



RMUTK
RAJAMANGALA
KRUNGTHAP



JTEP

วารสาร เทคโนโลยีและ วิศวกรรมก้าวหน้า

Journal of Technology and Engineering Progress

ปีที่ 3 ฉบับที่ 2

เดือน กรกฎาคม – ธันวาคม 2568

ISSN : 3027-6500 (Online)

Vol 3, No. 2, 2025 (July - December)

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ

วารสารเทคโนโลยีและวิศวกรรมก้าวหน้า

Journal of Technology and Engineering Progress

ปีที่ 3 ฉบับที่ 2 กรกฎาคม – ธันวาคม 2568 (Vol 3, No.2, 2025, July - December)

เจ้าของ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ

ที่ปรึกษา

อธิการบดี

คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

นายกสมาคมเทคโนโลยีและนวัตกรรมเชิงสร้างสรรค์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ

สมาคมเทคโนโลยีและนวัตกรรมเชิงสร้างสรรค์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ

บรรณาธิการ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ฤทธิชัย เกาเนียม

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ

รองบรรณาธิการ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กมลพงศ์ แจ่มกมล

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ

ผู้ช่วยบรรณาธิการ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศุภวัฒน์ ชูวารี

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ

กองบรรณาธิการ

รองศาสตราจารย์ ดร.จิระพล กลิ่นบุญ

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ

รองศาสตราจารย์ ดร.วิชาญ ช่วยพันธ์

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ

รองศาสตราจารย์ ดร.นเรศรฐ วัฒนเดช

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

รองศาสตราจารย์ ดร.บวรโชค ผู้พัฒน์

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

รองศาสตราจารย์ ดร.อิศรทัต พึ่งอัน

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

รองศาสตราจารย์ ดร.ประยูร สุรินทร์

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีปทุมวัน

รองศาสตราจารย์ ดร.อภิวัฒน์ มุตตามระ

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

รองศาสตราจารย์ ดร.ประภาศ เมืองจันทร์บุรี

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

รองศาสตราจารย์ วรพงศ์ บุญช่วยแทน

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กิตติชัย ไศจีพันธุ์

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

ผู้จัดทำวารสาร

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สมชาย วนไทยสงค์

นายวงศ์ธร วงศ์อินทร์

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ

บทความที่ลงตีพิมพ์ในวารสารเป็นความคิดเห็นของผู้เขียน**กองบรรณาธิการไม่จำเป็นต้องเห็นด้วยเสมอไป****ความเป็นมา**

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

บทความที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในวารสารเทคโนโลยีและวิศวกรรมก้าวหน้า เป็นบทความที่สร้างองค์ความรู้ และมีความคุณภาพในทางวิชาการสามารถนำไปใช้ประโยชน์เพื่อการอ้างอิงได้ 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 บทความที่ได้รับการตีพิมพ์ต้องผ่าน การพิจารณา
กลั่นกรองคุณภาพจากผู้ทรงคุณวุฒิ และได้รับความเห็นชอบจากกองบรรณาธิการ

ข้อความที่ปรากฏอยู่ในแต่ละบทความที่ตีพิมพ์ในวารสารวิชาการเล่มนี้ เป็นความคิดเห็นส่วนตัวของผู้เขียนแต่ละท่าน
ไม่เกี่ยวข้องกับมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพแต่อย่างใด ความรับผิดชอบด้านเนื้อหา และการตรวจร่างบทความ
แต่ละบทความเป็นของผู้เขียนแต่ละท่าน หากมีความผิดพลาดใด ๆ ผู้เขียน แต่ละท่านจะต้องรับผิดชอบบทความของตนเอง
แต่ผู้เดียว

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

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ

เลขที่ 2 ถนนนางลิ้นจี่ แขวงทุ่งมหาเมฆ เขตสาทร กรุงเทพฯ 10120

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

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

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

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

สารบัญ

	หน้า
การหาค่าที่เหมาะสมของตัวแปรในกระบวนการกัดเซาะโลหะด้วยไฟฟ้าสำหรับวัสดุเหล็กกล้าแม่พิมพ์งานเย็นเกรด DCMX Optimization of Electrical Discharge Machining Variables for DCMX Cold Work Die Steel ทงศ์ศักดิ์ คงสินธุ์	1
การปรับปรุงวัสดุทดแทนซีเมนต์จากหญ้าขจรจบสำหรับผลิตคอนกรีตบล็อก Improvement of Cement Substitute Materials from Mission Grass for Concrete Block Manufacture ณปภัช คงฤทธิ์, จักรพงษ์ จิตต์จำนงค์, พลสรรค์ แซ่เตียว, ปนัดดา โสฬส, วันนาเดีย นาวะ	9
การวิเคราะห์พฤติกรรมความล้าของเพลากรองในรถปิกอัพ Analytical on Fatigue Behavior of Counter Shaft in Pick-Up Car อภิวัฒน์ ฐิติวัฒน์วรวัจ, ประเสริฐ เสกกล้า, ดนุสรณ์ เหลียงพานิช, กฤษณะ นามโยธา	19
การผลิตเยื่อกระดาษจากเส้นใยใบสับปะรดสำหรับทำกระดาษนำไฟฟ้า Production of Pulp from Pineapple Leaf Fiber for Conductive Paper ศิริธร ไยสูง, สุธิดา อ่าบางกระทุ่ม, บุญชัย ดวงสวัสดิ์, อาฒยา สันตะกุล, สุพจน์ สระทองกลาง, ชุตินา อุปถัมภ์, อภิชาติ พองพลา	28
การเปรียบเทียบอายุความล้าของเหล็ก SCM 420 ที่ผ่านการชุบแข็งด้วยน้ำมันและการเคลือบผิวด้วยสารเคลือบ AlCrTiSiN Fatigue Life Comparison of SCM 420 Steel with Oil Quenching and AlCrTiSiN Coating เจริญ หมื่นจร, ธนวัฒน์ ม่วงไหมทอง, ศิริชัย ไตรสูงเนิน, ธนิต แต่งศรี	39
การศึกษาผลกระทบของพฤติกรรมการเสียรูปภายใต้การชนของยานพาหนะในเสาดูดซับพลังงานสูง Effect of Deformation Behavior under Vehicle Collision in High Energy Absorbing Poles ยงยศ จันทร์ปาน, นราชัย จิตรณรงค์, อุไรรัตน์ แจ่มสงวน, ศุภศิษฐ์ มาลา, เกษฏากร ลามโยไทย, ผดุงเดช แคนไชย, ณัฐวุฒิ พัฒนมะคงเงิน	48
การศึกษาอิทธิพลของพารามิเตอร์งานกลึงที่ส่งผลต่อลักษณะพื้นผิววัสดุชิ้นงานไทเทเนียม (Ti-6Al-4V) Studying Influence of Turning Parameters on Characteristics of Machined Surface of Titanium (Ti-6Al-4V) ชาติรี นุชนาง, ไพรัตน์ พลบุตร	62
การศึกษาโครงสร้างจุลภาคและสมบัติเชิงกลโลหะผสมทองแดง-นิกเกิล-โครเมียมในกระบวนการอบอ่อน Study of the Microstructure and Mechanical Properties of Copper-Nickel-Chromium Alloy in Annealing Process อภิชาติ แสนรัชฎากร, ดนัยณัฐ จันทุม	69

การหาค่าที่เหมาะสมของตัวแปรในกระบวนการกัดเซาะโลหะด้วยไฟฟ้า
สำหรับวัสดุเหล็กกล้าแม่พิมพ์งานเย็น เกรด DCMX
Optimization of Electrical Discharge Machining Variables
for DCMX Cold Work Die Steel

ทณงศักดิ์ คงสินธุ์*

ภาควิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมเครื่องกล วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

1518 ถนน ประชาราษฎร์ 1 แขวงวงศ์สว่าง บางซื่อ กรุงเทพมหานคร 10800

Tanongsak Kongsin*

Department of Mechanical Engineering Technology, College of Industrial Technology,

King Mongkut's University of Technology North Bangkok,

1518 Pracharat 1 Road, Wongsawang, Bangsue, Bangkok 10800

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

(Received: December 10, 2025 / Revised: December 27, 2025 / Accepted: December 28, 2025)

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาอิทธิพลและหาค่าที่เหมาะสมของตัวแปรในกระบวนการกัดเซาะโลหะด้วยไฟฟ้าที่มีต่ออัตราการขจัดเนื้องาน ของเหล็กกล้าแม่พิมพ์งานเย็นเกรด DCMX ที่ผ่านกระบวนการชุบแข็ง (58-60 HRC) การทดลองใช้การออกแบบแบบส่วนประสมกลาง (Central Composite Design) และวิเคราะห์ผลด้วยวิธีการพื้นผิวตอบสนอง (Response Surface Methodology) โดยกำหนดตัวแปรอิสระ 4 ตัว ได้แก่ กระแสไฟฟ้า เวลาเปิด ปฏิกิริยาประสิทธิภาพ และช่องว่างระหว่างอิเล็กโทรด ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนพบว่าตัวแปรทั้ง 4 มีอิทธิพลอย่างมีนัยสำคัญต่อค่าอัตราการขจัดเนื้องาน โดยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่สร้างขึ้นมีความแม่นยำสูงด้วยค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ R^2 เท่ากับ 99.38% จากการวิเคราะห์เพื่อหาค่าที่เหมาะสมที่สุด (Optimization) พบว่าสภาวะที่ให้ค่าอัตราการขจัดเนื้องานสูงสุด คือ กระแสไฟฟ้า 18 A, เวลาเปิด 150 μ s, ปฏิกิริยาประสิทธิภาพ 82%, และช่องว่างระหว่างอิเล็กโทรด 15 μ m ผลการทดลองยืนยันสภาวะดังกล่าวได้ค่าเฉลี่ยอัตราการขจัดเนื้องานที่ 26.4674 mm^3/min ซึ่งมีความคลาดเคลื่อนจากค่าพยากรณ์เพียง 4.07%

คำสำคัญ: การกัดเซาะโลหะด้วยไฟฟ้า เหล็กกล้าแม่พิมพ์งานเย็น DCMX อัตราการขจัดเนื้องาน วิธีการพื้นผิวตอบสนอง

Abstract

This research aims to investigate and optimize the Electrical Discharge Machining (EDM) variables affecting the Material Removal Rate (MRR) of hardened DCMX cold work die steel (58–60 HRC). The Central Composite Design (CCD) based on Response Surface Methodology (RSM) was employed to design experiments. Four independent variables were studied: current, pulse on-time, duty factor, and spark gap. The analysis of variance indicated that all four variables significantly influenced the MRR, and the developed mathematical model demonstrated high accuracy, with a coefficient of determination (R^2) of 99.38%. The optimization analysis revealed that the optimal conditions for maximizing the MRR were a current of 18 A, a pulse on-time of 150 μ s, a duty factor of 82%, and a spark gap of 15 μ m. Confirmatory experiments conducted under these conditions yielded an average MRR of 26.4674 mm^3/min , with a deviation of only 4.07% from the predicted value.

Keywords: Electrical Discharge Machining, DCMX cold work die steel, Material Removal Rate, Response Surface Methodology

1. บทนำ (Introduction)

ในปัจจุบันอุตสาหกรรมการผลิตชิ้นส่วนและแม่พิมพ์มีการเติบโตและการแข่งขันทางการตลาดสูง ทั้งในด้านต้นทุน คุณภาพ และระยะเวลาในการส่งมอบ ส่งผลให้มีการพัฒนาวัสดุชนิดใหม่ที่มีความแข็งแรงสูงเพื่อตอบสนองต่อการใช้งาน อย่างไรก็ตาม วัสดุเหล่านี้มักยากต่อการขึ้นรูปด้วยกรรมวิธีตัดเฉือนแบบดั้งเดิม กระบวนการกัดเซาะโลหะด้วยไฟฟ้า (Electrical Discharge Machining: EDM) จึงเข้ามามีบทบาทสำคัญและถูกประยุกต์ใช้อย่างแพร่หลายในการผลิตแม่พิมพ์ เนื่องจากสามารถขึ้นรูปชิ้นงานที่มีความซับซ้อน มีความละเอียดแม่นยำ และให้คุณภาพผิวงานที่ดีเยี่ยมโดยไม่ขึ้นกับความแข็งแรงของวัสดุ [1]

ในส่วนของวัสดุสำหรับทำแม่พิมพ์งานเย็น เหล็กกล้าเกรด DC53 ซึ่งพัฒนาต่อยอดมาจากเกรด SKD11 โดยบริษัท Daido Steel ประเทศญี่ปุ่น เป็นวัสดุที่ได้รับความนิยมสูงเนื่องจากได้รับการปรับปรุงสมบัติทางด้านความเหนียว ความแข็ง และความต้านทานการสึกหรอ รวมทั้งสามารถตอบสนองต่อกรรมวิธีทางความร้อนได้ดี งานวิจัยในอดีตของ Kanlayasiri และคณะ [2] ได้ศึกษาอิทธิพลของตัวแปรในกระบวนการตัดโลหะด้วยลวดไฟฟ้าที่มีต่อวัสดุ DC53 และพบว่าปัจจัยด้านเวลาเปิด (Pulse on-time) และกระแสไฟฟ้า (Current) ส่งผลอย่างมีนัยสำคัญต่อความหยาบผิวของชิ้นงาน อย่างไรก็ตาม แม้วัสดุ DC53 จะมีสมบัติเด่นหลายประการ แต่ยังคงประสบปัญหาเรื่องการเปลี่ยนแปลงขนาดหรือการบิดตัวทางมิติ (Dimensional distortion) ภายหลังกระบวนการอบชุบด้วยความร้อน ซึ่งส่งผลกระทบต่อคุณภาพของแม่พิมพ์ [3]

เพื่อแก้ไขปัญหาดังกล่าว จึงได้มีการพัฒนาวัสดุเหล็กกล้าเครื่องมืองานเย็นชนิดใหม่ คือเกรด DC-Matrix หรือ DCMX (Daido's Cold work die steel Matrix type) ซึ่งมีจุดเด่นคือโครงสร้างที่มีคาร์ไบด์ขนาดเล็กกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ ส่งผลให้มีความแข็งและความเหนียวสูง ทนทานต่อการสึกกร่อน และมีสมบัติเด่นด้านความเสถียรของขนาด ภายหลังการอบชุบ (Low-anisotropic) ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Takayuki Shimizu และคณะ [4] ที่เปรียบเทียบสมบัติการเปลี่ยนแปลงรูปร่างระหว่าง DCMX, DC53 และ SKD11 พบว่า DCMX มีการเปลี่ยนแปลงขนาดน้อยที่สุดและต้านทานการเสียรูปได้ดีที่สุดเมื่อผ่านกระบวนการที่อุณหภูมิเดียวกัน [5-6]

แม้ว่า DCMX จะเป็นวัสดุที่มีศักยภาพสูง แต่เนื่องจากเป็นวัสดุชนิดใหม่ ข้อมูลเชิงลึกด้านความสามารถในการขึ้นรูปด้วยกระบวนการ EDM ยังมีอยู่อย่างจำกัด ซึ่งเป็นข้อมูลสำคัญสำหรับผู้ผลิตแม่พิมพ์ในการกำหนดค่าตัวแปรการทำงาน งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาอิทธิพลของตัวแปรในกระบวนการกัดเซาะโลหะด้วยไฟฟ้า ได้แก่ กระแสไฟฟ้า (Current), เวลาปล่อยกระแสไฟฟ้า (On-time), ช่องว่างระหว่างอิเล็กโทรดกับชิ้นงาน (Gap Spark) และปัจจัยประสิทธิภาพ (Duty factor) ที่มีผลต่ออัตราการกัดเซาะของเหล็กกล้าแม่พิมพ์งานเย็นเกรด DCMX ที่ผ่านกระบวนการปรับปรุงคุณสมบัติทางความร้อน (Heat Treatment) ที่ระดับความแข็งอยู่ในช่วงระหว่าง 58-60HRC ทั้งนี้ใช้การออกแบบการทดลองแบบประสมกลาง (Central Composite Design: CCD) และวิเคราะห์ผลด้วยวิธีการพื้นผิวตอบสนอง (Response Surface Methodology: RSM) เพื่อหาภาวะที่เหมาะสมที่สุด (Optimization) ในการแปรรูปวัสดุดังกล่าว เพื่อให้ได้ประสิทธิภาพสูงสุดตามฟังก์ชันความพึงพอใจ (Desirability Function)

2. วิธีการดำเนินงานวิจัย

2.1 การออกแบบการทดลอง

ในงานวิจัยนี้เพื่อหาค่าตัวแปรที่เหมาะสมของตัวแปรเพื่อให้ได้ค่าอัตราการกัดเซาะงานที่ดีที่สุด วิธีการออกแบบการทดลอง (Design of Experiments : DOE) ซึ่งวิธีพื้นผิวผลตอบสนอง (Response Surface Methodology : RSM) แบบการทดลองส่วนประสมกลาง (Central Composite Design : CCD) ระดับตัวแปรในการทดลอง 3 ระดับ (3 Levels) ภายใต้ซอฟต์แวร์ Minitab 19 ถูกนำมาใช้ในการวิเคราะห์และสรุปผล

วัตถุประสงค์ของการออกแบบการทดลองโดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์นี้ เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ของตัวแปรต่างๆ ที่เมื่อตัวแปรใดตัวแปรหนึ่งเพิ่มหรือลดค่า ตัวแปรอื่นอาจเปลี่ยนแปลงไปในลักษณะที่ไม่เป็นเส้นตรง ทำให้ต้องมีการศึกษาความสัมพันธ์เชิงเส้นโค้ง (Quadratic Relationship) โดยการทดลองนี้จะกำหนดตัวแปรต้น 4 ตัวแปร แต่ละตัวแปร มี 3 ระดับการทดลอง ดังแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ตัวแปรและระดับของตัวแปรที่ใช้ในการทดลอง

Factors / (Unit)	Low (-1)	Medium (0)	High (+1)
A : Current (A)	12	15	18
B : On-time (μs)	50	100	150
C : Duty Factor (%)	65	75	82
D : Gap Spark (μm)	5	10	15

2.2 วัสดุและอุปกรณ์ในการทดลอง

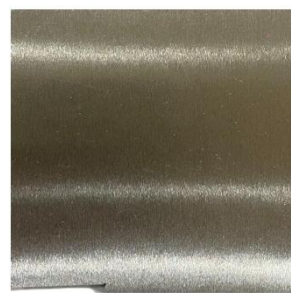
ในงานวิจัยนี้เครื่องกัดเซาะโลหะด้วยไฟฟ้า (Electrical Discharge Machine: EDM) ควบคุมด้วยระบบคอมพิวเตอร์ (CNC) ยี่ห้อ ARISTECH รุ่น Model 430 ถูกนำมาใช้สำหรับการเก็บผลการทดลอง ทั้งนี้ในกระบวนการแปรรูปกำหนดตัวแปรคงที่ประกอบด้วย การใช้อิเล็กโตรดวัสดุทองแดง (Copper) ความบริสุทธิ์ร้อยละ 96 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12 ± 0.05 มิลลิเมตร ทำการกัดเซาะลงบนชิ้นงานเหล็กกล้าเครื่องมืองานเย็นเกรด DCMX ผ่านกระบวนการชุบแข็ง โดยมีค่าความแข็งเฉลี่ยประมาณ 58-60 HRC กัดเซาะที่ระดับความลึก 1 มิลลิเมตร การเตรียมชิ้นงานทดลองใช้เครื่องกัดเซาะโลหะด้วยลวดไฟฟ้า โดยให้วัสดุชิ้นงานมีขนาดความกว้าง 57 มิลลิเมตร ความยาว 55 มิลลิเมตร หนา 10 มิลลิเมตร ดังแสดงในรูปที่ 1 หลังจากนั้นทำการปรับผิวชิ้นงานด้วยเครื่องเจียรระโนราบ เพื่อให้ผิวชิ้นงานมีความสม่ำเสมอและมีค่าความหยาบผิวชิ้นงานที่เหมาะสม ในส่วนของการกำหนดขั้วไฟฟ้ากำหนดให้อิเล็กโตรดมีสถานะเป็นขั้วบวก (Positive Polarity) ดำเนินการกัดเซาะภายใต้สารไดอิเล็กตริก ประเภทน้ำมัน ยี่ห้อ Total รุ่น DIET MS 700 ทั้งนี้ องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุชิ้นงาน DCMX ได้ผ่านการตรวจสอบยืนยันผลจากห้องปฏิบัติการ รายละเอียดแสดงดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุเหล็กกล้าเครื่องมืองานเย็น DCMX [6]

Element	Chemical Composition (%)											
	C	Cr	Ni	Si	Mn	P	S	Mo	Ti	W	Cu	Fe
	1.3	6.95	0.17	1.4	0.51	0.03	0.002	1.74	0.17	0.056	0.26	Bal.



ก)



ข)

รูปที่ 1 ขั้นตอนการดำเนินงานและการติดตั้งชิ้นงานทดลอง
ก) รูปแบบการดำเนินงาน ข) วัสดุ DCMX ที่ใช้ในการทดลอง

2.3 การตรวจสอบและการวิเคราะห์ผลค่าอัตราการขจัดเนื้องาน

สำหรับอัตราการขจัดเนื้องาน (Material Removal Rate : MRR) ในงานทดลองนี้ คำนวณจากปริมาตรเนื้องานที่ถูกขจัดออกต่อหน่วยเวลาที่ใช้ในการแปรรูปดังสมการที่ 1 [7] โดยการชักนำหน้าด้วยเครื่องชักดิจิทัล ยี่ห้อ Jadever รุ่น SKY-150 (Taiwan) ซึ่งมีค่าความละเอียด 0.001 กรัม

$$MRR \text{ (mm}^3/\text{min)} = \frac{(W_{w1} - W_{w2})}{\rho_w \times Mt} \times 10^3 \quad (1)$$

เมื่อ	Material Removal Rate (MRR)	คือ อัตราการขจัดเนื้องาน (ลูกบาศก์มิลลิเมตรต่อนาที),
	W_{w1} และ W_{w2}	คือ น้ำหนักของชิ้นงานก่อนและหลังการแปรรูปลึก (กรัม : g),
	ρ_w และ M_t	คือ ความหนาแน่นของวัสดุชิ้นงาน (AISI P20, 7.786 g/cm ³)
		และ เวลาในการแปรรูปลึก (นาที : min) ตามลำดับ

3. ผลการทดลองและการอภิปรายผล

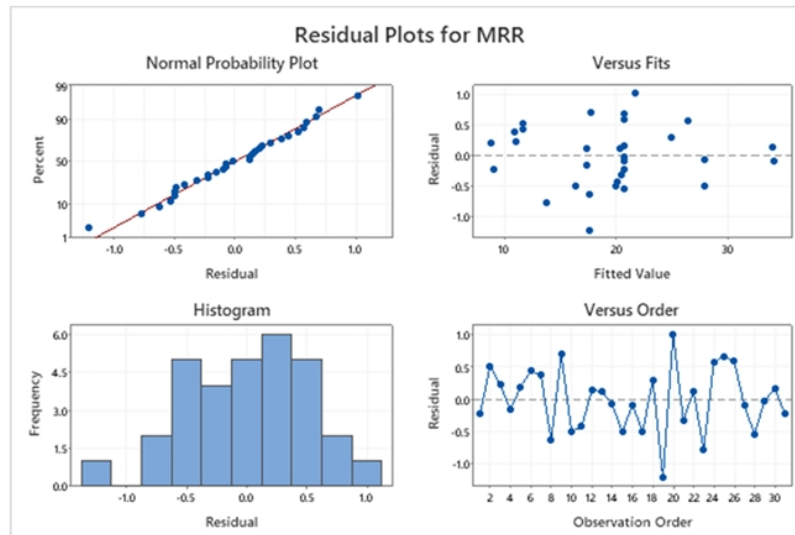
3.1 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

จากการทดลองกัดเซาะโลหะด้วยไฟฟ้าบนวัสดุเหล็กกล้าเครื่องมืองานเย็นเกรด DCMX ที่ผ่านกระบวนการทางความร้อน (กระบวนการชุบแข็ง) โดยอาศัยการออกแบบการทดลองแบบส่วนประสมการกลาง (CCD) จำนวน 31 การทดลอง และทำการวัดผลอัตราการขจัดเนื้องาน หลังจากนั้นจะนำผลที่ได้เข้าสู่กระบวนการวิเคราะห์ผลทางสถิติด้วยโปรแกรม Minitab 19 โดยใช้ระดับนัยสำคัญ $\alpha = 0.05$ ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่าอัตราการขจัดเนื้องาน ดังแสดงในตารางที่ 3 พบว่า ตัวแปรหลัก ประกอบไปด้วย Current (A), On-time (B), Duty Cycle (C), และ Gap Spark (D) มีค่า p-value เท่ากับ <0.001, <0.001, 0.048, และ <0.001 ตามลำดับ ตัวแปรหลักกำลังสอง On-time (B)*On-time (B), Duty Cycle (C)*Duty Cycle (C), และ Gap Spark (D)*Gap Spark (D) มีค่า p-value เท่ากับ 0.003, 0.050, และ 0.004 ตามลำดับ อันตรกิริยากำลัง 2-Way Interaction ระหว่าง (A*B) Current*On-time, (A*D) Current*Gap Spark, (B*D) On-time*Gap Spark, และ (C*D) Duty Cycle*Gap Spark มีค่า p-value เท่ากับ <0.001, <0.001, 0.002, และ 0.041 ตามลำดับ ซึ่งสามารถสรุปได้ว่าตัวแปรหลัก ตัวแปรหลักกำลังสอง และอันตรกิริยาเหล่านี้มีอิทธิพลต่ออัตราการขจัดเนื้องาน สำหรับวัสดุเหล็กกล้าเครื่องมืองานเย็นเกรด DCMX ที่ผ่านกระบวนการทางความร้อน (กระบวนการชุบแข็ง) ซึ่งให้ระดับค่าความแข็งอยู่ระหว่าง 58-60 HRC สำหรับการวิเคราะห์ความแปรปรวนในการตัดสินใจ (R^2) เท่ากับ 99.38% ซึ่งมีความมากกว่า $\alpha = 0.05$ สรุปได้ว่าข้อมูลที่ได้จากการทดลองมีความเหมาะสมกับแบบจำลองคณิตศาสตร์ที่สร้างขึ้น สามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้จริง

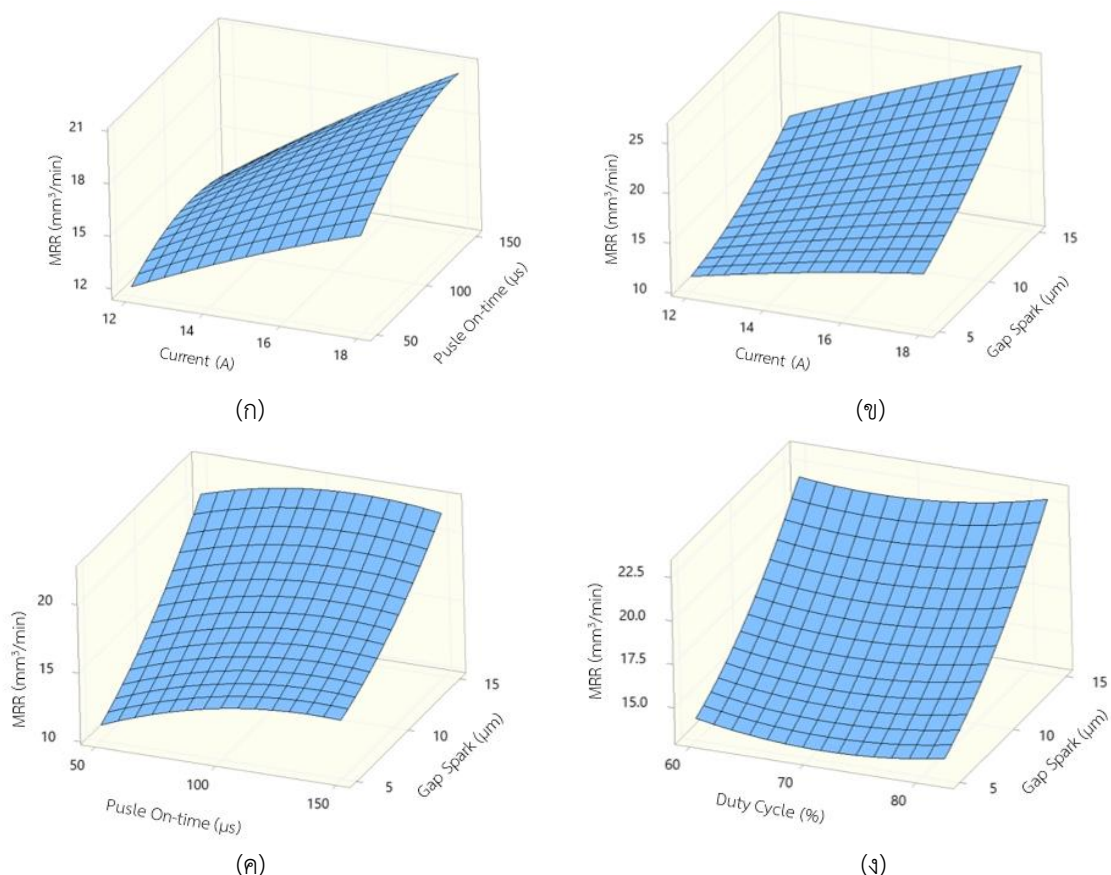
ตารางที่ 3 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance for MRR : ANOVA)

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	11	558.345	39.882	182.05	<0.001
(A) Current	1	183.244	183.244	836.47	<0.001
(B) On-time	1	22.304	22.304	101.81	<0.001
(C) Duty Cycle	1	0.970	0.970	4.43	0.048
(D) Gap Spark	1	309.763	309.763	1414.01	<0.001
(B*B) On-time ²	1	2.749	2.749	12.55	0.003
(C*C) Duty Cycle ²	1	0.903	0.903	4.12	0.050
(D*D) Gap Spark ²	1	2.394	2.394	10.93	0.004
(A*B) Current*On-time	1	7.412	7.412	33.83	<0.001
(A*D) Current*Gap Spark	1	22.959	22.959	104.80	<0.001
(B*D) On-time*Gap Spark	1	3.064	3.064	13.98	0.002
(C*D) Duty Cycle*Gap Spark	1	1.083	1.083	4.94	0.041
Error	13	3.505	0.219		
Total	27	561.850			
$R^2 = 99.38\%$		$R^2(\text{adj}) = 98.83\%$			

จากการวิเคราะห์ความเหมาะสมของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ด้วยกราฟ Residual Plots ดังแสดงในรูปที่ 2 พบว่า กราฟ Normal Probability Plot ของส่วนตกค้าง (Residual) มีแนวโน้มกระจายตัวเป็นเส้นตรง และมีลักษณะการกระจายตัวแบบปกติ เมื่อพิจารณากราฟส่วนตกค้างกับค่าการทำนาย (Versus Fits) พบว่า ส่วนตกค้างมีการกระจายตัวแบบอิสระไม่ขึ้นอยู่กับการทำนาย ซึ่งถือว่าไม่พบข้อมูลใดผิดปกติ และความเป็นอิสระของส่วนตกค้าง Versus Order ลักษณะการกระจายตัวของส่วนตกค้าง ไม่มีรูปแบบหรือแนวโน้มใดๆ หรือกระจายตัวแบบสุ่ม ทำให้สามารถสรุปได้ว่าการทดลองนี้มีความเหมาะสมกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ [2]



รูปที่ 2 Residual Plots เพื่อตรวจสอบความเหมาะสมของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์



รูปที่ 3 แสดงพื้นผิวตอบสนอง (ก) ผลกระทบร่วมของกระแสไฟฟ้ากับเวลาเปิด (ข) กระแสไฟฟ้ากับระยะช่องว่างอิเล็กโตรด (ค) เวลาเปิดกับระยะช่องว่างอิเล็กโตรด (ง) ปัจจัยประสิทธิภาพต่อช่องว่างอิเล็กโตรด ที่มีผลต่ออัตราการขจัดเนื้องานวัสดุ เหล็กกล้าเครื่องมืองานเย็นเกรด DCMX ชูบแข็งระดับค่าความแข็ง 58-60 HRC

เมื่อพิจารณากราฟพื้นผิวตอบสนองรูปที่ 3 (ก) ผลกระทบร่วมของกระแสไฟฟ้ากับเวลาเปิดมีความสัมพันธ์กันดังนี้ การปรับค่าระดับกระแสไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ได้ค่าอัตราการขจัดเนื้องานที่สูงขึ้น ผสมกับเวลาปล่อยประจุไฟฟ้าที่ยาวนานขึ้นทำให้ได้อัตราการขจัดเนื้องานที่สูงขึ้น ดังรูปที่ 3 (ข) (ค) และ (ง) ซึ่งเป็นผลมาจากการปล่อยกระแสไฟฟ้าที่มีความเข้มข้นสูงทำให้เกิดความร้อนสะสมมากเพียงพอทำให้เกิดการสปาร์คเป็นบริเวณที่กว้าง นอกจากนี้อุณหภูมิโลหะที่หลุดออกมามีจำนวนมาก ผสมกับระยะ Gap Spark ที่สูง (15 μ s) ทำให้สามารถขจัดเนื้องานออกไปได้ในจำนวนมาก [8] นอกจากนี้ระยะ Gap Spark ที่สูงทำให้สารไดอิเล็กทริกพัดพาอนุภาคออกจากบริเวณสปาร์คได้มากขึ้นเช่นเดียวกัน ทั้งนี้เมื่อมีการปล่อยประจุกระแสไฟฟ้าเป็นเวลานานจะเกิดการหลอมละลายและเย็นตัวกับมาใหม่ของผิวชิ้นงาน ซึ่งเรียกกระบวนการนี้ว่าการเกิด Recast Layer บนผิวชิ้นงาน [9] การที่อนุภาคหลงเหลืออยู่จำนวนมากและระยะเวลาการปล่อยกระแสไฟฟ้าที่ยาวนาน จนความร้อนสะสมเพียงพอที่จะเกิดการหลอมละลายและเย็นตัวใหม่ หรือเกิดการสปาร์คติดกับชิ้นงานอีกครั้งทำให้เวลาในการสปาร์คนานขึ้นส่งผลให้อัตราการขจัดเนื้องานลดต่ำลง [10] ดังรูปที่ 3 (ก) และ (ค) จากการศึกษาพื้นผิวตอบสนองแสดงผลกระทบร่วมที่มีต่ออัตราการขจัดเนื้องาน แสดงให้เห็นว่าค่าอัตราการขจัดเนื้องานสูงสุดสามารถได้จากการปรับค่าพารามิเตอร์ กระแสไฟฟ้า 18 A เวลาเปิด 150 μ s ระยะห่างระหว่างชิ้นงานกับอิเล็กโทรด 15 μ m และค่าปัจจัยประสิทธิภาพ 80 %

3.2 การหาค่าที่เหมาะสมของตัวแปร

จากการใช้ฟังก์ชันคำสั่งของ Response Optimizer ในโปรแกรม MINITAB 19 ซึ่งคำสั่งของ Response Optimizer สามารถทำการกำหนดค่าเป้าหมาย (Goal) ขอบเขตบน (Upper) ขอบเขตล่าง (Lower) ของค่า Response ของตัวแปรทั้ง 4 ตัวแปรที่ใช้ในการทดลอง ทั้งนี้ทำการปรับค่า Importance ความสำคัญเท่ากับ 5 สำหรับค่าเป้าหมาย (Goal) ซึ่งแสดงให้เห็นว่าในการทดลองจะให้ความสำคัญกับค่าที่ได้สูงสุด สอดคล้องกับค่าอัตราการขจัดเนื้องานกำหนดเป็นให้ค่าอัตราการขจัดเนื้องานที่สูงที่สุด (Maximum) ดังตารางที่ 4

ตารางที่ 4 เงื่อนไขในการหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของอัตราการขจัดเนื้องาน

Output Response	Goal	Lower	Upper	Weight	Importance
Current (A)	In range	12	18	1	5
On-time (μ s)	In range	50	150	1	5
Duty Cycle (%)	In range	60	82	1	5
Gap Spark (μ m)	In range	5	15	1	5
MRR (mm^3/min)	Maximum	10.0211	27.5367	1	5

ผลจากการวิเคราะห์พบว่า ค่าพยากรณ์สำหรับอัตราการขจัดเนื้องานที่สูงที่สุด จากการปรับค่าพารามิเตอร์ กระแสไฟฟ้า (Current) เท่ากับ 18 A เวลาเปิด (On-time) 135 μ s ปัจจัยประสิทธิภาพ 82 % และช่องว่างระหว่างอิเล็กโทรดกับชิ้นงาน (Gap Spark) 15 μ m ให้ค่าอัตราการขจัดเนื้องานเท่ากับ 27.5912 (mm^3/min) ซึ่งจากตัวแปรที่เหมาะสมให้ความพึงพอใจเท่ากับ 1.000 ให้ความหมายว่าผลตอบนั้นได้รับความพึงพอใจอย่างสมบูรณ์ ผลลัพธ์ค่าที่ได้จากการพยากรณ์ (Prediction) อยู่ในช่วง (26.335 - 28.848 mm^3/min) ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ดังแสดงในตารางที่ 5

ตารางที่ 5 ข้อมูลการวิเคราะห์ผลตอบสนองที่เหมาะสมสำหรับการวิเคราะห์ผลตอบสนอง

Response	Factor				Value	Composite Desirability
	Current (A)	On-time (μ s)	Duty Cycle (%)	Gap Spark (μ m)		
MRR (mm^3/min)	18	135	82	15	27.5912	1.000
Response Prediction 95% PI = (26.335, 28.848)						

3.3 การตรวจสอบเพื่อยืนยันผล

การยืนยันและเปรียบเทียบค่าที่ได้จากการพยากรณ์ (Prediction) กับการทดสอบจริง (Experiment) โดยทำการวิเคราะห์ผลตอบสนองที่เหมาะสมสำหรับการวิเคราะห์ผลตอบสนองหลายตัวแปรโดยใช้ฟังก์ชันความพึงพอใจ (Desirability Function) หลังจากนั้นพารามิเตอร์ที่เหมาะสมไปทำการทดลองจริง (Experiment) จำนวน 3 ครั้ง อย่างไรก็ตาม เนื่องจากข้อจำกัดเฉพาะของเครื่องที่ใช้ในการทดสอบที่สามารถปรับค่าพารามิเตอร์เวลาเปิดเป็นช่วงเวลา ได้แก่ 2, 4, 8, 10, 16, 20, 32, 50, 80, 100, 150, 200, 400, และ 510 μs ด้วยเหตุนี้ ซึ่งผลลัพธ์จากการพยากรณ์เวลาเปิดเท่ากับ 135 μs ผู้วิจัยจึงพิจารณาเลือกใช้เวลาเปิดที่ 150 μs ในการทดลอง ผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 6 จากผลการทดลองเพื่อยืนยันค่าตัวแปรที่เหมาะสม พบว่าได้ค่าเฉลี่ยของอัตราการขจัดเนื้องานที่ 26.4674 (mm^3/min) ค่าความคลาดเคลื่อนที่ 4.0730%

ตารางที่ 6 ผลการทดลองเพื่อยืนยันผลค่าตัวแปรที่เหมาะสม

No.	Parameter				Material Removal Rate		
	Current (A)	On-time (μs)	Duty Cycle (%)	Gap Spark (μm)	Experiment (mm^3/min)	Prediction (mm^3/min)	Error (%)
1	18	150	82	15	25.6857	27.5912	6.9062
2	18	150	82	15	26.9736	27.5912	2.2384
3	18	150	82	15	26.7429	27.5912	3.0745
Average					26.4674	27.5912	4.0730

4. สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยฉบับนี้ได้ศึกษาอิทธิพลของตัวแปรในกระบวนการกัดเซาะโลหะด้วยไฟฟ้าที่มีผลต่อประสิทธิภาพในการแปรรูปชิ้นงาน ในรูปแบบของอัตราการขจัดเนื้องานวัสดุเหล็กกล้าแม่พิมพ์งานเย็น เกรด DCMX ที่ผ่านกระบวนการปรับปรุงคุณสมบัติทางความร้อน (ชุบแข็ง) มีค่าความแข็งอยู่ในช่วงระหว่าง 58-60 HRC โดยผลการทดลองสามารถนำมาวิเคราะห์เชิงสถิติ อีกทั้งยังหาค่าตัวแปรที่เหมาะสม ทำการพยากรณ์ค่าตามเป้าหมายที่ต้องการโดยใช้ฟังก์ชันความพึงพอใจ ซึ่งสามารถสรุปได้ว่า ตัวแปรกระแสไฟฟ้า เวลาปล่อยกระแสไฟฟ้า ปัจจัยประสิทธิภาพ และระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรดกับผิวชิ้นงาน มีอิทธิพลต่อค่าอัตราการขจัดเนื้องาน และค่าตัวแปรที่เหมาะสม คือ กระแสไฟฟ้า 18 A เวลาเปิด 150 μs ปัจจัยประสิทธิภาพ 82% และช่องว่างระหว่างอิเล็กโทรดกับชิ้นงาน 15 μm จากการยืนยันผลค่าตัวแปรที่เหมาะสม พบว่าได้ค่าเฉลี่ยของอัตราการขจัดเนื้องานที่ 26.4674 (mm^3/min) ค่าความคลาดเคลื่อนที่ 4.0730% จากการทดสอบซ้ำ 3 ครั้ง อยู่ในช่วงค่าทำนาย อยู่ในช่วง (26.335 - 28.848 mm^3/min) ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% แสดงให้เห็นว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์มีความเหมาะสมเชื่อถือได้ และสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานได้จริง

จากฐานข้อมูลในงานวิจัยฉบับนี้ ผู้วิจัยจะนำไปต่อยอดและทำการศึกษาด้านความเค้นตกค้างจากกระบวนการกัดเซาะโลหะด้วยไฟฟ้าด้วยกระบวนการจำลองผลการทดลอง (Simulation) พร้อมกับศึกษาผลกระทบทางความร้อนที่มีผลต่อโครงสร้างด้านโลหะวิทยา

5. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ คณะวิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม ที่ให้การสนับสนุนตลอดระยะเวลาการศึกษาและดำเนินการวิจัย จนงานฉบับนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] กมลพงษ์ แจ่มกมล, ปิยะพงษ์ คำคุณ และ ศุภวัฒน์ ชูวารี. “การศึกษาประสิทธิภาพการตัดโลหะด้วยลวดไฟฟ้าแบบเดินตัดหลายครั้งบนวัสดุเหล็กกล้าเครื่องมือ SKD 61 โดยใช้ชุดพารามิเตอร์แนะนำของเครื่องจักร,” Engineering and Technology Horizons. ปีที่ 41. ฉบับที่ 3, 2567, หน้า 410305.
- [2] K. Kanlayasiri, and S. Boonmung. “An investigation on effects of wire-EDM machining parameters on surface roughness of newly developed DC53 die steel” Journal of Materials Processing Technology, Volumes 187–188, (2007), pp 26-29.

- [3] ศุภวัฒน์ ชูวารี, เอกชัย รอดพิสา, ปิยะพงษ์ คำคุณ, สมชาย วนไทยสงค์, และกมลพงศ์ แจ่มกมล. “การศึกษาอิทธิพลของตัวแปรในกระบวนการกัดเซาะโลหะด้วยไฟฟ้าที่มีผลต่ออัตราการขจัดเนื้องานเหล็กกล้าแม่พิมพ์งานเย็นเกรด DCMX,” การประชุมวิชาการราชชมงคลด้านเทคโนโลยีการผลิตและการจัดการ (RMTC 2024) ครั้งที่ 9 1-3 พฤษภาคม 2567 ณ โรงแรม เซอร์วิเทจ เชียงราย อำเภอเมือง จังหวัดเชียงราย, หน้า 321-327.
- [4] Takayuki Shimizu, Koichiro Inoue, and Atsushi Sekiya, “A New Type Cold Work Die Steel with Isotropy of Dimensional Change DCMX” Denki-Seiko (Electric Furnace Steel), volume 81 (1), (2010), p.53.
- [5] Coldwork_properties, <https://www.daido.co.jp/en/products/tool/cold/index.html>, 25 Janury 2024.
- [6] Daido Steel Group.ToolSteel. https://www.daido.co.jp/en/common/pdf/pages/products/tool/technicaldata/demkiseiko_vol81_p53.pdf%20, 25 Janury 2024.
- [7] S. Chuvaree, K. Kanlayasiri, “Effects of Side Flushing and Multi-Aperture Inner Flushing on Characteristics of Electrical Discharge Machining Macro Deep Holes”, Metals, 11, 2021, pp.148.
- [8] กมลพงศ์ แจ่มกมล และ ศุภวัฒน์ ชูวารี, “การศึกษาประสิทธิภาพการกัดโลหะด้วยไฟฟ้าโดยการประยุกต์ใช้เทคนิคการหมุนอิเล็กโทรดร่วมกับการปล่อยไดอิเล็กทริกผ่านแกนกลางอิเล็กโทรด”, วารสารวิจัย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย, ปีที่ 14, ฉบับที่ 1, 2565, หน้า 16-30.
- [9] Niwat Mookam, Piyawan Sunasuan, Tavee Madsa, Phisith Muangnoy, and Suppawat Chuvaree. “Effects of Graphite and Boron Carbide Powders Mixed into Dielectric Fluid on Electrical Discharge Machining of SKD 11 Tool Steel”, Arabian Journal for Science and Engineering, volume 46, (2021), pp 2553–2563.
- [10] Kamonpong, J., Piyapong, K., and Suppawat, C. “Influence of Electrical Parameters on the Machining Performance in the Small Hole Drilling by EDM Process” Solid State Phenomena, volume 349, (2023), pp 33-39.

