

อิทธิพลของปัจจัยทางกระแสไฟฟ้าในการเจาะรูของรอยเชื่อม เหล็กกล้าเครื่องมือ เกรด JIS SKD61 ด้วยกระบวนการกัดเซาะด้วยไฟฟ้า

Influence of Discharge Current in Drilling Hole of Weld on JIS SKD61 Tool Steel by Using Electrical Discharge Machining Process

สมชาย วนไทยสงค์¹ รัตติกรณ์ เสาร์แดน^{1*} เอนก สุทธิฤทธิ์¹ รอยต่อ เจริญสินโอฬาร¹ และ พิชัย จันทรมณี¹

¹ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกลและอุตสาหกรรมศาสตร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ

2 ถนนนางลิ้นจี่ ทุ่งมหาเมฆ สาทร กรุงเทพฯ 10120

Somchai Wonthaisong¹, Rattikorn Saodaen^{1*}, Anek Suttirit¹, Roytor Charoensin-o-larn¹ and Pichai Janmanee¹

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

Rajamangala University of Technology Krungthep,

2 Nanglinchi Road, Thungmahamek, Sathorn, Bangkok, 10120

Corresponding author Email: Rattikorn.s@mail.rmuk.ac.th*

(Received: January 16, 2023; Revised: June 7, 2023; Accepted: June 8, 2023)

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาประสิทธิภาพการเจาะรูด้วยกระบวนการกัดเซาะด้วยไฟฟ้า (EDM) ของวัสดุเหล็กกล้าเครื่องมือ เกรด JIS SKD61 ซึ่งผ่านกระบวนการเชื่อมซ่อมด้วยการเชื่อมไฟฟ้า (SMAW) และการเชื่อมอาร์กโลหะด้วยแก๊ส (GMAW) โดยใช้อิเล็กโทรดสำหรับสปาร์คที่แตกต่างกันสองประเภท ได้แก่ ทองเหลือง และทองแดง ด้วยการปรับตั้งค่าปัจจัยหลักทางกระแสไฟฟ้า 3 ระดับ คือ 2.5, 3 และ 3.5 แอมแปร์ ตามลำดับ จากนั้นประเมินผลประสิทธิภาพการทำงานในรูปของอัตราการขจัดเนื้องาน (MRR), อัตราการสึกหรอของอิเล็กโทรด (EWR), ความหยาบผิว (Ra), และลักษณะรูเจาะเข้า-ออก ตามลำดับ ผลการทดลองพบว่ารูเจาะของรอยเชื่อม SMAW ที่ถูกสปาร์คด้วยอิเล็กโทรดทองเหลือง, กระแสไฟฟ้า 3 แอมแปร์ มีอัตราการขจัดเนื้องานสูงสุด 21.458 มม.²/นาที และอัตราการสึกหรอของอิเล็กโทรด 82.1% ความหยาบผิวเฉลี่ย (Ra) ต่ำสุดของรอยเชื่อม SMAW ที่ถูกสปาร์คด้วยอิเล็กโทรดทองแดง, กระแสไฟฟ้า 3 แอมแปร์ มีค่าเท่ากับ 1.9457 ไมโครเมตร ลักษณะรูเจาะของรอยเชื่อม SMAW และ GMAW มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางรูเข้ามากกว่า 1 มม. และมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางรูออกน้อยกว่า 1 มม. จากการใช้อิเล็กโทรดทั้งสองประเภทและทั้งหมดของการปรับตั้งค่ากระแสไฟฟ้า

คำสำคัญ: เหล็กกล้าเครื่องมือ เกรด JIS SKD61 อัตราการขจัดเนื้องาน อัตราการสึกหรอของอิเล็กโทรด ความหยาบผิว

