



วารสาร

เทคโนโลยีและ วิศวกรรมก้าวหน้า

Journal of Technology and Engineering Progress

ปีที่ 4 ฉบับที่ 1

เดือน มกราคม – มิถุนายน 2569

ISSN : 3027-6500 (Online)

Vol 4, No.1, 2026, January - June

คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ

วารสารเทคโนโลยีและวิศวกรรมก้าวหน้า

Journal of Technology and Engineering Progress

ปีที่ 4 ฉบับที่ 1 มกราคม – มิถุนายน 2569 (Vol 4, No.1, 2026, January - June)

เจ้าของ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ

ที่ปรึกษา

อธิการบดี

คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

นายกสมาคมเทคโนโลยีและนวัตกรรมเชิงสร้างสรรค์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ

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.นเรศรฐ วัฒนเดช

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

รองศาสตราจารย์ ดร.บวรโชค ผู้พัฒน์

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

รองศาสตราจารย์ ดร.อิศรทัต พึ่งอัน

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

รองศาสตราจารย์ ดร.ประยูร สุรินทร์

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีปทุมวัน

รองศาสตราจารย์ ดร.อภิวัฒน์ มุตตามระ

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

รองศาสตราจารย์ ดร.ประภาศ เมืองจันทร์บุรี

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กิตติชัย ไสจพันธ์

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

ผู้จัดทำวารสาร

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สมชาย วนไทยสงค์

นายวงศ์ธร วงศ์ดีอินทร์

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ

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 เพราะผ่านการพิจารณาถ่วงถ่วง และประเมินคุณภาพจากผู้ทรงคุณวุฒิในสาขาวิชาที่เกี่ยวข้อง จากหลากหลายสถาบัน อย่างน้อย 3 ท่าน ซึ่งเป็น การประเมินแบบไม่แสดงชื่อผู้แต่งและผู้ประเมิน (Double blinded) ก่อนที่จะเผยแพร่สู่สาธารณชน จึงทำให้วารสารเทคโนโลยีและวิศวกรรมก้าวหน้า เป็นวารสารวิชาการที่มีคุณภาพ

กองบรรณาธิการ วารสารเทคโนโลยีและวิศวกรรมก้าวหน้า จัดทำวารสารเป็นรูปแบบฉบับสมบูรณ์และเผยแพร่ให้กับสถาบันการศึกษาต่าง 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 และตอบสนองต่อการพัฒนาด้านเทคโนโลยีและวิศวกรรมของประเทศไทย

นโยบายการรับบทความ

กองบรรณาธิการวารสารเทคโนโลยีและวิศวกรรมก้าวหน้า มีความยินดีที่จะรับบทความจากอาจารย์ นักวิจัย นักวิชาการทั้งภายในและภายนอกมหาวิทยาลัย ที่เขียนเป็นภาษาไทยหรือภาษาอังกฤษ ซึ่งผลงานที่ส่งมาขอตีพิมพ์ต้องไม่เคยเผยแพร่ในสิ่งพิมพ์อื่นใดมาก่อน และต้องไม่อยู่ในระหว่างการพิจารณาของวารสารอื่น

การละเมิดลิขสิทธิ์ถือเป็นความรับผิดชอบของผู้ส่งบทความโดยตรง บทความที่ได้รับการตีพิมพ์ต้องผ่าน การพิจารณา
กลั่นกรองคุณภาพจากผู้ทรงคุณวุฒิ และได้รับความเห็นชอบจากกองบรรณาธิการ

ข้อความที่ปรากฏอยู่ในแต่ละบทความที่ตีพิมพ์ในวารสารวิชาการเล่มนี้ เป็นความคิดเห็นส่วนตัวของผู้เขียนแต่ละท่าน
ไม่เกี่ยวข้องกับมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพแต่อย่างใด ความรับผิดชอบด้านเนื้อหา และการตรวจร่างบทความ
แต่ละบทความเป็นของผู้เขียนแต่ละท่าน หากมีความผิดพลาดใด ๆ ผู้เขียน แต่ละท่านจะต้องรับผิดชอบบทความของตนเอง
แต่ผู้เดียว

กองบรรณาธิการขอสงวนสิทธิ์มีให้นำเนื้อหา 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
การประยุกต์ใช้ DMAIC ในการเชื่อมซ่อมโครงสร้างเตาเผาสุญญากาศที่ทำจากเหล็กกล้าไร้สนิม SS310S Application of DMAIC to Repair Welding of Vacuum Furnace Structures Made of SS310S Stainless Steel พิชา พันธุ์มงคล, เวทรินทร์ อธิจิระสิงห์, ธนิต แต่งศรี, วิษณุ พึ่งขุนทด, นพกร ภูระย้า, ศศิรัศม์ ไชยดีสูงเนิน	1
การวิเคราะห์ปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพการบดของเครื่องบดถ่านพลังงานแสงอาทิตย์ Analysis of Factors Affecting the Grinding Performance of a Solar-Powered Charcoal Grinder วรพงศ์ พงศ์ภัทรวุฒิ, ชีรภัทร เอื้องกลาง, พิชัยภูษิต แก้วทอง, ณภัทร อินทนนท์	15
การผลิตผงโลหะทองแดงด้วยกระบวนการพ่นละอองน้ำโลหะด้วยก๊าซ Production of Copper Metal Powder Using Gas Atomization Process ธีรยุทธ กาญจนแสงทอง, สุรัตน์ วรรณศรี, วิโรจน์ ฉัตรเกษ	24
การวิเคราะห์ผลของกระบวนการแปรรูปต่อสมบัติเชิงกลของเหล็กกล้าคาร์บอน SS400 Analysis of the Effects of Machining Processes on the Mechanical Properties of SS400 Carbon Steel ทงศักดิ์ คงสินธุ์	31
สมบัติเชิงกลและโครงสร้างจุลภาคของรอยเชื่อมด้วยกระบวนการเชื่อมอาร์คทั้งสแตนเลสสปีคคูลระหว่าง วัสดุเหล็ก A335 P11 และ A312 TP304 Mechanical properties and Microstructure of GTAW Welded Joints Between A335 P11 and A312 TP304 ธรา มีทรัพย์นิคม, วันเฉลิม จันทร์หนู, ศิริวัฒน์ งามนางนาค, ศราวุฒิ คำลา, ทศพร แสงสกุล	40
การศึกษาอิทธิพลของขนาดชิ้นงานทดสอบตามมาตรฐาน ASTM E8M ต่อสมบัติทางกลสำหรับวัสดุ อะลูมิเนียม 6063 Studying Influence of Dimensional Sample of ASTM E8M on Mechanical Properties for Aluminum 6063 Material ปิยะพงษ์ คำคุณ, ไพบุลย์ หาญมนต์, เจษฎา แก้ววิชิต	52
ผลกระทบของการเคลือบผิวด้วย TIN และการชุบแข็งด้วยน้ำมันต่ออายุความล้าของเหล็ก SCM 420 ในเพลารอง Effect of TiN Coating on Fatigue Life of SCM 420 Steels Counter Shaft กฤษณภูมิ เรือนใหม่, ธนกาญจน์ ธีรจวง, พรศักดิ์นรินทร์ พูนมา, กัมปนาท ม่อมวิทย์	60
การปรับปรุงประสิทธิภาพสายการผลิตเบาะรถยนต์โดยใช้ระบบการผลิตแบบโตโยต้า Improving the Efficiency of the Car Seat Production Line Using the Toyota Production System วิเรชา คำจันทร์, ปิยนุช สีผาง, ศักดิ์ดา คำจันทร์	67

การประยุกต์ใช้ DMAIC ในการเชื่อมซ่อมโครงสร้างเตาเผาสุญญากาศ ที่ทำจากเหล็กกล้าไร้สนิม SS310S

Application of DMAIC to Repair Welding of Vacuum Furnace Structures Made of SS310S Stainless Steel

พิชา พันธุ์มงคล^{1*}, เวทรินทร์ อธิจิระสิงห์¹, ธนิต แต่งศรี¹, วิษณุ พึ่งขุนทด²,
นพกร ภูระยา³, ศศิรัศม์ ไชยดีสูงเนิน^{4,5}

¹สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธนบุรี

²วิศวกรโครงการ บริษัท เออีซี อินดัสเตรียล เซอร์วิส จำกัด

³ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล

⁴สาขาวิชาวิศวกรรมเหมืองแร่และวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

⁵ศูนย์วิจัยเพื่อความยั่งยืนและวัสดุขั้นสูง คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

Picha Panmongkol^{1*}, Wetarin Atijirasing¹, Tanit Tangsri¹, Wissanu Pongkuntod²,

Noppakorn Phuraya³, Sasirat Chaideesungnoen^{4,5}

¹Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Thonburi University

²Project Engineer, AEC INDUSTRIAL SERVICES CO., LTD.

³Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Mahidol University

⁴Department of Mining and Materials Engineering, Faculty of Engineering, Prince of Songkla University

⁵Research Center for Sustainable and Advanced Materials (CSAM),

Faculty of Engineering, Prince of Songkla University

*Corresponding author Email: picha.p@thonburi-u.ac.th

(Received: November 05, 2025 / Revised: June 11, 2026 / Accepted: June 23, 2026)

บทคัดย่อ

กรณีศึกษาการปรับปรุงกระบวนการเชื่อมซ่อมผนังเตาเผาสุญญากาศเกรด SS310S ที่ผ่านการใช้งานที่อุณหภูมิสูง ซึ่งประสบปัญหาการแตกร้าวขณะร้อนหลังการเชื่อมซ่อม โดยได้ประยุกต์ใช้กรอบแนวคิด Lean Six Sigma (DMAIC) เพื่อวิเคราะห์และแก้ปัญหาอย่างเป็นระบบ ระยะวิเคราะห์ (Analyze) พบว่าการใช้โลหะเติม ER310 ซึ่งเป็นโลหะเติมที่มีองค์ประกอบใกล้เคียงกับกลุ่มวัสดุ SS310S ยังทำให้เกิดการแตกร้าว เนื่องจากแนวเชื่อมมีแนวโน้มประกอบด้วยโครงสร้างแบบออสเทนไนต์ทั้งหมด ซึ่งไวต่อการแตกร้าว โดยเฉพาะเมื่อเชื่อมบนวัสดุฐานที่เสื่อมสภาพ (Aged Material) ระยะปรับปรุง (Improve) จึงได้นำเสนอการใช้โลหะเติมแบบผสม โดยใช้ ER309L เป็นชั้นบัพเฟอร์ในแนวเชื่อมชั้นที่ 1-3 เพื่อสร้างโครงสร้างออสเทนไนต์กับเฟอร์ไรต์ (AF Mode) ที่ต้านทานการแตกร้าว จากนั้นจึงเชื่อมปิดผิวหน้าในชั้นที่ 4 ด้วยโลหะเติม ER310 เพื่อให้ได้สมบัติทนอุณหภูมิสูงที่ผิวหน้า ซึ่งการเชื่อมด้วย ER310 ในชั้นนี้ไม่เกิดการแตกร้าวเนื่องจากผลของชั้นบัพเฟอร์ ER309L ที่อยู่ข้างใต้ ในระยะควบคุม (Control) ผลการใช้งานจริงต่อเนื่องเป็นระยะเวลา 1 ปี สนับสนุนว่าแนวทางการเชื่อมซ่อมดังกล่าวสามารถใช้งานได้อย่างมีประสิทธิภาพโดยไม่พบการแตกร้าวหรือการหยุดเสียของเตาเผา (Breakdown) ใดๆ แนวทางที่ได้รับการสนับสนุนจากผลการใช้งานจริงนี้จึงถูกจัดทำเป็นมาตรฐานขั้นตอนปฏิบัติงาน (SOP) สำหรับการซ่อมบำรุงเตาเผาอื่นภายในโรงงานต่อไป จากการคาดการณ์ด้วยแผนภาพชีพจรพบว่าสภาวะ ER310 + SS310S ที่การเจือจางเท่ากับ 30% มีแนวโน้มให้โครงสร้างออสเทนไนต์ทั้งหมด หรือมีเดลต้าเฟอร์ไรต์ต่ำมาก (<3%) ขณะที่สภาวะ ER309L + SS310S ให้โครงสร้างออสเทนไนต์กับเฟอร์ไรต์ ที่มีเดลต้าเฟอร์ไรต์ประมาณ 8% และหลังการปรับปรุงโดยควบคุม อุณหภูมิระหว่างชั้นแนวเชื่อมไม่เกิน 150°C ไม่พบรอยแตกร้าวจากการทดสอบด้วยสารแทรกซึมและไม่พบ Breakdown ตลอดการติดตามผล 1 ปี

คำสำคัญ: การเชื่อมซ่อม, เหล็กกล้าไร้สนิม SS310S, การแตกร้าวขณะร้อน, ชั้นบัพเฟอร์, ER309L, ER310, DMAIC, แผนภาพชีพจร

Abstract

This research presents a case study on improving the repair welding process for a heat-exposed SS310S stainless steel vacuum furnace, which suffered from persistent hot cracking post-repair. The study applied the Lean Six Sigma (DMAIC) framework to systematically analyze and resolve the issue. The "Analyze" phase confirmed that using the standard ER310 matching filler metal failed due to the formation of a fully austenitic microstructure. This structure is highly susceptible to cracking, especially when welding on the aged (sensitized) base material. The "Improve" phase, therefore, implemented a Composite Filler Metal. This involved using ER309L as buffer layers (Passes 1-3) to establish a crack-resistant Austenite with Ferrite (AF Mode) microstructure. Subsequently, the cover pass (Pass 4) was completed using the ER310 filler metal to restore the original high-temperature properties at the surface. This final ER310 pass did not crack due to the positive metallurgical influence of the underlying ER309L buffer layers. In the "Control" phase, the repair's integrity was supported by one full year of continuous furnace operation with no subsequent cracking or breakdown observed. The field-supported methodology has been established as a Standard Operating Procedure (SOP) for all future SS310S furnace maintenance within the facility. Schaeffler Diagram prediction indicated that ER310 + SS310S at 30% dilution was located in the fully austenitic region or contained very low delta ferrite (<3%), whereas ER309L + SS310S produced an Austenite with Ferrite structure with approximately 8% δ -ferrite. After the improved procedure with an interpass temperature not exceeding 150°C, PT inspection showed no cracking and no breakdown was observed during one year of service monitoring.

Keywords: Repair welding, SS310S stainless steel, Hot cracking, Buffer layer, ER309L, ER310, DMAIC, Schaeffler diagram

1. บทนำ

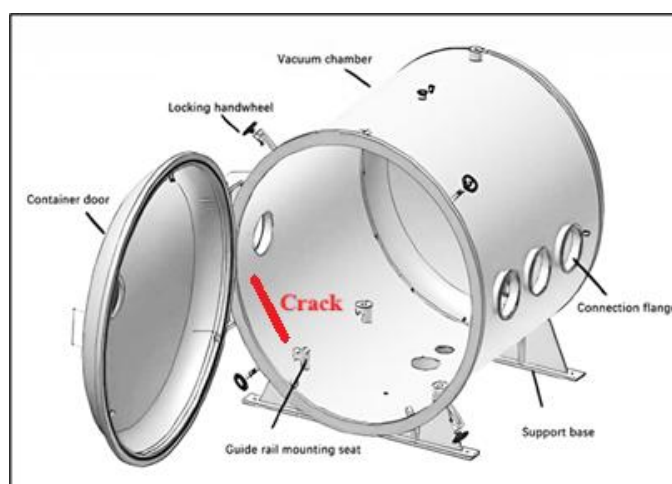
ในอุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการให้ความร้อน เตาเผาสุญญากาศ (Vacuum Furnace) ดังแสดงในรูปที่ 1 เป็นเทคโนโลยีที่ใช้ในการให้ความร้อนภายใต้สภาวะความดันต่ำหรือสุญญากาศ เพื่อลดปฏิกิริยาที่ไม่พึงประสงค์ เช่น การเกิดออกซิเดชันและการเกิดคราบสกปรกบนพื้นผิวชิ้นงาน เตาเผาสุญญากาศมักถูกใช้ในกระบวนการทางโลหวิทยา เช่น การชุบแข็ง (Heat Treatment) การเผาผนึก (Sintering) และการเผาไล่สารระเหย (Brazing & Degassing) เตาเผาสุญญากาศถูกนำมาใช้ในอุตสาหกรรมหลายประเภท โดยเฉพาะอุตสาหกรรมโลหวิทยาขั้นสูง เช่น การผลิตใบพัดกังหัน (Turbine Blades), การผลิตชิ้นส่วนอากาศยาน (Aerospace Components), อุตสาหกรรมยานยนต์ (Automotive Industry) และอุตสาหกรรมเครื่องมือแพทย์ (Medical Instruments) อย่างไรก็ตาม เมื่อใช้งานเป็นเวลานาน วัสดุโครงสร้างของเตาเผามีโอกาสเสื่อมสภาพจากการสัมผัสอุณหภูมิสูงซ้ำๆ ทำให้เกิดรอยแตกร้าว ซึ่งต้องได้รับการซ่อมแซมด้วยกระบวนการเชื่อม

ในกรณีศึกษา เตาเผาสุญญากาศถูกใช้ในการอบชิ้นงานที่อุณหภูมิประมาณ 1000-1200°C เตาเผาผ่านการใช้งานเป็นระยะเวลานานถึง 7 ปี อาจส่งผลให้เสื่อมสภาพวัสดุโครงสร้างของเตาเผาได้ ในกรณีที่มีการใช้งานที่ผิดปกติหรือมีปัญหาในการควบคุมอุณหภูมิภายในเตา จากกรณีศึกษานี้ตรวจสอบพบว่าบริเวณผนังด้านในใกล้ปากทางเข้าเตา เกิดการเสื่อมสภาพจนเกิดรอยแตกร้าวที่ถูกตรวจพบด้วยการทดสอบด้วยสารแทรกซึม (Penetrant Testing - PT) ดังแสดงในรูปที่ 2 การเสื่อมสภาพนี้อาจเกิดจากปัจจัยหลายประการ เช่น การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาคจากความร้อน การสะสมของออกไซด์และความเค้นตกค้างที่สะสมในวัสดุ เมื่อพบรอยแตกร้าว การซ่อมแซมด้วยกระบวนการเชื่อมเป็นแนวทางที่ถูกเลือกใช้ การเลือกพารามิเตอร์การเชื่อมเป็นปัจจัยที่สำคัญ ตัวแปรในการเชื่อม (Welding Parameters) ที่ส่งผลต่อความสำเร็จของการเชื่อมซ่อม การเลือกกระบวนการเชื่อม โลหะเติม (Filler Material) กระแสไฟฟ้า (Welding Current) ความเร็วในการเชื่อม (Welding Speed) และอัตราการนำความร้อนเข้าสู่ชิ้นงาน (Heat Input) ล้วนมีผลต่อโครงสร้างจุลภาคของแนวเชื่อมและบริเวณกระทบร้อน (Heat Affected Zone, HAZ) หากมีการเลือกค่าพารามิเตอร์และโลหะเติมที่ไม่เหมาะสม อาจทำให้เกิดการแตกร้าวหลังการเชื่อม (Hot Crack หรือ Solidification Crack) ได้ [1-4]

การเลือกใช้ตัวแปรการเชื่อมและโลหะเติมที่เหมาะสมมีผลโดยตรงต่อคุณภาพของแนวเชื่อม เนื่องจากเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด SS310S มีแนวโน้มเกิดการแตกร้าร้อน (Hot Crack หรือ Solidification Crack) สูงเมื่อทำการเชื่อม เนื่องจากเป็นวัสดุที่แข็งตัวในโครงสร้างออสเทนไนต์ทั้งหมด (Fully Austenite) ซึ่งไม่มีเดลต้าเฟอร์ไรต์ (δ -Ferrite) ช่วยลดการแตกร้า [5] เหล็กกล้าไร้สนิมเกรด SS310S เป็นเหล็กกล้าไร้สนิมโครเมียม-นิกเกิลที่มีปริมาณโครเมียมและนิกเกิลสูง โดยองค์ประกอบทางเคมีที่ใช้เป็นข้อมูลอ้างอิงในงานวิจัยนี้อ้างอิงตามมาตรฐาน ASTM A240 TP310S [6] ในการศึกษาเชิงทดลองนี้ใช้โลหะเติมเกรด ER309L และ ER310 เพื่อเปรียบเทียบผลกระทบต่อการสร้างแนวเชื่อมและความต้านทานการแตกร้า โดยองค์ประกอบทางเคมีของโลหะเติมดังกล่าวอ้างอิงตามมาตรฐาน AWS A5.9/A5.9M สำหรับลวดเชื่อมและแท่งเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิม [7]

นอกจากนี้ การใช้งานเหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่ม 310S ที่อุณหภูมิสูงเป็นเวลานานอาจทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาค เช่น การเสื่อมสภาพจากการคืบ การเกิดคาร์ไบด์บริเวณขอบเกรน หรือการเปลี่ยนแปลงความต้านทานการกัดกร่อนหลังสัมผัสสภาวะอุณหภูมิสูง ซึ่งอาจทำให้วัสดุฐานมีความไวต่อการแตกร้ามากกว่าวัสดุในสภาพใหม่ [8–9] ดังนั้น บทความนี้จะนำเสนอกรณีศึกษาเกี่ยวกับปัญหาที่พบบ่อยระหว่างการเชื่อมซ่อมโครงสร้างเตาเผาสุญญากาศ ซึ่งผลิตจากเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด SS310S รวมถึงแนวทางการแก้ไขโดยอาศัยหลักการทางโลหวิทยาและการปรับตัวแปรการเชื่อมให้เหมาะสม เพื่อป้องกันการแตกร้าและยืดอายุการใช้งานของโครงสร้างเตาเผาสุญญากาศซึ่งผ่านการใช้งานที่อุณหภูมิสูงมาแล้ว

อย่างไรก็ตาม งานวิจัยก่อนหน้านี้ส่วนใหญ่ยังมุ่งเน้นการเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมในสภาวะวัสดุใหม่ การเปรียบเทียบพารามิเตอร์การเชื่อม หรือการประเมินสมบัติเชิงกลและโครงสร้างจุลภาคเป็นหลัก ขณะที่งานศึกษาการเชื่อมซ่อม SS310S ที่ผ่านการใช้งานอุณหภูมิสูงเป็นเวลานานในสภาพอุตสาหกรรมจริงยังมีจำกัด งานวิจัยล่าสุดที่เกี่ยวข้องกับการแตกร้าขณะร้อนของ AISI 310S แสดงให้เห็นว่าปริมาณเดลต้าเฟอร์ไรต์และธาตุบางชนิด เช่น S, P และ Si มีผลต่อความไวต่อการแตกร้าระหว่างการแข็งตัวของแนวเชื่อม ขณะที่งานด้านเฟอร์ไรต์ในเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก การเสื่อมสภาพของ 310S จากความร้อน และการใช้ชั้นเชื่อมทับหรือชั้นบัพเฟอร์ ช่วยสนับสนุนว่าการควบคุมโครงสร้างจุลภาคและการเลือกโลหะเติมมีความสำคัญต่อความต้านทานการแตกร้า [10–13] ในขณะเดียวกัน งานด้าน Lean Six Sigma และ DMAIC ในกระบวนการอุตสาหกรรมสะท้อนให้เห็นว่ากรอบ DMAIC สามารถใช้เป็นแนวทางในการกำหนดปัญหา วัตถุประสงค์ วิเคราะห์สาเหตุ ปรับปรุง และควบคุมผลลัพธ์ของกระบวนการได้อย่างเป็นระบบ [14–15] ดังนั้น ช่องว่างของงานวิจัยนี้คือการบูรณาการการออกแบบโลหะเติมเชิงโลหวิทยาร่วมกับ DMAIC เพื่อควบคุมและยกระดับกระบวนการเชื่อมซ่อม SS310S ที่ผ่านการใช้งานอุณหภูมิสูงในสภาพอุตสาหกรรมจริงอย่างเป็นระบบ



รูปที่ 1 เตาเผาสุญญากาศ (Vacuum Furnace)



รูปที่ 2 บริเวณผนังด้านในใกล้ปากทางเข้าที่ตรวจพบรอยแตกร้าวก่อนทำการเชื่อมซ่อม

1.2 วัตถุประสงค์

- 1) เพื่อวิเคราะห์สาเหตุเชิงโลหะการของการเกิดรอยแตกร้าวขณะร้อน (Hot Cracking) ในการเชื่อมซ่อมเหล็กกล้าไร้สนิม SS310S ที่ผ่านการใช้งานที่อุณหภูมิสูง (Aged Material)
- 2) เพื่อประเมินแนวทางการใช้ ER309L เป็นชั้นบัฟเฟอร์ร่วมกับ ER310 เป็นชั้นปิดผิวหน้า ในการลดการแตกร้าวของแนวเชื่อมซ่อม SS310S ที่ผ่านการใช้งานอุณหภูมิสูง
- 3) เพื่อประยุกต์ใช้กรอบแนวคิด DMAIC ในการกำหนดปัญหา วัดผล วิเคราะห์สาเหตุ ปรับปรุง และควบคุม กระบวนการเชื่อมซ่อม จนนำไปสู่แนวทางมาตรฐานสำหรับการใช้งานจริงในโรงงาน

1.3 ขอบเขต

เพื่อให้การศึกษามีความชัดเจนและสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้จริง โครงการนี้ถูกกำหนดขอบเขตดังต่อไปนี้

- 1) การศึกษานี้มุ่งเน้นกรณีศึกษาการเชื่อมซ่อมเตาเผาสุญญากาศที่ผลิตจาก SS310S ซึ่งผ่านการใช้งานที่อุณหภูมิ 1000-1200°C มานานกว่า 7 ปี (Aged Material)
- 2) การวิเคราะห์เชิงโลหะการจะประยุกต์ใช้ Schaeffler Diagram เพื่อคาดการณ์โครงสร้างจุลภาคของแนวเชื่อมในกรณีหลัก ได้แก่ ER310 + SS310S, ER309L + SS310S และ ER310 Cover Pass บนชั้นบัฟเฟอร์ ER309L
- 3) แนวทางการปรับปรุงกระบวนการอยู่ภายใต้กรอบแนวคิด DMAIC และมุ่งเน้นการใช้เทคนิคโลหะเติมแบบผสม (Filler Metal Technique) ร่วมกับการควบคุมตัวแปรสำคัญ เช่น อุณหภูมิระหว่างชั้นแนวเชื่อม (Interpass Temperature)
- 4) การประเมินความสำเร็จของแนวเชื่อมซ่อม จะใช้การตรวจสอบแบบไม่ทำลาย (Penetrant Testing - PT) และการติดตามผลการใช้งานจริง (In-service Monitoring) เป็นระยะเวลา 1 ปี
- 5) ข้อจำกัดการศึกษา: การศึกษานี้มุ่งเน้นการแก้ไขปัญหาหน้างานจริง จึงไม่รวมถึงการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคเชิงลึกด้วยกล้องจุลทรรศน์ (Microscopy) หรือการทดสอบเชิงกลแบบทำลาย (Destructive Testing) การตีความผลจึงอยู่บนหลักฐานจากข้อมูลหน้างาน การตรวจ VT/PT การคาดการณ์ด้วยแผนภาพแซฟเฟิลเลอร์ (Schaeffler Diagram) และการติดตามผลการใช้งานจริง

2. วิธีการศึกษา

2.1 วัสดุ

งานวิจัยนี้ดำเนินการภายใต้ข้อกำหนดของงานเชื่อมซ่อมของผนังเตาทำจากเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด SS310S หนา 6 มม. ที่ผ่านการใช้งานที่อุณหภูมิสูงกว่า 1000-1200°C ที่ผ่านการใช้งานเตาเป็นเวลานาน แล้วตรวจพบรอยแตกร้าว (ดังแสดงในรูปที่ 2) ด้วยข้อจำกัดหน้างานไม่สามารถดำเนินการตรวจสอบส่วนผสมทางเคมีที่หน้างานได้ โดยองค์ประกอบทางเคมีของเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด SS310S ซึ่งอ้างอิงตามมาตรฐาน ASTM A240 TP310S [6] แสดงในตารางที่ 1

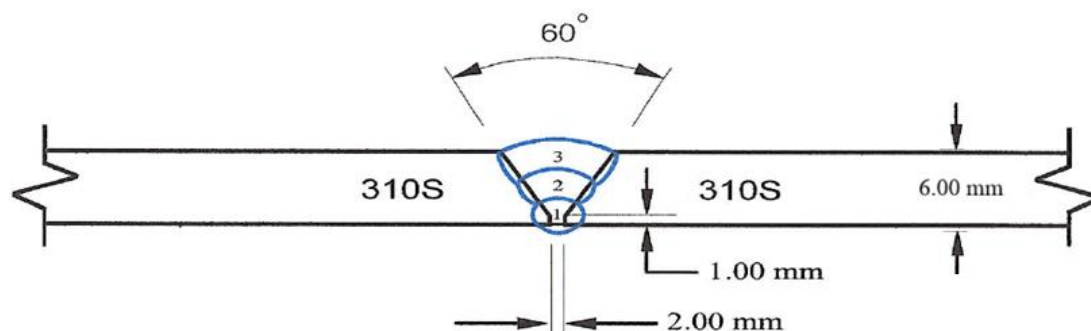
การกำหนดตัวแปรในการศึกษา (เสนอเพิ่มตามข้อเสนอแนะผู้ทรงคุณวุฒิ): การศึกษานี้เป็นกรณีศึกษาเชิงอุตสาหกรรม ไม่ใช้การออกแบบการทดลองแบบเต็มรูปแบบในห้องปฏิบัติการ ดังนั้นตัวแปรต้นหลักคือชนิดโลหะเติมและลำดับชั้นแนวเชื่อม ได้แก่ ER310 โดยตรง และ ER309L เป็น Buffer Layers ร่วมกับ ER310 เป็น Cover Pass ตัวแปรควบคุม ได้แก่ การเชื่อมอาร์กทั้งสแตนเลสสตีล (GTAW) ขนาดลวดเชื่อม กระแสเชื่อม แรงดันเชื่อม ความเร็วในการเชื่อม อัตราการไหลของแก๊สปกคลุม และ อุณหภูมิระหว่างชั้นแนวเชื่อม ตัวแปรตอบสนอง ได้แก่ การพบหรือไม่พบรอยแตกร้าวจาก VT/PT และผลการติดตามการใช้งานจริง 1 ปี ส่วนตัวแปรวิเคราะห์ ได้แก่ Cr_{eq} , Ni_{eq} , การเจือจาง (Dilution) และโซนโครงสร้างที่คาดการณ์จาก แผนภาพแชฟเฟลอร์ (Schaeffler Diagram)

ตารางที่ 1 องค์ประกอบทางเคมีของเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด SS310S [6]

ธาตุ	เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก (%)
คาร์บอน (C)	สูงสุด 0.08
แมงกานีส (Mn)	สูงสุด 2.00
ซิลิกอน (Si)	สูงสุด 1.50
โครเมียม (Cr)	24.00–26.00
นิกเกิล (Ni)	19.00–22.00
ฟอสฟอรัส (P)	สูงสุด 0.045
กำมะถัน (S)	สูงสุด 0.030
เหล็ก (Fe)	ส่วนที่เหลือ (Balance)

2.2 การเตรียมรอยต่อการเชื่อมซ่อม

รอยต่อที่ใช้ในงานเชื่อมซ่อมผนังเตาจุดที่พบรอยแตกร้าวถูกเตรียมในรูปแบบ Single V Groove ซึ่งมีการบากขอบของชิ้นงานให้เป็นรูปตัว V ด้านเดียว โดยกำหนด มุมรอยบากที่ 60° พร้อมทั้งกำหนดรากของรอยต่อ (Root Gap) ขนาด 2.00 mm และกำหนดระยะขอบราก (Root Face) ที่ 1.00 mm ก่อนทำการเชื่อม ทำความสะอาดขอบรอยบากด้วยการเจียรหรือขัดผิว เพื่อขจัดสิ่งสกปรกและออกไซด์ ป้องกันการปนเปื้อนที่อาจส่งผลกระทบต่อคุณภาพของแนวเชื่อม ดังแสดงในรูปที่ 3



รูปที่ 3 รอยต่อที่ใช้ในงานเชื่อมเป็นแบบ Single V Groove

2.3 พารามิเตอร์การเชื่อมที่ใช้ในการเชื่อม

พารามิเตอร์การเชื่อมที่ใช้ในการเชื่อมถูกควบคุมตัวแปรต่างๆที่สำคัญตามเอกสารข้อกำหนดขั้นตอนการเชื่อม (Welding Procedure Specification; WPS) และเอกสารรวบรวมรายละเอียดเกี่ยวกับขั้นตอนและข้อกำหนดงานเชื่อม (Procedure Qualification Record; PQR) ของชิ้นงานทดสอบ โดยมีรายละเอียดที่สำคัญแสดงดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ข้อกำหนดขั้นตอนการเชื่อมและพารามิเตอร์ที่ใช้ในการเชื่อม

ตัวแปร	ค่าที่ใช้ในการเชื่อม
กระบวนการเชื่อม (Welding Process)	GTAW (Gas Tungsten Arc Welding)
โลหะเติม (Filler Metal)	ER310 ER309L
ขนาด (Filler Metal Size)	Ø 2.4 mm
กระแสเชื่อม (Welding Current)	50-150 A
แรงดันเชื่อม (Welding Voltage)	8-14 V
ขั้วไฟฟ้า (Polarity)	DCEN (Direct Current Electrode Negative)
ความเร็วในการเชื่อม (Travel Speed)	3-12 cm/min
อัตราการไหลของแก๊สปกคลุม (Shielding Gas Flow Rate)	Argon 5-15 l/min
อัตราการไหลของแก๊สป้องกันด้านหลัง (Backing Gas Flow Rate)	Argon 5-15 l/min
อุณหภูมิก่อนการเชื่อมต่ำสุด (Preheat Temp. Min.)	10°C
อุณหภูมิสูงสุดระหว่างขั้นแนวเชื่อม (Interpass Temp. Max.)	150°C
การบำรุงรักษาอุณหภูมิ (Preheat Maintenance)	Cool in still air
อุณหภูมิหลังการเชื่อม (Post Weld Heat Treatment; PWHT)	ไม่มี (NO PWHT)

2.4 โลหะเติม (Filler Metal) ที่ใช้ในการเชื่อม

ในการดำเนินการเชื่อมผอมนิ่งเตาเผาสุญญากาศที่ทำจากเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด SS310S การวางแผนและการปรับพารามิเตอร์การเชื่อมตามเอกสาร WPS เป็นสิ่งสำคัญ โดยในการศึกษานี้แผนภาพแชฟเฟลเลอร์ (Schaeffler Diagram) [5] ถูกนำมาใช้เป็นเครื่องมือช่วยคาดการณ์โครงสร้างจุลภาค ได้เลือกใช้โลหะเติมทั้งหมด 2 ประเภท คือ ER310 และ ER309L เพื่อเปรียบเทียบผลของโลหะเติมที่แตกต่างกันต่อแนวโน้มการเกิดรอยแตกร้าวในแนวเชื่อม (Weld Metal) ตารางที่ 3 แสดงองค์ประกอบทางเคมีของโลหะเติมเกรด ER310 และ ER309L ที่ใช้ในกระบวนการเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมครั้งนี้ ซึ่งข้อมูลนี้อ้างอิงจากมาตรฐาน AWS A5.9/A5.9M:2017 [7]

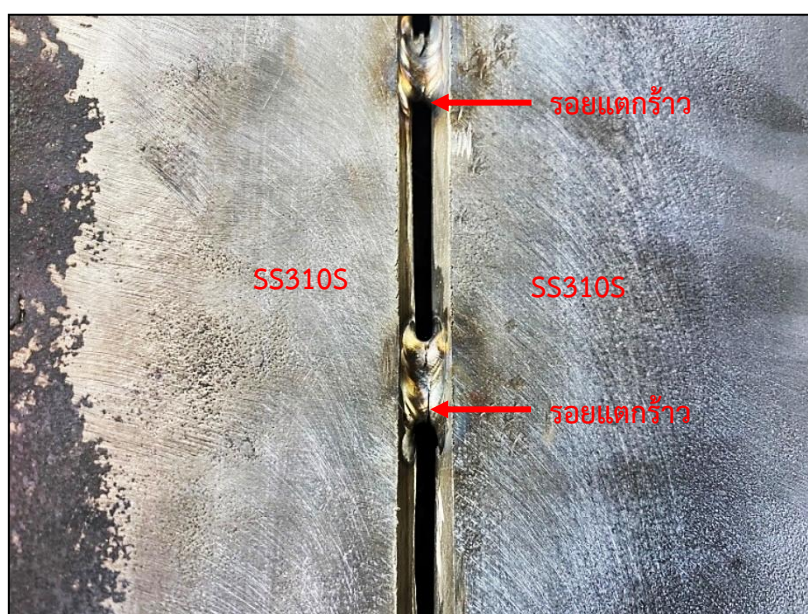
ตารางที่ 3 องค์ประกอบทางเคมีของโลหะเติมเกรด ER309L และ ER310

ธาตุ	ER310 (% โดยน้ำหนัก)	ER309L (% โดยน้ำหนัก)
คาร์บอน (C)	สูงสุด 0.08	สูงสุด 0.03
ซิลิกอน (Si)	สูงสุด 1.00	สูงสุด 1.00
แมงกานีส (Mn)	สูงสุด 2.00	1.00–2.50
ฟอสฟอรัส (P)	สูงสุด 0.03	สูงสุด 0.03
กำมะถัน (S)	สูงสุด 0.03	สูงสุด 0.03
โครเมียม (Cr)	25.0–28.0	22.0–25.0
นิกเกิล (Ni)	19.0–22.0	12.0–14.0
โมลิบดีนัม (Mo)	ไม่ระบุ	สูงสุด 0.75
เหล็ก (Fe)	ส่วนที่เหลือ (Balance)	ส่วนที่เหลือ (Balance)

3. ผลการดำเนินงาน

3.1 ผลการเชื่อมด้วยโลหะเติม ER310

โดยใช้กระบวนการเชื่อมอาร์กทั้งสแตนเลสคลูม (Gas Tungsten Arc Welding; GTAW) และควบคุมตัวแปรที่สำคัญ ได้แก่ กระแสเชื่อมในช่วง 116–118 แอมป์ แรงดันเชื่อมในช่วง 10–11 โวลต์ และความเร็วในการเชื่อม 6.8 เซนติเมตร ต่อนาที โดยใช้โลหะเติม ER310 ขนาด $\varnothing$ 2.4 มิลลิเมตร ในระหว่างการเชื่อมได้ควบคุมก๊าซอาร์กอนเป็น 2 ส่วน ได้แก่ แก๊สปกคลุมด้านหน้าแนวเชื่อมที่อัตราการไหล 12 L/min เพื่อป้องกันการปนเปื้อนจากบรรยากาศบริเวณบ่อหลอม และแก๊สป้องกันด้านหลังแนวเชื่อมที่อัตราการไหล 10 L/min เพื่อป้องกันการเกิดออกซิเดชันบริเวณรากแนวเชื่อมและผิวด้านในของชิ้นงาน



รูปที่ 4 รอยเชื่อมที่ใช้โลหะเติมเกรด ER310 พบรอยแตกร้าว (Crack)

หลังการเชื่อมแนวเชื่อมราก (Root Pass) ดำเนินการตรวจสอบด้วยการตรวจพินิจ (Visual Inspection; VT) พบว่าเกิดรอยแตกร้าวขณะร้อน (Hot Cracking หรือ Solidification Cracking) ทันทีหลังจากหยุดเชื่อม ซึ่งเป็นรอยแตกร้าวที่เกิดขึ้นในช่วงที่แนวเชื่อมแข็งตัว ยังไม่เย็นตัวเต็มที่ โดยรอยแตกร้าวจะเกิดขึ้นในเฟสกึ่งของแข็ง (Mushy Zone) ซึ่งเป็นช่วงที่โลหะยังไม่แข็งตัวสมบูรณ์ ดังแสดงในรูปที่ 4 ซึ่งเป็นปัญหาสำคัญที่ส่งผลต่อคุณภาพของแนวเชื่อม สมมติฐานการวิเคราะห์สาเหตุของปัญหา จากการใช้โลหะเติมเกรด ER310 จะให้โครงสร้างออสเทนไนต์ทั้งหมด (Fully Austenite) ในแนวเชื่อม ซึ่งมีแนวโน้มต่อการแตกร้าวร้อน เนื่องจากไม่มีโครงสร้างเฟอร์ไรต์ (Ferrite) ช่วยดูดซับมลทินในขณะแข็งตัวและลดความเค้นตกค้าง นอกจากนี้ ความเค้นดึงที่เกิดขึ้นระหว่างการแข็งตัวของโลหะเชื่อม รวมถึงการเย็นตัวอย่างรวดเร็วในบริเวณเนื้อโลหะเชื่อม อาจเป็นปัจจัยที่กระตุ้นให้เกิดการแตกร้าวได้ง่ายขึ้น และ เหล็กกล้าไร้สนิมเกรด SS310S เป็นเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก (Austenitic Stainless Steel) ที่มีนิกเกิล (20–22%) และโครเมียม (24–26%) สูง ทำให้แข็งตัวเป็นออสเทนไนต์เป็นหลัก แต่การใช้งานในเตาอบความร้อนที่อุณหภูมิเป็นเวลานาน อาจทำให้เกิดผลกระทบต่อการสร้างจุลภาค เนื่องจากวัสดุที่ผ่านการใช้งาน (Aged Material) มีแนวโน้มสูงที่จะเกิดอาจมีการเกิดโครเมียมคาร์ไบด์ (Chromium Carbide Precipitation; Cr_{23}C_6) ที่ขอบเกรน ส่งผลให้ขอบเกรนเปราะและมีแนวโน้มเกิดการแตกร้าวได้ง่ายขึ้น [8-9] เพราะสิ่งที่กำลังเชื่อมซ่อมไม่ใช่ SS310S ในสภาพปกติ (As-delivered) แต่เป็น Aged/Sensitized SS310S ซึ่งมีความเปราะและไวต่อการแตกร้าวสูงกว่าปกติ การที่ขอบเกรนเปราะ (จากการตกตะกอนคาร์ไบด์) อาจเป็นปัจจัยร่วมที่สำคัญอย่างยิ่งที่ทำให้เกิดการแตกร้าว ไม่ใช่แค่เพียงโครงสร้างออสเทนไนต์ทั้งหมด (Fully Austenite) ของโลหะเติมเกรด ER310 เพียงเท่านั้น

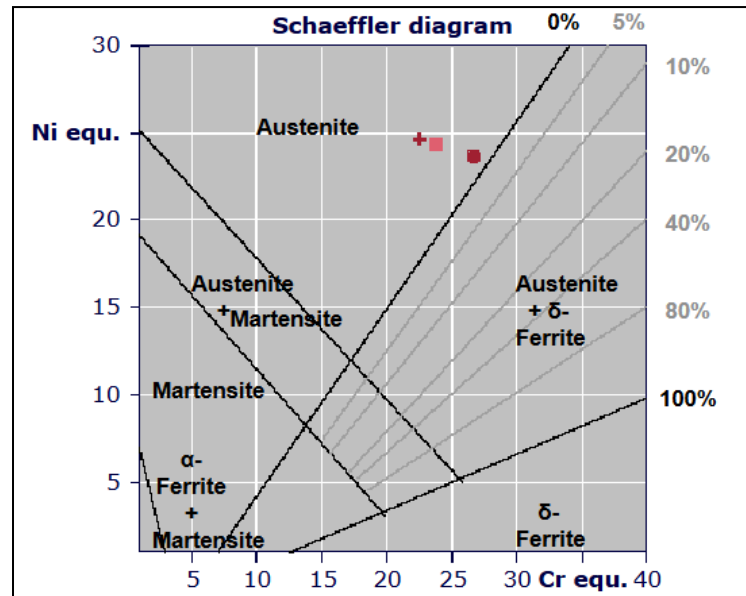
จากการวิเคราะห์โครงสร้างของแนวเชื่อมด้วยแผนภาพแชฟเฟลเลอร์ (Schaeffler Diagram) สามารถบอกองค์ประกอบทางเคมี จะทำให้ทราบถึงการเกิดโครงสร้างจุลภาค ผ่านค่านิกเกิลเทียบเท่า (Nickel Equivalent; Ni_{eq}) หรือค่าโครเมียมเทียบเท่า (Chromium Equivalent; Cr_{eq}) ใช้ในการคาดการณ์โครงสร้างจุลภาคของโลหะเชื่อมที่เกิดจากการผสมของโลหะฐาน (Base Metal) และโลหะเติม (Filler Metal) โดยใช้ค่าศักยภาพเฟอร์ไรต์ (Ferrite Number, FN) และสมดุลเฟสของธาตุหลัก ด้วยการคำนวณ Equivalent Factors Chromium Equivalent (Cr_{eq}) และ Nickel Equivalent (Ni_{eq}) ซึ่งสามารถคำนวณได้จากองค์ประกอบทางเคมีของโลหะฐาน และโลหะเติม

โดยใช้แผนภาพแชฟเฟลเลอร์ (Schaeffler Diagram) มีสมการดังนี้:

$$\text{Chromium Equivalent (Cr}_{\text{eq}}) = \% \text{Cr} + \% \text{Mo} + 1.5 \times \% \text{Si} + 0.5 \times \% \text{Nb} \quad (1)$$

$$\text{Nickel Equivalent (Ni}_{\text{eq}}) = \% \text{Ni} + 30 \times \% \text{C} + 0.5 \times \% \text{Mn} \quad (2)$$

