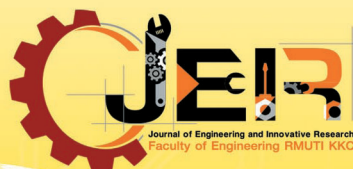




วารสารวิศวกรรมศาสตร์และการวิจัยเชิงนวัตกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มทร.อีสาน วิทยาเขตขอนแก่น Journal of Engineering and Innovative Research Faculty of Engineering RMUTI KKC



ISSN : 2822-129X (Print)

ISSN : 2985-0207 (Online)

Vol. 3 No. 1

January-June 2025

ปีที่ 3 ฉบับที่ 1

มกราคม - มิถุนายน 2568

 [https : pho3.tci-thaijo/index.php/JEIRKKC](https://pho3.tci-thaijo/index.php/JEIRKKC)

 @eng.rmuti.kkc

นโยบายและขอบเขตการตีพิมพ์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี วิทยาเขตขอนแก่น กำหนดออกวารสารฉบับออนไลน์รายหกเดือน ฉบับที่ 1 มกราคม-มิถุนายน ฉบับที่ 2 กรกฎาคม-ธันวาคม และจัดพิมพ์เล่มรายปีภายใต้ชื่อ “วารสารวิศวกรรมศาสตร์และการวิจัยเชิงนวัตกรรม” เพื่อตีพิมพ์เผยแพร่บทความและงานวิจัยด้านวิศวกรรมศาสตร์วิทยาศาสตร์ นวัตกรรมและเทคโนโลยี รวมถึงงานวิจัยสหวิทยาการและสาขาอื่นที่เกี่ยวข้อง ซึ่งครอบคลุมเนื้อหาที่เป็นองค์ความรู้พื้นฐาน การประยุกต์ จนกระทั่งการนำไปใช้ประโยชน์ ทั้งในแง่ทฤษฎี การทดลอง การออกแบบหรือการพัฒนาอุปกรณ์ รวมถึงการจำลองการทำงานของระบบ หรือกระบวนการต่างๆ เป็นต้น บทความที่ได้รับการตีพิมพ์จะถูกกลั่นกรองโดยผู้ทรงคุณวุฒิแบบ double blind peer review โดยพิจารณาจากความคิดสร้างสรรค์ ความใหม่ คุณภาพของการเขียนบรรยายและผลการทดลองที่แสดงให้เห็นการค้นพบแบบมีนัยสำคัญ

วัตถุประสงค์และขอบเขตวารสาร

เพื่อตีพิมพ์เผยแพร่ผลงานทางวิชาการด้านวิทยาศาสตร์และวิศวกรรมศาสตร์ โดยวารสารรับพิจารณาตีพิมพ์บทความวิชาการและบทความวิจัยครอบคลุมอนุสาขาด้านวิศวกรรมศาสตร์ วิทยาศาสตร์บริสุทธิ์ และวิทยาศาสตร์ประยุกต์ และเทคโนโลยี งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการคิดค้นสิ่งประดิษฐ์หรือนวัตกรรมใหม่ที่มีกระบวนการทำวิจัย วิเคราะห์และอภิปรายผลการทดสอบอย่างเป็นระบบ รวมทั้งงานวิจัยด้านนวัตกรรมการศึกษาหรือที่เกี่ยวข้องกับวิทยาศาสตร์ศึกษาและวิศวกรรมศึกษา หรือสาขาอื่นที่เกี่ยวข้อง

สาขาวิชาที่เปิดรับผลงาน

วารสารวิศวกรรมศาสตร์และการวิจัยเชิงนวัตกรรม เน้นรับบทความทางด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ในกลุ่มสาขาวิชาดังนี้

1. กลุ่มสาขาวิศวกรรมศาสตร์

- 1.1 วิศวกรรมโยธา
- 1.2 วิศวกรรมเครื่องกล
- 1.3 วิศวกรรมแมคคาทรอนิกส์และหุ่นยนต์
- 1.4 วิศวกรรมเกษตรและแปรรูปอาหาร
- 1.5 วิศวกรรมไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์
- 1.6 วิศวกรรมคอมพิวเตอร์และซอฟต์แวร์
- 1.7 วิศวกรรมอุตสาหการและโลจิสติกส์
- 1.8 วิศวกรรมระบบราง ขนส่งและยานยนต์

2. กลุ่มสาขาวิทยาศาสตร์

- 2.1 เคมี
- 2.2 คณิตศาสตร์
- 2.3 ฟิสิกส์
- 2.4 วัสดุศาสตร์
- 2.5 นาโนเทคโนโลยี

3. กลุ่มสาขาวิชาสหวิทยาการวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

4. กลุ่มสาขานวัตกรรมการศึกษา หรือที่เกี่ยวข้องกับวิทยาศาสตร์ศึกษาและวิศวกรรมศึกษา หรือสาขาอื่นที่เกี่ยวข้อง

ที่ปรึกษา

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ประพันธ์ ยาวระ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นพยา กัมพลานนท์
อาจารย์บุญกิจ อุ่นพิกุล
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศุภฤกษ์ ชามงคลประดิษฐ์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อติเรก จันทะคุณ
รองศาสตราจารย์ ดร.วิเชียร แสงอรุณ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปฐมภรณ์ ชัยกุล
อาจารย์ขุนแผน ปฎิมาประกร
นางสาวรัชนิวัลย์ มูลสีละ

รองอธิการบดีประจำวิทยาเขตขอนแก่น
ผู้ช่วยอธิการบดีประจำวิทยาเขตขอนแก่น
ผู้ช่วยอธิการบดีประจำวิทยาเขตขอนแก่น
คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
รองคณบดีฝ่ายบริหาร
รองคณบดีฝ่ายวิชาการและวิจัย
รองคณบดีฝ่ายแผนและประกันคุณภาพการศึกษา
รองคณบดีฝ่ายพัฒนานักศึกษา
หัวหน้าสำนักงานคณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

บรรณาธิการ

รองศาสตราจารย์ ดร. วิเชียร แสงอรุณ

มทร.อีสาน วิทยาเขตขอนแก่น

กองบรรณาธิการ

ศาสตราจารย์ ดร.วิทยา เรืองพรวิสุทธิ
ศาสตราจารย์ ดร.รวีวัฒน์ เสงี่ยมวิบูล
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กิตติศักดิ์ แสงสุระ
รองศาสตราจารย์ ดร.นาวิ กังวาลย์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อุดมรัตน์ ทิพวรรณ
ศาสตราจารย์ ดร.วันชัย สะตะ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.คมกฤช ปิติฤกษ์
ศาสตราจารย์ ดร.สุวัตร นานนท์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ทศพล ตรีจุฑาภาพงศ์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิษณุ ทองเล็ก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
มหาวิทยาลัยขอนแก่น
มหาวิทยาลัยขอนแก่น
มหาวิทยาลัยขอนแก่น
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา

รองศาสตราจารย์ ดร.ศักดิ์ระวี ระวังกุล
รองศาสตราจารย์ ดร.ปณัสชัย เซษฐิโชติศักดิ์
รองศาสตราจารย์ ดร.สมศักดิ์ เหล็กโคกสูง
รองศาสตราจารย์ ดร.ฐิติกันต์ สมบูรณ์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อัจฉริยา เจียรศิริสมบูรณ์

มทร.อีสาน วิทยาเขตขอนแก่น
มทร.อีสาน วิทยาเขตขอนแก่น
มทร.อีสาน วิทยาเขตขอนแก่น
มทร.อีสาน วิทยาเขตขอนแก่น
มทร.อีสาน วิทยาเขตขอนแก่น

ผู้ประสานงาน

นางประวีณา เนื่องรินทร์

มทร.อีสาน วิทยาเขตขอนแก่น

การพิจารณาบทความ

ต้นฉบับบทความจะได้รับการพิจารณาจากผู้ทรงคุณวุฒิ (Peer Review) ในสาขาวิชานั้น ๆ ไม่น้อยกว่า 3 ท่าน โดยเป็นการประเมินแบบอำพรางสองฝ่าย (Double Blind) และส่งผลการพิจารณาแก่ผู้เขียน เพื่อปรับปรุงแก้ไขบทความ หรือพิมพ์ต้นฉบับใหม่แล้วแต่กรณี เมื่อบทความผ่านการพิจารณาจากผู้ทรงคุณวุฒิและกองบรรณาธิการแล้ว ผู้เขียนจะได้รับการตอบรับตีพิมพ์บทความในวารสาร

กำหนดเผยแพร่

จัดพิมพ์เผยแพร่ ปีละ 2 ฉบับ (วารสารราย 6 เดือน)

ฉบับที่ 1 เดือนมกราคม - มิถุนายน

ฉบับที่ 2 เดือนกรกฎาคม - ธันวาคม

ลิขสิทธิ์ งานบัณฑิตศึกษา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตขอนแก่น
150 หมู่ 6 ถนนศรีจันทร์ ตำบลในเมือง อำเภอเมือง จังหวัดขอนแก่น 40000
อาคาร 50 ปี เทคนิค ไทย-เยอรมัน ขอนแก่น ชั้น 2 (ห้องแผนกงานวิชาการและวิจัย)
โทรศัพท์ 043-283700 กด 83120 โทรสาร 043-338870
E-mail : jeir.eng.rmuti@gmail.com
Website : <https://ph03.tci-thaijo.org/index.php/JEIRKKC>

พิมพ์ที่

โรงพิมพ์ คำคุณดี-ไซน์
123 หมู่ 8 ตำบลน้ำพอง อำเภอน้ำพอง จังหวัดขอนแก่น 40140
เบอร์โทร 081-1472506, 089-7136877

บทบรรณาธิการ

นับเป็นความภาคภูมิใจอย่างยิ่งที่วารสาร วิศวกรรมศาสตร์ และการวิจัยเชิงนวัตกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี วิทยาเขตขอนแก่น ได้ดำเนินการมาจนเข้าสู่ ปีที่ 3 ฉบับที่ 1 อย่างมั่นคง วารสารฉบับนี้มีเป้าหมายสำคัญในการเผยแพร่ผลงานวิจัย บทความวิชาการ และนวัตกรรมด้านวิศวกรรมศาสตร์ ในหลากหลายสาขา ทั้งในระดับประเทศและระดับนานาชาติ เพื่อเป็นเวทีให้คณาจารย์ นักวิจัย นักศึกษา และผู้ประกอบการวิชาชีพด้านวิศวกรรม ได้แลกเปลี่ยนองค์ความรู้ ประสบการณ์ และแนวทางการพัฒนาเทคโนโลยี ที่ตอบโจทย์ต่อการเปลี่ยนแปลงของสังคมในยุคปัจจุบัน

วารสารฉบับนี้ประกอบด้วยบทความที่มีความหลากหลายทางวิชาการ ทั้งในด้านวิศวกรรมศาสตร์ ได้แก่ วิศวกรรมโยธา วิศวกรรมไฟฟ้า และวิศวกรรมอุตสาหการ ด้านวิทยาศาสตร์ ได้แก่ เคมีและสถิติ ซึ่งผ่านกระบวนการพิจารณาอย่างเข้มข้นจากผู้ทรงคุณวุฒิในแต่ละสาขา เพื่อรับประกันคุณภาพและความน่าเชื่อถือทางวิชาการ

ในโอกาสนี้ คณะผู้จัดทำขอขอบคุณทุกท่านที่มีส่วนร่วมในการพัฒนาวารสารฉบับนี้ให้ประสบผลสำเร็จ ไม่ว่าจะเป็นคณะกรรมการกองบรรณาธิการ ผู้ทรงคุณวุฒิภายนอก ผู้เขียนบทความ และผู้อ่านทุกท่าน ความร่วมมืออย่างต่อเนื่องของท่านคือพลังสำคัญที่ช่วยผลักดันให้วารสารของเราก้าวสู่มาตรฐานวิชาการที่สูงขึ้นอย่างยั่งยืน

สุดท้ายนี้ หวังเป็นอย่างยิ่งว่าวารสาร วิศวกรรมศาสตร์ และการวิจัยเชิงนวัตกรรม ฉบับนี้จะเป็นแหล่งข้อมูลที่เป็นประโยชน์ต่อการเรียนรู้การสืบค้น และการต่อยอดองค์ความรู้ทางวิศวกรรมต่อไปในอนาคต

ด้วยความเคารพอย่างสูง
รองศาสตราจารย์ ดร.วิเชียร แสงอรุณ
บรรณาธิการวารสาร



สารบัญ

บทความ

หน้า

ประสิทธิภาพของอัลกอริทึมแมลงหวี่สำหรับการออกแบบคานลิกคอนกรีตเสริมเหล็ก สุชิน ไชยแสงราช และ อัศนัย ทาเภา	1
Removal of Styrene Contaminant in Petroleum Ether 40-60 by Adsorption on Activated Carbon Kawinna Wongyaeng, Rungnapha Phaethaisong, Nicharee Kliniam, Titikan Somboon and Wimonrat Tongpoothorn	14
การสร้างแบบจำลองสนามแม่เหล็กของมอเตอร์แม่เหล็กถาวรแบบฟลักซ์ตามแนวแกน โดยใช้วิธีไฟไนท์อีลิเมนต์แบบ 3 มิติ อารักษ์ บุญมาตย์, ธนัญญา สิมมา และ พงษ์พิสิฐ สายคำ	19
Comparing the Performance of Probabilistic Weighting Classification Techniques for Water Quality Assessment Nipada Papukdee, Preut Thanarat, Kanokporn Rattanasuteerakul, and Chatklaw Jareanpon	29
การศึกษาปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อรอยเชื่อมใบเลื่อยสายพานโคบอลต์ M42 ด้วยกระบวนการเชื่อมเลเซอร์ บัญญัติ พันธุ์ประสิทธิ์เวช, ปฏิพัทธ์ หงษ์สุวรรณ, ธรรมวิทย์ ประเสริฐ, ธนวัตี เอี่ยมสำอางค์ และ ธนัตพร จิตตยานุรักษ์	36

ประสิทธิภาพของอัลกอริทึมแมลงหวี่สำหรับการออกแบบคานลึกลูกคอนกรีตเสริมเหล็ก
The efficiency of fruit fly optimization algorithm for design of
reinforced concrete deep beams

สุชิน ไชยแสงราช และ อัสนัย ทาณา*

สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตขอนแก่น
อำเภอเมือง จังหวัดขอนแก่น 40000

*Corresponding Author: assanai.ta@rmu.ac.th

Received 17 January 2025; Received in revised form 17 March 2025; Accepted 4 April 2025

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้นำเสนอประสิทธิภาพของอัลกอริทึมแมลงหวี่ในการออกแบบคานลึกลูกคอนกรีตเสริมเหล็ก โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อการออกแบบที่มีความประหยัดสูงสุด อัลกอริทึมแมลงหวี่ถูกสร้างขึ้นโดยใช้ Microsoft Visual Studio และทดสอบออกแบบกับตัวอย่างคานลึกจำนวน 3 ตัวอย่าง โดยมีการกำหนดค่าจำนวนแมลงหวี่ไว้ตั้งแต่ 100 ถึง 500 ตัว และจำนวนการทำซ้ำตั้งแต่ 50 ถึง 500 ครั้ง ผลการทดลองพบว่า จำนวนแมลงหวี่และจำนวนการทำซ้ำมีผลกระทบโดยตรงต่อการค้นพบคำตอบที่เหมาะสมของอัลกอริทึมแมลงหวี่ ยิ่งกว่านั้น การเลือกใช้จำนวนแมลงหวี่ตั้งแต่ 400 ตัวและจำนวนการทำซ้ำตั้งแต่ 350 ครั้งขึ้นไปจะส่งผลให้ได้รับราคาเฉลี่ย และค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานที่ดีกว่าค่าอื่น นอกจากนี้ ผลการออกแบบที่เหมาะสมยังมีความประหยัดมากกว่าวิธีการออกแบบอื่นที่นำมาเปรียบเทียบโดยเฉลี่ยร้อยละ 8

คำสำคัญ: อัลกอริทึมแมลงหวี่, การออกแบบที่เหมาะสม, การออกแบบคานลึกลูกคอนกรีตเสริมเหล็ก

Abstract

This research presents the performance of the fruit fly optimization algorithm for designing reinforced concrete deep beams. The objective of this research is to design the most economical deep beams. The fruit fly optimization algorithm was generated using Microsoft Visual Studio and tested using three deep-beam samples. The number of fruit flies was set between 100 and 500 and the number of iterations ranged from 50 to 500. The experimental results showed that the number of fruit flies and the number of iterations directly affected the ability of the algorithm to find optimal solutions. Moreover, selecting at least 400 fruit flies and at least 350 iterations resulted in a better average cost and standard deviation than the other parameters. In addition, the optimal design results were, on average, 8 % more economical than the other design methods used for comparison.

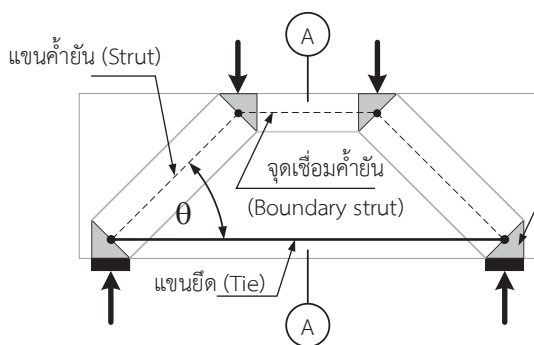
Keywords: Fruit fly optimization algorithm, optimum design, reinforced concrete deep beam.

บทนำ

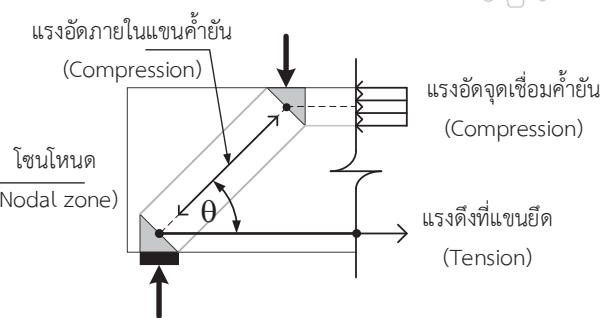
คานลึกลึคคองกริตเสริมเหล็ก (Reinforced concrete deep beam) เป็นองค์ประกอบสำคัญในโครงสร้างที่ต้องรับน้ำหนักบรรทุกทุกสูงในพื้นที่จำกัด เช่น อาคารสูง สะพาน และโครงสร้างพิเศษที่ต้องการความแข็งแรงและความปลอดภัยสูง ในมาตรฐาน ACI318-19 (American Concrete Institute) ปี ค.ศ. 2019 [1] ได้นิยามคานลึกไว้ว่าเป็นโครงสร้างที่แรงกระทำด้านหนึ่งส่งผ่านไปยังจุดรองรับอีกด้านหนึ่งโดยเกิดแรงอัดในรูปแบบของค้ำยัน (Strut) ระหว่างจุดรับแรงและจุดรองรับ คานลึกจะต้องมีคุณสมบัติตรงตามเงื่อนไขต่อไปนี้ 1) ระยะห่างระหว่างจุดรองรับต้องไม่เกิน 4 เท่าของความลึกของคาน 2) จุดที่รับแรงกระทำแบบจุด (Concentrated loads) ต้องอยู่ภายในระยะ 2 เท่าของความลึกคานเมื่อวัดจากจุดรองรับ ในการออกแบบคานลึกต้องพิจารณาการกระจายของความเครียดตามความลึกของคานที่มีลักษณะไม่เป็นเชิงเส้น (Nonlinear strain distribution) ซึ่ง ACI318-19 ได้กำหนดแบบจำลองแกนค้ำยันและแกนยึด (Strut and tie model) เพื่อใช้ในการออกแบบคานลึก รูปที่ 1 แสดงแนวคิดแบบจำลองแกนค้ำยันและแกนยึดของคานลึกคอนกรีตเสริมเหล็ก โดยในรูปที่ 1(ก) แสดงพฤติกรรมของแรงภายในคานลึก ซึ่งมีเส้นอัดรองรับแรงอัดและเส้นดึง (Tie) รองรับแรงดึง ส่วนรูปที่ 1(ข) แสดงการกระจายแรงภายในคาน โดยมีแรงอัด (Compression) ที่ตำแหน่งของค้ำยันและจุดเชื่อมค้ำยัน และแรงดึง (Tension) ที่ตำแหน่งแกนยึด บริเวณแกนค้ำยันต้องออกแบบเพื่อรับแรงเฉือนและบริเวณแกนยึดต้องออกแบบเพื่อรับแรงดึงหรือโมเมนต์ดัด

ในส่วนของพฤติกรรมการรับน้ำหนักของคานลึกคอนกรีตเสริมเหล็ก Adhikary และคณะ [2] ได้ศึกษาพฤติกรรมการรับแรงเฉือนของคานลึกคอนกรีตเสริมเหล็กภายใต้แรงกระทำแบบไดนามิก (Dynamic loading conditions) พบว่า ความต้านทานแรงเฉือนสูงสุดเพิ่มขึ้นตามอัตราส่วนการเสริมเหล็กรับแรงเฉือน

ที่เพิ่มขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งการเสริมเหล็กรับแรงเฉือนในปริมาณสูงสามารถป้องกันการวิบัติแบบร่นแรงได้ นอกจากนี้ ยังมีการสร้างสมการสำหรับทำนายอัตราส่วนของแรงที่กระทำต่อความต้านทานแรงเฉือนสูงสุดของคาน ซึ่งสมการเหล่านี้สามารถใช้ในการประมาณกำลังรับแรงเฉือนได้อย่างแม่นยำ Kareim และคณะ [3] ได้ศึกษาพฤติกรรมและความแข็งแรงของคานลึกที่มีช่องเปิดในส่วนตัดขวาง โดยเฉพาะคานที่มีส่วนตัดขวางแบบมีปีก (flanged section) ผลการศึกษาชี้ให้เห็นว่าปีกของคานมีผลต่อความแข็งแรง ซึ่งต้องพิจารณาในการออกแบบทุกครั้ง และพบว่าทฤษฎีสถานะแรงอัดดัดแปลง (Modified compression field theory, MCFT) ให้ผลการทำนายที่ใกล้เคียงกับผลการทดลองมากที่สุด Nassif และคณะ [4] ได้ศึกษาทั้งการทดลองและการจำลองเชิงตัวเลขเกี่ยวกับพฤติกรรมการดัดของคานลึกคอนกรีตที่เสริมด้วยแท่งโพลีเมอร์เสริมแรงด้วยเส้นใยแก้ว (Glass fiber reinforced polymers, GFRP) โดยใช้คอนกรีตความแข็งแรงสูง (High strength concrete, HSC) ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าความกว้างของรอยแตกและการโก่งตัวที่กลางคานลดลงอย่างมีนัยสำคัญเมื่อใช้อัตราส่วนการเสริมแรง GFRP ที่ 1.2 μ b เมื่อเทียบกับคานที่เสริมด้วยเหล็กเสริมปกติ สามารถช่วยลดการโก่งตัวของคานลงถึงร้อยละ 20 - 39 และจากงานวิจัยของ Ibrahim และคณะ [5] ได้นำเสนอสูตรสำหรับการคำนวณความสามารถในการรับแรงเฉือนของคานลึก จากผลการศึกษาแสดงให้เห็นประสิทธิภาพของ NLFE (Non-linear finite element analysis) ว่ามีความใกล้เคียงกับความสามารถในการรับน้ำหนักของคานที่ทดสอบและได้รับการวิเคราะห์เปรียบเทียบกับโปรแกรม ABAQUS ซึ่งผลการเปรียบเทียบแสดงให้เห็นความแม่นยำของแบบจำลองการวิเคราะห์ในการแสดงพฤติกรรมของคานลึกทั้งแบบทึบและแบบมีช่องเปิด รวมไปถึงการทำนายน้ำหนักที่ทำให้เกิดการแตกร้าวและรูปแบบของรอยแตกร้าว



(ก) แบบจำลองแขนค้ำยันและแขนยึด



(ข) แผนผังอิสระบริเวณ A - A (Free body diagram)

รูปที่ 1 แบบจำลองแขนค้ำยันและแขนยึดในคานลิก

การประเมินความถูกต้องของผลการออกแบบและกำลังรับน้ำหนักของคานลิกคอนกรีตเสริมเหล็กโดยทั่วไปนิยมใช้มาตรฐาน ACI 318-19 [1] ซึ่งเป็นมาตรฐานที่ได้รับการยอมรับอย่างกว้างขวางในระดับสากล โดยมาตรฐานนี้ได้กำหนดแนวทางในการออกแบบและก่อสร้างโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กเพื่อให้มั่นใจในความปลอดภัย ความทนทาน และประสิทธิภาพของโครงสร้าง ถึงแม้ว่ามาตรฐาน ACI 318 จะได้รับความนิยมเป็นอย่างมาก แต่การนำไปปรับใช้ในบางพื้นที่อาจมีข้อจำกัด เนื่องจากปัจจัยด้านสภาพภูมิประเทศ ภูมิอากาศ และข้อกำหนดเฉพาะของหน่วยงานกำกับดูแลในแต่ละท้องถิ่น ทำให้ในการออกแบบภายในประเทศไทยยังคงมีความจำเป็นต้องใช้มาตรฐานของวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย (ว.ส.ท.) [6] ซึ่งมาตรฐานของ ว.ส.ท. ได้ถูกปรับปรุงให้เหมาะสมกับสภาพแวดล้อมของประเทศไทย ไม่ว่าจะเป็นเรื่องของอุณหภูมิ ความชื้น ฝนตกหนัก หรือสภาวะการเกิดแผ่นดินไหว รวมถึงปัจจัยอื่น ๆ ที่อาจส่งผลต่อพฤติกรรมของโครงสร้าง การใช้มาตรฐานที่สอดคล้องกับบริบทของประเทศจะช่วยให้โครงสร้างมีความปลอดภัยมากขึ้น อีกทั้งยังสามารถปฏิบัติตามข้อกำหนดทางกฎหมายและกฎระเบียบของหน่วยงานที่เกี่ยวข้อง

คานธรรมดา มักมีพฤติกรรมการรับแรงที่แรงภายในเกิดการกระจายตัวเป็นเชิงเส้นและมีโมเมนต์ดัด (Bending moment) เป็นปัจจัยหลักในการออกแบบ [7] ในทางตรงกันข้าม คานลิกมีการ

