



RMUTK
RAJAMANGALA
KRUNGTHAP



วารสาร เทคโนโลยีและ วิศวกรรมก้าวหน้า

JTEP

- JOURNAL OF TECHNOLOGY AND ENGINEERING PROGRESS -



ปีที่ 3 ฉบับที่ 1

เดือน มกราคม – มิถุนายน 2568

ISSN : 3027-6500 (Online)

คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ

วารสารเทคโนโลยีและวิศวกรรมก้าวหน้า

Journal of Technology and Engineering Progress

ปีที่ 3 ฉบับที่ 1 มกราคม – มิถุนายน 2568 (Vol 3, No.1, 2025, January - June)

เจ้าของ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ

ที่ปรึกษา

อธิการบดี

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ

คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ

นายกสมาคมเทคโนโลยีและนวัตกรรมเชิงสร้างสรรค์

สมาคมเทคโนโลยีและนวัตกรรมเชิงสร้างสรรค์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ

บรรณาธิการ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ฤทธิชัย เกาเนียม

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ

รองบรรณาธิการ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กมลพงศ์ แจ่มกมล

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ

ผู้ช่วยบรรณาธิการ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศุภวัฒน์ ชูวารี

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ

กองบรรณาธิการ

รองศาสตราจารย์ ดร.จิระพล กลิ่นบุญ

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ

รองศาสตราจารย์ ดร.วิชาญ ช่วยพันธ์

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ

รองศาสตราจารย์ ดร.นเรศธรรุ พัฒนเดช

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

รองศาสตราจารย์ ดร.บวรโชค ผู้พัฒน์

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

รองศาสตราจารย์ ดร.อิศรทัต พึ่งอัน

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

รองศาสตราจารย์ ดร.ประยูร สุรินทร์

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีปทุมวัน

รองศาสตราจารย์ ดร.อภิวัฒน์ มุฑามระ

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

รองศาสตราจารย์ ดร.ประภาศ เมืองจันทร์บุรี

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

รองศาสตราจารย์ วรพงศ์ บุญช่วยแทน

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กิตติชัย โสจิพันธุ์

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

ผู้จัดทำวารสาร

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สมชาย วนไทยสงค์

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ

นายวงศธร วงศ์ดีอินทร์

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ

บทความที่ลงตีพิมพ์ในวารสารเป็นความคิดเห็นของผู้เขียน**กองบรรณาธิการไม่จำเป็นต้องเห็นด้วยเสมอไป****ความเป็นมา**

วารสารเทคโนโลยีและวิศวกรรมก้าวหน้า ISSN 3027 - 6500 เป็นวารสารวิชาการของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ คณะวิศวกรรมศาสตร์ ร่วมกับ สมาคมเทคโนโลยีและนวัตกรรมเชิงสร้างสรรค์ (ICTA) ซึ่งมีนโยบายรับตีพิมพ์บทความคุณภาพสูงในด้านวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยี และวิศวกรรม โดยเผยแพร่เป็นราย 6 เดือน ซึ่งตีพิมพ์ปีละ 2 ฉบับ (ฉบับละ 8 - 12 บทความ) และ มีการดำเนินงานจัดพิมพ์บทความประเภทต่าง ๆ ได้แก่ บทความวิจัย (Research paper) บทความวิชาการ (Academic paper) และบทความปริทัศน์ (Review article)

บทความที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในวารสารเทคโนโลยีและวิศวกรรมก้าวหน้า เป็นบทความที่สร้างองค์ความรู้ และมีความคุณภาพในทางวิชาการสามารถนำไปใช้ประโยชน์เพื่อการอ้างอิงได้ เพราะผ่านการพิจารณาถ่วงดุล และประเมินคุณภาพจากผู้ทรงคุณวุฒิในสาขาวิชาที่เกี่ยวข้อง จากหลากหลายสถาบัน อย่างน้อย 3 ท่าน ซึ่งเป็น การประเมินแบบไม่แสดงชื่อผู้แต่งและผู้ประเมิน (Double blinded) ก่อนที่จะเผยแพร่สู่สาธารณชน จึงทำให้วารสารเทคโนโลยีและวิศวกรรมก้าวหน้า เป็นวารสารวิชาการที่มีคุณภาพ

กองบรรณาธิการ วารสารเทคโนโลยีและวิศวกรรมก้าวหน้า จัดทำวารสารเป็นรูปเล่มฉบับสมบูรณ์และเผยแพร่ให้กับสถาบันการศึกษาต่าง ๆ ทั่วประเทศไทย นอกจากนี้ยังสามารถสืบค้นเพื่ออ้างอิงหรืออ่านบทความที่เปี่ยมด้วยองค์ความรู้ได้ที่ <https://ph03.tci-thaijo.org/index.php/JTEP>

วัตถุประสงค์

1. เพื่อเผยแพร่บทความวิจัย (Research paper) บทความวิชาการ (Academic paper) และบทความปริทัศน์ (Review article) ที่มีคุณภาพของอาจารย์ นักวิจัย นักวิชาการทั้งภายในและภายนอกมหาวิทยาลัย ในสาขาวิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี สาขาอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้อง และสาขาต่าง ๆ ที่มีการบูรณาการข้ามศาสตร์ที่เกี่ยวข้องกับวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยี และวิศวกรรม เพื่อให้เกิดองค์ความรู้ใหม่ที่ทันสมัย ได้แก่

- 1.1. ด้านกระบวนการผลิตขั้นสูง
- 1.2. กรรมวิธีการแปรรูปสมัยใหม่
- 1.3. เทคโนโลยีวัสดุขั้นสูงและวัสดุศาสตร์
- 1.4. วิศวกรรมงานเชื่อมและโลหะการ
- 1.5. การวิจัยการดำเนินงานขั้นสูง
- 1.6. เทคโนโลยีและนวัตกรรม

1.7 วิศวกรรมย้อนรอยและการตรวจสอบ

2. เพื่อส่งเสริมและเป็นกลไกการขับเคลื่อนงานวิจัย ทำให้เกิดผลงานวิจัยที่เข้าไปสู่การพัฒนาต่อภาคสังคม ชุมชน อุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้อง และนำไปประยุกต์ใช้ในการเรียนการสอนเพื่อต่อยอด และเกิดความเชื่อมโยงระหว่างงานวิจัย งานวิชาการ ซึ่งนำมาสู่การเกิดประโยชน์ต่อมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ และตอบสนองต่อการพัฒนาด้านเทคโนโลยี และวิศวกรรมของประเทศไทย

นโยบายการรับบทความ

กองบรรณาธิการวารสารเทคโนโลยีและวิศวกรรมก้าวหน้า มีความยินดีที่จะรับบทความจากอาจารย์ นักวิจัย นักวิชาการทั้งภายในและภายนอกมหาวิทยาลัย ที่เขียนเป็นภาษาไทยหรือภาษาอังกฤษ ซึ่งผลงานที่ส่งมาขอตีพิมพ์ต้องไม่เคยเผยแพร่ในสิ่งพิมพ์อื่นใดมาก่อน และต้องไม่อยู่ในระหว่างการพิจารณาของวารสารอื่น

การละเมิดลิขสิทธิ์ถือเป็นความรับผิดชอบของผู้ส่งบทความโดยตรง บทความที่ได้รับการตีพิมพ์ต้องผ่าน การพิจารณา กลั่นกรองคุณภาพจากผู้ทรงคุณวุฒิ และได้รับความเห็นชอบจากกองบรรณาธิการ

ข้อความที่ปรากฏอยู่ในแต่ละบทความที่ตีพิมพ์ในวารสารวิชาการเล่มนี้ เป็นความคิดเห็นส่วนตัวของผู้เขียนแต่ละท่าน ไม่เกี่ยวข้องกับมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพแต่อย่างใด ความรับผิดชอบด้านเนื้อหา และการตรวจร่างบทความ แต่ละบทความเป็นของผู้เขียนแต่ละท่าน หากมีความผิดพลาดใด ๆ ผู้เขียน แต่ละท่านจะต้องรับผิดชอบบทความของตนเอง แต่ผู้เดียว

กองบรรณาธิการขอสงวนสิทธิ์ให้นำเนื้อหา หรือข้อคิดเห็นใด ๆ ของบทความในวารสารเทคโนโลยีและวิศวกรรม ก้าวหน้า ไปเผยแพร่ก่อนได้รับอนุญาตจากกองบรรณาธิการ อย่างเป็นลายลักษณ์อักษร ผลงานที่ได้รับการตีพิมพ์ถือเป็น ลิขสิทธิ์ของวารสาร ผู้ประสงค์จะส่งบทความกรุณาอ่านรายละเอียดการส่งบทความที่คำแนะนำสำหรับผู้เขียนบทความ ซึ่งได้ ระบุไว้ในเล่มวารสารเทคโนโลยีและวิศวกรรมก้าวหน้า (Online) หรือ <https://ph03.tci-thaijo.org/index.php/JTEP> และ สามารถส่ง Online ได้โดยกรอกรายละเอียดให้ครบถ้วนในระบบการส่งบทความ Online หากต้องการสอบถามข้อมูลเพิ่มเติม ติดต่อได้ที่

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ

เลขที่ 2 ถนนนางลิ้นจี่ แขวงทุ่งมหาเมฆ เขตสาทร กรุงเทพฯ 10120

E-mail: jtep.journal@mail.rmutk.ac.th

<https://ph03.tci-thaijo.org/index.php/JTEP>

กำหนดการเผยแพร่ ปีละ 2 ฉบับ (ทุก 6 เดือนต่อฉบับ)
ฉบับที่ 1 เดือน มกราคม – มิถุนายน
ฉบับที่ 2 เดือน กรกฎาคม – ธันวาคม

การเผยแพร่ เผยแพร่ผ่านระบบออนไลน์
<https://ph03.tci-thaijo.org/index.php/JTEP>

สารบัญ

หน้า

การศึกษาอิทธิพลของตัวแปรในการเชื่อมความต้านทานแบบจุดที่มีต่อความต้านทานแรงดึงเฉือนระหว่างอะลูมิเนียมผสมกับเหล็กกล้าคาร์บอนผสมต่ำ	1
Investigation of the Influence of Resistance Spot Welding Parameters on the Tensile Shear Strength of Dissimilar Joints between Aluminum Alloy and Low-Carbon Steel	
ศราวุธ จันทร์กลาง, วรชัย มั่นศิลป์, ศทาวุธ อรรถชชร, วิชัย บุญโคง, เกียรติศักดิ์ สมนึก, ธีรวัฒน์ เชื้อนแก้ว, ศักดิ์ดา วงศ์จัญไร, ประจักษ์ จิตกุล	
การลดของเสียบริเวณผิวชิ้นงานในกระบวนการผลิตชิ้นส่วนข้อต่อโลหะ กรณีศึกษา บริษัท โกลบอล-ไทยซอน พรีซิชั่น อินดัสทรี จำกัด	15
Minimization of Surface Defects in the Manufacturing Process of Metal Joint Components: A Case Study of Global-Thaison Precision Industry Co., Ltd.	
กนกวรรณ เกริกสูงเนิน, วรณนิตา นุชคุ้ม, จิตติวัฒน์ นิธิกาญจนธาร, ภูมิบุญ พลต่าง, อรรถพล คำชาย, สุภัทรา หมูปาร์, ภาณุภักดิ์ สาธวงศ์	
ผลกระทบของอุณหภูมิการอบอ่อนหลังกระบวนการที่ส่งผลต่อพฤติกรรมแอนไอโซทรอปิกและความสามารถในการลากขึ้นรูปของโลหะแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม SUS304	26
The Effect of Process Annealing Temperature on The Evaluation of Anisotropy and Deep Drawability of Stainless Steel Sheet SUS304	
ณัฐศักดิ์ พรพุดศิริ, เฉลิมพล คล้ายนิล, พงศกร หลีตระกูล, จินกมล ลุยจันทร์, ภาสพิรุฬห์ วัชรศรีสำเร็จ	
การผสมผสานพลังงานหมุนเวียนในระบบไฟฟ้าเพื่ออาคารอัจฉริยะ: แนวทางสู่การเป็น Net Zero Energy Building	37
Integrating Renewable Energy into Electrical Systems for Smart Buildings: A Pathway to Net Zero Energy Buildings	
สันติ การิสันต์, สิทธิศักดิ์ ไรจยะยะ	
การศึกษาสมบัติเชิงกลและโครงสร้างทางโลหะวิทยาสำหรับการเชื่อมระหว่างเหล็ก Q235 และ AISI 304 โดยวิธีก๊าซทังสเตนอาร์ค GTAW	49
The Study of Mechanical Properties and Metallurgical for Steel Metal Welding between Q235 and AISI 304 by Gas Tungsten Arc Welding (GTAW)	
ณัฐวุฒิ มุขน้อย, สุรินทร์ สไลวงษ์, ประวิทย์ มุลนนท์, มะขาม ปัญญา, เมืองแก้ว ยุตัน	
การปรับปรุงกระบวนการผลิตชุดเสริมความแข็งแรงแผงหน้าปัดรถยนต์	60
Improvements in the Manufacturing Processes for Reinforcement Panels of Automotive Dashboards	
ภาณุภักดิ์ สาธวงศ์, ภาสวุฒิ กุณพล, ณัฐวุฒิ สมนึก, สุธี คงโคกแฝง, วรณนิตา นุชคุ้ม, ภูมิบุญ พลต่าง, จิตติวัฒน์ นิธิกาญจนธาร, กนกวรรณ เกริกสูงเนิน	
อิทธิพลของการปล่อยของเหลวไดอิเล็กทริกในกระบวนการกัดเจาะโลหะด้วยไฟฟ้าที่ส่งผลต่อความสามารถสำหรับการเจาะรูขนาดเล็กบนวัสดุเหล็กกล้าเครื่องมือ AISI P20	74
Influence of Dielectric Flushing in Electrical Discharge Machining Process on the Machinability for Small Hole Drilling on AISI P20 Tool Steel	
เชษฐา หนูนเหลือง, ภูมิภัทร วงษ์ปิตร์ตัน, ไพบุลย์ หาญมนต์, เอกชัย รอดพิสา, สันญา คำจริง, เจษฎา แก้ววิจิตร	

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

ระบบคัดแยกวัตถุอัตโนมัติจากสีโดยใช้เทคนิคประมวลผลภาพ

84

Color-Based Automated Sorting System Using Image Processing Techniques

ธงชัย เพ็งจันทร์ดี, สุทธิวิธ แววดี, ฤทธิเกียรติ กิจแก้ว, พีระวัฒน์ พิมพ์พันธ์ดี, จิรภัทร จันทร์อุทัย,
ประสาน คำดีผล

การศึกษาอิทธิพลของตัวแปรในการเชื่อมความต้านทานแบบจุดที่มีต่อความต้านทาน แรงดึงเฉือนระหว่างอะลูมิเนียมผสมกับเหล็กกล้าคาร์บอนผสมต่ำ

Investigation of the Influence of Resistance Spot Welding Parameters on the Tensile Shear Strength of Dissimilar Joints between Aluminum Alloy and Low-Carbon Steel

ศราวุธ จันทรงกลาง¹, วรชัย มั่นศิลป์², ศราวุธ อรรถชกร³, วิชัย บุญโคง⁴, เกียรติศักดิ์ สมนึก⁵, ธีรวัฒน์ เชื้อนแก้ว⁶,
ศักดิ์ดา วงศ์จัญญ์⁷ และ ประจักษ์ จัตกุล^{8*}

^{1,8}สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์บูรณาการและเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก
วิทยาเขตจันทบุรี อำเภอเขาฉกรรจ์ จันทบุรี 22210

²แผนกวิชาช่างเชื่อมโลหะ วิทยาลัยเทคนิคจันทบุรี สถาบันการอาชีวศึกษาภาคตะวันออก อำเภอเมืองจันทบุรี
จังหวัดจันทบุรี 22000

³แผนกวิชาช่างเชื่อมและเทคนิคโลหะ วิทยาลัยเทคนิคขอนแก่น สถาบันการอาชีวศึกษาภาคตะวันออกเฉียงเหนือ 3
อำเภอเมือง จังหวัดขอนแก่น 40000

^{4,5}แผนกวิชาช่างเทคนิคการผลิต วิทยาลัยเทคนิคสุรินทร์ สถาบันการอาชีวศึกษาภาคตะวันออกเฉียงเหนือ 5 อำเภอเมือง
จังหวัดสุรินทร์ 32000

⁶สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตขอนแก่น
อำเภอเมือง จังหวัดขอนแก่น 40000

⁷ภาควิชาเทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์ วิทยาลัยเทคนิคหาดใหญ่ สถาบันการอาชีวศึกษาภาคใต้ 3 อำเภอหาดใหญ่
จังหวัดสงขลา 90110

Sarawut Junklang¹, Worachai Mansilp², Katawoot Akkasorn³, Vichai Boonkong⁴, Kiatisak Somnuek⁵,
Teerawut Khuenkaew⁶, Sakda Wongadyarin⁷ and Prajak Jattakul^{8*}

^{1,8}Department of Industrial Engineering, Faculty of Integrated Engineering and Technology, Rajamangala
University of Technology Tawan-Ok, Chanthaburi Campus, Khao Khitchakut, Chanthaburi 22210

²Department of Welding, Chanthaburi Technical College, Institute of Vocational Education: Eastern Region,
Mueang Chanthaburi, Chanthaburi 22000

³Department of Welding & Metal Technology Division, Khonkaen Technical College, Institute of Vocational
Education: Northeastern Region 3, Mueang, Khon Kaen 40000

^{4,5}Department of Production Technology, Surin Technical College, Institute of Vocational Education:
Eastern Northeastern Region 5, Mueang, Surin 32000

⁶Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Isan,
Khon Kaen Campus, Mueang, Khon Kaen 40000

⁷Department of Electronics Technology, Hatyai Technical College, Institute of Vocational Education:
Southern Region 3, Hat Yai, Songkhla, 90110

*Corresponding author Email: Prajak_ja@rmutto.ac.th

(Received: June 7, 2025 / Revised: June 19, 2025 / Accepted: June 20, 2025)

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาอิทธิพลของตัวแปรในการเชื่อมความต้านทานแบบจุดที่มีต่อความต้านทานแรงดึงเฉือน พฤติกรรมการแตกหักและการก่อตัวของผลิตภัณฑ์ระหว่างอะลูมิเนียมผสม 5052 กับเหล็กกล้าคาร์บอนผสมต่ำ SPFH 780 โดยใช้เงื่อนไขที่เป็น เวลาในการปล่อยกระแสขาขึ้นและเวลาในการปล่อยกระแสขาลง 0 และ 15 Cycle โดยควบคุมแรงกดของอิเล็กโทรดเป็น 0.075 MPa และ 0.150 MPa จากผลการศึกษา พบว่าเงื่อนไขที่ส่งผลให้ชิ้นงานมีค่าความต้านทานแรงดึงเฉือนบริเวณรอยต่อของชิ้นงานสูงสุดคือ เวลาในการปล่อยกระแสขาขึ้นที่ 15 Cycle เวลาในการปล่อยกระแสขาลงที่ 0 Cycle และแรงกดของอิเล็กโทรด 0.075 MPa สำหรับการวิเคราะห์พฤติกรรมการแตกหักพบว่าชิ้นงานที่ให้ค่าความต้านทานแรงดึงเฉือนสูงสุดปรากฏพฤติกรรมการแตกหักแบบเหนียว (Ductile) และมีการก่อตัวขึ้นของชั้นสารประกอบเชิงโลหะของเฟส $Al_{0.95}Mg_{0.05}$, $(Al_{0.5}Cr_{0.5})Fe$, $Cr_{0.03}Fe_{0.97}$ และ $Fe_{2.99}(Al_{0.441}Si_{0.559})$

คำสำคัญ: เวลาในการปล่อยกระแสขาขึ้น, เวลาในการปล่อยกระแสขาลง, แรงกดของอิเล็กโทรด, ความต้านทานแรงดึงเฉือน, การเชื่อมความต้านทานแบบจุด, พฤติกรรมการแตกหัก, ชั้นสารประกอบเชิงโลหะ

Abstract

This study aims to investigate the influence of resistance spot welding parameters on the tensile shear strength, fracture behavior, and crystal formation between 5052 aluminum alloy and SPFH 780 low-carbon alloy steel. The welding parameters included an upslope and downslope current time of 0 and 15 cycles, respectively, with electrode forces controlled at 0.075 MPa and 0.150 MPa. The results revealed that the condition yielding the highest tensile shear strength at the joint was an upslope current time of 15 cycles, a downslope current time of 0 cycles, and an electrode force of 0.075 MPa. Fracture behavior analysis indicated that the joint exhibiting the highest tensile shear strength demonstrated ductile fracture characteristics. Additionally, phase formation analysis revealed the presence of intermetallic compounds, including $Al_{0.95}Mg_{0.05}$, $(Al_{0.5}Cr_{0.5})Fe$, $Cr_{0.03}Fe_{0.97}$ และ $Fe_{2.99}(Al_{0.441}Si_{0.559})$

Keywords: Up slope, Down slope, Electrode force, Tensile shear force, Resistance spot weld, Fracture Behavior, Intermetallic Compound

1. บทนำ

ในปัจจุบันอุตสาหกรรมยานยนต์เป็นหนึ่งในอุตสาหกรรมที่มีความสำคัญเป็นอย่างมาก และเพื่อให้เป็นไปตามข้อกำหนดของการปล่อยก๊าซเรือนกระจก ซึ่งรวมถึงเทคโนโลยีที่ลดการใช้พลังงานของรถยนต์และการปล่อย CO_2 และนำไปสู่เทคโนโลยีที่เกี่ยวข้องกับการผลิตส่วนประกอบของโครงสร้างตัวถังรถยนต์ที่ผลิตจากวัสดุผสมที่มีความแข็งแรงสูงและน้ำหนักเบา เพื่อตอบสนองความต้องการของลูกค้าและเพื่อลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจก ดังนั้นผู้ผลิตในภาคอุตสาหกรรมยานยนต์จึงพยายามลดน้ำหนักของรถยนต์ด้วยการออกแบบตัวถังของรถยนต์ให้น้ำหนักที่เบา โดยการใช้ตัวถังแบบผสมที่ยังคงความแข็งแรงและการประหยัดต้นทุนของเหล็กเข้ากับวัสดุที่มีน้ำหนักเบา เช่น อะลูมิเนียมผสม ดังนั้นการเลือกวัสดุในการใช้งานที่เหมาะสม ผู้ผลิตสามารถที่จะหาค่าที่เหมาะสมทั้งในเรื่องของน้ำหนักของโครงสร้างตัวถังและต้นทุนในการผลิต โดยจะต้องให้เกิดสมดุลกันระหว่างราคาและประสิทธิภาพในด้านความปลอดภัยที่เพิ่มสูงขึ้นกว่าเดิม จึงจะได้รับการยอมรับว่าเป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพในการลดน้ำหนักของรถยนต์ได้ [1-3]

ในช่วงหลายปีที่ผ่านมา อะลูมิเนียมผสม 5052 นั้นได้รับความสนใจเป็นอย่างมากในอุตสาหกรรมยานยนต์และการบินโดยใช้เป็นส่วนหนึ่งของโครงสร้างตัวถังรถยนต์ ส่วนปิดคลุม และแชสซีของตัวรถยนต์ เป็นต้น เนื่องจากการที่อะลูมิเนียมผสม

5052 นั้นน้ำหนักเบา โดยอะลูมิเนียมผสม 5052 จะเบากว่าเหล็กแบบเดิมถึง 3 เท่า ซึ่งน้ำหนักเบายังช่วยให้ยานยนต์มีอัตรา การประหยัดเชื้อเพลิงที่ดีกว่าเดิม สามารถขึ้นรูปได้ดีเยี่ยม ดูดซับแรงปะทะได้มากกว่าเหล็กหรือทนต่อการชนได้ดี [4-6]

ในกระบวนการผลิตตัวถังรถยนต์จะมีกระบวนการเชื่อมต่อวัสดุที่เป็นโลหะแผ่นที่มีรอยต่อแบบเกยเข้าด้วยกันอยู่ หลายวิธีคือ การเชื่อมอาร์กไฟฟ้า การเชื่อมต้านทานและการเชื่อมด้วยแรงเสียดทาน ในบรรดาวิธีการเชื่อมต่อโลหะเหล่านี้ การเชื่อมต้านทานแบบจุดเป็นกระบวนการเชื่อมที่มีความสำคัญมากวิธีหนึ่ง และถูกใช้อย่างแพร่หลาย เนื่องจากว่าเป็น กระบวนการเชื่อมต่อที่ให้อายุการใช้งานสูงเชื่อถือได้และใช้งานง่าย จึงเป็นกระบวนการเชื่อมที่เหมาะสมสำหรับการผลิต จำนวนมาก อย่างไรก็ตามการเชื่อมระหว่างอะลูมิเนียมผสม 5052 และเหล็กกล้าก็ยังมีความยากกว่าการเชื่อมระหว่าง ชิ้นงานโลหะชนิดเดียวกันอันเนื่องมาจากความแตกต่างของสมบัติวัสดุ การขยายตัวเนื่องจากความร้อนของวัสดุส่งผลให้เกิดรู พุนขนาดเล็กบริเวณรอยต่อ (Pores) และการก่อตัวของชั้นสารประกอบเชิงโลหะซึ่งจะส่งผลต่อความแข็งแรงหรือคุณภาพ ของรอยต่อได้ [7-10]

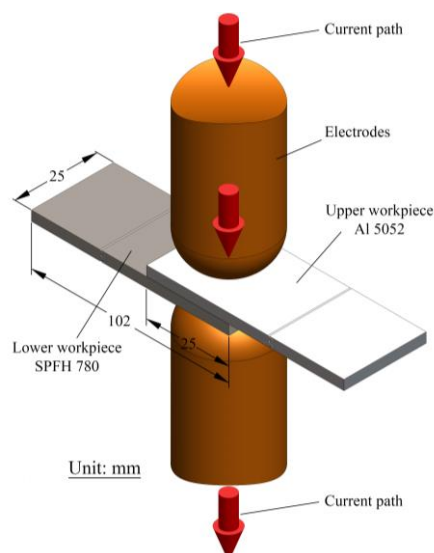
จากการศึกษาที่ผ่านมาได้มีการนำเสนอแนวทางในการปรับปรุงรอยเชื่อมในหลายรูปแบบเช่น การใช้ค่ากระแสไฟฟ้าใน การเชื่อมที่สูงและใช้ระยะเวลาในการเชื่อมที่ต่ำเพื่อลดการเกิดสารประกอบเชิงโลหะ แต่ก็อาจจะส่งผลต่ออายุการใช้งานของ อิเล็กโทรดให้สั้นลงรวมทั้งเกิดตำหนิที่รอยเชื่อมได้ง่าย เนื่องจากกระแสไฟฟ้าการเชื่อมที่สูงนั้นส่งผลให้เกิดความร้อนที่สูงทำให้ เกิดการสึกหรอของอิเล็กโทรดได้ง่าย [10-13] และนอกจากนี้ยังมีการใช้แผ่นเหล็กกล้าไปทำการชุบเคลือบผิวด้วยสังกะสี ซึ่ง จะช่วยลดการกัดตัวของชั้นสารประกอบเชิงโลหะได้ แต่จะส่งผลให้เกิดรูพุนบริเวณรอยต่อ เนื่องจากเกิดการระเหยของ สังกะสีที่เคลือบบนพื้นผิวของแผ่นเหล็กกล้าในระหว่างการผลิตได้รับความร้อน [14] และอีกวิธีหนึ่งก็คือการลดการเกิด สารประกอบเชิงโลหะโดยการใช้โลหะเดิมในกระบวนการเชื่อม แต่อย่างไรก็ตามอาจจะเป็นการเพิ่มขั้นตอนและต้นทุนใน กระบวนการผลิตซึ่งส่งผลต่อรอบเวลาการผลิตได้ [15]

ซึ่งจากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องพบว่า มีเฉพาะการศึกษาเพื่อหาเงื่อนไขที่เหมาะสมในการเชื่อมความต้านทาน กับวัสดุชนิดเดียวกันและต่างชนิดกันโดยใช้ตัวแปรกระแสไฟฟ้าแบบพัลส์เดี่ยวและพัลส์คู่ เวลาในการปล่อยกระแสไฟฟ้า แรง กดของอิเล็กโทรด ชนิดและขนาดของอิเล็กโทรด ที่มีอิทธิพลต่อค่าความต้านทานแรงดึงเฉือนโดยใช้วิธีการออกแบบการ ทดลองด้วยวิธีต่างๆ แต่ยังคงขาดการศึกษาและวิจัยที่เกี่ยวข้องกับเวลาในการปล่อยกระแสขาขึ้น (Up Slope) เวลาในการปล่อย กระแสขาลง (Down Slope) และแรงกดของอิเล็กโทรด (Electrode Force) ในกระบวนการเชื่อมความต้านทานทั้งกับวัสดุ ชนิดเดียวกันและต่างชนิดกันที่มีอิทธิพลต่อค่าความต้านทานแรงดึงเฉือน พฤติกรรมการแตกหัก และการก่อตัวของโครงสร้าง ผลึกบริเวณรอยต่อ ดังนั้นในการศึกษานี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาเวลาในการปล่อยกระแสขาขึ้นและขาลงของการเชื่อม ความต้านทานที่มีผลต่อพฤติกรรมการแตกหักและการก่อตัวของโครงสร้างผลึกบริเวณรอยต่อระหว่างอะลูมิเนียมผสม 5052 กับเหล็กกล้าคาร์บอนผสมต่ำ SPFH780 เพื่อเป็นแนวทางในการประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมการผลิตชิ้นส่วนยานยนต์และ อุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้องได้

2. วิธีการดำเนินงานวิจัย

2.1 การเตรียมโลหะพื้น

การเตรียมโลหะพื้นสำหรับศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิในการเชื่อมความต้านทานระหว่างอะลูมิเนียมผสม 5052 กับ เหล็กกล้าคาร์บอนผสมต่ำ SPFH 780 จะทำการเตรียมชิ้นงานตามมาตรฐานในการเชื่อมความต้านทาน AWS C1.1M/C1.1:2019 [16] โดยอะลูมิเนียมผสม 5052 ที่ใช้ในการศึกษานี้มีความหนา 1.50 mm และเหล็กกล้าคาร์บอนผสมต่ำ SPFH 780 หนา 1.60 mm ชิ้นงานถูกเตรียมโดยการตัดให้ได้ขนาดความกว้าง 25 mm และความยาว 102 mm โดยการจัด วางการเชื่อมความต้านทาน ขนาดของชิ้นงานทดสอบแสดงดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 การเชื่อมความต้านทานโดยการกดของอิเล็กโทรดบนชิ้นงานตามมาตรฐาน AWS [17]

2.2 วิธีการทดลอง

ในการศึกษานี้ใช้ปัจจัยในการทดลอง 3 ปัจจัย และแต่ละปัจจัยมี 2 ระดับ ดังนั้นจึงมีจำนวนการทดลองเท่ากับ 8 การทดลอง ซึ่งในการเชื่อมความต้านทานนี้มีเงื่อนไขหรือตัวแปรในการเชื่อมความต้านทาน ในการทดลองครั้งนี้ มีปัจจัยที่สามารถกำหนดและปรับค่าได้จำนวน 3 ตัวแปรด้วยกัน ได้แก่ (1) Up Slope: คือ เวลาในการปล่อยกระแสขาขึ้น (2) Down Slope: คือ เวลาในการปล่อยกระแสขาลง และ (3) Electrode Force: คือ แรงกดของอิเล็กโทรด ซึ่งตัวแปรและระดับในการเชื่อมความต้านทานที่ใช้ในการทดลองนี้ได้แสดงในตารางที่ 1

สำหรับในการศึกษานี้ เหตุผลที่ได้ทำการเลือกใช้ตัวแปรในการทดลองจำนวน 3 ตัว ซึ่งได้แก่ เวลาในการปล่อยกระแสขาขึ้น (Upslope) เวลาในการปล่อยกระแสขาลง (Downslope) และแรงกดของอิเล็กโทรด (Electrode Force) เนื่องจากเป็นปัจจัยที่สามารถควบคุมการเพิ่มและลดของกระแสไฟฟ้าในช่วงต้นและปลายของกระบวนการเชื่อมได้อย่างละเอียด ซึ่งส่งผลต่อการเกิดความร้อน การหลอมเหลว และการก่อตัวของสารประกอบเชิงโลหะบริเวณรอยต่อได้โดยตรง แม้ว่าปัจจัยหลักอื่น เช่น กระแสไฟฟ้า เวลาเชื่อม หรือขนาดอิเล็กโทรด จะมีการศึกษากันอย่างแพร่หลายในงานวิจัยก่อนหน้านี้แล้ว แต่ปัจจัยด้านการควบคุมรูปแบบของกระแสในลักษณะขึ้น-ลงยังมีการศึกษาน้อย ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นไปที่การศึกษามลกระทบของปัจจัยทั้งสามต่อความแข็งแรง พฤติกรรมการแตกหัก และการก่อตัวของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ เพื่อให้ได้ข้อมูลเชิงลึกที่สามารถประยุกต์ใช้ในกระบวนการผลิตจริงได้อย่างมีประสิทธิภาพ

ตารางที่ 1 ระดับและปัจจัยที่ใช้ในการทดลอง

ปัจจัย	ระดับ	
	Low	High
เวลาในการปล่อยกระแสขาขึ้น: Up Slope (Cycle)	0	15
เวลาในการปล่อยกระแสขาลง: Down Slope (Cycle)	0	15
แรงกดของอิเล็กโทรด: Electrode Force (MPa)	0.075	0.15

2.3 การเชื่อมความต้านทาน

ก่อนที่จะทำการเชื่อมความต้านทาน นำโลหะพื้นหรือชิ้นงานล้างทำความสะอาดพื้นผิวของชิ้นงานด้วยอะซิโตนเพื่อขจัดคราบน้ำมันที่ผิวและรอให้แห้ง จากนั้นทำการวางและเตรียมชิ้นงานทดสอบประกอบกับตัวจับยึดชิ้นงานดังแสดงในรูปที่ 1

แล้วทำการเชื่อมด้วยเครื่องเชื่อมความต้านทาน PANASONIC รุ่น YR500-CM2 ขนาดกำลัง 50 KVA 50 Hz โดยใช้อิเล็กโทรด ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 16 mm ที่มีลักษณะโค้งมนและตัดตรงบริเวณปลายอิเล็กโทรด โดยอิเล็กโทรดทำจากวัสดุ CuCrZr ใช้กระแสไฟฟ้าในการเชื่อมที่ 11,000 A และเวลาในการปล่อยกระแสไฟฟ้าปกติ 7 Cycle

2.4 การทดสอบความต้านทานแรงดึงเหนือบริเวณรอยต่อ

สำหรับขั้นตอนการทดสอบความต้านทานแรงดึงเหนือบริเวณรอยต่อ จะนำชิ้นงานที่ผ่านการเชื่อมความต้านทาน มาทำการทดสอบความต้านทานแรงดึงเหนือบริเวณรอยต่อ โดยใช้เครื่องทดสอบเอนกประสงค์ยี่ห้อ SHIMADZU รุ่น AG-X 100 kN ที่ความเร็ว 2.0 mm/min

2.5 การวิเคราะห์พฤติกรรมการแตกหักและชั้นสารประกอบบริเวณรอยต่อ

สำหรับขั้นตอนการวิเคราะห์พฤติกรรมการแตกหักบริเวณรอยต่อนั้น จะนำชิ้นงานที่ผ่านการทดสอบความต้านทานแรงดึงเหนือบริเวณรอยต่อที่ได้ค่าความต้านทานแรงดึงเหนือบริเวณรอยต่อ สูงสุด กลางและต่ำสุดมาทำการวิเคราะห์พฤติกรรมการแตกหักบริเวณรอยต่อ โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy: SEM) ยี่ห้อ JEOL รุ่น JSM-6510LV และวิเคราะห์การกระจายตัวของธาตุบริเวณรอยแตกหักด้วย Energy Dispersive X-Ray Spectrometry (EDS) ยี่ห้อ Oxford รุ่น X-MAX และทำการตรวจสอบชั้นสารประกอบเชิงโลหะหรือเฟสที่เกิดบริเวณรอยแตกหักของชิ้นงานที่ได้ค่าความต้านทานแรงดึงเหนือบริเวณรอยต่อ และชิ้นงานที่ได้ค่าความต้านทานแรงดึงเหนือบริเวณรอยต่อต่ำสุดโดยจะทำการวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-Ray Diffractometer) ในการศึกษาชั้นสารประกอบเชิงโลหะหรือโครงสร้างผลึกบริเวณพื้นผิวที่เกิดการแตกหัก ด้วยเครื่องตรวจสอบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ ยี่ห้อ BRUKER รุ่น D8-Discover ในการตรวจสอบใช้ความต่างศักย์ 40 kV กระแสไฟฟ้า 40 mA ความเร็วในการสแกน 0.2 min/0.02° กับมุมการเลี้ยวเบน 2θ ในช่วงความยาวคลื่น 25-75°

3. ผลการวิจัย

3.1 ผลจากการทดลองเชื่อมความต้านทาน

จากการทดลองเชื่อมความต้านทานชิ้นงาน หลังจากนั้นได้นำชิ้นงานมาทำการทดสอบความแข็งแรงบริเวณรอยต่อ โดยการทดสอบความต้านทานแรงดึงเหนือบริเวณรอยต่อและนำข้อมูลที่ได้จากการทดสอบมาทำการวิเคราะห์โดยทำการเลือกเงื่อนไขที่ให้ค่าความต้านทานแรงดึงเหนือบริเวณรอยต่อ สูงสุด กลางและต่ำสุดมาทำการวิเคราะห์พฤติกรรมการแตกหักบริเวณรอยต่อและทำการตรวจสอบชั้นสารประกอบเชิงโลหะหรือเฟสที่เกิดบริเวณรอยแตกหักของชิ้นงาน โดยผลการทดสอบค่าความต้านทานแรงดึงเหนือบริเวณรอยต่อแสดงดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ปัจจัยที่ได้จากการทดสอบค่าความต้านทานแรงดึงเหนือบริเวณรอยต่อ

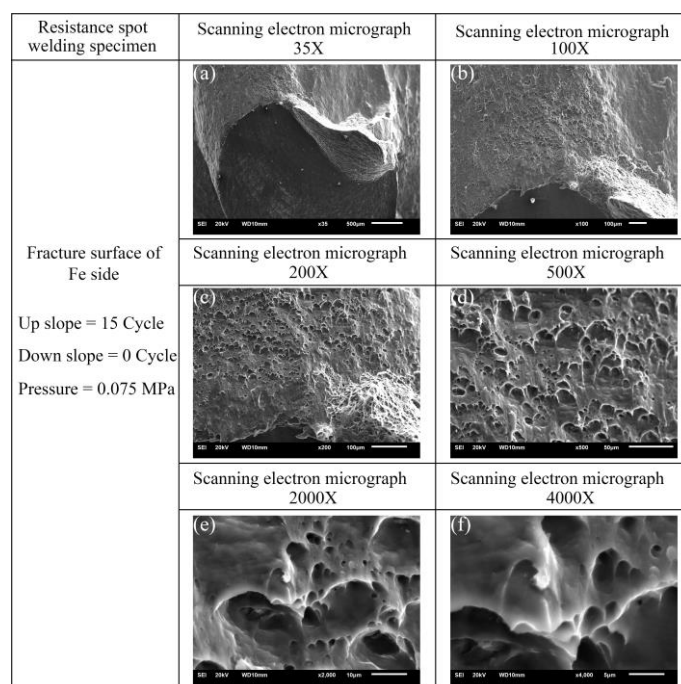
Samples No.	Up Slope (Cycle)	Down Slope (Cycle)	Electrode Force (MPa)	Average Tensile Shear Force (N)
1	0	0	0.075	2712.06
2	0	0	0.150	2367.40
3	0	15	0.075	2325.54
4	0	15	0.150	2833.18
5	7.5	7.5	0.115	2369.90
6	7.5	7.5	0.115	2424.84
7	7.5	7.5	0.115	2613.39
8	15	0	0.075	3939.98

9	15	0	0.150	3266.13
10	15	15	0.075	3263.89
11	15	15	0.150	1727.76

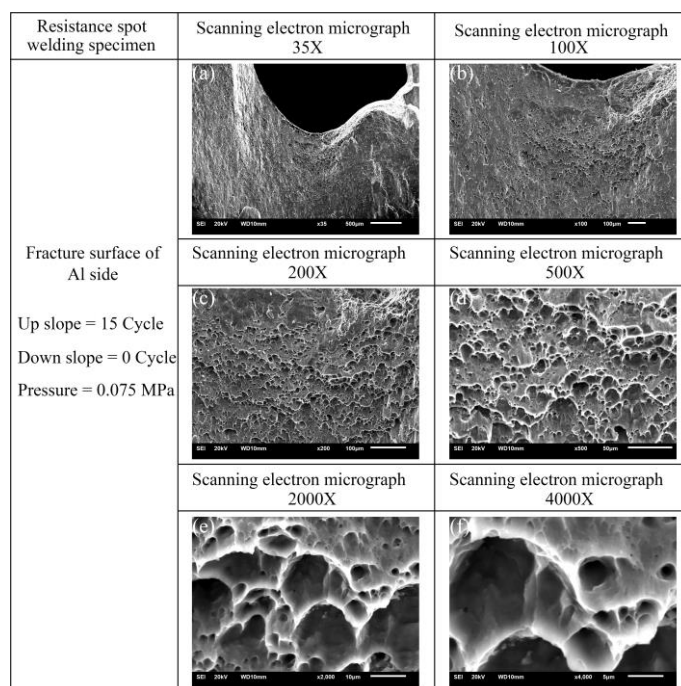
3.2 พฤติกรรมการแตกหักและการก่อตัวของชั้นสารประกอบเชิงโลหะบริเวณรอยต่อ

ในการวิเคราะห์พฤติกรรมการแตกหักของรอยต่อในการเชื่อมความดันที่ใช้เงื่อนไขหรือสภาวะในการเชื่อมที่แตกต่างกัน โดยในการศึกษานี้ได้ทำการคัดเลือกสภาวะการเชื่อมที่ส่งผลให้ชิ้นงานมีความสามารถในการต้านแรงดึงเฉือนที่ระดับสูงสุด ที่ Up Slope = 15 Cycle Down Slope = 0 Cycle และ Electrode Force = 0.075 MPa สำหรับสภาวะการเชื่อมที่ส่งผลให้ชิ้นงานมีความสามารถในการต้านแรงดึงเฉือนที่ระดับค่ากลางที่ Up Slope = 0 Cycle Down Slope = 0 Cycle และ Electrode Force = 0.075 MPa สำหรับสภาวะการเชื่อมที่ส่งผลให้ชิ้นงานมีความสามารถในการต้านแรงดึงเฉือนที่ระดับต่ำสุดนั้นจะอยู่ที่ Up Slope = 15 Cycle Down Slope = 15 Cycle และ Electrode Force = 0.15 MPa ไปทำการวิเคราะห์พฤติกรรมการแตกหักและการกระจายตัวของธาตุ รวมทั้งวิเคราะห์การก่อตัวของชั้นสารประกอบบริเวณรอยต่อของชิ้นงานที่เกิดการแตกหัก (เฉพาะเงื่อนไขที่ให้ค่าความดันต้านแรงดึงเฉือนสูงสุดและต่ำสุด)

เมื่อนำชิ้นงานที่ใช้สภาวะการเชื่อมที่ส่งผลให้ชิ้นงานมีความสามารถในการต้านแรงดึงเฉือนเฉลี่ยสูงสุดที่ 3939.98 N ไปทำการวิเคราะห์พฤติกรรมการแตกหัก พบรอยแตกหักที่มี Dimple (ลักษณะบุ่มเล็ก ๆ ที่เกิดจากการยึดตัวของโลหะในระหว่างการแตกหักแบบเหนียว) บนพื้นผิวของการแตกหักและมีการยึดตัวทั้งสองด้าน แสดงถึงการแตกหักแบบเหนียว ดังแสดงในรูปที่ 2 (a-f) ตามลำดับ ซึ่งเป็นพฤติกรรมการแตกหักแบบเหนียวของชิ้นงานด้านเหล็กกล้าคาร์บอนผสมต่ำ SPFH780 และด้านอะลูมิเนียมผสม 5052 โดยการเกิดแตกหักแบบเหนียวนั้นเป็นข้อดีของคุณสมบัติเชิงกลของรอยต่อ รอยต่อที่ดีนั้นเมื่อเกิดการแตกหักจะเกิดการแตกหักแบบเหนียวซึ่งจะมีความต้านทานต่อความล้าได้ดี แต่ถ้าเกิดการแตกหักแบบเปราะรอยแตกที่เกิดขึ้นจะขยายตัวไปได้ง่าย [18-19] นำไปสู่การลดลงของความต้านทานต่อความล้าของรอยต่อ

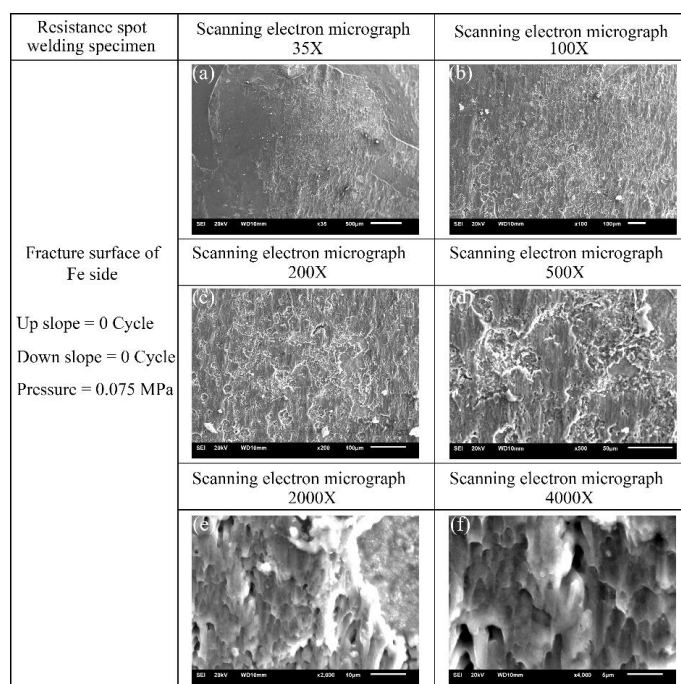


รูปที่ 2 พฤติกรรมการแตกหักด้านเหล็กกล้าคาร์บอนผสมต่ำภายใต้กำลังขยายต่างๆ ของชิ้นงานที่ให้ค่าความต้านทานแรงดึงเฉือนสูงสุด: (a): 35 เท่า (b): 100 เท่า (c): 200 เท่า (d): 500 เท่า (e): 2000 เท่า และ (f): 4000 เท่า

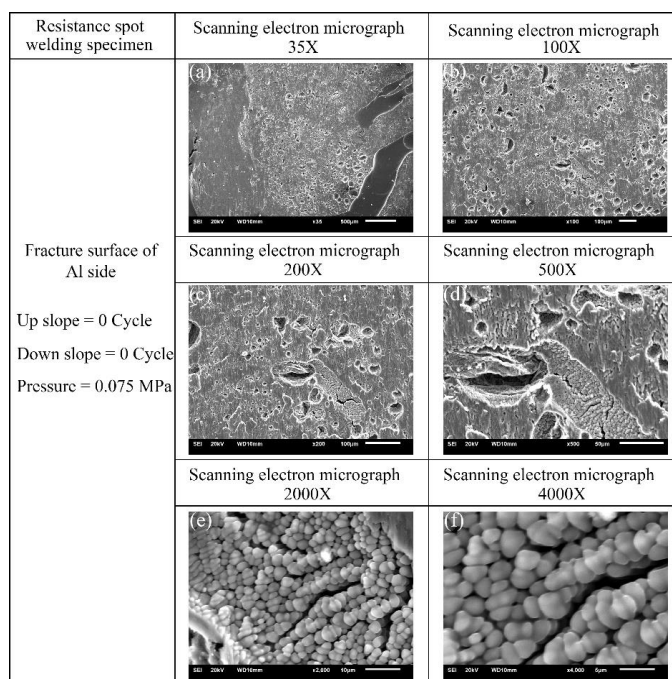


รูปที่ 3 พฤติกรรมการแตกหักด้านอะลูมิเนียมผสมภายใต้กำลังขยายต่าง ๆ ของชิ้นงานที่ให้ค่าความต้านทานแรงดึงเฉือนสูงสุด: (a): 35 เท่า (b): 100 เท่า (c): 200 เท่า (d): 500 เท่า (e): 2000 เท่า และ (f): 4000 เท่า

ในการเชื่อมชิ้นงานที่ให้ค่าความต้านทานแรงดึงเฉือนระดับค่ากลางสำหรับการศึกษาที่ 2712.06 N เมื่อทำการวิเคราะห์พฤติกรรมการแตกหัก พบว่าเกิดการแตกหักบริเวณรอยต่อ (Interface) ดังแสดงในรูปที่ 4 (a-f) และรูปที่ 5 (a-f) ตามลำดับ และพบว่าการเริ่มปรากฏรอยแตกหักที่มี ลักษณะบวม เล็กน้อยบนพื้นผิวของการแตกหัก ดังแสดงในรูปที่ 4 (f) ซึ่งแสดงถึงรอยต่อนั้นเริ่มมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้นบริเวณรอยต่อเมื่อใช้เงื่อนไขในการเชื่อมที่เปลี่ยนแปลงไป

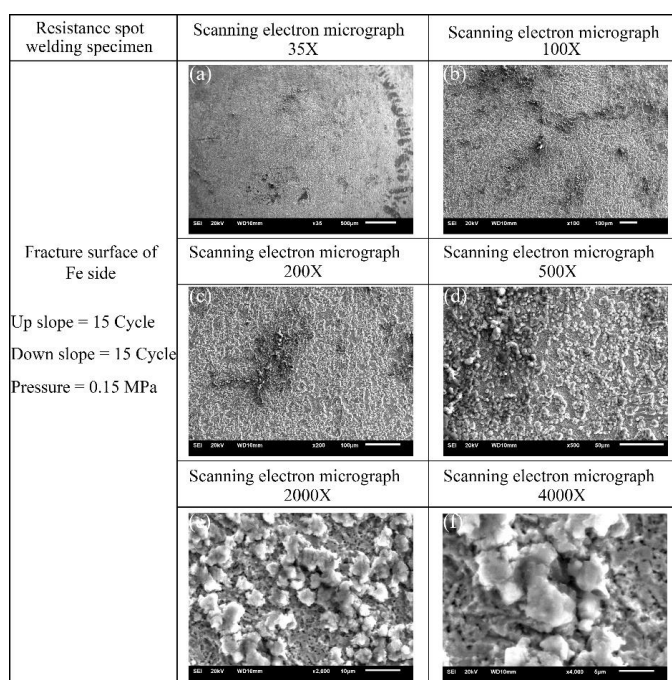


รูปที่ 4 พฤติกรรมการแตกหักด้านเหล็กกล้าคาร์บอนผสมต่ำที่แตกต่างกันของชิ้นงานที่ให้ค่าความต้านทานแรงดึงเฉือนระดับค่ากลาง: (a): 35 เท่า (b): 100 เท่า (c): 200 เท่า (d): 500 เท่า (e): 2000 เท่า และ (f): 4000 เท่า

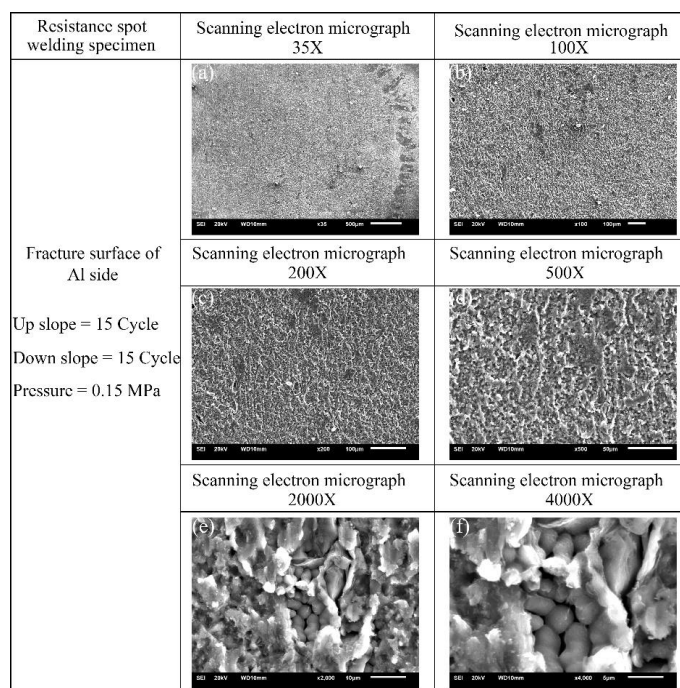


รูปที่ 5 พฤติกรรมการแตกหักด้านอะลูมิเนียมผสมที่แตกต่างกันของชิ้นงานที่ให้ค่าความต้านทานแรงดึงเฉือนระดับค่ากลาง: (a): 35 เท่า (b): 100 เท่า (c): 200 เท่า (d): 500 เท่า (e): 2000 เท่า และ (f): 4000 เท่า

ในทางตรงกันข้ามชิ้นงานที่ใช้เงื่อนไขในการเชื่อมที่ให้ค่าความต้านทานแรงดึงเฉือนเฉลี่ยต่ำสุดที่ 1727.76 N เมื่อทำการวิเคราะห์พฤติกรรมการแตกหัก พบว่าเกิดการแตกหักบริเวณรอยต่อ (Interface) และไม่ปรากฏรอยแตกหักที่มีลักษณะบวมเล็ก ๆ บนพื้นผิวของการแตกหักซึ่งแสดงถึงรอยต่อนั้นมีความแข็งแรงน้อย บ่งชี้ว่าการแตกหักแบบเปราะเกิดขึ้นบริเวณรอยต่อ ส่งผลให้รอยแตกที่เกิดขึ้นจะขยายตัวไปได้ง่าย นำไปสู่การลดลงของค่าความต้านทานแรงดึงเฉือนและความต้านทานต่อความล้าของรอยต่อ ดังแสดงในรูปที่ 6 และรูปที่ 7 ตามลำดับ

