

การวิเคราะห์ผลของกระบวนการแปรรูปต่อสมบัติเชิงกลของเหล็กกล้าคาร์บอน SS400

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

ทณงศักดิ์ คงสินธุ์*

ภาควิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมเครื่องกล วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

1518 ถนน ประชาธารา 1 แขวงวงศ์สว่าง บางซื่อ กรุงเทพมหานคร 10800

Tanongsak Kongsin*

Department of Mechanical Engineering Technology, College of Industrial Technology,

King Mongkut's University of Technology North Bangkok,

1518 Pracharat 1 Road, Wongsawang, Bangsue, Bangkok 10800

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

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

บทคัดย่อ

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

คำสำคัญ: กระบวนการตัดเฉือน, การตัดด้วยลวดไฟฟ้า, ทิศทางการรีด, ความต้านแรงดึงสูงสุด, ความหยาบผิว

Abstract

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

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

1. บทนำ (Introduction)

เหล็กกล้าคาร์บอนเป็นวัสดุที่ได้รับความนิยมอย่างแพร่หลายในงานวิศวกรรมโครงสร้างและอุตสาหกรรมการผลิต เนื่องจากมีคุณสมบัติด้านความแข็งแรง ความเหนียว และความสามารถในการขึ้นรูปที่เหมาะสม อีกทั้งยังมีต้นทุนการผลิตไม่

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

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

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

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

ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงมุ่งศึกษาผลของกระบวนการแปรรูปชิ้นงานที่แตกต่างกัน ได้แก่ กระบวนการแปรรูปทางกลและกระบวนการแปรรูปทางไฟฟ้า ต่อสมบัติการต้านทานแรงดึงและคุณภาพผิวของเหล็กกล้าคาร์บอนมาตรฐาน เกรด SS400 รวมถึงวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างกระบวนการแปรรูป ทิศทางการรีด และค่าความหยาบผิวเฉลี่ย เพื่อใช้เป็นแนวทางในการเลือกกระบวนการผลิตที่เหมาะสมสำหรับงานอุตสาหกรรมต่อไป

2. วิธีการดำเนินงานวิจัย

2.1 วัสดุและอุปกรณ์

งานวิจัยนี้ศึกษาอิทธิพลของกระบวนการแปรรูปชิ้นงานที่มีผลต่อคุณสมบัติทางกลและทางกายภาพ ของวัสดุ เหล็กกล้าคาร์บอน เกรด SS400 ซึ่งมีคุณสมบัติดังตารางที่ 1 และส่วนผสมทางเคมี ดังแสดงในตารางที่ 2 ตามลำดับ

ตารางที่ 1 คุณสมบัติทางกลวัสดุเหล็กกล้าคาร์บอน เกรด SS400 [1]

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

ตารางที่ 2 ส่วนผสมทางเคมีของวัสดุเหล็กกล้าคาร์บอน เกรด SS400 [1]

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

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

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

2.2 เครื่องจักร เครื่องมือ และอุปกรณ์ในงานวิจัย

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

ตารางที่ 3 พารามิเตอร์หลักที่ใช้ในการแปรรูปชิ้นงานทดสอบ

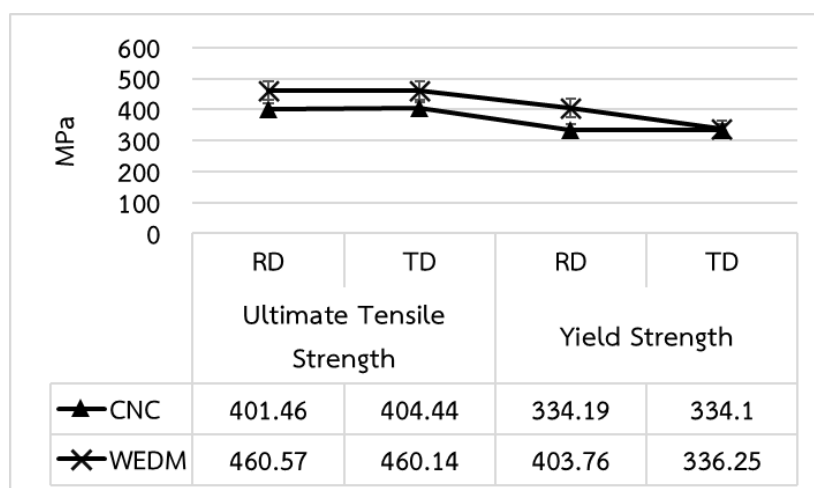
CNC 5-Axis Machining Center		Wire Electrical Discharge Machining	
Parameters	Values	Parameters	Values
Depth of Cut	0.25 มิลลิเมตร	Peak voltage (V)	65
Tooling	Endmill Ø 10 มิลลิเมตร	Peak current (A)	20
Spindle Speed	2500 รอบต่อนาที	Pulse on time (µs)	50
Cutting Speed	1000 เมตรต่อนาที	Pulse off time (µs)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