Abstract

This research aimed to study the efficiency of drilling hole with the electrical discharge machining process (EDM) of JIS SKD61 tool steel. Which was welded to repair by using the shield metal arc welding (SMAW) and gas metal arc welding (GMAW) processes. The welded specimens were sparked with two different electrodes of tool such as brass, and copper. The main factor of discharge current was set up 3 levels of 2.5, 3

and 3.5 Ampere. Then, the performance efficiency was evaluated by the material removal rate (MRR), and electrode wear ratio (EWR), surface roughness (Ra), and appearance of entrance-exit drilled hole, respectively. The experimental results were found that the drilled hole of the SMAW weld sparked by brass electrode, and discharge current of 3 Ampere had the highest material removal rate of 21.458 mm²/min, and electrode wear ratio 82.1 percentage. The average of lowest surface roughness of the SMAW weld which was conducted with Cu electrode, discharge current of 3 Ampere having of approximately 1.9457 micrometer. The appearance of entrance-exit drilled hole of SMAW as well as GMAW welds had the dimensional analysis of entrance drilled hole larger than 1 millimeter and smaller than 1 millimeter for exit drilled hole from using both electrodes and entire discharge current set up.

Keywords: JIS SKD61 tool steel, Material removal rate, Electrode wear ratio, Surface roughness

1. บทนำ

ในปัจจุบันโรงงานอุตสาหกรรมได้นำเทคโนโลยีหลากหลายรูปแบบมาใช้ในกระบวนการผลิต โดยมุ่งเป้าหมายไปที่การลดต้นทุน ลดเวลา เพิ่มผลผลิต และเพิ่มความแม่นยำสูงในการผลิต เพื่อตอบสนองความต้องการของโรงงานอุตสาหกรรมผลิตชิ้นส่วนต่างๆ ที่มีรูปร่างซับซ้อนและใช้วิธีการตัดเฉือนโดยทั่วไปได้ยาก เนื่องจากชิ้นส่วนแม่พิมพ์เป็นวัสดุที่ยากต่อการแปรรูปด้วยกระบวนการทางกล โดยเฉพาะในอุตสาหกรรมแม่พิมพ์สำหรับโลหะหรือแม่พิมพ์สำหรับพลาสติกที่ต้องการความแม่นยำค่อนข้างสูงนั้น ส่วนมากจะถูกผลิตที่ผ่านขั้นตอนการใช้เครื่องเจาะรูด้วยไฟฟ้า (Drill EDM) ซึ่งเป็นการแปรรูปโลหะด้วยกระบวนการกัดเซาะวัสดุชิ้นงานที่มีความแข็งสูง [1] โดยใช้หลักการทางความร้อนที่เกิดจากปฏิกิริยาทางไฟฟ้าส่งผ่านวัสดุตัวนำที่เรียกว่า “Electrode” จึงทำให้เกิดการหลอมละลายของเนื้อโลหะออกเป็นอนุภาคขนาดเล็กภายใต้ของเหลวกึ่งตัวนำที่เรียกว่าสาร “Dielectric” ซึ่งจะทำให้เกิดการขจัดเนื้องานหรือการหลอมละลายของเนื้อโลหะในบริเวณที่เล็กมากระหว่างอิเล็กโทรด (Electrode) และเนื้อโลหะ โดยสามารถควบคุมผิวชิ้นงานที่ขจัดออกมีลักษณะรูปร่างเหมือนอิเล็กโทรดที่ได้ในการแปรรูป [2,3] การแปรรูปวัสดุเหล็กกล้าเครื่องมือ (Tool steel) ด้วยเครื่องเจาะรูโลหะด้วยไฟฟ้า (Drill EDM) เป็นวิธีที่นิยมนำมาใช้มากในปัจจุบัน ซึ่งเป็นทางเลือกหนึ่งสำหรับการแปรรูปชิ้นงานประเภทวัสดุแม่พิมพ์ที่มีความแข็งสูงและเป็นวัสดุที่สามารถทำการแปรรูปโดยใช้การเจาะด้วยกระบวนการกัดเซาะด้วยไฟฟ้า (Electrical Discharge Machine: EDM) ได้เป็นอย่างดี [4]