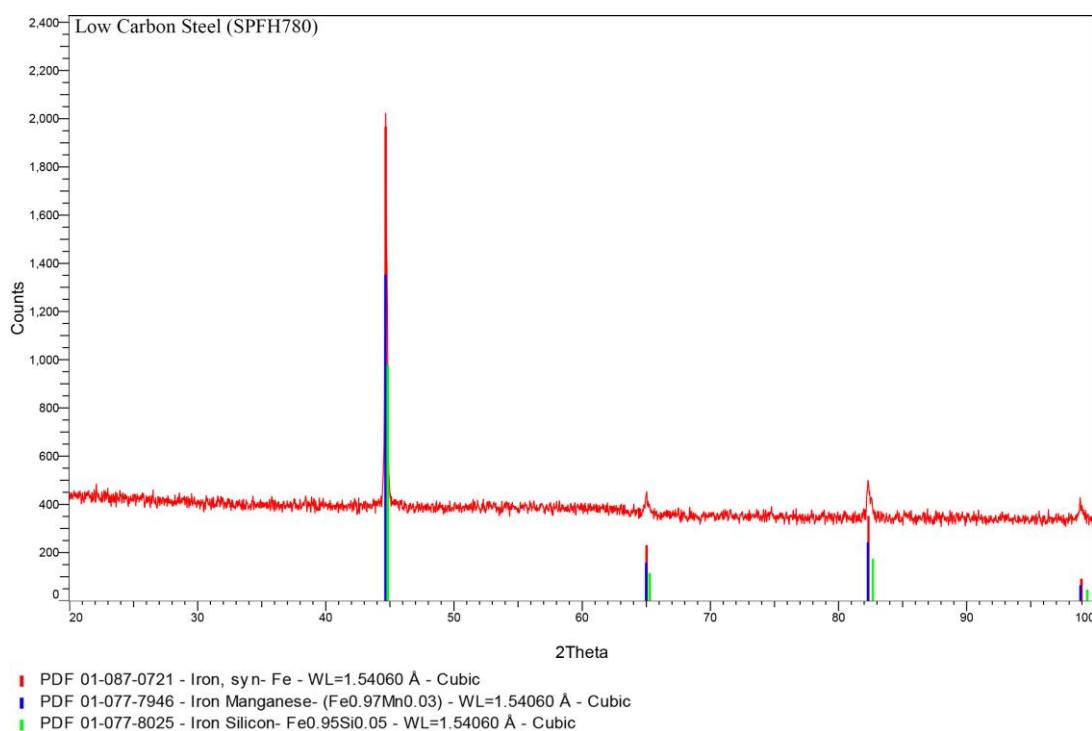


รูปที่ 6 พฤติกรรมการแตกหักของชิ้นงานด้านเหล็กกล้าคาร์บอนผสมต่ำที่แตกต่างกันของชิ้นงานที่ให้ค่าความต้านทานแรงดึงเฉือนต่ำสุด: (a): 35 เท่า (b): 100 เท่า (c): 200 เท่า (d): 500 เท่า (e): 2000 เท่า และ (f): 4000 เท่า

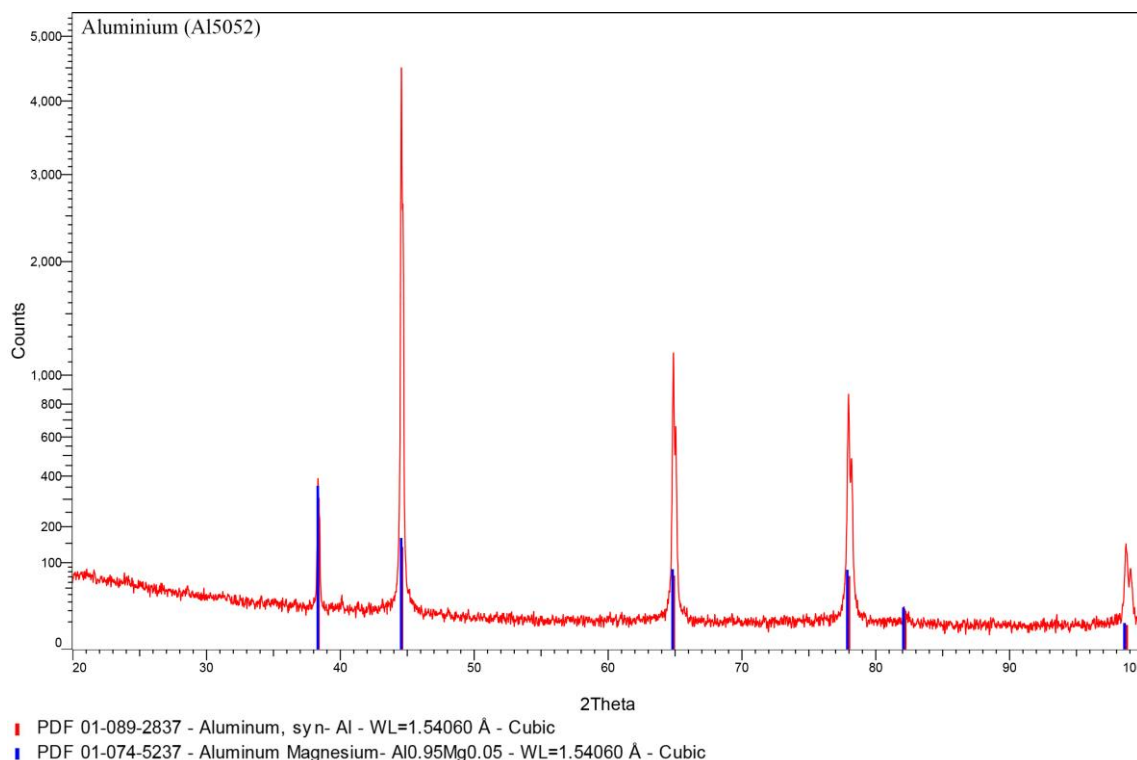


รูปที่ 7 พฤติกรรมการแตกหักของชิ้นงานด้านอะลูมิเนียมผสมภายใต้กำลังขยายต่าง ๆ ของชิ้นงานที่ให้ค่าความต้านทานแรงดึงเฉือนต่ำสุด: (a): 35 เท่า (b): 100 เท่า (c): 200 เท่า (d): 500 เท่า (e): 2000 เท่า และ (f): 4000 เท่า

ก่อนทำการวิเคราะห์ชิ้นสารประกอบเชิงโลหะที่รอยต่อในการเชื่อมความต้านทานสำหรับในการศึกษานี้ ได้ทำการวิเคราะห์ชิ้นงานก่อนทำการเชื่อมสำหรับเหล็กกล้าคาร์บอนผสมต่ำและอะลูมิเนียมผสม 5052 แสดงดังรูปที่ 8 และรูปที่ 9 ตามลำดับ จากการวิเคราะห์พบว่ามีการก่อตัวของเฟส Fe, $\text{Fe}_{0.97}\text{Mn}_{0.03}$ และ $\text{Fe}_{0.95}\text{Si}_{0.05}$ สำหรับเหล็กกล้าคาร์บอนผสมต่ำ และ $\text{Al}_{0.95}\text{Mg}_{0.05}$ สำหรับอะลูมิเนียมผสม 5052

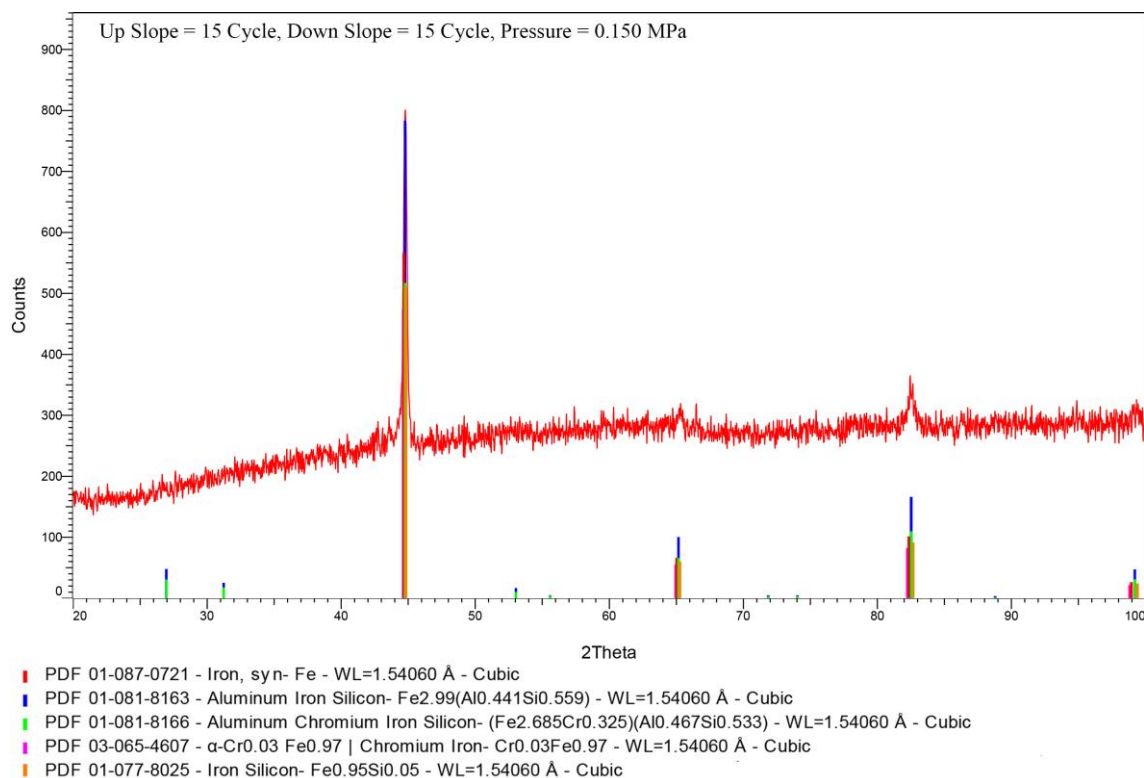


รูปที่ 8 การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของชิ้นสารประกอบที่รอยต่อของชิ้นงานเหล็กกล้าคาร์บอนผสมต่ำก่อนการเชื่อม

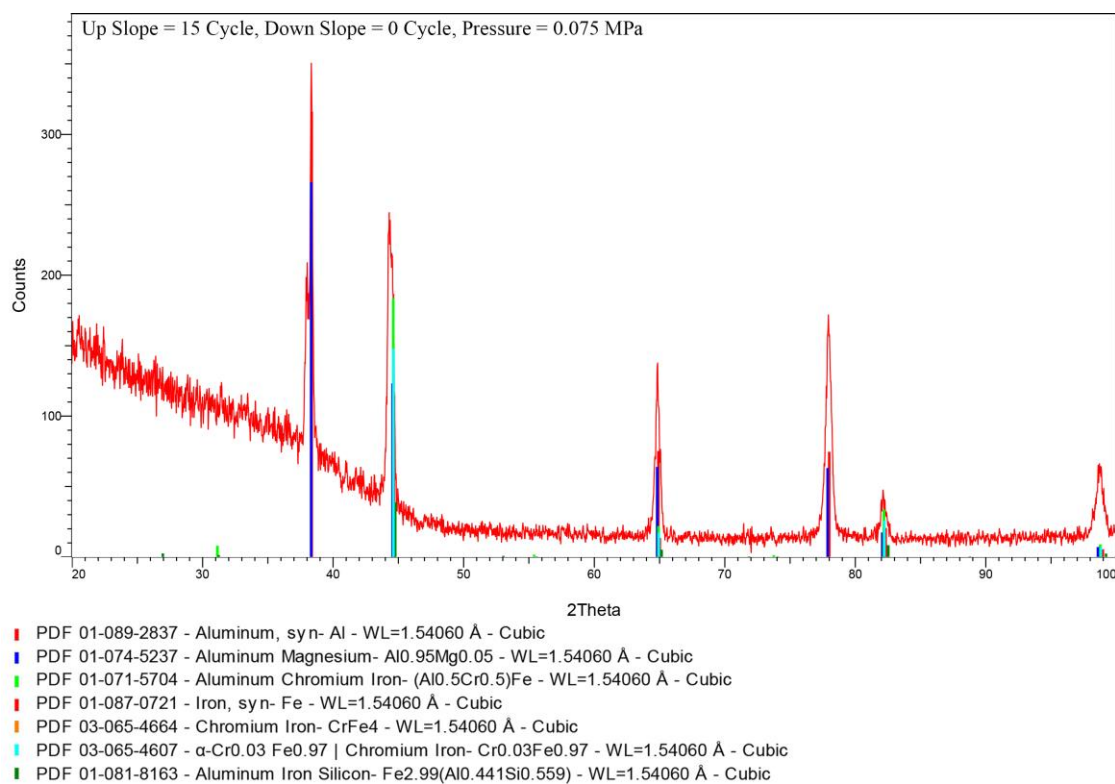


รูปที่ 9 การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของชั้นสารประกอบที่รอยต่อของชิ้นงานอะลูมิเนียมผสมก่อนการเชื่อม

จากการนำชิ้นงานไปทำการวิเคราะห์ชั้นสารประกอบเชิงโลหะที่รอยต่อในการเชื่อมความดันทาน สำหรับการศึกษา จะทำการเลือกเฉพาะชิ้นงานที่ใช้เงื่อนไขที่ให้ค่าความดันทานแรงดึงเฉือนสูงสุดและต่ำสุดคือ Up Slope = 15 Cycle Down Slope = 0 Cycle และ Electrode Force = 0.075 MPa และชิ้นงานที่ใช้เงื่อนไขที่ให้ค่าความดันทานแรงดึงเฉือนต่ำสุดที่ Up slope = 15 Cycle Down Slope = 15 Cycle และ Electrode Force = 0.15 MPa ตามลำดับ จากไบนารี เฟสไดอะแกรม (Binary Phase Diagram) ของธาตุผสม Al-Fe พบว่ามีชั้นสารประกอบเชิงโลหะ Fe-Rich, Al-Rich, Fe_3Al , FeAl_2 , Fe_2Al_5 และ FeAl_3 [19] ซึ่งจากผลการยืนยันเฟสที่เกิดขึ้นจากการวิเคราะห์ด้วย XRD นั้นพบว่ามีคุณสมบัติคล้ายกัน โดยตำแหน่งที่ทำการวิเคราะห์ชั้นสารประกอบเชิงโลหะแสดงดังรูปที่ 10 และรูปที่ 11 ตามลำดับ พบว่าชั้นสารประกอบเชิงโลหะที่เกิดขึ้นมีโครงสร้างผลึกเป็นแบบ Cubic จากการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกด้วยวิธีการวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ ของการศึกษานี้พบว่าบริเวณที่เกิดจากการแตกหักของชิ้นงานที่ใช้เงื่อนไขในการเชื่อมที่ให้ค่าความดันทานแรงดึงเฉือนสูงสุด นั้นปรากฏชั้นสารประกอบเชิงโลหะที่แตกต่างกันกับเงื่อนไขในการเชื่อมที่ให้ค่าความดันทานแรงดึงเฉือนต่ำสุดก่อดำเนินขึ้นอยู่ สาม ชนิดด้วยกัน คือ Aluminum Al, Aluminum Magnesium $\text{Al}_{0.95}\text{Mg}_{0.05}$ และ Aluminum Chromium Iron, $(\text{Al}_{0.5}\text{Cr}_{0.5})\text{Fe}$ โดยชั้นสารประกอบเชิงโลหะทั้งสามชนิดนี้มีโครงสร้างผลึกเป็นแบบ Cubic



รูปที่ 10 การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของชิ้นสารประกอบที่รอยต่อของชั้นงานที่ผ่านการเชื่อมภายใต้สภาวะการเชื่อม ความดันทานแบบจุดที่ส่งผลให้เกิดค่าความแข็งแรงต่อแรงเฉือนในระดับต่ำสุด



รูปที่ 11 การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของชิ้นสารประกอบที่รอยต่อของชั้นงานที่ผ่านการเชื่อมภายใต้สภาวะการเชื่อม ความดันทานแบบจุดที่ส่งผลให้เกิดค่าความแข็งแรงต่อแรงเฉือนในระดับสูงสุด

4. สรุป

จากการศึกษาการเชื่อมความต้านทานที่เงื่อนไขในการเชื่อมที่แตกต่างกันคือ เวลาในการปล่อยกระแสขาขึ้น เวลาในการปล่อยกระแสขาลงและแรงกดของอิเล็กโทรด และวิเคราะห์ตัวแปรหรือเงื่อนไขในการเชื่อมความต้านทานที่ให้ค่าความต้านทานแรงดึงเฉือนบริเวณรอยต่อที่มีอิทธิพลความต้านทานแรงดึงเฉือน พฤติกรรมการแตกหักและการก่อตัวของชิ้นสารประกอบเชิงโลหะระหว่างอะลูมิเนียมผสมกับเหล็กกล้าคาร์บอนผสมต่ำ จากการศึกษาพบว่า ชิ้นงานที่ใช้เงื่อนไขเวลาในการปล่อยกระแสขาขึ้นที่ 15 Cycle เวลาในการปล่อยกระแสขาลงที่ 0 Cycle และแรงกดของอิเล็กโทรด 0.075 MPa ให้ค่าความต้านทานแรงดึงเฉือนบริเวณรอยต่อสูงสุด สำหรับการวิเคราะห์พฤติกรรมการแตกหักพบว่าชิ้นงานที่ให้ค่าความต้านทานแรงดึงเฉือนสูงสุดปรากฏพฤติกรรมการแตกหักแบบเหนียว และมีการก่อตัวของชิ้นสารประกอบเชิงโลหะของเฟส $Al_{0.95}Mg_{0.05}$, $(Al_{0.5}Cr_{0.5})Fe$, $Cr_{0.03}Fe_{0.97}$ และ $Fe_{2.99}(Al_{0.441}Si_{0.559})$ ในทางกลับกันชิ้นงานที่ให้ค่าแรงดึงเฉือนต่ำสุดจะปรากฏพฤติกรรมการแตกหักเปราะ และมีการก่อตัวของชิ้นสารประกอบเชิงโลหะของเฟส $Fe_{0.95}Si_{0.05}$, $Fe_{2.99}(Al_{0.441}Si_{0.559})$ และ $Cr_{0.03}Fe_{0.97}$

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณสาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์บูรณาการและเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก วิทยาเขตจันทบุรี ที่ให้การสนับสนุนการวิจัยนี้

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Y.G. Yang, Z. Su, W. Zuo, D. Ni, Y. Hu, Z. Wei and Z. Mi, "Effects of resistance spot welding parameters on microstructure and mechanical properties of the dissimilar welded joint of quenching and partitioning steels," *Materials Research Express* (2024). <https://doi.org/10.1088/2053-1591/ad791e>
- [2] M. Li, W. Tao, J. Zhang, Y. Wang and S. Yang, "Hybrid resistance-laser spot welding of aluminum to steel dissimilar materials: Microstructure and mechanical properties," *Materials & Desi*, vol.221, (2022). <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2022.111022>
- [3] T. Das, R. Das and J. Paul, "Resistance Spot Welding of Dissimilar AISI-1008 steel/Al-1100 Alloy Lap Joints with A Graphene Interlayer", *Journal of Manufacturing Processes*, vol.53, (2020), pp. 260–274. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2020.02.032>
- [4] J.P. Oliveira, K. Ponder, E. Brizes, T. Abke, P. Edwards and A.J. Ramirez, "Combining Resistance Spot Welding and Friction Element Welding for Dissimilar Joining of Aluminum to High Strength Steels," *Journal of Materials Processing Technology*, vol.273, (2019), Article no. 116192. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2019.04.018>
- [5] S. Tokita, C.Y. Liu and Y.S. Sato, "Effects of Material Combination for Ultrasonic Spot Welding on Microstructure and Strength of Al/Al, Al/Cu, and Al/Ni Dissimilar Joints. *Journal of Materials Research and Technology*," vol. 26, (2023), pp. 7619–7633. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2023.09.094>
- [6] Z. Sun, Z. Liang, L. Wang, Y. Liu, Y. Liang and D. Wang, "Microstructure and Mechanical Properties of Al-Zn-Mg-Cu Alloy Joints Welded by Ultrasonic Spot Welding with Soft Specification," *Journal of Manufacturing Processes*, vol.116, (2024), pp. 306–314. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2024.02.061>

- [7] H. Azhari-Saray, M. Sarkari-Khorrami, A. Nademi-Babahadi and S.F. Kashani-Bozorg, “Dissimilar Resistance Spot Welding of 6061-T6 Aluminum Alloy/St-12 Carbon Steel Using a High Entropy Alloy Interlayer,” *Intermetallics*, vol.124, (2020), Article no. 106876. <https://doi.org/10.1016/j.intermet.2020.106876>
- [8] S.M. Manladan, F. Yusof, S. Ramesh and M. Fadzil, “A Review on Resistance Spot Welding of Magnesium Alloys,” *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol.86, (2016), pp. 1805–1825. <https://doi.org/10.1007/s00170-015-8258-9>
- [9] S.N. Mortazavi, P. Marashi, M. Pouranvari and M. Masoumi, “Investigation on Joint Strength of Dissimilar Resistance Spot welds of Aluminum Alloy and Low Carbon Steel,” *Advanced Materials Research*, vol.264–265, (2011), pp. 384–389. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.264-265.384>
- [10] B. Pan, H. Sun, S.L. Shang, M. Banu, P.C. Wang, B.E. Carlson, Z.K. Liu and J. Li, “Understanding Formation Mechanisms of Intermetallic Compounds in Dissimilar Al/Steel Joint Processed by Resistance Spot Welding,” *Journal of Manufacturing Processes*, vol.83, (2022), pp. 212–222. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2022.08.062>
- [11] X. Wan, Y. Wang and C. Fang, “Welding Defects Occurrence and Their Effects on Weld Quality in Resistance Spot Welding of AHSS Steel,” *ISIJ International*, vol.54, (2014), pp.1883–1889. <https://doi.org/10.2355/isijinternational.54.1883>
- [12] Z. Xu and Y. Zhang, “Improvement on Microstructure and Mechanical Properties of Cu/Al Ultrasonic Spot Welded Joints Assisted by Periodic Additional Force,” *Journal of Materials Processing Technology*, vol.326, (2024). <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2024.118325>
- [13] P. Bamberg, R. Seewald, A. Schiebahn, U. Reisgen, N. Precoma and M. Epperlein, “Improvement of the Resistance Spot Welding of Al-Mg-Si Alloys by Using Cladding Technology: An Optical and Mechanical Characterization Study,” *Journal of Advanced Joining Processes*. vol.5, (2022). <https://doi.org/10.1016/j.jajp.2021.100090>
- [14] J. Queval, E. Geslain, C. Pouvreau, P. Broussaud-Laloue and S. Loyer, “Joining Thin Galvanized Low Carbon Steel Sheet to AA6056-T4 by Resistance Spot Welding and Adhesive Weld Bounding,” *Journal of Manufacturing Processes*, vol.110, (2024). pp. 70–81. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2023.12.049>
- [15] A. Gullino, P. Matteis and F.D. Aiuto, “Review of Aluminum-to-Steel Welding Technologies for Car-Body Applications,” *Metals*, vol.9, (2019), Article no. 315. <https://doi.org/10.3390/met9030315>
- [16] C1.1M/C1.1:2019, “Recommended Practices for Resistance Welding,” (2019).
- [17] AWS C3, “Committee on Brazing and Soldering,” (2007), “Brazing Handbook,” 5 ed. American welding society, Miami, Florida, United States of America.
- [18] L. Shi, W. Li, S. Li, Y. Shi, F. Jiang, Z. Zhou, X. Su, “Effect of loading configuration on tensile and fatigue behavior of dissimilar resistance spot welds of selective laser-melted maraging steels,” *International Journal of Fatigue* vol.198 (2025). <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2025.109031>.

- [19] L. Shi, J. Xue, J. Kang, B.S. Amirkhiz, A.S. Haselhuhn, B.E. Carlson, “Tensile and fatigue behavior of novel dissimilar resistance spot welds of AA5754 to steels: Interplay of intermetallic layer, weld nugget diameter and notch root angle,” *Journal of Materials Research and Technology* vol.22 (2023). pp.1737–1752. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2022.12.032>.
- [20] T.B. Massalski, H. Okamoto, P.R. Subramanian and L. Kacprzak, “Binary Alloy Phase Diagrams,” Materials Park, OH: ASM International (2000)

การลดของเสียบริเวณผิวชิ้นงานในกระบวนการผลิตชิ้นส่วนข้อต่อโลหะ

กรณีศึกษา บริษัท โกลบอล-ไทยซอน พรีซิชั่น อินดัสทรี จำกัด

Minimization of Surface Defects in the Manufacturing Process of Metal Joint

Components: A Case Study of Global-Thaison Precision Industry Co., Ltd.

กนกวรรณ เกริกสูงเนิน¹, วรรณนิศา นุชคุ้ม¹, จิตติวัฒน์ นิธิกาญจนธาร¹, ภูมิบุญ พลต่าง¹,อรรถพล คำชาย², สุภัทรา หมูป่ารัง³ และ ภาณุภักดิ์ สารวงศ์^{4*}¹สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน²สาขาวิชาวิศวกรรมการผลิต คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน³สาขาวิชาอุตสาหกรรมและโลจิสติกส์ สำนักงานวิศวกรรมศาสตร์และนวัตกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก⁴สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสานKanokwan Kroeksungnoen¹, Wannisa Nutkhum¹, Jittiwat Nithikarnjanatharn¹, Bhoomboon Phontang¹,Atthapol Camchay², Supatthra Muparang³ and Panuput Satuwong^{4*}¹Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering and Technology,

Rajamangala University of Technology Isan

²Department of Production Engineering, Faculty of Engineering and Technology,

Rajamangala University of Technology Isan

³Department of Industrial Engineering and Logistics, School of Engineering and Innovation,

Rajamangala University of Technology Tawan-ok

⁴Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering and Technology,

Rajamangala University of Technology Isan

*Corresponding author Email: Nearmoonsakura@gmail.com

(Received: June 11, 2025 / Revised: June 22, 2025 / Accepted: June 24, 2025)

บทคัดย่อ

การลดของเสียบริเวณผิวชิ้นงานในกระบวนการผลิตข้อต่อโลหะของ บริษัท โกลบอล-ไทยซอน พรีซิชั่น อินดัสทรี จำกัด นำหลักการไคเซ็นมาประยุกต์ใช้เพื่อลดของเสียในกระบวนการผลิต จากการเก็บข้อมูลของเสีย พบอัตราของเสียสูงถึง 16.57% มีสาเหตุหลักจากรอยคลิ่น รอยบุบ รอยเกลี้ยงไม่ครบกระบวนการ และรอยขีดข่วน ต่อมาทำการวิเคราะห์ปัญหาที่เกิดขึ้นด้วยเครื่องมือทางคุณภาพในวิศวกรรมอุตสาหการ ได้แก่ แผนภาพแสดงเหตุและผล และการวิเคราะห์ความเสี่ยง เพื่อระบุสาเหตุหลักและสาเหตุรองของปัญหา จากนั้นนำคะแนนความเสี่ยงมาวิเคราะห์ลำดับความสำคัญของปัญหาด้วยแผนภาพพาเรโต ผลจากการดำเนินการปรับปรุงทำให้อัตราของเสีย ลดเหลือ 1.34% และเพิ่มอัตราผลิตภัณฑ์ที่ผ่านเกณฑ์คุณภาพจาก 80.19% เป็น 95.42% คิดเป็นการลดต้นทุนของเสียประมาณ 2,291,328 บาทต่อปี แสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพของการวิเคราะห์ปัญหาและการแก้ไขอย่างเป็นระบบในเชิงวิศวกรรม

คำสำคัญ: การลดของเสีย, การลดต้นทุน, การวิเคราะห์ความเสี่ยง (RPN)

Abstract

The reduction of surface defects in the manufacturing process of metal joints at Global-Thaison Precision Industry Co., Ltd. was achieved through the application of Kaizen principles to minimize waste in the manufacturing process. Defect data collection revealed a defect rate as high as 16.57%, with the primary causes being surface waviness, dents, incomplete turning, and scratches. Subsequently, the problems were analyzed using quality tools in industrial engineering, including a cause-and-effect diagram and risk analysis, to identify both primary and secondary causes of the defects. The risk scores were then prioritized using a Pareto chart. After implementing the improvements, the defect rate was reduced to 1.34%, and the percentage of products meeting quality standards increased from 80.19% to 95.42%. This resulted in an annual waste cost reduction of approximately 2,291,328 baht, demonstrating the effectiveness of systematic problem analysis and engineering-based corrective actions.

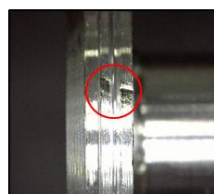
Keywords: Waste reduction, Cost reduction, Risk Priority Numbers (RPN)

1. บทนำ

อุตสาหกรรมยานยนต์เป็นรากฐานที่สำคัญในการพัฒนาเชิงเศรษฐกิจของประเทศไทยมากกว่า 60 ปี [1] ซึ่งประเทศไทยถือเป็นฐานการผลิตหลักแห่งหนึ่งของโลก จากการเป็นฐานประกอบรถยนต์มากกว่า 1.8 ล้านคัน ในปี พ.ศ. 2566 [2] ส่งผลให้ผู้ผลิตจำเป็นต้องพัฒนากระบวนการผลิตและคุณภาพสินค้าให้สอดคล้องกับความต้องการของตลาด [3] ทำให้เทคโนโลยีและการพัฒนากระบวนการผลิตเข้ามามีบทบาทสำคัญต่อการรักษาความสามารถในการแข่งขันและการขยายธุรกิจ [4] ซึ่งปี พ.ศ. 2568 ถึง 2570 ความต้องการชิ้นส่วนยานยนต์ในประเทศไทยมีทิศทางขยายตัวเพิ่มขึ้นเฉลี่ยปีละ 2.0-3.0% [5-6] การเติบโตของอุตสาหกรรมได้รับแรงหนุนจากการลงทุนของต่างประเทศคิดเป็นมูลค่ากว่า 130,000 ล้านบาท ส่งผลเชิงบวกต่อเศรษฐกิจและภาคการผลิตในประเทศ [7] การวิจัย การพัฒนา และการส่งเสริมนวัตกรรมในอุตสาหกรรมใหม่ เช่น ยานยนต์ไฟฟ้า ถือเป็นกุญแจสำคัญในการพัฒนาเศรษฐกิจของประเทศไทยให้เติบโตอย่างมั่นคงและยั่งยืน [8] บริษัทโกลบอล-ไทยซอน พรินซ์ อินดัสทรี จำกัด เป็นผู้นำด้านการผลิตชิ้นส่วนโลหะที่มีความละเอียดสูง ดำเนินการส่งมอบผลิตภัณฑ์คุณภาพสูง เช่น ชิ้นส่วนอุปกรณ์สื่อสาร อุปกรณ์ทางการแพทย์ และ ชิ้นส่วนยานยนต์ ซึ่งสายการผลิตกรณีศึกษาดำเนินการผลิตข้อต่อโลหะมีพนักงาน 6 คน และเครื่องจักรจำนวน 3 เครื่อง ปริมาณการผลิต 650 ชิ้นต่อวัน จากการศึกษาปัญหาในสายการผลิต พบว่าเกิดข้อบกพร่องบนผิวของชิ้นงาน ได้แก่ รอยผิวตัด รอยบุบ รอยกลิ้งไม่ครบกระบวนการ และรอยขีดข่วน ทำให้อัตราของเสียสูงถึง 19.81% ของของเสียทั้งหมด หรือประมาณ 1,198 ชิ้นต่อสัปดาห์ ขณะที่ค่า %Yield อยู่ที่ 80.19% ซึ่งค่า %Yield คือ สัดส่วนของจำนวนชิ้นงานดีต่อจำนวนชิ้นงานทั้งหมดที่ผลิตในสายการผลิต เป็นตัวชี้วัดประสิทธิภาพของกระบวนการผลิต โดยสายการผลิตกรณีศึกษากำหนดค่า %Yield มาตรฐานไว้ที่ 95% จากค่า %Yield ในปัจจุบันส่งผลกระทบต่อต้นทุนการผลิตและความพึงพอใจของลูกค้า เนื่องจากชิ้นงานไม่สามารถนำไปใช้งานได้ตามมาตรฐาน ดังรูปที่ 1



ก. รอยผิวตัด



ข. รอยบุบชิ้นงาน



ค. รอยกลิ้งไม่สมบูรณ์



ง. รอยขีดข่วน

รูปที่ 1 งานเสียจากข้อบกพร่องผิวชิ้นงาน

การศึกษางานวิจัยด้านคุณภาพของชิ้นงาน พบว่า วราภรณ์ ปิ่นแก้ว [9] ได้ศึกษาปัญหาที่เกิดขึ้นจากการตรวจสอบก่อนการส่งมอบผลิตภัณฑ์ โดยจัดลำดับความสำคัญของปัญหาด้วยแผนภาพพาเรโต และวิเคราะห์สาเหตุของปัญหาด้วยทฤษฎี Why - Why analysis ผลการปรับปรุงพบว่า ข้อร้องเรียนจากลูกค้าลดลงคิดเป็น 89.71% ต่อมา สมรรถณ เจริญนามวงศ์ [10] ศึกษาการลดของเสียในกระบวนการผลิตกรอบกระจกอลูมิเนียม โดยใช้แผนภาพพาเรโต และแผนภาพแสดงเหตุและผล วิเคราะห์ปัญหาและหาแนวทางการปรับปรุง ผลการปรับปรุงพบว่า สามารถลดของเสียคิดเป็น 61.36% และสามารถประหยัดต้นทุนคิดเป็น 14,220,000 บาทต่อปี ต่อมา ภาวัต วงศ์ธีรเดช [11] การลดของเสียและต้นทุนจากของเสียในกระบวนการผลิตชิ้นส่วนพลาสติก โดยใช้การวิเคราะห์กระบวนการ และแผนภาพแสดงเหตุและผล พบว่าอัตราของเสียลดลงจาก 33.80% เป็น 4.89% และต้นทุนลดลงจาก 93,862 บาท เป็น 14,157 บาทต่อเดือน แต่งานวิจัยที่ศึกษาดำเนินการปรับปรุงแก้ไขเพียงขั้นตอนการตรวจสอบก่อนส่งมอบ และการสั่งชิ้นส่วนใหม่ ซึ่งอาจเป็นการแก้ไขปัญหที่ปลายเหตุ สามารถเกิดของเสียในอนาคต ดังนั้นงานวิจัยในครั้งนี้จึงนำหลักการไคเซ็นมาเป็นแนวทางแก้ไขปัญหา เพื่อลดของเสียที่เกิดในองค์กร

ดังนั้นงานวิจัยนี้มุ่งเน้นการประยุกต์ใช้หลักการไคเซ็นด้วยเครื่องมือควบคุมคุณภาพในวิศวกรรมอุตสาหกรรม ได้แก่ แผนภาพแสดงเหตุและผล การวิเคราะห์ความเสี่ยง และแผนภาพพาเรโต เพื่อวิเคราะห์สาเหตุของปัญหาและดำเนินการปรับปรุงอย่างเป็นระบบ ซึ่งเป็นแนวทางตามหลักการไคเซ็น โดยประเมินผลลัพธ์ผ่านตัวชี้วัดด้านคุณภาพและต้นทุนก่อนและหลังการปรับปรุง เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการผลิต ลดต้นทุนการผลิต และควบคุมค่า %Yield ให้ไม่ต่ำกว่า 95% ตามมาตรฐานที่ทางโรงงานกำหนดไว้

2. วิธีดำเนินงาน

การดำเนินการลดของเสียบริเวณผิวชิ้นงานในกระบวนการผลิตชิ้นส่วนยานยนต์ในครั้งนี้ประกอบด้วยวิธีดำเนินงาน 6 ขั้นตอนหลัก ดังนี้

2.1 การศึกษาพื้นที่ปฏิบัติงาน

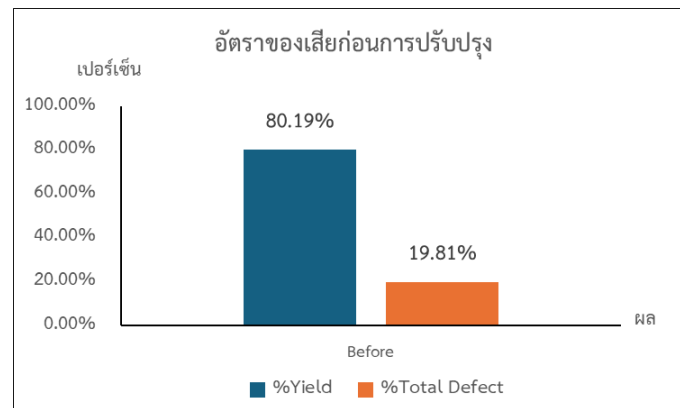
การดำเนินการศึกษากระบวนการผลิตข้อต่อโลหะ ดังรูปที่ 2 ซึ่งมีกระบวนการทำงานเริ่มจากการเตรียมวัตถุดิบความยาว 1500 มม. ต่อมานำวัตถุดิบเข้าเครื่อง CNC เพื่อทำการตัดเฉือนชิ้นงาน จากนั้นทำความสะอาดชิ้นงานด้วยเครื่องทำความสะอาดอัตโนมัติ และดำเนินการตรวจสอบคุณภาพด้วยสายตา จากนั้นนำชิ้นงานไปสุ่มตรวจยังพื้นที่ตรวจสอบคุณภาพและบรรจุผลิตภัณฑ์ในส่วนถัดไป



รูปที่ 2 ชิ้นส่วนข้อต่อโลหะ

2.2 การเก็บข้อมูลของเสีย

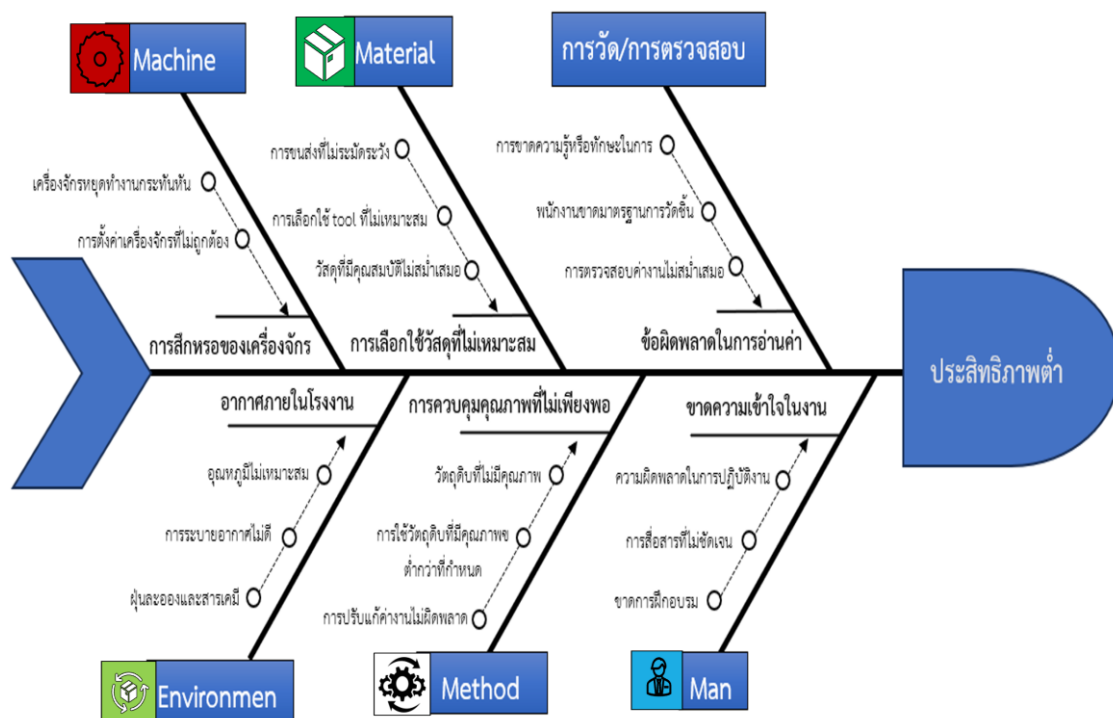
การศึกษาระบวนการผลิตข้อต่อโลหะ พบปัญหาในกระบวนการผลิต เนื่องจากผิวชิ้นงานเกิดความเสียหาย เช่น รอยขีด รอยบุบ รอยกลิ้งไม่ครบกระบวนการ และรอยขีดข่วน จากการเก็บข้อมูลของเสียในสายการผลิตกรณีศึกษา ระยะเวลา 1 เดือน พบว่ามีของเสียเฉลี่ย 1,198 ชิ้นต่อสัปดาห์ คิดเป็น 19.81% ของของเสียทั้งหมด ถือเป็นปัญหาที่รุนแรง สามารถแสดงอัตราของเสียก่อนการปรับปรุงในรูปแบบแผนภูมิแท่ง เพื่อถ่ายทอดการวิเคราะห์ข้อมูลของเสีย ดังรูปที่ 3



รูปที่ 3 อัตราของเสียก่อนปรับปรุง

2.3 การวิเคราะห์ด้วยแผนภาพแสดงเหตุและผล

การดำเนินการวิเคราะห์ปัญหาในกระบวนการผลิตข้อต่อโลหะ สามารถนำปัญหาที่พบมาวิเคราะห์ด้วยแผนภาพแสดงเหตุและผล ตามหลักการ 5M1E เพื่อวิเคราะห์หาสาเหตุของปัญหา ดังรูปที่ 4



รูปที่ 4 แผนภาพแสดงเหตุและผล

จากรูปที่ 4 สามารถสรุปสาเหตุของปัญหาในกระบวนการผลิตข้อต่อโลหะที่เกิดขึ้นจากสาเหตุทั้ง 6 ปัจจัยหลัก ดังนี้

1. ผู้ปฏิบัติงาน ขาดความเข้าใจกระบวนการทำงานที่ถูกต้อง เนื่องจากขาดการฝึกอบรมที่เป็นมาตรฐานเดียวกัน
2. เครื่องจักร เนื่องจากการตั้งค่าไม่ถูกต้อง ส่งผลให้กระบวนการผลิตไม่ต่อเนื่องและทำให้ชิ้นงานเกิดของเสีย
3. วัสดุ เกิดจากการเลือกใช้วัสดุไม่เหมาะสมกับการผลิต ทำให้ชิ้นงานเสียหายและไม่เป็นไปตามมาตรฐาน
4. กระบวนการทำงาน เนื่องจากกระบวนการควบคุมคุณภาพไม่ถูกวิธี เช่น การไม่ปฏิบัติตามมาตรฐานที่กำหนด
5. การวัด เกิดการอ่านค่าชิ้นงานผิดพลาด เนื่องจากการวัดค่าผิดพลาด หรือการใช้เครื่องมือไม่ถูกต้อง
6. สภาพแวดล้อม เนื่องจากการปนเปื้อนของสารเคมีในอากาศ อาจส่งผลกระทบต่อสุขภาพของผู้ปฏิบัติงาน

จากปัญหาทั้ง 6 ปัจจัย ส่งผลกระทบต่อการผลิต เช่น เกิดของเสียจำนวนมาก ไม่สามารถส่งมอบงานให้ลูกค้าได้ทันกำหนดเวลา ถือเป็นปัญหาที่ควรรับการแก้ไขอย่างรวดเร็ว โดยใช้แผนภาพพาเรโตในการวิเคราะห์ลำดับความรุนแรงของเสียในกระบวนการผลิต ดังหัวข้อที่ 2.5

2.4 การวิเคราะห์ความเสี่ยงด้วย RPN

การคำนวณค่า RPN เพื่อจัดลำดับความรุนแรงของสาเหตุแต่ละประเภท สามารถให้คะแนน ความรุนแรง (S) จากความรุนแรงของผลกระทบเมื่อมีความล้มเหลวเกิดขึ้น โอกาสเกิด (O) จากอัตราของเสียหรือความล้มเหลวที่พบ และการตรวจจับ (D) จากกระบวนการที่ใช้ในการตรวจจับของเสียหรือความล้มเหลวที่พบ จากนั้นนำคะแนนที่ได้จากการคำนวณค่า RPN มาวิเคราะห์และหาแนวทางแก้ไขปัญหาดังตารางที่ 1

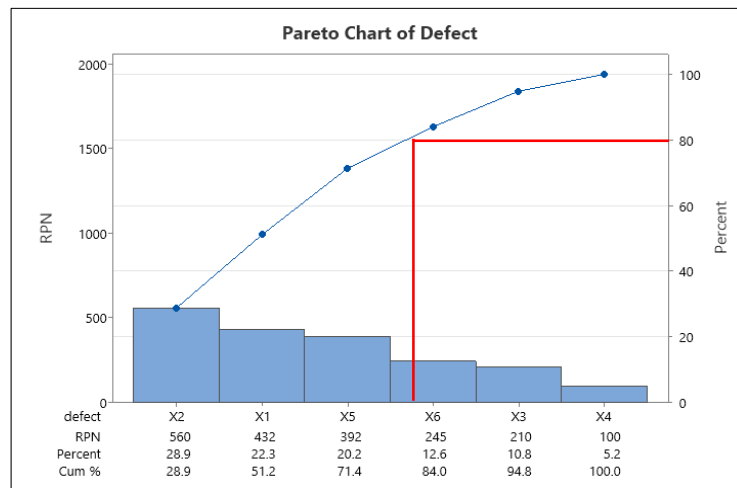
ตารางที่ 1 ข้อมูลการคำนวณค่าความเสี่ยง

สาเหตุ	ลักษณะของปัญหา	S	O	D	RPN
X1	การสึกหรอของเครื่องจักร	8	9	6	432
X2	การเลือกใช้วัสดุที่ไม่เหมาะสม	10	8	7	560
X3	ข้อผิดพลาดในการอ่านค่างาน	7	5	6	210
X4	อากาศภายในโรงงาน	5	4	5	100
X5	การตั้งค่าเครื่องจักรไม่ถูกต้อง	7	8	7	392
X6	พนักงานขาดทักษะและความเข้าใจ	7	5	7	245

จากตารางที่ 1 นำค่า RPN มาจัดลำดับความสำคัญของปัญหาด้วยแผนภาพพาเรโต เพื่อระบุสาเหตุหลักและสาเหตุรองของปัญหาในกระบวนการผลิต ตามหัวข้อ 2.5

2.5 การวิเคราะห์ด้วยแผนภาพพาเรโต

การวิเคราะห์ของเสียการวิเคราะห์ลำดับความรุนแรงของปัญหาจากคะแนน RPN ด้วยแผนภาพพาเรโต พบว่าสาเหตุของปัญหาที่เข้าตามกฎ 80/20 ได้แก่ X2, X1, X5 และ X6 ตามลำดับ มีอัตราของเสียเฉลี่ย 1,002 ชิ้นต่อสัปดาห์ คิดเป็น 16.57% ของของเสียหลัก ซึ่งเป็นปัญหาหลักที่ต้องเร่งดำเนินการแก้ไข ดังรูปที่ 5



รูปที่ 5 แผนภาพพาเรโต

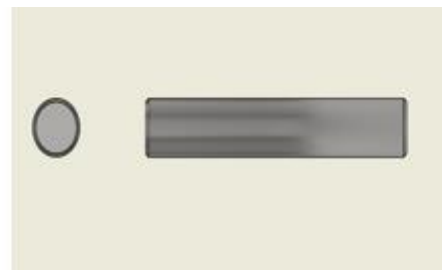
3. แนวทางการแก้ไขด้วยหลักวิศวกรรมอุตสาหกรรม

3.1 งานเสียกรณีที่มีผิวมีรอยผิวดัด (X2)

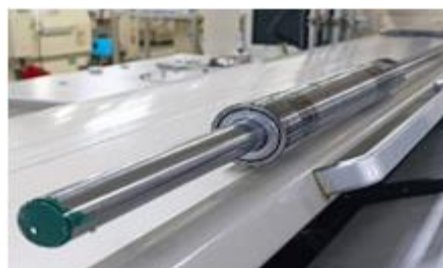
เกิดจากปัญหาการเลือกใช้วัสดุที่ไม่เหมาะสม (X2) ทำให้วัสดุเกิดการสั่นสะเทือนเพราะวัตถุดิบมีความยาวเกินไป ส่งผลให้บุชรองรับไม่ดี ทำให้บุชเกิดการคลายตัวระหว่างตัด วิธีแก้ไขปัญหาดังรูปที่ 6



ก. วัตถุดิบ 1500 มม.



ข. วัตถุดิบ 750 มม.



ค. บุชใหม่ เป็นอลูมิเนียม

รูปที่ 6 วิธีแก้ไขปัญหาลิ้นงานผิวมีรอยผิวดัด

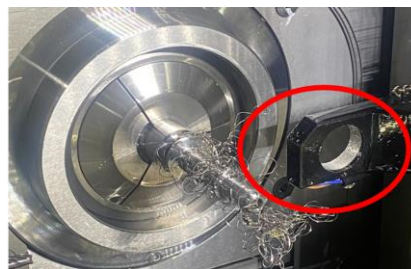
จากรูปที่ 6 ดำเนินการเปลี่ยนการตัดชิ้นงานความยาวจาก 1500 มม. เป็น 750 มม. และเปลี่ยนบุชใหม่เป็นอลูมิเนียม

3.2 งานเสียกรณีที่กรณีมีรอยบุบ (X1)

เกิดจากการสึกหรอของเครื่องจักร (X1) ทำให้เศษโลหะติดอยู่บนชิ้นงาน จากนั้นหัวจับชิ้นงานของฝักรอง จับชิ้นงานพร้อมกับเศษโลหะ ส่งผลให้ชิ้นงานเกิดรอยบุบ วิธีแก้ไขปัญหาดังรูปที่ 7



ก. ปรับท่อย้ายน้ำมัน



ข. Sensor Check แก่



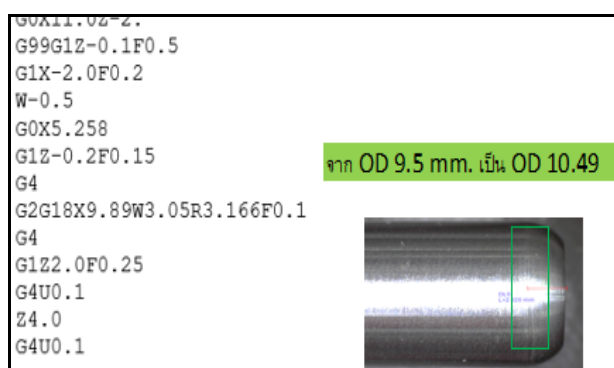
ค. Sensor Check ออกแบบใหม่

รูปที่ 7 วิธีแก้ไขปัญหากรณีมีรอยบุบ

จากรูปที่ 7 ดำเนินการปรับปรุงท่อย้ายน้ำมันให้ฉัดตรงตำแหน่งมีดกลึง เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการหล่อลื่นและลดความร้อนสะสม รวมถึงเปลี่ยนเซนเซอร์ตรวจสอบใหม่ให้ตรวจจับชิ้นงานแม่นยำขึ้น และออกแบบการไหลของเศษวัสดุให้หลุดออกจากชิ้นงานได้ดีขึ้น เพื่อลดของเสียและเพิ่มคุณภาพการผลิต

3.3 งานเสียกรณีย่อยกลึงไม่สมบูรณ์ (X5)

เกิดจากการตั้งค่าเครื่องจักรไม่ถูกต้อง (X5) ทำให้ชิ้นงานไม่ผ่านมาตรฐานคุณภาพ เนื่องจากพื้นผิวการกลึงไม่สมบูรณ์ สาเหตุเกิดจากการเก็บขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกสุดท้ายไม่ครบถ้วน เนื่องจากค่าที่ตั้งไว้ในโปรแกรมกลึง CNC เดิมคือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 9.5 มม. ซึ่งเล็กเกินไป ทำให้ขอบปลายของชิ้นงานเกิดรอยขรุขระหรือรอยกลึงไม่เต็ม จึงใช้เครื่องมือการปรับค่าพารามิเตอร์กระบวนการ ซึ่งเป็นเครื่องมือหนึ่งในแนวคิด การปรับปรุงคุณภาพแบบวิศวกรรมอุตสาหการ สามารถแสดงวิธีแก้ไขปัญหาดังรูปที่ 8

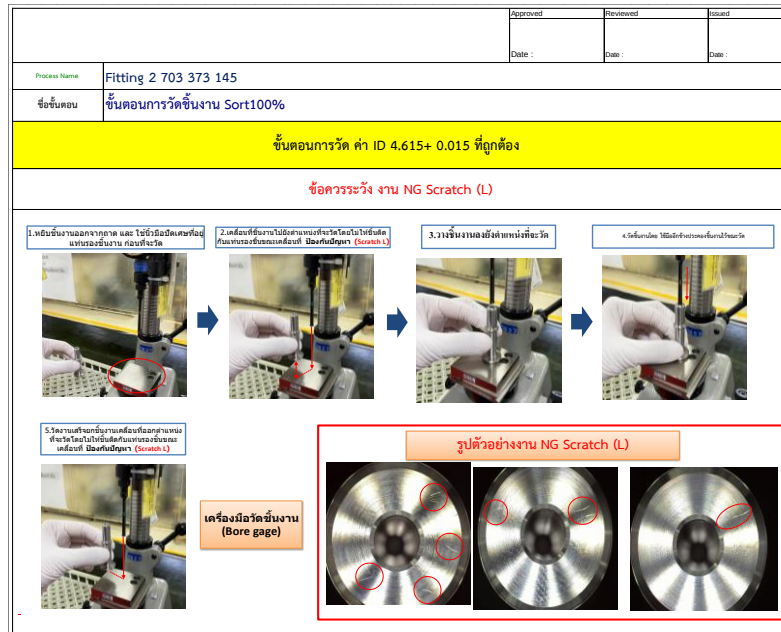


รูปที่ 8 วิธีแก้ไขปัญหาค้นงานกรณีย่อยกลึงไม่ครบกระบวนการ

จากรูปที่ 8 ดำเนินการปรับปรุงโปรแกรมควบคุมเครื่อง CNC หรือที่เรียกว่า G-code โดยกำหนด G2G18X9.89W3.05R3.166F0.1 เป็นคำสั่งที่ผสมระหว่างการกลึงโค้งและโปรไฟล์พิเศษ โดยระบุค่ารัศมี ความยาวตามแนวแกน W และตำแหน่ง X ซึ่งเป็นส่วนที่สำคัญในการสร้างรูปทรงหรือส่วนเว้าบนชิ้นงาน กำหนดให้การแก้ไขขนาดการกลึงหยาบขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกที่จะกลึงจากเดิม 9.5 มม. เพิ่มขึ้นเป็น 10.49 มม.

