผ่านของไอน้ำของฟิล์มเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณกรดแทนนิกเพิ่มสูงขึ้น สมบัติทางกลของฟิล์มเมื่อเพิ่มปริมาณกรดแทนนิกในฟิล์ม ค่าการต้านทานแรงดึงและค่าโมดูลัสของฟิล์มเพิ่มขึ้นในขณะที่การยืดตัวของฟิล์มลดลง ผลการวิเคราะห์ FT-IR พบว่าปริมาณกรดแทนนิกเพิ่มขึ้นมีผลต่อโครงสร้างของฟิล์ม โดยทำให้พบหมู่ไฮดรอกซิล (-OH) มากขึ้น ประสิทธิภาพของฟิล์มต่อการยับยั้งแบคทีเรียในเนื้อปลาหิลพบว่า สีของเนื้อปลาหิลจะเข้มขึ้นเล็กน้อยตามปริมาณกรดแทนนิกที่เพิ่มขึ้นหลังจากที่ถูกเก็บในตู้เย็นอุณหภูมิ 4 ± 2 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 7 วัน แต่การเพิ่มปริมาณกรดแทนนิกมากขึ้นจะทำให้สามารถยับยั้งการเจริญเติบโตของแบคทีเรียได้ดีขึ้น โดยพบว่าฟิล์มที่อัตราส่วนโดยน้ำหนัก PVA5/TA5 และ PVA5/TA10 สามารถเก็บรักษาเนื้อปลาหิลในตู้เย็นที่อุณหภูมิ 4 ± 2 องศาเซลเซียส ได้เกิน 7 วัน โดยที่แบคทีเรียไม่เกินมาตรฐานของสำนักงานมาตรฐานสินค้าเกษตรและอาหารแห่งชาติ ($< 5\times 10^5$ โคโลนีต่อกรัม)

คำสำคัญ: กรดแทนนิก; พอลิไวนิลแอลกอฮอล์; ปลาหิล; ยับยั้งแบคทีเรีย; ฟิล์มบรรจุภัณฑ์

Development of Packaging Films Based on Polyvinyl Alcohol and a Tannic Acid Blend for Inactivation of Bacteria in Tilapia (*Oreochromis niloticus*) Fillets

Pattama Naewkanya* and Nataporn Sowasod

Division of Chemical Process Engineering Technology, Faculty of Engineering and Technology, King Mongkut's University of Technology North Bangkok (Rayong Campus)

* Corresponding author, E-mail: pattama.n@eat.kmutnb.ac.th

Received: 16 March 2023; Revised: 29 June 2023; Accepted: 24 July 2023

Online Published: 7 November 2023

Abstract: This research aims to develop packaging films based on a tannic acid (TA) and polyvinyl alcohol (PVA) blend for the inactivation of bacteria on tilapia fillets. The weight ratios of PVA and TA blend were divided into three parts: PVA5/TA0, PVA5/TA5, and PVA5/TA10. In the case of tannic acid, 10% of glutaraldehyde (based on the weight of PVA and TA) was used as a crosslinker. The experimental results showed that the color of films increased with increasing tannic acid content because tannic acid was brownish yellow. The thickness, moisture content, and water vapor permeability of the film tended to increase with increasing tannic acid content. The mechanical properties of the film change with the increase in the content of tannic acid in the film; the tensile strength and Young's modulus increase while elongation at break decreases. The analysis of FT-IR found that the increased content of tannic acid affected the film structure by increasing the presence of hydroxyl (-OH) groups. The efficacy of film on the inactivation of bacteria in tilapia fillets showed that the color of the fillets slightly increased with increasing tannic acid content after being stored in the refrigerator at 4 ± 2 °C for 7 days. However, increasing the amount of tannic acid inhibited bacterial growth better. It was found that films with the weight ratios of PVA5/TA5 and PVA5/TA10 could be used to store tilapia fillets in the refrigerator at 4 ± 2 °C for more than 7 days without the total viable bacteria count exceeding the standard of the Thai Agricultural Commodity and Food Standard ($< 5\times 10^5$ CFU/g).

Keywords: Tannic acid; polyvinyl alcohol; tilapia; inactivation of bacteria; packaging film



1. บทนำ

บรรจุภัณฑ์ (Packaging) เป็นสิ่งสำคัญที่ช่วยให้การขนส่งและการจำหน่ายสินค้าทุกประเภทง่าย สะดวก สะอาด ปลอดภัยจากสภาวะสิ่งแวดล้อมภายนอก และรักษาคุณภาพของผลิตภัณฑ์ไว้ให้นานขึ้น นอกจากนี้บรรจุภัณฑ์ยังมีส่วนในการเพิ่มคุณค่าของผลิตภัณฑ์และทำให้เกิดความต้องการผลิตภัณฑ์อีกด้วย แต่บรรจุภัณฑ์ในปัจจุบันมีข้อจำกัดการใช้งานหลายด้าน ดังนั้นจึงมีความต้องการบรรจุภัณฑ์ในรูปแบบใหม่มากยิ่งขึ้น เช่น บรรจุภัณฑ์แอคทีฟ (Active Packaging) [1] บรรจุภัณฑ์ต้านรังสียูวี (Anti-UV Packaging) บรรจุภัณฑ์ต้านอนุมูลอิสระ (Antioxidant Packaging) และบรรจุภัณฑ์ต้านจุลินทรีย์ (Antimicrobial Packaging) โดยบรรจุภัณฑ์แบบใหม่นี้จะนิยมนำไปใช้ในด้านอาหารและการแพทย์ ซึ่งผลิตออกมาในรูปแบบของฟิล์มบรรจุภัณฑ์ เพื่อให้ง่ายในระหว่างกระบวนการขนส่งและการเก็บรักษาผลิตภัณฑ์ [2, 3] โดยสารที่นิยมนำมาใช้ขึ้นรูปแผ่นฟิล์ม คือ โพลีไวนิลแอลกอฮอล์ (PVA) เพราะมีคุณสมบัติที่ดีหลายด้าน

โพลีไวนิลแอลกอฮอล์ (PVA) เป็นพอลิเมอร์ที่ย่อยสลายได้ทางชีวภาพ และละลายน้ำได้ดี ไม่เป็นพิษ มีความยืดหยุ่น มีความทนทานต่อสารเคมีที่สูงและมีสมบัติเชิงกลที่ดี นอกจากนี้ยังมีความสามารถในการขึ้นรูปเป็นฟิล์ม [4-6] ด้วยคุณสมบัติเหล่านี้จึงได้รับความนิยมนำมาใช้เป็นฟิล์มบรรจุภัณฑ์ และยังสามารถนำไปใช้ทางด้านอื่นๆ ได้แก่ ด้านการแพทย์ ด้านสิ่งทอ และด้านการเกษตร แม้ว่า PVA จะสามารถใช้งานได้ดีในการเป็นฟิล์มบรรจุภัณฑ์แต่ยังไม่สามารถต้านอนุมูลอิสระและ/หรือต้านจุลินทรีย์ได้ ดังนั้นเพื่อปรับปรุงคุณสมบัติของฟิล์มบรรจุภัณฑ์จึงนำเอาสารอื่นมาผสม

โดยมักผสมกับสารต้านจุลินทรีย์ตามธรรมชาติหรือวัตถุดิบเสียชีวภาพ เช่น กรดแทนนิก [7] ไคโตซาน [8] น้ำมันหอมระเหย [9] และแทนนิน [10] โดยสารต้านจุลินทรีย์ตามธรรมชาติมักนิยมใช้มากกว่าสารต้านจุลินทรีย์สังเคราะห์ เพราะเป็นพิษต่ำกว่า โดยเฉพาะเมื่อนำไปใช้ในด้านชีวการแพทย์และด้านของบรรจุภัณฑ์อาหาร และเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมอีกด้วย

กรดแทนนิก (Tannic Acid, TA) มีสูตรเคมีเป็น $C_{76}H_{52}O_{46}$ จัดอยู่ในกลุ่มแทนนินชนิดที่สามารถละลายน้ำได้ เรียกว่า ไฮโดรไลเซเบิลแทนนิน (Hydrolysable Tannin) ซึ่งเป็นสารประกอบโพลีฟีนอลตามธรรมชาติที่ประกอบด้วยหมู่ไฮดรอกซิลจำนวนมาก มีฤทธิ์เป็นกรดอ่อน [11] ราคาถูก ย่อยสลายได้ทางชีวภาพ และไม่เป็นพิษ [12] พบได้ในกล้วย ข้าวฟ่าง ไวน์ กาแฟ ชา และเบียร์ [13] และแสดงคุณสมบัติต้านอนุมูลอิสระต้านจุลินทรีย์ ต้านภูมิแพ้ และต้านการอักเสบ [14] ดังนั้น TA ที่เป็นสารที่สกัดได้จากธรรมชาติจึงมีคุณสมบัติที่เหมาะสมในการนำมาใช้ผสมกับ PVA และใช้กับอาหารสดได้ เช่น เนื้อปลา เนื้อหมู เป็นต้น จึงสนใจในการนำไปใช้เป็นฟิล์มบรรจุภัณฑ์ปลา

ปลา (Oreochromis niloticus) ถูกนำเข้ามาในประเทศไทยครั้งแรกเมื่อปี พ.ศ. 2508 และเริ่มมีการเพาะพันธุ์ปลาในปี พ.ศ. 2517 ปัจจุบันปลานิลเป็นปลาที่มีความสำคัญทางเศรษฐกิจและเป็นปลาน้ำจืดที่มีผลผลิตเป็นอันดับหนึ่งของประเทศไทย โดยมีการผลิตปลานิลได้ถึง 205,971 ตันปี คิดเป็นมูลค่า 10,051 ล้านบาท ในปี พ.ศ. 2563 ประเทศไทยมีการส่งออกผลิตภัณฑ์ปลานิลเพียงร้อยละ 5 ของผลผลิตปลานิลทั้งหมด [15] การส่งออกปลานิลนั้นยากอันเนื่องมาจาก สัตว์น้ำจะเสื่อมเสียเร็วกว่าเนื้อสัตว์ชนิดอื่น เนื่องจากโปรตีนของสัตว์



น้ำย่อยสลายได้ง่าย และจุลินทรีย์ที่ทำให้เกิดการเน่าเสียมากที่สุด คือ แบคทีเรีย โดยพบว่าในปลาแช่เย็น (4-10 องศาเซลเซียส) จะเกิดแบคทีเรียกลุ่ม *Pseudomonas* รองลงมา คือ *Acinetobacter*, *Moraxella* และ *Flavobacterium* ถ้าอุณหภูมิแช่เย็นสูงขึ้นเล็กน้อยจะพบ *Micrococcus* และ *Bacillus* *Escherichia*, *Proteus*, *Serratia*, *Sarcina* และ *Clostridium* [16] แบคทีเรียกลุ่มนี้ส่วนใหญ่จะเจริญได้ที่อุณหภูมิห้องและอาจเจริญได้บ้างที่อุณหภูมิแช่เย็น ผลการเพิ่มขึ้นของแบคทีเรียจะส่งผลต่อเนื้อสัมผัส กลิ่น และสีของเนื้อปลา เช่น อาจมีสีเหลืองออกเขียวที่เกิดจากการเจริญของ *Pseudomonas fluorescens* เป็นต้น [16] ดังนั้นถ้ามีฟิล์มบรรจุภัณฑ์ที่ต้านแบคทีเรียก็จะสามารถยืดอายุการเก็บรักษาได้ดีขึ้นและส่งออกปลานิลสดได้นานขึ้นอีกด้วย

อย่างไรก็ตาม แม้จะมีงานวิจัยที่ผลิตฟิล์มบรรจุภัณฑ์ที่ต้านจุลินทรีย์ออกมามากมายแต่ยังไม่ค่อยมีงานวิจัยที่นำไปไปทดสอบกับเนื้อปลาและตรวจสอบการยืดอายุการเก็บรักษาเนื้อปลานิลมากนัก ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงสนใจศึกษาการพัฒนาฟิล์มบรรจุภัณฑ์จากส่วนผสมของกรดแทนนิกและพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ โดยจะทดสอบคุณสมบัติของแผ่นฟิล์มที่ได้ และศึกษาการยับยั้งแบคทีเรียบนเนื้อปลานิล เนื่องจากแบคทีเรียทำให้ปลาเน่าเสียมากที่สุด

2. วัสดุ อุปกรณ์ และวิธีการวิจัย

2.1 วัสดุ

โพลีไวนิลแอลกอฮอล์ ปริมาณการเกิดไฮโดรไลซิสร้อยละ 86-90 จากบริษัท กรุงเทพเคมี จำกัด กรดแทนนิก มวลโมเลกุล 1701.20 กรัมต่อโมล จากบริษัท Himedia จำกัด ประเทศอินเดีย กลูตาราลดีไฮด์

(Glutaraldehyde) ร้อยละ 25 จากบริษัท Loba Chemie จำกัด ประเทศอินเดีย แผ่นวัตเชื้อออโรบิคแบคทีเรียและแผ่นวัตเชื้ออีโคไลน์และโคลิฟอร์ม จากบริษัท 3M Petrifilm จำกัด

2.2 วิธีการขึ้นรูปฟิล์ม

เตรียมสารละลาย PVA โดยใช้อัตราส่วนที่ผสมระหว่าง PVA และ TA แสดงดังตารางที่ 1 โดยการนำ PVA มาละลายในน้ำกลั่น เป็นเวลา 30 นาที ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส ด้วยเครื่องกวนสารให้ความร้อน (Hotplate Stirrer, รุ่น C-MAG-HS7, IKA, Germany) โดยใช้ความเร็วในการกวนสารที่ 250 รอบต่อนาที และใส่แท่งแม่เหล็กกวนสาร ในกรณีที่เติม TA จะแบ่งปริมาณน้ำกลั่นที่ใช้ออกเป็น 2 ส่วน ส่วนแรกนำไปละลาย PVA และอีกส่วน นำไปละลายสาร TA เป็นเวลา 15 นาที ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส ที่ความเร็วในการกวนสารที่ 250 รอบต่อนาที และใส่แท่งแม่เหล็กกวนสาร หลังจากนั้นจะเติม TA ลงในสารละลาย PVA กวนสารต่อเป็นเวลา 30 นาที ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส ที่ความเร็วในการกวนสารที่ 250 รอบต่อนาที จนกระทั่งสารละลายเป็นเนื้อเดียวกัน เมื่อครบเวลานำมาตั้งไว้ให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง จากนั้นทำการเติมกลูตาราลดีไฮด์ร้อยละ 10 (โดยน้ำหนักของ PVA และ TA) เพื่อเป็นสารเชื่อมขวาง (Crosslink) [10] แล้วนำไปผสมให้เข้ากันโดยใช้ความเร็วในการกวนสารที่ 250 รอบต่อนาที เป็นเวลา 15 นาที หลังจากนั้นเทตัวอย่างใส่เพลท Petri Dish ขนาด 90x15 มิลลิเมตร จากนั้นทำให้แห้งโดยการนำไปอบในตู้อบลมร้อน (บริษัท Daeyang ETS. จำกัด, เกาหลี) เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส จากนั้นลอกฟิล์มออกจากเพลท



ใส่ถุงซิปลงและเก็บในโถดูดความชื้น เพื่อรอการวิเคราะห์และทดสอบต่อไป

ตารางที่ 1 แสดงอัตราส่วนระหว่าง PVA/TA ที่ความเข้มข้นต่างๆ

| Sample | TA (มล.) | น้ำกลั่น (มล.) | TA (กรัม) | PVA (กรัม) |
|-----------|-------------|-------------------|--------------|---------------|
| PVA5/TA0 | 0 | 30 | 0 | 1.5 |
| PVA5/TA5 | 1.5 | 28.5 | 0.075 | 1.425 |
| PVA5/TA10 | 3 | 27 | 0.15 | 1.35 |

2.3 การทดสอบสมบัติของฟิล์ม

2.3.1 ความหนา

นำตัวอย่างฟิล์มมาวัดความหนาของฟิล์ม ด้วยเครื่องวัดไมโครมิเตอร์แบบวัดภายนอก (รุ่น MC MW200-01, Mitutoyo, Japan) โดยวัดความหนาของฟิล์มแต่ละสูตรจำนวนสูตรละ 3 ชิ้น ตัวอย่างแต่ละชิ้นวัดความหนาจำนวน 3 จุดนับเป็น 1 ซ้ำ เพื่อคำนวณหาค่าเฉลี่ยของแผ่นฟิล์ม

2.3.2 ค่าสี

สีของฟิล์มจะถูกวัดด้วยเครื่องวิเคราะห์สี (Hunter Lab Digital Color Difference Meter, รุ่น YS 3020, 3nh, จีน) โดยนำแผ่นฟิล์มวางบนแผ่นกระดาษสีขาวในสภาวะแวดล้อมแบบเดียวกัน และรายงานผลออกมาในสัญลักษณ์ L^* , a^* และ b^* โดยใช้ White Standard Plate ($L_0^* = 96.57$, $a_0^* = -0.23$, และ $b_0^* = 0.26$) คำนวณค่าความแตกต่างของสีโดยรวมตามสมการที่ (1) [17]

$$\Delta E^* = \sqrt{(L^* - L_0^*)^2 + (a^* - a_0^*)^2 + (b^* - b_0^*)^2} \quad (1)$$

2.3.3 ปริมาณความชื้น (Moisture Content, MC)

ปริมาณความชื้น ดัดแปลงวิธีของ AOAC [18] ตัดตัวอย่างฟิล์มขนาด 20 มิลลิเมตร x 20 มิลลิเมตร ซึ่งน้ำหนักตัวอย่างฟิล์มก่อนอบ นำตัวอย่างใส่ถ้วยอะลูมิเนียม อบที่ 105 องศาเซลเซียส นาน 24 ชั่วโมง หลังจากนั้นจะนำตัวอย่างออกจากตู้อบลมร้อน (Hot Air Oven, รุ่น SOV70B, KWF, จีน) ทิ้งให้เย็นในโถดูดความชื้น โดยให้น้ำหนักตัวอย่างคงที่ แล้วชั่งน้ำหนักหลังอบ และคำนวณหาความชื้นของตัวอย่าง

2.3.4 อัตราการซึมผ่านของไอน้ำ (Water Vapor Permeability, WVTR)

ทดสอบอัตราการซึมผ่านของไอน้ำโดยดัดแปลงมาตรฐาน ASTM E96-95 [19] เติมน้ำกลั่นลงในถ้วย 30 มิลลิเมตร แล้วปิดด้วยฟิล์มที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 80 มิลลิเมตร พร้อมปิดด้วยเทปกาวให้แนบสนิท และชั่งน้ำหนัก จากนั้นนำไปวางในตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 37 ± 1 องศาเซลเซียส และความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 55 ± 1.5 แล้วทำการบันทึกน้ำหนักทุก 1 ชั่วโมง เป็นเวลา 6 ชั่วโมง ทำการทดสอบทั้งหมด 3 ซ้ำ แล้วนำผลที่ได้ไปสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักที่สูญเสียกับเวลา และคำนวณหาค่าอัตราการซึมผ่านของไอน้ำ ดังสมการที่ 2

$$WVTR = \frac{\text{Mass lost}}{t \times \text{film area}} = \frac{\text{slope}}{\text{film area}} \times 100 \quad (2)$$

โดยที่ WVTR = อัตราการซึมผ่านของไอน้ำ (ร้อยละ)

Mass lost = น้ำหนักน้ำที่สูญเสียไป (กรัม)

t = เวลาในการอบ (วัน)

film area = พื้นที่ของฟิล์มที่ไอน้ำซึมผ่าน (ตารางเมตร)

slope = ความชันของกราฟความสัมพันธ์ของน้ำหนักที่สูญเสียไปกับเวลา (กรัมต่อวัน)



2.3.5 สมบัติเชิงกลของฟิล์ม

สมบัติทางกล (Mechanical Properties) ได้แก่ การยืดตัว ณ จุดขาด (Elongation at Break) และความต้านทานแรงดึง (Tensile Strength) โดยดัดแปลงมาตรฐาน ASTM D882-97 [20] โดยใช้เครื่อง Universal Testing Machine (Instron, Model 5562, Massachusetts, USA) โดยตัดชิ้นตัวอย่างของฟิล์มขนาด 12 มิลลิเมตร ยาว 80 มิลลิเมตร กำหนดระยะการจับชิ้นงานที่ 50 มิลลิเมตร อัตราเร็วในการดึงเท่ากับ 500 มิลลิเมตร/นาที โดยทำการทดสอบทั้งหมด 10 ตัวอย่าง เพื่อหาค่าเฉลี่ย โดยความต้านทานแรงดึงและร้อยละการยืดตัวที่จุดขาด สามารถคำนวณดังสมการที่ (3) และ (4) ต่อไปนี้

$$\text{Tensile strength (TS)} = F_{\max} / A \quad (3)$$

$$\text{Elongation at break (EAB)} = (L / L_0) \times 100 \quad (4)$$

โดยที่ F_{\max} = ค่าแรงสูงสุดที่ทำให้ฟิล์มขาด (นิวตัน)

A = พื้นที่หน้าตัดของฟิล์ม (ตารางมิลลิเมตร)

L_0 = ความยาวเริ่มต้นของฟิล์ม (มิลลิเมตร)

L = ระยะความยาวที่ฟิล์มยืดออก (มิลลิเมตร)

2.3.6 ลักษณะโครงสร้างพื้นฐานวิทยาของฟิล์ม

ตรวจสอบหาโครงสร้างและองค์ประกอบของฟิล์ม ด้วยเครื่องฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรด สเปกโทรสโกปี (Fourier Transform Infrared Spectroscopy, FTIR, Spectrum Gx, PerkinElmer Scientific, USA) โดยวัดค่า Transmittance ของรังสีที่อยู่ในช่วงอินฟราเรด ช่วงเลขคลื่น (Wavenumber) 4000-400 cm^{-1}

2.4 การยืดอายุปลาแห้ง

2.4.1 การเตรียมชิ้นปลาและทดสอบการยืดอายุ

ปลานิล (*Oreochromis niloticus*) น้ำหนักเฉลี่ย 0.8-1 กิโลกรัม ซึ่งมาจากตลาดนิคมพัฒนา จังหวัดระยอง ชำและแช่ตู้เย็นไว้ 16 ชั่วโมง ก่อนนำมาล้างปลาด้วยน้ำประปา ลอกหนังออกและหั่นเป็นชิ้นหนา 8-10 มิลลิเมตร และน้ำหนักเฉลี่ย 5 กรัม นำไปทำการทดสอบโดยแบ่งออกเป็น 3 กลุ่ม ได้แก่ เนื้อปลาไม่ห่อฟิล์ม เนื้อปลาห่อด้วยฟิล์ม PVA และเนื้อปลาห่อฟิล์มที่ผสมระหว่าง PVA/TA วิธีในการห่อด้วยฟิล์มจะตัดแผ่นฟิล์มให้มีขนาดกว้าง 60 มิลลิเมตร ยาว 60 มิลลิเมตร ห่อให้ครอบคลุมทุกด้านของชิ้นปลา จากนั้นนำทั้ง 3 กลุ่มการทดลอง เก็บไว้ในตู้เย็นเป็นเวลา 7 วัน ที่อุณหภูมิ 4 ± 2 องศาเซลเซียส หลังจากนั้นนำมาวัดสีของชิ้นปลาและนำไปวัดเชื้อแอโรบิกแบคทีเรียทุกวันทั้ง 0 3 5 และ 7 ปลาที่จะใช้ทดลองจะต้องวัดเชื้อแอโรบิกแบคทีเรีย ถ้าเกิน 10^7 โคโลนีต่อกรัม ในวันที่ 0 จะไม่ใช้ผลการทดลองในรอบนั้น

2.4.2 การวิเคราะห์และการวัดในชิ้นปลา

นำตัวอย่างเนื้อปลาจำนวน 5 กรัม เติมน้ำตาลละลายเปปโตน (Peptone) ความเข้มข้นร้อยละ 0.1 ปริมาตร 45 มิลลิลิตร บั่นตัวอย่างด้วยเครื่องบั่นที่ผ่านการอบฆ่าเชื้อเป็นเวลา 1 นาที จากนั้นนำไปทำการเจือจางอย่างเป็นลำดับ (Serial Dilution) หลังจากนั้นดูดตัวอย่าง 1 มิลลิลิตร หยดลงบนแผ่นวัดเชื้อแอโรบิกแบคทีเรีย 3M (3M Aerobic Count Plate) นำเข้าตู้บ่มที่อุณหภูมิ 35 ± 1 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 48 ชั่วโมง ตามวิธีของ AOAC [17] หลังจากครบระยะเวลา นำแผ่นออกมานับแบคทีเรียที่มีชีวิตอยู่ โดยใช้การคำนวณออกมาในรูปแบบลอการิทึมของจำนวนแบคทีเรียที่มีอยู่



ต่อจำนวนแบคทีเรียที่ถูกแสดงผลในหน่วยของลอการิทึมของโคโลนีต่อกรัม (\log_{10} CFU/g)

3. ผลการวิจัยและการอภิปรายผล

ผลการวิจัยแบ่งออกเป็น 4 หัวข้อหลัก คือ สมบัติทางกายภาพของฟิล์มบรรจุภัณฑ์ สมบัติเชิงกลของฟิล์ม การวิเคราะห์หาค่าประกอบทางโครงสร้างของฟิล์ม และการทดสอบประสิทธิภาพของฟิล์มต่อเนื้อปลาเนื้ ดังนี้

3.1 สมบัติทางกายภาพของฟิล์มบรรจุภัณฑ์

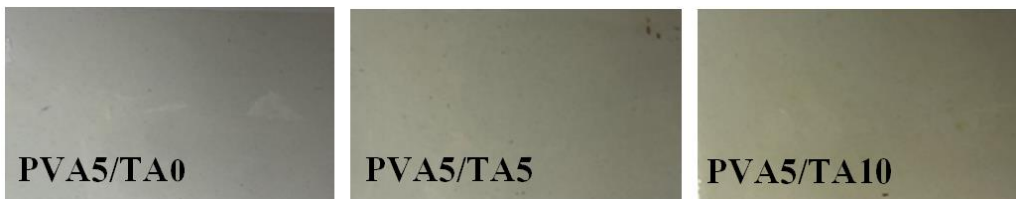
ความโปร่งใสของฟิล์มเป็นสมบัติสำคัญอีกอย่างหนึ่งซึ่งมีผลต่อการนำไปใช้ประโยชน์ เนื่องจากความโปร่งใสของฟิล์มทำให้เห็นลักษณะของผลิตภัณฑ์ที่ถูกบรรจุภายในฟิล์มบรรจุภัณฑ์ได้ แต่ความทึบแสงของฟิล์มนั้นก็สำคัญ เพราะช่วยป้องกันผลิตภัณฑ์ที่อยู่ในบรรจุภัณฑ์ที่มีความไวต่อแสงได้ เนื่องจากแสงเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา เช่น การเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันทำให้ผลิตภัณฑ์อาหารเกิดกลิ่นหืน ที่ไม่พึงประสงค์ได้ [21] ลักษณะฟิล์มที่ผสมระหว่าง PVA/TA หลังจากการขึ้นรูปในอัตราส่วนต่าง ๆ แสดงดังรูปที่ 1 พบว่าที่อัตราส่วนที่ไม่ผสม TA (PVA5/TA0) มีลักษณะสีใสมีความโปร่งแสง และเป็นเนื้อเดียวกัน เมื่อผสม TA มากขึ้น พบว่าฟิล์มยังเป็นเนื้อเดียวกันแต่มีสีเข้มขึ้น

ตามปริมาณ TA ที่เพิ่มขึ้น เนื่องจาก TA มีสีเหลืองอมน้ำตาล [22]

3.1.1 ค่าสี (Color) และความหนา

จากการขึ้นรูปฟิล์มบรรจุภัณฑ์กรดแทนนิกผสมกับพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ ค่าสี ความแตกต่างของสีโดยรวม และความหนาของฟิล์ม PVA และ TA แสดงในตารางที่ 2 โดยฟิล์มที่ได้มีค่าสี L^* (ความสว่าง) a^* (สีแดง) และ b^* (สีเหลือง) ที่แตกต่างกัน เมื่อเปรียบเทียบค่าความแตกต่างของสีโดยรวมพบว่า การเติมปริมาณ TA ที่มากขึ้น จะส่งผลต่อค่าความแตกต่างของสีโดยรวม (ΔE^*) ให้เพิ่มขึ้น เพราะผง TA มีสีเหลืองอมน้ำตาล เมื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยของ Jingjing Liao และคณะ [10] ที่ขึ้นรูปฟิล์มบรรจุภัณฑ์แทนนิน (TN) ที่สกัดได้จากผลเบอรี่เบอร์รี่จีนผสมกับ PVA ซึ่ง TN ก็มีสีน้ำตาลคล้ายกับ TA พบว่า มีสีน้ำตาลเพิ่มขึ้นตามปริมาณความเข้มข้นของ TN ที่เพิ่มขึ้นเช่นกัน

ส่วนความหนาของฟิล์มพบว่าเมื่อมีส่วนผสมระหว่างกรดแทนนิกเพิ่มขึ้นจะทำให้ฟิล์มมีความหนาเพิ่มขึ้นน้อยมาก เนื่องจากการทดลองควบคุมปริมาณสารละลายให้อยู่ที่ 30 มิลลิลิตรทุกแผ่นแต่ TA มีมวลโมเลกุลสูง จึงส่งผลให้ฟิล์มที่ผสม TA หนาเพิ่มขึ้นเล็กน้อย สอดคล้องกับงานวิจัยของ



รูปที่ 1 ลักษณะฟิล์มที่ผสมระหว่าง PVA และ TA หลังจากการขึ้นรูปในอัตราส่วนต่าง ๆ



ตารางที่ 2 ค่าสี ความแตกต่างของสีโดยรวม และความหนาของฟิล์ม PVA และ TA ที่อัตราส่วนต่าง ๆ

| อัตราส่วน PVA/TA | ค่าสี | | | | ความหนา (มิลลิเมตร) |
|---------------------|------------|-----------|-----------|--------------|------------------------|
| | L* | a* | b* | ΔE^* | |
| PVA5/TA0 | 87.73±0.48 | 1.26±0.34 | 5.89±0.88 | 10.64±0.23 | 0.087±0.03 |
| PVA5/TA5 | 86.22±0.72 | 0.34±0.79 | 1.99±3.15 | 11.02±0.28 | 0.090±0.04 |
| PVA5/TA10 | 85.52±0.93 | 0.49±0.27 | 3.09±2.63 | 11.77±0.45 | 0.091±0.05 |

หมายเหตุ ในแนวตั้ง มีความแตกต่างกันทางสถิติอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

da Cruz และคณะ [23] ที่ศึกษาฟิล์มบรรจุภัณฑ์ด้านเชื้อแบคทีเรียโดยใช้โพลีไวนิลแอลกอฮอล์ผสมกับแทนนินประจุบวก (Cationic Tannin) ที่อัตราส่วนต่าง ๆ เมื่อเทียบอัตราส่วนความหนาของแผ่นที่ไม่มีแทนนินประจุบวก กับมีแทนนินประจุบวกร้อยละ 10 ที่ PVA ร้อยละ 5 เท่ากัน พบว่ามีความหนาของแผ่นฟิล์มเพิ่มขึ้น เมื่อเพิ่มปริมาณแทนนินประจุบวกมากขึ้น ซึ่งมีแนวโน้มที่สอดคล้องกับในงานวิจัยนี้

3.1.2 ปริมาณความชื้นและอัตราการซึมผ่านของไอน้ำ

ผลการทดสอบค่าปริมาณความชื้นของฟิล์มที่ผสมระหว่าง PVA และ TA ในอัตราส่วนต่าง ๆ พบว่าฟิล์มมีปริมาณความชื้นอยู่ในช่วงร้อยละ 4.73-11.58 (ตารางที่ 3) และพบว่าปริมาณความชื้นของฟิล์ม PVA และ TA เพิ่มสูงขึ้น เนื่องจาก การเติม TA ที่เพิ่มมากขึ้น ทำให้ปริมาณ TA มากเกินพอที่จะเกิดพันธะร่วมกับกลูตาไรลดีไฮด์ ที่ทำหน้าที่เป็นสารเชื่อมขวางในพอลิเมอร์เมทริก อีกทั้ง TA ยังประกอบด้วย หมู่ ไฮดรอกซิล (-OH) จำนวนมาก ทำให้เกิดพันธะไฮโดรเจนกับโมเลกุลของน้ำได้ จึงเป็นสารที่อุ้มน้ำไว้ในเมทริกซ์ของฟิล์มได้ ทำให้ฟิล์มไวต่อความชื้นได้ง่ายเมื่อสัมผัสอากาศ [23] ซึ่งจะสอดคล้องกับผลของอัตราการซึมผ่านของไอน้ำ

ตารางที่ 3 ค่าร้อยละปริมาณความชื้น และค่าอัตราการซึมผ่านของไอน้ำของฟิล์ม PVA และ TA ที่อัตราส่วนต่าง ๆ

| อัตราส่วน PVA/TA | ปริมาณ ความชื้น (ร้อยละ) | WVTR (กรัม/ตารางเมตร วัน) |
|---------------------|--------------------------------|------------------------------|
| | | |
| PVA5/TA5 | 9.14±0.56 | 564.40±1.35 |
| PVA5/TA10 | 11.58±0.22 | 653.51±3.55 |

หมายเหตุ ในแนวตั้ง มีความแตกต่างกันทางสถิติอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

สมบัติการแพร่ผ่านของไอน้ำเป็นหนึ่งในสมบัติที่สำคัญของฟิล์มบรรจุภัณฑ์ที่ถูกนำมาใช้ในงานด้านอาหาร โดยค่าความสามารถในการแพร่ผ่านของไอน้ำของฟิล์มที่ต่ำช่วยป้องกันการแพร่ของความชื้นผ่านอาหารได้ [24] ซึ่งจะมีผลดีต่อการเก็บเนื้อปลาสด ตารางที่ 3 แสดงผลการทดสอบค่าอัตราการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์มที่ผสมระหว่าง PVA/TA ในอัตราส่วนต่างๆ พบว่า ฟิล์มที่มีส่วนผสมของ PVA5/TA10 มีอัตราการซึมผ่านของไอน้ำสูงสุด อัตราการซึมผ่านของไอน้ำจะเพิ่มขึ้นตามอัตราส่วนของ TA ที่เพิ่มขึ้น เนื่องจาก TA จัดเป็นพอลิเมอร์ที่จัดอยู่ในกลุ่มที่ชอบน้ำ (Hydrophilic) ซึ่งมีหมู่ไฮดรอกซิล (-OH) ที่เข้ากันได้ดีกับน้ำ เปรียบเหมือนเป็นตัวกลางในการดูดซึม [10]



3.2 สมบัติเชิงกลของฟิล์ม

โดยทั่วไปค่าความต้านทานแรงดึงของแผ่นฟิล์มมีผลต่อความทนทานของฟิล์มต่อความเค้นตึงฉาก (Normal Stress) ของฟิล์มในระหว่างการนำไปใช้งาน การขนส่ง และการจัดการอาหาร ค่าการยืดตัว ณ จุดขาดของฟิล์มเกี่ยวข้องกับความยืดหยุ่นของฟิล์มสำหรับบรรจุภัณฑ์อาหาร ส่วนค่าโมดูลัสของความยืดหยุ่นบ่งบอกถึงความแข็งของฟิล์ม (Stiffness) [9] จากผลการวัดการต้านทานแรงดึง การยืดตัว และค่าโมดูลัสของฟิล์ม แสดงในตารางที่ 4 ฟิล์มที่ผสม TA มีค่าความต้านทานแรงดึงสูงกว่าฟิล์มที่ไม่มี TA และส่งผลให้ค่าโมดูลัสของฟิล์มเพิ่มขึ้น ความแข็งแรงของฟิล์มจึงเพิ่มขึ้น ในขณะที่การยืดตัวของฟิล์มลดลง ความยืดหยุ่นของฟิล์มจึงลดลง สอดคล้องกับผลของการทดสอบปริมาณความชื้นและอัตราการซึมผ่านของไอน้ำ ซึ่งผลการทดลองที่ได้อาจจะเกิดจาก เมื่อเพิ่มปริมาณ TA เพิ่มขึ้น TA ไม่สามารถเกิดการเชื่อมขวางกับ PVA ได้ทั้งหมด และอีกเหตุผลหนึ่งอาจมาจากระหว่างพันธะจากสารเชื่อมขวางที่เดิมลงไปเชื่อมพันธะระหว่าง PVA-TA และ PVA-PVA มีขีดจำกัด ดังนั้นเมื่อเติม TA กับ PVA ที่เหมาะสมจะทำให้เกิดแรงระหว่างโมเลกุลเพิ่มขึ้น ทำให้ความต้านทานแรงดึงและความยืดหยุ่นของฟิล์มดีขึ้นด้วย [10]

3.3 การวิเคราะห์หาองค์ประกอบทางโครงสร้างของฟิล์ม

การตรวจวิเคราะห์หาองค์ประกอบด้วยเทคนิคเทคนิคฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรสโคปี (FTIR) เป็นเทคนิคที่ใช้ในการจำแนกประเภทสารอินทรีย์ สารอนินทรีย์ และพันธะเคมีในโมเลกุลรวมได้ [21] จากรูปที่ 2 แสดงเส้นสเปกตรัมของ TA และเส้นสเปกตรัมของฟิล์มผสมระหว่าง PVA/TA ที่อัตราส่วนต่างๆ จากรูปพบว่า เส้นสเปกตรัมของ TA จะพบหมู่ฟังก์ชัน C=C Stretching ที่ความยาวคลื่น $1,611\text{ cm}^{-1}$ พบฟังก์ชัน C-H Bending ที่ความยาวคลื่น $1,439\text{ cm}^{-1}$ ยังพบพีคความยาวคลื่น $1,315\text{ cm}^{-1}$ ของ -OH Stretching ของฟีนอลิกไฮดรอกซิล (Phenolic Hydroxyl) พบพีคความยาวคลื่น $1,717\text{ cm}^{-1}$ ของ C=O Stretching ที่บ่งชี้ว่าเป็นแทนนินกลุ่มละลายน้ำได้ [10, 23] และยังพบหมู่ไฮดรอกซิล (-OH) ที่ความยาวคลื่น $3,294\text{ cm}^{-1}$ โดยพบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณ TA ที่มากขึ้นจะพบหมู่ -OH มากขึ้น ซึ่งหมู่ -OH ทำให้เกิดพันธะไฮโดรเจนกับโมเลกุลของน้ำได้ ทำให้ฟิล์มไวต่อความชื้นได้ง่ายเมื่อสัมผัสอากาศ [23] ซึ่งจะสอดคล้องกับผลของอัตราการซึมผ่านของไอน้ำ

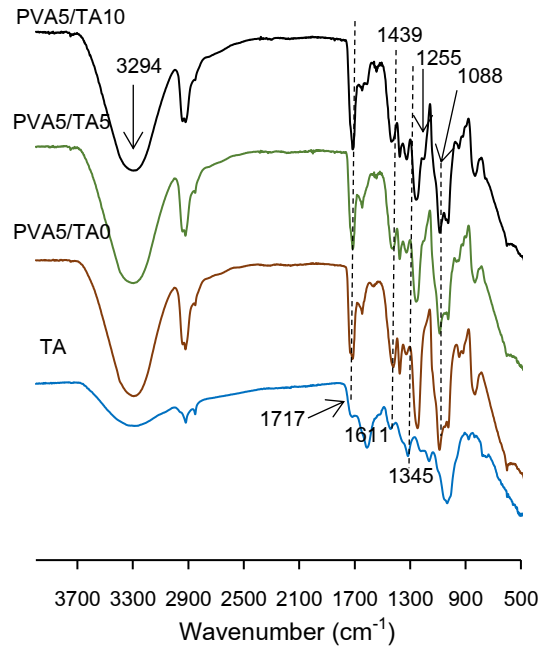
ตารางที่ 4 สมบัติทางกลของฟิล์ม PVA และ TA ที่อัตราส่วนต่าง ๆ

| อัตราส่วน PVA/TA | Tensile strength (เมกะปาสคาล) | Elongation @break (ร้อยละ) | Young's modulus (เมกะปาสคาล) |
|------------------|----------------------------------|-------------------------------|---------------------------------|
| PVA5/TA0 | 36.69 ± 11.58 | 145.42 ± 24.07 | 275.26 ± 49.64 |
| PVA5/TA5 | 35.80 ± 14.51 | 122.79 ± 24.16 | 795.52 ± 157.86 |
| PVA5/TA10 | 44.32 ± 5.89 | 101.37 ± 25.88 | 1075.58 ± 465.26 |

หมายเหตุ ในแนวดิ่ง มีความแตกต่างกันทางสถิติอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95



ในกรณี PVA5/TA0 (ไม่ผสมกรดแทนนิกและไม่เติมสารเชื่อมขวาง) จะพบ C-O Stretching ที่ความยาวคลื่น 1,088 cm^{-1} ซึ่งอยู่ในสายโซ่หลักของ PVA หลังเติมกลูตาราลดีไฮด์เป็นสารเชื่อมขวาง จะทำให้ PVA เชื่อมต่อกับสายโซ่ TA มากขึ้น เกิดคูโพลิเมอร์ระหว่าง PVA-PVA PVA-TA และ TA-TA [23] พบพีคความยาวคลื่น 1,315 cm^{-1} ของ -OH Stretching ของฟีนอลิกไฮดรอกซิลเพิ่มขึ้น เมื่อมีการเติม TA มากขึ้น ในกรณีที่เติมและกลูตาราลดีไฮด์ จะพบการเชื่อมขวาง (Crosslink) ระหว่างคู่ PVA TA และกลูตาราลดีไฮด์ ทำให้พบพันธะอะซีทัล (C-O-C) ที่ความยาวคลื่นช่วง 1,026-1,255 cm^{-1} ของ PVA5/TA10 และ PVA5/TA5 เข้มขึ้น เมื่อเทียบกับ PVA5/TA0 (ไม่ผสมกรดแทนนิกและไม่เติมสารเชื่อมขวาง) สอดคล้องกับงานวิจัยของ da Cruz และคณะ [23] ที่ศึกษาฟิล์มบรรจุภัณฑ์ด้านเชื้อแบคทีเรียโดยใช้โพลีไวนิลแอลกอฮอล์ผสมกับแทนนินประจุบวกที่อัตราส่วนต่างๆ พบความเข้มข้นของพันธะอะซีทัล (C-O-C) เช่นกัน



รูปที่ 2 เส้นสเปกตรัมของ TA และเส้นสเปกตรัมของฟิล์มผสมระหว่าง PVA/TA ที่อัตราส่วนต่างๆ

ตารางที่ 5 ค่าสีและความแตกต่างของสีโดยรวมของเนือปลานิลที่ถูกเก็บในตู้เย็นอุณหภูมิ 4±2 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 7 วัน

| อัตราส่วน PVA/TA | L* | a* | b* | ΔE^* |
|------------------|------------|------------|-----------|--------------|
| ปลาไม่ห่อ | 45.82±0.27 | 12.35±0.23 | 2.91±0.15 | 52.35±0.20 |
| PVA5/TA0 | 46.37±0.38 | 10.78±0.39 | 4.67±0.22 | 51.58±0.27 |
| PVA5/TA5 | 37.28±0.21 | 17.34±0.25 | 6.43±0.35 | 62.15±0.09 |
| PVA5/TA10 | 32.11±0.18 | 16.28±0.13 | 5.27±0.21 | 66.73±0.13 |

หมายเหตุ ΔE^* ในแนวตั้ง มีความแตกต่างกันทางสถิติอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95



3.4 การทดสอบประสิทธิภาพของฟิล์มต่อเชื้อปนลาหนิล

3.4.1 ลักษณะและค่าสีของเชื้อปนลาหนิลหลังครบระยะเวลาในการเก็บรักษา

ผลการเก็บรักษาเชื้อปนลาหนิลในตู้เย็นอุณหภูมิ 4 ± 2 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 7 วัน พบว่าสีของเชื้อปนลาหนิลที่ห่อด้วยฟิล์มที่ผสม TA มีความเข้มข้นตามปริมาณ TA ที่เพิ่มขึ้น และฟิล์มที่ใช้ในการห่อสามารถห่อและลอกออกจากเนื้อปลาได้ เมื่อนำไปวัดค่าสีและความแตกต่างของสีโดยรวมของเชื้อปนลาหนิล ในวันแรกก่อนนำไปเก็บรักษาพบว่า ค่าสีของเชื้อปนลาหนิลมีค่า L^* a^* b^* และ ΔE^* อยู่ที่ 48.92 ± 0.65 , 13.58 ± 0.53 , 4.23 ± 0.45 และ 49.78 ± 0.44 ซึ่งเป็นสีขาวอมชมพู หลังเก็บรักษาไว้ในตู้เย็นอุณหภูมิ 4 ± 2 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 7 วัน ค่าสีและความแตกต่างของสีโดยรวมแสดงดังตารางที่ 5 พบว่าปลาที่ไม่ได้ห่อฟิล์มมีค่าความแตกต่างของสีโดยรวมเพิ่มขึ้น เพราะปลาที่เก็บไว้นานจะเริ่มสูญเสียน้ำทำให้สีปลาเข้มขึ้น (ค่า L^* ลดลง) ปลาที่ห่อด้วยฟิล์ม PVA5/TA0 สามารถคงค่าสีโดยรวมไว้ได้ใกล้เคียงกับวันแรกมากที่สุด เพราะการห่อฟิล์มจะป้องกันการสูญเสียของเนื้อปลา สีของเชื้อปนลาหนิลที่ห่อด้วยฟิล์มที่ผสม TA มีความเข้มข้นตามปริมาณ TA ที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากเมื่อเพิ่มปริมาณ TA ทำให้ TA ที่จัดเป็นพอลิเมอร์กลุ่มที่ชอบน้ำ (Hydrophilic) ละลาย ส่งผลให้สีของฟิล์มติดที่เนื้อปลาเล็กน้อย สอดคล้องกับผลของ FTIR ที่พบว่าการเติม TA ที่มากขึ้นจะพบหมู่ไฮดรอกซิลมากขึ้น จึงละลายน้ำได้ดียิ่งขึ้น

3.4.2 ประสิทธิภาพของฟิล์มต่อการต้านเชื้อแบคทีเรียในเชื้อปนลาหนิล

การวิเคราะห์ปริมาณของแบคทีเรียที่มีชีวิตทั้งหมด (Total Aerobic bacteria) ด้วยวิธีการใช้แผ่นวัดแบคทีเรียสำเร็จรูป 3M Petrifilm พบว่าในวันที่ 0 เชื้อปนลาหนิลมีจำนวนแบคทีเรียทั้งหมดเฉลี่ย 1.96×10^4 โคโลนีต่อกรัม ซึ่งมีจำนวนไม่เกินมาตรฐานของสำนักงานมาตรฐานสินค้าเกษตรและอาหารแห่งชาติ มกอช. 7001-2547 [25] เมื่อนำเนื้อปลาแบ่งออกเป็น 3 กลุ่ม ได้แก่ เนื้อปลาไม่ห่อฟิล์ม (Non-film) เนื้อปลาห่อด้วยฟิล์ม PVA ไม่ผสม TA (PVA5/TA0) และเนื้อปลาห่อฟิล์มที่ผสมระหว่าง PVA/TA (PVA5/TA5 และ PVA5/TA10) เก็บที่อุณหภูมิ 4 ± 2 องศาเซลเซียส นาน 7 วัน ผลการศึกษาแสดงดังรูปที่ 3 พบว่า จำนวนแบคทีเรียทั้งหมดเพิ่มขึ้นตามจำนวนวันที่เก็บรักษามากขึ้น หลังเก็บเนื้อปลาได้เพียง 3 วัน ปลาที่ไม่ได้ห่อฟิล์มและปลาที่ห่อด้วยฟิล์ม PVA5/TA0 มีเชื้ออยู่ที่ 3.84×10^5 และ 3.42×10^5 โคโลนีต่อกรัม ตามลำดับ ซึ่งจะเกินมาตรฐาน มกอช. 7001-2547 ที่กำหนดให้ต้องมีจุลินทรีย์ทั้งหมดไม่เกิน 1×10^5 โคโลนีต่อกรัม จึงไม่ทำการวัดเชื้อในวันที่ 5 ต่อไป

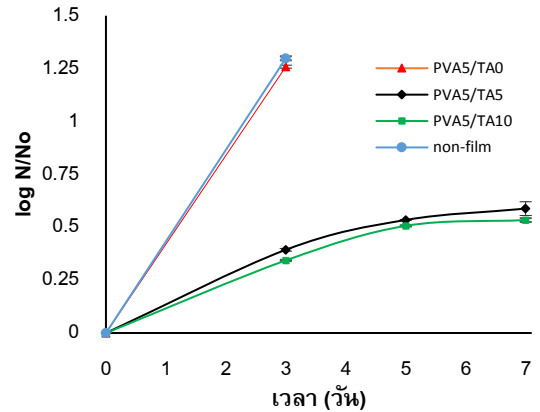
ส่วนในเนื้อปลาห่อฟิล์มที่ผสมระหว่าง PVA/TA สามารถยับยั้งการเจริญเติบโตของแบคทีเรียทั้งหมดได้ไม่เกินมาตรฐานจนครบระยะเวลา 7 วัน โดยที่อัตราส่วน PVA5/TA10 และ PVA5/TA5 ไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ดังนั้นอัตราส่วน PVA5/TA10 และ PVA5/TA5 สามารถยับยั้งการเจริญเติบโตของแบคทีเรียทั้งหมดได้ใกล้เคียงกัน ผลการยับยั้งการเจริญเติบโตของแบคทีเรียทั้งหมด เกิดจาก TA จัดอยู่



ในกลุ่มสารประกอบโพลีฟีนอลิก ซึ่งทำหน้าที่ยับยั้งการดูดซึมน้ำตาลและกรดอะมิโนของแบคทีเรีย [26] ที่สามารถยับยั้งแบคทีเรียที่ต้องการออกซิเจน (Aerobes) และไม่ต้องออกซิเจน (Anaerobes) ทั้งแบคทีเรียแกรมบวกและแกรมลบได้ [27] เช่น *Staphylococcus aureus*, *Escherichia coli*, *Streptococcus pyogenes*, *Enterococcus faecalis* และ *Pseudomonas aeruginosa* [28] จึงทำให้น้ำเนื้อปลาเน่าเสียช้าลงและยืดอายุการเก็บรักษาเนื้อปลานิลได้นานยิ่งขึ้น

4. สรุปผลการวิจัย

การพัฒนาบรรจุภัณฑ์จากส่วนผสมของกรดแทนนิกและพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ พบว่า มีค่าสีเพิ่มขึ้นตามปริมาณกรดแทนนิกที่เพิ่มมากขึ้น ความหนาปริมาณความชื้นและอัตราการซึมผ่านของไอน้ำของฟิล์มมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณกรดแทนนิกที่เพิ่มสูงขึ้น สมบัติทางกลของฟิล์มเมื่อเพิ่มปริมาณกรดแทนนิกในฟิล์ม ค่าการต้านทานแรงดึงและค่าโมดูลัสของความยืดหยุ่นเพิ่มขึ้นในขณะที่การยืดตัวของฟิล์มลดลง ผลการวิเคราะห์หาค่าประกอบทางโครงสร้างของฟิล์มพบว่า การเพิ่มปริมาณกรดแทนนิกจะทำให้พบหมู่ ไฮดรอกซิล (-OH) มากขึ้น การทดสอบประสิทธิภาพของฟิล์มต่อเนื้อปลานิลพบว่า ค่าสีของปลานิลจะเพิ่มขึ้นเล็กน้อยตามปริมาณกรดแทนนิกที่เพิ่มขึ้น การเพิ่มปริมาณกรดแทนนิกมากขึ้นจะทำให้สามารถยับยั้งการเจริญเติบโตของแบคทีเรียได้ดีขึ้น โดยพบว่าปลาที่ไม่ได้ห่อฟิล์ม และปลาที่ห่อด้วยฟิล์ม PVA5/TA0 หลังเก็บเนื้อปลาได้เพียง 3 วัน จะพบว่าปริมาณแบคทีเรียเกินมาตรฐานสำนักงานมาตรฐานสินค้าเกษตรและอาหารแห่งชาติ มกอช. 7001-2574 (เกิน 1×10^5 โคโลนีต่อกรัม) แต่ฟิล์มที่อัตราส่วน



รูปที่ 3 จำนวนแบคทีเรียทั้งหมดในเนื้อปลานิลถูกเก็บในตู้เย็นอุณหภูมิ 4 ± 2 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 7 วัน

PVA5/TA5 และ PVA5/TA10 สามารถเก็บรักษาปลานิลในตู้เย็นที่อุณหภูมิ 4 ± 2 องศาเซลเซียส ได้เกิน 7 วัน โดยที่แบคทีเรียไม่เกินมาตรฐานของ มกอช. 7001-2547 ดังนั้นการผสมกรดแทนนิกในฟิล์มช่วยยับยั้งการเจริญเติบโตของแบคทีเรียในเนื้อปลานิลได้

5. เอกสารอ้างอิง

- [1] J. Bonilla, E. Fortunati, L. Atares, A. Chiralt and J.M. Kenny, Physical, structural and antimicrobial properties of poly vinyl alcohol-chitosan biodegradable films, Food Hydrocolloids, 2013, 35, 463 – 470.
- [2] P. Cazón, M. Vazquez and G. Velazquez, Cellulose – glycerol – polyvinyl alcohol composite films for food packaging: evaluation of water adsorption, mechanical properties, light-barrier properties and transparency, Carbohydrate Polymers, 2018, 195(21), 432 – 443.



- [3] H. Haghghi, S.K. Leugoue, F. Pfeifer, H.W. Siesler, F. Licciardello, P. Fava and A. Pulvirenti, Development of antimicrobial films based on chitosan-polyvinyl alcohol blend enriched with ethyl lauroyl arginate (LAE) for food packaging applications, *Food Hydrocolloids*, 2020, 100, 105419.
- [4] S.B. Bahrami, S.S. Kordestani, H. Mirazadeh and P. Mamsoori, Poly (vinyl alcohol) – chitosan blends: preparation, mechanical and physical properties, *Iranian Polymer Journal*, 2002, 12(2), 139 – 146.
- [5] S.Y. Park, S.T. Jun and K.S. Marsh, Physical properties of PVOH/chitosan blended films cast from different solvents, *Food Hydrocolloids*, 2001, 15, 499 – 502.
- [6] K. Lewandowska, Surface studies of microcrystalline chitosan/poly (vinyl alcohol) mixtures, *Applied Surface Science*, 2012, 263, 115 – 123.
- [7] Y. Chen, L. Peng, T. Liu, Y. Wang, S. Shi and H. Wang, Poly (vinyl alcohol)-tannic acid hydrogels with excellent mechanical properties and shape memory behaviors, *ACS applied materials and interfaces*, 2016, 8(40), 27199 – 27206.
- [8] M.P. Balasubramaniam, P. Murugan, D. Chenthamara, S.G. Ramakrishnan, A. Salim, F.-H. Lin, B. Robert and S. Subramaniam Synthesis of chitosan-ferulic acid conjugated poly (vinyl alcohol) polymer film for an improved wound healing, *Materials Today Communications*, 2020, 25, 101510.
- [9] F. Debiagi, R.K. Kobayashi, G. Nakazato, L.A. Panagio and S. Mali, Biodegradable active packaging based on cassava bagasse, polyvinyl alcohol and essential oils, *Industrial Crops and Products*, 2014, 52, 664 – 670.
- [10] J. Liao, J. Li, H. Wang, Y. Zhu, H. Essawy, G. Du and X. Zhou, Development of antioxidant packaging film based on Chinese bayberry tannin extract and polyvinyl alcohol, *Journal of Renewable Energy*, 2022, 10(1), 19 – 31.
- [11] P. Buzzini, P. Arapitsas, M. Goretti, E. Branda, B. Turchetti, P. Pinelli, F. Ieri and A. Romani, Antimicrobial and antiviral activity of hydrolysable tannins, *Mini-Review Journal of Medicinal Chemistry*, 2008, 8, 1179 – 1187.
- [12] N. Sahiner, S. Sagbas, M. Sahiner, C. Silan, N. Aktas and M. Turk, Biocompatible and biodegradable poly (tannic acid) hydrogel with antimicrobial and antioxidant properties, *International Journal of Biological Macromolecules*, 2016, 82, 150 – 159.



- [13] E. Tomaszewska, P. Dobrowolski, A. Winiarska-Mieczan, M. Kwiecien, A. Tomczyk and S. Muszynski, The effect of tannic acid on the bone tissue of adult male Wistar rats exposed to cadmium and lead, *Experimental and Toxicologic Pathology*, 2017, 69(3), 131 – 141.
- [14] S. Lau, J. Wahn, G. Schulz, C. Sommerfeld and U. Wahn, Placebo-controlled study of the mite allergen-reducing effect of tannic acid plus benzyl benzoate on carpets in homes of children with house dust mite sensitization and asthma, *Pediatric Allergy and Immunology*, 2002, 13, 31 – 36.
- [15] <https://api.dtn.go.th/files/v3/614af620ef4140fe44141855/download>. (Accessed on 10 December 2022)
- [16] <http://elearning.psu.ac.th/courses.pdf>. (Accessed on 10 December 2022)
- [17] H. Yong, X. Wang, R. Bai, Z. Miao, X. Zhang and J. Liu, Development of antioxidant and intelligent pH-sensing packaging films by incorporating purple-fleshed sweet potato extract into chitosan matrix, *Food Hydrocolloids*, 2019, 90, 216 – 224.
- [18] AOAC, *Official Methods of Analysis*, 16th ed., Association of Official Analytical Chemists, VA, USA, 2000.
- [19] Y. Hu, V. Topolkaev, A. Hiltner and E. Baer, Measurement of water vapor transmission rate in highly permeable films, *Journal of Applied Polymer Science*, 2001, 81(7), 1624 – 1633.
- [20] ASTM D882, Standard Test Method for Tensile Properties of Thin plastic Sheeting, 1997.
- [21] N. Samsalee, N. Romsomsa and S. Musika, Physicochemical mechanical and thermal properties of edible film from Man Lueat (*Dioscorea alata*) flour, *RMUTP Research Journal*, 2021, 15, 24 – 39. (in Thai)
- [22] A.K. Das, M.N. Islam, M.O. Faruk, M. Ashaduzzaman and R. Dungani, Review on tannins: Extraction processes, applications and possibilities, *South African journal of Botany*, 2020, 135, 58 – 70.
- [23] J.A. da Cruz, A.B. da Silva, B.B. Ramin, P.R. Souza, K.C. Papat, R.S. Zola, M.J. Kipper and A.F. Martins, Poly (vinyl alcohol)/cationic tannin blend films with antioxidant and antimicrobial activities, *Materials Science & Engineering C, Materials for biological applications*, 2020, 107, 110357.
- [24] N. Samsalee and R. Sothornvit, Characterization of food application and quality of porcine plasma protein-based films incorporated with chitosan or encapsulated turmeric oil, *Food and Bioprocess Technology*, 2020, 13, 488 – 500.



- [25] TACFS 7001 – 2004, Thai Agricultural Commodity and Food Standard (TACFS), Tilapia, National Bureau of Agricultural Commodity and Food Standards (ACFS), 2004. (in Thai)
- [26] A. Pandey and P.S. Negi, Phytochemical composition, in vitro antioxidant activity and antibacterial mechanisms of *Neolamarckia cadamba* fruits extracts, *Natural Product Research*, 2018, 32, 1189 – 1192.
- [27] K.-T. Chung, Z. Lu and M.W. Chou, Mechanism of inhibition of tannic acid and related compounds on the growth of intestinal bacteria, *Food and Chemical Toxicology*, 1998, 36, 1053 – 1060.
- [28] B. Kaczmarek, Tannic acid with antiviral and antibacterial activity as a promising component of biomaterials – A minireview, *Materials*, 2020, 13, 3224.

การศึกษาตัวแปรกระบวนการผลิตสายพานดินตะขากับโปรแกรม Cast Designer สำหรับแบบหล่ออินเวสต์เมนต์เพื่อลดการหดตัว

ทินกร สวัสดิสาร* ขนิษฐา วงษ์สีดาแก้ว และ พัชรพิมล สุวรรณกาญจน์

ภาควิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมเครื่องกล, วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม,
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

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

วันที่รับบทความ: 16 มีนาคม 2566; วันที่ทบทวนบทความ: 15 สิงหาคม 2566; วันที่ตอบรับบทความ: 18 สิงหาคม 2566
วันที่เผยแพร่ออนไลน์: 15 ธันวาคม 2566

บทคัดย่อ: เทคโนโลยีการขึ้นรูปทางวิศวกรรมในปัจจุบันมีความก้าวหน้าอย่างมาก ทำให้สามารถผลิตชิ้นงานด้วยเครื่องมือ เครื่องจักรที่ทันสมัยมากขึ้น การผลิตชิ้นงานที่มีความซับซ้อน งานต้นแบบ งานที่มีลักษณะเฉพาะสามารถทำได้อย่างรวดเร็วขึ้นตามไปด้วย การนำโปรแกรมจำลองทางด้านวิศวกรรมเข้ามาช่วยให้การทำงานเป็นไปด้วยความราบรื่นก็มีความจำเป็นไม่ยิ่งหย่อนไปกว่ากัน ในกระบวนการหล่อโลหะแบบที่ียงตรงสูงเป็นกรรมวิธีการผลิตหนึ่งที่สามารถผลิตชิ้นงานที่มีความซับซ้อน งานที่ต้องการรายละเอียดโดยไม่ผ่านการตัดปาดผิวได้เป็นอย่างดี แต่มักพบข้อบกพร่องจำนวนหนึ่งที่เกิดขึ้นได้บ่อยครั้งจากประเภทการหดตัว ซึ่งการเทหล่อประกอบด้วยปัจจัยหลายส่วนสำคัญ ผู้วิจัยจึงนำโปรแกรม Cast Designer จำลองพฤติกรรมการไหลของโลหะหลอมเหลวสำหรับขึ้นรูปชิ้นส่วนสายพานดินตะขาบที่มีลักษณะเฉพาะ เพื่อเป็นการช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการทำงาน พัฒนาการผลิตชิ้นส่วนงานเทหล่อแบบที่ียงตรงสูง ลดความสูญเสียที่ไม่จำเป็น รวมไปถึงการช่วยวิเคราะห์แนวโน้มในการผลิตที่ทำได้อย่างแม่นยำ การจำลองพฤติกรรมการไหล พบว่า ความไม่สมบูรณ์ของชิ้นงานหล่อเกิดขึ้นได้น้อยที่สุดในเงื่อนไขที่สองโดยไม่ส่งผลเสียหายต่อชิ้นงาน พบข้อบกพร่องประเภทการหดตัว คิดเป็นร้อยละ 0.039 โดยใช้เวลาในการเทหล่อโลหะหลอมเหลว 23 วินาที และความเร็วในการเทหล่อโลหะหลอมเหลว 40 เมตรต่อวินาที ขณะที่เงื่อนไขที่สามพบข้อบกพร่องประเภทการหดตัวที่น้อยที่สุด คิดเป็นร้อยละ 0.023 ซึ่งมีความไม่สมบูรณ์ของชิ้นงานที่ไม่สามารถนำไปใช้งานได้

คำสำคัญ: หล่อที่ียงตรงสูง; กระบวนการหล่อ; การหดตัว; โปรแกรมแคสติ้งซอฟต์แวร์; สายพานดินตะขาบ

The study of Factors in Track Shoe Manufacturing Process with Cast Designer Program for Investment Casting to Reduce Shrinkage

Tinnagorn Swatdisan^{*}, Khanittha Wongseedakaew and Patpimol Suwankan

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

^{*} Corresponding author, E-mail: den.tinnagorn@gmail.com

Received: 16 March 2023; Revised: 15 August 2023; Accepted: 18 August 2023

Online Published: 15 December 2023

Abstract: Presently, engineering molding technology has made significant progress, making it possible to produce workpieces with modern tools and machines. Prototypes and unique work can also be done faster. An engineering simulation program is necessary to produce, and precision molding is one of the manufacturing processes that can produce complex workpieces or require detail without a machine. By the way, there are a lot of defects that occur in casting workpieces due to shrinkage. In this study, the casting designer is a simulation program that is necessary to investigate the flow behavior of molten metal for a track shoe part. To increase work efficiency, develop production, and reduce costs, including accurately analyzing trends in production. The flow behavior simulation result showed that the imperfections of the casting were minimal in the second condition without damaging the workpiece, displaying a shrinkage of 0.039 percent using a molten metal casting time of 23 seconds, and a molten metal casting velocity of 40 meters per second. While the third condition, it is the least shrinkage, representing 0.023 percent. The imperfections of the casting cannot be used.