เหล็กกล้าเครื่องมือ เกรด JIS SKD61 เป็นวัสดุที่มีความสำคัญมากสำหรับการนำไปใช้ในงานอุตสาหกรรมต่างๆ โดยเฉพาะอุตสาหกรรมแม่พิมพ์งานร้อนและเย็น [5,6] ฉะนั้น ความเสียหายมีโอกาสที่จะเกิดขึ้นในระหว่างการผลิตหรือการเสื่อมสภาพจากการใช้งานเป็นเวลานานของชิ้นส่วนประกอบดังกล่าว เช่น การเกิดรอยแตกร้าว การสึกหรอ และอื่นๆ จึงมีความจำเป็นสำหรับกระบวนการซ่อมบำรุงและซ่อมแซมส่วนที่เกิดความเสียหายด้วยกระบวนการเชื่อมอาร์ก เนื่องจากต้นทุนค่อนข้างต่ำ และใช้กันอย่างแพร่หลายในการเชื่อมซ่อมแม่พิมพ์ที่เกิดความเสียหาย [7] ก่อนถูกนำไปเข้าสู่กระบวนการแปรรูปโดยการเจาะด้วยกระบวนการกัดเซาะด้วยไฟฟ้า (EDM) กับการใช้วัสดุอิเล็กโทรด (Electrode) ที่มีคุณสมบัติแตกต่างกันซึ่งเป็นปัจจัยที่มีอิทธิพลโดยตรงต่อประสิทธิภาพการเจาะ คุณภาพความหยาบผิว และขนาดรูเจาะสำหรับวัสดุเหล็กกล้าเครื่องมือ เกรด JIS SKD61

ดังนั้น งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการเจาะรูสำหรับวัสดุเหล็กกล้าเครื่องมือ เกรด JIS SKD61 ที่ผ่านกระบวนการเชื่อมไฟฟ้า (SMAW) และการเชื่อมอาร์กโลหะด้วยแก๊ส (GMAW) ด้วยอิเล็กโทรดทองเหลืองและทองแดงสำหรับสปาร์กชิ้นงานทดสอบ จากการปรับค่ากระแสไฟฟ้าที่แตกต่างกัน และประเมินผลประสิทธิภาพการทำงานในรูปของอัตราการขจัดเนื้องาน

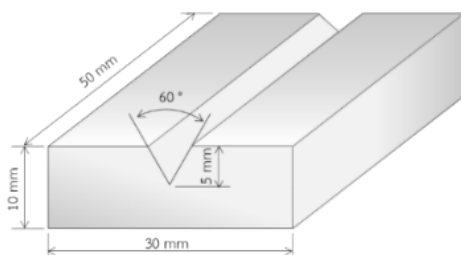
(MRR), อัตราการสึกหรอของอิเล็กโทรด (EWR), ความหยาบผิว (Ra), และลักษณะรูเจาะของวัสดุที่ถูกเชื่อมแต่ละประเภทและอิเล็กโทรดที่แตกต่างกัน

2. วัสดุ เครื่องมือ และอุปกรณ์

1) วัสดุทดสอบ คือ เหล็กกล้าเครื่องมือ เกรด JIS SKD61 ผ่านกระบวนการชุบแข็ง 1020 – 1050 °C และค่าความแข็งสูงสุด 334 HV แสดงคุณสมบัติส่วนผสมทางเคมีดังตารางที่ 1 [8,9] ชิ้นงานทดสอบถูกกำหนดขนาดความกว้าง 30 มม. ความยาว 50 มม. และความหนา 10 มม. ซึ่งถูกเตรียมชิ้นงานรอยเชื่อมในลักษณะร่องตัววี (V-shaped groove) บริเวณกลางชิ้นงานทดสอบ ความลึก 5 มม. มุมบากรวมร่อง (Groove Angle) 60 องศา ดังรูปที่ 1 (ก) และ (ข)

ตารางที่ 1 คุณสมบัติของวัสดุเหล็กกล้าเครื่องมือ เกรด JIS SKD61

ความหนาแน่น (g /cm ³)	7.85
ความจุความร้อนจำเพาะที่ 100°C (J/g °C)	0.44
การชุบแข็ง (°C)	1020 - 1050
ความแข็งสูงสุด (HV)	344
ส่วนผสมทางเคมี (%)	C = 0.32-0.45, Si = 0.80-1.20, Mn = 0.20-0.50, Cr = 4.75-5.50, Mo = 1.10-1.75, V = 0.80-1.20