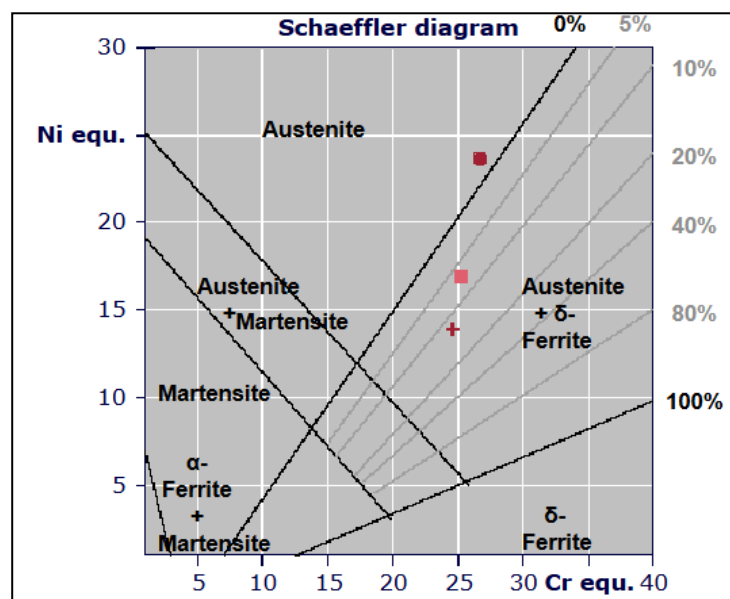
จากการคำนวณพบว่า เหล็กกล้าไร้สนิมเกรด SS310S มีค่า $\text{Cr}_{\text{eq}} = 26.80$ และ $\text{Ni}_{\text{eq}} = 23.60$ ในขณะที่โลหะเติมเกรด ER310 มีค่า $\text{Cr}_{\text{eq}} = 22.55$ และ $\text{Ni}_{\text{eq}} = 24.60$ เมื่อพิจารณาการเจือจางของโลหะฐานที่ (Dilution) ที่ 30% (โลหะฐาน (SS310S) มีสัดส่วน 30% และ (ER310) มีสัดส่วน 70%) และนำค่าที่คำนวณได้ไปพล็อตลงในแผนภาพแชฟเฟลเลอร์ (Schaeffler Diagram) พบว่าจุดที่ได้จาก $\text{Cr}_{\text{eq}} = 23.83$ และ $\text{Ni}_{\text{eq}} = 24.30$ จะอยู่ในโซนบริเวณออสเทนไนต์ทั้งหมด (Fully Austenite) (ดังแสดงในรูปที่ 5) หรืออาจมีเดลต้าเฟอร์ไรต์ในปริมาณเล็กน้อย (<3% Delta Ferrite) ซึ่งบ่งชี้ว่าแนวเชื่อมมีแนวโน้มพบปริมาณเฟอร์ไรต์ต่ำมาก ทำให้มีความเสี่ยงต่อการแตกร้าวขณะร้อน ผลการวิเคราะห์นี้สอดคล้องกับการทดลองเชื่อมจริง ซึ่งพบ รอยแตกร้าวในแนวเชื่อม (ดังแสดงในรูปที่ 4) โดยแสดงให้เห็นว่าโครงสร้างที่เป็นออสเทนไนต์ 100% หรือมีเฟอร์ไรต์ต่ำมาก ไม่สามารถป้องกันการแตกร้าวขณะร้อนในระหว่างการแข็งตัวของโลหะเชื่อมได้ โดยโครงสร้างที่เหมาะสมในการป้องกันปัญหาดังกล่าวควรมีปริมาณเฟอร์ไรต์ในแนวเชื่อมอยู่ในช่วง 3-10% เพื่อให้แนวเชื่อมแข็งตัวเป็นออสเทนไนต์กับเฟอร์ไรต์จำนวนเล็กน้อย (Austenitic with Small Ferrite; AF Mode) ซึ่งจะช่วยลดปัญหาการแตกร้าวในระหว่างการแข็งตัวของแนวเชื่อมได้อย่างมีประสิทธิภาพ [4-5] ดังนั้นจึงพิจารณาเลือกใช้โลหะเติม ER309L ในการทดลองขั้นตอนต่อไป



รูปที่ 5 แผนภาพแชฟเฟอร์ (Schaeffler Diagram) กรณีใช้โลหะเติม ER310

3.2 ผลการเชื่อมด้วยโลหะเติม ER309L

เพื่อแก้ไขปัญหาการเกิดรอยแตกร้าวขณะร้อน (Hot Cracking) ซึ่งเกิดขึ้นทันทีหลังจากหยุดเชื่อมจากการใช้โลหะเติมเกรด ER310 ได้ทำการใช้แผนภาพแชฟเฟอร์ (Schaeffler Diagram) เป็นเครื่องมือในการคาดการณ์โครงสร้างจุลภาคของแนวเชื่อมใหม่ โดยพิจารณาโลหะเติมเกรด ER309L ที่มีค่า $Cr_{eq} = 24.40$ และ $Ni_{eq} = 14.85$ และคำนวณการเปลี่ยนแปลงขององค์ประกอบทางเคมีจากการเจือจางของโลหะฐาน SS310S ที่อัตราส่วน Dilution 30% (โดยโลหะฐานมีสัดส่วน 30% และ ER309L มีสัดส่วน 70%) จากการคำนวณพบว่าค่าที่ได้หลังการผสมในแนวเชื่อมคือ $Cr_{eq} = 25.12$ และ $Ni_{eq} = 17.47$ เมื่อพล็อตลงในแผนภาพแชฟเฟอร์ (ดังแสดงในรูปที่ 6) พบว่าจุดที่ได้อยู่ในโซนออสเทนไนต์กับเฟอร์ไรต์ (~8% δ -Ferrite) ซึ่งหมายความว่าโครงสร้างของแนวเชื่อมจะประกอบไปด้วย ออสเทนไนต์ + เฟอร์ไรต์ (AF Mode)



รูปที่ 6 แผนภาพแชฟเฟอร์ (Schaeffler Diagram) กรณีใช้โลหะเติม ER309L

ในการทดลองเชื่อมซ่อมโครงสร้าง เหล็กกล้าไร้สนิมเกรด SS310S ได้ดำเนินการตาม WPS ที่กำหนด โดยควบคุมตัวแปรที่สำคัญ แสดงในตารางที่ 4 ผลการตรวจสอบแนวเชื่อมหลังการเชื่อม ดังแสดงในรูปที่ 7 (ซ้าย) แสดงให้เห็นแนวเชื่อมราก (Root Pass) ซึ่งหลังจากการเชื่อมและเย็นตัว ไม่พบรอยแตกร้าว ซึ่งแสดงให้เห็นว่าโครงสร้างของแนวเชื่อมชั้นแรกสามารถต้านทานการแตกร้าวได้ดี และ จากรูปที่ 7 (ขวา) แสดงให้เห็นแนวเชื่อมทับหน้า (Cover Pass) หลังจากทำการตรวจสอบด้วยสารแทรกซึม (Penetrant Testing; PT) ซึ่งยืนยันว่า ไม่มีรอยแตกร้าวปรากฏในแนวเชื่อม แสดงให้เห็นว่าการควบคุมพารามิเตอร์การเชื่อมและการเลือกใช้โลหะเติมที่เหมาะสมช่วยลดปัญหาการแตกร้าวได้อย่างมีประสิทธิภาพ การเลือกใช้โลหะเติมเกรด ER309L ในชั้น 1-3 เป็น "ชั้นบัฟเฟอร์ (Buffer Layer)" ทางโลหการ เพื่อปรับโครงสร้างจุลภาคของแนวเชื่อม ก่อนที่จะเชื่อมแนวทับหน้า (Cover Pass) ด้วยโลหะเติมเกรด ER310 (ชั้น 4) เพื่อให้ได้สมบัติที่ผิวหน้าตรงตามวัสดุเดิม (SS310S) ซึ่งต้องทนอุณหภูมิสูง

ตารางที่ 4 พารามิเตอร์ที่ใช้ในกระบวนการเชื่อมซ่อมที่ปรับปรุงแล้ว

ลำดับ ชั้น	กระบวนการ	โลหะ เติม	ขนาดโลหะ เติม (มม.)	กระแสเชื่อม (แอมป์)/ ขั้วไฟฟ้า	แรงดัน เชื่อม (โวลต์)	ความเร็วใน การเชื่อม (ชม./นาท)	อัตราการไหลของ ก๊าซปกคลุม
1- Root Pass	GTAW	ER309L	Ø 2.4 mm	116-118/DCEN	9-10	6.1	Ar: 12 L/min
2-Hot Pass	GTAW	ER309L	Ø 2.4 mm	116-118/DCEN	10-11	6.9	Ar: 12 L/min
3-Hot Pass	GTAW	ER309L	Ø 2.4 mm	116-118/DCEN	10-11	6.8	Ar: 12 L/min
4- Cover Pass	GTAW	ER310	Ø 2.4 mm	116-118/DCEN	10-11	7.4	Ar: 12 L/min



รูปที่ 7 แนวเชื่อมราก (Root Pass) ไม่พบรอยแตกร้าว (A) และ แนวเชื่อมทับหน้า (Cover Pass) ไม่พบรอยแตกร้าว (B)

ประเด็นสำคัญของการศึกษานี้คือการวิเคราะห์ว่าเหตุใดโลหะเติมเกรด ER310 ในชั้นที่ 4 (Cover Pass) จึงไม่เกิดการแตกร้าว ทั้งๆ ที่การใช้โลหะเติมเกรด ER310 เชื่อมกับโลหะฐาน SS310S โดยตรงนั้นล้มเหลวอย่างสิ้นเชิง การเปลี่ยนแปลงของ "โลหะฐาน" สำหรับการเชื่อมในชั้นที่ 4 ซึ่งในที่นี้ไม่ใช่ SS310S อีกต่อไป แต่เป็น "เนื้อเชื่อมของชั้นที่ 3" (ER309L) ที่ได้แข็งตัวและมีโครงสร้าง AF Mode ไปแล้ว (ซึ่งมีค่าคำนวณ $Cr_{eq} = 25.12$ และ $Ni_{eq} = 17.47$) เมื่อทำการวิเคราะห์การเจือจาง (Dilution 30%) ระหว่าง โลหะเติม ER310 (ชั้น 4) กับ เนื้อเชื่อมบัฟเฟอร์ ER309L (ชั้น 3) จะได้ค่าเทียบเท่าใหม่ ดังนี้:

- Cr_{eq} (Cover Pass) = 23.32
- Ni_{eq} (Cover Pass) = 22.46

เมื่อนำจุดพิกัดใหม่ (Cr_{eq} 23.32, Ni_{eq} 22.46) ไปพล็อตลงในแผนภาพแชฟเฟลเลอร์ (รูปที่ 5 และ 6) จะพบว่า จุดนี้ได้ "ถูกดึง" (Pulled) ออกมาจากโซนออสเทรไรต์ (Fully Austenite) (ซึ่งอยู่ที่ Cr_{eq} 23.8, Ni_{eq} 24.3) มาอยู่ในบริเวณเส้นแบ่งเขตแดนของโซน Austenite + Ferrite (A+F) คือหลักฐานเชิงประจักษ์ที่พิสูจน์ว่า ชั้นบัฟเฟอร์ ER309L ได้ทำหน้าที่ "ปรับองค์ประกอบทางเคมี" ของเนื้อโลหะเชื่อมในชั้นสุดท้ายได้ ทำให้เนื้อเชื่อม ER310 ในชั้นที่ 4 มีปริมาณเฟอร์ไรต์แฝง (Residual Ferrite) เพียงพอที่จะป้องกันการแตกร้าวขณะร้อนได้

ผลการเกิดรอยแตกร้าวเมื่อใช้โลหะเติมเกรด ER310 โดยตรงสอดคล้องกับหลักการ Weld Solidification Cracking ของเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก โดยงานของ Almomani et al. รายงานว่าเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด AISI 310S มีความไวต่อการแตกร้าวขณะร้อน (Solidification Cracking) เมื่อได้รับอิทธิพลร่วมจากธาตุ S, P, Si และปริมาณเดลต้าเฟอร์ไรต์ (δ -Ferrite) ต่ำ [10] ขณะที่งานของ Kadoi et al. ระบุว่าปริมาณเดลต้าเฟอร์ไรต์ (δ -Ferrite) ในระดับที่เหมาะสมมักช่วยลดความไวต่อการแตกร้าวขณะร้อน แต่ปริมาณที่สูงเกินไปก็อาจเพิ่มความเสี่ยงได้ จึงต้องควบคุมองค์ประกอบและโครงสร้างให้เหมาะสม [11]

สำหรับกรณีศึกษาครั้งนี้ ค่าเดลต้าเฟอร์ไรต์ (δ -Ferrite) ที่คาดการณ์ได้จากสภาวะ ER309L + SS310S ประมาณ 8% จึงสนับสนุนเหตุผลเชิงโลหะวิทยาว่าการใช้โลหะเติมเกรด ER309L ทำหน้าที่เป็นชั้นบัฟเฟอร์ (Buffer Layer) เพื่อลดแนวโน้ม Fully Austenitic solidification ก่อนเชื่อมปิดผิวด้วยโลหะเติมเกรด ER310 ทั้งนี้ ควรตีความผลภายใต้ข้อจำกัดว่าค่าเฟอร์ไรต์เป็นค่าที่คาดการณ์จากแผนภาพแชฟเฟลเลอร์ (Schaeffler Diagram) ไม่ใช่ค่าที่วัดโดยตรงจาก Ferrite Scope หรือการวิเคราะห์จุลภาค อีกประเด็นสำคัญคือวัสดุฐานเป็นเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกเกรด SS310S ที่ผ่านการใช้งานอุณหภูมิสูงเป็นเวลานาน งานของ Ma et al. แสดงให้เห็นว่าเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด SS310S นี้ สามารถเกิด ความไวต่อการกัดกร่อน (Sensitization) หลังผ่านการใช้งาน (Aging) ในช่วงอุณหภูมิที่เหมาะสม โดยสัมพันธ์กับการตกผลึกของคาร์ไบด์ (Carbide Precipitation) และการสูญเสียโครเมียม (Cr-Depletion) บริเวณขอบเกรน [12] ดังนั้น การแตกร้าวในกรณีนี้จึงควรอธิบายเป็นผลร่วมระหว่างโครงสร้างออสเทนไนต์ทั้งหมด (Fully Austenite) ของแนวเชื่อม ER310 ความเปราะของวัสดุฐานที่ผ่านการใช้งาน และความเค้นระหว่างการแข็งตัวของแนวเชื่อม

3.3 การประยุกต์ใช้กรอบแนวคิด DMAIC

การประยุกต์ใช้กรอบแนวคิด DMAIC (Define–Measure–Analyze–Improve–Control) ภายใต้ Lean Six Sigma เป็นหัวใจสำคัญของการปรับปรุงกระบวนการเชื่อมซ่อมเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด SS310S ที่ผ่านการใช้งานในเตาเผาสุญญากาศ โดยกรอบแนวคิดนี้ช่วยให้สามารถวิเคราะห์ปัญหาอย่างเป็นระบบ ลดความสูญเสียเชิงกระบวนการ และสร้างผลลัพธ์ที่คงทนในระยะยาว

จากการดำเนินงานจริงในโรงงาน พบว่าการนำ DMAIC มาประยุกต์ใช้ไม่เพียงช่วยแก้ปัญหาเชิงเทคนิค เช่น การแตกร้าวขณะร้อน (Hot Cracking) แต่ยังช่วยยกระดับการจัดการคุณภาพในภาพรวม ตั้งแต่การระบุปัญหา การเก็บข้อมูล วิเคราะห์สาเหตุ ไปจนถึงการควบคุมผลลัพธ์ให้ยั่งยืน ซึ่งสอดคล้องกับเป้าหมายเชิงอุตสาหกรรมที่ต้องการให้งานซ่อมบำรุงมีความเสถียร ลดความไม่แน่นอน และลดความเสี่ยงของการหยุดเสียของเตาเผา (Breakdown) การประยุกต์ใช้ DMAIC ในมิติการปรับปรุงกระบวนการมีความสอดคล้องกับงานวิจัยอุตสาหกรรมล่าสุดที่รายงานว่า Lean Six Sigma และ DMAIC ช่วยลดความสูญเสีย ปรับปรุงประสิทธิภาพ และควบคุมผลลัพธ์ของกระบวนการผลิตได้อย่างเป็นระบบ [14–15]

3.3.1 Define – การกำหนดปัญหา

ขั้นตอนแรกคือการนิยามปัญหาอย่างชัดเจน พบว่าการเชื่อมซ่อมโครงสร้างเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด SS310S ของเตาเผาสุญญากาศเกิดรอยแตกร้าวก่อนการเชื่อมและหลังเชื่อม ส่งผลให้ต้องซ่อมซ้ำและสูญเสียเวลาการผลิต การกำหนดขอบเขตและเป้าหมายการปรับปรุง ลดอัตราการแตกร้าวเพิ่มเติมและไม่ให้เกิด Breakdown ของเครื่องจักร กำหนดทิศทางในการแก้ปัญหาให้มีความชัดเจนและวัดผลได้

3.3.2 Measure – การวัดและเก็บข้อมูล

มีการเก็บข้อมูลเชิงปริมาณของแนวเชื่อมผ่านค่าพารามิเตอร์สำคัญ เช่น กระแสเชื่อม แรงดันเชื่อม ความเร็วในการเชื่อม อุณหภูมิระหว่างชั้นแนวเชื่อม รวมถึงข้อมูลด้านความเสียหายที่เกิดขึ้นจริง นอกจากนี้ยังมีการตรวจสอบด้วยการทดสอบด้วยสารแทรกซึม (PT) เพื่อเก็บข้อมูลก่อนและหลังการซ่อม ซึ่งช่วยสร้างฐานข้อมูลที่น่าเชื่อถือสำหรับการวิเคราะห์

3.3.3 Analyze – การวิเคราะห์หาสาเหตุ

จากการวิเคราะห์ปัญหาโดยใช้ข้อมูลเชิงโลหะวิทยาและเทคนิค Lean พบว่าสาเหตุหลักของการแตกร้าวมาจากการใช้โลหะเติมเกรด ER310 ซึ่งทำให้แนวเชื่อมมีโครงสร้างออสเทนไนต์ทั้งหมด (Fully Austenite) ที่มีปริมาณเฟอร์ไรต์ต่ำ ส่งผลให้เกิดการแตกร้าวขณะร้อน (Hot Cracking) การวิเคราะห์ด้วยแผนภาพแชฟเฟลเลอร์ (Schaeffler Diagram) ช่วยยืนยันผลการคาดการณ์โครงสร้างของโลหะเชื่อมและสนับสนุนข้อสรุปได้อย่างเป็นเหตุเป็นผล

3.3.4 Improve – การปรับปรุงกระบวนการ

การปรับปรุงกระบวนการ จากผลการวิเคราะห์ ได้นำมาออกแบบการปรับปรุงกระบวนการเชิงเทคนิค โดยเปลี่ยนจากการเชื่อมแบบเกรดเดียว (Single Filler) มาเป็น เทคนิคการเชื่อมแบบผสม (Composite Filler Technique) ดังนี้

1. ชั้นบัฟเฟอร์ (Buffer Layers) ใช้โลหะเติมเกรด ER309L สำหรับแนวเชื่อมราก (Root) และแนวเชื่อมเติม (Hot Pass) เพื่อสร้างโครงสร้าง AF ที่มีเฟอร์ไรต์สูง (7-8%) ซึ่งมีความต้านทานการแตกร้าวขณะร้อนสูง
2. ชั้นผิวหน้า (Cover Pass) กลับมาใช้โลหะเติมเกรด ER310 เพื่อให้ผิวหน้าของแนวเชื่อมมีสมบัติการทนอุณหภูมิสูงและมีองค์ประกอบทางเคมีใกล้เคียงกับวัสดุเดิม (SS310S) มากที่สุด

3.3.5 Control – การควบคุมและรักษามาตรฐาน

หลังจากดำเนินการปรับปรุงแล้ว มีการติดตามผลการใช้งานจริงเป็นระยะเวลา 1 ปี พบว่าไม่มีการเกิดรอยแตกร้าวหรือ Breakdown เพิ่มเติม แสดงให้เห็นถึงความสมบูรณ์และแข็งแรงของแนวเชื่อมซ่อม การทดสอบด้วยสารแทรกซึม (PT) เป็นระยะพร้อมบันทึกข้อมูลการเชื่อมเข้าสู่ระบบช่วยทำให้สามารถติดตามคุณภาพของงานได้ในเชิงสถิติ จากผลสำเร็จดังกล่าว จึงได้จัดทำเป็นขั้นตอนปฏิบัติงานมาตรฐาน (Standard Operating Procedure; SOP) สำหรับการซ่อมเตาเผาที่ทำจากเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด SS310S ในโรงงาน เพื่อให้สามารถควบคุมคุณภาพและผลลัพธ์ได้อย่างยั่งยืน ครอบคลุมประเด็นสำคัญ เช่น การเลือกโลหะเติม การควบคุมอุณหภูมิ การตรวจสอบแนวเชื่อม และการบันทึกข้อมูล จัดทำเอกสารขั้นตอนการเชื่อม WPS สำหรับงานเชื่อมซ่อม ผลจากการปรับปรุงช่วย ป้องกันการเกิดรอยแตกร้าวซ้ำ ลดโอกาสการซ่อมซ้ำในกรณีศึกษา และสนับสนุนการจัดทำฐานข้อมูลเพื่อประเมินผลเชิงสถิติในอนาคต สะท้อนถึงประสิทธิภาพของแนวทางปรับปรุงที่ชัดเจน

- กำหนดโลหะเติมเกรด ER309L เป็นชั้นบัฟเฟอร์ (FN ~7-8%)
- ควบคุมอุณหภูมิระหว่างชั้นแนวเชื่อม (Interpass Temperature) $\leq 150^{\circ}\text{C}$ ทุกชั้น
- ทดสอบด้วยสารแทรกซึม (PT) ทุกแนว (Root/Hot/Cover) และบันทึกผล
- บันทึกพารามิเตอร์เชื่อม (กระแสเชื่อม/แรงดันเชื่อม/ความเร็วเชื่อม/อัตราการไหลของแก๊ส) ลงฐานข้อมูล
- ทบทวนประจำปี (Annual review)

4. อภิปรายผล

บทบาทของโลหะเติมเกรด ER309L ในงานนี้ไม่ได้จำกัดเพียงการเป็นโลหะเติมทางเลือก แต่ทำหน้าที่เป็นชั้นบัฟเฟอร์เชิงโลหะวิทยาเพื่อปรับสมดุล Cr/Ni equivalent ลดผลของการเจือจาง (Dilution) จากวัสดุฐานที่ผ่านการใช้งาน และสร้างแนวโน้มโครงสร้างออสเทนไนต์กับเฟอร์ไรต์ (Austenite + Ferrite) ก่อนเชื่อมปิดผิวด้วยโลหะเติมเกรด ER310 แนวคิดดังกล่าวสอดคล้องกับงานการเชื่อมพอกผิว (Overlay Welding) ล่าสุดที่พบว่า การใช้โลหะเติมเกรด ER309L เป็นชั้นบัฟเฟอร์ (Buffer Layer) สามารถช่วยลดผลของ การเจือจาง (Dilution) และเพิ่มความต่อเนื่องทางโลหะวิทยาของชั้นเชื่อมทับได้ [13]

เมื่อเชื่อมโยงกับ DMAIC ผลของงานนี้แสดงให้เห็นว่าการแก้ปัญหาทางเชื่อมซ่อมไม่ได้เกิดจากการเปลี่ยนโลหะเติมเพียงอย่างเดียว แต่เกิดจากกระบวนการระบุปัญหา วัดข้อมูล วิเคราะห์ด้วยหลักโลหะวิทยา ทดลองปรับปรุง และควบคุมผลลัพธ์ด้วยการทดสอบด้วยสารแทรกซึม (PT) และการติดตามการใช้งานจริง ซึ่งเป็นองค์ประกอบที่ทำให้งานซ่อมบำรุงสามารถพัฒนาเป็นมาตรฐานปฏิบัติงาน (SOP) ได้

ข้อจำกัดของการศึกษา งานนี้ยังไม่ได้มีการยืนยันด้วยการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคเชิงลึก การวัด Ferrite Number จริง การทดสอบความแข็ง หรือการทดสอบเชิงกลแบบทำลาย ดังนั้นข้อสรุปด้านโครงสร้างจุลภาคควรถือเป็นการคาดการณ์

เชิงวิศวกรรมจากแผนภาพแชฟเฟลอร์ (Schaeffler Diagram) และผลการใช้งานจริง มากกว่าการพิสูจน์เชิงวิทยาศาสตร์แบบสมบูรณ์

5. สรุปผล

จากการศึกษาวิธีการเชื่อมซ่อมเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด SS310S ซึ่งถูกใช้งานในเตาเผาสุญญากาศเป็นระยะเวลา 7 ปี ภายใต้อุณหภูมิสูงประมาณ 1000–1200°C พบว่าประเด็นหลักที่ส่งผลให้การซ่อมแซมล้มเหลวคือ “การแตกร้าวขณะร้อน (Hot Cracking)” ที่เกิดขึ้นบริเวณแนวเชื่อมหลังการซ่อม ผลการวิเคราะห์ชี้ให้เห็นว่า สาเหตุของปัญหาไม่ได้เกิดจากโครงสร้างออสเทนไนต์ทั้งหมดของแนวเชื่อมจากโลหะเติมเกรด ER310 เพียงอย่างเดียว แต่เป็นผลมาจากปฏิสัมพันธ์ระหว่างโลหะเชื่อมและวัสดุฐานที่เสื่อมสภาพจากการใช้งานเมื่อวัสดุเกรด SS310S ถูกใช้งานที่อุณหภูมิสูงต่อเนื่องยาวนาน โครงสร้างภายในจะเกิดการเสื่อมสภาพ (Aging/Sensitization) ทำให้วัสดุมีความเปราะและไวต่อการแตกร้าวมากขึ้น การใช้โลหะเติมเกรด ER310 ซึ่งเป็นออสเทนไนต์ทั้งหมด จึงไม่สามารถต้านทานความเปราะของวัสดุฐานที่เสื่อมสภาพได้ ส่งผลให้เกิดการแตกร้าวขณะร้อนในการซ่อมครั้งแรก เพื่อแก้ไขปัญหาดังกล่าว วิธีการเชื่อมแบบ “ใช้โลหะเติมผสม” จึงถูกนำมาประยุกต์ใช้ โดยแบ่งการเชื่อมเป็นสองช่วงสำคัญ ได้แก่

1) การเชื่อมชั้นบัฟเฟอร์ (Buffer Layer)

ใช้โลหะเติมเกรด ER309L ประมาณ 1–3 ชั้น เพื่อสร้างแนวเชื่อมที่มีโครงสร้างออสเทนไนต์กับเฟอร์ไรต์ (Austenite + Ferrite) (AF Mode) ซึ่งทำให้แนวเชื่อมมีความเหนียวและต้านทานการแตกร้าวได้ดีขึ้น

2) การเชื่อมปิดผิวหน้า (Cover Pass)

เชื่อมทับด้วยโลหะเติมเกรด ER310 เป็นชั้นสุดท้าย ทำให้โลหะเติมเกรด ER310 หลอมรวมบนบัฟเฟอร์ที่มีเสถียรภาพ ไม่สัมผัสโดยตรงกับวัสดุฐานที่เสื่อมสภาพ จึงไม่เกิดการแตกร้าวซ้ำ

ขั้นตอนทั้งหมดถูกควบคุม ตรวจสอบ และประเมินผลตามกรอบ DMAIC โดยเฉพาะใน Control Phase มีการติดตามผลการใช้งานจริงเป็นเวลา 1 ปีเต็ม ไม่พบการแตกร้าวหรือความเสียหายซ้ำ จึงสนับสนุนว่าวิธีนี้มีประสิทธิภาพในเงื่อนไขของกรณีศึกษา และสามารถนำไปจัดทำเป็นมาตรฐานปฏิบัติงาน (SOP) สำหรับงานซ่อมบำรุงในโรงงานได้อย่างยั่งยืน กล่าวโดยสรุป แนวทางการเชื่อมแบบใช้โลหะเติมผสม ER309L + ER310 ช่วยแก้ปัญหาการแตกร้าวขณะร้อน (Hot Cracking) ในการซ่อมเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด SS310S ที่เสื่อมสภาพได้สำเร็จ ทั้งในเชิงโลหวิทยา และเชิงปฏิบัติการในภาคอุตสาหกรรม องค์ความรู้ใหม่ของงานนี้คือการแสดงบทบาทของโลหะเติมเกรด ER309L ในฐานะชั้นบัฟเฟอร์ (Buffer Layer) สำหรับ Aged SS310S ในสภาพซ่อมจริง และการบูรณาการ DMAIC เพื่อแปลงแนวทางเชิงโลหวิทยาให้เป็นขั้นตอนควบคุมงานซ่อมบำรุงในโรงงาน

6. กิตติกรรมประกาศ

ขอแสดงความขอบคุณ บริษัท เออีซี อินดัสเตรียล เซอร์วิส จำกัด ผู้บริหาร ทีมวิศวกร และ ทีมช่างเชื่อม ที่ให้การสนับสนุนอุปกรณ์และทรัพยากรที่จำเป็นในการดำเนินงานวิจัยนี้ ตลอดจนการอำนวยความสะดวกด้านเทคนิคที่ช่วยให้นักศึกษาสามารถดำเนินไปได้อย่างราบรื่น นอกจากนี้ ขอขอบคุณ ห้องปฏิบัติการ Welding Evaluation and Learning Laboratory (WELLab) มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ที่ให้การสนับสนุนซึ่งมีส่วนสำคัญอย่างยิ่งทางวิศวกรรม การเชื่อม สุดท้ายนี้ และขอขอบคุณเพื่อนร่วมงานทุกท่านที่ให้ความสนใจและการสนับสนุนตลอดระยะเวลาของการดำเนินงานวิจัยครั้งนี้

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] ตรีนตร ยิ่งสัมพันธ์เจริญ, & นครินทร์ ศรีสุวรรณ. (2012). อิทธิพลของกระแสไฟเชื่อมในกระบวนการเชื่อมอาร์กทั้งสแตนที่มีผลต่องานเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 201. วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, 22(1), 39–41.
- [2] Rao, V. A., & Deivanathan, R. (2014). Experimental investigation for welding aspects of stainless steel 310 for the process of TIG welding. Procedia Engineering, 97, 902–908. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.12.365>
- [3] Subhani, S. M., Kumar, D. S., Haq, A. U., & Satyanarayana, K. (2019). Evaluation of mechanical properties for TIG welding aspects of SS 310 and MS materials. Materials Today: Proceedings. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.08.121>

- [4] บรรเลง ศรีนิล, กอบบุญ หล่อทองคำ, & Hartung, F. (2016). การเชื่อมเหล็กกล้าผสมต่ำและเหล็กกล้าผสมสูง (Black-White Welding). The Journal of Welding Institute of Thailand, 2(1), 7–13.
- [5] Kobe Steel, Ltd. (2015). Arc welding of specific steels and cast irons. Kobe Steel, Ltd., Chapter 3.
- [6] ASTM International. (2023). ASTM A240/A240M-23a: Standard specification for chromium and chromium-nickel stainless steel plate, sheet, and strip for pressure vessels and general applications. ASTM International. https://doi.org/10.1520/A0240_A0240M-23a
- [7] American Welding Society. (2017). AWS A5.9/A5.9M: Specification for bare stainless steel welding electrodes and rods. American Welding Society.
- [8] Shalchi Amirkhiz, B., Xu, S., & Scott, C. (2019). Microstructural assessment of 310S stainless steel during creep at 800 °C. Materialia, 6, 100330. <https://doi.org/10.1016/j.mtla.2019.100330>
- [9] Tavares, S. S. M., Moura, V., da Costa, V. C., Ferreira, M. L. R., & Pardal, J. M. (2009). Microstructural changes and corrosion resistance of AISI 310S steel exposed to 600–800 °C. Materials Characterization, 60, 573–578. <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2008.12.005>
- [10] Almomani, A., Mourad, A.-H. I., & Barsoum, I. (2022). Effect of sulfur, phosphorus, silicon, and delta ferrite on weld solidification cracking of AISI 310S austenitic stainless steel. Engineering Failure Analysis, 139, Article 106488. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2022.106488>
- [11] Kadoi, K., Ueno, S., & Inoue, H. (2023). Effects of ferrite content and concentrations of carbon and silicon on weld solidification cracking susceptibility of stainless steels. Journal of Materials Research and Technology, 25, 1314–1321. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2023.06.018>
- [12] Ma, G., Xian, W., Bi, H., & Li, M. (2022). Effect of short-time aging on the sensitization characteristics of 310S stainless steel. International Journal of Electrochemical Science, 17(9), Article 22097. <https://doi.org/10.20964/2022.09.34>
- [13] Ma, Y., Zhang, J., Yu, Z., Li, M., Cai, Z., Feng, D., Ren, S., Zheng, W., & Yang, J. (2025). Influence of overlay welding process on the morphology, microstructure, and performance of the overlay layer. Metals, 15(9), 987. <https://doi.org/10.3390/met15090987>
- [14] Daniyan, I., Adeodu, A., Mpofu, K., Maladzhi, R., & Kana-Kana Katumba, M. G. (2022). Application of lean Six Sigma methodology using DMAIC approach for the improvement of bogie assembly process in the railcar industry. Heliyon, 8(3), e09043. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e09043>
- [15] กาญจนา ลายวิเชียร, & ศุภรัชชัยวรรธน์. (2565). การลดของเสียในกระบวนการผลิตแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ โดยวิธีซิก ชิกม่า. ใน เอกสารการประชุมวิชาการ/วารสารบัณฑิตศึกษา มหาวิทยาลัยธุรกิจบัณฑิต, 166–177.

การวิเคราะห์ปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพการบดของเครื่องบดถ่านพลังงานแสงอาทิตย์

Analysis of Factors Affecting the Grinding Performance of a Solar-Powered Charcoal Grinder

วรพงศ์ พงศ์ภักทรวุฒิ¹, ธีรภัทร เยื้องกลาง¹, พิชัยภูษิต แก้วทอง¹ และ ณภัทร อินทนนท์^{1*}

¹สาขาวิชาเทคโนโลยีอุตสาหกรรม คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน (วิทยาเขตขอนแก่น)

150 ถนนศรีจันทร์ ตำบลในเมือง อำเภอเมือง จังหวัดขอนแก่น 40000

Worapong Phongphattarawut¹, Teeraphat Yueangklang¹, Pichaipusit Kaewthong¹ and Naphatara Intanon^{1*}

¹Department of Industrial Technology, Faculty of Technical Education,

Rajamangala University of Technology Isan (Khon Kaen campus)

150 Srichun Road. Nai Mueang, Mueang Khon Kaen, Khon Kaen 40000

*Corresponding author Email: naphatara.in@rmuti.ac.th

(Received: June 10, 2026 / Revised: June 22, 2026 / Accepted: June 25, 2026)

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาประสิทธิภาพและหาสภาวะการทำงานที่เหมาะสมของเครื่องบดถ่านพลังงานแสงอาทิตย์ เครื่องบดพลังงานแสงอาทิตย์ที่ใช้ในการศึกษาค้นคว้าครั้งนี้ เป็นเครื่องบดชนิดเหวี่ยงกระแทก ใช้มอเตอร์กระแสตรงขนาด 750 วัตต์ ความเร็วรอบของการบด 1000 รอบต่อนาที และตะแกรงร่อนขนาดไม่เกิน 450 ไมครอน ปัจจัยที่ศึกษาได้แก่ ปริมาณถ่านก่อนบด 2 ระดับ (1 และ 2 กิโลกรัม) และเวลาในการบด 3 ระดับ (5, 6 และ 10 นาที) โดยทำการทดลองซ้ำในแต่ละเงื่อนไข ประสิทธิภาพของเครื่องวัดจากร้อยละของผงถ่านที่ได้ และสภาวะที่เหมาะสมคือสภาวะที่ทำให้ต้นทุนการดำเนินงานต่ำที่สุด ผลการศึกษาพบว่า กรณีบดครั้งละ 1 กิโลกรัม จะได้ผงถ่านที่ปริมาณสูงกว่าการบดครั้งละ 2 กิโลกรัมในทุกช่วงเวลาการบด และปริมาณถ่านก่อนบดและเวลาในการบดมีอิทธิพลต่อร้อยละของผงถ่านอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ที่ระดับ .05 ประสิทธิภาพของเครื่องสูงสุด เท่ากับ ร้อยละ 99.53 และสภาวะที่เหมาะสมที่ทำให้ต้นทุนการดำเนินงานต่ำสุด คือ บดครั้งละ 2 กิโลกรัม และใช้เวลาการบด 6 นาทีต่อครั้ง โดยมีต้นทุนต่อผงถ่านที่ได้คือ 17.81 บาทต่อกิโลกรัม

คำสำคัญ: เครื่องบดถ่าน, พลังงานแสงอาทิตย์, ผงถ่าน, ประสิทธิภาพการบด, ชีวมวล

Abstract

This research aimed to evaluate the performance and determine the optimal operating conditions of a solar-powered charcoal grinder. The grinder used in this study was a hammer mill powered by a 750-W DC motor operating at a rotational speed of 1,000 rpm and equipped with a sieve having an aperture size of less than 450 μ m. The experimental factors consisted of two charcoal feed quantities (1 and 2 kg) and three grinding times (5, 6, and 10 min). Each treatment combination was replicated four times. The performance of the grinder was evaluated based on the percentage yield of charcoal powder, whereas the optimal operating condition was determined by the lowest operating cost. The results showed that the grinder produced a higher charcoal powder yield when processing 1 kg of charcoal per batch than when processing 2 kg per batch at all grinding times. Statistical analysis indicated that both charcoal feed quantity and grinding time significantly affected the charcoal powder yield at the 0.05 significance level. The highest grinding efficiency reached 99.53%. Economic analysis revealed that

the optimal operating condition was a feed quantity of 2 kg and a grinding time of 6 min per batch. Under this condition, the production cost was reduced to 17.81 THB/kg of charcoal powder.

Keywords: Charcoal grinder, Solar-powered, Charcoal powder, Grinder efficiency, Biomass

1. บทนำ (Introduction)

ในปัจจุบัน การใช้ชีวมวล (Biomass) เป็นแหล่งพลังงานทดแทนได้รับความสนใจเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง เนื่องจากเป็นพลังงานที่สามารถทดแทนเชื้อเพลิงฟอสซิล ลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจก และสนับสนุนแนวทางเศรษฐกิจหมุนเวียน (Circular Economy) [1] ถ่านไม้ (Charcoal) จัดเป็นผลิตภัณฑ์ชีวมวลที่มีบทบาทสำคัญในภาคครัวเรือน ภาคเกษตรกรรม และอุตสาหกรรมขนาดเล็ก โดยเฉพาะในประเทศกำลังพัฒนา เนื่องจากมีค่าความร้อนสูง สามารถจัดเก็บและขนส่งได้สะดวก และมีต้นทุนการผลิตต่ำเมื่อเปรียบเทียบกับเชื้อเพลิงประเภทอื่น [2] นอกจากการใช้ถ่านไม้เป็นเชื้อเพลิงโดยตรงแล้ว ปัจจุบันผงถ่าน (Charcoal Powder) ยังเป็นวัตถุดิบสำคัญในหลายอุตสาหกรรม เช่น การผลิตถ่านอัดแท่ง (Charcoal Briquette) การผลิตเชื้อเพลิงชีวมวลอัดแท่ง การผลิตวัสดุดูดซับกลิ่นและสารปนเปื้อน การผลิตถ่านกัมมันต์ (Activated Carbon) ตลอดจนการประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมเกษตรและสิ่งแวดล้อม [3], [4] โดยคุณภาพของผงถ่านที่ได้มีผลโดยตรงต่อสมบัติของผลิตภัณฑ์ปลายทาง ทั้งด้านความหนาแน่น ความแข็งแรงเชิงกล อัตราการเผาไหม้ และประสิทธิภาพในการดูดซับสาร [5]

อย่างไรก็ตาม กระบวนการผลิตผงถ่านในระดับชุมชนและผู้ประกอบการรายย่อยยังประสบปัญหาหลายประการ โดยเฉพาะการใช้แรงงานคนในการบดหรือการใช้เครื่องบดไฟฟ้าขนาดเล็กที่มีประสิทธิภาพต่ำ ส่งผลให้กำลังการผลิตไม่เพียงพอ สูญเสียวัตถุดิบจากการฟุ้งกระจายของฝุ่นถ่าน และมีต้นทุนด้านพลังงานไฟฟ้าสูง [6] นอกจากนี้ ในหลายพื้นที่ชนบทหรือพื้นที่ห่างไกลยังประสบปัญหาการเข้าถึงไฟฟ้าอย่างไม่ต่อเนื่อง ส่งผลให้การใช้เครื่องจักรไฟฟ้ามีข้อจำกัดและไม่สามารถผลิตได้อย่างสม่ำเสมอ จากสถานการณ์ดังกล่าว การประยุกต์ใช้พลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับเครื่องจักรกลเกษตรและเครื่องจักรแปรรูปชีวมวลจึงเป็นทางเลือกที่ได้รับความนิยมอย่างมาก เนื่องจากพลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานสะอาด สามารถนำมาใช้ได้อย่างยั่งยืน มีต้นทุนการดำเนินงานต่ำ และเหมาะสมกับบริบทของประเทศไทยซึ่งได้รับรังสีดวงอาทิตย์เฉลี่ยประมาณ 18–20 MJ/m²/day ตลอดทั้งปี [7] งานวิจัยหลายฉบับรายงานว่า การประยุกต์ใช้ระบบเซลล์แสงอาทิตย์กับเครื่องจักรกลการเกษตรสามารถช่วยลดต้นทุนพลังงานได้มากกว่า 30% และเพิ่มความสามารถในการเข้าถึงเทคโนโลยีของชุมชนชนบท [8]

จากการทบทวนวรรณกรรมพบว่า มีงานวิจัยเกี่ยวกับการพัฒนาเครื่องบดวัสดุชีวมวลหลายประเภท เช่น เครื่องบดเปลือกหอยแมลงภู่ เครื่องบดเศษไม้ และเครื่องบดเศษหน่อไม้ [9], [10], [11] ซึ่งสามารถเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตและลดการใช้แรงงานได้อย่างมีนัยสำคัญ อย่างไรก็ตาม ยังพบงานวิจัยที่ศึกษาเกี่ยวกับเครื่องบดถ่านที่ขับเคลื่อนด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ในระดับชุมชนค่อนข้างจำกัด โดยเฉพาะการศึกษาประสิทธิภาพการบดภายใต้เงื่อนไขการทำงานที่แตกต่างกัน และการประเมินปริมาณผลผลิตที่ได้หลังการบด

ดังนั้น ผู้วิจัยจึงมีความสนใจที่จะศึกษาประสิทธิภาพของเครื่องบดถ่านพลังงานแสงอาทิตย์ ขนาดเล็กที่สร้างขึ้น รวมถึงการหาสภาวะการทำงานที่เหมาะสม ภายใต้เงื่อนไขและข้อจำกัดของเครื่อง เพื่อจะได้เป็นแนวทางในการพัฒนาเครื่องจักรแปรรูปชีวมวลที่ใช้พลังงานสะอาด ช่วยเพิ่มมูลค่าให้กับเศษถ่านเหลือใช้ ลดต้นทุนด้านพลังงาน และสนับสนุนการพัฒนาเทคโนโลยีที่เหมาะสมสำหรับชุมชนอย่างยั่งยืน

2. วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อศึกษาประสิทธิภาพของเครื่องบดถ่านพลังงานแสงอาทิตย์
2. เพื่อหาสภาวะการทำงานที่เหมาะสมที่ทำให้ต้นทุนการดำเนินงานต่ำสุด

3. เครื่องจักร และวัสดุการทดสอบ

เครื่องบดถ่านที่ใช้ในการทดสอบในครั้งนี้ เป็นเครื่องบดถ่านพลังงานแสงอาทิตย์ ที่สร้างขึ้น (รูปที่ 1 ก) โดยมีแผงโซลาร์เซลล์ ขนาด 350 W จำนวน 2 แผง ทำหน้าที่ในการประจุไฟฟ้า (Charger) ให้กับแบตเตอรี่ ขนาด 12V 60A. จำนวน 2 ตัว ต่อพ่วงแบบอนุกรม เพื่อให้ได้แรงดันไฟฟ้า 24 โวลต์ สำหรับขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง ขนาด 750 W ความเร็วรอบของมอเตอร์ 400 รอบต่อนาที ต่อพ่วงกับมูเลย์ อัตราทด 1:2.5 ได้ความเร็วรอบของชุดบด 1000 รอบต่อนาที ชุดบดถ่าน เป็นลักษณะเหวี่ยงกระแทก (Hammer mill) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของแกน 25 มิลลิเมตร ความยาว 500 มิลลิเมตร ชุดค้อน 9 ชุด เส้นผ่านศูนย์กลางค้อน 60 มิลลิเมตร

วัสดุที่ใช้ในการทดลองเป็นเศษถ่านไม้ที่มีขนาดเล็ก ไม่สามารถนำไปจัดจำหน่ายได้ (รูปที่ 1 ข) ถ่านที่นำมาใช้ในการทดลอง มีขนาดใกล้เคียงกัน เพื่อลดผลกระทบจากความแตกต่างของชนิดและคุณภาพของถ่านก่อนการทดลอง



(ก)



(ข)

รูปที่ 1 (ก) เครื่องบดถ่านที่ใช้ในการทดสอบ (ข) ขนาดของถ่านที่ใช้ในการทดสอบ

เงื่อนไขของการทดสอบ ผงถ่านที่ได้ต้องผ่านการกรองของตะแกรง MESH 40 (ขนาดผงถ่าน เท่ากับ 450 ไมครอน) (รูปที่ 2 (ก)และ (ข)) และต้องมีผลผลิตไม่ต่ำกว่า 10 กิโลกรัมต่อชั่วโมง โดยขนาดของช่องบรรจุถ่านของเครื่องบดถ่าน มีความจุสูงสุดประมาณ 2 กิโลกรัม ดังนั้น เพื่อให้ได้ผลผลิตตามที่ต้องการ จึงกำหนดเงื่อนไขในการทดลองเพื่อหาประสิทธิภาพของเครื่อง ซึ่งวัดจากร้อยละของผงถ่านที่ได้จากการทดสอบไว้ดังตารางที่ 1