Keywords: Investment casting; Casting process; Shrinkage; Cast designer; Track shoe



1. บทนำ

การเกษตรในปัจจุบันมีการใช้เครื่องจักรกลเพื่อเป็นเครื่องทุ่นแรงให้กับเกษตรกรอันเป็นสิ่งจำเป็นและหลีกเลี่ยงได้ยาก เครื่องมือเครื่องจักรกลทางการเกษตร ดังเช่น รถไถ รถแทรกเตอร์ ที่ใช้กันอยู่อย่างแพร่หลายนี้ต้องอาศัยสายพานดินตะขាប់ในการเคลื่อนที่ไปยังตำแหน่งหรือสถานที่ต่างๆ อายุการใช้งานและลักษณะพื้นผิวของพื้นที่เป็นสาเหตุสำคัญประการหนึ่งซึ่งส่งผลกระทบต่อความเสียหายขึ้นกับสายพานดินตะขាប់ การดำเนินการซ่อมแซมชิ้นส่วนสายพานดินตะขាប់เป็นเรื่องที่เกิดขึ้นได้ยากอันเนื่องจากชิ้นส่วนสายพานดินตะขាប់มีลักษณะเฉพาะทางด้านรูปพรรณ (Profile) รูปร่าง (Shape) และขนาด (Dimension) การเลือกใช้กระบวนการหล่อโลหะแบบเที่ยงตรงสูง (Precision Casting) จึงเป็นกระบวนการผลิตหนึ่งที่สามารถผลิตชิ้นส่วนสายพานดินตะขាប់ได้อย่างเหมาะสม อีกทั้งรายละเอียดของชิ้นส่วน ข้อจำกัดด้านการตัดแปดผิว (Machining) ขนาดและความเที่ยงตรง กระบวนการเทหล่อ (Casting Process) นี้สามารถทำได้ดีกว่ากระบวนการหล่อแบบอื่น แต่ทว่าในกระบวนการหล่อโลหะมักพบข้อบกพร่อง (Defect) ที่อาจจะเกิดขึ้นกับชิ้นงานได้จากขั้นตอนการเทหล่อโลหะ ยกตัวอย่างเช่น การเกิดโพรงอากาศ (Gas Porosity) รูพรุน (Void) โลหะหลอมเหลวไม่เต็มแม่พิมพ์ (Misrun) การเย็นตัวที่ไม่ประสานกัน (Cold Shut) การหดตัวของชิ้นงานหล่อ (Shrinkage) เป็นต้น

การออกแบบระบบการเทหล่อโลหะหลอมเหลวเป็นอีกหนึ่งปัจจัยสำคัญต่อการเกิดความบกพร่องของชิ้นงานหล่อ ซึ่งในระบบการเทหล่อโลหะหลอมเหลวมี

องค์ประกอบหลายส่วน ดังต่อไปนี้ แอ่งเทโลหะหลอมเหลว (Pouring Basin) รูเท (Sprue) ทางวิ่งของโลหะหลอมเหลว (Runner) ทางเข้าโลหะหลอมเหลว (Ingate) รูล้น (Blind) ตลอดจนอุณหภูมิเทหล่อโลหะหลอมเหลว (Tapping Temperature) และอุณหภูมิอบแม่พิมพ์ (Burnout Temperature) ซึ่งปัญหาความบกพร่องในชิ้นงานเทหล่อเกิดขึ้นได้จากหลายสาเหตุ แต่ละสาเหตุของความบกพร่องมีปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อความบกพร่องของชิ้นงานหล่อแตกต่างกันออกไป ดังนั้น การนำโปรแกรมหรือเครื่องมือเพื่อช่วยในการออกแบบ การจำลองพฤติกรรมกรหล่อ และการวิเคราะห์ผล เป็นการช่วยลดปัญหาที่ส่งผลกระทบต่อกระบวนการเทหล่อโลหะ ลดความบกพร่องที่เกิดขึ้นในชิ้นงาน ลดความสูญเสียด้านการลงทุน จึงนับได้ว่าโปรแกรมหรือเครื่องมือเหล่านี้มีความจำเป็นเพื่อตอบสนองความต้องการทางด้านวิศวกรรม โดยมีนักวิจัยจำนวนหนึ่งทำการจำลองพฤติกรรมกรไหลของโลหะเหลวด้วยโปรแกรม Cast Designer โดยการศึกษาอุณหภูมิเทหล่อ และการออกแบบระบบป้อนเติมโลหะเหลว (Casting System) ที่ส่งผลให้เกิดข้อบกพร่องของชิ้นงานคือ เทหล่อไม่เต็มแม่พิมพ์ รูพรุน ตามด และโพรงอากาศ [1] ในการออกแบบแม่พิมพ์ให้มีทางเข้าของโลหะเหลวทางเดียวและมีการจัดวางเรียงชิ้นงานเป็นมุมเอียงกับระนาบแนวนอน 30 45 และ 60 องศา องศาที่มีผลในการเติมเต็มของโลหะหลอมเหลว ซึ่งมุมจัดวางที่ 60 องศา ใช้เวลาในการเติมเต็มน้อยสุดเพียง 1.0667 วินาที [2] การออกแบบอัตราส่วนทางไหลของโลหะเหลวคือพื้นที่หน้าตัดของทางวิ่งต่อพื้นที่หน้าตัดทางเข้าเป็น 1:1.5 โดยมีความเร็วในการฉีดโลหะเหลวระหว่าง



1.5-2.5 เมตรต่อวินาที มีมุมการไหล 20 30 45 และ 60 องศา และอุณหภูมิของโลหะเหลวระหว่าง 680-800 องศาเซลเซียส ผลของการออกแบบจำลองพบว่า ตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อการเกิดรูพรุนในชิ้นงาน ต้องควบคุมความเร็วของการฉีดโลหะเหลว 2.4 เมตรต่อวินาที มุมของการไหลที่ 20 องศา และอุณหภูมิของโลหะเหลวที่ 690 องศาเซลเซียส [3] การออกแบบการทดลองจากอุณหภูมิอบเบ้า 480 540 และ 600 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิเทหล่อ 1,020 1,030 และ 1,060 องศาเซลเซียส เพื่อลดปัญหาของชิ้นงานที่เกิดจากการหดตัวในเงินสีชมพูจากกระบวนการหล่อแบบอินเวสต์เมนต์ (Investment Casting Process) พบว่าความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิอบเบ้ากับอุณหภูมิเทหล่อมีอิทธิพลอย่างมีนัยสำคัญต่อการเกิดรูพรุนจากการหดตัว ซึ่งเงื่อนไขที่เหมาะสมในการหล่อจะมีอุณหภูมิอบเบ้าที่ 480 องศาเซลเซียส กับอุณหภูมิเทหล่อที่ 1,060 องศาเซลเซียส หรืออุณหภูมิอบเบ้าที่ 600 องศาเซลเซียส กับอุณหภูมิเทหล่อที่ 1,030 องศาเซลเซียส [4] นักวิจัยจำนวนหนึ่งได้ทดลองหลอมโลหะผสมสีขาวที่อุณหภูมิคงที่ 990 องศาเซลเซียส ด้วยกระบวนการหล่อแบบซีฟิ่งหาย (Lost Wax Casting Process) โดยการออกแบบระบบทางไหลของโลหะเหลวมีทางเข้ารูปร่างสี่เหลี่ยมผืนผ้ากว้าง 2 มิลลิเมตร ยาว 4 มิลลิเมตร มีทางวิ่งขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4 มิลลิเมตร และชิ้นงานทำมุม 45 องศา กับรูเทที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตร ซึ่งทำจากปูนปลาสเตอร์ กำหนดอุณหภูมิแบบหล่อที่ 400 550 และ 630 องศาเซลเซียส พบว่า อุณหภูมิแบบหล่อมีผลต่อการเกิดรูพรุนจากการหดตัวที่บริเวณกึ่งกลางของชิ้นงาน มีลักษณะผิวหยาบ และรูปร่างไม่แน่นอน

อุณหภูมิแบบหล่อที่ 400 องศาเซลเซียส เกิดการหดตัวต่ำสุด [5] ด้านการศึกษาข้อบกพร่องของชิ้นงานประเภทโพรงอากาศ โดยใช้โปรแกรมจำลองกระบวนการหล่อ กำหนดให้มีทางเข้ากว้าง 1.5 มิลลิเมตร ยาว 30 มิลลิเมตร มุมการไหลตั้งแต่ 10 ถึง 60 องศา ความเร็วของโลหะเหลว 25 30 และ 60 เมตรต่อวินาที และอัตราส่วนพื้นที่หน้าตัดทางวิ่งต่อพื้นที่หน้าตัดทางเข้าตั้งแต่ 1.4 ถึง 3.5 พบว่าอิทธิพลของตัวแปรมุมการไหลในช่วง 20 ถึง 40 องศา เกิดข้อบกพร่องประเภทโพรงอากาศน้อย และอัตราส่วนของพื้นที่หน้าตัดไม่ควรต่ำกว่า 1 เท่า และไม่ควรเกิน 2.5 เท่า [6] การตรวจสอบความบกพร่องของชิ้นงานตัวเรือนสูบด้วยวิธีการเอกซเรย์ พบข้อบกพร่องคือการเกิดโพรงอากาศ จึงทำการจำลองกระบวนการหล่อขึ้นรูปด้วยโปรแกรม Flow 3D Cast วิเคราะห์ปัญหาจากชิ้นงานเดิม และออกแบบระบบทางไหลของโลหะเหลว โดยการเพิ่มพื้นที่หน้าตัดทางเข้าเป็น 37.5 ตาราง-มิลลิเมตร และเพิ่มพื้นที่หน้าตัดช่องทางออกเป็น 52.5 ตารางมิลลิเมตร พบว่าการเพิ่มพื้นที่หน้าตัดทางเข้าจะยิ่งทำให้เกิดโพรงอากาศในชิ้นงาน แต่ในทางกลับกันการเพิ่มพื้นที่หน้าตัดช่องทางออกจะทำให้ชิ้นงานเกิดโพรงอากาศลดน้อยลง [7] การทดลองเปรียบเทียบหาความสัมพันธ์ของค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่เกิดขึ้นกับข้อบกพร่องของชิ้นงานประเภทโพรงหดตัว โดยการใช้โปรแกรมทางสถิติคือ Minitab ในการวิเคราะห์ กำหนดแรงดัน 750 900 และ 1,000 บาร์ ความเร็วที่ทางเข้า 30 36 และ 42 เมตรต่อวินาที และระยะเวลาในการหล่อเย็น 127 130 และ 133 วินาที พบว่า การเพิ่มแรงดันฉีดในระหว่างการเย็นตัวและการหดตัวนั้นปริมาณของ



โลหะเหลวจะถูกดันเข้าไปซดเซยในส่วนที่เป็นโพรง จึงทำให้โพรงหดตัวนั้นมีขนาดที่เล็กลง [8] การวิเคราะห์สาเหตุของจุดเสียที่เกิดขึ้นจากกระบวนการหล่อของดุมล้อรถไถนา ชิ้นงานหล่อเย็นตัวแบบไม่ประสาน และชิ้นงานหล่อไม่เต็มแม่พิมพ์ โดยการจำลองกระบวนการหล่อด้วยโปรแกรม ProCAST กำหนดอัตราการเทหล่อที่ 1,000 กรัมต่อวินาที และอุณหภูมิเทหล่อ 1,190 ถึง 1,300 องศาเซลเซียส พบว่าอุณหภูมิที่ 1,220 ถึง 1,300 องศาเซลเซียส ไม่เกิดจุดเสียในชิ้นงาน แต่ที่อุณหภูมิต่ำกว่า 1,200 องศาเซลเซียส โลหะหลอมเหลวจะเกิดการแข็งตัวก่อนเต็มแบบทำให้ชิ้นงานเกิดจุดเสียหล่อไม่เต็มแม่พิมพ์ และชิ้นงานเกิดการเย็นตัวไม่ประสาน [9] อย่างไรก็ตาม การเทหล่อชิ้นส่วนสายพานดินตะขាប់ด้วยในกระบวนการเทหล่อแบบอินเวสต์เมนต์ (Investment Casting) ที่มีวิธีการแบบเทียงตรงสูง โดยเป็นชิ้นส่วนเครื่องจักรกลทางการเกษตรที่มีรูปพรรณซับซ้อนและประกอบเข้ากับชิ้นส่วนอื่นได้ เช่น สลักเกลียว บูชประคอง เป็นต้น ดังรูปที่ 1 เพื่อแก้ไขลดความบกพร่องที่เกิดจากกระบวนการเทหล่อโลหะจริง และปัจจัยที่ส่งผลให้เกิดความเสียหายต่อชิ้นงานสายพานดินตะขាប់ได้ ผู้วิจัยจึงนำโปรแกรม Cast Designer ช่วยในการจำลองพฤติกรรมการไหลของโลหะ และวิเคราะห์พฤติกรรมการไหลของการเทหล่อโลหะหลอมเหลวชิ้นส่วนสายพานดินตะขាប់นี้ ซึ่งใช้เวลาในการเทและความเร็วในการไหลในโพรงแบบแม่พิมพ์ เพื่อหาข้อบกพร่องของชิ้นงานหล่อประเภทการหดตัว นำไปสู่การแก้ไขชิ้นงานได้อย่างสมบูรณ์



รูปที่ 1 ชิ้นงานสายพานดินตะขាប់ที่ใช้งานจริง

2. วิธีการดำเนินงานทดลอง

2.1 วัสดุ

วัสดุที่ใช้ขึ้นรูปหล่อเป็นชิ้นส่วนสายพานดินตะขាប់เป็นเหล็กเกรด JIS SCM 415 ซึ่งจะจัดอยู่ในกลุ่มเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ (Low Carbon Steel) เป็นเหล็กที่มีปริมาณคาร์บอนไม่เกินร้อยละ 0.2 นอกจากคาร์บอนแล้ว ยังมีธาตุอื่นผสมอยู่ด้วย เช่น แมงกานีส (Mn) ซิลิคอน (Si) ฟอสฟอรัส (P) และกำมะถัน (S) เป็นต้น สมบัติของเหล็ก JIS SCM 415 มีความเหนียวแกร่งดี (Toughness) มีค่ายืดตัวสูง (Ductility) สามารถดัดงอ (Bending) ได้ง่าย ด้านทานต่อการบิดได้ดี (Torque) ด้านทานต่อการล้าได้ดี (Fatigue) และผิวด้านทานต่อการสึกหรอได้ดีเมื่อชุบคาร์บูไรซิง (Carburizing) มีความสามารถในการชุบแข็งแบบคาร์บูไรซิงชุบแข็งอุณหภูมิ 860-930 องศาเซลเซียส โดยใช้สารชุบเป็นน้ำมัน (Oil) ความแข็งก่อนชุบจะอยู่ที่ 8-12 HRC ส่วนความแข็งหลังชุบจะอยู่ที่ 58-60 HRC อุณหภูมิที่ใช้ในการอบคืนตัว (Tempering) 170-210 องศาเซลเซียส ใช้เวลาที่ 1 ชั่วโมง ค่าความแข็งหลังอบคืนตัว (Hardness) แล้วจะอยู่ที่ 52-56 HRC และ



การนำไปใช้งานส่วนมากนิยมใช้ทำอุปกรณ์ชิ้นส่วนเครื่องจักรที่ต้องรับภาระความล้าในระดับปานกลาง และมีการเสียดสีระหว่างการใช้งานสูง ทนต่อแรงกระแทก (Impact Strength) มีความเหนียวภายใน เช่น เฟืองตาม หรือเฟืองที่มีรอบคงที่ เพลลาที่รับแรงบิดไม่สูงมากนัก สลัก อุปกรณ์ชิ้นส่วนในการขุดเจาะดิน อุปกรณ์การเกษตร อะไหล่รถยนต์ รถจักรยานยนต์ และลูกปืนทนการเสียดสี โดยเหล็กเกรด JIS SCM 415 มีสมบัติทางเคมี ดังตารางที่ 1

2.2 กระบวนการหล่อแบบอินเวสต์เมนต์ (Investment Casting)

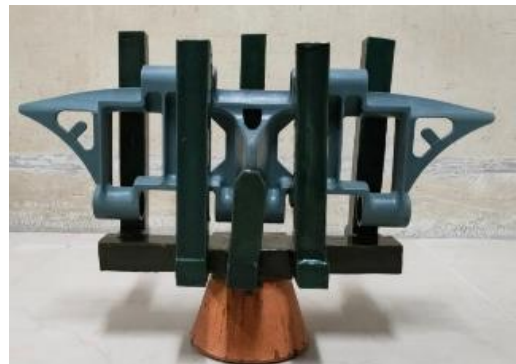
กระบวนการหล่อแบบอินเวสต์เมนต์เป็นกรรมวิธีการขึ้นรูปโลหะอีกชนิดหนึ่ง ที่จัดอยู่ในกระบวนการหล่อ ซึ่งการหล่อโลหะหลอมเหลวแบบเที่ยงตรงสูงนี้ จะทำโดยการสร้างใส่แบบหล่อ หรือกระสวน (Pattern) ตามรูปร่างของชิ้นงานที่ต้องการ จะทำจากขี้ผึ้ง (Wax) นำมาประกอบติดกับระบบการเทหล่อ (Pattern Assembly) ประกอบด้วยแอ่งเทโลหะหลอมเหลว รูปโลหะหลอมเหลว ทางวิ่งโลหะหลอมเหลว และทางเข้าโลหะหลอมเหลว ดังแสดงในรูปที่ 2 หลังจากประกอบเข้ากับส่วนต่างๆของระบบเทหล่อเสร็จแล้วจะนำไปเคลือบผิวกับวัสดุทนไฟที่ประกอบด้วย Zircon Sand และ Alumina Sand เป็นธาตุหลัก เพื่อทำเป็นแม่พิมพ์หล่อ ดังรูปที่ 3 เมื่อแม่พิมพ์แข็งตัวและแห้งแล้วจะนำไปอบด้วยความร้อนเพื่อทำการไล่ขี้ผึ้งออกจากแม่พิมพ์ และก่อนที่จะเทโลหะหลอมเหลวเข้าแม่พิมพ์จะมีการอุ่นแม่พิมพ์ให้มีอุณหภูมิที่ใกล้เคียงกับอุณหภูมิเทหล่อของโลหะหลอมเหลว เมื่อโลหะแข็งตัวจะทำการกระเทาะส่วนที่เป็นแม่พิมพ์ออกจากชิ้นงาน หลังจากนั้นนำชิ้นงานไปตกแต่งเพื่อความเรียบร้อย ซึ่ง

ตารางที่ 1 ส่วนประกอบทางเคมีของวัสดุ [10]

Chemical composition of JIS SCM 415 (wt %)

| | |
|----|-------|
| C | 0.16 |
| Si | 0.19 |
| Mn | 0.83 |
| P | 0.025 |
| S | 0.017 |
| Ni | 0.08 |
| Cr | 1.08 |
| Mo | 0.16 |
| Cu | 0.11 |

การหล่อแบบเที่ยงตรงสูงนี้สามารถหล่อชิ้นงานที่มีรูปร่างซับซ้อนได้ดี ผิวชิ้นงานที่ได้มีความเรียบมาก มีความละเอียดและแม่นยำทางด้านขนาดสูง ชิ้นงานที่ได้ไม่ต้องปรับแต่งผิวหรือแปรรูปอีก และใช้ได้กับโลหะหลายชนิด แต่กรรมวิธีการหล่อนี้มีราคาค่อนข้างสูง จำเป็นต้องทำกระสวนและแม่พิมพ์ใหม่ทุกครั้งและที่สำคัญอีกประการคือจำเป็นต้องใช้ผู้ที่มีความชำนาญในการทำแม่พิมพ์หล่อ



รูปที่ 2 ชิ้นงานหลังการประกอบเข้ากับส่วนต่างๆ ของระบบเทหล่อเป็นต้นเทียน (Way Tree)



รูปที่ 3 ชิ้นงานหลังการเคลือบวัสดุทนไฟ เพื่อเป็นแม่พิมพ์หล่อ

2.3 ตัวแปรในการจำลอง

การจำลองเพื่อศึกษากระบวนการเทหล่อโลหะหลอมเหลวมีตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อการเกิดข้อบกพร่องของชิ้นงานหล่อจำนวนมาก การทดลองนี้ถูกกำหนดอุณหภูมิเทหล่อโลหะหลอมเหลว 1,680 องศาเซลเซียส มีวัสดุที่ใช้ในการเทหล่อเป็น JIS SCM 415 แม่พิมพ์ประกอบด้วยวัสดุทนไฟ Zircon Sand และ Alumina Sand เป็นธาตุหลัก ความหนาของแม่พิมพ์ 8 มิลลิเมตร และอบแม่พิมพ์ที่อุณหภูมิ 1,000 องศาเซลเซียส และกำหนดตัวแปร (Variable) ที่มีอิทธิพลต่อการเกิดข้อบกพร่องของชิ้นงานประเภทการหดตัว ดังสมการที่ 1 เวลาที่ใช้เทโลหะหลอมเหลว (t) และดังสมการที่ 2 คือความเร็วในการไหลของโลหะหลอมเหลว (V)

เนื่องจากข้อบกพร่องที่เกิดขึ้น ได้เลือกปัจจัยที่มีอิทธิพลมากที่สุดนามาศึกษา คือ เวลาในการเทหล่อ และความเร็วในการเทหล่อ ซึ่งความเร็วในการไหลที่แตกต่างกันจะมีอิทธิพลต่อการไหลของโลหะหลอมเหลวแบบปั่นป่วนจะทำให้ชิ้นงานเกิดข้อบกพร่อง

$$t \approx (0.05 - 0.1) \times t_f \times (H_c / H_s) \quad (1)$$

โดยที่ t_f = เวลาของการแข็งตัวของโลหะเหลว (sec)

t = เวลาที่ใช้เทโลหะเหลวโดยประมาณ (sec)

H_c = ความสูงของชิ้นงานหล่อ หรือความหนาของชิ้นงานหล่อ (mm)

H_s = ความสูงของรูเท (mm)

$$v = \sqrt{2gH_b} \quad (2)$$

โดยที่ V = ความเร็วในการไหล (m/s)

A = พื้นที่หน้าตัดที่ตั้งฉากกับทิศทางการไหล (mm²)

g = ค่าแรงโน้มถ่วง (9.81 m/s²)

H_b = ความสูงของแอ่งเท (mm)

มากกว่าการไหลของโลหะหลอมเหลวที่เป็นหลอมเหลวอันเป็นสาเหตุของการไหลแบบปั่นป่วน หรือการไหลแบบราบเรียบ การไหลของโลหะแบบราบเรียบ ดังนั้นในช่วงตัวแปรมี ดังนี้ คือ ค่าสูง ค่ากลาง และค่าต่ำ เมื่อศึกษาพฤติกรรมของการไหลในระบบของการเทหล่อทั้งหมดแล้ว จะสามารถเห็นค่าของผลลัพธ์ของการเทหล่อที่ดี การแข็งตัวของโลหะหลอมเหลวได้รับอิทธิพลจากเวลาในการเทหล่อโลหะหลอมเหลว หากโลหะหลอมเหลวเกิดการแข็งตัวระหว่างการเทเข้าสู่โพรงแบบแม่พิมพ์ จะส่งผลให้ชิ้นงานเกิดข้อบกพร่องขึ้นได้

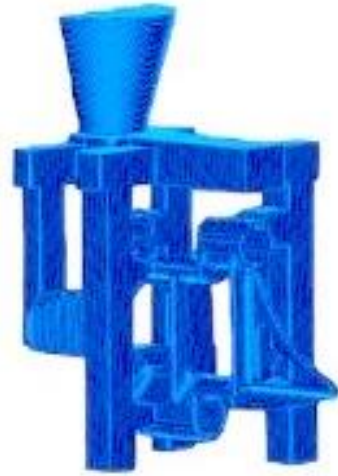
จากการกำหนดเงื่อนไขการทดลองสำหรับการเทหล่อโลหะ เพื่อให้ได้มาซึ่งเวลาที่ใช้เทโลหะหลอมเหลว และความเร็วในการไหลของโลหะหลอมเหลว จากตัวแปรทั้งสามค่า ที่ประกอบด้วย ค่าสูง ค่ากลางและค่าต่ำ จึงกำหนดสามเงื่อนไข ดังนี้ เวลาที่ใช้เทโลหะหลอมเหลวเงื่อนไขที่หนึ่ง 34 วินาที เงื่อนไขที่สอง 23 วินาที และเงื่อนไขที่สาม 17 วินาที ตามลำดับ และ



ใช้ความเร็วในการไหลของโลหะหลอมเหลวตามเงื่อนไข 37, 40 และ 42 เมตรต่อวินาที ตามลำดับ ตัวแปรในเงื่อนไขทั้งสามนี้ใช้กำหนดในโปรแกรม Cast Designer เพื่อศึกษาวิเคราะห์พฤติกรรมการไหลของโลหะเข้าสู่โพรงแบบแม่พิมพ์

2.4 โปรแกรม Cast Designer

Cast Designer เป็นโปรแกรมวิเคราะห์งานหล่อโลหะทุกชนิด ด้วยเทคโนโลยีการจำลอง Finite Element Method (FEM) ซึ่งเป็นเอกลักษณ์เฉพาะ และ CFD (Computer Fluid Dynamic) สามารถบอกจุดปัญหาต่างๆ ภายในเวลาอันรวดเร็วได้ ใช้งานง่าย คำนวณได้รวดเร็วและมีความแม่นยำสูง สามารถวิเคราะห์ได้หลายรูปแบบ เช่น แถบสีแสดงระดับความเสียหาย การไหล การเติม การถ่ายเทความร้อน ความเร็วในการแข็งตัวของโลหะ อากาศภายในแม่พิมพ์ การหดตัว เป็นต้น โดยการนำ CAD แบบที่มีขนาดเท่ากับชิ้นงานจริงมาใส่ในโปรแกรม Cast Designer แล้วทำการกำหนดสร้าง Finite Element Method Mesh และทำการสร้างแม่พิมพ์เป็นแม่พิมพ์แบบที่ยังตรงสูง จะเห็นได้ว่าชิ้นงานจาก CAD มีการตัดแบ่งครึ่งหนึ่งเพื่อลดเวลาในการวิเคราะห์ผลจำลองของคอมพิวเตอร์ เนื่องจากชิ้นงานมีความสมมาตรกัน จึงเกิดพฤติกรรมที่เหมือนกัน ดังรูปที่ 4 มีการกำหนดค่าอิเลเมนต์ (Elements) และกำหนดค่าตัวแปรต่างๆ จากนั้นเริ่มทำการวิเคราะห์ผลลัพธ์ต่างๆ ผลลัพธ์ที่ได้ เช่น พฤติกรรมการไหลของโลหะหลอมเหลว เวลาที่ใช้ในการเติมเต็มโลหะหลอมเหลวเข้าสู่แม่พิมพ์ เวลาในการแข็งตัวของโลหะหลอมเหลวหลังจากเทเข้าสู่แม่พิมพ์ที่เต็มแล้ว และร้อยละการหดตัวของชิ้นงานหลังจากที่โลหะหลอมเหลวนั้นแข็งตัวแล้ว เป็นต้น



รูปที่ 4 ชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการ Finite Element Method Mesh

3. ผลการทดลองและการอภิปรายผล

โปรแกรม Cast Designer ถูกนำมาใช้วิเคราะห์พฤติกรรมการไหลของโลหะหลอมเหลวในกระบวนการหล่อแบบอินเวสต์เมนต์ (Investment Casting Process) ของชิ้นงานสายพานตีนตะขาก ด้วย การกำหนดค่าความเร็วของการเทหล่อโดยการเลือกขนาดของอุปกรณ์ในการเทโลหะหลอมเหลว เพื่อเป็นตัวกำหนดปริมาตรของโลหะหลอมเหลวให้เหมาะสมกับขนาดของชิ้นงาน ในการเทโลหะหลอมเหลวแต่ละครั้ง โลหะหลอมเหลวในอุปกรณ์ควรจะต้องมีปริมาตรเท่ากับหรือมากกว่าปริมาตรของชิ้นงานที่ต้องการเทหล่อโดยเทียบกับเวลาในการเทหล่อ จะได้เป็นความเร็วในการไหล การควบคุมความเร็วในการไหลนี้ต้องเร่งให้ทันก่อนเกิดการแข็งตัวของโลหะหลอมเหลว การออกแบบระบบการเทหล่อจึงจำเป็นต้องควบคุมด้วยตัวแปรดังในตารางที่ 2

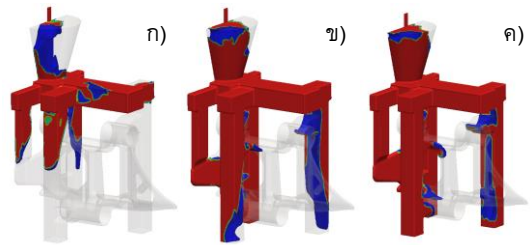


ตารางที่ 2 ตัวแปรที่ใช้ในการจำลองการเทหล่อโลหะหลอมเหลว

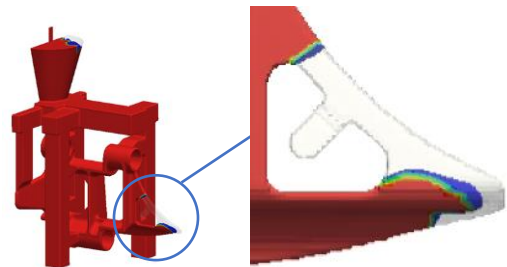
| เงื่อนไขที่ | เวลาที่ใช้เท (t) (วินาที) | ความเร็วในการไหล (V) (เมตรต่อวินาที) |
|-------------|---------------------------|--------------------------------------|
| 1 | 34 | 37 |
| 2 | 23 | 40 |
| 3 | 17 | 42 |

การกำหนดเงื่อนไขและตัวแปรที่ใช้ในการจำลองการเทหล่อโลหะหลอมเหลวแบบเทียงตรงสูงของชิ้นงานสายพานดินตะขาบ จะประกอบด้วยตัวแปรคือเวลาที่ใช้เทโลหะหลอมเหลวและใช้ความเร็วในการไหลของโลหะหลอมเหลว

จากผลการจำลองพบว่า เงื่อนไขที่หนึ่ง ใช้เวลาในการเทหล่อโลหะหลอมเหลว 34 วินาที ด้วยความเร็วในการไหล 37 เมตรต่อวินาที จากการจำลองพฤติกรรมไหลของโลหะหลอมเหลว (Fluid Fraction) จะไหลไปตามทิศทางโดยเริ่มจากแอ่งเท ไหลไปยังทางวิ่ง และทางเข้า เข้าไปส่วนของชิ้นงาน และสิ้นสุดที่ส่วนครีบท่างด้านข้างที่อยู่ไกลสุดจากทางเข้าของระบบเทหล่อ ดังแสดงรูปที่ 5 ในเงื่อนไขนี้จะเห็นได้ว่าพฤติกรรมไหลของโลหะหลอมเหลวเข้าไม่เต็มแม่พิมพ์ อันเนื่องมาจากบริเวณส่วนครีบท่างด้านข้างนี้อยู่ในส่วนที่ไกลที่สุด อีกทั้งยังเป็นพื้นที่ที่เล็กและมีลักษณะแคบที่สุดจากทางเข้าของโลหะหลอมเหลว ทำให้เกิดความบกพร่องจากโลหะหลอมเหลวไหลเข้าไม่เต็มแม่พิมพ์ ดังแสดงรูปที่ 6 เงื่อนไขที่หนึ่งนี้จะใช้เวลาในการเติมเต็มโลหะ (Fill Time) 1.6 วินาที

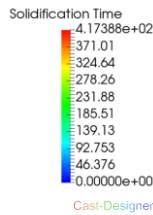
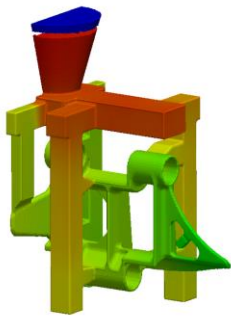


รูปที่ 5 พฤติกรรมการไหลของเงื่อนไขที่หนึ่ง ก) ร้อยละ 20 ข) ร้อยละ 60 ค) ร้อยละ 95

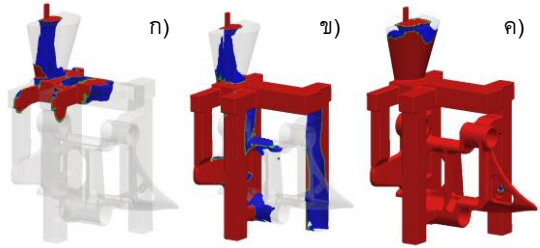


รูปที่ 6 โลหะหลอมเหลวที่ไหลเข้าไม่เต็มแม่พิมพ์ตามเงื่อนไขที่หนึ่ง

เมื่อพิจารณาด้านเวลาในการแข็งตัวของโลหะหลอมเหลวขณะเทหล่อ (Solid Fraction) พบว่า เมื่อเทโลหะหลอมเหลวเข้าสู่แม่พิมพ์ สถานะของเหลวจะเปลี่ยนเป็นสถานะของแข็ง โดยมีการแข็งตัวของโลหะหลอมเหลวเริ่มจากพื้นที่ส่วนที่เล็กและบางที่สุดไปจนถึงพื้นที่ที่มากที่สุด ตั้งแต่ส่วนครีบท่างด้านข้างของชิ้นงานที่ไล่ขึ้นไปจนถึงบริเวณที่เป็นแอ่งเท ดังแสดงรูปที่ 7 ซึ่งเงื่อนไขที่หนึ่ง นี้ใช้เวลาในการแข็งตัว 959 วินาที โดยความบกพร่องจากการเทหล่อนี้ พบว่าเกิดข้อบกพร่องในชิ้นงาน ดังรูปที่ 8 ซึ่งแสดงถึงความบกพร่องของชิ้นงานที่เกิดขึ้นจากพฤติกรรมหดตัว (Shrinkage Porosity) อยู่ร้อยละ 0.06 การหดตัวของเงื่อนไขนี้มากกว่าเงื่อนไขที่สองและสาม ตามลำดับ



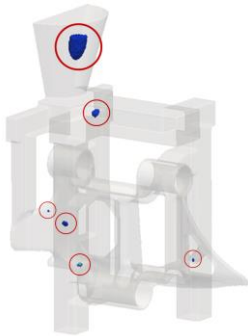
รูปที่ 7 พฤติกรรมการแข็งตัวของโลหะหลอมเหลว



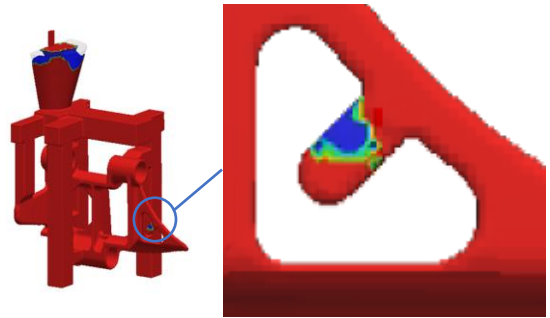
รูปที่ 9 พฤติกรรมการไหลของเงื่อนไขที่สอง

ก) ร้อยละ 20 ข) ร้อยละ 60 และ

ค) ร้อยละ 95



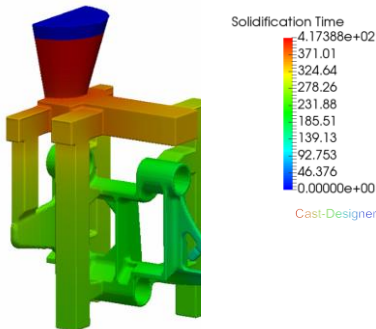
รูปที่ 8 ความบกพร่องที่พบจากการหดตัวตามเงื่อนไขที่หนึ่ง



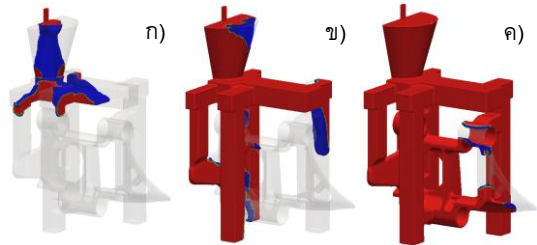
รูปที่ 10 โลหะหลอมเหลวที่ไหลเข้าไม่เต็มแม่พิมพ์ตามเงื่อนไขที่สอง

เงื่อนไขที่สอง ใช้เวลาในการเทหล่อโลหะหลอมเหลว 23 วินาที มีความเร็วในการไหล 40 เมตรต่อวินาที เงื่อนไขนี้จากการศึกษาพฤติกรรมการไหลของโลหะหลอมเหลว (Fluid Fraction) จะไหลไปตามทิศทางของระบบเทหล่อ คือ เริ่มจากแอ่งเท ไหลไปยังทางวิ่ง และทางเข้า เข้าไปสู่ชิ้นงาน จนไปถึงสิ้นสุดที่ส่วนครีบริบด้านข้างที่อยู่ไกลสุดจากทางเข้าของระบบเทหล่อ ดังแสดงรูปที่ 9 พฤติกรรมการไหลของเงื่อนไขนี้เป็นการไหลเข้าแบบไม่เต็มแม่พิมพ์บริเวณส่วนที่เป็นครีบริบด้านข้างของชิ้นงาน ซึ่งเงื่อนไขนี้พบว่าจะเกิดขึ้นน้อยกว่าเงื่อนไขที่หนึ่งและสาม เนื่องจากบริเวณนี้อยู่ไกลออกไปมากที่สุด

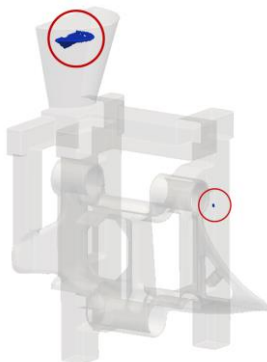
และมีพื้นที่ที่เล็กมากที่สุดจากทางเข้าของโลหะหลอมเหลว ดังรูปที่ 10 พฤติกรรมการไหลของโลหะหลอมเหลว โดยใช้เวลาในการเติมเต็ม (Fill Time) 2.5 วินาที เมื่อพิจารณาการแข็งตัวของโลหะหลอมเหลว (Solid Fraction) ตามเงื่อนไขที่สอง เห็นได้ว่าส่วนบริเวณครีบริบด้านข้างของชิ้นงาน เป็นส่วนพื้นที่ที่เล็กและบางที่สุด จะเป็นส่วนที่เริ่มเปลี่ยนสถานะจากของเหลวไปเป็นของแข็งก่อนและไล่ไปจนถึงบริเวณแอ่งเทที่มีพื้นที่มากที่สุดต่อไป ดังรูปที่ 11 โดยใช้เวลาในการแข็งตัว 1.601 วินาที



รูปที่ 11 พฤติกรรมการแข็งตัวของโลหะหลอมเหลว



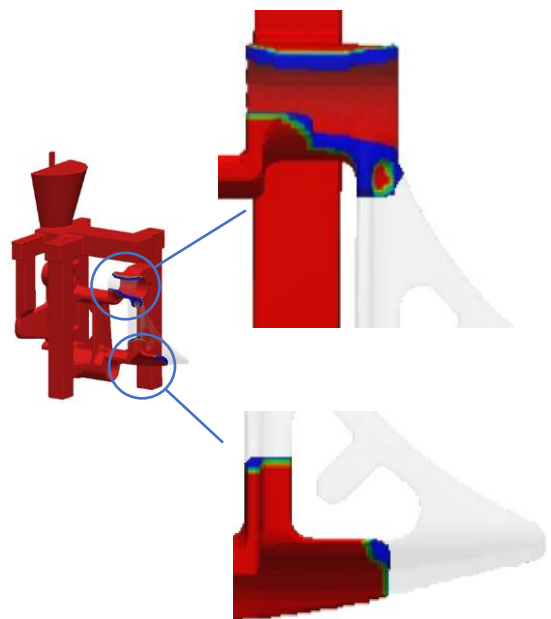
รูปที่ 13 พฤติกรรมการไหลของเงื่อนไขที่สาม
ก) ร้อยละ 20 ข) ร้อยละ 60 ค) ร้อยละ 95



รูปที่ 12 ความบกพร่องที่พบจากการหดตัวตาม
เงื่อนไขที่สอง

เงื่อนไขที่สาม ใช้เวลาในการเทหล่อโลหะหลอมเหลว 17 วินาที ด้วยความเร็วในการไหลของโลหะ 42 เมตรต่อวินาที พฤติกรรมการไหลของโลหะหลอมเหลว (Fluid Fraction) ในเงื่อนไขนี้จะไหลไปตามทิศทางของระบบเทหล่อ เช่นเดียวกับเงื่อนไขที่หนึ่งและเงื่อนไขที่สาม โดยเริ่มจากแอ่งเท ไหลไปยังทางวิ่ง และทางเข้า เข้าสู่ชิ้นงาน และสิ้นสุดที่ส่วนครีبد้านข้างที่อยู่ไกลสุดจากทางเข้าของระบบเทหล่อดังแสดงรูปที่ 13

รูปที่ 14 แสดงให้เห็นถึงพฤติกรรมการไหลของโลหะหลอมเหลว เป็นการไหลแบบไม่เต็มแม่พิมพ์ที่บริเวณส่วนครีبد้านข้างของชิ้นงานเช่นเดียวกับเงื่อนที่หนึ่ง



รูปที่ 14 โลหะหลอมเหลวที่ไหลเข้าไม่เต็มแม่พิมพ์ตาม
เงื่อนไขที่สาม

และสอง บริเวณที่อยู่ไกลสุดและมีพื้นที่เล็กสุดจากทางเข้าของโลหะหลอมเหลวยังเป็นส่วนที่ทำให้เกิดข้อบกพร่องเงื่อนไขนี้พบว่า การหล่อไม่เต็มแม่พิมพ์เกิดขึ้นมากกว่าเงื่อนไขที่หนึ่งและสองตามลำดับ

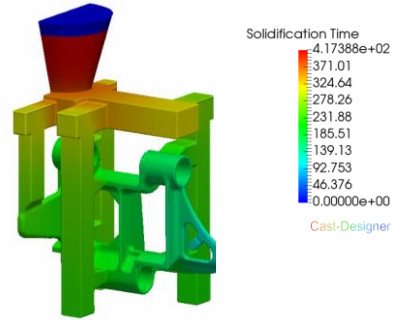


การไหลของโลหะหลอมเหลวเมื่อเข้าสู่แอ่งเทและไหลไปตามส่วนต่างๆ ของระบบหล่อไปสิ้นสุดการไหลส่วนที่เป็นครีบด้านข้างของชิ้นงาน โดยใช้เวลาในการเติมเต็ม (Fill Time) 2.4 วินาที เมื่อพิจารณาถึงการแข็งตัวของโลหะหลอมเหลว (Solid Fraction) ที่เข้าสู่แม่พิมพ์ แล้วเริ่มเปลี่ยนสถานะจากของเหลวเป็นของแข็ง จะเริ่มแข็งตัวจากพื้นที่ในส่วนที่เล็กที่สุดและบางที่สุดเช่นเดียวกับที่เกิดขึ้นในทุกเงื่อนไข ดังแสดงรูปที่ 15 โดยใช้เวลาในการแข็งตัว 1.139 วินาที หลังการเทหล่อ พบว่า เกิดความบกพร่องของชิ้นงานประเภทหดตัว บริเวณที่เกิดการหดตัวนี้ไม่ส่งผลกระทบต่อชิ้นงาน การหดตัว (Shrinkage Porosity) ที่เกิดขึ้นคิดเป็นร้อยละ 0.023 แสดงในรูปที่ 16 ความบกพร่องที่เกิดขึ้นในเงื่อนไขที่สามนี้น้อยกว่าเงื่อนไขที่หนึ่งและสองตามลำดับ

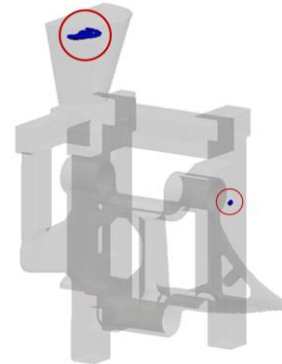
4. บทสรุป

การใช้โปรแกรม Cast Designer เพื่อจำลองพฤติกรรมไหลของโลหะหลอมเหลวในกระบวนการหล่อสายพานดินตะขابدวยกรรมวิธีการหล่อแบบอินเวสต์เมนต์ (Investment Casting) เพื่อวิเคราะห์ข้อบกพร่องที่เกิดขึ้นกับชิ้นงานประเภทการหดตัวสามารถสรุปได้ ดังนี้

1. การจำลองพฤติกรรมไหลของโลหะหลอมเหลว (Fluid Fraction) พบว่ามีปัจจัยที่ส่งอิทธิพลต่อการเกิดข้อบกพร่องประเภทการหดตัว (Shrinkage Porosity)
2. เวลาในการเทโลหะหลอมเหลวและความเร็วการไหลของโลหะหลอมเหลวเป็นปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการเกิดข้อบกพร่องประเภทการหดตัวของชิ้นงาน



รูปที่ 15 พฤติกรรมการแข็งตัวของโลหะหลอมเหลว



รูปที่ 16 ความบกพร่องที่พบจากการหดตัวตามเงื่อนไขที่สาม

3. ความไม่สมบูรณ์จากการเทหล่อโลหะหลอมเหลวที่พบในชิ้นงานจากการจำลอง เป็นแบบหล่อไม่เต็มแม่พิมพ์ ความเสียหายที่พบได้น้อยสุดเป็นไปตามเงื่อนไขที่สอง หนึ่งและสาม ตามลำดับ

4. ความบกพร่องของชิ้นงานประเภทการหดตัวในเงื่อนไขที่สองเป็นลักษณะที่ไม่ส่งผลเสียต่อชิ้นงานหล่อสายพานดินตะขาบ ซึ่งเป็นเงื่อนไขที่ดีที่สุดที่ได้จากการจำลองพฤติกรรมไหลของการเทหล่อโลหะหลอมเหลวด้วยโปรแกรม Cast Designer เกิดขึ้นร้อยละ 0.039 โดยใช้เวลาในการเทโลหะหลอมเหลว 23 วินาที ด้วยความเร็วในการไหลของโลหะหลอมเหลว 40 เมตรต่อวินาที



5. ถึงแม้ว่าเมื่อพิจารณาถึงความบกพร่องประเภท การหดตัวที่เกิดขึ้นเพียงอย่างเดียว จากการจำลอง เงื่อนไขที่สามมีการหดตัวเกิดขึ้นร้อยละ 0.023 เป็นการ หดตัวที่น้อยที่สุด แต่จุดบกพร่องเกิดขึ้นอยู่ในชิ้นงาน ทำให้ชิ้นงานไม่สามารถนำไปใช้งานได้

6. โปรแกรม Cast Designer สามารถใช้เป็น แนวทางสำหรับด้านการออกแบบระบบการหล่อ สามารถเลือกประเภทของการหล่อชิ้นส่วนสายพาน ดินตะขาก่อนการวางแผนการผลิตจริง และจากการ ออกแบบการหล่อเพื่อจำลองพฤติกรรมการไหลของ โลหะหลอมเหลวขณะเข้าสู่โพรงแบบของชิ้นส่วน สายพานดินตะขานี้ นำมาซึ่งผลลัพธ์ของสาเหตุความ บกพร่องในชิ้นงาน ที่ผ่านกระบวนการหล่อแบบ เทียงตรงสูงได้เป็นอย่างดี

5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยฉบับนี้ได้รับความช่วยเหลือจากคุณมงคล เอกสินธุ์กุล และบริษัท โฟร์ดี คอร์ปอเรชั่น จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์และสนับสนุนโปรแกรม Cast Designer เป็นเครื่องมือสำหรับการวิจัย เพื่อช่วยในการวิเคราะห์ที่มีประสิทธิภาพสูงและให้คำปรึกษาได้ เป็นอย่างดี

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] W. Laotweesub, P. Suwankan and P. Ngamsantivongsa, Simulating the flow behavior of liquid metal affects the damage of stainless steel in the investment casting process, Defence Technology Academic Journal, 2020, 2(4), 78-85. (in Thai)
- [2] P. Suwankan, N. Sornsuwit and P. Ngamsantivongsa, A study of flow behavior of AISI 430 stainless steel in investment casting by analysis program, Defence Technology Academic Journal, 2022, 3(9), 72-79. (in Thai)
- [3] P. Meitham and C. Suvanjumrat, High pressure die casting model and effective factors for porosity in parts, 28th Conference on Mechanical Engineering (MENETT 28), Proceedings, 2014, 705-711. (in Thai)
- [4] N. Apikamolkul and K. Kanlayasiri, Reduction of porosity in investment-casted pink silver: A case study of a jewelry company, The Journal of Industrial Technology, 2020, 80-89. (in Thai)
- [5] C. Pisansungkakoon, S. Rojananan and S. Rojananan, Effect of mold temperature on defects for white alloy in loss wax casting process, KMUTT Research and Development Journal, 2017, 91-101. (in Thai)
- [6] E. Kittikhewtraweersed, P. Rakkarn and S. Suranuntchai, Effects of fan gate's design parameters on flow behavior in a high pressure die casting process, KMUTT Research and Development Journal, 2011, 147-164. (in Thai)
- [7] P. Sratong-on, J. Kobbali, P. Tangworatham and N. Limjeerajarus, The reduction of blowholes defect in cylinder blocks during casting process, TNI Journal of Engineering and Technology, 2014, 30-35. (in Thai)



- [8] C. Sawangwong and S. Puajindanetr, Reduction of defect of shrinkage in high pressure die casting process, IE Network Conference, Proceeding, 2012, 1159-1162. (in Thai)
- [9] T. Kaiyarit, S. Kaewprasom and T. Thongklom, Misrun and cold shut analysis on the bob of pushcart wheel casting, The 10th National Academic Conference, Proceeding, 2016, 97-107. (in Thai)
- [10] Y. Hiraoka, Effect of phase in surface layers on rotating-bending fatigue strength of SCM415 steel after austenitic nitriding, Journal Material Research Technology, 2020, 9(3), 4894-4903.

การควบคุมความสว่างของท่อนำแสงร่วมกับหลอดแอลอีดีด้วยวิธี โครงข่ายประสาทเทียม

มณฑล พักเอม¹ เกียรติชัย บรรลุผลสกุล¹ ปิยะพงษ์ โสภารักษาชาติ¹ และ
ธรราทิพย์ ศรีสัตตบุตร²

¹ สาขาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์, คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม, มหาวิทยาลัยราชภัฏพิบูลสงคราม

² สาขาวิชาครุศาสตร์อุตสาหกรรม, คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม, มหาวิทยาลัยราชภัฏพิบูลสงคราม

* ผู้ประสานงานเผยแพร่ (Corresponding Author), E-mail: Monthol.f57@gmail.com

วันที่รับบทความ: 8 เมษายน 2566; วันที่ทบทวนบทความ: 20 กรกฎาคม 2566; วันที่ตอบรับบทความ: 23 สิงหาคม 2566

วันที่เผยแพร่ออนไลน์: 21 ธันวาคม 2566

บทคัดย่อ: ระบบแสงสว่างภายในอาคารเป็นปัจจัยหนึ่งในการใช้พลังงานไฟฟ้า การจะใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพนั้น ควรมีการนำแสงธรรมชาติมาใช้เพิ่มความสว่างภายใน เพื่อลดการสูญเสียพลังงานไฟฟ้าในระบบจากการนำแสงธรรมชาติผ่านท่อนำแสง (Light pipe) มาใช้ภายในอาคาร พบว่ามีปริมาณแสงเปลี่ยนแปลงตามสภาพอากาศและฤดูกาล ทำให้ค่าความเข้มแสงเปลี่ยนแปลงไป เพื่อรักษาความเข้มแสงให้คงที่ บทความวิจัยนี้ได้นำเสนอการใช้ท่อนำแสงร่วมกับการชดเชยแสงด้วยหลอดแอลอีดี (LED) โดยใช้โครงข่ายประสาทเทียม (Neural Network) มาควบคุมความสว่าง โดยใช้ตัวแปรที่ต้องการออกแบบเป็นขนาดพื้นที่ห้อง 14 ตารางเมตร (3.50 เมตร x 4.00 เมตร) มีเซ็นเซอร์วัดปริมาณแสงจำนวน 4 ตัว โดยนำตัวแปรดังกล่าวมาใช้ในการฝึกสอน เพื่อให้ความเข้มแสงเฉลี่ยของห้องทดสอบเป็นไปตามต้องการ จากผลการทดลองพบว่าระบบ สามารถควบคุมความเข้มแสงเฉลี่ยให้มีค่ามากกว่า 400 ลักซ์ (Lux) ตลอดทั้งวัน ถึงแม้มีการเปลี่ยนแปลงของสภาพอากาศภายนอก จากตัวอย่างวันที่ทดสอบหาประสิทธิภาพการประหยัดพลังงานไฟฟ้า สามารถประหยัดพลังงานมากกว่าการเปิดไฟคงที่ถึง 17.70 เปอร์เซ็นต์ ด้วยชุดควบคุมความสว่างที่นำเสนอ ในบทความนี้สามารถรักษาระดับความสว่างในโซนที่ต้องการได้

คำสำคัญ: ท่อนำแสง; การควบคุมหลอดแอลอีดี; โครงข่ายประสาทเทียม

Illuminance Control of Light Pipes and Dimmable LEDs with Artificial Neural Network

Monthol Fak-aim^{1*}, Kiatchai Banlupholsakul¹, Piyapong Olanthichachat¹ 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: Monthol.f57@gmail.com

Received: 8 April 2023; Revised: 20 July 2023; Accepted: 23 August 2023

Online Published: 21 December 2023

Abstract: A building's interior lighting system is one of high energy consumption. For the energy efficiency of the lighting system, the application of both natural sources of light and artificial lighting are combined. Therefore, in the proposed technique, the cooperation of the light pipe and dimming power LEDs stand with a stable lux level. Then, light's performance is controlled by an artificial neural network (ANN). To investigate the lighting performance of light pipe and dimming power LEDs, used as ANN training and testing set. The data for a room model area 14 m² (3.50 m x 4.00 m), 4 light sensors, are used as inputs of the ANN. It was found that the Illumination level at 400 lux could be stable all day long even on a cloudy day with this system. The results verify that this technique is an achievable technique. Moreover, approximately 17.70% of energy saving was achieved by this controller. In this paper, according to a zone-defined priority desired maintained illumination levels at each zone.

Keywords: Light Pipes; Dimmable LEDs; Artificial neural network



1. บทนำ

การใช้พลังงานแสงสว่างภายในอาคารในสำนักงาน อาคารในปัจจุบันมีอัตราการใช้พลังงานไฟฟ้าสูงถึง 25-35 เปอร์เซ็นต์ของการใช้พลังงานรวมทั้งหมดภายในอาคาร [1] เป็นอัตราส่วนในการใช้พลังงานที่สูง เนื่องจากมีการเปิดไฟตลอดช่วงเวลาในการทำงานทั้งวัน หรือแม้กระทั่งเวลาที่ไม่มีคนอยู่ภายในห้อง ทำให้ได้มีการกำหนดนโยบายควบคุมการใช้พลังงานไฟฟ้า อาทิเช่น กำหนดให้มีนโยบายปิดไฟในช่วงพักกลางวัน การเปิดไฟเฉพาะบริเวณที่ใช้แสงสว่าง เป็นต้น หรือแม้กระทั่งใช้เทคโนโลยีเปิด-ปิดอัตโนมัติตามผู้ใช้งาน อาทิเช่น ไฟแสงสว่างภายในห้องน้ำที่มีการเปิด-ปิดอัตโนมัติเมื่อมีการใช้งาน แนวทางดังกล่าวเป็นเทคโนโลยีที่ใช้ควบคุมแสงสว่างเพื่อลดการใช้พลังงานไฟฟ้าภายในอาคาร

ในการใช้เทคโนโลยีเพื่อควบคุมแสงสว่างภายในอาคารนั้น มีการพัฒนาชุดควบคุมความสว่างภายในอาคารโดยคำนึงถึงปริมาณแสงสว่างที่เหมาะสม [1-4] เป็นแนวทางการลดพลังงานด้านแสงสว่างในอาคารทั้งสิ้น โดยใช้การควบคุมความสว่างหลอดไฟร่วมกับการพิจารณาพื้นที่ใช้แสงสว่างกับปัจจัยด้านต่างๆ อาทิเช่น แสงสว่างธรรมชาติจากภายนอก เพื่อปรับระดับแสงสว่างให้เหมาะสม ด้วยอุปกรณ์สวิตซ์ทางไฟฟ้าเป็นที่นิยมในการวิจัยและพัฒนาเป็นอย่างมาก อาทิเช่น บัลลัสต์ที่สามารถควบคุมความสว่างของหลอดฟลูออเรสเซนต์ได้ เพื่อควบคุมแสงสว่างให้มีความเหมาะสมเพียงพอต่อการใช้งาน จนเข้ามาสู่ยุคเทคโนโลยีหลอดแอลอีดีที่มีจุดเด่นเรื่องการลดปริมาณพลังงานไฟฟ้า และง่ายต่อการควบคุมความสว่าง ทำให้อนุรักษ์การใช้พลังงานสำหรับแสงสว่างภายในอาคาร

มีปริมาณลดลง นอกจากนั้น ได้มีการออกแบบควบคุมความสว่างภายในห้องขนาดใหญ่ด้วยการจัดโครงข่ายของหลอดแอลอีดี (LED Network) เพื่อทำการควบคุมแสงสว่างเฉพาะบริเวณที่ต้องการใช้แสงเท่านั้น [5-6] โดยได้นำเสนอวิธีการตรวจวัดความเข้มแสงภายในบริเวณต่างๆ ของห้องด้วยชุดเซ็นเซอร์ (Sensor Network) วัดความเข้มแสงในแต่ละพื้นที่ มาเป็นชุดข้อมูลสำหรับควบคุมโครงข่ายของหลอดแอลอีดีแต่ละหลอดอย่างเหมาะสม เพื่อควบคุมความสว่างในบริเวณที่ต้องการใช้แสงให้มีความสว่างอย่างเพียงพอ จากการหาค่าเหมาะสมของชุดโครงข่ายหลอดแอลอีดี ได้มีการพัฒนาใช้ปัญญาประดิษฐ์มาช่วยควบคุมแสงสว่าง เพื่อให้สอดคล้องกับความต้องการใช้แสงและการประหยัดพลังงานไฟฟ้าให้มีความเหมาะสม อาทิเช่น การใช้โครงข่ายประสาทเทียม (Neural Network) สำหรับควบคุมชุดหลอดไฟแอลอีดี [5-7] เพื่อให้ได้ความสว่างตามต้องการของผู้ใช้งาน นอกจากนั้นมีการใช้ตัวควบคุมแบบฟัซซี่ (Fuzzy) ความสว่างของหลอดไฟ [8-9] และได้มีออกแบบระบบควบคุมความสว่างภายในให้มีความคงทน (Robust) รักษาระดับแสงตามที่กำหนดได้ด้วยชุดโครงข่ายประสาทเทียม [10] ทำงานร่วมกับใช้การควบคุมเชิงแบบจำลองภายใน (Artificial Neural Network based Internal Model Controller: ANN-IMC) ซึ่งในประเทศไทยเรามีปริมาณแสงสว่างจากธรรมชาติมากเพียงพอ โดยโครงสร้างอาคาร สำนักงาน ที่มีหน้าต่าง ผันงอาคาร เป็นกระจก รับแสงเพื่อรับแสงสว่างธรรมชาติ มาใช้ภายในอาคาร ทำให้สามารถลดการใช้พลังงานแสงสว่างจากหลอดไฟลงไปได้ส่วนหนึ่ง นอกจากนั้นยังได้มีเทคโนโลยีที่ใช้หลักการการสะท้อนของแสงสว่างจากภายนอกด้วยวัสดุ



สะท้อนแสงนำแสงธรรมชาติจากภายนอกผ่านท่อนำแสง (Light Pipe) [11-13] เพื่อนำแสงมาใช้ภายในอาคารที่เป็นแบบฝ้าปิด ไม่สามารถใช้หลังคาโปร่งแสงได้ หรือบริเวณที่ไกลจากหน้าต่างรับแสงของอาคาร เป็นต้น ปริมาณแสงจากท่อนำแสงจะแปรผันตามแสงธรรมชาติภายนอกอาคาร การรักษาระดับความสว่างของท่อนำแสงให้คงที่นั้นต้องมีการชดเชยแสงสว่างด้วยหลอดไฟ ในการทำงานร่วมกันระหว่างท่อนำแสงและหลอดไฟนั้น [14] ได้นำเสนอการควบคุมด้วยฟัซซีลอจิก (Fuzzy Logic) โดยควบคุมความสว่างของหลอดไฟแต่ละหลอดนั้นเป็นมีระดับความสว่างที่เท่ากันเพื่อรักษาความสว่างของหลอดฟลูออเรสเซนต์ ทำให้ค่าความสว่างเฉลี่ยภายในห้องไม่น้อยกว่า 350 ลักซ์ และยังสามารถพัฒนาเป็นชุดหลอดไฟแอลอีดีทำงานร่วมกับท่อนำแสง [15] เพื่อรักษาระดับความสว่างที่ต้องการและลดการใช้ปริมาณทางไฟฟ้าที่มากยิ่งขึ้นจากการศึกษาการควบคุมความสว่าง ด้วยระบบฟัซซี (Fuzzy) นั้นจะเป็นการตัดสินใจแบบตรรกะ ด้วยการเปรียบเทียบกฎ เป็นการตัดสินใจแบบคลุมเครือ ซึ่งค่าของแสงที่นำมาพิจารณานั้นที่รับเข้ามานั้นจะทำการพิจารณาตามการเปลี่ยนแปลงตามเงื่อนไขด้วยการเปรียบเทียบกฎในการตัดสินใจแต่ยังขาดการเรียนรู้พฤติกรรมเช่นแนวโคจรและองศาที่ทำมุมกับท่อนำแสงซึ่งมีการเปลี่ยนแปลงไปตามฤดูกาล ทำให้ต้องมีการเรียนรู้พฤติกรรมที่เกิดขึ้นนี้ด้วยหลักการของโครงข่ายประสาทเทียม (Neural Network) กับสภาวะแสงภายในห้องทดสอบให้มีความสัมพันธ์กันทั้งระบบตามช่วงฤดูกาลที่แตกต่างกันไป

โดยในงานวิจัยนี้ได้นำเสนอการใช้งานท่อนำแสงร่วมกับชุดโครงข่ายหลอดแอลอีดีสำหรับชดเชยแสงสว่าง ควบคุมด้วยโครงข่ายประสาทเทียมที่สอนให้จดจำปริมาณแสงที่ชดเชยแสงทำให้ห้องทดสอบมีปริมาณแสงเพียงพอต่อการใช้งานนอกจากนั้นยังได้มีการเก็บข้อมูลเรื่องการกระจายแสงท่อนำแสงสว่างธรรมชาติมาใช้ภายในห้องทดสอบ เนื่องจากผลของการโคจรของดวงอาทิตย์ทำให้มุมหักเหของแสงในแต่ละช่วงเวลาแตกต่างกันไป สำหรับสร้างชุดควบคุมหลอดแอลอีดีแต่ละหลอดเพื่อรักษาความสว่างแต่ละบริเวณของห้องให้เป็นไปตามความต้องการของผู้ใช้งาน เนื่องจากปริมาณแสงจากท่อนำแสงในบริเวณต่างๆของห้องมีค่าไม่เท่ากันในแต่ละช่วงเวลาต่างๆ และลดการใช้พลังงานของหลอดแอลอีดีแต่ละหลอดอย่างเหมาะสมเพื่อให้ได้ความสว่างตามต้องการในแต่ละบริเวณ

2. วิธีการดำเนินงานวิจัย

บทความนี้แนะนำเสนอการใช้แสงสว่างร่วมกันระหว่างแสงสว่างธรรมชาติที่ได้จากท่อนำแสงร่วมกับหลอดแอลอีดี โดยการดำเนินการวิจัยได้ทำการเก็บข้อมูลแสงธรรมชาติจากภายนอกสะท้อนเข้ามาภายในห้องทดสอบด้วยท่อนำแสงเพียงอย่างเดียว เพื่อนำมาเป็นข้อมูลสำหรับการออกแบบระบบชดเชยแสงสว่างร่วมกับหลอดแอลอีดีเพื่อรักษาระดับความสว่างตามความต้องการ และใช้เป็นข้อมูลในการฝึกสอนให้กับโครงข่ายประสาทเทียมที่ออกแบบขึ้นสำหรับช่วยทำนายระดับการควบคุมความสว่างของหลอดแอลอีดีแต่ละหลอดอิสระแยกจากกัน เพื่อรักษาความสว่างภายในห้องทดสอบให้เป็นไปตามต้องการได้



2.1 การออกแบบห้องทดสอบแสงสว่างและการนำแสงสว่างจากภายนอกด้วยท่อนำแสง

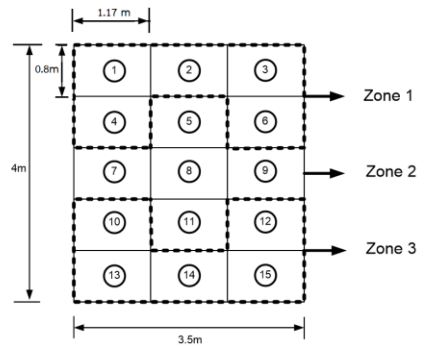
การออกแบบห้องทดสอบสำหรับแสงสว่างในงานวิจัยนี้ได้จำลองห้องขนาดกว้าง 3.5 เมตร ยาว 4 เมตร สูง 2.4 เมตร ไม่มีหน้าต่างรับแสงสว่างจากภายนอก ตั้งอยู่ในบริเวณที่ห้องทดสอบรับแสงสว่างได้ตลอดทั้งวัน ดังแสดงในรูปที่ 1 (ก) และบริเวณหลังคาติดตั้งท่อนำแสงที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.3 เมตร ยาว 1 เมตร มีโคมรับแสงสว่างจากดวงอาทิตย์ สะท้อนผ่านส่วนนำพาแสงที่เป็นวัสดุมันเงา สามารถสะท้อนแสงสว่างจากภายนอกเข้าไปใช้งานในห้องได้ ดังรูปที่ 1 (ข)

2.2 การออกแบบห้องทดสอบแสงสว่างและการนำแสงสว่างจากภายนอกด้วยท่อนำแสง

การออกแบบชุดโครงข่ายระบบส่องสว่าง (Networked Lighting System) สำหรับช่วยชดเชยแสงสว่างภายในห้องทดสอบ ทำงานร่วมกับแสงธรรมชาติจากท่อนำแสง โดยปกติแล้วแสงจากท่อนำแสงจะกระจายแสงไม่ครอบคลุมพื้นที่ห้องขนาดใหญ่ได้ และปัจจัยเรื่องปริมาณแสงธรรมชาติจากภายนอก อาทิเช่น ช่วงที่มีก้อนเมฆปกคลุม ช่วงเวลาเช้า-เย็นที่มีปริมาณแสงอาทิตย์น้อย เป็นต้น ทำให้ปริมาณแสงธรรมชาติน้อยส่งผลให้แสงจากท่อนำแสงมีปริมาณน้อยลงไปด้วย เพื่อรักษาความสว่างให้เป็นไปตามต้องการ ทำให้ต้องมีการใช้แสงจากระบบส่องสว่างช่วยเพิ่มความสว่างในห้อง และผลจากการสะท้อนของแสงธรรมชาติผ่านท่อนำแสงในช่วงเวลาต่างๆ พบว่าความสว่างของห้องตำแหน่งต่างๆ ไม่เท่ากัน ทำให้ต้องออกแบบชุดโครงข่ายระบบส่องสว่างที่มีระดับความสว่างของหลอดแอลอีดีแต่ละดวงอย่างเหมาะสมเพื่อรักษาระดับความ



(ก) แสดงห้องทดสอบด้านแสงสว่าง
(ข) แสดงการติดตั้งท่อนำแสงจากภายนอก



รูปที่ 2 แสดงการวัดความเข้มแสงในตำแหน่งต่างๆ ของห้องทดสอบ

เข้มแสงเฉลี่ยในบริเวณที่ต้องการใช้แสงสว่างเป็นไปตามต้องการ โดยงานวิจัยนี้ได้ออกแบบชุดโครงข่ายระบบส่องสว่าง ด้วยหลอดแอลอีดีจำนวน 2 หลอด ขนาด 15 วัตต์ (watt) แต่ละหลอดสามารถปรับความสว่างจากสัญญาณพัลส์วิดธ์มอดูเลชัน (PWM) มีค่าดิวตี้ไซเคิล (duty cycle) อิสระแยกจากกัน เพื่อรักษาระดับความเข้มแสงไม่น้อยกว่า 400 ลักซ์ (Lux) และลดการใช้พลังงานไฟฟ้าที่ต่ำกว่าการควบคุมหลอดแอลอีดีด้วยพัลส์วิดธ์มอดูเลชันเท่ากันทั้ง 2 หลอด การวัดความเข้มแสงในห้องทดสอบได้ทำการวางชุดเซ็นเซอร์วัดความเข้มแสงแต่ละตำแหน่งตามรูปที่ 2 โดยมี



เซ็นเซอร์จำนวน 15 ตัว เป็นตัวอย่างความเข้มแสงของพื้นที่กว้าง 0.8 เมตร ยาว 1.17 เมตร หรือครอบคลุมพื้นที่เท่ากับ 0.936 ตารางเมตร โดยทำการวางเซ็นเซอร์สูงจากพื้นประมาณ 0.7 เมตร หรือเทียบเท่าระดับโต๊ะทำงาน และได้แบ่งพื้นที่ห้องทดสอบออก 3 โซน โดยโซนที่ 1 และ 3 จะเป็นตำแหน่งที่ไกลจากท่อนำแสงออกไป ส่วนบริเวณโซนที่ 2 เป็นบริเวณที่ได้รับแสงจากท่อนำแสงโดยตรง

2.3 การออกแบบชุดควบคุมแสงสว่างด้วยโครงข่ายประสาทเทียม

จากการนำแสงสว่างจากภายนอกด้วยท่อนำแสงเพียงอย่างเดียวทำให้ปริมาณแสงไม่เพียงพอต่อการใช้งานในห้องทดสอบ เนื่องจากแสงจากดวงอาทิตย์ในแต่ละช่วงเวลาของวันทำมุมตกกระทบกับพื้นโลกเปลี่ยนไปตลอดทั้งวัน ทำให้การสะท้อนของแสงเข้ามาในห้องทดสอบไม่สม่ำเสมอ หรือปัจจัยจากสภาพท้องฟ้ามีเมฆปกคลุมทำให้ปริมาณแสงจากดวงอาทิตย์มีน้อย ทำให้ต้องมีการออกแบบชุดโครงข่ายหลอดแอลอีดีมาช่วยชดเชยแสง

การเก็บข้อมูลการสะท้อนของแสงธรรมชาติจากภายนอกผ่านท่อนำแสงเข้ามาในห้องทดสอบ ผู้วิจัยได้ทำการวางชุดเซ็นเซอร์ตรวจจับความเข้มแสงโซนต่างๆ เพื่อวัดความเข้มแสงก่อนและหลังการชดเชยแสงบริเวณพื้นที่ที่ต้องการควบคุมความสว่าง และงานวิจัยนี้ได้ติดตั้งชุดเซ็นเซอร์วัดความเข้มแสง (Light Sensor_{1,2,3,4}) บริเวณปลายท่อนำแสง ดังแสดงในรูปที่ 3 สำหรับเป็นข้อมูลตรวจวัดความเข้มแสงที่ได้จากท่อนำแสงภายในห้อง

จากผลการวิจัยพบว่า บริเวณโซนที่ 1 และ 3 เป็นโซนที่มีแสงสว่างน้อยกว่าโซนที่ 2 เนื่องจากพื้นที่

ดังกล่าวไกลจากจุดกระจายแสงของท่อนำแสง ดังนั้นได้ทำการติดตั้งหลอดแอลอีดีจำนวน 2 หลอด ทำหน้าที่ช่วยชดเชยแสงบริเวณโซนที่ 1 และ 3 จากการสะท้อนและหักเหของแสงมายังห้องทดสอบแต่ละช่วงเวลา โดยใช้ค่าจากชุดเซ็นเซอร์วัดความเข้มแสงปลายท่อนำแสงที่แสดงดังรูปที่ 3 เป็นค่าปริมาณแสงที่รับมาจากท่อนำแสงเพื่อเป็นข้อมูลของแสงสว่างในแต่ละช่วงเวลาของวัน ซึ่งการปรับความสว่างของโครงข่ายหลอดแอลอีดีแต่ละหลอด โดยงานวิจัยนี้ได้ใช้เทคนิคพัลส์วิดท์มอดูเลชันช่วยควบคุมความสว่างของหลอดแอลอีดีภายในห้องทดสอบ

ดังนั้นผู้วิจัยได้นำเสนอการใช้โครงข่ายประสาทเทียม (Neural Network) มาช่วยควบคุมหลอดแอลอีดีโดยใช้ชุดข้อมูลจากค่าความเข้มแสงที่ทำการวัดในแต่ละช่วงเวลาของวัน สำหรับใช้ในการฝึกสอนให้กับโครงข่ายประสาทเทียมจากชุดเซ็นเซอร์วัดความเข้มแสง 4 ตำแหน่งที่ปลายปากท่อนำแสงดังรูปที่ 3 ใช้เป็นข้อมูลอินพุตในการฝึกสอนให้กับโครงข่ายประสาทเทียมและได้ทำการเก็บข้อมูลจากชุดเซ็นเซอร์ตรวจวัดความเข้มแสงทั้ง 15 ตำแหน่งเป็นการวัดความสว่างที่ได้ภายในห้องทดสอบ ในข้างต้น เพื่อนำมาเป็นข้อมูลจากการชดเชยแสงที่ควบคุมด้วยโครงข่ายประสาทเทียมเพื่อทำให้ค่าความเข้มแสงภายในห้องทดสอบไม่น้อยกว่า 400 Lux ในงานวิจัยนี้เอาต์พุตของแต่ละโครงข่ายประสาทเทียมคือ พัลส์วิดท์มอดูเลชัน 1 (PWM₁) และค่าพัลส์วิดท์มอดูเลชัน 2 (PWM₂) เพื่อนำไปควบคุมความสว่างให้กับหลอดแอลอีดี 1 และ 2 ภายในห้องทดสอบ ในการฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียมจะใช้ข้อมูลที่เก็บผลจากการวัดโดยนำข้อมูลช่วงเวลา 9.00 น. ถึง 16.00 น. มาใช้ในการฝึกสอน



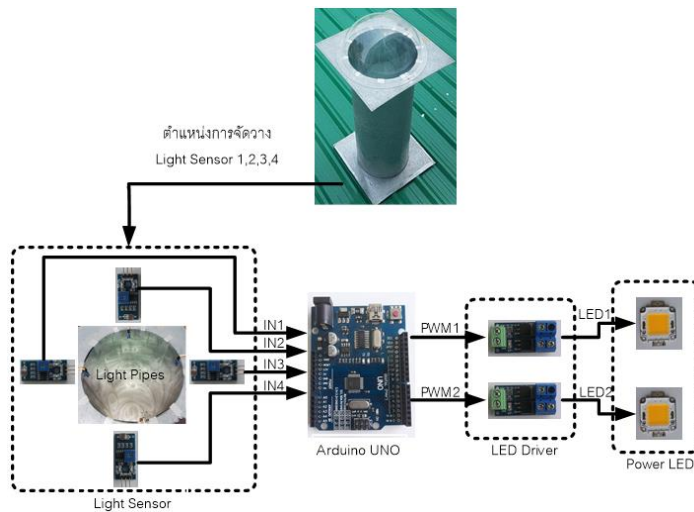
จะมีการปรับโครงสร้างและฟังก์ชันในแต่ละชั้นภายในโครงข่ายประสาทเทียม เพื่อหาโครงข่ายประสาทเทียมที่ให้สมรรถนะการเรียนรู้ที่ดีที่สุด ดังรูปที่ 4 แสดงการใช้โครงข่ายประสาทเทียมเพื่อใช้ในการฝึกสอน หาค่าพัลส์วิตช์มอดูเลชันทั้ง 2 ค่า เพื่อนำไปควบคุมความสว่างให้กับหลอดแอลอีดี 1 และ 2 แสดงให้เห็นว่าโครงข่ายประสาทเทียมที่นำมาใช้มี 1 ชั้นซ่อน โดยมีนิวรอนเป็น 30 นิวรอน สำหรับฟังก์ชันในชั้นซ่อนและเอาต์พุท คือ tansig และ purelin ตามลำดับ จากฟังก์ชันที่นำมาใช้ทำให้ได้ผลในการฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียมมีอัตราในการเรียนรู้ และใช้เวลาในการฝึกสอนที่สั้น

ข้อมูลในกระบวนการเรียนรู้ (Training Set) นำมาออกแบบเพื่อป้อนให้สถาปัตยกรรมโครงข่ายประสาทเทียมทั้ง 9 รูปแบบ เพื่อหาความสัมพันธ์อัตราการปรับค่าพัลส์วิตช์มอดูเลชันกับความสว่างภายในห้องทดสอบ โดยการพิจารณาความแม่นยำของสถาปัตยกรรมโครงข่ายประสาทเทียมด้วยค่าความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (Mean Squared Error: MSE) ในการวัดค่า

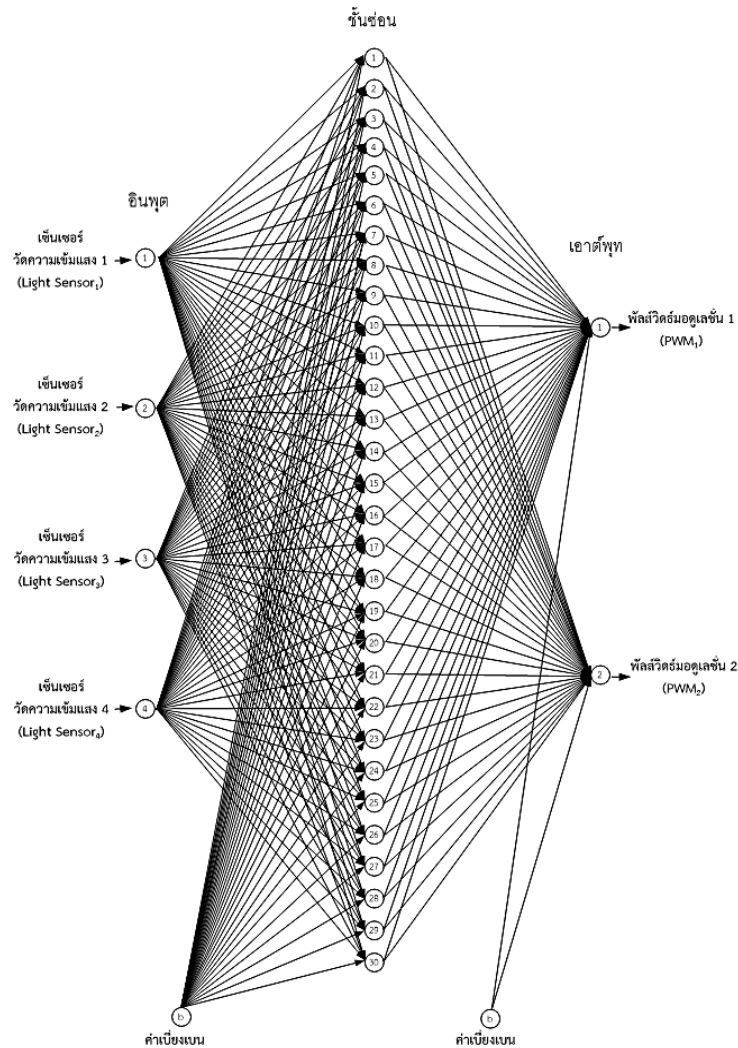
ความแม่นยำจากวิธีการนี้ยังค่าที่ได้มีค่าน้อยแสดงว่าโมเดลที่ได้จะมีความแม่นยำมากจึงนำมาใช้ในกระบวนการเรียนรู้ของสถาปัตยกรรมทั้ง 9 แบบได้สรุปดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 การออกแบบสถาปัตยกรรมโครงข่ายประสาทเทียม ทั้ง 9 แบบ

| แบบที่ | สถาปัตยกรรมโครงข่ายประสาทเทียม | MSE |
|--------|--------------------------------|-----------|
| 1 | ชั้นแฝง 1 ชั้น มี 10 นิวรอน | 0.40316 |
| 2 | ชั้นแฝง 1 ชั้น มี 15 นิวรอน | 0.21646 |
| 3 | ชั้นแฝง 1 ชั้น มี 20 นิวรอน | 0.34893 |
| 4 | ชั้นแฝง 1 ชั้น มี 25 นิวรอน | 0.019789 |
| 5 | ชั้นแฝง 1 ชั้น มี 30 นิวรอน | 0.010573 |
| 6 | ชั้นแฝง 1 ชั้น มี 35 นิวรอน | 0.013811 |
| 7 | ชั้นแฝง 1 ชั้น มี 40 นิวรอน | 0.031882 |
| 8 | ชั้นแฝง 1 ชั้น มี 45 นิวรอน | 0.021583 |
| 9 | ชั้นแฝง 1 ชั้น มี 50 นิวรอน | 0.0017761 |



รูปที่ 3 การติดตั้งชุดเซนเซอร์ตรวจจับความเข้มแสงปลายท่อนำแสง



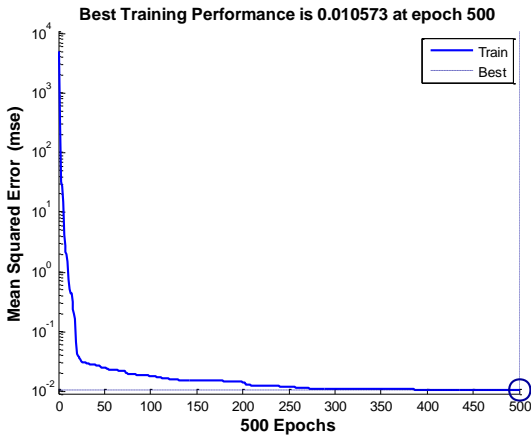
รูปที่ 4 แสดงการใช้โครงข่าย

พบว่า แบบที่ 9 ในกระบวนการทดสอบมีค่า MSE ที่ต่ำที่สุดเพียง 0.0017761 แต่จะพบว่า มีจำนวนนิวรอนแต่ละชั้นถึง 50 นิวรอน โดยเมื่อเทียบกับแบบที่ 5 ชั้นแฝง 1 ชั้น มีเพียง 30 นิวรอนมีค่า MSE ที่ต่ำรองลงมาที่ 0.010573 ซึ่งได้ทำการเลือกมาใช้ในระบบเพื่อควบคุมค่าพัลส์วิดธ์มอดูเลชันให้ความสว่างภายในห้องทดสอบเพื่อง่ายในการใช้งานจริงกับระบบควบคุมสำหรับห้องที่

มีขนาดจำกัดและจากผลในการทดสอบความสว่างกับค่าพัลส์วิดธ์มอดูเลชันในการควบคุมแสงทั้งสองแบบ การให้แสงสว่างภายในห้องทดสอบที่แตกต่างกันไม่มากจากผู้ใช้งานห้องจึงนำแบบที่ 5 มาใช้ในการทดสอบ โดยสมรรถนะของกระบวนการฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียมตามรูปที่ 5 ซึ่งมีการฝึกสอนจำนวน 500 รอบ โดยมีค่าผิดพลาด (MSE) เท่ากับ 0.010573

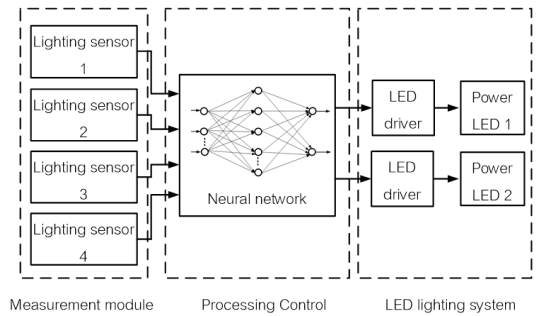
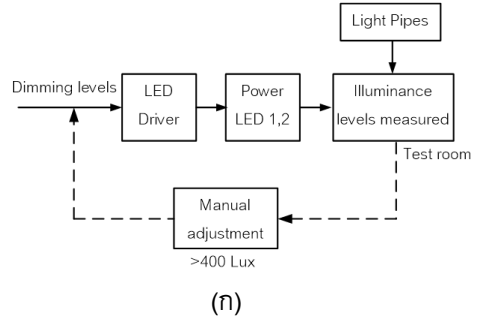


บทความวิจัย

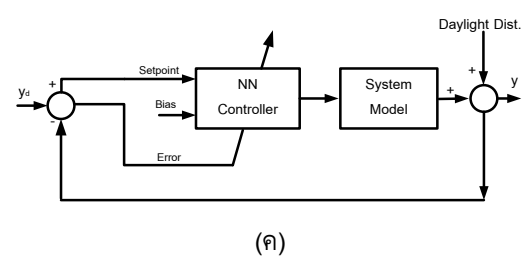


รูปที่ 5 สมรรถนะของกระบวนการฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียม

รูปที่ 6 แสดงการนำผลข้อมูลมาใช้ในระบบควบคุมความสว่างหลอดแอลอีดี ในรูปที่ 6 (ก) เป็นการปรับพัลส์วิตช์มอดูเลชัน ให้กับหลอดแอลอีดี โดยปรับแบบ Manual เพื่อหาค่าความสว่างภายในห้องทดสอบให้ได้ไม่ต่ำกว่า 400 Lux เพื่อนำค่าพัลส์วิตช์มอดูเลชันที่ได้จากการปรับให้ แอลอีดี 1,2 นำไปเป็นข้อมูลใช้ในการฝึกสอนให้กับระบบโครงข่ายประสาทเทียม โดยนำไปเป็นข้อมูลในการประมวลผลเพื่อนำค่าพัลส์วิตช์มอดูเลชัน ที่ได้จากการเรียนรู้นำไปขับหลอดแอลอีดี ทั้ง 2 หลอดให้ได้ระดับค่าเฉลี่ยแสงภายในห้องมากกว่า 400 Lux แสดงดังรูปที่ 6 (ข) โดยการควบคุมแบบ Closed Loop Control เพื่อนำมาควบคุมค่าพัลส์วิตช์มอดูเลชันด้วยโครงข่ายประสาทเทียม แสดงดังรูปที่ 6 (ค)



รูปที่ 6 การนำผลข้อมูลมาใช้ในระบบควบคุมความสว่าง:



(ก) การปรับความสว่างให้หลอดแอลอีดีแบบ Manual
 (ข) ระบบโครงข่ายประสาทเทียมในการประมวลผล และ
 (ค) การควบคุมแบบ Closed Loop Control



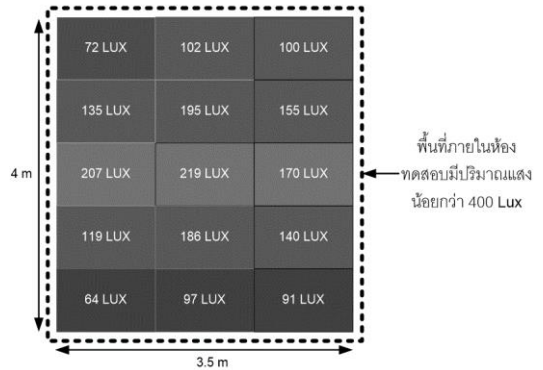
3. ผลการวิจัย

งานวิจัยนี้นำเสนอการใช้แสงสว่างร่วมกันระหว่างท่อนำแสงจากภายนอกพร้อมกับชุดโครงข่ายหลอดแอลอีดี โดยผลจากการวิจัยได้แบ่งออกเป็นแสงสว่างจากท่อนำแสงเพียงอย่างเดียว และแสงสว่างร่วมกับชุดหลอดแอลอีดี จากผลการทดลองได้ทำการเปรียบเทียบความเข้มแสงทั้งสองกรณี ด้วยการวัดความเข้มแสง 15 ตำแหน่ง ภายในห้องทดสอบ

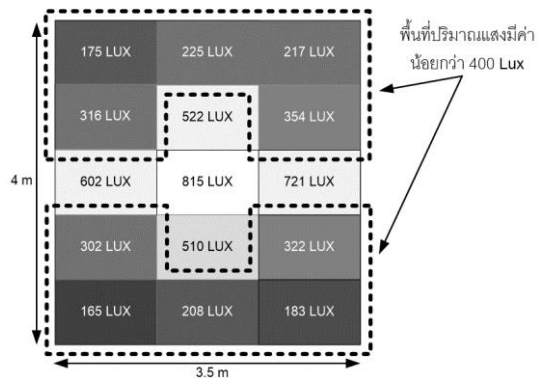
3.1 ความเข้มแสงภายในห้องทดสอบจากท่อนำแสง

ผลการการวิจัยของแสงสว่างจากภายนอกสะท้อนผ่านท่อนำแสงเข้ามายังห้องทดสอบเพียงอย่างเดียว ผู้วิจัยได้ทำการเก็บค่าความเข้มแสงตำแหน่งต่างๆ ภายในห้องทดสอบ เพื่อวิเคราะห์ความเข้มแสงของบริเวณต่างๆ ซึ่งมีการเปลี่ยนแปลงไปตามดวงอาทิตย์ มุมตกกระทบของแสงอาทิตย์กับห้องทดสอบ โดยยกตัวอย่างช่วงเวลา 9.00 น. และ 12.00 น. ของวันที่ท้องฟ้าโปร่งใส โดยแสดงค่าความเข้มแสงอาทิตย์ ตำแหน่งต่างๆ ของห้องทดสอบ จำนวน 15 ตำแหน่ง ดังรูปที่ 8 พบว่าในช่วงเวลา 9.00 น. แสงทำมุมเอียงกับห้องทดสอบทำให้ปริมาณแสงจากภายนอกเข้ามายังห้องทดสอบมีปริมาณน้อย ไม่เพียงพอต่อการใช้งานแสงสว่างทั้งห้อง ดังแสดงในรูปที่ 7 (ก) แต่จะพบว่าบริเวณโซนที่ 2 มีปริมาณแสงมากกว่าอีกสองโซนที่อยู่ไกลจากท่อนำแสง

ในกรณีช่วงเวลา 12.00 น. แสงอาทิตย์ตั้งฉากกับห้องทดสอบ ปริมาณแสงจากภายนอกสะท้อนผ่านลงมายังห้องทดสอบมากขึ้นกว่าช่วงเวลา 9.00 น. พบว่าบริเวณช่วงที่อยู่ใต้ท่อนำแสงหรือโซนที่ 2 มีปริมาณแสงมากกว่า 400 Lux ที่เพียงพอต่อการใช้งานด้านแสงสว่างดังแสดงในรูปที่ 7(ข)



(ก)



(ข)

รูปที่ 7 ตัวอย่างความเข้มแสงตำแหน่งต่างๆ ภายในห้องทดสอบ:

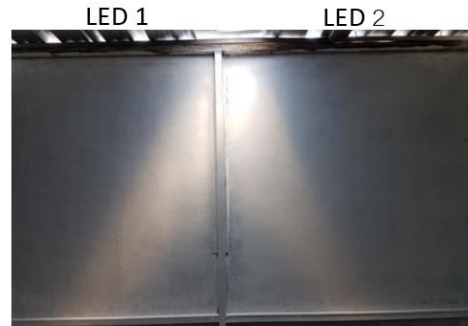
(ก) ช่วงเวลา 9.00น. และ (ข) ช่วงเวลา12.00 น.