การปรับปรุงวัสดุทดแทนซีเมนต์จากหญ้าขจรจบสำหรับผลิตคอนกรีตบล็อก Improvement of Cement Substitute Materials from Mission Grass for Concrete Block Manufacture

ณปภัช คงฤทธิ^{1*}, จักรพงษ์ จิตต์จำนงค์², พลสรณ์ แซ่เตียว³, ปณิดดา โสฬส⁴ และ วันนาเดียน นาวะ⁵

^{1,2,3,4,5}หลักสูตรสาขาวิชาเทคโนโลยีปิโตรเลียม คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรมและเทคโนโลยี

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย สงขลา

1 ถ.ราชดำเนินนอก ต.บ่อয়ง อ.เมือง จ.สงขลา 90000

Napaphat Kongrit^{1*}, Jakkrapong Jitjamnong², Phonsan Saetiao³, Panadda Solod⁴ and Wannadeear Nawae⁵

^{1,2,3,4,5}Department of Petroleum Technology, Faculty of Industrial Education and Technology,

Rajamangala University of Technology Srivijaya, Songkhla,

1 Ratchadamnoennok Rd. Boyang Sub-district, Muang District, Songkhla 90000, Thailand

*Corresponding author Email: Napaphat.s@rmutsv.ac.th

(Received: October 03, 2025 / Revised: December 12, 2025 / Accepted: December 20, 2025)

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาขององค์ประกอบทางเคมีโดยใช้เครื่องเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนส์สเปกโตรมิเตอร์ เปรียบเทียบสมบัติทางกายภาพของมอร์ตาร์หญ้าขจรจบระหว่างใช้สารโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้น 15 เปอร์เซ็นต์กับไม่ใช้สารโซเดียมไฮดรอกไซด์ในการปรับปรุงพื้นผิวสำหรับผลิตคอนกรีตบล็อก อัตราส่วนหญ้าขจรจบแทนซีเมนต์ร้อยละ 0 10 20 และ 30 โดยน้ำหนัก โดยใช้บล็อกอะคริลิกขนาด 5x5x5 เซนติเมตร ทำการทดสอบความสามารถในการรับแรงอัด ค่าความหนาแน่นของมอร์ตาร์หญ้าขจรจบที่อายุ 0 14 และ 28 วัน ผลการทดสอบพบว่าค่าเฉลี่ยกำลังอัดและค่าความหนาแน่นของมอร์ตาร์หญ้าขจรจบที่ไม่ปรับปรุงพื้นผิวด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ มีค่าเฉลี่ยกำลังอัดมากที่สุดผ่านการบ่มเป็นระยะเวลา 14 วัน มอร์ตาร์หญ้าขจรจบแทนซีเมนต์ร้อยละ 30 เท่ากับ 14.25 เมกะปาสคาล และมอร์ตาร์หญ้าขจรจบที่มีค่าความหนาแน่นมากที่สุดผ่านการบ่มเป็นระยะเวลา 14 วัน มอร์ตาร์หญ้าขจรจบแทนซีเมนต์ร้อยละ 10 มีค่าเท่ากับ 1.59 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร มอร์ตาร์หญ้าขจรจบที่ปรับปรุงพื้นผิวด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ มีค่าเฉลี่ยกำลังอัดมากที่สุดผ่านการบ่มเป็นระยะเวลา 0 วัน มอร์ตาร์หญ้าขจรจบแทนซีเมนต์ร้อยละ 20 เท่ากับ 12.19 เมกะปาสคาล มอร์ตาร์หญ้าขจรจบที่มีค่าความหนาแน่นมากที่สุดผ่านการบ่มเป็นระยะเวลา 14 วัน มอร์ตาร์หญ้าขจรจบแทนซีเมนต์ร้อยละ 20 เท่ากับ 1.73 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ปริมาณของเส้นใยหญ้าขจรจบและระยะเวลาในการบ่มที่มีผลต่อค่าความหนาแน่นและค่ากำลังอัด

คำสำคัญ: หญ้าขจรจบ มอร์ตาร์ วัสดุทดแทน โซเดียมไฮดรอกไซด์

Abstract

This research is to study the chemical composition using X-ray fluorescence spectrometer, comparison of the physical properties of *Pennisetum pedicellatum* mortar between using sodium hydroxide at a concentration of 15% and without sodium hydroxide for surface improvement for concrete block manufacture, the ratio of *Pennisetum pedicellatum* replaced cement in 0, 10, 20, and 30 %wt. Using acrylic block of size 5x5x5 cm, the compressive strength and density of incubated mortar were tested at 0, 14 and 28 days. The results showed that the compressive strength and density without sodium hydroxide treatment is the highest average compressive strength after curing for 14 days in *Pennisetum pedicellatum* mortar replaced 30%wt of cement, equal to 14.25 MPa. And the highest density of mortar that curing 14 days, the *Pennisetum pedicellatum* mortar replaced 10%wt cement, equal to 1.59 g/cm³. Sodium hydroxide surface-improved perennial *Pennisetum pedicellatum* mortar. Is the highest average compressive strength after curing for 0 days, *Pennisetum pedicellatum* mortar replaced 20%wt of cement equal to 12.19 MPa. The density of mortar that curing 14 days, *Pennisetum*

pedicellatum mortar replaced 20%wt cement equal to 1.73 g/cm^3 . The amount of *Pennisetum pedicellatum* fiber and the curing time affected the density and compressive strength.

Keywords: Mission grass, Mortar, Substitute materials, Sodium hydroxide

1. บทนำ

คอนกรีตเป็นวัสดุที่นิยมใช้ในงานก่อสร้างอย่างแพร่หลาย โดยเฉพาะปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (Portland cement) เป็นวัสดุผสมที่ใช้มากเป็นอันดับหนึ่งในการผลิตปูนซีเมนต์ โดยมีการนำปูนซีเมนต์เข้าเตาเผาแบบหมุนที่อุณหภูมิสูงประมาณ 1,500 องศาเซลเซียส เตาเผาเป็นท่อขนาดใหญ่วางเป็นมุมเอียงและหมุนรอบตัวเองช้า ๆ ปล่องวัดอุณหภูมิให้ไหลมาในท่อทางด้านต่ำสวนทางกับไฟที่พุ่งเข้าไปโดยน้ำมันเป็นเชื้อเพลิงในการเผา ซึ่งในการผลิตปูนซีเมนต์ต้องใช้ปริมาณเชื้อเพลิงและพลังงานสูงมาก ก่อให้เกิดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ส่งผลให้เกิดก๊าซเรือนกระจก ให้เกิดปัญหาภาวะโลกร้อน ซึ่งเกิดผลเสียต่อธรรมชาติและความเป็นอยู่ของมนุษย์เป็นอย่างมาก ทำให้เกิดการตระหนักและนึกคิดนวัตกรรม และสิ่งประดิษฐ์ใหม่ ๆ ที่เป็นมิตรต่อธรรมชาติและสิ่งแวดล้อมมากขึ้น เพื่อลดปัญหาการเกิดภาวะโลกร้อน จึงได้มีการใช้มอร์ตาร์จากธรรมชาติเป็นวัสดุทดแทนซีเมนต์เพื่อลดการผลิตซีเมนต์ที่เป็นปัญหาหนึ่งของการเกิดปัญหาภาวะโลกร้อน

มอร์ตาร์ คือ วัสดุก่อสร้างชนิดหนึ่งประกอบด้วยส่วนผสมระหว่างเป็นปูนซีเมนต์ หยาบ น้ำ และน้ำยาผสมคอนกรีตประเภทลดปริมาณน้ำที่ใช้ในส่วนผสม และหน่วงการก่อตัว ปัจจุบันมอร์ตาร์สามารถผลิตจากวัสดุธรรมชาติ เช่น ยางพารา แกลบ ฟาง และอื่น ๆ ที่มีคุณสมบัติในการผสมเหมือนหรือคล้ายซีเมนต์เพื่อลดปริมาณและทดแทนการใช้ซีเมนต์ที่มีกระบวนการผลิตซึ่งใช้ปริมาณเชื้อเพลิงและพลังงานสูงมาทดแทนซีเมนต์ การศึกษาทางวิจัยที่เกี่ยวข้อง พบว่า ภวักร สุขแสน และคณะ (2559) ได้ศึกษาการพัฒนาคอนกรีตมวลเบาจากวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรพบว่าฟางข้าวและขุยมะพร้าวซึ่งมีมากในประเทศไทยมาใช้เป็นวัสดุเสริมคอนกรีตและทำให้คอนกรีตมีน้ำหนักเบากว่าปูนมอร์ตาร์ 25 - 40 เปอร์เซ็นต์เมื่อมีเส้นใยในระบบ 30 - 50 เปอร์เซ็นต์ โดยปริมาตร การปรับปรุงผิวฟางข้าวทั้งแบบหยาบ (1-5 มิลลิเมตร) และแบบละเอียด (<1 มิลลิเมตร) ด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 15 เปอร์เซ็นต์ สามารถกำจัดเฮมิเซลลูโลส ลิกนินและกรดไขมันออกทำให้เซลลูโลสมีพื้นผิวที่ขรุขระและชอบน้ำมากขึ้น และเมื่อนำมาผสมกับเฟสปูนทำให้มีความเข้ากันได้ดี มีการกระจายตัวของเส้นใยในเมทริกซ์ความสม่ำเสมอและการยึดเกาะระหว่างผิวของเส้นใยและเฟสปูนดี เกิดช่องว่างบริเวณผิวสัมผัสน้อยลง คอนกรีตมวลเบาที่มีเส้นใยฟางละเอียด 20 เปอร์เซ็นต์ร่วมกับขุยมะพร้าวละเอียด 10 เปอร์เซ็นต์ ให้ค่ากำลังอัดสูงถึง 140 กก./ตร.ซม. โดยมีความหนาแน่นมวลรวมที่ลดลงกว่า 30 เปอร์เซ็นต์จากซีเมนต์มอร์ตาร์ การบ่มชิ้นงานคอนกรีตไว้เป็นเวลา มากกว่า 28 วัน จะมีการพัฒนาการรับแรงกดอัดที่สูง [1] Jyoti Rashmi Nayaka et al. (2022) ได้ศึกษาการตรวจสอบคุณสมบัติต่าง ๆ ของปูนสดและแบบชุบแข็งที่เสริมด้วยเส้นใยธรรมชาติ (ปอกระเจาและป่านศรนารายณ์) และปริมาณเส้นใยสังเคราะห์ (โพรพิลีน) ตั้งแต่ 1-2 เปอร์เซ็นต์ และศึกษาทดลองของมอร์ตาร์ ซึ่งรวมถึงปริมาณอากาศที่คงตัวของกำลังรับแรงอัด กำลังรับแรงดัดงอ และการหดตัว การถ่ายภาพพหุรูป MIP และ SEM จากผลการวิจัยพบว่าการใช้เส้นใยของเสียวจากธรรมชาติมีข้อดีที่แตกต่างจากเส้นใยสังเคราะห์ จึงแนะนำให้ใช้เส้นใยปอกระเจากับปูนเพื่อวัตถุประสงค์เชิงโครงสร้าง [2]

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงเลือกศึกษาการผลิตวัสดุทดแทนซีเมนต์จากวัชพืชทางการเกษตรที่มีอยู่มากและไม่สามารถกำจัดได้หมด เพื่อลดการใช้ซีเมนต์และเพิ่มคุณค่าของวัชพืช โดยวัชพืชที่สนใจศึกษา คือ หญ้าขจรจบเนื่องจากหญ้าขจรจบมีปริมาณเฉลี่ยมากถึง 1.8 ตันต่อไร่ และมีการนำหญ้าขจรจบไปใช้ประโยชน์น้อยมากอีกทั้งหญ้าขจรจบมีลักษณะที่คล้ายฟาง ทางผู้วิจัยจึงคิดว่าหญ้าขจรจบอาจมีความเหมาะสมสำหรับผลิตคอนกรีตบล็อก โดยมีการศึกษาสมบัติทางเคมีของหญ้าขจรจบแทนที่ซีเมนต์ เปรียบเทียบสมบัติทางกายภาพของมอร์ตาร์หญ้าขจรจบระหว่างการปรับปรุงพื้นผิวของด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) กับไม่ใช้ NaOH ศึกษา กำลังรับแรงอัด ค่าความหนาแน่น และเปรียบเทียบระยะเวลาการบ่มสำหรับนำมาผลิตมอร์ตาร์ทดแทนซีเมนต์

2. วิธีดำเนินงาน

2.1 การผสมส่วนผสมซีเมนต์

2.2.1 ปรับสภาพผิวของหญ้าขจรจบโดยใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้น 15 เปอร์เซ็นต์

2.2.2 นำซีเมนต์ หญ้าขจรจบขนาด 16 เมช ดินขนาด 30 เมช และน้ำที่ได้ทำการคำนวณส่วนผสมให้สมดุลกับบล็อกอะคริลิก ดังตารางที่ 1 จากนั้นเทลงในถังส่วนผสมและทำการผสมภายในระยะเวลา 30 นาที

2.2 การเตรียมวัสดุ

นำหญาขจรจบที่เตรียมไว้ไปอบให้แห้งเป็นเวลา 24 ชั่วโมง หลังจากอบเสร็จแล้วไปบดให้ละเอียดและคัดขนาดเส้นใยด้วยตะแกรงคัดขนาด 16 เมช เขย่าเป็นเวลา 1-2 นาที ให้นำดินที่เป็นก้อนไปบดให้ละเอียด แล้วนำไปคัดขนาดโดยใช้ตะแกรงคัดขนาด 30 เมช เขย่าเป็นเวลา 1-2 นาที

2.3 ออกแบบวิธีการทดลอง

การทดลองหล่อวัสดุทดแทนซีเมนต์ซีเมนต์จากหญาขจรจบ ด้วยการหล่อคอนกรีตขนาด $5 \times 5 \times 5$ เซนติเมตร ผสมกับปูนซีเมนต์มีอัตราส่วนผสมน้ำต่อปริมาณซีเมนต์และหญาขจรจบ 0.6 ใช้อัตราส่วนหญาขจรจบแทนที่ซีเมนต์ร้อยละ 0 10 20 และ 30 โดยน้ำหนักตามลำดับ โดยการหล่อทุกครั้งจะทำการชั่งน้ำหนัก โดยเทียบตามอัตราส่วนผสมเหล่านั้นมาผสมให้เข้ากันเป็นเนื้อเดียวแล้วทำการหล่อมอร์ตาร์

ตารางที่ 1 อัตราส่วนผสมของมอร์ตาร์

ร้อยละหญา ขจรจบแทนที่ ปูนซีเมนต์	หญาขจรจบ (กรัม)	ดิน (กรัม)	ซีเมนต์ (กรัม)	น้ำ (กรัม)
0	0	138	92	55.2
10	23	138	69	55.2
20	46	138	46	55.2
30	69	138	23	55.2

2.4 การทดสอบสมบัติทางกายภาพ

2.4.1 การทดสอบการบ่ม

2.4.1.1 หล่อมอร์ตาร์ขนาด $5 \times 5 \times 5$ เซนติเมตร

2.4.1.2 อัตราส่วนหญาขจรจบแทนปูนซีเมนต์ร้อยละ 0 10 20 และ 30 โดยน้ำหนัก

2.4.1.3 เตรียมหญาขจรจบที่ผ่านการปรับสภาพผิวจากสารโซเดียมไฮดรอกไซด์และไม่ปรับสภาพผิวจากสารโซเดียมไฮดรอกไซด์

2.4.1.4 การบ่มมอร์ตาร์ บ่มในน้ำที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 0 14 และ 28 วัน

2.4.2 การทดสอบสมบัติทางกล

2.4.2.1 ความหนาแน่น โดยการชั่งน้ำหนักของมอร์ตาร์ ดังสมการที่ (1)

$$\text{ความหนาแน่น (D)} = W/V \text{ (กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร)} \quad (1)$$

เมื่อ W คือ น้ำหนักของมอร์ตาร์ (กรัม)

V คือ ปริมาตรของมอร์ตาร์ (ลูกบาศก์เซนติเมตร)

2.4.2.2 การทดสอบกำลังอัด

การทดสอบกำลังอัดมอร์ตาร์ขนาด $5 \times 5 \times 5$ เซนติเมตร โดยใช้อัตราส่วนหญาขจรจบแทนซีเมนต์ร้อยละ 10 20 และ 30 โดยน้ำหนัก ระยะเวลาบ่ม 0 14 และ 28 วัน เข้าเครื่องทดสอบกำลังอัด (Compressive Strength, ksc) ยี่ห้อ GOTECH ดังรูปที่ 1 วางมอร์ตาร์บนแท่นกดด้านล่างโดยวางในตำแหน่งที่อยู่กึ่งกลางของแท่งกด (แผ่นของแท่งกดทั้งด้านบนและด้านล่างต้องสะอาด) เปิดเครื่องกดตัวอย่าง โดยการเพิ่มแรงกดอย่างสม่ำเสมอด้วยอัตรา 140 Ksc/min (Kilogram per square centimeter) และความเร็ว 10 mm/min จนมอร์ตาร์แตกละเอียดและทำการบันทึกผลการคำนวณ ดังสมการที่ (2)

$$G = P/A \quad (2)$$

เมื่อ G คือ กำลังอัด มีหน่วยเป็น พาสคัล (Pa)

P คือ แรงกดสูงสุดที่ทำให้มอร์ตาร์แตกละเอียด มีหน่วยเป็น นิวตัน (N)

A คือ พื้นที่หน้าตัดของมอร์ตาร์ มีหน่วยเป็นตารางเมตร (m^2)



รูปที่ 1 เครื่องทดสอบกำลังอัด

2.5 การหล่อและบ่มมอร์ตาร์หญาจรจบที่ไม่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH)

ซึ่งส่วนผสมทั้งหมดได้แก่ หญาจรจบ ซีเมนต์ หน้าที่ดิน และน้ำที่ได้จากการคำนวณ ดังตารางที่ 1 ผสมส่วนผสมทั้งหมดในอ่างผสมให้เข้ากันจากนั้นมาอัดลงบล็อกตัวอย่างขนาด $5 \times 5 \times 5$ เซนติเมตรและทิ้งไว้ให้แห้งบ่มในน้ำเป็นเวลา 0 14 และ 28 วัน ดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 มอร์ตาร์หญาจรจบบ่มน้ำเป็นเวลา 0 14 และ 28 วัน

2.6 การหล่อและบ่มมอร์ตาร์หญาจรจบที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH)

ซึ่งสารโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้นที่ 15 โมล โดยสารโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) 300 กรัมผสมกับน้ำ 500 ml และนำหญาจรจบที่คัดขนาดแล้วไปแช่สารเป็นเวลา 12 ชั่วโมง เมื่อครบเวลาที่กำหนดนำหญาจรจบมาล้างด้วยน้ำสะอาดจนกว่าค่า pH จะเป็นกลาง นำหญาจรจบไปบ่มอีกครั้งจนแห้งสนิทไปผสมกับส่วนผสมทั้งหมด และทำการอัดลงบล็อกตัวอย่างขนาด $5 \times 5 \times 5$ เซนติเมตร บ่มในน้ำเป็นเวลา 0 14 และ 28 วัน

3. ผลการวิจัยและอภิปรายผล

3.1 องค์ประกอบทางเคมีของหญ้าขจรจบ

3.1.1 ผลการทดสอบ X-ray fluorescence (XRF)

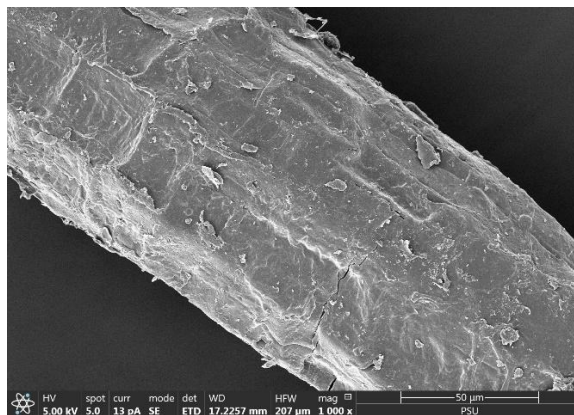
ผลการทดสอบเพื่อหาองค์ประกอบทางเคมีของหญ้าขจรจบโดยใช้เครื่องเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนส์สเปกโตรมิเตอร์ (X-ray Fluorescence Spectrometer-XRF) จากศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ได้ผลการทดสอบแสดงดังตารางที่ 2 มีค่าดังนี้ หญ้าขจรจบพบองค์ประกอบทางเคมีที่สำคัญ คือ อะลูมิเนียม (Al) ซิลิคอน (Si) แคลเซียม (Ca) และไอรอน (Fe) เท่ากับ 0.054 1.392 0.350 และ 0.049 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ซึ่งพบว่าองค์ประกอบทางเคมีของหญ้าขจรจบนั้นมีคุณสมบัติในการเชื่อมประสานที่น้อย เนื่องจากหญ้าขจรจบมีองค์ประกอบหลักทางเคมีในปริมาณที่น้อย ซึ่งการเพิ่มกำลังอัด คือ การที่ปริมาณของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Ca(OH)_2) ที่เพิ่มขึ้นจากปฏิกิริยาไฮเดรชันสามารถทำปฏิกิริยาปอซโซลานิกกับซิลิกา (SiO_2) ได้แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) เพิ่มขึ้นส่งผลให้โครงสร้างแน่นและรับกำลังอัดได้สูงขึ้น [3] ดังนั้น การเพิ่มปริมาณของเส้นใยทำให้ความสามารถในการยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลของปูนซีเมนต์ลดน้อยลง ผนวกกับเส้นใยมีความหนาแน่นน้อยเมื่อเส้นใยมีปริมาณมากเกินไปจะทำให้ความต้านทานแรงอัดลดน้อยลงด้วย [4] อีกทั้งองค์ประกอบทางเคมีจากการทดสอบ XRF ของหญ้าขจรจบแสดงให้เห็นว่ามีซิลิกา (Si) เป็นองค์ประกอบหลักร่วมกับออกไซด์ของอะลูมิเนียม แคลเซียม แมกนีเซียม โพแทสเซียม และโซเดียมในปริมาณรอง ซึ่งมีลักษณะคล้ายถ้าชีวมวลกลุ่มหญ้าที่ใช้เป็นวัสดุเสริมปฏิกิริยาปอซโซลานิกในซีเมนต์ได้ดี ดังนั้นหญ้าขจรจบจึงมีศักยภาพในการใช้เป็นวัสดุทดแทนซีเมนต์ [5]

ตารางที่ 2 องค์ประกอบทางเคมีของหญ้าขจรจบ

ลำดับ	ธาตุ	ร้อยละปริมาณ
1	โซเดียม (Na)	0.041
2	แมกนีเซียม (Mg)	0.145
3	อะลูมิเนียม (Al)	0.054
4	ซิลิคอน (Si)	1.392
5	ฟอสฟอรัส (P)	0.106
6	ซัลเฟอร์ (S)	0.120
7	คลอรีน (Cl)	0.209
8	โพแทสเซียม (K)	1.697
9	แคลเซียม (Ca)	0.350
10	แมงกานีส (Mn)	0.033
11	ไอรอน (Fe)	0.049
12	คอปเปอร์ (Cu)	0.011
13	ซิงค์ (Zn)	0.004
14	รูบิเดียม (Rb)	0.003

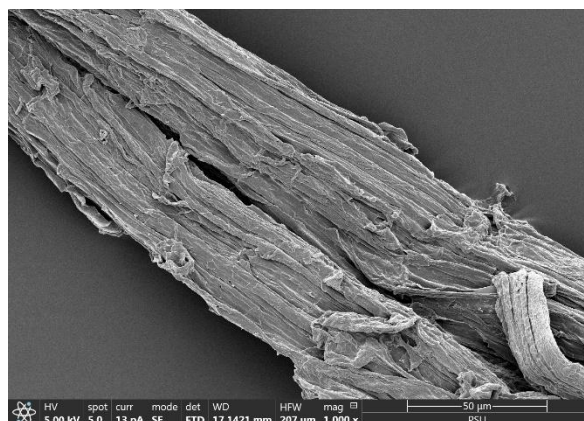
3.1.2 ผลการทดสอบ Scanning Electron Microscope (SEM)

3.1.2.1 ผลการทดสอบเพื่อหาโครงสร้างของหญ้าขจรจบที่ไม่ใช้สารโซเดียมไฮดรอกไซด์ในการปรับสภาพพื้นผิว โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy, SEM) ยี่ห้อ JEOL รุ่น JSM-5800 LV (SEM5800) จากศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ภาพที่ได้จากกล้อง SEM จะมีกำลังขยายอยู่ที่ 1,000 เท่า เป็นภาพที่กำลังขยายสูง และสามารถแยกแยะรายละเอียดของภาพได้ และมีลักษณะเหมือน 3 มิติที่มีระยะชัดลึกสูง ทำให้สามารถระบุลักษณะของพื้นผิวของชิ้นงานได้อย่างชัดเจน ดังรูปที่ 3



รูปที่ 3 หล้าขจรจบที่ไม่ใช้สารโซเดียมไฮดรอกไซด์ กำลังขยายที่ 1,000X

3.1.2.2 ผลการทดสอบเพื่อหาโครงสร้างของหล้าขจรจบที่ใช้สารโซเดียมไฮดรอกไซด์ในการปรับสภาพพื้นผิว โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy, SEM) กำลังขยายที่ 1,000 เท่า ดังรูปที่ 4 พบว่าเส้นใยหล้าขจรจบหลังจากการปรับสภาพด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ส่งผลต่อสภาพผิวและโครงสร้างของเส้นใยอย่างชัดเจน ดังนี้ พื้นผิวของเส้นใยหยาบ และมีร่องตามแนวยาวแสดงถึงการที่ NaOH เข้าไปละลายลิกนิน เฮมิเซลลูโลส และสารไขมันที่เคลือบผิวเส้นใย ทำให้พื้นที่ผิวจำเพาะเพิ่มขึ้น ช่วยให้สารยัดประสานสามารถแทรกซึมและยึดเกาะทางกลได้ดี เมื่อใช้เส้นใยเป็นวัสดุเสริมแรงในคอมโพสิตหรืออิฐบล็อก



รูปที่ 4 หล้าขจรจบที่ใช้สารโซเดียมไฮดรอกไซด์ กำลังขยายที่ 1,000X

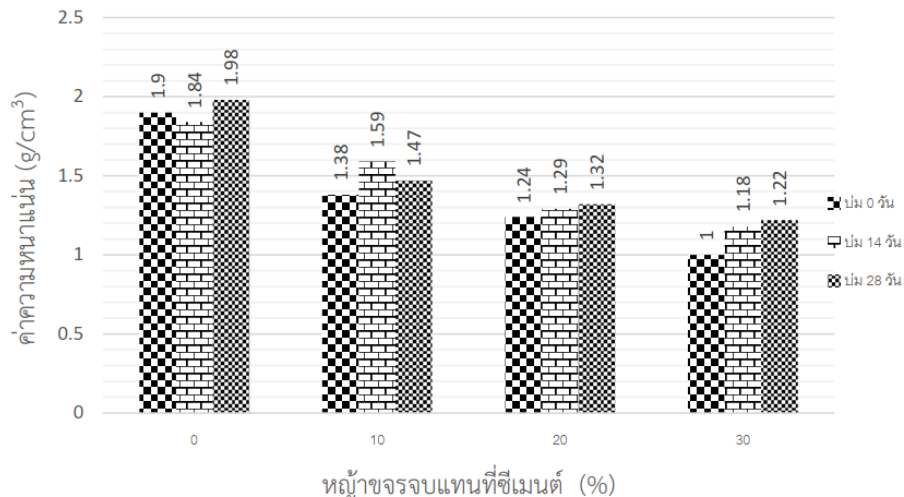
ผลจากการศึกษาลักษณะเส้นใยหล้าขจรจบที่ไม่ผ่านการปรับปรุงเส้นใยด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ พบว่ามีลักษณะพื้นผิวเรียบต่างจากเส้นใยหล้าขจรจบที่ผ่านการปรับปรุงด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ พบว่ามีลักษณะเปื่อย ไม่เรียบ เส้นใยมีการเรียงตัวเมื่อกำลังขยายมากขึ้นก็จะเห็นได้ว่าเส้นใยมีความชัดเจนมากขึ้น เนื่องจากโซเดียมไฮดรอกไซด์ไปกำจัดเฮมิเซลลูโลสและลิกนินออกมาทำให้ผิวของเส้นใยมีปริมาณเซลลูโลสมากขึ้น และมีความขรุขระขึ้น [6] ทำให้เส้นใยหล้าขจรจบที่ผ่านการปรับปรุงด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ดูดซับน้ำได้ดีกว่า

3.2 ความหนาแน่นของมอร์ตาร์หล้าขจรจบ

3.2.1 แสดงค่าเฉลี่ยความหนาแน่นของมอร์ตาร์หล้าขจรจบที่ไม่ปรับปรุงพื้นผิวด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์

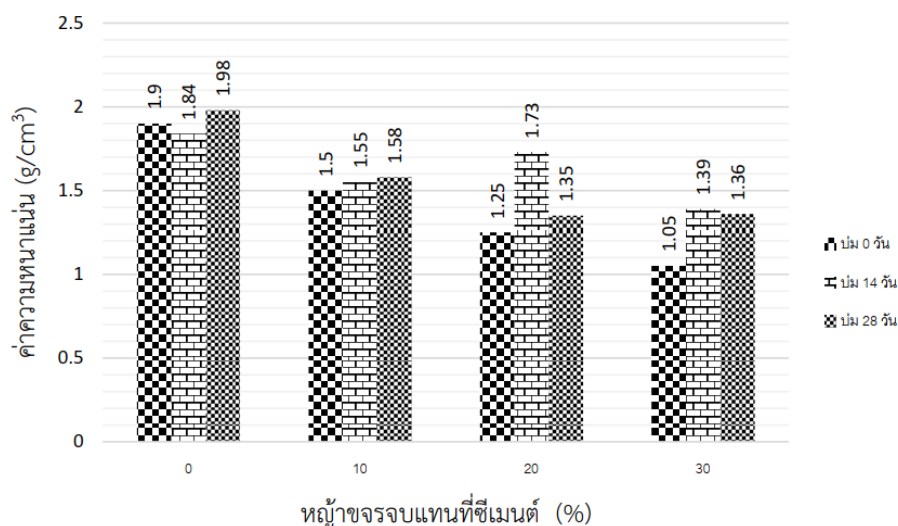
จากรูปที่ 5 แสดงให้เห็นว่ามอร์ตาร์หล้าขจรจบในการบ่มด้วยน้ำเป็นระยะเวลา 0 วัน หล้าขจรจบแทนที่ซีเมนต์ร้อยละ 0 10 20 และ 30 มีความหนาแน่นเท่ากับ 1.9 1.38 1.24 และ 1.0 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ตามลำดับ มอร์ตาร์หล้าขจรจบในการบ่มด้วยน้ำจืดเป็นระยะเวลา 14 วัน หล้าขจรจบแทนที่ซีเมนต์ร้อยละ 0 10 20 และ 30 มีความหนาแน่นเท่ากับ 1.84 1.59 1.29 และ 1.18 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ตามลำดับ มอร์ตาร์หล้าขจรจบในการบ่มด้วยน้ำจืด

เป็นระยะเวลา 28 วัน ภูเขาจระจบแทนที่ซีเมนต์ร้อยละ 0 10 20 และ 30 มีค่าความหนาแน่นเท่ากับ 1.98 1.47 1.32 และ 1.22 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ตามลำดับ พบว่ามอร์ตาร์ภูเขาจระจบที่มีความหนาแน่นมากที่สุด คือ มอร์ตาร์ภูเขาจระจบแทนที่ซีเมนต์ร้อยละ 0 ในการบ่มด้วยน้ำจืดเป็นระยะเวลา 28 วัน แต่เมื่อเปรียบเทียบกับการใช้วัสดุทดแทนซีเมนต์ภูเขาจระจบที่มีความหนาแน่นมากที่สุด คือ มอร์ตาร์ภูเขาจระจบแทนที่ซีเมนต์ร้อยละ 10 ในการบ่มด้วยน้ำจืดเป็นระยะเวลา 14 วัน และมอร์ตาร์ที่มีความหนาแน่นน้อยที่สุด คือ มอร์ตาร์ภูเขาจระจบที่บ่มเป็นเวลา 0 วัน ภูเขาจระจบแทนที่ซีเมนต์ร้อยละ 30 เนื่องจากภูเขาจระจบมีลักษณะพื้นผิวขรุขระและมีรูพรุน อากาศจึงเข้าไปแทนที่ในรูพรุนของกอมมอร์ตาร์จึงทำให้มีความหนาแน่นน้อยกว่าทราย ดังนั้น อัตราส่วนระหว่างปูนซีเมนต์ต่อทรายต่อภูเขาจระจบที่เพิ่มขึ้น จะทำให้ความหนาแน่นมอร์ตาร์ลดลง [7]



รูปที่ 5 ค่าเฉลี่ยความหนาแน่นมอร์ตาร์ภูเขาจระจบที่ไม่ปรับปรุงพื้นผิวด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ในการบ่มด้วยน้ำจืดเป็นระยะเวลา 0 14 และ 28 วัน

3.2.2 แสดงค่าเฉลี่ยความหนาแน่นของมอร์ตาร์ภูเขาจระจบที่ปรับปรุงพื้นผิวด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์

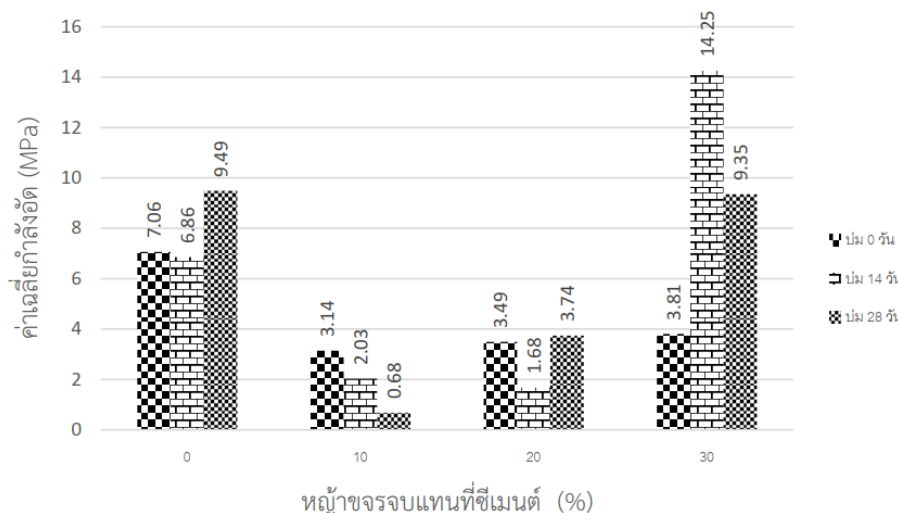


รูปที่ 6 ค่าเฉลี่ยความหนาแน่นมอร์ตาร์ภูเขาจระจบที่ปรับปรุงพื้นผิวด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ในการบ่มด้วยน้ำจืดเป็นระยะเวลา 0 14 และ 28 วัน

จากรูปที่ 6 แสดงให้เห็นว่ามอร์ตาร์หญาขจรจบในการบ่มด้วยน้ำจืดเป็นระยะเวลา 0 วัน หญาขจรจบแทนที่ซีเมนต์ร้อยละ 0 10 20 และ 30 มีค่าความหนาแน่นเท่ากับ 1.9 1.5 1.25 และ 1.05 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ตามลำดับ มอร์ตาร์หญาขจรจบในการบ่มด้วยน้ำจืดเป็นระยะเวลา 14 วัน หญาขจรจบแทนที่ซีเมนต์ร้อยละ 0 10 20 และ 30 มีค่าความหนาแน่นเท่ากับ 1.84 1.55 1.73 และ 1.39 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ตามลำดับ มอร์ตาร์หญาขจรจบในการบ่มด้วยน้ำจืดเป็นระยะเวลา 28 วัน หญาขจรจบแทนที่ซีเมนต์ร้อยละ 0 10 20 และ 30 มีค่าความหนาแน่นเท่ากับ 1.98 1.58 1.35 และ 1.36 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ตามลำดับ พบว่ามอร์ตาร์ที่มีความหนาแน่นน้อยที่สุด คือ มอร์ตาร์หญาขจรจบที่บ่มเป็นเวลา 0 วัน หญาขจรจบแทนที่ซีเมนต์ร้อยละ 30 เมื่อหญาขจรจบผ่านการแช่สารนั้นทำให้หญาขจรจบมีลักษณะพื้นผิวขรุขระที่มากขึ้นและมีรูพรุนที่มากขึ้น ทำให้วัสดุทดแทนซีเมนต์จากหญาขจรจบมีความหนาแน่นที่สูงขึ้น [4] เนื่องจากพื้นผิวที่หยาบทำให้เกิด mechanical interlocking ระหว่างเส้นใยกับซีเมนต์ ส่งผลให้ค่าความหนาแน่นเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับเส้นใยที่ไม่ผ่านการปรับปรุงสภาพ [8] หญาขจรจบที่มีความหนาแน่นมากที่สุด คือ มอร์ตาร์ในหญาขจรจบแทนที่ซีเมนต์ร้อยละ 0 ในการบ่มด้วยน้ำจืดเป็นระยะเวลา 28 วัน แต่เมื่อเปรียบเทียบกับการใช้วัสดุทดแทนซีเมนต์หญาขจรจบที่มีความหนาแน่นมากที่สุด คือ มอร์ตาร์หญาขจรจบแทนที่ซีเมนต์ร้อยละ 20 ในการบ่มด้วยน้ำจืดเป็นระยะเวลา 14 วัน

3.3 ผลการทดสอบกำลังอัดของมอร์ตาร์หญาขจรจบ

3.3.1 ผลกำลังอัดของมอร์ตาร์หญาขจรจบที่ไม่ปรับปรุงพื้นผิวด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์

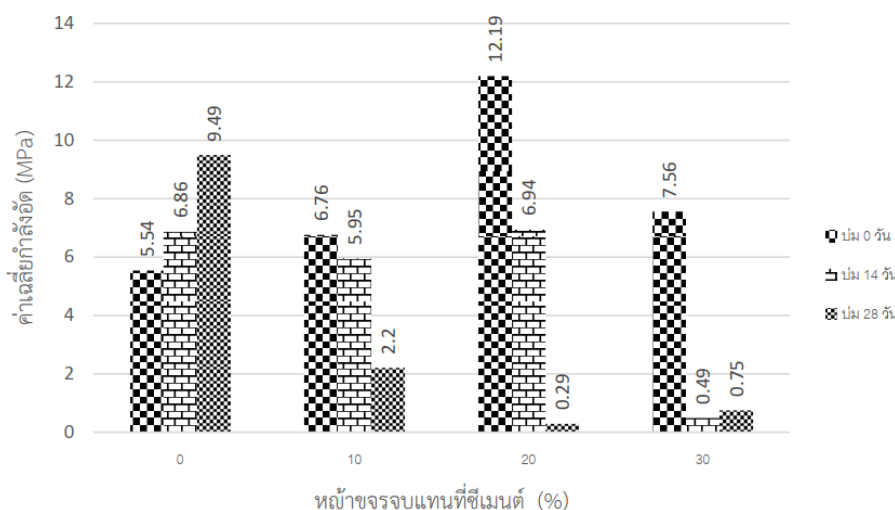


รูปที่ 7 กำลังอัดของมอร์ตาร์หญาขจรจบที่ไม่ปรับปรุงพื้นผิวด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ในการบ่มด้วยน้ำจืดเป็นระยะเวลา 0 14 และ 28 วัน

จากรูปที่ 7 แสดงให้เห็นว่ามอร์ตาร์หญาขจรจบในการบ่มเป็นระยะเวลา 0 วัน หญาขจรจบแทนที่ซีเมนต์ร้อยละ 0 10 20 และ 30 มีค่าเฉลี่ยกำลังอัดเท่ากับ 7.06 3.14 3.49 และ 3.81 MPa ตามลำดับ มอร์ตาร์หญาขจรจบในการบ่มด้วยน้ำเป็นระยะเวลา 14 วัน หญาขจรจบแทนที่ซีเมนต์ร้อยละ 0 10 20 และ 30 มีค่าเฉลี่ยกำลังอัดเท่ากับ 6.86 2.03 1.68 และ 14.25 MPa ตามลำดับ มอร์ตาร์หญาขจรจบในการบ่มด้วยน้ำเป็นระยะเวลา 28 วัน หญาขจรจบแทนที่ซีเมนต์ร้อยละ 0 10 20 และ 30 มีค่าเฉลี่ยกำลังอัดเท่ากับ 9.49 0.68 3.74 และ 9.35 MPa ตามลำดับ พบว่ามอร์ตาร์หญาขจรจบเมื่อนำมาเปรียบเทียบกับอัตราส่วนร้อยละ 10 20 และ 30 จะเห็นได้ว่ามอร์ตาร์หญาขจรจบที่บ่มเป็นระยะเวลา 14 วัน ในอัตราส่วนร้อยละ 30 มีค่ากำลังอัดสูงสุด คือ 14.25 MPa เนื่องจากระยะเวลาในการบ่มที่เพิ่มขึ้นจะทำให้ค่ากำลังอัดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น อาจเกิดผลเชิงปฏิกิริยาหรือการจัดเรียงโครงสร้างภายในมอร์ตาร์ที่ส่งผลให้เกิดโครงข่ายเจลไฮเดรตที่หนาแน่นขึ้นในระยะยาวแม้ผิวเส้นใยยังไม่ผ่านการปรับปรุงแนว โน้มดังกล่าวเมื่อปริมาณวัสดุเสริมถึงระดับวิกฤต การเกิดโครงข่ายเส้นใยสามารถเพิ่มความต้านทานต่อการแตกร้าวและเพิ่มกำลังอัดในระยะยาวได้ [9] และค่ากำลังอัดที่ได้นั้นเป็นไปตามมาตรฐานอุตสาหกรรมคอนกรีตบล็อกไม่รับน้ำหนัก มอก.58-2533 [10]

3.3.2 ผลกำลังอัดของมอร์ตาร์หญาขจรจบที่ปรับปรุงพื้นผิวด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์

จากรูปที่ 8 แสดงให้เห็นว่ามอร์ตาร์หญาขจรจบในการบ่มเป็นระยะเวลา 0 วัน หญาขจรจบแทนที่ซีเมนต์ร้อยละ 0 10 20 และ 30 มีค่าเฉลี่ยกำลังอัดเท่ากับ 5.54 6.76 12.19 และ 7.56 MPa ตามลำดับ มอร์ตาร์หญาขจรจบในการบ่มด้วยน้ำเป็นระยะเวลา 14 วัน หญาขจรจบแทนที่ซีเมนต์ ร้อยละ 0 10 20 และ 30 มีค่าเฉลี่ยกำลังอัดเท่ากับ 6.86 5.95 6.94 และ 0.49 MPa ตามลำดับ มอร์ตาร์หญาขจรจบในการบ่มด้วยน้ำเป็นระยะเวลา 28 วัน หญาขจรจบแทนที่ซีเมนต์ร้อยละ 0 10 20 และ 30 มีค่าเฉลี่ยกำลังอัดเท่ากับ 9.49 2.2 0.29 และ 0.75 MPa ตามลำดับ จะเห็นได้ว่ามอร์ตาร์หญาขจรจบที่บ่มเป็นระยะเวลา 0 วัน ในอัตราส่วนร้อยละ 20 มีค่ากำลังอัดสูงสุด คือ 12.19 MPa เนื่องจากปริมาณของเส้นใยหญาขจรจบและระยะเวลาในการบ่มที่เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ค่าความหนาแน่นมีแนวโน้มลดลง [11] พบว่ามอร์ตาร์หญาขจรจบที่มีปริมาณเพิ่มขึ้นทำให้ค่ากำลังอัดมีแนวโน้มลดลงตามไปด้วย การปรับปรุงพื้นผิวด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์จะละลายเอมิเซลลูโลสและบางส่วนของลิกนินทำให้เส้นใยมีพื้นผิวขรุขระและสัดส่วนเซลลูโลสสูงขึ้น [6] ส่งผลให้แรงยึดเหนี่ยวเริ่มต้นของมอร์ตาร์ดีขึ้นและกำลังอัดระยะสั้นสูง อย่างไรก็ตามในสภาวะบ่มน้ำของมอร์ตาร์ เส้นใยที่ถูกเปิดโครงสร้างจะเสื่อมสภาพเร็ว เกิดการแตกตัวของเซลลูโลสและการสูญเสียความสามารถในการรับแรง ทำให้กำลังอัดรวมของมอร์ตาร์ลดลงเมื่อระยะเวลาการบ่มที่เพิ่มขึ้น การเสื่อมสภาพของเส้นใยในต่างเป็นหนึ่งในกลุ่มหลักที่ทำให้กำลังอัดในระยะยาวลดลง [12]



รูปที่ 8 กำลังอัดของมอร์ตาร์หญาขจรจบที่ปรับปรุงพื้นผิวด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ในการบ่มด้วยน้ำจัดเป็นระยะเวลา 0 14 และ 28 วัน

4. สรุป

4.1 การทดสอบค่าเฉลี่ยกำลังอัดและการหาค่าความหนาแน่นของมอร์ตาร์หญาขจรจบที่ไม่ปรับปรุงพื้นผิวด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ พบว่ามอร์ตาร์หญาขจรจบที่มีค่าเฉลี่ยกำลังอัดมากที่สุด โดยเปรียบเทียบกับหญาขจรจบแทนที่ซีเมนต์ร้อยละ 10 20 และ 30 คือ มอร์ตาร์หญาขจรจบที่ผ่านการบ่มเป็นระยะเวลา 14 วัน ในอัตราส่วนร้อยละ 30 โดยมีค่ากำลังอัด เท่ากับ 14.25 เมกะปาสคาล และมอร์ตาร์หญาขจรจบที่มีค่าความหนาแน่นมากที่สุด คือ มอร์ตาร์หญาขจรจบที่ผ่านการบ่มเป็นระยะเวลา 14 วัน ในอัตราส่วนร้อยละ 10 โดยมีค่าความหนาแน่น เท่ากับ 1.59 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร

4.2 การทดสอบค่าเฉลี่ยกำลังอัดและการหาค่าความหนาแน่นของมอร์ตาร์หญาขจรจบที่ปรับปรุงพื้นผิวด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ พบว่ามอร์ตาร์หญาขจรจบที่มีค่าเฉลี่ยกำลังอัดมากที่สุด โดยเปรียบเทียบกับหญาขจรจบแทนที่ซีเมนต์ร้อยละ 10 20 และ 30 คือ มอร์ตาร์หญาขจรจบที่ผ่านการบ่มเป็นระยะเวลา 0 วัน ในอัตราส่วนร้อยละ 20 โดยมีค่ากำลังอัด เท่ากับ 12.19 เมกะปาสคาล และมอร์ตาร์หญาขจรจบที่มีค่าความหนาแน่นมากที่สุด คือ มอร์ตาร์หญาขจรจบที่ผ่านการบ่มเป็นระยะเวลา 14 วัน ในอัตราส่วนร้อยละ 20 โดยมีค่าความหนาแน่น เท่ากับ 1.73 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร

4.3 ปริมาณของหญาขจรจบ ระยะเวลาการบ่มมีผลต่อค่าความหนาแน่นและค่ากำลังแรงอัด โดยเมื่อเพิ่มปริมาณหญาขจรจบ ค่าความหนาแน่นและค่ากำลังแรงอัดลดลง และระยะการบ่มนานขึ้นจะช่วยเพิ่มกำลังแรงอัดได้ในบางอัตราส่วน

5. ข้อเสนอแนะ

ควรศึกษาและเปรียบเทียบคุณสมบัติของวัสดุธรรมชาติหลายชนิด เพื่อค้นหาวัสดุที่เหมาะสมที่สุดในการใช้แทนปูนซีเมนต์

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] P. Sooksaen, "Development of low cost lightweight precast concrete panels for value adding agricultural waste," Research report, Silpakorn University, 2019. (in Thai)
- [2] J. R. Nayaka, J. Bochen, and M. Gołaszewska, "Experimental studies on the effect of natural and synthetic fibers on properties of fresh and hardened mortar," Doctoral School, Silesian University of Technology, Poland, 2022.
- [3] B. Chatveera and N. Makul, "Effect of limestone powder size on the properties of portland cement mortar mixed with fly ash," Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Thammasat University (Rangsit Center), Pathum Thani, Thailand, 2012. (in Thai)
- [4] W. Deelaman, K. Chaowchanchaiyagul, and K. Tangsatchawong, "Development and production of lightweight blocks by mixing natural fibers," Faculty of Science and Technology, Rajamangala University of Technology Phra Nakhon, Thailand, 2016. (in Thai)
- [5] K.S. Ranatunga, E. del Rey Castillo, and C. L. Toma, "Evaluation of the optimal concrete mix design with coconut shell ash as a partial cement replacement," Constr.Build. Mater., vol. 401, Art. no. 132978, 2023.
- [6] P. Suksan, P. Sathukarn, N. Khunchomphu, and D. Saetang, "Development of lightweight concrete using agricultural by-products," Department of Materials Science and Engineering, Faculty of Engineering and Industrial Technology, Silpakorn University, Nakhon Pathom, Thailand, 2016. (in Thai)
- [7] P. Khamput, "Interlocking block products from tobacco stem waste," Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Thanyaburi, Pathum Thani, Thailand, 2019. (in Thai)
- [8] M. A. Adajar, J. Galupino, C. Frianeza, J. F. Aguilon, J. B. Sy, และ P. A. Tan, "Compressive strength and durability of concrete with coconut shell ash as cement replacement," Int. J. GEOMATE, vol. 18, no. 70, pp. 183–190, 2020.
- [9] S. A. I. Mohamad Sopi and M. H. Abu Hassan, "A Review on the Extraction of Silica Nanoparticles from Poaceae Family via Sol-Gel," Malaysian J. Sci. Health Technol., vol. 10, no. 1, pp. 7–18, 2023.
- [10] N. Intabut, "Innovation of heat-resistant interlocking bricks from rice straw and fly ash," Faculty of Engineering and Architecture, Rajamangala University of Technology Suvarnabhumi, Thailand, 2019. (in Thai)
- [11] K. Poongodi and P. Murthi, "Development of fibre reinforced green mortar made with waste brick material as fine aggregate for sustainable masonry construction," Department of Civil Engineering, SR University, Warangal, India, 2022.
- [12] A. K. Sahu, P. K. Singh, and R. K. Singh, "Extraction and characterization of silica nanoparticles from rice husk ash," Constr. Build. Mater., vol. 396, p. 132631, 2023.