ก



ข

รูปที่ 2 (ก) ตะแกรง MESH 40 (ข) ผงถ่านที่ผ่านการร่อนด้วยตะแกรง MESH40

ตารางที่ 1 น้ำหนักของถ่าน และเวลาที่ใช้ในการบด

น้ำหนัก / ครั้ง(kg)	เวลาที่ใช้/ครั้ง	ผลผลิต (kg./ชม.)	หมายเหตุ
1	5	12	สูงกว่าเป้าหมาย
1	6	10	ตรงตามเป้าหมาย
1	10	6	ต่ำกว่าเป้าหมาย
2	5	24	สูงกว่าเป้าหมาย
2	6	20	สูงกว่าเป้าหมาย
2	10	12	สูงกว่าเป้าหมาย

การทดลองครั้งนี้ ในแต่ละเงื่อนไขทำการทดลอง 4 ซ้ำ

4. ผลการทดสอบและอภิปรายผล

4.1 ผลการทดสอบ

หลังจากเครื่องบดถ่านทำงานครบกำหนดเวลาที่กำหนดไว้ ผู้วิจัยจะนำผงถ่านที่ได้มาร่อนเพื่อนำเศษถ่านที่มีขนาดเล็กกว่ากำหนดออก หลังจากนั้นจะนำผงถ่านที่ได้ไปชั่งน้ำหนัก และคำนวณเป็นค่าร้อยละ เปรียบเทียบกับน้ำหนักของถ่านที่ใส่เข้าไป ผลการทดสอบที่ได้ เป็นดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ร้อยละของผงถ่านที่ได้จากการทดสอบ

ที่	ปริมาณก่อนบด 1kg			ปริมาณก่อนบด 2kg		
	เวลา 5 นาที	เวลา 6 นาที	เวลา 10 นาที	เวลา 5 นาที	เวลา 6 นาที	เวลา 10 นาที
1	96.1	99.0	99.4	92.60	95.05	96.40
2	97.1	99.3	99.6	93.05	94.85	96.75
3	96.9	98.7	99.5	93.95	96.05	96.60
4	96.4	99.1	99.6	93.10	95.45	96.50
เฉลี่ย	96.63	99.03	99.53	93.18	95.35	96.56

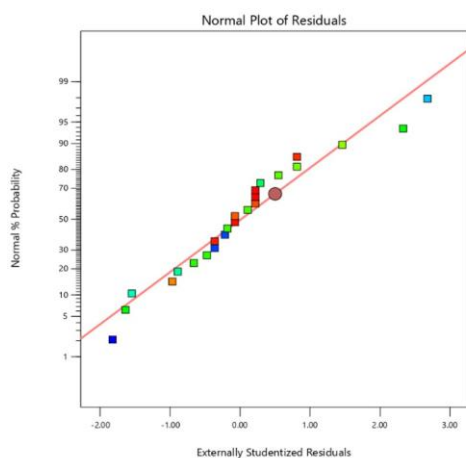
จากตารางที่ 2 พบว่าทั้งปริมาณถ่านก่อนบดและเวลาในการบดส่งผลต่อร้อยละของผงถ่านที่ได้อย่างชัดเจน โดยเมื่อใช้ถ่านปริมาณ 1 kg ให้ค่าร้อยละของผงถ่านสูงกว่าการใช้ถ่าน 2 kg ในทุกช่วงเวลาการบด โดยมีค่าเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 96.63–99.53% ขณะที่การใช้ถ่าน 2 kg ให้ค่าเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 93.18–96.56% เมื่อพิจารณาผลของเวลาในการบด พบว่าการเพิ่มระยะเวลาในการบดจาก 5 นาทีเป็น 10 นาที ส่งผลให้ร้อยละของผงถ่านเพิ่มขึ้น ทั้งในกรณีของการบดถ่าน 1 kg และ 2 kg เนื่องจากอนุภาคถ่านได้รับแรงกระแทกชุดไบต์เป็นระยะเวลานานขึ้น ทำให้เกิดการแตกหักของอนุภาคจนมีขนาดเล็กเพียงพอที่จะผ่านตะแกรงคัดขนาดได้มากขึ้น

4.2 วิเคราะห์ประสิทธิภาพของการบด

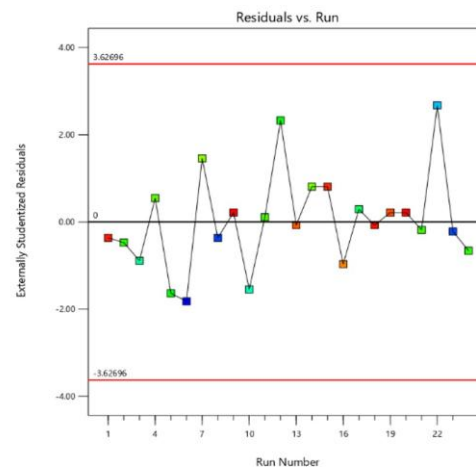
จากข้อมูลที่ได้ ผู้วิจัยได้ทำการวิเคราะห์ผลการทดลอง โดยใช้โปรแกรม Design Expert ช่วยในการวิเคราะห์ ผลที่ได้สามารถสรุปได้ตามลำดับต่อไปนี้

1) ความเพียงพอของตัวแบบ

การวิเคราะห์ความเพียงพอของตัวแบบพิจารณาได้จากกราฟ Normal Plot of Residual (รูปที่ 3 ก) และกราฟ Residual VS. Run (รูปที่ 3 ข) ผลจากการวิเคราะห์พบว่า ข้อมูลที่ได้มีการแจกแจงแบบปกติ (Normal Distribution) โดยพิจารณากราฟ Normal Plot of Residual พบว่าจุดข้อมูลจะเรียงตัวอยู่ใกล้เส้นตรงอ้างอิง (Reference Line) ไม่มีการโค้งเป็นรูปตัว S ที่ชัดเจน การเบี่ยงเบนออกจากเส้นตรงมีไม่มากจนผิดปกติ และจากการพิจารณากราฟ Residual VS. Run พบว่า ค่าที่ได้ไม่มีรูปแบบที่ชัดเจน แสดงให้เห็นว่า ค่าคลาดเคลื่อนมีความเป็นอิสระต่อกัน (Independence of Errors) และไม่มีอิทธิพลจากลำดับการทดลองหรือปัจจัยแทรกซ้อนที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา ส่งผลให้ผลการวิเคราะห์ ANOVA และแบบจำลองถดถอยมีความน่าเชื่อถือทางสถิติ ดังนั้นจึงสามารถวิเคราะห์ความแปรปรวนได้



(ก)



(ข)

รูปที่ 3 (ก) กราฟ Normal Plot of Residual (ข) กราฟ Residual VS. Run

1) การวิเคราะห์อิทธิพลของแต่ละปัจจัย

ในการหาอิทธิพลของแต่ละปัจจัย ทำได้โดยการวิเคราะห์ความแปรปรวนของข้อมูลที่ได้ ซึ่งผลการวิเคราะห์เป็นดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวน

Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F-value	p-value	
Model	110.63	5	22.13	147.41	< 0.0001	significant
A-weight	67.84	1	67.84	451.94	< 0.0001	
B-time	42.26	2	21.13	140.78	< 0.0001	
AB	0.5306	2	0.2653	1.77	0.1991	
Pure Error	2.70	18	0.1501			
Cor Total	113.33	23				

ตารางที่ 4 ค่าความสอดคล้องทางสถิติ (Fit Statistics)

Std. Dev.	0.3874	R ²	0.9762
Mean	96.71	Adjusted R ²	0.9695
C.V. %	0.4006	Predicted R ²	0.9576
		Adeq Precision	32.7799

จากตารางที่ 3 และ 4 พบว่าแบบจำลองมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.0001$) โดยมีค่า R^2 เท่ากับ 0.9762 แสดงว่าแบบจำลองสามารถอธิบายความแปรปรวนของข้อมูลได้ถึง 97.62% และมีค่า Predicted R^2 เท่ากับ 0.9576 ซึ่งมีความสอดคล้องกับค่า Adjusted R^2 (0.9695) แสดงให้เห็นว่าแบบจำลองมีความแม่นยำและสามารถใช้ทำนายผลการทดลองได้ดี

เมื่อพิจารณาปัจจัยหลัก พบว่าทั้งปริมาณถ่านก่อนบด (A) และเวลาในการบด (B) มีอิทธิพลต่อร้อยละของผงถ่านอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.0001$) อย่างไรก็ตาม ปัจจัยปริมาณถ่านก่อนบดมีอิทธิพลมากที่สุด โดยมีค่า F-value เท่ากับ 451.94 และมีค่า Sum of Squares เท่ากับ 67.84 คิดเป็นประมาณ 61.3% ของความแปรปรวนทั้งหมดที่แบบจำลองสามารถอธิบายได้ ขณะที่เวลาในการบดมีค่า F-value เท่ากับ 140.78 และ Sum of Squares เท่ากับ 42.26 หรือประมาณ 38.2% ของความแปรปรวนทั้งหมด

ผลดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าปริมาณถ่านที่ป้อนเข้าสู่เครื่องบดเป็นปัจจัยที่สำคัญกว่าระยะเวลาในการบด เนื่องจากปริมาณวัสดุที่มากเกินไปส่งผลโดยตรงต่อการกระจายตัวของอนุภาคภายในห้องบด ทำให้พลังงานจากใบตีถูกใช้ไปกับการเคลื่อนที่ของมวลวัสดุจำนวนมาก แทนที่จะถูกใช้ในการแตกหักของอนุภาค ส่งผลให้ประสิทธิภาพการลดขนาดลดลง แม้ว่าจะเพิ่มเวลาบดก็ตาม ในทางตรงกันข้าม เวลาในการบดส่งผลต่อการสะสมพลังงานที่ใช้ในการลดขนาดอนุภาค เมื่อระยะเวลาบดเพิ่มขึ้น อนุภาคมีโอกาสดำรงแรงกระแทกซ้ำมากขึ้น จึงช่วยเพิ่มสัดส่วนของผงถ่านที่มีขนาดเล็กได้ อย่างไรก็ตาม ผลของเวลาในการบดมีความสำคัญน้อยกว่าปริมาณวัสดุป้อน

สำหรับอิทธิพลร่วมระหว่างปริมาณถ่านและเวลาในการบด (AB) พบว่าไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ ($p = 0.1991$) แสดงให้เห็นว่าผลของเวลาในการบดมีแนวโน้มคงที่ในทุกระดับของปริมาณถ่าน และทั้งสองปัจจัยทำงานอย่างเป็นอิสระต่อกัน

2) สมการของตัวแบบ

จากการวิเคราะห์แบบจำลองเชิงสถิติสามารถสร้างสมการพยากรณ์ร้อยละของผงถ่านที่ได้ในรูปแบบของสมการถดถอย ดังสมการที่ (1)

$$Y = 96.71 - 1.68A + 0.5103B[1] - 0.1975B[2] + 0.0603AB[1] + 0.0192AB[2] \quad (1)$$

เมื่อ

Y = ร้อยละของผงถ่านที่ได้

A = ปริมาณถ่านก่อนบด

B = เวลาในการบด

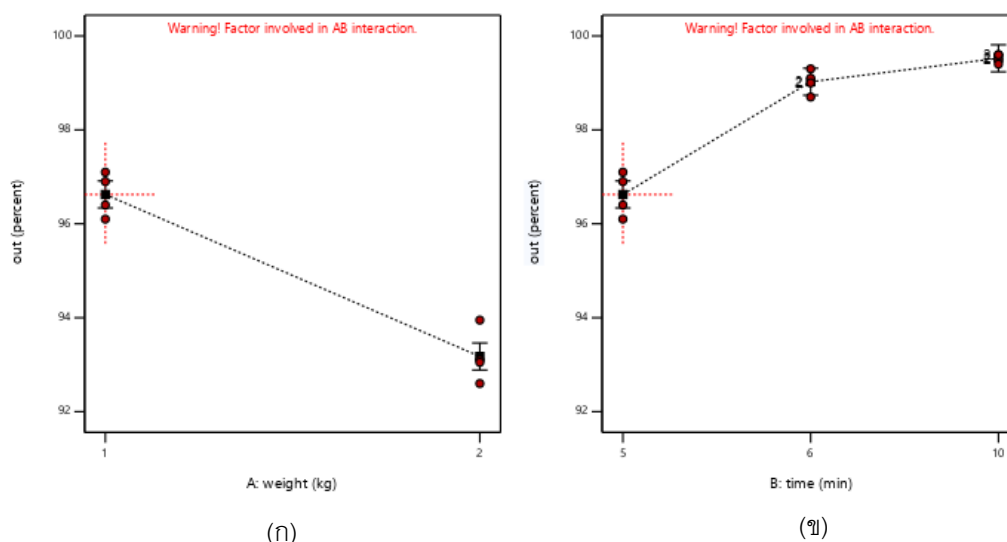
จากสมการพบว่าค่าสัมประสิทธิ์ของปัจจัย A มีค่าเป็นลบ (-1.68) และมีขนาดมากที่สุด แสดงให้เห็นว่าการเพิ่มปริมาณถ่านก่อนบดส่งผลให้ร้อยละของผงถ่านลดลงอย่างชัดเจน ขณะที่ปัจจัยด้านเวลาในการบดมีผลเชิงบวกต่อประสิทธิภาพการบด

จากสมการดังกล่าวสามารถนำไปใช้เป็นแนวทางในการกำหนดสภาวะการทำงานของเครื่องบดถ่านพลังงานแสงอาทิตย์ได้อย่างเหมาะสม โดยหากต้องการคุณภาพผงถ่านสูงสุด ควรเลือกใช้ปริมาณถ่าน 1 kg ต่อรอบ และระยะเวลาใน

การบด 10 นาที ซึ่งสามารถให้ร้อยละของผงถ่านสูงถึง 99.53% ขณะที่ยังคงรักษากำลังการผลิตให้อยู่ในระดับที่เหมาะสมต่อการใช้งานจริง

4.3 อภิปรายผล

ผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 2 พบว่าทั้งปริมาณถ่านก่อนบดและเวลาในการบดส่งผลต่อร้อยละของผงถ่านที่ได้ อย่างชัดเจน โดยเมื่อใช้ถ่านปริมาณ 1 kg ให้ค่าร้อยละของผงถ่านสูงกว่าการใช้ถ่าน 2 kg ในทุกช่วงเวลากการบด (รูปที่ 4 (ก)) เมื่อพิจารณาผลของเวลาในการบด พบว่าการเพิ่มระยะเวลาในการบดจาก 5 นาที เป็น 10 นาที ส่งผลให้ร้อยละของผงถ่านเพิ่มขึ้น (รูปที่ 4 (ข))



รูปที่ 4 (ก) ความสัมพันธ์ของร้อยละของผงถ่านกับปริมาณ (ข) ความสัมพันธ์ของร้อยละของผงถ่านกับเวลา

ค่าร้อยละของผงถ่านสูงสุดเท่ากับ 99.53% เกิดขึ้นที่เงื่อนไขปริมาณถ่าน 1 kg และเวลาบด 10 นาที ในขณะที่ค่าต่ำสุดเท่ากับ 93.18% เกิดขึ้นที่ปริมาณถ่าน 2 kg และเวลาบด 5 นาที แสดงให้เห็นว่าการเพิ่มปริมาณถ่านในหีบอบมากเกินไปส่งผลให้ประสิทธิภาพการบดลดลง เนื่องจากพื้นที่ว่างภายในหีบอบลดลง ทำให้การเคลื่อนที่ของอนุภาคและการถ่ายเทพลังงานจากใบตีไปยังอนุภาคถ่านเกิดขึ้นได้ไม่เต็มประสิทธิภาพ

อย่างไรก็ดี เมื่อพิจารณาต้นทุนในการดำเนินงาน โดยกำหนดค่าแรงในการทำงานชั่วโมงละ 40 บาท และถ่านก่อนการบด กิโลกรัมละ 15 บาท การบดครั้งละ 2 กิโลกรัม และบดนาน 6 นาที จะให้ต้นทุนการดำเนินงานต่ำสุด ที่ 17.81 บาท ต่อ กิโลกรัม

ผลการศึกษานี้สอดคล้องกับงานวิจัยของ Zhang et al. [12] ซึ่งศึกษาประสิทธิภาพของเครื่องบดชีวมวลแบบค้อนเหวี่ยง (Hammer Mill) และรายงานว่าปริมาณวัสดุป้อนเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการบดมากกว่าระยะเวลาการทำงาน เนื่องจากปริมาณวัสดุที่มากเกินไปทำให้เกิดการอัดแน่นภายในหีบอบ ส่งผลให้การถ่ายเทพลังงานลดลง

นอกจากนี้ ผลการทดลองยังสอดคล้องกับงานของ Miao et al. [13] ซึ่งศึกษาการลดขนาดของชีวมวลเพื่อการผลิตเชื้อเพลิงอัดแท่ง พบว่าการเพิ่มเวลาบดช่วยเพิ่มสัดส่วนของอนุภาคละเอียด แต่เมื่อปริมาณวัสดุป้อนสูงเกินค่าที่เหมาะสม ประสิทธิภาพในการลดขนาดจะลดลงอย่างมีนัยสำคัญ และผลการศึกษาของ Olatunji Akinlabi and Madushele [14] ที่รายงานว่าความสามารถในการลดขนาดของวัสดุชีวมวลขึ้นอยู่กับอัตราการป้อนวัสดุเข้าสู่เครื่องบดเป็นหลัก โดยการป้อนวัสดุในปริมาณต่ำช่วยให้เกิดการชนและแตกหักของอนุภาคได้อย่างมีประสิทธิภาพมากกว่า

5.สรุปผลการวิจัย

จากผลการทดลองสามารถสรุปได้ว่า สภาวะที่เหมาะสมสำหรับเครื่องบดถ่านพลังงานแสงอาทิตย์ที่พัฒนาขึ้น คือ การใช้ปริมาณถ่าน 1 kg และเวลาบด 10 นาที ซึ่งให้ร้อยละของผงถ่านสูงสุดเท่ากับ 99.53% โดยปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อประสิทธิภาพการบดมากที่สุดคือปริมาณถ่านก่อนบด รองลงมาคือเวลาในการบด ขณะที่อิทธิพลร่วมของทั้งสองปัจจัยไม่นัยสำคัญทางสถิติ

6. ข้อเสนอแนะ

ในการวิจัยครั้งนี้ เครื่องที่สร้างขึ้นมีความสามารถในการบรรจุได้จำกัด ทำให้ต้องทำการบดหลายครั้งจึงจะได้ปริมาณที่ต้องการ อย่างไรก็ตามจากผลการทดลองพบว่า ปริมาณที่ใส่หากล้นมากเกินไปจะทำให้ผงถ่านที่ได้มีปริมาณน้อยลง เนื่องจากเครื่องไม่สามารถบดให้ละเอียดได้ ดังนั้นในการออกแบบและสร้างเครื่องบด ควรต้องคำนึงปริมาณที่ใส่ เป็นสิ่งสำคัญ ต้องมีการออกแบบให้เหมาะสมกับผลผลิตที่ต้องการ

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] Demirbas A. Bioenergy: Biomass to Biofuels. London: Springer; 2009.
- [2] Rosillo-Calle F, de Groot P, Hemstock SL, Woods J. The Biomass Assessment Handbook. London: Earthscan; 2007.
- [3] Sotannde OO, Oluyeye MO, Abah SO. Physical and combustion properties of charcoal briquettes from neem wood residues. *Int Agrophys*. 2010;24(2):189–194.
- [4] Sevilla M, Fuertes AB. The production of carbon materials by hydrothermal carbonization of cellulose. *Carbon*. 2009;47(9):2281–2289.
- [5] Kaliyan D, Morey RV. Factors affecting strength and durability of densified biomass products. *Biomass Bioenergy*. 2009;33(3):337–359.
- [6] Mani S, Tabil LG, Sokhansanj S. Grinding performance and physical properties of wheat and barley straws, corn stover and switchgrass. *Biomass Bioenergy*. 2004;27(4):339–352.
- [7] Department of Alternative Energy Development and Efficiency (DEDE). Thailand Alternative Energy Report 2023. Bangkok: Ministry of Energy; 2023. (in Thai)
- [8] Hossain MA, Rahim NA, Selvaraj J, Pandey AK. Recent progress and development on power DC–DC converter topology, control, design and applications: A review. *Renew Sustain Energy Rev*. 2018;81:205–230.
- [9] Rungrattanaubon K, Srisukho P, Chuen-atsadongkot T, Loetkhamphu N, Angkhahiran W. Design and construction of a mussel shell grinding machine for shell-clay production in community enterprises. *Journal of Industrial Technology Suan Sunandha Rajabhat University*. 2024;12(2). (in Thai)
- [10] Meemon A, Pramunmak S, Jai-u J. Influence of agricultural residue particle size on biomass fuel pellet formation. Research Report under the Community Enterprise and Small and Medium Enterprise Research Program. Bangkok: National Research Council of Thailand; 2015. (in Thai)
- [11] Surin P, Kantha C, Mawilet W, Khanthakhiao Y, Jaikhampan M. Development of a bamboo shoot waste grinding machine. *Journal of Vocational Education Research and Innovation*. 2022;6(2). (in Thai)

- [12] Zhang Y, Wang L, Li H, Chen X. Effect of particle size reduction on biomass densification and fuel properties: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2022;158:112113.
- [13] Miao Z, Grift TE, Hansen AC, Ting KC. Energy consumption and particle size distribution in biomass grinding operations: Recent advances and future perspectives. *Biomass and Bioenergy*. 2021;149:106102
- [14] Olatunji OO, Akinlabi ET, Madushele N. Design considerations and performance evaluation of hammer mills for biomass processing: A review. *Sustainability*. 2023;15(8):6872.

การผลิตผงโลหะทองแดงด้วยกระบวนการพ่นละอองน้ำโลหะด้วยก๊าซ Production of Copper Metal Powder Using Gas Atomization Process

ธีรยุทธ กาญจนแสงทอง¹, สุรัตน์ วรรณศรี² และ วิโรจน์ ฉัตรเกษ^{3*}

¹สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ เขตสาทร กรุงเทพฯ 10120

²สถาบันสหสรรพศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน อ.เมือง จ.นครราชสีมา 30000

³สาขาวิชาเทคโนโลยีอุตสาหการ คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยนครพนม อ.เมือง จ.นครพนม 48000

Teerayut Kanchanasangtong¹, Surat Wannasri² and Wirot Chudget^{3*}

¹Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering,

Rajamangala University of Technology Krungthep, Sathorn, Bangkok 10120

²Institute of Interdisciplinary Studies, Rajamangala University of Technology Isan,

Nakhon Ratchasima, Muang, Nakhon Ratchasima 30000

³Department of Industrial Technology, Faculty of Industrial Technology,

Nakhonphanom University, Muang, Nakhonphanom 30000

*Corresponding author E-mail: Wirot_ch@npu.ac.th

(Received: May 29, 2026 / Revised: June 25, 2026 / Accepted: June 27, 2026)

บทคัดย่อ

การผลิตชิ้นงานแบบเติมเนื้อที่มีความหนาแน่นสูงต้องใช้อนุภาคผงโลหะที่มีความกลมและคุณภาพ มีความจำเป็นอย่างยิ่งในกระบวนการผลิตชิ้นงาน เนื่องจากความกลมและรูปร่างมีผลต่อความสามารถในการเคลื่อนที่ของอนุภาคผงโลหะ ซึ่งเป็นความท้าทายอย่างยิ่งในการผลิตผงโลหะทองแดงด้วยกระบวนการอะตอมไมเซชันด้วยก๊าซ เพื่อเพิ่มศักยภาพการผลิต และควบคุมคุณภาพของผงโลหะ งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการผลิตผงโลหะทองแดงด้วยกระบวนการอะตอมไมเซชันด้วยก๊าซ โดยทดลองผลิตผงโลหะด้วยเครื่อง Gas atomizer ภายใต้ค่าพารามิเตอร์หลัก คือ อุณหภูมิของน้ำโลหะ (1,085 1,110 และ 1,135 °C) รูปร่างของรูเท้าน้ำโลหะ (2, 3 และ 4 mm) และก๊าซไนโตรเจน ในการตรวจสอบปริมาณการผลิตและวัดค่าความกลมของอนุภาคผงโลหะ ผลลัพธ์แสดงให้เห็นว่าสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตผงทองแดงขนาด $\leq 100 \mu\text{m}$ คือ อุณหภูมิของน้ำโลหะ 1085°C เส้นผ่านศูนย์กลางรูเท้าน้ำโลหะ 4 mm และอัตราการไหลของก๊าซ 960 l/min ซึ่งให้ผลผลิตสูงสุด 540.7 g หรือ 54.07% ของโลหะที่ใช้ นอกจากนี้ เมื่ออุณหภูมิของน้ำโลหะสูงกว่าจุดหลอมละลายค่าอนุภาคของความกลมและรูปร่างมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น

คำสำคัญ: ขนาดรูเท้าน้ำโลหะ, ความกลม, ผงโลหะทองแดง

Abstract

The production of additive manufactured parts requires metal powder particles that are perfectly spherical and of high quality. It is essential in the workpiece manufacturing process. Because roundness and shape affect the mobility of metal powder particles, this presents a significant challenge in the production of metal powders using the gas atomization process. To enhance production capabilities and ensure the quality of metal powders. This research aims to study the production of copper metal powder using the gas atomization process. The powder was produced experimentally using a gas atomizer, the parameters are the molten metal temperature (1,085 1,110 and 1,135 °C), the pouring hole (2, 3 and 4 mm), and nitrogen gas. Monitoring production quantities and measuring the roundness of metal powder particles. The results show the optimal conditions for producing copper powder with a particle size of $\leq 100 \mu\text{m}$. This means the molten metal temperature is 1085°C, the diameter of the pouring hole is 4 mm, and the gas flow rate is 960 l/min. Which give a maximum of 540.7 g, or 54.07% of the metal used. In addition, when the temperature of the metal is higher than the melting point, the particle roundness tends to increase.

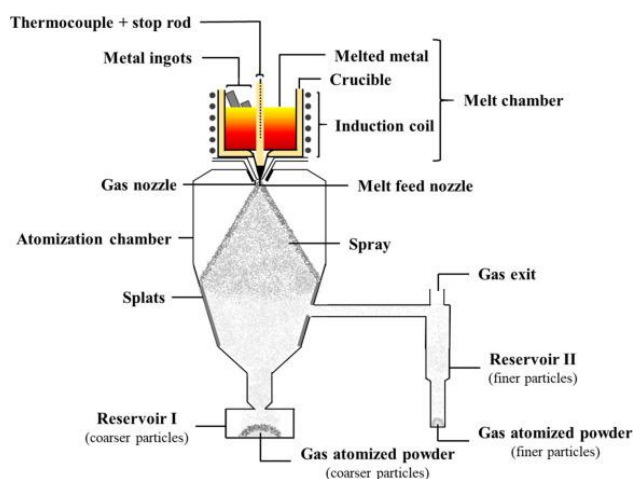
Keywords: Pouring Nozzle Diameter, Roundness, Copper metal powder

1. บทนำ

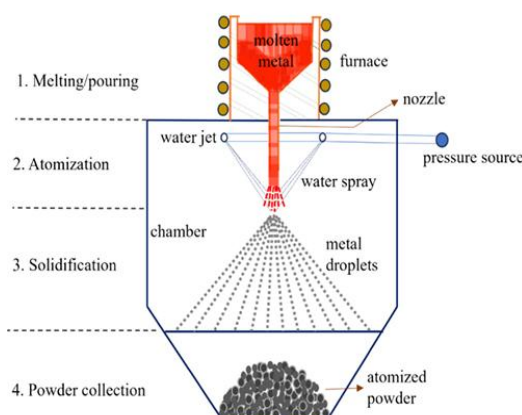
การผลิตแบบเติมเนื้อ (Additive manufacturing; AM) เป็นเทคโนโลยีการผลิตสมัยใหม่ที่มีประสิทธิภาพสูง ซึ่งสามารถผลิตชิ้นงานที่มีความซับซ้อนในรูปแบบชั้นๆ ได้ดีเยี่ยม โดยใช้การหลอมละลายผงโลหะด้วยลำแสงเลเซอร์ (Laser powder bed fusion (L-PBF) ลำแสงเลเซอร์จะทำหน้าที่หลอมผงโลหะทีละชั้น เพื่อสร้างชิ้นงานที่มีความหนาแน่นสูงและไม่มีข้อบกพร่อง [1-3] อย่างไรก็ตาม กระบวนการ L-PBF มีความจำเป็นต้องเลือกใช้ผงโลหะที่มีความเป็นทรงกลมสูง (≥ 0.85) และขนาดอนุภาคอยู่ในช่วง $10 - 60 \mu\text{m}$ คุณสมบัติเหล่านี้ช่วยให้ผงไหลได้ดีเยี่ยม ซึ่งสำคัญต่อการกระจายผงอย่างสม่ำเสมอในแต่ละชั้น ส่งผลให้กระบวนการ L-PBF สามารถสร้างชิ้นงานคุณภาพสูงได้อย่างง่ายและมีความแม่นยำสูง [1-5]

ในกระบวนการอะตอมไมซ์เซอร์เป็นวิธีการผลิตผงโลหะที่ได้รับความนิยม โดยสามารถแบ่งออกเป็น 2 รูปแบบ คือ การอะตอมไมซ์เซอร์ด้วยก๊าซ (Gas atomization) ดังแสดงในรูปที่ 1 และการอะตอมไมซ์เซอร์ด้วยน้ำ (Water atomization) ดังแสดงในรูปที่ 2 ซึ่งทั้งสองกระบวนการนี้จะใช้ก๊าซและแรงดันน้ำ เพื่อทำให้น้ำโลหะที่หลอมเหลวเกิดการแตกตัวเป็นละอองฝอยหรืออนุภาคผงขนาดเล็ก [6-7] ซึ่งในกระบวนการอะตอมไมซ์เซอร์ด้วยก๊าซโลหะจะถูกหลอมให้กลายเป็นน้ำโลหะ (Liquid metal) เพื่อให้เกิดการหยดตัวของน้ำโลหะ (Droplets) และไหลผ่านหัวพ่น (Nozzle) โดยใช้แรงดันของก๊าซเฉื่อยเป็นตัวช่วยเร่งให้เกิดการแตกกระจายเป็นละอองฝอยและแข็งตัวกลายเป็นผงโลหะ (Metal Powder) ภายในถังแบบปิด [8]

ขนาดของรูปร่างน้ำโลหะมีผลโดยตรงต่ออัตราการไหลและขนาดของลำน้ำโลหะขณะไหลผ่านหัวฉีด ซึ่งอาจส่งผลให้หยดน้ำโลหะเกิดการแตกกระจายตัวไม่เป็นละอองฝอย แต่อาจจะเป็นเม็ดโลหะขนาดใหญ่และไม่เป็นทรงกลม ซึ่งข้อบกพร่องนี้มีผลกระทบต่อคุณสมบัติลักษณะเฉพาะของวัสดุผงและประสิทธิภาพในการผลิตผง เมื่อต้องการผงที่มีความละเอียดสูง นอกจากนี้ ยังอาจเกิดปัญหาการอุดตัน (Clogging) ของหัวพ่นได้ง่าย [6]



รูปที่ 1 กระบวนการอะตอมไมซ์เซอร์ด้วยก๊าซ [6]



รูปที่ 2 กระบวนการอะตอมไมซ์เซอร์ด้วยน้ำ [7]

จากการทบทวนงานวิจัยที่ผ่านมา พบว่า Vitor E. Pinotti และคณะ [6] ได้ทดลองกระบวนการอะตอมไมเซชันด้วยก๊าซ เพื่อประเมินอิทธิพลของเส้นผ่านศูนย์กลางหัวฉีดป้อนโลหะหลอมเหลว (d_0) อุณหภูมิสูงกว่าจุดหลอมเหลว (ΔT) และแรงดันในการสร้างอะตอมไมเซชัน (P_G) ต่อคุณสมบัติทางกายภาพของผงโลหะผสมอลูมิเนียม AA2017 ซึ่งการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์มีผลกระทบต่อเส้นผ่านศูนย์กลางอนุภาคเฉลี่ย (d_{50}) เพียงเล็กน้อย พบว่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับ ($d_0 = 1.5 \text{ mm}$, $\Delta T = 150 \text{ }^\circ\text{C}$, $P_G = 20 \text{ Bar}$) ซึ่งแสดงให้เห็นถึงความสิ้นเปลืองและความหนาแน่นปรากฏที่เหมาะสมเนื่องจากการกระจายขนาดอนุภาคและลักษณะทางสัณฐานวิทยาที่เหมาะสม ในขณะที่ มนตรี ขาวสุข และคณะ [11] ได้ศึกษาลักษณะรูปแบบหัวพ่นอะตอมไมเซชันในกระบวนการอะตอมไมเซชันด้วยก๊าซ พบว่าหัวพ่นอะตอมไมเซชันแบบ Close-Coupled เป็นหัวพ่นที่ให้ประสิทธิภาพการผลิตสูงสุดขนาดของอนุภาคที่ผลิตได้มีขนาดเล็กสุดและมีรูปร่างเป็นเม็ดอนุภาคทรงกลม และ Somjit Mandal และ Chi-Chuan Wang [12] เสนอแบบจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (Computational Fluid Dynamics; CFD) เพื่อศึกษาการปรับความละเอียดของผงโลหะให้เหมาะสมที่สุด ในขณะที่ทำงานในช่วงพารามิเตอร์กระบวนการที่กำหนดในระบบการสร้างอะตอมไมเซชันด้วยแรงดันสูง (High-Pressure Gas Atomization; HPGA) พบว่าแรงดันและอุณหภูมิของแก๊สเข้าที่สูงขึ้นช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการพ่นละอองและผลิตผงที่ละเอียดขึ้น โดยแรงดันมีผลมากกว่าอุณหภูมิ นอกจากนี้ Soares Barreto และคณะ [13] ศึกษาการสร้างอะตอมไมเซชันด้วยก๊าซผ่านหัวฉีดแบบโครสคัปเปิล (Close-Coupled Gas Atomization; CCA) เพื่อสังเคราะห์โลหะผสมไบนารีที่สามารถขึ้นรูปเป็นแก้วได้ Ni62Nb38 ผลลัพธ์แสดงให้เห็นว่าผงทรงกลมที่ไม่มีโครงสร้างผลึกอย่างสมบูรณ์ที่มีผลผลิตสูงในช่วงขนาด 20–63 μm และระดับออกซิเจนต่ำกว่า 900 wppm

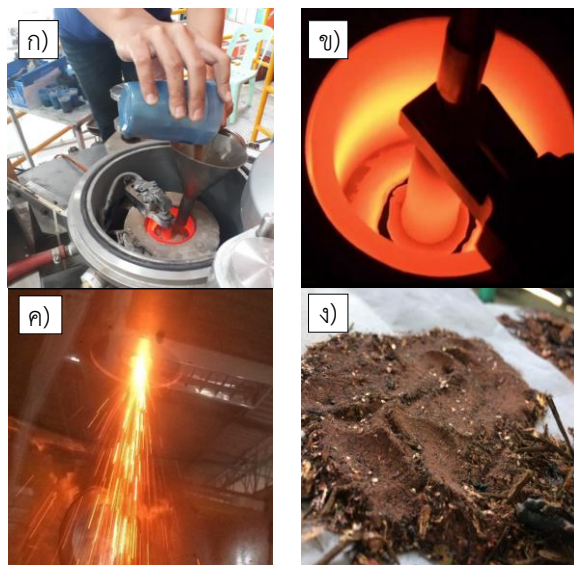
จากข้อมูลดังกล่าวข้างต้น แสดงให้เห็นถึงอิทธิพลของพารามิเตอร์ที่มีต่อกระบวนการอะตอมไมเซชันด้วยก๊าซ ภายใต้เงื่อนไขต่างๆ เช่น ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรูหัวฉีดโลหะ อุณหภูมิน้ำโลหะ แรงดันก๊าซ และชนิดของก๊าซ รวมถึงลักษณะของหัวฉีดและการประยุกต์ใช้แบบจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการผลิตผงโลหะและแก้ไขปัญหาลอยกลับของก๊าซ ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นศึกษาการผลิตผงโลหะทองแดงด้วยกระบวนการอะตอมไมเซชันด้วยก๊าซ โดยทดลองผลิตผงด้วยเครื่อง Gas atomizer ต้นแบบที่ถูกสร้างและพัฒนาขึ้นเอง ภายใต้การควบคุมพารามิเตอร์ที่สำคัญ ได้แก่ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางรูหัวฉีดโลหะ (Pouring Nozzle Diameter) อุณหภูมิน้ำโลหะ (Melting Temperature; T_m) ความดันก๊าซที่พ่น (P_G) และก๊าซไนโตรเจน (N_2) เพื่อทำการตรวจสอบปริมาณการผลิตและวัดค่าความกลมของอนุภาคผงโลหะที่ได้จากการทดลอง

2. วิธีการดำเนินงาน

2.1 การทดลอง

การทดลองผลิตผงโลหะทองแดงด้วยกระบวนการอะตอมไมเซชันด้วยก๊าซ ซึ่งมีรายละเอียดวิธีการดำเนินงาน ดังแสดงในรูปที่ 3 โดยมีพารามิเตอร์หลักที่ควบคุมได้ ประกอบด้วย อุณหภูมิน้ำโลหะ $T_m + 25 \text{ }^\circ\text{C}$ ($1,085 \text{ }^\circ\text{C}$), $T_m + 50 \text{ }^\circ\text{C}$ ($1,110 \text{ }^\circ\text{C}$) และ $T_m + 75 \text{ }^\circ\text{C}$ ($1,135 \text{ }^\circ\text{C}$) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางรูหัวฉีดโลหะ ($\varnothing 2, 3$ และ 4 mm) ก๊าซไนโตรเจน (ความดันก๊าซที่พ่น 10 bar หรือ 960 L/min) และมุมหัวพ่นก๊าซ 15 องศา ซึ่งสามารถอธิบายขั้นตอนได้ดังนี้

- 2.1.1 จัดเตรียมวัสดุสิ้นเปลืองและอุปกรณ์ต่างๆ ที่ใช้ในการทดลอง ประกอบด้วย เม็ดทองแดง เบ้าหลอมแกรไฟต์ (Graphite Crucibles) แท่งแกรไฟต์อุดเบ้า (Stopper) และก๊าซไนโตรเจน
- 2.1.2 วัสดุที่ใช้ในการทดลองเป็นทองแดงจากภาคอุตสาหกรรม โดยทำการเตรียมเม็ดทองแดงด้วยกระบวนการเทเม็ดโลหะด้วยเครื่องผลิตเม็ดโลหะแบบสุญญากาศของ Indutherm รุ่น GU 500 D
- 2.1.3 เตรียมเครื่อง Gas atomizer และวางเบ้าหลอมโลหะลงในช่องว่างของขดลวดเหนี่ยวนำความร้อนของเครื่องอินดักชัน (Induction heater)
- 2.1.4 ติดตั้งแท่ง Stopper และเทอร์โมคัปเปิล Type R (ช่วงวัดอุณหภูมิ 0°C ถึง $1,600^\circ\text{C}$) ภายในรูแท่ง Stopper เพื่ออุดกันเบ้าหลอมและวัดอุณหภูมิน้ำโลหะ พร้อมประกอบหัวพ่นเพื่อใช้ในการพ่นละอองฝอย
- 2.1.5 เปิดเครื่องอินดักชัน ปรับระดับอุณหภูมิที่ใช้ในการหลอมละลาย จากนั้น เมื่ออุณหภูมิ $600 \text{ }^\circ\text{C}$ เทเม็ดทองแดงลงเบ้า 1 kg. ดังแสดงในรูปที่ 3 ก)
- 2.1.6 เมื่ออุณหภูมิถึงจุดหลอมเหลวเม็ดทองแดงจะกลายเป็นของเหลวไหลคล้ายแก้ว ดังแสดงในรูปที่ 3 ข)
- 2.1.7 ยกแท่ง Stopper ขึ้น พร้อมเปิดวาล์วก๊าซไนโตรเจน (N_2) เพื่อฉีดพ่นน้ำโลหะเป็นละอองฝอย ปล่อยให้อนุภาคผงลอยในถัง Chamber ก่อนร่วงลงในถ้วยเก็บผง (Cup) แล้วนำผงไปคัดแยกและตรวจสอบสมบัติพื้นฐานของผงโลหะได้ ดังแสดงในรูปที่ 3 ค) – ง)



รูปที่ 3 การทดลองผลิตผงด้วยเครื่อง Gas atomizer

2.2 การวิเคราะห์ตรวจสอบ

2.2.1) การตรวจสอบหาปริมาณอนุภาคผงโลหะ

นำผงโลหะทองแดงที่ได้มาชั่งน้ำหนักเพื่อตรวจสอบปริมาณที่ผลิตได้และปริมาณโลหะที่ตกค้างในเบ้าหลอม ท่อลำเลียง และภาชนะรองรับ จากนั้นร่อนคัดแยกอนุภาคผงโลหะด้วยตะแกรงขนาด $100\ \mu\text{m}$ เป็นเวลา 5 นาที ด้วยเครื่องเขย่าตะแกรงร่อนแยก ของ HAVER & BOECKER รุ่น HAVER EML DIGITAL PLUS โดยอนุภาคผงโลหะที่มีขนาดใหญ่กว่า $100\ \mu\text{m}$ ไม่เหมาะสำหรับกระบวนการผลิตแบบเติมเนื้อ (AM) ด้วยวิธี Selective Laser Melting (SLM)

2.2.2) การวิเคราะห์ลักษณะรูปร่าง

การตรวจสอบและวิเคราะห์ลักษณะรูปร่างด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง (Optical Microscope, OM) ของ Olympus รุ่น BX60M โดยเทผงลงบนแผ่นรองตัวอย่าง ปรับหาตำแหน่งที่ต้องการวิเคราะห์ จากนั้นทำการบันทึกรูปภาพ

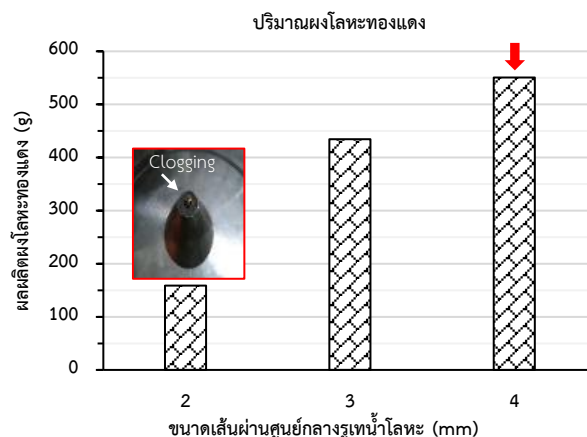
2.2.3) การวัดความกลม

การวัดค่าความกลมของอนุภาคทำโดยใช้ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์ (OM) และวิเคราะห์ผ่านโปรแกรม ImageJ Version 2019 โดยพิจารณาจากการเปรียบเทียบความยาวเส้นรอบวงของวงกลมที่สมมูลกับเส้นรอบวงของภาพฉายอนุภาค ค่าพารามิเตอร์รูปร่างที่ใช้แสดงผล คือ High Sensitivity Circularity (HSC) ซึ่งเป็นค่ามาตรฐานที่ใช้บ่งบอกระดับความใกล้เคียงของรูปร่างอนุภาคกับวงกลม ดังแสดงในสมการที่ 1 [9] โดยที่ *Area* และ *Perimeter* คือพื้นที่และเส้นรอบวงของอนุภาคที่วิเคราะห์ ตามลำดับ

$$HS\ Circularity = \frac{4\pi Area}{Perimeter^2} \quad (1)$$

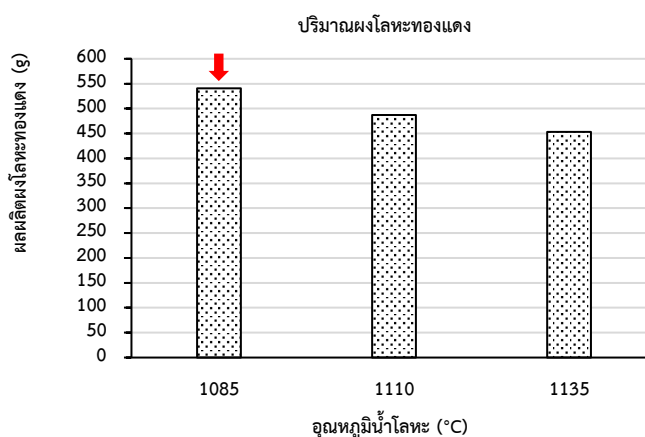
3. ผลทดลองและอภิปรายผล

จากการวิเคราะห์หัตถิพลของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางรูท่อน้ำโลหะต่อปริมาณผงโลหะทองแดง พบว่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรูท่อน้ำโลหะมีผลโดยตรงต่อปริมาณการผลิตผงโลหะทองแดง เมื่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเพิ่มขึ้น จะทำให้ปริมาณผงโลหะทองแดงที่ผลิตได้เพิ่มขึ้นตามไปด้วย แต่ถ้าขนาดรูท่อน้ำโลหะลดลงทำให้อัตราการไหลของน้ำโลหะลดลง อาจเกิดการอุดตันของหัวพ่นที่ทางออก ดังแสดงในรูปที่ 4 นอกจากนี้ ยังมีการแข็งตัวของหยดน้ำโลหะที่ก่อตัวขัดขวางการไหลของน้ำโลหะหลอมเหลวจากด้านบน ซึ่งสอดคล้องกับรายงานของ Junfeng Wang และคณะ [10]



รูปที่ 4 ปริมาณผงโลหะที่ผลิตได้ที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางรูเท้าน้ำโลหะต่างๆ ที่มุมหัวพ่นก๊าซ 15 องศา