พบว่า จากลักษณะของแสงที่เข้ามาภายในห้องมีลักษณะการสะท้อนทำมุมเปลี่ยนแปลงไปตามช่วงเวลาต่าง ๆ ของวันทำให้ยากต่อการควบคุมแสงให้มีความสม่ำเสมอทั้งห้อง ผู้วิจัยได้ทำการทดสอบปรับตำแหน่งท่อนำแสงให้ชิดกับผนังห้องทดสอบเพื่อสังเกตมุมสะท้อนที่เกิดขึ้นที่ผนังห้องทดสอบ ทำให้เห็นลักษณะการกระจายตัวของแสงในช่วงเวลาเก็บผลพบว่าลักษณะการสะท้อนแสงผ่านท่อนำแสงลงมายังห้อง

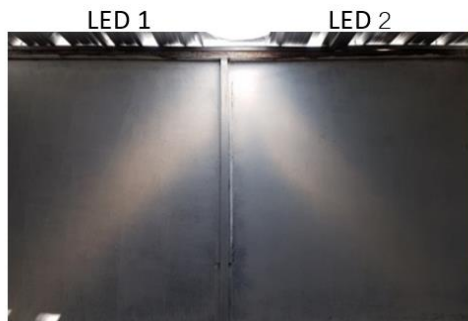


ทดสอบห้องสภาวะการเปลี่ยนแปลงไปตามองศาที่ดวงอาทิตย์ที่ทำมุมสะท้อนทำให้เห็นทิศทางแสงที่เกิดขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 8 พบว่าจาก ลักษณะของแสงที่เข้ามา ภายในห้องมีลักษณะการสะท้อนทำมุมเปลี่ยนแปลงไปตามช่วงเวลาต่าง ๆ ของวันทำให้ยากต่อการควบคุมแสงให้มีความสม่ำเสมอทั้งห้อง ผู้วิจัยได้ทำการทดสอบปรับตำแหน่งท่อนำแสงให้ชิดกับผนังห้องทดสอบเพื่อสังเกตมุมสะท้อนที่เกิดขึ้นที่ผนังห้องทดสอบ ทำให้เห็นลักษณะการกระจายตัวของแสงในช่วงเวลาเก็บผล พบว่าลักษณะการสะท้อนแสงผ่านท่อนำแสงลงมายังห้องทดสอบห้องสภาวะการเปลี่ยนแปลงไปตามองศาที่ดวงอาทิตย์ที่ทำมุมสะท้อนทำให้เห็นทิศทางแสงที่เกิดขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 8

จากผลการทดลองจากท่อนำแสงเพียงอย่างเดียว ผู้วิจัยได้ทำการเก็บผลในช่วงเวลาต่างๆของแต่ละวัน พบว่าแสงจากภายนอกสะท้อนผ่านท่อนำแสงลงมายังห้องทดสอบในแต่ละช่วงของวันจะมีปริมาณน้อยไม่เพียงพอต่อการใช้งานทั่วบริเวณห้องทดสอบ ช่วงเวลาเช้า (9.00 น. – 11.00 น.) และช่วงบ่าย (14.00 น. – 16.00 น.) ของแต่ละวัน ส่วนช่วงเวลากลางวัน (11.00 น. – 14.00 น.) มีปริมาณแสงมากกว่าช่วงเวลาที่กล่าวมาก่อนหน้านี้ บริเวณใต้ท่อนำแสงมีความเข้มแสงมากกว่า 400 Lux และตำแหน่งที่ไกลจากท่อนำแสงก็ยังมีปริมาณแสงที่ไม่เพียงพอต่อการใช้งาน โดยได้ทำการพล็อตกราฟความเข้มแสงในระนาบแกน x แกน y เป็นตำแหน่งต่างๆของห้องทดสอบ และแกน z เป็นค่าความเข้มแสงที่วัดได้ และมีระดับความเข้มแสงอ้างอิงเท่ากับ 400 Lux ดังรูปที่ 9 กรณีผลการทดลองตัวอย่าง วันที่ 28 มิถุนายน 2562



(ก)



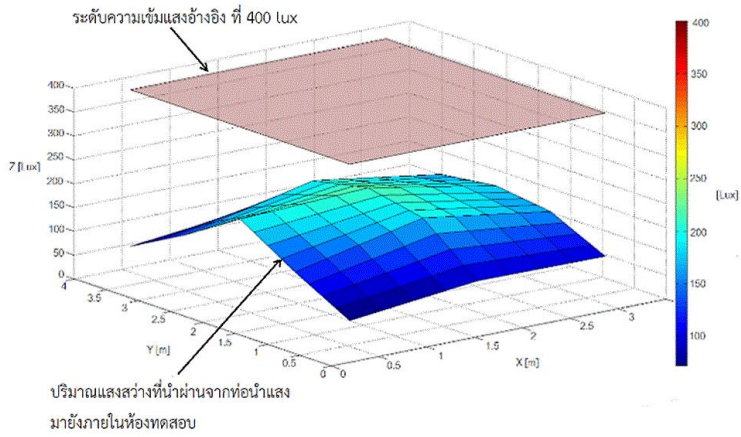
(ข)

รูปที่ 8 แสดงลักษณะการกระจายแสงภายในห้องทดสอบโดยปรับตำแหน่งท่อนำแสง:

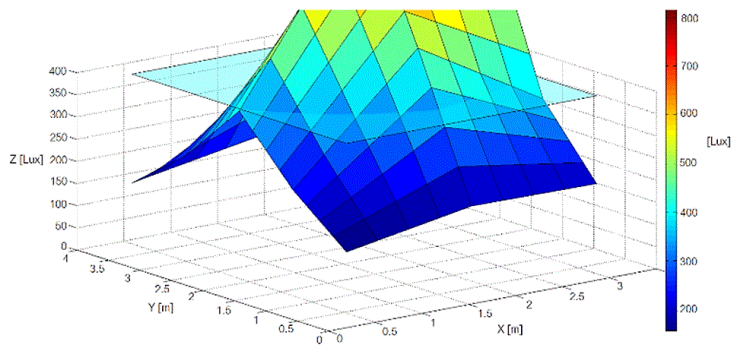
(ก) ช่วงเวลา 10.00 น. และ (ข) ช่วงเวลา 14.00 น.

ซึ่งท้องฟ้าโปร่งใส ไม่มีก้อนเมฆปกคลุม โดยยกตัวอย่าง 3 ช่วงเวลา ได้แก่รูปที่ 9 (ก) เวลา 9.00 น. รูปที่ 9 (ข) เวลา 12.00 น. และรูปที่ 9 (ค) เวลา 15.00 น. ตามลำดับ

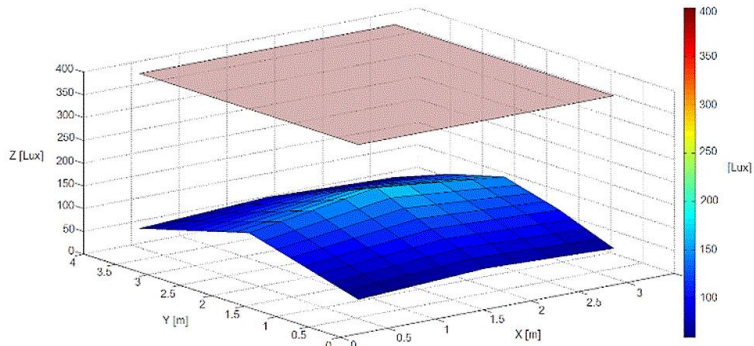
ผลการทดลองจากความเข้มแสง พบว่ามีเพียงช่วงเวลา 12.00 น. มีแสงสว่างเพียงพอต่อการใช้งานหรือมากกว่า 400 Lux จากผลการทดลองดังกล่าวทำให้ผู้วิจัยได้เพิ่มการชดเชยแสงในช่วงเวลาอื่นๆ ที่มีแสงไม่เพียงพอต่อการใช้งานด้วยหลอดแอลอีดี



(ก)



(ข)



(ค)

รูปที่ 9 แสดงปริมาณแสงสว่างที่นำผ่านจากท่อนำแสงมายังภายในห้องทดสอบ:

(ก) ช่วงเวลา 9.00 น. (ข) ช่วงเวลา 12.00 น. และ (ค) ช่วงเวลา 16.00 น.

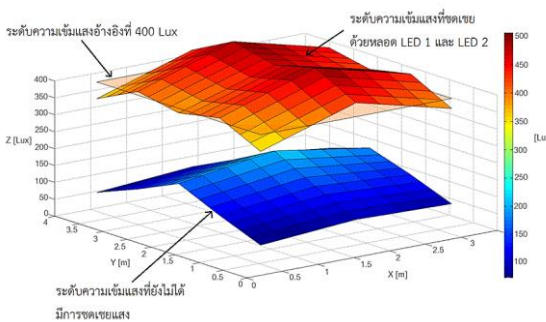


3.2 ความเข้มแสงจากท่อนำแสง ทำงานร่วมกับ หลอดแอลอีดี

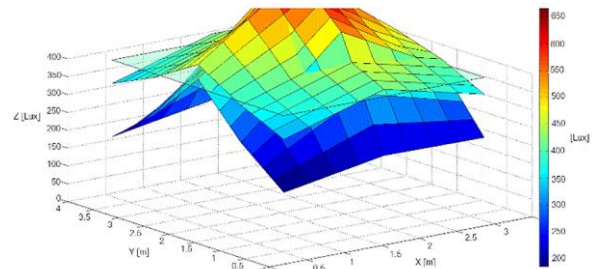
การใช้งานแสงสว่างจากธรรมชาติผ่านท่อนำแสง เข้ามายังห้องทดสอบในหัวข้อที่ผ่านมา พบว่าปริมาณแสงในแต่ละช่วงเวลาของวัน มีความเข้มแสงไม่เพียงพอต่อการใช้งาน หรือบางช่วงเวลามีปริมาณแสงเพียงพอแค่บริเวณบางส่วนเท่านั้น ดังนั้นผู้วิจัยได้ใช้แสงจากหลอดไฟแอลอีดี จำนวน 2 หลอด สำหรับชดเชยแสงภายในห้องทดสอบ โดยผู้วิจัยได้ออกแบบระบบควบคุมหลอดแอลอีดีแบบพัลส์วิดท์มอดูเลชันสำหรับปรับความสว่างภายในห้องทดสอบ เพื่อให้ปริมาณแสงมีปริมาณมากกว่า 400 Lux ดังข้อมูลของตัวอย่างการทดลอง วันที่ไม่มีก้อนเมฆปกคลุมดังรูปที่ 10 และวันที่ท้องฟ้ามีก้อนเมฆปกคลุมดังรูปที่ 10 (ก) พบว่าในช่วงเวลาเช้า 9.00 น. ของ

ทั้งสองกรณีมีปริมาณแสงไม่เพียงพอต่อการใช้งานทั้งห้อง แต่ช่วงเวลากลางวันของวันที่ไม่มีก้อนเมฆปกคลุม บริเวณกลางห้องมีปริมาณแสงเพียงพอ แต่ยังมีบริเวณมุมของห้องหรือพื้นที่ติดกับผนังของห้องก็ยังมีปริมาณแสงไม่เพียงพอ ดังรูปที่ 10 (ข) และช่วงเวลากลางวันของวันที่มีเมฆปกคลุม ปริมาณแสงยังไม่เพียงพอต่อการใช้งานทั้งห้อง

จากข้อมูลที่กล่าวมาข้างต้นผู้วิจัยได้ทำการปรับความสว่างจากโครงข่ายหลอดแอลอีดีทั้งสอง ด้วยค่าพัลส์วิดท์มอดูเลชันที่เหมาะสม (PWM_1 และ PWM_2) สำหรับหลอดแอลอีดีแต่ละหลอดเพื่อให้ปริมาณแสงเฉลี่ยในแต่ละโซนมากกว่า 400 Lux ทำให้ภาพรวมของแสงสว่างภายในห้องเหมาะสมต่อการใช้งาน ดังรูปที่ 10 และ 11 ตามลำดับ



(ก)

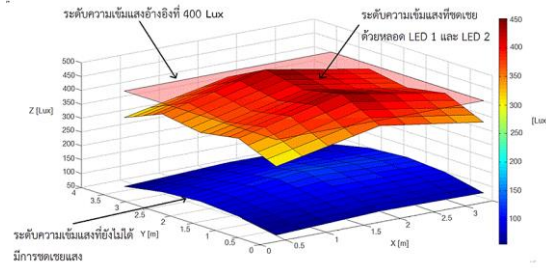


(ข)

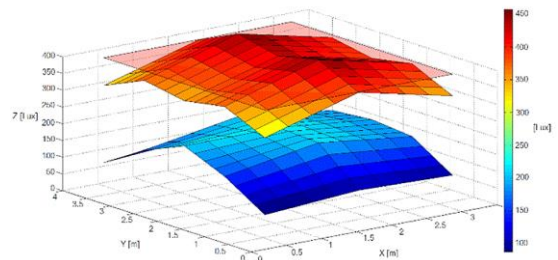
รูปที่ 10 ค่าความเข้มแสงของบริเวณต่างๆ ของห้องทดสอบในกรณีที่สภาพอากาศไม่มีเมฆ
ค่าความเข้มแสงของบริเวณต่างๆ ของห้องทดสอบ: (ก) ช่วงเวลา 9.00 น. และ (ข) ช่วงเวลา 12.00 น.



บทความวิจัย



(ก)



(ข)

รูปที่ 11 แสดงค่าความเข้มแสงของบริเวณต่างๆ ของห้องทดสอบ ในกรณีที่มีสภาพอากาศมีเมฆปกคลุม ค่าความเข้มแสงของบริเวณต่างๆ ของห้องทดสอบ: (ก) ช่วงเวลา 9.00 น. และ (ข) ช่วงเวลา 12.00 น.

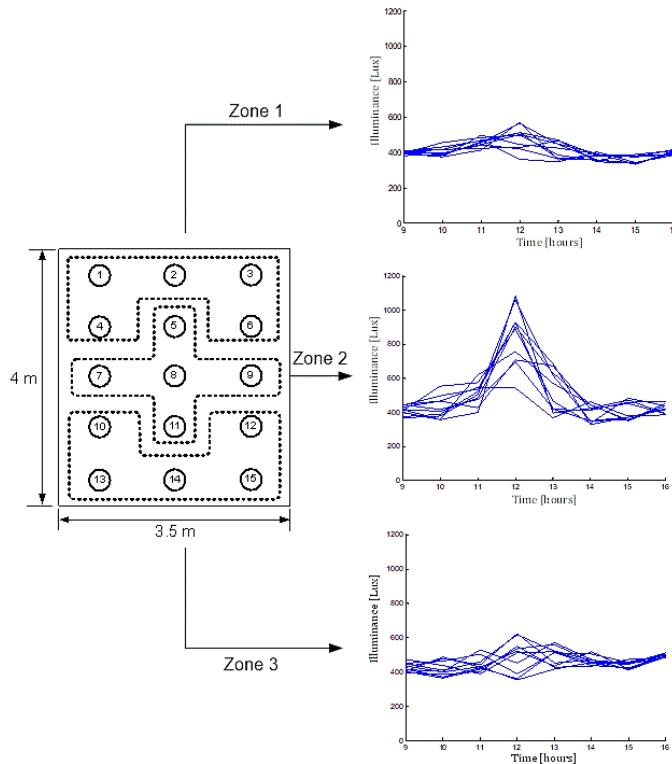
3.3 ความเข้มแสงภายในห้องทดสอบที่ควบคุมด้วยโครงข่ายประสาทเทียม

จากการเก็บข้อมูลและชดเชยแสงด้วยหลอดแอลอีดีในหัวข้อที่ผ่านมา ผู้วิจัยได้ทำการบันทึกข้อมูลแสงเฉลี่ยในแต่ละโซนและค่าฟลักซ์วัตต์มอดูเลชันของหลอดแอลอีดีแต่ละหลอดที่ชดเชยให้มีปริมาณแสงเฉลี่ยมากกว่า 400 Lux เป็นข้อมูลในการฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียม จากการทดสอบระบบควบคุมความเข้มแสงด้วยโครงข่ายประสาทเทียมในเวลา 9.00–16.00 น. และทำการเปรียบเทียบด้านพลังงานในช่วงเวลาทดสอบแสดงดังตารางที่ 2 โดยการเก็บผลของกรณีตัวอย่างจำนวน 10 วัน พบว่าในแต่ละโซนดังรูปที่ 12 มีปริมาณแสงเป็นไปตามต้องการ ซึ่งจะมีโซนที่ 2 มีปริมาณแสงที่ระหว่าง 500-1100 Lux มากกว่าบริเวณข้างเคียงเนื่องจากเป็นตำแหน่งที่รับแสงสว่างจากท่อแสงโดยตรงเพื่อทดสอบสมรรถนะของระบบควบคุมที่ออกแบบขึ้น โดยมีการจำลองตัวอย่างให้มีผู้ใช้งานบริเวณโซนที่ 1 ให้ระบบควบคุมหลอดแอลอีดีแต่ละหลอดรักษาระดับแสงเฉลี่ยในโซนที่ 1 มากกว่า 400 Lux ดังแสดงในรูปที่ 13 โดยการ

จำลองให้มีผู้ใช้งานบริเวณโซนที่ 1 ระบบสามารถรักษาระดับแสงภายในห้องทดสอบเป็นไปตามต้องการ และยังสามารถรักษาระดับแสงเฉพาะโซนที่ 2 และ โซนที่ 3 ได้ตามความต้องการของพื้นที่ใช้สอยของผู้ใช้งาน

ตารางที่ 2 ปริมาณกำลังทางไฟฟ้าและแสงสว่างในห้องทดสอบ (กรณีตัวอย่างวันที่ 28 มิถุนายน 2562)

| เวลา (h) | Duty cycle1 (%) | กำลังไฟฟ้า (W) | Duty cycle2 (%) | กำลังไฟฟ้า (W) |
|----------|-----------------|----------------|-----------------|----------------|
| 9.00 | 87 | 13.28 | 89 | 13.34 |
| 10.00 | 82 | 13.10 | 84 | 13.18 |
| 11.00 | 81 | 13.03 | 83 | 13.13 |
| 12.00 | 68 | 12.42 | 70 | 12.53 |
| 13.00 | 67 | 12.36 | 69 | 12.48 |
| 14.00 | 79 | 12.98 | 81 | 13.06 |
| 15.00 | 87 | 13.28 | 90 | 13.37 |
| 16.00 | 92 | 13.42 | 94 | 13.47 |



รูปที่ 12 แสดงค่าความเข้มแสงทั้ง 3 โซนภายในห้องทดสอบกรณีตัวอย่างจำนวน 10 วัน

จากตารางที่ 2 พบว่าแสงสะท้อนในห้องทดสอบมีลักษณะของทิศทางแสงตำแหน่ง LED1 มากกว่า LED2 ตลอดเวลาเป็นผลมาจากการจัดวางโครงสร้างของห้องและระบบการติดตั้งท่อนำแสงรวมถึงแนวโครง ของดวงอาทิตย์ในช่วงฤดูที่ทำการเก็บผล โดยทดสอบปรับตำแหน่งของท่อนำแสงไปซิดหนึ่งเพื่อให้เห็นทิศทางของแสงภายในห้องทดสอบพบว่าแสงที่สะท้อนเข้ามาภายในห้องจากรูปที่ 2 (ก)(ข) ช่วงเช้าและบ่ายจะมีการสะท้อนไปที่ LED1 มากกว่า LED2 ซึ่งทำให้การปรับค่า Duty Cycle ให้กับ LED2 มากตลอดช่วงเวลากการทดสอบส่งผลให้การใช้กำลังไฟฟ้าของ LED1 จึงน้อยกว่า LED2 เป็นไปตามตารางที่ 2

4. สรุปและอภิปรายผลการวิจัย

การใช้แสงสว่างจากภายนอกผ่านท่อนำแสงเข้ามาในห้องทดสอบ โดยใช้หลักการสะท้อนของแสงจากภายนอกผ่านท่อนำแสงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 30 เซนติเมตร เพื่อนำแสงจากภายนอกมาใช้ประโยชน์ในพื้นที่ที่ต้องการ จากระบบควบคุมความเข้มแสงด้วยโครงข่ายประสาทเทียม โดยการเก็บผลของกรณีตัวอย่างจำนวน 10 วัน พบว่าในโซนที่ 1 และ 3 มีปริมาณแสงอยู่ที่ 350-800 Lux และโซนที่ 2 มีปริมาณแสงอยู่ที่ 500 -1100 Lux มากกว่าบริเวณข้างเคียงเนื่องจากเป็นตำแหน่งที่รับแสงสว่างจากท่อแสงโดยตรง



ผลจากการวิจัยพบว่าปริมาณแสงในห้องทดสอบเปลี่ยนแปลงตามลักษณะของแสงอาทิตย์ที่ทำมุมกับพื้นโลก ช่วงเวลาที่แสงเหมาะสมต่อการใช้งานจะอยู่ในช่วงเวลา 11.00-13.00 น. ของวัน แต่ความสม่ำเสมอของแสงนั้นยังไม่เพียงพอต่อการใช้งานครอบคลุมทั้งห้องทดสอบ ในการเก็บข้อมูลการนำแสงของท่อนำแสงของผู้วิจัยนอกจากปัจจัยการโคจรของดวงอาทิตย์ ยังมีสภาพอากาศที่มีก้อนเมฆปกคลุมทำให้เกิดความไม่แน่นอนเรื่องความเข้มแสงที่สะท้อนลงมายังห้องทดสอบจากการทดลองจะเห็นได้ว่าผู้วิจัยใช้ LED เพียง 2 หลอดเพื่อหาความสามารถของระบบที่นำมาใช้ซึ่งจะเห็นว่าความสัมพันธ์ของขนาดห้องและจำนวนหลอด LED ที่ใช้ทดลองมีความสามารถให้ความสว่างเป็นไปตามต้องการได้ หากมีการเพิ่มขนาดห้องจำนวนหลอด LED เพิ่มขึ้นตามสัดส่วนของขนาดห้องจะทำให้การกระจายแสงดีมากขึ้น

5. กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณคณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏพิบูลสงคราม ที่ให้ความอนุเคราะห์เครื่องมือในการวิจัยและสำนักงานการวิจัยแห่งชาติ (วช.) ที่สนับสนุนทุนวิจัย

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] A. Pandharipande and D. Caicedo, Daylight integrated illumination control of LED systems based on enhanced presence sensing, *Energy and Buildings*, 2011, 43(4), 944-950.
- [2] S. Kim, I. Kim, A. Choi and M. Sung, Evaluation of optimized PV power generation and electrical lighting energy savings from the PV blind-integrated daylight responsive dimming system using LED lighting, *Solar Energy*, 2014, 107, 746-757.
- [3] H. Choi, S.k. Hong, A. Choi and M. Sung, Toward the accuracy of prediction for energy savings potential and system performance using the daylight responsive dimming system, *Energy and Buildings*, 2016, 133, 271-280.
- [4] P. Kakham and B. Ounpanich, The LED lighting systems with integrated daylighting for enhancing energy performance, *Engineering Journal Chiang Mai University*, 2016. 24(3), 13-24.
- [5] A.P.J.M. Raja and V. Meenakshi, Neural network based dimming level control of LED network, *International Journal on Recent and Innovation Trends in Computing and Communication*, 2015, 2(3), 438-443.
- [6] A.P.J.M. Raja and V. Meenakshi, Illuminance control of a LED lighting network using back propagated neural network, *International Journal of Innovative Trends and Emerging Technologies*, 2015, 1(2), IC15041.



- [7] A.P. Taraseviciene, N. Morkevicius, A. Janaviciute, A. Liutkevicius, A. Vrubliauskas and E. Kazanavicius , The usage of artificial neural networks for intelligent lighting control based on resident's behavioural pattern, *Elektronika ir Elektrotechnika*, 2015, 21(2), 71-79.
- [8] M. Lin Jin and M. Chun Ho, LabVIEW-based fuzzy controller design of a lighting control system, *Journal of Marine Science and Technology*, 2009, 17(2), 116-121.
- [9] J. Liu, W. Zhang, X. Chu and Y. Liu, Fuzzy logic controller for energy savings in a smart LED lighting system considering lighting comfort and daylight, *Energy and Buildings*, 2016, 127, 95–104.
- [10] N.K. Kumar, G. Karunagaran, C. Spanos, K.J. Tseng and B. Soong, Smart lighting system using ANN-IMC for personalized lighting control and daylight harvesting, *Building and Environment*, 2018, 139, 170-180.
- [11] V.D. Hien and S. Chirarattananon, Daylighting through light pipe for deep interior space of buildings with consideration of heat gain, *Asian Journal on Energy and Environment*, 2007, 08(01), 461-475.
- [12] M. Kischkoweit-Lopin, An overview of daylighting systems, *Solar Energy*, 2002, 73(2), 77-82.
- [13] N. Ekren and S. Görgülü , An investigation into the usability of straight light-pipes in Istanbul, *Energy Education Science and Technology Part A: Energy Science and Research*, 2012, 30(1), 637-644.
- [14] S. Görgülü and N. Ekren, Energy saving in lighting system with fuzzy logic controller which uses light-pipe and dimmable ballast, *Energy and Buildings*, 2013, 61, 172–176.
- [15] L. Sharma, S. Fatima Ali and D. Rakshit, Performance evaluation of a top lighting light-pipe in buildings and estimating energy saving potential, *Energy and Buildings*, 2018, 179, 57-72.

การควบคุมความกว้างของแนวเชื่อมแบบทันทีด้วยวิธีการควบคุมพีไอดีแบบปรับค่าได้โดยใช้การประมวลผลภาพอินฟราเรดในระหว่างการเชื่อมเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำด้วยไฟเบอร์เลเซอร์

สิทธิไชย สราญนาส¹ นรินทร์ ชัยธานี² และ ทศพร แก้ววิจิตร^{1*}

¹ ภาควิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมเครื่องกล, วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

² ภาควิชาวิศวกรรมยานยนต์, คณะวิศวกรรมศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น

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

วันที่รับบทความ: 16 มิถุนายน 2566; วันที่ทบทวนบทความ: 22 สิงหาคม 2566; วันที่ตอบรับบทความ: 7 กันยายน 2566

วันที่เผยแพร่ออนไลน์: 21 ธันวาคม 2566

บทคัดย่อ: ไฟเบอร์เลเซอร์มีข้อดีหลายประการได้แก่ ประสิทธิภาพการหลอมสูง พลังงานสูง และลักษณะความหนาแน่นของพลังงาน อย่างไรก็ตามในระหว่างกระบวนการเชื่อมเลเซอร์หากชิ้นงานมีความหนาไม่คงที่หรือเกิดความบกพร่องระหว่างการเชื่อมนั้นส่งผลกระทบต่อารควบคุม เพื่อให้ได้ความสม่ำเสมอของแนวเชื่อม ดังนั้นงานวิจัยนี้เสนอการควบคุมคุณภาพรอยเชื่อมแบบทันที (Real Time) ของกระบวนการเชื่อมเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำด้วยไฟเบอร์เลเซอร์ที่มีความหนาต่างกันตั้งแต่ 0.5 มม. ถึง 1.0 มม. โดยใช้การประมวลผลภาพอินฟราเรดในการวิเคราะห์ภาพของบ่อหลอมระหว่างกระบวนการเชื่อมและส่งข้อมูลเป็นข้อมูลนำเข้าให้ระบบควบคุมป้อนกลับพีไอดีแบบปรับค่าได้ (Adaptive PID) เพื่อควบคุมความกว้างของแนวเชื่อมให้มีความสม่ำเสมอ (Uniform Weld Bead) โดยใช้ความกว้างของบ่อหลอมที่ได้จากการประมวลผลภาพเป็นตัวแปรนำเข้าหลัก สำหรับควบคุมกำลัง (Power) ของไฟเบอร์เลเซอร์ให้สัมพันธ์กับความหนาของชิ้นงาน ซึ่งพบว่าระบบควบคุมป้อนกลับพีไอดีแบบปรับค่าได้ สามารถควบคุมกำลังเลเซอร์เพื่อรักษาความกว้างของบ่อหลอมให้อยู่ในช่วงความแม่นยำ ± 1.0 มม. จากจุดตั้งค่า ผลการทดลองพบว่าแนวเชื่อมมีการหลอมลึก (Full Penetration) และสม่ำเสมอ โดยมีค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานกรณีการเปลี่ยนแปลงความหนาในทิศทาง 0.5 ถึง 1.0 มม. เท่ากับ 0.22 และในทิศทาง 1.0 ถึง 0.5 มม. เท่ากับ 0.23 ดังนั้นเทคนิคการควบคุมป้อนกลับดังกล่าวมีความเหมาะสมกับระบบการเชื่อมด้วยเลเซอร์อัตโนมัติของแผ่นโลหะที่ไม่ทราบความหนาที่อยู่ระหว่างความหนา 0.5 มม. ถึง 1.0 มม.

คำสำคัญ: ไฟเบอร์เลเซอร์; การควบคุมแบบป้อนกลับ; การประมวลผลภาพ; เหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ

Real-time Feedback Control for Uniform Weld Bead using Adaptive PID Controller with Infrared Image Processing in Fiber Laser Welding of Low Carbon Steel

Sitthichai Sarannat¹, Naren Chaithanee² and Thossaporn Kaewwichit^{1*}

¹ Department of Mechanical Engineering Technology, College of Industrial Technology, King Mongkut's University of Technology North Bangkok

² Faculty of Engineering, Thai-Nichi Institute of Technology

* Corresponding author, E-mail: thossaporn.k@cit.kmutnb.ac.th

Received: 16 June 2023; Revised: 22 August 2023; Accepted: 7 September 2023

Online Published: 21 December 2023

Abstract: Fiber laser has considerable advantages; that is, high melting efficiency, high power, and power density. However, during the welding process, if the thickness of the steel sheet is not stable or the process has a defect, this could affect the control. To make the continuity in welds, the research is intended to propose a quality control system for the real-time weld beads. The process involves the welding of the low-carbon steel sheet by laser fiber of varying thicknesses of 0.5 to 1.0 mm. The infrared image processing is used to determine the molten pool during the welding process. Then, this data is input to the adaptive PID feedback control system in order to control the width of the weld bead quality (Uniform Weld Bead). In this regard, the width of the molten pool is used as the main input parameter for controlling the power of the fiber laser in accordance with the steel sheet thickness. The research results indicate that the adaptive PID can control the power of the fiber laser so that the molten pool width is maintained within ± 1.0 mm. accuracy from the setting point. Moreover, the experiment shows that the weld beads have full penetration and continuity. The standard deviations of the thickness adjustment in the 0.5-1.0 mm. and 1.0-0.5 mm directions are 0.22 and 0.23 respectively. Therefore, the feedback control technique is appropriate for the automatic laser welding of the worksheets with a thickness of 0.5-1.0 mm.

Keywords: Laser welding; Feedback control; Image processing; Low carbon steel sheet



1. บทนำ

ในปัจจุบันกระบวนการเชื่อมด้วยเลเซอร์ได้ถูกพัฒนาอย่างรวดเร็ว เนื่องจากข้อดีหลายประการได้แก่ กำลังวัตต์สูง แสงเลเซอร์มีประสิทธิภาพสูง และมีความยืดหยุ่นในการใช้งาน ในการใช้ประโยชน์สำหรับงานเชื่อมในอุตสาหกรรมต่างๆ อาทิเช่น อุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ อุตสาหกรรมเครื่องมือแพทย์ อุตสาหกรรมรถยนต์ อุตสาหกรรมท่อเรือและอื่นๆ [1-3] มีผู้วิจัยได้ทำการศึกษาพฤติกรรมในระหว่างกระบวนการเชื่อมเลเซอร์ เช่น ค่าอุณหภูมิในบ่อหลอมและบริเวณกระทบร้อน (Heat Affected Zone, HAZ) ขนาดบ่อหลอม (Molten Pool) ขนาดของคีย์โฮลด์ (Key Hole) รวมถึงขนาดพื้นที่และรูปร่างของบ่อหลอม เพื่อหาความสัมพันธ์ในการบ่งบอกถึงคุณภาพของงานเชื่อมได้ และใช้สำหรับการติดตามและการควบคุมกระบวนการเชื่อมแบบทันที เพื่อช่วยลดของเสียและลดต้นทุนการผลิต [4-5]

การกระจายตัวของความร้อนในระหว่างการเชื่อมซึ่งมีผลต่อโครงสร้างของแนวเชื่อมและชิ้นงานโดยตรง โดยเฉพาะชิ้นงานที่มีความหนาต่ำกว่า 1 มม. [6-8] พบว่ามีการติดตามอุณหภูมิในระหว่างการเชื่อมและการกระจายตัวของความร้อนเพื่อรักษาคุณภาพการเชื่อมด้วยการใช้เซนเซอร์แบบไม่สัมผัส ได้แก่ ไพโรมิเตอร์ (Pyrometers) กล้องอินฟราเรด (Infrared Camera) การใช้เซนเซอร์ร่วมกันหลายตัว (Multi Sensors) และการใช้กล้องอุตสาหกรรมความเร็วสูง (High Speed CCD Camera) เพื่อกำหนดตัวแปรนำเข้าที่พร้อมสำหรับการวัดและตรวจสอบที่สามารถวิเคราะห์การเชื่อมด้วยเลเซอร์ได้ [4,10,14] อย่างไรก็ตามในสภาวะการทำงานจริงนั้นการเชื่อมเลเซอร์ โดยเฉพาะ

วัสดุที่มีความหนาไม่เกิน 1 มม. มีความยากในการควบคุมของกระบวนการทำงานเพื่อให้ได้แนวเชื่อมที่มีคุณภาพสูง เนื่องจากพฤติกรรมในระหว่างการเชื่อมมีหลายปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อคุณภาพของแนวเชื่อมเปลี่ยนแปลง และทำให้เกิดจุดบกพร่องไม่คงที่ เช่น แนวเชื่อมไม่สม่ำเสมอ แนวเชื่อมทะลุ ปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อคุณภาพงานเชื่อมเหล่านั้นได้แก่ ความหนาของชิ้นงานไม่คงที่ การเปลี่ยนแปลงทางความร้อน ส่วนผสมของวัสดุ การเตรียมชิ้นงานก่อนทำการเชื่อม เป็นต้น ดังนั้นการใช้ประสบการณ์ในการปรับตั้งอาจไม่เพียงพอต่อกระบวนการทำงานจริง ด้วยการควบคุมแบบอัตโนมัติ การควบคุมแบบพีไอดี (PID) ที่เป็นระบบป้อนกลับแบบหนึ่งที่ถูกนำมาประยุกต์ใช้ในงานวิศวกรรมอย่างหลากหลาย และกระบวนการเชื่อมในหลายๆ ด้าน อาทิเช่น ระบบเชื่อมอาร์คอัตโนมัติด้วยพีไอดีบนกระบวนการเชื่อมแบบ SMAW [11] การนำระบบป้อนกลับแบบพีไอดีมาใช้ร่วมกับระบบตัดสินใจ ตรรกศาสตร์คลุมเคลือบบนกระบวนการเชื่อม MIG ของชิ้นงานอลูมิเนียมอัลลอยด์ที่ให้ผลของสัญญาณความถี่ที่มีความเสถียรและรอยเชื่อมดี [12] หรือนำไปใช้ร่วมกับโครงข่ายประสาทแบบคอนโวลูชันในการควบคุมกำลังวัตต์ของเครื่องเชื่อมเลเซอร์แบบสั่งการระยะไกลโดยให้ผลกับประสิทธิภาพของระบบสั่งการและเวลาตอบสนองของสัญญาณที่ดีขึ้น [13] ทำให้เป็นที่รู้จักในด้านความสามารถให้เสถียรภาพและความสม่ำเสมอในระบบควบคุม ในการเชื่อม การรักษากระบวนการเชื่อมให้คงที่และรอยเชื่อมสม่ำเสมอโดยมีข้อบกพร่องน้อยที่สุด การควบคุมพีไอดี สามารถช่วยปรับพารามิเตอร์ในการควบคุมคุณภาพการเชื่อม มีส่วนช่วยในการปรุง



ประสิทธิภาพการผลิต และปรับปรุงประสิทธิภาพการเชื่อม

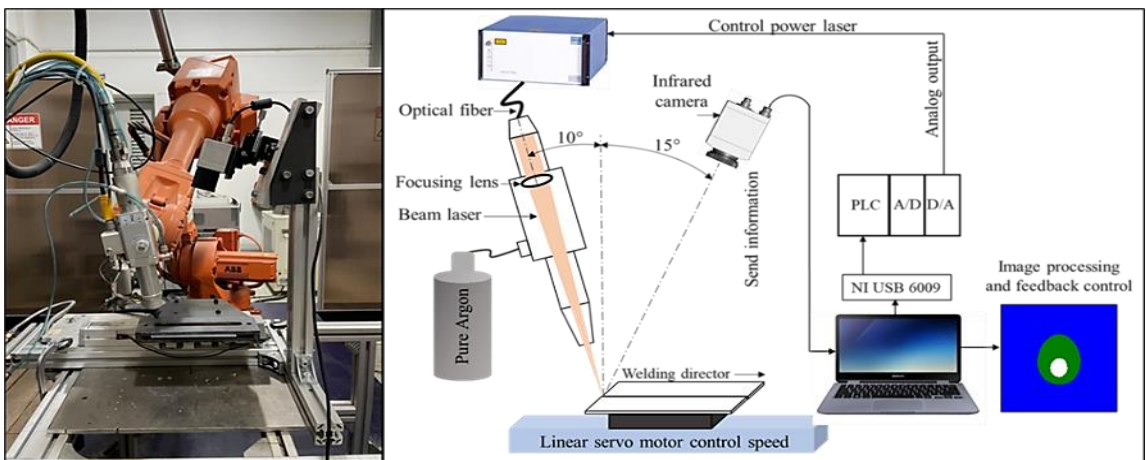
สำหรับงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อควบคุมคุณภาพของงานเชื่อมเลเซอร์แบบทันทึบนชั้นงานเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำที่มีความหนาต่างกันเพื่อจำลองสถานการณ์ของความหนาที่เปลี่ยนไประหว่าง 0.5 ถึง 1.0 มม. ด้วยวิธีการประมวลผลภาพบริเวณบ่อหลอมจากกล้องอินฟราเรดในการวิเคราะห์หาความกว้างและขนาดพื้นที่ของบ่อหลอม เพื่อใช้ควบคุมกระบวนการเชื่อมเลเซอร์แบบบ่อนกลับด้วยควบคุมพีไอดีแบบปรับค่าได้ โดยควบคุมแนวเชื่อมให้มีความคงที่ (Uniform Weld Bead) มากที่สุดและมีการซึมลึกสมบูรณ์ (Full Penetration)

2. วิธีการดำเนินงานวิจัย

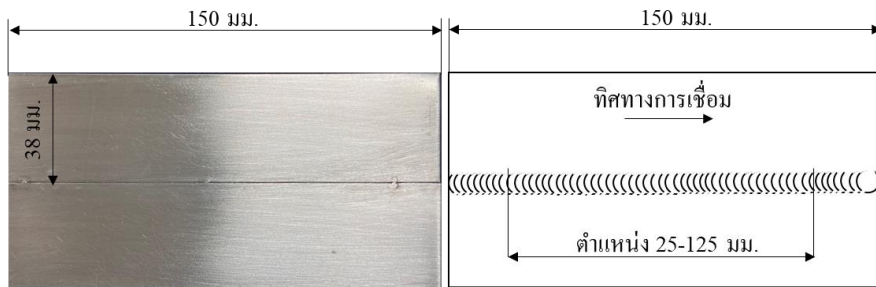
2.1 การติดตั้งอุปกรณ์

รูปที่ 1 แสดงการติดตั้งอุปกรณ์สำหรับงานวิจัย โดยใช้ไฟเบอร์เลเซอร์รุ่น JenLas CW500 มีกำลังวัตต์สูงสุด 500 วัตต์ เชื่อมเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ

JIS G3101 SS400 ความหนา 0.5-1.0 มม. รอยต่อชนท่าราบ (Butt Joint in Flat Position) ความเร็วในการเชื่อม 2.5 มิลลิเมตรต่อวินาที ใช้อาร์กอน 99.99 เปอร์เซ็นต์ ที่อัตราการไหล (Flow Rate) 5 ลิตรต่อนาที เพื่อป้องกันการเกิดปฏิกิริยาของออกซิเจน (Oxidation) ในระหว่างการเชื่อมเลเซอร์มี ระยะดีโฟกัส (Defocus) กับผิวชั้นงาน +20 มม. และทำมุม 10 องศา เพื่อป้องกันการสะท้อนกลับไปยังเลเซอร์ติดตั้งกล้องอินฟราเรดรุ่น Optris PI1M ห่างจากชั้นงาน 300 มม. ทำมุม 15 องศา เพื่อรับภาพขณะเชื่อมเลเซอร์ โดยตั้งค่านับทิก 10 เฟรมต่อวินาที มีการสอบเทียบขนาดของภาพการสอบเทียบและสัดส่วนที่ผิดเพี้ยน (Calibrate and Distortion) ที่แท้จริงโดยสอบเทียบในโปรแกรม Lab VIEW จากการวัดขนาดตารางที่ทราบขนาดจริงคือ 38 x 150 มม. นอกจากนี้เพื่อหลีกเลี่ยงความไม่คงที่ของการทดลองตอนเริ่มและตอนจบของการเชื่อมจึงวิเคราะห์ผลการทดลองช่วงระยะแนวเชื่อม 25-125 มม. ดังในรูปที่ 2



รูปที่ 1 การติดตั้งอุปกรณ์สำหรับงานเชื่อมไฟเบอร์เลเซอร์



รูปที่ 2 ตำแหน่งที่ใช้สำหรับการวัดผลเพื่อวิเคราะห์ข้อมูล

3. การออกแบบการควบคุมแบบป้อนกลับและการจำแนกพารามิเตอร์ของบ่อหลอม

3.1 การออกแบบการควบคุมแบบป้อนกลับ

รูปที่ 3 แสดงการควบคุมแบบพีไอดี ของระบบ โดยการปรับหาค่าความไว (Gain) K_p , K_i และ K_d ที่เหมาะสมความหนาขึ้นงานนั้นๆ ด้วยหลักการของซีกเกเลอร์-นิโคลส์ [9] ส่วนรูปที่ 4 แสดงไดอะแกรมการควบคุมพีไอดีแบบปรับค่าได้ (Adaptive PID) โดยเทคนิคดังกล่าวระบบควบคุมจะสามารถปรับค่าความไวได้เองแบบอัตโนมัติตามเงื่อนไขที่ตั้งไว้จากการพิจารณาค่าความผิดพลาด (Error) เทคนิคดังกล่าวได้ถูกนำมาประยุกต์ใช้ เพื่อลดค่าความผิดพลาดในสถานะคงตัว (Steady State Errors) และช่วงเวลาขึ้น (Rise time) ของระบบ โดยการควบคุมจะเปรียบเทียบกับจุดตั้งค่า (Set Point) กับค่าความผิดพลาด (Error) ความแตกต่างของสัญญาณในกรณีนี้ (ค่าความกว้างของภาพบ่อหลอม) ถูกนำมาคำนวณเพื่อใช้ในการควบคุมค่ากำลังวัตต์ของเลเซอร์ โดยการตอบสนองของข้อมูลอยู่ที่ 10 Hz โดยความแตกต่างของการควบคุมแบบพีไอดีกับการควบคุมพีไอดีแบบปรับค่าได้นั้นถูกนำมาใช้เพื่อเปรียบเทียบเสถียรภาพของการควบคุมและความคงที่ของแนวเชื่อม (Uniform Weld Bead)

3.2 การจำแนกพารามิเตอร์ของบ่อหลอม

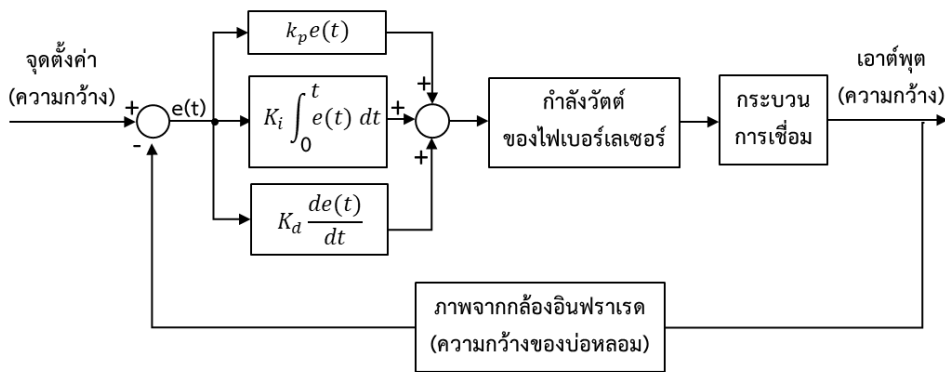
ในงานวิจัยนี้มุ่งเน้นพิจารณาบริเวณบ่อหลอมและคีย์โฮลด์ (Key Hole) ดังแสดงใน รูปที่ 5 (ข) โดยการตั้งค่าอุณหภูมิสำหรับแสดงรูปบ่อหลอมละลายที่สนใจในช่วง 900 - 1400 องศาเซลเซียส โดยเป็นการปรับตั้งตามผลที่เกิดระหว่างการทดลองซึ่งมีค่าความผิดพลาด (Error) น้อยและช่วยให้การนำภาพไปประมวลผลได้มีประสิทธิภาพดี ทั้งนี้ค่าเกณฑ์อุณหภูมิที่เหมาะสมจะขึ้นอยู่กับกระบวนการเชื่อม กำลังวัตต์ของเลเซอร์วัสดุและความหนาของวัสดุที่ใช้ ในที่นี้ได้ตั้งค่าช่วงอุณหภูมิดังกล่าวเพื่อใช้เป็นตัวแทนของช่วงการเกิดผลกระทบจากความร้อนจากผลการเชื่อมจำแนกด้วยสมการที่ (1) และทำการวิเคราะห์ภาพในเชิงตัวแปรนำเข้าของข้อมูลภาพต้นฉบับ ซึ่งมีการรับภาพมาจากกล้องถ่ายภาพมาจากซอฟต์แวร์ของ Optris PIX Connect และมีเพื่อตั้งค่ารูปแบบของอุณหภูมิและกำหนดสีในภาพเพื่อเป็นตัวแปรนำเข้าสำหรับป้อนเข้าสู่ระบบ เพื่อวัดความกว้างของระยะทางระหว่างขอบของภาพที่ตรวจพบในทิศทางเดียวกันภายในบริเวณสี่เหลี่ยมที่กำหนด (Clamp) ด้วยฟังก์ชันใน Ni Vision และวัดค่าลักษณะของวัตถุ (Particle Measurement)



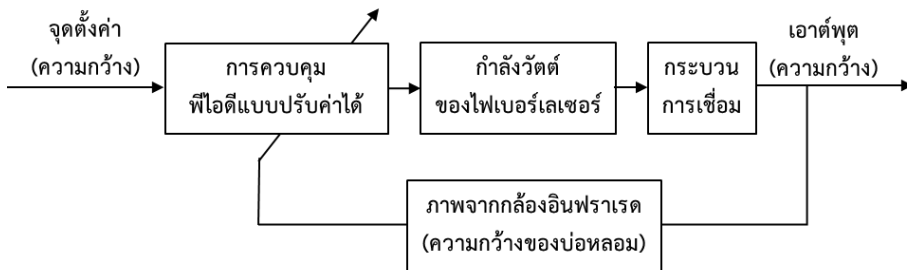
ซึ่งคือกลุ่มของพิกเซลที่อยู่ติดกันในภาพสองระดับสีที่นำมาใช้ในการบ่งบอกคุณสมบัติของพื้นที่ของบ่อหลอม ดังแสดงในรูปที่ 5 (ข) โดยมีขั้นตอนการประมวลผลภาพแสดงดังรูปที่ 6 เมื่อต้นแบบของภาพอุณหภูมิที่วัดได้ถูกนำมาสอบเทียบด้วยความบิดเบี้ยวของภาพโดยใช้ข้อมูลชุดจุดสมนัยกัน (Point Coordinates Calibration)

จากนั้นจึงใช้ข้อมูลการกระจายตัวของฮิสโทแกรมและตัวกรองความถี่ต่ำเพื่อการปรับปรุงคุณภาพของภาพในการลดสัญญาณรบกวนภายในภาพโดยไม่ทำให้ขอบวัตถุภายในภาพเบลอ ซึ่งแสดงถึงลักษณะของการปรับปรุงข้อมูลภายในภาพ หลังจากนั้นจึงทำการวัดขนาดความกว้างและพื้นที่ของบ่อหลอม

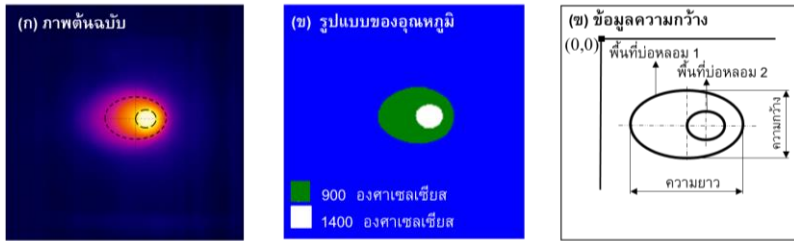
$$\text{Temperature profiles} = \begin{cases} \text{nonconsiderationzone} \leq 900 \\ \text{moltenpool} > 900 \\ \text{keyhole} > 1400 \end{cases} \quad (1)$$



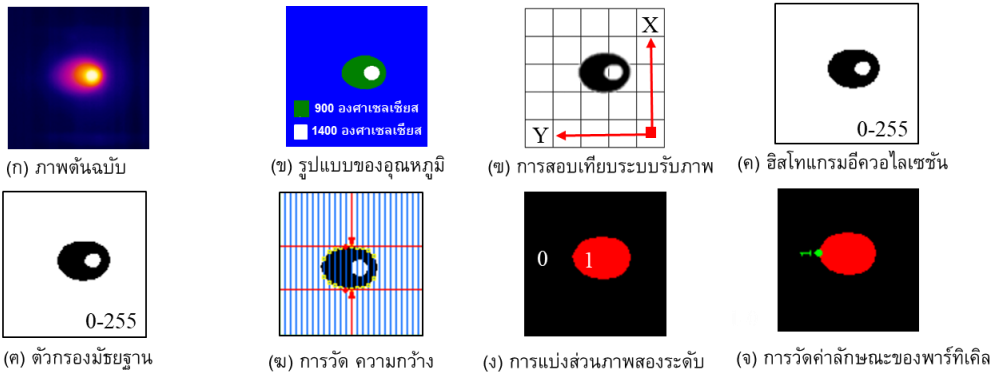
รูปที่ 3 ไดอะแกรมการควบคุมพีไอดี



รูปที่ 4 ไดอะแกรมการควบคุมพีไอดีแบบปรับค่าได้



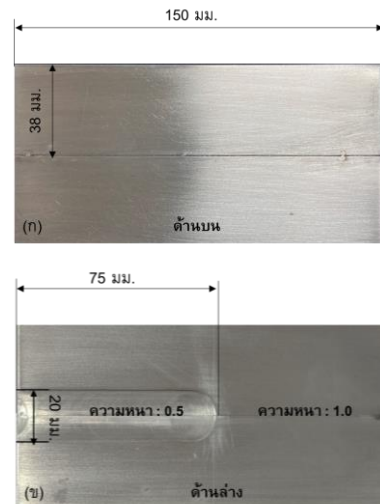
รูปที่ 5 ภาพบ่อหลอมและพารามิเตอร์ของบ่อหลอม



รูปที่ 6 ขั้นตอนการประมวลผลภาพ

4. ผลการทดลองและอภิปรายผลการทดลอง

ชิ้นงานที่นำมาศึกษาในงานวิจัยนี้ถูกออกแบบให้มีลักษณะความหนาไม่คงที่ที่มีลักษณะเปลี่ยนแปลงความหนาแบบขั้นบันได (ดังรูปที่ 7) โดยชิ้นงานผ่านกระบวนการกัด เพื่อใช้จำลองกระบวนการเชื่อมที่มีการเปลี่ยนแปลงความหนาของชิ้นงานที่อาจเกิดจากการออกแบบโดยตั้งใจหรือความไม่ตั้งใจของรูปลักษณะชิ้นงาน ถือว่าเป็นความท้าทายในด้านการควบคุมกำลังของไฟเบอร์เลเซอร์และเป็นการสร้างสิ่งรบกวนให้กับระบบควบคุม เพื่อศึกษาผลกระทบที่มีต่อการควบคุมและช่วยให้เข้มนักศึกษาคุณภาพของชิ้นงานที่มีความหนาแปรผันเป็นผลให้ได้งานเชื่อมที่มีคุณภาพ



รูปที่ 7 ชิ้นงานแบบเปลี่ยนแปลงความหนาแบบขั้นบันได (ก) ด้านบน (ข) ด้านล่าง



สำหรับการอภิปรายผลการทดลองถูกแบ่งออกเป็น 4 หัวข้อได้แก่หัวข้อ 4.1) การควบคุมแบบวงเปิด (No Feedback Control) เพื่อหาจุดตั้งค่า (Set Point) กรณีความหนาขึ้นงานคงที่ โดยการใช้ความหนาคงที่ 0.5 0.8 และ 1.0 มม. กำลังวัตต์ 100-500 วัตต์ โดยใช้ช่วงกำลังวัตต์ต่างกันครั้งละ 100 วัตต์ เพื่อหา กำลังวัตต์ที่เหมาะสมของแต่ละความหนาโดยการพิจารณาความคงที่ของแนวเชื่อมและการหลอมลึก (Full penetration) หลังจากนั้นจึงหาค่าความกว้างของบ่อหลอมที่เหมาะสมไปตั้งเป็นค่าจุดตั้งค่า (Setpoint) สำหรับการควบคุมแบบป้อนกลับด้วยพีไอดี (PID Feedback Control) ในหัวข้อ 4.2) กรณีความหนาขึ้นงานคงที่ โดยการใช้ความหนาคงที่ 0.5 0.8 และ 1.0 มม. เพื่อทดสอบประสิทธิภาพของแนวเชื่อมเมื่อใช้เทคนิคการป้อนกลับแบบ (PID) ซึ่งนำไปใช้ในหัวข้อ 4.3) การควบคุมแบบป้อนกลับด้วยพีไอดี (PID Feedback Control) กรณีมีการเปลี่ยนแปลงความหนาจาก 1.0 เป็น 0.5 มม. (1.0-0.5 มม.) และความหนาจาก 0.5 มม. เปลี่ยนแปลงไปเป็น 1.0 มม. (0.5-1.0 มม.) เพื่อทดสอบพฤติกรรมระหว่างเชื่อมที่มีความหนาไม่คงที่ นอกจากนั้นมีการเปรียบเทียบการควบคุมแบบพีไอดีแบบปรับค่าได้ของอัตราขยาย K_i (Adaptive PID) ในหัวข้อ 4.4) กรณีที่ความหนาของชิ้นงานแบบเปลี่ยนแปลงความหนา เพื่อควบคุมความกว้างให้มีความคงที่ที่มีการเปลี่ยนแปลงความหนาของชิ้นงานในระหว่างเส้นทางการเชื่อม

ในการศึกษานี้ ได้มีการนำค่าเฉลี่ยความกว้าง (Avg. Width) มาใช้เพื่อเป็นตัวแทนความกว้างของแนวเชื่อมที่เกิดขึ้นในช่วงต่างๆ และยังใช้ค่าส่วน

เบี่ยงเบนมาตรฐาน (S.D.) เพื่อเป็นตัวชี้วัดการแกว่งของความกว้างของแนวเชื่อม

4.1 การควบคุมแบบวงเปิด No feedback control เพื่อหาค่าจุดตั้งค่า Set point กรณี ความหนาขึ้นงานคงที่

รูปที่ 8 (ก) - (ค) แสดงค่าเฉลี่ยของความกว้าง (Avg. Width) และค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (S.D.) ของความหนา 0.5 0.8 และ 1.0 มม. ที่ได้จากการทดลองจากการเชื่อมที่กำลังวัตต์ต่าง ๆ และมีการแสดงผลกำลังวัตต์ต่อความกว้างแนวเชื่อมในทุกสภาวะดังรูปที่ 8 (ง) โดยเกณฑ์ในการพิจารณาเลือกเฉพาะชิ้นงานที่มีการหลอมลึกสมบูรณ์เท่านั้น โดยทำการสรุปผลความกว้างแนวเชื่อมที่มีการหลอมลึกสมบูรณ์ในแต่ละความหนาที่กำลังวัตต์ต่างๆ ไว้ในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ผลการทดลองการหาขนาดความกว้างของภาพบ่อหลอม ด้วยวิธีการควบคุมแบบวงเปิด

| ความหนา (มม.) | กำลัง (วัตต์) | | ความกว้างแนวเชื่อม ที่หลอมลึกสมบูรณ์ (มม.) | |
|-----------------------|------------------|--------|--|--------|
| | ต่ำสุด | สูงสุด | ต่ำสุด | สูงสุด |
| 0.5 | 200 | 500 | 5.48 | 9.65 |
| 0.8 | 300 | 500 | 5.19 | 6.61 |
| 1 | 400 | 500 | 6.75 | 7.31 |
| จุดตั้งค่า (Setpoint) | | | 5.80 | |

ค่าความกว้างที่ได้ ถูกนำมาหาเฉลี่ยเพื่อใช้เป็นตัวแทนจุดเริ่มต้นที่จะมาตั้งค่าหรือเรียกว่า จุดตั้งค่า (Setpoint) ในที่ค่าที่ได้คือ 5.80 มม. และจะสัมพันธ์กับการลากเส้นเปรียบเทียบโดยจะเป็นการทำการ



ลากเส้นประ (Dash Line) ของรูปที่ 8 (ง) เพื่อให้เห็นว่า ค่าตั้งกล่าวอยู่ในขอบเขตของที่เหมาะสมกับความหนาของชิ้นงานช่วง 0.5-1.0 มม. และใช้ค่าตั้งกล่าวไปตั้งเป็นจุดตั้งค่าในการควบคุมแบบป้อนกลับต่อไป

4.2 การควบคุมแบบป้อนกลับด้วยพีไอดี PID Feedback control กรณีความหนาชิ้นงานคงที่

รูปที่ 9 แสดงภาพความกว้างของแนวเชื่อมที่ได้จากการควบคุมแบบพีไอดีของชิ้นงานทั้ง 3 ความหนาที่มีการนำจุดตั้งค่าที่ได้จากหัวข้อ 4.1 มาประยุกต์ใช้ ซึ่งพบว่ามีการหลอมลึกที่สมบูรณ์ทั้งหมดและแนวเชื่อมค่อนข้างสม่ำเสมอ โดยรูปที่ 10 แสดงค่าความกว้างเฉลี่ยและค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานจากการวัดด้วยโปรแกรมประมวลผลภาพของชิ้นงานทั้ง 3 ความหนา และแสดงผลเปรียบเทียบค่าร้อยละความผิดพลาดจากจุดตั้งค่าที่ได้ในตารางที่ 2 ซึ่งพบว่าผลตอบสนองของระบบเมื่อการควบคุมด้วยตัวควบคุมพีไอดีทำให้มีค่า S.D. มีค่าน้อยกว่าเป็นผลให้ได้ความสม่ำเสมอของแนวเชื่อมที่ดีกว่ากว่าในกรณีการควบคุมแบบวงเปิดทุกกรณีและให้ค่าร้อยละความผิดพลาดจากจุดตั้งค่ามากที่สุดที่ร้อยละ 1.21 อีกทั้งระบบควบคุมมีเสถียรภาพและผลการ

ตอบสนองของเอาต์พุตเข้าสู่สถานะคงตัว โดยระบบจริงให้ผลเหมาะสมที่สุดกับงาน โดยข้อดีที่เหนือกว่าระบบการควบคุมแบบเปิดคือไม่จำเป็นต้องตั้งค่ากำลังของไฟเบอร์เลเซอร์ ระบบจะตัดสินใจจากความกว้างของภาพบ่อหลอมที่ป้อนกลับให้กับระบบควบคุมที่อ้างอิงจากจุดตั้งค่า

4.3 การควบคุมแบบป้อนกลับด้วยพีไอดี PID Feedback control กรณีความหนาชิ้นงานแบบเปลี่ยนแปลงความหนา

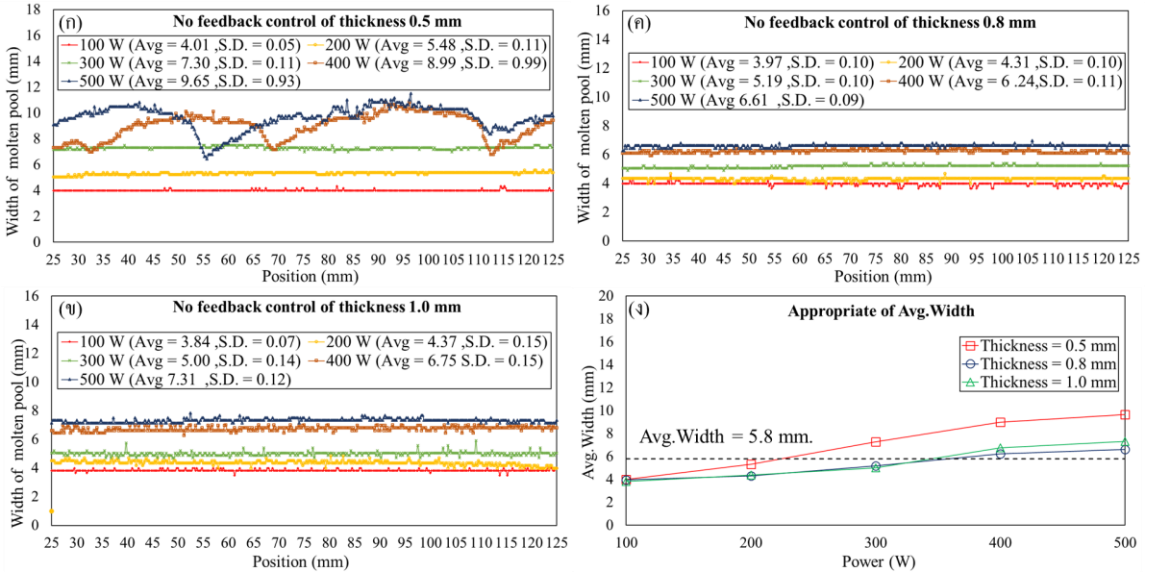
การควบคุมพีไอดีกรณีความหนาชิ้นงานแบบเปลี่ยนแปลงความหนาได้นำค่าอัตราขยายที่ได้จากการทดลองการเชื่อมชิ้นงานแบบความหนาคงที่ในหัวข้อที่ 4.2 มาประยุกต์ เพื่อทดสอบและแก้ไขสถานการณ์ที่มีความหนาของชิ้นงานไม่คงที่ เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงทางความร้อนในระหว่างการเชื่อม โดยมีการทดสอบทั้งสิ้น 4 สภาวะคือ ทิศทาง 0.5 มม. ไป 1.0 มม. และ 1.0 มม. ไป 0.5 มม. ที่นำค่าอัตราขยายของความหนา 0.5 มม. และ 1.0 มม. มาประยุกต์ใช้ในการเชื่อมดังแสดงผลการทดสอบในตารางที่ 3

ตารางที่ 2 ผลการทดลองการหาขนาดความกว้างของภาพบ่อหลอมด้วยวิธีการควบคุมแบบป้อนกลับกรณีความหนาคงที่

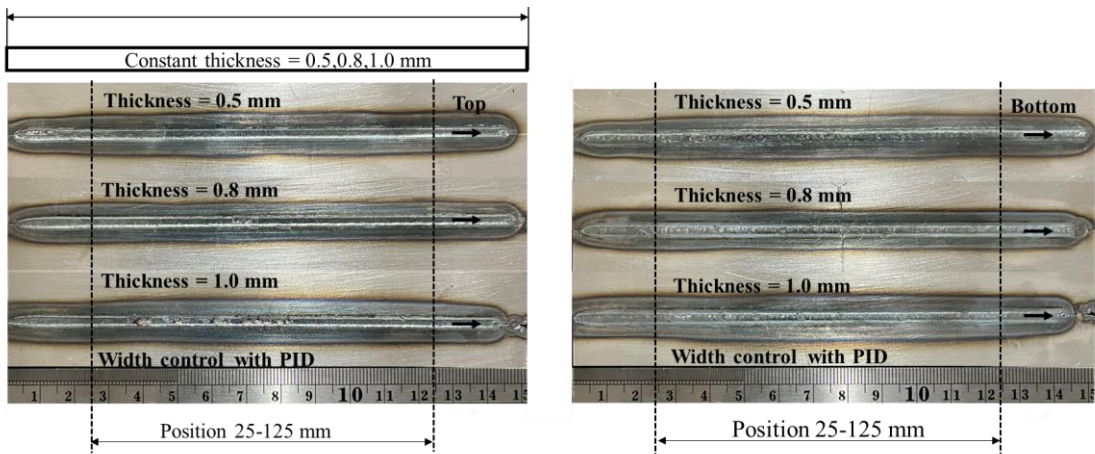
| ความหนา | Avg. width | S.D. | ร้อยละความผิดพลาดจากจุดตั้งค่า | กำลังขยาย |
|---------|------------|------|--------------------------------|-------------------------------|
| 0.5 | 5.87 | 0.08 | 1.21 | $K_p=0.5, K_i=0.045, K_d=0.5$ |
| 0.8 | 5.79 | 0.07 | 0.17 | $K_p=1.0, K_i=0.08, K_d=0.5$ |
| 1 | 5.75 | 0.06 | 0.86 | $K_p=1.0, K_i=0.08, K_d=0.5$ |



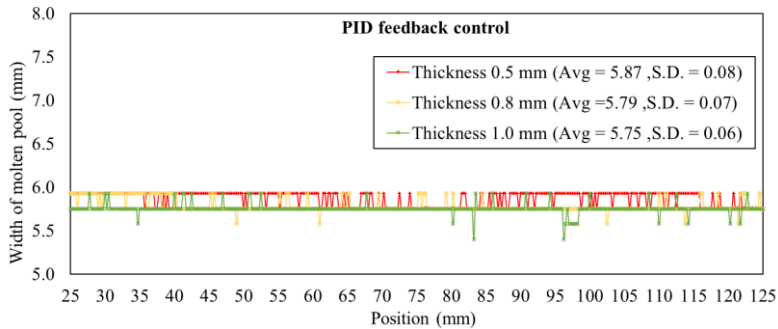
บทความวิจัย



รูปที่ 8 ความกว้างภาพพอลหลอมด้วยการควบคุมแบบวงเปิด ด้วยกำลังวัตต์ 100, 200, 300, 400 และ 500 วัตต์ (ก) งานหนา 0.5 มม. (ข) งานหนา 0.8 มม. (ค) งานหนา 1.0 มม. และ (ง) ค่าความกว้างเฉลี่ย (Avg. Width)



รูปที่ 9 ภาพแนวเชื่อมของชิ้นงานหนา 0.5, 0.8 และ 1.0 มม. จากการเชื่อมเลเซอร์ด้วยการควบคุมแบบพีไอดี ตั้งค่า จุดตั้งค่า (Setpoint) 5.80 มม. (ซ้าย) ด้านบน (ขวา) ด้านล่าง



รูปที่ 10 ค่าความกว้างเฉลี่ยและค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของการเชื่อมชิ้นงานที่มีความหนาคงที่

ตารางที่ 3 ผลการทดลองด้วยวิธีการควบคุมแบบป้อนกลับพีไอดี กรณีความหนาชิ้นงานแบบเปลี่ยนแปลงความหนา

| ความหนา | Avg. width | S.D. | ร้อยละความผิดพลาดจากจุดตั้งค่า | กำลังขยาย |
|-----------|------------|------|--------------------------------|-------------------------------|
| 0.5 – 1.0 | 5.76 | 0.31 | 0.69 | $K_p=1.0, K_i=0.08, K_d=0.5$ |
| 1.0 – 0.5 | 5.87 | 0.36 | 1.21 | $K_p=1.0, K_i=0.08, K_d=0.5$ |
| 0.5 – 1.0 | 5.71 | 0.40 | 1.55 | $K_p=0.5, K_i=0.045, K_d=0.5$ |
| 1.0 – 0.5 | 6.00 | 0.36 | 3.45 | $K_p=0.5, K_i=0.045, K_d=0.5$ |

โดยรูปที่ 11 (ก) และ 11 (ข) แสดงผลของค่าเฉลี่ยความกว้างและค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน และอัตราการใช้กำลังวัตต์โดยทิศทาง 0.5 ไป 1.0 มม. และทิศทาง 1.0 ไป 0.5 มม. ตามลำดับ ที่ใช้อัตราขยายของชิ้นงานความหนาคงที่ 1.0 มม. นอกจากนี้ รูปแนวเชื่อมทั้งสองทิศทางถูกแสดงไว้ในรูปที่ 12 (ก) และ 12 (ข) จากทั้งสองสภาวะให้ผลค่าเฉลี่ยความกว้างและร้อยละความผิดพลาดจากจุดตั้งค่าไม่แตกต่างจากกรณีความหนาคงที่แต่ให้ผลความเบี่ยงเบน (S.D.) มีค่าสูงขึ้น (จากหัวข้อ 4.2) เมื่อพิจารณาผลความเบี่ยงเบนในช่วงความหนา 0.5 มม. พบว่าแนวเชื่อมมีลักษณะไม่คงที่มีอัตราการแกว่งที่สูงกว่าช่วงความหนา 1.0 มม. ของทั้งสองสภาวะ เนื่องด้วยค่าอัตราขยายที่นำมาใช้เหมาะกับเฉพาะช่วงความหนา 1.0 มม.

