

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

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



DRIVEN BY



The Journal of Industrial Technology

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม ปีที่ ๑๙ ฉบับที่ ๑ ประจำปี ๒๕๖๖

VOLUME 19 | ISSUE 1 | 2023 | Focused on engineering and industrial technology

Published by College of Industrial Technology (CIT), KMUTNB

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม ปีที่ ๑๙ ฉบับที่ ๑ 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 ถนนประชากรราษฎร์ 1 แขวงวงศ์สว่าง เขตบางซื่อ กรุงเทพฯ 10800 โทร. 02-555-2000 ต่อ 6249, Email: JIT.journal@gmail.com

Objectives

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

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

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

Publishing Schedule

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

Publisher

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

บทบรรณาธิการ

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology, ISSN Print: 1686-9869, ISSN Online: 2697-5548) ปีที่ 19 ฉบับที่ 1 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 รวมถึงนำเข้าสู่ข้อมูลบทความสู่ฐานข้อมูล TCI แบบ Fast Track (Fast-track Indexing System) ฐานข้อมูล Asian Citation Index (ACI) และฐานข้อมูล Google Scholar ซึ่งทำให้การสืบค้นและการอ้างอิงข้อมูลบทความและข้อมูลของผู้นิพนธ์ด้วยระบบออนไลน์นั้นถูกต้องสมบูรณ์และรวดเร็วยิ่งขึ้น

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 โดยผู้ทรงคุณวุฒิเฉพาะสาขาวิชาขอเสนอแนะที่ทรงคุณค่า รวมทั้ง การจัดการที่มีประสิทธิภาพเพื่อดำเนินการจัดพิมพ์และการเผยแพร่บทความให้เป็นไปตามระยะเวลาที่กำหนด ส่งผลให้วารสารฯ มีความน่าเชื่อถือและผ่านการรับรองโดย TCI

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

บรรณาธิการ



สารบัญ

| | หน้า |
|--|-------|
| กองบรรณาธิการวารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (Editorial Board of The Journal of Industrial Technology) | A |
| วัตถุประสงค์ (Objectives) | C |
| บทบรรณาธิการ | E |
| บทความวิจัย | |
| การลดอัตราการเสียหายของเครื่องล้างจานโดยการวิเคราะห์อายุการใช้งานของอะไหล่ด้วยการคำนวณจากค่าความน่าเชื่อถือของระบบ (Reducing the Failure Rate of Dishwashers by Analyzing the Service Life of Spare Parts using System Reliability Calculation) <i>Jiranan Kanjanakulanurak, Prachuab Klomjit</i> | 1-16 |
| การจำลองเชิงตัวเลขเพื่อศึกษาผลกระทบของรูปร่างการเจาะรูบนครีบบatangกลมต่อสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนของแผงระบายความร้อน (Effects of Pin-perforation Shape on Thermal Enhancement Factor of Pin-fin Heat Sink via Numerical Simulation) <i>Parinya Ackaradetrungsri, Pawat Jantasorn, Ukrit Thamma, Athasit Wongcharoen</i> | 17-33 |
| การประเมินความเสี่ยงด้านสุขภาพจากการสัมผัสฝุ่น PM _{2.5} ในระยะเริ่มต้นพัฒนาโครงการพื้นที่ระเบียงเศรษฐกิจพิเศษภาคตะวันออกในช่วงฤดูแล้ง ปี 2022: กรณีศึกษาพื้นที่เมืองระยอง (Health Risk Assessment of PM _{2.5} Exposure in the Initiative of the Eastern Economic Corridor Area Project during Dry Season in 2022: Case Study of Rayong City) <i>Susira Bootdee, Supanan Tipayangkul, Sasithorn Timyoo, Sawaeng Kawichai</i> | 34-51 |
| การศึกษาตำแหน่งการเกิดดิซชาร์จบางส่วนบนวัสดุฉนวนอะคริลิก (A Study of the Partial Discharge Position on Acrylic Insulation) <i>Anyarat Sonsanam, Somporn Vongpeang, Tawatchai Sonsanam</i> | 52-62 |



สารบัญ (ต่อ)

| บทความวิจัย (ต่อ) | หน้า |
|---|-----------|
| วิธีการวิเคราะห์แบบล้อมกรอบข้อมูล-ทากูชิสำหรับการกำหนดพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของเครื่องขูดเกล็ดปลาตะเพียน (Data Envelopment Analysis-Taguchi Method for Determining Optimal Parameters of a Fish Scaling Machine) <i>Anucha Sriburum, Wanrop Khanthirat, Waraporn Warorot, Amin Lawong, Narong Wichapa, Thaithat Sudsuanssee, Supakit Sergsiri, Kiatipong Charoenjit, Anongnart Rotjanakorn Wangchamhan, Mantana Tongsupon, Atchara Choompol</i> | 63-80 |
| ศักยภาพการผลิตเชื้อเพลิงขยะจากขยะมูลฝอยในพื้นที่บ่อขยะเทกองแบบเปิดโล่ง (Potential of Refuse Derived Fuel Production from Solid Waste in Open Dumping Area) <i>Apichaya Sawasdee, Kanlayarat Sukkananchana, Saowaluck Haosagul, Sasitorn Hasin</i> | 81-92 |
| ไฮโดรเจลชีวภาพที่ซ่อมแซมตัวเองได้อย่างรวดเร็วสำหรับตรวจจับการเคลื่อนไหวของมนุษย์ (Rapid Self-healing Bio-based Hydrogels for Monitoring Human Motion) <i>Nattakan Jaroenthai, Pornnapa Kasemsiri</i> | 93-103 |
| การประยุกต์ใช้งาน Q-Learning เพื่อการจัดสรรกำลังที่เหมาะสมในระบบโนมาที่มีผู้ใช้ 2 ราย (On Applying Q-Learning to Optimize Power Allocation in 2-users NOMA System) <i>Phetnakorn Aermsa-Ard, Chonticha Wangsamad, Kritsada Mamat</i> | 104-116 |
| Optimization, Bioactivity and Composition of Curcuma aromatica Salisb. Extraction Oils Extracted by Microwave-assisted and Hydro-distillation <i>Manat Hearunyakij, Weerachai Phutdhawong</i> | 117-132 |
| ข้อมูลสำหรับผู้เขียนและการเตรียมต้นฉบับ (Authors Guideline and Manuscript Preparation) | S1 |
| แบบฟอร์มนำส่งบทความ (Manuscript Submission Form) | S2 |



การลดอัตราการเสียหายของเครื่องล้างจานโดยการวิเคราะห์อายุการใช้งานของอะไหล่ด้วยการคำนวณจากค่าความน่าเชื่อถือของระบบ

จิรพันธ์ กาญจนกุลานุรักษ์* และ ประจวบ กล่อมจิตร์

สาขาวิชาการจัดการงานวิศวกรรม, คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม, มหาวิทยาลัยศิลปากร

* ผู้ประสานงานเผยแพร่ (Corresponding Author), E-mail: kanjanakulanura_j@silpakorn.edu

วันที่รับบทความ: 18 เมษายน 2565; วันที่ทบทวนบทความ: 25 ตุลาคม 2565; วันที่ตอบรับบทความ: 24 พฤศจิกายน 2565

วันที่เผยแพร่ออนไลน์: 19 มีนาคม 2566

บทคัดย่อ: งานวิจัยฉบับนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อวิเคราะห์ข้อมูลและลดอัตราการเสียหายของเครื่องล้างจานสำหรับอุตสาหกรรมร้านอาหาร หลังทำการวิเคราะห์ข้อมูลพบว่าเครื่องล้างจานรุ่น A ในบริษัทกรณีศึกษา มีความถี่ในการซ่อมสูงสุด จึงทำการวิเคราะห์และหาสาเหตุการเสียหายของเครื่องจักร โดยใช้เครื่องมือในการวิเคราะห์ปัญหา คือ แผนภูมิพาเรโตในการจัดลำดับความสำคัญของปัญหา แผนภูมิแก๊งปลาในการวิเคราะห์ปัญหาและสาเหตุในแต่ละด้าน และใช้หลักการความน่าเชื่อถือในการกำหนดระยะเวลาการบำรุงรักษาเชิงป้องกัน จากการวิเคราะห์พบว่า ปัญหาเครื่องจักรไม่ทำงาน เป็นปัญหาหลักของการหยุดชะงักและเกี่ยวเนื่องจากชิ้นส่วนประกอบของเครื่องล้างจาน คือ สวิตช์เปิดปิด สวิตช์ทำงาน สวิตช์ประตู และแม่เหล็กสวิตช์ประตู การปรับปรุงได้จัดสร้างแผนการบำรุงรักษาเชิงป้องกันของเครื่องล้างจานรุ่น A โดยทำการเปลี่ยนชิ้นส่วนประกอบที่มีผลต่อการหยุดชะงักของเครื่องด้วยความถี่ ดังนี้ สวิตช์เปิดปิด สวิตช์ทำงาน สวิตช์ประตู 1.5 ปีต่อครั้ง และแม่เหล็กสวิตช์ประตู 2 ครั้งต่อปี ผลหลังจากการปรับปรุง พบว่า ปริมาณงานซ่อมลดลงจากเดิมร้อยละ 37.13 เป็นร้อยละ 29.50 และค่าความน่าเชื่อถือของเครื่องล้างจานเพิ่มขึ้นจากเดิมร้อยละ 17 เป็นร้อยละ 56 จากปริมาณเครื่องล้างจานทั้งหมดส่งผลให้เกิดค่าความน่าเชื่อถือเพิ่มขึ้น

คำสำคัญ: ค่าความน่าเชื่อถือ; เวลาเฉลี่ยระหว่างความเสียหาย; การบำรุงรักษาเชิงป้องกัน; การลดอัตราการเสียหายของเครื่องจักร; การวิเคราะห์สาเหตุและผลกระทบของความชำรุดเสียหาย

Reducing the Failure Rate of Dishwashers by Analyzing the Service Life of Spare Parts using System Reliability Calculation

Jiranan Kanjanakulanurak* and Prachuab Klomjit

Division of Engineering Management, Department of Engineering and Industrial Technology,
Silpakorn University

* Corresponding author, E-mail: kanjanakulanura_j@silpakorn.edu

Received: 18 April 2022; Revised: 1 October 2022; Accepted: 24 November 2022

Online Published: 19 March 2023

Abstract: This research aims to reduce and analyze the failure of food industry dishwashers machine. From analyzing data we find that dishwasher model A has the highest frequency of being repaired. We analyze and find the root cause of machine failure by using the analysis tool Pareto chart to prioritize the failure root cause. Fishbone Diagram is applied in finding relatives between the problem and root cause in each part and uses reliability to define the frequency of preventive maintenance. From analysis, we find that machine can't operate is the main problem for machine breakdown, and related to machine parts are the ON/OFF switch, RUN Switch, Door Switch, and Magnetic Switch. The preventive maintenance plan of dishwasher model A by changing the machine parts which have a high effect on machine breakdown is the ON/OFF switch, RUN Switch, Door Switch 1.5 years per time, and Magnetic Switch 2 times per year. From this research, it is found that the dishwasher machine model A has frequencies of failure reduced from 37.13% to 29.50% and has increased reliability from 17% to 56% from the whole machine.

Keywords: Reliability; Mean Time between Failures; Preventive Maintenance; Reduce Failure of Machine; Failure Mode and Effects Analysis



1. บทนำ

ในกลุ่มธุรกิจเครื่องจักรสำหรับอุตสาหกรรมร้านอาหารหรือครัวเรือน ตัวอย่างเช่น เครื่องล้างจานเป็นเครื่องจักรที่มีการจำหน่ายและติดตั้งอยู่ทั่วประเทศเป็นจำนวนมาก ผู้ใช้งานต่างล้วนต้องการเครื่องจักรที่สามารถทำงานได้ตลอดเวลา ไม่เกิดการชำรุดเสียหาย โดยการแข่งขันของธุรกิจดังกล่าวจะมุ่งเน้นไปที่การบริการหลังการขายเครื่องจักรเป็นสิ่งสำคัญ ซึ่งหากเครื่องจักรดังกล่าวเกิดขัดข้องหรือหยุดทำงานบ่อยครั้ง จะส่งผลกระทบต่อทั้งบริษัทตัวอย่างและลูกค้า ไม่ว่าจะเป็นค่าใช้จ่ายทั้งทางตรงและทางอ้อม เช่น ค่าแรงช่าง ค่าเดินทาง ส่งผลให้เกิดต้นทุนที่เพิ่มมากขึ้น

บริษัทกรณีศึกษาในครั้งนี้มีเครื่องล้างจานทั้งหมด 6 รุ่น จำนวนการเสียหายของเครื่องจักรถือว่ามีอัตราการเสียหายที่สูง ซึ่งข้อมูลความถี่ในการซ่อมเครื่องจักรแต่ละรุ่น แสดงในตารางที่ 1 ดังนี้

ตารางที่ 1 ความถี่การซ่อมเครื่องจักร ตั้งแต่เดือนมกราคมถึงพฤษภาคม 2564

| รุ่น | ความถี่ การซ่อม | เปอร์เซ็นต์ การซ่อม |
|------|--------------------|------------------------|
| A | 1362 | 37.13% |
| B | 522 | 14.23% |
| C | 150 | 4.09% |
| D | 623 | 16.98% |
| E | 417 | 11.37% |
| F | 594 | 16.19% |
| รวม | 3668 | 100% |

ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นที่จะลดอัตราการเสียหายของเครื่องล้างจานรุ่น A เนื่องจากมีร้อยละการซ่อมสูงที่สุด คือ 37.13% โดยอาศัยหลักการด้านการบำรุงรักษาเครื่องจักร [1] โดยวิเคราะห์จากค่าความน่าเชื่อถือ มีความถี่ในการซ่อมเครื่องจักรและค่าความน่าเชื่อถือ (Reliability) เป็นตัวชี้วัด

2. วิธีการดำเนินงานวิจัย

ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัยสามารถอธิบายได้ดังนี้คือ เริ่มต้นจากศึกษาวิธีการทำงานของเครื่องล้างจานเพื่อที่จะได้เข้าใจการทำงานโดยรวมและอุปกรณ์ชิ้นส่วนที่เกี่ยวข้อง หลังจากนั้นจึงเก็บข้อมูลและรวบรวมปัญหาการเสียหายของเครื่องล้างจาน โดยนำข้อมูลจากการแจ้งซ่อมของเครื่องล้างจาน และนำมาวิเคราะห์สาเหตุการเสียหายและผลกระทบ เพื่อจะนำสาเหตุที่ส่งผลกระทบมากที่สุดมาทำการแก้ไขปัญหา โดยสามารถอธิบายได้ ดังรูปที่ 1

2.1 เครื่องล้างจาน

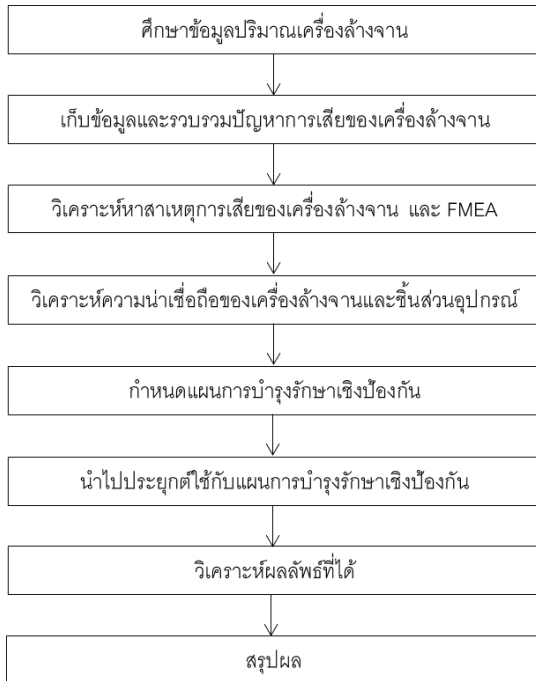
2.1.1 การศึกษาการทำงานของเครื่องล้างจาน

เครื่องล้างจานรุ่น A เป็นเครื่องล้างจานประเภทใต้เคาน์เตอร์ มีขนาด 59.5 x 65.5 x 83.0 เซนติเมตร ดังรูปที่ 2 และความสามารถในการล้าง 560 ใบต่อชั่วโมง

หลักการทำงานของเครื่องล้างจาน คือ นำจานที่ต้องการล้างเข้าภายในเครื่องล้างจาน หลังจากนั้นเครื่องล้างจานจะทำการล้างจาน โดยวัสดุที่ใช้ คือ น้ำร้อนอุณหภูมิ 65 และ 85 องศาเซลเซียส น้ำยาล้างจาน และน้ำยาช่วยแห้ง หลังจากเสร็จสิ้นกระบวนการจะได้จานที่ออกมาสะอาดพร้อมกับปลอดภัยไร้โรค โดยสามารถอธิบายหลักการดังกล่าว ดังแสดงในรูปที่ 3



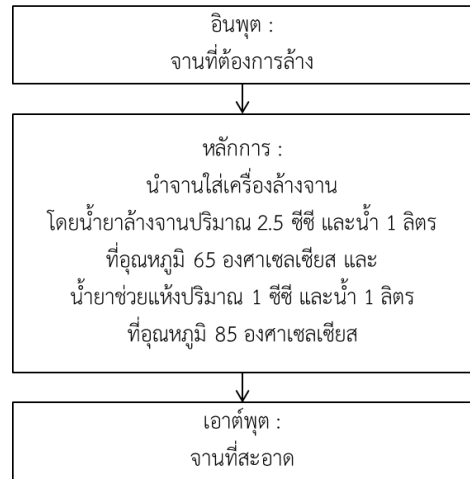
บทความวิจัย



รูปที่ 1 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย



รูปที่ 2 เครื่องล้างจานรุ่น A



รูปที่ 3 หลักการทำงานของเครื่องล้างจาน

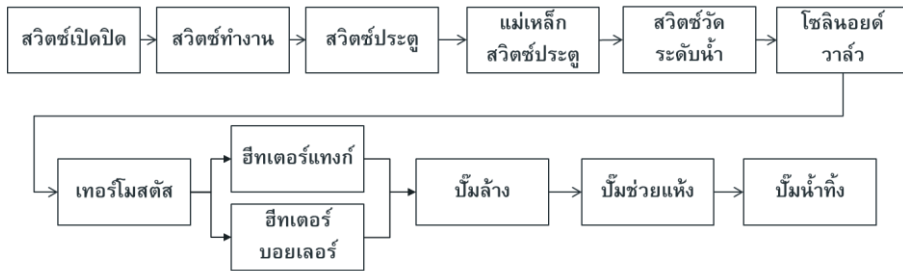
2.1.2 แผนผังการทำงานของเครื่องล้างจาน

เครื่องล้างจานประกอบด้วยชิ้นส่วนอุปกรณ์หลายชนิดประกอบรวมกัน เพื่อให้สามารถทำงานครบขั้นตอนกระบวนการ โดยการทำงานของชิ้นส่วนอุปกรณ์แต่ละชนิด จะประกอบต่อกันเป็นแบบอนุกรม ซึ่งหากอุปกรณ์ชนิดใดเสีย จะทำให้ไม่สามารถทำงานในขั้นตอนกระบวนการต่อไปได้ ดังแสดงในรูปที่ 4

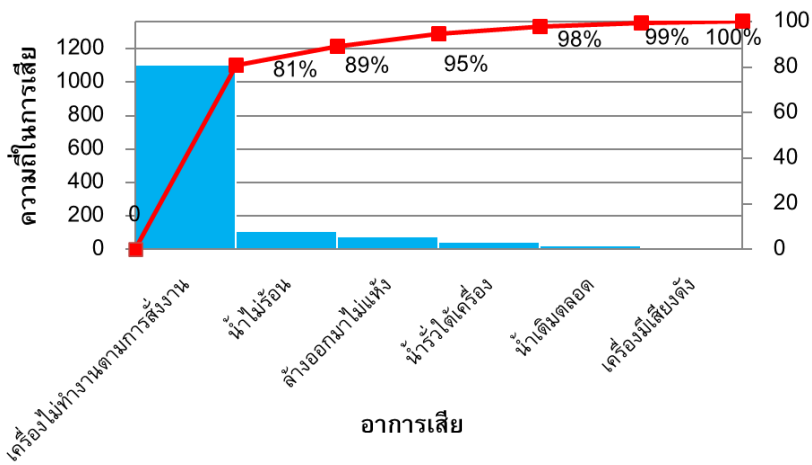
2.2 การรวบรวมและการวิเคราะห์ข้อมูล

เนื่องจากจุดประสงค์ของการวิจัยคือ การลดอัตราการเสียหายของเครื่องล้างจาน ดังนั้นจึงต้องรวบรวมข้อมูลที่เป็นสาเหตุที่ทำให้เครื่องหยุดการทำงาน

จากการเก็บรวบรวมข้อมูลปัญหาการหยุดการทำงานของเครื่องล้างจาน และได้นำข้อมูลทั้งหมดมาวิเคราะห์โดยใช้หนึ่งในเครื่องมือควบคุมคุณภาพหรือ 7 QC Tools [2] ที่ชื่อว่า แผนภูมิพาเรโต ผลปรากฏว่า ปัญหาของเครื่องล้างจานรุ่น A ที่ส่งผลต่อการหยุดการทำงานของเครื่องล้างจาน ดังแสดงในตารางที่ 2 และรูปที่ 5



รูปที่ 4 แผนภาพชิ้นส่วนอุปกรณ์ขั้นตอนการทำงานของเครื่องล้างจาน



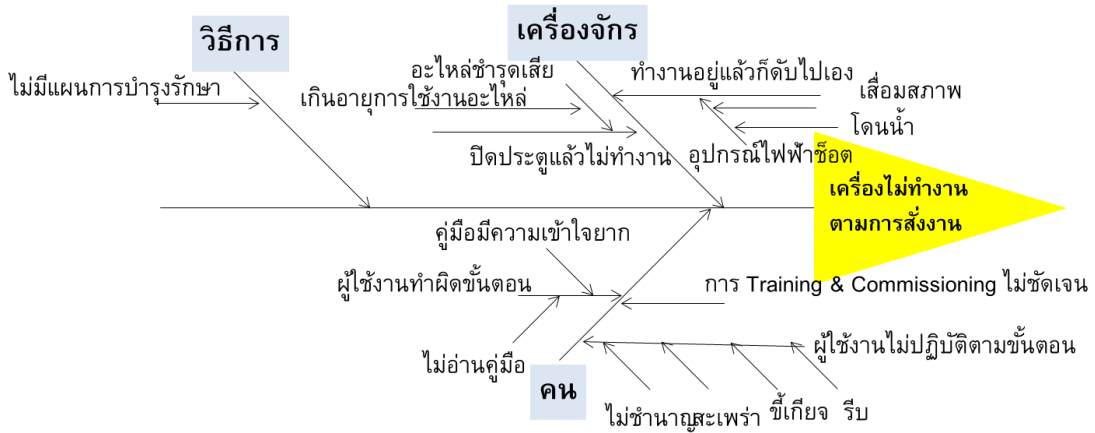
รูปที่ 5 พารेटโตแสดงอาการเสียของเครื่องล้างจาน

ตารางที่ 2 ความถี่ในการเสียของแต่ละอาการเสียของเครื่องล้างจาน

| อาการเสีย | ความถี่ | รวม | เปอร์เซ็นต์สะสม (%) |
|------------------------------|---------|------|---------------------|
| เครื่องไม่ทำงานตามการสั่งงาน | 1103 | 1103 | 81 |
| น้ำไม่ร้อน | 110 | 1213 | 89 |
| ล้างออกมาไม่แห้ง | 75 | 1288 | 95 |
| น้ำรั่วใต้เครื่อง | 43 | 1331 | 98 |
| น้ำเต็มตลอด | 22 | 1353 | 99 |
| เครื่องมีเสียงดัง | 9 | 1362 | 100 |

2.3 การวิเคราะห์สาเหตุการหยุดทำงานของเครื่องล้างจานจากอาการเครื่องไม่ทำงานตามการสั่งงาน

จากรายละเอียดข้างต้น พบว่าปัญหาที่ก่อให้เกิดความเสียหายของการหยุดเดินเครื่องถึงร้อยละ 80 ได้แก่ เครื่องไม่ทำงานตามการสั่งงาน ดังนั้นจึงได้ทำการวิเคราะห์หารากสาเหตุของปัญหาที่ก่อให้เกิดการหยุดทำงานของเครื่องล้างจานจากอาการดังกล่าว โดยใช้แผนภูมิแก๊งปลา ซึ่งมีรายละเอียดของแต่ละปัญหาดังรูปที่ 6



รูปที่ 6 แผนภูมิแก๊งปลาแสดงเครื่องไม่ทำงานตามการสั่งงาน

2.3.1 เครื่องไม่ทำงานตามการสั่งงาน

จากการวิเคราะห์แผนภูมิแก๊งปลาเพื่อหาสาเหตุการเสียหายของเครื่องไม่ทำงานตามการสั่งงานพบว่าสาเหตุของเครื่องไม่ทำงานตามการสั่งงานมาจาก 3 ด้าน ได้แก่ วิธีการ เครื่องจักร และคน

ด้านวิธีการได้แก่ ไม่มีแผนการบำรุงรักษา ด้านเครื่องจักร ได้แก่ ปิดประตูแล้วไม่ทำงาน, ทำงานอยู่แล้วก็ดับไปเอง โดยทั้งสองสาเหตุเนื่องมาจากชิ้นส่วนอุปกรณ์เสียหายเสื่อมสภาพ และเกินอายุการใช้งานอะไหล่ และสุดท้ายด้านคน กล่าวคือผู้ใช้งานปฏิบัติงานเครื่องผิดขั้นตอน ผู้ใช้งานไม่ปฏิบัติตามขั้นตอนการทำงานของเครื่องล้างจาน เนื่องจากคู่มือมีความเข้าใจยาก

2.3.1.1 การวิเคราะห์ลักษณะความเสียหายและผลกระทบ (FMEA)

จากการวิเคราะห์ด้วยแผนภูมิแก๊งปลาข้างต้นทำให้ทราบสาเหตุ โดยแต่ละสาเหตุจะถูกนำมาหาค่าเฉลี่ยในด้านความรุนแรงของปัญหา (Severity: SEV) ด้านโอกาสในการเกิดปัญหา (Occurrence: OCC) และ

ด้านความสามารถในการตรวจจับ (Detection: DET) จากนั้นวิเคราะห์หาค่า Risk Priority Number (RPN) ซึ่งสามารถหาได้จากสมการที่ 1

$$RPN = SEV \times OCC \times DET \quad (1)$$

จากแผนภูมิแก๊งปลาของเครื่องไม่ทำงานตามการสั่งงาน สามารถสรุปได้เป็น 3 สาเหตุหลักๆ ดังนี้ (1) ชิ้นส่วนอุปกรณ์ของเครื่องล้างจานเสื่อมสภาพ (2) คู่มือเข้าใจยาก และ (3) ไม่มีแผนการบำรุงรักษา ทั้งนี้ในการพิจารณาเพื่อหาแนวทางการจัดการความเสี่ยงเพื่อให้ประสิทธิภาพการทำงานของเครื่องล้างจานดีขึ้น จะพิจารณาที่ค่า RPN ของสาเหตุการเสียหายของเครื่องไม่ทำงานตามการสั่งงาน จากการคำนวณดังสมการที่ 1 โดยพิจารณาจากค่า SEV OCC และ DET โดยมีเกณฑ์ในการให้คะแนน ดังตารางที่ 3-5 [3, 4] โดยผลการวิเคราะห์ลักษณะความเสียหายและผลกระทบแสดงค่าระดับคะแนนความเสี่ยง (Risk Priority Number: RPN) แสดงดังตารางที่ 6



ตารางที่ 3 เกณฑ์การประเมินความรุนแรงของปัญหา (Severity: SEV)

| ผลกระทบ | คะแนน |
|---------------------------------------|-------|
| อันตรายที่เกิดขึ้นโดยปราศจากการเตือน | 10 |
| อันตรายที่เกิดขึ้นโดยมีการเตือน | 9 |
| สูงมาก (เครื่องจักรไม่สามารถทำงานได้) | 8 |
| สูง | 7 |
| ปานกลาง | 6 |
| ผลกระทบ | คะแนน |
| ต่ำ | 5 |
| ต่ำมาก | 4 |
| กระทบทางอ้อม | 3 |
| กระทบทางอ้อมมากๆ | 2 |
| ไม่มีผลกระทบ | 1 |

ตารางที่ 4 เกณฑ์การประเมินโอกาสในการเกิดปัญหา (Occurrence: OCC)

| โอกาสในการเกิดข้อบกพร่อง | คะแนน |
|---|-------|
| เกิดข้อบกพร่องมากกว่า 2 ครั้งใน 1 เดือน | 10 |
| เกิดข้อบกพร่อง 1 ครั้งใน 1 เดือน | 9 |
| เกิดข้อบกพร่องอย่างน้อย 2 ครั้งใน 6 เดือน | 8 |
| เกิดข้อบกพร่อง 1 ครั้งใน 6 เดือน | 7 |
| เกิดข้อบกพร่องอย่างน้อย 2 ครั้งใน 1 ปี | 6 |
| เกิดข้อบกพร่อง 1 ครั้งใน 1 ปี | 5 |
| เกิดข้อบกพร่องอย่างน้อย 2 ครั้งใน 2 ปี | 4 |
| เกิดข้อบกพร่อง 1 ครั้งใน 2 ปี | 3 |
| เป็นไปได้ที่จะเกิดข้อบกพร่อง | 2 |
| ไม่เกิดข้อบกพร่องเลย | 1 |

ตารางที่ 5 เกณฑ์การประเมินความสามารถในการตรวจพบสาเหตุของข้อบกพร่อง (Detection: DET)

| ประเภทของการตรวจสอบ | การควบคุมที่ใช้เพื่อให้ตรวจสอบ | คะแนน |
|---------------------------------------|---|-------|
| ผู้ปฏิบัติงาน | ไม่สามารถตรวจพบ | 10 |
| ผู้ปฏิบัติงาน | ทางอ้อมหรือสุ่ม | 9 |
| ผู้ปฏิบัติงาน | สายตา | 8 |
| ผู้ปฏิบัติงาน | สายตา 2 ครั้ง | 7 |
| เครื่องมือ หรือ ผู้ปฏิบัติงาน | แผนภูมิ SPC | 6 |
| เครื่องมือ | เครื่องมือวัด | 5 |
| ตัวป้องกันความผิดพลาด หรือ เครื่องมือ | ตรวจสอบความผิดพลาดในกระบวนการถัดไป หรือ เครื่องมือวัด | 4 |
| ตัวป้องกันความผิดพลาด หรือ เครื่องมือ | สามารถตรวจพบในจุดปฏิบัติงาน | 3 |
| ตัวป้องกันความผิดพลาด หรือ เครื่องมือ | สามารถตรวจพบในจุดปฏิบัติงาน | 2 |
| ตัวป้องกันความผิดพลาด | ไม่มีโอกาสเกิดบกพร่อง | 1 |

ทั้งนี้ การจัดกลุ่มประเภทความเสี่ยง ดังตารางที่ 7 จะพิจารณาจากการแบ่งอันตรายภาคชั้นเป็น 3 ชั้น [5] โดยกำหนดความกว้างของแต่ละช่วงเท่ากับ 121 ดังนี้

$$\text{ความกว้างของอันตรายภาคชั้น} = (RPN_{\text{มาก}} - RPN_{\text{น้อย}}) / 3$$

$$= (504 - 140) / 3$$

$$= 121$$



ตารางที่ 6 ผลการวิเคราะห์ลักษณะความเสียหายและผลกระทบ

| การวิเคราะห์ลักษณะความเสียหายและผลกระทบ (FMEA) เครื่องล้างจานไม่ทำงาน | | | | | | | | |
|---|---|---|-----|---|-----|---------------------------|-----|-----|
| สาเหตุของเครื่องไม่ทำงานตามการสั่งงาน | ลักษณะของความเสียหาย | ผลกระทบจากความเสียหาย | SEV | สาเหตุลักษณะความเสียหาย | OCC | วิธีการควบคุมในปัจจุบัน | DET | RPN |
| ชิ้นส่วนของอุปกรณ์ของเครื่องล้างจานเสื่อมสภาพ | ชิ้นส่วนของอุปกรณ์ชำรุดเสียหาย/เสื่อมสภาพ ไม่สามารถใช้งานชิ้นส่วนอุปกรณ์ได้ | เครื่องล้างจานไม่สามารถทำงานได้ หรือทำงานไม่เต็มประสิทธิภาพ | 8 | ใช้งานเกินอายุการใช้งานของชิ้นส่วนอุปกรณ์ | 5 | ซ่อมตามการเสีย | 10 | 400 |
| คู่มือเข้าใจยาก | ผู้ใช้งานปฏิบัติผิดขั้นตอนการทำงานของเครื่องล้างจาน | เครื่องล้างจานไม่สามารถล้างจานได้เต็มประสิทธิภาพ | 7 | ผู้ใช้งานไม่อ่านคู่มือการใช้งานเครื่องให้รอบคอบ | 8 | ปรับปรุง Work instruction | 4 | 224 |
| ไม่มีแผนการบำรุงรักษา | เครื่องล้างจานทำงานไม่เต็มประสิทธิภาพ | จานที่ล้างออกมาไม่สะอาด | 7 | ไม่มีการเข้าตรวจเช็คสภาพเครื่องล้างจาน | 6 | ซ่อมตามการเสีย | 10 | 420 |

ดังนั้น การแบ่งระดับค่าความเสี่ยงเป็น 3 ระดับ โดยสามารถกำหนดดังนี้

- ค่า RPN มากกว่า 365 จัดอยู่ในกลุ่มความเสี่ยงสูง (High risk: H)
- ค่า RPN ช่วง 243-364 จัดอยู่ในกลุ่มความเสี่ยงปานกลาง (Medium risk: M)
- ค่า RPN ช่วง 121-242 จัดอยู่ในกลุ่มความเสี่ยงต่ำ (Low risk: L)

ตารางที่ 7 ค่า RPN ของสาเหตุของเครื่องไม่ทำงานตามการสั่งงานโดยแบ่งกลุ่มความเสี่ยง

| ลำดับ | สาเหตุของเครื่องไม่ทำงานตามการสั่งงาน | ค่า RPN (มาก-น้อย) | H | M | L |
|-------|--|--------------------|---|---|---|
| 1 | ไม่มีแผนการบำรุงรักษา | 420 | H | | |
| 2 | ชิ้นส่วนอุปกรณ์ของเครื่องล้างจานเสื่อมสภาพ | 400 | H | | |
| 3 | คู่มือเข้าใจยาก | 224 | | | L |



จากตารางที่ 7 ข้างต้น การวิเคราะห์ค่า RPN ของสาเหตุเครื่องไม่ทำงานตามการสั่งงาน ผลลัพธ์ที่ได้ปรากฏว่า ไม่มีแผนการบำรุงรักษามีค่า RPN สูงถึง 420 รองลงมาคือ ชิ้นส่วนอุปกรณ์ของเครื่องล้างจานเสื่อมสภาพมีค่า RPN 400 ซึ่งทั้งสองสาเหตุจัดอยู่ในกลุ่มความเสี่ยงสูง และคู่มือเข้าใจยากจัดอยู่ในกลุ่มความเสี่ยงต่ำมีค่า RPN 224 จากการแบ่งระดับความเสี่ยงโดยค่า RPN ผู้วิจัยมุ่งเน้นการแก้ปัญหาที่กลุ่มความเสี่ยงสูง ได้แก่ ไม่มีแผนการบำรุงรักษาและชิ้นส่วนอุปกรณ์ของเครื่องล้างจานเสื่อมสภาพ

หากสร้างแผนการบำรุงรักษาเครื่องล้างจาน จะรวมไปถึงการเปลี่ยนชิ้นส่วนอุปกรณ์ของเครื่องล้างจานก่อนการเสื่อมสภาพ ดังนั้นแผนการบำรุงรักษาของเครื่องล้างจาน จึงสามารถสร้างหรือกำหนดได้จากอายุการใช้งานหรือระยะเวลาการเสื่อมสภาพของชิ้นส่วนอุปกรณ์ของเครื่องล้างจาน โดยคำนวณได้จากค่าความน่าเชื่อถือของเครื่องล้างจาน เนื่องจากค่าความน่าเชื่อถือสามารถบ่งบอกอัตราการเสียของเครื่องล้างจานได้ กล่าวได้ว่าหากทำการเปลี่ยนชิ้นส่วนอุปกรณ์เครื่องล้างจานก่อนการชำรุดเสื่อมสภาพ จะส่งผลให้เครื่องล้างจานไม่เกิดการชำรุด

2.4 ความน่าเชื่อถือของเครื่องล้างจาน

ผู้วิจัยนำข้อมูลของเครื่องล้างจาน รุ่น A เครื่องที่ A1 เนื่องจากข้อมูลการเสียและซ่อมของเครื่องจักรแต่ละเครื่องมีข้อมูลค่อนข้างใกล้เคียง จึงนำตัวอย่างกรณีการเสียเครื่องที่ A1 เพื่อนำมาวิเคราะห์ค่าความน่าเชื่อถือของเครื่องล้างจาน โดยนำข้อมูลประวัติการบำรุงรักษาเครื่องล้างจานย้อนหลังปี พ.ศ.2562-2563 ระหว่างเดือนมกราคม ถึง ธันวาคมมาทำการวิเคราะห์ โดยมี

รายละเอียดการซ่อมและบำรุงรักษาชิ้นส่วนอุปกรณ์ดังตารางที่ 8

ข้อมูลความถี่การเสียของชิ้นส่วนอุปกรณ์และระยะเวลาการหยุดทำงานของเครื่องจักร สามารถอธิบายได้ดังต่อไปนี้

- เครื่องล้างจานเกิดการหยุดทำงาน เนื่องจาก สวิตช์เปิดปิด ต้องทำการเปลี่ยนชิ้นส่วนอุปกรณ์ 1 ครั้ง รวมเวลาซ่อมแล้วเท่ากับ 1.5 ชั่วโมง
- เครื่องล้างจานเกิดการหยุดทำงาน เนื่องจาก สวิตช์ทำงาน ต้องทำการเปลี่ยนชิ้นส่วนอุปกรณ์ 1 ครั้ง รวมเวลาซ่อมแล้วเท่ากับ 0.5 ชั่วโมง
- เครื่องล้างจานเกิดการหยุดทำงาน เนื่องจาก สวิตช์ประตู ต้องทำการเปลี่ยนชิ้นส่วนอุปกรณ์ 1 ครั้ง รวมเวลาซ่อมแล้วเท่ากับ 3 ชั่วโมง
- เครื่องล้างจานเกิดการหยุดทำงาน เนื่องจาก แม่เหล็กสวิตช์ประตูชำรุดเสียหาย ต้องทำการเปลี่ยนชิ้นส่วนอุปกรณ์ 3 ครั้ง รวมเวลาซ่อมแล้วเท่ากับ 16.5 ชั่วโมง

ตารางที่ 8 ความถี่การเสียและระยะเวลาเสียของชิ้นส่วนอุปกรณ์

| ชิ้นส่วนอุปกรณ์ | ความถี่การเสีย | ระยะเวลาเสีย (ชั่วโมง) |
|---------------------|----------------|------------------------|
| สวิตช์เปิดปิด | 1 | 1.5 |
| สวิตช์ทำงาน | 1 | 0.5 |
| สวิตช์ประตู | 1 | 3 |
| แม่เหล็กสวิตช์ประตู | 3 | 16.5 |
| สวิตช์วัดระดับน้ำ | 0 | 0 |
| โซลินอยด์วาล์ว | 0 | 0 |



2.4.1 ค่าเวลาเฉลี่ยระหว่างความเสียหายของเครื่องจักร (Mean Time Between Failure: MTBF)

ระยะเวลาเฉลี่ยก่อนการเสียหายแต่ละครั้ง ค่า MTBF เป็นการวัดสมรรถนะความเชื่อถือได้ เป็นเวลาเฉลี่ยที่เครื่องจักรสามารถทำงานได้ตามปกติระหว่างจุดการทำงาน เครื่องจักรที่มีสมรรถนะสูง เชื่อถือได้สูง หมายถึงมีค่า MTBF ที่ยาวนาน โดยสามารถคำนวณหาค่า MTBF ได้ดังสมการที่ 2

$$MTBF = \frac{\text{ระยะเวลาที่เครื่องจักรเดินทั้งหมด}}{\text{จำนวนครั้งที่ชำรุด}} \quad (2)$$

ค่า MTBF ที่ได้จากระยะเวลาการเดินเครื่องในที่นี้จากข้อมูลย้อนหลังจำนวนเวลาที่ใช้ในการทำงาน มีค่าเท่ากับ (365 วัน x 8 ชั่วโมง x 2 ปี) = 5,840 ชั่วโมง

อัตราการชำรุด (Failure Rate) เป็นตัวบอกความเสื่อมสภาพของเครื่องจักรในแต่ละช่วงเวลาการใช้งานซึ่งจะมีอัตราการเสียหายแตกต่างกัน อัตราการเสียหายจะเป็นส่วนกลับของ MTBF คือแสดงให้เห็นถึงความถี่ของการเกิดความเสียหายในช่วงเวลาหนึ่งๆ สามารถคำนวณหาอัตราการชำรุด ได้ดังสมการที่ 3

$$\text{Failure Rate } (\lambda) = \frac{1}{MTBF} \quad (3)$$

ค่า MTBF และ Failure rate คำนวณจากสมการที่ 2 และ 3 ตามลำดับ แสดงได้ดังตารางที่ 9

จากตารางที่ 9 จะสังเกตเห็นได้ว่าเนื่องจากแม่เหล็กสวิตช์ประตุมีการเปลี่ยนชิ้นส่วนสูงถึง 3 ครั้ง จึงทำให้ค่า MTBF ของชิ้นส่วนดังกล่าวเหลือเพียง 1,947 ชั่วโมง เมื่อเทียบกับชิ้นส่วนประกอบอื่นๆ ที่มี MTBF 5,840 ชั่วโมง

ตารางที่ 9 ค่าเวลาเฉลี่ยระหว่างความเสียหายของเครื่องจักรและอัตราการเสียหายของชิ้นส่วนอุปกรณ์เครื่องจักร

| ชิ้นส่วนอุปกรณ์ | MTBF (ชั่วโมง) | อัตราการเสียหาย |
|----------------------|----------------|----------------------|
| สวิตช์เปิดปิด | 5840 | 1.7×10^{-4} |
| สวิตช์ทำงาน | 5840 | 1.7×10^{-4} |
| สวิตช์ประตุม | 5840 | 1.7×10^{-4} |
| แม่เหล็กสวิตช์ประตุม | 1947 | 5.1×10^{-4} |
| สวิตช์วัดระดับน้ำ | - | - |
| โซลินอยด์วาล์ว | - | - |

2.4.2 ความน่าเชื่อถือของเครื่องจักร (Reliability)

ค่าความน่าเชื่อถือของเครื่องจักร [3-5] ของแต่ละชิ้นส่วนอุปกรณ์แสดงดังตารางที่ 10 สามารถคำนวณได้ดังสูตรต่อไปนี้

$$R(t) = e^{-\lambda t} \quad (4)$$

โดยที่ R(t) = ค่าความน่าเชื่อถือของเครื่องจักรอุปกรณ์

e = ค่าลอการิทึมธรรมชาติ (Natural logarithms) มีค่าประมาณ 2.71828

λ = ค่าอัตราการเกิดความบกพร่องของเครื่องจักรอุปกรณ์ (Failure rate)

t = ช่วงเวลาที่พิจารณาความน่าเชื่อถือของกระบวนการผลิต



ตารางที่ 10 ค่าความน่าเชื่อถือของชิ้นส่วนอุปกรณ์เครื่องจักร

| ชิ้นส่วนอุปกรณ์ | ค่าความน่าเชื่อถือ |
|------------------------|--------------------|
| สวิตช์เปิดปิด | 0.75 |
| สวิตช์ทำงาน | 0.75 |
| สวิตช์ประตูลูก | 0.75 |
| แม่เหล็กสวิตช์ประตูลูก | 0.42 |
| สวิตช์วัดระดับน้ำ | 1 |
| โซลินอยด์วาล์ว | 1 |

ค่าความน่าเชื่อถือต่ำ หมายความว่า อัตราการเสียหาย ในทางกลับกันหากค่าความน่าเชื่อถือยิ่งสูง หมายความว่าอัตราการเสียหายยิ่งต่ำ หากค่าความน่าเชื่อถือ เท่ากับ 1 หมายความว่าเครื่องจักรนั้นไม่มีอัตราการเสียหาย จากค่าความน่าเชื่อถือของชิ้นส่วนอุปกรณ์แต่ละชนิด ความน่าเชื่อถือของแม่เหล็กสวิตช์ประตูลูก มีค่าความน่าเชื่อถือต่ำที่สุด 0.42 และ สวิตช์เปิดปิด สวิตช์ทำงาน สวิตช์ประตูลูก ตามลำดับความน่าเชื่อถือจากน้อยไปมาก สามารถแสดงรูปภาพของชิ้นส่วนอุปกรณ์ทั้ง 6 ชนิดได้ดังรูปที่ 7-12 และอธิบายการทำงานได้ดังตารางที่ 11



รูปที่ 7 สวิตช์เปิดปิด



รูปที่ 8 สวิตช์ทำงาน



รูปที่ 9 สวิตช์ประตูลูก



รูปที่ 10 แม่เหล็กสวิตช์ประตูลูก



รูปที่ 11 สวิตช์วัดระดับน้ำ



รูปที่ 12 วาล์วเปิดปิด

ตารางที่ 11 แผนการบำรุงรักษาเชิงป้องกันของชิ้นส่วนอุปกรณ์เครื่องล้างจาน

| ชิ้นส่วน | หน้าที่ | รูปแบบ ความ เสียหาย | ผลกระทบ ความ เสียหาย | สาเหตุของ ความ เสียหาย | การ บำรุงรักษา เชิงป้องกัน | รูปแบบ | ความถี่ |
|-----------------------------|--|---------------------------|--|------------------------------|----------------------------------|--------|--------------|
| สวิตช์ เปิดปิด | เปิดปิดการ ทำงานทั้งหมด ของเครื่อง ล้างจาน | ไม่ทำงาน | เครื่องจักรไม่ สามารถเริ่ม ทำงาน | เสื่อมสภาพ จากการใช้งาน | กำหนด MTBF | TBM | 1.5 ปี/ครั้ง |
| สวิตช์ ทำงาน | เริ่มต้น กระบวนการ ทำงานของเครื่อง ล้างจาน | ไม่ทำงาน | เครื่องจักรไม่ สามารถเริ่ม ทำงาน | เสื่อมสภาพ จากการใช้งาน | กำหนด MTBF | TBM | 1.5 ปี/ครั้ง |
| สวิตช์ ประตู | ตรวจสอบความ ปลอดภัยก่อน เริ่มกระบวนการ การทำงาน | ไม่ทำงาน | เครื่องจักร หยุด | เสื่อมสภาพ จากการใช้งาน | กำหนด MTBF | TBM | 1.5 ปี/ครั้ง |
| แม่เหล็ก สวิตช์ ประตู | ตรวจสอบความ ปลอดภัยก่อน เริ่มทำงาน | ไม่ทำงาน | เครื่องจักร หยุด | เสื่อมสภาพ จากการใช้งาน | กำหนด MTBF | TBM | 2 ครั้ง/ปี |

หมายเหตุ: การบำรุงรักษาตามรอบเวลา (Time-Based Maintenance: TBM) การซ่อมเมื่อเสียหาย (Run to Failure: RTF)



จากตารางที่ 10 สามารถสรุปออกมาได้ดังรูปที่ 13 ซึ่งเป็นชิ้นส่วนอุปกรณ์ของเครื่องล้างจานที่แสดงออกมาในรูปแบบแผนผังชิ้นส่วนอุปกรณ์ โดยกำหนดให้ชิ้นส่วนอุปกรณ์ที่ไม่ได้เกี่ยวข้องกับสาเหตุการเสียเครื่องไม่ทำงานตามการสั่งงาน มีค่าความน่าเชื่อถือเท่ากับ 1

2.4.3 การประเมินค่าความน่าเชื่อถือ

การคำนวณหาค่าความน่าเชื่อถือทั้งระบบของเครื่องล้างจาน ซึ่งเป็นการทำงานร่วมกันของแต่ละอุปกรณ์แบบอนุกรมและขนาน ใช้ค่าความน่าเชื่อถือโดยอ้างอิงจากตารางที่ 10 และสมการการคำนวณสมการที่ 5

$$\prod_{j=1}^{12} R_j = R_1 \times R_2 \times \dots \times R_{12} \quad (5)$$

$$R = 0.75 \times 0.75 \times 0.75 \times 0.42$$

$$R = 0.17$$

จากค่าความน่าเชื่อถือของระบบเครื่องจักร [6] เท่ากับ 0.17 สามารถกล่าวได้ว่าโอกาสที่เครื่องจักรเสีย มีมากถึง 83% และโอกาสที่เครื่องจักรยังสามารถเดินเครื่องได้ มีอัตรา 17%

2.5 การกำหนดช่วงระยะเวลาการบำรุงรักษาเชิงป้องกัน

ค่าความน่าเชื่อถือ (R (t)) จากวิศวกรรมความน่าเชื่อถือ (Reliability Engineering) [2] สามารถหาคาบเวลาที่เหมาะสมในการเข้าตรวจสอบสภาพชิ้นส่วนอุปกรณ์ที่มีระดับความน่าเชื่อถือต่ำของชิ้นส่วนของเครื่องล้างจาน โดยสามารถคำนวณระยะเวลาการบำรุงรักษา [7] ได้ดังสมการที่ 6 [8]

ผู้วิจัยได้เลือกระดับความน่าเชื่อถือที่ 50% [8] โดยรอบเวลาการบำรุงรักษาที่ได้สามารถนำมาใช้งานได้จริง กล่าวคือ ชิ้นส่วนอุปกรณ์ของเครื่องจักรจะมีชั่วโมงการใช้งานตามคาบเวลาไปเรื่อยๆ กระทั่งค่าความน่าเชื่อถือลดลงจนถึงระดับความเชื่อมั่นที่ 50% จากนั้นทีมช่างจะเข้าทำการบำรุงรักษาตามแผนงานเพื่อให้ชิ้นส่วนอุปกรณ์มีสภาพพร้อมใช้งานต่อไป

โดยระยะเวลาการบำรุงรักษาของสวิตช์เปิดปิดสวิตช์ทำงาน และสวิตช์ประตู สามารถคำนวณได้โดยการแทนค่าในสมการที่ 6 ดังต่อไปนี้

$$t = -\ln R(t) \times MTBF \quad (6)$$

$$t = -\ln (0.5) \times 5840$$

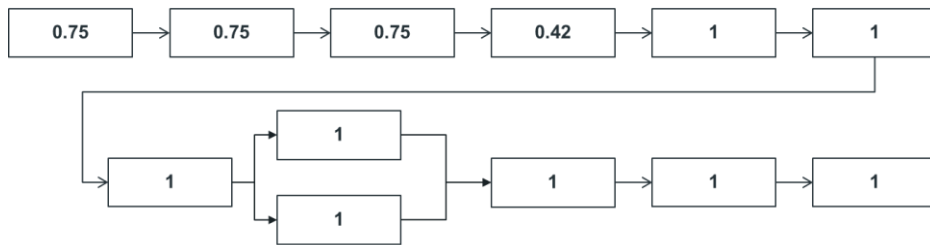
$$t = 4047.98$$

ระยะเวลาการบำรุงรักษาของแม่เหล็กสวิตช์ประตูสามารถคำนวณได้โดยการแทนค่าในสมการที่ 6 ดังต่อไปนี้

$$t = -\ln (0.5) \times 1947$$

$$t = 1349.33$$

จากช่วงระยะเวลาข้างต้น 4047.98 และ 1349.33 ชั่วโมง เมื่อนำมาคิดช่วงเวลาในการจัดแผนการบำรุงรักษาเชิงป้องกัน โดยเครื่องล้างจานทำงานวันละ 8 ชั่วโมง สามารถสรุปได้ว่าต้องทำการเปลี่ยนชิ้นส่วนอุปกรณ์สวิตช์เปิดปิด สวิตช์ทำงาน และสวิตช์ประตู ทุกๆ 1.5 ปี และทำการเปลี่ยนแม่เหล็กสวิตช์ประตู ทุกๆ 6 เดือน



รูปที่ 13 ค่าความน่าเชื่อถือของชิ้นส่วนอุปกรณ์

2.6 การสร้างแผนการบำรุงรักษาเชิงป้องกันและการนำไปใช้งาน

ผู้วิจัยได้จัดทำแผนการบำรุงรักษาเพื่อป้องกันไม่ให้เครื่องจักรหยุดทำงานก่อนการซ่อมบำรุง โดยกำหนดแผนการบำรุงรักษาเชิงป้องกัน [5, 9, 10] แสดงดังตารางที่ 11

3. ผลการวิจัย/ทดลองและการอภิปรายผล

3.1 ผลการวิจัย

จากขั้นตอนและวิธีการวิจัย การจัดทำแผนการบำรุงรักษาเชิงป้องกันโดยใช้วิธีการวิเคราะห์อายุการใช้งานของชิ้นส่วนอุปกรณ์ที่มีอัตราการก่อให้เกิดการหยุดทำงานของเครื่องจักรสูงด้วยการคำนวณค่าความน่าเชื่อถือ โดยนำแผนการบำรุงรักษาดังกล่าว ปรับใช้เข้ากับเครื่องล้างจานรุ่น A และเก็บผลการดำเนินการซ่อมเครื่องจักร ผลลัพธ์ที่ได้สามารถสังเกตได้จากความถี่ในการซ่อมเครื่องจักรก่อนและหลังการปรับใช้แผนการบำรุงรักษา ดังแสดงในตารางที่ 12

จากข้อมูลความถี่ในการซ่อมตารางที่ 12 สังเกตได้ว่าจำนวนครั้งในการซ่อมหลังปรับใช้แผนการบำรุงรักษา ลดลงจากก่อนปรับใช้แผนการบำรุงรักษาด้วยการเปลี่ยนชิ้นส่วนอุปกรณ์ด้วยความถี่ดังตารางที่ 11 อย่างเห็นได้ชัดเจน

ตารางที่ 12 เปรียบเทียบความถี่ในการซ่อมเครื่องจักรก่อนและหลังการประยุกต์ใช้แผนการบำรุงรักษาเชิงป้องกัน

| เดือน | ความถี่การซ่อม | |
|------------|----------------|------|
| | ก่อน | หลัง |
| เดือนที่ 1 | 216 | 189 |
| เดือนที่ 2 | 365 | 265 |
| เดือนที่ 3 | 254 | 184 |
| เดือนที่ 4 | 279 | 178 |
| เดือนที่ 5 | 248 | 149 |

โดยมีการนำข้อมูลดังกล่าววางแผนงานบำรุงรักษาผ่านโปรแกรม CMMS (Computerized Maintenance Management System) หรือระบบบริหารงานซ่อมบำรุงเครื่องจักรด้วยการใช้ระบบคอมพิวเตอร์เข้ามาช่วยแก้ไขปัญหา หาย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น ถูกออกแบบมาเพื่อเก็บข้อมูลงานซ่อมและบำรุงรักษาทั้งหมดในองค์กร กล่าวคือเมื่อผู้วิจัยได้นำโปรแกรม CMMS เข้ามาประยุกต์ใช้กับแผนการบำรุงรักษา ทำให้เข้าบำรุงรักษาตามแผนงานได้ตรงเวลา มีการซ่อมบำรุงครบถ้วนทุกหัวข้อที่กำหนดไว้ และเก็บข้อมูลการซ่อมและบำรุงรักษาได้อย่างแม่นยำอีกด้วย



กล่าวได้ว่าแผนการบำรุงรักษาเชิงป้องกันให้ผลลัพธ์ของความถี่ในการซ่อมเครื่องจักรในทิศทางที่ดี นอกจากนี้ข้อมูลความน่าเชื่อถือของชิ้นส่วนอุปกรณ์และความน่าเชื่อถือของระบบเครื่องล้างจาน รุ่น A เครื่องที่ A1 ก่อนและหลังการปรับใช้แผนการบำรุงรักษา แสดงได้ดังตารางที่ 13

4. บทสรุป

จากงานวิจัยทั้งหมดที่กล่าวมาข้างต้น สรุปได้ว่าผู้วิจัยได้ทำการเลือกเครื่องล้างจาน รุ่น A เนื่องจากมีความถี่ในการซ่อมมากที่สุดถึง 37.13% จากจำนวนเครื่องล้างจานทั้งหมด และเลือกข้อมูลเครื่องที่ A1 เพื่อนำมาวิเคราะห์ข้อมูล เมื่อวิเคราะห์ข้อมูลอาการเสียที่ทำให้เกิดการชำรุดขัดข้องของเครื่องจักรด้วยแผนภูมิพาเรโตพบว่า เครื่องไม่ทำงานตามการสั่งงานเป็นอาการเสียที่พบมากที่สุดถึง 81% จากนั้นจึงทำการวิเคราะห์หาสาเหตุของเครื่องไม่ทำงานตามการสั่งงานด้วยแผนภูมิแก๊งปลาพบว่า มีสาเหตุมาจาก 1. ชิ้นส่วนอุปกรณ์ของเครื่องล้างจานเสื่อมสภาพ 2. คู่มือเข้าใจยาก และ 3. ไม่มีแผนการบำรุงรักษา เมื่อนำ RPN มาช่วยในการจัดกลุ่มระดับค่าความเสี่ยงของแต่ละสาเหตุทำให้ทราบว่า ไม่มีแผนการบำรุงรักษาและชิ้นส่วนอุปกรณ์ของเครื่องล้างจานเสื่อมสภาพจัดอยู่ในกลุ่มความเสี่ยงสูง จึงดำเนินการแก้ไขที่ 2 สาเหตุดังกล่าว แนวทางในการแก้ไขคือต้องทำการจัดทำแผนการบำรุงรักษาเพื่อป้องกันไม่ให้ชิ้นส่วนอุปกรณ์เสื่อมสภาพ จึงนำค่าความน่าเชื่อถือมาใช้ในการคำนวณหาอายุการใช้งานของชิ้นส่วนอุปกรณ์เพื่อสร้างแผนการบำรุงรักษาเชิงป้องกัน ผลลัพธ์ที่ได้จากการนำแผนการบำรุงรักษาไปปรับใช้ สามารถแสดงได้ดังตารางที่ 14 ดังนี้

ตารางที่ 13 ค่าความน่าเชื่อถือของเครื่องจักรก่อนและหลังการประยุกต์ใช้แผนการบำรุงรักษาเชิงป้องกัน

| ชิ้นส่วน อุปกรณ์ | MTBF (ชั่วโมง) | | ค่าความ น่าเชื่อถือ | |
|-------------------------|-------------------|------|------------------------|------|
| | ก่อน | หลัง | ก่อน | หลัง |
| สวิตช์เปิดปิด | 5840 | - | 0.75 | 1 |
| สวิตช์ทำงาน | 5840 | - | 0.75 | 1 |
| สวิตช์ประตู | 5840 | - | 0.75 | 1 |
| แม่เหล็กสวิตช์ ประตู | 1947 | 2920 | 0.42 | 0.56 |
| สวิตช์วัดระดับน้ำ | - | - | 1 | 1 |
| โซลินอยด์วาล์ว | - | - | 1 | 1 |

หมายเหตุ: ค่าความน่าเชื่อถือของชิ้นส่วนอุปกรณ์แต่ละชนิดมีค่าที่สูงขึ้นจากเดิม เนื่องจากค่าเฉลี่ยระหว่างการเสียหาย (Mean Time Between Failure: MTBF) [5] ของชิ้นส่วนอุปกรณ์มีระยะเวลาที่สูงขึ้นและจำนวนครั้งที่เสียมีจำนวนลดลงด้วยเช่นกัน

ตารางที่ 14 สรุปค่าความน่าเชื่อถือและความถี่ในการซ่อมเครื่องจักรระหว่างก่อนและหลังการประยุกต์ใช้แผนการบำรุงรักษาเชิงป้องกัน

| ตัวชี้วัด | ก่อน | หลัง |
|--------------------|--------|--------|
| ค่าความน่าเชื่อถือ | 0.17 | 0.56 |
| เปอร์เซ็นต์การซ่อม | 37.13% | 29.50% |

การนำค่าความน่าเชื่อถือ อายุการใช้งานของชิ้นส่วน และแผนการบำรุงรักษาเชิงป้องกันมาประยุกต์ใช้เพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพการทำงานของเครื่องล้างจาน พบว่าแผนการทำงานของเครื่องล้างจานมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น ส่งผลให้สามารถดำเนินการใช้งานเครื่องจักรได้ยาวนานขึ้น เครื่องจักรเสียหายลดลง อีกทั้งยังลดต้นทุนการซ่อมอีกด้วย



5. กิตติกรรมประกาศ

การดำเนินการศึกษาและวิจัยในครั้งนี้ สามารถสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ขอบพระคุณบริษัทกรณีศึกษาที่ได้สนับสนุนข้อมูลในการดำเนินการศึกษาและวิจัยในครั้งนี้ รวมทั้งผู้จัดการแผนก พนักงานและผู้ที่เกี่ยวข้องทุกท่านที่ได้กรุณาให้ความร่วมมือเป็นอย่างดี

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] S. Preechawattanasakul, The increasing of the effectiveness of the weaving machine by using preventive maintenance plan, Thesis, King Mongkut's University of Technology North Bangkok, Thailand, 2007.
- [2] B. Lamesawan, Drill bush automobile parts productivity efficiency improvement by using quality control principle: Case study of R&D precision CO., LTD., Thesis, Rajabhat Rajanagarindra University, Thailand. 2013.
- [3] P. Sutthiprapapisit, Analysis of error characteristic of the impact by using FMEA in the production of plastic product for consumption, Thesis, Chiang Mai University, Thailand, 2019. (in Thai)
- [4] K. Inhun and T. Laosirihongtong, Prioritization of failure modes by using fuzzy analytic hierarchy process (FAHP): A case study electronics parts/components manufacturing process, The Journal of KMUTNB, 2016, 26(3), 427-436. (in Thai)
- [5] R. Kanchana, S. Triwanapong and K. Kimapong, Identifying preventive maintenance guidelines for rice combine harvester with application of failure mode and effect analysis technique, Journal of Engineering, RMUTT, 2020, 18(2), 35-45. (in Thai)
- [6] E. Kongboonsod, Analysis of reliability and unreliability cost for maintenance management; Case application of continuous process in petrochemical industry, Thesis, Kasetsart University, Thailand, 2010.
- [7] K. Jitjooon, Productivity improvement by reliability centered maintenance: A case study of machinery parts factory, Thesis, King Mongkut's University of Technology North Bangkok, Thailand, 2007.
- [8] P. Klomjit and S. Baoulan, Machine availability improvement for automotive parts manufacturing industry by reliability centered maintenance (RCM), Journal of Industrial Technology Ubon Ratchathani Rajabhat University, 2013, 3(6), 94-104. (in Thai)
- [9] J. Moubray, Reliability-centered maintenance, 1st Ed., Industrial Press Inc., NY, USA, 1992.
- [10] H.R. Zadry, D.A. Saputra, A.B. Tabri, D. Meilani and D. Rahmayanti, Failure modes and effects analysis (FMEA) for evaluation of a sugarcane machine failure, MATEC Web of Conferences (IMIEC 2018), 2018, 204, 01012.



