



JTEP

วารสาร เทคโนโลยีและ วิศวกรรมก้าวหน้า

Journal of Technology
and Engineering Progress

ปีที่ 1 ฉบับที่ 1 เดือน กรกฎาคม - ธันวาคม 2566

ISSN : xxxx-xxxx (Online)

สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มทร.กรุงเทพ

RMTK
ราชมนักลกรุงเทพร

วารสารเทคโนโลยีและวิศวกรรมก้าวหน้า

Journal of Technology and Engineering Progress

ปีที่ 1 ฉบับที่ 1 กรกฎาคม – ธันวาคม 2566 (Vol 1, No.1, 2023, July - December)

เจ้าของ สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ

ที่ปรึกษา

อธิการบดี

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ

คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ

นายกสมาคมเทคโนโลยีและนวัตกรรมเชิงสร้างสรรค์

สมาคมเทคโนโลยีและนวัตกรรมเชิงสร้างสรรค์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ

บรรณาธิการ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ฤทธิชัย เกาเนียม

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ

รองบรรณาธิการ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กมลพงศ์ แจ่มกมล

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ

ผู้ช่วยบรรณาธิการ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศุภวัฒน์ ชูวารี

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ

กองบรรณาธิการ

รองศาสตราจารย์ ดร.วิภาณู ช่วยพันธ์

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ

รองศาสตราจารย์ ดร.จิระพล กลิ่นบุญ

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ

รองศาสตราจารย์ ดร.นเรศรฐ์ พัฒนเดช

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

รองศาสตราจารย์ ดร.บวรโชค ผู้พัฒน์

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

รองศาสตราจารย์ ดร.อิศรทัต พึ่งอัน

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

รองศาสตราจารย์ ดร.ประยูร สุรินทร์

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีปทุมวัน

รองศาสตราจารย์ ดร.อภิวัฒน์ มุฑามระ

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

รองศาสตราจารย์ ดร.ประภาศ เมืองจันทร์บุรี

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

รองศาสตราจารย์ วรพงศ์ บุญช่วยแทน

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กิตติชัย โสจิพันธุ์

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

ผู้จัดทำวารสาร

ดร.สมชาย วนไทยสงค์

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ

นายวงศธร วงศ์ดีอินทร์

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ

บทความที่ลงตีพิมพ์ในวารสารเป็นความคิดเห็นของผู้เขียน**กองบรรณาธิการไม่จำเป็นต้องเห็นด้วยเสมอไป****ความเป็นมา**

วารสารเทคโนโลยีและวิศวกรรมก้าวหน้า ISSN xxxx - xxxx เป็นวารสารวิชาการของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ ร่วมกับ สมาคมเทคโนโลยีและนวัตกรรมเชิงสร้างสรรค์ (ICTA) ซึ่งมีนโยบายรับตีพิมพ์บทความคุณภาพสูงในด้านเทคโนโลยีและวิศวกรรม เป็นวารสารที่อยู่ในฐานข้อมูลของศูนย์ดัชนีการอ้างอิงวารสารไทย (TCI) ด้านวิทยาศาสตร์ และเทคโนโลยี โดยเผยแพร่เป็นราย 6 เดือน ซึ่งตีพิมพ์ปีละ 2 ฉบับ (ฉบับละ 8 - 12 บทความ) และ มีการดำเนินงาน จัดพิมพ์บทความประเภทต่าง ๆ ได้แก่ บทความวิจัย (Research paper) บทความวิชาการ (Academic paper) และบทความปริทัศน์ (Review article)

บทความที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในวารสารเทคโนโลยีและวิศวกรรมก้าวหน้า เป็นบทความที่สร้างองค์ความรู้ และมีคุณภาพในทางวิชาการสามารถนำไปใช้ประโยชน์เพื่อการอ้างอิงได้ เพราะผ่านการพิจารณาถ่วงดุล 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 และตอบสนองต่อการพัฒนาด้านเทคโนโลยี และวิศวกรรมของประเทศไทย

นโยบายการรับบทความ

กองบรรณาธิการวารสารเทคโนโลยีและวิศวกรรมก้าวหน้า มีความยินดีที่จะรับบทความจากอาจารย์ นักวิจัย นักวิชาการทั้งภายในและภายนอกมหาวิทยาลัย ที่เขียนเป็นภาษาไทยหรือภาษาอังกฤษ ซึ่งผลงานที่ส่งมาขอตีพิมพ์ต้องไม่เคยเผยแพร่ในสิ่งพิมพ์อื่นใดมาก่อน และต้องไม่อยู่ในระหว่างการพิจารณาของวารสารอื่น

การละเมิดลิขสิทธิ์ถือเป็นความรับผิดชอบของผู้ส่งบทความโดยตรง บทความที่ได้รับการตีพิมพ์ต้องผ่านการพิจารณา กลั่นกรองคุณภาพจากผู้ทรงคุณวุฒิ และได้รับความเห็นชอบจากกองบรรณาธิการ

ข้อความที่ปรากฏอยู่ในแต่ละบทความที่ตีพิมพ์ในวารสารวิชาการเล่มนี้ เป็นความคิดเห็นส่วนตัวของผู้เขียนแต่ละท่าน ไม่เกี่ยวข้องกับมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพแต่อย่างใด ความรับผิดชอบด้านเนื้อหา และการตรวจร่างบทความ แต่ละบทความเป็นของผู้เขียนแต่ละท่าน หากมีความผิดพลาดใด ๆ ผู้เขียน แต่ละท่านจะต้องรับผิดชอบบทความของตนเอง แต่ผู้เดียว

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

อาคาร 18/1 สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ 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 กรกฎาคม – ธันวาคม
ฉบับที่ 2 เดือน มกราคม – มิถุนายน (ปีถัดไป)

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

สารบัญ

หน้า

การเปรียบเทียบผลกระทบของเงื่อนไขการดึงขึ้นรูปในกระบวนการดึงลวดอลูมิเนียมผสม เกรด AA5052 Comparative on the Effect of Wire Drawing Condition for Wire Drawing Process of Aluminum Alloy AA5052 ณัฐศักดิ์ พรพุดศิริ, พิสิทธิ์ เมืองน้อย, เฉลิมพล คล้ายนิล	1
การหาค่าที่เหมาะสมของการเจาะรูระดับไมโครเหล็กกล้าไร้สนิม 316L ด้วยการปล่อยประจุไฟฟ้าผ่านแท่งอิเล็กโทรดชนิด CuZn Optimization of Micro EDM Drilling Parameters for 316L Stainless Steel Using CuZn Electrode ภูเมศวร์ แสงระยับ, ประสาน แสงเขียว, ทวี หมดส๊ะ, นิวัฒน์ มูเก็ม	15
ผลกระทบของกระบวนการทางความร้อนที่ส่งผลต่อสมบัติทางกลและลักษณะขอบตัดโลหะแผ่นเหล็กกล้าความแข็งแรงสูงชนิดเฟสคู่ (DP590) Effect of Heat Treatment Process on Mechanical Properties and Cutting Edge Characteristics of High Strength Steel (DP590) ณัฐศักดิ์ พรพุดศิริ, พิสิทธิ์ เมืองน้อย, นิวัฒน์ มูเก็ม, พงศกร หลีตระกูล	29
การพัฒนาแอปพลิเคชันติดตั้งเครื่องมือตัดบนเครื่องกลึงซีเอ็นซีด้วยเทคนิคการหมุนน้อยที่สุด Developing an Application to Install Cutting Tools on a Lathe Using the Least Rotation Technique จตุพร ใจดำรงค์	40
การจัดตารางเส้นทางพาหนะโดยวิธีอัลกอริทึมแบบประหยัด The Application of Saving Algorithms for Scheduling Vehicle Routing ณรรวดี สิทธิเดชารัง	51
การเพิ่มประสิทธิภาพกระบวนการประกอบเครื่องจักรโดยใช้หลักการไคเซ็น กรณีศึกษา บริษัทออกแบบติดตั้งระบบอัตโนมัติ The Increasing of Machine Assembly Processes Performance Efficiency by Using Kaizen Principle Case Study: Automation Design and Installation Company สินมหัต ฝ้ายลุย, รุ่งเพชร รัชมี, วีรพงศ์ นุพพล, วิษณุ แผงเมือง, ภัทรพงศ์ เกิดลาภี	61
การหาเวลาสั่งซื้อที่เหมาะสมสำหรับสินค้าหลายผลิตภัณฑ์ กรณีศึกษาร้านค้าร้านชำ Determining the Optimal Ordering Period for Multiple Products A Case Study of Waranya Shop ศักดิ์ดา คำจันทร์, ชัดติยา ภาวงศ์, วิรชชา คำจันทร์	70
การบันทึกข้อมูลการสอบเทียบเครื่องมือวัดด้วยโปรแกรมไมโครซอฟท์เอ็กเซล วีบีเอ และระบบบาร์โค้ด Using Excel VBA Program and Barcode System for Recording of Calibration Data ชญาณิส เฉลิมสุข, เถลิง พลเจริญ	78
การจำลองแบบในกระบวนการเชื่อมอาร์คทั้งสแตนภายใต้แก๊สปกคลุมด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ Welding Simulation of TIG Welding by Using Finite Element Technique เจษฎา แก้ววิจิตร, สัณญา คำจริง	89

การเปรียบเทียบผลกระทบของเงื่อนไขการดึงขึ้นรูปในกระบวนการดึงลวดอลูมิเนียมผสม เกรด AA5052

Comparative on the Effect of Wire Drawing Condition for Wire Drawing Process of Aluminum Alloy AA5052

ณัฐศักดิ์ พรพุดศิริ^{1*} พิสิต เมืองน้อย¹ เฉลิมพล คล้ายนิล¹

¹สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการและการผลิต คณะอุตสาหกรรมและเทคโนโลยี
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์

ถนนเพชรเกษม ตำบลหนองแก อำเภอบางพลี จังหวัดประจวบคีรีขันธ์ 77110

Natthasak Pornputsiri^{1*} Phisith Muangnoy¹ Chalermopol Klynil¹

¹Department of Industrial and Production Engineering, Faculty of Industry and Technology,
Rajamangala University of Technology Rattanakosin,
Phetchaseam road, Nongkeha, Hua-Hin, Prachubkhirkhan, 77110

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

(Received: 3 March 2023 / Accepted: 13 December 2023 / Published: 26 December 2023)

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาและเปรียบเทียบผลกระทบของเงื่อนไขการดึงขึ้นรูปเส้นลวดอลูมิเนียมผสมเกรด 5052 ซึ่งประกอบไปด้วยขนาดมุมตาย ชนิดสารหล่อลื่น และความเร็วในการดึงขึ้นรูป ที่ส่งผลต่อแรงดึงลวดและคุณภาพเส้นลวดสำเร็จ โดยดำเนินการดึงขึ้นรูปทำจากวัสดุทั้งสเตนคาร์ไบด์เกรด K20 (ISO Code) มีขนาดมุมไหลเข้าต่างกัน 3 ระดับ คือ 16°, 18° และ 20° เส้นลวดก่อนการดึงขึ้นรูปมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.0 มม. ทำการดึงขึ้นรูปด้วยอัตราการลดพื้นที่หน้าตัดเท่ากับร้อยละ 10 โดยใช้สารหล่อลื่นที่มีค่าความหนืดต่างกันจำนวน 3 ชนิด และถูกดึงด้วยความเร็ว 3 ระดับ ทำการทดสอบและวิเคราะห์ผลการทดลองจาก แรงดึงขึ้นรูป ค่าความหยาบผิว และความแข็งแรงดึงของเส้นลวดสำเร็จ ผลการทดลองพบว่าการดึงลวดผ่านตายที่มีขนาดมุมไหลเข้า 16° ด้วยความเร็ว 0.1 เมตร/วินาที โดยใช้สารหล่อลื่น DN Press Draw40 ได้เส้นลวดสำเร็จที่มีพื้นที่ผิวดีที่สุด โดยการดึงขึ้นรูปเส้นลวดผ่านตายที่มีขนาดมุมไหลเข้าขนาดใหญ่และใช้ความเร็วในการดึงขึ้นรูปต่ำ จะใช้แรงในการดึงขึ้นรูปและให้เส้นลวดสำเร็จที่มีความแข็งแรงมากกว่าจากผลของการเปลี่ยนรูปแบบบริดจ์แดนซ์ ส่วนการดึงขึ้นรูปผ่านตายที่มีขนาดมุมไหลเข้าขนาดเล็กและใช้ความเร็วในการดึงขึ้นรูปสูง จะใช้แรงในการดึงขึ้นรูปน้อยกว่าและเส้นลวดสำเร็จมีความแข็งแรงดึงน้อยกว่า ส่วนผลกระทบของสารหล่อลื่นพบว่า การดึงลวดโดยใช้สารหล่อลื่นที่มีค่าความหนืดต่ำจะใช้แรงดึงในการขึ้นรูปสูงกว่า ได้เส้นลวดสำเร็จซึ่งมีค่าความหยาบผิวและค่าความแข็งแรงดึงที่ต่ำกว่า

คำสำคัญ: กระบวนการดึงขึ้นรูปลวด มุมไหลเข้าแม่พิมพ์ สารหล่อลื่น ความเร็วในการดึงลวด เส้นลวดอลูมิเนียม

Abstract

The aim of this research was to comparative study on the effect of the aluminum alloy grade 5052 wire drawing conditions, which consisted of die approach angle, lubricant type and wire drawing speed, that affects to the wire drawing force and the finished wire quality. The wire drawing dies are made of tungsten carbide grade K20 (ISO Code). There are 3 different size of die approach angles: 16°, 18° and 20°. The aluminium wire before drawing has a diameter of 2.0 mm., wire drawing with a cross-sectional reduction

ratio of 10%, used of 3 different viscosity lubricants and 3 drawing velocity. Experiment and analyze on the drawing force, surface roughness and tensile strength of the finished wire. The experiment results showed that wire drawing by a die with an approach angle of 16° at a drawing velocity of 0.1 m/s and using lubricant DN Press Draw40 grade gave the best wire surface finish. The drawing by a large die approach angle and uses a low velocity speed Will use the higher drawing force and provide a stronger wire. Which is caused by the effect of redundance deformation. As for wire drawing through a small die approach angle size and a high drawing velocity, use the lower drawing force, the finished wire has less strength. As for the effects of lubricants, it is found that the wire drawing by the lubricants with low viscosity will use a higher drawing force. Finish wire, which has lower a surface roughness and tensile strength.

Keywords: wire drawing process, die approach angle, lubricant, drawing velocity, aluminium wire

1. บทนำ

กระบวนการดึงขึ้นรูปลวด (Wire drawing process) ถูกใช้เพื่อการผลิตเส้นลวดที่มีสมบัติทางกลและคุณภาพผิวที่ดีตามข้อกำหนด ดังนั้นผู้ผลิตหรือผู้ออกแบบกระบวนการผลิตจึงจำเป็นต้องเข้าใจถึงพฤติกรรมของวัสดุในระหว่างกระบวนการดึงขึ้นรูปเป็นอย่างดี ซึ่งพฤติกรรมการเปลี่ยนรูปของวัสดุจะขึ้นอยู่กับปัจจัยสำคัญหลายประการ เช่น ลักษณะรูปร่างของตายสมบัติทางกลของวัสดุ ชนิดสารหล่อลื่น และความเร็วในการดึงขึ้นรูป เป็นต้น ทั้งนี้เงื่อนไขการขึ้นรูปดังกล่าวจะส่งผลโดยตรงต่อคุณภาพของเส้นลวดสำเร็จและอัตราการสึกหรอของแม่พิมพ์

การผลิตเส้นลวดให้ได้ขนาดที่ถูกต้องเที่ยงตรงและมีคุณภาพผิวที่ดี ผู้ผลิตจะต้องมีพื้นฐานและประสบการณ์ในการออกแบบแม่พิมพ์เป็นอย่างดี ในการออกแบบและสร้างแม่พิมพ์ส่วนที่มักถูกมองข้ามและขาดการคำนึงถึงคือการกำหนดรายละเอียดของลักษณะรูปร่างภายในของตาย [1,2] เนื่องจากการเปลี่ยนรูปถาวรของเส้นลวดจะเกิดขึ้นภายในช่องว่างของตายซึ่งก่อให้เกิดแรงต้านภายในและส่งผลกระทบต่อแรงในการดึงขึ้นรูป อีกทั้งในขณะที่ขึ้นรูปจะส่งผลให้พื้นผิวสัมผัสระหว่างเส้นลวดและตายมีอุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นเกิดเป็นพลังงานความร้อนจากผลของความเครียดในการเปลี่ยนรูปและความเสียดทานที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวสัมผัส [3,4] ซึ่งค่าความร้อนบนชั้นผิวของเส้นลวดจะขึ้นอยู่กับสัมประสิทธิ์ความเสียดทานและความเร็วในการดึงขึ้นรูป โดยส่วนของการเปลี่ยนรูปถาวรขนาดใหญ่จะเกิดขึ้นบริเวณพื้นที่รูปทรงกรวยหรือเรียกว่ามุมไหลเข้าของตาย (Die approach angle) ดังนั้นการกำหนดขนาดมุมไหลเข้าที่เหมาะสม จะช่วยให้เส้นลวดเกิดการเปลี่ยนรูปที่สม่ำเสมอและลดการเปลี่ยนรูปแบบชั่วคราว ทั้งนี้หากกำหนดให้ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานมีค่าคงที่ ขนาดของแรงดึงขึ้นรูปจะขึ้นอยู่กับขนาดมุมตายและอัตราการลดลงของพื้นที่หน้าตัดเป็นหลัก นอกจากนี้ในระหว่างกระบวนการดึงขึ้นรูปพฤติกรรมของการเชื่อมเย็บที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวเส้นลวดและแม่พิมพ์ จะเป็นสาเหตุสำคัญที่ก่อให้เกิดการแตกหักเสียหายและส่งผลกระทบต่อการใช้งานของเส้นลวด [1, 5] Dixit และคณะ [6] ได้ทำการศึกษาตัวแปรที่ส่งผลกระทบต่อกระบวนการดึงขึ้นรูปเส้นลวด ซึ่งประกอบไปด้วยอัตราการลดลงของพื้นที่หน้าตัด ขนาดมุมตาย สัมประสิทธิ์ความเสียดทานและแรงดึงย้อนกลับ พบว่าเมื่ออัตราการขึ้นรูปเพิ่มขึ้นหรือขนาดของมุมตายลดลงจะส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานมีแนวโน้มลดลงและเส้นลวดมีความเป็นเนื้อเดียวกันมากขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่า ความเร็วในการดึงขึ้นรูป (Drawing velocity) ยังส่งผลโดยตรงต่อประสิทธิภาพการดึงขึ้นรูปและคุณภาพเส้นลวดสำเร็จ [7] เนื่องจากเงื่อนไขการดึงขึ้นรูปจะส่งผลโดยตรงต่อค่าความเค้นของเส้นลวดขณะทำการดึงขึ้นรูป

ทั้งนี้ชนิดของสารหล่อลื่นและวิธีการหล่อลื่นยังเป็นปัจจัยสำคัญซึ่งจะส่งผลกระทบต่อกระบวนการดึงขึ้นรูปและคุณภาพของเส้นลวดสำเร็จ ที่ผ่านมามีนักวิจัยซึ่งได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับอิทธิพลของสารหล่อลื่นที่ส่งผลกระทบต่อกระบวนการดึงขึ้นรูปเส้นลวดไว้อย่างหลากหลาย เช่น Byon และคณะ [8] ได้ทำการตรวจสอบผลกระทบของวิธีการหล่อลื่นในรูปแบบการเคลือบผิวแบบต่าง ๆ ที่จะส่งผลกระทบต่อแรงดึงขึ้นรูป โดยเลือกใช้สารหล่อลื่นชนิดผง 2 ชนิดซึ่งมีขนาดอนุภาคแตกต่างกันและทดสอบการดึงขึ้นรูปด้วยอัตราส่วนการขึ้นรูปที่ร้อยละ 10, 20 และ 30 ตามลำดับ พบว่าสารหล่อลื่นที่มีอนุภาคขนาดเล็กจะส่งผลให้ได้

เส้นลวดที่มีคุณภาพผิวที่ดีกว่าและใช้แรงในการดึงขึ้นรูปน้อยกว่าอย่างเห็นได้ชัด Dhafer [9] ได้ทำการศึกษาส่วนผสมในน้ำมันที่ส่งผลต่อความสามารถในการหล่อขึ้นรูป ซึ่งพบว่าสารหล่อขึ้นรูปที่มีส่วนผสมของแคลเซียมสเตียเรตร้อยละ 50 โซเดียมสเตียเรตร้อยละ 45 และ แคลเซียมออกไซด์ร้อยละ 5 เป็นอัตราส่วนที่มีความเหมาะสมต่อการดึงขึ้นรูปเส้นลวด ซึ่งอุตสาหกรรมการดึงลวดให้การยอมรับเพื่อใช้ทดแทนน้ำมันที่นำเข้ามาจากต่างประเทศ ทั้งนี้ Hillery และ McCabe [10] ได้ทำการศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิการดึงลวดที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการหล่อขึ้นรูปและแรงในการดึงขึ้นรูป พบว่าการดึงขึ้นรูปที่อุณหภูมิสูงจะส่งผลให้ประสิทธิภาพในการหล่อขึ้นรูปลดลงและใช้แรงในการดึงขึ้นรูปเพิ่มสูงขึ้น Hafis และคณะ [11] ทำการศึกษาผลกระทบของปริมาณสารหล่อขึ้นรูปที่ส่งผลต่อแรงดึงลวดและความหนาผิวเส้นลวดสำเร็จ พบว่าปริมาณสารหล่อขึ้นรูปช่วยในการลดแรงเสียดทานระหว่างกระบวนการขึ้นรูปและเพิ่มความสามารถในการขึ้นรูปโลหะในรูปแบบต่างๆ Saied และคณะ [12] ทำการศึกษาการไหลตัวของสารหล่อขึ้นรูปที่มีผลต่อกระบวนการดึงขึ้นรูปเส้นลวดโลหะ พบว่าการไหลตัวของสารหล่อขึ้นรูปที่ดีจะช่วยลดแรงในการขึ้นรูปและขึ้นงานมีคุณภาพผิวที่ดีขึ้น ทั้งนี้งานวิจัยดังกล่าวเป็นการมุ่งเน้นศึกษาลักษณะการไหลตัวของสารหล่อขึ้นรูปเท่านั้น ซึ่งไม่สามารถบ่งบอกคุณสมบัติของสารหล่อขึ้นรูปที่เหมาะสมเพื่อการขึ้นรูปขึ้นงานที่มีคุณภาพได้ งานวิจัยนี้จึงได้มุ่งเน้นศึกษาผลกระทบของเงื่อนไขการดึงขึ้นรูปเส้นลวดซึ่งประกอบไปด้วย เงื่อนไขในการออกแบบแม่พิมพ์ ความเร็วในการดึงลวด และชนิดของสารหล่อขึ้นรูป ที่ส่งผลต่อความสามารถในการดึงขึ้นรูปและคุณภาพของเส้นลวดสำเร็จ โดยจะพิจารณาจากแรงในการดึงขึ้นรูป คุณภาพผิวเส้นลวด และความแข็งแรงดึงของเส้นลวดสำเร็จ เพื่อกำหนดค่าความสัมพันธ์ของขนาดมุมไหลเข้าของตาย ความเร็วในการดึงลวด และชนิดของสารหล่อขึ้นรูปที่เหมาะสมในการดึงขึ้นรูปเส้นลวดอลูมิเนียมผสมเกรด 5052 ซึ่งเป็นชนิดที่นิยมใช้ในงานอุตสาหกรรม เพื่อนำผลที่ได้จากการวิจัยนี้ไปใช้ประโยชน์ในอุตสาหกรรมการผลิตเส้นลวดโลหะและสามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้ในงานปฏิบัติต่อไป

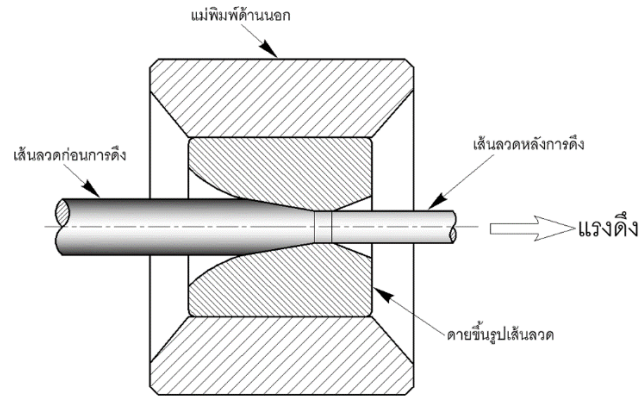
2. ทฤษฎีและวิธีการดำเนินการวิจัย

2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1.1 กระบวนการดึงลวด (Wire drawing process) เป็นกรรมวิธีในการลดขนาดหรือเปลี่ยนแปลงพื้นที่หน้าตัดของเส้นลวด โดยการใช้แรงดึงที่ส่วนปลายของเส้นลวดให้ไหลตัวผ่านแม่พิมพ์ดึงลวด ซึ่งจะส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนรูปถาวร (Plastic deformation) ลักษณะและขนาดของเส้นลวดที่ได้จะมีลักษณะเช่นเดียวกับรูหรือช่องว่างของตายสำหรับขึ้นรูปเส้นลวดดังรูปที่ 1 ขณะดึงขึ้นรูปเส้นลวดจะเกิดแรงกระทำหลัก 3 ส่วน ประกอบด้วยแรงเพื่อการขึ้นรูปวัสดุที่มีโครงสร้างเป็นเนื้อเดียวกัน (Ideal deformation force) แรงเฉือน (Shearing force) หรือแรงเฉือนรีดันแดนท์ (Redundant shearing force) และแรงเสียดทาน (Friction force) บนพื้นผิวสัมผัส ดังนั้นในการคำนวณหาค่าแรงเพื่อการดึงขึ้นรูปจึงต้องพิจารณาจากแรงกระทำทั้ง 3 ส่วน ซึ่งสามารถคำนวณได้ด้วยวิธีของไซเบล (Siebel's method) ดังสมการที่ (1) [13]

$$F_{D,tot} = F_{id,D} + F_{FR,S} + F_{sh} \quad (1)$$

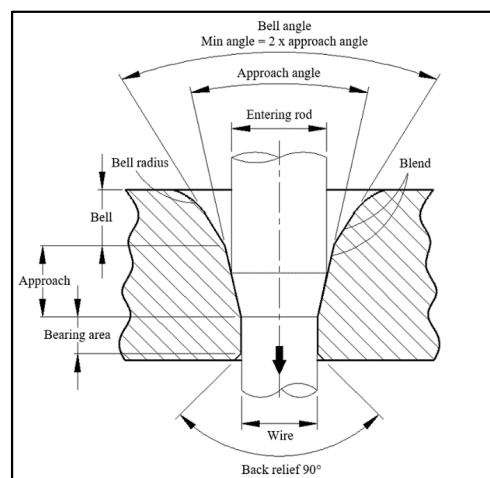
เมื่อ $F_{D,tot}$ คือ แรงดึงขึ้นรูปรวม, $F_{id,D}$ คือ แรงที่ใช้ในการขึ้นรูปวัสดุ, $F_{FR,S}$ คือ แรงเสียดทาน และ F_{sh} คือ แรงเฉือนรีดันแดนท์



รูปที่ 1 ชุดแม่พิมพ์สำหรับการดึงขึ้นรูปเส้นลวด

นอกจากนี้ยังสามารถเลือกใช้ทฤษฎีการสมดุลทางแรงในการวิเคราะห์แรงกระทำขณะขึ้นรูป เพื่อการออกแบบแม่พิมพ์และกำหนดเงื่อนไขกระบวนการดึงลวดที่เหมาะสม เนื่องจากค่าความเค้นที่เกิดขึ้นจะส่งผลโดยตรงต่อคุณภาพและความเสียหายที่อาจเกิดกับเส้นลวด [14] ตามหลักการของการขึ้นรูป ค่าความเค้นของเส้นลวดที่เกิดจากการดึงขึ้นรูปจะต้องไม่มากกว่าค่าความแข็งแรงดึงสูงสุดของวัสดุเส้นลวดหรือวัตถุดิบเริ่มต้น เพื่อหลีกเลี่ยงการแตกหักหรือการเปลี่ยนรูปที่ไม่สม่ำเสมอ ในทางปฏิบัติจะจำกัดค่าความเค้นจากการดึงขึ้นรูป (Drawing stress) ไว้ไม่เกิน 60% ของค่าความเค้นไหล (Flow stress) วัสดุเส้นลวด [15]

2.1.2 มุมไหลเข้า (Approach angle) ในกระบวนการดึงขึ้นรูป เส้นลวดจะถูกดึงให้ไหลตัวผ่านดายซึ่งมีลักษณะดังรูปที่ 2 โดยในช่วงเริ่มต้นวัตถุดิบจะถูกดึงให้ไหลตัวต่อเนื่องไปตามผนังทรงกรวยของดายซึ่งเรียกว่ามุมไหลเข้า (Approach angle) ขนาดของเส้นลวดวัตถุดิบจะค่อยๆ ลดลงตามลักษณะของพื้นผิวทรงกรวย โดยเส้นลวดสำเร็จจะมีขนาดเท่ากับส่วนปลายสุดของทรงกรวยและส่วนควบคุมขนาด (Bearing area) ซึ่งส่วนนี้จะไม่มีความเค้นหรือความเค้นอัดเกิดขึ้น ทั้งนี้เพื่อการควบคุมคุณภาพพื้นผิวเส้นลวดและลดแรงเสียดทานขณะทำการดึงขึ้นรูป สารหล่อลื่นจะถูกเติมเข้าไปในตำแหน่งพื้นที่ผิวโค้งทรงระฆัง (Bell radius) ตลอดเวลาที่มีการเคลื่อนที่ของเส้นลวด โดยสารหล่อลื่นจะถูกดึงเข้าไปในพื้นที่ของมุมไหลเข้าทรงกรวยซึ่งเป็นส่วนของการขึ้นรูปเพื่อลดแรงเสียดทานของพื้นผิวสัมผัสขณะขึ้นรูป ทั้งนี้ในอุตสาหกรรมการดึงขึ้นรูปเส้นลวด โดยทั่วไปจะกำหนดขนาดของมุมไหลเข้าของดาย (2α) อยู่ในช่วง $8^\circ - 20^\circ$



รูปที่ 2 ภาพตัดขวางของดายดึงขึ้นรูปเส้นลวด [14]

2.1.3 อัตราการลดลงของพื้นที่หน้าตัดหรืออัตราการขึ้นรูปเส้นลวด (Wire drawing ratio) อัตราการลดลงของพื้นที่หน้าตัดเป็นอีกปัจจัยที่มีความสำคัญและส่งผลกระทบโดยตรงต่อกระบวนการดึงลวดซึ่งในอุตสาหกรรมการดึงขึ้นรูปเส้นลวดได้กำหนดอัตราการลดรูปในแต่ละขั้นตอนไว้ไม่เกินร้อยละ 20 เนื่องจากมุมไหลเข้าของด้าย (Approach angle) และอัตราการดึงขึ้นรูป (Drawing ratio) เป็นปัจจัยหลักที่ส่งผลกระทบโดยตรงต่อกระบวนการดึงลวด อุตสาหกรรมการดึงขึ้นรูปเส้นลวดสมัยใหม่จึงได้รวมทั้ง 2 ส่วนเข้าด้วยกัน เพื่อใช้เป็นแนวทางในการกำหนดขนาดมุมไหลเข้าและอัตราการลดลงของพื้นที่หน้าตัดที่เหมาะสม เรียกว่าเดลต้าแฟกเตอร์ (Δ) ซึ่งค่าที่เหมาะสมถูกกำหนดไว้ในช่วง 1.5 – 3 หากค่าเดลต้าแฟกเตอร์สูงกว่าช่วงที่กำหนดจะชี้ให้เห็นว่าเป็นลักษณะของการดึงขึ้นรูปด้วยอัตราการลดลงของพื้นที่หน้าตัดต่ำและมีขนาดมุมไหลเข้าขนาดใหญ่เกินไป หากค่าเดลต้าแฟกเตอร์ต่ำกว่าช่วงที่กำหนด จะเป็นลักษณะการดึงขึ้นรูปด้วยอัตราการลดลงของพื้นที่หน้าตัดสูงและมีมุมไหลเข้าขนาดเล็ก [14] ซึ่งค่าคงที่เดลต้าแฟกเตอร์ (Δ) สามารถคำนวณได้ด้วยสมการที่ (2)

$$\Delta \approx \frac{\alpha}{r} [1+(1-r)^{1/2}]^2 \quad (2)$$

เมื่อ α คือขนาดครึ่งของมุมไหลเข้า (Approach semi-angle) และ r คือ อัตราการดึงขึ้นรูป คำนวณได้จากสมการที่ (3)

$$r = 1 - \frac{A_1}{A_0} \quad (3)$$

เมื่อ A_0 คือ พื้นที่หน้าตัดเริ่มต้น และ A_1 คือ พื้นที่หน้าตัดของเส้นลวดสำเร็จ

2.1.4 ผลกระทบของแรงเสียดทาน (Effect of friction) ในการออกแบบแม่พิมพ์ดึงลวดหากค่าเดลต้าแฟกเตอร์ต่ำกว่าช่วงที่กำหนด จะชี้ให้เห็นว่ามีแรงเสียดทานระหว่างพื้นผิวเส้นลวดและพื้นผิวดायมากเกินไป และหากเดลต้าแฟกเตอร์มีค่าสูงกว่าช่วงที่กำหนดแสดงว่าเส้นลวดจะได้รับแรงรีดดันแดนท์หรือค่าความเครียดถาวรเกิดขึ้นมากเกินไป ซึ่งพิจารณาได้จากการลดลงของพื้นที่หน้าตัดเส้นลวด โดยแรงรีดดันแดนท์จะเพิ่มมากขึ้นเมื่อค่าเดลต้าแฟกเตอร์สูงขึ้น ส่วนแรงเสียดทานจะเพิ่มขึ้นสูงหากค่าเดลต้าแฟกเตอร์ลดลง จากผลกระทบดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าค่าเดลต้าแฟกเตอร์ระดับปานกลางหรืออยู่ในช่วงที่เสนอแนะจึงเป็นค่าที่เหมาะสมที่สุด [14]

2.1.5 งานรีดดันแดนท์ของการขึ้นรูป (Redundant work of deformation) การเปลี่ยนรูปรีดดันแดนท์จะเกิดขึ้นในระหว่างการดึงขึ้นรูปจากแรงเฉือนที่เกิดขึ้นในพื้นที่ของการเปลี่ยนรูปของวัสดุ แสดงให้เห็นในรูปของแฟกเตอร์งานรีดดันแดนท์ (Φ) หรืออัตราส่วนของงานจากการเปลี่ยนรูปถาวรโดยรวมและงานที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงขนาดซึ่งแฟกเตอร์งานรีดดันแดนท์ สามารถคำนวณค่าโดยประมาณได้จากสมการที่ (4) [14]

$$\Phi \approx \left(\frac{\Delta}{6}\right) + 1 \quad (4)$$

2.2 วิธีการดำเนินการวิจัย

2.2.1 วัสดุการทดลอง งานวิจัยนี้มุ่งเน้นศึกษาเชิงเปรียบเทียบผลกระทบของเงื่อนไขที่เกี่ยวข้องในกระบวนการดึงขึ้นรูปเส้นลวดอลูมิเนียมผสมแมกนีเซียม 5052 โดยจะประเมินผลจากแรงที่ใช้ในการดึงขึ้นรูปเส้นลวด ค่าความหยาบผิว และค่าความแข็งแรงดึงของเส้นลวดสำเร็จ ซึ่งรายละเอียดสมบัติทางกลของวัสดุเส้นลวดจากการทดสอบแรงดึงที่อุณหภูมิห้องตามมาตรฐาน ISO 6892-1:2009 แสดงดังตารางที่ 1 โดยก่อนการทดลองจะทำการตรวจสอบความถูกต้องของขนาดความโตเส้นลวดด้วยดิจิตอลไมโครมิเตอร์ (Digital Micrometer) 0-25 มิลลิเมตร ความละเอียด 0.001 มิลลิเมตร ตรวจสอบและบันทึกค่าความหยาบผิวของเส้นลวดเริ่มต้นและพื้นผิวดायด้วยเครื่องวัดความหยาบผิว (Surface roughness

measuring device) โดยรายละเอียดของวัสดุเริ่มต้น แม่พิมพ์ดึงลวด และเงื่อนไขการทดสอบการดึงขึ้นรูปเส้นลวด แสดงดังตารางที่ 2

ตารางที่ 1 สมบัติทางกลของเส้นลวดอลูมิเนียมผสมแมกนีเซียม AA5052

Material	Yield Stress (MPa)	Ultimate Tensile Stress (MPa)	Modulus of elasticity; E (GPa)	Total Elongation (%)
AA5052	193	228	70.3	18

ตารางที่ 2 รายละเอียดของวัสดุเส้นลวด, แม่พิมพ์ดึงลวด และเงื่อนไขการดึงขึ้นรูป

รายการ	รายละเอียด	หมายเหตุ
ชนิดของวัสดุ	AA5052	
ขนาดความโตและความยาว	Ø 2 มม. ความยาว 90 มม.	ค่าความยาวเฉพาะส่วนที่มีการขึ้นรูป
ความหยาบผิวเฉลี่ยของเส้นลวดเริ่มต้น	Ra = 0.1823 µm.	ทำการวัดในแนวเส้นรอบวงเส้นลวด
ความหยาบผิวเฉลี่ยผิวตาย	Ra = 0.0823 µm.	
ขนาดมุมไหลเข้าของตาย (2α)	16°, 18° และ 20°	
ความเร็วในการดึงขึ้นรูปเส้นลวด	0.1, 0.25, และ 0.4 เมตร/วินาที	
ชนิดสารหล่อลื่น	DN Press Draw 40, ISO CUT 570-A และ RENOFORM MZA30	ตรวจสอบค่าความหนืดที่อุณหภูมิ 40 °C และ 100 °C

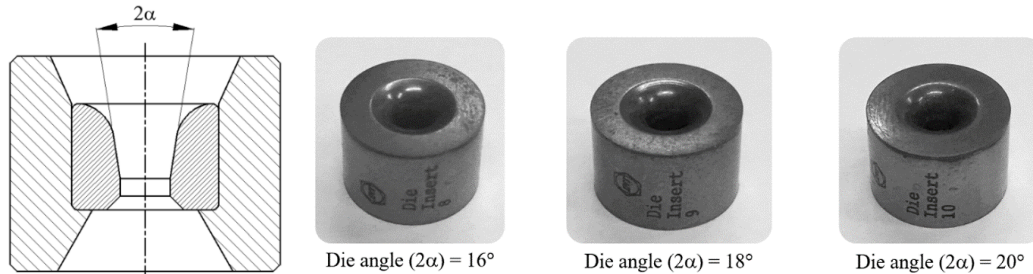
2.2.2 สารหล่อลื่น ในการทดลองเลือกใช้สารหล่อลื่น 3 ชนิด ซึ่งมีค่าความหนืดต่างกัน ซึ่งได้จากการตรวจสอบตามมาตรฐาน ASTM D445 [16] ที่อุณหภูมิที่กำหนดตามมาตรฐาน ซึ่งค่าความหนืดของสารหล่อลื่นเป็นปัจจัยหลักที่ก่อให้เกิดชั้นฟิล์มระหว่างผิวสัมผัส โดยค่าความหนืดตามระบบเมตริกจะมีหน่วยเรียกเป็น เซนติสโตก (Centistoke), (cSt) ซึ่งผลการทดสอบค่าความหนืดสารหล่อลื่นในการทดลองทั้ง 3 ชนิดที่อุณหภูมิ 40 °C และ 100 °C แสดงดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ค่าความหนืดของสารหล่อลื่นที่ใช้ในการทดลอง

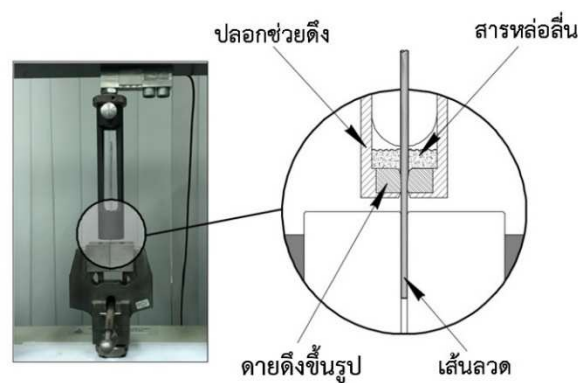
ชนิดสารหล่อลื่น	ค่าความหนืด (cSt)		ดัชนีความหนืด
	40°C	100°C	
DN Press Draw 40	20.01	4.136	108
ISO CUT 570-A	45.62	6.206	75
RENOFORM MZA30	141.63	12.63	76

2.2.3 แม่พิมพ์ดึงขึ้นรูปเส้นลวดและข้อกำหนดการทดลอง การทดลองนี้ใช้แม่พิมพ์ดึงขึ้นรูปเส้นลวดตามมาตรฐาน W103 ดายสำหรับการดึงขึ้นรูปเส้นลวด (Wire drawing die) ทำมาจากทังสเตนคาร์ไบด์เกรด K20 (ISO Code) ถูกเคลือบผิวแข็งด้วย TiC โดยกรรมวิธี CVD Coating ซึ่งเป็นกรรมวิธีที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรม มีขนาดมุมไหลเข้า (2α) ที่ 3 ขนาด คือ 16°, 18° และ 20° ตามลำดับ กำหนดอัตราการลดลงของพื้นที่หน้าตัด 10% ซึ่งลักษณะและรายละเอียดของดายดึง

ขึ้นรูปเส้นลวดแสดงดังรูปที่ 3 ผู้วิจัยได้ทำการออกแบบและจัดทำอุปกรณ์จับยึดชุดตายหรือบล็อกช่วยดึงเพื่อติดตั้งบนเครื่องทดสอบแรงดึง (Universal Tensile Test ยี่ห้อ Zwick / Z2020) ขนาด 2 ตัน และทำการทดสอบการดึงลวดที่อุณหภูมิห้องด้วยความเร็ว 0.1, 0.25, และ 0.4 เมตร/วินาที ขณะที่ทำการดึงขึ้นรูปสารหล่อลื่นจะถูกเติมลงในบล็อกช่วยดึงที่ตำแหน่งด้านหน้ามุมไหลเข้าของตายดังรูปที่ 4



รูปที่ 3 ลักษณะและรายละเอียดของตายดึงขึ้นรูปเส้นลวด



รูปที่ 4 การติดตั้งชุดทดสอบการดึงขึ้นรูปบนเครื่องทดสอบแรงดึงและลักษณะการเติมสารหล่อลื่น

เพื่อความถูกต้องแม่นยำในการวิเคราะห์ผลและได้ข้อมูลที่มีความเชื่อถือทางสถิติภายใต้ความเชื่อมั่นไม่น้อยกว่าร้อยละ 95 จึงกำหนดให้มีการทดลองซ้ำจำนวน 6 ตัวอย่าง ในแต่ละข้อกำหนดและเงื่อนไขการทดลอง โดยทำการทดสอบและบันทึกผลการทดลอง ซึ่งประกอบไปด้วย

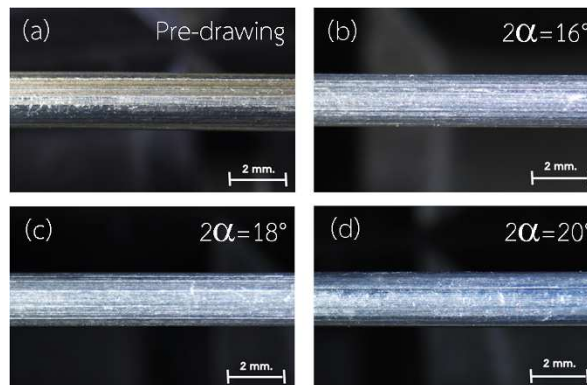
1. ขนาดแรงดึงขึ้นรูปเส้นลวด จากเครื่องทดสอบแรงดึงยี่ห้อ Zwick / Z2020 ขนาด 2 ตัน
2. ลักษณะพื้นผิวของเส้นลวดด้วยกล้องจุลทรรศน์กำลังขยายต่ำ (Stereo Macroscopic)
3. ค่าความหยาบผิวเฉลี่ย (R_a) ของผิวเส้นลวดหลังการดึงขึ้นรูป ซึ่งค่าความหยาบผิวเฉลี่ยเป็นค่าความสูงเฉลี่ยจากเส้นกึ่งกลางของรอยสูงต่ำบนพื้นผิวเส้นลวด
4. ค่าความแข็งแรงดึงของเส้นลวดสำเร็จ ด้วยเครื่องทดสอบแรงดึงเอนกประสงค์

3. ผลการวิจัยและอภิปรายผล

จากการทดลองดึงขึ้นรูปเส้นลวดอลูมิเนียม พบว่าขนาดมุมไหลเข้าของตาย ความเร็วดึงลวด และชนิดสารหล่อลื่นส่งผลโดยตรงต่อกระบวนการดึงลวดและคุณภาพเส้นลวดสำเร็จ ซึ่งผลการทดลองประกอบไปด้วย

3.1 ลักษณะพื้นผิวเส้นลวดสำเร็จ

จากผลการดึงลวดโดยใช้สารหล่อลื่นทั้ง 3 ชนิด สามารถดึงขึ้นรูปลวดได้สำเร็จและการดึงลวดโดยใช้สารหล่อลื่นที่มีความหนืดสูงจะได้เส้นลวดมีความหยาบผิวสูง ในขณะที่การดึงขึ้นรูปเส้นลวดผ่านตายที่มีขนาดมุมแตกต่างกันทั้ง 3 ขนาดมุม สามารถดึงลวดได้สำเร็จและได้เส้นลวดซึ่งมีลักษณะพื้นผิวที่แตกต่างกัน ดังรูปที่ 5

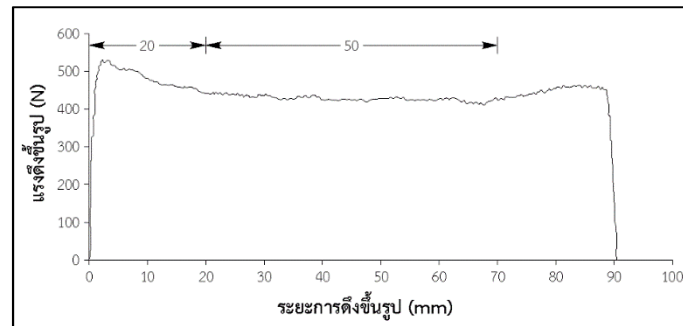


รูปที่ 5 ลักษณะเส้นลวด (a) ก่อนการดึงขึ้นรูป และเส้นลวดจากการดึงขึ้นรูปผ่านตายที่มีขนาดมุม (b) $2\alpha=16^\circ$ (c) $2\alpha=18^\circ$ และ (d) $2\alpha=20^\circ$

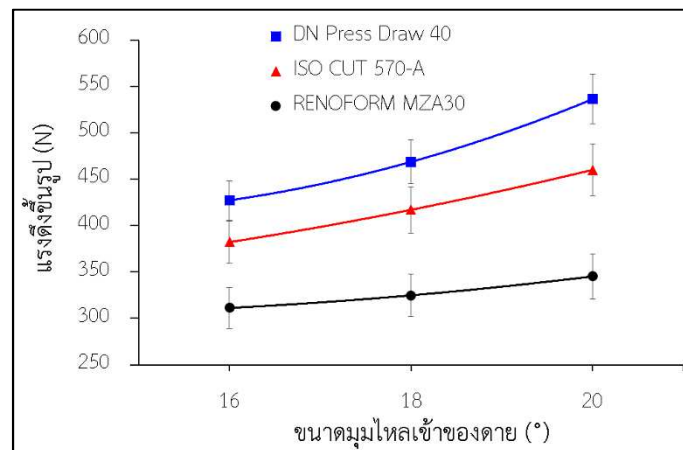
จากรูปที่ 5 แสดงลักษณะของพื้นผิวเส้นลวด ก่อนและหลังการดึงขึ้นรูปโดยใช้สารหล่อลื่น DN Press Draw 40 ด้วยความเร็ว 0.4 เมตร/วินาที ผ่านตายที่มีขนาดมุมต่างกัน โดยรูปที่ 5 (a) แสดงลักษณะของพื้นผิววัตถุดิบเส้นลวดก่อนการดึงขึ้นรูป ส่วนรูปที่ 6 (b) เป็นลักษณะพื้นผิวเส้นลวดสำเร็จจากการดึงผ่านตายที่มีขนาดมุม 16° ซึ่งพบว่าเส้นลวดมีความหยาบผิวสูงเมื่อขนาดมุมไหลเข้าของตายเพิ่มขึ้นที่ 18° และ 20° จะส่งผลให้ความหยาบผิวของเส้นลวดลดลงดังรูปที่ 6 (c) และ (d) เนื่องจากเมื่อมุมไหลเข้าของตายทำมุมกับทิศทางการไหลของเส้นลวดมากขึ้น จะเกิดผลกระทบจากแรงเฉือนรูดแน่นที่สูงซึ่งส่งผลให้ประสิทธิภาพในการหล่อลื่นต่ำลง ก่อให้เกิดการสัมผัสโดยตรงของพื้นผิวโลหะ (Metal to metal contact) ส่งผลให้เส้นลวดที่ได้มีความหยาบผิวต่ำลง (ผิวเรียบขึ้น) สอดคล้องกับภาพถ่ายลักษณะพื้นผิวของเส้นลวด เนื่องจากเส้นลวดที่ได้รับผลกระทบจากแรงเฉือนรูดแน่นที่สูงและมีความเสียดทานบริเวณพื้นผิวสัมผัสสูงด้วยนั้น จะส่งผลให้ค่าความหยาบผิวลดลง ซึ่งผลการทดลองดังกล่าวมีความสอดคล้องกับทฤษฎีคุณภาพพื้นผิวในการดึงขึ้นรูปเส้นลวด [17]

3.2 แรงดึงขึ้นรูปเส้นลวด

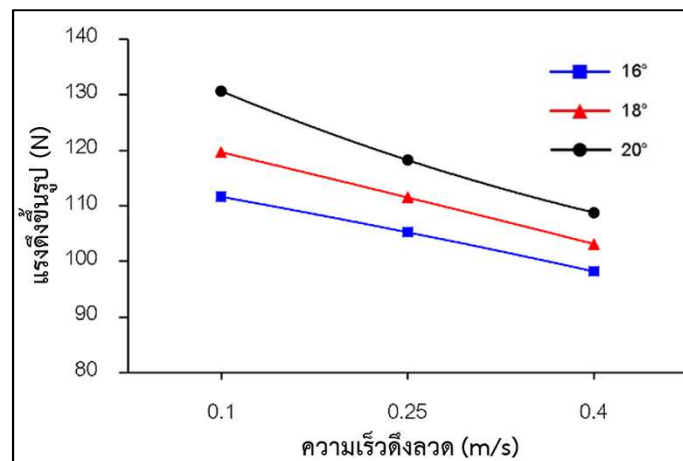
ผลการดึงลวดผ่านตายที่มีขนาดมุมต่างกันพบว่า ตัวอย่างแรงในการดึงขึ้นรูปเส้นลวดผ่านตายที่มีขนาดมุมไหลเข้า 16° โดยใช้สารหล่อลื่นชนิด DN Press Draw 40 แสดงในรูปที่ 6 ส่วนการดึงขึ้นรูปโดยใช้สารหล่อลื่นชนิดอื่นจะมีลักษณะของกราฟที่คล้ายกัน ซึ่งระยะการดึงลวดทั้งหมดที่นำมาพิจารณาแรงในการดึงลวดคือระยะ 90 มม. ซึ่งเริ่มวัดจากตำแหน่งเริ่มต้นจนถึงระยะ 20 มิลลิเมตร ซึ่งเป็นช่วงที่แรงดึงเกิดขึ้นสูงสุดเนื่องจากเป็นช่วงที่เส้นลวดเริ่มถูกดึงเข้ามาในแม่พิมพ์อย่างรวดเร็วทำให้มีลักษณะของการกระแทกเกิดขึ้น จากนั้นในช่วง 50 มม. ต่อมาจะเห็นได้ว่าช่วงนี้จะเป็นระยะที่แรงดึงมีแนวโน้มคงที่มากที่สุดในทุกสารหล่อลื่นจึงเลือกใช้เพื่อนำมาหาเป็นค่าเฉลี่ยของแรงในการดึงลวดผ่านตายที่มีขนาดมุมไหลเข้า ด้วยความเร็ว และใช้ชนิดของสารหล่อลื่นที่แตกต่างกันซึ่งในช่วงท้ายของการดึงขึ้นรูปจะพบว่าแรงดึงมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเนื่องจากเกิดการโค้งงอของปลายเส้นลวดจากผลการไหลตัวของเนื้อวัสดุที่ไม่เท่ากันจึงส่งผลให้แรงดึงในช่วงปลายเส้นลวดเพิ่มมากขึ้น