การวิเคราะห์พฤติกรรมความล้าของเพลารองในรถปิกอัพ

Analytical on Fatigue Behavior of Counter Shaft in Pick-Up Car

อภิวัฒน์ ฐิติวัฒน์วรารุจี, ประเสริฐ เสกกล้า*, ดนุสรณ์ เหลียงพานิช และ กฤษณะ นามโยธา

สาขาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธนบุรี

248 ซอย เพชรเกษม 110 แขวงหนองค้างพู้ เขตหนองแขม กรุงเทพมหานคร 10160

Apiwat Thitiwatworarujee, Prasoe Sekkla*, Danusorn Leangpanich and Krisana Namyotha

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

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

*Corresponding author Email: Prasoe.sekkla@effem.com

(Received: May 25, 2025 / Revised: December 17, 2025 / Accepted: December 21, 2025)

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อการประเมินอายุความล้าในเพลารองภายใต้ความเค้นสลับ (Cyclic load) ของเหล็กกล้า SCM420 โดยมุ่งเน้นศึกษาชิ้นงานทดสอบที่ได้จากตัวอย่างเพลารองในรถยนต์ที่ผ่านการใช้งานและเพลาลูกใหม่ ทำการทดสอบด้วยเครื่องทดสอบความล้าแบบ R.R. Moore ชิ้นงานทดสอบมีทั้งหมด 5 ชิ้น ขนาดความยาว 90 มม. เส้นผ่านศูนย์กลาง 8 มม. กำหนดให้ภาระที่กระทำแตกต่างกันตามลูกตุ้มน้ำหนัก 5 ระดับ คือ 60 80 100 120 และ 140 N ผลการทดสอบพบว่ากราฟมีลักษณะลดลงเป็นเส้นโค้ง จำนวนรอบที่นับได้สูงสุดของเพลาก่อนที่ผ่านการใช้งานอยู่ที่ 2,618, 628 รอบ และจำนวนรอบที่นับได้สูงสุดของเพลาลูกใหม่ที่ 4,158,674 รอบ โดยใช้น้ำหนักถ่วงเท่ากัน คือ 60 N เมื่อเปรียบเทียบจะมีอายุการใช้งานแตกต่างกันถึง 10 เท่า สรุปได้ว่าเมื่อลดระดับความเค้นที่กระทำต่อชิ้นทดสอบให้น้อยลง อายุการล้าจะมีค่าเพิ่มสูงขึ้นโดยเป็นไปตามลักษณะเส้น S-N Curve และผลลัพธ์ของการประเมินอายุความล้าจากการทดสอบด้วยเครื่องแบบ R.R. Moore นำมาเปรียบเทียบกับผลของการจำลองเชิงตัวเลขด้วยโปรแกรม Ansys ปรากฏว่าอัตราค่าการประเมินด้วยโปรแกรม Ansys สูงกว่าการทดลองประมาณ 5%

คำสำคัญ: เหล็ก SCM420 อายุการล้า เพลารอง โปรแกรม Ansys

Abstract

This aims of this research to the fatigue life evaluation of counter shafts under cyclic load of SCM420 steel. The focus is on the study of test specimens from old and new secondary shafts of automobiles. The tests were conducted using an R.R. Moore fatigue testing machine. There were tests for 5 specimens, each with a length of 90 mm and a diameter of 8 mm, and the loads were different according to five pendulum weights: 60, 80, 100, 120, and 140 N. The test results showed that the S-N Curve were in a decreasing curve. The maximum counted fatigue life of the old shafts were 2,618, 628 cycles, and the maximum counted fatigue life of the new shafts were 4,158,674 cycles, using the same counterweight of 60 N. When compared the fatigue life was different by 10 times. It can be concluded that when the stress level applied to the test pieces was reduced, Fatigue life will increase along the S-N Curve and the fatigue life evaluation results from R.R. Moore test were compared with the results of numerical simulation using Ansys program. It was found that the evaluation rate of Ansys program was higher than the experiment by about 5%.

Keywords: SCM420 steel, Fatigue life, Counter shaft, Ansys

1. บทนำ

เหล็กกล้า SCM 420 เป็นกลุ่มเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ (Low carbon steel) ที่มีความสามารถในการชุบแข็งสูง มีความเปราะเมื่ออุณหภูมิสูง การเชื่อมที่ดี คุณสมบัติการกลึงที่ดี และการยึดตัวเมื่อเย็นที่ยอดเยี่ยม โดยทั่วไปจะใช้สำหรับทำชิ้นส่วนที่ต้องการความต้านทานการสึกหรอสูง เช่น เกียร์ เฟลา ท่อแรงดันสูง และอุปกรณ์ยึดทุกประเภท

เฟลาเป็นชิ้นส่วนของเครื่องจักรที่ถูกนำมาใช้อย่างกว้างขวางในอุตสาหกรรม การส่งแรงบิดในระยะทางที่กำหนดไว้ใน การออกแบบ โดยทั่วไปที่มักได้รับการแก้ไขด้วยการใช้เฟลาที่ทำจากเหล็กกล้า เมื่อมีการใช้งานเป็นส่วนหนึ่งของเครื่องจักร เฟลาจะต้องอยู่ภายใต้การรับโหลดแบบไดนามิกที่มีลักษณะซับซ้อน โดยทั่วไปแล้วการรับโหลดของเฟลาจะอยู่ภายใต้แรงบิด และความเค้นดัดรวมกับความเข้มข้นของความเค้นในระดับต่าง ๆ สำหรับเฟลาที่พบปัญหาที่พบบ่อยคือโหลดที่เกิดจากความล่าช้า ความเสียหายของชิ้นส่วนเฟลาทำให้นักวิทยาศาสตร์และวิศวกรมีความพยายามที่จะศึกษาหาสาเหตุหลักของการแตกหักของเฟลาและเสนอวิธีการป้องกันความเสียหายที่จะเกิดขึ้น



รูปที่ 1 ลักษณะของเฟลารองใหม่และเฟลารองที่เสียหาย

งานวิจัยในอดีตที่ผ่านมา มีนักวิจัยที่ทำการศึกษาความเสียหายเนื่องจากความล้าของเฟลาซึ่งดังรายละเอียดต่อไปนี้ [1] ทำการศึกษาเรื่องความเค้นดัดล้าที่ความเร็วรอบสูงและพฤติกรรมการแตกหักของเหล็กหล่อเหนียว EN-GJS700-2 ที่ใช้ในเฟลาข้อเหวี่ยง โดยตรวจสอบรอยแตกด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด จากนั้นผลลัพธ์ที่ได้รับบ่งชี้ว่าอายุการใช้งานของเฟลาด้วยเส้นโค้ง S-N จากข้อมูลของ FEMFAT เนื่องจากตัวอย่างชิ้นงานมาตรฐานได้จากเฟลาข้อเหวี่ยงเพื่อพิจารณาผลกระทบที่มีต่อการผลิต การวิเคราะห์ความเสียหายจะสังเกตเห็นความแตกต่างของรื้อรอยขนานซึ่งเกิดจาก Cyclic load การหลุดร่อนของกราไฟต์จากเมทริกซ์เฟอร์ริติก - เฟอร์ลิติก (เป็นหลักฐานของการเปลี่ยนแปลงแบบพลาสติก) รอยแตกขนาดเล็กและรอยแตกทุติยภูมิ (ใกล้เคียงกับกราฟิตที่เป็นก้อนกลม) รอยแยก (เนื่องจากการแตกหักที่เปราะ) รอยขีดข่วน (อันเป็นผลมาจากแรงเสียดทานระหว่างสองพื้นผิวที่แตกหัก) และสารฝังใน [2] ทำการศึกษาพฤติกรรมความล้าของเฟลาในเทอร์โบชาร์จเจอร์ในรถดัมพ์ที่ใช้ในงานในเหมือง จากการศึกษาพบว่าสาเหตุหลักของความเสียหายคือความล้าที่เกิดจากการรับโหลดแบบซ้ำไปซ้ำมา อายุการใช้งานจากความล้าของเฟลาที่รับโหลดแบบความเค้นดัดนั้นถูกประเมินโดยการวิเคราะห์ตามเกณฑ์ของ Goodman และ Gerber ตามมาตรฐานของ ASME โดยใช้สมการของ Elliptic และ Soderberg การวิเคราะห์ด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์มีการใช้ซอฟต์แวร์ MSC Fatigue ผลการทดลองจากการรับโหลดแบบซ้ำไปซ้ำมาซึ่งเป็นผลการรับแรงบิดแบบโหลดคงที่ที่เกิดกับขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางที่เปลี่ยนแปลงต่ออายุความล้าของเฟลาภายใต้ความเค้นดัดแบบกลับปัดกลับมา [3] ได้ทำการประเมินค่าความคลาดเคลื่อนของความแข็งแรงต่อความล้าของเฟลาในสภาวะความล้าแบบที่รอบดัดสูง โดยทำการทดสอบเชิงทดลองกับเฟลาตัวอย่างเพื่อหาค่าความผันแปรของความแข็งแรงต่อความล้า ได้มีการพัฒนารูปแบบจำลองเชิงความน่าจะเป็นที่พิจารณาการแตกหักของเหล็กกล้าชุบแข็งและอบคืนตัวจากทั้งพื้นผิวและภายใน ดังนั้น จึงได้สร้างแบบจำลองทางสถิติของพารามิเตอร์ที่มีอิทธิพลต่อความผันแปร พารามิเตอร์เหล่านี้ทำหน้าที่เป็นข้อมูลป้อนเข้าในวิธีการหาความแข็งแรงเฉพาะสำหรับกลไกการแตกหัก โดยใช้การจำลองแบบมอนเตคาร์โล สามารถสร้างเฟลาแบบสุ่มได้ เฟลาที่สร้าง

ขึ้นจะถูกนำไปใช้กับวิธีการหากลไกการแตกหักโดยใช้การวิเคราะห์องค์ประกอบจำกัด โดยการประเมินทางสถิติของระดับความเค้นสมมติที่เกี่ยวข้องกับการแตกหักและการหยุดทำงานของเพลาคำนวณได้ สามารถกำหนดการกระจายความน่าจะเป็นของความแข็งแรงต่อความล้าได้ [4] ได้ทำวิเคราะห์สาเหตุของความเสียหายโดยการทดสอบเพลาคือเพลายืดที่เสียหายของเครื่องยนต์ดีเซลสองสูบที่ใช้ในรถยนต์เพื่อการพาณิชย์ขนาดเล็กซึ่งวิ่งประมาณ 80,000 กม. การตรวจสอบเพลาคือเพลายืดที่เสียหายนี้ให้รายละเอียดเกี่ยวกับองค์ประกอบของวัสดุ โครงสร้างจุลภาค และคุณสมบัติทางกล นอกจากนี้ การวิเคราะห์แบบหมุน การวิเคราะห์แบบจำลองเชิงทดลอง และการทดสอบทางกลของวัสดุมีประโยชน์ในการกำหนดลักษณะของวัสดุที่เหมาะสมที่จะเลือกและวิเคราะห์สาเหตุหลักของความเสียหาย ชุดอุปกรณ์ทดลองนี้ช่วยในการทดสอบเพลาคือเพลายืดและชิ้นส่วนตัวอย่างตามขั้นตอนการทดสอบ ASTM และผลลัพธ์จะถูกนำไปเปรียบเทียบกับผลการวิเคราะห์เชิงตัวเลขโดยใช้ซอฟต์แวร์ ANSYS วัตถุประสงค์ของการวิจัยนี้คือเพื่อให้ข้อมูลเชิงลึกผ่านการวิเคราะห์ความเสียหายแก่ผู้ออกแบบและผู้ผลิตเพื่อปรับปรุงความน่าเชื่อถือและความปลอดภัยของเพลาคือเพลายืดยานยนต์ และท้ายที่สุดยังช่วยลดการสูญเสียทางการเงิน [5] ได้ทำการศึกษาผลกระทบของพฤติกรรมความล้าต่อการแตกหักในเฟืองเกียร์ 4 ของรถปิกอัพ โดยทำการทดสอบทางกลตรวจสอบทางโลหะวิทยา และวิเคราะห์ความเค้นด้วยการจำลองเชิงตัวเลข ผลการทดลองพบว่าโมดูลีนิ้ม (Mo) มีขนาดต่ำกว่าค่ามาตรฐานมากคือ 0.025 ซึ่งจะทำให้ลดความทนทานการกัดกร่อนของเฟืองลง ผิวหน้ารอยแตกก็มีลักษณะรอยแตกตามขอบเกรน (Intergranular fracture) เนื่องจากเป็นชิ้นงานที่ผ่านการชุบผิวแข็ง ลักษณะของรอยแตกนี้เกิดจากโหลดที่กระทำกับรากฟันเฟืองมากเกินไป ซึ่งส่งผลให้ความเค้นที่รากฟันสูงกว่าค่าที่กัดความทนทานของวัสดุ เมื่อฟันเฟืองถูกกระทำโดยโหลดลักษณะเช่นนี้จะทำให้เกิดความเค้นซ้ำๆ ขึ้นจนเกิดรอยแตกที่รากฟัน

จากงานวิจัยในอดีตก็ยังไม่พบว่ามีมีการประเมินอายุความล้าของเพลาคือเพลายืดที่ใช้ผ่านการใช้งานแล้วและเพลาคือเพลายืดใหม่สำหรับเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ SCM 420 งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อเปรียบเทียบอายุความล้าระหว่างเพลาคือเพลายืดใหม่และเพลาคือเพลายืดที่ใช้ผ่านการใช้งานจนเกิดความเสียหายของรถปิกอัพดังรูปที่ 1 รถมีกำลังขับ 144 Hp การประเมินอายุความล้าของเพลาคือเพลายืดใหม่ จะมีการทดลองจากตัวอย่างชิ้นงานของเพลาคือเพลายืดใหม่และเพลาคือเพลายืดที่เสียหายซึ่งใช้เครื่องทดสอบความล้าในการทดลอง และยังนำวิธีการทางไฟไนต์เอลิเมนต์มาใช้ในการเปรียบเทียบผลการทดลองทั้งสองวิธีแล้วนำมาวิเคราะห์ปัญหาที่เกิดขึ้น และผลที่ได้จากงานวิจัยนี้จะประโยชน์ต่อผู้ที่สนใจในการศึกษาในงานด้านนี้ต่อไป

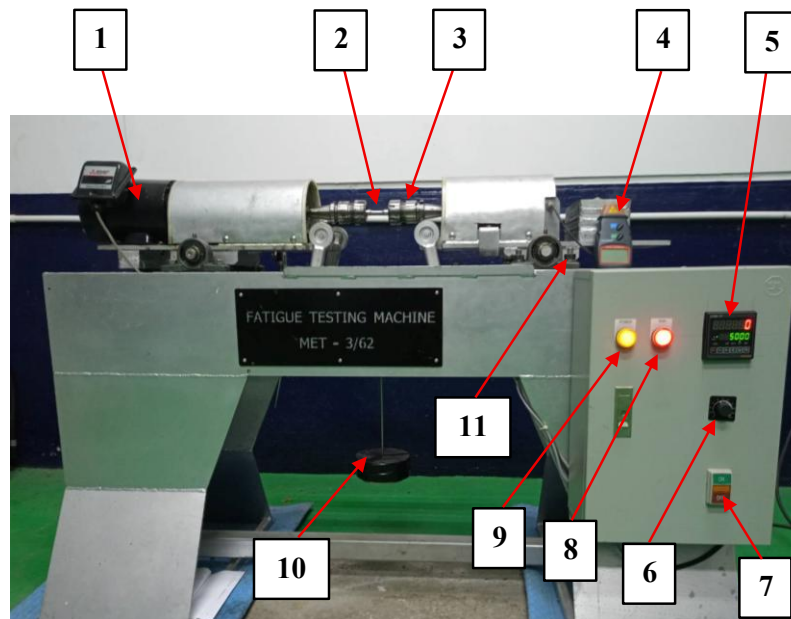
2. วิธีการทดลอง

การศึกษาอายุความล้าระหว่างเพลาคือเพลายืดใหม่และเพลาคือเพลายืดที่ใช้ผ่านการใช้งาน โดยการวิเคราะห์สมบัติทางเคมี การวิเคราะห์ทางมหภาค และการเปรียบเทียบอายุความล้าระหว่างเพลาคือเพลายืดใหม่และเพลาคือเพลายืดที่ความเสียหายด้วยเครื่องทดสอบความล้าและวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยมีวิธีการดำเนินการศึกษาดังต่อไปนี้

2.1 การตรวจสอบส่วนผสมทางเคมี วิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมีของเพลาคือเพลายืดใหม่ เติบกับมาตรฐานของเหล็กด้วยเครื่องวิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมี (Spark Emission Spectrometer) ยี่ห้อ Thermo รุ่น ARL 3460 การวิเคราะห์ส่วนผสมของวัสดุเพื่อตรวจสอบว่าวัสดุที่ใช้เป็นวัสดุชนิดใด เลือกใช้ตรงตามมาตรฐานหรือข้อกำหนดที่ออกแบบไว้หรือไม่สำหรับตัวอย่างชิ้นงานนี้จะตรวจสอบที่ผิวและตรงแกนกลางของเพลาคือเพลายืด

2.2 การตรวจสอบด้วยภาพถ่าย ตรวจสอบลักษณะทางกายภาพของผิวหน้าแตกหักด้วยสายตา (Visual Examination) พร้อมถ่ายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง ยี่ห้อ Olympus รุ่น DSX1000 ในบริเวณที่แตกหัก เพื่อตรวจสอบลักษณะของการแตกหัก

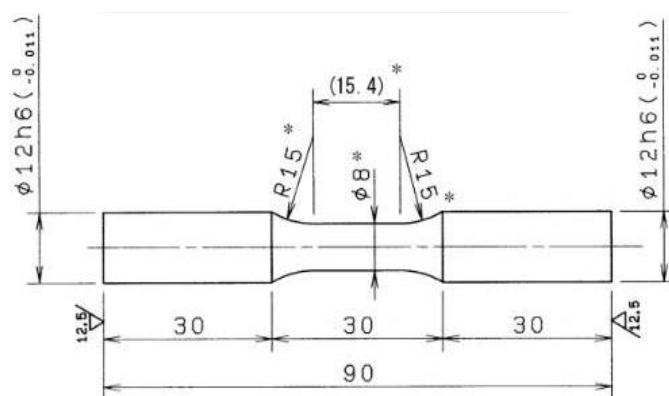
2.3 การทดสอบความล้าด้วยเครื่องทดสอบแบบ R.R. Moore งานทดลองนี้เป็นการศึกษาอายุความล้าของเพลาคือเพลายืดที่ทำมาจากเหล็ก SCM420 รับภาระแบบความเค้นสลับ (Cyclic stress) โดยมีมุ่งเน้นศึกษาชิ้นงานทดสอบที่ได้จากตัวอย่างในเพลาคือเพลายืดใหม่และเพลาคือเพลายืดที่เสียหาย เครื่องทดสอบความล้าเป็นแบบ R.R. Moore มีส่วนประกอบของอุปกรณ์ ดังแสดงในรูปที่ 2 และตารางที่ 1 ชิ้นงานที่ใช้ทดลองดังรูปที่ 3 โดยใช้ชิ้นงานตัวอย่างที่ได้จากเพลาคือเพลายืดเก่าและเพลาคือเพลายืดใหม่อย่างละ 6 ชิ้น ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 8 มิลลิเมตร ความยาว 90 มิลลิเมตร โดยที่ค่าความเค้นแรงดึงคราก (Yield strength) = 365 MPa [6] จึงเป็นที่มาของการกำหนดให้ภาระที่กระทำในการทดสอบปรับเปลี่ยนค่าที่แตกต่างกันตามลูกตุ้มน้ำหนักอยู่ระหว่าง 60 – 140 N ตามมาตรฐาน ISO-1143 ผลลัพธ์ที่ได้มาลงในกราฟ S-N เพื่อประเมินอายุความล้าของชิ้นงานตัวอย่าง



รูปที่ 2 เครื่องทดสอบความล้าแบบ R. R. Moore ที่ใช้ในการทดลอง

ตารางที่ 1 ส่วนประกอบของเครื่องทดสอบความล้าแบบ R. R. Moore

ลำดับ	ชื่ออุปกรณ์	ลำดับ	ชื่ออุปกรณ์
1	มอเตอร์ทดสอบ	7	ปุ่ม Start, Stop
2	ชิ้นงานทดสอบ	8	หลอดแสดงเครื่องกำลังทำงาน
3	หัวจับชิ้นงานทดสอบ	9	หลอดแสดงเครื่องหยุดทำงาน
4	เครื่องวัดความเร็วรอบ	10	ลูกตม้น้ำหนัก
5	มาตรวัดจำนวนรอบ	11	Limit switch
6	สวิตช์ควบคุมความเร็วรอบ		



รูปที่ 3 ขนาดของชิ้นงานทดสอบความล้า

2.4 การประเมินความล้าด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ การประเมินความล้าด้วยโปรแกรม Ansys จะทำควบคู่ไปกับการวิเคราะห์การดัด (σ_d) และโมเมนต์บิด (M_o) ตามหลักเกณฑ์การออกแบบของกูดแมน (DE-Goodman) ผลของวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เพื่อนำไปเปรียบเทียบกับค่าความเค้นที่ได้จากการคำนวณตามมาตรฐานของกูดแมน การจำลองเชิงตัวเลขจะเริ่มจากการใช้โปรแกรม Solid Works 2016 ในการสร้างแบบจำลอง 3 มิติ หลังจากนั้นจะนำไปแปลงลงในโปรแกรม Ansys โดยกำหนดคุณสมบัติของวัสดุเพลลาที่ใช้เทียบกับ SCM 420 ซึ่งใช้ค่าความหนาแน่นเท่ากับ 7850 kg/m^3 และ อัตราส่วนปัวซองเท่ากับ 0.29 [6] แบบจำลองการทำงานของเมชที่สร้างขึ้นด้วยเอลิเมนต์ชนิดรูปทรงสี่เหลี่ยมขนาด 1 mm มีจำนวนเอลิเมนต์ทั้งหมด 104 เอลิเมนต์ จำนวนโหนดเท่ากับ 7,118 โหนด และองศาความเป็นอิสระในการเคลื่อนที่ (Degrees of freedom, DOF) เท่ากับ 1,601 ถูกเลือกสำหรับการควบคุมเมช แต่ละโหนดมี DOF เคลื่อนที่ไปตามทิศทางของแกน x, y และ z เท่านั้น รวมทั้งใช้ค่าของแรงบิดเท่ากับ 140 N-m ในการจำลองเชิงตัวเลขกับชิ้นงานตามแบบของชิ้นงานตัวอย่างที่ต้องรับแรงบิด [7]

3. ผลการทดลอง

3.1 การตรวจสอบส่วนผสมทางเคมี

การตรวจสอบสมบัติทางเคมีของเพลารองโดยใช้เครื่อง Optical emission spectrometer: ARL 3460 ผลที่ได้ออกมาเป็นเปอร์เซ็นต์ส่วนประกอบทางเคมีของเพลารองที่เสียหายอยู่ในค่ามาตรฐานของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ SCM 420 ที่มีโครเมียม-โมลิบดีนัมเป็นส่วนผสมสำคัญ ดังแสดงในตารางที่ 2

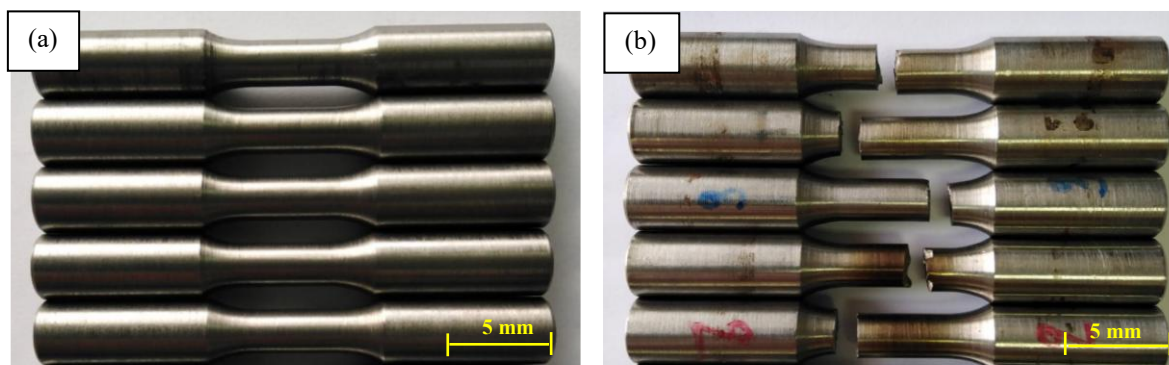
ตารางที่ 2 ผลการตรวจสอบทางเคมีของเพลารอง SCM 420 steel (%wt)

Materials	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Fe
Failed shaft	0.394	0.228	0.791	0.0201	0.0124	1.08	0.152	Balance
SCM 420 [8]	0.38-0.43	0.15-0.35	0.60-0.90	≤ 0.030	≤ 0.030	0.90-1.20	0.15-0.30	Balance

3.2 การทดสอบความล้าด้วยเครื่องทดสอบความล้าเป็นแบบ R.R. Moore

การศึกษาผลกระทบของภาระที่ใช้ในการทดสอบจะปรับเปลี่ยนค่าที่แตกต่างกันคือตั้งแต่ 60 80 100 120 และ 140 N ตามลำดับ โดยใช้ความเร็วรอบของมอเตอร์ที่ 1725 rpm วัสดุที่นำมาทดสอบคือเหล็กกล้าคาร์บอน SCM 420 ที่ได้มาจากตัวอย่างของเพลลาเก่าที่ผ่านการใช้งานและเพลลาใหม่

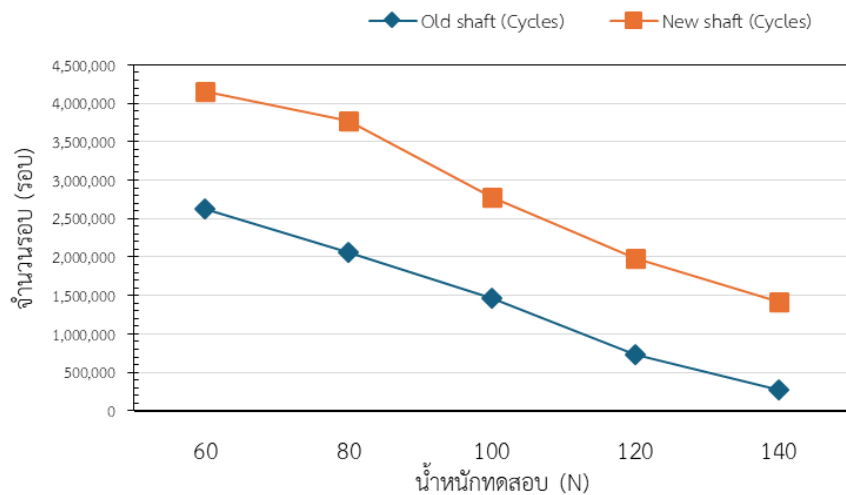
ผลของการทดลองด้วยเครื่องทดสอบความล้าในตัวอย่างชิ้นงานเพลลาทั้ง 5 ชิ้น ดังแสดงในรูปที่ 4 เป็นภาพตัวอย่างชิ้นงานที่ใช้ทดลองทั้งก่อนและหลังในการทดลองนี้ และค่าอายุการล้าของชิ้นงานที่ผ่านการทดสอบความล้าของเพลลาเก่าที่ผ่านการใช้งานและเพลลาใหม่ ได้ค่าออกมาดังแสดงในตารางที่ 3 และสามารถนำมาเขียนกราฟ S-N ดังรูปที่ 5



รูปที่ 4 เหล็ก SCM420 ใช้ทดสอบความล้า (a) ชิ้นงานก่อนการทดสอบ (b) ชิ้นงานหลังการทดลอง

ตารางที่ 3 เปรียบเทียบผลการทดสอบความล้าเพลากเก่า และเพลาลำใหม่ของวัสดุเหล็ก SCM420

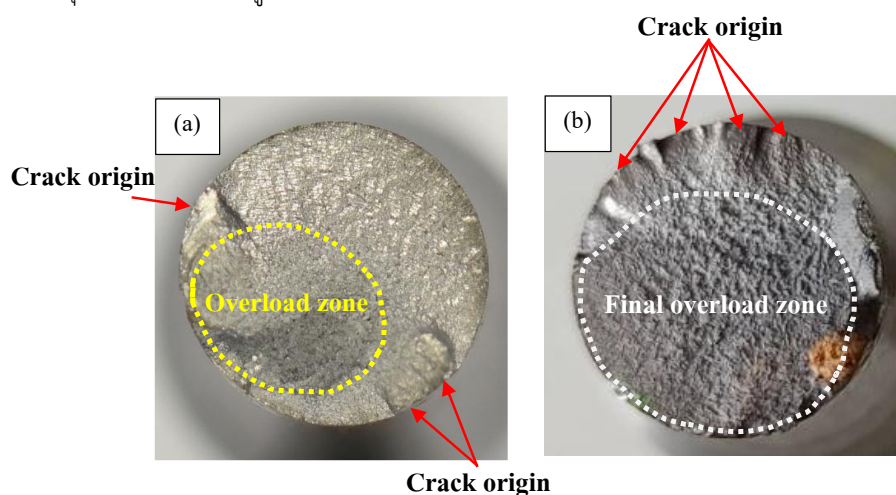
ลำดับ	Load (N)	Old shaft (Cycles)	New shaft (Cycles)
1	60	2,618,628	4,158,674
2	80	2,061,955	3,771,147
3	100	1,460,842	2,785,945
4	120	729,637	1,989,185
5	140	268,594	1,412,425



รูปที่ 5 เปรียบเทียบผลทดสอบความล้าของ เหล็ก SCM420 ในเพลากเก่า และเพลาลำใหม่

ผลการทดลองเพื่อประเมินหาอายุของความล้าของวัสดุภายใต้ความเค้นสลับ (Cyclic load) ของเหล็ก SCM420 จะทำการทดลองขึ้นงานทั้งหมด 5 ชั้น ดังแสดงในรูปที่ 5 จะสังเกตได้ว่าแนวโน้มของกราฟมีลักษณะลดลงเป็นเส้นโค้ง การทดลองแต่ละครั้งจะลดน้ำหนักถ่วงลงทีละ 20 N พบว่าโดยจำนวนรอบที่นับได้สูงที่สุดของเพลากเก่าที่ผ่านการใช้งานอยู่ที่ 2,618,628 รอบ ใช้น้ำหนักถ่วงเท่ากับ 60 N และจำนวนรอบที่นับได้น้อยที่สุดอยู่ที่ 268,594 รอบ ใช้น้ำหนักถ่วงเท่ากับ 140 N

ในทำนองเดียวกันจำนวนรอบที่นับได้สูงที่สุดของเพลาลำใหม่อยู่ที่ 4,158,674 รอบ ใช้น้ำหนักถ่วงเท่ากับ 60 N และจำนวนรอบที่นับได้น้อยที่สุดอยู่ที่ 1,412,425 รอบ ใช้น้ำหนักถ่วงเท่ากับ 140 N เมื่อนำจำนวนรอบในการทดสอบความล้าของเพลาทั้ง 2 แบบมาเปรียบเทียบจะมีค่าแตกต่างกันถึง 10 เท่า จากการทดลองสรุปได้ว่าเมื่อลดระดับความเค้นที่กระทำต่อชิ้นทดสอบให้น้อยลง อายุการล้าจะมีค่าเพิ่มสูงขึ้นโดยเป็นไปตามลักษณะของเส้นโค้ง S-N

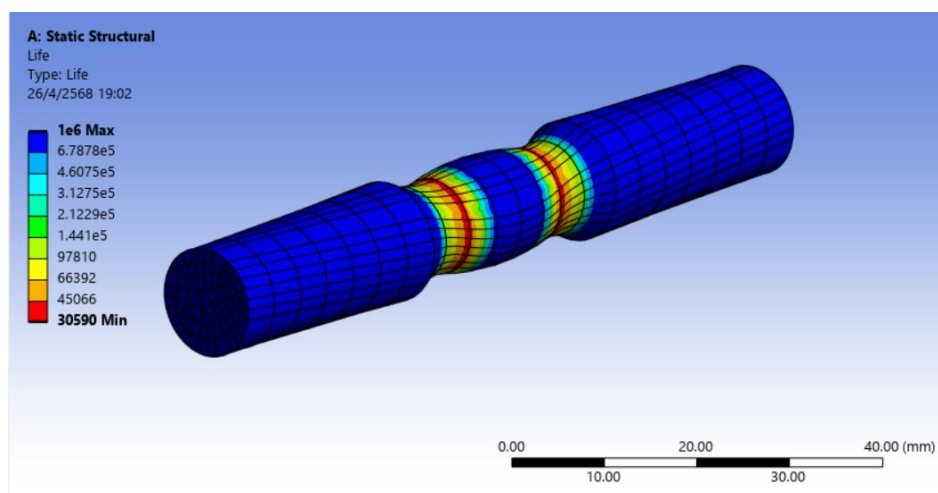


รูปที่ 6 ลักษณะรอยแตกของชิ้นงาน (a) เพลากเก่าที่ผ่านการใช้งาน (b) เพลาลำใหม่

การตรวจสอบด้วยภาพถ่ายของลักษณะการแตกหักจากความล้าในการดัดแบบหมุน ผิวหน้ารอยแตกหักของเพลาก่อนที่ผ่านการใช้งานและเพลานี้มีรูปร่างที่ 6 จะสังเกตเห็นได้ว่าจะมีลักษณะที่คล้ายกัน แสดงให้เห็นจุดเริ่มต้นของรอยแตกหรือ crack origin เกิดขึ้นหลายจุด จากนั้นรอยแตกจะขยายตัวอย่างช้าๆ ผ่านพื้นที่ fatigue zone หรือบริเวณที่ได้รับความเสียหายจากการรับแรงแบบคาบ ซ้ำไปซ้ำมา ในช่วงระหว่างการขยายตัวของรอยแตกอย่างช้าๆ จะมีความผันแปรของแรงที่กระทำและมีผลต่ออัตราการขยายตัวของรอยแตก มีลักษณะเป็นแบบ beach marks ซึ่งเป็นแนวเส้นที่แสดงลักษณะการขยายตัวของรอยแตก เมื่อรอยแตกขยายตัวไปได้ระยะหนึ่งจะทำให้วัสดุเหลือพื้นที่ในการรับแรงน้อย และทำให้เกิดเป็นพื้นที่รับแรงเกินพิกัด (Final overload zone)

3.3 การเปรียบเทียบผลประเมินอายุของความล้าด้วยเครื่องทดสอบและโปรแกรม Ansys

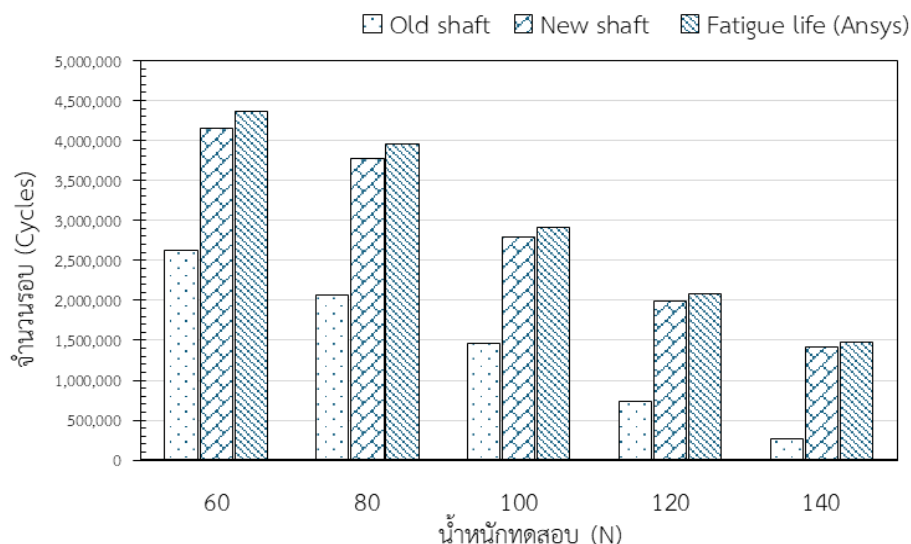
การจำลองเชิงตัวเลขที่สอดคล้องกับการทดสอบความล้าของเพลาก่อนที่ผ่านการใช้งานและเพลานี้มีรูปร่างที่ 6 ข้างต้นดำเนินการโดยใช้โปรแกรม ANSYS ผลลัพธ์ที่ได้ออกมาคือค่าพิกัดความล้า (Endurance Limit) ดังแสดงในรูปที่ 7 ซึ่งแถบสีจะเป็นจำนวนอายุของความล้า บริเวณพื้นที่สีแดงมีจำนวนรอบต่ำสุด 30,590 รอบ บริเวณพื้นที่สีเหลืองมีจำนวนรอบ 66,392 รอบ บริเวณพื้นที่สีเขียวมีจำนวนรอบ 144,100 รอบ บริเวณพื้นที่สีฟ้ามีจำนวนรอบ 460,750 รอบ และบริเวณพื้นที่สีน้ำเงินมีจำนวนรอบสูงสุด 1,000,000 รอบ เมื่อมีการนำผลลัพธ์ของการประเมินอายุความล้าจากการทดสอบด้วยเครื่องแบบ R.R. Moore ในเพลานี้มาเปรียบเทียบกับผลของการจำลองเชิงตัวเลขด้วยโปรแกรม ANSYS ปรากฏว่าอัตราการประเมินของ ANSYS สูงกว่าการทดลองประมาณ 5% ซึ่งสมเหตุสมผล ตารางที่ 4 และกราฟในรูปที่ 8 เป็นผลการประเมินอายุความล้าทั้ง 3 แบบ



รูปที่ 7 ค่าพิกัดความล้า Endurance Limit ที่ได้จากการจำลองเชิงตัวเลขด้วยโหลด 140 N-m

ตารางที่ 4 เปรียบเทียบผลการทดสอบความล้าเพลาก่อนและเพลานี้กับการจำลองเชิงตัวเลข

ลำดับ	Load (N)	Old shaft (Cycles)	New shaft (Cycles)	Fatigue life (Ansys)
1	60	2,618, 628	4,158,674	4.36×10^6
2	80	2,061,955	3,771,147	3.95×10^6
3	100	1,460,842	2,785,945	2.92×10^6
4	120	729,637	1,989,185	2.08×10^6
5	140	268,594	1,412,425	1.48×10^6



รูปที่ 8 อายุความล้าจากการทดสอบเพลาก่อนและเพลานใหม่เปรียบเทียบกับผลการจำลองเชิงตัวเลข

4. สรุป

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาเพื่อประเมินอายุการล้าในเพลารอง ที่ใช้กับรถยนต์ภายใต้ความเค้นสลับ (Cyclic load) ของเหล็ก SCM420 จากการทดลองดังกล่าวสามารถสรุปผลได้ดังต่อไปนี้

4.1 แนวโน้มของกราฟ S-N มีลักษณะลดลงเป็นเส้นโค้ง พบว่าจำนวนรอบที่นับได้สูงสุดของเพลาก่อนที่ผ่านการใช้งานอยู่ที่ 2,618, 628 รอบ และจำนวนรอบที่นับได้สูงสุดของเพลานใหม่อยู่ที่ 4,158,674 รอบ โดยใช้น้ำหนักถ่วงเท่ากันคือ 60 N เมื่อเปรียบเทียบจะมีอายุการใช้งานแตกต่างกันถึง 10 เท่า จากการทดลองสรุปได้ว่าเมื่อลดระดับความเค้นที่กระทำต่อชิ้นทดสอบให้น้อยลง อายุการล้าจะมีค่าเพิ่มสูงขึ้นโดยเป็นไปตามลักษณะเส้น S-N Curve

4.2 จากการเปรียบเทียบผลการตรวจสอบด้วยภาพถ่ายของลักษณะการแตกหักในเพลาก่อนที่ใช้งานและเพลานใหม่ปรากฏว่ามีลักษณะที่ใกล้เคียงกันมากคือพบว่ามีจุดเริ่มต้นของรอยแตกกว้าง crack origin เกิดขึ้นหลายจุด จากนั้นรอยแตกจะขยายตัวอย่างช้าๆ ผ่านพื้นที่ fatigue zone และการขยายตัวของรอยแตกเป็นแบบ beach marks เมื่อรอยแตกขยายตัวไปได้ระยะหนึ่งจะทำให้วัสดุเหลือพื้นที่ในการรับแรงน้อย และทำให้เกิดเป็นพื้นที่รับแรงเกินพิกัด (final overload zone) ในพื้นที่ดังกล่าวพบว่รอยแตกที่ขยายตัวส่วนใหญ่มีลักษณะทางมหภาคเป็นการแตกแบบเปราะ

4.3 ผลลัพธ์ของการประเมินอายุความล้าจากการทดสอบด้วยเครื่องแบบ R.R. Moore ในเพลานใหม่มาเปรียบเทียบกับผลของการจำลองเชิงตัวเลขด้วยโปรแกรม ANSYS ปรากฏว่าอัตราการประเมินของ ANSYS สูงกว่าการทดลองประมาณ 5%

5. เอกสารอ้างอิง

- [1] Mohammad Jamalkhani Khameneh, Mohammad Azadi, "Evaluation of high-cycle bending fatigue and fracture behaviors in EN-GJS700-2 ductile cast iron of crankshafts." Engineering Failure Analysis, vol. 85, 2018, pp. 189-200.
- [2] Sajjad Seifoori, Ahmad Mahdian Parrany, Mojtaba Khodayari, "A high-cycle fatigue failure analysis for the turbocharger shaft of BELAZ 75131 mining dump truck," Engineering Failure Analysis, vol. 116, 2020, pp. 104752.
- [3] Sebastian Vetter, Erhard Leidich, Alexander Hasse, "Method to estimate the fatigue strength scatter of shafts in the high-cycle and very-high-cycle fatigue regimes," Engineering Failure Analysis, vol. 143, 2023, pp. 106861.
- [4] Suresh Mysamy, Neelakrishnan Subramanyan, "Fatigue failure prediction through factor of safety and stress concentration in a malfunctioned AISI 4140 automotive crankshaft," Materials Research Express, vol. 10, 2023, pp. 126516.