โดยรูปที่ 13 (ก) และ 13 (ข) แสดงผลของค่าเฉลี่ยความกว้างและค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน และอัตราการใช้กำลังวัตต์โดยทิศทาง 0.5 ไป 1.0 มม. และทิศทาง 1.0 ไป 0.5 มม. ตามลำดับ ที่ใช้อัตราขยายของชิ้นงานความหนาคงที่ 0.5 มม. นอกจากนี้รูปแนวเชื่อมทั้งสองทิศทางถูกแสดงไว้ในรูปที่ 14 (ก) และ 14 (ข) ทั้งสองกรณี พบว่าความกว้างของแนวเชื่อมมีความคงที่ แต่เมื่อพิจารณาในช่วงเปลี่ยนแปลงความหนาของชิ้นงานมีอัตราการเปลี่ยนแปลงสูงเป็นผลให้ความกว้างที่ได้ลดลงในกรณีทิศทาง 0.5 ไป 1.0 มม. และความกว้างเพิ่มขึ้นในกรณีทิศทาง 1.0 ไป 0.5 มม. อันเนื่องมาจากเป็นช่วงการเปลี่ยนแปลงความหนาและระบบยังไม่สามารถตอบสนององกำลังวัตต์ได้เร็วเพียงพอที่จะเข้าสู่จุดตั้งค่าและระบบใช้เวลาในการเข้าสู่สภาวะคงตัวช้า สังเกตได้จากช่วงตำแหน่งความยาว

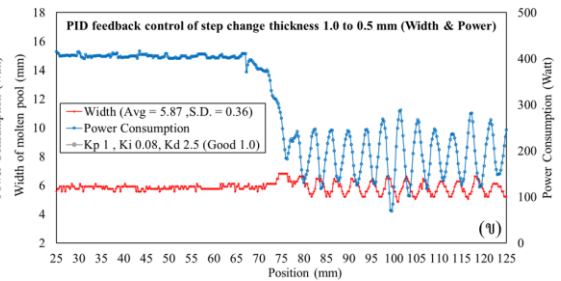
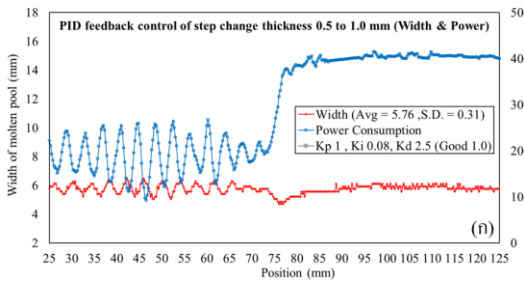


บทความวิจัย

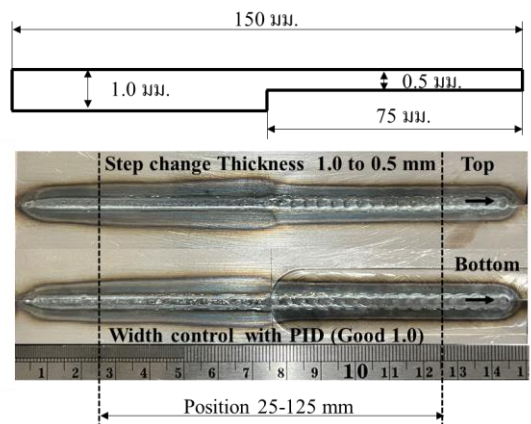
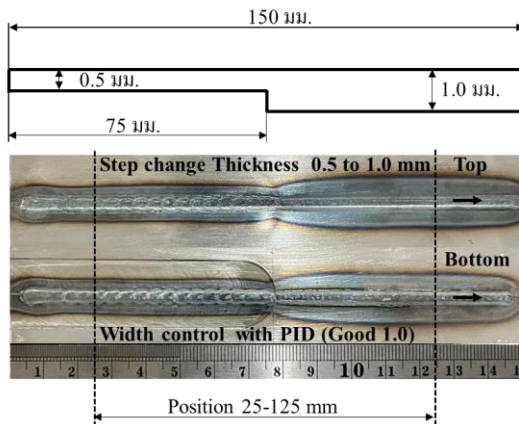
ตั้งแต่ 75 มม. ถึง 85 มม. เนื่องด้วยค่าอัตราขยายที่นำมาใช้เหมาะกับเฉพาะช่วงความหนา 0.5 มม.

จากผลการทดลองในหัวข้อนี้พบว่า การเปลี่ยนแปลงความหนานั้นส่งผลกระทบต่อเสถียรภาพของการ

ควบคุมพีไอดี ที่ใช้ความไวเพื่อเข้าหาจุดตั้งค่าจากอัตราขยายแบบคงที่เป็นอย่างมาก ส่งผลกระทบต่อความคงที่ของความกว้างแนวเชื่อม



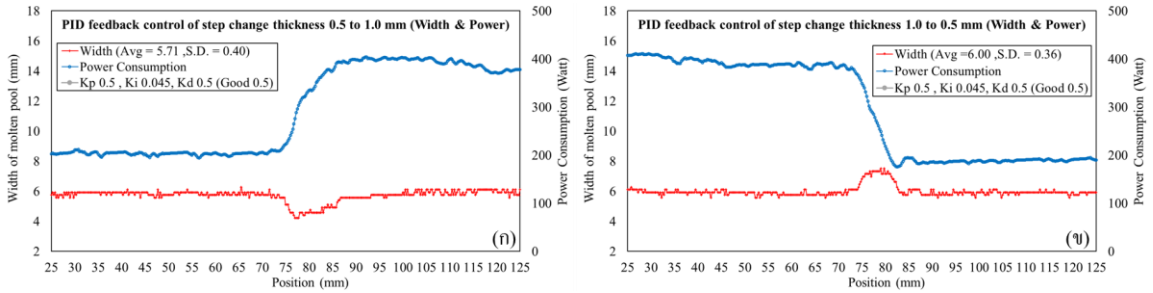
รูปที่ 11 ความกว้างเฉลี่ยกับค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานและอัตราการใช้กำลังวัตต์ด้วยการควบคุมพีไอดี (ค่า K_p 1, K_i 0.08, K_d 2.5) ของชิ้นงานแบบเปลี่ยนแปลงความหนา (ก) ทิศทาง 0.5 ถึง 1.0 มม. (ข) ทิศทาง 1.0 ถึง 0.5 มม.



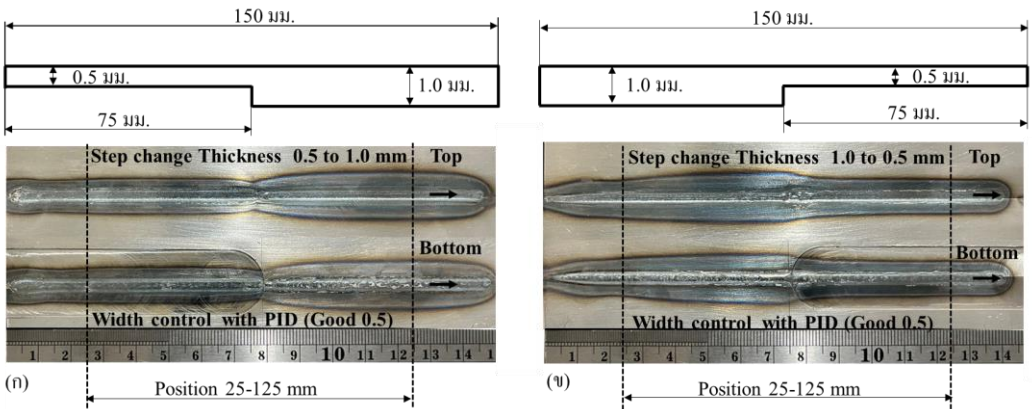
รูปที่ 12 ภาพแนวเชื่อมของชิ้นงานแบบเปลี่ยนแปลงความหนา จากการเชื่อมเลเซอร์ด้วยการควบคุมแบบพีไอดี ตั้งค่า จุดตั้งค่า (Setpoint) 5.80 มม. (ค่า K_p 1, K_i 0.08, K_d 2.5)



บทความวิจัย



รูปที่ 13 ความกว้างเฉลี่ยกับค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานและอัตราการใช้กำลังวัตต์ ของการควบคุมพีไอดี (ค่า K_p 0.5, K_i 0.045, K_d 0.5) ของชิ้นงานแบบเปลี่ยนแปลงความหนา (ก) ทิศทาง 0.5 ถึง 1.0 มม. (ข) ทิศทาง 1.0 ถึง 0.5 มม.



รูปที่ 14 ภาพแนวเชื่อมของชิ้นงานแบบเปลี่ยนแปลงความหนา จากการเชื่อมเลเซอร์ด้วยการควบคุมแบบพีไอดี ตั้งค่า จุดตั้งค่า (Setpoint) 5.80 มม. (ค่า K_p 0.5, K_i 0.045, K_d 0.5)

4.4 การควบคุมพีไอดีแบบปรับค่าได้ของอัตราขยาย K_i Adaptive PID กรณีความหนาชิ้นงานแบบเปลี่ยนแปลงความหนา

ผลการทดลองในหัวข้อที่ 4.2 และ 4.3 พบว่าอัตราขยายที่เหมาะสมของการใช้งานการควบคุมพีไอดีกับระบบที่ใช้ในการเชื่อมชิ้นงาน ความหนาช่วง 0.5 – 1.0 มม. แสดงในตารางที่ 4 พบว่าค่า (K_i) มีอิทธิพลต่อผลตอบสนองของระบบควบคุมเป็นอย่างดี

มาก โดยเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความหนาในระหว่างการเชื่อมเลเซอร์ หากใช้ค่า (K_i) คงที่จะทำให้ระบบมีการตอบสนองช้ามากจึงทำให้แนวเชื่อมมีความกว้างไม่คงที่ อีกทั้งอาจทำให้เวลาเข้าสู่สมดุลช้าเกินไป ทั้งนี้การเปลี่ยนแปลงค่า (K_i) ควรมีการเปลี่ยนแปลงให้สอดคล้องกับความผิดพลาดของความกว้างที่ผิดเพี้ยนไปจากจุดตั้งค่าอย่างเป็นสัดส่วนในช่วงค่า (K) ที่ยอมรับได้ของระบบโดยเรียกค่าช่วงที่ยอมรับได้นี้ว่า



ค่าสัมประสิทธิ์ตัวคูณค่ากำลังขยาย (K_f) โดยเป็นค่าระหว่างค่าสัมประสิทธิ์ (K_i) มากสุด (K_{max}) กับ (K_i) น้อยสุด (K_{min}) โดยนำมาเทียบช่วงดังกล่าวให้เป็นสัดส่วน 100 % ดังสมการที่ 2

จากนั้นทำการนำการคำนวณหาค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดของความกว้าง (ΔW_{error}) ได้จากสัดส่วนของจุดตั้งค่า (S) ต่อค่าปัจจุบัน (P) ได้จากสมการที่ 3

ดังนั้นสามารถหาค่า (K_i) ที่เกิดจากความผิดพลาดของความกว้าง ($\Delta K_{i(error)}$) ที่เป็นสัดส่วนระหว่างค่าสัมประสิทธิ์ตัวคูณค่ากำลังขยายกับค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดของความกว้างได้ดังสมการที่ 4

ทั้งนี้ค่า (K_i) แบบปรับค่าได้ที่นำมาใช้ในระบบ ($K_{i(Adaptive)}$) เกิดจากการชดเชยค่า (K_i) ที่เกิดจาก

ความผิดพลาดของความกว้าง (K_i) น้อยสุดที่ยอมรับได้ในระบบดังสมการที่ 5

โดยในที่นี้ได้แสดงการจำลองการคำนวณสมภาวะที่เกิดขึ้นในช่วงของค่าความกว้างปัจจุบัน (P) และนำไปคำนวณเป็นค่า (K_i) แบบปรับค่าได้ที่จะนำมาใช้ในระบบ ($K_{i(Adaptive)}$) ในตารางที่ 5

$$K_f = \frac{K_{max} - K_{min}}{100} \tag{2}$$

$$\Delta W_{error} = \frac{S-P}{P} \times 100 \tag{3}$$

$$\Delta K_{i(error)} = \Delta W_{error} \times K_f \tag{4}$$

$$K_{i(Adaptive)} = K_{i(0)} + \Delta K_{i(error)} \tag{5}$$

ตารางที่ 4 ช่วงค่าอัตราขยายสำหรับควบคุมป้อนกลับพีไอดีแบบปรับค่าได้ ของชิ้นงานแบบเปลี่ยนแปลงความหนา

| ค่ากำลังขยาย | K | K_{max} | $K_{min}(K_{i(0)})$ | K_f |
|--------------|------------|-----------|---------------------|---------|
| K_p | 0.5 | - | - | - |
| K_i | 0.045-0.08 | 0.08 | 0.045 | 0.00035 |
| K_d | 0.5 | - | - | - |

ตารางที่ 5 แสดงการจำลองผลการคำนวณค่ากำลังขยายด้วยวิธีควบคุมป้อนกลับพีไอดีแบบปรับค่าได้

| K_{max} | K_{min} | S | P | K_f | ΔW_{error} | $\Delta K_{i(error)}$ | $K_{i(Adaptive)}$ |
|-----------|-----------|-----|-----|---------|--------------------|-----------------------|-------------------|
| 0.08 | 0.045 | 5.8 | 5.6 | 0.00035 | 3.44828 | 0.00121 | 0.04621 |
| 0.08 | 0.045 | 5.8 | 5.7 | 0.00035 | 1.72414 | 0.00060 | 0.04560 |
| 0.08 | 0.045 | 5.8 | 5.8 | 0.00035 | 0.00000 | 0.00000 | 0.04500 |
| 0.08 | 0.045 | 5.8 | 5.9 | 0.00035 | -1.72414 | -0.00060 | 0.04440 |
| 0.08 | 0.045 | 5.8 | 6.0 | 0.00035 | -3.44828 | -0.00121 | 0.04379 |



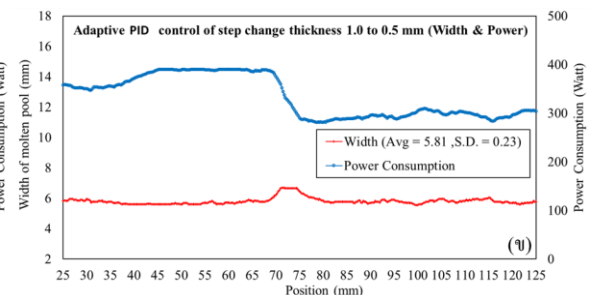
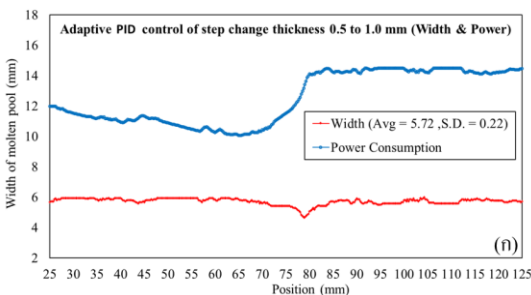
การควบคุมพีไอดีแบบปรับค่าได้ กรณีความหนา
ชิ้นงานแบบเปลี่ยนแปลงความหนา มีการนำมาใช้เพื่อ
แก้ไขสถานการณ์ที่มีความหนาที่มีการเปลี่ยนแปลง
กะทันหันของชิ้นงานที่ไม่คงที่ และเพื่อควบคุม
ความกว้างของแนวเชื่อมให้มีความสม่ำเสมอ และช่วย
ปรับปรุงเสถียรภาพของระบบนำไปสู่การตอบสนองที่
เร็วขึ้น ก่อนที่ระบบจะเข้าสู่สภาวะเสถียร (Steady-state)

รูปที่ 15 (ก) และ 15 (ข) แสดงความกว้างเฉลี่ยกับ
ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานและอัตราการใช้
กำลังวัตต์ ของการควบคุมพีไอดีแบบปรับค่าได้ของ
ชิ้นงานความหนาแบบเปลี่ยนแปลงความหนา
ทิศทาง 0.5 ถึง 1.0 มม. และ 1.0 ถึง 0.5 มม.
ตามลำดับ และแสดงผลเปรียบเทียบในตารางที่ 6

ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าค่าความกว้างเฉลี่ย
และร้อยละความผิดพลาดจากจุดตั้งค่าของ
การควบคุมพีไอดีแบบปรับค่าได้มีค่าไม่แตกต่างจาก

ตารางที่ 6 ผลการทดลองด้วยวิธีการควบคุมแบบป้อนกลับพีไอดีแบบปรับค่าได้ กรณีความหนาชิ้นงานแบบ
เปลี่ยนแปลงความหนา

| ความหนา | Avg. Width | S.D. | ร้อยละความผิดพลาดจากจุดตั้งค่า |
|-----------|------------|------|--------------------------------|
| 0.5 - 1.0 | 5.72 | 0.22 | 1.38 |
| 1.0 - 0.5 | 5.81 | 0.23 | 0.17 |



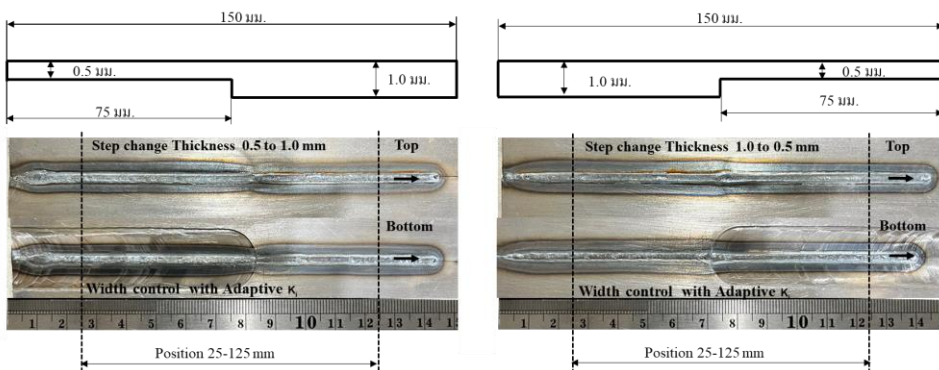
รูปที่ 15 ความกว้างเฉลี่ยกับค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานและอัตราการใช้กำลังวัตต์ ของการควบคุมพีไอดีแบบปรับค่าได้
ของชิ้นงานความหนาแบบการไล่ความหนา (ก)ทิศทาง 0.5 ถึง 1.0 มม. (ข) ทิศทาง 1.0 ถึง 0.5 มม.



และรักษาความกว้างแนวเชื่อมได้สม่ำเสมอมากกว่าแบบการควบคุมแบบป้อนกลับด้วยพีไอดีด้วยค่าอัตราขยายคงที่ นอกจากนี้เมื่อพิจารณากำลังวัตต์ของกรณีการควบคุมพีไอดีแบบปรับค่าได้ (รูปที่ 15 (ก) และ 15 (ข)) พบว่ามีความคงที่และไม่เกิดการแกว่งของการควบคุมกำลังวัตต์ของไฟเบอร์เลเซอร์แสดงให้เห็นว่ามีเสถียรภาพของการควบคุมที่ดีกว่าการควบคุมแบบพีไอดีแบบคงที่ ในส่วนนี้ถือว่าสอดคล้องกับงานวิจัยของ Alex Božič และคณะ [13] ที่ระบบพีไอดีใช้ร่วมกับโครงข่ายประสาทแบบคอนโวลูชันในการควบคุมกำลังของเครื่องเชื่อมเลเซอร์แบบสั่งการระยะไกลโดยให้ผลกับประสิทธิภาพของระบบสั่งการและเวลาตอบสนองของสัญญาณที่ดีขึ้น ซึ่งชี้ให้เห็นว่าการเลือกระบบป้อนกลับที่เหมาะสมสามารถเพิ่มประสิทธิภาพของการควบคุมได้เป็นอย่างดี

การเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของความกว้างและค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน จากการเชื่อมในเงื่อนไขของความหนาชิ้นงานแบบเปลี่ยนแปลงความหนา ระหว่างการควบคุมพีไอดี กับการควบคุมพีไอดีแบบปรับค่าได้ แสดงในรูปที่ 17 (ก) และ ในรูปที่ 17 (ข) ซึ่งพบว่า

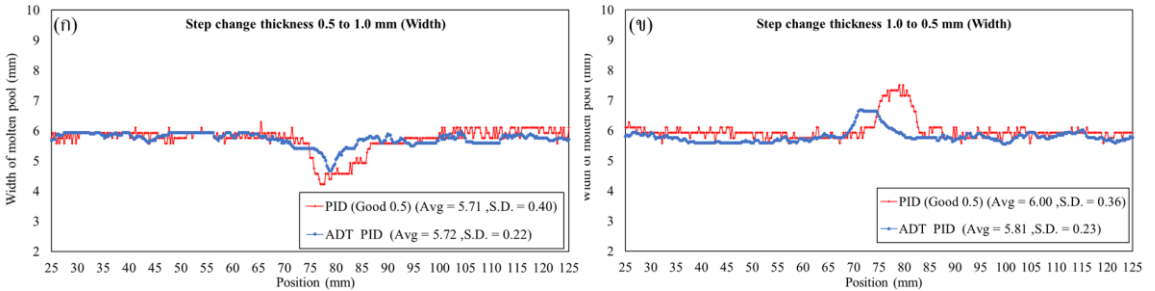
การควบคุมควบคุมพีไอดีแบบปรับค่าได้สามารถควบคุมให้ขนาดความกว้างของแนวเชื่อมได้คงที่มากกว่า โดยการพิจารณาจากค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน ทิศทาง 0.5 ไป 1.0 มม. มีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานต่ำกว่าอยู่ 0.18 และทิศทาง 1.0 ไป 0.5 มม. มีค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานต่ำกว่าอยู่ 0.13 ดังนั้นแสดงว่าการตอบสนองที่ไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลา (Transient Response) ของการควบคุมพีไอดีแบบปรับค่า โดยมีผลการตอบสนองเร็วขึ้นจนเริ่มเข้าไปอยู่ในช่วงจุดตั้งค่าของความกว้างที่กำหนด และค่าความผิดพลาดค่อนข้างต่ำกว่าแสดงถึงประสิทธิภาพของระบบที่ดีของการควบคุม ซึ่งผลการทดลองยังสอดคล้องกับงานวิจัยของ Guodong Peng และคณะ [14] ที่ใช้วิธีการควบคุมความกว้างของแนวเชื่อมแบบทันทีร่วมกับและใช้การควบคุมวงปิดด้วยระบบวิทัศน์ที่สามารถรักษาความกว้างแนวเชื่อม ได้อย่างมีประสิทธิภาพและการตอบสนองที่รวดเร็วของระบบ อีกทั้งยังรักษาโอเวอร์ชูตไม่ให้มีค่าสูงเกินไปอีกด้วย



รูปที่ 16 ภาพแนวเชื่อมของชิ้นงานหนาแบบเปลี่ยนแปลงความหนา จากการเชื่อมเลเซอร์ด้วยการควบคุมแบบพีไอดีแบบปรับค่าได้ ตั้งค่า จุดตั้งค่า (Setpoint) 5.80 มม



บทความวิจัย



รูปที่ 17 การเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของความกว้างและค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานจากการเชื่อมในเงื่อนไขความหนาชิ้นงานแบบเปลี่ยนแปลงความหนา ระหว่างการควบคุมพีไอดี กับการควบคุมพีไอดีแบบปรับค่าได้

5. สรุปผลการทดลอง

ในการศึกษานี้ได้นำเสนอการควบคุมคุณภาพรอยเชื่อมแบบทันทีของกระบวนการเชื่อมเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำด้วยไฟเบอร์เลเซอร์ที่มีความหนาต่างกันระหว่าง 0.5 มม. ถึง 1.0 มม. โดยใช้การประมวลผลภาพอินฟราเรดในการวิเคราะห์ภาพของบ่อหลอมระหว่างกระบวนการเชื่อมและส่งข้อมูลเป็นข้อมูลนำเข้าให้ระบบควบคุมแบบป้อนกลับพีไอดีแบบปรับค่าได้ (Adaptive PID) เพื่อควบคุมความกว้างของแนวเชื่อมให้มีความสม่ำเสมอ (Uniform Weld Bead) จากการนำสัญญาณภาพจากกล้องอินฟราเรดเป็นตัวแปรนำเข้าหลัก และหาจุดตั้งค่าที่เหมาะสม (ในการศึกษานี้ให้ผล 5.8 มม.) เพื่อใช้อ้างอิงเป็นจุดตั้งค่าเริ่มต้นสำหรับนำมาใช้กับระบบป้อนกลับที่ใช้ในการควบคุมความกว้างของบ่อหลอม พบว่าผลการวิจัยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

- กรณีชิ้นงานความหนาคงที่ที่ใช้การควบคุมแบบพีไอดีแบบมีจุดตั้งค่า ให้ผลของความสม่ำเสมอของความกว้างแนวเชื่อมที่ดี โดยมีค่าร้อยละความผิดพลาดจากจุดตั้งค่าไม่เกินร้อยละ 1.21

- กรณีชิ้นงานแบบเปลี่ยนแปลงความหนาที่ควบคุมพีไอดีแบบอัตราขยายคงที่ให้ยังให้ผลแนวเชื่อมไม่คงที่ อันเนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงความหนานั้นส่งผลกระทบต่อเสถียรภาพของการควบคุมพีไอดี ที่ใช้ความไวเพื่อเข้าหาจุดตั้งค่าจากอัตราขยายแบบคงที่เป็นอย่างมาก ส่งผลกระทบต่อความคงที่ของความกว้างแนวเชื่อม

- กรณีชิ้นงานแบบเปลี่ยนแปลงความหนาที่ควบคุมพีไอดีแบบปรับค่าได้ในกรณีการปรับค่า K_c มาประยุกต์ร่วม พบว่าความกว้างของแนวเชื่อมมีความสม่ำเสมอและมีการตอบสนองเร็วขึ้น โดยผลของค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (S.D.) ของแนวเชื่อมดีกว่าการควบคุมแบบป้อนกลับด้วยพีไอดี โดยให้ผลในการลดค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานต่ำกว่า 0.18 และให้ผลร้อยละความผิดพลาดจากจุดตั้งค่าไม่เกินร้อยละ 1.38 อีกทั้งให้ความแม่นยำไม่เกิน ± 1.0 มม. จากจุดตั้งค่า

- จากการศึกษานางานวิจัยนี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการเชื่อมชิ้นงานที่มีความหนาเปลี่ยนแปลงเพื่อให้ยังคงรักษาคุณภาพของแนวเชื่อมในระหว่างกระบวนการได้ดีเป็นผลให้เข้าสู่สภาวะสมดุล



เร็วกว่าและรักษาความกว้างแนวเชื่อมได้สม่ำเสมอ และเมื่อพิจารณากำลังวัตต์ของกรณีการควบคุมพีไอดีแบบปรับค่าได้นั้น มีความคงที่และไม่เกิดการแกว่งของการควบคุมกำลังวัตต์ของไฟเบอร์เลเซอร์ แสดงให้เห็นว่ามีเสถียรภาพของการควบคุมที่ดี

นอกจากนี้ งานวิจัยในอนาคตยังสามารถนำระบบดังกล่าวไปใช้ประยุกต์กับความหนาวัสดุ งานเชื่อมที่ต่างออกไป หรือผสมผสานระบบตัดสีนใจ อาทิ ตรรกศาสตร์คลุ่มเครือและโครงข่างประสาทเทียม โดยมีการใช้ร่วมกับการตรวจสอบคุณภาพเชิงลึกในดำเนินงานเชื่อม

6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณ Center of Innovation in Design and Engineering for Manufacturing (CoI-DEM), KMUTNB” ให้ความอนุเคราะห์เอื้อเฟื้อสถานที่และอุปกรณ์ในการเชื่อมเลเซอร์และแขนกล

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] D.Y. You, X.D Gao and S. Katayama, Review of laser welding monitoring, Science and Technology of Welding and Joining, 2014, 19(3), 181-201.
- [2] J. Stavridis, A. Papacharalampopoulos and P. Stavropoulos, Quality assessment in laser welding: a critical review. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2018, 94, 1825-1847.
- [3] W. Huang, and R. Kovacevic, Feasibility study of using acoustic signals for online monitoring of the depth of weld in the laser welding of high-strength steels. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, 2009, 223(4), 343-361.
- [4] W. Meng, X. Yin, J. Fang, L. Guo, Q. Ma and Z. Li, Dynamic features of plasma plume and molten pool in laser lap welding based on image monitoring and processing techniques, Optics and Laser Technology, 2019, 109, 168-177.
- [5] A.R. Konuk, R.G. Aarts, A.J. Huis, T. Sibillano, D. Rizzi and A. Ancona, Process control of stainless steel laser welding using an optical spectroscopic sensor, Physics Procedia, 2011, 12, 744-751.
- [6] M. Xia, E. Biro, Z. Tian and Y.N. Zhou, Effects of heat input and martensite on HAZ softening in laser welding of dual phase steels, ISIJ international, 2008, 48(6), 809-814.
- [7] M. Xia, Z. Tian, L. Zhao, and Y.N. Zhou, Fusion zone microstructure evolution of Al-alloyed TRIP steel in diode laser welding, Materials transactions, 2008, 49(4), 746-753.



- [8] Z. Gu, S. Yu, L. Han, X. Li, and H. Xu, Influence of welding speed on microstructures and properties of ultra-high strength steel sheets in laser welding, *ISIJ international*, 2012, 52(3), 483-487.
- [9] M. Kushwah, and A. Patra, PID controller tuning using Ziegler-Nichols method for speed control of DC motor, *International Journal of Scientific Engineering and Technology Research*, 2014, 3(13), 2924-2929.
- [10] B. Kaewprachum, and P. Srisungsitthisunti, Real-time process monitoring of laser welding by infrared camera and image processing, *Key Engineering Materials*, 2020, 856, 160-168.
- [11] Y.W. Huang, P.C. Tung and C.Y. Wu, Tuning PID control of an automatic arc welding system using a SMAW process, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2007, 34, 56-61.
- [12] W. Mao, S. Li, P. Liu and J. Xue, Study on double-pulse welding process of aluminum alloy based on fuzzy self-tuning of PID parameters, *12th International Conference on Intelligent Human-Machine Systems and Cybernetics (IHMSC)*, Proceeding, 2020, 1, 167-170.
- [13] A. Božič, M. Kos and M. Jezeršek, Power control during remote laser welding using a convolutional neural network, *Sensors*, 2020, 20(22), 6658.
- [14] G. Peng, B. Chang, G. Wang, Y.Gao, R. Hou, S. Wang and D. Du, Vision sensing and feedback control of weld penetration in helium arc welding process, *Journal of Manufacturing Processes*, 2021, 72, 168-178.



อิทธิพลของสภาวะการบ่มต่อกำลังของมอร์ตาร์ที่ใช้วัสดุประสานกระตุ้น ด้วยต่างจากเถ้านหินแคลเซียมสูงและเถ้านหินแคลเซียมต่ำ

อภิวิชญ์ ทองรักษา¹ เซาฟีร์ ดือราแม*¹ สิริชัย เพชรรุ่ง¹ อรรถเดช อับดุลมาติน² และ
ทวิช กล้าแท้³

¹ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ

² ภาควิชาวิศวกรรมโยธา, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยนราธิวาสราชนครินทร์

³ หลักสูตรวิชาวิศวกรรมโยธา, วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรมและการจัดการ,
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย

* ผู้ประสานงานเผยแพร่ (Corresponding Author), E-mail: Saofee.d@mail.rmutk.ac.th

วันที่รับบทความ: 14 มิถุนายน 2566; วันที่ทบทวนบทความ: 15 สิงหาคม 2566; วันที่ตอบรับบทความ: 3 ตุลาคม 2566

วันที่เผยแพร่ออนไลน์: 24 ธันวาคม 2566

บทคัดย่อ: งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลการบ่มต่อการพัฒนา กำลังอัดของมอร์ตาร์ที่ใช้วัสดุประสานกระตุ้น
ด้วยต่างจากเถ้านหินที่มีองค์ประกอบของแคลเซียมที่ต่างกัน ได้แก่ การใช้เถ้านหินเถ้าแคลเซียมสูงและการใช้
เถ้านหินแคลเซียมสูงร่วมกับเถ้านหินแคลเซียมต่ำ ทำการศึกษาระยะเวลาการก่อตัว และการพัฒนา กำลังอัด
ของมอร์ตาร์ที่ทำจากวัสดุประสานกระตุ้นด้วยต่างที่ทำการบ่มอุณหภูมิห้องและบ่มด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 80 องศา
เซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากผลการทดสอบ พบว่า ปริมาณแคลเซียมในองค์ประกอบของ สารตั้งต้นส่งผลต่อ
การก่อตัวที่เร็วขึ้น โดยการใช้วัสดุประสานจากเถ้านหินแคลเซียมสูงร่วมกับเถ้านหินแคลเซียมต่ำมีระยะเวลา
การก่อตัวนานกว่าการใช้เถ้านหินแคลเซียมสูง การใช้เถ้านหินที่มีปริมาณของแคลเซียมสูงเป็นวัสดุประสาน
กระตุ้นด้วยต่างสามารถพัฒนา กำลังอัดได้ดีกว่าการใช้เถ้านหินแคลเซียมสูงร่วมกับเถ้านหินที่มีปริมาณ
แคลเซียมต่ำเมื่อบ่มที่อุณหภูมิห้อง เมื่อมีการบ่มด้วยความร้อนอุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 ชั่วโมง
พบว่า มอร์ตาร์จากเถ้านหินกระตุ้นด้วยต่างที่ใช้เถ้านหินแคลเซียมสูงร่วมกับเถ้านหินที่มีปริมาณแคลเซียม
ต่ำเป็นสารตั้งต้นสามารถพัฒนา กำลังอัดได้ดีกว่ามอร์ตาร์ที่ใช้เถ้านหินแคลเซียมสูงเป็นสารตั้งต้นเพียงอย่างเดียว โดย
มอร์ตาร์ที่ใช้เถ้านหินแคลเซียมสูงร่วมกับเถ้านหินแคลเซียมต่ำในอัตราส่วน 50:50 และบ่มด้วยความร้อนมี
กำลังอัดเท่ากับ 151, 168, 187 และ 189 กก/ซม² ที่อายุ 7, 28, 45 และ 60 วัน ตามลำดับ

คำสำคัญ: วัสดุประสานกระตุ้นด้วยต่าง; เถ้านหินแคลเซียมสูง; เถ้านหินแคลเซียมต่ำ; กำลังอัด; การบ่มด้วยความร้อน

Influence of Curing Conditions on Strength of Alkali Activated Mortar Made from High Calcium Fly Ash and Low Calcium Fly Ash

Apiwish Thongraksa¹, Saofee Dueramae^{1*}, Sirichai Pethrung¹, Akkadath Abdulmatin² and Tawich Klathae³

¹ Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Krungthep

² Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Princess of Naradhiwas University

³ Department of Civil Engineering, College of Industrial Technology and Management, Rajamangala University of Technology

* Corresponding author, E-mail: Saofee.d@mail.rmutk.ac.th

Received: 14 June 2023; Revised: 15 August 2023; Accepted: 3 October 2023

Online Published: 24 December 2023

Abstract: This research aims to study the effect of curing conditions on the strength development of mortar made from alkali-activated fly ash with different calcium contents, which consist of high calcium fly ash and a combination of high and low calcium fly ash. The setting time and the development of compressive strength of the alkali-activated fly ash mortar under curing at ambient temperature and a temperature of 80 °C for 24 hours were investigated. The experimental results found that the calcium content in precursors affected the setting time, with higher calcium content resulting in a faster setting time. Using a blend of high and low calcium fly ash as a binder provided a longer setting time than the binder made with only high calcium fly ash. The alkali-activated mortar made with high calcium fly ash as a binder had higher strength than the blend of high and low calcium fly ash at ambient temperature. For the curing temperature of 80 °C, the binder made from high calcium fly ash had lower strength than the blend of high and low calcium fly ash. The compressive strength of alkali-activated mortar made from high calcium fly ash and low calcium fly ash in a 50:50 ratio with a curing temperature of 80 °C was 151, 168, 187 and 189 kg/cm² at 7, 28, 45, and 60 days, respectively.

Keywords: Alkali activated; High calcium fly ash; Low calcium fly ash; Compressive strength; Heat curing



1. บทนำ

ปูนซีเมนต์เป็นวัสดุหลักที่ใช้ในงานก่อสร้างโดยทั่วไป ซึ่งใช้เป็นวัสดุเชื่อมประสานสำหรับการผลิตคอนกรีตที่ใช้ในงานก่อสร้าง ในปัจจุบันความต้องการในการใช้ปูนซีเมนต์มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามการขยายตัวอุตสาหกรรมกรรมก่อสร้าง อย่างไรก็ตามกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ก่อให้เกิดปัญหาสิ่งแวดล้อมจากการปล่อยก๊าซเรือนกระจก เนื่องจากวัตถุดิบหลักในการผลิตปูนซีเมนต์คือหินปูน (CaCO_3) และเมื่อถูกนำมาเผาเพื่อผลิตปูนเม็ดจะปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) จำนวนมากสู่บรรยากาศ โดยการผลิตปูนซีเมนต์ 1 ตันจะปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สู่บรรยากาศถึง 0.82 ตัน [1] ในปัจจุบันมีการศึกษาการใช้วัสดุประสานชนิดใหม่เพื่อทดแทนการใช้ปูนซีเมนต์ เช่น การใช้วัสดุประสานกระตุ้นด้วยต่างหรือจีโอพอลิเมอร์ โดยใช้สารตั้งต้นที่มีองค์ประกอบของ ซิลิกาออกไซด์ และ อลูมินาออกไซด์ และสารละลายต่างที่มีองค์ประกอบของ โซเดียมหรือโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์และ/หรือซิลิเกต ซึ่งโดยทั่วไปมักใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) โซเดียมซิลิเกต (Na_2SiO_3) หรือโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) เพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่เป็นโครงสร้างยึดประสานและรับกำลังได้

เถ้านหินเป็นวัสดุชนิดหนึ่งที่สามารถนำมาใช้เป็นสารตั้งต้นในการผลิตวัสดุประสานกระตุ้นด้วยต่าง เนื่องจากเถ้านหินเป็นวัสดุที่มีองค์ประกอบของซิลิกา อลูมินา และเฟอริก เป็นองค์ประกอบหลัก ทั้งนี้ องค์ประกอบทางเคมีขึ้นอยู่กับชนิดของเถ้านหิน และกระบวนการที่ใช้ในการเผา จากงานวิจัยของ Assi *et al.* [2] ได้ทำการศึกษาค้นคว้าเถ้านหินที่มีแคลเซียมต่ำผลิตเป็นจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต พบว่า เถ้า

ถ้านหินที่มีปริมาณแคลเซียมต่ำมีอัตราการทำปฏิกิริยาช้าที่อุณหภูมิห้อง ส่งผลต่อการพัฒนากำลังอัด โดยเฉพาะการพัฒนากำลังอัดในช่วงอายุต้น เช่นเดียวกับงานวิจัยของ Wijaya and Hardjito [3] และ Rajmohan *et al.* [4] ซึ่งพบว่าจีโอพอลิเมอร์ที่ทำจากเถ้านหินที่มีแคลเซียมต่ำส่งผลต่อระยะเวลาการก่อตัวที่ยาวนานกว่าและมีการพัฒนากำลังอัดในช่วงอายุต้นที่ต่ำ โดยทั่วไปจำเป็นต้องใช้ความร้อนในการเร่งการเกิดปฏิกิริยาเพื่อให้สามารถรับกำลังได้ดีขึ้น นอกจากนี้การใช้วัสดุที่มีองค์ประกอบของแคลเซียมร่วมกับเถ้านหินที่มีแคลเซียมต่ำสามารถช่วยให้เกิดการทำปฏิกิริยาได้ที่อุณหภูมิห้อง Zhou *et al.* [5] พบว่าเถ้านหินร่วมกับใช้ตะกั่วเตาถลุงเหล็กกรรมสามารถพัฒนากำลังอัดให้เพิ่มขึ้นได้ เนื่องจากตะกั่วเตาถลุงเหล็กมีองค์ประกอบของแคลเซียมสูงส่งผลต่อการเพิ่มปริมาณองค์ประกอบของแคลเซียมของสารตั้งต้นในการทำปฏิกิริยา เช่นเดียวกับผลการทดสอบของ Alanazi *et al.* [6] พบว่าการเพิ่มตะกั่วเตาถลุงในส่วนผสมของวัสดุประสานกระตุ้นด้วยต่างส่งผลต่อการทำปฏิกิริยาและการพัฒนากำลังอัดที่อุณหภูมิห้องให้ดีขึ้น อย่างไรก็ตามงานวิจัยของ Nuaklong *et al.* [7] ได้ทำการศึกษาผลของการใช้เถ้านหินแคลเซียมสูงร่วมกับเถ้านหินแคลเซียมต่ำผลิตเป็นจีโอพอลิเมอร์ซึ่งใช้สารละลายโซเดียมซิลิเกตและสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นสารละลายต่าง พบว่า ปริมาณของเถ้านหินแคลเซียมสูงในส่วนผสมส่งผลให้มีการก่อตัวที่รวดเร็วและสามารถพัฒนากำลังอัดมากขึ้น

จากงานวิจัยที่ผ่านมาเห็นได้ว่าสมบัติของวัสดุประสานกระตุ้นด้วยต่างมีศักยภาพในการนำไปใช้เป็นวัสดุประสานในการผลิตคอนกรีตแทนการใช้ปูนซีเมนต์



อย่างไรก็ตามขึ้นอยู่กับสมบัติทางเคมีของสารตั้งต้นและสารละลายที่ใช้ ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงทำการศึกษาผลของการใช้เถ้าถ่านหินที่มีองค์ประกอบทางเคมีที่แตกต่างกัน ได้แก่ เถ้าถ่านหินแคลเซียมสูงและเถ้าถ่านหินแคลเซียมต่ำในสร้างวัสดุประสานชนิดใหม่โดยไม่ใช้ปูนซีเมนต์ นอกจากนี้ยังศึกษาผลของการบ่มด้วยความร้อน เพื่อพัฒนาสมบัติทางกลของวัสดุประสานที่ทำจากเถ้าถ่านหินทั้ง 2 ชนิดที่มีองค์ประกอบทางเคมีที่ต่างกัน

2. วิธีการทดลอง

2.1 วัสดุที่ใช้ในงานวิจัย

งานวิจัยนี้ใช้เถ้าถ่านหินเป็นสารตั้งต้นของวัสดุประสานกระตุ้นด้วยต่างในการหล่อตัวอย่างมอร์ตาร์ โดยไม่มีส่วนผสมของปูนซีเมนต์ เถ้าถ่านหินที่ใช้ในงานวิจัยที่เป็นวัสดุเหลือทิ้งจากการผลิตกระแสไฟฟ้าซึ่งมาจากแหล่งที่ต่างกัน 2 แหล่ง ได้แก่ เถ้าถ่านหินจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ จ.ลำปาง (HFA) และเถ้าถ่านหินจากโรงไฟฟ้าจังหวัดระยอง (LFA) ผลการทดสอบองค์ประกอบทางเคมีของเถ้าถ่านหินจากทั้งสองแหล่งสำหรับงานวิจัยนี้แสดงในตารางที่ 1 พบว่า เถ้าถ่านหินจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ จ.ลำปาง (HFA) มีผลรวมออกไซด์ของซิลิกา อลูมินา และเฟอร์ริก เท่ากับร้อยละ 56.9 และมีแคลเซียมออกไซด์เท่ากับร้อยละ 29.6 จัดเป็นเถ้าถ่านหินที่มีแคลเซียมสูง (High-Calcium Fly Ash, Class C) ส่วนเถ้าถ่านหินที่ได้จากโรงไฟฟ้าจังหวัดระยอง (LFA) มีผลรวมออกไซด์ของซิลิกา อลูมินา และเฟอร์ริก เท่ากับร้อยละ 87.3 และมีแคลเซียมออกไซด์เท่ากับร้อยละ 0.7 จัดเป็นเถ้าถ่านหินที่มีปริมาณแคลเซียมต่ำ (Low-Calcium Fly Ash, Class F) ตามมาตรฐาน ASTM C618 [8] สำหรับ

ตารางที่ 1 Chemical Composition of Raw Materials

| Oxide (%) | HFA | LFA |
|--|------|------|
| Silicon Dioxide (SiO ₂) | 24.2 | 53.1 |
| Aluminum Oxide (Al ₂ O ₃) | 14.4 | 29.4 |
| Iron Oxide (Fe ₂ O ₃) | 18.3 | 4.8 |
| Calcium Oxide (CaO) | 29.6 | 0.7 |
| Sulfur Trioxide (SO ₃) | 6.5 | 0.4 |
| Magnesium Oxide (MgO) | 2.4 | 0.3 |
| Sodium Oxide (Na ₂ O) | 2.1 | 0.3 |
| Potassium Oxide (K ₂ O) | 0.3 | 0.7 |
| Loss on Ignition (LOI) | 0.6 | 5.4 |

สมบัติทางกายภาพของเถ้าถ่านหินที่ใช้ พบว่าเถ้าถ่านหิน HFA มีค่าความถ่วงจำเพาะ เท่ากับ 2.26 และมีขนาดอนุภาคข้างบนตะแกรงเบอร์ 325 เท่ากับร้อยละ 28.7 เถ้าถ่านหิน LFA มีค่าความถ่วงจำเพาะ และมีร้อยละของขนาดอนุภาคข้างบนตะแกรงเบอร์ 325 เท่ากับ 2.45 และ 23.4 ตามลำดับ

2.2 ส่วนผสมของมอร์ตาร์

งานวิจัยนี้ทำการศึกษาผลของการใช้เถ้าถ่านหินจาก 2 แหล่งซึ่งมีองค์ประกอบทางของแคลเซียมออกไซด์ที่ต่างกัน ซึ่งใช้เถ้าถ่านหินแคลเซียมสูง (HFA100) และใช้เถ้าถ่านหินแคลเซียมสูงร่วมกับเถ้าถ่านหินแคลเซียมต่ำในอัตราส่วน 50:50 (HFA50-LFA50) เป็นวัสดุประสานในการผลิตมอร์ตาร์จากวัสดุประสานกระตุ้นด้วยต่าง (Alkali Activated Mortar) มอร์ตาร์กระตุ้นด้วยต่างจากเถ้าถ่านหินในงานวิจัยนี้ใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) เข้มข้น 6 โมลาร์เป็นสารละลายต่างในการกระตุ้นกำลังผสม



ตารางที่ 2 Mix Proportion of Mortar

| Sample | Mix Proportion (g) | | | | | L/S ratio | Flow (%) | |
|---------------|--------------------|---------|-----|------|-------|-----------|----------|---------------|
| | Cement | Fly ash | | Sand | Water | | | NaOH Solution |
| | | HFA | LFA | | | | | |
| CT | 740 | - | - | 2035 | 490 | - | 0.66 | 109 |
| HFA100 | - | 740 | - | 2035 | - | 410 | 0.55 | 107 |
| HFA50-LFA50 | - | 370 | 370 | 2035 | - | 410 | 0.55 | 110 |
| HFA100-T | - | 740 | - | 2035 | - | 410 | 0.55 | 107 |
| HFA50-LFA50-T | - | 370 | 370 | 2035 | - | 410 | 0.55 | 110 |

ของมอร์ตาร์ใช้อัตราส่วนของสารละลายตัววัสดุประสานหรือสารละลายต่อสารตั้งต้น (L/S) เท่ากับ 0.55 มีอัตราส่วนระหว่างวัสดุประสานต่อทราย เท่ากับ 1:2.75 หลังจากหล่อตัวอย่างเป็นเวลา 24 ชั่วโมงทำการถอดแบบและบ่มในน้ำจนกว่าจะถึงอายุการทดสอบ นอกจากนั้นทำการศึกษาผลของการบ่มด้วยความร้อนโดยนำตัวอย่างมอร์ตาร์หลังจากถอดแบบไปบ่มด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ก่อนนำตัวอย่างไปบ่มในน้ำจนถึงอายุการทดสอบจนถึงอายุการทดสอบ (HFA100-T และ HFA50-LFA50-T) โดยอัตราส่วนผสมของมอร์ตาร์แสดงในตารางที่ 2

2.3 การทดสอบการก่อตัวของมอร์ตาร์

ทดสอบการก่อตัวของมอร์ตาร์ ทำการทดสอบโดยประยุกต์ใช้การทดสอบการก่อตัวโดยใช้เข็มไวแคตตามมาตรฐาน ASTM C191 [9] เพื่อเปรียบเทียบผลของการก่อตัวของมอร์ตาร์ที่ทำจากวัสดุประสานกระตุ้นด้วยต่างที่มีส่วนผสมของสารตั้งต้นที่แตกต่างกัน

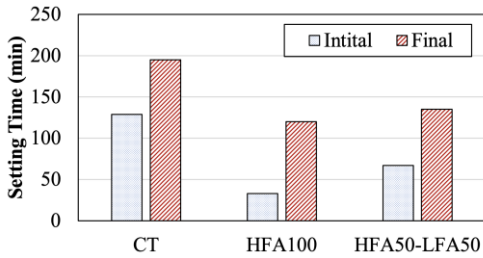
2.4 การทดสอบกำลังอัดของมอร์ตาร์

การทดสอบกำลังอัดของมอร์ตาร์ใช้ตัวอย่างทรงลูกบาศก์ขนาด 5 x 5 x 5 ซม.³ ทำการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C109 [10] โดยทดสอบที่อายุ 7, 28, 45 และ 60 วัน ซึ่งในแต่ละอายุการทดสอบทำการทดสอบตัวอย่างมอร์ตาร์ จำนวน 3 ตัวอย่าง เพื่อนำมาหาค่าเฉลี่ย

3. วิเคราะห์ผลทดลอง

3.1 การก่อตัวของมอร์ตาร์

ผลการทดสอบการก่อตัวของมอร์ตาร์ที่ทำจากวัสดุประสานกระตุ้นด้วยต่างเปรียบเทียบกับมอร์ตาร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์เป็นวัสดุประสานแสดงดังรูปที่ 1 จากผลการทดสอบพบว่า มอร์ตาร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ (CT) มีค่าการก่อตัวเริ่มต้นและการก่อตัวสุดท้าย เท่ากับ 129 และ 195 นาที่ ตามลำดับ ส่วนมอร์ตาร์ที่ใช้วัสดุประสานกระตุ้นด้วยต่างมีค่าการก่อตัวรวดเร็วกว่ามอร์ตาร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ทั้งการก่อตัวเริ่มต้นและการก่อตัวสุดท้ายโดยมอร์ตาร์ HFA100 ที่ใช้แก้ถ่านหินแคลเซียมสูง



รูปที่ 1 Setting Time of Mortar

มีค่าการก่อตัวเริ่มต้นเท่ากับ 33 นาที และการก่อตัวสุดท้ายเท่ากับ 120 นาที ส่วนมอร์ตาร์ HFA50-LFA50 ที่ใช้เถ้าถ่านหินแคลเซียมสูงร่วมกับเถ้าถ่านหินแคลเซียมต่ำมีค่าการก่อตัวเริ่มต้นเท่ากับ 67 นาที และการก่อตัวสุดท้ายเท่ากับ 135 นาที จากผลการทดสอบเห็นได้ว่าการใช้วัสดุประสานกระตุ้นด้วยต่างจากเถ้าถ่านหินมีค่าการก่อตัวที่เร็วกวามอร์ตาร์ที่ใช้วัสดุประสานที่ใช้ปูนซีเมนต์ โดยเฉพาะการใช้เถ้าถ่านหินที่มีองค์ประกอบของแคลเซียมในปริมาณสูง เนื่องจากเถ้าถ่านหินแคลเซียมสูงสามารถทำปฏิกิริยาได้ดีกว่าเถ้าถ่านหินแคลเซียมต่ำที่อุณหภูมิห้อง [11] ดังนั้นเมื่อนำเถ้าถ่านหินแคลเซียมต่ำมาใช้ร่วมกับเถ้าถ่านหินที่มีแคลเซียมสูง (HFA50-LFA50) เพื่อเป็นสารตั้งต้นในการผลิตวัสดุประสานกระตุ้นด้วยต่างจึงมีระยะเวลาการก่อตัวนานขึ้น เนื่องด้วยมีปริมาณของแคลเซียมออกไซด์ในระบบของสารตั้งต้นที่ลดลง สอดคล้องกับงานวิจัยของ Chindaprasit *et. al.* [12] ซึ่งพบว่าปริมาณแคลเซียมในสารตั้งต้นมีผลต่อการเร่งการทำปฏิกิริยาและการสร้างสารประกอบแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) ทำให้การก่อตัวเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว

3.2 กำลังอัดของมอร์ตาร์

ตารางที่ 3 แสดงผลการทดสอบกำลังอัดของมอร์ตาร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์และมอร์ตาร์ที่ทำจากวัสดุ

ประสานกระตุ้นด้วยต่างจากเถ้าถ่านหิน จากการทดสอบ พบว่า มอร์ตาร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์มีกำลังอัดเท่ากับ 278, 294, 308 และ 313 กก/ซม² ที่อายุ 7, 28, 45 และ 60 วัน ตามลำดับ โดยกลุ่มของมอร์ตาร์ที่ทำจากวัสดุประสานกระตุ้นด้วยต่างจากเถ้าถ่านหินที่มีแคลเซียมสูงและใช้เถ้าถ่านหินแคลเซียมสูงร่วมกับเถ้าถ่านหินที่มีแคลเซียมต่ำที่มีการบ่มในน้ำ มีค่ากำลังอัดอยู่ระหว่าง 18 – 74 กก/ซม² ส่วนกลุ่มของมอร์ตาร์ที่ทำจากวัสดุประสานกระตุ้นด้วยต่างจากเถ้าถ่านหินที่มีแคลเซียมสูงและใช้เถ้าถ่านหินแคลเซียมสูงร่วมกับเถ้าถ่านหินที่มีแคลเซียมต่ำที่มีการบ่มที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 ชั่วโมงก่อนนำไปบ่มในน้ำ มีค่ากำลังอัดอยู่ระหว่าง 97 – 189 กก/ซม² โดยที่กำลังอัดของกลุ่มมอร์ตาร์ที่ใช้วัสดุประสานกระตุ้นด้วยต่างจากเถ้าถ่านหินที่บ่มในน้ำ ได้แก่ มอร์ตาร์ HFA100 มีค่าเท่ากับ 56 กก/ซม² ที่อายุ 7 วัน และเพิ่มเป็น 74 กก/ซม² ที่อายุ 60 วัน และมอร์ตาร์ HFA50-LFA50 มีกำลังอัดเท่ากับ 18 และ 34 กก/ซม² ที่ 7 และ 60 วัน ตามลำดับ ในขณะที่เดียวกันกลุ่มของมอร์ตาร์ที่ใช้วัสดุประสานกระตุ้นด้วยต่างจากเถ้าถ่านหินที่มีการบ่มด้วย

ตารางที่ 3 Compressive Strength of Mortar

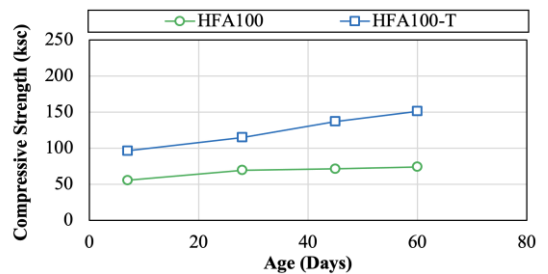
| Sample | Compressive Strength (ksc) | | | |
|---------------|----------------------------|---------|---------|---------|
| | 7 Days | 28 Days | 45 Days | 60 Days |
| CT | 278 | 294 | 308 | 313 |
| HFA100 | 56 | 69 | 72 | 74 |
| HFA50-LFA50 | 18 | 27 | 32 | 34 |
| HFA100-T | 97 | 115 | 137 | 151 |
| HFA50-LFA50-T | 151 | 168 | 187 | 189 |

อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส (มอร์ตาร์ HFA100-T และ HFA50-LFA50-T) มีกำลังอัดที่ อายุ 7 วัน เท่ากับ 97 และ 151 กก/ซม² และกำลังอัดที่ 60 วัน เพิ่มขึ้นเป็น 151 และ 189 กก/ซม² จากผลการทดสอบเห็นได้ว่า มอร์ตาร์ที่ทำจากวัสดุประสานกระตุ้นด้วยต่างจากเถา ถ่านหินมีแนวโน้มของการพัฒนา กำลังที่เพิ่มขึ้นตาม อายุการบ่มเช่นเดียวกับการใช้วัสดุประสานทั่วไปที่ทำ จากปูนซีเมนต์ อย่างไรก็ตามจากงานวิจัยที่ผ่านมา พบว่า ผลิตภัณฑ์ที่เป็นโครงสร้างในการรับกำลังที่ได้ จากวัสดุประสานกระตุ้นด้วยต่างเกิดจากกระบวนการที่ แตกต่างกับการทำปฏิกิริยาของปูนซีเมนต์ โดย โครงสร้างของวัสดุประสานกระตุ้นด้วยต่างเกิดจากการ ทำปฏิกิริยาของซิลิกา อลูมินา และแคลเซียมซึ่งเป็น องค์ประกอบหลักของเถาถ่านหิน ซึ่งถูกชะละลายด้วย สารละลายต่าง (โซเดียมไฮดรอกไซด์, NaOH) รวมตัว กันเป็นโครงสร้างของแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) และ แคลเซียมอลูมิโนซิลิเกตไฮเดรต (C-A-S-H) ซึ่งเป็นโครงสร้างที่สามารถรับกำลังได้ [11, 13]

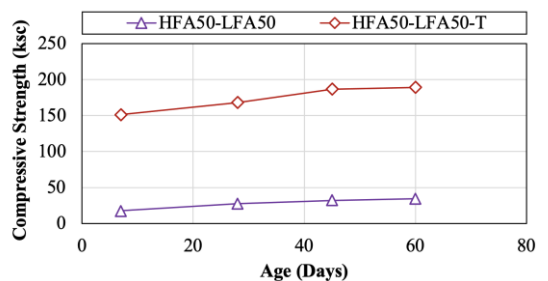
3.3 ผลของการบ่มต่อกำลังอัดของมอร์ตาร์กระตุ้น ด้วยต่างจากเถาถ่านหิน

ผลของการบ่มต่อการพัฒนา กำลังอัดของมอร์ตาร์ที่ วัสดุประสานกระตุ้นด้วยต่างจากเถาถ่านหินแสดงดังรูป ที่ 2 จากผลการทดสอบเห็นได้ชัดเจนว่า การบ่มด้วย ความร้อนที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 ชั่วโมง สามารถพัฒนา กำลังอัดของมอร์ตาร์ได้ดีกว่า มอร์ตาร์ที่บ่มในน้ำ ทั้งมอร์ตาร์ที่มีสารตั้งต้นจากเถา ถ่านหินที่มีแคลเซียมสูงและเถาถ่านหินที่มีแคลเซียมสูง ร่วมกับเถาถ่านหินที่มีแคลเซียมต่ำ โดยมอร์ตาร์ ที่ทำจากเถาถ่านหินแคลเซียมสูงกระตุ้นด้วยต่าง (รูปที่ 2 (a)) มีกำลังอัดอยู่ระหว่าง 56 – 74 กก/ซม²

เมื่อบ่มในน้ำปกติ และเมื่อทำการบ่มด้วยความร้อนที่ อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส พบว่า มอร์ตาร์สามารถ พัฒนา กำลังอัดเพิ่มขึ้นเท่ากับ 97 – 151 กก/ซม² หรือ คิดเป็นร้อยละ 42.6 ถึง 50.9 ผลการทดสอบมีแนวโน้ม เช่นเดียวกับการใช้วัสดุประสานจากเถาถ่านหิน แคลเซียมสูงร่วมกับเถาถ่านหินแคลเซียมต่ำ (รูปที่ 2 (b)) พบว่าสามารถพัฒนา กำลังอัดจาก 18 – 34 กก/ซม² เพิ่มขึ้นเป็น 151 – 189 กก/ซม² หรือคิด เป็นร้อยละ 81.2 ถึง 88.4 แสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิการ บ่มส่งผลต่อการพัฒนา กำลังอัดของมอร์ตาร์อย่างมี นัยสำคัญ เนื่องจากอุณหภูมิที่ใช้ในการบ่มส่งผลต่อ อัตราการทำปฏิกิริยาที่รวดเร็วขึ้น ทำให้โครงสร้างของ เนื้อซีเมนต์เพสต์มีความแน่นขึ้น ส่งผลต่อการรับกำลัง อัดที่สูงขึ้น [14]



(a) High Calcium Fly Ash



(b) Blend of High and Low Calcium Fly Ash

รูปที่ 2 Effect of Curing Conditions on Compressive Strength of Mortar



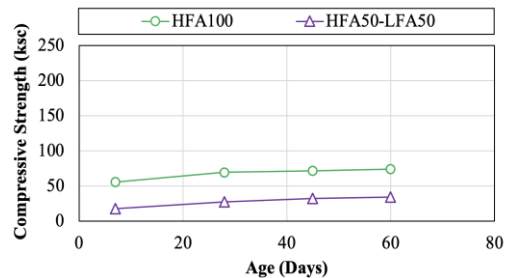
นอกจากนั้น งานวิจัยของ Kumar and Kumar [15] พบว่า การบ่มด้วยความร้อนส่งผลโครงสร้างทางจุลภาคของเพสต์ซึ่งมีปริมาณการก่อตัวของอลูมิโน-ซิลิเกตเจล (Alumino-silicate Gel) ในโครงสร้างที่เพิ่มขึ้นและส่งผลต่อการพัฒนาสมบัติทางกลที่ดีขึ้น

3.4 ผลของปริมาณแคลเซียมในเถ้าถ่านหินต่อกำลังอัดของมอร์ตาร์กระตุ้นด้วยต่าง

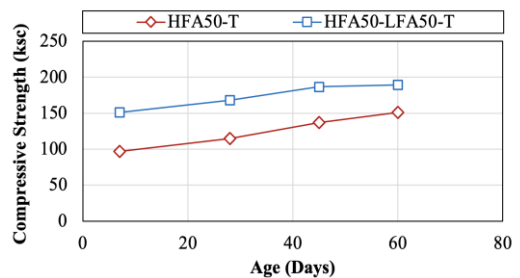
รูปที่ 3 เปรียบเทียบผลของการใช้เถ้าถ่านหินที่มีแคลเซียมสูงและการใช้เถ้าถ่านหินแคลเซียมสูงร่วมกับเถ้าถ่านหินแคลเซียมต่ำเพื่อเป็นสารตั้งต้นในการผลิตวัสดุประสานกระตุ้นด้วยต่างที่ใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นสารละลายต่าง จากรูปที่ 3 (a) เห็นได้ว่าวัสดุประสานกระตุ้นด้วยต่างที่ใช้เถ้าถ่านหินแคลเซียมสูงมีกำลังสูงกว่าการใช้เถ้าถ่านหินแคลเซียมสูงร่วมกับเถ้าถ่านหินที่มีปริมาณแคลเซียมต่ำเมื่อบ่มในน้ำที่ โดยมอร์ตาร์ HFA100 มีกำลังอัดเท่ากับ 56, 69, 72 และ 74 กก/ซม² ที่อายุ 7, 28, 45 และ 60 วัน ตามลำดับ ในขณะที่มอร์ตาร์ HFA50-LFA50 มีกำลังอัดเท่ากับ 18, 27, 32 และ 34 กก/ซม² ที่อายุ 7, 28, 45 และ 60 วัน ตามลำดับ โดยทั่วไปการสร้างผลึกของโครงสร้างโซเดียมอลูมิโนซิลิเกตซึ่งทำหน้าที่ในการยึดประสานโครงสร้าง จำเป็นต้องใช้อุณหภูมิในการเร่งการเกิดปฏิกิริยา โดยเฉพาะสารตั้งต้นที่มีองค์ประกอบของแคลเซียมต่ำจะทำปฏิกิริยาได้น้อยที่อุณหภูมิห้อง [3, 4] ปริมาณของแคลเซียมออกไซด์ที่สูงมีผลต่อการเกิดโครงสร้างในการรับกำลังของวัสดุประสานและสามารถเกิดปฏิกิริยาได้ที่อุณหภูมิห้อง โดยปริมาณแคลเซียมออกไซด์ (CaO) ในวัสดุตั้งต้นที่สูงส่งผลต่อการเกิดโครงสร้างแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) และแคลเซียมอลูมิโนซิลิเกตไฮเดรต (C-A-S-H) มากขึ้นให้

สามารถรับกำลังที่สูงกว่า [16, 17] ทำให้มอร์ตาร์ที่ใช้วัสดุประสานจากเถ้าถ่านหินแคลเซียมสูงกระตุ้นด้วยต่างจึงมีการพัฒนากำลังอัดได้ดีกว่าที่อุณหภูมิห้อง

ในทางกลับกันจากผลการทดสอบเห็นได้ว่าการใช้เถ้าถ่านหินแคลเซียมสูงร่วมกับเถ้าถ่านหินที่มีปริมาณแคลเซียมต่ำเป็นสารตั้งต้นสามารถพัฒนา กำลังได้ดีกว่าการใช้เถ้าถ่านหินแคลเซียมสูงเพียงอย่างเดียว เมื่อบ่มที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 ชั่วโมง ดังรูปที่ 3 (b) โดยมอร์ตาร์ HFA100-T มีกำลังอัดเท่ากับ 97, 115, 137 และ 151 กก/ซม² ที่อายุ 7, 28, 45 และ 60 วัน ตามลำดับ ส่วนมอร์ตาร์ HFA50-LFA50-T มีกำลังอัดเท่ากับ 151, 168, 187 และ 189 กก/ซม² ที่อายุ 7, 28, 45 และ 60 วัน ตามลำดับ



(a) Curing in water



(b) Curing at 80 °C temperature

รูปที่ 3 Effect of Fly Ash Type on Compressive Strength of Mortar

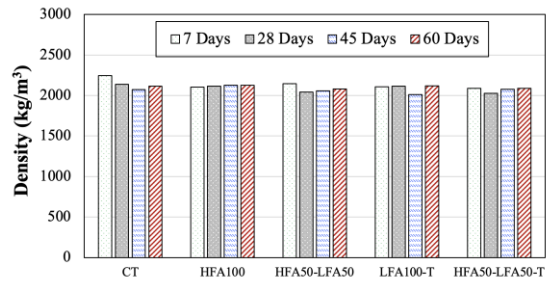


เมื่อทำการบ่มด้วยความร้อนจะส่งผลต่อการเร่งการแตกตัวของโซเดียมไอออน (Na^+) และไฮดรอกไซด์ไอออน (OH^-) จากสารละลายต่างและเข้าทำปฏิกิริยากับซิลิกาออกไซด์ (SiO_2) และอลูมินาออกไซด์ (Al_2O_3) ทำให้เกิดเป็นพันธะของโครงสร้างที่รับกำลังได้ [18] ดังนั้นมอร์ตาร์ HFA50-LFA50-T ที่มีปริมาณของซิลิกาและอลูมินาออกไซด์ในสารตั้งต้นมากกว่า มอร์ตาร์ HFA100-T เนื่องจากเถาถ่านหินที่มีแคลเซียมต่ำจะมีองค์ประกอบของซิลิกาออกไซด์และอลูมินาออกไซด์สูงกว่าเถาถ่านหินที่มีแคลเซียมสูง จึงทำให้มอร์ตาร์มีกำลังอัดสูงกว่า

เมื่อบ่มที่อุณหภูมิสูง นอกจากนั้นงานวิจัยของ Myers *et al.* [19] ซึ่งชี้ให้เห็นว่าเมื่อมีอุณหภูมิการบ่มสูงขึ้น จะเกิดการทำปฏิกิริยาระหว่างอลูมินาออกไซด์อิสระ (Al^{free}) กับโครงสร้างแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) ทำให้มีอัตราการก่อตัวของโครงสร้างแคลเซียมอลูมิโนซิลิเกตไฮเดรต (C-A-S-H) จะเพิ่มขึ้นในระบบโครงสร้างทางจุลภาคและอาจมีผลทำให้สามารถรับกำลังได้มากขึ้น

3.5 ความหนาแน่นของของมอร์ตาร์

ความหนาแน่นของมอร์ตาร์ที่ใช้วัสดุประสานจากเถาถ่านหินกระตุ้นด้วยต่างเปรียบเทียบกับมอร์ตาร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์เป็นวัสดุประสาน แสดงดังรูปที่ 4 ผลการทดสอบ พบว่า มอร์ตาร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์เป็นวัสดุประสาน มีค่าความหนาแน่นอยู่ระหว่าง 2071 – 2245 กก/ม³ ส่วนกลุ่มของมอร์ตาร์กระตุ้นด้วยต่างที่ใช้เถาถ่านหิน มีค่าความหนาแน่นอยู่ระหว่าง 2013 – 2146 กก/ม³ จากผลการทดสอบเห็นได้ว่ามอร์ตาร์กระตุ้นด้วยต่างที่ใช้



รูปที่ 4 Density of Mortar

สารตั้งต้นจากเถาถ่านหินแคลเซียมสูงและเถาถ่านหินแคลเซียมสูงร่วมกับเถาถ่านหินแคลเซียมต่ำ มีค่าความหนาแน่นใกล้เคียงกับมอร์ตาร์ทั่วไปที่ใช้ปูนซีเมนต์

4. บทสรุป

จากผลการศึกษามอร์ตาร์ที่ใช้วัสดุประสานกระตุ้นด้วยต่างที่ใช้สารตั้งต้นจากเถาถ่านหินแคลเซียมสูงและเถาถ่านหินแคลเซียมสูงร่วมกับเถาถ่านหินแคลเซียมต่ำ สามารถสรุปได้ดังนี้

1. มอร์ตาร์ที่ทำจากวัสดุประสานกระตุ้นด้วยต่างจากเถาถ่านหินแคลเซียมสูงมีระยะเวลาการก่อตัวเร็วกว่าการใช้สารตั้งต้นจากเถาถ่านหินแคลเซียมสูงร่วมกับเถาถ่านหินแคลเซียมต่ำ อย่างไรก็ตามการใช้วัสดุประสานจากเถาถ่านหินกระตุ้นด้วยต่างทั้งสองชนิดมีระยะเวลาการก่อตัวที่เร็วกว่าวัสดุประสานที่ใช้ปูนซีเมนต์
2. จากการทดสอบกำลัง พบว่า มอร์ตาร์ที่ใช้ส่วนผสมจากเถาถ่านหินแคลเซียมสูงร่วมกับเถาถ่านหินแคลเซียมต่ำและบ่มด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียสให้ค่ากำลังรับแรงอัดสูงที่สุดเท่ากับ 189 กก/ซม² ที่อายุ 60 วัน



3. การใช้เถ้าถ่านหินที่มีปริมาณของแคลเซียมสูงเป็นวัสดุประสานกระตุ้นด้วยต่างสามารถพัฒนากำลังอัดได้ดีกว่าการใช้เถ้าถ่านหินแคลเซียมสูงร่วมกับเถ้าถ่านหินที่มีปริมาณแคลเซียมต่ำเมื่อบ่มที่อุณหภูมิห้อง

4. เมื่อมีการบ่มด้วยความร้อนอุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง พบว่า มอร์ตาร์จากเถ้าถ่านหินกระตุ้นด้วยต่างที่ใช้เถ้าถ่านหินแคลเซียมสูงร่วมกับเถ้าถ่านหินที่มีปริมาณแคลเซียมต่ำเป็นสารตั้งต้นสามารถพัฒนากำลังอัดดีกว่ามอร์ตาร์ที่ใช้เถ้าถ่านหินแคลเซียมสูงเป็นสารตั้งต้นเพียงอย่างเดียว

5. จากผลการทดสอบความหนาแน่นของมอร์ตาร์พบว่า กลุ่มของมอร์ตาร์ที่ใช้เถ้าถ่านหินกระตุ้นด้วยต่างเป็นวัสดุประสานมีค่าความหนาแน่นใกล้เคียงกับมอร์ตาร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์เป็นวัสดุประสาน

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] L.K. Tumer and F.G. Collins, Carbon dioxide equivalent (CO₂-e) emissions: A comparison between geopolymer and OPC cement concrete, *Construction and Building Materials*, 2013, 43, 125-130.
- [2] L.N. Assi, E.E. Deaver, M.K. ElBatanouny, and P. Ziehl, Investigation of early compressive strength of fly ash-based geopolymer concrete, *Construction and Building Materials*, 2016, 112, 807-815.

- [3] S.W. Wijaya and D. Hardjito, Factors affecting the setting time of fly ash-based geopolymer, *Materials Science Forum*, 2016, 841, 90-97.
- [4] B. Rajmohan, R.R. Nayaka, K.R. Kumar and K. Kaleemuddin, Mechanical and durability performance evaluation of heat cured low calcium fly ash based sustainable geopolymer concrete, *Materials Today: Proceedings*, 2022, 58, 1337-1343.
- [5] S. Zhou, C. Ma, G. Long and Y. Xie, A novel non-Portland cementitious material: Mechanical properties, durability and characterization, *Construction and Building Materials*, 2020, 238, 117671.
- [6] H. Alanazi, J. Hu and Y.R. Kim, Effect of slag, silica fume, and metakaolin on properties and performance of alkali-activated fly ash cured at ambient temperature, *Construction and Building Materials*, 2019, 197, 747-756.
- [7] P. Nuaklong, A. Wongsas, V. Sata, K. Boonserm, J. Sanjayan and P. Chindaprasit, Properties of high-calcium and low-calcium fly ash combination geopolymer mortar containing recycled aggregate, *Heliyon*, 2019, 5(9) e02513.
- [8] ASTM C618, Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete, American Society for Testing and Materials, 2017.



- [9] ASTM C191, Standard Test Methods for Time of Setting of Hydraulic Cement by Vicat Needle, American Society for Testing and Materials, 2021.
- [10] ASTM C109: Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in. or [50 mm] Cube Specimens, American Society for Testing and Materials, 2020.
- [11] T. Phoo-Ngernkham, V. Sata, S. Hanjitsuwan, C. Ridditirud, S. Hatanaka and P. Chindaprasirt, High calcium fly ash geopolymer mortar containing Portland cement for use as repair material, *Construction and building materials*, 2015, 98, 482-488.
- [12] P. Chindaprasirt, P. De Silva, K. Sagoe-Crentsil and S. Hanjitsuwan, Effect of SiO_2 and Al_2O_3 on the setting and hardening of high calcium fly ash-based geopolymer systems, *Journal of Materials Science*, 2012, 47, 4876-4883.
- [13] U. Rattanasak and P. Chindaprasirt, Influence of NaOH solution on the synthesis of fly ash geopolymer. *Minerals Engineering*, 2009, 22(12), 1073-1078.
- [14] S. Dueramae, W. Tangchirapat, P. Chindaprasirt, and C. Jaturapitakkul, Influence of activation methods on strength and chloride resistance of concrete using calcium carbide residue-fly ash mixture as a new binder, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2017, 29(4), 04016265.
- [15] S. Kumar and R. Kumar, Mechanical activation of fly ash: Effect on reaction, structure and properties of resulting geopolymer, *Ceramics International*, 2011, 37(2), 533-541.
- [16] S. Hanjitsuwan, S. Hunpratub, P. Thongbai, S. Maensiri, V. Sata and P. Chindaprasirt, Effects of NaOH concentrations on physical and electrical properties of high calcium fly ash geopolymer paste, *Cement and Concrete Composites*, 2014, 45, 9-14.
- [17] S. Dueramae, W. Tangchirapat, P. Sukontasukkul, P. Chindaprasirt and C. Jaturapitakkul, Investigation of compressive strength and microstructures of activated cement free binder from fly ash-calcium carbide residue mixture, *Journal of Materials Research and Technology*, 2019, 8(5), 4757-4765.



- [18] P. Sajan, T. Jiang, C. Lau, G. Tan and K. Ng, Combined effect of curing temperature, curing period and alkaline concentration on the mechanical properties of fly ash-based geopolymer, *Cleaner Materials*, 2021, 1, 100002.
- [19] R.J. Myers, E. L'Hôpital, J.L. Provis and B. Lothenbach, Effect of temperature and aluminium on calcium (aluminosilicate) hydrate chemistry under equilibrium conditions, *Cement and Concrete Research*, 2015, 68, 83-93.