รูปที่ 6 กราฟแรงดึงขึ้นรูปเส้นลวดผ่านตายขนาดมุมไหลเข้า 16° และใช้สารหล่อลื่นชนิด DN Press Draw 40



รูปที่ 7 กราฟแสดงผลกระทบของขนาดมุมไหลเข้าของตายที่ส่งผลต่อแรงดึงขึ้นรูปเส้นลวด



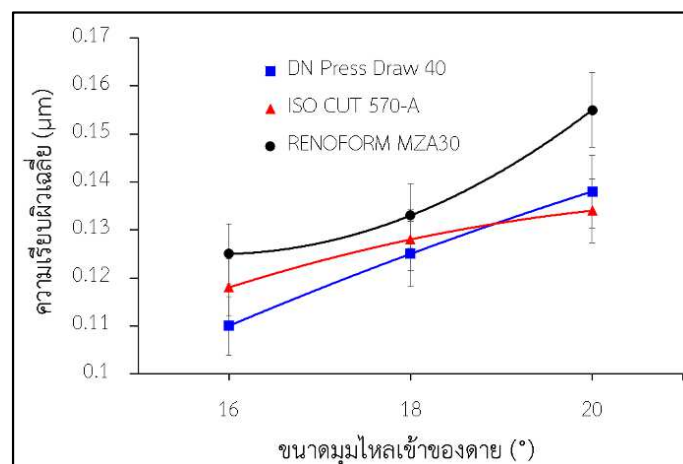
รูปที่ 8 กราฟแสดงผลกระทบของความเร็วดึงลวดที่ส่งผลต่อแรงดึงขึ้นรูปเส้นลวด

ผลการวัดแรงเฉลี่ยที่ใช้ในการขึ้นรูปเส้นลวดผ่านตายที่มีขนาดมุม ค่าความเร็วในการดึงลวด และใช้สารหล่อลื่นชนิดต่างๆ พบว่าขนาดแรงดึงขึ้นรูปจะแปรผันตามขนาดมุมไหลเข้าของมุมตาย ดังรูปที่ 7 กล่าวคือขนาดของแรงดึงขึ้นรูปจะมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นเมื่อขนาดมุมตายเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากขนาดของมุมตายส่งผลโดยตรงต่อแรงเฉือนรีดดันตันตัน ซึ่งเป็นหนึ่งในองค์ประกอบที่ใช้ในการคำนวณแรงดึงขึ้นรูปในสมการที่ 1 และค่าแรงดึงขึ้นรูปจากการทดลองมีความสอดคล้องกับผลการคำนวณค่ารีดดันตันตันแฟกเตอร์ (Φ) ดังสมการที่ 4 เนื่องจากเมื่อขนาดมุมไหลเข้าหรือค่าความลาดเอียงของตายมากขึ้นจะ

ส่งผลให้เส้นลวดไหลตัวได้ยากและแรงเฉือนรีตันแดนท์เพิ่มสูงขึ้น [18] อีกทั้งขนาดของมุมตายที่เพิ่มสูงขึ้นยังส่งผลให้ประสิทธิภาพในการหล่อลื่นที่ผิวสัมผัสมีแนวโน้มลดลง [19] จึงส่งผลทำให้ต้องใช้แรงเพื่อการดึงขึ้นรูปสูงขึ้น ซึ่งเป็นไปตามทฤษฎีของ Siebel [13] ส่วนผลกระทบของสารหล่อลื่น พบว่าขนาดขนาดของแรงดึงจะแปรผกผันกับค่าความหนืดของสารหล่อลื่น กล่าวคือขนาดของแรงดึงจะมีแนวโน้มลดลงเมื่อค่าทำการดึงขึ้นรูปโดยใช้สารหล่อลื่นที่มีค่าความหนืดสูงขึ้น เนื่องจากชนิดและค่าความหนืดของสารหล่อลื่นจะส่งผลต่อสัมประสิทธิ์ความเสียดทานระหว่างผิวเส้นลวดและผิวแม่พิมพ์ขณะทำการดึงขึ้นรูปเท่านั้น ส่วนรูปที่ 8 แสดงให้เห็นว่าแรงดึงขึ้นรูปเส้นลวดจะมีแนวโน้มลดลงเมื่อความเร็วในการดึงขึ้นรูปเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากค่าความเค้นจากการดึงขึ้นรูป (Wire drawing stress) จะแปรผกผันกับค่าความเร็วในการดึงขึ้นรูป ซึ่งเป็นไปตามทฤษฎีของการดึงขึ้นรูป [2] อีกทั้งการดึงขึ้นรูปด้วยความเร็วสูงจะส่งผลให้ประสิทธิภาพในการหล่อลื่นดีขึ้น เนื่องจากเส้นลวดถูกดึงผ่านตายด้วยความเร็วสูงส่งผลให้การเกาะติดของหล่อลื่นกับเส้นลวดมีประสิทธิภาพสูงขึ้น จึงส่งผลให้ใช้แรงเพื่อการดึงขึ้นรูปเส้นลวดลดลง

3.3 ค่าความหยาบผิวเส้นลวดสำเร็จ

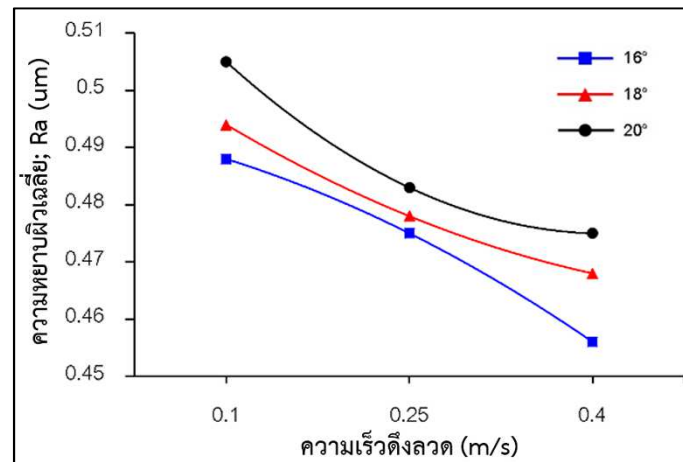
เส้นลวดสำเร็จที่ได้จากกระบวนการดึงขึ้นรูป จะถูกนำไปวัดค่าความหยาบผิวเฉลี่ย (R_a) ในแนวเส้นรอบวง ซึ่งเป็นแนวตั้งฉากกับทิศทางการขึ้นรูป ทำให้ได้รายละเอียดของผิวเส้นลวดโดยรวมได้ดีกว่าโดยเฉพาะหากเกิดการขูดขีดบริเวณผิวลวด โดยผลการวัดค่าความหยาบผิวเฉลี่ยของพื้นผิวลวดแสดงดังรูปที่ 9 และรูปที่ 10



รูปที่ 9 กราฟแสดงผลกระทบของขนาดมุมไหลเข้าของตายที่ส่งผลต่อค่าความหยาบผิวเส้นลวด

จากผลการทดลองรูปที่ 9 พบว่าค่าความหยาบผิวของเส้นลวดสำเร็จจะลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับเส้นลวดวัตถุดิบก่อนการดึงขึ้นรูป และค่าความหยาบผิวที่วัดได้ยังมีความสอดคล้องกับค่าความหนืดของสารหล่อลื่น ซึ่งเห็นได้ชัดว่าเมื่อความหนืดของสารหล่อลื่นเพิ่มมากขึ้นจะส่งผลให้เส้นลวดสำเร็จมีค่าความหยาบผิวสูงขึ้น โดยสารหล่อลื่น DN Press Draw 40 ซึ่งเป็นสารหล่อลื่นที่มีค่าความหนืดต่ำสุดจะให้เส้นลวดที่มีผิวเรียบที่สุด เนื่องจากสารหล่อลื่นที่มีค่าความหนืดน้อยจะส่งผลให้ฟิล์มของสารหล่อลื่นจะมีความหนาน้อยเช่นกัน [18,19] จึงทำให้เกิดกลไกการถ่ายผิว จากการสัมผัสโดยตรง (Metal to metal contact) ระหว่างผิวเส้นลวดและพื้นผิวดาย อีกทั้งยังพบว่าเส้นลวดที่ได้จากการดึงผ่านตายซึ่งมีขนาดมุมไหลเข้าแคบ (Narrow angle) จะมีค่าความหยาบผิวที่ต่ำกว่าการดึงผ่านตายซึ่งมีขนาดมุมทางไหลเข้าขนาดใหญ่ (Wide angle) เนื่องจากการค้อย ๆ ลดลงของขนาดของเส้นลวด จากการกำหนดขนาดมุมลาดเอียงน้อยจะส่งผลให้เส้นลวดมีความเป็นเนื้อเดียวกันและมีพื้นผิวสัมผัสในส่วนการขึ้นรูปของเส้นลวดและพื้นผิวดายมากกว่า ดังรายละเอียดผลการทดลองซึ่งพบว่าพื้นผิวเส้นลวดที่

ถูกดึงผ่านด้ายขนาดมุม 16° จะมีค่าความหยาบผิวเฉลี่ยต่ำที่สุด (เรียบที่สุด) และเส้นลวดที่ถูกดึงผ่านด้ายขนาดมุม 20° จะมีค่าความหยาบผิวเฉลี่ยสูงที่สุด (หยาบที่สุด)

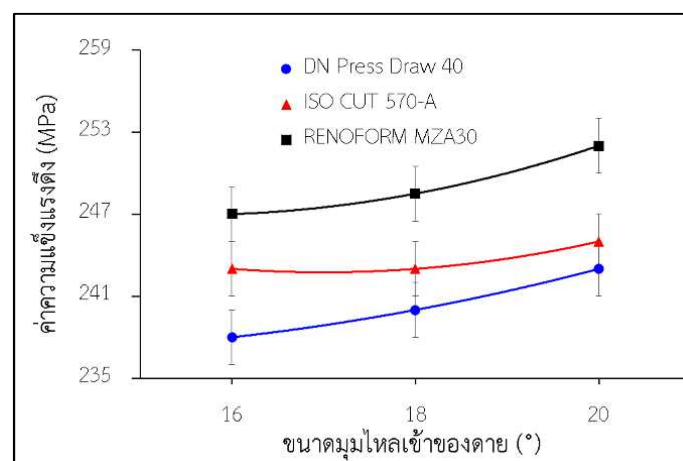


รูปที่ 10 กราฟแสดงผลกระทบของความเร็วดึงลวดที่ส่งผลต่อค่าความหยาบผิวเส้นลวด

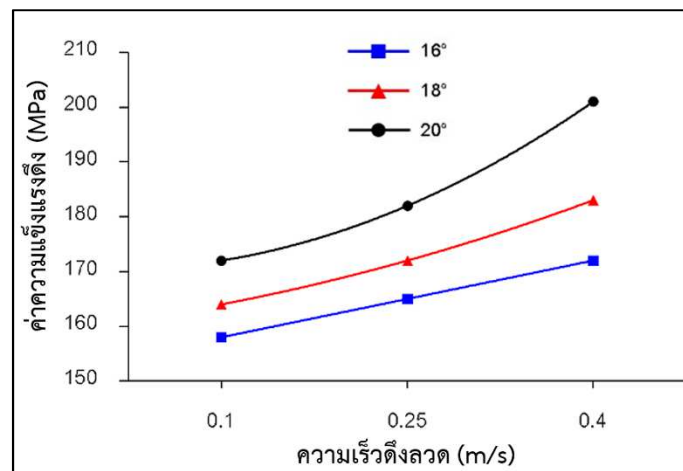
จากรูปที่ 10 แสดงให้เห็นว่าค่าความหยาบผิวของเส้นลวดสำเร็จจะแปรผกผันกับค่าความเร็วในการดึงขึ้นรูป ซึ่งพบว่าค่าความหยาบผิวของเส้นลวดจะมีแนวโน้มลดลง (เรียบขึ้น) เมื่อถูกดึงด้วยความเร็วที่เพิ่มสูงขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมา [20] เนื่องจากความเร็วในการดึงลวดจะมีความสัมพันธ์โดยตรงกับประสิทธิภาพการยึดเกาะของน้ำมันหล่อลื่นบนเส้นลวด โดยเส้นลวดที่ได้จากการดึงผ่านด้ายซึ่งมีขนาดมุมไหลเข้า 16° ด้วยความเร็ว 0.4 เมตร/วินาที จะมีค่าความหยาบผิวต่ำที่สุด (ผิวเรียบที่สุด) และเส้นลวดที่ได้จากการดึงผ่านด้ายขนาดมุมไหลเข้า 20° ด้วยความเร็ว 0.1 เมตร/วินาที จะมีค่าความหยาบผิวสูงที่สุด (ผิวหยาบที่สุด)

3.4 สมบัติทางกลเส้นลวดสำเร็จ

ผลการเปรียบเทียบค่าความแข็งแรงดึงของเส้นลวดสำเร็จที่ได้จากการดึงขึ้นรูปผ่านด้ายที่มีขนาดมุมไหลเข้า ค่าความเร็วในการดึงขึ้นรูป และใช้สารหล่อลื่นที่แตกต่างกัน พบว่าค่าความแข็งแรงดึงของเส้นลวดจะเพิ่มสูงขึ้นเมื่อทำการดึงขึ้นรูปผ่านด้ายที่มีขนาดมุมไหลเข้าขนาดใหญ่ ใช้ความเร็วในการดึงขึ้นรูปสูง และใช้สารหล่อลื่นที่มีค่าความหนืดเพิ่มมากขึ้น ดังผลการทดลองรูปที่ 11 และรูปที่ 12



รูปที่ 11 กราฟแสดงผลกระทบของขนาดมุมไหลเข้าของด้ายที่ส่งผลต่อค่าความแข็งแรงดึงเส้นลวด



รูปที่ 12 กราฟแสดงผลกระทบของความเร็วดึงลวดที่ส่งผลต่อค่าความแข็งแรงดึงเส้นลวด

ผลการทดลองรูปที่ 11 และรูปที่ 12 แสดงให้เห็นว่าค่าความเค้นแรงดึงสูงสุด (UTS) หรือค่าความแข็งแรงดึงของเส้นลวดสำเร็จ จะแปรผันตามขนาดมุมไหลเข้าของตาย ค่าความเร็วในการดึงขึ้นรูป และค่าความหนืดของสารหล่อลื่น โดยค่าความแข็งแรงดึงของเส้นลวดจะมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นเมื่อถูกดึงผ่านตายที่มีขนาดมุมไหลเข้าขนาดโตขึ้น เนื่องจากขนาดมุมไหลเข้าของตายที่ใหญ่ขึ้นจะส่งผลให้การเปลี่ยนรูปแบบบริดจ์และคานต์และความเค้นตกค้างในเส้นลวดเพิ่มสูงขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับผลการคำนวณค่าเดลต้าแฟกเตอร์ (Δ) ของสมการที่ (2) นอกจากนี้ผลการทดลองดังกล่าวยังสอดคล้องกับผลการวิจัยที่ผ่านมา [21] ซึ่งพบว่าค่าดัชนีความเครียดแข็ง (Strain hardening exponent) ของเส้นลวดจะมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นเมื่อขนาดมุมไหลเข้าของตายเพิ่มสูงขึ้น และค่าความแข็งแรงดึงของเส้นลวดจะเพิ่มสูงขึ้นเมื่อถูกดึงด้วยความเร็วที่เพิ่มขึ้น เนื่องการดึงขึ้นรูปด้วยความเร็วสูงจะส่งผลทำให้การเปลี่ยนรูปของเนื้อวัสดุเกิดขึ้นด้วยระยะเวลาสั้น วัสดุมีเวลาในการจัดเรียงตัวของเกรนจำกัดจึงส่งผลให้เส้นลวดที่ได้มีลักษณะของเกรนที่ไม่เป็นระเบียบ ซึ่งส่งผลโดยตรงให้ค่าความเครียดแข็งและค่าความแข็งแรงของเส้นลวดเพิ่มสูงขึ้น อีกทั้งการใช้สารหล่อลื่นที่มีค่าความหนืดสูงจะส่งผลให้เส้นลวดไม่เกิดการสัมผัสโดยตรงกับผิวตาย ค่าความร้อนที่พื้นผิวสัมผัสจึงเพิ่มขึ้นน้อยและเส้นลวดสำเร็จมีความเป็นเนื้อเดียวกันสูง

4. สรุป

1. ขนาดมุมตายที่เพิ่มสูงขึ้นจะส่งผลให้ต้องใช้แรงในการดึงขึ้นรูปเพิ่มสูงขึ้น ส่วนค่าความเรียบผิวของเส้นลวดสำเร็จจะแปรผกผันกับขนาดมุมไหลเข้าของตาย และค่าความแข็งแรงดึงของเส้นลวดสำเร็จจะแปรผันตามขนาดมุมไหลเข้าของตาย
2. ความเร็วในการดึงลวดที่เพิ่มสูงขึ้นจะส่งผลต่อแรงดึงลวดและคุณภาพเส้นลวดสำเร็จ ซึ่งพบว่าแรงดึงขึ้นรูปจะแปรผกผันกับค่าความเร็วในการดึงขึ้นรูป โดยขนาดของแรงดึงขึ้นรูปจะมีแนวโน้มลดลงเมื่อความเร็วในการดึงลวดที่เพิ่มขึ้น ส่วนค่าความเรียบผิวของเส้นลวดสำเร็จจะแปรผันตามค่าความเร็วในการดึงขึ้นรูปเส้นลวด โดยการดึงขึ้นรูปด้วยความเร็วสูงจะได้เส้นลวดที่มีความเรียบผิวที่ดีกว่า และค่าความแข็งแรงดึงของเส้นลวดสำเร็จจะแปรผันตามความเร็วในการดึงขึ้นรูปเส้นลวด
3. การดึงขึ้นรูปเส้นลวดโดยใช้สารหล่อลื่นที่มีค่าความหนืดต่ำ ใช้แรงในการดึงขึ้นรูปสูงกว่าการใช้สารหล่อลื่นที่มีค่าความหนืดสูง เส้นลวดสำเร็จที่ได้จากการดึงขึ้นรูปโดยใช้สารหล่อลื่นที่มีค่าความหนืดต่ำจะมีค่าความหยาบผิวต่ำกว่า ส่วนเส้นลวดสำเร็จที่ได้จากการดึงขึ้นรูปโดยใช้สารหล่อลื่นที่มีค่าความหนืดสูงจะมีค่าความแข็งแรงดึงสูงกว่าจากความเป็นเนื้อเดียวกันของเส้นลวด
4. จากผลการทดลองของการวิจัยนี้เพื่อการประยุกต์ใช้งานที่เหมาะสม ผู้วิจัยเสนอแนะให้ใช้ขนาดมุมตายต่ำสุดที่ 16° และทำการดึงขึ้นรูปด้วยความเร็วสูงสุดที่ 0.4 เมตร/วินาที โดยใช้สารหล่อลื่นที่มีค่าความหนืดสูง เนื่องจากจะส่งผลดีต่อคุณภาพผิวเส้นลวดและเกิดการเปลี่ยนแปลงของสมบัติทางกลน้อยที่สุด

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์ ที่อนุเคราะห์เครื่องมือและอุปกรณ์เพื่อการทำงานวิจัยในครั้งนี้ และขอขอบคุณอาจารย์ เจ้าหน้าที่ และนักศึกษา สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการและการผลิต คณะอุตสาหกรรมและเทคโนโลยีที่มีส่วนช่วยในการดำเนินงานและเก็บผลการทดลอง ทางผู้วิจัยใคร่ขอขอบคุณมา ณ โอกาสนี้

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] T. Viktor. "Steel Wire Production by Cold Drawing", *Hochschule Anhalt*. Vol. 1, 2010, pp. 70-83.
- [2] G. FEDORKO, V. MOLNÁR, N. HUSÁKOVÁ, M. WEISZER. "Analysis of forces in steel wire rope of mining hoisting machine passing sheave", *In: 4th Balkan Mining Congress: 18th-20th October 2011, Ljubljana, 2011*, pp. 235-238.
- [3] J. BOROŠKA, V. MOLNÁR, G. FEDORKO, "Vplyv priemeru drôtu ocelového lana na jeho skutočné napätie", *Doprava a logistika*, Vol. 8, 2005, pp. 5-15.
- [4] G. Vega, A. Haddi, A. Imad, "Temperature effects on wire-drawing process: Experimental investigation", *International Journal of Material Forming*, 2009, : DOI: 10.1007/s12289-009-0468-y
- [5] F.A.Hashim, S.M.Ihmoood, K.A. Mohammed, "Microstructural Investigation of Wire Failure in Wire Drawing Process", *University of Thi-Qar Journal*, Vol.14 (1), 2019, pp. 53-62.
- [6] U.S. Dixit, P.M. Dixit, "An analysis of the steady-state wire drawing of strain hardening materials", *Journal of Material Process Technology*, Vol. 47, 1995, pp. 201–29.
- [7] M. Suliga, R. Kruzel, T. Garstka. (2015). "The influence of drawing speed on structure changes in high carbon steel wires", *J. Gazdowicz Metalurgija*, Vol. 54, pp. 161–164.
- [8] S. M. Byon, S. J. Lee, D. W. Lee, Y. H. Lee, and Y. Lee, "Effect of coating material and lubricant on forming force and surface defects in wire drawing process," *Trans. Nonferrous Met. Soc. China English Ed.*, vol. 21(1), 2011, pp. s104–s110.
- [9] S.M. Dhaher, "Preparation of Dry Solid Lubricant for Drawing of Welding Steel Wires from Local Iraqi Materials," *Al - Mustansiriya J. Sci*, vol. 20 (5), 2009, pp. 28–34.
- [10] M. T. Hillery and V. J. McCabe, "precessh g Materials Wire drawing at elevated temperatures using different die materials and lubricants IAVOmeter Pyrometer," *J. Mater. Process. Technol*, vol. 55, 1995, pp. 53–57.
- [11] S. M. Hafis, M. J. M. Ridzuan, A. Rahayu, Mohamed, R. N. Farahana, and S. Syahrullail, "Minimum quantity lubrication in cold work drawing process: Effects on forming load and surface roughness," *Procedia Eng.*, vol. 68, 2013, pp. 639–646.
- [12] E.K. Saied, N.I. Elzeiny, H.T. Elmetwally, A.A. Abd-Eltwab, "An Experimental Study of Lubricant Effect on Wire Drawing Process", *International Journal of Advanced Science and Technology*, Vol. 29 (1), 2020, pp. 560–568.
- [13] E. Siebel, R. Kobitzsch, "Die Erwärmung des Ziehgutes beim Drahtziehen". *Stahl U. Eisen*(63), 1943, pp. 110-113.

- [14] G. Vega , A. Haddi, A. Imad, “Temperature effects on wire-drawing process: experimental investigation”, *Int. J. Mater.* Vol.2, 2009, pp. 229–232.
- [15] M. Suliga, R. Kruzel, T. Garstka, “The influence of drawing speed on structure changes in high carbon steel wires”, *J. Gazdowicz, Metalurgija*, Vol.54, 2015, pp. 161–164.
- [16] A.F. Gutsol, “Improving ASTM D445, the Manual Viscosity Test, by Video Recording”, *Journal of Testing and Evaluation*, Vol. 47 (1), 2019, pp. 310-323.
- [17] J.Larsson, A. Jansson, P.Karlsson, “Monitoring and evaluation of the wire drawing process using thermal imaging” *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol.101, 2019, pp. 2121–2134.
- [18] Z. Muskalski, S. Wiewiórowska, “The Theoretical Analysis of Wire Drawing Process for Hydrodynamic Friction Conditions” *Metallurgical and Mining Industry*, Vol. 3 (7), 2011, pp. 74-78.
- [19] E.K. Saied, N.I. Elzeiny, H.T. Elmetwally, A.A. Abd-Eltwab, “An Experimental Study of Lubricant Effect on Wire Drawing Process”, *International Journal of Advanced Science and Technology*, Vol. 29 (1), 2020, pp. 560 – 568.
- [20] M. Suliga, “The influence of drawing speed on surface topography of high carbon steel wires”, *Metalurgija*, Vol. 56, 2017, pp. 182–184.
- [21] M.M. Mahdavi, H. Haghighat, “On the Optimum Die Angle in Rod Drawing Process Considering Strain-hardening Effect of Materia” *Iranian Journal of Mechanical Engineering*, Vol. 20(1), 2019, pp.113-128.

การหาค่าที่เหมาะสมของการเจาะรูระดับไมโครเหล็กกล้าไร้สนิม 316L ด้วยการปล่อยประจุไฟฟ้าผ่านแท่งอิเล็กโทรดชนิด CuZn

Optimization of Micro EDM Drilling Parameters for 316L Stainless Steel Using CuZn Electrode

ภูเมศวร์ แสงระยับ^{1*} ประสาน แสงเขียว² ทวี หมดส๊ะ³ นิวัฒน์ มูเก็ม⁴

^{1,2,3,4}สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการและการผลิต คณะอุตสาหกรรมและเทคโนโลยี

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์ วิทยาเขตวังไกลกังวล

อำเภอหัวหิน จังหวัดประจวบคีรีขันธ์ 77110

Phoometh Sangrayub^{1*} Prasan Saengkhaio² Tavee Madsa³ Niwat Mookam⁴

^{1,2,3,4}Department of Industrial and Production Engineering, Faculty of Industry and Technology,

Rajamangala University of Technology Rattanakosin, Wang Klai Kangwon Campus,

Hua Hin, Prachuap Khiri Khan, 77110

*Corresponding author Email: phoometh.san@rmutr.ac.th

(Received: 30 November 2023 / Accepted: 15 December 2023 / Published: 26 December 2023)

บทคัดย่อ

บทความวิจัยฉบับนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อหาพารามิเตอร์ที่เหมาะสมในการเจาะรูเหล็กกล้าไร้สนิม 316L ด้วยการปล่อยประจุไฟฟ้าในระดับไมโคร การทดลองหาค่าที่เหมาะสมดำเนินการโดยใช้ฟังก์ชันความพึงพอใจในรูปแบบผลตอบสนองแบบสองตัวแปรได้แก่ ระยะเจาะเกินของรู (Overcut: DOC) และความเรียวของรูเจาะ (Taper Angle: TR) การคัดกรองความสำคัญของตัวแปรใช้วิธีการทางสถิติ fraction $2^{(n-1)}$ factorial design และใช้เทคนิค Box-Behnken Design ในการออกแบบการทดลองสำหรับพารามิเตอร์ที่เหมาะสม ตัวแปรการเจาะรูที่ศึกษาประกอบด้วย กระแสไฟฟ้า (Peak current) ระยะห่างการสปาร์ค (Gap) ความเร็วในการเจาะ (Drilling speed) เวลาเปิด (Pulse on time) และเวลาปิด (Pulse off time) ผลการศึกษาพบว่า กระแสไฟฟ้า ระยะในการสปาร์ค และเวลาเปิดมีผลกระทบต่อค่า DOC และ TR ที่ระดับ $\alpha = 0.05$ สำหรับตัวแปรที่เหมาะสมกรณี DOC คือ กระแสไฟฟ้าที่ 1 (steps) ระยะห่างในการสปาร์คที่ 6 (steps) และเวลาเปิดที่ 1 (steps) ในขณะที่ตัวแปรที่เหมาะสมสำหรับ TR คือ กระแสไฟฟ้าที่ 3 (steps) ระยะห่างในการสปาร์คที่ 6 (steps) และเวลาเปิดที่ 1 (steps) ผลการหาตัวแปรที่เหมาะสมสำหรับผลตอบสนองทั้งสอง (DOC และ TR) ด้วยฟังก์ชันความพึงพอใจได้ค่าที่เหมาะสม คือ กระแสไฟฟ้าที่ระดับ 3 (steps) ระยะห่างในการสปาร์คที่ 4 (steps) และเวลาเปิดที่ 1 (steps) ได้ผลการทดลองเพื่อยืนยันผลและคิดคำนวณค่าเฉลี่ยของระยะเจาะเกินของขนาดรูเท่ากับ 23.78 % และความเรียวของรูเจาะเท่ากับ 1.2436 deg.

คำสำคัญ: การเจาะรูในระดับไมโคร, พารามิเตอร์ที่เหมาะสม, เหล็กกล้าไร้สนิม 316L

Abstract

This paper aims to identify the optimal parameters for drilling 316L stainless steel using micro drilling. The response optimization of experimental parameters is Overcut (DOC) and Taper Angle. (TR). The study applied the fraction $2^{(n-1)}$ factorial design for specifying the significant parameters and Box-Behnken Design for experimental design. The focused drilling parameters are peak current, gap, drilling speed, and

pulse on-off time. As a result, pulse peak current, gap, and pulse on time affect DOC and TR values at $\alpha = 0.05$. The optimal parameter for DOC is at the pulse peak current 1 (steps), the sixth-step gap, and on-time 1 (steps), while the optimal parameter of TR is at the current 3 (steps), the sixth-step gap, and on-time 1 (steps). In sum, the optimal parameter for both DOC and TR is at the current 3 (steps), the fourth-step gap, and on-time 1 (steps). As a result, the experiment showed that the average DOC is 23.78% and the average TR is 1.2436 deg.

Keyword: Micro EDM drilling, Optimization parameters, 316L stainless steel, CuZn electrode

1. บทนำ

ปัจจุบันเหล็กกล้าไร้สนิม 316L นิยมใช้งานกันอย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมยานยนต์ เนื่องจากมีสมบัติทางกลที่โดดเด่นด้านการยึดตัวและต้านทานการกัดกร่อนจากสารเคมีและน้ำทะเลได้ดี ดังนั้นวัสดุชนิดนี้จึงถูกนำมาใช้ผลิตเป็นชิ้นส่วนต่าง ๆ เช่น โครงสร้าง วาล์ว หัวฉีด ชิ้นส่วนอากาศยาน และเครื่องมือทางการแพทย์ เป็นต้น [1-2] สำหรับกระบวนการผลิตในอุตสาหกรรมยานยนต์และอากาศยาน การพัฒนากระบวนการเจาะรูในระดับไมโครเป็นเทคโนโลยีที่มีความสำคัญอย่างยิ่งในกระบวนการผลิต [3-4] เนื่องจากชิ้นส่วนที่ผลิตมาจากกระบวนการ เช่น หัวฉีด เป็นหัวใจสำคัญของเครื่องยนต์ ถ้าสามารถผลิตรูเจาะให้มีขนาดเล็กในระดับไมโครและมีความเที่ยงตรงสูงจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการจ่ายเชื้อเพลิงได้อย่างมีประสิทธิภาพ สำหรับการฉีดพ่นเชื้อเพลิงนำไปสู่การเผาไหม้ที่ดี สามารถช่วยลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจก เช่น คาร์บอนมอนอกไซด์จากการเผาไหม้ได้อีกด้วย [5-7] ดังนั้นจึงได้มีการพัฒนาเทคโนโลยีและมีวิธีการใหม่ ๆ สำหรับกระบวนการเจาะรูในระดับไมโคร ซึ่งในปัจจุบันเทคโนโลยีการเจาะรูระดับไมโครที่ได้รับการพัฒนาเพื่อตอบสนองความต้องการของอุตสาหกรรมยานยนต์ อากาศยาน ได้แก่ การเจาะด้วยเลเซอร์ (Laser Machining) การเจาะด้วยเครื่องจักรกล (Machining drilling) และการเจาะรูด้วยการจ่ายประจุไฟฟ้า (Electrical discharge drilling) ซึ่งในกลุ่มของกระบวนการเหล่านี้การเจาะด้วยกระบวนการทางความร้อนแบบใหม่เป็นวิธีหนึ่งของเทคโนโลยีกระบวนการผลิตสมัยใหม่ที่มีประสิทธิภาพสูงในภาคอุตสาหกรรม และพบนิยมใช้สำหรับการผลิตหัวฉีดเครื่องยนต์ หัวพิมพ์อิงเจ็ทที่มีขนาดเล็กและมีความเที่ยงตรงสูง [8-11]

การเจาะรูโลหะด้วยการปล่อยประจุไฟฟ้าเป็นวิธีการที่มีความสามารถในการเจาะรูโลหะที่มีรูปร่างซับซ้อนหรือมีความยากต่อการเจาะรูด้วยกระบวนการแบบดั้งเดิม สามารถเจาะชิ้นงานที่ผ่านการชุบแข็งมาแล้วได้ดี [12-13] ซึ่งหมายถึงกระบวนการเจาะวิธีนี้ความแข็งแรงของวัสดุไม่มีผลต่อคุณภาพของรูเจาะ แต่การเจาะโลหะด้วยการปล่อยประจุไฟฟ้ามีตัวแปรที่ส่งผลต่อคุณภาพของการเจาะรูหลายตัวแปรเช่นกัน ประกอบด้วย กระแสไฟฟ้า ระยะห่างในการสปาร์ค ความเร็วในการเจาะ เวลาเปิด และเวลาปิด เป็นต้น ซึ่งในกรณีการใช้ตัวแปรที่ไม่เหมาะสมก็จะส่งผลต่อคุณภาพของรูเจาะ อัตราการตัดเนื้อชิ้นงาน (MRR) อัตราการสึกหรอของอิเล็กโทรด (EWR) ระยะเจาะเกินของขนาดรู (DOC) และ ความเร็วของรูเจาะ (TR) [1-16] การนำไปใช้งาน เช่น หัวฉีด จะทำให้หัวฉีดทำงานได้แบบไม่เต็มประสิทธิภาพและสิ้นเปลืองเชื้อเพลิง นอกจากนี้ในงานวิจัยของ Parthiban และ Harinath [15] ศึกษาหาเงื่อนไขที่เหมาะสมในการเจาะรูในระดับไมโครของไทเทเนียมอัลลอยด์ด้วย Micro EDM มีตัวแปรที่ศึกษาประกอบด้วย เวลาเปิด (Pulse on time) เวลาปิด (Pulse off time) และ ความต่างศักย์ทางไฟฟ้า (Voltage) ที่ส่งผลต่อการสึกหรอของอิเล็กโทรดและระยะเจาะเกินของขนาดรู ผลการศึกษาพบว่า ตัวแปรทั้งสามมีผลต่อ EWR และ DOC ในขณะที่ Ali [16] ศึกษาอิทธิพลของตัวแปรและชนิดของอิเล็กโทรดที่ส่งผลต่อคุณภาพรูเจาะในการเจาะเหล็กกล้าไร้สนิม 304 ด้วย Micro EDM drilling โดยตัวแปรที่ศึกษา คือ กระแสไฟฟ้า เวลาเปิด และชนิดอิเล็กโทรด

ประกอบด้วย ทองแดง แกรไฟต์ โลหะผสมของทองแดงชนิด CuZn37 และทองแดงเคลือบดีบุก พบว่า การใช้กระแสไฟฟ้าที่ระดับสูง (16A) ช่วยปรับปรุง MRR, DOC และ TR ได้ ในขณะที่ค่า EWR ที่มีค่าต่ำสุดพบที่การใช้กระแสไฟฟ้าที่ระดับต่ำ (8A) สำหรับเวลาเปิด การใช้ค่าที่ระดับสูง (75 μ s) จะช่วยปรับปรุงความเร็วของรูเจาะได้ ในแง่ของชนิดอิเล็กโทรด รูเจาะที่มีค่าความเร็วต่ำสุดถูกพบจากการใช้อิเล็กโทรดชนิดทองแดง สำหรับงานวิจัยของ Shamsudin และคณะ [4] ได้ศึกษาอิทธิพลของตัวแปรในการเจาะรูทั้งส텐คาร์ไบด์ด้วย Micro EDM drilling โดยมีตัวแปรที่ศึกษา คือ กระแสไฟฟ้า (1.5-3A) เวลาเปิด (3.2-6.4 μ s) และพัลส์กระแสไฟฟ้าในการสปาร์ค ตรวจสอบคุณภาพรูเจาะประกอบด้วย MRR EWR และ DOC ผลการศึกษาพบว่า ค่า MRR มีค่ามากขึ้นเมื่อใช้กระแสไฟฟ้าพัลส์ที่ระดับสูง ในขณะที่ค่า EWR ได้ค่าต่ำสุดเมื่อใช้กระแสไฟฟ้าพัลส์ที่ระดับต่ำ สำหรับ DOC การใช้เวลาเปิดที่ระดับต่ำด้วยกระแสไฟฟ้าพัลส์จะให้ค่า DOC ที่ต่ำที่สุด จากงานวิจัยที่ผ่านมาเห็นได้ว่ากระบวนการ Micro EDM drilling มีผลตอบสนองหลายค่า ซึ่งแต่ละผลตอบสนองจะใช้พารามิเตอร์ที่เหมาะสมแตกต่างกัน ดังนั้นเพื่อยอดการพัฒนาเทคโนโลยีการเจาะรูในระดับไมโคร สนับสนุนเทคโนโลยีการสร้างหัวฉีดที่มีประสิทธิภาพและคุ้มค่า งานวิจัยนี้จึงมีแนวคิดนำเทคนิคทางสถิติมาประยุกต์ใช้กับการหาค่าที่เหมาะสมสำหรับกรณีหลายผลตอบสนอง ซึ่งหลายๆ งานวิจัยยังมีข้อจำกัดไม่สามารถหาผลตอบสนองที่ดีที่สุดพร้อมกันได้

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการเจาะรูเหล็กกล้าไร้สนิม 316L ด้วยการปล่อยประจุไฟฟ้าผ่านแท่งอิเล็กโทรดชนิด CuZn โดยการหาค่าที่เหมาะสมดำเนินการทดลองด้วยฟังก์ชันความพึงพอใจในรูปแบบผลตอบสนองหลายตัวแปร และใช้ Fraction $2^{(n-1)}$ factorial design ในการคัดกรองความสำคัญของตัวแปร ตัวแปรที่ศึกษาประกอบด้วย กระแสไฟฟ้า ระยะห่างในการสปาร์ค ความเร็วในการเจาะ เวลาเปิด และเวลาปิด คุณภาพของรูเจาะหรือผลตอบสนองประกอบด้วย ระยะเจาะเกินของขนาดรูและความเร็วของรูเจาะ

2. วิธีการดำเนินงานวิจัย

วัสดุทดลองใช้แผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม 316L ขนาด 20x20x0.5 mm ใช้อิเล็กโทรดชนิด CuZn ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 300 μ m สมบัติของอิเล็กโทรดแสดงดังตารางที่ 1 สำหรับการเจาะรูดำเนินการเจาะด้วยเครื่องเจาะรูโลหะด้วยการปล่อยประจุไฟฟ้า (Micro EDM drilling) ยี่ห้อ KOTON รุ่น KTH-200A โดยใช้อิเล็กโทรด 1 แท่งต่อการเจาะ 1 รู

ตารางที่ 1 สมบัติของอิเล็กโทรด [17]

Electrode	Melting Point (°C)	Electric Conductivity [%IACS]	Density (g/cm ³)
CuZn	920	≥ 28	8.4

2.1 การออกแบบการทดลอง

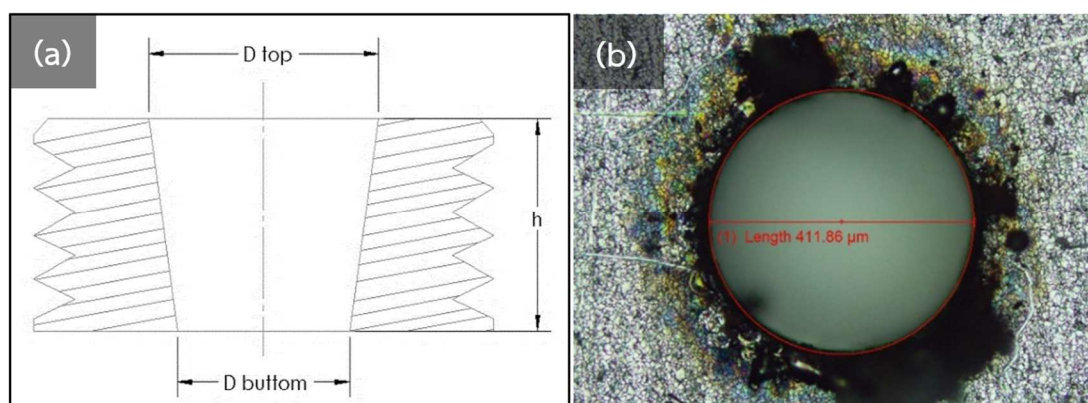
สำหรับการออกแบบการทดลอง เนื่องจากกระบวนการเจาะรูโลหะด้วยการปล่อยประจุไฟฟ้ามีตัวแปรในการดำเนินงานหลายตัวแปร กรณีการทดลองมีวัสดุและงบประมาณที่จำกัด ไม่สามารถศึกษาตัวแปรที่เหมาะสมสำหรับทุกตัวแปรได้ ดังนั้นจึงต้องมีวิธีการการคัดกรองตัวแปรที่มีผลต่อการเจาะรูด้วยเครื่องเจาะโลหะด้วยการปล่อยประจุไฟฟ้า โดยออกแบบการทดลองด้วย $\frac{1}{2}$ fraction $2^{(5-1)}$ factorial design ตัวแปรที่ศึกษาประกอบด้วย A คือ กระแสไฟฟ้า, B คือ ระยะห่างในการสปาร์ค, C คือ ความเร็วในการเจาะ, D คือ เวลาเปิด และ E คือ เวลาปิด โดยแต่ละตัวแปรได้กำหนดระดับในการศึกษา 2 ระดับ มีทั้งหมด 16 การทดลอง แสดงตัวแปรในการศึกษาดังตารางที่ 2 ช่วงระดับของตัวแปรที่ใช้ในการศึกษารั้งนี้ได้มาจากคำแนะนำของคู่มือการเจาะรูโลหะด้วยการปล่อยประจุไฟฟ้ายี่ห้อ KOTON รุ่น KTH-200A [18]

ตารางที่ 2 ตัวแปรและระดับในการทดลองสำหรับการคัดกรองตัวแปรด้วย $\frac{1}{2}$ fraction $2^{(5-1)}$ factorial design

ลำดับ	ตัวแปร	ระดับ	
		ต่ำ (-1)	สูง (1)
1	A: กระแสไฟฟ้า (steps)	2	4
2	B: ระยะห่างในการสปาร์ค (steps)	5	7
3	C: ความเร็วในการเจาะ (steps)	4	6
4	D: เวลาเปิด (steps)	2	4
5	E: เวลาปิด (steps)	1	3

2.2 การศึกษาคุณภาพของรูเจาะ

ในขั้นตอนการศึกษานาฬิกาของรูจะนำชิ้นงานมาส่องวิเคราะห์คุณภาพของรูโดยใช้กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (Optical Microscope, OM) ยี่ห้อ Olympus รุ่น BX53M วัดขนาดของรูด้านบน (D_{top}) และรูด้านล่าง (D_{bottom}) ดังรูปที่ 1 เพื่อนำค่าไปวิเคราะห์หาระยะเจาะเกินของขนาดรูและความเรียวของรูเจาะ



รูปที่ 1 ลักษณะการวัด (a) การวัดขนาดของรูด้านบน (D_{top}) และรูด้านล่าง (D_{bottom}) และ (b) ตัวอย่างการวัดขนาดรู

2.2.1 การวัดระยะเจาะเกินของขนาดรู (Overcut: DOC)

การบันทึกค่าระยะเจาะเกินของขนาดรู ดำเนินการโดยใช้กล้องจุลทรรศน์แบบส่องแสงด้วยกำลังขยาย 100 เท่า วัดขนาดรูเจาะด้านบน และนำมาคำนวณหาค่า DOC ได้ดังสมการที่ 1

$$\text{ระยะเจาะเกินของขนาดรู (\%DOC)} = 100 \left(\frac{D_{top} - D_{tool}}{D_{tool}} \right) \quad (1)$$

โดย D_{top} ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรูด้านบน และ D_{tool} คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของอิเล็กโทรด [6]

2.2.2 การวัดความเรียวของรูเจาะ (Taper angel: TR)

การบันทึกค่าความเรียวของรูเจาะ ดำเนินงานโดยใช้กล้องจุลทรรศน์แบบส่องแสงด้วยกำลังขยาย 100 เท่า วัดขนาดรูเจาะด้านบนและรูด้านล่าง และนำมาคำนวณหาค่า TR ได้จากสมการที่ 2

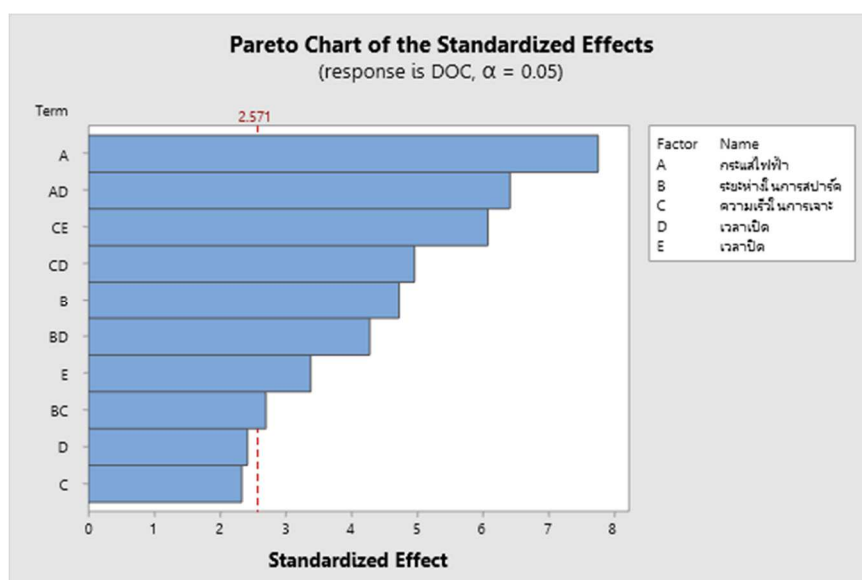
$$\text{ความเริ้วของรูเจาะ TR (deg.)} = \tan^{-1} \left(\frac{D_{\text{top}} - D_{\text{bottom}}}{(2) \times (h)} \right) \quad (2)$$

โดยที่ D_{top} ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรูด้านบน และ D_{bottom} คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรูด้านล่าง และ h คือ ความลึกของรูเจาะ (ความลึกที่เกิดกับผิวชิ้นงานเท่ากับความหนาของชิ้นงาน) [6]

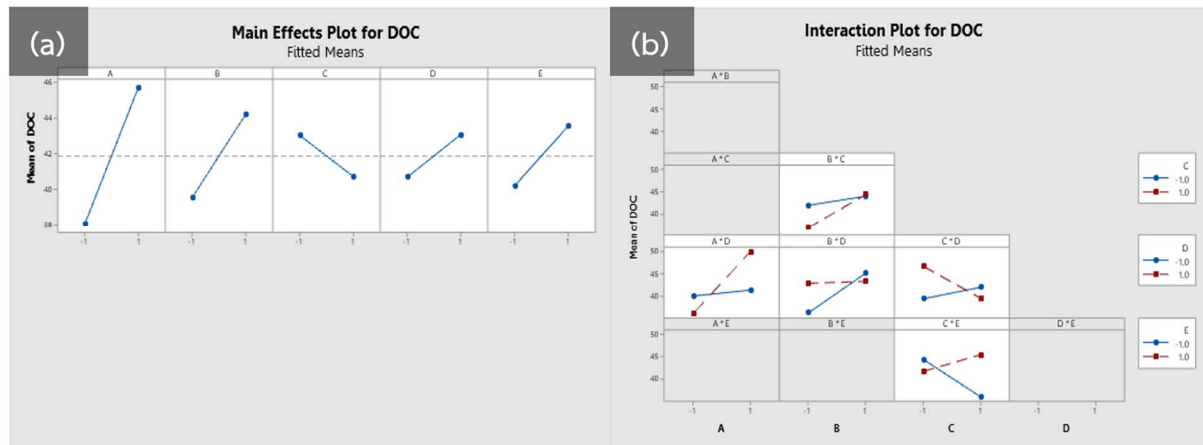
หลังจากที่ทราบอิทธิพลของตัวแปรที่มีผลต่อระยะเจาะเกินของขนาดรูเจาะแล้ว นำตัวแปรที่มีผลสามอันดับแรก (Coef.) มาหาเงื่อนไขที่เหมาะสมด้วยการออกแบบการทดลอง Box Behnken Design ต่อไป

3. ผลการวิจัย

จากการวิเคราะห์ข้อมูลเพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์และหาความแปรปรวนของแบบจำลองในทอมต่าง ๆ ในการคัดกรองตัวแปรที่ส่งผลต่อ %DOC ด้วย $\frac{1}{2}$ fraction $2^{(5-1)}$ factorial design พบว่า การตรวจสอบสมมติฐานของแบบจำลองของข้อมูลจากส่วนตกค้างไม่พบสิ่งผิดปกติใด ๆ จากกราฟในรูปที่ 2 แสดงให้เห็นถึงอิทธิพลของแต่ละตัวแปรที่มีผลต่อกระบวนการเจาะด้วยการปล่อยประจุไฟฟ้าที่แตกต่างกัน ซึ่งจากการเปรียบเทียบระดับความสูงของกราฟแท่ง (ค่าสัมประสิทธิ์ของตัวแปร) ของแต่ละตัวแปรจากกราฟ Pareto chart จะเห็นได้ว่าที่ตัวแปรหลัก กระแสไฟฟ้า (A) มีอิทธิพลต่อขนาดของรูเจาะมากที่สุด รองลงมา คือ อันตรกิริยาระหว่างกระแสไฟฟ้ากับเวลาเปิด (AD) อันตรกิริยาระหว่างความเร็วในการเจาะกับเวลาเปิด (CE) อันตรกิริยาระหว่างความเร็วในการเจาะกับเวลาเปิด (CD) ระยะห่างในการสปาร์ค (B) อันตรกิริยาระหว่างระยะห่างในการสปาร์คกับเวลาเปิด (BD) เวลาเปิด (E) และ อันตรกิริยาระหว่างระยะห่างในการสปาร์คกับความเร็วในการเจาะ (BC) ตามลำดับ มีผลกระทบต่อนขนาดของรูเจาะที่ระดับ $\alpha = 0.05$ และมีค่า R-Sq = 97.91% และ R-Sq (adj) = 93.72%



รูปที่ 2 Pareto chart สำหรับสัมประสิทธิ์ของตัวแปรที่ส่งผลต่อ DOC



รูปที่ 3 (a) Main effects และ (b) Interaction plot สำหรับ DOC

ซึ่งจากผลจากการวิเคราะห์ทดลอง Pareto chart ในรูปที่ 2 พบว่า ค่าสัมประสิทธิ์อิทธิพลของตัวแปรอันดับที่ 1 และ 2 คือ กระแสไฟฟ้า (A) และระยะห่างในการสปาร์ค (B) สำหรับตัวแปรลำดับที่สาม เป็นได้สองตัวแปรคือ เวลาเปิด (D) และเวลาปิด (E) ถึงแม้ว่าเวลาเปิดในตัวแปรหลักจะไม่มีผลกระทบใน Pareto chart แต่ในอันตรกิริยาร่วม เวลาเปิดมีอันตรกิริยาร่วมกระแสไฟฟ้า (AD) และระยะห่างในการสปาร์ค (BD) ซึ่งมีค่าสัมประสิทธิ์อยู่ในลำดับที่ 2 และ 6 ดังนั้นจึงต้องวิเคราะห์ต่อด้วย Main effects และ Interaction plot ในรูปที่ 3 เมื่อพิจารณา Main effects plot ของตัวแปรหลัก พบว่า ทั้งสองตัวแปรมีค่า mean for DOC ใกล้เคียงกัน โดย D มีค่าเท่ากับ 40.65% และ E เท่ากับ 40.17% ดังนั้นจึงต้องพิจารณาที่อันตรกิริยาร่วมจาก Interaction plot ซึ่งจะเห็นได้ว่า D มีอันตรกิริยาร่วมกับ AD, BD และ CD และมีค่า Mean ของ DOC ต่ำสุดเท่ากับ 36.01% เมื่อเทียบกับตัวแปร E พบว่ามีอันตรกิริยาร่วมเฉพาะกับ CE ซึ่งตัวแปร C ไม่มีผลกระทบต่อ DOC ในทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ผลการวิจัยที่ได้สอดคล้องกับผลงานวิจัยของ Urso et al.[1] และ Shamsudin et al. [4] ดังนั้นตัวแปรลำดับที่สามสำหรับการศึกษารุ่นนี้ คือ เวลาเปิด (D) ผู้วิจัยจึงได้นำ 3 ตัวแปรนี้มาใช้ในการศึกษาผลตอบสนองที่เหมาะสมด้วยวิธี Box-Behnken Design สำหรับการเจาะรูเหล็กกล้าไร้สนิม 316L ด้วยเครื่องเจาะรูโลหะด้วยการปล่อยประจุไฟฟ้ายี่ห้อ KOTON รุ่น KTH-200A ต่อไป