การจำลองเชิงตัวเลขเพื่อศึกษาผลกระทบของรูปร่างการเจาะรูบนครีบบางวงกลมต่อสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนของแผงระบายความร้อน

ปริญญา อัครเดชเรืองศรี ภาวิฑ์ จันทสร อุกฤษฏ์ ธรรมะ และ อรรถสิทธิ์ วงศ์เจริญ*

ภาควิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมเครื่องกล, วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม,

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

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

วันที่รับบทความ: 12 ตุลาคม 2565; วันที่ทบทวนบทความ: 29 พฤศจิกายน 2565; วันที่ตอบรับบทความ: 16 มกราคม 2566

วันที่เผยแพร่ออนไลน์: 19 มีนาคม 2566

บทคัดย่อ: งานวิจัยนี้นำเสนอการจำลองเชิงตัวเลขเพื่อศึกษาผลกระทบของรูปร่างการเจาะรูบนครีบบางวงกลมต่อสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนของแผงระบายความร้อน กำหนดให้แผงระบายความร้อนแบบครีบบางมีลักษณะครีบบางเป็นครีบบางวงกลมและเป็นวัสดุประเภทอะลูมิเนียมอัลลอย ให้ฟลักซ์ความร้อนอยู่ใต้พื้นผิวของแผงระบายความร้อนมีค่าเท่ากับ 45 W ในส่วนของของไหล กำหนดให้เป็นอากาศที่มีอุณหภูมิและความเร็วลมทางเข้าเท่ากับ 300 K และ 5.2 m/s ตามลำดับ โดยการไหลของอากาศเป็นแบบปั่นป่วนมาตรฐาน $k-\epsilon$ ในงานวิจัยนี้ออกแบบรูปร่างรูเจาะบนครีบบางวงกลมของแผงระบายความร้อนมีดังนี้ รูปร่างสามเหลี่ยม รูปร่างเพชร และรูปร่างหกเหลี่ยม โดยกำหนดอัตราส่วนของพื้นที่ผิวสัมผัสแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างแผงระบายความร้อนและอากาศ (ISA) ต่อปริมาตรทั้งหมดของแผงระบายความร้อน (TVH) เท่ากับ 0.54 mm^{-1} จากผลพบว่าประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อน (Nu) มีค่าจากต่ำไปสูงดังนี้ รูปร่างเพชร รูปร่างสามเหลี่ยม รูปร่างหกเหลี่ยม และรูปร่างวงกลม และความดันลด (ΔP) มีค่าจากต่ำไปสูงดังนี้ รูปร่างวงกลม รูปร่างหกเหลี่ยม รูปร่างเพชร และรูปร่างสามเหลี่ยม เนื่องจากสมรรถนะการถ่ายเทความร้อน (TEF) คำนวณมาจากอัตราส่วนของประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนต่อการสูญเสียความดันภายในระบบที่เกิดจากแรงเสียดทาน จึงพบว่ารูปร่างการเจาะรูต่าง ๆ มีค่า TEF ที่ต่างกัน ซึ่งมีค่าจากต่ำไปสูงดังนี้ รูปร่างเพชร รูปร่างสามเหลี่ยม รูปร่างหกเหลี่ยม และรูปร่างวงกลม โดยการเจาะรูรูปร่างวงกลมมีค่า TEF มีค่าสูงที่สุด และมีค่ามากกว่าแผงระบายความร้อนแบบครีบบางวงกลมที่ไปถึง 43.1 %

คำสำคัญ: แผงระบายความร้อนแบบครีบบางวงกลม; เลขนัสเซิลต์; ความดันลด; สมรรถนะการถ่ายเทความร้อน



Effects of Pin-perforation Shape on Thermal Enhancement Factor of Pin-fin Heat Sink via Numerical Simulation

Parinya Ackaradetrungsri, Pawat Jantasorn, Ukrit Thamma and Athasit Wongcharoen*

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

* Corresponding author, E-mail: athasit.w@cit.kmutnb.ac.th

Received: 12 October 2022; Revised: 29 November 2022; Accepted: 16 January 2023

Online Published: 19 March 2023

Abstract: Effects of pin-perforation shape on the thermal enhancement factor of pin-fin heat sink via numerical simulation are presented here in this study. The material for the pin-fin heat sink is assigned to be an aluminum alloy, and the shape of the pin fins on the heat sink is circular. The heat source generating 45 W of heat flux is placed on the bottom of the heat sink. The inlet air temperature and velocity are 300 K and 5.2 m/s, respectively. The numerical air-flow model of steady turbulent main flow follows the standard $k - \epsilon$. Four pin-perforation shapes on pin fins are diamond, triangular, hexagonal, and circular of which all share the same ratio of the air/heat-sink interfacial surface area (ISA) to the total volume of the heat sink (TVH) of approximately 0.54 mm^{-1} . The lowest to highest Nusselt number (Nu), which represents the convective heat transfer efficiency, is found in diamond-perforation, triangular-perforation, hexagonal-perforation, and circular-perforation pin-fin heat sink, respectively. The lowest to highest pressure drop (ΔP), which signifies the hydraulic friction loss due to airflow restriction caused by pin-fin heat sinks, is found in circular-perforation, hexagonal-perforation, diamond-perforation, and triangular-perforation pin-fin heat sink, respectively. Lastly, the thermal enhancement factor (TEF), a ratio of the convective heat transfer efficiency to friction loss, from the lowest to highest are diamond-perforation, triangular-perforation, hexagonal-perforation, and circular-perforation pin-fin heat sinks, respectively. The circular-perforation pin-fin heat sink is shown to yield the highest TEF which is 43.1% higher than that of the pin-fin heat sink without pin-perforation.

Keywords: Circular pin-fin heat sink; Nusselt number; Pressure drop; Thermal enhancement factor



1. บทนำ

ในปัจจุบันเทคโนโลยีมีความก้าวหน้าเป็นอย่างมากทำให้ภาคอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์เป็นที่ต้องการอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์มาผลิตชิ้นส่วน และอะไหล่ในกลุ่มอุตสาหกรรม เช่น ยานยนต์ เครื่องใช้ไฟฟ้า โทรศัพท์ คอมพิวเตอร์ ฯลฯ ทำให้มีการแข่งขันสูงจึงส่งผลให้ผู้ประกอบการ และผู้ผลิตต้องสร้างผลิตภัณฑ์ใหม่ ๆ ให้มีความหลากหลายมากยิ่งขึ้น ซึ่งในการออกแบบอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ให้มีประสิทธิภาพในการทำงานได้รวดเร็ว มีน้ำหนักเบา ราคาถูกและมีขนาดเล็กจึงส่งผลให้เกิดอัตราความร้อนที่สูงขึ้น ความร้อนดังกล่าวเป็นสาเหตุทำให้อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์มีอายุการใช้งานที่สั้นลงและมีประสิทธิภาพลดลง ซึ่งแผงระบายความร้อน (Heat Sink) เป็นอุปกรณ์ที่นิยมใช้ในการระบายความร้อนให้อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์โดยการเพิ่มพื้นที่ผิวในอากาศซึ่งทำให้พาความร้อนจากตัวอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์เข้าสู่ในอากาศโดยรอบส่งผลให้เกิดการระบายความร้อนได้รวดเร็ว ในปัจจุบันแผงระบายความร้อนด้วยการพาความร้อนแบบบังคับแบ่งออกเป็น 2 ประเภท ดังนี้ แผงระบายความร้อนแบบครีบบัฟเฟ่น (Plate-fin) และแบบครีบบัฟเฟ่น (Pin-fin) ซึ่งแผงระบายความร้อนแบบครีบบัฟเฟ่นมีประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนหรือเลขนัสเซลต์ (Nusselt Number) สูงกว่าแผงระบายความร้อนแบบครีบบัฟเฟ่น อย่างไรก็ตามแผงระบายความร้อนแบบครีบบัฟเฟ่นมีค่าความดันลด (Pressure drop) และค่าการสูญเสียความดันภายในระบบที่เกิดจากแรงเสียดทาน (Friction Factor) สูงกว่าแผงระบายความร้อนแบบครีบบัฟเฟ่น [1-5]

รูปทรงของครีบบัฟเฟ่นแผงระบายความร้อนมีผลกระทบต่อประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนซึ่งมีงานวิจัยก่อนหน้านี้ได้เปรียบเทียบประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนของแผงระบายความร้อนที่มีครีบบัฟเฟ่นรูปทรงเรขาคณิตต่าง ๆ เช่น แบบครีบบัฟเฟ่นสี่เหลี่ยมผืนผ้า แบบครีบบัฟเฟ่นสี่เหลี่ยมจัตุรัส แบบครีบบัฟเฟ่นหกเหลี่ยม แบบครีบบัฟเฟ่นวงกลม และแบบครีบบัฟเฟ่นวงรี โดยพบว่าระบายความร้อนแบบครีบบัฟเฟ่นวงกลมมีประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนสูงที่สุด [5, 6]

นอกจากนี้การจัดเรียงตำแหน่งของครีบบัฟเฟ่นบนแผงระบายความร้อนยังมีผลกระทบต่อประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อน และต่อความดันลดและค่าการสูญเสียความดันภายในระบบที่เกิดจากแรงเสียดทานในการจัดเรียงครีบบัฟเฟ่นแบ่งออกเป็น 2 แบบดังนี้ (1) แบบแถวตรง (In-line) และ (2) แบบแถวสลับ (Staggered) ซึ่งม้งานวิจัยก่อนหน้านี้ได้เปรียบเทียบแผงระบายความร้อนแบบครีบบัฟเฟ่นจัดเรียงแบบแถวตรงกับครีบบัฟเฟ่นจัดเรียงแบบแถวสลับ พบว่าการจัดเรียงครีบบัฟเฟ่นแบบแถวสลับมีประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนสูงกว่าการจัดเรียงครีบบัฟเฟ่นแบบแถวตรงแต่การจัดเรียงครีบบัฟเฟ่นแบบแถวสลับมีค่าความดันลดและค่าการสูญเสียความดันภายในระบบที่เกิดจากแรงเสียดทานสูงกว่าการจัดเรียงครีบบัฟเฟ่นแบบแถวตรง [5-9]

การเจาะรูบนครีบบัฟเฟ่นของแผงระบายความร้อนมีผลต่อประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อน และต่อความดันลดและค่าการสูญเสียความดันภายในระบบที่เกิดจากแรงเสียดทาน เนื่องการเจาะรูบนครีบบัฟเฟ่นเป็นการเพิ่มพื้นที่ผิวในการแลกเปลี่ยนความร้อนกับอากาศและยังทำให้อากาศเคลื่อนตัวผ่านได้ง่ายขึ้น ซึ่งมี



งานวิจัยก่อนหน้านี้ได้เปรียบเทียบแผนกระจายความร้อนแบบครีบบางที่กับแบบเจาะรูบนครีบบางพบว่าแผนกระจายความร้อนแบบเจาะรูบนครีบบางมีประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนสูงกว่าแบบครีบบางที่บวม และการเจาะรูบนครีบบางทำให้ความดันลดลงและมีค่าการสูญเสียความดันภายในระบบที่เกิดจากแรงเสียดทานลดลง [10-23] จากการศึกษาของ Huang et. al., [24] ได้ออกแบบแผนกระจายความร้อนแบบเจาะรูบนครีบบางวงกลมจัดเรียงครีบบางแบบแถวสลับโดยใช้วิธีเลเวนเบิร์ก-มาร์ควาร์ดท์ (Levenberg-Marquardt) เพื่อประเมินค่าที่เหมาะสมที่สุดของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางรูเจาะวงกลม ขนาดครีบบางวงกลม และความสูงของครีบบางวงกลม โดยกำหนดให้ปริมาตรของแผนกระจายความร้อนมีค่าเท่ากัน จากผลการจำลองเชิงตัวเลขซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับผลการทดลองจริง พบว่าการเจาะรูปร่างวงกลมบนครีบบางวงกลมของแผนกระจายความร้อนมีประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนเพิ่มขึ้น 25.9% ถึง 28.0% และอุณหภูมิเฉลี่ยบนแผ่นฐานลดลง 20.2% ถึง 21.5% เมื่อเทียบกับแผนกระจายความร้อนแบบครีบบางวงกลมที่บวม แต่ยังไม่มีการคำนึงถึงพื้นที่ผิวของแผนกระจายความร้อนที่อาจจะผลกระทบต่อประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนและการสูญเสียความดันภายในระบบที่เกิดจากแรงเสียดทานของ แผนกระจายความร้อนที่ไม่เท่ากัน

เนื่องจากงานวิจัยที่ผ่านมา ยังไม่ได้มีการศึกษาในเชิงลึกของรูปร่างการเจาะรูบนครีบบางวงกลมของแผนกระจายความร้อนที่มีผลกระทบต่อประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนและผลกระทบต่อ การสูญเสียความดันภายในระบบที่เกิดจากแรงเสียดทานของแผนกระจายความร้อนอย่างไร ในศึกษาการจำลอง

เชิงตัวเลขเพื่อศึกษาผลกระทบของรูปร่างการเจาะรูบนครีบบางวงกลมต่อสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนของแผนกระจายความร้อน โดยได้ออกแบบรูปร่างรูเจาะต่าง ๆ บนครีบบางวงกลมของแผนกระจายความร้อนให้มีอัตราส่วนของพื้นที่ผิวสัมผัสแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างแผนกระจายความร้อนและอากาศต่อปริมาตรทั้งหมดของแผนกระจายความร้อนนั้นเท่ากัน

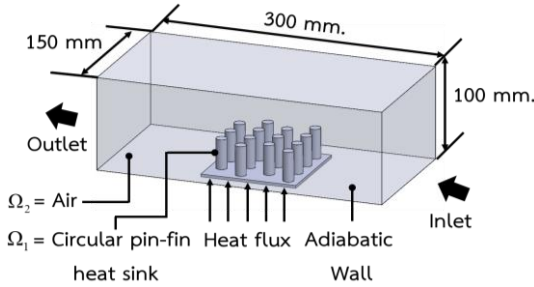
2. วิธีการดำเนินงานวิจัย

2.1 โดเมน สมการ และพารามิเตอร์ในการจำลองเชิงตัวเลข

ผู้วิจัยได้ศึกษาการตั้งค่าการจำลองเชิงตัวเลขของแผนกระจายความร้อนแบบครีบบางวงกลมจากการศึกษาของ Huang et. al., [24] ที่มีผลการจำลองเชิงตัวเลขของการกระจายความร้อนใกล้เคียงกับผลการทดลองจริง โดยการจำลองเชิงตัวเลขในการศึกษานี้กำหนดให้ Ω เป็นโดเมนที่ถูกสร้างขึ้นมาเพื่อใช้ในการจำลองเชิงตัวเลขมี ความกว้าง x ความยาว y ความสูงเท่ากับ $150 \times 300 \times 100$ mm และ $\{\Omega\} = \{\Omega_1 \cup \Omega_2\}$ ดังแสดงในรูปที่ 1 โดยที่ Ω_1 เป็นส่วนของแผนกระจายความร้อนแบบครีบบางวงกลม วัสดุเป็นอะลูมิเนียมอัลลอย A5083P มีค่าการนำความร้อนเท่ากับ 168 W/m.K และ Ω_2 เป็นส่วนของของไหลนั้นซึ่งเป็นอากาศที่มีคุณสมบัติทางอุณหพลศาสตร์เป็นค่าคงที่และมีการไหลแบบอัดตัวไม่ได้ มีอุณหภูมิและความเร็วลมทางเข้าเท่ากับ 300 K และ 5.2 m/s ตามลำดับ จากความเร็วลมทางเข้าสามารถคำนวณเป็นเลขเรย์โนลด์ส์ได้ $39,259$ ดังนั้นจึงเป็นการไหลแบบปั่นป่วน แต่ในส่วนฟลักซ์ความร้อน (q) จะอยู่ที่พื้นผิวของแผนกระจายความร้อนแบบครีบบางวงกลม (A_p) ซึ่งมีค่าฟลักซ์ความร้อนเท่ากับ 45 W



บทความวิจัย



รูปที่ 1 โดเมนการจำลองเชิงตัวเลข

การคำนวณในการจำลองเชิงตัวเลขของแผ่กระจายความร้อนแบบครีปแท่งวงกลม Ω_1 มีสมการพลังงานในแนวแกน XYZ ตามสมการดังนี้

$$\frac{\partial^2 T_f(\Omega_1)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_f(\Omega_1)}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T_f(\Omega_1)}{\partial z^2} = 0; \text{ in } \Omega_1 \quad (1)$$

$$k_f \frac{\partial T_f}{\partial z} = q; \text{ ใต้พื้นผิวของแผ่กระจายความร้อนแบบครีปแท่งวงกลม } A_b \quad (2)$$

เมื่อ T_f คือ การกระจายอุณหภูมิของแผ่กระจายความร้อนแบบครีปแท่งวงกลม (K)

k_f คือ การนำความร้อนของแผ่กระจายความร้อนแบบครีปแท่งวงกลม (W/m.K)

การคำนวณในการจำลองเชิงตัวเลขของการไหลของอากาศ Ω_2 มีสมการมวล สมการโมเมนตัม และสมการพลังงาน ในแนวแกน XYZ โดยแสดงในสมการ (3), (4) และ(5) ตามลำดับดังนี้ [25]

$$\frac{\partial \rho u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (3)$$

$$\rho u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] \quad (4)$$

$$\rho u_j \frac{\partial T_a}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\frac{\mu_l}{\sigma_l} + \frac{\mu_t}{\sigma_t} \right) \frac{\partial T_a}{\partial x_j} \right] \quad (5)$$

เมื่อ ρ คือ ค่าความหนาแน่น (kg/m³)

x_i, x_j คือ พิกัด (m)

u_i, u_j คือ ส่วนประกอบความเร็วลม (m/s)

P คือ ความดัน (N/m²)

T คือ อุณหภูมิ (K)

σ คือ เลขพริ้นต์เทิล

แบบจำลองการไหลของอากาศ Ω_2 ได้ประยุกต์การไหลแบบปั่นป่วนมาตรฐาน $k - \varepsilon$ (Turbulence Standard $k - \varepsilon$) ในสภาวะคงที่ที่ใช้เป็นหลักของสมการพลังงานจลน์ของความปั่นป่วน (Turbulence Kinetic Energy, k) และสมการอัตรากระจายพลังงานจลน์ของความปั่นป่วน (Dissipation of Turbulence Kinetic Energy, ε) โดยแสดงในสมการ (6) และ (7) ตามลำดับ ดังนี้ [25]

$$\rho u_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\mu_t}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + \mu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \rho \varepsilon \quad (6)$$

$$\rho u_j \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right) + C_1 \mu_t \frac{\varepsilon}{k_a} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - C_2 \rho \frac{\varepsilon^2}{k_a} \quad (7)$$

เมื่อ k คือ พลังงานจลน์ของความปั่นป่วน (m²/s²)

ε คือ กระจายพลังงานจลน์ของความปั่นป่วน (m²/s²)

μ คือ ค่าความหนืดของอากาศ (kg/m.s)

$\sigma_k, \sigma_\varepsilon$ คือ ค่าคงที่ของความปั่นป่วน

k_a คือ การนำความร้อนของอากาศ (W/m.K)

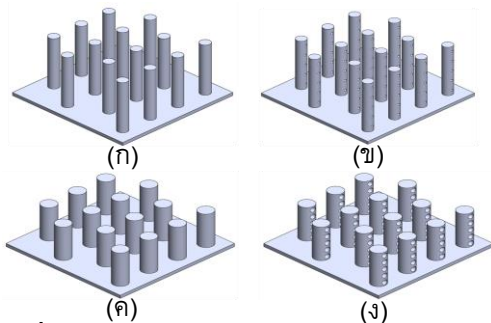
C_1, C_2 คือ ค่าคงที่ของความปั่นป่วน



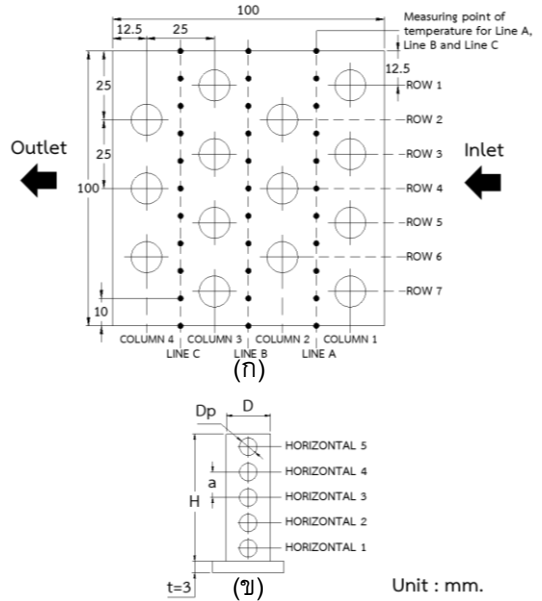
โดเมนในการจำลองเชิงตัวเลขนั้นมีเงื่อนไขขอบเขตผนังโดเมนแบบไม่ลื่น (Nonslip Boundary Conditions) ซึ่งถูกนำไปใช้กับผนังทั้งหมดในโดเมนเพื่อให้ความเร็วในการไหลมีค่าเท่ากับ 0 ในทุกพื้นที่ผิว ซึ่งการจำลองเชิงตัวเลขผู้วิจัยได้นำโปรแกรม ANSYS Fluent 19.3 มาใช้แก้สมการพีชคณิตตั้งที่กล่าวมาเบื้องต้นด้วยวิธีเชิงตัวเลขแบบทำซ้ำในงานวิจัยนี้

2.2 ผลกระทบของพื้นที่ผิวของแผงระบายความร้อนแบบครีบบatang วงกลมต่อประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อน

แผงระบายความร้อนแบบครีบบatang วงกลมที่ใช้ในการจำลองเชิงตัวเลขของ Huang et. al. [24] ประกอบไปด้วยแผงระบายความร้อน Solid #1 และ Solid #2 เป็นครีบบatang วงกลมแบบทึบ และในส่วนแผงระบายความร้อน Design #3-1 และ Design No.1 เป็นแบบเจาะรูบนครีบบatang วงกลมดังแสดงในรูปที่ 2 โดยในส่วนขนาดของแผงระบายความร้อน ขนาดของครีบบatang วงกลม ตำแหน่งของครีบบatang วงกลม และขนาดรูเจาะบนครีบบatang วงกลม ดังแสดงในรูปที่ 3 และตารางที่ 1



รูปที่ 2 แผงระบายความร้อนแบบครีบบatang วงกลม (ก) Solid #1, (ข) Design #3-1, (ค) Solid #2 และ (ง) Design No.1



รูปที่ 3 ข้อมูลของแผงระบายความร้อนแบบครีบบatang วงกลม (ก) ขนาดของแผงระบายความร้อนและตำแหน่งของครีบบatang วงกลม และ (ข) ขนาดครีบบatang และขนาดรูเจาะบนครีบบatang วงกลม

ตารางที่ 1 ข้อมูลครีบบatang วงกลมของแผงระบายความร้อนของ Huang et. al., [24]

| Pin-fin heat Sinks | D (mm.) | H (mm.) | D _p (mm.) | a (mm.) |
|--------------------|---------|---------|----------------------|---------|
| Solid #1 | 8.00 | 50.00 | - | - |
| Solid #2 | 11.30 | 32.10 | - | - |
| Design #3-1 | 8.00 | 50.00 | 2.00 | 10.00 |
| Design No.1 | 11.30 | 32.10 | 4.42 | 6.42 |

สมการที่ใช้ในการตรวจสอบ และสรุปผลการทดลองของผลการจำลองเชิงตัวเลขที่ใกล้เคียงกับผลการทดลองจริงของ Huang et. al., [24] มีสมการดังต่อไปนี้



$$Nu = \frac{qDh}{k_{air} \left(T_w - \frac{T_{out} + T_{in}}{2} \right)} \quad (8)$$

เมื่อ Nu คือ เลขนัสเซิลต์

q คือ ฟลักซ์ทางความร้อน (W/m^2)

Dh คือ เส้นผ่าศูนย์กลางท่อสี่เหลี่ยม (m)

k_{air} คือ การนำความร้อนของอากาศ ($W/m.K$)

T_w คือ อุณหภูมิเฉลี่ยบนแผ่นฐาน (K)

T_{out} คือ อุณหภูมิทางออก (K)

T_{in} คือ อุณหภูมิทางเข้า (K)

$$Re_h = \frac{\rho U_0 Dh}{\mu} \quad (9)$$

เมื่อ Re_h คือ เลขเรย์โนลด์ส์

ρ คือ ค่าความหนาแน่นของอากาศ (kg/m^3)

U_0 คือ ความเร็วลมของอากาศทางเข้า (m/s)

μ คือ ค่าความหนืดของอากาศ ($kg/m.s$)

$$Dh = \frac{4A}{Pc} \quad (10)$$

เมื่อ A คือ พื้นที่หน้าตัดของช่องสี่เหลี่ยม (m)

Pc คือ เส้นรอบรูปของช่องสี่เหลี่ยม (m)

$$ISA/TVH = \frac{\text{Interfacial surface area between air and heat sink}}{\text{Total volume of heat sink}} \quad (11)$$

ตารางที่ 2 ผลการจำลองเชิงตัวเลข Design No.1, Design #3-1, Solid #1 และ Solid #2 ของ Huang et. al., [24]

| Pin-fin Heat Sinks | Nu | T_w (°C) | Surface Area (mm ²) | Volume (mm ³) | ISA/TVH (mm ⁻¹) |
|--------------------|----------|------------|---------------------------------|---------------------------|-------------------------------|
| Design No.1 | 1,183.59 | 46.49 | 34,313.84 | 63,232 | 0.54 |
| Design #3-1 | 940.00 | 51.46 | 30,612.82 | 63,382 | 0.48 |
| Solid #1 | 888.56 | 52.88 | 27,593.02 | 64,919 | 0.42 |
| Solid #2 | 871.58 | 53.43 | 25,953.74 | 74,882 | 0.35 |

ผลการจำลองเชิงตัวเลขซึ่งผลใกล้เคียงกับผลการทดลองจริงของ Huang et. al. [24] พบว่าค่า Nu มีค่าจากสูงไปยังค่าต่ำตามลำดับดังนี้ Design No.1, Design #3-1, Solid #1 และ Solid #2 แสดงให้เห็นว่า Design No.1 นั้นถ่ายเทความร้อนสูงที่สุดเนื่องจากพื้นที่ผิวของแผงระบายความร้อนมีผลกระทบต่ออัตราการถ่ายเทความร้อนของแผงระบายความร้อน ผู้วิจัยจึงตั้งสมมุติฐานว่าอัตราส่วนของพื้นที่ผิวสัมผัสแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างแผงระบายความร้อนและอากาศ (Interfacial surface area between air and heat sink, ISA) ต่อปริมาตรทั้งหมดของแผงระบายความร้อน (Total volume of heat sink, TVH) ตามสมการที่ 11 มีผลกระทบต่ออัตราการถ่ายเทความร้อนของแผงระบายความร้อน

จากผลพบว่าค่า Nu มีค่าจากสูงไปต่ำตามค่า ISA/TVH ตามลำดับดังนี้ Design No.1, Design #3-1, Solid #1 และ Solid #2 ดังแสดงในตารางที่ 2 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนของแผงระบายความร้อนแบบครีบบั้วทรงกลมทั้ง 4 แบบนี้แปรผันตรงกับ ISA/TVH



2.3 การออกแบบรูปร่างรูเจาะบนครีบบนแท่งวงกลมของแผงระบายความร้อน

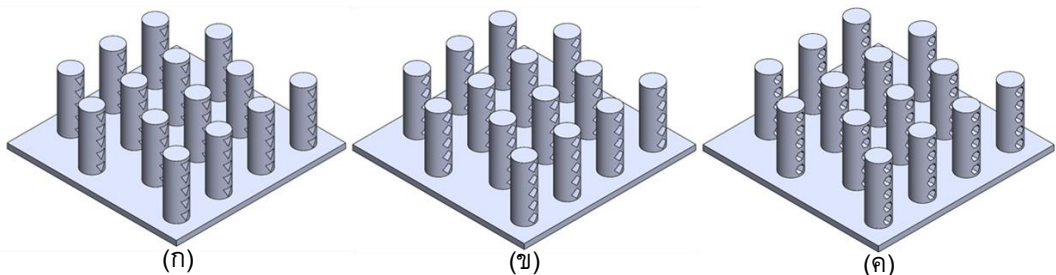
ผู้วิจัยมีความสนใจในการศึกษาผลกระทบของรูปร่างรูเจาะบนครีบบนแท่งวงกลมของแผงระบายความร้อน ผู้วิจัยจึงได้ออกแบบรูปร่างรูเจาะบนครีบบนแท่งวงกลมแบบอื่น ๆ เพิ่มเติมคือ รูปร่างสามเหลี่ยม รูปร่างเพชร และรูปร่างหกเหลี่ยม ดังแสดงในรูปที่ 4 โดยอ้างอิงขนาดและตำแหน่งของครีบบนแท่งวงกลมบนแผงระบายความร้อน Design No. 1 ที่มีรูเจาะรูปร่างวงกลมบนครีบบนแท่งวงกลม ในการศึกษาของ Huang et. al., [24] ซึ่งขนาดของรูเจาะที่มีรูปร่างเพิ่มเติมดังที่กล่าวมานี้ จะถูกออกแบบ และกำหนดขนาดเพื่อให้มีค่า ISA/TVH เท่ากับแผงระบายความร้อนแบบเจาะรูรูปร่างวงกลมบนครีบบนแท่งวงกลมหรือ Design No. 1 ที่มีค่า ISA/TVH เท่ากับ 0.54 mm^{-1} เพื่อควบคุมตัวแปรของพื้นที่ผิวของแผงระบายความร้อนที่มีผลกระทบต่อประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนให้มีความคงที่

ในงานวิจัยนี้ผู้วิจัยได้ใช้สมการสมรรถนะการถ่ายเทความร้อน (Thermal enhancement factor, TEF) ตามสมการที่ 12 มาวิเคราะห์ผลกระทบของรูปร่างรูเจาะต่าง ๆ บนครีบบนแท่งวงกลมต่อสมรรถนะ

การถ่ายเทความร้อนของแผงระบายความร้อนแบบครีบบนแท่งวงกลม เนื่องจาก TEF คำนึงประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อน (Nu / Nu_0) ต่อการสูญเสียความดันภายในระบบที่เกิดจากแรงเสียดทานของแผงระบายความร้อน $(f / f_0)^{1/3}$ [26-28] โดยกำหนดให้แผงระบายความร้อนแบบครีบบนแท่งวงกลม Solid #2 (Nu_0 และ f_0) เปรียบเทียบกับแผงระบายความร้อนแบบเจาะรูรูปร่างต่าง ๆ บนครีบบนแท่งวงกลม (Nu และ f) มีสมการดังนี้

$$TEF = \frac{\left(\frac{Nu}{Nu_0} \right)}{\left(\frac{f}{f_0} \right)^{1/3}} \quad (12)$$

- เมื่อ TEF คือ สมรรถนะการถ่ายเทความร้อน
- Nu คือ เลขนัสเซิลต์ของแผงระบายความร้อนแบบเจาะรูบนครีบบนแท่งวงกลม
- Nu_0 คือ เลขนัสเซิลต์ของแผงระบายความร้อนแบบครีบบนแท่งวงกลมที่ Solid #2
- f คือ แรงเสียดทานของแผงระบายความร้อนแบบเจาะรูบนครีบบนแท่งวงกลม
- f_0 คือ แรงเสียดทานของแผงระบายความร้อนแบบครีบบนแท่งวงกลมที่ Solid #2



รูปที่ 4 แผงระบายความร้อนแบบรูเจาะบนครีบบนแท่งวงกลม (ก) รูปร่างสามเหลี่ยม (ข) รูปร่างเพชร และ (ค) รูปร่างหกเหลี่ยม



$$f = \frac{\left(\frac{\Delta P}{L}\right) Dh}{\frac{1}{2} \rho U_0^2} \quad (13)$$

เมื่อ ΔP คือ ความดันลด (Pa)

L คือ ระยะความยาวของท่อสี่เหลี่ยม (m)

$$\Delta P = P_{in} - P_{out} \quad (14)$$

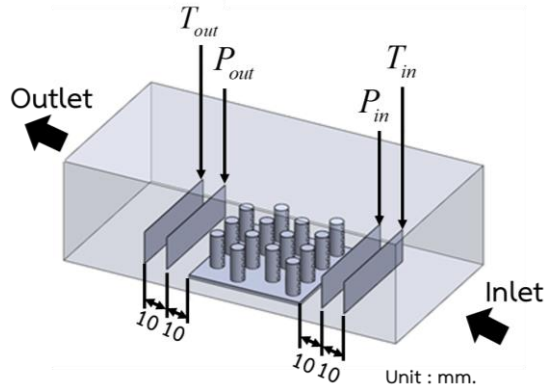
เมื่อ P_{in} คือ ความดันทางเข้า (Pa)

P_{out} คือ ความดันทางออก (Pa)

จากการจำลองเชิงตัวเลขผู้วิจัยได้กำหนดจุดวัดค่า P_{in} , P_{out} , T_{in} และ T_{out} โดยการหาค่าเฉลี่ยบนระนาบที่ตั้งแสดงในรูปที่ 5 เพื่อใช้ในการคำนวณหาค่า Nu , f และ TEF

3. ผลการทดลองและการอภิปรายผล

ในการจำลองเชิงตัวเลขผู้วิจัยกำหนดโครงสร้างเป็นแบบกริดไร้โครงสร้าง (Unstructured Grid) โดยควบคุมคุณภาพกริดด้วยความเบ้ (Skewness) มีค่าน้อยกว่า 0.25 ซึ่งกำหนดวิธีการแก้ปัญหาเป็นแบบ Pressure-based coupled solver และรูปแบบการแก้ปัญหาของมวล, โมเมนตัม, พลังงาน, พลังงานจลน์ของความปั่นป่วน และอัตราการกระจายพลังงานจลน์ของความปั่นป่วนด้วยสมการอันดับ 2 (Second order) โดยใช้ระเบียบวิธีเชิงตัวเลขแบบทำซ้ำได้ถูกนำมาแก้ปัญหาระบบสมการพีชคณิตของปัญหาและค่าการลู่เข้าของระบบสมการนั้นกำหนดให้ค่าความแตกต่าง (Residual of Physical Quantities) ต้องมีค่าน้อยกว่า 10^{-3} ในการทดลองหาจำนวนกริดที่เหมาะสมในการจำลองเชิงตัวเลข ผู้วิจัยได้สร้างกริด 5 จำนวน สำหรับการจำลองเชิงตัวเลขของแผง



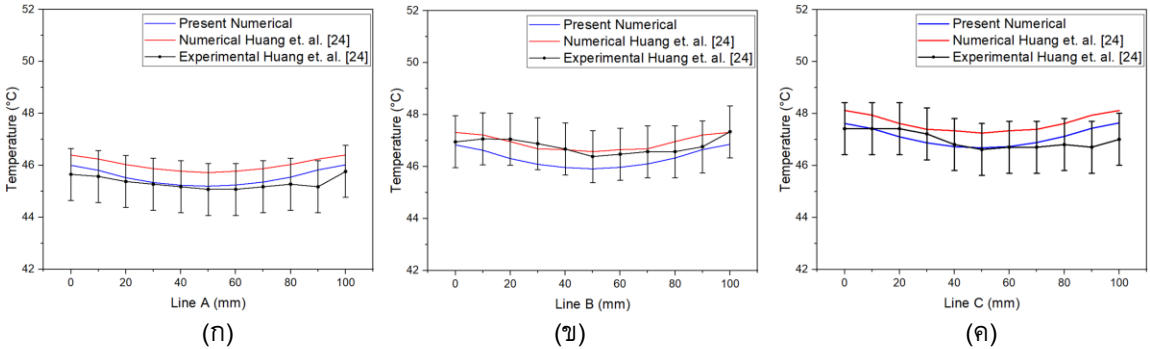
รูปที่ 5 แสดงตำแหน่งจุดวัดค่าเฉลี่ยบนระนาบ P_{in} , P_{out} , T_{in} และ T_{out}

ระบายความร้อนแบบเจาะรูรูปร่างวงกลมบนครีบท่างวงกลม (Design No.1) ดังนี้ 1.3×10^6 , 1.4×10^6 , 1.5×10^6 , 1.6×10^6 และ 1.7×10^6 จากผลการจำลองเชิงตัวเลขตามจำนวนกริดพบว่าค่า T_w เท่ากับ 46.451°C , 46.396°C , 46.362°C , 46.337°C และ 46.332°C ตามลำดับ ซึ่งค่าผิดพลาดสัมพัทธ์ของ T_w ระหว่างจำนวนกริดเท่ากับ 1.6×10^6 และ 1.7×10^6 แค่เพียง 0.01% จึงไม่จำเป็นต้องสร้างกริดไปมากกว่านี้ ผู้วิจัยจึงนำจำนวนกริด 1.6×10^6 มาใช้ในการจำลองเชิงตัวเลขทั้งหมด

เพื่อตรวจสอบความถูกต้องของการจำลองเชิงตัวเลขโดยการวัดอุณหภูมิตาม Line A, Line B และ Line C ดังแสดงในรูปที่ 3 ซึ่งผู้วิจัยได้นำผลการจำลองเชิงตัวเลขของแผงระบายความร้อนแบบเจาะรูรูปร่างวงกลมบนครีบท่างวงกลม (Design No.1) มาเปรียบเทียบกับผลการจำลองเชิงตัวเลขและการทดลองจริงของ Huang et. al. [24] พบว่ามีค่าผิดพลาดไม่เกิน 1°C ดังแสดงในรูปที่ 6



บทความวิจัย



รูปที่ 6 อุณหภูมิบนแผ่นฐานของแผงระบายความร้อนแบบเจาะรูรูปร่างวงกลมบนครีบบางวงกลม (Design No.1)

(ก) Line A (ข) Line B และ (ค) Line C

3.1 ผลกระทบของรูปร่างการเจาะรูบนครีบบางวงกลมต่อประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนของแผงระบายความร้อน

จากการวัดอุณหภูมิของแผงระบายความร้อนแบบเจาะรูรูปร่างต่าง ๆ บนครีบบางวงกลม ได้แก่ รูปร่างเพชร รูปร่างสามเหลี่ยม รูปร่างหกเหลี่ยม และรูปร่างวงกลมดังแสดงในรูปที่ 7 และรูปที่ 8 พบว่าค่า T_w เท่ากับ 48.904°C, 47.706°C, 46.528°C และ 46.337°C ตามลำดับ ซึ่งการเจาะรูรูปร่างต่าง ๆ บนครีบบางวงกลม ช่วยลดอุณหภูมิในแผงระบายความร้อนเมื่อเปรียบเทียบกับแผงระบายความร้อนแบบครีบบางวงกลมที่บ Solid #2 ที่มีค่า T_w เท่ากับ 53.038°C จากผลค่า Nu ยิ่งมีค่าสูงขึ้นเป็นผลเนื่องมาจาก T_w มีค่าต่ำลง ซึ่งแผงระบายความร้อนแบบเจาะรูรูปร่างวงกลมบนครีบบางวงกลมมีค่า Nu สูงที่สุด ดังแสดงในตารางที่ 3

Al-Damook et. al., [29] กล่าวว่าความเร็วลมที่เพิ่มขึ้นระหว่างครีบบาง และความเร็วมที่ผ่านรูเจาะมีส่วนช่วยให้เพิ่มประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนแบบ

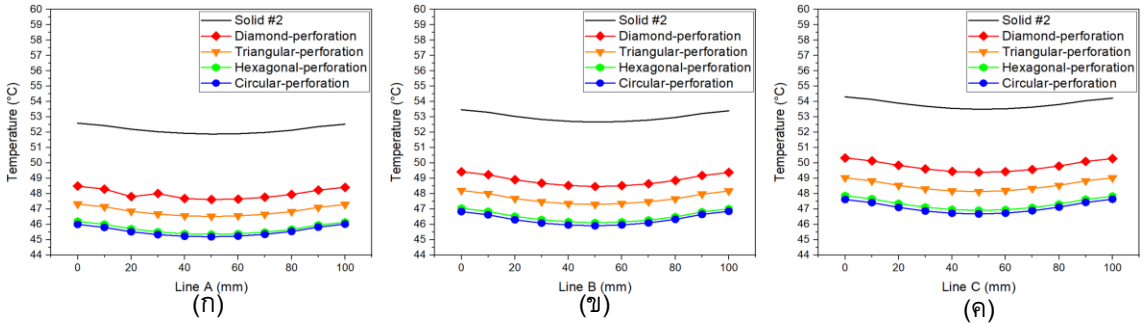
การพาความร้อน ผู้วิจัยจึงวัดค่าเฉลี่ยความเร็วลมในรูเจาะทั้งหมดบนครีบบางวงกลมบนระนาบแนวนอนและแนวตั้ง (U_{Hole}) พบว่าค่า U_{Hole} แปรผันตรงตามค่า Nu ดังแสดงในตารางที่ 3 และรูปที่ 9 ซึ่งแผงระบายความร้อนแบบเจาะรูรูปร่างวงกลมบนครีบบางวงกลมมีค่า U_{Hole} สูงที่สุด

ตารางที่ 3 ผลของการจำลองเชิงตัวเลขในการศึกษาผลกระทบของรูปร่างการเจาะรูบนครีบบางวงกลมต่อประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนของแผงระบายความร้อน

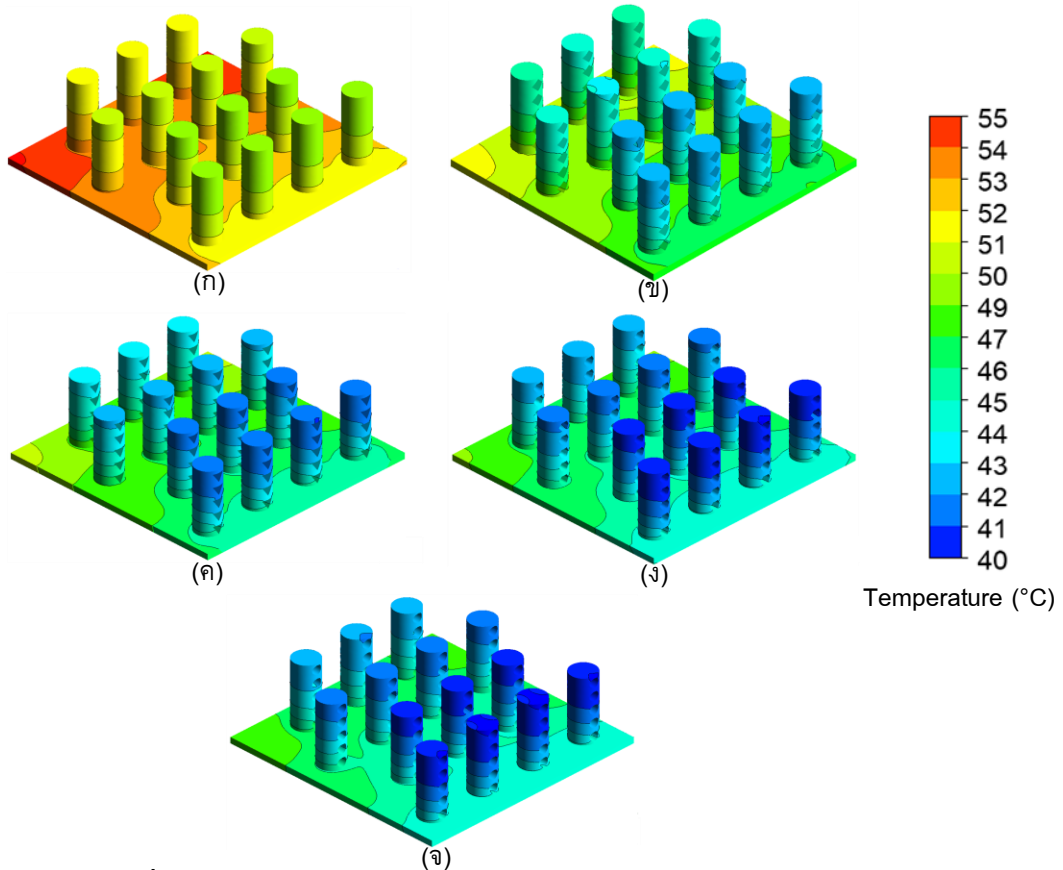
| Pin-fin Heat Sinks | T_w (°C) | Nu | U_{Hole} (m/s) |
|------------------------|---------------|-----------|---------------------|
| Solid #2 | 53.038 | 849.058 | 0.000 |
| Diamond-perforation | 48.904 | 1,016.064 | 3.371 |
| Triangular-perforation | 47.706 | 1,079.930 | 3.420 |
| Hexagonal-perforation | 46.528 | 1,144.715 | 3.625 |
| Circular-perforation | 46.337 | 1,157.011 | 3.641 |



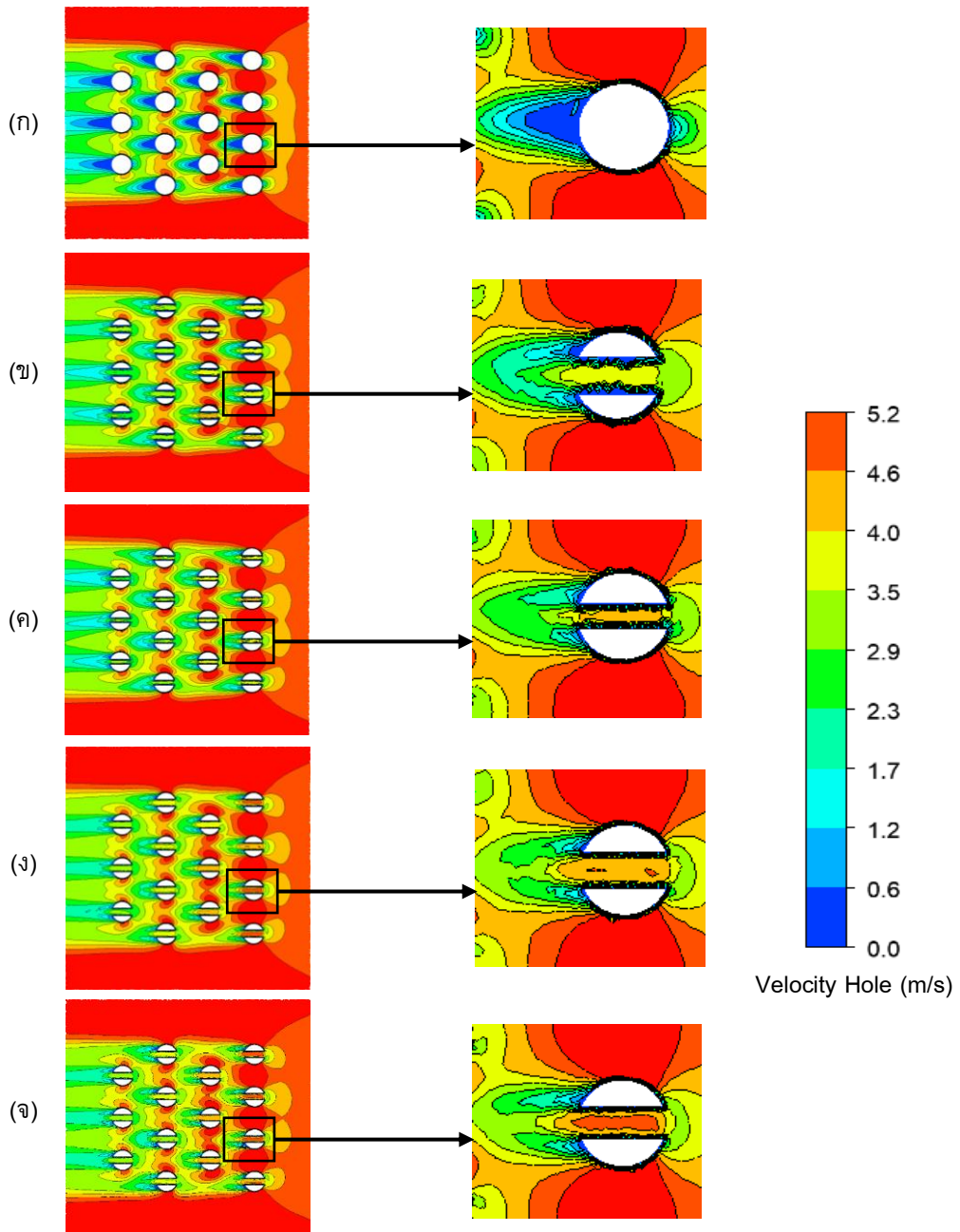
บทความวิจัย



รูปที่ 7 อุณหภูมิบนพื้นฐานของแผงระบายความร้อนแบบค้ำยันวงกลม Solid #2, Diamond-perforation, Triangular-perforation, Hexagonal-perforation และ Circular-perforation
(ก) Line A (ข) Line B และ (ค) Line C



รูปที่ 8 การกระจายอุณหภูมิของแผงระบายความร้อนแบบค้ำยันวงกลม: (ก) Solid #2, (ข) Diamond-perforation, (ค) Triangular-perforation, (ง) Hexagonal-perforation และ (จ) Circular-perforation



รูปที่ 9 ความเร็วลมบนระนาบแนว Horizontal 3 ของแผงระบายความร้อนแบบคี่รับแท่งวงกลม: (ก) Solid #2, (ข) Diamond-perforation, (ค) Triangular-perforation, (ง) Hexagonal-perforation และ (จ) Circular-perforation



3.2 ผลกระทบของรูปร่างการเจาะรูบนครีบบั่แกววงกลมต่อความดันลดของแผงระบายความร้อน

จากการจำลองเชิงตัวเลขของแผงระบายความร้อนแบบเจาะรูรูปร่างต่าง ๆ บนครีบบั่แกววงกลม ได้แก่วรูปร่างวงกลม รูปร่างหกเหลี่ยม รูปร่างเพชร และรูปร่างสามเหลี่ยม พบว่า ΔP เท่ากับ 6.782Pa, 6.851Pa, 7.126Pa และ 7.310Pa ตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 4 แสดงให้เห็นถึงการเพิ่มขึ้นของขนาดพื้นที่หน้าตัดตามแนวขวางของรูเจาะ (A_{Hole}) ที่ตั้งฉากกับการไหลของลมส่งผลกระทบต่อให้ ΔP นั้นลดลง ซึ่งการเจาะรูรูปร่างวงกลมบนครีบบั่แกววงกลมที่มีค่า A_{Hole} สูงที่สุด จะมีค่า ΔP ต่ำที่สุด ทั้งนี้เนื่องมาจากขนาด A_{Hole} ที่ใหญ่ขึ้นจะทำให้อากาศไหลผ่านได้ง่ายขึ้น

3.3 ผลกระทบของรูปร่างการเจาะรูบนครีบบั่แกววงกลมต่อสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนของแผงระบายความร้อน

จากการจำลองเชิงตัวเลขของแผงระบายความร้อนแบบเจาะรูรูปร่างต่าง ๆ บนครีบบั่แกววงกลม ได้แก่วรูปร่างเพชร รูปร่างสามเหลี่ยม รูปร่างหกเหลี่ยม และรูปร่างวงกลม พบว่ามีค่า TEF เท่ากับ 1.236, 1.303, 1.411 และ 1.431 ตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 5 แสดงให้เห็นว่ารูปร่างการเจาะรูบนครีบบั่แกววงกลมส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อน (Nu / Nu_0) ต่อการสูญเสียความดันภายในระบบที่เกิดจากแรงเสียดทาน $(f / f_0)^{1/3}$ ซึ่งทำให้มีค่า TEF ที่ต่างกัน ซึ่งพบว่าการเจาะรูรูปร่างวงกลมบนครีบบั่แกววงกลมของแผงระบายความร้อนมีค่า TEF สูงที่สุด

ตารางที่ 4 ผลของการจำลองเชิงตัวเลขในการศึกษาของผลกระทบของรูปร่างการเจาะรูบนครีบบั่แกววงกลมต่อความดันลดของแผงระบายความร้อน

| Pin-fin Heat Sinks | ΔP (Pa) | A_{Hole} (mm ²) |
|------------------------|-----------------|-------------------------------|
| Circular-perforation | 6.782 | 15.344 |
| Hexagonal-perforation | 6.851 | 14.420 |
| Diamond-perforation | 7.126 | 13.213 |
| Triangular-perforation | 7.310 | 11.176 |
| Solid #2 | 7.855 | 0.000 |

ตารางที่ 5 ผลของการจำลองเชิงตัวเลขในการศึกษาของผลกระทบของรูปร่างการเจาะรูบนครีบบั่แกววงกลมต่อสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนของแผงระบายความร้อน

| Pin-fin Heat Sinks | Nu | f | TEF |
|------------------------|-----------|-------|-------|
| Solid #2 | 849.058 | 0.197 | 1.000 |
| Diamond-perforation | 1,016.064 | 0.179 | 1.236 |
| Triangular-perforation | 1,079.930 | 0.184 | 1.303 |
| Hexagonal-perforation | 1,144.715 | 0.172 | 1.411 |
| Circular-perforation | 1,157.011 | 0.170 | 1.431 |

4. บทสรุป

จากการออกแบบรูปร่างรูเจาะบนครีบบั่แกววงกลมของแผงระบายความร้อนมีดังนี้ รูปร่างสามเหลี่ยม รูปร่างเพชร และรูปร่างหกเหลี่ยม โดยอ้างอิงขนาดและตำแหน่งแผงระบายความร้อนแบบเจาะรูรูปร่างวงกลมบนครีบบั่แกววงกลมหรือ Design No. 1 ที่มีค่า ISA/TVH เท่ากับ 0.54 mm⁻¹ เพื่อควบคุมตัวแปรของพื้นที่ผิวของแผงระบายความร้อนที่มีผลกระทบต่อ



ประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนให้มีค่าคงที่ โดยใช้สมการสมรรถนะการถ่ายเทความร้อน (TEF) มาวิเคราะห์ผลกระทบของรูปร่างรูเจาะต่าง ๆ บนครีบบางวงกลมต่อ TEF ของแผงระบายความร้อนแบบครีบบางวงกลม ซึ่งมีข้อสรุปผลจากการจำลองเชิงวิธีเชิงตัวเลขได้ดังนี้

- ประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อน (Nu) ที่สูงขึ้นเนื่องมาจากการเจาะรูรูปร่างต่าง ๆ บนครีบบางวงกลมเมื่อเปรียบเทียบกับครีบบางวงกลมทึบของแผงระบายความร้อน มีค่าจากต่ำไปสูงดังนี้ รูปร่างเพชร รูปร่างสามเหลี่ยม รูปร่างหกเหลี่ยม และรูปร่างวงกลม ซึ่งการเจาะรูรูปร่างวงกลมมีค่า Nu สูงที่สุด

- ผลกระทบของรูปร่างการเจาะรูบนครีบบางวงกลมต่อประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อน (Nu) ที่สูงขึ้นเนื่องจากค่าเฉลี่ยความเร็วลมในรูเจาะทั้งหมดบนครีบบางวงกลมบนระนาบแนวนอนและแนวตั้ง (U_{Hole}) ที่สูงขึ้นมีค่าจากต่ำไปสูงดังนี้ รูปร่างเพชร รูปร่างสามเหลี่ยม รูปร่างหกเหลี่ยม และรูปร่างวงกลม ซึ่งการเจาะรูรูปร่างวงกลมมีค่า U_{Hole} มีค่าสูงที่สุด

- ความดันลด (ΔP) ที่ลดลงเนื่องมาจากการเจาะรูรูปร่างต่าง ๆ บนครีบบางวงกลมเมื่อเปรียบเทียบกับครีบบางวงกลมทึบของแผงระบายความร้อน มีค่าจากต่ำไปสูงดังนี้ รูปร่างวงกลม รูปร่างหกเหลี่ยม รูปร่างเพชร และรูปร่างสามเหลี่ยม ซึ่งการเจาะรูรูปร่างวงกลมมีค่า ΔP มีค่าต่ำที่สุด

- ผลกระทบของรูปร่างการเจาะรูบนครีบบางวงกลมต่อความดันลด (ΔP) ที่ลดลงของแผงระบายความร้อนเนื่องจากขนาดพื้นที่หน้าตัดตามแนวขวางของรูเจาะ (A_{Hole}) ที่เพิ่มขึ้น มีค่าจากสูงไปต่ำดังนี้ รูปร่างวงกลม

รูปร่างหกเหลี่ยม รูปร่างเพชร และรูปร่างสามเหลี่ยม ซึ่งการเจาะรูรูปร่างวงกลมมีค่า A_{Hole} มีค่าสูงที่สุด

- เนื่องจากรูปร่างการรูเจาะมีผลกระทบต่อประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อน (Nu / Nu_0) และการสูญเสียความดันภายในระบบที่เกิดจากแรงเสียดทาน (f / f_0)^{1/3} จึงทำให้มีค่า TEF ที่ต่างกัน โดยมีค่าจากต่ำไปสูงดังนี้ รูปร่างเพชร รูปร่างสามเหลี่ยม รูปร่างหกเหลี่ยม และรูปร่างวงกลม ซึ่งการเจาะรูรูปร่างวงกลมมีค่า TEF มีค่าสูงที่สุด และเมื่อเทียบกับแผงระบายความร้อนแบบครีบบางวงกลมทึบ TEF เพิ่มขึ้นถึง 43.1 %

5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนจากวิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือตามสัญญาเลขที่ CIT-2020-GRAD-05

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] K. Altaf, A. Tariq, S.W. Ahmad, G. Hussain, T.A.H. Ratlamwala and H.M. Ali, Thermal and hydraulic analysis of slotted plate fins heat sinks using numerical and experimental techniques, Case Studies in Thermal Engineering, 2022, 35, 102109.
- [2] K. Nilpueng, H.S. Ahn, D.W. Jerng and S. Wongwises, Heat transfer and flow characteristics of sinusoidal wavy plate fin heat sink with and without crosscut flow control, International Journal of Heat and Mass Transfer, 2019, 137, 565-572.