กระจายแรงภายในที่ไม่เป็นเชิงเส้น โดยแรงเฉือน (Shear force) มีอิทธิพลต่อคานมากกว่าโมเมนต์ดัด และมักเกิดการถ่ายแรงแบบคาน-เสา (Strut-and-tie model) ภายในโครงสร้าง [8] นอกจากนี้ คานลิกยังมีแนวโน้มที่จะเกิดความเค้นรวมตัว (Stress concentration) และการแตกร้าว (Cracking) ในบริเวณที่รับแรงเฉือนสูง ซึ่งเป็นพฤติกรรมที่คานธรรมดาพบไม่บ่อยนัก ด้วยความซับซ้อนดังกล่าว การออกแบบคานลิกจึงต้องอาศัยวิธีการวิเคราะห์ที่ละเอียดและแม่นยำมากกว่าคานธรรมดา วิธีการออกแบบแบบในทางปฏิบัตินิยมใช้ประสบการณ์หรือการประมาณเชิงตัวเลขอาจไม่เพียงพอ และมีโอกาสเกิดความผิดพลาดได้เมื่อต้องทำซ้ำหลายครั้ง [9] ดังนั้น การนำเทคโนโลยีปัญญาประดิษฐ์ (Artificial intelligence, AI) มาใช้ในการออกแบบคานลิกจึงเป็นทางเลือกที่น่าสนใจ เทคโนโลยี AI เช่น การเรียนรู้ของเครื่องจักร (Machine learning) และวิธีการแก้ปัญหาที่เหมาะสม (Optimization algorithms) มีศักยภาพในการวิเคราะห์และออกแบบโครงสร้างที่ซับซ้อนได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยสามารถลดข้อผิดพลาดและเพิ่มความแม่นยำในการคำนวณ [10]

อัลกอริทึมแมลงหวี่ (Fruit fly optimization algorithm, FOA) เป็นวิธีแก้ปัญหที่เหมาะสมที่จำลองพฤติกรรมการหาอาหารของแมลงหวี่ โดยอาศัยประสาทสัมผัสกลิ่นและการมองเห็นในการระบุตำแหน่งแหล่งอาหารที่ดีที่สุด [11] เริ่มต้นจากการ

ส่วนตำแหน่งเริ่มต้นของกลุ่มแมลงหวี่ในพื้นที่ค้นหา จากนั้นคำนวณค่าฟังก์ชันเป้าหมาย (Objective Function) เพื่อเปรียบเทียบคุณภาพของตำแหน่งที่แมลงหวี่แต่ละตัวค้นพบ จากข้อมูลดังกล่าว แมลงหวี่จะปรับตำแหน่งเข้าใกล้จุดที่มีค่าที่ดีที่สุด โดยมีหลายงานวิจัยที่นำ FOA ไปประยุกต์ใช้ เช่น การออกแบบเส้นทางการขนส่ง (Logistics) [12] การจูนพารามิเตอร์ของระบบควบคุม (PID controller tuning) [13] การเลือกคุณลักษณะสำหรับการเรียนรู้ของเครื่องจักร [14] และการปรับปรุงประสิทธิภาพระบบวิศวกรรมที่ซับซ้อน [15] เป็นต้น ด้วยความเรียบง่ายและประสิทธิภาพที่ดี FOA จึงเป็นเครื่องมือที่เหมาะสมสำหรับการแก้ปัญหาใดๆ ทั้งแบบมีเงื่อนไขและไม่มีเงื่อนไข [16]

จากปัญหาที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบคานลิกคอนกรีตเสริมเหล็กและประสิทธิภาพของ FOA ที่กล่าวถึงข้างต้น งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ในการนำเสนอประสิทธิภาพของ FOA ในการออกแบบคานลิกคอนกรีตเสริมเหล็กให้มีความประหยัดที่สุด โดยการปรับค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญ เช่น ขนาดประชากรของแมลงหวี่และจำนวนการทำซ้ำ เพื่อค้นหาค่าที่ทำให้ FOA มีประสิทธิภาพสูงสุดในกระบวนการออกแบบ ทั้งนี้ การออกแบบจะพิจารณาปัจจัยด้านราคาค่าก่อสร้างและความสามารถในการรับน้ำหนักของโครงสร้าง โดยอ้างอิงตามมาตรฐานการออกแบบของวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย (ว.ส.ท. 1008-38) ในรูปแบบการออกแบบตามวิธีกำลัง [6] ผลการทดลองเชิงสถิติจะถูกนำมาใช้เพื่อแสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพของ FOA อย่างชัดเจน

ข้อกำหนดการออกแบบคานลิก

คานลิกคอนกรีตเสริมเหล็กตามมาตรฐานการออกแบบของ ว.ส.ท.1008-38 วิธีกำลัง [6] ได้กำหนดสมการสำหรับคำนวณและตรวจสอบสำหรับการออกแบบคานลิกไว้ดังนี้

กำลังรับโมเมนต์ดัดที่คำนวณออกแบบ ($\phi_m M_n$, กก.-ม.) ของหน้าตัดคานคำนวณได้จากสมการที่ (1)

ต้องมีค่ามากกว่าโมเมนต์ดัดประลัยที่กระทำ (M_u , กก.-ม.)

$$\phi_m M_n = \phi_m A_s f_y \left(d - \frac{a}{2} \right) > M_u \quad (1)$$

เมื่อ ϕ_m คือ ค่าแฟคเตอร์ลดกำลังรับโมเมนต์ดัดกรณีของคานลิกซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.85 โดยที่ M_n คือ ค่าโมเมนต์ดัดของหน้าตัดคานที่ยังไม่สูญเสียกำลัง (กก.-ม.) A_s คือ เนื้อที่หน้าตัดเหล็กเสริมรับแรงดึง (ชม.²) f_y คือ กำลังรับแรงดึงที่จุดครากของเหล็กเสริม (กก./ชม.²) d คือ ค่าความลึกประสิทธิภาพผลของหน้าตัดคาน (ชม.) โดยวัดจากขอบบนสุดของหน้าตัดคานถึงระยะกึ่งกลางเฉลี่ยของเหล็กเสริมรับแรงดึงทุกชั้น และ a คือ ค่าหน่วยแรงรูปกล่องสี่เหลี่ยมเทียบเท่าในหน้าตัดคาน (ชม.) ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (2) โดยเป็นสัดส่วนระหว่างกำลังรับแรงดึงที่จุดครากของเหล็กเสริมและกำลังรับแรงอัดของคอนกรีต (f'_c , กก./ชม.²)

$$a = \frac{A_s f_y}{0.85 f'_c b} \quad (2)$$

อัตราส่วนปริมาณเหล็กเสริมด้านทานโมเมนต์ดัดในหน้าตัดคาน (ρ) จะมีปริมาณที่คำนวณได้ตามสมการที่ (3) โดยจะต้องมีปริมาณมากกว่าอัตราส่วนขั้นต่ำ (ρ_{min}) ตามสมการที่ (4) และต้องมีค่าไม่เกินอัตราส่วนสูงสุดที่ยอมให้ (ρ_{max}) ตามสมการที่ (5)

$$\rho = \frac{A_s}{bd} \quad (3)$$

$$\rho_{min} = \frac{14}{f_y} \quad (4)$$

$$\rho_{max} = 0.75 \left(\frac{0.85 f'_c \beta_1}{f_y} \right) \left(\frac{6120}{6120 + f_y} \right) \quad (5)$$

เมื่อ b คือ ด้านแคบของหน้าตัดคาน (ชม.) โดยที่ β_1 มีค่าเท่ากับ 0.85 เมื่อ f'_c น้อยกว่าหรือเท่ากับ 280

กก./ชม.² หาก f'_c มากกว่า 280 กก./ชม.² สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (6)

$$\beta_1 = 0.85 - 0.05 \left(\frac{f'_c - 280}{70} \right) \quad (6)$$

สำหรับกรณีของคานาลึกจะมีแนวอัดในลักษณะค้ำยันระหว่างน้ำหนักรับบรรทุก และที่รองรับจึงต้องพิจารณากำลังรับแรงเฉือนตลอดความลึกของหน้าตัด กำลังรับแรงเฉือนสูงสุดในหน้าตัดคาน (ϕV_n , กก.) คำนวณได้จากสมการที่ (7) โดยพิจารณากำลังรับแรงเฉือนที่คำนวณออกแบบของคอนกรีตร่วมกับเหล็กเสริมจะต้องมีค่ามากกว่าแรงเฉือนประลัยที่กระทำ (V_u , กก.)

$$\phi V_n = \phi V_c + \phi V_s > V_u \quad (7)$$

เมื่อ ϕ คือ แฟคเตอร์ลดกำลังรับแรงเฉือนของคานมีค่าเท่ากับ 0.85 สำหรับ V_c คือ กำลังรับแรงเฉือนของคอนกรีต (กก.) ซึ่งคำนวณได้จากสมการที่ (8) และ V_s คือ กำลังรับแรงเฉือนของเหล็กเสริม (กก.) ซึ่งคำนวณได้จากสมการที่ (9)

$$\phi V_c = \phi_v \left(3.5 - 2.5 \frac{M_u}{V_u d} \right) \left(0.5 \sqrt{f'_c} + 176 \rho \frac{V_u d}{M_u} \right) b d \quad (8)$$

$$\phi V_s = \phi_v \left(\frac{A_v}{s_v} \cdot \frac{1 + (L_n / d)}{12} + \frac{A_{vh}}{s_{vh}} \cdot \frac{11 - (L_n / d)}{12} \right) f_y d \quad (9)$$

เมื่อ A_v คือ พื้นที่หน้าตัดของเหล็กเสริมรับแรงเฉือนแนวตั้ง (ชม.²) s_v คือ ระยะเรียงของเหล็กเสริมแนวตั้ง (ชม.) A_{vh} คือ พื้นที่หน้าตัดเหล็กเสริมรับแรงเฉือนแนวนอน (ชม.²) s_{vh} คือ ระยะเรียงของเหล็กเสริมรับแรงเฉือนในแนวนอน (ชม.) และ L_n คือ ความยาวของคาน (ม.)

ค่า ϕV_c ที่คำนวณได้ต้องมีค่าไม่เกินค่ากำลังรับแรงเฉือนของคอนกรีตที่ยอมให้ ($V_{c,allow}$, กก./ชม.²) ซึ่งมีค่าไม่เกินสมการที่ (10)

$$V_{c,allow} = \phi_v 1.6 \sqrt{f'_c} b d > \phi V_c \quad (10)$$

ข้อกำหนดระยะเรียงของเหล็กเสริมรับแรงเฉือน s_v และ s_{vh} ถูกกำหนดให้เป็นไปตามสมการที่ (11) และ (12) หรือ มีระยะเรียงไม่เกิน 45 ซม. สำหรับการตรวจสอบพื้นที่หน้าตัดของเหล็กเสริมขั้นต่ำสำหรับรับแรงเฉือนในแนวตั้งต้องมีค่ามากกว่า $0.0015 b s_v$ และพื้นที่หน้าตัดเหล็กเสริมรับแรงเฉือนในแนวนอนขั้นต่ำต้องมีค่ามากกว่า $0.0025 b s_{vh}$

$$s_v \leq \frac{d}{5} \leq 45 \text{ ซม.} \quad (11)$$

$$s_{vh} \leq \frac{d}{3} \leq 45 \text{ ซม.} \quad (12)$$

วิธีค้นหาแบบแมลงหวี่

FOA ถูกคิดค้นโดย Pan ในปี 2011 [17] เป็นวิธีที่ใช้สำหรับการค้นหาคำตอบที่เหมาะสมวิธีการหนึ่งที่ได้รับแรงบันดาลใจจากพฤติกรรมกรหาอาหารของแมลงหวี่ (Fruit fly) ที่มีความสามารถในการดมกลิ่นและการมองเห็นเพื่อค้นหาอาหารอย่างมีประสิทธิภาพ โดยที่ FOA มีกระบวนการหาคำตอบตามรายละเอียดในหัวข้อย่อยดังต่อไปนี้

1. การเริ่มต้น

ในการเริ่มต้นกระบวนการต้องกำหนดพารามิเตอร์เริ่มต้นที่จำเป็นก่อนการใช้งาน ได้แก่ จำนวนแมลงหวี่ (Fruit fly population) และจำนวนการทำซ้ำ (Iterations) ซึ่งทั้ง 2 พารามิเตอร์นี้เป็นตัวควบคุมจำนวนครั้งในการปรับปรุงตำแหน่งและพื้นที่ค้นหา (Search space) ซึ่งเป็นขอบเขตที่แมลงหวี่จะสำรวจเพื่อหาคำตอบที่เหมาะสมที่สุด [18] จากนั้น สุ่มกำหนดตำแหน่งเริ่มต้นของแมลงหวี่ในพื้นที่ค้นหาตามสมการที่ (13) โดยตำแหน่งเหล่านี้จะถูกนำไปใช้เป็นจุดเริ่มต้นในการประเมินค่าสมการเป้าหมายและค้นหาตำแหน่งที่ดีกว่าในขั้นตอนถัดไป

$$x'_0 = Lower + Random(-1,1) \times Upper \quad (13)$$

เมื่อ x'_0 คือ ตำแหน่งเริ่มต้นของแมลงหวี่ $Lower$ คือ ค่าต่ำสุดของตัวแปรออกแบบ $Upper$ คือ ค่าสูงสุดของตัวแปรออกแบบ และ $Random(-1,1)$ คือ ค่าสุ่มใดๆ ที่มีค่าอยู่ระหว่าง 0 ถึง 1

2. การบินแบบสุ่ม

เป็นกระบวนการที่แมลงหิวเคลื่อนที่ไปยังตำแหน่งใหม่แบบสุ่มรอบจุดปัจจุบันในพื้นที่การค้นหาโดยใช้ระยะการเคลื่อนที่ที่ถูกกำหนดไว้ล่วงหน้า มีลักษณะตามสมการที่ (14)

$$x_i^{t+1} = x_i^t + \text{Random}(-\text{Range}, \text{Range}) \quad (14)$$

เมื่อ x_i^{t+1} คือ ตำแหน่งใหม่ของแมลงหิว x_i^t คือ ตำแหน่งเดิมของแมลงหิว และ $\text{Random}(-\text{Range}, \text{Range})$ คือ ค่าสุ่มใดๆ ที่มีค่าอยู่ในช่วงที่กำหนด โดยค่า Range ที่เหมาะสมต่อการใช้งานจะอยู่ในช่วงระหว่าง -5 ถึง 5 ตามคำแนะนำของ Xiao และคณะ [19]

3. การคำนวณระยะทางจากจุดศูนย์กลาง

การคำนวณระยะทางจากจุดศูนย์กลางใน FOA เป็นกระบวนการสำคัญที่ใช้ในการวัดว่าตำแหน่งใหม่ของแมลงหิวอยู่ห่างจากจุดเดิมเป็นเท่าใด (D_i) โดยระยะทางนี้จะถูกใช้เป็นตัวแปรสำคัญในการคำนวณค่าความเหมาะสมของตำแหน่งนั้น ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (15)

$$D_i = |x_i^{t+1} - x_i^t| \quad (15)$$

4. การประเมินกลิ่น

การประเมินกลิ่นใน FOA เป็นขั้นตอนที่ใช้ค่าความเหมาะสม (Smell_i) ของตำแหน่งที่แมลงหิวค้นพบอยู่ กระบวนการนี้เลียนแบบการดมกลิ่นของแมลงหิวเพื่อหาตำแหน่งที่มีแหล่งอาหารดีที่สุด สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (16)

$$\text{Smell}_i = \frac{1}{D_i} \quad (16)$$

5. การปรับปรุงตำแหน่ง

ในการปรับปรุงตำแหน่งของแมลงหิวในรอบถัดไป ถ้าหากตำแหน่งใหม่ที่แมลงหิวแต่ละตัวค้นพบมีค่าความเหมาะสมที่ดีกว่าตำแหน่งเดิม แมลงหิวจะบินไปยังจุดนั้นทันที แต่ถ้าไม่ใช่ แมลงหิวก็จะยังคงบินอยู่ที่เดิม

6. การทำซ้ำ

กระบวนการดังกล่าวจะทำซ้ำตั้งแต่ขั้นตอนที่ 2 ถึง 5 จนกว่าจะถึงเงื่อนไขที่กำหนดไว้ เช่น จำนวนรอบการทำซ้ำครบตามที่กำหนด หรือ เงื่อนไขอื่นที่เหมาะสมกับปัญหานั้น เพื่อให้ได้ผลลัพธ์ที่เหมาะสมที่สุดตามข้อกำหนดของแต่ละปัญหา

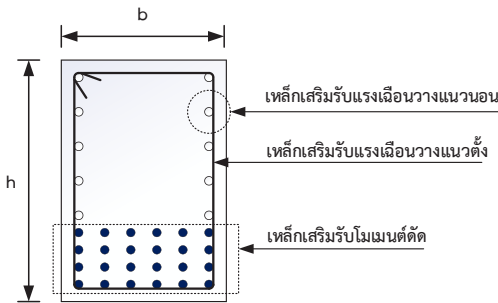
ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

1. ขอบเขตการออกแบบ

งานวิจัยนี้สร้างโปรแกรมออกแบบที่เหมาะสมโดยใช้ Microsoft visual studio 2022 คอมพิวเตอร์ Intel core i5-8350U CPU@1.70 GHz หน่วยความจำ Ram 32 GB ระบบปฏิบัติการ 64-bit และมีขอบเขตการออกแบบดังนี้ f'_c ที่เลือกได้เท่ากับ 140 180 210 240 280 300 320 350 400 420 และ 450 กก./ชม.² f_y ที่เลือกได้เท่ากับ 4,000 และ 5,000 กก./ชม.² เหล็กเสริมคอนกรีตทั้งในส่วนของการรับโมเมนต์ดัดและแรงเฉือนเลือกใช้เหล็กข้ออ้อย (Deformed bar, DB) ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 10 12 16 20 25 28 32 36 และ 40 มม. โดยที่จำนวนเหล็กเสริมรับโมเมนต์ดัดมีตั้งแต่ 2 เส้น ไปจนถึง 40 เส้น โดยปรับเพิ่มครั้งละ 1 เส้น ส่วนของเหล็กเสริมรับแรงเฉือนมีระยะเรียงตั้งแต่ 10 ซม. ไปจนถึง 50 ซม. โดยปรับเพิ่มครั้งละ 2.5 ซม.

การออกแบบคานลิกโดยออกแบบหน้าตัดของคานให้สามารถรองรับโมเมนต์ดัดและแรงเฉือนที่เกิดจากแรงภายนอก สำหรับการเสริมเหล็กหลักรับแรงดัดจะเสริมเหล็กที่ส่วนล่างของคาน (Singly reinforced deep beam) เพื่อรองรับพฤติกรรม การรับโมเมนต์ดัดบวมที่เกิดขึ้นในคานลิกที่มีการรองรับแบบง่าย และมีการเสริมเหล็กรับแรงเฉือน 2 ตำแหน่ง โดยมีรายละเอียดดังรูปที่ 2 โดยคานมีขนาดความกว้างเป็นค่า b และขนาดความลึกเป็นค่า h แบ่งการเสริมเหล็กออกเป็น 3 ส่วนได้แก่ ส่วนที่ 1 การเสริมเหล็กในแนวนอนสำหรับรับโมเมนต์ดัด โดยแบ่งออกเป็น 4 ชั้น ชั้นละไม่เกิน 10 เส้น ส่วนที่ 2 การเสริมเหล็กรับแรงเฉือนในแนวตั้ง (เหล็กถูกดัด) และส่วนที่ 3 การเสริมเหล็กรับแรงเฉือนในแนวนอน

ที่ถูกเรียงถัดจากเหล็กเสริมรับโมเมนต์ดัดขึ้นไปจนถึงขอบบนสุดของคาน



รูปที่ 2 รายละเอียดการเสริมเหล็กในคาน

2. สมการเป้าหมาย

วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้คือการออกแบบคานลิกคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีความประหยัด ดังนั้นสมการเป้าหมายจึงถูกกำหนดเป็นสมการของราคารวมค่าก่อสร้างรวม ที่ส่งผลให้ผลการออกแบบคานลิกคอนกรีตเสริมเหล็กมีความประหยัดมากที่สุด งานวิจัยนี้จึงกำหนดให้สมการที่ (17) เป็นสมการเป้าหมาย

$$f_{cost} = \text{Minimize} \sum (V_c C_c + V_s C_s + V_f C_f) L_n \quad (17)$$

เมื่อ f_{cost} คือ ราคารวมค่าก่อสร้างรวมของคานลิกคอนกรีตเสริมเหล็ก (บาท) L_n คือ ความยาวของคาน (ม.) V_c V_s และ V_f คือ ปริมาณของคอนกรีต (ม.³) เหล็กเสริม (กก.) และแบบหล่อ (ม.²) ตามลำดับ ในขณะที่ C_c C_s และ C_f คือ ราคาของคอนกรีต (บาท/ม.³) เหล็กเสริม (บาท/กก.) และแบบหล่อ (บาท/ม.²) ตามลำดับ

ราคาวัสดุที่ใช้คำนวณราคานำมาจากบัญชีราคาค่าวัสดุก่อสร้างและค่าแรงงานประจำปี 2567 ของกลุ่มออกแบบและก่อสร้าง สำนักอำนวยการ [20] โดยมีรายละเอียดราคาคอนกรีตผสมเสร็จที่รวมค่าแรงแล้วอยู่ในรูปแบบของสมการเชิงเส้นดังสมการที่ (18) โดยที่ราคาของเหล็กเสริมคอนกรีตระดับชั้น SD40 และ SD50 คิดเป็นราคาเฉลี่ยที่รวมค่าแรง

แล้วมีราคาเท่ากับ 29 และ 30 บาท/กก. และราคาของแบบหล่อที่รวมค่าแรงแล้วเท่ากับ 621 บาท/ม.²

$$C_c = 0.0062(f'_c)^2 - 1.4982(f'_c) + 3020 \quad (18)$$

3. ขั้นตอนการออกแบบที่เหมาะสม

ขั้นตอนการออกแบบที่เหมาะสมโดย FOA แบ่งออกเป็น 5 ขั้นตอนหลักดังแสดงในรูปที่ 3 โดยแต่ละขั้นตอนมีรายละเอียดดังนี้

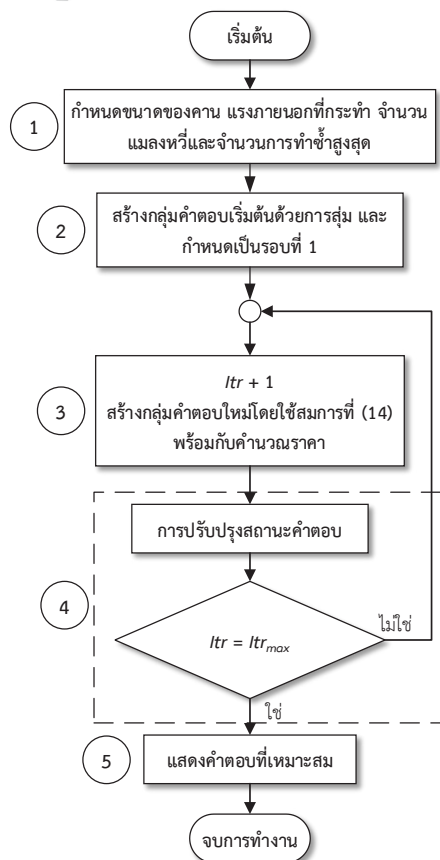
ขั้นตอนที่ 1 เริ่มต้นจากการกำหนดขนาดของคานก่อนการออกแบบได้แก่ b h และความยาวคาน (L_n) ต่อมำกำหนดน้ำหนักประลัยที่กระทำต่อคานได้แก่ M_u และ V_u จากนั้น กำหนดพารามิเตอร์พื้นฐานของ FOA ได้แก่ จำนวนแมลงหวี่สูงสุด (PN_{max}) และจำนวนการทำซ้ำสูงสุด (itr_{max}) ตามลำดับ

ขั้นตอนที่ 2 เริ่มทำงานในการทำซ้ำ (itr) ครั้งที่ 1 เริ่มต้นสุ่มออกแบบตามขอบเขตของการออกแบบที่ได้กำหนดไว้โดยใช้สมการที่ (13) เพื่อสร้างกลุ่มคำตอบเริ่มต้น จากนั้น คำนวณกำลังรับน้ำหนักและราคาทุกคำตอบ ซึ่งในขั้นตอนนี้จะทำจนกว่าทุกคำตอบผ่านมาตรฐานการออกแบบ แล้วจึงทำต่อขั้นตอนที่ 3

ขั้นตอนที่ 3 คือ การสุ่มสร้างคำตอบใหม่โดยอาศัยพื้นฐานของคำตอบเดิมที่ผ่านมาและปรับแต่งคำตอบตามสมการที่ (14) จากนั้น จึงคำนวณราคาและกำลังรับน้ำหนัก แล้วจึงทำต่อขั้นตอนที่ 4

ขั้นตอนที่ 4 พิจารณาคำตอบใหม่ทุกคำตอบ ถ้าหาก ผลการออกแบบของคำตอบใหม่มีความประหยัดกว่า มีความปลอดภัยและเป็นไปตามมาตรฐานการออกแบบ ให้แทนที่คำตอบเดิมด้วยคำตอบใหม่ จากนั้น ตรวจสอบจำนวนการทำซ้ำ ถ้าหาก itr เท่ากับ itr_{max} ให้ทำต่อขั้นตอนที่ 5 แต่ถ้าไม่ใช่ ให้กลับไปทำต่อขั้นตอนที่ 3

ขั้นตอนที่ 5 แสดงผลการออกแบบที่มีความประหยัดที่สุดในกลุ่ม แล้วแสดงรายละเอียดของผลการออกแบบที่เหมาะสม



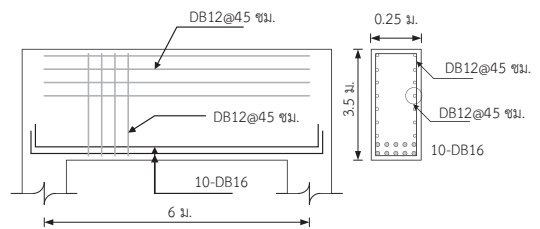
รูปที่ 3 ขั้นตอนการออกแบบที่เหมาะสม

4. ตัวอย่างทดสอบ

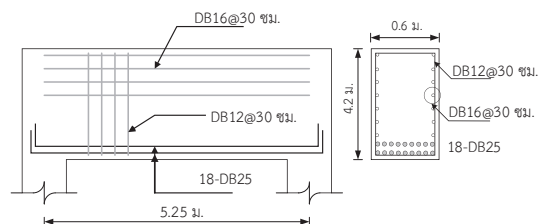
งานวิจัยนี้ได้นำตัวอย่างออกแบบมาจาก Kong [21] จำนวน 3 ตัวอย่าง ซึ่งมีรายละเอียดสำหรับออกแบบดังตารางที่ 1 ประกอบด้วย แรงภายนอกที่กระทำและขนาดคานเบื้องต้นสำหรับออกแบบคาน ลึกประกอบด้วย ความยาว ความกว้างและความลึกของคาน โมเมนต์ดัดประลัยและแรงเฉือนประลัยที่แตกต่างกัน โดยในรูปที่ 4 คือรายละเอียดของผลการออกแบบเดิมที่ Kong [21] ได้ทำการออกแบบไว้แล้ว

ตารางที่ 1 ตัวอย่างทดสอบ

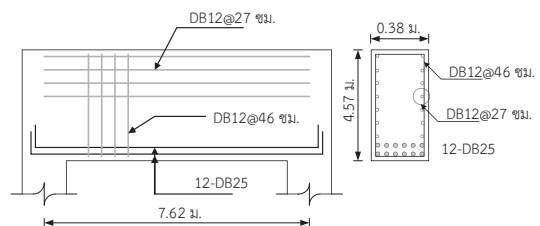
ตัวอย่างที่	1	2	3
L_n (ม.)	6.00	5.25	7.62
b (ซม.)	25	60	38
h (ซม.)	350	420	457
M_u (กก.-ม.)	251,831	838,200	582,369
V_u (กก.)	66,600	638,662	419,573