3.1 การหาพารามิเตอร์ที่เหมาะสม

สำหรับการหาพารามิเตอร์ที่เหมาะสมใช้เทคนิคการออกแบบการทดลองด้วย Box-Behnken Design ทำซ้ำ 3 ครั้ง ทั้งหมด 45 การทดลอง แสดงตัวแปรในการศึกษาดังตารางที่ 3 ตัวแปร A คือ กระแสไฟฟ้า B คือ ระยะห่างในการสปาร์ค และตัวแปร C คือ เวลาเปิด ซึ่งการวัดคุณภาพรูเจาะหลังจากการทดลองดำเนินการโดยใช้กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง ยี่ห้อ Olympus รุ่น BX53M ทำการวัดขนาดตามรูปที่ 1 และนำมาคำนวณหาค่าระยะเจาะเกินของขนาดรู และค่าความเรียบของรูเจาะตามสมการที่ 1 และ 2 ตามลำดับ ผลจากการคำนวณและนำมาวิเคราะห์ด้วย Box-Behnken Design สามารถสรุปได้ดังนี้

ตารางที่ 3 ตัวแปรและระดับในการทดลอง Bok Behnken Design

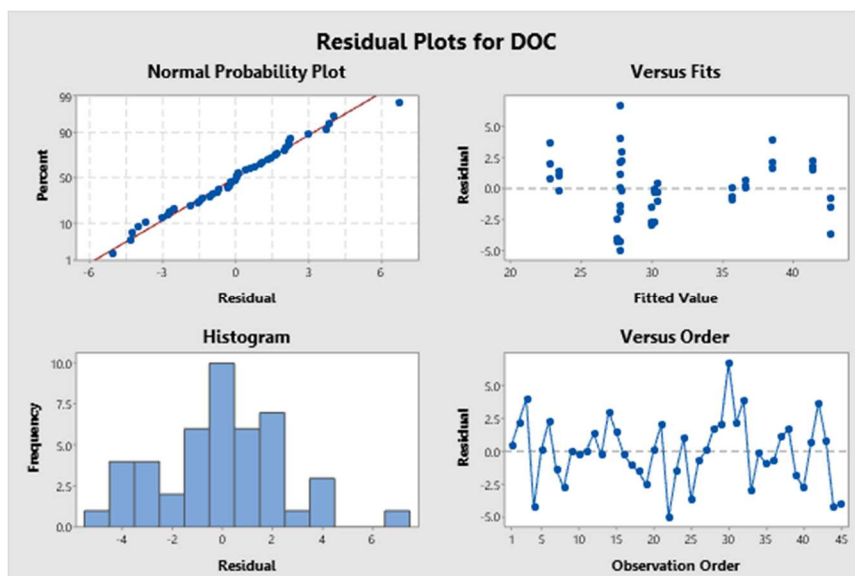
ลำดับ	ตัวแปร	ระดับ		
		ต่ำ (-1)	กลาง (0)	สูง (1)
1	A: กระแสไฟฟ้า (steps)	1	2	3
2	B: ระยะห่างในการสปาร์ค (steps)	4	5	6
3	C: เวลาเปิด (steps)	1	2	3

3.1.1 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติสำหรับ DOC

จากการนำผลการศึกษาระยะเจาะเกินของขนาดรูมาวิเคราะห์ด้วย ANOVA โดยใช้โปรแกรม Minitab ในวิธีการออกแบบการทดลอง Box-Behnken Design แสดงผลดังตารางที่ 4 จากผลการทดลองพบว่า ตัวแปรหลักทั้งสามตัวแปร (A, B และ C) และอันตรกิริยาร่วมระหว่างกระแสไฟฟ้ากับกระแสไฟฟ้า (A,A), เวลาเปิดกับเวลาเปิด (C,C), กระแสไฟฟ้ากับระยะห่างในการสปาร์ค (A,B) และระยะห่างในการสปาร์คกับเวลาเปิด (B,C) มีผลต่อระยะเจาะเกินของขนาดรูที่ระดับ $\alpha = 0.05$ (P-value < 0.05) โดยมีค่า R-sq = 85.50% และ R-sq (adj) = 82.76% และเมื่อตรวจสอบความถูกต้องของข้อมูลพบว่า ข้อมูลมีการแจกแจงแบบปกติ ความแปรปรวนคงที่ และการกระจายตัวของข้อมูลไม่มีรูปแบบหรือแนวโน้มใดหรือมีการกระจายตัวอิสระต่อกันดังแสดงในรูปที่ 4 ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่า รูปแบบของสมการที่ได้จากการวิเคราะห์เพื่อหาค่าที่เหมาะสมของตัวแปรในการเจาะรูเหล็กกล้าไร้สนิม 316L ด้วยการปล่อยประจุไฟฟ้าในระดับไมโครที่มีผลต่อ DOC โดยใช้วิธีการออกแบบการทดลองแบบ Box-Behnken Design มีความเหมาะสม

ตารางที่ 4 สัมประสิทธิ์ของตัวแปรสำหรับ DOC

Term	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value
Constant	27.990	0.907	30.87	<0.001
A	1.458	0.555	2.63	0.013
B	-1.901	0.555	-3.42	0.002
C	5.514	0.555	9.93	<0.001
A* A	3.658	0.817	4.48	<0.001
C* C	2.970	0.817	3.63	0.001
A* B	4.703	0.785	5.99	<0.001
B* C	-4.467	0.785	-5.69	<0.001

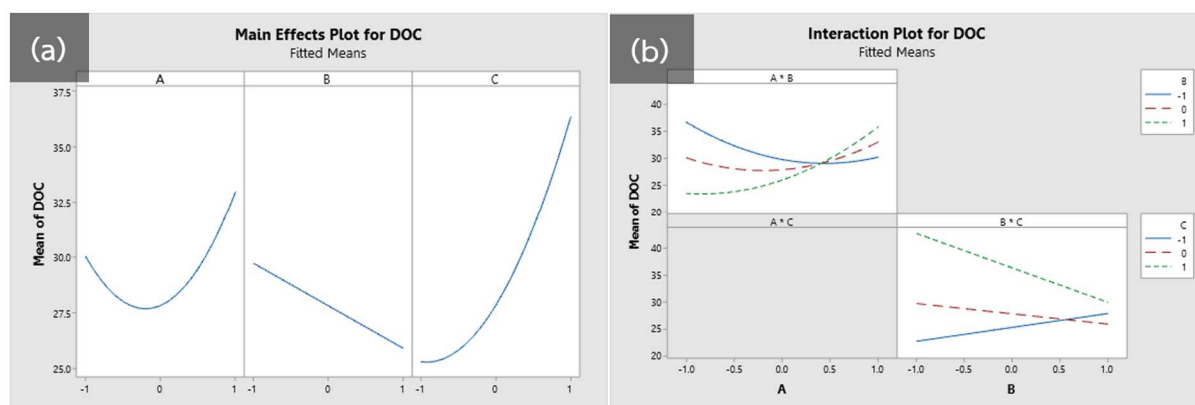


รูปที่ 4 กราฟแสดงส่วนตกค้างจากการทดลองสำหรับ DOC

เมื่อนำค่าสัมประสิทธิ์ของเทอมต่าง ๆ ที่มีผลต่อระยะเจาะเกินของขนาดรูเจาะ (DOC) ไปทำการเขียนสมการทำนาย สามารถเขียนได้ดังสมการที่ 3 เมื่อ Y_{DOC} คือ ระยะเจาะเกินของขนาดรู และค่าตัวแปรทั้งสามในสมการแทนด้วยตัวแปรถูกเข้ารหัส (Code unit) คือ

$$Y_{DOC} = 27.821 + 1.458 A - 1.901 B + 5.514 C + 3.679 A*A + 2.992 C*C + 4.703 A*B - 4.468 B*C \quad (3)$$

จากรูปที่ 5 Main effects plot และ Interaction plot สามารถเลือกค่าที่ส่งผลต่อ %DOC ต่ำคือ กระแสไฟฟ้าที่ -1 (1) ระยะห่างในการสปาร์คที่ 1 (6) และเวลาเปิดที่ -1 (1)



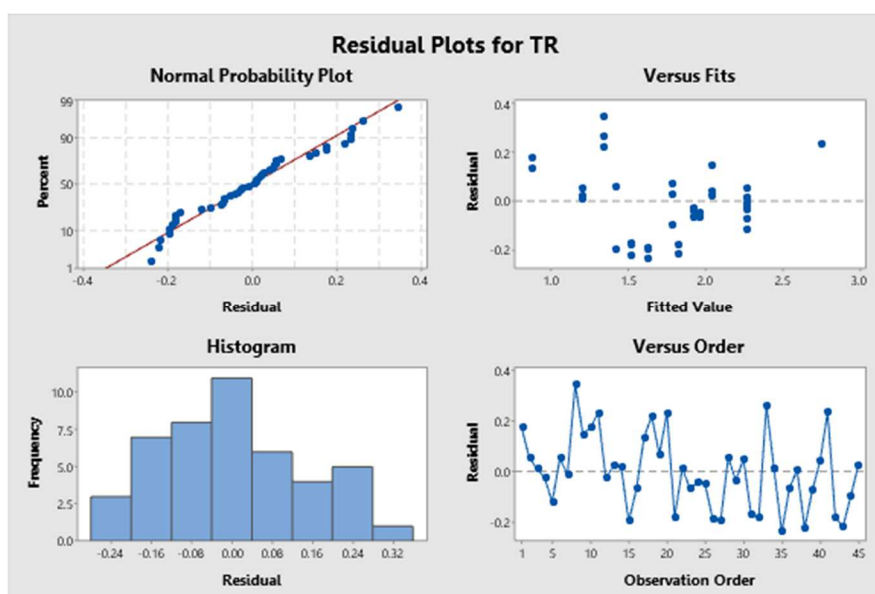
รูปที่ 5 (a) Main effects plot และ (b) Interaction plot สำหรับ DOC

3.1.2 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติสำหรับ TR

จากการนำผลการศึกษาความเรียบของรูเจาะ (TR) มาวิเคราะห์ ANOVA โดยใช้โปรแกรม Minitab ในวิธีการออกแบบการทดลอง Box-Behnken Design แสดงผลดังตารางที่ 5 พบว่า ตัวแปรหลักทั้งสามตัวแปร (A, B และ C) และอันตรกิริยาร่วมระหว่างกระแสไฟฟ้ากับกระแสไฟฟ้า (A,A), เวลาเปิดกับเวลาเปิด (C,C), กระแสไฟฟ้ากับระยะห่างในการสปาร์ค (A,B) และกระแสไฟฟ้ากับเวลาเปิด (A,C) มีผลต่ออัตราเรียบของรูเจาะที่ระดับ $\alpha = 0.05$ (P-value < 0.05) โดยมีค่า R-sq = 91.19% และ R-sq (adj) = 89.53% และเมื่อตรวจสอบความถูกต้องของข้อมูลพบว่า ข้อมูลมีการแจกแจงแบบปกติ ความแปรปรวนคงที่ และการกระจายตัวของข้อมูลไม่มีรูปแบบหรือแนวโน้มใดดังแสดงในรูปที่ 6 ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่า รูปแบบของสมการที่ได้จากการวิเคราะห์เพื่อหาค่าที่เหมาะสมของตัวแปรในการเจาะรูเหล็กกล้าไร้สนิม 316L ด้วยการปล่อยประจุไฟฟ้าในระดับไมโครที่มีผลต่อ TR โดยใช้วิธีการออกแบบการทดลองแบบ Box-Behnken Design มีความเหมาะสม

ตารางที่ 5 สัมประสิทธิ์ของตัวแปรสำหรับ TR

Term	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value
Constant	2.2742	0.0450	50.50	<0.001
A	-0.2529	0.0331	-7.63	<0.001
B	-0.3127	0.0331	-9.44	<0.001
C	0.0692	0.0331	2.09	0.044
A* A	-0.1810	0.0486	-3.72	0.001
C* C	-0.6887	0.0486	-14.16	<0.001
A* B	0.1057	0.0469	2.26	0.030
A* C	0.2020	0.0469	4.31	<0.001

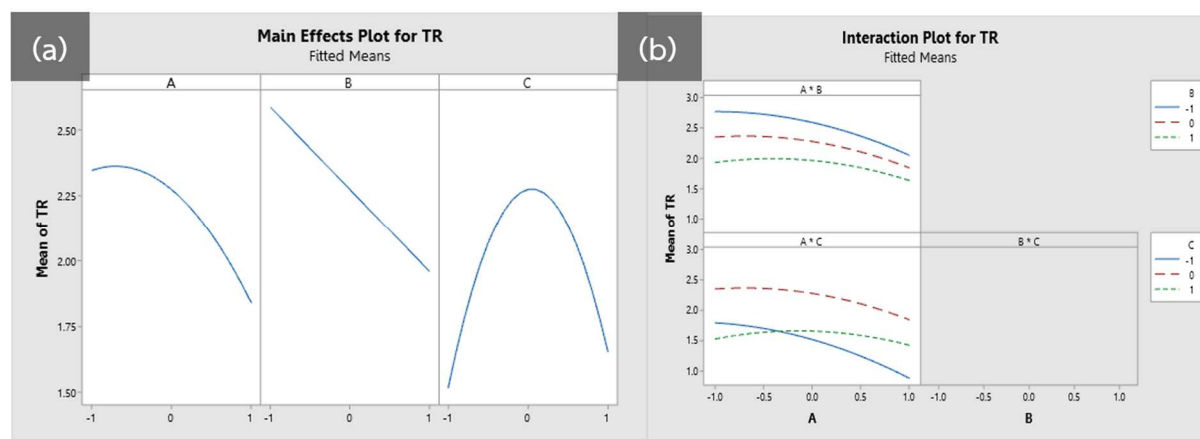


รูปที่ 6 กราฟแสดงส่วนตกค้างจากการทดลองสำหรับ TR

เมื่อนำค่าสัมประสิทธิ์ของเทอมต่าง ๆ ที่มีผลต่ออัตราเร็วของรูเจาะ ไปทำการเขียนสมการทำนาย สามารถเขียนได้ดังสมการที่ 4 เมื่อ Y_{TR} คือ อัตราเร็วของรูเจาะ และค่าตัวแปรทั้งสามในสมการแทนด้วยตัวแปรถูกเข้ารหัส (Code unit) คือ

$$Y_{TR} = 2.2742 - 0.2529A - 0.3127B + 0.0692C - 0.1810A*A - 0.6887C*C + 0.1057A*B + 0.2020A*C \quad (4)$$

จากรูปที่ 7 Main effects plot และ Interaction plot สามารถเลือกค่าที่ส่งผลต่อค่า TR ต่ำคือ กระแสไฟฟ้าที่ 1 (3) ระยะห่างในการสปาร์คที่ 1 (6) และเวลาเปิดที่ -1 (1)



รูปที่ 7 (a) Main effects plot และ (b) Interaction plot สำหรับ TR

การหาค่าที่เหมาะสมสำหรับการเจาะรูแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม 316L ด้วยเครื่องเจาะรูโลหะด้วยการปล่อยประจุไฟฟ้า ยี่ห้อ KOTON รุ่น KTH-200A เนื่องจากคุณภาพของรูเจาะในการศึกษาครั้งนี้มีผลตอบสนองสองค่าคือ ระยะเจาะเกินของขนาดรู และความเร็วของรูเจาะ ดังนั้นเพื่อหาพารามิเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับผลตอบสนองทั้งสองค่า ผู้วิจัยจึงเลือกใช้ฟังก์ชันความพึงพอใจ (Desirability function) ในการหาพารามิเตอร์ที่เหมาะสม โดยกำหนดเป้าหมายของผลตอบสนองทั้งสองค่า (Goal) เป็นค่าน้อยที่สุด (Minimum) ดังตารางที่ 6 เนื่องจากต้องการให้ได้ระยะเจาะเกินและความเร็วของรูเจาะให้มีค่าน้อยที่สุด ค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมจากการหาด้วยฟังก์ชันความพึงพอใจสำหรับผลตอบสนองแบบสองตัวแปรใน Response Optimizer แสดงดังตารางที่ 7

ตารางที่ 6 เป้าหมายของผลตอบสนอง

Response	Goal	Lower	Target	Upper	Weight	Importance
TR	Minimum		1.0174	3.0024	1	1
DOC	Minimum		22.7700	43.6800	1	1

ตารางที่ 7 ผลการทำนายค่าที่เหมาะสมสำหรับ DOC และ TR

Solution	A	B	C	TR Fit	DOC Fit	Composite Desirability
1	1	-1	-1	1.08739	23.1666	0.972852
95% PI				(0.7044, 1.4704)	(16.77, 29.57)	

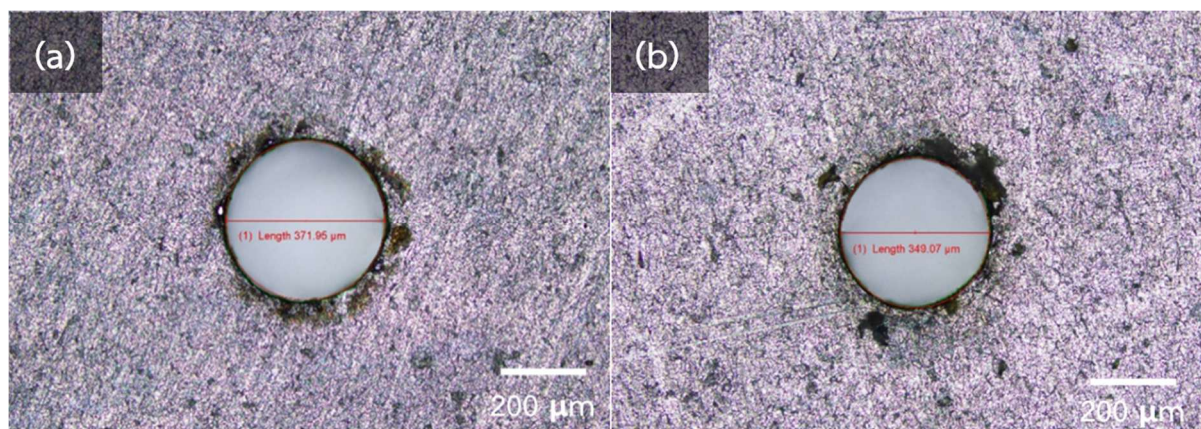
3.1.3 การทดลองเพื่อยืนยันผลการทำนาย

จากการหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของตัวแปรที่มีผลต่อความเร็วของรูเจาะและระยะเจาะเกินของขนาดรูด้วยกระบวนการเจาะรูเหล็กกล้าไร้สนิม 316L ด้วยการปล่อยประจุไฟฟ้าในระดับไมโคร โดยใช้ฟังก์ชันความพึงพอใจใน Response Optimizer สำหรับผลตอบสนองแบบสองตัวแปรผลของการทำนาย คือ กระแสไฟฟ้าที่ระดับ 1 ระยะห่างในการสปาร์คที่ระดับ -1 และเวลาเปิดที่ระดับ -1 ได้ความเร็วของรูเจาะเท่ากับ 1.0874 deg. ระยะเจาะเกินของขนาดรูเท่ากับ 23.17% และได้ค่าความพึงพอใจเท่ากับ 0.97 และเพื่อยืนยันผลการทำนาย ผู้วิจัยจึงได้นำค่าพารามิเตอร์เหล่านี้ไปทดลองจริงโดยทำซ้ำจำนวน 5 ครั้ง ผลจากการทดลองแสดงดังตารางที่ 8

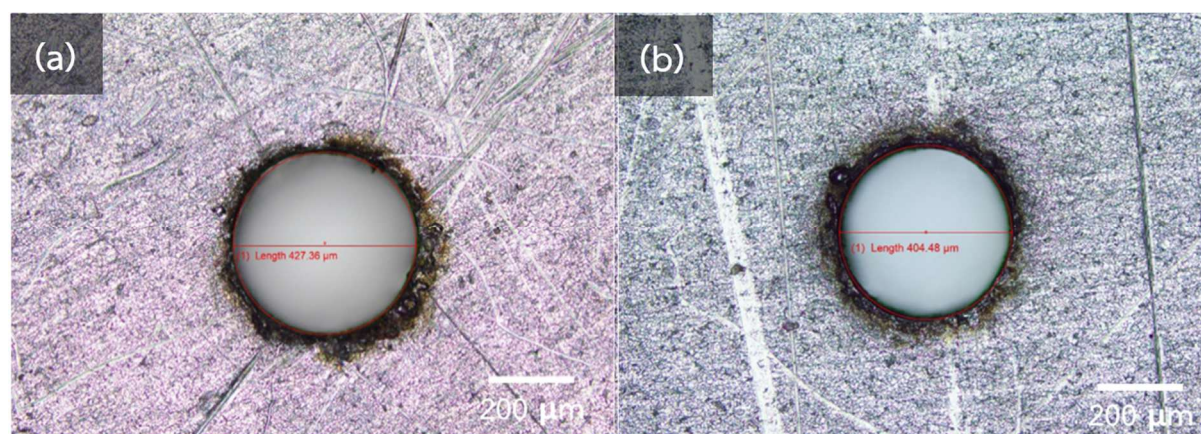
ตารางที่ 8 การทดสอบเพื่อยืนยันผลจากการทำนาย

ลำดับ	DOC (%)	TR (deg.)
1	23.98	1.1838
2	23.73	1.2702
3	23.98	1.2525
4	23.49	1.2265
5	23.73	1.2848
เฉลี่ย	23.78	1.2436

จากผลการทดลองดังตารางที่ 8 ผลการทดลองเจาะรูที่กระแสไฟฟ้าที่ระดับ 1 ระยะห่างในการสปาร์คที่ระดับ -1 และเวลาเปิดที่ระดับ -1 จำนวน 5 ตัวอย่างและนำมาคำนวณค่าเฉลี่ยได้ระยะเจาะเกินของขนาดรูเฉลี่ยเท่ากับ 23.78 % และความเร็วของรูเจาะเฉลี่ยเท่ากับ 1.2436 deg. ซึ่งทั้งสองค่านี้อยู่ในช่วง 95% PI มีค่าเท่ากับ 16.77 ถึง 29.57 % สำหรับ DOC และ 0.7044 ถึง 1.4704 deg. สำหรับ TR จึงสรุปได้ว่าผลการทำนายผลตอบสนองจากการศึกษาครั้งนี้สามารถเชื่อถือได้ แสดงรูปชิ้นงานทดลองที่ใช้ค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมดังรูปที่ 8 และรูปที่ 9 แสดงชิ้นงานทดลองที่ใช้ค่าพารามิเตอร์ที่ไม่เหมาะสม



รูปที่ 8 ขนาดรูเจาะที่กำลังขยาย 100 เท่า ของค่าพารามิเตอร์ที่ดีที่สุด (a) รูเจาะด้านบน (b) รูเจาะด้านล่าง



รูปที่ 9 ขนาดรูเจาะที่กำลังขยาย 100 เท่า ของค่าพารามิเตอร์ที่ไม่เหมาะสม (a) รูเจาะด้านบน (b) รูเจาะด้านล่าง

4. สรุป

งานวิจัยนี้ศึกษาการเจาะรูเหล็กกล้าไร้สนิม 316L ด้วยเครื่องเจาะรูโลหะด้วยการปล่อยประจุไฟฟ้าในระดับไมโคร (Micro EDM drilling) ยี่ห้อ KOTON รุ่น KTH-200A โดยหาค่าที่เหมาะสมด้วยฟังก์ชันความพึงพอใจในรูปแบบผลตอบสนองหลายตัวแปร ผลการศึกษาสามารถสรุปได้ดังนี้

1. ผลการศึกษา ANOVA กระแสไฟฟ้า ระยะในการสปาร์ค และเวลาเปิดมีอิทธิพลต่อค่า DOC และ TR ที่ระดับ $\alpha = 0.05$
2. ค่าตัวแปรที่เหมาะสมสำหรับ DOC คือ กระแสไฟฟ้าที่ 1 (steps) ระยะห่างในการสปาร์คที่ 6 (steps) และเวลาเปิดที่ 1 (steps)
3. ค่าตัวแปรที่เหมาะสมสำหรับ TR คือ กระแสไฟฟ้าที่ 3 (steps) ระยะห่างในการสปาร์คที่ 6 (steps) และเวลาเปิดที่ 1 (steps)
4. การหาพารามิเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับผลตอบสนองแบบสองตัวแปร (DOC และ TR) ด้วยฟังก์ชันความพึงพอใจ ค่าที่เหมาะสมคือ กระแสไฟฟ้าที่ 3 (steps) ระยะห่างในการสปาร์คที่ 4 (steps) และเวลาเปิดที่ 1 (steps) ได้ผลการทดลองเพื่อยืนยันผลและคิดคำนวณค่าเฉลี่ยของระยะเจาะเกินของขนาดรูเท่ากับ 23.78 % และความเรียวของรูเจาะเท่ากับ 1.2436 deg.

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์ และศูนย์บริการวิชาการด้านการผลิตและการทดสอบ สำหรับอุตสาหกรรมสำหรับการสนับสนุนเครื่องมือและอุปกรณ์ในการวิจัยนี้

6. ข้อเสนอแนะ

เนื่องจากเครื่องเจาะโลหะด้วยการปล่อยประจุไฟฟ้าที่ห่อ KOTON รุ่น KTH-200A เสนอแนะให้ใช้พารามิเตอร์ของแต่ละตัวแปรเป็นระดับ (steps) ในการทดลองข้างต้น แต่ไม่ได้ระบุค่าที่แท้จริงไว้ ในอนาคตควรมีการตรวจสอบข้อมูลและค่าตามระดับที่คู่มือที่แนะนำไว้ ด้วยเครื่องมือที่เหมาะสม เช่น ใช้ดิจิตอลออสซิลอโคป เป็นต้น

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] G. D. Urso, G. Maccarini, M. Quarto, C. Ravasio, and M. Caldara, "Micro-electro discharge machining drilling of stainless steel with copper electrode: The influence of process parameters and electrode size," *Advances in Mechanical Engineering*, vol. 8(12), 2016, pp. 1–16.
- [2] J. C. Pilligrin, P. Asokan, J. Jerald, G. Kanagaraj, J. Mukund Nilakantan, and I. Nielsen, "Tool speed and polarity effects in micro-EDM drilling of 316L stainless steel," *Prod Manuf Res*, vol. 5(1), 2017, pp. 99–117.
- [3] K. Wang, Q. Zhang, G. Zhu, Y. Huang, and J. Zhang, "Influence of Tool Size on Machining Characteristics of Micro-EDM," in *Procedia CIRP*, 2018, vol. 68, pp. 604–609.
- [4] S. Shamsudin, M. Faizal, and M. Batcha, "The Influence of EDM Parameters When Micro-hole Drilling of Tungsten Carbide," *Engineering Postgraduate Conference (EPC) 2008*, Bangi, Selangor.
- [5] L. Li, C. Diver, J. Atkinson, R. Giedl-Wagner, and H. J. Helml, "Sequential Laser and EDM Micro-drilling for Next Generation Fuel Injection Nozzle Manufacture," in *Annals of the CIRP*, vol. 55(1), 2006.
- [6] S. Kuriakose, P. K. Patowari, and J. Bhatt, "Effect of micro-EDM machining parameters on the accuracy of micro hole drilling in Zr-based metallic glass," *Engineering Research Express*, vol. 2(1), 2020, pp. 1–12.
- [7] Y. Fu, T. Miyamoto, W. Natsu, W. Zhao, and Z. Yu, "Study on Influence of Electrode Material on Hole Drilling in Micro-EDM," in *Procedia CIRP*, 2016, vol. 42, pp. 516–520.
- [8] G. D. Urso and C. Merla, "Workpiece and electrode influence on micro-EDM drilling performance," *Precision Engineering*, vol. 38(4), 2014, pp. 903–914.
- [9] S. U. Sapkal and P. S. Jagtap, "Optimization of Micro EDM Drilling Process Parameters for Titanium Alloy by Rotating Electrode," in *Procedia Manufacturing*, 2018, vol. 20, pp. 119–126.
- [10] G. D. Urso, G. Maccarini, and C. Ravasio, "Process performance of micro-EDM drilling of stainless steel," *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 72(9), 2014, pp. 1287–1298.

- [11] L. Ye, K. K. Saxena, J. Qian, and D. Reynaerts, "Micro-edm drilling/milling as a potential technique for fabrication of bespoke artificial defects on bearing raceways," *Micromachines (Basel)*, vol. 13(3), Mar. 2022.
- [12] L. Zhang, H. Tong, and Y. Li, "Precision machining of micro tool electrodes in micro EDM for drilling array micro holes," *Precision Engineering*, vol. 39, 2015, pp. 100–106.
- [13] C. Diver, J. Atkinson, H. J. Helml, and L. Li, "Micro-EDM drilling of tapered holes for industrial applications," *Journal of Materials Processing Technology*, Jun. 2004, vol. 149(1–3), pp. 296–303.
- [14] G. D.Urso, G. Maccarini, and C. Ravasio, "Influence of electrode material in micro-EDM drilling of stainless steel and tungsten carbide," *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 85(9–12), 2016, pp. 2013–2025.
- [15] M. Parthiban and M. Harinath, "Optimization of micro-EDM drilling on titanium alloy (Ti-6AL-4V) using RSM and neural network," *Journal of Physics: Conference Series*, Nov. 2021, vol. 2070(1).
- [16] S. M. Ali, "Influence of Electrodes and Parameters on Micro-EDM Drilling Performances of 304L Stainless Steel," *2019 2nd International Conference on Engineering Technology and its Applications, IICETA 2019*, Aug. 2019, pp. 55–60.
- [17] CuZn37 Physical properties, Material Datasheet CuZn37, Available: [http://www. Aurubis.com](http://www.Aurubis.com).
- [18] Drilling electric discharge machine manual, KTH-200A, KOTON technology, 2016.

ผลกระทบของกระบวนการทางความร้อนที่ส่งผลต่อสมบัติทางกลและลักษณะขอบตัดโลหะ แผ่นเหล็กกล้าความแข็งแรงสูงชนิดเฟสคู่ (DP590)

Effect of Heat Treatment Process on Mechanical Properties and Cutting Edge Characteristics of High Strength Steel (DP590)

ณัฐศักดิ์ พรพุดศิริ^{1*} พิสิต เมืองน้อย¹ นิวัฒน์ มูเก็ม¹ พงศกร หลีตระกูล¹

¹สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการและการผลิต คณะอุตสาหกรรมและเทคโนโลยี

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์ วิทยาเขตวังไกลกังวล อำเภอหัวหิน จังหวัดประจวบคีรีขันธ์ 77110

Natthasak Pornputsiri^{1*} Phisith Muangnoy¹ Niwat Mookam¹ Pongsakorn Leetrakul¹

¹Department of Industrial and Production Engineering, Faculty of Industry and Technology,
Rajamangala University of Technology Rattanakosin, Wang Klai Kang Won Campus,
Hua-Hin, Prachubkhirikhan, 77110

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

(Received: 24 August 2023 / Accepted: 15 December 2023 / Published: 26 December 2023)

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาผลกระทบของกระบวนการทางความร้อนกับโลหะแผ่นเหล็กกล้าความแข็งแรงสูงชนิดเฟสคู่ เพื่อปรับปรุงคุณภาพขอบตัด โดยนำโลหะแผ่นไปผ่านกระบวนการทางความร้อนที่แตกต่างกัน ซึ่งประกอบไปด้วย กระบวนการอบคืนตัว กระบวนการอบปกติ และกระบวนการอบอ่อน ตรวจสอบผลกระทบที่มีต่อสมบัติทางกล โครงสร้างจุลภาคและความสูงส่วนต่าง ๆ ของขอบตัด ซึ่งพบว่ากระบวนการทางความร้อนจะส่งผลให้วัสดุเกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาคและสมบัติทางกล โดยโลหะแผ่นที่ผ่านกระบวนการอบคืนตัว เฟสมาร์เทนไซต์จะเกิดการแตกตัวละเอียดมากขึ้นซึ่งส่งผลให้ค่าความเค้นครากเพิ่มสูงขึ้นเล็กน้อย ส่วนค่าความแข็งแรงดึงและอัตราการยืดตัวจะมีค่าลดลง สำหรับโลหะแผ่นที่ผ่านกระบวนการอบแบบปกติด้วยอุณหภูมิสูง ทำให้เฟสมาร์เทนไซต์เกิดการสลายตัวอย่างสมบูรณ์และการเย็นตัวอย่างรวดเร็วทำให้วัสดุมีโครงสร้างจุลภาคที่ไม่เป็นระเบียบ ส่งผลให้ค่าความแข็งแรงดึงลดลงและมีอัตราการยืดตัวเพิ่มมากขึ้น ส่วนกรณีการอบอ่อน ผลจากการควบคุมให้เย็นตัวอย่างช้า ๆ ภายในเตาทำให้เกรนเกิดการเติบโต ซึ่งส่งผลให้วัสดุมีค่าความแข็งแรงดึงลดลง ส่วนอัตราการยืดตัวจะเพิ่มสูงขึ้นอย่างเห็นได้ชัด ทั้งนี้สมบัติทางกลของโลหะแผ่นจะมีความสัมพันธ์โดยตรงกับลักษณะขอบตัดที่ได้ โดยพบว่าค่าความสูงของส่วนโค้งมนจะแปรผกผันกับค่าความเค้นครากของวัสดุ ค่าความสูงของส่วนเรียบตรงจะแปรผกผันกับค่าความแข็งแรงดึง ค่าความสูงของส่วนรอยแตกจะแปรผกผันกับค่าความแข็งแรงดึงและอัตราการยืดตัวของวัสดุ และค่าความสูงครึ่งจะแปรผันตามอัตราการยืดตัวของวัสดุ

คำสำคัญ: เหล็กกล้าความแข็งแรงสูง กระบวนการทางความร้อน โครงสร้างจุลภาค สมบัติทางกล ขอบตัด

Abstract

This research is study to the effect of heat treatment process of dual phase high strength steel sheets. For improve the quality of the cutting edge by used of different heat treatment processes of sheet metal, which consists of tempering, normalizing and annealing process. Examine the effect on mechanical properties, microstructure and different region heights on the cutting edge. The experiment result shown that, the heat treatment process affected to changes of the microstructure and mechanical properties of

metal sheets. Where the sheet metal that has undergone a tempering process, the martensite phase have a look more fine, which results in a slight increase in the yield stress, vice versa the tensile strength and elongation was decrease. For the sheet metal that has undergone normalizing processes at Upper-Critical Temperature. This causes the martensite phase to decompose completely and the rapid cooling gives the material a disordered microstructure. As a result, the strength is reduced and the elongation is increased. On the case of annealing process, as a result of slow cooling rate in the furnace, affect to the grain grows. As a result, the strength decreases and elongation significantly increase. The mechanical properties of sheet metal are directly related to the cutting edge characteristics. It was found that the height of the rollover region was inversely proportional to the yield stress of the material. The height of the burnish region is inversely proportional to the tensile strength. The height of fracture region is inversely proportional to the tensile strength and elongation, the burr height is proportional to the elongation of metal sheets.

Keywords: High strength steel, Heat treatment process, Microstructure, Mechanical properties, Cutting edge

1. บทนำ

เหล็กกล้าความแข็งแรงสูง (High strength steel) ถูกใช้ผลิตเป็นชิ้นส่วนในอุตสาหกรรมยานยนต์ ด้วยสมบัติด้านความแข็งแรงที่โดดเด่นและความสามารถในการขึ้นรูปที่ดี จึงนิยมนำไปผลิตเป็นส่วนประกอบหลักของยานยนต์และชิ้นส่วนที่ต้องการความแข็งแรงสูง [1] โดยเหล็กกล้าชนิดเฟสคู่ (Dual phase) เป็นชนิดที่ถูกนำมาใช้มากที่สุดในกลุ่มเหล็กกล้าความแข็งแรงสูง เนื่องจากมีสมบัติด้านความแข็งแรงสูงแต่มีค่าความเค้นครากค่อนข้างต่ำ สามารถเปลี่ยนรูปได้อย่างต่อเนื่องและมีสมบัติด้านความเคียดแข็งสูง [2] จึงมีคุณสมบัติที่ผสมผสานกันระหว่างความสามารถในการขึ้นรูปและมีค่าความแข็งแรงสูง [3] ค่าความแข็งแรงที่โดดเด่นของเหล็กกล้าชนิดนี้เกิดจากองค์ประกอบของโครงสร้างจุลภาคซึ่งประกอบด้วย 2 เฟสหลักคือ เฟสชนิดมาร์เทนไซต์ (Martensitic phase) ที่เกิดกระจายตัวอยู่ในโครงสร้างพื้นเฟอร์ไรท์ (Ferrite matrix) ทำให้เหล็กกล้าชนิดนี้มีความสามารถในการขึ้นรูปที่ดีและความแข็งแรงสูง [4] เหมาะสำหรับผลิตเป็นชิ้นส่วนยานยนต์เพื่อให้มีน้ำหนักเบา ซึ่งจะส่งผลดีต่อสิ่งแวดล้อมจากการลดอัตราการสิ้นเปลืองของน้ำมันเชื้อเพลิงและมีต้นทุนการผลิตที่ต่ำกว่า ส่วนข้อเสียของเหล็กกล้าชนิดนี้คือ การขึ้นรูปชิ้นส่วนที่มีรัศมีขนาดเล็กหรือมีรูปทรงที่ซับซ้อนมักจะเกิดการแตกร้าวเสียหายได้ง่าย ด้วยความไวในการแตกหักขณะขึ้นรูปแบบเย็น จึงเป็นปัญหาที่สำคัญ โดยเฉพาะในงานปั๊มตัดโลหะแผ่น ซึ่งจะส่งผลกระทบต่อกระบวนการต่อเนื่องและคุณภาพของชิ้นงานสำเร็จ

กระบวนการปั๊มตัดงานโลหะแผ่นในอุตสาหกรรมยานยนต์และอุตสาหกรรมอื่นๆ ที่เกี่ยวข้องกับการขึ้นรูปในประเทศไทย ส่วนใหญ่ได้จากการบวนการตัดเชิงกลหรือเรียกว่า การปั๊มตัดแผ่นเปล่า (Blanking) ที่มีอัตราการผลิตสูง นอกจากนี้ยังมีกระบวนการตัดเฉือนในรูปแบบการตัดเจาะ (Piercing) และการตัดขอบ (Trimming) เพื่อตกแต่งรูปร่างและขนาดของผลิตภัณฑ์ในขั้นตอนสุดท้าย ซึ่งคุณภาพของขอบตัดจะส่งผลโดยตรงต่อกระบวนการผลิตต่อเนื่องและคุณภาพชิ้นงานสำเร็จ จึงมีงานวิจัยจำนวนมากที่ได้ทำการศึกษาถึงปัจจัยดังกล่าว ส่วนใหญ่ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับการออกแบบเครื่องมือหรือแม่พิมพ์เป็นหลัก ซึ่งงานวิจัยที่ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับการปั๊มตัดโลหะแผ่นได้ชี้ให้เห็นถึงปัญหาและข้อกังวลเกี่ยวกับการตัดโลหะแผ่นชนิดเหล็กกล้าชนิดต่าง ๆ โดยการทดลองและวิเคราะห์ผลจากลักษณะของรอยตัดเฉือนบนขอบตัด ซึ่งองค์ประกอบของขอบตัดโดยทั่วไปมี 4 ส่วน ประกอบด้วย ส่วนโค้งมน (Rollover) ส่วนเรียบตรง (Burnish) เรียกอีกอย่างว่าส่วนการตัดเฉือน ส่วนรอยแตก (Fracture surface) หรือเรียกว่าส่วนการแตกร้าว และส่วนของครีบ (Burr) ในบางกรณีอาจมีส่วนเรียบตรงเกิดขึ้น 2 ส่วน ซึ่งจะขึ้นอยู่กับสมบัติทางกลเกี่ยวกับความไวในการแตกร้าวของวัสดุและระยะช่องว่างคมตัดของแม่พิมพ์ [5] นอกจากนี้ยังมีงานวิจัยซึ่งได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับการปรับปรุงสมบัติทางกลของโลหะแผ่นโดยใช้กระบวนการทางความร้อนเพื่อเพิ่ม

ความสามารถในการขึ้นรูปและยืดอายุการใช้งานของแม่พิมพ์ซึ่งเป็นอีกหนึ่งแนวทางที่น่าสนใจ [6–7] เนื่องจากกระบวนการทางความร้อนของโลหะแผ่นส่งผลโดยตรงต่อสมบัติทางกล เช่น ความแข็งแรงและความสามารถในการยืดตัว ซึ่งส่งผลต่อแรงในการขึ้นรูปและอัตราการสึกหรอของแม่พิมพ์ และยังแสดงให้เห็นว่ากระบวนการทางความร้อนจะส่งผลโดยตรงต่อประสิทธิภาพการตัดเฉือนของโลหะแผ่นและคุณภาพชิ้นงานสำเร็จ

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงได้มุ่งเน้นเพื่อพัฒนากระบวนการขึ้นรูปตัดโลหะแผ่นเปล่า โดยใช้กระบวนการทางความร้อนในการปรับปรุงสมบัติทางกลและโครงสร้างจุลภาคของโลหะแผ่นเหล็กกล้าความแข็งแรงสูงชนิดเฟสคู่ โดยใช้กระบวนการทางความร้อนที่แตกต่างกัน ซึ่งประกอบไปด้วย การอบคืนตัว (Tempering) การอบแบบปกติ (Normalizing) และการอบอ่อน (Annealing) เพื่อหาแนวทางในการเพิ่มคุณภาพขอบตัด โดยประเมินผลจากสมบัติทางกล การเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างจุลภาค และค่าความสูงของส่วนต่าง ๆ บนขอบตัดชิ้นงานสำเร็จ

2. วิธีดำเนินการวิจัย

2.1 วัสดุการทดลอง งานวิจัยนี้ใช้โลหะแผ่นเหล็กกล้าความแข็งแรงสูงพิเศษชนิดเฟสคู่เกรด DP590 ความหนา 1 mm. โดยก่อนการทดลองจะนำโลหะแผ่นไปทำการตรวจสอบสมบัติทางกล ด้วยการทดสอบแรงดึงในทิศทางารีดที่แตกต่างกัน ซึ่งผลการทดสอบแรงดึงแสดงดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 สมบัติทางกลของโลหะแผ่นเหล็กกล้าความแข็งแรงสูงพิเศษ DP59

Rolling Direction	Yield Strength (MPa)	Ultimate Tensile Strength (MPa)	Total Elongation (%)
0°	451.30	609.19	22.47
45°	419.80	601.54	28.29
90°	492.35	615.64	23.05

2.2 กระบวนการทางความร้อน ในงานวิจัยนี้มุ่งเน้นศึกษาผลกระทบของกระบวนการทางความร้อนที่ส่งผลต่อสมบัติทางกล โครงสร้างจุลภาค และลักษณะขอบตัดขึ้นทดสอบ ซึ่งประกอบไปด้วย

2.2.1 กระบวนการอบคืนตัว นำโลหะแผ่นขึ้นทดสอบมาทำการอบให้ความร้อนโลหะแผ่นที่อุณหภูมิ 400 °C ระยะเวลา 30 min และปล่อยให้เย็นตัวในอากาศ ทั้งนี้เพื่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของเฟสมาร์เทนไซต์ที่กระจายตัวอยู่ในโครงสร้างพื้นเฟอร์ไรท์ ซึ่งจะทำให้วัสดุมีความแข็งแรงลดลงในขณะที่ค่าความเหนียวจะเพิ่มมากขึ้น [8]

2.2.2 กระบวนการอบปกติ สำหรับเหล็กกล้าคาร์บอนโดยปกติจะทำการอบให้ความร้อนที่อุณหภูมิเหนือเส้นขอบเขตบนของอุณหภูมิวิกฤต (Upper-Critical Temperature, A_3) ประมาณ 40 °C แล้วปล่อยให้เย็นตัวในอากาศ ซึ่งการทดลองนี้ได้ทำการอบให้ความร้อนแก่โลหะแผ่นที่อุณหภูมิ 850 °C และคงอุณหภูมิดังกล่าวเป็นระยะเวลา 2 Hr. เพื่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของเฟสมาร์เทนไซต์โดยสมบูรณ์และนำออกมาปล่อยให้เย็นตัวในอากาศภายนอกเตา

2.2.3 กระบวนการอบอ่อน ทำการอบให้ความร้อนขึ้นทดสอบในเตาอบไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 800 °C และคงอุณหภูมิดังกล่าวที่ระยะเวลา 1 Hr. จากนั้นจะถูกทำให้เย็นตัวอย่างช้าๆ ภายในเตาจนถึงอุณหภูมิห้อง

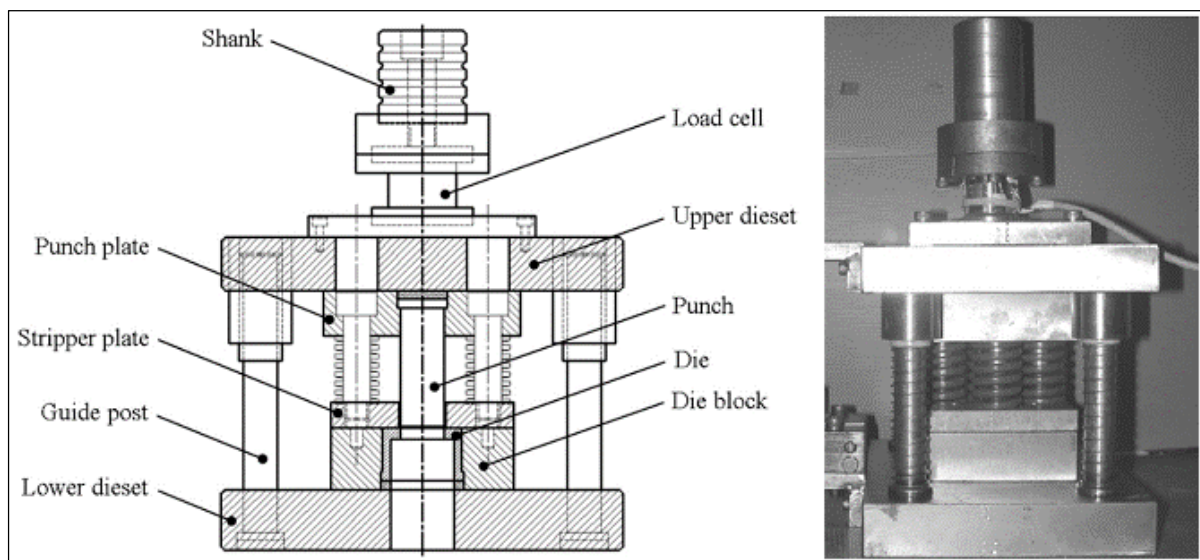
2.3 วิธีทดสอบ

2.3.1 การทดสอบแรงดึง (Tensile test) ขึ้นทดสอบที่ผ่านกระบวนการทางความร้อนถูกเตรียมตามมาตรฐาน ASTM E8M และนำไปทดสอบแรงดึงโดยเครื่องทดสอบอเนกประสงค์ (Universal Testing Machine) ขนาด 50 kN รุ่น AGS-X ยี่ห้อ SHIMADZU ดังรูปที่ 1 เพื่อตรวจสอบสมบัติทางกล ทำการดึงทดสอบด้วยความเร็ว 10 mm/min โดยรายละเอียดผลการทดสอบจะประกอบไปด้วย ค่าความเค้นคราก (Yield stress) ค่าความแข็งแรงดึงสูงสุด (Ultimate tensile strength) และเปอร์เซ็นต์การยืดตัว (Elongation) ของวัสดุ



รูปที่ 1 เครื่องทดสอบแบบอเนกประสงค์

2.3.2 กระบวนการปั๊มตัดแผ่นเปล่า (Blanking process) ผลกระทบของกระบวนการทางความร้อนที่ส่งผลต่อลักษณะขอบตัดทดสอบโดยการปั๊มตัดขึ้นรูปแผ่นเปล่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 20 mm. ด้วยแม่พิมพ์ตัด (Blanking die) ดังรูปที่ 2 ซึ่งพินซ์และดายทำจากเหล็กกล้าเครื่องมือเกรด SKD 11 และทำการชุบแข็งให้มีค่าความแข็งที่ 60 ± 2 HRC โดยกำหนดให้ขนาดรูดายมีค่าความโตเท่ากับขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของแผ่นเปล่า (Blank) และกำหนดระยะช่องว่างคมตัด (Cutting clearance) ตามมาตรฐานของการปั๊มตัดโลหะแผ่นประเภทเหล็กกล้าที่ 8% ของค่าความหนาแผ่นชิ้นงาน



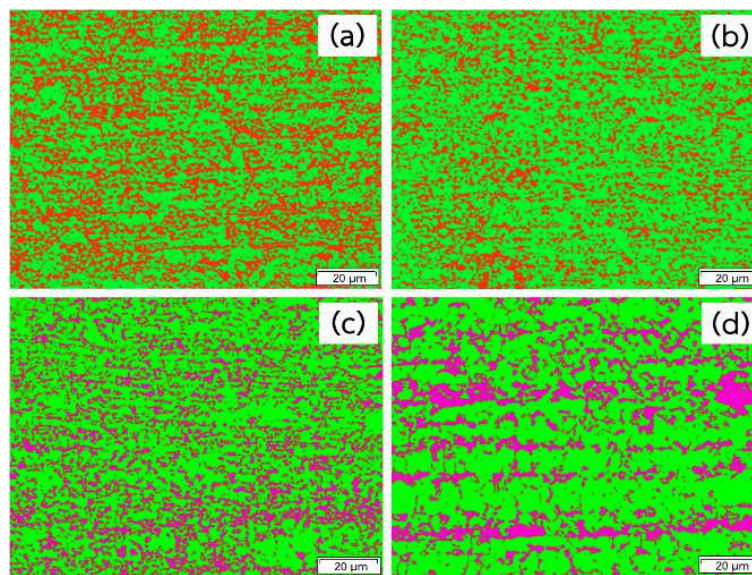
รูปที่ 2 แม่พิมพ์เพื่อทดสอบการปั๊มตัดแผ่นเปล่า

3. ผลการทดลองและการวิจารณ์ผล

โลหะแผ่นที่ผ่านกระบวนการทางความร้อนถูกนำไปตรวจสอบผลกระทบด้านต่างๆ ตามวัตถุประสงค์ซึ่งประกอบไปด้วย การทดสอบแรงดึง (Tensile test) การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค (Microstructure) และการปั๊มตัดแผ่นเปล่า (Blanking) โดยจะทำการประเมินผลและวิเคราะห์ผลการทดลองจากโครงสร้างจุลภาค สมบัติทางกล และลักษณะความสูง

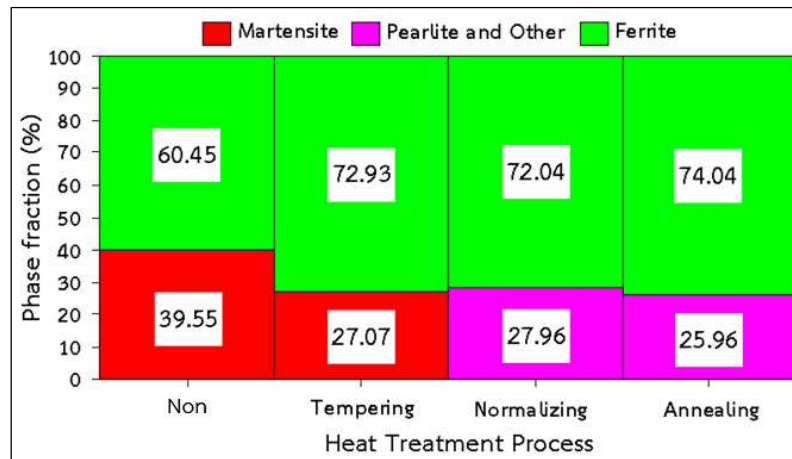
ส่วนต่างๆ บนขอบตัด แสดงผลการทดลองได้ดังนี้