- [5] P. Janmanee, R. Saodaen, C. Thanadngarn, T. Kumnorkaew, K. Jamkamon, K. Utjimajiratthitikarn, "Effect of fatigue behaviour on fracture in the 4th gear of a pick-up truck." Archives of Materials Science and Engineering, vol. 126, 2024, pp. 5-14.
- [6] Otai Special Steel. (2024, October 20). ASTM 4118 Steel | SCM420 | 18CrMo4 | 1.7243 [Online]. Available: <https://www.astmsteel.com/product/astm-4118-steel-scm420-18crmo4-1-7243/>
- [7] วิษณุ บุญมาก และ กนกอร รจนากิจ, "การวิเคราะห์ความเสียหายของเพลากรองในรถบรรทุกขนาดเล็ก," วารสารวิศวกรรมศาสตร์และนวัตกรรม, ปีที่ 17, ฉบับที่ 3, 2567, pp. 133-144.
- [8] Japanese Steels and Alloys. (2024, October 20). SCM420-Chemical composition, standards and properties: https://steeljis.com/jis_steel_datasheet.php?name_id=15

การผลิตเยื่อกระดาษจากเส้นใยใบสับประรดสำหรับทำกระดาษนำไฟฟ้า

Production of Pulp from Pineapple Leaf Fiber for Conductive Paper

ศิริธร ไยสูง¹, สุธิดา อ่าบางกระทุ่ม¹, บุญชัย ดั่งสวัสดิ์¹, อาฒยา สันตะกุล²,

สุพจน์ สรทองหลาง³, ชุตินา อุปถัมภ์⁴ และ อภิชาติ พองพลา^{5*}

¹สาขาวิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ

2 ถนนนางลิ้นจี่ แขวงทุ่งมหาเมฆ เขตสาทร กรุงเทพมหานคร 10120

²สาขาวิชาเทคโนโลยีและการจัดการความปลอดภัยของอาหาร คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ

2 ถนนนางลิ้นจี่ แขวงทุ่งมหาเมฆ เขตสาทร กรุงเทพมหานคร 10120

³สาขาวิชาคณิตศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ

2 ถนนนางลิ้นจี่ แขวงทุ่งมหาเมฆ เขตสาทร กรุงเทพมหานคร 10120

^{4,5}สาขาวิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ

2 ถนนนางลิ้นจี่ แขวงทุ่งมหาเมฆ เขตสาทร กรุงเทพมหานคร 10120

Siritorn Yaisong¹, Suthida Ambangkrathum¹, Boonchai Duangsawat¹, Ataya Santakul²,

Suphot Srathonglang³, Chutima Oopathump⁴ and Aphichard Phongphala^{5*}

¹Division of Chemistry, Faculty of Science and Technology,

Rajamangala University of Technology Krungthep,

2 Nanglinchi Rd., Thungmahamek, Sathorn, Bangkok, 10120, Thailand

²Division of Food Safety Management and Technology, Faculty of Science and Technology,

Rajamangala University of Technology Krungthep,

2 Nanglinchi Rd., Thungmahamek, Sathorn, Bangkok, 10120, Thailand

³Division of Mathematics, Faculty of Science and Technology,

Rajamangala University of Technology Krungthep,

2 Nanglinchi Rd., Thungmahamek, Sathorn, Bangkok, 10120, Thailand

^{4,5}Division of Physic, Faculty of Science and Technology,

Rajamangala University of Technology Krungthep,

2 Nanglinchi Rd., Thungmahamek, Sathorn, Bangkok, 10120, Thailand

*Corresponding author Email: Apichard.p@mail.rmutk.ac.th

(Received: September 18, 2025 / Revised: November 24, 2025 / Accepted: December 18, 2025)

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาวิธีที่เหมาะสมในการทำกระดาษนำไฟฟ้าจากเส้นใยใบสับประรด เริ่มจากการหาเงื่อนไขที่ดีที่สุดในการทำกระดาษจากใบสับประรด โดยศึกษาชนิดของตัวทำละลายที่ดีที่สุดระหว่างน้ำประปา และน้ำปูนใส นอกจากนี้ยังศึกษาระยะเวลาที่ดียิ่งที่สุดในขั้นตอนการต้มเส้นใยในสารละลายทั้งสอง โดยศึกษาเวลาต้ม 2, 4 และ 6 ชั่วโมง ตามลำดับ พบว่าเงื่อนไขที่ดีที่สุดคือ ต้มเส้นใยใบสับประรดในน้ำปูนใส ระยะเวลา 6 ชั่วโมง กระดาษที่ได้มีลักษณะการกระจายตัวของเยื่ออย่างสม่ำเสมอ การยึดเกาะ และความหนาแน่นของเยื่อมากเพียงพอที่นำมาทำกระดาษ ดูได้จากภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์ และน้ำหนักของกระดาษ หลังจากนั้นทดสอบคุณภาพของกระดาษ ได้แก่ น้ำหนักเฉลี่ยของกระดาษมีค่าเท่ากับ 3.77 ± 0.02 กรัม, การวัดมุมสัมผัสของกระดาษมีค่าเท่ากับ 104.30 ± 0.00 องศา, การหาสภาพยืดหยุ่นของกระดาษมีค่าเท่ากับ 1.60×10^6 นิวตันต่อตารางเมตร และสมบัติการทึบแสงของกระดาษมีค่าเท่ากับ 9.40 ± 0.01 ลักซ์ ซึ่งมีคุณสมบัติเหมาะสมนำไปประยุกต์ใช้ในการทำกระดาษนำไฟฟ้าเบื้องต้น หลังจากนั้นนำกระดาษตามเงื่อนไขที่ดีที่สุดมาผสมกับคาร์บอนนาโนทิวบ์ โดยทำการวัดสภาพการนำไฟฟ้าจากกระดาษที่ผสมคาร์บอนนาโนทิวบ์ที่ความเข้มข้น 2%, 3%, 4%, 5% w/w ได้ค่าดังนี้

2.50×10^{-5} โอห์ม, 2.94×10^{-4} โอห์ม, 4.05×10^{-4} โอห์ม และ 2.06×10^{-3} โอห์ม สรุปได้ว่าสภาพการนำไฟฟ้าเพิ่มขึ้นตามปริมาณคาร์บอนนาโนทิวบ์ที่ใส่เข้าไป

คำสำคัญ : กระดาษ ใบสับปะรด การนำไฟฟ้า น้ำปูนใส คาร์บอนนาโนทิวบ์

Abstract

Objective of this research is to study the suitable method for making conductive paper from pineapple leaf fibers. Firstly, the suitable solvent was considered between tap water and limewater. Next, boiled times was also study, 2, 4 and 6 hours, respectively. It was found that the suitable solvent was limewater it took 6 hours. Picture form Microscope and paper weight indicated the characteristics of pineapple leaf paper. Surface paper showed uniform pulp distribution sufficient adhesion and pulp density. After that, the paper quality was tested such as the weight of paper was 3.77 ± 0.02 g, the contact angle was 104.30 ± 0.00 degrees, the elasticity of paper 1.6×10^6 N/m² and the opacity of the paper was 9.40 ± 0.01 lux. Which suitable qualification are applied in making basic conductive paper. Conductivity of sample was measured from paper mixed with carbon nanotubes concentration at 2%, 3%, 4%, 5% w/w. These values are as follows: 2.50×10^{-5} ohms, 2.94×10^{-4} ohms, 4.05×10^{-4} ohms, and 2.06×10^{-3} ohms. The result indicated that conductivity of paper vary with carbon nanotube concentration.

Keywords: Paper, Pineapple leaf, Conductivity, Limewater, Carbon nanotube

1. บทนำ

สับปะรด (*Ananas comosus*) [1] เป็นพืชล้มลุก, มีพุ่มทรงใหญ่ และอาศัยอยู่ใต้ดิน ใบมีลักษณะเป็นใบรูปหอกยาว ปลายใบแหลม, มีหนามแหลมตรงปลาย, ใบเรียงสลับซ้อนกันรอบต้น, ใบมีสีเขียว และไม่มีก้านใบ ประเทศไทยนิยมปลูกต้นสับปะรดทั่วทุกภาค และปลูกได้ทุกฤดูกาล มีประโยชน์มากมีสรรพคุณทางยา อาทิ เช่น ช่วยลดคอแห้ง, แก้กระหายน้ำ และป้องกันการเจ็บคอ

ปัจจุบันมีการทำงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการผลิตกระดาษมากขึ้น เนื่องมาจากหลังจากการเก็บเกี่ยวผลผลิตของสับปะรดในสวน [2] ทำให้ต้องมีการตัดใบของสับปะรดที่เหลือทิ้ง ซึ่งใบสับปะรดที่ถูกตัดทิ้งจะยังคงอยู่ในสวนนั้น จะไม่มีการนำมาใช้งานต่อ และจะต้องมีการกำจัดใบสับปะรดโดยการเผาโดยปัญหาจากการเผาทำให้เกิดมลพิษทางดิน และมลพิษทางอากาศจำนวนมาก เพราะทำให้เกิดควันดำ เกิดความอันตรายเมื่อได้รับเข้าไปในระบบทางเดินหายใจ หลังจากการเก็บเกี่ยวสับปะรด จึงได้มีวิธีการเพิ่มมูลค่าของใบสับปะรด โดยการนำใบสับปะรดมาทำเป็นผลิตภัณฑ์เพื่อเพิ่มมูลค่าทางด้านการตลาดด้านวิทยาศาสตร์ รวมทั้งยังทำกระดาษที่สามารถนำไฟฟ้าได้ โดยใช้สารที่สามารถนำไฟฟ้า [3],[4],[5],[14] เช่น ท่อนาโนคาร์บอน นำมาผสมกับเส้นใยสับปะรด ทำเป็นแผ่นกระดาษจากใบสับปะรด มีการเพิ่มสารที่ทำหน้าที่เป็นตัวประสานเยื่อกระดาษที่มีความปลอดภัย เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม การใช้ตัวทำละลายที่ไม่มีความเป็นพิษต่อผู้ใช้งาน [2] เช่น น้ำปูนใส ทั้งระยะเวลาในการต้มที่มากขึ้น การสลายตัวของเส้นใยก็ดียิ่งขึ้น ทำให้ได้ผลิตภัณฑ์กระดาษจากใบสับปะรดที่สามารถนำไฟฟ้าได้ใกล้เคียงกับแผ่นโลหะ มีน้ำหนักเบา ซึ่งจะมีความยืดหยุ่น

นอกจากนี้ยังสามารถนำไปใช้ในอุปกรณ์ไฟฟ้า, เครื่องมือเชิงไฟฟ้า, กล้อง, ไมโครโฟน, แอลอีดี, ตัวควบคุมมอเตอร์, ลำโพง, ขั้วอิเล็กทรอนิกส์ และขั้วแบตเตอรี่แทนการใช้โลหะเพื่อนำไฟฟ้า [6],[7],[8],[9],[10] เพราะเป็นอุปกรณ์ที่เปลี่ยนพารามิเตอร์ทางกายภาพเป็นสัญญาณของไฟฟ้าส่งผลให้เกิดการผลิตพลังงานในรูปของความร้อน หรือพลังงานในรูปแบบของการเคลื่อนที่ เนื่องจากสามารถนำไฟฟ้าได้ดี[11],[12],[13] มีน้ำหนักเบา ทำให้มีรูปร่างแบบอื่นได้ง่ายกว่าการใช้โลหะ, มีการย่อยสลายได้ง่ายกว่าการใช้โลหะ และใช้ระยะเวลาในการย่อยสลายน้อยกว่า ทั้งยังมีราคาถูก และมีความปลอดภัยต่อผู้ใช้งาน จึงนำมาทำเป็นกระดาษที่สามารถนำไฟฟ้า

2. วัสดุ อุปกรณ์ และวิธีการทดลอง

สับปะรดจากสวนในจังหวัดประจวบคีรีขันธ์ โดยตัดเอาเฉพาะ ใบสับปะรดให้มีขนาดความยาวตั้งแต่ 30 เซนติเมตร ขึ้นไป นำใบสับปะรดมาล้างน้ำให้สะอาด และนำไปฟุ้งแดดให้แห้งสนิท แสดงใบสับปะรดสดก่อนนำมาตากแดดให้แห้งตามรูปที่ 1

สารเคมีที่ใช้ได้แก่ ปูนแดง (Pun-daeng), โซเดียมเบนโซเอต (Sodium benzoate), เอทานอล (Ethanol), โพลีไวนิลแอลกอฮอล์ (Polyvinyl alcohol), ผงคาร์บอน นาโนทิวบ์ (Carbon nanotube powder)

นำใบสับปะรดมาล้างด้วยน้ำสะอาด ตากแดดประมาณ 2-5 วัน แล้วตัดให้มีขนาด 1 นิ้ว ตัดส่วนที่เน่าเสียออกให้หมด จากนั้นนำปูนแดงมา 200 กรัม ละลายในน้ำประปา 1 ลิตร รอให้เกิดการตกตะกอน นำสารละลายใสด้านบนมาเจือจางในน้ำอีก 5 ลิตร จะได้ค่า pH = 10-11 แล้วนำใบสับปะรด 500 กรัม ไปแช่น้ำ 1 วัน นำไปต้มกับสารละลายโดยเปรียบเทียบระหว่างน้ำประปา และน้ำปูนใส ปริมาณ 12 ลิตร โดยเปรียบเทียบเวลาในการต้ม 2, 4 และ 6 ชั่วโมงด้วย เมื่อครบเวลาใช้กระชอนตักวัตถุดิบ และนำไปแช่ในน้ำเย็น นำใบสับปะรดมาปั่นประมาณ 10 นาที สังเกตด้วยตา เยื่อจะมีลักษณะละเอียดและนุ่มฟู อาจจะเหลือเส้นใยบางส่วน นำเยื่อใบสับปะรดที่ปั่นแล้วมาแช่ด้วยโซเดียมเบนโซเอต 0.1% w/v แช่เป็นเวลา 5-10 นาที ทำการเตรียมสารละลายโพลีไวนิลแอลกอฮอล์ 10% w/v เพื่อขึ้นรูปเยื่อ นำไปตากแดดจนแห้งสนิท แล้วนำไปทดสอบคุณภาพของกระดาษที่ทำด้วยมือ ได้แก่ ลักษณะเยื่อที่ได้จากการต้มด้วยน้ำประปา และน้ำปูนใสโดยใช้กล้องจุลทรรศน์ถ่ายภาพที่ 500 เท่า และ 1000 เท่า, การหาน้ำหนักของกระดาษทดสอบโดยตัดกระดาษขนาด 10x10 เซนติเมตร จำนวน 3 แผ่น ชั่งหามวลของกระดาษที่ตัดทั้ง 3 แผ่น แล้วคำนวณหาน้ำหนักเฉลี่ยของกระดาษที่ชั่งได้, การวัดมุมสัมผัสของหยดน้ำทดสอบ โดยตัดกระดาษขนาด 1x1 นิ้ว วางบนพื้นเรียบ หยดน้ำลงบนกระดาษ ทำการวัดค่ามุมของหยดน้ำ ทำซ้ำ 3 ครั้ง และหาค่าเฉลี่ย, สภาพการยืดหยุ่นของกระดาษ ทดสอบโดยตัดกระดาษขนาด 2x10 เซนติเมตร, 4x10 เซนติเมตร และ 6x10 เซนติเมตรอย่างละ 3 แผ่น เติมลูกตุ้มน้ำหนักลงในที่ใส่น้ำหนักพร้อมวัดระยะยืดเสมอจนกระดาษขาด และบันทึกค่าผลการทดลอง และสมบัติการทึบแสงของกระดาษ ทดสอบโดยใช้เครื่องลักซ์มิเตอร์ วัดปริมาณแสงที่ส่องผ่านเข้ามาในพื้นที่ทดสอบ ความสว่างจะแสดงในหน่วยของลักซ์ (LUX) โดยมีโคมไฟเป็นแหล่งกำเนิดแสง และสร้างกล่องทึบสีดำให้มีขนาด 14.5x15.5x15 เซนติเมตร เจาะรูตรงกลางขนาด 2x2 เซนติเมตร และตัดกระดาษขนาด 10x10 เซนติเมตร จากนั้นนำไปวางที่ตำแหน่งทดสอบ ทำการวัด 3 ครั้ง และหาค่าเฉลี่ย

การทำกระดาษนำไฟฟ้าจากใบสับปะรดทำได้โดยนำเยื่อกระดาษจากใบสับปะรดที่คุณภาพดีที่สุด มาผสมกับสารละลายโพลีไวนิลแอลกอฮอล์ 10% w/v ในอัตราส่วน 1:1 ผสมให้เข้ากัน มา 0.98 กรัม, 0.97 กรัม, 0.96 กรัม และ 0.95 กรัม ตามลำดับ นำมาใส่ลงบีกเกอร์ที่มีผงท่อนาโนคาร์บอนในอัตราส่วน 0.02 กรัม, 0.03 กรัม, 0.04 กรัม และ 0.05 กรัม ตากแดดจนแห้งสนิท จากนั้นตัดกระดาษที่ผสมคาร์บอนนาโนทิวบ์ 2%, 3%, 4% และ 5% w/w ให้มีขนาด 1x1 เซนติเมตร นำมาวัดด้วยเครื่อง Digital multimeter



รูปที่ 1 ใบสับปะรดสดก่อนนำมาตากแดดให้แห้ง

3. ผลการทดลองและอภิปรายผล

3.1 ลักษณะเยื่อที่ได้จากการต้มด้วยน้ำประปา และน้ำปูนใส

ใช้กล้องจุลทรรศน์ถ่ายภาพที่ 500 เท่า และ 1000 เท่า เพื่อดูความแตกต่างของเยื่อ ผลการถ่ายภาพแสดงในตารางที่ 1



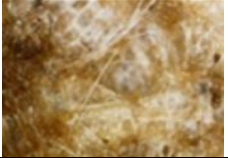
รูปที่ 2 ใบสับปะรดเมื่อต้มเสร็จแล้ว



รูปที่ 3 เยื่อใบสับปะรดที่ปั่นแล้ว

ตารางที่ 1 ลักษณะกระดาษจากเยื่อใบสับปะรดที่ได้จากการต้มด้วยน้ำประปา และน้ำปูนใส

เวลา (ชั่วโมง)	ตัวทำละลาย	คำอธิบาย	รูปภาพของเยื่อที่ 500 เท่า	รูปภาพของเยื่อที่ 1000 เท่า
2	น้ำประปา	มีการแตกตัวของเส้นใยน้อยที่สุด มีขนาดความกว้างของเส้นใยที่มากที่สุด		
4		มีการแตกตัวของเส้นใยน้อย มีขนาดความกว้างของเส้นใยที่มาก		
6		มีการแตกตัวของเส้นใยมาก มีขนาดความกว้างของเส้นใยที่เล็กลง		
2	น้ำปูนใส	มีการแตกตัวของเส้นใยน้อย มีขนาดความกว้างของเส้นใยที่เล็กลง		

เวลา (ชั่วโมง)	ตัวทำละลาย	คำอธิบาย	รูปภาพของเยื่อที่ 500 เท่า	รูปภาพของเยื่อที่ 1000 เท่า
4		มีการแตกตัวของเส้นใยมากที่สุด มี ขนาดความกว้างของเส้นใยที่เล็กลง		
6		มีการแตกตัวของเส้นใยมากที่สุด มี ขนาดความกว้างของเส้นใยที่เล็ก ที่สุด		

รูปที่ 2 และ รูปที่ 3 แสดงใบสับปรดเมื่อต้มเสร็จแล้วและเยื่อใบสับปรดที่ปั่นแล้วตามลำดับ จากตารางที่ 1 พบว่า ตัวทำละลายน้ำปูนใสที่ระยะเวลาในการต้ม 6 ชั่วโมง สามารถย่อยสลายเส้นใยของใบสับปรดให้มีขนาดเล็กลงได้ดีที่สุด มีการแตกตัวของเส้นใยจำนวนมากที่สุด มีการกระจายตัวของเส้นใยอย่างสม่ำเสมอ มีลักษณะพื้นผิวสัมผัสที่เกิดจากการกระจายตัวของเส้นใยมากกว่าแบบอื่น และลักษณะของเส้นใยใบสับปรดมีความเหมาะสมที่สุดต่อการนำไปขึ้นรูปเยื่อกระดาษนำไฟฟ้าจากใบสับปรดต่อไป

3.2 การหาน้ำหนักของกระดาษ

ทดสอบโดยการตัดกระดาษขนาด 10x10 เซนติเมตร จำนวน 3 แผ่น ซึ่งหามวลของกระดาษที่ตัดทั้ง 3 แผ่น แล้วคำนวณหาน้ำหนักเฉลี่ยของกระดาษที่ชั่งได้

ตารางที่ 2 การหาน้ำหนักของกระดาษที่ต้มด้วยน้ำประปา และน้ำปูนใส

เวลา (ชั่วโมง)	ตัวทำละลาย	น้ำหนักของกระดาษที่ชั่งได้ (กรัม)			
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 1	ค่าเฉลี่ย
2	น้ำประปา	3.39	3.42	3.40	3.40±0.02
	น้ำปูนใส	3.42	3.45	3.46	3.44±0.02
4	น้ำประปา	3.38	3.37	3.32	3.36±0.03
	น้ำปูนใส	3.62	3.63	3.63	3.63±0.01
6	น้ำประปา	3.74	3.76	3.75	3.74±0.01
	น้ำปูนใส	3.75	3.77	3.78	3.77±0.02

จากตารางที่ 2 พบว่า ตัวทำละลายน้ำปูนใสที่ระยะเวลาในการต้ม 6 ชั่วโมง มีค่าน้ำหนักของกระดาษที่มากที่สุด เพราะมีการกระจายตัวของเส้นใยใบสับปรดดีกว่าตัวอื่น เส้นใยมีการแตกตัวมากที่สุด มีค่าน้ำหนักเฉลี่ยของกระดาษเท่ากับ 3.77±0.02 กรัม

3.3 การวัดมุมสัมผัสของหยดน้ำของกระดาษ

ทดสอบโดยการตัดกระดาษขนาด 1x1 นิ้ว วางบนพื้นเรียบ หยดน้ำลงบนกระดาษ และทำการวัดค่ามุมของหยดน้ำ ทำซ้ำ 3 ครั้ง และหาค่าเฉลี่ย

ตารางที่ 3 การวัดมุมสัมผัสของหยดน้ำของกระดาษที่ต้มด้วยน้ำประปา และน้ำปูนใส

เวลา (ชั่วโมง)	ตัวทำละลาย	มุมสัมผัส (องศา)			
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย
2	น้ำประปา	43.40	43.40	43.40	43.40±0.00
	น้ำปูนใส	56.60	56.70	56.70	56.67±0.06
4	น้ำประปา	71.70	71.70	71.70	71.70±0.00
	น้ำปูนใส	78.20	78.20	78.20	78.20±0.00
6	น้ำประปา	84.60	84.50	84.50	84.53±0.06
	น้ำปูนใส	104.30	104.30	104.30	104.30±0.00

จากตารางที่ 3 พบว่า ตัวทำละลายน้ำปูนใสที่ระยะเวลาในการต้ม 6 ชั่วโมง มีค่าของมุมสัมผัสเท่ากับ 104.30±0.00 องศา จัดอยู่ในแบบ Hydrophobic เพราะเส้นใยมีลักษณะที่เล็กมาก ทำให้ผิวสัมผัสมีความแข็งแรงน้อยที่สุด ทำให้การดึงดูดระหว่างน้ำกับพื้นพื้นน้อยลง สามารถอธิบายจากปรากฏการณ์น้ำกลิ้งบนใบบัว (Lotus effect) พื้นผิวที่มีความขรุขระระดับไมโครเมตร หรือระดับนาโนเมตร จึงทำให้หยดน้ำมีลักษณะเป็นแบบไม่ชอบน้ำ ทำให้โมเลกุลของน้ำเกิดแรงยึดเหนี่ยวกับวัสดุจึงเกิดมุมสัมผัสมาก

3.4 การหาสภาพการยึดหยุ่นของกระดาษ

ทดสอบโดยการตัดกระดาษขนาด 2x10 เซนติเมตร, 4x10 เซนติเมตร และ 6x10 เซนติเมตรอย่างละ 3 แผ่น เติมน้ำลงในภาชนะที่ใส่น้ำหนักพร้อมวัดระยะยืดเสมอจนกระดาษขาด และบันทึกค่าผลการทดลอง

ตารางที่ 4 การหาสภาพการยึดหยุ่นของกระดาษที่ต้มด้วยน้ำประปา และน้ำปูนใสของกระดาษขนาด 2x10 เซนติเมตร

เวลา (ชั่วโมง)	ตัวทำละลาย	σ (N/m ²)	ϵ	σ/ϵ (N/m ²)
2	น้ำประปา	2.04×10 ⁵	0.17	1.20×10 ⁶
	น้ำปูนใส	2.06×10 ⁵	0.17	1.21×10 ⁶
4	น้ำประปา	2.11×10 ⁵	0.17	1.24×10 ⁶
	น้ำปูนใส	2.16×10 ⁵	0.17	1.27×10 ⁶
6	น้ำประปา	2.21×10 ⁵	0.17	1.30×10 ⁶
	น้ำปูนใส	2.28×10 ⁵	0.17	1.34×10 ⁶

ตารางที่ 5 การหาสภาพการยึดหยุ่นของกระดาศที่ต้มด้วยน้ำประปา และน้ำปูนใสของกระดาศขนาด 4x10 เซนติเมตร

เวลา (ชั่วโมง)	ตัวทำละลาย	σ (N/m ²)	ϵ	σ/ϵ (N/m ²)
2	น้ำประปา	2.22×10^5	0.17	1.31×10^6
	น้ำปูนใส	2.30×10^5	0.17	1.35×10^6
4	น้ำประปา	2.31×10^5	0.17	1.36×10^6
	น้ำปูนใส	2.36×10^5	0.17	1.39×10^6
6	น้ำประปา	2.40×10^5	0.17	1.41×10^6
	น้ำปูนใส	2.47×10^5	0.17	1.45×10^6

ตารางที่ 6 การหาสภาพการยึดหยุ่นของกระดาศที่ต้มด้วยน้ำประปา และน้ำปูนใสของกระดาศขนาด 6x10 เซนติเมตร

เวลา (ชั่วโมง)	ตัวทำละลาย	σ (N/m ²)	ϵ	σ/ϵ (N/m ²)
2	น้ำประปา	2.40×10^5	0.17	1.41×10^6
	น้ำปูนใส	2.45×10^5	0.17	1.44×10^6
4	น้ำประปา	2.50×10^5	0.17	1.47×10^6
	น้ำปูนใส	2.55×10^5	0.17	1.50×10^6
6	น้ำประปา	2.64×10^5	0.17	1.55×10^6
	น้ำปูนใส	2.72×10^5	0.17	1.60×10^6

จากตารางที่ 4 ถึงตารางที่ 6 พบว่า ตัวทำละลายน้ำปูนใสที่ระยะเวลาในการต้ม 6 ชั่วโมง มีค่ามอดูลัสที่มากที่สุดเท่ากับ 1.60×10^6 N/m² ซึ่งแสดงว่า วัสดุมีความทนทานต่อการเปลี่ยนแปลงมาก มีความยืดหยุ่นของกระดาศต่อการรับแรงดึงจนทำให้กระดาศขาดได้ดีที่สุด เป็นการเปลี่ยนรูปร่างไปอย่างถาวร เมื่อมีแรงดึงมากกระทำที่วัสดุจนทำให้ขาด และไม่สามารถกลับสู่สภาพปกติ

3.5 การหาความทึบแสงของกระดาศ

ทดสอบโดยใช้เครื่องลักซ์มิเตอร์ วัดปริมาณแสงที่ส่องผ่านเข้ามาในพื้นที่ทดสอบ ความสว่างจะแสดงในหน่วยของลักซ์ (LUX) โดยมีโคมไฟเป็นแหล่งกำเนิดแสง และสร้างกล่องทึบสีดำให้มีขนาด 14.5x15.5x15 เซนติเมตร เจาะรูตรงกลางขนาด 2x2 เซนติเมตร และตัดกระดาศขนาด 10x10 เซนติเมตร จากนั้นนำไปวางที่ตำแหน่งทดสอบ ทำการวัด 3 ครั้ง และหาค่าเฉลี่ย

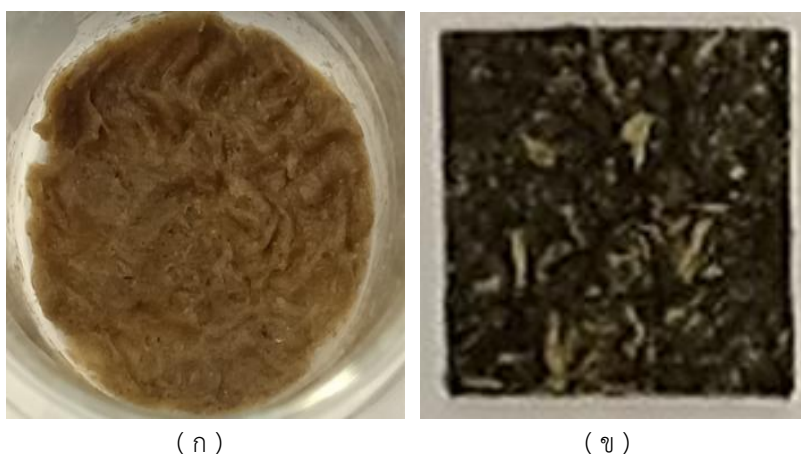
ตารางที่ 7 การหาความทึบแสงของกระดาศที่ต้มด้วยน้ำประปา และน้ำปูนใส

เวลา (ชั่วโมง)	ตัวทำละลาย	ความทึบแสง (Lux)			
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย
2	น้ำประปา	9.36	9.37	9.38	9.37 ± 0.01
	น้ำปูนใส	9.36	9.38	9.36	9.37 ± 0.01
4	น้ำประปา	9.37	9.38	9.35	9.38 ± 0.01
	น้ำปูนใส	9.36	9.39	9.40	9.38 ± 0.01
6	น้ำประปา	9.38	9.39	9.39	9.39 ± 0.01
	น้ำปูนใส	9.39	9.40	9.40	9.40 ± 0.01

จากตารางที่ 7 พบว่า กระดาษทุกชนิดมีความทึบแสงใกล้เคียงกัน ซึ่งแสดงว่า แสงที่ผ่านเข้ามาขึ้นอยู่กับความหนา ไม่ขึ้นอยู่กับสภาพเส้นใยใบสับปรด เพราะกระดาษมีความหนาใกล้เคียงกัน

3.2 กระดาษนำไฟฟ้าจากใบสับปรด

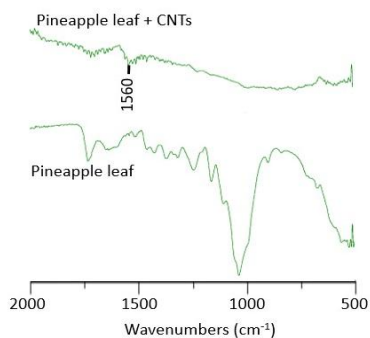
กระดาษนำไฟฟ้าทำได้โดยนำเยื่อใบสับปรดมาผสมกับโพลีไวนิลแอลกอฮอล์ 10% w/v ในอัตราส่วน 1:1 ดังภาพที่ 2 และชั่งมา 0.98 กรัม, 0.97 กรัม, 0.96 กรัม และ 0.95 กรัม ตามลำดับ นำมาผสมกับผงคาร์บอนนาโนทิวบ์ 0.02, 0.03, 0.04 และ 0.05 กรัม ตามลำดับ เป็นสารนำไฟฟ้าที่ผสมกับเอทานอลอย่างละ 1 มิลลิลิตร เพื่อช่วยในการผสมให้เกิดการกระจายตัวได้ดี ทั้งยังระเหยได้ง่าย และไม่มีการตกค้าง ทำการอัดให้เรียบในภาชนะบรรจุ ตากแดดจนแห้งสนิท และลอกออกจากภาชนะ จะได้กระดาษน้ำหนัก 1 กรัม ที่ความเข้มข้นของคาร์บอนนาโนทิวบ์ 2% w/w, 3% w/w, 4% w/w และ 5% w/w ตามลำดับ ดังรูปที่ 4



รูปที่ 4 (ก) กระดาษจากใบสับปรดผสมโพลีไวนิลแอลกอฮอล์ 10% w/v
(ข) กระดาษนำไฟฟ้า(ผสมคาร์บอนนาโนทิวบ์)จากใบสับปรดขนาด 1x1 เซนติเมตร



รูปที่ 5 ภาพถ่าย SEM ของอนุภาคคาร์บอนนาโนทิวบบนกระดาษนำไฟฟ้าจากใบสับปรด



รูปที่ 6 FTIR สเปกตรัมของคาร์บอนนาโนทิวบบนกระดาษนำไฟฟ้าจากใบสับปรด

จากรูปที่ 5 แสดงสัณฐานวิทยาของอนุภาคคาร์บอนนาโนทิวบ์บนกระดาษนำไฟฟ้าจากใบสับปะรด เป็นการยืนยันบ่งชี้ว่ามีคาร์บอนนาโนทิวบ์ในกระดาษจากใบสับปะรดจริง และจากรูปที่ 6 พิกซ์ที่เกิดจาก carboxylate anion stretch ที่เลขคลื่น $1,560\text{ cm}^{-1}$ เป็นพิกซ์หลักของคาร์บอนนาโนทิวบ์

ตารางที่ 8 การวัดสภาพการนำไฟฟ้าของกระดาษที่ต้มด้วยน้ำปูนใส

เวลา (ชั่วโมง)	ตัวทำละลาย	เปอร์เซ็นต์ความเข้มข้นของคาร์บอนนาโนทิวบ์ (%w/w)	สภาพการนำไฟฟ้า (โอห์ม)
6	น้ำปูนใส	2	0.000025
6	น้ำปูนใส	3	0.000294
6	น้ำปูนใส	4	0.000405
6	น้ำปูนใส	5	0.002060



รูปที่ 7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ความเข้มข้นของคาร์บอนนาโนทิวบ์ (% w/w) และสภาพการนำไฟฟ้า(โอห์ม)

จากตารางที่ 8 และรูปที่ 7 พบว่า เปอร์เซ็นต์ความเข้มข้นของคาร์บอนนาโนทิวบ์ยิ่งเพิ่มมากขึ้น การนำไฟฟ้ายิ่งเพิ่มมากขึ้นเช่นกัน เนื่องจากคาร์บอนนาโนทิวบ์เกิดจากคาร์บอนที่มีการต่อกันเป็นสายจำนวนมากจนทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าเพิ่มขึ้น

4. สรุปผลการทดลอง

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาหาเงื่อนไขที่เหมาะสมในการทำกระดาษจากใบสับปะรด ผลจากการศึกษาพบว่า ตัวทำละลายที่เหมาะสม คือ น้ำปูนใสที่ระยะเวลาในการต้ม 6 ชั่วโมงเนื่องจากมีลักษณะการกระจายตัวของเยื่ออย่างสม่ำเสมอ มีการยึดเกาะที่ดีที่สุด และความหนาแน่นของเยื่อมากเพียงพอที่จะนำมาทำกระดาษ หลังจากนั้นทดสอบคุณภาพของกระดาษ ได้แก่ น้ำหนักเฉลี่ยของกระดาษมีค่าเท่ากับ 3.77 ± 0.02 กรัม, การวัดมุมสัมผัสของกระดาษมีค่าเท่ากับ 104.30 ± 0.00 องศา, การหาสภาพการยืดหยุ่นของกระดาษมีค่าเท่ากับ 1.60×10^6 นิวตันต่อตารางเมตร และความทึบแสงของกระดาษมีค่าเท่ากับ 9.40 ± 0.01 ลักซ์ ซึ่งมีคุณสมบัติเหมาะสมนำไปประยุกต์ในการทำกระดาษนำไฟฟ้าจากใบสับปะรด และเมื่อนำมาทำเป็นกระดาษนำไฟฟ้าโดยผสมกับคาร์บอนนาโนทิวบ์ พบว่ายิ่งความเข้มข้นของคาร์บอนนาโนทิวบ์มากขึ้น สภาพการนำไฟฟ้าก็เพิ่มมากขึ้นเช่นกัน

ข้อดีของการผลิตกระดาษนำไฟฟ้า ได้แก่ การผลิตที่ไม่ใช้สารเคมีในการต้มโดยใช้ น้ำปูนใสที่เป็นเบสได้มาจากธรรมชาติ มีค่า pH อยู่ที่ 10-11 ไม่เป็นอันตรายต่อผู้ใช้งาน การใช้ตัวประสานที่ไม่เป็นอันตรายต่อนำมาทดสอบ และผู้ใช้งานซึ่งเมื่อสารโพลีไวนิลแอลกอฮอล์โดนความร้อนจะไม่เกิดก๊าซที่มีความเป็นอันตราย สามารถล้างออกได้ง่าย สามารถย่อยสลายได้ง่าย มีราคาถูก เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมโดยลักษณะทั่วไปของกระดาษที่ดี คือ ต้องเป็นแผ่นเหนียว, ไม่ขาดง่าย, ไม่มีรอย

ทะเล, ไม่มีสิ่งปนเปื้อน หรือรอยตำหนิ กระดาษสามารถนำไฟฟ้าได้ดี แต่จุดสูงสุดของการนำไฟฟ้าในกระดาษจะต้องมีการศึกษาเพิ่มเติม ผู้สนใจที่จะศึกษาต่อไปต่อยอดในการทำงานวิจัยต่อไปได้

5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยเรื่องการผลิตเยื่อกระดาษจากเส้นใยใบสับปะรดสำหรับทำกระดาษนำไฟฟ้า ขอขอบคุณสาขาวิชาเคมี ภาควิชาวิทยาศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ที่เอื้อเฟื้อสถานที่ และอุปกรณ์ในการดำเนินงานวิจัยนี้จนสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ขอขอบพระคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพที่มอบโอกาสในการนำเสนองานวิจัยชิ้นนี้ และสุดท้ายนี้ ขอขอบคุณทุกท่านที่มีส่วนสนับสนุนในทุกด้านเพื่อให้งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงอย่างดี

6. อ้างอิง

- [1] วรภัทร ลัคนทินวงศ์. (2546). กระดาษจากใบของสับปะรดและอุตสาหกรรมของครีวเรื่อน. ใน การประชุมวิชาการ พิษสวนแห่งชาติ ครั้งที่ 3 (หน้า 221).
- [2] วีระ โชติธรรมภรณ์. (2566). การผลิตกระดาษหัตถกรรมจากเยื่อใบสับปะรด เยื่อฟางข้าวและเยื่อกากกล้วยและการเคลือบด้วยสารไคโตซาน. ก้าวทันโลกวิทยาศาสตร์, 23, 1–12.
- [3] Aguilar, J., Bautista-Quijano, J., & Avilés, F. (2010). Influence of carbon nanotube clustering on the electrical conductivity of polymer composite films. *Express Polymer Letters*, 4, 292–299.
- [4] Abd Razak, S. I., Ahmad Sharif, N. F., & Mat Nayan, N. H. (2014). Electrically conductive paper of polyaniline-modified pineapple leaf fiber. *Fibers and Polymers*, 15, 1107–1111. <https://doi.org/10.1007/s12221-014-1107-0>
- [5] Anderson, R. E., Guan, J., Ricard, M., et al. (2010). Multifunctional single-walled carbon nanotube–cellulose composite paper. *Journal of Materials Chemistry*, 20, 2400–2407. <https://doi.org/10.1039/B924497H>
- [6] Bauhofer, W., & Kovacs, J. (2009). A review and analysis of electrical percolation in carbon nanotube polymer composites. *Composites Science and Technology*, 69, 1486–1498.
- [7] Boonthum, D., Oopathump, C., Pakdee, U., & others. (2022). Screen-printing of functionalized MWCNT–PEDOT:PSS based solution on bendable substrate for ammonia gas sensing. *Micromachines*, 13(3), 462.
- [8] Bunshi, F., Eiichi, S., Masaki, S., & others. (2008). Electrical conductivity and electromagnetic interference shielding of nanotubes/celluloses composite papers. *Carbon*, 46, 1256–1258.
- [9] Jutarut, I., Piyaporn, K., Yutthawee, W., & others. (2020). Biodegradable plates made of pineapple leaf pulp with biocoatings to improve water resistance. *Journal of Materials Research and Technology*, 9, 5055–5066.
- [10] Kim, D.-H., Cho, Y.-I., Choi, J. H., et al. (2015). Conductive carbon nanotube paper by recycling waste paper. *RSC Advances*, 5(40), 32118–32123. <https://doi.org/10.1039/C5RA03312F>
- [11] Park, S., Song, Y., Ryu, B., Song, Y.-W., Lee, H., Kim, Y., Lim, J., Lee, D., Yoon, H., Lee, C., & Yun, C. (2024). Highly conductive ink based on self-aligned single-walled carbon nanotubes through inter-fiber sliding in cellulose fibril networks. *Advanced Science*, 11(40), Article 2402854. <https://doi.org/10.1002/advs.202402854>
- [12] Selvam, K. P., Nagahata, T., Kato, K., et al. (2020). Synthesis and characterization of conductive flexible cellulose carbon nanohorn sheets for human tissue applications. *Biomaterials Research*, 24, 18. <https://doi.org/10.1186/s40824-020-00192-x>

- [13] Thaibunnak, A., & Pakdee, U. (2022). Pen-based writing of functionalized MWCNT–PEDOT:PSS ink on flexible substrate for application in ammonia gas sensor. *Suranaree Journal of Science and Technology*, 29(2), 010119 (1–7).
- [14] Udomdej, P., & Anaya, T. (2019). Growth of MWCNTs on plasma ion-bombarded thin gold films and their enhancements of ammonia-sensing properties using inkjet printing. *Journal of Nanotechnology*, 2019, 1–11. <https://doi.org/10.1155/2019/3424915>

การเปรียบเทียบอายุความล้าของเหล็ก SCM 420 ที่ผ่านการชุบแข็งด้วยน้ำมัน และการเคลือบผิวด้วยสารเคลือบ AlCrTiSiN

Fatigue Life Comparison of SCM 420 Steel with Oil Quenching and AlCrTiSiN Coating

เจริญ หมื่นจร, ธนวัฒน์ ม่วงไหมทอง*, ศิริชัย ไตรสูงเนิน และ ธนิต แท่งศรี

สาขาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธนบุรี

248 ซอย เพชรเกษม 110 แขวงหนองค้างพลู เขตหนองแขม กรุงเทพมหานคร 10160

Charoen Muenjohn, Thanawat Muangmaithong*, Sirichai Traisoongnoen and Tanit Tangsri

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

*Corresponding author Email: Artmuangmaithong@gmail.com

(Received: May 28, 2025 / Revised: December 24, 2025 / Accepted: December 26, 2025)

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินอายุการล้าของเพลที่ทำจากเหล็กกล้าผสมคาร์บอนต่ำ JIS-SCM 420 โดยมีการเปรียบเทียบระหว่างชิ้นงานที่ผ่านวิธีการชุบแข็งด้วยน้ำมัน และการเคลือบผิวด้วย AlCrTiSiN มีการวัดค่าความหยาบผิว การวัดความหนาของชั้นเคลือบผิว และการทดสอบด้วยเครื่องทดสอบความล้าแบบ R.R. Moore ผลของการวัดค่าความหยาบผิวเฉลี่ย (Ra) ของชิ้นงานที่ผ่านการชุบแข็งด้วยน้ำมันเท่ากับ $1.089\ \mu\text{m}$ และชิ้นงานที่ผ่านเคลือบผิวด้วย AlCrTiSiN มีค่าความหยาบผิวเท่ากับ $0.322\ \mu\text{m}$ ชิ้นงานที่เคลือบผิวด้วย AlCrTiSiN มีค่าความแข็งเท่ากับ 190.8 HB และสูงกว่าชั้นเคลือบการชุบแข็งด้วยน้ำมันมีค่าความแข็งเท่ากับ 67 HB ความแข็งที่เพิ่มสูงขึ้นเป็นผลมาจากการเติมธาตุซิลิกอน จนส่งผลให้ขอบเกรนมีความละเอียดเพิ่มขึ้น จำนวนรอบที่ได้จากการทดสอบความล้าสูงสุดของคือชิ้นงานที่เคลือบผิวด้วยสาร AlCrTiSiN อยู่ที่ 1,841,537 รอบ และการชุบแข็งด้วยน้ำมันอยู่ที่ 1,521,942 รอบ มีค่าแตกต่างกัน 21% จึงสรุปได้ว่าชิ้นงานที่เคลือบผิวด้วยสาร AlCrTiSiN มีอายุการใช้งานที่มากกว่าชิ้นงานที่ผ่านชุบแข็งด้วยน้ำมัน

คำสำคัญ: เหล็กกล้า JIS-SCM 420 การชุบแข็งด้วยน้ำมัน การเคลือบผิวด้วย AlCrTiSiN

Abstract

This research aimed to evaluate the fatigue life of shafts made from low - carbon alloy steel JIS - SCM 420 by comparing specimens treated with oil quenching and those coated with AlCrTiSiN. The surface roughness and coating thickness were measured, and fatigue tests were conducted using an R.R. Moore fatigue testing machine. The testing results showed that the average surface roughness (Ra) of the oil - quenched specimens was $1.089\ \mu\text{m}$, whereas the AlCrTiSiN - coated specimens exhibited a lower surface roughness of $0.322\ \mu\text{m}$. The hardness of the AlCrTiSiN - coated specimens was 190.8 HB, which was higher than that of the oil - quenched layer at 67 HB. The increased hardness resulted from the addition of silicon, which refined the grain boundaries. The maximum fatigue cycles obtained were 1,841,537 cycles for the AlCrTiSiN - coated specimens and 1,521,942 cycles for the oil - quenched specimens, representing a 21% difference. It was concluded that the AlCrTiSiN - coated specimens showed a longer fatigue life compared to the oil-quenched specimens.