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

3. ผลการทดลองและการอภิปรายผล

3.1 ผลการทดสอบสมบัติด้านการต้านทานแรงดึง

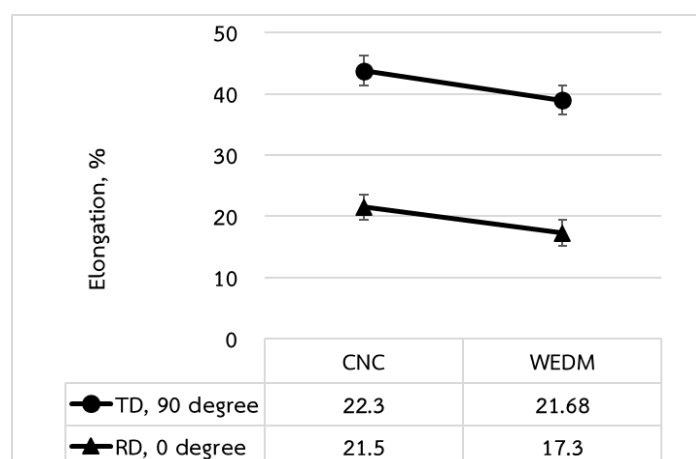
ผลการทดสอบแรงดึงของเหล็กกล้าคาร์บอน เกรด SS400 ที่ผ่านกระบวนการแปรรูปแตกต่างกัน ซึ่งแสดงในรูปที่ 1 พบว่า กระบวนการเตรียมชิ้นงานมีผลต่อค่าความต้านแรงดึงสูงสุดของวัสดุอย่างชัดเจน โดยชิ้นงานที่เตรียมด้วยกระบวนการตัดโลหะด้วยลวดไฟฟ้า (Wire Electrical Discharge Machining: WEDM) ให้ค่าความต้านแรงดึงสูงสุดมากที่สุด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



รูปที่ 1 ผลการทดสอบสมบัติด้านการต้านทานแรงดึงของชิ้นงานทดสอบ

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

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



รูปที่ 2 ความสามารถในการยืดตัวของวัสดุในกระบวนการกระบวนการทางกลและทางไฟฟ้า

3.2 ผลการทดสอบความสามารถในการยืดตัวของวัสดุ (Elongation)

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

นอกจากนี้ ผลการทดลองยังสามารถอธิบายเพิ่มเติมได้จากความสัมพันธ์ระหว่างโครงสร้างจุลภาคและสมบัติเชิงกลตามหลัก Hall-Petch Relationship ซึ่งระบุว่าขนาดเกรนมีผลต่อความแข็งแรงและความเหนียวของวัสดุ โดยเมื่อเกรนมีขนาดใหญ่ขึ้นจากผลของความร้อน จะทำให้ค่าความเหนียวและความสามารถในการเสียรูปแบบพลาสติกลดลง ในทางกลับกัน