3.1 โครงสร้างจุลภาค (Microstructure) และการวิเคราะห์เฟส (Phase analysis) การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของชิ้นทดสอบก่อนและหลังผ่านกระบวนการทางความร้อน ดำเนินการโดยนำตัวอย่างไปหล่อในเรซิน ชัดผิวด้วยกระดาษทรายเบอร์ 320-1,200 และขัดละเอียดด้วยผงอะลูมินาขนาด 0.3 ไมโครเมตร บนผ้าสักหลาด จากนั้นกัดผิวตัวอย่างด้วยสารละลายกรดเพื่อตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคโดยใช้กล้องจุลทรรศน์แบบแสง (Optical microscope; OM) และวิเคราะห์สัดส่วนเฟสที่เกิดขึ้นด้วยโปรแกรม Olympus stream image analysis โดยปกติเหล็กกล้าความแข็งแรงสูงชนิดเฟสคู่เกรด DP590 โครงสร้างจุลภาคปรากฏเฟสมาร์เทนไซต์ (Martensitic phase) กระจายตัวในเมตริกซ์ของเฟอร์ไรท์ (Ferrite matrix; F) [9] จากรูปที่ 3 แสดงผลการวิเคราะห์เฟสโครงสร้างจุลภาคที่กำลังขยาย 100 เท่า ซึ่งเฟสเฟอร์ไรท์หรือเมตริกซ์พื้นมีลักษณะเป็นสีเขียว เฟสมาร์เทนไซต์แทนด้วยสีแดง ส่วนเฟสเพียไลต์ (Pearlite phase) และอื่นๆ จะแทนด้วยพื้นสีม่วง พบว่าชิ้นทดสอบที่ไม่ผ่านกระบวนการทางความร้อนเฟสมาร์เทนไซต์ละเอียดกระจายทั่วโครงสร้างจุลภาคและมีปริมาณมากแสดงดังรูปที่ 3 (a) ซึ่งโดยปกติสำหรับเหล็ก DP590 การปรากฏเฟสมาร์เทนไซต์ในปริมาณมากส่งผลให้วัสดุมีความต้านทานแรงดึงสูง [10] รูปที่ 3 (b) ชิ้นทดสอบที่ผ่านกระบวนการอบคืนตัว พบว่าเฟสมาร์เทนไซต์มีลักษณะละเอียดและมีสัดส่วนลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับชิ้นทดสอบที่ไม่ผ่านกระบวนการทางความร้อนแต่เฟอร์ไรท์มีสัดส่วนที่เพิ่มขึ้น ส่วนรูปที่ 3 (c) แสดงโครงสร้างจุลภาคของตัวอย่างที่ผ่านอบแบบปกติ (Normalizing) เนื่องจากอุณหภูมิเหนือเส้นขอบเขตบนของอุณหภูมิวิกฤต (Upper-Critical Temperature, A_3 หรือ A_{cm}) จึงส่งผลทำให้เฟสมาร์เทนไซต์เกิดการสลายตัวอย่างสมบูรณ์และเกิดการเปลี่ยนแปลงไปเป็นเฟสเพียไลต์ ซีเมนไตต์คาร์ไบด์ (Fe_3C) และเฟสอื่น ๆ หลังจากกระบวนการเย็นตัว [11] ส่วนลักษณะโครงสร้างจุลภาคของชิ้นทดสอบหลังการอบอ่อน การเย็นตัวอย่างช้าๆ ภายในเตาส่งผลให้เฟสเฟอร์ไรท์รวมตัวกันเกิดเป็นเฟสที่มีขนาดใหญ่บนเมตริกซ์พื้นดังรูปที่ 3 (d)



รูปที่ 3 โครงสร้างจุลภาคและการวิเคราะห์เฟส (a) ไม่ผ่านกระบวนการทางความร้อน (b) อบคืนตัว (c) อบปกติ และ (d) อบอ่อน

โดยสัดส่วนของแต่ละเฟสแสดงดังรูปที่ 4 ซึ่งพบว่าชิ้นทดสอบที่ผ่านกระบวนการทางความร้อนจะส่งผลให้ปริมาณของเฟสชนิดแข็งเช่น เฟสมาร์เทนไซต์ เฟสเพียไลต์ และเฟสอื่น ๆ ลดลงในทุกกระบวนการ นั่นหมายถึงเมตริกซ์พื้นซึ่งมีความอ่อนเหนียวจะมีสัดส่วนที่เพิ่มมากขึ้น ซึ่งกระบวนการการอบอ่อนเพิ่มสัดส่วนเมตริกซ์พื้นได้มากที่สุดทำให้เกิดการยึดตัวของวัสดุได้ดีและมีความแข็งแรงลดลงมากที่สุด

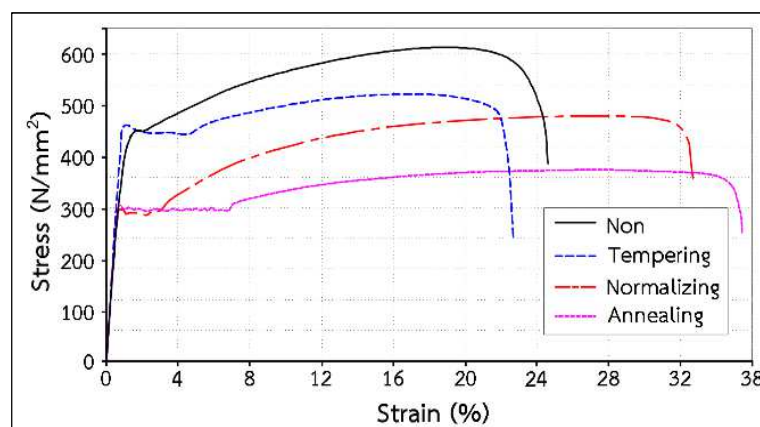


รูปที่ 4 สัดส่วนของเฟส

3.2 สมบัติทางกล (Mechanical properties) ภายหลังจากผ่านกระบวนการทางความร้อนโลหะแผ่นซึ่งถูกตัดเตรียมตามมาตรฐาน ASTM E8M นำไปทดสอบแรงดึงด้วยเครื่องทดสอบอเนกประสงค์ โดยผลการทดสอบแรงดึงจะแสดงในรูปของกราฟความสัมพันธ์ของความเค้น-ความเครียด ผลการทดสอบแสดงรายละเอียดดังตารางที่ 2 และรูปที่ 5

ตารางที่ 2 สมบัติทางกลเฉลี่ยของชิ้นทดสอบจากกระบวนการทางความร้อนที่แตกต่างกัน

Heat treatment process	Yield Strength (MPa)	Ultimate Tensile Strength (MPa)	Total Elongation (%)
Non	454.48	608.79	24.6
Tempering	462.24	524.26	22.9
Normalizing	290.78	480.80	32.2
Annealing	291.25	365.89	37.2

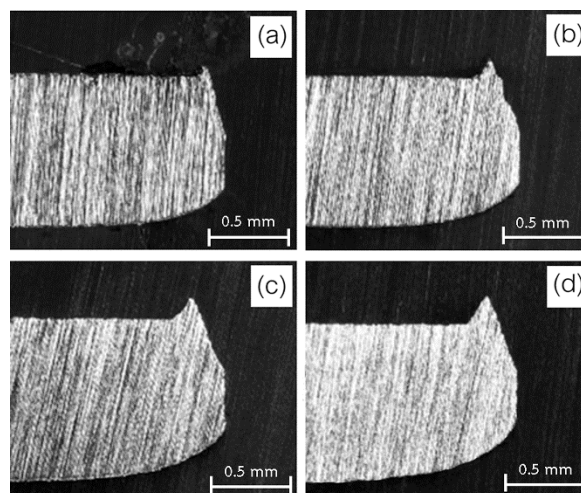


รูปที่ 5 สมบัติทางกลชิ้นทดสอบจากการทดสอบแรงดึง

จากผลการทดสอบแรงดึงของโลหะแผ่นในทิศทางต่างๆ และนำข้อมูลการทดสอบมาคำนวณเป็นค่าเฉลี่ย เมื่อเปรียบเทียบค่าความเค้นคราก (Yield stress;YS) พบว่าชิ้นทดสอบที่ผ่านกระบวนการอบคืนตัวจะมีค่าความเค้นครากสูงสุดที่ 462.24 N/mm² และชิ้นทดสอบที่ผ่านกระบวนการอบปกติมีค่าความเค้นครากต่ำที่สุดที่ 290.78 N/mm² ส่วนผลการเปรียบเทียบค่าความแข็งแรงดึง (Ultimate tensile stress;UTS) พบว่าชิ้นทดสอบที่ไม่ผ่านกระบวนการทางความร้อนจะมีค่า

ความแข็งแรงดึงสูงสุดที่ 571.98 N/mm^2 ส่วนชิ้นทดสอบที่ผ่านกระบวนการอบอ่อนมีค่าความแข็งแรงดึงต่ำสุดที่ 365.89 N/mm^2 และผลการเปรียบเทียบอัตราการยืดตัวโดยรวม (Total elongation; TE) พบว่าชิ้นทดสอบที่ผ่านกระบวนการอบอ่อนมีอัตราการยืดตัวโดยรวมมากที่สุดที่ 37.2% และชิ้นทดสอบที่ผ่านกระบวนการอบคืนตัวมีอัตราการยืดตัวโดยรวมน้อยสุดที่ 22.9% ซึ่งให้เห็นว่ากระบวนการทางความร้อนส่งผลโดยตรงต่อสมบัติทางกลของโลหะแผ่น ชิ้นทดสอบซึ่งพบว่ากระบวนการอบคืนตัว จะส่งผลให้ค่าความเค้นครากของโลหะแผ่นเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ในขณะที่ความแข็งแรงดึงและอัตราการยืดตัวจะลดลง เนื่องจากเกิดการแตกตัวของเฟสมาร์เทนไซต์ทำให้มีขนาดที่ละเอียดและมีการจัดเรียงตัวใหม่ของเกรนเกิดขึ้น [12] ส่วนโลหะแผ่นชิ้นทดสอบที่ผ่านกระบวนการอบปกติ (Normalizing) ส่งผลให้ค่าความเค้นครากและค่าความแข็งแรงดึงลดลง ในขณะที่อัตราการยืดตัวจะเพิ่มสูงขึ้น เนื่องจากโลหะแผ่นได้รับความร้อนเหนือเส้นของอุณหภูมิวิกฤต (A_3) ทำให้ให้เฟสมาร์เทนไซต์เกิดการสลายตัวเปลี่ยนเป็นเฟสออสเทนไนต์สมบูรณ์ และด้วยการเย็นตัวอย่างรวดเร็วในอากาศหนึ่งปกติ ทำให้เกรนมีการจัดเรียงตัวและกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ ซึ่งส่งผลให้วัสดุมีอัตราการยืดตัวเพิ่มสูงขึ้น จากอัตราการเย็นตัวที่มากกว่าเส้นอัตราการเย็นตัววิกฤต ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงเฟสในโครงสร้างจุลภาค ซึ่งส่งผลให้ค่าความแข็งแรงดึงลดลง [13] และชิ้นทดสอบที่ผ่านกระบวนการอบอ่อน ค่าความแข็งแรงดึงจะลดลงมากที่สุด ในขณะที่คุณสมบัติด้านอัตราการยืดตัวจะมีค่าเพิ่มสูงขึ้นสูงสุด เนื่องจากการอบอ่อนเป็นกระบวนการที่ให้ความร้อนแก่วัสดุจนอุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิวิกฤตและปล่อยให้เย็นตัวอย่างช้าๆ ภายในเตา ซึ่งส่งผลให้เฟสเฟอร์ไรต์เกิดการขยายตัวโตขึ้น ส่งผลทำให้โลหะแผ่นมีค่าความแข็งแรงดึงลดลง ในขณะเดียวกันสมบัติด้านความเหนียวหรืออัตราการยืดตัวจะเพิ่มสูงขึ้นอย่างเห็นได้ชัด

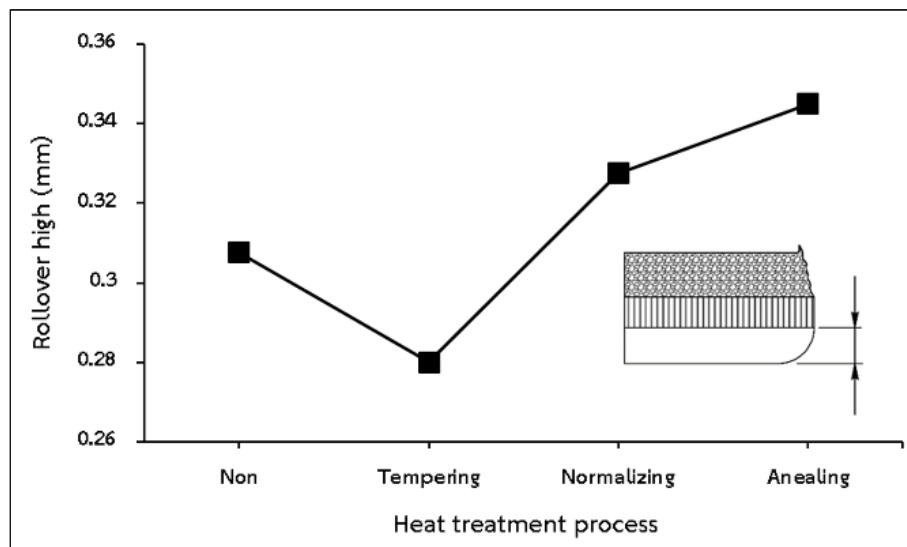
3. ลักษณะขอบตัด (Cutting edge characteristics) แผ่นเปล่าที่ได้จากการบีมตัดไปหล่อด้วยเรซินและขัดผิวด้วยกระดาษทรายเบอร์ 600 จากนั้นทำการบันทึกภาพในแนวภาคตัดขวางของขอบตัดโดยใช้กล้องจุลทรรศน์ (Stereo microscope) ที่กำลังขยาย 20 เท่า ดังรูปที่ 6 เพื่อวัดค่าความสูงของส่วนต่างๆ บนขอบตัดเพื่อเปรียบเทียบผลกระทบของกระบวนการทางความร้อนที่มีต่อความสูงส่วนต่างๆ บนขอบตัด ซึ่งผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 7-10 ตามลำดับ



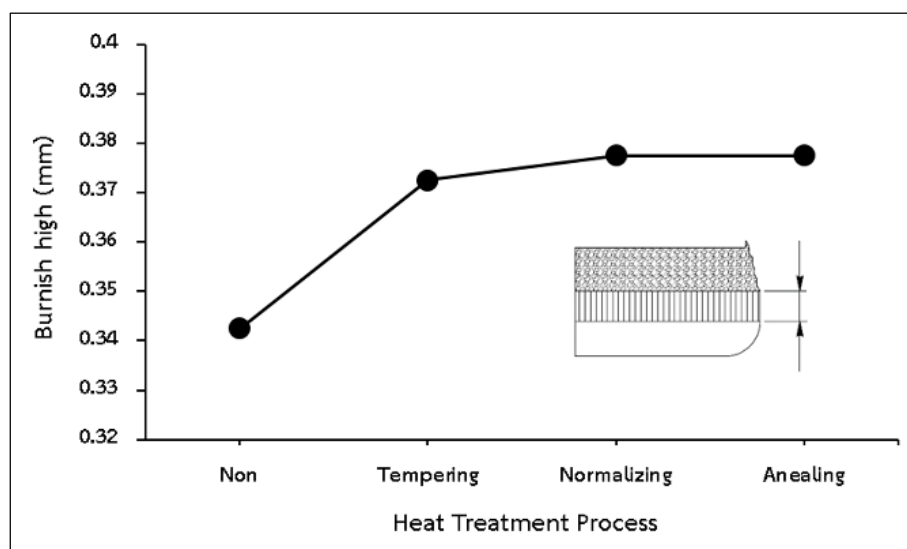
รูปที่ 6 ลักษณะขอบตัด (a) ไม่ผ่านกระบวนการทางความร้อน (b) อบคืนตัว (c) อบปกติ (d) อบอ่อน

ผลการทดลองในรูปที่ 7 แสดงผลกระทบของกระบวนการทางความร้อนที่ส่งผลต่อค่าความสูงส่วนโค้งมน (Rollover) บนขอบตัด ซึ่งพบว่าชิ้นทดสอบที่ผ่านกระบวนการอบคืนตัวมีค่าความสูงของส่วนโค้งมนลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับชิ้นทดสอบที่ไม่ผ่านกระบวนการทางความร้อน ส่วนชิ้นทดสอบที่ผ่านกระบวนการอบแบบปกติจะมีค่าความสูงของส่วนโค้งมนเพิ่มมากขึ้นและชิ้นทดสอบที่ผ่านกระบวนการอบอ่อนจะมีค่าความสูงของส่วนโค้งมนมากที่สุด จากผลการทดลองพบว่าค่าความสูงของส่วนโค้งมนจะแปรผกผันกับค่าความเค้นครากของโลหะแผ่น เนื่องจากส่วนโค้งมนเป็นผลมาจากการเปลี่ยนรูปถาวรของวัสดุ [14] วัสดุที่มีค่าความเค้นครากต่ำจะเกิดการเปลี่ยนรูปถาวรได้ง่าย จึงสอดคล้องกับผลการทดลองซึ่งพบว่าชิ้นทดสอบที่ผ่านกระบวนการอบคืนตัวซึ่งมีค่าความเค้นครากสูงที่สุด ส่งผลให้ชิ้นทดสอบมีค่าความสูงของส่วนโค้งมนน้อยสุด

ในขณะที่ขึ้นทดสอบที่ผ่านกระบวนการอบอ่อนซึ่งมีค่าความเค้นครากต่ำ จะมีค่าความสูงของส่วนโค้งมนมากที่สุด

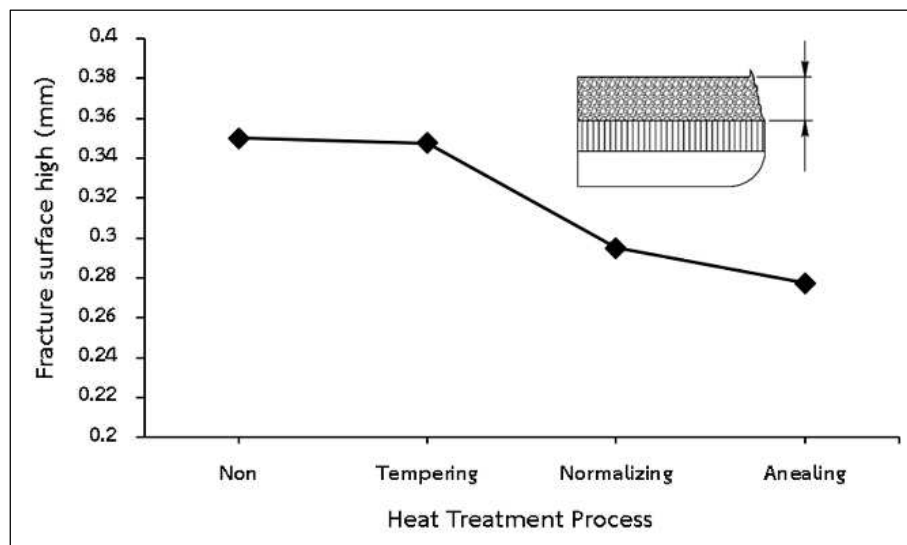


รูปที่ 7 ความสูงส่วนส่วนโค้งมนของขอบตัด



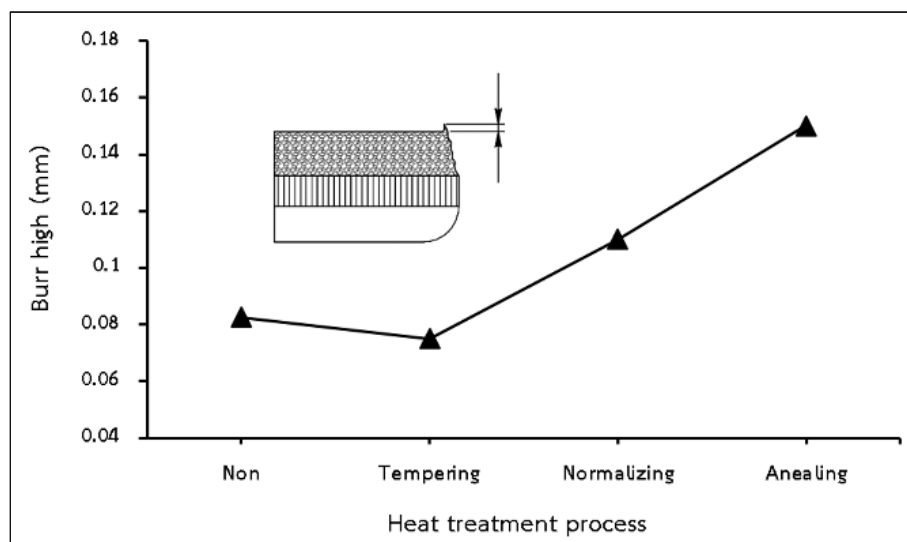
รูปที่ 8 ความสูงส่วนเรียบตรงของขอบตัด

จากรูปที่ 8 แสดงผลกระทบของกระบวนการทางความร้อนที่ส่งผลต่อค่าความสูงของส่วนเรียบตรง (Burnish) บนขอบตัดซึ่งเป็นส่วนที่ต้องการมากที่สุดเพราะเป็นตัวบ่งชี้ถึงขนาดและคุณภาพชิ้นงานสำเร็จ พบว่าขึ้นทดสอบที่ผ่านกระบวนการทางความร้อนจะมีค่าความสูงของส่วนเรียบตรงเพิ่มมากขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับขึ้นทดสอบที่ไม่ผ่านกระบวนการทางความร้อน โดยขึ้นทดสอบที่ผ่านกระบวนการอบอ่อนจะมีค่าความสูงของส่วนเรียบตรงมากที่สุด โดยพบว่าความสูงของส่วนเรียบตรงจะแปรผกผันกับค่าความแข็งแรงดึงของวัสดุ เนื่องจากส่วนเรียบตรงเป็นผลมาจากการเสียรูปแบบเฉือน (Shear deformation) ภายในเนื้อวัสดุ เกิดขึ้นหลังจากวัสดุได้รับความเค้นเกินค่าความเค้นดึงสูงสุด [15] ดังนั้นวัสดุที่มีค่าความแข็งแรงดึงต่ำ การตัดเฉือนจะเกิดขึ้นได้ง่ายกว่า ส่งผลให้ขอบตัดมีส่วนเรียบตรงสูง



รูปที่ 9 ความสูงส่วนส่วนรอยแตกของขอบตัด

จากรูปที่ 9 แสดงผลกระทบของกระบวนการทางความร้อนที่ส่งผลต่อค่าความสูงของส่วนรอยแตก (Fracture surface) ซึ่งเป็นส่วนที่ไม่ต้องการ พบว่าชิ้นทดสอบที่ผ่านกระบวนการทางความร้อนจะมีค่าความสูงของส่วนรอยแตกลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับกรณีที่ไม่ผ่านกระบวนการทางความร้อน โดยชิ้นทดสอบที่ผ่านการอบคืนตัว ค่าความสูงของส่วนรอยแตกจะลดลงเพียงเล็กน้อย ส่วนชิ้นทดสอบที่ผ่านกระบวนการอบอ่อนจะส่งผลให้ความสูงของส่วนรอยแตกลดลงมากที่สุด ทั้งนี้พบว่าค่าความสูงของส่วนรอยแตกจะแปรผกผันกับค่าความแข็งแรงดึงและอัตราการยืดตัวของวัสดุ เนื่องจากวัสดุที่มีคุณสมบัติด้านความเหนียวน้อย (เปราะ) มักเกิดรอยแตกหรือเกิดการแตกหักเสียหายได้ง่ายเมื่อได้รับแรงกระทำ ส่วนวัสดุเหนียวจะเกิดการแตกหักเสียหายได้ยากกว่า



รูปที่ 10 ผลการวัดค่าความสูงครีบ

ผลการทดลองรูปที่ 10 แสดงผลกระทบของกระบวนการทางความร้อนที่ส่งผลต่อค่าความสูงครีบ (Burr) บนขอบตัด ซึ่งเป็นส่วนที่ต้องกำจัดออก พบว่าชิ้นทดสอบที่ผ่านกระบวนการอบคืนตัวมีค่าความสูงครีบลดลงเล็กน้อย ในขณะที่การอบแบบปกติส่งผลให้ครีบบีความสูงเพิ่มมากขึ้นและชิ้นทดสอบที่ผ่านกระบวนการอบอ่อน ครีบจะมีความสูงมากที่สุด โดยค่าความสูงครีบจะแปรผันตามอัตราการยืดตัวของวัสดุหรือค่าความสูงครีบจะเพิ่มมากขึ้นเมื่อวัสดุมีอัตราการยืดตัวเพิ่มมากขึ้น

เนื่องจากวัสดุที่มีความเหนียวมากจะสามารถยืดตัวได้ดี ดังนั้นในระหว่างกระบวนการตัดเฉือนเนื้อวัสดุที่อยู่ระหว่างช่องว่างคมตัดจึงฉีกขาดออกจากกันได้ช้า ซึ่งส่งผลให้ชิ้นทดสอบมีค่าความสูงของครีบมากกว่าวัสดุที่มีอัตราการยืดตัวน้อย

4. สรุป

จากการทดลองเพื่อศึกษาผลกระทบของกระบวนการทางความร้อนที่มีต่อ สมบัติทางกล โครงสร้างจุลภาค และค่าความสูงของส่วนต่างๆ บนขอบตัด ของโลหะแผ่นเหล็กกล้าความแข็งแรงสูงชนิดเฟสคู่เกรด DP590 โดยผลการทดลองสามารถสรุปได้ดังนี้

4.1 กระบวนการทางความร้อนจะส่งผลโดยตรงต่อสมบัติทางกลของชิ้นทดสอบ ซึ่งทำให้วัสดุมีค่าความแข็งแรงดิ่งลดลงและมีอัตราการยืดตัวเพิ่มมากขึ้น โดยกระบวนการอบอ่อนจะเป็นกระบวนการที่ส่งผลให้โลหะแผ่นมีค่าความแข็งแรงลดลงมากที่สุดและมีอัตราการยืดตัวสูงสุดเช่นเดียวกัน

4.2 กระบวนการทางความร้อนส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาค โดยชิ้นทดสอบที่ผ่านกระบวนการทางความร้อนลดการเกิดขึ้นของเฟสมาร์เทนไซต์หรือเฟสชนิดแข็ง พร้อมกับเพิ่มสัดส่วนเมตริกซ์ของเฟอร์ไรท์ อย่างไรก็ตามแต่ละกระบวนการทางความร้อนมีปริมาณสัดส่วนของแต่ละเฟสแตกต่างกันเล็กน้อย สำหรับกระบวนการอบอ่อนลดการเกิดขึ้นของเฟสชนิดแข็งและเพิ่มสัดส่วนเมตริกซ์ขึ้นได้มากที่สุด วัสดุจึงมีการยืดตัวที่ดี ขอบตัดที่ได้จากการบีบอัดมีส่วนเรียบตรงเกิดขึ้นมากและทำให้รอยแตกลดลง

4.3 กระบวนการทางความร้อนจะส่งผลต่อลักษณะขอบตัดของแผ่นเปล่าและสัมพันธ์กับสมบัติทางกล โดยพบว่ากระบวนการอบอ่อนจะส่งผลให้ค่าความสูงของส่วนโค้งมน ส่วนเรียบตรงและความสูงครีบเพิ่มขึ้นมากที่สุด ในขณะที่ส่วนรอยแตกจะลดลงมากที่สุด ซึ่งสัมพันธ์กับสมบัติทางกลเนื่องจากการอบอ่อนจะส่งผลให้วัสดุมีความเหนียวเพิ่มขึ้นในขณะที่ค่าความแข็งแรงดิ่งจะลดลงมากที่สุดเช่นเดียวกัน

4.4 จากผลการวิจัยนี้ หากมีวัตถุประสงค์เพื่อการปรับปรุงคุณภาพขอบตัดชิ้นงาน เสนอแนะให้เลือกใช้กระบวนการอบคืนตัว เนื่องจากส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางกลของโลหะแผ่นน้อยที่สุด แต่คุณภาพขอบตัดเพิ่มขึ้นใกล้เคียงกับกระบวนการทางความร้อนอื่นๆ

5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจาก มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์ ขอขอบคุณอาจารย์ เจ้าหน้าที่ และนักศึกษา ของสาขาวิศวกรรมอุตสาหการและการผลิต คณะอุตสาหกรรมและเทคโนโลยี ที่มีส่วนช่วยเหลือให้งานวิจัยฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] ณัฐศักดิ์ พรพุดศิริ, “อิทธิพลของกระบวนการตัดขึ้นรูปแบบ 3 จุด ที่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาคและความเสียหายของโลหะแผ่นเหล็กกล้าความแข็งแรงสูงชนิดเฟสคู่ JSC980Y”, วารสารวิจัย มทรกรุงเทพ., 15 (2): (2564), หน้า 84-94.
- [2] T.T. Huang, R.B. Gou, W.J. Dan n, and W.G. Zhang, “Strain-hardening behaviors of dual phase steels with microstructure features”, Materials Science&Engineering A, Vol.672, (2016), pp. 88–97.
- [3] W. Wang, M. Li, Y. Zhao, and X. Wei, “Study on stretch bendability and shear fracture of 800 MPa dual phase steel sheet” Materials and Design, Vol.56, (2014), pp. 907–913.

- [4] J.C. Zhang, H.S. Di, Y.G. Deng, S.C. Li, and R.D.K. Misra, “Microstructure and mechanical property relationship in an ultrahigh strength 980 MPa grade high-Al low-Si dual phase steel”, *Materials and Design*, Vol.645, (2015), pp. 232–240.
- [5] S.F. Golovashchenko, N. Wang, S. Nasheralahkami, N.A. Reinberg, and W. Zhou, “Mechanism of fracture in sheet metal cutting processes and its effect on sheared edge stretchability”, *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, Vol.418, (2018), 012057. doi:10.1088/1757-899X/418/1/012057.
- [6] D. Bublíková, S. Jeníček, I. Vorel, B. Mašek, “New heat treatment process for advanced high-strength steels”, *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, Vol.179(1), (2017), 012009, doi: 10.1088/1757-899X/179/1/012009
- [7] Z. Zhang, Y. Li, K. Manabe, and F. Zhu, “Effect of Heat Treatment on Microstructure and Mechanical Properties of TRIP Seamless Steel Tube”, *Materials Transactions*, Vol. 53, No. 5 (2012), pp. 833 - 837.
- [8] F. Forouzan, N. Strandqvist, E. Vuorinen, E. Navara, and F. Mücklich, “Effect of Tempering on Microstructure and Mechanical Properties of Laser Welded and Post-Weld Treated AHSS Specimens”, *Materials Science Forum*, Vol. 891, (2017), pp. 18-24.
- [9] E. Aldalur, A. Suarez, F. Veiga, “Metal transfer modes for Wire Arc Additive Manufacturing Al-Mg alloys: Influence of heat input in microstructure and porosity” *Journal of Materials Processing Tech.* 297 (2021) 117271.
- [10] P. Libo, C. Lin, and W. Zhou. "Study on mechanical properties and microstructure of DP590 steel with different annealing process." *E3S Web of Conferences*. Vol. 245, (2021). EDP Sciences.
- [11] V.B. da Trindade Filho, A.S. Guimarães and J.da C. Payão Filho, “Normalizing Heat Treatment Effect on Low Alloy Steel Weld Metals”, *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, Vol. XXVI, (2004), No.1, pp.62-66.
- [12] T. Senthilkumar, and T. K. Ajiboye, “Effect of Heat Treatment Processes on the Mechanical Properties of Medium Carbon Steel”, *Journal of Minerals & Materials Characterization & Engineering*, Vol. 11, No.2, (2012), pp.143-152.
- [13] A.W. Morsy, and A.I.Z. Farahat, “Effect of Cr and Thermomechanical Processing on the Microstructure and Mechanical properties of Advanced High Strength Steel” *Journal of Engineering Materials and Technology*, Vol. 140(2), (2018), doi:10.1115/1.4038393.
- [14] K. Fuchiwakia, Y. Mureb, K. Yoshidac, and M. Murakawa, “Prediction of die-roll in fine blanking by use of profile parameters”, *Procedia Engineering*, Vol. 207, (2017), pp. 1564–1569.
- [15] E. Kancaa, O. Eyercioğlub, I.H. Karahanc, A. Günend, and K. Göv, “Effects of Blanking Speed on the Shear Surface of Mild Steel (St37)”, *Acta Physica Polonica Series a*, Vol. 130, (2016), pp. 370-374.

การพัฒนาแอปพลิเคชันติดตั้งเครื่องมือตัดบนเครื่องกลึงซีเอ็นซีด้วยเทคนิคการหมุนน้อยที่สุด

Developing an Application to Install Cutting Tools on a Lathe Using the Least Rotation Technique

จตุพร ใจดำรงค์*

สาขาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย

อำเภอเมือง จังหวัดสงขลา 90000

Jatuporn Jaidumrong*

Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering,

Rajamangala University of Technology Sivijaya, Songkhla, 90000

*Corresponding author Email: jatuporn.j@rmuts.ac.th, jatuporn1974@gmail.com

(Received: 25 August 2023 / Accepted: 16 December 2023 / Published: 26 December 2023)

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาแอปพลิเคชันที่พัฒนาขึ้นบนระบบปฏิบัติการแอนดรอยด์มาช่วยในการหาตำแหน่งในการติดตั้งเครื่องมือตัดบนป้อมมีดกลึงโดยใช้วิธีการฮิวริสติกแบบหมุนน้อยที่สุดเพื่อลดจำนวนช่องของป้อมมีดหรือเวลาที่ใช้ในการหมุนเปลี่ยนเครื่องมือตัด วิธีการนี้ถูกประยุกต์ใช้กับป้อมมีดและเครื่องมือตัดชิ้นงาน การกำหนดรูปแบบการทำงานของเครื่องมือตัดและคำนวณหารูปแบบในการติดตั้งเครื่องมือตัดโดยการกำหนดลำดับการทำงานของเครื่องมือตัดและสร้างข้อมูลเครื่องมือโดยใช้กรอบไอคอนิกในแอปพลิเคชันมือถือแอนดรอยด์ ผลการวิจัยพบว่าแอปพลิเคชันที่พัฒนาสามารถกำหนดตำแหน่งในการติดตั้งเครื่องมือตัดบนป้อมมีดกลึงได้อย่างมีประสิทธิภาพสูงสุดด้วยวิธีการแบบหมุนน้อยที่สุดโดยมีจำนวนช่องในการหมุนเฉลี่ยเท่ากับ 34.95

คำสำคัญ: เครื่องมือตัด ป้อมมีด เครื่องกลึงซีเอ็นซี หมุนน้อยที่สุด ระบบปฏิบัติการแอนดรอยด์

Abstract

The research objective of this study was to develop an application on the Android operating system that helps find the position of the cutting tool on the lathe using the least rotation method to reduce the number of tool magazine slots or time used to rotate and change cutting tools. This method is applied to lathes and cutting tools. The work pattern of the cutting tool is determined and the installation pattern of the cutting tool is calculated by specifying the work sequence of the cutting tool and creating tool data using an icon frame in a mobile android application. The research found that the developed application can position the cutting tools on major turrets. Most efficiently using the control method with an average value equal to 34.95.

Keywords: Cutting Tool, Tool Turret, CNC Turning, Short Rotate, Android Operation

1. บทนำ

การผลิตชิ้นส่วนด้วยเครื่องจักรซีเอ็นซี (CNC) ช่วยให้การงานมีความถูกต้องแม่นยำและรวดเร็วยิ่งขึ้น นอกจากนี้ยังช่วยลดความผิดพลาดในการผลิตอันเนื่องมาจากคนงานได้อีกด้วย สำหรับเครื่องกลึงซีเอ็นซี (CNC Lathe) ที่มีเครื่องมือตัดจำนวนมากติดตั้งเครื่องมือตัดบนป้อมมีดกลึง (Tool turret) ซึ่งช่วยลดเวลาเปลี่ยนเครื่องมือตัด แต่ในการทำงานก็ยังคงมีความสูญเสียเปล่าอันเนื่องมาจากเวลาหรือจำนวนช่องในการหมุนเปลี่ยนเครื่องมือตัด เส้นทางเดินของเครื่องมือตัดและลำดับขั้นตอนในการทำงานของชิ้นงานอีกด้วย การทำงานที่หลากหลาย เช่น การกลึงบอก การกลึงเกลียว การเจาะรู การเจาะรู และงานกัดตามแนวแกนหรือรัศมี ดังนั้นจึงได้รับความนิยมในการผลิตชิ้นงานมากยิ่งขึ้นในปัจจุบัน ซึ่งเครื่องกลึงซีเอ็นซีแต่ละรุ่นแต่ละยี่ห้อจะมีจำนวนเครื่องมือตัดที่ต่างกัน เช่น ยี่ห้อ JOBBER JR มีจำนวนเครื่องมือตัด 8 รายการ ยี่ห้อ HAAS SL-20 หรือยี่ห้อ MAZAK INTEGREX 200 มีจำนวนเครื่องมือตัด 12 รายการ และยี่ห้อ MIYONO BND 42S5 มีจำนวนเครื่องมือตัด 24 รายการ เป็นต้น ดังนั้นการจัดเตรียมเครื่องมือตัดให้เหมาะสมกับการทำงานโดยการติดตั้งบนป้อมมีดบนต้องสอดคล้องกับกระบวนการในการทำงาน เพื่อให้การตัดเฉือนมีประสิทธิภาพ และยืดอายุในการใช้งาน

การศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องเพื่อลดเวลาสูญเสียเปล่าในการทำงานกับเครื่องซีเอ็นซี Kenneth Castelino, et al. [1] ได้ทำการออกแบบวิธีการสร้างเส้นทางเดินเครื่องมือเพื่อลดระยะเส้นทางเดินของเครื่องมือในช่วงที่ไม่มีการกัดชิ้นงานหรือเรียกว่าเวลาเดินในอากาศเพื่อให้เวลารวมในการกัดชิ้นงานน้อยที่สุด และการจัดลำดับขั้นตอนในการทำงานของชิ้นงานโดยการใช้เครื่องมือตัดที่มีลักษณะแตกต่างกันอีกด้วย M. Selim Akturk, et al. [2] ได้ทำการพัฒนาระบบการจัดลำดับการทำงานของชิ้นงานบนเครื่องจักรเครื่องเดียวด้วยวิธีการจัดเรียงงานที่ใช้เวลาน้อยไปหามากเพื่อลดเวลารวมในการทำงาน สำหรับ A. Gjelaj, J. Balic and M. Ficko [3] ได้ทำการออกแบบวิธีการทำงานกับเครื่องซีเอ็นซี โดยพิจารณาปัจจัยในการเลือกใช้สองประการ คือ ประการแรกเป็นเวลาน้อยที่สุดของการเรียกใช้เครื่องมือตัดที่ติดตั้งในชุดเก็บหรือป้อมมีดด้วยโดยพิจารณาถึงมุมหมุนในการติดตั้งเครื่องมือตัดของชุดจัดเก็บเครื่องมือตัด (Tool Magazine) ประการที่สองเป็นรูปทรงของเครื่องมือตัดที่เหมาะสมกับการทำงานกับชิ้นงานรูปทรงต่างๆ โดยนำวิธีการเชิงพันธุกรรม (Genetic Algorithm) มาช่วยในการค้นหาค่าสถานะในการทำงานที่เหมาะสมอีกด้วย นอกจากนี้ E. Niemi [4] ได้พัฒนาตัวแบบทางคณิตศาสตร์จำนวนเต็มเชิงเส้นแบบผสมสำหรับการติดตั้งเครื่องมือตัดบนป้อมมีดแบบหมุนโดยไม่มีการเรียกเครื่องมือตัดมารอในตำแหน่งเปลี่ยน ตัวแบบนี้เป็นการกำหนดตำแหน่งในการติดตั้งเครื่องมือตัดบนตำแหน่งของป้อมมีดเพื่อให้มีจำนวนช่องในการหมุนร่นน้อยที่สุดตามลำดับการทำงานของเครื่องมือ สำหรับ Diptesh Ghosh [5] พัฒนาเทคนิคในการค้นหาแบบตาบอด (Tabu search) เพื่อการกำหนดตำแหน่งในการติดตั้งเครื่องมือตัดบนป้อมมีด ผลการวิจัยพบว่าวิธีการที่พัฒนาขึ้นช่วยลดค่าใช้จ่ายลง 20%-30% สำหรับ Joze, B., Miha, K. & Bostjan, V. [6] ได้ทำการออกแบบวิธีเชิงพันธุกรรมเพื่อเขียนโปรแกรมระบบสำหรับการเลือกเครื่องมือตัดซีเอ็นซี ลำดับการวางแผน และการเพิ่มประสิทธิภาพของการตัดเฉือน พบว่าเวลาทำงานของเครื่องจักรลดลง 16% และลดความต้องการผู้ปฏิบัติงานมีทักษะที่สูงบนระบบ CAD/CAM และ CNC อีกด้วย

การกลึงชิ้นงานด้วยเครื่องกลึงซีเอ็นซีแบบป้อมมีดกลึงโดยมีการทำงานในหลากหลายลักษณะ การใช้เครื่องมือตัดและสถานะในการทำงานที่เหมาะสมจะแตกต่างกันไปตามลักษณะในการทำงาน การติดตั้งเครื่องมือตัดในตำแหน่งต่างๆบนป้อมมีดกลึงจะมีการสูญเสียเวลาเพื่อหมุนเปลี่ยนเครื่องมือตัดไปยังตำแหน่งทำงาน ดังนั้นตำแหน่งในการติดตั้งที่เหมาะสมของเครื่องมือตัดบนป้อมมีดกลึงจึงเป็นปัญหาหนึ่งที่มีความสำคัญเพื่อช่วยลดเวลาในการทำงานด้วยเครื่องกลึงซีเอ็นซี จตุพร และบรรเลง [7] การพัฒนาโปรแกรมช่วยในการกำหนดตำแหน่งในการติดตั้งเครื่องมือตัดบนป้อมมีดของเครื่องกลึงซีเอ็นซี โปรแกรมพัฒนาขึ้นด้วยวิซวลเบสิก 6.0 ด้วยวิธีการแบบไปข้างหน้า ของ ปารเมศ [8] การทำงานของโปรแกรมประกอบด้วยสามส่วน คือ ส่วนรับข้อมูล ส่วนประมวลผล และส่วนแสดงผลการติดตั้ง ผลการทดลองกับการทำงานจำนวน 15 กรณีพบว่าโปรแกรมที่พัฒนาขึ้นสามารถกำหนดตำแหน่งในการติดตั้งเครื่องมือตัดบนป้อมมีดมีจำนวนช่องในการหมุนเปลี่ยนเครื่องมือตัดน้อยกว่าวิธีการแบบสุ่มเท่ากับ 51.46 เปอร์เซ็นต์ ธัญญมาศ, วุฒิชัย และ จตุพร [9] พัฒนาแอปพลิเคชันสำหรับติดตั้งเครื่องมือบนป้อมมีดของเครื่องกลึงซีเอ็นซีโดยใช้วิธีการแก้ปัญหาแบบไปข้างหน้าเพื่อลดเวลาในการหมุนเปลี่ยนเครื่องมือตัด

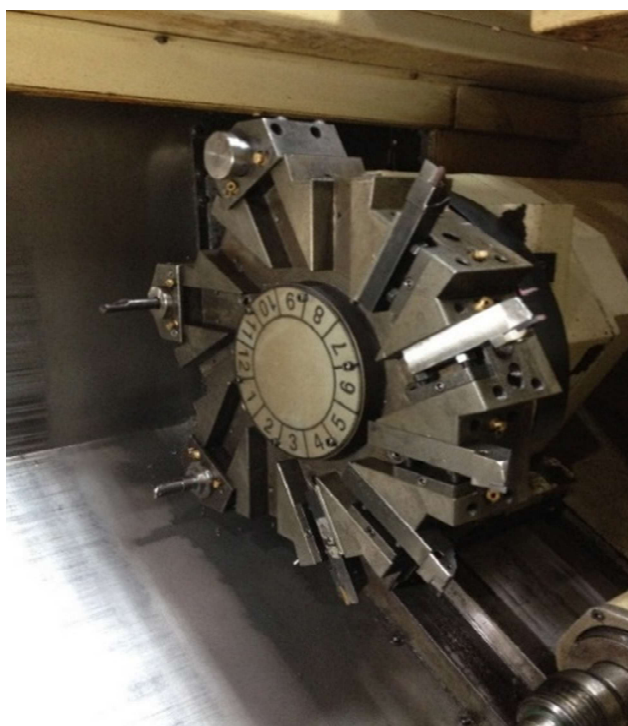
วิธีการนี้ประยุกต์ใช้กับป้อมมิตและเครื่องมือตัดชิ้นงาน การกำหนดรูปแบบการทำงานของเครื่องมือตัดและคำนวณหารูปแบบในการติดตั้งเครื่องมือตัดโดยการกำหนดลำดับการทำงานของเครื่องมือตัดและสร้างข้อมูลเครื่องมือโดยใช้กรอบไอออนิกในแอปพลิเคชันมือถือแอนดรอยด์ผลการวิจัยพบว่าแอปพลิเคชันที่พัฒนาขึ้นช่วยลดจำนวนช่องในการหมุนของป้อมมิตบนเครื่องกลึงซีเอ็นซีได้โดยเฉลี่ย 57.31% พาววิญ พัดเย็นใจ และ ชนุดม เอกเตชวุฒิ [10] ได้พัฒนาแอปพลิเคชันสำหรับโทรศัพท์มือถือระบบปฏิบัติการแอนดรอยด์ เพื่อการควบคุมเครื่องใช้ไฟฟ้าภายในบ้านจากระยะไกล โดยพัฒนาผ่าน Ionic Framework ซึ่งใช้ภาษาเอชทีเอ็มแอล ซีเอสเอส และจาวาสคริปต์ จตุพร และ สิริรัตน์ [11] นำเสนอวิธีการติดตั้งเครื่องมือตัดบนป้อมมิตกลึงของเครื่องกลึงซีเอ็นซีโดยวิธีการแบบหมุนน้อยที่สุด เพื่อลดเวลาหรือลดจำนวนช่องในการเปลี่ยนเครื่องมือตัด การทดลองโดยเปรียบเทียบผลการติดตั้งเครื่องมือตัดด้วยวิธีแบบสุ่ม แบบตามลำดับ แบบไปข้างหน้า และแบบหมุนน้อยที่สุด ผลการทดลองพบว่าวิธีการแบบหมุนน้อยที่สุดมีค่าเฉลี่ยจำนวนช่องในการหมุนรวมน้อยที่สุด

งานวิจัยนี้เป็นการพัฒนาแอปพลิเคชันบนระบบปฏิบัติการแอนดรอยด์เพื่อช่วยหารูปแบบการติดตั้งเครื่องมือตัดบนป้อมมิตของเครื่องกลึงซีเอ็นซีเพื่อให้การทำงานมีจำนวนช่องในการหมุนน้อยที่สุดโดยประยุกต์ใช้วิธีเทคนิคการหมุนน้อยที่สุด

2. การติดตั้งเครื่องมือตัด

2.1 ลำดับการทำงานของเครื่องมือตัด

การผลิตชิ้นงานบนเครื่องกลึงซีเอ็นซีจำเป็นที่จะต้องมีการวางแผนขั้นตอนการทำงานกับชิ้นงานและการติดตั้งเครื่องมือตัด ดังรูปที่ 1 ซึ่งประกอบด้วยการกำหนดลำดับการทำงานและเครื่องมือตัด ดังแสดงในตารางที่ 1 โดยแสดงลำดับในการทำงานของเครื่องมือตัดดังนี้ คือ 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 และ 2 ตามลำดับ



รูปที่ 1 ลักษณะป้อมมิตของเครื่องกลึงซีเอ็นซี [11]

ตารางที่ 1 ขั้นตอนการผลิตชิ้นงาน

ลำดับ	ลักษณะงาน	หมายเลขเครื่องมือตัด
1	กลึงปอกหยาบภายนอกตามแนวแกน	1
2	การกลึงเจาะรูภายนอก	2
3	กลึงปอกละเอียดภายนอกตามแนวแกน	3
4	กลึงเกลียวภายนอก M12x1	4
5	เจาะรูนำศูนย์	5
6	เจาะรูลำดับ #1	6
7	เจาะรูลำดับ #2	7
8	ตัดชิ้นงาน	2

2.2 การหมุนของป้อนมีด

การหมุนป้อนมีดของเครื่องกลึงซีเอ็นซี โดยหลักการในหมุนเครื่องมือตัดบนป้อนมีดเครื่องกลึงซีเอ็นซี สามารถหมุนได้ทั้ง 2 ทิศทางคือทิศทางตามเข็มนาฬิกาและทวนเข็มนาฬิกา การหมุนเครื่องมือตัดในทิศทางที่มีจำนวนช่องของป้อนมีดน้อยกว่าเสมอ เช่น ลำดับการทำงานของเครื่องมือตัด ดังนี้ 1 – 2 – 3 – 4 – 5 – 6 – 7 – 2 การกำหนดเครื่องมือตัดเริ่มต้น โดยทำการตัดเครื่องมือตัดที่เข้ากันออกก็จะได้จำนวนเครื่องมือตัดที่จะทำการติดตั้งบนป้อนมีดของเครื่องกลึงซีเอ็นซีมาใช้งานทั้งหมด 7 จำนวนเครื่องมือตัด คือ 1 – 2 – 3 – 4 – 5 – 6 – 7

การคำนวณโดยวิธีการนับจำนวนช่องที่น้อยที่สุดของการหมุนในทิศทางตามและทวนเข็มนาฬิกาของการทำงานในข้อที่ 1 ซึ่งมีการทำงานทั้งหมด 8 การทำงาน โดยแสดงขั้นตอนการหาจำนวนช่องการหมุนของป้อนมีด ดังตารางที่ 2 ดังนี้ การหมุนป้อนมีดแบบตามเข็มนาฬิกาและทวนเข็มนาฬิกาเหมือนกัน คือ 1 + 3 + 1 + 1 + 1 + 1 + 1 + 1 เท่ากับ 9 ช่อง ดังนั้นลำดับการทำงานของ 1 – 2 – 3 – 4 – 5 – 6 – 7 – 2 มีรูปแบบลำดับการติดตั้งเครื่องมือตัดบนป้อนมีด คือ 1 – 0 – 3 – 4 – 5 – 6 – 7 – 2 มีจำนวนช่องรวมการหมุนมีดตามลำดับการทำงานทั้งหมด 9 ช่อง

ตารางที่ 2 วิธีการหาผลรวมจำนวนช่องการหมุน

ลำดับการหมุนป้อนมีด	Min {ตาม,ทวน}	จำนวนช่องหมุน
1 → 2	Min {7, 1}	1
2 → 3	Min {3, 5}	3
3 → 4	Min {1, 7}	1
4 → 5	Min {1, 7}	1
5 → 6	Min {1, 7}	1
6 → 7	Min {1, 7}	1
7 → 2	Min {1, 7}	1
	Σ Min =	9

จากนั้นนำเครื่องมือตัดที่ได้ไปติดตั้งบนป้อนมีดของเครื่องกลึงซีเอ็นซี โดยมีรูปแบบการติดตั้งเครื่องมือตัด ดังนี้ 1 – 0 – 3 – 4 – 5 – 6 – 7 – 2

3. วิธีการติดตั้งเครื่องมือตัด

3.1 แบบตามลำดับ (Order Method, OM)

การติดตั้งเครื่องมือตัดโดยนำรูปแบบเริ่มต้นของเครื่องมือตัด ดังแสดงในตารางที่ 3 มาเป็นรูปแบบในการติดตั้งเครื่องมือตัดบนป้อมมีด ดังแสดงในตารางที่ 4

ตารางที่ 3 ขั้นตอนการทำงานและการใช้เครื่องมือตัด

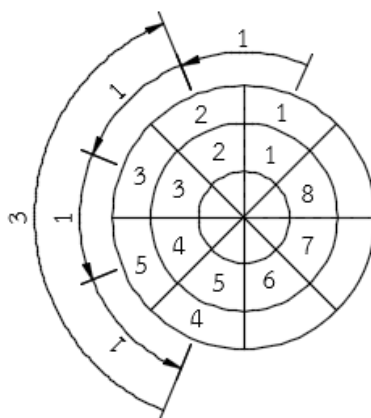
ลำดับการทำงาน	1	2	3	4	5	6
เครื่องมือตัด	1	2	3	5	4	2

ตารางที่ 4 การติดตั้งแบบตามลำดับการทำงาน

ลำดับบนป้อมมีด	1	2	3	4	5	6	7	8
เครื่องมือตัด			1	2	3	5	4	

3.2 แบบไปข้างหน้า (Forward Method, FM)

การติดตั้งเครื่องมือตัดลงบนป้อมมีดแบบไปข้างหน้าโดยนำรูปแบบเริ่มต้นของเครื่องมือตัด ดังแสดงในตารางที่ 5 มาทำการค้นหารูปแบบการติดตั้งด้วยวิธีการแบบไปข้างหน้า [6] โดยมีผลการติดตั้ง ดังแสดงในตารางที่ 6



รูปที่ 2 ค่าเป้าหมายในการติดตั้งเครื่องมือตัดบนป้อมมีด [11]

การจัดลำดับการทำงานถึงชิ้นงานของเครื่องมือตัดโดยวิธีการแบบไปข้างหน้าต้องมีการจัดเตรียมข้อมูลเริ่มต้นในการทำงาน โดยเรียงลำดับการทำงานของเครื่องมือตัดจบครบ แต่ถ้ามีการเรียกใช้เครื่องมือตัดซ้ำกันอีกครั้งให้ข้ามไปโดยไม่ต้องนำเครื่องมือตัดหมายเลขนั้นมาทำการจัดลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 3

ตารางที่ 5 การกำหนดรูปแบบเริ่มต้นของวิธีไปข้างหน้า

ลำดับการทำงานของเครื่องมือตัด	1	2	3	5	4	2
รูปแบบเริ่มต้นของเครื่องมือตัด	1	2	3	5	4	

ตารางที่ 6 การติดตั้งแบบไปข้างหน้า

ป้อมมีด	1	2	3	4	5	6	7	8
เครื่องมือตัด			1	2	3	4	5	

3.3 แบบหมุนน้อยที่สุด (Shortest Rotating, SR)