- [3] M.A.H. Abdelmohimen, K. Almutairi, M.A. Elkotb, H.E. Abdelrahman and S. Algarni, Numerical investigation of using different arrangement of fin slides on the plate-fin heat sink performance, *Thermal Science*, 2021, 25(6B), 4683-4693.
- [4] E.C. Silva, Á.M. Sampaio and A.J. Pontes, Evaluation of active heat sinks design under forced convection-effect of geometric and boundary parameters, *Materials*, 2021, 14, 2041.
- [5] D. Soodphakdee, M. Behnia and D.W. Copeland, A comparison of fin geometries for heatsinks in laminar forced convection: part i – round, elliptical, and plate fins in staggered and in-line configurations, *The International Journal of Microcircuits and Electronic Packaging*, 2001, 24(1), 68-76.
- [6] E.H. Muhammad, A comparison of the heat transfer performance of a hexagonal pin fin with other types of pin fin heat sinks, *International Journal of Science and Research*, 2015, 4(9), 1781-1789.
- [7] K. Bilen, U. Akyol and S. Yapici, Heat transfer and friction correlations and thermal performance analysis for a finned surface, *Energy Conversion and Management*, 2001, 42(9), 1071-1083.
- [8] O.N. Şara, Performance analysis of rectangular ducts with staggered square pin fins, *Energy Conversion and Management*, 2003, 44(11), 1787-1803.
- [9] P. Naphon and A. Sookkasem, Investigation on heat transfer characteristics of tapered cylinder pin fin heat sinks, *Energy Conversion and Management*, 2007, 48(10), 2671-2679.
- [10] B. Sahin and A. Demir, Thermal performance analysis and optimum design parameters of heat exchanger having perforated pin fins, *Energy conversion and management*, 2008, 49(6), 1684-1695.
- [11] B. Sahin and A. Demir, Performance analysis of a heat exchanger having perforated square fins, *Applied Thermal Engineering*, 2008, 28(5-6), 621-632.
- [12] M. Baruah, A. Dewan and P. Mahanta, Performance of elliptical pin fin heat exchanger with three elliptical perforations, *CFD Letters*, 2011, 3(2), 65-73.
- [13] A. Al-Damook, N. Kapur, J.L. Summers and H.M. Thompson, An experimental and computational investigation of thermal air flows through perforated pin heat sinks, *Applied thermal engineering*, 2015, 89, 365-376.



- [14] A. Al-Damook, J.L. Summers, N. Kapur and H. Thompson, Effect of temperature-dependent air properties on the accuracy of numerical simulations of thermal airflows over pinned heat sinks, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 2016, 78, 163-167.
- [15] V.V. Dhole, V.S. Shinde and S.S. Kore, Thermal and hydraulic performance analysis of cylindrical pin fin heat sink with conical perforations, *International Journal of Current Engineering and Technology*, 2016, 5, 436-440.
- [16] W. Al-Sallami, A. Al-Damook and H.M. Thompson, A numerical investigation of thermal airflows over strip fin heat sinks, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 2016, 75, 183-191.
- [17] C.H. Wu, H.W. Tang and Y.T. Yang, Numerical simulation and optimization of turbulent flows through perforated circular pin fin heat sinks, *Numerical Heat Transfer, Part A: Applications*, 2017, 71(2), 172-188.
- [18] A.S. Tijani and N.B. Jaffri, Thermal analysis of perforated pin-fins heat sink under forced convection condition, *Procedia Manufacturing*, 2018, 24, 290-298.
- [19] M. Hatem, H. Abdellatif and W. Hussein, Enhancement of perforated pin-fins heat sink under forced convection, *International Research Journal of Engineering and Technology*, 2020, 7(10), 1440-1445.
- [20] N.A. Ghyadh, S.S. Ahmed and M.A.R.S. Al-Baghdadi, Enhancement of forced convection heat transfer from cylindrical perforated fins heat sink-CFD study, *Journal of Mechanical Engineering Research and Developments*, 2021, 44(3), 407-419.
- [21] S.S. Kore, R. Yadav, S. Chinchankar, P. Tipole and V. Dhole, Experimental investigations of conical perforations on the thermal performance of cylindrical pin fin heat sink, *International Journal of Ambient Energy*, 2022, 43(1), 3431-3442.
- [22] S.B. Chin, J.J. Foo, Y.L. Lai and T.K.K. Yong, Forced convective heat transfer enhancement with perforated pin fins, *Heat and Mass Transfer*, 2013, 49, 1447-1458.
- [23] C.H. Huang, Y.C. Liu and H. Ay, The design of optimum perforation diameters for pin fin array for heat transfer enhancement, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2015, 84, 752-765.



- [24] C.H. Huang and M.H. Chen, An estimation of the optimum shape and perforation diameters for pin fin arrays, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2019, 131, 72-84.
- [25] Y.T. Yang and H.S. Peng, Numerical study of the heat sink with un-uniform fin width designs, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2009, 52(15-16), 3473-3480.
- [26] A. Boonloi and W. Jedsadaratanachai, Numerical investigation on turbulent forced convection and heat transfer characteristic in a square channel with discrete combined V-baffle and V-orifice, *Case Studies in Thermal Engineering*, 2016, 8, 226-235.
- [27] A. Boonloi and W. Jedsadaratanachai, Numerical study on flow and heat transfer mechanisms in the heat exchanger channel with V-orifice at various blockage ratios, gap spacing ratios, and flow directions, *Modelling and Simulation in Engineering*, 2019, 2019, 8656435.
- [28] A. Boonloi and W. Jedsadaratanachai, CFD analysis on heat transfer characteristics and fluid flow structure in a square duct with modified wavy baffles, *Case Studies in Thermal Engineering*, 2022, 29, 101660.
- [29] A. Al-Damook, N. Kapur, J.L. Summers and H.M. Thompson, Computational design and optimisation of pin fin heat sinks with rectangular perforations, *Applied Thermal Engineering*, 2016, 105, 691-703.



การประเมินความเสี่ยงด้านสุขภาพจากการสัมผัสฝุ่น $PM_{2.5}$ ในระยะเริ่มต้นพัฒนาโครงการพื้นที่ระเบียงเศรษฐกิจพิเศษภาคตะวันออก ในช่วงฤดูแล้ง ปี 2022: กรณีศึกษาพื้นที่เมืองระยอง

ศุภิระ บุตรดี^{1*} ศุภานัน ทิพยางกูร¹ ศศิธร ทิมอยู่¹ และ แสง กาวิชัย²

¹ สาขาวิชากระบวนการอุตสาหกรรมเคมีและสิ่งแวดล้อม, คณะวิทยาศาสตร์พลังงานและสิ่งแวดล้อม, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ วิทยาเขตระยอง

² สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์สุขภาพ, มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

* ผู้ประสานงานเผยแพร่ (Corresponding Author), E-mail: susira.b@sciee.kmutnb.ac.th

วันที่รับบทความ: 5 กันยายน 2565; วันที่ทบทวนบทความ: 30 พฤศจิกายน 2565; วันที่ตอบรับบทความ: 3 มกราคม 2566

วันที่เผยแพร่ออนไลน์: 21 มีนาคม 2566

บทคัดย่อ: การหายใจรับฝุ่น $PM_{2.5}$ มีผลต่อปัญหาสุขภาพของมนุษย์ ซึ่งอาจจะเป็นสาเหตุการก่อมะเร็งและเพิ่มอัตราการเสียชีวิต การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินความเสี่ยงการก่อมะเร็งในมนุษย์จากการสัมผัสฝุ่น $PM_{2.5}$ ที่ปล่อยมาจากพื้นที่อุตสาหกรรมของจังหวัดระยอง ในช่วงฤดูแล้ง ปี พ.ศ. 2565 ทำการเก็บตัวอย่างฝุ่น $PM_{2.5}$ บนกระดาษกรองแบบเทพรอน ด้วยเครื่องเก็บตัวอย่างฝุ่นละออง PQ 200 โดยพบว่าความเข้มข้นเฉลี่ยของฝุ่น $PM_{2.5}$ มีค่า $20.1 \pm 10.9 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ($4.9\text{-}52.3 \mu\text{g}/\text{m}^3$) และไม่พบความแตกต่างกันของปริมาณฝุ่น $PM_{2.5}$ ของแต่ละเดือนอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$) ผลการประเมินความเสี่ยงต่อสุขภาพจากการสัมผัสฝุ่น $PM_{2.5}$ ด้วยวิธีการคำนวณค่าความเสี่ยงในการก่อมะเร็งในตลอดช่วงชีวิต (R_{lc}) พบว่า ค่าเฉลี่ย R_{lc} ของวัยเด็ก วัยรุ่น และวัยผู้ใหญ่ อยู่ในช่วง 10^{-6} ถึง 10^{-4} ซึ่งบ่งชี้ว่า ภาวะความเสี่ยงการก่อมะเร็งที่ยอมรับได้ และวัยเด็กเล็ก ช่วงอายุ 1-5 ปี มีค่า R_{lc} สูงที่สุด ดังนั้นในระยะยาวเด็กมีโอกาสดังกล่าวได้รับฝุ่น $PM_{2.5}$ เข้าสู่ระบบทางเดินหายใจได้มากกว่าผู้ใหญ่

คำสำคัญ: ฝุ่น $PM_{2.5}$; มลพิษทางอากาศ; การประเมินความเสี่ยงต่อสุขภาพ; ค่าความเสี่ยงในการก่อมะเร็งในตลอดช่วงชีวิต (R_{lc})



Health Risk Assessment of PM_{2.5} Exposure in the Initiative of the Eastern Economic Corridor Area Project during Dry Season in 2022: Case Study of Rayong City

Susira Bootdee^{1*}, Supanan Tipayangkul¹, Sasithorn Timyoo¹ and Sawaeng Kawichai²

¹ Chemical Industrial Process and Environment, Faculty of Science, Energy and Environment, King Mongkut's University of Technology North Bangkok (Rayong Campus)

² Research Institute for Health Sciences, Chiang Mai University

* Corresponding author, E-mail: susira.b@sciee.kmutnb.ac.th

Received: 5 September 2022; Revised: 30 November 2022; Accepted: 3 January 2023

Online Published: 21 March 2023

Abstract: Inhaling PM_{2.5} has been linked to a variety of impacts on human health, including cancer and increased mortality. The objective of this study is to investigate the carcinogenic risk of PM_{2.5} released from an industrial area in Rayong province during the dry seasons of 2022. A PQ 200 air sampler was used to collect PM_{2.5} samples on Teflon filters. The average PM_{2.5} concentrations during the dry season were observed to be 20.1±10.9 µg/m³ (4.9-52.3 µg/m³). Additionally, there was no apparent difference in the average PM_{2.5} concentrations during any month ($p>0.05$). Furthermore, the health risks of PM_{2.5} exposure were assessed using the individual lifetime cancer risk (R_{ic}), with the results revealing that the average R_{ic} values for children, teenagers, and adults in the dry season varied from 10⁻⁶ to 10⁻⁴, indicating probable carcinogenic health risks with young children aged 1-5 years having the highest of R_{ic} values. As a result, children are more likely than adults to exposure to more PM_{2.5} in their respiratory system for a long time.

Keywords: Fine particles (PM_{2.5}); Air pollution; Health risk assessment; the individual lifetime cancer risk (R_{ic})



1. บทนำ

ในสถานการณ์สิ่งแวดล้อมปัจจุบัน ฝุ่นละอองขนาดเล็กในบรรยากาศ ถือเป็นมลพิษทางอากาศที่สำคัญและอาจส่งผลกระทบต่อการดำรงชีวิตของประชากรทั่วโลก โดยเฉพาะฝุ่นละอองขนาดเล็กกว่า 2.5 ไมครอน (ฝุ่น $PM_{2.5}$) หรือฝุ่นละเอียด (Fine Particulate Matters) ซึ่งเป็นฝุ่นละอองที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเล็กกว่า 2.5 ไมครอน แต่ส่วนใหญ่ฝุ่น $PM_{2.5}$ จะเป็นอนุภาคทุติยภูมิที่เกิดขึ้นในบรรยากาศ เมื่อมีแก๊สต่าง ๆ เช่น ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO_2) ก๊าซไนโตรเจนไดออกไซด์ (NO_2) และสารประกอบอินทรีย์ระเหยง่าย (Volatile Organic Compounds: VOCs) โดยเกิดจากการเผาไหม้เชื้อเพลิง ถูกเปลี่ยนรูปในอากาศ โดยทำปฏิกิริยาทางเคมีและฟิสิกส์ ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงวิฤภาคจากแก๊สไปอยู่ในรูปของอนุภาคที่อยู่ในอากาศ มีช่วงเวลาที่อยู่ในอากาศเป็นระยะเวลายาวนานสามารถลอยอยู่ในอากาศได้เป็นเวลาหนึ่งปี [1-3] อย่างไรก็ตามการศึกษาก่อนหน้านี้ พบว่ามีสารมลพิษทางอากาศที่ตรึงอยู่กับฝุ่น $PM_{2.5}$ เป็นกลุ่มสารมลพิษที่ก่อโรคมะเร็ง ได้แก่ กลุ่มโลหะหนัก เช่น แคดเมียม (Cd) สารหนู (As) โครเมียม (Cr) นิกเกิล (Ni) และตะกั่ว (Pb) เป็นต้น กลุ่มสารพอลิไซคลิกอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอน (Polycyclic Aromatic Hydrocarbons: PAHs) และสารประกอบอินทรีย์ระเหยง่าย (Volatile Organic Compounds: VOCs) [4-7] ซึ่งการสัมผัสฝุ่น $PM_{2.5}$ อาจส่งผลกระทบต่อสุขภาพได้ในระยะยาว

ฝุ่น $PM_{2.5}$ มีแหล่งกำเนิดจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงจากการจราจร ไฟป่า การเผาในที่โล่ง และโรงงานอุตสาหกรรมที่ใช้เชื้อเพลิง ฟอสซิล เช่น ถ่านหิน น้ำมัน ก๊าซธรรมชาติ เป็นต้น [8, 9] ดังนั้น พื้นที่ที่จะได้รับ

ผลกระทบจากปัญหาฝุ่น $PM_{2.5}$ จะเป็นพื้นที่เขตเมืองที่มีการจราจรหนาแน่น และพื้นที่เขตเมืองอุตสาหกรรมที่มีการใช้เชื้อเพลิงถ่านหิน ก๊าซธรรมชาติ และชีวมวล เป็นต้น เนื่องจากฝุ่น $PM_{2.5}$ มีขนาดเล็กมาก สามารถเข้าไปในถุงลมปอดของร่างกายโดยเล็ดลอดผ่านผนังถุงลมเข้าสู่เส้นเลือดฝอยและกระจายอยู่ในกระแสเลือด ความเป็นอันตรายต่อร่างกายขึ้นอยู่กับค่าความเข้มข้นของฝุ่น $PM_{2.5}$ รวมถึงระยะเวลาที่สัมผัสและสภาพร่างกายของผู้ที่สูดหายใจเข้าไป ผู้ที่มีความเสี่ยงสูงที่จะได้รับผลกระทบคือ เด็กและคนชรา เมื่อสูดดมหายใจเข้าไปทำให้มีความเสี่ยงในการเกิดโรคในระบบทางเดินหายใจและโรคปอดต่าง ๆ โรคหลอดเลือดในสมอง โรคหัวใจขาดเลือด โรคมะเร็งปอด [10-12] นอกจากนี้ องค์การอนามัยโลก (World Health Organization: WHO) ได้กำหนดให้ฝุ่นละอองขนาดเล็กในบรรยากาศเป็นสารก่อมะเร็ง [13] โดยมีการกำหนดค่ามาตรฐานของฝุ่น $PM_{2.5}$ ในบรรยากาศเฉลี่ยรายวัน (24 ชั่วโมง) มีค่า $15 \mu\text{g}/\text{m}^3$ และ องค์การพิทักษ์สิ่งแวดล้อมสหรัฐอเมริกา (United States Environmental Protection Agency: US-EPA) มีค่า $35 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ส่วนในประเทศไทย กรมควบคุมมลพิษ (Pollution Control Department: PCD) ได้มีการกำหนดค่ามาตรฐานฝุ่น $PM_{2.5}$ รายวัน มีค่า $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$

โครงการพัฒนาพื้นที่ระเบียงเศรษฐกิจพิเศษภาคตะวันออก (Eastern Economic Corridor Development หรือ EEC) เป็นโครงการภายใต้นโยบายพัฒนาชาติ 20 ปี หรือนโยบายพัฒนาระดับชาติไปสู่ "ไทยแลนด์ 4.0" ซึ่งมีพื้นที่ 3 จังหวัดของภาคตะวันออกของประเทศประกอบด้วย จังหวัดฉะเชิงเทรา จังหวัดชลบุรี และจังหวัดระยอง โดยมีการเสริมสร้างและพัฒนาชีวิต

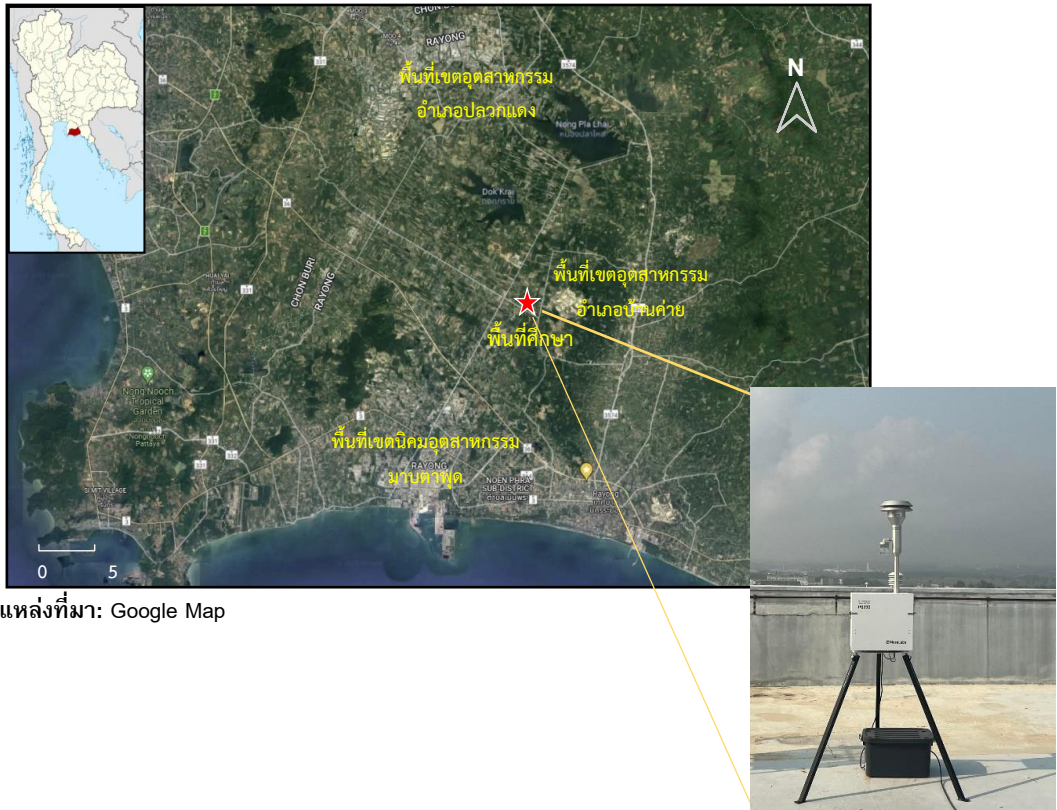


ความสามารถในการแข่งขันของภาคอุตสาหกรรม การผลิตทางเกษตร บริการ และการค้าการลงทุน เพื่อยกระดับศักยภาพในการแข่งขันของประเทศ ต่อยอดความเข้มแข็งของอุตสาหกรรมที่มีศักยภาพปัจจุบันเพื่อยกระดับไปสู่อุตสาหกรรมที่ใช้เทคโนโลยีขั้นสูง [14]

ปัจจุบันจังหวัดระยองเป็นเขตพื้นที่อุตสาหกรรมที่สำคัญแห่งหนึ่งของประเทศไทย และมีเขตพื้นที่อุตสาหกรรมที่สำคัญ คือ นิคมอุตสาหกรรมมาบตาพุดอำเภอเมือง จากข้อมูลกรมโรงงานอุตสาหกรรม มีการสรุปภาพรวมจำนวนโรงงานอุตสาหกรรมในพื้นที่จังหวัดระยอง มีทั้งสิ้น 2,958 โรงงาน ประกอบด้วยโรงงานในเขตนิคมอุตสาหกรรม จำนวน 1,156 โรงงาน และนอกเขตนิคมอุตสาหกรรม จำนวน 1,802 โรงงาน มีพนักงานโรงงานอุตสาหกรรมทั้งสิ้น 189,233 คน คิดเป็นเนื้อที่โรงงาน 4.24% ของพื้นที่จังหวัด โดยมีกลุ่มอุตสาหกรรมที่สำคัญ คือ เคมีภัณฑ์และผลิตภัณฑ์เคมี ผลิตภัณฑ์พลาสติก ผลิตภัณฑ์โลหะและผลิตภัณฑ์ยานพาหนะและอุปกรณ์รวมทั้งการซ่อมยานพาหนะและอุปกรณ์ เป็นต้น [15] ภายใต้โครงการ EEC จังหวัดระยองจะได้รับการพัฒนาให้เป็นจังหวัดที่มีอุตสาหกรรมอนาคต ซึ่งเป็นอุตสาหกรรมใหม่ที่ประเทศไทย มีศักยภาพในการแข่งขัน และมีผู้สนใจลงทุน ประกอบด้วยอุตสาหกรรมหุ่นยนต์เพื่อการอุตสาหกรรม (Robotics) อุตสาหกรรมการบินและโลจิสติกส์ (Aviation and Logistics) อุตสาหกรรมเชื้อเพลิงชีวภาพและเคมีชีวภาพ (Biofuels and Biochemicals) อุตสาหกรรมดิจิทัล (Digital) และอุตสาหกรรมการแพทย์ครบวงจร (Medical Hub) [16] ซึ่งการพัฒนาดังกล่าวอาจจะมีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม โดยเฉพาะมลพิษทางอากาศที่

อาจจะเพิ่มขึ้นในอนาคต ซึ่งมีแหล่งกำเนิดมาจากอุตสาหกรรมและการจราจร เช่น ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ก๊าซไนโตรเจนไดออกไซด์ สารประกอบอินทรีย์ระเหยง่าย และฝุ่นละอองขนาดเล็ก โดยเฉพาะฝุ่น PM_{2.5} เป็นต้น จากรายงานข้อมูลคุณภาพอากาศของกรมควบคุมมลพิษ พบว่าความเข้มข้นเฉลี่ยของฝุ่น PM_{2.5} จากสถานีตรวจวัดคุณภาพอากาศ (Air Quality Monitoring Station: AQM) ในพื้นที่จังหวัดฉะเชิงเทรา จังหวัดชลบุรี และจังหวัดระยอง ในปี พ.ศ. 2564 มีค่า 23.0, 16.9-19.5 และ 16.5-20.0 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ตามลำดับ ซึ่งมีค่าไม่เกินค่ามาตรฐานเฉลี่ยรายปี (25 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) ใดๆก็ตาม ในช่วงเดือนมกราคมถึงเดือนเมษายน 2565 และเดือนธันวาคม 2564 มีปริมาณฝุ่น PM_{2.5} ก่อนช่วงสูงและเกินค่ามาตรฐานเฉลี่ยรายวัน (25 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) ซึ่งผลการตรวจวัดปริมาณฝุ่น PM_{2.5} ได้รายงานสอดคล้องไปในทิศทางเดียวกันทั้ง 3 จังหวัด [17]

การวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อติดตามตรวจสอบความเข้มข้นของฝุ่น PM_{2.5} จากพื้นที่อุตสาหกรรมกรณีศึกษาในพื้นที่จังหวัดระยอง ก่อนที่จะเริ่มมีการพัฒนาเข้าสู่โครงการเขตพัฒนาพื้นที่ระเบียงเศรษฐกิจพิเศษภาคตะวันออกหรือ EEC และนำผลการศึกษาที่ได้รับไปประเมินผลกระทบต่อความเสี่ยงการก่อมะเร็งในมนุษย์จากการสัมผัสฝุ่น PM_{2.5} ในบรรยากาศ ซึ่งจะเป็นข้อมูลพื้นฐานและแนวทางของการบริหารจัดการมลพิษทางอากาศที่จะส่งผลกระทบต่อสุขภาพอนามัยและคุณภาพชีวิตของประชากรในเขตพื้นที่อุตสาหกรรม เพื่อให้สอดคล้องกับแผนเขตพัฒนาพื้นที่ EEC ที่มุ่งเน้นให้การเติบโตทางเศรษฐกิจสังคมที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมที่ยั่งยืนต่อไป



แหล่งที่มา: Google Map

รูปที่ 1 แผนที่การเก็บตัวอย่างฝุ่น PM_{2.5} ในพื้นที่เขตอุตสาหกรรม เมืองระยอง

2. วิธีการดำเนินงานวิจัย

2.1 พื้นที่ศึกษา

พื้นที่ศึกษาหรือจุดเก็บตัวอย่างได้เลือกบริเวณภายในมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ วิทยาเขตระยอง ซึ่งตั้งอยู่ในอำเภอบ้านค่าย จังหวัดระยอง โดยพื้นที่ศึกษาดังกล่าวมีระยะห่างจากพื้นที่เขตนิคมอุตสาหกรรมมาบตาพุด ประมาณ 23 กิโลเมตร จากพื้นที่เขตอุตสาหกรรมในอำเภอปลวกแดง 32 กิโลเมตร และจากพื้นที่เขตอุตสาหกรรม

อำเภอบ้านค่าย ประมาณ 6 กิโลเมตร โดยจุดเก็บตัวอย่างตั้งอยู่บนตาดฟ้าของอาคารกองงานวิทยาเขตระยอง ซึ่งมีความสูง 9 ชั้น เพื่อหลีกเลี่ยงแหล่งกำเนิดจากการจราจร โดยการศึกษาครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาปริมาณฝุ่น PM_{2.5} ในบรรยากาศ จากแหล่งกำเนิดอุตสาหกรรม ซึ่งพื้นที่ศึกษาตั้งอยู่ระหว่างพื้นที่เขตอุตสาหกรรมทั้ง 3 แหล่ง (รูปที่ 1) ดังนั้นพื้นที่ศึกษาอาจจะมีโอกาสได้รับผลกระทบจากมลพิษทางอากาศที่มาจากแหล่งกำเนิดอุตสาหกรรม โดย



หลักการเลือกพื้นที่ศึกษาพิจารณาจากทิศทางลมมรสุมที่พัดผ่านประเทศไทย ในช่วงกลางเดือนตุลาคมจนถึงกลางเดือนกุมภาพันธ์จะมีลมมรสุมพัดมาจากทางทิศตะวันออกเฉียงเหนือหรือทิศเหนือ และในช่วงกลางเดือนพฤษภาคมจนถึงเดือนกลางเดือนตุลาคมจะมีลมมรสุมพัดมาจากทิศตะวันตกเฉียงใต้ ซึ่งอาจจะมีโอกาสพัดพาเอาสารมลพิษอากาศมาจากแหล่งกำเนิดในพื้นที่อุตสาหกรรมทั้ง 3 แหล่งมายังพื้นที่ศึกษาได้ [18]

2.2 การเก็บตัวอย่างฝุ่น PM_{2.5}

ทำการเก็บตัวอย่างฝุ่น PM_{2.5} ด้วยเครื่องเก็บตัวอย่างฝุ่นละออง PQ 200 (Ambient Air Particulate Sampler ยี่ห้อ BGI/MesaLabs ประเทศสหรัฐอเมริกา) ซึ่งได้รับมาตรฐาน US-EPA (RFPS-0498-116) โดยตั้งไว้บนดาดฟ้าของอาคารกองงานวิทยาเขตระยอง มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ วิทยาเขตระยอง อาคารมีความสูง 9 ชั้น ซึ่งมีความสูงประมาณ 30 เมตรจากระดับพื้นดิน โดยทำการเก็บฝุ่น PM_{2.5} ไว้บนกระดาษกรองแบบเทฟลอน (Teflon Filter หรือ Polytetrafluoroethylene: PTFE) มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 47.0 มิลลิเมตร (ยี่ห้อ BGI/MesaLabs ประเทศสหรัฐอเมริกา) เป็นเวลา 24 ชั่วโมง (รูปที่ 1) เป็นวิธีการเก็บตัวอย่างฝุ่นละอองด้วยระบบกราวิเมตริก (Gravimetric Method)

การเตรียมกระดาษกรองแบบเทฟลอนก่อนนำไปเก็บตัวอย่างฝุ่น PM_{2.5} ชั้นแรกนำกระดาษกรองเก็บไว้ในตู้ดูดความชื้น (Desiccator) เป็นเวลา 48 ชั่วโมง

ก่อนนำไปชั่งด้วยเครื่องชั่ง 6 ตำแหน่ง (ยี่ห้อ Mettler-Toledo) จากนั้นนำไปเก็บตัวอย่างฝุ่น PM_{2.5} เป็นเวลา 24 ชั่วโมง หลังจากเก็บตัวอย่างฝุ่น PM_{2.5} ในพื้นที่ศึกษาเสร็จแล้ว นำฝุ่น PM_{2.5} ที่อยู่บนกระดาษกรองมาเก็บไว้ในตู้ดูดความชื้น เป็นเวลา 48 ชั่วโมง เพื่อนำมาหาค่าหนักสุทธิ (มวล) ดังสมการที่ 1 โดยทำการเก็บตัวอย่างฝุ่น PM_{2.5} แบบวันเว้นวัน ตั้งแต่เดือนพฤศจิกายน 2565 ถึงเดือนเมษายน 2565 ซึ่งเป็นช่วงฤดูแล้ง โดยกรมอุตุนิยมวิทยาได้นิยามว่าเป็นช่วงฤดูหนาวต่อเนื่องถึงช่วงฤดูร้อน โดยเริ่มต้นช่วงกลางเดือนตุลาคมถึงกลางเดือนพฤษภาคมของปีถัดไป [18] และทำการเก็บตัวอย่างปริมาณฝุ่น PM_{2.5} ได้จำนวน 88 ตัวอย่าง

นอกจากนี้ การศึกษาปัจจัยทางอุตุนิยมวิทยาที่มีความสัมพันธ์ต่อความเข้มข้นของฝุ่น PM_{2.5} ในบรรยากาศ ได้กำหนดพารามิเตอร์ทางอุตุนิยมวิทยา ได้แก่ อุณหภูมิอากาศ (Air Temperature: Temp.) ร้อยละความชื้นสัมพัทธ์ (%Relative Humidity: %RH) ความเร็วลม (Wind speed: WS) และปริมาณน้ำฝนรวม (Rainfall) ซึ่งได้รับข้อมูลมาจากสถานีอุตุนิยมวิทยาศูนย์วิจัยพืชไร่ระยอง กรมอุตุนิยมวิทยา

$$PM_{2.5} \text{ concentrations} = \frac{W_{\text{after}} - W_{\text{before}}}{V_{\text{std}}} \quad (1)$$

W_{after} คือ น้ำหนักกระดาษกรองหลังเก็บตัวอย่าง (μg)

W_{before} คือ น้ำหนักกระดาษกรองก่อนเก็บตัวอย่าง (μg)

V_{std} คือ ปริมาตรอากาศมาตรฐาน (m^3)

ตารางที่ 1 พารามิเตอร์จากการสัมผัสฝุ่น PM_{2.5} เพื่อประเมินความเสี่ยงของสุขภาพมนุษย์ [20]

| พารามิเตอร์ | วัยเด็กเล็ก 1-5 ปี | วัยเด็ก 6-11 ปี | วัยรุ่น 12-19 ปี | วัยผู้ใหญ่ ≥ 20 ปี |
|----------------------------|-----------------------|----------------------|----------------------|-----------------------|
| BW (kg) | 16 | 29 | 52 | 65 |
| ED (years) | 2 | 3 | 3.5 | 30 |
| InhR (m ³ /day) | 7.6 | 11 | 14 | 13 |
| SF (per µg/kg-day) | 6.6X10 ⁻⁵ | 2.5X10 ⁻⁵ | 1.1X10 ⁻⁵ | 9.5X10 ⁻⁶ |

2.3 การประเมินความเสี่ยงการก่อมะเร็งในมนุษย์

การประเมินความเสี่ยงการก่อมะเร็งในมนุษย์จากการสัมผัสฝุ่น PM_{2.5} คำนวณจากค่าความเสี่ยงในการก่อมะเร็งในตลอดช่วงชีวิต หรือ ค่า R_{ic} (The individual lifetime cancer risk) สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ 1 [19] ซึ่งคำนวณได้จากค่าเฉลี่ยปริมาณสารที่ได้รับจากการหายใจในแต่ละวันตลอดช่วงชีวิต หรือ LADD (The potential Lifetime Average Daily Dose) โดยมีพารามิเตอร์ของแต่ละช่วงอายุ เพื่อนำประเมินความเสี่ยงของสุขภาพมนุษย์อ้างอิงมาจาก Prasertsin and Natthapindhu [20] และค่าสัมประสิทธิ์ความชันในการก่อมะเร็ง (The Slope Factor for Inhalation: SF) ดังสมการที่ 3 และ 4 ตามลำดับ

เมื่อผลการประเมินความเสี่ยงการก่อมะเร็งด้วยค่า R_{ic} มีค่าน้อยกว่า 10⁻⁶ (หนึ่งในล้าน) แสดงว่า ไม่มีภาวะความเสี่ยงการก่อมะเร็งหรือภาวะความเสี่ยงการก่อมะเร็งต่ำ (Low Potential Health Risk) หากมีค่าอยู่ในช่วง 10⁻⁶ ถึง 10⁻⁴ แสดงว่า มีภาวะความเสี่ยงการก่อมะเร็งที่ยอมรับได้ (Potential Health Risk) และถ้ามีค่ามากกว่า 10⁻⁴ แสดงว่า มีความเสี่ยงการก่อมะเร็งสูง (High Potential Health Risk) [21]

$$R_{ic} = LADD \times SF \quad (2)$$

เมื่อ R_{ic} คือ ค่าความเสี่ยงในการก่อมะเร็งในตลอดช่วงชีวิต

LADD คือ ค่าเฉลี่ยปริมาณสารที่ได้รับจากการหายใจในแต่ละวันตลอดช่วงชีวิต (µg/kg-day)

SF คือ ค่าสัมประสิทธิ์ความชันในการก่อมะเร็ง (per µg/kg-day)

$$LADD (\mu\text{g}/\text{kg} - \text{day}) = \frac{C \times \text{InhR} \times \text{ED}}{\text{BW} \times 70 \text{ years}} \quad (3)$$

เมื่อ LADD คือ ค่าเฉลี่ยปริมาณสารที่ได้รับจากการหายใจในแต่ละวันในตลอดช่วงชีวิต (µg/kg-day)

C_i คือ ค่าเฉลี่ยความเข้มข้นของฝุ่น PM_{2.5} (µg/m³)

InhR คือ Inhalation Rate หรืออัตราการสัมผัสสิ่งคุกคามต่อหน่วยเวลา (m³/day)

ED คือ ระยะเวลาที่สัมผัส (year)

BW คือ น้ำหนักร่างกายเฉลี่ย (kg)



$$SF (\text{per } \mu\text{g}/\text{kg} - \text{day}) = \frac{UR}{BW \times \text{InhR}} \quad (4)$$

- เมื่อ SF คือ ค่าสัมประสิทธิ์ความชันในการก่อมะเร็ง (per $\mu\text{g}/\text{kg}\text{-day}$) แสดงในตารางที่ 1
- InhR คือ Inhalation Rate หรืออัตราการสูดดมสิ่งคุกคามต่อหน่วยเวลา (m^3/day)
- BW คือ น้ำหนักร่างกายเฉลี่ย (kg)
- UR คือ Unit Risk (per $\mu\text{g}/\text{m}^3$) สำหรับฝุ่น $\text{PM}_{2.5}$ คือ 0.008 per $\mu\text{g}/\text{m}^3$ [19]

3. ผลการวิจัยและการอภิปรายผล

3.1 ความเข้มข้นของฝุ่น $\text{PM}_{2.5}$ ในบรรยากาศของพื้นที่อุตสาหกรรม เมืองระยอง

จากการศึกษาความเข้มข้นของฝุ่น $\text{PM}_{2.5}$ ในบรรยากาศของพื้นที่อุตสาหกรรม เมืองระยอง ในช่วงฤดูแล้ง ปี พ.ศ. 2565 ดังแสดงตามรูปที่ 2 และตารางที่ 2 ผลของการศึกษา พบว่า มีค่าเฉลี่ยความเข้มข้นของฝุ่น $\text{PM}_{2.5}$ ในช่วงเดือนพฤศจิกายน พ.ศ. 2564 ถึง เดือนเมษายน พ.ศ. 2565 เรียงจากความเข้มข้นมากไปน้อยได้ดังนี้ เดือนธันวาคม 2564 ($22.7 \pm 12.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$) > เดือนเมษายน พ.ศ. 2565 ($22.5 \pm 14.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$) > เดือนมกราคม พ.ศ. 2565 ($22.2 \pm 9.9 \mu\text{g}/\text{m}^3$) > เดือนกุมภาพันธ์ พ.ศ. 2565 ($21.4 \pm 10.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$) > เดือนมีนาคม พ.ศ. 2565 ($15.6 \pm 9.7 \mu\text{g}/\text{m}^3$) > เดือนพฤศจิกายน พ.ศ. 2564 ($15.5 \pm 6.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$) และมีค่าอยู่ในช่วง $4.9\text{-}52.3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ และมีค่าเฉลี่ย $20.1 \pm 10.9 \mu\text{g}/\text{m}^3$ เมื่อนำผลการศึกษาปริมาณความเข้มข้นของฝุ่น $\text{PM}_{2.5}$ มาทดสอบความแตกต่างของปริมาณความเข้มข้นฝุ่น $\text{PM}_{2.5}$ ของ

แต่ละเดือนทางสถิติด้วยวิธีการ One-way ANOVA พบว่า ความเข้มข้นของฝุ่น $\text{PM}_{2.5}$ ในแต่ละเดือนไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$)

นำผลวิจัยครั้งนี้มาเทียบกับงานวิจัยก่อนหน้านี้ในพื้นที่เขตอุตสาหกรรมของประเทศปากีสถาน พบว่า มีค่าเฉลี่ยความเข้มข้นของฝุ่น $\text{PM}_{2.5}$ ในบรรยากาศช่วงฤดูหนาวและฤดูร้อน (ฤดูแล้ง) มีค่า $37.9 \pm 0.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ และ $36.9 \pm 12.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ตามลำดับ [22] Lu *et al.*, [23] รายงานการศึกษาปริมาณความเข้มข้นของฝุ่น $\text{PM}_{2.5}$ ในบรรยากาศของเมืองไถหนาน ประเทศไต้หวัน ซึ่งเป็นพื้นที่อุตสาหกรรมที่สำคัญของประเทศ ประกอบด้วยกลุ่มอุตสาหกรรมประเภทเคมีภัณฑ์ เหล็กและโลหะ อุตสาหกรรมพลังงาน โรงงานไฟฟ้า ถ่านหิน เป็นต้น พบว่ามีค่าความเข้มข้นของฝุ่น $\text{PM}_{2.5}$ อยู่ในช่วง $14.9 - 41.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ เฉลี่ยต่อปี $31.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$ อย่างไรก็ตาม งานวิจัยดังกล่าว มีค่าเฉลี่ยความเข้มข้นของฝุ่น $\text{PM}_{2.5}$ มากกว่า 1-2 เท่าของงานวิจัยในครั้งนี้ สำหรับประเทศไทย มีการศึกษาปริมาณความเข้มข้นของฝุ่น $\text{PM}_{2.5}$ ในบรรยากาศใกล้พื้นที่นิคมอุตสาหกรรมนวนคร จังหวัดปทุมธานี ในช่วงฤดูแล้ง พบว่า ค่าเฉลี่ยความเข้มข้นของฝุ่น $\text{PM}_{2.5}$ มีค่า $32.6 \pm 11.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ [9] ซึ่งมีค่ามากกว่างานวิจัยนี้

เมื่อนำผลการศึกษาของปริมาณความเข้มข้นฝุ่น $\text{PM}_{2.5}$ ในบรรยากาศรายวันของพื้นที่เขตอุตสาหกรรมจังหวัดระยอง ในช่วงฤดูแล้ง ปี 2565 มาเทียบกับค่ามาตรฐานคุณภาพอากาศเฉลี่ยรายวัน (24 ชั่วโมง) ของกรมควบคุมมลพิษ (PCD) องค์การพิทักษ์สิ่งแวดล้อม สหรัฐอเมริกา (US-EPA) และองค์การอนามัยโลก (WHO) พบว่า ความเข้มข้นของฝุ่น $\text{PM}_{2.5}$ ในบรรยากาศ มีค่าเกินมาตรฐานทั้ง 3 องค์กร ประมาณ



บทความวิจัย

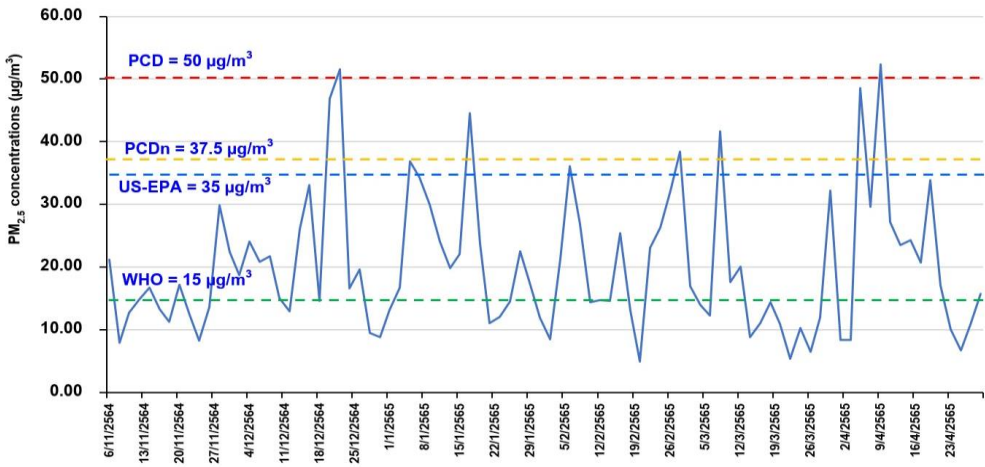
ร้อยละ 2.3 (2 วัน), 10.2 (9วัน) และ 56.8 (50 วัน) ตามลำดับ นอกจากนี้ กรมควบคุมมลพิษได้กำหนดค่ามาตรฐานใหม่ของฝุ่น PM_{2.5} ในบรรยากาศ (PCD_n) 24 ชั่วโมง มีค่าไม่เกิน 37.5 µg/m³ (มีผลบังคับใช้ในวันที่ 1 มิถุนายน 2566) จากผลการศึกษาในครั้งนี้ พบว่ามีค่าความเข้มข้นฝุ่น PM_{2.5} เกินค่ามาตรฐานใหม่ของกรมควบคุมมลพิษประมาณร้อยละ 8.0 (7 วัน) ดังแสดงในรูปที่ 2 กล่าวโดยสรุป ค่าเฉลี่ยความเข้มข้นฝุ่น PM_{2.5} ในช่วงฤดูแล้งไม่เกินค่ามาตรฐานของกรมควบคุมมลพิษและมาตรฐานขององค์การพิทักษ์สิ่งแวดล้อม สหรัฐอเมริกา แต่ส่วนใหญ่มีค่าเฉลี่ยความเข้มข้นฝุ่น PM_{2.5} เกินค่ามาตรฐานขององค์การอนามัยโลก นอกจากนี้ หลายงานวิจัยก่อนหน้านี้ [22, 23] พบว่า ฝุ่น PM_{2.5} มีค่าสูงที่สุดในช่วงฤดูแล้ง ซึ่งต่างจากผลการศึกษางานวิจัยนี้ พบว่า ฝุ่น PM_{2.5} มีค่าน้อยกว่าการศึกษาก่อนหน้านี้ อาจเนื่องมาจากในช่วงแต่ละเดือนที่ทำการศึกษามีปริมาณน้ำฝนมาก (ตารางที่ 2) อาจจะเนื่องมาจาก

ปรากฏการณ์ลานีญา ทำให้มีปริมาณฝนตกมากในช่วงต้นปีที่ผ่านมา [24] ซึ่งอาจจะเป็นปัจจัยหนึ่งที่ทำให้ปริมาณความเข้มข้นของฝุ่น PM_{2.5} ลดลงจากบรรยากาศเนื่องจากการชะของน้ำฝนลงมา [25] แต่อย่างไรก็ตาม ในช่วงฤดูแล้งยังคงต้องตระหนักถึงผลกระทบจากฝุ่น PM_{2.5} ต่อสุขภาพอนามัยของประชาชน เนื่องจากในช่วงฤดูแล้งมีปริมาณฝนตกน้อย นอกจากนี้ อุณหภูมิของอากาศที่มีค่าต่ำ อาจจะทำให้ปริมาณความเข้มข้นของฝุ่น PM_{2.5} เพิ่มขึ้นเนื่องจากชั้นบรรยากาศผสม (Mixing height) มีระดับที่ใกล้กับพื้นดิน [25] โดยจะเห็นได้จากกรณีเดือนมกราคมและเดือนมีนาคม 2565 พบว่า มีค่าเฉลี่ยความเข้มข้นของฝุ่น PM_{2.5} ที่มีค่าใกล้เคียงกัน ในขณะที่เดือนมกราคม 2565 มีปริมาณน้ำฝนและปริมาณความเข้มข้นของฝุ่น PM_{2.5} มากกว่าเดือนมีนาคม 2565 ซึ่งจะเห็นได้จากเดือนมกราคม 2565 มีค่าเฉลี่ยของอุณหภูมิของอากาศน้อยกว่าเดือนมีนาคม 2565

ตารางที่ 2 ความเข้มข้นของฝุ่น PM_{2.5} (µg/m³) ของพื้นที่เขตอุตสาหกรรม จังหวัดระยอง

| เดือน | พ.ย. 2564 | ธ.ค. 2564 | ม.ค. 2565 | ก.พ. 2565 | มี.ค. 2565 | เม.ย. 2565 |
|------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|------------|------------|
| ค่าต่ำที่สุด | 7.9 | 8.9 | 11.1 | 4.9 | 5.4 | 6.7 |
| ค่าสูงที่สุด | 29.8 | 51.6 | 44.6 | 38.4 | 41.6 | 52.3 |
| ค่าเฉลี่ย±SD | 15.5±6.1 | 22.7±12.5 | 22.2±9.9 | 21.4±10.2 | 15.6±9.7 | 22.5±14.1 |
| Rainfall (mm)* | 55.1 | 7.95 | 47.4 | 21.7 | 44.8 | 59.0 |
| Air Temperature (°C)* | 26.8±0.5 | 25.9±1.4 | 26.4±0.8 | 26.8±1.2 | 28.1±1.2 | 28.5±1.7 |
| Relative Humidity (%)* | 80.6±9.0 | 68.7±8.9 | 78.5±7.5 | 81.0±11.6 | 84.9±3.1 | 79.6±7.5 |
| Wind Speed (m/s)* | 1.86±0.72 | 1.91±0.59 | 1.10±0.44 | 1.12±0.52 | 0.81±0.18 | 1.19±0.76 |

*ที่มา: สถานีอุตุนิยมวิทยาศูนย์วิจัยพืชไร่ระยอง กรมอุตุนิยมวิทยา



รูปที่ 2 ความเข้มข้นของฝุ่น PM_{2.5} ในพื้นที่เขตอุตสาหกรรม จังหวัดระยอง

จากการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างพารามิเตอร์ทางอุตุนิยมวิทยากับฝุ่น PM_{2.5} โดยใช้วิธีการวิเคราะห์สหสัมพันธ์ (Correlation) ซึ่งมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (Correlation Coefficient: r) โดยมีค่าอยู่ระหว่าง -1.000 ถึง +1.000 ถ้าค่าเข้าใกล้ -1.000 หมายความว่า ตัวแปรสองตัวมีความสัมพันธ์แบบแปรผกผันอย่างมาก ถ้าค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์เข้าใกล้ +1.000 หมายความว่า ตัวแปรสองตัวมีความสัมพันธ์แบบแปรผันตรงอย่างมาก และถ้าค่าเป็น 0 หมายความว่า ไม่มีความสัมพันธ์กัน แต่ถ้าค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์อยู่ในช่วง 0.900 - 1.000 หมายความว่า ตัวแปรสองตัวมีความสัมพันธ์กันสูงมาก และช่วง 0.700-0.899 แสดงความสัมพันธ์กันสูง ส่วนตัวแปรที่มีความสัมพันธ์กันปานกลางมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์อยู่ในช่วง 0.400 - 0.699 และค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์อยู่ในช่วง 0.000 - 0.399 หมายความว่า ตัวแปรสองตัวมีความสัมพันธ์กันน้อย [26]

เมื่อนำค่าเฉลี่ยของแต่ละพารามิเตอร์ทางอุตุนิยมวิทยากับฝุ่น PM_{2.5} โดยใช้วิธีการวิเคราะห์สหสัมพันธ์แบบเพียร์สัน (Pearson Correlation) ดังแสดงผลในตารางที่ 3 โดยแสดงค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (r) ที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างฝุ่น PM_{2.5} และพารามิเตอร์ทางอุตุนิยมวิทยา ซึ่งประกอบด้วย อุณหภูมิอากาศ (Temp.) ร้อยละความชื้นสัมพัทธ์ (%RH) ความเร็วลม (WS) และน้ำฝนรวม (Rainfall) พบว่า ความเข้มข้นของฝุ่น PM_{2.5} กับค่าร้อยละความชื้นสัมพัทธ์และอุณหภูมิอากาศ มีความสัมพันธ์แบบแปรผกผันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($r = -0.317$) และค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างฝุ่น PM_{2.5} กับอุณหภูมิอากาศ ($p < 0.05$) มีค่า -0.224 อาจเนื่องมาจากสูงของชั้นบรรยากาศผสม (Mixing height) ที่สูงขึ้นและอุณหภูมิอากาศสูงขึ้น ซึ่งส่งผลต่อการลดปริมาณฝุ่น PM_{2.5} ในบรรยากาศ [25] และร้อยละความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศมีค่าเพิ่มขึ้นจะทำให้ปริมาณของฝุ่น PM_{2.5} ลดลง ซึ่งอาจจะมาจากปริมาณน้ำฝนรวมที่เพิ่มขึ้นทำให้



บทความวิจัย

มีร้อยละความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศเพิ่มขึ้นด้วย ($r = 0.251$; $p < 0.05$) และงานวิจัยในครั้งนี้มีพื้นที่ศึกษาอยู่ใกล้ทะเล เมื่อมีอุณหภูมิอากาศเพิ่มขึ้นอาจจะส่งผลทำให้การระเหยของน้ำทะเลเพิ่มขึ้นด้วย โดยมีสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์แบบแปรผันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติตามระหว่างร้อยละความชื้นสัมพัทธ์กับอุณหภูมิอากาศ ($r = 0.256$; $p < 0.05$) นอกจากนี้ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างความเร็วลม (WS) กับอุณหภูมิอากาศและร้อยละความชื้นสัมพัทธ์ มีค่า -0.284 และ -0.358 ตามลำดับ ซึ่งมีความสัมพันธ์แบบแปรผกผันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.01$) โดยความเร็วลมที่เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้อุณหภูมิอากาศและร้อยละความชื้นสัมพัทธ์ลดลง อีกทั้งหากมีปริมาณ

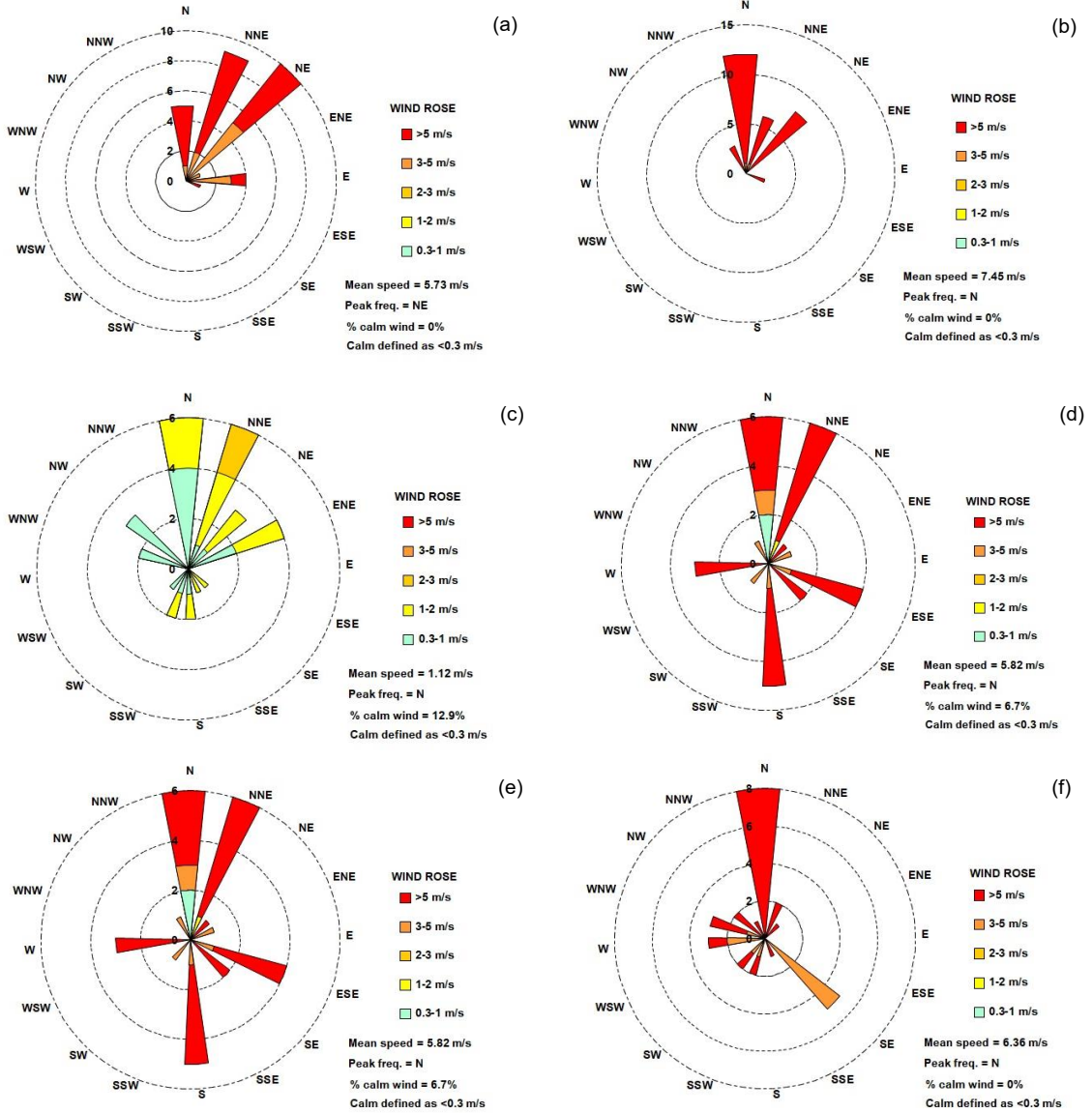
น้ำฝนรวมเพิ่มขึ้นจะมีผลต่อร้อยละความชื้นสัมพัทธ์ที่เพิ่มขึ้นเช่นกัน ($r = 0.251$) ซึ่งจะส่งผลต่อความสัมพันธ์แบบแปรผกผันกับความเข้มข้นของฝุ่น $PM_{2.5}$ ในบรรยากาศที่จะลดลงด้วย เนื่องจากปริมาณน้ำฝนจะช่วยชะฝุ่น $PM_{2.5}$ จากบรรยากาศ [25] จากรูปที่ 3 พบว่าทิศทางลมส่วนใหญ่มาจากทางทิศเหนือหรือทางทิศตะวันออกเฉียงเหนือไปสู่ทางทิศใต้ และมีความเร็วลมสูง ซึ่งอาจจะส่งผลให้ปริมาณการสะสมของฝุ่น $PM_{2.5}$ ในระดับใกล้พื้นดินลดลง [25] และมีโอกาสที่จะพัดพาฝุ่น $PM_{2.5}$ ออกสู่ทะเล อย่างไรก็ตาม จากการศึกษาในงานวิจัยในครั้งนี้ พบว่า ปัจจัยทางอุตุนิยมวิทยาที่อาจจะส่งผลต่อปริมาณฝุ่น $PM_{2.5}$ ในบรรยากาศ คือ อุณหภูมิอากาศและร้อยละความชื้นสัมพัทธ์

ตารางที่ 3 ผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างพารามิเตอร์ทางอุตุนิยมวิทยากับฝุ่น $PM_{2.5}$

| พารามิเตอร์ | $PM_{2.5}$ | Temp. | %RH | WS | Rainfall |
|-------------|-----------------|-----------------|-----------------|---------------|----------|
| $PM_{2.5}$ | 1.000 | | | | |
| Temp. | -0.224* | 1.000 | | | |
| %RH | -0.317** | 0.256* | 1.000 | | |
| WS | 0.052 | -0.284** | -0.358** | 1.000 | |
| Rainfall | -0.055 | -0.075 | 0.251* | 0.227* | 1.000 |

* Correlation is significant at the 0.05 level (2-tailed).