(ก) ขนาดชิ้นงานทดสอบ



(ข) ลักษณะชิ้นงานทดสอบก่อนเชื่อม

รูปที่ 1 การเตรียมชิ้นงานทดสอบรอยเชื่อมวัสดุเหล็กกล้าเครื่องมือ เกรด JIS SKD61

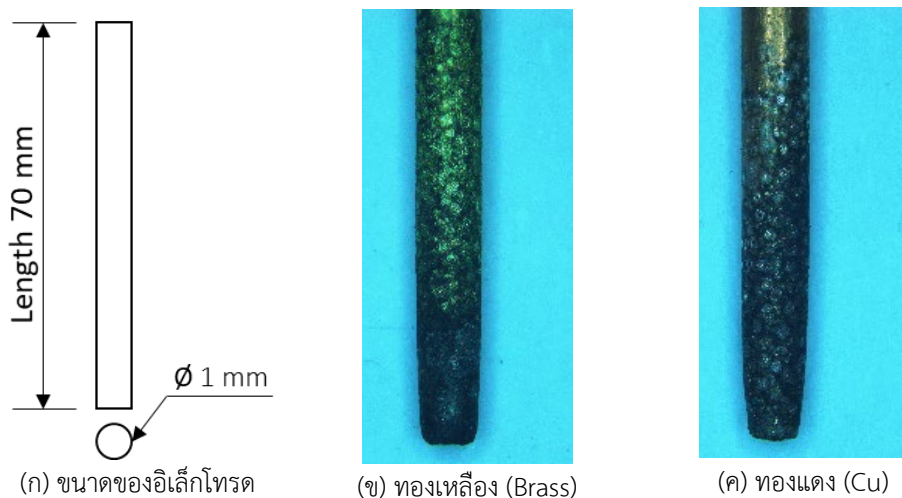


รูปที่ 2 ตัวอย่างรอยเชื่อม SMAW และ GMAW

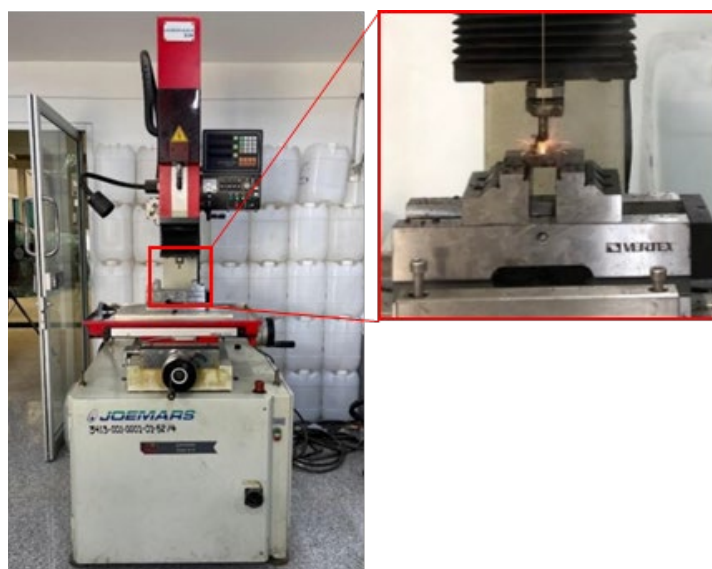
จากนั้นดำเนินการเชื่อมชิ้นงานทดสอบด้วยกระบวนการเชื่อมไฟฟ้า (Shield Metal Arc Welding : SMAW) โดยการใช้ลวดเชื่อม AWS A5.1 E6013 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.6 มม. แรงดันไฟฟ้า 35 โวลต์, และกระแสไฟฟ้า 90 แอมแปร์ สำหรับ

การเชื่อมอาร์กโลหะด้วยแก๊ส (Gas Metal Arc Welding : GMAW) ด้วยเงื่อนไขการเชื่อม ได้แก่ ลวดเชื่อม DIN 8555 MSG6-4Z-60 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.2 มม. แรงดันไฟฟ้า 6 โวลต์, กระแสไฟฟ้า 100 แอมแปร์ และแก๊สปกคลุม Ar75%+CO₂25% เป็นต้น แสดงลักษณะรอยเชื่อมดังรูปที่ 2

2) วัสดุอิเล็กโทรด คือ ทองเหลือง (Brass) และทองแดง (Cu) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 มม. ความยาว 70 มม. ดังรูปที่ 3



รูปที่ 3 อิเล็กโทรดสำหรับสปาร์คขึ้นงานทดสอบ



รูปที่ 4 เครื่องกัดเจาะเนื้อโลหะด้วยไฟฟ้า (SHEDM)