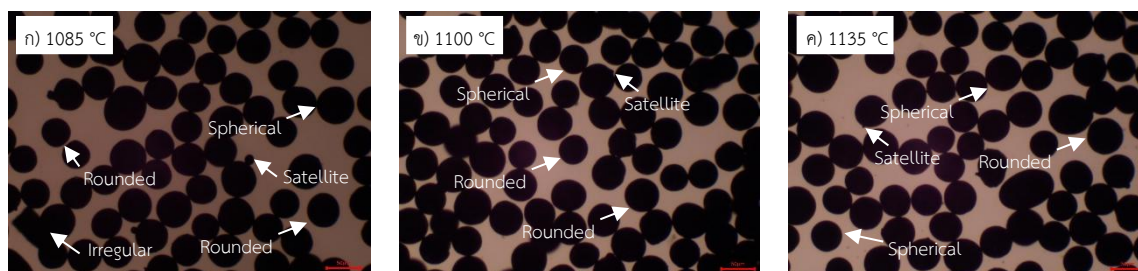
นอกจากนี้ ได้การศึกษาค่าประสิทธิภาพของอุณหภูมิน้ำโลหะต่อปริมาณผงโลหะทองแดงพบว่า อุณหภูมิน้ำโลหะที่ต่างกันไม่ มีผลต่อปริมาณผงโลหะที่ผลิตได้ เนื่องจากทุกอุณหภูมิน้ำโลหะสามารถผลิตผงโลหะทองแดงได้มีปริมาณค่อนข้างใกล้เคียงกัน ดังแสดงในรูปที่ 5 เนื่องจากอุณหภูมิความร้อน 1,085 °C ถึง 1,135 °C ที่ใช้ในการหลอมเหลวเม็ดทองแดงจากสถานะ ของแข็งกลายเป็นของเหลว ซึ่งทำให้น้ำโลหะสามารถไหลผ่านหัวพ่นละอองฝอยขณะฉีดได้อย่างต่อเนื่อง



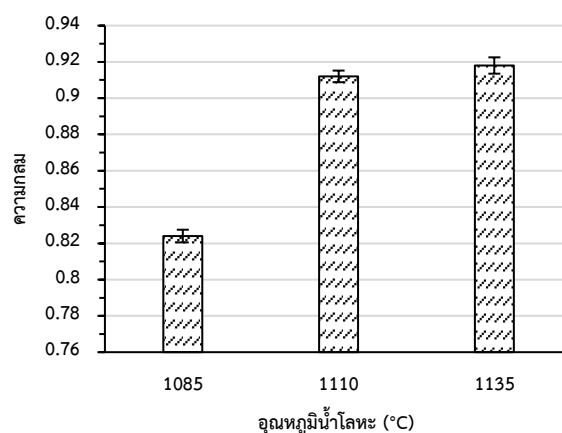
รูปที่ 5 ปริมาณผงโลหะเฉลี่ยที่ผลิตได้ที่อุณหภูมิน้ำโลหะต่างๆ ที่มุมหัวพ่นก๊าซ 15 องศา

จากการวิเคราะห์ภาพถ่ายอนุภาคของผงโลหะทองแดงที่ผ่านกระบวนการอะตอมไมเซชันด้วยก๊าซ ในช่วงขนาด $\leq 50 \mu\text{m}$ พบว่าอนุภาคผงโลหะทองแดงส่วนใหญ่มีลักษณะรูปร่างเป็นทรงกลม (Spherical) และกลมมน (Rounded) นอกจากนี้ ยังพบอนุภาคผงโลหะที่มีรูปร่างไม่สม่ำเสมอ (Irregular) และมีการเกาะติดของเม็ดบริวาร (Satellite Particles) ดังแสดงในรูปที่ 6 ซึ่งสอดคล้องกับรายงานของ Marian Grigoros และคณะ [14]

จากการวัดค่าความกลมของอนุภาคผงโลหะ พบว่าอุณหภูมิน้ำโลหะที่สูงขึ้นมีผลต่อค่าความกลมของอนุภาคผงโลหะ เพิ่มขึ้น โดยที่อุณหภูมิ 1,085 °C มีค่าความกลมอยู่ที่ 0.824 เมื่ออุณหภูมิน้ำโลหะเพิ่มขึ้นเป็น 1,110 °C และอุณหภูมิ 1,135 °C พบว่าอนุภาคผงโลหะมีค่าความกลมอยู่ที่ 0.912 และ 0.918 ตามลำดับ ซึ่งค่าความกลมมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามระดับ อุณหภูมิน้ำโลหะ ดังกราฟเปรียบเทียบที่แสดงในรูปที่ 7 อย่างไรก็ตาม หากขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางรูเท้าน้ำโลหะลดลงและ อุณหภูมิน้ำโลหะต่ำ อาจเกิดการอุดตันของลำน้ำโลหะภายในท่อลำเลียงของหัวฉีดได้ง่าย



รูปที่ 6 ลักษณะรูปร่างของผงโลหะทองแดงที่สภาวะแตกต่างกัน ก) 1085°C ข) 1100°C และ ค) 1135°C



รูปที่ 7 เปรียบเทียบค่าความกลมของอนุภาคที่สภาวะแตกต่างกัน

4. สรุป

งานวิจัยนี้ศึกษาผลกระทบของรูปร่างน้ำโลหะต่อปริมาณและความกลมของอนุภาคผงโลหะทองแดงที่ผ่านกระบวนการอะตอมไมเซชันด้วยก๊าซ ซึ่งสามารถสรุปผลได้ดังนี้

1) สภาวะที่เหมาะสมในการผลิตผงโลหะทองแดงที่มีขนาดอนุภาค $\leq 100 \mu\text{m}$ คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางรูท่อน้ำโลหะ 4 mm. อุณหภูมิน้ำโลหะ 1085°C, และอัตราการไหลของก๊าซ 960 l/min โดยสามารถผลิตผงโลหะทองแดงได้สูงสุด 540.7 g หรือคิดเป็น 54.07% ของเนื้อโลหะทั้งหมดที่ใช้ในการทดลอง

2) อุณหภูมิน้ำโลหะที่สูงกว่าจุดหลอมละลายมีผลทำให้ค่าความกลมของอนุภาคผงเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิน้ำโลหะ อย่างไรก็ตาม การเพิ่มประสิทธิภาพกระบวนการผลิตผงโลหะและควบคุมคุณภาพของอนุภาคผงโลหะถือเป็นความท้าทายอย่างยิ่ง สำหรับงานวิจัยในอนาคตอาจมุ่งเน้นศึกษาผลของแรงดันก๊าซต่อขนาดและลักษณะรูปร่างของผงโลหะ นอกจากนี้ ยังสามารถต่อยอดงานวิจัยทางด้านการประยุกต์ใช้ผงโลหะทองแดงด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์สามมิติหรือการผลิตแบบเติมเนื้อ (Additive Manufacturing; AM)

5. กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้จัดทำวิจัยขอขอบพระคุณ สาขาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ที่ให้ความอนุเคราะห์สถานที่ และอุปกรณ์ในการทำวิจัยในครั้งนี้

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] A. A. Zerwas, F. C. Da Silva, R. Guardani, L. Achelis, and U. Fritsching, "Impact of the gas atomizer nozzle configuration on metal powder production for additive manufacturing," Powder Technology, vol. 443, Jul. 2024, p. 119974
- [2] T. DebRoy et al., "Additive manufacturing of metallic components – Process, structure and properties," Progress in Materials Science, vol. 92, Mar. 2018, pp. 112–224.
- [3] B. Dutta, S. Babu, and B. Jared, "Metal additive manufacturing," in Science, Technology and Applications of Metals in Additive Manufacturing, Elsevier, 2019, pp. 1–10.

- [4] A. Zocca, G. Franchin, P. Colombo, and J. Günster, “Additive Manufacturing,” in *Encyclopedia of Materials: Technical Ceramics and Glasses*, Elsevier, 2021, pp. 203–221.
- [5] J. Ting, J. Connor, and S. Ridder, “High-speed cinematography of gas-metal atomization,” *Materials Science and Engineering: A*, vol. 390, no. 1–2, Jan. 2005, pp. 452–460
- [6] V. E. Pinotti, A. F. Andreoli, and P. Gargarella, “Gas atomization of AA2017 aluminum alloy: Effect of process parameters in the physical properties of powders for additive manufacturing,” *Journal of Materials Research and Technology*, vol. 30, May 2024, pp. 3650–3662
- [7] E.-H. Go, R. Vasudevan, J.-W. Ha, S.-J. Jo, G. Baek, and S.-J. Hong, “Revealing the improved thermoelectric performances of (BiSb)₂Te₃ alloy through rapid solidification of cold-water assisted water atomization approach,” *Journal of Alloys and Compounds*, vol. 1010, Jan. 2025, p. 177548
- [8] Niraj Kumar, Supriya Sarkar, T.N.C. Anand, and Shamit Bakshi “Estimating metal mass flow rate in gas-atomization for metal powder production”, *Powder Technology*, Volume 448, 1 Dec 24,
- [9] Christophe D’Angelo, Anne-Charlotte Robisson and Christelle Duguay, “Flow properties of uranium dioxide control-shaped powders: Link with the particle morphology and size of asperities” *Powder Technology* Volume 459, June 2025, 120824
- [10] Junfeng Wang, Min Xia, Jialun Wu and Changchun Ge, “Nozzle Clogging in Vacuum Induction Melting Gas Atomization: Influence of the Delivery-Tube and Nozzle Coupling” *Arch. Metall. Mater.* 67 (2022), 4, pp. 1359-1370
- [11] M. Kawsuk, S. Wannasri, and S. Torsakul, “Characteristics of Atomizer Nozzle in Gas Atomization”, *RMUTP Sci J*, vol. 15, no. 2, pp. 180–193, Dec. 2021.
- [12] Mandal, S. and Wang, C.-C. “Numerical Investigations and Optimization for the Supersonic Gas Atomization System for Manufacturing Metal Powder” *Processes* 2025, 13, 2075
- [13] Erika Soares Barreto, Maximilian Frey, Lucas Matthias Ruschel, Jan Wegner, Stefan Kleszczynski, Ralf Busch and Nils Ellendt “Gas atomization of fully-amorphous Ni₆₂Nb₃₈ powder” *Materials Letters* vol. 357, 15 February 2024, 135798
- [14] Marian Grigoras, Mihaela Lostun, George Stoian, Gabriel Ababei, Marieta Porcescu and Nicoleta Lupu, “The Influence of Preparation Parameters on the Morphology and Magnetic Properties of Fe-N Powders Obtained by the Gas Atomization Method” *Appl. Sci.* 2023, 13, 11529.

การวิเคราะห์ผลของกระบวนการแปรรูปต่อสมบัติเชิงกลของเหล็กกล้าคาร์บอน SS400

Analysis of the Effects of Machining Processes on the Mechanical Properties of SS400 Carbon Steel

ทงศักดิ์ คงสินธุ์*

ภาควิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมเครื่องกล วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

1518 ถนน ประชาราษฎร์ 1 แขวงวงศ์สว่าง บางซื่อ กรุงเทพมหานคร 10800

Tanongsak Kongsin*

Department of Mechanical Engineering Technology, College of Industrial Technology,

King Mongkut's University of Technology North Bangkok,

1518 Pracharat 1 Road, Wongsawang, Bangsue, Bangkok 10800

*Corresponding author Email: Tanongsak.k@cit.kmutnb.ac.th

(Received: May 31, 2026 / Revised: June 20, 2026 / Accepted: June 24, 2026)

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของกระบวนการแปรรูปชิ้นงานต่อสมบัติเชิงกลและคุณภาพผิวของเหล็กกล้าคาร์บอนมาตรฐาน เกรด SS400 โดยเปรียบเทียบกระบวนการผลิต 2 วิธี ได้แก่ การตัดเฉือนทางกลด้วยเครื่องจักรกลอัตโนมัติ และการตัดด้วยลวดไฟฟ้า ชิ้นงานทดสอบถูกเตรียมตามมาตรฐาน ASTM E8/E8M และทดสอบใน 2 ทิศทางของแนวรีด ประกอบด้วย ตามแนวรีดและแนวตั้งฉากกับแนวรีด ผลการทดลองพบว่ากระบวนการแปรรูปส่งผลต่อค่าความต้านแรงดึงสูงสุด ค่าการยืดตัว และค่าความหยาบผิว อย่างมีนัยสำคัญ โดยกระบวนการตัดด้วยลวดไฟฟ้าให้ค่าความต้านแรงดึงสูงสุด ขณะที่กระบวนการตัดเฉือนทางกลด้วยเครื่องจักรกลอัตโนมัติให้ค่าการยืดตัวสูงสุด และมีค่าความหยาบผิวเฉลี่ยต่ำที่สุด ผลการศึกษานี้สามารถนำไปใช้เป็นแนวทางในการเลือกกระบวนการแปรรูปที่เหมาะสม เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการใช้งานของวัสดุในงานอุตสาหกรรมต่อไป

คำสำคัญ: กระบวนการตัดเฉือน, การตัดด้วยลวดไฟฟ้า, ทิศทางการรีด, ความต้านแรงดึงสูงสุด, ความหยาบผิว

Abstract

This research aimed to investigate the effects of machining processes on the mechanical properties and surface quality of SS400 carbon steel. Two manufacturing methods were compared: conventional machining using automated machine tools and Wire Electrical Discharge Machining (WEDM). Tensile test specimens were prepared in accordance with the ASTM E8/E8M standard and tested in two rolling directions: parallel to the rolling direction and perpendicular to the rolling direction. The experimental results indicated that the machining processes significantly affected the ultimate tensile strength, elongation, and surface roughness of the material. The specimens produced by WEDM exhibited the highest ultimate tensile strength, whereas those manufactured by conventional machining using automated machine tools showed the highest elongation and the lowest average surface roughness. The findings of this study can serve as a guideline for selecting appropriate machining processes to enhance material performance in industrial applications.

Keywords: Machining Process, Wire Electrical Discharge Machining (WEDM), Rolling Direction, Ultimate Tensile Strength, Surface Roughness

1. บทนำ (Introduction)

เหล็กกล้าคาร์บอนเป็นวัสดุที่ได้รับความนิยมอย่างแพร่หลายในงานวิศวกรรมโครงสร้างและอุตสาหกรรมการผลิต เนื่องจากมีคุณสมบัติด้านความแข็งแรง ความเหนียว และความสามารถในการขึ้นรูปที่เหมาะสม อีกทั้งยังมีต้นทุนการผลิตไม่

สูง เหล็กกล้าคาร์บอนตามมาตรฐาน เกรด SS400 จึงถูกนำมาใช้อย่างกว้างขวางในงานโครงสร้างอาคาร เครื่องจักร และชิ้นส่วนทางวิศวกรรมต่าง ๆ อย่างไรก็ตาม คุณสมบัติทางกลของวัสดุไม่ได้ขึ้นอยู่กับองค์ประกอบทางเคมีเพียงอย่างเดียว แต่ยังได้รับอิทธิพลจากกระบวนการผลิต วิธีการแปรรูป และลักษณะโครงสร้างจุลภาคของวัสดุอีกด้วย [1]

จากการศึกษางานวิจัยที่ผ่านมา พบว่ากระบวนการแปรรูปชิ้นงานแต่ละประเภทส่งผลต่อสภาพผิวและสมบัติทางกลของวัสดุแตกต่างกัน กระบวนการตัดเฉือนทางกลสามารถทำให้เกิดความเค้นตกค้าง การเปลี่ยนแปลงความแข็งบริเวณผิวและความหยาบผิว ซึ่งส่งผลต่อความสามารถในการรับแรงของวัสดุ ขณะที่กระบวนการตัดด้วยลวดไฟฟ้า (Wire Electrical Discharge Machining: WEDM) มีข้อดีด้านความแม่นยำสูงและลดแรงกระทำทางกลต่อชิ้นงาน แต่สามารถก่อให้เกิดชั้นหลอมใหม่ (Recast Layer) หรือรอยแตกร้าวขนาดเล็กบนผิววัสดุ ซึ่งอาจส่งผลต่อพฤติกรรมการแตกหักของวัสดุ [2] ส่วนกระบวนการตัดด้วยเลเซอร์อาจทำให้เกิดโซนที่ได้รับผลกระทบจากความร้อน (Heat Affected Zone: HAZ) ส่งผลให้โครงสร้างจุลภาคบริเวณผิวเกิดการเปลี่ยนแปลง เช่น การเปลี่ยนแปลงขนาดเกรนหรือการเกิดเฟสที่มีความแข็งสูงขึ้น ซึ่งอาจมีผลต่อความแข็งแรงและความเหนียวของวัสดุ [3] นอกจากกระบวนการแปรรูปแล้ว ทิศทางการรีดยังเป็นอีกปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อสมบัติทางกลของวัสดุโลหะ โดยเฉพาะวัสดุแผ่นที่ผ่านกระบวนการรีดร้อนหรือรีดเย็น ซึ่งมักมีการเรียงตัวของเกรนตามแนวการรีด ทำให้เกิดพฤติกรรมแอนไอโซทรอปี (Anisotropy) หรือความไม่สม่ำเสมอของสมบัติทางกลในแต่ละทิศทางการวิจัยก่อนหน้านี้รายงานว่า ทิศทางของเกรนส่งผลต่อค่าความต้านทานแรงดึง ค่าการยืดตัว และลักษณะการแตกหักของวัสดุอย่างมีนัยสำคัญ [4] โดยทิศทางของการไหลของเกรน (Grain Flow) ที่สัมพันธ์กับแนวการรีด เช่น 0° และ 90° สามารถส่งผลต่อพฤติกรรมการรับแรงดึงของวัสดุได้แตกต่างกัน

ในช่วง 5 ปีที่ผ่านมา มีงานวิจัยจำนวนมากที่มุ่งศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างกระบวนการตัดขึ้นรูป คุณภาพผิว และสมบัติเชิงกลของเหล็กกล้าคาร์บอนและเหล็กโครงสร้าง โดยพบว่ากระบวนการผลิตสมัยใหม่ส่งผลต่อโครงสร้างจุลภาคบริเวณผิวและพฤติกรรมการรับแรงของวัสดุอย่างมีนัยสำคัญ Zhang และคณะ [5] รายงานว่ากระบวนการตัดด้วยเลเซอร์ไฟเบอร์สามารถทำให้เกิดเขตได้รับผลกระทบจากความร้อน (HAZ) ที่มีขนาดแตกต่างกันตามพลังงานเลเซอร์ ส่งผลให้ค่าความแข็งบริเวณผิวเพิ่มขึ้นแต่ความเหนียวลดลง ขณะที่ Li และคณะ [6] ศึกษาการตัดด้วยลวดไฟฟ้า (WEDM) ในเหล็กกล้าคาร์บอนและพบว่าความหนาของชั้นหลอมใหม่ (Recast Layer) และความเค้นตกค้างบริเวณผิวมีผลโดยตรงต่อการเริ่มต้นการแตกร้าวภายใต้แรงดึง นอกจากนี้ Kumar และคณะ [7] รายงานว่าค่าความหยาบผิวที่เพิ่มขึ้นจากกระบวนการตัดเฉือนสามารถลดค่าความต้านทานแรงดึงและอายุความล้าได้ เนื่องจากร่องรอยบนผิวทำหน้าที่เป็นจุดเริ่มต้นของความเสียหายเฉพาะที่ ขณะเดียวกัน Chen และคณะ [8] ได้ศึกษาพฤติกรรมแอนไอโซทรอปีของเหล็กแผ่นรีดร้อนและพบว่าทิศทางการทดสอบที่แตกต่างจากแนวการรีดส่งผลต่อค่าความเค้นคราก ความต้านทานแรงดึงสูงสุด และรูปแบบการแตกหักอย่างชัดเจน อันเนื่องมาจากการจัดเรียงตัวของเกรนและการกระจายตัวของเฟสภายในวัสดุ สอดคล้องกับงานของ Singh และคณะ [9] ที่รายงานว่าการพิจารณาผลร่วมระหว่างทิศทางการรีดและสภาพผิวหลังการแปรรูปมีความสำคัญต่อการประเมินสมบัติเชิงกลของเหล็กโครงสร้างในงานอุตสาหกรรม เนื่องจากทั้งสองปัจจัยสามารถส่งผลเชิงปฏิสัมพันธ์ต่อความสามารถในการรับแรงและพฤติกรรมการแตกหักของวัสดุได้มากกว่าการพิจารณาแยกปัจจัยเพียงอย่างเดียว

จากการทบทวนวรรณกรรมพบว่า แม้จะมีงานวิจัยที่ศึกษาผลของกระบวนการแปรรูปหรือทิศทางการรีดต่อสมบัติทางกลของวัสดุโลหะอยู่เป็นจำนวนมาก แต่การศึกษาที่เปรียบเทียบผลของกระบวนการแปรรูปหลายรูปแบบร่วมกับทิศทางการไหลของเกรนต่อสมบัติการรับแรงดึงของเหล็กกล้าคาร์บอนมาตรฐาน เกรด SS400 ยังมีอยู่อย่างจำกัด นอกจากนี้ งานวิจัยที่วิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหยาบผิวเฉลี่ยกับผลการทดสอบแรงดึงของชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการแปรรูปแตกต่างกันยังมีไม่มากนัก จึงจำเป็นต้องมีการศึกษาเชิงเปรียบเทียบอย่างเป็นระบบ เพื่อทำความเข้าใจผลกระทบของกระบวนการแปรรูปและทิศทางเกรนต่อสมบัติทางกลของวัสดุ ในการศึกษาครั้งนี้ได้พิจารณาทิศทางการทดสอบที่มุม 0° และ 90° (Rolling Direction: RD) และแนวตั้งฉากกับแนวรีด (Transverse Direction: TD) ตามลำดับ เพื่อให้สามารถประเมินพฤติกรรมเชิงแอนไอโซทรอปีของวัสดุได้อย่างครอบคลุมมากยิ่งขึ้น เนื่องจากการทดสอบเฉพาะแนว อาจไม่สามารถสะท้อนการเปลี่ยนแปลงของสมบัติเชิงกลระหว่างสองทิศทางหลักได้อย่างสมบูรณ์

ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงมุ่งศึกษาผลของกระบวนการแปรรูปชิ้นงานที่แตกต่างกัน ได้แก่ กระบวนการแปรรูปทางกลและกระบวนการแปรรูปทางไฟฟ้า ต่อสมบัติการต้านทานแรงดึงและคุณภาพผิวของเหล็กกล้าคาร์บอนมาตรฐาน เกรด SS400 รวมถึงวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างกระบวนการแปรรูป ทิศทางการรีด และค่าความหยาบผิวเฉลี่ย เพื่อใช้เป็นแนวทางในการเลือกกระบวนการผลิตที่เหมาะสมสำหรับงานอุตสาหกรรมต่อไป

2. วิธีการดำเนินงานวิจัย

2.1 วัสดุและอุปกรณ์

งานวิจัยนี้ศึกษาอิทธิพลของกระบวนการแปรรูปชิ้นงานที่มีผลต่อคุณสมบัติทางกลและทางกายภาพ ของวัสดุ เหล็กกล้าคาร์บอน เกรด SS400 ซึ่งมีคุณสมบัติดังตารางที่ 1 และส่วนผสมทางเคมี ดังแสดงในตารางที่ 2 ตามลำดับ

ตารางที่ 1 คุณสมบัติทางกลวัสดุเหล็กกล้าคาร์บอน เกรด SS400 [1]

Mechanical Properties of Material	Standard Values
Ultimate Tensile Strength	400-510 MPa
Yield Strength	245-275 MPa (แปรผันตามความหนา)
Elongation	20-23%
Modulus of Elasticity	190-210 GPa
Hardness	160-180 HBW

ตารางที่ 2 ส่วนผสมทางเคมีของวัสดุเหล็กกล้าคาร์บอน เกรด SS400 [1]

Element	Maximum Percentage (%)
Carbon (C)	0.17% for thickness ≤ 16mm
Manganese (Mn)	1.60%
Phosphorus (P)	0.050%
Sulfur (S)	0.050%
Ferrous (Fe)	Balance

การศึกษานี้มุ่งเปรียบเทียบพฤติกรรมการต้านทานแรงดึงของเหล็กกล้าคาร์บอนที่ผ่านกระบวนการแปรรูปชิ้นงาน ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM E8/E8M ด้วยกระบวนการที่แตกต่างกัน ได้แก่ กระบวนการแปรรูปทางกลด้วยเครื่องจักรกลอัตโนมัติ (CNC Machining) และกระบวนการแปรรูปทางไฟฟ้า (Wire Electrical Discharge Machining: WEDM)

นอกจากนี้ ยังได้ศึกษาผลของทิศทางการไหลของเกรน (Grain Flow) ที่สัมพันธ์กับแนวการรีดของวัสดุในทิศทาง 0° และ 90° โดยนำมาวิเคราะห์เปรียบเทียบกับแต่ละกระบวนการแปรรูปชิ้นงาน รวมถึงตรวจสอบค่าความหยาบผิวเฉลี่ย (Average Surface Roughness) เพื่อวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างสภาพผิวและสมบัติเชิงกลของวัสดุ อันจะช่วยยืนยันผลการทดลองในขั้นตอนสุดท้ายได้อย่างมีประสิทธิภาพ

2.2 เครื่องจักร เครื่องมือ และอุปกรณ์ในงานวิจัย

งานวิจัยนี้ดำเนินการเตรียมชิ้นงานทดสอบจากเหล็กกล้าคาร์บอน เกรด SS400 ตามข้อกำหนด ASTM E8/E8M (Sheet Type) โดยใช้กระบวนการแปรรูป 2 วิธี และกำหนดทิศทางการรีดของวัสดุ 2 ทิศทางในการทดสอบ ได้แก่ 0° และ 90° จากแนวการรีด

ตารางที่ 3 พารามิเตอร์หลักที่ใช้ในการแปรรูปชิ้นงานทดสอบ

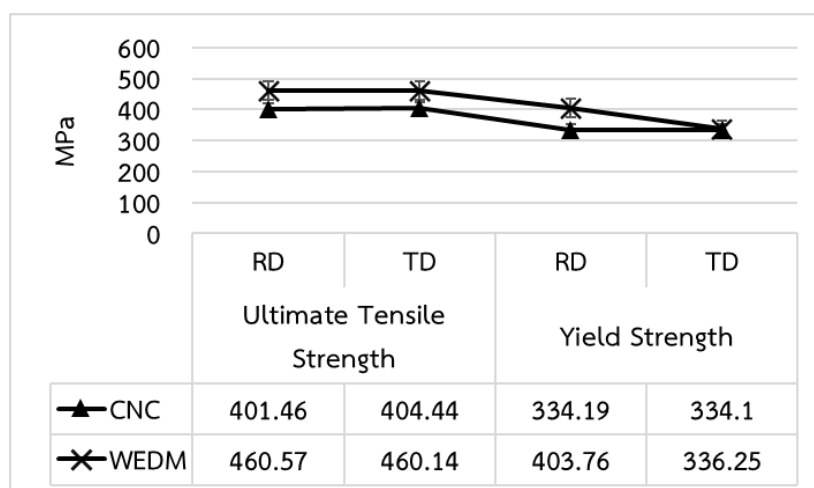
CNC 5-Axis Machining Center		Wire Electrical Discharge Machining	
Parameters	Values	Parameters	Values
Depth of Cut	0.25 มิลลิเมตร	Peak voltage (V)	65
Tooling	Endmill Ø 10 มิลลิเมตร	Peak current (A)	20
Spindle Speed	2500 รอบต่อนาที	Pulse on time (µs)	50
Cutting Speed	1000 เมตรต่อนาที	Pulse off time (µs)	50

กระบวนการแปรรูปที่ใช้ในการศึกษาประกอบด้วย กระบวนการแปรรูปทางกลด้วยเครื่องจักรกลอัตโนมัติแบบ CNC 5 แกน (CNC 5-Axis Machining Center) รุ่น UMC-750 ยี่ห้อ HAAS กระบวนการแปรรูปทางไฟฟ้าด้วยเครื่องตัดโลหะด้วยลวดไฟฟ้า (Wire Electrical Discharge Machining: WEDM) รุ่น MV1200S ยี่ห้อ Mitsubishi รายละเอียดการแปรรูปในการแปรรูปดังแสดงในตารางที่ 3 ทั้งนี้ภายหลังการแปรรูป ชิ้นงานถูกตรวจสอบลักษณะผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์เลเซอร์คอนโฟคอลแบบสามมิติ (3D Laser Scanning Confocal Microscope) รุ่น LEXT OLS5000 ยี่ห้อ Olympus เพื่อวิเคราะห์ค่าความหยาบผิว ทั้งนี้ในการวัดค่าความหยาบผิวจะดำเนินการตามมาตรฐาน ISO 4287 สำหรับการวัดความหยาบผิวแบบ 2 มิติ (Line Profile Roughness) และศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างสภาพผิวกับผลการทดสอบความสามารถในการต้านทานแรงดึงของวัสดุในแต่ละทิศทางการรีดและกระบวนการแปรรูปที่ต่างกัน โดยการใช้เครื่องทดสอบแรงดึง (Tensile Test) รุ่น AGS-X Series 50 kN ยี่ห้อ SHIMADSU ทำการทดสอบชิ้นงานซ้ำ 3 ครั้งต่อการทดลองและหาค่าเฉลี่ย

3. ผลการทดลองและการอภิปรายผล

3.1 ผลการทดสอบสมบัติด้านการต้านทานแรงดึง

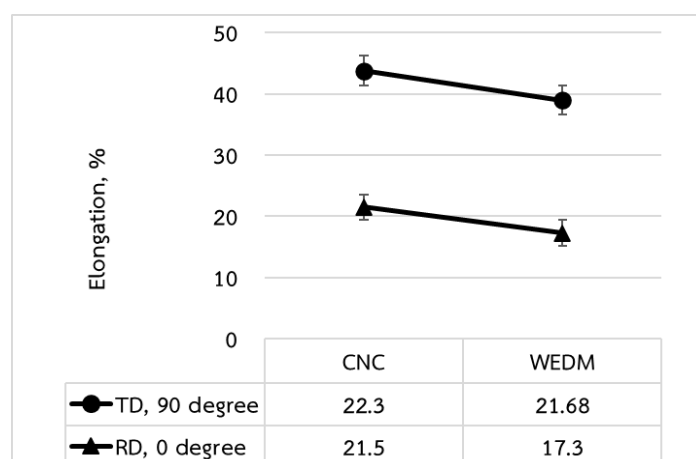
ผลการทดสอบแรงดึงของเหล็กกล้าคาร์บอน เกรด SS400 ที่ผ่านกระบวนการแปรรูปแตกต่างกัน ซึ่งแสดงในรูปที่ 1 พบว่า กระบวนการเตรียมชิ้นงานมีผลต่อค่าความต้านแรงดึงสูงสุดของวัสดุอย่างชัดเจน โดยชิ้นงานที่เตรียมด้วยกระบวนการตัดโลหะด้วยลวดไฟฟ้า (Wire Electrical Discharge Machining: WEDM) ให้ค่าความต้านแรงดึงสูงสุดมากที่สุด รองลงมาคือ กระบวนการตัดเฉือนทางกลด้วย CNC Milling ให้ค่าความต้านแรงดึงต่ำที่สุด อย่างไรก็ตาม ค่าความต้านแรงดึงสูงสุดของชิ้นงานทั้ง 2 กระบวนการยังคงอยู่ในช่วงมาตรฐานของเหล็กกล้าคาร์บอน เกรด SS400 ซึ่งกำหนดไว้ที่ 400–510 MPa แสดงให้เห็นว่ากระบวนการแปรรูปที่ใช้ในการศึกษานี้ไม่ส่งผลให้สมบัติเชิงกลของวัสดุออกนอกเกณฑ์มาตรฐานที่กำหนด



รูปที่ 1 ผลการทดสอบสมบัติด้านการต้านทานแรงดึงของชิ้นงานทดสอบ

พฤติกรรมดังกล่าวสามารถอธิบายได้จากหลักการของความเค้นตกค้าง (Residual Stress) และผลกระทบทางโลหะวิทยาที่เกิดขึ้นระหว่างกระบวนการตัดเฉือน ซึ่งกระบวนการผลิตแต่ละประเภทส่งผลต่อโครงสร้างจุลภาคและสมบัติเชิงกลของวัสดุอย่างมีนัยสำคัญ กระบวนการตัดเฉือนทางกลด้วย CNC Milling เป็นกระบวนการตัดเฉือนที่อาศัยแรงกลในการกำจัดเนื้อวัสดุ โดยในระหว่างการตัดจะเกิดทั้งแรงตัด (Cutting Force) และความร้อนสะสมบริเวณผิวชิ้นงาน ส่งผลให้เกิดการเสียรูปแบบพลาสติก (Plastic Deformation) ในชั้นผิววัสดุ นอกจากนี้ยังทำให้เกิดความเค้นตกค้างชนิดแรงดึง (Tensile Residual Stress) ภายในชิ้นงาน ซึ่งมีผลต่อการลดลงของความแข็งแรงเชิงกล ความต้านทานการล้า (Fatigue Strength) และอาจเป็นจุดเริ่มต้นของการแตกร้าวได้ โดยเฉพาะในวัสดุแผ่นที่มีความหนาไม่มาก ความเค้นตกค้างดังกล่าวสามารถส่งผลต่อค่าความต้านแรงดึงและค่าการยืดตัวของวัสดุได้อย่างชัดเจน [10-11] ทั้งนี้ งานวิจัยของ Yuan Ma และคณะ [12] รายงานว่าแรงตัดและอุณหภูมิที่สูงขึ้นในกระบวนการตัดเฉือนทางกลด้วย CNC Milling มีความสัมพันธ์โดยตรงกับการเพิ่มขึ้นของ tensile residual stress บริเวณผิวชิ้นงาน ซึ่งส่งผลให้สมบัติเชิงกลของวัสดุลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับกระบวนการที่ไม่มีแรงกลโดยตรง

ในทางตรงกันข้าม กระบวนการ Wire Electrical Discharge Machining (WEDM) เป็นกระบวนการกำจัดวัสดุด้วยการคายประจุไฟฟ้า (Electrical Discharge) ระหว่างลวดอิเล็กโทรดและชิ้นงาน โดยไม่มีการสัมผัสเชิงกลโดยตรง จึงแทบไม่เกิดแรงตึงและไม่ก่อให้เกิดการเสียรูปแบบพลาสติกภายในเนื้อวัสดุ ส่งผลให้ความเค้นตกค้างภายในชิ้นงานมีค่าน้อยกว่ากระบวนการ machining แบบดั้งเดิม นอกจากนี้ โครงสร้างจุลภาคของวัสดุส่วนใหญ่ยังคงเดิม ยกเว้นเฉพาะบริเวณผิวที่เกิดการหลอมและเย็นตัวอย่างรวดเร็ว จนเกิดเป็นชั้นหลอมใหม่ (Recast Layer) และชั้นได้รับผลกระทบจากความร้อนขนาดบางมาก (White Layer) [13] ดังนั้นค่าความแข็งแรงเชิงกลของชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการ WEDM จึงมักสูงกว่าชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการตัดเฉือนทางกลด้วย CNC Milling และมีแนวโน้มคงสมบัติดั้งเดิมของวัสดุไว้ได้ดีกว่า นอกจากนี้ ผลการทดลองยังแสดงให้เห็นว่าทิศทางการรีดขึ้นรูปของโลหะมีผลต่อสมบัติเชิงกลอย่างชัดเจน โดยค่าที่วัดในทิศทาง Rolling Direction (RD, 0°), และ Transverse Direction (TD, 90°) มีความแตกต่างกัน ตามทฤษฎีโครงสร้างผลึกของวัสดุรีด (Rolled Steel Texture Theory) กระบวนการรีดทำให้เกรนของโลหะยืดตัวไปตามแนวรีด และเกิดการเรียงตัวเชิงผลึกแบบเฉพาะทิศทาง (Preferred Crystallographic Orientation หรือ Texture) ส่งผลให้สมบัติเชิงกลในแต่ละทิศทางไม่เท่ากัน [14] ทิศทางตามแนวรีดมักมีค่าความแข็งแรงสูงกว่าเนื่องจากเกรนเรียงตัวในทิศทางเดียวกับแรงกระทำ ขณะที่ทิศทางตั้งฉากกับแนวรีดมักมีความต้านทานการเสียรูปต่ำกว่า อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาผลการทดลองร่วมกับค่าการยืดตัว พบว่าแนวโน้มของค่า elongation ในทิศทาง Rolling Direction (RD, 0°) มีค่าสูงกว่าทิศทาง Transverse Direction (TD, 90°) แสดงให้เห็นว่าการเรียงตัวของโครงสร้างผลึกจากกระบวนการรีดยังคงมีอิทธิพลต่อพฤติกรรมการเสียรูปของวัสดุ ทั้งนี้ผลการวิเคราะห์แสดงในรูปที่ 2



รูปที่ 2 ความสามารถในการยืดตัวของวัสดุในกระบวนการกระบวนการทางกลและทางไฟฟ้า

3.2 ผลการทดสอบความสามารถในการยืดตัวของวัสดุ (Elongation)

ผลการทดสอบความสามารถในการยืดตัวของวัสดุ ดังแสดงในรูปที่ 2 สามารถอธิบายได้จากอิทธิพลของพลังงานความร้อนที่ส่งผลต่อโครงสร้างจุลภาคและสมบัติเชิงกลของวัสดุในระหว่างกระบวนการตัดเฉือน โดยเฉพาะกระบวนการ Wire Electrical Discharge Machining (WEDM) ซึ่งเป็นกระบวนการที่เกี่ยวข้องกับการถ่ายเทพลังงานความร้อนเข้าสู่ชิ้นงานโดยตรง ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างภายในวัสดุและมีผลต่อความสามารถในการเสียรูปแบบพลาสติก กระบวนการ WEDM แม้จะไม่มีแรงทางกลโดยตรงมากระทำต่อชิ้นงาน แต่หลักการทำงานของวัสดุเกิดจากการคายประจุไฟฟ้าระหว่างลวดอิเล็กโทรดและชิ้นงาน ซึ่งเปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานความร้อนที่มีอุณหภูมิสูงมากในช่วงเวลาสั้น ๆ ส่งผลให้เกิดการหลอมและระเหยวัสดุเฉพาะบริเวณผิว [13] แม้ว่าบริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อนของ WEDM จะมีขนาดเล็กแต่ยังคงเกิดการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างจุลภาคบริเวณผิว เช่น การเกิดชั้นหลอมใหม่ (Recast Layer) ชั้นสีขาว (White Layer) และรอยแตกร้าวขนาดเล็ก (Micro-crack) ในบางกรณี ซึ่งล้วนส่งผลต่อสมบัติเชิงกลของวัสดุ โดยเฉพาะค่าความเหนียวและค่าการยืดตัว

นอกจากนี้ ผลการทดลองยังสามารถอธิบายเพิ่มเติมได้จากความสัมพันธ์ระหว่างโครงสร้างจุลภาคและสมบัติเชิงกลตามหลัก Hall-Petch Relationship ซึ่งระบุว่าขนาดเกรนมีผลต่อความแข็งแรงและความเหนียวของวัสดุ โดยเมื่อเกรนมีขนาดใหญ่ขึ้นจากผลของความร้อน จะทำให้ค่าความเหนียวและความสามารถในการเสียรูปแบบพลาสติกลดลง ในทางกลับกัน

หากเกิดโครงสร้างละเอียดและแข็งจากการเย็นตัวอย่างรวดเร็ว แม้ว่าความแข็งแรงอาจเพิ่มขึ้น แต่ค่าการยึดตัวจะลดลง เนื่องจากวัสดุมีความเปราะมากขึ้น [15] ดังนั้น จากการวิเคราะห์ผลการทดลองสามารถสรุปได้ว่า ค่าการยึดตัวของวัสดุได้รับอิทธิพลโดยตรงจากผลกระทบทางความร้อนที่เกิดขึ้นระหว่างกระบวนการตัดเฉือน โดยกระบวนการที่มีการให้พลังงานความร้อนสูงและมีอัตราการเย็นตัว ในกระบวนการ WEDM แม้จะเกิดผลกระทบทางความร้อนเช่นกัน แต่มีผลต่อนิวส์ตในบริเวณจำกัด ตลอดจนกระบวนการตัดเฉือนทางกลสามารถรักษาเนื้อวัสดุดั้งเดิมได้ดีกว่า จึงให้คุณสมบัติการยึดตัวได้ดีกว่ากระบวนการทางความร้อน ทั้งนี้ ข้อมูลดังกล่าวมีความสำคัญต่อการเลือกกระบวนการผลิตให้เหมาะสมกับชิ้นงานที่ต้องการสมบัติเชิงกลด้านความเหนียวและความสามารถในการเสียรูปสูง

ในทางตรงกันข้าม กระบวนการ CNC Milling เป็นกระบวนการตัดเฉือนทางกล (Mechanical Machining Process) ที่ใช้คมตัดในการกำจัดเนื้อวัสดุออกจากชิ้นงาน โดยอาศัยแรงเฉือนและการเคลื่อนที่สัมผัสระหว่างเครื่องมือตัดกับชิ้นงาน แม้ว่าจะระหว่างกระบวนการจะเกิดความร้อนจากแรงเสียดทานและการเสียรูปของวัสดุบริเวณหน้าสัมผัส แต่ระดับอุณหภูมิที่เกิดขึ้นโดยทั่วไปยังไม่สูงเพียงพอที่จะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาคอย่างรุนแรงเมื่อเทียบกับกระบวนการตัดด้วยความร้อนจากพลังงานไฟฟ้า เช่น กระบวนการ WEDM หรือ EDM [16] ดังนั้น บริเวณผิวของชิ้นงานจึงไม่เกิดเขตได้รับผลกระทบจากความร้อน (Heat Affected Zone: HAZ) อย่างชัดเจน และไม่เกิดการเปลี่ยนเฟส (Phase Transformation) ภายในเนื้อวัสดุ

อย่างไรก็ตาม แม้ว่ากระบวนการตัดเฉือนทางกลด้วย CNC Milling จะไม่ก่อให้เกิดผลกระทบทางความร้อนในระดับสูง แต่กระบวนการดังกล่าวยังคงส่งผลต่อสมบัติเชิงกลของวัสดุผ่านกลไกทางกลศาสตร์ของการตัดเฉือน โดยแรงตัดที่เกิดขึ้นสามารถทำให้บริเวณผิววัสดุเกิดการเสียรูปแบบพลาสติก (Plastic Deformation) และเกิดความเค้นตกค้าง (Residual Stress) ภายในชิ้นผิวของชิ้นงานได้ ความเค้นตกค้างดังกล่าวโดยเฉพาะความเค้นตกค้างชนิดแรงดึง (Tensile Residual Stress) มีผลต่อความสามารถในการเสียรูปของวัสดุ และอาจทำให้ค่าการยึดตัวลดลงเมื่อทำการทดสอบแรงดึง [15]

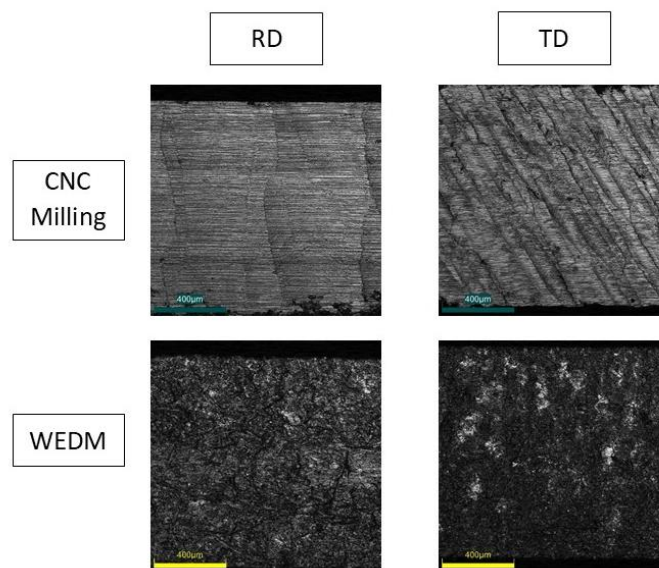
นอกจากนี้ การตัดเฉือนด้วย CNC Milling ยังอาจก่อให้เกิดปรากฏการณ์ Strain Hardening บริเวณผิววัสดุ ซึ่งเกิดจากการเสียรูปแบบพลาสติกซ้ำบริเวณผิวหน้าระหว่างกระบวนการตัด ส่งผลให้ความหนาแน่นของดิสโลเคชัน (Dislocation Density) เพิ่มขึ้น ทำให้วัสดุมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น แต่มีความสามารถในการเสียรูปแบบพลาสติกลดลง ดังนั้นแม้ว่าโครงสร้างจุลภาคโดยรวมของวัสดุจะไม่เปลี่ยนแปลงจากผลของความร้อน แต่ผลกระทบเชิงกลจากกระบวนการตัดเฉือนยังคงสามารถลดค่าการยึดตัวของวัสดุได้อย่างมีนัยสำคัญ เมื่อเปรียบเทียบกับกระบวนการ WEDM พบว่า CNC Milling มีข้อได้เปรียบในด้านการรักษาโครงสร้างจุลภาคเดิมของวัสดุ เนื่องจากไม่มีการเกิด HAZ หรือการเปลี่ยนเฟสของโลหะ แต่ในขณะเดียวกัน ผลจากแรงตัดและการเสียรูปเชิงกลกลับส่งผลต่อสมบัติเชิงกลในลักษณะที่แตกต่างกัน กล่าวคือ กระบวนการที่ใช้พลังงานความร้อนสูงมักลดค่าการยึดตัวจากการเปลี่ยนแปลงทางโลหะวิทยา ขณะที่ CNC Milling ส่งผลต่อค่าการยึดตัวผ่านกลไกของความเค้นตกค้างและการแข็งตัวเนื่องจากการเสียรูป (Deformation-Induced Hardening)

3.3 ผลการตรวจคุณภาพผิวชิ้นงาน (Surface Quality)