**Correlation is significant at the 0.01 level (2-tailed).



รูปที่ 3 แผนภูมิลม (Wind rose) ของทิศทางลม (WD) และความเร็วม (WS) ในช่วงฤดูแล้งของจังหวัดระยอง ระหว่างเดือนพฤศจิกายน 2564 ถึง เดือนเมษายน 2565: (a) พฤศจิกายน 2565 (b) ธันวาคม 2564 (c) มกราคม 2565 (d) กุมภาพันธ์ 2565 (e) มีนาคม 2565 และ (f) เมษายน 2565



3.2 การประเมินความเสี่ยงการก่อมะเร็งในมนุษย์จากการสัมผัสฝุ่น PM_{2.5} ในบรรยากาศ

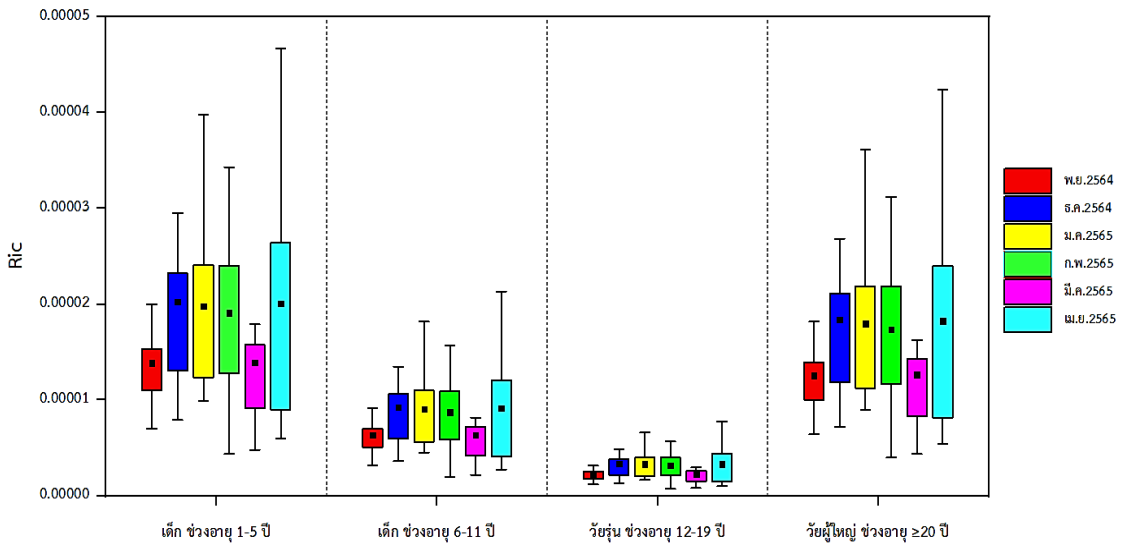
ผลการประเมินความเสี่ยงการก่อมะเร็งในมนุษย์ (Carcinogenic Health Risk Assessment) คำนวณจากค่าความเสี่ยงในการก่อมะเร็งในตลอดช่วงชีวิต หรือ ค่า R_{ic} (The Individual Lifetime Cancer Risk) จากการสัมผัสกับฝุ่น PM_{2.5} ทางการหายใจของวัยเด็ก วัยรุ่นและวัยผู้ใหญ่ ในพื้นที่เขตอุตสาหกรรมจังหวัดระยอง แสดงได้ดังตารางที่ 4 โดยได้ทำการศึกษาค่าเฉลี่ยปริมาณสารที่ได้รับจากการหายใจในแต่ละวันตลอดช่วงชีวิต หรือ LADD วัยเด็ก วัยรุ่นและวัยผู้ใหญ่ พบว่าค่าเฉลี่ย LADD จากการสัมผัสฝุ่น PM_{2.5} ของวัยเด็กเล็ก ช่วงอายุ 1-5 ปี, วัยเด็ก ช่วงอายุ 6-11 ปี, วัยรุ่น ช่วงอายุ 12-19 ปี และวัยผู้ใหญ่ ช่วงอายุ 20 ปีขึ้นไป มีค่าอยู่ในช่วง 0.21±0.08 ถึง 0.31±0.17, 0.25±0.10 ถึง 0.37±0.20, 0.21±0.08 ถึง 0.31±0.17 และ 1.33±0.52 ถึง 1.95±1.07 µg/kg-day ตามลำดับ

รูปที่ 4 แสดงค่าความเสี่ยงการก่อมะเร็งในตลอดช่วงชีวิต (R_{ic}) จากการสัมผัสฝุ่น PM_{2.5} ด้วยการ

หายใจของวัยเด็ก วัยรุ่น และวัยผู้ใหญ่ พบว่าค่าเฉลี่ย R_{ic} ของฝุ่น PM_{2.5} ด้วยการหายใจในวัยเด็กเล็ก ช่วงอายุ 1-5 ปี, วัยเด็ก ช่วงอายุ 6-11 ปี, วัยรุ่น ช่วงอายุ 12-19 ปี และวัยผู้ใหญ่ ช่วงอายุ 20 ปีขึ้นไป มีค่าอยู่ในช่วง 1.4×10⁻⁵ ถึง 2.0 ×10⁻⁵, 6.3×10⁻⁶ ถึง 9.3 ×10⁻⁶, 2.3×10⁻⁶ ถึง 3.4×10⁻⁶ และ 1.3×10⁻⁵ ถึง 1.8×10⁻⁵ ตามลำดับ ค่าเฉลี่ย R_{ic} ของฝุ่น PM_{2.5} ของวัยเด็ก วัยรุ่นและผู้ใหญ่มีค่าอยู่ในช่วง 10⁻⁶ ถึง 10⁻⁴ แสดงว่า มีภาวะความเสี่ยงในการก่อมะเร็งที่ยอมรับได้ (Potential Health Risk) หากประเมินจากจำนวนประชากรหนึ่งล้าน พบว่าภาวะความเสี่ยงในการก่อมะเร็งในวัยเด็กเล็ก ช่วงอายุ 1-5 ปี ประมาณ 14-20 คน วัยเด็ก ช่วงอายุ 6-11 ปี ประมาณ 6-9 คน วัยรุ่น ช่วงอายุ 12-19 ปี ประมาณ 2-3 คน และวัยผู้ใหญ่ ช่วงอายุ 20 ปีขึ้นไป ประมาณ 13-18 คน ขณะที่ภาวะความเสี่ยงในการก่อมะเร็งเฉลี่ย 70 ปี พบว่า ในวัยเด็กเล็ก ช่วงอายุ 1-5 ปี วัยเด็ก ช่วงอายุ 6-11 ปี วัยรุ่น และวัยผู้ใหญ่ ประมาณ 7-10, 2-3, 0.6-0.8 และ 0.4-0.6 คนต่อปี ตามลำดับ

ตารางที่ 4 ค่าเฉลี่ยปริมาณฝุ่น PM_{2.5} ที่ได้รับจากการหายใจในแต่ละวันตลอดช่วงชีวิต (LADD)

| LADD (µg/kg-day) | พ.ย. 2564 | ธ.ค. 2564 | ม.ค. 2565 | ก.พ. 2565 | มี.ค. 2565 | เม.ย. 2565 |
|------------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|------------|------------|
| เด็กเล็ก ช่วงอายุ 1-5 ปี | 0.21±0.08 | 0.31±0.17 | 0.30±0.13 | 0.29±0.14 | 0.21±0.13 | 0.31±0.19 |
| เด็ก ช่วงอายุ 6-11 ปี | 0.25±0.10 | 0.37±0.20 | 0.36±0.16 | 0.35±0.17 | 0.25±0.16 | 0.37±0.23 |
| วัยรุ่น ช่วงอายุ 12-19 ปี | 0.21±0.08 | 0.31±0.17 | 0.30±0.13 | 0.29±0.14 | 0.21±0.13 | 0.30±0.19 |
| ผู้ใหญ่ ช่วงอายุ 20 ปีขึ้นไป | 1.33±0.52 | 1.95±1.07 | 1.90±0.84 | 1.84±0.87 | 1.34±0.83 | 1.93±1.21 |



รูปที่ 4 ค่าความเสี่ยงการก่อมะเร็งในตลอดช่วงชีวิต (R_c) จากการสัมผัสฝุ่น $PM_{2.5}$ ด้วยการหายใจในพื้นที่เขตอุตสาหกรรม จังหวัดระยอง

อย่างไรก็ตาม ประเมินความเสี่ยงการก่อมะเร็งในมนุษย์ พบว่าวัยเด็กเล็ก ช่วงอายุ 1-5 ปี มีความเสี่ยงการก่อมะเร็งมากที่สุด เนื่องจากปัจจัยด้านสรีรวิทยาเด็ก โดยวัยเด็กจะมีความต้องการปริมาณออกซิเจนสูงเมื่อเทียบจากอัตราการหายใจต่อน้ำหนักตัวที่สูง [12] ซึ่งอัตราการหายใจเข้าเฉลี่ยของวัยเด็กจะมีค่ามากกว่าสามเท่าของวัยผู้ใหญ่ [27] ดังนั้น ระยะเวลาวัยเด็กจะได้รับสัมผัสฝุ่นละอองในอากาศเข้าสู่ทางเดินหายใจมากกว่าผู้ใหญ่ และอีกปัจจัย คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของทางเดินหายใจของวัยเด็กมีขนาดเล็กกว่าวัยผู้ใหญ่ จึงทำให้อัตราการหายใจของเด็กเพิ่มสูงขึ้นจึงส่งผลทำให้มีโอกาสการสะสมของฝุ่นละอองมากขึ้นได้ [28]

4. สรุปผลการวิจัย

จากการศึกษาความเข้มข้นของฝุ่น $PM_{2.5}$ ในบรรยากาศของพื้นที่เขตอุตสาหกรรม จังหวัดระยอง ช่วงฤดูแล้ง พบว่า มีค่าความเข้มข้นของฝุ่น $PM_{2.5}$ ในบรรยากาศช่วงฤดูแล้ง เฉลี่ยรายวัน (24 ชั่วโมง) มีค่าเกินค่ามาตรฐานคุณภาพอากาศเฉลี่ยรายวันของกรมควบคุมมลพิษ ($50 \mu g/m^3$) องค์การพิทักษ์สิ่งแวดล้อมสหรัฐอเมริกา ($35 \mu g/m^3$) และองค์การอนามัยโลก ($15 \mu g/m^3$) ประมาณร้อยละ 2.3, 10.2 และ 56.8 ตามลำดับ นอกจากนี้ สำหรับการประเมินค่าความเสี่ยงในการก่อมะเร็งในตลอดช่วงชีวิต (R_c) ของเด็กและผู้ใหญ่ พบว่า อยู่ในช่วง 10^{-6} ถึง 10^{-4} แสดงว่า



ภาวะความเสี่ยงในการก่อมะเร็งยอมรับได้ งานวิจัยนี้จะสรุปได้ว่า ปริมาณความเข้มข้นของฝุ่น $PM_{2.5}$ อาจจะไม่ส่งผลกระทบต่ออาการก่อมะเร็งในมนุษย์ในพื้นที่จังหวัดระยองที่มีการเริ่มต้นพัฒนาโครงการ EEC แต่การพัฒนาพื้นที่ EEC อาจส่งผลกระทบต่อสุขภาพในอนาคตได้ ดังนั้น หน่วยงานราชการองค์กรปกครองส่วนท้องถิ่นที่มีส่วนเกี่ยวข้อง จึงต้องดำเนินการวางแผนการจัดการปัญหาหมอกพิษทางอากาศ เพื่อรองรับการพัฒนาเศรษฐกิจต่อไป

5. ข้อเสนอแนะ

การเก็บตัวอย่างฝุ่น $PM_{2.5}$ ในบรรยากาศของพื้นที่เขตอุตสาหกรรม จังหวัดระยอง ในช่วงฤดูแล้ง อาจจะไม่เพียงพอสำหรับการประเมินผลกระทบด้านมลพิษทางอากาศและการนำไปประเมินความเสี่ยงด้านสุขภาพของประชาชน ควรมีการศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับสารมลพิษทางอากาศชนิดอื่นร่วมด้วย อาทิเช่น สาร VOCs, สาร PAHs, O_3 , NO_2 และ SO_2 เป็นต้น และมีการศึกษาปริมาณฝุ่น $PM_{2.5}$ ทุกช่วงฤดูกาลหรือตลอดระยะเวลาหนึ่งปี (ระยะยาว) อาจทำให้การประเมินความเสี่ยงด้านสุขภาพของมนุษย์มีความน่าเชื่อถือมากขึ้น

แนวทางแก้ไขและป้องกันปัญหาหมอกพิษทางอากาศที่จะเกิดขึ้น ประชาชนสามารถติดตามข้อมูลข่าวสารมลพิษทางอากาศจากกรมควบคุมมลพิษผ่านทางแอปพลิเคชัน (Application) ชื่อว่า Air 4 Thai ที่สามารถติดตั้งในโทรศัพท์มือถือได้ ซึ่งจะมีข้อมูลของสารมลพิษทางอากาศหลักที่ได้จากสถานีตรวจวัดคุณภาพอากาศ (AQM) ทั่วประเทศไทย นอกจากนี้

หากเกิดปัญหาหมอกพิษทางอากาศ ควรเลือกใช้หน้ากากที่สามารถป้องกันฝุ่นละอองขนาดเล็กได้ เช่น N95 หรือ KN 95 สำหรับภายในอาคารที่อยู่อาศัยหรือสำนักงาน ควรมีระบบกรองอากาศ หรือเครื่องกรองอากาศติดตั้ง และหลีกเลี่ยงการทำกิจกรรมภายนอกอาคารเมื่อเกิดปัญหาหมอกพิษทางอากาศ ซึ่งเป็นแนวทางเบื้องต้นในการป้องกันปัญหาหมอกพิษทางอากาศที่อาจจะส่งผลกระทบต่อสุขภาพได้

6. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนจากกองทุนส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม และมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ตามสัญญาเลขที่ KMUTNB-FF-65-33 และขอขอบคุณ คณะวิทยาศาสตร์ พลังงานและสิ่งแวดล้อม ที่สนับสนุนการทำวิจัยให้แล้วเสร็จตามวัตถุประสงค์

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] W. Jinsart, Air pollution and air quality management, 1st Ed., Chula Book center, Chulalongkorn University, Bangkok, Thailand, 2008. (in Thai)
- [2] N. Panich, Air pollution treatment system textbook, 3rd Ed., Department of Industrial Works, Bangkok, Thailand, 2016. (in Thai)
- [3] J. Sun and T. Zhou, Health risk assessment of China's main air pollution, BMC Public Health, 2017, 17, 212.



- [4] H. Xu, J.-F. Léon, C. Liousse, B. Guinot, V. Yoboué, A.B. Akpo, J. Adon, K.F. Ho, S.S.H. Ho, L. Li, E. Gardrat, Z. Shen and J. Cao, Personal exposure to PM_{2.5} emitted from typical anthropogenic sources in southern West Africa: chemical characteristics and associated health risks, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2019, 19(10), 6637-6657.
- [5] X. Zhang, S. Gao, Q. Fu, D. Han, X. Chen, S. Fu, X. Huang and J. Cheng, Impact of VOCs emission from iron and steel industry on regional O₃ and PM_{2.5} Pollutions, *Environmental Science and Pollution Research*, 2020, 27, 28853-28866.
- [6] H. Shen, P.-H. Cheng, C.-S. Yuan, Z.-M. Yang, C.-M. Hung and I.-R. Ie, Chemical characteristics, spatiotemporal distribution, and source apportionment of PM_{2.5} surrounding industrial complexes in Southern Kaohsiung, *Aerosol and Air Quality Research*, 2020, 20, 557-575.
- [7] S. Kawichai and S. Bootdee, Health risk assessment on exposure to PM_{2.5}-bound PAHs from an urban-industrial area in Rayong city, Thailand, *Macedonian Journal of Medical Science*, 2022, 10(E), 1-10.
- [8] S.N. Koplitz, D.J Jacob, M.P Sulprizio, L. Myllyvirta and C. Reid, Burden of Disease from Rising Coal-fired Power plant Emissions in Southeast Asia, *Environmental Science & Technology*, 2017, 51, 1467-1476.
- [9] D. Narita, N.T Kim Oanh, K. Sato, M. Hao, D.A. Permadi, N.N. Ha Chi, T. Ratanajaratroj and I. Pawarmart, Pollution characteristics and policy actions on fine particulate matter in a growing Asian economy: The case of Bangkok metropolitan region, *Atmosphere*, 2019, 10(5), 227.
- [10] T. Ponpiboon, I. Jayasvasti and A. Roongpisuthipong, Disaster in the winter of particle matter (PM_{2.5}), *EAU Heritage Journal Science and Technology*, 2014, 8(1), 40-46. (in Thai)
- [11] D. Hu and J. Jiang, PM_{2.5} pollution and risk for lung cancer: Arising issue in China, *Journal of Environmental Protection*, 2014, 5(8), 731-738.
- [12] L. Miller and X. Xu, Ambient PM_{2.5} human health effects-findings in China and research directions, *Atmosphere*, 2018, 9, 424.



- [13] International Agency for Research on Cancer (IARC), Outdoor air pollution, V.109, IARC publication, Lyon Cedex, France, 2015.
- [14] <https://www.eeco.or.th/th/rules-regulations>. (Accessed on 26 May 2022) (in Thai)
- [15] <https://reg.diw.go.th/executive/Prov3.asp?prove20>. (Accessed on 26 March 2022) (in Thai)
- [16] <https://www.ratchakitcha.soc.go.th/DATA/PDF/2561/E/041/25.PDF> (Accessed on 28 August 2022) (in Thai)
- [17] <https://air4thai.pcd.go.th/webV3/#/Histor> (Accessed on 27 November 2022) (in Thai)
- [18] <https://www3.tmd.go.th/info/Drought> (Accessed on 24 November 2022) (in Thai)
- [19] N.A. Greene and V.R. Morris, Assessment of public health risk associated with atmospheric exposure to PM_{2.5} in Washington, DC, USA, International Journal of Environmental Research and Public Health, 2006, 3(1), 86-97.
- [20] S. Prasertsin and G. Nathapindhu, The temporal pattern of ambient PM_{2.5} and Health risk assessment in Thailand, Indian Journal of Public Health Research and Development, 2020, 11(03), 1,096-1,100.
- [21] C.-M. Liao and K.-C. Chiang, Probabilistic risk assessment for personal exposure to carcinogenic polycyclic aromatic hydrocarbons in Taiwanese temples, Chemosphere, 2006, 63(9), 1610-1619.
- [22] A. Aslam, M. Ibrahim, I. Shahid, A. Mahmood, M. Kashif Irshad, M. Yamin, M. Gazala Tariq and R.R Shamshiri, Pollution characteristics of particulate matter (PM_{2.5} and PM₁₀) and constituent carbonaceous aerosols in a South Asian future megacity, Applied Sciences, 2020, 10, 8864.
- [23] H.Y. Lu, Y.L. Wu, K. Mutuku and K.-H. Chang, Various sources of PM_{2.5} and their impact on the air quality in Tainan city, Taiwan, Aerosol and Air Quality Research, 2019, 19, 601-619.
- [24] <http://climate.tmd.go.th/data/province>. (Accessed on 8 April 2022) (in Thai)
- [25] V.S. Chithra and S.M. Shiva Nagendra, Impact of outdoor meteorology on indoor PM₁₀, PM_{2.5} and PM₁ concentrations in a naturally ventilated classroom, Urban Climate, 2014, 10, 77-91.



- [26] P. Schober, C. Boer and L.A. Schwarte, Correlation coefficients: Appropriate use and interpretation, *Anesthesia and Analgesia*, 2018, 126(5), 1763-1768.
- [27] <http://www.epa.gov/ncea/efh>. (Accessed on 26 May 2022)
- [28] M.D. Miller, M.A. Marty, A. Arcus, J. Brown, D. Morry and M. Sandy, Differences between children and adults: implications for risk assessment at California EPA, *International Journal of Toxicology*, 2002, 21, 403–418.



การศึกษาตำแหน่งการเกิดดิสชาร์จบางส่วนบนวัสดุฉนวนอะคริลิก

อัญญารัตน์ สอนสนาม¹ สมพร วงษ์เพ็ง¹ และ ธวัชชัย สอนสนาม^{2*}

¹ ภาควิชาครุศาสตร์อุตสาหกรรม, คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

² สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า, คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี, มหาวิทยาลัยราชภัฏธนบุรี

* ผู้ประสานงานเผยแพร่ (Corresponding author), E-mail: tawatchai.s@dru.ac.th

วันที่รับบทความ: 6 ตุลาคม 2565; วันที่ทบทวนบทความ: 14 พฤศจิกายน 2565; วันที่ตอบรับบทความ: 19 ธันวาคม 2565

วันที่เผยแพร่ออนไลน์: 22 มีนาคม 2566

บทคัดย่อ: บทความนี้นำเสนอการตรวจจับดิสชาร์จบางส่วนบนฉนวนอะคริลิกซึ่งเป็นวัสดุที่นิยมใช้แพร่หลายในงานป้องกันส่วนที่เป็นบัสบาร์และต่อเชื่อมในส่วนประกอบของอุปกรณ์ไฟฟ้า งานวิจัยนี้ได้ออกแบบและสร้างชุดตรวจจับดิสชาร์จบางส่วนที่เกิดขึ้นจากการจำลองกับฉนวนอะคริลิกที่ใช้เป็นฉนวนไฟฟ้าในการทดลอง โดยใช้หลักการวิธีวัดกระแสความถี่สูงที่เกิดขึ้นจากการเกิดดิสชาร์จบางส่วนในฉนวนไฟฟ้าเมื่อได้รับแรงดันสูง ผู้วิจัยได้ใช้ชุดวงจรอินทิเกรทร่วมกับอุปกรณ์ตรวจจับกระแสความถี่สูง ซึ่งสามารถเหนี่ยวนำสัญญาณได้ตั้งแต่ 500 กิโลเฮิร์ตซ์ขึ้นไป การใช้งานอุปกรณ์ตรวจจับสามารถนำไปคล้องกับสายตัวนำชุดทดลองเพื่อให้เกิดการเหนี่ยวนำสัญญาณผ่านวงจรอินทิเกรต ผลการทดลองพบว่าอุปกรณ์ที่สร้างขึ้นสามารถตรวจวัดสัญญาณการเกิดดิสชาร์จบางส่วนบนผิวและในเนื้อของฉนวน รวมทั้งโคโรนาดิสชาร์จที่ตำแหน่งปลายแหลมทางด้านแรงดันสูงและด้านกราวด์ได้เป็นอย่างดี ประสิทธิภาพของอุปกรณ์การตรวจจับเกิดดิสชาร์จบางส่วนเป็นไปตามมาตรฐาน IEC 60270 และรูปคลื่นของสัญญาณเป็นไปตามรูปแบบมาตรฐานที่กำหนดซึ่งสามารถใช้อ้างอิงตำแหน่งการเกิดดิสชาร์จบางส่วนบนฉนวนอะคริลิกได้

คำสำคัญ: โคโรนา; ดิสชาร์จบางส่วน; แรงดันเบรกดาวน; อะคริลิก



A Study of the Partial Discharge Position on Acrylic Insulation

Anyarat Sonsanam¹, Somporn Vongpeang¹ and Tawatchai Sonsanam^{2*}

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

² Division of Electrical Engineering, Faculty of Science and Technology, Dhonburi Rajabhat University

* Corresponding author, E-mail: tawatchai.s@dru.ac.th

Received: 6 June 2022; Revised: 14 November 2022; Accepted: 19 December 2022

Online Published: 22 March 2023

Abstract: This paper presents the design and construction of partial discharge detection from simulation with acrylic insulation instead of general electrical insulation by using the concept of measurement of high current frequency from partial discharge on insulation when high voltage was supplied. An integrated circuit was created to use together with a high current frequency detection signal from 500 kHz or more frequency. Partial discharge detection can hook on the conductor to induce magnetic induction and signal through integrated circuits. The result showed that this tool was able to detect partial discharge signals on the surface and internal of the insulator, including the corona discharge that occurs at the high voltage rod and the ground rod as well. The testing of efficiency detection was similar according to IEC 60270 standard. It can be used to refer to the partial discharge position on acrylic insulation.

Keywords: Corona; Partial Discharge; Breakdown Voltage; Acrylic



1. บทนำ

ปัจจัยสำคัญของการใช้แรงดันไฟฟ้าทุกระดับคือ การฉนวน ซึ่งหมายถึงวัสดุที่นำมาใช้เป็นฉนวนและ เทคนิคการฉนวน กล่าวคือ ที่ใดมีไฟฟ้าแรงดันสูงที่นั่น ย่อมมีการฉนวนเพื่อป้องกันไม่ให้เกิดอันตรายแก่บุคคล และสิ่งมีชีวิตที่เข้าไปใกล้หรือสัมผัสไฟฟ้าแรงดันสูงและ ป้องกันไม่ให้เกิดการลัดวงจรของระบบไฟฟ้าระหว่าง สายเฟสกับสายเฟสหรือสายเฟสกับสายดิน ในการ ฉนวนอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงนั้นจะทำได้ง่ายหากมีพื้นที่ ว่างมากเพียงพอหรือเป็นการฉนวนที่ระดับไฟฟ้า แรงดันต่ำซึ่งจะใช้เทคนิคการฉนวนที่ไม่ซับซ้อนเท่า แรงดันสูงหากแต่การฉนวนไฟฟ้าแรงดันสูงและมีการ จำกัดพื้นที่ต้องออกแบบการฉนวนให้ดีและคำนึงถึง ค่าใช้จ่าย ดังนั้นผู้ออกแบบจึงจำเป็นต้องมีความรู้ พื้นฐานเกี่ยวกับลักษณะของสนามไฟฟ้า ความเครียด สนามไฟฟ้า โดยเฉพาะอย่างยิ่งความคงทนของฉนวน ต่อความเครียดสนามไฟฟ้า [1]

ปัจจุบันฉนวนในอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงนั้นเป็น ส่วนประกอบหลักที่สำคัญ โดยทั่วไปฉนวนไฟฟ้านั้นมี ความต้านทานสูง ความต้านทานของฉนวนไม่ได้มี ความสัมพันธ์กับความแข็งแรงไดอิเล็กทริกซึ่งพิจารณา ได้จากเกรเดียนต์หรือความหนาแน่นฟลักซ์ไฟฟ้า ถ้า สนามไฟฟ้าที่ให้กับฉนวนมีค่าสูงกว่าความแข็งแรง ไดอิเล็กทริกของฉนวนจะเกิดการเบรกดาวนของฉนวน ขึ้น [2] หรือถ้าหากฉนวนเกิดความบกพร่องเนื่องจากการผลิตหรือใช้งานอยู่ในสภาพแวดล้อมที่ไม่เหมาะสม หรือได้รับแรงดันเกินเป็นระยะเวลาานจะทำให้เกิดการ เสื่อมสภาพของฉนวนได้ โดยสภาพเช่นนี้อาจทำให้ อุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงเกิดดิซชาร์จบางส่วนซึ่งเป็นการ เกิดเบรกดาวนที่ไม่สมบูรณ์โดยพลังงานที่ทำให้เกิดการ

ดิซชาร์จนั้นไม่มากพอที่จะทำให้ฉนวนเปลี่ยนสภาพจาก ฉนวนเป็นตัวนำได้สมบูรณ์ ดิซชาร์จบางส่วนเป็นหนึ่งใน ปัจจัยหลักที่สามารถนำไปสู่ความผิดพลาดของ อุปกรณ์ไฟฟ้ากำลัง ยิ่งไปกว่านี้ดิซชาร์จบางส่วน สามารถทำลายระบบฉนวน และทำให้เกิดการ เสื่อมสภาพของระบบฉนวน [3] ซึ่งเป็นต้นเหตุที่ทำให้ ฉนวนเกิดการเสื่อมสภาพแล้วนำไปสู่การเบรกดาวนใน ที่สุด ดังนั้นอุปกรณ์ไฟฟ้าที่ใช้กับแรงดันสูงจึง จำเป็นต้องมีการทดลองการวัดค่าดิซชาร์จบางส่วนก่อน นำไปใช้งานหรือระหว่างที่ใช้งานไปได้ระยะหนึ่งแล้ว การตรวจติดตามอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงนั้นจะทำให้พบ ความบกพร่องในอุปกรณ์ก่อนที่จะได้รับความเสียหาย และจะทำให้การทำงานของระบบไฟฟ้าแรงสูงมี ประสิทธิภาพและความน่าเชื่อถือมากยิ่งขึ้น [4] โดยเป็น การทดลองแบบไม่ทำลาย เนื่องจากการวัดค่าดิซชาร์จ บางส่วนเป็นการวัดค่าการดิซชาร์จภายในเนื้อฉนวนซึ่ง เกิดจากโพรงก๊าซหรือการมีสิ่งเจือปนอยู่ภายในเนื้อ ฉนวน ณ ตำแหน่งต่าง ๆ ของอุปกรณ์การดิซชาร์จ ภายในภายใต้ความเครียดสนามไฟฟ้าและระยะเวลา การดิซชาร์จทำให้ฉนวนเกิดการเบรกดาวนในที่สุด [5] ดังนั้น ผู้วิจัยจึงได้เกิดแนวความคิดในการศึกษาวัสดุ ฉนวนอะคริลิคเนื่องจากเป็นที่นิยมประยุกต์ใช้กันส่วนที่ มีไฟฟ้าอย่างแพร่หลายเพื่อประเมินและหา ความสัมพันธ์ของแรงดันไฟฟ้าเบรกดาวนระหว่าง อิเล็กโทรด [6] และรูปแบบของการเกิดดิซชาร์จบางส่วน โดยอ้างอิงตามมาตรฐานที่กำหนด [7-9]

จากงานวิจัยผ่านมาพบว่าในการจำแนกรูปแบบ ดิซชาร์จบางส่วนที่นิยมและใช้กันมากมี 3 แบบ คือ แบบที่ 1 คือการตรวจวัดดิซชาร์จบางส่วนที่ต้องจัดกลุ่ม ลักษณะการเกิดขึ้นหรือการจำแนกประเภท แบบที่ 2



คือ การคำนวณหาค่าของการเกิดดิสชาร์จบางส่วนแต่ละชนิดเพื่อใช้เป็นข้อมูลในการจำและจำแนกประเภทโดยใช้เทคนิคในการเลือกลักษณะที่เหมาะสมเพื่อลดจำนวนให้น้อยลง และแบบที่ 3 คือการจำแนกประเภทของดิสชาร์จบางส่วนโดยใช้ปัญญาประดิษฐ์ช่วย ซึ่งในงานวิจัยนี้ผู้วิจัยได้สร้างอุปกรณ์การตรวจจับดิสชาร์จบางส่วนตามมาตรฐานและวัดสัญญาณบนฐานเวลารูปคลื่นไซส์

2. ระเบียบวิธีการ

2.1 การเตรียมอุปกรณ์การทดลอง

สำหรับการออกแบบวงจรจะพิจารณาจากความถี่ที่เกิดดิสชาร์จบางส่วนในรูปแบบต่าง ๆ คือ โคโรนาดิสชาร์จ (Corona Discharge) ดิสชาร์จภายใน (Internal Discharge) และดิสชาร์จตามผิว (Surface Discharge) ซึ่งความถี่ของกระแสดิสชาร์จบางส่วนจะเกิดขึ้นในความถี่ตั้งแต่ระดับกิโลเฮิร์ตซ์จนถึงเมกะเฮิร์ตซ์ ดังนั้นการออกแบบจึงให้ครอบคลุมย่านความถี่หรือช่วงความถี่ของดิสชาร์จบางส่วนที่ชุดเหนี่ยวนำกระแสที่สามารถวัดได้ [3-4]

งานวิจัยนี้เลือกใช้วงจรอินทิเกรตแบบแอกทิฟตัวกรองสัญญาณช่วงความถี่ย่านที่กว้าง ตามมาตรฐาน IEC 60270 ระบุว่าความถี่ของอุปกรณ์วัดที่จะใช้ตรวจจับดิสชาร์จบางส่วนนั้นต้องสามารถตอบสนองได้ตั้งแต่ 500 กิโลเฮิร์ตซ์ ขึ้นไปและช่วงความถี่ของการเกิดดิสชาร์จบางส่วนในแต่ละรูปแบบมีค่าในระดับ 1 เมกะเฮิร์ตซ์ ขึ้นไปและค่าขนาดแรงดันที่วัดได้อยู่ในช่วง 200-1000 มิลลิโวลต์ ลักษณะเป็นรูปคลื่นพัลส์ความถี่สูง [7] ดังนั้นการเลือกออปแอมป์จะต้องมีคุณสมบัติตอบสนองความถี่อยู่ในช่วง 500 กิโลเฮิร์ตซ์ ขึ้นไปจนถึงระดับ

10 เมกะเฮิร์ตซ์ หรือมากกว่า มีค่าอัตราสูงสุดของการเปลี่ยนแปลงของเอาต์พุต (Slew Rate) และช่วงเวลาที่ผลตอบสนองเมื่อสัญญาณเอาต์พุต (Rise Time) ต่ำเพื่อลดปัญหาความผิดเพี้ยนของรูปสัญญาณเพื่อให้การวัดมีความแม่นยำมากยิ่งขึ้น

จากข้อมูลข้างต้นจึงเลือกใช้ออปแอมป์ที่เหมาะสมกับการใช้งานนี้ คือ เบอร์ LM6181IN และทำการจำลองวงจรอินทิเกรตเพื่อหาค่า Frequency Response และ Bandwidth ของตัววงจรอินทิเกรต หลังจากนั้นจะทำการประกอบสร้างชุดอินทิเกรตขึ้นและนำไปทดลองร่วมกับชุดวัดกระแสความถี่สูง เพื่อใช้ในการวิเคราะห์ผลในการหารูปแบบของการเกิดดิสชาร์จบางส่วน ซึ่งช่วงความถี่ที่ได้ออกแบบและอัตราการขยายเป็นไปดังสมการที่ 1-2 [13-14]

$$F_L = \frac{1}{2\pi \times R_1 C_1} \quad (1)$$

$$= \frac{1}{2\pi \times 200 \times 6800 \times 10^{-12}}$$

$$= 117 \text{ กิโลเฮิร์ต}$$

$$F_H = \frac{1}{2\pi \times R_2 C_2} \quad (2)$$

$$= \frac{1}{2\pi \times 200 \times 100 \times 10^{-12}}$$

$$= 8 \text{ เมกะเฮิร์ต}$$

$$AV = R_4 : R_3 = 300:100 = 3:1$$

เมื่อ F_L คือ ความถี่ต่ำสุดที่ผ่านได้

F_H คือ ความถี่สูงสุดที่ผ่านได้

AV คือ อัตราการขยายกลับเฟส

R_1, R_2 คือ Element Input ของวงจรอินทิเกรต

C_1, C_2 คือ Feedback Element ของวงจรอินทิเกรต

R_3, R_4 คือ ความต้านทานของวงจรขยายกลับเฟส



วงจรอินทิเกรตที่ได้ทำการออกแบบเป็นชนิดตัวกรองความถี่รวม (Band Pass Filter) โดยออกแบบให้มีช่วงความถี่ 117 กิโลเฮิร์ต ถึง 8 เมกกะเฮิร์ต และมีอัตราการขยายอินพุตต่อเอาต์พุตเท่ากับ 1:3 ในการทดลองจะป้อนสัญญาณรูปคลื่นไซน์ (Sinusoidal) เพื่อทดลองรูปคลื่นสัญญาณโดยให้ CH1 คือ อินพุต และ CH2 คือ เอาต์พุตจากวงจรอินทิเกรต ดังรูปที่ 1-4

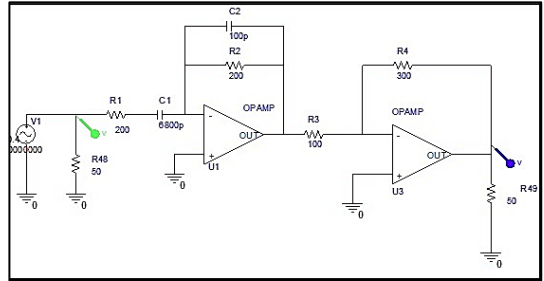
2.2 การออกแบบอุปกรณ์วัดกระแสความถี่สูง (High Frequency Current Transformer)

การเลือกใช้วัสดุต้องเลือกอุปกรณ์ที่สามารถตอบสนองต่อความถี่ที่ต้องการใช้งาน จากการศึกษาการออกแบบอุปกรณ์วัดกระแสความถี่สูง พบว่าแกนเฟอร์ไรท์ที่เหมาะสมและจัดหามาใช้ได้กับงานวิจัยนี้ก็คือ แกนเฟอร์ไรท์แบบวงแหวน (Ferrite Ring Core) ลักษณะรูปร่างของและสายการวัด แสดงดังรูปที่ 5

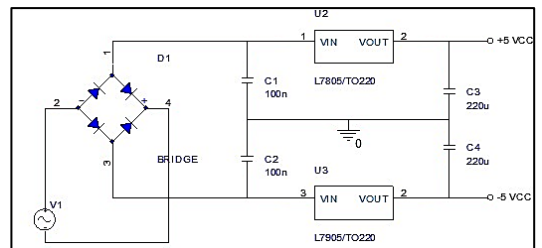
2.3 การออกแบบจำลองการเกิดดิซาร์จบางส่วน

อุปกรณ์ทดลองที่ใช้เพื่อจำลองสภาวะการเกิดดิซาร์จบางส่วนแบ่งออกเป็น 3 รูปแบบ คือ การเกิดดิซาร์จบางส่วนภายใน การเกิดดิซาร์จบางส่วนที่ผิว และการเกิดโคโรนาดิซาร์จที่กระจายแหลม

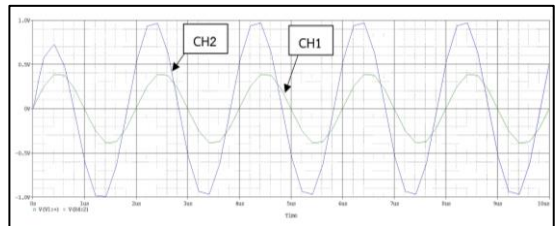
ผู้วิจัยเลือกวัสดุชนิดนวนชนิดอะคริลิคตัดเป็นรูปทรงกลมใช้ในการจำลองการเกิดดิซาร์จบางส่วนภายใน และการเกิดดิซาร์จบางส่วนตามผิว ส่วนการทดลองการเกิดโคโรนาดิซาร์จที่กระจายแหลมจะใช้วัสดุทองเหลืองกลิ้งขึ้นรูปให้ปลายแหลมทำมุม 45 องศา และอีกด้านเป็นแผ่นทองเหลืองระนาบลักษณะจานกลม ซึ่งวัสดุทดลองทั้งสามรูปแบบ แสดงได้ดังรูปที่ 6-8



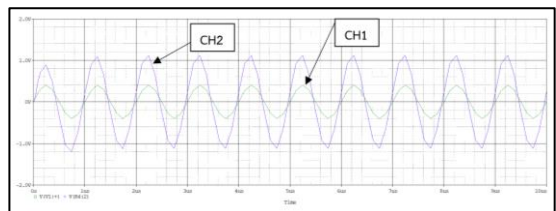
รูปที่ 1 การจำลองวงจรอินทิเกรตและวงจรขยาย



รูปที่ 2 การจำลองวงจรออปแอมป์



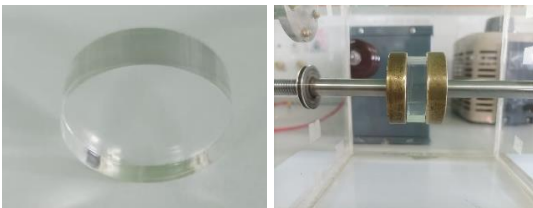
รูปที่ 3 สัญญาณจากการจำลองที่ความถี่ 500 กิโลเฮิร์ต



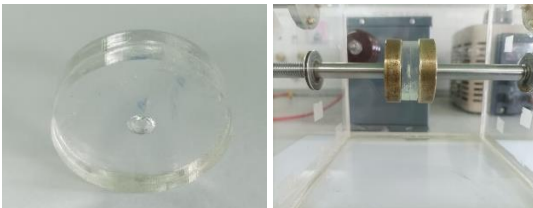
รูปที่ 4 สัญญาณจากการจำลองที่ความถี่ 1 เมกกะเฮิร์ต



รูปที่ 5 แกนเฟอร์ไรท์แบบวงแหวน



รูปที่ 6 วัสดุทดลองสำหรับการดิสชาร์จที่ผิว



รูปที่ 7 วัสดุทดลองสำหรับการดิสชาร์จภายใน



รูปที่ 8 การทดลองสำหรับการดิสชาร์จแบบโคโรนา

2.4 วงจรทดลองการเกิดดิสชาร์จบางส่วน

วงจรทดลองการเกิดดิสชาร์จบางส่วน ประกอบด้วย ตัวปรับแหล่งจ่ายแรงดันกระแสสลับ (Variac) 0-220 โวลต์ เชื่อมต่อกับหม้อแปลงทดลองแรงสูงขนาด 0-15 กิโลโวลต์ (Single-Phase AC Voltage Test Transformer) เพื่อป้อนแรงดันสูงให้กับชุดทดลอง (Test Object) [8-9] โดยวัดสัญญาณจากอุปกรณ์ตรวจจับกระแสความถี่สูง (HFCT) และแสดงผลบนออสซิลโลสโคปบนฐานเวลารูปคลื่นไซต์ตามมาตรฐาน IEC 60270 [7] ดังรูปที่ 9-10

3. ผลการทดลอง

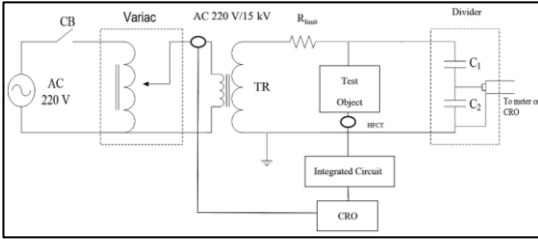
3.1. ผลการตรวจวัดสัญญาณการเกิดดิสชาร์จบางส่วนแบบต่าง ๆ

การทดลองตรวจวัดรูปแบบสัญญาณการเกิดดิสชาร์จบางส่วนนั้นจะทำการเพิ่มแรงดันกระแสสลับจากแหล่งจ่ายหม้อแปลงแรงดันสูง และสังเกตการเปลี่ยนแปลงด้วยปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นกับวัสดุทดสอบร่วมกับสัญญาณพัลส์ดิสชาร์จที่ตรวจจับได้ในออสซิลโลสโคป (CH2) บนฐานเวลารูปคลื่นไซต์ และการตรวจวัดแรงดันที่ทำการจ่ายให้กับวัสดุทดสอบนั้นทำการวัดโดยใช้โวลเตจดีไวเดอร์ซึ่งวัดทางด้านแรงดันสูงของหม้อแปลงทดสอบ (CH3)

สำหรับการเกิดดิสชาร์จภายในเนื้อฉนวนในรูปที่ 11 ปรากฏการณ์ดิสชาร์จจะเริ่มเกิดขึ้นเมื่อทำการเพิ่มแรงดันทดลองจนถึง 6.2 กิโลโวลต์ ของวัสดุทดลองหนา 1 เซนติเมตร ค่ายอดของกระแสดิสชาร์จจะมีขนาดใกล้เคียงกันเมื่อเปรียบเทียบระหว่างไซเคิลบวกหรือไซเคิลลบทางด้านเดียวกันของรูปคลื่นไซต์



บทความวิจัย



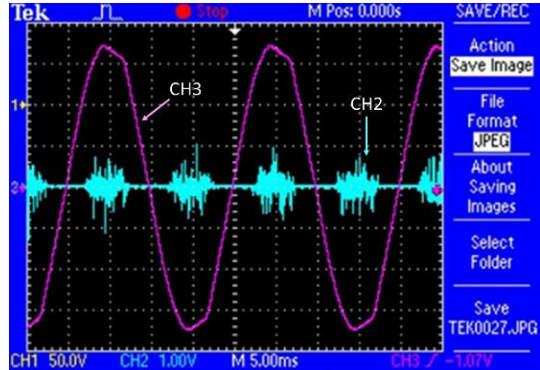
รูปที่ 9 วงจรทดลองการเกิดดิสชาร์จบางส่วน



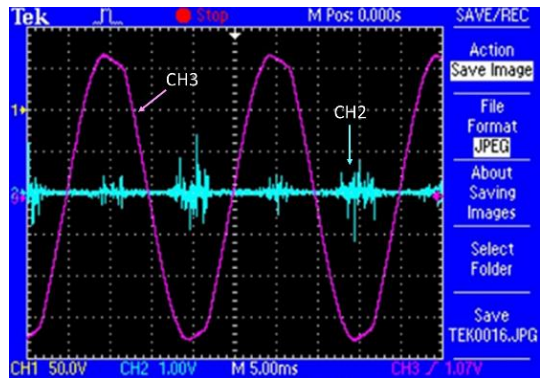
รูปที่ 10 วงจรจริงที่ใช้ในการทดลองดิสชาร์จบางส่วน

สำหรับการเกิดดิสชาร์จตามผิวแสดงดังรูปที่ 12 การเกิดดิสชาร์จเกิดขึ้นเมื่อแรงดันทดลองสูงขึ้นถึง 7.2 กิโลโวลต์ ของวัสดุทดลองหนา 1 เซนติเมตร ปรากฏการดิสชาร์จบางส่วนจะเกิดขึ้นก่อนค่าแรงดันทดลองขึ้นถึงจุดสูงสุด แต่การเกิดดิสชาร์จบางส่วนตามผิวนี้นพบว่าระดับความสูงของพัลส์หรือประจุของไซเคิลบวกและลบไม่เท่ากันโดยที่ประจุหรือพัลส์ในไซเคิลบวกจะมีขนาดต่ำกว่าประจุหรือพัลส์ในไซเคิลลบ

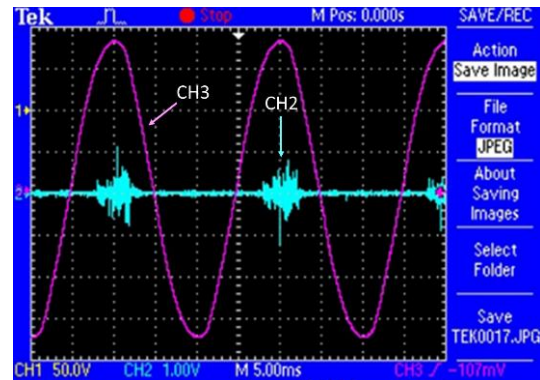
การเกิดโคโรнадิสชาร์จที่ปลายแหลมทางด้านกราวด์มีผลตรวจวัดตามรูปที่ 13 พบว่าปรากฏการณ์ดิสชาร์จเกิดเพียงไซเคิลใดไซเคิลหนึ่ง จากรูปมีประจุหรือพัลส์เกิดขึ้นรอบๆ ค่ายอดของแรงดันเพียงไซเคิลบวกเท่านั้น การเกิดโคโรнадิสชาร์จที่ปลายแหลมทางด้านกราวด์จะเริ่มเกิดขึ้นเมื่อแรงดันทดลองเพิ่มสูงถึง 4.5 กิโลโวลต์ ที่ระยะห่างของช่องอากาศ 1 เซนติเมตร



รูปที่ 11 การเกิดดิสชาร์จบางส่วนภายในเนื้อฉนวน



รูปที่ 12 การเกิดดิสชาร์จบางส่วนตามผิวของฉนวน



รูปที่ 13 การเกิดโคโรнадิสชาร์จที่ปลายแหลม

ทางด้านกราวด์ที่ระยะห่างของช่องอากาศ

1 เซนติเมตร

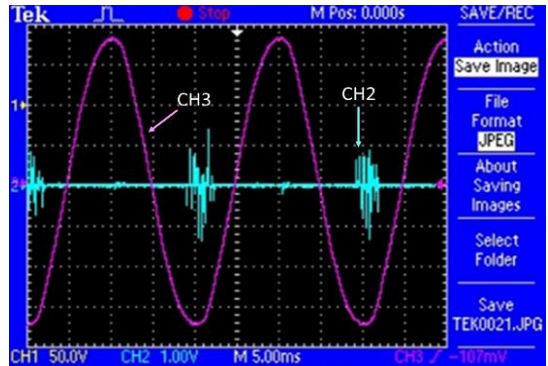


รูปที่ 14 แสดงการเกิดโคโรนาดิสชาร์จปลายแหลมทางด้านแรงดันสูง พบว่าปรากฏการณ์การเกิดดิซชาร์จเกิดขึ้นเพียงไซเคิลใดไซเคิลหนึ่ง จากรูปพบว่า มีประจุหรือกระแสพัลส์เกิดขึ้นรอบๆ ค่ายอดของแรงดันเพียงไซเคิลลบเท่านั้น การเกิดโคโรนาดิสชาร์จที่ปลายแหลมทางด้านแรงดันสูงจะเริ่มเกิดขึ้นเมื่อแรงดันทดลองเพิ่มสูงถึง 4.2 กิโลโวลต์ ที่ระยะห่างของช่องอากาศ 1 เซนติเมตร

ผลการวัดดิซชาร์จบางส่วนแบบโคโรนาดิสชาร์จโดยให้ปลายแหลมเป็นด้านแรงดันสูงดังรูปที่ 14 การเกิดโคโรนาดิสชาร์จเกิดที่ตำแหน่ง 90 องศา ของรูปคลื่นไซน์และเมื่อเปลี่ยนให้ปลายแหลมเป็นกราวด์ตำแหน่งการเกิดดิซชาร์จบางส่วนยังเกิดที่ตำแหน่ง 90 องศาเหมือนเดิมแต่อยู่ในซีกบวกของแรงดันทดลอง

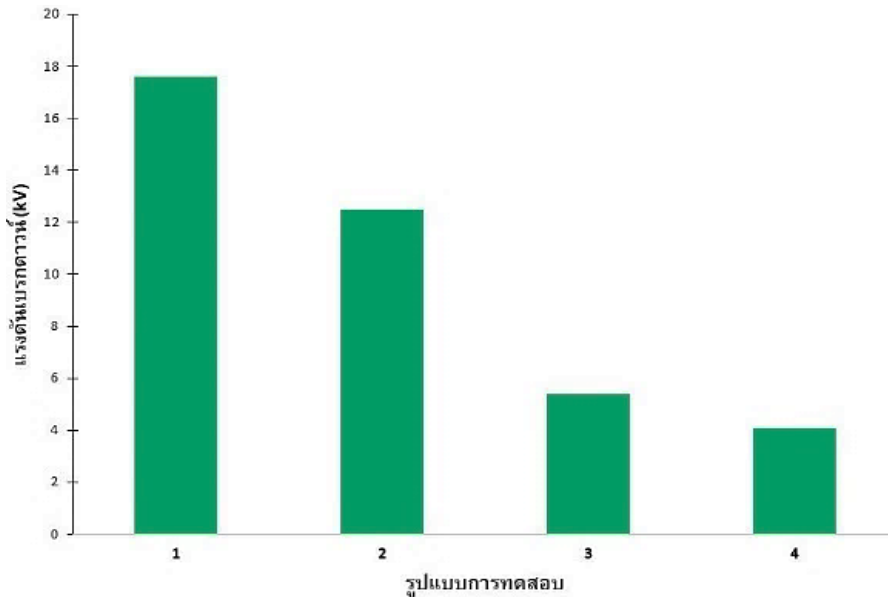
จากผลการทดลองได้ทำการการเปรียบเทียบผลการวัดที่จากอุปกรณ์วัดกระแสความถี่สูงที่ได้ออกแบบและสร้างขึ้นจากแกนเฟอร์ไรท์ เบอร์ Ferrite Ring Core 742 702 5 พันด้วยลวดตัวนำจำนวนรอบเท่ากันคือ 25 รอบ พบว่าลักษณะและตำแหน่งของสัญญาณกระแสพัลส์ได้จากแกนเฟอร์ไรท์มีลักษณะใกล้เคียงกับลักษณะกระแสพัลส์หรือรูปแบบการเกิดดิซชาร์จตามมาตรฐานและสามารถแยกรูปแบบการเกิดดิซชาร์จบางส่วนได้ชัดเจนและสามารถเหนี่ยวนำกระแสที่เกิดการดิซชาร์จได้ดี

การทดลองฉนวนทางไฟฟ้าแรงสูงอีกรูปแบบหนึ่งก็นิยมทำการวัดค่าคือ แรงดันเบรกดาวน์ของฉนวนไม่ว่าช่องว่างอากาศหรือวัสดุฉนวนแข็งที่นำมาใช้งานเพื่อสังเกตและประเมินผลกลไกการเกิดเบรกดาวน์ [10-11] จากรูปที่ 15 คือ ค่าแรงดันเบรกดาวน์ของ รูปแบบการทดลองที่ 1-4 คือ กรณีวัสดุอะคริลิกปกติ กรณีวัสดุ



รูปที่ 14 การเกิดโคโรนาดิสชาร์จที่ปลายแหลมทางด้านแรงสูงที่ระยะห่างของช่องอากาศ 1 เซนติเมตร

อะคริลิกที่มีรูพรองข้างใน กรณีปลายแหลม ด้านกราวด์และกรณีปลายแหลมด้านไฟฟ้าแรงดันสูง ตามลำดับ จากผลการทดลองพบว่าเมื่อเปรียบเทียบแรงดันเบรกดาวน์ของรูปแบบการทดลองที่ 2 มีค่า แรงดันน้อยกว่ารูปแบบการทดลองที่ 1 เท่ากับ 5.1 กิโลโวลต์ หรือ 28.98 เปอร์เซ็นต์ เนื่องจากรูปแบบการทดลองที่ 2 นั้นจำลองให้วัสดุไม่เป็นเนื้อเดียวกันโดยให้เกิดรูพรองอากาศตรงกลางเมื่อแรงดันที่ตกคร่อมช่องว่างอากาศจะเกือบเท่ากับแรงดันทั้งหมดระหว่างขั้วอิเล็กโทรด การสปาร์กจะเกิดในช่องว่างอากาศก่อนเรียกว่า การเกิดดิซชาร์จบางส่วนและทำให้มีประจุเกิดขึ้นบนผิวฉนวนเพิ่มขึ้นมีประจุสะสมอยู่มากเนื่องจากมีค่าไดอิเล็กทริกต่ำ มีความเครียดสนามไฟฟ้าสูงกว่าบริเวณอื่นและมีค่าเปอร์มิตติวิตีต่ำกว่าเนื้อฉนวนหลักเมื่อจ่ายแรงดันไฟฟ้าจะเกิดความร้อนเกิดขึ้นมากกว่าบริเวณส่วนอื่น ฉะนั้นสนามไฟฟ้าภายในช่องว่างจึงเกิดขึ้นมากกว่าค่าแรงดันเบรกดาวน์ทำให้น้ำไปสู่การเบรกดาวน์ที่เร็วกว่าวัสดุอะคริลิกรูปแบบที่ 1 [12-13]



รูปที่ 15 แรงดันเบรกตาวาน์ของการทดลองแต่ละกรณี

เมื่อเปรียบเทียบแรงดันเบรกตาวาน์ของรูปแบบการทดลองที่ 3 และ 4 พบว่า อิเล็กโทรดปลายแหลมหัวแรงดันสูงเมื่อเทียบกับแผ่นระนาบเมื่อแรงดันสูงถึงค่าแรงดันคอโรนาเริ่มเกิด ก๊าซที่อยู่ระหว่างปลายแหลมกับแผ่นระนาบจะเกิดการแตกตัวบริเวณที่ปลายแหลมซึ่งอิเล็กตรอนมีสมบัติเคลื่อนที่ได้เร็วจะวิ่งเข้าหาปลายแหลมที่มีศักย์เป็นบวกหรือแอนอด ทำให้วัตถุปลายแหลมมีสภาพเป็นกลางทางไฟฟ้า ขณะที่ไอออนบวกถูกดึงอิเล็กตรอนออกไปบริเวณปลายแหลมซึ่งมีสมบัติเคลื่อนที่ได้ช้ากว่าอิเล็กตรอนค้างอยู่บริเวณผิวปลายแหลมเป็นผลทำให้ความเครียดทางไฟฟ้าที่บริเวณปลายแหลมลดลง แต่ในทางตรงกันข้ามความเครียดของสนามไฟฟ้าจะไปเกิดขึ้นที่บริเวณแผ่นระนาบสูงขึ้นอันเนื่องมาจากประจุไอออนบวกหน้าปลายแหลมที่ค้างอยู่คล้ายกับปลายอิเล็กโทรดมีพื้นที่มากขึ้นและการสะสมตัวของไอออนสูงเหมือน

ต่อระยะปลายแหลมให้ระยะห่างระหว่างปลายแหลมกับแผ่นระนาบสั้นลงขณะที่ความเครียดสนามไฟฟ้าเพิ่มขึ้นระหว่างช่องว่างของปลายแหลมกับแผ่นระนาบเป็นผลทำให้เกิดเบรกตาวาน์ได้ง่ายนั่นคือ ประจุคงค้างทำให้แรงดันเบรกตาวาน์หัวบวกลดลงทำให้แรงดันเบรกตาวาน์รูปแบบการทดลองที่ 4 ต่ำกว่ารูปแบบการทดลองที่ 3 [1, 14]

4. สรุปผลการทดลอง

จากผลการวัดดิสชาร์จบางส่วนแบบโคโรนา ดิสชาร์จโดยให้ปลายแหลมเป็นด้านแรงดันสูง การเกิดโคโรนาดิสชาร์จจะเกิดที่ตำแหน่ง 90 องศา ของรูปคลื่นไซน์และเมื่อเปลี่ยนให้ปลายแหลมเป็นกราวด์ตำแหน่งการเกิดดิสชาร์จบางส่วนยังเกิดที่ตำแหน่ง 90 องศา เหมือนเดิมแต่อยู่ในฝั่งด้านบวกของแรงดันทดลอง



ดิสชาร์จบางส่วนภายในเนื่อฉนวนพบว่าคลื่นตำแหน่งที่เกิดจะเกิดขึ้นที่มุมระหว่าง 0-90 องศา และ 180-270 องศา การทดลองการเกิดดิสชาร์จบางส่วนตามผิวของฉนวนจะเกิดที่มุมเฟสระหว่าง 0-90 องศา และ 180-270 องศา เหมือนกับดิสชาร์จบางส่วนภายในผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าการเกิดดิสชาร์จบางส่วนตามผิวนั้น ไซเคิลบวกมีกระแสดิสชาร์จบางส่วนน้อยกว่าไซเคิลลบ

ขนาดของแรงดันที่เริ่มเกิดดิสชาร์จและเบรกดาวนขึ้นอยู่กับความเครียดสนามไฟฟ้าในโพรงอากาศ และความคงทนต่อการเบรกดาวนของโพรงอากาศโดยที่ความเครียดสนามไฟฟ้าในโพรงอากาศขึ้นอยู่กับความเข้มของสนามไฟฟ้าและความเข้มสนามไฟฟ้าขึ้นอยู่กัขนาดแรงดันที่ป้อนและขนาดของโพรงอากาศและทิศทางของความเข้มสนามไฟฟ้าซึ่งสัมพันธ์กับสนามไฟฟ้าและผลของประจุค้างจะเกิดขึ้นในกรณีที่มีค่าสูงกว่าแรงดันโคโรนาเริ่มเกิด และผลกระทบของประจุค้างทำให้แรงดันเบรกดาวนของขั้วบวกและขั้วลบต่างกันเ็นทางตรงกันข้ามกับแรงดันเบรกดาวนโดยตรง

อุปกรณ์ตรวจจับกระแสความถี่สูงสำหรับตรวจจับดิสชาร์จบางส่วนที่ออกแบบและสร้างเพื่อใช้ในการตรวจวัดดิสชาร์จบางส่วนของฉนวนอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูง พบว่าอุปกรณ์ตรวจจับกระแสความถี่สูงสามารถทำการวัดสัญญาณการเกิดดิสชาร์จบางส่วนในเนื่อฉนวน การดิสชาร์จบางส่วนที่ผิวของฉนวนและโคโรนาดิสชาร์จที่เกิดขึ้นที่ปลายแหลมทางด้านแรงดันสูงและปลายแหลมทางด้านกราวด์ได้มีลักษณะใกล้เคียงเมื่อเทียบกับรูปแบบลักษณะการเกิดดิสชาร์จบางส่วนตามมาตรฐาน

5. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณมหาวิทยาลัยราชภัฏธนบุรีที่อนุเคราะห์สถานที่และเครื่องมือในการทดลอง

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] M. Abdel-Salam, H. Anis, A. El-Morshedy and R. Radwan, High voltage engineering: Theory and practice, Marcel Dekker Inc., NY, USA, 2000.
- [2] S. Sumruay, High voltage engineering, 3rd Ed., Chulalongkorn University, Thailand, 2006.
- [3] S. Boonpoke, Development of partial discharges pattern recognition systems by using artificial intelligence techniques, Thesis, Suranaree University of Technology, Thailand, 2010.
- [4] R. Sriphuek, S. Chotigo and K. Tikakosol, Application of on-line partial discharge measurement for high voltage equipment in thailand, KMUTT Research and Development Journal, 2016, 39(1), 101-118. (in Thai)
- [5] A. Phongsa and W. Plueksawan, Partial discharge diagnosis and localization in underground cable at Hin Kong power station, Nong Kae district, Saraburi, Thailand, Journal of Engineering, RMUTT, 2020, 18(2), 59-68. (in Thai)



- [6] M. Schueller, A. Blaszczyk, A. Krivda and J. Smajic, Influence of the surface conductivity of a single glass barrier on the breakdown voltage in an air insulated rod plane arrangement, 2016 IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena (CEIDP), Proceeding, 2016, 428-431.
- [7] IEC 60270, High-voltage Test Techniques – Partial Discharge Measurements, 2000.
- [8] IEC 60060-1, High-voltage Test Techniques, 1989.
- [9] IEEE 4a, Standard Techniques for High-Voltage Testing, 2001.
- [10] B. Chen, M. Kolosche, M. Stewart, J. Busfield and F. Carpi, Electrical breakdown of on acrylic dielectric elastomer: effects of hemispherical probing electrode's size and force, International Journal of Smart and Nano Materials, 2015, 6(4), 290-303.
- [11] S. Chakraborty, R. Patil and Y.B. Mandake, Study of breakdown phenomenon in solid insulators using sphere gap and insulation testing kits, International Research Journal of Engineering and Technology, 5(4), 2018, 2759-2761.
- [12] S.S. M.Ghoneim, S.S. Dessouky, A. Boubakeur, A.A. Elfaraskoury, A.B.A. Sharaf, K. Mahmoud, M. Lehtonen and M.M.F. Darwish, Accurate insulating oil breakdown voltage model associated with different barrier effects, Processes, 2021, 9, 657.
- [13] M. S. Naidu and V. Kamaraju, High voltage engineering, McGraw Hill Ltd., NY, USA, 1995.
- [14] E. Kuffel, W.S. Zaengl and J. Kuffel, High-voltage engineering, Butterworth Heinemann Inc., Oxford, UK, 2000.