การติดตั้งเครื่องมือตัดลงบนป้อมมิตแบบนี้จะมี 2 ส่วน คือ ส่วนแรกเป็นการกำหนดรูปแบบเริ่มต้นของเครื่องมือตัด ดังแสดงในตารางที่ 3 ส่วนที่สองจะเป็นการกำหนดตำแหน่งการติดตั้งเครื่องมือตัดโดยการพิจารณาพร้อมกับจำนวนช่องบนป้อมมิตและลำดับในการทำงาน โดยมีขั้นตอนการพิจารณาเลือกตำแหน่งในการติดตั้งในทิศทางการหมุนที่มีจำนวนช่องน้อยที่สุด ดังแสดงในตารางที่ 7 และแสดงผลการติดตั้งเครื่องมือตัดบนป้อมมิตด้วยวิธีแบบการหมุนน้อยที่สุดในตารางที่ 8

ตารางที่ 7 ขั้นตอนการติดตั้งเครื่องมือตัดแบบหมุนน้อยที่สุด

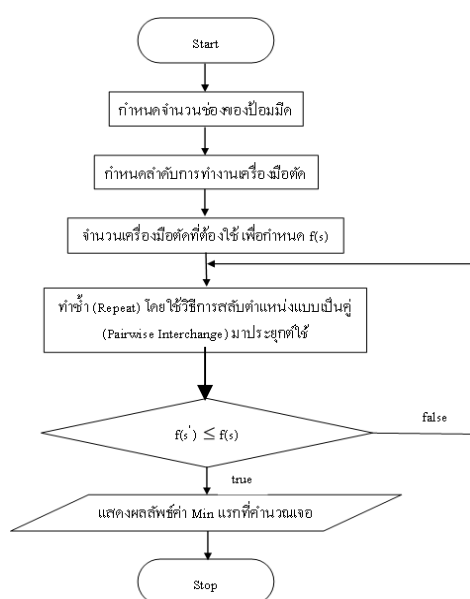
ลำดับการทำงาน	เครื่องมือตัด	การติดตั้ง	ช่องหมุนน้อยที่สุดติดตั้ง	ตำแหน่งติดตั้ง	จำนวนช่องหมุน
1	1	-	-	1	-
2	2	(8-1-2)	Min(1-1)	2	1
3	3	(8-2-3)	Min(2-1)	3	1
4	5	(8-3-4)	Min(3-1)	4	1
5	4	(8-4-5)	Min(4-1)	5	1
6	2	-	-	2	3

ตารางที่ 8 ผลการติดตั้งเครื่องมือตัดแบบหมุนน้อยที่สุด

ป้อมมิต	1	2	3	4	5	6	7	8
เครื่องมือตัด	1	2	3	5	4			

4. แอปพลิเคชัน

การออกแบบการทำงานแอปพลิเคชันและการพัฒนาแอปพลิเคชันบนระบบปฏิบัติการแอนดรอยด์ โดยใช้ภาษาโปรแกรม Sublime text 3 ในการพัฒนาแอปพลิเคชัน ซึ่งทำการพัฒนาร่วมกันกับ Ionic Framework โดย Ionic Framework ซึ่งเป็นเครื่องมือที่ใช้ในการพัฒนา Mobile Application แบบ Hybrid โดยจะมีขั้นตอนการทำงานของแอปพลิเคชัน ดังรูปที่ 3



รูปที่ 3 การทำงานของแอปพลิเคชัน [9]

4.1 การพัฒนาแอปพลิเคชัน

การพัฒนาแอปพลิเคชันบนระบบปฏิบัติการแอนดรอยด์ (Android) โดยมีขั้นตอนดังนี้

4.1.1 สร้างที่เก็บข้อมูลในรูปแบบของไฟล์งานเอกสารงานทั้งหมด

4.1.2 สร้างแฟ้มงานที่ชื่อว่า Project_ionic แฟ้มงานที่มีชื่อว่า CNC-Magazine และเลือก Templates แบบ Tabs ซึ่งแสดงผลไปยังหน้าต่างของโปรแกรมค้นหา

4.1.3 เข้าไปยังแฟ้มงานที่ชื่อว่า CNC-Magazine ที่สร้างไว้โดยใช้คำสั่ง C:\App\CNC-Magazine และทำการสร้าง platform add android โดยใช้คำสั่ง \$ ionic platform add android

4.1.4 ทำการดำเนินงานตามคำสั่งที่ป้อนไว้ในโปรแกรมขึ้นโดยใช้คำสั่ง \$ ionic serve -lab

4.1.5 ทำการแก้ไขรหัสคำสั่งโปรแกรมตามที่ต้องการ โดยการเปิดโปรแกรม Sublime text 3 ขึ้นมาแล้วทำการเลือกแฟ้มงานที่ชื่อว่า CNC-Magazine เพื่อทำการเก็บแสดงรหัสคำสั่ง

4.1.6 ทำการเขียนรหัสคำสั่ง (Code)

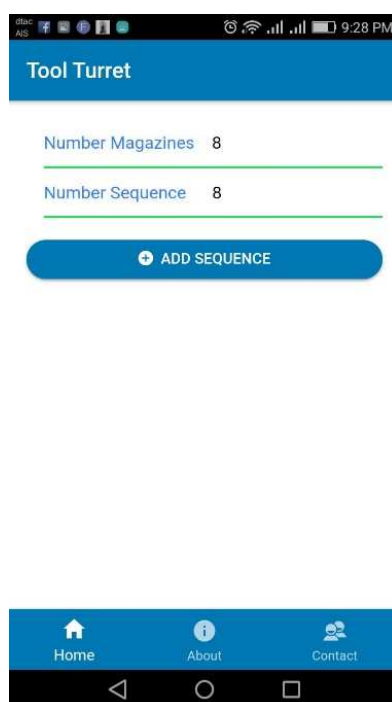
4.1.7 ทำการสร้างตัวติดตั้ง APK ขึ้นมาในแฟ้มงานชื่อว่า CNC-Magazine โดยใช้คำสั่ง \$ ionic build android เมื่อทำการติดตั้งเรียบร้อยแล้วจะได้แฟ้มงานสำหรับโปรแกรมประยุกต์บนระบบปฏิบัติการแอนดรอยด์ในที่จัดเก็บแฟ้ม

4.1.8 ทำการติดตั้งแฟ้มโปรแกรมประยุกต์บนอุปกรณ์ระบบปฏิบัติการแอนดรอยด์ที่ต้องการใช้งาน

4.2 หลักการทำงานของแอปพลิเคชัน

แอปพลิเคชันที่มีชื่อว่า Tool Turret หลังจากติดตั้งบนระบบปฏิบัติการแอนดรอยด์ (Android) ซึ่งมีขั้นตอนการทำงาน

4.2.1 การป้อนข้อมูลจำนวนตำแหน่งของป้อมมีดที่มีจำนวน 8 ตำแหน่งและจำนวนลำดับการทำงานของเครื่องมือตัดจำนวน 8 ขั้นตอนการทำงาน ดังรูปที่ 4



รูปที่ 4 ข้อมูลการทำงาน [9]

4.2.2 การป้อนข้อมูลเครื่องมือตัดตามลำดับการทำงาน คือ 1-2-3-4-5-6-7-2 ดังรูปที่ 5

Tool Turret

Please enter the work order.
Magazines = 8 , Sequence = 8

Tool Sequence 1	1
Tool Sequence 2	2
Tool Sequence 3	3
Tool Sequence 4	4
Tool Sequence 5	5
Tool Sequence 6	6
Tool Sequence 7	7
Tool Sequence 8	2

Home About Contact

รูปที่ 5 ลำดับการทำงานของเครื่องมือตัด [9]

4.2.3 การแสดงรายการเครื่องมือตัดที่มีการใช้งาน คือ 1, 2, 3, 4, 5, 6, และ 7 ดังรูปที่ 6

Tool Turret

Tool Sequence 1 1
Tool Sequence 2 2
Tool Sequence 3 3
Tool Sequence 4 4
Tool Sequence 5 5
Tool Sequence 6 6
Tool Sequence 7 7
Tool Sequence 8 2

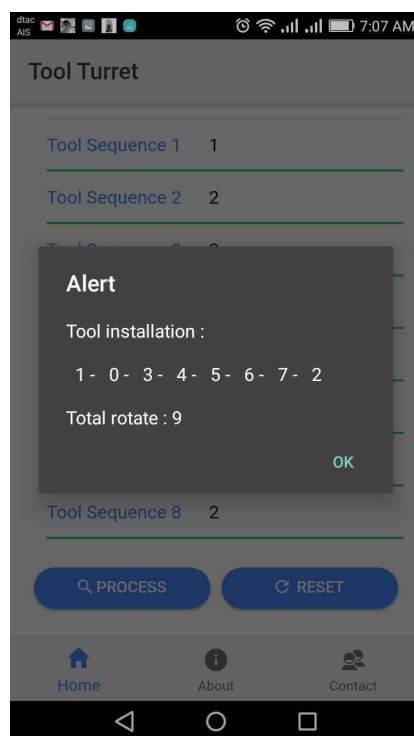
Alert
Tool setup :
1 - 2 - 3 - 4 - 5 - 6 - 7 - 0
OK

PROCESS RESET

Home About Contact

รูปที่ 6 รายการเครื่องมือตัด [9]

4.2.4 ผลการจัดลำดับ ดังรูปที่ 7 การติดตั้งเครื่องมือตัดบนป้อมมีดของเครื่องกลึงซีเอ็นซีของแอปพลิเคชันที่พัฒนาขึ้น ด้วยวิธีการหมุนน้อยที่สุด (ตำแหน่งบนป้อมมีด - หมายเลขเครื่องมือตัด) คือ (1-1) (2-0) (3-3) (4-4) (5-5) (6-6) (7-7) (8-2)



รูปที่ 7 ผลการทำงานของแอปพลิเคชัน [9]

5. การทดลองและสรุปผล

การทดลองโปรแกรมแอปพลิเคชัน (Application) ที่พัฒนาขึ้นหาสำหรับการตำแหน่งในการติดตั้งเครื่องมือตัดบนเครื่องกลึงซีเอ็นซีโดยด้วยวิธีการกำหนดตำแหน่งในการติดตั้งเครื่องมือตัดแบบต่างๆจำนวน 4 วิธี มีผลดังแสดงในตารางที่ 9 พบว่าวิธีการติดตั้งเครื่องมือตัดแบบหมุนน้อยที่สุดมีจำนวนช่องในการหมุนเปลี่ยนเครื่องมือตัดเฉลี่ยน้อยที่สุดคือ 34.95 เมื่อเปรียบเทียบกับทุกวิธีการ ยกเว้นเพียงหนึ่งกรณีของการทดลองลำดับที่ 9 เท่านั้นซึ่งแตกต่างมากกว่าวิธีการแบบเรียงตามลำดับตามวิธีการทำงานและแบบไปข้างหน้า ซึ่งในการทดลองมีโอกาสที่จะเกิดสถานการณ์เช่นนี้เกิดขึ้นได้ เนื่องจากวิธีการที่พัฒนาขึ้นเป็นแบบฮิวริสติกไม่สามารถรับประกันได้ว่าจะให้ค่าที่ดีที่สุดในการทดลองทุกกรณี สำหรับวิธีการแบบสุ่มจะมีจำนวนช่องในการหมุนเปลี่ยนเครื่องมือตัดมากที่สุดในทุกกรณีของการทดลอง

โปรแกรมแอปพลิเคชัน (Application) ที่พัฒนาขึ้นบนระบบปฏิบัติการแอนดรอยด์ (Android) ชื่อว่า Tool Turret สามารถใช้ค้นหาตำแหน่งในการติดตั้งเครื่องมือตัดบนป้อมมีดกลึงได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยผู้ใช้งานมีการกำหนดจำนวนของป้อมมีดที่ใช้ทำงาน ลำดับการทำงานของเครื่องมือตัด แอปพลิเคชันที่พัฒนาขึ้นก็จะช่วยกำหนดตำแหน่งในการติดตั้งเครื่องมือตัดบนป้อมมีดของเครื่องกลึงซึ่งช่วยจำนวนช่องในการหมุนเปลี่ยนเครื่องมือตัดหรือลดเวลาในการทำงานลงนั่นเอง การทำงานของโปรแกรมแอปพลิเคชันมีความสะดวก รวดเร็วในการทำงานและเพิ่มประสิทธิภาพในการวางแผนกระบวนการผลิตยิ่งขึ้น

ข้อเสนอแนะของงานวิจัยนี้ควรพัฒนาเทคนิคแบบอื่นๆเพื่อช่วยในการกำหนดตำแหน่งในการติดตั้งเครื่องมือตัดได้อย่างมีประสิทธิภาพที่ดีและมีความรวดเร็วยิ่งขึ้นในการประมวลผลหาคำตอบเมื่อมีเครื่องมือตัดจำนวนมาก นอกจากนี้ควรพิจารณาถึงลำดับของการใช้เครื่องมือตัดร่วมด้วยในการพัฒนาวิธีการวางแผนขั้นตอนการผลิตชิ้นงาน

ตารางที่ 9 ผลการทดลองหมุนเปลี่ยนเครื่องมือตัด (ช่อง)

กรณีทดลอง	การหมุนเปลี่ยนตำแหน่งในการติดตั้งเครื่องมือตัด (ช่อง)			
	แบบสุ่ม	แบบตามลำดับ	แบบไปข้างหน้า	แบบหมุนน้อยที่สุด
1	6	4	4	4
2	12	8	7	7
3	10	6	6	6
4	16	12	9	9
5	18	8	8	6
6	11	7	7	7
7	31	10	10	10
8	42	35	28	24
9	36	17	17	22*
10	35	31	22	21
11	75	45	42	41
12	68	38	36	33
13	82	31	30	28
14	169	105	89	73
15	149	120	106	88
16	152	91	74	68
17	166	70	68	61
18	98	62	60	61
19	104	72	70	62
20	139	67	65	55
รวม	1,419	839	758	664
เฉลี่ย	70.95	41.95	37.9	34.95

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย สงขลา สำหรับสถานที่ในการดำเนินงาน ตลอดจนบุคคลที่ให้คำแนะนำและช่วยเหลือในการจัดทำและพัฒนาแอปพลิเคชัน

เอกสารอ้างอิง

- [1] Kenneth Castelino, Roshan D' Souza and Paul K. Wright, "Tool-path Optimization for Minimization Airtime During Machining" Journal of Manufacturing Systems, Volume 22, Issue 3, 2003, pp. 173-180.
- [2] M. Selim Akturk, et al., "Scheduling with tool changes to minimize total completion time: Basic results and SPT performance" European Journal of Operational Research, Volume 157, Issue 3, 16 September 2004, pp. 784-790.

- [3] A. Gjelaj, J. Balic and M. Ficko, “Intelligent optimal tool selections for cnc programming of machine tools” *Transations of Famena*, Volume 37, Issue 3, 2013, pp. 31-40.
- [4] E. Niemi, “Optmal tool magazine operation. Part 1: Rotating magazines with unbuffered tool change” *International Advanced Manufacturing Technology*, Volume 22, 2003, pp. 720-726.
- [5] Diptesh Ghosh, “Allocating tools to index positions in tool magazines using tabu search” *Indian Institute of Management Ahmedabad*, 2016, pp. 1-14.
- [6] Joze, B., Miha, K. & Bostjan, V., “Intelligent Programming of CNC Turning Operations Using Genetic Algorithm” *Journal of Intelligent Manufacturing*, volume 17, 2006, pp. 331–340.
- [7] J. Jaidumrong and K. Banlang, “A program to install cutting tools on a CNC lathe” *9th ECTI-CARD 2017*, Chiang khan Thailand, 2017, pp. 767-770. (in Thai)
- [8] P. Chutima, *Application of scheduling techniques in industry* Application of scheduling techniques in industry, Bangkok, Chulalongkorn University, 2008. (in Thai)
- [9] T. Chob-Ngam, W. Thongmee and J. Jaidumrong, “Application Development for Cutting Tool Installation on Turret of CNC Turning”, in *Proceeding of 2th Rajamangala Manufacturing and Management Technology Conference 2017 (RMTC2017)*, Chonburi, Thailand, 2017, pp. 162-167. (in Thai)
- [10] P. Pad Yen Jai and C. Ekthachawut, “Application for Operation System Android to Control Home”, *Journal of Project in Computer Science and Information Technology*, Vol 2, No.2, July – December 2016, pp. 44-48. (in Thai)
- [11] J. Jaidumrong and S. Pungchompoo, “Installation of Cutting Tool on Turret Lathe by Least Spin Method”, *Proceeding of Industrial Engineering Network Conference 2017 (IE-Network 2017)*, Chiang Mai, Thailand, 2017, pp. 971-975. (in Thai)

การจัดตารางเส้นทางพาหนะโดยวิธีอัลกอริทึมแบบประหยัด

The Application of Saving Algorithms for Scheduling Vehicle Routing

ณราวดี สิทธิเดชารัง*

สาขาวิชาวิศวกรรมกระบวนการและอุตสาหกรรม สถาบันวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร

140 แขวงกระทุ่มราย เขตหนองจอก กรุงเทพมหานคร 10530

*Corresponding author Email: Narawadee@mut.ac.th

(Received: 28 August 2023 / Accepted: 17 December 2023 / Published: 26 December 2023)

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อประยุกต์ใช้อัลกอริทึมแบบประหยัด ในการจัดเส้นทางขนส่งสินค้าที่เหมาะสม และลดต้นทุนเชื้อเพลิงในการขนส่ง จากการวิเคราะห์ข้อมูลพบว่าบริษัทกรณีศึกษาไม่มีระบบการจัดเส้นทางรถขนส่งที่มีประสิทธิภาพ ดังนั้นผู้วิจัยจึงปรับปรุงการจัดเส้นทางรถขนส่ง โดยการประยุกต์ใช้อัลกอริทึมแบบประหยัดแบ่งขั้นตอนออกเป็น 4 ส่วนดังนี้ 1. การสร้างเมตริกซ์ระยะทาง 2. การสร้างเมตริกซ์แบบประหยัด 3. การลำดับค่าระยะทางที่ประหยัด 4. จัดลำดับลูกค้าในแต่ละเส้นทาง พบว่าผลการปรับปรุงรถขนส่งคันที่ 1 ระยะทางก่อนปรับปรุง 1,752 กิโลเมตร หลังปรับปรุง 1,371 กิโลเมตร ลดลง 21.75 % ค่าเชื้อเพลิงก่อนปรับปรุง 11,879 บาท/รอบ หลังปรับปรุง 9,401.38 บาท/รอบ ลดลง 20.86 % รถขนส่งคันที่ 2 ระยะทางก่อนปรับปรุง 1,375 กิโลเมตร หลังปรับปรุง 1,341 กิโลเมตร ลดลง 2.47 % ค่าเชื้อเพลิงก่อนปรับปรุง 10,521.40 บาท/รอบ หลังปรับปรุง 10,249.88 บาท/รอบ ลดลง 2.58 % ขนส่งคันที่ 3 ระยะทางก่อนปรับปรุง 1,461 กิโลเมตร หลังปรับปรุง 1,190.50 กิโลเมตร ลดลง 18.55 % ค่าเชื้อเพลิงก่อนปรับปรุง 10,691.10 บาท/รอบ หลังปรับปรุง 8,722.58 บาท/รอบ ลดลง 18.41 %

คำสำคัญ: การจัดเส้นทางเดินรถ, อัลกอริทึมแบบประหยัด, ลดระยะทาง

Abstract

The purpose of this research is to use the saving algorithm to organize the appropriate cargo routes and reduce fuel costs of transportation from the data analysis, it was found that the case study company did not have an efficient freight routing system. Therefore, the researcher improved the freight routing by applying a saving algorithm. Therefore, the researcher improved the freight routing by applying a saving algorithm. The steps are divided into four parts, as follows: 1. Creating a distance matrix 2. Creating a saving matrix 3. Ranking of economical distance values. Finally, arrange the customers in order of their route. The result of the improvement of transport vehicle 1 before improvement by 1,752 kilometers after improvement by 1,371 kilometers, decreased 21.75%. Fuel cost before improvement 11,879 baht/round after improvement 9,401.38 baht/round, decreased 20.86%. Transport vehicle 2 distance before improvement 1,375 kilometers after improvement 1,341 kilometers, decreased 2.47%. Fuel cost before improvement 10,521.40 baht/round after adjusting 10,249.88 baht/round, decreased 2.58%. Transport vehicle 3 distance before improvement 1,461 kilometers. After improvement 1,190.50 kilometers, decreased 18.55%. Fuel cost before improvement 10,691.10 baht/round after adjusting 8,722.58 baht/round, decreased 18.41%.

Keywords: Vehicle Routing, Saving Algorithm, Reduce the distance

1. บทนำ

การขนส่งถือได้ว่าเป็นอุตสาหกรรมบริการ (Service Industry) ประเภทหนึ่งที่มีความสำคัญอย่างยิ่งต่อการดำรงชีวิตประจำวันของบุคคลในปัจจุบัน หรือเป็นสิ่งที่จำเป็นแก่การปฏิบัติการกิจต่างๆ ไม่ว่าจะเป็นการเดินทางหรือเคลื่อนย้ายสินค้าจากที่หนึ่งไปยังอีกที่หนึ่ง การขนส่งมีความสำคัญต่อการขายและการจัดจำหน่าย เพราะการขนส่งเป็นปัจจัยที่ช่วยเพิ่มคุณค่าของสินค้าและบริการ

ปี 2565-2567 ธุรกิจบริการขนส่งสินค้าทางถนนมีแนวโน้มเติบโตเฉลี่ย 3-5% ต่อปี ปัจจัยหนุนจากการเติบโตของภาคการผลิต การค้า และการลงทุนโครงสร้างพื้นฐานภาครัฐ รวมถึงปริมาณผลผลิตสินค้าเกษตรที่มีแนวโน้มปรับตัวขึ้น รวมถึงธุรกรรมการค้าออนไลน์ซึ่งเป็นที่ยอมรับมากขึ้น [1]

บริษัทธนีสึกษาให้บริการขนส่งสินค้าให้กับบริษัทว่าจ้าง โดยรับสินค้าจากคลังของบริษัทผู้ว่าจ้าง เพื่อขนส่งสินค้าให้กับบริษัทลูกค้า โดยสินค้าที่ขนส่งส่วนใหญ่เป็นสินค้าประเภทอาหารสดและอาหารแช่เย็น จากการศึกษาข้อมูลเบื้องต้นของบริษัทธนีสึกษาพบว่า บริษัทธนีสึกษายังไม่มีระบบการจัดเส้นทางในการเดินทางขนส่งสินค้าที่มีประสิทธิภาพ เนื่องมาจากระบบการขนส่งสินค้าจากคลังสินค้าไปยังลูกค้าตามจุดต่างๆ นั้นจะอาศัยจากการตัดสินใจและประสบการณ์ของพนักงานขับรถขนส่งสินค้า ทำให้บริษัทต้องมีค่าใช้จ่ายหรือที่เรียกว่าต้นทุนหลัก เป็นค่าเชื้อเพลิงที่ใช้ในการวิ่งรถขนส่งสินค้าค่อนข้างสูง ดังนั้นวัตถุประสงค์ของงานวิจัย คือ การจัดเส้นทางขนส่งสินค้าจากคลังสินค้าผู้ว่าจ้างไปยังลูกค้า โดยการประยุกต์ใช้อัลกอริทึมแบบประหยัด (Saving Algorithm) เพื่อลดระยะทางการขนส่งให้สั้นลงและลดต้นทุนเชื้อเพลิงในการขนส่งสินค้าของบริษัทธนีสึกษา ตัวแปรที่ใช้ในงานวิจัยนี้ประกอบไปด้วย ตำแหน่งที่ตั้งของคลังสินค้า ตำแหน่งที่ตั้งของลูกค้า จำนวนสินค้าที่ต้องส่งให้ลูกค้าแต่ละราย โดยพิจารณาเลือกระยะทางที่ประหยัดที่สุด

2. ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ผู้วิจัยได้นำแนวคิด ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ดำเนินการวิจัยดังต่อไปนี้

2.1. แผนผังแสดงเหตุและผล (Cause and Effect Diagram)

การหาสาเหตุของปัญหาโดยใช้แผนผังแสดงเหตุและผล (Cause and Effect Diagram) หรือที่นิยมเรียกกันว่าแผนผังก้างปลา (Fishbone Diagram) แสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างปัญหากับสาเหตุทั้งหมดที่เป็นไปได้ ที่อาจก่อให้เกิดปัญหา ประกอบไปด้วยส่วนสำคัญ 2 ส่วน คือส่วนโครงกระดูกที่เป็นตัวหลักคือสาเหตุของปัญหา ซึ่งสามารถแยกเป็นสาเหตุรองและสาเหตุย่อยได้อีก และส่วนหัวปลาคือปัญหาที่เกิดขึ้น [2]

2.2. การจัดเส้นทางรถเดินทาง (Vehicle Routing)

การจัดเส้นทางรถเดินทาง (Vehicle Routing Problem) ซึ่งมีวิธีการหนึ่งที่เป็นที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายในการจัดเส้นทางรถเดินทาง [3] ที่ได้รับความนิยม คือ วิธีเซฟวิง อัลกอริทึม (Saving Algorithm) ซึ่งเสนอโดย Clarke และ Wright ซึ่งได้พิจารณาการจัดเส้นทางยานพาหนะที่มีความต้องการของลูกค้าหลายราย และยานพาหนะมีความจุหลายขนาด ส่งสินค้าออกจากคลังพัสดุแห่งเดียว ให้สามารถเลือกเส้นทางยานพาหนะที่เหมาะสมที่สุด และผลที่ได้จากการแก้ปัญหา คือ ทำให้ทราบจำนวนยานพาหนะที่จะใช้ในการขนส่ง และปริมาตรสินค้าที่ขนส่งโดยยานพาหนะแต่ละคัน งานวิจัยนี้ได้พัฒนาขั้นตอนให้สามารถเลือกเส้นทางยานพาหนะที่เหมาะสมที่สุด ทำให้ทราบจำนวนยานพาหนะที่จะใช้ในการขนส่งและปริมาตรสินค้าที่ขนส่งโดยยานพาหนะแต่ละคัน

วิธีการเปรียบเทียบการประหยัด (Saving Algorithm) กล่าวว่าเป็นการรวมจุดรับส่งมากกว่า 1 จุดไว้ในเส้นทางเดียวกัน และเปรียบเทียบค่าใช้จ่ายที่สามารถประหยัดที่สุด [4] เป็นวิธีที่นิยมนำมาใช้ในการแก้ปัญหาทางฮิวริสติก ในปัญหาขนาดเล็กและขนาดกลาง [5]

2.3. งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

จากการวิจัยที่ผ่านมาได้มีการนำเสนอวิธีการจัดเส้นทางที่หลากหลาย ปัญหาการกำหนดเส้นทางสำหรับยานพาหนะ (Vehicle Routing Problem: VRP) เป็นปัญหาด้านการขนส่งและโลจิสติกส์รูปแบบหนึ่งที่มีการศึกษากันอย่างแพร่หลาย โดยมี Dantzig และ Ramser [6] เป็นผู้เริ่มศึกษาปัญหาการขนส่งน้ำมันไปยังสถานีจ่ายน้ำมันต่างๆ แนวคิดของการขนส่งโดยทั่วไป จะมุ่งเน้นในการจัดส่งสินค้าให้ถึงลูกค้าได้เร็วที่สุด ซึ่งอาจทำให้ละเลยในการวางแผนการจัดลำดับเส้นทางจัดส่งสินค้า จำนวนสินค้าที่จะต้องจัดส่งให้กับลูกค้า ความจุของรถที่สามารถบรรจุสินค้าได้ รวมถึงการจัดลำดับการจัดส่งสินค้า เพื่อให้การขนส่งแต่ละครั้งมีการประหยัดค่าใช้จ่ายมากที่สุด [6] มีการศึกษาการเปรียบเทียบวิธีการ ฮิวริสติกส์สำหรับระบบการจัดการขยะ เพื่อแก้ปัญหาในการลดต้นทุน งานวิจัยนี้ได้บอกถึงการประยุกต์วิธีการหาคำตอบโดยวิธีการ Saving Heuristic, Nearest Heuristic และ Max-Nearest เพื่อเปรียบเทียบกัน จะเห็นว่าวิธี Saving Heuristic ให้คำตอบที่ดีที่สุด วิธี Saving และ Nearest สามารถลดระยะทางและสามารถควบคุมเวลาในการเก็บขยะได้อีกด้วย [7] งานวิจัยนี้ได้นำเสนอวิธีการฮิวริสติกส์ 4 วิธีคือ Saving Heuristic (SH), Nearest Heuristic (NH), Max-Nearest Heuristic (MNH) และ Earliest Due Date (EDD) ได้ผลสรุปจากการเปรียบเทียบการทดลองพบว่า วิธีการฮิวริสติกส์ 4 วิธีสามารถจัดเส้นทางได้ภายใต้เงื่อนไขที่กำหนด [8] การวิเคราะห์หาเส้นทางที่เหมาะสมด้วยวิธี Saving Algorithm และวิเคราะห์เปรียบเทียบต้นทุนรวมในการขนส่งสินค้า ผลการวิจัยพบว่ารูปแบบการจัดเส้นทางขนส่งด้วยวิธี Saving Algorithm สามารถลดระยะทางขนส่งรวมลดลง 395,740.8 กิโลเมตรต่อปี คิดเป็นร้อยละ 18.83 ปริมาณเชื้อเพลิงรวมลดลง 65,956.80 ลิตรต่อปี คิดเป็นร้อยละ 18.38 [9]

จากการศึกษางานวิจัยที่ผ่านมาในงานวิจัยนี้ได้นำวิธีการจัดเส้นทางขนส่งด้วยวิธี Saving Algorithm ในการแก้ไขปัญหให้กับบริษัทกรณีศึกษา มุ่งหวังเพื่อลดระยะทางให้สั้นลงและลดต้นทุนเชื้อเพลิงในการขนส่งสินค้า

3. วิธีการวิจัยและดำเนินงาน

3.1. วิเคราะห์ปัญหาของงานวิจัย

ทำการเก็บรวบรวมข้อมูล โดยมีขั้นตอนดังต่อไปนี้การสัมภาษณ์เชิงลึก (In Depth Interview) สัมภาษณ์พนักงานระดับผู้บริหารและระดับปฏิบัติการ หลังจากนั้นจึงทำการวิเคราะห์หาสาเหตุจากแผนผังก้างปลาสาเหตุต่างๆ ที่ส่งผลให้มิต้นทุนการใช้พลังงานเชื้อเพลิงในการขนส่งสินค้าสูง การวิเคราะห์หาสาเหตุจากแผนผังก้างปลาเป็นสิ่งที่สำคัญมากเพราะจะทำให้สามารถแก้ไขปัญหาที่รากเงาของปัญหาได้ตรงประเด็นจะชัดเจน

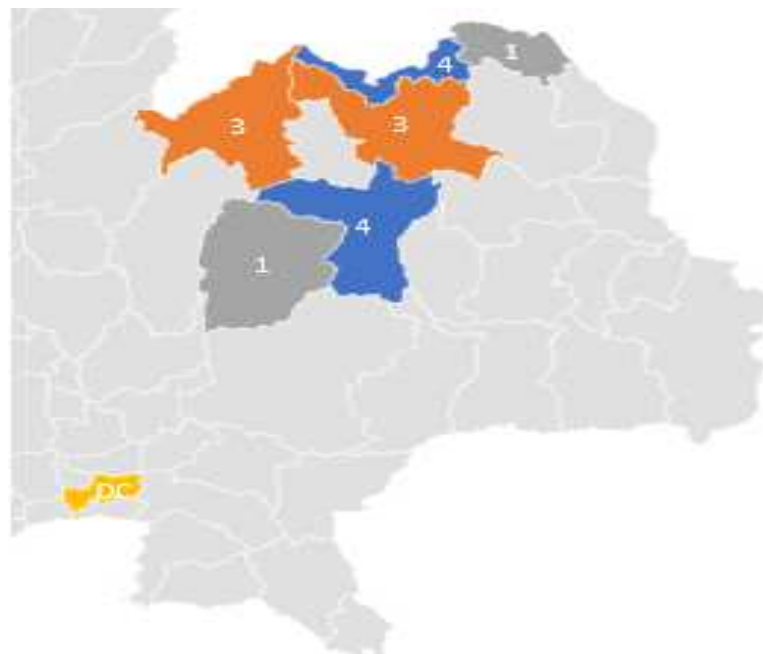


รูปที่ 1 วิเคราะห์หาสาเหตุจากแผนผังก้างปลา

จากการวิเคราะห์หาสาเหตุจากแผนผังก้างปลาที่รูปที่ 1 พบว่าต้นทุนเชื้อเพลิงในการขนส่งสินค้าสูงมีสาเหตุดังต่อไปนี้ พนักงานขับรถจะวิ่งเส้นทางในการขนส่งสินค้าตามความเคยชิน และไม่ได้มีความตระหนักถึงเรื่องการประหยัดพลังงานเชื้อเพลิง เพราะไม่มีการฝึกอบรมสร้างความตระหนักให้กับพนักงาน จึงทำให้สิ้นเปลืองพลังงานเชื้อเพลิง การขนส่งทางบริษัทไม่มีการเส้นทางในการวิ่งรถ รวมถึงไม่ได้จัดลำดับความสำคัญในการวิ่งขนส่งสินค้าก่อนหลังให้ลูกค้า จึงทำให้สิ้นเปลืองพลังงานเชื้อเพลิงส่งผลต่อต้นทุนค่าเชื้อเพลิงโดยตรง เนื่องจากรถบางคันมีระยะการใช้งานที่ยาวนานจึงทำให้มีความเสื่อมของสมรรถนะของรถและไม่มีแผนในการซ่อมบำรุงอย่างต่อเนื่อง ลักษณะภูมิประเทศ บางเส้นทางที่ใช้ในการขนส่งสินค้าไปยังลูกค้า มีภูเขาสูงทำให้ต้องใช้ความแรงของยานพาหนะเพิ่มขึ้น ส่งผลให้เกิดการสิ้นเปลืองพลังงานเชื้อเพลิงได้

3.2. เก็บรวบรวมข้อมูลของบริษัทกรณีศึกษา

การขนส่งสินค้าของบริษัทจะขนส่งสินค้าจากคลังสินค้าที่ต้นทางกรุงเทพมหานคร ไปที่ภาคอีสานตอนบนประกอบไปด้วย 6 จังหวัด ดังนี้ 1. นครราชสีมา จำนวนลูกค้า 4 ราย 2. อุตรดิตถ์ จำนวนลูกค้า 3 ราย 3. เลย จำนวนลูกค้า 3 ราย 4. บึงกาฬ จำนวนลูกค้า 1 ราย 5. ขอนแก่น จำนวนลูกค้า 4 ราย 6. ชัยภูมิ จำนวนลูกค้า 1 ราย โดยมีลูกค้ารวมทั้งหมด 16 ราย ทางบริษัทใช้รถขนส่ง 10 ล้อ ในการขนส่งสินค้าให้ลูกค้าแสดงดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 ตำแหน่งลูกค้าในแต่ละจังหวัด

การศึกษาวิธีแก้ปัญหาสำหรับยานพาหนะด้วยวิธีอัลกอริทึมแบบประหยัด (Saving Algorithm) ภายใต้เงื่อนไขเฉพาะระยะทางการขนส่งที่สั้นที่สุด ไม่รวมเงื่อนไขอื่นๆ เช่น สภาพการจราจร ระยะเวลาในการขนส่งสินค้า โดยตำแหน่งที่ตั้งต่างๆ นั้น จะนำข้อมูลพิกัดภูมิศาสตร์ (Geographic Coordinates) โดยเก็บข้อมูลมาได้เป็นพิกัดละติจูด (Latitude) และลองจิจูด (Longitude) ใช้ในการระบุตำแหน่งที่ตั้งของคลังสินค้า (Location of Warehouse) ตำแหน่งที่ตั้งของลูกค้า (Location of Customers) จำนวนสินค้าที่ต้องส่งให้ลูกค้าแต่ละราย (Demand) ซึ่งความต้องการของลูกค้าคงที่ จำนวนความต้องการของลูกค้ามีหน่วยเป็นจำนวนพาเลท รายละเอียดแสดงดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 พิกัดที่ตั้งคลังสินค้าพิกัดที่ตั้งลูกค้าและปริมาณความต้องการของลูกค้าแต่ละราย

ตำแหน่ง	ละติจูด	ลองจิจูด	ความต้องการ (พาเลท)
คลังสินค้า	13.69182	100.90122	-
ลูกค้า 1	18.07963	103.45008	4
ลูกค้า 2	17.76478	102.19926	5
ลูกค้า 3	17.67494	103.25120	3
ลูกค้า 4	17.74608	103.26399	1
ลูกค้า 5	18.02778	103.08311	4
ลูกค้า 6	17.87319	102.74482	4
ลูกค้า 7	17.89017	102.77611	4
ลูกค้า 8	17.89823	102.77087	1
ลูกค้า 9	17.88350	101.65405	3
ลูกค้า 10	17.46878	101.72596	3
ลูกค้า 11	17.30079	101.77727	2
ลูกค้า 12	16.52991	102.13388	1
ลูกค้า 13	16.80252	102.18416	1
ลูกค้า 14	16.59435	101.94534	1
ลูกค้า 15	16.00768	101.06985	1
ลูกค้า 16	16.51883	102.11756	1

3.3. การดำเนินงาน

การวิเคราะห์วิธีการแก้ปัญหาการจัดเส้นทางสำหรับยานพาหนะด้วยอัลกอริทึมแบบประหยัด (Saving Algorithm) ดำเนินการตามขั้นตอนดังนี้

3.3.1. การสร้างเมตริกซ์ระยะทาง (Distance Matrix) เพื่อหาระยะทางระหว่างคลังสินค้ากับลูกค้าทั้งหมด รวมทั้งระยะทางระหว่างลูกค้าแต่ละราย โดยใช้ Google Maps ระบุตำแหน่งที่ตั้งที่ชัดเจน โดยการคำนวณเมตริกซ์ระยะทางบ่งชี้ (Distance Matrix) เป็นการบ่งชี้ระยะทางระหว่างลูกค้าทุกๆ คู่ของระยะทางที่ต้องส่งสินค้า ตัวอย่างการคำนวณบ่งชี้ระยะทางระหว่างคลังสินค้าและลูกค้ารายที่ 1 ดังนี้

$$\text{Distance Matrix (A, B)} = \sqrt{(X_A - X_B)^2 + (Y_A - Y_B)^2} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \text{Distance Matrix (DC, 1)} &= \sqrt{(13.69182 - 18.07963)^2 + (100.90122 - 103.45008)^2} \\ &= 5.074403 \end{aligned}$$

จากผลลัพธ์การคำนวณผู้วิจัยเลือกใช้ตำแหน่งทศนิยมหนึ่งตำแหน่ง และได้ใช้ Microsoft Excel ในการหาคำตอบจากสมการที่ (1) การคำนวณได้ผลการสร้างเมตริกซ์ระยะทาง แสดงดังรูปที่ 3

	DC	ลูกค้าที่ 1	ลูกค้าที่ 2	ลูกค้าที่ 3	ลูกค้าที่ 4	ลูกค้าที่ 5	ลูกค้าที่ 6	ลูกค้าที่ 7	ลูกค้าที่ 8	ลูกค้าที่ 9	ลูกค้าที่ 10	ลูกค้าที่ 11	ลูกค้าที่ 12	ลูกค้าที่ 13	ลูกค้าที่ 14	ลูกค้าที่ 15	ลูกค้าที่ 16
ลูกค้าที่ 1	5.1																
ลูกค้าที่ 2	4.3	1.3															
ลูกค้าที่ 3	4.6	0.5	1.1														
ลูกค้าที่ 4	4.7	0.4	1.1	0.1													
ลูกค้าที่ 5	4.9	0.4	0.9	0.4	0.3												
ลูกค้าที่ 6	4.6	0.7	0.6	0.5	0.5	0.4											
ลูกค้าที่ 7	4.6	0.7	0.6	0.5	0.5	0.3	0.04										
ลูกค้าที่ 8	4.6	0.7	0.6	0.5	0.5	0.3	0.04	0.01									
ลูกค้าที่ 9	4.3	1.8	0.6	1.6	1.6	1.4	1.09	1.12	1.1								
ลูกค้าที่ 10	3.9	1.8	0.6	1.5	1.6	1.5	1.10	1.13	1.1	0.4							
ลูกค้าที่ 11	3.7	1.8	0.6	1.5	1.6	1.5	1.12	1.16	1.2	0.6	0.2						
ลูกค้าที่ 12	3.1	2.0	1.2	1.6	1.7	1.8	1.48	1.50	1.5	1.4	1.0	0.8					
ลูกค้าที่ 13	3.4	1.8	1.0	1.4	1.4	1.5	1.21	1.24	1.2	1.2	0.8	0.6	0.3				
ลูกค้าที่ 14	3.1	2.1	1.2	1.7	1.8	1.8	1.51	1.54	1.5	1.3	0.9	0.7	0.2	0.3			
ลูกค้าที่ 15	2.3	3.2	2.1	2.7	2.8	2.9	2.51	2.54	2.5	2.0	1.6	1.5	1.2	1.4	1.05		
ลูกค้าที่ 16	3.1	2.1	1.2	1.6	1.7	1.8	1.49	1.52	1.5	1.4	1.0	0.9	0.0	0.3	0.19	1.2	

รูปที่ 3 เมตริกซ์ระยะทาง (Distance Matrix)

3.3.2. การสร้างเมตริกซ์แบบประหยัด (Saving Matrix) เป็นการประหยัดค่าใช้จ่ายด้วยการรวมลูกค้าในรถขนส่งคันเดียวกัน สามารถอธิบายขั้นตอนได้ว่า ถ้าใช้รถ 1 คัน วิ่งส่งสินค้าให้กับลูกค้า 2 ราย (i และ j) ในเที่ยวเดียวกัน ระยะทางจะลดลง โดยการรวมลูกค้าในรถขนส่งจะต้องมีน้ำหนักบรรทุกไม่เกินความสามารถสูงสุดแสดงดังรูปที่ 4

	ลูกค้าที่ 1	ลูกค้าที่ 2	ลูกค้าที่ 3	ลูกค้าที่ 4	ลูกค้าที่ 5	ลูกค้าที่ 6	ลูกค้าที่ 7	ลูกค้าที่ 8	ลูกค้าที่ 9	ลูกค้าที่ 10	ลูกค้าที่ 11	ลูกค้าที่ 12	ลูกค้าที่ 13	ลูกค้าที่ 14	ลูกค้าที่ 15	ลูกค้าที่ 16
ลูกค้าที่ 1																
ลูกค้าที่ 2	8.1															
ลูกค้าที่ 3	9.2	7.8														
ลูกค้าที่ 4	9.4	7.9	9.2													
ลูกค้าที่ 5	9.6	8.2	9.1	9.2												
ลูกค้าที่ 6	8.9	8.3	8.7	8.7	9.1											
ลูกค้าที่ 7	9.0	8.3	8.7	8.8	9.1	9.1										
ลูกค้าที่ 8	9.0	8.3	8.7	8.8	9.1	9.1	9.2									
ลูกค้าที่ 9	7.5	8.0	7.3	7.3	7.7	7.7	7.7									
ลูกค้าที่ 10	7.1	7.6	7.0	7.0	7.3	7.3	7.3	7.7								
ลูกค้าที่ 11	6.9	7.4	6.8	6.9	7.1	7.2	7.2	7.2	7.4	7.4						
ลูกค้าที่ 12	6.1	6.1	6.1	6.1	6.2	6.2	6.2	6.2	5.9	5.9	6.0					
ลูกค้าที่ 13	6.6	6.7	6.6	6.6	6.7	6.7	6.7	6.7	6.4	6.4	6.4	6.2				
ลูกค้าที่ 14	6.0	6.2	6.0	6.0	6.1	6.1	6.1	6.1	6.0	6.0	6.1	6.0	6.1			
ลูกค้าที่ 15	4.2	4.5	4.2	4.2	4.3	4.4	4.4	4.4	4.6	4.6	4.6	4.2	4.3	4.4		
ลูกค้าที่ 16	6.1	6.1	6.1	6.1	6.1	6.2	6.2	6.2	5.9	5.9	5.9	6.2	6.2	6.0	4.2	

รูปที่ 4 เมตริกซ์แบบประหยัด (Saving Matrix)

สมการของเมตริกซ์แบบประหยัดจากสมการที่ (2)

$$S_{ij} = (d_{D,i} + d_{D,j}) - d_{i,j} \quad (2)$$

เมื่อ S_{ij} คือ ระยะทางที่ประหยัดเมื่อรวมเที่ยวการขนส่งของลูกค้า i และ j
 $d_{D,i}$ คือ ระยะทางจากคลังสินค้าไปยังลูกค้า i
 $d_{D,j}$ คือ ระยะทางจากคลังสินค้าไปยังลูกค้า j
 $d_{i,j}$ คือ ระยะทางจากลูกค้า i ไปยังลูกค้า j

ตัวอย่างการคำนวณระยะทางที่ประหยัดด้วยสมการที่ (2) จากข้อมูลในรูปที่ 3 เช่น $S(1,2) = (5.1 + 4.3) - 1.3 = 8.1$ กิโลเมตร การคำนวณทำซ้ำจนสามารถจัดเส้นทางวิ่งรถครอบคลุมลูกค้าครบทุกราย จากนั้นจะนำผลการคำนวณมาสร้างเมตริกซ์แบบประหยัดแสดงดังรูปที่ 4

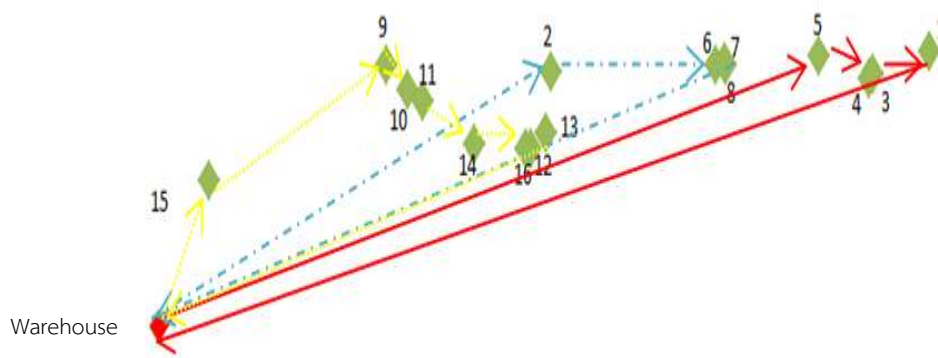
3.3.3. การลำดับค่าระยะทางที่ประหยัด เพื่อกำหนดลูกค้าให้กับรถบรรทุกและวางแผนการขนส่งที่จะทำให้เกิดการประหยัดจากรูปที่ 4 ทำการเรียงลำดับค่า S_{ij} มากไปหาน้อย เช่น $S(5,1)$ มีค่ามากที่สุดที่ 9.6 กิโลเมตร จึงจัดให้เป็นลำดับที่ 1 ทำการจัดลำดับจนครบทุก S_{ij} และกำหนดลำดับในการขนส่งจากก่อนไปหลัง เช่น $S(5,1)$ มีค่าระยะทางที่ประหยัดเป็นลำดับที่ 1 การกำหนดแผนการขนส่งคือ จะส่งให้กับลูกค้ารายที่ 1 และ รายที่ 5 เป็นลำดับที่ 1 และ 2 ต่อด้วย $S(4,1)$ มีค่าระยะทางที่ประหยัด เป็นลำดับที่ 2 จึงส่งให้กับลูกค้ารายที่ 4 เป็นลำดับที่ 3 โดยทำการจัดลำดับจนครบทั้ง 16 ราย ทั้งนี้จากเงื่อนไขการรวมลูกค้านั้นรถขนส่งจะต้องบรรจุได้ไม่เกินความสามารถสูงสุด จากกรณีศึกษา พบว่ารถขนส่งมีความจุได้ไม่เกินความสามารถในการบรรจุสูงสุด คือ 13 พาเลทต่อคัน และมีจำนวนรถบรรทุก 3 คัน จากการดำเนินการจัดลำดับในการขนส่งสามารถแบ่งกลุ่มลูกค้าได้ดังนี้

รถขนส่งสินค้าคันที่ 1: ลูกค้ารายที่ 1-5-4-3

รถขนส่งสินค้าคันที่ 2: ลูกค้ารายที่ 2-8-7-6

รถขนส่งสินค้าคันที่ 3: ลูกค้ารายที่ 9-10-11-12-13-14-15-16

3.3.4. จัดลำดับลูกค้าในเส้นทางเพื่อลดระยะทางที่พาหนะแต่ละคันต้องเดินทางเปลี่ยนลำดับของการส่งสินค้า โดยวิธีการกวาด (Sweep Algorithm) จุดๆ ใดในเส้นทางจะถูกเลือกและกวาดไปตามเข็มนาฬิกาได้ดังรูปที่ 5



รูปที่ 5 ลำดับการส่งสินค้าโดยวิธี (Sweep Algorithm)

ตารางที่ 2 สรุปตารางการขนส่งสินค้าของบริษัทกรณีศึกษา

รถขนส่งสินค้า	ลำดับการขนส่ง	รวมระยะทางการขนส่ง
1	คลังสินค้า, 5, 4, 3, 1, คลังสินค้า	$533.7+52+21.2+65.4+699 = 1,371$ กิโลเมตร
2	คลังสินค้า, 2, 6, 7, 8, คลังสินค้า	$603+90.8+10.4+5.3+632 = 1,341$ กิโลเมตร
3	คลังสินค้า, 15, 9, 10, 11, 14, 16, 12, 13, คลังสินค้า	$308+283+51.5+20.6+97.1+ 21.6+7.3+30.6+370.8 = 1,190.50$ กิโลเมตร

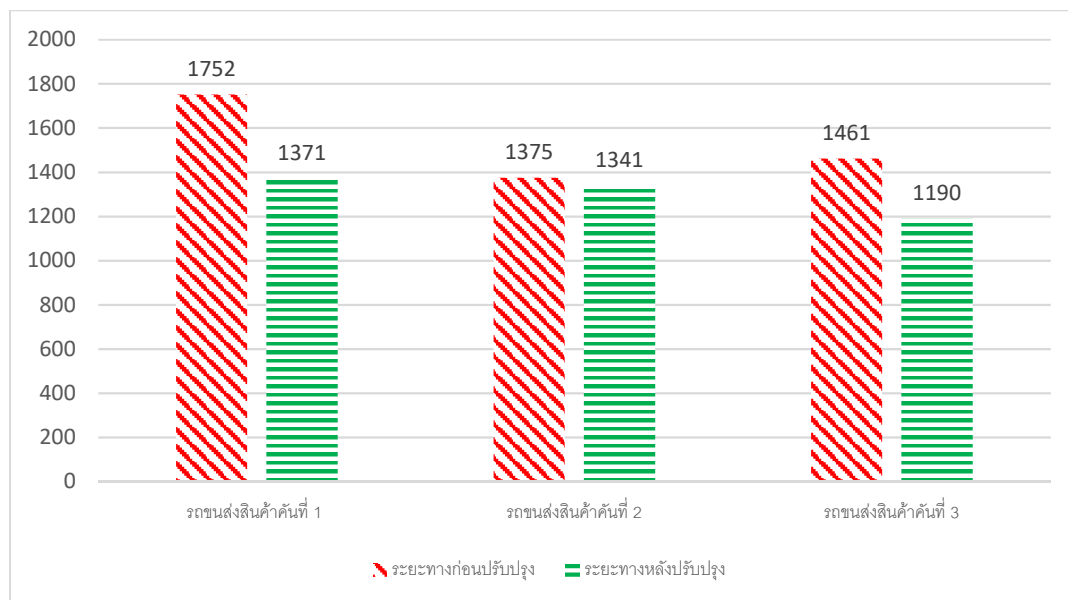
4. อภิปรายผล

เปรียบเทียบระยะทางขนส่งสินค้าก่อนและหลังปรับปรุงของรถขนส่งสินค้าแต่ละคันแสดงดังรูปที่ 6 ดังนี้

4.1. รถขนส่งสินค้าคันที่ 1 การเดินทางก่อนปรับปรุง คลังสินค้า, ลูกค้ารายที่ 1, 2, 3, 4, 5, คลังสินค้า หลังปรับปรุง คลังสินค้า, ลูกค้ารายที่ 5, 4, 3, 1, คลังสินค้า ระยะทางก่อนปรับปรุง $699+199+175+21.2+658 = 1,752$ กิโลเมตร หลังปรับปรุง $533.7+52+21.2+65.4+699 = 1,371$ กิโลเมตร ระยะทางที่ลดลง 381 กิโลเมตร เปอร์เซ็นต์ลดลง 21.75 %

4.2. รถขนส่งสินค้าคันที่ 2 การเดินทางก่อนปรับปรุง คลังสินค้า, ลูกค้ารายที่ 5, 6, 7, 8, คลังสินค้า หลังปรับปรุง คลังสินค้า, ลูกค้ารายที่ 2, 6, 7, 8, คลังสินค้า ระยะทางก่อนปรับปรุง $682+45.9+10.4+5.3+632 = 1,375$ กิโลเมตร หลังปรับปรุง $603+90.8+10.4+5.3+632 = 1,341$ กิโลเมตร ระยะทางที่ลดลง 34 กิโลเมตร เปอร์เซ็นต์ลดลง 2.47 %