A Study of The Application of Vortex Tube for Temperature Reduction of Heated Volume

Seekharin Komonhirun¹, Warissara Suriyasing¹, Anuphong No-inkaew¹,
Pongpol Sanjaiwong¹ and Weerayut Jitwiriya^{2,*}

¹ Department of Power Engineering Technology, College of Industrial Technology,
King Mongkut's University of Technology North Bangkok

² Department of Mechanical Engineering Technology, College of Industrial Technology,
King Mongkut's University of Technology North Bangkok

* Corresponding author, E-mail: weerayut.j@cit.kmutnb.ac.th

Received: 12 June 2023; Revised: 6 October 2023; Accepted: 12 October 2023

Online Published: 24 December 2023

Abstract: Vortex tube is the device that used for spot cooling. It uses only compressed air as the main supply to induce the swirl phenomena inside the tube. It consists of the cold and hot end at the opposite side of the tube. The cold outlet releases cold air that can be used for cooling application while the hot air is dumped out as a waste. In this research, the vortex tube is designed and applied to cool down the simulated heated volume with an electronic heater. The hot end of the vortex tube is modified with four different numbers of outlets, 4 holes, 8 holes, 12 holes and 16 holes in order to achieve the best cooling efficiency. The results show that the increasing number of hot outlet holes can decrease the cold end temperature. The heat transfer rate inside the vortex tube is improved by letting the high amount of heat escaped through the hot end with a mass flow rate whereas the vortex phenomena inside is still maintained. In the experiment, the cooling of the heated volume using vortex tube can reduce the air temperature inside the volume from 50 °C to the lowest at 38 °C during 60 minutes of operation which can prevent the electronic failure due to the accumulated heat inside the box.

Keywords: Vortex tube; Cooling Application; Heat transfer; Turbulent flow

1. Introduction

Vortex tube is a cooling device that used for a limited space such as mining area, electronic boxes and jet cooling for some machine fabrication process. It generates cold jet flow which normally uses as spot cooling which uses only the compressed air supply as a main source. It is maintenance-free with no use of refrigerant. Differ from air cycle air condition system, it cannot use for cooling a large volume space due to the size of the vortex tube. It has to be small in order to maintain the turbulent phenomena.

The vortex tube consists of two ends, a cold end and a hot end which is connect together by the tube according to Figure 1. The inlet is on the top side of the cold end which also connects to the vortex chamber that uses for creating vortex flow. The cold air from cold end is used for cooling another device. The hot end also emits the hot air by the second law thermodynamic process for refrigerator, similar to the condenser from a vapor cycle refrigeration

process. Contrastingly, this hot air normally dumped outside as a thermodynamically waste.

Vortex tube is working by injecting the compressed air into the inlet. Compressed air is forced to swirl using the vortex generator which is the tangential holes. These holes create the force vortex air that move toward along the tube until it reaches the hot end at on the other side. During the process, compressed swirl air inside the tube is continuously accumulated heat by friction between moving flow and tube wall and the air temperature is drastically increased. At the hot end, some air can be escape through the holes as a hot waste air but the rest of air is reversely move through tube as inner force vortex core, creating double force vortexes that flow opposing to each other. These counter flows are transfer heat and particle from each other, reducing pressure, density and temperature of inner flow and conversely increasing those parameters in outer flow [1]. At the cold end, the cold swirling flow moves out which use for

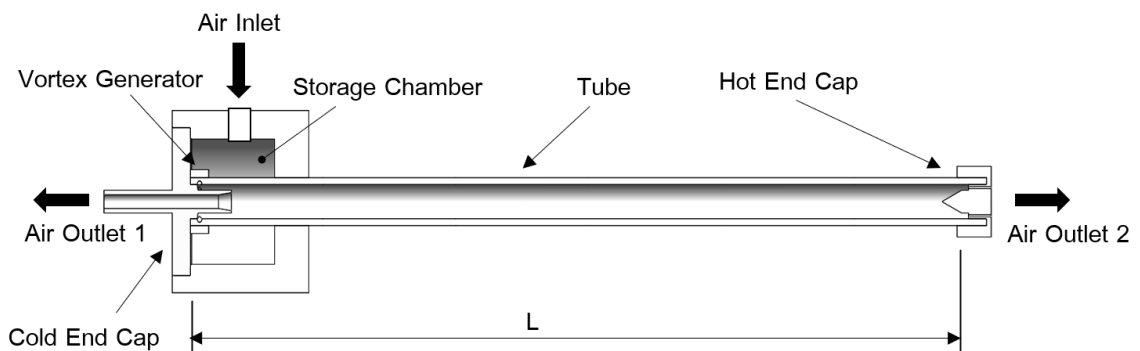


Fig. 1 Vortex tube component



cooling device application. However, the flow has small cross section area which is appropriate for limited application. However, the flow has small cross section area which is appropriate for limited space application.

It is proved in the application that the vortex tube cooling time has 17% cooling rate higher than the high-speed industrial fan when applying with steel welding cooling process [2]. Another interesting application is to apply with the avionic box inside the aircraft. The aircraft has bleed air from air cycle machine air conditioning system which is the high-pressure air that higher than 7 bar [3]. It has potential to be a main supply source for vortex tube. The air ventilates around the avionic bay at the lower aircraft fuselage which is not directly cooling the avionic box which might lead to electronic failure during the operation. The reliability curve which has the minimum failure rate is lie within range of $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ to $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ for avionic device [4]. Therefore, the cold air the vortex tube has the possibility to accomplish temperature range. However, the vortex tube dimension must be optimized.

Many researches attempted to increase the vortex tube efficiency. The maximum COP yields at the cold mass fraction ratio Eq. (1) from 0.5 to 0.7 [5, 6].

$$\mu_c = \frac{M_c}{M_i} = \frac{\text{Cold outlet mass flow rate}}{\text{air inlet mass flow rate}} \quad (1)$$

Therefore, the vortex tube dimension must be designed which is the variation of the cold end and the hot end diameter. According to the vortex tube guidance design [7], Length to diameter ratio (L/D) is in range 5.24 to 54 and cold end diameter to tube diameter (Dc/D) is in range 0.16 to 0.77. Another parameter is the number of inlet nozzle which is varied from 2 to 6 according to [8-10] to create the turbulent flow inside the tube. However, the variation of Dc/D is difficult to obtain. Some researches use the variation of hot end instead by varying the angle of the hot end conical valve. The smaller angle improves the vortex tube performance by increasing the cold mass fraction ratio [11, 12].

This research is focus on study the feasibility of vortex tube application to cooling the heated simulated heated box. The simulated heated box is a representative of avionic box inside the aircraft or electronic box that generate amount of heat during operation process. The jet flow from the cold end is injected into the heated box, then measure the temperature reduction during the process. The hot end of the vortex tube is also modified to identify the appropriate condition for this application.

2. Experimental Procedure

2.1 Vortex tube experiment set up

According to the vortex tube guidance design from [5-12], this research has selected and fixed the L/D and Dc/D to keep it simple for manufacturing



process and testing procedure. The tube has 350 mm. long with 15 mm. inner diameter which give the L/D ratio of 23.33. The vortex tube for this experiment is made of 5058 aluminums as demonstrate in Figure 1. The vortex chamber has outer size of 80 x 80 x 60 mm. with 6 mm. inlet diameter and 55 mm. vortex chamber diameter. The cold end has 6 mm. inner diameter which is maintain the D_c/D at 0.4 mm. and 10 mm. outer diameter connect to vortex chamber. In Figure 2, the vortex generator has 6 tangential holes with 2 mm. diameter each. This chamber is sealed with rubber gasket and tighten with 4 bolts fastener to prevent air leakage.

The hot ends are divided in 4 designs which show in Figure 3, each connect to the tube with M21 thread. All of them contain the same inner diameter of 31 mm. with 60-degree cone shape end inside to separate the outer and inner vortices. The different is the number of the circular pattern 1 mm. holes. Those contain 4, 8, 12 and 16 holes for each piece which is consider in experiment. The increase of number for hot end holes is to vary the cold mass fraction (μ_c) from highest to lowest possible that can achieve within the ring diameter. Then, the cold mass fraction (μ_c) in each case is compared to obtain their effects to the vortex tube performance [8-10].

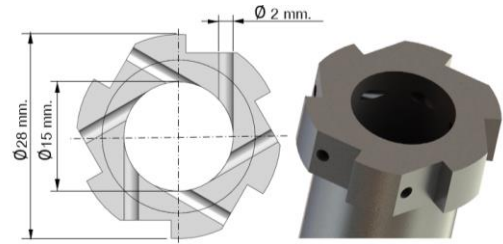


Fig. 2 Vortex generator design

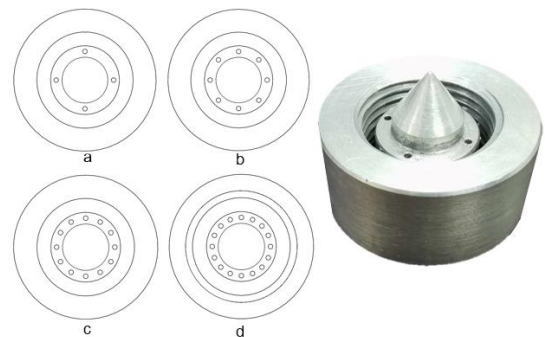


Fig. 3 Four types of hot end designs, 16 holes, 12 holes, 8 holes and 4 holes

First, the vortex tube with different types of hot end are tested with no heat load condition. The vortex tube is clamped with the table inside the 25 °C room temperature, then connected with 7 bar compressed air as an inlet. The temperature measurement for both cold and hot end are used type K thermocouple with an accuracy of $\pm 1.5\%$. The measurement begin after the inlet air is flow through the vortex tube. The measurement time is increased from 0 to 30 minutes with 2 minutes increment. The digital anemometer with a velocity accuracy of $\pm 3\%$ is



also used to measure the jet flow speed at the same distant 6.5 cm. next to the cold end and hot end. Finally, after finishing each experiment, the vortex tube is left to cool down at least 10 minutes to remove the excess accumulated heat until the vortex tube wall temperature decreases to the room temperature.

For additional information that can be used in analysis, the wall temperature is measured at 30 minutes. The tube measuring point is divided into 6 sections from the vortex chamber, 5 cm. for each section. The results from this experiment can aid the explanation of the accumulated heat of the vortex tube during the operation. All tests are repeating 5 times.

2.2 Heated volume experiment set up

The simulated heated box has sizing of 44 x 61 x 23 cm. with total air volume of 61,732 cm³ as shown in Figure 4. At top side of the box, two of 16.7 mm. holes are drilled and connected each other with plastic tube as an inlet of the vortex tube cold air from cold end section. The flow can escape through the opened channel at both side of the box as a simple electronic box. Inside the box is installed the heater as the heat generator which can heat air inside the box up to 50°C. Type K thermo-couples are also installed 4 points inside the box, the vortex tube cold and hot outlet as located in Figure 4.

The measurement begins when the air temperature is reached 50 °C. Then the compressed air valve is opened to let the air pass through the vortex tube and enter the box, respectively. The temperature is measure at every 2 minutes for 30 minutes long with the best result hot end type from the first experiment in section 2.1 without turning off the heater. Similar to the vortex tube, the box is also left to cool down at least 10 minutes until the temperature decrease to the room temperature before beginning the next experiment. Similar to no load experiment, the test is repeating 5 times. Then, all results are analyzed and discuss in the next section.

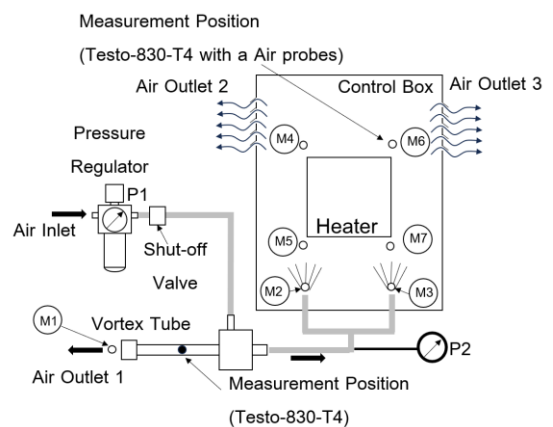


Fig. 4 Component inside the heated volume



3. Result and Discussion

3.1 Effect of hot end holes variation results with no heat load

The cold end results are demonstrated in Figure 5. The results show that the cold end jet flow temperature trend has lowest value at starting point then continuously increase over time, then reaches the steady stage around 15 minutes. The sixteen holes result is the lowest of all cases. Contrastingly, the four holes has the highest jet flow temperature. The experimental has average standard deviation of 0.18 after repeating 5 times with total amount of 17 points measurement in each case during 30 minutes interval.

From the hot end results that demonstrates in Figure 6, the four holes result has the highest jet flow temperature and the sixteen holes is the lowest. The results from the anemometer measurement are summarized in Table 1 and the cold mass flow rate and cold mass fraction in Table 2. As the number of holes at hot end increase, the flow speed at cold end decreases but increases the flow speed at hot end which is also explained by the vortex tube mass conservation of mass ($M_i = M_c + M_h$). The higher number of holes implies that the hot end jet flow mass flow rate increases due to the increase of flow velocity which also reduces accumulated heat inside the vortex tube by wall friction, especially at the hot end.

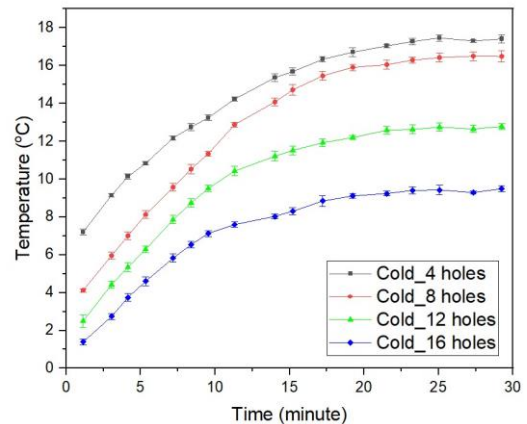


Fig. 5 Cold end jet flow temperature with variation of hot end number of holes

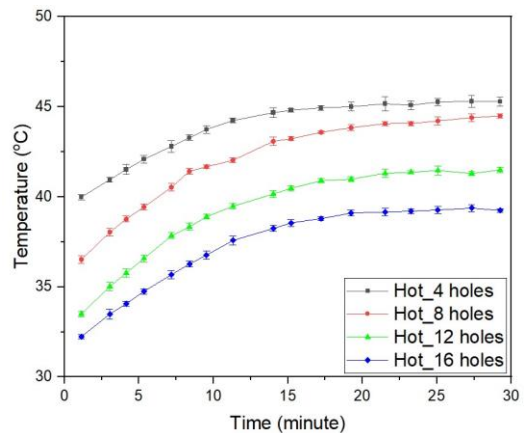


Fig. 6 Hot end jet flow temperature with variation of hot end number of holes.

3.2 Wall temperature results

For additional results, the wall temperature is measured at 30-minute operation time. From Figure 7, the wall temperature in each case is lowest at the beginning section (point 1), then increasing rapidly until it reaches peak around 20 cm. length of tube in case 4 holes and 8 holes.



After that the temperature trend start to decrease toward the hot end which resemble to the result of [13]. However, in 12 holes and 16 holes, the highest temperature point is shifted toward the hot end. The highest temperature is still be the 4 holes result and the lowest is the 16 holes result. This can be explained that the higher amount of flow can escape at the hot end in the 16 holes case rather than the 4 holes case, thus the accumulated heat can evacuate through the hot end by the hot end mass flow.

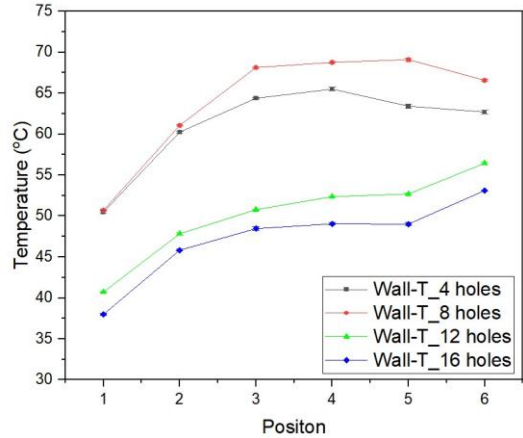


Fig. 7 Wall temperature at 30-minute vortex tube operation

Table 1 Jet flow speed results from anemometer

| Number of holes | Jet flow speed (m/s) | |
|-----------------|----------------------|-------------|
| | Cold End Cap | Hot End Cap |
| 4 | 27.8 | 10.7 |
| 8 | 25.02 | 14.38 |
| 12 | 22.84 | 17.61 |
| 16 | 20.46 | 18.7 |

Table 2 Cold mass flow rate and cold mass fraction ratio results

| Number of holes | Cold mass flow rate (g/s) | Cold mass fraction |
|-----------------|---------------------------|--------------------|
| 4 | 0.96 | 0.96 |
| 8 | 0.86 | 0.87 |
| 12 | 0.79 | 0.80 |
| 16 | 0.7 | 0.71 |

For the discussion, these results can be concluded that the higher number of holes at the hot end has better cold end temperature decrease by increasing the hot end mass flow which also decrease the hot end temperature. The escaped air flow at hot end also carries the accumulated heat with it and reduces the wall temperature, thus improves the heat transfer process. In other words, this can be also interpreted that the speed reduction of the cold end in higher number of hot end holes increases the amount of time for heat transfer between two vortex cores inside the tube which also promotes the decreasing of the cold end temperature.

The key of the vortex tube design is to maximize the hot outlet area that the accumulated heat inside the vortex tube can be escaped by the amount of flow rate and promoted the heat transfer rate



between the outer and inner core vortexes which resembles to the explanation from [13, 14]. From the no load condition results, the 16 holes case has highest hot end outlet cross-section area which yields the lowest cold outlet and wall temperature results from all cases. The 16 holes case has the cold mass fraction ratio of 0.71 which in appropriate range of the highest performance value. Therefore, the 16 holes result is selected as a candidate for testing at heat load condition.

3.3 Effect of hot end holes variation results with heat volume.

When apply the 16 hot end holes design vortex tube into the heated volume (simulated box), the results show in Figure 8 that at the first 5 minute the temperature inside the box is rapidly decreased from 50°C during the operation of heater to average at 40 °C. For 4 points of measurement of the simulated box, the results are similar to each other with variation of ± 1 °C. After the first 5 minutes, the temperature result has insignificantly change during the rest of the operation time (55 minutes later) with the lowest temperature result at 38 °C average. The cold outlet, hot outlet and wall temperature yield similar results with the no heat load results Figure 7 in both trend and values because the vortex tube cold air producing process has not involved with the heat load similar to the application in [2]. The experimental has average standard deviation of 0.16 after repeating 5 times.

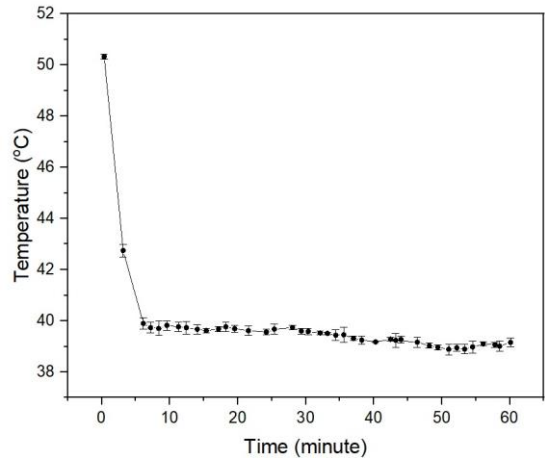


Fig. 8 Temperature of heated volume using the vortex tube cooling with holes

3.4 Efficiency analysis

The efficiency of the vortex tube is calculated using COP formula in Eq. (2), as refer from researches [1, 5].

$$COP = \frac{\mu_c C_p (T_i - T_c)}{\left(\frac{\gamma}{\gamma - 1}\right) RT_i \left[\left(\frac{P_i}{P_c}\right)^{\frac{\gamma - 1}{\gamma}} - 1\right]} \quad (2)$$

From Eq. (2), γ is the specific heat ratio of air P_i/P_c is the pressure inlet to cold outlet ratio and $(T_i - T_c)$ is the temperature different between inlet and cold outlet. The COP calculation result is summarized in Figure 9. It is shown that the COP is related to the cold mass fraction ratio. The cold mass fraction ratio is also increased the temperature different which also increasing COP. The COP is increase when decreasing the cold mass fraction to around 0.71 which resemble to

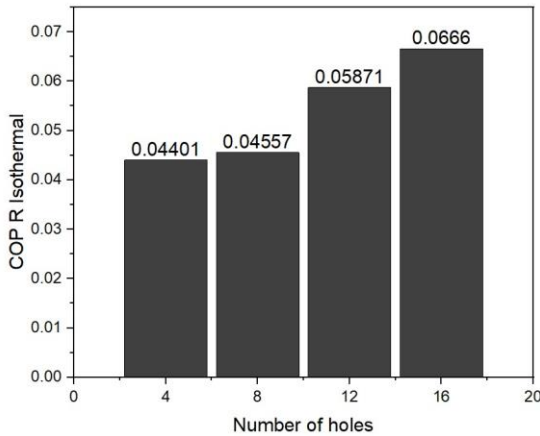


Fig. 9 COP analysis with number of hot ends holes variation

results from [9, 12]. The explanation of these phenomena is the lower cold mass fraction ratio induces the temperature separation inside the vortex tube which is the result in temperature different which also describes in [13-15].

When applying load as the heat generated box, the heat removing rate is 20 W from Eq. (3) which is suitable for the limited volume application.

$$Q = M_c C_p (T_{final} - T_{initial}) \quad (3)$$

From the study, it is show that the vortex tube has the high enough heat removing rate that has the possibility to apply with the aircraft avionic box or the electronic box that generate heat. The final temperature after steady stage cooling is reduced to fit the avionic box operating temperature range of -15 °C to 50 °C [3] which also prevent electronic failure.

4. Conclusion

This research is aimed at apply the vortex tube with the heated volume such as electronic box by varying different number of hot end outlet area. The heated volume is simulated by using electronic heater stored inside the box. The experiment let the air from cold outlet of the vortex tube enters the box after air in the box is heated up to 50 °C.

The results show that the highest COP is 0.068 at pressure inlet 7 bar with the cold mass fraction of 0.71 at no load condition. However, the vortex tube has the potential to cool the simulated heated box from 50 °C to 38 °C after 60-minute duration which could prevent the electronic failure during the normal electronic operating condition.

5. Acknowledgement

The authors sincerely thank to Department and Aircraft Maintenance Engineering Technology Workshop (ACET) in the Power Engineering Technology Department (PET) College of Industrial Technology (CIT) of the King Mongkut's University of Technology North Bangkok (KMUTNB) for facilities and instrumental supports.

6. Reference

- [1] S. Eiamsa-ard and P. Promvongse, Review of Ranque–Hilsch effects in vortex tubes, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2008, 12, 1822-1842.



- [2] H.R. Thakare and A.D. Parekh, Experimental investigation of Ranque–Hilsch vortex tube and techno – Economical evaluation of its industrial utility, *Applied Thermal Engineering*, 169, 2020, 114934.
- [3] R. Sterkenburg, *Aircraft maintenance and repair*, 8th Ed., McGraw-Hill Company Inc., NY, USA, 2019.
- [4] V. Gorbunov, S. Kuznetsov, A. Savvina and I. Poleshkina, Methodological aspects of avionics reliability at low temperatures during aircraft operation in the Far North and the Arctic, *Transportation Research Procedia*, 2021, 57, 220-229.
- [5] J.R. Simoes-Moreira, An air-standard cycle and a thermodynamic perspective on operational limits of Ranque–Hilsh or vortex tubes, *International Journal of Refrigeration*, 2010, 33, 765-773.
- [6] K. Dincer, S. Baskaya, B.Z. Uysal and I. Ucgul, Experimental investigation of the performance of a Ranque–Hilsch vortex tube with regard to a plug located at the hot outlet, *International Journal of Refrigeration*, 2009, 32, 87-94
- [7] R. Godbole and P.A. Ramakrishna, Design guidelines for the vortex tube, *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2020, 118, 110169.
- [8] I. Cebeci, V. Kirmaci and U. Topcuoglu, The effects of orifice nozzle number and nozzle made of polyamide plastic and aluminum with different inlet pressures on heating and cooling performance of counter flow ranque-hilsch vortex tubes: an experimental investigation, *International Journal of Refrigeration*, 2016, 72, 140-146.
- [9] H. Ahmed, M.S. Ahmed, M. Attalla and A.A. El-Wafa, An experimental study of nozzle number on Ranque Hilsch counter-flow vortex tube, *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2017, 82, 381-389.
- [10] S.U. Nimbalkar and M.R. Muller, An experimental investigation of the optimum geometry for the cold end orifice of a vortex tube, *Applied Thermal Engineering*, 2009, 55, 509-514.
- [11] B. Markal, O. Aydin and M. Avci, An experimental study on the effect of the valve angle of counter-flow Ranque–Hilsch vortex tubes on thermal energy separation, *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2010, 34, 966-971.
- [12] K. Devade and A. Pise, Effect of cold orifice diameter and geometry of hot end valves on performance of converging type Ranque Hilsch vortex tube, *Energy Procedia*, 2014, 54, 642-653.



- [13] Y. Xue, M. Arjomandi and R. Kelso, A critical review of temperature separation in a vortex tube, *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2010, 34, 1367-1374.
- [14] D.G. Akhmetov and T.D. Akhmetov, Flow structure and mechanism of heat transfer in a Ranque–Hilsch vortex tube, *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2020, 113, 110024.
- [15] A. Poolkrajang and N. Preamjai, A study of air cooling efficiency in vortex tube, *The Journal of Industrial Technology*, 2012, 8, 28-36. (in Thai)

การประเมินการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกโดยการตัดแยกขยะรีไซเคิลประเภทกระดาษของวิทยาลัยนวัตกรรมการจัดการ

กมลรัตน์ ยอดหาญ*

วิทยาลัยนวัตกรรมการจัดการ, มหาวิทยาลัยราชภัฏวไลยอลงกรณ์ ในพระบรมราชูปถัมภ์

* ผู้ประสานงานเผยแพร่ (Corresponding Author), E-mail: kamonrat@vru.ac.th

วันที่รับบทความ: 14 มิถุนายน 2566; วันที่ทบทวนบทความ: 10 ตุลาคม 2566; วันที่ตอบรับบทความ: 16 ตุลาคม 2566

วันที่เผยแพร่ออนไลน์: 25 ธันวาคม 2566

บทคัดย่อ: งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินปริมาณการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากการตัดแยกขยะรีไซเคิลในสำนักงานของวิทยาลัยนวัตกรรมการจัดการ มหาวิทยาลัยราชภัฏวไลยอลงกรณ์ ในพระบรมราชูปถัมภ์ ภายใต้โครงการสนับสนุนกิจกรรมลดก๊าซเรือนกระจก ซึ่งวิธีดำเนินการวิจัยแบ่งออกเป็น 2 ส่วนหลัก คือ (1) การศึกษาและเก็บรวบรวมข้อมูลการจัดการขยะภายในวิทยาลัยนวัตกรรมการจัดการ และ (2) การคำนวณปริมาณการลดก๊าซเรือนกระจกจากการดำเนินกิจกรรม จากผลการวิจัยพบว่า ปริมาณเศษกระดาษในช่วงระยะเวลาเก็บข้อมูล ตั้งแต่เดือนพฤษภาคม 2565 ถึงเดือนพฤศจิกายน 2565 มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น โดยในเดือนพฤศจิกายนนั้นมีปริมาณสูงสุด คือ 835 กิโลกรัม มีปริมาณรวมทั้งสิ้น คือ 1,848 กิโลกรัม เมื่อนำน้ำหนักที่ได้ไปคำนวณปริมาณการลดก๊าซเรือนกระจกจากการดำเนินกิจกรรม พบว่า สามารถลดการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกได้มากถึง 10.484 tCO₂eq จากการดำเนินการลดการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกของสำนักงานวิทยาลัยนวัตกรรมการจัดการนั้น สามารถเป็นส่วนหนึ่งในการสนับสนุนกิจกรรมมหาวิทยาลัยสีเขียว ของมหาวิทยาลัยราชภัฏวไลยอลงกรณ์ ในพระบรมราชูปถัมภ์ และยังสอดคล้องกับยุทธศาสตร์ระยะยาวในการพัฒนาการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกในประเทศไทย

คำสำคัญ: ก๊าซเรือนกระจก; การตัดแยกขยะรีไซเคิล; โครงการสนับสนุนกิจกรรมลดก๊าซเรือนกระจก

Evaluation of Greenhouse Gas Emission Reduction by Paper Waste Recycle Sorting from College of Innovative Management

Kamonrat Yodharn*

College of Innovative Management, Valaya Alongkorn Rajabhat University under the Royal Patronage

* Corresponding author, E-mail: kamonrat@vru.ac.th

Received: 14 June 2023; Revised: 10 October 2023; Accepted: 16 October 2023

Online Published: 25 December 2023

Abstract: This research's objective was to evaluate the greenhouse gas emission reduction achieved by recycling waste sorting in the College of Innovative Management Office, Valaya Alongkorn Rajabhat University under the Royal Patronage through a low emission support scheme (LESS). The research methodology is divided into two main parts: (1) Study and collect data on waste management within the College of Innovative Management and (2) Calculate the amount of greenhouse gas reduction from activities. The results showed that the amount of paper waste during the data collection period from May 2022 to November 2022 tends to increase, with the highest amount in November being 835 kilograms, totaling 1,848 kilograms. When using the weight to calculate the amount of greenhouse gas reduction from activities, it was found that greenhouse gas emissions can be reduced by as much as 10.484 tCO₂eq. The Greenhouse Gas Emission Reduction of the College of Innovative Management Office can support the green university of Valaya Alongkorn Rajabhat University under the Royal Patronage. According to Long-term Low Greenhouse Gas Emission Development Strategies (LT-LEDS) in Thailand.

Keywords: Greenhouse Gas Emission; Recycle Waste Sorting; Low Emission Support Scheme



1. บทนำ

ปัจจุบันการประชุมรัฐภาคีกรอบอนุสัญญาสหประชาชาติว่าด้วยการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ สมัยที่ 26 (COP26) ประเทศภาคีสมาชิก ได้ร่วมกันกำหนดทิศทาง การดำเนินงานด้านการแก้ไขปัญหาการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ รัฐบาลของประเทศไทย ได้เน้นย้ำถึงความสำคัญของการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจก ร่วมกับประชาคมโลกตามเป้าหมายที่กำหนดไว้ ภายใต้แผนยุทธศาสตร์ระยะ ยาวในการพัฒนาการลด การปล่อย ก๊าซ เรือน กระจก (Long-term Low Greenhouse Gas Emission Development Strategies : LT-LEDS) ของประเทศไทย รวมถึงประกาศเป้าหมายความเป็นกลางทางคาร์บอน (Carbon Neutrality) ภายในปี.ศ. 2608 [1] ซึ่งมาตรการสำคัญในการดำเนินงานเพื่อมุ่งสู่ความเป็นกลางด้านคาร์บอน (Carbon Neutrality) และการปล่อยก๊าซเรือนกระจก สุทธิเป็นศูนย์ (Net Zero GHG Emission) ประกอบด้วย ปรับปรุงประสิทธิภาพการใช้พลังงานและปรับเปลี่ยน เทคโนโลยีในภาคขนส่ง ปรับปรุงกระบวนการทาง อุตสาหกรรมและการใช้ผลิตภัณฑ์ การจัดการขยะและ ลดปริมาณขยะในชุมชน การจัดการระบบการทำเกษตร การใช้ประโยชน์ที่ดิน รวมถึงการปลูกป่าและฟื้นฟูป่า ธรรมชาติและป้องกันการบุกรุกพื้นที่ป่าและการเผาป่า [2] อย่างไรก็ตาม การเพิ่มขึ้นของการปล่อยคาร์บอนทั่วโลก เนื่องจากกิจกรรมของมนุษย์ เช่น การตัดไม้ทำลายป่า และการเผาไหม้เชื้อเพลิงฟอสซิลกลายเป็นปัญหาที่ทั่วโลกกังวล ส่งผลให้หลายองค์กรและสถาบันต่าง ๆ รวมถึงมหาวิทยาลัยต่างมุ่งมั่นที่จะเพิ่มประสิทธิภาพ ด้านสิ่งแวดล้อมและความรับผิดชอบต่อ ซึ่งรวมถึงความ พยายามในการลดการปล่อยคาร์บอน ส่งเสริมความ

ยั่งยืนและต่อสู้กับการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ [3] การคัดแยกและลดการสร้างขยะจึงมีความสำคัญอย่าง ยิ่งในใช้เป็นกลยุทธ์การลดการปล่อยคาร์บอนของชุมชน เนื่องจากคนในชุมชน ครัวเรือนและหน่วยงานสามารถ ร่วมกันทำกิจกรรมดังกล่าวได้ในทันทีและต่อเนื่อง โดยทั่วไปสถาบันอุดมศึกษามุ่งเน้นไปที่การเป็นมิตรกับ สิ่งแวดล้อมที่แตกต่างกันด้านกิจกรรมของมหาวิทยาลัย เพื่อลดการปล่อยคาร์บอน เช่น การลดกระดาษใน สำนักงาน การบริโภคที่พอประมาณ การใช้พลังงาน การบำบัดน้ำเสีย และการเพิ่มพื้นที่สีเขียว [4] การลด การใช้กระดาษ เป็นที่ทราบกันอย่างแพร่หลายใช้ในทาง วิชาการว่ามีการผลิต การใช้ประโยชน์ และการกำจัด ของกระดาษ ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม เช่น การตัดไม้ทำลายป่า การใช้น้ำปริมาณมากใน กระบวนการผลิตกระดาษ รวมถึงหมึกปริ้นท์ที่มี ผลกระทบทางด้านลบทางน้ำ อากาศ และดิน รวมถึง การเพิ่มปริมาณการปลดปล่อยคาร์บอนในระหว่าง การผลิตเป็นต้น [5] ดังนั้นการลดการใช้กระดาษและการคัด แยกขยะประเภทกระดาษจึงเป็นกิจกรรมที่สำคัญในการ ลดการปล่อยคาร์บอนในองค์กร หน่วยงานและ สำนักงาน ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยที่เกี่ยวข้องของ จินตนา แสนวงศ์ [5] ซึ่งดำเนินการศึกษาการลดก๊าซ เรือนกระจกจากการคัดแยกขยะครัวเรือนเพื่อการ รีไซเคิลภายใต้โครงการสนับสนุนกิจกรรมลดก๊าซเรือน กระจก กรณีศึกษา โรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้า โดยผลการวิจัยพบว่าสามารถลดการปล่อยก๊าซเรือน กระจกได้ 2,399.08 kgCO₂e_q ทั้งยังสอดคล้องกับ งานวิจัยที่เกี่ยวข้องของ Lian et al [6] ซึ่งให้เห็นว่าการ คัดแยกขยะและการบำบัดขยะที่ถูกต้อง มีความสำคัญ อย่างยิ่งต่อการลดการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกและ



จากที่องค์การบริหารจัดการก๊าซเรือนกระจก โครงการสนับสนุนกิจกรรมลดก๊าซเรือนกระจก (Low Emission Support Scheme) หรือเรียกว่าโครงการ LESS มีแนวคิดในการพัฒนารูปแบบการดำเนินกิจกรรม เพื่อสร้างความตระหนักให้เกิดการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจก [7] ด้วยเหตุนี้ เพื่อเป็นส่วนหนึ่งในการสนับสนุนกิจกรรมมหาวิทยาลัยสีเขียว (Green Office) ในด้านการลดการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกของมหาวิทยาลัยราชภัฏวไลยอลงกรณ์ ในพระบรมราชูปถัมภ์ ผู้วิจัยจึงมีวัตถุประสงค์ในการวิจัยเพื่อประเมินปริมาณการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากการคัดแยกขยะรีไซเคิลในสำนักงานของวิทยาลัยนวัตกรรมการจัดการ ด้วยการประยุกต์ใช้ การคำนวณการลดก๊าซเรือนกระจก (Less Evaluation Sheet)

2. วิธีดำเนินการวิจัย

2.1 การศึกษาและเก็บรวบรวมข้อมูลการจัดการขยะภายในวิทยาลัยนวัตกรรมการจัดการ

การดำเนินการศึกษาและเก็บรวบรวมข้อมูลการจัดการขยะภายในวิทยาลัยนวัตกรรมการจัดการ สืบหาปริมาณขยะภายในวิทยาลัยนวัตกรรมการจัดการ จากนั้นจึงจัดทำโครงการวิทยาลัยนวัตกรรมการจัดการ คัดแยกขยะรีไซเคิลโดยนำหลักการ 3Rs [8] มาประยุกต์ใช้ในการดำเนินการ โดยมีรายละเอียดดังนี้

1. มีการจัดโครงการ KM (Knowledge Management) เพื่อให้ความรู้เกี่ยวกับประเภทขยะ รวมถึงการจัดการขยะอย่างถูกวิธีให้บุคลากรในวิทยาลัยนวัตกรรมการจัดการทราบ

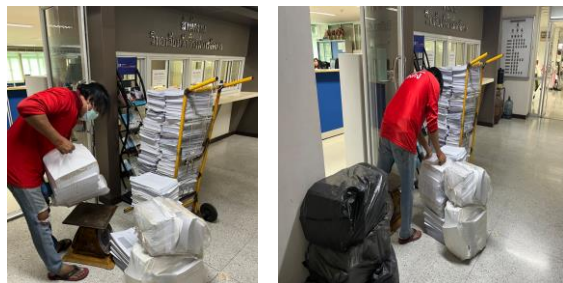
2. มีการจัดมุมคัดแยกขยะรีไซเคิล ไว้ในบริเวณห้องสำนักงานวิทยาลัยนวัตกรรมการจัดการ เพื่อให้บุคลากรในวิทยาลัยนวัตกรรมการจัดการรวบรวมจากแต่ละหลักสูตร และสำนักงาน มารวมกันที่จุดคัดแยกขยะรีไซเคิล ดังรูปที่ 1

3. เจ้าหน้าที่ประจำวิทยาลัยนวัตกรรมการจัดการจะเป็นผู้รวบรวมขยะ บันทึกน้ำหนักขยะ และติดต่อร้านรับซื้อขยะ ทุก ๆ 2 เดือน ดังรูปที่ 2

4. เจ้าหน้าที่ประจำวิทยาลัยนวัตกรรมการจัดการ จัดเก็บข้อมูลปริมาณขยะรีไซเคิล และใบเสร็จการซื้อขายไว้เป็นหลักฐาน เพื่อประเมินการลดก๊าซเรือนกระจก และการขอรับรองโครงการ LESS



รูปที่ 1 มุมคัดแยกขยะรีไซเคิลสำนักงานวิทยาลัยนวัตกรรมการจัดการ



รูปที่ 2 การรวบรวมขยะ บันทึกน้ำหนักขยะ



ซึ่งในการขอรับรองนั้น จะมีข้อพิจารณาโครงการที่เข้า
ข่าย ดังนี้

4.1 มีการตัดแยกขยะรีไซเคิลแต่ละประเภทเพื่อ
รวบรวมนำไปรีไซเคิลเท่านั้น

4.2 ประเภทขยะรีไซเคิลที่พิจารณา คือ กระดาษ
ประกอบด้วย กระดาษขาวดำ กระดาษสี และกระดาษ
ที่ทำลายแล้ว

4.3 สามารถตรวจวัดน้ำหนักขยะรีไซเคิลแต่ละ
ประเภทได้

4.4 มีการบันทึกข้อมูลปริมาณขยะรีไซเคิล
สม่ำเสมอและข้อมูลสามารถตรวจสอบได้

2.2 การคำนวณปริมาณก๊าซเรือนกระจก

การคำนวณปริมาณก๊าซเรือนกระจกจากการตัดแยก
ขยะเพื่อการรีไซเคิลภายใต้โครงการ LESS ซึ่งเป็น
กลไกที่นำไปสู่การเป็นสังคมคาร์บอนต่ำ โดยวิธีการ
คำนวณจากองค์การจัดการก๊าซเรือนกระจก (อบก.) ซึ่ง
สามารถคำนวณการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกได้จาก
การดำเนินกิจกรรม [7] ดังสมการที่ 1

$$GHG \text{ Emission} = AD \times EF \quad (1)$$

โดยที่ GHG Emissions หมายถึง ปริมาณคาร์บอน
ฟุตพริ้นท์หรือปริมาณการปลดปล่อยก๊าซเรือน
กระจก มีหน่วยเป็น tCO₂eq หรือ kgCO₂eq
ข้อมูลกิจกรรม (Activity Data: AD) หมายถึง
ปริมาณ การใช้พลังงาน หรือ กิจกรรมที่
ปลดปล่อยหรือดูดกลับก๊าซเรือนกระจก
ค่าการปลดปล่อยหรือดูดกลับก๊าซเรือนกระจก
(Emission Factor: EF) หมายถึง ค่าสัมประสิทธิ์
การปลดปล่อยหรือดูดกลับก๊าซเรือนกระจกต่อ
หน่วยของข้อมูลกิจกรรม (ตารางที่ 1)

จากนั้นจึงคำนวณการปล่อยก๊าซเรือนกระจกกรณี
ฐานเปรียบเทียบกับการปล่อยก๊าซเรือนกระจกกรณีการ
ดำเนินโครงการ [7] ดังสมการที่ (2)

$$GHG \text{ (kgCO}_2\text{eq)} = \text{Baseline GHG (kgCO}_2\text{eq)} - \text{Project GHG (kgCO}_2\text{eq)} \quad (2)$$

โดยที่ GHG คือ ปริมาณการลดการปล่อยก๊าซเรือน
กระจก

Baseline GHG คือ ปริมาณการปล่อยก๊าซเรือน
กระจกกรณีฐาน

Project GHG คือ ปริมาณการปล่อยก๊าซเรือน
กระจกจากการดำเนินโครงการ

ตารางที่ 1 ค่าสัมประสิทธิ์ในการปล่อยก๊าซเรือนกระจก
(Emission Factor: EF) สำหรับการจัดการขยะรีไซเคิล

| รายละเอียด | Emission Factor: EF (kgCO ₂ eq) | อ้างอิง [9] |
|--|--|-----------------------------|
| EF สำหรับการนำ กระดาษไปรีไซเคิล เพื่อทดแทนวัตถุดิบ ตั้งต้น แทนการนำไป ทิ้งในหลุมฝังกลบ | 3.5460 | T-VER- TOOL- WASTE-01 |

3. ผลการวิจัย

3.1 ผลการสำรวจปริมาณขยะรีไซเคิลของวิทยาลัย นวัตกรรมการจัดการ

จากการเก็บข้อมูลปริมาณขยะรีไซเคิลของวิทยาลัย
นวัตกรรมการจัดการ พบว่ามีขยะรีไซเคิลประเภท
กระดาษ ทั้งกระดาษสี กระดาษขาวดำ กระดาษสี
รวมถึงเศษกระดาษที่ผ่านการทำลายแล้ว ซึ่งเหล่านี้เป็น



วัสดุที่ใช้ภายในสำนักงานและใช้ในการจัดการเรียนการสอนอีกด้วย โดยปริมาณกระดาษในช่วงระยะเวลาเก็บข้อมูล ตั้งแต่เดือน พฤษภาคม 2565 ถึงเดือน พฤศจิกายน 2565 มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น โดยในเดือน พฤศจิกายน นั้นมีปริมาณสูงสุด คือ 835 กิโลกรัม แสดงดังตารางที่ 2 ซึ่งปริมาณรวมทั้งสิ้น คือ 1,848 กิโลกรัม ซึ่งในการรีไซเคิลกระดาษนั้นยังส่ง ผลให้เพิ่มอัตราการกักเก็บคาร์บอนภายในป่า รวมถึง การลดแหล่งที่มาของกระดาษจากการตัดต้นไม้อีกด้วย [10]

ดังนั้น เมื่อได้ข้อมูลปริมาณกระดาษในหน่วย กิโลกรัม จึงนำไปสู่การคำนวณปริมาณการลดการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจก ภายใต้โครงการ LESS ต่อไป

3.2 ผลการคำนวณปริมาณการลดก๊าซเรือนกระจกจากการดำเนินโครงการ

ผลจากการคำนวณการปริมาณการลดก๊าซเรือนกระจกจากการดำเนินโครงการตัดแยกขยะรีไซเคิล โดยการคำนวณข้อมูลสำหรับโครงการตัดแยกขยะรีไซเคิล นั้น สามารถลดการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกได้ตั้งแต่วินิจฉัย ซึ่งการอ้างอิงจากการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกกรณีฐาน ซึ่งการอ้างอิงจากการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกกรณีฐานนั้น มีการคำนวณการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจก 2 ชนิด คือ ก๊าซมีเทน (CH_4) และ ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) โดยการคำนวณการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกในกรณีฐานที่ดำเนินโครงการทุก ๆ 2 เดือน จากปริมาณขยะรีไซเคิลนั้น พบว่า ในเดือน พฤษภาคม มีปริมาณการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจก กรณีฐาน 1,582.92 $kgCO_2eq$ ในเดือนกรกฎาคม มีปริมาณการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกกรณีฐาน 2,008.44 $kgCO_2eq$ ในเดือน กันยายน มีปริมาณการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกกรณีฐาน 2,155.95 $kgCO_2eq$ และในเดือนพฤศจิกายน ปริมาณ

ตารางที่ 2 แสดงปริมาณขยะที่ผ่านการคัดแยกภายในวิทยาลัยนวัตกรรมการจัดการ

| วัน เดือน ปี | รายการ | น้ำหนัก (kg) |
|--------------|-----------------------|--------------|
| 11 พ.ค. 2565 | กระดาษสี | 24 |
| | กระดาษขาวดำ | 238 |
| | กระดาษลัง | 17 |
| | รวม | 279 |
| 22 ก.ค. 2565 | กระดาษขาวดำ | 309 |
| | กระดาษลัง | 5 |
| | เศษกระดาษที่ทำลายแล้ว | 40 |
| | รวม | 354 |
| 16 ก.ย. 2565 | กระดาษขาวดำ | 337 |
| | กระดาษลัง | 3 |
| | เศษกระดาษที่ทำลายแล้ว | 40 |
| | รวม | 380 |
| 30 พ.ย. 2565 | กระดาษขาวดำ | 751 |
| | กระดาษลัง | 16 |
| | เศษกระดาษที่ทำลายแล้ว | 68 |
| | รวม | 835 |

การปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกกรณีฐาน 4,737.41 $kgCO_2eq$ ตามลำดับ ซึ่งเมื่อนำมาคำนวณปริมาณการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกกรณีฐานรวม มีค่า 10,484.71 $kgCO_2eq$ หรือ 10,484 tCO_2eq และปริมาณการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากการดำเนินโครงการนั้นมีค่าเป็น 0 เนื่องจากเป็นโครงการประเภทการจัดการของเสีย โดยการคัดแยกขยะเพื่อนำไปรีไซเคิล ดังนั้นเมื่อนำไปสู่การคำนวณปริมาณการลดการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจก จึงมีค่า 10,484.71 $kgCO_2eq$ ดังตารางที่ 3

**ตารางที่ 3 ผลการคำนวณปริมาณการลดก๊าซเรือนกระจกจากการดำเนินโครงการตัดแยกขยะรีไซเคิล**

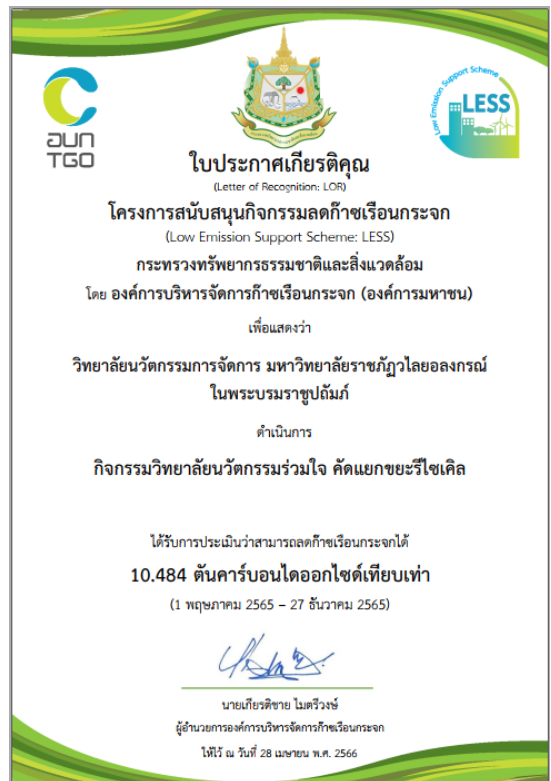
| ลำดับ | น้ำหนักของ ขยะรีไซเคิล กระดาษ (กิโลกรัม) | ปริมาณ การปล่อยก๊าซเรือน กระจกกรณีฐาน (kgCO ₂ eq) | ปริมาณการปล่อยก๊าซ เรือนกระจกจากการ ดำเนินโครงการ (kgCO ₂ eq) | ปริมาณการลดการ ปล่อยก๊าซเรือนกระจก (kgCO ₂ eq) |
|----------|---|---|---|---|
| 1 (พ.ค.) | 279.00 | 1,582.92 | - | 1,582.92 |
| 2 (ก.ค.) | 354.00 | 2,008.44 | - | 2,008.44 |
| 3 (ก.ย.) | 380.00 | 2,155.95 | - | 2,155.95 |
| 4 (พ.ย.) | 835.00 | 4,737.41 | - | 4,737.41 |

นอกจาก เมื่อนอกจากนี้เมื่อนำผลการลดการปล่อย
ก๊าซเรือนกระจกมาเปรียบเทียบกับงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง
ที่มีการดำเนินการในลักษณะเดียวกันสามารถแสดงดัง
ตารางที่ 4

ซึ่งหลังจากการคำนวณปริมาณการลดก๊าซเรือน
กระจกจากการดำเนินโครงการตัดแยกขยะรีไซเคิล
จึงนำไปสู่การขอรับการรับรองภายใต้โครงการสนับสนุน
กิจกรรมลดก๊าซเรือนกระจก (LESS) โดยองค์การ
บริหารจัดการก๊าซเรือนกระจก (องค์การมหาชน)
ภายใต้การดำเนินกิจกรรมวิทยาลัยนวัตกรรมร่วมใจ คัด
แยกขยะรีไซเคิล ดังรูปที่ 3

ตารางที่ 4 เปรียบเทียบงานวิจัยที่เกี่ยวข้องและ
งานวิจัยนี้

| ประเภทขยะ ที่ตัดแยก | ปริมาณการลด การปล่อยก๊าซ เรือนกระจก | อ้างอิง |
|---------------------------|---|-------------|
| ขยะครัวเรือน 11 ประเภท | 2,399.08 kgCO ₂ eq | [5] |
| ขยะมูลฝอย | 2,801 tonCO ₂ eq | [6] |
| ขยะกระดาษ | 10,484 kgCO ₂ eq | งานวิจัยนี้ |



รูปที่ 3 ใบประกาศเกียรติคุณ โครงการสนับสนุน
กิจกรรมลดก๊าซเรือนกระจก (LESS)



ซึ่งในการดำเนินกิจกรรมเพื่อลดการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจก ภายใต้การบรรลุวัตถุประสงค์ของโครงการ LESS นั้น นอกจากผู้ดำเนินกิจกรรมจะสามารถมีส่วนร่วมในการลดก๊าซเรือนกระจกและได้รับการรับรองโดยองค์การบริหารจัดการก๊าซเรือนกระจกแล้วยังสามารถเปลี่ยนขยะรีไซเคิลให้กลายเป็นรายได้พร้อมกับการสร้างจิตสำนึกรักษ์สิ่งแวดล้อมผ่านการคัดแยกขยะที่ต้นทางอีกด้วย [11]

4. บทสรุป

จากการดำเนินการคัดแยกขยะรีไซเคิล ในระหว่างเดือนพฤษภาคม ถึงพฤศจิกายน พ.ศ. 2565 ภายใต้กิจกรรมวิทยาลัยนวัตกรรมร่วมใจ คัดแยกขยะรีไซเคิลนั้น สามารถแยกขยะรีไซเคิลประเภทกระดาษได้ และนำไปซึ่งน้ำหนักเพื่อคำนวณปริมาณการลดการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจก โดยผลการดำเนินการได้สนับสนุนกิจกรรมลดก๊าซเรือนกระจก LESS ด้านการจัดการของเสียโดยการคัดแยกขยะรีไซเคิล ซึ่งสามารถลดการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกได้มากถึง 10.484 tCO₂eq ซึ่งการดำเนินการลดการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกของสำนักงานวิทยาลัยนวัตกรรมจัดการนั้น สามารถเป็นส่วนหนึ่งในการสนับสนุนกิจกรรมมหาวิทยาลัยสีเขียว (Green University) ของมหาวิทยาลัยราชภัฏวไลยอลงกรณ์ ในพระบรมราชูปถัมภ์ สอดคล้องกับยุทธศาสตร์ระยะยาวในการพัฒนาการปล่อยก๊าซเรือนกระจกต่ำ (Long-term Low Greenhouse Gas Emission Development Strategies : LT-LEDS) ของประเทศไทย และสอดคล้องกับเป้าหมายการพัฒนาที่ยั่งยืน (Sustainable Development Goals: SDGs) SDG 13 การรับมือกับ

การเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ และ SDG 12 เป้าหมายย่อย 12.5 เป็นการลดการเกิดของเสียโดยให้มีการป้องกัน การลดปริมาณ การใช้ซ้ำ และการนำกลับมาใช้ใหม่อีกด้วย

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อภิษฐา สวัสดิ์ และอาจารย์ ดร.ศศิธร หาสิน สังกัดสาขาวิชานวัตกรรมการจัดการสิ่งแวดล้อม วิทยาลัยนวัตกรรมการจัดการ ที่ให้คำแนะนำในการดำเนินการวิจัยให้แล้วเสร็จตามวัตถุประสงค์การวิจัย

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] <http://www.tgo.or.th/2020/index.php/th/post>. (Accessed on 12 June 2023)
- [2] P. Nuntramas, A. Suprasert, and P. Ekachan, Road to BCG economy, Net zero emission, Krungthai Compass, Thailand, 2021. (in Thai)
- [3] M. Crippa, D. Guizzardi, E. Solazzo, M. Muntean, E. Schaaf, F. Monforti-Ferrario, M. Banja, J.G.J. Olivier, G. Grassi, S. Rossi and E. Vignati, GHG emissions of all world countries, Publications Office of the European Union, 2021.
- [4] R. Roy, S. Potter, and K. Yarrow, Designing low carbon higher education systems: Environmental impacts of campus and distance learning systems, International Journal of Sustainability in Higher Education, 2008, 9(2), 116-130.



- [5] C. Sanvong, A study on reducing greenhouse gas emissions from household waste sorting for recycling under the low emission support scheme (LESS). Case study: Chulachomklao Royal Military Academy, CRMA Journal, 2021, 19, 57-64. (in Thai)
- [6] H. Lian, D. Wang and H. Li, Waste sorting and its effects on carbon emission reduction: Evidence from China, Chinese Journal of Population, Resources and Environment, 2020, 18, 26-34.
- [7] <https://ghgreduction.tgo.or.th/th/download-less/100-less-management/1229-2019-10-02-04-59-23.html> (Accessed on 12 June 2023)
- [8] T. Manipharak, Waste management in accordance with 3R principles in the Eastern Bangkok area, Journal of Local Governance and Innovation, 2020, 4(1), 157-170. (in Thai)
- [9] <https://ghgreduction.tgo.or.th/th/tver-method/tver-tool/waste.html> (Accessed on 12 June 2023)
- [10] <https://archive.epa.gov/epawaste/conserve/tools/warm/pdfs/chapter3.pdf>. (Accessed on 12 June 2023)
- [11] B. Barrera and P.S. Hooda, Greenhouse gas emissions of waste management processes and options: A case study, Waste Management and Research, 2016, 34(7), 658-665.

การดูดซับสีย้อมแอสิดในคอลัมน์เบตหนึ่งด้วยเม็ดอลูมินากัมมันต์ที่เตรียมจากเศษอลูมิเนียม

พัชรี คำธิตา* และ ัญฐารณ ศรีนาม

ภาควิชาวิศวกรรมเคมี, วิทยาลัยวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยรังสิต

* ผู้ประสานงานเผยแพร่, E-mail: patcharee.k@rsu.ac.th

วันที่รับบทความ: 7 สิงหาคม 2566; วันที่ทบทวนบทความ: 12 ตุลาคม 2566; วันที่ตอบรับบทความ: 17 ตุลาคม 2566

วันที่เผยแพร่ออนไลน์: 25 ธันวาคม 2566

บทคัดย่อ: งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับสีย้อมเหลืองแอสิด 36 ในสารละลายด้วยเม็ดอลูมินากัมมันต์ที่เตรียมจากเศษอลูมิเนียมในคอลัมน์เบตหนึ่ง โดยศึกษาปัจจัยความสูงของเบต 2-4 cm อัตราการไหลของสารละลายสีย้อม 10-20 mL/min และความเข้มข้นเริ่มต้น 40-60 mg/L ที่มีผลต่อลักษณะการเบรคทฤษฎีของการดูดซับในคอลัมน์เบตหนึ่ง พบว่าการดูดซับสีย้อมเหลืองแอสิด 36 ที่มีความเข้มข้นของสารละลาย 50 mg/L ในคอลัมน์เบตหนึ่งที่มีความสูงของเบตอลูมินากัมมันต์ 4 cm อัตราการไหล 15 mL/min สามารถดูดซับสีย้อมเหลืองแอสิด 36 ได้สูงสุด 157.35 mg/g แสดงให้เห็นว่าเม็ดอลูมินากัมมันต์เป็นสารดูดซับที่มีประสิทธิภาพต่อการกำจัดสีย้อมเหลืองแอสิด 36 ในคอลัมน์เบตหนึ่ง ทั้งนี้อัตราการไหลมีผลต่อประสิทธิภาพการดูดซับและเวลาอิ่มตัวของสารดูดซับซึ่งขึ้นกับความสูงของเบตและความเข้มข้นของสีย้อม เมื่อวิเคราะห์ข้อมูลการทดลองโดยศึกษากราฟเบรคทฤษฎีเทียบกับแบบจำลองจลนศาสตร์ของ Thomas, Yoon-Nelson และ Adams-Bohart พบว่าพฤติกรรมของกราฟเบรคทฤษฎีมีความสอดคล้องกับแบบจำลองของ Thomas และ Yoon-Nelson โดยมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ $R^2 \geq 0.89$ ที่สภาวะต่างๆ และสามารถทำนายความสามารถในการดูดซับเพื่อนำไปใช้ในการออกแบบกระบวนการบำบัดน้ำเสียจากสีย้อม

คำสำคัญ: การดูดซับ; สีย้อมเหลืองแอสิด 36; คอลัมน์เบตหนึ่ง; เม็ดอลูมินากัมมันต์; กราฟเบรคทฤษฎี

Fixed-bed Adsorption of Acid Dye using Granular Activated Alumina Prepared from Aluminum Scrap

Patcharee Kamthita* and Natthawan Srinam

Department of Chemical Engineering, College of Engineering, Rangsit University

* Corresponding author, E-mail: patcharee.k@rsu.ac.th

Received: 7 August 2023; Revised: 12 October 2023; Accepted: 17 October 2023

Online Published: 25 December 2023

Abstract: This research aimed to study the adsorption performance of acid yellow 36 (AY36) from an aqueous solution using granular activated alumina (GAA) prepared from aluminum scrap in a fixed-bed column. The effects of GAA bed height (2-4 cm), dye solution flow rate (10-20 mL/min), and initial dye concentration (40-60 mg/L) on the breakthrough characteristics of the fixed-bed adsorption were investigated. The maximum adsorption capacity of the column was found to be 157.35 mg of AY36 per gram of GAA adsorbent at a bed height of 4 cm, initial dye concentration of 50 mg/L, and flow rate of 15 mL/min. The results revealed that GAA can be used as an effective adsorbent for the removal of acid yellow 36 in the fixed-bed column. The flow rate affected the adsorption efficiency and adsorbent saturation time, which depended on bed height and dye concentration. Thomas, Yoon-Nelson, and Adams-Bohart kinetic models were applied to analyze the experimental data and calculate the characteristic parameters of the column dynamics. The behaviors of the breakthrough curves fitted well to the Thomas and Yoon-Nelson models with coefficients of correlation $R^2 \geq 0.89$ at different conditions. These models can predict the adsorption capacity in a fixed-bed column to be used in the design of dye wastewater treatment processes.

Keywords: Adsorption; Acid yellow 36; Fixed-bed column; Granular activated alumina; Breakthrough curve



1. บทนำ

กระบวนการฟอกย้อมสีเส้นใยในอุตสาหกรรมสิ่งทอมีการใช้สารเคมีและน้ำปริมาณมาก ซึ่งสีย้อมที่ใช้ในอุตสาหกรรมมีหลายชนิด เช่น สีรีแอคทีฟ (Reactive Dyes) สีย้อมแอซิด (Acid Dyes) สีย้อมเบสิก (Basic Dyes) สีไ้ตรง (Direct Dyes) สีแว้ต (Vat Dyes) และสีดีสเพอร์ส (Disperse Dyes) เป็นต้น ในบรรดาสีย้อมต่างๆ เหล่านี้มีการใช้สีย้อมแอซิดอย่างกว้างขวางในอุตสาหกรรมสิ่งทอ เหมาะสำหรับการย้อมเส้นใยโปรตีน เช่น ไหม ขนสัตว์ และเส้นใยสังเคราะห์บางชนิด เมื่อละลายน้ำแล้วโมเลกุลสีจะมีประจุเป็นลบจึงเรียกว่าสีย้อมแอนไอออน (Anionic Dye) สีชนิดนี้สามารถกระจายตัวในน้ำได้ดี มีโครงสร้างประกอบด้วยพันธะคู่ของไนโตรเจน ($-N=N-$) เชื่อมระหว่างวงแหวนอะโรมาติก 2 วง ซึ่งเป็นโครงสร้างโครโมฟอร์ (Chromophores) ที่ทำให้เกิดสีเข้มสดใส [1] ในกระบวนการฟอกย้อมนั้นสีย้อมบางส่วนถูกชะล้างด้วยน้ำปริมาณมากทำให้มีสิ่งปนเปื้อนอยู่ในน้ำเสีย เช่น สารแขวนลอย โลหะหนักและอื่นๆ จึงจำเป็นที่จะต้องมีการบำบัดน้ำเสียก่อนปล่อยลงสู่แหล่งน้ำเพื่อลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม มีการศึกษาเทคโนโลยีการบำบัดน้ำเสียเพื่อให้ได้คุณภาพน้ำทิ้งตามมาตรฐานด้วยเทคนิคการบำบัดทางกายภาพ เคมีและชีวภาพ (Physico-chemical and Biological Techniques) แต่ละเทคนิคมีข้อจำกัดแตกต่างกันในด้านประสิทธิภาพ ต้นทุน และอาจก่อให้เกิดมลพิษใหม่จากกากตะกอน [2] โดยส่วนใหญ่เลือกใช้กระบวนการดูดซับ เนื่องจากมีประสิทธิภาพในการบำบัดสามารถกำจัดโมเลกุลของสีย้อมที่ปนเปื้อนอยู่ในสารละลายให้มีความเข้มข้นลดลง ใช้เวลาในการบำบัดไม่มาก สามารถดำเนินการภายใต้

ความดันบรรยากาศและอุณหภูมิปกติ มีการศึกษากระบวนการดูดซับสีย้อมด้วยสารดูดซับชนิดต่างๆ ใน 2 รูปแบบคือ การดูดซับแบบกะหรือแบบแบตช์ (Batch Adsorption) โดยทำการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับเช่น ปริมาณของสารดูดซับ ความเป็นกรด-ด่าง ความเข้มข้นของสารละลาย เวลาและอุณหภูมิที่ใช้ในการดูดซับ ศึกษาสมมูลของการดูดซับและประสิทธิภาพการดูดซับสูงสุดโดยใช้แบบจำลองไอโซเทอร์มการดูดซับ (Adsorption Isotherm) เช่นแบบจำลองของ Langmuir และ Freundlich รวมทั้งศึกษาจลนศาสตร์ของการดูดซับ (Kinetic Adsorption) [3] กระบวนการดูดซับอีกรูปแบบหนึ่งคือ การดูดซับในคอลัมน์แบบต่อเนื่อง (Continuous Fixed-bed Adsorption) ที่มีปัจจัยต่อการดูดซับขึ้นอยู่กับสภาวะการไหลผ่านชั้นของสารดูดซับ ความเข้มข้นของสารถูกดูดซับ (Adsorbate) อัตราการไหลและความสูงของชั้นสารดูดซับ โดยศึกษาการดูดซับจากเส้นโค้งการดูดซับหรือเรียกว่ากราฟเบรคทูร์ (Breakthrough Curve) ซึ่งสามารถอธิบายพฤติกรรมของการดูดซับแบบต่อเนื่องของสารถูกดูดซับบนพื้นผิวของสารดูดซับ (Adsorbent Surface) และเปรียบเทียบกับแบบจำลองการดูดซับของ Thomas, Yoon-Nelson และ Adams-Bohart ระหว่างความเข้มข้นของสารถูกดูดซับกับเวลาในการดูดซับ ซึ่งการศึกษาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ทำให้สามารถขยายสเกลไปใช้ในระดับอุตสาหกรรมได้ มีงานวิจัยจำนวนมากที่ศึกษาการดูดซับสีย้อมแอซิด สีย้อมรีแอคทีฟในคอลัมน์แบบต่อเนื่อง โดยใช้สารดูดซับที่เป็นสารอินทรีย์ เช่น ถ่านกัมมันต์และไคโตซาน [4-10] แต่เนื่องจากการผลิตถ่านกัมมันต์และไคโตซานมีขั้นตอนที่ซับซ้อนและต้นทุนสูง จึงได้มีการศึกษาสารดูดซับชนิด



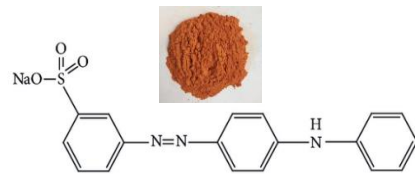
อื่นที่เป็นสารอนินทรีย์ เช่น สารดูดซับคอมโพสิตคาร์บอน-อลูมินา [11] และงานวิจัยที่ผ่านมาได้พัฒนาการผลิตสารดูดซับอลูมินากัมมันต์ (Activated Alumina) หรือแกมมาอลูมินา ($\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$) ที่มีชั้นตอนไม่ซับซ้อนและใช้ต้นทุนต่ำ โดยเตรียมจากเศษอลูมิเนียม (Aluminum Scrap) ด้วยวิธีการตกตะกอน และทดสอบประสิทธิภาพการดูดซับสีย้อมเหลืองแอสซิด 36 แบบกะด้วยอลูมินากัมมันต์ได้สูงถึง 98% ภายในเวลา 20 นาที มีสมดุลการดูดซับสอดคล้องกับไอโซเทอร์มแลงเมียร์ ความสามารถในการดูดซับสีย้อมเหลืองแอสซิด 36 ได้สูงสุด 125 mg/g และมีจลนศาสตร์การดูดซับสีย้อมในสารละลายสอดคล้องกับอัตราปฏิกิริยาอันดับสองเทียม [12] ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้ศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับสีย้อมเหลืองแอสซิด 36 แบบต่อเนื่องในคอลัมน์เบตหนึ่งที่บรรจุด้วยเม็ดอลูมินากัมมันต์ที่เตรียมจากเศษอลูมิเนียม โดยมีตัวแปรความสูงของเบต อัตราการไหล และความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายสีย้อม ศึกษากราฟเบรคทรู เพื่อวิเคราะห์ประสิทธิภาพของการดูดซับสีย้อมด้วยเม็ดอลูมินากัมมันต์แบบต่อเนื่องในคอลัมน์เบตหนึ่ง และศึกษาความสามารถในการดูดซับของสารดูดซับสูงสุดเปรียบเทียบกับแบบจำลองของ Thomas, Yoon-Nelson และ Adams-Bohart เพื่อเป็นแนวทางในการออกแบบกระบวนการบำบัดน้ำเสียในระดับอุตสาหกรรมที่สามารถบำบัดสีย้อมในน้ำเสียปริมาณมากได้

2. วิธีการดำเนินงานวิจัย

2.1 เตรียมสารละลายสีย้อมเหลืองแอสซิด 36

สีย้อมเหลืองแอสซิด 36 (Acid Yellow 36; AY36) ของบริษัท Ajax Finechem Pty Ltd. เป็นสีย้อมชนิด

แอนไอออน สูตรเคมี $\text{C}_{18}\text{H}_{14}\text{N}_3\text{NaO}_3\text{S}$ มวลโมลาร์ 375.38 g/mol มีค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่นสูงสุด (λ_{max}) 414 nm ลักษณะทางกายภาพและโครงสร้างของสีย้อม AY36 แสดงดังรูปที่ 1 เตรียมสารละลายสีย้อม AY36 เป็นสารละลายตั้งต้นเก็บไว้ในขวดสีชา ที่มีความเข้มข้น 100 mg/L ด้วยน้ำกลั่น ปรับค่า pH 3 ด้วยสารละลายกรดไฮโดรคลอริก [12] เพื่อใช้ในการเตรียมสารละลายสีย้อมที่มีความเข้มข้นเริ่มต้น 40, 50 และ 60 mg/L ตามลำดับ



รูปที่ 1 ลักษณะทางกายภาพและโครงสร้างของสีย้อมเหลืองแอสซิด 36

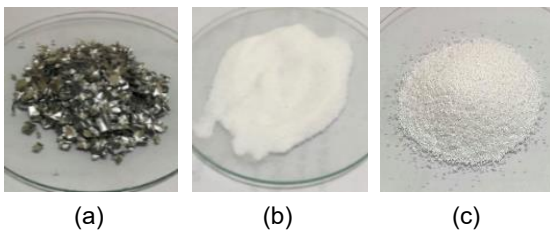
2.2 เตรียมสารดูดซับเม็ดอลูมินากัมมันต์

การเตรียมผงอลูมินากัมมันต์จากเศษอลูมิเนียมในงานวิจัยนี้ใช้วิธีการเตรียมด้วยการตกตะกอนที่เหมาะสมเช่นเดียวกับงานวิจัยที่ผ่านมา [12] โดยการละลายเศษอลูมิเนียมด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 3.0 M ในอัตราส่วน 1:1 ได้สารละลายโซเดียมอลูมิเนต ($\text{NaAl}(\text{OH})_4$) ปรับค่า pH 6.5 และบ่มสารละลายที่อุณหภูมิ 45 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมงเพื่อให้เกิดเจลของอลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ ($\text{Al}(\text{OH})_3$) ทำการกรองและเผาที่อุณหภูมิ 550 °C เป็นเวลา 3 ชั่วโมง ได้ผงอลูมินากัมมันต์สีขาว นำไปวิเคราะห์ด้วยเครื่อง X-ray Diffractometer รุ่น Bruker D5005, Germany พบว่า XRD pattern ของอลูมินากัมมันต์สอดคล้องกับโครงสร้างของแกมมาอลูมินา ($\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$)



และวิเคราะห์พื้นที่ผิวและขนาดรูพรุนด้วยเครื่อง Surface Area and Pore Size Analyzer ยี่ห้อ Quantachrome รุ่น Autosorb iQ, USA พบว่ามีพื้นที่ผิวจำเพาะ (BET Surface Area) $286 \text{ m}^2/\text{g}$ ปริมาตรของรูพรุน (BJH Pore Volume) $0.36 \text{ cm}^3/\text{g}$ และขนาดรูพรุน 5.03 nm รวมทั้งวิเคราะห์ขนาดของอนุภาคด้วยเครื่อง Particle Size Analyzer ยี่ห้อ Beckman Coulter รุ่น Delsa Max, USA พบว่ามีขนาดอนุภาคเฉลี่ย $2.554 \mu\text{m}$

การเตรียมเม็ดอลูมินากัมมันต์ (Granular Activated Alumina) โดยการผสมผงอลูมินากัมมันต์กับพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ (PVA) ความเข้มข้น $5\%/\text{w/w}$ ในอัตราส่วน 10 g ต่อ 4.5 mL (ละลาย PVA ในน้ำและให้ความร้อนจนกระทั่งละลายหมด) ซึ่ง PVA ทำหน้าที่เป็นสารยึดเหนี่ยว (Binder) มีสมบัติในการยึดติดได้ดี ช่วยในการขึ้นรูปผงอลูมินากัมมันต์ให้เป็นเม็ด [11] ทำการกวนผสมจนกระทั่งจับตัวเป็นเม็ดยานำไปอบที่อุณหภูมิ $100 \text{ }^\circ\text{C}$ เป็นเวลา 1 hr และร่อนผ่านตะแกรงขนาด $300 \mu\text{m}$ เม็ดอลูมินากัมมันต์มีความหนาแน่นเนื้อ (Solid Density) 2.97 g/mL ซึ่งมีลักษณะทางกายภาพดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 ลักษณะทางกายภาพของ (a) เศษอลูมิเนียม (b) ผงอลูมินากัมมันต์ และ (c) เม็ดอลูมินากัมมันต์

2.3 การดูดซับในคอลัมน์เบตหนึ่ง

คอลัมน์ที่ใช้ในการดูดซับแบบเบตหนึ่งทำด้วยท่อแก้วที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 1.14 cm ความสูง 28 cm ส่วนล่างของคอลัมน์บรรจุใยแก้วเพื่อป้องกันการหลุดลอกของเม็ดอลูมินากัมมันต์ โดยบรรจุเม็ดอลูมินากัมมันต์ในคอลัมน์ตามความสูง (Bed Height) ที่กำหนด และบรรจุเม็ดแก้วทับด้านบนของเม็ดอลูมินากัมมันต์เพื่อป้องกันการกระจายของเม็ดอลูมินากัมมันต์และช่วยให้เกิดการไหลของสารละลายอย่างสม่ำเสมอ ทำการป้อนสารละลายสีย้อม AY36 ไหลเข้าสู่คอลัมน์จากด้านล่างออกทางด้านบน (Up-Flow) โดยใช้ปั๊มดูดจ่ายสารละลาย (Peristaltic Pump) ควบคุมอัตราการไหล ทำการทดลองและเก็บสารละลายตัวอย่างในช่วงเวลาที่กำหนด วิเคราะห์ความเข้มข้นของสีย้อม AY36 ที่เหลืออยู่ในสารละลายด้วยเครื่อง UV-visible Spectrophotometer ยี่ห้อ HACH รุ่น DR-6000, UK ที่ความยาวคลื่น 414 nm

2.3.1 ตัวแปรที่มีผลต่อการดูดซับสีย้อม

1. ความสูงของเบต (Z) 2, 3 และ 4 cm หรือเทียบเท่ากับมวลของเม็ดอลูมินากัมมันต์ 1.27, 1.90 และ 2.53 g ตามลำดับ โดยควบคุมอัตราการไหลของสารละลายสีย้อมคงที่ 15 mL/min ความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อม AY36 ในสารละลาย 50 mg/L
2. อัตราการไหลของสารละลายสีย้อม (F) 10, 15 และ 20 mL/min ตามลำดับ โดยใช้ความเข้มข้นเริ่มต้น 50 mg/L ความสูงของเบต 3 cm
3. ความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อม AY36 ในสารละลาย (C_0) 40, 50 และ 60 mg/L ตามลำดับ โดยควบคุมอัตราการไหลของสารละลายสีย้อมคงที่ 15 mL/min ความสูงของเบต 3 cm