วิธีการวิเคราะห์แบบล้อมกรอบข้อมูล-ทากุชิสำหรับการกำหนดพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของเครื่องขุดเกล็ดปลาตะเพียน

อนุชา ศรีบุรัมย์¹ วรณรพ ชันธิรัตน์^{1*} วราภรณ์ วัชรอส¹ อามิณฑ์ หล้าวงศ์¹
นรงค์ วิชาภา¹ ไทยทัศน์ สุดสวนสี¹ ศุภกิจ เต็กศิริ¹ เกียรติพงษ์ เจริญจิตต์²
อนงค์นาถ โรจนกร วังคำหาญ³ มณฑนา ทองสุพล⁴ และ อัจฉรา ชุมพล⁵

¹ สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ, คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม, มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์

² สาขาวิชาเทคโนโลยีการอาหาร, คณะเทคโนโลยีการเกษตร, มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์

³ สาขาวิชาวิทยาการสิ่งแวดล้อมและทรัพยากรธรรมชาติ, คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีสุขภาพ, มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์

⁴ สาขาวิชานวัตกรรมการออกแบบและสถาปัตยกรรม, คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม, มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์

⁵ สาขาวิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์, คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม, มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์

* ผู้ประสานงานเผยแพร่ (Corresponding Author), E-mail: wanrop.kh@ksu.ac.th

วันที่รับบทความ: 30 กันยายน 2565; วันที่ทบทวนบทความ: 25 พฤศจิกายน 2565; วันที่ตอบรับบทความ: 9 มกราคม 2566

วันที่เผยแพร่ออนไลน์: 3 เมษายน 2566

บทคัดย่อ: การกำหนดสภาวะที่เหมาะสมของเครื่องจักรเป็นปัญหาหนึ่งที่มีความสำคัญสำหรับกระบวนการผลิต เพราะว่าการกำหนดพารามิเตอร์ที่เหมาะสมช่วยให้การใช้งานเครื่องจักรที่มีอยู่ให้เกิดประโยชน์สูงสุด งานวิจัยนี้นำเสนอการวิเคราะห์แบบล้อมกรอบข้อมูลและทากุชิเพื่อกำหนดค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของเครื่องขุดเกล็ดปลาตะเพียนสำหรับกระบวนการผลิตอาหารแปรรูปจากปลา ได้แก่ ปลาแห้ง และ ปลาต้ม เริ่มจากกำหนดปัจจัยที่เกี่ยวข้องจำนวน 3 ปัจจัย ได้แก่ ความเร็วรอบ เวลา และความจุ ซึ่งแต่ละปัจจัยมีจำนวน 3 ระดับ และผลตอบสนองคือความเสียหายของปลา และประสิทธิภาพการขุดเกล็ดปลา ผลการศึกษาพบว่า ปัจจัยความเร็วรอบ เวลา และความจุ มีนัยสำคัญต่อผลตอบสนองทั้งสองค่า ($P\text{-value} \leq 0.05$) โดยเมื่อเทียบกับผลการทดลองเดิมพบว่าความเสียหายของปลาลดลง 31.46% และประสิทธิภาพของการขุดเกล็ดเพิ่มขึ้น 24.47% นอกจากนี้วิธีที่นำเสนอมีประสิทธิภาพที่ดีเทียบกับวิธีอื่นในวรรณกรรม ดังนั้นวิธีที่นำเสนอนี้สามารถใช้เป็นวิธีการที่มีประสิทธิภาพวิธีหนึ่งสำหรับการแก้ปัญหาการกำหนดสภาวะที่เหมาะสมที่มีผลตอบสนองหลายค่าได้

คำสำคัญ: การวิเคราะห์แบบล้อมกรอบข้อมูล; วิธีทากุชิ; เครื่องขุดเกล็ดปลา; ปัญหาการกำหนดสภาวะที่เหมาะสมที่มีผลตอบสนองหลายค่า



Data Envelopment Analysis-Taguchi Method for Determining Optimal Parameters of a Fish Scaling Machine

Anucha Sriburum¹, Wanrop Khanthirat^{1,*}, Waraporn Warorot¹, Amin Lawong¹,
Narong Wichapa¹, Thaithat Sudsuansee¹, Supakit Sergsiri¹, Kiatipong Charoenjit²,
Anongnart Rotjanakorn Wangchamhan³, Mantana Tongsupon⁴ and Atchara Choompol⁵

¹ Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Kalasin University

² Department of Food Technology, Faculty of Agro-Industrial Technology, Kalasin University

³ Department of Environmental Science and Natural Resources, Faculty of Science, Kalasin University

⁴ Department of Innovation Design and Architecture, Faculty of Engineering, Kalasin University

⁵ Department of Computer Engineering, Faculty of Engineering, Kalasin University

* Corresponding author, E-mail: wanrop.kh@ksu.ac.th

Received: 30 September 2022; Revised: 25 November 2022; Accepted: 9 January 2023

Online Published: 3 April 2023

Abstract: Determining the optimal parameters of a machine is an important issue in the manufacturing process because it can help optimize the use of existing machines. This paper presents a data envelopment analysis and the Taguchi method to find the optimal parameters of a fish scaling machine to produce processed foods from fish, including dried fish and pickled fish. Three related factors, including speed, time, and capacity, were considered; each factor had three levels, and the responses were fish scaling removal efficiency and fish damage. The results showed that speed, time, and capacity were significant for both responses (P -value ≤ 0.05). Compared to the original condition, the fish damage was decreased by 31.46% and the fish scaling removal efficiency was increased by 24.47%. In addition, the proposed method had good efficacy compared to other methods in the literature. Therefore, the proposed method can be used as an effective way for solving multi-response optimization problems in real-world applications.

Keywords: Data Envelopment Analysis; Taguchi Method; Fish Scaling Machine; Multi-Response Optimization Problem



1. บทนำ

ประเทศไทยมีความอุดมสมบูรณ์ของแหล่งอาหารจากแหล่งน้ำจืดตามธรรมชาติ โดยมีแหล่งน้ำจืดที่สำคัญประมาณ 25 ลุ่ม และมีลุ่มน้ำย่อย จำนวน 254 แห่ง แหล่งน้ำจืดเหล่านี้ประกอบด้วย แม่น้ำสายหลัก แม่น้ำสายย่อย อ่างเก็บน้ำ ลำคลอง ห้วย หนอง คลอง บึง และทะเลสาบ รวมทั้งแหล่งน้ำที่สร้างขึ้นเองเพื่อใช้ในภาคการเกษตร และการประมง คิดเป็นพื้นที่โดยประมาณ 511,361 ตารางกิโลเมตร ประชาชนที่อาศัยตามแหล่งน้ำส่วนใหญ่ จะประกอบอาชีพเกษตรกรรมและการประมงควบคู่กันไป บางกลุ่มทำอาชีพการประมงเป็นอาชีพหลักสร้างรายได้ให้แก่ครอบครัว จากผลการสำรวจปริมาณปลาน้ำจืดที่จับได้ในปี 2563 มีปริมาณการจับ 112,727.31 ตัน คิดเป็นร้อยละ 96.47 ของปริมาณสัตว์น้ำทั้งหมด มีมูลค่ารวม 6,754.98 ล้านบาท คิดเป็นร้อยละ 90.50 ของมูลค่าสัตว์น้ำทั้งหมด โดยปลาตะเพียนมีปริมาณการจับมากที่สุด 19,384.86 ตัน คิดเป็นร้อยละ 16.59 ของปริมาณสัตว์น้ำทั้งหมด มีมูลค่า 946.06 ล้านบาท คิดเป็น ร้อยละ 12.68 ของมูลค่าสัตว์น้ำทั้งหมด รองลงมาได้แก่ ปลานิล มีปริมาณการจับ 15,647.26 ตัน คิดเป็นร้อยละ 13.39 ของปริมาณสัตว์น้ำทั้งหมด มีมูลค่า 878.90 ล้านบาท คิดเป็นร้อยละ 11.78 ของมูลค่าสัตว์น้ำทั้งหมด อันดับสามได้แก่ ปลาสวาย มีปริมาณการจับ 11,231.23 ตัน คิดเป็นร้อยละ 9.61 ของปริมาณสัตว์น้ำทั้งหมด มีมูลค่า 477.28 ล้านบาท คิดเป็นร้อยละ 6.39 ของมูลค่าสัตว์น้ำทั้งหมด [1]

พื้นที่จังหวัดกาฬสินธุ์มีเขื่อนลำปาวซึ่งเป็นเขื่อนดินขนาดใหญ่ เป็นแหล่งกักเก็บน้ำเพื่อการเกษตร การประมง การประปา และแหล่งท่องเที่ยวที่มีชื่อเสียง

ของจังหวัด เขื่อนลำปาวเป็นแหล่งน้ำที่สร้างรายได้ให้กับเกษตรกรในพื้นที่ ซึ่งประชากรส่วนใหญ่ประกอบอาชีพเกษตรกรรม และบางรายทำการประมงเป็นอาชีพหลักที่สร้างรายได้ให้แก่กลุ่มชุมชน โดยอาชีพที่สร้างรายได้สูงให้แก่ชุมชนคืออาชีพค้าขายผลิตภัณฑ์จากปลา เช่น ปลาดุกแห้ง ปลาส้ม และปลาร้า จากการสำรวจข้อมูลพบว่าพื้นที่รอบเขื่อนลำปาวมีประชากรอาศัยมากกว่า 1,500 หลังคาเรือน ประชากรกลุ่มหนึ่งในพื้นที่ที่กรณศึกษาประกอบอาชีพการประมงเป็นอาชีพหลัก โดยการนำปลาที่จับได้มาทำการแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์ปลาแห้ง และปลาส้มไว้จำหน่าย ซึ่งวัตถุดิบที่ใช้ในการแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์ปลาแห้ง และปลาส้มได้แก่ ปลาตะเพียนและปลาสวาย จากเขื่อนลำปาว จากการสำรวจข้อมูลพบว่าความต้องการสินค้าประเภท ปลาดุกแห้ง และปลาส้ม มีปริมาณความต้องการสูงมาก ทั้งตลาดภายในประเทศ และต่างประเทศ อย่างไรก็ตาม กระบวนการผลิตปลาแปรรูป ยังไม่เพียงพอต่อความต้องการของผู้บริโภค เนื่องจากกระบวนการผลิตปลาแปรรูปทั้งปลาแห้ง และปลาส้ม มีขั้นตอนที่ต้องใช้เวลาก่อผลผลิตช้า มีต้นทุนแรงงานสูง และสุขอนามัยที่ยังไม่ดีเพียงพอ นอกจากนี้ผู้ประกอบการยังขาดองค์ความรู้ด้านเครื่องมือช่วยในการผลิต

ขั้นตอนการแปรรูปปลาแห้งและปลาส้มจะมีกระบวนการผลิตหลักเหมือนกัน ได้แก่ (1) เตรียมปลาสดที่รับซื้อจากชาวประมงในพื้นที่ (2) ขอดเกล็ดปลาโดยใช้แรงงานคน (3) ล้างปลา (4) ตัดหัว (5) หมักปลา หลังจากนั้น นำปลาไปแปรรูปเป็นปลาแห้งหรือปลาส้มต่อไป

จากการการสัมภาษณ์และรวบรวมข้อมูลของผู้ประกอบการในพื้นที่กรณศึกษา จังหวัดกาฬสินธุ์



พบว่าขั้นตอนการขอดเกล็ดปลาเป็นขั้นตอนที่เป็นจุดคอขวดของกระบวนการผลิตปลาแห้งและปลาสาม (ใช้เวลาและแรงงานคนในการผลิตมากที่สุด) โดยการขอดเกล็ดปลาด้วยมือจำนวน 150 กิโลกรัม จะใช้แรงงานคนโดยประมาณ จำนวน 4 คน จะใช้เวลาในการขอดเกล็ดประมาณ 8 ชั่วโมง โดยชนิดของปลาที่ใช้สำหรับแปรรูปจะเป็นปลาในกลุ่มปลาตะเพียน ได้แก่ ปลาสวายขาวและปลาตะเพียนขาว ดังรูปที่ 1 ปัจจุบันทางกลุ่มมีการแปรรูปปลาเป็นผลิตภัณฑ์ปลาแห้ง และปลาสามมีปริมาณการผลิตหรือแปรรูปอยู่ระหว่าง 100-150 กิโลกรัมต่อวันสำหรับการจำหน่ายให้ลูกค้า

จากเหตุผลดังกล่าวในข้างต้น กลุ่มวิจัยจึงได้ทำการพัฒนาเครื่องขอดเกล็ดปลาตะเพียนสำหรับช่วยในกระบวนการผลิตปลาแปรรูป เพื่อเพิ่มกำลังการผลิต ลดต้นทุนแรงงาน และเพิ่มความสะดวกต่อกระบวนการผลิต อย่างไรก็ตามเพื่อให้เกิดประโยชน์สูงสุดเครื่องขอดเกล็ดปลาที่สร้างขึ้น ต้องทำการกำหนดพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องให้เหมาะสม เพื่อให้ได้ผลตอบสนองที่มีประสิทธิภาพสูงสุด ซึ่งงานวิจัยนี้ได้กำหนดผลตอบสนองไว้ 2 ผลตอบสนอง ได้แก่ ประสิทธิภาพการขอดเกล็ด (การหลุดของเกล็ดปลาหลังการขอดเกล็ดเทียบกับก่อนการขอดเกล็ดปลา) และความเสียหายของเนื้อปลาที่ผ่านกระบวนการขอดเกล็ดปลา (ปลาเนื้อขาว หรือปลาเนื้อละเอียด) โดยประเมินประสิทธิภาพการขอดเกล็ดปลา และความเสียหายของเนื้อปลา ในงานวิจัยนี้จะใช้ผู้ประกอบการที่มีส่วนเกี่ยวข้องเป็นผู้ให้คะแนนแบบมาตราประมาณค่า (Rating Scale) เนื่องจากปัญหานี้เป็นปัญหาการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดที่มีหลายผลตอบสนองซึ่งมีความซับซ้อนและยุ่งยากในการวิเคราะห์หาผลเฉลย



รูปที่ 1 วัตถุดิบสำหรับการแปรรูปปลาแห้งและปลาสาม

ที่เหมาะสมเนื่องจากมีผลตอบสนองหลายค่า การพัฒนาเครื่องมือในการประมวลผลที่เหมาะสมสำหรับการแก้ปัญหา เป็นแนวทางหนึ่งที่สามารถใช้เครื่องจักรที่สร้างขึ้นให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุดต่อไป ทั้งนี้เพื่อการพัฒนาศักยภาพของผู้ประกอบการปลาแปรรูปให้มีความสามารถในการแข่งขัน และรายได้เพิ่มขึ้น การนำองค์ความรู้ด้านวิศวกรรมและนวัตกรรมมาช่วยในการปรับปรุงกระบวนการผลิต ดังเช่น การสร้างเครื่องขอดเกล็ดปลาตะเพียน และการกำหนดพารามิเตอร์ที่เหมาะสมในกรณีศึกษา จึงเป็นวิธีการหนึ่งที่จะช่วยยกระดับความกินดี อยู่ดีของชุมชนในพื้นที่ได้

การวิเคราะห์แบบล้อมกรอบข้อมูล (Data Envelopment Analysis: DEA) เป็นวิธีการหนึ่งที่นิยมใช้ในการวัดประสิทธิภาพของหน่วยผลิต (Decision Making Unit: DMU) ที่มีหลายปัจจัย ทั้งปัจจัยนำเข้า (Inputs) และปัจจัยผลผลิต (Outputs) [2-4] ทั้งนี้หน่วยผลิตอาจหมายถึง หน่วยงานธุรกิจ โรงเรียนโรงพยาบาล โรงแรม และอื่นงาน การวิเคราะห์แบบล้อมกรอบข้อมูลได้รับการยอมรับอย่างแพร่หลายทั้งในประเทศและต่างประเทศ ซึ่งวิธีนี้ได้ถูกนำไปประยุกต์ใช้ในหลากหลายสาขา ทั้งด้านวิศวกรรมศาสตร์ บริหารธุรกิจ และเศรษฐศาสตร์ โดยการวิเคราะห์แบบล้อมกรอบ



ข้อมูลสามารถนำไปประยุกต์ใช้ร่วมกับวิธีการอื่น ๆ เพื่อแก้ปัญหาที่ซับซ้อนที่ไม่สามารถใช้วิธีการใดวิธีการหนึ่งเพียงลำพังได้

การออกแบบการทดลองแบบทากูชิเป็นเครื่องมือเชิงคุณภาพที่ช่วยปรับปรุงหรือพัฒนากระบวนการได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อกำหนดปัจจัยที่เหมาะสมของกระบวนการโดยการออกแบบแผนการทดลองออร์ทोगอนัล (Orthogonal Array) โดยการลดจำนวนการทดลองให้เหมาะสมเพียงพอกับเงื่อนไขที่กำหนด สำหรับการกำหนดพารามิเตอร์ที่เหมาะสม โดยใช้อัตราส่วนสัญญาณต่อสิ่งรบกวน (Signal to-Noise Ratio: S/N) มีค่าสูงสุด แบ่งได้เป็น 3 กรณี คือ กรณียิ่งมากยิ่งดี (Larger-the Better), กรณีค่าน้อยยิ่งดี (Smaller-the Better) และกรณีค่าตรงเป้าหมายดีที่สุด (Target-the Better) [5-7] วิธีทากูชิเป็นวิธีที่ได้รับความนิยมสูงมากในการนำมาใช้ในงานด้านวิศวกรรมการผลิต [8-10] วิธีทากูชิดั้งเดิมจะใช้แก้ปัญหาการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดที่มีผลตอบสนองเพียงผลตอบสนองเดียว อย่างไรก็ตามในปัญหาจริงอาจมีผลตอบสนองหลายค่าที่มีความสำคัญและมีความจำเป็นต้องพิจารณาร่วมกันในการกำหนดพารามิเตอร์ที่เหมาะสม แนวทางในการแก้ปัญหาการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดที่มีผลตอบสนองหลายค่า มีหลายวิธี อย่างไรก็ตามวิธีการตัดสินใจแบบหลายเกณฑ์ (Multi-Criteria Decision Making: MCDM) ได้รับความนิยมสูงมากในการนำมาประยุกต์ใช้สำหรับการแก้ปัญหา โดยใช้วิธีการตัดสินใจแบบหลายเกณฑ์ มีเครื่องมือที่มีประสิทธิภาพที่ได้รับความนิยมหลายวิธี เช่น การวิเคราะห์ความสัมพันธ์แบบเกรย์ (Grey Relational Analysis: GRA) เทคนิคการเรียงลำดับตามอุดมคติ

(Technique of Order Preference Similarity to the Ideal Solution: TOPSIS) และการวิเคราะห์แบบล้อมกรอบข้อมูล (Data Envelopment Analysis: DEA) การวัดประสิทธิภาพด้วยการวิเคราะห์แบบล้อมกรอบข้อมูล หรือ DEA มีข้อดี [11-13] คือ สามารถวัดประสิทธิภาพของหน่วยผลิตที่มีหลายปัจจัยได้ โดยไม่จำเป็นต้องปรับข้อมูลให้เป็นข้อมูลปกติ (Normalized Data) ก่อนการคำนวณ และไม่จำเป็นต้องกำหนดน้ำหนักความสำคัญของแต่ละปัจจัยเพราะการวิเคราะห์แบบล้อมกรอบข้อมูลจะให้ผลเฉลยของน้ำหนักที่เหมาะสมที่สุด (Optimal Weights) จากจากการประมวลผลจากตัวแบบทางคณิตศาสตร์ของ DEA ได้

ด้วยเหตุผลดังกล่าวในข้างต้น งานวิจัยนี้จะเป็นการนำเสนอวิธีการวิเคราะห์แบบล้อมกรอบข้อมูลและทากูชิสำหรับการกำหนดพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของเครื่องขุดเกล็ดปลาตะเพียนที่สร้างขึ้น โดยเริ่มจากการกำหนดปัจจัยและระดับปัจจัยที่เกี่ยวข้อง จากนั้นดำเนินการออกแบบการทดลองโดยใช้วิธีทากูชิ แล้วทำการทดลองที่สภาวะที่กำหนดไว้ สุดท้ายคำนวณหาผลเฉลยโดยใช้การวิเคราะห์แบบล้อมกรอบข้อมูลและทากูชิสำหรับการกำหนดพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของเครื่องขุดเกล็ดปลาตะเพียนที่นำเสนอ

2. งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

หัวข้อนี้เป็นงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการแก้ปัญหาการกำหนดค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสม กรณีผลตอบสนองหลายค่า โดยมีรายละเอียดดังนี้

Nakwong [14] ได้นำเสนอการวิเคราะห์ความสัมพันธ์แบบเกรย์และทากูชิสำหรับการกำหนดพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของกระบวนการการกัดอาร์คด้วยเส้นลวดไฟฟ้าบนเหล็กเกรดเอสเคดี 11 (SKD11)



โดยในงานวิจัยนี้ได้ทำการออกแบบการทดลองด้วยวิธีทากูชิเป็นแบบ L18 โดยมีปัจจัยการทดลอง 3 ปัจจัย ได้แก่ ค่าปัจจัยประสิทธิภาพ กระแสไฟฟ้า และความเร็วในการเดินเส้นลวด ส่วนผลตอบสนอง 2 ค่า ได้แก่ อัตราการกำจัดวัสดุ (MRR) และคุณภาพพื้นผิวชิ้นงาน (Ra) ผลการวิจัยพบว่าวิธีที่นำเสนอสามารถเป็นแนวทางหนึ่งที่มีประสิทธิภาพสำหรับการแก้ปัญหาการกำหนดพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของงานวิจัยนี้

Kumboon และคณะผู้วิจัย [15] ได้นำเสนอการวิเคราะห์ความสัมพันธ์แบบเกรย์เพื่อหาสภาวะเงื่อนไขที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการผลิตไบโอดีเซลจากไส้ปลา โดยกำหนดปัจจัยที่เกี่ยวข้อง จำนวน 4 ปัจจัย ได้แก่ อัตราส่วนผสมของเมทานอลต่อโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ ความเร็วรอบการกวน เวลาในการทำปฏิกิริยา และอุณหภูมิการทำปฏิกิริยา และผลตอบสนองจำนวน 3 ค่า ได้แก่ ปริมาณกรดไขมันอิสระ (FFA) ค่าแฉะลเฟต และจุดวาบไฟ ผลการวิจัยพบว่าวิธีที่นำเสนอในงานวิจัยนี้เป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพสามารถกำหนดพารามิเตอร์ที่เหมาะสมสอดคล้องกับมาตรฐานของกรมธุรกิจพลังงานที่กำหนด

Jaemsang และ Mookam [16] ได้นำเสนอการวิเคราะห์ความสัมพันธ์แบบเกรย์ในการแก้ปัญหาผลตอบสนองหลายค่าของการตัดเลเซอร์สำหรับเหล็ก SM490 โดยมีปัจจัยที่เกี่ยวข้อง จำนวน 3 ปัจจัย ได้แก่ พลังงาน ความเร็ว และแรงดันแก๊สในการตัด และผลตอบสนอง จำนวน 2 ค่า ได้แก่ ช่องว่างการตัด และความเรียบผิว ผลการวิจัยพบว่าวิธีที่นำเสนอในงานวิจัยนี้สามารถแก้ปัญหาการกำหนดพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของงานวิจัยนี้ โดยสามารถปรับปรุงคุณลักษณะการตัดได้ดีขึ้นเมื่อเทียบกับสภาวะเดิม

Şimşek และ Uygunoğlu [17] ได้นำเสนอเทคนิคการเรียงลำดับตามอุดมคติและทากูชิในการแก้ปัญหาผลตอบสนองหลายค่าของคอนกรีตผสมพอลิเมอร์ ผลการวิจัยพบว่าวิธีที่นำเสนอในงานวิจัยนี้สามารถใช้เป็นแนวทางสำหรับการแก้ปัญหาด้านสิ่งแวดล้อม และพลังงานได้

Liao และ Chen [18] ได้นำเสนอการวิเคราะห์แบบล้อมกรอบข้อมูลและทากูชิสำหรับการแก้ปัญหาผลตอบสนองหลายค่า โดยวิธีที่นำเสนอถูกนำไปทดสอบกับปัญหาต่าง ๆ ในวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง พบว่าวิธีที่นำเสนอมีประสิทธิภาพสูงในการแก้ปัญหาผลตอบสนองหลายค่า

Kamath และคณะผู้วิจัย [19] ได้นำเสนอการวิเคราะห์แบบล้อมกรอบข้อมูลและทากูชิสำหรับการแก้ปัญหาผลตอบสนองหลายค่าของพารามิเตอร์กระบวนการกัดสำหรับวัสดุผสมอลูมิเนียมและไทเทเนียม ผลการศึกษาพบว่าวิธีที่นำเสนอมีประสิทธิภาพในการแก้ปัญหาผลตอบสนองหลายค่าในกรณีศึกษา

จากการทบทวนวรรณกรรมพบว่ายังไม่ม้งานวิจัยที่นำวิธีการวิเคราะห์แบบล้อมกรอบข้อมูลร่วมกับวิธีทากูชิในการแก้ปัญหาที่เหมาะสมที่สุดแบบผลตอบสนองหลายค่า (Multi-response Optimization Problem) หรือปัญหาการกำหนดพารามิเตอร์ที่เหมาะสมให้กับเครื่องขุดเกล็ดปลาที่นำเสนอ

3. วิธีการทดลอง

วิธีการทดลองประกอบด้วยขั้นตอนดังต่อไปนี้ (1) เตรียมวัตถุดิบและเครื่องขุดเกล็ดปลาที่นำเสนอซึ่งวัตถุดิบได้แก่ ปลาตะเพียน และปลาสร่อยขาวที่จับได้จากเขื่อนลำปาวจะมีลักษณะและขนาด



บทความวิจัย

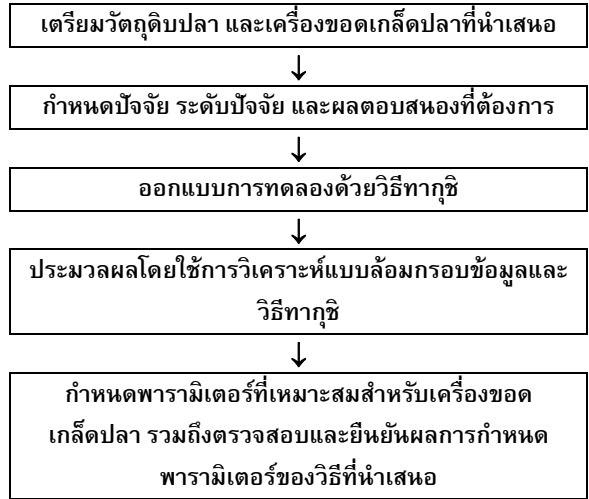
ที่ใกล้เคียงกันตามขนาดของอวนหรือเครื่องมือที่ใช้ในการจับปลา (2) กำหนดปัจจัย ระดับของปัจจัย และผลตอบสนองที่ต้องการ (3) ออกแบบการทดลองด้วยวิธีทากูชิ (4) ประมวลผลโดยใช้การวิเคราะห์แบบล้อมกรอบข้อมูลและวิธีทากูชิ (5) กำหนดพารามิเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับเครื่องขูดเกล็ดปลาที่นำเสนอ รวมถึงตรวจสอบและยืนยันผลการกำหนดพารามิเตอร์จากวิธีการที่นำเสนอกรอบการดำเนินงาน ดังรูปที่ 2

3.1 เตรียมวัตถุดิบปลา

วัตถุดิบที่ใช้ในกระบวนการผลิตปลาแปรรูปจะใช้ปลาในกลุ่มปลาตะเพียน เช่น ปลาตะเพียน ปลาสวายขาว และปลากะมัง ที่จับได้จากบริเวณพื้นที่กรณีศึกษา โดยกำหนดขนาดของปลากว้าง x ยาว โดยประมาณ 40 x 140 มิลลิเมตร กว้างซึ่งปลาเหล่านี้เป็นปลาที่นิยมนำมาแปรรูปเป็นอาหาร ได้แก่ ปลาแห้ง และปลาต้ม ลักษณะของปลาที่ถูกใช้เป็นวัตถุดิบในการทดลอง แสดงดังรูปที่ 1 และเครื่องขูดเกล็ดปลาที่นำเสนอจะแสดงดังรูปที่ 3

3.2 กำหนดปัจจัย ระดับปัจจัย และผลตอบสนองที่ต้องการ

กำหนดปัจจัยจำนวน 3 ปัจจัย ได้แก่ ความเร็วรอบ (rpm) เวลา (Second) และความจุ (kg) โดยความเร็วรอบหมายถึงความเร็วในการหมุนของเครื่องขูดเกล็ดปลามีหน่วยเป็นรอบต่อนาที เวลาหมายถึงเวลาที่ใช้ในการเดินเครื่องขูดเกล็ดปลามีหน่วยเป็นวินาที และความจุหมายถึงปริมาณปลาตะเพียนที่ใส่ลงในถังขูดเกล็ดปลาแต่ละครั้งมีหน่วยเป็นกิโลกรัม ซึ่งแต่ละปัจจัยมี จำนวน 3 ระดับ ดังตารางที่ 1



รูปที่ 2 กรอบการดำเนินงาน



รูปที่ 3 เครื่องขูดเกล็ดปลาที่นำเสนอ

ตารางที่ 1 ปัจจัยและระดับของแต่ละปัจจัย

| ปัจจัย | ระดับ 1 | ระดับ 2 | ระดับ 3 |
|-------------------|---------|---------|---------|
| ความเร็วรอบ (rpm) | 50 | 60 | 70 |
| เวลา (second) | 180 | 240 | 300 |
| ความจุ (kg) | 15 | 20 | 25 |



3.3 ออกแบบการทดลองด้วยวิธีทากูชิ

เนื่องจากงานวิจัยนี้กำหนดปัจจัยที่เกี่ยวข้องจำนวน 3 ปัจจัยและแต่ละปัจจัยมี 3 ระดับ การออกแบบการทดลองด้วยวิธีทากูชิ L9 มีการทดลองทั้งหมดดังตารางที่ 2

จากการศึกษาพบว่าผลตอบสนองที่ต้องการ จำนวน 2 ค่า ได้แก่ ความเสียหายของปลา (R_1) ถ้าค่าของ R_1 น้อยกว่า แสดงว่าผลตอบสนองนั้นดีกว่า (Smaller is better) และประสิทธิภาพการขอดเกล็ดปลา (R_2) ถ้าค่าของ R_2 มากกว่า แสดงว่าผลตอบสนองนั้นดีกว่า (Larger is better) การวัดผลตอบสนองทั้งสองค่าได้จากการประเมินของผู้ประกอบการ จำนวน 15 ราย โดยใช้ค่าเฉลี่ยเป็นตัวแทนของผลตอบสนองแต่ละค่าในแต่ละครั้งของการทดลอง

ตารางที่ 2 การทดลองด้วยวิธีทากูชิ L9

| ลำดับ | ความเร็วรอบ | เวลา | ความจุ |
|-------|--------------|-----------------|-------------|
| | (A) (rpm) | (B) (second) | (C) (kg) |
| 1 | 50 | 180 | 15 |
| 2 | 50 | 240 | 20 |
| 3 | 50 | 300 | 25 |
| 4 | 60 | 180 | 20 |
| 5 | 60 | 240 | 25 |
| 6 | 60 | 300 | 15 |
| 7 | 70 | 180 | 25 |
| 8 | 70 | 240 | 15 |
| 9 | 70 | 300 | 20 |

3.4 ประมวลผลโดยใช้การวิเคราะห์แบบล้อมกรอบข้อมูลและวิธีทากูชิ

ผลตอบสนองทั้งสองค่า ได้แก่ ประสิทธิภาพการขอดเกล็ดปลา และความเสียหายของปลา จะถูกนำมาคำนวณค่าประสิทธิภาพเชิงสัมพัทธ์ (Relative Efficiency) จากแบบจำลอง DEA-CCR [2] ดังนี้

$$E_{kk} = \text{Max} \sum_{r=1}^S u_{rk} Y_{rk} \quad (1)$$

$$\sum_{i=1}^m v_{ik} X_{ik} = 1, \quad k = 1, 2, 3, \dots, n$$

$$\sum_{r=1}^S u_{rk} Y_{rj} - \sum_{i=1}^m v_{ik} X_{ij} \leq 0, \quad j = 1, 2, 3, \dots, n$$

$$v_{ik}, u_{rk} \geq 0, \quad \forall i, \forall k, \forall r$$

กำหนดให้:

- i เป็นดัชนีของผลตอบสนองความเสียหายของปลา
- r เป็นดัชนีของผลตอบสนองประสิทธิภาพการขอดเกล็ดปลา
- j เป็นดัชนีของลำดับการทดลอง
- k เป็นดัชนีของลำดับการทดลองที่ถูกประเมิน
- X_{ij} คือ ค่าของผลตอบสนองความเสียหายของปลา i และลำดับการทดลอง j
- Y_{rj} คือ ค่าของผลตอบสนองประสิทธิภาพการขอดเกล็ดปลา r และลำดับการทดลอง j
- u_{rk} คือน้ำหนักของผลตอบสนองประสิทธิภาพการขอดเกล็ดปลา r สำหรับลำดับการทดลองที่ถูกประเมิน k
- v_{ik} คือน้ำหนักของผลตอบสนองความเสียหายของปลา i สำหรับลำดับการทดลองที่ถูกประเมิน k



เมื่อได้ค่าประสิทธิภาพเชิงสัมพัทธ์ของแต่ละลำดับการทดลองแล้ว (E_{kk}) จากนั้นจะเป็นการวิเคราะห์ผลกระทบของตัวแปรด้วยวิธีทาคุชิ ในการวิเคราะห์ผลการทดลองเครื่องขอตเกล็ดปลาที่นำเสนอนี้ ผู้วิจัยได้กำหนดผลตอบแทนประสิทธิภาพการขอตเกล็ดปลา มาทำการวิเคราะห์ปัจจัยรบกวน (S/N Ratio) โดยพิจารณาเป็น “ค่ามากกว่า ดีกว่า (Larger is better)” ดังสมการที่ (2) และสำหรับค่าผลตอบแทนความเสียหายของปลา พิจารณาเป็น “ค่าน้อยกว่า ดีกว่า (Smaller is better)” ดังสมการที่ (3) [20] และใน ส่วน ของ ผลตอบแทนค่าประสิทธิภาพเชิงสัมพัทธ์จะพิจารณา “ค่ามากกว่า ดีกว่า” ดังสมการที่ (2)

เมื่อ y คือผลตอบแทน และ n เป็นจำนวนซ้ำของการทดลอง จากนั้นทำการวิเคราะห์ตามหลักการของวิธีทาคุชิ ด้วยโปรแกรม Minitab v.16 ผลที่ได้จากกราฟปัจจัยรบกวนที่ส่งผลต่อผลตอบแทน ประสิทธิภาพการขอตเกล็ดปลา ผลตอบแทนความเสียหายของปลา และผลตอบแทนประสิทธิภาพเชิงสัมพัทธ์ (การรวมกันของผลตอบแทนประสิทธิภาพการขอตเกล็ดปลาและผลตอบแทนความเสียหายของปลา) มาทำการวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสม เพื่อสรุปผลการศึกษาวิจัย

3.5 ตรวจสอบและยืนยันผลการกำหนดพารามิเตอร์จากวิธีการวิเคราะห์แบบล้อมกรอบข้อมูลและทาคุชิ

ทำการเปรียบเทียบวิธีที่นำเสนอในงานวิจัยนี้กับวิธีที่นิยมในวรรณกรรม รวมถึงทดสอบเพื่อเปรียบเทียบผลการทดลองกับค่าพารามิเตอร์เดิมที่กำหนดไว้เบื้องต้น

$$S / N = -10 \log \sum_{i=1}^n \frac{y^{-2}}{n} \quad (2)$$

$$S / N = -10 \log \sum_{i=1}^n \frac{y^2}{n} \quad (3)$$

4. ผลการศึกษา

หลังจากการทดลองตามหัวข้อที่ 3.1 ถึง หัวข้อที่ 3.5 ที่ได้ออกแบบการทดลองไว้แล้ว ขั้นตอนต่อไปจะเป็นการวิเคราะห์ผลการทดลอง ตามลำดับดังนี้

4.1 ผลการทดลองด้วยวิธีทาคุชิ

งานวิจัยนี้กำหนดปัจจัยที่ใช้ในการทดลองจำนวน 3 ปัจจัย แต่ละปัจจัยมีจำนวน 3 ระดับ ในการทดลองจะต้องใช้วัตถุดิบปลาเป็นจำนวนมาก ดังนั้นเพื่อเป็นการลดค่าใช้จ่ายและลดระยะเวลาในการทดลอง ผู้วิจัยจึงได้นำเอาวิธีทาคุชิมาประยุกต์ใช้ในการทดลองเพื่อหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสม โดยออกแบบการทดลองเป็นแบบ Orthogonal Array L9 ลำดับการทดลองมีจำนวนทั้งสิ้น 9 การทดลอง กำหนดให้ ความเร็วรอบ (A) เวลาเดินเครื่องในการขอตเกล็ดปลาแต่ละครั้ง (B) และความจุหรือปริมาณปลาที่ป้อนเข้าเครื่องในแต่ละครั้ง (C) โดยในแต่ละลำดับการทดลองผลตอบแทนความเสียหายของปลา (R_1) และผลตอบแทนประสิทธิภาพการขอตเกล็ดปลา (R_2) จะถูกประเมินจากผู้ประกอบการ จำนวน 15 ราย โดยใช้มาตราประมาณค่า (Rating Scale) แบบ 5 ระดับ ดังตารางที่ 3 และตารางที่ 4 ตามลำดับ และรูปที่ 4 แสดงลักษณะของปลาที่เสียหายในแต่ละระดับ

จากนั้นทำการหาค่าเฉลี่ยของผลตอบแทนความเสียหายของปลา และผลตอบแทนประสิทธิภาพการขอตเกล็ดปลา จากการประเมินของผู้เกี่ยวข้องจำนวน 15 ราย เช่น การทดลองลำดับที่ 1 ผู้ประเมินให้คะแนนผลตอบแทน R_2 ดังนี้ 4, 3, 4, 4, 5, 3, 3, 4, 4,



บทความวิจัย

4, 4, 3, 4, 3, 5 ซึ่งค่าเฉลี่ยเท่ากับ 3.80 ส่วนรายละเอียดของผลการทดลองอื่น ดังตารางที่ 5

ตารางที่ 3 มาตรฐานประมาณค่าของผลตอบสนองความเสียหายของปลา

| คะแนน | ความหมาย |
|-------|-----------------|
| 5 | เสียหายมาก |
| 4 | เสียหาย |
| 3 | ปานกลาง |
| 2 | เสียหายเล็กน้อย |
| 1 | ไม่เสียหาย |

ตารางที่ 4 มาตรฐานประมาณค่าของผลตอบสนองประสิทธิภาพการขอดเกล็ดปลา

| คะแนน | ความหมาย |
|-------|-------------------------|
| 1 | ขอดเกล็ดปลาได้น้อยมาก |
| 2 | ขอดเกล็ดปลาได้น้อย |
| 3 | ปานกลาง |
| 4 | ขอดเกล็ดปลาได้มาก |
| 5 | ขอดเกล็ดปลาได้มากที่สุด |

ตารางที่ 5 ผลการทดลองด้วยวิธีทากูชิ L9

| ลำดับ | A (rpm) | B (second) | C (Kg) | R_1 (คะแนน) | R_2 (คะแนน) |
|-------|---------|------------|--------|---------------|---------------|
| 1 | 50 | 180 | 15 | 1.20 | 3.80 |
| 2 | 50 | 240 | 20 | 1.93 | 4.40 |
| 3 | 50 | 300 | 25 | 2.13 | 3.80 |
| 4 | 60 | 180 | 20 | 1.47 | 4.93 |
| 5 | 60 | 240 | 25 | 1.73 | 4.73 |
| 6 | 60 | 300 | 15 | 3.00 | 3.80 |
| 7 | 70 | 180 | 25 | 1.53 | 4.50 |
| 8 | 70 | 240 | 15 | 3.00 | 3.93 |
| 9 | 70 | 300 | 20 | 4.00 | 4.00 |



ระดับความเสียหาย 1: ปลามีสภาพปกติ (ไม่เสียหาย)



ระดับความเสียหาย 2: ปลามีสภาพเสียหายเล็กน้อย (ใช้การสัมผัสร่วมด้วย)



ระดับความเสียหาย 3: ปลามีสภาพหนังขาวซีด (สัมผัสจะมีสภาพเริ่มเนื้อนุ่ม)



ระดับความเสียหาย 4: ปลามีสภาพหนังขาวซีด (สัมผัสจะมีสภาพเริ่มเนื้อนุ่ม)



ระดับความเสียหาย 5:

ปลามีสภาพสีขาวซีดมาก เนื้อปลาและ รวมถึงปลามีสภาพไส้แตก

รูปที่ 4 ลักษณะความเสียหายของปลา

4.2 ผลการสร้างกราฟปัจจัยการรบกวนต่อผลตอบสนอง

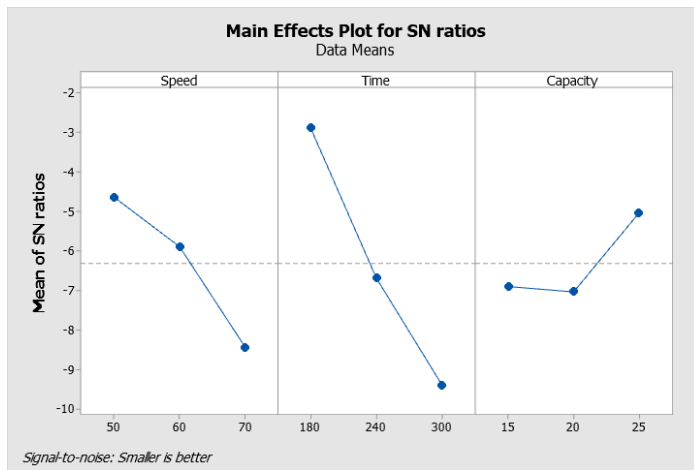
หลังจากการทดลองตามแผนการทดลองทากูชิ L9 ข้อมูลในตารางที่ 5 ถูกนำมาใช้ในการคำนวณค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสิ่งรบกวนระบบ (S/N Ratio) ของผลตอบสนองความเสียหายของปลา (R_1) โดยใช้โปรแกรม Minitab 16 กำหนดรูปแบบของผลตอบสนอง R_1 เป็นแบบ ค่าน้อยกว่า ดีกว่า (Smaller is the better) ผลการทดลอง S/N Ratio สำหรับผลตอบสนอง R_1 ดังรูปที่ 5



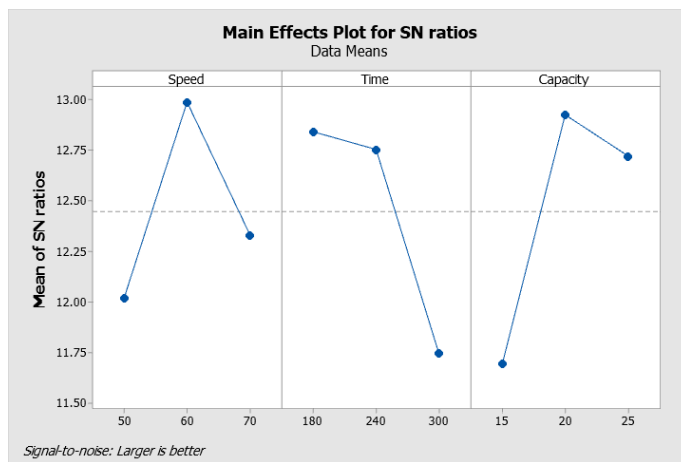
จากรูปที่ 4 แสดงให้เห็นว่าผลกระทบของปัจจัยหลักสำหรับอัตราส่วนสัญญาณต่อสิ่งรบกวนระบบของ R_1 ปัจจัยความเร็วที่ระดับ 70 รอบต่อนาที ปัจจัยเวลาที่ระดับ 300 วินาที และปัจจัยความจุที่ระดับ 20 กิโลกรัม เป็นค่าระดับที่ดีที่สุดสำหรับผลตอบสนอง R_1

สำหรับการคำนวณค่า S/N Ratio สำหรับผลตอบสนอง R_2 กำหนดรูปแบบเป็น ค่ามากกว่าดีกว่า (Larger is better) ดังรูปที่ 6

จากรูปที่ 6 แสดงให้เห็นว่าผลกระทบของปัจจัยหลักสำหรับอัตราส่วนสัญญาณต่อสิ่งรบกวนระบบของ R_2 ปัจจัยความเร็วที่ระดับ 60 รอบต่อนาที ปัจจัยเวลาที่ระดับ 180 วินาที และปัจจัยความจุที่ระดับ 20 กิโลกรัม เป็นค่าระดับที่ดีที่สุดสำหรับผลตอบสนอง R_2



รูปที่ 5 ผลกระทบของปัจจัยหลักสำหรับอัตราส่วนสัญญาณต่อสิ่งรบกวนระบบของ R_1



รูปที่ 6 ผลกระทบของปัจจัยหลักสำหรับอัตราส่วนสัญญาณต่อสิ่งรบกวนระบบของ R_2



4.3 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของปัจจัย (ANOVA)

การวิเคราะห์ความแปรปรวนของปัจจัยและสมการทำนายสำหรับผลตอบสนองความเสียหายของปลา และประสิทธิภาพการรอดเกล็ดปลา ดังแสดงในตารางที่ 6 และตารางที่ 7 ตามลำดับ

ตารางที่ 6 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของผลตอบสนองความเสียหายของปลา

| Source | DF | Adj SS | Adj MS | F-Value | P-Value |
|----------|----|---------|---------|---------|---------|
| Speed | 2 | 1.89052 | 0.94526 | 48.52 | 0.020 |
| Time | 2 | 4.05630 | 2.02815 | 104.10 | 0.010 |
| Capacity | 2 | 0.80726 | 0.40363 | 20.72 | 0.046 |
| Error | 2 | 0.03897 | 0.01948 | | |
| Total | 8 | 6.79305 | | | |

| S | R-sq | R-sq(adj) | R-sq(pred) |
|----------|--------|-----------|------------|
| 0.139581 | 99.43% | 97.71% | 88.38% |

ตารางที่ 7 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของผลตอบสนองประสิทธิภาพการรอดเกล็ดปลา

| Source | DF | Adj SS | Adj MS | F-Value | P-Value |
|----------|----|---------|----------|---------|---------|
| Speed | 2 | 0.37897 | 0.189483 | 74.11 | 0.013 |
| Time | 2 | 0.53756 | 0.268779 | 105.12 | 0.009 |
| Capacity | 2 | 0.62245 | 0.311223 | 121.72 | 0.008 |
| Error | 2 | 0.00511 | 0.002557 | | |
| Total | 8 | 1.54408 | | | |

| S | R-sq | R-sq(adj) | R-sq(pred) |
|-----------|--------|-----------|------------|
| 0.0505647 | 99.67% | 98.68% | 93.29% |

จากตารางที่ 6 และตารางที่ 7 ผลจากการใช้เลือกใช้ตัวแปรที่เหมาะสมจากการใช้วิธีทาคุชิ พบว่าปัจจัยความเร็วรอบ (A) เวลาในการรอดเกล็ดปลา (B) และความจุของปลาที่ป้อนเข้าเครื่องรอดเกล็ดปลา (C) มีผลกระทบต่อผลตอบสนองความเสียหายของปลา และมีผลกระทบต่อผลตอบสนองประสิทธิภาพการรอดเกล็ดปลา อย่างมีนัยสำคัญ โดยพิจารณาจากค่า P-Value ของแต่ละปัจจัยมีค่าน้อยกว่า 0.05 ทั้งหมด แสดงว่าปัจจัยทั้งสามมีผลกระทบต่อผลตอบสนองทั้งสองอย่างมีนัยยะสำคัญที่ 0.05 สำหรับการพิจารณาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมในแต่ละผลตอบสนองนั้นมีความแตกต่างหรือขัดแย้งกันเนื่องจากความต้องการผลตอบสนองความเสียหายของปลาต้องการผลตอบสนองน้อยสุด แต่ต้องการผลตอบสนองประสิทธิภาพการรอดเกล็ดปลามากสุด ทำให้ไม่สามารถกำหนดพารามิเตอร์ที่เหมาะสมได้เนื่องจากความต้องการผลตอบสนองทั้งสองค่าแตกต่างกัน ดังนั้น การวิเคราะห์แบบล้อมกรอบข้อมูลและวิธีทาคุชิจึงถูกนำมาประยุกต์ใช้ในการแก้ปัญหาในงานวิจัยนี้ โดยวิธีการวิเคราะห์แบบล้อมกรอบข้อมูลจะถูกนำมาใช้เพื่อรวมผลตอบสนองทั้งสองให้เป็นผลตอบสนองเดียว โดยที่ค่าจากผลการคำนวณจะเป็นค่าประสิทธิภาพเชิงสัมพัทธ์ ซึ่งการวิเคราะห์แบบล้อมกรอบข้อมูลเป็นวิธีการหนึ่งที่มีประสิทธิภาพ และได้รับความนิยมสูงในการแก้ปัญหาคัดสินใจแบบหลายเกณฑ์ (Multi-Criteria Decision Making Problem: MCDM) รายละเอียดและผลการคำนวณของวิธีที่นำเสนอ แสดงในหัวข้อ 4.4



4.4 ผลการวิเคราะห์แบบล้อมกรอบข้อมูลโดยใช้หลักการของทากูชิ

โดยใช้หลักการของการวิเคราะห์แบบล้อมกรอบข้อมูลสำหรับการกำหนดปัจจัยนำเข้า (x) และปัจจัยผลผลิต (y) ดังนั้นสามารถนิยามให้ผลตอบสนองความเสียหายของปลา (R₁) เป็นปัจจัยนำเข้า (x) และผลตอบสนองประสิทธิภาพการขอดเกล็ดปลา (R₂) เป็นปัจจัยผลผลิต (y) รายละเอียดผลการทดลองดังแสดงในตารางที่ 8

จากนั้นนำข้อมูลในตารางที่ 8 มาแทนค่าลงในสมการที่ (1) เพื่อคำนวณหาค่าประสิทธิภาพเชิงสัมพัทธ์ของแต่ละลำดับการทดลอง หรือ DMUs ตัวอย่างการคำนวณประสิทธิภาพเชิงสัมพัทธ์ของลำดับการทดลองที่ 1 (E₁₁)

$$\begin{aligned}
 \text{Max } E_{11} &= 3.80u_{11} \\
 1.20v_{11} &= 1 \\
 3.800u_{11} - 1.200v_{11} &\leq 0 \\
 4.400u_{11} - 1.930v_{11} &\leq 0 \\
 3.800u_{11} - 2.130v_{11} &\leq 0 \\
 4.930u_{11} - 1.470v_{11} &\leq 0 \\
 4.730u_{11} - 1.730v_{11} &\leq 0 \\
 3.800u_{11} - 3.000v_{11} &\leq 0 \\
 4.500u_{11} - 1.530v_{11} &\leq 0 \\
 3.930u_{11} - 3.000v_{11} &\leq 0 \\
 4.000u_{11} - 4.000v_{11} &\leq 0 \\
 u_{11}, v_{11} &\geq 0
 \end{aligned}$$

ตัวแบบการโปรแกรมเชิงเส้น (Linear Programming: LP) ของ DEA สำหรับลำดับการทดลองที่ 1 หรือหน่วยผลิตที่ 1 ถูกนำไปคำนวณหาผลเฉลยโดยใช้ซอฟต์แวร์ LINGO จะได้ค่าของ E₁₁ หรือ ค่า CCR

ตารางที่ 8 ค่าประสิทธิภาพเชิงสัมพัทธ์ของแต่ละลำดับการทดลอง

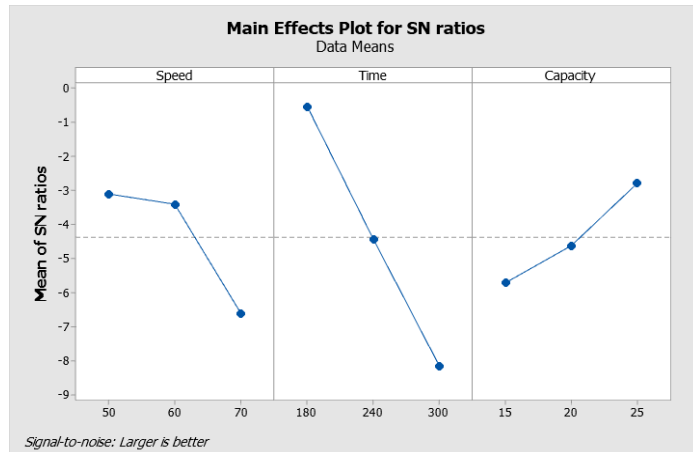
| ลำดับ | ปัจจัยและระดับ | X (R ₁) | Y (R ₂) | CCR |
|-------|--|---------------------|---------------------|-------|
| 1 | A ₁ B ₁ C ₁ (DMU ₁) | 1.20 | 3.80 | 0.944 |
| 2 | A ₁ B ₂ C ₂ (DMU ₂) | 1.93 | 4.40 | 0.680 |
| 3 | A ₁ B ₃ C ₃ (DMU ₃) | 2.13 | 3.80 | 0.532 |
| 4 | A ₂ B ₁ C ₂ (DMU ₄) | 1.47 | 4.93 | 1.000 |
| 5 | A ₂ B ₂ C ₃ (DMU ₅) | 1.73 | 4.73 | 0.815 |
| 6 | A ₂ B ₃ C ₁ (DMU ₆) | 3.00 | 3.80 | 0.378 |
| 7 | A ₃ B ₁ C ₃ (DMU ₇) | 1.53 | 4.50 | 0.877 |
| 8 | A ₃ B ₂ C ₁ (DMU ₈) | 3.00 | 3.93 | 0.391 |
| 9 | A ₃ B ₃ C ₂ (DMU ₉) | 4.00 | 4.00 | 0.298 |

ตารางที่ 9 ผลกระทบของปัจจัยหลักสำหรับ S/N Ratios Larger is better

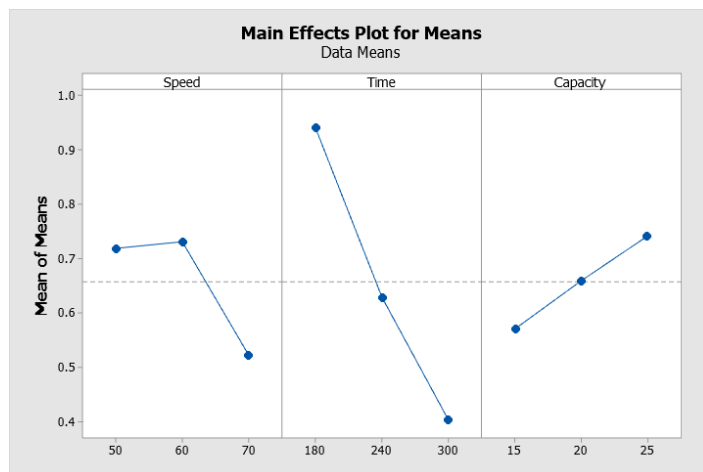
| Level | Speed | Time | Capacity |
|-------|---------|---------|----------|
| 1 | -3.1112 | -0.5462 | -5.7070 |
| 2 | -3.4105 | -4.4307 | -4.6211 |
| 3 | -6.6053 | -8.1502 | -2.7990 |
| Delta | 3.4941 | 7.6039 | 2.9080 |
| Rank | 2 | 1 | 3 |

ของหน่วยผลิตที่ 1 = 0.944 ในส่วนค่าคะแนนประสิทธิภาพเชิงสัมพัทธ์ของลำดับการทดลองอื่น หรือหน่วยผลิตอื่น สามารถคำนวณหาผลเฉลยได้เช่นเดียวกับการคำนวณค่าของ E₁₁ โดยรายละเอียดผลการคำนวณค่าประสิทธิภาพเชิงสัมพัทธ์ของลำดับการทดลองทั้งหมด หรือหน่วยผลิตทั้งหมด แสดงในตารางที่ 8 คอลัมน์ที่ 5 จากนั้นทำการวิเคราะห์ผลกระทบของปัจจัยหลักสำหรับ S/N Ratios ดังตารางที่ 9 และรูปที่ 7

ในส่วนการวิเคราะห์ผลกระทบของปัจจัยหลักสำหรับค่าเฉลี่ย ดังตารางที่ 10 และรูปที่ 8



รูปที่ 7 ผลกระทบของปัจจัยหลักสำหรับ S/N Ratios



รูปที่ 8 ผลกระทบของปัจจัยหลักสำหรับค่าเฉลี่ย

ตารางที่ 10 ผลกระทบของปัจจัยหลักสำหรับค่าเฉลี่ย

Larger is better

| Level | Speed | Time | Capacity |
|-------|----------------|----------------|----------------|
| 1 | 0.7186 | 0.9404* | 0.5708 |
| 2 | 0.7310* | 0.6285 | 0.6593 |
| 3 | 0.5219 | 0.4026 | 0.7414* |
| Delta | 0.2091 | 0.5378 | 0.1706 |
| Rank | 2 | 1 | 3 |

จากตารางที่ 9 ตารางที่ 10 รูปที่ 7 และรูปที่ 8 แสดงผลกระทบหลักประสิทธิภาพเชิงสัมพัทธ์สำหรับ S/N Ratios และ Means มีความสอดคล้องกัน ดังนั้นสามารถกำหนดพารามิเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับการทดลองวิธีทากูชิ L9 ได้ดังนี้ พารามิเตอร์ที่เหมาะสมคือ ความเร็วรอบ (A) เท่ากับ 60 รอบต่อนาที เวลา (B) เท่ากับ 180 วินาที และ ความจุของปลา (C) เท่ากับ 25 กิโลกรัม (A₂B₁C₃) โดยขั้นตอนต่อไปจะเป็นการยืนยัน



ผลการกำหนดสภาวะที่เหมาะสมจากพารามิเตอร์ที่กำหนดจากวิธีที่นำเสนอในหัวข้อ 4.5 ดังนี้

4.5 ผลการเปรียบเทียบและยืนยันผลการกำหนดพารามิเตอร์จากวิธีการวิเคราะห์แบบล้อมกรอบข้อมูลและทากุชิ

จากนั้นทำการทดสอบเพื่อยืนยันผลโดยใช้พารามิเตอร์ที่คำนวณได้จากวิธีที่นำเสนอ เทียบกับสภาวะหรือพารามิเตอร์เดิม โดยผลการทดสอบการขดเกล็ดปลาที่สภาวะที่เหมาะสม จะได้ลักษณะของปลาที่ผ่านการขดเกล็ดปลาจากเครื่องที่นำเสนอ ดังรูปที่ 9

ส่วนรายละเอียดของการปรับปรุงผลตอบสนองทั้งสอง ดังตารางที่ 11 แสดงให้เห็นว่าพารามิเตอร์ที่กำหนดโดยใช้วิธีที่นำเสนอสามารถปรับปรุงผลตอบสนองความเสียหายของปลาดีขึ้น 31.46% และสามารถปรับปรุงผลตอบสนองประสิทธิภาพการขดเกล็ดปลาดีขึ้น 24.47%

สุดท้ายทำการเปรียบเทียบวิธีการที่นำเสนอเทียบกับวิธีการวิเคราะห์ความสัมพันธ์แบบเกรย์ [14] เทคนิคการเรียงลำดับตามอุดมคติ [17] และเทคนิค DEAR [19] ผลการเปรียบเทียบแสดงดังตารางที่ 12

จากตารางที่ 12 แสดงให้เห็นว่าวิธีที่นำเสนอมีความสอดคล้องกับทุกวิธีที่นำเสนอ ดังนั้นวิธีที่นำเสนอสามารถใช้เป็นเครื่องมือหรือวิธีหนึ่งที่มีประสิทธิภาพสำหรับการแก้ปัญหาที่เหมาะสมที่สุดที่มีผลตอบสนองหลายค่าที่ได้ (Multi-Response Optimization Problem)

ตารางที่ 11 การทดสอบเพื่อยืนยันผล

| ผลการตอบสนอง | สภาวะเดิม | สภาวะที่เหมาะสม | การปรับปรุง |
|--------------|---------------|-----------------|---|
| ระดับปัจจัย | $A_1 B_3 C_3$ | $A_2 B_1 C_3$ | $R_1 = ((2.13 - 1.47) / 2.13) \times 100 = 31.46\%$ |
| | | | $R_2 = ((4.73 - 3.80) / 3.80) \times 100 = 24.47\%$ |

ตารางที่ 12 เปรียบเทียบวิธีที่นำเสนอกับวิธีอื่น

| วิธี | ปัจจัย |
|---------------------------------------|---------------|
| การวิเคราะห์ความสัมพันธ์แบบเกรย์ [14] | $A_2 B_1 C_3$ |
| เทคนิคการเรียงลำดับตามอุดมคติ [17] | $A_2 B_1 C_3$ |
| DEAR [19] | $A_2 B_1 C_3$ |
| วิธีที่นำเสนอ | $A_2 B_1 C_3$ |

5. สรุปผล

ปัญหาการกำหนดพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของเครื่องจักรเป็นปัญหาที่มีความสำคัญต่อประสิทธิภาพของการใช้เครื่องจักรให้เกิดประโยชน์สูงสุด บางครั้งการกำหนดพารามิเตอร์หรือสภาวะที่เหมาะสมอาจมีผลตอบสนองหลายค่าทำให้มีความยุ่งยากซับซ้อนมากขึ้นในการประเมินเพื่อกำหนดพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุด งานวิจัยนี้ได้นำเสนอการวิเคราะห์แบบล้อมกรอบข้อมูลและวิธีทากุชิสำหรับการกำหนดพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของเครื่องขดเกล็ดปลาสำหรับกระบวนการผลิตปลาแห้งและปลาต้ม ซึ่งมีปัจจัยที่เกี่ยวข้องจำนวน 3 ปัจจัย



ได้แก่ ปัจจัยความเร็วรอบของเครื่องจักร ปัจจัยเวลาในการขุดเกล็ดปลาในแต่ละครั้ง และปริมาณหรือความจุของเครื่องขุดเกล็ดปลาในแต่ละครั้ง ในส่วนของผลตอบสนอง จำนวน 2 ผลตอบสนอง ได้แก่ ความเสียหายของปลา และประสิทธิภาพการขุดเกล็ด หลังจากนั้นวิธีที่นำเสนอได้ถูกนำมาทดสอบกับปัญหาการกำหนดพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของเครื่องขุดเกล็ดปลาตะเพียนที่สร้างขึ้น ผลการศึกษาพบว่า ความเสียหายของปลาลดลง 31.46% และประสิทธิภาพของการขุดเกล็ดเพิ่มขึ้น 24.47% เมื่อเทียบกับสถานะเดิม นอกจากนี้วิธีที่นำเสนอมีประสิทธิภาพที่ดีเทียบกับวิธีอื่นในวรรณกรรม ดังนั้นวิธีที่นำเสนอมีความน่าเชื่อถือสูงสำหรับใช้เป็นแนวทางในการกำหนดพารามิเตอร์ที่เหมาะสมให้กับเครื่องขุดเกล็ดปลาตะเพียนที่มีผลตอบสนองหลายค่าได้

สำหรับการวิจัยในอนาคต ผู้วิจัยเสนอแนะให้นำเครื่องมือนี้ไปประยุกต์ใช้กับกรณีศึกษาอื่น หรือพัฒนาวิธีการนี้เพื่อแก้ปัญหาการกำหนดสถานะที่เหมาะสมที่มีผลตอบสนองหลายค่าที่มีข้อมูลที่คลุมเครือ หรือข้อมูลที่ไม่แน่นอน แม้ว่าจะเป็นการยากที่จะหาคำตอบแต่ก็เป็นสิ่งที่มีประโยชน์สำหรับบางปัญหาที่มีผลตอบสนองหลายค่าที่มีข้อมูลที่คลุมเครือหรือข้อมูลที่ไม่แน่นอน

6. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนทุนจากกองทุนส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม ประเภท Fundamental Fund ปีงบประมาณ พ.ศ. 2565 รหัสโครงการ 164064: การจัดการห่วงโซ่อุปทานเพื่อยกระดับรายได้ของกลุ่มผู้ประกอบการผลิตภัณฑ์ปลาแปรรูป จังหวัดกาฬสินธุ์ รวมถึงผู้เชี่ยวชาญขอขอบพระคุณ

มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์ ที่สนับสนุนงานวิจัยฉบับนี้ และผู้แต่งขอขอบคุณผู้ทรงคุณวุฒิที่พิจารณาบทความและให้ข้อเสนอแนะที่เป็นประโยชน์ เพื่อให้คุณภาพของบทความวิจัยนี้ดียิ่งขึ้น

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] https://www4.fisheries.go.th/local/file_document/20211216161523_1_file.pdf. (Accessed on 25 September 2022)
- [2] A. Chames, W.W. Cooper and E. Rhodes, Measuring the efficiency of decision-making units, *European Journal of Operational Research*, 1978, 2(6), 429-444.
- [3] M. Afzalinejad, Evaluating radial efficiency considering environmental factors: A generalization of classical DEA, *Measurement*, 2021, 179, 109497.
- [4] N.Wichapa, P.Khokhajaikiat and K.Chaiphet, Aggregating the results of benevolent and aggressive models by the CRITIC method for ranking of decision-making units: A case study on seven biomass fuel briquettes generated from agricultural waste, *Decision Science Letters*, 2020, 10(1), 79-92.
- [5] G. Taguchi, *Taguchi techniques for quality engineering*, McGraw-Hill, New York, 1988.
- [6] J.P. Davim, Design of optimization of cutting parameters for turning metal matrix composites based on the orthogonal arrays, *Journal of Material Processing Technology*, 2003, 132(1-3), 340-344.