Keywords: JIS-SCM 420 steel, Oil Quenching, AlCrTiSiN Coating

1. ที่มาและความสำคัญ

ในปัจจุบันสารเคลือบ AlCrTiSiN เป็นวัสดุเคลือบชนิดหนึ่งที่ใช้สำหรับเพิ่มความแข็งแรงและเพิ่มความทนทานต่อการสึกหรอเป็นหลัก โดยเป็นสารเคลือบที่ซับซ้อนทำจากอลูมิเนียม (Al) โครเมียม (Cr) ไททาเนียม (Ti) ซิลิกอน (Si) และไนโตรเจน (N) สารเคลือบชนิดนี้มักใช้ในกระบวนการสะสมไอทางกายภาพ (PVD) เทคโนโลยีการเคลือบผิวแบบ PVD (Physical Vapor Deposition) เป็นกระบวนการสร้างฟิล์มบางที่มีความแข็งแรงสูง [1] ซึ่งฟิล์มนี้มีแรงเสียดทานบนพื้นผิวต่ำ มีความต้านทานการขัดสีที่ดีเยี่ยม สามารถต้านทานการเกิดออกซิเดชัน ต้านทานการกัดกร่อน และช่วยยืดอายุผลิตภัณฑ์ให้ใช้งานได้ยาวนานขึ้น [2] จึงเริ่มเป็นที่นิยมนำมาใช้งานอุตสาหกรรม ตัวอย่างเช่น ดอกกัด มีดกลึง เพลา และเฟือง เป็นต้น

งานวิจัยในอดีตที่ผ่านมา มีนักวิจัยที่ทำการศึกษสมบัติทางกลของสารเคลือบผิว และประเมินอายุความล้าของเพลา ซึ่งมีดังรายละเอียดต่อไปนี้ (เจษฎา รุจิสมนภา, 2013) ได้ศึกษาพฤติกรรมการสึกหรอของดอกกัดที่เคลือบผิวด้วยวิธีไอทางระเหยฟิล์มแบบคาโทดิกอาร์ค โดยใช้ชั้นเคลือบอะลูมิเนียม โครเมียมไนไตรด์ (AlCrN), ไทเทเนียมไนไตรด์ (TiN), อะลูมิเนียมโครเมียมไทเทเนียมซิลิกอน ไนไตรด์ (AlCrTiSiN) และไทเทเนียมอะลูมิเนียมซิลิกอนไนไตรด์ (TiAlSiN) เปรียบเทียบกับ ดอกกัดที่ไม่ได้เคลือบ ทำการทดสอบการสึกหรอความแข็งแรงระดับนาโน การทดสอบความต้านทานต่อการขีดขีด และการทดสอบการใช้งานจริงโดยกัดผิวด้วยเครื่อง CNC ผลที่ได้จากการทดสอบความต้านทานต่อการขีดขีด และทดสอบค่าความแข็งแรงระดับนาโน พบว่า ชั้นเคลือบ AlCrTiSiN มีความแข็งแรงและความสามารถในการยึดเกาะสูงกว่าชั้นเคลือบ TiN, AlCrN และ TiAlSiN ตามลำดับ (Mohammad Jamalkhani Khameneh et al, 2018) ได้ทำการทดสอบความล้าจากชิ้นงานตัวอย่างที่ได้จากเพลาข้อเหวี่ยงที่เสียหาย ผลลัพธ์ที่ได้ระบุว่าอายุการใช้งานของความล้ารอบสูง-ต่ำกว่าเส้นโค้ง S-N เนื่องจากตัวอย่างชิ้นงานที่ได้จากเพลาข้อเหวี่ยงเพื่อพิจารณาผลกระทบที่มีต่อการผลิต สังเกตเห็นความแตกต่างของร็วรอยขนาน (เกิดจาก cyclic load) การหลุดร่อนของกรไฟต์จากเมทริกซ์เฟอร์ริติก - เพิร์ลลิติก (เป็นหลักฐานของการเปลี่ยนรูปแบบพลาสติก) และบ่งชี้ว่าเป็นการแตกหักแบบเปราะ (Sajjad Seifoori et al, 2020) ได้กล่าวไว้ว่าสาเหตุหลักของความเสียหายคือความล้าที่เกิดจากการรับโหลดแบบซ้ำไปซ้ำมาซึ่งเป็นผลจากรับแรงบิดแบบโหลดคงที่ที่เกิดกับขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางที่เปลี่ยนแปลงต่ออายุความล้าของเพลาภายใต้ความเค้นดัดแบบกลับไปกลับมา (Libin Zang et al, 2023) ได้ทำการศึกษาผลกระทบของการเคลือบผิวด้วยสารแมงกานีสฟอสเฟตที่มีขนาดผลึกแตกต่างกันต่ออายุการใช้งานของเฟืองเฉียงที่ทำจากเหล็กกล้า 20MnCrS5 ด้วยวิธีคาร์บูไรซิ่ง เริ่มจากการคำนวณความเค้นสัมผัสของพื้นผิวฟันภายใต้สัมประสิทธิ์แรงเสียดทานที่แตกต่างกันโดยใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ และทำการทดสอบความล้าจากการสัมผัสโดยใช้แท่นทดสอบกับเฟือง 3 แบบคือ เฟืองที่ไม่เคลือบสาร เฟืองที่เคลือบผิวด้วยสาร Mn-PH[U] และเฟืองที่เคลือบผิวด้วยสาร Mn-PH[S] ผลสรุปของการทดลองพบว่า การเคลือบ Mn-PH[S] ที่มีขนาดเม็ดใหญ่กว่าให้ผลดีที่สุดและอายุความล้าจากการสัมผัสของเฟืองเพิ่มขึ้นมากกว่า 100% เมื่อเทียบกับเฟือง 20MnCrS5 คาร์บูไรซ์ที่ไม่ได้เคลือบผิว ชี้แจงถึงความล้าจากการสัมผัสเพิ่มขึ้นประมาณ 150 MPa (Suresh Mylsamy et al, 2023) ได้ทำวิเคราะห์สาเหตุของความเสียหายโดยการทดสอบเพลาข้อเหวี่ยงที่เสียหายของเครื่องยนต์ดีเซลสองสูบที่ใช้ในรถยนต์เพื่อการพาณิชย์ขนาดเล็กซึ่งวิ่งประมาณ 80,000 กม. การตรวจสอบเพลาข้อเหวี่ยงที่เสียหายนี้ให้รายละเอียดเกี่ยวกับองค์ประกอบของวัสดุ โครงสร้างจุลภาค และคุณสมบัติทางกล นอกจากนี้ การวิเคราะห์แบบหมุน การวิเคราะห์แบบจำลองเชิงทดลอง และการทดสอบทางกลของวัสดุมีประโยชน์ในการกำหนดลักษณะของวัสดุที่เหมาะสมที่จะเลือกและวิเคราะห์สาเหตุหลักของความเสียหาย ชุดอุปกรณ์ทดลองนี้ช่วยในการทดสอบเพลาข้อเหวี่ยงและชิ้นส่วนตัวอย่างตามขั้นตอนการทดสอบ ASTM และผลลัพธ์จะถูกนำไปเปรียบเทียบกับกราฟเชิงตัวเลขโดยใช้ซอฟต์แวร์ ANSYS วัตถุประสงค์ของการวิจัยนี้คือเพื่อให้ข้อมูลเชิงลึกผ่านการวิเคราะห์ความเสียหายแก่ผู้ออกแบบและผู้ผลิตเพื่อปรับปรุงความน่าเชื่อถือและความปลอดภัยของเพลาข้อเหวี่ยงยานยนต์ และท้ายที่สุดยังช่วยลดการสูญเสียทางการเงิน

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินอายุความล้าของวัสดุเพลา SCM 420 ทั้ง 2 ชนิด คือ ชิ้นงานมีการชุบแข็งด้วยน้ำมัน และชิ้นงานมีการเคลือบผิวด้วย AlCrTiSiN โดยมีกระบวนการวิเคราะห์สมบัติทางเคมี การวัดค่าความหนาผิว การวัดความหนาของชั้นเคลือบผิว การประเมินอายุความล้าจากเครื่องทดสอบความล้า และลักษณะรอยแตกของชิ้นงานตัวอย่าง จากการศึกษานี้จะช่วยให้เห็นถึงข้อแตกต่างของอายุการใช้งานของวัสดุเพลาแบบวิธีการชุบแข็งด้วยน้ำมัน (Oil Quenching) และการเคลือบผิวด้วย AlCrTiSiN ซึ่งสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานที่เกี่ยวข้องได้ต่อไป

2. วิธีการทดลอง

การทดลองนี้ใช้วัสดุเพลาทที่ทำจากเหล็ก SCM420 โดยทำการทดสอบด้วยการชุบแข็งด้วยน้ำมัน และการเคลือบผิวด้วย AlCrTiSiN (ตัวอย่างชิ้นงานทดสอบอย่างละ 3 ชิ้น) จากนั้นวิเคราะห์สมบัติทางเคมี การวัดค่าความหยาบผิว การวัดความหนาของสารเคลือบผิว และการประเมินอายุความล้าจากเครื่องทดสอบความล้า โดยมีวิธีการดำเนินการศึกษาดังนี้

2.1 การตรวจสอบส่วนผสมทางเคมี วิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมีของเพลารอง เทียบกับมาตรฐานของเหล็กด้วยเครื่องวิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมี (Spark Emission Spectrometer) การวิเคราะห์ส่วนผสมของวัสดุ เพื่อตรวจสอบว่าวัสดุที่ใช้เป็นวัสดุชนิดใด เลือกใช้ตรงตามมาตรฐานหรือข้อกำหนดที่ออกแบบไว้หรือไม่สำหรับตัวอย่างชิ้นงานนี้จะตรวจสอบที่ผิวและตรงแกนกลางของเพลารอง

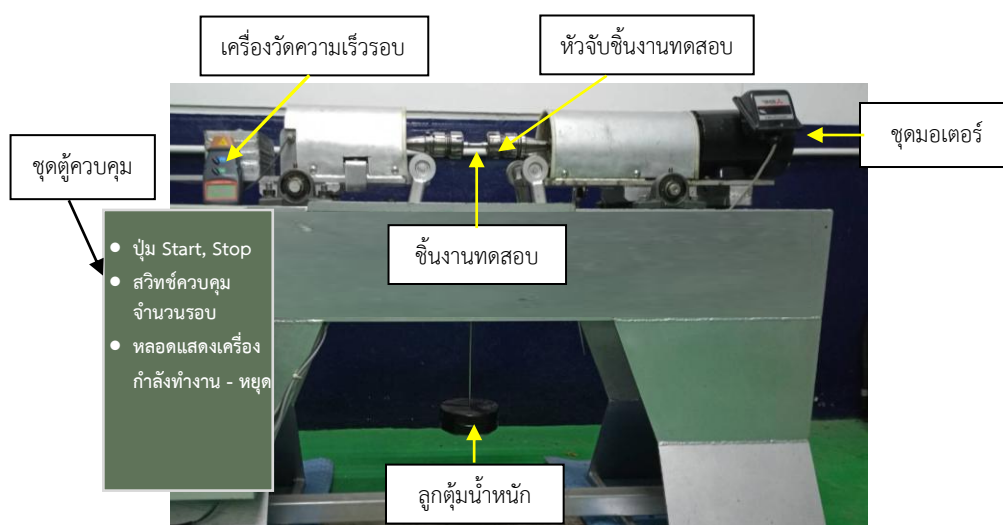
2.2 การทดสอบหาค่าความหยาบผิวของชิ้นงาน นำชิ้นงานมาทำการตรวจสอบพื้นผิว (Surface) กล้องจุลทรรศน์ชนิดคอนฟોકอล ยี่ห้อ OLYMPUS รุ่น OLS4100 ทำการทดสอบตามมาตรฐาน ISO4287 และวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม LEXT

2.3 การวัดความหนาของชั้นเคลือบผิว การวัดความหนาของชั้นเคลือบผิวจะมีวิธีการทดสอบดังนี้ ปรับตั้งค่าการวัดให้เป็นศูนย์ เปรียบเทียบค่าการวัดกับแผ่นมาตรฐาน และวัดความหนาของชั้นเคลือบผิว AlCrTiSiN ในชิ้นงานตัวอย่าง

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

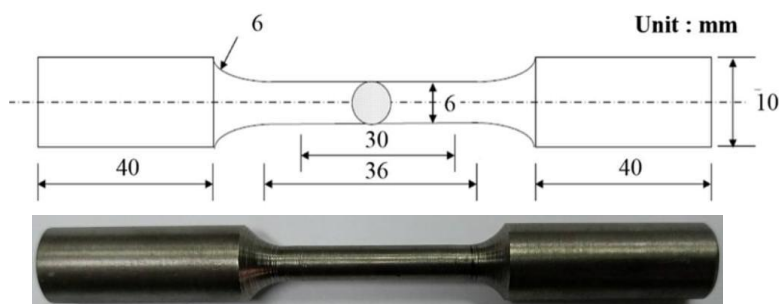
2.4 การทดสอบความล้า (Fatigue Test) การทดลองนี้จะใช้เครื่องทดสอบความล้าแบบ RR. Moore ดังแสดงในรูปที่ 1 ซึ่งมีส่วนประกอบสำคัญดังนี้

- 1) เครื่องวัดความเร็วรอบ
- 2) มอเตอร์ทดสอบ
- 3) หัวจับชิ้นงานทดสอบ
- 4) ลูกตุ้มน้ำหนัก
- 5) ลิมิทสวิตช์ (Limit switch)
- 6) ชุดตู้ควบคุมเครื่องทดสอบ
 - ปุ่มเริ่ม (Start), หยุด (Stop)
 - หลอดแสดงเครื่องกำลังทำงาน
 - หลอดแสดงเครื่องหยุดทำงาน
 - มาตรวัดจำนวนรอบ
 - สวิตช์ควบคุมความเร็วรอบ



รูปที่ 1 เครื่องทดสอบความล้าแบบ RR. Moore

ชิ้นงานที่ใช้ทดสอบตัวอย่างได้มาจากเพลาลูกเบี้ยว ทำการกลึงให้ได้ขนาดตามมาตรฐาน ASTM E8M-22 [3] ดังรูปที่ 2 โดยใช้ตัวอย่างทั้งหมด 3 ชิ้น เป็นการทดสอบความล้าแบบการตัด จะต้องทำการขัดเงาผิวชิ้นทดสอบจนถึงตรงแกนกลาง นำชิ้นงานมาจับยึดที่ปลายทั้งสองข้างของชิ้นงาน จากนั้นจะมีการให้แรงกระทำกับชิ้นทดสอบที่คงที่ โดยชิ้นทดสอบจะมีลักษณะโก่งขึ้น ทำให้ผิวด้านบนรับแรงดึงและผิวด้านล่างรับแรงกด จากนั้นให้หมุนมอเตอร์ไปจนกว่าชิ้นงานทดสอบจะแตกหักและบันทึกจำนวนรอบที่ชิ้นงานแตกหัก การทดสอบความล้าเป็นไปตามมาตรฐาน ISO-1143 [4] ผลลัพธ์ที่ได้มาลงในกราฟ S-N เพื่อประเมินอายุความล้าของชิ้นงานตัวอย่าง เมื่อได้ชิ้นงานตัวอย่างที่เกิดการแตกหักจากการทดสอบความล้าจะถูกนำมาเพื่อสำรวจลักษณะทั่วไปของรอยแตก จากนั้นจึงนำพื้นผิวที่แตกหักไปตรวจด้วยกล้องจุลทรรศน์ที่มีรายละเอียดมากขึ้นโดยใช้กล้องจุลทรรศน์ระบบดิจิทัล DSX-1000



รูปที่ 2 ขนาดของชิ้นงานทดสอบการล้าตามมาตรฐาน ASTM E8M-22 [3]

3. ผลการทดลอง

การศึกษานี้เป็นวัสดุเพลาลูกเบี้ยวที่ทำจากเหล็ก SCM 420 ซึ่งมีการทดสอบชิ้นงาน 6 ชิ้น ด้วยชิ้นงานที่ผ่านการชุบแข็งด้วยน้ำมันจำนวน 3 ชิ้น และการเคลือบผิวด้วย AlCrTiSiN จำนวน 3 ชิ้น โดยมีการวิเคราะห์สมบัติทางเคมี การวัดค่าความหยาบผิว การวัดความหนาของชั้นเคลือบผิว และการประเมินอายุความล้าจากเครื่องทดสอบความล้า ซึ่งมีผลการทดลองดังต่อไปนี้

3.1 การตรวจสอบส่วนผสมทางเคมี

การตรวจสอบสมบัติทางเคมีของเพลาลูกเบี้ยวโดยใช้เครื่อง Optical Emission Spectrometer: ARL 3460 ผลที่ได้ออกมาเป็นเปอร์เซ็นต์ส่วนประกอบทางเคมีดังแสดงในตารางที่ 1 เพลาลูกเบี้ยวที่ทำจากเหล็กกล้าผสมต่ำเกรด JIS-SCM420 เป็นโลหะผสมที่นิยมใช้ในงานวิศวกรรม เช่น เฟือง เพลานโรยยนต์ และชิ้นส่วนที่ต้องการความแข็งแรงและคุณสมบัติการตัด

ตารางที่ 1 ผลการตรวจสอบทางเคมีของเพลาลูกเบี้ยว SCM 420 steel [5]

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

3.2 การวัดค่าความหยาบผิวของชิ้นงานทดสอบ (Surface Roughness)

ผลของลักษณะภาพพื้นผิวที่ได้จากกล้องจุลทรรศน์ชนิดคอนฟอกอล ยี่ห้อ OLYMPUS รุ่น OLS4100 ค่าความหยาบของชิ้นงาน (Ra) ทั้ง 3 ชิ้น หลังการชุบแข็งด้วยน้ำมัน และตารางที่ 2 เป็นผลของค่าความหยาบผิวเฉลี่ยหลังการชุบแข็งด้วยน้ำมัน โดยมีค่า Ra เฉลี่ยเท่ากับ 1.089 μm ค่า Ry เฉลี่ยเท่ากับ 6.247 μm และ ค่า Rz เฉลี่ยเท่ากับ 8.089 μm ค่าความหยาบผิวของชิ้นงานตัวอย่าง (Ra) ทั้ง 3 ชิ้น หลังการเคลือบผิวด้วย AlCrTiSiN และตารางที่ 3 เป็นผลของค่าความหยาบผิวเฉลี่ยหลังการเคลือบผิวด้วย AlCrTiSiN โดยมีค่า Ra เฉลี่ยเท่ากับ 0.322 μm ค่า Ry เฉลี่ยเท่ากับ 3.007 μm และค่า Rz เฉลี่ยเท่ากับ 4.534 μm

ตารางที่ 2 ค่าความหยาบผิวของชิ้นงานตัวอย่างหลังการชุบแข็งด้วยน้ำมัน

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

ตารางที่ 3 ค่าความหยาบผิวของชิ้นงานตัวอย่างหลังการเคลือบผิวด้วย AlCrTiSiN

ชิ้นงาน	Ra(μm)	Ry(μm)	Rz(μm)
1	0.426	3.666	5.391
2	0.222	2.312	3.268
3	0.317	3.044	4.942
ค่าเฉลี่ย	0.322	3.007	4.534

เมื่อทำการเปรียบเทียบความหยาบผิวเฉลี่ย (Ra) จากตารางที่ 2 และ 3 พบว่าผิวของชิ้นงานที่ผ่านการชุบแข็งด้วยน้ำมันมีความหยาบผิวเฉลี่ย (Ra) ค่อนข้างมากซึ่งมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 1.089 μm เมื่อเปรียบเทียบกับชิ้นงานที่ผ่านเคลือบผิวด้วย AlCrTiSiN พบว่าค่าความหยาบผิวเฉลี่ย (Ra) มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0.322 μm นั้นแสดงให้เห็นว่าความหยาบผิวเฉลี่ย (Ra) ของชิ้นงานที่ผ่านเคลือบผิวด้วย AlCrTiSiN ที่มีค่าค่อนข้างน้อย ซึ่งมีข้อดีหลายประการทั้งเรื่องการเพิ่มคุณสมบัติเชิงกลของวัสดุ เช่น การสึกหรอของชิ้นงานเมื่อนำไปใช้งาน ลดการกัดกร่อนต่างๆ ยืดอายุการใช้งาน และลดความเสี่ยงของการที่ชิ้นงานเกิดรอยร้าว และแตกหัก จึงสามารถสรุปได้ว่าชิ้นงานที่ผ่านการเคลือบผิวด้วยสาร AlCrTiSiN จะมีประสิทธิภาพในการใช้งานที่เพิ่มมากขึ้นเมื่อเทียบกับชิ้นงานที่ผ่านการชุบแข็งด้วยน้ำมัน

3.3 การวัดความหนาชั้นเคลือบผิว (Coating Thickness)

การวัดความหนาชั้นเคลือบผิวในชิ้นงานตัวอย่างเคลือบผิวด้วย AlCrTiSiN ด้วยเครื่องวัดความหนาชั้นเคลือบยี่ห้อ FISCHER Dual Scope FMP40 ดังแสดงตารางที่ 4 แสดงผลของการวัดความหนาชั้นเคลือบผิวของชิ้นงานที่เคลือบผิวด้วย AlCrTiSiN ค่าความหนาของชั้นเคลือบเฉลี่ยทั้ง 10 จุด เท่ากับ 28.8 μm ค่าความหนาของชั้นเคลือบสูงสุดเท่ากับ 33.9 μm และค่าความหนาของชั้นเคลือบต่ำสุดเท่ากับ 23.1 μm

ตารางที่ 4 ผลของวัดความหนาชั้นเคลือบผิวของชิ้นงานที่เคลือบผิวด้วย AlCrTiSiN

ตำแหน่งที่วัด	ความหนาของชั้นเคลือบ AlCrSiTiN (μm)
1	30.1
2	33.9
3	27.4
4	32.2
5	32.1
6	28.1
7	25.4
8	25.5
9	30.0
10	23.1
Average	28.8
Max.	33.9
Min.	23.1

3.4 การทดสอบความแข็ง (Hardness Test)

การวัดค่าความแข็งของชิ้นงานทดสอบโดยใช้เครื่องวัดความแข็งแบบพกพา ยี่ห้อ NOVOTEST ชนิด Shore D ผลของการวัดค่าความแข็งของชิ้นงานตัวอย่างดังแสดงในตารางที่ 5 แสดงผลของการวัดค่าความแข็งของชิ้นงานตัวอย่าง ค่าความแข็งเฉลี่ยของชิ้นงานที่ชุบแข็งด้วยน้ำมันเท่ากับ 67 HB และค่าความแข็งเฉลี่ยของชิ้นงานที่เคลือบผิวด้วย AlCrTiSiN เท่ากับ 190.8 HB

ตารางที่ 5 ผลของการวัดค่าความแข็งของชิ้นงานตัวอย่างที่ชุบแข็งด้วยน้ำมันและชิ้นงานที่เคลือบผิวด้วย AlCrTiSiN

ตำแหน่งทดสอบ	วิธีการชุบแข็ง	
	การชุบแข็งด้วยน้ำมัน (HB)	การเคลือบสาร AlCrTiSiN (HB)
1	71	183
2	63	192
3	78	199
4	61	193
5	62	187
ค่าเฉลี่ย	67	190.8

ชิ้นเคลือบ AlCrSiTiN มีค่าความแข็งสูงกว่าชิ้นเคลือบการชุบแข็งด้วยน้ำมัน และจากผลการทดสอบวิเคราะห์โครงสร้างของชิ้นเคลือบ AlCrSiTiN ด้วย SEM (ไม่สามารถเปิดเผยรูปภาพได้ เนื่องจากเป็นความลับของบริษัท) จากภาพโครงสร้างสามารถอธิบายได้ว่า เมื่อเติมธาตุซิลิกอนเข้าไปจะมีผลทำให้ค่าความแข็งสูงขึ้นเนื่องจากซิลิกอนจะถูกทำให้อยู่ในรูปโครงสร้างพื้น Amorphous โดยผลึกของ AlCrSiTiN ในระดับนาโนจะถูกฝังเข้าไปในโครงสร้างพื้น Amorphous และมีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ เกรนจึงละเอียดขึ้นส่งผลให้มีขอบเกรนเพิ่มขึ้น การเคลื่อนที่ของดิสโลเคชันจึงถูกยับยั้ง ซึ่งภาพโครงสร้างสอดคล้องกับงานวิจัยของ [1] ดังนั้นค่าความแข็งของชิ้นเคลือบ AlCrSiTiN จึงเพิ่มขึ้น

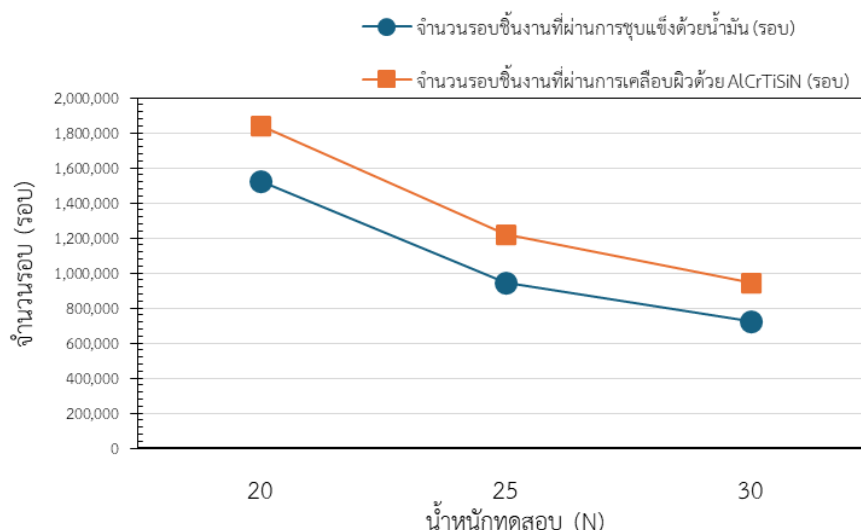
3.5 การทดสอบความล้า (Fatigue Test)

ตัวอย่างชิ้นงานที่นำมาทดสอบได้มาจากตัวอย่างของวัสดุพลาเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ SCM420 ที่ยังไม่ผ่านการใช้งาน โดยนำมาทดสอบแรงดึงซึ่งได้ค่าความเค้นแรงดึงสูงสุด (Ultimate Tensile Strength) เท่ากับ 517 MPa และค่าความเค้นแรงดึงคราก (Yield Strength) เท่ากับ 365 MPa [4] การทดสอบความล้าทั้งหมดดำเนินการที่อุณหภูมิแวดล้อม 25 °C ความถี่ในการรับโหลด 50 Hz ความเร็วของมอเตอร์ทดสอบเท่ากับ 1,500 รอบต่อนาที ภาระที่ใช้ในการทดสอบจะปรับเปลี่ยนค่าที่แตกต่างกันตั้งแต่ 20, 25 และ 30 N ตามลำดับ

ผลของการทดลองด้วยเครื่องทดสอบความล้าในตัวอย่างชิ้นงานที่ผ่านการชุบแข็งด้วยน้ำมันจำนวน 3 ชิ้น และชิ้นงานที่ผ่านการเคลือบผิวด้วย AlCrTiSiN จำนวน 3 ชิ้น ได้ค่าอายุการล้าของชิ้นงานทดสอบออกมาดังแสดงในตารางที่ 6 และสามารถนำมาเขียนกราฟ S-N ดังรูปที่ 3

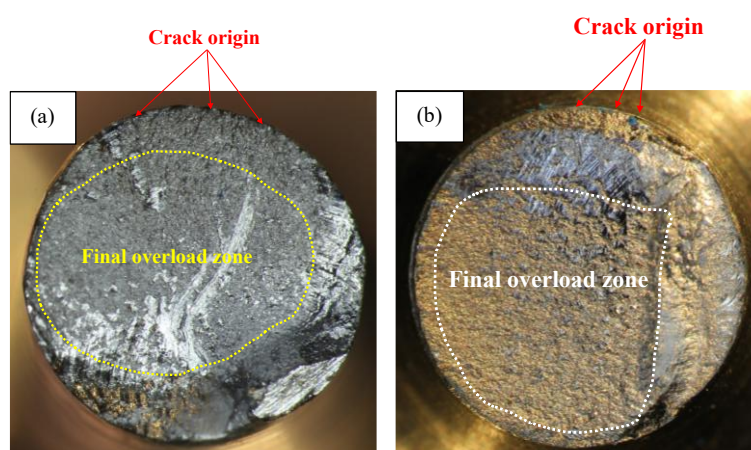
ตารางที่ 6 ผลจากการคำนวณและผลการทดสอบความล้าที่ความเร็วรอบ 1500 รอบ/นาที

ลำดับ	น้ำหนักทดสอบ (N)	จำนวนรอบชิ้นงานที่ผ่านการชุบแข็งด้วยน้ำมัน (รอบ)	จำนวนรอบชิ้นงานที่ผ่านการเคลือบผิวด้วย AlCrTiSiN (รอบ)
1	20	1,521,942	1,841,537
2	25	945,917	1,219,814
3	30	724,146	942,193



รูปที่ 3 ผลเปรียบเทียบรอบความล้าระหว่างการชุบแข็งด้วยน้ำมันและการเคลือบผิวด้วย AlCrTiSiN

จากรูปที่ 3 ผลการทดลองเพื่อประเมินอายุของความล้าของวัสดุภายใต้ความเค้นสลับ (Cyclic Load) ของเหล็ก JIS – SCM 420 จะทำการทดลองขึ้นงานทั้งหมด 3 ขึ้น จะสังเกตได้ว่าแนวโน้มของกราฟมีลักษณะลดลงเป็นเส้นโค้ง การทดลองแต่ละครั้งจะลดน้ำหนักถ่วงลงทีละ 5 N พบว่าเมื่อใช้น้ำหนักถ่วงเท่ากับ 20 N โดยจำนวนรอบที่นับได้สูงที่สุดของสาร AlCrTiSiN อยู่ที่ 1,841,537 รอบ และการชุบแข็งด้วยน้ำมัน (Oil Quenching) อยู่ที่ 1,521,942 รอบ มีค่าแตกต่างกัน 319,595 รอบ เมื่อคิดเป็นเปอร์เซ็นต์คือแตกต่างกัน 20.99 % และเมื่อใช้น้ำหนักถ่วงเท่ากับ 30 N จำนวนรอบที่นับได้น้อยที่สุดของสาร AlCrTiSiN อยู่ที่ 942,193 รอบ และการชุบแข็งด้วยน้ำมัน (Oil Quenching) อยู่ที่ 724,146 รอบ มีค่าแตกต่างกัน 218,047 รอบ เมื่อคิดเป็นเปอร์เซ็นต์คือแตกต่างกัน 30.11 % จากการทดลองจะสังเกตเห็นได้ชัดเจนว่าจำนวนรอบความล้าของเหล็กเพลลาที่เคลือบด้วยสาร AlCrTiSiN จะมีจำนวนรอบที่มากกว่าการชุบแข็งแบบชุบแข็งด้วยน้ำมัน สรุปได้ว่าเมื่อลดระดับความเค้นที่กระทำต่อชิ้นทดสอบให้น้อยลงอายุการล้าจะมีค่าเพิ่มสูงขึ้นโดยเป็นไปตามลักษณะเส้น S - N Curve [6][9]



รูปที่ 4 ลักษณะรอยแตกของชิ้นงาน (a) การชุบแข็งด้วยน้ำมัน และ (b) การเคลือบผิวด้วยสาร AlCrTiSiN

การตรวจสอบด้วยภาพถ่ายของลักษณะการแตกหักจากความล้าในการดัดแบบหมุน ผิวหน้ารอยแตกหักที่กำลังขยายตัวด้วยกล้อง Zoom Stereo Microscope ดังรูปที่ 4 แสดงให้เห็นจุดเริ่มต้นของรอยแตกหรือ Crack origin เกิดขึ้นหลายจุด จากนั้นรอยแตกจะขยายตัวอย่างช้าๆ ผ่านพื้นที่ Fatigue Zone หรือบริเวณที่ได้รับความเสียหายจากการรับแรงแบบคาบ เข้าไปเข้ามา ในช่วงระหว่างการขยายตัวของรอยแตกอย่างช้าๆ จะมีความผันแปรของแรงที่กระทำและมีผลต่ออัตราการขยายตัวของรอยแตก เมื่อรอยแตกขยายตัวไปได้ระยะหนึ่งจะทำให้วัสดุเหลือพื้นที่ในการรับแรงน้อย และทำให้เกิดเป็นพื้นที่รับแรงเกินพิกัด (Final Overload Zone) [7][8]

4. สรุป

งานวิจัยนี้เป็นการเปรียบเทียบวัสดุเพลลาที่ทำจากเหล็ก SCM 420 ซึ่งมีการชุบแข็งด้วยน้ำมัน และการเคลือบผิวด้วย AlCrTiSiN โดยมีการวิเคราะห์สมบัติทางเคมี การวัดค่าความหยาบผิว การวัดความหนาของชั้นเคลือบผิว และการประเมินอายุความล้าจากเครื่องทดสอบความล้า จากการทดลองดังกล่าวสามารถสรุปผลได้ดังต่อไปนี้

4.1 ผลของการวัดค่าความหยาบผิวเฉลี่ย (Ra) ของชิ้นงานที่ผ่านการชุบแข็งด้วยน้ำมันความหยาบผิวมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ $1.089 \mu\text{m}$ และชิ้นงานที่ผ่านเคลือบผิวด้วย AlCrTiSiN มีค่าความหยาบผิวเฉลี่ยเท่ากับ $0.322 \mu\text{m}$ ซึ่งส่งผลให้ชิ้นงานที่ผ่านการเคลือบผิวด้วยสาร AlCrTiSiN จะมีประสิทธิภาพการใช้งานที่เพิ่มมากขึ้นเมื่อเทียบกับชิ้นงานที่ผ่านการชุบแข็งด้วยน้ำมัน

4.2 ผลของความหนาของชั้นเคลือบและการวัดค่าความแข็งมีความสัมพันธ์กัน โดยพบว่าชั้นเคลือบ AlCrTiSiN มีค่าความแข็งเท่ากับ 190.8 HB สูงกว่าชั้นเคลือบการชุบแข็งด้วยน้ำมันมีค่าความแข็งเท่ากับ 67 HB ความแข็งที่เพิ่มขึ้นสูงมากนี้เป็นผลมาจากเมื่อเติมธาตุซิลิกอนเข้าไปจะทำให้ค่าความแข็งสูงขึ้นเนื่องจากการเคลือบในระดับนาโนจะถูกฝังเข้าไปในโครงสร้างพื้น amorphous และมีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ และส่งผลให้ขอบเกรนมีความละเอียดเพิ่มขึ้น

4.3 ผลการความล้าจะเห็นได้ว่าแนวโน้มของกราฟมีลักษณะลดลงเป็นเส้นโค้ง เมื่อใช้น้ำหนักถ่วงเท่ากับ 20 N โดยจำนวนรอบที่นับได้สูงที่สุดของสาร AlCrTiSiN อยู่ที่ 1,841,537 รอบ และ การชุบแข็งด้วยน้ำมัน อยู่ที่ 1,521,942 รอบ มีค่าแตกต่างกัน 21 % และเมื่อใช้น้ำหนักถ่วงเท่ากับ 30 N จำนวนรอบที่นับได้น้อยที่สุดของสาร AlCrTiSiN อยู่ที่ 942,193 รอบ และ การชุบแข็งด้วยน้ำมันอยู่ที่ 724,146 รอบ มีค่าแตกต่างกัน 30 % จึงสรุปได้ว่าชิ้นงานที่เคลือบสาร AlCrTiSiN มีอายุการใช้งานที่มากกว่าการชุบแข็งด้วยน้ำมัน

4.4 การตรวจสอบด้วยภาพถ่ายของลักษณะการแตกหักจากความล้าของชิ้นงานตัวอย่างที่ทั้ง 2 แบบพบว่าจุดเริ่มต้นของรอยแตกร้าว Crack Origin เกิดขึ้นหลายจุด จากนั้นรอยแตกจะขยายตัวอย่างช้าๆ ผ่านพื้นที่ Fatigue Zone หรือบริเวณที่ได้รับความเสียหายจากการรับแรงแบบคาบ เข้าไปเข้ามา ในช่วงระหว่างการขยายตัวของรอยแตกอย่างช้าๆ เมื่อรอยแตกขยายตัวไปได้ระยะหนึ่งจะทำให้วัสดุเหลือพื้นที่ในการรับแรงน้อย และทำให้เกิดเป็นพื้นที่รับแรงเกินพิกัด (Final Overload Zone)

5. เอกสารอ้างอิง

- [1] เจษฎา รุจิสมณฑา, “พฤติกรรมการสึกหรอของดอกกัดที่เคลือบผิวด้วยชั้นเคลือบโดยวิธีไอระเหยทางฟิสิกส์,” วิทยานิพนธ์ของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโลหการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, 2556.
- [2] Nurot Panich, Surasak Surinphong, D.A. Karpov, Yong Kwang Tan, Chin Foo Goh, Jan Ma, “Mechanical Properties “Mechanical Properties of AlCrTiSiN Coatings Developed by Cathodic Arc for Protection Applications.” Solid State Phenomena, vol. 185, 2012, pp. 81-83.
- [3] American Society for Testing and Materials E8/E8M-22. (2025, October 20). Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials [Online]. Available: https://store.astm.org/e0008_e0008m-22.html
- [4] INTERNATIONAL STANDARD ISO 1143. (2025, October 20). Metallic materials - Rotating bar bending fatigue testing [Online]. Available: <https://cdn.standards.iteh.ai/samples/79575/71ce80272d3a4ce4920ea96f0a7894df/ISO-1143-2021.pdf>
- [5] Otai Special Steel. (2024, October 20). ASTM 4118 Steel | SCM420 | 18CrMo4 | 1.7243 [Online]. Available: <https://www.astmsteel.com/product/astm-4118-steel-scm420-18crmo4-1-7243/>
- [6] Mohammad Jamalkhani Khameneh, Mohammad Azadi, “Evaluation of high-cycle bending fatigue and fracture behaviors in EN-GJS700-2 ductile cast iron of crankshafts.” Engineering Failure Analysis, vol. 85, 2018, pp. 189-200.
- [7] Sajjad Seifoori, Ahmad Mahdian Parrany, Mojtaba Khodayari, “A high-cycle fatigue failure analysis for the turbocharger shaft of BELAZ 75131 mining dump truck,” Engineering Failure Analysis, vol. 116, 2020, pp. 104752.

- [8] Libin Zang, Yong Chen, Weijie Hou, Tao Sun, Yimin Wu, Baoshan Zhao, “Effect of manganese phosphate conversion coating with different crystal sizes on fatigue life of 20MnCrS5 steel helical gears,” *Tribology International*, vol. 186, 2023, pp. 108622.
- [9] Suresh Mysamy, Neelakrishnan Subramanyan, “Fatigue failure prediction through factor of safety and stress concentration in a malfunctioned AISI 4140 automotive crankshaft,” *Materials Research Express*, vol. 10, 2023, pp. 126516.

การศึกษาผลกระทบของพฤติกรรมการเสียรูปภายใต้การชนของยานพาหนะ ในเสาดูดซับพลังงานสูง

Effect of Deformation Behavior under Vehicle Collision in High Energy Absorbing Poles

ยงยศ จันทรปาน*, นราชัย จิตรณรงค์, อุไรรัตน์ แจ่มสงวน, ศุภศิษฏ์ มาลา, เจษฎากร ลามโยไทย,
ผดุงเดช แคนไชย และ ณัฐวุฒิ พัฒนมะมั่งคงเงิน

สาขาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธนบุรี

248 ซอย เพชรเกษม 110 แขวงหนองค้างพูล เขตหนองแขม กรุงเทพมหานคร 10160

Yongyos Chunpan*, Narachai Jitnarong, Urairat Jamsa-nguean, Suphasit Mala, Jedsadsorn Lamyothai,

Phadungdech Kanchai and Nattawut Pattanamongkhongnoen

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

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

*Corresponding author Email: Nickzakata@hotmail.com

(Received: May 25, 2025 / Revised: December 17, 2025 / Accepted: December 21, 2025)

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาสมบัติทางกลของเสาข้อรับแรงแบบ A ทรงแปดเหลี่ยมที่ทำมาจากเหล็กรีดร้อนเกรด SS400 ผ่านขบวนการเคลือบด้วยสังกะสี ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 150 มม. หนา 2.3 มม. แล้วนำผลลัพธ์ที่ได้จากการทดสอบมาเปรียบเทียบกับเสาแบบ B ทรงกลม ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 90 มม. หนา 3.3 มม. และเสาแบบ C ทรงแปดเหลี่ยม ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 100 มม. หนา 2.3 มม. มีการใช้เทคนิคของการต่อด้วยหมุดย้ำที่ระยะพิทช์ 150 มม. ขั้นตอนในการทดสอบใช้เครื่องทดสอบการเสียรูป และการสร้างแบบจำลองโครงสร้างของเสาด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ที่จำลองขึ้นจากแบบของเสาเพื่อให้เห็นรายละเอียดพฤติกรรมในการเสียรูปของเสาทั้ง 3 ชนิด ผลการทดลองพบว่าการเสียรูปของเสาเปรียบเทียบกับผลของการจำลองเชิงตัวเลขด้วยโปรแกรมปรากฏว่าการจำลองเชิงตัวเลขมีค่าสูงกว่าการทดสอบการเสียรูปประมาณ 3% ซึ่งถือว่าสมเหตุสมผล เส้นผ่านศูนย์กลางที่ใหญ่ขึ้นและความหนาที่เท่ากันจะมีเปอร์เซ็นต์การเสียรูปที่แตกต่างกัน และสามารถสรุปได้ว่าเสาแบบ A ทรงแปดเหลี่ยมมีความสามารถในการดูดซับพลังงานสูงสุด ดังนั้นจึงถือว่าเสาแบบ A เป็นตัวเลือกที่มีศักยภาพสำหรับการออกแบบเสาดูดซับพลังงานสูงได้

คำสำคัญ: การเสียรูปของเสา สมบัติทางกล การจำลองเชิงตัวเลข

Abstract

This research aims to study the mechanical properties of A-type energy absorbing pole octagonal shape made from hot rolled steel grade SS400 through galvanized coating process, diameter 150 mm., thickness 2.3 mm. The test results were compared with those of round B-type energy absorbing pole, 90 mm diameter and 3.3 mm thick, and C-type energy absorbing pole octagonal, 100 mm diameter and 2.3 mm thick, the riveted connection technique at a pitch of 150 mm was used. The experimental procedure used a deformation test press, and the structural model of the pole was created using the finite element method, which was simulated from the column model, to see the details of the deformation behavior of the 3 types of energy absorbing poles. The experimental results showed that the deformation of the columns compared with the results of numerical simulation by a program. It was found that the numerical simulation was approximately 3% higher than the deformation test, which is reasonable. Larger diameters and the same thickness will have different percentages of deformation. It can be concluded that the octagonal A-type energy absorbing pole has the highest energy absorption capacity. Therefore, the A-type energy absorbing pole can be considered as a potential option for the design of high energy absorbing poles.