(ก) ตัวอย่างที่ 1



(ข) ตัวอย่างที่ 2



(ค) ตัวอย่างที่ 3

รูปที่ 4 รายละเอียดการออกแบบจาก Kong [21]

5. การศึกษาประสิทธิภาพของ FOA

การทดสอบเพื่อประเมินประสิทธิภาพของ FOA ได้ทำการกำหนดจำนวน PN_{max} ในช่วง 100 ถึง 500 ตัว และ $litr_{max}$ ระหว่าง 50 ถึง 500 ครั้ง ซึ่งช่วงของค่าพารามิเตอร์ดังกล่าวให้ผลการทดลองเบื้องต้นที่ดี โดยเป้าหมายการทดสอบนี้คือ เพื่อศึกษาผลกระทบของค่าพารามิเตอร์จะส่งผลให้ FOA มีประสิทธิภาพเพียงใดในการออกแบบคานลึกลดคอนกรีตเสริมเหล็ก ซึ่งงานวิจัยของ Hazim และคณะ [22] ได้ชี้ให้เห็นว่าการปรับแต่งค่าพารามิเตอร์เหล่านี้อย่างเหมาะสมจะช่วยให้เพิ่มความสามารถของ FOA ในการแก้ปัญหาได้อย่างชัดเจน และสามารถนำไปปรับใช้ในงานด้านต่าง ๆ ได้อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น โดยการทดสอบนี้ ทุกค่าพารามิเตอร์จะถูกนำไปใช้กับตัวอย่างทดสอบทั้งหมด โดยให้ FOA ออกแบบในแต่ละค่าพารามิเตอร์จำนวน 50 ครั้ง เพื่อประเมินผล

ด้วยการวิเคราะห์เชิงสถิติ และสุดท้ายคือการเปรียบเทียบผลการออกแบบที่เหมาะสมกับงานวิจัยที่ผ่านมา

ผลการทดสอบและการอภิปรายผล

1. ผลการทดสอบทางสถิติ

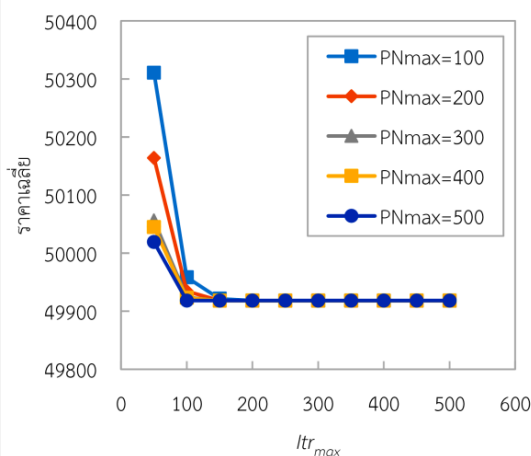
ผลการวิเคราะห์ทางสถิติของตัวอย่างที่ 1 แสดงในรูปที่ 5 ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนการทำซ้ำกับราคาเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของ PN_{max} ตั้งแต่ 100 ถึง 500 โดยในกราฟราคาเฉลี่ยรูปที่ 5(ก) พบว่า ค่าเฉลี่ยลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อ Itr_{max} มีค่าเท่ากับ 100 และเริ่มคงที่เมื่อจำนวนการทำซ้ำเพิ่มขึ้น โดยทุกค่า PN_{max} มีแนวโน้มคล้ายกันและบรรจบกันเมื่อ Itr_{max} เท่ากับ 150 ในส่วนของค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานที่แสดงในรูปที่ 5(ข) พบว่า ส่วนเบี่ยงเบนลดลงอย่างมากในช่วงต้นเช่นเดียวกับราคาเฉลี่ย และลดลงจนเป็นศูนย์ในทุกค่าของ PN_{max} เมื่อกำหนด Itr_{max} เท่ากับ 200 ซึ่งแสดงถึงความแปรปรวนของข้อมูลที่ลดลงและความเสถียรของกระบวนการออกแบบเมื่อมีการทำซ้ำมากขึ้น ซึ่งเป็นที่แน่ชัดแล้วว่า การเลือก Itr_{max} เท่ากับ 200 ส่งผลให้ FOA มีประสิทธิภาพสูงสุดในตัวอย่างนี้

จากรูปที่ 6 คือ ผลการวิเคราะห์ทางสถิติของตัวอย่างที่ 2 พบว่า ราคาเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานมีแนวโน้มเช่นเดียวกับตัวอย่างที่ผ่านมา แต่ความผันผวนของ PN_{max} ตั้งแต่ 100 ถึง 300 มีความผันผวนมากที่สุด แต่เมื่อ Itr_{max} เท่ากับ 300 พบว่า ค่า PN_{max} เท่ากับ 400 และ 500 ให้ผลลัพธ์ที่มีความเสถียรมากที่สุดเนื่องจากมีอัตราการบรรจบกันโดยไม่มีความแปรปรวนในทุกค่าของ Itr_{max} ทั้งในส่วนของราคาเฉลี่ยและค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน ดังนั้น ค่าพารามิเตอร์ที่ทำให้ FOA มีประสิทธิภาพสูงสุดในตัวอย่างนี้คือ การเลือกใช้ PN_{max} เท่ากับ 400 และ Itr_{max} เท่ากับ 300

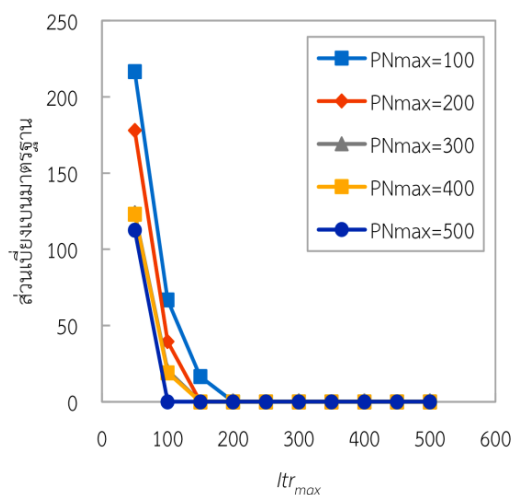
ผลการทดสอบทางสถิติของตัวอย่างที่ 3 แสดงในรูปที่ 7 ซึ่งพบว่า เมื่อ PN_{max} เท่ากับ 200 ถึง 500 มีราคาเฉลี่ยบรรจบกันเมื่อ Itr_{max} เท่ากับ 300 ตามรูปที่ 7(ก) และบรรจบกันทั้งหมดเมื่อ Itr_{max} เท่ากับ 450 โดยมีแนวโน้มลักษณะการลู่เข้าเช่นเดียวกับ

ตัวอย่างที่ผ่านมา ในขณะที่ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานในรูปที่ 7(ข) มีความแปรปรวนเฉพาะเส้นของ PN_{max} เท่ากับ 200 เมื่อกำหนด Itr_{max} เท่ากับ 400 ขณะที่เส้นอื่นมีการลดลงอย่างคงที่ ดังนั้น ในตัวอย่างนี้ FOA จะมีประสิทธิภาพสูงสุดเมื่อกำหนด PN_{max} ตั้งแต่ 300 เป็นต้นไป และ Itr_{max} เท่ากับ 350 เนื่องจาก เมื่อกำหนด Itr_{max} เท่ากับ 350 มีการบรรจบกันของ PN_{max} เท่ากับ 300 ถึง 500 อย่างชัดเจน

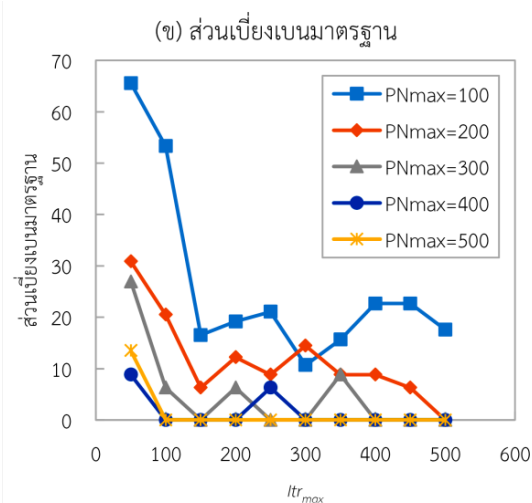
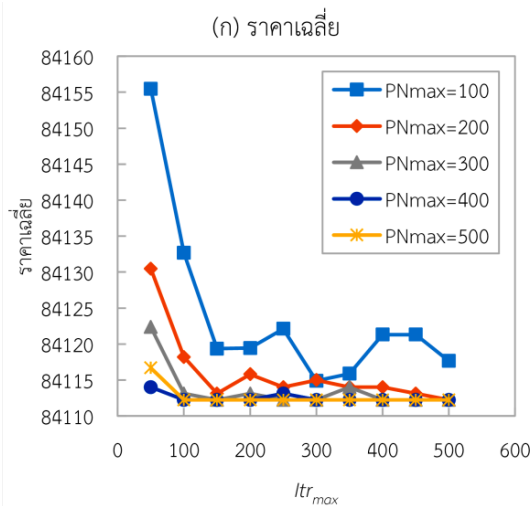
(ก) ราคาเฉลี่ย



(ข) ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน



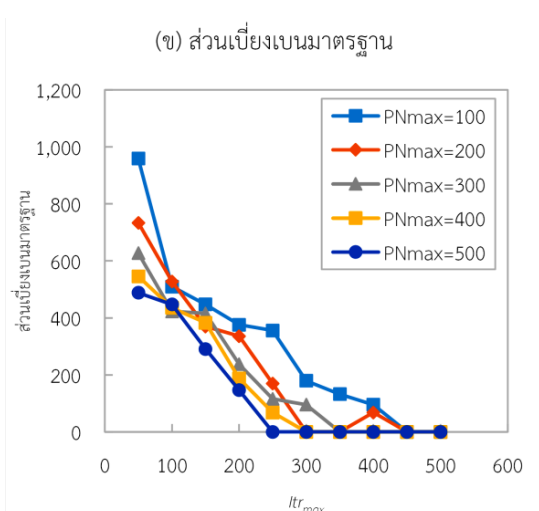
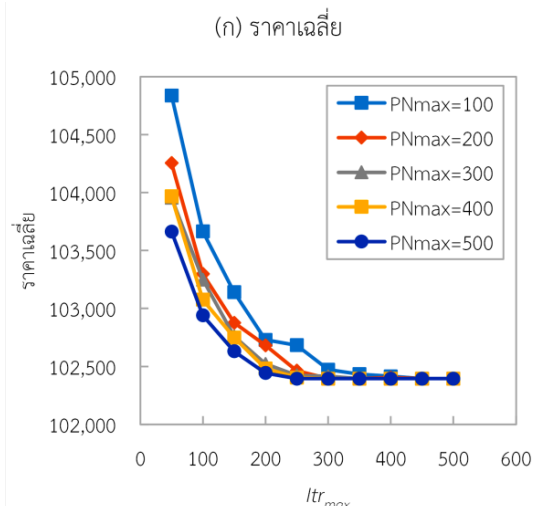
รูปที่ 5 ผลการทดสอบทางสถิติของตัวอย่างที่ 1



รูปที่ 6 ผลการทดสอบทางสถิติของตัวอย่างที่ 2

2. เปรียบเทียบผลการออกแบบที่เหมาะสม

จากการวิเคราะห์ความแตกต่างระหว่าง FOA และ Kong [21] ในตารางที่ 2 พบว่า FOA สามารถออกแบบได้อย่างประหยัดกว่างานวิจัยที่เปรียบเทียบทุกตัวอย่าง โดยเฉพาะตัวอย่างที่ 2 และ 3 FOA จะเลือก f'_c ที่ต่ำกว่า ซึ่งทำให้ราคาค่าก่อสร้างลดลง แต่โครงสร้างยังคงปลอดภัยและเป็นไปตามมาตรฐานการออกแบบ ในขณะที่การเลือก f_y ที่สูงกว่าสามารถลดปริมาณเหล็กเสริมลงทั้งเหล็กแนวตั้งและแนวนอน จึงทำให้ราคารวมของโครงสร้างมีความประหยัดกว่าร้อยละ 1 ถึง 14 ทั้งนี้ ผลการออกแบบที่เหมาะสมดังกล่าวสอดคล้องกับงานวิจัยที่



รูปที่ 7 ผลการทดสอบทางสถิติของตัวอย่างที่ 3

ผ่านมา [23] ที่ได้ทดลองใช้วิธีการค้นหาแบบค้างคา (Bat algorithm) ออกแบบ ซึ่งให้ผลลัพธ์ในลักษณะเดียวกันในทุกตัวอย่าง

สรุปผลการทดลอง

จากการศึกษาประสิทธิภาพของ FOA สำหรับการออกแบบคานกลีคคอนกรีตเสริมเหล็กโดยกำหนดใช้สมการเป้าหมายเป็นสมการของราคารวมค่าก่อสร้างที่มีความประหยัดมากที่สุด ประเมินประสิทธิภาพของ FOA โดยการกำหนดจำนวน PN_{max} ในช่วง 100 ถึง 500 ตัว และ ltr_{max} ระหว่าง 50 ถึง 500 และออกแบบในแต่ละค่าพารามิเตอร์จำนวน 50 ครั้ง กับตัวอย่างคานกลีคจำนวน 3 ตัวอย่าง จากนั้น วิเคราะห์ผลการทดลองด้วยการ

ตารางที่ 2 การเปรียบเทียบผลการออกแบบที่เหมาะสม

ตัวแปรออกแบบ	ตัวอย่างที่ 1		ตัวอย่างที่ 2		ตัวอย่างที่ 3	
	FOA	Kong [21]	FOA	Kong [21]	FOA	Kong [21]
f'_c (กก./ซม. ²)	140	210	300	420	320	420
f_y (กก./ซม. ²)	5,000	4,000	5,000	4,000	5,000	4,000
เหล็กเสริมรับโมเมนต์ดัด	12 – DB16	10 – DB16	34 – DB16	18 – DB25	15 – DB20	12 – DB25
A_s (ซม. ²)	24.13	20.10	68.36	88.35	47.12	58.9
เหล็กเสริมรับแรงเฉือนแนวตั้ง	DB10@40 ซม.	DB12@45 ซม.	DB10@40 ซม.	DB12@30 ซม.	DB10@40 ซม.	DB12@46 ซม.
A_v (ซม. ²)	3.92	3.49	3.92	4.54	3.92	4.95
เหล็กเสริมรับแรงเฉือนแนวนอน	DB10@40 ซม.	DB12@45 ซม.	DB10@35 ซม.	DB16@30 ซม.	DB10@40 ซม.	DB12@27 ซม.
A_{vh} (ซม. ²)	3.92	5.03	4.49	13.40	3.92	8.47
ราคาคอนกรีต (บาท)	15,392	15,639	41,391	46,099	42,020	46,109
ราคาเหล็กเสริม (บาท)	7,513	7,824	13,379	22,383	15,326	21,504
ราคาแบบหล่อ (บาท)	27,014	27,014	29,342	29,342	45,049	45,049
ราคาก่อสร้าง (บาท)	49,918	50,476	84,112	97,824	102,395	112,662
ร้อยละความแตกต่าง	1.10 %		14.02 %		9.11 %	

วิเคราะห์ทางสถิติ ซึ่งพบว่า FOA มีประสิทธิภาพมากที่สุดเมื่อกำหนด PN_{max} ตั้งแต่ 400 และ $l_{tr_{max}}$ ตั้งแต่ 350 เป็นต้นไป โดยผลวิเคราะห์ทางสถิติแสดงให้เห็นว่า ค่าเหล่านี้สามารถค้นพบคำตอบที่เหมาะสมทุกครั้งที่ออกแบบหรือคิดเป็นอัตราการค้นพบคำตอบที่เหมาะสมร้อยละ 100 เช่นเดียวกับ งานวิจัยที่ผ่านมา [23] เพียงแต่ FOA ต้องใช้ค่าพารามิเตอร์ที่มากกว่า ยิ่งไปกว่านั้น ผลการออกแบบที่เหมาะสมยังมีความประหยัดมากกว่า Kong [21] โดยเฉลี่ยจากทั้ง 3 ตัวอย่างคิดเป็นร้อยละ 8

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตขอนแก่น ที่สนับสนุนงานวิจัยในครั้งนี้

เอกสารอ้างอิง

[1] ACI Committee 318. (2019). Building code requirements for structural concrete : (ACI 318-19) ; and commentary

(ACI 318-19). Farmington Hills, MI :American Concrete Institute.

[2] Adhikary, S.D., Li, B., and Fujikake, K. (2013). Strength and behavior in shear of reinforced concrete deep beams under dynamic loading conditions, *Nuclear Engineering and Design*, vol. 259(1), June 2013, pp. 14-28.

[3] Kareim, A., Arafa, A., Hassanin, A., et al. (2020). Behavior and strength of reinforced concrete flanged deep beams with web openings, *Structures*, vol. 27(1), October 2020, pp. 506-524.

[4] Nassif, M., Erfan, A., Fadel, O., et al. (2021). Flexural behavior of high strength concrete deep beams reinforced with GFRP bars, *Case Studies in Construction Materials*, vol. 15(1), December 2021, e00613.

[5] Ibrahim, M.A., Thakeb, A., Mostfa, A.A., et al. (2018). Proposed formula for



design of deep beams with shear openings, *HBRC Journal*, vol. 14(3), December 2018, pp. 450-465.

[6] Engineering Institute of Thailand. Standard of reinforced concrete building, strength design method (E.I.T. 1008-38), Bangkok, Engineering Institute of Thailand.

[7] Liu, D., Qin, F., Di, J., Zhang, Z. (2023). Flexural behavior of reinforced concrete (RC) beams strengthened with carbon fiber reinforced polymer (CFRP) and ECC, *Case Studies in Construction Materials*, vol. 19(1), December 2023, e02270.

[8] Abbood, I. (2023). Strut-and-tie model and its applications in reinforced concrete deep beams: A comprehensive review, *Case Studies in Construction Materials*, vol. 19(1), December 2023, e02643.

[9] Ying, Z., Xilin, L., Dagen, W. and Ruifu, Z. (2012). A practical design method for reinforced concrete structures with viscous dampers, *Engineering Structures*, vol. 39(1), June 2012, pp. 187-198.

[10] Puttegowda, M., Nagaraju, S.B. (2025) Artificial intelligence and machine learning in mechanical engineering: Current trends and future prospects, *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, vol. 142, February 2025, 109910.

[11] Wen-Tsao, P. (2012). A new Fruit Fly Optimization Algorithm: Taking the financial distress model as an example, *Knowledge-Based Systems*, vol. 26(1), February 2012, pp. 69-74.

[12] Lian, J. (2021). An optimization model of cross-docking scheduling of cold chain logistics based on fuzzy time

window, *Journal of Intelligent & Fuzzy Systems*, vol. 41(1). June 2021, pp. 1-15.

[13] Han, J., Wang, P. and Yang, X. (2012). Tuning of PID controller based on Fruit Fly Optimization Algorithm, paper presented in *IEEE International Conference on Mechatronics and Automation*, Chengdu, China.

[14] Alexander, B., Michael, D. and Matthias M. (2020). The neural network behind the eyes of a fly, *Current Opinion in Physiology*, vol. 16(1), August 2020, pp. 33-42.

[15] Li, Y. and Han, M. (2020). Improved fruit fly algorithm on structural optimization, *Brain Informatics*, vol. 7(1), February 2020, pp. 1-13.

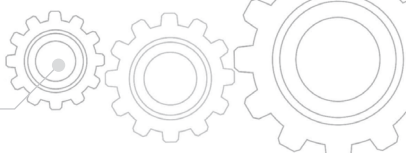
[16] Ranjeet, K., and Vijay, K. (2023). A systematic review on fruit fly optimization algorithm and its applications, *Artificial Intelligence Review*, vol. 56(11), November 2023, pp. 13015–13069.

[17] Pan, W. (2011). A new fruit fly optimization algorithm: Taking the financial distress model as an example, *Knowledge-Based Systems*, vol. 26(1), February 2012, pp. 69-74.

[18] Huiying, J. (2024). Design of fruit fly optimization algorithm based on Gaussian distribution and its application to image processing, *Systems and Soft Computing*, vol. 6(1), 2024, 200090.

[19] Xiao, W., Yang, Y., Xing, H. and Meng, X. (2015). Clustering Algorithm Based on Fruit Fly Optimization, *Lecture Notes in Computer Science*, vol. 9436(1), pp. 408-419.

[20] Committee of Construction Price. (2024), Labor account/operation for



estimate and calculate price (revised edition) year 2024, Bangkok, Committee of Construction.

[21] Kong, F.K. (2002). Reinforced Concrete Deep Beams, New York, Taylor & Francis e-Library.

[22] Hazim, I. and Mesut, G. (2014). Parameter Analysis on Fruit Fly Optimization Algorithm, *Journal of Computer and Communications*, Vol.2 No.4(1), March 2014, pp. 1-5.

[23] Tapao, A. and Cheerarot, R. (2021). Optimum design of reinforced concrete deep beams using bat algorithm, *Engineering Journal of Research and Development*, vol. 32(4), October 2021, pp. 29-41.



Removal of Styrene Contaminant in Petroleum Ether 40-60 by Adsorption on Activated Carbon

Kawinna Wongyaeng¹, Rungnapha Phaethaisong¹, Nicharee Kliniam²,
Titikan Somboon¹ and Wimonrat Tongpoothorn^{1*}

¹Department of Chemistry, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Isan, Khon Kaen Campus, Khon Kaen, 40000 Thailand

²RCI Labscan Limited, Bangthorat, Mueang Samut Sakhon, Samut Sakhon, 74000 Thailand

*Corresponding Author: Wimonrat.to@rmuti.ac.th

Received 3 January 2025; Received in revised form 24 May 2025; Accepted 1 June 2025

Abstract

The removal of contaminants in petroleum ether 40-60 with an adsorption method using 9 types of activated carbon (AC) was investigated. The optimum condition was achieved by varying the types of AC, ratios between solvent volume to AC amount, and adsorption time. The GC-FID results reveal that the main impurity in petroleum ether 40-60 is styrene. By using activated carbon type BITU8x30 with a ratio of 900L:135Kg and adsorption time of 24 hours, styrene was removed up to 98.43%. The purification of petroleum ether 40-60 was also confirmed by UV-visible spectrometry. This adsorption method provides efficiency, cost effectiveness and low energy consumption. Moreover, this proposed method can reduce time and steps of petroleum ether 40-60 purification in industrial scale as well.

Keywords: Adsorption; Activated carbon; Purification; Organic solvent

1. Introduction

The purification of organic chemicals depends on the nature of the compounds and the impurities in them. Generally, various methods can be used for purification of organic compounds, such as filtration [1], distillation [2], chromatography [3]. The organic solvent named petroleum ether 40-60 is mostly used by pharmaceutical companies and in the manufacturing process. It is a lightweight hydrocarbon used chiefly as a nonpolar solvent. The requirement for petroleum ether in laboratory uses as

solvent and extraction solvent is analytical grade (AR). Thus, purification of petroleum ether is required.

Recently, adsorption is one of the effective methods for removal pollutant [4-7]. The method provides simplicity, cost-effectiveness, and high efficiency. Activated carbon (AC) is porous, inexpensive and readily available for use as adsorbents. It is widely used as an adsorbent in wastewater treatment because of its high adsorption capacities, extremely high surface areas, micropore volumes, and fast adsorption. The

adsorption of organic solvents, such as styrene [8] toluene [9] benzene [10] by activated carbon was reported. Therefore, the adsorption process for removal of contaminants in petroleum ether is considered promising as described above. Therefore, the different types of commercial AC, the ratio of solvent volume to adsorbent, and adsorption time were investigated to obtain the optimized condition for purification of petroleum ether in industrial scale.

2. Experiments

2.1 Chemicals and instruments

Nine types of commercial AC (COCONUT, HRLC-105, BITU, BITU8x30, BITU12x40, GB1000, HR1240, YL-303, HRCS1240) were purchased. Raw material of petroleum ether 40-60 was obtained from RCI Labscan. The amount of contaminated styrene was detected by UV-Visible Spectrophotometer with single beam (Agilent Technology, UV8453) and Gas Chromatograph-Flame Ionization Detector (GC-FID) (Agilent Technology, 7890A).

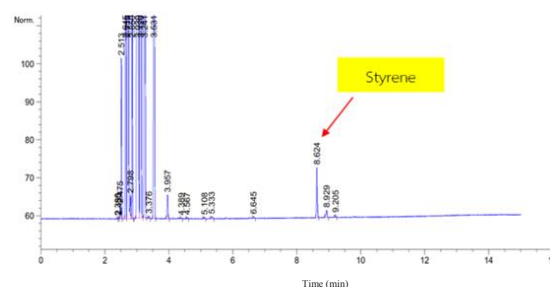
2.2 Adsorption processes

The removal of styrene in raw material of petroleum ether 40-60 (RM) was carried out by batch reactor. The 9 types of commercial AC (COCONUT, HRLC-105, BITU, BITU8x30, BITU12x40, GB1000, HR1240, YL-303, HRCS1240) were employed as adsorbent. The volume of RM was fixed at 50 mL. The adsorbent was varied (2.5, 5.0 and 7.5 g), corresponding to the ratio of 900L:45kg, 900L:90kg and 900L:135kg, respectively. The adsorption time was also investigated (4, 8

and 24 hours). The removal of styrene contaminated in RM was detected by GC-FID and UV-Visible spectrophotometry.

3. Results and discussion

Fig. 1 presents raw material of petroleum ether 40-60 chromatogram. The experimental results confirm that RM is mainly contaminated with styrene as seen at the retention time of about 8.6 min. The presence of styrene in the solvent (RM) results in a clearly intense odor. Therefore, removal of it to purify the RM is required.



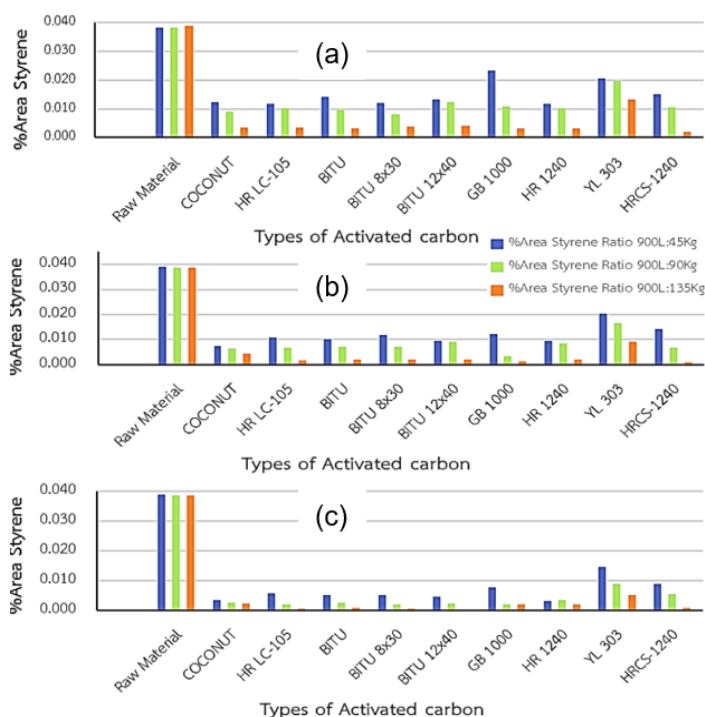


Fig. 2 Adsorption of styrene by different types of activated carbon with various ratio. (a), (b) and (c) present adsorption under 4, 8 and 24 hours, respectively.