4.3. รถขนส่งสินค้าคันที่ 3 การเดินทางก่อนปรับปรุง คลังสินค้า, ลูกค้ารายที่ 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, คลังสินค้า หลังปรับปรุง คลังสินค้า, ลูกค้ารายที่ 15, 9, 10, 11, 14, 16, 12, 13, คลังสินค้า ระยะทางก่อนปรับปรุง $215+51.50+20.60+126+30.60+34.3+270+214+499 = 1,461$ กิโลเมตร หลังปรับปรุง $308+283+51.50+20.60+97.1+21.6+7.3+30.6+370.8 = 1,190.50$ กิโลเมตร ระยะทางที่ลดลง 271 กิโลเมตร เปอร์เซ็นต์ลดลง 18.55 %



รูปที่ 6 กราฟเปรียบเทียบระยะทางก่อนและหลังปรับปรุง

5. สรุปผลการดำเนินการวิจัย

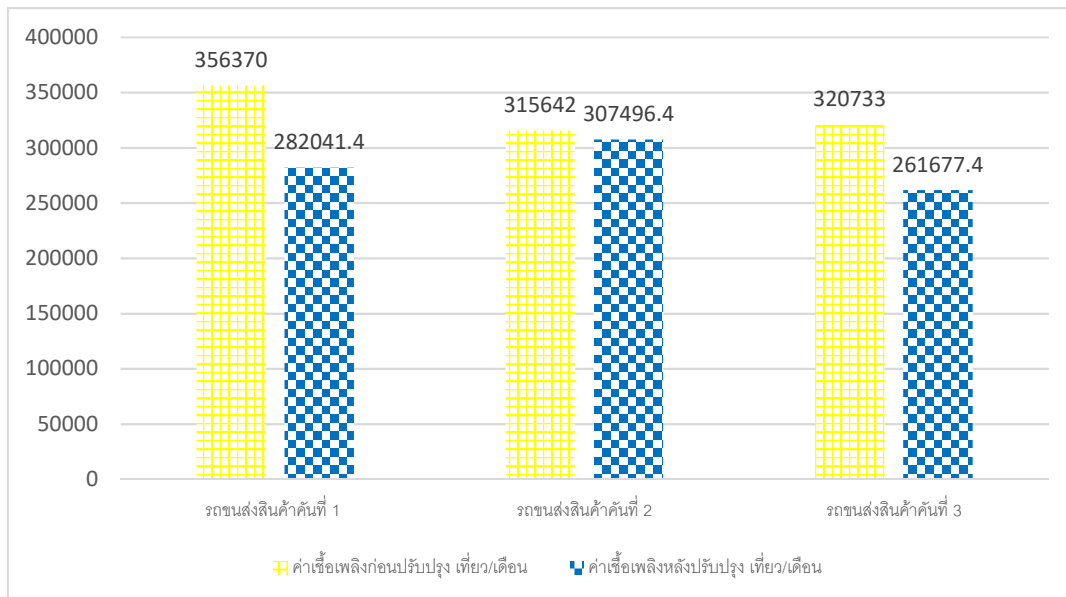
จากการปรับปรุงเส้นทางการขนส่งสินค้าด้วยวิธีการจัดเส้นทางสำหรับยานพาหนะด้วยอัลกอริทึมแบบประหยัด (Saving Algorithm) พบว่าสามารถลดระยะทางการขนส่งสินค้าที่สั้นลงและสามารถลดค่าใช้จ่ายของค่าเชื้อเพลิงลงได้ ทำให้สินค้าสามารถกระจายไปยังลูกค้าได้รวดเร็วขึ้นส่งผลให้คุณภาพของสินค้าไม่เสียหายเนื่องจากสินค้าส่วนใหญ่เป็นอาหารสดและอาหารแช่เย็น และได้ทำการเปรียบเทียบระยะทางและค่าเชื้อเพลิงที่ใช้ในการขนส่งสินค้าก่อนและหลังปรับปรุงแสดงดังนี้

รถขนส่งคันที่ 1 ระยะทางก่อนปรับปรุง 1,752 กิโลเมตร หลังปรับปรุง 1,371 กิโลเมตร ค่าเชื้อเพลิงก่อนปรับปรุง การใช้น้ำมัน 350 ลิตร/เที่ยว ราคาน้ำมันดีเซลลิตรละ 33.94 ฉะนั้นเชื้อเพลิงที่ใช้ต่อเที่ยว เท่ากับ 11,879 บาท/เที่ยว จำนวนการวิ่ง 30 เที่ยว/เดือน ค่าเชื้อเพลิง 1 เดือน เท่ากับ 356,370 บาท หลังปรับปรุงอัตราการใช้การใช้น้ำมัน 277 ลิตร/เที่ยว ค่าเชื้อเพลิงที่ใช้ต่อเที่ยว เท่ากับ 9,401.38 บาท/เที่ยว จำนวนการวิ่ง 30 เที่ยว/เดือน ค่าเชื้อเพลิง 1 เดือน เท่ากับ

282,041.40 บาท ต้นทุนที่ลดลงได้ 2,477.62 บาท/เที่ยว คิดเป็นต่อเดือน 74,328.60 บาท/เดือน คิดเป็นต่อปี 891,943.20 บาท/ปี คิดเป็นเปอร์เซ็นต์ที่ลดลง 20.86 %

รถขนส่งคันที่ 2 ระยะทางก่อนปรับปรุง 1,375 กิโลเมตร หลังปรับปรุง 1,341 กิโลเมตร ค่าเชื้อเพลิงก่อนปรับปรุง การใช้น้ำมัน 310 ลิตร/เที่ยว เชื้อเพลิงที่ใช้ต่อเที่ยว เท่ากับ 10,521.40 บาท/เที่ยว จำนวนการวิ่ง 30 เที่ยว/เดือน ค่าเชื้อเพลิง 1 เดือน เท่ากับ 315,642 บาท หลังปรับปรุงอัตราการใช้น้ำมัน 302 ลิตร/เที่ยว ค่าเชื้อเพลิงที่ใช้ต่อเที่ยว เท่ากับ 10,249.88 บาท/เที่ยว จำนวนการวิ่ง 30 เที่ยว/เดือน ค่าเชื้อเพลิง 1 เดือน เท่ากับ 307,496.40 บาท ต้นทุนที่ลดลงได้ 271.52 บาท/เที่ยว คิดเป็นต่อเดือน 8,145.60 บาท/เดือน คิดเป็นต่อปี 97,747.20 บาท/ปี คิดเป็นเปอร์เซ็นต์ที่ลดลง 2.58 %

รถขนส่งคันที่ 3 ระยะทางก่อนปรับปรุง 1,461 กิโลเมตร หลังปรับปรุง 1,190.50 กิโลเมตร ค่าเชื้อเพลิงก่อนปรับปรุง การใช้น้ำมัน 315 ลิตร/เที่ยว เชื้อเพลิงที่ใช้ต่อเที่ยว เท่ากับ 10,691.10 บาท/เที่ยว จำนวนการวิ่ง 30 เที่ยว/เดือน ค่าเชื้อเพลิง 1 เดือน เท่ากับ 320,733 บาท หลังปรับปรุงอัตราการใช้น้ำมัน 257 ลิตร/เที่ยว ค่าเชื้อเพลิงที่ใช้ต่อเที่ยว เท่ากับ 8,722.58 บาท/เที่ยว จำนวนการวิ่ง 30 เที่ยว/เดือน ค่าเชื้อเพลิง 1 เดือน เท่ากับ 261,677.40 บาท ต้นทุนที่ลดลงได้ 1,968.52 บาท/เที่ยว คิดเป็นต่อเดือน 59,055.60 บาท/เดือน คิดเป็นต่อปี 708,667.20 บาท/ปี คิดเป็นเปอร์เซ็นต์ที่ลดลง 18.41 %



รูปที่ 7 กราฟเปรียบเทียบค่าเชื้อเพลิงก่อนและหลังปรับปรุง

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] แนวโน้มธุรกิจ/อุตสาหกรรมปี (2565-2567). ธุรกิจบริการขนส่งสินค้าทางถนน [Online]. Available: <https://www.krungsri.com/th/research/industry/industry-outlook/logistics/road-freight-transportation/IO/road-freight-transportation-2022-2024>
- [2] รัชต์วรรณ กาญจนปัญญาคม, การศึกษางานอุตสาหกรรม, ฉบับปรับปรุงใหม่, บริษัท สำนักพิมพ์ท็อป จำกัด, 2562.
- [3] Nazari, M., Oroojlooy, A., Snyder, L., & Takác, M., "Reinforcement learning for solving the vehicle routing problem," 32nd Conference on Advances in Neural Information Processing Systems (NeurIPS 2018), Montréal, Canada.

- [4] Clarke, Geoff; Wright, John W, "Scheduling of vehicles from a central depot to a number of delivery points," Operations research, Vol 12(4), 1964, pp. 568-581.
- [5] วิไลวรรณ แก่นสาร และ สมบัติ สินธุเชาน์, "การเปรียบเทียบวิธีการฮิวริสติกส์สำหรับระบบการจัดการขยะ," วารสารวิชาการ Thai VCML. ปีที่ 6 ฉบับที่ 2 (2559) กรกฎาคม - ธันวาคม 2559.
- [6] Dantzig, G. B., & Ramser, J. H, "The truck dispatching problem," Management science, Vol6(1), 1959, pp. 80-91.
- [7] Pichpibul, T., & Kawtummachai, R, "An improved Clarke and Wright savings algorithm for the capacitated vehicle routing problem," Science Asia, Vol38(3), 2012, pp. 307-318.
- [8] จารุพงษ์ บรรเทา, นันทพัทธ์ สันติชูวงศ์, วีระชัย ตาลกลาง, "Solving a Vehicle Routing Problem with Time Window by Heuristics Method: A Case Study of Automotive Part Manufacturer," วารสารวิจัย มทร. กรุงเทพฯ, ปีที่ 10(2), 2016, pp. 31-42.
- [9] Rawirod Pongsub, "Vehicle Routing Arrangement for Automotive Parts: A Case Study Of Automotive Parts Transport Company" Burapha University 2021.

การเพิ่มประสิทธิภาพกระบวนการประกอบเครื่องจักรโดยใช้หลักการไคเซ็น
กรณีศึกษา บริษัทออกแบบติดตั้งระบบอัตโนมัติ

The Increasing of Machine Assembly Processes Performance Efficiency
by Using Kaizen Principle

Case Study: Automation Design and Installation Company

สินมหัต ฝ่ายลุ่ม¹ รุ่งเพชร รัตมี¹ วีรพงศ์ นุพพล¹ วิษณุ แสงเมือง¹ ภัทรพงศ์ เกิดลาภี^{1*}

1 สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ
60 หมู่ 3 ถนนสายเอเชีย (กรุงเทพฯ นครสวรรค์) ตำบลหันตรา อำเภอพระนครศรีอยุธยา จังหวัดพระนครศรีอยุธยา 13000

Sinmahut phailuy¹ Rungphet Rasamee¹ Weerapong Nuppon¹

Wisanu Fangmuang¹ Phattharapong Kiedlaphi^{1*}

¹Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering and Architecture,

Rajamangala University of Technology Suvarnabhumi,

60 Moo 3 Asian Highway, Phranakhon Si Ayutthaya, 13000

*Corresponding author Email: pongsak.ke@rmutsb.ac.th

(Received: 7 September 2023 / Accepted: 14 December 2023 / Published: 26 December 2023)

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพกระบวนการประกอบเครื่องจักรโดยใช้หลักการไคเซ็น โดยการวิเคราะห์หาสาเหตุของปัญหาและการแก้ไขปัญห โดยมีขั้นตอนการดำเนินงานดังนี้คือ 1) ศึกษากระบวนการประกอบเครื่องจักร 2) ระบุปัญหาที่เกิดขึ้นในกระบวนการประกอบเครื่องจักร และเลือกประเภทปัญหาที่สำคัญโดยใช้หลักการเครื่องมือคุณภาพ 7 อย่าง 3) วิเคราะห์หาสาเหตุของปัญหาที่ได้รับการเลือกโดยใช้เครื่องมือคุณภาพ และนำเสนอแนวทางการลดปัญหาที่เกิดขึ้นโดยใช้หลักการไคเซ็น 4) นำหลักการไคเซ็นปฏิบัติ พร้อมทั้งเปรียบเทียบผล จากการปรับปรุงตามแนวทางที่เสนอ ผลการศึกษาพบว่า ประสิทธิภาพกระบวนการประกอบเครื่องจักรสูงขึ้น เวลาในการประกอบเครื่องจักรลดลง ปัญหาที่เกิดกับลูกค้าน้อยลง ผลิตได้ตามมาตรฐานที่ลูกค้าต้องการ เนื่องจากการรวบรวมข้อมูลและการวิเคราะห์ปัญหาด้วยเครื่องมือคุณภาพ และดำเนินการวิเคราะห์สาเหตุ และหาวิธีการแก้ไข ส่งผลให้ประสิทธิภาพการดำเนินการประกอบเครื่องจักรสูงขึ้นมากกว่า 25 เปอร์เซ็นต์ เวลาของการทำงานที่ลดลงเฉลี่ย 30 เปอร์เซ็นต์ ส่งงานทันตามกำหนดเวลา

คำสำคัญ: เครื่องมือคุณภาพ 7 อย่าง กระบวนการประกอบเครื่องจักร ประสิทธิภาพ หลักการไคเซ็น

Abstract

The objectives of this research are to machine assembly processes efficiency by Using Kaizen principle to analyze the cause and solve problems. The methodology of this research has 4 steps. 1) To study the process of the machine assembly processes. 2) To define the defect in a process of machine assembly processes and select the significant defect by using 7 QC tools principle. 3) To analyze the cause of the significant defect and to propose the guideline for reduce the defect by Kaizen principle. 4) To implement the Kaizen principle and compare the result. The improvement was tried to Higher machine assembly process efficiency. It was found that the reduced assembly time fewer customer problems

Produced according to the standards required by customers. The efficiency of machine assembly operations is increased by more than 25 percent, the average work time is reduced by 30 percent, and the work is delivered on time.

Keywords: 7 QC tools, Machine Assembly Process, Efficiency, Kaizen

1. บทนำ

โลกยุคปัจจุบันนี้ การทำงานในหน่วยงานหรือองค์กรจำเป็นต้องมีการปรับปรุงเปลี่ยนแปลงเพื่อพัฒนาตนเองและองค์กรของตนให้ทันต่อเหตุการณ์และเตรียมรับมือกับสถานการณ์ที่จะเกิดขึ้นในอนาคต เพื่อให้องค์กรของตนอยู่รอดและสามารถขับเคลื่อนต่อไปได้ [1] ในสภาวะการแข่งขันที่จำเป็นต้องใช้ทรัพยากรที่มีอยู่ให้เกิดคุณค่ามากที่สุดกลับมีความสูญเสียเปล่าหลายอย่างซ่อนอยู่และไม่มีการปรับปรุงหรือพัฒนา แนวทางการเพิ่มผลผลิตภาพเพื่อให้แข่งขันกับนานาประเทศได้นั้น สามารถทำได้หลากหลายวิธี เช่น การปลูกจิตสำนึกและทำความเข้าใจด้านผลผลิตภาพให้พนักงานในองค์กร การฝึกทักษะการปฏิบัติงานให้พนักงาน มีความชำนาญ การพัฒนากระบวนการคิดหรือการปรับปรุงงานให้กับพนักงาน เป็นต้น เครื่องมือพื้นฐานการเพิ่มผลผลิตภาพที่ช่วยพัฒนาบุคลากรและกระบวนการทำงานอย่าง Kaizen เป็นอีกหนึ่งเครื่องมือที่หลากหลาย องค์กร นิยมนำมาประยุกต์ใช้ในองค์กร [2] อีกทั้งมีผู้วิจัยนำหลักการของ Kaizen มาทำการวิเคราะห์หาสาเหตุพร้อมเสนอแนวทางในการแก้ไขต่างๆ เช่น การเพิ่มประสิทธิภาพกระบวนการผลิตขวดแก้ว [4] การลดความสูญเสียของกระบวนการผลิตเต้าหู้ปลา [5] การเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานการออกแบบวิธีการติดตั้งสถานีส่งสัญญาณระบบ 4G [6] ส่งผลให้ประสิทธิภาพการผลิตสูงขึ้น ปัญหาของเสียในกระบวนการผลิตลดลง เป็นต้น

จากการที่ผู้วิจัยได้เข้าไปศึกษาในกระบวนการผลิตเครื่องจักรของบริษัทออกแบบติดตั้งระบบอัตโนมัติกรณีศึกษา พบว่าเครื่องจักรที่ทำการผลิตนั้น ได้รับคำร้องเรียนจากลูกค้าว่าใช้เวลาในการผลิตนานเกินไป ส่งผลต่อสายการผลิตของลูกค้า ดังนั้น การทำงานวิจัยในครั้งนี้จึงทำการศึกษาแนวคิดโคเซ็น เพื่อนำมาปรับใช้ในกระบวนการทำงานประกอบเครื่องจักรควบคุมด้วยระบบอัตโนมัติ เพื่อให้สามารถลดข้อบกพร่อง เพิ่มประสิทธิภาพอย่างต่อเนื่อง ตอบสนองความต้องการของลูกค้าให้ดีที่สุด โดยการวิเคราะห์หาสาเหตุพร้อมนำเสนอแนวทางในการแก้ไขและนำแนวทางที่แนะนำไปปฏิบัติโดยใช้หลักเครื่องมือคุณภาพในการหาสาเหตุของปัญหาและประยุกต์ใช้หลักการโคเซ็นแก้ไขปัญหามาจากกระบวนการผลิตดังกล่าว

2. ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 เครื่องมือควบคุมคุณภาพ 7 อย่าง (7 QC Tools)

เครื่องมือที่ใช้แก้ปัญหาย่างต่อเนื่อง ให้กระบวนการผลิตไม่เปลี่ยนแปลงและมีสมรรถภาพสูงขึ้น ซึ่งประกอบด้วยเครื่องมือควบคุมคุณภาพ 7 อย่าง (7 QC Tools) ดังต่อไปนี้ ใบตรวจสอบ (Check Sheet) ฮิสโตแกรม (Histogram) แผนภาพพาเรโต (Pareto Chart) แผนภาพสาเหตุและผล (Cause and Effective Diagram) แผนภูมิควบคุม (Control Chart) แผนภาพการกระจาย (Scatter Diagram) และกราฟ (Graph) คาโอริ อชิการว ได้เป็นผู้ให้นิยามเครื่องมือควบคุมคุณภาพ 7 อย่าง แผนภูมิควบคุมน่าจะเป็นเครื่องมือที่ซับซ้อนที่สุด โดยเครื่องมือควบคุมคุณภาพมีหน้าที่คือ [4,5]

1. ใช้ในการเก็บรวบรวมข้อมูล คือ ใบตรวจสอบ

2. ใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูล คือ ฮิสโตแกรม แผนภาพพาเรโต แผนภาพสาเหตุและผล แผนภาพการกระจาย และแผนภูมิควบคุม

3. ใช้ในการแสดงผลของข้อมูลคือ ฮิสโตแกรม และกราฟ

ทั้งนี้ในการใช้เครื่องมือทั้ง 7 อย่าง จะต้องคำนึงถึงลักษณะและชนิดของข้อมูลที่ได้ รวมถึงความเหมาะสมกับสถานการณ์ที่เกิดขึ้นจริง เพื่อให้การวิเคราะห์ที่ได้ใกล้เคียงกับความจริงและเกิดความถูกต้องมากที่สุด จึงจะสามารถนำไปใช้ในการควบคุมคุณภาพได้อย่างมีประสิทธิภาพ

2.2 หลักการไคเซ็น

ไคเซ็น หมายถึง กลยุทธ์การบริหารงานแบบญี่ปุ่น (Kaizen) เป็นภาษาญี่ปุ่น แปลว่า การปรับปรุง (Improvement) เป็นแนวคิดที่ใช้ในการบริหารการจัดการมีประสิทธิภาพ โดยมีมุ่งปรับปรุงวิธีการมีส่วนร่วมของพนักงานทุกคน บุคลากรทุกระดับร่วมกันแสวงหาแนวทางใหม่ ๆ เพื่อปรับปรุงวิธีการทำงานให้ดีขึ้นไปเรื่อย ๆ อย่างต่อเนื่อง ทั้งฝ่ายบริหารและฝ่ายปฏิบัติเกิดจากการบริหาร ที่ประสบปัญหาที่เกิดขึ้นในระหว่างทศวรรษที่ 1980 และทศวรรษที่ 1990 บริษัทที่ประสบความสำเร็จมักนำเอาแนวคิดของไคเซ็นคือการยอมรับว่าการบริหารให้ประสบผลสำเร็จจะต้องแสวงหาวิธีการที่จะทำให้ลูกค้าพึงพอใจและตอบสนองความต้องการของลูกค้าได้เป็นอย่างดี เป็นกลยุทธ์ในการปรับปรุงที่มุ่งที่ตัวลูกค้า นอกจากนี้แนวคิดไคเซ็นยังขยายขอบข่ายออกไปถึงความสัมพันธ์ระหว่างพนักงานกับนายจ้างด้วยในด้านการผลิต การตลาด การจัดจำหน่าย ฯลฯ อย่างเป็นระบบ Kaizen ให้ความสำคัญกับกระบวนการทำงานและริเริ่มวิธีการคิดที่มุ่งกระบวนการทำงานและระบบการบริหารที่สนับสนุนและยอมรับแนวคิดของผู้บริหารและพนักงาน จากหลักการของ Kaizen จึงเป็นแนวคิดที่จะช่วยมาตรฐานที่มีอยู่เดิม (Maintain) และปรับปรุงให้ดียิ่งขึ้น (Improvement) ซึ่งกำหนดแนวคิดนี้แล้ว มาตรฐานที่มีอยู่เดิมก็จะค่อย ๆ ลดลง ให้ความสำคัญในกระบวนการของ Kaizen คือ การใช้ความรู้ความสามารถของพนักงานมาคิดปรับปรุงงาน โดยใช้การลงทุนเพียงเล็กน้อยซึ่งก่อให้เกิดการปรับปรุงที่ละเล็กละน้อยที่ค่อย ๆ เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง ตรงข้ามกับแนวคิดของนวัตกรรม (Innovation) ซึ่งเป็นการเปลี่ยนแปลงขนาดใหญ่ ที่ต้องใช้เทคโนโลยีซับซ้อนระดับสูงด้วยเงินลงทุนมหาศาล ดังนั้นไม่ว่าจะอยู่ในสถานะเศรษฐกิจแบบใดก็สามารถใช้วิธีการของ Kaizen เพื่อปรับปรุงได้ [3]

2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการแก้ปัญหาโดยใช้หลักการไคเซ็นในกระบวนการผลิตมีผู้วิจัยจำนวนมาก ในที่นี้ขอยกมาเพียงบางส่วนดังนี้

ภัทรพงศ์ เกิดลาภีและคณะ [4] ได้ทำการวิจัยการเพิ่มประสิทธิภาพกระบวนการผลิต โดยการแก้ไขปัญหาคุณภาพความสูงของบรรจุภัณฑ์แก้วโดยการวิเคราะห์หาสาเหตุของปัญหาและนำเสนอแนวทางการลดข้อเสียที่เกิดขึ้นไปปฏิบัติ ผลการศึกษาพบว่า ประสิทธิภาพการผลิตสูงขึ้น ปัญหาของเสียในกระบวนการผลิตลดลงจากสัดส่วนของเสียได้ถึง 3.2 เท่า

ไชยพศ แก้วจัน [6] ได้ทำการวิจัยการเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานการออกแบบวิธีการติดตั้งสถานีส่งสัญญาณระบบ 4G LTE โดยใช้แนวคิดไคเซ็น ผลการศึกษาสามารถเพิ่มประสิทธิภาพการออกแบบวิธีการติดตั้งสถานีส่งสัญญาณ ลดข้อบกพร่องลงเหลือ 2 เปอร์เซนต์ ลดค่าใช้จ่ายในการขนส่ง เฉลี่ย 13 เปอร์เซนต์

ภัทรพงศ์ เกิดลาภีและสิริรัตน์ พึ่งชมภู [5] ได้ทำการปรับปรุงประสิทธิภาพของเครื่องจักรโดยรวมโดยการลดความสูญเสียและประยุกต์ใช้ TPM ของกระบวนการผลิตเตาหุ้ปลาสามารถสรุปได้ว่าการบำรุงรักษาแบบทีผลที่ทุกคนมีส่วนร่วม (TPM) ด้วยประสิทธิภาพโดยรวมของเครื่องจักร (OEE) ในกระบวนการผลิตเตาหุ้ปลาประสบความสำเร็จ และเป็นไปตามวัตถุประสงค์

พงษ์ศักดิ์ เกิดลาภี [7] ได้ทำการศึกษาปัญหาของเสียที่เกิดขึ้นในกระบวนการหล่อเครื่องประดับเงิน โดยการวิเคราะห์หาสาเหตุพร้อมเสนอแนวทางในการแก้ไข นำไปปฏิบัติ ผลการศึกษาจากการปรับปรุงตามแนวทางที่เสนอ พบว่าสามารถลดข้อเสียในการผลิตได้ 8 เปอร์เซนต์ และสามารถลดการใช้พลังงานไฟฟ้าได้ 6 เปอร์เซนต์ ซึ่งส่งผลให้คุณภาพของงานหล่อดีขึ้น

3. วิธีการดำเนินงาน

3.1 ศึกษากระบวนการสถานประกอบการกรณีศึกษา [4,7]

การศึกษาระบบการประกอบเครื่องจักรคุมด้วยระบบอัตโนมัติเพื่อให้ได้ข้อมูลที่ถูกต้องโดยใช้เครื่องมือบริหารข้อเท็จจริง 3 ประการ คือ สถานที่จริง (Genba) ของจริง (Genbutsu) และกระบวนการจริง (Genjitsu) ตั้งแต่เริ่มต้นจนถึงสิ้นสุดกระบวนการ ผู้วิจัยจึงใช้สถานประกอบการเป็นกรณีศึกษา จำนวน 1 สถานประกอบการ

3.2 ระบุปัญหาที่เกิดขึ้นในสถานประกอบการ

การระบุของเสียที่เกิดขึ้นในกระบวนการทำงานประกอบเครื่องจักรควบคุมด้วยระบบอัตโนมัติ และเลือกประเภทของปัญหาที่สำคัญโดยใช้เครื่องมือคุณภาพ ซึ่งเครื่องมือเบื้องต้นที่เลือกใช้ คือ ใบตรวจสอบ (Check Sheet) ฮิสโตแกรม (Histogram) แผนภาพพาเรโต (Pareto Chart) เพื่อสำรวจปัญหา

3.3 วิเคราะห์หาสาเหตุของปัญหา

การวิเคราะห์หาสาเหตุของปัญหาที่ได้รับการเลือกโดยใช้เครื่องมือคุณภาพ และนำเสนอแนวทางการลดปัญหาที่เกิดขึ้นโดยใช้หลักการไคเซ็น โดยการระดมสมอง (Brain Storming) และใช้แผนภาพสาเหตุและผล (Cause and Effective Diagram) ของแต่ละปัญหาเพื่อแยกประเด็นปัญหาจากสาเหตุหลักไปสู่การหาสาเหตุรองและสาเหตุย่อยตามลำดับ

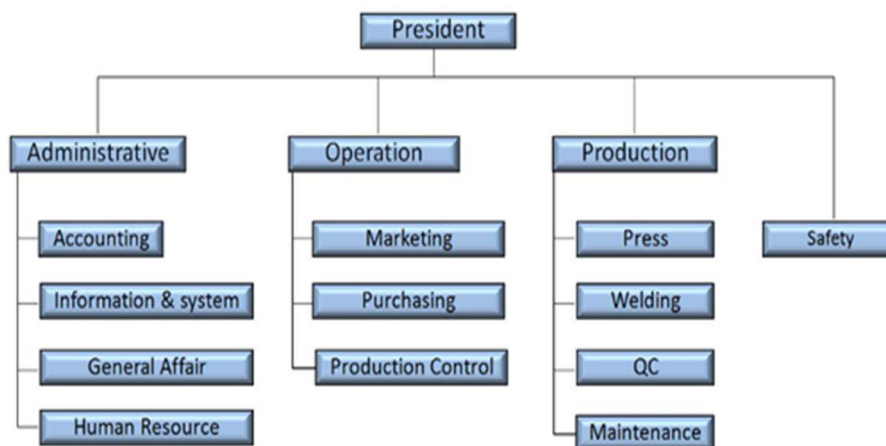
3.4 นำหลักการไคเซ็นปฏิบัติ พร้อมทั้งเปรียบเทียบผล

การนำแนวทางไปปฏิบัติจะใช้วิธีการเชิงระบบ (System Approach) หรือหลักวงจรบริหารและการปรับปรุงอย่างต่อเนื่อง เรียกว่า PDCA (Plan-Do-Check-Action) ที่นำไปใช้หรือประยุกต์ใช้ในงานทุกกิจกรรมหรือทุกระบบปฏิบัติงาน พร้อมทั้งเปรียบเทียบผลการดำเนินงานก่อนและหลังแก้ปัญหาที่เกิดขึ้นในกระบวนการทำงานประกอบเครื่องจักรควบคุมด้วยระบบอัตโนมัติ

4. ผลการดำเนินงาน

4.1 ศึกษากระบวนการ

การศึกษาระบวนการประกอบเครื่องจักรควบคุมด้วยระบบอัตโนมัติของสถานประกอบการแบ่งการบริหารออกเป็น 3 แผนก ประกอบด้วย แผนกธุรการ (Administrative) แผนกปฏิบัติการ (Operation) และแผนกผลิต (Production) ดังที่แสดงในรูปที่ 1



รูปที่ 1 การบริหารงานของสถานประกอบการ

4.2 ระบุปัญหาที่เกิดขึ้นในสถานประกอบการ

จากการค้นหาสาเหตุของปัญหาจากสถานประกอบการนักศึกษาที่เกิดขึ้นในกระบวนการประกอบเครื่องจักร โดยใช้ใบตรวจสอบ (Check Sheet) เพื่อรวบรวมปัญหาที่เกิดขึ้นทุกแผนกงาน แล้วนำมาสร้างแผนภาพพาเรโต (Pareto Chart) เพื่อระบุความสำคัญของปัญหา พบว่ามีปัญหาหลักๆ คือ การผลิตใช้เวลานานเกินไป ฝ่ายจัดซื้อผิดพลาด บุคลากรขาดงาน ตารางปฏิบัติงานผิด เกิดอุบัติเหตุบ่อย และปัญหาอื่นๆ ซึ่งปัญหาการผลิตประกอบเครื่องจักรส่งงานไม่ทันมีความสำคัญมากที่สุด จากแผนภาพพาเรโต นำมาซึ่งการเลือกปัญหาที่สำคัญเพื่อนำไปวิเคราะห์หาสาเหตุปัญหาของสถานประกอบการนักศึกษาที่เกิดขึ้นในกระบวนการประกอบเครื่องจักร โดยเลือกปัญหาลำดับแรก คือ การผลิตใช้เวลานานเกินไป ซึ่งส่งผลให้เกิดปัญหาถึง 59.4 เปอร์เซ็นต์ นำไปปรับปรุงและแนวทางที่เสนอแนะในการแก้ไขปัญหาดังแสดงในผังพาเรโตในรูปที่ 2



รูปที่ 2 ผังพาเรโตแสดงสาเหตุปัญหาของสถานประกอบการ

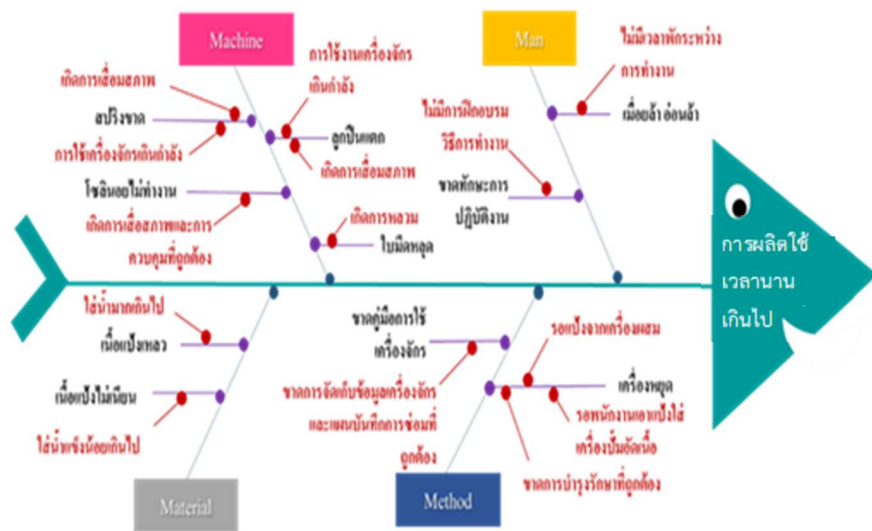
4.3 วิเคราะห์สาเหตุของปัญหา

จากการค้นหาสาเหตุของปัญหาจากสถานประกอบการกรณีศึกษาที่เกิดขึ้นในกระบวนการประกอบเครื่องจักร ได้รับคำร้องเรียนจากลูกค้าว่าใช้เวลาในการผลิตเครื่องจักรควบคุมด้วยระบบอัตโนมัติที่ทำการผลิตใช้เวลานานเกินไป ส่งผลต่อกระบวนการผลิตของลูกค้าเกิดการขัดข้องจากการรอเครื่องจักรที่ต้องส่งมอบให้ทันตามสัญญา สภาพพื้นที่การทำงานที่ส่งผลให้การทำงานล่าช้า ดังแสดงในรูปที่ 3



รูปที่ 3 สภาพพื้นที่การทำงาน

จึงได้นำปัญหาทั้งหมดมาวิเคราะห์ด้วยแผนภาพสาเหตุและผล (Cause and Effective Diagram) โดยใช้หลักการ 4M คือ คน (Man) เครื่องจักร (Machine) วิธีการ (Method) และวัตถุดิบ (Material) ดังแสดงในรูปที่ 4 แล้วจึงนำสาเหตุที่เกิดขึ้นมาเขียนรวมตามประเภทที่วิเคราะห์เพื่อให้ง่ายต่อการนำเสนอ ดังแสดงในตารางที่ 1



รูปที่ 4 แผนภาพสาเหตุและผลของปัญหาสถานประกอบการ

ตารางที่ 1 การวิเคราะห์แผนภาพสาเหตุและผล (Cause and Effective Diagram) ของปัญหาการผลิตใช้เวลานานเกินไป

ปัจจัย	ปัญหา	สาเหตุ
คน	ขาดทักษะการปฏิบัติงาน	- ไม่มีการฝึกอบรมวิธีการทำงาน
	เมื่อยล้าอ่อนล้า	- ไม่มีเวลาพักระหว่างการทำงาน - ขาดความตั้งใจทำงาน
วัตถุดิบ	รอวัสดุ อุปกรณ์ ที่สั่งซื้อ	- ฝ่ายจัดซื้อผิดพลาด - รอวัสดุ อุปกรณ์จากต่างประเทศ
	วัสดุ อุปกรณ์ที่สั่งซื้อไม่ถูกต้อง	- ฝ่ายจัดซื้อผิดพลาด - ผู้ขายผิดพลาด
วิธีการ	เสียเวลาการหาชิ้นส่วนและอุปกรณ์	- ไม่แยกการจัดเก็บอุปกรณ์ของแต่ละเครื่อง - ใช้เครื่องมือแล้วไม่เก็บที่เดิม
	การประกอบชิ้นส่วนของเครื่องจักร ไม่ถูกต้อง	- ไม่แยกการจัดเก็บอุปกรณ์ของแต่ละเครื่อง - ใช้เครื่องมือแล้วไม่เก็บที่เดิม
	การประกอบชิ้นส่วนไม่แน่น	- ใช้อุปกรณ์ไม่เหมาะสม - ใช้ nut screw ผิดขนาด
	ขาดคู่มือการใช้เครื่องจักร	- ขาดการจัดเก็บข้อมูลและแผนบันทึกการซ่อมที่ถูกต้อง
เครื่องจักร /เครื่องมือ	เครื่องจักร/เครื่องมือชำรุด	- เกิดการเสื่อมสภาพ - การใช้เครื่องมือเครื่องจักรเกินกำลัง
	ใช้เครื่องจักร/เครื่องมือผิดประเภท	- ขาดวินัยในการใช้เครื่องมือ เครื่องจักร - ขาดการบำรุงรักษาที่ถูกต้อง

4.4 นำหลักการไคเซ็นปฏิบัติ พร้อมทั้งเปรียบเทียบผล

จากสาเหตุของปัญหาที่ได้วิเคราะห์ด้วยเครื่องมือคุณภาพ โดยสรุปแนวทางการแก้ไขปัญหาดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ตัวอย่างแนวทางการแก้ไขปัญหาลหลักของปัญหาการผลิตใช้เวลานานเกินไปในสถานประกอบการ

ปัญหา	แนวทางการแก้ไข
ขาดการบำรุงรักษาที่ถูกต้อง	จัดทำแผนการบำรุงรักษาด้วยตนเอง (SM) และแผนการบำรุงรักษาเชิงป้องกัน (PM) โดยต้องมีการบังคับใช้แผนการบำรุงรักษาในทุกขั้นตอน
เสียเวลาการหาชิ้นส่วนและอุปกรณ์	จัดทำระบบ 5 ส แยกชิ้นส่วนและอุปกรณ์ของแต่ละเครื่องโดยใส่แยกตะกร้าที่ต่างสี
การประกอบชิ้นส่วนของเครื่องจักรไม่ถูกต้อง	จัดทำระบบ 5 ส แยกชิ้นส่วนและอุปกรณ์ของแต่ละเครื่องโดยใส่แยกตะกร้าที่ต่างสี
ขาดการจัดเก็บข้อมูลเครื่องจักร และแผนบันทึกการซ่อมที่ถูกต้อง	จัดทำโปรแกรมจัดเก็บข้อมูลเครื่องจักร จัดทำเอกสารแบบฟอร์มบันทึกงานซ่อม และบันทึกลงในระบบอิเล็กทรอนิกส์ด้วย <i>Microsoft Excel</i>
ขาดทักษะ และความรู้ในการปฏิบัติงาน	ทำการฝึกอบรมพนักงาน และจัดทำใบสอนงาน
การประกอบชิ้นส่วนไม่แน่น	จัดทำใบงานขั้นตอนการปฏิบัติงาน และจัดลำดับการทำงานก่อน-หลังระหว่างการทำงาน

การเปรียบเทียบผลการดำเนินงานก่อนและหลังการเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานด้วยหลักการไคเซ็นดังตารางที่ 3-4

ตารางที่ 3 แสดงค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพการประกอบก่อนการปรับปรุง ระหว่าง เดือนกรกฎาคม 2565-กันยายน 2565

เดือน	จำนวนชิ้นส่วนเครื่องจักร	ประสิทธิภาพการประกอบ	เวลาของการทำงาน
กรกฎาคม	20	55 %	26 วัน
สิงหาคม	20	60 %	27 วัน
กันยายน	20	50 %	25 วัน
เฉลี่ย	20	55 %	26 วัน

ตารางที่ 4 แสดงค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพการประกอบหลังการปรับปรุง เดือนตุลาคม 2565

เดือน	จำนวนชิ้นส่วนเครื่องจักร	ประสิทธิภาพการประกอบ	เวลาของการทำงาน
ตุลาคม	20	80 %	19 วัน

5. อภิปรายผล

งานวิจัยในครั้งนี้ทำการศึกษาแนวคิดไคเซ็น เพื่อนำมาปรับใช้ในกระบวนการทำงานประกอบเครื่องจักรควบคุมด้วยระบบอัตโนมัติ ให้สามารถลดข้อบกพร่อง เพิ่มประสิทธิภาพการทำงานอย่างต่อเนื่อง สามารถตอบสนองความต้องการของลูกค้าได้ดี โดยการวิเคราะห์หาสาเหตุปัญหาด้วยเครื่องมือคุณภาพพร้อมนำเสนอแนวทางในการแก้ไขและนำแนวทางที่แนะนำไปปฏิบัติโดยการประยุกต์ใช้หลักการไคเซ็นแก้ไขปัญหาดังกล่าวอย่างเป็นรูปธรรม ดังแสดงตัวอย่างการดำเนินการก่อนปรับปรุงและหลังปรับปรุง ดังแสดงในรูปที่ 5 ทั้งนี้ การปรับปรุงดังกล่าวใช้หลักการไคเซ็นปรับปรุงงานในขั้นเริ่มต้นที่ปฏิบัติงานระยะเวลา 4 เดือนเท่านั้น ซึ่งสามารถนำหลักการดังกล่าวมาเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานในขั้นตอนอื่นได้อย่างต่อเนื่อง และช่วงเวลาอื่นต่อไปได้



รูปที่ 5 การเปรียบเทียบผลการดำเนินงานก่อนและหลังการเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานด้วยหลักการไคเซ็น

6. สรุป

ประสิทธิภาพกระบวนการประกอบเครื่องจักรสูงขึ้น เวลาในการประกอบเครื่องจักรลดลง ปัญหาที่เกิดกับลูกค้าน้อยลง ผลิตได้ตามมาตรฐานที่ลูกค้าต้องการ เนื่องจากการรวบรวมข้อมูลและการวิเคราะห์ปัญหาด้วยเครื่องมือคุณภาพ และดำเนินการวิเคราะห์สาเหตุ และหาวิธีการแก้ไข ส่งผลให้ประสิทธิภาพการดำเนินการประกอบเครื่องจักรสูงขึ้นมากกว่า 25 เปอร์เซ็นต์ เวลาของการทำงานที่ลดลงเฉลี่ย 30 เปอร์เซ็นต์ ส่งงานทันตามกำหนดเวลา

7. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ ใช้กรณีศึกษาจากสถานประกอบการออกแบบติดตั้งระบบอัตโนมัติในเขตจังหวัดพระนครศรีอยุธยา ที่รับนักศึกษาสาขาวิชาวิศวกรรมการผลิต คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ เข้าปฏิบัติงานสหกิจศึกษาประจำปีการศึกษา 2565

8. เอกสารอ้างอิง

- [1] U. Kessripongsa (2 0 1 3). Kaizen endless improvements. Kaizen- 2 0 1 3 .Available: <http://blog.bru.ac.th/2019>
- [2] Kaizen & QCC Productivity Tools for Organizational Development.(2 0 1 7). Available: <https://piu.ftpi.or.th/wp-content>.
- [3] Kaizen principles.(online). Available: <http://www.thaidisplay.com/content-2.html>.
- [4] P. Kiedlaphi Ch. komdee Th. Wijansiri W. Fangmuang and S. Phailouie. Production process efficiency by resolving the height quality of Production of glass containers. in Proceeding of 7th Rajamangala Manufacturing and Management Technology Conference 2022 (RMTC2022), Rajamangala University of Technology Isan, Thailand, 2022, pp. 141–147. (in Thai)
- [5] P. Kiedlaphi and S. Pungchompoo. (2021). OEE improvement by reducing losses and applying TPM of fish tofu process. in Proceeding of The Conference of Industrial Engineering Network (IE NETWORK 2021), Rajamangala University of Technology Srivijaya, 2021, Thailand, pp. 481–486. (in Thai)
- [6] Ch. Kaewchin and S. Worarat. (2020). The increasing of performance efficiency by using KAIZEN concepts. Case Study of The Installation Engineering Department. Master of Engineering Thesis Engineering Management, Dhurakij Pundit University.
- [7] P. Kiedlaphi (2016). Defect reduction in the silver jewelry casting process. in Proceeding of The Conference of Industrial Engineering Network (IE NETWORK 2016), Khon Kaen, 2016, Thailand, pp. 669–674. (in Thai)

การหาเวลาสั่งซื้อที่เหมาะสมสำหรับสินค้าหลายผลิตภัณฑ์ กรณีศึกษาร้านค้าวรญา

Determining the Optimal Ordering Period for Multiple Products A Case Study of Waranya Shop

ศักดิ์ดา คำจันทร์¹ ชัตติยา ภาวงศ์¹ วิเรखा คำจันทร์^{1*}

¹สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกลและการผลิต คณะวิทยาศาสตร์และวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตเฉลิมพระเกียรติ จังหวัดสกลนคร

59 หมู่ 1 ตำบลเชิงเครือ อำเภอเมือง จังหวัดสกลนคร 47000

Sakda Khamjan¹ Khattiya Phawong¹ Wirekha Khamjan^{1*}

¹Industrial Engineering Major, Department of Mechanical and Manufacturing Engineering,

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

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

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

(Received: 10 September 2023 / Accepted: 16 December 2023 / Published: 26 December 2023)

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ในการหาเวลาสั่งซื้อที่เหมาะสมสำหรับสินค้าหลายผลิตภัณฑ์ โดยมี 3 นโยบาย คือ นโยบายการจัดการสินค้าแบบจัดหาสินค้าทีละรายการ นโยบายการจัดการสินค้าแบบจัดหาสินค้าพร้อมกัน และนโยบายการจัดการสินค้าแบบจัดหาสินค้าแบบผสม จากการศึกษาระบบปัจจุบันพบว่า ค่าใช้จ่ายในการดำเนินงานโดยเฉลี่ยต่ำสุดเท่ากับ 16,521.01 บาทต่อวัน และผลจากการวิจัยนโยบายที่เหมาะสมที่สุด คือ นโยบายสินค้าคงคลังแบบจัดหาสินค้าทีละรายการ มีค่าใช้จ่ายในการดำเนินงานโดยเฉลี่ยต่ำสุด เท่ากับ 15,321.18 บาทต่อวัน ซึ่งช่วยลดค่าใช้จ่ายลงได้ 1,199.83 บาทต่อวัน คิดเป็นร้อยละ 7.26

คำสำคัญ: รอบเวลาสั่งซื้อ สินค้าหลายผลิตภัณฑ์ สินค้าคงคลัง

Abstract

This research aims to determine the optimal ordering period for multiple products. There are three policies: individual ordering policy, joint ordering policy, and mixed ordering policy. The study of the current system found the lowest average operation cost of 16,521.01 baht per day. The most optimal policy research results are individual ordering policy has the lowest average operation cost of 15,321.18 baht per day. This reduces expenses by 1,199.83 baht per day or 7.26 percent.