2.3.2 วิเคราะห์การดูดซับในคอลัมน์เบตหนึ่ง

ประสิทธิภาพของการดูดซับในคอลัมน์เบตหนึ่งสามารถวิเคราะห์ได้จากกราฟเบรคทรู โดยพล็อตระหว่าง C_t/C_0 กับเวลา t เมื่อ C_0 และ C_t เป็นความเข้มข้นของสีย้อมเริ่มต้นและภายหลังการดูดซับที่เวลา t ตามลำดับ และพล็อตกราฟระหว่าง $(C_0 - C_t)$ กับเวลา t คำนวณค่าอินทิเกรตจากพื้นที่ใต้กราฟเพื่อคำนวณปริมาณการดูดซับทั้งหมด Q_{total} (mg) ปริมาณของสีย้อมที่ไหลเข้าสู่คอลัมน์ M_{total} (mg) และเปอร์เซ็นต์การกำจัดสีย้อม (% Dye Removal) ดังสมการ (1), (2) และ (3) ตามลำดับ [13]

$$Q_{total} = \frac{F}{1000} \int_{t=0}^{t_{total}} (C_0 - C_t) dt \quad (1)$$

$$M_{total} = \frac{C_0 F t_{total}}{1000} \quad (2)$$

$$\% \text{Dye Removal} = \frac{Q_{total}}{M_{total}} \times 100 \quad (3)$$

เมื่อ F เป็นอัตราการไหล (mL/min) และ $(C_0 - C_t)$ เป็นความเข้มข้นของสีย้อมที่ถูกดูดซับ (mg/L) และ t_{total} เป็นเวลาที่ใช้ในการดูดซับทั้งหมด (min)

ความสามารถในการดูดซับสูงสุดของเบต (Maximum Capacity Adsorption), Q_{eq} (mg/g) และความเข้มข้นของสีย้อมที่เหลืออยู่ (Unadsorbed Dye Concentration), C_{eq} (mg/L) คำนวณจากการดูดซับในคอลัมน์เบตหนึ่งๆ ที่เข้าสู่ภาวะสมดุล ดังสมการ (4) และ (5) ตามลำดับ [13]

$$Q_{eq} = \frac{Q_{total}}{m} \quad (4)$$

$$C_{eq} = \frac{M_{total} - Q_{total}}{F t_{total}} \times 100 \quad (5)$$

เมื่อ m คือ มวลของสารดูดซับเม็ดดอลูมินาแกมมันต์ที่บรรจุในคอลัมน์ตามความสูงของเบต (g)

2.3.3 แบบจำลองการดูดซับในคอลัมน์เบตหนึ่ง

การวิเคราะห์การดูดซับในคอลัมน์เบตหนึ่งจากกราฟเบรคทรูเป็นสิ่งสำคัญต่อการออกแบบกระบวนการดูดซับเพื่อใช้ทำนายความสามารถในการดูดซับสูงสุดภายใต้สภาวะปฏิบัติการที่เกี่ยวข้องกับความสูงของเบต อัตราการไหลและความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลาย [5] โดยเปรียบเทียบกราฟเบรคทรูจากการทดลองการดูดซับสีย้อม AY36 ด้วยสารดูดซับเม็ดดอลูมินาแกมมันต์ในคอลัมน์เบตหนึ่งกับแบบจำลองของ Thomas, Yoon-Nelson และ Adams-Bohart

3. ผลการวิจัยและอภิปรายผล

การศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับสีย้อม AY36 ด้วยเม็ดดอลูมินาแกมมันต์ในคอลัมน์เบตหนึ่งๆ ที่มี 3 ตัวแปร คือ ความสูงของเบต อัตราการไหลและความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายสีย้อมที่มีผลต่อการดูดซับสีย้อม ผลการศึกษากราฟเบรคทรูของการดูดซับในคอลัมน์เบตหนึ่งๆ โดยกำหนดเวลาเบรคทรู (Breakthrough Time), t_b (min) ที่อัตราส่วนความเข้มข้น $C_t/C_0 = 0.05$ และเวลาที่ใช้ในการดูดซับตั้งแต่เริ่มต้นจนกระทั่งความสามารถในการดูดซับถึงจุดอิ่มตัว (Saturation Time), t_s (min) ที่อัตราส่วนความเข้มข้น $C_t/C_0 = 0.99$ แสดงดังตารางที่ 1



ตารางที่ 1 ผลการทดลองการดูดซับสีย้อม AY36 ด้วยเม็ดอลูมินาแกมมันต์ในคอลัมน์เบตหนึ่งทีสภาวะตัวแปรต่างๆ

| Z | F | C _o | m | Q _{Total} | M _{Total} | Adsorption | Q _{eq} | C _{eq} | t _B | t _S |
|------|----------|----------------|------|--------------------|--------------------|------------|-----------------|-----------------|----------------|----------------|
| (cm) | (mL/min) | (mg/L) | (g) | (mg) | (mg) | (%) | (mg/g) | (mg/L) | (min) | (min) |
| 2 | 15 | 50 | 1.27 | 150.26 | 630.00 | 23.85 | 118.32 | 38.07 | 10 | 840 |
| 3 | 15 | 50 | 1.90 | 252.02 | 832.50 | 30.27 | 132.64 | 34.86 | 50 | 1110 |
| 4 | 15 | 50 | 2.53 | 398.09 | 1035.00 | 38.46 | 157.35 | 30.77 | 135 | 1380 |
| 3 | 10 | 50 | 1.90 | 290.28 | 720.00 | 40.32 | 152.78 | 33.70 | 75 | 1440 |
| 3 | 15 | 50 | 1.90 | 252.02 | 832.50 | 30.27 | 132.64 | 34.86 | 50 | 1110 |
| 3 | 20 | 50 | 1.90 | 204.69 | 850.00 | 24.08 | 107.73 | 37.96 | 25 | 850 |
| 3 | 15 | 40 | 1.90 | 240.09 | 780.00 | 30.78 | 126.36 | 27.69 | 60 | 1300 |
| 3 | 15 | 50 | 1.90 | 252.02 | 832.50 | 30.27 | 132.64 | 34.86 | 50 | 1110 |
| 3 | 15 | 60 | 1.90 | 272.50 | 855.00 | 31.87 | 143.42 | 45.69 | 40 | 950 |

3.1 ความสูงของเบต

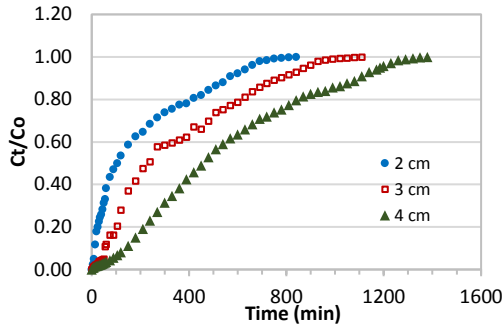
ผลการดูดซับสีย้อม AY36 ด้วยอลูมินาแกมมันต์ในคอลัมน์เบตหนึ่งทีมีความสูงของเบต 2, 3 และ 4 cm เทียบเท่ากับมวลของเม็ดอลูมินาแกมมันต์ 1.27, 1.90 และ 2.53 g ตามลำดับ โดยควบคุมอัตราการไหลของสารละลายสีย้อมคงที่ 15 mL/min ความเข้มข้นเริ่มต้น 50 mg/L แสดงผลกราฟเบรคทรู ดังรูปที่ 3 และตารางที่ 1 พบว่าความสูงของเบตที่เพิ่มขึ้นจาก 2 – 4 cm ทำให้มีมวลของเม็ดอลูมินาแกมมันต์เพิ่มขึ้น จึงมีเวลาเบรคทรูเพิ่มขึ้นจาก 10 เป็น 135 min และใช้เวลาถึงจุดอิ่มตัวของเบตนานขึ้นจาก 840 เป็น 1380 min ซึ่งมีความสามารถในการดูดซับสูงสุดของเบตเพิ่มขึ้นจาก 118.32 mg/g เป็น 157.35 mg/g เห็นได้ว่าความสูงของเบตที่เพิ่มขึ้นเทียบเท่ากับมีปริมาณของสารดูดซับมากขึ้น จึงมีพื้นผิวที่ดูดซับโมเลกุลสีย้อมได้มากขึ้น ทำให้มีประสิทธิภาพการดูดซับเพิ่มขึ้นจาก 23.85% เป็น 38.46% ซึ่งมีแนวโน้มไปทางเดียวกับงานวิจัยอื่นที่ใช้สารดูดซับต่างชนิดกันในการดูดซับสีย้อมในคอลัมน์เบตหนึ่ง [2, 7, 14]

3.2 อัตราการไหลของสารละลายสีย้อม

ผลการดูดซับสีย้อม AY36 ด้วยอลูมินาแกมมันต์ในคอลัมน์เบตหนึ่งทีมีอัตราการไหล 10, 15 และ 20 mL/min ตามลำดับ โดยใช้ความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อม 50 mg/L ความสูงของเบต 3 cm แสดงผลกราฟเบรคทรู ดังรูปที่ 4 และตารางที่ 1 พบว่าสารละลายสีย้อมไหลเข้าสู่คอลัมน์ทีอัตราการไหล 10 mL/min มีลักษณะกราฟเบรคทรูที่เพิ่มขึ้นอย่างช้าๆ มีเวลาเบรคทรู 75 min เวลาจุดอิ่มตัวของเบต 1440 min และมีประสิทธิภาพการดูดซับ 40.32 % ในขณะที่การดูดซับทีอัตราการไหล 15 และ 20 mL/min มีกราฟเบรคทรูที่เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในตอนเริ่มต้น ทำให้มีเวลาเบรคทรูที่เร็วขึ้นเป็น 50 และ 25 min และมีเวลาถึงจุดอิ่มตัวของเบตเร็วขึ้นเป็น 1110 และ 850 min ตามลำดับ ทั้งนี้ เนื่องจากอัตราการไหลเพิ่มสูงขึ้น เวลาในการถ่ายโอนมวลสารของสีย้อมเข้าสู่พื้นผิวของสารดูดซับอลูมินาแกมมันต์ลดลง ทำให้การดูดซับเกิดขึ้นไม่สมบูรณ์ และทีสภาวะสมดุลยังคงมีความเข้มข้นของสีย้อมที่ไม่ถูกดูดซับเหลืออยู่



บทความวิจัย

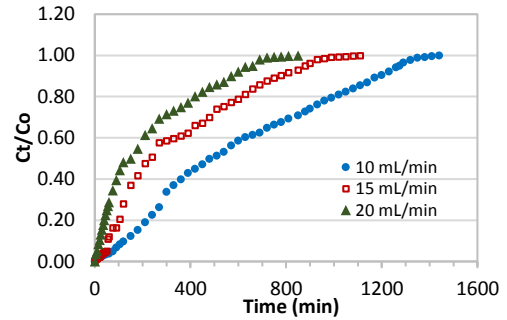


รูปที่ 3 กราฟเบรคทรูการดูดซับสีย้อม AY36 ที่มีความสูงของเบตต่างกัน (อัตราการไหล 15 mL/min ความเข้มข้นเริ่มต้น 50 mg/L)

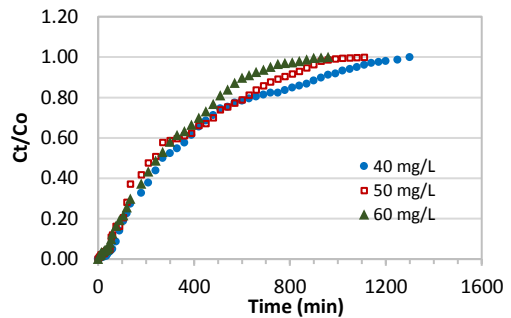
ส่งผลให้การดูดซับสีย้อมได้สูงสุดลดลงจาก 152.78 mg/g เหลือ 107.73 mg/g ซึ่งผลการดูดซับสีย้อม AY36 มีแนวโน้มเดียวกับงานวิจัยอื่น [2, 7, 14] โดยใช้อัตราการไหลที่ไม่สูงเกินไปเหมาะสมกับความสูงของเบตสามารถเพิ่มประสิทธิภาพการดูดซับให้มากขึ้น

3.3 ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายสีย้อม

ผลการดูดซับสีย้อม AY36 ด้วยเม็ดอลูมินาแกมมันต์ในคอลัมน์เบตหนึ่งที่มีความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อม 40, 50 และ 60 mg/L ตามลำดับ โดยใช้อัตราการไหลคงที่ 15 mL/min ความสูงของเบต 3 cm แสดงผลกราฟเบรคทรู ดังรูปที่ 5 และตารางที่ 1 พบว่าการเพิ่มความเข้มข้นเริ่มต้นให้มากขึ้นมีผลผกผันกับเวลาเบรคทรูที่เร็วขึ้นจาก 60 เป็น 40 min และเวลาถึงจุดอิ่มตัวของเบตเร็วขึ้นจาก 1300 เป็น 950 min แสดงให้เห็นว่าความเข้มข้นเริ่มต้นที่มากขึ้นมีผลต่อความสามารถในการดูดซับของเบตถึงจุดอิ่มตัวเร็วขึ้นและที่สภาวะสมดุลยังคงมีความเข้มข้นสีย้อมที่เหลืออยู่มากขึ้นจาก 27.69 เป็น 45.69 mg/L ซึ่งมีแนวโน้มเดียวกับงานวิจัยอื่น [2, 7, 14]



รูปที่ 4 กราฟเบรคทรูของการดูดซับสีย้อม AY36 ที่มีความเข้มข้นเริ่มต้นต่างกัน (ความเข้มข้นเริ่มต้น 50 mg/L ความสูงของเบต 3 cm)



รูปที่ 5 กราฟเบรคทรูของการดูดซับสีย้อม AY36 ที่มีความเข้มข้นเริ่มต้นต่างกัน (อัตราการไหล 15 mL/min ความสูงของเบต 3 cm)

3.4 แบบจำลองการดูดซับในคอลัมน์เบตหนึ่ง

ผลการวิเคราะห์กราฟเบรคทรูของการดูดซับสีย้อม AY36 ด้วยเม็ดอลูมินาแกมมันต์ในคอลัมน์เบตหนึ่งจากการทดลองภายใต้สภาวะปฏิบัติการที่เกี่ยวข้องกับความสูงของเบต อัตราการไหล และความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายสีย้อม AY36 เทียบกับกราฟเบรคทรูตามแบบจำลองของ Thomas, Yoon-Nelson และ Adams-Bohart ดังนี้



3.4.1 แบบจำลอง Thomas ใช้กับการดูดซับในคอลัมน์เบตหนึ่งที้อาศัยหลักการจลนศาสตร์ปฏิกิริยาอันดับสองโดยมีการไหลแบบทางเดียว (Plug Flow) ไม่มีการกระจายในแนวแกน และใช้สมมติฐานของไอโซเทอร์มแลงเมียร์ (Langmuir Isotherm) ที่สภาวะสมดุลเพื่อคำนวณความสามารถในการดูดซับสูงสุดของเบตและค่าคงที่ของการดูดซับ [5, 6, 13] โดยวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้น (linear Regression analysis) ของข้อมูลการไหลในคอลัมน์เบตหนึ่งตามความสัมพันธ์ของแบบจำลอง Thomas ดังสมการ (6)

$$\ln \left(\frac{C_0}{C_t} - 1 \right) = \frac{k_{TH} Q_{TH} m}{F} - k_{TH} C_0 t \quad (6)$$

เมื่อ k_{TH} เป็นค่าคงที่อัตรา Thomas (mL/mg min) และ Q_{TH} เป็นความจุการดูดซับสูงสุดของเบต (mg/g) ซึ่งคำนวณค่า k_{TH} และ Q_{TH} จากค่าความชันและจุดตัดแกนของกราฟที่พล็อตระหว่าง $\ln \left(\frac{C_0}{C_t} - 1 \right)$ กับเวลา t และค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์, $R^2 \geq 0.89$ แสดงดังตารางที่ 2 และรูปที่ 6 เห็นได้ว่าค่าความจุการดูดซับสูงสุดของเบต, Q_{eq} ที่คำนวณจากผลการทดลองและกราฟเบรคทรูเปรียบเทียบกับค่า Q_{TH} ที่คำนวณจากแบบจำลอง Thomas มีแนวโน้มของการเปลี่ยนแปลงตามตัวแปรของสภาวะการดูดซับไปในทิศทางเดียวกัน ซึ่งความสูงของเบตและความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อมที่เพิ่มขึ้นมีผลทำให้ค่า Q_{TH} เพิ่มขึ้น แต่ค่าคงที่อัตรา k_{TH} ลดลง เนื่องจากมีแรงขับเคลื่อนสำหรับการดูดซับจากความแตกต่างระหว่างปริมาณสีย้อมที่อยู่ในสารละลายกับปริมาณสีย้อมที่ถูกดูดซับ ในขณะที่การเพิ่มอัตราการไหลของสารละลายสีย้อมมี

ผลทำให้ค่า Q_{TH} ลดลง แต่ค่า k_{TH} เพิ่มขึ้น จึงเห็นได้ว่าผลการทดลองใช้อัตราการไหลและความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อมที่ต่ำกว่าและใช้อลูมินาเบตที่สูงขึ้นมีผลต่อการดูดซับสีย้อมด้วยเม็ดอลูมินากัมมันต์ได้ดี และมีความสอดคล้องกับแบบจำลองของ Thomas

3.4.2 แบบจำลอง Yoon-Nelson เป็นแบบจำลองที่ไม่ซับซ้อนและใช้ข้อมูลของการดูดซับในคอลัมน์น้อยกว่าแบบจำลองอื่นๆ โดยแบบจำลองนี้ศึกษาภายใต้สมมติฐานที่ว่าอัตราการดูดซับที่ลดลงมีความสัมพันธ์กับการดูดซับโมเลกุลสารที่ถูกดูดซับ และลักษณะของกราฟเบรคทรูการดูดซับสามารถนำมาใช้ในการทำนายเวลาการดูดซับ [5, 6, 13] โดยวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นของข้อมูลการไหลในคอลัมน์เบตหนึ่งตามความสัมพันธ์ของแบบจำลอง Yoon-Nelson แสดงดังสมการ (7)

$$\ln \left(\frac{C_t}{C_0 - C_t} \right) = k_{YN} t - k_{YN} \tau \quad (7)$$

เมื่อ k_{YN} เป็นค่าคงที่อัตรา Yoon-Nelson (1/min) และ τ เป็นเวลาในการดูดซับจนกระทั่งความเข้มข้นสารถูกดูดซับเหลือ 50% (min) ซึ่งคำนวณค่า k_{YN} และ τ จากค่าความชันและจุดตัดแกนของกราฟที่พล็อตระหว่าง $\ln \left(\frac{C_t}{C_0 - C_t} \right)$ กับเวลา t และค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์, $R^2 \geq 0.89$ แสดงดังตารางที่ 3 และรูปที่ 7 เห็นได้ว่าเวลาในการดูดซับจนกระทั่งความเข้มข้นของสีย้อมเหลือ 50% ($t_{50\%}$) จากผลการทดลองและกราฟเบรคทรูเปรียบเทียบกับค่า τ ที่คำนวณจากแบบจำลอง Yoon-Nelson มีแนวโน้มของการเปลี่ยนแปลงตามตัวแปรของสภาวะการดูดซับไปในทิศทางเดียวกัน เนื่องจากกลไก



ในการดูดซับสีย้อมด้วยอลูมินาแกมมันต์มีผลต่ออัตราการดูดซับ การเพิ่มอัตราการไหลของสารละลายสีย้อมและความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อมมีผลทำให้ค่าคงที่อัตรา k_{YN} เพิ่มขึ้น แต่เวลาในการดูดซับจนกระทั่งความเข้มข้นสารถูกดูดซับเหลือ 50% ลดต่ำลง แสดงให้เห็น

ว่าปริมาณของสีย้อมที่เพิ่มขึ้นมีผลต่ออัตราการดูดซับ ในขณะที่ความสูงของเบดที่มีผลทำให้เวลา τ เพิ่มขึ้น แต่ค่า k_{YN} ลดลง จึงเห็นได้ว่าแบบจำลอง Yoon-Nelson เหมาะสำหรับการดูดซับที่เบดมีความสูงมาก

ตารางที่ 2 ค่าพารามิเตอร์ของการดูดซับสีย้อม AY36 ในคอลัมน์เบดหนึ่งเทียบกับแบบจำลอง Thomas

| Experimental data | | | | Thomas model | | |
|-------------------|---------------|-----------------|--------------------|-------------------------|--------------------|--------|
| Z (cm) | F (mL/min) | C_0 (mg/L) | Q_{eq} (mg/g) | k_{TH} (mL/mg min) | Q_{TH} (mg/g) | R^2 |
| 2 | 15 | 50 | 118.32 | 0.1560 | 115.01 | 0.9041 |
| 3 | 15 | 50 | 132.64 | 0.1520 | 150.49 | 0.9212 |
| 4 | 15 | 50 | 157.35 | 0.1220 | 168.21 | 0.9323 |
| 3 | 10 | 50 | 152.78 | 0.1060 | 160.70 | 0.9196 |
| 3 | 15 | 50 | 132.64 | 0.1520 | 150.49 | 0.9212 |
| 3 | 20 | 50 | 107.73 | 0.1480 | 152.86 | 0.8852 |
| 3 | 15 | 40 | 126.36 | 0.1325 | 141.16 | 0.8986 |
| 3 | 15 | 50 | 132.64 | 0.1520 | 150.49 | 0.9212 |
| 3 | 15 | 60 | 143.42 | 0.1433 | 155.59 | 0.9480 |

ตารางที่ 3 ค่าพารามิเตอร์ของการดูดซับสีย้อม AY36 ในคอลัมน์เบดหนึ่งเทียบกับแบบจำลอง Yoon-Nelson

| Experimental data | | | | Yoon-Nelson model | | |
|-------------------|---------------|-----------------|---------------------|---------------------|-----------------|--------|
| Z (cm) | F (mL/min) | C_0 (mg/L) | $t_{50\%}$ (min) | k_{YN} (1/min) | τ (min) | R^2 |
| 2 | 15 | 50 | 105 | 0.0078 | 194.76 | 0.9041 |
| 3 | 15 | 50 | 240 | 0.0076 | 381.25 | 0.9212 |
| 4 | 15 | 50 | 470 | 0.0061 | 567.43 | 0.9323 |
| 3 | 10 | 50 | 480 | 0.0053 | 610.64 | 0.9196 |
| 3 | 15 | 50 | 240 | 0.0076 | 381.25 | 0.9212 |
| 3 | 20 | 50 | 210 | 0.0074 | 184.05 | 0.8852 |
| 3 | 15 | 40 | 390 | 0.0053 | 447.00 | 0.8986 |
| 3 | 15 | 50 | 240 | 0.0076 | 381.25 | 0.9212 |
| 3 | 15 | 60 | 210 | 0.0086 | 328.48 | 0.9480 |



3.4.3 แบบจำลอง Adams-Bohart เป็นแบบจำลองที่ใช้หลักการของปฏิกิริยาที่พื้นผิวของสารดูดซับ ซึ่งอัตราการดูดซับเป็นสัดส่วนกับพื้นผิวของสารดูดซับที่เหลืออยู่ในการดูดซับ [5, 6, 13] โดยวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นของข้อมูลการไหลในคอลัมน์เบตหนึ่งตามความสัมพันธ์ของแบบจำลอง Adams-Bohart แสดงดังสมการ (8) และ (9)

$$\ln \left(\frac{C_t}{C_0} \right) = k_{AB} C_0 t - k_{AB} N_{AB} \left(\frac{Z}{U} \right) \quad (8)$$

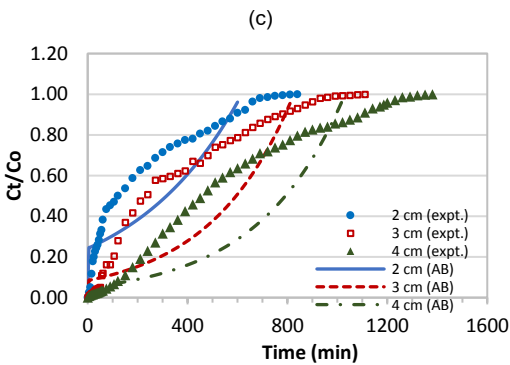
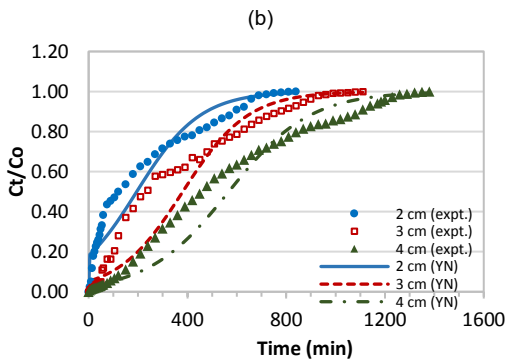
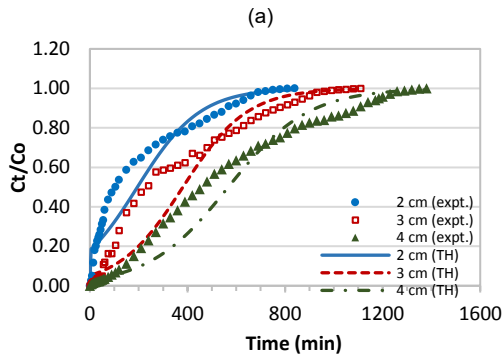
$$Q_{AB} = N_{AB} / \rho \quad (9)$$

เมื่อ k_{AB} เป็นค่าคงที่จลนศาสตร์ Adams-Bohart (mL/mg min), N_{AB} เป็นความจุการดูดซับสูงสุดของเบตต่อปริมาตรสารดูดซับ (mg/mL) หรือ Q_{AB} เป็นความจุการดูดซับสูงสุดของเบตต่อมวลสารดูดซับ (mg/g) โดยที่ ρ เป็นความหนาแน่นของสารดูดซับ (g/mL) และ u เป็นความเร็วของสารละลายที่ไหลเข้าสู่คอลัมน์ (cm/min) ค่า k_{AB} และ N_{AB} คำนวณได้จาก

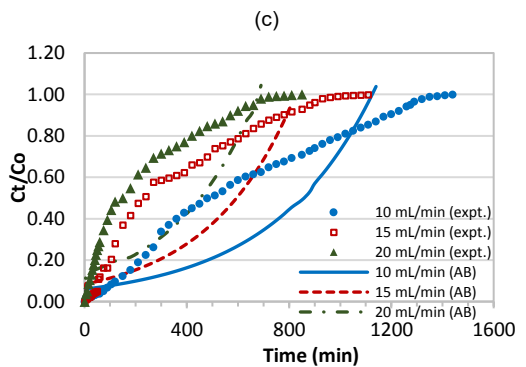
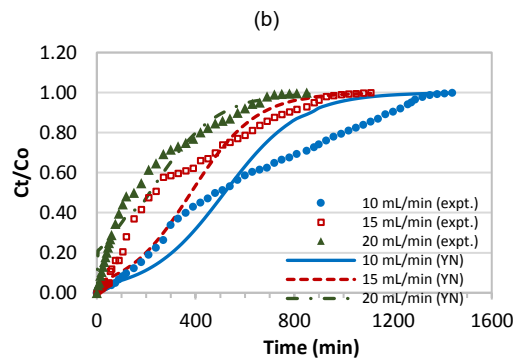
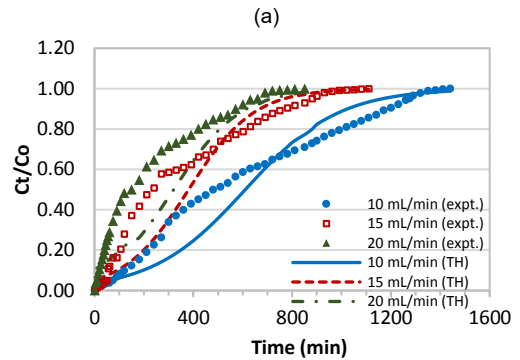
ความชันและจุดตัดแกนของกราฟที่พล็อตระหว่าง $\ln \left(\frac{C_t}{C_0} \right)$ กับเวลา t และค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ แสดงดังตารางที่ 4 และรูปที่ 8 พบว่าความจุการดูดซับสูงสุดของเบตต่อมวลของสารดูดซับ, Q_{eq} จากผลการทดลองมีค่ามากกว่าค่า Q_{AB} ที่คำนวณจากแบบจำลอง Adams-Bohart เนื่องจากแบบจำลองนี้เหมาะสำหรับการอธิบายเส้นโค้งการดูดซับแบบต่อเนื่องในช่วงเริ่มต้นที่อัตราส่วน C_t/C_0 ต่ำกว่า 0.5 เพราะสารดูดซับยังมีพื้นผิวที่ว่างอยู่มาก [6] เมื่อเพิ่มความเข้มข้นเริ่มต้นมีผลทำให้ค่าคงที่ k_{AB} ลดลง แต่ค่า Q_{AB} เพิ่มขึ้น ในขณะที่การเพิ่มอัตราการไหลมีผลทำให้ค่าคงที่ k_{AB} และค่า Q_{AB} เพิ่มขึ้น ซึ่งแบบจำลองของ Adams-Bohart ไม่สอดคล้องกับผลการทดลอง และมีแนวโน้มของการเปลี่ยนแปลงตามตัวแปรของสภาวะการดูดซับไม่เป็นไปในทิศทางเดียวกัน เห็นได้ว่าทุกสภาวะการดูดซับมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ $R^2 \leq 0.75$

ตารางที่ 4 ค่าพารามิเตอร์ของการดูดซับสีย้อม AY36 ในคอลัมน์เบตหนึ่งเทียบกับแบบจำลอง Adams-Bohart

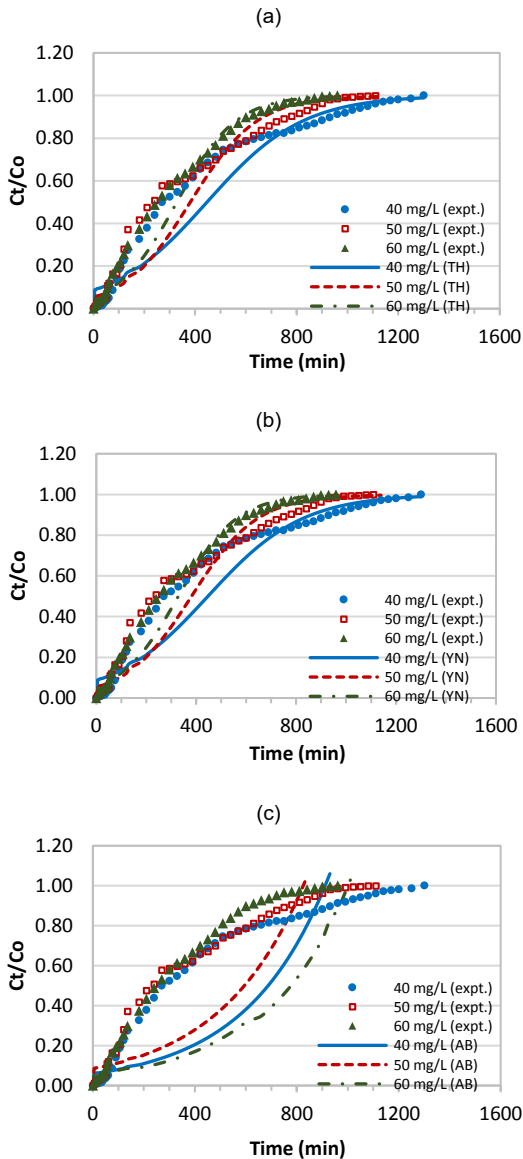
| Experimental data | | | | Adams-Bohart model | | | |
|-------------------|----------|----------------|-----------------|--------------------|-----------------|-----------------|----------------|
| Z | F | C ₀ | Q _{eq} | k _{AB} | N _{AB} | Q _{AB} | R ² |
| (cm) | (mL/min) | (mg/L) | (mg/g) | (mL/mg min) | (mg/mL) | (mg/g) | |
| 2 | 15 | 50 | 118.32 | 0.0460 | 226.75 | 76.35 | 0.5565 |
| 3 | 15 | 50 | 132.64 | 0.0600 | 202.17 | 68.07 | 0.6460 |
| 4 | 15 | 50 | 157.35 | 0.0580 | 189.30 | 63.74 | 0.7457 |
| 3 | 10 | 50 | 152.78 | 0.0500 | 183.68 | 61.85 | 0.7528 |
| 3 | 15 | 50 | 132.64 | 0.0600 | 202.17 | 68.07 | 0.6460 |
| 3 | 20 | 50 | 107.73 | 0.0620 | 211.01 | 71.05 | 0.6075 |
| 3 | 15 | 40 | 126.36 | 0.0775 | 178.54 | 60.11 | 0.6173 |
| 3 | 15 | 50 | 132.64 | 0.0600 | 202.17 | 68.07 | 0.6460 |
| 3 | 15 | 60 | 143.42 | 0.0517 | 267.80 | 90.17 | 0.7062 |



รูปที่ 6 เปรียบเทียบกราฟเบรคทรูการดูดซับสีย้อม AY36 ที่มีความสูงของเบตต่างกัน (อัตราการไหล 15 mL/min ความเข้มข้นเริ่มต้น 50 mg/L) กับ แบบจำลอง (a) Thomas, (b) Yoon-Nelson, (c) Adams-Bohart



รูปที่ 7 เปรียบเทียบกราฟเบรคทรูการดูดซับสีย้อม AY36 ที่มีอัตราการไหลต่างกัน (ความเข้มข้นเริ่มต้น 50 mg/L ความสูงของเบต 3 cm) กับ แบบจำลอง (a) Thomas, (b) Yoon-Nelson, (c) Adams-Bohart



รูปที่ 8 เปรียบเทียบกราฟเบรคทรูการดูดซับสีย้อม AY36 ที่มีความเข้มข้นเริ่มต้นต่างกัน (อัตราการไหล 15 mL/min ความสูงของเบด 3 cm) กับ แบบจำลอง (a) Thomas, (b) Yoon-Nelson, (c) Adams-Bohart

4. บทสรุป

การศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับสีย้อม AY36 ด้วยเม็ดดอลูมินากัมมันต์ที่เตรียมจากเศษอลูมิเนียมในคอลัมน์เบตนิ่ง พบว่า ตัวแปรความสูงของเบตและความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายสีย้อมที่เพิ่มขึ้น มีผลทำให้ประสิทธิภาพการดูดซับและความจุของการดูดซับสูงสุดเพิ่มมากขึ้นโดย ในขณะที่การเพิ่มอัตราการไหลของสารละลายสีย้อมที่ป้อนเข้าสู่คอลัมน์มีผลทำให้ประสิทธิภาพการดูดซับลดลง เนื่องจากเวลาที่ใช้ในการสัมผัสเพื่อถ่ายโอนมวลสารระหว่างสีย้อมกับสารดูดซับเม็ดดอลูมินากัมมันต์ลดลง ดังนั้นอัตราการไหลของสารละลายที่เหมาะสมจึงเป็นปัจจัยที่สำคัญต่อกระบวนการดูดซับในคอลัมน์เบตนิ่งตามความสูงของเบตและความเข้มข้นของสารละลาย ซึ่งผลการดูดซับสีย้อม AY36 ที่มีความเข้มข้นเริ่มต้น 50 mg/L ใช้ความสูงของเบดดอลูมินากัมมันต์ 4 cm อัตราการไหล 15 mL/min สามารถดูดซับสีย้อม AY36 ได้สูงสุด 157.35 mg/g โดยใช้เวลาเบรคทรู 135 min และเวลาในการดูดซับถึงจุดอิ่มตัวของเบต 1380 min เห็นได้ว่าสารดูดซับเม็ดดอลูมินากัมมันต์สามารถใช้ในการดูดซับแบบต่อเนื่องได้อย่างมีประสิทธิภาพ และจากการศึกษากราฟเบรคทรูของข้อมูลการทดลองเพื่อวิเคราะห์ประสิทธิภาพของการดูดซับสีย้อม AY36 เทียบกับแบบจำลองการดูดซับพบว่ามีความสอดคล้องกับแบบจำลองของ Thomas และ Yoon-Nelson โดยมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์, $R^2 \geq 0.89$ และสามารถคำนวณความสามารถในการดูดซับสูงสุดจึงนำแบบจำลองนี้ไปใช้เป็นแนวทางในการออกแบบกระบวนการบำบัดน้ำเสียในระดับอุตสาหกรรมที่ต้องการบำบัดสีย้อมในน้ำเสียปริมาณมากได้



5. เอกสารอ้างอิง

- [1] N. Sekar, 15 - Acid dyes, Handbook of textile and industrial dyeing, Woodhead Publishing, PA, USA, 2011, pp. 486-514.
- [2] S. Charola, R. Yadav, P. Das and S. Maiti, Fixed-bed adsorption of Reactive Orange 84 dye onto activated carbon prepared from empty cotton flower agro-waste, Sustainable Environment Research, 2018, 28(6), 298-308.
- [3] S. Banerjee, S. Dubey, R.K. Gautam, M.C. Chattopadhyaya and Y.C. Sharma, Adsorption characteristics of alumina nanoparticles for the removal of hazardous dye, Orange G from aqueous solutions, Arabian Journal of Chemistry, 2019, 12(8), 5339-5354.
- [4] W.T. Mohammed, H.F. Farhood and A.H.B. Al-Mas'udi, Removal of Dyes from Wastewater of Textile Industries Using Activated Carbon and Activated Alumina, Iraqi Journal of Chemical and Petroleum Engineering, 2009, 10(1), 43-52.
- [5] A.A. Ahmad and B.H. Hameed, Fixed-bed adsorption of reactive azo dye onto granular activated carbon prepared from waste, Journal of Hazardous Materials, 2010, 175(1-3), 298-303.
- [6] M. Nainamalai, M. Palani, B. Soundarajan and A. Ebinesar J.S.S, Decolorization of synthetic dye wastewater using packed bed electro-adsorption column, Chemical Engineering and Processing - Process Intensification, 2018, 130, 160-168.
- [7] J. López-Cervantes, D.I. Sánchez-Machado, R.G. Sánchez-Duarte and M.A. Correa-Murrieta, Study of a fixed-bed column in the adsorption of an azo dye from an aqueous medium using a chitosan–glutaraldehyde biosorbent, Adsorption Science and Technology, 2017, 36(1-2), 215-232.
- [8] C.A. Demarchi, M. Campos and C.A. Rodrigues, Adsorption of textile dye Reactive Red 120 by the chitosan–Fe(III)-crosslinked: Batch and fixed-bed studies, Journal of Environmental Chemical Engineering, 2013, 1(4), 1350-1358.
- [9] S. Rouf and M. Nagapadma, Modeling of fixed bed column studies for adsorption of azo dye on chitosan impregnated with a cationic surfactant, International Journal of Scientific and Engineering Research, 2015, 6(2), 538-544.



- [10] R.G. Mavinkattimath, V.S. Kodialbail and G. Srinikethan, Continuous fixed-bed adsorption of reactive azo dye on activated red mud for wastewater treatment-Evaluation of column dynamics and design parameters, *Environmental Science and Pollution Research*, 2023, 30(19), 57058–57075.
- [11] M. Dutta and J.K. Basu, Fixed-bed column study for the adsorptive removal of acid fuchsin using carbon–alumina composite pellet, *International Journal of Environmental Science and Technology*, 2013, 11(1), 87-96.
- [12] P. Kamthita and S. Tiamsri, Application of response surface methodology for optimization of γ -alumina nanoparticles synthesis and acid dye adsorption, *Journal of Current Science and Technology*, 2019, 9(1), 1-15.
- [13] A.P. Lim and A.Z. Aris, Continuous fixed-bed column study and adsorption modeling: Removal of cadmium (II) and lead (II) ions in aqueous solution by dead calcareous skeletons, *Biochemical Engineering Journal*, 2014, 87, 50-61.
- [14] H.I. Albroomi, M.A. Elsayed, A. Baraka, and M.A. Abdelmaged, Batch and fixed-bed adsorption of tartrazine azo-dye onto activated carbon prepared from apricot stones, *Applied Water Science*, 2016, 7(4), 2063-2074.



การทำนายพฤติกรรมการตัดของคานคอกกรีดเสริมเหล็กที่เสื่อมสภาพ ได้รับการซ่อมและเสริมกำลังด้วยแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์โดยใช้วิธี ไฟไนต์เอลิเมนต์

สุพิชญา อารีย์มิตร* สายันต์ ศิริมนตรี ศุภรหทัย โภธินามทอง และ ชนะชัย ทองโหม

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต

* ผู้ประสานงานเผยแพร่, E-mail: supitcharya.areem@dome.tu.ac.th

วันที่รับบทความ: 23 พฤษภาคม 2566; วันที่ทบทวนบทความ: 18 กันยายน 2566; วันที่ตอบรับบทความ: 25 ตุลาคม 2566

วันที่เผยแพร่ออนไลน์: 25 ธันวาคม 2566

บทคัดย่อ: บทความนี้นำเสนอการทำนายพฤติกรรมการตัดของคานคอกกรีดเสริมเหล็กที่เสื่อมสภาพ ได้รับการซ่อมและเสริมกำลังด้วยแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ โดยใช้วิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์ ด้วยโปรแกรม ANSYS โดยนำผลวิเคราะห์ที่ได้มาเทียบกับผลจากงานวิจัยในอดีตที่ได้ทำการทดสอบในห้องปฏิบัติการ เปรียบเทียบในรูปแบบความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกกับการแ่นตัวที่กึ่งกลางคาน ผลการศึกษาพบว่า แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์สามารถทำนายพฤติกรรมของคานคอกกรีดเสริมเหล็กที่เสื่อมสภาพ ได้รับการซ่อมและเสริมกำลังด้วยแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยให้ผลสอดคล้องกับผลการทดสอบของงานวิจัยในอดีต อีกทั้งแบบจำลองที่ได้พัฒนาขึ้นนี้ยังสามารถทำการศึกษาผลกระทบของตัวแปรอื่นที่มีผลต่อพฤติกรรมและกำลังของคาน โดยตัวแปรที่ศึกษาได้แก่ กำลังอัดคอกกรีด กำลังรับแรงดึงของเหล็กเสริม และจำนวนของแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ ซึ่งพบว่า กำลังอัดคอกกรีดมีผลค่อนข้างน้อยต่อการรับน้ำหนักบรรทุกสูงสุดของคานที่สภาวะประลัย กำลังรับแรงดึงของเหล็กเสริมมีผลต่อการรับน้ำหนักบรรทุกสูงสุดที่สภาวะประลัยอย่างมีนัยสำคัญ และจำนวนชั้นของแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้คานคอกกรีดเสริมเหล็กที่เสื่อมสภาพแล้วถูกซ่อมแซมด้วยซีเมนต์ไม่หดตัวและเสริมกำลังด้วยแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์มีการแ่นตัวลดลงและกำลังรับน้ำหนักที่สภาวะประลัยสูงขึ้น

คำสำคัญ: วิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์; คานคอกกรีดเสริมเหล็ก; การเสื่อมสภาพ; การเสริมกำลัง; แผ่นคาร์บอนไฟเบอร์

Prediction of Flexural Behavior of Degraded Beam Repaired and Strengthened by CFRP Sheets Using Finite Element Method

Supitcharya Areemit^{*}, Sayan Sirimontree, Sutthahathai Potinamtong and Chanachai Thongchom

Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Thammasat University Rangsit Campus

^{*} Corresponding author, E-mail: supitcharya.areem@dome.tu.ac.th

Received: 25 May 2023; Revised: 18 September 2023; Accepted: 25 October 2023

Online Published: 25 December 2023

Abstract: The paper presents the prediction of the flexural behavior of deteriorated concrete beams reinforced with carbon fiber sheets by a finite element model. The program ANSYS was chosen for the analysis. The results from the finite element model in terms of the load-deflection relationship are compared to results tested by the previous researcher, it was found that analytical results consistent with test results. Therefore, the model can effectively predict the flexural behavior of deteriorated reinforced concrete beams strengthened by carbon fiber sheets. The developed finite element model was used to analyze the effect of other variables on the beam flexural behavior, namely the compressive strength of concrete, tensile strength of reinforcing steel, and number of carbon fiber sheets. The results show that the effect of concrete compressive was not significant for maximum carrying load capacity for beams in all cases. The tensile strength of steel has a significant effect on the load-carrying capacity. As the number of CFRP layers has been increased, the deflection of the degraded reinforced concrete beam repaired and strengthened with CFRP sheet decreased and load load-carrying capacity of the beam significantly increased.

Keywords: Finite Element Method; Reinforced Concrete Beam; Degraded; Strengthen; Carbon Fiber Plate



1. บทนำ

โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กเป็นที่นิยมอย่างแพร่หลายในการก่อสร้างอาคารต่างๆ ทั้งในประเทศและต่างประเทศ [1] เมื่อถูกใช้งานไปเป็นระยะเวลาอันยาวนานอาจทำให้โครงสร้างมีการเสื่อมสภาพตามอายุการใช้งานเนื่องจากการเสื่อมสภาพของวัสดุ [2] การบรรทุกน้ำหนักเกินค่าที่ออกแบบ หรือสภาพอากาศที่รุนแรง ปัญหาดังกล่าวส่งผลต่อความสามารถในการรับน้ำหนักของโครงสร้างและความปลอดภัยต่อการใช้งานหรืออาจเกิดการวิบัติของโครงสร้าง ดังนั้นจึงต้องได้รับการตรวจสอบ ซ่อมแซมหรือการเสริมกำลังเพื่อให้โครงสร้างสามารถต้านทานน้ำหนักบรรทุกทั้งสภาวะใช้งานและสภาวะประลัย การเสริมกำลังโครงสร้างมีหลากหลายวิธี [3] การเสริมกำลังด้วยแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ เป็นหนึ่งในวิธีการเสริมกำลังภายนอกที่สะดวกในการติดตั้งและมีประสิทธิภาพ [4]

การศึกษาพฤติกรรมการตัดของคานคอนกรีตเสริมเหล็กภายใต้น้ำหนักบรรทุก โดยทั่วไปจะทำการทดสอบภายในห้องปฏิบัติการ เป็นวิธีการที่ทำให้เห็นถึงพฤติกรรมจริงทางกายภาพของคานคอนกรีตเสริมเหล็ก แต่การทดสอบมีข้อจำกัดทั้งในด้านแรงงานทรัพยากรและมีค่าใช้จ่ายสูง

เพื่อลดปัญหาดังกล่าว ในปัจจุบันมีการพัฒนาวิธีการวิเคราะห์โครงสร้างโดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ [5] ซึ่งเป็นการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และทำการวิเคราะห์โดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ สามารถกำหนดรูปร่างและรูปแบบน้ำหนักบรรทุกได้หลากหลาย อีกทั้งในปัจจุบันขีดความสามารถของ

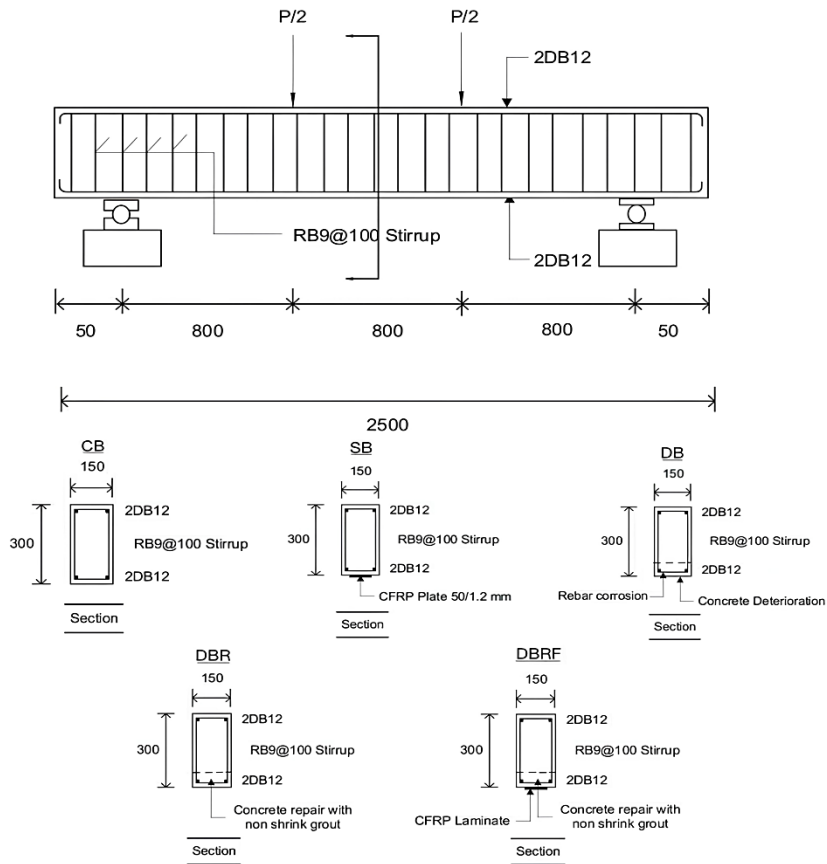
โปรแกรมและคอมพิวเตอร์เองก็ถูกพัฒนาอย่างต่อเนื่อง ทำให้การวิเคราะห์โครงสร้างโดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ง่ายและสะดวกในการศึกษา ผลที่ได้จากการวิเคราะห์ เมื่อนำมาเทียบเคียงกับผลการทดสอบจะทำให้แบบจำลองมีความน่าเชื่อถือ สามารถวิเคราะห์ผลเนื่องจากตัวแปรอื่นที่หลากหลายได้ [6]

จากเหตุผลที่กล่าวข้างต้น งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์หลักที่จะศึกษาและประยุกต์ใช้แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ในการวิเคราะห์พฤติกรรมการตัดของคานคอนกรีตที่เสริมสภาพได้รับการซ่อมด้วยซีเมนต์ไม่หดตัว (Nonshrink-mortar) และเสริมกำลังด้วยแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ โดยนำผลการวิเคราะห์จากแบบจำลองนี้ มาเปรียบเทียบกับข้อมูลที่ได้จากการทดสอบคานคอนกรีตเสริมเหล็กในห้องปฏิบัติการจริง [7, 8] จากนั้นจะศึกษาผลของการแปรเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ที่มีผลต่อพฤติกรรมการตัดของคาน

2. วัสดุและวิธีการทดสอบ

2.1 คานคอนกรีตเสริมเหล็กที่ใช้ในการทดสอบเพื่อการอ้างอิง

ในงานวิจัยนี้ได้นำผลการทดสอบคานคอนกรีตเสริมเหล็กของ P.Panichsakulchai et. al. [7] และ I. Sanan et. al. [8] ซึ่งได้ทำการทดสอบคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีขนาดความยาว 2,500 มิลลิเมตร ความกว้าง 150 มิลลิเมตร และความลึก 300 มิลลิเมตร ใช้เหล็ก 2-DB12 ทั้งด้านบนและด้านล่างตลอดความยาวคาน 2,450 มิลลิเมตร สำหรับเหล็กปลอกใช้เหล็กขนาด RB9 ระยะเรียง 100 มิลลิเมตร และมีระยะหุ้ม



รูปที่ 1 ขนาดและหน้าตัดคานตัวอย่าง

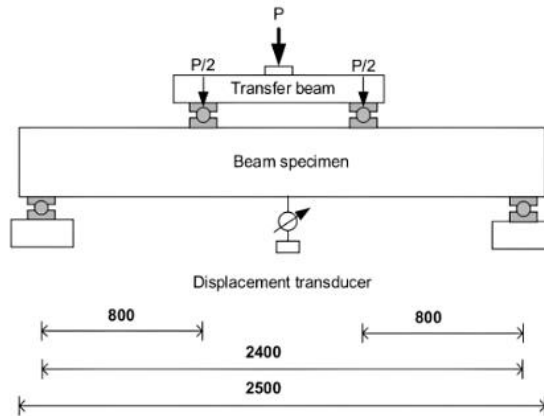
เหล็กเสริม 25 มิลลิเมตร ซึ่งเพียงพอสำหรับการป้องกันการวิบัติด้วยแรงเฉือน และมีการจำลองการเสื่อมสภาพของคอนกรีตส่วนที่หุ้มเหล็กเสริมรับแรงดึงบริเวณใต้ท้องคาน โดยการเว้นช่องว่างไม่ให้มีคอนกรีตหุ้ม มีความยาว 1,800 มิลลิเมตร ความลึก 50 มิลลิเมตร ดังแสดงในรูปที่ 1 เหล็กเสริมจึงไม่อยู่ในสภาพยึดเหนี่ยว (Bond) กับคอนกรีต จากนั้นจะทำการซ่อมแซมด้วยการฉาบปิดด้วยซีเมนต์ไม่หดตัว (Non-shrink Mortar) และมีการเสริมกำลังรับโมเมนต์ดัดด้วยแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์

[9] บริเวณท้องคาน ซึ่งในการทดสอบประกอบไปด้วยคานทั้งหมด 5 ตัวอย่าง ได้แก่ คานคอนกรีตเสริมเหล็ก กำหนดให้เป็นคานควบคุม (CB) คานคอนกรีตเสริมเหล็กที่เสริมกำลังด้วยแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ (SB) คานคอนกรีตเสริมเหล็กที่เสื่อมสภาพ (DB) คานคอนกรีตเสริมเหล็กที่เสื่อมสภาพแล้วซ่อมแซมด้วยซีเมนต์ไม่หดตัว [10] (DBR) และคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่ถูกซ่อมแซมด้วยซีเมนต์ไม่หดตัว และมีการเสริมกำลังด้วยแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์บริเวณท้องคาน (DBRF)

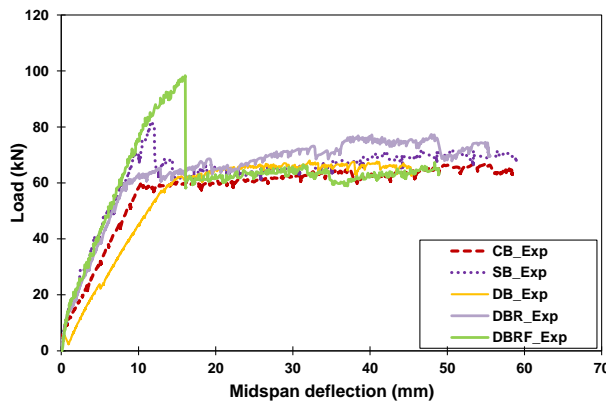


แผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ที่ใช้มีขนาดกว้าง 50 มิลลิเมตร ความหนา 1.2 มิลลิเมตร การทดสอบคานตัวอย่างนั้น จะทำการกดน้ำหนักบรรทุก 2 จุดลงบนคานตัวอย่าง มีช่วงความยาวของการทดสอบ (L) 2,400 มิลลิเมตร โดยระหว่างจุดกดน้ำหนักบรรทุกถึงจุดรองรับเท่ากับ 800 มิลลิเมตร (L/3) ดังแสดงในรูปที่ 2 การทดสอบให้ น้ำหนักกระทำแก่คานคอนกรีตเสริมเหล็กทั้ง 5 กรณีจนเกิดการวิบัติแล้วถอนน้ำหนักบรรทุกออก [7] (Monotonic Loading) ตัวอย่างทดสอบทั้งหมดมีการ ติดตั้งมาตรวัดความเครียด (Strain Gauge) ที่เหล็ก

เสริมด้านบนและล่างบริเวณกึ่งกลางหน้าตัดคานและ เหล็กเสริมด้านล่างที่หน้าตัดคานที่ได้รับแรงกดกระทำ ทั้งสองข้าง มีการติดตั้ง Displacement Transducer เพื่อวัดค่าการแอ่นตัวที่กึ่งกลางคาน จากความสัมพันธ์ ระหว่างน้ำหนักบรรทุกกับการแอ่นตัว [7] ดังรูปที่ 3 จะ เห็นว่า คานที่เสื่อมสภาพ (DB) จะมีความแข็งเชิงดัด (Flexural Stiffness) ที่พิจารณาจากความชันของเส้น ความสัมพันธ์ในช่วงอีลาสติก ลดลงอย่างมีนัยสำคัญ เมื่อเทียบกับคานอ้างอิง (CB) ทั้งนี้เป็นผลจากคอนกรีต และเหล็กเสริมรับแรงดึงไม่ยึดเหนี่ยวกัน (Unbond)



รูปที่ 2 การติดตั้งเครื่องมือวัดกับคานทดสอบ



รูปที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและการแอ่นตัวของคานทดสอบ [7]



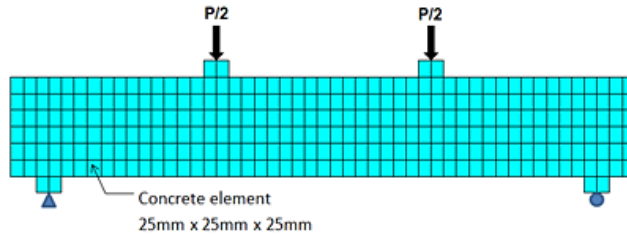
ในช่วงคานที่คอนกรีตเสื่อมสภาพ ส่วนน้ำหนักบรรทุกสูงสุดที่สภาวะประลัยค่อนข้างไม่แตกต่างกันเนื่องจากที่ปลายคานที่เสื่อมสภาพยังคงมีสภาพยึดเหนี่ยวที่ปลายคานระหว่างคอนกรีตและเหล็กเสริม (End Anchorage) เมื่อคานคอนกรีตที่เสื่อมสภาพได้รับการซ่อมด้วยซีเมนต์ไม่หดตัว (DBR) จะส่งผลให้ความแข็งแรงเชิงดัดของคานและกำลังรับน้ำหนักบรรทุกเพิ่มขึ้นใกล้เคียงกับคานอ้างอิง โดยมีค่าค่อนข้างมากกว่าคานอ้างอิง เนื่องด้วยผลของค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของซีเมนต์ไม่หดตัวสูงกว่าค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตจึงทำให้ความต้านทานการเสียรูปของวัสดุ (Stiffness) สูงกว่า แต่ค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกต่างกันอย่างไม่มีความสำคัญ เมื่อคานเสื่อมสภาพและได้รับการซ่อมและเสริมกำลังด้วยแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ (DBRF) จะเห็นว่าทั้งความแข็งแรงเชิงดัดและกำลังรับน้ำหนักบรรทุกที่สภาวะประลัยเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ การวิบัติของคานจะเกิดขึ้นเนื่องจากการหลุดร่อนของแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ (Debonding of CFRP)

2.2 การจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์

ในการจำลองตัวอย่างทดสอบด้วยวิธีการทางไฟไนต์เอลิเมนต์นี้ ได้ใช้โปรแกรม ANSYS 15.0 [11] ซึ่งเอลิเมนต์และคุณสมบัติวัสดุสำหรับใช้สร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับคานคอนกรีตเสริมเหล็กนั้นมีการอธิบายไว้ในการศึกษาที่ผ่านมา [12-14] ในการจำลองจะใช้คุณสมบัติวัสดุอ้างอิงจากการศึกษาคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่เสื่อมสภาพ ได้รับการซ่อมและเสริมกำลังด้วยแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ในห้องปฏิบัติการของ P.Panichsakulchai et. al. [7] และ I.Sanan et. al.

[8] โดยใช้สมบัติทางกลของคอนกรีต ซีเมนต์ไม่หดตัว เหล็กเสริมและแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ตั้งตารางที่ 1 และใช้เอลิเมนต์ชนิด Solid 65 กับคอนกรีต ซึ่งมีลักษณะ 3 มิติ เป็นทรงกล่อง มี 8 จุดต่อ (Node) และแต่ละจุดต่อนั้นมี 3 ตัวแปรอิสระ (Degree of Freedom) อีกทั้งใช้เอลิเมนต์ชนิด Solid 185 กับฐานรองรับและแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ ซึ่งมีคุณสมบัติเหมือนกับ Solid 65 ยกเว้นลักษณะการบดอัด (Crushing) และใช้เอลิเมนต์ชนิด Link 180 กับเหล็กเสริม ซึ่งมีความสามารถในการรับความเค้นดึงและความเค้นอัด [11] และใช้เอลิเมนต์ชนิด COMBIN14 ในการยึดเหนี่ยวพันธะระหว่างเหล็กเสริมรับแรงดึงและคอนกรีตในแบบจำลอง โดยมีค่ากำลังอัดคอนกรีต เท่ากับ 24 MPa ค่ากำลังรับแรงดึงของเหล็กปลอกเท่ากับ 240 MPa และค่ากำลังรับแรงดึงของเหล็กข้ออ้อยเท่ากับ 420 MPa

จากความสมมาตรของเงื่อนไขขอบเขตในการกำหนดค่าการยึดรั้งของ Node [15-16] โดยใช้ความสมมาตรของระนาบตามความยาวคาน คือ ระนาบ XY และมีการกำหนดเงื่อนไขขอบเขตที่ฐานรองรับทั้งสองของคาน โดยกำหนดให้เงื่อนไขขอบเขตที่ฐานรองรับด้านซ้ายเป็นแบบ Hinge Support คือจะไม่มีการเคลื่อนที่ในแนวตั้ง แนวราบและแนวด้านข้างของคาน ส่วนเงื่อนไขขอบเขตที่ฐานรองรับด้านขวาเป็นแบบ Roller Support คือมีการเคลื่อนตัวตามแนวยาวของคานแต่จะไม่มีการเคลื่อนตัวตามแนวตั้งและแนวด้านข้างของคาน ส่วนจุดที่ให้น้ำหนักบรรทุกก็จะใช้เงื่อนไขขอบเขตเหมือนกัน โดยจะให้น้ำหนักบรรทุกกระจายลงบน Node ในทิศทางแกน Y ดังรูปที่ 4



รูปที่ 4 แบบจำลองคานทดสอบ

ตารางที่ 1 สมบัติทางกลของคอนกรีตซีเมนต์ไม่หดรัดตัว เหล็กเสริมและแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์

| วัสดุ | โมดูลัสยืดหยุ่น (GPa) | อัตราส่วนปัวซอง |
|--------------------|-----------------------|-----------------|
| คอนกรีต | 23.1 | 0.3 |
| ซีเมนต์ไม่หดรัดตัว | 40.3 | 0.3 |
| เหล็กเสริม | 200 | 0.3 |
| แผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ | 170 | 0.2 |

3. ผลการวิเคราะห์และอภิปรายผล

3.1 การเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและการแอ่นตัวจากผลการทดสอบกับผลการวิเคราะห์ด้วยแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์

ผลที่ได้จากการวิเคราะห์แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของคานตัวอย่างทั้งหมดเมื่อนำมาเปรียบเทียบกับผลการทดสอบจะแสดงได้ดังตารางที่ 2 และรูปที่ 5 (ก) ถึง 5 (จ) จะเห็นว่าผลที่ได้จากแบบจำลองมีค่าใกล้เคียงกับผลจากการทดสอบจริง [7, 8] โดยผลการวิเคราะห์คาน CB DB และ DBR ซึ่งเป็นคานที่ไม่มีการเสริมกำลังด้วย CFRP พบว่าความแข็งแรงตัดในช่วงอิลาสติกมีแนวโน้มมากกว่าผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการเล็กน้อย น้ำหนักบรรทุก ณ จุดครากของเหล็กเสริมมากกว่าน้ำหนักบรรทุก ณ จุดครากของคานทดสอบเท่ากับร้อยละ 0.2 สำหรับคานควบคุม (CB) และน้อยกว่าน้ำหนักบรรทุกทดสอบ

เท่ากับร้อยละ 6.7 และร้อยละ 6.8 สำหรับคานที่เสื่อมสภาพ (DB) และคานที่เสื่อมสภาพแล้วได้รับการซ่อมแซมด้วยซีเมนต์ไม่หดรัดตัว (DBR) ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าแตกต่างกันน้อยมากอย่างไม่มีนัยสำคัญ ส่วนน้ำหนักบรรทุกสูงสุดที่สภาวะประลัย แบบจำลองให้ผลใกล้เคียงกับผลทดสอบโดยน้ำหนักบรรทุกสูงสุดที่ได้จากแบบจำลองน้อยกว่าผลทดสอบร้อยละ 9.4, 5.1 และ 21.4 สำหรับ CB DB และ DBR ตามลำดับ

สำหรับการวิเคราะห์แบบจำลองของคานที่ได้รับการเสริมกำลังด้วยแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์นั้นจะพิจารณาเปรียบเทียบกับผลการทดสอบในช่วงเริ่มต้นจนถึงน้ำหนักบรรทุกสูงสุดขณะเกิดการปริและหลุดร่อนของแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์เท่านั้น เนื่องจากข้อจำกัดของโปรแกรมและพฤติกรรมการวิบัติโดยการหลุดร่อนของแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ของคานทดสอบที่มักจะหลุดออกก่อนถึงกำลังรับน้ำหนักบรรทุกสูงสุดที่สภาวะประลัยที่ได้จากการวิเคราะห์ [17-19] โดยสมมุติให้แผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ได้ยึดติดไปกับคอนกรีต (Perfect Bond) จนถึงน้ำหนักสูงสุด เมื่อเกิดการวิบัติคอนกรีตเกิดการอัดจนแตก ทำให้มีค่าน้ำหนักบรรทุกสูงสุดจากการวิเคราะห์สูงกว่าค่าน้ำหนักบรรทุกสูงสุดที่ได้จากการทดสอบ งานวิจัยนี้จะพิจารณาการหลุดร่อนของแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์โดยการตรวจสอบ



ตารางที่ 2 เปรียบเทียบน้ำหนักบรรทุกสูงสุดและการแอ่นตัวที่กึ่งกลางคานระหว่างผลที่ได้จากแบบจำลองและการทดสอบ

| ชื่อคาน | น้ำหนักบรรทุกสูงสุด (kN) | | การแอ่นตัว ณ จุดน้ำหนักบรรทุกสูงสุด (mm) | | การแอ่นตัวสูงสุด (mm) | | ความแตกต่างของน้ำหนักบรรทุกสูงสุด (ร้อยละ) |
|---------|--------------------------|-------------|--|-------------|-----------------------|-------------|--|
| | จากการทดสอบ | จากแบบจำลอง | จากการทดสอบ | จากแบบจำลอง | จากการทดสอบ | จากแบบจำลอง | |
| | CB | 67.2 | 60.9 | 55.7 | 20.0 | 58.4 | |
| SB | 81.3 | 89.8 | 12.2 | 12.5 | 12.2 | 12.5 | 10.5 |
| DB | 68.0 | 64.5 | 32.2 | 15.9 | 48.3 | 39.7 | 5.1 |
| DBR | 77.3 | 60.7 | 47.9 | 23.1 | 69.8 | 62.8 | 21.4 |
| DBRF | 98.3 | 88.7 | 15.9 | 12.6 | 15.9 | 12.6 | 9.8 |

ความเครียดใน CFRP โดยน้ำหนักบรรทุกสูงสุดจะหมายถึงน้ำหนักที่ทำให้ความเครียดในแผ่น CFRP เท่ากับความเครียดที่ทำให้เกิดการหลุดร่อนของ CFRP ซึ่งมาตรฐาน ACI 440.2R-17 [20] กำหนดสมการสำหรับคำนวณค่าความเครียดขณะเกิดการสูญเสียการยึดเหนี่ยวของ CFRP (Debonding Strain) ดังสมการที่ 1

$$\epsilon_{fd} = 0.41 \sqrt{\frac{f_c'}{n E_f t_f}} \leq 0.9 \epsilon_{fu} \quad (1)$$

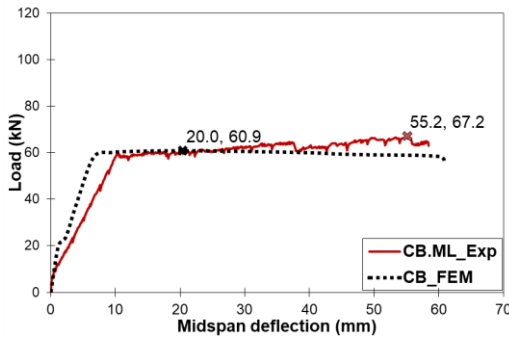
เมื่อ ϵ_{fd} คือ Debonding Strain ของ CFRP, f_c' คือ ค่ากำลังอัดของคอนกรีตที่ 28 วัน, n คือ จำนวนชั้นของคาร์บอนไฟเบอร์, E_f คือ ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคาร์บอนไฟเบอร์ และ t_f คือ ความหนาของคาร์บอนไฟเบอร์

โดยจากการคำนวณตามสมการที่ (1) พบว่าความเครียดใน CFRP สูงสุดขณะเกิดการหลุดร่อน

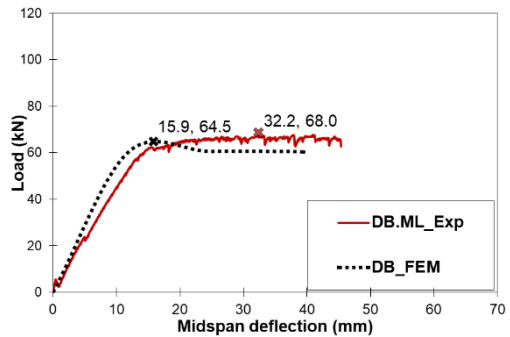
เท่ากับ 0.0045 ซึ่งเมื่อนำค่าดังกล่าวมาทำนายผลการทดสอบจากแบบจำลองดังแสดงในรูปที่ 5 (ง) และ 5 (จ) จะได้ค่าน้ำหนักบรรทุกสูงสุดที่เกิดการหลุดร่อนของคาร์บอนไฟเบอร์ของคานที่เสริมกำลัง (SB) เท่ากับ 89.8 kN จากการทดสอบน้ำหนักบรรทุกสูงสุดเท่ากับ 81.3 kN โดยมีค่าน้ำหนักบรรทุกจากแบบจำลองสูงกว่าน้ำหนักบรรทุกของที่ได้จากการทดสอบในห้องปฏิบัติการเท่ากับร้อยละ 10.5 จะเห็นได้ว่ามีค่าใกล้เคียงกัน ส่วนคานที่เสื่อมสภาพและได้รับการซ่อมแซมแล้วเสริมกำลังด้วยแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ (DBRF) จะมีค่าน้ำหนักบรรทุก สูงสุดขณะเกิดการหลุดร่อนของ FRP ที่ได้จากแบบจำลองเท่ากับ 88.7 kN และจากการทดสอบน้ำหนักบรรทุกสูงสุดเท่ากับ 98.3 kN โดยมีค่าน้ำหนักบรรทุกจากแบบจำลองต่ำกว่าน้ำหนักบรรทุกของที่ได้จากการทดสอบในห้องปฏิบัติการเท่ากับร้อยละ 9.8 ซึ่งจะเห็นได้ว่าแตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญ



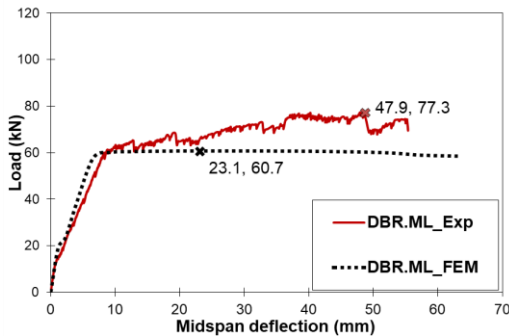
บทความวิจัย



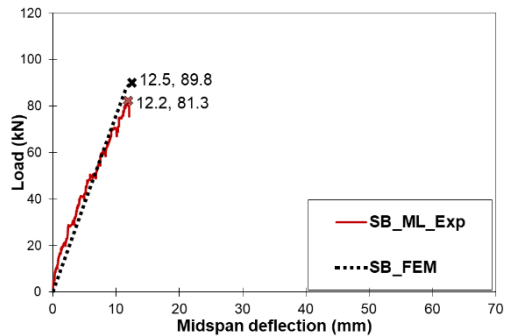
(ก) คานควบคุม (CB)



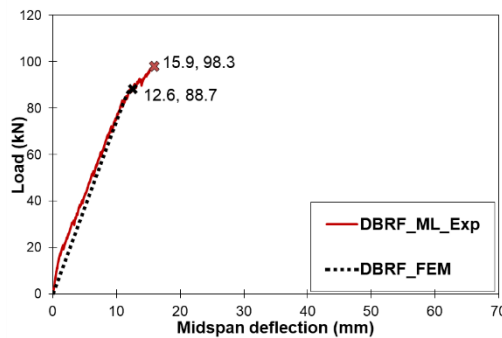
(ข) คานที่เสื่อมสภาพ (DB)



(ค) คานที่เสื่อมสภาพและได้รับการซ่อมแซม (DBR)



(ง) คานเสริมกำลังด้วยแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ (SB)



(จ) คานที่เสื่อมสภาพและได้รับการซ่อมแซมและเสริมกำลังด้วยแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ (DBRF)

รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกกับการแอ่นตัวที่กึ่งกลางคานจากผลการวิเคราะห์ด้วย FEM เปรียบเทียบกับการทดสอบ

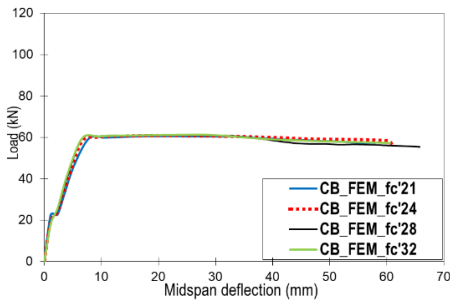


3.2 ผลกระทบของพารามิเตอร์ที่มีผลต่อพฤติกรรมการดัดของคาน จากผลการวิเคราะห์ด้วยแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์

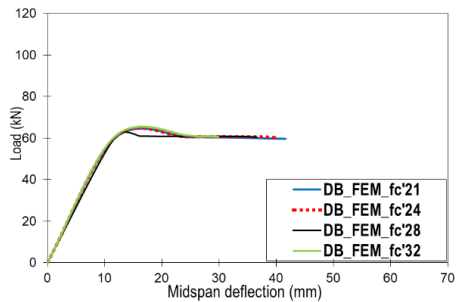
3.2.1 กำลังอัดคอนกรีต

ผลกระทบจากการแปรเปลี่ยนกำลังอัดของคอนกรีตที่ได้จากแบบจำลอง แสดงได้ด้วยความสัมพันธ์

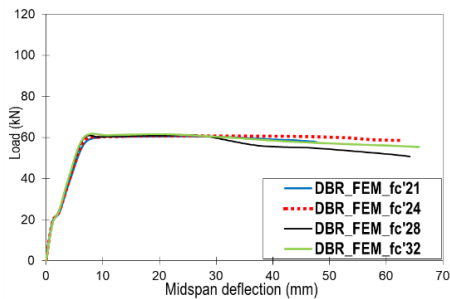
ระหว่างน้ำหนักบรรทุกกับการแอ่นตัวที่กึ่งกลางคาน ดังรูปที่ 6 (ก) ถึง 6 (จ) กำลังอัดคอนกรีตที่แปรเปลี่ยนเท่ากับ 21 MPa, 24 MPa, 28 MPa และ 32 MPa จะเห็นได้ว่า กำลังอัดของคอนกรีตมีผลน้อยมากต่อน้ำหนักบรรทุกสูงสุดที่คานรับได้



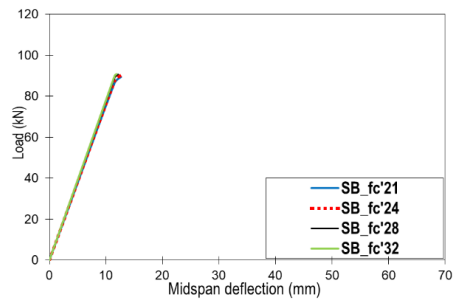
(ก) คานควมคุม (CB)