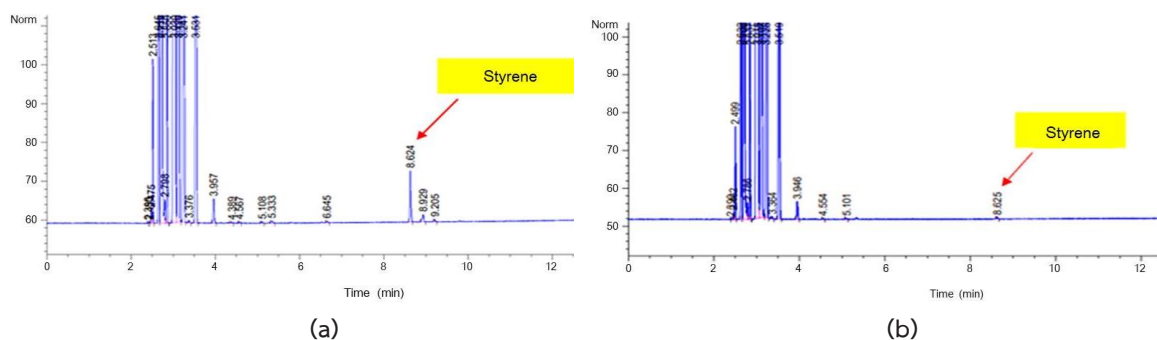


Fig. 3 Chromatogram of petroleum ether 40-60 under the condition without adsorption (a) and with adsorption by BITU8X30 (b).

Table 1. Removal efficiency of styrene under adsorption by different types of AC

		%Removal of each AC type							
Adsorption time	Coconut	HR LC-105	BITU	BITU 8x30	BITU 12x40	GB 1000	HR 1240	YL 303	HRCS-1240
4	90.82	91.15	86.82	86.76	88.33	80.08	91.80	62.17	77.59
8	88.96	94.53	93.06	94.99	93.83	94.63	91.31	77.27	85.66
24	94.30	98.27	98.04	98.43	97.59	94.71	95.07	87.05	98.09

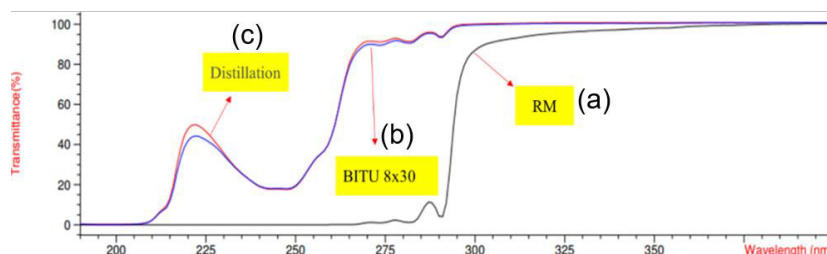


Fig. 4 UV-Visible spectra of Petroleum Ether 40-60 in case of (a) raw material, (b) under the adsorption by AC (BITU8X30) and (c) distillation.

The removal efficiency was evaluated by using equation as follows:

$$\% \text{Removal} = \frac{A_0 - A}{A_0} \times 100$$

Where A_0 and A are the %peak area of styrene before and after adsorption.

The removal efficiency was summarized in Table 1. All types of AC can remove more than 85% styrene within 24 hrs. Moreover, the ratio of 900 L to 135 kg of BITU8X30 shows the highest removal efficiency (98.43%). Therefore, this is the best condition for removal of styrene from raw material of petroleum ether 40-60.

BITU8x30 activated carbon is produced from bituminous coal containing 80 – 90 % of carbon content [11]. Also, it has high density and low moisture content, so it's effective in high absorption of aromatic compounds. The interaction between AC with styrene would be the Van der Waals forces of nonpolar molecules, specifically London dispersion forces [8-10]. Also, the porous structure provides numerous sites where styrene molecules can physically adsorb onto the carbon surface.

The styrene removal was again confirmed by the GC results as shown in Fig.3. The results show that styrene is totally removed, indicated by reduction of the

styrene peak. This insists that the designed adsorption process for styrene removal can be successfully done. UV-VIS technique is also employed to analysis purity of petroleum ethers 40-60 solvent (RM). As shown in Fig.4, the transmittance at the wavelength between 210-250 nm increases, confirming that the RM is purified by the adsorption by AC. Moreover, the experimental results showed that the purity of the solvent treated with activated carbon adsorption was comparable to that obtained through distillation.

4. Conclusion

The removal of styrene from petroleum ether 40-60 raw material by the adsorption with AC is successful. The purity of the solvent through AC adsorption provides efficiency comparable to that of the distillation process. However, adsorption presents simplicity, low energy consumption, and cost effectiveness. Moreover, this research shows the first time of using new method for solvent purification based on adsorption instead of distillation (conventional method) in industry.

5. Acknowledgement

This research project is supported by Faculty of Engineering, Rajamangala



University of Technology Isan, Khon Kaen campus (RMUTI.KKC). Authors thanks RCI Labscan. Ltd. company for supporting students in the Cooperative and Work Integrated Education (CWIE) Program.

6. References

- [1] Ursino, C., Simone, S., Donato, L., Santoro, S., De Santo, M. P., Drioli, E., Di Nicolòb, E., and Figoli, A. (2016). ECTFE membranes produced by non-toxic diluents for organic solvent filtration separation, *RSC Advances*, vol. 6, pp. 81001-81012.
- [2] Gupta, O., Roy, S., and Mitra, S. (2018). Enhanced membrane distillation of organic solvents from their aqueous mixtures using a carbon nanotube immobilized membrane, *Journal of Membrane Science*, vol. 568, pp. 134-140.
- [3] Wagenaar, F. L., Hochlowski, J. E., Pan, J. Y., Tu, N. P., and Searle, P. A. (2009). Purification of high-throughput organic synthesis libraries by counter-current chromatography, *Journal of Chromatography A*, vol. 1216, pp. 4154-4160.
- [4] Gonzalez-Serrano, E., Cordero, T., Rodriguez-Mirasol, J., Cotoruelo, L., Rodriguez, J. J. (2009). Removal of water pollutants with activated carbons prepared from H₃PO₄ activation of lignin from kraft black liquors, *Water Research*, vol. 38, pp. 3043-3050.
- [5] Mariana, M., Abdul Khalil H. P. S., Mistar, E. M., Yahya, B. E., Alfatah, T., Danish, M., Amayreh, M. (2021). Recent advances in activated carbon modification techniques for enhanced heavy metal adsorption, *Journal of Water Process Engineering*, vol. 43, pp. 102221.
- [6] Zhang, Z., Wang, T., Zhang, H., Liu, Y., Xing, B. (2021). Adsorption of Pb(II) and Cd(II) by magnetic activated carbon and its mechanism, *Science of The Total Environment*, vol. 757, pp. 143910.
- [7] Wang, H., Li, Z., Yahyaoui, S., Hanafy, H., Seliem, H. K., Bonilla-Petriciolet, A., Dotto, G. L., Sellaoui, L., Li, Q. (2021). Effective adsorption of dyes on an activated carbon prepared from carboxymethyl cellulose: Experiments, characterization and advanced modelling, *Chemical Engineering Journal*, vol. 417, pp. 128116.
- [8] Isinkaralar, K., Mamyrbayeva, K., Bandegharaei, A. H. (2023). Adsorption of gas styrene on activated carbon from agro waste of Silybum marianum L. as a sustainable precursor, *Biomass Conversion and Biorefinery*. vol. 13, pp. 1-12.
- [9] Wibowo, N., Setyadhi, L., Wibowo, D., Setiawan, J., Ismadji, S. (2007). Adsorption of benzene and toluene from aqueous solutions onto activated carbon and its acid and heat treated forms: Influence of surface chemistry on adsorption, *Journal of Hazardous Materials*. vol. 146, pp. 237-242.
- [10] Mataji, M., Khoshandam, B. (2014). Adsorption of Benzene on activated carbon from Agricultural waste materials. *Chemical Engineering Communications*. vol. 201, pp. 1294-1313.
- [11] Sadasivam, S., Masum, S., Chen, M., Stanczyk, K., Thomas, H. (2022). Kinetics of Gas Phase CO₂ Adsorption on Bituminous Coal from a Shallow Coal Seam. *Energy Fuels*. vol. 36, pp. 8360-8370.

การสร้างแบบจำลองสนามแม่เหล็กของมอเตอร์แม่เหล็กถาวรแบบฟลักซ์ตามแนวแกน
โดยใช้วิธีไฟไนต์อีลิเมนต์แบบ 3 มิติ

Magnetic Field Modeling of Axial Flux Permanent Magnet Motor
Using 3D Finite Element Method

อารักษ์ บุญมาตย์*, ธนัญญา สิมมา และ พงษ์พิสิฐ สายคำ

สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตขอนแก่น
อำเภอเมือง จังหวัดขอนแก่น 40000

*Corresponding Author: arak.bu@rmuti.ac.th, 080-1647600

Received 27 April 2025; Received in revised form 28 May 2025; Accepted 2 June 2025

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาผลกระทบของตำแหน่งการติดตั้งแม่เหล็กถาวรต่อการกระจายสนามแม่เหล็กและลักษณะแรงบิดในมอเตอร์แกนฟลักซ์ โดยใช้เครื่องมือจำลองเชิงตัวเลขด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์สามมิติ (3D-FEM) ที่พัฒนาขึ้นเอง รูปแบบที่วิเคราะห์ประกอบด้วยมอเตอร์แม่เหล็กถาวรแบบฝังในแกนโรเตอร์ (IPMSM) และแบบติดตั้งที่ผิวโรเตอร์ (SPMSM) ผลการวิเคราะห์แสดงให้เห็นว่า IPMSM ให้การกระจายศักย์เวกเตอร์แม่เหล็กที่สม่ำเสมอกว่า และมีแรงบิดเฉลี่ยสูงกว่า SPMSM อย่างมีนัยสำคัญ ข้อค้นพบนี้สนับสนุนแนวทางการออกแบบที่เหมาะสมสำหรับมอเตอร์แกนฟลักซ์ในยานยนต์ไฟฟ้า โดยมุ่งเน้นการเพิ่มสมรรถนะและการลดขนาดของมอเตอร์

คำสำคัญ: มอเตอร์ฟลักซ์แนวแกน, แม่เหล็กถาวร, วิธีไฟไนต์อีลิเมนต์ 3 มิติ, ยานยนต์ไฟฟ้า

Abstract

This study examines the impact of permanent magnet placement on magnetic field distribution and torque characteristics in flux axial motors using a self-developed three-dimensional finite element method (3D-FEM) simulation tool. Two configurations were analyzed: interior permanent magnet synchronous motors (IPMSMs) and surface permanent magnet synchronous motors (SPMSMs). Results indicate that IPMSMs achieve a more uniform magnetic vector potential distribution and significantly higher average torque compared to SPMSMs. These insights support optimal design strategies for flux axial motors in electric vehicle applications, targeting enhanced performance and motor downsizing.

Keywords: Axial Flux Motor, Permanent Magnet, 3D Finite Element Method, Electric Vehicle

บทนำ

ในปัจจุบัน ประเทศไทยยังคงพึ่งพาเทคโนโลยีและบุคลากรจากต่างประเทศในการพัฒนายานยนต์

ไฟฟ้า ทั้งในด้านการออกแบบ การผลิต และการบำรุงรักษา ส่งผลให้ขาดความสามารถในการพัฒนาเทคโนโลยีขั้นสูงภายในประเทศ โดยเฉพาะใน

องค์ประกอบสำคัญอย่าง "มอเตอร์ไฟฟ้า" ซึ่งเป็นหัวใจหลักของระบบขับเคลื่อน [1-2]

มอเตอร์แกนฟลักซ์ (Axial Flux Motor) เป็นทางเลือกที่มีศักยภาพ เนื่องจากมีโครงสร้างแบนและกะทัดรัด เหมาะสำหรับการออกแบบที่ต้องการประหยัดพื้นที่ โดยเฉพาะในยานยนต์ไฟฟ้าที่มุ่งเน้นการเพิ่มประสิทธิภาพและลดขนาดของระบบขับเคลื่อน นอกจากนี้ยังให้แรงบิดต่อขนาดสูงเมื่อเทียบกับมอเตอร์ทั่วไป [3] จึงเป็นที่สนใจในงานวิจัยด้านวิศวกรรมไฟฟ้าและพลังงาน

องค์ประกอบสำคัญที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพของมอเตอร์คือการกระจายตัวของสนามแม่เหล็กภายใน ซึ่งขึ้นอยู่กับรูปแบบการติดตั้งแม่เหล็กถาวร เช่น การฝังแม่เหล็กภายในโรเตอร์ (IPMSM) หรือการติดตั้งที่ผิวโรเตอร์ (SPMSM) ความแตกต่างนี้ส่งผลต่อคุณสมบัติของสนามแม่เหล็กและค่าแรงบิดที่มอเตอร์สามารถสร้างได้ [4]

ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงมีเป้าหมายเพื่อศึกษาและเปรียบเทียบผลกระทบของรูปแบบการติดตั้งแม่เหล็กถาวรภายในมอเตอร์แกนฟลักซ์ โดยใช้ระเบียบวิธีไฟไนท์อีลิเมนต์แบบ 3 มิติ (3D Finite Element Method: 3D FEM) ผ่านโปรแกรมที่พัฒนาขึ้นเอง เพื่อให้สามารถจำลองสภาพสนามแม่เหล็กได้อย่างใกล้เคียงความเป็นจริง ช่วยเพิ่มความแม่นยำในการออกแบบมอเตอร์ที่เหมาะสมกับการใช้งานในยานยนต์ไฟฟ้า [5] และเป็นการสร้างองค์ความรู้ที่สามารถต่อยอดไปสู่การพัฒนาเทคโนโลยีในประเทศได้อย่างยั่งยืน

วิธีดำเนินงาน

1. แบบจำลองคณิตศาสตร์ของสนามแม่เหล็กในมอเตอร์แม่เหล็กถาวรแบบฟลักซ์ตามแนวแกน

ในการคำนวณหาสนามแม่เหล็กสามารถดำเนินการได้โดยเล็งไปคำนวณหาค่าศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็กก่อน เนื่องจากสามารถคำนวณได้ง่ายกว่า โดยสนามแม่เหล็กสามารถคำนวณได้ด้วยการเคิร์ลศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็ก [6] ซึ่งสามารถแสดงได้ดังนี้

$$B = \nabla \times A \quad (1)$$

การคำนวณสนามแม่เหล็กของมอเตอร์แกนฟลักซ์เริ่มจากการหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของสนามแม่เหล็ก โดยการวิเคราะห์สนามแม่เหล็กที่เปลี่ยนแปลงค่าตามเวลา มีอิทธิพลของสนามแม่เหล็กที่เกิดจากสองส่วนคือ ขอลวดสเตเตอร์ที่รับกระแสไฟฟ้าเป็นอินพุตและแม่เหล็กถาวรบริเวณโรเตอร์ [7-8] ซึ่งทั้งสองจะสร้างสนามแม่เหล็กขึ้น ดังสมการที่ (2)

$$\nabla \times \frac{1}{\mu} \nabla \times A = j + \nabla \times H_c \quad (2)$$

j คือผลรวมของค่ากระแสในขดลวดสเตเตอร์ ซึ่งประกอบด้วยสองส่วนคือ กระแสภายนอก (external current: j_0) และกระแสตกค้าง (eddy current: j_{eddy}) ดังสมการที่ (3)

$$j = j_0 + j_{eddy} \quad (3)$$

เมื่อ $j_{eddy} = -\sigma \frac{\partial A}{\partial t}$ โดยที่ σ คือ สภาพนำทางไฟฟ้า (conductivity) นำสมการที่ (3) แทนในสมการที่ (2) จะได้

$$\nabla \times \frac{1}{\mu} \nabla \times A = j_0 - \sigma \frac{\partial A}{\partial t} + \nabla \times H_c \quad (4)$$

จากการศึกษาคุณสมบัติของ A พบว่า $\nabla \cdot A = 0$ ประกอบกับการใช้เอกลักษณ์ของสมการ จึงได้สมการของศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็กดังสมการที่ (5)

$$\frac{1}{\mu} (-\nabla^2 A) = j_0 - \sigma \frac{\partial A}{\partial t} + \nabla \times H_c \quad (5)$$

จากสมการที่ (5) เขียนให้อยู่ในรูปสมการอนุพันธ์ย่อย จะได้สมการอนุพันธ์ย่อยอันดับสองดังสมการที่ (6)

$$\frac{1}{\mu_x} \left(\frac{1}{\mu_x} \frac{\partial A}{\partial x} \right) + \frac{1}{\mu_y} \left(\frac{1}{\mu_y} \frac{\partial A}{\partial y} \right) + \frac{1}{\mu_z} \left(\frac{1}{\mu_z} \frac{\partial A}{\partial z} \right) - \sigma \left(\frac{\partial A}{\partial t} \right) = -j_0 + \left(\left(\frac{\partial H_{cx}}{\partial y} - \frac{\partial H_{cy}}{\partial z} \right) i - \left(\frac{\partial H_{cy}}{\partial x} - \frac{\partial H_{cx}}{\partial z} \right) j + \left(\frac{\partial H_{cy}}{\partial x} - \frac{\partial H_{cx}}{\partial y} \right) k \right) \quad (6)$$

ดังนั้นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สนามแม่เหล็กของมอเตอร์แกนฟลักซ์ เมื่อพิจารณามอเตอร์ใน 3 มิติ

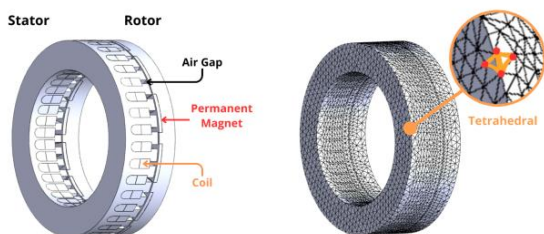
ตามระนาบพิกัด xyz ซึ่งแปรผันตามเวลา จึงสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (6) ซึ่งเป็นการสมมติให้สนามแม่เหล็กวางตัวตามพื้นที่หน้าตัดในระนาบพิกัด xyz ของมอเตอร์ ดังนั้นการพิจารณาเทอมของ A และ j_0 จะปรากฏเฉพาะส่วนประกอบของแกน z เท่านั้น โดยสมการจะปรากฏอยู่ในรูปสมการอนุพันธ์ย่อยอันดับสอง [8]

2. การสร้างสมการไฟไนต์อิลิเมนต์ 3 มิติ

2.1 การแบ่งอิลิเมนต์พื้นที่ศึกษา

ในการวิเคราะห์เชิงตัวเลข (Numerical Analysis) ของระบบที่ซับซ้อน การแบ่งพื้นที่ปัญหาออกเป็นองค์ประกอบย่อย (Discretization) ถือเป็นขั้นตอนที่มีความสำคัญยิ่ง งานวิจัยนี้ได้เลือกใช้ องค์ประกอบย่อยแบบสี่หน้า (Tetrahedral Element) สำหรับการจำลองเชิงโครงข่าย (Mesh Generation) เนื่องจากเป็นรูปทรงที่ประกอบด้วยจำนวนโนด (Nodes) หรือจุดเชื่อมต่ออย่างน้อยที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับองค์ประกอบในรูปทรงอื่น ส่งผลให้สามารถลดภาระในการคำนวณได้อย่างมีประสิทธิภาพ [8-9]

โดยสมมติให้การแจกแจงของตัวแปรที่สนใจภายในแต่ละองค์ประกอบเป็นแบบเชิงเส้น (Linear Interpolation) ซึ่งเพียงพอต่อการประมาณค่าในเบื้องต้น การสร้างโครงข่ายองค์ประกอบ (Finite Element Mesh) ในการศึกษาครั้งนี้ดำเนินการโดยใช้ซอฟต์แวร์สำเร็จรูป SOLIDWORKS ซึ่งสามารถสร้างองค์ประกอบได้ทั้งหมด 104,984 องค์ประกอบ และมีจำนวนจุดเชื่อมต่อรวม 19,945 จุด สำหรับต้นแบบของมอเตอร์ชนิดแกนฟลักซ์ (Flux Switching Motor Prototype) รายละเอียดแสดงไว้ในรูปที่ 1



รูปที่ 1 การแบ่งอิลิเมนต์และจุดต่อบนต้นแบบมอเตอร์แกนฟลักซ์ด้วยอิลิเมนต์รูปทรงสี่หน้า

2.2 ฟังก์ชันการประมาณภายในอิลิเมนต์

เป็นการเลือกรูปแบบของฟังก์ชันการประมาณภายในอิลิเมนต์ (Element Interpolation Function) โดยเมื่อสมมติลักษณะการกระจายของผลเฉลยบนอิลิเมนต์เป็นแบบเชิงเส้น [9] จึงได้

$$A(x, y, z) = A_1N_1 + A_2N_2 + A_3N_3 + A_4N_4 \quad (7)$$

โดยที่ N_i , $i = 1, 2, 3, 4$ คือฟังก์ชันการประมาณภายในอิลิเมนต์ และ A_i , $i = 1, 2, 3, 4$ คือผลลัพธ์ของศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็กในแต่ละจุดต่อ (1, 2, 3, 4) ของอิลิเมนต์ [10] ซึ่ง

$$N_i = \frac{1}{6V} (a_i + b_i x + c_i y + d_i z) \quad (8)$$

จากสมการที่ (5) เป็นสมการเชิงเวกเตอร์ ซึ่งเป็นสมการเดียวกับสมการที่ (6) ที่เป็นสมการอนุพันธ์ย่อยอันดับสอง เมื่อจัดรูปสมการที่ (4) ให้สมการด้านขวาเท่ากับศูนย์ และจาก $H_c = v\mu_0 M$ และ $v = I/\mu$ [11] จะได้ดังสมการที่ (9)

$$\nabla \times v(\nabla \times A) - j_0 + \sigma \frac{\partial A}{\partial t} - \nabla \times (v\mu_0 M) = 0 \quad (9)$$

การสร้างสมการของอิลิเมนต์ด้วยการถ่วงน้ำหนักเศษตกค้างมีหลักการดังนี้คือ หากแทนผลเฉลยโดยประมาณลงในสมการที่ (9) จะไม่ได้ค่าเท่ากับศูนย์ แต่จะมีค่าเท่ากับ R [11-12] ดังแสดงด้วยสมการที่ (10)

$$\nabla \times v(\nabla \times A) - j_0 + \sigma \frac{\partial A}{\partial t} - \nabla \times (v\mu_0 M) = R \quad (10)$$

2.3 การสร้างสมการอิลิเมนต์

ในงานวิจัยนี้ได้ประยุกต์ใช้วิธีการถ่วงน้ำหนักเศษตกค้างของกาเลอร์คิน (Galerkin Weighted Residual Method) โดยวิธีการนี้จะคูณ R ด้วยฟังก์ชันน้ำหนัก W ซึ่งมีรูปแบบเดียวกับฟังก์ชันฐาน จากนั้นทำการอินทิเกรตตลอดทั้งโดเมนขององค์ประกอบ V และกำหนดผลรวมของอินทิเกรชันให้เท่ากับศูนย์ [12] นั่นคือ

$$\int_V W_n R dV = 0, \quad n = 1, 2, 3, 4 \quad (11)$$

สำหรับอีลิเมนต์รูปทรงสี่หน้า จุดที่ไม่รู้ค่ามี 4 จุด ซึ่งได้แก่จุดต่อทั้งสี่ ดังนั้นจึงต้องการ 4 สมการในการแก้หาจุดที่ไม่รู้ค่า นั่นหมายถึงในสมการที่ (11) จะต้องมามีค่า $n=1,2,3,4$ และโดยปกติเราจะเลือก $W_n=N_n$ ซึ่งเรียกว่าบับโนฟ-กาลอร์กิน (Bubnov-Galerkin) [13] ดังนั้นเมื่อแทน R ด้วยสมการที่ (10) ลงในสมการที่ (11) จึงได้

$$\iiint_V \nabla \times (\nu (\nabla \times A) - \nu \mu_0 M) N_n dx dy dz + \iiint_V N_n \sigma \frac{\partial A}{\partial t} dx dy dz = \iiint_V N_n j_0 dx dy dz \quad (11)$$

ดังนั้นจากสมการที่ (11) จัดรูปสมการใหม่ได้ดังนี้

$$\begin{aligned} & \iiint_V N_n \sigma \frac{\partial A}{\partial t} dx dy dz + \iiint_V \nu \left(\frac{\partial A}{\partial x} \frac{\partial N_n}{\partial x} + \frac{\partial A}{\partial y} \frac{\partial N_n}{\partial y} + \frac{\partial A}{\partial z} \frac{\partial N_n}{\partial z} \right) dx dy dz = \\ & \iiint_V \nu \mu_0 \left(M_x \left(\frac{\partial N_n}{\partial y} - \frac{\partial N_n}{\partial z} \right) - M_y \left(\frac{\partial N_n}{\partial x} - \frac{\partial N_n}{\partial z} \right) + M_z \left(\frac{\partial N_n}{\partial x} - \frac{\partial N_n}{\partial y} \right) \right) dx dy dz + \iiint_V N_n j_0 dx dy dz \end{aligned} \quad (12)$$

จากสมการที่ (12) พิจารณาในรูปสมการทั่วไปได้ดังสมการที่ (13)

$$[M]_{4 \times 4} \{A\}_{4 \times 1} + [K]_{4 \times 4} \{A\}_{4 \times 1} = \{F\}_{4 \times 1} \quad (13)$$