Keywords: Ordering Period, Multiples Products, Inventory

1. บทนำ

ธุรกิจร้านขายของชำเป็นธุรกิจที่มีขนาดเล็กมีไว้เพื่อจำหน่ายสินค้าอุปโภคบริโภคโดยจะสั่งซื้อสินค้ามาจากร้านค้าส่งหรือห้างค้าส่งแล้วนำมาจำหน่ายให้แก่ลูกค้าที่อาศัยอยู่บริเวณใกล้เคียงที่ร้านค้า การจัดการสินค้าคงคลังสำหรับร้านค้าของชำมักมีการเติมสินค้าเพิ่มรายวัน โดยพิจารณาสินค้าที่ถูกจำหน่ายจนหมดหรือใกล้จะหมด โดยไม่มีการพิจารณาเป็นรอบการ

สั่งซื้อที่ชัดเจน ในการประกอบธุรกิจร้านค้าอาจเกิดปัญหาเกี่ยวกับการจัดการสินค้าคงคลังซึ่งมีความสำคัญต่อต้นทุนของร้านค้า เช่น ปริมาณสินค้าคงคลังมากเกินไป ปริมาณสินค้าไม่เพียงพอต่อความต้องการของลูกค้า สินค้าเสียหมดอายุจากการสั่งซื้อสินค้ามากเกินไป ทำให้เสียโอกาสในการขายเนื่องจากสินค้าไม่เพียงพอต่อความต้องการของลูกค้า เป็นต้น ดังนั้นการแก้ไขปัญหาดังกล่าวจะเป็นเรื่องของการควบคุมสินค้าคงคลัง โดยเจ้าของกิจการควรจะสั่งซื้อสินค้าครั้งละเท่าไรและควรจะสั่งซื้อสินค้าเมื่อใดโดยให้เสียค่าใช้จ่ายรวมเฉลี่ยต่ำสุด

ร้านค้าวิทยาลัย ตั้งอยู่ในจังหวัดสกลนคร ดำเนินการเปิดขายทุกวันตั้งแต่เวลา 08.00-02.00 น. (เวลาเปิด-ปิด ไม่แน่นอน) ประกอบเป็นกิจการร้านค้าสะดวกซื้อขายของปลีกต่างๆ เช่น เครื่องดื่มแอลกอฮอล์ บุหรี่ ขนม น้ำดื่ม น้ำอัดลม นม เครื่องปรุง ผงซักฟอก และของใช้เบ็ดเตล็ด เป็นต้น จากการเข้าไปศึกษาการจัดการสินค้าคงคลังของร้านค้าทำให้ทราบว่าในปัจจุบันร้านค้าไม่ได้กำหนดปริมาณการสั่งซื้อ โดยสั่งซื้อสินค้าเมื่อสินค้านั้นใกล้จะหมดหรือหมดแล้วเท่านั้น ไม่ได้คำนึงถึงค่าใช้จ่ายต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับสินค้าคงคลัง

ดังนั้นคณะผู้วิจัยจึงมีความสนใจที่จะหาปริมาณการสั่งซื้อ และเวลาการสั่งซื้อสินค้าที่เหมาะสมของสินค้า 30 รายการเป็นตัวอย่างการศึกษาและเป็นสินค้าที่ทางผู้ประกอบการสนใจที่จะควบคุมเป็นพิเศษ โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อต้องการให้มีค่าใช้จ่ายในการดำเนินงานเกี่ยวกับสินค้าคงคลังต่ำสุด

2. ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

สินค้าคงคลัง (Inventory) หมายถึง จำนวนสินค้าที่ถูกเก็บไว้ในสภาพที่ไม่มีผลผลิตหรือยังไม่ขายเพื่อเตรียมสำรองไว้สำหรับรอการขาย เพื่อให้เพียงพอกับความต้องการของลูกค้า หรือให้เพียงพอกับอุปสงค์ของสินค้าในช่วงหนึ่ง ซึ่งไม่รวมถึงสินค้าที่ได้ส่งไปแล้วแต่ยังไม่มาถึงร้าน ทั้งนี้เพราะสินค้าเหล่านี้ที่จะยังไม่พอตอบสนองอุปสงค์ที่เกิดขึ้นมาได้

2.1 ต้นทุนหรือค่าใช้จ่ายในระบบสินค้าคงคลัง การควบคุมสินค้าคงคลังนั้นจะต้องตัดสินใจขึ้นพื้นฐาน 2 อย่างคือ จะสั่งซื้อสินค้าปริมาณเท่าใด และจะสั่งซื้อสินค้าเมื่อใด

2.2 นโยบายและวัตถุประสงค์ของสินค้าคงคลัง คือ การกำหนดระดับสินค้าคงคลังให้เหมาะสม เพื่อให้ค่าใช้จ่ายในการดำเนินงานมีค่าต่ำสุด ซึ่งจะมี

2.2.1 นโยบายสินค้าคงคลังแบบจัดหาสินค้าทีละรายการ (Individual ordering policy)

2.2.2 นโยบายสินค้าคงคลังแบบจัดหาสินค้าพร้อมกัน (Joint ordering policy)

2.2.3 นโยบายสินค้าคงคลังแบบจัดหาสินค้าแบบผสม (Mixed ordering policy)

จากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้อง เช่น [1] ได้ทำการปรับปรุงและเพิ่มประสิทธิภาพการจัดการคลังสินค้า กรณีศึกษาโรงงานผลิตและจำหน่ายแท่งก้นน้ำ เพื่อศึกษาและปรับปรุงการจัดการคลังสินค้า [2] ได้ทำการปรับปรุงการบริหารสินค้าคงคลัง กรณีศึกษาร้านดอนซากคำว้สด ซึ่งในปีเดียวกันนี้ [3] ได้ทำการเพิ่มประสิทธิภาพการจัดการวัตถุดิบคงคลัง กรณีศึกษาโรงงานผลิตน้ำดื่ม โดยก่อนหน้านี้ [4] ได้ศึกษาการจัดการสินค้าคงคลังในโรงงานผลิต และกระจายสินค้าแข่ง เพื่อปรับปรุงการบริหารจัดการสินค้าคงคลัง และ [5] ได้แก้ไขปัญหาการจัดเก็บสต็อกสินค้า กรณีศึกษาซึ่งเป็นโรงงานผลิตเลนส์แว่นตา [6] ได้นำเสนอการกำหนดราคาแบบไดนามิกและการควบคุมสินค้าคงคลังสำหรับผลิตภัณฑ์หลายรายการในเครือข่ายการค้าปลีก [7] และ [8] ได้นำเสนอแบบจำลองสำหรับการเพิ่มประสิทธิภาพระบบสินค้าคงคลังหลายผลิตภัณฑ์ที่มีข้อจำกัดหลายประการ [9] ได้ทำการวิเคราะห์ต้นทุนสินค้าคงคลังสำหรับผลิตภัณฑ์หลายรายการ [10] ได้ศึกษาปัญหาการกำหนดราคาสต็อกและการควบคุมสินค้าคงคลังที่มีข้อจำกัด ซึ่งงานวิจัยที่กล่าวมาได้แก้ไขปัญหาเกี่ยวกับการจัดการสินค้าคงคลัง

3. วิธีการดำเนินการวิจัย

3.1 การศึกษาระบบสินค้าคงคลัง โดยศึกษาระบบสินค้าคงคลังในปัจจุบันของร้านค้า ซึ่งสินค้าคงคลังที่นำมาศึกษา มีจำนวน 30 รายการ โดยเลือกสินค้าที่มีปริมาณการขายสูงสุด

3.2 การเก็บรวบรวมข้อมูล โดยเก็บข้อมูลอุปสงค์หรือยอดขายสินค้าของแต่ละเดือน ย้อนหลังเฉลี่ย 4 เดือน และข้อมูลค่าใช้จ่ายต่างๆ ที่เกิดขึ้นในระบบสินค้าคงคลังของสินค้าที่นำมาศึกษาทั้ง 30 รายการ นำมาวิเคราะห์ค่าใช้จ่ายในการเตรียมสินค้า และค่าใช้จ่ายในการเก็บรักษาสินค้า ดังนี้

3.2.1 ราคาต้นทุนสินค้า (Item cost) เขียนแทนด้วย c บาทต่อหน่วยสินค้า

3.2.2 ค่าใช้จ่ายในการเตรียมการจัดหาสินค้า แทนด้วย K บาทต่อครั้ง ประกอบด้วยค่าจ้างพนักงาน

3.2.3 ค่าการเก็บรักษาสินค้า แทนด้วย h บาทต่อหน่วยสินค้าต่อวัน ประกอบด้วย ค่าไฟฟ้า ค่าเช่าพื้นที่เก็บสินค้า และค่าเสียโอกาสของเงินทุน

$$\text{ค่าไฟฟ้า} = \frac{\text{ค่าไฟฟ้าเฉลี่ย}}{\text{จำนวนวันในหนึ่งเดือน} \times \text{จำนวนสินค้าที่วางในตู้แช่}} \quad (1)$$

$$\text{ค่าเช่าพื้นที่เก็บสินค้า} = \frac{\text{ค่าเช่า}}{\text{จำนวนสินค้าตามหน่วยสินค้าที่ศึกษา}} \quad (2)$$

$$\text{ค่าเสียโอกาสของเงินทุน} = \frac{\text{อัตราดอกเบี้ยต่อปี} \times c_i}{365} \quad (3)$$

ทำการสรุปค่าใช้จ่ายในการเก็บรักษาสินค้าคงคลังของสินค้า และจำนวนสินค้าในคลังตลอดระยะเวลาที่ศึกษาของสินค้าแต่ละรายการ ประกอบไปด้วย ค่าไฟฟ้า ค่าเช่าสถานที่เก็บสินค้า ค่าเสียโอกาสของเงินทุน

3.3 การศึกษาตัวแบบสินค้าคงคลัง โดยศึกษาเพื่อเลือกตัวแบบสินค้าคงคลังให้มีความสอดคล้องกับข้อมูลของร้านค้า ดูวิธีการสั่งซื้อสินค้า เมื่อสินค้าในคลังสินค้าในคลังหมดจะต้องสั่งซื้อทันที โดยไม่ให้สินค้าขาดแคลน ได้รับสินค้าทั้งหมดทันทีที่สั่งซื้อ การสั่งซื้อสินค้าแต่ละรายการมาจากผู้ขายรายเดียวกันหรือไม่ ซึ่งจากการวิเคราะห์ข้อมูลพบว่าร้านค้า มีข้อสมมติที่สอดคล้องกับ ตัวแบบสินค้าคงคลังที่มีหลายรายการมาจากคลังเดียว

3.4 การวิเคราะห์ข้อมูล ซึ่งแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ

3.4.1 การวิเคราะห์ระบบสินค้าคงคลังปัจจุบัน ว่าในปัจจุบันร้านค้ามีการดำเนินการอย่างไร ระยะห่างระหว่างการสั่งซื้อแต่ละรอบเป็นแบบใด มีการสั่งซื้อสินค้าจากแหล่งใด ในแต่ละครั้งมีการสั่งซื้อสินค้าแบบใดสั่งซื้อที่ละรายการหรือสั่งซื้อพร้อมกันหลายรายการ ปริมาณเท่าใด และค่าใช้จ่ายในระบบสินค้าคงคลังโดยเฉลี่ยเป็นเท่าใด

สูตรการหาค่าใช้จ่ายโดยเฉลี่ยต่อหน่วยเวลาของสินค้าแต่ละรายการในระบบสินค้าคงคลังปัจจุบัน

$$AC_i^* = \frac{(K(n) + [(Q_i C_i) + (h_i R_i)])}{N} \quad (4)$$

3.4.2 การวิเคราะห์ระบบสินค้าคงคลังใหม่ จากการศึกษาาระบบสินค้าคงคลังของร้านหน้าหอเชรวิ ได้เลือกตัวแบบสินค้าคงคลังที่มีหลายรายการมาจากคลังเดียว ซึ่งมี 3 นโยบายคือ นโยบายการจัดหาสินค้าแบบจัดหาสินค้าทีละรายการ นโยบายการจัดหาสินค้าแบบจัดหาสินค้าพร้อมกัน และนโยบายการจัดหาสินค้าแบบจัดหาสินค้าแบบผสม ทำการศึกษาทั้ง 3 นโยบาย และเลือกเพียงนโยบายเดียวที่มีค่าใช้จ่ายเฉลี่ยต่อหน่วยเวลาต่ำที่สุด

4. ผลการวิจัยและอภิปรายผล

การวิเคราะห์สินค้าคงคลังประเภทหลายรายการมาจากคลังเดียว จำนวนสินค้า 30 รายการ ทำการเปรียบเทียบค่าใช้จ่ายในการดำเนินงานเฉลี่ยของแต่ละนโยบาย

4.1 นโยบายสินค้าคงคลังแบบจัดหาสินค้าทีละรายการ (Individual ordering policy)

การหาปริมาณการสั่งซื้อสินค้ารายการที่ i ที่เหมาะสม (Q_i^*) ตามนโยบายสินค้าคงคลังทีละรายการสามารถคำนวณได้ จากสมการ

$$Q_i^* = \sqrt{\frac{2K_i D_i}{h_i}} \quad ; i = 1, 2, \dots, m \quad (5)$$

การหาระยะเวลาระหว่างการสั่งซื้อสินค้ารายการที่ i ที่เหมาะสม 2 ครั้งติดกัน (T_i^*) สามารถคำนวณได้ จากสมการ

$$T_i^* = \sqrt{\frac{2K_i}{D_i h_i}} \quad ; i = 1, 2, \dots, m \quad (6)$$

การหาค่าใช้จ่ายในการดำเนินงานทั้งหมดโดยเฉลี่ยต่อหน่วยเวลาต่ำที่สุด (AC_i^*) สามารถคำนวณได้ จากสมการ

$$AC_i^* = \sum_{i=1}^m (c_i D_i + \sqrt{2K_i D_i h_i}) \quad ; i = 1, 2, \dots, m \quad (7)$$

การหาค่าใช้จ่ายในการดำเนินงานของสินค้าแต่ละรายการสามารถคำนวณได้ จากสมการ

$$AC_i^* = c_i D_i + \sqrt{2K_i D_i h_i} \quad ; i = 1, 2, \dots, m \quad (8)$$

ค่าใช้จ่ายรวมในการดำเนินงานโดยเฉลี่ยต่ำสุดของสินค้าทั้ง 30 รายการ สำหรับนโยบายนี้ สามารถคำนวณได้จากสมการ

$$AC_i^* = \sum_{i=1}^m AC_i^* = \sum_{i=1}^m (c_i D_i + \sqrt{2K_i D_i h_i}) \quad (9)$$

4.2 นโยบายสินค้าคงคลังแบบจัดหาสินค้าพร้อมกัน (Joint ordering policy)

การหาปริมาณการสั่งซื้อสินค้ารายการที่ i ที่เหมาะสม (Q_i^*) ตามนโยบายสินค้าคงคลังแบบจัดสินค้าพร้อมกันสามารถคำนวณได้ จากสมการ

$$Q_i^* = D_i T^* \quad ; i = 1, 2, \dots, m \quad (10)$$

การหาระยะเวลาระหว่างการสั่งซื้อสินค้าที่เหมาะสม 2 ครั้งติดกัน (T^*) สามารถคำนวณได้ จากสมการ

$$T^* = \sqrt{\frac{2K}{\sum_{i=1}^m D_i h_i}} \quad (11)$$

การหาค่าใช้จ่ายในการดำเนินงานทั้งหมดโดยเฉลี่ยต่อหน่วยเวลาต่ำที่สุด สามารถคำนวณได้ จากสมการ

$$AC_i^* = \sum_{i=1}^m c_i D_i + \sqrt{2K \sum_{i=1}^m D_i h_i} \quad ; i = 1, 2, \dots, m \quad (12)$$

4.3 นโยบายสินค้าคงคลังแบบจัดหาสินค้าคงคลังแบบผสม (Mixed ordering policy)

ขั้นตอนที่ 1 หา T_i ซึ่งเป็นเวลาสัมพันธ์ระหว่างการจัดหาแต่ละครั้งสำหรับสินค้ารายการที่ i สามารถคำนวณได้จากสมการ

$$T_i = \sqrt{\frac{2K}{h_i D_i}} \quad (13)$$

ขั้นตอนที่ 2 เรียงลำดับค่าระยะเวลาของสินค้าที่มีการจัดหาสินค้าที่สั้นที่สุด (T_i) จากนั้นไปหามากเพื่อคำนวณหาระยะเวลาของสินค้าโดยเฉลี่ยที่สั้นที่สุด (α_i) จาก $T_i = \alpha_i T_1$ และปรับให้ค่า (α_i) เป็นตัวเลขจำนวนเต็มทีละมากที่สุด

ขั้นตอนที่ 3 คำนวณหาระยะเวลาของสินค้าที่มีการจัดหาสินค้าที่สั้นที่สุดได้ จากสมการ

$$T_1 = \sqrt{\frac{2(K)}{\sum_{i=1}^m h_i D_i [\alpha_i]}} \quad \text{เมื่อ } K = 30 \quad \text{และ } i = 1, 2, \dots, 30 \quad (14)$$

ขั้นตอนที่ 4 คำนวณหาปริมาณสั่งซื้อสินค้าที่เหมาะสม และค่าใช้จ่ายในการดำเนินงานทั้งหมดโดยเฉลี่ยต่อหน่วยเวลาต่ำสุด

ค่าใช้จ่ายในการดำเนินงานทั้งหมดโดยเฉลี่ยต่อหน่วยเวลาต่ำสุด สามารถคำนวณได้ จากสมการ

$$AC_M^* = \sum_{i=1}^m c_i D_i + \sqrt{2 \left(k + \sum_{i=1}^m \frac{k_i}{[\alpha_i]} \right) \sum_{i=1}^m h_i D_i [\alpha_i]} \quad (15)$$

การหาปริมาณการสั่งซื้อสินค้ารายการที่ i ที่เหมาะสม (Q_i^*) สามารถคำนวณได้ ดังสมการ

$$Q_i^* = D_i T_1^* [\alpha_i] \quad (16)$$

ขั้นตอนที่ 5 จัดทำตารางการจัดหาสินค้าว่าในแต่ละครั้งนั้นจะประกอบด้วยสินค้ารายการใดบ้างโดยจะการจัดหาสินค้าแต่ละครั้งนั้นจะจัดหาทุก 1 วัน ซึ่งจะสามารถจัดหาสินค้าได้ และสามารถสรุปปริมาณการสั่งซื้อสินค้า ระยะเวลาการสั่งซื้อสินค้า และค่าใช้จ่ายในการดำเนินงานทั้งหมดโดยเฉลี่ยต่อหน่วยเวลาต่ำที่สุด ของแต่ละนโยบายได้เช่นกัน ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ค่าใช้จ่ายเฉลี่ยของสินค้าทั้ง 3 นโยบาย

รายการสินค้า	หน่วย สินค้า	นโยบายจัดหา สินค้าทีละรายการ		นโยบายจัดหา สินค้าพร้อมกัน		นโยบายจัดหา สินค้าแบบผสม	
		Q_i^*	T_i^*	Q_i^*	T_i^*	Q_i^*	T_i^*
1. ชาเขียวอิชิตันน้ำผึ้งมะนาว 420 มิลลิลิตร	ลัง	11	18	1	2	2	3
2. ชาเขียวอิชิตันข้าวญี่ปุ่น 420 มิลลิลิตร	ลัง	11	18	1	2	2	3
3. น้ำดื่มทิพย์ 1,500 มิลลิลิตร	แพ็ค	28	7	8	2	4	1
4. น้ำดื่มคริสตัล 1,500 มิลลิลิตร	แพ็ค	28	8	7	2	4	1
5. น้ำดื่มสิงค์ 1,500 มิลลิลิตร	แพ็ค	28	7	7	2	7	2
6. กาแฟเบอร์ดีโรบัสต้า 180 มิลลิลิตร	ลัง	7	30	1	2	1	5
7. กาแฟเบอร์ดีเอสเปรสโซ 180 มิลลิลิตร	ลัง	14	52	1	2	1	7
8. เครื่องดื่ม C-VITT รสเลมอน 140 มิลลิลิตร	ลัง	9	26	1	2	1	4
9. เครื่องดื่ม C-VITT รสส้ม 140 มิลลิลิตร	ลัง	9	26	1	2	2	5
10. โคโคแม็คน้ำมะพร้าว 100% 350 มิลลิลิตร	ลัง	12	18	1	2	2	3
11. เบียร์ช้างคลาสสิกใหม่ 620 มิลลิลิตร	ลัง	36	6	12	2	6	1
12. เบียร์ลิโอ 620 มิลลิลิตร	ลัง	36	6	12	2	6	1
13. สุราข้าวหอม 40 ดีกรี 625 มิลลิลิตร	ลัง	9	20	1	2	2	4
14. สุราขาว 40 ดีกรี 625 มิลลิลิตร	ลัง	9	21	1	2	2	4
15. โขดร้อนคามาเห็น 325 มิลลิลิตร	ถาด	30	7	9	2	5	1
16. สุราหงส์ทอง 1,000 มิลลิลิตร	ลัง	9	18	1	2	2	4
17. ไค้ก 1,250 มิลลิลิตร	แพ็ค	21	10	4	2	4	2
18. เอสโคล่า 1,000 มิลลิลิตร	แพ็ค	20	10	4	2	4	2
19. น้ำมันถั่วเหลืองตราอรุณ 1,000 มิลลิลิตร	ลัง	9	21	1	2	0	1
20. น้ำมันปาล์มตราโอลีน 500 มิลลิลิตร	แพ็ค	11	22	1	2	2	4
21. มาม่าหมูสับ 60 กรัม	ลัง	11	19	1	2	2	4
22. มาม่าต้มยำกุ้ง 55 กรัม	ลัง	11	20	1	2	2	4
23. มาม่าต้มยำกุ้งน้ำข้น 55 กรัม	ลัง	11	19	1	2	2	4
24. ไวไวบะหมี่หมูสับต้มยำ 60 กรัม	ลัง	12	18	1	2	3	4
25. ไวไววุ้นรสต้มยำมันกุ้ง 60 กรัม	ลัง	12	18	1	2	3	4
26. ไวไววุ้นรสต้มโคล้ง 60 กรัม	ลัง	12	18	1	2	3	4
27. ไวไววุ้นรสต้มยำกุ้ง 60 กรัม	ลัง	12	18	1	2	3	4
28. ชาร์ดินในซอสเหลืองสามแม่ครัว 155 กรัม	แพ็ค	16	15	2	2	3	3
29. แมคเคอเรลในซอสโรซ่า 155 กรัม	แพ็ค	16	15	2	2	3	3
30. ผงชูรสตราถ้วยแดง 250 กรัม	แพ็ค	7	30	1	2	1	6
ค่าใช้จ่ายในการดำเนินงานโดยเฉลี่ย (บาทต่อวัน)		15,321.18		15,343.54		15,429.39	

จากตารางที่ 1 เป็นการแสดงค่าใช้จ่ายเฉลี่ยของสินค้าทั้ง 3 นโยบาย อภิปรายผลได้ว่านโยบายที่เหมาะสมที่สุด คือ นโยบายสินค้าคงคลังแบบจัดหาสินค้าทีละรายการ โดยมีปริมาณการสั่งซื้อสินค้าในแต่ละครั้ง และระยะเวลาระหว่างการสั่งซื้อสินค้าของสินค้าทั้ง 30 รายการ เป็นดังนี้ จำนวนสินค้า 2 รายการ มีรอบสั่งซื้อทุก 6 วัน จำนวนสินค้า 3 รายการ มีรอบสั่งซื้อทุก 7 วัน จำนวนสินค้า 1 รายการ มีรอบสั่งซื้อทุก 8 วัน จำนวนสินค้า 2 รายการ มีรอบสั่งซื้อทุก 10 วัน จำนวนสินค้า 2 รายการ มีรอบสั่งซื้อทุก 15 วัน จำนวนสินค้า 8 รายการ มีรอบการสั่งซื้อทุก 18 วัน จำนวนสินค้า 2 รายการ มีรอบสั่งซื้อทุก 19 วัน จำนวนสินค้า 2 รายการ มีรอบสั่งซื้อทุก 20 วัน จำนวนสินค้า 2 รายการมีรอบสั่งซื้อทุก 21 วัน จำนวนสินค้า 1 รายการ มีรอบสั่งซื้อทุก 22 วัน จำนวนสินค้า 2 รายการ มีรอบสั่งซื้อทุก 26 วัน จำนวนสินค้า 2 รายการ มีรอบสั่งซื้อทุก 30 วัน จำนวนสินค้า 1 รายการ มีรอบสั่งซื้อทุก 52 วัน ซึ่งจะทำให้มีค่าใช้จ่ายในการดำเนินงานโดยเฉลี่ยต่ำสุด เท่ากับ 15,321.18 บาทต่อวัน ดังนั้นร้านค้าควรเลือกนโยบายที่ 1 นโยบายสินค้าคงคลังแบบจัดหาสินค้าทีละรายการ เพราะมีค่าใช้จ่ายในการดำเนินงานโดยเฉลี่ยต่อหน่วยเวลาต่ำที่สุด เท่ากับ 15,321.18 บาทต่อวัน

5. สรุปผลและข้อเสนอแนะ

ผลการวิจัยระบบสินค้าคงคลังของร้านค้ารัฐธัญฯ ซึ่งได้เลือกสินค้าที่ต้องดูแลเป็นพิเศษมาศึกษาจำนวน 30 รายการ ด้วยตัวแบบสินค้าคงคลังโดยพิจารณาจากสินค้าที่สั่งซื้อมาจำหน่ายมาจากบ้านเดียวกัน และภายใต้ข้อสมมติของตัวแบบสินค้าคงคลัง กล่าวคือ ทราบค่าอุปสงค์หรือความต้องการสินค้ามีค่าคงที่ จำนวนสินค้าที่สั่งซื้อในแต่ละครั้งเท่ากัน เมื่อสินค้าในคลังใกล้หมดจะต้องสั่งซื้อทันที โดยไม่ให้สินค้าขาดแคลน ได้รับสินค้าทั้งหมดทันทีโดยไม่มีเวลารอคอยสินค้า ซึ่งในทางปฏิบัติแล้วอาจจะเป็นไปได้ยาก และจากการคำนวณนั้นตัวเลขที่คำนวณได้ไม่เป็นจำนวนเต็ม แต่การสั่งซื้อจริงนั้นจะต้องสั่งสินค้าเป็นจำนวนเต็ม ซึ่งอาจทำให้ค่าใช้จ่ายในการดำเนินงานสูงกว่าที่คำนวณ แต่สามารถนำผลจากการวิเคราะห์ไปเป็นข้อมูลประกอบการตัดสินใจเบื้องต้นได้และตามทฤษฎีระบบสินค้าคงคลังที่มีหลายรายการ มาจากคลังเดียว โดยมี 3 นโยบาย คือ นโยบายสินค้าคงคลังแบบจัดหาสินค้าทีละรายการ นโยบายสินค้าคงคลังแบบจัดหาสินค้าพร้อมกัน และนโยบายสินค้าคงคลังแบบจัดหาสินค้าแบบผสม โดยตารางที่ 2 จะเป็นการสรุปค่าใช้จ่ายในการดำเนินงานของสินค้าทั้ง 3 นโยบาย

ตารางที่ 2 ค่าใช้จ่ายในการดำเนินงานของสินค้า

กิจกรรม	ระบบสินค้าคงคลัง (บาทต่อวัน)		ลดลง	ลดลงร้อยละ
	ปัจจุบัน	ใหม่		
นโยบายการจัดหาสินค้าแบบจัดหาสินค้าทีละรายการ	16,521.01	15,321.18	1,199.83	7.26
นโยบายการจัดหาสินค้าแบบจัดหาสินค้าพร้อมกัน	16,521.01	15,343.54	1,177.47	7.13
นโยบายการจัดหาสินค้าแบบจัดหาสินค้าแบบผสม	16,521.01	15,429.39	1,091.62	6.61

ค่าใช้จ่ายในการดำเนินงานระบบสินค้าคงคลังปัจจุบันโดยเฉลี่ย เท่ากับ 16,521.01 บาทต่อวัน ซึ่งสูงกว่าระบบสินค้าคงคลังที่มีหลายรายการ มาจากคลังเดียว โดยมีค่าใช้จ่ายในการดำเนินงานโดยเฉลี่ย เท่ากับ 15,321.18 บาทต่อวัน พบว่าน้อยกว่าระบบสินค้าคงคลังปัจจุบันของร้านค้า และช่วยลดค่าใช้จ่ายลงได้ 1,199.83 บาทต่อวัน คิดเป็นร้อยละ 7.26 ซึ่งนโยบายที่เหมาะสมที่สุด คือ นโยบายสินค้าคงคลังแบบจัดหาสินค้าทีละรายการ โดยมีปริมาณการสั่งซื้อสินค้าในแต่ละครั้งระยะเวลาระหว่างการสั่งซื้อสินค้าสองครั้งติดต่อกัน และค่าใช้จ่ายในการดำเนินงานโดยเฉลี่ยต่ำที่สุด

4. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้สำเร็จลงไปด้วยความอนุเคราะห์จากร้านค้าวิทยุญา จังหวัดสกลนคร ที่ได้ให้ข้อมูลในการศึกษาครั้งนี้

5. เอกสารอ้างอิง

- [1] T. Thongkorn and L. Tullayaluck, "Improved Efficiency for Inventory Management: A Case Study of Water Tank Production Company." B.Eng .Thesis, King Mongkut's University of Technology North Bangkok, Bangkok, Thailand, 2019.
- [2] M. Siangwong, S. Phetlai, N. Phookpanich and D. Thavorn, "Inventory management improvement: A case study Don-Zak construction materials shop," *Interdisciplinary Studies Journal, Faculty of Social Sciences and Humanities, Mahidol University*, Vol. 22(1), 2018, pp.50 – 82.
- [3] S. Niemsakul, "Improved efficiency for inventory management: a case study of drinking water production company," *Interdisciplinary Sripatum Chonburi Journal*, Vol. 4(2), 2018, pp. 1–14.
- [4] N. Sakulpradit, "Inventory management for producing and distributing factory of frozen products," M.Eng .thesis, Thammasat University Bangkok, Thailand, 2018.
- [5] T. Suwannahong, "Inventory management to reduce emergency shipments: a case study of lens manufacturer," M.Eng .thesis, Thammasat University, Bangkok, Thailand, 2017.
- [6] J.H. Rios and J.R. Vera, "Dynamic pricing and inventory control for multiple products in a retail chain," *Computers & Industrial Engineering*, Vol. 177, 2023, 109065.
- [7] R. Kleber, S. Minner and G. Kiesmüller, "A continuous time inventory model for a product recovery system with multiple options," *International Journal of Production Economics*, Vol.79(2), 2002, pp. 121-141.
- [8] C. Haksever and J. Moussourakis, "A model for optimizing multi-product inventory systems with multiple constraints," *International Journal of Production Economics*, Vol. 97(1), 2005, pp. 18-30.
- [9] Y-J Hsieh, "Demand switching criteria for multiple products: An inventory cost analysis," *Omega*, Vol. 39(2), 2011, pp. 130-137.
- [10] H. Shavandi, H. Mahlooji and N.E. Nosratian, "A constrained multi-product pricing and inventory control problem," *Applied Soft Computing*, Vol. 12(8), 2012, pp. 2454-2461.

การบันทึกข้อมูลการสอบเทียบเครื่องมือวัด ด้วยโปรแกรมไมโครซอฟเอกเซล วีบีเอ และระบบบาร์โค้ด Using Excel VBA Program and Barcode System for Recording of Calibration Data

ชญาณิศ เฉลิมสุข¹ เถลิง พลเจริญ^{2*}

^{1,2}สาขาวิชาเทคโนโลยีการจัดการอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธนบุรี

248 เพชรเกษม 110 เขตหนองแขม แขวงหนองค้างพลู กรุงเทพฯ 10160

Chayanis Chalermasuk¹ Thaloeng Poljaroen^{2*}

^{1,2}Industrial Management Technology, Faculty of Engineering, Thonburi University

248 Soi Petchkasem 110, Nong Khang Phlu, Nong Khaem, Bangkok 10160

*Corresponding author Email: ponjaroen@yahoo.com

(Received: 11 September 2023 / Accepted: 15 December 2023 / Published: 26 December 2023)

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้จัดทำขึ้นเพื่อออกแบบและปรับปรุงระบบการบันทึกข้อมูล การสอบเทียบเครื่องมือวัด มีจุดมุ่งหมายเพื่อปรับปรุงระบบการบันทึกข้อมูลการสอบเทียบเครื่องมือวัดด้วยโปรแกรม Microsoft Excel VBA และระบบบาร์โค้ด ซึ่งเป็นระบบที่ช่วยลดขั้นตอน ระยะเวลา และเพิ่มความแม่นยำ ในการบันทึกข้อมูล จากปัญหาที่พบก่อนทำการปรับปรุงระบบ พบว่าการบันทึกข้อมูลมีหลายขั้นตอน มีข้อมูลจำนวนมาก และไม่ถูกต้อง จึงทำให้เกิดการปรับปรุงขึ้น การออกแบบและปรับปรุงระบบการบันทึกข้อมูล คณะผู้จัดทำได้นำแผนผังก้างปลา (Fishbone Diagram) มาใช้ในการวิเคราะห์ปัญหาและเพื่อหาแนวทางในการแก้ปัญหา และปรับปรุงกระบวนการด้วยหลักการลดความสูญเปล่า ECRS รวมทั้งนำเอาโปรแกรม Microsoft Excel VBA มาประยุกต์ใช้กับเครื่องสแกนบาร์โค้ด จากผลการทดสอบการออกแบบระบบการบันทึกข้อมูล การสอบเทียบเครื่องมือวัด โดยนำ Microsoft Excel VBA มาประยุกต์ใช้เข้ากับเครื่องสแกนบาร์โค้ด ทำให้สามารถใช้งานได้จริง โดยกระบวนการสอบเทียบเครื่องมือวัด ลดลงจาก 8 ขั้นตอน เหลือ 6 ขั้นตอน เวลาจากเดิม 59 นาที ลดเหลือ 31 นาที หรือคิดเป็น 52.54 % ของเวลา ก่อนปรับปรุง และในกระบวนการทวนสอบ 8 ขั้นตอน เวลาจากเดิม 95 นาที ลดเหลือ 39 นาที หรือคิดเป็น 41.05 % ถือว่าการทดสอบการทำงานนั้น มีประสิทธิภาพ

คำสำคัญ : การสอบเทียบ, การทวนสอบ, ไมโครซอฟท์ เอกซ์เซล วีบีเอ

Abstract

This research was conducted to design and improve the data recording system. Calibration of measuring instruments the aim is to improve the system for recording data of Calibration with Microsoft Excel VBA and barcode system. This is a system that reduces steps, time and increases data to accuracy. From problems encountered before improving the system, it was found that recording data had several steps with a lot of incorrect information causing the needs for improvements. Designing and developing a system for recording data with barcodes, the organizers have applied the theory of Fishbone Diagram principle to analyze the problem to find a solution, Improve the process by reducing waste (ECRS) Including bringing the Microsoft Excel VBA program and barcode system for recording of calibration data, the process

of calibration of measuring instruments was reduced from 8 steps to 6 steps, the time using from 59 minutes to 31 minutes or 52.54% of the time reduction. The verification process of the procedure still had 8 steps, but the time was reduced from 95 minutes to 39 minutes, or 41.05 % of the time reduction. Therefore, it is considered that the test run is effective.

Keywords: Calibration, Re- Calibration, Microsoft Excel VBA

1. ที่มาและความสำคัญ

ปัจจุบันการนำเทคโนโลยีคอมพิวเตอร์และบาร์โค้ดมาประยุกต์ใช้งานในธุรกิจ [1] มีใช้กันอย่างแพร่หลาย ไม่ว่าจะเป็นธุรกิจค้าปลีกขนาดเล็ก ขนาดกลางและขนาดใหญ่หรืออุตสาหกรรมต่าง ๆ นิยมใช้ Barcode Scanner เพื่อให้การทำงานมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น นอกจากการทำงานที่มีประสิทธิภาพแล้ว ระบบบาร์โค้ดยังช่วยให้ธุรกิจประหยัดเวลา ต้นทุนและแรงงาน สามารถช่วยเพิ่มผลผลิต คุณภาพของงาน สำหรับการทำงานที่ใช้กระบวนการแบบทำด้วยมือ การใช้ปากกา ดินสอจดจะพบว่ามีความเสี่ยงที่อาจเกิดความผิดพลาดของการบันทึกข้อมูลสูงกว่าการใช้บาร์โค้ดเพราะมีความแม่นยำสูง ทุกสิ้นปีหรือหมดไตรมาส ที่ต้องมีการสรุปข้อมูลโดยรวมการใช้ ระบบแมนนวล พนักงานจะต้องเสียเวลาในการจัดการข้อมูลเป็นจำนวนมากเพื่อทำสรุป รวมเวลาที่ต้องเสียไปสำหรับหาข้อผิดพลาดต่าง ๆ ที่อาจจะเจอได้ตลอด ความผิดพลาดในส่วนจำนวนของผลิตภัณฑ์ที่หายไป เกินไป ขาดไป เมื่อใช้บาร์โค้ดจะช่วยตรวจสอบข้อผิดพลาด

แผนกประกันคุณภาพ ในส่วนของ QA Lab รับผิดชอบการสอบเทียบเครื่องมือวัด (Calibration) ที่ใช้ในองค์กรทั้งหมด เป็นกระบวนการหนึ่งในอุตสาหกรรมที่ใช้สร้างความมั่นใจว่าเครื่องมือวัดที่ใช้งานอยู่นั้น ยังคงมีคุณภาพและมาตรฐานถูกต้องเหมาะสมแก่การนำไปใช้งานในกระบวนการผลิต เมื่อผ่านการสอบเทียบจะกำหนดหมายเลขเพื่อใช้ในการควบคุม และบันทึกข้อมูลใน Microsoft Excel และออกรีพอร์ทในขั้นตอนสุดท้าย จากการปฏิบัติงานทั้งหมด ทางคณะผู้จัดทำได้สังเกตเห็นถึงปัญหาของการบันทึกข้อมูลมีความล่าช้า เกิดการผิดพลาดค่อนข้างสูง การสอบกลับเป็นไปได้ยาก เนื่องจากการทำงานรูปแบบเดิมในส่วนของ QA Lab พนักงานใช้กระบวนการแบบทำด้วยมือ ใช้ปากกา ดินสอจด บันทึกข้อมูลก่อนนำมาบันทึกลงคอมพิวเตอร์การทำงานใช้เวลานานเพราะมีหลายขั้นตอน ประกอบกับพนักงานที่รับผิดชอบมีการเปลี่ยนแปลงพนักงานอยู่บ่อยครั้ง เป็นสาเหตุให้การบันทึกข้อมูลเกิดการผิดพลาดค่อนข้างสูง [2]

จากปัญหาดังกล่าวข้างต้น คณะผู้จัดทำจึงมีความสนใจที่จะแก้ไขปัญหา โดยจะสร้างโปรแกรมสำหรับบันทึกข้อมูลเพื่อลดเวลาการทำงาน [3] และลดความผิดพลาดจากการบันทึกข้อมูลด้วยมือ โดยใช้โปรแกรม Excel VBA มาประยุกต์เข้ากับเครื่องสแกนบาร์โค้ด เพื่อช่วยให้การบันทึกข้อมูลง่ายขึ้น และมีการแจ้งเตือน เมื่อบันทึกข้อมูลที่สำคัญไม่ครบถ้วน ปรับปรุงการลงทะเบียนจากคีย์หมายเลขเอง ให้เป็นระบบอัตโนมัติ และมีการจำกัดสิทธิ์ผู้ใช้งานด้วย User/Password รวมถึงการสร้างรายงานด้วยปุ่มเดียว โดยมีวัตถุประสงค์ดังนี้

1) เพื่อศึกษาและปรับปรุงระบบการบันทึกข้อมูล การสอบเทียบเครื่องมือวัด รวมถึงเก็บรักษาข้อมูล โดยใช้โปรแกรม Microsoft Excel VBA

2) เพื่อลดขั้นตอนและเวลาการทำงานในการบันทึกข้อมูล

มีขอบเขตของงานวิจัยดังนี้

1) ควบคุมเครื่องมือวัด ตั้งแต่กระบวนการรับจนถึงการติดตามตลอดการใช้งานในบริษัท

2) การใช้โปรแกรมบันทึกข้อมูลการสอบเทียบ จะใช้ภายในแผนกประกันคุณภาพ และบุคคลที่สามารถปรับปรุงข้อมูลได้จะต้องมีหน้าที่รับผิดชอบการสอบเทียบเครื่องมือวัด เท่านั้น

3) การใช้โปรแกรมเพื่อการเช็คข้อมูลการสอบเทียบเครื่องมือวัด จะใช้ภายในบริษัทเท่านั้น

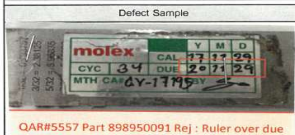
3. ขั้นตอนการวิเคราะห์

3.1 การวิเคราะห์ขั้นตอนและระยะเวลาการสอบเทียบเครื่องมือ [4]

จากการศึกษาขั้นตอนในการทำงานตั้งแต่รับเครื่องมือ จนถึงการออกรายงาน พบว่าพนักงานมีการบันทึกข้อมูล โดยข้อมูลที่พนักงานใช้ในการออกรายงาน เป็นการนำข้อมูลเดิมในทุกรายงาน และในการทำงาน มีขั้นตอนการทำงานหลายขั้นตอน และจากการตรวจสอบในฐานข้อมูล พบว่ามีความผิดพลาด เช่น ลงวันหมดอายุเครื่องมือผิด ทำให้เครื่องมือที่หมดอายุถูกใช้งานในสายการผลิต อาจส่งผลให้ชิ้นงานที่ผลิตภายใต้เครื่องมือที่หมดอายุ ไม่ตรงกับความต้องการของลูกค้า การลงข้อมูลไม่เป็นมาตรฐานเดียวกัน เช่น การลงวันที่ ที่ไม่เป็นมาตรฐานเดียวกัน ทำให้การค้นหาเครื่องมือหมดอายุเพื่อเรียกกลับมาสอบเทียบตกหล่น จึงทำให้การค้นหาข้อมูลทำได้ยาก รวมถึงการสร้างรายงานหลายฉบับโดยใช้ข้อมูลเดิม ซึ่งทำให้เกิดความสับสนเปล่าในการปฏิบัติงาน

User Location	Calibration Frequency	Calibration date	Calibration due	Calibration status	
QA-Lab	1Y	2021/Mar/26	2022/Mar/26	PASSED	
QA-Lab	1Y	2021/Jun/10	2022/Jun/10	PASSED	
QA-Lab	1Y	2021/May/07	2022/May/07	PASSED	
QA-Lab	1Y	2021/Mar/26	2022/Mar/26	PASSED	
Engineering	1Y	2020/Aug/21	#VALUE!	PASSED	มีความผิดพลาดของการบันทึกข้อมูล ทำให้เครื่องมือไม่ถูกเรียกกลับมาทวนสอบ
Engineering	1Y	2021/Aug/27	2022/Aug/27	PASSED	
QA-Lab	1Y	2021/May/07	2022/May/07	PASSED	
Maint	1Y	2021/Jul/15	2022/Jul/15	PASSED	
Sub con	1Y	2021/May/14	2022/May/14	PASSED	
NPI	1Y	2021/Mar/12	2022/Mar/12	PASSED	
Engineering	1Y	2021/Jun/04	2022/Jun/04	PASSED	

รูปที่ 1 ตัวอย่างข้อมูลในฐานข้อมูลที่ผิดพลาด

Quality Alert Report (QAR)		No. 5557
Issued to Section (ออกให้แผนก):	QA - Production	Date (วันที่ออกเอกสาร): 2021/12/08
Originator (ผู้รายงาน):	QA-Lab	Time (เวลาออกเอกสาร): 12:00
Part No (หมายเลขชิ้นงาน):	343450001	MFG Date (วันที่ผลิต): 2021/12/04
PO# (คำสั่งซื้อ):	343451255	M/C No. (หมายเลขเครื่อง): 1012 - 60 1715
PO Qty (จำนวนในคำสั่งซื้อ):	2500 Pcs	Operator (รหัสพนักงาน): 40215
Reject Qty (Defect/Sampling):	400/400	☐ Repeat by same operator (พนักงานเดิมทำให้เกิดปัญหาซ้ำ) ☐ Terminate training certificate (ยกเลิกใบอนุญาต) ☐ Do not terminate training certificate (ไม่ยกเลิกใบอนุญาต)
Actual production Qty (จำนวนผลิตจริง):	400/2000	
Inspector (ผู้ตรวจสอบ):	QA-Lab	
Problem Definition (รายละเอียดของปัญหา):		
Ruler over due		
Defect Sample		
		
QA Justification		
Require IQN:	☒ No ☐ Yes, QN#	N/A
Require stop ship	☒ No ☐ Yes, SS#	N/A
MQE/QA Supervisor:	QA-Lab	Date: 2021/12/08
Problem Verification		
QA Supervisor/Leader		Date: 2021/12/08
Process Engineer		Date: 2021/12/08
Prod. Supervisor		Date: 2021/12/10
Containment action and Correction		

รูปที่ 2 เอกสาร QAR ตรวจสอบพบเครื่องมือวัดไม่ได้รับการทวนสอบตามอายุ

ขั้นตอนในการทำงานก่อนการพัฒนามีทั้งหมด 10 ขั้นตอน

โดยมีขั้นตอนและระยะเวลาในการสอบเทียบดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 รับเครื่องมือและเอกสารจากผู้ร้องขอ 1 นาที

ขั้นตอนที่ 2 พนักงาน QA Lab ลงรายละเอียดเครื่องมือและเซ็นรับเครื่องมือ 5 นาที

ขั้นตอนที่ 3 พนักงาน QA Lab ใช้เวลาตรวจสอบเครื่องมือวัด ตามข้อกำหนดรวม 15 นาที

ขั้นตอนที่ 4 พนักงาน QA Lab ทำการบันทึกหมายเลขระบุเครื่องมือวัดลงในแบบฟอร์มการบันทึกหมายเลข (Record Number) ใช้เวลา 3 นาที

ขั้นตอนที่ 5 เขียนหมายเลขเครื่องมือวันหมดอายุเรียกกลับมาทวนสอบและทำการนำสติกเกอร์ที่ระบุวันที่สอบเทียบและวันหมดอายุติดที่เครื่องมือวัด ใช้เวลาปฏิบัติงาน 3 นาที

ขั้นตอนที่ 6 สร้างผลการตรวจสอบที่แบบฟอร์มเอกสารข้อมูลการสอบเทียบ (Calibration Data Sheet) ในข้อมูล (File Excel) ที่ได้จากการจดผลบันทึกด้วยปากกาลงในกระดาษ ก่อนที่จะนำมาบันทึกในข้อมูลเอ็กเซล (File Excel) อีกครั้ง ใช้เวลาปฏิบัติงานทั้งสิ้น 15 นาที

ขั้นตอนที่ 7 พิมพ์ผลการสอบเทียบ (Calibration Report) และลงลายชื่อผู้สอบเทียบและผู้อนุมัติ ใช้เวลา 5 นาที

ขั้นตอนที่ 8 จัดเก็บข้อมูลที่สแกนมาเพื่อทำการบันทึกไว้ใน (File excel) และ PDF. File ไว้ที่เครื่องคอมพิวเตอร์ ใช้เวลาปฏิบัติงาน 5 นาที

ขั้นตอนที่ 9 ทำการปรับปรุงเครื่องมือวัดใหม่โดยการบันทึกไว้ในข้อมูลเอ็กเซล (File Excel) ใหม่ให้อยู่ในข้อมูลสรุปแผน (File Summarize Plan) ใช้เวลาปฏิบัติงาน 5 นาที

ขั้นตอนที่ 10 เก็บเอกสารสอบเทียบ (Calibration Data Sheet) เข้าแฟ้มใช้เวลาปฏิบัติงาน 2 นาที

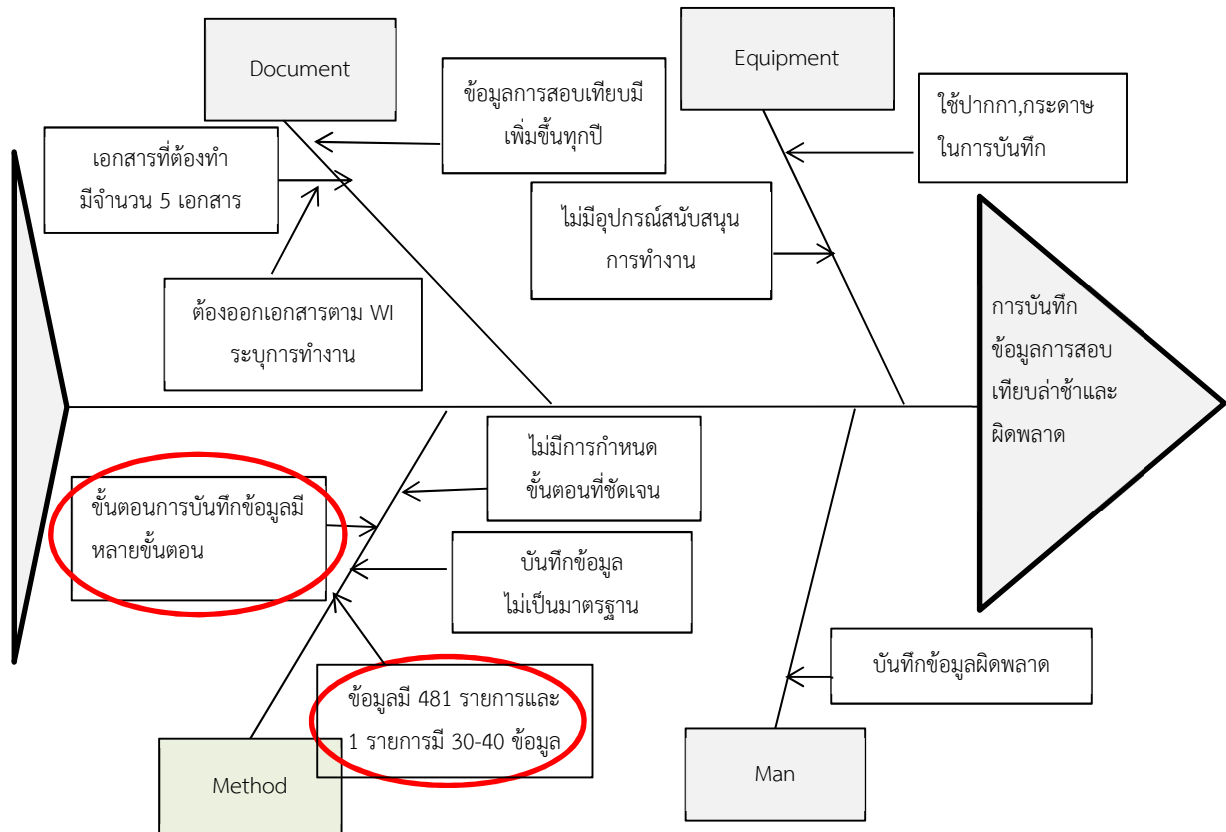
ตารางที่ 1 ข้อมูลเวลาโดยแยกเป็นกิจกรรม

เวลาที่ใช้ของกิจกรรม	New-Calibration			Re-Calibration		
	เวลาที่ใช้ (นาที)	จำนวน ขั้นตอน	สัดส่วน (%)	เวลาที่ใช้ (นาที)	จำนวน ขั้นตอน	สัดส่วน (%)
1. การปฏิบัติการ	42	8	71.19	78	8	82.11
2. การเคลื่อนย้าย	-	-	-	-	-	-
3. การตรวจสอบ	15	1	25.42	15	1	15.79
4. การรอคอย	-	-	-	-	-	-
5. การจัดเก็บ	2	1	3.39	2	1	2.10
รวม	59	10	100	95	10	100

ตารางที่ 1 แสดงข้อมูลของแต่ละกิจกรรมสรุปได้ว่า กิจกรรมการปฏิบัติการ ซึ่งเป็นขั้นตอนของการสร้างรีพอร์ตและบันทึกข้อมูลต่างๆ โดยการทำงานของ การสอบเทียบเครื่องมือวัด (New-Calibration) พบว่ามีขั้นตอนการปฏิบัติการทั้งหมด 8 ขั้นตอน ใช้เวลาในการทำงานทั้งหมด 42 นาที ซึ่งคิดเป็นสัดส่วนของการทำงานถึง 71.19 % และ ขั้นตอนการเรียกเครื่องมือวัดกลับมาทวนสอบ (Re-Calibration) พบว่ามีขั้นตอนการปฏิบัติการทั้งหมด 8 ขั้นตอน ใช้เวลาในการทำงานทั้งหมด 78 นาที ซึ่งคิดเป็นสัดส่วนของการทำงานถึง 82.11 % การสร้างรีพอร์ตนั้นมีหลายขั้นตอนเนื่องจากมีหลายรีพอร์ตหลายแบบฟอร์มการทำงาน จึงทำให้ขั้นตอนในการปฏิบัติการใช้เวลาในการทำงานมาก ทำให้เกิดความสูญเปล่าของเวลาการทำงานในกระบวนการ ดังนั้นจึงได้พิจารณาเลือกกิจกรรมการลงบันทึกข้อมูล ที่เป็นสาเหตุสำคัญของความสูญเปล่ามาดำเนินงานปรับปรุงเพื่อลดเวลาการทำงาน และลดข้อผิดพลาดในการบันทึกข้อมูลลง

3.2 แผนภูมิภาพเหตุและผล แผนผังก้างปลา (Fishbone Diagram) [5]

ได้วิเคราะห์ถึงสาเหตุของปัญหาที่เกิดขึ้น จากการลงบันทึกข้อมูลที่ล่าช้าและผิดพลาด เพื่อมาทำการประเมินความสามารถของการสร้างระบบ จนนำไปสู่การแก้ไขปัญหาที่เกิดขึ้น ของการบันทึกข้อมูลของพนักงาน ตามแผนผังก้างปลา



รูปที่ 3 แผนผังก้างปลาแสดงปัญหาที่เกิดขึ้น

จากแผนภูมิก้างปลาที่ได้วิเคราะห์สาเหตุของปัญหา จะเห็นได้ว่าสาเหตุของปัญหาการบันทึกข้อมูลการสอบเทียบล่าช้า และการเกิดข้อผิดพลาดนั้นมาจาก 2 สาเหตุหลัก คือ มีขั้นตอนในการทำงานหลายขั้นตอน และรายละเอียดของข้อมูลมีมาก ดังนี้

- 1) ปัญหาขั้นตอนในการบันทึกข้อมูลมีหลายขั้นตอน พบว่าไม่มีการกำหนดขั้นตอนที่ชัดเจน เพราะการสร้างรายงานหลายฉบับ ทำให้การทำงานล่าช้า พนักงานสับสน ทำให้ข้ามขั้นตอนการบันทึกไป เป็นที่มาของข้อมูลไม่ครบ และผิดพลาด
- 2) ปัญหาข้อมูลของการสอบเทียบมีจำนวนมาก ข้อมูล พนักงานต้องใช้ความเข้าใจ และความจำ 40-30 รายการมี 1 ในการทำงาน ทำให้บันทึกข้อมูลผิดพลาด และบันทึกข้อมูลไม่เป็นมาตรฐานเดียวกัน ทำให้การสอบกลับของข้อมูลใช้เวลานาน ส่งผลทำให้การควบคุมการสอบเทียบไม่ได้ถูกดำเนินการตามแผน เครื่องมือไม่ได้รับการทวนสอบตามรอบ “แสดงดังรูปที่ 3”

3.3 การลดการสูญเสียด้วยหลักการ ECRS [6]

คณะผู้จัดทำร่วมกันพิจารณาหาแนวทางแก้ไขกระบวนการทำงาน ดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 แนวการปรับปรุงกระบวนการทำงานโดยใช้ ECRS

สภาพปัญหา/ ความสูญเสีย	แนวคิดในการปรับปรุง	วิธีการปรับปรุง			
		E	C	R	S
การบันทึกข้อมูลมีหลายขั้นตอนทำให้ต้องใช้เวลาในการทำงานมาก	กำจัดการสูญเสียเวลาในขั้นตอนการลงบันทึกโดยใช้กระดาษ ปากกาออกให้บันทึกข้อมูลลงคอมพิวเตอร์ โดยมีแนวคิดคือ ให้ผู้ร้องขอกรอกข้อมูลในโปรแกรมแทนการเขียนแบบเดิม	✓			
	นำขั้นตอนการสร้างเอกสารที่มีทั้งหมด 5 เอกสาร 5 ขั้นตอนมารวมกันให้เหลือเพียง 1 ขั้นตอน ดังนี้ 1) สร้างโปรแกรมการบันทึกข้อมูลโดย Microsoft Excel VBA ให้ดึงข้อมูลจากผู้ร้องขอบันทึกในขั้นตอนแรกเนื่องจากข้อมูล ที่ใช้สร้างเอกสารทั้งหมดเป็นข้อมูลเดียวกัน และพนักงานจะบันทึกผลการตรวจสอบเพิ่ม 2) สร้างโปรแกรมการบันทึกข้อมูลโดย Microsoft Excel VBA ให้ทำงานร่วมกับบาร์โค้ดเพื่อเรียกข้อมูลในฐานข้อมูล และแสดงข้อมูลในหน้าของรายงานโดยไม่ต้องพิมพ์ ลดความผิดพลาด และรวดเร็ว		✓	✓	✓
	จัดขั้นตอนการทำงานใหม่ เพื่อลดการทำงานยุ่งยากซับซ้อนที่มากเกินไป			✓	
ข้อมูลที่บันทึกมีเพิ่มมากขึ้นเกิดความผิดพลาดขณะบันทึกข้อมูล	การปรับปรุงการทำงานให้ง่ายและสะดวกขึ้น โดยออกแบบโปรแกรมบันทึกข้อมูลโดย Microsoft Excel VBA ทำงานควบคู่กับเครื่องสแกนบาร์โค้ดช่วยในการบันทึกข้อมูลสะดวกและแม่นยำมากขึ้น ซึ่งสามารถลดความผิดพลาดของการบันทึกข้อมูล				✓

จากการวิเคราะห์ปัญหา 2 สาเหตุ จากตารางที่ 2 โดยใช้ทฤษฎีการลดความสูญเสีย (ECRS) ในการแก้ไขปัญหา คณะผู้จัดทำได้สรุปประเด็นปัญหาและหาแนวทางแก้ไขปัญหที่เกิดขึ้นดังนี้

1) ปัญหาของขั้นตอนในการบันทึกข้อมูล และเวลาที่ใช้ในการทำงานที่มีมาก จึงจำเป็นต้องลดขั้นตอนในกระบวนการทำงานที่ไม่จำเป็นออกไป โดยการนำโปรแกรมสำเร็จรูป Microsoft Excel VBA สร้างโปรแกรมบันทึกข้อมูล มาใช้ในการแก้ปัญหา รวมไปถึงการลดเวลาในกระบวนการขั้นตอนของการทำงานที่ไม่จำเป็นลง

2) ปัญหาของข้อมูลที่มีมาก จนทำให้พนักงานบันทึกข้อมูลผิดพลาด บันทึกข้อมูลที่ไม่เป็นมาตรฐานเดียวกัน ส่งผลให้การสืบกลับของข้อมูลผิดพลาด และใช้เวลานาน จึงจำเป็นต้องหาวิธีป้องกันการบันทึกข้อมูลผิดพลาดออกไป โดยการนำโปรแกรมสำเร็จรูป Microsoft Excel VBA สร้างโปรแกรมบันทึกข้อมูลทำงานควบคู่กับเครื่องสแกนบาร์โค้ด มาใช้ในการแก้ปัญหา