3) เครื่องกัดโลหะด้วยไฟฟ้า (Electrical Discharge Machine : EDM) เป็นเครื่องจักรแบบควบคุมด้วยตัวเลข (Computer Numerical Control) แบบ Small Hole Electrical Discharge Machine (SHEDM) ยี่ห้อ JOEMARS รุ่น JM325D แสดงดังรูปที่ 4

3. การทดลอง

3.1 การออกแบบการทดลอง

การออกแบบการทดลองสำหรับศึกษาประสิทธิภาพการเจาะรูของรอยเชื่อมที่ผ่านกระบวนการเชื่อม SMAW และ GMAW ที่ความลึกรอยเชื่อม 5 มม. ด้วยการใช้อิเล็กโทรดทองเหลืองและทองแดง ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 มม.

การกำหนดปัจจัยคงที่ ได้แก่ เวลาเปิด (On-time), เวลาปิด (Off-time), ระยะห่าง (Gap) และอื่นๆ เพื่อให้เหมาะสมกับการปรับค่ากระแสไฟฟ้าที่ระดับ 2.5, 3 และ 3.5 แอมแปร์ ตามลำดับ [11] แสดงการปรับตั้งค่าเงื่อนไขการทดลองตามตารางที่ 2

ตารางที่ 2 การปรับตั้งค่าเงื่อนไขการทดลอง

เงื่อนไข	รายละเอียด
Depth	10
IP	8
C	7
On-time (μs)	12
Off-time (μs)	5
Gap (mm)	2
Pressure (kg/cm ²)	70
Electrode wear (%)	55~58
Working time	18"~19"
Current (A)	2.5, 3, 3.5

3.2 ประเมินผลประสิทธิภาพการทำงานอัตราการขจัดเนื้องาน (MRR) และอัตราการสึกหรอของอิเล็กโทรด (EWR) การเปรียบเทียบผลการทดลองในแต่ละเงื่อนไขโดยถูกกำหนดด้วยผลการประเมิน [10] ดังนี้

1) อัตราการขจัดเนื้องาน (MRR) ในการแปรรูปชิ้นงานคำนวณจากสมการที่ 1

$$MRR = \frac{\text{ปริมาตรเนื้องานที่ถูกขจัดออกไป}}{\text{เวลาที่ใช้}} \quad (1)$$

2) อัตราการสึกหรอของอิเล็กโทรด (EWR) สามารถคำนวณจากสมการที่ 2

$$EWR = \frac{\text{ระดับความลึกของชิ้นงานที่แท้จริง}}{\text{ระยะที่อิเล็กโทรดสึกหรอออกไป}} \times 100 \quad (2)$$

3.3 ประเมินคุณภาพความหยาบผิวและขนาดรูเจาะ

การประเมินคุณภาพผิวของรูเจาะถูกวัดค่าความหยาบผิวเฉลี่ย (Ra) บริเวณผนังรูเจาะจากภาคตัดขวาง (Cross section) ของรูเจาะด้วยกล้องจุลทรรศน์ Laser Confocal Microscope แบบ 3 มิติในระดับนาโนเมตร ยี่ห้อ Olympus รุ่น OLS5000 และถูกวัดขนาดรูเจาะด้านบน (รูเข้า) และด้านล่าง (รูออก) จากการเจาะด้วยภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์ยี่ห้อ Olympus STM6 และ

เปรียบเทียบประสิทธิภาพการทำงานและคุณภาพผิวงานรูเจาะของรอยเชื่อม SMAW และ GMAW ด้วยการใช้อิเล็กโทรดทองเหลืองและทองแดง และการเปลี่ยนแปลงค่ากระแสไฟฟ้า