โดยเมื่อแยกพิจารณาสมการที่ (13) ทีละพจน์จะสามารถพิจารณาได้ดังนี้

$$[M]_{4 \times 4} = \frac{\sigma V}{20} \begin{bmatrix} 2 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 2 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 2 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 2 \end{bmatrix} \quad (14)$$

$$[K]_{4 \times 4} = \frac{\nu}{36V} \begin{bmatrix} b_1 b_2 + c_1 c_2 + d_1 d_2 & b_1 b_2 + c_1 c_2 + d_1 d_2 & b_1 b_2 + c_1 c_2 + d_1 d_2 & b_1 b_2 + c_1 c_2 + d_1 d_2 \\ b_1 b_2 + c_1 c_2 + d_1 d_2 & b_1 b_2 + c_1 c_2 + d_1 d_2 & b_1 b_2 + c_1 c_2 + d_1 d_2 & b_1 b_2 + c_1 c_2 + d_1 d_2 \\ b_1 b_2 + c_1 c_2 + d_1 d_2 & b_1 b_2 + c_1 c_2 + d_1 d_2 & b_1 b_2 + c_1 c_2 + d_1 d_2 & b_1 b_2 + c_1 c_2 + d_1 d_2 \\ b_1 b_2 + c_1 c_2 + d_1 d_2 & b_1 b_2 + c_1 c_2 + d_1 d_2 & b_1 b_2 + c_1 c_2 + d_1 d_2 & b_1 b_2 + c_1 c_2 + d_1 d_2 \end{bmatrix} \quad (15)$$

$$\{F\}_{4 \times 1} = \frac{\nu \mu_0}{6} \left(M_x \begin{bmatrix} c_1 - d_1 \\ c_2 - d_2 \\ c_3 - d_3 \\ c_4 - d_4 \end{bmatrix} - M_y \begin{bmatrix} b_1 - d_1 \\ b_2 - d_2 \\ b_3 - d_3 \\ b_4 - d_4 \end{bmatrix} + M_z \begin{bmatrix} b_1 - c_1 \\ b_2 - c_2 \\ b_3 - c_3 \\ b_4 - c_4 \end{bmatrix} \right) + \frac{j_0 V}{4} \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (16)$$

2.4 การแก้ปัญหภายใต้สถานะชั่วคราว

ในการวิเคราะห์ปัญหาในสภาวะไม่คงตัว (Transient State) งานวิจัยนี้ประยุกต์ใช้วิธีความสัมพันธ์เวียนบังเกิด (Recurrence Relation Method) โดยลักษณะของผลลัพธ์ขึ้นอยู่กับ

ค่าพารามิเตอร์ β ตามที่แสดงในสมการที่ (17) ซึ่ง Δt คือช่วงเวลา (Time Step) ซึ่งในงานวิจัยนี้เลือกใช้วิธีผลต่างสี่เหลี่ยมย้อนหลัง ดังแสดงในสมการที่ (18) เนื่องจากสามารถรับประกันการลู่เข้าของคำตอบได้ และให้ผลลัพธ์ที่มีความต่อเนื่องในเชิงเวลาอย่างเหมาะสมกับลักษณะพลวัตของระบบที่ศึกษา [14]

$$\beta \{A\}^{t+\Delta t} + (1-\beta) \{A\}^t = \frac{\{A\}^{t+\Delta t} - \{A\}^t}{\Delta t} \quad (17)$$

$$\{A\}^{t+\Delta t} = \frac{\{A\}^{t+\Delta t} - \{A\}^t}{\Delta t} \quad (18)$$

เลือกใช้วิธีผลต่างสี่เหลี่ยมย้อนหลัง จึงได้ผลลัพธ์ของสมการไฟไนท์อีลิเมนต์เมื่อพิจารณาปัญหาที่ขึ้นอยู่กับเวลา ดังสมการที่ (19)

$$\left(\frac{1}{\Delta t} [M] + [K] \right) \{A\}^{t+\Delta t} = \frac{1}{\Delta t} [M] \{A\}^t + \{F\}^{t+\Delta t} \quad (19)$$

2.5 การคำนวณค่าตัวแปรอื่นที่ต้องการ

เมื่อทราบค่าศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็ก A ที่จุดต่อต่างๆ แล้ว จึงสามารถคำนวณหาค่าต่างๆ ที่สัมพันธ์กันต่อไปได้ โดยสนามแม่เหล็ก B ที่กระจายตัวในระบบพิกัดฉาก (ระนาบ xyz) ของมอเตอร์สามารถคำนวณได้จาก $B = \nabla \times A$ ดังนั้นเมื่อพิจารณามอเตอร์ใน 3 มิติ ตามระนาบพิกัด xyz จึงได้ค่าสนามแม่เหล็กในแนวแกน x (B_x) และค่าสนามแม่เหล็กในแนวแกน y (B_y) [15] ดังแสดงด้วยสมการที่ 20 และ 21 ตามลำดับ

$$B_x = \frac{\partial A_z}{\partial y} = \frac{c_1 A_1 + c_2 A_2 + c_3 A_3 + c_4 A_4}{6V} \quad (20)$$

$$B_y = -\frac{\partial A_z}{\partial x} = -\left(\frac{b_1 A_1 + b_2 A_2 + b_3 A_3 + b_4 A_4}{6V} \right) \quad (21)$$

จากนั้นแปลงระบบจากพิกัดฉากไปเป็นพิกัดทรงกระบอก เพื่อใช้คำนวณหาค่าสนามแม่เหล็กในแนวรัศมี (radial flux density, B_r) และสนามแม่เหล็กในแนวสัมผัส (tangential flux density, B_t) ที่กระทำกับช่องอากาศของมอเตอร์ตรงส่วนของฟันสเตเตอร์ในแต่ละซี่ที่มีมุม ϕ

เปลี่ยนแปลงไป สามารถแสดงได้ดังนี้
 $B_r = B_x \cos \phi + B_y \sin \phi$, $B_t = -B_x \sin \phi + B_y \cos \phi$

[15-16]

เมื่อคำนวณค่า B_r และ B_t แล้ว จากนั้นจึงใช้สมการความเค้นของแมกซ์เวลล์หาค่าแรงแม่เหล็กไฟฟ้าที่กระทำกับช่องอากาศ ซึ่งจะมีผลต่อการสั่นสะเทือนในมอเตอร์PMSM โดยที่

$$F_r = \frac{1}{2\mu_0} (B_r^2 - B_t^2) \quad (22)$$

$$F_t = \frac{1}{\mu_0} (B_r B_t) \quad (23)$$

ซึ่ง F_r และ F_t คือแรงแม่เหล็กไฟฟ้าในแนวรัศมีและแนวสัมผัสตามลำดับ โดยขนาดของการสั่นสะเทือนที่เกิดจากแรงแม่เหล็กไฟฟ้าในแนวสัมผัสจะมีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับแนวรัศมี ดังนั้นการพิจารณาแรงแม่เหล็กไฟฟ้าที่กระทำกับช่องอากาศของมอเตอร์ แต่เมื่อพิจารณาแรงบิดของมอเตอร์ที่ทำให้โรเตอร์หมุน แรงแม่เหล็กไฟฟ้าในแนวสัมผัสจะเป็นแรงหลักที่ต้องนำมาพิจารณา [16]

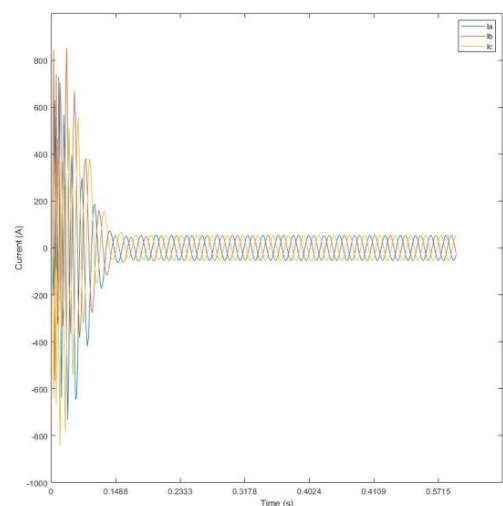
3. การประยุกต์เงื่อนไขเริ่มต้นและเงื่อนไขขอบเขต

ประยุกต์เงื่อนไขเริ่มต้นและเงื่อนไขขอบเขต (initial and boundary condition) ที่สอดคล้องกับปัญหาในสมการรวมของระบบ (constraints) ซึ่งงานวิจัยนี้มีค่าเงื่อนไขเริ่มต้นในรอบแรกที่พิจารณาการหมุนของมอเตอร์คือ $A(t=0) = 0$ ส่วนการหมุนรอบถัดไปจะใช้คำตอบจากรอบที่แล้วเป็นเงื่อนไขเริ่มต้น เพื่อประหยัดเวลาในการหาคำตอบที่ถูกต้อง[17] ส่วนค่าเงื่อนไขขอบเขต จะกำหนดให้ขอบในที่ดีกับเพลลาและขอบนอกของมอเตอร์มีค่า $A = 0$

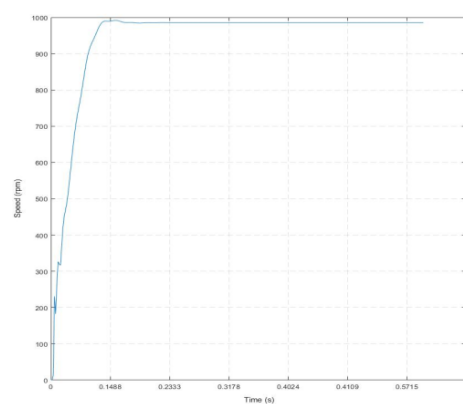
การจำลองผลสนามแม่เหล็ก ได้พิจารณาต้นแบบมอเตอร์แกนฟลักซ์แบบสเตเตอร์เดี่ยวโรเตอร์เดี่ยวขนาด 5kW โดยค่าพารามิเตอร์ต่างๆทั้งทางไฟฟ้าและทางกลแสดงในตารางที่ 1 [17-18] และกระแสที่นำมาจำลองแสดงดังรูปที่ 2

ตารางที่ 1 แสดงค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์แกนฟลักซ์

พารามิเตอร์	ค่า
กำลังงานขาออก	5 kW
แรงดันแหล่งจ่าย	380 V
จำนวนขั้ว	6 P
ความถี่แหล่งจ่าย	50 Hz
ความเร็วพิกัด	1000 rpm
ชนิดการพันของขดลวดสเตเตอร์	แบบสองชั้น
จำนวนร่องของสเตเตอร์	36 ร่อง
ความกว้างช่องอากาศ	1.5 mm
ความหนาแม่เหล็ก	4 mm
เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก	200 mm
เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน	140 mm



รูปที่ 2 รูปคลื่นกระแสไฟฟ้าแต่ละเฟสที่จ่ายให้มอเตอร์



รูปที่ 3 กราฟความเร็วรอบเปลี่ยนแปลงตามเวลาที่ได้จากการคำนวณ

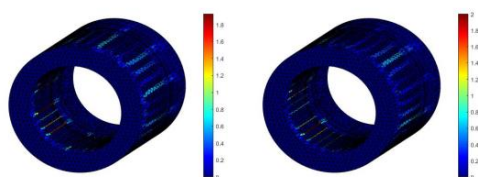
จากรูปที่ 3 จะเห็นว่า ค่าความเร็วรอบจะมีค่าเป็นศูนย์ที่เวลาเริ่มต้น และจะมีเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว และคงที่ที่เวลาประมาณ 0.2 วินาที ด้วยค่าความเร็วรอบประมาณ 985 rpm

ผลการทดลองและการอภิปรายผล

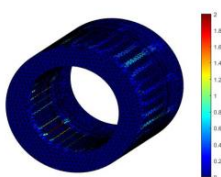
ในการคำนวณเชิงตัวเลขผลลัพธ์ที่ได้ของสนามแม่เหล็กโดยใช้ MATLAB ดังแสดงในรูปที่ 4 เป็นผลการจำลองของมอเตอร์มอเตอร์แกนฟลักซ์แบบแม่เหล็กถาวรฝังในแกนโรเตอร์ แสดงการกระจายตัวของสนามแม่เหล็ก ตามปริมาตรของมอเตอร์เมื่อโรเตอร์หมุนไปจากมุม 0 องศา ถึง 180 องศา ในรูปที่ 5 เป็นผลการจำลองของมอเตอร์มอเตอร์แกนฟลักซ์แบบแม่เหล็กถาวรฝังในแกนโรเตอร์ แสดงการกระจายตัวของสนามแม่เหล็ก ตามปริมาตรของมอเตอร์เมื่อโรเตอร์หมุนไปจากมุม 0

องศา ถึง 180 องศา โดยโรเตอร์ทั้งสองรูปแบบหมุนในทิศทางตามเข็มนาฬิกา ด้วยมุมต่างกัน 45 องศา

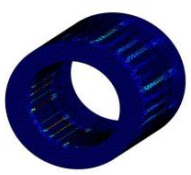
การคำนวณหาค่าความหนาแน่นสนามแม่เหล็กในแนวลำตัว (B_r) ที่กระทำกับช่องอากาศของมอเตอร์ตรงส่วนของฟันสเตเตอร์ในแต่ละซี่ทั้ง 36 ซี่ ที่มีมุมการหมุนของโรเตอร์แปรเปลี่ยนไป โดยรูปที่ 4-5 เป็นการแสดงค่า B_r ที่กระทำตรงฟันของสเตเตอร์ในแต่ละซี่ ซึ่งเป็นการพิจารณาเมื่อร่องโรเตอร์หมุนไป 0 องศา, 90 องศา และ 180 องศา (ซี่ที่ 1 คือตำแหน่ง 0 องศา เทียบกับแกน x+ และซี่ถัดไปจะวางตัวเป็นลำดับในทิศทางตามเข็มนาฬิกา) ซึ่งจะสังเกตเห็นว่ารูปกราฟมีแอมพลิจูดสูงสุดประมาณ 0.3 T และรูปกราฟของ B_r จะมีลักษณะเหมือนเดิมเมื่อโรเตอร์หมุนผ่านไปประมาณ 180 องศา



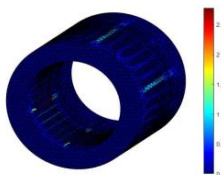
(ก) 0 องศา



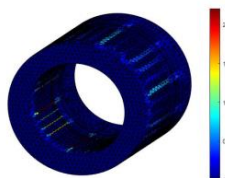
(ข) 45 องศา



(ค) 90 องศา



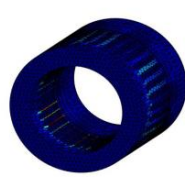
(ง) 135 องศา



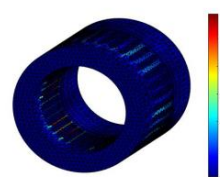
(จ) 180 องศา

รูปที่ 4 การกระจายตัวของสนามแม่เหล็ก (T)

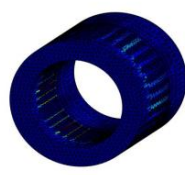
เมื่อพิจารณาการติดตั้งแม่เหล็กแบบฝังในแกนโรเตอร์ เมื่อโรเตอร์หมุนตามเข็มนาฬิกา



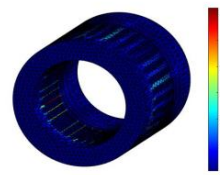
(ก) 0 องศา



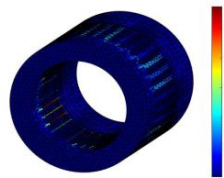
(ข) 45 องศา



(ค) 90 องศา



(ง) 135 องศา



(จ) 180 องศา

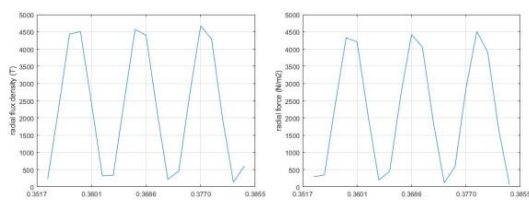
รูปที่ 5 การกระจายตัวของสนามแม่เหล็ก (T)

เมื่อพิจารณาการติดตั้งแม่เหล็กที่ผิวโรเตอร์ เมื่อโรเตอร์หมุนตามเข็มนาฬิกา



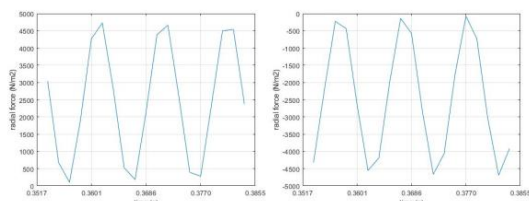
เมื่อคำนวณหาค่าสนามแม่เหล็กแล้ว ได้นำสมการความเค้นของแมกซ์เวลล์มาหาค่าแรงแม่เหล็กในแนวรัศมีและแนวสัมผัสที่กระทำกับช่องอากาศตรงพื้นสเตเตอร์ในแต่ละซี่ เทียบกับเวลาที่โรเตอร์หมุนครบ 1 รอบ โดยพิจารณาซี่ที่ 1 ถึงซี่ที่ 6 เนื่องจากผลการกระทำซ้ำกันตามระยะพิทช์ จากรูปที่ 6 พบว่ากราฟแรงแม่เหล็กในแนวรัศมีเทียบกับเวลามีลักษณะคล้ายคลื่นไซน์ โดยมีแรงสูงสุดประมาณ $60,117 \text{ N/m}^2$ ที่ซี่ที่ 6 และต่ำสุดประมาณ $3,732 \text{ N/m}^2$ ที่ซี่ที่ 5 ซึ่งแรงในแนวรัศมีส่งผลต่อการสั่นสะเทือนของมอเตอร์ จากรูปที่ 7 กราฟแรงแม่เหล็กในแนวสัมผัสแสดง

พฤติกรรมคล้ายคลื่นไซน์เช่นกัน โดยมีแรงสูงสุดประมาณ $45,643 \text{ N/m}^2$ ที่ซี่ที่ 3 และต่ำสุดประมาณ 544 N/m^2 ที่ซี่ที่ 1 ซึ่งแรงแนวสัมผัสมีผลต่อการหมุนของมอเตอร์ สำหรับรูปที่ 8 พบว่าแรงแม่เหล็กในแนวรัศมีมีค่าสูงสุดประมาณ $8,638 \text{ N/m}^2$ ที่ซี่ที่ 1 และต่ำสุดประมาณ 432 N/m^2 ที่ซี่ที่ 3 ขณะที่ในรูปที่ 9 กราฟแรงแม่เหล็กในแนวสัมผัสมีค่าสูงสุดประมาณ $9,635 \text{ N/m}^2$ ที่ซี่ที่ 3 และต่ำสุดประมาณ $1,082 \text{ N/m}^2$ ที่ซี่ที่ 5 แสดงให้เห็นพฤติกรรมของแรงที่แตกต่างกันในแต่ละซี่และผลกระทบที่มีต่อการทำงานของมอเตอร์



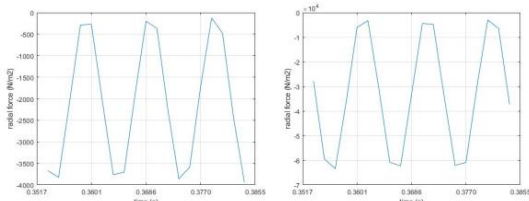
(ก) ซี่ที่ 1

(ข) ซี่ที่ 2



(ค) ซี่ที่ 3

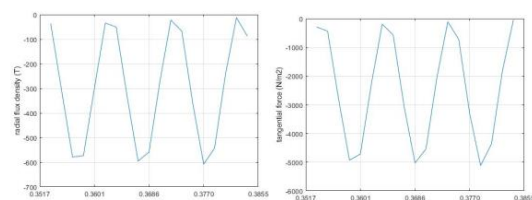
(ง) ซี่ที่ 4



(จ) ซี่ที่ 5

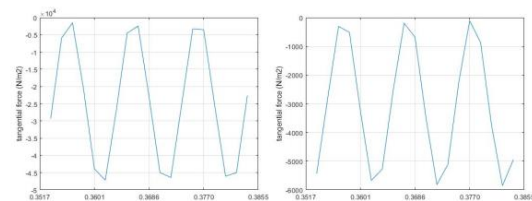
(ฉ) ซี่ที่ 6

รูปที่ 6 แรงแม่เหล็กตามแนวรัศมีที่กระทำกับพื้นสเตเตอร์เมื่อพิจารณาการติดตั้งแม่เหล็กที่ฝังโรเตอร์



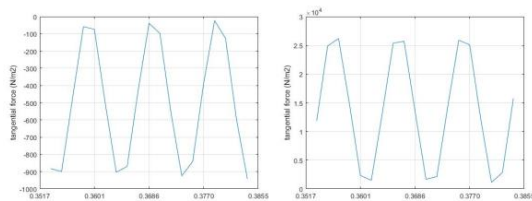
(ก) ซี่ที่ 1

(ข) ซี่ที่ 2



(ค) ซี่ที่ 3

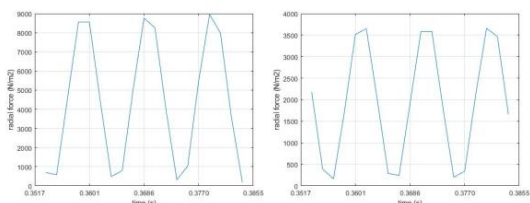
(ง) ซี่ที่ 4



(จ) ซี่ที่ 5

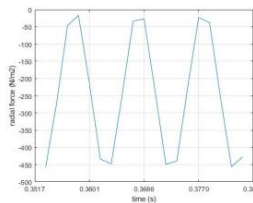
(ฉ) ซี่ที่ 6

รูปที่ 7 แรงแม่เหล็กแนวสัมผัสที่กระทำกับพื้นสเตเตอร์เมื่อพิจารณาการติดตั้งแม่เหล็กแบบฝังในแกนโรเตอร์

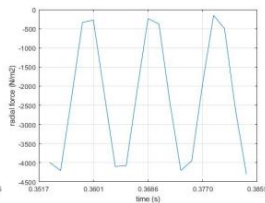


(ก) ชีตที่ 1

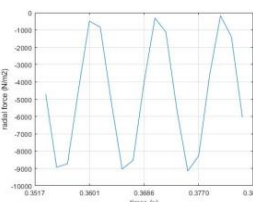
(ข) ชีตที่ 2



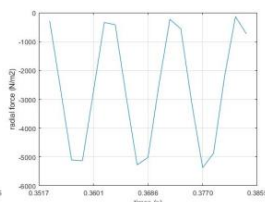
(ค) ชีตที่ 3



(ง) ชีตที่ 4

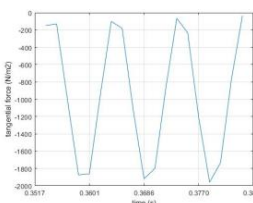


(จ) ชีตที่ 5

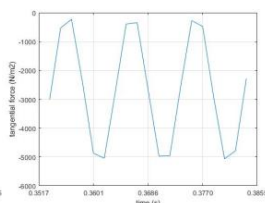


(ฉ) ชีตที่ 6

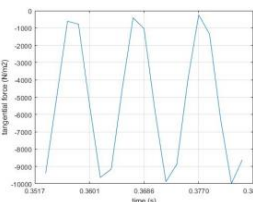
รูปที่ 8 แรงแม่เหล็กตามแนวรัศมีที่กระทำกับฟันสเตเตอร์เมื่อพิจารณาการติดตั้งแม่เหล็กที่ผิวโรเตอร์



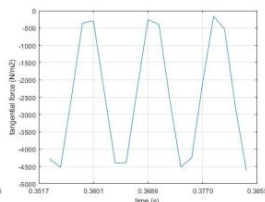
(ก) ชีตที่ 1



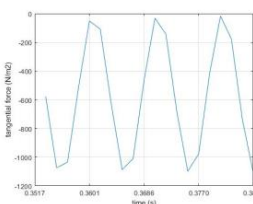
(ข) ชีตที่ 2



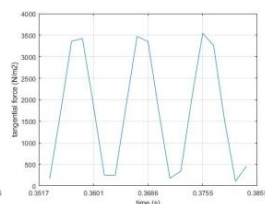
(ค) ชีตที่ 3



(ง) ชีตที่ 4



(จ) ชีตที่ 5



(ฉ) ชีตที่ 6

รูปที่ 9 แรงแม่เหล็กตามแนวสัมผัสที่กระทำกับฟันสเตเตอร์เมื่อพิจารณาการติดตั้งแม่เหล็กที่ผิวโรเตอร์

เมื่อพิจารณาแรงบิด (r) ที่ทำให้โรเตอร์หมุนในสถานะคงที่ จะใช้แรงแม่เหล็กไฟฟ้าในแนวสัมผัส (F_t) มาพิจารณา โดยสามารถหาแรงบิดที่เกิดขึ้นได้จากสมการ $r = F_t \times r^2$ เมื่อ r คือรัศมีของมอเตอร์ ค่าแรงบิดในตารางที่ 2 และ 3 จะพิจารณาเมื่อโรเตอร์หมุนไปตามมุมต่างๆ ตั้งแต่มุม 0 องศา ถึง 180 องศา ทิศทางตามเข็มนาฬิกาต่างกันทีละ 45 องศา

ตารางที่ 2 แสดงค่าของแรงบิดสูงสุดที่เกิดขึ้นเมื่อพิจารณาการติดตั้งแม่เหล็กถาวรแบบฝังในแกนโรเตอร์

มุมที่มอเตอร์หมุนไป (องศา)	เวลา (s)	ค่าแรงแม่เหล็กแนวสัมผัส (N/m^2)	ค่าแรงบิดสูงสุด (Nm)
0	0.3517	3.08×10^4	307.96
45	0.3601	4.60×10^4	459.87
90	0.3686	3.41×10^4	341.01
135	0.3770	6.37×10^4	636.66
180	0.3855	3.83×10^4	382.86

ตารางที่ 3 แสดงค่าของแรงบิดสูงสุดที่เกิดขึ้นเมื่อพิจารณาการติดตั้งแม่เหล็กถาวรที่ผิวโรเตอร์

มุมที่มอเตอร์หมุนไป (องศา)	เวลา (s)	ค่าแรงแม่เหล็กแนวสัมผัส (N/m^2)	ค่าแรงบิดสูงสุด (Nm)
0	0.3517	1.29×10^4	129.23
45	0.3601	8.09×10^4	80.91
90	0.3686	8.85×10^4	85.44
135	0.3770	9.72×10^4	97.25
180	0.3855	1.31×10^4	131.12

จากตารางที่ 2 แสดงค่าของแรงบิดสูงสุดที่เกิดขึ้นเมื่อพิจารณาการติดตั้งแม่เหล็กถาวรแบบฝังในแกนโรเตอร์ ค่าแรงบิดสูงสุดที่เกิดขึ้นเท่ากับ 636.66 Nm ที่มุม 135 องศา และจากตารางที่ 3 แสดงค่าของแรงบิดสูงสุดที่เกิดขึ้นเมื่อพิจารณาการติดตั้งแม่เหล็ก

ถาวรติดตั้งแม่เหล็กถาวรที่ผิวโรเตอร์ ค่าแรงบิดสูงสุดที่เกิดขึ้นเท่ากับ 131.12 Nm ที่มุม 180 องศา

จากการจำลองสนามแม่เหล็กของมอเตอร์แกนฟลักซ์ โดยเปรียบเทียบการติดตั้งแม่เหล็กถาวรสองรูปแบบ คือ แบบฝังในแกนโรเตอร์ (IPM) และแบบติดตั้งที่ผิวโรเตอร์ (SPM) พบว่า มอเตอร์แบบฝังในแกนโรเตอร์ให้การกระจายศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็กที่สมดุลกว่า มีความหนาแน่นสนามแม่เหล็กและแรงแม่เหล็กในแนวรัศมีสูงกว่า ส่งผลให้แรงบิดเฉลี่ยที่ได้มีค่ามากกว่ามอเตอร์แบบติดตั้งที่ผิวโรเตอร์ ขณะที่แบบติดตั้งที่ผิวโรเตอร์มีการกระจายสนามแม่เหล็กที่ไม่สมดุล ส่งผลให้แรงบิดต่ำกว่า ดังนั้นโครงสร้างแม่เหล็กแบบฝังในจึงเหมาะสำหรับการพัฒนามอเตอร์แกนฟลักซ์ที่ต้องการแรงบิดสูงและขนาดกะทัดรัดสำหรับใช้งานในยานยนต์ไฟฟ้า

สรุปผลการทดลอง

จากการศึกษาผลกระทบของรูปแบบการติดตั้งแม่เหล็กถาวรในมอเตอร์แกนฟลักซ์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์แบบสามมิติ พบว่าการติดตั้งแม่เหล็กแบบฝังในแกนโรเตอร์ (Interior Permanent Magnet: IPM) ส่งผลให้การกระจายตัวของศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็กมีความสมดุลมากกว่าการติดตั้งที่ผิวโรเตอร์ (Surface Permanent Magnet: SPM) โดยมีความหนาแน่นสนามแม่เหล็กและแรงบิดสูงกว่ารูปแบบ SPM อย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งส่งผลโดยตรงต่อประสิทธิภาพและเสถียรภาพของมอเตอร์ในสภาวะการหมุนคงที่ ทั้งนี้ รูปแบบ IPM จึงเหมาะสมสำหรับการพัฒนาเทคโนโลยีมอเตอร์แกนฟลักซ์เพื่อใช้งานในยานยนต์ไฟฟ้า ที่ต้องการแรงบิดสูงในขนาดที่กะทัดรัด อย่างไรก็ตาม เพื่อให้การประเมินสมรรถนะของมอเตอร์มีความครบถ้วนยิ่งขึ้น งานวิจัยในอนาคตควรขยายขอบเขตการศึกษาไปยังปัจจัยอื่น ๆ เช่น ลักษณะรูปทรงแม่เหล็ก ชนิดวัสดุแม่เหล็ก คุณสมบัติทางความร้อน และพฤติกรรมของมอเตอร์ภายใต้สภาวะโหลดที่เปลี่ยนแปลง เพื่อเพิ่มความแม่นยำในการออกแบบและประเมินประสิทธิภาพในสภาพการใช้งานจริง

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนทุนการศึกษาจากคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตขอนแก่น

เอกสารอ้างอิง

- [1] T. F. Chan and L. L. Lai, "An axial-flux permanent-magnet synchronous for a direct-coupled wind-turbine system," IEEE Trans. Energy Convers., vol. 22, no. 1, pp. 86–94, Mar. 2007.
- [2] S. Javadi and M. Mirsalim, "Design and analysis of 42-V coreless axial-flux permanent-magnet generators for automotive applications," IEEE Trans. Magn., vol. 46, no. 4, pp. 1015–1023, Apr. 2010.
- [3] A. Kampker et al., "Comprehensive Review and Systemization of the Product Features of Axial Flux Machines," 2024 1st International Conference on Production Technologies and Systems for E-Mobility (EPTS), Bamberg, Germany, 2024.
- [4] Aydin, M., Gulec, M., Demir, Y., et al.: Design and validation of a 24-pole coreless axial flux permanent magnet motor for a solar powered vehicle'. 2016 XXII Int. Conf. on Electrical Machines (ICEM), Lausanne, Switzerland, 2016, pp. 1493–1498.
- [5] Benzaquen J, He J, Mirafzal B. Toward more electric powertrains in aircraft: Technical challenges and advancements. CES Trans Electric Motors Syst 2021;5(3): 177–193.
- [6] B. V and C. C, "Characteristic Stability Analysis of Axial Flux Motors in Comparison with Radial Flux Motors Subjected to EV Application," 2023 IEEE International Conference on Power Electronics, Smart Grid, and Renewable Energy (PESGRE), Trivandrum, India, 2023, pp. 1-6.