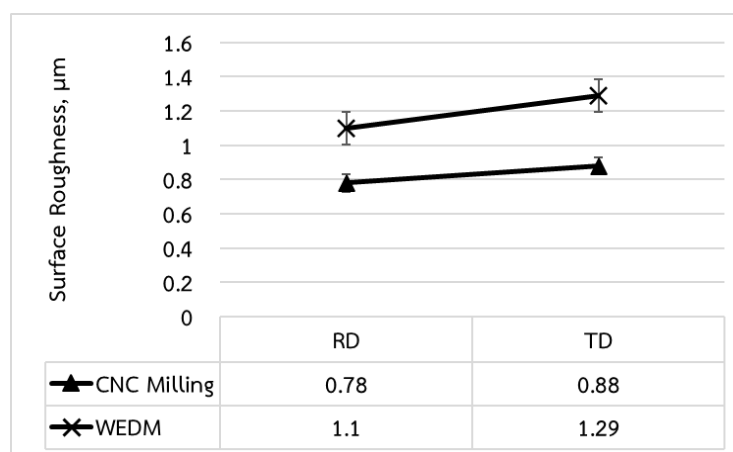
ผลการตรวจสอบคุณภาพผิวชิ้นงาน (Surface Quality) ดังแสดงในรูปที่ 3 และ 4 ตามลำดับ พบว่ากระบวนการตัดเฉือนทางกล CNC Milling ให้ค่าความหยาบผิวเฉลี่ย (Average Surface Roughness; Ra) ต่ำที่สุด รองลงมาคือกระบวนการ Wire Electrical Discharge Machining (WEDM) ทั้งนี้สามารถอธิบายได้จากลักษณะกลไกการกำจัดวัสดุและผลกระทบทางความร้อนที่แตกต่างกันของแต่ละกระบวนการผลิต กล่าวคือกระบวนการตัดเฉือนทางกล CNC Milling เป็นกระบวนการตัดเฉือนทางกล (Mechanical Machining) ที่ใช้คมตัดซึ่งมีรูปทรงเรขาคณิตแน่นอนในการกำจัดเนื้อวัสดุ โดยสามารถควบคุมพารามิเตอร์การตัด เช่น ความเร็วรอบ อัตราป้อน และความลึกในการตัด ได้อย่างแม่นยำ ส่งผลให้เกิดผิวชิ้นงานที่มีความสม่ำเสมอสูงและมีค่าความหยาบผิวดำ นอกจากนี้ กระบวนการดังกล่าวไม่ทำให้วัสดุเกิดการหลอมละลาย จึงไม่เกิดการแข็งตัวใหม่ของโลหะบนผิวชิ้นงาน และไม่เกิดรอยผิวที่เกิดจากการไหลของโลหะหลอมเหลวเหมือนในกระบวนการตัดด้วยความร้อน อีกทั้งหากใช้เครื่องมือตัดที่มีความคมและพารามิเตอร์ที่เหมาะสม จะช่วยลดการเกิด Built-up Edge และลดแรงสั่นสะเทือนระหว่างการตัด ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญที่ช่วยให้คุณภาพผิวดีขึ้น [17]

ในส่วนของกระบวนการ WEDM เป็นกระบวนการกำจัดวัสดุด้วยการคายประจุไฟฟ้า (Electrical Discharge) ระหว่างลวดอิเล็กโทรดและชิ้นงาน โดยพลังงานไฟฟ้าจะถูกเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อนที่มีอุณหภูมิสูงมากในช่วงเวลาสั้น ๆ ส่งผลให้วัสดุหลอมและระเหยออกเป็นจุดเล็ก ๆ บนผิวชิ้นงาน ลักษณะดังกล่าวทำให้เกิดหลุมขนาดจุลภาค (Crater) จากการสปาร์คจำนวนมากกระจายทั่วพื้นผิว รวมทั้งเกิดชั้นหลอมแข็งตัวใหม่ (Recast Layer) บริเวณผิวชิ้นงาน [18-19] ส่งผลให้ค่าความหยาบผิวสูงกว่ากระบวนการตัดเฉือนทางกล CNC Milling นอกจากนี้ หากพลังงานในการคายประจุสูงเกินไปหรือมี

การกำจัดเศษวัสดุหลอมเหลวไม่สมบูรณ์ อาจทำให้เกิดรอยแตกร้าวขนาดเล็ก (Micro-crack) และความไม่สม่ำเสมอของพื้นผิวเพิ่มขึ้น ซึ่งส่งผลต่อคุณภาพผิวและสมบัติเชิงกลของชิ้นงาน



รูปที่ 3 ผลการตรวจคุณภาพผิวชิ้นงาน (Surface Quality)



รูปที่ 4 ค่าความหยาบผิวเฉลี่ยชิ้นงานภายหลังการแปรรูป (ทดสอบ 5 ชิ้น) หน่วย (µm)

นอกจากนี้ ทิศทางการเคลื่อนที่ของเครื่องมือตัดเมื่อเปรียบเทียบกับแนวการเรียงตัวของเกรนจากกระบวนการรีดโลหะ (Rolling Direction) ยังมีผลต่อคุณภาพผิวชิ้นงานหลังการแปรรูป โดยวัสดุโลหะแผ่นรีดร้อนมีลักษณะโครงสร้างจุลภาคแบบแอนไอโซทรอปิก (Anisotropic Structure) ซึ่งเกรนจะยึดตัวไปตามแนวรีด ส่งผลให้ความต้านทานต่อการตัดเฉือนในแต่ละทิศทางแตกต่างกัน หากแนวการเคลื่อนที่ของเครื่องมือตัดสอดคล้องกับแนวการเรียงตัวของเกรน จะช่วยให้การตัดเฉือนเป็นไปอย่างต่อเนื่องและลดการฉีกขาดของผิว แต่หากตัดในทิศทางตั้งฉากกับแนวเกรน อาจทำให้เกิดการหลุดร่อนหรือการเสียรูปเฉพาะที่ ส่งผลให้ค่าความหยาบผิวเพิ่มขึ้น นอกจากผลต่อคุณภาพผิวแล้ว ค่าความหยาบผิวยังมีผลโดยตรงต่อสมบัติเชิงกลของชิ้นงานเหล็กกล้าคาร์บอน โดยผิวที่มีความหยาบสูงจะทำให้เกิดจุดรวมความเค้น (Stress Concentration) บริเวณรอยบากขนาดเล็กบนผิวชิ้นงาน ซึ่งสามารถทำหน้าที่เป็นจุดเริ่มต้นของการแตกร้าว (Crack Initiation Site) เมื่อวัสดุได้รับแรงกระทำ [20] ตามหลัก Fracture Mechanics ค่าความเข้มของความเค้น (Stress Intensity Factor) จะเพิ่มขึ้นบริเวณตำหนิบนผิว ส่งผลให้ความสามารถในการรับแรงดึง ความเหนียว และค่าการยึดตัวลดลง นอกจากนี้ ความหยาบผิวยังส่งผลต่อความต้านทานความล้า (Fatigue Resistance) อย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากรอยบากขนาดเล็กบนพื้นผิวช่วยเร่งการเริ่มต้นและการแพร่กระจายของรอยร้าวล้า (Fatigue Crack Propagation) [21]

4. สรุปผลการทดลอง

การวิจัยเรื่องการวิเคราะห์ผลของกระบวนการแปรรูปต่อสมบัติเชิงกลของเหล็กกล้าคาร์บอน SS400 สามารถสรุปได้ดังนี้

- 1) การเตรียมชิ้นงานด้วยกระบวนการตัดโลหะด้วยลวดไฟฟ้า (WEDM) ให้ค่าความต้านแรงดึงสูงสุด ที่ 460.57 MPa ในทิศทางตามแนวรีด (Rolling Direction, RD, 0°) รองลงมาคือกระบวนการเตรียมชิ้นงานจากการตัดเฉือนทางกล (CNC milling) ให้ค่าความต้านแรงดึงสูงสุด ที่ 404.44 MPa ในทิศทางตั้งฉากกับแนวรีด Transverse Direction (TD, 90°)
- 2) กระบวนการตัดเฉือนทางกลด้วย CNC Milling ให้ค่า Elongation สูงที่สุดที่ 22.3% รองลงมาคือกระบวนการ WEDM ให้ค่า Elongation สูงที่สุดที่ 21.68% ในทิศทางตั้งฉากกับแนวรีด Transverse Direction (TD, 90°)
- 3) ความหยาบผิวเฉลี่ยของกระบวนการ CNC milling ให้ค่าต่ำสุดที่ 0.78 μm รองลงมาคือกระบวนการ WEDM ให้ค่าต่ำสุดที่ 1.1 μm ในทิศทางตามแนวรีด (Rolling Direction, RD, 0°)

5. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม ที่ให้การสนับสนุนตลอดระยะเวลาการศึกษาและดำเนินการวิจัย จนงานวิจัยฉบับนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Sunny Steel, "JIS G3101 Structural Carbon Steel Plate Specification," [Online]. Available: Sunny Steel JIS G3101 SS400, [Accessed: May 25, 2026]
- [2] J. W. Murray and A. T. Clare, "Repair of EDM induced surface cracks by pulsed electron beam irradiation," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 212, no. 12, pp. 2642–2651, Aug. 2012, doi: 10.1016/j.jmatprotec.2012.07.018.
- [3] J. Chen, F. Tu, P. Wang, and Y. Cao, "Revealing the enhancement mechanism of laser cutting on the Strength–Ductility combination in low carbon steel," *Metals*, vol. 14, no. 5, p. 541, May 2024, doi: 10.3390/met14050541.
- [4] M. Wu et al., "Mechanical anisotropy and local ductility in transverse tensile deformation in hot rolled steels: The role of MnS inclusions," *Materials Science and Engineering A*, vol. 744, pp. 324–334, Jan. 2019, doi: 10.1016/j.msea.2018.12.026.
- [5] A. Basak, A. Pramanik, C. Prakash, S. Shankar, and S. Debnath, "Understanding the Micro-Mechanical Behaviour of Recast Layer Formed during WEDM of Titanium Alloy," *Metals*, vol. 12, no. 2, p. 188, Jan. 2022, doi: 10.3390/met12020188.
- [6] M. Balant, T. Pepelnjak, and M. Plančak, "The influence of the rolling direction on the mechanical properties of cold-rolled aluminium alloy sheets," *Materials*, vol. 8, no. 5, Art. no. 217, Sept. 2024, doi: 10.3390/materials8050217.
- [7] R. Nowicki and R. Świercz, "Microstructural Analysis of Recast Layer Thickness and Microcrack Formation During EDM of Hastelloy C-22 with Different Graphite Electrodes," *Materials*, vol. 18, no. 23, p. 5338, Nov. 2025, doi: 10.3390/ma18235338.
- [8] J. Pokropek, M. Kozłowski, and P. Ślęzak, "The influence of rolling direction and dynamic strengthening on the mechanical properties of S700MC steel," *Materials*, vol. 18, no. 18, Art. no. 4471, Sept. 2025, doi: 10.3390/ma18184471.
- [9] T. T. Phan and V. H. Dong, "Influence of process parameters on the microstructural characteristics and mechanical properties of wire electrical discharge machined surfaces," *International Journal of Engineering*, vol. 34, no. 5B, pp. 1223–1231, 2021, doi: 10.5829/IJE.2021.34.05B.24.
- [10] M. Králik and V. Jerz, "The Measurement of Residual Stresses in the Surface Layers of the Materials after Machining," *Materials Science Forum*, vol. 919, pp. 345–353, Apr. 2018, doi: 10.4028/www.scientific.net/msf.919.345.

- [11] S. Chuvaree, N. Mookam, and K. Jamkamon, "An investigation on TIG hardfacing of Cobalt-Based alloys on tool steels using desirability function," *Arabian Journal for Science and Engineering*, Dec. 2025, doi: 10.1007/s13369-025-10997-y.
- [12] Y. Ma, P. Feng, J. Zhang, Z. Wu, and D. Yu, "Prediction of surface residual stress after end milling based on cutting force and temperature," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 235, pp. 41–48, Apr. 2016, doi: 10.1016/j.jmatprotec.2016.04.002.
- [13] K. Jamkamon, P. Kumkoon, and S. Chuvaree, "Studying performance of wire electrical discharge machining for multi-pass cutting strategy on the tool Steel SKD 61 using recommended parameters of machine," *Engineering and Technology Horizons*, no. 3, Sep. 2024, doi: 10.55003/eth.410305.
- [14] Hosford, W. F., & Caddell, R. M. (2011). *Metal Forming: Mechanics and Metallurgy* (4th ed.). Cambridge University Press.
- [15] Callister, W. D., & Rethwisch, D. G. (2020). *Materials Science and Engineering: An Introduction* (10th ed.). Wiley.
- [16] K. H. Ho and S. T. Newman, "State of the art electrical discharge machining (EDM)," *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 43, no. 13, pp. 1287–1300, Sep. 2003, doi: 10.1016/s0890-6955(03)00162-7.
- [17] R. M'Saoubi, J. C. Outeiro, H. Chandrasekaran, O. W. Dillon Jr, and I. S. Jawahir, "A review of surface integrity in machining and its impact on functional performance and life of machined products," *International Journal of Sustainable Manufacturing*, vol. 1, no. 1/2, p. 203, Jan. 2008, doi: 10.1504/ijsm.2008.019234.
- [18] K. Jamkamon, P. Janmanee, N. Mookam, and S. Chuvaree, "Machinability of the stepped cylindrical electrode in the electrical discharge machining," *International Journal of Technology*, vol. 17, no. 2, p. 498, Mar. 2026, doi: 10.14716/ijtech.v17i2.7979.
- [19] K. Muralova, R. Zahradnicek, L. Benes, T. Prokes, R. Hrdy, and J. Fries, "Study of Micro Structural Material Changes after WEDM Based on TEM Lamella Analysis," *Metals*, vol. 10, no. 7, p. 949, Jul. 2020, doi: 10.3390/met10070949.
- [20] Totten, G. E. (2006). *Steel Heat Treatment: Metallurgy and Technologies*. CRC Press.
- [21] Stephens, R. I., Fatemi, A., Stephens, R. R., & Fuchs, H. O. (2000). *Metal Fatigue in Engineering* (2nd ed.). Wiley.

สมบัติเชิงกลและโครงสร้างจุลภาคของรอยเชื่อมด้วยกระบวนการเชื่อมอาร์คทั้งสแตนเลสสเปคคูลระหว่างวัสดุเหล็ก A335 P11 และ A312 TP304

Mechanical properties and Microstructure of GTAW Welded Joints Between A335 P11 and A312 TP304

ธารา มีทรัพย์นิคม*, วันเฉลิม จันทร์หนู, ศิริวัฒน์ งามนางนาค, สราวุธ คำลา และ ทศพร แสงสกุล
สาขาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธนบุรี

248 ซอย เพชรเกษม 110 แขวงหนองค้างพลู เขตหนองแขม กรุงเทพมหานคร 10160

Thara Meesapnikhom*, Wanchalrem Channu, Siriwat Ngamnangnak, Sarawut khamla
and Todsaporn Sangsakul

Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Thonburi University,
248 Soi Phetkasem 110, Nong Khang Phlu Subdistrict, Nong Khaem District, Bangkok 10160, Thailand

*Corresponding author Email: Thara85210@gmail.com

(Received: June 17, 2025 / Revised: June 27, 2026 / Accepted: June 28, 2026)

บทคัดย่อ

การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อหาสมบัติเชิงกลและโครงสร้างจุลภาคทางโลหะวิทยาของรอยเชื่อมเหล็ก A335 P11 และ A312 TP304 สำหรับท่อขนาด 3 นิ้ว ยาว 13 ซม.หนา 5.54 มม. ด้วยกระบวนการเชื่อมอาร์คทั้งสแตนเลสสเปคคูล (Gas Tungsten Arc Welding; GTAW) โดยใช้ลวดเชื่อม SMT-625 (ER NiCrMo-3) เครื่องเชื่อมแบบอาร์กอน RILON TIG 200S กระแสไฟเชื่อม 120 A ความเร็วเชื่อม 13.7 มม./นาที ปริมาณการไหลของแก๊สสเปคคูล 16 ลิตร/นาที ทำการทดสอบสมบัติทางกลและตรวจสอบโครงสร้างทางโลหะวิทยา ผลการทดลองพบว่าลักษณะการซึมลึกและการหลอมละลายระหว่างเนื้อเชื่อมกับ โลหะงานสม่ำเสมอ และมีความสมบูรณ์ระหว่างเนื้อเชื่อมและโลหะงาน ความกว้างของเขตบริเวณอิทธิพลทางความร้อนของกระบวนการเชื่อมใกล้เคียงกัน และไม่มีจุดบกพร่องของแนวเชื่อม รอยเชื่อมมีค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุดเฉลี่ยเท่ากับ 675 MPa และมีค่าความแข็งเฉลี่ยสูงสุดเท่ากับ 230.4 HV การทดสอบแรงกระแทกพบว่าพลังงานดูดซับเฉลี่ยบริเวณพื้นที่กระทบร้อน (HAZ) ของวัสดุ A312 TP304 มีความเหนียวที่ดีกว่าบริเวณพื้นที่กระทบร้อน (HAZ) ของวัสดุ A335 P11 ผลการทดสอบการดัดโค้งบริเวณรอยเชื่อมเมื่อทำการดัดโค้งจนถึงมุมโค้ง 180° และทำการตรวจสอบด้วยสายตาไม่พบรอยร้าวของชิ้นงานตัวอย่างทั้งหมด นั้นแสดงให้เห็นว่ากระบวนการเชื่อมขึ้นงานทั้งหมดนี้มีคุณภาพเป็นที่น่าพอใจและเป็นแนวทางในการเลือกใช้กระบวนการเชื่อมนี้สำหรับการนำไปใช้งานเพื่อให้ได้ประสิทธิภาพที่เหมาะสม

คำสำคัญ: กระบวนการเชื่อมอาร์คทั้งสแตนเลสสเปคคูล, สมบัติเชิงกล, โครงสร้างจุลภาค

Abstract

This study aimed to determine the mechanical properties and metallurgical structure of welded joints of A335 P11 and A312 TP304 steel for pipe size 3 inches, length 13 cm., thickness 5.54 mm. by gas tungsten arc GTAW method using filler metals SMT-625 (ER NiCrMo-3), RILON TIG 200S argon welding machine, welding current 120 A, welding speed 13.7 mm/min, shielding gas flow volume 16 liters/min. Perform mechanical property tests and metallurgical structures. The results of the experiment found that characteristics of deep penetration and melting between the weld metal and consistent fusion and there is sound metallurgical bonding and the work metal. The width of the thermal influence zone of the welding process is similar and there are no defects in the welding line. The gas tungsten arc welding process will produce an average maximum tensile strength of 675 MPa and an average maximum hardness of 230.4 HV. Impact tests have found that the average energy absorbed in the HAZ (A312 TP304) has better toughness than the HAZ (A335 P11) and the weld metal. Bending test results when bending to an angle of 180° and visual inspection did not reveal surface cracks in all specimens. It can be concluded

that the welding processes in all these workpieces were of satisfactory quality and will serve as a guideline for selecting welding processes for applications to achieve optimum performance.

Keywords: Gas Tungsten Arc Welding, Mechanical Properties, Microstructure

1. บทนำ

หม้อไอน้ำคือภาชนะความดันปิดที่ใช้สำหรับให้ความร้อนกับน้ำหรือของเหลวอื่นๆ ภายในภาชนะปิดสนิท โดยไอน้ำเกิดจากน้ำที่ได้รับการถ่ายเทความร้อนจากการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงจนกระทั่งกลายเป็นไอ หม้อไอน้ำขนาดใหญ่ส่วนมากมักถูกนำไปใช้ในกระบวนการต่างๆ สำหรับอุตสาหกรรมเชิงพาณิชย์และสาธารณูปโภค เช่น วัสดุแปรรูป และการผลิตไฟฟ้า ขนาดและความซับซ้อนของหม้อไอน้ำอาจแตกต่างกันอย่างมาก ขึ้นอยู่กับข้อกำหนดการใช้งาน [1] โลหะที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรมการผลิตหม้อไอน้ำคือ A335 P11 และ A312 TP304 ซึ่งมีความสามารถในการเชื่อมได้ดี ทนต่อการกัดกร่อน ทนความร้อน คุณสมบัติเหล่านี้ทำให้เป็นโลหะผสมที่คุ้นเคยและใช้บ่อยที่สุด

การศึกษาวิจัยเกี่ยวกับสมบัติทางโลหะวิทยาและเชิงกลของรอยเชื่อมมีมากมายดังนี้ Rakesh Chaudhari และ Asha Ingle [2] ได้ทำการศึกษารอยเชื่อมของโลหะต่างชนิดระหว่าง SA335 P11 และ SA312 TP304 ที่เกิดจากการเชื่อมโลหะด้วยก๊าซเฉื่อย (MIG) ดำเนินการตรวจสอบโดยใช้การทดสอบแรงดึง การวัดความแข็ง และการสังเกตโครงสร้างจุลภาค ผลการทดลองพบว่าความแข็งแรงในการดึงที่วัดได้ต่ำกว่าในรอยเชื่อม MIG เมื่อเทียบกับโลหะพื้นฐาน พบว่าบริเวณแนวเชื่อมมีความแข็งแรงที่สูงกว่าบริเวณโลหะพื้นฐานเนื่องจากการก่อตัวของคาร์ไบด์ในบริเวณแนวเชื่อม ความแข็งแรงของแนวเชื่อมยังคงไม่เปลี่ยนแปลงหลังจากการอบด้วยความร้อน ในขณะที่ความแข็งเพิ่มขึ้นสังเกตได้จากการตกตะกอนของคาร์ไบด์ที่ขอบเกรน Vipin Tandon และคณะ [3] ได้ทำการทดลองวิธีการเชื่อมด้วยก๊าซทั้งสแตนอาร์กเพื่อเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิม 201 และ 316L โดยใช้โลหะเติมชนิดต่างๆ คือ 316L, 309L และ 309LMO ผลการทดลองพบว่ารอยเชื่อมทั้งหมดมีลักษณะการแตกหักแบบเหนียว นอกจากนี้ ยังพบการความไวในการแข็งตัวที่สูงกว่าในการเชื่อมด้วยโลหะเติม 309LMO โดยการเชื่อมด้วยโลหะเติม 309L และ 316L ก็เกิดปรากฏการณ์ที่เหมือนกัน ซึ่งเกิดจากปริมาณเฟอร์ไรต์ที่เพิ่มสูงขึ้น ปริมาณเฟอร์ไรต์ที่สูงขึ้นส่งผลให้มีบริเวณอินเทอร์เฟสของเฟอร์ไรต์/ออสเทนไนต์มากขึ้น และยังส่งผลให้ความไวต่อโลหะเติมมากขึ้น

การศึกษานี้มุ่งเน้นไปที่หาสมบัติทางกลและโครงสร้างทางโลหะวิทยาของรอยเชื่อมด้วยกระบวนการเชื่อมอาร์คทั้งสแตนแก๊สปกคลุม (Gas Tungsten Arc Welding; GTAW) โดยใช้ลวดเชื่อม SMT-625 (ER NiCrMo-3) ที่มีผลต่อเหล็ก A335 P11 และเหล็กกล้าไร้สนิม A312 TP304 เพื่อเลือกกระบวนการเชื่อมที่เหมาะสมสำหรับรอยเชื่อมของวัสดุทั้ง 2 ชนิดดังรูปที่ 1 ซึ่งจะทำการวิเคราะห์โครงสร้างมหภาค และจุลภาค การตรวจสอบแรงดึง และการตรวจสอบความแข็ง ในขั้นตอนสุดท้ายมีการวิเคราะห์และสรุปผลการทดลอง



รูปที่ 1 ลักษณะชิ้นงานทดสอบรอยเชื่อมของท่อสำหรับวัสดุ A335 P11 และ A312 TP304 ด้วยกระบวนการเชื่อมอาร์คทั้งสแตนแก๊สปกคลุม

2. ขั้นตอนการดำเนินงาน

การเชื่อมระหว่างวัสดุ 2 ชนิด ได้แก่ เหล็ก A335 P11 และเหล็กกล้าไร้สนิม A312 TP304 ด้วยกระบวนการเชื่อมอาร์คทั้งสแตนเลสสเปคคูลัม (Gas Tungsten Arc Welding หรือ GTAW) โดยใช้ลวดเชื่อม SMT-625 (ER NiCrMo-3) แสดงวัสดุ เครื่องมือ และอุปกรณ์ ดังนี้

1) วัสดุทดสอบ

วัสดุที่ใช้สำหรับเชื่อมเป็นวัสดุที่นิยมนำมาใช้งานท่อไฟของหม้อน้ำมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางท่อ 3 นิ้ว ยาว 13 ซม. หนา 5.54 มม. โดยวัสดุเชื่อมเป็นเหล็ก ASTM A335 P11 ดังแสดงส่วนผสมทางเคมีดังตารางที่ 1 และ เหล็กกล้าไร้สนิมเกรด A312 TP304 ดังแสดงส่วนผสมทางเคมีดังตารางที่ 2

ตารางที่ 1 ส่วนผสมทางเคมีของเหล็กท่อ ASTM A335 P11 [4]

Materials	C	Mn	P	S	Si	Cr	Mo
A335 P11	0.05-0.15	0.30-0.60	≤ 0.025	≤ 0.025	0.50-0.10	1.00-1.50	0.44-0.65

ตารางที่ 2 ส่วนผสมทางเคมีของเหล็กท่อ ASTM A312 TP 304 [5]

Materials	C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni
A312 TP304	≤ 0.080	≤ 2.00	≤ 1.00	≤ 0.045	≤ 0.030	18.0-20.0	8.0-11.0

2) เครื่องเชื่อมที่ใช้สำหรับทดลอง เป็นอาร์กอน รุ่น TIG 200S ยี่ห้อ RILON กระแสเชื่อม 120 แอมแปร์ เป็นเชื่อม TIG ระบบเดียวซึ่งเหมาะสำหรับการเชื่อมวัสดุเหล็กกล้าไร้สนิม และเหล็กกล้าคาร์บอน

3) ลวดเชื่อม เป็นลวดเชื่อมชนิด SMT-625 (ER NiCrMo-3) ซึ่งถูกเลือกใช้ในการเชื่อมที่มีความเหมาะสมกับวัสดุทดลองเชื่อมทั้ง 2 ชนิด ซึ่งส่วนผสมทางเคมีของลวดเชื่อมดังแสดงในตารางที่ 3 และรายละเอียดเงื่อนไขที่ใช้ในการเชื่อม ดังแสดงในตารางที่ 4

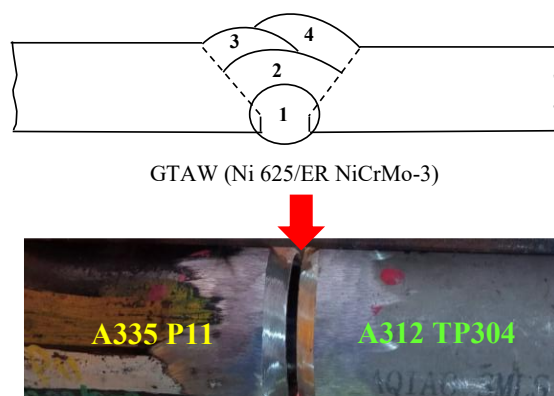
ตารางที่ 3 ส่วนผสมทางเคมีของลวดเชื่อม SMT-625 (ER NiCrMo-3) [6]

C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Nb+Ta
0.02	0.20	0.03	0.006	0.001	22.0	64.0	9.00	3.60

ตารางที่ 4 เงื่อนไขการเชื่อมด้วยกระบวนการเชื่อมอาร์คทั้งสแตนเลสสเปคคูลัม (GTAW)

ชนิดลวดเชื่อม	Ni 625/ER NiCrMo-3
ขนาดลวดเชื่อม /หรือเส้นผ่านศูนย์กลาง (มม.)	2.4
แรงดันไฟฟ้า (โวลต์)	14
กระแสเชื่อม (แอมแปร์)	120
ความเร็วในการเชื่อม (มม./นาที)	13.7
ปริมาณการไหลของแก๊สสเปคคูลัม (ลิตร/นาที)	16 (Argon)

2.4 การเตรียมชิ้นงานทดสอบ สำหรับศึกษาโครงสร้างจุลภาคและสมบัติเชิงกลของรอยเชื่อมระหว่างเหล็ก ASTM A335 P11 และเหล็กกล้าไร้สนิม เกรด A312 TP304 ด้วยกระบวนการเชื่อมอาร์คทั้งสแตนเลสสเปคคูลัม (GTAW) ตามมาตรฐาน AWS D1.1 โดยทำการทดลอง 3 ครั้ง ซึ่งถูกกำหนดรอยต่อและลำดับการเชื่อมแต่ละแนว แสดงดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 การเตรียมชิ้นงานและการกำหนดลำดับการเชื่อมตามกระบวนการเชื่อมอาร์คทั้งสแตนเลสสปีคคูลม (GTAW)

2.5 การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของรอยเชื่อม

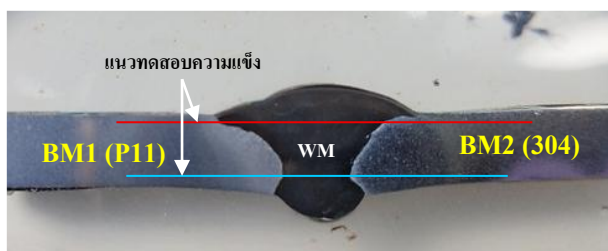
รอยเชื่อมที่ถูกเชื่อมด้วยกระบวนการเชื่อมอาร์คทั้งสแตนเลสสปีคคูลม (GTAW) ระหว่างวัสดุที่แตกต่างกัน 2 ชนิด คือ เหล็ก ASTM A335 P11 และเหล็กกล้าไร้สนิม เกรด A312 TP304 ถูกตรวจสอบโครงสร้างมหภาคและวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคบริเวณความกว้างและความสูงของรอยเชื่อม ลักษณะการซึมลึกของรอยเชื่อม และจุดบกพร่องของแนวเชื่อมหรือภายในรอยเชื่อม และบริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อนในกระบวนการเชื่อม โดยใช้กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (Light microscope) เพื่อตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคบริเวณเนื้อโลหะเดิม (Base metal: BM) บริเวณแนวเชื่อม (Weld metal zone: WM) และบริเวณกระทบร้อน (Heat affected zone: HAZ) และ ตามมาตรฐาน ASTM E340 และ E407

2.6 การทดสอบแรงดึง (Tensile Test)

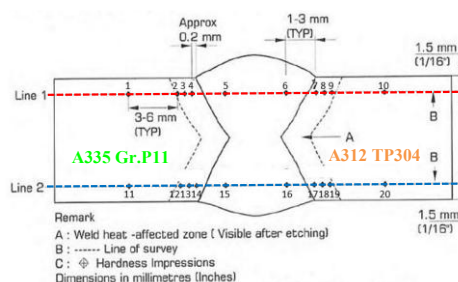
ชิ้นงานทดสอบรอยเชื่อมถูกทดสอบแรงดึงเพื่อหาสมบัติทางกลของรอยเชื่อม โดยใช้เครื่องทดสอบแรงดึง ยี่ห้อ INSTRON รุ่น 8801 ขนาด 10 ตัน โดยทำการทดสอบตามยาวของเนื้อโลหะเชื่อม (Weld Metal) ตามมาตรฐาน ASTM E8M-22

2.7 การทดสอบความแข็ง (Hardness Testing)

ชิ้นงานทดสอบรอยเชื่อมถูกทดสอบความแข็งของรอยเชื่อมด้วยการทดสอบความแข็งแบบวิกเกอร์ด้วยเครื่องทดสอบความแข็ง SHIMADZU รุ่น HMV-G ตามมาตรฐาน ASTM E3-11 ใช้แรงกด 200 kgf เวลาทดสอบ 15 วินาที เพื่อเปรียบเทียบความแข็งบริเวณแนวเชื่อม บริเวณกระทบร้อน และบริเวณโลหะงาน ตามลำดับ การเตรียมชิ้นงานทดสอบและตำแหน่งการทดสอบความแข็งของรอยเชื่อม แสดงดังรูปที่ 3



(ก) แนวทดสอบความแข็ง



(ข) ตำแหน่งการทดสอบความแข็ง

รูปที่ 3 การเตรียมชิ้นงานสำหรับทดสอบความแข็ง

2.9 การทดสอบความต้านทานแรงกระแทก (Impact Test)

ชิ้นงานทดสอบรอยเชื่อมถูกทดสอบความต้านทานแรงกระแทกด้วยการทดสอบแรงกระแทกแบบชาร์ปี (Charpy impact Test) เพื่อประเมินค่าความเหนียวหรือวัดค่าพลังงานที่ดูดซับไว้ของวัสดุทดสอบ โดยกำหนดลักษณะของชิ้นงานทดสอบที่ถูกกำหนดตามมาตรฐาน ASTM A370-21 จำนวน 3 ชิ้นตัวอย่าง/ต่อหนึ่งจุดทดสอบของรอยเชื่อมที่ได้จากชิ้นงาน

ตัวอย่าง บริเวณแนวเชื่อม (Weld metal) บริเวณกระทบร้อน (HAZ) A335 Gr.P11 และ บริเวณกระทบร้อน (HAZ) A312 TP304 แสดงตัวอย่างชิ้นงานทดสอบดังในรูปที่ 4



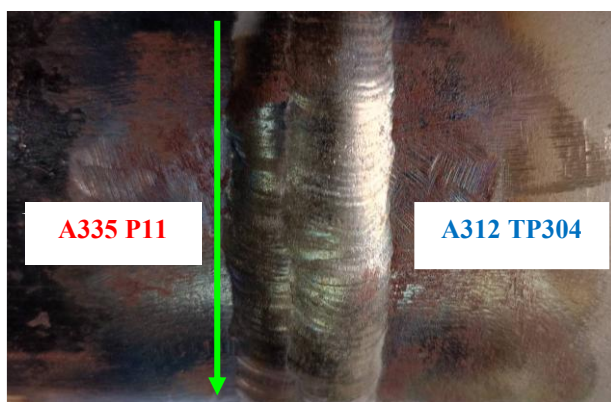
รูปที่ 4 การเตรียมชิ้นงานสำหรับทดสอบการกระแทก

3. ผลการทดลอง

3.1 ผลการตรวจสอบโครงสร้างมหภาคและจุลภาคของรอยเชื่อม

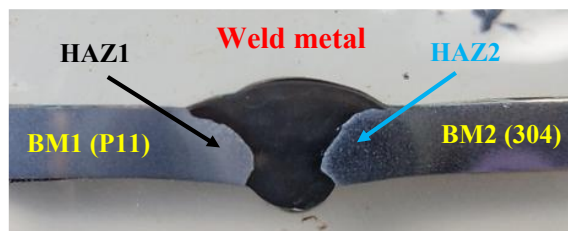
3.1.1 ผลการตรวจสอบทางกายภาพ ลักษณะทางกายภาพของรูปร่างแนวเชื่อมดังรูปที่ 5 การเกิดเม็ดโลหะบริเวณของ ชิ้นงาน ลักษณะผิวหน้าของแนวเชื่อม การซึมลึก การหลอมละลาย ระหว่างชั้นของเนื้อเชื่อมกับโลหะงาน ความกว้างบริเวณเขตอิทธิพลทางความร้อน และจุดบกพร่องของแนวเชื่อม พบว่ากระบวนการเชื่อมแบบ GTAW เกร็ดแนวเชื่อมมีความเรียบสม่ำเสมอ ลักษณะการซึมลึกและการหลอมละลายระหว่างเนื้อเชื่อมกับ โลหะงานสม่ำเสมอ และมีความสมบูรณ์ระหว่างเนื้อเชื่อมและโลหะงานความกว้างของบริเวณอิทธิพลทางความร้อนของกระบวนการเชื่อมใกล้เคียงกัน และไม่มีจุดบกพร่องของแนวเชื่อม

Welding direction

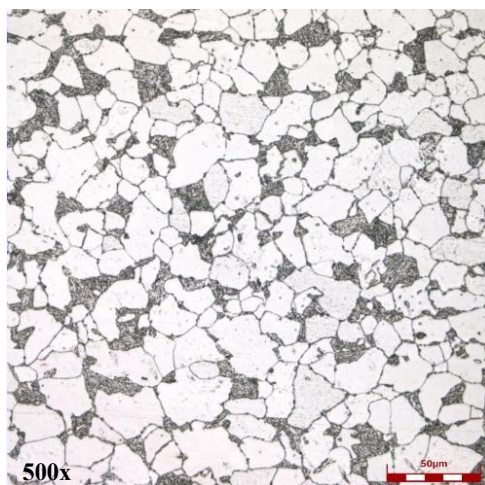


รูปที่ 5 ลักษณะทางกายภาพและโครงสร้างมหภาค

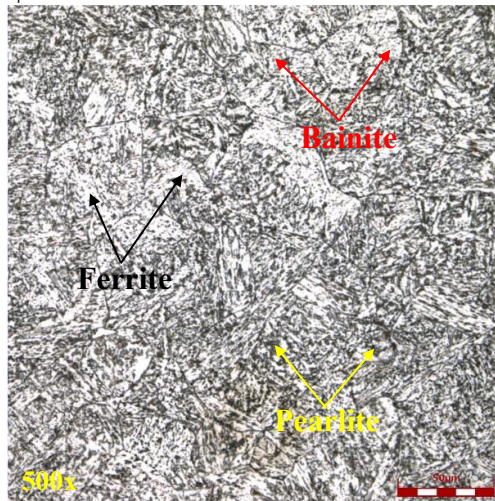
3.1.2 การตรวจสอบโครงสร้างทางจุลภาคด้วยกล้องจุลภาคแบบใช้แสง (OM) รูปที่ 6 จะเป็นภาพตำแหน่งที่ทำการตรวจสอบทั้ง 5 จุด รูปที่ 7 เป็นภาพบริเวณเนื้อโลหะงานของเหล็ก A335 P11 (Base metal: BM1) ที่กำลังขยาย 500 เท่า 50 μm โครงสร้างจุลภาคประกอบด้วยเฟอร์ไรต์และเพิร์ลไลต์ รวมถึงเบนไนต์และคาร์ไบด์ที่เป็นเม็ดเล็กๆ จำนวนเล็กน้อย [2] รูปที่ 8 เป็นภาพในบริเวณแนวพื้นที่กระทบร้อนต่อการเชื่อมของท่อเหล็ก ASTM A335 P11 (Heat affected zone: HAZ1) ที่กำลังขยาย 500 เท่า 50 μm โครงสร้างจุลภาคประกอบด้วยเพิร์ลไลต์ เฟอร์ไรต์ เบนไนต์ที่เป็นเม็ด และคาร์ไบด์ที่เป็นเม็ดเล็กๆ บางชนิด เฟอร์ไรต์หยาบบางตัวจะกระจายไปตามขอบเกรนในลักษณะของโครงตาข่าย และมีคาร์ไบด์จำนวนเล็กน้อย [2]



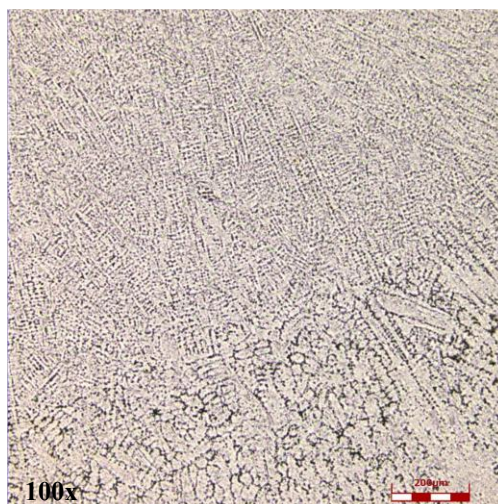
รูปที่ 6 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์แบบแสงของรอยเชื่อมเหล็ก ASTM A335 P11 และเหล็กกล้าไร้สนิม A312 TP304



รูปที่ 7 โครงสร้างจุลภาคในบริเวณโลหะงานของเหล็ก A335 P11 (Base metal: BM1)



รูปที่ 8 โครงสร้างจุลภาคในบริเวณแนวพื้นที่กระทบร้อน (Heat affected zone: HAZ1)

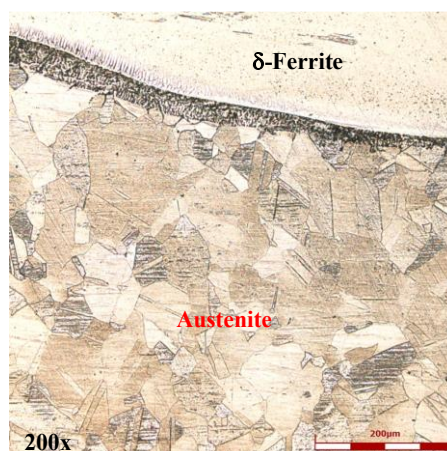


รูปที่ 9 โครงสร้างจุลภาคในบริเวณแนวเชื่อม (Weld metal zone: WM)

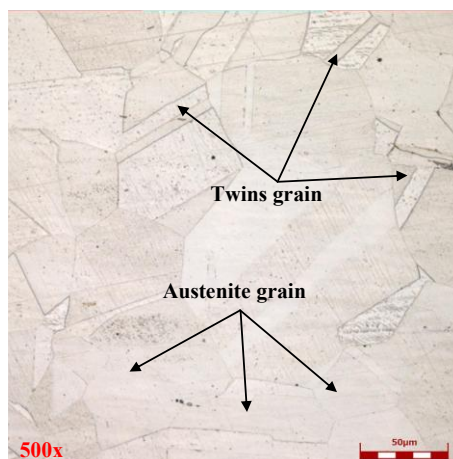
ตารางที่ 5 ผลการตรวจสอบทางเคมีของบริเวณแนวเชื่อม (Weld metal) (%wt)

Element	Ni	Cr	Fe	Mo	Nb
Wt%	59.28	23.89	6.04	7.08	3.71

รูปที่ 9 โครงสร้างจุลภาคในบริเวณแนวเชื่อม (Weld metal zone: WM) ที่กำลังขยาย 100 เท่า 200 μm ประกอบด้วยเดนไดรต์เฟอร์ไรต์ และ เมทริกซ์ออสเทนไนต์ พร้อมกันนี้ยังมีการตรวจสอบส่วนผสมทางเคมีด้วยเทคนิค EDS (Energy dispersive spectroscopy) โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ผลของการวิเคราะห์ พบว่ามีปริมาณธาตุโดยส่วนใหญ่เป็นส่วนประกอบของลวดเชื่อมที่มีธาตุเหล็กมากที่สุด ส่วนธาตุอื่นๆ จะมีรายละเอียดดังแสดงในตารางที่ 5 รูปที่ 10 เป็นภาพในบริเวณแนวพื้นที่กระทบร้อนต่อการเชื่อมของท่อเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด A312 TP304 (Heat affected zone: HAZ2) ที่กำลังขยาย 200 เท่า 200 μm โครงสร้างจุลภาคของโลหะเชื่อมทั้งสองประกอบด้วยเดนไดรต์เฟอร์ไรต์ปฐมภูมิ กับออสเทนไนต์ระหว่างเดนไดรต์ เป็นที่น่าสนใจว่าทั้งสองมีปริมาณเดลต้าเฟอร์ไรต์ค่อนข้างสูง อาจเนื่องมาจากผลกระทบของปริมาณคาร์บอนต่ำในโลหะตัวเดิมทั้งสองตัวในการเชื่อมในงานนี้ ซึ่งสอดคล้องกับบทบาทที่คาร์บอนมีแนวโน้มที่จะทำให้เฟสออสเทนไนต์เสถียรในโลหะเชื่อม [2] รูปที่ 11 เป็นภาพบริเวณเนื้อโลหะงานของเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด A312 TP304 (Base metal: BM2) ที่กำลังขยาย 500 เท่า 50 μm โครงสร้างจุลภาคโดยทั่วไปเป็นสแตนเลสชนิดออสเทนนิติกแบบทวิน [2]



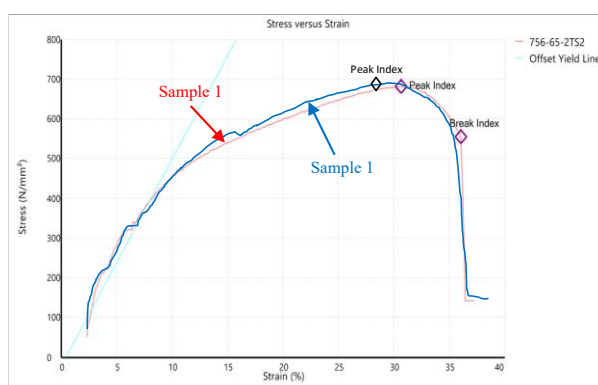
รูปที่ 10 โครงสร้างจุลภาคในบริเวณแนวพื้นที่กระทบร้อน (Heat affected zone: HAZ2)



รูปที่ 11 โครงสร้างจุลภาคในบริเวณเนื้อโลหะเดิมของเหล็กกล้าไร้สนิม A312 TP304 (Base metal: BM2)

3.2 ผลการทดสอบความต้านทานแรงดึง (Tensile test)

ผลการทดสอบแรงดึงจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของชิ้นงานเชื่อมตัวอย่างในรูปที่ 12 พบว่าความเค้นทั้งหมดมีค่าใกล้เคียงกันเนื่องจากการแตกหักจากของชิ้นงานอันเป็นผลจากการทดสอบแรงดึง อย่างไรก็ตามยังตรวจพบว่าการแตกหักทั้งหมดเกิดขึ้นในบริเวณพื้นที่กระแทกร้อน A335 P11 (HAZ) [7] ดังแสดงในรูปที่ 13 ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าส่วนที่เปราะบางที่สุดของชิ้นงานเชื่อมตัวอย่างคือบริเวณพื้นที่กระแทกร้อน A335 Gr.P11 (HAZ) ดังแสดงไว้ในตารางที่ 5



รูปที่ 12 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียด



รูปที่ 13 การแตกหักทั้งหมดของชิ้นงานตัวอย่างเกิดขึ้นในบริเวณบริเวณพื้นที่กระแทกร้อน A335 P11 (HAZ) หลังการทดสอบแรงดึง