3.4 งานเสียไม่ยอมรับกรณีรอยขีดข่วน (X6)

เกิดจากพนักงานขาดทักษะและความเข้าใจ (X6) ทำให้การวัดค่าผิดพลาด หรือการใช้เครื่องวัดชิ้นงานแบบไม่ถูกต้อง ซึ่งพนักงาน อาจไม่เข้าใจขั้นตอนการวัด ทำให้เกิดข้อผิดพลาด ซึ่งส่งผลกระทบต่อคุณภาพของชิ้นงาน สามารถแสดงวิธีแก้ไขปัญหาดังรูปที่ 9



รูปที่ 9 วิธีแก้ไขปัญหาลูกชิ้นงานรอยขีดข่วน

จากรูปที่ 9 ดำเนินการจัดทำคู่มือการปฏิบัติงาน ขั้นตอนการวัดค่างานที่ถูกต้อง และกำหนดให้พนักงานปฏิบัติงานตามเพื่อลดปัญหาลูกชิ้นงานผิดวิธี

3.5 การเปรียบเทียบผลก่อนและหลังปรับปรุง

การลดของเสียบริเวณผิวชิ้นงานในสายการผลิตข้อต่อโลหะจาก 4 ปัญหาหลัก คือ 1) รอยผิวดัด 2) รอยบุบชิ้นงาน 3) กลิ้งไม่สมบูรณ์ และ 4) รอยขีดข่วน หลังจากการปรับปรุง โดยเก็บข้อมูลและติดตามผลการประเมินเปรียบเทียบผลก่อนและหลังปรับปรุง พบว่าก่อนปรับปรุงมีอัตราของเสียเฉลี่ย 1,002 ชิ้นต่อสัปดาห์ คิดเป็น 16.57% ของของเสียหลัก และหลังปรับปรุงมีอัตราของเสียเฉลี่ย 118 ชิ้นต่อสัปดาห์ คิดเป็น 1.34% ของของเสียหลัก ดังตารางที่ 2 ซึ่งการปรับปรุงกระบวนการกลิ้งด้วยเครื่องมือตัด Carbide insert ช่วยลดรอยคลิ่นได้ 70% สอดคล้องกับงานของ Smith et al. [12] ที่พบว่าเครื่องมือ Carbide ลดรอยคลิ่นได้ 60-75% ในชิ้นงานโลหะ

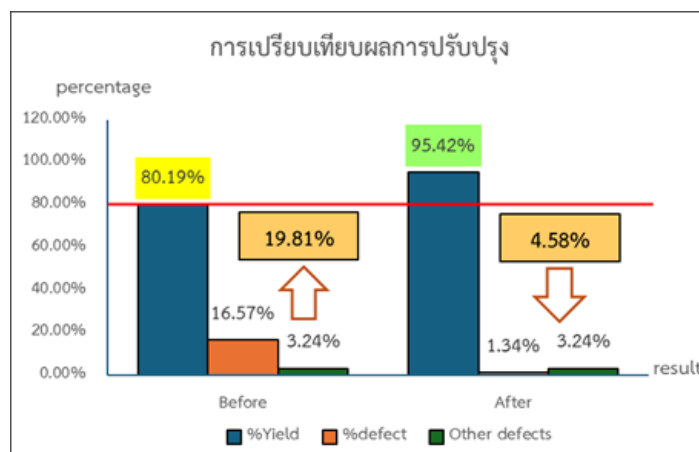
ตารางที่ 2 การเปรียบเทียบข้อมูลอัตราของเสีย ก่อนและหลังการปรับปรุง

Before	Top 4 Defect	ก่อนปรับปรุง (ชิ้น)	% ของเสีย ก่อนปรับปรุง	Top 4 Defect	หลังปรับปรุง (ชิ้น)	% ของเสีย หลังปรับปรุง
1	รอยผิวดัด	526	8.70%	รอยผิวดัด	69	0.78%
2	รอยบุบชิ้นงาน	231	3.82%	รอยบุบชิ้นงาน	44	0.50%
3	กลิ้งไม่สมบูรณ์	155	2.56%	กลิ้งไม่สมบูรณ์	5	0.06%
4	รอยขีดข่วน	90	1.49%	รอยขีดข่วน	0	0.00%
Total	6,048	1,002	16.57%	8,831	118	1.34%

จากการสุ่มตรวจสอบคุณภาพผิวชิ้นงานจำนวน 200 ชิ้นภายหลังจากการปรับปรุง พบว่าชิ้นงานที่ผ่านเกณฑ์มาตรฐานผิวเรียบตามค่าความเรียบผิว $Ra < 1.6 \mu m$ มีมากถึง 96.5% สะท้อนถึงประสิทธิภาพของการแก้ไขกระบวนการผลิตในเชิงลึก ซึ่งสอดคล้องกับงานของ Wang et al. [13] ที่พบว่าการปรับปรุงด้วยวิธีควบคุมพารามิเตอร์กระบวนการร่วมกับการวิเคราะห์ RPN ช่วยเพิ่มคุณภาพผิวโลหะและลดรอยตำหนิได้ถึง 95%

3.6 ผลการดำเนินงานการลดของเสีย

การศึกษากระบวนการทำงานในสายการผลิต พบว่าค่า %Yield ก่อนการปรับปรุง มีค่า %Yield เท่ากับ 80.19% ซึ่งต่ำกว่ามาตรฐานที่ 95% ตามมาตรฐานที่ทางโรงงานกำหนดไว้ ส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพการผลิต ต้นทุนการดำเนินงาน และคุณภาพของผลิตภัณฑ์ จึงดำเนินการวิเคราะห์หาสาเหตุของปัญหาอย่างละเอียด พร้อมทั้งนำหลักการไคเซ็นและแนวทางการปรับปรุงกระบวนการผลิตมาใช้ เพื่อควบคุมและลดปริมาณของเสียให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น ส่งผลให้หลังการปรับปรุงด้วยหลักการไคเซ็นสามารถเพิ่มค่า %Yield เท่ากับ 95.42% ซึ่งเป็นไปตามมาตรฐานที่ทางโรงงานกำหนดไว้ เนื่องมาจากการเพิ่มขึ้นของจำนวนชิ้นงาน และจำนวนของเสียที่ลดลง ดังรูปที่ 10

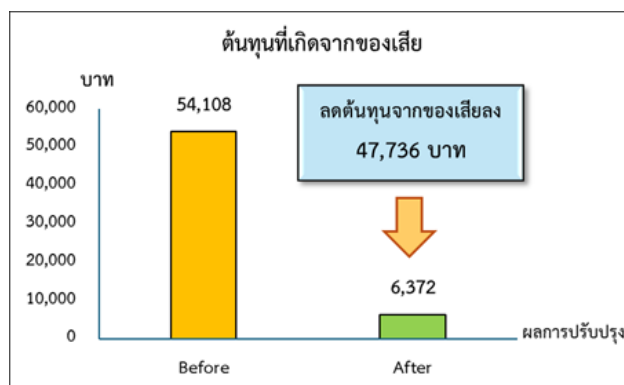


รูปที่ 10 การเปรียบเทียบการลดของเสีย

นอกจากนี้ ได้ทำการสุ่มตรวจสอบผิวชิ้นงานจำนวน 100 ชิ้น หลังการปรับปรุงโดยใช้เกณฑ์การประเมินแบบสายตา ร่วมกับเครื่องวัดความเรียบผิว (Surface Roughness Tester) พบว่าร้อยละ 98.2 ของชิ้นงานไม่มีตำหนิที่ส่งผลต่อการใช้งาน เช่น รอยขีดข่วน รอยบุบ หรือรอยกลิ้งไม่ครบกระบวนการ ซึ่งสอดคล้องกับงานของ Wang et al. [13] ที่ระบุว่า การควบคุมคุณภาพแบบบูรณาการร่วมกับการใช้เครื่องมือวิเคราะห์ RPN และแผนภาพพาเรโต อย่างเป็นระบบสามารถเพิ่มความสม่ำเสมอของคุณภาพผลิตภัณฑ์ได้อย่างมีนัยสำคัญในอุตสาหกรรมผลิตชิ้นส่วนโลหะ แสดงให้เห็นว่าการควบคุมและวิเคราะห์แบบบูรณาการช่วยให้คุณภาพผิวดีขึ้นอย่างชัดเจน

3.7 การลดต้นทุนของเสีย

การลดของเสียและต้นทุนจากของเสียในกระบวนการผลิตชิ้นส่วนข้อต่อโลหะ โดยใช้การวิเคราะห์กระบวนการและแผนภาพแสดงเหตุและผล พบว่าอัตราของเสียที่เกิดจาก 4 ปัญหาหลักลดลงจาก 1,002 ชิ้นต่อสัปดาห์ คิดเป็น 16.57% เหลือ 118 ชิ้นต่อสัปดาห์ คิดเป็น 1.34% ของของเสียหลัก ส่งผลให้อัตราของเสียที่เกิดทั้งหมดในสายการผลิตกรณีศึกษาจาก 19.81% เหลือ 4.58% ของของเสียทั้งหมด ซึ่งสามารถลดต้นทุนที่เกิดจากของเสียจากมูลค่า 54,108 บาทต่อสัปดาห์ เหลือ 6,372 บาทต่อสัปดาห์ คิดเป็นการลดลง 47,736 บาทต่อสัปดาห์ ดังรูปที่ 11



รูปที่ 11 แผนภูมิแท่งการลดต้นทุนของเสีย

4. อภิปรายผล

การประยุกต์ใช้หลักการทางด้านวิศวกรรมอุตสาหการเพื่อลดของเสียในกระบวนการผลิตชิ้นส่วนยานยนต์ แสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพการผลิตที่เกิดจากการลดของเสียและต้นทุนจากของเสียในกระบวนการผลิตที่สามารถลดของเสียจาก 19.81% เหลือ 4.58% ของของเสียทั้งหมด สูงกว่าผลการศึกษาของ Chen et al. [14] ที่ลดได้เพียง 10% เนื่องจากใช้ RPN เพื่อระบุสาเหตุย่อย แต่เนื่องจากงานวิจัยนี้ใช้การวิเคราะห์ปัญหาด้วยแผนภาพพาเรโต และการวิเคราะห์ความเสี่ยง ซึ่งมีความสอดคล้องกับงานวิจัยของ ภาวัต วรศิริเดช [11] แต่ผลลัพธ์งานวิจัยครั้งนี้สามารถลดอัตราของเสียได้มากกว่างานวิจัยในข้างต้น และสามารถเพิ่มคุณภาพของผลิตภัณฑ์จาก 80.19% เป็น 95.42% ของการผลิตทั้งหมด

อย่างไรก็ตาม แม้งานวิจัยนี้จะสามารถลดอัตราของเสียได้อย่างมีนัยสำคัญ แต่ยังไม่รวมการวิเคราะห์เชิงต้นทุนด้านเวลาเครื่องจักรและแรงงานโดยตรง ซึ่งต่างจากแนวทางของ Ishikawa [15] ที่เสนอให้มีการวิเคราะห์ผลกระทบต่อสายการผลิตโดยรวมเพื่อประเมินความคุ้มค่าของการปรับปรุงในระยะยาว ดังนั้นการขยายผลโดยใช้ Value Stream Mapping (VSM) ในงานวิจัยอนาคตจะช่วยให้สามารถประเมินต้นทุนรวมทั้งระบบได้ครอบคลุมมากขึ้น ซึ่งงานนี้เน้นเฉพาะคุณภาพชิ้นงานและต้นทุนเสีย ไม่ได้พิจารณาค่าใช้จ่ายแฝงในกระบวนการโดยรวมตามแนว Ishikawa

5. สรุปผล

การวิเคราะห์และปรับปรุงกระบวนการผลิตเพื่อลดของเสียบริเวณผิวชิ้นงานทำอัตราการผลิตสำเร็จเพิ่มขึ้นจาก 80.19% เป็น 95.42% ของการผลิตทั้งหมด โดยปริมาณของเสียลดลงจาก 19.81% เหลือ 4.58% ของของเสียทั้งหมด ส่งผลให้ต้นทุนที่เกิดจากของเสียลดลงจาก 54,108 บาทต่อสัปดาห์ เหลือ 6,372 บาทต่อสัปดาห์ สามารถประหยัดต้นทุน 47,736 บาทต่อสัปดาห์ และคิดเป็น 2,291,328 บาทต่อปี

6. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณ บริษัทกรณีศึกษา ที่ให้ความอนุเคราะห์ข้อมูล และความร่วมมือ และการอธิบายงานของบริษัท

7. อ้างอิง

- [1] จีรวัฒน์ เชนนิตติชัย, “การศึกษาบทบาทของอุตสาหกรรมผู้ผลิตชิ้นส่วนยานยนต์ต่อการเปลี่ยนแปลงสู่ยานยนต์ไฟฟ้า กรณีศึกษา บริษัทผู้ผลิตชุดสายไฟรถยนต์ญี่ปุ่นรายหนึ่ง”, บริหารธุรกิจมหาบัณฑิต, สาขาวิชานวัตกรรมทางธุรกิจ, มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์, 2566.
- [2] K-Research. (2025, March 10). Trends in the Thai Auto Parts Industry 2025 [Online]. Available: <https://www.settrade.com/th/research/analyst-research/stock/market/77805-k-research-auto-parts-industry>

- [3] ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ (MTEC). (2025, March 10). การพัฒนาเทคโนโลยีบรรจุภัณฑ์เพื่อความยั่งยืน, รายงานการวิจัย, 2564. [ออนไลน์]. ข้อมูลจาก: <https://shorturl.asia/eLXD3>
- [4] อภิญญา ขนนทอง. (13 มกราคม 2567). อุตสาหกรรมในประเทศไทยเป็นหนึ่งในฐานการผลิตที่สำคัญของโลก [ออนไลน์]. ข้อมูลจาก: <https://www.Krungsri.com/th/research/industry/industry-outlook>
- [5] Krungsri Research. (2025, March 10). Thai business and industry trends 2025-2027 [Online]. Available: <https://shorturl.asia/yib7j>
- [6] ปฐมพงษ์ หอมศรี, “เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการบริหารสินค้า,” Thai VCML 2019: Disruption in Logistics and Supply Chain 16,Thailand ,Nov. 28-29, 2019, pp. 20-29.
- [7] บริษัท เอสซีจี แพคเกจจิ้ง จำกัด (มหาชน) (SCGP). (15 กุมภาพันธ์ 2566). SCGP ปี 2565 ทำรายได้ 1.46 แสนล้าน เติบโตร้อยละ 18 วางแผนปี 66 เน้นลงทุนธุรกิจศักยภาพสูง เพิ่มนวัตกรรมและโซลูชันบรรจุภัณฑ์ครบวงจร รับเศรษฐกิจฟื้น [ออนไลน์]. ข้อมูลจาก: <https://shorturl.asia/w8QGC>
- [8] บริษัท อมตะ คอร์ปอเรชัน จำกัด (มหาชน). (15 กุมภาพันธ์ 2566). รายงานผลการดำเนินงานด้านความยั่งยืนของบริษัท อมตะ คอร์ปอเรชัน จำกัด (มหาชน) ในปี 2566 ซึ่งอาจมีข้อมูลเกี่ยวกับความสำคัญของความยั่งยืนในภาคอุตสาหกรรม [ออนไลน์]. ข้อมูลจาก: <https://shorturl.asia/HsKuL>
- [9] วราภรณ์ ปิ่นแก้ว, “การปรับปรุงคุณภาพกระบวนการตรวจสอบด้วยสายตาของโรงงานผลิตแผ่นพิมพ์วงจรอิเล็กทรอนิกส์,” วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาวิชาการจัดการทางวิศวกรรม, มหาวิทยาลัยธุรกิจบัณฑิต, 2562.
- [10] สมรรถณ เจริญงามวงศ์ และ ศักดิ์ชาย รักการ, “การลดของเสียในกระบวนการผลิตกรอบกระจกอลูมิเนียม,” วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยสุโขทัยธรรมาธิราช.Vol. 2, 2565, pp. 1-11.
- [11] ภาวัต วรงค์ธีรเดช และ ศุภรัชชัย วรรัตน์, “การลดของเสียในกระบวนการผลิตชิ้นส่วนยานยนต์,” วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาการจัดการทางวิศวกรรม, มหาวิทยาลัยธุรกิจบัณฑิต, 2564.
- [12] J. A. Smith, B. C. Johnson, & D. E. Lee, “Tool wear and surface finish in precision machining of automotive alloys using carbide inserts,” International Journal of Machine Tools and Manufacture, Vol. 158, 2020, pp. 103-120.
- [13] L. Wang, “Surface Improvement by Risk-Based Process Optimization in Precision Machining,” Journal of Materials Processing Technology, 2020.
- [14] X. Chen, Y. Wang, & Q. Zhang, “Application of FMEA and Pareto analysis in quality improvement of automotive part manufacturing,” Journal of Manufacturing Systems. Vol. 52(3), 2019, pp. 145-154.
- [15] K. Ishikawa, Guide to Quality Control, Asian Productivity Organization, 1986.

ผลกระทบของอุณหภูมิการอบอ่อนหลังกระบวนการที่ส่งผลต่อพฤติกรรมแอนไอโซทรอปิกและความสามารถในการลากขึ้นรูปของโลหะแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม SUS304

The Effect of Process Annealing Temperature on The Evaluation of Anisotropy and Deep Drawability of Stainless Steel Sheet SUS304

ณัฐศักดิ์ พรพุดศิริ^{1*}, เฉลิมพล คล้ายนิล¹, พงศกร หลีตระกูล¹, จินกมล ลุยจันทร์¹ และ ภาสพิรุฬห์ วัชรศรีสำเริง²

¹คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี วิทยาเขตวังไกลกังวล

²คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ

Natthasak Pornputsiri^{1*}, Chalernpol Klaynil¹, Pongsakorn Leetrakul¹, Jinkamol Lujjan¹ and Bhadpiroon Watcharasresomroeng²

¹Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Rattanakosin

²Faculty of Engineering and Architecture, Rajamangala University of Technology Suvarnabhumi

*Corresponding author Email: Natthasak.por@rmutr.ac.th

(Received: June 4, 2025 / Revised: June 19, 2025 / Accepted: June 21, 2025)

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิการอบอ่อนหลังกระบวนการที่ส่งผลต่อความสามารถในการขึ้นรูปในแต่ละทิศทางของการรีดหรือค่าแอนไอโซทรอปิกของวัสดุโลหะแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม จุดประสงค์ของการวิจัยนี้คือศึกษาโดยการออกแบบการทดลอง เพื่อประกอบการประเมินผลพฤติกรรมการขึ้นรูปลึกและความสามารถในการลากขึ้นรูปของโลหะแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด SUS304 ซึ่งถูกนำไปผลิตเป็นผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมต่างๆ อย่างแพร่หลาย เพื่อพัฒนาแนวทางในการทำนายเชิงเปรียบเทียบผลกระทบของอุณหภูมิการอบอ่อน จากสมบัติทางกล ความกว้างของปีกถ้วย และการเปลี่ยนแปลงค่าความหนาผนังถ้วย โดยทำการอบอ่อนขึ้นทดสอบ ที่ระดับอุณหภูมิ 200 °C 400 °C และ 600 °C ภายในเตาอบไฟฟ้าเป็นระยะเวลา 5 นาที ที่จำนวนตัวอย่างเงื่อนไขละ 30 ชิ้น จากนั้นนำขึ้นทดสอบไปทำการทดสอบแรงดึงและทดสอบการลากขึ้นรูปด้วยทรงระบอบบนเครื่องทดสอบการขึ้นรูปของอิริคสัน โดยกำหนดค่าอัตราการลากขึ้นรูปตามมาตรฐานที่ 1.8 ผลการทดลองพบว่า ค่าความแตกต่างของของความกว้างปีกถ้วยและค่าความหนาของผนังถ้วยจะแปรผกผันกับอุณหภูมิการอบอ่อน ทั้งนี้การขึ้นรูปตามแนวการรีดจะส่งผลให้ค่าความหนาผนังถ้วยลดลงมากที่สุด ส่วนปีกถ้วยจะมีความกว้างมากที่สุด ในขณะที่การขึ้นรูปในทิศทางขวางแนวรีดค่าความหนาผนังจะลดลงน้อยที่สุดส่วนปีกถ้วยจะมีความกว้างน้อยที่สุด ซึ่งพฤติกรรมดังกล่าวมีความสอดคล้องกับสมบัติทางกลของวัสดุที่ได้จากการทดสอบแรงดึง

คำสำคัญ: อุณหภูมิการอบอ่อน, สมบัติทางกล, ความสามารถในการลากขึ้นรูป, แอนไอโซทรอปิก, เหล็กกล้าไร้สนิม

Abstract

This research aims to investigate the effect of process annealing temperature on the formability in different rolling directions, specifically focusing on the anisotropic behavior of stainless-steel sheet. The objective of the study is to design and conduct experiments to evaluate the deep drawing behavior and drawability of SUS304 stainless steel sheets, which are widely used in various industrial products. The goal is to develop a comparative predictive approach for analyzing the influence of annealing temperature based on mechanical properties, flange width, and wall thickness variation of drawn cups. The specimens were

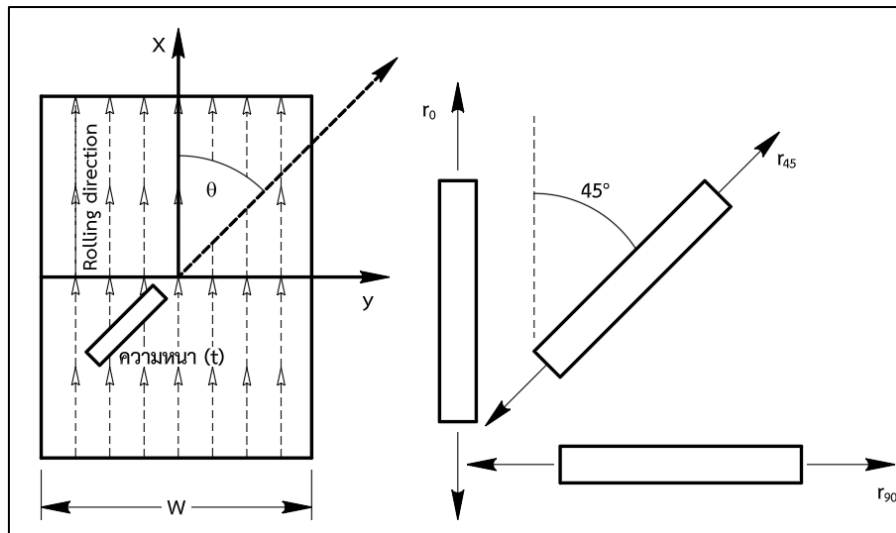
annealed at three temperature levels: 200 °C, 400 °C, and 600 °C in an electric furnace for 5 minutes, with 30 specimens per condition. Tensile tests and cylindrical cup drawing tests were then conducted using an Erichsen forming test machine, with the drawing ratio set at the standard value of 1.8. The experimental results showed that the difference in flange width and wall thickness of the cups varied inversely with the annealing temperature. Forming along the rolling direction resulted in the greatest reduction in wall thickness but the widest flange, whereas forming in the transverse direction led to the smallest reduction in wall thickness and the narrowest flange. These forming behaviors correspond well with the mechanical properties obtained from the tensile tests.

Keywords: Annealing temperature, Mechanical properties, Formability, Anisotropic, Stainless steel

1. บทนำ

เหล็กกล้าไร้สนิมชนิดออสเทนนิติก (Austenitic stainless steel) ถูกนำมาผลิตเป็นชิ้นส่วนต่างๆ อย่างหลากหลาย ในอุตสาหกรรมต่างๆ เช่น เครื่องใช้ในครัวเรือน อุตสาหกรรมอาหาร เฟอร์นิเจอร์ และเครื่องมือทางการแพทย์ เป็นต้น [1] สมบัติที่โดดเด่นของเหล็กกล้าไร้สนิมคือ ความสามารถในการต้านทานการกัดกร่อนได้ดีและต้านทานการเกิดออกไซด์หรือไม่เป็นสนิม [2] อีกทั้งโลหะแผ่นกลุ่มเหล็กกล้าไร้สนิมได้ถูกนำมาประยุกต์ใช้งานมากที่สุด ซึ่งเหล็กกล้าดังกล่าวมีโครงสร้างผลึกเป็นแบบ FCC (Face-Centered Cubic) ทั้งนี้เหล็กกล้ากลุ่มนี้ไม่สามารถเพิ่มความแข็งแรงได้ด้วยกระบวนการทางความร้อน แต่สามารถทำให้แข็งแรงขึ้นภายหลังการขึ้นรูปเย็นหรือเรียกว่าความเครียดแข็ง (Work hardening) ซึ่งหลังจากผ่านกระบวนการอบอ่อนจะมีสมบัติที่ไม่ดูดติดแม่เหล็ก (Non-magnetic) [3] ทั้งนี้การผลิตชิ้นส่วนจากโลหะแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมทำได้จากกรรมวิธีการผลิตที่หลากหลาย เช่น การปั๊มตัด (Stamping) การปั๊มขึ้นรูป (Forming) และการลากขึ้นรูป (Deep drawing) เป็นต้น ซึ่งกระบวนการเหล่านี้ล้วนต้องการความแม่นยำและความเที่ยงตรงสูงเพื่อให้ได้ชิ้นงานสำเร็จที่มีคุณภาพตามความต้องการ

นอกจากนี้สมบัติที่แตกต่างจากผลกระทบบของกระบวนการผลิต โดยเฉพาะการรีดขึ้นรูปของโลหะแผ่น เรียกความแตกต่างที่ขึ้นอยู่กับทิศทางการรีดซึ่งความแตกต่างนี้เรียกว่าแอนไอโซทรอปิก (Anisotropy) [4] ซึ่งพฤติกรรมดังกล่าวจะส่งผลโดยตรงต่อความสามารถในการขึ้นรูปของโลหะแผ่น [5] กล่าวคือสาเหตุที่สำคัญมากที่สุดซึ่งทำให้โลหะมีคุณสมบัติการเปลี่ยนรูปแบบแอนไอโซทรอปิกก็คือทิศทางของเกรนจากผลกระทบบของการรีดขึ้นรูปในกระบวนการผลิตหรือเนื้อของรูปผลึกที่พัฒนาขึ้นในเหล็กกล้าที่เกิดจากการหมุนของแลคทิกซ์ในเกรนระหว่างการเปลี่ยนรูป โดยการสลิป (Slip) หรือการทวิน (Twinning) [6] พฤติกรรมการเปลี่ยนรูปของขึ้นทดสอบการดึงของแถบวัสดุซึ่งถูกตัดมาจากแผ่นจากการรีดขึ้นรูป เมื่อได้รับแรงดึงในแนวแกนสามารถเกิดการครากได้โดยการสลิปในแนวระนาบ และการต้านแรงดึงครากของวัสดุจะมีความแตกต่างกันซึ่งขึ้นอยู่กับทิศทางการรีดขึ้นรูปของโลหะแผ่น [7] องค์ประกอบแอนไอโซทรอปิก (Anisotropic) ของวัสดุ คือ สมบัติด้านความสามารถในการเปลี่ยนรูปถาวรของวัสดุประเภทโลหะหลายผลึก ซึ่งเป็นผลมาจากลักษณะโครงสร้างผลึกและการจัดเรียงตัวของเกรนจากกระบวนการผลิต ในกรณีของวัสดุหลายผลึก แอนไอโซทรอปิกเชิงโครงสร้างจะมีความเด่นชัดมากกว่า เมื่อการจัดทิศทางของผลึก (เกรน) อยู่ในทิศทางเดียวกับแรงกระทำเพื่อการเปลี่ยนรูปถาวร การตรวจสอบสมบัติความเป็นแอนไอโซทรอปิกของวัสดุสามารถทำได้ด้วยวิธีการทดสอบแรงดึงแล้วหาอัตราส่วนของความเครียดแนวขวางกับความเครียดแนวความหนาแสดงในรูปที่ 1



รูปที่ 1 วิธีการตัดเตรียมชิ้นทดสอบเพื่อตรวจสอบความเป็นแอนไอโซทรอปิกของวัสดุโลหะแผ่น

คุณสมบัติด้านความสามารถในการขึ้นรูป (Formability) คือ การขึ้นรูปขึ้นงานได้สำเร็จโดยไม่เกิดความเสียหายและมีขนาดที่ถูกต้องเที่ยงตรง [8] ทั้งนี้ปัญหาคrucialในการลากขึ้นรูปลึกขึ้นส่วนเหล็กกล้าไร้สนิม คือความแตกต่างของความกว้างปีกถ้วยหรือความสูงขอบถ้วยเพราะจะส่งผลกระทบอย่างมากต่อกระบวนการประกอบขึ้นส่วนและคุณภาพผลิตภัณฑ์สำเร็จ [9] ปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อความสามารถในการขึ้นรูป มีหลายประการ เช่น สมบัติทางกลของโลหะแผ่น ลักษณะรูปร่างของเครื่องมือและขนาดความหนาของวัสดุเป็นต้น [10] ทั้งนี้การขึ้นรูปที่อุณหภูมิสูงหรือการนำวัสดุประเภทเหล็กกล้าไปผ่านกระบวนการทางความร้อนเป็นอีกหนึ่งทางเลือกในการเพิ่มความสามารถในการขึ้นรูป ซึ่งจะทำให้วัสดุสามารถขึ้นรูปได้ง่ายและแตกร้าเสียหายได้ยากขึ้น [11-12] การอบอ่อนภายหลังกระบวนการ (Process annealing) หรือกระบวนการอบอ่อนภายใต้อุณหภูมิวิกฤติ (Sub-critical annealing) เป็นกระบวนการอบให้ความร้อนแก่เหล็กกล้าภายใต้อุณหภูมิการเกิดผลึกใหม่ จึงไม่ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของเฟสภายในโครงสร้างจุลภาค [13] ซึ่งเป็นวิธีการที่ถูกใช้เพื่อการปรับปรุงสมบัติของวัสดุประเภทเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ (ไม่เกิน 0.25%) ที่ผ่านกระบวนการขึ้นรูปเย็นหรือใช้ในการปรับปรุงค่าความเหนียวของเหล็กกล้าคาร์บอนสูงและโลหะผสม ซึ่งจะช่วยเพิ่มคุณสมบัติด้านความสามารถในการตัดเฉือน การกลึงขึ้นรูป หรือกระบวนการขึ้นรูปของวัสดุทำได้ง่ายยิ่งขึ้น ทั้งนี้จากการศึกษาและสืบค้นงานวิจัยที่ผ่านมายังไม่พบว่า มีงานวิจัยซึ่งได้ศึกษาเกี่ยวกับผลกระทบของอุณหภูมิการอบอ่อนหลังกระบวนการที่ส่งผลต่อความสามารถในการลากขึ้นรูปและพฤติกรรมความเป็นแอนไอโซทรอปิกของโลหะแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมแต่อย่างใด

งานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิการอบอ่อนหลังกระบวนการที่ส่งผลต่อพฤติกรรมความเป็นแอนไอโซทรอปิกและความสามารถในการขึ้นรูปของโลหะแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด SUS304 เพื่อใช้เป็นข้อมูลในการพัฒนาและควบคุมกระบวนการขึ้นรูปโลหะแผ่นอย่างมีประสิทธิภาพ ด้วยวิธีการทดสอบการลากขึ้นรูปด้วยทรงกระบอกกลมบนเครื่องทดสอบของอริคสัน ทั้งนี้เพื่อเป็นแนวทางในการปรับปรุงสมบัติของเหล็กกล้าไร้สนิมให้เหมาะสมก่อนนำมาขึ้นรูปขึ้นงานให้ได้คุณภาพตามที่กำหนด หลีกเลี่ยงความเสียหายหรือข้อบกพร่องที่อาจเกิดขึ้นระหว่างกระบวนการขึ้นรูปและเพื่อนำไปใช้ประโยชน์สำหรับอุตสาหกรรมการขึ้นรูปโลหะแผ่นต่อไป

2. วิธีการดำเนินการวิจัย

2.1 วัสดุการทดลอง

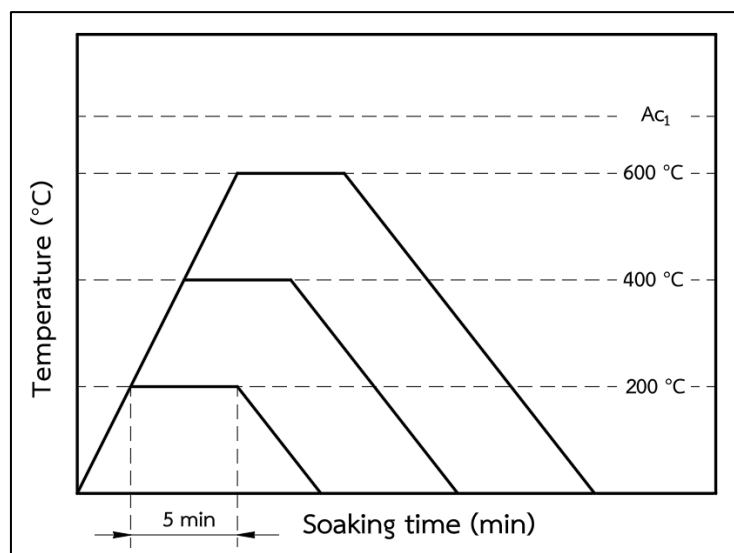
งานวิจัยนี้ทำการทดลองกับโลหะแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด SUS304 ขนาดความหนา 1.2 มิลลิเมตร เบื้องต้นก่อนการอบอ่อนจะนำโลหะแผ่นไปทำการตรวจสอบความต้านทานแรงดึงในทิศทางการรีดต่างๆ คือ ตามแนวการรีด (0°) เฉียงแนวการรีด (45°) และขวางแนวการรีด (90°) โดยผลการทดสอบแรงดึงแสดงดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 สมบัติทางกลในแต่ละทิศทางการรีดของโลหะแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด SUS304

Rolling direction	Yield Stress (N/mm ²)	Ultimate Tensile Strength (N/mm ²)	Total Elongation (%)
0°	241.967	721.477	65.834
45°	241.233	695.141	69.351
90°	251.575	726.387	63.167
เฉลี่ย	244.925	714.335	66.117

2.2 กระบวนการอบอ่อน

ชิ้นทดสอบโลหะแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมจะถูกอบให้ความร้อนภายในเตาอบไฟฟ้าที่อุณหภูมิแตกต่างกัน 3 ระดับ คือ 200°C , 400°C และ 600°C ด้วยอัตราการให้ความร้อน (Heat rate) ที่ $20^\circ\text{C}/\text{min}$ ที่ระดับอุณหภูมิละ 30 ชิ้น และแช่ชิ้นทดสอบไว้ในเตา (Soaking time) เป็นระยะเวลา 5 นาที โดยอุณหภูมิของชิ้นทดสอบภายในเตาอบจะถูกวัดด้วยเทอร์โมคัปเปิล กำหนดค่าความคลาดเคลื่อนของอุณหภูมิไว้ไม่เกิน $\pm 2.0^\circ\text{C}$ จากนั้นชิ้นทดสอบจะถูกทำให้เย็นตัวในอากาศจนถึงอุณหภูมิห้อง ซึ่งแผนภาพของการอบอ่อนภายหลังกระบวนการของการทดลองนี้แสดงดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 แผนภาพความร้อนและระยะเวลาการอบอ่อน

2.3 วิธีการทดสอบ

2.3.1 การทดสอบแรงดึง (Tensile test) ชิ้นทดสอบที่ผ่านกระบวนการอบอ่อนถูกเตรียมตามมาตรฐาน ASTM E8M [12] และนำไปทดสอบสมบัติทางกลโดยเครื่องทดสอบอเนกประสงค์ (Universal testing machine) ขนาด 50 kN. รุ่น AGS-X ยี่ห้อ SHIMADZU ดังรูปที่ 3 กำหนดความเร็วในการดึงทดสอบที่ 10 มิลลิเมตร/นาที โดยรายละเอียดผลการทดสอบจะ

ประกอบไปด้วย ค่าความเค้น ณ จุดคราก (Yield stress; YS) ความต้านทานแรงดึงสูงสุด (Ultimate tensile strength; UTS) และอัตราการยืดตัวรวม (Total elongation; TE) ของชิ้นทดสอบ

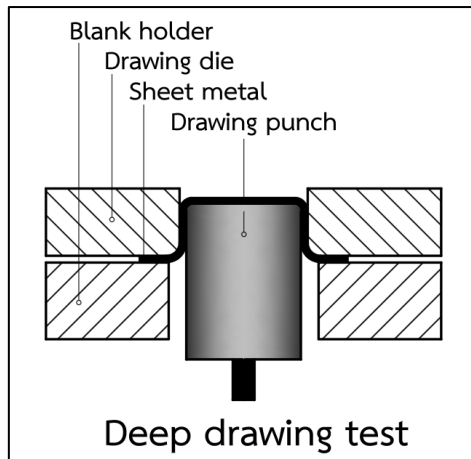


รูปที่ 3 เครื่องทดสอบแรงดึงเพื่อตรวจสอบสมบัติทางกล

2.3.2 ทดสอบความสามารถในการลากขึ้นรูป (Deep drawing ability) ตรวจสอบความสามารถในการลากขึ้นรูป ด้วยวิธีการการลากขึ้นรูปลึกด้วยทรงกระบอกกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 30 มิลลิเมตร ด้วยเครื่องทดสอบของอิริคสัน ยี่ห้อ SIEMENS รุ่น SAMATIC HMI Modell 134 ดังรูปที่ 4 โดยกำหนดค่าความเร็วในการลากขึ้นรูปที่ 10 มิลลิเมตร/นาที และ กำหนดแรงกดแผ่นขึ้นงาน (Blank holder force) ที่ 3.0 กิโลนิวตัน ส่วนองค์ประกอบของชุดทดสอบการลากขึ้นรูปลึกแสดง ดังรูปที่ 5



รูปที่ 4 เครื่องทดสอบการขึ้นรูปของอิริคสัน



รูปที่ 5 องค์ประกอบของชุดทดสอบการลากขึ้นรูปลึก

3. ผลการวิจัยและอภิปรายผล

โลหะแผ่นที่ผ่านการอบอ่อนหลังกระบวนการภายใต้อุณหภูมิที่แตกต่างกันจะถูกนำไปตรวจสอบและวิเคราะห์ผลการทดลองตามวัตถุประสงค์ ซึ่งประกอบไปด้วย สมบัติทางกลโดยการทดสอบแรงดึง (Tensile test) แรงลากขึ้นรูป (Drawing force) ความกว้างปิ๊กถ้วยทั้ง 3 แนวรีด และความหนาส่วนผนังถ้วยที่ได้จากการลากขึ้นรูปด้วยเครื่องทดสอบของอิริคสัน (Erichsen cupping test) โดยรายละเอียดของผลการทดลองประกอบไปด้วย

3.1 สมบัติทางกล (Mechanical properties)

ชิ้นทดสอบโลหะแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม ซึ่งผ่านการทดสอบแรงดึงตามมาตรฐาน ASTM E8M ด้วยเครื่องทดสอบเอนกประสงค์ หลังจากนำชิ้นทดสอบไปผ่านกระบวนการอบอ่อนที่ระดับอุณหภูมิต่างๆ เป็นระยะเวลา 5 นาที ซึ่งผลการทดสอบแรงดึงภายหลังการอบอ่อนจะแสดงดังตารางที่ 2

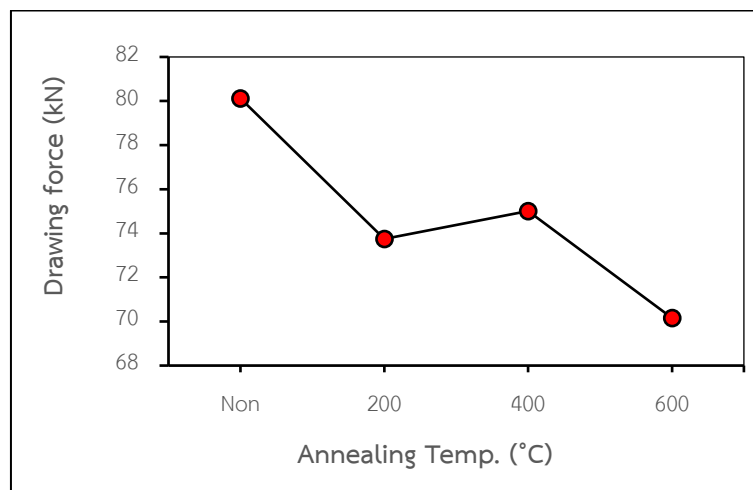
ตารางที่ 2 สมบัติทางกลเฉลี่ยของโลหะแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด SUS304 ก่อนและหลังการอบอ่อนที่อุณหภูมิต่างๆ

Annealing Temperature	Rolling direction	Yield Stress (N/mm ²)	Ultimate Tensile Strength (N/mm ²)	Total Elongation (%)
Non	0°	241.967	721.477	65.834
	45°	241.233	695.141	69.351
	90°	251.575	726.387	63.167
200 °C	0°	234.884	720.340	68.421
	45°	234.171	694.045	72.076
	90°	244.210	725.242	65.649
400 °C	0°	260.157	719.970	68.750
	45°	259.367	693.689	72.423
	90°	270.487	724.870	65.965
600 °C	0°	262.074	717.169	66.186
	45°	261.279	690.991	69.722
	90°	272.481	722.050	63.505

จากผลการทดสอบแรงดึงของโลหะแผ่นเมื่อเปรียบเทียบค่าความเค้นคลาก (Yield Stress; YS) จะพบว่าชิ้นทดสอบซึ่งผ่านการอบอ่อนที่อุณหภูมิ 600 °C ในทิศทางขวางแนวรีดมีค่าความเค้นคลากเฉลี่ยสูงสุดที่ 272.481 N/mm² และชิ้นทดสอบที่ผ่านกระบวนการอบอ่อนที่อุณหภูมิ 200 °C ในทิศทางเฉียงแนวรีดมีค่าความเค้นคลากเฉลี่ยต่ำที่สุดที่ 234.171 N/mm² ส่วนผลการเปรียบเทียบค่าความแข็งแรงดึง (Ultimate Tensile Stress; UTS) พบว่าชิ้นทดสอบที่ไม่ผ่านกระบวนการอบอ่อนในทิศทางขวางแนวรีดมีค่าความแข็งแรงดึงเฉลี่ยสูงสุดที่ 726.387 N/mm² ส่วนชิ้นทดสอบที่ผ่านกระบวนการอบอ่อนที่อุณหภูมิ 600 °C ในทิศทางเฉียงแนวรีดมีค่าความแข็งแรงดึงเฉลี่ยต่ำสุดที่ 690.991 N/mm² และผลการเปรียบเทียบอัตราการยืดตัวโดยรวม (Total Elongation; TE) จะพบว่าชิ้นทดสอบที่ผ่านกระบวนการอบอ่อนที่อุณหภูมิ 400 °C ในทิศทางเฉียงแนวรีดมีอัตราการยืดตัวโดยรวมเฉลี่ยมากที่สุดที่ 72.423 % และชิ้นทดสอบที่ไม่ผ่านกระบวนการอบอ่อนในทิศทางขวางแนวรีดมีอัตราการยืดตัวโดยรวมเฉลี่ยน้อยสุดที่ 63.167%

3.2 แรงลากขึ้นรูป (Drawing force)

ผลการเปรียบเทียบผลกระทบของอุณหภูมิการอบอ่อนหลังกระบวนการที่ส่งผลต่อแรงในการลากขึ้นรูปด้วยเครื่องทดสอบการขึ้นรูปของอริคสัน โดยผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 6

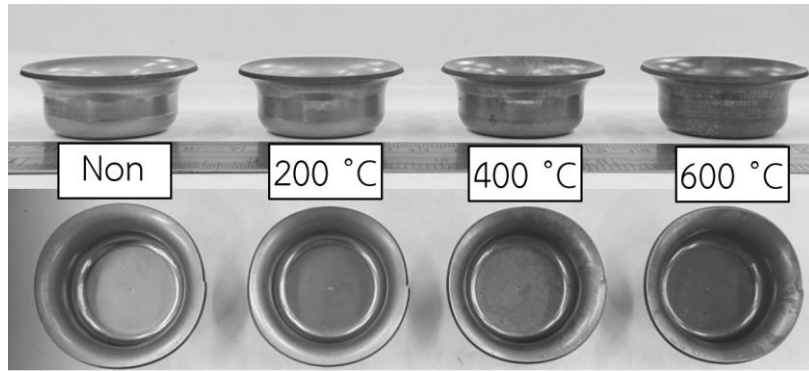


รูปที่ 6 แรงลากขึ้นรูปถ้วย

จากผลการทดลองรูปที่ 6 แสดงให้เห็นว่าแรงในการลากขึ้นรูปจะมีแนวโน้มลดลงเมื่ออุณหภูมิในการอบอ่อนเพิ่มมากขึ้น โดยชิ้นทดสอบที่ไม่ผ่านกระบวนการอบอ่อนใช้แรงในการขึ้นรูปสูงที่สุดที่ 80.12 kN. เมื่ออุณหภูมิการอบอ่อนเพิ่มมากขึ้นพบว่าแรงที่ใช้ในการขึ้นรูปจะมีแนวโน้มลดลงขึ้น โดยชิ้นทดสอบที่ผ่านการอบอ่อนด้วยอุณหภูมิ 600 °C จะใช้แรงในการขึ้นรูปต่ำสุดที่ 70.16 kN. ซึ่งจะเห็นได้ชัดว่าขนาดของแรงในการขึ้นรูปมีความสัมพันธ์โดยตรงกับค่าความแข็งแรงดึงและสมบัติทางกลของวัสดุ [14]

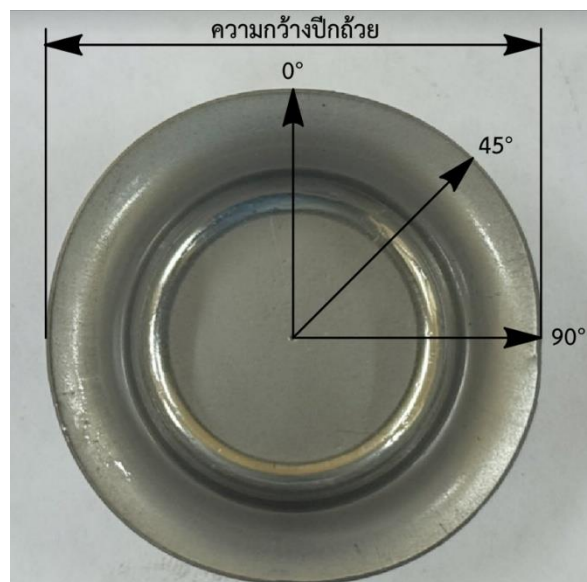
3.3 ความกว้างปีกถ้วย

ทำการเตรียมชิ้นทดสอบโลหะแผ่นก่อนและหลังการอบอ่อนที่ระดับอุณหภูมิต่างๆ เพื่อทดสอบการลากขึ้นรูปลึกโดยกำหนดขนาดแผ่นเปล่ารูปวงกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 54 มิลลิเมตร เพื่อลากขึ้นรูปลึกด้วยอัตราการลากขึ้นรูป (Drawing ratio) ที่ 1.8 โดยกำหนดขนาดของพินซ์ให้มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 30 มิลลิเมตรและรัศมีพินซ์ที่ 4 มิลลิเมตร ส่วนของตายกำหนดให้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 32.6 มิลลิเมตร และกำหนดรัศมีตายที่ 5 มิลลิเมตร จากนั้นจะทำการทดสอบการลากขึ้นรูปลึกถ้วยแบบมีปีกที่ระยะความลึก 16 มิลลิเมตร โดยกำหนดแรงกดแผ่นขึ้นงาน (Blank holder force) ที่ 3.0 กิโลนิวตัน โดยลักษณะของถ้วยซึ่งได้จากการลากขึ้นรูปแสดงดังรูปที่ 7

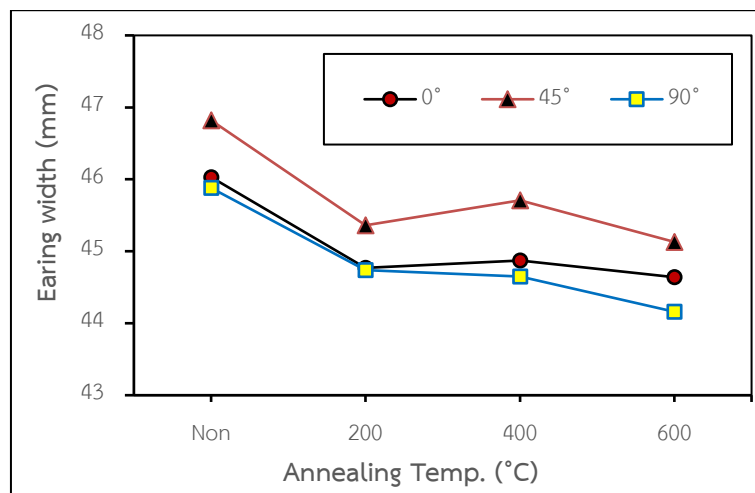


รูปที่ 7 ลักษณะถ้วยทรงกระบอกกลมจากการลากขึ้นรูปลึก

ถ่ายภาพด้านบนของถ้วยที่ได้จากการลากขึ้นรูปเพื่อวัดขนาดความกว้างของปีกถ้วยด้วยกล้องจุลทรรศน์กำลังขยายต่ำ (Optical macro-scope) โดยตำแหน่งการวัดขนาดความกว้างของปีกถ้วยในทิศทางการรีดต่างๆ แสดงดังรูปที่ 8 และผลการวัดค่าความกว้างของปีกถ้วย แสดงดังรูปที่ 9



รูปที่ 8 การวัดค่าความกว้างปีกถ้วยในทิศทางการรีดต่างๆ



รูปที่ 9 กราฟความกว้างปีกถ้วยในทิศทางการรีดต่างๆ

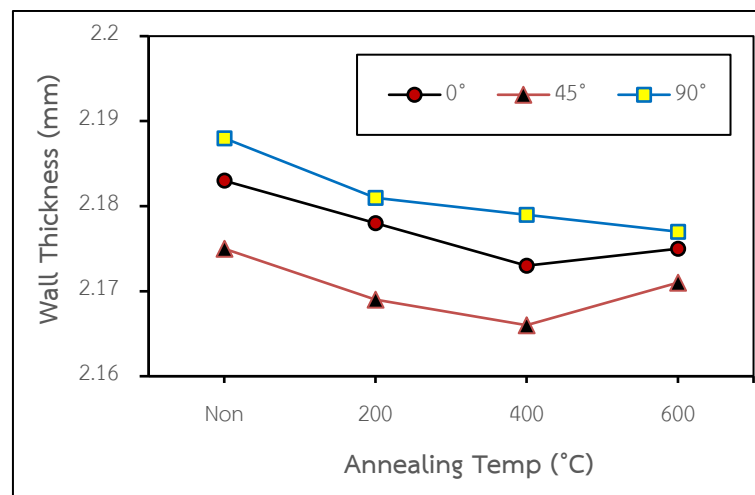
จากผลการทดลองรูปที่ 9 แสดงให้เห็นว่าความกว้างของปีกถ้วยในทิศทางการรีดซึ่งทำมุม 45° กับแนวรีดมีค่าความกว้างของปีกถ้วยมากที่สุด และในทิศทางขวางแนวการรีด (90°) ปีกถ้วยจะมีความกว้างน้อยที่สุด ซึ่งพฤติกรรมดังกล่าวมีความสอดคล้องและสัมพันธ์กับอัตราการยืดตัวโดยรวม (Total elongation) ของวัสดุที่ได้จากการทดสอบแรงดึงดังตารางที่ 1 ทั้งนี้ยังพบว่าเมื่ออุณหภูมิการอบอ่อนเพิ่มสูงขึ้นจะส่งผลให้ค่าความกว้างของปีกถ้วยในทุกทิศทางการรีดมีแนวโน้มลดลงอย่างต่อเนื่อง ซึ่งสอดคล้องกับสมบัติทางกลที่ได้จากการทดสอบแรงดึงในตารางที่ 2 โดยผลการทดลองดังกล่าวชี้ให้เห็นว่า อุณหภูมิการอบอ่อนส่งผลต่อคุณสมบัติความเป็นแอนไอโซทรอปิกของเหล็กกล้าไร้สนิมอย่างมีนัยสำคัญ

3.4 ความหนาผนังถ้วย

นำถ้วยซึ่งได้จากการลากขึ้นรูปไปตัดแบ่งด้วยเครื่องตัดขึ้นสอบที่ระยะกึ่งกลางความสูงของถ้วยเพื่อวัดค่าความหนาของผนังถ้วยในทิศทางการรีดต่างๆ โดยลักษณะของถ้วยขึ้นทดสอบที่ผ่านการตัดแบ่งและตำแหน่งการวัดค่าความหนาผนังถ้วยแสดงดังรูปที่ 10 ส่วนผลการวัดค่าความหนาผนังถ้วยจะแสดงดังรูปที่ 11



รูปที่ 10 ภาพตัดขวางของถ้วยทรงกระบอกกลมจากการลากขึ้นรูปลึก



รูปที่ 11 กราฟเปรียบเทียบความหนาผนังถ้วยในแต่ละทิศทางการรีด

จากผลการทดลองรูปที่ 11 แสดงให้เห็นว่าความหนาของผนังถ้วยในทิศทางซึ่งทำมุม 45° กับแนวรีด มีค่าความหนาของผนังถ้วยน้อยที่สุด ส่วนในทิศทางตั้งฉากกับแนวรีด (90°) มีขนาดความหนาของผนังถ้วยมากที่สุด อีกทั้งจะเห็นได้ว่าเมื่ออุณหภูมิการอบอ่อนเพิ่มสูงขึ้นจะส่งผลต่อการลดลงของค่าความหนาผนังอย่างเห็นได้ชัด ทั้งนี้พฤติกรรมดังกล่าวมีความสัมพันธ์โดยตรงและสอดคล้องสมบัติทางกลของขึ้นทดสอบจากผลการทดสอบแรงดึงและการเปลี่ยนแปลงของความกว้างปีกถ้วย

4. สรุป

งานวิจัยนี้เป็นการวิจัยเพื่อศึกษาเปรียบเทียบผลกระทบของอุณหภูมิการอบอ่อนที่ส่งผลต่อพฤติกรรมแอโนไอโซทรอปิกและความสามารถในการลากขึ้นรูปลึกของโลหะแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม โดยวิเคราะห์ผลจากสมบัติทางกล ขนาดแรงในการลากขึ้นรูป และลักษณะของชิ้นงานสำเร็จ จากผลการทดลองสามารถสรุปได้ดังนี้

1) วัสดุเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด SUS304 เป็นวัสดุที่มีความสามารถในการยืดตัวสูง โดยสามารถยืดตัวได้สูงสุดในทิศทางซึ่งทำมุม 45° กับแนวรีด ขณะที่ในทิศทางขวางแนวการรีดจะมีความแข็งแรงดึงสูงสุดแต่มีความสามารถในการยืดตัวต่ำสุด

2) ค่าแรงลากขึ้นรูปของชิ้นทดสอบจะแปรผันตามค่าความแข็งแรงดึงของวัสดุ กล่าวคือการดึงขึ้นรูปวัสดุที่ไม่ผ่านการอบอ่อนซึ่งมีความแข็งแรงดึงสูงจะใช้แรงในการดึงขึ้นรูปสูงสุด เมื่อนำชิ้นทดสอบไปทำการอบอ่อนด้วยอุณหภูมิสูงขึ้นทำให้วัสดุมีค่าความแข็งแรงลดลง จึงส่งผลโดยตรงให้แรงในการลากขึ้นรูปมีแนวโน้มลดลงอย่างเห็นได้ชัด

3) ค่าความกว้างของปีกถั่วขึ้นอยู่กับความสามารถในการยืดตัวของวัสดุในแต่ละทิศทางโดยความกว้างของปีกถั่วในทิศทางการรีดซึ่งทำมุม 45° กับแนวรีดมีค่าความกว้างของปีกถั่วมากที่สุด และในทิศทางขวางแนวการรีด (90°) ปีกถั่วจะมีความกว้างน้อยที่สุด