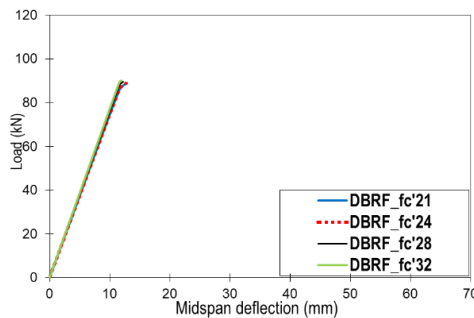
(ข) คานที่เสื่อมสภาพ (DB)



(ค) คานที่เสื่อมสภาพและได้รับการซ่อมแซม (DBR)



(ง) คานเสริมกำลังด้วยแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ (SB)



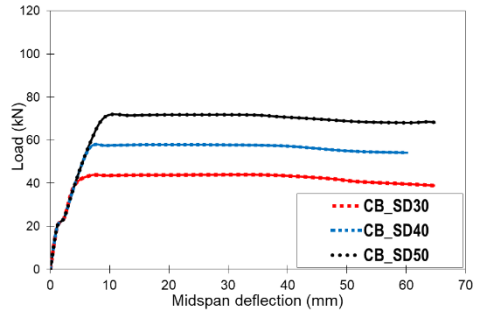
(จ) คานที่เสื่อมสภาพและได้รับการซ่อมแซมและเสริมกำลังด้วยแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ (DBRF)

รูปที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกกับการแอ่นตัวที่กึ่งกลางคานจากการแปรเปลี่ยนกำลังรับแรงอัดคอนกรีต

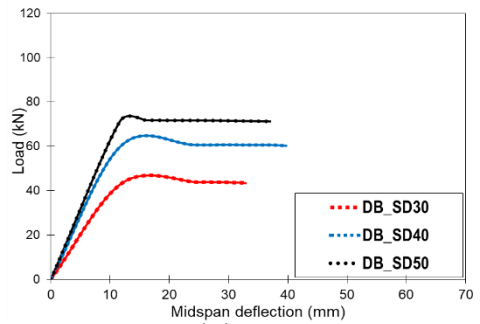


3.2.2 กำลังรับแรงดึงของเหล็กเสริม

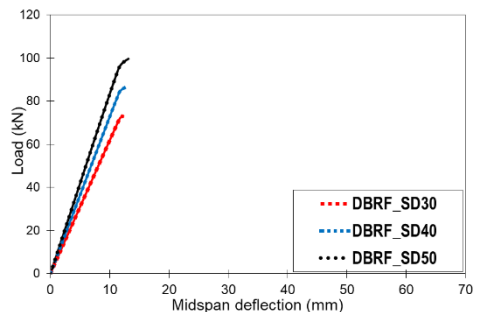
ผลกระทบของกำลังรับแรงดึงของเหล็กเสริมที่ได้จากแบบจำลองเมื่อแปรเปลี่ยนกำลังรับแรงดึงที่จุดครากของเหล็กเสริมที่ 300 MPa (SD30), 400 MPa (SD40) และ 500 MPa (SD50) ซึ่งเป็นมาตรฐานเหล็กเส้นเสริมคอนกรีตสำหรับเหล็กข้ออ้อย (มอก 24-2559) [21] โดยจากรูปที่ 7 (ก) ถึง 7 (ค) และตารางที่ 3 พบว่า คานคอนกรีตเสริมเหล็ก (CB) และคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่เสื่อมสภาพ (DB) สามารถรับน้ำหนักสูงสุดได้เพิ่มขึ้นตามกำลังรับแรงดึงของเหล็กเสริมอย่างมีนัยสำคัญ โดยน้ำหนักบรรทุกสูงสุดที่คาน CB และ DB รับได้จะเท่ากันเมื่อใช้เหล็กที่มีกำลังรับแรงดึงเท่ากัน แต่การแอนตัวสูงสุดแตกต่างกันเนื่องจากการเสื่อมสภาพของคอนกรีตของคาน DB ทำให้เหล็กเสริมกับคอนกรีตอยู่ในสภาพไม่ยึดเหนี่ยวกัน (Unbond) ความแข็งแรงดัดจึงลดลง ทำให้การแอนตัวสูงสุดที่สภาวะประลัยลดลงเมื่อเทียบกับคานควบคุม และคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่ได้รับการซ่อมแซมด้วยซีเมนต์ไม่หดตัว (Non-shrink mortar) หลังจากการเสื่อมสภาพและเสริมกำลังด้วยแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ (DBRF) สามารถรับน้ำหนักสูงสุดได้เพิ่มขึ้นตามกำลังรับแรงดึงที่จุดครากที่เพิ่มขึ้นของเหล็กเสริมอย่างมีนัยสำคัญ นอกจากนี้การแอนตัวในช่วงอีลาสติกลดลงเนื่องจากความแข็งแรงดัดเพิ่มขึ้น



(ก) คานควบคุม (CB)



(ข) คานที่เสื่อมสภาพ (DB)



(ค) คานที่เสื่อมสภาพและได้รับการซ่อมแซมและเสริมกำลังด้วยแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ (DBRF)

รูปที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกกับการแอนตัวที่กึ่งกลางคานจากการแปรเปลี่ยนกำลังรับแรงดึงของเหล็กเสริม

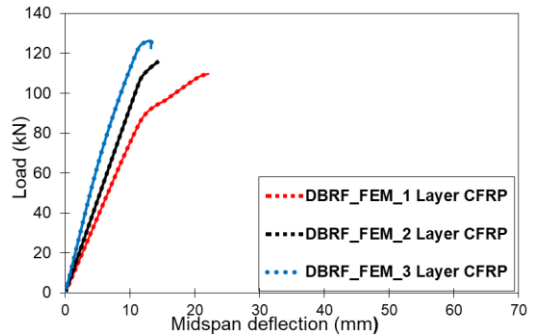


ตารางที่ 3 เปรียบเทียบผลกระทบจากกำลังรับแรงดึงของเหล็กเสริมต่อน้ำหนักบรรทุกและการแอ่นตัวสูงสุด

| ชื่อคาน | กำลังรับแรงดึง (MPa) | น้ำหนักบรรทุกสูงสุด (kN) | การแอ่นตัวสูงสุด (mm) |
|---------|----------------------|--------------------------|-----------------------|
| CB | 300 | 43.8 | 64.7 |
| | 400 | 57.8 | 60.2 |
| | 500 | 71.8 | 64.8 |
| DB | 300 | 43.8 | 32.8 |
| | 400 | 57.8 | 43.8 |
| | 500 | 71.7 | 36.9 |
| DBRF | 300 | 73.2 | 12.3 |
| | 400 | 86.2 | 12.5 |
| | 500 | 99.6 | 13.1 |

3.2.3 จำนวนชั้นของแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์

การศึกษาผลกระทบจากจำนวนชั้นของแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ที่มีต่อพฤติกรรมการดัดคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่เสื่อมสภาพได้รับการซ่อมแซมด้วยซีเมนต์ไม่หดตัว (Non-shrink Mortar) และมีการเสริมกำลังด้วยแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์บริเวณท้องคานจะกำหนดให้กำลังรับแรงดึงที่จุดครากของเหล็กเสริมเท่ากับ 420 MPa ใช้แผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ ขนาดกว้าง 50 มิลลิเมตร ความหนา 1.2 มิลลิเมตร ความยาว 1,800 มิลลิเมตร ในการสร้างแบบจำลอง จำนวนชั้นของแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ แบ่งเป็น 1 ชั้น 2 ชั้น และ 3 ชั้น ตามลำดับ ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกกับการแอ่นตัวที่กึ่งกลางคานที่ได้จากการวิเคราะห์ดังแสดงในรูปที่ 8 จะเห็นว่าน้ำหนักบรรทุกสูงสุดเมื่อคาร์บอนไฟเบอร์เกิดการหลุดร่อนเท่ากับ 109.7 kN, 115.6 kN และ 126.3 kN การแอ่นตัวสูงสุดเท่ากับ 22.0 mm, 14.2 mm และ 13.1 mm เมื่อจำนวนแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์เท่ากับ 1, 2 และ 3 ตามลำดับ



รูปที่ 8 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกกับการแอ่นตัวที่กึ่งกลางคานเมื่อแปรเปลี่ยนจำนวนชั้นของแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์

จะเห็นได้ว่า น้ำหนักบรรทุกสูงสุดเพิ่มขึ้น ร้อยละ 5.3 และร้อยละ 15.1 เมื่อเพิ่มจำนวนแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ 2 และ 3 ชั้นเทียบกับจำนวนแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ 1 ชั้น ส่วนการแอ่นตัวสูงสุดจะเห็นว่าการลดลงร้อยละ 55.4 และร้อยละ 67.9 เมื่อเพิ่มจำนวนแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ 2 และ 3 ชั้นเทียบกับจำนวนแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ 1 ชั้น แสดงให้เห็นว่ากำลังรับน้ำหนักเมื่อเกิดการหลุดร่อนของแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์เพิ่มขึ้นแต่การแอ่นตัวสูงสุดจะลดลงแสดงให้เห็นถึงความเหนียวที่ลดลง

4. สรุปผลการศึกษา

จากผลการศึกษาการพัฒนาแบบจำลองไฟไนต์-เอลิเมนต์เพื่อทำนายพฤติกรรมการดัดของคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่เสื่อมสภาพที่ได้รับการซ่อมแซมและเสริมกำลังด้วยแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์สามารถสรุปได้ดังนี้

ผลการวิเคราะห์ที่ได้จากแบบจำลองไฟไนต์-เอลิเมนต์ในรูปแบบของความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกกับการแอ่นตัว และ กำลังรับโมเมนต์ดัดของหน้าตัดคานซึ่งแสดงได้โดยน้ำหนักบรรทุกสูงสุดที่สภาวะ



ประลัย ให้ผลสอดคล้องกับผลการทดสอบของงานวิจัยในอดีตเป็นอย่างดีมีความน่าเชื่อถือและสามารถนำไปศึกษาผลกระทบจากตัวแปรอื่น

จากการศึกษาตัวแปรที่มีผลกระทบโดยใช้แบบจำลองที่ได้รับการเทียบเคียงกับผลทดสอบของงานวิจัยในอดีตพบว่ากำลังอัดของคอนกรีตมีผลน้อยมากอย่างไม่มีความสำคัญต่อการรับน้ำหนักสูงสุดของคาน การเพิ่มกำลังรับแรงดึงที่จุดครากของเหล็กเสริมมีผลต่อการเพิ่มความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกอย่างมีนัยสำคัญ การเพิ่มจำนวนแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ที่ใช้เสริมกำลังมีผลต่อการเพิ่มของน้ำหนักบรรทุกสูงสุดของคาน โดยน้ำหนักบรรทุกเพิ่มขึ้น ร้อยละ 15.1 เมื่อเสริมกำลังด้วยแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ 3 แผ่น เมื่อเทียบกับการเสริม 1 แผ่น การแ่นตัวสูงสุดลดลงเมื่อจำนวนแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์เพิ่มขึ้น

5. เอกสารอ้างอิง

- [1] P. Joyklad and S. Suparp, Reinforced Concrete: Origin to Siam, Thailand Engineering Journal, 2014, 67(1), 17-24. (in Thai)
- [2] CPAC Concrete Academy, Concrete technology: Damage of concrete, The Concrete Product and Aggregate, Bangkok, Thailand, 2000, 143-151. (in Thai)
- [3] Department of Public Works and Town & Country Planning, Guide to building structural repair, Thammasat Printing house, Pathumthani, Thailand, 2019. (in Thai)
- [4] T. Khongsakditrakul, External reinforcement of reinforced concrete structures with fiber-reinforced materials, Civil Engineering Magazine, 2003, 14-18. (in Thai)
- [5] R.D. Cook, D.S. Malkus and M.E. Plesha, Concepts and application of finite element analysis, 3rd Ed., John Wiley & Sons Inc., WI, USA, 1988.
- [6] A. Phuhudsuan, Reinforced concrete structures of finite element analysis, Thesis, Burapha University, Thailand, 2012. (in Thai)
- [7] P. Panichsakulchai and T. Nujareon, Flexural behavior of reinforced concrete beams strengthened by CFRP strip plates, Thesis, Thammasat University, Thailand, 2020.
- [8] I. Sanan and K. Prakobsup, Behavior of reinforced concrete beams strengthened with carbon fiber reinforced polymer under repeated loading, Thesis, Thammasat University, Thailand, 2021. (in Thai)
- [9] Laminat, TDS.EU-EN.V2, S&P Clever Reinforcement Company AG, Seewen, Switzerland, 2020.
- [10] SIKA, SikaGrout-212 GP, Product Data Sheet, Version 03.01, Sika (Thailand) Ltd., Chonburi, Thailand, 2020.
- [11] Ansys, Finite element computer software for nonlinear structural analysis, Version 15.0., Ansys Inc., PA, USA, 2013.



- [12] L.V.H. Bui, C. Thongchom, S. Sirimonree, P.T. Nguyen, T.-T. Nguyen, S. Keawsawasvong, P. Nuaklong and P. Jongvivatsakul, Experimental, numerical, and analytical study of concrete beams reinforced with steel stirrups and embedded with functional plates, *Structures*, 2022, 39, 293-309.
- [13] K. Chueachom, Application of finite element method in analysis of flexural behavior of full scale prestressed concrete girder strengthened by external post-tension, Thesis, Thammasat University, Thailand, 2014. (in Thai)
- [14] Ansys. Finite element computer software for nonlinear structural analysis, version 18.2, Ansys Inc., PA, USA, 2017.
- [15] A. Cheng, and D.T. Cheng, Heritage and early history of the boundary element method, *Engineering Analysis with Boundary Elements*, 2005, 29(3), 268-302.
- [16] H.H. West, Fundamental of structural analysis, John Wiley & Sons Inc., NY, USA, 1993.
- [17] A.H. Al-Saidy, A.S. Al-Harthy, K.S. Al-Jabri, M. Abdul-Halim and N.M. Al-Shidi, Structural performance of corroded RC beams repaired with CFRP sheets, *Composite Structure*, 92(8), 2010, 1931-1938.
- [18] A. Lenwari, C. Thongchom and R.S. Aboutaha, Cyclic flexural performance of fire-damaged reinforced concrete beams strengthened with carbon fiber-reinforced polymer plates, *ACI Structural Journal*, 2020, 117(6), 133-146.
- [19] A. Sakbana and M. Mashreib, Finite element analysis of CFRP-reinforced concrete beams, *Revista Ingenieria de Construccion, English Version*, 2020, 35(2), 148-169.
- [20] ACI Committee 440, Guide for design and construction of externally bonded FRP systems for strengthening concrete structures (ACI 440.2R-17), American Concrete Institute, Farmington Hills, USA, 2017, pp 24.
- [21] TIS 24-2559, Reinforced Concrete: Deformed Bars, 2016. (in Thai)



การหาสภาวะที่เหมาะสมของการย้อมสีไม้ยางพาราประสานด้วยสีไม้สักจากใบชาอัสสัม

อัคร เสมรบุญย์ อธิพันธ์ ลอยเมืองกลาง ศุภวัฒน์ โพธิ์ขาว วิทยา ดำรงค์ธรรม และ ศิริชัย ยศวังใจ*

ภาควิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมอุตสาหกรรม, วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม,
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

* ผู้ประสานงานเผยแพร่, E-mail: sirichai.y@cit.kmutnb.ac.th

วันที่รับบทความ: 4 กรกฎาคม 2566; วันที่ทบทวนบทความ: 13 พฤศจิกายน 2566; วันที่ตอบรับบทความ: 27 พฤศจิกายน 2566
วันที่เผยแพร่ออนไลน์: 26 ธันวาคม 2566

บทคัดย่อ: การย้อมสีจากวัสดุธรรมชาติได้รับความสนใจมากขึ้นเนื่องจากเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม ใบชาอัสสัมเป็นผลิตภัณฑ์จากธรรมชาติและนำมาใช้งานง่าย ปฏิกริยาออกซิไดซ์เป็นปฏิกริยาทางเคมีของใบชาอัสสัมจะเปลี่ยนจากใบชาสีเขียวเป็นสีน้ำตาล ซึ่งคุณลักษณะของสีสามารถใช้ย้อมสีผลิตภัณฑ์ได้ งานวิจัยนี้แบ่งออกเป็น 3 ส่วน ประกอบด้วย ส่วนที่หนึ่งเปรียบเทียบค่าสีไม้ที่ย้อมจากใบชาอัสสัมกับสีของไม้สักด้วยระบบ CIE Lab ส่วนที่สองเปรียบเทียบค่าสีไม้ที่ย้อมจากใบชาอัสสัมและเคลือบด้วยสีรองพื้นอุตสาหกรรมไม้และแลคเกอร์กับสีของไม้สัก และส่วนที่สามหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมในการสกัดสารย้อมไม้สีสักซึ่งประกอบด้วย ใบชาอัสสัมสำเร็จรูป เกล็ดโซเดียมไฮดรอกไซด์ น้ำสะอาด ระยะเวลาต้ม และจำนวนรอบในการทา ด้วยวิธีเชิงแฟคทอเรียลแบบสมบูรณ์ที่ 2 ระดับ จากผลการทดลองส่วนที่หนึ่ง พบว่า ชั้นไม้ยางพาราที่ผ่านการย้อมจะมีสีน้ำตาลอ่อนและเข้มตามอัตราส่วนที่สกัด ค่า L^* มีค่า 34.16 – 54.14 ค่า a^* มีค่า 8.74 – 15.85 และค่า b^* มีค่า 12.05 – 24.21 ส่วนที่สอง พบว่า ค่าความต่างสีมีค่าต่ำสุด สูงสุด และเฉลี่ยที่ 2.02, 13.90 และ 4.53 ตามลำดับ และส่วนที่สาม พบว่า ระยะเวลาในการต้มไม่มีผลต่อค่าความต่างของสีอย่างมีนัยสำคัญ และถ้ากำหนดใบชา 40 กรัม ปริมาณน้ำสะอาด 400 มิลลิลิตร เกล็ดโซเดียมไฮดรอกไซด์ 10 กรัม และจำนวนทา 4 รอบ จะให้ค่าความต่างสีต่ำสุดที่ 1.47 ซึ่งผู้สังเกตทั่วไปไม่สามารถเห็นความแตกต่างของสีได้

คำสำคัญ: ใบชาอัสสัม; การย้อมสีไม้; สีไม้สัก; การทดลองเชิงแฟคทอเรียลแบบสมบูรณ์

Optimized Dyeing Process for Rubber Wood Finger Joint Board by Teak Color of Assam Tea Leaves

Akara Smerapunya, Atipunt Loymuangklang, Supawat Pokhaw, Witthaya Damrongtham and Sirichai Yodwangjai *

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

* Corresponding author, E-mail: sirichai.y@cit.kmutnb.ac.th

Received: 4 July 2023; Revised: 13 November 2023; Accepted: 27 November 2023

Online Published: 26 December 2023

Abstract: Dyeing from natural sources is gaining increasing interest due to its outstanding merits of being environmentally friendly. Assam tea leaves are natural products and are easy to use. The oxidation process is a chemical reaction that leaves turn color from green to brown. The characteristic of color is used for product dyeing. The research is divided into 3 sections. In Section 1, the comparison of color value between the dyeing woods from Assam tea leaves and teak color which measurss the difference of color space by the CIE Lab system. Section 2, the dyeing wood from Assam tea leaves is coated by sanding sealer and lacquer that is compared with teak color. In the last section, find the optimal parameter for extraction of wood dyeing that includes Assam tea leaves, Sodium Hydroxide, water, boiling time, and dyeing time. The research is tested by 2^k full factorial design. The results of section 1, the dyeing rubber wood from Assam tea leaves displayed light brown and dark brown depending on the extraction ratio. The color value includes the L* value is 34.16 – 54.14, the a* value is 8.74 – 15.85 and the b* value is 12.05 – 24.21. In section 2, the minimum value, maximum value, and average value of color space are 2.02, 13.90 and 4.53, respectively. In the last result, the experiment shows that boiling time's not effect on color space is statistically significant. The experiment was determined by Assam tea leaves, 40 grams, Sodium Hydroxide, 10 grams, water, 400 milliliters, and dyeing time, 4 times that are the least differential value at 1.47. The general observer is unable to determine the difference in color.

Keywords: Assam tea leaves; Wood dye; Teak color; Full factorial design



1. บทนำ

อุตสาหกรรมเฟอร์นิเจอร์ไม้เป็นอุตสาหกรรมหนึ่งที่มีการชะลอตัวในการส่งออกอย่างต่อเนื่องเป็นผลมาจากเศรษฐกิจโลก ทำให้เกิดปัญหาในวัฏจักรของการนำไม้ที่ผ่านการแปรรูปมาใช้ ไม้ยางพาราเป็นวัตถุดิบหลักในอุตสาหกรรมเฟอร์นิเจอร์ ไม้ไม่มีสีอ่อน ลายเส้นไม้เด่นชัด เมื่อนำมาผลิตเป็นเฟอร์นิเจอร์แล้ว ผู้บริโภคมองว่าเป็นเฟอร์นิเจอร์ไม้ที่มีราคาถูก การที่จะพัฒนาอุตสาหกรรมเฟอร์นิเจอร์ไม้ยางพาราจะต้องอาศัยความร่วมมือทั้งอุตสาหกรรมต้นน้ำ อุตสาหกรรมกลางน้ำ และอุตสาหกรรมปลายน้ำ ในส่วนอุตสาหกรรมเฟอร์นิเจอร์เป็นอุตสาหกรรมปลายน้ำที่นำไม้มาใช้และปรับปรุงคุณภาพให้เกิดประโยชน์มากที่สุด [1] ในทางกลับกันไม้สักหรือไม้วีเนียร์สักมีการส่งออกไปยังตลาดทวีปยุโรปอย่างต่อเนื่องเพื่อใช้ในอุตสาหกรรมการต่อเรือหรืองานทางสถาปัตยกรรม [2] นอกจากนี้ ไม้สักเป็นหนึ่งในวัตถุดิบที่ยังได้รับความนิยมในประเทศไทย [3] ซึ่งไม้สักที่มีจำหน่ายอยู่ในท้องตลาดมาจากไม้สักบ้านเรือนเก่า ไม้สักป่าปลูกขององค์การอุตสาหกรรมไม้ หรือเรียกว่า ไม้สัก อ.อ.ป. และไม้สักที่ปลูกบนที่ดินที่มีหนังสือแสดงสิทธิทำกิน เรียกว่า ไม้สัก น.ส. โดยไม้ที่นิยมนำมาทำเฟอร์นิเจอร์จะเป็นไม้สัก อ.อ.ป. และไม้สัก น.ส. ลักษณะสีของไม้สัก อ.อ.ป. จะมีสีน้ำตาลเข้มกว่า ไม้สัก น.ส. เนื่องจากมีอายุ 30 - 40 ปี [4, 5] และเนื้อไม้จะมีกระพี้น้อยกว่า

สีของเนื้อไม้มีผลต่อรูปแบบของผลิตภัณฑ์ที่ทำจากไม้ เช่น เฟอร์นิเจอร์ หรือเครื่องดนตรี ซึ่งสีจะมีการเปลี่ยนแปลงตามกระบวนการผลิต [6] กระบวนการย้อมสีเป็นหนึ่งในขั้นตอนการผลิตเฟอร์นิเจอร์ไม้จริง มี 2 รูปแบบ คือ การย้อมเลียนไม้

(Wood Stain) และการย้อมผิวและเส้นใยไม้ (Wood Dye) โดยการย้อมผิวและเส้นใยไม้จะทำให้ไม้มีสีที่เปลี่ยนไปจากเดิมตามผลิตภัณฑ์ย้อมสีไม้ ผลิตภัณฑ์ที่ใช้ย้อมสีไม้ได้มาจากหลายรูปแบบตั้งแต่การผสมกันจากสีฝุ่นและดินสอพอง สีหมึกพิมพ์อุตสาหกรรม รวมไปถึงสารเคมีสำเร็จรูป แต่ละวิธีจะต้องใช้เทคนิคในการย้อมสีอย่างชำนาญจึงจะได้สีตามที่ต้องการ สีย้อมไม้ที่มีจำหน่ายในท้องตลาดมีการกำหนดสีตามประเภทของไม้ที่ทำการย้อม สีไม้สักส่วนใหญ่จะเป็นสีเหลืองอมทองที่เหมาะสมกับไม้สัก อ.อ.ป. ส่วนไม้สัก น.ส. เวลา ย้อมจะเกิดเป็นสีเหลืองอมส้ม ในทางกลับกันเมื่อนำสีย้อมไม้เคมีสำเร็จรูปมาย้อมไม้ยางพาราที่มีสีเนื้อไม้เป็นสีเหลืองอ่อนแสดงดังรูปที่ 1 (ก) ลักษณะสีย้อมจะเคลือบเป็นฟิล์มสีบนผิวไม้ แสดงดังรูปที่ 1 (ข) เมื่อทำการเช็ดสีย้อมออก พบว่า เนื้อไม้ที่ได้มีสีออกส้มซึ่งแตกต่างจากสีไม้สักเป็นอย่างมาก แสดงดังรูปที่ 1 (ค)

ชาดำเป็นเครื่องดื่มชาที่มีการบริโภคมากที่สุดในโลก คิดเป็นสัดส่วนมากกว่าร้อยละ 55 ของการผลิตชาทั่วโลก โดยสายพันธุ์ชาที่ใช้ผลิตชา แบ่งได้เป็น 2 สายพันธุ์ใหญ่ ๆ คือ กลุ่มพันธุ์ชาอัสสัม (Assam Tea) และกลุ่มพันธุ์ชาจีน (Chinese Tea) [7] สำหรับ



ก.สีเนื้อไม้ก่อนย้อม ข.ลักษณะสีย้อม ค.สีเนื้อไม้หลังย้อมแล้วเช็ด

รูปที่ 1 ลักษณะไม้ยางพาราย้อมสีด้วยสีย้อมเคมี



ประเทศไทยในเขตพื้นที่ภาคเหนือตอนบนจะเป็นแหล่งปลูกของชาทั้งสองสายพันธุ์ โดยที่ชาอัสสัมเพาะปลูกมากกว่าร้อยละ 80 ของปริมาณ [8] ถือเป็นพืชท้องถิ่นตามธรรมชาติที่นิยมนำมาแปรรูปเป็นชาดำ ทั้งนี้เป็นการเพิ่มมูลค่าใบชาและส่งเสริมเศรษฐกิจชุมชน อีกทั้งยังช่วยลดการกำจัดกากใบชาในอุตสาหกรรมเครื่องดื่ม [9] องค์ประกอบทางเคมีของชาจะมีโพลีฟีนอลชนิดคาเทชิน ซึ่งคาเทชินเป็นสารที่ให้สีชาเหลืองในกระบวนการผลิตชาอัสสัมจะนำใบชาสดมาหมักอย่างสมบูรณ์ ทำให้สารคาเทชินถูกออกซิไดซ์และเกิดปฏิกิริยารวมกันเป็นสารในกลุ่มที่อะโรบิจินที่ให้สีน้ำชาเป็นสีน้ำตาลแดง [10] มีการนำคุณสมบัติทางด้านสีไปใช้ประโยชน์ในการย้อมสีผลิตภัณฑ์ได้ [11]

กระบวนการสกัดสีย้อมจากธรรมชาติเพื่อให้ได้สีที่มีความเข้มข้นสำหรับนำไปย้อมผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ นั้น มีหลายปัจจัยที่ทำการทดลอง เช่น อัตราส่วนผสม เวลาในการต้มสกัด อุณหภูมิ ปริมาณสารที่ใช้สกัด เป็นต้น และนำไปวัดค่าสีด้วยระบบ CIE Lab เพื่อเปรียบเทียบความต่างของสีที่สกัดได้ [12-14]

ดังนั้น งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมในการสกัดสารย้อมสีไม้จากใบชาอัสสัม เพื่อใช้ย้อมสีไม้ยางพาราให้มีความใกล้เคียงกับไม้สักที่มีสีน้ำตาลอมเหลืองด้วยวิธีการออกแบบการทดลอง โดยเบื้องต้นกำหนดพารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดลอง และทำการเปรียบเทียบความต่างของค่าสีจากไม้สักตัวอย่างโดยผู้วิจัยคาดหวังว่างานวิจัยนี้จะเป็นแนวทางในการเพิ่มมูลค่าไม้ยางพาราและเพิ่มทางเลือกในการใช้ไม้ยางพาราต่อไป

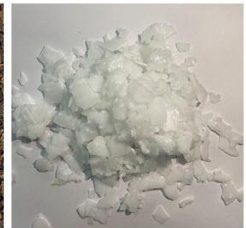
2. วัสดุ อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

2.1 วัสดุและอุปกรณ์

ใบชาอัสสัมสำเร็จรูปที่ผ่านกระบวนการเก็บ หมัก และอบแห้ง เกล็ดโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) หรือเกล็ดโซดาไฟ และน้ำสะอาด [15] แสดงดังรูปที่ 2 การทดลองใช้แผ่นไม้ยางพาราประสาน (Rubber Wood Finger Joint Board) ที่นำเศษไม้ยางพารามาต่อเรียงกันบริเวณหัวไม้ด้วยลายนปลากให้เป็นแผ่นใหญ่คุณภาพผิวของแผ่นไม้ที่เลือกทดลองเป็นแบบบีซี (BC) โดยผิวด้านบีจะมีรอยตาไม้สีดำน้อยกว่าด้านซีไม่มีรอยตาไม้สีดำ ส่วนผิวด้านซีจะมีตาไม้สีดำและมีรอยไปว้างเล็กน้อย แผ่นไม้มีขนาดความหนา 16 มิลลิเมตร



ก. ใบชาอัสสัมสำเร็จรูป



ข. เกล็ด NaOH

รูปที่ 2 วัสดุที่ใช้ในการทดลอง

2.2 วิธีการทดลอง

การทดลองครั้งนี้กำหนดพารามิเตอร์ที่คาดว่าจะส่งผลต่อคุณภาพสีที่ได้จากการสกัดสีจากชาอัสสัมจำนวน 5 พารามิเตอร์ ประกอบด้วย ปริมาณใบชาอัสสัม ปริมาณน้ำสะอาด เกล็ด NaOH ระยะเวลาต้ม และจำนวนรอบในการย้อมสีด้วยการทาบขั้นตอนการทดลองจะใช้การออกแบบการทดลอง (Design of Experiment) เซิงแฟคทอเรียลแบบสมบูรณ์ (2^k Full Factorial Design) ในแต่ละพารามิเตอร์



ได้ประยุกต์จากงานวิจัยที่สกัดสารย้อมสีด้วยวิธีเช็ดย้อมจากกากกาแฟ [16] ซึ่งกำหนดจำนวน 2 ระดับคือ ระดับต่ำและระดับสูง แสดงดังตารางที่ 1 การทดลองเชิงแฟคทอเรียลแบบสมบูรณจะทำการทดลองเท่ากับ 2^5 เท่ากับ 32 การทดลอง และทำการทดลองซ้ำจำนวน 5 ครั้ง รวมทั้งหมด 160 การทดลอง

ตารางที่ 2 เป็นตัวอย่างการออกแบบการทดลอง โดยในคอลัมน์แรกเป็นการทดลองสุ่มตามหลักสถิติ (StdOrder) คอลัมน์ที่สองเป็นลำดับการทดลองจริง (RunOrder) และคอลัมน์ลำดับถัดไปจะเป็นพารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดลองที่แตกต่างกันเพื่อใช้ในการกำหนดลำดับการทดลอง นำแผ่นไม้ยางพาราประสานขนาดความกว้าง 1.20 เมตร ขนาดความยาว 2.40 เมตร มาตัดแบ่งออกเป็นแผ่นเตรียมทดลองขนาด 30x30 เซนติเมตร จำนวน 32 แผ่น โดยในแต่ละแผ่นทำการแบ่งออกเป็นช่องจำนวน 5 ช่อง ซึ่งจะได้ช่องสำหรับการย้อมสีทั้งหมด 160 ช่อง

ตัวอย่างการเตรียมสารสกัดสำหรับย้อมสีทำการต้มใบชาอัสสัมแห้งจำนวน 60 กรัม ด้วยน้ำสะอาดปริมาณ 400 มิลลิลิตร จนเดือด แล้วทำการเติมเกล็ด NaOH จำนวน 5 กรัม ต้มเป็นระยะเวลา 10 นาที เมื่อครบเวลาทำการคั้นน้ำใบชาแล้วปล่อยให้เย็นตัวลงในอุณหภูมิห้อง สารสกัดที่ได้จะเป็นของเหลวสีน้ำตาลเข้ม แสดงดังรูปที่ 3 หลังจากนั้นนำสารสกัดที่ได้ไปย้อมสีด้วยการใช้แปรงทาบขนไม้ตัวอย่างด้านบี (B) จำนวน 2 รอบ แสดงดังรูปที่ 4 แต่ละรอบทิ้งไว้ประมาณ 5 วินาที แล้วทำการเช็ดสีย้อมออกด้วยผ้าสะอาด แสดงดังรูปที่ 5 เพื่อไม่ให้สีย้อมปิดผิวลายไม้ทั้งหมดตามลำดับการทดลองที่ 1 ในตารางที่ 2



รูปที่ 3 สารสกัดจากใบชาอัสสัม



รูปที่ 4 ทาสีย้อมด้วยแปรงบนแผ่นไม้



รูปที่ 5 เช็ดสีย้อมด้วยผ้าสะอาด



ตารางที่ 1 ระดับพารามิเตอร์ในการทดลอง

| พารามิเตอร์ | ระดับพารามิเตอร์ | ต่ำ | สูง |
|---------------------------------|------------------|---------------|---------------|
| A ปริมาณไบโซลซั่ม | 2 | 40 กรัม | 60 กรัม |
| B ปริมาณน้ำสะอาด | 2 | 300 มิลลิลิตร | 400 มิลลิลิตร |
| C เกล็ดโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) | 2 | 5 กรัม | 10 กรัม |
| D ระยะเวลาต้ม | 2 | 5 นาที | 10 นาที |
| E จำนวนรอบในการทา | 2 | 2 รอบ | 4 รอบ |

ตารางที่ 2 ตัวอย่างลำดับการทดลองทั้ง 160 การทดลอง

| StdOrder | RunOrder | ไบโซลซั่ม (กรัม) | ปริมาณน้ำ (มิลลิลิตร) | เกล็ด NaOH (กรัม) | ระยะเวลาต้ม (นาที) | จำนวนทา (รอบ) |
|----------|----------|---------------------|--------------------------|----------------------|-----------------------|------------------|
| 140 | 1 | 60 | 400 | 5 | 10 | 2 |
| 122 | 2 | 60 | 300 | 5 | 10 | 4 |
| 57 | 3 | 40 | 300 | 5 | 10 | 4 |
| 146 | 4 | 60 | 300 | 5 | 5 | 4 |
| : | : | : | : | : | : | : |
| 88 | 159 | 60 | 400 | 10 | 5 | 4 |
| 183 | 160 | 40 | 400 | 5 | 5 | 4 |

รูปที่ 6 เป็นชิ้นไม้ที่ผ่านการย้อมสีจากการสกัดสารย้อมสีไม้ด้วยวิธีการออกแบบทดลองเชิงแฟคทอเรียลทั้ง 32 รูปแบบ โดยอักษรภาษาอังกฤษตัวพิมพ์เล็กและพิมพ์ใหญ่แสดงค่าพารามิเตอร์ระดับต่ำและสูง ตามลำดับ

2.3 การวิเคราะห์ค่าสี

คณะกรรมการระหว่างประเทศด้านความส่องสว่าง หรือ International Commission on Illumination (CIE) พัฒนาระบบการวัดสีในรูปของวัตถุ โดยไม่ต้องอาศัยประสบการณ์ และกำหนดระบบการบรรยายสี

แบบ 3 มิติ ($L^* - a^* - b^*$) มีระดับสีตามค่าความสว่าง (L^*) ค่าความเป็นสีแดงหรือสีเขียว (a^*) และค่าความเป็นสีเหลืองหรือสีน้ำเงิน (b^*) และเรียกวิธีนี้ว่าการวัดค่าสีระบบ CIE Lab [17] โดยที่ L^* หมายถึงค่าความสว่าง (Lightness) มีค่าอยู่ระหว่าง 0-100 ค่าเข้าใกล้ 100 หมายถึง สีขาว (สีขาว) ค่าเข้าใกล้ 0 หมายถึง สีเข้ม (สีคล้ำ) ที่สุด ถ้าค่า a^* มีค่าเป็นบวก หมายถึง ตัวอย่างมีสีแดง แต่ถ้ามีค่าเป็นลบ หมายถึง ตัวอย่างมีสีเขียว และถ้าค่า b^* มีค่าเป็นบวก หมายถึง ตัวอย่างมีสีเหลือง แต่ถ้ามีค่าเป็นลบ หมายถึง ตัวอย่างมีสีน้ำเงิน



รูปที่ 6 ชั้นไม้ที่ผ่านการย้อมสีทั้งหมด 32 การทดลอง

เมื่อนำชั้นไม้ที่ผ่านการย้อมสีด้วยไบซาล์สสัมมา เปรียบเทียบกับชั้นไม้สักตัวอย่าง สามารถวัดความต่างของค่าสีได้จากสมการที่ (1)

$$\Delta E = \sqrt{(L_1 - L_2)^2 + (a_1 - a_2)^2 + (b_1 - b_2)^2} \quad (1)$$

โดย ΔE คือ ค่าความแตกต่างของสี

L_1 คือ ค่าความสว่างของไม้สักตัวอย่าง

L_2 คือ ค่าความสว่างของชั้นไม้ย้อมสี

a_1 คือ ค่าความเป็นสีเขียว-แดงของไม้สักตัวอย่าง

a_2 คือ ค่าความเป็นสีเขียว-แดงของชั้นไม้ย้อมสี

b_1 คือ ค่าความเป็นสีน้ำเงิน-เหลืองของไม้สักตัวอย่าง

b_2 คือ ค่าความเป็นสีน้ำเงิน-เหลืองของชั้นไม้ย้อมสี



โดยค่า ΔE ระหว่าง 0 - 1.5 หมายถึง ผู้สังเกตทั่วไปไม่เห็นความแตกต่างของสี ค่าระหว่าง 1.5 - 6.0 หมายถึง ผู้สังเกตที่มีประสบการณ์สามารถเห็นความแตกต่างของสี และ ค่ามากกว่า 6.0 หมายถึง ผู้สังเกตทั่วไปสามารถสังเกตเห็นสีแตกต่างชัดเจน [18, 19]

3. ผลการวิจัย

3.1 ผลการเปรียบเทียบค่าสีไม้ยางพาราประสานย้อมสีกับสีไม้สัก

การวัดความแตกต่างของสีที่ได้จากการย้อมสีด้วยไบซาลัสสัมจะวัดค่าสีบนชิ้นไม้ตัวอย่างด้วยเครื่องวัดสีแบบพกพา HunterLab รุ่น Mini EZ จำนวน 3 ตำแหน่ง แสดงดังรูปที่ 7 และจะใช้ค่าสีที่วัดจากชิ้นไม้สักตัวอย่างที่มีอายุมากกว่า 40 ปี ที่ไม่มีกระพี้ไม้ [6] แสดงรูปที่ 8 เป็นค่ามาตรฐานโดยลักษณะของสีไม้สักเป็นสีน้ำตาลอมเหลืองจำนวน 5 ชิ้น แสดงดังรูปที่ 9 ซึ่งมีค่าเฉลี่ย L^* , a^* และ b^* เท่ากับ 46.16, 10.74 และ 23.81 ตามลำดับ

จากตารางที่ 3 เป็นตัวอย่างการวัดค่าสีที่ได้จากชิ้นไม้ย้อมสีตัวอย่างทั้งหมด 160 การทดลอง เมื่อทำการวัดค่าสี พบว่า ชิ้นไม้ที่ผ่านการย้อมสีมีค่า L^* อยู่



รูปที่ 7 การวัดค่าสีบนชิ้นไม้ยางพาราประสานย้อมสี



รูปที่ 8 การวัดค่าสีบนชิ้นไม้สักตัวอย่าง



รูปที่ 9 สีชิ้นไม้สักตัวอย่าง



ตารางที่ 3 ตัวอย่างค่าสีที่วัดได้จากชิ้นไม้ยางพาราประสานย้อมสี

| ลำดับ | ใบชาอัสสัม (กรัม) | ปริมาณน้ำ (มิลลิลิตร) | เกล็ด NaOH (กรัม) | ระยะเวลาต้ม (นาที) | จำนวนทาบ (รอบ) | L_2 | a_2 | b_2 | ΔE |
|-------|-------------------|-----------------------|-------------------|--------------------|----------------|-------|-------|-------|------------|
| 1 | 60 | 400 | 5 | 10 | 2 | 52.88 | 11.52 | 22.90 | 6.83 |
| 2 | 60 | 300 | 5 | 10 | 4 | 46.03 | 12.29 | 21.28 | 2.97 |
| 3 | 40 | 300 | 5 | 10 | 4 | 44.18 | 12.08 | 20.56 | 4.03 |
| 4 | 60 | 300 | 5 | 5 | 4 | 40.66 | 12.28 | 18.18 | 8.02 |
| : | : | : | : | : | : | : | : | : | : |
| 159 | 60 | 400 | 10 | 5 | 4 | 41.34 | 12.00 | 21.74 | 5.39 |
| 160 | 40 | 400 | 5 | 5 | 4 | 45.26 | 11.12 | 19.73 | 4.19 |

ระหว่าง 34.16 – 54.14 ค่า a^* อยู่ระหว่าง 8.74 – 15.85 และ b^* อยู่ระหว่าง 12.05 – 24.21 และคำนวณค่า ΔE พบว่า ค่า ΔE ต่ำสุดเท่ากับ 1.47 (ตัวอักษรหนาและเอียง) ในตารางที่ 5 ในการทดลองที่มีใบชา 40 กรัม ปริมาณน้ำ 400 มิลลิลิตร เกล็ด NaOH 10 กรัม เวลาต้ม 10 นาที และจำนวนทาบ 4 รอบ ส่วนค่า ΔE สูงสุดเท่ากับ 16.80 ในการทดลองที่มีน้ำหนักใบชา 60 กรัม ปริมาณน้ำ 300 มิลลิลิตร เกล็ด NaOH 10 กรัม เวลาต้ม 10 นาที และจำนวนทาบ 4 รอบ และค่าเฉลี่ย ΔE ค่าสูงสุด ค่าเฉลี่ย และค่าต่ำสุดของการทดลองทั้งหมดเท่ากับ 8.14, 5.80 และ 3.89 ตามลำดับ แสดงดังตารางที่ 5 โดยค่าเฉลี่ยทั้งหมดอยู่ในเกณฑ์ที่ผู้สังเกตทั่วไปไม่สามารถเห็นความแตกต่างของสีที่ย้อมได้

3.2 ผลการเปรียบเทียบไม้ยางพาราย้อมสีและเคลือบผิวด้วยสารเคลือบผิว

หลังจากย้อมสีไม้ด้วยสารสกัดจากใบชาอัสสัมแล้วจะนำชิ้นไม้ตัวอย่างมาทำการเคลือบด้วยสีรองพื้น

อุดเสี้ยนไม้ (Sanding Sealer) และแลคเกอร์ (Lacquer) ด้วยการพ่นทับเพื่อดูลักษณะของค่าสีให้เหมือนกับการทำสีเฟอร์นิเจอร์จริง พ่นสีรองพื้นอุดเสี้ยนไม้และแลคเกอร์อย่างละ 2 รอบ โดยชิ้นไม้สักตัวอย่างได้ทำการพ่นเคลือบเช่นกันแสดงดังรูปที่ 10 และ 11 แล้วทำการวัดค่า L^* , a^* และ b^* ของชิ้นไม้สักขี้ มีค่าเฉลี่ย L^* , a^* และ b^* เท่ากับ 37.18, 11.51 และ 17.66 ตามลำดับ แสดงดังตารางที่ 4

ตารางที่ 4 ค่าสีของชิ้นไม้สักที่ผ่านการเคลือบผิว

| ชิ้นที่ | ค่า L^* | ค่า a^* | ค่า b^* |
|---------|-----------|-----------|-----------|
| 1 | 37.84 | 11.18 | 18.51 |
| 2 | 37.00 | 12.20 | 17.31 |
| 3 | 35.89 | 10.73 | 15.11 |
| 4 | 38.40 | 12.83 | 20.06 |
| 5 | 36.76 | 10.63 | 17.31 |
| เฉลี่ย | 37.18 | 11.51 | 17.66 |



ชั้นที่ 1

ชั้นที่ 2

ชั้นที่ 3

ชั้นที่ 4

ชั้นที่ 5

รูปที่ 10 สีชั้นไม้สักตัวอย่างที่พ่นเคลือบด้วยแลคเกอร์



1.abcdE

2.abcdE

3.abcdE

4.abcdE

5.abcdE

6.abcdE

7.abcdE

8.abcdE



9.abcdE

10.abcdE

11.abcdE

12.abcdE

13.abcdE

14.abcdE

15.abcdE

16.abcdE



17.abcdE

18.abcdE

19.abcdE

20.abcdE

21.abcdE

22.abcdE

23.abcdE

24.abcdE



25.abcdE

26.abcdE

27.abcdE

28.abcdE

29.abcdE

30.abcdE

31.abcdE

32.abcdE

รูปที่ 11 ชั้นไม้ที่ผ่านการย้อมสีและพ่นเคลือบด้วยแลคเกอร์



บทความวิจัย

ตารางที่ 5 ค่า ΔE ของการทดลองทั้งหมด 32 การทดลอง

| ลำดับ | ไบซาส์ส้ม (กรัม) | ปริมาณน้ำ (มิลลิลิตร) | เกล็ด NaOH (กรัม) | ระยะเวลาต้ม (นาที) | จำนวนรอบ | ΔE ไม่พ่นสารเคลือบผิว | | | | ΔE พ่นสารเคลือบผิว | | | |
|--------|------------------|-----------------------|-------------------|--------------------|----------|-------------------------------|-------|-------------|------|----------------------------|-------|-------------|------|
| | | | | | | Max | Mean | Min | Std | Max | Mean | Min | Std |
| 1 | 40 | 300 | 5 | 5 | 2 | 7.84 | 5.13 | 4.27 | 1.52 | 12.52 | 10.10 | 7.26 | 2.14 |
| 2 | 40 | 300 | 5 | 5 | 4 | 9.98 | 7.86 | 5.35 | 2.05 | 12.49 | 8.05 | 4.27 | 3.76 |
| 3 | 40 | 300 | 5 | 10 | 2 | 5.37 | 3.71 | 2.56 | 1.36 | 15.95 | 12.53 | 10.18 | 2.36 |
| 4 | 40 | 300 | 5 | 10 | 4 | 11.51 | 6.61 | 2.92 | 3.67 | 17.57 | 9.53 | 3.69 | 5.39 |
| 5 | 40 | 300 | 10 | 5 | 2 | 7.01 | 3.89 | 2.36 | 1.99 | 17.11 | 12.66 | 7.56 | 4.49 |
| 6 | 40 | 300 | 10 | 5 | 4 | 7.80 | 5.89 | 3.05 | 2.04 | 14.42 | 9.77 | 6.30 | 3.16 |
| 7 | 40 | 300 | 10 | 10 | 2 | 8.00 | 6.22 | 3.97 | 2.01 | 10.21 | 8.03 | 6.65 | 1.48 |
| 8 | 40 | 300 | 10 | 10 | 4 | 10.06 | 9.58 | 8.64 | 0.55 | 10.11 | 7.76 | 6.05 | 1.54 |
| 9 | 40 | 400 | 5 | 5 | 2 | 5.57 | 3.52 | 2.55 | 1.33 | 16.88 | 13.09 | 7.32 | 3.85 |
| 10 | 40 | 400 | 5 | 5 | 4 | 10.08 | 4.74 | 2.51 | 3.08 | 14.49 | 11.37 | 9.01 | 2.15 |
| 11 | 40 | 400 | 5 | 10 | 2 | 6.15 | 4.47 | 3.21 | 1.36 | 16.80 | 15.26 | 13.23 | 1.68 |
| 12 | 40 | 400 | 5 | 10 | 4 | 4.86 | 3.78 | 2.51 | 1.00 | 18.48 | 12.36 | 7.87 | 4.24 |
| 13 | 40 | 400 | 10 | 5 | 2 | 5.87 | 3.57 | 2.18 | 1.54 | 13.52 | 11.18 | 5.97 | 3.07 |
| 14 | 40 | 400 | 10 | 5 | 4 | 10.11 | 8.28 | 5.86 | 1.89 | 11.20 | 6.86 | 3.40 | 3.50 |
| 15 | 40 | 400 | 10 | 10 | 2 | 4.98 | 3.59 | 2.42 | 1.02 | 16.89 | 12.71 | 8.52 | 3.76 |
| 16 | 40 | 400 | 10 | 10 | 4 | 7.77 | 4.35 | 1.47 | 2.55 | 12.98 | 10.92 | 9.30 | 1.59 |
| 17 | 60 | 300 | 5 | 5 | 2 | 6.05 | 4.04 | 3.03 | 1.20 | 13.21 | 11.13 | 8.55 | 1.73 |
| 18 | 60 | 300 | 5 | 5 | 4 | 8.27 | 6.59 | 3.11 | 2.11 | 10.91 | 8.99 | 8.14 | 1.16 |
| 19 | 60 | 300 | 5 | 10 | 2 | 6.61 | 5.06 | 3.51 | 1.24 | 11.54 | 8.75 | 5.45 | 2.28 |
| 20 | 60 | 300 | 5 | 10 | 4 | 5.67 | 4.20 | 2.97 | 1.02 | 12.07 | 10.19 | 7.55 | 1.84 |
| 21 | 60 | 300 | 10 | 5 | 2 | 7.86 | 5.13 | 3.65 | 1.69 | 17.44 | 12.18 | 9.47 | 3.26 |
| 22 | 60 | 300 | 10 | 5 | 4 | 12.96 | 10.88 | 7.95 | 2.23 | 9.16 | 6.30 | 3.08 | 3.03 |
| 23 | 60 | 300 | 10 | 10 | 2 | 10.58 | 8.39 | 4.95 | 2.32 | 8.42 | 6.66 | 4.14 | 1.59 |
| 24 | 60 | 300 | 10 | 10 | 4 | 16.80 | 13.51 | 10.79 | 2.78 | 6.91 | 4.24 | 2.26 | 1.84 |
| 25 | 60 | 400 | 5 | 5 | 2 | 8.16 | 4.46 | 2.44 | 2.30 | 19.57 | 14.29 | 9.52 | 3.61 |
| 26 | 60 | 400 | 5 | 5 | 4 | 6.02 | 4.25 | 3.32 | 1.13 | 11.80 | 10.34 | 8.70 | 1.40 |
| 27 | 60 | 400 | 5 | 10 | 2 | 7.31 | 5.83 | 3.73 | 1.47 | 18.73 | 16.18 | 10.88 | 3.18 |
| 28 | 60 | 400 | 5 | 10 | 4 | 6.28 | 4.48 | 2.85 | 1.39 | 14.17 | 10.97 | 7.15 | 2.69 |
| 29 | 60 | 400 | 10 | 5 | 2 | 6.97 | 4.70 | 1.91 | 2.21 | 14.41 | 10.15 | 7.52 | 2.57 |
| 30 | 60 | 400 | 10 | 5 | 4 | 9.68 | 7.31 | 5.39 | 2.03 | 11.17 | 8.56 | 5.90 | 2.32 |
| 31 | 60 | 400 | 10 | 10 | 2 | 2.69 | 2.12 | 1.81 | 0.38 | 15.83 | 12.83 | 9.52 | 2.61 |
| 32 | 60 | 400 | 10 | 10 | 4 | 15.55 | 9.52 | 7.11 | 3.44 | 13.04 | 8.85 | 3.66 | 3.47 |
| เฉลี่ย | | | | | | 8.14 | 5.80 | 3.89 | 1.81 | 13.75 | 10.40 | 7.13 | 2.71 |



ผลการทดลอง พบว่า ค่า L^* อยู่ระหว่าง 35.79 – 55.37 ค่า a^* อยู่ระหว่าง 11.28 – 23.29 และ b^* อยู่ระหว่าง 14.59 – 32.37 ค่า ΔE ต่ำสุดเท่ากับ 2.26 (ตัวอักษรหนาและเอียง) ในตารางที่ 5 ในการทดลองที่มีไบซา 60 กรัม ปริมาณน้ำ 300 มิลลิลิตร เกล็ด NaOH 10 กรัม เวลาต้ม 10 นาที และจำนวนทา 4 รอบ ส่วนค่า ΔE สูงสุดเท่ากับ 19.57 ในการทดลองที่มีไบซา 60 กรัม ปริมาณน้ำ 400 มิลลิลิตร เกล็ด NaOH 5 กรัม เวลาต้ม 5 นาที และจำนวนทา 2 รอบ และค่าเฉลี่ย ΔE ค่าสูงสุด ค่าเฉลี่ย และค่าต่ำสุดของการทดลองทั้งหมดเท่ากับ 13.75, 10.40 และ 7.13 ตามลำดับ แสดงดังตารางที่ 5

เมื่อนำไม้ที่ผ่านการย้อมสีและเคลือบด้วยสีรองพื้น อดสีเย็นไม้และแลคเกอร์ไปเปรียบเทียบกับไม้สักตัวอย่างที่ไม่เคลือบผิว พบว่า ค่า ΔE ต่ำสุดเท่ากับ 2.02 ในการทดลองที่มีไบซา 40 กรัม ปริมาณน้ำ 300 มิลลิลิตร เกล็ด NaOH 5 กรัม เวลาต้ม 10 นาที และจำนวนทา 4 รอบ ส่วนค่า ΔE สูงสุดเท่ากับ 13.90 ในการทดลองที่มีไบซา 60 กรัม ปริมาณน้ำ 300 มิลลิลิตร เกล็ด NaOH 10 กรัม เวลาต้ม 10 นาที และจำนวนทา 4 รอบ และค่าเฉลี่ยการทดลองทั้งหมดเท่ากับ 4.53

3.3 พารามิเตอร์ที่เหมาะสมในการย้อมสี

หลังจากทำการย้อมสีไม้และวัดค่าสีทั้งหมด 160 การทดลองแล้ว นำผลความต่างค่าสีมาวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) จากพารามิเตอร์ทั้ง 5 พารามิเตอร์ พบว่า ระยะเวลาต้มในการสกัดสีไบซาสัมผัสไม่มีผลต่อความต่างของค่าสีอย่างมีนัยสำคัญ ($P\text{-value}>0.05$) แสดงดังตารางที่ 6 แต่เมื่อวิเคราะห์ปฏิสัมพันธ์ (Interaction) ตั้งแต่ 2 พารามิเตอร์ขึ้นไป พบว่า ปริมาณไบซา เกล็ด NaOH น้ำสะอาด และ

จำนวนรอบในการทา มีผลต่อการทดลองในทุก ๆ ปฏิสัมพันธ์ การวิเคราะห์ปฏิสัมพันธ์ 3 พารามิเตอร์ ที่ประกอบด้วย ไบซา น้ำสะอาด เกล็ด NaOH หรือไบซา เกล็ด NaOH จำนวนรอบในการทา หรือ น้ำสะอาด เกล็ด NaOH ระยะเวลาต้ม นั้นมีผลต่อความต่างของสี ($P\text{-value}<0.05$) และ การวิเคราะห์ปฏิสัมพันธ์ 4 พารามิเตอร์ ที่ประกอบด้วย ไบซา น้ำสะอาดระยะเวลาต้ม และจำนวนรอบในการทา มีผลต่อความต่างสีเช่นกัน ($P\text{-value}=0.003$) การวิเคราะห์อิทธิพลหลัก (Main effect) พบว่า ถ้ากำหนดค่าในแต่ละพารามิเตอร์ที่ประกอบด้วย ไบซาที่ 40 กรัม ปริมาณน้ำสะอาด 400 มิลลิลิตร เกล็ด NaOH จำนวน 5 กรัม และจำนวนรอบทา 2 รอบ จะให้ค่าจะให้ค่า ΔE ต่ำสุด แสดงดังรูปที่ 12 ส่วนการวิเคราะห์อิทธิพลร่วม (Interaction Effect) พบว่า ถ้ากำหนดไบซา 60 กรัม ($P\text{-value}=0.001$) และเกล็ด NaOH 5 กรัม หรือ เกล็ด NaOH 5 กรัม และจำนวนทา 2 รอบ ($P\text{-value}=0.00$) หรือปริมาณน้ำสะอาด 400 มิลลิลิตร และเกล็ด NaOH 5 กรัม ($P\text{-value}=0.014$) ให้ค่า ΔE ต่ำ แสดงดังรูปที่ 13

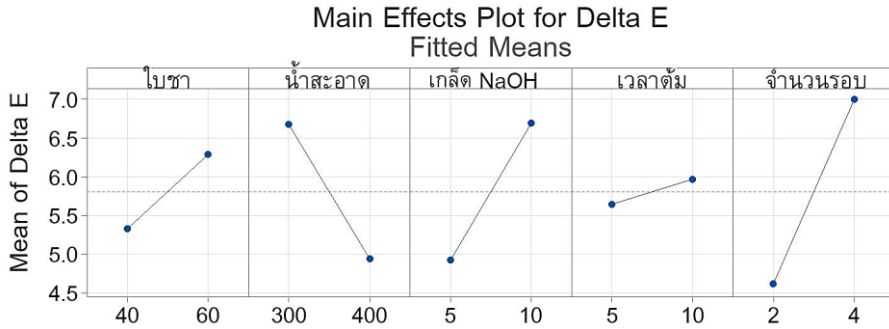
จากรูปที่ 14 เป็นการเปรียบเทียบสีของไม้ยางพาราประสานที่ผ่านการย้อมสีด้วยสารสกัดจากไบซาสัมผัส ด้วยค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่ให้ค่า ΔE ต่ำสุด โดยรูปที่ 14 (ก) เป็นชิ้นไม้ตัวอย่างที่ผ่านการย้อมสีและรูปที่ 14 (ข) เป็นชิ้นไม้เดียวกับรูปที่ 14 (ก) ที่พ่นเคลือบด้วยแลคเกอร์นำไปเปรียบเทียบกับชิ้นไม้สักตัวอย่างและชิ้นไม้สักที่พ่นเคลือบด้วยแลคเกอร์ในรูปที่ 14 (ค) และรูปที่ 14 (ง) ตามลำดับ ซึ่งมีสีใกล้เคียงกัน มีเพียงความแตกต่างของลักษณะเส้นหรือลายไม้เท่านั้น



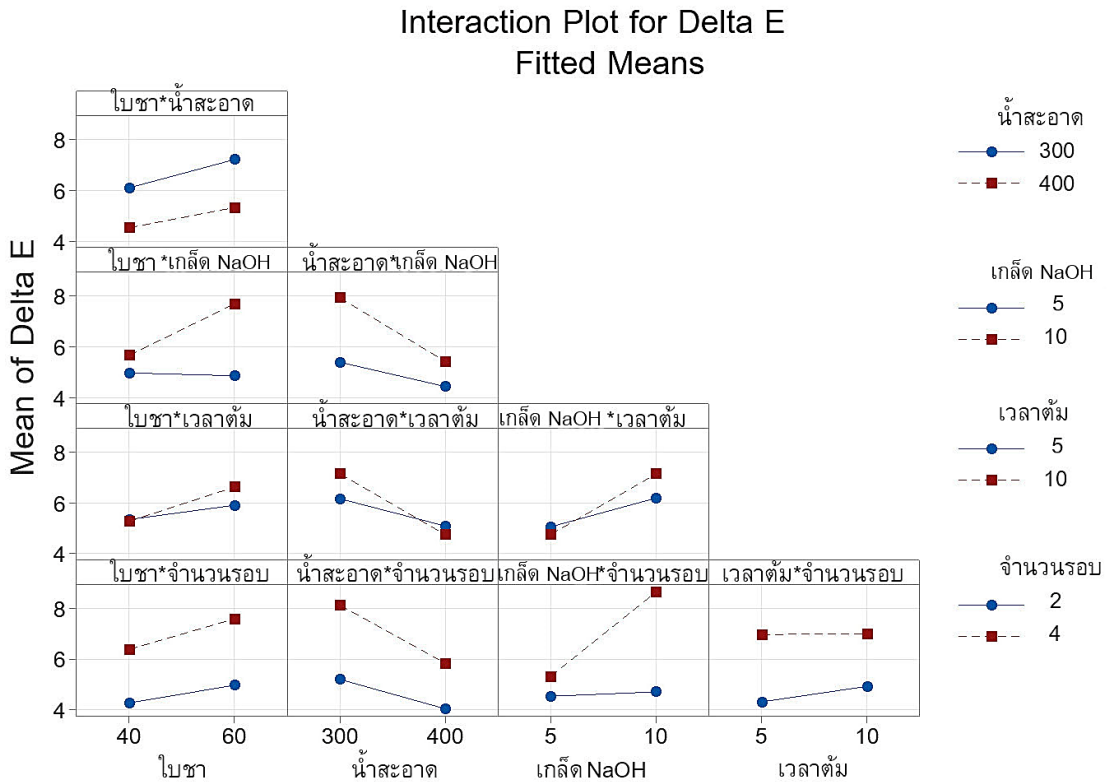
บทความวิจัย

ตารางที่ 6 การวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance)

| Source | DF | Adj SS | Adj MS | F-Value | P-Value |
|--|-----|---------|---------|---------|---------|
| Model | 31 | 971.53 | 31.340 | 8.16 | 0.000 |
| Linear | 5 | 511.07 | 102.214 | 26.60 | 0.000 |
| ใบชา | 1 | 36.52 | 36.520 | 9.51 | 0.003 |
| น้ำสะอาด | 1 | 120.05 | 120.047 | 31.25 | 0.000 |
| เกล็ด NaOH | 1 | 124.42 | 124.419 | 32.38 | 0.000 |
| เวลาดำ | 1 | 4.16 | 4.159 | 1.08 | 0.300 |
| จำนวนรอบ | 1 | 225.93 | 225.927 | 58.81 | 0.000 |
| 2-Way Interactions | 10 | 230.12 | 23.012 | 5.99 | 0.000 |
| ใบชา*น้ำสะอาด | 1 | 1.00 | 1.000 | 0.26 | 0.611 |
| ใบชา*เกล็ด NaOH | 1 | 45.78 | 45.781 | 11.92 | 0.001 |
| ใบชา*เวลาดำ | 1 | 6.23 | 6.228 | 1.62 | 0.205 |
| ใบชา*จำนวนรอบ | 1 | 2.56 | 2.556 | 0.67 | 0.416 |
| น้ำสะอาด*เกล็ด NaOH | 1 | 23.98 | 23.978 | 6.24 | 0.014 |
| น้ำสะอาด*เวลาดำ | 1 | 17.45 | 17.452 | 4.54 | 0.035 |
| น้ำสะอาด*จำนวนรอบ | 1 | 12.89 | 12.894 | 3.36 | 0.069 |
| เกล็ด NaOH*เวลาดำ | 1 | 15.83 | 15.831 | 4.12 | 0.044 |
| เกล็ด NaOH*จำนวนรอบ | 1 | 100.96 | 100.963 | 26.28 | 0.000 |
| เวลาดำ*จำนวนรอบ | 1 | 3.44 | 3.437 | 0.89 | 0.346 |
| 3-Way Interactions | 10 | 170.98 | 17.098 | 4.45 | 0.000 |
| ใบชา*น้ำสะอาด*เกล็ด NaOH | 1 | 32.42 | 32.423 | 8.44 | 0.004 |
| ใบชา*น้ำสะอาด*เวลาดำ | 1 | 2.47 | 2.467 | 0.64 | 0.424 |
| กากชา*น้ำสะอาด*จำนวนรอบ | 1 | 0.12 | 0.123 | 0.03 | 0.858 |
| กากชา*เกล็ด NaOH *เวลาดำ | 1 | 0.04 | 0.039 | 0.01 | 0.920 |
| กากชา*เกล็ด NaOH *จำนวนรอบ | 1 | 40.42 | 40.421 | 10.52 | 0.002 |
| กากชา*เวลาดำ*จำนวนรอบ | 1 | 2.43 | 2.431 | 0.63 | 0.428 |
| น้ำสะอาด*เกล็ด NaOH *เวลาดำ | 1 | 74.48 | 74.485 | 19.39 | 0.000 |
| น้ำสะอาด*เกล็ด NaOH *จำนวนรอบ | 1 | 9.00 | 9.001 | 2.34 | 0.128 |
| น้ำสะอาด*เวลาดำ*จำนวนรอบ | 1 | 0.01 | 0.014 | 0.00 | 0.951 |
| เกล็ด NaOH *เวลาดำ*จำนวนรอบ | 1 | 9.58 | 9.580 | 2.49 | 0.117 |
| 4-Way Interactions | 5 | 52.99 | 10.599 | 2.76 | 0.021 |
| ใบชา*น้ำสะอาด*เกล็ด NaOH *เวลาดำ | 1 | 1.78 | 1.781 | 0.46 | 0.497 |
| ใบชา*น้ำสะอาด*เกล็ด NaOH *จำนวนรอบ | 1 | 1.24 | 1.244 | 0.32 | 0.570 |
| ใบชา*น้ำสะอาด*เวลาดำ*จำนวนรอบ | 1 | 35.58 | 35.584 | 9.26 | 0.003 |
| ใบชา*เกล็ด NaOH *เวลาดำ*จำนวนรอบ | 1 | 14.38 | 14.384 | 3.74 | 0.055 |
| น้ำสะอาด*เกล็ด NaOH *เวลาดำ*จำนวนรอบ | 1 | 0.00 | 0.001 | 0.00 | 0.987 |
| 5-Way Interactions | 1 | 6.36 | 6.360 | 1.66 | 0.201 |
| ใบชา*น้ำสะอาด*เกล็ด NaOH*เวลาดำ*จำนวนรอบ | 1 | 6.36 | 6.360 | 1.66 | 0.201 |
| Error | 128 | 491.77 | 3.842 | | |
| Total | 159 | 1463.30 | | | |



รูปที่ 12 การวิเคราะห์ Main Effect Plot



รูปที่ 13 การวิเคราะห์ Interaction Plot



รูปที่ 14 เปรียบเทียบสีของไม้ยางพาราประสานย้อมสีกับไม้สัก



รูปที่ 15 เปรียบเทียบสีย้อมทั่วไปกับไม้ยางพาราและไม้สัก

4. สรุปผลและอภิปรายผล

งานวิจัยนี้นำไบซอัสสัมมาสกัดสีเพื่อนำมาเป็นสารย้อมสีไม้ให้มีลักษณะคล้ายสีไม้สัก โดยวัดค่าสีที่ย้อมได้ในระบบ CIE Lab เพื่อเปรียบเทียบความต่างของสีชิ้นไม้ที่ผ่านการย้อมกับไม้สักตัวอย่าง และชิ้นไม้ที่ผ่านการย้อมสีและเคลือบสารเคลือบผิวกับชิ้นไม้สักตัวอย่าง ผลการทดลองพบว่า ค่า ΔE เฉลี่ยที่ 5.80 และ 4.53 ตามลำดับ พารามิเตอร์ที่ใช้ประกอบด้วย ไบซอัสสัม น้ำสะอาด เกล็ด NaOH ระยะเวลาต้ม และจำนวนรอบ ทำการทดลองด้วยวิธีการออกแบบการทดลองเชิงแฟคทอเรียล ผลการทดลองพบว่า ระยะเวลาต้มไบซอัสสัมไม่มีผลต่อความต่างของค่าสี และเมื่อกำหนดไบซอัสสัม 40 กรัม ปริมาณน้ำสะอาด 400 มิลลิลิตร เกล็ด NaOH

10 กรัม และจำนวนทวน 4 รอบ ให้ค่า ΔE ต่ำสุดที่ 1.47 จากค่าเฉลี่ยของ ΔE ที่คำนวณได้จะซึ่งเป็นค่าที่ผู้สังเกตทั่วไปไม่สามารถเห็นความแตกต่างของสีที่ทำการย้อมได้

เพื่อเป็นการยืนยันผลการทดลอง จึงนำสีย้อมไม้เคมีสีสักไปย้อมชิ้นไม้ยางพาราประสานจำนวน 4 รอบ พบว่า ลักษณะสีบนชิ้นไม้ยางพาราประสานจะมีสีเหลืองอมส้ม ดังในรูปที่ 15 (ก) และเมื่อนำสีย้อมไม้เคมีสีสักไปย้อมชิ้นไม้สักตัวอย่าง พบว่า ไม่เกิดความแตกต่างจากเดิม ดังในรูปที่ 15 (ข) ในทางกลับกันเมื่อนำสารสกัดจากไบซอัสสัมมาย้อมชิ้นไม้สักตัวอย่าง พบว่า ชิ้นไม้สักตัวอย่างมีสีน้ำตาลที่เข้มขึ้นและมีลักษณะเส้นไม้เด่นชัด ดังในรูปที่ 15 (ค)



การย้อมสีด้วยสารสกัดจากใบชาอัสสัมในไม้ยางพาราที่เป็นไม้ใบกว้าง (Hardwoods) สามารถซึมผ่านและยึดเกาะเส้นใยไม้ได้ดีเนื่องจากสารที่สกัดได้มีความเข้มข้น สอดคล้องกับจากงานวิจัยที่ผ่านมาที่นำวัสดุจากธรรมชาติไปย้อมไม้ใบกว้าง เช่น สารสกัดจากไม้พะยูนที่นำไปย้อมกระพีไม้ป๊อบ (*Populus Tementosa*) [14] สารสกัดจากบีทรูท (*Beetroot*) นำไปย้อมไม้โอ๊ค และไม้วอลนัท [20] หรือนำไปย้อมกับไม้ใบแคบ (Softwoods) เช่น สารสกัดจากหญ้าฝรั่น (*Saffron*) นำไปย้อมไม้สนสก๊อตและกระพีไม้บีชโอเรียนเต็ล [21, 22]

แนวทางต่อไปของการพัฒนากระบวนการย้อมสีด้วยสารสกัดจากธรรมชาติจากใบชาอัสสัมจะต้องเพิ่มระดับพารามิเตอร์ หรือเพิ่มสารบางชนิดจากธรรมชาติ เพื่อให้ได้สารสกัดที่มีสีใกล้เคียงกับไม้สักมากขึ้น อีกทั้งยังสามารถนำวัสดุจากธรรมชาติที่ให้สีสันทันที่ต่างกันมาพัฒนาต่อไป

5. กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณ ภาควิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมอุตสาหกรรม วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ที่เอื้อเพื่อ อุปกรณ์ สถานที่ ตลอดจนเงินทุนสนับสนุน วัสดุการวิจัยในครั้งนี้

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] S. Sangsuwan, Y. Uddhimethi and S. Jarusombuti, The development of rubberwood furniture industry for export of thailand, *Journal of Humanities and Social Sciences Thonburi University*, 2019, 13(3), 77-84. (in Thai)
- [2] M. Makka and T. Tachakitkachorn, Transition of teak timber supply chain in architectural, *Sarasatr*, 2021, 4(4), 704-715. (in Thai)
- [3] B. Pangngakhrua and W. Hoamuangkaew, Demand for teak lumber by wooden furniture factories in bangkok, *Thai Journal of Forestry*, 2012, 31(1), 38-45. (in Thai)
- [4] S. Inwiset, Growth and yeild of teak (*Tectona grandis* Linn.) under different regeneration methods in khun mae khum mee platation, phrae province, *Thai Journal of Forestry*, 2014, 33(2), 52-60. (in Thai)
- [5] G. Silva, K.R. Curvo, A.C. Oliveira, P.N.M. Neto, L.G. Vasconcelos, A. Carvalho, M.J. Silva, R. Natalino and B.L.C. Pereira, Effect of age on heartwood propportion, color, chemical composition, and biological resistance of teakwood, *BioResources*, 2023, 18(2), 4116-4131.
- [6] M. Gašparík, M. Gaff, F. Kačik and A. Sikora, Color and chemical changes in teak (*Tectona grandis* L. f.) and meranti (*Shorea* spp.) wood after thermal treatment, *BioResources*, 2019, 14(2), 2667-2683.
- [7] T. Boupun, T. Sassa-deepang and K. Dongfookam, Comparison of physicochemical properties and sensory quality of orthodox versus modified CTC methods of assam black tea, *Journal of Food Technology, Siam University*, 2022, 17(2), 55-68. (in Thai)



- [8] C. Choocharoen, P. Chompoota, S. Lertsiri and S. Sritho, Good agricultural practices for fresh tea leaves of tea farmers in royal project foundation, Chiang Mai province, Agricultural Science Journal, 2021, 52(2), 202-212. (in Thai)
- [9] K. Atittaya, A feasibility study of using extracted tea leaves from beverage industry for particle board production instead of wood chip, Thesis, Prince of Songkla University, Thailand, 2013. (in Thai)
- [10] T. Theppakorn, Tea (*Camellia sinensis* L.): Manufacturing and chemical compositions from fermentation, Burapha Science Journal, 2015, 17(2), 189-196. (in Thai)
- [11] M. Masae, P. Joypod, P. Choopook and P. Srisawang, Colour fastness and UV protection of silk dyed with tea, Journal of Srinakharinwirot University (Journal of Science and Technology), 2017, 9(17), 73-82.
- [12] A. Jitphusa, Optimization of time and ratios of mixed fixing agents for dyeing of 100% cotton using instant coffee, RMUTSB Academic Journal, 2017, 5(2), 136-145. (in Thai)
- [13] P. Seekhaw, N. Nearnmayhom, N. Promla, N. Sukonpakdee, S. Yoopech and A. Jutiviboonsuk, Study of color hues and fastness of natural dyes from the leaves of *Bouea burmanica* Griff on silk and cotton, PSRU Journal of Science and Technology, 2022, 7(2), 89-102. (in Thai)
- [14] T. Zhu, K. Ren, J. Sheng, Q. Zhang, J. Li and J. Lin, Natural dye extracted from *Dalbergia cochinchinensis* residue with water fastness, mildew resistance and permeability properties for wood staining, Wood Science and Technology, 2022, 56(3), 969-988.
- [15] S.E. Yeager, M.E. Batali, L.X. Lim, J. Liang, J. Han, A.N. Thompson, J.X. Guinard and W.D. Ristenpart, Roast level and brew temperature significantly affect the color of brewed coffee, Journal of Food Science, 2022, 87(4), 1837-1850.
- [16] T. Eakkawit and P. Siraphop, Appropriate condition for dyeing ground coffee raised teak wood by applying of experiment method, Project, King Monkut's University of Technology North Bangkok, Thailand, 2020.



- [17] W. Dong, R. Hu, Z. Chu, J. Zhao and L. Tan, Effect of different drying techniques on bioactive components, fatty acid composition, and volatile profile of robusta coffee beans, *Food Chemistry*, 2017, 234, 121-130.
- [18] W. Mokrzycki and M. Tatol, Colour difference ΔE -A survey, *Mach Graph Vis*, 2011, 20(4), 383-411.
- [19] X. Duan, *Wood color control technology*, China Building Materials Press, Beijing, China, 2002.
- [20] M. Yeniocak, O. Goktas, M. Colak, E. Ozen and M. Ugurlu, Natural coloration of wood material by red beetroot (*Beta vulgaris*) and determination color stability under UV exposure, *Maderas. Ciencia y tecnología*, 2015, 17(4), 711-722.
- [21] O. Goktas, M.E. Duru, M. Yeniocak and E. Ozen, Determination of the color stability of an environmentally friendly wood stain derived from laurel (*Laurus nobilis* L.) leaf extracts under UV exposure, *Forest Product Journal*, 2008, 58(1/2), 77-80.
- [22] O. Goktas and E. Ozen, Determination of the color stability of an environmentally-friendly wood stain from saffron (*Crocus sativus* L.) extracts under UV exposure, 2009, *Wood Research*, 54(4), 111-118.