ตารางที่ 5 ผลการทดสอบแรงดึง

ชิ้นงาน	Yield strength (MPa)	UTS (MPa)	Elongation %	Location of fracture
1	325	670	10.14	A335 Gr.P11 HAZ
2	330	681	10.62	A335 Gr.P11 HAZ

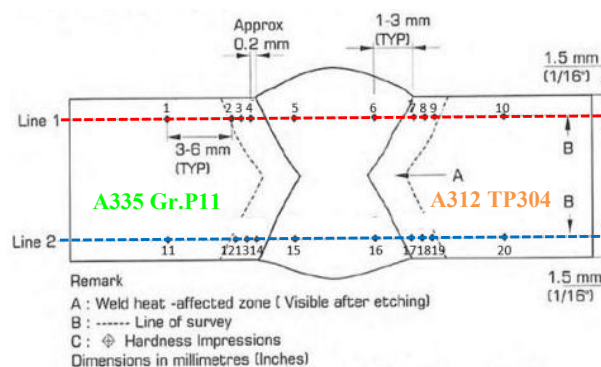
3.3 ผลการทดสอบค่าความแข็ง (Hardness test)

ตำแหน่งของบริเวณจุดทดสอบดังแสดงในรูปที่ 14 ผลจากการทดสอบความแข็งจากกระบวนการเชื่อมแบบ GTAW ดังแสดงในรูปที่ 15 โปรไฟล์ความแข็งของรอยเชื่อมแบ่งออกเป็น 5 โซน ได้แก่ บริเวณโลหะงาน (Base metal: BM P11) บริเวณพื้นที่กระทบร้อน (Heat affected zone: HAZ P11) บริเวณแนวเชื่อม (Weld metal: WM) บริเวณพื้นที่กระทบร้อน (Heat affected zone: HAZ TP304) และบริเวณโลหะงาน (Base metal: BM TP304) [2]

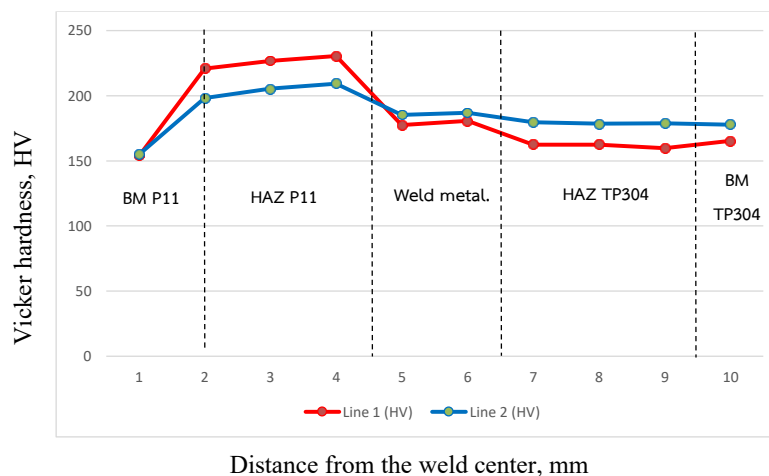
แนวโน้มของการค่าความแข็งในแต่ละบริเวณจุดทดสอบทั้ง 10 จุด ในแนวเส้นที่ 1 (เส้นสีแดง) พบว่ามีค่าความแข็งมากที่สุดในจุดที่ 4 บริเวณพื้นที่กระทบร้อนเท่ากับ 230.4 HV และค่าความแข็งได้น้อยที่สุดคือจุดที่ 1 บริเวณโลหะงาน BM P11 เท่ากับ 153.8 HV และบริเวณพื้นที่กระทบร้อน (HAZ P11) จากตำแหน่งจุดทดสอบที่ 2 - 4 จะมีค่าความแข็งที่สูงกว่าบริเวณแนวเชื่อมเล็กน้อย (WM) ตำแหน่งจุดทดสอบที่ 5 - 6 แต่ค่าความแข็งจะสูงกว่าบริเวณพื้นที่กระทบร้อน (HAZ TP304) ที่จุด 7-9

ส่วนแนวโน้มของการค่าความแข็งในแต่ละบริเวณจุดทดสอบทั้ง 10 จุด ในแนวเส้นที่ 2 (เส้นสีน้ำเงิน) พบว่ามีค่าความแข็งมากที่สุดในจุดที่ 4 บริเวณพื้นที่กระทบร้อนเท่ากับ 209.3 HV และค่าความแข็งได้น้อยที่สุดคือจุดที่ 1 บริเวณโลหะงาน BM P11 เท่ากับ 154.9 HV และบริเวณอิทธิพลทางความร้อน (HAZ P11) จากตำแหน่งจุดทดสอบที่ 2 - 4 จะมีค่าความแข็งที่สูงกว่าบริเวณแนวเชื่อมเล็กน้อย (WM) ตำแหน่งจุดทดสอบที่ 5 - 6 แต่ค่าความแข็งจะสูงกว่าบริเวณพื้นที่กระทบร้อน (HAZ TP304) ที่จุด 7-9

จากการทดสอบพบว่าบริเวณเนื้อเชื่อมเมื่อได้รับความร้อนจากการเชื่อมทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างกลายเป็นโครงสร้างของแข็งจึงส่งผลต่อค่าความแข็งที่เพิ่มขึ้น และกระบวนการเชื่อมบริเวณอิทธิพลทางความร้อนที่อยู่ติดกับบริเวณโลหะงานจะมีค่าความแข็งที่มากกว่าบริเวณเนื้อเชื่อมแต่จะมากกว่าบริเวณเนื้อโลหะงาน และจะให้ผลที่เหมือนกันทั้ง 2 เส้นของการทดสอบ [2]



รูปที่ 14 บริเวณตำแหน่งจุดทดสอบทั้ง 10 จุด



รูปที่ 15 ผลการทดสอบความแข็งแบบวิกเกอร์

3.3 ผลการทดสอบการดัดโค้ง (Bending test)

ผลการทดสอบการดัดโค้งได้ชิ้นงานเชื่อมตัวอย่าง 4 ชิ้น ทดสอบที่อุณหภูมิ 25°C (อุณหภูมิห้อง) ค่าความขึ้นสัมพัทธ์ 50% เมื่อทำการดัดจนถึงมุมโค้ง 180° ดังในตารางที่ 6 เมื่อทำการตรวจสอบด้วยสายตาไม่พบรอยร้าวของชิ้นงานตัวอย่างทั้งหมด จากผลการทดสอบและการวิเคราะห์ สรุปได้ว่ากระบวนการเชื่อมในชิ้นงานทั้งหมดนี้มีคุณภาพสูง [7]

ตารางที่ 6 ผลการทดสอบการดัดโค้งของชิ้นงานตัวอย่างทั้ง 4 ชิ้น

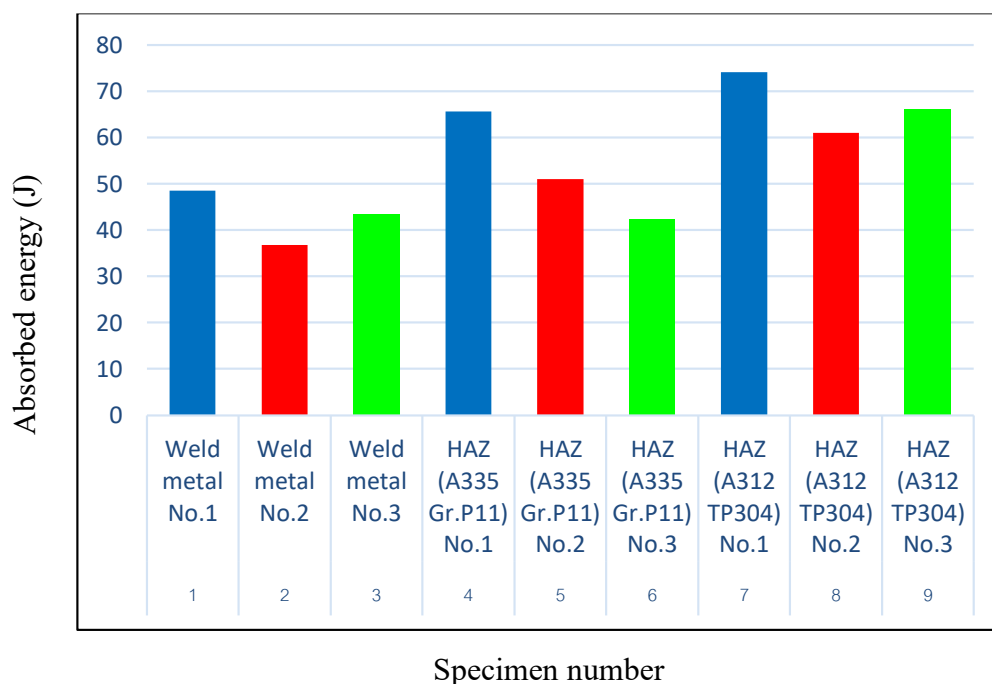
ชิ้นงาน	Mandrel Diameter (mm)	Bend Angle (degree)	Visually examined result for surface discontinuity
1	22	180°	No Surface Discontinuity
2	22	180°	No Surface Discontinuity
3	22	180°	No Surface Discontinuity
4	22	180°	No Surface Discontinuity

3.4 การทดสอบความต้านทานแรงกระแทก (Impact Test)

ชิ้นงานทดสอบถูกทดสอบแรงกระแทกแบบชาร์ปี (Charpy impact Test) ที่อุณหภูมิ 25°C (อุณหภูมิห้อง) พลังงานที่ดูดซับเป็นฟังก์ชันของอุณหภูมิทดสอบและลักษณะการแตกหักของชิ้นงานหลังการทดสอบแบบชาร์ปีดังแสดงในรูปที่ 16 ปริมาณพลังงานดูดซับของชิ้นงานที่ผ่านการทดสอบแบบชาร์ปีทั้งหมดดังแสดงในรูปที่ 17 และตารางที่ 7 จะเห็นได้ว่าพลังงานดูดซับเฉลี่ยบริเวณพื้นที่กระแทกร้อน HAZ (A312 TP304) มีค่ามากที่สุดเท่ากับ 87.53 J ในขณะที่พลังงานดูดซับเฉลี่ยบริเวณพื้นที่กระแทกร้อน HAZ (A335 Gr.P11) มีค่ารองลงมาเท่ากับ 64.47 J และ พลังงานดูดซับเฉลี่ยบริเวณแนวเชื่อม (Weld metal) มีค่าน้อยที่สุดเท่ากับ 48.73 J สรุปได้ว่าพลังงานดูดซับเฉลี่ยบริเวณพื้นที่กระแทกร้อน HAZ (A312 TP304) มีความเหนียวที่ดีกว่าบริเวณพื้นที่กระแทกร้อน HAZ (A335 Gr.P11) และ บริเวณแนวเชื่อม [8]



รูปที่ 16 ลักษณะชิ้นงานตัวอย่างภายหลังการทดสอบแรงกระแทก



รูปที่ 17 ปริมาณพลังงานดูดซับของชิ้นงานหลังการทดสอบแรงกระแทกแบบชาร์ปี

ตารางที่ 7 ผลการทดสอบแรงกระแทก

ชิ้นงาน	Location of Charpy V-Notch	Absorbed energy (J)	
		Individual	Average
1	Weld metal	44.7	48.73
2		46.6	
3		54.9	
4	HAZ (A335 Gr.P11)	32.7	64.47
5		89.6	
6		71.1	
7	HAZ (A312 TP304)	89.2	87.53
8		86.5	
9		86.9	

4. สรุปผลการทดลอง

การศึกษาสัมบัติทางกลและโครงสร้างทางโลหะวิทยาของการเชื่อมเหล็ก A335 P11 และ A312 TP304 ด้วยกระบวนการก๊าซทั้งสแตนอาร์ค (GTAW) โดยมีการวิเคราะห์โครงสร้างทางมหภาคและจุลภาคของโลหะทั้ง 2 ชนิด สัมบัติทางกล ข้อสรุปที่ได้จากการตรวจสอบสามารถอธิบายได้ดังนี้

1) การตรวจสอบโครงสร้างทางมหภาค พบว่า ลักษณะการเชื่อมและการหลอมละลายระหว่างเนื้อเชื่อมกับ โลหะงานสม่ำเสมอ และมีความสมบูรณ์ระหว่างเนื้อเชื่อมและโลหะงาน ความกว้างของเขตบริเวณอิทธิพลทางความร้อนของกระบวนการเชื่อมใกล้เคียงกัน และไม่มีจุดบกพร่องของแนวเชื่อม

2) โครงสร้างจุลภาคในบริเวณแนวเชื่อมประกอบด้วยเดนไดรต์เฟอร์ไรต์และเมทริกซ์ออสเทนไนต์ นอกจากนี้ ผลการตรวจสอบองค์ประกอบทางเคมีโดยใช้เทคนิค EDS พบธาตุหลายชนิดซึ่งเป็นส่วนผสมทางเคมีของลวดเชื่อม โดยนิกเกิลมีปริมาณสูงสุดที่ 59.28 %wt รองลงมาคือโครเมียมที่ 23.89 %wt ในบริเวณแนวเชื่อมของชิ้นงานตัวอย่างที่ใช้ทดลองนี้

3) การทดสอบแรงดึงในชิ้นงานตัวอย่าง 2 ชิ้น พบว่ามีสมบัติทางกลที่ใกล้เคียงกัน อย่างไรก็ตาม การแตกหักทั้งหมดเกิดขึ้นในบริเวณพื้นที่กระแทกร้อน A335 P11 (HAZ)

4) ผลการทดสอบความแข็ง พบว่าค่าความแข็งสูงสุดอยู่ที่บริเวณพื้นที่กระแทกร้อน (HAZ P11) เท่ากับ 230.4 HV และค่าความแข็งต่ำสุดอยู่ที่โลหะฐาน (BM P11) เท่ากับ 153.8 HV เมื่อบริเวณโลหะเชื่อมได้รับความร้อนจากการเชื่อม จะทำให้โครงสร้างเปลี่ยนไปเป็นโครงสร้างแข็ง ส่งผลให้ค่าความแข็งเพิ่มขึ้น ในกระบวนการเชื่อม บริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อนที่อยู่ติดกับโลหะฐานจะมีค่าความแข็งสูงกว่าบริเวณแนวเชื่อมแต่สูงกว่าบริเวณโลหะงาน

5) การทดสอบการดัดของตัวอย่างชิ้นงาน เมื่อทำการดัดจนถึงมุมโค้ง 180° และทำการตรวจสอบด้วยสายตาไม่พบรอยร้าวของชิ้นงานตัวอย่างทั้งหมด จากผลการทดสอบและการวิเคราะห์ สรุปได้ว่ากระบวนการเชื่อมในชิ้นงานทั้งหมดนี้มีคุณภาพสูง

6) ผลการทดสอบแรงกระแทกแสดงให้เห็นว่าพลังงานที่ดูดซับเฉลี่ยในโซนที่ได้รับผลกระทบจากความร้อน HAZ (A312 TP304) มีค่าสูงสุดที่ 87.53 J ในขณะที่พลังงานที่ดูดซับเฉลี่ยในบริเวณพื้นที่กระแทกจากความร้อน HAZ (A335 P11) มีค่าสูงสุดเป็นอันดับสองที่ 64.47 J และพลังงานที่ดูดซับเฉลี่ยในแนวเชื่อมมีค่าต่ำสุดที่ 48.73 J จะเห็นได้ว่าพลังงานดูดซับเฉลี่ยบริเวณพื้นที่กระแทกร้อน HAZ (A312 TP304) มีความเหนียวที่ต่ำกว่าบริเวณพื้นที่กระแทกร้อน HAZ (A335 P11) และบริเวณแนวเชื่อม

5. เอกสารอ้างอิง

- [1] Koch Applied Solutions. (2025, January 20). Steam & Hot Water Boilers [Online]. Available: <https://www.kochapplied.com/blog/boilers-101/>.
- [2] Rakesh Chaudhari and Asha Ingle, "Experimental Investigation of Dissimilar Metal Weld of SA335 P11 and SA312 TP304 Formed by Gas Tungsten Arc Welding (GTAW)," Trans Indian Inst Met, vol. 72, 2019, pp. 1145-1152.
- [3] Vipin Tandon, Awanikumar P. Patil, Suhas Kowshik, "Impact of Filler Electrodes on Welding Properties of Dissimilar Welded 316L/ 201 Austenitic Stainless Steels." Engineering proceedings. vol. 59, 2023, pp. 90.
- [4] Octalsteel. (2025, January 20). ASTM A335 P11 Pipe Specification (Chrome Moly Seamless Pipe) [Online]. Available: <https://www.octalsteel.com/resources/astm-a335-p11-pipe/>.
- [5] Octalsteel. (2025, January 20). ASTM A312 Stainless Steel Pipe Specification [Online]. Available: <https://www.octalsteel.com/resources/astm-a312-tp304-tp316-ss-pipe/>.
- [6] SMT-625. (2025, January 20). AWS A5.14/ ASME SFA5.14 ERNiCrMo-3 [Online]. Available: <https://arcweldingservice.com/content/file/product/0618201592461732.pdf>.
- [7] Chang'an Li, Guoliang Qin, Yuansheng Tang, Binggang Zhang, Sanbao Lin, Peihao Geng, "Study on the Mechanical Performance of Dissimilar Butt Joints between Low Ni Medium-Mn and Ni-Cr Austenitic Stainless Steels Processed by Gas Tungsten Arc Welding." Metals. vol. 11, 2021, pp. 1439.
- [8] Sachin Sirohi, Shailesh M. Pandey, Aleksandra Swierczyńska, Grzegorz Rogalski, Naveen Kumar, Michał Landowski, Dariusz Fydrych, Chandan Pandey, "Microstructure and Mechanical Properties of Combined GTAW and SMAW Dissimilar Welded Joints between Inconel 718 and 304L Austenitic Stainless Steel." Metals. vol. 13, 2023, pp. 14.

การศึกษาอิทธิพลของขนาดชิ้นงานทดสอบตามมาตรฐาน ASTM E8M ต่อสมบัติทางกล สำหรับวัสดุอะลูมิเนียม 6063

Studying Influence of Dimensional Sample of ASTM E8M on Mechanical Properties for Aluminum 6063 Material

ปิยะพงษ์ คำคุณ¹, ไพบุณย์ หาญมนต์² และ เจษฎา แก้ววิชิต^{3*}

^{1,2}ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกลและอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ

2 ถนนนางลิ้นจี่ แขวงทุ่งมหาเมฆ เขตสาทร จังหวัดกรุงเทพฯ 12120

³สาขาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ (ศูนย์สุพรรณบุรี)

450 ม. 6 ถนนสุพรรณบุรี-ชัยนาท ตำบลย่านยาว อำเภอสามชุก จังหวัดสุพรรณบุรี 72130

Piyapong Kumkoon¹, Paiboon Hanmon² and Jesada Kaewwichit^{3*}

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

Rajamangala University of Technology Krungthep,

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

³Department 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, Thailand

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

(Received: June 01, 2026 / Revised: June 17, 2026 / Accepted: June 23, 2026)

บทคัดย่อ

การทดสอบแรงดึงเป็นกระบวนการพื้นฐานสำหรับการประเมินความสามารถในการรับแรงดึงของวัสดุซึ่งเป็นที่ยอมรับโดยทั่วกัน การจัดเตรียมวัสดุชิ้นงานอะลูมิเนียม 6063 สำหรับการทดสอบแรงดึงตามมาตรฐาน ASTM E8M มีการกำหนดชิ้นงานเป็นขนาดมาตรฐาน (Standard Specimens) และขนาดชิ้นงานแบบย่อส่วน (Subsize Specimen) สำหรับชิ้นงานแผ่นบาง (Sheet Type) ซึ่งตามมาตรฐานมีความแตกต่างทางด้านของขนาดชิ้นงาน อย่างไรก็ตามยังมียังมีงานวิจัยน้อยมากที่บ่งชี้ถึงความแตกต่างของขนาดชิ้นงานที่ส่งผลต่อสมบัติทางกลในการทดสอบแรงดึง โดยงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินผลกระทบทางด้านของขนาดวัสดุชิ้นงานและต้นทุนในการจัดเตรียมวัสดุชิ้นงานโดยกระบวนการตัดโลหะด้วยลวดไฟฟ้าและในแต่ละเงื่อนไขการทดลองถูกทำซ้ำจำนวน 3 ครั้ง ผลจากการทดลอง พบว่า ชิ้นงานทดสอบขนาดมาตรฐานมีค่าความเค้นครากตัวและความเค้นสูงสุดมีค่าเป็น 224.36 และ 244.42 นิวตัน/ตารางมิลลิเมตร ในขณะที่ชิ้นงานแบบย่อขนาดมีค่าเป็น 268.00 และ 298.65 นิวตัน/ตารางมิลลิเมตร ตามลำดับ โดยในส่วนของความเครียดสำหรับชิ้นงานทดสอบแบบมาตรฐานและแบบย่อขนาดมีผลรายงานเป็น 17.26 และ 15.39 เปอร์เซ็นต์ จึงทำให้สามารถสรุปได้ว่า ชิ้นงานทดสอบขนาดมาตรฐานมีผลรายงานค่าความเค้นต่ำกว่าชิ้นงานแบบย่อขนาดแต่รายงานผลความเครียดจะสูงกว่าชิ้นงานทดสอบแบบย่อขนาด อย่างไรก็ตามการจัดเตรียมขนาดวัสดุชิ้นงานโดยกระบวนการตัดโลหะด้วยไฟฟ้าสำหรับชิ้นงานแบบย่อส่วนประเมินจากเวลาที่ใช้ในการตัด แสดงให้เห็นว่าการตัดเตรียมชิ้นงานขนาดเล็กจะช่วยลดเวลาในการตัดลงโดยประมาณ 49.94 เปอร์เซ็นต์ นอกจากนี้ปริมาณวัสดุชิ้นงานสำหรับการทดสอบแบบย่อขนาดจะลดลง 75.66 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเปรียบเทียบกับทดสอบโดยใช้ชิ้นงานแบบมาตรฐาน

คำสำคัญ: การทดสอบแรงดึง, มาตรฐาน ASTM E8M, อะลูมิเนียม

Abstract

Tensile testing is a fundamental and widely accepted process for evaluating the strength of materials. The preparation of testing specimens of aluminum 6063 for ASTM E8M was standard and sub-size sample for the sheet type. According to the testing standards, there are differences in the size of the workpiece. However, a few of studying has indicated on the effect of differences in sample size on the mechanical properties tensile testing. This research aims to evaluate the influence of the sample size of specimen on the mechanical properties and preparation costs with using the wire electric discharge machining process. The experiments were replicated 3 times for any testing conditions. The experiments showed that the standard-sized test pieces had yield stress and maximum stress values of 224.36 and 244.42 N/mm², while the subsize specimens have values of 268.00 and 298.65 N/mm², respectively. The reported stress values for standard and subsize testing specimens were 17.26 and 15.39 percent, respectively. Therefore, it can be concluded that the standard specimen reported the testing results of higher stress more than subsize but the strain represented lower value. However, the prepared specimen of with wire electrical discharge machining process was estimated based on the machining time. The sub-size specimen was reduced the machining time by approximately 49.94 percent. In addition, the raw material volume of subsize sample less required by 75.66 percent compared to testing using standard size of specimen.

Keywords: Tensile Testing, Standard ASTM E8M, Aluminum

1. บทนำ

การทดสอบแรงดึง (Tensile test) เป็นกระบวนการทดสอบสมบัติทางกล (Mechanical test) ขั้นพื้นฐานพื้นฐานเพื่อบ่งชี้ถึงความสามารถในการใช้งานของวัสดุในเชิงวิศวกรรม ภายใต้พื้นฐานของความต้านทานแรงภายนอกที่กระทำที่ส่งผลต่อการต้านทานและการเปลี่ยนรูปของวัสดุภายใต้ नियามของการเปลี่ยนรูปแบบยืดหยุ่น (Elastic deformation) และการเปลี่ยนรูปแบบถาวร (Plastic deformation) การทดสอบแรงดึงภายใต้มาตรฐานสากลซึ่งเป็นที่ยอมรับในระบบมาตรฐานเมตริก (ASTM E8M) สำหรับวัสดุที่เป็นโลหะแผ่นบาง (Sheet metal) โดยขนาดวัสดุขึ้นทดสอบแบ่งออกเป็นขนาดมาตรฐาน (Standard specimen) และขนาดแบบย่อ (Subsize specimen) ซึ่ง Sabdin และคณะ [1] เลือกเตรียมชิ้นงานทดสอบแบบย่อขนาดสำหรับการศึกษาอิทธิพลของการเตรียมวัสดุชิ้นงานเหล็กกล้ารีดเย็น (Cold Rolled Commercial Steel, SPCC) แบบขนาดมาตรฐานและแบบสี่เหลี่ยมผืนผ้า ทั้งนี้ถึงแม้ว่าผลลัพธ์จากชิ้นงานรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าจะดูมีความสม่ำเสมอว่าในบางกรณีแต่ก็ต้องตีความอย่างระมัดระวังเนื่องจากการกระจายความเค้น Kumar และคณะ [2] ศึกษาอิทธิพลของปริมาณแมกนีเซียมต่อคุณสมบัติแรงดึงและพฤติกรรมการเสียรูปของแผ่นโลหะผสม อะลูมิเนียม-แมกนีเซียม-ซิลิกอน โดยเลือกใช้ชิ้นงานทดสอบแบบย่อขนาด ผลจากการทดลอง พบว่า โลหะผสม Al-3.1 Mg-Si แสดงให้เห็นถึงคุณสมบัติทางกลที่เหนือกว่าโดยมีค่าความแข็งแรงครากและความแข็งแรงดึงสูงกว่าแผ่นโลหะผสม Al-0.9 Mg-Si โดยประมาณ 1.8 เท่า

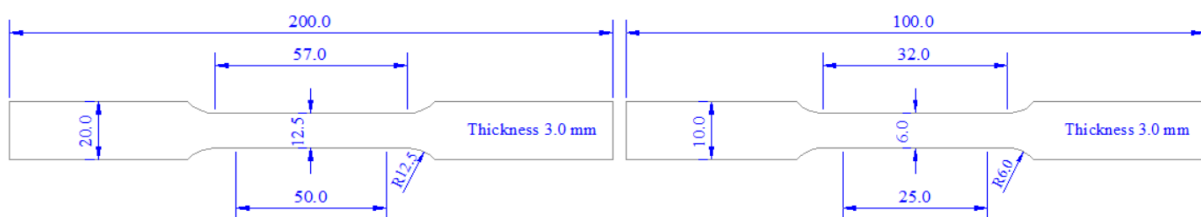
การแปรรูปด้วยกระบวนการทางกล (Conventional Machining) เป็นกระบวนการแปรรูปโดยใช้เครื่องมือคมตัดสำหรับการตัดเฉือนวัสดุชิ้นงานเพื่อให้เกิดเป็นรูปทรงที่ต้องการโดยในกระบวนการตัดเฉือนจะทำให้เกิดเศษ (Chip) โดยกระบวนการกัดและกลึงเป็นกระบวนการที่นิยมใช้สำหรับการเตรียมชิ้นงานทดสอบแรงดึงที่มีลักษณะเป็นทรงกระบอก [3] และเป็นแผ่น [4] ตามลำดับ นอกจากนี้ยังมีการใช้แม่พิมพ์สำหรับการตัดเพื่อจัดเตรียมชิ้นงานในกลุ่มวัสดุที่เป็นพลาสติกซึ่งมีความแข็งแรงต่ำ ในขณะที่การแปรรูปสมัยใหม่ (Non-traditional machining) เป็นการอาศัยพลังงานเพื่อให้เกิดการจัดเนื้องานออกในรูปของอนุภาคขนาดเล็ก โดยหนึ่งในกระบวนการเหล่านั้นคือกระบวนการตัดโลหะด้วยลวดไฟฟ้า (Wire Electrical Discharge Machining, WEDM) [5] จัดเป็นหนึ่งในกระบวนการที่อาศัยความร้อนจากการควบคุมพารามิเตอร์ทางไฟฟ้าเพื่อให้เกิดการสปาร์คระหว่างวัสดุชิ้นงานกับอิเล็กโทรดภายใต้การปกคลุมด้วยของเหลวไดอิเล็กทริกที่เรียกว่าการกัดเจาะโลหะด้วยไฟฟ้า (Electrical Discharge Machining, EDM) [6] Korkmaz และคณะ [7] ประเมินผลกระทบของขนาดชิ้นงานและวิธีการเตรียมตัวอย่างต่อคุณสมบัติทางกลของแผ่น Ti-6Al-4V โดยการเตรียม

ชิ้นงานทดสอบประกอบด้วย การตัดด้วยเลเซอร์ การตัดด้วยน้ำแรงดันสูง และการตัดโลหะด้วยลวดไฟฟ้า ผลจากการทดลองพบว่า การตัดด้วยชิ้นงานทดสอบด้วย เลเซอร์ และการตัดโลหะด้วยลวดไฟฟ้าจะทำให้ได้รับผลกระทบจากกระบวนการทางความร้อนส่งผลให้เกิดการค้ำเบ้นมาตรฐานที่สูงกว่าการตัดด้วยน้ำแรงดันสูง นอกจากนี้ยังพบว่าขนาดของชิ้นงานมีผลต่อความแข็งแรงของวัสดุและแรงดึง Göğüş และคณะ [8] ศึกษาผลกระทบของวิธีการเตรียมชิ้นงานทดสอบแรงดึงต่อการออกแบบชิ้นส่วนหลักชิ้นรูปเย็น วิธีการตัดที่เลือกใช้ ได้แก่ การตัดด้วยเลเซอร์โดยใช้แก๊สออกซิเจน การตัดด้วยเลเซอร์โดยใช้ไนโตรเจน และการตัดโลหะด้วยลวดไฟฟ้า โดยผลจากการทดลอง พบว่า การตัดโลหะด้วยไฟฟ้าทำให้เกิดพื้นผิววัสดุชิ้นงานที่มีคุณภาพสูง

อะลูมิเนียมเป็นวัสดุในกลุ่มโลหะที่มีความโดดเด่นทางด้านความสามารถในการรับแรงที่สูงเมื่อเปรียบเทียบกับน้ำหนัก นิยมใช้สำหรับชิ้นส่วนยานยนต์ไฟฟ้า และอากาศยาน เนื่องจากเป็นวัสดุที่มีความสามารถในการแปรรูป (Machining) ที่สูงและสามารถขึ้นรูป (Forming) ได้ดี [9] การทดสอบแรงดึงเป็นกระบวนการ หนึ่งในกระบวนการทดสอบที่นิยมใช้ เนื่องจากสามารถบ่งชี้ถึงสมบัติการกลในการรับแรงของวัสดุ อย่างไรก็ตามในปัจจุบันนี้มีความวิจัยน้อยมากที่บ่งชี้ถึงผลกระทบของขนาดชิ้นงานมาตรฐานที่ส่งผลต่อการรายงานผลความสามารถในการรับแรงและต้นทุนในการจัดเตรียมชิ้นงานทดสอบ ดังนั้นงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินอิทธิพลของการเตรียมวัสดุชิ้นงานที่มีขนาดตามมาตรฐานและขนาดแบบย่อส่วนซึ่งส่งผลต่อสมบัติทางกลและต้นทุนในการจัดเตรียมวัสดุชิ้นงานโดยกระบวนการตัดโลหะด้วยลวดไฟฟ้า วัสดุชิ้นงานอะลูมิเนียม ผลกระทบของขนาดชิ้นงานที่มีผลต่อสมบัติทางกลประเมินจาก ความสามารถในการรับแรงดึง (ความเค้น (Stress)) ณ จุดครากตัว (Yield Strength) และความสามารถในการรับแรงสูงสุด (Ultimate Strength) ตลอดจนความสามารถในการยืดตัว (Strain) และมอดูลัสความยืดหยุ่น (Modulus of Elastic) รวมทั้งต้นทุนในการจัดเตรียมชิ้นงานทดสอบ

2. วิธีการดำเนินงาน

งานวิจัยมีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินอิทธิพลของขนาดชิ้นงานตามมาตรฐานการทดสอบแรงดึงที่ส่งผลต่อรายงานการทดสอบ วัสดุชิ้นงานทดสอบเป็นอะลูมิเนียมเกรด 6063 [10, 11] ขนาดความหนา 3 มิลลิเมตร ขนาดกำหนดตามมาตรฐาน ASTM E8M [12] ขนาดชิ้นงานทดสอบมาตรฐานสำหรับการทดสอบวัสดุแผ่นบางมีความกว้าง (Narrower width) 12.5 มิลลิเมตร ความยาวทดสอบ (Gauge length) 50 มิลลิเมตร โดยชิ้นงานทดสอบแบบย่อขนาดตามมาตรฐานบางมีความกว้าง (Narrower width) 6 มิลลิเมตร ความยาวทดสอบ (Gauge length) 25 มิลลิเมตร ดังแสดงรูปที่ 1 ก) และ ข) ตามลำดับ วัสดุชิ้นงานทดสอบถูกจัดเตรียมโดยเครื่องกัดเซาะโลหะด้วยไฟฟ้ายี่ห้อ Mitsubishi รุ่น D-Cubes MV1200S ดังแสดงในรูปที่ 2 โดยการตัดเตรียมชิ้นงานใช้ชุดคำสั่งมาตรฐานของเครื่องจักรควบคุมค่าพารามิเตอร์ทางไฟฟ้าสำหรับการสปาร์คภายใต้การปกคลุมด้วยของเหลวไดอิเล็กทริก (Dielectric fluid) ที่เป็นน้ำกลั่น (Deionized water) และใช้ลวดอิเล็กโทรดทองเหลืองที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.25 มิลลิเมตร โดยการควบคุมการเคลื่อนที่ของเครื่องจักรใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ควบคุมเชิงตัวเลข (Computer numerical control, CNC) ทั้งนี้เพื่อเป็นการหลีกเลี่ยงปัจจัยคุณภาพของพื้นผิววัสดุชิ้นงานทดสอบการตัดเตรียมวัสดุชิ้นงานทั้งสองขนาดจะถูกกระทำภายใต้เงื่อนไขควบคุมเดียวกัน โดยการตัดวัสดุชิ้นงานจะกระทำในทิศทางตามแนวรีดของแผ่นวัสดุชิ้นงาน ทั้งนี้เวลาที่ใช้สำหรับการตัดวัสดุชิ้นงานจะถูกบันทึกโดยตรงจากหน้าจอแสดงการทำงานของเครื่องจักร



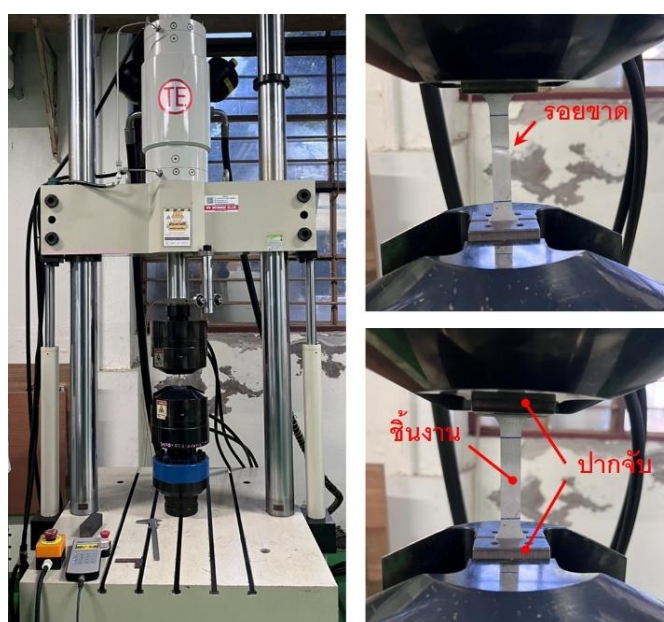
ก) ชิ้นงานมาตรฐาน (Standard specimen)

ข) ชิ้นงานแบบย่อขนาด (Subsize specimen)

รูปที่ 1 ขนาดชิ้นงานทดสอบตามมาตรฐาน ASTM E8M สำหรับวัสดุชิ้นงานแผ่นบาง (Sheet type)



รูปที่ 2 การตัดวัสดุชิ้นงานทดสอบโดยเครื่องตัดโลหะด้วยลวดไฟฟ้า



รูปที่ 3 การทดสอบแรงดึงบนเครื่องทดสอบแบบอเนกประสงค์ (Universal Testing Machine)

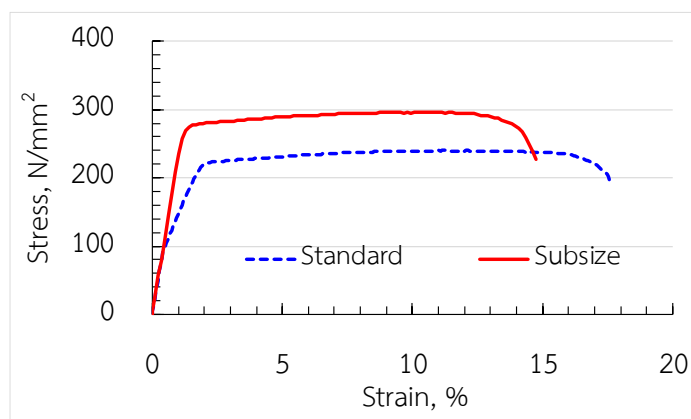
การทดสอบแรงดึงกระทำบนเครื่องทดสอบแบบอเนกประสงค์ซึ่งสามารถรองรับแรงในการทดสอบสูงสุด 10 kN ดังแสดงในรูปที่ 3 ขนาดความกว้างของชิ้นงานตัวอย่างตรวจวัดขนาดความกว้างและความหนาโดยเวอร์เนียคาลิเปอร์ Mitutoyo ค่าความละเอียด 0.02 มิลลิเมตร โดยค่าที่ทำการตรวจวัดสำหรับชิ้นงานตัวอย่างแต่ละชิ้นถูกป้อนเข้าเครื่องทดสอบโดยตรง ทั้งนี้ในการทดสอบคงที่ความเร็วในการดึงอยู่ที่ระดับ 1 มิลลิเมตรต่อนาที [13] ผลการทดลองบันทึกในรูปแบบของความเค้น (stress) และความเครียด (Strain) ชิ้นงานตัวอย่างแต่ละขนาดจะมีการทำซ้ำจำนวน 3 ครั้ง และรายงานผลเป็นค่าเฉลี่ยพร้อมค่าความคลาดเคลื่อน

3. ผลการทดลองและการอภิปราย

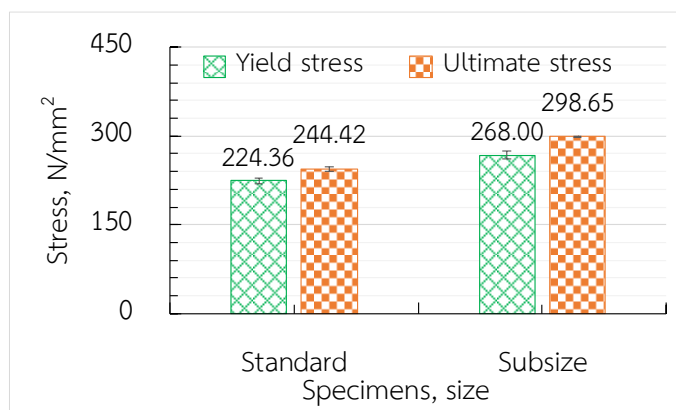
3.1. ความเค้น (Stress) และความเครียด (Strain)

ขนาดชิ้นงานทดสอบที่แตกต่างกันส่งผลต่อค่าความเค้นและความเครียดที่รายงานจากการทดสอบแรงดึง แสดงผลการทดลองดึงวัสดุชิ้นงานแบบมาตรฐาน (Standard) และชิ้นงานทดสอบแบบย่อยขนาด (Subsize) ดังรูปที่ 4 ก) โดยผลจากการทดลองค่าความเค้น (Stress) จะเพิ่มขึ้นตามระดับค่าความเครียด (Strain) ทั้งนี้ชิ้นงานทดสอบขนาดมาตรฐานจะมีผลค่าความแข็งแรงดึงที่ต่ำกว่าชิ้นงานทดสอบแบบย่อยขนาด แต่ชิ้นงานทดสอบขนาดมาตรฐานจะมีรายงานผลค่าความสามารถในการยึดตัวที่สูงกว่าชิ้นงานแบบย่อยขนาด เมื่อพิจารณาสมบัติทางกลจากค่าความแข็งแรงดึงครากตัว (ความเค้นครากตัว

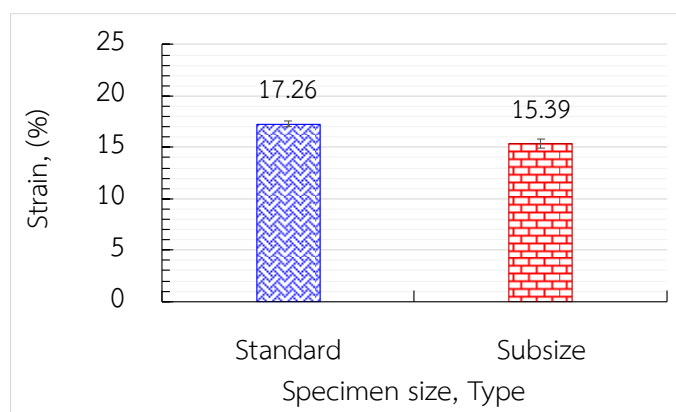
Yield stress) ความต้านทานแรงดึงสูงสุด (ความเค้นสูงสุด Ultimate stress) และความเครียด (Strain) แสดงดังรูปที่ 4 ข) และ ค) ตามลำดับ โดยผลจากการทดลองแสดงให้เห็นว่า ชิ้นงานทดสอบขนาดมาตรฐานและชิ้นงานทดสอบแบบย่อขนาดมีค่าความเค้นครากตัว 224.36 และ 268.00 นิวตัน/ตารางมิลลิเมตร ซึ่งมีความเค้นแรงดึงสูงสุด 244.42 และ 298.65 นิวตัน/ตารางมิลลิเมตร โดยมีค่าความเครียดเป็น 17.26 และ 15.39 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ทั้งนี้ผลการทดลองปรากฏความแตกต่างสำหรับค่าความเค้นครากตัว 19.45 เปอร์เซ็นต์ ความเค้นแรงดึงสูงสุด 22.19 เปอร์เซ็นต์ และ ความเครียดเป็น 10.84 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ จึงทำให้สามารถสรุปได้ว่าขนาดชิ้นงานทดสอบมีผลต่อการรายงานผลค่าทดสอบสมบัติทางกลจากการทดสอบแรงดึงซึ่งสอดคล้องกับผลงานวิจัยของ Zhang และคณะ [14]



ก) ผลการทดลองความเค้น (Stress) – ความเครียด (Strain)



ข) ความเค้น (Stress)

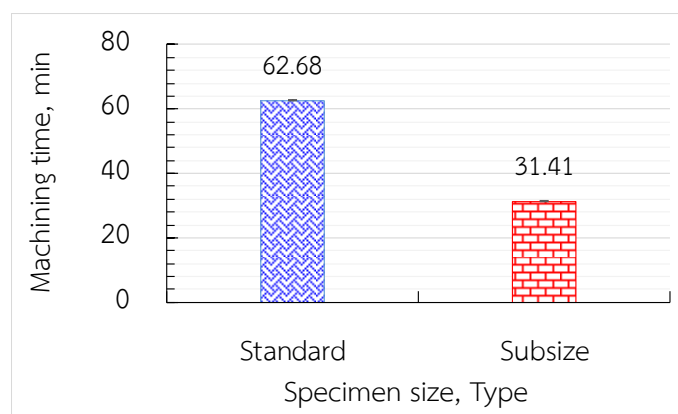


ค) ความเครียด (Strain)

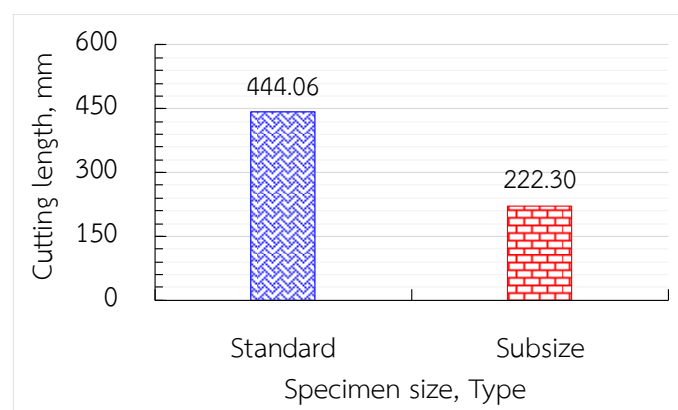
รูปที่ 4 ความเค้นและความเครียดจากการทดสอบแรงดึงตามมาตรฐาน ASTM E8M

3.2. เวลาที่ใช้สำหรับการตัดเตรียมวัสดุชิ้นงาน (Machining Time)

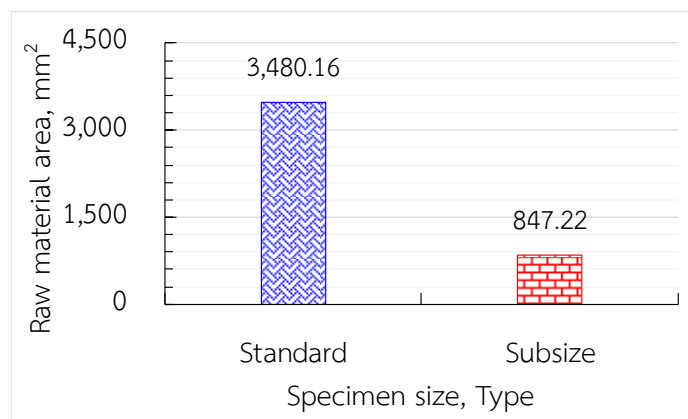
เวลาที่ใช้สำหรับการจัดเตรียมวัสดุชิ้นงานโดยกระบวนการตัดโลหะด้วยไฟฟ้า จากความยาวในการเดินตัด (Cutting length) สำหรับแบบงานมาตรฐานมีขนาด 444.06 มิลลิเมตร และชิ้นงานแบบย่อยขนาดมีความยาวในการเดินตัดรวม 222.30 มิลลิเมตร เวลาที่ใช้สำหรับการเดินตัดเฉลี่ยอยู่ที่ 62.68 ± 0.27 นาที และเวลาที่ใช้สำหรับการตัดชิ้นงานแบบย่อยขนาดอยู่ที่ 31.41 ± 0.08 นาที ดังแสดงในรูปที่ 5 เมื่อประเมินในรูปของความเร็วในการเดินตัดจะมีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 7.085 และ 7.078 มิลลิเมตรต่อนาที และสำหรับการเดินตัดชิ้นงานขนาดมาตรฐานและชิ้นงานแบบย่อยขนาด ตามลำดับ จึงทำให้สามารถสรุปได้ว่าเวลาที่ใช้สำหรับการเดินตัดชิ้นงานแบบย่อยขนาดต่ำกว่าการชิ้นงานแบบมาตรฐาน 49.94 เปอร์เซ็นต์ ($100 \times ((444.06 - 222.30) / 444.06)$) นอกจากนี้เมื่อประเมินเป็นพื้นที่สำหรับการเตรียมเนื้อวัสดุชิ้นงาน (Raw material area) พบว่า ชิ้นงานทดสอบแบบย่อยขนาดจะลดพื้นที่ของขนาดชิ้นงานลง 75.66 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเปรียบเทียบกับกรเตรียมชิ้นงานแบบขนาดมาตรฐาน (ชิ้นงานแบบย่อยขนาดมีพื้นที่ 847.22 ตารางมิลลิเมตร และชิ้นงานแบบมาตรฐานมีพื้นที่ 3,480.16 มิลลิเมตร) จากผลการทดลองสรุปได้ว่าชิ้นงานแบบย่อยขนาดจะช่วยลดเวลาและปริมาณวัสดุสำหรับการสร้างชิ้นงานทดสอบลง 75.66 เปอร์เซ็นต์ ($100 \times ((3,480.16 - 847.22) / 3,480.16)$) อย่างไรก็ตามปริมาณวัสดุชิ้นงานทดสอบและเวลาที่ใช้ในการตัดจะแปรผันตามค่าความหนาและขนาดของวัสดุชิ้นงานซึ่งส่งผลโดยตรงต่อต้นทุนในการจัดเตรียมวัสดุชิ้นงาน



ก) เวลาที่ใช้ในการตัดชิ้นงานทดสอบ



ข) ความยาวสำหรับการตัดวัสดุชิ้นงาน
รูปที่ 5 เวลาที่ใช้สำหรับการตัดวัสดุชิ้นงาน



ค) ขนาดพื้นที่ชิ้นงานทดสอบ
รูปที่ 5 เวลาที่ใช้สำหรับการตัดวัสดุชิ้นงาน (ต่อ)

4. สรุป

การศึกษาอิทธิพลของขนาดชิ้นงานที่มีผลต่อสมบัติทางกลสำหรับการทดสอบแรงดึงตามมาตรฐาน ASTM E8M สามารถสรุปผล ได้ดังนี้

1) ค่าความเค้น (Stress) แรงดึงของวัสดุชิ้นงานทดสอบมาตรฐานอยู่ที่ระดับ 244.42 นิวตัน/ตารางมิลลิเมตร ในขณะที่ชิ้นงานทดสอบแบบย่อขนาดมีค่าความแข็งแรงดึงอยู่ที่ 298.65 นิวตัน/ตารางมิลลิเมตร ซึ่งรายงานผลความเค้นของชิ้นงานทดสอบขนาดมาตรฐานจะต่ำกว่าชิ้นงานทดสอบแบบย่อขนาดโดยประมาณ 22.19 เปอร์เซ็นต์ อย่างไรก็ตามค่าความเครียด (Strain) ของชิ้นงานทดสอบขนาดมาตรฐานจะสูงกว่าชิ้นงานแบบย่อขนาดซึ่งมีค่ารายงานผลเป็น 17.26 และ 15.39 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ

2) ชิ้นงานทดสอบขนาดมาตรฐาน (Standard) มีความยาวในการเดินตัดวัสดุชิ้นงาน 444.06 มิลลิเมตร ในขณะที่การชิ้นงานทดสอบแบบย่อขนาด (Subsize) มีความยาวในการเดินตัด 222.30 มิลลิเมตร โดยผลจากการทดลองความเร็วในการตัดโดยเฉลี่ยสำหรับกระบวนการตัดโลหะด้วยไฟฟ้าอยู่ที่ 7.085 และ 7.078 มิลลิเมตรต่อนาที จึงทำให้ระยะเวลาในการเดินตัดชิ้นงานแบบย่อขนาดลดลง 49.94 % เมื่อเปรียบเทียบกับชิ้นงานทดสอบขนาดมาตรฐาน นอกจากนี้ชิ้นงานทดสอบแบบย่อขนาดจะมีการใช้วัสดุชิ้นงานต่ำกว่าขนาดชิ้นงานมาตรฐาน 75.66 % โดยประมาณ

ผลการทดลองจากงานวิจัยนี้บ่งชี้ถึงผลกระทบของขนาดชิ้นงานที่จัดเตรียมตามมาตรฐานการทดสอบที่มีผลต่อสมบัติทางกลในกระบวนการทดสอบภายใต้กรอบมาตรฐานซึ่งเป็นประโยชน์อย่างยิ่งต่อการลดต้นทุนในกระบวนการทดสอบทั้งในส่วน of ระยะเวลาการจัดเตรียมชิ้นงาน และต้นทุนในการดำเนินการทดสอบ ซึ่งคาดหวังเป็นอย่างยิ่งว่าจะเป็นประโยชน์ต่อผู้ที่สนใจและภาคอุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้อง อย่างไรก็ตามการศึกษาดังกล่าวและการวิเคราะห์ถึงกลไกการเปลี่ยนรูปของชิ้นงานทดสอบเนื่องจากขนาดความหนาของวัสดุที่ส่งผลต่อการรายงานผลการทดสอบเป็นสิ่งที่คณะผู้วิจัยให้ความสนใจสำหรับการศึกษาในอนาคต

5. กิตติกรรมประกาศ

ทางคณะผู้วิจัยใคร่ขอขอบพระคุณ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพที่ให้การสนับสนุนทางด้านเครื่องมือและห้องปฏิบัติการในการดำเนินงานวิจัยจนสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Sabdin, S. D., Rahim, M. A. S. A., & Ab Ghani, M. K. N. (2025). Comparison Dogbone and Rectangular Specimen for Tensile Test Mechanical Properties Using Steel Plate Cold Rolled Commercial (SPCC). *Journal on Technical and Vocational Education*, 10(2), 92-101.
- [2] Kumar, R., & Gautam, V. (2025). Influence of Magnesium Content on Tensile Properties and Deformation Behaviour of Al-Mg-Si Alloy Sheets. *Transactions of the Indian Institute of Metals*, 78(2), 51.