4) ความหนาของผนังถั่วขึ้นอยู่กับความสามารถในการยืดตัวและอุณหภูมิการอบอ่อน โดยพบว่าเมื่ออุณหภูมิการอบอ่อนเพิ่มสูงขึ้นจะส่งผลให้วัสดุมีความสามารถในการยืดตัวโดยรวมเพิ่มขึ้น ซึ่งส่งผลโดยตรงให้ค่าความหนาของผนังถั่วมีแนวโน้มลดลงในทุกทิศทางการรีด

5. กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้ดำเนินงานวิจัย ขอขอบคุณสาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการและการผลิต คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี วิทยาเขตวังไกลกังวล นักศึกษาและคณะอาจารย์ทุกท่านที่ช่วยอำนวยความสะดวกด้านอุปกรณ์และการดำเนินการทดลอง งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] M. Kaladhar, K.V. Subbaiah and C.H.S. Rao, "Machining of austenitic stainless steels – a review", Int. J. Machining and Machinability of Materials, Vol. 12, Nos. 1/2, (2012).
- [2] D. Ding, "Properties of stainless steel and its application in construction", Proceedings of the 4th International Conference on Materials Chemistry and Environmental Engineering., (2024). DOI: 10.54254/2755-2721/59/20240748
- [3] A.F. Padilha, R.L. Plaut and P.R. Rios, "Annealing of Cold-worked Austenitic Stainless Steels" ISIJ International, Vol. 43 (2003), No. 2, pp. 135–143.
- [4] M. Safaei, and W.D. Waele, "Evolution of anisotropy of sheet metals during plastic deformation", Sustainable Construction and Design, (2013). DOI: 10.21825/scad.v4i1.746.
- [5] Wang, H., Niu, Q., & Yan, Y. (2024). Study of anisotropic behavior in sheet metal forming. Materials, 17(9), 2031. <https://doi.org/10.3390/ma17092031>
- [6] D. Banabic, F. Barlat, O. Cazacu and T. Kuwabara, "Advances in anisotropy and formability", Int J Mater Form (2010), Vol. 3, pp.165–189.
- [7] T. Trzepieciniski, and H.L. Gelgele, "Investigation of anisotropy problems in sheet metal forming using finite element method", International Journal of Material Forming, (2011). DOI

- 10.1007/s12289-010-0994-7.
- [8] A.C.S. Reddy, S. Rajesham, P.R. Reddy, and A.C. Umamaheswar, “Formability: A review on different sheet metal tests for formability” AIP Conference Proceedings 2269, 030026 (2020).
<https://doi.org/10.1063/5.0019536>
 - [9] R. Nur, M.A. Suyuti, M. Iswar and A.N. Muttaqin, “Springback Analysis in the Bending Process of V-shaped Stainless Steel AISI 304 Using Central Composite Design (CCD) Approach” E3S Web of Conferences 517 ICETIA 2023, 12001 (2024).
 - [10] W.C. Emmens, “A Review of Parameters and Processes that Control, Limit or Enhance the Formability of Sheet Metal”, Springer Briefs in Applied Sciences and Technology, (2011).
<http://www.springer.com/series/8884>
 - [11] M. Azadeh and M.R. Toroghinejad, “Effect of Heat Treatment on Formability of Hot-dip Galvanized Low Carbon Steel Sheet”, ISIJ International, Vol. 49 (2009), No. 12, pp. 1945–1951.
 - [12] A.K. Gupta, S. Priyadarshi, D. Pustovoytov and P. Tandon, “Effects of Heat Treatment on the Surface Quality and Improvement in Formability of Deformation Machined Products of Al 6061”, Journal of Manufacturing Science and Engineering, (2022), Vol. 144.
 - [13] C. Ji, L. WANG and M.Y. ZHU, “Effect of Subcritical Annealing Temperature on Microstructure and Mechanical Properties of SCM435 Steel”, JOURNAL OF IRON AND STEEL RESEARCH, INTERNATIONAL., (2015), 22(11), pp.1031-1036.
 - [14] U. Pranavi, P.V. Reddy, K. Lavanya, N.V. Charyulu, and P.J. Ramulu, “Effect of Mechanical Properties on Deep Drawing Formability Prediction”, International Journal of Current Engineering and Technology, (2014). DOI: 10.14741/ijcet/spl.2.2014.55

การผสานพลังงานหมุนเวียนในระบบไฟฟ้าเพื่ออาคารอัจฉริยะ:

แนวทางสู่การเป็น Net Zero Energy Building

Integrating Renewable Energy into Electrical Systems for Smart Buildings:

A Pathway to Net Zero Energy Buildings

สันติ การสันต์¹ และ สิริศักดิ์ โรจชยะ^{2*}

¹วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรมและการจัดการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย

99 หมู่ที่ 4 ตำบลท้องเนียน อำเภอนวม จังหวัดนครศรีธรรมราช 80210

²คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย

179 หมู่ที่ 3 ตำบลไม้ฝาด อำเภอสิเกา จังหวัดตรัง 92150

Santi Karisan¹ and Sittisak Rojchaya^{2*}

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

99 Moo 4, Thong Nian Subdistrict, Khanom District, Nakhon Si Thammarat Province, 80210

²Faculty of Engineering and Technology, Rajamangala University of Technology Srivijaya

179 Moo 3, Mai Fat Subdistrict, Sikao District, Trang Province, 92150

*Corresponding author Email: Sittisak.r@rmutsv.ac.th

(Received: March 27, 2025 / Revised: June 20, 2025 / Accepted: June 21, 2025)

บทคัดย่อ

การวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อวิเคราะห์พฤติกรรมการใช้พลังงานของอาคารเรียนรวมช่วงอุตสาหกรรม ภายในวิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรมและการจัดการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย โดยมุ่งพัฒนาแนวทางออกแบบระบบพลังงานแสงอาทิตย์ (Solar PV) และระบบกักเก็บพลังงาน (Energy Storage System: ESS) ที่เหมาะสม ตลอดจนการปรับปรุงประสิทธิภาพการใช้พลังงานผ่านการบริหารจัดการโหลดไฟฟ้า และการเพิ่มค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้า (Power Factor: PF) ผลการวิเคราะห์พบว่า อาคารมีโหลดไฟฟ้าเฉลี่ยอยู่ที่ 80 กิโลวัตต์ โดยระบบ Solar PV ขนาด 427 กิโลวัตต์ สามารถผลิตพลังงานได้ประมาณ 80% ของโหลดเฉลี่ยต่อวัน ภายใต้สภาพแสงแดดเฉลี่ย 4.5 ชั่วโมง/วัน และประสิทธิภาพระบบที่ 80% สำหรับระบบ ESS ขนาด 300–350 กิโลวัตต์ชั่วโมง สามารถสำรองพลังงานในช่วงที่ไม่มีแสงแดดได้อย่างเพียงพอ นอกจากนี้ยังพบว่าค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้า (PF) ในบางช่วงเวลาค่าต่ำกว่า 0.5 ซึ่งส่งผลให้เกิดการสูญเสียพลังงานและต้นทุนสูง จึงเสนอแนวทางปรับปรุงโดยการติดตั้ง Capacitor Bank หรือ Smart Inverter เพื่อปรับค่า PF ให้อยู่ในช่วง 0.9–1.0 จากผลการวิเคราะห์และการออกแบบระบบโดยรวม พบว่าสามารถ เพิ่มประสิทธิภาพการใช้พลังงานได้มากกว่า 25% และ ลดต้นทุนค่าไฟฟ้ารายเดือนได้ประมาณ 30–35% นอกจากนี้ยังสามารถ ลดพลังงานสูญเสียจากค่า PF ต่ำได้กว่า 15–20% และ ลดการพึ่งพาไฟฟ้าจากกริดหลักลงเฉลี่ย 70–80% ต่อวัน งานวิจัยนี้แสดงให้เห็นว่าการบูรณาการพลังงานหมุนเวียนควบคู่กับระบบบริหารจัดการโหลดอัจฉริยะ เป็นแนวทางที่มีศักยภาพในการขับเคลื่อนอาคารเรียนไปสู่การเป็นอาคารพลังงานสุทธิเป็นศูนย์ (Net Zero Energy Building) ได้อย่างยั่งยืน

คำสำคัญ: ระบบพลังงานแสงอาทิตย์, ระบบจัดเก็บพลังงาน, อัตราการทำงานของพลังงาน, การบริหารจัดการโหลด

Abstract

This research aims to analyze the energy usage behavior of the Industrial Technician School Building at the College of Industrial Technology and Management, Rajamangala University of Technology Srivijaya. The objective is to develop an optimal design approach for integrating solar photovoltaic (Solar PV) systems and energy storage systems (ESS), along with improving energy efficiency through load management and power factor (PF) enhancement. The analysis revealed that the building has an average electrical load of approximately 80 kW. A Solar PV system with a capacity of 427 kW can supply around 80% of the average daily energy demand, based on average solar irradiance of 4.5 hours/day and a system performance ratio of 80%. For nighttime or non-solar hours (approximately 4 hours), an ESS with a capacity of 300–350 kWh is sufficient to meet the critical load. Additionally, the power factor was found to be below 0.5 on several days, which contributes to energy losses and increased costs. Therefore, it is recommended to install a capacitor bank or smart inverter to improve the PF to a range of 0.9–1.0. Overall, the integrated system design resulted in more than a 25% improvement in energy efficiency, with a 30–35% reduction in monthly electricity costs. Furthermore, it can reduce energy losses due to low PF by over 15–20%, and decrease dependence on grid electricity by 70–80% per day. This study demonstrates that integrating renewable energy with intelligent load management is a viable strategy to transition educational buildings toward becoming Net Zero Energy Buildings (NZEBS) in a sustainable manner.

Keywords: Solar PV, Energy Storage system, Power factor, Load management

1. บทนำ

ในปัจจุบัน การใช้พลังงานในอาคารและภาคอุตสาหกรรมได้รับความสนใจเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง โดยเฉพาะการนำพลังงานทดแทนจากแหล่งพลังงานหมุนเวียน เช่น พลังงานแสงอาทิตย์ มาใช้เป็นทางเลือกในการลดการพึ่งพาเชื้อเพลิงฟอสซิล ซึ่งเป็นทรัพยากรที่มีจำกัดและก่อให้เกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม [3], [10] พลังงานแสงอาทิตย์ถือเป็นแหล่งพลังงานสะอาดที่มีศักยภาพสูงในการลดต้นทุนด้านพลังงาน และสนับสนุนการพัฒนาที่ยั่งยืนในระยะยาว [1], [9] โดยเฉพาะเมื่อผสานกับระบบกักเก็บพลังงาน (Energy Storage System: ESS) ที่สามารถจัดเก็บพลังงานที่ผลิตได้ในช่วงกลางวัน และนำมาใช้ในช่วงที่ไม่มีแสงแดด ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการใช้พลังงานและความมั่นคงของระบบ [1], [6] งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อวิเคราะห์พฤติกรรมการใช้พลังงานของอาคารเรียนรวมช่างอุตสาหกรรม วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรมและการจัดการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย โดยใช้ข้อมูลจริงจากการตรวจวัดค่ากระแสไฟฟ้าและพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในงานในแต่ละช่วงเวลา เพื่อพัฒนาแนวทางออกแบบระบบ Solar PV และ ESS ที่เหมาะสมต่อการใช้งานจริงในพื้นที่ การออกแบบยังเน้นการบริหารจัดการโหลดไฟฟ้า และการปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้า (Power Factor: PF) เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการใช้พลังงานสูงสุด [2], [10] การทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องสนับสนุนหลักการออกแบบระบบพลังงานหมุนเวียนในอาคารอย่างมีประสิทธิภาพ ทั้งด้านการคำนวณขนาดของ Solar PV การกำหนดความจุของ ESS ให้เหมาะสมกับช่วงเวลาที่ไม่มีแสงแดด รวมถึงเทคนิคการปรับค่า PF ผ่านการติดตั้งอุปกรณ์ เช่น Capacitor Bank หรือ Smart Inverter [4-6] ข้อมูลการใช้พลังงานจริงของอาคารที่ศึกษาในครั้งนี้จึงมีคุณค่าสำคัญในการนำไปใช้ในการออกแบบระบบพลังงานที่ตอบสนองต่อพฤติกรรมโหลดไฟฟ้าจริง ลดการพึ่งพาไฟฟ้าจากโครงข่ายหลัก และเพิ่มการใช้พลังงานหมุนเวียนอย่างมีประสิทธิภาพ [7], [9]

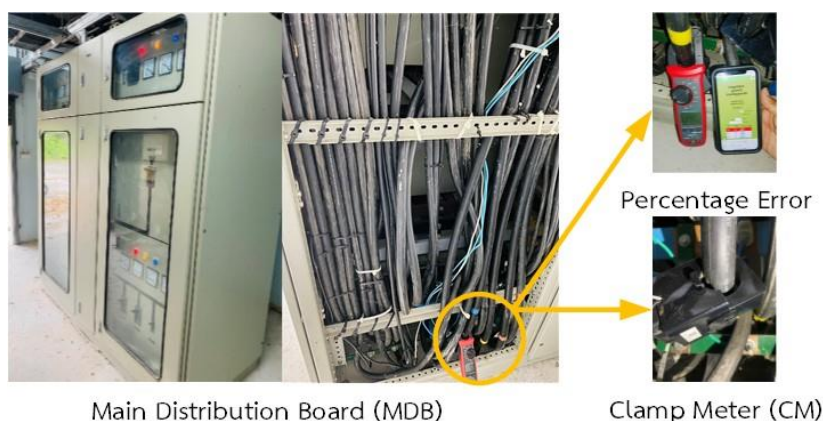
นอกจากนี้ จุดเด่นของงานวิจัยนี้คือการนำหลักการของ “อาคารอัจฉริยะ” (Smart Building) มาใช้ในการออกแบบระบบ โดยใช้แนวคิด Data-Driven Energy Management ที่ผสานข้อมูลการใช้พลังงานจริง เข้ากับระบบควบคุมอัตโนมัติ การคาดการณ์โหลด และระบบ Demand Response เพื่อควบคุมและจัดสรรพลังงานอย่างมีประสิทธิภาพในแต่ละช่วงเวลา ระบบที่พัฒนาขึ้นสามารถช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการใช้พลังงานได้มากกว่า 25% ลดต้นทุนค่าไฟฟ้าเฉลี่ยลงราว 30–35% ลดการสูญเสียพลังงานจากค่า PF ต่ำได้กว่า 15–20% และลดการพึ่งพาพลังงานจากโครงข่ายไฟฟ้าหลักลงเฉลี่ย 70–80% ต่อวัน แนวทางที่นำเสนอในงานวิจัยนี้จึงไม่เพียงมุ่งเน้นที่การผลิตพลังงานหมุนเวียน แต่ยังรวมถึงการบริหารจัดการพลังงานอย่างชาญฉลาดและปรับตัวได้ สู่เป้าหมายการเป็นอาคารพลังงานสุทธิเป็นศูนย์ (Net Zero Energy Building: NZEB) อย่างยั่งยืนในระยะยาว ทั้งในเชิงสิ่งแวดล้อม เศรษฐศาสตร์ และการใช้เทคโนโลยีอัจฉริยะในภาคการศึกษาและอุตสาหกรรม [3], [8]

2. วิธีการศึกษา

ในงานวิจัยนี้จะทำการวิเคราะห์พฤติกรรมการใช้พลังงานของอาคารเรียนรวมช่างอุตสาหกรรม วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรมและการจัดการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย เพื่อนำไปสู่การออกแบบระบบพลังงานแสงอาทิตย์ (Solar PV) และระบบกักเก็บพลังงาน (Energy Storage System: ESS) ที่เหมาะสม โดยการติดตั้งระบบตรวจวัดพลังงานใช้เซ็นเซอร์ตรวจจ่ายกระแสไฟฟ้าร่วมกับระบบ IoT เพื่อรวบรวมข้อมูล กระแสไฟฟ้า การใช้พลังงาน และค่าอุณหภูมิสายเมนในช่วงเวลาต่าง ๆ ช่วยให้สามารถวิเคราะห์แนวโน้มการใช้พลังงานได้อย่างแม่นยำ และตรวจจับความผิดปกติในการใช้พลังงานได้แบบเรียลไทม์ ซึ่งมีขั้นตอนการดำเนินการดังนี้

2.1 การเก็บข้อมูล

ข้อมูลในงานวิจัยนี้ประกอบด้วยข้อมูลกระแสไฟฟ้าเฉลี่ยและกำลังไฟฟ้าที่ใช้ภายในอาคารในแต่ละวัน รวมถึงข้อมูลค่า Power Factor (PF) ซึ่งถูกเก็บรวบรวมจากระบบตรวจวัดพลังงานที่ใช้เซ็นเซอร์ตรวจจ่ายกระแสไฟฟ้าร่วมกับระบบ IoT เพื่อติดตามการใช้พลังงานไฟฟ้าในอาคารเป็นระยะเวลา 2 เดือน (ธันวาคม 2567 - มกราคม 2568) นอกจากนี้ ระบบยังสามารถส่งการแจ้งเตือนผ่านแอปพลิเคชัน Line กรณีเกิดความผิดปกติ และยังสามารถเข้าถึงข้อมูลในรูปแบบเรียลไทม์เพื่อการตรวจสอบสถานะของระบบได้อย่างสะดวกและรวดเร็ว



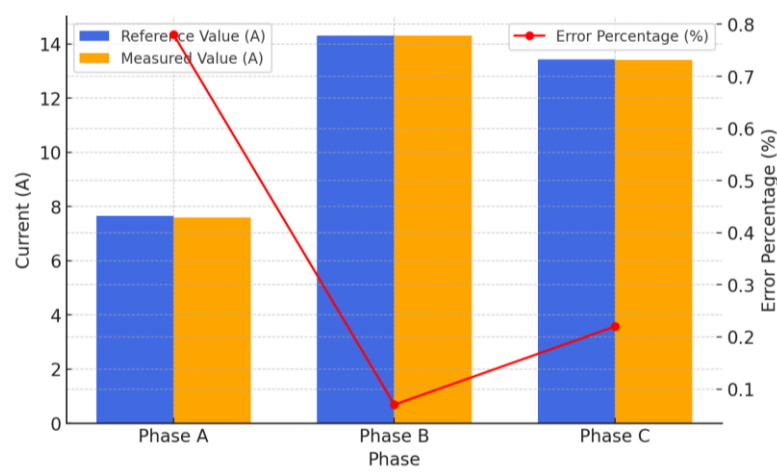
รูปที่ 1 การเก็บรวบรวมข้อมูลการใช้พลังงานใช้เซ็นเซอร์วัดกระแสไฟฟ้าร่วมกับระบบ IoT

รูปที่ 1 ภาพของการเก็บรวบรวมข้อมูลการใช้พลังงานไฟฟ้าในอาคารโดยใช้เซ็นเซอร์วัดกระแสไฟฟ้าที่ติดตั้งร่วมกับระบบ IoT (ซ้ายสุด) เป็นตู้ควบคุมไฟฟ้าหลักในอาคารเรียนรวมช่างอุตสาหกรรม ซึ่งเป็นจุดที่ระบบวัดพลังงานติดตั้ง (กลาง) เป็น Clamp Meter หรือเซ็นเซอร์วัดกระแสไฟฟ้าคล้องอยู่กับสายเมนหลักทั้ง 3 เฟส (A, B, C) ที่ต่อไปยังอาคารเรียน (ขวา)

เป็นการเปรียบเทียบกับเครื่องมือวัดทางไฟฟ้าแบบมาตรฐานกับค่าที่ระบบเก็บรวบรวมข้อมูลการใช้พลังงานใช้เซ็นเซอร์วัดกระแสไฟฟ้าร่วมกับระบบ IoT สามารถแสดงให้เห็นถึงความแม่นยำของระบบที่สูง สรุปคือรูปนี้แสดงถึงกระบวนการติดตั้งและการใช้งานอุปกรณ์วัดกระแสไฟฟ้าร่วมกับระบบ IoT เพื่อเก็บข้อมูลการใช้พลังงานในอาคารแบบอัตโนมัติและต่อเนื่องเพื่อใช้ในการวิเคราะห์พฤติกรรมการใช้พลังงานที่แม่นยำต่อไป

ตารางที่ 1 การเปรียบเทียบความแม่นยำระหว่างระบบกับเครื่องมือวัด (เปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อน)

Phase	Reference Value (A)	Measured Value (A)	Error Percentage %
Phase A	7.66	7.6	0.78
Phase B	14.31	14.3	0.07
Phase C	13.43	13.4	0.22



รูปที่ 2 เปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อน

จากกราฟรูปที่ 2 พบว่าเฟส A (7.6A) วัดได้ 7.66A (+0.78%) เฟส B (14.3A) วัดได้ 14.31A (+0.07%) และเฟส C (13.4A) วัดได้ 13.43A (+0.22%) ค่าที่วัดได้ใกล้เคียงค่ามาตรฐาน ความคลาดเคลื่อนอยู่ในช่วง 0.07% - 0.78%

2.2 การออกแบบระบบพลังงานแสงอาทิตย์

ขนาดของระบบ Solar PV ที่เหมาะสมจะถูกคำนวณจากการใช้ข้อมูลโหลดพลังงานเฉลี่ยของอาคาร โดยใช้สูตรการคำนวณขนาดแผง Solar PV ดังนี้

$$P_{PV} = \frac{P_{avg} \times 0.8}{PSH \times \eta} \quad (1)$$

โดยที่ PSH (Peak Sun Hours) ของประเทศไทยเฉลี่ยที่ 4.5 ชั่วโมง/วัน และประสิทธิภาพของระบบ Solar PV (η) ถูกกำหนดที่ 80% (0.8)

2.3 การออกแบบระบบจัดเก็บพลังงาน (ESS)

ระบบจัดเก็บพลังงาน (Energy Storage System) จะถูกออกแบบเพื่อเก็บพลังงานที่ผลิตจาก Solar PV สำหรับใช้ในช่วงที่ไม่มีแสงแดด โดยจะคำนวณขนาด ESS ตามระยะเวลาในการใช้งานและการจัดเก็บพลังงานที่ต้องการ คำนวณจากสูตร

$$E_{ESS} = P_{avg} \times 4 \quad (2)$$

โดยที่ E_{ESS} คือ ความจุของระบบจัดเก็บพลังงาน (Energy Storage Capacity), P_{avg} คือ ค่าเฉลี่ยของกำลังไฟฟ้าที่โหลดใช้งาน (Average Load Power), 4 คือ ระยะเวลาใช้งานระบบสำรองพลังงาน (เช่น 4 ชั่วโมงในช่วงไม่มีแสงแดด)

2.4 การปรับปรุง Power Factor (PF)

การปรับปรุงค่า PF จะดำเนินการโดยการติดตั้ง Capacitor Bank หรือ Smart Inverter เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพพลังงานของระบบไฟฟ้า โดยค่า PF จะถูกคำนวณและวิเคราะห์ในแต่ละวันเพื่อประเมินประสิทธิภาพการทำงานของระบบ ค่า PF ซึ่งค่า PF จะต้องอยู่ในช่วง 0.9-1.0 เพื่อให้ระบบทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพสูงสุด คำนวณจากสูตร

$$\text{Power Factor (PF)} = \frac{\text{Real Power (kW)}}{\text{Apparent Power (kVA)}} \quad (3)$$

โดยที่ Real Power (kW) = พลังงานไฟฟ้าที่ใช้งานได้จริง, Apparent Power (kVA) = ผลรวมของพลังงานจริง (kW) และพลังงานรีแอคทีฟ (kVAR) ในรูปของเวกเตอร์

2.5 การวิเคราะห์ข้อมูล

ข้อมูลจากการวัดกระแสไฟฟ้า, กำลังไฟฟ้า และค่า PF จะถูกนำมาวิเคราะห์โดยใช้เทคนิคทางสถิติและวิธีการคำนวณทางวิศวกรรม เพื่อหาขนาดที่เหมาะสมของระบบ Solar PV และ ESS และวิเคราะห์ผลกระทบของการปรับปรุง PF ต่อประสิทธิภาพของระบบ ผลลัพธ์จะถูกแสดงในรูปของกราฟที่ 3, 4, 5, 6, 7(ก)(ข) และตารางที่ 2, 3, 4, 5 และ 6 เพื่อให้เห็นความสัมพันธ์ระหว่างค่า PF, การใช้พลังงาน และประสิทธิภาพของระบบไฟฟ้า

2.6 การบริหารจัดการโหลดไฟฟ้า

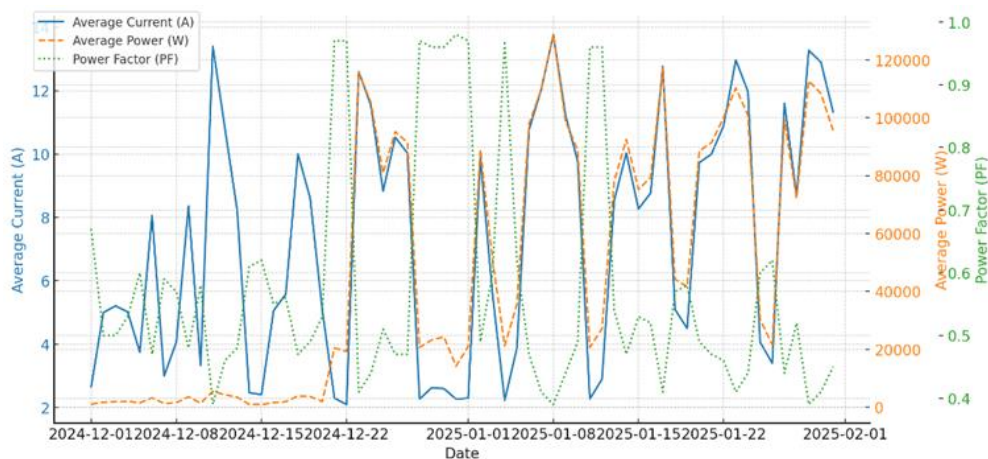
ใช้ระบบ Smart Metering และ Demand Response เพื่อตรวจสอบและจัดการโหลดไฟฟ้าภายในอาคาร โดยจะทำการวิเคราะห์พฤติกรรมการใช้พลังงาน และลดการใช้พลังงานในช่วงที่มีการใช้พลังงานสูงสุด การใช้ข้อมูลจาก Smart Meter จะช่วยให้สามารถวางแผนการใช้พลังงานและปรับเปลี่ยนพฤติกรรมการใช้พลังงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ

3. ผลการศึกษา

ในส่วนนี้จะเป็นการนำข้อมูลจากการเก็บรวบรวมจากระบบตรวจวัดพลังงานที่ใช้เซ็นเซอร์ตรวจวัดกระแสไฟฟ้า ร่วมกับระบบ IoT มาทำการวิเคราะห์โดยจะเน้นการอภิปรายผลในด้านต่าง ๆ ประกอบกับข้อเสนอแนะในแต่ละด้าน เช่น การออกแบบขนาดระบบ Solar PV, ระบบการจัดเก็บพลังงาน (ESS), การปรับปรุงค่า Power Factor (PF) เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพพลังงานในอาคาร และการบริหารจัดการโหลดไฟฟ้า ภายใต้อุปกรณ์พลังงานที่มีประสิทธิภาพ

ตารางที่ 2 ค่าตัวประกอบกำลังของระบบไฟฟ้าสามเฟส

Date	Average Current (A)	Average Power (W)	Power Factor (PF)
Dec 1-5, 2024	4.33	1601.35	0.56
Dec 6-10, 2024	5.36	2179.05	0.54
Dec 11-15, 2024	7.46	2986.57	0.51
Dec 16-20, 2024	6.87	2554.90	0.52
Dec 21-25, 2024	7.47	68312.40	0.66
Dec 26-31, 2024	5.06	44815.08	0.80
Jan 1-5, 2025	4.77	43482.35	0.73
Jan 6-10, 2025	11.51	104817.09	0.44
Jan 11-15, 2025	6.40	58698.36	0.69
Jan 16-20, 2025	8.17	74187.84	0.51
Jan 21-25, 2025	9.98	86584.38	0.48
Jan 26-31, 2025	10.20	84954.82	0.47



รูปที่ 3 แนวโน้มของกระแสเฉลี่ย, กำลังไฟเฉลี่ย และตัวประกอบกำลัง (ธันวาคม 2567 - มกราคม 2568)

จากกราฟรูปที่ 3 พบว่า กระแสไฟฟ้าเฉลี่ยมีความผันผวนค่อนข้างสูง โดยเฉพาะในช่วงกลางเดือนธันวาคม 2567 และ มกราคม 2568 มีค่าสูงสุดเป็นช่วง ๆ ซึ่งอาจเกิดจากโหลดที่เพิ่มขึ้นชั่วคราว ในบางช่วงมีค่าลดลงใกล้ศูนย์ ซึ่งอาจหมายถึงช่วงเวลาที่ไม่มีโหลดหรืออุปกรณ์บางตัวปิดการทำงาน กำลังไฟฟ้าเฉลี่ย มีแนวโน้มสอดคล้องกับกระแสไฟฟ้าเฉลี่ย (A) ซึ่งสมเหตุสมผล เนื่องจากกำลังไฟฟ้าขึ้นอยู่กับกระแสและแรงดันไฟฟ้า มีการเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจนในช่วงของ มกราคม 2568 ซึ่งอาจสะท้อนถึงการใช้พลังงานที่สูงขึ้นในเดือนนี้ ตัวประกอบกำลัง มีการเปลี่ยนแปลงเป็นช่วง ๆ บางช่วงอยู่ที่ค่าประมาณ 0.9-1.0 ซึ่งเป็นค่าที่ดี อย่างไรก็ตาม มีบางช่วงที่ค่า PF ลดลงต่ำกว่า 0.5 หรือแม้แต่ติดลบ ซึ่งอาจเกิดจากโหลดที่มีลักษณะรีแอกทีฟสูง หรือปัญหาในระบบไฟฟ้า ข้อสังเกตเพิ่มเติม ในมกราคม 2568 กระแสไฟฟ้าและกำลังไฟฟ้ามีแนวโน้มสูงขึ้นเมื่อเทียบกับ ธันวาคม 2567 ซึ่งอาจเป็นผลมาจากการเพิ่มขึ้นของโหลดไฟฟ้าในช่วงเวลาดังกล่าว ตัวประกอบกำลังมีความผันผวนสูง ซึ่งควรตรวจสอบว่าสาเหตุเกิดจากโหลดประเภทใด และพิจารณาวิธีปรับปรุง เช่น การใช้ตัวปรับปรุงตัวประกอบกำลัง (Power Factor Correction)

3.1 การออกแบบขนาดระบบพลังงานแสงอาทิตย์

การออกแบบระบบพลังงานหมุนเวียน ขนาดของระบบ Solar PV ที่เหมาะสม จากข้อมูล กำลังไฟฟ้าเฉลี่ยต่อวัน ประมาณ 50-100 kW หากต้องการให้ระบบ Solar PV จ่ายพลังงาน 80% ของโหลดเฉลี่ย สามารถคำนวณขนาดแผงที่ต้องการได้ จาก (1) โดยจะทำการคำนวณสำหรับโหลดเฉลี่ย ขนาด 80kW

$$P_{PV} = \frac{1,920 \times 0.8}{4.5 \times 0.8} = 426.7 \text{ kW}$$

จากการคำนวณ สามารถสรุปได้ว่าระบบพลังงานแสงอาทิตย์ที่เหมาะสม ควรมีขนาดกำลังการผลิตที่ 427kW ซึ่งจะสามารถตอบสนองความต้องการใช้พลังงานได้ประมาณร้อยละ 80 ของปริมาณการใช้พลังงานรวม ระบบขนาดดังกล่าวนี้จะสร้างสมดุลที่เหมาะสมระหว่างการลงทุนกับประสิทธิภาพในการพึ่งพาตนเองด้านพลังงาน ช่วยลดภาระค่าไฟฟ้าในระยะยาว และส่งเสริมการใช้พลังงานสะอาดอย่างยั่งยืน

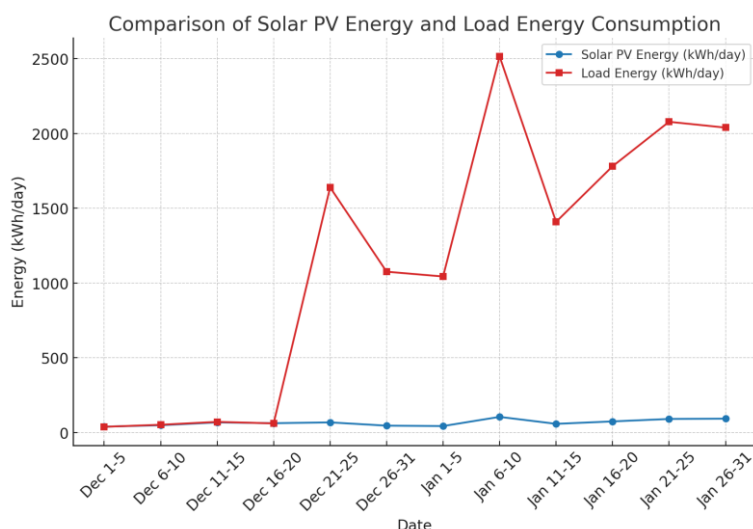
ขนาดระบบกักเก็บพลังงาน (Energy Storage System หรือ ESS) ต้องการสำรองพลังงานไว้ใช้ 4 ชั่วโมง เมื่อไม่มีแสงแดด

$$E_{ESS} = P_{avg} \times 4 = 80,000 \times 4 = 320,000 \text{ Wh} = 320 \text{ kWh}$$

จากการคำนวณ สามารถสรุปได้ว่า ระบบกักเก็บพลังงาน (ESS) ขนาด 300-350 kWh เป็นขนาดที่เหมาะสมสำหรับรองรับความต้องการพลังงานไฟฟ้าที่จำเป็น เพื่อสร้างความมั่นคงด้านพลังงานและใช้ประโยชน์จากระบบได้อย่างมีประสิทธิภาพ

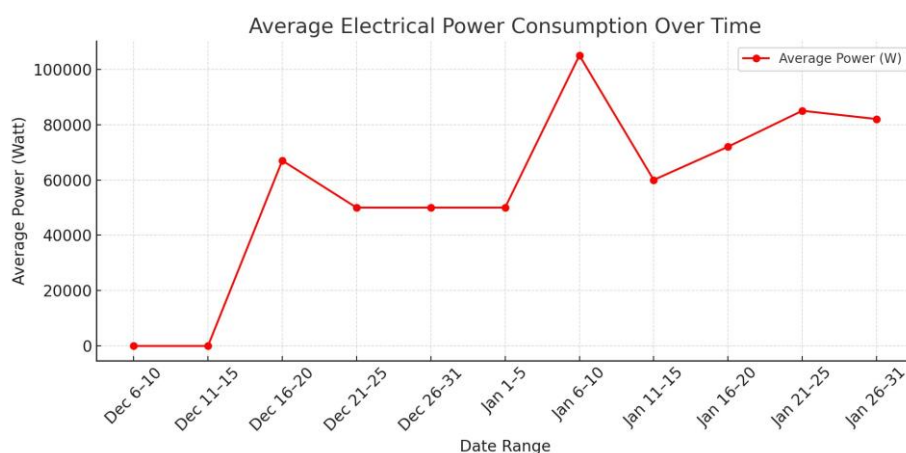
ตารางที่ 3 การคำนวณพลังงานจากระบบโซลาร์ฟาร์มและการโหลดไฟฟ้า

Date	Average Current (A)	Average Power (W)	Solar PV Energy (kWh/day)	Load Energy (kWh/day)
Dec 1-5, 2024	4.33	1601.35	39.49	38.43
Dec 6-10, 2024	5.36	2179.05	48.88	52.3
Dec 11-15, 2024	7.46	2986.57	68.04	71.68
Dec 16-20, 2024	6.87	2554.90	62.65	61.32
Dec 21-25, 2024	7.47	68312.40	68.13	1639.5
Dec 26-31, 2024	5.06	44815.08	46.15	1075.56
Jan 1-5, 2025	4.77	43482.35	43.5	1043.58
Jan 6-10, 2025	11.51	104817.09	104.97	2515.61
Jan 11-15, 2025	6.40	58698.36	58.37	1408.76
Jan 16-20, 2025	8.17	74187.84	74.51	1780.52
Jan 21-25, 2025	9.98	86584.38	91.02	2078.03
Jan 26-31, 2025	10.20	84954.82	93.02	2038.92



รูปที่ 4 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานจากโซลาร์และพลังงานจากโหลด (ธันวาคม 2567 - มกราคม 2568)

จากกราฟรูปที่ 4 พบว่า พลังงานแสงอาทิตย์เพิ่มขึ้นจาก 40 kWh/day (ต้นธันวาคม 2567) เป็น 70 kWh/day (กลางธันวาคม 2567) และสูงสุดที่ 110 kWh/day (กลางมกราคม 2568) ก่อนลดลงและทรงตัวที่ 90-95 kWh/day (ปลายมกราคม 2568) ส่วนพลังงานโหลดเริ่มต่ำ (≈ 0 kWh/day ต้นธันวาคม 2567) ก่อนพุ่งขึ้นเป็น 80 kWh/day (กลางธันวาคม 2567) และ 120 kWh/day (กลางมกราคม 2568) จากนั้นลดลงและเพิ่มขึ้นอีกครั้งเป็น 100 kWh/day (ปลายมกราคม 2568) ความสัมพันธ์ ตั้งแต่ กลางธันวาคม 2567 เป็นต้นไป ทั้งสองค่ามีแนวโน้มขึ้น-ลงสอดคล้องกัน โดย กลางมกราคม 2568 เป็นจุดสูงสุดของทั้งคู่ ขณะที่ ปลายมกราคม 2568 พลังงานโหลดเริ่มสูงกว่าพลังงานแสงอาทิตย์ อาจบ่งชี้ถึงความต้องการพลังงานเสริมจากแหล่งอื่น



รูปที่ 5 กราฟกำลังไฟเฉลี่ย (ธันวาคม 2567 - มกราคม 2568)

จากกราฟรูปที่ 5 พบว่าใน เดือน ธันวาคม 2567 ช่วง 6-20 ธันวาคม 2567 กำลังไฟฟ้าเฉลี่ยอยู่ในระดับต่ำ ใกล้ศูนย์วัตต์ ก่อนเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเป็น 70 kW (21-25 ธันวาคม 2567) และลดลงเหลือ 45 kW ในช่วงปลายเดือน ส่วนในเดือน มกราคม 2568 กำลังไฟฟ้าเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วตั้งแต่ต้นเดือนแตะ 110 kW (6-10 มกราคม 2568) ก่อนลดลงเหลือ 60 kW (11-15 มกราคม 2568) และเพิ่มขึ้นต่อเนื่องจนถึง 85-90 kW ในช่วงปลายเดือน จุดสำคัญ ได้แก่ การเปลี่ยนแปลงฉับพลัน

ของโหลดกลางเดือน ธันวาคม 2567, พิกโหลดสูงสุด 110 kW ช่วงต้น มกราคม 2568 และความผันผวนสูงของกำลังไฟฟ้า ตลอดช่วงปลายธันวาคม 2567 ถึง มกราคม 2568 ซึ่งอาจส่งผลต่อเสถียรภาพของระบบไฟฟ้า

ตารางที่ 4 โหลดไฟฟ้าเฉลี่ย (Average Load) ของแต่ละเดือน

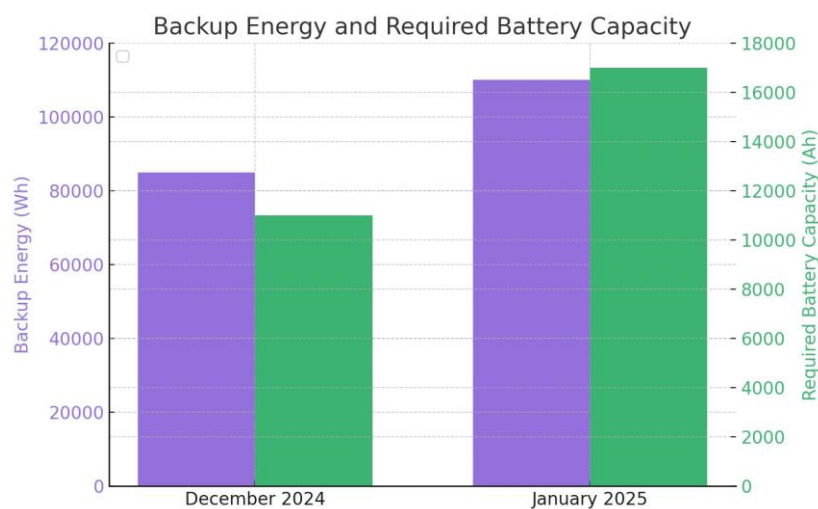
Month	Average Load (kWh/day)	Peak Load (W)
December 2024	509	68312.4
January 2025	1818.59	104817.1

3.2 ระบบการจัดเก็บพลังงาน (Energy Storage System หรือ ESS)

การประเมินขนาดของระบบการจัดเก็บพลังงาน (ESS) ในช่วง Peak Load เป็นการคำนวณปริมาณพลังงานที่จำเป็นต้องเก็บในระบบเพื่อรองรับช่วงที่มีการใช้งานพลังงานสูงสุด

ตารางที่ 5 ความต้องการพลังงานสำรองและความจุแบตเตอรี่ที่ต้องการในแต่ละเดือน

Month	Backup Energy (Wh)	Required Battery Capacity (Ah)
December 2024	68312.4	11163.73
January 2025	104817.09	17119.02



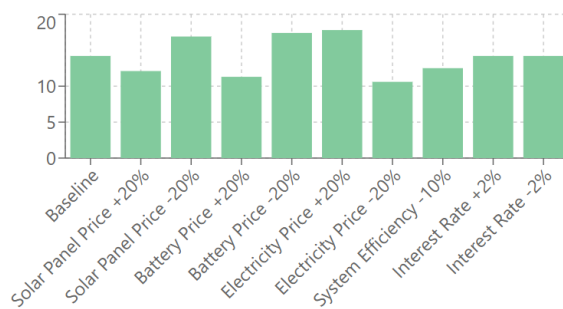
รูปที่ 6 การประเมินขนาดของระบบจัดเก็บพลังงาน (ESS) ในช่วงโหลดสูงสุด (ธันวาคม 2567 - มกราคม 2568)

จากกราฟรูปที่ 6 พบว่าแนวโน้มของพลังงานสำรอง (Wh) และความจุแบตเตอรี่ที่ต้องการ (Ah) เดือน มกราคม 2568 มีค่าทั้งสองตัวแปรสูงกว่าเดือน ธันวาคม 2567 พลังงานสำรองเพิ่มขึ้นจากเดือน ธันวาคม 2567 ไปยัง มกราคม 2568 ความจุแบตเตอรี่ที่ต้องการก็เพิ่มขึ้นเช่นกัน สาเหตุที่อาจเป็นไปได้ อาจเกิดจากโหลดไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นในเดือน มกราคม 2568 ทำให้ต้องการพลังงานสำรองมากขึ้น หากใช้พลังงานหมุนเวียน เช่น โซลาร์เซลล์ อาจแสดงว่าผลผลิตพลังงานแสงอาทิตย์เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ต้องการแบตเตอรี่ที่มีความจุมากขึ้น ความจุแบตเตอรี่ที่ต้องการ (Ah) สูงขึ้นในเดือน มกราคม 2568 อัตราส่วนระหว่างพลังงานสำรอง (Wh) และความจุแบตเตอรี่ (Ah) ค่อนข้างใกล้เคียงกันทั้งสองเดือน

ตารางที่ 6 ผลการวิเคราะห์ความไวของโครงการ

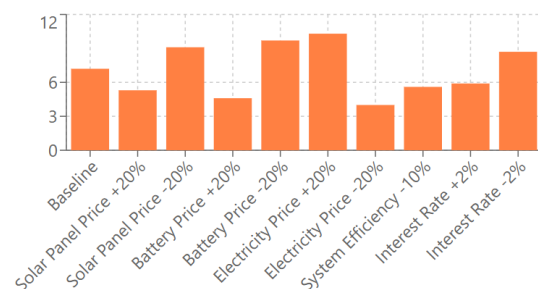
Factor	Change	Payback Period (Years)	IRR (%)	NPV (Million Baht)
Baseline	-	8.0	14.2%	7.2
Solar Panel Price	+20%	9.2	12.1%	5.3
Solar Panel Price	-20%	6.8	16.9%	9.1
Battery Price	+20%	9.5	11.3%	4.6
Battery Price	-20%	6.7	17.4%	9.7
Electricity Price	+20%	6.6	17.8%	10.3
Electricity Price	-20%	10.0	10.6%	4.0
System Efficiency	-10%	8.9	12.5%	5.6
Interest Rate	+2%	8.0	14.2%	5.9
Interest Rate	-2%	8.0	14.2%	8.7

IRR (%)



(ก) IRR

NPV (Million Baht)



(ข) NPV

รูปที่ 7 มูลค่าปัจจุบันสุทธิ (NPV) และอัตราผลตอบแทนภายใน (IRR)

จากกราฟรูปที่ 7 (ก) และ (ข) พบว่า ตัวชี้วัดทางการเงิน อัตราผลตอบแทนภายในและมูลค่าปัจจุบันสุทธิ และการประเมินประสิทธิภาพทางการเงินของโครงการ ประกอบด้วยสองดัชนีสำคัญ ได้แก่ อัตราผลตอบแทนภายใน (Internal Rate of Return: IRR) และมูลค่าปัจจุบันสุทธิ (Net Present Value: NPV) อัตราผลตอบแทนภายใน (IRR) ช่วงค่าอัตราผลตอบแทน ร้อยละ 10-15 วัตถุประสงค์เพื่อการประเมินความสามารถในการสร้างผลตอบแทนของโครงการ เกณฑ์การพิจารณา ค่า IRR ที่สูงบ่งชี้ถึงศักยภาพการลงทุนที่น่าดึงดูด มูลค่าปัจจุบันสุทธิ (NPV) ช่วงมูลค่า 2-10 ล้านบาท วัตถุประสงค์เพื่อการวิเคราะห์มูลค่าปัจจุบันของกระแสเงินสดในอนาคต เกณฑ์การพิจารณา NPV เป็นบวกแสดงถึงความเป็นไปได้ทางการเงิน สรุปผลการวิเคราะห์ พบความสอดคล้องระหว่างดัชนี IRR และ NPV ข้อมูลสนับสนุนการตัดสินใจเลือกทางเลือกการลงทุนที่มีประสิทธิภาพสูงสุด

3.3 การปรับปรุงค่า Power Factor (PF) เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพพลังงานในอาคาร

การวิเคราะห์ระบบไฟฟ้าในอาคารเรียนรวมช่างอุตสาหกรรม พบว่า ค่า Power Factor (PF) ต่ำกว่า 0.5 หลายวัน ส่งผลให้ประสิทธิภาพพลังงานลดลง และอาจถูกปรับค่าพลังงานรีแอคทีฟ (Reactive Power) ผลกระทบของ PF ต่ำ การสูญเสียพลังงานเพิ่มขึ้น เนื่องจากกระแสไฟฟ้าสูงขึ้น ทำให้สายไฟและหม้อแปลงร้อนขึ้น ค่าไฟสูงขึ้น จากค่าปรับโวลต์รีแอคทีฟ ความสามารถรองรับโหลดลดลง ระบบไฟฟ้าทำงานหนักขึ้น รองรับโหลดใหม่ได้ยาก แนวทางแก้ไขติดตั้ง Capacitor

Bank ปรับ PF เป็น 0.9 - 1.0 ลดพลังงานสูญเสีย ใช้ Smart Inverter ควบคุม PF อัตโนมัติ ปรับระบบให้เหมาะกับพลังงานหมุนเวียน เพื่อเป็นการ ลดค่าไฟฟ้า เพิ่มประสิทธิภาพการใช้พลังงานในอาคาร ตลอดจนยืดอายุอุปกรณ์ ปูทางสู่ Smart Building / Net Zero Energy Building (NZE)

3.4 การบริหารจัดการโหลดไฟฟ้า กุญแจสู่ระบบพลังงานที่มีประสิทธิภาพ

การบริหารจัดการโหลดไฟฟ้าเพื่อประสิทธิภาพสูงสุด ปัญหาของโหลดที่ไม่บริหารจัดการ จะมีภาวะเสี่ยงโหลดเกิน (Overload), ค่าไฟพุ่ง, PF ต่ำ และอุปกรณ์เสื่อมเร็ว กลยุทธ์บริหารโหลด Load Balancing โดยการกระจายโหลดสมดุล ลดกระแสเกิน ป้องกันความร้อนสะสม Peak Load Management ควบคุมโหลดช่วงพีก เพื่อช่วยลดค่า Demand Charge Smart Load Control การใช้ AI & IoT วิเคราะห์และปรับโหลดอัตโนมัติ Demand Response ปรับใช้ไฟตามราคาพลังงาน ลดต้นทุน รองรับพลังงานหมุนเวียน Power Factor Optimization ติดตั้ง Capacitor Bank / Smart Inverter ลดพลังงานสูญเสีย เพื่อให้ได้ผลลัพธ์ของการใช้พลังงานในอาคารเต็มประสิทธิภาพ ลดค่าไฟ ลดพลังงานสูญเสีย พร้อมรองรับ Smart Building / Net Zero Energy Building (NZE)

3.5 ความแตกต่างของพลังงานแสงอาทิตย์ในแต่ละเดือน

พลังงานที่ผลิตจากระบบโซลาร์เซลล์มีความแตกต่างกันตามช่วงเวลาของปี เนื่องจากปัจจัยทางธรรมชาติต่าง ๆ เช่น ความเข้มของแสงแดด, ความยาวของวัน, สภาพอากาศ และตำแหน่งของดวงอาทิตย์ในท้องฟ้า ในช่วงเดือนที่มีแดดจัดและวันยาว เช่น ฤดูร้อน พลังงานที่ผลิตได้จะสูงกว่าช่วงเดือนที่มีเมฆมากหรือฝนตก เช่น ฤดูฝน ปริมาณรังสีอาทิตย์ที่ตกกระทบบนแผงโซลาร์เซลล์เปลี่ยนแปลงไปตามมุมและความสูงของดวงอาทิตย์ ทำให้ประสิทธิภาพในการผลิตไฟฟ้าแตกต่างกันไปในแต่ละเดือน นอกจากนี้อุณหภูมิที่สูงเกินไปในบางช่วงเวลาอาจส่งผลให้ประสิทธิภาพของแผงลดลงเล็กน้อย ความแตกต่างของพลังงานแสงอาทิตย์ในแต่ละเดือนจึงเป็นสิ่งสำคัญที่ต้องนำมาพิจารณาในการออกแบบและวางแผนระบบพลังงานหมุนเวียน เพื่อให้สามารถรองรับการใช้งานได้อย่างเหมาะสมและมีประสิทธิภาพ การเข้าใจถึงความเปลี่ยนแปลงนี้จะช่วยในการประเมินกำลังผลิตเฉลี่ยและพลังงานสะสมตลอดปี รวมถึงการวางแผนการใช้พลังงานสำรองหรือการบริหารจัดการโหลดให้เหมาะสมเพื่อให้ระบบไฟฟ้าของอาคารทำงานได้อย่างต่อเนื่องและมั่นคง

4. สรุป

การพัฒนา ระบบไฟฟ้าของอาคารเรียนรวมช่วงอุตสาหกรรม วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรมและการจัดการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย มุ่งเน้นการลดการใช้พลังงานและเพิ่มประสิทธิภาพสูงสุดของการใช้พลังงาน โดยอาศัยข้อมูลโหลดไฟฟ้าจริงมาประยุกต์ใช้ในการออกแบบระบบที่สามารถลดการสูญเสียพลังงาน และรองรับการใช้พลังงานหมุนเวียนได้อย่างยั่งยืน การนำเทคโนโลยีอัจฉริยะเข้ามาประยุกต์ใช้ในระบบไฟฟ้า เช่น ระบบมอนิเตอร์แบบเรียลไทม์ การจัดการโหลดอย่างชาญฉลาด และการวิเคราะห์พฤติกรรมการใช้พลังงาน ช่วยให้สามารถบริหารจัดการพลังงานอย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น ลดความสูญเสีย และเพิ่มความยืดหยุ่นของระบบ อย่างไรก็ตามยังมีความท้าทายสำคัญที่ต้องพิจารณา เช่น ความไม่แน่นอนของสภาพอากาศที่ส่งผลต่อการผลิตพลังงานแสงอาทิตย์ พฤติกรรมการใช้พลังงานของผู้ใช้งานที่เปลี่ยนแปลงได้ และข้อจำกัดด้านข้อมูลเรียลไทม์ที่อาจกระทบต่อการวิเคราะห์โหลดและวางแผนระบบสำรองพลังงานในอนาคต แนวทางการพัฒนาเพิ่มเติมอาจรวมถึงการทดสอบระบบในฤดูกาลที่หลากหลาย การประยุกต์ใช้ AI และ Machine Learning เพื่อพยากรณ์โหลดได้แม่นยำยิ่งขึ้น การศึกษาเทคโนโลยีแบตเตอรี่ประสิทธิภาพสูง เช่น Solid-State Battery ตลอดจนการพัฒนาแนวคิด Grid-Interactive Buildings ที่สามารถเชื่อมต่อและสื่อสารกับโครงข่ายไฟฟ้า เพื่อเพิ่มเสถียรภาพและลดต้นทุนการดำเนินงาน ด้วยแนวทางเหล่านี้ Net Zero Energy Building จะไม่ใช่เพียงเป้าหมายของการพัฒนาอาคารเท่านั้น แต่คือรากฐานของอาคารยุคใหม่ที่ชาญฉลาด มีเสถียรภาพ และยั่งยืน รองรับอนาคตของโลกพลังงานสะอาดอย่างแท้จริง

5. เอกสารอ้างอิง

- [1] R. Tu, Z. Guo, L. Liu, S. Wang, and X. Yang, “Reviews of Photovoltaic and Energy Storage Systems in Buildings for Sustainable Power Generation and Utilization from Perspectives of System Integration and Optimization,” *Energies*, vol. 18, no. 11, Art. 2683, 2025.
- [2] H. Haggi and J. M. Fenton, “Techno-Economic Assessment of Net-Zero Energy Buildings: Financial Projections and Incentives for Achieving Energy Decarbonization Goals,” arXiv preprint, Dec. 1, 2024. [Online]. Available: <https://arxiv.org/>
- [3] “A Comprehensive Review on Technologies for Achieving Zero-Energy Buildings,” *Sustainability*, vol. 16, no. 24, 2024.
- [4] “Smart building energy management with renewables and storage,” *Scientific Reports*, 2024.
- [5] “Building energy technologies towards achieving net-zero pathway,” *ScienceDirect*, 2025.
- [6] M. W. S. Mubarak, S. Ramadhani, and M. I. Tsaqif, “Renewable Energy Solutions for Achieving Net Zero Building,” *Journal of Building Research and Environment (JBREV)*, vol. 2, no. 1, pp. 11–20, May 2024.
- [7] “Advancing smart net-zero energy buildings with renewable energy,” *Journal of Energy Storage*, 2025.
- [8] “Recent Progress in Net-Zero Energy Buildings in Tropical Climates,” in *Recent Progress in Earth Surface and Coastal Studies*, Springer, 2024.
- [9] EnergyX DY Building (South Korea): First plus-zero commercial ZEB, self-sufficiency 121.7%, 2023. [Online]. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/EnergyX_DY-Building
- [10] K. M. Anderson, “The role of renewable energy in achieving net zero energy buildings: A case study on smart building integration,” Master’s thesis, Univ. of California, 2019.