Keywords: Metallurgical pole deformation, Mechanical properties, Numerical simulation

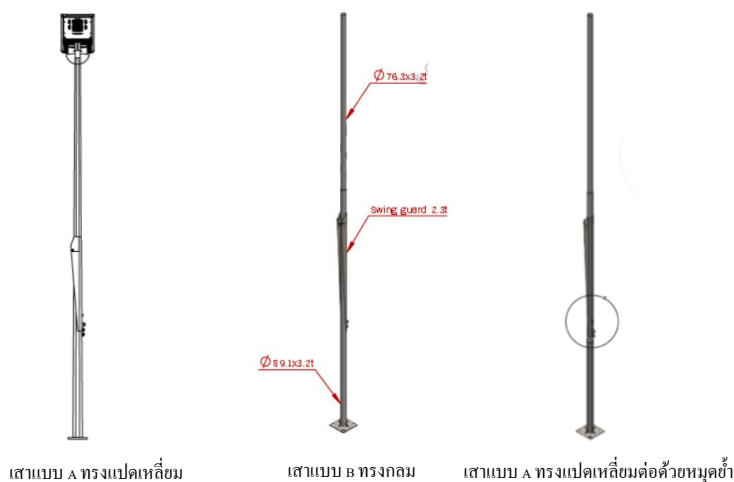
1. บทนำ

ในช่วงหลายปีที่ผ่านมาเกิดอุบัติเหตุบนท้องถนนจำนวนมากซึ่งเป็นปัญหาที่สำคัญทั่วโลก รวมทั้งประเทศไทย จากรายงานของศูนย์ข้อมูลอุบัติเหตุเพื่อเสริมสร้างวัฒนธรรมความปลอดภัยทางถนนที่เกิดขึ้นในประเทศไทยปี 2568 [1] โดยพบว่าปัจจัยภายนอกที่มักกระทำส่วนใหญ่มิสาเหตุมาจากรถชนเสาไฟฟ้า รถเกี่ยวสายไฟฟ้าหรือสายสื่อสาร และต้นไม้ล้มทับเสาและสายไฟฟ้า ส่งผลกระทบให้เกิดไฟฟ้าดับเป็นบริเวณกว้าง ผู้ใช้ไฟฟ้าได้รับความเดือนร้อนไม่มีไฟฟ้าใช้เป็นระยะเวลานาน และเกิดอันตรายต่อประชาชนทั่วไปจากเสาและสายไฟฟ้าที่หักโค่น นอกจากนี้ ยังมีค่าใช้จ่ายในการซ่อมแซมวัตถุหรือโครงสร้างที่เสียหายอีกด้วย [2]

การออกแบบยานพาหนะและถนนที่ปรับปรุงประสิทธิภาพจะช่วยลดการเสียชีวิตโดยรวม แต่การชนกับวัตถุเหล่านี้ยังคงทำให้เกิดการบาดเจ็บและเสียชีวิตจากการดูแลสภาพอย่างมีนัยสำคัญ คุณสมบัติความปลอดภัยในยานพาหนะ เช่น ถูกลมนิรภัย และโครงสร้างดูดซับแรงกระแทก มีจุดมุ่งหมายเพื่อป้องกันผู้โดยสารระหว่างเกิดอุบัติเหตุ โดยเน้นวัสดุที่มีน้ำหนักเบาและการออกแบบ แม้ว่ามาตรการด้านความปลอดภัยในรถยนต์จะช่วยให้ แต่ก็ไม่สามารถป้องกันการบาดเจ็บจากการชนกับวัตถุริมถนนได้อย่างเต็มที่ โดยการชนกันด้านหน้าเป็นประเภทที่พบมากที่สุด วัสดุและการออกแบบใหม่ในโครงสร้างเสาดูดซับพลังงานมีความสำคัญต่อความปลอดภัยของรถยนต์และผู้ใช้รถ โดยต้องมีการประเมินจากข้อมูลเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพให้เหมาะสมกับการทดสอบการชน การทดสอบโดยใช้รถยนต์จริงการชนอาจมีค่าใช้จ่ายในการทดสอบที่สูง ดังนั้นการวิเคราะห์องค์ประกอบที่จำกัดขอบเขตเป็นเครื่องมือที่มีประโยชน์ในการทำนายพฤติกรรมและการดูดซับพลังงานของเสาที่ได้ออกแบบมาใหม่ว่าจะให้ผลได้ดีเพียงใดในระหว่างการชน ทำให้สามารถศึกษาวัสดุและการออกแบบได้ดียิ่งขึ้น

มีงานวิจัยที่การศึกษาคุณสมบัติของเสาไฟซึ่งมีรายละเอียดดังนี้ Mohammad Sharif Uddin และคณะ [3] ได้ทำการออกแบบระบบกันกระแทกพลังงานสูงสำหรับถนน โดยใช้แนวคิดในระหว่างการชน พลังงานจลน์ของยานพาหนะที่วิ่งชนจะถูกดูดซับโดยการเปลี่ยนรูปของเซลล์อย่างต่อเนื่อง จึงลดความเสียหายต่อยานพาหนะ การทดสอบโดยใช้การจำลององค์ประกอบไฟไนต์เอลิเมนต์ และเทคนิคการทดลองถูกดำเนินการเพื่อประเมินการเสียรูปและความสามารถในการดูดซับพลังงานของเซลล์ ผลการจำลองนั้นใกล้เคียงกับผลการทดลองโดยมีข้อผิดพลาดค่อนข้างน้อย ผลลัพธ์บ่งชี้ว่าบัพเฟอร์ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางเซลล์ที่ใหญ่กว่านั้นเหมาะสำหรับใช้ในโซนความเร็วสูง Mohammad Sharif Uddin และคณะ [4] ได้ทำการวิเคราะห์การเสียรูปของท่อกลวงหกเหลี่ยมที่ดูดซับพลังงานโดยใช้วิธีการบีบอัดด้านข้างของท่อ การทดลองด้วยการการออกแบบคือเส้นผ่านศูนย์กลางและความหนาของผนังท่อเพื่อกำหนดความสามารถในการเสียรูปและดูดซับพลังงานของท่อทั้ง 3 แบบ ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าเมื่อเส้นผ่านศูนย์กลางและความหนาเพิ่มขึ้น ความแข็งแรงในการเสียรูปจะเพิ่มขึ้น ท่อหกเหลี่ยมที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 219 มม. และความหนา 4 มม. มีความสามารถในการดูดซับพลังงานสูงสุด เมื่อเปรียบเทียบกับรูปทรงกระบอกและแปดเหลี่ยม ดังนั้น Stanislawek. S และคณะ [5] ได้มีการวิเคราะห์ประสิทธิภาพของแบรีเออร์บนถนนเนื่องจากแรงเสียดทานที่แปรผันระหว่างยางและพื้นดินภายใต้สภาพอากาศที่แตกต่างกัน การทดลองเต็มรูปแบบโดยใช้รถบรรทุก Renault Midlum และรถบัส SETRA S215L ดำเนินการตามข้อบังคับ EN 1317 เพื่อตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองเชิงตัวเลข ได้ทำการทดสอบเชิงตัวเลขชุดหนึ่งเพื่อตรวจสอบอิทธิพลของค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน ($\mu_{wr} = 0-1.1$) ต่อผลการทดสอบ และพิสูจน์แล้วว่าในการทดสอบ TB 42 ดังนั้นจึงสามารถยืนยันได้ว่ามาตรฐาน EN 1317 อาจให้ข้อมูลไม่เพียงพอเกี่ยวกับความปลอดภัยของแบรีเออร์บนถนน ไม่สามารถคาดการณ์พฤติกรรมของแบรีเออร์ได้อย่างง่ายดายในระหว่างการกระแทกในสภาพอากาศที่เลวร้าย เมื่อการสัมผัสพื้นผิวกับล้อไม่เพียงพอ Pawel Baranowski และคณะ [6] ได้มีการนำเสนอการจำลองเชิงตัวเลขของขั้นตอนการทดสอบตามมาตรฐานยุโรป EN 12767 สำหรับการชนกันระหว่างยานพาหนะกับเสาไฟ โดยเริ่มจากการใช้แบบจำลองยานพาหนะ และให้ความสำคัญกับการลักษณะดิน และเสาไฟ โดยมีการจำลองเชิงตัวเลขแบบ (Explicit Dynamics Analysis) ควบคู่กับองค์ประกอบของวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ด้วยโปรแกรม Ansys Workbench ดำเนินการศึกษาคความไวของตาข่ายเสาไฟ ส่งผลให้ใช้ขนาดตาข่ายที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับพารามิเตอร์ทางกายภาพ เช่น คุณสมบัติของดินและค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานในส่วนต่อระหว่างยานพาหนะกับเสาไฟ พบว่าแรงเสียดทานและขนาดของตาข่ายมีอิทธิพลอย่างมากต่อดัชนีความรุนแรงของการเร่งความเร็ว (ASI) ความเร็วการกระแทกศีรษะตามทฤษฎี (THIV) ความเร็วหลังการกระแทก และพฤติกรรมของยานพาหนะในระหว่างสถานการณ์การชนเสาไฟ Mahmoud T. Nawar และคณะ [7] ได้มีการตรวจสอบเชิงทดลองและการจำลองเชิงตัวเลขเพื่อระบุประสิทธิภาพของเสาไฟฟ้าคาร์บอนไฟเบอร์ ทรงรียาวที่มีประตูแบบมีที่จับโดยใช้ฐานบล็อกเหล็กจนกว่าจะเกิดความเสียหาย ผลการทดลองโดยการเพิ่มความสูงของเสาขึ้นสองเท่า พบว่าทำให้มีความทนทานเพิ่มขึ้นอย่างน้อยสามเท่าครั้งโดยประมาณ และผลของการจำลองเชิงตัวเลขมีค่ามากกว่าผลการทดลองจะอยู่ที่ค่าประมาณน้อยกว่า 3.5% Pawel Baranowski และคณะ [8] ได้มีการประเมิน

พลังงานเทียบเท่าความเสียหายของรถยนต์ โดยใช้แบบจำลององค์ประกอบของ Toyota Yaris ที่พัฒนาโดยศูนย์วิเคราะห์การชนแห่งชาติ (NCAC) เพื่อใช้ในสภาพแวดล้อมซอฟต์แวร์ LS DYNA R.11 และยังมีการทดสอบโดยใช้รถยนต์ชนกำแพง ชนิดวัตถุที่จำลองคือเสาและต้นไม้ การเสียรูปที่ได้จะใช้เพื่อกำหนดค่าความเร็วเทียบเท่าพลังงานโดยใช้ซอฟต์แวร์ “Crash 3—EBS Calculation 12.0” และการเปรียบเทียบภาพกับฐานข้อมูลแค็ตตาล็อก EES โดยจะคำนวณค่าพารามิเตอร์ EES ใหม่เพื่อกำหนดถึงความแตกต่างของมวลในรถยนต์



รูปที่ 1 เสาไฟทั้ง 3 แบบ เสาแบบ A ทรงแปดเหลี่ยม แบบ B ทรงกลม และแบบ C ทรงแปดเหลี่ยมต่อด้วยหมุดยั่วที่ระยะพิตช์ 150 มม.

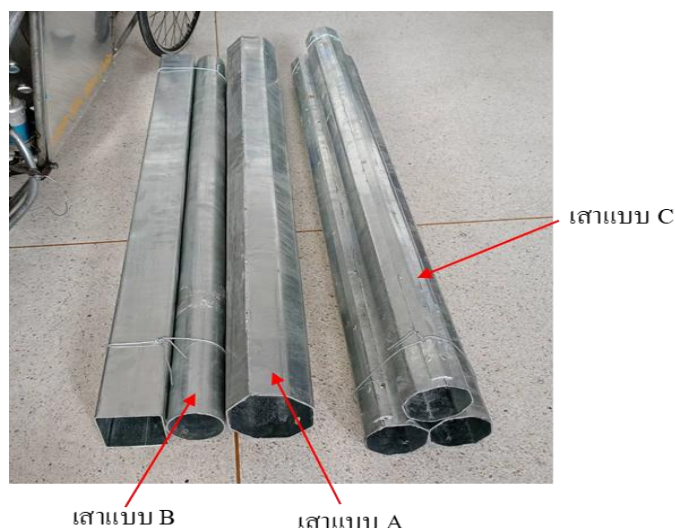
งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อการทดสอบเสาแบบ A ทรงแปดเหลี่ยม เพื่อนำผลการทดสอบที่ได้มาเปรียบเทียบกับเสาแบบ B ทรงกลม และเสาแบบ C ทรงแปดเหลี่ยมมีการต่อด้วยหมุดยั่ว ที่มีระยะพิตช์ 150 มม. ดังรูปที่ 1 และในการทดลองยังมีการสร้างแบบจำลองเสาด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ที่จำลองขึ้นจากแบบของเสาทั้ง 3 ชนิด เพื่อให้เห็นรายละเอียดของพฤติกรรมของการเสียรูป พร้อมกันนี้ยังนำผลที่ได้จากการทดลองทั้งหมดมาวิเคราะห์และประเมินผลที่เหมาะสมในการออกแบบให้กับเสาซึ่งแรงที่ได้ออกแบบไว้ให้ดียิ่งขึ้น

2. วัสดุและวิธีการทดลอง

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาสมบัติเชิงกลของเสาไฟทั้ง 3 แบบ โดยมีการวิเคราะห์สมบัติทางเคมี การทดสอบแรงดึง การทดสอบการเสียรูปของเสาไฟ และการสร้างแบบจำลองและวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ซึ่งมีวิธีการดำเนินการศึกษาดังต่อไปนี้

2.1 วัสดุที่ใช้ในการทดสอบ

เริ่มจากการตัดเสาตัวอย่างทั้ง 3 แบบดังแสดงในรูปที่ 2 ชนิด เสาแบบ A ทรงแปดเหลี่ยม และมีการเชื่อมที่รอยต่อมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 150 มม. หนา 2.3 มม. เสาแบบ B ทรงกลม ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 90 มม. หนา 3.3 มม. และ เสาแบบ C เสาแปดเหลี่ยมมีระยะพิตช์ของหมุดยั่ว 150 มม. ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 100 มม. หนา 2.3 มม. หลังจากนั้นก็นำตัวอย่างแต่ละชิ้นนำมาตัดให้ได้ 3 ชิ้น โดยแต่ละชิ้นงานยาว 500 มม.



รูปที่ 2 ชิ้นงานตัวอย่างของเสาทั้ง 3 แบบ

2.2 การวิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมี (Spark Emission Spectrometer)

เครื่องวิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมี (Spark Emission Spectrometer) ดังรูปที่ 3 เป็นเครื่องมือที่ใช้หาปริมาณธาตุองค์ประกอบของวัสดุโลหะหรือโลหะผสมต่าง ๆ โดยการวัดพลังงานของแสงที่ปล่อยออกมาหลังจากถูกกระตุ้นด้วยประจุไฟฟ้าจากการสปาร์ก หรืออาร์กซึ่งวัสดุหรือชิ้นส่วนที่นำมาทดสอบควรมีสภาพนำไฟฟ้าได้ การวิเคราะห์ส่วนผสมของวัสดุ เพื่อตรวจสอบว่าวัสดุที่ใช้เป็นวัสดุชนิดใด เลือกใช้ตรงตามมาตรฐานหรือข้อกำหนดที่ออกแบบไว้หรือไม่



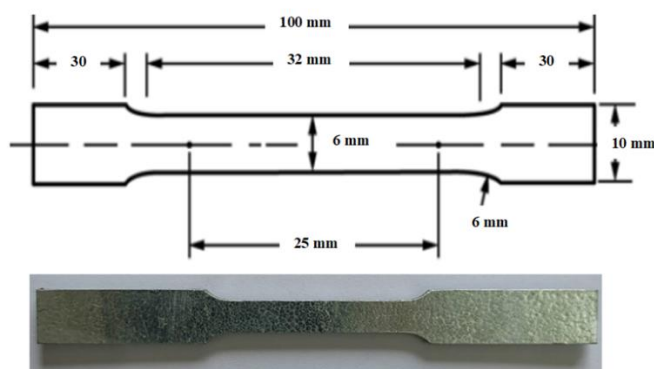
รูปที่ 3 เครื่องวิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมี (Spark Emission Spectrometer)

2.3 การทดสอบแรงดึง (Universal Testing Machine)

เครื่องทดสอบแรงดึงที่ใช้ในการทดลองนี้แสดงดังรูปที่ 4 ยี่ห้อ INSTRON รุ่น 8801 ขนาด 10 ตัน เป็นเครื่องสำหรับทดสอบแรงดึงในแนวตามยาวของเนื้อ โดยเตรียมชิ้นงาน ทดสอบแบบลวด การทดสอบสามารถป้อนค่าพารามิเตอร์ได้โดยตรงจากหน้าจอ การประมวลผลการทดสอบจะเป็นลักษณะของตัวเลขและกราฟ โดยในงานวิจัย ครั้งนี้ใช้ทดสอบเพื่อหาค่าความแข็งแรงดึงสูงสุด (Ultimate Tensile Strength) ความแข็งแรงที่จุดคราก (Yield Strength) และ เปอร์เซ็นต์ในการยืดตัว (Percent Elongation) การเตรียมชิ้นงานสำหรับทดสอบแรงดึงให้ได้ตามมาตรฐาน กำหนด ค่าพารามิเตอร์ในการทดสอบให้เป็นไปตามมาตรฐาน ASTM E8/E8M-22 แสดงในรูปที่ 5



รูปที่ 4 เครื่องทดสอบแรงดึง INSTRON รุ่น 8801



รูปที่ 5 การเตรียมชิ้นงานสำหรับทดสอบแรงดึงตามมาตรฐาน ASTM E8/E8M-22

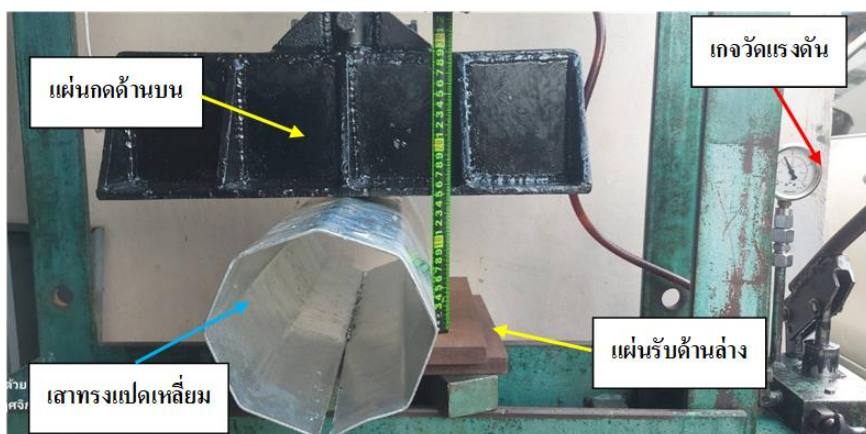
2.4 การทดสอบการเสียรูปของเสาทดสอบ

ทำการเลือกชิ้นงานตัวอย่างเสาจากตำแหน่งที่จะเกิดอุบัติเหตุสูงซึ่งมีความสำคัญต่อความปลอดภัยของผู้ใช้รถ และมีการตัดเสาออกเป็น 3 ชิ้น มีขนาดความยาว 500 มม. นำชิ้นงานตัวอย่างมาทดสอบการชนที่ 3 ระดับความเร็ว 50 กม/ชม. 70 กม/ชม. และ 100 กม/ชม. ดังรูปที่ 6 เมื่อทดสอบการเสียรูปได้แล้ว จดบันทึกค่าความดันเกจ และการเสียรูปโดยใช้ ตลับเมตรวัดอัตราการยุบตัวทั้งหมด 5 ระยะ เมื่อได้ผลการทดสอบทั้งหมดแล้วเลือกชิ้นงานที่มีลักษณะการเสียรูปดีที่สุดมา 3 ชิ้น และหาค่าเฉลี่ย โดยตั้งข้อสมมติฐานว่าในระหว่างการชนนั้น ตัวรถยนต์จะดูดซับพลังงานจลน์ทั้งหมดของยานพาหนะได้ ครึ่งหนึ่ง ดังนั้นเป้าหมายของเสาซึ่งแรงคือการดูดซับพลังงานจลน์ทั้งหมดที่เหลืออีกครึ่งหนึ่งผ่านการเสียรูปของเสา ดังนั้นจึง กำหนดให้มวลของยานพาหนะเป็น m_{vehicle} กำลังเคลื่อนที่ด้วยความเร็ว v และชนกับวัตถุคงที่ พลังงานจลน์ทั้งหมดของยานพาหนะสามารถประมาณได้ดังสมการที่ 1

$$K.E_{\text{totle}} = \frac{1}{2} m_{\text{vehicle}} \cdot v^2 \quad (1)$$

ดังนั้น พลังงานจลน์ที่เสาจะดูดซับจึงสามารถคำนวณได้ดังสมการที่ 2

$$K.E_{\text{pole}} = \frac{1}{2} K.E_{\text{totle}} \quad (2)$$



รูปที่ 6 การตั้งค่าการทดลองเพื่อการเสียรูปของเสา

ในการหาเปอร์เซ็นต์การเสียรูป (percentage of elongation) ของเสาสามารถคำนวณได้ดังสมการที่ 3

$$\text{เปอร์เซ็นต์การเสียรูป} = \frac{\delta}{L} \times 100\% \quad (3)$$

เมื่อ δ คือ ความยาวที่ยุบตัวลง
 L คือ ความยาวเดิม

ค่าเปอร์เซ็นต์การยืดและเปอร์เซ็นต์การลดพื้นที่หน้าตัดนี้เป็นค่าที่ใช้วัดความเหนียวของ วัสดุ วัสดุที่เหนียวมากจะมีค่าทั้งสองนี้สูงเพราะการยืดตัวมากและพื้นที่หน้าตัดลดลงมาก ก่อนที่จะขาดจากกันสำหรับหลักโครงสร้างโดยทั่วไปเปอร์เซ็นต์การลดลงของหน้าตัดจะอยู่ที่ 60 ถึง 70 เปอร์เซ็นต์

ตัวอย่างการคำนวณกรณีเสาแบบ A ทรงแปดเหลี่ยมที่ความเร็ว 100 km/hr.

น้ำหนักรถที่ใช้คือ $m_{\text{vehicle}} = 2000 \text{ kg}$.

ชนเสาที่ความเร็ว 100 km/hr. แปลงหน่วย = 27.78 m/s

แทนค่ามวลของรถยนต์และความเร็วลงในสมการที่ 1

$$K.E._{\text{totle}} = \frac{1}{2} m_{\text{vehicle}} \cdot v^2 = \frac{1}{2} \times 2000 \times 27.78^2 = 771,728 \text{ J}$$

แทนพลังงานจลน์รวม $K.E._{\text{totle}}$ ลงในสมการที่ 2

$$K.E._{\text{pole}} = \frac{1}{2} K.E._{\text{totle}} = \frac{1}{2} \times 771728 = 385,864 \text{ J}$$

การหาเปอร์เซ็นต์การเสียรูป

หาค่าการยุบตัว $\delta = 150 - 36 = 114 \text{ mm}$.

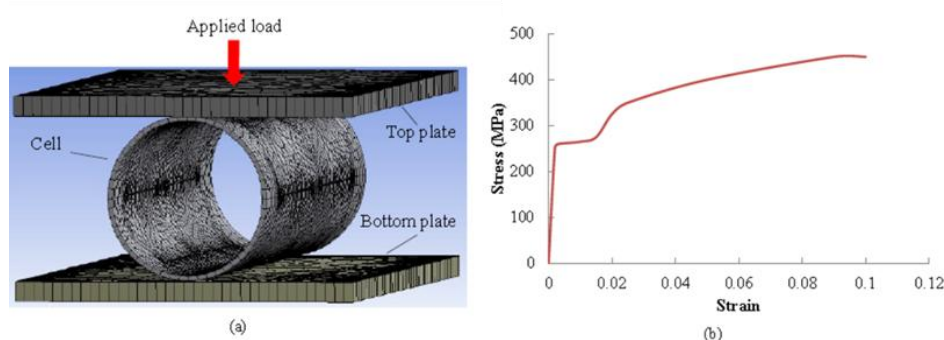
ความยาวเดิม 150 mm.

แผนค่าลงในสมการที่ 3

$$\text{เปอร์เซ็นต์การเสียรูป} = \frac{\Delta L}{L_0} \times 100\% = 76\%$$

2.5 การสร้างแบบจำลองและวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

การสร้างแบบจำลองโดยใช้เทคนิคไฟไนต์เอลิเมนต์ได้ถูกดำเนินการเพื่อให้เข้าใจได้มากขึ้นว่าเสาเสียรูปอย่างไรและต้องใช้แรงเท่าไรจึงจะเริ่มเสียรูปได้ ซึ่งทำให้สามารถประมาณค่าการดูดซับพลังงานหรือความสามารถในการทำงานของเสาซึ่งแรงภายใต้แรงกระทำที่กำหนดได้ วิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์เป็นข้อมูลที่ใช้อ้างอิงควบคู่กันกับวิธีการคำนวณเพื่อช่วยให้เห็นภาพการกระจายของชิ้นงานที่ได้รับออกแบบมา การวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์จึงถูกนำไปใช้กับเสาในเบื้องต้น การตั้งค่าการสร้างแบบจำลองได้รับการออกแบบในลักษณะที่สามารถจำลองเหมือนกับการทดสอบจริงเพื่อการเปรียบเทียบให้เห็นลักษณะการเสียรูป รูปที่ 7(a) แสดงแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของเซลล์ ส่วนรูปที่ 7(b) แสดงให้เห็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดที่เกิดขึ้นกับชิ้นงานทดสอบ [3,4]



รูปที่ 7 (a) แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของเซลล์ และ
(b) กราฟความเค้น-ความเครียด ของวัสดุเสาที่ใช้ในการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์

แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ประกอบด้วยเสาที่วางอยู่ระหว่างแผ่นด้านบนและแผ่นด้านล่างโดยแผ่นด้านล่างจะยึดแน่นในขณะที่แผ่นด้านบนจะเคลื่อนที่ได้ในแนวตั้งเท่านั้น แผ่นด้านบนได้รับการกำหนดให้เคลื่อนที่ในแนวตั้งซึ่งจะบังคับให้เสาถูกบีบอัดในแนวเส้นรอบวง ซึ่งจะจำลองแผ่นดินที่ติดอยู่กับกระบอกไฮดรอลิกระหว่างการทดลองจริง โปรแกรม ANSYS ถูกนำมาใช้เพื่อแก้ปัญหาการสัมผัสระหว่างเสากับแผ่นด้านบนและด้านล่าง เมื่อนำแบบจำลองของเสาเข้าสู่โปรแกรม ANSYS จะมีการเลือกตาข่าย 4 โหนดเพื่อนำมาเป็นแบบจำลอง และมีการป้อนแรงดันที่เกิดขึ้นกับชิ้นงานทดสอบเสา เพื่อตรวจสอบพฤติกรรมของการเสียรูปจากความเค้นที่เกิดขึ้นในชิ้นงานทดสอบ การเลือกตาข่ายที่มีความละเอียดจะใช้ในจุดที่เราให้ความสนใจเป็นพิเศษ ในขณะที่ตาข่ายแบบหยาบถูกใช้ที่บริเวณอื่นๆ โดยเปอร์เซ็นต์ของข้อผิดพลาดอยู่ที่ 1 – 5 % ซึ่งถือว่าเป็นขีดจำกัดที่ยอมรับได้สำหรับการวิเคราะห์ทางวิศวกรรม พร้อมกันนี้จะต้องมีการจำลองด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์อย่างน้อย 3 ครั้งเช่นเดียวกับการทดลองการเสียรูป เพื่อหาค่าเฉลี่ยที่เหมาะสมในการออกแบบ

3. ผลการทดลอง

โครงการนี้เป็นการศึกษาสมบัติเชิงกลของเสาไฟทั้ง 3 แบบ โดยมีการตรวจสอบส่วนผสมทางเคมี การทดสอบแรงดึง การทดสอบการเสียรูปของเสาไฟ และการสร้างแบบจำลองและวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ซึ่งมีผลการทดลองดังต่อไปนี้

3.1 การตรวจสอบส่วนผสมทางเคมี

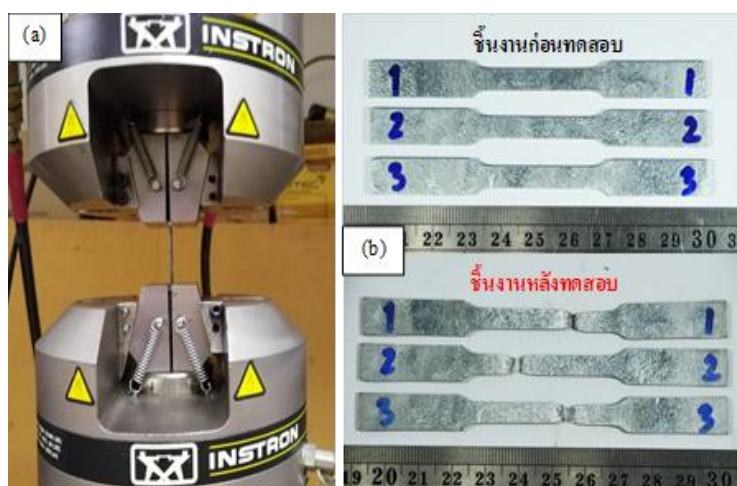
ผลของการตรวจสอบสมบัติทางเคมีของเสาไฟที่ได้ออกมาเป็นเปอร์เซ็นต์โดยมีส่วนประกอบทางเคมีดังแสดงในตารางที่ 1 เสาไฟทำจากเหล็กเกรด SS400 คุณสมบัติของเหล็ก SS400 จะมีความแข็งแรงตามมาตรฐาน เหมาะสำหรับการก่อสร้างทั่วไป ยกตัวอย่างการใช้งาน เช่น ใบบีม เชน บีม เหล็กฉาก เหล็กรางน้ำ เหล็กแบน แผ่นเหล็กต่างๆ ที่นำมาทำโครงสร้างสะพาน งานวิศวกรรมต่างๆ หรือ แม้กระทั่งโครงสร้างของเครื่องจักรขนาดใหญ่

ตารางที่ 1 ส่วนผสมทางเคมีของเหล็ก SS400 (%wt)

Materials	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Al
SS400	1.27	0.124	0.76	0.069	0.042	0.042	0.037	0.056	0.025

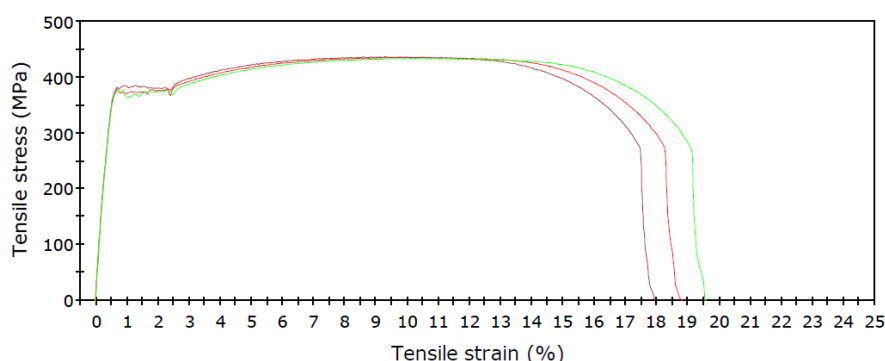
3.2 ทดสอบแรงดึง (Tensile Test)

เครื่องทดสอบแรงดึงที่ใช้ในการทดลองนี้แสดงดังรูปที่ 8(a) ยี่ห้อ INSTRON รุ่น 8801 ในการทดสอบสอแรงดึงมีวัตถุประสงค์เพื่อหาค่ามาตรฐานของวัสดุที่ใช้ทำเสาไฟและนำค่านี้ไปหาความสัมพันธ์กับผลการทดลองที่ได้จากการทดสอบการยุบตัวของเสาไฟ ชิ้นงานทดสอบนี้ได้มาจากเสาไฟดังรูปที่ 8(b) แสดงชิ้นงานก่อนและหลังการทดสอบแรงดึง ผลของการทดสอบแรงดึงของวัสดุเสาไฟดังรูปที่ 9 เป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น-ความเครียดของเหล็ก SS400 และตารางที่ 2 เป็นผลของค่าความแข็งแรงดึงสูงสุด (Ultimate Tensile Strength) ความแข็งแรงที่จุดคราก (Yield Strength) และเปอร์เซ็นต์ในการยืดตัว (Percent Elongation) [9]



รูปที่ 8 (a) เครื่องทดสอบแรงดึง INSTRON และ (b) ชิ้นงานก่อนและหลังการทดสอบแรงดึง

Tensile test



รูปที่ 9 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น-ความเครียดของเหล็ก SS400

ตารางที่ 2 ผลการทดสอบแรงดึงของชิ้นงานตัวอย่างทั้ง 3 ชิ้น

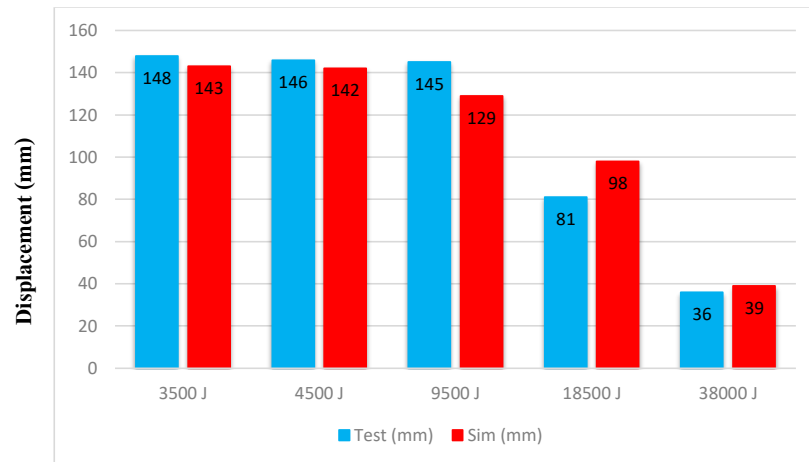
No.	Yield strength (MPa)	UTS (MPa)	Elongation at Break %
1	378	435	18.24
2	381	435	17.68
3	375	433	19.12
ค่าเฉลี่ย	378	434	18.34

3.3 การเปรียบเทียบระหว่างวิธีทดสอบการเสียรูปและวิธีวิเคราะห์การจำลองเชิงตัว

ผลการทดลองการเสียรูปที่ได้จากค่าดูดซับพลังงาน ซึ่งมีการเปรียบเทียบกันระหว่างวิธีการทดสอบและวิธีการจำลองเชิงตัวเลขของเสาแบบ A ทรงแปดเหลี่ยม และมีการเชื่อมที่รอยต่อมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 150 มม. หน้า 2.3 มม. ดังในตารางที่ 3 ปริมาณการดูดซับพลังงานของเสาแบบ A ทรงแปดเหลี่ยมประเมินได้จากกราฟในรูปที่ 10 โดยแผ่นด้านบน (แผ่นกด) จะประเมินโดยการผานพื้นที่ใต้เส้นโค้งการรับพลังงานจนกระทั่งมีการเสียรูปจนถึง 76% ของระดับการเสียรูปสูงสุดของเสา ผลลัพธ์แสดงให้เห็นว่าแนวโน้มโดยรวมของการรับ การดูดซับพลังงานของทั้ง 2 วิธีนั้นค่อนข้างคล้ายคลึงกัน ในระยะเริ่มต้นขนาดของการลดการทดสอบการเสียรูปและการจำลองเชิงตัวเลข เพื่อให้เสาเสียรูปนั้นเกือบจะเท่ากัน อย่างไรก็ตาม หลังจากการเปลี่ยนรูปแบบยึดหยุ่นเริ่มต้นประมาณ 5 - 69 มม. ภาระการจำลองจะสูงกว่าการทดสอบการเสียรูป และค่านี้จะคงที่เกือบตลอดจนกว่าเสาจะถึงจุดการเสียรูปสูงสุด ในทางกลับกันความสามารถในการดูดซับพลังงานสะสมจะเพิ่มขึ้นแบบเป็นเส้นตรงตามการเสียรูปแบบของเสาส่วนรูปที่ 11 เป็นภาพลักษณะการเสียรูปของเสา ซึ่งเปรียบเทียบกันระหว่างวิธีการทดสอบและวิธีการจำลองเชิงตัวเลข [3,4]

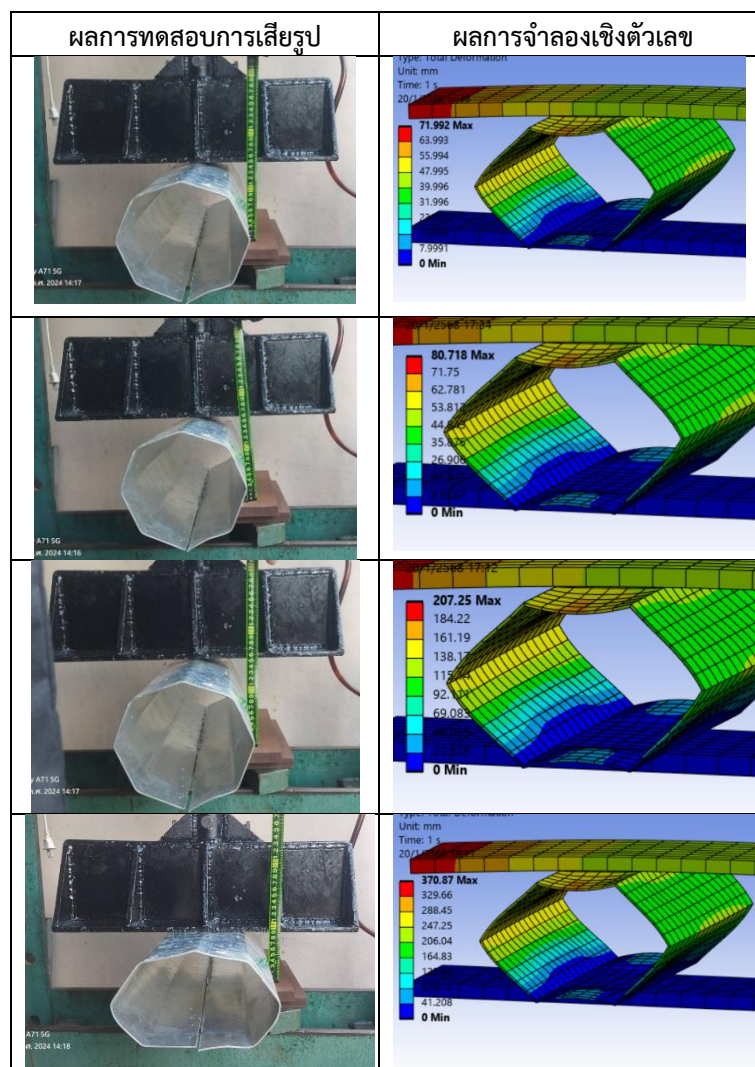
ตารางที่ 3 ผลการทดสอบค่าพลังงานดูดซับที่ 5 ระดับความเร็วของรถบีค็อพน้ำหนัก 2,000 kg

ชนิดของเสา	V = 30 km/hr. 3500 J	V = 45 km/hr. 4500 J	V = 50 km/hr. 9500 J	V = 70 km/hr. 18,500 J	V = 100 km/hr. 38,000 J
แบบ A ทรงแปดเหลี่ยม (mm)	148 (2%)	146 (3%)	145 (4%)	81 (46%)	36 (76%)
แบบ A Simulation (mm)	143 (4%)	142 (5%)	129 (14%)	98 (65%)	39 (74%)
แบบ B ทรงกลม (mm)	87 (3%)	86 (4%)	85 (6%)	49 (45%)	34 (62%)
แบบ B Simulation (mm)	85 (6%)	84 (7%)	78 (13%)	64 (29%)	37 (58%)
แบบ C ทรงแปดเหลี่ยม P = 150 mm	98 (2%)	97 (3%)	87 (13%)	61 (42%)	48 (52%)
แบบ C Simulation (mm)	96 (4%)	95 (5%)	89 (11%)	78 (22%)	56 (44%)



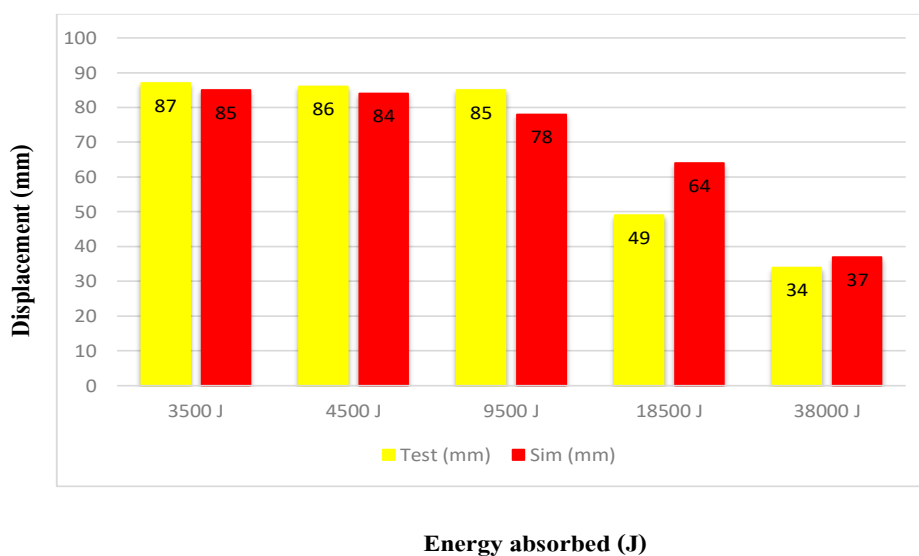
Energy absorbed (J)

รูปที่ 10 ผลเปรียบเทียบระหว่างการทดสอบการเสียรูปเสาและการจำลองเชิงตัวเลขของเสาแบบ A ทรงแปดเหลี่ยม



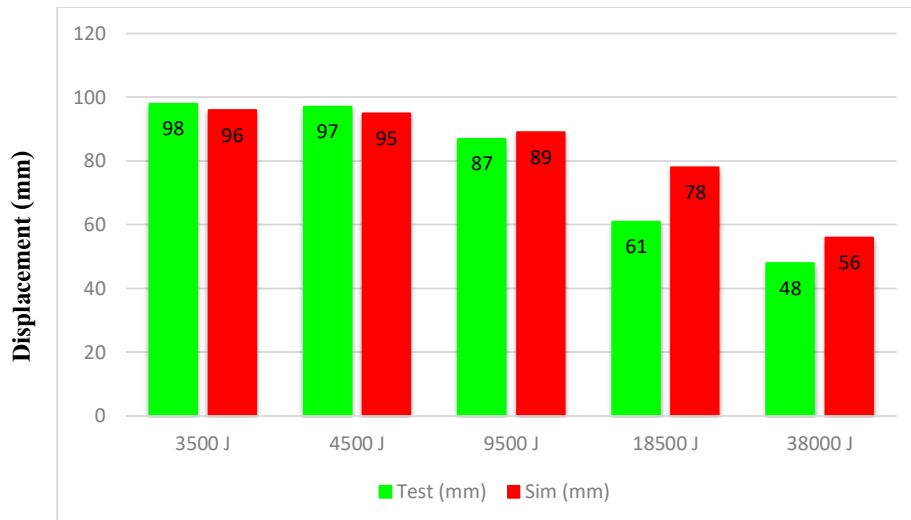
รูปที่ 11 การเปรียบเทียบการเสียรูปของเสาแบบ A ทรงแปดเหลี่ยมโดยการทดสอบและการจำลองเชิงตัวเลข

การเปรียบเทียบรูปแบบการดูดซับพลังงาน-การเสียรูปที่ได้จากการทดสอบและการจำลองเชิงตัวเลขของเสาแบบ B ท่อกลม ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 90 มม. หนา 3.3 มม. ปริมาณการดูดซับพลังงานของเสาแบบ B ท่อกลม ประเมินได้จากกราฟในรูปที่ 12 โดยแผ่นด้านบน (แผ่นกด) จะประเมินโดยการผานพื้นที่ใต้เส้นโค้งการรับพลังงานจนซึ่งมีการเสียรูปจนถึง 62% ของระดับการเสียรูปสูงสุดของเสา ผลลัพธ์แสดงให้เห็นว่าแนวโน้มโดยรวมของการรับ การดูดซับพลังงานของทั้ง 2 วิธีนั้นค่อนข้างคล้ายคลึงกัน ในระยะเริ่มต้น ขนาดของภาระลดการทดสอบการเสียรูปและการจำลองเชิงตัวเลข เพื่อให้เสาเสียรูปนั้นเกือบจะเท่ากัน อย่างไรก็ตาม หลังจากการเปลี่ยนรูปแบบยืดหยุ่นเริ่มต้นประมาณ 5 - 41 มม. ภาระการจำลองจะสูงกว่าการทดสอบการเสียรูป และค่านี้จะคงที่เกือบตลอดจนกว่าเสาจะถึงจุดการเสียรูปสูงสุด ในทางกลับกันความสามารถในการดูดซับพลังงานสะสมจะเพิ่มขึ้นแบบเป็นเส้นตรงตามการเสียรูปแบบของเสา [3,4]



รูปที่ 12 ผลเปรียบเทียบระหว่างการทดสอบการเสียรูปและการจำลองเชิงตัวเลข ของเสาแบบ B ทรงกลม

การเปรียบเทียบรูปแบบการดูดซับพลังงาน-การเสียรูปที่ได้จากการทดสอบและการจำลองเชิงตัวเลขของเสาแบบ C เสาแปดเหลี่ยมมีระยะพิชชของหมุดย้ำ 150 มม. ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 100 มม. หนา 2.3 มม. ประเมินได้จากกราฟในรูปที่ 13 โดยแผ่นด้านบน (แผ่นกด) จะประเมินโดยการผานพื้นที่ใต้เส้นโค้งการรับพลังงานจนซึ่งมีการเสียรูปจนถึง 52% ของระดับการเสียรูปสูงสุดของเสา ผลลัพธ์แสดงให้เห็นว่าแนวโน้มโดยรวมของการรับ การดูดซับพลังงานของทั้ง 2 วิธีนั้นค่อนข้างคล้ายคลึงกัน ในระยะเริ่มต้น ขนาดของภาระลดการทดสอบการเสียรูปและการจำลองเชิงตัวเลข เพื่อให้เสาเสียรูปนั้นเกือบจะเท่ากัน อย่างไรก็ตาม หลังจากการเปลี่ยนรูปแบบยืดหยุ่นเริ่มต้นประมาณ 12 - 39 มม. ภาระการจำลองจะสูงกว่าการทดสอบการเสียรูป และค่านี้จะคงที่เกือบตลอดจนกว่าเสาจะถึงจุดการเสียรูปสูงสุด ในทางกลับกันความสามารถในการดูดซับพลังงานสะสมจะเพิ่มขึ้นแบบเป็นเส้นตรงตามการเสียรูปแบบของเสา และลักษณะการเสียรูปของเสาภายใต้แรงกดซึ่งเป็นภาพเปรียบเทียบระยะยุบตัวระหว่างวิธีการทดสอบและวิธีการจำลองเชิงตัวเลข [3,4]

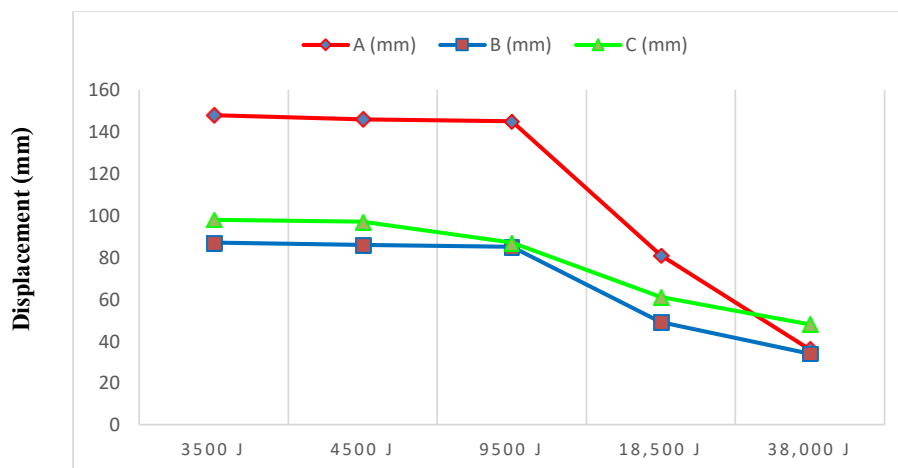


Energy absorbed (J)

รูปที่ 13 ผลเปรียบเทียบระหว่างการทดสอบการเสียรูปและการจำลองเชิงตัวเลขของเสาแบบ C แปดเหลี่ยม ที่มีระยะพิชชของหมุดย้า 150 มม.