- [3] Önder, S. (2026). Effect of roller burnishing parameters on the surface integrity and high-cycle fatigue performance of AISI 4340 steel. *Materials Testing*, (0).
- [4] Pancarana, I. D. M., & Suherman, I. K. (2025, October). Analysis of the Effect of Cooling Fluid Flow and Welding Time on Tensile Strength in Spot Welding Tools. In *Proceedings of the International Conference on Sustainable Green Tourism Applied Science-Engineering Applied Science 2025 (ICOSTAS-EAS 2025)* (Vol. 2, p. 84). Springer Nature.
- [5] Jamkamon, K., Kumkoon, P., & Chuvaree, S. (2024). Studying Performance of Wire Electrical Discharge Machining for Multi-pass Cutting Strategy on the Tool Steel SKD 61 Using Recommended Parameters of Machin. *Engineering and Technology Horizons*, 41(3), 410305-410305.
- [6] Jamkamon, K., Janmanee, P., Mookam, N., & Chuvaree, S. (2026). Machinability of the stepped cylindrical electrode in the electrical discharge machining. *International Journal of Technology*, 17 (2), 498–512
- [7] Korkmaz, H. G., Toros, S., & Türköz, M. (2021, November). The effect of specimen size and preparation method on the mechanical properties of Ti 6Al 4V sheets. In *International Conference on Engineering Technologies (ICENTE'21)* (pp. 580-583).
- [8] Göğüş, M. T., Cabiroğlu, A., Ekmekyapar, T., & Özakça, M. (2014). Effect of Specimen Preparation Methods for Tension Test on Design of Cold-Formed Steel Members. In *Proc. of the Second Intl. Conf. on Advances In Civil, Structural and Environmental Engineering-ACSEE* (pp. 126-130).
- [9] Li, S. S., Yue, X., Li, Q. Y., Peng, H. L., Dong, B. X., Liu, T. S., Yang, H. Y., Fan, J., Shu, S. L., Qiu, F., & Jiang, Q. C. (2023). Development and applications of aluminum alloys for aerospace industry. *Journal of materials research and technology*, 27, 944-983.
- [10] Daramola, O. O., Ogunsanya, O. A., Akintayo, O. S., Oladele, I. O., Adewuyi, B. O., & Sadiku, E. R. (2018). Mechanical properties of Al 6063 metal matrix composites reinforced with agro-wastes silica particles. *Leonardo Electronic Journal of Practices and Technologies*, 33, 89-104.
- [11] Sammaiah, P., Suresh, A., & Tagore, G. R. N. (2010). Mechanical properties of friction welded 6063 aluminum alloy and austenitic stainless steel. *Journal of Materials Science*, 45(20), 5512-5521.
- [12] Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials. (2026, June 16). Tension Testing of Metallic Materials1 [Online]. Available: <https://www.galvanizeit.com/uploads/ASTM-E-8-yr-13.pdf>
- [13] Rady, M. H., Khalafe, W. H., Jadoau, R. J., Kale, S. A., & Shamsudin, S. (2024). Analysis of Tensile Strength of Friction Stir Welding for Aluminum Alloys AA6061 with AA5083 Using Design of Experiment Approach. *Journal homepage: http://iieta.org/journals/ijcmem*, 12(4), 389-394.
- [14] Zhang, L., Harrison, W., Yar, M. A., Brown, S. G., & Lavery, N. P. (2021). The development of miniature tensile specimens with non-standard aspect and slinness ratios for rapid alloy prototyping processes. *Journal of materials research and technology*, 15, 1830-1843.

ผลกระทบของการเคลือบผิวด้วย TIN และการชุบแข็งด้วยน้ำมันต่ออายุความล้า ของเหล็ก SCM 420 ในเพลารอง

Effect of TiN Coating on Fatigue Life of SCM 420 Steels Counter Shaft

กฤษฎภูมิ เรือนใหม่, ธนากาญจน์ ธีจวง*, พรศักดิ์นรินทร์ พุนมา และ กัมปนาท ม่อมวิทย์

สาขาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธนบุรี

248 ซอย เพชรเกษม 110 แขวงหนองค้างพลู เขตหนองแขม กรุงเทพมหานคร 10160

Kritsanuphum Ruanmai, Thanakan Reejuang*, Pornsaknarin Phunma and Kampanat Momwit

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

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

*Corresponding author Email: thanakanreejung@gmail.com

(Received: May 28, 2025 / Revised: June 27, 2026 / Accepted: June 28, 2026)

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินอายุการล้าของเพลาคู่ที่ทำจากเหล็กกล้าผสมคาร์บอนต่ำ JIS-SCM420 โดยมีการเปรียบเทียบระหว่างชิ้นงานที่ผ่านวิธีการชุบแข็งด้วยน้ำมัน และการเคลือบผิวด้วยไทเทเนียมไนไตรด์ (TiN) มีการวัดค่าความหยาบผิว การวัดความหนาของชั้นเคลือบผิว และการทดสอบด้วยเครื่องทดสอบความล้าแบบ R.R. Moore ผลของการวัดค่าความหยาบผิวเฉลี่ย (Ra) ของชิ้นงานที่ผ่านการชุบแข็งด้วยน้ำหนักร้อยเท่ากับ $1.089\ \mu\text{m}$ และชิ้นงานที่ผ่านเคลือบผิวด้วย TiN มีค่าความหยาบผิวเท่ากับ $0.296\ \mu\text{m}$ ชิ้นงานที่เคลือบผิวด้วย TiN มีค่าความแข็งเท่ากับ 246.2 HB และสูงกว่าชั้นเคลือบการชุบแข็งด้วยน้ำมันมีค่าความแข็งเท่ากับ 67 HB ความแข็งที่เพิ่มสูงขึ้นเป็นผลมาจากการเติมธาตุไทเทเนียมไนไตรด์ จนส่งผลให้ขอบเกรนมีความละเอียดเพิ่มขึ้น จำนวนรอบที่ได้จากการทดสอบความล้าสูงสุดของคือชิ้นงานที่เคลือบผิวด้วยสาร TiN อยู่ที่ 2,015,264 รอบ และ การชุบแข็งด้วยน้ำมันอยู่ที่ 1,521,942 รอบ มีค่าแตกต่างกัน 32.41% จึงสรุปได้ว่าชิ้นงานที่เคลือบผิวด้วยสาร TiN มีอายุการใช้งานที่มากกว่าชิ้นงานที่ผ่านชุบแข็งด้วยน้ำมัน

คำสำคัญ: เหล็กกล้า JIS-SCM420, ค่าความหยาบผิว, ค่าความแข็ง, จำนวนรอบความล้า

Abstract

This research aims to evaluate the fatigue life of shafts made of low carbon alloy steel JIS-SCM420 by comparing between oil quenching specimens and titanium nitride (TiN) coated specimens. There are inspections on surface roughness, coating thickness, and R.R. Moore fatigue testing. The average surface roughness (Ra) of oil quenching specimens was $1.089\ \mu\text{m}$, and that TiN coated specimens was $0.296\ \mu\text{m}$. The hardness of TiN coated specimens was 246.2 HB, and higher than that of oil quenching which was 67 HB. The increased hardness was due to the addition of titanium nitride, which resulted in finer grain boundaries. The maximum fatigue test cycles of the TiN coated specimens were 2,015,264 cycles and those of the oil quenching specimens were 1,521,942 cycles, which a different of 32.41%. Therefore, it can be concluded that the TiN coated specimens had longer service life than the oil quenching specimens.

Keywords: JIS-SCM420 steel, Surface roughness, Hardness, Fatigue test cycles.

1. บทนำ

เพลารอง (Counter Shaft) เป็นชิ้นส่วนที่อยู่ในเกียร์ธรรมดาของรถยนต์ ถูกนำมาใช้อย่างกว้างขวางในอุตสาหกรรมยานยนต์ ในโครงงานนี้เพลารองทำมาจากเหล็ก SCM 420 เพลาคู่จะต้องอยู่ภายใต้การรับโหลดแบบไดนามิก (Dynamic Loading) ที่มีลักษณะซับซ้อน โดยทั่วไปแล้วการรับโหลดของเพลาคู่จะอยู่ภายใต้แรงบิดและความเค้นดัดร่วมกับความเข้มข้นของความเครียดในระดับต่างๆ สำหรับเพลารองปัญหาที่พบบ่อยคือโหลดที่เกิดจากความล้า ความเสียหายของชิ้นส่วนเพลาคู่

ให้นักวิทยาศาสตร์และวิศวกรมีความพยายามที่จะศึกษาหาสาเหตุหลักของการแตกหักของเพลารองและเสนอวิธีการป้องกันความเสียหายที่จะเกิดขึ้น

การเพิ่มความแข็งที่ผิวของเพลาก็เป็นอีกวิธีการที่จะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของเพล่าให้มีอายุการใช้งานที่ยาวนานขึ้น การชุบผิวแข็งสามารถทำได้ทั้งวิธีการชุบแข็งด้วยน้ำมัน (Oil Quenching) โดยการนำเอาชิ้นเหล็กเผาให้ได้อุณหภูมิวิกฤตของเหล็กประมาณ $780 - 950^{\circ}\text{C}$ แล้วทำให้เย็นลงอย่างรวดเร็วเกินอัตราเย็นตัววิกฤตของเหล็กในน้ำมัน ซึ่งจะช่วยให้ผิวของเหล็กมีความแข็งขึ้น สามารถทนต่อการสึกหรอและความล้าได้ดี ในปัจจุบันสารเคลือบ TiN (Titanium Nitride) เป็นประเภทของการเคลือบแข็งที่ใช้เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพและอายุการใช้งานของชิ้นส่วนเครื่องจักรกล การเคลือบนี้ผสมไทเทเนียมไนไตรด์เพื่อสร้างวัสดุที่มีชั้นผิวที่ทนทานต่อการสึกหรอ ป้องกันการกัดกร่อนได้ดี มีความหนาของผิวเคลือบสม่ำเสมอ มีความแข็งสูง ทนต่อแรงกระแทก สารเคลือบชนิดนี้มักใช้ในกระบวนการสะสมไอทางกายภาพ (PVD) เทคโนโลยีการเคลือบผิวแบบ PVD (Physical Vapor Deposition) เป็นกระบวนการสร้างฟิล์มบางที่มีความแข็งสูง การเคลือบ TiN ทำให้ผิวชิ้นงานมีความแข็งสูง ซึ่งช่วยปรับปรุงความทนทานต่อการสึกหรอของเครื่องมือ นอกจากนี้ ยังช่วยเพิ่มอายุการใช้งานของชิ้นส่วน ลดต้นทุนการบำรุงรักษา และเพิ่มประสิทธิภาพการผลิต

งานวิจัยในอดีตมีนักวิจัยทำการศึกษาศักยภาพของสารเคลือบผิวและประเมินอายุความล้า ซึ่งมีดังรายละเอียดต่อไปนี้ (เจษฎา รุจิสมนา, 2013) ได้ศึกษาพฤติกรรมการสึกหรอของดอกกัดที่เคลือบผิวด้วยวิธีไอทาง ระเหยฟิสิกส์แบบคาโทดิกอาร์ค โดยใช้ชั้นเคลือบอะลูมิเนียม ไครเมียมไนไตรด์ (AlCrN), ไทเทเนียมไนไตรด์ (TiN), อะลูมิเนียมไครเมียม ไทเทเนียมซิลิกอน ไนไตรด์ (AlCrTiSiN) และไทเทเนียมอะลูมิเนียมซิลิกอนไนไตรด์ (TiAlSiN) เปรียบเทียบกับ ดอกกัดที่ไม่ได้เคลือบ ทำการทดสอบการสึกหรอความแข็งระดับนาโน การทดสอบความต้านทานต่อการขีดขีด และการทดสอบการใช้งานจริงโดยกัดผิวด้วยเครื่อง CNC ผลที่ได้จากการทดสอบความต้านทานต่อการขีดขีด และทดสอบ ค่าความแข็งระดับนาโนพบว่า ชั้นเคลือบ AlCrTiSiN มีความแข็งและความสามารถในการยึดเกาะสูงกว่าชั้นเคลือบ TiN, AlCrN และ TiAlSiN ตามลำดับ (Sajjad Seifoori et al, 2020) ได้กล่าวไว้ว่าสาเหตุหลักของความเสียหายคือความล้าที่เกิดจากการรับโหลดแบบซ้ำไปซ้ำมาซึ่งเป็นผลการรับแรงบิดแบบโหลดคงที่ที่เกิดกับขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางที่เปลี่ยนแปลงต่ออายุความล้าของเพลาลายใต้ความเค้นดัดแบบกลับไปกลับมา (Libin Zang et al, 2023) ได้ ทำการศึกษาลักษณะของการเคลือบผิวด้วยสารแมงกานีสฟอสเฟตที่มีขนาดผลึกแตกต่างกันต่ออายุการใช้งานของเฟืองเฉียง ที่ทำจากเหล็กกล้า 20MnCr5 ด้วยวิธีการบูโรไนซิง เริ่มจากการคำนวณความเค้นสัมผัสของพื้นผิวฟันภายใต้สัมผัสประสิทธิผลแรง เสียตทานที่แตกต่างกันโดยใช้วิธีไฟไนต์เอเลเมนต์ และทำการทดสอบความล้าจากการสัมผัสโดยใช้แท่นทดสอบกับเฟือง 3 แบบคือ เฟืองที่ไม่เคลือบสาร เฟืองที่เคลือบผิวด้วยสาร Mn-Ph[U] และเฟืองที่เคลือบผิวด้วยสาร Mn-Ph[S] ผลสรุปของการ ทดลองพบว่า การเคลือบ Mn-Ph[S] ที่มีขนาดเม็ดใหญ่กว่าให้ผลดีที่สุดและอายุความล้าจากการสัมผัสของเฟืองเพิ่มขึ้น มากกว่า 100% เมื่อเทียบกับเฟือง 20MnCr5 คาร์บูไรซ์ที่ไม่ได้เคลือบผิว ขีดจำกัดความล้าจากการสัมผัสเพิ่มขึ้นประมาณ 150 MPa

วัตถุประสงค์ของโครงการนี้คือเพื่อประเมินอายุความล้าของวัสดุเพล่า SCM 420 ทั้ง 2 แบบ ชิ้นงานแรกมีการชุบแข็งด้วยน้ำมัน ชิ้นงานที่สองมีการเคลือบผิวด้วย TiN โดยมีการวิเคราะห์สมบัติทางเคมี การวัดค่าความหยาบผิว และการประเมินอายุความล้าจากเครื่องทดสอบความล้า ความรู้ที่ได้รับจากการศึกษานี้จะช่วยให้เห็นถึงข้อแตกต่างของอายุการใช้งานและประสิทธิภาพของวัสดุเพล่าทั้ง 2 แบบ แบบวิธีการชุบแข็งด้วยน้ำมัน (Oil Quenching) และการเคลือบผิวด้วย TiN

2. วิธีการทดลอง

งานวิจัยนี้มีการทดลองวัสดุเพล่าที่ทำจากเหล็ก SCM420 โดยมีการทดสอบชิ้นงาน 3 ชิ้น ชิ้นงานแรกมีการชุบแข็งด้วยน้ำมัน ชิ้นงานที่สองมีการเคลือบผิวด้วย TiN โดยมีการวิเคราะห์สมบัติทางเคมี การวัดค่าความหยาบผิว การวัดความหนาของสารเคลือบผิว และ การประเมินอายุความล้าจากเครื่องทดสอบความล้า โดยมีวิธีการดำเนินการศึกษาดังต่อไปนี้

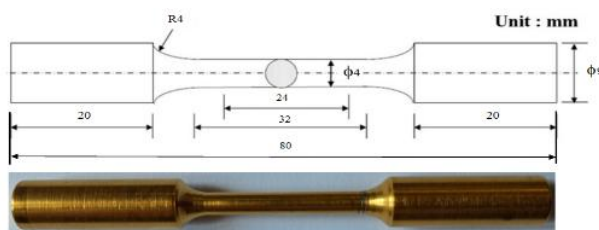
2.1 การตรวจสอบส่วนผสมทางเคมี วิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมีของเพลารอง เทียบกับมาตรฐานของเหล็กด้วยเครื่องวิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมี Optical Emission Spectrometer: ARL 3460 ทำการวิเคราะห์ส่วนผสมของวัสดุ เพื่อตรวจสอบว่าวัสดุที่ใช้เป็นวัสดุชนิดใด เลือกใช้ตรงตามมาตรฐานหรือข้อกำหนดที่ออกแบบไว้หรือไม่สำหรับตัวอย่างชิ้นงานนี้จะตรวจสอบที่ผิวและตรงแกนกลางของเพลารอง

2.2 การทดสอบหาค่าความหยาบผิวของชิ้นงาน นำชิ้นงานมาทำการตรวจสอบพื้นผิว (Surface) ด้วยกล้องจุลทรรศน์ชนิดคอนฟोकอล ยี่ห้อ OLYMPUS รุ่น OLS4100 ทำการทดสอบตามมาตรฐาน ISO4287 และวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม LEXT

2.3 การวัดความหนาของชั้นเคลือบผิว การวัดความหนาของชั้นเคลือบผิวจะมีวิธีการทดสอบดังนี้ ปรับตั้งค่าการวัดให้เป็นศูนย์ เปรียบเทียบค่าการวัดกับแผ่นมาตรฐาน และวัดความหนาของชั้นเคลือบผิว TiN ในชิ้นงานตัวอย่าง

2.4 การวัดค่าความแข็ง (Hardness Test) โดยใช้เครื่องวัดความแข็งแบบพกพา ยี่ห้อ NOVOTEST ชนิด Shore D เป็นเครื่องทดสอบความแข็งแบบอัลตราโซนิก (UCI) ที่ใช้แท่งสั่นสะเทือนที่มีปลายเพชรในการวัดความแข็งของโลหะ และได้รับการออกแบบมาเพื่อจัดการกับงานที่ไม่สามารถแก้ไขได้ด้วยวิธี Leeb

2.4 การทดสอบความล้า (Fatigue Test) ชิ้นงานที่ใช้ทดสอบตัวอย่างได้มาจากเพลลาของเกียร์ ทำการกลึงให้ได้ขนาดตามมาตรฐาน ASTM E8M-22 ดังรูปที่ 1 โดยใช้ตัวอย่างทั้งหมด 6 ชิ้น เป็นการทดสอบความล้าแบบการดัด จะต้องทำการขัดเงาผิวชิ้นทดสอบจนถึงตรงแกนกลาง นำชิ้นงานมาจับยึดที่ปลายทั้งสองข้างของชิ้นงาน จากนั้นจะมีการให้แรงกระทำกับชิ้นทดสอบที่คงที่ โดยชิ้นทดสอบจะมีลักษณะโค้งขึ้น ทำให้ผิวด้านบนรับแรงดึงและผิวด้านล่างรับแรงกด จากนั้นให้หมุนมอเตอร์ไปจนกว่าชิ้นงานทดสอบจะแตกหักและบันทึกจำนวนรอบที่ชิ้นงานแตกหักกับความเค้นที่นำไปสร้างกราฟ S-N ที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น (Stress) กับจำนวนรอบ (Number of cycle) ชิ้นงานตัวอย่างที่เกิดการแตกหักจากการทดสอบความล้าด้วยเครื่องทดสอบความล้าได้รับการตรวจสอบด้วยสายตาเพื่อให้ได้ภาพรวมของการแตกหักลักษณะทั่วไปของรอยแตกและพื้นผิวของการแตกหัก การทดสอบความล้าเป็นไปตามมาตรฐาน ISO-1143 [3] ชิ้นงานตัวอย่างที่แตกหักจะถูกนำมาเพื่อสำรวจลักษณะทั่วไปของรอยแตก จากนั้นจึงนำพื้นผิวที่แตกหักไปตรวจด้วยกล้องจุลทรรศน์ที่มีรายละเอียดมากขึ้นโดยใช้กล้องจุลทรรศน์ระบบดิจิทัล DSX-1000



รูปที่ 1 ขนาดตามมาตรฐานของชิ้นงานทดสอบการล้าแบบหมุนรอบ

3. ผลการทดลอง

3.1 การตรวจสอบส่วนผสมทางเคมี

การตรวจสอบสมบัติทางเคมีของเพลลาโดยใช้เครื่อง Optical Emission Spectrometer: ARL 3460 โดยมีการวัดส่วนผสมทางเคมี 2 จุด ที่บริเวณผิวของเพลลา (Case) และที่บริเวณผิวตรงกลางเพลลา (Core) ผลที่ได้ออกมาเป็นเปอร์เซ็นต์ส่วนประกอบทางเคมีดังแสดงในตารางที่ 1 เพลลาทำจากเหล็กกล้าผสมต่ำเกรด JIS-SCM420 เป็นโลหะผสมที่นิยมใช้ในงานวิศวกรรม เช่น เพื่องเพลลาในรถยนต์ และชิ้นส่วนที่ต้องการความแข็งแรงและคุณสมบัติการดัด [5]

ตารางที่ 1 ผลการตรวจสอบทางเคมีของเพลารอง SCM420 steel (%wt)

Materials	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo
Failed gear (Case)	0.46	0.32	0.86	0.009	0.012	0.104	0.90	0.15
(Core)	0.21	0.23	0.78	0.016	0.015	0.019	1.035	0.025
JIS-SCM420 [5]	0.18-0.23	0.15-0.35	0.60-0.90	≤ 0.030	≤ 0.030	≤ 0.25	0.90-1.20	0.15-0.25

3.2 การวัดค่าความหยาบผิวของชิ้นงานทดสอบ (Surface Roughness)

ผลของลักษณะภาพพื้นผิวที่ได้จากกล้องจุลทรรศน์ชนิดคอนฟોકอล ยี่ห้อ OLYMPUS รุ่น OLS4100 รูปที่ 2 เป็นค่าความหยาบผิวของชิ้นงาน (Ra) ทั้ง 3 ชิ้น หลังการชุบแข็งด้วยน้ำมัน และตารางที่ 3.2 เป็นผลของค่าความหยาบผิวเฉลี่ยหลังการชุบแข็งด้วยน้ำมัน โดยมีค่า Ra เฉลี่ยเท่ากับ 1.089 μm ค่า Ry เฉลี่ยเท่ากับ 6.247 μm และ ค่า Rz เฉลี่ยเท่ากับ 8.089 μm ค่าความหยาบผิวของชิ้นงานตัวอย่าง (Ra) ทั้ง 3 ชิ้น หลังการเคลือบผิวด้วย TiN และตารางที่ 3 เป็นผลของค่าความหยาบผิวเฉลี่ยหลังการเคลือบผิวด้วย TiN โดยมีค่า Ra เฉลี่ยเท่ากับ 0.296 μm ค่า Ry เฉลี่ยเท่ากับ 2.700 μm และ ค่า Rz เฉลี่ยเท่ากับ 3.953 μm [1]

ตารางที่ 2 ค่าความหยาบผิวของชิ้นงานตัวอย่างหลังการชุบแข็งด้วยน้ำมัน

ชิ้นงาน	Ra (μm)	Ry (μm)	Rz (μm)
1	0.952	5.373	7.332
2	1.024	6.113	7.376
3	1.29	7.254	9.559
ค่าเฉลี่ย	1.089	6.247	8.089

ตารางที่ 3 ค่าความหยาบผิวของชิ้นงานตัวอย่างหลังการเคลือบผิวด้วย TiN

ชิ้นงาน	Ra (μm)	Ry (μm)	Rz (μm)
1	0.294	2.663	3.810
2	0.273	2.511	3.921
3	0.320	2.926	4.128
ค่าเฉลี่ย	0.296	2.700	3.953

เมื่อทำการเปรียบเทียบความหยาบผิวเฉลี่ย (Ra) จากตารางที่ 2 และ 3 พบว่าผิวของชิ้นงานที่ผ่านการชุบแข็งด้วยน้ำมันมีความหยาบผิวเฉลี่ย (Ra) ค่อนข้างมากซึ่งมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 1.089 μm เมื่อเปรียบเทียบกับชิ้นงานที่ผ่านเคลือบผิวด้วย TiN พบว่าค่าความหยาบผิวเฉลี่ย (Ra) มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0.296 μm นั้นแสดงให้เห็นว่าความหยาบผิวเฉลี่ย (Ra) ของชิ้นงานที่ผ่านเคลือบผิวด้วย TiN ที่มีค่าค่อนข้างน้อย ซึ่งมีข้อดีหลายประการทั้งเรื่องการเพิ่มคุณสมบัติเชิงกลของวัสดุ เช่น การสึกหรอของชิ้นงานเมื่อนำไปใช้งาน ลดการกัดกร่อนต่างๆ ยืดอายุการใช้งาน และลดความเสี่ยงของการที่ชิ้นงานเกิดรอยร้าวและแตกหัก จึงสามารถสรุปได้ว่าชิ้นงานที่ผ่านการเคลือบผิวด้วยสาร TiN จะมีประสิทธิภาพในการใช้งานที่เพิ่มมากขึ้นเมื่อเทียบกับชิ้นงานที่ผ่านการชุบแข็งด้วยน้ำมัน

3.3 การวัดความหนาชั้นเคลือบผิว (Coating Thickness)

การวัดความหนาชั้นเคลือบผิวในชิ้นงานตัวอย่างเคลือบผิวด้วย TiN ด้วยเครื่องวัดความหนาชั้นเคลือบยี่ห้อ FISCHER Dual Scope FMP40 ดังแสดงตารางที่ 3 แสดงผลของการวัดความหนาชั้นเคลือบผิวของชิ้นงานที่เคลือบผิวด้วย TiN ค่าความหนาของชั้นเคลือบเฉลี่ยทั้ง 10 จุด เท่ากับ 10.1 μm ค่าความหนาของชั้นเคลือบสูงสุดเท่ากับ 11.7 μm และค่าความหนาของชั้นเคลือบต่ำสุดเท่ากับ 8.2 μm

ตารางที่ 3 ผลของวัดความหนาชั้นเคลือบผิวของชิ้นงานที่เคลือบผิวด้วย TiN

ตำแหน่งที่วัด	ความหนาของชั้นเคลือบ TiN (μm)
1	11.7
2	9.0
3	10.0
4	10.7
5	9.4
6	8.2
7	9.2
8	9.7
9	11.2
10	12.0
Average	10.1
Max.	11.7
Min.	8.2

3.4 การทดสอบความแข็ง (Hardness Test)

การวัดค่าความแข็งของชิ้นงานทดสอบโดยใช้เครื่องวัดความแข็งแบบพกพา ยี่ห้อ NOVOTEST ชนิด Shore D ผลของการวัดค่าความแข็งของชิ้นงานตัวอย่างดังแสดงในตารางที่ 4 ค่าความแข็งเฉลี่ยของชิ้นงานที่ชุบแข็งด้วยน้ำมันเท่ากับ 67 HB และค่าความแข็งเฉลี่ยของชิ้นงานที่เคลือบผิวด้วย TiN เท่ากับ 246.2 HB

ตารางที่ 4 ผลของการวัดค่าความแข็งของชิ้นงานตัวอย่าง

ตำแหน่งทดสอบ	วิธีการชุบแข็ง	
	การชุบแข็งด้วยน้ำมัน (HB)	การเคลือบสาร TiN (HB)
1	71	250
2	63	238
3	78	256
4	61	252
5	62	235
ค่าเฉลี่ย	67	246.2

ชั้นเคลือบ TiN มีความแข็งสูงกว่าชั้นเคลือบการชุบแข็งด้วยน้ำมัน และจากผลการทดสอบวิเคราะห์โครงสร้างของชั้นเคลือบ TiN ด้วย SEM (ไม่สามารถเปิดเผยรูปภาพได้ เนื่องจากเป็นความลับของบริษัท) จากภาพโครงสร้างสามารถอธิบายได้ว่า เมื่อเติมธาตุไทเทเนียม ไนไตรด์ (Titanium Nitride) เข้าไปจะมีผลทำให้ค่าความแข็งสูงขึ้นเนื่องจากไทเทเนียม ไนไตรด์จะถูกทำให้อยู่ในรูปโครงสร้างพื้น amorphous โดยผลึกของ TiN ในระดับนาโนจะถูกฝังเข้าไปในโครงสร้างพื้น amorphous และมีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ เกรนจึงละเอียดขึ้นส่งผลให้มีขอบเกรนเพิ่มขึ้น การเคลื่อนที่ของ ดิสโลเคชันจึงถูกยับยั้งซึ่งภาพโครงสร้างสอดคล้องกับงานวิจัยของเจษฎา รุจิสมญา [1] ดังนั้นค่าความแข็งของชั้นเคลือบ TiN จึงเพิ่มขึ้น

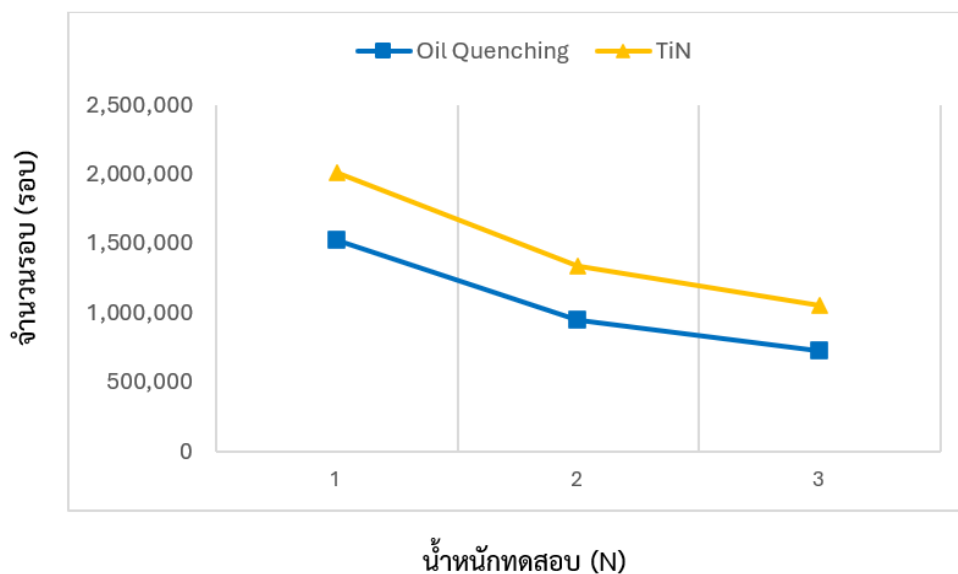
3.5 การทดสอบความล้า (Fatigue Test)

ตัวอย่างชิ้นงานที่นำมาทดสอบได้มาจากตัวอย่างของวัสดุพลาเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ SCM420 ที่ยังไม่ผ่านการใช้งาน โดยนำมาทดสอบแรงดึงซึ่งได้ค่าความเค้นแรงดึงสูงสุด (Ultimate Tensile Strength) เท่ากับ 998 MPa และค่าความเค้นแรงดึงคราก (Yield Strength) เท่ากับ 395 MPa การทดสอบความล้าทั้งหมดดำเนินการที่อุณหภูมิห้อง 25 °C ความถี่ในการรับโหลด 50 Hz ความเร็วของมอเตอร์ทดสอบเท่ากับ 1,725 รอบต่อนาที ภาระที่ใช้ในการทดสอบจะปรับเปลี่ยนค่าที่แตกต่างกันตั้งแต่ 20, 25 และ 30 N ตามลำดับ

ผลของการทดลองด้วยเครื่องทดสอบความล้าในตัวอย่างชิ้นงานที่ผ่านการชุบแข็งด้วยน้ำมันจำนวน 3 ชิ้น และชิ้นงานที่ผ่านการเคลือบผิวด้วย TiN จำนวน 3 ชิ้น ได้ค่าอายุการล้าของชิ้นงานทดสอบออกมาดังแสดงในตารางที่ 5 และสามารถนำมาเขียนกราฟ S-N ดังรูปที่ 2

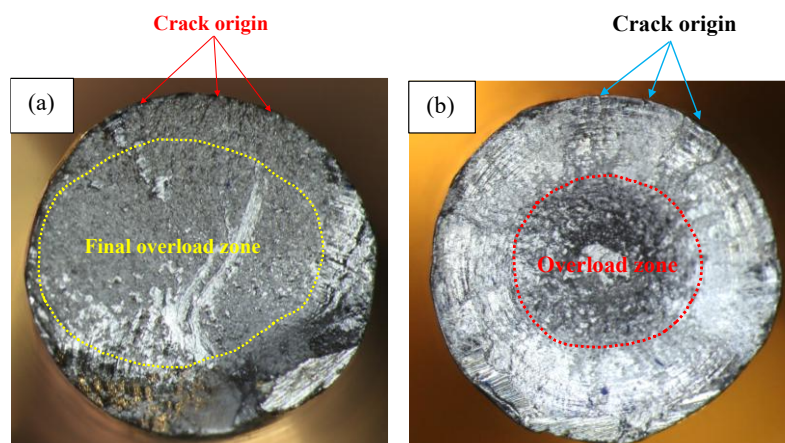
ตารางที่ 5 ผลจากการคำนวณและผลการทดสอบความล้าที่ความเร็วรอบ 1725 รอบ/นาที

ลำดับ	น้ำหนักทดสอบ (N)	จำนวนรอบชิ้นงานที่ผ่านการชุบแข็งด้วยน้ำมัน (รอบ)	จำนวนรอบชิ้นงานที่ผ่านการเคลือบผิวด้วย TiN (รอบ)
1	20	1,521,942	2,015,264
2	25	945,917	1,338,724
3	30	724,146	1,060,216



รูปที่ 2 ผลเปรียบเทียบรอบความล้าระหว่างการชุบแข็ง Oil quenching และการเคลือบ TiN

การตรวจสอบด้วยภาพถ่ายของลักษณะการแตกหักจากความล้าในการดัดแบบหมุน ผิวหน้ารอยแตกหักที่กำลังขยายตัวด้วยกล้อง Zoom Stereo Microscope ดังรูปที่ 3 แสดงให้เห็นจุดเริ่มต้นของรอยแตกร้าว Crack origin เกิดขึ้นหลายจุด จากนั้นรอยแตกจะขยายตัวอย่างช้าๆ ผ่านพื้นที่ Fatigue Zone หรือบริเวณที่ได้รับความเสียหายจากการรับแรงแบบคาบ ซ้ำไปซ้ำมา ในช่วงระหว่างการขยายตัวของรอยแตกอย่างช้าๆ จะมีความผันแปรของแรงที่กระทำและมีผลต่ออัตราการขยายตัวของรอยแตก เมื่อรอยแตกขยายตัวไปได้ระยะหนึ่งจะทำให้วัสดุเหลือพื้นที่ในการรับแรงน้อย และทำให้เกิดเป็นพื้นที่รับแรงเกินพิกัด (Final Overload Zone) ในพื้นที่ดังกล่าวพบว่ารอยแตกที่ขยายตัวส่วนใหญ่มีลักษณะทางมหภาคเป็นการแตกแบบเปราะ [7][8]



รูปที่ 3 ลักษณะรอยแตกของชิ้นงาน (a) การชุบแข็งด้วยน้ำมัน (b) การเคลือบผิวด้วยสาร TiN

4. สรุป

งานวิจัยนี้เป็นการเปรียบเทียบวัสดุเพลลาที่ทำจากเหล็ก SCM 420 ซึ่งมีการชุบแข็งด้วยน้ำมัน และการเคลือบผิวด้วย TiN โดยมีวิเคราะห์สมบัติทางเคมี การวัดค่าความหยาบผิว การวัดความหนาของชั้นเคลือบผิว และการประเมินอายุความล้าจากเครื่องทดสอบความล้า จากการทดลองดังกล่าวสามารถสรุปผลได้ดังต่อไปนี้

4.1 ผลของการวัดค่าความหยาบผิวเฉลี่ย (Ra) ของชิ้นงานที่ผ่านการชุบแข็งด้วยน้ำมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ $1.089\ \mu\text{m}$ และชิ้นงานที่ผ่านเคลือบผิวด้วย TiN มีค่าความหยาบผิวเฉลี่ยเท่ากับ $0.296\ \mu\text{m}$ ซึ่งส่งผลให้ชิ้นงานที่ผ่านการเคลือบผิวด้วยสาร TiN จะมีประสิทธิภาพในการใช้งานที่เพิ่มมากขึ้นเมื่อเทียบกับชิ้นงานที่ผ่านการชุบแข็งด้วยน้ำมัน

4.2 ผลของความหนาของชั้นเคลือบและการวัดค่าความแข็งมีความสัมพันธ์กัน โดยพบว่าชั้นเคลือบ TiN มีค่าความแข็งเท่ากับ 246.2 HB สูงกว่าชั้นเคลือบการชุบแข็งด้วยน้ำมัน ที่มีค่าความแข็งเท่ากับ 67 HB ความแข็งที่เพิ่มขึ้นสูงมากนี้เป็นผลมาจาก เมื่อเติมธาตุไทเทเนียมไนไตรด์ (Titanium Nitride) เข้าไปจะทำให้ค่าความแข็งสูงขึ้น เนื่องจากการเคลือบในระดับนาโนจะถูกฝังเข้าไปในโครงสร้างพื้น Amorphous และมีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ และส่งผลให้ขอบเกรนมีความละเอียดเพิ่มขึ้น

4.3 ผลการความล้าจะเห็นได้ว่าแนวโน้มของกราฟมีลักษณะลดลงเป็นเส้นโค้ง เมื่อใช้น้ำหนักถ่วงเท่ากับ 20 N โดยจำนวนรอบที่นับได้สูงที่สุดของสาร TiN อยู่ที่ 2,015,264 รอบ และ Oil Quenching อยู่ที่ 1,521,942 รอบ มีค่าแตกต่างกัน 32.41% และเมื่อใช้น้ำหนักถ่วงเท่ากับ 30 N จำนวนรอบที่นับได้น้อยที่สุดของสาร TiN อยู่ที่ 1,060,216 รอบ และ Oil Quenching อยู่ที่ 724,146 รอบ มีค่าแตกต่างกัน 46.40% จึงสรุปได้ว่าชิ้นงานที่เคลือบสาร TiN มีอายุการใช้งานที่มากกว่า Oil Quenching

5. เอกสารอ้างอิง

- [1] เจษฎา รุจิสมณฑา, “พฤติกรรมการสึกหรอของดอกกัดที่เคลือบผิวด้วยชั้นเคลือบโดยวิธีไอระเหยทางฟิสิกส์,” วิทยานิพนธ์ของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโลหการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, 2556.
- [2] Nurot Panich, Surasak Surinphong, D. A. Karpov, Yong Kwang Tan, Chin Foo Goh, Jan Ma, “Mechanical Properties of AlCrTiSiN Coatings Developed by Cathodic Arc for Protection Applications.” Solid State Phenomena, vol. 185, 2012, pp. 81-83.
- [3] ISO 1143. (2024, October 20). Metallic materials — Rotating bar bending fatigue testing [Online]. Available: <https://cdn.standards.iteh.ai/samples/79575/71ce80272d3a4ce4920ea96f0a7894df/ISO-1143-2021.pdf>
- [4] Otai Special Steel. (2024, October 20). ASTM 4118 Steel | SCM420 | 18CrMo4 | 1.7243 [Online]. Available: <https://www.astmsteel.com/product/astm-4118-steel-scm420-18crmo4-1-7243/>
- [5] Mohammad Jamalkhani Khameneh, Mohammad Azadi, “Evaluation of high-cycle bending fatigue and fracture behaviors in EN-GJS700-2 ductile cast iron of crankshafts.” Engineering Failure Analysis, vol. 85, 2018, pp. 189-200.
- [6] Sajjad Seifoori, Ahmad Mahdian Parrany, Mojtaba Khodayari, “A high-cycle fatigue failure analysis for the turbocharger shaft of BELAZ 75131 mining dump truck,” Engineering Failure Analysis, vol. 116, 2020, pp. 104752.
- [7] Libin Zang, Yong Chen, Weijie Hou, Tao Sun, Yimin Wu, Baoshan Zhao, “Effect of manganese phosphate conversion coating with different crystal sizes on fatigue life of 20MnCrS5 steel helical gears,” Tribology International, vol. 186, 2023, pp. 108622.
- [8] Suresh Mysamy, Neelakrishnan Subramanyan, “Fatigue failure prediction through factor of safety and stress concentration in a malfunctioned AISI 4140 automotive crankshaft,” Materials Research Express, vol. 10, 2023, pp. 126516.