4. ผลการทดลองและอภิปรายผล

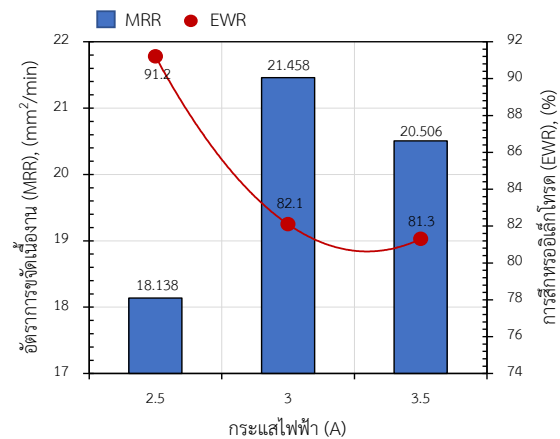
ผลการทดลองจากการศึกษาผลกระทบของกระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการสปาร์คขึ้นงานทดสอบขณะเจาะรูด้วยอิเล็กโทรดทองเหลืองและทองแดงสำหรับวัสดุเหล็กกล้าเครื่องมือ เกรด JIS SKD61 ที่ถูกเชื่อมด้วยกระบวนการเชื่อมไฟฟ้า (SMAW) และการเชื่อมอาร์กโลหะด้วยแก๊ส (GMAW) สามารถอภิปรายผลการทดลอง ดังนี้

4.1 ผลการทดลองค่าปัจจัยประสิทธิภาพเบื้องต้น

การศึกษาประสิทธิภาพการเจาะรูบริเวณรอยเชื่อม SMAW ด้วยอิเล็กโทรดทองเหลืองและทองแดงจากการปรับค่ากระแสไฟฟ้าที่ระดับ 2.5, 3 และ 3.5 แอมแปร์ แสดงผลการทดลอง ดังตารางที่ 3 พบว่าอิเล็กโทรดทองเหลืองมีอัตราการขจัดเนื้องาน (MRR) 18.138 - 21.458 mm³/min และอัตราการสึกหรอของอิเล็กโทรด (EWR) 81.3 - 91.2% สำหรับอิเล็กโทรดทองแดงพบว่ามีอัตราการขจัดเนื้องาน (MRR) 6.829 - 9.428 mm³/min และอัตราการสึกหรอของอิเล็กโทรด (EWR) 154.6 - 164.3%

ตารางที่ 3 อัตราการขจัดเนื้องานและอัตราการสึกหรอของอิเล็กโทรดสำหรับรอยเชื่อม SMAW

อิเล็กโทรด	กระแสไฟฟ้า (A)	MRR (mm ³ /min)	EWR (%)
ทองเหลือง (Brass)	2.5	18.138	91.2
	3	21.458	82.1
	3.5	20.506	81.3
ทองแดง (Cu)	2.5	9.428	164.3
	3	6.829	154.6
	3.5	7.139	156.1



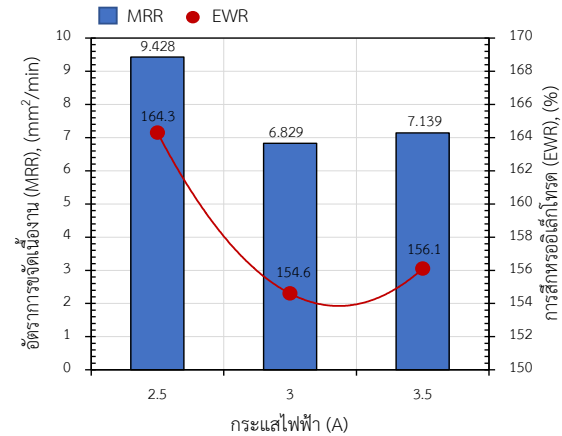
รูปที่ 5 อัตราการขจัดเนื้องานและอัตราการสึกหรอของอิเล็กโทรดทองเหลืองสำหรับรอยเชื่อม SMAW

รูปที่ 5 กราฟเปรียบเทียบประสิทธิภาพการเจาะรูสำหรับรอยเชื่อม SMAW ของอิเล็กโทรดทองเหลือง พบว่าอัตราการขจัดเนื้องานสูงสุดเท่ากับ 21.458 mm³/min และอัตราการสึกหรอของอิเล็กโทรด 82.1% เมื่อใช้กระแสไฟฟ้า 3 แอมแปร์ ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับกระแสไฟฟ้า 3.5 แอมแปร์ เมื่อเปรียบเทียบกับกระแสไฟฟ้า 2.5 แอมแปร์ พบว่าอัตราการขจัดเนื้องานมีค่าต่ำสุดและอัตราการสึกหรอของอิเล็กโทรดค่อนข้างสูง