การปรับปรุงกระบวนการผลิตเสื้อผ้าสำเร็จรูปเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการผลิต: กรณีศึกษาบริษัท ABC จำกัด

วิชชุดร์ งามสะอาด^{1*} ปิยะเนตร นาคสีดี¹ และ ณ์ฐพล อิงประเสริฐ²

¹ คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยหอการค้าไทย

² สาขาวิชาการจัดการโลจิสติกส์, คณะบริหารธุรกิจมหาบัณฑิต, มหาวิทยาลัยหอการค้าไทย

* ผู้ประสานงานเผยแพร่, E-mail: witchayut_tim@utcc.ac.th

วันที่รับบทความ: 7 กรกฎาคม 2566; วันที่ทบทวนบทความ: 24 พฤศจิกายน 2566; วันที่ตอบรับบทความ: 29 พฤศจิกายน 2566
วันที่เผยแพร่ออนไลน์: 28 ธันวาคม 2566

บทคัดย่อ: บริษัท ABC จำกัดเป็นธุรกิจรับจ้างผลิตเสื้อผ้าสำเร็จรูปตามความต้องการของลูกค้า (Original Design Manufacturing) โดยปัจจุบันกำลังประสบปัญหาด้านการส่งมอบสินค้าล่าช้า ทำให้เสียคะแนนการประเมินด้านการส่งมอบสินค้าตรงเวลา และสูญเสียรายได้จากอัตราส่วนลดตามวันที่ส่งมอบสินค้าเกินกำหนด รวมถึงการเก็บเงินค่าขนส่งสินค้าทางอากาศจากโรงงานตามข้อตกลงการส่งมอบ ซึ่งจากข้อมูลที่ได้มีการบันทึกไว้ย้อนหลัง 1 ปี พบว่าสาเหตุหลักเกิดจากปัญหาด้านความล่าช้าในการผลิต เป็นผลให้ผลิตสินค้าเสร็จหลังจากวันกำหนดส่งมอบสินค้าทางผู้จัดทำจึงได้เลือกสินค้ารุ่นตัวอย่างที่มีการบันทึกว่ามีจำนวนและมูลค่าความเสียหายจากการที่ส่งมอบล่าช้ามากที่สุดมาเป็นตัวอย่างในการศึกษาครั้งนี้ โดยผลการศึกษาพบว่า ก่อนการปรับปรุงมีขั้นตอนการผลิตในรุ่นสินค้าตัวอย่างทั้งหมด 30 สถานี ความเร็วในการผลิตเฉลี่ย 106 วินาทีต่อตัว มีกำลังการผลิต 272 ตัวต่อวัน ใน 1 วันทำงาน 8 ชั่วโมง คิดเป็นประสิทธิภาพการผลิตที่ 54% ซึ่งหลังปรับปรุงขั้นตอนการผลิตและจัดสมดุลการผลิตใหม่โดยใช้หลักการจัดสมดุลสายการผลิต และเทคนิค ECRS ที่สามารถเข้ามาช่วยลดขั้นตอนการผลิต ลดความสูญเสียที่เกิดขึ้นในขั้นตอนการผลิต การจัดเรียงขั้นตอนการทำงานใหม่ รวมถึงการกระจายงานย่อยไปยังสถานีใกล้เคียงเพื่อปรับสมดุลของระยะเวลารอคอยในแต่ละสถานี พบว่าลงมีขั้นตอนการผลิตลดลงเหลือ 28 สถานี มีรอบการผลิตเฉลี่ยลดลงเหลือ 77 วินาทีต่อตัว ส่งผลให้มีกำลังการผลิตเพิ่มขึ้นเป็น 374 ตัวต่อวัน คิดเป็นประสิทธิภาพการผลิตที่ 80 %

คำสำคัญ: ประสิทธิภาพในการผลิต; การจัดสมดุลการผลิต; ความสูญเสีย

Garment Production Process Improvement to Increase Production Efficiency: A Case Study of ABC Co., Ltd.

Witchayut Ngamsaard^{1*}, Piyanate Nakseedee¹ and Nutthaphon Ingprasert²

¹ Faculty of Engineering, University of the Thai Chamber of Commerce

² Master of Business Administration, University of the Thai Chamber of Commerce

* Corresponding author, witchayut_tim@utcc.ac.th

Received: 7 July 2023; Revised: 24 November 2023; Accepted: 29 November 2023

Online Published: 28 December 2023

Abstract: ABC Co., Ltd., a garment manufacturer operating as an Original Design Manufacturing (ODM) company, is currently facing issues related to delayed delivery, resulting in a decline in on-time delivery performance, discounted rates due to late delivery, and increased air freight costs. The primary cause of these problems, identified through the analysis of last year's records, is factory production delays. Therefore, We chose the sample product that was recorded to have the highest amount and value of damage from delayed delivery as a sample for this study. The results of the study found that before the improvement, there were 30 stations in the production process for the sample product models. The average takt time was 106 seconds per unit, with a production capacity of 272 units per day in 1 working day of 8 hours, which is considered to be a production efficiency of 54%. After improving the production process and rebalancing production. Using the principle of Line balancing and ECRS techniques can help to reduce the steps and waste that occur in the production process. Rearranging work steps This includes distributing subtasks to nearby stations to balance waiting times at each station. The results were found that the production process was reduced to 28 stations, with the average takt time reduced to 77 seconds per piece which made the increase in production capacity to 374 pieces per day and a production efficiency of 80%.

Keywords: Production Efficiency; Line Balancing; Waste



1. บทนำ

กลุ่มอุตสาหกรรมสิ่งทอในประเทศไทยมีแนวโน้มที่จะชะลอตัวลงตามสถานการณ์เศรษฐกิจโลกประกอบกับการแข่งขันที่สูงขึ้นในแง่ของการจัดการต้นทุน โดยเฉพาะกลุ่มลูกค้าที่มีความเสี่ยงในด้านของอุปสงค์ของลูกค้ามีความผันผวนมาก หลังจากเผชิญสถานการณ์โควิด 19 จึงเริ่มมีการย้ายฐานการผลิตไปยัง เวียดนาม และเมียนมา มากยิ่งขึ้น ด้วยปัจจัยด้านทักษะของแรงงาน ค่าแรงและต้นทุนที่มีข้อได้เปรียบกว่าไทย ทำให้โรงงานต่างๆ ทรุดตัวระดับประสิทธิภาพในการส่งมอบสินค้าให้แก่ลูกค้าไว้อยู่ในเกณฑ์ที่ดี ทั้งในด้านของคุณภาพสินค้า ต้นทุน และการส่งมอบสินค้าที่ตรงเวลา ยังมีส่วนสำคัญอย่างมากในการรักษาฐานลูกค้าที่มีการใช้ฐานโรงงานการผลิตในไทย เพื่อป้องกันการสูญเสียลูกค้าในสถานการณ์ที่มองหาอุปสงค์เข้ามาทดแทนได้ยาก รวมถึงกรณีที่เลวร้ายที่สุดคือการเชิญพนักงานออกเพื่อลดกำลังการผลิตให้เหมาะสมกับอุปสงค์ รวมถึงลดการแบกรับต้นทุนในขนาดหรือเกิดการปิดกิจการ

บริษัท ABC จำกัด เป็นธุรกิจรับจ้างผลิตเสื้อผ้าสำเร็จรูปในรูปแบบ ODM (Original Design Manufacturing) โดยใช้หลักการผลิตตามคำสั่งซื้อล่วงหน้าของลูกค้า (Make to Order) ตั้งอยู่ในพื้นที่เขตสามพราน จังหวัด นครปฐม มีปัจจัยสำคัญในการส่งมอบสินค้าคือ กำลังการผลิต คุณภาพและนวัตกรรม การผลิตให้แก่แบรนด์ต่างๆ ซึ่งในปัจจุบันบริษัทประสบปัญหาด้านการส่งมอบสินค้าล่าช้าจากวันนัดหมายของลูกค้า โดยเฉพาะในกลุ่มลูกค้าหลักที่มีจำนวนการสั่งซื้อเยอะ ส่งผลให้บริษัทเสียคะแนนด้านความสามารถใน

การส่งมอบตรงเวลา จากผลการประเมิน Outsource ของลูกค้า ซึ่งจะกระทบต่อจำนวนคำสั่งซื้อที่ลูกค้าจะวางแผนให้สำหรับการสั่งรอบถัดไป และสูญเสียรายได้จากการที่ลูกค้าขอส่วนลดจากมูลค่าของคำสั่งซื้อที่ส่งมอบล่าช้าออกไปตามเกณฑ์ที่กำหนด รวมถึงต้องรับผิดชอบค่าขนส่งทางอากาศในกรณีที่ลูกค้าต้องการสินค้าเร่งด่วน จากวันที่แจ้งขอส่งมอบล่าช้า พบว่ามีมูลค่าความเสียหาย 4.6 ล้านบาท โดยพบว่าปัจจุบันมีความสามารถในการผลิตต่อในกลุ่มสินค้านี้วันละ 272 ตัวต่อวัน

ปัญหาที่พบจากการศึกษาข้อมูลพบว่าสาเหตุที่ส่งผลกระทบต่อมากที่สุดเกิดจากความล่าช้าการดำเนินงานของโรงงานที่ไม่สามารถผลิตสินค้าให้เสร็จได้ทันเวลา โดยสามารถเกิดขึ้นได้จากหลากหลายสาเหตุ เช่น จำนวนงานที่ต้องส่งมอบเกินความสามารถในการผลิตของแผนการผลิตรายสัปดาห์, ความชำนาญในทักษะของพนักงานตัดเย็บ, ความยากของงาน, เครื่องจักรมีปัญหา และขั้นตอนการผลิต เป็นต้น ทางผู้จัดทำจึงเล็งเห็นว่า การปรับปรุงที่ขั้นตอนการผลิตสามารถทำให้เกิดประสิทธิภาพในการผลิตมากยิ่งขึ้น ลดระยะเวลาในการผลิตต่อชิ้นลง เพิ่มความเร็วในการผลิตเพื่อเพิ่มความสามารถในการผลิตให้เสร็จทันเวลา ซึ่งกระบวนการผลิตเป็นสาเหตุที่ปัจจัยภายนอกไม่สามารถส่งผลกระทบต่อการแก้ไขปัญหาได้ทำให้พนักงาน 1 คน สามารถผลิตชิ้นงานต่อวันได้มากขึ้น

1.1 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

เพื่อศึกษาแนวทางในการปรับปรุงขั้นตอนการผลิตเพื่อเพิ่มความเร็วในการผลิตและเพิ่มประสิทธิภาพในการผลิต



2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 ทฤษฎีจัดสมดุลสายการผลิต

การจัดสมดุลสายการผลิตเป็นการกำหนดงานให้กับหน่วยการผลิต โดยแบ่งออกเป็นสถานีงานหลายๆ สถานี ที่มีเครื่องมือ เครื่องจักร จำนวนคนและหน้าที่ในการประกอบสินค้าที่แตกต่างกันออกไป จุดประสงค์ของการจัดสมดุลเพื่อให้ภาระงานของแต่ละสถานี มีความสมดุล ให้เกิดระยะเวลาการรอคอยและการว่างงานน้อยที่สุดในสถานีต่าง ๆ รวมถึงทำให้มีอัตราการผลิตสอดคล้องกับความต้องการที่มีอยู่ ซึ่งข้อมูลที่ใช้ในการจัดสมดุลสายการผลิต ประกอบด้วย ปริมาณการผลิต ลำดับขั้นการทำงาน และเวลาการทำงานของแต่ละขั้น [1-4]

กำลังการผลิตต่อวัน = เวลาในการทำงานในสายการผลิตต่อวัน/รอบเวลาในการผลิตต่อชิ้น

ประสิทธิภาพการผลิต = ผลผลิตที่ทำได้จริงต่อวัน/ผลผลิตที่ต้องการต่อวัน

ความเร็วในการผลิต (Takt Time) = เวลาที่ใช้ในการทำงานต่อวัน/ปริมาณความต้องการของลูกค้า

2.2 การศึกษาการเคลื่อนไหวและเวลา

การศึกษาการเคลื่อนไหวและเวลา (Motion and Time Study) เป็นเทคนิคการวิเคราะห์การปฏิบัติงาน เพื่อการพัฒนาวิธีการทำงานที่ดียิ่งขึ้น โดยทำการหางานที่ไม่จำเป็นและขจัดออกหรือเปลี่ยนแปลงวิธีการทำงานให้ดีขึ้น ทั้งในด้านของมาตรฐาน สภาพการทำงาน และเครื่องมือ ไปจนถึงการฝึกพนักงานให้ทำงานด้วยวิธีการที่ถูกต้อง

การหาเวลาที่เป็นมาตรฐานในการทำงานที่ใช้สำหรับการวัดผลงานเป็นเวลาทำงานได้ เรียกว่า เวลามาตรฐาน (Standard Time) หมายถึงเวลาที่พนักงาน

ทำงานภายใต้เงื่อนไขการทำงานปกติด้วยอัตราความเร็วมาตรฐาน โดยมีขั้นตอนหลักประกอบด้วย การแยกงานออกมาเป็นงานย่อย แบ่งกลุ่มงานย่อย การสังเกตและจับเวลา การคำนวณ หารอบเวลาในการผลิต การคำนวณหาเวลาเฉลี่ย การคำนวณหาเวลาปกติและเวลามาตรฐาน ซึ่งการศึกษาเวลาแบ่งออกเป็น 2 ประเภท [5-8]

2.2.1 การศึกษาเวลาโดยตรง (Direct Time Study) คือ การศึกษาเวลาผ่านการจับเวลาในการทำงานของพนักงาน ซึ่งต้องมีการกำหนดจำนวนครั้งในการจับเวลาแล้วจึงนำมาหาเวลาทำงานปกติและเวลามาตรฐานต่อไป

2.2.2 การสุ่มงาน (Sampling) เป็นการศึกษาเวลาเพื่อให้ได้เวลามาตรฐานจากการสุ่มจับเวลาที่ใช้ในการทำงานจริงในสายการผลิต

2.3 ทฤษฎี ECRS

การลดต้นทุนหรือขั้นตอนที่ไม่จำเป็นนอกจากการทำงานที่สามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้อย่างแพร่หลายในการเพิ่มประสิทธิภาพในการทำงาน มี 4 หลักการสำคัญซึ่ง ECRS ย่อมาจาก Eliminate, Combine, Rearrange และ Simplify หรือการขจัด การผสม การจัดใหม่ และการทำให้ง่าย ซึ่งแต่ละวิธีมีความหมายดังนี้ [9]

2.3.1 การกำจัด (Eliminate) หมายถึง การกำจัดเอาขั้นตอนในการทำงานที่ไม่จำเป็นออกไป

2.3.2 การผสม (Combine) หมายถึง การรวมขั้นตอนการทำงานที่มีความคล้ายคลึงกัน เข้ามาทำงานร่วมกันในจุดเดียว เพื่อลดปริมาณงานที่ไม่จำเป็นหรือเกิดงานที่ซ้อนทับกัน

2.3.3 การจัดใหม่ (Rearrange) หมายถึง การจัดเรียงขั้นตอนการทำงานใหม่ ไม่ให้เกิดความซ้ำซ้อน หรือ



จัดเรียงตามความถนัดเพื่อลดความยุ่งยากในขั้นตอนที่
ไม่จำเป็น

2.3.4 การทำให้ง่าย (Simplify) หมายถึง การ
จัดรูปแบบของงานให้เข้าใจง่าย หาวิธีการดำเนินงาน
แบบใหม่แทนรูปแบบเดิมเพื่อให้คนทำงานสามารถ
ทำงานนั้นได้อย่างมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น

2.4 ทฤษฎี Pareto

ทฤษฎี Pareto คือเครื่องมือที่ใช้สำหรับตรวจสอบ
ปัญหาต่างๆที่เกิดขึ้น ที่สามารถไปประยุกต์ใช้ได้กับทุก
ปัญหา ซึ่งจะแสดงให้เห็นในรูปของแผนผัง แบ่งปัญหา
ออกมาตามประเภทของสาเหตุ พร้อมกับลำดับ
ความสำคัญของปัญหา เพื่อให้เห็นถึงสัดส่วนของ
ปัญหาที่ส่งผลกระทบต่อมากน้อยเพียงใด โดยแผนภูมิจะ
แสดงด้วยกราฟแท่ง สื่อถึงปัญหาที่เกิดขึ้นมากที่สุด
ร่วมกับกราฟเส้นที่จะบอกการสะสมของปัญหาทุก
ปัญหาอย่างต่อเนื่อง [10]

2.5 ทฤษฎีกังปลา

ทฤษฎีกังปลาเป็นแผนผังเพื่อแสดงสาเหตุและผล
แสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างปัญหาที่เกิดขึ้นกับสาเหตุ
ทั้งหมดที่เป็นไปได้ที่จะก่อให้เกิดปัญหานั้นเพื่อนำไปสู่
แนวทางการแก้ไขปัญหาที่ถูกต้อง โดยการกำหนด
ปัจจัยของแผนผังนั้น สามารถกำหนดกลุ่มปัจจัยตาม
ความสำคัญหรือแยกตามจุดประสงค์เป้าหมายของงาน
ตามหลักการ 4M เป็นกลุ่มปัจจัยเพื่อนำไปสู่การ
แยกแยะสาเหตุของปัญหา ประกอบไปด้วยรายละเอียด
ดังนี้

2.5.1 Man พนักงาน หรือ บุคลากร

2.5.2 Machine เครื่องจักร เครื่องมือ อุปกรณ์อำนวยความสะดวก

2.5.3 Material วัตถุดิบหรืออะไหล่ อุปกรณ์อื่นๆ ที่ใช้
ในกระบวนการ

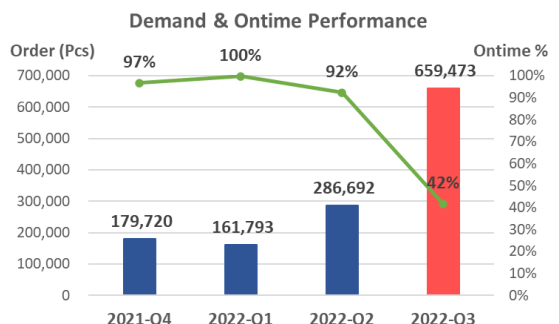
2.5.4 Method ขั้นตอนงาน กระบวนการทำงาน

3. การวิเคราะห์ปัญหาและแนวทางการแก้ไข

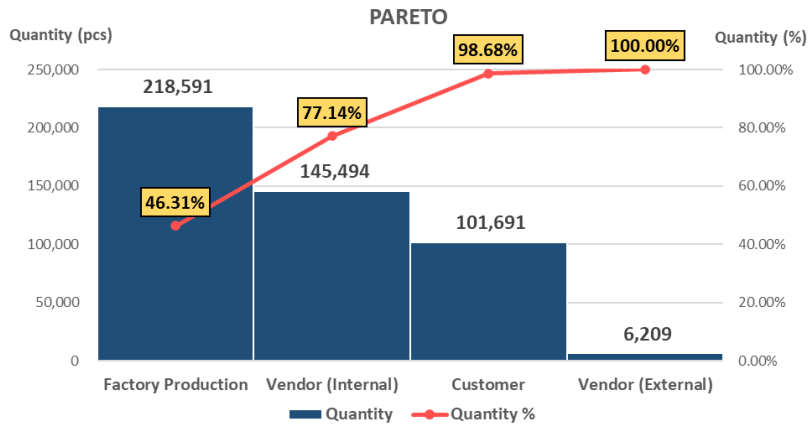
3.1 การวิเคราะห์ปัญหา

จากการศึกษาสาเหตุของปัญหาพบว่าในช่วง 1 ปี
ย้อนหลังตั้งแต่ปี 2021 ไตรมาสที่ 4 ถึงปี 2022
ไตรมาสที่ 3 โดยมีอุปสงค์สูงสุดในช่วงไตรมาสที่ 3 ของ
ปี 2022 หลังจากการฟื้นตัวหลังสถานการณ์ Covid 19
รวมถึงเป็นช่วงมีความสามารถในการส่งมอบสินค้าตรง
เวลาน้อยที่สุดดังรูปที่ 1

เมื่อดูข้อมูลย้อนหลังที่มีการบันทึกสาเหตุของการ
ส่งมอบล่าช้าด้วยแผนภูมิ Pareto ดังรูปที่ 2 พบว่า
สาเหตุหลักที่มีส่วนมากที่สุดเกิดจาก Factory
Production ซึ่งหมายถึงสาเหตุการผลิตของโรงงาน ซึ่ง
มีสัดส่วนอยู่ที่ 46.31% จากจำนวนทั้งหมด ลำดับถัดมา
คือ Vendor (Internal) หมายถึง ผู้ส่งมอบวัตถุดิบที่
บริษัทเป็นคนจัดหาเอง, Customer หมายถึง ความ
ล่าช้าที่เกิดจากทางลูกค้า และ Vendor (External)
หมายถึงผู้ส่งมอบวัตถุดิบที่ลูกค้าเป็นคนจัดหาเอง



รูปที่ 1 ข้อมูลอุปสงค์และความสามารถในการส่ง
มอบสินค้าตรงเวลา 1 ปี ย้อนหลัง



รูปที่ 2 ข้อมูลสัดส่วนสาเหตุของการส่งมอบสินค้าล่าช้าย้อนหลัง

หลังจากนั้นได้ทำการวิเคราะห์เพื่อหาสัดส่วนของชนิดสินค้าที่เกิดการส่งมอบล่าช้ามากที่สุด โดยพิจารณาจากมูลค่าความเสียหาย พบว่ากลุ่มสินค้า Jacket มีสัดส่วนของจำนวนการส่งมอบสินค้าล่าช้าและเกิดค่าความเสียหายมากที่สุด ดังตารางที่ 1

ทางผู้จัดทำจึงได้เลือกรุ่นสินค้า Jacket ที่มีการผลิตแล้วเกิดการส่งมอบล่าช้ามาเป็นสินค้าตัวอย่างดังรูปที่ 3 สำหรับการศึกษารุ่นนี้

จากแผนภูมิ Pareto และการวิเคราะห์สินค้านี้ ตัวอย่างดังรูปที่ 2 และตารางที่ 1 พบว่าสาเหตุของปัญหาที่ส่งผลกระทบต่อมากที่สุดคือปัญหาจากการผลิตของโรงงาน จึงนำแผนภูมิแก๊งปลาประกอบการวิเคราะห์สาเหตุของปัญหาด้านประสิทธิภาพการผลิตในสินค้านี้ตัวอย่างดังรูปที่ 4

การวิเคราะห์แผนภูมิแก๊งปลา พบว่าสาเหตุหลักของปัญหาที่เกิดขึ้นในการผลิตสินค้านี้ตัวอย่างจะเป็นสาเหตุด้านขั้นตอนและวิธีการทำงาน เช่น มีขั้นตอนที่ทำงานซ้ำซ้อน มีความสูญเปล่าเกิดขึ้นระหว่างการผลิตรวมถึงทักษะความชำนาญของพนักงาน

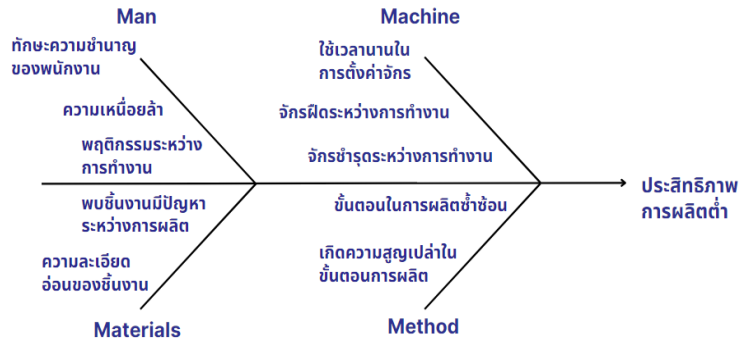
ตารางที่ 1 สัดส่วนประเภทของสินค้าที่ส่งมอบล่าช้า

| ประเภทสินค้า | จำนวนที่ส่งมอบล่าช้า | ความเสียหาย (USD) | On-time Delivery % |
|--------------|----------------------|-------------------|--------------------|
| แจ็กเก็ต | 96,543 | 71,669 | 74% |
| เสื้อยืด | 65,648 | 32,642 | 78% |
| กางเกงขาสั้น | 57,669 | 28,608 | 78% |
| กางเกงขายาว | 4,363 | 1,316 | 85% |

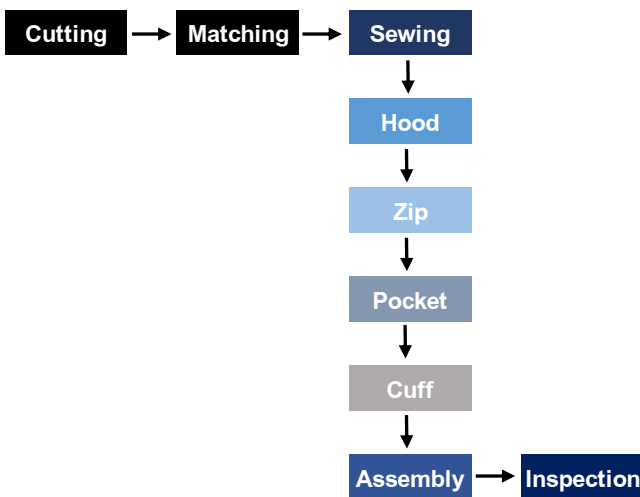


รูปที่ 3 สินค้า Jacket รุ่นตัวอย่าง H01

หลังจากนั้น ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับขั้นตอนการผลิตสินค้านี้ตัวอย่างในรูปแบบที่ 5 และแผนผังสายการผลิตของสินค้านี้ตัวอย่างนี้ดังรูปที่ 6



รูปที่ 4 แผนภูมิแก๊งปลา



รูปที่ 5 ขั้นตอนการผลิตสินค้ารุ่นตัวอย่าง

ขั้นตอนการผลิตเริ่มจากการตัดผ้า (Cutting) การนำชิ้นส่วนผ้าไปผ่านกระบวนการย่อย เช่น การสกรีนผ้า การปักโลโก้ และนำชิ้นงานมาประกบคู่ (Matching) รวมกันซึ่งขั้นตอนเหล่านี้จะไม่ถูกนำมาคำนวณอยู่ในรอบเวลาการผลิต เนื่องจากเป็นขั้นตอนที่ตั้งอยู่นอกสายการผลิต ไม่เกี่ยวข้องกับส่วนของการตัดเย็บ หลังจากนั้นจึงนำเข้าสู่สายการผลิต ดังรูปที่ 6

Sewing Line

| Input | Output |
|-------|--------|
| 1 | 30 |
| 2 | 29 |
| 3 | 28 |
| 4 | 27 |
| 5 | 26 |
| 6 | 25 |
| 7 | 24 |
| 8 | 23 |
| 9 | 22 |
| 10 | 21 |
| 11 | 20 |
| 12 | 19 |
| 13 | 18 |
| 14 | 17 |
| 15 | 16 |

46 processes 30 stations

รูปที่ 6 แผนผังสายการผลิตสินค้ารุ่นตัวอย่าง

ที่มีลักษณะการจัดวางสายการผลิตส่วนของการตัดเย็บ (Sewing) แบบ U-Shape สำหรับขั้นตอนการเย็บทั้งหมด 30 สถานี ซึ่งประกอบไปด้วยส่วนหลักๆ คือ การทำหมวก การทำซิป การทำถุงกระเป๋าสบแขน การประกอบตัวและการตรวจสอบสินค้า โดยกราฟในข้อมูลหลังจากนี้ ขั้นตอนการตัดเย็บต่างๆ จะอ้างอิงสีดังรูปที่ 5 รวมถึงใน 1 สถานี อาจมีจำนวนงานมากกว่า 1 งาน ดังตารางที่ 2



ตารางที่ 2 ขั้นตอนการผลิตสินค้ารุ่นตัวอย่าง

| Station | Work load | NO | Process | Machine | Takt Time |
|---------|-----------|----|----------------|---------|-----------|
| S1 | Sub1 | 1 | LOAD | M | 37 |
| S1 | Sub2 | 2 | HOOD | 4OL | 28 |
| S2 | Sub1 | 3 | HOOD | IL | 42 |
| S3 | Sub1 | 4 | HOOD | BH | 47 |
| S4 | Sub1 | 5 | HOOD | 4OL | 39 |
| S4 | Sub2 | 6 | HOOD | 4OL | 32 |
| S5 | Sub1 | 7 | HOOD | M | 10 |
| S5 | Sub2 | 8 | HOOD | SN | 60 |
| S6 | Sub1 | 9 | HOOD | SN | 24 |
| S6 | Sub2 | 10 | ZIP | SN | 20 |
| S7 | Sub1 | 11 | FRONT & POCKET | M | 38 |
| S7 | Sub2 | 12 | FRONT & POCKET | IL | 46 |
| S8 | Sub1 | 13 | FRONT & POCKET | 3OL | 27 |
| S9 | Sub1 | 14 | FRONT & POCKET | SN | 48 |
| S9 | Sub2 | 15 | FRONT & POCKET | SN | 37 |
| S10 | Sub1 | 15 | FRONT & POCKET | SN | 37 |
| S10 | Sub2 | 16 | FRONT & POCKET | BT | 27 |
| S10 | Sub3 | 17 | FRONT & POCKET | M | 18 |
| S11 | Sub1 | 18 | SLEEVE CUFF | SN | 52 |
| S12 | Sub1 | 19 | PRE SLEEVE | 4OL | 56 |
| S13 | Sub1 | 20 | ASSEMBLY | 4OL | 34 |
| S14 | Sub1 | 21 | ASSEMBLY | IL | 26 |
| S14 | Sub2 | 22 | ASSEMBLY | SN | 11 |
| S15 | Sub1 | 23 | ASSEMBLY | 4OL | 93 |
| S16 | Sub1 | 24 | ASSEMBLY | IL | 73 |
| S17 | Sub1 | 25 | ASSEMBLY | 4OL | 55 |
| S17 | Sub2 | 26 | ASSEMBLY | 4OL | 35 |
| S18 | Sub1 | 27 | ASSEMBLY | IL | 54 |
| S19 | Sub1 | 28 | ASSEMBLY | IL | 76 |
| S20 | Sub1 | 29 | ASSEMBLY | 4OL | 48 |
| S21 | Sub1 | 30 | ASSEMBLY | SN | 33 |
| S21 | Sub2 | 31 | ASSEMBLY | SN | 49 |
| S22 | Sub1 | 32 | ASSEMBLY | 4OL | 62 |
| S23 | Sub1 | 33 | ASSEMBLY | IL | 56 |
| S24 | Sub1 | 34 | ASSEMBLY | SN | 92 |
| S25 | Sub1 | 34 | ASSEMBLY | SN | 92 |
| S26 | Sub1 | 35 | ASSEMBLY | SN | 49 |
| S26 | Sub2 | 36 | ASSEMBLY | SN | 57 |
| S27 | Sub1 | 37 | ASSEMBLY | SN | 96 |
| S28 | Sub1 | 38 | ASSEMBLY | SN | 41 |
| S28 | Sub2 | 39 | ASSEMBLY | M | 6 |
| S28 | Sub3 | 40 | ASSEMBLY | M | 34 |
| S28 | Sub4 | 41 | ASSEMBLY | SN | 16 |
| S29 | Sub1 | 42 | ASSEMBLY | BT | 25 |
| S29 | Sub2 | 43 | ASSEMBLY | BT | 46 |
| S30 | Sub1 | 44 | INSPECTION | M | 79 |

หลังจากนั้นได้ทำการเก็บข้อมูลกลุ่มตัวอย่างสำหรับการศึกษาด้วยการจับเวลาในแต่ละขั้นตอนการผลิตของแต่ละสถานี ทั้งหมด 30 ตัวอย่าง แบ่งออกเป็นทั้งหมด 3 ชุดช่วงเวลา รอบที่ 1 เวลา 10.00 น. ในรูปที่ 7 รอบที่ 2 เวลา 13.00 น. ในรูปที่ 8 และรอบที่ 3 เวลา 16.00 น. ในรูปที่ 9 เพื่อลดความคลาดเคลื่อนของเวลาสรุปออกมาด้วยแผนภูมิ Yamazumi Chart โดยเส้นสีแดงด้านบนคือระยะเวลาที่ใช้ในการผลิตเพื่อให้เห็นต่อความต้องการของลูกค้าที่ 104 วินาที โดยคำนวณจากรอบเวลาการผลิตและประสิทธิภาพในการผลิตที่กำหนดไว้ ดังตัวแปรต่อไปนี้

จำนวนสถานี = 30 สถานี

ชั่วโมงการทำงาน = 8 ชั่วโมงต่อวัน

รอบเวลาการผลิตที่ลูกค้ากำหนด = 31.1 นาทีต่อชิ้น

ประสิทธิภาพในการผลิต = 60%

กำลังการผลิตตามปริมาณความต้องการของลูกค้า

= จำนวนสถานี x ชั่วโมงการทำงาน x นาที x

ประสิทธิภาพการผลิต / รอบเวลาการผลิตต่อชิ้น

= $30 \times 8 \times 60 \times 0.6 / 31.1$

= 8,640 / 31.1

= 278 ชิ้น ต่อวัน

ความเร็วในการผลิตต่อวัน

= เวลาที่ใช้ในการทำงานต่อวัน/ปริมาณความต้องการของลูกค้า

= $8 \times 60 \times 60 / 278$

= 104 วินาทีต่อชิ้น

(เส้นสีเหลืองด้านล่างคือระยะเวลาที่ใช้ในการผลิตตามรอบเวลาที่กำหนดไว้ที่ 95 วินาที ซึ่งเป็นเวลาอ้างอิงจากรุ่นเก่าที่มีลักษณะแบบใกล้เคียงกัน) ดังตัวแปรต่อไปนี้



จำนวนสถานี = 30 สถานี

ชั่วโมงการทำงาน = 8 ชั่วโมงต่อวัน

รอบเวลาการผลิตที่โรงงานกำหนด = 28.6 นาทีต่อชิ้น

ประสิทธิภาพในการผลิต = 60%

กำลังการผลิตตามรอบการผลิตที่โรงงานกำหนด

= จำนวนสถานี x ชั่วโมงการทำงาน x นาที x

ประสิทธิภาพการผลิต / รอบเวลาการผลิตต่อชิ้น

= 30 x 8 x 60 x 0.6 / 28.6

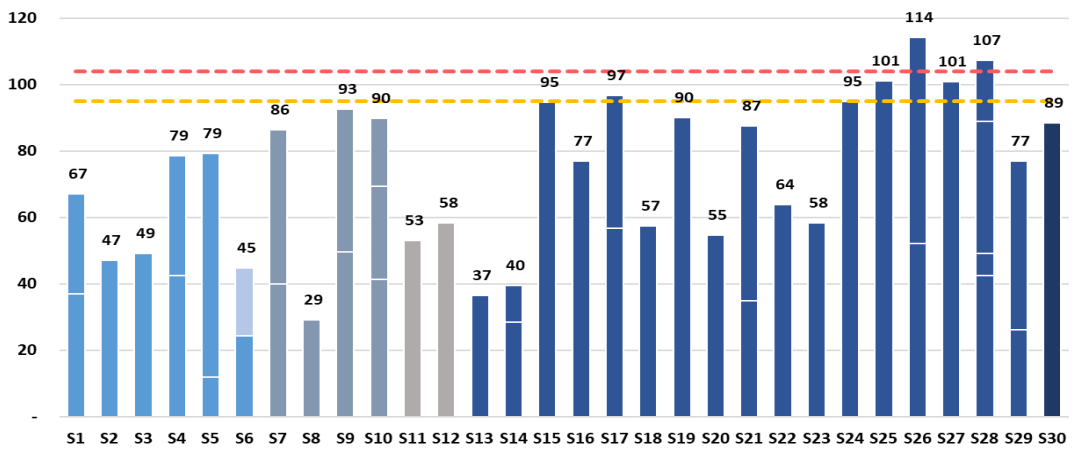
= 8,640 / 28.6

= 302 ชิ้น ต่อวัน

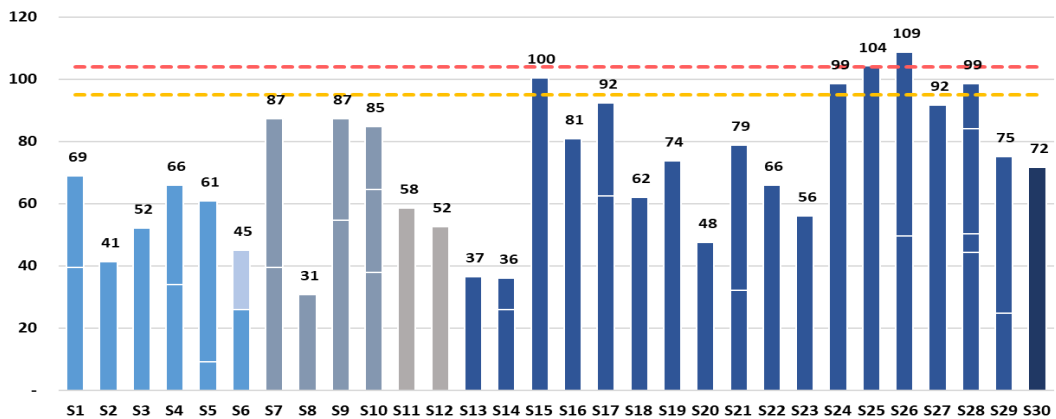
ความเร็วในการผลิตต่อวัน = เวลาที่ใช้ในการทำงาน
ต่อวัน/ปริมาณความต้องการของลูกค้า

= 8 x 60 x 60 / 302

= 95 วินาทีต่อชิ้น



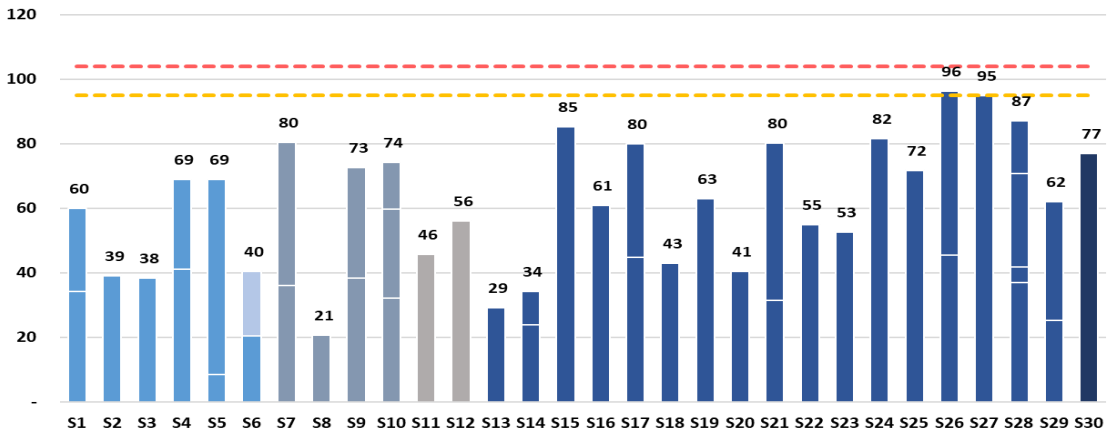
รูปที่ 7 ค่าเฉลี่ยของเวลาที่ใช้ในการผลิตจากกลุ่มตัวอย่างชุดที่ 1



รูปที่ 8 ค่าเฉลี่ยของเวลาที่ใช้ในการผลิตจากกลุ่มตัวอย่างชุดที่ 2



บทความวิจัย



รูปที่ 9 ค่าเฉลี่ยของเวลาที่ใช้ในการผลิตจากกลุ่มตัวอย่างชุดที่ 3

หลังจากนั้นจึงนำข้อมูลทั้ง 3 ชุดเฉลี่ยออกมาเป็น Takt Time ที่ใช้ในการผลิตก่อนการปรับปรุงเพื่อลดความผันผวนจากค่าเวลาในแต่ละช่วงของวัน ดังรูปที่ 10 ที่มีปัจจัยมาจากความเหนื่อยล้าของพนักงาน ในแต่ละช่วงเวลาของวันที่แตกต่างกันออกไป

จากข้อมูลกราฟข้างต้นจะปรากฏเส้นควบคุมสีแดงและสีเหลืองที่มีความหมายดังนี้
เส้นสีแดง หมายถึง Takt Time ที่ได้จากการคำนวณกำลังการผลิตตามปริมาณความต้องการของลูกค้า
เส้นสีเหลือง หมายถึง Cycle Time ของเวลาอ้างอิงจากรุ่นเก่าที่มีลักษณะแบบใกล้เคียงกันที่เคยผลิตผ่านมาใช้เป็นเป้าหมายในการปรับปรุงเวลา

การวิเคราะห์ค่าเฉลี่ยของเวลาที่ใช้ในการผลิตจากกลุ่มตัวอย่างทั้งหมดพบว่า มี ทั้งหมด 3 สถานีที่ใช้เวลามากกว่ารอบเวลาการทำงานที่กำหนดไว้ ซึ่งเป็นขั้นตอนที่ทำให้เกิดคอขวดในสายการผลิต รวมถึงยังมีหลายสถานีที่ใช้เวลาในขั้นตอนการผลิตของตนเองน้อยมากเมื่อเทียบกับ ทำให้สายการผลิตขาดความสมดุล

อย่างมาก เมื่อดูจากค่าสูงสุด 106 วินาที ในสถานีที่ 26 และน้อยสุด 27 วินาที ในสถานีที่ 6 ส่งผลให้มีค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานจากเวลาที่ใช้ในการผลิตของแต่ละสถานีอยู่ที่ 21.43 วินาที

จากรูปที่ 11 ในแท่งสีแดงแสดงให้เห็นถึงระยะเวลาที่ใช้ในการผลิตจริงมากกว่าระยะเวลามาตรฐานที่ตั้งไว้ ซึ่งพบว่ามีอยู่ 28 สถานีที่ใช้ระยะเวลามากกว่าระยะเวลามาตรฐาน

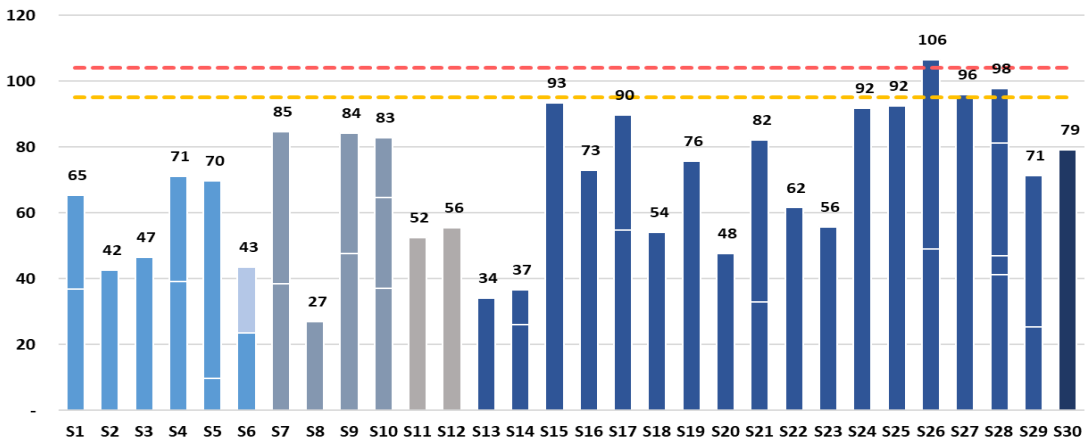
3.2 แนวทางการแก้ไขปัญหา

ขั้นตอนที่ 1 เริ่มจากการหาขั้นตอนหรือการเคลื่อนไหวที่ไม่ก่อให้เกิดมูลค่า (NVA) ในกระบวนการผลิต ผ่านการสังเกตวิธีการทำงานและคำแนะนำจากหัวหน้างาน ซึ่งพบว่ามี 12 ขั้นตอน จากทั้งหมด 11 สถานี ที่มีการเคลื่อนไหวที่เกิดความสูญเปล่าประกอบไปด้วยสถานีที่ 9, 10, 12, 14, 15, 16, 17, 22, 24, 25 และ 27 ซึ่งสถานีส่วนใหญ่จะอยู่ในขั้นตอนการประกอบชิ้นงาน โดยสังเกตที่แท่งสีแดงดังรูปที่ 12

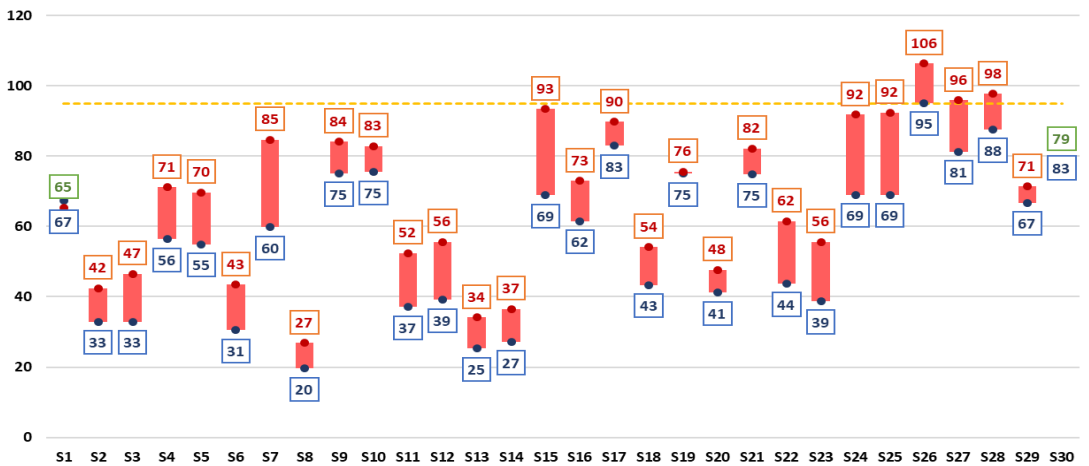


ขั้นตอนที่ 2 หลังจากที่ทำกรวิเคราะห์เพื่อหาขั้นตอนที่มีความสูญเสียเปล่า เริ่มทำการปรับปรุงวิธีการเคลื่อนไหวโดยมีหัวหน้างานให้คำแนะนำแก่พนักงานและอ้างอิงจากสินค้าที่เคยมีการปรับปรุง พัฒนาขั้นตอนการผลิต ซึ่งมีขั้นตอนการผลิตที่คล้ายคลึงกันกับสินค้าตัวอย่าง 80% จึงได้นำวิธีการเหล่านั้นเข้ามาช่วยในการปรับวิธีการจับชิ้นงานระหว่างเย็บ

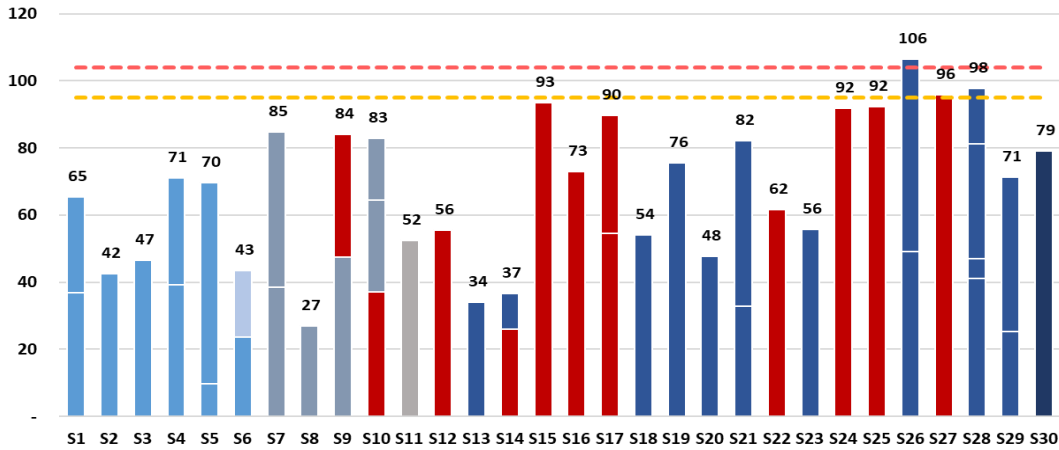
การปรับมุดตอนเอาชิ้นงานเข้าเครื่องจักรให้มีความแม่นยำและรวดเร็วยิ่งขึ้น รวมถึงสาเหตุของการหยุดจักรบ่อยในบางสถานี ที่ส่งผลให้ใช้เวลาในการทำงานนานกว่าค่าเวลายามาตรฐานที่กำหนดไว้ จากนั้นจึงทำการประมาณเวลาที่สามารถลดลงได้จากการใช้ข้อมูลในอดีตเพื่อประเมินความเป็นไปได้ว่าสามารถลดเวลาในการผลิตไปได้ดังตารางที่ 3



รูปที่ 10 ค่าเฉลี่ยของเวลาที่ใช้ในการผลิตจากกลุ่มตัวอย่างทั้งหมด



รูปที่ 11 ค่าเฉลี่ยของเวลาที่ใช้ในการผลิตเกินในแต่ละสถานี



รูปที่ 12 กราฟแสดงขั้นตอนที่มีการเคลื่อนไหวที่สูญเปล่าในการผลิต

ขั้นตอนที่ 3 การจัดเรียงขั้นตอนการทำงานและสถานีใหม่ โดยอ้างอิงจากสินค้าที่เคยมีการปรับปรุงพัฒนาขั้นตอนการผลิต ซึ่งมีขั้นตอนการผลิตที่คล้ายคลึงกันกับสินค้าตัวอย่าง จากเดิมจะทำการผลิตโดยเริ่มจากการทำชุดไปตามองค์ประกอบของเสื้อ จากนั้นจึงเริ่มประกอบตัว ซึ่งหลังจากการศึกษาขั้นตอนของสินค้าในอดีต พบว่าขั้นตอนการเย็บชิ้นงานไม่จำเป็นที่จะต้องเสร็จตามองค์ประกอบของเสื้อที่ละส่วน พนักงานเย็บสามารถผลิตชิ้นงานในส่วนของตนเองได้โดยไม่เกิดปัญหาคุณภาพตามมา โดยช่วยให้ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของเวลาที่ใช้ในการผลิตของแต่ละสถานี 21.43 ลดลงเหลือ 17.01 แสดงให้เห็นว่าสมดุลในไลน์การผลิตดีขึ้นเมื่อทำการจัดเรียงขั้นตอนใหม่ โดยที่ยังไม่ได้ทำการคัดแยกงานย่อยหลังจากการปรับสมดุลใหม่ดังรูปที่ 13

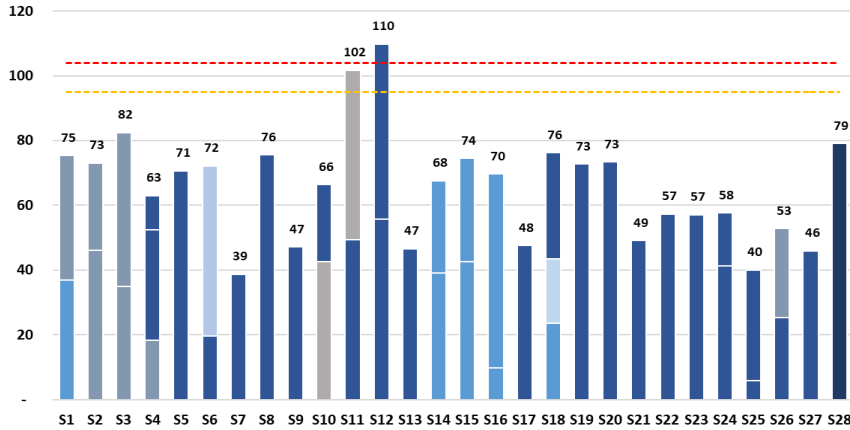
ขั้นตอนที่ 4 หลังจากการทำการจัดเรียงขั้นตอนการผลิตใหม่ในขั้นตอนที่ 3 แล้วจำเป็นจะการคัดแยกงานย่อยในขั้นตอนการทำงานที่ไม่ใช่ทักษะเฉพาะ หรือการมอบหมายงานสนับสนุนไปยังสถานีใกล้เคียงเพื่อปรับสมดุลการผลิต เนื่องจากยังคงมีบางสถานีที่เป็นขั้นตอนที่ต้องใช้เวลาในการผลิตนานเกินกว่าเวลามาตรฐาน รวมถึงยังมีความแตกต่างของเวลาในแต่ละสถานี โดยสังเกตจากค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานที่ 17.01 ซึ่งสถานีใกล้เคียงจะประกอบด้วย ด้านซ้าย ขวา และสถานีตรงกันข้าม เพื่อลดระยะเวลาการเคลื่อนไหวของพนักงานจากสถานีหนึ่งไปยังอีกสถานี เช่น การจัดเรียงชิ้นงานเพื่อให้สถานีถัดไป ไม่ต้องใช้เวลาในการหาชิ้นงานเพื่อไปทำต่อ, การช่วยจับมุมชิ้นงานขณะเลื่อนชิ้นงานออกจากจักรเพื่อให้ชิ้นงานถูกเย็บอย่างต่อเนื่อง รวมถึงการช่วยสถานีสุดท้ายในการวัดไซส์มาตรฐาน ซึ่งเป็นหนึ่งในงานย่อยของการตรวจสินค้าเบื้องต้น เป็นต้น



ตารางที่ 3 ตัวอย่างการปรับปรุงขั้นตอนการผลิตเพื่อลดความสูญเปล่า

| ลำดับ | สถานี | หน้าที่ | เทคนิค ECRS | Cycle time (วินาที) |
|--------------|-------|---|----------------|---------------------------|
| ก่อนปรับปรุง | 9 | เย็บติดกระเป๋าด้านใน | C | 35 |
| | 10 | เย็บคิ้วและเนาริมล่าง | C | 35 |
| | | | | |
| หลังปรับปรุง | 9 | เย็บติดกระเป๋าด้านใน เย็บคิ้วพร้อมกัน | C | 30 |
| | | | | |
| ก่อนปรับปรุง | 14 | ลาหัดคิ้วไหล่ | C & S | 20 |
| | 15 | ลาตะเข็บข้างแขน | C & S | 62 |
| | | | | |
| หลังปรับปรุง | 14 | ลาไหล่และข้างแขนต่อเนื่องด้วยการปรับ motion การวางชิ้นงานก่อนเข้าจักร | C & S | 54 |
| | | | | |

| ลำดับ | สถานี | หน้าที่ | เทคนิค ECRS | Cycle time (วินาที) |
|--------------|-------|--|----------------|---------------------------|
| ก่อนปรับปรุง | 27 | เสียเวลาในการเย็บผ้าตลอด 2 แนวข้างหลังเย็บซิปและต้องคอยกดผ้าเพื่อย้ายจักร | E & S | 81 |
| | | | | |
| หลังปรับปรุง | 27 | ตั้งเส้นบล็อคดีที่ขั้นตอนเจาะซิปและให้วางผ้าพอดีกับเส้นกันทำให้การคว้ซิปไม่ต้องเย็บผ้าออกและตั้ง auto จักรในการย้ายเพื่อลด motion ในการกดผ้า | E & S | 43 |
| | | | | |
| ก่อนปรับปรุง | 12 | โพ่งเข้าแขนโดยหยุดจักรบ่อยและใช้กลองกระดาก | E & S | 39 |
| | | | | |
| หลังปรับปรุง | 12 | เปลี่ยนวิธีการจับผ้าลด motion ในการหยุดจักรและเปลี่ยนที่ใส่ผ้า | E & S | 26 |
| | | | | |



รูปที่ 13 กราฟแสดง cycle Time หลังการจัดเรียงขั้นตอนการผลิต

ตารางที่ 4 ผลลัพธ์ของการปรับปรุงขั้นตอนการผลิต เพื่อลดเวลาในการผลิตของแต่ละสถานี

| สถานี | Cycle time ก่อนปรับปรุง (วินาที) | Cycle time หลังปรับปรุง (วินาที) | ลดลง (วินาที) |
|-------|----------------------------------|----------------------------------|---------------|
| 9,10 | 70 | 30 | 40 |
| 12 | 39 | 26 | 13 |
| 14,15 | 82 | 54 | 28 |
| 16 | 69 | 46 | 23 |
| 17 | 48 | 32 | 16 |
| 22 | 34 | 23 | 11 |
| 24 | 44 | 29 | 15 |
| 25 | 92 | 73 | 19 |
| 27 | 81 | 43 | 38 |

ตารางที่ 5 สรุปผลลัพธ์ของการปรับปรุงขั้นตอนการผลิต

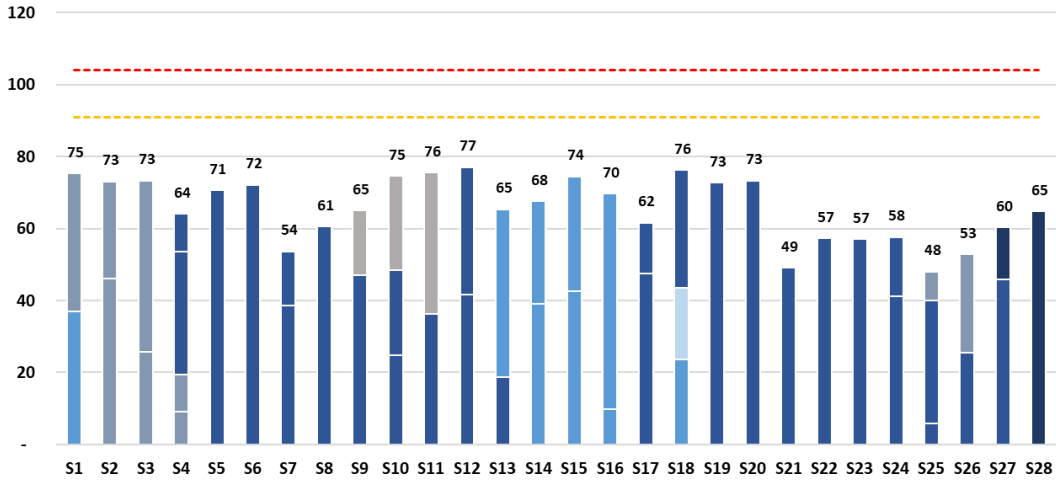
| Total Cycle Time | Before | After | Saving | Unit |
|--------------------------|--------|-------|--------|---------|
| Actual Cycle time (Sec) | 2,063 | 1,860 | 203 | per pcs |
| Actual Cycle time (Mins) | 34.38 | 31.00 | 3.38 | per pcs |
| Station | 30 | 28 | 2 | sewers |

4. ผลการดำเนินงาน

การปรับปรุงการจัดสมดุลการผลิต (Line Balancing) ด้วยการวิเคราะห์หาขั้นตอนที่ไม่ก่อให้เกิดมูลค่า (NVA) เพื่อกำจัดการเคลื่อนไหวที่สูญเปล่า (Eliminate) การรวมขั้นตอนเข้ามาทำต่อเนื่องกันในสถานีเดียว (Combine) และการทำให้พนักงานทำงานได้ง่ายขึ้น (Simplify) จากนั้นทำการการจัดเรียงขั้นตอนการผลิตใหม่ (Rearrange) โดยอ้างอิงจากสินค้าที่เคยมีการปรับปรุงมาก่อน ตามหลัก ECRS จากนั้นทำการแบ่งงานย่อยของสถานีออกมา มอบหมายงานย่อยให้กับสถานีใกล้เคียงด้านข้างและด้านตรงข้าม ที่ใช้เวลาในการทำงานน้อยกว่า เพื่อปรับสมดุลให้แต่ละสถานีมีระยะเวลาในการทำงานที่ใกล้เคียงกัน ซึ่งจะส่งผลให้ขั้นตอนการผลิตเกิดสภาวะคอขวดลดลงและมีประสิทธิภาพการผลิตที่สูงขึ้น จาก Takt time สูงสุดในทุกสถานีที่ลดน้อยเหลือสูงสุดในสถานีที่ 12 ที่ใช้เวลา 77 วินาทีดังรูปที่ 14 รวมถึงการเคลื่อนไหวในการแบ่งงานย่อยของพนักงานก่อนและหลังปรับปรุงดังรูปที่ 15

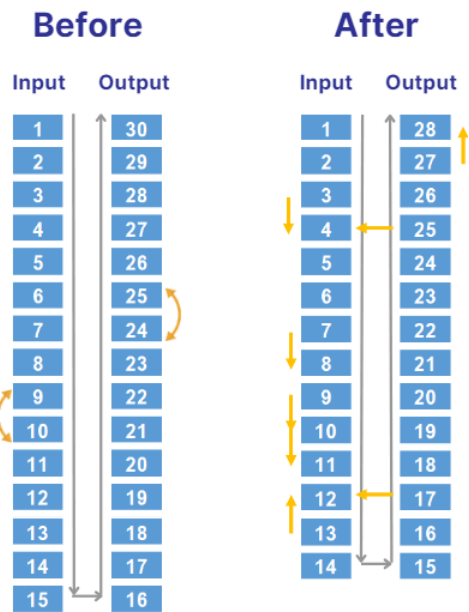


บทความวิจัย



รูปที่ 14 กราฟแสดง Takt Time หลังการปรับปรุง

โดย Cycle Time สูงสุดก่อนปรับปรุงอยู่ที่ 106 วินาที น้อยสุด 27 วินาที และมีค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานอยู่ที่ 21.43 วินาที จากทั้งหมด 30 สถานี ซึ่งหากประมาณการจากการวางแผนด้วยชั่วโมงการทำงาน 8 ชั่วโมง จะสามารถผลิตได้ 272 ตัวต่อวัน หรือ 34 ชิ้นต่อชั่วโมงคิดเป็นประสิทธิภาพการผลิตที่ 54% และหลังจากปรับปรุงในขั้นตอนการจัดเรียงและแบ่งงานย่อยใหม่แล้ว ในสายการผลิตใช้ Cycle Time สูงสุดที่ 77 วินาที น้อยสุด 48 วินาที และมีค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานอยู่ที่ 8.80 วินาที จากทั้งหมด 28 สถานี ซึ่งหากประมาณการจากการวางแผนด้วยชั่วโมงการทำงาน 8 ชั่วโมง จะสามารถผลิตได้ 374 ตัวต่อวัน หรือ 46.75 ชิ้นต่อชั่วโมง คิดเป็นประสิทธิภาพการผลิตที่ 80%



รูปที่ 15 Layout และการเคลื่อนไหวในการแบ่งงานย่อยของพนักงานก่อนและหลังปรับปรุง



5. สรุปผล

จากการวิเคราะห์ข้อมูลเพื่อปรับปรุงขั้นตอนการผลิตและประสิทธิภาพการผลิตในสินค้าตัวอย่าง ผู้จัดทำได้นำแนวคิดและทฤษฎีเกี่ยวกับการลดความสูญเสียความสูญเสียนในการทำงานอย่าง ECRS และการจัดสมดุลการผลิต พบว่าพนักงานในสายการผลิตมีการเคลื่อนไหวที่สูญเสียเปล่า โดยอ้างอิงแนวทางการปรับปรุงจากสินค้ารุ่นอื่นที่เคยผ่านการปรับปรุงในอดีต เพื่อลดการเคลื่อนไหวที่สูญเสียเปล่า เพื่อให้พนักงานสามารถทำงานได้รวดเร็วขึ้น ซึ่งหลังจากปรับปรุงแล้วคาดว่าจะสามารถลดระยะเวลาลงได้ 203 วินาทีต่อการผลิตเสื้อ 1 ตัว อีกทั้งมีจำนวนสถานีลดลงจากสถานีเดิมก่อนปรับปรุงที่ 10 และ 15 ทั้งหมด 2 สถานี

หลังจากนั้น จึงทำการจัดเรียงขั้นตอนการทำงาน และ Layout ใหม่ ทำให้สามารถลดระยะเวลาการรอคอยลงได้ รวมถึงการปรับสมดุลการผลิต ส่งผลให้งานในแต่ละสถานีมีความสมดุลมากยิ่งขึ้น สามารถลด Cycle Time ที่นานที่สุดจากเดิม 106 วินาที เหลือ 77 วินาที และมีค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานจากเดิม 21.23 เหลือ 8.80 วินาทีต่อสถานี แสดงให้เห็นถึงระยะเวลาการรอคอยที่ลดลง จากค่าเฉลี่ยของเวลาที่ใช้แต่ละสถานีซึ่งหากประมาณการจากการวางแผนด้วย ชั่วโมงการทำงาน 8 ชั่วโมง ประสิทธิภาพการผลิตจากเดิม 54% เพิ่มขึ้นเป็น 80%

6. กิตติกรรมประกาศ

การศึกษาค้นคว้าอิสระครั้งนี้สำเร็จได้ด้วยความกรุณาจาก อาจารย์ที่ปรึกษาการศึกษาค้นคว้าอิสระ ที่ได้ให้ความกรุณาแนะนำ ตรวจสอบตราและแก้ไขเนื้อหา

ตลอดจนให้กำลังใจในการทำการศึกษาค้นคว้าอิสระ ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่และบุคคลที่เกี่ยวข้องภายในบริษัท ABC จำกัด ที่ให้ความรู้ ความร่วมมือและความช่วยเหลือตลอดการศึกษาวิจัยในครั้งนี้

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] T. Wuttipornpun, Methods for sequencing and scheduling production, Amarin Book Center Co., Ltd., Bangkok, Thailand, 2016. (in Thai)
- [2] C. Saringkarnsiri, Production planning and control, Technology Promotion Association (Thailand-Japan), Bangkok, Thailand, 2000. (in Thai)
- [3] P. Lersakwanich and P. Klomjit, Setup time reduction for hot pressing mold changeover Journal of Engineering RMUTT, 2020, 18(2), 47-58. (in Thai)
- [4] W. Rakphakawong, J. Sacharung, R. Taweechalermdit, A. Chanwuthinun, T. Chattaweelarp and P. Parinyarux, Waiting time and service times for outpatient services at a middle-level private hospital, Thai Journal of Clinical Pharmacy, 2021, 2(27), 53-63. (in Thai)
- [5] T. Kuaites, Calculating the standard time of workers: A case study in hotel industry, Journal of Logistics and Supply Chain College, 2021, 7(1), 5-18. (in Thai)



- [6] P. Khumla, C. Yasopha, T. Chaikambang, P. To-on, R. Taengphukieo, N. Issarapong and K. Sarawan, Standard time in production process of ready mixed concrete using direct time study, Industrial Technology Journal Surindra Rajabhat University, 2021, 6(2), 41-51. (in Thai)
- [7] W. Sitticharoen, Work study, Rajamangala University, Bangkok, Thailand, 2004. (in Thai)
- [8] W. Rijiravanich, Time study, Chulalongkorn University, Bangkok, Thailand, 2005. (in Thai)
- [9] K. Krajungduang, P. Singhdong and P. Weerapong, Improving warehouse operations with mobile applications and ECRS concepts case study of Yusen Logistics (Thailand) Co., Ltd., Journal of Learning Innovation and Technology, 2021, 1(2), 62-69. (in Thai)
- [10] P. Klomjit, Productivity improvement: Principle and practice, SE-Education Public Co., Ltd., Bangkok, Thailand, 2014. (in Thai)



ข้อมูลสำหรับผู้เขียนและการเตรียมต้นฉบับ

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรมตีพิมพ์ปีละ 3 ฉบับ โดยวิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ บทความที่พิจารณาตีพิมพ์ต้องไม่เคยตีพิมพ์เผยแพร่ในวารสารใดมาก่อน และไม่อยู่ในระหว่างการพิจารณาของวารสารอื่น เรื่องที่ตีพิมพ์จะต้องได้รับการกลั่นกรองจากผู้ทรงคุณวุฒิในสาขาที่เกี่ยวข้อง แบบปกปิดข้อมูล (Double-Blind Peer-Review) และได้รับความเห็นชอบจากบรรณาธิการวารสารฯ

บทความต้องมีความยาวไม่น้อยกว่า 5 หน้ากระดาษ B5 หรือไม่น้อยกว่า 2500 คำ โดยนับคำด้วยคำสั่ง word count ใน MS Word (ไม่ควรเกิน 15 หน้ากระดาษ) บทความประกอบด้วยชื่อเรื่อง ชื่อผู้เขียน สถานที่ทำงาน การติดต่อผู้เขียน บทคัดย่อ และคำสำคัญ (3 - 5 คำ) โดยเนื้อหาตั้งกล่าวทั้งหมดต้องจัดเตรียมในรูปแบบภาษาไทย 1 หน้ากระดาษ และภาษาอังกฤษ 1 หน้ากระดาษ

เนื้อเรื่องของบทความวิจัยประกอบด้วย 5 - 6 ส่วน คือ (1) บทนำ (2) วิธีการดำเนินงานวิจัย/ทดลอง (3) ผลการวิจัย/ทดลองและการอภิปรายผล (4) บทสรุป (5) กิตติกรรมประกาศ (ถ้ามี) และ (6) เอกสารอ้างอิง

สำหรับเนื้อเรื่องของบทความวิชาการให้เตรียมเป็นบทความที่เรียบเรียงเนื้อหาจากหนังสือ งานวิจัย ประสบการณ์ หรือเรื่องแปล เพื่อเผยแพร่ความรู้ในสาขาต่าง ๆ หรือแสดงข้อคิดเห็นที่เป็นประโยชน์มีคุณค่าทางวิชาการ โดยองค์ประกอบของบทความวิชาการอาจคล้ายคลึงกับบทความวิจัย แต่ไม่มีเนื้อหาของการดำเนินงานวิจัยและผลการวิจัย ซึ่งผู้เขียนสามารถกำหนดได้เองตามความเหมาะสมของบทความวิชาการ

ผู้เขียนบทความสามารถดาวน์โหลดรูปแบบบทความสำเร็จรูปและแบบฟอร์มนำส่งบทความได้จากเว็บไซต์: ojs.kmutnb.ac.th/index.php/jointtech

Authors Guideline and Manuscript Preparation

JIT is published tri-annually by College of Industrial Technology, King Mongkut's University of Technology North Bangkok. All considered articles have not been published elsewhere and are not currently submitted for consideration in other journals. All articles are independently assessed by specialist in their relevant fields (Double-Blind Peer Review), and must be approved by the editor.

The length of the manuscript is not less than 5 pages in B5 paper size or not less than 2500 words using a word count of MS Word (should not exceed 15 pages). The first page of the manuscript should contain the full title, author's name(s), affiliation, contact address of correspondence, abstract and keywords (3-5 words).

The content of the research article consists of 5-6 parts, arranged in the following details; (1) introduction (2) experimental procedure (3) results and discussion (4) conclusion (5) acknowledgement (if any) and (6) references.

For review or academic article, the contents may prepare from text book, research experiences, or translation for publishing knowledge in various fields or provide useful and valuable comments. The main contents may contain a similar section to the research article but without sections of the experimental and results. The topic and content can be specified by the author as appropriate for the article.

The author can download manuscript templates and submission form in the journal's website: ojs.kmutnb.ac.th/index.php/jointtech.



แบบฟอร์มนำส่งบทความ

1. ชื่อบทความวิจัย/บทความวิชาการ

ภาษาไทย

ภาษาอังกฤษ

2. ประเภทบทความ บทความวิจัย บทความวิชาการ

3. ชื่อ-สกุลเจ้าของบทความ หรือผู้แทนส่งบทความ

4. สถานที่ติดต่อเจ้าของบทความหรือผู้แทนส่งบทความ

ที่อยู่

โทรศัพท์

โทรสาร

E-mail

5. รายชื่อและที่อยู่ของผู้ร่วมบทความ (สามารถเพิ่มรายชื่อได้ในเอกสารแนบเพิ่มเติม)

| ชื่อ-สกุล (ภาษาไทย ตัวบรรจง) | ชื่อ-สกุล (ภาษาอังกฤษ ตัวบรรจง) | หน่วยงาน | โทรศัพท์ | E-mail |
|---------------------------------|------------------------------------|----------|----------|--------|
| | | | | |
| | | | | |
| | | | | |

6. เสนอรายชื่อผู้ประเมิน

1. โทรศัพท์

E-mail

2. โทรศัพท์

E-mail

3. โทรศัพท์

E-mail

7. การรับรองบทความ

 ขอรับรองว่าบทความต้นฉบับนี้ยังไม่เคยได้รับการเผยแพร่และตีพิมพ์ในวารสารอื่นใดมาก่อน

เจ้าของบทความ (ลงชื่อ)

8. แบบฟอร์มนี้ข้าพเจ้าได้แนบต้นฉบับบทความดังรายการต่อไปนี้ครบถ้วนแล้ว

 ส่งบทความทางระบบออนไลน์ที่เว็บไซต์ <http://ojs.kmutnb.ac.th/index.php/jointech/index> ส่งบทความทางไปรษณีย์อิเล็กทรอนิกส์ ที่ e-mail: JIT.journal@gmail.com ส่งบทความด้วยตัวเอง หรือทางไปรษณีย์

ขอรับรองว่าข้อความดังกล่าวข้างต้นเป็นจริงทุกประการ

ลงชื่อ เจ้าของบทความ หรือผู้แทนส่งบทความ

()

วันที่ เดือน พ.ศ.



Manuscript Submission Form

1. Title

2. Type of manuscript Research Article Academic Article (Review)

3. Corresponding Author Name

4. Affiliation

Tel. Fax E-mail

5. List of co-author(s) and address

| 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/jointtech/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 ๓ ประจำปี ๒๕๖๖

บทความ (Articles)

- Biochemical Methane Potential and Kinetics on Anaerobic Co-digestion of Food Waste and Cellulose-based Food Packaging Product, The Journal of Industrial Technology, 2023, 19(3), 1-15.
- Development of Packaging Films Based on Polyvinyl Alcohol and a Tannic Acid Blend for Inactivation of Bacteria in Tilapia (*Oreochromis niloticus*) Fillets, The Journal of Industrial Technology, 2023, 19(3), 16-30.
- The study of Factors in Track Shoe Manufacturing Process with Cast Designer Program for Investment Casting to Reduce Shrinkage, The Journal of Industrial Technology, 2023, 19(3), 31-44.
- Illuminance Control of Light Pipes and Dimmable LEDs with Artificial Neural Network, The Journal of Industrial Technology, 2023, 19(3), 45-61.
- Real-time Feedback Control for Uniform Weld Bead using Adaptive PID Controller with Infrared Image Processing in Fiber Laser Welding of Low Carbon Steel, The Journal of Industrial Technology, 2023, 19(3), 62-80.
- Influence of Curing Conditions on Strength of Alkali Activated Mortar Made from High Calcium Fly Ash and Low Calcium Fly Ash, The Journal of Industrial Technology, 2023, 19(3), 81-92.
- A Study of The Application of Vortex Tube for Temperature Reduction of Heated Volume, The Journal of Industrial Technology, 2023, 19(3), 93-103.
- Evaluation of Greenhouse Gas Emission Reduction by Paper Waste Recycle Sorting from College of Innovative Management, The Journal of Industrial Technology, 2023, 19(3), 104-112.
- Fixed-bed Adsorption of Acid Dye using Granular Activated Alumina Prepared from Aluminum Scrap, The Journal of Industrial Technology, 2023, 19(3), 113-127.
- Prediction of Flexural Behavior of Degraded Beam Repaired and Strengthened by CFRP Sheets Using Finite Element Method, The Journal of Industrial Technology, 2023, 19(3), 128-141.
- Optimized Dyeing Process for Rubber Wood Finger Joint Board by Teak Color of Assam Tea Leaves, The Journal of Industrial Technology, 2023, 19(3), 142-159.
- Garment Production Process Improvement to Increase Production Efficiency: A Case Study of ABC Co., Ltd., The Journal of Industrial Technology, 2023, 19(3), 160-176.