การศึกษาสมบัติเชิงกลและโครงสร้างทางโลหะวิทยาสำหรับการเชื่อมระหว่างเหล็ก Q235 และ AISI 304 โดยวิธีก๊าซทังสเตนอาร์ค GTAW

The Study of Mechanical Properties and Metallurgical for Steel Metal Welding between Q235 and AISI 304 by Gas Tungsten Arc Welding (GTAW)

ณัฐวุฒิ มุขน้อย*, สุรินทร์ สไลวงษ์, ประวิทย์ มุลนนท์, มะขาม ปัญญา และ เมืองแก้ว ยุตัน

สาขาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธนบุรี

248 ซอย เพชรเกษม 110 แขวงหนองค้างพลู เขตหนองแขม กรุงเทพมหานคร 10160

Natthawuth Muknoy*, Surin Salaiwong, Prawit Moonnun, Makhm Panya and Muangkaew Yutan

Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Thonburi University,

248 Soi Phetkasem 110, Nong Khang Phlu Subdistrict, Nong Khaem District, Bangkok 10160

*Corresponding author Email: Nickzakata@hotmail.com

(Received: April 20, 2025 / Revised: June 8, 2025 / Accepted: June 14, 2025)

บทคัดย่อ

การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อหาสมบัติเชิงกลและโครงสร้างทางโลหะวิทยาของรอยเชื่อมบนแผ่นเหล็ก Q235 และ AISI 304 ที่มีขนาดความกว้าง 150 มม. ความยาว 200 มม. และความหนา 6 มม. โดยวิธีก๊าซทังสเตนอาร์ค GTAW ใช้ลวดเชื่อม AWS A5.9: ER309L และทำการเชื่อมโดยใช้เครื่อง RILON TIG 200S แรงดันอาร์ค 120 V ความเร็วในการเชื่อม 13.7 มม./นาที และกำหนดอัตราการไหลของแก๊สปกคลุม 16 ลิตร/นาที การทดสอบเชิงกลและการวิเคราะห์ทางโลหะวิทยาได้ดำเนินการเพื่อประเมินคุณภาพของรอยเชื่อม ผลการทดลองบ่งชี้ว่าคุณสมบัติเชิงกลและการเชื่อมที่สม่ำเสมอและการหลอมรวมที่มีประสิทธิภาพระหว่างโลหะเชื่อมและโลหะฐาน ความต้านทานแรงดึงเฉลี่ยของรอยเชื่อมคือ 467.85 MPa และความต้านทานแรงดึงครากเฉลี่ยคือ 345.86 HV ผลการวิจัยเหล่านี้แสดงให้เห็นว่าพารามิเตอร์และวัสดุในการเชื่อมที่เลือกนั้นสามารถผลิตรอยเชื่อมคุณภาพสูงที่มีสมบัติทางกลและลักษณะทางโลหะวิทยาที่น่าพอใจ

คำสำคัญ: วิธีการเชื่อมแบบก๊าซทังสเตนอาร์ค, สมบัติทางกล, โครงสร้างทางโลหะวิทยา

Abstract

This study investigates the mechanical properties and metallurgical structure of welds on Q235 and AISI 304 steel plates with dimensions of 150 mm in width, 200 mm in length, and 6 mm in thickness. The welding was performed using the Gas Tungsten Arc Welding (GTAW) process. AWS A5.9: ER309L filler metal was utilized, and the welding was carried out using a RILON TIG 200S machine with the arc voltage of 120 V. The welding speed was maintained at 13.7 mm/min, and the shielding gas flow rate was set at 16 liters/min. Mechanical testing and metallurgical analysis were conducted to evaluate the quality of the welds. The experimental results indicated consistent penetration depth and effective fusion between the weld metal and the base metals. The average tensile strength of the welds was 467.85 MPa, and the average hardness was 345.86 HV. These findings demonstrate that the selected welding parameters and materials produced high-quality welds with satisfactory mechanical properties and metallurgical characteristics.

Keywords: Gas tungsten arc, Mechanical Properties, Metallurgical

1. บทนำ

เหล็กแผ่นรีดร้อน ASTM Q235 เป็นเหล็กที่มีความเหนียว และความสามารถในการเชื่อม เช่นเดียวกับความแข็งแรง ประสิทธิภาพการดัดเย็นที่ดี ใช้งานอย่างแพร่หลายในการก่อสร้างและเชื่อมโครงสร้างทางวิศวกรรม ส่วนเหล็กแผ่น AISI 304 เป็นเหล็กกล้าไร้สนิมที่มีโครเมียม 18% และ Ni 8% SS304 มีความสามารถในการเชื่อมได้ดีเยี่ยม ทนความร้อนและการกัดกร่อน มีความแข็งแรงที่อุณหภูมิห้อง สามารถแปรรูปได้ คุณสมบัติทางกล ไม่แข็งตัวจากการบำบัดความร้อน

มีงานวิจัยที่ทำการศึกษาศสมบัติ โครงสร้างทางโลหะวิทยา และความเค้นตกค้างของแนวเชื่อมซึ่งมีรายละเอียดดังนี้ Hongduo Wang และคณะ [7] ได้ทำการเชื่อมแบบกวนด้วยแรงเสียดทาน (FSW) ในการเชื่อมโลหะต่างชนิด (เหล็กกล้าไร้สนิมชนิด 304 (SS304) และเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ Q235) ผลการทดลองพบว่าโครงสร้างโลหะวิทยาในบริเวณแนวเชื่อมประกอบไปด้วยเฟอร์ไรต์รูปเข็มและเฟิร์ลไลต์ ความต้านทานแรงดึงบริเวณแนวเชื่อมคือ 493 MPa ซึ่งมากกว่าบริเวณโลหะฐานเหล็ก Q235 ประมาณ 4% อย่างไรก็ตาม ค่าการยืดตัวอยู่ที่ 17% ซึ่งลดลงประมาณ 50% นอกจากนี้ พื้นผิวรอยแตกยังแสดงให้เห็นรอยแตกแบบเหนียวที่มีรอยปุ่ม Chang'an Li และคณะ [8] ได้ทำการทดลองโดยใช้โลหะเติมเสริมเหล็กกล้าคาร์บอนลงในโลหะฐานของแผ่นหุ้มเหล็กกล้าไร้สนิม ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าองค์ประกอบโลหะผสมในบริเวณรอยเชื่อมประกอบด้วยเหล็กกล้าไร้สนิมและเหล็กกล้าคาร์บอนเนื่องมาจากการก่อตัวของเฟสมาร์เทนไซต์ในชั้นแรกของรอยเชื่อมด้วยโลหะเสริมเหล็กกล้าคาร์บอน ความแข็งในโลหะเชื่อมจะสูงกว่าโลหะฐาน และรอยแตกร้าวของชิ้นงานจะเกิดขึ้นใกล้กับบริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อน

โครงการนี้มุ่งเน้นไปที่การศึกษาศสมบัติทางกลและโครงสร้างทางโลหะวิทยาของรอยเชื่อมด้วยวิธีก๊าซทั้งสแตนอาร์ค (GTAW) โดยใช้ลวดเชื่อม AWS A5.9: ER309L ที่มีผลต่อเหล็ก Q235 และ AISI 304 เพื่อเลือกกระบวนการเชื่อมที่เหมาะสมสำหรับรอยเชื่อมของวัสดุทั้ง 2 ชนิด คือ เหล็กแผ่น Q235 และ เหล็กแผ่น AISI 304 ซึ่งจะทำการวิเคราะห์โครงสร้างมหภาคและจุลภาค การตรวจสอบแรงดึง การตรวจสอบความแข็ง และในขั้นตอนสุดท้ายมีการวิเคราะห์และสรุปผลการทดลอง ซึ่งจะนำผลการทดลองที่ได้ไปใช้เป็นส่วนอ้างอิงในการพัฒนาและปรับปรุงในชิ้นส่วนที่ต้องการใช้โลหะที่ต่างชนิดกันได้อย่างมีประสิทธิภาพ

2. วัสดุและวิธีการทดลอง

การศึกษาศสมบัติเชิงกลและโครงสร้างทางโลหะวิทยาสำหรับการเชื่อมเหล็ก Q235 และ AISI 304 ด้วยลวดเชื่อม AWS A5.9: ER309L โดยใช้ก๊าซทั้งสแตนอาร์ค (GTAW) ทำการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคของเหล็กทั้ง 2 ชนิด และ สมบัติทางกล โดยมีวิธีการดำเนินการศึกษาดังต่อไปนี้

2.1 เครื่องเชื่อมอาร์กอน RILON TIG 200S แรงดันอาร์ค 120 โวลต์ เป็นตู้เชื่อมอาร์กอนขนาดเล็ก เคลื่อนย้ายสะดวก เชื่อมทีละระบบเดียว เหมาะกับงาน สแตนเลส และ เหล็ก

2.2 วัสดุเชื่อม

วัสดุเชื่อมเป็นเหล็กแผ่น กว้าง 100 มม. ยาว 150 มม. และหนา 6 มม. โดยวัสดุเชื่อมชิ้นแรกเป็นเหล็ก Q235 ส่วนผสมทางเคมีดังแสดงในตารางที่ 1 และชิ้นที่สองเป็นเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 ในตารางที่ 2

ตารางที่ 1 ส่วนผสมทางเคมีของเหล็กกล้า Q235 (%wt) [1]

Materials	C	Si	Mn	P	S
Q235	0.22	0.35	1.40	0.045	0.050

ตารางที่ 2 ส่วนผสมทางเคมีของเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 (%wt) [2]

Materials	C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	N
AISI 304	0.0-0.07	0.0-2.0	0.0-1.0	0.0-0.05	0.0-0.03	17.5-19.5	8.0-10.5	0.0-0.11

2.3 ลวดเชื่อม

ลวดเชื่อม เลือกใช้ลวดเชื่อมชนิด AWS A5.9: ER309L ให้มีความเหมาะสมกับวัสดุทดลองเชื่อมทั้งสองชนิด สมบัติทางเคมีดังของลวดเชื่อมดังแสดงในตารางที่ 3 ส่วนพารามิเตอร์ที่ใช้ในการเชื่อมดังแสดงในตารางที่ 4

ตารางที่ 3 ส่วนผสมทางเคมีของลวดเชื่อม AWS A5.9: ER309L (%wt) [2]

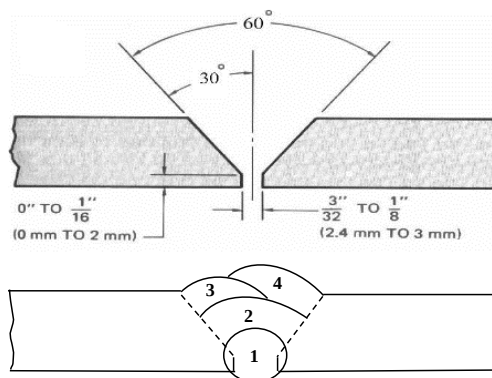
C	Mn	Si	Cr	Ni	S	P	Mo	Cu
0.03 max	1.0-2.5	0.30-0.65	23-25	12-14	0.03 max	0.03 max	0.75 max	0.75 max

ตารางที่ 4 ลวดเชื่อมและตัวแปรในการเชื่อม

เงื่อนไข	รายละเอียด
กระบวนการเชื่อม	การเชื่อมอาร์คทั้งสแตนแก๊สปกคลุม (GTAW)
ชนิดลวดเชื่อม	ER309L
ขนาดของลวดเชื่อม (mm)	2.4
แรงดันอาร์ค (V)	120
กระแสเชื่อมไฟฟ้า (A)	14
ความเร็วในการเชื่อม (มม./นาที)	13.4
ปริมาณการไหลของแก๊สปกคลุม (ลิตร/นาที)	16 (Argon)

2.4 การเตรียมชิ้นงาน

ในการศึกษาสมบัติเชิงกลและโครงสร้างทางโลหะวิทยาสำหรับการเชื่อมเหล็ก Q235 และ AISI 304 ด้วยวิธี ก๊าซทั้งสแตนอาร์ค ตามมาตรฐาน AWS D1.1 มีชิ้นงานตัวอย่างทดสอบเชื่อมทั้งหมด 3 ชิ้น การกำหนดรอยต่อโดยการบากร่อง 60 องศา และกำหนดลำดับการเชื่อมแต่ละแนว ดังแสดงในรูปที่ 1 สำหรับกระบวนการเชื่อมโดยใช้ลวดเชื่อมทั้งสแตนเป็นตัว อาร์คให้เกิดความร้อน และใช้แก๊สปกคลุมการเชื่อมด้วยมือ (GTAW) แก๊สปกคลุมขณะทำการเชื่อม คือ แก๊สอาร์กอน (Argon)

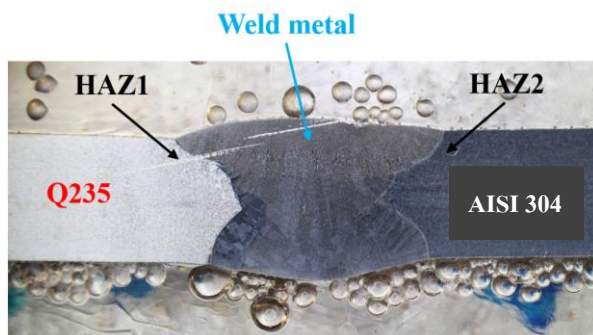


รูปที่ 1 ข้อกำหนดมาตรฐานรอยต่อและการกำหนดลำดับการเชื่อม

2.5 การตรวจสอบโครงสร้างโลหะวิทยา

การตรวจสอบโครงสร้างทางโลหะวิทยาจะตรวจสอบโครงสร้างมหภาค เพื่อดูลักษณะทางกายภาพของแนวเชื่อม เช่น ความกว้าง ความสูง การซึมลึก และจุดบกพร่องของแนวเชื่อม บริเวณอิทธิพลทางความร้อน ซึ่ง บริเวณอิทธิพลทางความร้อนแบ่งได้เป็นส่วน ๆ ตามความมากน้อยของอุณหภูมิที่ได้รับ

การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคโดยใช้กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (Light microscope) เพื่อตรวจสอบลักษณะของเกรนในบริเวณแนวเชื่อม (Weld metal zone: WM) บริเวณพื้นที่กระทบร้อน (Heat affected zone: HAZ) และ บริเวณเนื้อโลหะเดิม (Base metal: BM) ตามมาตรฐาน ASTM E340 และ E407 [7-8] ดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 ตำแหน่งของตรวจสอบโครงสร้างทางโลหะวิทยาในชิ้นงานตัวอย่าง

2.6 เครื่องทดสอบแรงดึง (Universal Testing Machine)

เครื่องทดสอบแรงดึงที่ใช้ในการทดลองนี้แสดงดังรูปที่ 3 ยี่ห้อ INSTRON รุ่น 8801 ขนาด 10 ตัน เป็นเครื่องสำหรับทดสอบแรงดึงในแนวตามยาวของเนื้อ โลหะเชื่อม (All Weld Metal) โดยเตรียมชิ้นงาน ทดสอบแบบลดขนาด การทดสอบสามารถป้อนค่าพารามิเตอร์ได้โดยตรงจากหน้าจอ การประมวลผลการทดสอบจะเป็นลักษณะของตัวเลขและกราฟ โดยในงานวิจัย ครั้งนี้ใช้ทดสอบเพื่อหาค่าความแข็งแรงดึงสูงสุดของงานเชื่อม (Ultimate Tensile Strength) ความแข็งแรงที่จุดคราก (Yield Strength) และ เปอร์เซ็นต์ในการยืดตัว (Percent Elongation) ตามมาตรฐาน ASTM E8M-22



รูปที่ 3 เครื่องทดสอบแรงดึงยี่ห้อ INSTRON รุ่น 8801

2.7 เครื่องทดสอบความแข็ง (Hardness Testing)

การทดสอบความแข็งแบบวิกเกอร์จะใช้เครื่องทดสอบความแข็ง SHIMADZU รุ่น HMV-G ดังรูปที่ 4 ขึ้นงานทดสอบได้จากบริเวณรอยเชื่อมดังแสดงในรูปที่ 5 การตรวจสอบโครงสร้างโลหะวิทยา มีการวัดโปรไฟล์ความแข็งของรอยเชื่อมโดยแบ่งออกเป็น 3 โซน ได้แก่ บริเวณเนื้อโลหะฐาน (Base metal) บริเวณพื้นที่กระทบร้อน (Heat affected zone) บริเวณแนวเชื่อม (Weld metal: WM) การทดสอบเป็นไปตามมาตรฐาน ASTM E3-11 ใช้แรงกด 200 kgf (HV0.2 (1.961N) เวลาทดสอบ 15 วินาที เพื่อเปรียบเทียบความแข็งบริเวณเนื้อเชื่อม บริเวณอิทธิพลทางความร้อน และบริเวณโลหะฐาน



รูปที่ 4 เครื่องทดสอบความแข็ง SHIMADZU รุ่น HMV-G



รูปที่ 5 การเตรียมชิ้นงานสำหรับทดสอบความแข็ง

3. ผลการทดลอง

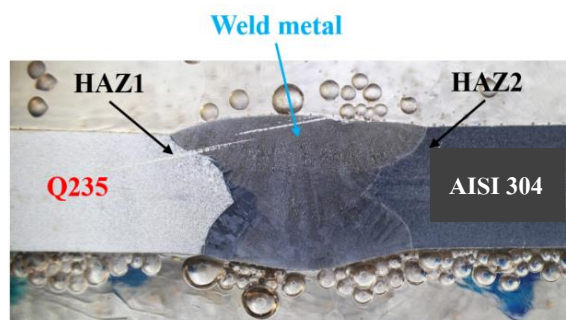
3.1 ผลการตรวจสอบโครงสร้างทางโลหะวิทยา

3.1.1 ผลการตรวจสอบทางกายภาพ ลักษณะทางกายภาพของรูปร่างแนวเชื่อมดังรูปที่ 6 การเกิดเม็ดโลหะบริเวณของ ชิ้นงาน ลักษณะผิวหน้าของแนวเชื่อม การซึมลึก การหลอมละลาย ระหว่างชั้นของเนื้อเชื่อมกับโลหะงาน ความกว้างบริเวณเขตอิทธิพลทาง ความร้อน และจุดบกพร่องของแนวเชื่อม พบว่ากระบวนการเชื่อมแบบ GTAW เกร็ดแนวเชื่อมมีความเรียบสม่ำเสมอ ลักษณะการซึมลึกและการหลอมละลายระหว่างเนื้อเชื่อมกับ โลหะงานสม่ำเสมอ

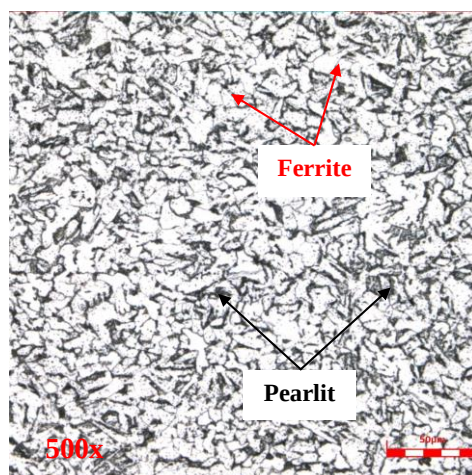


รูปที่ 6 ลักษณะทางกายภาพและโครงสร้างมหภาค

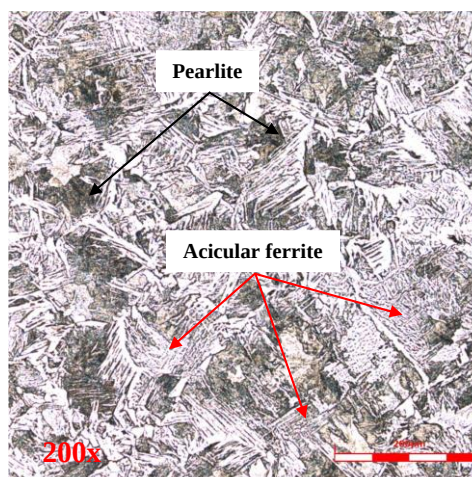
3.1.2 การตรวจสอบโครงสร้างทางจุลภาคด้วยกล้องจุลภาคแบบใช้แสง (OM) รูปที่ 7 จะเป็นภาพตำแหน่งที่ทำการตรวจสอบทั้ง 5 จุด รูปที่ 8 เป็นภาพบริเวณเนื้อโลหะเดิมของเหล็ก Q235 (Base metal: BM) ที่กำลังขยาย 500 เท่า 50 μm โครงสร้างจุลภาคโดยทั่วไปประกอบไปด้วย เฟอร์ไรต์และเพิร์ลไลต์ โดยเพิร์ลไลต์กระจายตัวอยู่บนขอบเกรนของเฟอร์ไรต์ [7] รูปที่ 9 เป็นภาพบริเวณแนวพื้นที่กระทบร้อน (Heat affected zone: HAZ1) ที่กำลังขยาย 200 เท่า 200 μm เห็นได้ชัดว่าโครงสร้างจุลภาคของโลหะเชื่อมทั้งสองประกอบด้วยออสเทนไนต์ที่สมบูรณ์ ซึ่งสอดคล้องกับโครงสร้างจุลภาคของเฟอร์ไรต์รูปเข็มที่มีเศษส่วนสูง เฟอร์ไรต์รูปเข็มบ่งชี้ว่าอุณหภูมิสูงสุดอยู่ภายในของเหล็ก Q235 จะเข้าใกล้อุณหภูมิการหลอมละลายของเหล็ก AISI 304 ที่ 1,050 $^{\circ}\text{C}$ [7]



รูปที่ 7 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์แบบแสงของรอยเชื่อมเหล็ก Q235 และ AISI 304

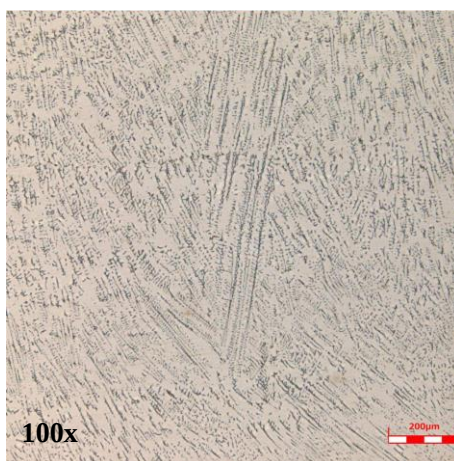


รูปที่ 8 โครงสร้างจุลภาคในบริเวณเนื้อโลหะพื้นของเหล็ก Q235 (Base metal)

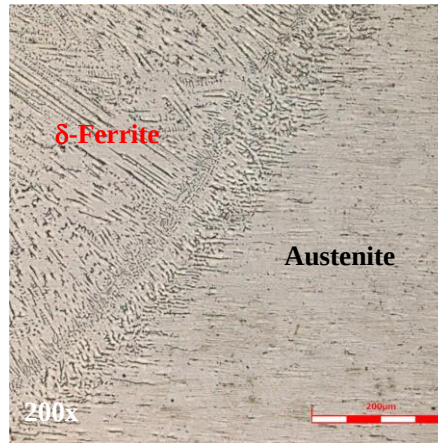


รูปที่ 9 โครงสร้างจุลภาคในบริเวณแนวพื้นที่กระทบร้อน (Heat affected zone: HAZ1)

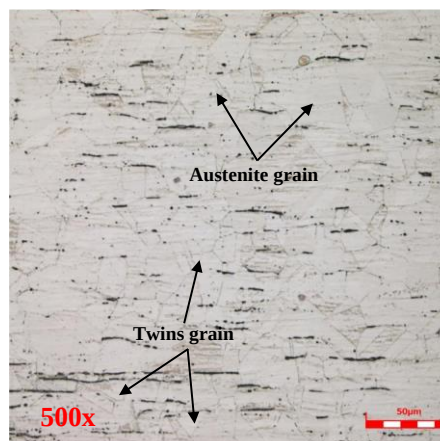
จากรูปที่ 10 โครงสร้างจุลภาคในบริเวณแนวเชื่อม (Weld metal zone: WM) ที่กำลังขยาย 100 เท่า 200 μm ประกอบด้วยเดนไดรต์เฟอร์ไรต์ และ เมทริกซ์ออสเทนไนต์ [7] รูปที่ 11 เป็นภาพในบริเวณแนวพื้นที่กระทบร้อนต่อการเชื่อมของเหล็ก AISI 304 (Heat affected zone: HAZ2) ที่กำลังขยาย 200 เท่า 200 μm เห็นได้ชัดว่าโครงสร้างจุลภาคของโลหะเชื่อมทั้งสองประกอบด้วยเดนไดรต์เฟอร์ไรต์ปฐมภูมิ กับออสเทนไนต์ระหว่างเดนไดรต์ เป็นที่น่าสนใจว่าทั้งสองมีปริมาณเดลต้าเฟอร์ไรต์ค่อนข้างสูง อาจเนื่องมาจากผลกระทบของปริมาณคาร์บอนต่ำในโลหะตัวเดิมทั้งสองตัวในการเชื่อมในงานนี้ ซึ่งสอดคล้องกับบทบาทที่คาร์บอนมีแนวโน้มที่จะทำให้เฟสออสเทน-ไอต์เสถียรในโลหะเชื่อม [7] รูปที่ 12 เป็นภาพบริเวณเนื้อโลหะเดิมของเหล็ก AISI 304 (Base metal: BM2) ที่กำลังขยาย 500 เท่า 50 μm โครงสร้างจุลภาคโดยทั่วไปเกรนออสเทนไนต์มีลักษณะหยาบและเป็นสเดนเลสชนิดออสเทนนิติกแบบทวิน [7]



รูปที่ 10 โครงสร้างจุลภาคในบริเวณแนวเชื่อม (Weld metal zone: WM)



รูปที่ 11 โครงสร้างจุลภาคในบริเวณแนวพื้นที่กระทบร้อน (Heat affected zone: HAZ2)

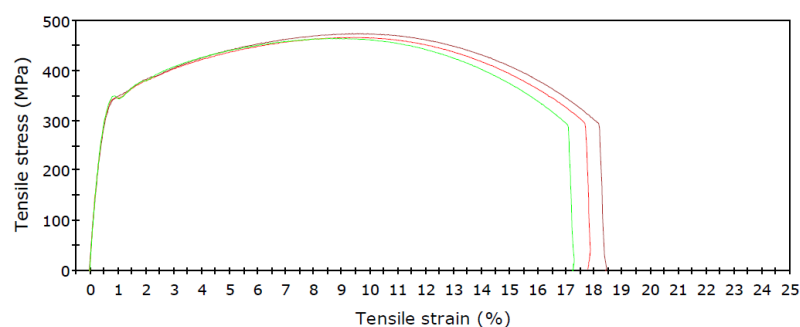


รูปที่ 12 โครงสร้างจุลภาคในบริเวณเนื้อโลหะเดิมของเหล็ก AISI 304 (Base metal)

3.2 การทดสอบแรงดึง (Tensile test)

ผลการทดสอบแรงดึงจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของชิ้นงานเชื่อมตัวอย่างในรูปที่ 13 พบว่าความเค้นทั้งหมดมีค่าใกล้เคียงกันเนื่องจากการแตกหักจากของชิ้นงานอันเป็นผลจากการทดสอบแรงดึง [8] อย่างไรก็ตามยังตรวจพบว่าการแตกหักทั้งหมดเกิดขึ้นในด้านโลหะพื้นฐาน Q235 ดังแสดงในรูปที่ 14 ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าส่วนที่เปราะบางที่สุดของชิ้นงานเชื่อมตัวอย่างคือบริเวณโลหะพื้นฐาน Q235 ดังแสดงไว้ในตารางที่ 3

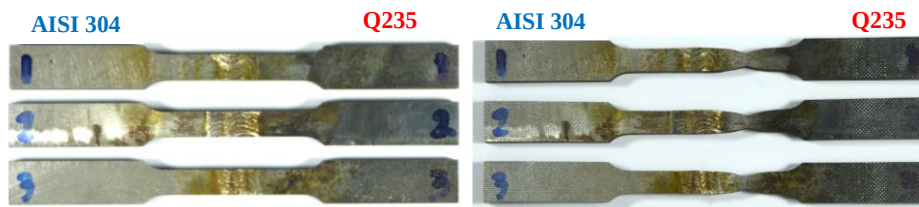
Tensile test



รูปที่ 13 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของชิ้นงานตัวอย่างทั้ง 3 ชิ้น

ตารางที่ 3 ผลการทดสอบแรงดึง

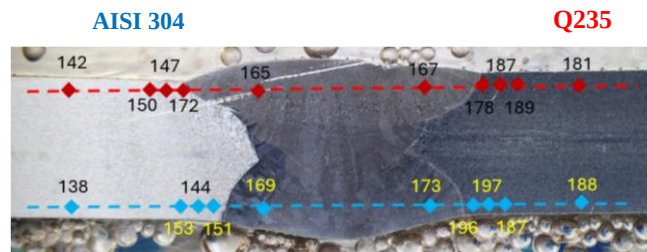
ชิ้นงาน	Yield strength (MPa)	UTS (MPa)	Elongation %	Location of fracture
1	345.48	465.88	17.68	Base metal Q235
2	342.71	473.76	18.18	Base metal Q235
3	349.38	463.92	17.07	Base metal Q235
ค่าเฉลี่ย	345.86	467.85	17.64	Base metal Q235



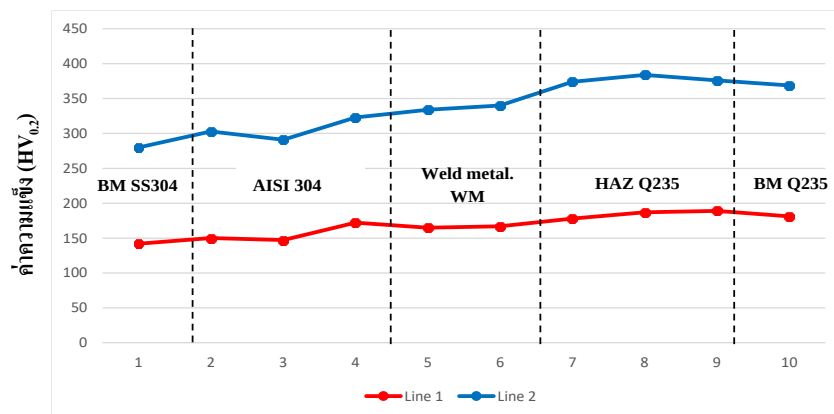
รูปที่ 14 ภาพชิ้นงานตัวอย่างก่อนและหลังการทดสอบแรงดึง

3.3 การทดสอบความแข็ง (Hardness test)

ตำแหน่งของบริเวณจุดทดสอบดังแสดงในรูปที่ 15 ผลจากการทดสอบความแข็งจากกระบวนการเชื่อมแบบ GTAW ดังแสดงในรูปที่ 16 โปรไฟล์ความแข็งของรอยเชื่อมแบ่งออกเป็น 5 โซน ได้แก่ บริเวณเนื้อโลหะเดิม (Base metal: BM AISI 304) บริเวณพื้นที่กระทบร้อน (Heat affected zone: HAZ AISI 304) บริเวณแนวเชื่อม (Weld metal: WM) บริเวณพื้นที่กระทบร้อน (Heat affected zone: HAZ Q235) และบริเวณเนื้อโลหะเดิม (Base metal: BM Q235) [8]



รูปที่ 15 บริเวณตำแหน่งจุดทดสอบทั้ง 10 จุด



ตำแหน่งจุดทดสอบ

รูปที่ 16 ผลการทดสอบความแข็งแบบวิกเกอร์

แนวโน้มของการค่าความแข็งในแต่ละบริเวณจุดทดสอบทั้ง 10 จุด ในแนวเส้นที่ 1 (เส้นสีแดง) พบว่ามีค่าความแข็งมากที่สุดในจุดที่ 9 บริเวณอิทธิพลทางความร้อนเท่ากับ 189 HV และค่าความแข็งได้น้อยสุดคือจุดที่ 1 เท่ากับ 142 HV และบริเวณอิทธิพลทางความร้อน (HAZ Q235) จากตำแหน่งจุดทดสอบที่ 7 - 9 จะมีค่าความแข็งที่สูงกว่าบริเวณแนวเชื่อมเล็กน้อย (WM) ตำแหน่งจุดทดสอบที่ 5 - 6 แต่จะมีค่าความแข็งที่มากกว่าบริเวณอิทธิพลทางความร้อน (HAZ AISI 304) ตำแหน่งจุดทดสอบที่ 2 - 4 ส่วนแนวโน้มของการค่าความแข็งในแต่ละบริเวณจุดทดสอบทั้ง 10 จุด ในแนวเส้นที่ 2 (เส้นสีน้ำเงิน) พบว่ามีค่าความแข็งมากที่สุดในจุดที่ 8 บริเวณอิทธิพลทางความร้อนเท่ากับ 197 HV และค่าความแข็งได้น้อยสุดคือจุดที่ 1 เท่ากับ 138 HV และบริเวณอิทธิพลทางความร้อน (HAZ Q235) จากตำแหน่งจุดทดสอบที่ 7 - 9 จะมีค่าความแข็งที่สูงกว่าบริเวณแนวเชื่อมเล็กน้อย

จากการทดสอบพบว่าบริเวณเนื้อเชื่อมเมื่อได้รับความร้อนจากการเชื่อมทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างกลายเป็นโครงสร้างของแข็งจึงส่งผลต่อค่าความแข็งที่เพิ่มขึ้น [6] และกระบวนการเชื่อมบริเวณอิทธิพลทางความร้อนที่อยู่ติดกับบริเวณโลหะฐานจะมีค่าความแข็งที่มากกว่าบริเวณเนื้อเชื่อมแต่จะมากกว่าบริเวณโลหะฐาน และจะให้ผลที่เหมือนกันทั้ง 2 เส้นของการทดสอบ

4. สรุป

การศึกษาสมบัติทางกลและโครงสร้างทางโลหะวิทยาของการเชื่อมเหล็ก Q235 และ AISI 304 ด้วยลวดเชื่อม AWS A5.9: ER309L โดยวิธีก๊าซทั้งสตนอาร์ค (GTAW) โดยมีการวิเคราะห์โครงสร้างทางมหภาคและจุลภาคของโลหะทั้ง 2 ชนิด สมบัติทางกล ข้อสรุปที่ได้จากการตรวจสอบสามารถอธิบายได้ดังนี้

4.1 การตรวจสอบโครงสร้างทางมหภาค พบว่า ลักษณะการซึมลึกและการหลอมละลายระหว่างเนื้อเชื่อมกับโลหะฐานสม่ำเสมอ และมีความสมบูรณ์ระหว่างเนื้อเชื่อมและโลหะฐาน ความกว้างของเขตบริเวณอิทธิพลทางความร้อนของกระบวนการเชื่อมใกล้เคียงกัน และไม่มีจุดบกพร่องของแนวเชื่อม

4.2 การทดสอบแรงดึง พบว่าสมบัติทางกลที่ใกล้เคียงกัน อย่างไรก็ตามยังตรวจพบว่าการแตกหักทั้งหมดเกิดขึ้นในด้านโลหะพื้นฐาน Q235 ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าส่วนที่เปราะบางที่สุดของชิ้นงานเชื่อมตัวอย่างคือบริเวณโลหะพื้นฐาน Q235

4.3 การทดสอบความแข็งแบบวิกเกอร์ พบว่าบริเวณเนื้อเชื่อมเมื่อได้รับความร้อนจากการเชื่อมทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างกลายเป็นโครงสร้างของแข็งจึงส่งผลต่อค่าความแข็งที่เพิ่มขึ้น และกระบวนการเชื่อมบริเวณอิทธิพลทางความร้อนที่อยู่ติดกับบริเวณโลหะฐาน (HAZ Q235) จะมีค่าความแข็งที่มากกว่าบริเวณเนื้อเชื่อม (WM) แต่จะมากกว่าบริเวณโลหะฐาน

5. เอกสารอ้างอิง

- [1] UNION CONSTRUCTION GROUP. (2024, October 15). Q235 Steel Equivalent [Online]. Available: <https://www.unionyl.com/blog/q235-steel-equivalent-properties-specification-composition.html>
- [2] AZO MATERIALS. (2024, June 11). Grade 304 Stainless Steel [Online]. Available: <https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=2867>
- [3] Aircraft Materials. (2024, December 18). AWS ER 309/309L [Online]. Available: <https://aircraftmaterials.com/data/weld/er309.html>
- [4] สลิตา เพชรสังข์ และประภาศ เมืองจันทร์บุรี, “โครงสร้างจุลภาคและสมบัติทางกลของชิ้นงานเชื่อมเหล็กกล้าโครเมียม-โมลิบดีนัมเกรด 2.25Cr-1Mo,” การประชุมวิชาการระดับชาติ “วลัยลักษณ์วิจัย” ครั้งที่ 10 วันที่ 27-28 มีนาคม 2561, pp. 1-9. (in Thai)

- [5] วรณา วัฒนจิตศิริ สุรัตน์ ตริยวนพงศ์ และกิตติพงษ์ กิมะพงศ์, “โครงสร้างจุลภาคและการแตกร้าวในโลหะเชื่อมอาร์คโลหะแก๊สคลุมของรอยต่อตัวที่ระหว่างเหล็กกล้า SS400/SUS304,” วิศวกรรมสารฉบับวิจัยและพัฒนา, vol. 29, 2561, pp. 27–36.
- [6] เดช เหมือนขาว ยงยุทธ ดุลยกุล ชัยยุทธ มีงาม และวรวิทย์ ศรีวิทยากุล, “การศึกษาสมบัติทางกลและโครงสร้างทางโลหะวิทยาของรอยเชื่อมเหล็กกล้าโครงสร้าง SS400,” การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 27 วันที่ 24-26 สิงหาคม 2565 จ.เชียงใหม่.
- [7] Hongduo Wang, Kuaishe Wang, Wen Wang, Liying Huang, Pai Peng, Hailiang Yud, “Microstructure and mechanical properties of dissimilar friction stir welded type 304 austenitic stainless steel to Q235 low carbon steel,” Materials Characterization, vol. 115, 2019, pp. 109803.
- [8] Chang’ an Li, Guoliang Qina, Yuansheng Tang, Binggang Zhang, Sanbao Lin, Peihao Geng, “Microstructures and mechanical properties of stainless steel clad plate joint with diverse filler metals,” Journal of Materials Research and Technology, vol. 9, no. 2, 2020, pp. 2522–2534.

การปรับปรุงกระบวนการผลิตชุดเสริมความแข็งแรงแผงหน้าปัดรถยนต์

Improvements in the Manufacturing Processes for Reinforcement Panels of Automotive Dashboards

ภาณุภัฏ สาธวงศ์¹, ภาสวุฒิ กุลชล², ณัฐวุฒิ สมนึก², สุธี คงโคกแฝก³, วรณนิตา นุชคุ้ม³, ภูมิบุญ พลต่าง³,
จิตติวัฒน์ นิธิกาญจนธาร³ และ กนกวรรณ เกริกสูงเนิน^{3*}

¹สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน

²สาขาวิชาวิศวกรรมการผลิต คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน

³สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน

Panuput Satuwong¹, Phatsawut Kuntan², Nanthawut Somnuek², Suthi Khongkhokfaek³, Wannisa Nutkhum³,

Bhoomboon Phontang³, Jittiwat Nithikarnjanatharn³ and Kanokwan Kroeksungnoen^{3*}

¹Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering and Technology,
Rajamangala University of Technology Isan

²Department of Production Engineering, Faculty of Engineering and Technology,
Rajamangala University of Technology Isan

³Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering and Technology,
Rajamangala University of Technology Isan

*Corresponding author Email: kanokwan.ks@gmail.com

(Received: June 10, 2025 / Revised: June 21, 2025 / Accepted: June 23, 2025)

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อปรับปรุงกระบวนการผลิตชุดเสริมความแข็งแรงแผงหน้าปัดรถยนต์ โดยมุ่งเน้นการลดระยะเวลาในการทำงานและต้นทุนการผลิตผ่านการลดกิจกรรมที่ไม่สร้างมูลค่า การศึกษาดำเนินการโดยการวิเคราะห์กระบวนการทำงานด้วยแผนภูมิการไหล แผนภูมิแก้งปลา และการจัดลำดับความสำคัญของปัญหาด้วยวิธี FMEA ก่อนดำเนินการปรับปรุงด้วยหลักการ ECRS และ 7 QC Tools เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการทำงาน ผลการศึกษาพบว่าจำนวนขั้นตอนการทำงานลดลงจาก 53 เหลือ 49 ขั้นตอน โดยการจัดวางตำแหน่งจุดวางชิ้นงานใหม่ช่วยลดการเคลื่อนไหวที่ไม่จำเป็นของพนักงาน เพิ่มความคล่องตัวในการทำงาน และลดความเมื่อยล้า เวลาการผลิตต่อชิ้นลดลงจาก 290.6 เหลือ 274.3 วินาที หรือประมาณ 5.61% และต้นทุนการผลิตลดลงจาก 88,531.2 บาทต่อปี เหลือ 86,420.16 บาทต่อปี คิดเป็น 2.39% ส่งผลให้ลดโอกาสเกิดข้อผิดพลาดและความเมื่อยล้าของพนักงานระหว่างการขนย้าย เพิ่มประสิทธิภาพของสายการผลิตโดยไม่ต้องลงทุนเพิ่มในทรัพยากรใหม่

คำสำคัญ: แผงหน้าปัดรถยนต์, การปรับปรุงกระบวนการผลิต, การลดต้นทุน

Abstract

This research aimed to improve the manufacturing process of the reinforcement assembly for automotive dashboards by focusing on reducing working time and production costs through the elimination of non-value-added activities. The study was conducted by analyzing the workflow using flow process charts, fishbone diagrams, and prioritizing problems with Failure Mode and Effects Analysis (FMEA). Process improvements were then implemented based on the ECRS principle and the 7 QC Tools to enhance operational efficiency. The results showed that the number of work steps was reduced from 53 to 49. By moving the workpiece storage position closer to the operator, unnecessary movements were minimized, operational agility was improved, and worker fatigue was reduced. The production time per unit decreased from 290.6 to 274.3 seconds, representing approximately a 5.61% reduction. Additionally, the production cost decreased from 88,531.2 baht per year to 86,420.16 baht per year, a reduction of 2.39%. This leads to decreased error ratios and staff weariness during transportation, hence increasing production line efficiency without necessitating further investment in new resources.

Keywords: Automotive dashboard, Improving production processes, Reducing costs

1. บทนำ

อุตสาหกรรมยานยนต์เป็นภาคการผลิตที่มีบทบาทสำคัญต่อการขับเคลื่อนเศรษฐกิจไทย โดยเฉพาะในด้านการจ้างงาน การลงทุน และการส่งออกสินค้าไปยังต่างประเทศ ประเทศไทยถือเป็นศูนย์กลางการผลิตยานยนต์ที่สำคัญที่สุดแห่งหนึ่งของภูมิภาคเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ โดยมีสัดส่วนการส่งออกรถยนต์กว่า 70% ของผลผลิตทั้งหมด และสร้างรายได้มากกว่าหลายแสนล้านบาทต่อปี [1-2] อย่างไรก็ตาม แนวโน้มการแข่งขันที่รุนแรงจากผู้ผลิตรายอื่นทั่วโลก การเปลี่ยนแปลงพฤติกรรมของผู้บริโภค และความจำเป็นในการลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม ทำให้อุตสาหกรรมยานยนต์ต้องเร่งปรับตัวสู่กระบวนการผลิตที่มีความยืดหยุ่นและมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น [3] ชิ้นส่วนชุดเสริมความแข็งแรงแผงหน้าปัดรถยนต์ เป็นหนึ่งในองค์ประกอบที่มีความสำคัญด้านโครงสร้างและความปลอดภัยภายในห้องโดยสาร โดยมักผลิตจากโลหะหรือวัสดุผสมซึ่งมีน้ำหนักมาก การจัดการและการเคลื่อนย้ายจึงส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพในการผลิตโดยตรง เช่น ความสูญเสียจากการเคลื่อนไหวที่ไม่จำเป็นของพนักงาน ส่งผลให้รอบเวลาการผลิตยืดเยื้ออีกทั้งเกิดต้นทุนที่ไม่จำเป็น [4-5]

ด้วยเหตุนี้ การปรับปรุงกระบวนการผลิตชุดเสริมความแข็งแรงจึงมีความจำเป็นอย่างยิ่ง ไม่ว่าจะเป็นการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีใหม่ในการเชื่อมประกอบ หรือการใช้เครื่องมือทางวิศวกรรมอุตสาหการนำมาประยุกต์ใช้ในสายการผลิต เช่น ECRS ในการปรับปรุงกระบวนการผลิตหรือกระบวนการทำงาน หรือ 7 QC Tools มาใช้ในการวิเคราะห์และแก้ไขปัญหาที่เกิดขึ้นอย่างเป็นระบบ [6] งานวิจัยล่าสุดที่แสดงให้เห็นถึงความสำเร็จของการปรับปรุงกระบวนการผลิตในอุตสาหกรรมยานยนต์ เช่น งานของ Sidhu และ Chatha (2025) [7] ได้ประยุกต์ใช้แนวทางไคเซน ร่วมกับ ECRS และ 7 QC Tools ในสายการผลิตชิ้นส่วนรถยนต์ในอินเดียตอนเหนือ Biadacz (2024) [8] ที่ศึกษาการใช้ Kaizen Costing และ ECRS ใน SME ที่ผลิตชิ้นส่วนประกอบรถยนต์ iu et al. (2025) [9] ที่ศึกษาการใช้ Digital Twin ร่วมกับ ECRS และ 7 QC Tools ในสายการผลิตระบบขับเคลื่อน รวมทั้งสุภาพร แสนกุล และคณะ (2568) [10] แสดงให้เห็นถึงการประยุกต์ใช้ ECRS ร่วมกับ 7 QC Tools ในการปรับปรุงสายการผลิตของญี่ปุ่นในอุตสาหกรรมยานยนต์ จากงานวิจัยข้างต้นแสดงให้เห็นว่าการใช้หลัก ECRS และ 7 QC Tools ไม่เพียงเป็นแนวคิดทางทฤษฎีเท่านั้นแต่สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในภาคปฏิบัติได้จริง

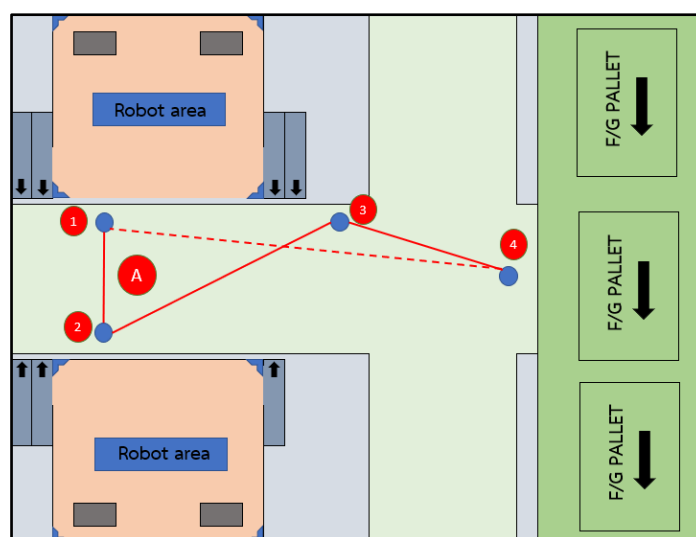
ช่วยลดขั้นตอนที่ไม่จำเป็น ลดระยะเวลาและต้นทุน เพิ่มความคล่องตัวของพนักงาน ลดความผิดพลาด และยกระดับประสิทธิภาพของกระบวนการผลิตอย่างเป็นระบบและยั่งยืน โดยเฉพาะในอุตสาหกรรมยานยนต์ที่มีความซับซ้อนด้านสายการผลิต

บริษัท ทรินิตี้ศึกษาเป็นหนึ่งในผู้ผลิตชิ้นส่วนหน้าปัดรถยนต์ของประเทศไทย ชูจุดเสริมความแข็งแกร่งแห่งหน้าปัดรถยนต์เป็นชิ้นส่วนสำคัญที่ส่งผลต่อความแข็งแรงโครงสร้างและความปลอดภัยภายในห้องโดยสาร ซึ่งจากการเข้าไปศึกษาในสายการผลิตจริง พบว่ามีความสูญเสียเปล่าด้านการเคลื่อนไหวของพนักงาน และการจัดวางตำแหน่งชิ้นงานที่ไม่เหมาะสม ส่งผลให้รอบเวลาการผลิตยืดเยื้อและต้นทุนสูงกว่าที่ควรจะเป็น หากสามารถปรับปรุงให้มีประสิทธิภาพมากขึ้นได้ จะช่วยยกระดับความสามารถในการแข่งขันของผู้ผลิตให้สูงขึ้น เพื่อแก้ไขปัญหานี้เหล่านักวิจัยจึงสนใจศึกษาการปรับปรุงกระบวนการผลิตจุดเสริมความแข็งแกร่งแห่งหน้าปัดรถยนต์ เพื่อลดระยะเวลาการทำงาน ลดความสูญเสียเปล่า ลดต้นทุนการผลิต และเพิ่มประสิทธิภาพโดยรวมของสายการผลิต โดยไม่จำเป็นต้องลงทุนเพิ่มเติมในเครื่องจักรหรือทรัพยากรใหม่

2. วิธีการดำเนินงาน

2.1 ศึกษาขั้นตอนและกระบวนการทำงาน

การศึกษาและเก็บรวบรวมข้อมูลกระบวนการผลิตจุดเสริมความแข็งแกร่งแห่งหน้าปัดมีผังกระบวนการผลิต รูปที่ 1 มีพนักงานปฏิบัติงาน 1 คน คือ พนักงาน A เส้นสีแดงแสดงเส้นทางการเดินของพนักงาน A และเส้นประคือเส้นทางการเดินกลับไปจุดเริ่มต้นของกระบวนการผลิต ดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 แผนผังกระบวนการผลิต (ก่อนปรับปรุง)

จากรูปที่ 1 แสดงขั้นตอนและกระบวนการทำงานของพนักงาน A โดยมีรายละเอียดดังนี้ พนักงาน A จะเริ่มจากการหยิบชิ้นงานและเดินไปยังจุดกระบวนการผลิตที่ 1 เพื่อเริ่มดำเนินการผลิต และรอรับชิ้นงาน หลังจากนั้นจะหยิบชิ้นงานดังกล่าวและเดินไปยังกระบวนการผลิตที่ 2 เพื่อดำเนินการผลิตในขั้นตอนถัดไป เมื่อได้รับชิ้นงานจากกระบวนการนี้ พนักงาน A จะเดินไปยังจุดที่ 3 เพื่อตรวจสอบคุณภาพของชิ้นงาน และนำชิ้นงานที่ผ่านการตรวจสอบไปจัดเก็บไว้ที่จุดที่ 4

2.2 การเก็บรวบรวมข้อมูล

การเก็บข้อมูลขั้นตอนกระบวนการผลิต การทำงานของพนักงานเริ่มจากการจับเวลาการทำงานของพนักงานในแต่ละขั้นตอน โดยใช้เครื่องมือจับเวลา เพื่อบันทึกเวลาเริ่มต้น และสิ้นสุดของกระบวนการ ข้อมูลที่ได้จะถูกบันทึกในฟอร์มระบุเวลา และขั้นตอนการทำงาน เพื่อบันทึกค่าเฉลี่ย และใช้ในการปรับปรุงกระบวนการผลิตต่อไป ดังรูปที่ 2 ในการศึกษากระบวนการทำงาน และกำหนดเวลา อ้างอิงจากเวลามาตรฐานที่กำหนดโดยบริษัทกรณีศึกษา ผ่านการประชุมร่วมกับจากหลายฝ่าย เพื่อหาค่าที่เหมาะสมในแต่ละกระบวนการ