[7] A. Bunmat and P. Pao-la-or, (2015). Analysis of magnetic field effects operators working a power transmission line using 3-D finite element method, *2015 18th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS)*, Pattaya, Thailand, pp. 1187-1191.

[8] P. Saikham, P. Pao-La-Or, T. Yuangkaew, and A. Bunmat, (2023). Electromagnetic Field Simulation of Pantograph for Electric Train Using 3D Finite Element Method, *2023 International Electrical Engineering Congress (iEECON)*, Krabi, Thailand, pp. 68-71.

[9] M. V. K. Chari and S. J. Salon, (2000). *Numerical methods in electromagnetism*, Academic Press, USA.

[10] Jr.W.H. Hayt and J.A. Buck, (2006). *Engineering Electromagnetics* (7th edition), McGraw-Hill, Singapore.

[11] S. Hadi, (1999). *Power System Analysis*, Senior Consulting Edition (3rd ed.), New York: Mc-Graw Hill.

[12] R. Lerch, (1990). Simulation of piezoelectric devices by two and three dimension finite element, *IEEE Transactions on Ultrasonics*, 37 (2): 233-247.

[13] M. Ibrahim and A. Abd-Elhady, (2017), Calculation of Electric Field and Partial Discharge Activity Reduction for Covered Conductor/High Voltage Insulator Systems, *Electric Power Systems Research*, vol. 144, pp. 72-80.

[14] P. Pao-la-or, and A. Bunmat, (2019). Shielding of Magnetic Field Effects on Operators Working a Power Transmission Lines Using 3-D FEM, *International Journal of*

Mechanical Engineering and Robotics Research, vol. 8, no. 5.

[15] A. Bunmat, P. Saikham and P. Pao-La-Or, "Distributions of Flux and Electromagnetic Force in Brushless Motor Using 3-D FEM," *2023 International Electrical Engineering Congress (iEECON)*, Krabi, Thailand, 2023, pp. 342-345.

[16] A. Bunmat, T. Kongtham, P. Krikodsong, W. Bunyawut and T. Simma, "Magnetic Field Simulation of Multiphase Wind Generator Using 3D Finite Element Method," *2024 12th International Electrical Engineering Congress (iEECON)*, Pattaya, Thailand, 2024.

[17] Mojtaba Alamdar Yazdi, Seyed Amin Saied, and Seyyed Mehdi Mirimani (2020). Design and construction of new axial-flux permanent magnet motor. *IET Electric Power Applications*. 14: 2389-2394.

[18] Hao, Z.; Ma, Y.; Wang, P.; Luo, G.; Chen, Y. A Review of Axial-Flux Permanent-Magnet Motors: Topological Structures, Design, Optimization and Control Techniques. *Machines* 2022.



Comparing the Performance of Probabilistic Weighting Classification Techniques for Water Quality Assessment

Nipada Papukdee^{1*}, Preut Thanarat², Kanokporn Rattanasuteerakul³,
and Chatklaw Jareanpon⁴

¹ Department of Applied Statistics, Faculty of Engineering, Rajamagala University of Technology Isan, Khon Kaen campus, 150 Moo 6, Srichan Road, Muang Khon Kaen, Khon Kaen, 40000

² Department of New Media, Faculty of Informatics, Mahasarakham University, Kamrieng subdistrict, Kantharawichai, Maha Sarakham, 44150

³ Department of Department of Sociology and Anthropology, Faculty of Humanities and Social Sciences, Mahasarakham University, Kamrieng subdistrict, Kantharawichai, Maha Sarakham, 44150

⁴ Department of Computer Science, POLAR Lab, Faculty of Informatics, Mahasarakham University Kamrieng subdistrict, Kantharawichai, Maha Sarakham, 44150, Thailand

*Corresponding Author: nipada.pa@rmuti.ac.th, 0885521606

Received 2 May 2025; Received in revised form 12 June 2025; Accepted 16 June 2025

Abstract

This research investigation explores the comparative performance of probability weighting classification techniques in the assessment of water quality. The dataset, sourced from Kaggle, comprises 7,999 records detailing water quality, characterized by 21 dimensions of chemical component quantities and another binary-class quality indicator. Through the integration of ensemble methods and the utilization of pairwise comparison techniques, the study demonstrates enhancements in precision, recall, and F-measure, achieving a minimum increase of 6.68%, albeit with a maximum trade-off of 5.16% in accuracy, when compared to single classifiers. These findings not only contribute to advancing single classification techniques but also lay the groundwork for the development of more resilient and dependable models. The implications of this research extend to practical applications in environmental monitoring practices, influencing policy decisions, and guiding interventions aimed at safeguarding water quality. By establishing a foundation for robust modeling, the study underscores its significance in shaping proactive measures for sustaining and preserving the quality of water resources.

Keywords: Water Quality, Classification, Probabilistic Weighting Ensemble, Machine Learning, Model Performance



1. Introduction

Water quality assessment is fundamental to ensuring environmental sustainability and public health [1]. As the demand for automated and scalable water monitoring systems grows, the integration of machine learning (ML) models becomes increasingly essential [2]. These models enable the analysis of complex, high-dimensional datasets and uncover patterns that may elude traditional analytical approaches [3]. However, challenges such as class imbalance and the demand for high precision in sensitive environmental contexts continue to hinder the effectiveness of traditional classification methods [4-5].

This study addresses these challenges by investigating the efficacy of probabilistic weighting ensemble classification techniques. Unlike single-model classifiers, ensemble methods integrate multiple learning algorithms to enhance robustness, mitigate biases, and improve overall predictive accuracy [6-7]. This paper specifically evaluates the use of probabilistic weighting strategies in ensemble learning for water quality classification, with an emphasis on model performance, precision, and practical utility [8-9].

To this end, a comprehensive dataset is employed, accompanied by advanced data preprocessing and robust evaluation metrics to assess model performance. This framework provides a solid foundation for examining the methodology, experimental results, and broader implications of adopting ensemble-based techniques in environmental monitoring systems [6, 10].

The rising severity of global water pollution stemming from sources such as agricultural runoff, industrial discharge, and urban waste underscores the urgency of accurate and adaptive classification systems [1, 11]. Tackling these multifaceted challenges is essential for the development of intelligent, responsive water quality monitoring infrastructures [5].

Prior research has highlighted the advantages of ML in this domain. For instance, [6] demonstrated the power of ensemble models like Random Forests in capturing non-linear relationships in water quality data. In a comprehensive review, [10] discussed the application of supervised learning techniques across environmental datasets. Domingos [12] explored Bayesian classifiers, showcasing their ability to handle imbalanced datasets effectively—a common issue in water quality monitoring. The foundational work of Vapnik [13] on statistical learning theory continues to inform many modern classification frameworks.

Feature engineering remains a critical aspect of improving model performance. As shown in [14], tailored preprocessing steps significantly enhance the accuracy of predictive models in water quality applications. Likewise, [15] emphasized the value of integrating domain knowledge with ML algorithms to boost model interpretability without sacrificing performance.

Handling missing data is another persistent challenge. Research by [16] evaluated various imputation methods such as mean substitution, k-nearest neighbors (k-

NN), and iterative imputation, and iterative imputations have been evaluated for their impact on model outcomes.

Beyond feature engineering, recent advancements in deep learning have also shown promise in automating the feature extraction process. Convolutional Neural Networks (CNNs), for instance, have been adapted for water quality time-series data, offering insights into temporal patterns and trends.

2. Methodology

2.1 Dataset Description

The dataset used in this study was sourced from Kaggle and includes 7,999 records, each characterized by 21 chemical parameters and a binary quality indicator. Preprocessing steps included normalization to standardize data ranges, handling missing values using mean imputation, and applying recursive feature elimination to select the most relevant features [17]. Data visualization techniques, such as heatmaps and box plots, were employed to analyze the relationships among variables and to examine data distribution, as shown in Fig. 1 and Fig. 2. The analysis revealed that some variables contain values that fall outside the normal range (outliers), which may affect the accuracy of the model in subsequent stages.

Additional data preprocessing was performed by detecting and removing outliers using the Interquartile Range (IQR) method, as illustrated in Fig. 3, is a preprocessing step that enhances data quality prior to advanced analysis or model development [18]. Furthermore, Principal Component Analysis (PCA) was applied to

reduce data dimensionality and enhance computational efficiency during model training [19].

Data augmentation techniques, such as synthetic oversampling, were employed to address class imbalance, ensuring that the minority class received adequate representation during training.

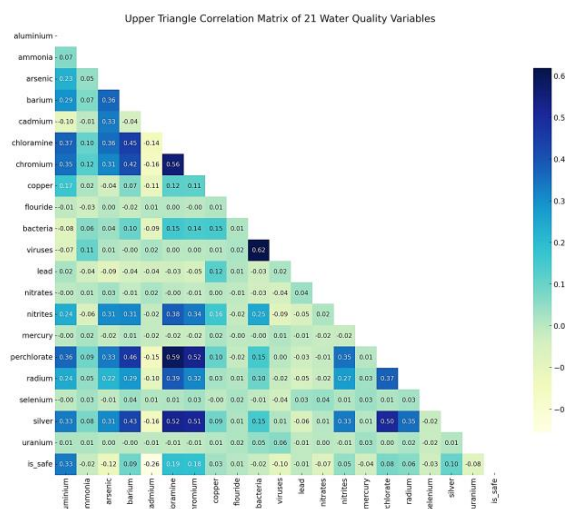


Fig. 1 Heatmap for Correlation Matrix of data water quality

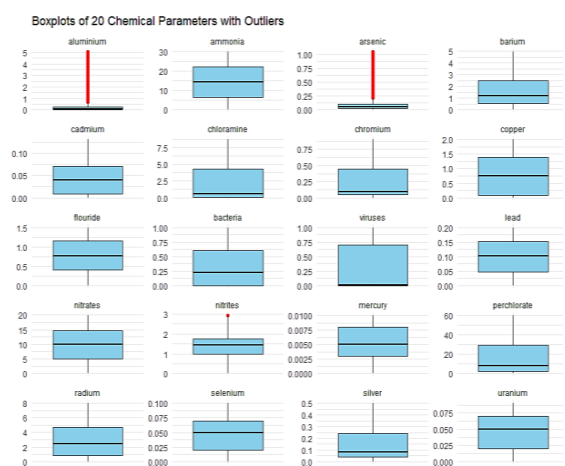


Fig. 2 Boxplots show the distribution of 20 chemical parameters including outliers.

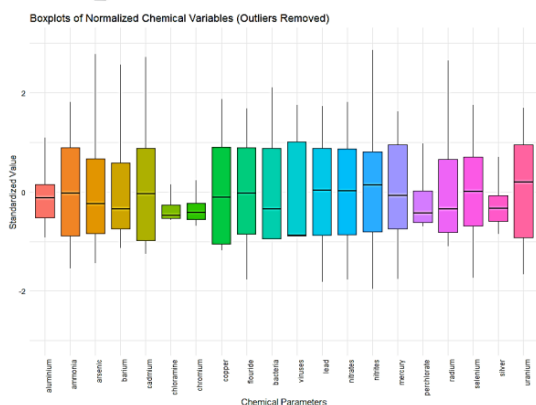
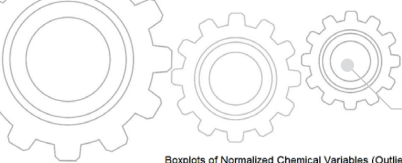


Fig. 3 Distribution of 20 normalized chemical parameters after removing outliers using the IQR method. Standardized values are shown as Z-scores

Table 1 presents the descriptive statistics of selected variables used in the water quality analysis. The table includes the mean, standard deviation, minimum, and maximum values for each variable. This information provides an overview of the data distribution and serves as a foundation for more advanced analyses in subsequent stages. We selected variables based on their Pearson correlation with the target variable `is_safe`. Specifically, we computed the correlation matrix across all 21 variables in Fig. 1, then chose the top five variables most strongly related to `is_safe` to populate Table 1.

Table 1 Statistics of some dataset

Parameter	Mean	Std. Dev.	Min	Max
1. aluminium	0.67	1.27	0.00	5.05
2. cadmium	0.04	0.04	0.00	0.13
3. chloramine	2.18	2.57	0.00	8.68
4. chromium	0.25	0.27	0.00	0.90
5. arsenic	0.16	0.25	0.00	1.05

2.2 Classification Techniques

We employed multiple classification techniques, including Decision Trees, which split data based on important features using a tree structure, making the results easy to interpret [20]. Support Vector Machines (SVMs) were used to find the optimal decision boundary that maximizes the margin between classes, especially effective for high-dimensional and complex data [21]. Additionally, we implemented Probabilistic Weighting Ensembles, which combine multiple models through weighted majority voting where weights are dynamically adjusted based on each model's confidence scores, enhancing classification performance and result stability [22-23]. Hyperparameter tuning was performed using a grid search methodology to optimize model performance. Cross-validation was applied to ensure robustness, using a 5-fold validation approach. All computations were performed in R using the `caret` package.

The models were evaluated under various scenarios, including imbalanced class distributions and noise injections, to simulate real-world challenges. Comparative analyses were conducted to benchmark the probabilistic ensemble against traditional classifiers.

2.3 Performance Metrics

Performance was evaluated using precision, recall, F-measure, and accuracy. These metrics provide a comprehensive view of model effectiveness, balancing the trade-offs between true positive rates and prediction reliability. The Matthews correlation coefficient (MCC) was also



included to assess the balance between all four confusion matrix categories.

3. Results and Conclusion

3.1 Comparative Performance

Table 2 and Fig. 4 present a comparison of performance metrics for three classification models: SVM, Probabilistic Ensemble, and Decision Tree, using four key measures:

Table 2 Performance Metrics Comparison

Model Type	SVM	Probabilistic Ensemble	Decision Tree
1. Precision (%)	78.32	84.50	80.45
2. Recall (%)	75.10	82.45	78.33
3. F-Measure (%)	76.68	83.47	79.38
4. Accuracy (%)	85.42	80.26	82.90



Fig. 4 Performance Evaluation of Classification Models: SVM, Probabilistic Ensemble, and Decision Tree

Precision: the proportion of positive predictions that are correct. The Probabilistic Ensemble model achieves the highest precision at 84.50%, outperforming both SVM and Decision Tree.

Recall: the proportion of actual positive cases correctly identified by the model. The Probabilistic Ensemble again leads with the highest recall of 82.45%, indicating better detection of positive instances.

F-Measure: the harmonic mean of precision and recall, reflecting the balance between them. The Probabilistic Ensemble attains the highest F-Measure at 83.47%, demonstrating the best overall performance.

Accuracy: the proportion of total correct predictions. Although the SVM model shows the highest accuracy at 85.42%, the Probabilistic Ensemble outperforms in precision, recall, and F-Measure, suggesting a more balanced and effective classification performance.

The probabilistic weighting ensemble models demonstrated significant improvements in precision (+6.68%) and recall, translating to higher F-measure scores. However, a maximum trade-off of 5.16% in accuracy was observed, highlighting the need for context-specific model selection.

The Probabilistic Ensemble model notably improves Precision and Recall, despite a slight decrease in Accuracy (~5%). Its superior F1 score indicates a well-balanced reduction in both false positives and false negatives. Thus, significantly reducing false positives and false negatives is deemed worthwhile, even at the cost of a minor decline in overall accuracy [24-25].

The choice of a Probabilistic Ensemble model goes beyond simply leveraging algorithmic platforms it directly tackles practical concerns by significantly reducing



critical errors in water quality assessment systems.

3.2 Conclusion

This study confirms that probabilistic weighting ensemble techniques outperform single models in water quality assessment, particularly in terms of Precision and Recall. These metrics offer a clearer view of model performance in reducing classification errors, especially in imbalanced datasets. While Accuracy remains a standard evaluation metric, it is increasingly recognized that relying solely on it can be misleading in such contexts. Therefore, current best practices recommend prioritizing Precision and Recall, as they better reflect the model's effectiveness in identifying true positive cases and minimizing false classifications [26], [27]. These findings hold significant potential for enhancing environmental monitoring systems and informing public health and environmental policy. Future work will aim to expand the approach to multiclass classification problems and tackle related computational challenges, leveraging machine learning advances and domain expertise to support the sustainable management of water resources.

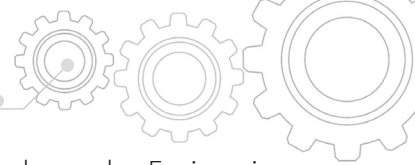
Future work will focus on addressing computational challenges and extending the methodology to multiclass classification scenarios. By leveraging advancements in ML and domain knowledge, we aim to contribute further to the sustainability and preservation of water resources.

4. Acknowledgement

This research received support from the Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Isan, Khon Kaen Campus.

5. References

- [1] World Health Organization. (2017). Guidelines for drinking-water quality (4th ed.). Geneva: WHO.
- [2] Zhou, Z.-H., Wu, J., & Tang, W. (2002). Ensembling neural networks: Many could be better than all. *Artificial Intelligence*, 137(1–2), 239–263.
- [3] Dutta, S., Mishra, S., & Roy, R. (2020). Water quality prediction using machine learning and IoT. *Procedia Computer Science*, 167, 2241–2248.
- [4] Jia, X., Wang, M., & Du, P. (2019). A new class-imbalance learning method for environmental data. *Environmental Modelling & Software*, 118, 231–245.
- [5] He, H., & Garcia, E. A. (2009). Learning from imbalanced data. *IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering*, 21(9), 1263–1284.
- [6] Dietterich, T. G. (2000). Ensemble methods in machine learning. In *Multiple classifier systems* (pp. 1–15). Springer.
- [7] Rokach, L. (2010). Ensemble-based classifiers. *Artificial Intelligence Review*, 33(1–2), 1–39.
- [8] Opitz, D. W., & Maclin, R. (1999). Popular ensemble methods: An empirical study. *Journal of Artificial Intelligence Research*, 11, 169–198.
- [9] Zhou, Z.-H. (2012). *Ensemble methods: Foundations and algorithms*. Boca Raton: CRC Press.



[10] Khan, S., Shishir, M. A., Tazin, M. M., & Hoque, M. A. (2022). Water quality monitoring system using IoT and machine learning: A review. *Sensors*, 22(21), 8265.

[11] World Health Organization. (2019). Water pollution and global health. Geneva: WHO.

[12] Domingos, P., & Pazzani, M. (1997). On the optimality of the simple Bayesian classifier under zero-one loss. *Machine Learning*, 29(2–3), 103–130.

[13] Vapnik, V. (1998). Statistical learning theory. New York: Wiley.

[14] Zhang, J., Wang, T., & Wang, Y. (2021). Feature engineering strategies for water quality classification. *Environmental Science & Technology*, 55(3), 1750–1760.

[15] Das, A. A., & Mishra, N. (2020). Integrating domain knowledge into ML-based water quality models. *Applied Water Science*, 10(3), 67–78.

[16] Farhangfar, M., Kurgan, L., & Dy, J. (2008). Impact of imputation of missing values on classification error for discrete data. *Pattern Recognition*, 41(12), 3692–3705.

[17] Kaggle. (n.d.). Water Quality Dataset. Retrieved June 5, 2025,

[18] Leys, C., Ley, C., Klein, O., Bernard, P., & Licata, L. (2013). Detecting outliers: Do not use standard deviation around the mean, use absolute deviation around the median. *Journal of Experimental Social Psychology*, 49(4), 744–746

[19] Jolliffe, I. T., & Cadima, J. (2016). Principal component analysis: A review and recent developments. *Philosophical Transactions of the Royal Society A:*

Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 374(2065), 20150202.

[20] Quinlan, J. R. (1986). Induction of decision trees. *Machine Learning*, 1(1), 81–106.

[21] Cortes, C., & Vapnik, V. (1995). Support-vector networks. *Machine Learning*, 20(3), 273–297

[22] Dietterich, T. G. (2000). Ensemble methods in machine learning. In J. Kittler & F. Roli (Eds.), *Multiple classifier systems* (pp. 1–15). Springer.

[23]. Kuncheva, L. I. (2004). Combining pattern classifiers: Methods and algorithms. Wiley-Interscience.

[24] M. Zajac et al., “Precision vs. Recall: Metrics definitions, tradeoffs & use cases,” V7 Labs Blog, 2022.

[25] Google Developers. (n.d.). Classification: Accuracy, precision, recall, and related metrics [Crash Course module]. Retrieved June 20, 2025, <https://developers.google.com/machine-learning/crash-course/classification/accuracy-precision-recall>

[26] “Classification: Accuracy, precision, recall, and related metrics,” Google Developers, n.d.