การปรับปรุงประสิทธิภาพสายการผลิตเบาะรถยนต์โดยใช้ระบบการผลิตแบบโตโยต้า

Improving the Efficiency of the Car Seat Production Line

Using the Toyota Production System

วิเรชา คำจันทร์, ปิยนุช สีผาง และ ศักดิ์ดา คำจันทร์*

สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกลและการผลิต คณะวิทยาศาสตร์และวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตเฉลิมพระเกียรติ จังหวัดสกลนคร

59 หมู่ 1 ตำบลเชียงเครือ อำเภอเมือง จังหวัดสกลนคร 47000

Wirekha Khamjan, Piyanut Seepang and Sakda Khamjan*

Industrial Engineering Major, Department of Mechanical and Manufacturing Engineering,

Faculty of Science and Engineering, Kasetsart University Chalermphrakiat Sakon Nakhon Province Campus

59 Moo.1, Chiangkrua Sub District, Muang, Sakon Nakhon, Thailand, 47000

*Corresponding author Email: sakda.kh@ku.th

(Received: June 08, 2026 / Revised: June 28, 2026 / Accepted: June 29, 2026)

บทคัดย่อ

การปรับปรุงประสิทธิภาพของสายการผลิตเบาะรถยนต์โดยใช้ระบบการผลิตของโตโยต้า วัตถุประสงค์คือเพื่อพัฒนาขั้นตอนการผลิตให้สอดคล้องกับปริมาณการผลิตจริง จัดลำดับขั้นตอนการทำงานให้เป็นมาตรฐาน และลดความสูญเปล่าตามหลักการของอีซีอาร์เอส จากการดำเนินการปรับปรุง พบว่าสามารถลดจำนวนพนักงานได้รวม 5 คน โดยในสายการผลิตรถกระบะส่วนหน้า ลดพนักงานจาก 6 คน เหลือ 5 คน ส่งผลให้ประสิทธิภาพการทำงานเพิ่มขึ้นจาก 59.57% เป็น 79.67% ส่วนสายการผลิตรถกระบะส่วนหลัง ลดพนักงานจาก 3 คน เหลือ 2 คน ทำให้ประสิทธิภาพการทำงานเพิ่มขึ้นจาก 58.43% เป็น 98.47% และในสายการผลิตรถเก๋งได้ปรับลดจำนวนพนักงานตามรอบเวลาการผลิต จาก 6 คน เหลือ 3 คน โดยประสิทธิภาพการทำงานเดิมอยู่ที่ 97.26% และหลังการปรับปรุงอยู่ที่ 94.41% ผลลัพธ์จากการปรับปรุงทั้งหมดนี้ช่วยให้โรงงานสามารถลดต้นทุนการผลิตได้ถึง 432,000 บาทต่อปี

คำสำคัญ: ระบบการผลิตแบบโตโยต้า (TPS), หลักการอีซีอาร์เอส, เวลาการผลิต, แผนภูมิยามาซุมิ

Abstract

Improving the efficiency of the car seat production line using the Toyota Production System. The objective is to develop production processes that align with actual production volumes, standardize work procedures, and reduce waste in line with the ECRS principles. The improvements resulted in a reduction of two employees in total. In the pickup front-seat production line, the number of employees was reduced from 6 to 5, increasing work efficiency from 59.57% to 79.67%. In the rear-seat pickup production line, the number of employees was reduced from 3 to 2, improving efficiency from 58.43% to 98.47%. In the passenger car seat production line, the number of employees was reduced from 6 to 3 in line with Takt Time, resulting in a decrease in efficiency from 97.26% to 94.41%. Overall, these improvements enabled the factory to reduce production costs by 432,000 baht per year.

Keywords: Toyota Production System (TPS), ECRS Principles, Takt Time, Yamazumi Chart

1. บทนำ

บริษัท ตรีศก เป็นผู้นำในการผลิตชิ้นส่วนยานยนต์ในประเทศไทย โดยผลิตชิ้นส่วนสำคัญ เช่น แหนบรถยนต์ เบาะรถยนต์ Coil Spring Flat Spring และชิ้นส่วนภายในรถยนต์ รวมถึงอุปกรณ์สำหรับอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ เช่น ชิ้นส่วนฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ ซึ่งทางบริษัท ตรีศก ได้รับการสนับสนุนเทคโนโลยีจากบริษัทแม่ในต่างประเทศ และมุ่งมั่นพัฒนาผลิตภัณฑ์ให้มีคุณภาพสูงเพื่อตอบสนองความต้องการของลูกค้าทั้งในและต่างประเทศ สภากรรมการปัจจุบัน บริษัท ตรีศก

ได้ดำเนินกิจกรรมลดต้นทุนเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานของพนักงานและลดต้นทุนการผลิต เนื่องจากบริษัทคู่ค้ามีการปรับแผนการทำงาน โดยต้องการรวมสายการผลิตรถเก๋งและรถกระบะเข้าด้วยกัน เนื่องจากยอดความต้องการที่ลดลงทำให้ต้องลดกำลังการผลิตลง เพื่อให้สอดคล้องต่อความต้องการของลูกค้า

ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงได้มุ่งศึกษาและหาแนวทางปรับปรุงสายการผลิตในส่วนของเบาะรถยนต์และปรับจำนวนพนักงานให้สอดคล้องกับปริมาณการผลิตของลูกค้า เพื่อสนับสนุนการเติบโตขององค์กรอย่างยั่งยืน โดยใช้ระบบการผลิตแบบโตโยต้า และหลักการลดความสูญเปล่าซีอาร์เอส เพื่อพัฒนากระบวนการผลิตให้สอดคล้องกับปริมาณการผลิตจริง โดยการจัดลำดับขั้นตอนการทำงานให้เป็นมาตรฐานและลดความสูญเปล่าที่เกิดขึ้นในสายการผลิต

ซึ่งจะสอดคล้องกับงานวิจัย [1] ได้ประยุกต์ใช้ระบบการผลิตแบบโตโยต้าในกระบวนการผลิตเสื้อผ้าสำเร็จรูป กรณีศึกษาการผลิตเสื้อแจ็คเก็ตบริษัททีวีทีการเน้นที่จำกัด สามารถเพิ่มประสิทธิภาพการผลิต 92% [2] ได้นำเทคนิคการผลิตแบบโตโยต้า กรณีศึกษาโรงงานถาวรการเกษตร เพื่อลดความสูญเปล่าในกระบวนการบรรจุห่อหุ้มใหญ่ และ [3] ได้ทำการประยุกต์ใช้ซีอาร์เอสร่วมกับระบบการผลิตแบบโตโยต้าในการปรับปรุงกระบวนการทำงานของแผนกตัวถังและสีบริษัทโตโยต้าสงขลามาช่วยแก้ปัญหากระบวนการทำงาน

2. ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 การศึกษางาน (Work study) [4] คือวิธีการศึกษาอย่างมีระเบียบเกี่ยวกับงานอย่างใดอย่างหนึ่งเพื่อที่จะปรับปรุงการทำงานนั้นให้มีประสิทธิภาพขึ้น ลดต้นทุน รวมถึงการเพิ่มผลผลิต (Productivity) ความสำคัญของการศึกษางานเกิดจากความจำเป็นในการใช้แรงคน วัสดุดิบ และเครื่องจักรอุปกรณ์ที่มีอยู่อย่างจำกัดให้ได้ประโยชน์มากที่สุด

2.2 แผนภูมิยามาซุมิ (Yamazumi Chart) [5] เป็นแผนภูมิแท่งซ้อนกันที่ใช้ในการผลิตแบบลีน (Lean Manufacturing) สามารถค้นหา Muda (ของเสีย) Mura (ความไม่สม่ำเสมอ) และ Muri (ภาระเกิน) ได้ รวมถึงสามารถปรับสมดุลสายการผลิตเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของเวลาในการผลิตและให้สอดคล้องกับ Takt Time ได้

2.3 ระบบการผลิตแบบโตโยต้า [6] (Toyota Production System; TPS) เป็นการจัดการกระบวนการผลิต การจัดการซัพพลายเออร์ รวมถึงโลจิสติกส์ และการส่งมอบสินค้าให้ลูกค้า แนวคิดพื้นฐานคือการลดต้นทุนโดยการกำจัดความสูญเปล่าและการเพิ่มประสิทธิภาพของเครื่องจักรและศักยภาพของคน โดยระบบการผลิตแบบทันเวลาพอดี (Just-in-Time) และ จิโดกะ (Jidoka) เป็นเสาหลักสำคัญ

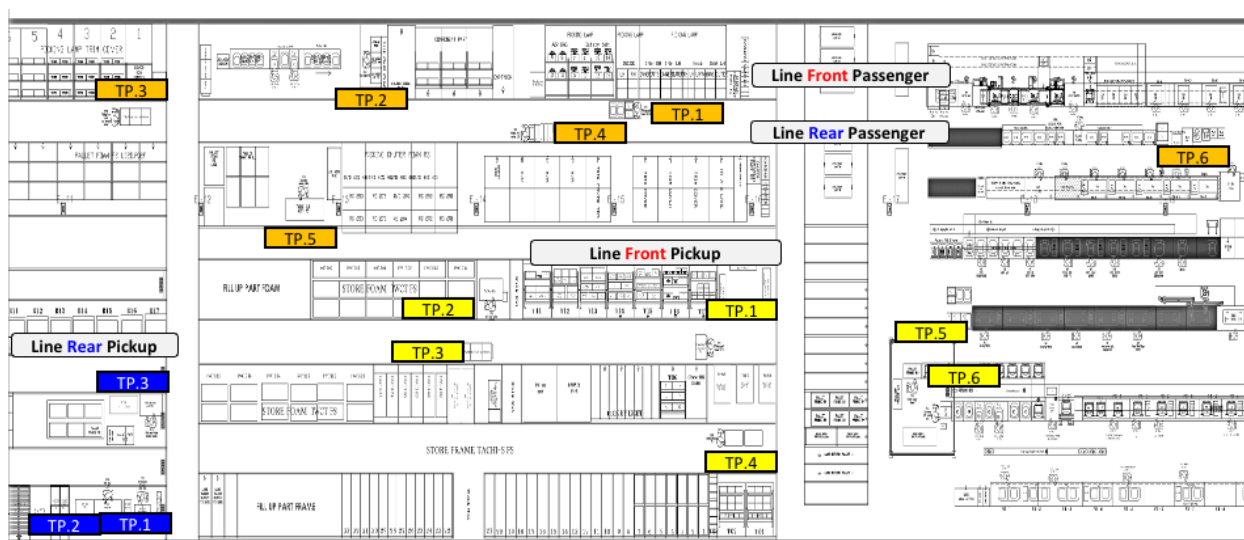
2.4 ไคเซ็น (Kaizen) [7] เป็นแนวคิดที่ใช้ในการทำงานภายในโรงงาน โดยการมุ่งเน้นไปที่การรักษาสภาพและปรับปรุงไปที่ละเล็กละน้อย ผสมผสานกับการนำนวัตกรรมมาใช้ในการงาน โดยใช้หลักทำงานแบบ Kaizen คือ ความคิดสร้างสรรค์ และการใช้หลัก เลิก ลด เปลี่ยน

2.5 หลักการลดความสูญเปล่าซีอาร์เอส แนวคิด ECRS [8] เป็นทฤษฎีที่ช่วยลดความสูญเสียนในกระบวนการทำงาน โดยเฉพาะความสูญเสียที่เกิดจากต้นทุนที่ไม่ก่อให้เกิดมูลค่า ประกอบด้วยหลักการ 4 ตัว คือ Eliminate (การกำจัด) Combine (การรวมกัน) Rearrange (การจัดลำดับใหม่) และ Simplify (การทำให้ง่ายขึ้น)

2.6 หลักของการจัดสมดุลสายการผลิต [9] การรวมกลุ่มงานย่อยเป็น Workstation และทำให้เวลาสถานีงานใกล้เคียงกันหรือเท่ากัน โดยต้องคำนึงถึงข้อจำกัดของลำดับก่อนหลังของงานย่อย เพื่อให้สามารถปฏิบัติงานและเพิ่มความต่อเนื่องของกระบวนการผลิต โดยมีหลากหลายงานวิจัยที่ใช้การจัดสมดุลสายการผลิตมาช่วยในการแก้ปัญหา เช่น [10] ได้ทำการจัดสมดุลสายการประกอบโดยการประยุกต์ใช้หลักการสมูทอย่างมีหลักเกณฑ์ สามารถเพิ่มประสิทธิภาพสายการประกอบผลิตภัณฑ์ตัวอย่างและลดรอบเวลาการทำงาน รวมถึงลดการสูญเสียความสมดุลที่เกิดขึ้นในสายการประกอบลงได้ และ [11] ได้ทำการจัดสมดุลกระบวนการผลิตแผนวงจรอุปกรณ์ควบคุมโดยการประยุกต์ใช้เทคนิคไคเซ็นร่วมกับการออกแบบผังการผลิตรูปแบบตัวยูในการเพิ่มประสิทธิภาพสายการผลิตและลดเวลาการทำงานลงได้

3. วิธีการดำเนินงาน

3.1 การศึกษาผังการทำงานของพนักงานในกระบวนการผลิตเบาะรถยนต์กรณีศึกษา โดยทำการศึกษาระบบการผลิตเบาะรถยนต์กรณีศึกษาเพื่อเก็บรวบรวมข้อมูลและทำความเข้าใจเกี่ยวกับกระบวนการผลิตเบาะรถยนต์ 2 สายการผลิต คือ สายการผลิตรถกระบะ และสายการผลิตรถเก๋ง โดยเข้าไปศึกษาทั้งหมด 2 ส่วน ได้แก่ กระบวนการซัพพลายพาร์ท (Supply Part) ประกอบหัวหมอน (Headrest) และเบาะรองแขน (Armrest) ทำการศึกษาการทำงานของแต่ละจุดทั้งหมด 15 จุด โดยมีผังการทำงานดังรูปที่ 1

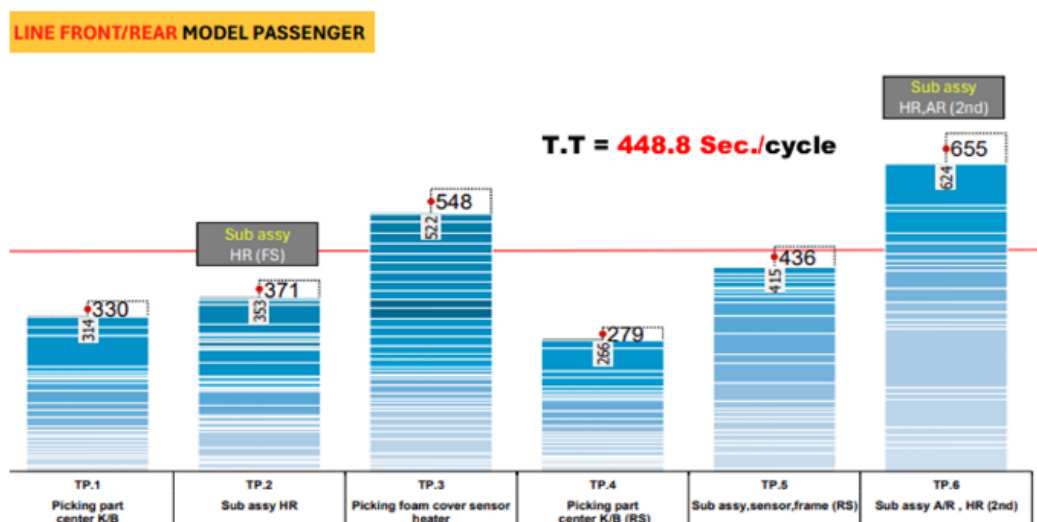


รูปที่ 1 แผนผังสายการผลิตก่อนปรับปรุง

หมายเหตุ

- สายการผลิตเร่งจุด Supply Part Line Passenger และจุด Sub Ass'y
- สายการผลิตกระเบจจุด Supply Part Line Pickup Line Front Seat
- สายการผลิตกระเบจจุด Sub Ass'y Line Rear Seat

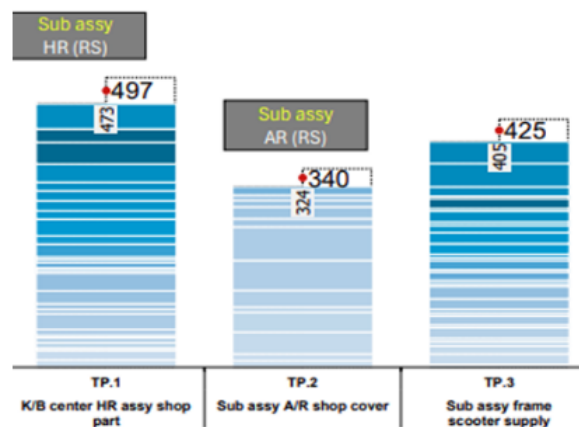
3.2 การศึกษาวิธีการและเก็บรวบรวมข้อมูลรอบเวลาการทำงานในแต่ละกระบวนการผลิตเบาะรถยนต์ โดยทำการรวบรวมข้อมูลกระบวนการทำงานของพนักงานในสายการผลิตของเดือนเมษายน พ.ศ. 2568 ทำการศึกษาและได้ทำการจับเวลาการทำงานแต่ละกระบวนการ ซึ่งแต่ละกระบวนการและรอบเวลาการทำงาน ดังรูปที่ 2, 3 และ 4 แผนภูมิมาชুমิรอบเวลาการทำงานของพนักงานก่อนปรับปรุง



รูปที่ 2 รอบเวลาการทำงานสายการผลิตเร่ง

LINE FRONT MODEL PICK UP

รูปที่ 3 รอบเวลาการทำงานสายการผลิตรถกระบะ Front Seat

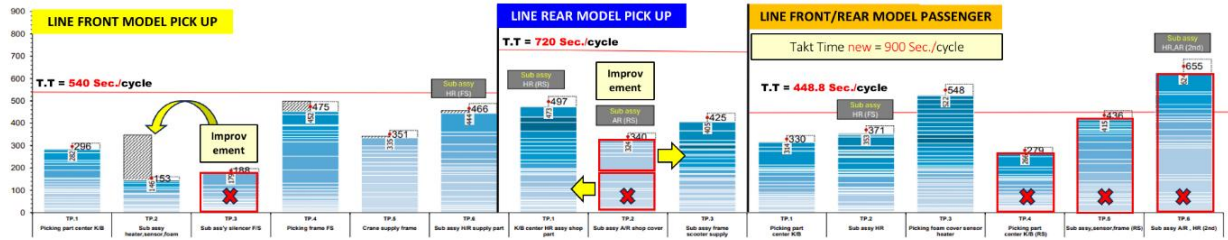
LINE REAR MODEL PICK UP**T.T = 720 Sec./cycle**

รูปที่ 4 รอบเวลาการทำงานสายการผลิตรถกระบะ Rear Seat

4. ผลการดำเนินงาน

4.1 การวิเคราะห์ปัญหาและแนวทางการปรับปรุงแก้ไข จากการศึกษาและเก็บข้อมูลเวลาการทำงานของพนักงานในแต่ละสายการผลิต พบว่ามีขั้นตอนที่ซ้ำซ้อนและเกิดความสูญเสียเปล่า จึงได้ปรับปรุงกระบวนการทำงานโดยใช้ระบบการผลิตโตโยต้า หลักการ Kaizen และหลักการ ECRS เพื่อลดงานย่อย ลดความซ้ำซ้อน และปรับเวลาในการทำงานให้เหมาะสมยิ่งขึ้น ดังรูปที่ 5 แสดงแผนภูมิมาซุมิรอบเวลาการทำงานของพนักงาน ซึ่งเป็นแผนการดำเนินการที่จะดำเนินการต่อไป

PICKUP H40A TP.F/S	T.T	540 sec./cycle	JPH	20	U/JPH	2 CT (HRS)	1,920 sec./cycle	MPV (cab)	4	Mon/Shift	MPV (Actual)	4	Mon/Shift	Dir MPV	2	Mon/Shift
PICKUP H40A TP.F/S	T.T	540 sec./cycle	JPH	15	U/JPH	2 CT (HRS)	1,360 sec./cycle	MPV (cab)	2	Mon/Shift	MPV (Actual)	3	Mon/Shift	Dir MPV	1	Mon/Shift
PASSENGER TP.F/S,R/S,2nd	T.T	254.4 sec./cycle	JPH	16	U/JPH	2 CT (HRS)	2,419 sec./cycle	MPV (cab)	4	Mon/Shift	MPV (Actual)	4	Mon/Shift	Dir MPV	0	Mon/Shift



รูปที่ 5 แผนการดำเนินรอบเวลาการทำงานของพนักงาน

4.2 วิธีแก้ไขปัญหาด้านหลักการ ECRS

4.2.1 Eliminate

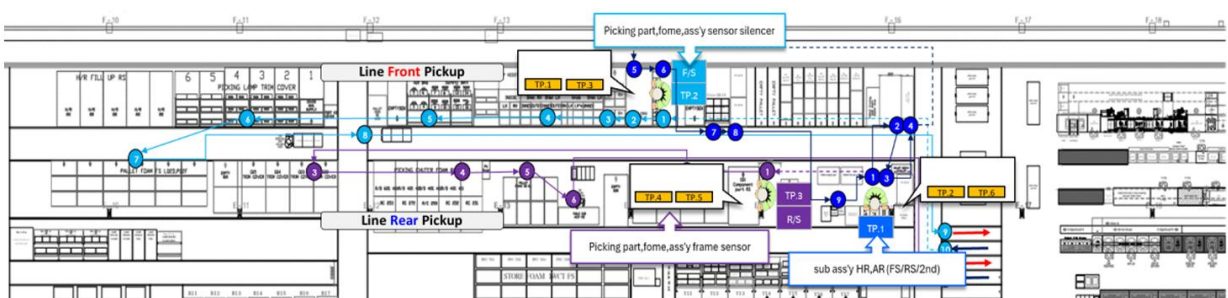
- (1) Line Front Seat (Pickup) ทำการลดขั้นตอนและลดพนักงาน 1 คน โดยปรับตำแหน่งการหยิบโม่ให้สะดวกขึ้น และตัดความสูญเปล่าออกจากกระบวนการ
- (2) Line Rear Seat (Pickup) ทำการปรับผังการทำงานเพื่อลดระยะการหยิบและเวลาเดิน พร้อมกำจัดความสูญเปล่าในกระบวนการ
- (3) Line Front & Rear Seat (Passenger) ทำการปรับผังการทำงานใหม่และเพิ่มชั้นวางสองชั้น เพื่อลดระยะการหยิบชิ้นงานและกำจัดความสูญเปล่า

4.2.2 Combine

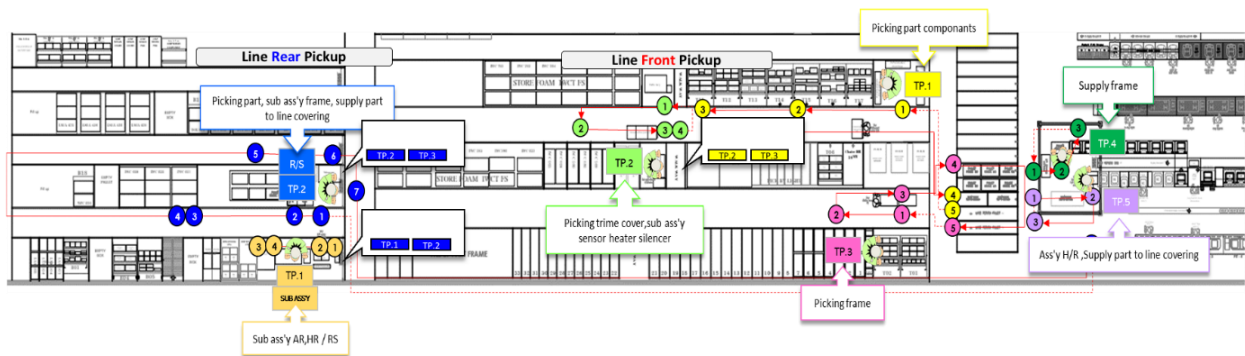
- (1) Line Front Seat (Pickup) ทำการรวมขั้นตอนของพนักงานคนที่ 3 ให้กับคนที่ 2 เพื่อให้เคลื่อนไหวน้อยลง Line Rear Seat (Pickup) รวมขั้นตอนที่คล้ายกัน แบ่งงานระหว่างคนที่ 1, 2 และ 3 เพิ่มชั้นวาง และลดการเคลื่อนไหวที่ไม่จำเป็น
- (2) Line Front & Rear Seat (Passenger) ทำการรวมขั้นตอนของพนักงานหลายตำแหน่งเข้าด้วยกัน และรวมจุด Sub Ass'y ที่หัวไลน์ เพื่อลดการเคลื่อนไหว

4.2.3 Rearrange จัดระบบการทำงานใหม่ โดยกำหนดมาตรฐานเวลาปฏิบัติงาน จับเวลาและบันทึกข้อมูลในเอกสารมาตรฐานต่าง ๆ เพื่อป้องกันการรอคอยภายในกระบวนการผลิต

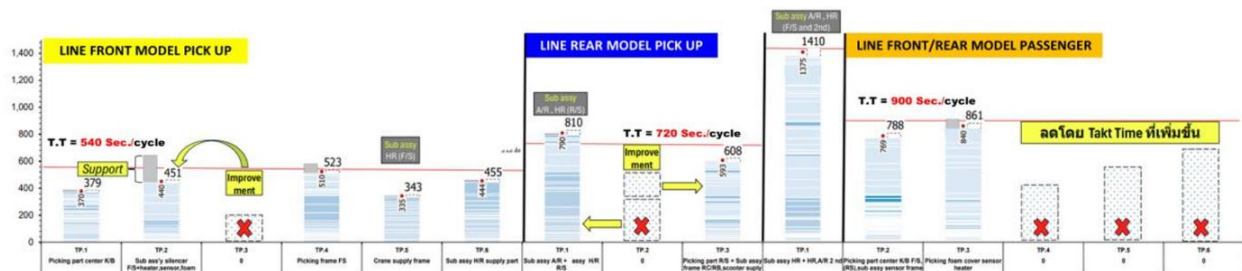
4.2.4 Simplify นำพนักงานส่วนเกินออก และกำหนดเส้นทางการเคลื่อนไหวใหม่ให้สะดวก แม่นยำ และเหมาะสมกับตำแหน่งเครื่องจักร เพื่อให้ลดเวลาการทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ



รูปที่ 6 แผนผังการทำงานสายการผลิตรถเก๋งหลังปรับปรุง



รูปที่ 7 แผนผังการทำงานสายการผลิตรถกระบะ ทั้ง 2 จุด หลังการปรับปรุง



รูปที่ 8 แผนภูมิมาซูมิรอบเวลาการทำงานของพนักงานหลังการปรับปรุง

จากการวิเคราะห์และหาแนวทางการแก้ไขปัญหาด้วยหลักการ ECRS ซึ่งเป็นหลักการที่ใช้ในการปรับปรุงกระบวนการทำงาน เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพและประสิทธิผลในการลดจำนวนพนักงานและลดขั้นตอนการดำเนินงาน แสดงแผนผังการทำงานหลังปรับปรุงของสายการผลิตรถกระบะดังรูปที่ 6 และสายการผลิตรถกระบะทั้ง 2 จุด หลังทำการปรับปรุง แสดงแผนผังการทำงานดังรูปที่ 7 และรูปที่ 8 แสดงแผนภูมิมาซูมิรอบเวลาการทำงานของพนักงานหลังการปรับปรุง ซึ่งมีความสอดคล้องกับงานวิจัยและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องดังที่กล่าวข้างต้น

5. สรุปผลการดำเนินงาน

1) สรุปผลการปฏิบัติงาน การปรับปรุงกระบวนการทำงานสามารถลดพนักงานได้รวม 5 คน โดยสายการผลิตรถกระบะส่วนหน้า ลดจาก 6 คน เหลือ 5 คน ประสิทธิภาพเพิ่มจาก 59.57% เป็น 79.67% ส่วนสายการผลิตรถกระบะส่วนหลัง ลดจาก 3 คน เหลือ 2 คน ประสิทธิภาพเพิ่มจาก 58.43% เป็น 98.47% และสายการผลิตรถกระบะทั้ง 2 จุด หลังทำการปรับปรุง ประสิทธิภาพลดลงเล็กน้อยจาก 97.26% เหลือ 94.41% แต่ยังคงอยู่ในเกณฑ์ยอมรับได้ ส่งผลให้โรงงานสามารถลดต้นทุนได้ถึง 432,000 บาทต่อปี

2) ข้อเสนอแนะ จากการศึกษากระบวนการผลิตเบาะรถยนต์บริษัท พบประเด็นที่ควรเสนอแนะเพื่อให้โรงงานกรณีศึกษานำไปพิจารณาปรับปรุง ได้แก่ การปรับปรุงลักษณะการเดิน การหยิบชิ้นงานของพนักงาน และการจัดวางสถานีงานให้เหมาะสมยิ่งขึ้น เนื่องจากพบว่าบางสถานีมีการทำงานเกินกว่ารอบเวลาที่กำหนด ซึ่งอาจส่งผลต่อประสิทธิภาพโดยรวมของกระบวนการผลิต ทั้งนี้หากมีการดำเนินการปรับปรุงในประเด็นดังกล่าวอย่างต่อเนื่อง จะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการทำงาน ลดความสูญเสียของกระบวนการลงได้

6. กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้จัดทำขอขอบคุณบริษัทกรณีศึกษา และทีมงานผู้มีส่วนร่วมทุกท่านที่ให้ความอนุเคราะห์ข้อมูลและร่วมมือในการให้ข้อมูลสภาพปัญหาของงานและร่วมดำเนินการแก้ไขเพื่อให้บรรลุวัตถุประสงค์และสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] K. Korbuakaew, P. Phoosomma, and C. Bunsan, "Implementing the Toyota Production System in the Manufacturing Process of Ready-Made Clothing A Case Study Jacket Production, VT Garment Co., Ltd." *The Journal of Industrial Technology: Suan Sunandha Rajabhat University*, Vol. 11(2), 2023, pp. 95–108.
- [2] P. Larpsomboonchai, and N. Kecharananta, "Waste Reduction in Onion Packing Process by Using Toyota Production System (TPS): A Study at Thawornkarnkaset Packing Plant" *Suthiparithat*, Vol. 29(92), 2015, pp. 218–235.
- [3] J. Prommontree, and W. Suksanchananun, "Application of Six Sigma in Conjunction with Toyota Production System to Improve the Process of the Body and Paint Departments Toyota Songkhla Co., Ltd." *Suthiparithat*, Vol. 29(92), 2015, pp. 182–199.
- [4] T. Prayatwong, C. Thurapaeng, T. Tonglim, and C. Pornsing, "Work Study and Standard Time for Processing Dragon Jars: Case Study of a Dragon Jar Factory," *Industrial Technology Lampang Rajabhat University Journal*, Vol. 15(1), 2022, pp. 1-12.
- [5] H. Suraphan, and S. Swangnop, "Improvement of Laminate Production Line with Lean Concept," *Journal of Engineering and Innovation*, Vol. 18(4), 2025, pp. 65-78.
- [6] P. Homsri, A. Krairit, and P. Wisuwan, "An Application of Toyota Production System: A Case Study of Automotive Fuel Tank Manufacturer," *Journal of Engineering, RMUTT*, Vol. 1(1), 2012, pp. 11-24.
- [7] N. Udomsri, N. Sukachat, P. Trinrachatamete, and W. Wongjinda, "Improving and Upgrading Work to Increase Productivity with Kaizen Techniques for Industry 5.0," *Interdisciplinary Academic and Research Journal*, Vol. 5(3), 2025, pp. 263-272.
- [8] C. Mongkhonchai, C. Rabob, and P. Vanakul, "Waste Reduction in Cosmetic Inventory Management by Using ECRS Principles," *UMT-POLY Journal*, Vol. 22(1), 2026, pp. 39-47.
- [9] W. Keaitnukul, "A Line Balancing of the Aluminium Frame Assembly Processes Case Study: A Sample Company," *Thai Industrial Engineering Network Journal*, Vol. 4(1), 2018, pp. 49-58.
- [10] J. Klunngien, "Heuristic Method for Assembly Line Balancing a Case Study in Refrigerator Factor," *Kasem Bundit Engineering Journal*, Vol. 5(2), 2015, pp. 56-69.
- [11] B. Phontang, K. Plaengdee, J. Nithikarnjanatharn, W. Nutkhum, and P. Nachaisit, "Optimization of Control Device Circuit Board Production with Kaizen Techniques and U-Shaped Layout," *Thai Industrial Engineering Network Journal*, Vol. 11(2), 2025, pp. 75-84.

คำแนะนำสำหรับผู้เขียน

วารสารเทคโนโลยีและวิศวกรรมก้าวหน้า รับบทความภาษาไทยหรือภาษาอังกฤษ 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 ไม่ต้องระบุคำนำหน้าและตำแหน่งทางวิชาการ ให้ใส่หมายเลขลำดับ (ด้วยก) แสดงสังกัดที่แตกต่างกัน และใส่เครื่องหมายดอกจัน (*) ไว้หลัง ชื่อ-สกุล และหมายเลขสังกัด ของผู้เขียนหลัก (ด้วยก)

2.2.1 สำหรับผู้เขียนหลัก ให้ระบุ E-mail เพื่อใช้ในการติดต่อ

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

2.4 บทคัดย่อ (Abstract) มีทั้งภาษาไทยและภาษาอังกฤษ ใช้ตัวอักษรขนาด 14 หัวข้อให้ใช้ตัวพิมพ์หนาและสำหรับเนื้อหาของบทคัดย่อให้ใช้ตัวพิมพ์ปกติ ซึ่งเป็นการสรุปประเด็นเนื้อหาที่เป็นแก่นสำคัญเน้นประเด็นสำคัญของงาน ที่ต้องการนำเสนอ โดยควรประกอบด้วยวัตถุประสงค์ วิธีการ เครื่องมือ และผลสรุป ควรเขียนให้สั้นที่ได้จากการวิจัย และกระชับสำหรับบทคัดย่อภาษาอังกฤษ 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 และใส่หมัดภาค หรือ เครื่องหมายจุดหลังตัวเลข เว้นระยะห่าง 1 ช่อง และตามด้วยลำดับหัวข้อ โดยกำหนดให้ทั้งหัวข้อเป็นตัวพิมพ์หนาหากมีการแบ่งหัวข้อย่อย ให้ใช้เลขระบบทศนิยมกับหัวข้อย่อย เช่น 1.1 โดยใช้อักษรรูปแบบปกติ ซึ่งในส่วนเนื้อหาของเนื้อหาควรมีหัวข้อเรื่องระเบียบวิธีการ วัสดุและอุปกรณ์ และหัวข้ออื่นที่จำเป็นต่อการได้มาซึ่งผลการวิจัย

2.7.1 รูปแบบการเขียนตารางให้ดูตัวอย่างดังตารางที่ 1 กำหนดให้มีเส้นในแนวนอน มีเฉพาะเส้นในแนวนอน หัวข้อหลักในแต่ละคอลัมน์ กำหนดให้เป็นตัวหนา จัดชิดขอบด้านซ้ายของแต่ละคอลัมน์ และในส่วนเนื้อหาของเนื้อหาควรร่างอิงและมีการอธิบายตารางที่นำมาใช้สื่อสารกับผู้อ่านในบทความ 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	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
รองศาสตราจารย์ ดร.ศิริชัย ต่อสกุล	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
รองศาสตราจารย์ ดร.คมกริช ละวรรณวงษ์	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ
รองศาสตราจารย์ สุรสิทธิ์ ระวังวงศ์	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย
รองศาสตราจารย์ ดร.วัชรินทร์ สติธิเจริญ	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา
รองศาสตราจารย์ ดร.กนกวรรณ จ้าวสุวรรณ	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ
รองศาสตราจารย์ ดร.จิตติวัฒน์ นิธิกาญจนธาร	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
รองศาสตราจารย์ ดร.ศุภชัย ปลายเนตร	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนครพนม
รองศาสตราจารย์ ดร.วสันต์ เจริญสุวรรณ	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ
รองศาสตราจารย์ ดร.สายชล ชุตเจื้อจัน	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ
รองศาสตราจารย์ ชาตรี หอมเขียว	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย
รองศาสตราจารย์ ดร.ฉันทมนี พูลเจริญศิลป์	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ
รองศาสตราจารย์ ดร.ประเสริฐ ฮ่องฉ้วน	สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
รองศาสตราจารย์ ดร.วราภรณ์ กลิ่นบุญ	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ
รองศาสตราจารย์ เดช เหมือนขาว	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย
รองศาสตราจารย์ สมศักดิ์ แก้วพลอย	คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏสงขลา
รองศาสตราจารย์ ดร.เจษฎา ก้อนแพง	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ

รองศาสตราจารย์ ดร.กิตติพงษ์ กิมะพงศ์	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ประจักษ์ จัตกุล	คณะวิศวกรรมศาสตร์บูรณาการและเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ภาสพิรุฬห์ วัชรศรีสำโรง	คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศุภสิทธิ์ มะโนเครื่อง	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา
รองศาสตราจารย์ ดร.อภิรักษ์ ภูเกล้าวัน	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เชาฟีร์ ดือราแม	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พีรวิทย์ โชคเหมาะ	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นรงค์ วิชาพา	คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์
รองศาสตราจารย์ วรพงศ์ บุญช่วยแทน	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พชรพล ตันทวีรุฬห์	คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุรัชย์ เหมศิริณ	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เชิดพงษ์ จอมเดช	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.รัตติกรณ์ เสาร์แดน	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุวัฒน์ กิจเจริญวัฒน์	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธีรยุทธ กาญจนแสงทอง	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปริญญาศรีสัตยกุล	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ทองเพียร พรหมบุตร	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พิสิทธิ์ เมื่อน้อย	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.มนัส เจริญกิจ	วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กุลยุทธ์ บุญแข็ง	คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏสงขลา
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เลิศลักษณ์ แก้ววิมล	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชัยณรงค์ ศรีระบุตร	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ จตุพร ใจดำรงค์	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อดิสร ศิริคำ	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศุภลักษณ์ มะโนธรรม	คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ก้าวหน้า จงวัฒนารักษ์	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จันทกมล ลุยจันทร์	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศักดิ์ดา คำจันทร์	คณะวิทยาศาสตร์และวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธีรวัศ คำหน่อแก้ว	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กาญจนา ลือพงษ์	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.แมน ดุ้ยแพร่	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ณัฐนันท์ มุลสระคู	คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรมและเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วุฒิวัฒน์ คงรัตนประเสริฐ	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ณัฐศักดิ์ พรพุดศิริ	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศุภพัชร พวงแก้ว	คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วนิดา บุญโถม	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 มหาวิทยาลัยขอนแก่น
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ปัทมิตา นาควงษ์	คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏพระนครศรีอยุธยา
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สมมาตร ศรีประเทือง	คณะวิศวกรรมศาสตร์บูรณาการและเทคโนโลยี มหาวิทยาลัย เทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ทวี หมดสี	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สุรเทพ เป้นเกิด	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ฐิติ หมอรักษา	คณะวิศวกรรมศาสตร์บูรณาการและเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ เฉลิมพล คล้ายนิล	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ชัชวาลย์ สุขมัน	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ จีรวัดน์ ณ พัทลุง	สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์และนวัตกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ไพบุลย์ หาญมนต์	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ภัทรพงศ์ เกิดลาภี	คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัย เทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ชูไฮดี สนิ	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ นภัสดล สิงหะตา	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สัญญา คำจริง	คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัย เทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ โอริส มณีสาย	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ
ดร.จิระศักดิ์ ธาระจักร์	คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
ดร.เอกชัย วารินศิริรักษ์	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ อนันต์ โสภิน

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ

ดร.ปริญญา กวีกิจบัณฑิต

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ดร.ปกรณ์ ชุมรัมย์

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ

ดร.พลภัทร ทิพย์บุญศรี

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

ดร.พิริยะ ปิ่นทอง

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ

ดร.ณัฐภัทร สุปรียธิติกุล

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์

ดร.ธงชัย เพ็งจันทร์ดี

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

ดร.สุริยพงศ์ นิลสังข์

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

ดร.ทงศักดิ์ คงสินธุ์

วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

ดร.ปิยะพงษ์ คำคุณ

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ

ดร.ปรวิทย์ เจียนดอน

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน

ดร.วิเรชา คำจันทร์

คณะวิทยาศาสตร์และวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ดร.สุรธันย์ ปาละพรพิสุทธิ์

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ

ดร.เอกชัย คุปตาวาทิน

คณะบริหารธุรกิจและเทคโนโลยีสารสนเทศ

(สาขาโลจิสติกส์)

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน

นาวาเอก ดร.บพิช ทศเทพพิทักษ์

กรมอุทกหารเรือ

โรงเรียนช่างกรมอุทกหารเรือ

ดร.ยุทธนา แก้วคำแจ้ง

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ

ดร.ธวัชชัย ปัญญาคิด

คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก

ดร.ปรเมศวร์ เป้าวรรณ

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน

ดร.พงศ์พนธ์ สกลธีอ

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ

ดร.อดิศักดิ์ นาวเหนียว

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยบูรพา

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

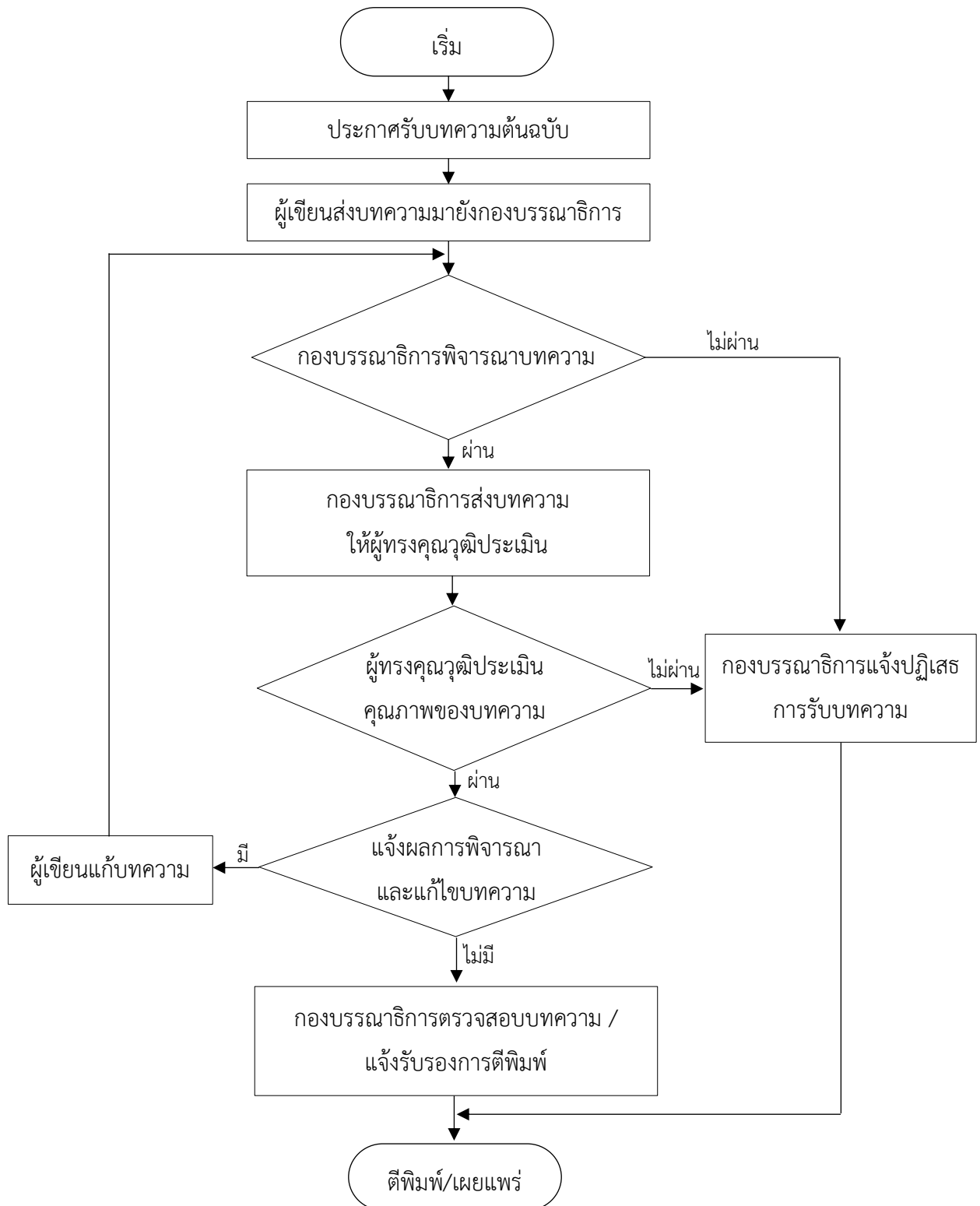
.....

.....

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