คำอธิบาย	ระยะทาง (เมตร)	เวลา (วินาที)	สัญลักษณ์					หมายเหตุ
			○	➡	D	□	▽	
1 Unload SA 55338- , SA 55334-,Part P#1 to Hanger	-	12	●	➡	D	□	▽	พนักงาน = 1 คน
2 Walk to stand component	-	1.5	○	➡	D	□	▽	พนักงาน = 1 คน
3 หยิบชิ้นงาน 55334-,55376-,55371-,55339-,55335-	-	6	●	➡	D	□	▽	พนักงาน = 1 คน
4 เดินไปยัง Process ประกอบ1	-	1.5	○	➡	D	□	▽	พนักงาน = 1 คน
5 เชื้อชิ้นงาน 55334-,55376-,55371-,55339-,55335- + H/S	-	22	●	➡	D	□	▽	พนักงาน = 1 คน
6 เดินไปยังสแตนด์ของชิ้นส่วนประกอบ	-	1.5	○	➡	D	□	▽	พนักงาน = 1 คน
7 หยิบชิ้นงาน SA 55334 ,55462-,55344-,	-	3	●	➡	D	□	▽	พนักงาน = 1 คน
8 เดินไปยัง Process ประกอบ1	-	1.5	○	➡	D	□	▽	พนักงาน = 1 คน
9 เชื้อชิ้นงาน SA 55334 ,55462-,55344-,	-	9	●	➡	D	□	▽	พนักงาน = 1 คน
10 เดินไปยังสแตนด์ของชิ้นส่วนประกอบ	-	1.5	○	➡	D	□	▽	พนักงาน = 1 คน
11 หยิบชิ้นงาน 55121-,55366-	-	3	●	➡	D	□	▽	พนักงาน = 1 คน
12 เดินไปยัง Process ประกอบ1	-	1.5	○	➡	D	□	▽	พนักงาน = 1 คน
13 เชื้อชิ้นงาน 55121-,55366-	-	6	●	➡	D	□	▽	พนักงาน = 1 คน
14 เดินไปยังสแตนด์ของชิ้นส่วนประกอบ	-	1.5	○	➡	D	□	▽	พนักงาน = 1 คน
15 หยิบชิ้นงาน 55331-,55332-	-	6	●	➡	D	□	▽	พนักงาน = 1 คน
16 เดินไปยัง Process ประกอบ1	-	1.5	○	➡	D	□	▽	พนักงาน = 1 คน
17 เชื้อชิ้นงาน 55331-,55332- + H/S	-	12	●	➡	D	□	▽	พนักงาน = 1 คน
18 ปิดสวิตช์ 1 & รอกเคลื่อนที่	-	1.4	○	➡	●	□	▽	พนักงาน = 1 คน
19 เดินไปยังสแตนด์ของชิ้นส่วนประกอบ	-	1.5	○	➡	D	□	▽	พนักงาน = 1 คน
20 หยิบชิ้นงาน SA 55339-,SA 55338-,55428-,55427-	-	8	●	➡	D	□	▽	พนักงาน = 1 คน
21 เดินไปยัง Process ประกอบ1	-	1.5	○	➡	D	□	▽	พนักงาน = 1 คน
22 เชื้อชิ้นงาน SA 55339-,SA 55338-,55428-,55427-	-	12	●	➡	D	□	▽	พนักงาน = 1 คน
23 ปิดสวิตช์ 2 ไรบอททำงาน ประกอบที่ Process 1	-	1	●	➡	D	□	▽	พนักงาน = 1 คน
24 ไรบอทเชื่อมอัตโนมัติ 64 จุด	-		●	➡	D	□	▽	พนักงาน = 1 คน
25 เดินไปยัง Process ถัดไป	-		○	➡	D	□	▽	พนักงาน = 1 คน
26 อันโหลด SA 55125-	-	6	●	➡	D	□	▽	พนักงาน = 1 คน
27 เดินไปยังสแตนด์ของชิ้นส่วนประกอบ	-	1.5	○	➡	D	□	▽	พนักงาน = 1 คน
28 หยิบชิ้นงาน 55125-,55341-,55342-,55337-	-	10	●	➡	D	□	▽	พนักงาน = 1 คน
29 เดินไปยัง Process ประกอบ2	-	1.5	○	➡	D	□	▽	พนักงาน = 1 คน
30 เชื้อชิ้นงาน 55125-,55341-,55342-,55337-	-	14	●	➡	D	□	▽	พนักงาน = 1 คน
31 เดินไปยังสแตนด์ของชิ้นส่วนประกอบ	-	1.5	○	➡	D	□	▽	พนักงาน = 1 คน
32 หยิบชิ้นงาน 55386-,55326-,55397-,55369-	-	10	●	➡	D	□	▽	พนักงาน = 1 คน
33 เดินไปยัง Process ประกอบ2	-	1.5	○	➡	D	□	▽	พนักงาน = 1 คน
34 เชื้อชิ้นงาน 55386-,55326-,55397-,55369-	-	14	●	➡	D	□	▽	พนักงาน = 1 คน
35 เดินไปยังสแตนด์ของชิ้นส่วนประกอบ	-	1.5	○	➡	D	□	▽	พนักงาน = 1 คน

รูปที่ 2 แผนภูมิกระบวนการไหลก่อนปรับปรุง

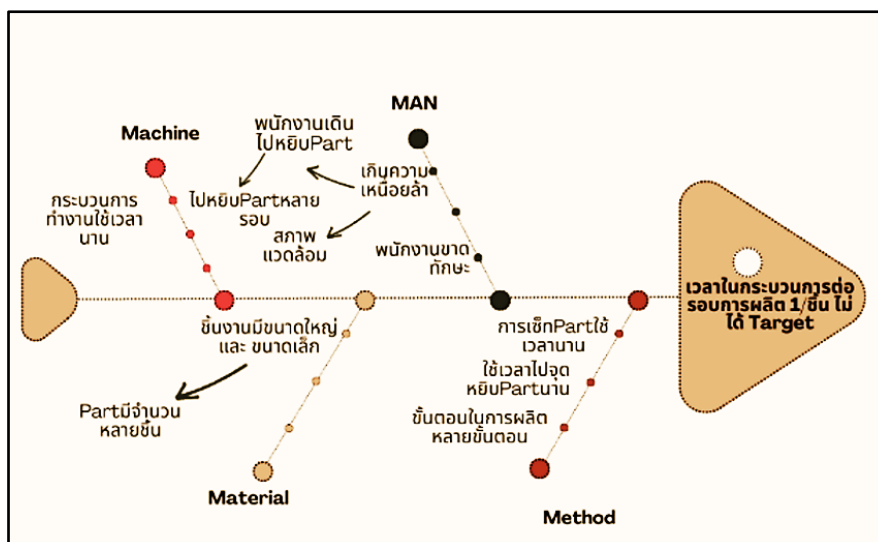
คำอธิบาย	ระยะทาง (เมตร)	เวลา (วินาที)	สัญลักษณ์					หมายเหตุ
			○	➡	D	□	▽	
36 หยิบชิ้นงาน 55321-,55365-,5538A-,55345-	-	10	●	➡	D	□	▽	พนักงาน = 1 คน
37 เดินไปยัง Process ประกอบ2	-	1.5	○	➡	D	□	▽	พนักงาน = 1 คน
38 เชื้อชิ้นงาน 55321-,55365-,5538A-,55345-	-	14	●	➡	D	□	▽	พนักงาน = 1 คน
39 ปิดสวิตช์ 1 แคมป์ & ยก	-	1.2	●	➡	D	□	▽	พนักงาน = 1 คน
40 เดินไปยังสแตนด์ของชิ้นส่วนประกอบ	-	1.5	○	➡	D	□	▽	พนักงาน = 1 คน
41 หยิบชิ้นงาน 55325-,SA 55125-	-	5	●	➡	D	□	▽	พนักงาน = 1 คน
42 เดินไปยัง Process ประกอบ2	-	1.5	○	➡	D	□	▽	พนักงาน = 1 คน
43 เชื้อชิ้นงาน 55325-,SA 55125- + H/S 55337-	-	11	●	➡	D	□	▽	พนักงาน = 1 คน
44 เดินไปยังสแตนด์ของชิ้นส่วนประกอบ	-	1.5	●	➡	D	□	▽	พนักงาน = 1 คน
45 หยิบชิ้นงาน SA 55343-,55324-	-	5	●	➡	D	□	▽	พนักงาน = 1 คน
46 เดินไปยัง Process ประกอบ2	-	1.5	○	➡	D	□	▽	พนักงาน = 1 คน
47 เชื้อชิ้นงาน SA 55343-,55324-	-	7	●	➡	D	□	▽	พนักงาน = 1 คน
48 ปิดสวิตช์ 2 โรบอททำงาน ประกอบที่ Process 2	-	1	●	➡	D	□	▽	พนักงาน = 1 คน
49 โรบอทเชื่อมอัตโนมัติ 63 จุด	-		●	➡	D	□	▽	พนักงาน = 1 คน
50 เดินไปยัง Process ถัดไป	-		○	➡	D	□	▽	พนักงาน = 1 คน
51 เช็คความถูกต้องของงาน	-	35	●	➡	D	□	▽	พนักงาน = 1 คน
52 เช็คชุดเชื่อม	-	10	●	➡	D	□	▽	พนักงาน = 1 คน
53 เดินไปโรงงานที่จุดพักงาน	-	6	○	➡	D	□	▽	พนักงาน = 1 คน
รวม	0	290.6						

รูปที่ 2 แผนภูมิกระบวนการไหลก่อนปรับปรุง (ต่อ)

จากรูปที่ 2 แสดงลำดับการเคลื่อนที่ และการปฏิบัติงานของพนักงานในกระบวนการผลิตชุดเสริมความแข็งแรงแผ่นหน้าปัดรถยนต์ โดยมีการจับเวลาในแต่ละขั้นตอนอย่างละเอียดเพื่อวิเคราะห์ระยะเวลาในการทำงานของแต่ละขั้นตอน ซึ่งข้อมูลดังกล่าวมีความสำคัญในการระบุปัญหา และความสูญเสียที่อาจเกิดขึ้นในกระบวนการผลิต เพื่อใช้เป็นฐานในการวิเคราะห์ และปรับปรุงประสิทธิภาพการทำงาน โดยกระบวนการผลิตที่ 1 พนักงาน A มีจำนวน 53 ขั้นตอนใช้เวลา 290.6 วินาที ข้อมูลเชิงเปรียบเทียบนี้สามารถนำไปวิเคราะห์ในแผนภูมิแกงปลา เพื่อหาแนวโน้มของสาเหตุที่ทำให้เกิดความล่าช้า ความไม่สมดุลของภาระงาน หรือปัญหาในสายการผลิตโดยพิจารณาจากปัจจัย เช่น เครื่องจักร วัสดุ วิธีการ และสภาพแวดล้อม

2.3 วิเคราะห์และหาสาเหตุของปัญหา

การวิเคราะห์หาสาเหตุของปัญหาด้วยแผนภูมิแกงปลา ซึ่งเป็นหนึ่งใน 7 QC Tools ที่ได้รับความนิยมอย่างแพร่หลายในงานด้านการปรับปรุงคุณภาพและเพิ่มประสิทธิภาพ ซึ่งเป็นวิธีการวิเคราะห์เชิงระบบที่เน้นระบุสาเหตุรากของปัญหา โดยใช้หลัก 6M คือ Man, Machine, Material, และ Method ในการวิเคราะห์ครั้งนี้ คณะผู้วิจัยและทีมงานของบริษัทกรณีศึกษาได้ร่วมกันระดมสมอง (Brainstorming) เพื่อรวบรวมปัจจัยที่อาจมีผลต่อปัญหาที่พบในกระบวนการผลิต โดยแต่ละหมวดหมู่ได้ทำการแยกแยะและวิเคราะห์อย่างละเอียด ดังรูปที่ 3



รูปที่ 3 แผนภูมิแก๊งปลาวิเคราะห์สาเหตุและปัญหา

2.3.1 ด้านผู้ปฏิบัติงาน เกิดจากความเมื่อยล้าในการปฏิบัติงาน จากการวิเคราะห์พบว่า มีสองปัจจัยหลักที่ส่งผลให้พนักงานเกิดความเมื่อยล้า ได้แก่ สภาพอากาศ เนื่องจากภายในโรงงานมีอุณหภูมิสูงจากการทำงานของเครื่องจักรมีควันจากกระบวนการเชื่อมด้วยหุ่นยนต์ ซึ่งส่งผลให้พนักงานต้องสวมใส่อุปกรณ์ป้องกันทางเดินหายใจ ทำให้หายใจไม่สะดวกในส่วนการเดินไปหยิบชิ้นส่วน พบว่าพนักงานต้องเดินไปยังจุดจัดเก็บชิ้นส่วนเพื่อหยิบชิ้นงานมาใช้ในการกระบวนการที่ 1 และกระบวนการที่ 2 ซึ่งต้องเดินไป-กลับหลายรอบ ส่งผลให้เกิดความเหนื่อยล้า

2.3.2 ด้านวัสดุ พบว่าชิ้นงานที่ผลิตในสายการผลิตประกอบด้วยหลายชิ้นส่วน ซึ่งบางชิ้นส่วนมีขนาดเล็กแต่เมื่อประกอบรวมกันแล้วจะมีขนาดใหญ่และมีน้ำหนักมาก เพิ่มความยุ่งยากในการขนย้ายชิ้นงานส่งผลให้เพิ่มโอกาสเกิดความผิดพลาดระหว่างการขนย้ายมากขึ้น อีกทั้งพนักงานต้องใช้แรงมากขึ้นในการหยิบจับ ซึ่งส่งผลต่อความเมื่อยล้าของพนักงาน

2.3.3 ด้านกระบวนการผลิต พบว่าจำนวนชิ้นส่วนที่ต้องจัดเตรียมการประกอบชิ้นงานต้องใช้ชิ้นส่วนจำนวนมาก ส่งผลให้กระบวนการจัดเตรียมชิ้นส่วนใช้เวลานานมีขั้นตอนการผลิตที่ซับซ้อนเนื่องจากชิ้นงานประกอบด้วยหลายชิ้นส่วน จึงต้องมีการตรวจสอบความถูกต้องของชิ้นงานให้ตรงตามข้อกำหนดของลูกค้า ส่งผลให้ต้องเพิ่มขั้นตอนการตรวจสอบในกระบวนการผลิตระยะเวลาในการไปหยิบชิ้นส่วนพนักงานต้องเดินไปยังจุดจัดเก็บชิ้นส่วนเพื่อหยิบชิ้นงานมาใช้ในการกระบวนการที่ 1 และกระบวนการที่ 2 ซึ่งจุดจัดเก็บอยู่ห่างจากพื้นที่ปฏิบัติงาน ส่งผลให้ต้องใช้เวลามากขึ้น

2.3.4 ด้านเครื่องจักร พบว่าระยะเวลาในการทำงานของเครื่องจักร มีเวลานานเนื่องจากกระบวนการผลิตใช้วิธีการเชื่อมชิ้นส่วนเข้าด้วยกัน ซึ่งเป็นการเชื่อมแบบแนวต่อเนื่อง ทำให้ใช้เวลานาน ส่งผลให้กระบวนการทำงานโดยรวมมีระยะเวลายาวนานขึ้น

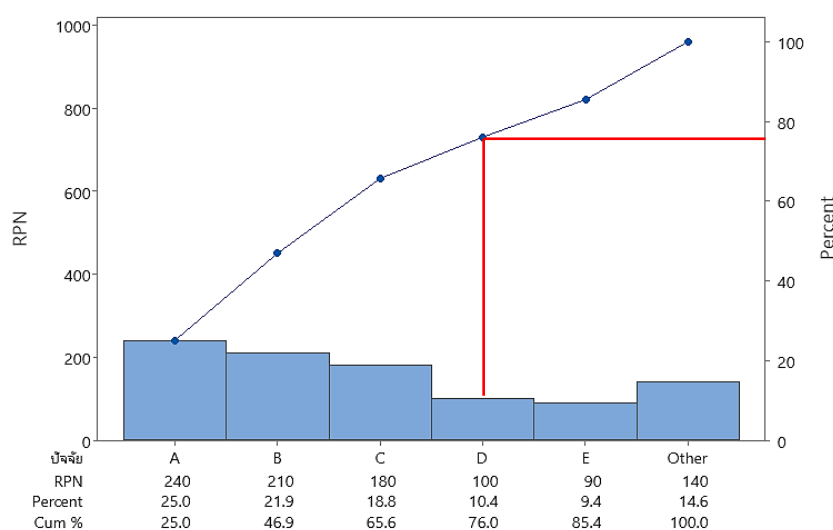
2.4 จัดลำดับความสำคัญของปัญหา

จากที่กล่าวมาข้างต้นปัญหาและสาเหตุที่ทำให้ระยะเวลาในกระบวนการต่อรอบการผลิตหนึ่งชิ้นไม่เป็นไปตามเป้าหมาย เมื่อระบุสาเหตุของปัญหา จึงดำเนินการจัดลำดับความสำคัญของปัญหาโดยใช้การวิเคราะห์ข้อบกพร่องและผลกระทบ (FMEA) ซึ่งจะประเมินแต่ละปัญหาใน 3 ด้าน ได้แก่ ความรุนแรง (S) โอกาส (O) และการตรวจจับ (D) ซึ่งระดับคะแนนในการประเมินแต่ละด้านกำหนดอยู่ในช่วง 1 - 10 สำหรับจัดลำดับความสำคัญของปัญหา [6] ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 การจัดลำดับความสำคัญหลักสาเหตุของปัญหา

สาเหตุของปัญหา	ระดับคะแนนความสำคัญ				
	ความรุนแรง (S)	โอกาส (O)	การตรวจจับ (D)	RPN	ลำดับ
(A) ใช้เวลาไปจุดหยิบ Part นาน	8	5	6	240	1
(B) เกิดความเมื่อยล้า	7	5	6	210	2
(C) ขั้นตอนในการผลิตหลายขั้นตอน	5	4	5	100	4
(D) ชิ้นงานมีขนาดใหญ่ และขนาดเล็ก	6	5	6	180	3
(E) กระบวนการทำงานใช้เวลามาก	5	3	4	60	7
(F) การเซ็ท Part ใช้เวลานาน	6	3	5	90	5
(G) พนักงานขาดทักษะ	5	4	4	80	6

จากตารางที่ 1 ปัญหาที่มีค่า RPN สูงสุด คือ (A) ใช้เวลาไปจุดหยิบ Part นาน โดยมีค่า RPN เท่ากับ 240 รองลงมา คือ (B) เกิดความเมื่อยล้า มีค่า RPN เท่ากับ 210 และ (D) ชิ้นงานมีขนาดใหญ่ และขนาดเล็ก มีค่า RPN เท่ากับ 180 ในส่วนของปัญหาอื่น ๆ มีระดับคะแนน RPN รองลงมา แผนภูมิพาเรโต (Pareto Diagram) จะถูกนำมาใช้เพื่อจัดลำดับลำดับความสำคัญของปัญหาที่ส่งผลกระทบมากที่สุด ตามกฎ 80 : 20 โดยเรียงจากซ้ายมือไปขวามือ ดังรูปที่ 4



รูปที่ 4 แผนภาพพาเรโตวิเคราะห์ลำดับสาเหตุปัญหา

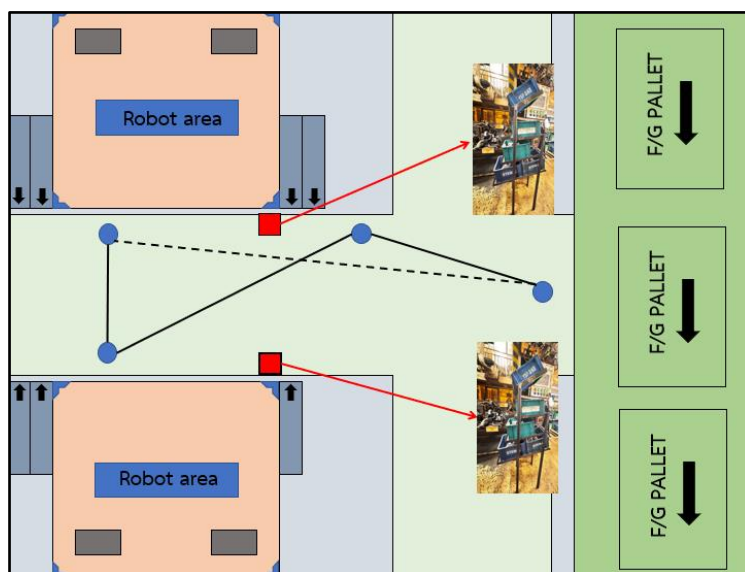
จากรูปที่ 4 การระบุปัจจัยหลักด้วยแผนภูมิพาเรโต (Pareto Diagram) ช่วยให้สามารถมุ่งเน้นการแก้ไขที่สำคัญ โดยไม่ต้องปรับกระบวนการทั้งหมด ส่งผลให้สามารถออกแบบแนวทางแก้ไขที่เฉพาะเจาะจงได้ ดังนั้นการศึกษานี้หลักการ ECRS จะถูกนำมาประยุกต์ใช้เพื่อแก้ไขสาเหตุที่มีค่า RPN สูงที่สุดก่อน ได้แก่

1. ใช้เวลาไปจุดหยิบ Part นาน พบว่าพนักงานต้องเดินไปหยิบชิ้นงาน เพื่อนำมาทำความสะอาดชิ้นงาน ทำให้เวลาในการเดินหยิบนานมากขึ้น และเดินไปกลับหลายรอบเพื่อหยิบชิ้นงาน วิธีแก้ไขโดยกำหนดตำแหน่งจุดวางชิ้นงานใหม่
2. พนักงานเกิดความเมื่อยล้า พบว่าเป็นสาเหตุต่อเนื่องจากหัวข้อปัญหาที่กล่าวข้างต้น ซึ่งพนักงานจำเป็นต้องเดินเพื่อไปหยิบ Part หลายรอบ วิธีแก้ไขโดยกำหนดตำแหน่งจุดวางชิ้นงานใหม่
3. ชิ้นงานมีขนาดใหญ่ และขนาดเล็ก พบว่าชิ้นงานมีส่วนประกอบหลายส่วน โดยแต่ละส่วนมีขนาดที่หลากหลาย วิธีการแก้ไขโดยการออกแบบชิ้นวางชิ้นงาน เพื่อให้ง่ายต่อการหยิบจับ
4. ขั้นตอนในการผลิตหลายขั้นตอน พบว่าต้องประกอบชิ้นงานย่อยหลายชิ้นในลำดับที่ต่อเนื่องกันส่งผลต่อเวลาในการผลิตและความเสี่ยงในการเกิดข้อผิดพลาด อีกทั้งยังเพิ่มภาระทางกายภาพให้กับพนักงาน ซึ่งอาจนำไปสู่ความเมื่อยล้าและคุณภาพงานที่ไม่สม่ำเสมอ วิธีแก้ไขโดยจำกัดขั้นตอนที่ไม่จำเป็น และรวมขั้นตอนบางขั้นตอนเข้าด้วยกัน

3. ผลการดำเนินงาน

3.1 ผลการจัดตำแหน่งจุดวางชิ้นงาน

การปรับลดจำนวนจุดพักและเส้นทางขนย้ายผล โดยมุ่งเน้นการจัดเส้นทางขนย้ายให้สั้นและตรงขึ้นการเพิ่มจุดพัก/จุดรับส่งที่มีประสิทธิภาพ และการจัดวางพื้นที่จัดเก็บวัสดุให้อยู่ใกล้กระบวนการมากขึ้น ดังรูปที่ 5



รูปที่ 5 แผนผังการผลิต (หลังปรับปรุง)

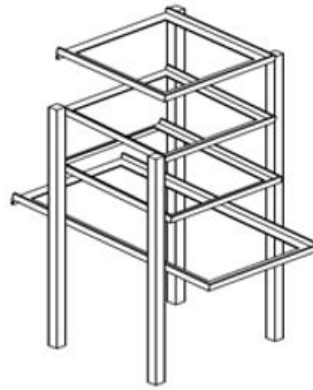
จากรูปที่ 5 หลังจากปรับปรุงตำแหน่งจุดวางชิ้นงานใหม่ ซึ่งมีการนำเอาอุปกรณ์วางชิ้นมาติดตั้งใกล้กับจุดผลิตมากขึ้น ช่วยลดโอกาสเกิดอุบัติเหตุจากการขนย้ายชิ้นงานและช่วยลดความเมื่อยล้าของพนักงานจากการเดินไปหยิบชิ้นงานหลายรอบ

3.2 ผลการออกแบบอุปกรณ์วางชิ้นงาน

ผลการออกแบบอุปกรณ์ใหม่ในรูปแบบของชิ้นวางชิ้นงานแบบ 3 D ที่สามารถจัดเก็บชิ้นงานแต่ละประเภทตามลักษณะขนาดได้อย่างเป็นระบบและสะดวกต่อการหยิบจับ โดยยึดหลักการของ ECRS ในการลดความสูญเสีย อีกทั้งยังช่วยเพิ่มความคล่องตัวและลดระยะเวลาทำงานให้สั้นลง ดังรูปที่ 6



(ก) ชั้นวางชิ้นงานเดิม



(ข) ชั้นวางชิ้นงานแบบใหม่

รูปที่ 6 แบบชั้นวางชิ้นงานใหม่ 3 D

จากรูปที่ 6 แบบชั้นวางชิ้นงานแบบใหม่ที่ถูกออกแบบสำหรับรองรับชิ้นงานหลากหลายขนาด ตัวโครงสร้างทำจากเหล็กเพื่อเพิ่มความแข็งแรงสามารถรองรับการจัดวางชิ้นงานได้หลายระดับ เพิ่มพื้นที่ในการจัดเก็บโดยไม่ใช้พื้นที่แนวราบมากเกินไป ช่วยให้การจัดการชิ้นงานมีระเบียบและง่ายต่อการตรวจสอบเพิ่มประสิทธิภาพการจัดเก็บและการหยิบใช้ชิ้นงาน

3.3 ผลการปรับปรุงกระบวนการผลิต

ผลลัพธ์การดำเนินการปรับปรุงกระบวนการผลิตด้วยแผนภูมิกระบวนการไหล (Flow Process Chart) พบว่ามีการลดจำนวนขั้นตอนที่ไม่จำเป็นลง และรวมขั้นตอนที่สามารถทำร่วมกัน ส่งผลให้กระบวนการผลิตมีความคล่องตัว ลดความซ้ำซ้อนของงานย่อยหลายจุด ลำดับขั้นตอนเป็นไปตามลำดับการผลิตที่ ดังรูปที่ 7

คำอธิบาย	ระยะทาง (เมตร)	เวลา (วินาที)	สัญลักษณ์					หมายเหตุ
			○	➡	D	□	▽	
1 อันโบลัด SA 55339-	-	5	●	➡	D	□	▽	พนักงาน = 1 คน
2 อันโบลัด SA 55333-	-	5	●	➡	D	□	▽	พนักงาน = 1 คน
3 อันโบลัด SA 55391- , SA 55392-	-	8	●	➡	D	□	▽	พนักงาน = 1 คน
4 เดินไปยังสแตนด์ของชิ้นส่วนประกอบ	-	1.5	○	➡	D	□	▽	พนักงาน = 1 คน
5 หยิบชิ้นงาน 55333-,55377-,553712-,55338-,55335-	-	12	●	➡	D	□	▽	พนักงาน = 1 คน
6 เดินไปยัง Process ประกอบ1	-	1.5	○	➡	D	□	▽	พนักงาน = 1 คน
7 เชื้อชิ้นงาน 55333-,55377-,55372-,55338-,55335- + H	-	18	●	➡	D	□	▽	พนักงาน = 1 คน
8 เดินไปยังสแตนด์ของชิ้นส่วนประกอบ	-	1.5	○	➡	D	□	▽	พนักงาน = 1 คน
9 หยิบชิ้นงาน 55392-,55373-,55391-,55354-	-	8	●	➡	D	□	▽	พนักงาน = 1 คน
10 เดินไปยัง Process ประกอบ1	-	1.5	○	➡	D	□	▽	พนักงาน = 1 คน
11 เชื้อชิ้นงาน 55392-,55373-,55391-,55354-	-	12	●	➡	D	□	▽	พนักงาน = 1 คน
12 เดินไปยังสแตนด์ของชิ้นส่วนประกอบ	-	1.5	○	➡	D	□	▽	พนักงาน = 1 คน
13 หยิบชิ้นงาน S/A 55391-,55392-,55333-,55323-	-	8	●	➡	D	□	▽	พนักงาน = 1 คน
14 เดินไปยัง Process ประกอบ1	-	1.5	○	➡	D	□	▽	พนักงาน = 1 คน
15 เชื้อชิ้นงาน S/A 55391-,55392-,55333-,55323-	-	12	●	➡	D	□	▽	พนักงาน = 1 คน
16 เดินไปยัง Process ถัดไป	-		○	➡	D	□	▽	พนักงาน = 1 คน
17 อันโบลัด SA 55343-	-	6	●	➡	D	□	▽	พนักงาน = 1 คน
18 อันโบลัด ชิ้นงาน F/G 55330-0A070	-	8	●	➡	D	□	▽	พนักงาน = 1 คน
19 เดินไปยัง Hangker SA ประกอบ #1 55330-0A070	-	1.5	○	➡	D	□	▽	พนักงาน = 1 คน
20 หยิบชิ้นงาน SA Assy # 1 55330-0A070	-	5	●	➡	D	□	▽	พนักงาน = 1 คน
21 เดินไปยัง Process ประกอบ2	-	1.5	○	➡	D	□	▽	พนักงาน = 1 คน

รูปที่ 7 แผนภูมิกระบวนการไหลหลังปรับปรุง

คำอธิบาย	ระยะทาง (เมตร)	เวลา (วินาที)	สัญลักษณ์					หมายเหตุ
			○	⇒	D	□	▽	
22 เชื้อชิ้นงาน SA Assy # 1 55330-0A070	-	8	●	⇒	D	□	▽	พนักงาน = 1 คน
23 เดินไปยังสแตนด์ของชิ้นส่วนประกอบ	-	1.5	○	⇒	D	□	▽	พนักงาน = 1 คน
24 หยิบชิ้นงาน 55343-,55335-,55387-	-	6	●	⇒	D	□	▽	พนักงาน = 1 คน
25 เดินไปยัง Process ประกอบ2	-	1.5	○	⇒	D	□	▽	พนักงาน = 1 คน
26 เชื้อชิ้นงาน 55343-,55335-,55387-H/S	-	11.3	●	⇒	D	□	▽	พนักงาน = 1 คน
27 เดินไปยังสแตนด์ของชิ้นส่วนประกอบ	-	1.5	○	⇒	D	□	▽	พนักงาน = 1 คน
28 หยิบชิ้นงาน 55322-,55463-,55346-	-	6	●	⇒	D	□	▽	พนักงาน = 1 คน
29 เดินไปยัง Process ประกอบ2	-	1.5	○	⇒	D	□	▽	พนักงาน = 1 คน
30 เชื้อชิ้นงาน 55322-,55463-,55346-	-	9	●	⇒	D	□	▽	พนักงาน = 1 คน
31 เดินไปยัง Process ถัดไป	-		○	⇒	D	□	▽	พนักงาน = 1 คน
32 ตรวจสอบเช็คครีสมั้วกลม	-	109	●	⇒	D	□	▽	พนักงาน = 1 คน
รวม	0	274.3						

รูปที่ 7 แผนภูมิกระบวนการไหลหลังปรับปรุง (ต่อ)

จากรูปที่ 7 กระบวนการผลิตชุดเสริมความแข็งแรงแผงหน้าปัดหลังปรับปรุง พบว่ามีการลดความซ้ำซ้อนของการเคลื่อนที่ หลายขั้นตอนของการขนย้ายลดลงและถูกรวมให้สั้นลง มีการจัดลำดับการทำงานที่เป็นระบบ การเดินของพนักงานเป็นลำดับต่อเนื่อง ไม่มีการย้อนกลับ มีการจัดเก็บชิ้นงานไว้ในชั้นวางชัดเจน เวลารวมในการผลิตลดลงเหลือ 274.3 วินาที จากเวลาการผลิตก่อนปรับปรุง 290.6 วินาที

3.3 ผลการวิเคราะห์เปรียบเทียบผล

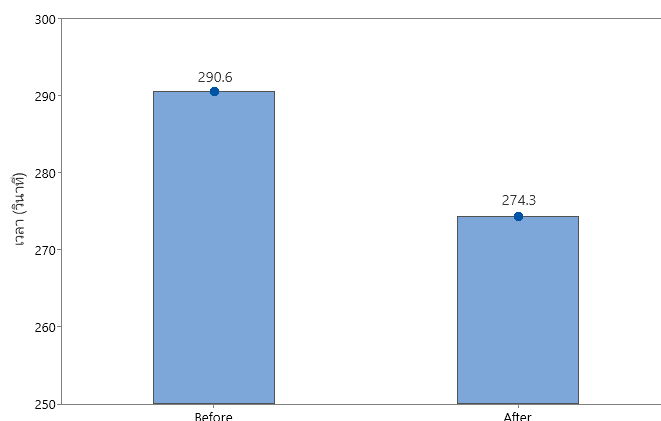
3.3.1 ผลการเปรียบเทียบเวลาการผลิตต่อชิ้น

ผลการเปรียบเทียบเวลาการผลิตชิ้นงานก่อนและหลังปรับปรุง ซึ่งการลดเวลาการผลิตดังกล่าว สะท้อนให้เห็นถึงประสิทธิภาพของการวิเคราะห์และปรับปรุงกระบวนการทำงาน โดยเฉพาะการจัดตำแหน่งจุดวางชิ้นงานที่ถูกย้ายมาอยู่ด้านหน้าของกระบวนการ ทำให้พนักงานสามารถหยิบจับชิ้นงานได้สะดวก ลดระยะทางและเวลาในการเดิน ลดขั้นตอนการวางชิ้นงาน ซึ่งช่วยลดเวลาสูญเสียได้ผลการเปรียบเทียบก่อนและหลังปรับปรุงสรุปไว้ในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ผลการปรับปรุงกระบวนการไหลของพนักงาน A

แผนภูมิกระบวนการไหลของงาน REINFORCEMENT ASSY, INSTRUMENT PANEL RHD			
Activity	ก่อนปรับปรุง	หลังปรับปรุง	ลดลง
ปฏิบัติงาน ○	30	2	1
เคลื่อนย้าย ⇒	22	19	3
ล่าช้า/รอคอย D	1	1	-
ตรวจสอบ □	-	-	-
จัดเก็บ ▽	-	-	-
รวมสัญลักษณ์	53	49	4
จำนวนพนักงาน	1	1	-
รวมเวลา (วินาที)	290.6	274.3	16.3

จากตารางที่ 2 ซึ่งแสดงผลการปรับปรุงกระบวนการไหลของพนักงาน A ในการประกอบชิ้นงาน พบว่ากิจกรรมการเคลื่อนย้าย (Move) และล่าช้ารอคอย (Delay) ลดลงอย่างมีนัยสำคัญ โดยการเคลื่อนย้ายลดจาก 22 ครั้ง เหลือ 19 ครั้ง และการล่าช้ารอคอยคงที่อยู่ที่ 1 ครั้ง แสดงให้เห็นถึงการจัดระเบียบพื้นที่ทำงานและปรับปรุงการจัดวางอุปกรณ์ให้เหมาะสมมากขึ้น ดังรูปที่ 8

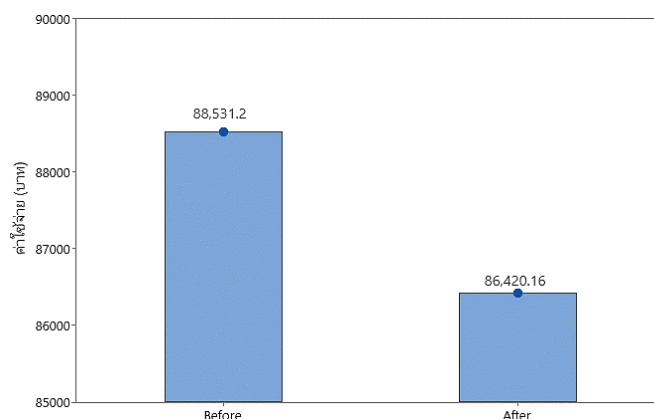


รูปที่ 8 เวลาการผลิตชิ้นงานก่อน และหลังปรับปรุง

จากรูปที่ 8 โดยเวลารวมของกระบวนการลดลงจาก 290.6 วินาที เป็น 274.3 วินาที หรือลดลง 16.3 วินาทีต่อชิ้น (ประมาณ 5.61%) ถึงแม้จะเป็นการลดเวลาที่ไม่มากนัก แต่ถือว่าการเพิ่มผลผลิตของสายการผลิต โดยไม่ต้องเพิ่มจำนวนพนักงาน ซึ่งยังคงไว้ที่ 1 คนเท่าเดิม ซึ่งการลดเวลานี้ยังส่งผลต่อความสามารถในการส่งมอบสินค้าได้เร็วขึ้น และสามารถเพิ่มกำลังการผลิตได้ในระยะยาว [11] ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Liu et al. [12] ที่พบว่าการปรับปรุงการจัดวางวัสดุช่วยลดข้อผิดพลาดในการประกอบชิ้นส่วนรถยนต์ได้อย่างมีนัยสำคัญ อย่างไรก็ตาม ผลลัพธ์นี้แตกต่างจากงานของ Tadic และ Komatina [13] ที่เน้นการใช้ระบบอัตโนมัติเป็นหลัก แทนการปรับปรุงด้วยวิธี Manual Layout Improvement แบบในงานวิจัยนี้

3.3.2 การเปรียบเทียบค่าใช้จ่ายกระบวนการผลิต

ผลจากการปรับปรุงกระบวนการผลิต ไม่เพียงแต่ส่งผลต่อระยะเวลาในการผลิตเท่านั้น แต่ยังช่วยลดต้นทุนการดำเนินงานได้อย่างชัดเจน ทั้งในด้านแรงงาน เวลา และทรัพยากรที่ใช้ในสายการผลิต ดังรูปที่ 9



รูปที่ 9 การเปรียบเทียบค่าใช้จ่ายก่อน และหลังปรับปรุง

จากรูปที่ 9 การเปรียบเทียบค่าใช้จ่ายก่อน และหลังการปรับปรุง พบว่าการลดลงอย่างมีนัยสำคัญ โดยก่อนปรับปรุง มีค่าใช้จ่ายอยู่ที่ 88,531.2 บาทต่อปี ซึ่งหลังจากปรับปรุงลดลงเหลือ 86,420.16 บาทต่อปี ลดลงรวมทั้งสิ้น 2,111.04 บาทต่อปี หรือคิดเป็น ประมาณ 2.39% ค่าใช้จ่ายที่ลดลงนี้เป็นผลมาจากหลายปัจจัย เช่น การลดการเคลื่อนไหวและขั้นตอนที่ไม่จำเป็นในสายการผลิต การจัดระเบียบพื้นที่ทำงานให้เหมาะสมลดระยะทางและเวลาในการเดิน และการลดความสูญเสียในรูปแบบของการรอคอย สอดคล้องกับงานวิจัยของ Lin et al. [14] และ Yamashita et al. [15] ซึ่งชี้ให้เห็นว่าการลดค่าใช้จ่ายด้วยการวิเคราะห์กระบวนการผลิตโดยใช้แผนภูมิการไหลควบคู่กับการประยุกต์ ECRS สามารถช่วยลดต้นทุนได้เฉลี่ย 2–6% ต่อรอบการผลิต

4. อภิปรายผล

จากผลการดำเนินงานด้านการปรับปรุงกระบวนการผลิตชุดเสริมความแข็งแรงแผงหน้าปัดรถยนต์ พบว่าเวลาในการผลิตและรูปแบบการปฏิบัติงานของพนักงานมีผลต่อประสิทธิภาพของกระบวนการผลิตอย่างมีนัยสำคัญ โดยเฉพาะในด้านของเวลาในการผลิต จากเดิมที่ใช้เวลา 290.6 วินาทีต่อชิ้นงาน ลดลงเหลือ 274.3 วินาที หรือลดลงประมาณ 5.61% ซึ่งแม้ว่าจุดลดลงเล็กน้อยแต่สำหรับการผลิตแบบ Mass Production ที่มีปริมาณชิ้นงานสูงถึง 10,000 ชิ้นต่อเดือน จะช่วยประหยัดเวลาได้รวม 9.72 ชั่วโมงต่อเดือน สะท้อนถึงการเพิ่มประสิทธิภาพในการทำงานโดยไม่ต้องลงทุนเพิ่มในเรื่องเครื่องจักรหรือแรงงาน ทั้งนี้การปรับปรุงตำแหน่งจุดวางชิ้นงานใหม่ให้ใกล้จุดทำงานมากขึ้น ทำให้ลดเวลาเดินและลดความเมื่อยล้าของพนักงานช่วยเสริมสร้างความต่อเนื่องของกระบวนการผลิตและลดความสูญเสียได้อย่างมีประสิทธิภาพ อีกทั้งค่าใช้จ่ายในการผลิตลดลงจากเดิม 88,531.2 บาทต่อปี เป็น 86,420.16 บาทต่อปี หรือคิดเป็นการลดลงประมาณ 2.39% ซึ่งถือว่าเป็นอัตราการลดที่น่าพึงพอใจ โดยการลดลงดังกล่าวเป็นผลจากการลดเวลา ปรับลดกิจกรรม เช่น การเคลื่อนย้าย การรอคอย และการหีบวางซ้ำซ้อน รวมถึงการจัดเรียง Layout พื้นที่ทำงานใหม่ให้เหมาะสม [16-17] การดำเนินการในลักษณะนี้ ไม่เพียงช่วยลดต้นทุนและเวลาในระยะสั้นเท่านั้น แต่ยังส่งผลในระยะยาวในการสร้างรากฐานของการปรับปรุงอย่างยั่งยืน ช่วยเพิ่มขีดความสามารถในการแข่งขันมากขึ้น [18] นอกจากนี้ยังพบว่าความพึงพอใจของพนักงานในด้านสภาพแวดล้อมการทำงานดีขึ้นจากผลการสัมภาษณ์ภายหลังการปรับปรุง โดยเฉพาะด้านความเหนื่อยล้าที่ลดลง และความสะดวกในการหยิบจับชิ้นงานที่เพิ่มขึ้นซึ่งแตกต่างจากงานของ Renata Biadacz [19] ที่เน้นผลเชิงการเงินจากการใช้ Kaizen Costing แต่ไม่ได้วิเคราะห์เชิงความรู้สึกของผู้ปฏิบัติงานโดยตรง จึงแสดงให้เห็นว่าการประเมินเชิงมนุษย์สัมพันธ์ร่วมด้วยสามารถสะท้อนประโยชน์แบบองค์รวมจากการปรับปรุงกระบวนการได้ชัดเจนยิ่งขึ้น ผลลัพธ์ดังกล่าวยังสอดคล้องกับงานวิจัยของ Simranjit Singh Sidhu และ Jagjeet Chatha [20] ซึ่งว่าการลดเวลาเพียงเล็กน้อยอาจไม่ส่งผลต่อต้นทุนหากไม่ควบคู่กับการปรับปรุงอื่นๆ เช่น การฝึกอบรมพนักงาน ซึ่งเป็นข้อแตกต่างจากงานวิจัยนี้ที่มุ่งเน้นเฉพาะการจัดวางชิ้นงาน

5. สรุปผลการวิจัย

การปรับปรุงกระบวนการผลิตชุดเสริมความแข็งแรงแผงหน้าปัดรถยนต์ในครั้งนี้ ส่งผลให้ประสิทธิภาพในสายการผลิตเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ โดยสามารถลดระยะเวลาในการผลิตจาก 290.6 วินาที เหลือ 274.3 วินาทีต่อชิ้นงาน (ลดลง 5.94%) และลดค่าใช้จ่ายต่อการรอบการผลิตจาก 88,531.2 บาทต่อปี เหลือ 86,420.16 บาทต่อปี (ลดลง 2.39%) ผลลัพธ์ดังกล่าวเกิดจากการวิเคราะห์และปรับปรุงตำแหน่งจุดวางชิ้นงานให้เหมาะสม ลดการเคลื่อนไหวและขั้นตอนที่ไม่จำเป็นของพนักงานแนวทางที่นำมาใช้ ได้แก่ หลักการ ECRS และเครื่องมือ 7 QC Tools ช่วยให้การระบุปัญหาได้อย่างแม่นยำและจัดลำดับความสำคัญของสาเหตุเพื่อการแก้ไขอย่างเป็นระบบ ผลลัพธ์ที่ได้สอดคล้องกับงานวิจัยในอุตสาหกรรม

ยานยนต์สมัยใหม่ ซึ่งชี้ให้เห็นว่าการปรับปรุงกระบวนการโดยไม่ต้องลงทุนในเทคโนโลยีสูงสามารถเพิ่มผลิตภาพและลดต้นทุนได้จริง จึงสามารถนำแนวทางนี้ไปประยุกต์ใช้กับสายการผลิตอื่น ๆ ในอุตสาหกรรมเดียวกันได้อย่างมีประสิทธิภาพ

6. กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณบริษัทกรณีศึกษาที่ให้ความอนุเคราะห์ข้อมูลขอขอบคุณ ผู้บริหาร และพนักงานที่เสียสละเวลาให้ความร่วมมือในการให้ข้อมูล และสัมภาษณ์อธิบายกระบวนการทำงาน

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] Ma, Y., Zhang, D., and Wang, L., “Advanced lightweight materials and manufacturing processes in automotive applications: A review,” *Journal of Manufacturing Processes*. Vol. 64, 2021, pp. 865–881.
- [2] Thakur, A., et al., “Challenges and trends in the automotive industry: A global perspective,” *Materials Today: Proceedings*. Vol. 47(1), 2021, pp. 2142–2148.
- [3] Singh, R., and Kumar, R., “Composite materials in vehicle structural components,” *Journal of Reinforced Plastics and Composites*. Vol. 41(5), 2022, pp. 342–351.
- [4] Zhang, X., et al., “Crashworthiness analysis of dashboard reinforcement structures using hybrid materials”, *Composite Structures*. Vol. 238, 2020, 111904.
- [5] Kim, H., Park, S., and Lee, J., “Optimization of Automotive Panel Reinforcement Using DOE and CAE Integration”, *Materials Today: Proceedings*. Vol. 29, 2020, pp. 1234–1239.
- [6] Ahmed, M., and Hasan, R., “Process Improvement in Sheet Metal Reinforcement for Automotive Dashboards using SPC and DMAIC”, *Procedia Manufacturing*. Vol. 51, 2020, pp. 317–324.
- [7] Sidhu, S. S., and Chatha, J., “A Review on Kaizen Implementation in North Indian Manufacturing Industries”, *Sciences*. Vol. 2(2), 2025, pp. 90–98.
- [8] Biadacz, R., “Application of Kaizen and Kaizen Costing in SMEs. *Production Engineering Archives*”, Vol. 30(1), 2024, pp. 17–35.
- [9] Liu, H., Zhang, B., Wu, V., Yang, X., and Wang, L., “Review of Digital Twin in the Automotive Industry on Products, Processes and Systems”, *International Journal of Automotive Manufacturing and Materials*. Vol. 12(1), 2025, pp. 1–13.
- [10] สุภาพร แสงกุล และคณะ. “การปรับปรุงกระบวนการผลิตด้วยหลักการลดความสูญเปล่า ECRS: กรณีศึกษากระบวนการผลิตยางญี่ปุ่น”, *วารสารวิศวกรรมและเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์*. Vol. 3(1), 2568, pp. 58–70.
- [11] Nakamura, Y., and Ishikawa, M., “Application of ECRS Principles to Improve Production Line Efficiency in the Automotive Industry”, *Journal of Manufacturing Processes*. Vol. 64, 2021, pp. 832–841.
- [12] D. Tadic and N. Komatina, “A hybrid interval type-2 fuzzy DEMATEL-MABAC approach for strategic failure management in automotive manufacturing”, *Journal of Engineering Management and Systems Engineering*. Vol. 4(1), 2025, pp. 21–38

- [13] Liu H., Zhang B., Wu V., Yang X., and Wang L., “Review of digital twin in the automotive industry on products, processes and systems”, *International Journal of Automotive Manufacturing and Materials (IJAMM)*. Published March 24, 2025, pp 1-13.
- [14] Lin, C., Wang, P., and Chen, Y., “Cost Reduction Through Lean Process Improvement in Automotive Parts Assembly”, *International Journal of Production Economics*. Vol. 248, 2022, 108475.
- [15] Yamashita, K., and Mori, T., “A Case Study of Cost Optimization by ECRS Application in Automotive Manufacturing”, *Procedia CIRP*. Vol. 96, 2021, pp. 482–487.
- [16] Ma, Y., Zhang, D., and Wang, L., “Advanced lightweight materials and manufacturing processes in automotive applications: A review”, *Journal of Manufacturing Processes*. Vol. 64, 2021, pp. 865–881.
- [17] Thakur, A., et al., “Challenges and trends in the automotive industry: A global perspective”, *Materials Today: Proceedings*. Vol. 47(1), 2021, pp. 2142–2148.
- [18] Zhou, W., He, L., & Zhang, H., “Flexible Manufacturing and Data-driven Decision in Automotive Production: Toward Sustainable Process Optimization”, *Journal of Cleaner Production*. Vol. 314, 2021, 128010.
- [19] Renata Biadacz, “Application of Kaizen and KaizenCosting in SMEs”, *Productio Engineering ARCHIVES*. Vol. 30(1), 2024, pp. 17-35.
- [20] Simranjit Singh Sidhu, and Jagjeet Chatha., “A Review on Kaizen Implementation in North Indian Manufacturing Industries”, *Sciences*. Vol. 2(2), 2025, pp 90-98

อิทธิพลของการปล่อยของเหลวไดอิเล็กทริกในกระบวนการกัดเจาะโลหะด้วยไฟฟ้าที่ส่งผลต่อ ความสามารถสำหรับการเจาะรูขนาดเล็กบนวัสดุเหล็กกล้าเครื่องมือ AISI P20 Influence of Dielectric Flushing in Electrical Discharge Machining Process on the Machinability for Small Hole Drilling on AISI P20 Tool Steel

เชษฐา หนูนเหลือง¹, ภูมิภัทร วงษ์ปิตรีตัน², ไพบุลย์ หาญมนต์³, เอกชัย รอดพิสา⁴,
สัญญา คำจริง⁵ และ เจษฎา แก้ววิชิต^{6*}

^{1,2,3,4}ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกลและอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ

2 ถนนนางลิ้นจี่ แขวงทุ่งมหาเมฆ เขตสาทร จังหวัดกรุงเทพฯ 12120

⁵สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องมือและแม่พิมพ์ คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ (ศูนย์นนทบุรี)

217 ถนนนนทบุรี ตำบลสวนใหญ่ อำเภอเมืองนนทบุรี จังหวัดนนทบุรี 11000

⁶สาขาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ (ศูนย์สุพรรณบุรี)

450 ม. 6 ถนนสุพรรณบุรี-ชัยนาท ตำบลย่านยาว อำเภอสามชูก จังหวัดสุพรรณบุรี 72130

Chedtha Noonluang¹, Pumpat Wongpitirut², Phaiboon Hanmon³, Ekkachai Rodpisa⁴,

Sanya Kumjing⁵ and Jesada Kaewwichit^{6*}

^{1,2,3,4}Department of Mechanical and Industrial Engineering, Faculty of Engineering,

Rajamangala University of Technology Krungthep,

2 Nanglin Chi Rd., Thung Mahamek, Sathorn, Bangkok, 10120

⁵Department of Tool and Die Engineering, Faculty of Engineering and Architecture,

Rajamangala University of Technology Suvarnabhumi (Nonthaburi),

217, Nonthaburi Rd., Suanyai Sub-district, Nonthaburi District, Nonthaburi Province, 11000

⁶Department of Industrial Engineering, Faculty of Technical Education,

Rajamangala University of Technology Suvarnabhumi (Suphanburi),

450 M.6, Suphanburi-Chainat Rd., Yanyao Sub-district, Samchuk District, Suphanburi Province, 72130

*Corresponding author Email: Jesada.ka@rmutsb.ac.th

(Received: May 10, 2025 / Revised: June 15, 2025 / Accepted: June 17, 2025)

บทคัดย่อ

การเจาะรูขนาดเล็กเป็นสิ่งที่ทำได้ยากในกระบวนการเจาะด้วยเครื่องมือกลเนื่องจากเครื่องมือคมตัดต้องการความเร็วรอบในการหมุนที่สูงและง่ายต่อการเกิดความเสียหายของเครื่องมือคมตัด การพัฒนาทางด้านเทคโนโลยีทำให้เกิดเครื่องจักรสมัยใหม่ที่อาศัยการควบคุมพารามิเตอร์ทางไฟฟ้าทำให้เกิดการสปาร์คภายใต้การปกคลุมด้วยของเหลวไดอิเล็กทริก กระบวนการดังกล่าวจะใช้เครื่องมือเป็นเป็นตัวนำไฟฟ้า ซึ่งเรียกว่าอิเล็กโทรดทำการสปาร์คกับวัสดุชิ้นงานภายใต้การขวางกันที่เป็นของเหลวไดอิเล็กทริก ทำให้สมบัติทางกลของวัสดุไม่ส่งผลต่อความสามารถในการแปรรูปของวัสดุชิ้นงาน งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาอิทธิพลของรูปแบบการปล่อยของเหลวไดอิเล็กทริกที่ส่งผลต่อความสามารถในการเจาะรูขนาดเล็กในกระบวนการกัดเจาะโลหะด้วยไฟฟ้า โดยท่อทองเหลืองขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 มิลลิเมตร (รูในโต 0.40 มิลลิเมตร) ทำการเจาะทะลุลงบนวัสดุชิ้นงานเหล็กกล้า AISI P20 มีความหนา 25 มิลลิเมตร โดยควบคุมการปล่อยของเหลวไดอิเล็กทริกโดยการฉีดผ่านแกนกลาง และการฉีดผ่านแกนกลางร่วมกับการฉีดด้านข้าง ทั้งในรูปแบบที่มีการปกคลุมและไม่มีการปกคลุมพื้นผิวชิ้นงาน

ด้วยของเหลวไดอิเล็กทริก ทั้งนี้ผลจากการทดลอง พบว่า การฉีดของเหลวไดอิเล็กทริกผ่านแกนกลางร่วมกับการฉีดด้านข้างมีอัตราการขจัดเนื้องานที่สูงกว่าการเจาะแบบทั่วไป และการปกคลุมด้วยของเหลวไดอิเล็กทริกจะส่งผลให้อัตราการสึกหรอของอิเล็กโทรดเพิ่มสูงขึ้นแต่ขนาดความแตกต่างของรูเจาะฝั่งขาเข้ากับฝั่งทางออกจะลดต่ำลง

คำสำคัญ: การกัดเซาะโลหะด้วยไฟฟ้า, การเจาะรูขนาดเล็ก, ของเหลวไดอิเล็กทริก

Abstract

Drilling small holes is difficult to produce conventional machining process due to the requirement of high rotational speed of spindle and easily damage of drilled bite cutting tool. Technological developments have led to modern machinery that uses electrical parameter control to induce sparks under cover of dielectric fluid. The machining process uses an electrically conductive tool, called an electrode, to spark with the specimen under the dielectric fluid barrier, so that the mechanical properties of the workpiece do not affect the machinability of the material removed. This research is to study the influence of dielectric fluid discharge flushing pattern on the ability of small-hole drilling in the process of electrical discharge machining. Brass tubes with a diameter of 1 mm (0.40 mm inner diameter) were drilled into AISI P20 tool steel. The work material is a thickness of 25 mm. Controlling of dielectric fluid injection is flowed through the core and combined with side flushing for both with and without covering the workpiece surface with dielectric fluid. The experimental results found that the injection of dielectric fluid through the core combined with side flushing has a higher material removal rate than the conventional electrical discharge machining. However, the covering with dielectric fluid resulted in higher electrode wear ratio but the difference size of inlet and outlet holes was reduced.