- [7] M.S. Chua, M. Rahman, Y.S. Wong and H.T. Loh, Determination of optimal cutting conditions using design of experiments and optimization techniques, *International Journal of Machine Tools and Manufacturing*, 1993, 33(2), 297-305.
- [8] M. Nalbant, H. Gökkaya and G.Sur, Application of Taguchi method in the optimization of cutting parameters for surface roughness in turning, *Journal of Material Design*, 2007, 28(4), 1379-1385.
- [9] H.Yang and Y.S. Tarng, Application of the Taguchi method to optimization of submerged arc welding process, *Materials and Manufacturing Process*, 1998, 13(3), 455-467.
- [10] C. Ahilan; S. Kumanan and N. Sivakumar, Application of grey based Taguchi method in multi-response optimization of turning process, *Advances in Production Engineering and Management*, 2010, 5(3), 171-180.
- [11] Y. Fan, B. Bai, Q. Qiao, P. Kang, Y. Zhang and J. Guo, Study on eco-efficiency of industrial parks in China based on data envelopment analysis, *Journal of Environmental Management*, 2017, 192(1), 107-115.
- [12] C.N. Wang, X.T. Nguyen and Y.H. Wang, Automobile industry strategic alliance partner selection: The application of a hybrid DEA and Grey theory model, *Sustainability*, 2016, 8(2), 173.
- [13] P. Krisomlom and N. Wichapa, Evaluating and ranking the fuel briquettes from agricultural residues using the virtual cross – efficiency method, *The Journal of Industrial Technology*, 2022, 18 (2), 230-246. (in Thai)
- [14] P. Nakwong, Application of taguchi principles and grey relational analysis to predict the suitability of the parameters in wire electrical discharge process, *Kasem Bundit Engineering Journal*, 2020, 10(3), 46-61. (in Thai)
- [15] A. Kumboon, W. Sirirak, P. Luesak and R. Sirirak, Grey relational analysis for optimal condition of biodiesel production process from fish entrails, *Srinakharinwirot University Engineering Journal*, 2019, 14(1), 88-98. (in Thai)
- [16] O. Jaemsang and N. Mookam, Solving problem the multiple response optimization of laser cutting for SM490 Steel using grey relational analysis, *UTK Research Journal*, 2018, 12(1), 132-143.



- [17] B. Şimşek and T. Uygunoğlu, Multi-response optimization of polymer blended concrete: A TOPSIS based Taguchi application, *Construction and Building Materials*, 2016, 117, 251-262.
- [18] H.C. Liao and Y.K. Chen, Optimizing multi-response problem in the Taguchi method by DEA based ranking method, *International Journal of Quality and Reliability Management*, 2002, 19(7), 825-837.
- [19] G.B. Kamath, K. Subramaniam, S. Devesh, V. Chavan, N. Mohan, R. Bhat and H.T. Wijerathne, Multi-Response optimization of milling process parameters for aluminum-titanium diboride metal matrix composite machining using taguchi - data envelopment analysis ranking approach, *Engineered Science*, 2022, 18, 271-277.
- [20] M. Modi, G. Agarwal, S.D. Chaugaonkar, U. Bhatia and V. Patil, Effect of machine feed rate on Kerf-Width, material removal rate, and surface roughness in machining of Al/SiC composite material with wire electrical discharge machine, *Strojnícky casopis Journal of Mechanical Engineering*, 2020, 70(1), 81-88.



ศักยภาพการผลิตเชื้อเพลิงขยะจากขยะมูลฝอยในพื้นที่บ่อขยะเทกองแบบเปิดโล่ง

อภิชญา สวัสดิ์^{1*} กัลยารัตน์ สุขพันธ์ชนะ² เสาวลักษณ์ เข้าสกุล³ และ ศศิธร หาสิน¹

¹ สาขาวิชาวิศวกรรมการจัดการสิ่งแวดล้อม, วิทยาลัยนวัตกรรมการจัดการ, มหาวิทยาลัยราชภัฏวไลยอลงกรณ์ ในพระบรมราชูปถัมภ์

² สาขาวิชาการจัดการการบริการและการโรงแรม, วิทยาลัยนวัตกรรมการจัดการ, มหาวิทยาลัยราชภัฏวไลยอลงกรณ์ ในพระบรมราชูปถัมภ์

³ ศูนย์เทคโนโลยีไบโอเซ็นเซอร์และไบโออิเล็กทรอนิกส์, สำนักวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

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

วันที่รับบทความ: 3 พฤศจิกายน 2565; วันที่ทบทวนบทความ: 6 มกราคม 2566; วันที่ตอบรับบทความ: 18 มกราคม 2566

วันที่เผยแพร่ออนไลน์: 13 เมษายน 2566

บทคัดย่อ: การศึกษาศักยภาพการผลิตเชื้อเพลิงขยะจากขยะมูลฝอยในพื้นที่บ่อขยะเทกองแบบเปิดโล่ง (Open Dumping) มีวัตถุประสงค์เพื่อสำรวจปริมาณขยะมูลฝอยในพื้นที่บ่อขยะ ค่าความร้อน และค่าความชื้นของขยะมูลฝอย เพื่อนำไปสู่การวิเคราะห์ศักยภาพในการผลิตเชื้อเพลิงขยะ ผลการวิจัยพบว่า จากการลงพื้นที่สำรวจพบว่าน้ำหนักขยะมูลฝอยสุทธิเฉลี่ย 216.61 ตันต่อวัน ปริมาณขยะเข้าออกพื้นที่เฉลี่ย 74 คันต่อวัน ตามลำดับ ค่าความร้อนของขยะมูลฝอยที่มีอายุ 3-10 ปี มีค่า 4,000 กิโลแคลอรีต่อกิโลกรัม อายุ 0-3 ปี มีค่า 6,000 กิโลแคลอรีต่อกิโลกรัม อายุ 10 ปี ขึ้นไป มีค่า 8,000 กิโลแคลอรีต่อกิโลกรัม ในส่วนขยะมูลฝอยใหม่ที่มีการเก็บขนและเข้ามาทิ้งในพื้นที่บ่อขยะ มีค่า HHV 7,000 กิโลแคลอรีต่อกิโลกรัม ตามลำดับ ค่าความชื้นของอายุขยะ 0-3 ปี มีค่าความชื้นมากที่สุดคือ 35% ที่อายุขยะ 3-10 ปี ซึ่งเป็นขยะเก่า นั้น มีค่าความชื้นเฉลี่ย 20% ที่อายุขยะ 10 ปี มีค่าความชื้นเฉลี่ย 10% และที่ผิวบ่อ ซึ่งเป็นขยะใหม่มีค่าความชื้น น้อยกว่า 5% ตามลำดับ จากงานวิจัยสามารถนำข้อมูลไปใช้รองรับการจัดการขยะมูลฝอยในพื้นที่บ่อขยะ นำไปสู่การผลิตเชื้อเพลิงขยะ (Refuse Derived Fuel: RDF) 2 และ 3 เพื่อนำไปใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตพลังงานความร้อนหรือพลังงานไฟฟ้าได้ ซึ่งสามารถเชื่อมโยงกับเป้าหมายการพัฒนาที่ยั่งยืนที่ 7 ด้านการเข้าถึงพลังงาน และเพิ่มสัดส่วนของพลังงานทดแทนได้

คำสำคัญ: เชื้อเพลิงขยะ; พื้นที่บ่อขยะเทกองแบบเปิดโล่ง; ขยะมูลฝอย



Potential of Refuse Derived Fuel Production from Solid Waste in Open Dumping Area

Apichaya Sawasdee^{1*}, Kanlayarat Sukkananchana², Saowaluck Haosagul³ and Sasitorn Hasin¹

¹ Program in Innovation of Environmental Management, College of Innovative Management, Valaya Alongkorn Rajabhat University under the Royal Patronage

² Program in Hospitality and Hotel Management, College of Innovative Management, Valaya Alongkorn Rajabhat University under the Royal Patronage

³ Biosensor and Bioelectronics Technology Centre, Science and Technology Research Institute, King Mongkut's University of Technology North Bangkok, Bangkok

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

Received: 3 November 2022; Revised: 6 January 2023; Accepted: 18 January 2023

Online Published: 13 April 2023

Abstract: The objectives for the potential of refuse-derived fuel production from solid waste in open dumping area were to survey the amount of municipal solid waste (MSW) in open dumping area, heating value, and moisture content of MSW to analyze the potential of refuse-derived fuel production. The results showed that the average weight of MSW was 216.61 tons per day, and the number of garbage trucks that entered the area was 74 cars per day, respectively. The heating value of MSW 3-10 years was 4,000 kcal/kg, 0-3 years was 6,000 kcal/kg, and more than 10 years was 8,000 kcal/kg, in term of daily MSW that was collected and disposed of into this open dumping area has heating value 7,000 kcal/kg, respectively. The moisture content of MSW 0-3 years was an average of 35%, 0-3 years was an average of 20%, more than 10 years was an average of 10%, and daily MSW was an average of 5%, respectively. From the research, the data can support MSW management in open dumping area, producing refuse-derived fuel: RDF 2 and 3 that are material for thermal energy or electrical energy. Thus, this research can be linked to sustainable development goal 7 on access to energy and increasing the proportion of alternative energy.

Keywords: Open Dumping Area; Refuse Derived Fuel; Solid Waste



1. บทนำ

ปัจจุบันปัญหาขยะมูลฝอยเป็นปัญหาทั้งในระดับประเทศ ระดับจังหวัด และระดับท้องถิ่น ซึ่งต้องเร่งรัดแก้ไขปัญหานี้กันอย่างจริงจัง ด้วยความร่วมมือจากทุกภาคส่วนทั้งหน่วยงานภาครัฐ ภาคเอกชน รวมถึงภาคการศึกษา เพื่อให้เกิดกระบวนการจัดการในทุกมิติอย่างยั่งยืน ซึ่งมีหลายพื้นที่ในประเทศไทยที่มีการเทกองแบบเปิดโล่ง (Open Dumping) ที่ไม่ได้มีการควบคุม และไม่มีการบำบัดใดๆ ในการควบคุมสารมลพิษหรือสารปนเปื้อนจากสถานที่เทกองขยะมูลฝอย ทำให้ส่งผลเสียต่อสิ่งแวดล้อมและชุมชนโดยรอบ จังหวัดกาญจนบุรีเป็นจังหวัดหนึ่งที่ต้องการแก้ไขปัญหามลพิษจากการจัดการขยะมูลฝอยในระยะเร่งด่วน โดยจัดการขยะมูลฝอยนั้น รวมถึงการจัดการของเสียอันตราย และยังมีแผนปฏิบัติการแก้ไขปัญหามลพิษในพื้นที่วิกฤตที่ต้องเร่งแก้ไขปัญหามลพิษจากขยะมูลฝอยไม่ถูกต้องและตกค้างสะสม ทำให้มีความจำเป็นอย่างยิ่งในการดำเนินการจัดการขยะมูลฝอยอย่างถูกวิธี เพื่อลดผลกระทบต่อประชาชนโดยรอบ พื้นที่บริเวณเชิงเขาทอง หมู่ที่ 5 ตำบลแก่งเสี้ยน อำเภอเมือง จังหวัดกาญจนบุรี มีพื้นที่บ่อขยะเพื่อใช้ในการจัดการขยะมูลฝอย 53 ไร่ สถานการณ์ปัญหาขยะมูลฝอยเข้าขั้นวิกฤตจนถึงระดับที่ต้องได้รับการแก้ไขอย่างเร่งด่วน เนื่องจากมีปริมาณขยะมูลฝอยที่เข้าสู่พื้นที่เป็นจำนวนมาก นำไปสู่การจัดการขยะมูลฝอยอย่างถูกวิธี เพื่อลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม สุขภาพอนามัยของประชาชนในบริเวณใกล้เคียง โดยเฉพาะอย่างยิ่งปัญหาการแพร่กระจายของพาหะนำโรคจากแมลงวันที่สามารถนำเชื้อโรคจากพื้นที่บ่อขยะไปแพร่สู่คนและสัตว์ ซึ่งอาจส่งผลกระทบต่อชุมชนและ

เกษตรกรผู้เลี้ยงสัตว์ในบริเวณใกล้เคียงเป็นอย่างมาก รวมถึงเมื่อน้ำชะขยะเกิดขึ้นในพื้นที่บ่อขยะ ยังส่งผลให้เป็นแหล่งเพาะพันธุ์ยุง นำไปสู่การเกิดโรคไข้เลือดออก และยังนำไปสู่การปนเปื้อนของน้ำชะขยะในแหล่งน้ำผิวดินและแหล่งน้ำใต้ดินซึ่งจะส่งผลกระทบต่อพืช สิ่งมีชีวิตในน้ำ และมนุษย์ โดยทำให้เกิดมลพิษต่อน้ำดื่ม และการชลประทานเพื่อการเกษตร [1] นอกจากนี้พื้นที่บ่อขยะยังมีการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกสู่บรรยากาศ เช่น ก๊าซมีเทน (CH_4) ก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ หรือก๊าซไข่เน่า (H_2S) เนื่องจากพื้นที่ที่มีการทับถมกันของขยะมูลฝอยหลายประเภท

เชื้อเพลิงขยะ (Refuse Derived Fuel: RDF) เป็นการใช้เปลี่ยนขยะมูลฝอยหรือของเสียให้เป็นพลังงานสำหรับเชื้อเพลิงขยะ RDF นั้นสามารถแบ่งเป็น 7 ประเภท ตั้งแต่ RDF 1 ถึง RDF 7 ตามลักษณะการแปรรูปเป็นเชื้อเพลิงขยะ ขนาดของเชื้อเพลิงขยะ และค่าความร้อน ซึ่งเป็นทางเลือกในการจัดการขยะมูลฝอยและแก้ไขปัญหาการขาดแคลนพลังงาน ทำให้เกิดการใช้ประโยชน์ของขยะมูลฝอยได้ และสามารถรองรับการเพิ่มขึ้นของขยะมูลฝอยในปัจจุบันได้ [2] โดยเชื้อเพลิงขยะสามารถนำไปใช้ในการเผาไหม้โดยตรงหรือการเผาไหม้ร่วมกับเชื้อเพลิงประเภทอื่นๆได้ [3, 4]

ดังนั้น คณะผู้วิจัยจึงดำเนินการศึกษาศักยภาพการผลิตเชื้อเพลิงขยะจากขยะมูลฝอยในพื้นที่บ่อขยะเทกองแบบเปิดโล่ง เพื่อเป็นแนวทางนำไปสู่การใช้ประโยชน์จากขยะมูลฝอยในพื้นที่บ่อขยะในจังหวัดกาญจนบุรีและในพื้นที่อื่น ที่มีจำนวนมากในประเทศไทยผลิตเป็นเชื้อเพลิงจากขยะ และนำไปใช้ประโยชน์เพื่อผลิตเป็นพลังงานความร้อนหรือพลังงานไฟฟ้าต่อไป



2. วิธีการดำเนินการวิจัย

2.1 พื้นที่ศึกษา

พื้นที่ศึกษาในงานวิจัยนี้ คือ พื้นที่บ่อขยะบริเวณเชิงเขาทอง ตำบลแก่งเสี้ยน อำเภอเมือง จังหวัดกาญจนบุรี พิกัด 14.1015853, 99.5455744 ดังรูปที่ 1

2.2 การสำรวจปริมาณขยะมูลฝอย

การสำรวจปริมาณขยะมูลฝอยในบ่อขยะ แบ่งเป็น 2 ส่วน ดังนี้

(1) การใช้รถขุดเจาะในพื้นที่ เพื่อนำขยะมูลฝอยที่ถูกฝังกลบไว้ ไปหาค่าความร้อน และค่าความชื้น เก็บตัวอย่างใส่ถังพลาสติกขนาด 20 ลิตร เพื่อให้เพียงพอต่อการนำไปวิเคราะห์ การใช้รถขุดเจาะเพื่อเก็บตัวอย่างในพื้นที่ ดำเนินการลงพื้นที่วิจัยเพื่อเก็บตัวอย่างในช่วงมกราคม 2565 ถึงมีนาคม 2565 โดยระยะเวลาการฝังกลบของแต่ละจุดเจาะนั้นจะมีความแตกต่างกันไป เริ่มตั้งแต่ระยะเวลา 0 ปี ถึงมากกว่า 10 ปี โดยที่การขุดจะแบ่งเป็นช่วงเวลา 0-3 ปี ที่ความลึก 2 เมตร 3-10 ปี ที่ความลึก 4 เมตร และ 10 ปีขึ้นไป ที่ความลึก 6 เมตร ตามลำดับ ดังรูปที่ 2

(2) การนับจำนวนรถขยะที่เข้าสู่พื้นที่ และบันทึกข้อมูล ด้วยแบบบันทึกจำนวนรถขยะ เป็นการนับจำนวนรถขยะในวันทำการ ตั้งแต่เวลา 08:00-17:00 น. เพื่อให้ทราบถึงจำนวน และขนาดของรถขยะ เพื่อนำมาคำนวณเป็นปริมาณขยะมูลฝอยใหม่ที่เกิดขึ้นในแต่ละวัน ดังรูปที่ 3

2.3 การวิเคราะห์ความหนาแน่นของขยะมูลฝอย

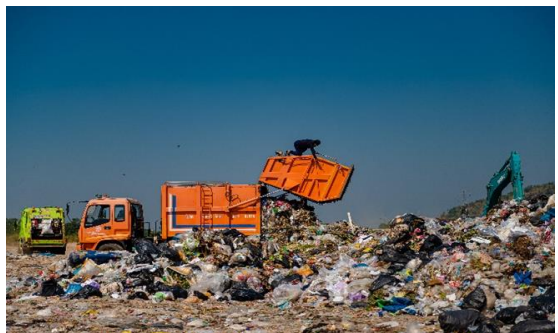
การวิเคราะห์ค่าความหนาแน่นของขยะมูลฝอยทำได้โดยวิเคราะห์ความหนาแน่นปกติ (Bulk Density) เป็นความหนาแน่นขยะมูลฝอยในภาชนะเก็บรวบรวม



รูปที่ 1 แสดงบริเวณพื้นที่สำรวจขยะมูลฝอย



รูปที่ 2 การใช้รถขุดเจาะเพื่อวิเคราะห์ปริมาณขยะมูลฝอยเก่าภายในบ่อขยะ



รูปที่ 3 รถขยะที่เข้ามาทิ้งขยะมูลฝอยในพื้นที่บ่อขยะ

ขยะมูลฝอย โดยจะมีการอัดให้แน่นเล็กน้อยในภาชนะตวง ซึ่งหน่วยของความหนาแน่นคือ กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร [5] ค่ารวมได้ดังสมการที่ (1)



$$D = \frac{W_1 - W_2}{V} \quad (1)$$

โดยที่

D = ความหนาแน่นปกติ (Bulk Density)

W_1 = น้ำหนักขยะมูลฝอยสด และน้ำหนักภาชนะตวงขยะมูลฝอย (กิโลกรัม)

W_2 = น้ำหนักภาชนะตวงขยะมูลฝอย (กิโลกรัม)

V = ปริมาตรภาชนะตวงขยะมูลฝอย (ลบ.ม.)

2.4 การหาค่าความร้อนของเชื้อเพลิงขยะด้วยเครื่อง Bomb calorimeter

การหาค่าความร้อนของเชื้อเพลิงขยะด้วยเครื่อง Bomb calorimeter [6] อาศัยหลักการเผาสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่มีออกซิเจนความดันสูงภายในภาชนะสแตนเลสที่ปริมาตรคงที่และล้อมรอบด้วยน้ำ เมื่อมีการกดปุ่มจุดระเบิด น้ำรอบภาชนะสแตนเลสจะทำหน้าที่ดูดซับความร้อนไว้ ส่งผลให้สามารถวัดอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงของน้ำก่อนจุดระเบิดและหลังจุดระเบิดเชื้อเพลิง เพื่อนำมาใช้ในการคำนวณหาค่าความร้อนของเชื้อเพลิงขยะ

สำหรับขั้นตอนการทดสอบเชื้อเพลิงประกอบด้วย 3 ขั้นตอนหลักคือ (1) การเตรียมตัวอย่างขยะ (2) การทดสอบหาค่าความร้อนของเชื้อเพลิงขยะ และ (3) การคำนวณค่าความร้อนของเชื้อเพลิงขยะ

โดยในขั้นตอนแรกจะทำการลดความชื้นของขยะเบื้องต้นด้วยการนำไปอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 105 °C นาน 3 ชม. จากนั้นนำมาตัดให้เป็นชิ้นเล็กๆ แล้วนำไปอัดให้เป็นก้อนให้มีน้ำหนักขยะแห้งประมาณ 0.5 กรัม ทำการทดลอง 3 ซ้ำ จากนั้นตั้งค่าอุปกรณ์เพื่อทดสอบค่าความร้อนในขั้นตอนที่ 2 เริ่มต้นจากนำเชื้อเพลิงอัดก้อนที่ได้ใส่ลงในถ้วยเผาที่มีการต่อลวด

จุดระเบิดยาวประมาณ 13 ซม. ที่ขั้วไฟฟ้าทั้งสองข้าง จากนั้นนำถ้วยเชื้อเพลิงที่ได้ใส่ลงในกระบอกสแตนเลส ทำการปิดฝากระบอกให้สนิทและเติมออกซิเจนประมาณ 25-30 บาร์ และบรรจุกระบอกสแตนเลสลงในถังสแตนเลสที่มีการเติมน้ำไว้ปริมาตร 2 ลิตร ต่อขั้วไฟฟ้าและเปิดสวิตช์ไปกวนพร้อมทั้งติดตั้งเทอร์โมมิเตอร์ไว้อ่านค่าอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลง (รูปที่ 4) จดค่าอุณหภูมิน้ำเริ่มต้นทุกๆ 1 นาทีจำนวน 5 ครั้ง หลังจากนั้นกดปุ่มจุดเชื้อเพลิงพร้อมทั้งจดค่าอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงทุกๆ 10 วินาทีจนกว่าอุณหภูมิน้ำจะลดลงและเริ่มคงที่ใน 3 ค่าสุดท้าย จากนั้นจดค่าอุณหภูมิต่อไปเป็นทุกๆ 1 นาทีจำนวน 5 ครั้ง จึงสิ้นสุดการทดลอง ทำการถอดอุปกรณ์ทั้งหมดและวัดค่าความยาวลวดที่เหลือหลังจุดระเบิด เพื่อนำมาใช้คำนวณหาค่าความร้อนของเชื้อเพลิงขยะในขั้นตอนที่ 3 ดังสมการที่ (2)

$$Q = \frac{W\Delta T - eR}{G} \quad (2)$$

โดยที่

Q = ค่าความร้อนของเชื้อเพลิงชนิดต่างๆ (แคลอรีต่อกิโลกรัม)

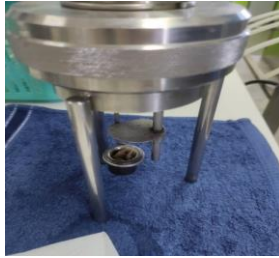
W = Water equivalent ของเครื่องบอมบ์แคลอรีมิเตอร์ ซึ่งเท่ากับ 2,826 (แคลอรี)

e = ความยาวเส้นลวดเผาไหม้ Firing wire ที่ถูกเผา (ซม.)

R = ค่าความร้อนที่หักออกจากการเผาไหม้ Firing wire เท่ากับ 0.96

ΔT = ความแตกต่างของอุณหภูมิน้ำก่อนจุดระเบิดและหลังจุดระเบิดเชื้อเพลิง

G = น้ำหนักของเชื้อเพลิงชนิดต่างๆ (กรัม)



รูปที่ 4 การวิเคราะห์ค่าความร้อนโดยบอมม์แคลอรีมิเตอร์

2.5 การหาค่าความชื้นและค่าความร้อนขั้นต่ำ (Lower Heating Value: LHV)

การหาค่าความชื้นของขยะมูลฝอย ทำได้โดยนำตัวอย่างขยะมูลฝอยที่ได้จากบ่อขยะ มาทำการคัดแยกขยะมูลฝอยที่เผาไหม้ไม่ได้ออกไป ซึ่งองค์ประกอบส่วนใหญ่ของขยะมูลฝอยในพื้นที่นี้ คือ พลาสติก เช่น ถุงพลาสติก ขวดพลาสติก แก้วพลาสติก และเศษผ้า โดยนำไปอบในตู้อบ (Oven) ที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส ดังรูปที่ 5

จากนั้นนำไปชั่งน้ำหนักและคำนวณหาค่าความชื้นดังสมการที่ (3) การคำนวณค่าความร้อนขั้นต่ำ (Lower Heating Value: LHV) สามารถคำนวณได้จากค่าความชื้นที่มีในขยะมูลฝอย ค่าความร้อนขั้นสูง (High Heating Value: HHV) และ เปอร์เซนต์ไฮโดรเจนของขยะมูลฝอย [7] ดังสมการที่ 4



รูปที่ 5 การอบขยะมูลฝอยหาค่าความชื้น

$$\text{ปริมาณความชื้น (เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก)} \quad (3) \\ = \frac{(A - B) \times 100}{A}$$

โดยที่

A = น้ำหนักตัวอย่างก่อนอบ (กรัม)

B = น้ำหนักตัวอย่างหลังอบ (กรัม)

$$\text{LHV (กิโลแคลอรีต่อกิโลกรัม)} \quad (4) \\ = \text{HHV} - (5.72 \times 9.00 \times H + M)$$

โดยที่

H = % ของธาตุไฮโดรเจนในชีวมวล

M = % ของความชื้นในชีวมวล

3. ผลการวิจัย

3.1 ผลการสำรวจปริมาณขยะมูลฝอยในพื้นที่บ่อขยะ

การสำรวจปริมาณขยะมูลฝอยใหม่ที่เข้ามาทั้งในพื้นที่บ่อขยะทุกวัน ด้วยการนับจำนวนรถขยะที่เข้าสู่พื้นที่บ่อขยะนั้น ดำเนินการสำรวจในวันธรรมดา เนื่องจากมีรถขนขยะเข้าออกเป็นจำนวนมาก ซึ่งแหล่งกำเนิดขยะมีทั้งของจังหวัดกาญจนบุรีเองและจังหวัดข้างเคียง และจากการลงพื้นที่สำรวจพบว่า มีน้ำหนักขยะมูลฝอยสุทธิเฉลี่ย 216.61 ตันต่อวัน โดยมีปริมาณรถขยะเข้าออกพื้นที่เฉลี่ย 74 คันต่อวัน ดังตารางที่ 1



ตารางที่ 1 จำนวนรขยและปริมาณขยสุทธิ

| ครั้งที่ | น้ำหนักขยสุทธิ (ตัน) | จำนวนรข (ตัน) |
|-----------|-------------------------|------------------|
| 1 | 189.43 | 66 |
| 2 | 244.30 | 80 |
| 3 | 223.93 | 77 |
| 4 | 208.79 | 75 |
| ค่าเฉลี่ย | 216.61 | 74 |

ข้อมูลจากการนับจำนวนรขยที่เข้าสู่พื้นที่ในแต่ละวัน แสดงให้เห็นถึงศักยภาพของพื้นที่บ่อขยที่สามารถนำมาเป็นวัตถุดิบในการผลิตเชื้อเพลิงขยได้นอกจากนี้ในการวิเคราะห์ค่าความหนาแน่นของขยมูลฝอย พบว่าค่าเฉลี่ยความหนาแน่นของขยมูลฝอย มีค่า 202.17 ± 11.08 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร เนื่องจากมีปริมาณขยมูลฝอยที่ถูกเก็บขนเข้าสู่พื้นที่เป็นจำนวนมาก จากข้อมูลการกำจัดขยมูลฝอยโดยการกำจัดขยมูลฝอยแบบถูกต้อง คือการผลิตเชื้อเพลิงขยนั้น มีเพียง 12 แห่งเท่านั้น [8] ซึ่งแสดงให้เห็นว่าปริมาณขยมูลฝอย ไม่เพียงแต่ภายในพื้นที่บ่อขยบริเวณเชิงเขาทอง ตำบลแก่งเสี้ยน จังหวัดกาญจนบุรี มีศักยภาพในการผลิตเป็นเชื้อเพลิงขยเท่านั้น แต่ปริมาณขยมูลฝอยที่เกิดขึ้นในประเทศไทยนั้น ยังมีปริมาณมาก และต้องมีการจัดการขยมูลฝอย เพื่อรองรับปริมาณขยมูลฝอยที่เกิดขึ้นในทุกๆวัน อีกด้วย

3.2 ค่าความร้อนของเชื้อเพลิงขย

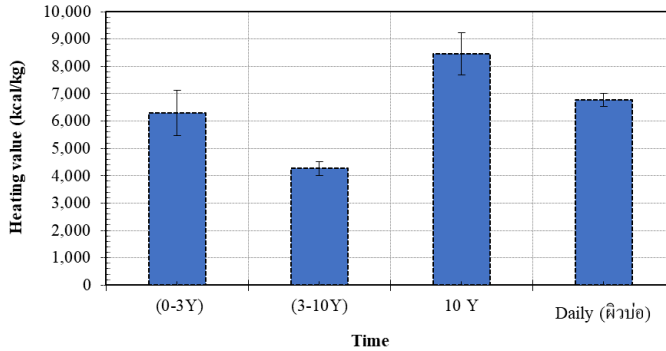
ค่าความร้อน (Calorific value or Heating value) เกิดจากการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงขย ซึ่งจะขึ้นอยู่กับปริมาณคาร์บอนที่มีอยู่ โดยเชื้อเพลิงที่มีคุณภาพสูงนั้นจะต้องมีค่าความร้อนสูง จากการ

วิเคราะห์ค่าความร้อนของขยแต่ละอายุ และขยระบบฝอยบ่อ แสดงดังรูปที่ 6 และในรูปที่ 7 เป็นข้อมูลค่าความร้อนของขยมูลฝอยในบ่อขย ที่มีอายุ 3-10 ปี นั้นมีค่าน้อยที่สุด คือ มีค่าความร้อนเฉลี่ย HHV $4,268.84 \pm 249.68$ กิโลแคลอรีต่อกิโลกรัม อายุขย 0-3 ปี มีค่าความร้อนเฉลี่ย HHV $6,305.96 \pm 829.12$ กิโลแคลอรีต่อกิโลกรัม อายุขย 10 ปี ขึ้นไป มีค่าความร้อนเฉลี่ย HHV $8,452.40 \pm 764.39$ กิโลแคลอรีต่อกิโลกรัม และขยใหม่ที่มีรขยเข้าออกทุกวัน เพื่อนำขยมูลฝอยเข้ามาทิ้งในพื้นที่มีค่าความร้อนเฉลี่ย HHV $6,772.44 \pm 242.34$ กิโลแคลอรีต่อกิโลกรัม ตามลำดับ

เมื่อพิจารณาค่าความร้อนของขยมูลฝอยที่มีอายุตั้งแต่ 0-10 ปีขึ้นไป พบว่าเป็นค่าที่อยู่ในช่วงที่เหมาะสมสำหรับการนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงขย ตามประกาศกรมควบคุมมลพิษ เรื่องคุณลักษณะเบื้องต้นที่เหมาะสมสำหรับเชื้อเพลิงจากขยมูลฝอยชุมชน และ American Society for Testing and Materials (ASTM) Standard [9]



รูปที่ 6 ตัวอย่างขยมูลฝอยในหลุมฝังกลบภายในพื้นที่บ่อขย



รูปที่ 7 ค่าความร้อนของขยะมูลฝอยในแต่ละระยะเวลา (ขยะมูลฝอยเก่า และขยะมูลฝอยใหม่)

หมายเหตุ: ขยะมูลฝอยเก่า คือ ขยะที่มีอายุมากกว่า 0 ปี ถึง 10 ปี และขยะมูลฝอยใหม่ คือ ขยะที่ถูกเก็บขนและนำมาทิ้งในพื้นที่ทุกวัน

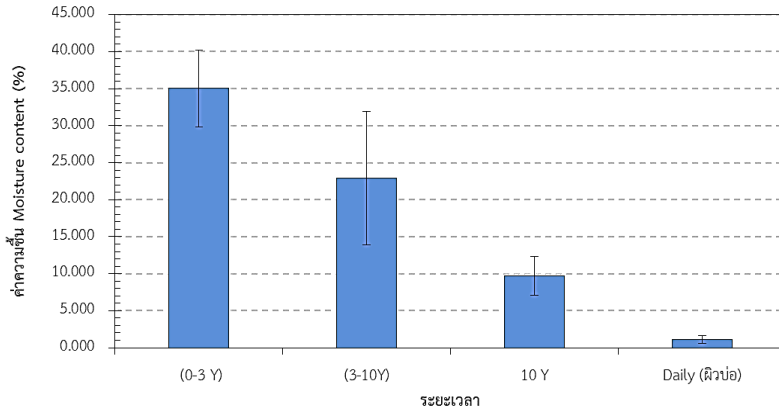
นอกจากนี้เมื่อนำค่าความร้อนของขยะมูลฝอยมาคำนวณหาศักยภาพในการผลิตพลังงานไฟฟ้า โดยใช้เทคโนโลยี Incinerator นั้นพบว่ากรณีที่ขยะมูลฝอยมีค่าความร้อนที่ 6 เมกกะจูลต่อกิโลกรัม เมื่อนำไปสู่การผลิตพลังงานไฟฟ้าจะสามารถให้กำลังการผลิตอยู่ที่ 0.58 เมกกะวัตต์-ชั่วโมงต่อตัน และในกรณีที่ค่าความร้อนสูงถึง 10 เมกกะจูลต่อกิโลกรัมจะมีกำลังการผลิตอยู่ที่ 0.97 เมกกะวัตต์-ชั่วโมงต่อตัน

ดังนั้นเมื่อนำมาคำนวณเทียบกับค่าความร้อนที่พื้นที่บ่อขยะ ซึ่งจะถูกแบ่งเป็นขยะมูลฝอยเก่าที่มีอายุตั้งแต่ 0-10 ปี และขยะมูลฝอยใหม่ที่ถูกเก็บขนมาเทกองในทุกๆวัน พบว่าขยะมูลฝอยเก่ามีค่าความร้อนเฉลี่ยอยู่ที่ 25.12 เมกกะจูลต่อกิโลกรัม เมื่อคำนวณค่ากำลังการผลิต 2.44 เมกกะวัตต์-ชั่วโมงต่อตัน และขยะใหม่มีค่าความร้อนเฉลี่ยอยู่ที่ 29.31 เมกกะจูลต่อกิโลกรัม เมื่อคำนวณค่ากำลังการผลิต 2.84 เมกกะวัตต์-ชั่วโมงต่อตัน และเมื่อนำค่าความร้อนมาพิจารณาพบว่า เป็นค่าความร้อนของเชื้อเพลิงขยะ RDF 2 ซึ่งเป็นขยะที่เผาไหม้ได้ถูกบดหรือตัดต่ออย่างหยาบๆ และ RDF 3 ซึ่งเป็นการคัดแยกส่วนที่เผาไหม้ไม่ได้ออก

เช่น โลหะ แก้ว ทำให้มีองค์ประกอบส่วนใหญ่เป็นองค์ประกอบที่เผาไหม้ได้เท่านั้น และมีการบดตัดให้มีขนาดเล็กกว่า 2 นิ้ว อย่างไรก็ตามทั้ง RDF 2 และ RDF 3 นั้นมีค่าความร้อน 23.56 เมกกะจูลต่อกิโลกรัม [10,11] ดังนั้นจากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าขยะมูลฝอยของพื้นที่บ่อขยะนี้มีความเหมาะสมที่จะนำมาทำเป็น RDF 2 และ RDF 3

3.3 ค่าความชื้นและค่าความร้อนขั้นต่ำ (Lower Heating Value: LHV) ของขยะมูลฝอย

ค่าความชื้น (Moisture Content) เป็นค่าที่แสดงถึงความชื้นของขยะ เป็นค่าที่มีผลต่อเนื้อและค่าความร้อนของเชื้อเพลิงขยะ จากการวิเคราะห์ค่าความชื้นของขยะมูลฝอยในแต่ละระยะเวลานั้นพบว่า ที่อายุขยะ 0-3 ปี ซึ่งเป็นขยะเก่ามีค่าความชื้นมากที่สุดมีค่าเฉลี่ย 35% ที่อายุขยะ 3-10 ปี ซึ่งเป็นขยะเก่ามีค่าความชื้นเฉลี่ย 20% ที่อายุขยะมากกว่า 10 ปี มีค่าความชื้นเฉลี่ย 10% และที่ผิวบ่อ ซึ่งเป็นขยะใหม่มีค่าความชื้นน้อยกว่า 5% ตามลำดับ (รูปที่ 8) ซึ่ง RDF 3 นั้นจะมีค่าความชื้นอยู่ในช่วง 13% ถึง 25% (Standard of RDF3)



รูปที่ 7 ค่าความชื้นของขยะมูลฝอยในแต่ละช่วงอายุ (ขยะมูลฝอยเก่า และขยะมูลฝอยใหม่)

จากการพิจารณาถึงค่าความร้อน HHV และ LHV แสดงดังตารางที่ 2 พบว่าขยะมูลฝอยสามารถเป็นทรัพยากรที่สำคัญ และเป็นประโยชน์ในการทดแทนแหล่งพลังงานหลักของเชื้อเพลิงฟอสซิล โดยเฉพาะอย่างยิ่งในอุตสาหกรรมปูนซีเมนต์ สามารถนำเชื้อเพลิงขยะมาเป็นเชื้อเพลิงในการผลิตพลังงานความร้อนได้ถึง 20% อย่างไรก็ตามต้องพิจารณาค่าความชื้นเช่นกัน ซึ่งควรอยู่ในช่วง 10-15% [3] สอดคล้องกับผลการวิจัยที่มีค่าความชื้นอยู่ในช่วงที่เหมาะสม และสามารถนำไปเป็นวัตถุดิบในการผลิต

เชื้อเพลิงขยะได้ เป็นเชื้อเพลิงทดแทนหรือเชื้อเพลิงร่วมในเตาเผาต่อไป

เมื่อพิจารณาถึงค่าความร้อนเปรียบเทียบกับงานวิจัยอื่นพบว่า ในงานวิจัยนี้เชื้อเพลิงขยะมีค่าความร้อนสูงกว่างานวิจัยอื่น ซึ่งแสดงให้เห็นถึงศักยภาพในการผลิตเชื้อเพลิงขยะในงานวิจัยนี้ ดังตารางที่ 3 ที่สามารถนำมาทำเป็น RDF 2 และ RDF 3 เพื่อรองรับโรงไฟฟ้าของพื้นที่ในอนาคต รวมถึงส่งขายไปยังโรงปูนหรือโรงไฟฟ้าเพื่อเป็นเชื้อเพลิงทดแทนได้อีกทางหนึ่ง

ตารางที่ 2 แสดงค่า HHV และ LHV ของขยะมูลฝอยในแต่ละช่วงอายุ

| อายุขยะใหม่/ค่าความร้อน | 0-3 ปี | 3-10 ปี | 10 ปีขึ้นไป | ฝัวย่อ (Daily) |
|-----------------------------|----------|----------|-------------|----------------|
| HHV (กิโลแคลอรีต่อกิโลกรัม) | 6,305.96 | 4,268.84 | 8,452.40 | 6,772.44 |
| LHV (กิโลแคลอรีต่อกิโลกรัม) | 5,394.99 | 4,246.19 | 7,686.61 | 6,055.55 |

หมายเหตุ ขยะมูลฝอยในพื้นที่บ่อขยะ องค์ประกอบส่วนใหญ่เป็นพลาสติก เช่น ถุงพลาสติก ขวดพลาสติก แก้วพลาสติก และเศษผ้า



ตารางที่ 3 การเปรียบเทียบค่าความร้อนในงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

| ค่าความร้อน (เมกกะจูลต่อกิโลกรัม) | Reference |
|--------------------------------------|-------------|
| 5.30 | [12] |
| 14.40 | [13] |
| 29.00 | [14] |
| 25.12 -29.31 | งานวิจัยนี้ |

4. บทสรุป

จากการศึกษาศักยภาพการผลิตเชื้อเพลิงขยะจากขยะมูลฝอยในพื้นที่บ่อขยะเทกองแบบเปิดโล่ง (Open Dumping) นั้น จากการลงพื้นที่สำรวจพบว่าองค์ประกอบส่วนใหญ่เป็นพลาสติก เช่น ถุงพลาสติก ขวดพลาสติก แก้วพลาสติก และเศษผ้า และมีขยะประเภทอื่น เช่น ขยะเศษอาหาร เป็นต้น น้ำหนักขยะมูลฝอยสุทธิเฉลี่ย 216.61 ตันต่อวัน โดยมีปริมาณรถขยะเข้าออกพื้นที่เฉลี่ย 74 คันต่อวัน ซึ่งก่อนการนำขยะมูลฝอยในบ่อขยะมาเปลี่ยนเป็น RDF นั้น ต้องมีการคัดแยกในส่วนขยะที่ไม่สามารถใหม่ได้และขยะที่มีค่าความร้อนสูงออกไปก่อน ในส่วนค่าความร้อนของขยะมูลฝอยในหลุมที่มีอายุ 3-10 ปี มีค่า HHV $4,268.84 \pm 249.68$ กิโลแคลอรีต่อกิโลกรัม อายุ 0-3 ปี มีค่า HHV $6,305.96 \pm 829.12$ กิโลแคลอรีต่อกิโลกรัม อายุ 10 ปี ขึ้นไป มีค่า HHV $8,452.40 \pm 764.39$ กิโลแคลอรีต่อกิโลกรัม และบนบ่อซึ่งเป็นขยะใหม่ที่มีรถขยะเข้าออกทุกวัน มีค่า HHV $6,772.44 \pm 242.34$ กิโลแคลอรีต่อกิโลกรัม ตามลำดับ ค่าความชื้นของอายุขยะ 0-3 ปี มีค่าความชื้นมากที่สุดคือ 35% ที่อายุขยะ 3-10 ปี ซึ่งเป็นขยะเก่า่นั้นมีค่าความชื้นเฉลี่ย 20% ที่

อายุขยะ 10 ปี มีค่าความชื้นเฉลี่ย 10% และที่บ่อบ่อซึ่งเป็นขยะใหม่มีค่าความชื้นน้อยกว่า 5% ตามลำดับ ซึ่ง RDF 2 และ 3 นั้นจะมีค่าความชื้นอยู่ในช่วง 13% ถึง 25% ซึ่งทั้ง RDF 2 และ 3 นั้น สามารถนำไปขายในโรงปูนและโรงไฟฟ้าเพื่อเป็นเชื้อเพลิงทดแทนได้ ซึ่งจากงานวิจัยสามารถนำข้อมูลไปใช้รองรับการจัดการขยะมูลฝอยในพื้นที่บ่อขยะอื่นๆ และนำขยะมูลฝอยมาใช้ประโยชน์ในการผลิตพลังงานความร้อนหรือพลังงานไฟฟ้าได้

5. กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณทูลสนับสนุนการวิจัยจาก บริษัทแก่งเสี้ยน พาวเวอร์ จำกัด ประจำปีงบประมาณ 2565

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] KS. Rajoo, DS. Karam, A. Ismail and A. Arifin, Evaluating the leachate contamination impact of landfills and open dumpsites from developing countries using the proposed Leachate Pollution Index for Developing Countries (LPIDC), Environmental Nanotechnology, Monitoring and Management, 2020, 14, 100372.
- [2] P. Dianda, Mahidin and E. Munawar, Production and characterization refuse derived fuel (RDF) from high organic and moisture contents of municipal solid waste (MSW), IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2018, 334, 012035.



- [3] I. Brás, M.E. Silva, G. Lobo, A. Cordeiro, M. Faria and L.T. Lemos, Refuse derived fuel from municipal solid waste rejected fractions-a case study, *Energy Procedia*, 2017, 120, 349-356.
- [4] T. Ganesh, P. Vignesh and G. A. Kunar, Refuse derived fuel to electricity, *International Journal of Engineering Research and Technology*, 2013, 2(9), 2930-2932.
- [5] W. Leelaphitak, W. Jutidamrongphan and P. Vanapruck, A study of solid waste composition processed in biogas: Case studies of waste to energy and fertilizer plants in Nakhon-Ratchasima and Sungnoen Municipalities, *RSU National Research Conference, Proceeding 2019*, 174-183. (in Thai)
- [6] D.R. Kurniati and I. Rohman, The concept and science process skills analysis in bomb calorimeter experiment as a foundation for the development of virtual laboratory of bomb calorimeter, *Journal of Physics: Conference Series*, 2018, 1013, 012088.
- [7] A. Khuriati, W.S. Budi, M. Nur, I. Istadi and G. Suwoto, Modeling of heating value of municipal solid waste based on ultimate analysis using multiple stepwise regression linear in Semarang, *ARNP Journal of Engineering and Applied Sciences*, 2017, 12(9), 2870-2876.
- [8] Pollution Control Department, <https://www.pcd.go.th/publication/26832>, (Accessed on 31 October 2022)
- [9] W. Dong, Z. Chen, J. Chen, Z.J. Ting, R. Zhang, G. Ji and M. Zhao, A novel method for the estimation of higher heating value of municipal solid wastes, *Energies*, 2022, 15(7), 2593.
- [10] Y. Suma, N. Pasukphun, A. Hongtong, V. Keawdunglek, P. Laor and T. Apidechkul, Waste composition evaluation for solid waste management guideline in highland rural tourist area in Thailand, *Applied Environmental Research*, 2019, 41(2), 13-26.
- [11] T. Kiatsiriroat, P. Panitchkul, M. Jamsil, N. Vorayos, J. Prasityousil and N. Dutsadee, Demonstration projects on thermal energy from waste in University, *National Research Council of Thailand, Research Report*, 2011. (in Thai)
- [12] H. Zhou, A.H. Meng, Y.Q. Long, Q.H. Li and Y.G. Zhang, An overview of characteristics of municipal solid waste fuel in China: Physical, chemical composition and heating value, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2014, 36, 107-122.



- [13] Y. Chang, C. Liu, C. Hung, A. Hu and S. Chen, Change in MSW characteristics under recent management strategies in Taiwan, *Waste Management*, 2008, 28(12), 2433-2455.
- [14] T. Weerasak and S. Sanongraj, Potential of production refuse derived fuel (RDF) from municipal solid waste at Rajamangala University of Technology Isan Surin Campus, *Applied Environmental Research*, 2015, 37(2), 85-91.



ไฮโดรเจลชีวภาพที่ซ่อมแซมตัวเองได้อย่างรวดเร็วสำหรับตรวจจับการเคลื่อนไหวกของมนุษย์

ณัฐกานต์ เจริญไทย และ พรนภา เกษมศิริ*

สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยขอนแก่น

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

วันที่รับบทความ: 12 ตุลาคม 2565; วันที่ทบทวนบทความ: 3 มกราคม 2566; วันที่ตอบรับบทความ: 18 มกราคม 2566

วันที่เผยแพร่ออนไลน์: 13 เมษายน 2566

บทคัดย่อ: ไฮโดรเจลนำไฟฟ้าอัจฉริยะที่สามารถเป็นเซนเซอร์วัดความเครียดได้รับความสนใจเป็นอย่างมาก นิยมนำมาใช้ในทางการแพทย์เพื่อตรวจจับการเคลื่อนไหวกของมนุษย์และตรวจสอบการดูแลสุขภาพส่วนบุคคล ในงานวิจัยนี้มีจุดประสงค์เพื่อพัฒนาไฮโดรเจลนำไฟฟ้าจาก กลูเตน/กัวกัม (GG) ที่เชื่อมขวางด้วยบอแรกซ์ (Borax) และกรดแทนนิก (TA) โดยศึกษาผลของความเข้มข้นของ TA (0-5 wt%) ต่อความสามารถในการนำไฟฟ้าและซ่อมแซมตนเองของไฮโดรเจล การเติม TA เป็นส่วนประกอบของไฮโดรเจล ที่ความเข้มข้น 1.25-5 wt% แสดงความสามารถในการซ่อมแซมตนเองของไฮโดรเจลเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วและแข็งแรง โดยเวลาในการซ่อมแซมตนเองลดลงจาก 20 วินาที เป็น 3 วินาที เมื่อความเข้มข้นของ TA เพิ่มขึ้น มีค่าการนำไฟฟ้าของไฮโดรเจลในช่วง 0.022-0.027 S/m การทดสอบการยืดเกาะผิวหนังของมนุษย์แสดงให้เห็นว่าไฮโดรเจลที่มี TA 2.5 wt% สามารถเกาะติดกับผิวหนังได้โดยปราศจากสิ่งตกค้างเมื่อนำตัวอย่างออก แสดงให้เห็นว่าไฮโดรเจลที่มี TA 2.5 wt% เป็นความเข้มข้นที่เหมาะสมสำหรับการเตรียมไฮโดรเจล ไฮโดรเจลที่มี TA 2.5 wt% แสดงคุณสมบัติอัจฉริยะ เช่น การซ่อมแซมตนเอง การยืดเกาะ และความเสถียรของสัญญาณระหว่างการใช้งานตรวจจับการเคลื่อนไหวกของมนุษย์ จากผลการทดลองสรุปได้ว่าไฮโดรเจลที่มีส่วนผสมของ Borax และ TA 2.5 wt% สามารถนำไปประยุกต์ใช้เป็นเซนเซอร์วัดความเครียดในการตรวจจับการเคลื่อนไหวกของมนุษย์ได้

คำสำคัญ: ไฮโดรเจลนำไฟฟ้า; เซนเซอร์วัดความเครียด; พอลิเมอร์ธรรมชาติ



Rapid Self-healing Bio-based Hydrogels for Monitoring Human Motion

Nattakan Jaroenthai and Pornnapa Kasemsiri*

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

* Corresponding author, E-mail: pornkas@kku.ac.th

Received: 12 October 2022; Revised: 3 January 2023; Accepted: 18 January 2023

Online Published: 13 April 2023

Abstract: Conductive hydrogels are widely used as strain sensor in medical application for detecting human motion and personal health care monitoring. This research aims to develop a conductive hydrogel based on gluten/guar gum (GG) crosslinked by borax and tannic acid (TA). The effect of TA content (0-5 wt%) on the conductivity and self-healing ability of hydrogels was investigated. The presence of TA at 1.25-5 wt% in the hydrogel showed rapid and strong self-healing. The self-healing time decreased from 20 s to 3 s when TA content increased. The conductivity of hydrogels was observed in the range of 0.022-0.027 S/m. The human skin adhesion test revealed that the hydrogel containing 2.5 wt% TA could adhere to the skin and left no residue when the sample was removed. It can be suggested that the 2.5 wt% TA was a suitable content for hydrogel preparation. The hydrogel containing 2.5 wt% TA integrated smart functions such as self-healing and self-adhere which performed reproducibility and the stability of the signals during monitoring of human limbs movement. According to the results, the hydrogel containing borax and 2.5 wt% TA could be applied as a strain sensor for monitoring human health.