3.4 การออกแบบระบบการบันทึกการสอบเทียบเครื่องมือ ด้วยโปรแกรม Microsoft Excel VBA คณะผู้จัดทำได้ออกแบบโปรแกรมโดยใช้โปรแกรม Microsoft Excel VBA เพื่อช่วยในการบันทึกข้อมูลและใช้งานร่วมกับบาร์โค้ด เพื่อช่วยลดระยะเวลาในการทำงาน และเพิ่มความแม่นยำในการบันทึกข้อมูลให้กับพนักงาน ซึ่งต่างจากการทำงานรูปแบบเดิมที่พนักงานใช้กระบวนการแบบทำด้วยมือ โดยใช้วิธีจดบันทึกข้อมูลในแบบฟอร์มก่อน จากนั้นนำมาบันทึกลงคอมพิวเตอร์ ซึ่งมีขั้นตอนการทำงานที่ซ้ำซ้อน และมีความผิดพลาดสูง ดังนั้นคณะผู้จัดทำจึงได้ออกแบบโปรแกรม Microsoft Excel VBA

3.5 การลดขั้นตอนและเวลาการทำงานการบันทึกข้อมูลการสอบเทียบเครื่องมือวัด รวมถึงเก็บรักษาข้อมูลและการสอบกลับข้อมูล ผลของการออกแบบโปรแกรมโดยใช้โปรแกรม Microsoft Excel VBA เพื่อลดขั้นตอนการบันทึกข้อมูล การสร้างรายงานที่ใช้เวลานาน และใช้ทดแทนระบบเดิมที่เป็นการจดบันทึกข้อมูล โดยมีผลการดำเนินงาน ดังนี้

สิทธิในการใช้งานโปรแกรมบันทึกข้อมูลการสอบเทียบเครื่องมือวัดของพนักงาน QA Lab (User) จะมีรายละเอียดดังตารางที่ 3 โดย User จะสามารถเข้าถึงโปรแกรมได้ทุกคำสั่ง ยกเว้น Data Base

ตารางที่ 3 สิทธิในการเข้าใช้โปรแกรมบันทึกข้อมูลการสอบเทียบเครื่องมือวัดของพนักงาน QA Lab (User)

ลำดับ	สิทธิในการใช้งานโปรแกรม	ระดับ : พนักงาน
1	Request --> Release New Equipment	ใช้ได้
2	Created Report Calibration	ใช้ได้
3	Create Report for Monthly	ใช้ได้
4	Equipment Standard	ใช้ได้
5	History	ใช้ได้
6	Data Base	-

สิทธิในการใช้งานโปรแกรมบันทึกข้อมูลการสอบเทียบเครื่องมือวัด ของAdmin จะมีรายละเอียดดังตารางที่ 4 โดย Admin จะสามารถเข้าถึงโปรแกรมได้ทุกคำสั่ง

ตารางที่ 4 สิทธิในการเข้าใช้โปรแกรมของ Admin

ลำดับ	สิทธิในการใช้งานโปรแกรม	ระดับ : พนักงาน
1	Request --> Release New Equipment	ใช้ได้
2	Created Report Calibration	ใช้ได้
3	Create Report for Monthly	ใช้ได้
4	Equipment Standard	ใช้ได้
5	History	ใช้ได้
6	Data Base	ใช้ได้

ขั้นตอนที่มีการแก้ไขการบันทึกข้อมูลการสอบเทียบเครื่องมือวัดและขั้นตอนที่มีการแก้ไขการบันทึกข้อมูลทวนสอบเครื่องมือวัด (Re – Calibration) แสดงดังตารางที่ 5 และตารางที่ 6 ตามลำดับ

ตารางที่ 5 ขั้นตอนที่มีการแก้ไขการบันทึกข้อมูลการสอบเทียบเครื่องมือวัด

ลำดับ	สถานะ	ขั้นตอน	แบบเดิม		แบบใหม่	
			ระยะทาง (เมตร)	เวลา (นาที)	ระยะทาง (เมตร)	เวลา (นาที)
1	ปกติ	รับเครื่องมือและเอกสารจากผู้ร้องขอ	-	1	-	1
2	ตัดออก	พนักงาน QA Lab ลงรายละเอียดเครื่องมือ และลงลายชื่อผู้รับเครื่องมือ	-	5	-	-
3	ปกติ	พนักงาน QA Lab ตรวจสอบเครื่องมือ ตาม ข้อกำหนด	-	15	-	15
4	ตัดออก	จองหมายเลขเครื่องมือลงในแบบฟอร์ม Record Number	-	3	-	-
5	เปลี่ยนวิธี	พิมพ์หมายเลขเครื่องมือ และวันหมดอายุที่ สติ๊กเกอร์ ติดที่เครื่องมือ	-	3	-	1
6	เปลี่ยนวิธี	สร้างผลการตรวจสอบ ที่แบบฟอร์ม Calibration data sheet	-	15	-	3
7	ปกติ	พิมพ์ผล Calibration Report และลง ลายชื่อผู้สอบเทียบ และ ผู้อนุมัติ	-	5	-	5
8	ลดเวลา	จัดเก็บ Pdf. file ไว้ที่เครื่องคอมพิวเตอร์	-	5	-	3
9	เปลี่ยนวิธี	ปรับปรุงข้อมูลเครื่องมือใหม่ใน Summarize Plan	-	5	-	1
10	ปกติ	เก็บเอกสาร Calibration data sheet เข้า แฟ้ม	-	2	-	2
รวม			-	59	-	31

ตารางที่ 6 ขั้นตอนที่มีการแก้ไขการบันทึกข้อมูลทวนสอบเครื่องมือวัด (Re – Calibration)

ลำดับ	สถานะ	ขั้นตอน	แบบเดิม		แบบใหม่	
			ระยะทาง (เมตร)	เวลา (นาที)	ระยะทาง (เมตร)	เวลา (นาที)
1	เปลี่ยนวิธี	สร้างแบบฟอร์ม Re-Calibration ส่งอีเมล เรียกเครื่องมือทวนสอบ	-	15	-	3
2	เปลี่ยนวิธี	สร้าง File Master Plan โดย Copy ข้อมูล จาก Re-Calibration	-	15	-	3
3	ปกติ	พนักงาน QA Lab ตรวจสอบเครื่องมือ ตาม ข้อกำหนด	-	15	-	15
4	เปลี่ยนวิธี	พิมพ์หมายเลขเครื่องมือ และวันหมดอายุที่ สติ๊กเกอร์ติดที่เครื่องมือ	-	3	-	1
5	เปลี่ยนวิธี	สร้างผลการตรวจสอบ ที่แบบฟอร์ม Calibration data sheet	-	15	-	3
6	ปกติ	พิมพ์ผล Calibration Report และลงลายชื่อ ผู้สอบเทียบ และ ผู้อนุมัติ	-	5	-	5
7	ลดเวลา	จัดเก็บไฟล์ ทั้ง excel file และ Pdf. file ไว้ที่ เครื่องคอมพิวเตอร์	-	5	-	3
8	เปลี่ยนวิธี	ปรับปรุงข้อมูลเครื่องมือใน Summarize Plan	-	5	-	1
9	ปกติ	เก็บเอกสาร Calibration Data Sheet เข้า แฟ้ม	-	2	-	2
10	เปลี่ยนวิธี	ออกเอกสาร Scrap Lost เมื่อพบว่าเครื่องมือ เสียหายหรือสูญหาย	-	15	-	3
รวม			-	95	-	39

4. ผลการปรับปรุงกระบวนการ

ผลการปรับปรุงกระบวนการจากการสร้างโปรแกรมสำหรับบันทึกข้อมูลเพื่อลดเวลาการทำงานโดยใช้โปรแกรม Excel VBA มาประยุกต์เข้ากับเครื่องสแกนบาร์โค้ด แสดงผลตามตารางที่ 7 แสดงการปรับปรุงกระบวนการสอบเทียบ New - Calibration ซึ่งแสดงเวลาที่ใช้และจำนวนขั้นตอนในแต่ละกิจกรรม ก่อน – หลัง พบว่าจำนวนขั้นตอนลดลงจาก 8 ขั้นตอน เหลือ 6 ขั้นตอน และตารางที่ 8 แสดงข้อมูลเวลา ก่อน – หลัง การปรับปรุงกระบวนการทวนสอบ Re – Calibration โดยแยกเป็นกิจกรรมต่างๆ

ตารางที่ 7 ข้อมูลเวลา ก่อน – หลัง การปรับปรุงกระบวนการสอบเทียบ New - Calibration โดยแยกเป็นกิจกรรม

เวลาที่ใช้ของกิจกรรม	New - Calibration (เดิม)			New - Calibration (ใหม่)		
	เวลาที่ใช้ (นาท)	จำนวน ขั้นตอน	สัดส่วน (%)	เวลาที่ใช้ (นาท)	จำนวน ขั้นตอน	สัดส่วน (%)
1. การปฏิบัติการ	42	8	71.19	14	6	45.16
2. การเคลื่อนย้าย	-	-	-	-	-	-
3. การตรวจสอบ	15	1	25.42	15	1	48.39
4. การรอคอย	-	-	-	-	-	-
5. การจัดเก็บ	2	1	3.39	2	1	6.45
รวม	59	10	100	31	8	100

ตารางที่ 8 ข้อมูลเวลา ก่อน – หลัง การปรับปรุงกระบวนการทวนสอบ Re - Calibration โดยแยกเป็นกิจกรรม

เวลาที่ใช้ของกิจกรรม	Re - Calibration (เดิม)			Re - Calibration (ใหม่)		
	เวลาที่ใช้ (นาท)	จำนวน ขั้นตอน	สัดส่วน (%)	เวลาที่ใช้ (นาท)	จำนวน ขั้นตอน	สัดส่วน (%)
1. การปฏิบัติการ	78	8	82.11	22	8	56.41
2. การเคลื่อนย้าย	-	-	-	-	-	-
3. การตรวจสอบ	15	1	15.79	15	1	38.46
4. การรอคอย	-	-	-	-	-	-
5. การจัดเก็บ	2	1	2.11	2	1	5.13
รวม	95	10	100	39	10	100

5. สรุปผล

1) จากการศึกษาและปรับปรุงระบบการบันทึกข้อมูลการสอบเทียบเครื่องมือวัด รวมถึงเก็บรักษาข้อมูล โดยใช้โปรแกรม Microsoft Excel VBA และระบบบาร์โค้ด สามารถใช้งานได้อย่างมีประสิทธิภาพ ข้อมูลถูกต้องครบถ้วน และสามารถสืบกลับข้อมูลได้สะดวกยิ่งขึ้น

2) จากการออกแบบและพัฒนาการบันทึกข้อมูลการสอบเทียบเครื่องมือวัด โดยใช้โปรแกรม Microsoft Excel VBA และระบบบาร์โค้ด สรุปได้ว่า จากผลการทดสอบการออกแบบระบบการบันทึกข้อมูล การสอบเทียบเครื่องมือวัด โดยนำ Microsoft Excel VBA มาประยุกต์ใช้เข้ากับเครื่องสแกนบาร์โค้ด ทำให้สามารถใช้งานได้จริง โดยกระบวนการสอบเทียบเครื่องมือวัด ลดลงจาก 8 ขั้นตอน เหลือ 6 ขั้นตอน เวลาจากเดิม 59 นาที ลดเหลือ 31 นาที หรือคิดเป็น 52.54 % ของเวลา ก่อนปรับปรุง และในกระบวนการทวนสอบ 8 ขั้นตอน เวลาจากเดิม 95 นาที ลดเหลือ 39 นาที หรือคิดเป็น 41.05 % ถือว่าการทดสอบการทำงานนั้น มีประสิทธิภาพ โดยอ้างอิงจาก อกฤษฎา สุขมอยและคณะฯ [7] นำหลักการ ECRS ลดความสูญเสียเพื่อปรับปรุงขั้นตอนการทำงานในกระบวนการตรวจสอบข้อมูล เครื่องมือวัดให้สอดคล้องกับการนำระบบตรวจ เช็กข้อมูลเครื่องมือวัดเข้ามาปรับใช้ โดยผลจากการปรับปรุงพบว่าขั้นตอนการตรวจเช็ก ข้อมูลเครื่องมือวัดลดลงจาก 7 ขั้นตอน เหลือเพียง 3 ขั้นตอน เวลาที่ใช้ในการทำงานลดลงจาก 3,375.63 วินาที เหลือ 1,496.57 วินาที ลดลงจากเดิม 1,879.06 วินาที หรือร้อยละ 55.66

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Sumipol Agile Technology. (25 ตุลาคม 2565). ประโยชน์ของ เครื่องอ่านบาร์โค้ด (Barcode Reader) ในโรงงานอุตสาหกรรม [ออนไลน์]. สืบค้นจาก : <https://www.sumipol.com/knowledge/benefits-using-barcode-reader-industrial/>
- [2] ชาญศักดิ์ ตรงจิต, “การเพิ่มประสิทธิภาพกระบวนการผลิต กรณีศึกษาโรงงานผลิต อีพีโอเอ็มสำหรับบรรจุภัณฑ์, ” วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ..การจัดการงานวิศวกรรม, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยบูรพา., 2559.
- [3] โชติรส นพพลกรัง และ พรทิศา ถามะพันธ์ “การลดระยะเวลาและเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตน้ำดื่มบรรจุขวด : กรณีศึกษา โรงงานสหกรณ์การเกษตรยางชุมน้อย จำกัด อำเภอยางชุมน้อย จังหวัดศรีสะเกษ,” วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏศรีสะเกษ ปีที่ 2(2) , 2565, หน้า 32-42
- [4] พัชร ศรีสุภาพ, “การออกแบบวิธีการจัดลำดับงานของการสอบเทียบเครื่องมือวัด, ” วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ..การจัดการงานวิศวกรรม, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยบูรพา., 2559.
- [5] ธนิชญา มีชำนาญ, “การลดของเสียประเภทมีจุดดำในกระบวนการผลิตไม้แขวนพลาสติก กรณีศึกษา : บริษัทพลาสติก เวิลด์ จำกัด, ” วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต ..การจัดการสิ่งแวดล้อม, คณะบริหารการพัฒนาสิ่งแวดล้อม, สถาบันบัณฑิตพัฒนบริหารศาสตร์., 2563.
- [6] คลอเคลีย วนะวิชาการและคณะ, “การปรับปรุงประสิทธิภาพกระบวนการผลิตเพื่อลดความสูญเสียและเพิ่มคุณภาพผลิตภัณฑ์เครื่องปั้นดินเผา กรณีศึกษาชุมชนเครื่องปั้นดินเผาปากห้วยวังนอง จังหวัดอุบลราชธานี,” วารสารวิชาการ วิศวกรรมศาสตร์ ม.อบ.ปีที่ 9(2), 2559, หน้า 41–42.
- [7] อภิญา สุขมอยและคณะ, “การเพิ่มประสิทธิภาพในกระบวนการสอบเทียบข้อมูลเครื่องมือวัด ภายในบริษัท กรณีศึกษา บริษัท อัลโลแอนซ์ ลอนดรี จ (ประเทศไทย) จำกัด” วารสารพัฒนารัฐกิจและอุตสาหกรรม ปีที่ 3(2) , 2566, หน้า 17-28

การจำลองแบบในกระบวนการเชื่อมอาร์คทั้งสแตนภายใต้แก๊สปกคลุมด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ Welding Simulation of TIG Welding by Using Finite Element Technique

เจษฎา แก้ววิชิต¹ สัญญา คำจริง^{2*}

¹สาขาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ (ศูนย์สุพรรณบุรี)

450 ม. 6 ถนนสุพรรณบุรี-ชัยนาท ตำบลย่านยาว อำเภอสามชุก จังหวัดสุพรรณบุรี 72130

²สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องมือและแม่พิมพ์ คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ (ศูนย์นนทบุรี)

217 ถนนนนทบุรี ตำบลสวนใหญ่ อำเภอเมืองนนทบุรี จังหวัดนนทบุรี 11000

Jesada Kaewwichit¹ Sanya Kumjing^{2*}

¹Department 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

²Department of Tool and Die Engineering, Faculty of Engineering and Architecture,

Rajamangala University of Technology Suvarnabhumi (Nonthaburi),

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

*Corresponding author Email: sanya.k@rmutsb.ac.th

(Received: 11 October 2023 / Accepted: 13 December 2023 / Published: 26 December 2023)

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาเกี่ยวกับการจำลองสภาวะทางความร้อนในระหว่างการเชื่อมเหล็กเครื่องมืองานเย็น SKD 11 ซึ่งเป็นวัสดุที่นิยมใช้ในงานขึ้นชิ้นแม่พิมพ์โลหะด้วยกระบวนการเชื่อมแบบอาร์คทั้งสแตน โดยการกระจายตัวทางความร้อนและอัตราการเย็นตัวภายในชิ้นงานจะส่งผลกระทบต่อคุณสมบัติและอายุการใช้งานของแม่พิมพ์โลหะ โดยเทคนิคการจำลองแบบทางวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ การทดลองประกอบด้วย 2 ส่วน คือ การวิเคราะห์แบบจำลองงานเชื่อมด้วยโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ MSC. Marc Mentat 2008 จำลองแบบเป็น 3 มิติ ขนาด 50 x 80 x 6 มิลลิเมตร วิเคราะห์แบบช่วงเวลา เชื่อมไม่เติมลวด แหล่งความร้อนเคลื่อนที่เป็นแบบ Gaussian disc model สมบัติทางความร้อนของวัสดุเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิ ตัวแปรการเชื่อม ได้แก่ กระแสไฟฟ้าเชื่อม 3 ระดับ คือ 65, 100 และ 135 แอมแปร์ แรงดัน 10.5 โวลต์ ความเร็วเชื่อม 1, 3 และ 5 มิลลิเมตรต่อวินาที หลังจากนั้นนำผลของอัตราการเย็นตัวมาวิเคราะห์กับแผนภูมิการเย็นตัวอย่างต่อเนื่อง (CCT Diagram) เพื่อประมาณค่าความแข็งของวัสดุที่ตำแหน่งต่าง ๆ ในส่วนสุดท้ายจะทำการทดลองเชื่อมชิ้นงานจริง และนำไปวัดค่าความแข็งแบบวิกเกอร์ ณ บริเวณเนื้อเชื่อม (Weld metal) บริเวณผลกระทบทางความร้อน (HAZ) โลหะงาน (Base metal) จากผลการทดลองเมื่อทำการเปรียบเทียบ ค่าประมาณความแข็ง ณ บริเวณชิ้นงานเชื่อมต่าง ๆ จากแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ และค่าวัดจากชิ้นงานทดลองพบว่าค่าประมาณความแข็งจากระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์มีแนวโน้มสอดคล้องกับค่าวัดจากชิ้นงานทดลอง ซึ่งแนวทางวิจัยนี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการจำลองและวิเคราะห์ปัจจัยการเชื่อมเชื่อมชิ้นส่วนแม่พิมพ์โลหะที่มีผลกระทบต่อสมบัติการใช้งานต่อไป

คำสำคัญ: การเชื่อมแบบอาร์คทั้งสแตน ไฟไนต์เอลิเมนต์ เหล็กเครื่องมืองานเย็น SKD 11

Abstract

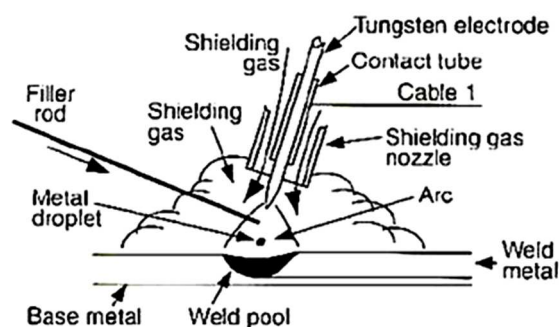
This research presents a simulation of the thermal state during TIG welding in cold work (SKD 11), which is widely used in the tool and die industry. After welding, thermal distribution and cooling rate affect material properties and tool life. Experimental sets, including finite element analysis (FEA) and experiments, and bead-on-plate welding were simulated by the FE program MSC. Marc Mentat 2008, 3D model, specimen size 50x80x6 mm, analysis is based on transient, Gaussian disc model is used for moving heat source, material properties depend on temperature, welding parameters are current 3 levels 65, 100 and 135 A, voltage 10.5 V, welding speed 1, 3 and 5 mm/s. And then, an estimated cooling rate from simulation led to an evaluation of Vicker hardness by the CCT diagram at the weld metal, base metal, and heat-affected zone (HAZ). As the results show, it can be concluded that the hardness values of the FEA simulation agree with the experiment results.

Keywords: TIG welding, Finite element analysis, Cold work SKD 11

1. ที่มาและความสำคัญ

งานเชื่อมเป็นกระบวนการที่มีประสิทธิภาพและถูกนำมาใช้ในวงการอุตสาหกรรมมากมาย โดยเฉพาะในงานซ่อมบำรุงชิ้นส่วนแม่พิมพ์ต่างๆ ซึ่งจะช่วยลดต้นทุนและเวลาในการเปลี่ยนอะไหล่เมื่อเกิดความเสียหายอย่างไรก็ตาม หากการเชื่อมมีการปฏิบัติหรือกำหนดตัวแปรที่ไม่เหมาะสมจะมีผลกระทบต่ออายุการใช้งานของชิ้นส่วนแม่พิมพ์โลหะ (Tool and die) ลดลงได้ ดังนั้นงานวิจัยนี้จะศึกษาเกี่ยวกับตัวแปรงานเชื่อมที่มีผลต่อความแข็งของ เหล็กเครื่องมืองานเย็น เกรด SKD 11 ซึ่งเป็นวัสดุที่ใช้ทำแม่พิมพ์โลหะนิยมใช้กันทั่วไป ภายหลังการเชื่อมแบบอาร์คทั้งสเทน (TIG Welding)

กระบวนการเชื่อมอาร์คด้วยทั้งสเทนภายใต้แก๊สปกคลุม (Gas Tungsten Arc Welding, GTAW) เป็นกรรมวิธีที่เหมาะสมกับงานเชื่อมคุณภาพสูง [1] เป็นการหลอมละลายและเชื่อมต่อวัสดุด้วยความร้อนจากการอาร์คระหว่างแท่งอิเล็กโทรด ซึ่งทำมาจากทั้งสเทน (Nonconsumable tungsten electrode) และชิ้นงาน โดยมีแก๊สปกคลุม (Shielding Gas) เพื่อป้องกันการทำปฏิกิริยากับอากาศภายนอกมาของบ่อหลอมเชื่อม (Weld pool) และส่งเสริมความเสถียรของอาร์ค (Arc stability) เช่น แก๊สอาร์คอน ฮีเลียม หรือแก๊สผสมระหว่างอาร์คอนและฮีเลียม เป็นต้น การเชื่อมต่อไปจะใช้วิธีหลอมละลายระหว่างโลหะงานเข้าด้วยกันหรือเติมด้วยลวดเชื่อม (Filler rod) ก็ได้ ดังแสดงในรูปที่ 1 [1], [2]



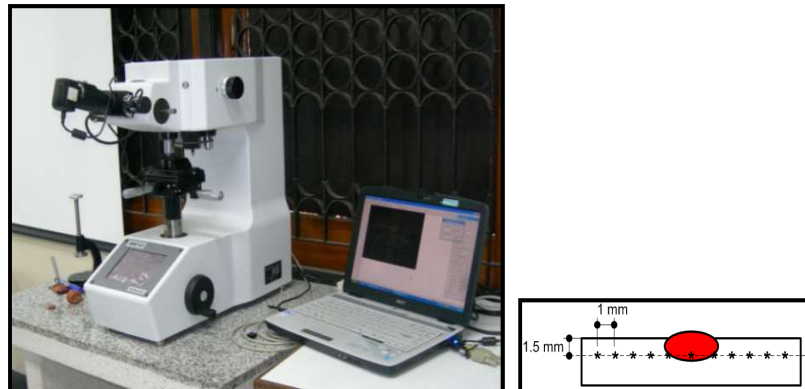
รูปที่ 1 กระบวนการเชื่อมอาร์คด้วยทั้งสเทนภายใต้แก๊สปกคลุม [2]

อย่างไรก็ตามถึงแม้รอยเชื่อมของชิ้นงานจากกระบวนการเชื่อม GTAW จะมีคุณภาพสูงแต่ยังคงมีข้อเสียหลายประการ เช่น อัตราการเติมเต็มโลหะเชื่อมต่ำ (Low deposition rate) ผลิตภาพต่ำ ระบบแก๊สปกคลุมที่ไม่เหมาะสมหรือกรณีเชื่อมชิ้นงานรูปร่างซับซ้อน ทำให้เกิดรอยบกพร่องในแนวเชื่อมได้ ซึ่งจะเป็นอันตรายต่อการใช้งาน เช่น รอยแตกร้าวเนื่องจาก

ไอโรเจน รูปทรงแปดเหลี่ยม เป็นต้น ดังนั้น งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อทำนายและเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็ง ณ บริเวณชิ้นงานเชื่อมในตำแหน่งต่าง ๆ สำหรับวัสดุเหล็กเครื่องมืองานเย็น เกรด SKD 11 ด้วยการจำลองแบบทางวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์โดยใช้กระบวนการเชื่อมอาร์คด้วยทังสเตน (TIG)

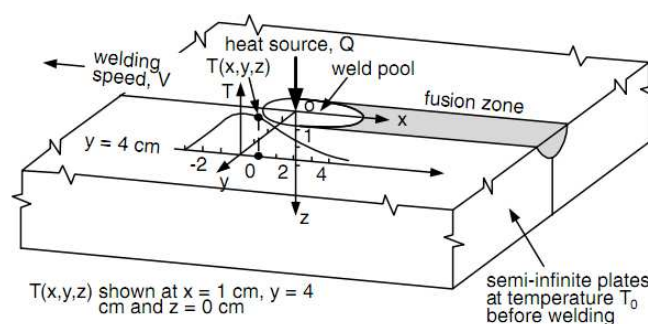
2. วัสดุและอุปกรณ์การทดลอง

การทดลองในงานวิจัยนี้ประกอบด้วย ชิ้นงานเป็นวัสดุเหล็กเครื่องมืองานเย็น เกรด SKD 11 ขนาดความกว้าง 50 มิลลิเมตร ความยาว 80 มิลลิเมตร หนา 6 มิลลิเมตร ทำการเชื่อมด้วยเครื่องเชื่อมแบบอาร์คทังสเตน (TIG -Welding) รุ่น KEMPPI MASTER TIG 2500 ขั้วเคลื่อนหัวเชื่อมอัตโนมัติตามแนวเชื่อม ลักษณะรอยเชื่อมแบบไม่เต็มลวด (Bead on plate) ตัวแปรการเชื่อม (Welding parameters) ที่สำคัญซึ่งคำนึงถึงการใช้งานและสมรรถนะของเครื่องเชื่อมที่ใช้ทดลอง ได้แก่ กระแสไฟฟ้าเชื่อมแบ่งเป็น 3 ระดับ คือ 65, 100 และ 135 แอมแปร์ แรงดัน 10.5 โวลต์ ความเร็วเชื่อม 1.2 มิลลิเมตรต่อวินาที ซึ่งในการทดลองนี้จะใช้จำนวน 3 ตัวอย่างชิ้นงานทดลอง และภายหลังการเชื่อมชิ้นงานจะถูกวัดค่าความแข็งตำแหน่งลึกจากผิวงาน 1.5 มิลลิเมตร ระยะห่างระหว่างจุดวัด 1 มิลลิเมตร ด้วยเครื่องวัดความแข็งแบบไมโครวิกเกอร์ Matsuzawa รุ่น MMT-X3 ดังแสดงในรูปที่ 3



รูปที่ 3 เครื่องวัดความแข็ง Matsuzawa รุ่น MMT-X3 และตำแหน่งการวัดค่าความแข็งในชิ้นงานเชื่อม

การวิเคราะห์การถ่ายเทของความร้อน (Heat flow) ในงานเชื่อม ณ ตำแหน่งต่างๆ จะทำให้สามารถประมาณการอัตราการเย็นตัว และปัจจัยงานเชื่อมที่เหมาะสมได้ ซึ่งการประมาณค่าเชิงวิเคราะห์ (Analytical method) ด้วยสมการ Rosenthal เป็นที่ยอมรับและนิยมใช้เนื่องจากให้ผลการประมาณค่า ณ ตำแหน่งต่าง ๆ ได้เหมาะสมกว่าสมการการถ่ายเททางความร้อนทั่วไป [2] โดยสมการนี้จะคำนึงถึงเฉพาะสภาวะการนำความร้อน (Thermal conductivity) ในชิ้นงานและคุณสมบัติทางความร้อนต่างๆ คงที่ ดังรูปที่ 2 และสมการที่ 1



รูปที่ 2 ระบบพิกัดของแบบจำลอง Rosenthal [2]

$$\text{สมการ} \quad \frac{2\pi(T - T_0)kR}{Q} = \exp\left(\frac{-V(R - x)}{2\alpha}\right) \quad (1)$$

เมื่อ T คือ อุณหภูมิ

T_0 คือ อุณหภูมิชิ้นงานก่อนเชื่อม

k คือ ค่าการนำความร้อน

Q คือ พลังงานความร้อนที่เข้าสู่ชิ้นงาน

ซึ่งมาจากผลคูณของกระแสไฟฟ้าเชื่อม แรงดัน และสัมประสิทธิ์สัดส่วนความร้อนที่สู่ชิ้นงาน (η) ซึ่งงานวิจัยนี้ได้ใช้ค่า 0.68 [3] เมื่อ

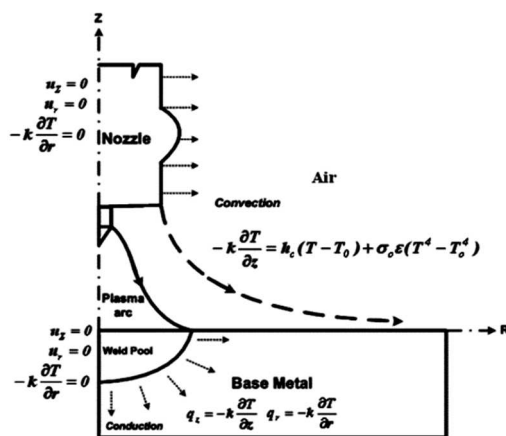
V คือ ความเร็วเชื่อม

α คือ สัมประสิทธิ์การแพร่ของความร้อน (Thermal diffusivity)

R คือ ระยะรัศมีจากจุดเชื่อม ซึ่งคำนวณได้จาก $\sqrt{x^2 + y^2 + z^2}$

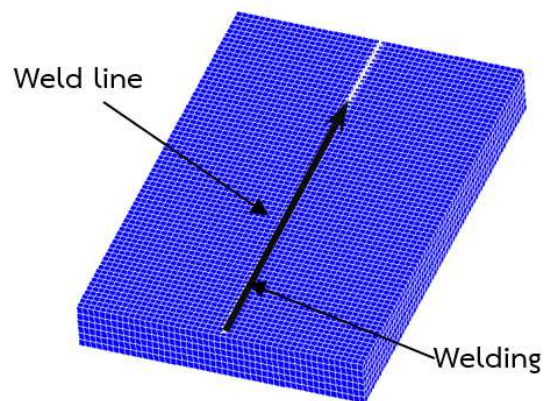
3. การจำลองแบบทางวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับการเชื่อมแบบอาร์คทั้งสแตน

งานวิจัยนี้ทำการวิเคราะห์โดยใช้โปรแกรมทางไฟไนต์เอลิเมนต์ MSC.Marc Mentat 2008 สำหรับการวิเคราะห์ปัญหาทางความร้อน (Thermal analysis) ในงานเชื่อม ซึ่งประกอบด้วยแบบจำลองชิ้นงานเป็น 3 มิติ ขนาดชิ้นงานขนาด $50 \times 80 \times 6$ มิลลิเมตร ซึ่งจำลองการเชื่อมแบบไม่เต็มลวด แหล่งความร้อนเคลื่อนที่ (Moving heat source) แบบ Gaussian disc model สมบัติทางความร้อนของวัสดุเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิ [3, 4, 6] โดยจะคำนึงถึงช่วงเวลา (Transient analysis) ซึ่งแสดงแบบจำลองทางความร้อน ดังรูปที่ 4 และรูปที่ 5 ตามลำดับ



รูปที่ 4 แบบจำลองทางความร้อน

ในกระบวนการเชื่อมอาร์คด้วยทั้งสแตน (TIG) [5-6]

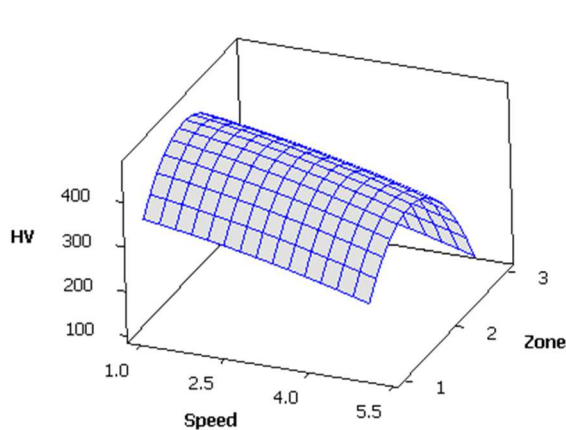


รูปที่ 5 แบบจำลอง (Model) ชิ้นงานเชื่อม

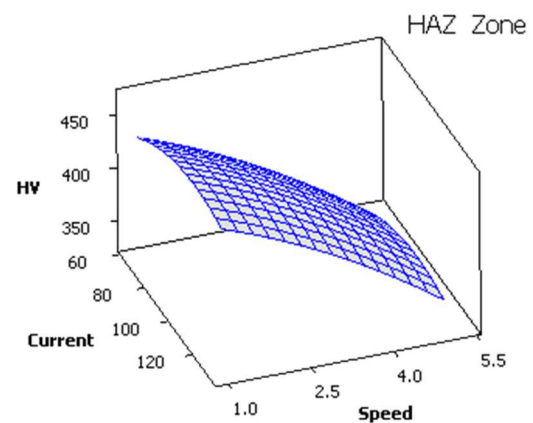
รูปที่ 5 แสดงแบบจำลอง (Model) ชิ้นงานเชื่อมเหล็กเครื่องมืองานเย็น เกรด SKD 11 ขนาดความกว้าง 50 มิลลิเมตร ความยาว 80 มิลลิเมตร หนา 6 มิลลิเมตร และชนิดอิเลเมนต์ (Element type) เป็นแบบ 3 -D Thermo Mechanical class 8hex.

4. ผลการทดลอง

จากผลการทดลองได้ทำการวิเคราะห์พื้นผิว (Surface response methology) ซึ่งได้แสดงผลความสัมพันธ์ต่างๆ ดังรูปที่ 6 แสดงกราฟพื้นผิวแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งและความเร็วเชื่อมที่กระแสไฟฟ้าเชื่อม 100 แอมแปร์ ณ ตำแหน่งต่าง ๆ ได้แก่ 1) เนื้อเชื่อม (Weld metal) 2) บริเวณผลกระทบทางความร้อน (HAZ) และ 3) โลหะงาน (Base metal) พบว่าความเร็วเชื่อมต่ำจะมีแนวโน้มความแข็งเพิ่มขึ้นและค่าความแข็งสูงสุดที่บริเวณ HAZ เท่ากับ 473.1 HV และเมื่อวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของค่าความแข็งระหว่างกระแสไฟฟ้าเชื่อมและความเร็วเชื่อม ณ บริเวณ HAZ ผลการทดลองแสดงถึงปัจจัยที่ส่งผลทำให้ค่าความแข็งภายหลังการเชื่อมเพิ่มขึ้น คือ กระแสไฟฟ้าเชื่อม ขณะที่ความเร็วมีผลกระทบในทางตรงกันข้าม แสดงดังรูปที่ 7



รูปที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งและความเร็วเชื่อม ณ ตำแหน่งต่างๆ ที่กระแสไฟฟ้าเชื่อม 100 แอมแปร์

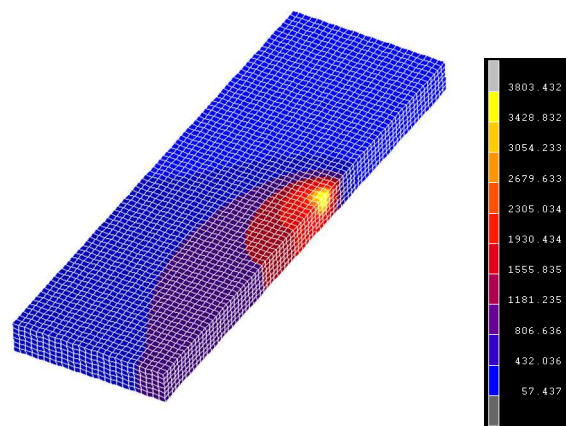


รูปที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งและระยะห่างจากกึ่งกลางแนวเชื่อม

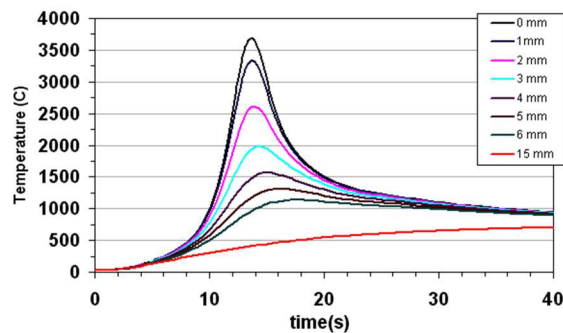
รูปที่ 8 แสดงภาพตัดชิ้นงานเชื่อมที่กระแสไฟฟ้าเชื่อม 100 แอมแปร์ พบว่าบริเวณรอยเชื่อมมีการหลอมลึก 2 ใน 3 ของความหนาชิ้นงานได้อย่างสมบูรณ์ดีและแสดงบริเวณพื้นที่กระทบร้อนจากความร้อนความดันมีขอบเขตที่กว้างและเมื่อทำการจำลองการวิเคราะห์ทางความร้อนขณะเชื่อมจากระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ที่กระแสไฟฟ้าเชื่อม 135 แอมแปร์ ณ เวลา 38 วินาที ดังในรูปที่ 9 แสดงข้อมูลอุณหภูมิในการจำลองการเชื่อมด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ที่มีการกระจายอุณหภูมิทางความร้อนของบ่อหลอมเชื่อมบนชิ้นงานขณะเชื่อมได้สม่ำเสมอและแสดงอุณหภูมิบริเวณตรงกลางบ่อหลอมเชื่อมประมาณ 1181-3428 °C



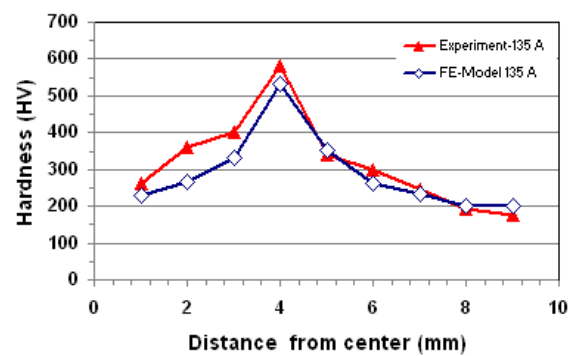
รูปที่ 8 ชิ้นงานเชื่อมด้วย TIG welding



รูปที่ 9 การกระจายอุณหภูมิขณะเชื่อม



รูปที่ 10 เส้นโค้งการเย็นตัวของเชื่อมจากแบบจำลองทางไฟไนเอลิเมนต์



รูปที่ 11 ค่าความแข็งจาก FEM และชิ้นงานทดลอง

รูปที่ 10 แสดงตัวอย่างเส้นโค้งการเย็นตัว (Cooling curve) ขณะเชื่อม ณ ตำแหน่งห่างจากกึ่งกลางแนวเชื่อม 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6 และ 15 มิลลิเมตร ตามลำดับ ที่ระดับกระแสไฟฟ้าเชื่อม 135 แอมแปร์ พบว่าการวัดอุณหภูมิมีระยะห่างจากกึ่งกลางบ่อหลอมเชื่อมมากขึ้นจะส่งต่ออัตราการเย็นตัว (Cooling rate) ลดลงเช่นเดียวกัน เนื่องจากแนวโน้มความร้อนจุดสูงสุดของอุณหภูมิในเส้นกราฟเส้นโค้งการเย็นตัวมีลักษณะลดต่ำลงจากระยะห่างที่เพิ่มขึ้น จากรูปที่ 11 แสดงกราฟเปรียบเทียบค่าประมาณความแข็งจากการจำลองทางไฟไนเอลิเมนต์ (FEM) และค่าจากชิ้นงานจริงชิ้นงานทดลองที่กระแสไฟฟ้าเชื่อม 100 แอมแปร์ ความเร็วเชื่อม 1 มิลลิเมตรต่อนาที พบว่าค่าการประมาณในแบบจำลอง FEM กับค่าวัดจากชิ้นงานทดลองมีความสอดคล้องกันและจะแตกต่างกันมากกว่าในบริเวณเนื้อเชื่อม

5. สรุป

จากผลการทดลองพบว่า เมื่อทำการเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็ง ณ บริเวณชิ้นงานเชื่อมตำแหน่งต่าง ๆ จากแบบจำลองทางไฟไนเอลิเมนต์ พบว่าค่าประมาณความแข็งจากระเบียบวิธีไฟไนเอลิเมนต์มีแนวโน้มสอดคล้องกับค่าวัดจากชิ้นงานทดลอง อย่างไรก็ตามค่าประมาณความแข็งจากแบบจำลองวิธีไฟไนเอลิเมนต์ในงานวิจัยนี้จะให้ผลการทำนายได้ใกล้เคียง ณ บริเวณตั้งแต่บริเวณผลกระทบทางความร้อน (HAZ) และโลหะฐาน (Base metal) ซึ่งแนวทางวิจัยนี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการจำลองและวิเคราะห์ปัจจัยการเชื่อมซ่อมชิ้นส่วนแม่พิมพ์โลหะที่มีผลกระทบต่อสมบัติการใช้งานต่อไป

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] American Welding Society, Welding Hand Book, Vol. 1. 2001: Welding Science and technology, 9th ed., American Welding Society, Miami, FL, USA.
- [2] Sindo Kou., Inc 2003. Welding Metallurgy. Second edition. University of Wisconsin: Wiley & Son
- [3] C.S. Wu, J.Q. Gao. 2002. Analysis of the heat flux distribution at the anode of a TIG welding arc. Computational Materials Science, 24: 323–327.
- [4] Dorrenberg Edelstahl GmbH, Material data. www.doerrenberg.de
- [5] I.S. Kim, A. Basu., 1998. A mathematical model of heat transfer and fluid flow in the gas metal arc welding process. Journal of Materials Processing Technology 77: 17–24
- [6] Lu, Xinhua Tang, Hailiang Yu, Shun Yao., 2006. Numerical simulation on interaction between TIG welding arc and weld pool. Computational Materials Science 35: 458–465.

คำแนะนำสำหรับผู้เขียน

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

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

2.6. บทนำ (Introduction) ใช้ตัวอักษรขนาด 14 หัวข้อให้ใช้ตัวพิมพ์หนาและสำหรับเนื้อหาให้ใช้ตัวพิมพ์ปกติ ในส่วนนี้เป็นเนื้อหาที่ผู้เขียนตั้งใจให้อ่านเกิดความสนใจในเรื่องนั้นๆ ซึ่งควรมีข้อมูลปฐมภูมิจากการทบทวนวรรณกรรม ข้อมูลทางวิชาการ โดยการสรุปและมีการอ้างอิง เพื่อไว้เป็นข้อมูลที่ใช้กำหนดวัตถุประสงค์ของงานวิจัย

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

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

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

ชื่อ ตารางที่ 1 ใช้ตัวอักษรขนาด 14 ด้วยตัวพิมพ์หนาและตามด้วยชื่อตารางด้วยตัวพิมพ์ปกติจัดวางอยู่เหนือตาราง โดยไม่เว้นบรรทัดระหว่างชื่อตารางกับตาราง ตำแหน่งของชื่อตารางและตัวตารางให้จัดชิดซ้ายสุด

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

2.7.3 การเขียนสมการจะต้องมีหมายเลขกำกับอยู่ภายในวงเล็บและเรียงลำดับที่ถูกต้อง ควรใช้ตัวพจน์เฉพาะแสดงถึงพารามิเตอร์หรือตัวแปรในสมการหรืออาจใช้สัญลักษณ์เฉพาะ 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 ผลที่ได้จากการวิจัยต้องมีการวิเคราะห์ข้อมูลหรือเปรียบเทียบกับงานวิจัยก่อนหน้านี้เพื่อให้ได้ข้อสรุปที่ได้จากงานวิจัยนี้ ควรแสดงถึงสิ่งที่ได้จากงานวิจัยนี้เพื่อประโยชน์ในการพัฒนาต่อยอดกับงานวิจัยอื่นหรือผู้อ่าน รวมถึงสามารถใช้อ้างอิงข้อมูลหรือนำไปใช้ประโยชน์ได้ โดยอาจเขียนแบ่งเป็นข้อ ๆ

1) บทความวิจัยควรมีความยาวของหน้ากระดาษระหว่าง 6 ถึง 12 หน้า

2) บทความทุกบทความที่ส่งเข้าในระบบเพื่อกระบวนการเผยแพร่ในวารสารเทคโนโลยีและวิศวกรรมก้าวหน้า ต้องได้รับความยินยอมจากผู้เขียนร่วมทุกท่าน และจะถูกตรวจสอบความซ้ำซ้อนจากกองบรรณาธิการตามมาตรฐานที่กำหนด รวมถึงจะถูกกลั่นกรองจากผู้ทรงคุณวุฒิในการพิจารณายอมรับ 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. Bunyawichkul 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.วิชาญ ช่วยพันธ์	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ
รองศาสตราจารย์ ดร.จิระพล กลิ่นบุญ	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ
รองศาสตราจารย์ ดร.นเรศรชฎ พัฒนาเดช	คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
รองศาสตราจารย์ ดร.บวรโชค ผู้พัฒน์	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
รองศาสตราจารย์ ดร.อิสริหัต พึ่งอัน	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
รองศาสตราจารย์ ดร.ประยูร สุรินทร์	คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีปทุมวัน
รองศาสตราจารย์ ดร.อภิวัฒน์ มุตตามระ	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
รองศาสตราจารย์ ดร.ประภาศ เมืองจันทร์บุรี	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
รองศาสตราจารย์ สุรสิทธิ์ ระวังวงศ์	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย
รองศาสตราจารย์ ดร.ศิริชัย ต่อสกุล	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
รองศาสตราจารย์ ดร.วัชรินทร์ สิทธิเจริญ	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา
รองศาสตราจารย์ วรพงศ์ บุญช่วยแทน	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย
รองศาสตราจารย์ ดร.คมกริช ละวรรณวงษ์	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กิตติชัย ไศจิพันธ์	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จิตติวัฒน์ นิธิกาญจนธาร	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อภิรักษ์ ภูเกล้าวัน	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ภาสพิรุฬห์ วัชรศรีสำเริง	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พีรวิทย์ โชคเหมาะ	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ใหม่ น้อยพิทักษ์	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เพชรพล ตัณพิรุฬห์	คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เชิดพงษ์ จอมเดช	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.รัตติกรณ์ เสาร์แดน	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ภาณุเดช แสงสีดา	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธีรยุทธ กาญจนแสงทอง	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปริญญา ศรีสัตยกุล	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พิสิทธิ์ เมืองน้อย	คณะอุตสาหกรรมและเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นิวัฒน์ มูเก็ม	คณะอุตสาหกรรมและเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กั้วหน้า จงวัฒนารักษ์	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชัยณรงค์ ศรีวัชรบุตร	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ฐิติ หมอรักษา	โครงการจัดตั้งคณะวิศวกรรมศาสตร์บูรณาการและเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก วิทยาเขตจันทบุรี
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ เฉลิมพล คล้ายนิล	คณะอุตสาหกรรมและเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ จิรวัดน์ ณ พัทลุง	สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์และนวัตกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก
ดร.จิระศักดิ์ ธาระจักร์	คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
ดร.เอกชัย วารินศิริรักษ์	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล
ดร.ปริญญา กวีกิจบัณฑิต	คณะอุตสาหกรรมและเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์
ดร.ปกรณ์ ชุมรัมย์	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ
ดร.ธงชัย เพ็งจันทร์ดี	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

ดร.ประจักษ์ จิตกุล

ดร.สุริยพงศ์ นิลสังข์

ดร.ทงศักดิ์ คงสินธุ์

ดร.ปิยะพงษ์ คำคุณ

โครงการจัดตั้งคณะวิศวกรรมศาสตร์บูรณาการและเทคโนโลยี
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก วิทยาเขตจันทบุรี
คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ

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 ถือเป็นลิขสิทธิ์ของสาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ

ลงชื่อ.....

(.....)



หนังสือรับรองการตีพิมพ์บทความ
วารสารเทคโนโลยีและวิศวกรรมก้าวหน้า
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ

ขอรับรองว่าบทความ.....

โดย

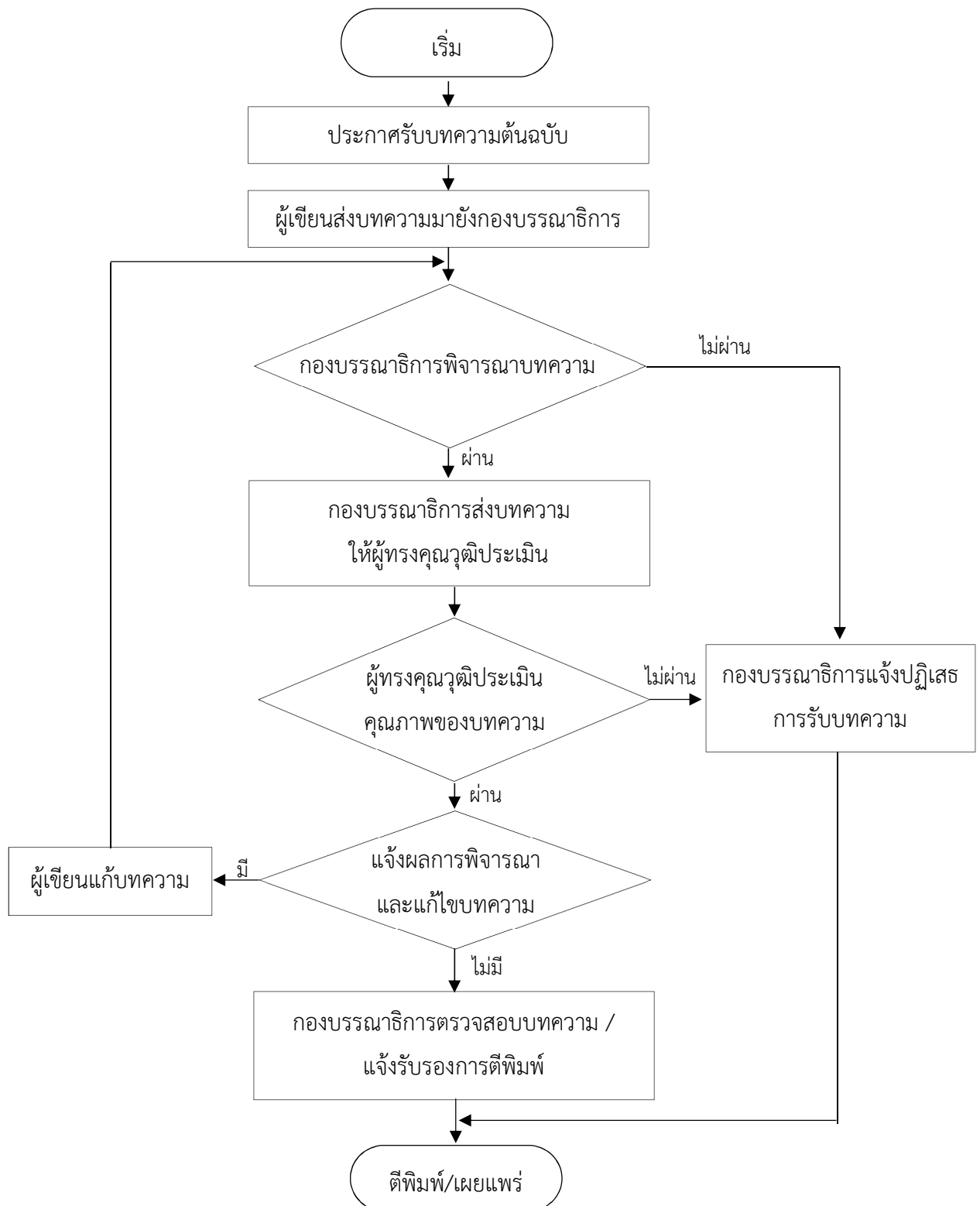
.....

.....

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

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ฤทธิชัย เกาเนียม)
บรรณาธิการวารสารเทคโนโลยีและวิศวกรรมก้าวหน้า
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ

ขั้นตอนการจัดทำวารสารเทคโนโลยีและวิศวกรรมก้าวหน้า





Journal of Technology and Engineering Progress

วารสารเทคโนโลยีและวิศวกรรมก้าวหน้า

Journal of Technology and Engineering Progress

อาคาร 18/1 สาขาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ เล่งที่ 2 ถนนนางลิ้นจี่

แขวงทุ่งมหาเมฆ เขตสาทร กรุงเทพฯ 10120

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