[27] Author, B., Smith, J., & Doe, A. (2024, May). A hybrid machine learning approach for imbalanced irrigation water quality classification. ScienceDirect. Retrieved <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1944398624204203sciencedirect.com+6sciencedirect.com+6researchgate.net+6>



การศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อรอยเชื่อมใบเลื่อยสายพานโคบอลต์ M42 ด้วยกระบวนการเชื่อมเลเซอร์

Study of factors affecting the weld of M42 cobalt band saw blades using a laser welding process

บัญญัติ พันธุ์ประสิทธิ์เวช¹, ปฏิพัทธ์ หงษ์สุวรรณ¹, ธรรมวิทย์ ประเสริฐ¹, ธนวัตติ์ เอี่ยมสำอางค์¹
และ ธนัตพร จิตตยานูรักษ์^{1*}

ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการและการจัดการ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม
มหาวิทยาลัยศิลปากร ต.พระปฐมเจดีย์ อ.เมือง จ.นครปฐม 73000

E-mail: Cittayanurak.t@gmail.com, Telephone Number: 063 1936550

Received 18 April 2025; Received in revised form 17 May 2025; Accepted 6 June 2025

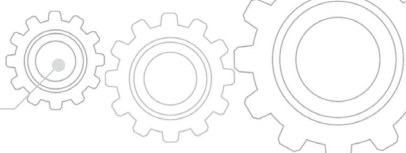
บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มุ่งศึกษาและวิเคราะห์ปัจจัยที่ส่งผลต่อค่าความเค้นแรงดึงของใบเลื่อยสายพาน Cobalt M42 ด้วยการทดสอบแรงดึง หลังจากเชื่อมด้วยเครื่องเชื่อมเลเซอร์รุ่น UG-1000LW ใช้ลวดเชื่อมแบบไส้ฟลักซ์ โดยใบเลื่อยที่นำมาใช้ในการทดลองผ่านการหาค่าความเค้นแรงดึงด้วยเครื่องทดสอบแรงดึง รุ่น Waw-1000 Electro-Hydraulic Servo Tensile ตามมาตรฐาน DIN EN ISO 6892-1 โดยค่าความเค้นแรงดึงเฉลี่ย 72 เมกะปาสคาล ปัจจัยที่ใช้ในการทดลอง ได้แก่ กำลังเลเซอร์ 20%, 30% และ 40% อัตราป้อนลวดเชื่อม 6, 8 และ 10 เมตร/นาที และระยะห่างระหว่างรอยต่อในการเชื่อมต่อใบเลื่อย 0.3, 0.6 และ 0.9 มิลลิเมตร โดยออกแบบการทดลองเป็นแบบแฟกทอเรียลเต็มรูปแบบ โดยทำการทดลองทั้งหมด 81 ครั้ง ที่ค่าความเชื่อมั่น 95% จากการวิเคราะห์โดยใช้ ANOVA พบว่าปัจจัยทั้ง 3 ปัจจัยและ 1 ปฏิสัมพันธ์ระหว่างปัจจัย มีผลต่อค่าความเค้นแรงดึงอย่างมีนัยสำคัญ ได้แก่ กำลังเลเซอร์มีค่า P-value เท่ากับ 0.033 อัตราป้อนลวดเชื่อมมีค่า P-value เท่ากับ 0.00 และระยะห่างระหว่างรอยต่อในการเชื่อมต่อใบเลื่อยมีค่า P-value เท่ากับ 0.034 และ ปฏิสัมพันธ์ระหว่างปัจจัย กำลังเลเซอร์ กับ อัตราป้อนลวดเชื่อม มีค่า P-value เท่ากับ 0.00 โดยมีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจอยู่ที่ 92.86% และจากการหาสถานะที่เหมาะสม ของผลการทดลองที่ได้ พบว่าค่าที่เหมาะสมของปัจจัยแต่ละปัจจัยได้แก่ กำลังเลเซอร์ 40% อัตราป้อนลวดเชื่อม 10 เมตร/นาที และ ระยะห่างระหว่างรอยต่อในการเชื่อมต่อใบเลื่อย 0.3 มิลลิเมตร ผลที่ได้จากปัจจัยดังกล่าวนี้สามารถให้ค่าความเค้นแรงดึง 77.33 เมกะปาสคาล ซึ่งสูงกว่าค่าก่อนการเชื่อมเดิม จึงสรุปได้ว่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมสามารถเชื่อมใบเลื่อยสายพานให้มีความแข็งแรงเพียงพอที่จะนำกลับมาใช้งานได้จริง และสามารถหลีกเลี่ยงการเกิดการขาดที่จุดเดิมได้ รวมทั้งช่วยลดต้นทุนในการจัดซื้อใบเลื่อยใหม่

คำสำคัญ: การเชื่อมด้วยเลเซอร์, ใบเลื่อยสายพาน, โปรแกรมมินิแทบ, การทดสอบแรงดึง, ค่าความเค้นแรงดึง

Abstract

This study aimed to investigate and analyze the factors affecting the tensile stress of Cobalt M42 band saw blades after being welded using a UG-1000LW laser welding machine, employing flux-cored filler wire. The tensile testing was performed using a WAW-1000 Electro-Hydraulic Servo Tensile Testing Machine following the DIN EN ISO 6892-1 standard. The average



tensile stress observed was 72 MPa. The experimental factors included laser power (20%, 30%, and 40%), wire feed rate (6, 8, and 10 meters per minute), and joint gap distance (0.3, 0.6, and 0.9 millimeters). A full factorial experimental design was employed, comprising 81 trials with a confidence level of 95%. The results of an ANOVA analysis revealed that all three factors, as well as one interaction between laser power and wire feed rate, significantly affected the tensile stress. The P-values for laser power, wire feed rate, and joint gap distance were 0.033, 0.000, and 0.034, respectively. Additionally, the interaction between laser power and wire feed rate yielded a P-value of 0.000. The model showed a coefficient of determination (R^2) of 92.86%, indicating a high degree of fit. Optimal welding parameters identified using the Response Optimizer were laser power at 40%, wire feed rate at 10 m/min, and joint gap distance at 0.3 mm. These conditions yielded a maximum tensile stress of 77.33 MPa, which is higher than the pre-weld tensile stress, confirming that the optimized parameters enhance the mechanical integrity of the welded joint. Consequently, it can be concluded that the optimized welding parameters enable the reuse of band saw blades, prevent failure at the original weld joint, and reduce the cost of purchasing new blades.

Keywords: Laser welding, Band saw blades, Minitab, Tensile Test, Tensile Stress

บทนำ

ในปัจจุบัน อุตสาหกรรมการผลิตมีการพัฒนาอย่างต่อเนื่อง โดยเฉพาะด้านเทคโนโลยีการแปรรูปวัสดุ ซึ่งกระบวนการตัดโลหะเป็นหนึ่งในขั้นตอนพื้นฐานที่มีความสำคัญต่อการจัดเตรียมวัตถุดิบหรือชิ้นส่วนสำหรับผลิตภัณฑ์ ใบเลื่อยสายพาน (Band Saw Blade) เป็นเครื่องมือตัดที่นิยมใช้อย่างแพร่หลายในภาคอุตสาหกรรม เนื่องจากสามารถตัดวัสดุได้อย่างต่อเนื่อง มีความแม่นยำ และให้ผิวตัดที่ดี โดยเฉพาะใบเลื่อยชนิด Bi-metal ที่ผลิตจากเหล็กโคบอลต์ M42 ซึ่งประกอบด้วยธาตุ Cobalt (Co), Chromium (Cr), Tungsten (W) และ Carbon (C) ช่วยเพิ่มความแข็งแรง ความต้านทานต่อการสึกหรอ และความทนทานต่ออุณหภูมิสูง [1]

แม้ว่าใบเลื่อยสายพานจะมีคุณสมบัติทางกลที่ดี แต่ในการใช้งานจริงยังคงมีโอกาสดังกล่าวหรือขาดก่อนหมดอายุการใช้งาน ซึ่งอาจเกิดจากการตัดวัสดุที่มีความแข็งหรือความหนาสูง การตั้งค่าความเร็วและแรงตึงไม่เหมาะสม การขาดการบำรุงรักษาเครื่องจักร หรือปัญหาด้านคุณภาพของใบเลื่อยเอง สภาวะเหล่านี้ส่งผลให้เกิดความเสียหายต่อใบเลื่อย

ก่อนเวลาอันควร และก่อให้เกิดต้นทุนในการเปลี่ยนใบเลื่อยใหม่อย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้ การศึกษาที่ผ่านมาระบุว่า การเชื่อมเลเซอร์สามารถใช้กับวัสดุความแข็งสูง เช่น M42 โดยให้คุณสมบัติเชิงกลของแนวเชื่อมอยู่ในระดับที่ใช้งานได้จริง นอกจากนี้ การใช้เทคนิคการเชื่อมเลเซอร์ยังช่วยลดผลกระทบจากความร้อนที่เกิดขึ้นในบริเวณรอบแนวเชื่อม สามารถปรับปรุงคุณสมบัติของรอยเชื่อมให้มีความแข็งแรงและทนต่อความล้าได้ดี ช่วยยืดอายุการใช้งานของใบเลื่อย ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อความแข็งแรงและความทนทานของใบเลื่อยที่ได้รับการซ่อมแซม [2-4]

อย่างไรก็ตาม แม้ว่าจะมีงานวิจัยจำนวนมากที่ศึกษาเทคนิคการเชื่อมเลเซอร์ในวัสดุประเภทโลหะผสมพิเศษ เช่น โลหะผสมไทเทเนียม หรือสแตนเลสที่มีความแข็งสูง [5-6] แต่ยังมีจำนวนน้อยมากที่มุ่งศึกษาไปยังใบเลื่อยสายพาน Bi-metal ที่ผลิตจากเหล็ก Cobalt M42 โดยเฉพาะในประเด็นเกี่ยวกับการซ่อมแซมใบเลื่อยที่ชำรุดผ่านกระบวนการเชื่อมเลเซอร์ งานวิจัยส่วนใหญ่ให้ความสำคัญกับคุณสมบัติเชิงกลของรอยเชื่อมในวัสดุเนื้อเดียว หรือรอยเชื่อมในชิ้นงานใหม่ มากกว่าการนำชิ้นงานที่ผ่าน

การใช้งานแล้วกลับมาใช้ใหม่ นอกจากนี้ ยังไม่มีงานวิจัยที่เปรียบเทียบผลของพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของกระบวนการเชื่อมเลเซอร์ เช่น กำลังเลเซอร์ อัตราป้อนลวดเชื่อม และระยะห่างระหว่างชิ้นงาน ต่อความแข็งแรงของแนวเชื่อมในใบเลื่อย Cobalt M42 โดยตรง ซึ่งถือเป็นปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อคุณภาพของการเชื่อมแซม

ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อเติมเต็มช่องว่างดังกล่าว โดยการออกแบบการทดลองที่เป็นระบบ เพื่อศึกษาปัจจัยที่ใช้ในการเชื่อมใบเลื่อยสายพานที่ขาดจากการใช้งานแต่ยังไม่หมดอายุการใช้งานด้วยกระบวนการเชื่อมเลเซอร์ โดยหาปัจจัยที่มีผลต่อความแข็งแรงของแนวเชื่อมผ่านการทดสอบแรงดึงเพื่อนำไปใช้ในการประเมินความเป็นไปได้ในการนำใบเลื่อยกลับมาใช้งานใหม่ โดยมีค่าใกล้เคียงของเดิม ซึ่งจะช่วยลดต้นทุนในกระบวนการผลิต และเพิ่มความคุ้มค่าทางเศรษฐกิจในภาคอุตสาหกรรม

วัตถุประสงค์

เพื่อศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อความแข็งแรงดึงของใบเลื่อยสายพาน Cobalt M42 ที่เชื่อมด้วยเครื่องเชื่อมเลเซอร์ UG-1000LW โดยมีค่าใกล้เคียงของเดิมเพื่อนำใบเลื่อยกลับมาใช้งานใหม่ได้ และเป็นการลดต้นทุนในการจัดซื้อใบเลื่อยใหม่

1. วิธีดำเนินงาน

งานวิจัยนี้มุ่งศึกษาและวิเคราะห์ปัจจัยที่ส่งผลต่อค่าความแข็งแรงของค่าความแข็งแรงดึงของใบเลื่อยสายพาน Cobalt M42 ด้วยการทดสอบแรงดึง (Tensile Testing) หลังจากเชื่อมด้วยเครื่องเชื่อมเลเซอร์ UG-1000LW

1.1 เครื่องมือ อุปกรณ์ และวัสดุ

- เครื่องเชื่อมเลเซอร์รุ่น UG-1000LW Hand-held Fiber Laser Welding และหัวเชื่อม ดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 เครื่องเชื่อมเลเซอร์รุ่น UG-1000LW Hand-held Fiber Laser Welding และหัวเชื่อม

- เครื่อง Tensile Testing รุ่น Waw-1000 Electro-Hydraulic Servo Tensile ใช้ความเร็วหัวจับในการทดสอบแรงดึง 5 มิลลิเมตรต่อนาที ดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 เครื่อง Tensile Testing

- รางเลื่อน มีมอเตอร์สำหรับขับเคลื่อนรางเลื่อนให้เข้า-ออก ด้านบนมีที่จับยึดชิ้นงานให้แน่นทั้งสองฝั่งโดยการขันเกลียว โดยรางเลื่อนมีความเร็ว 0.003 เมตรต่อนาที ดังรูปที่ 3



รูปที่ 3 รางเลื่อน

- ใบเลื่อยสายพาน M42 Cobalt ความกว้าง 27 มิลลิเมตร หนา 0.9 มิลลิเมตร ดังรูปที่ 4



รูปที่ 4 ใบเลื่อยสายพาน

การทดลองในครั้งนี้ทางผู้วิจัยได้นำใบเลื่อยสายพานสภาพเดิม ไม่ผ่านการใช้งาน เข้ากระบวนการทดสอบแรงดึงตามมาตรฐาน DIN EN ISO 6892-1 เพื่อหาความเค้นแรงดึง ผลลัพธ์ที่ได้จะถูกนำไปใช้เปรียบเทียบกับความเค้นแรงดึงของใบเลื่อยหลังเชื่อมด้วยเลเซอร์ โดยกำหนดตำแหน่งการดึง 2 ส่วน

1. ใบเลื่อยสายพานบริเวณที่ไม่มีการเชื่อม
2. ใบเลื่อยสายพานบริเวณที่ถูกเชื่อม

โดยค่าความเค้นแรงดึงของใบเลื่อยสายพานสภาพเดิมเฉลี่ยอยู่ที่ 72 เมกะปาสคาล

1.2 ปัจจัยที่ศึกษา

1.2.1 ปัจจัยคงที่

- แรงดันก๊าซ ใช้ก๊าซ CO₂ เป็นแก๊สป้องกัน โดยกำหนดอัตราการไหลของก๊าซ CO₂ ที่ 8 ลิตรต่อนาที
- ลวดเชื่อม ใช้ลวดเชื่อมชนิดไส้ฟลักซ์ขนาดความหนา 1.2 มิลลิเมตร
- ความเร็วหัวจับในการทดสอบแรงดึง 5 มิลลิเมตรต่อนาที
- ความถี่ ที่ใช้ในการเชื่อมกำหนดไว้ที่ 3000 เฮิร์ตซ์
- ความเร็วของรางเลื่อน 0.003 เมตรต่อนาที

1.2.2 ปัจจัยอิสระ

- กำลังเลเซอร์ ในที่นี้จะใช้คำว่า Power โดยกำหนดค่า 20%, 30% และ 40%
- อัตราป้อนลวดเชื่อม ในที่นี้จะใช้คำว่า Feeds โดยกำหนดค่า 6, 8 และ 10 เมตรต่อนาที

- ระยะห่างระหว่างรอยต่อในการเชื่อมต่อใบเลื่อย ในที่นี้จะใช้คำว่า Distance โดยกำหนดค่า 0.3, 0.6 และ 0.9 มิลลิเมตร

1.3 การทดลอง

1.3.1 การออกแบบทดลอง

การทดลองจะทำการเชื่อมต่อชิ้นงาน 2 แผ่นด้วยการเชื่อมเลเซอร์ ชิ้นงานเป็นใบเลื่อยสายพาน Cobalt M42 มีลักษณะเป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้าความกว้าง 27 มิลลิเมตร หนา 0.9 มิลลิเมตร และเนื่องจากข้อจำกัดทางวัสดุ ตัวชิ้นงานจึงถูกตัดให้มีความยาว 50 มิลลิเมตรต่อชิ้น โดยใช้เครื่องเชื่อมเลเซอร์ รุ่น UG-1000LW ลวดเชื่อมชนิดไส้ฟลักซ์ขนาด 1.2 มิลลิเมตร โดยเชื่อมตามแนวของรอยต่อชิ้นงาน



รูปที่ 5 ใบเลื่อยหลังทำการเชื่อม

หลังทำการเชื่อมลักษณะที่ได้เป็นดังรูปที่ 5 นำชิ้นงานเข้าเครื่อง Tensile Testing รุ่น Waw-1000 Electro-Hydraulic Servo Tensile ความเร็วหัวจับในการทดสอบแรงดึง 5 มิลลิเมตรต่อนาที และเว้นระยะเกจ (Gauge length) 50 มิลลิเมตร เพื่อทดสอบแรงดึง แล้วนำข้อมูลที่ได้ไปใช้ในการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม Minitab โดยใบเลื่อยหลังดึงมีลักษณะดังรูปที่ 6



รูปที่ 6 ใบเลื่อยหลังทำการดึง

การทดลองนี้ใช้แผนการทดลองแบบแฟกทอเรียลเต็มรูปแบบ (Full Factorial Design) ที่มี 3 ปัจจัย และแต่ละปัจจัยมี 3 ระดับ ดังตารางที่ 1 โดยมีการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง ส่งผลให้มีจำนวนการ

ทดลองทั้งหมด 81 ครั้ง [7] และใช้การสุ่มตัวอย่างในการดำเนินการทดลอง ดังรูปที่ 7 ตัวอย่างตารางสุ่มการทดลอง

StdOrder	RunOrder	PtType	Blocks	Power	Feed	Distance	Stress
53	1	1	1	40	10	0.6	
47	2	1	1	40	6	0.6	
62	3	1	1	20	10	0.6	
18	4	1	1	30	10	0.9	
36	5	1	1	20	10	0.9	
35	6	1	1	20	10	0.6	
61	7	1	1	20	10	0.3	
59	8	1	1	20	8	0.6	
51	9	1	1	40	8	0.9	
38	10	1	1	30	6	0.6	
2	11	1	1	20	6	0.6	
41	12	1	1	30	8	0.6	
15	13	1	1	30	8	0.9	
9	14	1	1	20	10	0.9	
56	15	1	1	20	6	0.6	
40	16	1	1	30	8	0.3	
23	17	1	1	40	8	0.6	
55	18	1	1	20	6	0.3	
72	19	1	1	30	10	0.9	
48	20	1	1	40	6	0.9	
1	21	1	1	20	6	0.3	
43	22	1	1	30	10	0.3	
8	23	1	1	20	10	0.6	
44	24	1	1	30	10	0.6	
65	25	1	1	30	6	0.6	
80	26	1	1	40	10	0.6	
49	27	1	1	40	8	0.3	
34	28	1	1	20	10	0.3	
21	29	1	1	40	6	0.9	

รูปที่ 7 ตัวอย่างตารางสุ่มการทดลอง

ตารางที่ 1 ตารางแสดงปัจจัยและระดับปัจจัยที่ใช้ในการทดลอง

ปัจจัย	ระดับปัจจัย			หน่วย	สัญลักษณ์
	Low (-1)	Medium (0)	High (+1)		
Power	20	30	40	%	α
Feeds	6	8	10	m/min	β
Distance	0.3	0.6	0.9	mm	γ

1.3.2 การตั้งสมมติฐาน

ในการวิเคราะห์ผลการทดลอง จะมีการตั้งสมมติฐานเพื่อตรวจสอบว่าปัจจัยต่าง ๆ ส่งผลต่อค่าความเค้นแรงดึงหรือไม่ โดยใช้ การวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) ในการตรวจสอบผลกระทบ โดยกำหนดสมมติฐานดังนี้

สมมติฐานที่ใช้ในการทดสอบประกอบด้วย

1.3.2.1 สมมติฐานหลัก (Main Hypothesis)

- สมมติฐานที่ 1: Power (α)

H_0 : Power (α) ไม่มีผลกระทบอย่างมีนัยสำคัญต่อค่าความเค้นแรงดึง ของรอยเชื่อม

$$H_0 : \alpha_1 = \alpha_2 = \dots \alpha_i \text{ } i=1,2,\dots$$

H_1 : Power (α) มีผลกระทบอย่างมีนัยสำคัญต่อค่าความเค้นแรงดึง ของรอยเชื่อม

$H_1 : \alpha_1 \neq \alpha_2 \neq \dots \alpha_i$ อย่างน้อย 1 ตัวไม่เท่ากับ 0

- สมมติฐานที่ 2: Feeds (β)

H_0 : Feeds (β) ไม่มีผลกระทบอย่างมีนัยสำคัญต่อค่าความเค้นแรงดึง ของรอยเชื่อม

$$H_0 : \beta_1 = \beta_2 = \dots \beta_j \text{ } j=1,2,\dots$$

H_1 : Feeds (β) มีผลกระทบอย่างมีนัยสำคัญต่อค่าความเค้นแรงดึง ของรอยเชื่อม

$H_1 : \beta_1 \neq \beta_2 \neq \dots \beta_j$ อย่างน้อย 1 ตัวไม่เท่ากับ 0

- สมมติฐานที่ 3: Distance (γ)

H_0 : Distance (γ) ไม่มีผลกระทบอย่างมีนัยสำคัญต่อค่าความเค้นแรงดึง ของรอยเชื่อม

$$H_0 : \gamma_1 = \gamma_2 = \dots \gamma_k \text{ } k=1,2,\dots$$

H_1 : Distance (γ) มีผลกระทบอย่างมีนัยสำคัญต่อค่าความเค้นแรงดึง ของรอยเชื่อม

$H_1 : \gamma_1 \neq \gamma_2 \neq \dots \gamma_k$ อย่างน้อย 1 ตัวไม่เท่ากับ 0

1.3.2.2 สมมติฐานปฏิสัมพันธ์ (Interaction Hypothesis)

- สมมติฐานที่ 4: ปฏิสัมพันธ์ระหว่างปัจจัย Power (α) และ Feeds (β)

H_0 : ไม่มีปฏิสัมพันธ์อย่างมีนัยสำคัญระหว่าง Power (α) และ Feeds (β) ต่อค่าความเค้นแรงดึง ของรอยเชื่อม

H_1 : มีปฏิสัมพันธ์อย่างมีนัยสำคัญระหว่าง Power (α) และ Feeds (β) ต่อค่าความเค้นแรงดึงของรอยเชื่อม

- สมมติฐานที่ 5: ปฏิสัมพันธ์ระหว่างปัจจัย Power (α) และ Distance (γ)

H_0 : ไม่มีปฏิสัมพันธ์อย่างมีนัยสำคัญระหว่าง Power (α) และ Distance (γ) ต่อค่าความเค้นแรงดึงของรอยเชื่อม

H_1 : มีปฏิสัมพันธ์อย่างมีนัยสำคัญระหว่าง Power (α) และ Distance (γ) ต่อค่าความเค้นแรงดึงของรอยเชื่อม

- สมมติฐานที่ 6: ปฏิสัมพันธ์ระหว่างปัจจัย Feeds (β) และ Distance (γ)

H_0 : ไม่มีปฏิสัมพันธ์อย่างมีนัยสำคัญระหว่าง Feeds (β) และ Distance (γ) ต่อค่าความเค้นแรงดึงของรอยเชื่อม

H_1 : มีปฏิสัมพันธ์อย่างมีนัยสำคัญระหว่าง Feeds (β) และ Distance (γ) ต่อค่าความเค้นแรงดึงของรอยเชื่อม

- สมมติฐานที่ 7: ปฏิสัมพันธ์ระหว่างปัจจัย Power (α), Feeds (β) และ Distance (γ)

H_0 : ไม่มีปฏิสัมพันธ์อย่างมีนัยสำคัญระหว่าง Power (α), Feeds (β) และ Distance (γ) ต่อค่าความเค้นแรงดึงของรอยเชื่อม

H_1 : มีปฏิสัมพันธ์อย่างมีนัยสำคัญระหว่าง Power (α), Feeds (β) และ Distance (γ) ต่อค่าความเค้นแรงดึงของรอยเชื่อม

ในการวิเคราะห์ผลการทดลองนี้ ใช้ระดับความเชื่อมั่น 95% หรือระดับนัยสำคัญ $\alpha = 0.05$

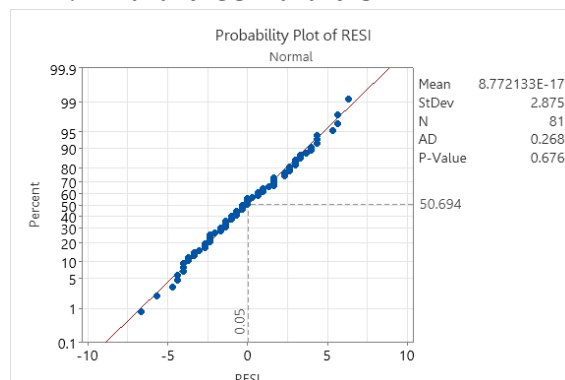
2. ผลการทดลอง

ผลการศึกษาเชื่อมชิ้นงานใบเลื่อยสายพาน Cobalt M42 ความหนา 0.9 มิลลิเมตร จำนวนสองแผ่นเข้าด้วยกัน เป็นดังแสดงในตารางที่ 2 ซึ่งเป็นตารางบันทึกผลการทดลอง เป็นผลการทดลองแบบแฟกทอเรียลเต็มรูปแบบ (Full Factorial Design) 3 ปัจจัย 3 ระดับ และทดลองซ้ำ 3 ครั้ง รวมทั้งหมด 81 ครั้ง ดังแสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ผลการทดลองความเค้นแรงดึง

ผลการทดลอง ที่ระดับปัจจัย Power 20%										
		Distance (mm)								
		0.3			0.6			0.9		
Feeds (m/min)	6	69	60	61	47	46	56	51	43	43
	8	56	65	64	46	51	48	32	35	38
	10	41	46	46	39	31	43	41	41	51
ผลการทดลอง ที่ระดับปัจจัย Power 30%										
		Distance (mm)								
		0.3			0.6			0.9		
Feeds (m/min)	6	69	61	65	44	41	40	35	32	40
	8	68	66	59	57	62	66	54	56	64
	10	64	65	56	61	52	63	37	46	42
ผลการทดลอง ที่ระดับปัจจัย Power 40%										
		Distance (mm)								
		0.3			0.6			0.9		
Feeds (m/min)	6	36	30	37	30	30	31	32	31	30
	8	60	57	61	69	62	59	54	50	49
	10	76	75	81	67	72	74	67	61	60

2.1 การตรวจสอบการกระจายตัว



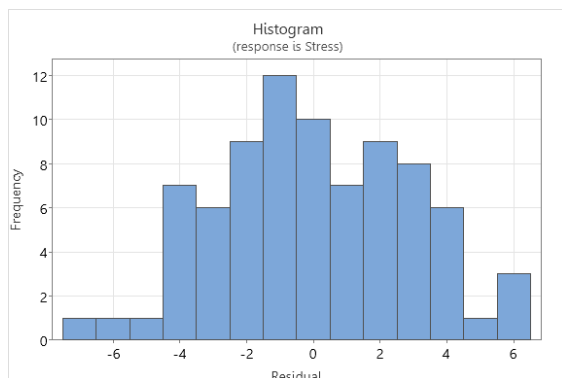
รูปที่ 8 การทดสอบ Normality test ค่าความเค้นที่ได้จากการดึง

จากรูปที่ 8 แสดงการทดสอบ Normality test ค่าความเค้น ได้ทำการทดสอบ Normality test เป็นการตรวจสอบการกระจายตัวแบบปกติ ซึ่งพบว่า P-value = 0.676 > 0.05 ซึ่งสรุปได้ว่าการกระจายตัวของ Residual มีการกระจายตัวตามแนวเส้นตรง ข้อมูลอยู่ในแนวเส้น ทำให้ประมาณได้ว่าข้อมูลมีการแจกแจงแบบปกติ

2.2 การตรวจผลการทดลอง

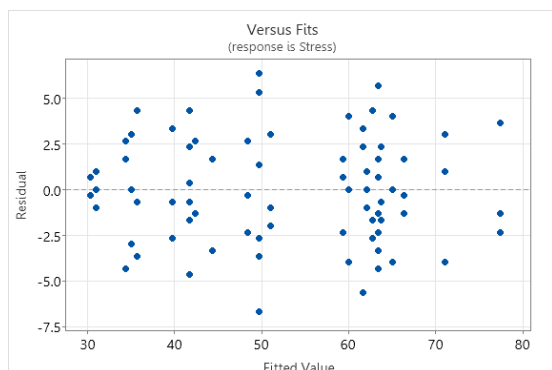
จากผลการทดลองนำมาตรวจสอบความเหมาะสมและความถูกต้องของข้อมูลที่ได้จากการ

ทดลอง พบว่า กราฟ Histogram ดังรูปที่ 9 ที่สามารถลากเส้นโค้งที่มีลักษณะใกล้เคียงกับรูประฆังคว่ำแสดงว่าเศษตกค้างของข้อมูลมีการแจกแจงแบบปกติ ลักษณะกราฟกระจายแบบธรรมชาติ จุดที่มีความสูงที่สุดคล้ายโค้งระฆังคว่ำ ข้อมูลส่วนมากเข้าใกล้ศูนย์กลางและมีการกระจายออกด้านซ้ายและขวาอย่างสมมาตร