Keywords: Conductive hydrogel; Strain sensor; Biopolymer



1. บทนำ

เซนเซอร์วัดความเครียด (Strain Sensor) ที่มีความยืดหยุ่นได้รับความสนใจเป็นอย่างมาก มีการใช้กันอย่างแพร่หลายในผลิตภัณฑ์อิเล็กทรอนิกส์ที่สวมใส่ได้ เช่น การตรวจจับการเคลื่อนไหวของมนุษย์ การตรวจสอบดูแลสุขภาพส่วนบุคคล ผิวน้ำหนัก อิเล็กทรอนิกส์ และหุ่นยนต์อัจฉริยะ [1] โดยทั่วไปเซนเซอร์วัดความเครียด ประกอบจากวัสดุนำไฟฟ้า (เช่น อนุภาคนำไฟฟ้านินทรีย์, กราฟีน, ท่อนาโน, คาร์บอน และลวดนาโนโลหะ) และอีลาสโตเมอร์ การกระจายสารเติมแต่งในอีลาสโตเมอร์อย่างสม่ำเสมอจำเป็นต้องใช้กระบวนการที่ซับซ้อนและเทคโนโลยีขั้นสูง นอกจากนี้เกิดการเสียดสีระหว่างอีลาสโตเมอร์และสารเติมแต่งที่เป็นสื่อนำกระแสไฟฟ้า ส่งผลให้เกิดความเสียหายอย่างมากต่อประสิทธิภาพทางกลของเซนเซอร์ [2] ไฮโดรเจล (Hydrogel) คือวัสดุที่ประกอบด้วยพอลิเมอร์ที่มีความชอบน้ำ (Hydrophilic) ซึ่งมีพันธะหรือแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลทำให้มีโครงสร้างร่างแหสามมิติ [3] สามารถออกแบบให้มีสมบัติอัจฉริยะ เช่น การซ่อมแซมตัวเองเพื่อซ่อมแซมชิ้นงานที่ได้รับความเสียหายขณะใช้งาน

ในปัจจุบันไฮโดรเจลที่มีสมบัตินำไฟฟ้าได้รับความสนใจเป็นอย่างมาก เนื่องจากสามารถนำมาประยุกต์ใช้งานได้หลากหลาย เช่น อิเล็กโทรไลต์ที่เป็นของแข็ง, อุปกรณ์สวมใส่ที่ยืดหยุ่น และเซนเซอร์การใช้พอลิเมอร์ธรรมชาติในการเตรียมไฮโดรเจลเป็นแนวทางที่ทำให้ได้วัสดุที่มีความเป็นพิษต่ำและเข้ากันได้ทางชีวภาพ กลูเตน (Gluten) เป็นพอลิเมอร์ชีวภาพที่มีอยู่ในข้าวสาลี ข้าวไรย์ และข้าวบาร์เลย์

องค์ประกอบหลักของ กลูเตน ได้แก่ กลูเตนินและไกลอะดีน ซึ่งจะทำให้มีลักษณะเหนียว ยืดหยุ่น และไม่ละลายน้ำ [4] Han และคณะ [5] พัฒนาวัสดุชีวภาพนำไฟฟ้าจากกลูเตนที่นำไฟฟ้า (i- Gluten) ด้วยวิธีที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม แสดงคุณสมบัติทางกลและความยืดหยุ่นที่ดีโดยมีค่าความต้านทานแรงดึง 150 กิโลปาสคาล และ ระยะยืดสูงสุด ณ จุดขาดเท่ากับ 600% ไฮโดรเจลนำไฟฟ้าที่ได้สามารถนำมาใช้เพื่อติดตามพฤติกรรมเคลื่อนไหวของมนุษย์และยังสามารถยึดติดกับพื้นผิวต่างๆ ด้วยตัวเอง เช่น หนังหมู พลาสติก แก้ว กระดาษ และสแตนเลส นอกจากนี้ในงานวิจัยของ Ounkaew และคณะ [6] ได้สังเคราะห์ไฮโดรเจลที่มีองค์ประกอบของกลูเตนและกัวกัม (GG) ซึ่งเป็นพอลิแซ็กคาไรด์ที่ได้จากการสกัดเมล็ดถั่ว โดยมีส่วนประกอบหลักได้แก่ กลูเตนินและไกลอะดีน สมบัติทั่วไปของ GG มีลักษณะเหนียว และยืดหยุ่น จากการศึกษาสมบัติการยึดติดบนพื้นผิวต่างๆ พบว่า ไฮโดรเจลที่มีอัตราส่วนกลูเตน/GG เท่ากับ 10/0.15 แสดงความแข็งแรงในการยึดเกาะที่สูงที่สุด เนื่องจากการเกิดแรงกระทำระหว่างโมเลกุล เช่น พันธะไฮโดรเจน และการรวมตัวของโมเลกุลที่ลดลง ทำให้พื้นผิวของ กลูเตน/GG มีความขรุขระที่สูง ความขรุขระที่สูงนั้นเพิ่มพื้นที่สัมผัสระหว่างพื้นผิวและส่งเสริมการยึดติดของพื้นผิวนอกจากนี้การเติมบอแรกซ์ใน กลูเตน/GG สามารถเกิดปฏิกิริยาผันกลับได้ผ่านพันธะโคเวเลนต์ ทำให้ซ่อมแซมตัวเองและขึ้นรูปใหม่ได้ แต่ทั้งนี้ไฮโดรเจลที่มีส่วนประกอบของกลูเตน/GG ยังมีข้อจำกัด เนื่องจากใช้ระยะเวลาจนถึง 3 ชั่วโมง ในการซ่อมแซมตัวเอง



ดังนั้น การพัฒนาเซนเซอร์ไฮโดรเจลนำไฟฟ้าให้มีการซ่อมแซมตัวเองที่รวดเร็วขึ้น จึงเป็นแนวทางหนึ่งที่จะทำให้มีความสะดวกต่อการใช้ Wenjiao Ge และคณะ [7] สังเคราะห์ไฮโดรเจลจากพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ (PVA) และเซลลูโลสนาโนไฟเบอร์ (CNF) โดยใช้กรดแทนนิก (TA) ร่วมกับบอแรกซ์ในอัตราส่วน 5/1 (v/v) พบว่าการเกิดพันธะบอแรกซ์ เอสเตอร์และพันธะไฮโดรเจนระหว่างพอลิเมอร์เมตริกซ์บอแรกซ์และ TA ส่งผลให้ไฮโดรเจลสามารถซ่อมแซมตัวเองได้อย่างรวดเร็วภายในเวลา 10 วินาที เนื่องจากปริมาณของหมู่ไฮดรอกซิลอิสระ และบอแรกซ์ที่เพียงพอนำไฮโดรเจลสามารถสร้างพันธะบอแรกซ์ เอสเตอร์และพันธะไฮโดรเจนในการเกิดปฏิกิริยาผันกลับ จากงานวิจัยของ Li Zhao และคณะ [8] ได้ศึกษาการเพิ่มขึ้นของความเข้มข้น TA ในไฮโดรเจล พบว่าเมื่อปริมาณของ TA เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ไฮโดรเจลมีความเครียดที่สูงขึ้น แต่อย่างไรก็ตามค่าความทนต่อแรงดึงก็มีค่าลดลง ดังนั้นเพื่อลดเวลาในการซ่อมแซมตัวเอง การใช้บอแรกซ์และ TA ร่วมกัน จึงเป็นแนวทางที่น่าสนใจและในการพัฒนาในไฮโดรเจลอัจฉริยะที่ซ่อมแซมตัวเองได้อย่างรวดเร็ว

ในงานวิจัยนี้มุ่งเน้นที่จะศึกษาการพัฒนาไฮโดรเจลสำหรับประยุกต์ใช้งานเป็นเซนเซอร์วัดความเครียดจาก กลูเตน/GG ที่เชื่อมขวางด้วย Borax และใช้ TA เป็นสารเชื่อมขวาง เพื่อให้ได้คุณสมบัติทางด้านความสามารถในการซ่อมแซมตัวเองและการนำไฟฟ้า นอกจากนี้ยังศึกษาความสามารถในการตรวจจับการเคลื่อนไหวต่าง ๆ ของมนุษย์ในชีวิตประจำวันร่วมด้วย

2. วิธีการดำเนินงานวิจัย

2.1 วัสดุอุปกรณ์

กลูเตนและกัวกัม (GG) จากห้างสรรพสินค้าทั่วไป จังหวัดขอนแก่น กลีเซอรอล โมโนสเตียเรท (GMS) จากบริษัท Krungthepchemi กลีเซอรอล ความบริสุทธิ์ 99.5% จาก Elago Enterprises กรดบอแรกซ์ (Borax) ความบริสุทธิ์ 99% จากบริษัท Intereducation Supplies และกรดแทนนิก (TA) มวลโมเลกุล 1,701.20 กรัม/โมล จากบริษัท Sigma-Aldrich

2.2 วิธีการทดลอง

เตรียมสารละลายกลูเตน โดยละลายกลูเตน 10 กรัม ในสารละลายที่ประกอบด้วยกลีเซอรอล 14 มิลลิลิตร และน้ำ DI 30 มิลลิลิตร กวนผสมให้เข้ากันเป็นเวลา 5 นาที จากนั้นเตรียมสารละลาย GG โดยละลาย GG 0.15 กรัม และ GMS 0.012 กรัม ในน้ำ DI 10 มิลลิลิตร กวนผสมให้เข้ากันเป็นเวลา 20 นาที ที่อุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียส ทำการผสมสารละลายกลูเตน/GG จากนั้นเติมสารละลายบอแรกซ์ โดยละลายบอแรกซ์ 3 กรัม ในน้ำ DI 10 มิลลิลิตร แล้วกวนผสมให้เข้ากันเป็นเวลา 10 นาที ที่อุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียส เมื่อสารละลายเข้ากันดีแล้วเติมสารละลาย TA ที่ความเข้มข้น 0 1.25 2.5 3.75 และ 5 wt% กวนผสมต่อเป็นเวลา 14 นาที ที่อุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียส เพื่อให้ได้ไฮโดรเจลอัจฉริยะ

2.3 การทดสอบสมบัติของไฮโดรเจล

2.3.1 วิเคราะห์สมบัติของหมู่ฟังก์ชันด้วยเทคนิค Fourier Transform Infrared Spectrophotometer (FT-IR) ที่ความยาวคลื่น $3500-600\text{ cm}^{-1}$



2.3.2 การทดสอบประสิทธิภาพในการซ่อมแซมตนเองของไฮโดรเจล โดยการตัดแบ่งออกเป็นสองส่วน แล้วประกบเข้าด้วยกัน ที่อุณหภูมิห้อง จับเวลาในการซ่อมตนเอง จากนั้นนำไปทดสอบความแข็งแรง โดยการถ่วงน้ำหนัก 50 กรัม

2.3.3 การทดสอบการนำไฟฟ้า (Conductivity Properties Testing) ทำการทดสอบโดยใช้หลักการ Two Point Probe ด้วยเครื่อง LCR รุ่น KEITHLEY model 2400 ซึ่งสามารถหาความต้านทานของวัสดุสารกึ่งตัวนำ โดยกำหนดระยะห่างและความหนาของชิ้นงานและใช้คำนวณในสมการที่ (1)

$$\sigma = \frac{L}{(R \cdot S)} \quad (1)$$

เมื่อ σ = ค่าการนำไฟฟ้า (S/m)

L = ระยะห่างระหว่างจุดสองจุด (m)

R = ความต้านทาน (Ω)

S = พื้นที่หน้าตัดของชิ้นงาน (m^2)

2.3.4 การทดสอบประสิทธิภาพเซนเซอร์สำหรับตรวจจับการเคลื่อนไหว (Strain Sensor Testing) การทดสอบการเคลื่อนไหวของมนุษย์ได้แก่ ข้อมือ นิ้วเข้า และศอก เพื่อทดสอบความสามารถในการตรวจสอบการเคลื่อนไหวโดยการต่อวงจรอนุกรมด้วยเครื่อง RMS multimeter รุ่น Fluke 289 โดยมีสมการในการคำนวณดังสมการที่ 2

$$RR = \frac{(R - R_0)}{R_0} \times 100 \quad (2)$$

เมื่อ RR = ความต้านทานสัมพัทธ์ (%)

R = ความต้านทานที่เกิดขึ้น (Ω)

R_0 = ความต้านทานที่จุดเริ่มต้น (Ω)

S = พื้นที่หน้าตัดของชิ้นงาน (m^2)

3. ผลการวิจัยและอภิปรายผล

3.1 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของไฮโดรเจลด้วยเทคนิค Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR)

สเปกตรัมของ ATR-FTIR ของไฮโดรเจลที่มีส่วนผสมของกลูเตน GG GMS กลีเซอรอล TA และบอแรกซ์ แสดงในรูปที่ 1 และสรุปลักษณะหมู่ฟังก์ชันตามตำแหน่งเลขคลื่นในตารางที่ 1 สเปกตรัมของไฮโดรเจล 0 wt% TA จะพบพีคของการเชื่อมขวางของ B-O-B และพีคของการสั่นยืดของพันธะ B-O ที่ 665 cm^{-1} และ 851 cm^{-1} ตามลำดับ สำหรับไฮโดรเจลที่มีการเติม TA จะพบที่ตำแหน่ง 751 ซึ่งแสดงถึงลักษณะของ TA บ่งบอกถึงการรวมตัวกันของ TA และเมตริกซ์ที่ดี โดยกระบวนการเชื่อมขวางของบอแรกซ์ภายในพอลิเมอร์เมตริกซ์แสดงในรูปที่ 2

3.2 สมบัติการซ่อมแซมตนเองของไฮโดรเจล (Self-healing)

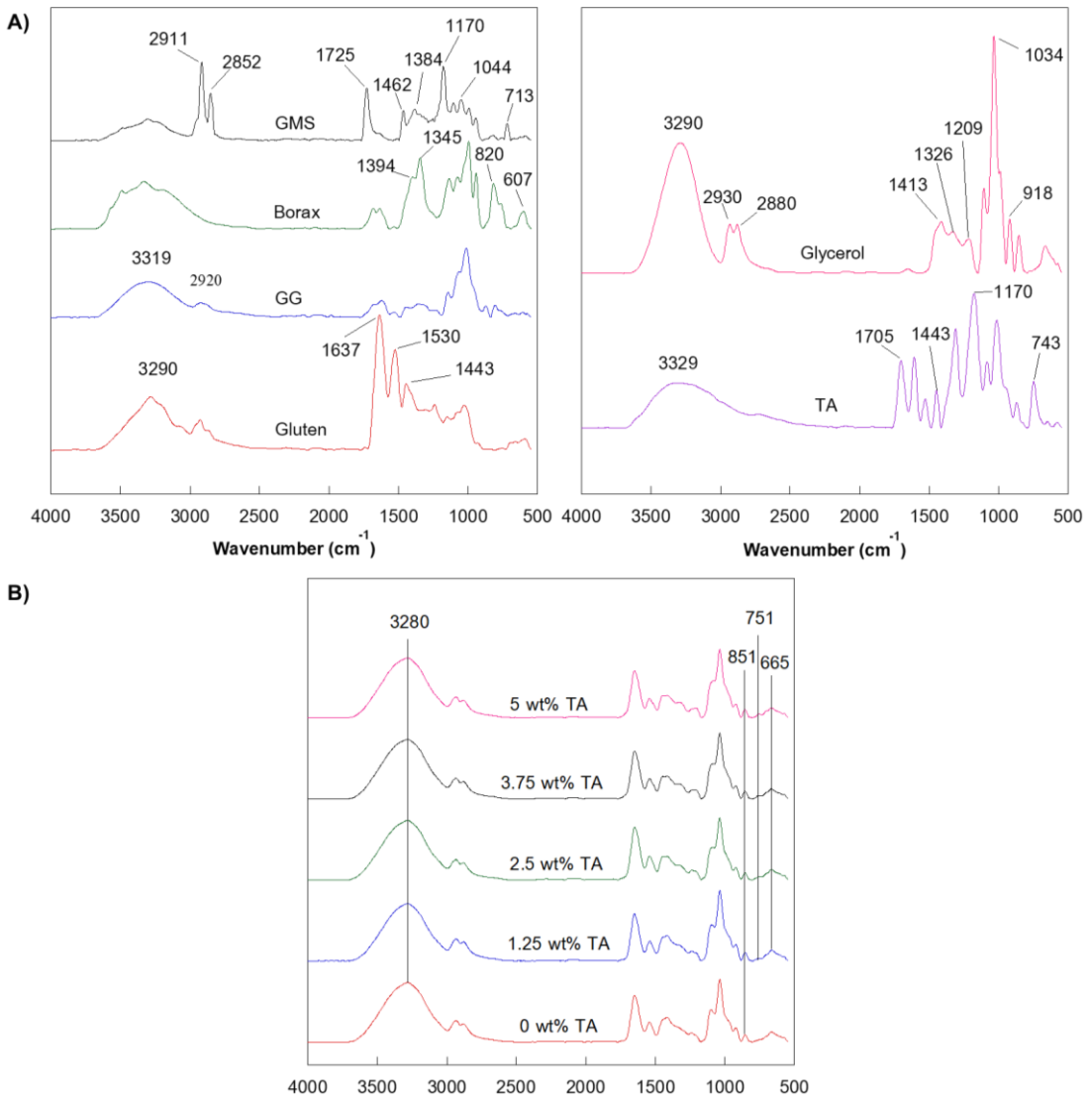
ในการทดสอบการซ่อมแซมตนเอง ไฮโดรเจลถูกตัดแบ่งเป็นสองส่วนแล้วประกบเข้าด้วยกัน ที่อุณหภูมิห้อง โดยปราศจากสิ่งกระตุ้นภายนอก พบว่าไฮโดรเจลสามารถซ่อมแซมตนเองได้ โดยกลไกการซ่อมแซมตนเองสามารถอธิบายโดยการผันกลับของพันธะโควาเลนต์ระหว่างหมู่ไฮดรอกซิลของกลูเตน GG กลีเซอรอล TA และบอแรกซ์ การผันกลับของพันธะบอเรนตเอสเทอร์ทำหน้าที่ในการซ่อมแซมตนเองของไฮโดรเจล หลังจากได้รับความเสียหายของโครงข่ายจะสามารถเกิดการเชื่อมขวางแบบผันกลับได้ อีกทั้งจากการทดสอบพบว่าการเพิ่มขึ้นของความเข้มข้น TA ส่งผลให้เกิดการซ่อมแซมตนเองเร็วขึ้น โดยพบว่าเวลาในการซ่อมแซมลดลงจาก 20 วินาที



บทความวิจัย

สำหรับไฮโดรเจลที่มี TA 1.25 wt% ถึง 3 วินาที สำหรับไฮโดรเจลที่มี TA 5 wt% ดังตารางที่ 2 การมี TA ในไฮโดรเจลทำให้ความแข็งแรงในการซ่อมแซมเพิ่มขึ้น โดยสามารถถ่วงน้ำหนัก 50 กรัมได้นานกว่า

ไฮโดรเจลที่ไม่มี TA ดังรูปที่ 3 ทั้งนี้การซ่อมแซมที่รวดเร็วนั้นเกิดจากหมู่ไฮดรอกซิลอิสระและบอเรนดในปริมาณที่เพียงพอสำหรับการสร้างพันธะบอเรนดเอสเทอร์และพันธะไฮโดรเจนภายในไฮโดรเจล [7]

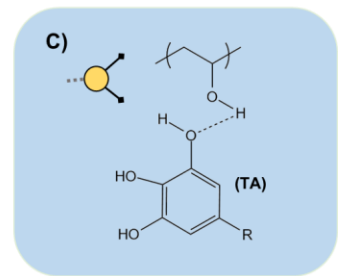
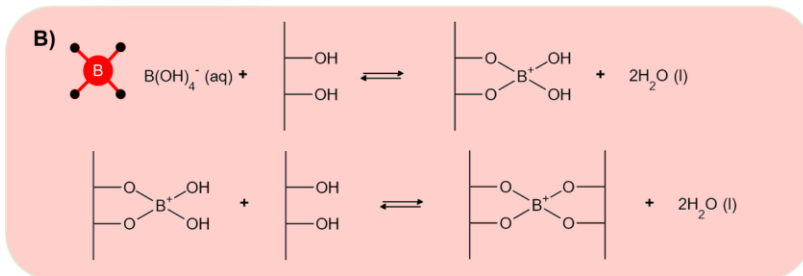
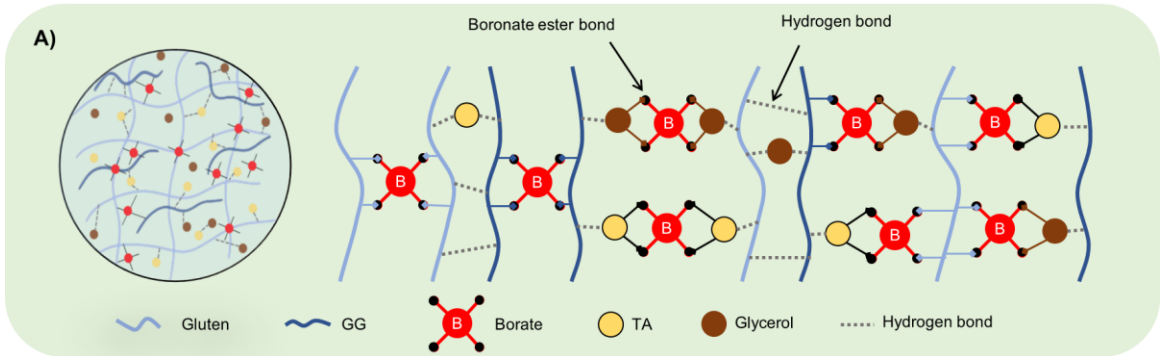


รูปที่ 1 สเปกตรัม ATR-FTIR: A) วัสดุดิบที่เป็นส่วนผสมของไฮโดรเจลอัจฉริยะ และ B) ไฮโดรเจล



ตารางที่ 1 หมู่ฟังก์ชันของกลูเตน GG GMS กลีเซอรอล บอแรกซ์ และ TA ตามตำแหน่งเลขคลื่นต่างๆ

| ATR-FTIR peaks (cm ⁻¹) | | | | | | Vibration mode |
|------------------------------------|-------|------------|----------|----------------|------|------------------|
| Gluten | GG | GMS | Glycerol | Borax | TA | |
| 3290 | 3319 | 3310 | | 3000-3500 | 3329 | O-H stretching |
| | 1647 | | | | | O-H Bending |
| | 1405, | | | | | C-H stretching |
| | 2920 | | | | | |
| | | 713 | | | | C-H Bending |
| | | 1044, 1170 | 1034 | | 1170 | C-O stretching |
| 1637 | | 1725 | | | | C=O |
| | | | | | 1705 | C=O stretching |
| | 1150 | | | | | C-O-C stretching |
| | | | | | 1443 | C-C stretching |
| 1520, 3100-3500 | | | | | | N-H |
| | | | | | 754 | C=C |
| | | | | 1300-1600, 851 | | B-O stretching |



รูปที่ 2 A) แบบจำลองการเชื่อมขวางภายในไฮโดรเจล B) ปฏิกิริยาการเชื่อมขวางของพันธะบอโรเนตเอสเทอร์ C) พันธะไฮโดรเจน



บทความวิจัย



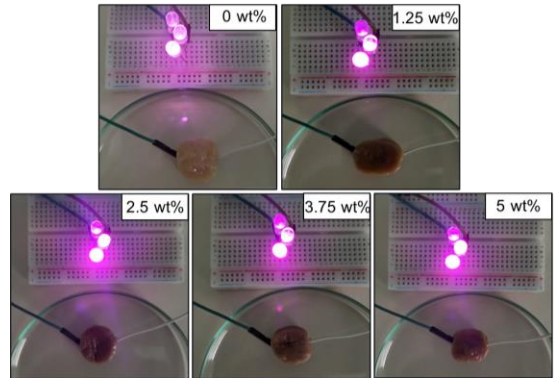
รูปที่ 3 ทดสอบความแข็งแรงของไฮโดรเจลหลังการซ่อมแซมตนเอง ณ เวลา 60 วินาที

3.3 การนำไฟฟ้าของไฮโดรเจล

จากการทดสอบการนำไฟฟ้าโดยต่อวงจรไฟฟ้ากับไฮโดรเจล พบว่าสามารถทำให้หลอด LED สว่าง ดังแสดงในรูปที่ 4 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าไฮโดรเจลสามารถนำไฟฟ้าได้ สำหรับค่าการนำไฟฟ้าของไฮโดรเจลที่มี TA ในปริมาณแตกต่างกันแสดงในตารางที่ 2 โดยพบว่ามีการนำไฟฟ้าในช่วง 0.022-0.027 S/m การเพิ่มปริมาณ TA ไม่ได้ส่งผลต่อค่าการนำไฟฟ้า ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าอิทธิพลหลักของการนำไฟฟ้ามาจากกลไกการเชื่อมขวางของบอแรกซ์ในโครงข่ายสามมิติของกลูเตน GG และกลีเซอรอลในไฮโดรเจลทำหน้าที่เป็นพอลิอิเล็กโทรไลต์ [9-10]

3.4 การประยุกต์ใช้ไฮโดรเจลเพื่อตรวจสอบการเคลื่อนไหวของมนุษย์

ในการเลือกเซนเซอร์วัดความเครียดที่เหมาะสมต่อการใช้งาน ชิ้นงานจะต้องสามารถติดและลอกออกได้โดยปราศจากเศษของชิ้นงาน โดยไฮโดรเจลที่มี TA ความเข้มข้นน้อยกว่า 2.5 wt% สามารถติดและลอกออกจากผิวหนังได้หมด ในขณะที่ความเข้มข้นของ TA



รูปที่ 4 ทดสอบการนำไฟฟ้าโดยต่อวงจรไฟฟ้ากับไฮโดรเจล

ตารางที่ 2 เวลาในการซ่อมแซมตนเองและค่าการนำไฟฟ้าของไฮโดรเจล

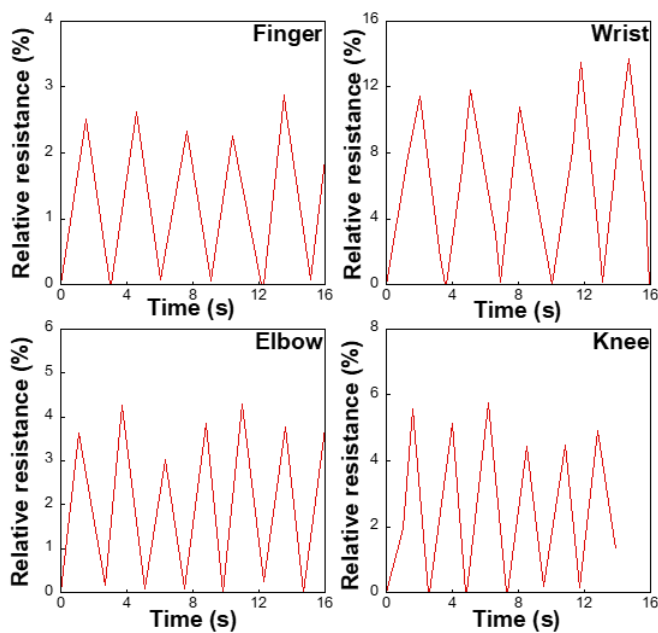
| Samples (wt% TA) | Self-healing time (s) | Conductivity (S/m) |
|------------------|-----------------------|--------------------|
| 0 | - | 0.027 |
| 1.25 | 20 | 0.023 |
| 2.5 | 12 | 0.022 |
| 3.75 | 10 | 0.026 |
| 5 | 3 | 0.027 |

ที่สูงขึ้นนั้นชิ้นงานไม่สามารถลอกออกจากผิวหนังได้หมด ดังแสดงในรูปที่ 5 เนื่องจากการมีอยู่ของหมู่ไฮดรอกซิลในไฮโดรเจลที่มากเกินไปสำหรับการสร้างพันธะไฮโดรเจนกับผิวหนังได้ [6]

จากการทดสอบประสิทธิภาพของเซนเซอร์วัดความเครียดโดยการประยุกต์ใช้ในการตรวจสอบการเคลื่อนไหวของมนุษย์โดยการวัดค่าการนำไฟฟ้าของไฮโดรเจล พบว่าไฮโดรเจลที่มีการเติม TA ความเข้มข้น 2.5 wt% สามารถตรวจจับการเคลื่อนไหวได้อย่างชัดเจน เช่น ข้อมือ ข้อศอก หัวเข่า และนิ้ว ดังรูปที่ 6



รูปที่ 5 ทดสอบการลอกออกของไฮโดรเจลที่มี TA 2.5 และ 3.75 wt%



รูปที่ 6 การประยุกต์ใช้ไฮโดรเจลเพื่อตรวจจับการเคลื่อนไหว

สัญญาณการเคลื่อนที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าที่ผลิตจากเซนเซอร์ กระแสไฟฟ้าถูกสร้างขึ้นเมื่อเซนเซอร์อยู่ในสถานะผ่อนคลายและ

สัญญาณจะเพิ่มขึ้นถึงค่าสูงสุดเมื่อเซนเซอร์ที่ติดอยู่ตามร่างกายขยับ สัญญาณที่ได้รับสามารถสะท้อนในรูปแบบการเคลื่อนที่แต่ละรูปแบบ นอกจากนี้ยัง



สังเกตเห็นความสามารถในการทำซ้ำและความเสถียรของสัญญาณในการขยับและการเคลื่อนไหว ซึ่งเกิดจากการเคลื่อนที่ของบอแรทไฮดรอกไซด์ที่เกิดจากการละลายบอแรทซ์ภายในโครงข่ายของไฮโดรเจล เมื่อส่วนของรายการมีการโค้งงอทำให้โครงข่ายของไฮโดรเจลยืดออกส่งผลให้ความต้านทานเพิ่มขึ้นและลดลงเมื่อกลับสู่สภาพเดิม สรุปได้ว่า ไฮโดรเจลที่มีส่วนผสมของ Borax และ TA เป็นเซนเซอร์ตรวจจับการเคลื่อนไหวที่ดีที่สุดสำหรับการเคลื่อนไหวของมนุษย์

4. สรุปผลการวิจัย

จากการศึกษาพบว่าไฮโดรเจลจากกลูเตน/GG ที่เชื่อมขวางด้วย Borax และใช้ TA เป็นสารเชื่อมขวางสามารถซ่อมแซมตัวเองได้อย่างรวดเร็ว เนื่องจากการฟื้นกลับของพันธะบอโรเนตเอสเทอร์และพันธะไฮโดรเจน การมี TA ในพอลิเมอร์ช่วยส่งเสริมความแข็งแรงในการซ่อมแซมที่ดียิ่งขึ้น ในการนำไฟฟ้าพบว่าสามารถทำให้หลอด LED ติดสว่างได้ และมีค่าการนำไฟฟ้าในช่วง 0.022-0.027 S/m ไฮโดรเจลที่มีความเข้มข้นของ TA 2.5 wt% สามารถติดและลอกออกจากผิวหนังได้หมดและมีระยะเวลาในการซ่อมแซมตนเองได้อย่างรวดเร็วภายใน 12 วินาที อีกทั้งยังสามารถตรวจจับการเคลื่อนไหวต่าง ๆ ของมนุษย์ได้อย่างชัดเจน ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าไฮโดรเจลที่มีส่วนผสมของ Borax และ TA สามารถนำมาใช้เป็นเซนเซอร์วัดความเครียดได้

5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับงบประมาณสนับสนุนจากคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] C. Choi, J.M. Lee, S.H. Kim, S.J. Kim, J. Di and R.H. Baughman, Twistable and stretchable sandwich structured fiber for wearable sensors and supercapacitors, *Nano Letters*, 2016, 16, 7677-7684.
- [2] T.Q. Trung, S. Ramasundaram, B. Hwang and N. Lee, An all-elastomeric transparent and stretchable temperature sensor for body-attachable wearable electronics, *Advanced Materials*, 2016, 28(3), 502-509.
- [3] A. Atrei, M. Fiorani, A. Bellingeri, G. Protano and I. Corsi, Remediation of acid mine drainage-affected stream waters by means of eco-friendly magnetic hydrogels crosslinked with functionalized magnetite nanoparticles, *Environmental Nanotechnology, Monitoring and Management*, 2019, 12,100263.
- [4] J.R. Biesiekierski, What is gluten?, *Journal of Gastroenterology and Hepatology*, 2017, 32(S1), 78-81.
- [5] X. Han, W. Lu, W. Yu, H. Xu, S. Bi and H. Cai, Conductive and adhesive gluten ionic skin for eco-friendly strain sensor, *Journal of Materials Science*, 2021, 56, 3970-3980.



- [6] A. Ounkaew, P. Kasemsiri, N. Srichiangsa, K. Jetsrisuparb, J.T.N. Knijnenburg, M. Okhawilai, S. Hizioglu and S.Theerakulpisut, Multifunctional gluten/guar gum copolymer with self-adhesion, self-healing, and remolding properties as smart strain sensor and self-powered device, *Express Polymer Letters*, 2022, 16(6), 607-623.
- [7] W. Ge, S. Cao, F. Shen, Y. Wang, J. Ren and X. Wang, Rapid self-healing, stretchable, moldable, antioxidant and antibacterial tannic acid-cellulose nanofibril composite hydrogels, *Carbohydrate Polymers*, 2019, 224, 115147.
- [8] L. Zhao, Z. Ren, X. Liu, Q. Ling, Z. Li and H. Gu, A Multifunctional, Self-Healing, Self-Adhesive, and Conductive Sodium Alginate/Poly(vinyl alcohol) Composite Hydrogel as a Flexible Strain Sensor, *ACS Applied Materials and Interfaces*, 2021, 13, 11344-11355.
- [9] X. Pan, Q. Wang, D. Ning, L. Dai, K. Liu, Y. Ni, L. Chen and L. Huang, Ultraflexible self-healing guar gum-glycerol hydrogel with Injectable, Antifreeze, and Strain-Sensitive Properties, *ACS Biomaterials Science and Engineering*, 2018, 4, 3397-3404.
- [10] I. Taesuwan, A. Ounkaew, M. Okhawilai, S. Hizioglu, W. Jareemboon, P. Chindaprasirt and P. Kasemsiri, Smart conductive nanocomposite hydrogel containing green synthesized nanosilver for use in an eco-friendly strain sensor, *Cellulose*, 2022, 29, 273-286.



การประยุกต์ใช้งาน Q-Learning เพื่อการจัดสรรกำลังที่เหมาะสมในระบบโนมาที่มีผู้ใช้ 2 ราย

เพชรนคร เอี่ยมสะอาด ชลธิชา หวังสมัด และ กฤษฎา มามาตร*

ภาควิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์, วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม,
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

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

วันที่รับบทความ: 1 สิงหาคม 2565; วันที่ทบทวนบทความ: 28 พฤศจิกายน 2565; วันที่ตอบรับบทความ: 20 มกราคม 2566
วันที่เผยแพร่ออนไลน์: 13 เมษายน 2566

บทคัดย่อ: บทความนี้พิจารณาการเข้าถึงหลายส่วนแบบไม่ตั้งฉาก (Non-Orthogonal Multiple Access: NOMA) หรือ โนมา ซึ่งเป็นวิธีการถึงช่องสัญญาณของผู้ใช้ในระบบสื่อสารไร้สายยุคที่ 5 และหลังจากนั้นโดยวิธี Successive Interference Cancellation (SIC) ถูกนำมาประยุกต์ใช้เพื่อตรวจจับข้อมูลของผู้ใช้แต่ละรายในโดเมนกำลังและการจัดสรรกำลังส่งมีผลกระทบต่อสมรรถนะของระบบ บทความนี้นำเสนอการประยุกต์ใช้วิธี Q-Learning ซึ่งเป็นวิธีหนึ่งของการเรียนรู้ของเครื่องเพื่อแก้ปัญหาการจัดสรรกำลังที่เหมาะสมในระบบโนมาที่มีผู้ใช้งาน 2 รายโดยมีวัตถุประสงค์เพื่อให้ได้อัตราบิตต่ำสุดสูงที่สุดโดยนำเสนอการแปลงส่วนต่าง ๆ ของระบบโนมาไปเป็นองค์ประกอบของวิธี Q-Learning ได้แก่ เอเจนต์ แอคชัน สเตจ รางวัล และสภาพแวดล้อมซึ่งมีความสำคัญต่อกระบวนการเรียนรู้ ผลการจำลองระบบแสดงให้เห็นการจัดสรรกำลังด้วยวิธี Q-Learning มีการเรียนรู้เพื่อเพิ่มรางวัลในแต่ละสเตจ ในส่วนของสมรรถนะของระบบนั้นวิธี Q-Learning ให้อัตราบิตของผู้ใช้ทั้งสองรายใกล้เคียงกันและยังใช้ต่ำสุดที่สูงกว่าวิธีการจัดสรรกำลังที่มีอยู่ก่อนหน้าและเครื่องมือในไลบรารีของภาษา Python

คำสำคัญ: โนมา; การจัดสรรกำลัง; Q-Learning



On Applying Q-Learning to Optimize Power Allocation in 2-users NOMA System

Phetnakorn Aermsa-Ard, Chonticha Wangsamad and Kritsada Mamat*

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

* Corresponding author, E-mail: kritsada.m@cit.kmutnb.ac.th

Received: 1 August 2022; Revised: 28 November 2022; Accepted: 20 January 2023

Online Published: 13 April 2023

Abstract: This article considers a power domain non-orthogonal multiple access (NOMA) system which is a multiple access technique considered to be used in the 5G technology and beyond. Successive interference cancellation (SIC) is applied to decode user's signals and power allocation significantly affects the system performance. In this article, we propose to apply Q-learning which is one of the machine learning methods to solve a transmit power allocation problem in a 2-users NOMA system where the objective function is to maximize the minimum transmission rate. We show how to transform NOMA system into O-Learning components namely agent, action, stage, reward, and environment which are very important for the learning process. Numerical results show that the Q-learning offers higher reward in each step. For the system performance, the bit rates of two users in the system are very close to each other when the Q-learning is applied. Furthermore, the Q-learning offers a higher minimum rate than that performed by dynamic power allocation methods in the literature and optimizers in Python's library.

Keywords: NOMA; power allocation; Q-Learning



1. บทนำ

เทคโนโลยีการสื่อสารไร้สาย (Wireless Communication) เป็นเทคโนโลยีที่มีความสำคัญในโลกยุคปัจจุบันเป็นอย่างมาก เนื่องจากความสามารถในการเข้าถึงพื้นที่ต่าง ๆ ได้มากกว่าการสื่อสารที่ต้องใช้สายส่งสัญญาณ (Wireline Communication) ในปัจจุบันเทคโนโลยีการสื่อสารไร้สายมีการพัฒนาจนมาถึงในยุคที่ 5 หรือ 5G ซึ่งมีความต้องการเข้าใช้งานและอัตราส่งที่สูงขึ้นอย่างมาก เพื่อที่จะตอบโจทย์ความต้องการข้างต้นในปัจจุบันได้มีแนวคิดการใช้งานเทคนิคการเข้าถึงหลายส่วนแบบไม่ตั้งฉาก (Non-Orthogonal Multiple Access: NOMA) หรือโนมามาเป็นส่วนหนึ่งของการสื่อสารยุคใหม่โดยมีงานวิจัยจำนวนมากได้แสดงให้เห็นว่าวิธีโนมานั้นมีประสิทธิภาพเชิงสเปกตรัม (Spectral Efficiency) มากกว่าวิธีการเข้าถึงหลายทางแบบตั้งฉาก (Orthogonal Multiple Access: OMA) หรือโอมา [1, 2]

ในการสื่อสารโนมานั้นผู้ใช้สามารถเข้าใช้ช่องสัญญาณที่เวลาและความถี่เดียวกันโดยผู้ใช้แต่ละรายจะมีกำลังหรือการเข้ารหัสที่แตกต่างกัน [3] สำหรับการตรวจจับข้อมูลนั้นในโดเมนของกำลังมีการใช้วิธี Successive Interference Cancellation หรือ (SIC) และการจัดสรรกำลังมีผลต่อสมรรถนะของระบบ [4, 5] งานวิจัยของ El-Sayed et. al., [4] ได้นำเสนอวิธีการจัดสรรกำลังสองวิธี โดยวิธีแรกมีวัตถุประสงค์เพื่อทำให้กำลังรับของผู้ใช้แต่ละรายมีค่าเท่ากันในขณะที่วิธีที่สองมีวัตถุประสงค์เพื่อรับประกันคุณภาพของการสื่อสารของผู้ใช้ในระบบ 1 ราย งานวิจัยของKaaffah และ Iskandar [5] นำเสนอการจัดสรรกำลังแบบพลวัต (Dynamic) และแสดงให้เห็นว่าการจัดสรรกำลังดังกล่าว

ให้สมรรถนะที่ดีกว่าการจัดสรรกำลังแบบตายตัวโดยมีผลรวมของอัตราบิตเป็นฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (Objective function)

ในปัจจุบันเทคโนโลยีปัญญาประดิษฐ์ (Artificial Intelligence: AI) หรือ การเรียนรู้ของเครื่อง (Machine Learning : ML) ได้รับความสนใจและมีการประยุกต์ใช้งานที่หลากหลาย ตัวอย่างเช่น ในอุตสาหกรรม การเกษตร อุตสาหกรรมกรแพทย์และอุตสาหกรรม การขนส่ง หลักการของ ML คือการเรียนรู้ผ่านกระบวนการลองผิดลองถูก (Trial-and-Error) ของ เอเจนต์ (Agent) ต่อสภาพแวดล้อม (Environment) เพื่อสร้างกระบวนการตัดสินใจที่เหมาะสม [6] โดยในงานวิจัยที่ผ่านมามีการประยุกต์ใช้งาน ML ในระบบสื่อสารไร้สาย ตัวอย่างเช่น งานวิจัยของ Chen et. al., [7] ได้นำเสนอการใช้งาน ML เพื่อการหาค่าอัปลิงค์และดาว์นลิงค์ (uplink and downlink) ที่เหมาะสมในระบบดีคัปปลิง (Decoupling) และงานวิจัยของ Sun et. al., [8] ได้นำเสนอการนำ ML มาใช้เพื่อจัดสรรกำลังในระบบสื่อสารไร้สายโดยมีวัตถุประสงค์เพื่อให้อัตราบิตรวมมีค่าสูงที่สุด

บทความนี้แนะนำเสนอการประยุกต์ใช้วิธี Q-Learning ซึ่งเป็นหนึ่งในวิธี ML เพื่อจัดสรรกำลังส่งในระบบโนมาที่มีผู้ใช้งานจำนวน 2 รายโดยมีวัตถุประสงค์เพื่อให้อัตราบิตต่ำสุดในระบบมีค่าสูงที่สุดโดยการกระทำดังกล่าวจะช่วยรับประกันคุณภาพสื่อสารของทั้งระบบในการประยุกต์ใช้ Q-Learning ในระบบโนมานั้นจำเป็นต้องมีการแปลงองค์ประกอบในระบบโนมาให้เป็นส่วนต่าง ๆ ใน Q-Learning ได้แก่ เอเจนต์ (Agent) สภาพแวดล้อม (Environment) สถานะ (State) แอคชันหรือการกระทำ (Action) และรางวัล (Reward) การ



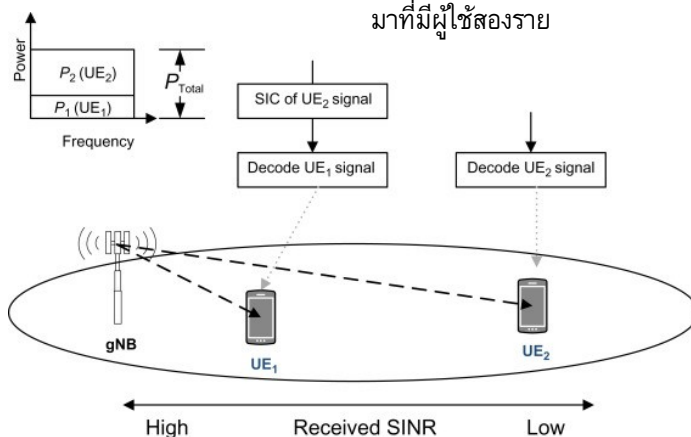
ประยุกต์ใช้ Q-Learning กับระบบที่ใช้ SIC นั้นเคยถูกพิจารณาในงานวิจัยของ Mete และ Girici [9] โดยในงานดังกล่าวได้ใช้ Q-Learning เพื่อการจัดสรรเวลาในการส่งข้อมูลเพื่อให้ได้จำนวนของแพ็คเกจ (Packet) สูงที่สุด ผลการจำลองระบบแสดงให้เห็นว่าการประยุกต์ใช้ Q-Learning ให้อัตราบิตรวมที่ต่ำกว่าวิธีการจัดสรรกำลังที่มีอยู่ก่อนหน้าบางวิธีแต่ให้อัตราบิตต่ำสุดสูงที่สุด นอกจากนี้แล้วบทความนี้ยังเปรียบเทียบวิธี Q-Learning กับเครื่องมือแก้ปัญหาค่าเหมาะสม (Optimizer) ที่มีอยู่ในไลบรารีของภาษา Python และพบว่าวิธี Q-Learning ให้อัตราบิตต่ำสุดสูงที่สุดเช่นกัน

บทความนี้มีส่วนประกอบตามเนื้อหาในแต่ละหัวข้อดังนี้ หัวข้อที่ 2 กล่าวถึงทฤษฎีพื้นฐานของโนมาและ Q-Learning รวมทั้งวิธีการจัดสรรกำลังที่มีอยู่ก่อนหน้า หัวข้อที่ 3 นำเสนอการประยุกต์ใช้ Q-Learning สำหรับแก้ปัญหาการจัดสรรกำลังในระบบโนมา หัวข้อที่ 4 นำเสนอผลการดำเนินการและการวิเคราะห์ผลที่ได้ หัวข้อที่ 5 เป็นการสรุปและอภิปรายผลการดำเนินการรวมทั้งนำเสนอแนวทางการพัฒนางานในอนาคต

2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 ช่องสัญญาณโนมาและการจัดสรรกำลังส่ง

การเข้าถึงหลายส่วนแบบไม่ตั้งฉาก (Non-Orthogonal Multiple Access : NOMA) หรือโนมานั้นเป็นวิธีการเข้าใช้ช่องสัญญาณเมื่อมีผู้ใช้เป็นจำนวนมากในระบบสื่อสารไร้สายยุคที่ 5 และหลังจากนั้น โดยสื่อสารในยุคนั้น 1 ถึงยุคที่ 4 นั้นใช้การเข้าถึงหลายส่วนแบบแบ่งความถี่ (Frequency Division Multiple Access : FDMA) การเข้าถึงหลายส่วนแบบแบ่งเวลา (Time Division Multiple Access : TDMA) การเข้าถึงหลายส่วนแบบแบ่งรหัส (Code Division Multiple Access: CDMA) และการเข้าถึงหลายส่วนแบบตั้งฉากทางความถี่ (Orthogonal Frequency Multiple Access : OFDMA) ตามลำดับ หลักการของโนมานั้นคือการให้ผู้ใช้แต่ละรายในระบบเข้าใช้งานช่องสัญญาณโดยใช้ความถี่และถี่ร่วมกันซึ่งการแบ่งแยกผู้ใช้แต่ละรายนั้นอาจกระทำได้ในโดเมน ของกำลัง (Power domain) หรือโดเมนของคำรหัส (Code domain) รูปที่ 1 แสดงตัวอย่างการแบ่งผู้ใช้งานในโดเมนของกำลังในระบบโนมาที่มีผู้ใช้สองราย



รูปที่ 1 แสดงตัวอย่างการแบ่งผู้ใช้งานในโดเมนของกำลังในระบบโนมาที่มีผู้ใช้สองราย [10]



เมื่อพิจารณารูปที่ 1 พบว่าในระบบมีผู้ใช้จำนวนสองรายคือโดยรายที่ 1 คือ UE1 และรายที่ 2 คือ UE2 โดยผู้ใช้ทั้งสองรายใช้ความถี่ร่วมกันเพื่อติดต่อกับสถานีฐาน gNB และใช้กำลังที่แตกต่างกันโดยผู้ใช้รายที่ 1 ใช้กำลัง P_1 และผู้ใช้รายที่ 2 ใช้กำลัง P_2 ตามลำดับ จากรูปพบว่าอัตราส่วนของกำลังต่อการแทรกสอดและสัญญาณรบกวน (Signal-to-Interference plus Noise Ratio : SINR) ซึ่งเป็นตัวบ่งชี้คุณภาพของสัญญาณของผู้ใช้ 1 มีมากกว่าผู้ใช้รายที่ 2 ดังนั้นในการจัดสรรกำลังจึงต้องจัดสรรกำลังของผู้ใช้รายที่ 2 ให้มากกว่าผู้ใช้รายที่ 1 ตามที่แสดงในรูปวิธีการดังกล่าวเรียกว่า Super position coding และสัญญาณส่งที่ออกจากสถานีฐานสามารถเขียนอธิบายได้ดังนี้

$$x = \sqrt{\alpha_1 p_{tot}} s_1 + \sqrt{\alpha_2 p_{tot}} s_2 \quad (1)$$

เมื่อ x แทนสัญญาณส่ง α_1 และ α_2 แทนตัวประกอบการจัดสรรกำลัง p_{tot} แทนกำลังส่งรวม s_1 และ s_2 แทนข้อมูลของผู้ใช้รายที่ 1 และ 2 ตามลำดับ สัญญาณที่รับได้ของผู้ใช้สามารถเขียนอธิบายได้ดังนี้

$$y_k = c_k h_k x + n_k, k = 1, 2 \quad (2)$$

เมื่อ y_k แทนสัญญาณรับของผู้ใช้ c_k , $0 < c_k < 1$ แทนสัมประสิทธิ์การลดทอนของช่องสัญญาณ h_k แทนอัตราขยายของช่องสัญญาณและ n_k แทนสัญญาณรบกวนเกาส์สีขาวแบบบวก (Additive White Gaussian Noise : AWGN) ตามลำดับ สำหรับการตรวจจับข้อมูล (Decode) ของวิธีโนมานั้นใช้วิธี Successive Interference Cancellation หรือ (SIC)

โดยวิธี SIC นั้นเริ่มจากการตรวจจับข้อมูลของผู้ใช้รายที่ 1 ก่อนโดยกำหนดให้ผู้ใช้รายที่ 2 ประพฤติตัวเป็นสัญญาณแทรกสอดของผู้ใช้รายที่ 1 เมื่อได้ข้อมูลของผู้ใช้รายที่ 1 แล้วจึงนำข้อมูลของผู้ใช้รายที่ 1 ลบออกจากสัญญาณรับของผู้ใช้รายที่ 2 ดังนั้นค่า SINR ของผู้ใช้รายที่ 1 สามารถเขียนอธิบายได้ดังนี้

$$\gamma_1 = \frac{\alpha_1 P_{tot} c_1^2 |h_1|^2}{\alpha_2 P_{tot} c_2^2 |h_2|^2 + \sigma_n^2} \quad (3)$$

และสำหรับผู้ใช้รายที่ 2

$$\gamma_2 = \frac{\alpha_2 P_{tot} c_2^2 |h_2|^2}{\sigma_n^2} \quad (4)$$

เมื่อ γ_1 และ γ_2 แทน SINR ของผู้ใช้รายที่ 1 และ 2 ตามลำดับ จาก SINR ของผู้ใช้ทั้งสองราย สามารถหาอัตราส่ง (Bitrate) ในหน่วยบิตต่อวินาทีต่อความถี่ (bit/sec/Hz) ของผู้ใช้แต่ละรายได้ดังนี้

$$R_k = \log_2(1 + \gamma_k), k = 1, 2 \quad (5)$$

และอัตราส่งรวม (Sum rate) ได้ดังนี้

$$R_{sum} = R_1 + R_2 \quad (6)$$

เมื่อพิจารณาสมการ (3)-(6) พบว่าสมรรถนะของระบบขึ้นอยู่กับตัวประกอบการจัดสรรกำลัง α_1 และ α_2 โดยงานวิจัย [4] ได้นำเสนอวิธี Channel inversion โดยวิธีดังกล่าวจะจัดสรรกำลังให้กับผู้ใช้แต่ละรายผกผันกับคุณภาพของช่องสัญญาณดังนี้

$$\alpha_k = \frac{1}{c_k^2 |h_k|^2 \sum_{i=1}^K \frac{1}{c_i^2 |h_i|^2}} \quad (7)$$



บทความวิจัย

เมื่อพิจารณาสมการ (7) พบว่าวิธี Channel inversion จะจัดสรรกำลังที่มากกว่าให้กับผู้ใช้ที่มีคุณภาพช่องสัญญาณแยกว่า นอกจากวิธี Channel inversion แล้วงานวิจัย [4] ยังได้นำเสนอวิธีจัดสรรกำลังที่รับประกันคุณภาพของการสื่อสาร (Quality of Service : QoS) ของผู้ใช้จำนวน 1 ราย ซึ่งโดยทั่วไปแล้วเป็นผู้ใช้ที่มีคุณภาพของช่องสัญญาณแยกว่าจัดสรรกำลังด้วยวิธีดังกล่าวสามารถเขียนอธิบายได้ดังนี้

$$\alpha_{itd} = \frac{\gamma(c_{itd}^2|h_{itd}|^2 + \frac{\sigma_n^2}{P_{tot}})}{c_{itd}|h_{itd}|^2(1+\gamma)} \quad (8)$$

เมื่อ $\gamma < c_{itd}^2|h_{itd}|^2 \frac{\sigma_n^2}{P_{tot}}$ แทนค่า SINR ของผู้ใช้ที่ต้องการรับประกันคุณภาพของการสื่อสารและดรรชนี itd แทนผู้รายดังกล่าวสำหรับการจัดสรรกำลังวิธีนี้ ผู้ใช้รายอื่นในระบบจะได้รับการจัดสรรกำลังเท่ากับค่า $(1 - \alpha_{itd})/K$ เมื่อ K แทนจำนวนผู้ใช้ทั้งหมดในระบบ เมื่อพิจารณาวิธีการจัดสรรกำลังทั้งสองวิธี พบว่าวิธีทั้งสองมีการปรับกำลังให้เหมาะสมกับคุณภาพของช่องสัญญาณของผู้ใช้งานเพื่อรักษาคุณภาพการสื่อสาร อย่างไรก็ตามทั้งสองวิธีไม่ได้คำนึงถึงคุณภาพการสื่อสารของผู้ใช้ที่มีอัตราบิตต่ำที่สุด

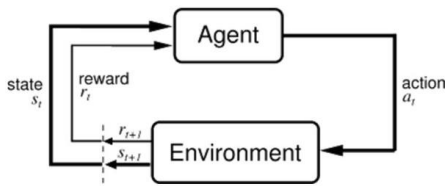
2.2 วิธี Q-Learning

วิธี Q-Learning จัดเป็นวิธีการเรียนรู้ของเครื่อง (Machine Learning : ML) วิธีหนึ่งโดยวิธีการดังกล่าวเป็นการเรียนรู้จากการลองผิดลองถูก (trial-and-error) เพื่อหาวิธีการแก้ปัญหาที่เหมาะสมโดยหลักการการทำงานของวิธี Q-Learning สามารถอธิบายได้ ดังรูปที่ 2 พบว่าวิธี Q-Learning มีส่วนประกอบที่สำคัญคือเอเจนต์ (Agent) สภาพแวดล้อม (Environment) สถานะ (State) การกระทำหรือแอคชัน (Action) และรางวัล (Reward)

โดยการทำงานของวิธี Q-Learning นั้นอยู่บนพื้นฐานของกระบวนการตัดสินใจมาร์คอฟ (Markov Decision Process : MDP) เริ่มต้นจากเอเจนต์ดำเนินการแอคชัน a_t กับสภาพแวดล้อมที่เสถียรปัจจุบัน s_t หลังจากนั้นสภาพแวดล้อมจะคืนค่ารางวัล r_t และย้ายไปที่เสถียร s_{t+1} จากนั้นเอเจนต์จะดำเนินการแอคชัน a_{t+1} เพื่อรับรางวัล r_{t+1} การกระทำดังกล่าวจะดำเนินการไปเรื่อย ๆ เพื่อหาแอคชันที่เหมาะสมสำหรับแต่ละเสถียร โดยความหมายของแอคชันที่เหมาะสมคือแอคชันที่กระทำต่อสภาพแวดล้อมในเสถียรปัจจุบันแล้วได้รางวัลคืนค่ากลับมาสูงที่สุด เพื่อให้กระบวนการดังกล่าวเป็นไปอย่างถูกต้องจำเป็นต้องมีการสร้างตารางเพื่อบันทึกค่า Q (Q-value) สำหรับทุกเสถียรและแอคชันทั้งหมดที่เป็นไปได้ตารางดังกล่าวคือ Q-table โดยจำนวนของเซลล์ใน Q-table ทั้งหมดเท่ากับจำนวนเสถียรทั้งหมดคูณกับจำนวนแอคชันทั้งหมด สำหรับการอัปเดตค่า Q ใน Q-table นั้นใช้สมการของ Bellman ดังนี้ [6]

$$Q^{new}(s_t, a_t) \leftarrow Q^{old}(s_t, a_t) + \eta((r(s_t, a_t) + \beta \max_a Q^{new}(s_{t+1}, a) - Q^{old}(s_t, a_t))) \quad (9)$$

โดยที่ η คืออัตราการเรียนรู้ (Learning rate) และ β แทนปัจจัยส่วนลด (Discount factor) เมื่อพิจารณาสมการ (9) พบว่าค่าที่อัปเดตใน Q-table หรือ $Q^{new}(s_t, a_t)$ ขึ้นอยู่กับค่าเดิม $Q^{old}(s_t, a_t)$ รางวัล $r(s_t, a_t)$ และรางวัลสูงสุดที่คาดหวัง $\max_a Q^{new}(s_{t+1}, a)$ โดยเมื่อการอัปเดต Q-table เสร็จสมบูรณ์แล้วเอเจนต์ก็จะทราบแอคชันที่เหมาะสมสำหรับแต่ละเสถียร



รูปที่ 2 หลักการทำงานของวิธี Q-Learning [11]

3. วิธีการดำเนินการ

บทความนี้นำเสนอการประยุกต์ใช้วิธี Q-Learning เพื่อแก้ปัญหาคำสั่งจัดสรรกำลังในระบบโนมาเพื่อให้ อัตราบิตของผู้ใช้ที่ต่ำสุดมีค่าสูงสุดเมื่อกำหนดให้ผู้ใช้ในระบบมีจำนวนสองราย โดยปัญหาดังกล่าวสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$\begin{aligned} & \max_{\{\alpha_1, \alpha_2\}} \gamma_{min} \\ & \text{subject to } \gamma_k \geq \gamma_{min} \text{ for } k = 1, 2 \\ & \alpha_1 + \alpha_2 \leq 1 \\ & \alpha_1, \alpha_2 > 0 \end{aligned} \quad (10)$$

เมื่อ γ_{min} แทนค่า SINR ต่ำที่สุด ปัญหาในสมการ (10) สามารถแก้ได้ด้วยเครื่องมือ (Optimizer) อื่นเช่น วิธี KKT (Karush–Kuhn–Tucker) ถ้าหากทราบค่าทางสถิติของช่องสัญญาณเช่นฟังก์ชันความหนาแน่นของความน่าจะเป็น (probability density function : pdf) อย่างไรก็ตาม ถ้าหากไม่ทราบค่าทางสถิติของช่องสัญญาณปัญหาในสมการ (10) สามารถแก้ได้ด้วยการลองผิดลองถูกโดยในงานนี้เลือกใช้วิธี Q-Learning เนื่องจากมีกระบวนการทำงานที่เข้าใจง่ายและให้ผลเฉลยที่เหมาะสมซึ่งเป็นการเริ่มต้นที่ดีในการประยุกต์ใช้ ML เพื่อแก้ปัญหาคำสั่งจัดสรรทรัพยากรในระบบสื่อสารไร้สาย

ในการแก้ปัญหาในสมการ (10) ด้วยวิธี Q-Learning นั้นเริ่มต้นได้กำหนดส่วนประกอบในระบบโนมาให้เป็นส่วนประกอบใน Q-Learning ดังนี้

- **เอเจนต์:** สถานีฐานซึ่งทำหน้าที่จัดสรรกำลังส่งให้ผู้ใช้แต่ละราย
- **แอคชัน:** การปรับค่า α_1 ให้เพิ่มขึ้นหรือลดลงครั้งละ 0.005 โดย α_2 สามารถคำนวณได้จาก $\alpha_2 = (1 - \alpha_1)$
- **เสตจ:** เมื่อสถานีฐานจัดสรรกำลังส่งให้แก่ผู้ใช้ทั้งสองรายจะสามารถคำนวณอัตราการส่งข้อมูลของผู้ใช้แต่ละรายได้ ดังนั้นเสตจคืออัตราการส่งข้อมูลของผู้ใช้ทั้งสองราย R_1 และ R_2
- **รางวัล:** เนื่องจากต้องการทำให้อัตราการส่งข้อมูลต่ำสุดมีค่าสูงที่สุดซึ่งจะเป็นจริงได้ก็ต่อเมื่ออัตราการส่งข้อมูลของผู้ใช้ทั้งสองรายมีค่าใกล้เคียงกันมากที่สุดดังนั้นการกำหนดรางวัลให้แก่ระบบจึงใช้เปอร์เซ็นต์ความแตกต่างของอัตราการส่งข้อมูลของผู้ใช้ทั้งสองรายดังนี้

$$r_t = 100 - \frac{|R_1 - R_2|}{R_1} \times 100 \quad (11)$$

เนื่องจากวิธี Q-Learning ต้องการรางวัลที่สูง ดังนั้นจึงกำหนดให้รางวัลเท่ากับ 100 ลบ ด้วยเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างตามที่แสดงในสมการ (11)

- **สภาพแวดล้อม:** เพื่อให้สอดคล้องกับเอเจนต์แอคชันและรางวัลก่อนหน้านี้ กำหนดสภาพแวดล้อมเอาไว้ตามที่แสดงใน

Algorithm 1

**Algorithm 1:** สภาพแวดล้อม: $env(\cdot)$

1. กำหนดเสตจปัจจุบัน s_t, α_1
2. เพิ่มหรือลด α_1 ครั้งละ 0.005 คำนวณ
 $\alpha_2 = (1 - \alpha_1), R_1$ และ R_2
3. ไปยังเสตจถัดไป s_{t+1}
4. คำนวณรางวัลของเสตจปัจจุบัน $r(s_t, a_t)$ ด้วยสมการ (11)
10. **return** s_{t+1} และ $r(s_t, a_t)$

สำหรับการสร้าง Q-table ให้สอดคล้องกับการจัดสรรกำลังในระบบโนมาในสมการ (10) นั้นสามารถทำได้ตามที่แสดงไว้ในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 Q-table ของการจัดสรรกำลังในระบบโนมาที่มีผู้ใช้ 2 ราย

| เสตจ R_1 | เสตจ R_2 | เพิ่ม α_1 | ลด α_1 |
|------------|------------|------------------|---------------|
| | | 0.005 | 0.005 |
| ขั้นที่ 1 | ขั้นที่ 1 | | |
| ขั้นที่ 2 | ขั้นที่ 2 | | |
| . | . | | |
| . | . | | |
| ขั้นที่ 10 | ขั้นที่ 10 | | |

เมื่อพิจารณาตารางที่ 1 พบว่าจำนวนชั้นของเสตจ R_1 และ R_2 มีค่าเท่ากับ 10 ทั้งนี้เนื่องจากอัตราบิตของผู้ใช้ทั้งสองรายจาก **Algorithm 1** เป็นค่าที่ไม่รู้จัก ดังนั้น จึงทำการแบ่งนับ (Quantize) ค่าที่ไม่รู้จักให้เป็นค่าที่รู้จักจำนวน 10 ชั้นมีค่าอยู่ในช่วง (0,8] โดยในตอนต้นนั้นได้กำหนดให้ทุกค่าใน Q-table เท่ากับ 0 ในส่วนของการอัปเดต Q-table นั้นได้ใช้วิธีการเรียนรู้ (Training) ตามที่แสดงใน **Algorithm 2**

Algorithm 2: กระบวนการเรียนรู้ (Training)

1. กำหนด จำนวนรอบ N, ϵ, η, β
2. **for** episode = 1: N **do**
3. **if** episode < $N/2$
4. $\phi = 0.5$
5. **else**
6. $\phi = \epsilon$
7. **endif**
8. สุ่มค่า $0 < \alpha_1 < 1$
9. $s_{t+1}, r(s_t, a_t) = env(\alpha_1)$
10. **while** $r(s_t, a_t) < 90$ **do**
11. **if** $rand() < \phi$ **then**
12. สุ่มทำแอกชัน
13. **else**
14. เลือกแอกชันจาก $argmax_a Q(s_t, a)$
15. **endif**
16. อัปเดตค่า Q ด้วยสมการ (9)
17. **endwhile**
18. **endfor**

โดยการทำงานใน **Algorithm 2** เริ่มจากการกำหนดรอบของการวนซ้ำสำหรับการเรียนรู้โดยในครั้งแรกของการเรียนรู้นั้นเป็นการสุ่มทำแอกชันเพื่อให้มีค่า Q แทนค่า 0 ที่กำหนดไว้ตอนต้นใน Q-table ทุกค่าสำหรับครั้งหลังนั้นเป็นการเลือกแอกชันที่ให้ค่า Q มากที่สุดในส่วนนี้แสดงไว้ในขั้นตอนที่ 3-7 สำหรับการวนซ้ำแต่ละรอบเริ่มต้นเป็นการสุ่มค่า α_1 และผ่านค่า α_1 เข้าสู่สภาพแวดล้อมตามขั้นตอนที่ 9 ในขั้นตอนที่ 10-17 เป็นการหาค่า α_1 ที่เหมาะสมเพื่อให้ได้รางวัลที่มีค่ามากกว่าหรือเท่ากับ 90 โดยระหว่างการ



ดำเนินการดังกล่าวค่าใน Q-table ก็จะมีการอัปเดตไปพร้อมกันด้วย ฟังก์ชัน $rand()$ ในบรรทัดที่ 11 เป็นการค่าสุ่มแบบยูนิฟอร์มที่มีค่าอยู่ในช่วง $[0,1]$ ดังนั้นเมื่อค่าใน Q-table มีการอัปเดตอย่างเหมาะสมแล้วสถานะฐานที่มีหน้าที่จัดสรรกำลังก็จะทราบการจัดสรรกำลังที่เหมาะสมสำหรับทุกเสตจ