3.4 การเปรียบเทียบผลของการเสียรูประหว่างเสาแบบ A แปดเหลี่ยม เสาแบบ B ท่อกลม และเสาแบบ C แปดเหลี่ยมที่ต่อด้วยหมุดย้า

เพื่อตรวจสอบหาประสิทธิภาพของเสาแบบ A รูปทรงแปดเหลี่ยม จึงได้ทำการทดสอบเปรียบเทียบการเสียรูปกับเสาแบบ B ท่อกลม และ เสาแบบ C แปดเหลี่ยมที่ต่อด้วยหมุดย้า เพื่อประเมินผลการรับพลังงานจลน์และการเสียรูปของเสาทั้ง 3 แบบ ในระหว่างการทดสอบได้พิจารณาท่อที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางที่แตกต่างกันและความหนาเท่ากัน โดยใช้ค่าเปอร์เซ็นต์การยุบตัวของเสา เพื่อประโยชน์ในการเปรียบเทียบประสิทธิภาพที่มีค่าแรงดันในการทดสอบที่เท่ากัน ความสามารถในการดูดซับพลังงานเป็นตัวบ่งชี้อีกตัวหนึ่งในการวัดความสามารถในการเสียรูปของเสา โดยพลังงานนั้นประมาณเป็นพื้นที่ใต้เส้นโค้งการรับภาระและการเสียรูป



Energy absorbed (J)

รูปที่ 14 การเปรียบเทียบการเสียรูปของเสาแบบ A ทรงแปดเหลี่ยม เสาแบบ B ทรงกลม และเสาแบบ C ทรงแปดเหลี่ยมที่ต่อด้วยหมุดย้า

รูปที่ 14 แสดงการเปรียบเทียบความสามารถในการดูดซับพลังงานระหว่างเสาแบบ A เสาแบบ B และเสาแบบ C ผลการทดสอบพบว่าเสาแบบ A แปดเหลี่ยมมีความสามารถในการดูดซับพลังงานได้สูงสุดในบรรดาเสาทั้ง 3 แบบ เสาแบบ B ท่อกลมมีความสามารถในการเสียรูปสูงเป็นอันดับสอง เหตุผลเบื้องหลังความแตกต่างในความสามารถในการเสียรูปก็คือการเปลี่ยนแปลงทางเรขาคณิตโดยธรรมชาติอันเนื่องมาจากรูปร่างของเสา ผลการทดสอบแสดงให้เห็นชัดเจนว่าเสาแบบ A แปดเหลี่ยมสามารถใช้สำหรับการออกแบบสำหรับการกระแทกด้วยความเร็วสูงได้ ดังที่เห็นเพิ่มเติมในรูปที่ 14 เสาแบบ A ทรงแปดเหลี่ยม ($d_o = 150 \text{ mm}$, $t = 2.3 \text{ mm}$) มีความสามารถในการดูดซับพลังงานประมาณ 38.58 kJ ที่การเสียรูปของเสาคือ 76% ตัวอย่างเช่น ยานพาหนะที่มีมวล 2,000 กก. ที่วิ่งด้วยความเร็ว 100 กม./ชม. มีพลังงานจลน์ 77.17 kJ คาดว่าพลังงานนี้จะถูกดูดซับโดยเสาและโครงสร้างของยานพาหนะเท่าๆ กัน ดังนั้นเสาที่จะออกแบบจะดูดซับพลังงาน 38.58 kJ ผลลัพธ์บ่งชี้ว่าเสาแบบ A ทรงแปดเหลี่ยมจะมีขนาดกะทัดรัดและคุ้มต้นทุนกว่ามาก [3,4,6,8]

4. สรุป

โครงการนี้เป็นการศึกษาเกี่ยวกับเสาดูดซับพลังงานที่ติดตั้งอยู่ริมถนนโดยใช้เสาแบบ A ทรงแปดเหลี่ยม เสาแบบ B ทรงวงกลม และเสาแบบ C ทรงแปดเหลี่ยมที่ใช้การต่อต้านด้วยหมุดยั่วที่มีระยะพิตช์ 150 มม. โดยการจำลองเชิงตัวเลข เพื่อตรวจสอบผลกระทบของรูปทรงต่างๆ ต่อการเสียรูปและความสามารถในการดูดซับพลังงานของเสาทั้ง 3 แบบ ซึ่งสามารถสรุปได้ดังนี้

1. ผลการทดสอบการเสียรูปและการจำลองเชิงตัวเลขมีค่าใกล้เคียงกันมาก แสดงให้เห็นว่าแบบจำลองเชิงตัวเลขมีความแม่นยำเพียงพอที่จะประมาณการการเสียรูปของเสาทั้ง 3 แบบ
2. การศึกษาเชิงพารามิเตอร์แสดงให้เห็นว่าเส้นผ่านศูนย์กลางที่ใหญ่ขึ้นและความหนาที่เท่ากันจะมีเปอร์เซ็นต์การเสียรูปที่แตกต่างกัน
3. สำหรับเส้นผ่านศูนย์กลางและความหนาที่กำหนด พบว่าเสาแบบ A ทรงแปดเหลี่ยมมีความสามารถในการดูดซับพลังงานสูงสุด ดังนั้นจึงสามารถถือว่าเป็นตัวเลือกที่มีศักยภาพสำหรับการออกแบบเสาแบบขับเคลื่อนได้
4. ผลลัพธ์ของการเสียรูปของเสาเปรียบเทียบกับผลของการจำลองเชิงตัวเลขด้วยโปรแกรม ANSYS ปรากฏว่าอัตราค่าการประเมินของ ANSYS สูงกว่าการทดลองประมาณ 3% ซึ่งสมเหตุสมผล

5. เอกสารอ้างอิง

- [1] ศูนย์ข้อมูลอุบัติเหตุเพื่อเสริมสร้างวัฒนธรรมความปลอดภัยทางถนน. (2024, October 15). สถิติข้อมูลผู้เสียชีวิตสะสม ประเทศไทย ปี 256 [Online]. Available: <https://www.thairsc.com/>
- [2] Wang Y G, Chen K M, Ci Y S, and Hu L W, "Safety Performance Audit for Roadside and Median Barriers Using Freeway Crash Records: Case Study in Jiangxi China," *Scientia Iranica*, vol. 18, 2011, pp. 1222-1230.
- [3] Mohammad Sharif Uddin, Jacob Quintel, Grad Zivkovic, "On the Design of Energy Absorbing Crash Buffers for High Speed Roadways," *Open Journal of Safety Science and Technology*, vol. 6, 2016, pp. 11-24.
- [4] M. S. Uddin, Nurul Amirah Shafie, Grad Zivkovic, "Hexagonal Hollow Tube Based Energy Absorbing Crash Buffers for Roadside Fixed Objects," *Materials Science and Engineering*, vol. 184, 2017, pp. 012038.
- [5] Stanislawek. S, Dziewulski. P, & Kedzierski. P, "Deterioration of Road Barrier Protection Ability Due to Variable Road Friction," *Int j simul model*. Vol. 18, 2019, pp. 432-440.
- [6] Pawel Baranowski and Krzysztof Damaziak, "Numerical Simulation of Vehicle-Lighting Pole Crash Tests: Parametric Study of Factors Influencing Predicted Occupant Safety Levels," *Materials*, vol. 14, 2021, pp. 2822.

- [7] Mahmoud T. Nawar, Mostafa E. Kaka, Ayman El-Zohairy, Osama Elhosseiny, Ibrahim T. Arafa, “Effect of Supporting Base System on the Flexural Behavior and Toughness of the Lighting GFRP Poles,” Sustainability. Vol. 14, 2022, pp. 12614.
- [8] Pawel Baranowski, Tomas Pasaulis, Robertas Peceliunas, Saugirdas Pukalskas, “Evaluation of the Energy Equivalent Speed of Car Damage Using a Finite Element Model,” Vehicles. Vol. 6, 2024, pp. 632–650.
- [9] กนกอร รจนากิจ, เมืองแก้ว ยุตัน, “การศึกษาคุณลักษณะทางกลและโครงสร้างทางโลหะวิทยาของรอยเชื่อมโลหะที่ต่างกันระหว่างเหล็ก A335 P11 และ A312 TP304 ด้วยวิธีก๊าซทั้งสแตนอาร์ค,” วารสารวิศวกรรมศาสตร์และนวัตกรรม. ฉบับที่ 1, 2068, 50–62.

การศึกษาอิทธิพลของพารามิเตอร์งานกลึงที่ส่งผลต่อลักษณะพื้นผิววัสดุชิ้นงาน ไทเทเนียม (Ti-6Al-4V)

Studying Influence of Turning Parameters on Characteristics of Machined Surface of Titanium (Ti-6Al-4V)

ชาตรี นุชนาง และ ไพรัตน์ พลบุตร

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ วิทยาลัยเชียงราย

199 หมู่ 6 ต.ป่าอ้อดอนชัย อ.เมือง จ.เชียงราย 57000

Chatree Nutnang and Phairat Pholbut

Department of Mechanical Engineering, Faculty
of engineering Chiang rai College,

199, Pa O Don Chai, Mueang Chiang Rai District, Chiang Rai 57000

*Corresponding author Email: Obb_april@hotmail.com

(Received: December 06, 2025 / Revised: December 27, 2025 / Accepted: December 28, 2025)

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาพารามิเตอร์สำหรับงานกลึงที่ส่งผลต่อลักษณะพื้นผิววัสดุชิ้นงานไทเทเนียม (Ti-6Al-4V) โดยการทดลองกลึงปอกบนเครื่องกลึงแบบอัตโนมัติด้วยเม็ดมีดแบบไม่เคลือบผิวภายใต้สภาวะการตัดเฉือนที่ปราศจากการใช้สารหล่อเย็น พารามิเตอร์สำหรับการตัดเฉือนที่ทำการศึกษาประกอบด้วย ความเร็วตัด (Cutting speed) อัตราป้อน (Feed rate) และความลึกของการตัด (Depth of cut) ผลจากการทดลองการตัดเฉือน พบว่า ความหยาบผิวเฉลี่ยแบบสิบจุด (Rz) ลดลงเมื่อความเร็วตัดเพิ่มมากขึ้น โดยความหยาบผิวเฉลี่ยแบบสิบจุดจะลดลงจาก 11.58 ไมโครเมตร เป็น 8.58 ไมโครเมตร จากการควบคุมความเร็วตัด 150.0 เมตรต่อนาที ถึง 262.5 เมตรต่อนาที การลดลงของความหยาบผิวชิ้นงานอาจเป็นผลมาจากความเร็วตัดที่เพิ่มสูงขึ้นส่งผลให้วัสดุชิ้นงานเกิดการอ่อนตัวเนื่องจากความร้อนเป็นเหตุให้แรงที่ใช้ในกระบวนการตัดเฉือนลดลง ในขณะที่ความหยาบผิวเฉลี่ยจะเพิ่มขึ้นตามอัตราป้อนเกิดจากอัตราการที่สูงขึ้นเป็นการเพิ่มความหนาของเศษวัสดุซึ่งส่งผลโดยตรงต่อลักษณะพื้นผิววัสดุชิ้นงานจากการสัมผัสของขอบเครื่องมือคมตัด นอกจากนี้ความหยาบผิววัสดุชิ้นงานมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามระดับความลึกของการตัด โดยที่ระดับความลึกของการตัด 0.3 มิลลิเมตรต่อรอบ มีความหยาบผิวเฉลี่ย 16.7 ไมโครเมตร

คำสำคัญ: ไทเทเนียม ความเร็วตัด อัตราป้อน ความลึกการตัด

Abstract

This research aims to study the influence of turning parameters affecting on the machined surface characteristics of titanium grade Ti-6Al-4V. Experimental tests for longitudinal turning were carried on the automatic machine with uncoated cermet under the dry machining condition. A study of turning parameters consisted of cutting speed, feed rate and depth of cut. The results of the machining experiments showed that the ten-point average surface roughness (Rz) decreased with increasing cutting speed. The average surface roughness of ten points was reduced from 11.789 μm to 8.532 μm by controlling the cutting speed from 150.0 m/min to 262.5 m/min. The reduction in surface roughness of workpiece may result from increased cutting speeds causing the work material to soften due to heat, thus reducing the force required in the cutting process. The average surface roughness increased with feed rate due to the more distance of cermet moving was leading to higher chip thickness which directly affects the machined surface of workpiece due to the contact of the cutting edge tool. In addition, the roughness of the machined surface of workpiece was increased with the depth of cut. The average roughness of machined surface presented by 16.7 microns at a depth of cut of 0.3 mm/rev.

Keywords: Ti-6Al-4V, Cutting speed, Feed rate, Depth of cut

1. บทนำ

การกลึงเป็นการผลิตชิ้นงานทรงกระบอกที่มีความสมมาตรโดยการควบคุมเครื่องมือคมตัดเคลื่อนที่ตัดเฉือนวัสดุชิ้นงานซึ่งจัดอยู่ในหมวดหมู่การแปรรูปโดยใช้เครื่องมือแบบของคมตัดเดี่ยว (Single point cutting tool) กระบวนการกลึงเป็นการแปรรูปวัสดุชิ้นงานในหลากหลายอุตสาหกรรม เช่น ชิ้นส่วนยานยนต์ ชิ้นส่วนแม่พิมพ์ เครื่องจักร และอากาศยาน เป็นต้น [1] งานกลึงเป็นกระบวนการผลิตชิ้นงานที่มีความยืดหยุ่นโดยการเคลื่อนที่ตัดเฉือนวัสดุชิ้นงานจะทำให้เกิดการเปลี่ยนรูปของวัสดุในบริเวณเริ่มต้น (Primary deformation zone) ซึ่งเป็นการเปลี่ยนรูปที่เกิดขึ้นในเนื้อวัสดุโดยความแข็งแรงของชิ้นงานจะส่งผลเป็นอย่างมากต่อความสามารถในการตัดเฉือน และในการตัดเฉือนพิเศษจะไหลตัวผ่านพื้นผิวของเครื่องมือคมตัด (Secondary deformation zone) โดยการไหลตัวของเศษจะเกิดบนพื้นผิวเครื่องมือคมตัด และการเปลี่ยนรูปบริเวณพื้นชิ้นงาน (Tertiary deformation zone) จะปรากฏเป็นลักษณะพื้นผิวชิ้นงานภายหลังการตัดเฉือน [2] มีดำเนินการวิจัยที่หลากหลายในการศึกษาการแปรรูปวัสดุชิ้นงานโดยปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อความสามารถในกระบวนการกลึงประกอบด้วย ความเร็วตัด (Cutting speed) ซึ่งเป็นค่าพารามิเตอร์ควบคุมเพื่อให้ทราบถึงความเร็วของเศษวัสดุที่ต้องจัดออกโดยมีหน่วยการวัดเป็นเมตรต่อนาที (เมตร/นาที) อัตราป้อน (Feed rate) เป็นการควบคุมความหนาของเศษก่อนการตัดโดยกำหนดเป็นระยะการเคลื่อนที่ของเครื่องมือคมตัดต่อการหมุนในแต่ละรอบของวัสดุชิ้นงานมีหน่วยควบคุมเป็นมิลลิเมตรต่อรอบ (มิลลิเมตร/รอบ) ความลึกในการตัด (Depth of cut) โดยความลึกในการตัดสำหรับการกลึงปอกแล้วจะทำให้ขนาดชิ้นงานเปลี่ยนแปลงเป็นสองเท่าของความลึกในการตัดซึ่งมีหน่วยเป็นมิลลิเมตร วัสดุชิ้นงาน (Work material) และเครื่องมือคมตัด (Cutting tool) ทั้งนี้ผลที่เกิดขึ้นจากกระบวนการกลึงจะประกอบด้วย ขนาดของชิ้นงาน (Dimension) เศษกลึง (Chip) ความหยาบผิว (Surface roughness) และการสึกหรอของเครื่องมือคมตัด (Tool wear) [3]

การทบทวนงานวิจัยที่ผ่านมามีนักวิจัยหลายท่านได้ทำการทดลองเพื่อศึกษาอิทธิพลของพารามิเตอร์งานกลึงที่ส่งผลประสิทธิภาพการกลึงวัสดุชิ้นงานต่างๆ เช่น พิชญา พิศสุวรรณ และคณะ [3] ซึ่งได้ทำการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อความขรุขระผิวในการกลึงปอกอะลูมิเนียมเกรด 2024 โดยใช้เมตต์คาร์ไบด์ และกำหนดปัจจัยที่ใช้ในการทดลอง เป็น ความเร็วรอบ อัตราป้อน และความลึกในการตัด สำหรับการกลึงวัสดุชิ้นงานอะลูมิเนียมที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 25 มิลลิเมตร โดยผลจากการทดลอง พบว่า ความหยาบผิวชิ้นงาน (Arithmetical mean roughness, Ra) มีแนวโน้มลดลงเมื่อใช้อัตราป้อนและความลึกในการตัดที่ต่ำภายใต้ความเร็วรอบที่สูง จุฬาลักษณ์ วิจารณ์กุล และคณะ [4] พยากรณ์ค่าความขรุขระสำหรับการกลึงคว้านเหล็กหล่อเหนียวโดยการใช้วิธีการพื้นผิวผลตอบสนองและการสึกหรอของเมตต์คาร์ไบด์ จากผลการทดลอง พบว่า ความหยาบผิวชิ้นงานมีแนวโน้มลดลงเมื่อใช้ความลึกในการตัดต่ำ และเพิ่มความเร็วรอบรวมทั้งขนาดรัศมีปลายมีดของเครื่องมือคมตัด (Nose radius) ทั้งนี้ในการกลึงคว้านความเสียหายที่เกิดขึ้นกับเครื่องมือคมตัดที่ปรากฏโดยส่วนใหญ่จะเป็นการแตกที่ปลายของขอบคมตัดเนื่องจากการกระแทก สัมผัสกัน หยาดขี้ และคณะ [5] ศึกษาการปรับปรุงค่าความหยาบเรียบผิวเหล็ก ST 37 ด้วยเครื่องกลึงซีเอ็นซีโดยใช้เทคนิคทากูชิ โดยทางคณะผู้วิจัยได้วิเคราะห์สภาวะการทำงานที่เหมาะสมซึ่งส่งผลให้เกิดค่าความเรียบผิวงาน 0.984 ไมครอนเมตร โดยการควบคุมความเร็วรอบ 2,000 รอบต่อนาที อัตราป้อน 0.06 มิลลิเมตรต่อรอบ และความลึกในการตัด 0.5 มิลลิเมตร พงศ์ธร จันทรสุขจำเริญ [6] ศึกษาความคุ้มค่าในการเลือกใช้เมตต์คาร์ไบด์สำหรับกลึงวัสดุเหล็กกล้าไร้สนิม โดยผลจากการศึกษาปรากฏให้เห็นว่า การใช้เมตต์คาร์ไบด์ชุบเคลือบผิวจะมีต้นทุนที่ถูกกว่าเมตต์คาร์ไบด์ที่เป็นเซอร์เมทโดยประมาณ 19.62 % Janmanee และคณะ [7] ศึกษาการเปลี่ยนรูปของเศษในการกลึงไทเทเนียมด้วยเมตต์คาร์ไบด์แบบเซอร์เมทและแบบชุบเคลือบเมตต์คาร์ไบด์ด้วยอลูมิเนียมโครเมียมซิลิกอนไทเทเนียมไนไตร (AlCrSiTiN) และไทเทเนียมอลูมิเนียมซิลิกอนไนไตร (TiAlSiN) โดยจากการทดลองพบว่าการใช้เมตต์คาร์ไบด์เซอร์เมทจะทำให้เกิดการบิดตัวของเศษมากกว่าการใช้เครื่องมือคมตัดแบบชุบเคลือบผิว โดยเมตต์คาร์ไบด์ชุบเคลือบผิวด้วย TiAlSiN จะมีการสึกหรอที่ต่ำ Lu และคณะ [8] สร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อพยากรณ์ความหยาบผิววัสดุชิ้นงาน ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าการพยากรณ์จะมีความแม่นยำเพิ่มมากขึ้นเมื่อพิจารณาถึงความหยาบผิวทางทฤษฎี (Theoretical roughness) ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Jia และคณะ [9]

จากงานวิจัยที่ผ่านมาโดยส่วนใหญ่จะมุ่งเน้นการศึกษาพารามิเตอร์การกลึงที่ส่งผลต่อความหยาบผิวเฉลี่ยของวัสดุชิ้นงานต่างๆ อย่างไรก็ตามมีงานวิจัยน้อยมากที่ให้ความสนใจเกี่ยวกับการควบคุมพารามิเตอร์ในงานกลึงที่ส่งผลต่อลักษณะพื้นผิวสำหรับการกลึงวัสดุชิ้นงานไทเทเนียม ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาอิทธิพลของ ความเร็วตัด อัตราป้อน ความลึกของการตัด ที่ส่งผลต่อลักษณะพื้นผิวของวัสดุชิ้นงานโดยใช้เครื่องมือคมตัดแบบไม่ชุบเคลือบผิว

2. วิธีการดำเนินการทดลอง

การทดลองกระทำบนเครื่องกลึงแบบอัตโนมัติที่มีเครื่องหมายการค้าเป็น HAAS รุ่น TL1 ดังแสดงในรูปที่ 1 ก) และลักษณะพื้นผิววัสดุชิ้นงานภายหลังการกลึงจะถูกประเมินโดยใช้เครื่องทดสอบความหยาบผิวที่มีเครื่องหมายการค้าเป็น Mahr รุ่น MarSurf PS1 ดังแสดงในรูปที่ 1 ข) ทั้งนี้วัสดุชิ้นงานที่ใช้สำหรับการทดลองเป็นไทเทเนียมเกรด Ti-6Al-4V ขนาด 25 มิลลิเมตร โดยวัสดุชิ้นงานจะถูกจับยึดบนเพลาหัวจับเครื่องกลึงด้วยปากจับแบบ 3 ฟันพร้อม และทำการกลึงปอกยาว 30 มิลลิเมตร ภายใต้เงื่อนไขการตัดเฉือนโดยไม่ใช้สารหล่อเย็น ทั้งนี้พารามิเตอร์ควบคุมในการทดลองจะทำการปรับ ความเร็วตัด อัตราป้อน และความลึกการตัดดังแสดงในตารางที่ 1 โดยในการทดลองจะทำการกลึงด้วยเม็ดมีดที่มีเครื่องหมายการค้า TNMG 160402R-S N9530 บนตัวมีดกลึงปอก รุ่น DTR BCSR202-K17



ก) เครื่องกลึงอัตโนมัติที่มีเครื่องหมายการค้าเป็น HAAS รุ่น TL1 ข) เครื่องวัดความหยาบผิวยี่ห้อ Mahr รุ่น MarSurf PS1
รูปที่ 1 เครื่องกลึงอัตโนมัติและเครื่องวัดความหยาบผิวที่ใช้ในการทดลอง

ตารางที่ 1 พารามิเตอร์ควบคุมในการทดลอง

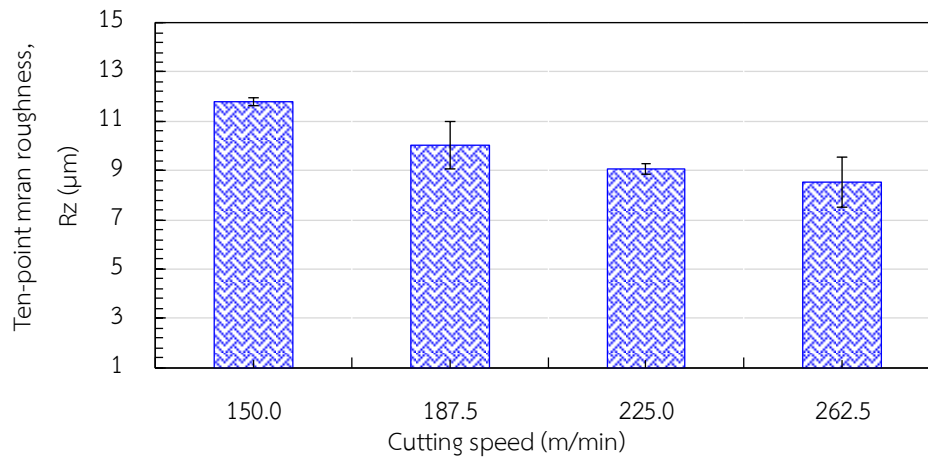
พารามิเตอร์ควบคุมในการทดลอง	รายละเอียด
ความเร็วตัด (เมตรต่อนาที)	150.0, 187.5, 225.0, 262.5
อัตราป้อน (มิลลิเมตรต่อรอบ)	0.20, 0.25, 0.30
ความลึกการตัด (มิลลิเมตร)	0.5, 1.0, 1.2
เม็ดมีดกลึงปอก (Tungaloy)	TNMG 160402R-S N9530
ตัวมีดกลึงปอก (Tungaloy)	DTR BCSR202-K17

3. ผลการทดลองและวิเคราะห์ผล

การทดลองกลึงวัสดุชิ้นงานจะทำการทดลองและวัดความหยาบผิวซ้ำ 3 ครั้ง สำหรับแต่ละเงื่อนไขการทดลอง ทั้งนี้เพื่อหลีกเลี่ยงความไม่สอดคล้องของควบคุมสถานะแวดล้อมในการทดลองทางคณะผู้วิจัยได้ทำการกลึงปรับสภาพพื้นผิววัสดุชิ้นงานก่อนการกลึงเพื่อประเมินลักษณะพื้นผิววัสดุชิ้นงานด้วยเม็ดมีดใหม่สำหรับการทดลองในแต่ละเงื่อนไข

3.1 ความเร็วในการตัด (Cutting speed)

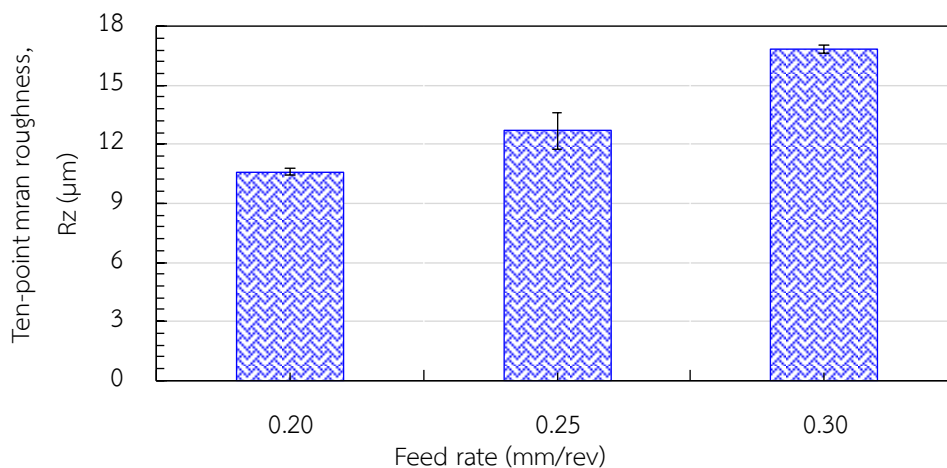
การทดลองกลึงวัสดุชิ้นงานไทเทเนียมโดยการปรับพารามิเตอร์ความเร็วในการตัด 150.0, 187.5, 225.0 และ 262.5 เมตรต่อนาที ซึ่งคงที่อัตราป้อน 0.20 มิลลิเมตร และความลึกของการตัด 0.5 มิลลิเมตร ทั้งนี้ในการทดลองจะทำการแปรผันความเร็วในการหมุนของเพลาหัวเครื่องเพื่อคงที่ความเร็วในการตัด โดยผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 2 ทั้งนี้จะเห็นได้ว่าความหยาบผิวเฉลี่ยสปีจุด (Rz) มีแนวโน้มลดลงเมื่อความเร็วตัดเพิ่มมากขึ้น โดยแสดงค่าความหยาบผิวแบบสปีจุดอยู่ที่ระดับ 11.789, 10.040, 9.062 และ 8.532 ตามลำดับ โดยการลดลงของความหยาบผิวเฉลี่ยอาจเกิดจากความเร็วตัดที่เพิ่มสูงขึ้นซึ่งส่งผลให้วัสดุเกิดการอ่อนตัวเนื่องจากความร้อนเป็นเหตุให้แรงที่เกิดขึ้นในกระบวนการตัดลดลง



รูปที่ 2 ผลการทดลองปรับความเร็วตัด (Cutting speed) ที่ส่งผลต่อความหยาบผิวเฉลี่ย (Rz)

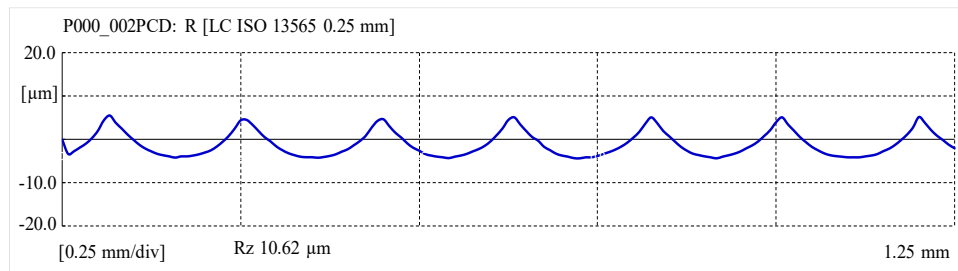
3.2 อัตราป้อน (Feed rate)

การทดลองกลึงวัสดุชิ้นงานไทเทเนียมโดยการปรับพารามิเตอร์อัตราป้อน 0.20, 0.25 และ 0.30 มิลลิเมตรต่อรอบ โดยมีการคงที่ความเร็วตัด 150.0 เมตรนาที และความลึกของการตัด 0.5 มิลลิเมตร โดยผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 3 ทั้งนี้ ความหยาบผิวเฉลี่ยแบบสิบจุด (Rz) จะเพิ่มขึ้นตามอัตราป้อน

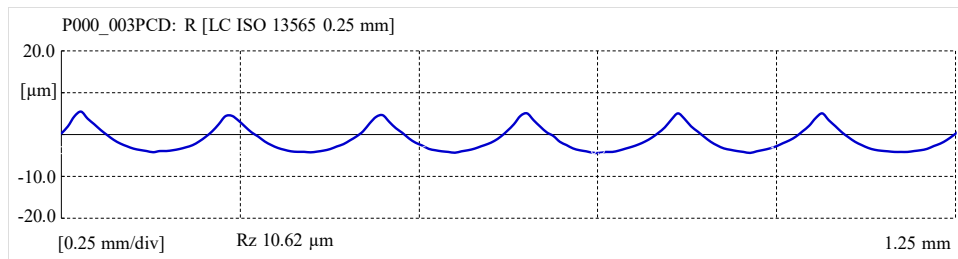


รูปที่ 3 ผลการทดลองปรับอัตราป้อน (Feed rate) ที่ส่งผลต่อความหยาบผิวเฉลี่ย (Rz)

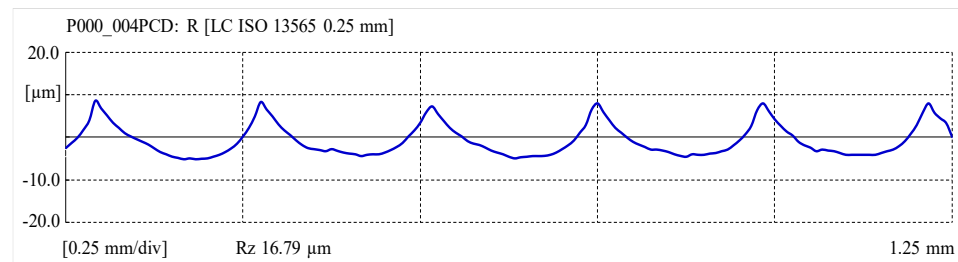
การเพิ่มขึ้นของความหยาบผิวเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงอัตราป้อนเป็นผลมาจาก การเพิ่มขึ้นของอัตราป้อนต่อรอบ หมายถึงการเพิ่มความหนาของเศษชิ้นงานก่อนการตัด (Uncut chip thickness) เปรียบเสมือนการสร้างระยะห่างสำหรับการเดินตัดของขอบคมตัดซึ่งจะประกบกับพื้นผิววัสดุชิ้นงาน ดังแสดงในรูปที่ 4 ก), 4 ข) และ 4 ค) สำหรับอัตราป้อน 0.20, 0.25 และ 0.30 มิลลิเมตรต่อรอบ ตามลำดับ ทั้งนี้ในการทดลองนี้เลือกใช้เม็ดมีดที่มีรัศมีปลายมีด 0.4 มิลลิเมตร นั้นหมายถึงของคมตัดจะเกิดการเคลื่อนที่ตัดเฉือนวัสดุชิ้นงานโดยประมาณ 50 เปอร์เซ็นต์ และ 75 เปอร์เซ็นต์ของรัศมีปลายมีดซึ่งลักษณะพื้นผิวชิ้นงานที่ปรากฏจะอยู่ในบริเวณการเสียรูปในตำแหน่งที่สาม (Tertiary deformation zone)



ก) อัตราป้อน 0.20 มิลลิเมตรต่อรอบ



ข) อัตราป้อน 0.25 มิลลิเมตรต่อรอบ

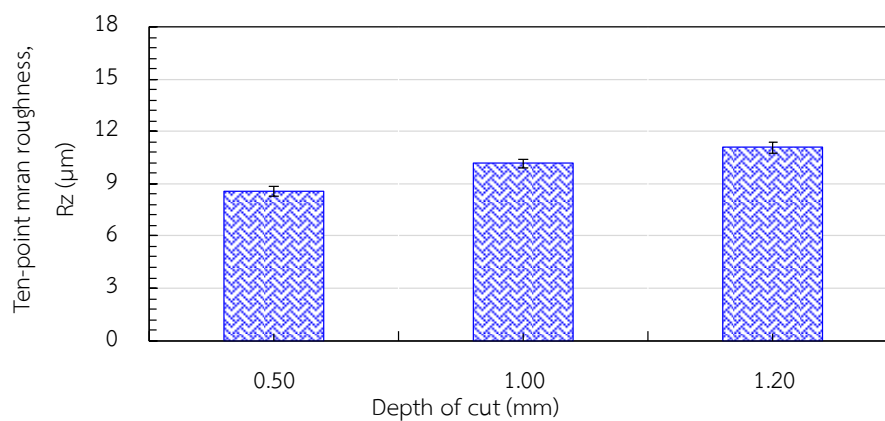


ค) อัตราป้อน 0.30 มิลลิเมตรต่อรอบ

รูปที่ 4 ลักษณะพื้นผิววัสดุชิ้นงานที่ปรากฏจากการตรวจสอบด้วยเครื่องวัดความหยาบผิว

3.3 ความลึกในการตัด (Depth of cut)

การทดลองกลึงวัสดุชิ้นงานไทเทเนียมโดยการปรับความลึกในการตัด 0.50, 10.00 และ 1.20 มิลลิเมตร โดยมีอัตราการความเร็วตัด 150.0 เมตรนาที และอัตราป้อน 0.20 มิลลิเมตร โดยผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 5



รูปที่ 5 ผลการทดลองปรับความลึกในการตัด (Depth of cut) ที่ส่งผลต่อความหยาบผิวเฉลี่ย (Rz)

จากรูปจะเห็นได้ว่า ความหยาบผิวเฉลี่ยแบบลิบจุด (Rz) มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามความลึกในการตัด โดยค่าความหยาบผิวชิ้นงานจะเพิ่มขึ้นตามความลึกการตัดเป็น 8.567, 10.156 และ 11.086 ไมโครเมตร ตามลำดับ การเพิ่มขึ้นของความหยาบผิวชิ้นงานเนื่องจากความเร็วตัดเป็นผลมาจากการกระโดดจากการจัดเนื้องานที่สูงขึ้นอาจทำให้ต้องใช้แรงที่ใช้ในการตัดเฉือนสูงอาจทำให้เกิดการสั่นสะเทือนและการพอกผิวของเครื่องมือคมตัดซึ่งส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงคุณภาพพื้นผิวของชิ้นงาน

4. สรุป

การทดลองปรับพารามิเตอร์สำหรับการกลึงวัสดุไทเทเนียมเพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงของลักษณะพื้นผิววัสดุชิ้นงาน ภายหลังการกลึงปอก สามารถสรุปผลการศึกษาดังนี้ การประเมินความหยาบผิวเฉลี่ยแบบลิบจุด (Rz) แสดงให้เห็นว่าค่าความหยาบพื้นผิวมีแนวโน้มลดลงอยู่ในช่วง 11.789 ถึง 8.532 ไมโครเมตร เมื่อความเร็วตัดเพิ่มขึ้นจาก 150.0 เป็น 262.5 เมตรต่อนาที ในขณะที่ลักษณะพื้นผิววัสดุชิ้นงานมีคุณภาพเพิ่มสูงขึ้นภายใต้เงื่อนไขอัตราป้อนและความลึกการตัดที่ต่ำ อย่างไรก็ตามการเปลี่ยนแปลงของความหยาบพื้นผิววัสดุชิ้นงานจะมีการเปลี่ยนแปลงเป็นอย่างมากเมื่อมีการปรับค่าอัตราป้อนเนื่องจากอัตราป้อนต่อรอบมามากขึ้นเป็นการเพิ่มระยะทางในการเคลื่อนที่ของเครื่องมือคมตัดในแต่ละรอบ หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งได้ว่าเป็นการเพิ่มความหนาของเศษก่อนการตัด นอกจากนี้การเพิ่มขึ้นของความลึกการตัดยังเป็นการสนับสนุนให้ค่าความหยาบผิวชิ้นงานเพิ่มสูงขึ้นซึ่งอาจการจากภาระโหลดในการตัดและการเกิดการพอกตัวของวัสดุชิ้นงานในบริเวณพื้นผิวขอบคมตัดของเม็ดมีด ทั้งนี้การตรวจสอบภาระแรงและการเกิดการพอกตัวของเศษวัสดุชิ้นงานบนขอบคมตัดที่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงของลักษณะพื้นผิววัสดุชิ้นงาน รวมทั้งการศึกษาพารามิเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับการกลึงวัสดุไทเทเนียมเป็นหัวข้อที่ทางคณะผู้วิจัยให้ความสนใจสำหรับการศึกษาในอนาคต

5. กิตติกรรมประกาศ

ทางคณะผู้วิจัยใคร่ขอขอบพระคุณ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกลและอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ ที่ให้การสนับสนุนทางด้านเครื่องมือและห้องปฏิบัติการสำหรับการทดลองในการดำเนินการวิจัย

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] A.J. Lissaman, and S.J. Martin, Principles of Engineering Production, London, The English Universities Press LTD, 1964.
- [2] K. Jamkamon, "The effect of laser assisting for milling process of difficult-to-cut materials," D.Eng. dissertation, Dept. Graduate school of engineering. Eng., Hiroshima Univ., Hiroshima, Japan, 2019.
- [3] พิษญา พิศสุวรรณ, ปยวิทย์ สุวรรณ, ณัฐวิช ลิ้มสิริสกุล, และ อานาจ ชิวเมธาพันธ์, "ปัจจัยที่มีผลต่อความขรุขระผิวในการกลึงปอกอะลูมิเนียมเกรด 2024," วารสารวิศวกรรมศาสตร์และนวัตกรรม, ฉบับที่ 4, 2022, pp. 184–191.
- [4] จุฬาลักษณ์ โรจนานุกูล, สุรสิทธิ์ ระวังวงศ์, และชาตรี หอมเขียว, "การพยากรณ์ค่าความขรุขระผิวในการกลึงคว้านรูในเหล็กหล่อเหนียวโดยใช้วิธีการพื้นผิวผลตอบสนองและการสีกหระของเม็ดมีด," วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา, ฉบับที่ 2, 2021, pp. 1-10.
- [5] สัมภาษณ์ หาญตั้ง, วรรณรพ ชันธิรัตน์, อามินท์ หล้าวงศ์, วราภรณ์ วโรส, และไทยทัศน์ สุดสวนสี, "การปรับปรุงค่าความเรียบผิวเหล็ก ST37 ด้วยเครื่องกลึงซีเอ็นซีโดยใช้เทคนิค ทาคูชิ," วารสารวิศวกรรมและเทคโนโลยีอุตสาหกรรมมหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์, ฉบับที่ 5, 2023, pp. 27–39.
- [6] พงศธร จันทรสุขจำเริญ, "การศึกษาปัจจัยของกระบวนการกลึง CNC ที่มีผลต่อคุณภาพชิ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิม AISI/SUS 304 และความคุ้มค่าในการเลือกใช้เม็ดมีดกลึง," วศ.ม. การจัดการวิศวกรรม, วิทยานิพนธ์, ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรมและการจัดการ, บัณฑิตวิทยาลัย, มหาวิทยาลัยศิลปากร, 2016.
- [7] P. Janmanee, C. Thanadngarn, K. Jamkamon, R. Saodaen, T. Kumnorkaew, and C. Nutnang, "An investigation of chip formation in turning of titanium for cermet inserts coated with AlCrSiTiN and TiAlSiN," Archives of Materials Science and Engineering, vol. 127 no.1, 2024, pp. 32–41.
- [8] J. Lu, X. Wang, S. Chen, X. Liao, and K. Chen, "Surface roughness prediction for turning based on the corrected subsection theoretical model," The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, vol. 124, no. 1, 2023, pp. 21-35.

- [9] J. Jia, L. Ma, Y. Sun, D. Li, W. Liu, Z. Han, and M. Li, "Study on the surface formation mechanism and theoretical model of brittle surface roughness in turning machinable ceramics," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 130, no.7, 2024, pp. 3877-3889.

การศึกษาโครงสร้างจุลภาคและสมบัติเชิงกลโลหะผสมทองแดง-นิกเกิล-โครเมียม ในกระบวนการอบอ่อน

Study of the Microstructure and Mechanical Properties of Copper-Nickel-Chromium Alloy in Annealing Process

อภิชาติ แสนรัชฎากร และ ดนัยณัฐ จันปุม*

สาขาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะอุตสาหกรรมและเทคโนโลยี

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตสกลนคร

199 หมู่ 3 ตำบลพังโคน อำเภอพังโคน จังหวัดสกลนคร 47160

Apichat Sanratsadakhon and Danainut Janpum*

Program in Industrial Engineering, Faculty of Industry and Technology,

Rajamangala University of Technology Isan, Sakon Nakhon Campus

199, Moo 3, Phang Khon Sub-district, Phang Khon District, Sakon Nakhon Province, 47160

*Corresponding author Email: Danainut.ja@rmuti.ac.th

(Received: November 02, 2025 / Revised: December 27, 2025 / Accepted: December 28, 2025)

บทคัดย่อ

โลหะผสมทองแดง-นิกเกิล-โครเมียม (Cu-Ni30-Cr2) เป็นวัสดุที่ถูกพัฒนาขึ้นเพื่อรองรับความต้องการของอุตสาหกรรมที่ต้องใช้วัสดุที่ทนทานต่อการกัดกร่อน โดยเฉพาะอย่างยิ่งในสภาพแวดล้อมทางทะเล แต่เนื่องจากโครงสร้างแบบเดนไดรต์ และพฤติกรรมระหว่างการแข็งตัวของวัสดุซึ่งนำไปสู่คุณสมบัติแอนไอโซทรอปิ วัสดุนี้จึงเป็นอุปสรรคในกระบวนการขึ้นรูปและการกระบวนการแมกซิ่งนึ่ง ในการศึกษาครั้งนี้ ผู้วิจัยมีความสนใจที่จะนำเสนอกระบวนการอบอ่อนในการทดลองเพื่อให้ทราบถึงพฤติกรรมโครงสร้างจุลภาคและสมบัติเชิงกลของวัสดุเดิมกับวัสดุที่ผ่านกระบวนการอบอ่อน โดยใช้อุณหภูมิคงที่ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง ซึ่งผลการทดลองพบว่าการใช้กระบวนการอบอ่อน ในด้านโครงสร้างจุลภาคพบว่ากระบวนการอบอ่อนมีการกระจายตัวขององค์ประกอบที่ดีขึ้น มีส่วนช่วยเพิ่มความเหนียวของวัสดุ ในด้านค่าความแข็งสูงสุด 186 HV สรุปได้ว่ากรรมวิธี As-cast + Annealing เป็นกระบวนการที่เหมาะสมที่สุดในการทดสอบของงานวิจัยนี้ เหมาะสำหรับการประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมที่มีความต้องการสูงด้านความทนทาน เช่น อุตสาหกรรมพลังงาน และอุตสาหกรรมทางทะเล

คำสำคัญ: โลหะผสมทองแดง-นิกเกิล-โครเมียม กระบวนการอบอ่อน โครงสร้างจุลภาค

Abstract

Copper-nickel-chromium alloy (Cu-Ni30-Cr2) is a material developed to meet the needs of industries requiring corrosion-resistant materials, especially in marine environments. However, due to its dendrite structure and anisotropic behavior during solidification, this material poses obstacles in forming and machining processes. This study aimed to demonstrate an annealing process to determine the microstructure and mechanical properties of the original and annealed materials. Annealing was performed at a constant temperature of 500°C for 3 hours. The results showed that annealing improved the compositional distribution of the alloy's components, contributing to increased toughness. The maximum hardness reached 186 HV. In conclusion, the As-cast + Annealing method is the most suitable process for this research, ideal for applications in industries demanding high toughness, such as the energy and marine industries.