รูปที่ 9 กราฟ Histogram

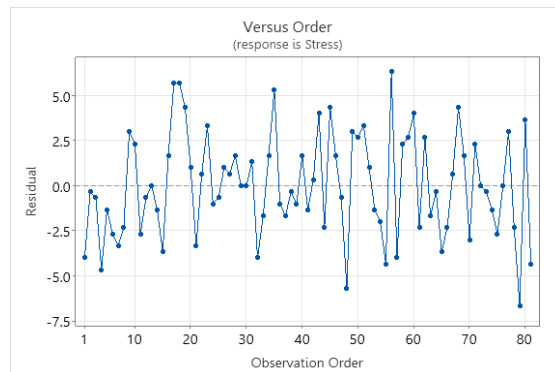
กราฟ Versus Fits ดังรูปที่ 10 แสดงการกระจายตัวของส่วนตกค้าง (Residual) เทียบกับ Fitted Value มีลักษณะกระจัดกระจายอยู่รอบเส้นกลางและไม่มีรูปแบบที่แน่นอน แสดงว่าเศษตกค้างเป็นแบบสุ่มและมีความแปรปรวนที่เท่ากันหรือคงที่สามารถนำข้อมูลดังกล่าวไปทำการวิเคราะห์ความถดถอยเชิงเส้นอย่างง่ายในขั้นตอนต่อไปได้



รูปที่ 10 กราฟ Versus Fits

กราฟ Versus order เป็นกราฟที่ใช้ตรวจสอบดูว่าส่วนตกค้างนั้นขึ้นอยู่กับเวลาที่เปลี่ยนไปในการเก็บข้อมูลหรือไม่ ซึ่งบนกราฟนี้ไม่ควรปรากฏลักษณะของ

แนวโน้มหรือรูปแบบใดๆ อย่างชัดเจน ซึ่งควรมีการกระจายตัวขึ้นลงอย่างสม่ำเสมอ ดังนั้นจากรูปที่ 11 สามารถสรุปได้ว่าข้อมูลที่ได้นำมาวิเคราะห์ สามารถให้ผลการวิเคราะห์ที่ถูกต้องและเชื่อถือได้



รูปที่ 11 กราฟ Versus order

2.3 การวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA)

การวิเคราะห์ความแปรปรวนของข้อมูลค่าของช่องว่างที่เกิดจากรอยตัด ผลการวิเคราะห์ความถดถอยของข้อมูล (General Factorial Regression) โดยโปรแกรม Minitab ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ได้ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของข้อมูล ดังรูปที่ 12

Factor Information

Factor	Type	Levels	Values
Power	Fixed	3	20, 30, 40
Feed	Fixed	3	6, 8, 10
Distance	Fixed	3	0.3, 0.6, 0.9

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	26	9309.1	358.04	2.93	0.000
Linear	6	3945.5	657.58	5.37	0.000
Power	2	887.4	443.72	3.63	0.033
Feed	2	2177.4	1088.68	8.90	0.000
Distance	2	880.7	440.35	3.60	0.034
2-Way Interactions	12	4738.0	394.83	3.23	0.002
Power*Feed	4	3423.8	855.96	7.00	0.000
Power*Distance	4	736.0	184.01	1.50	0.214
Feed*Distance	4	578.1	144.53	1.18	0.329
3-Way Interactions	8	625.6	78.20	0.64	0.741
Power*Feed*Distance	8	625.6	78.20	0.64	0.741
Error	54	6606.7	122.35		
Total	80	15915.7			

Model Summary

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
9.88889	92.86%	89.42%	83.93%

รูปที่ 12 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวน

2.3.1 ค่าความเหมาะสมของแบบจำลอง (Model Summary)

จากรูปที่ 12 ค่า $R^2 = 92.86\%$ บ่งชี้ว่าแบบจำลองที่ใช้สามารถอธิบายความแปรปรวนของค่าแรงดึงได้ถึง 92.86% ซึ่งแสดงให้เห็นว่าแบบจำลองสามารถอธิบายความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยที่ศึกษา (Power, Feeds, Distance) และค่าความเค้นแรงดึงของการเชื่อมได้อย่างมีประสิทธิภาพ

ค่า $R^2(\text{adj}) = 89.42\%$ และ $R^2(\text{pred}) = 83.93\%$ เป็นตัวชี้วัดความสอดคล้องของแบบจำลองกับข้อมูลใหม่ที่ไม่ได้ใช้ในการสร้างแบบจำลอง ซึ่งแสดงให้เห็นว่าแบบจำลองนี้สามารถทำนายค่าผลลัพธ์ได้แม่นยำ และสามารถทำนายค่าแรงดึงจากการทดลองในอนาคตได้อย่างน่าเชื่อถือ

ค่า $S = 9.89$ คือค่าเฉลี่ยของส่วนเหลือ (Residuals) ซึ่งแสดงถึงค่าความคลาดเคลื่อนระหว่างค่าที่ได้จากการทำนายและค่าจริงที่ได้จากการทดลอง แม้ว่าแบบจำลองจะมีความแม่นยำสูง แต่ยังคงมีความคลาดเคลื่อนอยู่ในระดับที่สามารถยอมรับได้

ทั้งนี้ผลลัพธ์ที่ได้แสดงถึงความเหมาะสมของแบบจำลองในการอธิบายและทำนายค่าแรงดึงที่เกิดจากกระบวนการเชื่อมด้วยเลเซอร์

2.3.2 วิเคราะห์ความแปรปรวนโดยโปรแกรม Minitab (ANOVA) เพื่อทดสอบสมมติฐาน

สมมติฐานที่ 1: Power (α)

- กำลังเลเซอร์ (Power) มีผลต่อค่าความเค้นแรงดึงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ Reject H_0 และ Accept H_1 ($P=0.033 < \alpha=0.05$)

สมมติฐานที่ 2: Feeds (β)

- อัตราป้อนลวดเชื่อม (Feeds) มีผลต่อค่าความเค้นแรงดึงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ Reject H_0 และ Accept H_1 ($P=0.000 < \alpha=0.05$)

สมมติฐานที่ 3: Distance (γ)

- ระยะห่างระหว่างรอยต่อในการเชื่อมต่อใบเลื่อย (Distance) มีผลต่อค่าความเค้นแรงดึงอย่างมี

นัยสำคัญทางสถิติ Reject H_0 และ Accept H_1 ($P=0.034 < \alpha=0.05$)

สมมติฐานที่ 4: ปฏิสัมพันธ์ระหว่างปัจจัย Power (α) และ Feeds (β)

- ปัจจัยร่วมระหว่าง กำลังเลเซอร์ (Power) และ อัตราป้อนลวดเชื่อม (Feeds) มีผลต่อค่าความเค้นแรงดึงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ Reject H_0 และ Accept H_1 ($P=0.000 < \alpha=0.05$)

สมมติฐานที่ 5: ปฏิสัมพันธ์ระหว่างปัจจัย Power (α) และ Distance (γ)

- ปัจจัยร่วมระหว่าง กำลังเลเซอร์ (Power) และ ระยะห่างระหว่างรอยต่อในการเชื่อมต่อใบเลื่อย (Distance) ไม่มีผลต่อค่าความเค้นแรงดึงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ Accept H_0 และ Reject H_1 ($P=0.214 > \alpha=0.05$)

สมมติฐานที่ 6: ปฏิสัมพันธ์ระหว่างปัจจัย Feeds (β) และ Distance (γ)

- ปัจจัยร่วมระหว่าง อัตราป้อนลวดเชื่อม (Feeds) และ ระยะห่างระหว่างรอยต่อในการเชื่อมต่อใบเลื่อย (Distance) ไม่มีผลต่อค่าความเค้นแรงดึงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ Accept H_0 และ Reject H_1 ($P=0.329 > \alpha=0.05$)

สมมติฐานที่ 7: ปฏิสัมพันธ์ระหว่างปัจจัย Power (α), Feeds (β) และ Distance (γ)

- ปัจจัยร่วมระหว่าง กำลังเลเซอร์ (Power) และ อัตราป้อนลวดเชื่อม (Feeds) และ ระยะห่างระหว่างรอยต่อในการเชื่อมต่อใบเลื่อย (Distance) ไม่มีผลต่อค่าความเค้นแรงดึงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ Accept H_0 และ Reject H_1 ($P=0.741 > \alpha=0.05$)

2.4 การวิเคราะห์อันตรกิริยา

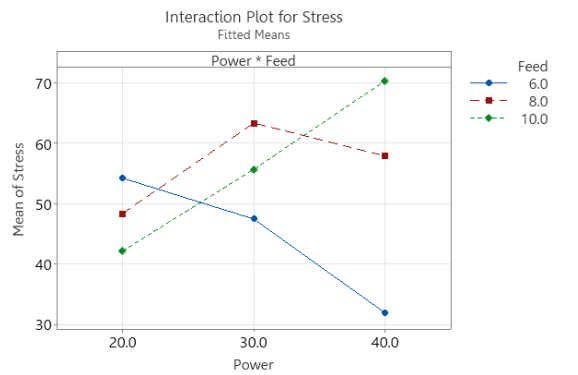
จากรูปที่ 13 แสดงกราฟ Interaction Plot สำหรับค่าเฉลี่ยของ Stress ภายใต้การเปลี่ยนแปลงของสามปัจจัย ได้แก่ Power, Feed, Distance โดยวัตถุประสงค์เพื่อวิเคราะห์ปฏิสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยแต่ละคู่ ซึ่งมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของค่าความเค้นแรงดึง (Stress)

ปฏิสัมพันธ์ระหว่าง Power และ Feed จากกราฟดังรูปที่ 13(ก) พบว่าเส้นแสดงค่าเฉลี่ยของ Stress สำหรับระดับ Feed ต่าง ๆ มีลักษณะไม่ขนานกัน และตัดกันในช่วง ซึ่งเป็นลักษณะของการเกิดปฏิสัมพันธ์อย่างมีนัยสำคัญ ระหว่างปัจจัย Power และ Feed กล่าวคือ ผลของการเปลี่ยนแปลงค่า Power ต่อค่า Stress ขึ้นอยู่กับระดับของ Feed ที่ใช้

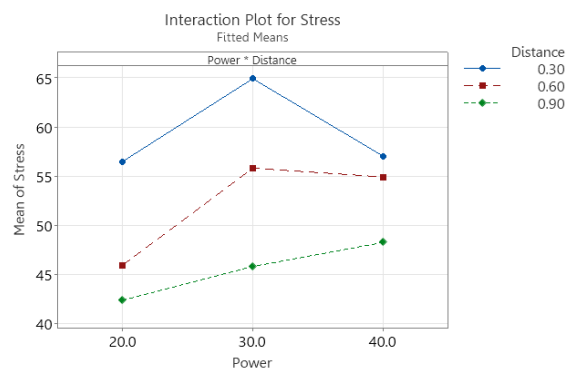
ปฏิสัมพันธ์ระหว่าง Power และ Distance จากกราฟดังรูปที่ 13(ข) พบว่าเส้นของระดับ Distance ทั้งสามมีลักษณะเกือบขนานกัน และไม่มีการตัดกันอย่างชัดเจน แสดงให้เห็นว่า ไม่มีปฏิสัมพันธ์ระหว่าง Power และ Distance ในการส่งผลต่อค่า Stress ผลของการเปลี่ยนแปลงค่า Power ต่อ Stress จึงสามารถพิจารณาได้โดยไม่ต้องคำนึงถึงค่า Distance ที่ใช้

ปฏิสัมพันธ์ระหว่าง Feed และ Distance จากกราฟดังรูปที่ 13(ค) เส้นกราฟไม่ขนานกันอย่างสมบูรณ์ โดยเฉพาะในระดับ Feed 6.0 ที่มีความแตกต่างระหว่างค่า Distance ชัดเจนมากขึ้น อย่างไรก็ตาม ไม่มีการตัดกันของเส้นกราฟ จึงอาจกล่าวได้ว่า มีแนวโน้มของการเกิดปฏิสัมพันธ์ระหว่าง Feed และ Distance แต่ไม่รุนแรงเท่าคู่ของ Power และ Feed การพิจารณาผลของ Feed ควรคำนึงถึงระดับของ Distance ด้วย แต่ความสัมพันธ์อาจไม่ถึงขั้นมีนัยสำคัญทางสถิติ

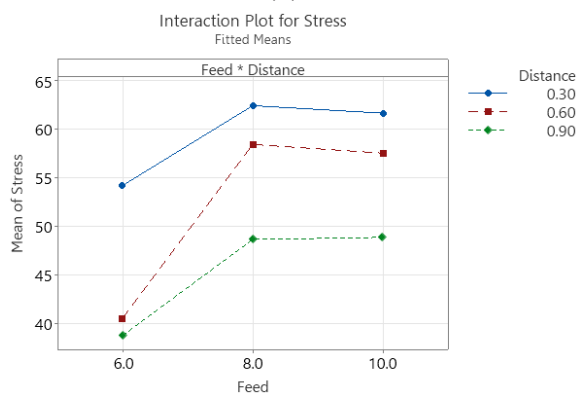
กราฟ Main Effects Plot for Stress ดังรูปที่ 14 แสดงผลกระทบหลักเพื่อตรวจสอบความแตกต่างระหว่างค่าเฉลี่ยระดับสำหรับปัจจัยทั้ง 3 ปัจจัย ผลกระทบหลักจะเกิดขึ้นเมื่อปัจจัยต่างระดับส่งผลต่อการตอบสนองต่างกัน กราฟผลกระทบหลักจะแสดงค่าเฉลี่ยการตอบสนองสำหรับปัจจัยแต่ละระดับที่เชื่อมต่อกันด้วยเส้นตรง



(ก)

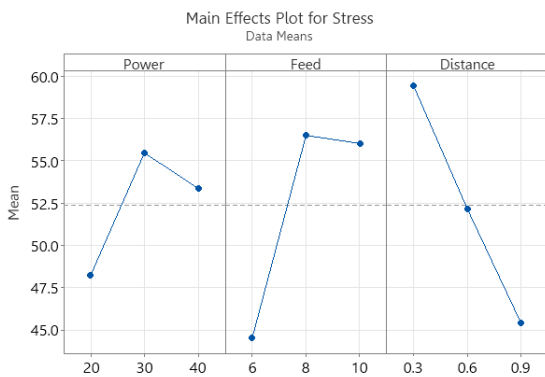


(ข)



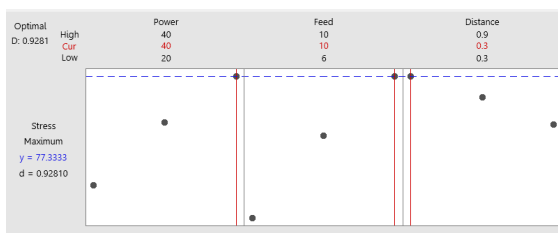
(ค)

รูปที่ 13 อันตรกิริยาแบบ 3 ปัจจัย ปฏิสัมพันธ์ระหว่าง (ก) Power และ Feed (ข) Power และ Distance (ค) Feed และ Distance



รูปที่ 14 กราฟ Main Effects Plot for Stress

2.5 การหาค่าที่เหมาะสมของปัจจัย



รูปที่ 15 การวิเคราะห์ค่าที่เหมาะสมสำหรับค่าความเค้นแรงดึง

จากการวิเคราะห์ Response optimizer โปรแกรม Minitab ที่ระดับความเชื่อมั่นที่ 95% ดังรูปที่ 15 ในการวิเคราะห์ข้อมูลพบว่าค่าที่เหมาะสมที่สุดสำหรับค่าความเค้นแรงดึง คือ 77.33 MPa จากปัจจัยที่ใช้ ได้แก่ กำลังเลเซอร์ 40% อัตราป้อนลวดเชื่อม 10 m/min ระยะห่างระหว่างชิ้นงาน 0.3 mm

2.6 การวิเคราะห์ผลเชิงสถิติด้วย Regression

จากผลการวิเคราะห์ ได้สมการถดถอยเชิงเส้นที่ใช้พยากรณ์ค่าการรับแรงดึงดังนี้

Regression Equation

$$\text{Stress} = 35.60 + 0.257 \text{ Power} + 2.880 \text{ Feed} - 23.33 \text{ Distance}$$

การตีความสมการ

ค่าสัมประสิทธิ์ของ Power (0.257) หมายถึง ยิ่งเพิ่มกำลังเลเซอร์ ค่าความเค้นจะ เพิ่มขึ้นเล็กน้อย

ค่าสัมประสิทธิ์ของ Feed (2.880) หมายถึง ยิ่งเพิ่มอัตราป้อนลวดเชื่อม ค่าความเค้นจะ เพิ่มขึ้นมาก

ค่าสัมประสิทธิ์ของ Distance (-23.33) หมายถึง ยิ่งระยะห่างมาก ค่าความเค้นจะ ลดลงอย่างชัดเจน

จากสมการถดถอยเชิงเส้นที่ได้นำมากำหนดค่าปัจจัยตามสถานะที่เหมาะสมจาก Response Optimizer คือ Power = 40 (%), Feed = 10 (เมตร/นาที), Distance = 0.3 (มิลลิเมตร)

เมื่อนำค่าดังกล่าวเข้าสมการ จะได้

$$\text{Stress} = 35.60 + (0.257 \times 40) + (2.880 \times 10) - (23.33 \times 0.3)$$

$$\text{Stress} = 35.60 + 10.28 + 28.80 - 6.999$$

$$\text{Stress} = 67.681 \text{ MPa}$$

ดังนั้น ค่าความเค้นแรงดึงที่ได้จากการคำนวณตามสมการถดถอยข้างต้น เท่ากับ 67.681 MPa ซึ่งต่ำกว่าค่าที่ได้จาก Response optimization อยู่ประมาณ 9.65 เมกะปาสคาล หรือคิดเป็นการคลาดเคลื่อน 12.48%

ความคลาดเคลื่อนดังกล่าวสามารถอธิบายได้จากข้อจำกัดของสมการถดถอยเชิงเส้น ซึ่งเป็นแบบจำลองที่อาศัยสมมติฐานว่าความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรต้นและตัวแปรตามเป็นเชิงเส้น (linear relationship) ขณะที่กระบวนการเชื่อมด้วยเลเซอร์ในความเป็นจริงมีลักษณะที่ซับซ้อน และมักมีพฤติกรรมแบบไม่เชิงเส้น (non-linear behavior) ทำให้แบบจำลองเชิงเส้นไม่สามารถอธิบายผลตอบแทนได้ครบถ้วนในทุกกรณี ผลการศึกษานี้สอดคล้องกับงานวิจัยของ Kumar et al. (2022) [8] ได้กล่าวถึงการใช้วิธีการเพิ่มประสิทธิภาพแบบหลายวัตถุประสงค์ (Multi-objective optimization) เพื่อเพิ่มสมบัติทางกลของชิ้นส่วนที่เชื่อมด้วยเลเซอร์ โดยใช้วิธีการ Response Surface Methodology (RSM) ซึ่งเป็นแนวทางที่คล้ายคลึงกับการใช้ Response Optimizer ในโปรแกรม Minitab บทความนี้ชี้ให้เห็นว่าการใช้เครื่องมือเพิ่มประสิทธิภาพสามารถให้ค่าที่เหมาะสม

ที่สุดสำหรับพารามิเตอร์การเชื่อม แต่ผลลัพธ์ที่ได้อาจแตกต่างจากค่าที่ได้จากสมการถดถอยเชิงเส้น เนื่องจากความซับซ้อนของกระบวนการเชื่อม นอกจากนี้ยังสอดคล้องกับ Singh et al. (2021)[9] ได้ทำการวิจัยเกี่ยวกับการพยากรณ์ค่าความเค้นแรงดึงสูงสุดในรอยเชื่อม และรายงานว่าค่าที่ได้จากสมการถดถอยมักมีความคลาดเคลื่อนจากค่าจริง โดยเฉพาะเมื่อมีตัวแปรแฝงหรือความซับซ้อนของกระบวนการที่แบบจำลองไม่สามารถจับได้ แนะนำให้ใช้เครื่องมือการเพิ่มประสิทธิภาพควบคู่กับการพยากรณ์เพื่อให้ผลที่แม่นยำและเหมาะสมสำหรับการใช้งานจริงมากยิ่งขึ้น

จากการวิเคราะห์ดังกล่าว จึงสามารถสรุปได้ว่าเครื่องมือ Response Optimizer เป็นเครื่องมือที่มีประสิทธิภาพสูงในการหาเงื่อนไขที่เหมาะสมที่สุดในกระบวนการเชื่อม โดยเฉพาะเมื่อเป้าหมายคือการเพิ่มค่าความเค้นแรงดึงสูงสุด ขณะที่สมการถดถอยควรถูกใช้เพื่อวิเคราะห์แนวโน้มภาพรวม

3. สรุปผลการทดลอง

การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อวิเคราะห์ปัจจัยที่ส่งผลต่อความเค้นแรงดึง ด้วยการเชื่อมเลเซอร์ ผลการวิเคราะห์ ANOVA แสดงให้เห็นว่า ปัจจัยหลักทั้งสาม ได้แก่ กำลังเลเซอร์ (Power), อัตราการป้อนลวดเชื่อม (Feed), ระยะห่างระหว่างรอยต่อในการเชื่อมต่อใบบเลื่อย (Distance) มีผลต่อความเค้นแรงดึง (Stress) ของรอยเชื่อมอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% รวมถึงปฏิสัมพันธ์ระหว่างกำลังเลเซอร์และอัตราการป้อนลวดเชื่อม มีผลอย่างมีนัยสำคัญ โดยมีค่า $R^2 = 92.86\%$ แสดงว่าโมเดลสามารถอธิบายความแปรปรวนของค่า Stress ได้ดี และจากการวิเคราะห์ค่าที่เหมาะสมที่สุด (Response optimization) พบว่าเงื่อนไขที่ให้ค่าความเค้นแรงดึง (Stress) สูงสุดเท่ากับ 77.33 เมกะปาสคาล คือ Power = 40%, Feed = 10 เมตรต่อนาที และ Distance = 0.3 มิลลิเมตร และจากแบบจำลองสมการถดถอยเชิงเส้นสามารถเขียนเป็นสมการดังนี้ $Stress = 35.60 + 0.257(Power) + 2.880(Feed) - 23.33(Distance)$

เมื่อนำเงื่อนไขจากการวิเคราะห์ค่าที่เหมาะสมที่สุด (Response optimization) ที่ให้ค่าความเค้นแรงดึงสูงสุด ใส่ลงในสมการถดถอยเชิงเส้น ผลลัพธ์ที่ได้ $Stress = 67.681$ เมกะปาสคาล จึงสรุปได้ว่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมสามารถเชื่อมใบบเลื่อยสายพานให้มีความแข็งแรงเพียงพอที่จะนำกลับมาใช้งานได้จริง และสามารถหลีกเลี่ยงการเกิดการขาดที่จุดเดิมได้ รวมทั้งช่วยลดต้นทุนในการจัดซื้อใบบเลื่อยใหม่

3.1 ข้อเสนอแนะ

3.1.1 ข้อเสนอแนะเชิงเทคนิค

ในกระบวนการเชื่อมใบบเลื่อยสายพาน ควรควบคุมระยะห่างระหว่างชิ้นงานให้น้อยที่สุดเท่าที่เป็นไปได้ (ไม่เกิน 0.3 มิลลิเมตร) เพื่อให้เกิดรอยเชื่อมที่แข็งแรงและต่อเนื่อง

- ควรเลือกใช้ค่ากำลังเลเซอร์และอัตราการป้อนลวดที่เหมาะสมร่วมกัน เพื่อให้การเติมลวดและการหลอมเกิดขึ้นอย่างมีประสิทธิภาพสูงสุด
- หากมีความต้องการที่จะได้ค่าความเค้นแรงดึงที่มากขึ้น จากงานวิจัยของ Lazarchuk, K., & Rebezniuk, I. (2022).[10] ได้สรุปว่าการตัดชิ้นงานให้ทำมุมก่อนนำมาเชื่อมต่อกันนั้นสามารถเพิ่มค่าความเค้นแรงดึงให้มากขึ้นได้

3.1.2 ข้อเสนอแนะสำหรับการศึกษารั้งต่อไป

- ควรศึกษาลักษณะจุลโครงสร้างของรอยเชื่อม (Microstructure) และความแข็ง (Hardness) เพื่อยืนยันคุณภาพของรอยเชื่อมทั้งในเชิงกลศาสตร์และเชิงวัสดุศาสตร์
- ควรขยายการทดลองไปยังใบบเลื่อยชนิดอื่นหรือวัสดุฐานอื่น เพื่อประเมินความเหมาะสมของกระบวนการเชื่อมเลเซอร์ในบริบทที่หลากหลายยิ่งขึ้น

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณคณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ และการจัดการ มหาวิทยาลัยศิลปากร ที่เอื้อเฟื้อสถานที่ งบประมาณ วัสดุอุปกรณ์ และสิ่งต่าง ๆ สำหรับการทํารววจัยในครั้งนี้

เอกสารอ้างอิง

- [1] Carpenter Technology, "M42® Specialty Alloy," [Online]. Available: <https://www.carpentertechnology.com/alloy-finder/m42>. [Accessed: March 7, 2024].
- [2] Zhang, H., Chen, G., Zhang, Y., Zhang, H., & Liu, J. (2016). Study of the microstructure and properties of m42x32 dissimilar metal CO₂ laser welding joints. *Optik*, 127(4), 2052–2056.
- [3] Bergmann, J. P., & Stambke, M. (2014). Fatigue of laserbeam welded joints of high-carbon steel strips. *Physics Procedia*, 56, 435–443.
- [4] Materials Science and Metallurgy Department, University of Cambridge, England. July (2002) LASER WELDING - Literature Review.
- [5] Cao, Y., et al. (2018). Optimizing pulsed Nd:YAG laser beam welding process for thin AISI 316L sheet. *Optics & Laser Technology*, 108, 347–356.
- [6] Patel, P., et al. (2019). Parameter Optimization for Laser Welding of High-Strength Dissimilar Materials. *Materials Today: Proceedings*, 18, 1573–1580.
- [7] Montgomery, D. C. (2017). Design and analysis of experiments (9th ed.). Wiley.
- [8] Kumar, A., Patel, R., & Singh, S. (2022). Multi-objective optimization of laser welding parameters using response surface methodology. *Journal of Manufacturing Processes*, 76, 123-135.
- [9] Singh, M., Sharma, P., & Gupta, V. (2021). Modeling and prediction of tensile strength in laser welded joints using regression and optimization techniques. *Materials Today: Proceedings*, 45(5), 982-990.
- [10] Lazarchuk, K., & Rebezniuk, I. (2022). Increasing the strength of the welded joint in band saws. *PRO LIGNO*, 18(2), 29–38.



งานบัณฑิตศึกษา คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตขอนแก่น

โทรศัพท์ 043-283700 กด 83120 โทรสาร 043-338870

อีเมล gs.eng.kkc@rmuti.ac.th, gs.eng.rmuti.kkc@gmail.com

Website : www.eng.rmuti.ac.th