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

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

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

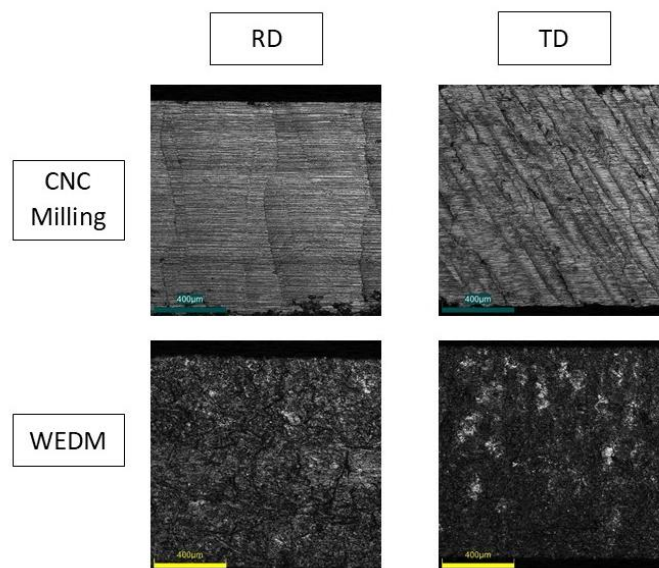
นอกจากนี้ การตัดเฉือนด้วย CNC Milling ยังอาจก่อให้เกิดปรากฏการณ์ Strain Hardening บริเวณผิววัสดุ ซึ่งเกิดจากการเสียรูปแบบพลาสติกซ้ำบริเวณผิวหน้าระหว่างกระบวนการตัด ส่งผลให้ความหนาแน่นของดิสโลเคชัน (Dislocation Density) เพิ่มขึ้น ทำให้วัสดุมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น แต่มีความสามารถในการเสียรูปแบบพลาสติกลดลง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

3.3 ผลการตรวจคุณภาพผิวชิ้นงาน (Surface Quality)

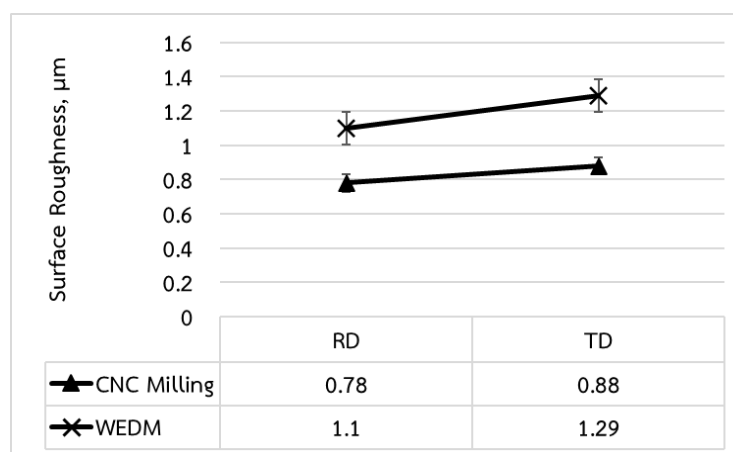
ผลการตรวจสอบคุณภาพผิวชิ้นงาน (Surface Quality) ดังแสดงในรูปที่ 3 และ 4 ตามลำดับ พบว่ากระบวนการตัดเฉือนทางกล CNC Milling ให้ค่าความหยาบผิวเฉลี่ย (Average Surface Roughness; Ra) ต่ำที่สุด รองลงมาคือกระบวนการ Wire Electrical Discharge Machining (WEDM) ทั้งนี้สามารถอธิบายได้จากลักษณะกลไกการกำจัดวัสดุและผลกระทบทางความร้อนที่แตกต่างกันของแต่ละกระบวนการผลิต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

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

การกำจัดเศษวัสดุหลอมเหลวไม่สมบูรณ์ อาจทำให้เกิดรอยแตกร้าวขนาดเล็ก (Micro-crack) และความไม่สม่ำเสมอของพื้นผิวเพิ่มขึ้น ซึ่งส่งผลต่อคุณภาพผิวและสมบัติเชิงกลของชิ้นงาน



รูปที่ 3 ผลการตรวจคุณภาพผิวชิ้นงาน (Surface Quality)



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

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

4. สรุปผลการทดลอง

การวิจัยเรื่องการวิเคราะห์ผลของกระบวนการแปรรูปต่อสมบัติเชิงกลของเหล็กกล้าคาร์บอน SS400 สามารถสรุปได้ดังนี้

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

5. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม ที่ให้การสนับสนุนตลอดระยะเวลาการศึกษาและดำเนินการวิจัย จนงานวิจัยฉบับนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี

6. เอกสารอ้างอิง

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

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