Keywords: Electrical discharge machining, Small hole drilling, Dielectric fluid

1. บทนำ

ปัจจุบันภาคอุตสาหกรรมการผลิตได้มีการนำเทคโนโลยีที่ทันสมัยและหลากหลายเข้ามาใช้โรงงานอุตสาหกรรมเพื่อทำการลดต้นทุน, ลดเวลา, เพิ่มผลผลิต และตอบสนองความต้องการของอุตสาหกรรมการผลิต [1] การกัดเซาะโลหะด้วยไฟฟ้า (Electrical discharge machining, EDM) เป็นหนึ่งในกระบวนการที่นิยมใช้สำหรับการแปรรูปชิ้นงานที่มีความแข็งแรงและยากต่อการแปรรูปด้วยกระบวนการทางกล [2,3] นอกจากนี้ยังมีการเจาะรูขนาดเล็กโดยการกัดเซาะโลหะด้วยไฟฟ้า (Small-hole EDM drilling) [4] เป็นอีกหนึ่งเทคโนโลยีที่ถูกนำมาใช้ในอุตสาหกรรมการผลิต เช่น ชิ้นส่วนเครื่องจักร, ชิ้นส่วนยานยนต์, แม่พิมพ์ และอื่นๆ โดยกระบวนการดังกล่าวเป็นการแปรรูปโลหะด้วยทออิเล็กโทรดที่อาศัยความร้อนจากปฏิกิริยาทางไฟฟ้าจากการอาร์กกระหว่างอิเล็กโทรดกับวัสดุชิ้นงานทำให้การหลอมละลายของเนื้อโลหะออกเป็นอนุภาคขนาดเล็ก [5] กระบวนการนี้เป็นที่นิยมใช้กันในการแปรรูปวัสดุเหล็กกล้าเครื่องมือ [6] หรือวัสดุที่มีความแข็งแรงค่อนข้างสูงที่ยากต่อการตัดเฉือนเพื่อลดโอกาสการเกิดรอยแตกร้าวของวัสดุชิ้นงาน [7]

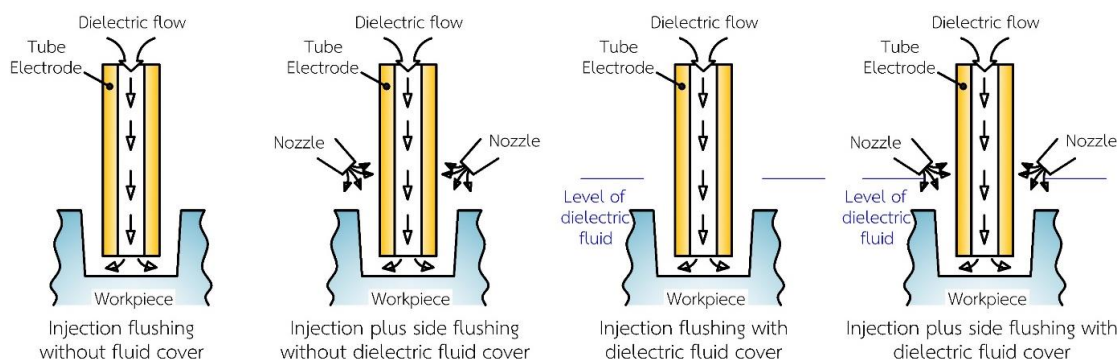
ในช่วงที่ผ่านมาได้มีการศึกษาค้นคว้าและทดลองเพื่อสร้างความเข้าใจและเพิ่มขีดความสามารถในการกัดเซาะโลหะด้วยไฟฟ้าในหลากหลายแนวทาง โดย K. Jamkamon และคณะ [8] ได้ทำการควบคุมพารามิเตอร์ กระแส (Discharge current) เวลาเปิด (Pulse on time) เวลาปิด (Pulse off time) และแรงดันของเหลวไดอิเล็กทริก (Dielectric flushing

pressure) ในการเจาะรูขนาดเล็กด้วยกระบวนการกัดเซาะโลหะด้วยไฟฟ้าโดยใช้ท่ออิเล็กโทรดขนาด 1 มิลลิเมตร สำหรับการเจาะเหล็กกล้าเครื่องมือหนา 40 มิลลิเมตร โดยผลจากการศึกษา พบว่า ความเร็วที่ใช้ในการเจาะและการสึกหรอของอิเล็กโทรดจะเพิ่มขึ้นตามระดับกระแสไฟฟ้า ทั้งนี้เวลาในการเจาะและการสึกหรอของอิเล็กโทรดจะลดลงเมื่อเวลาเปิดเพิ่มมากขึ้น นอกจากนี้ขนาดความแตกต่างของรูเจาะขาเข้าและขาออกมีการเปลี่ยนแปลงตามการควบคุมพารามิเตอร์ทางไฟฟ้า Z. Wang และคณะ [9] ทำการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการฉีดของเหลวไดอิเล็กทริกสำหรับการเจาะรูขนาดเล็กโดยการวิเคราะห์การไหลตัวของเศษอนุภาค โดยจากการทดลอง พบว่า การไหลสำหรับของเหลวไดอิเล็กทริกในช่วงก่อนที่จะเกิดการทะลุของชิ้นงานจะทำให้เกิดความต่างของขนาดรูเจาะฝั่งขาเข้าและออก ทั้งนี้การปรับปรุงประสิทธิภาพการไหลสำหรับของเหลวไดอิเล็กทริกจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการเจาะรูด้วยกระบวนการกัดเซาะโลหะด้วยไฟฟ้าเป็นอย่างมาก W. Liang [10] ทำการเพิ่มประสิทธิภาพในการขับป้อนเซอร์โวมอเตอร์เพื่อควบคุมช่วงว่างในการปล่อยประจุกระแสไฟฟ้าสำหรับการเจาะรูขนาดเล็กอย่างรวดเร็ว โดยจากผลการทดลองแปรรูปแบบของการควบคุมไฟฟ้าเพื่อจ่ายไปยังมอเตอร์ขับป้อนจะช่วยให้ประสิทธิภาพในการทำงานเพิ่มสูงขึ้นถึง 38.1 เปอร์เซ็นต์

โดยทั่วไปกระบวนการเจาะมีจุดมุ่งหมายทำให้วัสดุชิ้นงานต่างๆ เกิดรูที่มีความแม่นยำและเที่ยงตรง ซึ่งการเจาะรูขนาดเล็กโดยการกัดเซาะโลหะไฟฟ้าเป็นเครื่องจักรที่ถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลายในการเจาะรูขนาดเล็กของวัสดุชิ้นงานโดยการตัดเฉือนด้วยการปล่อยกระแสไฟฟ้า ทั้งนี้เนื่องจากการกัดเซาะโลหะด้วยไฟฟ้าเป็นการอาศัยความร้อนที่เกิดจากการอาร์กของท่ออิเล็กโทรดกับวัสดุชิ้นงานโดยที่ผิววัสดุชิ้นงานและพื้นผิวของท่ออิเล็กโทรดไม่สัมผัสกันจึงทำให้ไม่เกิดแรงทางกลในการแปรรูปส่งผลให้ความสามารถในการแปรรูปของวัสดุชิ้นงาน แต่อย่างไรก็ตามการหลอมละลายของทั้งวัสดุอิเล็กโทรดและชิ้นงานทำให้ความรุนแรงที่เกิดจากการสปาร์คจะปรากฏเป็นลักษณะพื้นผิวของวัสดุชิ้นงานซึ่งส่งผลต่อความแม่นยำตลอดจนความเที่ยงตรงทางด้านรูปทรงของชิ้นงาน อย่างไรก็ตาม จากงานวิจัยที่ผ่านมาจนถึงปัจจุบันนี้ [1-10] มีการศึกษาน้อยมากที่สามารถบ่งชี้ถึงอิทธิพลของรูปแบบการปล่อยของเหลวไดอิเล็กทริกที่ส่งผลต่อความสามารถในการแปรรูปของเครื่องจักร ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาอิทธิพลของรูปแบบการปล่อยของเหลวไดอิเล็กทริกที่ส่งผลต่อความสามารถในการเจาะรูขนาดเล็กในกระบวนการกัดเซาะโลหะด้วยไฟฟ้า

2. วิธีการดำเนินงาน

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินรูปแบบการปล่อยของเหลวไดอิเล็กทริกที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการทำงานสำหรับการเจาะรูขนาดเล็กด้วยกระบวนการกัดเซาะโลหะด้วยไฟฟ้า โดยการควบคุมการปล่อยของเหลวไดอิเล็กทริกจะมี 4 รูปแบบ ประกอบด้วย การปล่อยของเหลวไดอิเล็กทริกโดยการฉีดผ่านแกนอิเล็กโทรดปราศจากการปกคลุมด้วยของเหลวไดอิเล็กทริก (Injection flushing without dielectric fluid cover) การปล่อยของเหลวโดยการฉีดผ่านแกนอิเล็กโทรดรวมกับการฉีดด้านข้างปราศจากการปกคลุมด้วยของเหลวไดอิเล็กทริก (Injection plus side flushing without dielectric fluid cover) การปล่อยของเหลวไดอิเล็กทริกโดยการฉีดผ่านแกนอิเล็กโทรดภายใต้การปกคลุมด้วยของเหลวไดอิเล็กทริก (Injection flushing with dielectric fluid cover) และการปล่อยของเหลวโดยการฉีดผ่านแกนอิเล็กโทรดรวมกับการฉีดด้านข้างภายใต้การปกคลุมด้วยของเหลวไดอิเล็กทริก (Injection plus side flushing with dielectric fluid cover) ดังแสดงรูปที่ 1



รูปที่ 1 การควบคุมการปล่อยของเหลวไดอิเล็กทริกและการประเมินผล

ทั้งนี้จะประเมินผลของการควบคุมของเหลวไดอิเล็กทริกที่มีต่อความสามารถในการแปรรูปจากอัตราการกัดเนื้องาน (Material removal rate, MRR) อัตราการสึกกร่อนของอิเล็กโทรด (Electrode wear ratio, EWR) และความสมบูรณ์ของรูเจาะจากการตรวจวัดขนาดรูเจาะขาเข้า (Inlet hole) และรูเจาะขาออก (Outlet)

2.1 เครื่องมือและอุปกรณ์

การทดลองเพื่อประเมินอิทธิพลของการควบคุมของเหลวไดอิเล็กทริกที่มีต่อประสิทธิภาพการทำงานในการแปรรูปวัสดุชิ้นงานเหล็กกล้าเครื่องมือ กระทำบนเครื่องกัดเซาะด้วยไฟฟ้ายี่ห้อ JOEMARS รุ่น JM325D โดยวัสดุชิ้นงานเหล็กกล้าเครื่องมือเกรด AISI P20 [11] จะถูกจับยึดบนโต๊ะงานด้วยปากกา และท่ออิเล็กโทรดขนาด 1 มิลลิเมตร (รูในโต 0.40 มิลลิเมตร) จะถูกติดตั้งบนจับอิเล็กโทรดและขับเคลื่อนสำหรับการเจาะรูทะลุบนวัสดุชิ้นงานที่มีความหนา 25 มิลลิเมตร วัสดุชิ้นงานจะอยู่ในถังโต๊ะงานที่สามารถควบคุมระดับของปริมาณของเหลวไดอิเล็กทริกที่ปกคลุมพื้นผิวชิ้นงาน (Level of dielectric fluid) และการฉีดด้านข้างผ่านท่อ (Nozzle) ใน 4 ตำแหน่ง ดังแสดงในรูปที่ 2 ในส่วนของพารามิเตอร์ควบคุมในการทดลองถูกควบคุมระดับตามคู่มือแนะนำการใช้งานของเครื่องจักร ประกอบด้วย ระดับกระแสไฟฟ้า 25 แอมแปร์ เวลาเปิด 32 ไมโครวินาที เวลาปิด 12 ไมโครวินาที และสภาวะแวดล้อมการทำงานอื่นๆ ดังแสดงในตารางที่ 1 ในการทดลองแต่ละครั้งจะใช้ท่ออิเล็กโทรดใหม่และทำการทดลองซ้ำจำนวน 3 ครั้งสำหรับแต่ละเงื่อนไขการทดลอง



รูปที่ 2 การทดลองเจาะรูขนาดเล็กบนโต๊ะงานเครื่องกัดโลหะด้วยไฟฟ้า

ตารางที่ 1 เงื่อนไขและสภาวะแวดล้อมในการทดลอง

เงื่อนไขการทดลอง	รายละเอียด
กระแสไฟฟ้า (แอมแปร์)	25
เวลาเปิด (ไมโครวินาที)	32
เวลาเปิด (ไมโครวินาที)	12
แรงดันของเหลวไดอิเล็กทริกผ่านแกน (kg/cm ³)	70
ขนาดท่ออิเล็กทรอนิกส์โทรดทองเหลือง (มิลลิเมตร)	1
การปล่อยของเหลวไดอิเล็กทริก	- Injection flushing without dielectric fluid cover - Injection plus side flushing without dielectric fluid cover - Injection flushing with dielectric fluid cover - Injection plus side flushing with dielectric fluid cover

2.2. การประเมินผล

อิทธิพลของการปล่อยของเหลวไดอิเล็กทริกที่มีผลต่อประสิทธิภาพการทำงานของเครื่องเจาะรูขนาดเล็กโดยการกัดเซาะโลหะด้วยไฟฟ้าประเมินจาก อัตราการขจัดเนื้องาน อัตราการสึกหรอของอิเล็กโทรด และขนาดรูเจาะฝังเข้าและออก โดยอัตราการขจัดเนื้องาน (MRR) จะถูกประเมินอยู่ในรูปของปริมาณเนื้องานที่ถูกขจัดออกต่อหน่วยเวลาที่ใช้ ดังแสดงในสมการที่ (1) และอัตราการสึกหรอของอิเล็กโทรดประเมินอยู่ในรูปเปอร์เซ็นต์ของปริมาตรอิเล็กโทรดที่สึกหรอต่อปริมาตรวัสดุเนื้องานที่ขจัดออกดังสมการที่ (2) ขนาดความโตรูเจาะทั้งขาเข้าและขาออก รวมทั้งลักษณะพื้นผิวชิ้นงานและอิเล็กโทรดจะถูกวัดและตรวจสอบโดยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (Optical measuring microscope) ยี่ห้อ OLYMPUS รุ่น STM6 ดังแสดงในรูปที่ 3

$$MRR = \frac{W_i - W_f}{(M_t)(\rho_w)} \quad (1)$$

เมื่อ MRR คือ อัตราการขจัดเนื้องาน (ลบ.มม./นาท)

W_i คือ น้ำหนักชิ้นงานก่อนเจาะ (กรัม)

W_f คือ น้ำหนักชิ้นงานหลังเจาะ (กรัม)

M_t คือ เวลาที่ใช้ในการเจาะวัสดุชิ้นงาน (นาท) และ

ρ_w คือ ความหนาแน่นของวัสดุชิ้นงานเหล็กกล้า AISI P 20 ($\approx 7.86 \times 10^{-3}$ กรัม/ลบ.มม.) [9]

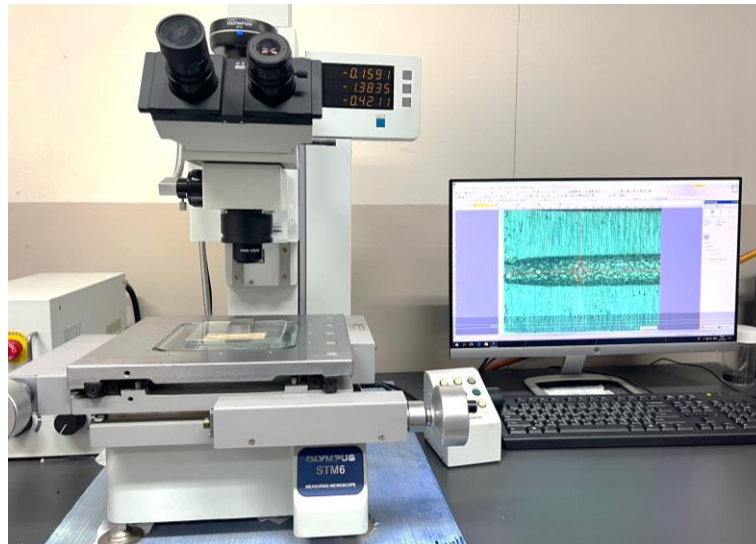
$$EWR = \frac{E_i - E_f / (\rho_E)}{(W_i - W_f) / (\rho_w)} \times 100 \quad (2)$$

เมื่อ EWR คือ อัตราการสึกหรอของอิเล็กโทรด (เปอร์เซ็นต์)

E_i คือ น้ำหนักอิเล็กโทรดก่อนเจาะ (กรัม)

E_f คือ น้ำหนักอิเล็กโทรดหลังเจาะ (กรัม) และ

ρ_E คือ ความหนาแน่นของวัสดุอิเล็กโทรดทองเหลือง ($\approx 8.60 \times 10^{-3}$ กรัม/ลบ.มม.)

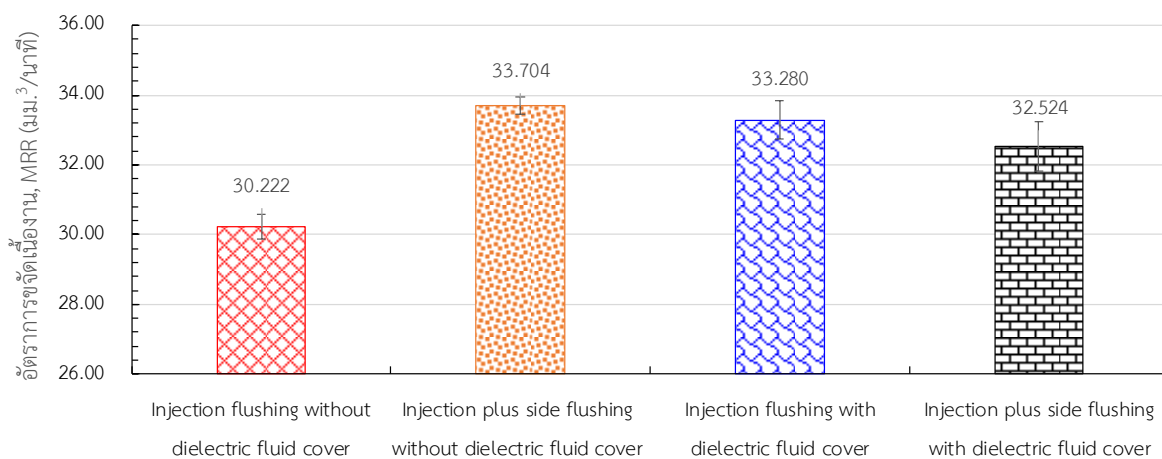


รูปที่ 3 กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (Optical measuring microscope) ยี่ห้อ OLYMPUS รุ่น STM6

3. ผลการทดลองและการอภิปราย

3.1 อัตราการขจัดเนื้องาน (Material removal rate, MRR)

การควบคุมการปล่อยของเหลวไดอิเล็กทริกเพื่อประเมินอัตราการขจัดเนื้องาน พบว่า การปรับเปลี่ยนรูปแบบการปล่อยของเหลวไดอิเล็กทริกทำให้อัตราการขจัดเนื้องานมีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการปล่อยของเหลวไดอิเล็กทริกแบบทั่วไปที่มีการปล่อยของเหลวไดอิเล็กทริกผ่านแกนกลาง (Injection flushing without dielectric fluid cover) ที่มีอัตราการขจัดเนื้องาน อยู่ที่ระดับ 30.222 ลูกบาศก์มิลลิเมตร/นาที ดังแสดงในรูปที่ 4 ทั้งนี้ประสิทธิภาพการทำงานจะเพิ่มขึ้นโดยประมาณ 12, 10 และ 8 เปอร์เซ็นต์ เมื่อมีการใช้งานร่วมจากการฉีดของเหลวไดอิเล็กทริก และการปกคลุมพื้นผิววัสดุชิ้นงานด้วยของเหลวไดอิเล็กทริก ตามลำดับ

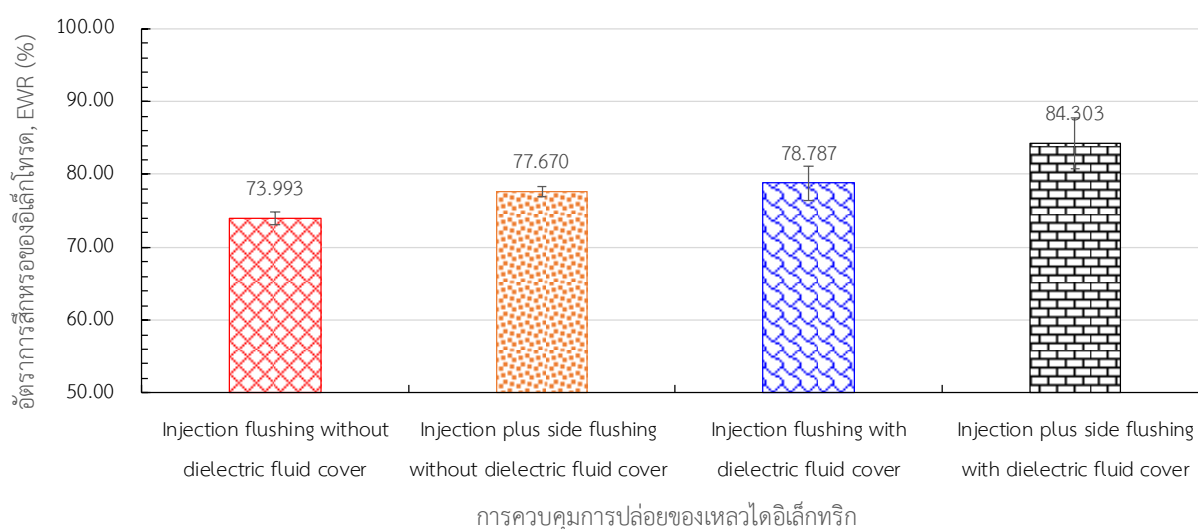


การควบคุมการปล่อยของเหลวไดอิเล็กทริก

รูปที่ 4 อัตราการขจัดเนื้องาน (Material removal rate, MRR)

3.2 อัตราการสึกหรอของอิเล็กโทรด (Electrode wear ratio, EWR)

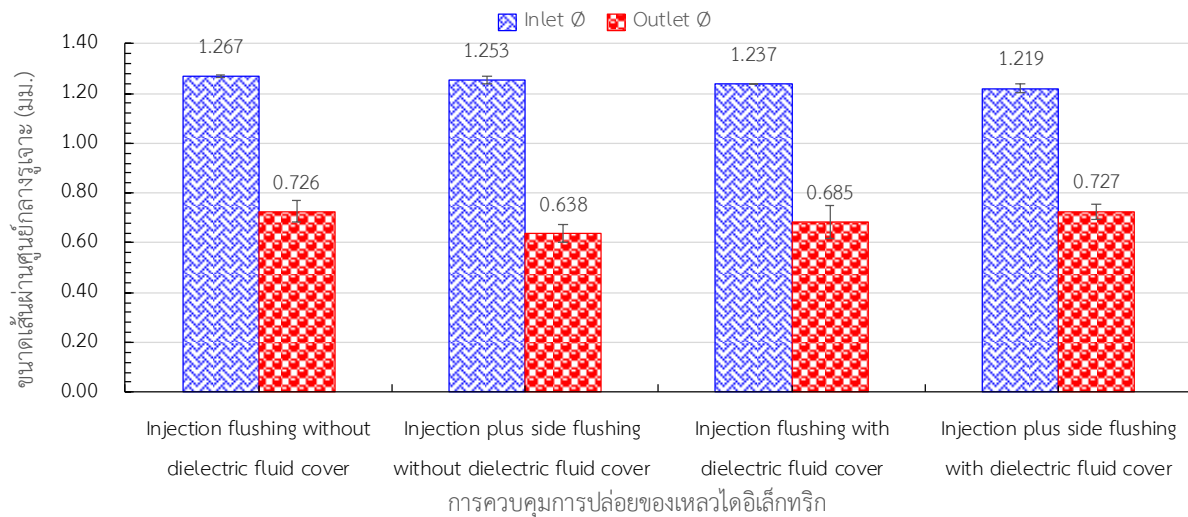
ผลการทดลองควบคุมรูปแบบการไหลสำหรับของเหลวไดอิเล็กทริกเพื่อประเมินอัตราการสึกหรอของอิเล็กโทรดแสดงดังรูปที่ 5 จากรูป จะเห็นได้ว่าการปล่อยของเหลวไดอิเล็กทริกผ่านแกนกลางอิเล็กโทรดแบบทั่วไปจะทำให้เกิดอัตราการสึกหรอของอิเล็กโทรดต่ำสุด ที่ระดับ 73.993 เปอร์เซ็นต์ อย่างไรก็ตามเมื่อมีการเพิ่มการฉีดของเหลวไดอิเล็กทริกด้านอิเล็กโทรด และการปกคลุมพื้นผิวชิ้นงานด้วยของเหลวไดอิเล็กทริกจะทำให้อัตราการสึกหรอของอิเล็กโทรดเพิ่มสูงขึ้นเป็น 77.670, 78.787 และ 84.303 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ การเพิ่มขึ้นของอัตราการสึกหรอของอิเล็กโทรดอาจเป็นผลมาจากปริมาณของเหลวที่ปกคลุมในบริเวณพื้นผิวการสปาร์คจะทำให้เกิดความเสถียรที่ส่งผลให้เกิดความรุนแรงของการกัดเซาะที่ส่งผลให้เกิดความร้อนและการสึกกร่อนที่เพิ่มมากขึ้นทั้งในส่วนของวัสดุชิ้นงานและวัสดุอิเล็กโทรด อย่างไรก็ตามปริมาณของเหลวไดอิเล็กทริกที่มากเกินไปจะส่งผลให้เกิดการสึกหรอของอิเล็กโทรดที่เพิ่มมากขึ้นเนื่องจากอนุภาคเศษเนื้อวัสดุในบริเวณพื้นผิวการสปาร์คไหลตัวได้ยากขึ้นเนื่องจากผลกระทบการต้านการเคลื่อนที่จากแรงโน้มถ่วง



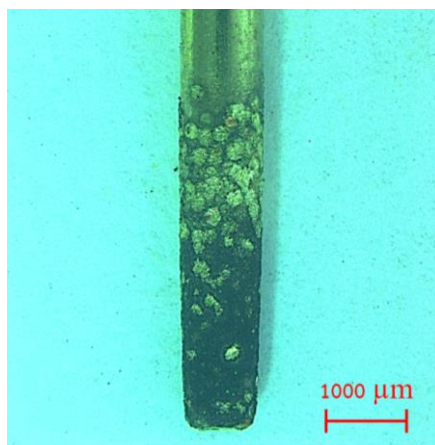
รูปที่ 5 อัตราการสึกหรอของอิเล็กโทรด (Electrode wear ratio, EWR)

3.3. ความสมบูรณ์ของรูเจาะ

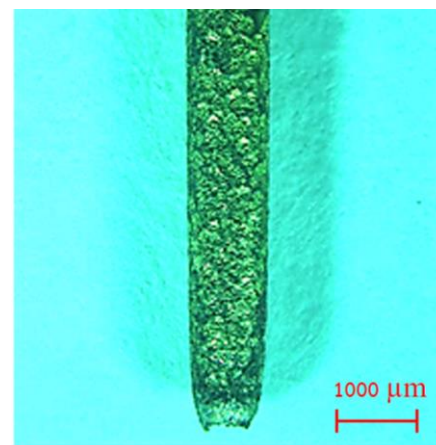
รูปที่ 6 แสดงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรูเจาะขาเข้า จากรูปจะสังเกตเห็นได้ว่ารูเจาะฝั่งขาเข้า (Inlet Ø) จะมีขนาดโตกว่าอิเล็กโทรด และรูเจาะฝั่งขาออก (Outlet Ø) จะมีขนาดเล็กกว่ารูเจาะฝั่งขาเข้า ทั้งนี้เป็นผลมาจากการสปาร์คจะทำให้เกิดช่องว่างระหว่างพื้นผิววัสดุชิ้นงานกับอิเล็กโทรด อย่างไรก็ตามสึกกร่อนในบริเวณส่วนปลายของอิเล็กโทรดในระหว่างการสปาร์คจะทำให้รูปทรงของอิเล็กโทรดเกิดการเปลี่ยนแปลง ทั้งนี้เมื่อความลึกของการเจาะเพิ่มมากขึ้นจะส่งผลให้ขนาดความต่างบริเวณส่วนปลายอิเล็กโทรดมีความแตกต่างอย่างเห็นได้ชัดดังแสดงในรูปที่ 7 ความต่างของขนาดอิเล็กโทรดจะส่งผลโดยตรงต่อขนาดของรูเจาะฝั่งขาเข้าและขาออก ทั้งนี้หากพิจารณาคุณภาพและความสมบูรณ์ของรูเจาะจากค่าความต่างต่ำสุดพบว่า การเจาะโดยปล่อยของเหลวไดอิเล็กทริกร่วมกับการฉีดด้านข้างภายใต้การปกคลุมด้วยของเหลวไดอิเล็กทริกจะมีประสิทธิภาพสูงสุด โดยมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางรูเจาะขาเข้า และขาออก เป็น 1.219 และ 0.727 มิลลิเมตร ตามลำดับ ทั้งนี้ลักษณะของรูเจาะฝั่งขาเข้าและขาออกจากการตรวจวัดด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงแสดงดังรูปที่ 8



รูปที่ 6 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรูเจาะขาเข้า (Inlet $\varnothing$) และรูเจาะฝั่งขาออก (Outlet $\varnothing$)

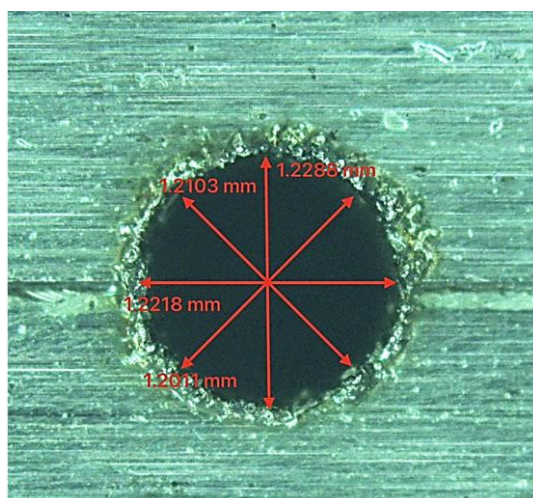


ก) เจาะรูลึก 5 มิลลิเมตร

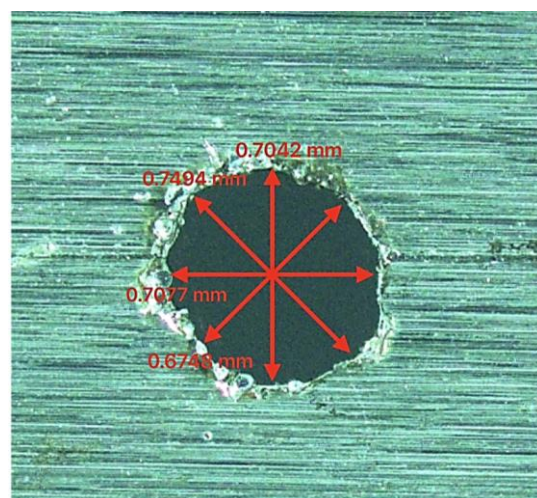


ข) เจาะรูทะลุ 25 มิลลิเมตร

รูปที่ 7 ลักษณะการสึกกร่อนของวัสดุเล็กโพรดท่อทองเหลืองขนาด 1 มิลลิเมตร เจาะรูวัสดุชิ้นงานที่ระดับความลึกต่างกัน



ก) รูเจาะฝั่งขาเข้า (Inlet $\varnothing$)



ข) รูเจาะฝั่งขาออก (Outlet $\varnothing$)

รูปที่ 8 ลักษณะของรูเจาะฝั่งขาเข้าและขาออกจากการตรวจวัดด้วยกล้องจุลทรรศน์

4. สรุป

การทดลองควบคุมการปล่อยของเหลวไดอิเล็กทริกโดยเพิ่มการฉีดด้านข้างอิเล็กโทรด และการปกคลุมพื้นผิวชิ้นงานวัสดุชิ้นงานด้วยของเหลวไดอิเล็กทริกเพื่อประเมินประสิทธิภาพการทำงานโดยเปรียบเทียบกับวิธีการเจาะรูโดยการกัดเจาะโลหะด้วยไฟฟ้าแบบทั่วไปที่มีการฉีดของเหลวไดอิเล็กทริกผ่านแกนกลาง สามารถสรุปผล ได้ดังนี้

1) อัตราการจัดเนื้องานสำหรับการเจาะรูโดยการกัดเจาะโลหะด้วยไฟฟ้าโดยทั่วไปจะอยู่ที่ระดับ 30.222 ลบ.มม./นาที่ ทั้งนี้เมื่อมีการใช้งานร่วมจากการฉีดของเหลวไดอิเล็กทริก และการปกคลุมพื้นผิววัสดุชิ้นงานด้วยของเหลวไดอิเล็กทริก จะทำให้ประสิทธิภาพการทำงานเพิ่มขึ้นโดยประมาณ 12, 10 และ 8 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ

2) การปล่อยของเหลวไดอิเล็กทริกผ่านแกนกลางอิเล็กโทรดแบบทั่วไปจะทำให้เกิดอัตราการสึกหรอของอิเล็กโทรดต่ำสุด ที่ระดับ 73.993 เปอร์เซ็นต์ อย่างไรก็ตามเมื่อมีการประยุกต์ใช้การปล่อยของเหลวไดอิเล็กทริกร่วมกับการฉีดด้านข้าง และการปกคลุมพื้นผิววัสดุชิ้นงาน อัตราการสึกหรอของอิเล็กโทรดก็จะมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นเป็น 77.670, 78.787 และ 84.303 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ

3) การประยุกต์ใช้การฉีดของเหลวไดอิเล็กทริกร่วมกับการฉีดด้านข้างอิเล็กโทรดและการปกคลุมพื้นผิววัสดุชิ้นงานด้วยของเหลวไดอิเล็กทริกมีแนวโน้มที่ทำให้เกิดความแตกต่างของรูเจาะฝั่งขาเข้ากับฝั่งขาออกต่ำสุด ที่ระดับ 1.219 และ 0.727 มิลลิเมตร ตามลำดับ

5. กิตติกรรมประกาศ

ทางคณะผู้วิจัยใคร่ขอขอบพระคุณสาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ และสาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ (ศูนย์สุพรรณบุรี) ที่ให้การสนับสนุนทางด้านเครื่องมือและห้องปฏิบัติการในการดำเนินงานวิจัยจนสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Koç Muammer and Tugrul Özel eds, *Modern manufacturing processes*, John Wiley & Sons, 2019.
- [2] H.T. Cao, J.R. Ho, P.C. Tung, Y.T. Lin, and C.K. Lin, “Machined quality prediction and optimization for micro-EDM drilling of semi-conductive SiC wafer,” *Materials Science in Semiconductor Processing*, Vol. 169, 2024, pp.107911.
- [3] M. Zishanur Rahman, A. K. Das, and S. Chattopadhyaya, “Microhole drilling through electrochemical processes: A review,” *Materials and Manufacturing Processes*, Vol. 33 (13), 2018, pp. 1379-1405.
- [4] L. Ye, X. Xi, M. Bellotti, J. Qian, and D. Reynaerts, “Investigation of advanced control schemes for high-speed small-hole EDM drilling,” *Procedia CIRP*, Vol. 95, 2020, pp.539-544.
- [5] S. Chakraborty, “Multi-objective optimization of EDM process on AISI P-20 Tool steel using multi-criteria decision-making technique,” In *Machine Learning Applications in Non-Conventional Machining Processes*. (2021) IGI Global, pp. 33-44
- [6] S.S. Kumar, T. Varol, A. Canakci, S.T. Kumaran, and M. Uthayakumar, “A review on the performance of the materials by surface modification through EDM,” *International Journal of Lightweight Materials and Manufacture*, Vol. 4 (1), 2021, pp.127-144.
- [7] M.M. Hasan, T. Saleh, A. Sophian, M.A. Rahman, T. Huang, and M.S. Mohamed, “Experimental modeling techniques in electrical discharge machining (EDM): A review,” *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 127 (5), 2023, pp.2125-2150.

- [8] K. Jamkamon, P. Kumkoon, and S. Chuvaree, “Influence of Electrical Parameters on the Machining Performance in the Small Hole Drilling by EDM Process,” *Solid State Phenomena*, Vol. 349, 2023, pp.33-39.
- [9] Z. Wang, H. Tong, Y. Li, and C. Li, “Dielectric flushing optimization of fast hole EDM drilling based on debris status analysis,” *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 97, 2018, pp.2409-2417.
- [10] W. Liang, H. Tong, Y. Li, B. Li, and Q. Kong, “Sliding-mode controller and algorithm for improving servo control of discharge gap in precise fast hole EDM,” *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 105, 2019, pp.2689-2698.
- [11] A. Eaysin, S. Kabir, E. Gunister, N. Jahan, A. Hamza, M.A. Zinnah, and A.B. Rashid, “ Process Parameter Optimization of Laser Beam Machining for AISI-P20 Mold Steel Using ANFIS Method,” *Results in Surfaces and Interfaces*, 2024, pp.100357.

ระบบคัดแยกวัตถุอัตโนมัติจากสีโดยใช้เทคนิคประมวลผลภาพ

Color-Based Automated Sorting System Using Image Processing Techniques

ธงชัย เพ็งจันทร์ดี¹, สุทธิวัส แววดี้², ฤทธิเกียรติ กิจแก้ว³, พีระวัฒน์ พิมพันธ์ดี⁴, จิรภัทร จันทร์อุทัย⁵ และ ประสาน คำดีผล^{6*}

^{1,2,3,4,5}ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

39 หมู่ที่ 1 ตำบลคลองหก อำเภอคลองหลวง จังหวัดปทุมธานี 12120

⁶ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

63 หมู่ที่ 7 ถนนรังสิต-นครนายก คลอง 16 ตำบลคลองครักษ์ อำเภองครักษ์ จังหวัดนครนายก 26120

Thongchai Pangjundee¹, Suthiwat Waewdee², Rittikeat Kijkaew³, Peerawat Pimpandee⁴,

Jiraprat Januthai⁵ and Prasan Kumdeephol^{6*}

^{1,2,3,4,5}Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering,

Rajamangala University of Technology Thunyaburi

39 Moo 1, Klong 6, Khlong Luang, Pathum Thani, 12120

⁶Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Srinakharinwirot University,

63 Moo 7, Rangsit-Nakhon Nayok Road, Khlong 16, Ongkharak, Ongkharak, Nakhon Nayok, 26120

*Corresponding author Email: Prasarnk@g.swu.ac.th

(Received: May 23, 2025 / Revised: June 14, 2025 / Accepted: June 15, 2025)

บทคัดย่อ

ระบบคัดแยกวัตถุอัตโนมัติเป็นเทคโนโลยีที่ถูกพัฒนาขึ้นเพื่อตอบสนองความต้องการของอุตสาหกรรมที่ต้องการเพิ่มประสิทธิภาพในการผลิตลดความผิดพลาดจากมนุษย์ และประหยัดเวลาในกระบวนการผลิตการนำหุ่นยนต์ และเทคโนโลยีการตรวจจับต่าง ๆ เช่น การประมวลผลภาพ (image processing) และปัญญาประดิษฐ์ (AI) เข้ามาช่วยในการคัดแยกวัตถุได้อย่างแม่นยำ งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาระบบการตรวจจับภาพของ Image Processing ทดสอบการทำฟิแอลซีที่ใช้รวมกับการ Image Processing ในการทำงานคัดแยกสี และหาประสิทธิภาพของชุดจำลองการคัดแยกของสีบนระบบสายพานลำเลียงอัตโนมัติงานวิจัยนี้ออกแบบระบบให้สามารถคัดแยกวัตถุที่มีสีแตกต่างกันได้ทุกสีตามค่าที่ตั้งไว้ พร้อมปรับความเร็วสายพานได้ 3 ระดับ (ช้า, กลาง, เร็ว) โดยใช้กล้องตรวจจับสีของวัตถุและโซลินอยด์ในการแยกวัตถุที่ตรงตามคุณสมบัติ การทดสอบดำเนินการเพื่อวัดความแม่นยำและประสิทธิภาพของระบบผลการวิจัยพบว่าระบบที่พัฒนาสามารถคัดแยกวัตถุได้อย่างแม่นยำ 100% ตามที่ตั้งค่าไว้ ทั้งยังสามารถทำงานต่อเนื่อง และปรับความเร็วได้โดยไม่สูญเสียประสิทธิภาพโครงการนี้ประสบความสำเร็จในการพัฒนาระบบคัดแยกวัตถุอัตโนมัติที่มีความแม่นยำสูง และสามารถใช้งานในหลายอุตสาหกรรม เช่น การผลิตอาหาร การเกษตร และการผลิตชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ ระบบนี้ช่วยลดต้นทุน เพิ่มประสิทธิภาพการผลิต และเป็นเครื่องมือฝึกปฏิบัติที่มีศักยภาพในการพัฒนาองค์ความรู้ด้านระบบอัตโนมัติในอนาคตได้อย่างแม่นยำ

คำสำคัญ: การประมวลผลภาพ, การคัดแยกวัตถุ, ระบบอัตโนมัติ, ฟิแอลซี, สายพานลำเลียง

Abstract

Automatic object sorting system is a technology developed to meet the needs of industries that want to increase production efficiency, reduce human errors, and save time in the production process. The use of robots and various detection technologies such as image processing and artificial intelligence (AI) to help sort objects accurately. This thesis aims to study the image processing detection system, test the PLC used in conjunction with image processing in color sorting, and find the efficiency of the color sorting simulation set on the automatic conveyor system. This research designed a system that can sort objects of different colors according to the set values, with 3 levels of belt speed adjustment (slow, medium, fast) using a camera to detect the color of the object and a solenoid to separate objects that match the properties. Testing was conducted to measure the accuracy and efficiency of the system. The results of the research found that the developed system can sort objects according to the set color. It can also work continuously and adjust the speed without losing efficiency. This project was successful in developing a highly accurate automatic object sorting system that can be used in many industries, such as food production, agriculture, and electronic parts production. This system helps reduce costs, increases production efficiency, and is a potential training tool to develop knowledge in automation systems in the future accurately.

Keywords: Image processing, Object sorting, Automation, PLC, Conveyor belt

1. บทนำ

ระบบคัดแยกวัตถุอัตโนมัติเป็นเทคโนโลยีที่ถูกพัฒนาขึ้นเพื่อตอบสนองความต้องการของอุตสาหกรรมที่ต้องการเพิ่มประสิทธิภาพในการผลิตลดความผิดพลาดจากมนุษย์ และประหยัดเวลาในกระบวนการผลิตการนำหุ่นยนต์ และเทคโนโลยีการตรวจจับต่าง ๆ เช่น การประมวลผลภาพ (image processing) และปัญญาประดิษฐ์ (AI) เข้ามาช่วยในการคัดแยกวัตถุได้อย่างแม่นยำ และรวดเร็วในยุคที่ความต้องการผลิตสินค้าเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วความแม่นยำ [1-3] และความเร็วในการคัดแยกวัตถุเป็นสิ่งสำคัญระบบอัตโนมัติจึงมีบทบาทสำคัญในการลดต้นทุนแรงงาน และเวลาในการทำงาน ตัวอย่างการใช้ระบบนี้มีในหลายอุตสาหกรรม เช่น อุตสาหกรรมอาหาร การเกษตร การผลิตชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ซึ่งระบบคัดแยกอัตโนมัติช่วยแยกวัตถุตามลักษณะเฉพาะ เช่น สี ขนาด รูปร่าง หรือคุณภาพของผลิตภัณฑ์ [4-6] เพิ่มประสิทธิภาพในการทำงานระบบอัตโนมัติช่วยให้การคัดแยกวัตถุทำได้เร็วขึ้น และสามารถทำงานได้ต่อเนื่องโดยไม่ต้องหยุดพักลดความผิดพลาดการใช้เทคโนโลยีการประมวลผลภาพ และปัญญาประดิษฐ์ช่วยเพิ่มความแม่นยำในการคัดแยกลดความผิดพลาดที่อาจเกิดจากการทำงานของมนุษย์ลดต้นทุนแรงงานระบบอัตโนมัติสามารถแทนที่การใช้แรงงานในกระบวนการคัดแยกวัตถุได้บางส่วนทำให้ลดต้นทุนแรงงาน และลดค่าใช้จ่ายในการผลิตปรับตัวเข้ากับหลายอุตสาหกรรม [7] [8]

ระบบนี้สามารถนำไปปรับใช้ในหลายสาขา เช่น อุตสาหกรรมอาหารที่ต้องการคัดแยกผลิตภัณฑ์ตามคุณภาพ หรืออุตสาหกรรมเกษตรที่ใช้ในการคัดแยกผลไม้ตามขนาด และสีระบบคัดแยกวัตถุด้วยระบบอัตโนมัติเป็นโครงการที่มีความสำคัญในการเพิ่มประสิทธิภาพ และลดความผิดพลาดในการผลิตช่วยตอบสนองต่อโจทย์ความต้องการของอุตสาหกรรมที่มุ่งเน้นการผลิตที่รวดเร็ว และมีคุณภาพเทคโนโลยี และเครื่องมือที่ใช้ระบบคัดแยกวัตถุอัตโนมัติพัฒนาโดยใช้เทคโนโลยีต่าง ๆ [2], [5], [6] เทคโนโลยีเหล่านี้มีความสามารถในการประมวลผลข้อมูลแบบเรียลไทม์ ทำให้การคัดแยกวัตถุเป็นไปอย่างรวดเร็วและแม่นยำมากขึ้นเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพ[3], [9] และลดการใช้แรงงานมนุษย์ความท้าทายในการพัฒนาหนึ่งในความท้าทายของระบบ

ตัดแยกวัตถุอัตโนมัติคือการประมวลผลภาพในสภาพแวดล้อมที่ซับซ้อน เช่น การตัดแยกวัตถุที่มีลักษณะคล้ายกันหรือมีการบิดเบือนนอกจากนี้ยังต้องพัฒนาระบบให้สามารถทำงานในอัตราความเร็วที่สูงได้ในขณะที่ยังคงรักษาความแม่นยำผลกระทบเชิงเศรษฐกิจจากระบบตัดแยกวัตถุอัตโนมัติช่วยลดต้นทุนแรงงานได้อย่างมาก ทำให้ธุรกิจสามารถเพิ่มกำไรได้โดยการเพิ่มประสิทธิภาพการผลิต และลดข้อผิดพลาดที่เกิดจากการทำงานของมนุษย์ นอกจากนี้ยังช่วยลดความสูญเสียจากการตัดแยกวัตถุผิดประเภท ซึ่งช่วยรักษาคุณภาพของผลิตภัณฑ์ในกระบวนการผลิตระบบตัดแยกวัตถุด้วยระบบอัตโนมัติไม่เพียงแต่ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพ [1], [2], [10]

ดังนั้น งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อสร้างชุดจำลองการตัดแยกของสปีบนระบบสายพานลำเลียงอัตโนมัติ และประเมินประสิทธิภาพในการตัดแยกของสปีบนระบบสายพานลำเลียงอัตโนมัติโดยการใช้กล้องตรวจสอบของวัตถุในการตัดแยกการตรวจสอบและประเมินผล

2. วัสดุ อุปกรณ์ และเครื่องมือ

2.1 ชิ้นส่วนหลักในการทำงาน

ชิ้นส่วนหลักในการทำงาน ได้แก่ กล้องเว็บแคม, สายพานลำเลียง, คอมพิวเตอร์พกพา, Servo Motor, ไฟ led และ กล่องคลุมป้องกันแสง แสดงหน้าที่ในการทำงานในแต่ละชิ้นส่วนตามภาพที่ 1



(ก) กล้องเว็บแคม



(ข) สายพานลำเลียง



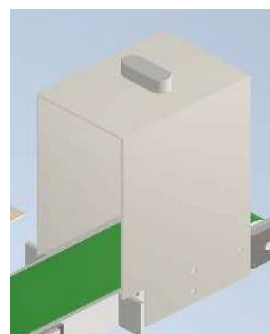
(ค) คอมพิวเตอร์พกพา



(ง) Servo Motor



(จ) ไฟ led



(ฉ) กล่องคลุมป้องกันแสง

ภาพที่ 1 ชิ้นส่วนหลักในการทำงาน

จากภาพที่ 1 อธิบายชื่อชิ้นส่วนและหน้าที่การทำงาน ดังนี้

(ก) กล้องเว็บแคม

หน้าที่การทำงาน : ใช้ในการตรวจจับภาพของผลิตภัณฑ์ในการตรวจสอบความถูกต้อง

(ข) สายพานลำเลียง

หน้าที่การทำงาน : ใช้ในการลำเลียงชิ้นงานเพื่อเข้าสู่กระบวนการตรวจสอบ

(ค) คอมพิวเตอร์พกพา

หน้าที่การทำงาน : ใช้ในการควบคุมและรันโปรแกรม

(ง) Servo Motor

หน้าที่การทำงาน : ใช้ในการปิดวัตถุออก

(จ) ไฟ led

หน้าที่การทำงาน : ใช้สำหรับเพิ่มแสง เพื่อให้เป็นแสงที่คงที่ โดยไม่ใช่แสงธรรมชาติ

(ฉ) กล้องคลุมป้องกันแสง

หน้าที่การทำงาน : ใช้สำหรับป้องกันแสงรบกวนระหว่างการทำงานของเครื่องมือในการตรวจสอบ ซึ่งจะทำให้การตรวจสอบมีความแม่นยำมากขึ้นเมื่อไม่มีแสงมารบกวน

2.2 การออกแบบเครื่องคัดแยกด้วยระบบอัตโนมัติ

(ก) ขั้นตอนที่ 1 ทำการออกแบบระบบสายพาน (Conveyor System)

(ข) ขั้นตอนที่ 2 ทำการออกแบบติดตั้งเซ็นเซอร์ตรวจจับวัตถุ จำนวน 2 ตัว (Color Sensor) ไว้ที่ด้านข้างของตัวสายพานเพื่อให้ตัวเซ็นเซอร์ได้ตรวจจับของวัตถุ

(ค) ขั้นตอนที่ 3 ทำการติดตั้งตัว Servo Motor จำนวน 2 ตัวในการปิดวัตถุที่กำหนด

(ง) ขั้นตอนที่ 4 ทำการศึกษาระบบควบคุม (Controller) PLC และตัว Raspberry Pi ในการเขียนโปรแกรมเพื่อเตรียมความพร้อมในการทดสอบ

(จ) ขั้นตอนที่ 5 ทำการทดสอบกับวัตถุสีตามที่เรากำหนดว่าสามารถทำการคัดแยกสีได้ตามที่กำหนด

(ฉ) ขั้นตอนที่ 6 ทำการปรับแต่งเครื่องให้สมบูรณ์ตามที่กำหนด

3. ขั้นตอนการดำเนินงาน

3.1 ขั้นตอนการศึกษาข้อมูล

ศึกษาข้อมูลและรายละเอียดของปัจจัยต่างๆ รวมถึงปัจจัยทางด้านค่าความชื้นของพืช โดยรวบรวมแนวคิดการศึกษาข้อมูลจากหลักทฤษฎีและวรรณกรรม เพื่อเขียนโครงสร้างจากการศึกษาข้อมูล ศึกษาการคัดแยกวัตถุในรูปแบบต่างๆ

3.2 การวิเคราะห์ระบบการคัดแยกด้วยสี (Color Sorting System)

การวิเคราะห์ระบบการคัดแยกด้วยสีสามารถแบ่งออกเป็นหลายมุมมอง ขึ้นอยู่กับบริบทการใช้งาน เช่น ในอุตสาหกรรมการผลิต การรีไซเคิล หรือด้านเทคโนโลยีคอมพิวเตอร์ ดังนั้นผลการวิเคราะห์ทั่วไปจะครอบคลุมการทำงานของระบบการคัดแยกด้วยสี ระบบจะใช้เซ็นเซอร์ตรวจจับสี (Color Sensor) หรือกล้อง (Camera) เพื่อตรวจสอบสีของวัตถุ แล้วใช้โปรแกรมประมวลผลภาพ (Image Processing) เพื่อระบุ และคัดแยกวัตถุตามสี โดยระบบอาจใช้กลไกเชิงกล (Mechanical Sorter) เช่น แขนกลหรือสายพาน ในการแยกวัตถุออกไปยังช่องต่าง ๆ ระบบคัดแยกด้วยสีมีพื้นฐานมาจากการตรวจจับและประมวลผล “สี” ของวัตถุ โดยใช้เซ็นเซอร์ตรวจจับสีหรือกล้องดิจิทัลในการรับข้อมูล จากนั้นส่งข้อมูลไปยังหน่วยประมวลผล เช่น ไมโครคอนโทรลเลอร์ (Arduino, Raspberry Pi) เพื่อ วิเคราะห์ค่าของสี (เช่น ค่า RGB หรือ HSV) แล้วจึงสั่งการให้ระบบกลไกทำการคัดแยกวัตถุไปยังตำแหน่งที่กำหนดไว้ตามสีตามตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ขั้นตอนการดำเนินงานการทดสอบวัตถุที่มีสีแตกต่างกันเข้าสู่เครื่องทดสอบระบบสี

หัวข้อวิเคราะห์	รายละเอียด
หลักการทำงาน	ใช้เซ็นเซอร์หรือกล้องตรวจจับสีของวัตถุ จากนั้นวิเคราะห์ข้อมูลด้วย
เทคโนโลยีที่ใช้	เซ็นเซอร์สีTCS3200/กล้อง, ไมโครคอนโทรลเลอร์/RaspberryPi, มอเตอร์เซอร์โว
การตรวจจับสี	เซ็นเซอร์วัดค่าความถี่ของแสงในแต่ละแม่สี (RGB) แล้วส่งข้อมูลไปยังหน่วยประมวลผล
การประมวลผลข้อมูลสี	ค่าสีที่วัดได้จะถูกเปรียบเทียบกับเกณฑ์ที่กำหนดไว้ล่วงหน้า เพื่อจัดกลุ่มวัตถุ
ระบบตัดสินใจ	หากสีอยู่ในช่วงที่กำหนด เช่น สีแดง/เหลือง/น้ำเงิน
กลไกการคัดแยก	ใช้เซอร์โวมอเตอร์หรือระบบสายพานในการเคลื่อนย้ายวัตถุไปยังช่องแยกต่าง ๆ
ข้อดีของระบบ	แยกวัตถุได้รวดเร็วและแม่นยำ ลดภาระแรงงาน ต้นทุนต่อหน่วยต่ำหลังติดตั้ง
ข้อจำกัดของระบบ	แสงสว่างมีผลต่อการตรวจจับสีที่คล้ายกันอาจแยกผิดพลาดไม่เหมาะสม
แนวทางพัฒนาเพิ่มเติม	ใช้ระบบแสงควบคุมในพื้นที่คัดแยกปรับปรุงซอฟต์แวร์ เพิ่มจำนวนสีที่รองรับการแยก

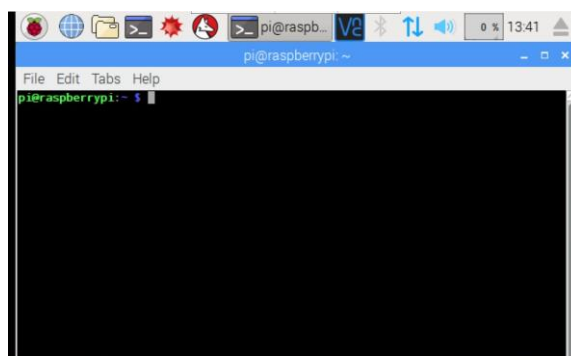
ข้อมูลการทดสอบระบบคัดแยกด้วยสีทำการทดสอบโดยการทดสอบวัตถุที่มีสีแตกต่างกันเข้าสู่เครื่องทดสอบระบบสีที่ทำการทดสอบได้แก่ สีแดง สีนํ้าเงิน สีเหลือง และทำการบันทึกผลการคัดแยกในแต่ละรอบดังตารางที่ 1 ปัจจัยที่มีผลต่อความผิดพลาดได้แก่ สภาพแสงตำแหน่งการวาง และความคมชัดของสายพาน

- 1) รอบที่ 1 จำนวนวัตถุ 10 ชิ้น สีที่ใช้ทดสอบ สีแดง คัดแยกถูกต้องทั้งหมดมีความแม่นยำ ในที่แสงสว่างที่พอดี
- 2) รอบที่ 2 จำนวนวัตถุ 10 ชิ้น สีที่ใช้ทดสอบ สีนํ้าเงิน แยกถูกต้องทั้งหมดมีความแม่นยำ ในที่แสงสว่างที่พอดี
- 3) รอบที่ 3 จำนวนวัตถุ 10 ชิ้น สีที่ใช้ทดสอบ สีเหลือง คัดแยกถูกต้องทั้งหมดมีความแม่นยำ ในที่แสงสว่างที่พอดี
- 4) รอบที่ 4 จำนวนวัตถุ 20 ชิ้น สีที่ใช้ทดสอบ สีนํ้าเงิน สีเหลือง คัดแยกถูกต้องทั้งหมดมีความแม่นยำ ในที่แสงสว่างที่พอดี
- 5) รอบที่ 5 จำนวนวัตถุ 30 ชิ้น สีที่ใช้ทดสอบ สีแดง สีนํ้าเงิน สีเหลือง คัดแยกถูกต้องทั้งหมดมีความแม่นยำ ในที่แสงสว่างที่พอดี

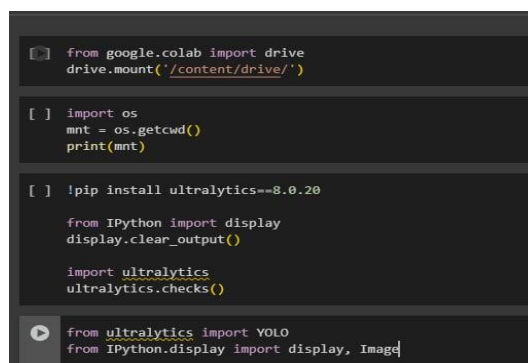
3.3 การพัฒนาฮาร์ดแวร์

- ขั้นตอนที่ 1 การเข้าสู่หน้าเว็บไซต์ PyMySQL บนโปรแกรม Raspberry Pi
- ขั้นตอนที่ 2 ทำการกด install ติดตั้งโปรแกรม PyMySQL สำหรับการเชื่อมต่อ Python เข้ากับฐานข้อมูล MySQL
- ขั้นตอนที่ 3 ทำการทดสอบการเข้าโปรแกรม
- ขั้นตอนที่ 4 รันโปรแกรม Python 2 เพื่อจะทดสอบก่อนเริ่มทำการเขียนจริง
- ขั้นตอนที่ 5 ตรวจสอบความสำเร็จของการติดตั้ง เมื่อติดตั้งเสร็จแล้วให้เปิด Python interpreter และทำการทดสอบว่า PyMySQL สามารถนำเข้าได้ให้ลองพิมพ์
- ขั้นตอนที่ 6 ดึงข้อมูลจากฐานข้อมูล (Optional) สามารถอ่านข้อมูลในฐานข้อมูลด้วยโค้ด Python ด้วยโค้ด
- ขั้นตอนที่ 7 เครื่องมือที่ใช้สำหรับการเขียนและรันโค้ดในรูปแบบของ notebook ซึ่งเป็นเครื่องมือที่ใช้สำหรับการเขียนและรันโค้ดในรูปแบบของ notebook ทางออนไลน์ มีเซลล์โค้ดต่างๆ แสดงอยู่ ซึ่งทำงานบน Python 2 Engine backend ที่มี GPU
- ขั้นตอนที่ 8 การพัฒนาและรันโค้ดขั้นตอนนี้แสดงหน้าจอของ PyMySQL ซึ่งเป็นสภาพแวดล้อมเพื่อการพัฒนาและรันโค้ดในรูปแบบของ notebook ซึ่งเป็นไลบรารีที่ใช้สำหรับการทำงานเกี่ยวกับการมองเห็นด้วยคอมพิวเตอร์ (computer vision) และการเรียนรู้ของเครื่อง (machine learning)
- ขั้นตอนที่ 9 การเขียนโค้ดขั้นตอนนี้แสดงหน้าจอของ Python 2 แสดงส่วนของการเขียนโค้ดใน notebook ภายใน notebook มีเซลล์ที่มีการเขียนโค้ดในภาษา Python เพื่อทำงานต่างๆ.