4. ผลการดำเนินงาน

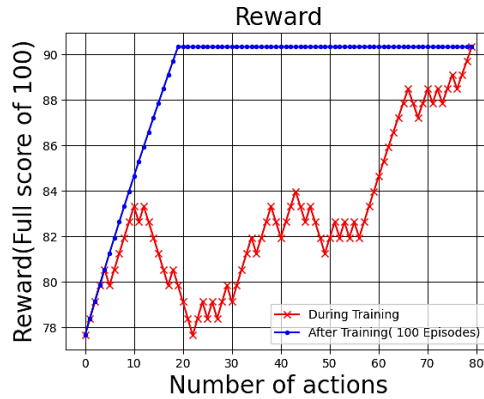
การทดสอบสมรรถนะของวิธี Q-Learning ในบทความนี้ใช้การเขียนโปรแกรมภาษา Python ในการจำลองระบบสื่อสารโหนดโดยการจำลองระบบนั้นใช้วิธีการสุ่มสร้างช่องสัญญาณเพื่อใช้คำนวณอัตราส่งและเป็นข้อมูลสำหรับการเรียนรู้ให้แก่วิธี Q-Learning โดยงานนี้ได้ทำการเปรียบเทียบข้อดีข้อเสียของวิธี Q-Learning กับวิธีการจัดสรรกำลังที่มีอยู่ก่อนหน้าและเครื่องมือในไลบรารีของภาษา Python

รูปที่ 3 แสดงรางวัลของวิธี Q-Learning ในระหว่างการเรียนรู้แสดงด้วยเส้นสีแดงและหลังจากเรียนรู้เรียบร้อยแล้วแสดงด้วยเส้นสีน้ำเงินโดยเมื่อพิจารณารางวัลในระหว่างการเรียนรู้นั้นจะพบว่าในแต่ละรอบของการเรียนรู้รางวัลที่ได้ในแต่ละรอบมีการเพิ่มขึ้นหรือลดลงทั้งนี้เนื่องจากในตอนเริ่มต้นค่าใน Q-table ยังมีค่าเป็น 0 หรือมีการอัปเดตเพียงไม่กี่ครั้ง อย่างไรก็ตามหลังจากเรียนรู้ไปได้ระยะหนึ่งค่าใน Q-table มีการอัปเดตเป็นค่าที่เหมาะสมดังจะเห็นได้จากรางวัลที่มีการเพิ่มเพียงอย่างเดียวเมื่อจำนวนแอดชันมีค่าตั้งแต่ 55 เป็นต้นไป ในส่วนของหลังการเรียนรู้นั้นพบว่ารางวัลมีการเพิ่มขึ้นเพียงอย่างเดียวและจะ

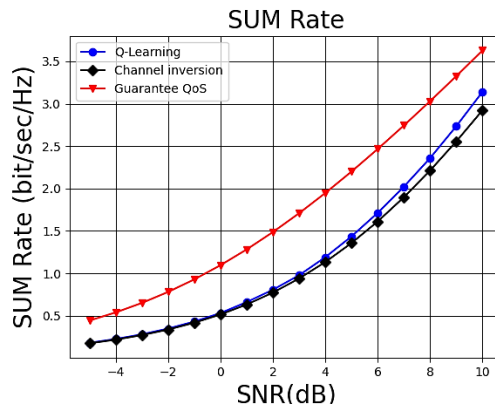
เพิ่มขึ้นจนถึงจุดสูงสุดเมื่อจำนวนแอดชันผ่านไปเพียง 19 เท่านั้น ทั้งนี้เนื่องจากหลังการเรียนรู้ค่าใน Q-table มีการอัปเดตอย่างเหมาะสมแล้ว

รูปที่ 4 แสดงการเปรียบเทียบวิธีสมรรถนะของการจัดสรรกำลังด้วยวิธี Q-Learning แสดงด้วยเส้นสีน้ำเงินกับวิธีที่มีอยู่ก่อนหน้าคือวิธี Channel inversion ที่มีการจัดสรรกำลังให้แก่ผู้ใช้ที่มีคุณภาพช่องสัญญาณแย่มากกว่าผู้ใช้ที่มีคุณภาพช่องสัญญาณดีกว่าแสดงด้วยเส้นสีดำและวิธีที่รับประกันคุณภาพการสื่อสารของผู้ใช้ 1 รายแสดงด้วยเส้นสีแดงโดยเปรียบเทียบ ในเทอมของอัตราบิดรวมของผู้ใช้ทั้งสองราย เมื่อพิจารณารูปดังกล่าวพบว่าวิธีที่รับประกันคุณภาพของการสื่อสารของผู้ใช้ 1 รายให้อัตราบิดรวมมากที่สุด ในขณะที่วิธี Q-Learning ให้อัตราบิดรวมที่เทียบเท่ากับวิธี Channel inversion เมื่อค่า SINR มีค่าน้อย อย่างไรก็ตามเมื่อค่า SNR มีค่าเพิ่มขึ้นวิธี Q-Learning ให้สมรรถนะที่สูงกว่าวิธี Channel inversion และความแตกต่างของทั้งสองวิธีก็มีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้นเมื่อค่า SNR มากขึ้น

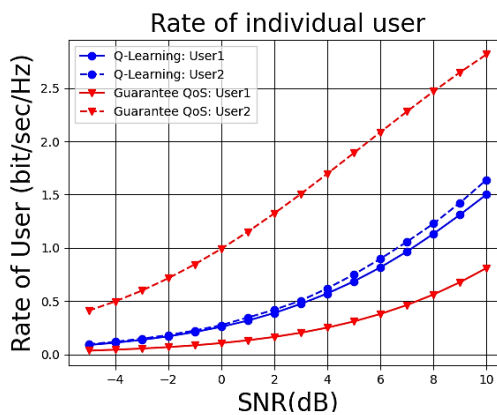
รูปที่ 5 แสดงการเปรียบเทียบอัตราบิดต่ำสุดของระบบโหนดโดยเส้นสีน้ำเงินแทนวิธี Q-Learning เส้นสีดำแทนวิธี Channel inversion และเส้นสีแดงแทนวิธีที่รับประกันคุณภาพการสื่อสารของผู้ใช้ 1 ราย เมื่อพิจารณารูปดังกล่าวพบว่าวิธี Q-learning ให้อัตราบิดต่ำสุดสูงที่สุดในสามวิธีการจัดสรรกำลังเมื่อ SNR มีค่าสูงและค่าความแตกต่างดังกล่าวมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อ SNR มีค่ามากขึ้น โดยที่ค่า SNR มีค่าต่ำนั้นวิธี Q-Learning มีสมรรถนะเทียบเท่าวิธี Channel inversion



รูปที่ 3 แสดงรางวัลของวิธี Q-Learning ในระหว่างการเรียนรู้และหลังจากเรียนรู้เรียบร้อยแล้ว



รูปที่ 4 แสดงการเปรียบเทียบวิธีสมรรถนะของการจัดสรรกำลังด้วยวิธี Q-Learning กับวิธีที่มีอยู่ก่อนหน้า



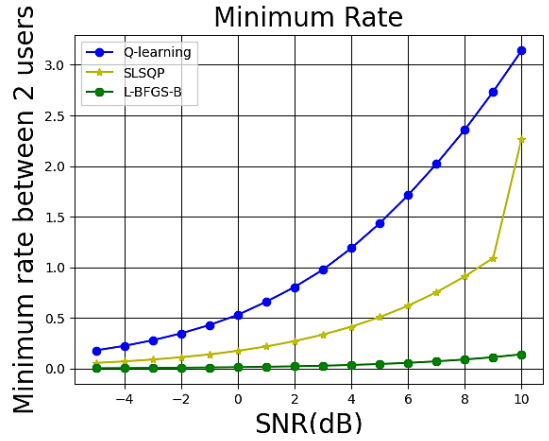
รูปที่ 5 แสดงการเปรียบเทียบอัตราบิตต่ำสุดของระบบโนมาของการจัดสรรกำลังทั้งสามวิธี



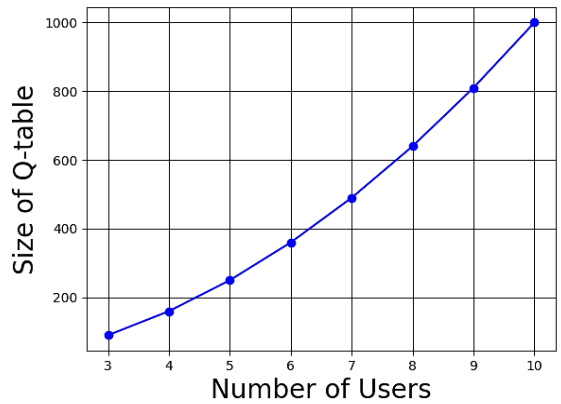
บทความวิจัย

เมื่อพิจารณารูปที่ 4 และ 5 พบว่าวิธี Q-Learning ให้อัตราบิตต่ำสุดที่สูงที่สุดและอัตราบิตรวมที่สูงกว่าวิธี Channel inversion อย่างไรก็ตามวิธี Q-Learning มีอัตราบิตรวมที่ต่ำกว่าวิธีที่รับประกันคุณภาพการสื่อสารของผู้ใช้ 1 ราย รูปที่ 6 แสดงอัตราบิตของผู้ใช้ทั้งสองรายในระบบโนมาจากการจัดสรรกำลังด้วยวิธี Q-Learning และวิธีที่รับประกันคุณภาพการสื่อสารของผู้ใช้ 1 ราย โดยเส้นสีน้ำเงินแทนวิธี Q-Learning และเส้นสีแดงแทนวิธีที่รับประกันคุณภาพการสื่อสารของผู้ใช้ 1 ราย เมื่อพิจารณารูปดังกล่าวพบว่าอัตราบิตของผู้ใช้รายที่ 1 และผู้ใช้รายที่ 2 จากวิธีที่รับประกันคุณภาพการสื่อสารของผู้ใช้ 1 รายมีความแตกต่างกันมากซึ่งไม่เป็นผลดีต่อระบบสื่อสารเนื่องจากการสื่อสารที่ดีนั้นคุณภาพการสื่อสารของผู้ใช้แต่ละรายไม่ควรแตกต่างกันมาก ในส่วนของวิธี Q-Learning นั้นอัตราการส่งข้อมูลของผู้ใช้รายที่ 1 และผู้ใช้รายที่ 2 มีความใกล้เคียงกันมาก

นอกจากการเปรียบเทียบวิธี Q-Learning กับวิธีการจัดสรรกำลังที่มีอยู่ก่อนหน้าทั้งสองวิธีดังที่แสดงในตอนต้นของหัวข้อแล้ว บทความนี้ยังได้เปรียบเทียบวิธี Q-Learning กับเครื่องมืออื่นที่มีอยู่ในไลบรารีของภาษา Python ได้แก่ SLSQP และ L-BFGS-B โดยกำหนดให้เครื่องมือทั้งสองแก้ปัญหาที่ทำให้เปอร์เซ็นต์ความต่างของอัตราบิตของผู้ใช้ทั้งสองรายมีค่าต่ำที่สุดตามที่แสดงในรูปที่ 7 โดยเส้นสีน้ำเงินแทนวิธี Q-Learning เส้นสีเหลืองแทนวิธี SLSQP และเส้นสีเขียวแทนวิธี L-BFGS-B จากรูปดังกล่าวจะพบว่าวิธี Q-Learning ให้อัตราบิตต่ำสุดสูงที่สุดทั้งนี้เนื่องจากเครื่องมือ SLSQP และ L-BFGS-B มีการจัดกำลังโดยไม่มีการเรียนรู้ข้อมูลเหมือนกับวิธี Q-Learning



รูปที่ 7 แสดงการเปรียบเทียบวิธี Q-Learning กับเครื่องมือในไลบรารีของภาษา Python



รูปที่ 8 แสดงขนาดของ Q-Table เมื่อพิจารณาที่จำนวนผู้ใช้ตั้งแต่ 3-10 ราย

รูปที่ 8 แสดงขนาดของ Q-Table เมื่อพิจารณาที่จำนวนผู้ใช้ตั้งแต่ 3-10 ราย จากรูปพบว่าขนาดของ Q-Table มีการเพิ่มขึ้นอย่างเอกซ์โพเนนเชียลกับจำนวนของผู้ใช้งานในระบบโนมาก่อให้เกิดความซับซ้อนของกระบวนการเรียนรู้ในแง่ของเวลาที่เพิ่มขึ้น



5. สรุปผลการดำเนินงานและข้อเสนอแนะ

บทความนี้นำเสนอการประยุกต์ใช้วิธี Q-Learning ซึ่งเป็นวิธีหนึ่งใน Machine Learning เพื่อแก้ปัญหาการจัดสรรกำลังในช่องสัญญาณโนมาที่มีผู้ใช้จำนวนสองรายโดยมีวัตถุประสงค์เพื่อให้อัตราบิตต่ำสุดมีค่าสูงที่สุด ผู้เขียนได้นำเสนอวิธีการแปลงองค์ส่วนต่าง ๆ ในระบบโนมาให้เป็นองค์ประกอบของวิธี Q-Learning ได้แก่ เอเจนต์ สภาพแวดล้อม แอคชัน เสดจและรางวัล ตามลำดับ ผู้เขียนได้เปรียบเทียบวิธี Q-Learning กับวิธีการจัดสรรกำลังของระบบโนมาที่มีอยู่ก่อนหน้า ผลการจำลองระบบแสดงให้เห็นว่าวิธี Q-Learning ไม่ได้ให้อัตราบิตรวมที่มากที่สุดแต่ให้อัตราบิตต่ำสุดที่สูงที่สุด นอกจากนี้ผู้เขียนยังได้เปรียบเทียบวิธี Q-Learning กับเครื่องมือที่มีอยู่ในไลบรารีของภาษา Python และพบว่าวิธี Q-Learning ยังคงให้อัตราบิตต่ำสุดสูงที่สุด ทั้งนี้เนื่องจากวิธี Q-Learning นั้นมีกระบวนการเรียนรู้ข้อมูลเพื่อหาวิธีการจัดสรรกำลังที่เหมาะสมในแต่ละเสดจ ถึงแม้ว่าวิธี Q-Learning สามารถแก้ปัญหาการจัดสรรกำลังในช่องสัญญาณโนมาได้เป็นอย่างดี อย่างไรก็ตามเราไม่สามารถมองข้ามปัญหาเรื่องความซับซ้อนอันเนื่องจากการเรียนรู้ข้อมูลได้ งานในอนาคตสนใจที่จะลดปัญหาจากความซับซ้อนดังกล่าวรวมถึงการประยุกต์ใช้งาน Q-Learning ในการแก้ปัญหาที่ซับซ้อนมากกว่านี้ด้วย

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] L. Dai, B. Wang, Z. Ding, Z. Wang, S. Chen, and L. Hanzo, A survey of non-orthogonal multiple access for 5G, IEEE Communication Surveys Tutorials, 2018, 20(3), 2294–2323.
- [2] M. Zeng, A. Yadav, O.A. Dobre, G.I. Tsiropoulos, and H.V. Poor, On the sum rate of MIMO-NOMA and MIMO-OMA systems, IEEE Wireless Communication Letter, 2017, 6(4), 534–537.
- [3] B. Makki, K. Chitti, A. Behravan and M.-S. Alouini, A survey of NOMA: Current status and open research challenges, IEEE Open Journal of the Communications Society, 2020 1, 179-189.
- [4] M.M. El-Sayed, A.S. Ibrahim and M.M. Khairy, Power allocation strategies for non-orthogonal multiple access, International Conference on Selected Topics in Mobile & Wireless Networking (MoWNeT-Egypt 2016), Proceeding, 2016, 1-6.
- [5] M.A.M. Kaaffah and I. Iskandar, Power allocation effect on capacity of single carrier power domain non-orthogonal multiple access (NOMA), 7th International Conference on Wireless and Telematics (ICWT-Indonesia 2021), Proceeding, 2021, 1-5.
- [6] R.S. Sutton and A.G. Barto, Reinforcement Learning: An Introduction, 2nd Ed., MIT Press, Cambridge, Massachusetts, London, 2017.
- [7] M. Chen, W. Saad and C. Yin, Optimized uplink-downlink decoupling in LTE-U networks: An echo state approach, IEEE International Conference on Communications (ICC-Malaysia 2016), Proceeding, 2016, 1-6.



- [8] H. Sun, X. Chen, Q. Shi, M. Hong, X. Fu and N. D. Sidiropoulos, Learning to optimize: training deep Neural networks for interference management, *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2018, 6(20), 5438-5453.
- [9] E. Mete and T. Girici, Q-Learning based scheduling with successive interference cancellation, *IEEE Access*, 2020, 8, 172034-172042.
- [10] <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/non-orthogonal-multiple-access>. (Accessed on 18 July 2022)
- [11] <https://medium.com/@nutorbitx/reinforcement-learning>. (Accessed on 18 July 2022)



Optimization, Bioactivity and Composition of *Curcama aromatica* Salisb. Extraction Oils Extracted by Microwave-assisted and Hydro-distillation

Manat Hearunyakij* and Weerachai Phutdhawong

Faculty of Liberal Arts and Science, Kasetsart University, Kamphaeng Saen, Nakhon Pathom

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

Received: 10 November 2022; Revised: 17 March 2023; Accepted: 20 March 2023

Online Published: 14 April 2023

Abstract: *Curcama aromatica* Salisb. (*C.aromatica*) rhizomes were extracted by hydro-distillation (HD) and microwave-assisted extraction (MAE). The response surface method (RSM) and analysis of variance (ANOVA) were carried out to optimize the statistical data of MAE. The extraction oils (Eos) were analyzed by the compositions by GC/MS and were compared to the antioxidant activity, total phenolic contents (TPC), and total flavonoid contents (TFC). The highest yields (dry weight basis) of HD and MAE were 1.96% and 2.22% (w/w) respectively. From the optimization result, the highest yield for MAE was 2.33% at 795 W power, time 44 mins, and a solid/liquid ratio of 100 g/583 ml. The compositions detected from HD and MAE were 41 and 45 contents respectively. Cedrene and copaene were the major compositions, detected in the extraction oils. Cedrene was detected in HD (25.54%) and MAE (23.69%). Copaene was detected in HD (22.97%) and MAE (24.71 %). MAE presented DPPH (%inhibition) at 82.68 ± 0.31 %, TPC at 4227.62 ± 28.72 (mgGAE/g Dry weight), and TFC at 3.92 ± 28.72 (mgRE/g Dry weight) higher than HD. The extraction oils obtained in this study contained many potential compositions, and MAE was an effective method to extract the essential oil from *C.aromatica*.

Keywords: Cedrene; copaene; response surface method; isolation oil; antioxidant



1. Introduction

Curcuma aromatica Salisb. (*C.aromatica*) is an aromatic medicinal herb that belongs to the Zingiberaceae family. *C.aromatica* (wild turmeric) is widely cultivated in many countries, such as India, China, Bangladesh, Australia, and a few countries in Southeast Asia (e.g., Thailand and Myanmar) [1]. Many parts of *C.aromatica* such as leaves, flowers, and rhizomes are commonly used as folk and modern medicines due to their pharmacology, antioxidant, and bioactivity [2, 3]. However, the extraction oils (EOs) extracted from *C.aromatica* rhizomes, which were cultivated in different areas, were identified with different major compositions [4]. Xanthorrhizol, camphor, curdione, and curcumene were the typical major compositions detected in the EOs obtained from *C.aromatica* rhizomes grown in India, Thailand, and China [3, 5-8].

There are many methods used to extract *C.aromatica* rhizomes for their compositions and bioactivities benefits. Hydro-distillation (HD) and heat refluxing were typical methods of extracting the EOs from *C.aromatica* rhizomes. HD is one of the conventional methods to extract EOs from plants. Compositions among forty-four contents were identified in the EOs obtained from HD [3]. Heat refluxing with ethanol is used to extract the EO from *C.aromatica* fresh rhizomes. *C.aromatica* presented a very high percent

inhibition (% inhibition) compared with other *Curcuma* species [8]. *C.aromatica* rhizomes obtained from different areas in China were also extracted by steam distillation (SD) to investigate their compositions and bioactivities [9]. The different compositions among seventy-eight contents were identified in the EOs obtained from *C.aromatica*, grown in different areas. The EO yields and results obtained from SD were around 3.12% to 4.23%.

Microwave-assisted extraction (MAE) is also known as one of the green extraction methods using less power, time, and solvent [10]. During extraction with microwave irradiation, the temperature of the plant sample and solvent increased due to the dipole rotation and ionic conduction [11]. Therefore, the electric field changes over time, and the polar molecules of the samples are reoriented by repeating their orientation in a field polarity. The process variables of MAE have been studied in many reports to investigate the EO yields and compositions [12]. Different combinations of variables in MAE, such as power, time, and a solid/liquid ratio, produced different results of the EO yields, composition contents, and bioactivities [13, 14]. The plant samples extracted by MAE reached the boiling temperature faster than conventional methods due to the heat generated by microwave irradiation. Consequently, the



sample degradation due to a very high temperature was less than a conventional method. Furthermore, the microstructures of plant samples were more ruptured and damaged. It caused a higher rate of isolation oil released from the oil glands when compared with a conventional method.

The antioxidants and bioactivities of the EOs from plant samples were studied in the reports as well. *C.aromatica* fresh and dry rhizomes were extracted to compare the EO. From the previous report, the antioxidant activity results (DPPH/inhibitory concentration at 50%, IC₅₀) of the EOs from *C.aromatica* rhizomes obtained from different areas (e.g., India, Thailand, and China) were in a range of 3.5-10.03 mg/mL; meanwhile, the antioxidant activity results (DPPH/% inhibition) was at 62 % [15]. The phenolic contents and the antioxidant activity results of the EOs obtained from *Curcuma* species growth in Thailand (17 species) were also studied [16]. The total phenolic content and the antioxidant activity of the EO from *C.aromatica* were 11.0 ± 0.2 (mg GAE/g Dry Weight) and 20.8 ± 0.1 (% inhibition), respectively. The relationship between the radical scavenging assay results and the total phenolic contents of *Curcuma* species was not necessarily correlated. The total flavonoid content was investigated in the EO obtained from *C.aromatica* fermented with a common fungus (*Rhizopus oligosporus*) [17]. The fermented *C.aromatica* showed higher

antioxidant activities and flavonoid contents than a conventional method. The interaction between a fungus and *C.aromatica* in a fermentation process increased the number of enzymes and lead to more ruptures in the microstructure of the plant sample.

In the underlying study, the *C.aromatica* rhizomes were extracted to obtain the EOs. Resulted yields, chemical compositions, and bioactivities of the EOs obtained by HD and MAE were used to compare in this study. The response surface method (RSM) based on Box-Behnken Design (BBD) was carried out to illustrate the relationship between the process variables of MAE. The statistical data was analyzed using analysis of variance (ANOVA). The chemical compositions of EOs from HD and MAE were analyzed by gas chromatography mass-spectrometer (GC/MS). The DPPH radical scavenging assay, the total phenol content (TPC), and the flavonoid content (TFC) for EOs obtained by HD and MAE, and used in this study.

2. Materials and methods

2.1 Plant sample preparation

The *C.aromatica* fresh rhizomes (5000 g) were collected and purchased from the local herbs market (Prachinburi, Thailand). The fresh *C.aromatica* rhizomes were cut into small pieces using a cutting machine and dried in a hot air oven at 65 °C for 5 hrs to reduce moisture. The dried



rhizomes were grounded via a blade grinder and sieved through a standard 50-mesh size screen. The voucher specimen (code: SL-NC209) was kept at Laboratory for Medicinal Cannabis Research, Kamphaeng Saen, Nakhon Pathom, Thailand. In this study, distilled water was used as a non-chemical reagent in the extraction methods. A Clevenger-type apparatus (1000 mL) round bottom flask was used in this study.

2.2 The extraction oil (EO) yield of HD and MAE

The *C.aromatica* dried powder (100 g) was prepared in each experiment. The weighted *C.aromatica* powder was mixed with distilled water, followed by the experimental design based on BBD in Table 2. for MAE and 600 mL for HD. The EOs derived by HD and MAE were separated from the hydrosol, weighted, and calculated EO yield using the equation (1).

$$\text{Yield \% (w/w)} = \frac{\text{weight of EO (g)}}{\text{weight of sample (g)}} \times 100\% \quad (1)$$

2.3 Hydro distillation (HD)

A Clevenger-types apparatus (1000 mL) with an adjustable temperature heating mantle was prepared for HD. A solid/liquid ratio for HD was constant at 100 g/600 mL. The cThe clevenger apparatus condensing unit was connected to a water-cooled chiller. The water temperature of a chiller was set at 8.0 °C, meanwhile, a heating

mantle temperature was set at 120 °C. The extraction time of HD was set at 6.0 hrs. The extraction oil yield results for the HD were performed in triplicate and used the average data values.

2.4 Microwave-assisted extraction (MAE)

The MAE apparatus as shown in Fig. 1 was modified from a microwave oven (Model: ER-SM20(W), Toshiba, Thailand). The MAE oven chamber was redesigned from the original design to increase the chamber capacity from 20 to 35 liters. The new chamber was fabricated from a stainless-steel sheet (grade: SUS304, a thickness of 1.5 mm). A magnetron and other electrical components were reassembled in the new chamber. For operational safety, the irradiation leakage was measured by a microwave leak detector (Model: EMF300), EXTECH instruments, Thailand. The temperature setting of MAE was controlled in the same manner as HD. The process parameters of MAE followed the experimental design in Table 1.

Table 1 Independent variables and coded setting levels of MAE

| Independent variables | Code setting levels | | |
|--------------------------------|---------------------|-----|-----|
| | -1 | 0 | 1 |
| Microwave power (W) (X1) | 400 | 600 | 800 |
| Microwave time (min) (X2) | 15 | 30 | 45 |
| Solid/liquid ratio (g/mL) (X3) | 1:4 | 1:5 | 1:6 |

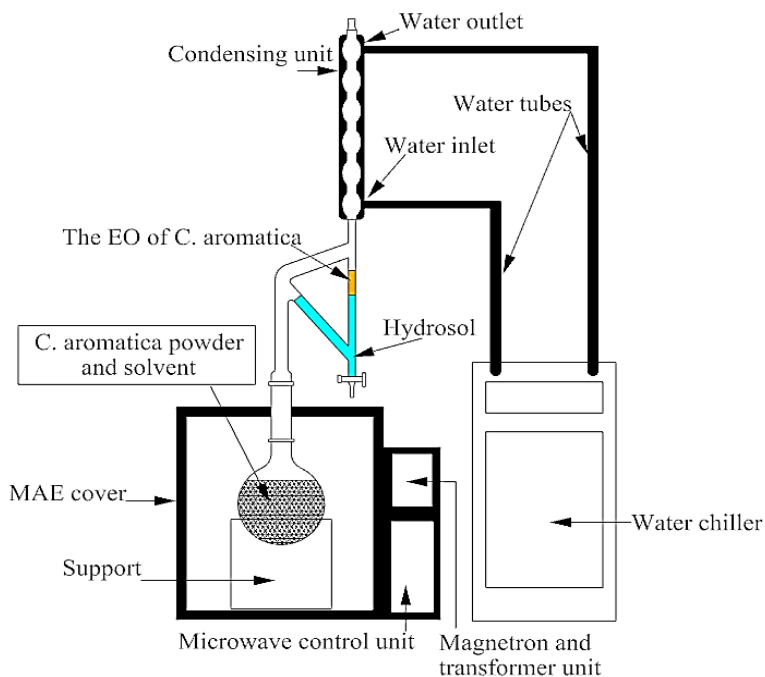


Fig. 1 MAE apparatus and control unit

2.5 Yield optimization for MAE

The response surface methodology (RSM) based on Box-Behnken Design (BBD) was performed in the experimental design for MAE. The BBD with three numeric parameters at three levels (-1, 0, 1) was used to determine the number of experimental and process variables of MAE. Three main independent parameters consisted of power (400, 600, and 800 W), time (20, 30, and 40 min), and solid/liquid ratio (1:4, 1:5, and 1:6 g/mL). The actual parameters and values are shown in Table 1. The total experiment number of MAE was fifteen experiments, including the center points (three

replicated) shown in Table 2. The second-order polynomial and quadratic model equation were carried out to indicate the correlation between MAE process variables and the EO of *C. aromatica*. The quadratic model equation of MAE is expressed in equation (2).

$$Y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i X_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} X_i^2 + \sum_{i=1}^{k-1} \sum_{j>1}^k \beta_{ij} X_i X_j \quad (2)$$

Where Y is the dependent variable, β_0 , β_i , β_{ii} and β_{ij} are the regression coefficients of the intercept, linear, quadratic, and interaction between variables respectively, meanwhile, X_i and X_j are the independent variables.

Table 2 Experimental design with BBD and the response values

| No. | Code setting level | | | Actual setting level | | | %Yield | |
|-----|--------------------|----|----|----------------------|----------|-----------|-----------|--------|
| | X1 | X2 | X3 | X1 (W) | X2 (min) | X3 (g/mL) | Predicted | Actual |
| 1 | 0 | 0 | 0 | 600 | 30 | 1:5 | 1.27 | 1.3 |
| 2 | 1 | -1 | 0 | 800 | 15 | 1:5 | 1.26 | 1.22 |
| 3 | 1 | 0 | -1 | 800 | 30 | 1:4 | 2 | 1.97 |
| 4 | 0 | 1 | 1 | 600 | 45 | 1:6 | 1.96 | 1.89 |
| 5 | 1 | 0 | 1 | 800 | 30 | 1:6 | 1.94 | 1.93 |
| 6 | -1 | 0 | -1 | 400 | 30 | 1:4 | 0.41 | 0.42 |
| 7 | -1 | -1 | 0 | 400 | 15 | 1:5 | 0.39 | 0.38 |
| 8 | 0 | -1 | -1 | 600 | 15 | 1:4 | 0.63 | 0.67 |
| 9 | 0 | 0 | 0 | 600 | 30 | 1:5 | 1.27 | 1.23 |
| 10 | -1 | 1 | 0 | 400 | 45 | 1:5 | 1.09 | 1.12 |
| 11 | 1 | 1 | 0 | 800 | 45 | 1:5 | 2.14 | 2.22 |
| 12 | 0 | -1 | 1 | 600 | 15 | 1:6 | 0.6 | 0.63 |
| 13 | 0 | 1 | -1 | 600 | 45 | 1:4 | 0.73 | 0.69 |
| 14 | 0 | 0 | 0 | 600 | 30 | 1:5 | 1.27 | 1.29 |
| 15 | -1 | 0 | 1 | 400 | 30 | 1:6 | 1.69 | 1.72 |

The experiment was repeated in triplicate and the value data was expressed as the means \pm standard deviation (SD). The correlations between the response value and process variables were calculated using computer software, and shown as 2D contours and 3D surface plots.

2.6 Chemical compositions analysis

The compositions of the EOs were analyzed by gas chromatography-mass spectrometer (GC/MS). Shimadzu model GCMS-QP2020

assembled with DB-WAX column (30 m \times 0.25 mm \times 0.25 μ m, film thickness) and mass detector in the full scan mode was carried out to identify the compositions of EOs. Helium was used as a carrier gas, and it was set constant flow rate of 1.0 mL/min. The samples were diluted in dichloromethane (1 μ L) and were injected into an oven with a split ratio of 1:200. The temperature was set constant initially at 60 $^{\circ}$ C for 2.0 min, and it was increased continuously to 2 $^{\circ}$ C/min until it



reached a maximum point at 250 °C for a 5- minute holding time. The MS quad was set a temperature at 140 °C with maximum temperature control of 190 °C, meanwhile, the MS source temperature was set at 220 °C with maximum temperature control of 250 °C. The full scan mode of MS was set to 40 to 350 m/z using an ionization mode (EI) with 70-eV. In each composition analysis, the total run time was approximately 65.0 min. The analysis data was kept and analyzed by the LabSolutions DB/CS software. The compositions of EOs were compared with the NIST17 M/S library by computer matching and were identified by their retention time (RT) relative to Kovat's index (DB-WAX column) in the literature data [6, 7, 17-18].

2.7 DPPH radical scavenging assay

The EOs mixed methanol (2 mg/mL) and butylated hydroxytoluene (BHT) mixed methanol (200 µg/mL) were prepared in this study. The sample and control solutions (50 µL) were prepared in a well plate and mixed with 2,2-Diphenyl-1-picrylhydrazyl (DPPH) of 950 µL (0.1 mM in methanol). The sample solutions were incubated a room temperature (28 ± 2 °C) for 30 min. Spectrophotometer (ONILAB, model SP-UV1100) was used to measure the absorbance at 517 nm. The results were repeated in triplicates, and the value data was expressed as the mean ± SD. The results of percent inhibition were calculated followed by equation (3).

2.8 Total phenolic content determination

The total phenolic content of EOs was determined using a Follin-Clocalteu method. The sample solution (250 µg/mL) and gallic acid solution (10-100 µg/mL) of 0.2 mL were dissolved with the Follin-Clocalteu reagent (0.5 mL) with a concentration of 1:10 in deionized water and sodium bicarbonate solution (0.8 mL) with 7.5 % w/v. The sample solution was incubated at room temperature (28 ± 2 °C) for 30 min. The spectrophotometer was used to measure the absorbance of the sample at 765 nm. The results were repeated in triplicates and expressed as milligrams of gallic acid equivalent in 1 g of the sample and dried powder (mgGAE/g).

2.9 Total flavonoid content determination

The total flavonoid content of EOs was investigated by the aluminum chloride assay. In brief, the sample solution (500 µL) was diluted in methanol (2.0 mL) and 10 % aluminum chloride (0.1 mL). Sodium acetate (0.1 mL) was added to the prepared sample solution. Distilled water (5 mL) was added into the prepared sample solution to increase volume, shaken, and incubated in

$$\%Inhibition = \left[\frac{A_0 - A_1}{A_0} \right] \times 100 \quad (3)$$

Where A_0 and A_1 are the absorbances of a control and sample, respectively.



room temperature for 30 min. Rutin was used as a control, and the absorbance was measured at 415 nm. The results were carried out in triplicates and expressed in terms of rutin equivalents (mgRE/g).

3. Results and discussion

3.1 The EOs comparison between HD and MAE

The color of the EO obtained from HD provided a lighter clear yellowish than MAE. The highest yields of HD and MAE were 1.96 ± 0.06 % and 2.22 ± 0.09 %, respectively. The highest yield of MAE was obtained from experimental run no. 11 of power (800 W), time (45 min), and a solid/liquid ratio (100 g/500 mL) as shown in Table 2. Meanwhile, the lowest yield of MAE was 0.42 % which was obtained from run no. 6 of power (400 W), time (30 min), and a solid/liquid ratio (100 g/400 mL). The increasing power affected the results of the EO yield of *C.aromatica*. At a lower microwave power, the temperature of the immersed sample was heated up and reached the boiling point slower than at higher power. Due to the heat generation mechanism of microwave irradiation, the microstructures of *C.aromatica* were disrupted by the electromagnetic field change. Therefore, the cell walls of oil glands were ruptured and leading to the release of EOs. The extraction time of MAE also affected the EO yield of *C.aromatica*.

A longer extraction time and a higher solid/liquid ratio presented a better result of the EOs than the lower. A longer extraction time affected the penetration rate of the solvent to take place in isolation oil microstructures, meanwhile, a higher solid/liquid ratio affected the viscosity rate of a solvent. The temperature of immersed *C. aromatica* and the solvent was increased immediately by the heat generation mechanism of microwave irradiation as described previously [10]. Hence, the temperature of MAE reached boiling point faster than the heat convection mechanism from HD. However, the highest amount of solid/liquid ratio in this study showed a slight decrease in the EO yield. A higher solid/liquid ratio takes a longer time to reach a boiling point than a lower ratio. Therefore, the highest yield was obtained from a solid/liquid ratio at 100g/500 mL.

3.2 Statistical data analysis and optimization

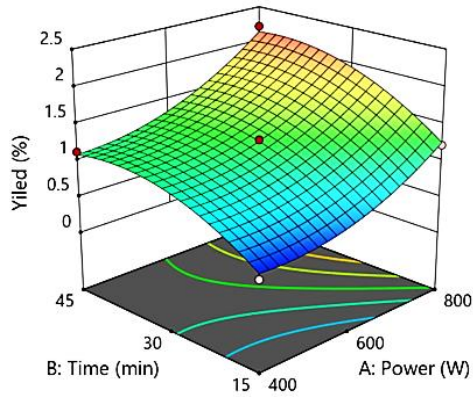
From the ANOVA results in Table 3, the model of RSM presented a statistically significant ($p < 0.0001$) to the independent variables (power, time, and solid/liquid ratio). The value of the determination coefficient (R^2) and the adjusted determination coefficient (R^2_{Adj}) were 0.993 and 0.980, respectively. It was indicated that the model of the second-order response surface model was appropriate with the predicted data



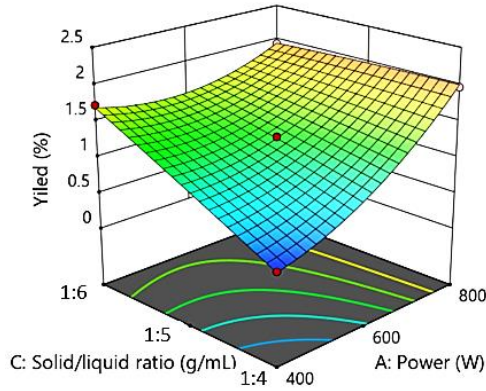
and actual experimental. Furthermore, the lack of fit test also showed a non-significant value relative to the pure error ($p > 0.05$) at 0.115. Linear (X_1 , X_2 , and X_3) and interaction (X_1X_3 and X_2X_3) of process variables which were power, time, and solid/liquid ratio showed a highly significant ($p < 0.0001$) to the response value. Meanwhile, the interaction between power and time (X_1X_2) and the quadratic solid/liquid ratio (X_3^2) showed a non-significant value. The predicted value and actual data are shown in Table 2. The correlation between process variables of MAE is shown in Fig 2. The temperature of immersed *C.aromatica*. was increased as the result of dipole rotation and ionic conduction [12, 14]. The immersed *C.aromatica* at a higher power could reach a boiling point faster. Meanwhile, increasing the extraction time affected the thermal accumulation between the immersed sample and solvent. Moreover, a more prolonged extraction time provided a better result for a continuous process of solvent vapor to take the EO from a heating-immersed sample to a condensing unit. Hence, the highest yield was obtained by the highest power and time, as shown in Fig 2 (a). The EO yield results from the interaction between a power and a solid/liquid ratio

are shown in Fig 2 (b). The EO yield of *C.aromatica* increased by increasing power and solid/liquid ratio. The amount of solvent affected the efficiency of the solvent flow rate and a viscosity rate of the immersed sample. Meanwhile, in the interaction between time and solid/liquid ratio shown in Fig. 2 (c), the highest yield was found at a higher solid/liquid ratio and time. Microwave irradiation increased the sample temperature from room to a boiling point. A longer time showed a better result in the solvent performance taking the EO from immersed sample to a condensing unit. A higher amount of solvent required a higher power and a longer time to reach a boiling point. However, a higher amount of solvent improved the solubility rate between the EO and solvent. Therefore, the EO yield increased as the time and solid/liquid ratio increased. For the optimal result, the highest yield obtained from MAE was obtained at 2.33% of microwave power (795 W), time (44.0 min), and a solid/liquid ratio (100 g/583 mL). The model regression equation of MAE in this study is shown in equation (4).

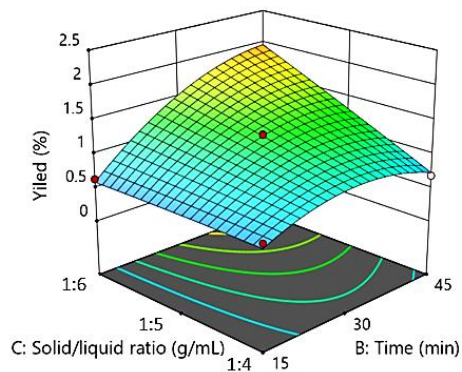
$$\begin{aligned} \text{Yield} = & 1.27 + 0.4606X_1 + 0.3767X_2 + 0.3041X_3 \quad (4) \\ & + 0.0635X_1X_2 - 0.3347X_1X_3 + 0.3130X_2X_3 \\ & + 0.2525X_1^2 - 0.2878X_2^2 - 0.0115X_3^2 \end{aligned}$$



(a) Graph plot between yield, power and time



(b) Graph plot between yield, power and solid/liquid ratio



(c) Graph plot between yield, time and solid/liquid ratio

Fig. 2 3D surface plots and 2D contours of process variables and response value

**Table 3** Chemical compositions of *C. aromatica* extracted by HD and MAE

| S.No | RT | Composition contents | HD | MAE | RI a | RI b |
|------|-------|---------------------------------|--------------|--------------|------|------|
| 1 | 3.55 | α -Pinene | 0.22 | 0.08 | 940 | 943 |
| 2 | 4.54 | β -Pinene | 0.41 | 0.69 | 962 | 971 |
| 3 | 5.75 | D-limonene | 0.97 | 0.72 | 1015 | 1018 |
| 4 | 5.92 | Eucalyptol | 0.20 | tr | 1058 | 1059 |
| 5 | 8.42 | Ethylcinnamate | 0.18 | 0.65 | 1367 | 1367 |
| 6 | 9.13 | Cedrene | 25.54 | 23.69 | 1394 | 1399 |
| 7 | 10.72 | Sesquithujene | 2.15 | 1.88 | 1563 | 1560 |
| 8 | 11.46 | Chavibetol | 1.99 | 1.06 | 1566 | 1392 |
| 9 | 11.58 | 4-(p-Tolyl) pentanal | - | 0.19 | 1410 | 1406 |
| 10 | 12.74 | Caryophyllene | 0.75 | 0.34 | 1583 | 1587 |
| 11 | 12.95 | Copaene | 22.97 | 24.71 | 1591 | 1475 |
| 12 | 13.21 | Curcumene | 2.07 | 2.16 | 1516 | 1503 |
| 13 | 14.06 | Citrylideneacetone | 0.24 | 0.23 | 1532 | 1511 |
| 14 | 14.86 | (Z)-beta-Sesquisabinene hydrate | 1.79 | 1.64 | 1538 | 1523 |
| 15 | 15.22 | Camphor | 4.17 | 3.60 | 1540 | 1535 |
| 16 | 15.37 | ar-Turmerol | 0.39 | 0.38 | 1551 | 1511 |
| 17 | 16.02 | (E)- β -elemene | 0.74 | 0.66 | 1623 | 1384 |
| 18 | 17.14 | Bergamotene | 0.32 | 0.55 | 1432 | 1430 |
| 19 | 19.38 | Epicurzerenone | 3.52 | 3.41 | 1580 | 1584 |
| 20 | 23.81 | Atractylon | 0.20 | 0.17 | 1654 | 1655 |
| 21 | 24.12 | trans- β -Farnesene | 3.73 | 2.91 | 1662 | 1661 |
| 22 | 24.68 | Isoborneol | 2.15 | 2.03 | 1669 | 1672 |
| 23 | 25.01 | β -Humulene | - | 1.26 | 1703 | 1675 |
| 24 | 25.74 | α -Terpineol | 0.19 | 0.11 | 1712 | 1680 |
| 25 | 27.16 | α -Selinene | 0.93 | 0.87 | 1719 | 1703 |
| 26 | 27.47 | Zingiberene | - | 0.40 | 1720 | 1728 |
| 27 | 27.93 | β -(Z)-Curcumen-12-ol | 0.60 | 0.65 | 1722 | 1730 |



Table 3 continued

| S.No | RT | Composition contents | HD | MAE | RI a | RI b |
|--|-------|---------------------------|--------------|--------------|------|------|
| 28 | 28.45 | Xanthorrhizol | 10.40 | 13.97 | 1744 | 1730 |
| 29 | 28.82 | Ethyl p-methoxycinnamate | 0.13 | 0.52 | 1556 | 1760 |
| 30 | 29.11 | Selina-3,7(11)-diene | 0.73 | 0.61 | 1507 | 1793 |
| 31 | 29.64 | β -Germacrene | 1.98 | 2.08 | 1603 | 1802 |
| 32 | 29.86 | Cuparene | 0.40 | - | 1822 | 1825 |
| 33 | 30.21 | Curcumenone | 0.14 | 0.16 | 1840 | 1844 |
| 34 | 30.67 | Curzerene | 1.31 | 1.36 | 1902 | 1898 |
| 35 | 32.42 | Gerany-p-cymene | 0.39 | 0.39 | 2006 | 1980 |
| 36 | 32.95 | Zederone | 0.14 | 0.18 | 2012 | 2009 |
| 37 | 33.57 | Cinnamaldehyde | 0.95 | 0.13 | 2025 | 2025 |
| 38 | 33.96 | α -Nerolidol | 0.17 | 0.18 | 2040 | 2042 |
| 39 | 34.08 | Elemol | 0.22 | 0.11 | 2055 | 2058 |
| 40 | 34.24 | Globulol | 0.29 | tr | 2080 | 2083 |
| 41 | 34.47 | Cubenol | - | 0.23 | 2085 | 2085 |
| 42 | 34.53 | trans- β -elemenone | - | 0.18 | 2092 | 2099 |
| 43 | 35.01 | Geranyl-alpha-terpinene | 0.12 | 0.22 | 2103 | 2142 |
| 44 | 35.11 | Tumerone | 1.18 | 0.56 | 2211 | 2245 |
| 45 | 36.29 | Isospathulenol | 0.81 | 0.80 | 2220 | 2222 |
| 46 | 35.23 | Farnesol | - | 0.15 | 2376 | 2378 |
| Monoterpene (Sr. No. 1-4, 30, 32) | | | 4.14 | 3.63 | | |
| Monoterpenoid (Sr. No. 15) | | | 4.17 | 3.60 | | |
| Sesquiterpene (Sr. No. 6-7, 10-12, 21, 23, 25-29,31, 42) | | | 71.25 | 75.44 | | |
| Sesquiterpenoid (Sr. No. 14, 16-17, 19-20, 30, 32-34,36, 38-40, 42, 44-46) | | | 12.03 | 10.55 | | |
| Others (Sr. No. 5, 8-9, 13,18, 35, 37, 41, 43) | | | 4.19 | 3.65 | | |



3.3 Composition analysis of the EOs between HD and MAE

The compositions were detected in the EOs from HD and MAE at 40 and 45, respectively. The total identified compositions obtained from HD and MAE were 95.78 % and 96.87 %, as shown in Table 3. The majorities of compositions detected in the EOs from HD and MAE were cedrene, copaene, and xanthorrhizol. Cedrene at 25.54 % was the highest composition detected in HD; meanwhile, MAE was detected at 23.69 %. Copaene at 24.71 % was the highest composition detected in MAE; meanwhile, HD was detected at 22.97 %. Xanthorrhizol, a sesquiterpene was detected in the EOs from HD at 10.40 %, with MAE at the higher rate of 13.97 %. Cubenol (0.23 %), zingiberene (0.40 %), farnesol (0.15 %), trans- β -element (0.18 %), 4-(p-Tolyl) pentanal (0.19 %) and β -humulene (1.26 %) were only found in the EO from MAE. Cuparene (0.40 %), sesquiterpenoid was only detected in the EO from HD. Camphor, equicurzerenone, curcumene, trans- β -farnesene, and β -germacrene were the minor composition contents detected in the EOs from HD and MAE.

3.4 Antioxidant activity, total phenolic contents (TPC), and total flavonoid contents (TFC)

In antioxidant activity, TPC and TFC results of the EOs were shown in Table 4. The percent inhibition (% inhibition, 50 mg/mL) of the EOs from

HD and MAE were 81.21 ± 0.31 % and 82.68 ± 0.40 %, respectively. The antioxidant activity of HD and MAE was higher than that of a control (BHT) of 16.04 ± 1.63 %. The TPC results of the EO obtained from HD were 3975.04 ± 25.82 (mg GAE/g Dry weight), and MAE was 4227.62 ± 28.72 (mg GAE/g Dry weight). Meanwhile, the TFC result of the EO obtained from HD was higher than MAE. The EO from HD presented the TFC result at 3.92 ± 0.01 (mg RE/g Dry weight) and MAE was 3.70 ± 0.08 (mg RE/g Dry weight). In this study, MAE presented better results of the antioxidant activity and TPC than HD. Due to the composition contents of the EOs, the MAE showed higher composition numbers than HD. It revealed a positive correlation between the antioxidant activity and TPC of the EOs from HD and MAE. Meanwhile, TFC results showed a non-positive linear correlation between antioxidant activity and TPC.

4. Conclusion

Microwave-assisted extraction (MAE) and hydro-distillation (HD) were performed to extract the EOs from *C.aromatica* rhizomes. The relationships between process variables of MAE for the response value were analyzed by response surface method (RSM) and analysis of variance (ANOVA). MAE presented the advantages of a shorter extraction time, composition contents, antioxidant activity, and TPC. Meanwhile, HD



presented a higher TFC result. The EOs obtained from *C.aromatica* contained various compositions. From the results, MAE and RSM were the

potential methods to extract the EOs from *C.aromatica* and to optimize the process variables.

Table 4 ANOVA result of MAE

| Source | Adj SS | DF | Adj MS | F-Value | P-Value | Significant |
|----------------------|--------|----|--------|---------|----------|-----------------|
| Model | 5.02 | 9 | 0.5573 | 79.62 | < 0.0001 | significant |
| A-Power | 1.7 | 1 | 1.7 | 242.51 | < 0.0001 | *** |
| B-Time | 1.14 | 1 | 1.14 | 162.23 | < 0.0001 | *** |
| C-Solid/liquid ratio | 0.7399 | 1 | 0.7399 | 105.72 | 0.0001 | ** |
| AB | 0.0161 | 1 | 0.0161 | 2.3 | 0.1895 | * |
| AC | 0.4482 | 1 | 0.4482 | 64.04 | 0.0005 | ** |
| BC | 0.3919 | 1 | 0.3919 | 55.99 | 0.0007 | ** |
| A ² | 0.2353 | 1 | 0.2353 | 33.62 | 0.0021 | ** |
| B ² | 0.3058 | 1 | 0.3058 | 43.69 | 0.0012 | ** |
| C ² | 0.0005 | 1 | 0.0005 | 0.0703 | 0.8015 | * |
| Residual | 0.035 | 5 | 0.007 | | | |
| Lack of Fit | 0.0322 | 3 | 0.0107 | 7.82 | 0.1155 | Non-significant |
| Pure Error | 0.0027 | 2 | 0.0014 | | | |
| Cor Total | 5.05 | 14 | | | | |

$R^2 = 0.987$, $R^2_{Adj} = 0.964$, ***($p < 0.001$); **($p < 0.01$); *($p < 0.05$)

Table 5 Bioactivity results of the EOs obtained from HD and MAE

| Methods | Antioxidant activity (%inhibition) ¹ | Total phenolic contents (mgGAE/g Dry weight) | Total flavonoid contents (mgRE/g Dry weight) |
|---------|--|---|---|
| HD | 81.21 ± 0.40 | 3975.04 ± 25.82 | 3.92 ± 0.01 |
| MAE | 82.68 ± 0.31 | 4227.62 ± 28.72 | 3.70 ± 0.08 |

¹ Antioxidant activity (%): final sample concentration = 50 mg/mL, BHT (%inhibition) = 16.04 ± 1.63



5. References

- [1] S. Rajkumari and K. Sanatombi, Nutritional value, phytochemical composition, and biological activities of edible *Curcuma* species: A review, *International Journal of Food Properties*, 2017, 20, S2668-S2687.
- [2] S.G. Jaiswal and S.N. Naik, Turmeric oil: composition, extraction, potential health benefits and other useful applications, *Avicenna Journal of Medical Biochemistry*, 2021, 9(2), 93-106.
- [3] S. Behura, A. Sahoo, S. Singh, S. Jena, B. Har and S. Nayak, Variation in essential oil yield and volatile constituents of curcuma aromatica rhizome from different regions of eastern and southern India, *Journal of Essential Oil Bearing Plants*, 2021, 24(6), 1248-1255.
- [4] N.S. Dosoky and W.N. Setzer, Chemical composition and biological activities of essential oils of curcuma species, *Nutrients*, 2018, 10, 1196.
- [5] S.V. Nampoothiri, R.M. Phillip, S. Kankangi, C.R. Kiran and A.N. Menon, Essential oil composition, α -amylase inhibition and antiglycation potential of curcuma aromatica salisb, *Journal of Essential Oil Bearing Plants*, 2015, 18(5), 1051-1058.
- [6] H. Xiang, L. Zhang, L. Xi, Y. Yang, X. Wang, D. Lei, X. Zheng and X. Liu, Phytochemical profiles and bioactivities of essential oils extracted from seven *Curcuma* herbs, *Industrial Crops and Products*, 2018, 111, 298-305.
- [7] S.Y. Tsai, S.J. Huang, C.C. Chyau, C.H. Tsai, C.C. Weng and J.L. Mau, Composition and antioxidant properties of essential oils from curcuma rhizome, *Asian Journal of Arts and Sciences*, 2011, 2(1), 57-66.
- [8] Y. Shi, X. Liang, L. Chi, Y. Chen, L. Liang, J. Zhao, Y. Luo, W. Zhang, Q. Cai, X. Wu, Z. Tan and L. Zhang, Ethanol extracts from twelve *Curcuma* species rhizomes in China: Antimicrobial, antioxidative and anti-inflammatory activities, *South African Journal of Botany*, 2021, 140, 167-172.
- [9] H. Xiang, L. Zhang, Z. Yang, F. Chen, X. Zheng and X. Liu, Chemical compositions, antioxidative, antimicrobial, anti-inflammatory and antitumor activities of curcuma aromatica Salisb. essential oils, *Industrial Crops and Products*, 2017, 108, 6-16.
- [10] P. Rodsamran and R. Sothornvit, Microwave heating extraction of pectin from lime peel: Characterization and properties compared with the conventional heating method, *Food Chemistry*, 2019, 278, 364-372.



- [11] H.S. Kusuma, D.K.Y. Putri, I. Triesty and M. Mahfud, Comparison of microwave hydrodistillation and solvent-free microwave extraction for extraction of agarwood oil, *Chiang Mai Journal of Science*, 2019, 46(4), 741-755.
- [12] G.F. Najmuldeen, K. Narayanan, D.A. Kirubananthan and G.G. Faisal, Comparison of tongkat ali root chemical composition extracted by soxhlet, conventional steam and microwave assisted extraction techniques, *Pharmacognosy Journal*, 2018, 10(5), 916-920.
- [13] A. Elik, D.K. Yanik and F. Göğüş, Microwave-assisted extraction of carotenoids from carrot juice processing waste using flaxseed oil as a solvent, *LWT - Food Science and Technology*, 2020, 123, 109100.
- [14] S. Rahmati, A. Abdullah and O.L. Kang, Effects of different microwave intensity on the extraction yield and physicochemical properties of pectin from dragon fruit (*Hylocereus polyrhizus*) peels, *Bioactive Carbohydrates and Dietary Fibre*, 2019, 18, 100186.
- [15] S. Burapan, M. Kim, Y. Paisooksantivatana, B.E. Eser and J. Han, Thai curcuma species: Antioxidant and bioactive compounds, *Foods*, 2020, 9, 1219.
- [16] J. Lim, T.T.H. Nguyen, K. Pal, C.G. Kang, C. Park, S.W. Kim and D. Kim, Phytochemical properties and functional characteristics of wild turmeric (*curcuma aromatica*) fermented with *Rhizopus oligosporus*, *Food Chemistry: X*, 2022, 13, 100198.
- [17] <https://webbook.nist.gov/chemistry/NIST>, National Institute of Standards and Technology: NIST Chemistry Webbook. Data from NIST Standard Reference Database 69. (Accessed on 15 August 2022)
- [18] R.P. Adams, Identification of essential oil components by gas chromatography/mass spectrometry, 4th ed., Allured Publishing Corporation, IL, USA, 2007.



ข้อมูลสำหรับผู้เขียนและการเตรียมต้นฉบับ

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

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

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

สำหรับเนื้อเรื่องของบทความวิชาการให้เตรียมเป็นบทความที่เรียบเรียงเนื้อหาจากหนังสือ งานวิจัย ประสบการณ์ หรือเรื่องแปล เพื่อเผยแพร่ความรู้ในสาขาต่าง ๆ หรือแสดงข้อคิดเห็นที่เป็นประโยชน์มีคุณค่าทางวิชาการ โดยองค์ประกอบของบทความวิชาการอาจคล้ายคลึงกับบทความวิจัย แต่ไม่มีเนื้อหาของการดำเนินงานวิจัยและผลการวิจัย ซึ่งผู้เขียนสามารถกำหนดได้เองตามความเหมาะสมของบทความวิชาการ

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

Authors Guideline and Manuscript Preparation

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

The length of the manuscript is not less than 5 pages in B5 paper size or no less than 2500 words using a word count command of MS Word (up to 15 pages). The first page of the manuscript should contain the full title, author's name(s), affiliation, contact address of correspondence, abstract and keywords (3 – 5 words).

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

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

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



แบบฟอร์มนำส่งบทความ

1. ชื่อบทความวิจัย/บทความวิชาการ

ภาษาไทย

ภาษาอังกฤษ

2. ประเภทบทความ บทความวิจัย บทความวิชาการ

3. ชื่อ-สกุลเจ้าของบทความ หรือผู้แทนส่งบทความ

4. สถานที่ติดต่อเจ้าของบทความหรือผู้แทนส่งบทความ

ที่อยู่

โทรศัพท์

โทรสาร

E-mail

5. รายชื่อและที่อยู่ของผู้ร่วมบทความ (สามารถเพิ่มรายชื่อได้ในเอกสารแนบเพิ่มเติม)

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

6. เสนอรายชื่อผู้ประเมิน

1. โทรศัพท์

E-mail

2. โทรศัพท์

E-mail

3. โทรศัพท์

E-mail

7. การรับรองบทความ

 ขอรับรองว่าบทความต้นฉบับนี้ยังไม่เคยได้รับการเผยแพร่และตีพิมพ์ในวารสารอื่นใดมาก่อน

เจ้าของบทความ (ลงชื่อ)

8. แบบฟอร์มนี้ข้าพเจ้าได้แนบต้นฉบับบทความดังรายการต่อไปนี้ครบถ้วนแล้ว

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

ขอรับรองว่าข้อความดังกล่าวข้างต้นเป็นจริงทุกประการ

ลงชื่อ เจ้าของบทความ หรือผู้แทนส่งบทความ

()

วันที่ เดือน พ.ศ.

**Manuscript Submission Form**

1. Title

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

3. Corresponding Author Name

4. Affiliation

Tel. Fax E-mail

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

| Name | Affiliation | Telephone | E-mail |
|------|-------------|-----------|--------|
| | | | |
| | | | |
| | | | |

6. Suggested reviews (Author must suggest the reviewer at least three people in the field of research presented in manuscript including name, organization, contact address and e-mail)

1. Tel. Email

2. Tel. Email

3. Tel. Email

7. Manuscript's certification

 I certify that this manuscript has not been accepted nor submitted for publication elsewhere.

Corresponding's author name (Signature)

8. Together with this form, I (we) have been attached other documents included:

 Manuscript submission by system online at <http://ojs.kmutnb.ac.th/index.php/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 ๑ ประจำปี ๒๕๖๖

บทความ (Articles)

- Reducing the Failure Rate of Dishwashers by Analyzing the Service Life of Spare Parts using System Reliability Calculation, The Journal of Industrial Technology, 2023, 19(1), 1-16.
- Effects of Pin-perforation Shape on Thermal Enhancement Factor of Pin-fin Heat Sink via Numerical Simulation, The Journal of Industrial Technology, 2023, 19(1), 17-33.
- Health Risk Assessment of PM2.5 Exposure in the Initiative of the Eastern Economic Corridor Area Project during Dry Season in 2022: Case Study of Rayong City, The Journal of Industrial Technology, 2023, 19(1), 34-51.
- A Study of the Partial Discharge Position on Acrylic Insulation, The Journal of Industrial Technology, 2023, 19(1), 52-62.
- Data Envelopment Analysis-Taguchi Method for Determining Optimal Parameters of a Fish Scaling Machine, The Journal of Industrial Technology, 2023, 19(1), 63-80.
- Potential of Refuse Derived Fuel Production from Solid Waste in Open Dumping Area, The Journal of Industrial Technology, 2023, 19(1), 81-92.
- Rapid Self-healing Bio-based Hydrogels for Monitoring Human Motion, The Journal of Industrial Technology, 2023, 19(1), 93-103.
- On Applying Q-Learning to Optimize Power Allocation in 2-users NOMA System, The Journal of Industrial Technology, 2023, 19(1), 104-116.
- Optimization, Bioactivity and Composition of Curcuma aromatica Salisb. Extraction Oils Extracted by Microwave-assisted and Hydro-distillation, The Journal of Industrial Technology, 2023, 19(1), 117-132.