Keywords: Copper-nickel-chromium alloy, Annealing process, Microstructure

1. บทนำ

โลหะผสมทองแดง-นิกเกิล-โครเมียม (Cu-Ni30-Cr2) เป็นวัสดุที่ถูกพัฒนาขึ้นเพื่อรองรับความต้องการของอุตสาหกรรมที่ต้องใช้วัสดุที่ทนทานต่อการกัดกร่อน โดยเฉพาะอย่างยิ่งในสภาพแวดล้อมทางทะเล ด้วยคุณสมบัติที่โดดเด่นในด้านความแข็งแรงสูงและความต้านทานต่อการกัดกร่อนในน้ำทะเล วัสดุนี้จึงถูกนำไปใช้ในหลากหลายอุตสาหกรรมการขนส่งทางทะเล และการผลิตอุปกรณ์ที่ต้องการความทนทานต่อสภาวะแวดล้อมที่รุนแรง เช่น ท่อคอนเดนเซอร์บนเรือเดินทะเล [1] โลหะผสมทองแดง-นิกเกิล-โครเมียม เป็นโลหะผสมที่พัฒนาขึ้นจากโลหะผสมทองแดง-นิกเกิล ซึ่งมีธาตุทองแดง-นิกเกิลเป็นส่วนผสมหลักและมีธาตุโครเมียมเป็นองค์ประกอบเพิ่มเติม เพื่อเพิ่มความแข็งแรง ความเหนียว และความต้านทานการกัดกร่อนของน้ำทะเล โครงสร้างจุลภาคของโลหะผสมทองแดง-นิกเกิล-โครเมียม [2] มีโครงสร้างแบบเดนไดรต์ (Dendrite) มีความสามารถในการขึ้นรูปต่ำ การผลิตชิ้นส่วนในอุตสาหกรรมทางทะเลจึงถูกจำกัดด้วยกระบวนการแมกซิงนิง (Machining) ส่งผลให้ต้นทุนในการผลิตสูงและมีของเสีย ด้วยพฤติกรรมระหว่างการแข็งตัวของวัสดุซึ่งนำไปสู่คุณสมบัติแอนไอโซทรอปิก (Anisotropic) นั้นหมายถึงคุณสมบัติของวัสดุที่แตกต่างกันไปในแต่ละทิศทาง [3] การเกิดแอนไอโซทรอปิกนี้อาจส่งผลต่อการขึ้นรูปโลหะ และเกิดข้อบกพร่อง เช่น รอยแตกกร้าว หรือรอยฉีกขาดได้ นอกจากนี้การแยกตัวของโลหะขนาดเล็กในระหว่างการแข็งตัว ซึ่งเป็นการกระจายตัวที่ไม่สม่ำเสมอของธาตุโลหะผสมในระดับเดนไดรต์ ทำให้เกิดบริเวณที่มีสิ่งเจือปนและรูพรุนจากการหดตัวของเนื้อโลหะเมื่อเย็นตัว รอยแตกสามารถแพร่กระจายผ่านบริเวณที่อาจเกิดจากความไม่สม่ำเสมอในเนื้อวัสดุ [4] จากปัญหาดังกล่าวนั้นหมายความว่าวัสดุนี้ยังไม่สามารถนำไปประยุกต์ใช้งานทางวิศวกรรมที่หลากหลายได้ และงานที่ต้องการความแข็งแรงเชิงกล จากการศึกษาทางวิจัยของโลหะผสมทองแดง-นิกเกิล-โครเมียม พบว่าหลังจากวัสดุในสภาวะหล่อขึ้นรูป (As-cast) โครงสร้างจุลภาคแบบเดนไดรต์สามารถปรับปรุงให้เป็นเนื้อเดียวกัน (Homogenization) ได้มากขึ้นด้วยกระบวนการอบอ่อน (Annealing) [5] ซึ่งเป็นกระบวนการหนึ่งที่ได้รับการยอมรับในการปรับปรุงสมบัติเชิงกลให้ดีขึ้น ผู้วิจัยจึงมีความสนใจที่จะนำเสนอกระบวนการอบอ่อนในงานวิจัยนี้

สำหรับงานวิจัยนี้ได้นำโลหะผสมทองแดง-นิกเกิล-โครเมียม (Cu-Ni30-Cr2) ผลิตโดยใช้กระบวนการหล่อในแม่พิมพ์ทรายเขียว ตามมาตรฐานการป้องกันของสหราชอาณาจักร Defence Standard 02-824 (NES 824) เพื่อเป็นการศึกษาเกี่ยวกับพฤติกรรมโครงสร้างจุลภาคในกระบวนการอบอ่อน ที่จะส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงของความแข็งแรงและเกรนโครงสร้างของวัสดุ เพื่อเป็นองค์ความรู้ในการพัฒนากระบวนการปรับปรุงคุณสมบัติเชิงกลที่เหมาะสมต่อไป

2. วัสดุโลหะผสมทองแดง-นิกเกิล-โครเมียม (Cu-Ni-Cr)

สมบัติวัสดุโลหะผสมทองแดง-นิกเกิล-โครเมียม (Cu-Ni30-Cr2) ผลิตตามมาตรฐานการป้องกันของสหราชอาณาจักร Defence Standard 02-824 (NES 824) [6] ผลิตโดยใช้กระบวนการหล่อในแม่พิมพ์ทรายเขียว แสดงรายละเอียดดังตารางที่ 1 และตารางที่ 2 ตามลำดับ

ตารางที่ 1 ส่วนผสมทางเคมี

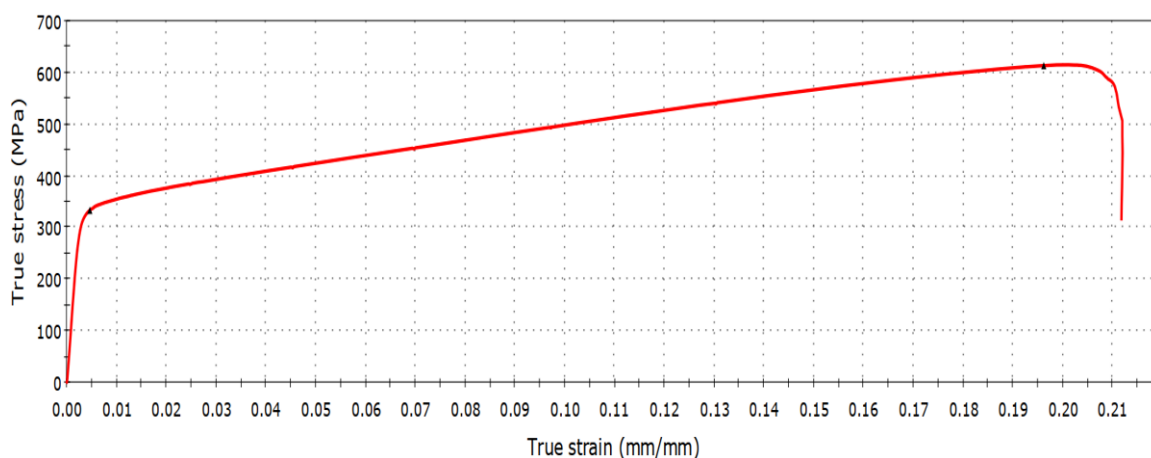
Cu	Ni	Cr	Fe	Mn	Si	Zr	Ti
ส่วนที่เหลือ	29.0-32.0	1.6-2.0	0.5-1.0	0.5-1.0	0.20-0.40	0.05-0.15	0.03-0.15

ตารางที่ 2 ปริมาณรวมของสิ่งเจือปน 0.070% โดยน้ำหนัก

Pd	P	Bi	S	C	Co	B
0.005	0.005	0.001	0.005	0.020	0.050	0.001

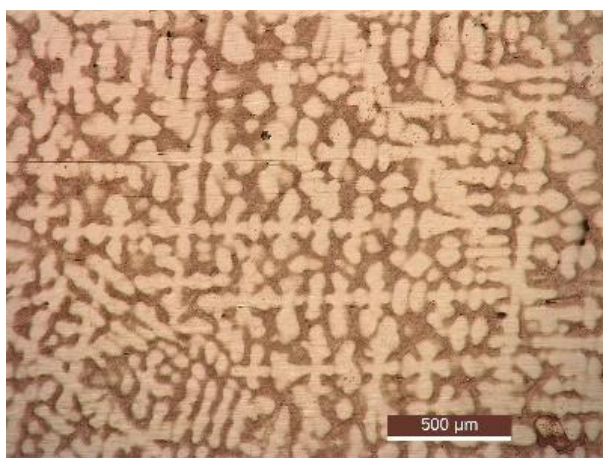
ธาตุผสมที่สำคัญหลักคือ ทองแดง (Copper) จะป้องกันการกัดกร่อนจากน้ำและไอน้ำได้ การกัดกร่อนในสภาพอากาศในทะเล สามารถป้องกันน้ำเกลือ, โลหะผสมทองแดงจะสร้างแผ่นฟิล์มบนพื้นผิวของวัสดุและฟิล์มนี้จะทำหน้าที่ป้องกันการกัดกร่อน นิกเกิล (Nickel) มีลักษณะแข็งและเหนียวมีค่าการนำไฟฟ้าที่เหมาะสม (25% ของทองแดง) และการนำความร้อน มีความทนทานสูงต่อการกัดกร่อนในชั้นบรรยากาศและด้านทานกรด โครเมียม (Chromium) เป็นองค์ประกอบที่ทำให้โลหะผสม Cu-Ni สามารถช่วยเพิ่มความแข็งแรงและการต้านทานการสึกกร่อนของน้ำทะเลและการกัดเซาะของของแข็ง

ทดสอบแรงดึง (True stress-strain) ตามมาตรฐาน ASTM 208-14 ชิ้นงานขนาด 12.770 มิลลิเมตร กำหนดค่า 0.2 Yield Strength ผลการทดสอบ Elongation 20.01%, Modulus (E-modulus) 125.483 Gpa, Yield Strength 322.766 Mpa, Ultimate Tensile Strength 503.977 Mpa [7] แสดงดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 ผลการทดสอบแรงดึงวัสดุเดิม (As-cast)

โครงสร้างจุลภาคของโลหะผสม Cu-Ni-Cr มีโครงสร้างดั้งเดิมเป็นแบบเดนไดรต์ (dendrite) แสดงดังรูปที่ 2 จะเกิดขึ้นในกระบวนการหล่อ เมื่อเกิดการเย็นตัวในขณะที่โลหะแข็งตัว อะตอมของโลหะทองแดงจะเริ่มจับตัวก่อน เนื่องจากมีจุดหลอมตัวสูงกว่า เมื่อจับตัวใหญ่ขึ้นก็จะไล่พวกสารมลทินซึ่งยังเหลวอยู่ให้หนีออกไปบริเวณผลึก ดังนั้นเมื่อโลหะแข็งตัวหมด สารมลทินจะมารวมตัวกันอยู่บริเวณขอบเกรน (Grain Boundary)



รูปที่ 2 โครงสร้างจุลภาคเดิมโลหะผสม Cu-Ni-Cr

3. วิธีการทดลอง

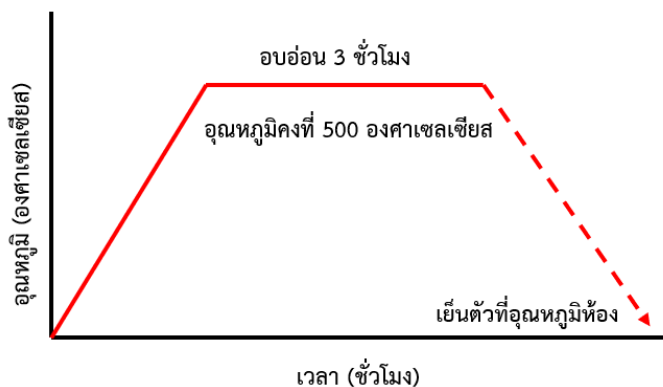
การทดลองด้วยกระบวนการอบอ่อนใช้วัสดุเป็นวัสดุเดิม (As-cast) อินกอต (Ingot) แสดงดังรูปที่ 3 เพื่อทำการทดลองกระบวนการอบอ่อน (Annealing) โดยเตรียมชิ้นงานขนาด 10×10 มิลลิเมตร หนา 2 มิลลิเมตร ตั้งเวลาในโปรแกรมของเตา KS 80 อุณหภูมิคงที่ 500 องศาเซลเซียส ตามมาตรฐานการป้องกันของสหราชอาณาจักร Defence Standard 02-824 (NES 824) [6] แสดงดังรูปที่ 4 (ก) เตาอบ KS 80, (ข) ขั้นตอนการอบอ่อนอุณหภูมิคงที่ 500 องศาเซลเซียส เวลาในการอบ 3 ชั่วโมง



รูปที่ 3 วัสดุเดิม (As-cast) อินกอต (Ingot)



(ก)



(ข)

รูปที่ 4 (ก) เตาอบ KS 80, (ข) ขั้นตอนการอบอ่อนอุณหภูมิคงที่ 500 องศาเซลเซียส เวลาในการอบ 3 ชั่วโมง

หลังจากทำการทดลองการอบอ่อนเสร็จแล้วจะทำการศึกษาสมบัติของวัสดุ นำชิ้นงานมาทำการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค โดยทำการขัดชิ้นงานด้วยกระดาษทรายน้ำ เรียงเบอร์ดังนี้ 180, 200, 400, 600, 800, 1,000 และ 1,200 ขั้นตอนสุดท้ายของการขัดปรับผิวจะใช้ผงอะลูมินาขนาด 0.01 ไมโครเมตร ขัดบนผ้าสักหลาดเพื่อให้ได้ผิวที่ละเอียด แล้วนำไปกัดกรด 1% Fe Cl_3 1:1 HCL และน้ำกลั่นผสมเจือจาง ใช้เวลากัดกรดประมาณ 10-15 วินาที เมื่อได้ชิ้นงานแล้วจะตรวจสอบถ่ายภาพโครงสร้างจุลภาค ด้วยกล้องจุลทรรศน์ LEICA DM2500 M เลนส์ HP PLAN EPI แสดงดังรูปที่ 5

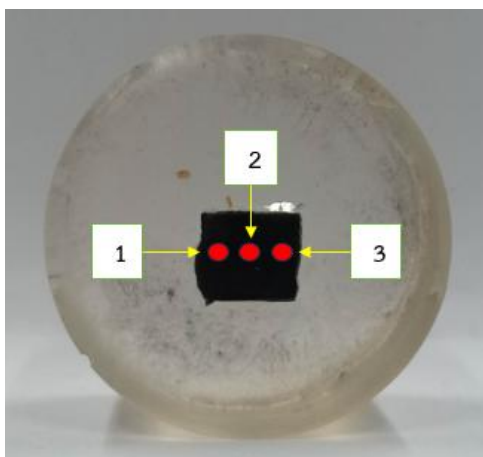


รูปที่ 5 กล้องจุลทรรศน์ LEICA DM2500 M

ต่อจากนั้นนำชิ้นงานทั้งหมดมาทำการทดสอบความแข็งด้วยเครื่อง Micro Vickers Hardness Tester รุ่น HMV-G31S ENG 230V แรงกด 0.2 HV (1.961 N) ขนาดของหัวกด 0.043 มิลลิเมตร แสดงดังรูปที่ 6 ตำแหน่งที่จุดกดทดสอบค่าความแข็งจำนวน 3 จุด แสดงดังรูปที่ 7 และหาค่าความแข็งโดยเฉลี่ย



รูปที่ 6 เครื่องทดสอบความแข็ง Micro Vickers Hardness Tester



รูปที่ 7 ตำแหน่งจุดกดทดสอบค่าความแข็ง

4. ผลการทดลอง

4.1 เปรียบเทียบโครงสร้างจุลภาคหลังกระบวนการอบอ่อน

As-Cast เปรียบเทียบกับ As-Cast + Annealing ที่ขยาย 5X และ 10X จะเห็นความแตกต่างของโครงสร้างจุลภาคซึ่งสามารถอธิบายและเปรียบเทียบผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 8

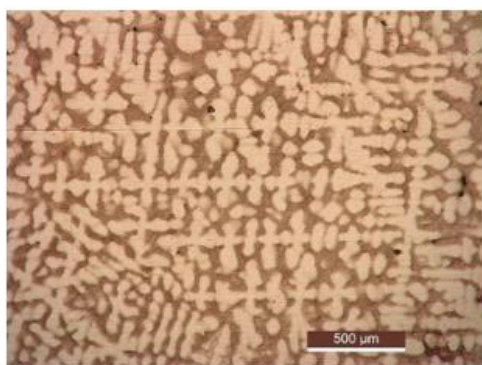
As-Cast

มีลักษณะโครงสร้างแบบเดนไดรต์ (Dendritic) หรือโครงสร้างที่เกิดจากการแข็งตัวอย่างรวดเร็วของของเหลวเมื่อลดอุณหภูมิลงในแม่พิมพ์ หรือ อินกอต (Ingot) ลักษณะจะเป็นเส้นกิ่งก้านของผลึกที่ยังไม่สลายตัวเพราะยังมีการกระจายตัวขององค์ประกอบต่างๆ อยู่ไม่สมดุล รอยต่อระหว่างก้านเดนไดรต์ยังค่อนข้างคมและยังไม่ได้เกิดการปรับสมดุลองค์ประกอบอะตอมในเนื้อโลหะอย่างทั่วถึง ลักษณะนี้ทำให้โลหะมีความไม่สม่ำเสมอขององค์ประกอบและความเค้นค้างในเนื้อวัสดุค่อนข้างสูง

As-Cast + Annealing

หลังจากอบอ่อน (Annealing) และค่อยๆ เย็นตัวโครงสร้างจะเปลี่ยนไปเป็นรูปร่างที่เรียบขึ้นและมีขนาดใหญ่ขึ้นเห็นได้ชัดว่าโครงสร้างเดนไดรต์เดิมมีแนวโน้ม พอร์มตัวแบบกลมมนมากขึ้น และมีการเรียงตัวของเนื้อโลหะที่เรียบกว่าเดิม เกิด

การฟื้นตัว (recovery) ของผลึกภายใน ซึ่งช่วยลดความเค้นคงค้าง และองค์ประกอบต่างๆ กระจายตัวได้ดียิ่งขึ้น บริเวณที่เคยมีแนวเดนไดรต์คมจะค่อยๆ หายไป กรอบลายจะกลมและเรียบขึ้นกระบวนการอบอ่อน (Annealing) จึงช่วยให้โครงสร้างขยายตัวแบบใหม่และลดความไม่สมดุลขององค์ประกอบ จึงทำให้คุณสมบัติทางกลและทางกายภาพดีขึ้น [8]

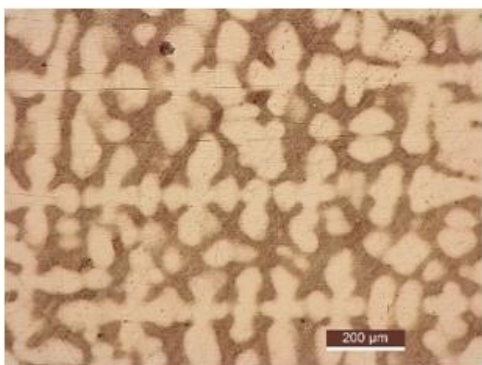


As-Cast

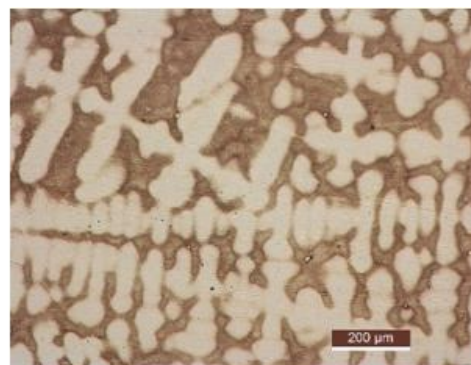


As-Cast + Annealing

(ก) แสดงโครงสร้างจุลภาคกำลังขยาย 5X



As-Cast



As-Cast + Annealing

(ข) แสดงโครงสร้างจุลภาคกำลังขยาย 10X

รูปที่ 8 การเปรียบเทียบโครงสร้างจุลภาค (ก) โครงสร้างจุลภาคกำลังขยาย 5X (ข) โครงสร้างจุลภาคกำลังขยาย 10X

จากการวิเคราะห์ลักษณะโครงสร้าง ความเรียบ ความเค้นคงค้าง และการกระจายองค์ประกอบ ของชิ้นงานทดสอบวัสดุ As-cast และ As-cast + Annealing พบว่าวัสดุ As-cast มีโครงสร้างเดนไดรต์หยาบ และชิ้นงานวัสดุ As-Cast + Annealing มีลักษณะที่ขอบเรียบ เกรนใหญ่และมีการเรียงตัวดีขึ้น และพบว่าความเค้นคงค้างลดลงเมื่อทำการทดลองแบบ As-Cast + Annealing เนื่องจากการอบอ่อนช่วยปรับสมดุลองค์ประกอบและโครงสร้าง แสดงผลสรุปดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 สรุปการเปลี่ยนแปลงหลัก

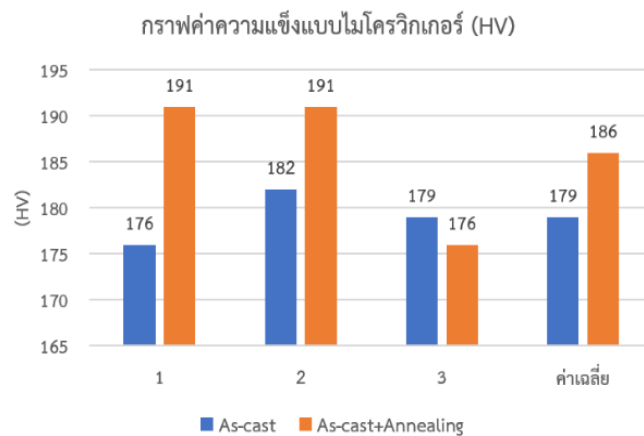
ลักษณะ	As-Cast	As-Cast + Annealing
โครงสร้าง	เดนไดรต์หยาบ	ขอบเรียบขึ้น
ความเรียบ	ไม่เรียบ, มีแถบขอบคม	เรียบชัด, ฟอรั่มใหญ่
ความเค้นคงค้าง	สูง	ลดลง
การกระจายองค์ประกอบ	ไม่สม่ำเสมอ	กระจายดีขึ้น

4.2 ผลการทดสอบค่าความแข็ง

จากผลการทดสอบความแข็งแบบไมโครวิกเกอร์ (HV) ของชิ้นงาน As-cast และ As-cast + Annealing ที่ตำแหน่งกุด 3 จุด พบว่าค่าความแข็งมีแนวโน้มเปลี่ยนแปลงอย่างชัดเจนหลังผ่านกระบวนการอบคืนไฟ (annealing) แสดงค่าความแข็งดังตารางที่ 4

ตารางที่ 4 ค่าความแข็งแบบไมโครวิกเกอร์ (HV)

ค่าความแข็งแบบไมโครวิกเกอร์ (HV)		
จุดกุด	As-cast	As-cast + Annealing
1	176	191
2	182	191
3	179	176
ค่าเฉลี่ย	179	186



รูปที่ 9 ค่าความแข็งแบบไมโครวิกเกอร์ (HV)

จากรูปที่ 9 กราฟเปรียบเทียบค่าความแข็งแบบไมโครวิกเกอร์ (HV) ของชิ้นงาน As-cast และ As-cast + Annealing ที่ตำแหน่งกุด 3 จุด และค่าเฉลี่ย โดยใช้แรงกด 0.2 HV (1.961 N) ขนาดของหัวกด 0.043 มิลลิเมตร ผลการทดลองพบว่าหลังผ่านกระบวนการ annealing ค่าความแข็งมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นจากค่าความแข็งเฉลี่ยประมาณ 179 HV เป็น 186 HV จากการวิเคราะห์เชิงโครงสร้างพบว่า As-Cast ยังมีความแข็งต่ำสุด จากโครงสร้างเดนไดรต์และรูพรุน As-Cast + Annealing แข็งกว่า As-Cast สะท้อนถึงผลของการอบอ่อนที่ช่วยปรับโครงสร้างจุลภาคและส่งผลต่อสมบัติเชิงกลของวัสดุ

5. สรุป

จากการศึกษานี้มุ่งเน้นการวิเคราะห์และเปรียบเทียบผลของกระบวนการทางกลและความร้อน ได้แก่ การหล่อ (As-Cast), การอบอ่อน (Annealing) ต่อสมบัติเชิงกลและโครงสร้างจุลภาคของโลหะผสม Cu-Ni30-Cr2 เพื่อประเมินความเหมาะสมในการใช้งานในอุตสาหกรรม ผลการทดลองหลักเป็นความแข็ง (Hardness) ของ As-Cast + Annealing สรุปผลการทดลอง ดังนี้

1) ผลโครงสร้างจุลภาคชิ้นงาน As-Cast มีลักษณะโครงสร้างเดนไดรต์หยาบ ไม่เรียบ, มีแถบขอบคม, มีรูพรุนและการแยกตัวของธาตุสูง และชิ้นงาน As-Cast + Annealing มีเกรนสมมาตรขึ้น ความพรุนลดลง และมีการกระจายองค์ประกอบดีขึ้น

2) ค่าความแข็งแบบไมโครวิกเกอร์ (HV) ของชิ้นงาน As-Cast มีค่าความแข็ง 179 HV และชิ้นงาน As-Cast + Annealing มีค่าความแข็ง 186 HV

3) กรรมวิธี As-Cast + Annealing เป็นทางเลือกที่ดีในการพัฒนาโลหะผสม Cu Ni30-Cr2 สำหรับใช้งานจริง เหมาะสำหรับการประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมพลังงานและอุตสาหกรรมทางทะเล เป็นต้น

ข้อเสนอแนะ

ข้อเสนอแนะเพื่อการพัฒนาในอนาคต

- 1) ควรศึกษาผลของพารามิเตอร์ต่าง ๆ ในการอบอ่อน เช่น อุณหภูมิและระยะเวลา เพื่อให้ได้สมบัติเชิงกลที่เหมาะสมที่สุด
- 2) แนะนำให้ศึกษาเพิ่มเติมในด้าน สมบัติเชิงความล้า (fatigue) และความต้านทานการกัดกร่อนแบบเฉพาะทางเพื่อการใช้งานในระยะยาว
- 3) ผลลัพธ์สามารถใช้เป็นแนวทางในการปรับปรุงวัสดุอื่น ๆ ที่อยู่ในกลุ่มโลหะผสมทองแดง นิกเกิล-โครเมียม

6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณที่ปรึกษาและผู้ร่วมวิจัยทุกท่าน ขอขอบคุณนายเอกกิตติ์ธณภูมิ ว่องวรณานนท์ สำหรับวัสดุที่ใช้ในการวิจัย และขอขอบคุณสาขาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะอุตสาหกรรมและเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยี ราชมงคลธัญบุรี วิทยาเขตสกลนคร ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้เครื่องมือและสถานที่ในการวิจัยนี้

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] Findik, F, & Rehman, F (2025) A spinodal Cu-Ni-Cr alloy. WIT Transactions on Engineering Sciences, 2.
- [2] Xu, X., Zhu, N., Zheng, W., & Lu, X. G. (2016). Experimental and computational study of interdiffusion for fcc Ni-Cu-Cr alloys. Calphad, 52, 78-87.
- [3] Du, J., Guo, Z., Zhang, A., Yang, M., Li, M., & Xiong, S. (2017). Correlation between crystallographic anisotropy and dendritic orientation selection of binary magnesium alloys. Scientific reports, 7(1), 13600.
- [4] Li, Z., Liu, Y., Jia, P., Luo, C., Zhang, R., Qi, H., & Yang, W. (2021). Effect of austenite reverted transformation-annealing heat treatment on microstructure and mechanical properties of Fe-0.14 C-5Mn-1Al-Ce steel. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering, 235(6), 2221-2229.
- [5] Ministry of Defence Defence Standard 02-824 (NES 824), Issue 1 Publication Date (01 April 2000).
- [6] บริษัทศูนย์วิจัยโลหะวิทยา แอล พี เอ็น (ประเทศไทย) จำกัด. 2565. ผลการทดสอบแรงดึง. สมุทรปราการ: ม.ป.ท
- [7] Wongvaranon, K., Rojananan, S., & Thipprakmas, S. (2024). Characterization of microstructural evolution and mechanical properties of Cu-Ni-Cr alloys deformed by ECAP. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering, 09544089241296616.
- [8] Abreu, C. M., Feijoo, I., & Pérez, C. (2022). Effect of the annealing treatment on the microstructure and corrosion resistance of a Cu-Al-Ni alloy. Metals, 12(9), 1473.

คำแนะนำสำหรับผู้เขียน

วารสารเทคโนโลยีและวิศวกรรมก้าวหน้า รับบทความภาษาไทยหรือภาษาอังกฤษ ต้องเป็นต้นฉบับ ไม่เคยตีพิมพ์หรือเผยแพร่ที่ไหนมาก่อน มีจุดประสงค์เพื่อเผยแพร่ความรู้ และผลงานวิชาการด้านเทคโนโลยีและวิศวกรรม และมีการตรวจสอบคุณภาพอย่างเคร่งครัด

1. ข้อกำหนดทั่วไป

บทความต้องประกอบด้วยส่วนต่าง ๆ ตามลำดับต่อไปนี้ คือ

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

2. คำแนะนำในการเขียนและพิมพ์

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

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

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

2.2.1 สำหรับผู้เขียนหลัก ให้ระบุ E-mail เพื่อใช้ในการติดต่อ

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

2.4 บทย่อดัด (Abstract) มีทั้งภาษาไทยและภาษาอังกฤษ ใช้ตัวอักษรขนาด 14 หัวข้อให้ใช้ตัวพิมพ์หนาและสำหรับเนื้อหาของบทคัดย่อให้ใช้ตัวพิมพ์ปกติ ซึ่งเป็นการสรุปประเด็นเนื้อหาที่เป็นแก่นสำคัญเน้นประเด็นสำคัญของงาน ที่ต้องการนำเสนอ โดยควรประกอบด้วยวัตถุประสงค์ วิธีการ เครื่องมือ และผลสรุป ควรเขียนให้สั้นที่ได้จากการวิจัย และกระชับสำหรับบทคัดย่อภาษาอังกฤษ ผู้เขียนต้องใช้หลักไวยากรณ์ที่ถูกต้องและต้องมีความหมายเดียวกันกับบทคัดย่อภาษาไทย ถ้าบทความเป็นภาษาไทยจะต้องมีบทคัดย่อทั้งภาษาไทยและภาษาอังกฤษโดยให้ภาษาไทยขึ้นก่อน มีความยาวไม่เกิน 1,000 คำ

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

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

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

การลำดับหัวข้อในส่วนเนื้อหาของเรื่องนี้ ให้ใส่เลขกำกับโดยให้บทนำเป็นหัวข้อหมายเลข 1 และใส่หัวภาค หรือ เครื่องหมายจุดหลังตัวเลข เว้นระยะห่าง 1 ช่อง และตามด้วยลำดับหัวข้อ โดยกำหนดให้ทั้งหัวข้อเป็นตัวพิมพ์หนาหากมีการแบ่งหัวข้อย่อย ให้ใช้เลขระบบทศนิยมกับหัวข้อย่อย เช่น 1.1 โดยใช้อักษรรูปแบบปกติ ซึ่งในส่วนเนื้อหาของบทความควรมีหัวข้อเรื่องระเบียบวิธีการ วัสดุและอุปกรณ์ และหัวข้ออื่นที่จำเป็นต่อการได้มาซึ่งผลการวิจัย

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

ชื่อ ตารางที่ 1 ใช้ตัวอักษรขนาด 14 ด้วยตัวพิมพ์หนาและตามด้วยชื่อตารางด้วยตัวพิมพ์ปกติจัดวางอยู่เหนือตาราง โดยไม่เว้นบรรทัดระหว่างชื่อตารางกับตาราง ตำแหน่งของชื่อตารางและตัวตารางให้จัดชิดซ้ายสุด

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

2.7.3 การเขียนสมการจะต้องมีหมายเลขกำกับอยู่ภายในวงเล็บและเรียงลำดับที่ถูกต้อง ควรใช้ตัวพยัญชนะเสียงแสดงถึงพารามิเตอร์หรือตัวแปรในสมการหรืออาจใช้สัญลักษณ์เฉพาะ หรือใช้รูปแบบ Equation ในการเขียน โดยต้องมีรายละเอียดแสดงความหมายของพารามิเตอร์ที่ปรากฏอยู่ในสมการ เว้นหนึ่งบรรทัดก่อนเขียนสมการ และเว้นหนึ่งบรรทัดหลังเขียนสมการ จัดให้สมการอยู่ตรงกลางหน้ากระดาษ

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

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

(เว้น 1 บรรทัด ด้วยขนาดอักษร 14)

3. สรุป

ในส่วนเนื้อหา ผลที่ได้จากการวิจัยต้องมีการวิเคราะห์ข้อมูลหรือเปรียบเทียบกับงานวิจัยก่อนหน้าเพื่อให้ได้ข้อสรุปที่ได้จากงานวิจัยนี้ ควรแสดงถึงสิ่งที่ได้จากงานวิจัยนี้เพื่อประโยชน์ในการพัฒนาต่อยอดกับงานวิจัยอื่นหรือผู้อ่าน รวมถึงสามารถใช้อ้างอิงข้อมูลหรือนำไปใช้ประโยชน์ได้ โดยอาจเขียนแบ่งเป็นข้อ ๆ

1) บทความวิจัยควรมีความยาวของหน้ากระดาษระหว่าง 6 ถึง 12 หน้า

2) บทความทุกบทความที่ส่งเข้าในระบบเพื่อกระบวนการเผยแพร่ในวารสารเทคโนโลยีและวิศวกรรมก้าวหน้า ต้องได้รับความยินยอมจากผู้เขียนร่วมทุกท่าน และจะถูกตรวจสอบความซ้ำซ้อนจากกองบรรณาธิการตามมาตรฐานที่กำหนด รวมถึงจะถูกกลั่นกรองจากผู้ทรงคุณวุฒิในการพิจารณาอนุมัติ ให้แก้ไข หรือปฏิเสธการเผยแพร่ในวารสาร

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

4. กิตติกรรมประกาศ

บรรณาธิการขอขอบคุณท่านที่สนใจเสนอผลงานเพื่อเผยแพร่ในวารสารเทคโนโลยีและวิศวกรรมก้าวหน้า (JTEP) และหวังเป็นอย่างยิ่งว่าจะได้รับการสนับสนุนจากทุกท่านเพื่อเผยแพร่ผลงานในวารสารนี้ต่อไป

5. เอกสารอ้างอิง

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

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

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

ตัวอย่างการเขียนเอกสารอ้างอิง

หนังสือ

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

การประชุมวิชาการ

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

วารสาร

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

มาตรฐาน

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

สิทธิบัตร

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

เว็บไซต์

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

วิทยานิพนธ์

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

รายชื่อผู้ทรงคุณวุฒิ (Peer Review)

รองศาสตราจารย์ ดร.นิวัฒน์ มูแก้ม	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
รองศาสตราจารย์ ดร.ศิริชัย ต่อสกุล	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
รองศาสตราจารย์ ดร.คมกริช ละวรรณวงษ์	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ
รองศาสตราจารย์ สุรสิทธิ์ ระวังวงศ์	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย
รองศาสตราจารย์ ดร.วัชรินทร์ สิทธิเจริญ	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา
รองศาสตราจารย์ ดร.กนกวรรณ จ้าวสุวรรณ	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ
รองศาสตราจารย์ ดร.จิตติวัฒน์ นิธิกาญจนธาร	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
รองศาสตราจารย์ ดร.ศุภชัย ปลายเนตร	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนครพนม
รองศาสตราจารย์ ดร.วสันต์ เจริญสุวรรณ	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ
รองศาสตราจารย์ ดร.สายชล ชุตเจื้อจัน	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ
รองศาสตราจารย์ ชาดรี หอมเขียว	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย
รองศาสตราจารย์ ดร.ฉันทมนี พูลเจริญศิลป์	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ
รองศาสตราจารย์ ดร.ประเสริฐ เอ่งฉ้วน	สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
รองศาสตราจารย์ ดร.วราภรณ์ กลิ่นบุญ	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ
รองศาสตราจารย์ เดช เหมือนขาว	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย
รองศาสตราจารย์ สมศักดิ์ แก้วพลอย	คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏสงขลา
รองศาสตราจารย์ ดร.เจษฎา ก้อนแพง	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ประจักษ์ จัตกุล	คณะวิศวกรรมศาสตร์บูรณาการและเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ภาสพิรุฬห์ วัชรศรีสำเร็จ	คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศุภสิทธิ์ มะโนเครื่อง	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา
รองศาสตราจารย์ ดร.อภิรักษ์ ภูเกล้าวัน	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เชาพีร์ คือราแม	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พีรวิทย์ โชคเหมาะ	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นรงค์ วิชาพา	คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์
รองศาสตราจารย์ วรพงศ์ บุญช่วยแทน	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พชรพล ตันทวีรุฬห์	คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุรัชย์ เหมศิริญ	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เชิดพงษ์ จอมเดช	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.รัตติกรณ์ เสาร์แดน	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุวัฒน์ กิจเจริญวัฒน์	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธีรยุทธ กาญจนแสงทอง	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปริญญา ศรีสัตยกุล	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ทองเพียร พรหมบุตร	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พิสิทธิ์ เมื่อน้อย	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.มนัส เหมบุญกิจ	วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เลิศลักษณ์ แก้ววิมล	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชัยณรงค์ ศรีวะบุตร	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ จตุพร ใจดำรงค์	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อดิสร ศรีคำ	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศุภลักษณ์ มะโนธรรม	คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กั้วหน้า จงวัฒนารักษ์	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จินกมล ลุยจันทร์	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศักดิ์ดา คำจันทร์	คณะวิทยาศาสตร์และวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธีรวิศ คำหน่อแก้ว	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กาญจนา ลือพงษ์	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.แมน ด้อยแพร่	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ณัฐนันท์ มูลสระตู่	คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรมและเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วุฒิวัฒน์ คงรัตนประเสริฐ	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ณัฐศักดิ์ พรพุดศิริ	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วนิดา บุญโณม	คณะบริหารธุรกิจและเทคโนโลยีสารสนเทศ (สาขาวิชาโลจิสติกส์) มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.รัตนามร ยวงสวัสดิ์	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พิชิตชัย บุตรน้อย	คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ นพดล ศรีพุทธา	คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สุรเชษฐ์ เกื้อนแก้วสิงห์	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ปทิตตา นาควงษ์	คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏพระนครศรีอยุธยา
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สมมาตร ศรีประเทือง	คณะวิศวกรรมศาสตร์บูรณาการและเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ทวี หมดส๊ะ	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สุรเทพ แป้นเกิด	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ จูติ หมอรักษา	คณะวิศวกรรมศาสตร์บูรณาการและเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ เฉลิมพล คล้ายนิล	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ชัชวาลย์ สุขมัน	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ จิรวัดน์ ณ พัทลุง	สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์และนวัตกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ไพบุลย์ หาญมนต์	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ภัทรพงศ์ เกิดลาภี	คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ชูไฮดี สนิ	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ นภัสดล สิงหะตา	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สัญญา คำจริง	คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ โอริส มณีสาย	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ
ดร.จิระศักดิ์ ธาระจักร์	คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
ดร.เอกชัย วารินศิริรักษ์	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ อนันต์ โสภิน	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ
ดร.ปริญญา กวีกิจบัณฑิต	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
ดร.ปกรณ์ ชุมรัมย์	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ

ดร.พิริยะ ปิ่นทอง	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ
ดร.ณัฐภัทร สุปรียธิติกุล	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ดร.ธงชัย เพ็งจันทร์ดี	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ดร.สุริยพงศ์ นิลสังข์	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ดร.ทงศักดิ์ คงสินธุ์	วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
ดร.ปิยะพงษ์ คำคุณ	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ
ดร.ปวิทย์ เจียนดอน	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
ดร.วิเรชา คำจันทร์	คณะวิทยาศาสตร์และวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
ดร.สุรฉัญ ปาละพรพิสุทธิ์	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ
ดร.เอกชัย คุปตาวาทิน	คณะบริหารธุรกิจและเทคโนโลยีสารสนเทศ (สาขาโลจิสติกส์) มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
นาวาเอก ดร.บพิท ทศเทพพิทักษ์	กรมอุทกหารเรือ โรงเรียนช่างกรมอุทกหารเรือ
ดร.ยุทธนา แก้วคำแจ้ง	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ
ดร.ธวัชชัย ปัญญาคิด	คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก
ดร.ปรเมศวร์ เป้าวรรณ	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
ดร.พงศ์พจน์ สกุลอื้อ	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ
ดร.อดิศักดิ์ นาวเหนียว	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา
ดร.กชกร วิรัชกุล	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
ดร.สุกัญญา เชิดชูงาม	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

แบบฟอร์มส่งบทความเพื่อพิจารณาตีพิมพ์ลงในวารสารเทคโนโลยีและวิศวกรรมก้าวหน้า

วันที่..... เดือน..... พ.ศ.....

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

ขอส่ง ☐ บทความวิจัย ☐ บทความวิชาการ

เรื่อง (ภาษาไทย)

เรื่อง (ภาษาอังกฤษ)

ชื่อผู้เขียนร่วม (ภาษาไทย)

1. ชื่อ..... นามสกุล.....

2. ชื่อ..... นามสกุล.....

3. ชื่อ..... นามสกุล.....

ชื่อผู้เขียนร่วม (ภาษาอังกฤษ)

1. Firstname..... Surname

2. Firstname..... Surname

3. Firstname..... Surname

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

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

รหัสไปรษณีย์..... E-mail.....

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

ข้าพเจ้าขอรับรองว่าบทความนี้ ☐ เป็นผลงานของข้าพเจ้าแต่เพียงผู้เดียว☐ เป็นผลงานของข้าพเจ้าและผู้ร่วมงานตามชื่อที่ระบุในบทความจริง

โดยขอรับรองว่ารูปภาพและข้อความทั้งหมดในบทความนี้ ไม่ละเมิดลิขสิทธิ์ใด ๆ และบทความนี้ไม่เคยลงตีพิมพ์ในวารสารใดมาก่อน และจะไม่นำบทความนี้ไปเพื่อพิจารณาตีพิมพ์ในวารสารอื่นอีกเป็นการซ้ำซ้อนการละเมิดลิขสิทธิ์ถือเป็นความรับผิดชอบของผู้เขียนบทความโดยตรง ทั้งนี้ผู้เขียนเข้าใจในนโยบายการรับบทความของวารสารเทคโนโลยีและวิศวกรรมก้าวหน้าแล้ว และยินยอมว่าบทความที่ตีพิมพ์ลงในวารสารเทคโนโลยีและวิศวกรรมก้าวหน้า ถือเป็นลิขสิทธิ์ของคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ

ลงชื่อ.....

(.....)



หนังสือรับรองการตีพิมพ์บทความ
วารสารเทคโนโลยีและวิศวกรรมก้าวหน้า
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ

ขอรับรองว่าบทความ.....

โดย

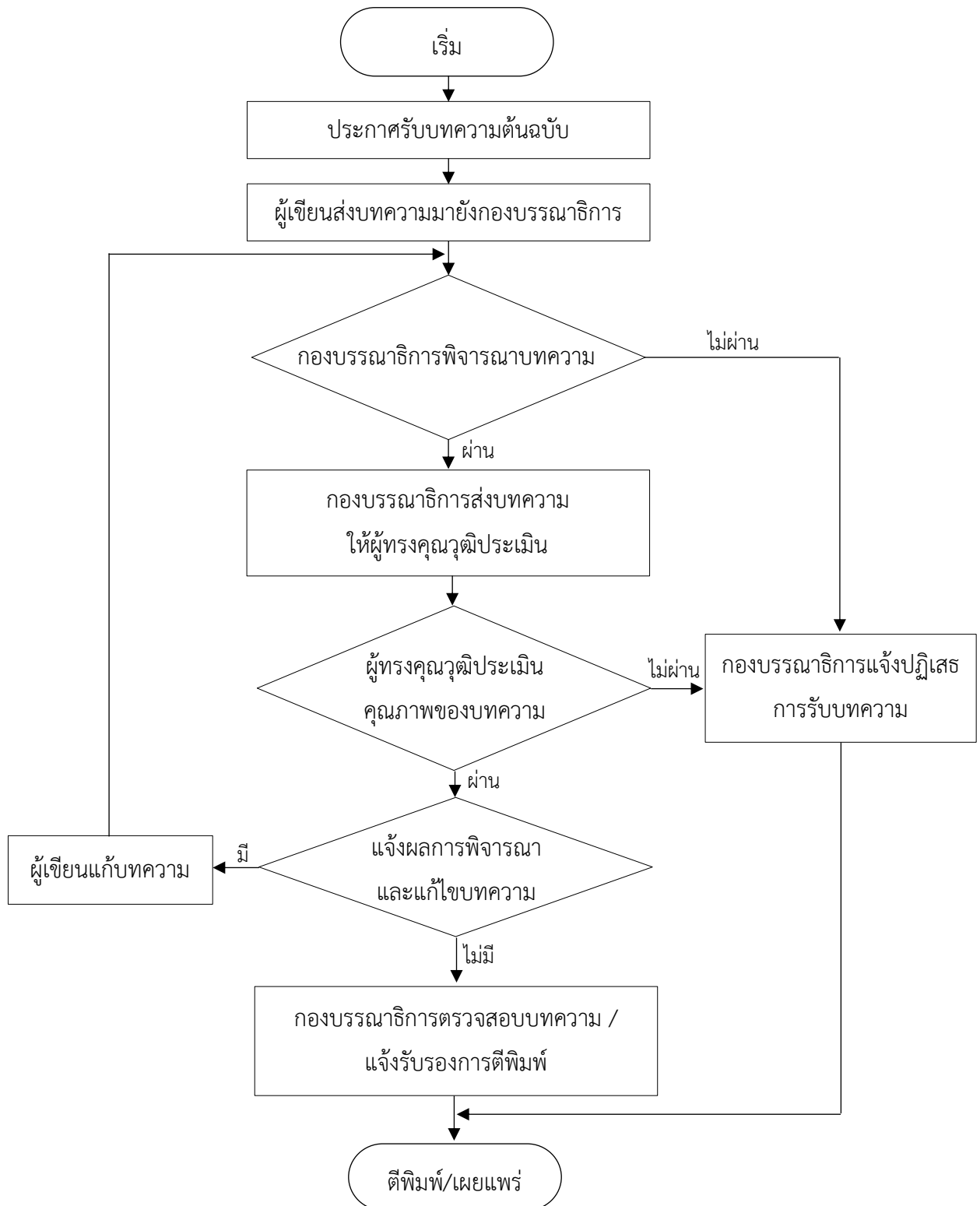
.....

.....

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

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ฤทธิชัย เกาเนียม)
บรรณาธิการวารสารเทคโนโลยีและวิศวกรรมก้าวหน้า
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ

ขั้นตอนการจัดทำวารสารเทคโนโลยีและวิศวกรรมก้าวหน้า





วารสารเทคโนโลยีและวิศวกรรมก้าวหน้า

Journal of Technology and Engineering Progress

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ
เลขที่ 2 ถนนนางลิ้นจี่ แขวงทุ่งมหาเมฆ เขตสาทร กรุงเทพมหานคร 10120
E-mail : jtep_journal@mail.rmuth.ac.th