- ขั้นตอนที่ 10 การรันโค้ดของ Colorsplit.py
- ขั้นตอนที่ 11 ทำการเปิดโปรแกรมทดสอบการรันโค้ดของ Colorsplit.py ว่าสามารถทำงานการคัดแยกสีคู่กับกล้อง
- ขั้นตอนที่ 12 โค้ดการรันของ Servotest.py ทำการทดสอบการโค้ดเขียนถูกต้องตามหลัก
- ขั้นตอนที่ 13 การเขียนคำสั่งโปรแกรม พีแอลซี เปิดโปรแกรม GX Works 3
- ขั้นตอนที่ 14 New Project จะปรากฏหน้าต่างขึ้นมาจากนั้นจะได้หน้าต่างขึ้นมา
- ขั้นตอนที่ 15 เลือกชนิดของ พีแอลซี ตามรุ่นที่ต้องการป้อนข้อมูลลงในที่นั้นจากนั้นจะได้หน้าต่างขึ้นมา
- ขั้นตอนที่ 16 กดเลือก Parameter เพื่อเลือกไฟล์ที่ต้องการที่จะส่งและกดเลือก Execute ยืนยันการส่งไฟล์
- ขั้นตอนที่ 17 โหลดไฟล์ไปยัง พีแอลซี และกด Cancel เพื่อปิดหน้าต่างหลังจากโหลดไฟล์เสร็จ

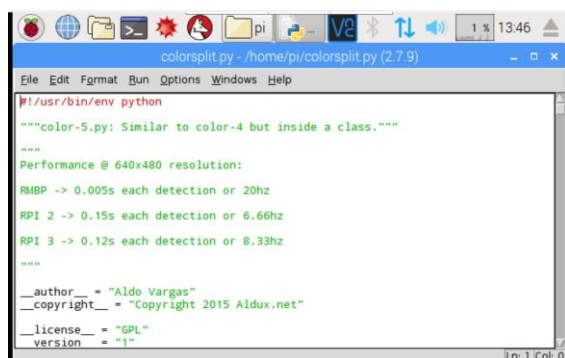


ภาพที่ 2 หน้าตาโปรแกรม Python 2

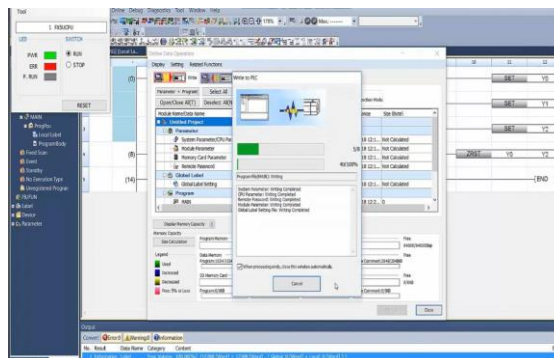


ภาพที่ 3 หน้าจอของ PyMySQL

แสดงส่วนของการเขียนโค้ด



ภาพที่ 4 หน้าจอการรันโค้ดของ Colorsplit.py 1



ภาพที่ 5 การโหลดคำสั่งเข้า พีแอลซี

จากภาพที่ 2 – 5 ตามลำดับ แสดงตัวอย่างการพัฒนาและการใช้งานโมเดลวิสัยทัศน์คอมพิวเตอร์ (computer vision models) บนของเว็บไซต์ของโปรแกรม ซึ่งระบบนี้สามารถนำไปเป็นชุดจำลองการทำงานได้จริง และการควบคุมคุณภาพระบบการคัดแยกวัตถุตามสี ได้อย่างแม่นยำ Raspberry Pi กับ PLC และ Image Processing ทำงานร่วมกันได้และช่วยให้การคัดแยกวัตถุเป็นไปอย่างอัตโนมัติอัตราความถูกต้องของการคัดแยก ในสภาวะที่กำหนดเวลา และแรงงานในการคัดแยกวัตถุเมื่อเทียบกับการทำงานด้วยมือระบบสามารถปรับใช้กับกระบวนการผลิตและต่อยอดพัฒนาใช้งานในอุตสาหกรรมได้จริงต่อไป

4. ผลการทดลอง

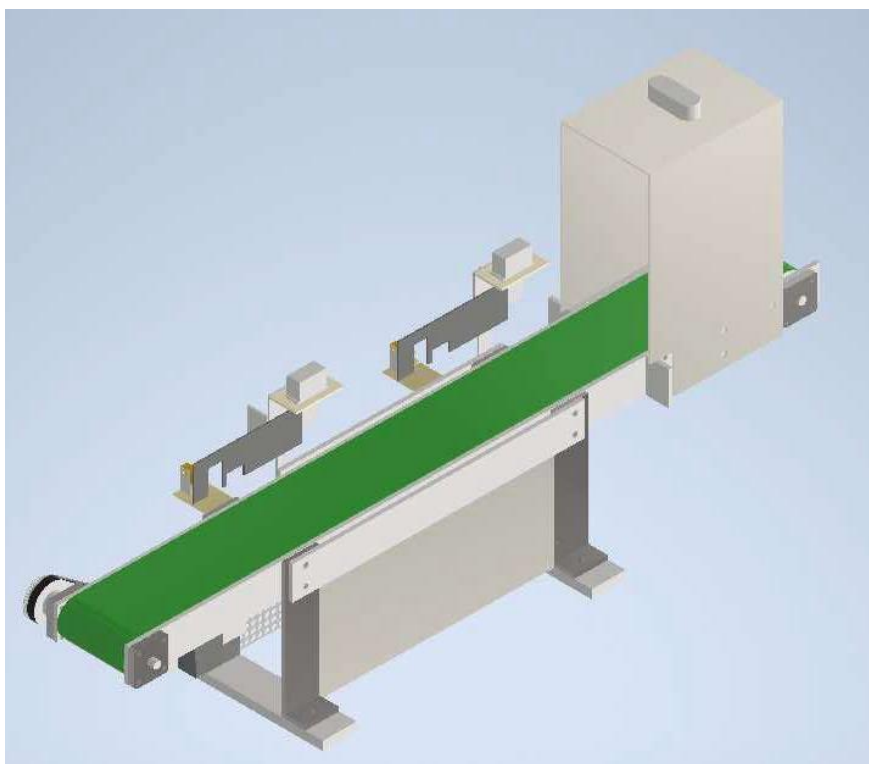
การวิเคราะห์ระบบการคัดแยกด้วยสี (Color Sorting System) สามารถแบ่งออกเป็นหลายมุมมอง ขึ้นอยู่กับบริบทการใช้งาน เช่น ในอุตสาหกรรมการผลิต การรีไซเคิล หรือด้านเทคโนโลยีคอมพิวเตอร์ ดังนั้นผลการวิเคราะห์ทั่วไปจะครอบคลุม

4.1 การทำงานของระบบการคัดแยกด้วยสี

ระบบจะใช้เซ็นเซอร์ตรวจจับวัตถุ หรือกล้อง เพื่อตรวจสอบสีของวัตถุ แล้วใช้โปรแกรมประมวลผลภาพ (Image Processing) เพื่อระบุ และคัดแยกวัตถุตามสี โดยระบบอาจใช้ สายพาน ในการแยกวัตถุออกไปยังช่องต่าง ๆ ระบบคัดแยกด้วยสีมีพื้นฐานมาจากการตรวจจับและประมวลผล “สี” ของวัตถุ โดยใช้เซ็นเซอร์ตรวจจับวัตถุ หรือกล้องในการรับข้อมูล จากนั้นส่งข้อมูลไปยังหน่วยประมวลผล เช่น ไมโครคอนโทรลเลอร์ (Arduino, Raspberry Pi) เพื่อวิเคราะห์ค่าของสี ทำการคัดแยกวัตถุไปยังตำแหน่งที่กำหนดไว้ตามสี

4.2 ข้อมูลการทดลองระบบคัดแยกด้วยสี

การทดลองโดยการทดลองวัตถุที่มีสีแตกต่างกันเข้าสู่เครื่องทดลองระบบสีที่ทำการทดสอบได้แก่ สีแดง สีน้ำเงิน สีเหลือง และทำการบันทึกผลการคัดแยกในแต่ละรอบการที่เกิดข้อผิดพลาดได้แก่ สภาพแสงตำแหน่งการวางความเร็วรอบ และความคมชัดของสายพานภาพที่ 6



ภาพที่ 6 เครื่องทดลองคัดแยกด้วยสี

ผลการทดลองการคัดแยกสีแสดงให้เห็นว่ากระบวนการทำงานมีประสิทธิภาพสูง โดยระบบสามารถตรวจจับสีแดง สีน้ำเงิน และสีเหลือง ได้ครบ 30 ครั้งต่อแต่ละสี โดยไม่พบความผิดพลาด และตำแหน่งที่ตรวจจับทั้งหมดถูกต้อง (OK) ซึ่งสรุปได้ว่าการคัดแยกสีในครั้งนี้มีความแม่นยำภายใต้เงื่อนไขการทดลองดังผลการทดลองตามตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ผลการทดลองการตัดแยกเฉพาะสีที่ตรวจจับ

สีที่ตรวจจับ	จำนวนครั้ง	ความผิดพลาด	ตำแหน่งที่ถูกต้อง
สีแดง	30	-	OK (ถูกต้อง)
สีเหลือง	30	-	OK (ถูกต้อง)
สีน้ำเงิน	30	-	OK (ถูกต้อง)

ผลการทดลองการตัดแยกวัตถุตามความเร็วของสายพานที่แตกต่างกัน (ต่ำ กลาง สูง) โดยใช้เวลาในการตัดแยกวัตถุจำนวน 30 ชิ้น พบว่าเมื่อความเร็วของสายพานเพิ่มขึ้น เวลาที่ใช้ในการตัดแยกลดลง แต่ข้อผิดพลาดในการตัดแยกเพิ่มขึ้นตามลำดับ ได้แก่ ความเร็วต่ำใช้เวลา 14 วินาที ไม่มีข้อผิดพลาด ความเร็วปานกลางใช้เวลา 10 วินาที พบข้อผิดพลาด 1 ชิ้น และความเร็วสูงใช้เวลา 7 วินาที พบข้อผิดพลาด 2 ชิ้น แสดงให้เห็นว่าความเร็วของสายพานส่งผลต่อความแม่นยำในการตัดแยกวัตถุดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ผลการทดลองการตัดแยกด้วยความเร็วรอบ ความเร็วต่ำ ความเร็วกลาง ความเร็วสูง

ชิ้นงานทดสอบ	เวลาที่ใช้ตัดแยก (วินาที)	จำนวนวัตถุที่ตัดแยก	ความเร็วสายพาน (ม./วินาที)	ข้อผิดพลาดที่พบ	หมายเหตุ
1	14	30	0.5	NG 0	รอบต่ำ
2	10	30	1.0	NG 1	รอบกลาง
3	7	30	1.5	NG 2	รอบสูง

ตารางที่ 4 ผลการทดลองการตัดแยกวัตถุทรงสี่เหลี่ยม สีแดง เหลือง และน้ำเงิน

ครั้งที่ทดลอง	วิธีการจับเวลา (TIM)			เวลาที่ใช้ (ม./วินาที)			การจำแนก (ได้,ไม่ได้)			ตำแหน่ง (ถูก,ไม่ถูก)		
	แดง	เหลือง	น้ำเงิน	แดง	เหลือง	น้ำเงิน	แดง	เหลือง	น้ำเงิน	แดง	เหลือง	น้ำเงิน
1	จับเวลาโดยตรง			7.56	12.06	10.00	ได้			ถูก		
2	จับเวลาโดยตรง			7.59	12.08	10.02	ได้			ถูก		
3	จับเวลาโดยตรง			7.55	12.05	10.04	ได้			ถูก		
4	จับเวลาโดยตรง			7.57	12.09	10.03	ได้			ถูก		
ค่าเฉลี่ย				7.57	12.07	10.02						

ผลการทดลองการตัดแยกวัตถุทรงสี่เหลี่ยมสีแดง 4 ครั้ง โดยมีการจับเวลาและบันทึกระยะเวลาที่ใช้ในการตัดแยกซึ่งอยู่ในช่วงประมาณ 7.55 - 7.59 วินาที ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าวัตถุสามารถถูกจำแนกได้ถูกต้องทุกครั้ง และตำแหน่งการวางก็ถูกต้องทั้งหมด แสดงให้เห็นว่าระบบสามารถตัดแยกวัตถุสีแดงได้อย่างมีประสิทธิภาพและแม่นยำในทุกครั้งของการทดลองดังตารางที่ 4 สำหรับผลการทดลองการตัดแยกวัตถุทรงสี่เหลี่ยมสีเหลือง โดยมีการจับเวลาและบันทึกระยะเวลาที่ใช้ในการตัดแยก ซึ่งอยู่ในช่วงประมาณ 12.05 - 12.09 วินาที ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าวัตถุสามารถถูกจำแนกได้ถูกต้องทุกครั้ง และตำแหน่งการวางก็ถูกต้องทั้งหมด แสดงให้เห็นว่าระบบสามารถตัดแยกวัตถุสีเหลืองได้อย่างมีประสิทธิภาพและแม่นยำในทุกครั้งของการทดลอง และผลการทดลองการตัดแยกวัตถุทรงสี่เหลี่ยมสีน้ำเงิน พบว่ามีเวลาและบันทึกระยะเวลาที่ใช้ในการตัดแยกอยู่ในช่วงประมาณ 10.00 - 10.04 วินาที ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าวัตถุสามารถถูกจำแนกได้ถูกต้องทุกครั้ง

และตำแหน่งการวางก็ถูกต้องทั้งหมด แสดงให้เห็นว่าระบบสามารถคัดแยกวัตถุสีแดงได้อย่างมีประสิทธิภาพและแม่นยำในทุกครั้งของการทดลอง

5. สรุปผล

5.1 ชุดฝึกอบรมอัตโนมัติสำหรับฝึกปฏิบัติที่สามารถจำลองการคัดแยกของสีบนระบบสายพานลำเลียงด้วยระบบคัดแยกวัตถุตามสีสามารถพัฒนาได้โดยใช้กล้องสำหรับตรวจจับสี

5.2 การใช้กล้องร่วมกับการประมวลผลภาพ และการควบคุมเซอร์โวมอเตอร์ด้วย Raspberry Pi ซึ่งคัดแยกวัตถุตามสีแดง สีเหลือง และน้ำเงิน คัดแยกได้อย่างแม่นยำ รวดเร็ว ระบบสามารถจำลองสถานการณ์จริงในงานอุตสาหกรรมได้ และมีประสิทธิภาพ

5.3 ระบบการตรวจจับภาพด้วยกระบวนการ Image Processing การประมวลผลภาพผ่านกล้องร่วมกับซอฟต์แวร์ OpenCV สามารถจำแนกสีแดง สีเหลือง และสีน้ำเงินได้อย่างแม่นยำ สามารถตอบสนองที่รวดเร็ว

5.4 ระบบคัดแยกสีที่ใช้การควบคุมร่วมกันระหว่าง PLC และ Raspberry Pi ซึ่งระบบสามารถทำงานร่วมกันได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดย Raspberry Pi ทำหน้าที่ประมวลผลภาพเพื่อตรวจจับสีของวัตถุ และส่งข้อมูลไปยัง PLC สำหรับควบคุมกลไกการคัดแยก

6. ข้อเสนอแนะ

1) การวิเคราะห์ระบบการคัดแยกมีความจำเป็นต้องทำการประเมินระยะสั้นๆ และทำให้ผู้วิเคราะห์ ได้เข้าใจถึงการเปลี่ยนแปลงในกระบวนการในการคัดแยก

2) ในการตรวจจับภาพควรใช้กล้องที่มีความคมชัด และความละเอียดสูง

3) โปรแกรมที่ใช้ในการตรวจจับจำเป็นต้องเป็นโปรแกรมเฉพาะทางมากขึ้น จึงจะทำให้ประสิทธิภาพของโปรแกรมมีความแม่นยำ และเสถียรมากขึ้น

4) แสงของความสว่างมีผลต่อการตรวจจับของกล้องแสงมากเกินไปอาจมีการผิดพลาดของโปรแกรมในการตรวจจับ

7. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจาก มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี เพื่อศึกษาเครื่องต้นแบบสำหรับคัดแยกวัตถุโดยใช้ Image Processing ในการทำงานคัดแยกสีของชิ้นงาน

8. เอกสารอ้างอิง

- [1] กันตภณ พลั่วไธสง. (2559). “เครื่องคัดแยกสีวัตถุอัตโนมัติที่สายพานลำเลียงที่ถูกควบคุมด้วยอาตูโน”. สมาคมสถาบันอุดมศึกษาเอกชนแห่งประเทศไทย, ปีที่ 5 ฉบับที่ 1, มกราคม-มิถุนายน 2559. หน้า 15-21.
- [2] วนายุทธ์ แสนเงิน, ณรงค์พล นัยสงวนศรี, กริชธนา บุญนาค และ นัฐพร แซ่พู. (2565). "การพัฒนาชุดศึกษาระบบคัดแยกสีของวัตถุนสายพานลำเลียงด้วยแขนกลหุ่นยนต์สกร่า". การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 45. วันที่ 16-18 พฤศจิกายน 2565. ณ ภูสัถธาร รีสอร์ท อำเภอมือง จังหวัดนครนายก. หน้า xx-xx.
- [3] ณัฐพงศ์ โพธิ์ศรี, กนกกร ทองบ่อ และกิตติวัฒน์ นิมเกิดผล. (2556). “คัดแยกวัตถุด้วยการประมวลผลภาพ”. ปริญญา นิพนธ์, ภาควิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี.
- [4] ณัฐพงษ์ บุหงา, วีระชัย บุญเพิ่ม และสนอง ดีสม. (2564). “เครื่องคัดแยกวัตถุอัตโนมัติในสายพานลำเลียงควบคุมด้วยระบบพีแอลซี”. วารสารวิศวกรรมฟาร์มและเทคโนโลยีการควบคุมอัตโนมัติ. January–June 2021; 7(1): 49-59.

- [5] สุนทร ก้องสินธุ์, อนุชิต สิงห์จันทร์, สมนึก ดำนัย และ ณัฐวิรัช สุขสง. (2561). "การออกแบบชุดทดลองคัดแยกสีอัตโนมัติบนระบบสายพานลำเลียงโดยโมดูลแยกสีอัตโนมัติ". วารสารวิจัยและนวัตกรรมสถาบันการอาชีวศึกษา กรุงเทพมหานคร. ปีที่ 1 ฉบับที่ 2, กรกฎาคม-ธันวาคม 2561. หน้า 56-67.
- [6] กัลยาวิดี ชูเจริญเดช, ขนทัต ดำนุ่น และ ภควรรษ เอียดพวง. (2566). "การออกแบบชุดทดลองคัดแยกสีอัตโนมัติบนระบบสายพานลำเลียง โดยโมดูลแยกสี". ปรินิพนธ์นิพนธ์สาขาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มทร.ศรีวิชัย. กันยายน 12, 2566.
- [7] ณัฐดนัย เรือนคำ. (2559). "แบบจำลองเครื่องคัดแยกวัตถุอัตโนมัติบนสายพานลำเลียง". การประชุมวิชาการระดับชาติ มหาวิทยาลัยราชภัฏกำแพงเพชร ครั้งที่ 3 (ฉบับที่ 1). วันที่ 22 ธันวาคม 2559. หน้า 625-635.
- [8] สมเจตน์ ทองดี. (2559). "การสร้างและหาประสิทธิภาพชุดฝึกอบรมอัตโนมัติสำหรับการฝึกปฏิบัติ". งานวิจัยจากมหาวิทยาลัยราชภัฏพิบูลสงคราม, ประจำปีงบประมาณ 2559.
- [9] Bickman, Josh, "Automated Color-Sorting uses optical technology", vol. 13, 1996.
- [10] R Mattone, G. Campagiorni, F. Galati, "Sorting of items on a moving conveyor belt. Part1: A Technique for detecting and classifying objects", vol. 16, issues 2-3, 1999.

คำแนะนำสำหรับผู้เขียน

วารสารเทคโนโลยีและวิศวกรรมก้าวหน้า รับผิดชอบต่อภาษาไทยหรือภาษาอังกฤษ ต้องเป็นต้นฉบับ ไม่เคยตีพิมพ์หรือเผยแพร่ที่ไหนมาก่อน มีจุดประสงค์เพื่อเผยแพร่ความรู้ และผลงานวิชาการด้านเทคโนโลยีและวิศวกรรม และมีการตรวจสอบคุณภาพอย่างเคร่งครัด

1. ข้อกำหนดทั่วไป

บทความต้องประกอบด้วยส่วนต่าง ๆ ตามลำดับต่อไปนี้ คือ

- ชื่อเรื่อง/บทความ (Title)
- ชื่อผู้เขียน/อีเมล (Author, E-mail)
- ที่อยู่ผู้เขียน (Affiliation)
- บทคัดย่อ (Abstract)
- คำสำคัญ (Keywords)
- บทนำ (Introduction)
- เนื้อหา (Text)
- สรุป (Conclusion)
- กิตติกรรมประกาศ (ถ้ามี) (Acknowledgements)
- เอกสารอ้างอิง (References)

2. คำแนะนำในการเขียนและพิมพ์

บทความที่มีความประสงค์เผยแพร่ในวารสารเทคโนโลยีและวิศวกรรมก้าวหน้า ให้ผู้เขียนใช้ฟอนต์ TH Sarabun New ทั้งฉบับ เว้นแต่การใช้สัญลักษณ์เฉพาะ โดยมีการกำหนดขนาดของตัวอักษรและการกำหนดตัวพิมพ์หนา (Bold) และตัวพิมพ์ปกติ (Regular) ดังนี้

2.1. ชื่อเรื่อง/บทความ (Title) มีทั้งภาษาไทยและภาษาอังกฤษ ใช้ตัวอักษรขนาด 18 ด้วยการพิมพ์ตัวหนา ควรใช้ชื่อเรื่องให้มีความกระชับแต่ครอบคลุมสาระเนื้อหาของบทความเพื่อสื่อความหมายของบทความอย่างชัดเจน ไม่ใช้คำย่อ โดยจัดวางกึ่งกลางหน้ากระดาษ

2.2. ชื่อผู้เขียนหลัก (Corresponding Author) และผู้เขียนร่วม (Co-Author) มีทั้งภาษาไทยและภาษาอังกฤษ ใช้ตัวอักษรขนาด 14 ด้วยการพิมพ์ตัวปกติ ไม่ต้องระบุตำแหน่งและตำแหน่งทางวิชาการ ให้ใส่หมายเลขลำดับ (ตัวยก) แสดงสังกัดที่แตกต่างกัน และใส่เครื่องหมายดอกจัน (*) ไว้หลัง ชื่อ-สกุล และหมายเลขสังกัด ของผู้เขียนหลัก (ตัวยก)

2.2.1 สำหรับผู้เขียนหลัก ให้ระบุ E-mail เพื่อใช้ในการติดต่อ

2.3. สังกัดผู้เขียน (Affiliation) มีทั้งภาษาไทยและภาษาอังกฤษ ใช้ตัวอักษรขนาด 14 ด้วยการพิมพ์ตัวปกติ ประกอบด้วย ชื่อสังกัด ที่อยู่ และรหัสไปรษณีย์ โดยให้ใส่ตัวเลขกำกับไว้ด้านหน้าโดยใช้ตัวยก

2.4. บทย่อบทคัดย่อ (Abstract) มีทั้งภาษาไทยและภาษาอังกฤษ ใช้ตัวอักษรขนาด 14 หัวข้อให้ใช้ตัวพิมพ์หนาและสำหรับเนื้อหาของบทคัดย่อให้ใช้ตัวพิมพ์ปกติ ซึ่งเป็นการสรุปประเด็นเนื้อหาที่เป็นแก่นสำคัญเน้นประเด็นสำคัญของงาน ที่ต้องการนำเสนอ โดยควรประกอบด้วยวัตถุประสงค์ วิธีการ เครื่องมือ และผลสรุป ควรเขียนให้สั้นที่ได้จากการวิจัย และกระชับ สำหรับบทคัดย่อภาษาอังกฤษ ผู้เขียนต้องใช้หลักไวยากรณ์ที่ถูกต้องและต้องมีความหมายเดียวกันกับบทคัดย่อภาษาไทย ถ้าบทความเป็นภาษาไทยจะต้องมีบทคัดย่อทั้งภาษาไทยและภาษาอังกฤษโดยให้ภาษาไทยขึ้นก่อน มีความยาวไม่เกิน 1,000 คำ

2.5. คำสำคัญ (Keywords) มีทั้งภาษาไทยและภาษาอังกฤษ ใช้ตัวอักษรขนาด 14 โดยใช้ตัวพิมพ์หนาตัวพิมพ์ปกติ ดังตัวอย่างใน Template นี้ ควรเป็นคำที่อยู่ในชื่อบทความ โดยให้ระบุ 3-5 คำ สำหรับภาษาไทย ให้เว้นวรรคระหว่างคำสำคัญ โดยไม่ใส่จุลภาค หรือ ลูกน้ำ (,) ขึ้นระหว่างคำสำคัญ

2.6. บทนำ (Introduction) ใช้ตัวอักษรขนาด 14 หัวข้อให้ใช้ตัวพิมพ์หนาและสำหรับเนื้อหาให้ใช้ตัวพิมพ์ปกติ ในส่วนนี้เป็นเนื้อหาที่ผู้เขียนตั้งใจให้ผู้อ่านเกิดความสนใจในเรื่องนั้นๆ ซึ่งควรมีข้อมูลปฐมภูมิจากการทบทวนวรรณกรรม ข้อมูลทางวิชาการ โดยการสรุปและมีการอ้างอิง เพื่อไว้เป็นข้อมูลที่ผู้กำหนดวัตถุประสงค์ของงานวิจัย

2.7. เนื้อหา (Text) ใช้ตัวอักษรขนาด 14 ด้วยตัวพิมพ์ปกติ โดยบทความที่เสนออาจพิมพ์เป็นภาษาไทยหรือภาษาอังกฤษ ตามรูปแบบที่กำหนดเพื่อพร้อมที่จะนำไปพิมพ์ได้ทันที โดยกำหนดขนาดพิมพ์ขนาด A4 ใช้รูปแบบการพิมพ์ 1 คอลัมน์ตามรูปแบบบทความนี้ ไม่มีเว้นระยะห่างระหว่างบรรทัด นอกจากการขึ้นหัวข้อใหม่ให้เว้นบรรทัด 1 บรรทัด โดยจะต้องพิมพ์ให้เต็มคอลัมน์ก่อนที่จะขึ้นคอลัมน์ใหม่ หรือขึ้นหน้าใหม่ ห้ามเว้นที่เหลือไว้ว่างเปล่า

การลำดับหัวข้อในส่วนเนื้อหาของเรื่องนี้ ให้ใส่เลขกำกับโดยให้บทนำเป็นหัวข้อหมายเลข 1 และใส่มหัพภาค หรือ เครื่องหมายจุดหลังตัวเลข เว้นระยะห่าง 1 ช่อง และตามด้วยลำดับหัวข้อ โดยกำหนดให้ทั้งหัวข้อเป็นตัวพิมพ์หนาหากมีการแบ่งหัวข้อย่อย ให้ใช้เลขระบบทศนิยมกับหัวข้อย่อย เช่น 1.1 โดยใช้อักษรรูปแบบปกติ ซึ่งในส่วนของเนื้อหาควรมีหัวข้อเรื่องระเบียบวิธีการ วัสดุและอุปกรณ์ และหัวข้ออื่นที่จำเป็นต่อการได้มาซึ่งผลการวิจัย

2.7.1 รูปแบบการเขียนตารางให้ดูตัวอย่างดังตารางที่ 1 กำหนดให้มีเส้นในแนวนอน มีเฉพาะเส้นในแนวนอน หัวข้อหลักในแต่ละคอลัมน์ กำหนดให้เป็นตัวหนา จัดชิดขอบด้านซ้ายของแต่ละคอลัมน์ และในส่วนของเนื้อหาควรอ้างอิงและมีการอธิบายตารางที่นำมาใช้สื่อสารกับผู้อ่านในบทความ โดยใช้อักษรขนาด 12 ในเนื้อหาของตาราง โดยหัวข้อในตารางให้ใช้ตัวพิมพ์หนา

ชื่อ ตารางที่ 1 ใช้ตัวอักษรขนาด 14 ด้วยตัวพิมพ์หนาและตามด้วยชื่อตารางด้วยตัวพิมพ์ปกติจัดวางอยู่เหนือตาราง โดยไม่เว้นบรรทัดระหว่างชื่อตารางกับตาราง ตำแหน่งของชื่อตารางและตัวตารางให้จัดชิดซ้ายสุด

2.7.2 รูปภาพที่ใส่ในบทความควรมีความละเอียดเพียงพอต่อการแสดงรายละเอียดเพื่อสื่อสารกับผู้อ่าน ต้องมีอัตราส่วน (Ratio) ของรูปภาพที่ถูกต้อง หากมีตัวอักษรในภาพต้องมีขนาดใหญ่เพียงพอและได้สัดส่วนกับรูปภาพดังกล่าว รูปภาพทุกรูปจะต้องมีหมายเลขกำกับเรียงลำดับก่อนและหลังพร้อมคำบรรยายได้รูปภาพ โดยจัดคำอธิบายและรูปไว้กึ่งกลางหน้ากระดาษ ไม่ควรใช้คำว่า “แสดง” เช่น ไม่ควรเขียนว่า “รูปที่ 1 แสดงเงื่อนไขการสร้างความเค้นตกค้างขณะเชื่อม” ที่ถูกต้องควรเป็น “รูปที่ 1 เงื่อนไขการสร้างความเค้นตกค้างขณะเชื่อม” ทั้งนี้ทุกรูปภาพต้องมีการอ้างอิงในเนื้อหา

2.7.3 การเขียนสมการจะต้องมีหมายเลขกำกับอยู่ภายในวงเล็บและเรียงลำดับที่ถูกต้อง ควรใช้ตัวพยัญชนะเสียงแสดงถึงพารามิเตอร์หรือตัวแปรในสมการหรืออาจใช้สัญลักษณ์เฉพาะ หรือใช้รูปแบบ Equation ในการเขียน โดยต้องมีรายละเอียดแสดงความหมายของพารามิเตอร์ที่ปรากฏอยู่ในสมการ เว้นหนึ่งบรรทัดก่อนเขียนสมการ และเว้นหนึ่งบรรทัดหลังเขียนสมการ จัดให้สมการอยู่ตรงกลางหน้ากระดาษ

ตัวอย่างเช่น ความสัมพันธ์ระหว่างแรงเสียดทาน (Friction Force; f) กับความดันกระทำตั้งฉากกับทิศทางการเคลื่อนที่ (Normal Pressure; N) ที่รู้จักกันในชื่อ Coulomb Friction ดังสมการ (1) โดยที่ μ คือ ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน (Coefficient of Friction) [2] ซึ่งต้องมีการอ้างอิงหากนำมาจากแหล่งอื่น ตัวอย่างการเขียนสมการแสดงดังสมการที่ (1) (เว้น 1 บรรทัด ด้วยขนาดอักษร 14)

$$\mu = \frac{f}{N} \quad (1)$$

(เว้น 1 บรรทัด ด้วยขนาดอักษร 14)

3. สรุป

ในส่วนเนื้อหา ผลที่ได้จากการวิจัยต้องมีการวิเคราะห์ข้อมูลหรือเปรียบเทียบกับงานวิจัยก่อนหน้าเพื่อให้ได้ข้อสรุปที่ได้จากงานวิจัยนี้ ควรแสดงถึงสิ่งที่ได้จากงานวิจัยนี้เพื่อประโยชน์ในการพัฒนาต่อยอดกับงานวิจัยอื่นหรือผู้อ่าน รวมถึงสามารถใช้อ้างอิงข้อมูลหรือนำไปใช้ประโยชน์ได้ โดยอาจเขียนแบ่งเป็นข้อ ๆ

1) บทความวิจัยควรมีความยาวของหน้ากระดาษระหว่าง 6 ถึง 12 หน้า

2) บทความทุกบทความที่ส่งเข้าในระบบเพื่อกระบวนการเผยแพร่ในวารสารเทคโนโลยีและวิศวกรรมก้าวหน้า ต้องได้รับความยินยอมจากผู้เขียนร่วมทุกท่าน และจะถูกตรวจสอบความซ้ำซ้อนจากกองบรรณาธิการตามมาตรฐานที่กำหนด รวมถึงจะถูกกลั่นกรองจากผู้ทรงคุณวุฒิในการพิจารณาอนุมัติ ให้แก้ไข หรือปฏิเสธการเผยแพร่ในวารสาร

3) การส่งบทความให้ดำเนินการผ่านระบบออนไลน์ ที่ <https://ph03.tci-thaijo.org/index.php/JTEP>

4. กิตติกรรมประกาศ

บรรณาธิการขอขอบคุณท่านที่สนใจเสนอผลงานเพื่อเผยแพร่ในวารสารเทคโนโลยีและวิศวกรรมก้าวหน้า (JTEP) และหวังเป็นอย่างยิ่งว่าจะได้รับการสนับสนุนจากทุกท่านเพื่อเผยแพร่ผลงานในวารสารนี้ต่อไป

5. เอกสารอ้างอิง

- [1] R. Phaoniam, S. Wonthaisong, K. Nurinram and J. Kaewwichit. “ Study of Cracking Behavior of a Drilled Hole Edge Crack on ECT Sensitivity for Machinery Component Maintenance,” in *Proceeding of 7th Rajamangala Manufacturing and Management Technology Conference 2022 (RMTC2022)*, Rajamangala University of Technology Isan, Thailand, 2022, pp. 221–222. (in Thai)
- [2] K. Lange, *Handbook of Metal Forming*, New York, McGraw-Hill, 1985.

การอ้างอิงเอกสารใช้ระบบ (Vancouver Style) เรียงตามลำดับ ตามการใช้งาน โดยใส่ตัวเลขของ 1,2,3 เอกสารอ้างอิงไว้ในวงเล็บ เช่น [1] เป็นต้น แล้วรวบรวมไปเขียนอ้างอิง ตามรูปแบบวารสารกำหนด

ในการเขียนเอกสารอ้างอิงผู้เขียนต้องเขียนเป็นภาษาอังกฤษ ในกรณีแหล่งข้อมูลที่ใช้อ้างอิงมาจากแหล่งอ้างอิงภาษาไทย เช่น ตำราไทย วารสารไทย เป็นต้น ให้แปลเป็นภาษาอังกฤษ แล้ววงเล็บด้านท้ายชื่อภาษาต้น เช่น (in Thai) สำหรับรูปแบบการพิมพ์รายการเอกสารอ้างอิง กำหนดให้ใช้รูปแบบ IEEE ดังตัวอย่างข้างล่าง ทั้งนี้ เพื่อความสะดวก สามารถใช้ IEEE style file ในโปรแกรม Endnote หรือใช้บริการจัดรูปแบบเอกสารอ้างอิงออนไลน์ฟรี โดยยกตัวอย่างเช่น เว็บไซต์ <http://www.citethisforme.com/citation-generator/ieee>

ตัวอย่างการเขียนเอกสารอ้างอิง

หนังสือ

- [3] K. Lange, *Handbook of Metal Forming*, New York, McGraw-Hill, 1985.
- [4] L. Stein, “Random patterns,” in *Computers and You*, J. S. Brake, Ed. New York: Wiley, 1994, pp. 55-70.
- [5] G. W. Stachowiak and A. W. Batchelor, *Engineering Tribology*, 3rd ed., Elsevier Butterworth-Heinemann, USA, 2005.

การประชุมวิชาการ

- [6] N. Angsuseranee and B. Watcharasresomroeng, “Performance of Diamond-like Carbon Film Sliding on Stainless Steel Graded SUS304 BA,” in *Proceeding of 5th Rajamangala Manufacturing and Management Technology Conference 2020 (RMTC2020)*, Rajamangala University of Technology Tawan-ok, Thailand, 2020, pp. 217–222. (in Thai)

วารสาร

- [7] A. Gård, P.V. Krakhmalev, J. Bergström and N. Hallbäck, “Galling resistance and wear mechanisms – cold work tool materials sliding against carbon steel sheets,” *Tribology Letters*. Vol. 26(1), 2007, pp. 67–72.
- [8] N. Angsuseranee, B. Watcharasresomroeng, P. Bunyawanchikul and S. Chartniyom, “Tribological behavior of tool steel substrate and solid films against 304 BA austenitic stainless steel under dry sliding,” *Advances in Tribology*, vol. 2020, 2020, pp. 1–11.

มาตรฐาน

- [9] *IEEE Criteria for Class IE Electric Systems*, IEEE Standard 308, 1969.
- [10] *Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials*, ASTM E8/E8M – 13a, 2013.

สิทธิบัตร

- [11] J.P. Wilkinson, “Nonlinear resonant circuit devices,” U.S. Patent 3 624 125, July 16, 1990.

เว็บไซต์

- [12] J. Jones. (1991, May 10). Networks (2nd ed.) [Online]. Available: <http://www.atm.com>
- [13] JFE Steel Corporation. (2020, September 9). Stainless Steels [Online]. Available: <https://www.jfe-steel.co.jp/en/products/stainless/catalog/g1e-001.pdf>

วิทยานิพนธ์

- [14] J.O. Williams, “Narrow-band analyzer,” Ph.D. dissertation, Dept. Elect. Eng., Harvard Univ., Cambridge, MA, 1993.
- [15] N.M. Amer, “The effects of homogeneous magnetic fields on developments of tribolium confusum,” Ph.D. dissertation, Radiation Lab., Univ. California, Berkeley, Tech. Rep. 16854, 1995.

รายชื่อผู้ทรงคุณวุฒิ (Peer Review)

รองศาสตราจารย์ ดร.นิวัฒน์ มูแก้ม	คณะอุตสาหกรรมและเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
รองศาสตราจารย์ ดร.ศิริชัย ต่อสกุล	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
รองศาสตราจารย์ ดร.คมกริช ละวรรณวงศ์	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ
รองศาสตราจารย์ สุรสิทธิ์ ระวังวงศ์	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย
รองศาสตราจารย์ ดร.วัชรินทร์ สิทธิเจริญ	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา
รองศาสตราจารย์ ดร.กนกวรรณ จ้าวสุวรรณ	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ
รองศาสตราจารย์ ดร.จิตติวัฒน์ นิธิกาญจนธาร	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
รองศาสตราจารย์ ดร.ศุภชัย ปลายเนตร	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนครพนม
รองศาสตราจารย์ ดร.วสันต์ เขียวสุวรรณ	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ
รองศาสตราจารย์ ดร.สายชล ชูเดื่อจีน	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ
รองศาสตราจารย์ ขาตรี หอมเขียว	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย
รองศาสตราจารย์ ดร.ฉันทมณี พูลเจริญศิลป์	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ
รองศาสตราจารย์ ดร.ประเสริฐ เองฉ้วน	สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
รองศาสตราจารย์ ดร.วรภรณ์ กลิ่นบุญ	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ
รองศาสตราจารย์ เดช เหมือนขาว	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย
รองศาสตราจารย์ สมศักดิ์ แก้วพลอย	คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏสงขลา
รองศาสตราจารย์ ดร.เจษฎา ก้อนแพง	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ประจักษ์ จิตกุล	คณะวิศวกรรมศาสตร์บูรณาการและเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก

JTEP : Journal of Technology and Engineering Progress, Vol 3, No. 1, 2025 (January - June)

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อดิสร ศิริคำ	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศุภลักษณ์ มะโนธรรม	คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ก้าวหน้า จงวัฒนารักษ์	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จิณกมล ลุยจันทร์	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศักดิ์ดา คำจันทร์	คณะวิทยาศาสตร์และวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กาญจนา ลือพงษ์	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.แมน ตัญแพร์	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ณัฐนันท์ มูลสระคู	คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรมและเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วุฒิวัฒน์ คงรัตนประเสริฐ	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ณัฐศักดิ์ พรพุดศิริ	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วนิดา บุญโณม	คณะบริหารธุรกิจและเทคโนโลยีสารสนเทศ (สาขาวิชาโลจิสติกส์) มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.รัตนกร ยวงสวัสดิ์	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พิชิตชัย บุตรน้อย	คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ นพดล ศรีพุทธา	คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สุรเชษฐ์ เกื้อนแก้วสิงห์	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ปัทมिता นาควงษ์	คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏพระนครศรีอยุธยา
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สมภาร ศรีประเทือง	คณะวิศวกรรมศาสตร์บูรณาการและเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ทวี หมดสี	คณะอุตสาหกรรมและเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สุรเทพ แป้นเกิด	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ จูติ หมอรักษา	คณะวิศวกรรมศาสตร์บูรณาการและเทคโนโลยี
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ เฉลิมพล คล้ายนิล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ชัชวาลย์ สุขมัน	คณะอุตสาหกรรมและเทคโนโลยี
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ จิรวัดน์ ณ พัทลุง	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ไพบุลย์ หาญมนต์	คณะวิศวกรรมศาสตร์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ภัทรพงศ์ เกิดลาภี	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ชูไฮดี สนิ	สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์และนวัตกรรม
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ นภัสกล สิงหะตา	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สัญญา คำจริง	คณะวิศวกรรมศาสตร์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ โอริส มณีสาย	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ
ดร.จิระศักดิ์ ธาระจักร์	คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์
ดร.เอกชัย วารินศิริรักษ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ อนันต์ โสภิน	คณะวิศวกรรมศาสตร์
ดร.ปริญญา กวีกิจบัณฑิต	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย
ดร.ปกรณ์ ชุมชุม	คณะวิศวกรรมศาสตร์
ดร.พิริยะ ปิ่นทอง	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ
ดร.ณัฐภัทร สุปรียาธิกุล	คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์
ดร.ธงชัย เพ็งจันทร์ดี	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ
ดร.สุริยพงศ์ นิลสังข์	คณะวิศวกรรมศาสตร์
	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ
	คณะวิทยาศาสตร์
	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
	คณะวิศวกรรมศาสตร์
	มหาวิทยาลัยมหิดล
	คณะวิศวกรรมศาสตร์
	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ
	คณะอุตสาหกรรมและเทคโนโลยี
	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์
	คณะวิศวกรรมศาสตร์
	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ
	คณะวิศวกรรมศาสตร์
	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ
	คณะวิศวกรรมศาสตร์
	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์
	คณะวิศวกรรมศาสตร์
	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
	คณะวิศวกรรมศาสตร์
	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

ดร.ทงศักดิ์ คงสินธุ์	วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
ดร.ปิยะพงษ์ คำคุณ	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ
ดร.ปรีวิทย์ เจียนดอน	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
ดร.วิเรชา คำจันทร์	คณะวิทยาศาสตร์และวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
ดร.สุรธัญ ปาละพรพิสุทธิ์	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ
ดร.เอกชัย คุปตาวาทิน	คณะบริหารธุรกิจและเทคโนโลยีสารสนเทศ (สาขาโลจิสติกส์) มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
นาวาเอก ดร.บพิตร ทศเทพพิทักษ์	กรมอุทกหารเรือ โรงเรียนช่างกรมอุทกหารเรือ
ดร.ยุทธนา แก้วคำแจ้ง	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ
ดร.ธวัชชัย ปัญญาคิด	คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก
ดร.ปรเมศวร์ เป้าวรรณ	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
ดร.พงศ์พนธ์ สุกุลอื้อ	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ
ดร.อดิศักดิ์ นาวเหนียว	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา
ดร.ธีรวิธ คำหน่อแก้ว	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ
ดร.กชกร วิรัชกุล	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
ดร.สุกัญญา เชิดชูงาม	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

แบบฟอร์มส่งบทความเพื่อพิจารณาตีพิมพ์ลงในวารสารเทคโนโลยีและวิศวกรรมก้าวหน้า

วันที่..... เดือน..... พ.ศ.....

ข้าพเจ้า (นาย/นาง/นางสาว)..... นามสกุล.....

ขอส่ง ☐ บทความวิจัย ☐ บทความวิชาการ

เรื่อง (ภาษาไทย)

เรื่อง (ภาษาอังกฤษ)

ชื่อผู้เขียนร่วม (ภาษาไทย)

1. ชื่อ..... นามสกุล.....

2. ชื่อ..... นามสกุล.....

3. ชื่อ..... นามสกุล.....

ชื่อผู้เขียนร่วม (ภาษาอังกฤษ)

1. Firstname..... Surname

2. Firstname..... Surname

3. Firstname..... Surname

ที่อยู่ที่สามารถติดต่อได้สะดวก..... หมู่ที่..... ซอย.....

ถนน..... ตำบล/แขวง..... อำเภอ/เขต..... จังหวัด.....

รหัสไปรษณีย์..... E-mail.....

โทรศัพท์..... โทรสาร..... โทรศัพท์ (มือถือ).....

ข้าพเจ้าขอรับรองว่าบทความนี้ ☐ เป็นผลงานของข้าพเจ้าแต่เพียงผู้เดียว

☐ เป็นผลงานของข้าพเจ้าและผู้ร่วมงานตามชื่อที่ระบุในบทความจริง

โดยขอรับรองว่ารูปภาพและข้อความทั้งหมดในบทความนี้ ไม่ละเมิดลิขสิทธิ์ใด ๆ และบทความนี้ไม่เคยลงตีพิมพ์ในวารสารใดมาก่อน และจะไม่นำบทความนี้ไปเพื่อพิจารณาตีพิมพ์ในวารสารอื่นอีกเป็นการซ้ำซ้อนการละเมิดลิขสิทธิ์ถือเป็นความรับผิดชอบของผู้เขียนบทความโดยตรง ทั้งนี้ผู้เขียนเข้าใจในนโยบายการรับบทความของวารสารเทคโนโลยีและวิศวกรรมก้าวหน้าแล้ว และยินยอมว่าบทความที่ตีพิมพ์ลงในวารสารเทคโนโลยีและวิศวกรรมก้าวหน้า ถือเป็นลิขสิทธิ์ของคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ

ลงชื่อ.....

(.....)



หนังสือรับรองการตีพิมพ์บทความ
วารสารเทคโนโลยีและวิศวกรรมก้าวหน้า
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ

ขอรับรองว่าบทความ.....

โดย

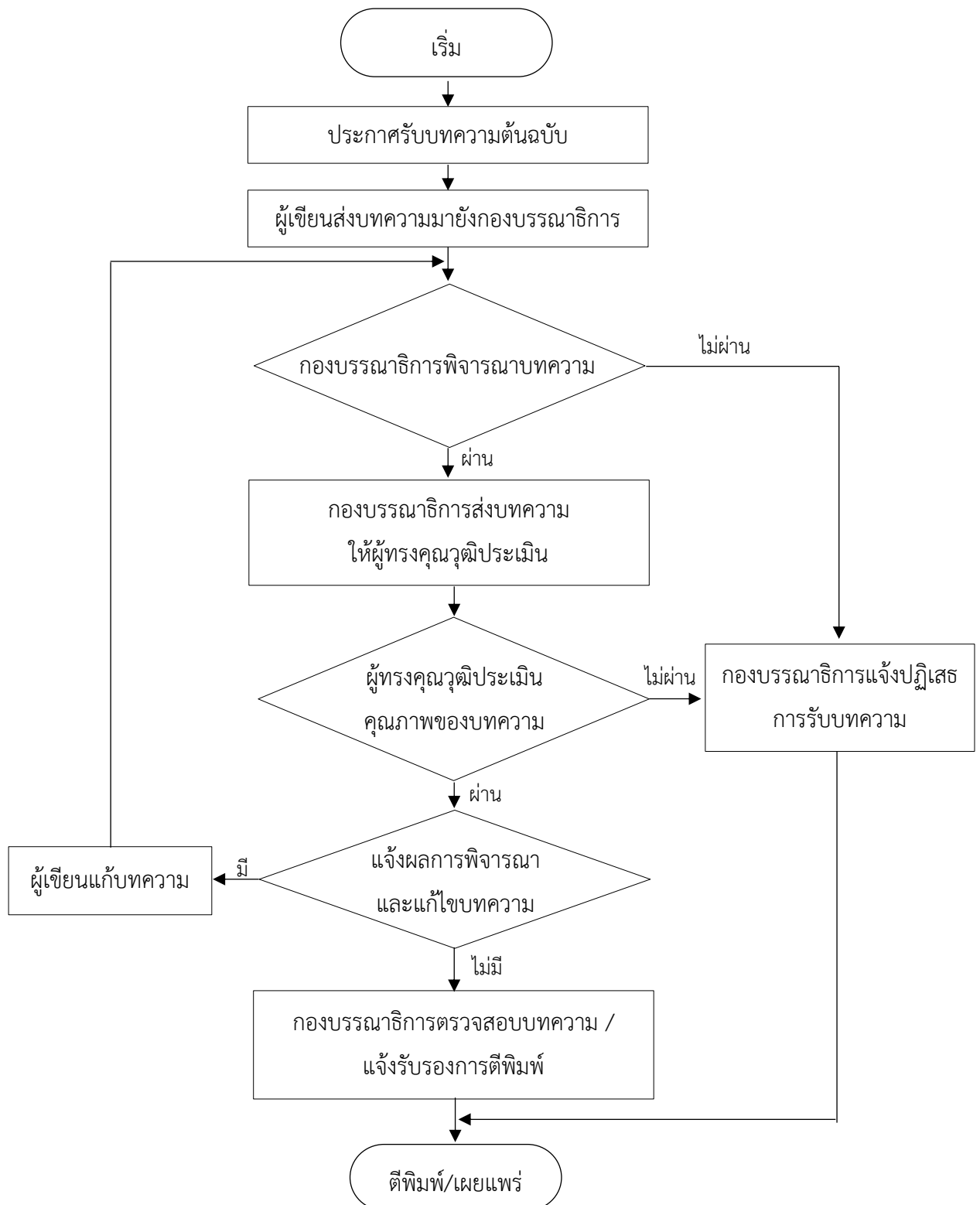
.....

.....

ได้ผ่านการประเมินจากคณะกรรมการผู้ทรงคุณวุฒิจำนวน 3 ท่าน
และตีพิมพ์ในวารสารเทคโนโลยีและวิศวกรรมก้าวหน้า
ปีที่ ฉบับที่ (..... - พ.ศ.)

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ฤทธิชัย เกาเนียม)
บรรณาธิการวารสารเทคโนโลยีและวิศวกรรมก้าวหน้า
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ

ขั้นตอนการจัดทำวารสารเทคโนโลยีและวิศวกรรมก้าวหน้า





วารสารเทคโนโลยีและวิศวกรรมก้าวหน้า

Journal of Technology and Engineering Progress

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ

เลขที่ 2 ถนนนางลิ้นจี่ แขวงทุ่งมหาเมฆ เขตสาทร

กรุงเทพมหานคร 10120

E-mail : jtep_journal@mail.rmutk.ac.th