ตารางที่ 4 อัตราการขจัดเนื้องานและอัตราการสึกหรอ

ของอิเล็กโทรดสำหรับรอยเชื่อม GMAW

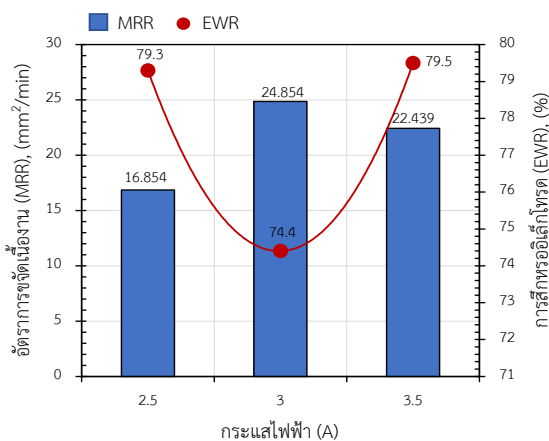
อิเล็กโทรด	กระแสไฟฟ้า (A)	MRR (mm ³ /min)	EWR (%)
ทองเหลือง (Brass)	2.5	16.854	79.3
	3	24.854	74.4
	3.5	22.439	79.5
ทองแดง (Cu)	2.5	10.471	155.4
	3	8.894	150.4
	3.5	6.735	157.5



รูปที่ 6 อัตราการขจัดเนื้องานและอัตราการสึกหรอ

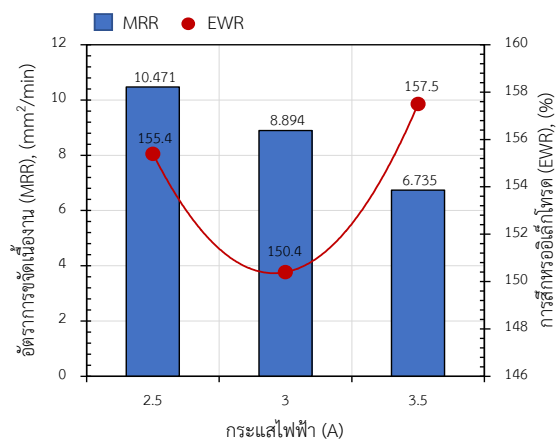
ของอิเล็กโทรดทองแดงสำหรับรอยเชื่อม SMAW

ตารางที่ 4 แสดงอัตราการขจัดเนื้องานและอัตราการสึกหรอของอิเล็กโทรดทองเหลืองและทองแดงสำหรับเจาะรอยเชื่อม GMAW พบว่าอิเล็กโทรดทองเหลืองมีอัตราการขจัดเนื้องาน (MRR) เท่ากับ 16.854 - 24.854 mm³/min และอัตราการสึกหรอของอิเล็กโทรด (EWR) เท่ากับ 74.4 - 79.5% สำหรับอิเล็กโทรดทองแดงมีอัตราการขจัดเนื้องาน (MRR) เท่ากับ 6.735 - 10.471 mm³/min และอัตราการสึกหรอของอิเล็กโทรด (EWR) เท่ากับ 150.4 - 157.5% เมื่อใช้กระแสไฟฟ้า 2.5 - 3.5 แอมแปร์ ของทั้งสองชนิดอิเล็กโทรด สำหรับอิเล็กโทรดทองแดงมีอัตราการขจัดเนื้องาน (MRR) สูงสุดเท่ากับ 9.428 mm³/min และอัตราการสึกหรอของอิเล็กโทรด (EWR) เท่ากับ 164.3% ที่กระแสไฟฟ้า 2.5 แอมแปร์ ซึ่งมีค่าค่อนข้างสูงเมื่อเปรียบเทียบกับกระแสไฟฟ้า 3 และ 3.5 แอมแปร์ แสดงดังกราฟรูปที่ 6



รูปที่ 7 อัตราการขจัดเนื้องานและอัตราการสึกหรอ

ของอิเล็กโทรดทองเหลืองสำหรับรอยเชื่อม GMAW



รูปที่ 8 อัตราการขจัดเนื้องานและอัตราการสึกหรอ

ของอิเล็กโทรดทองแดงสำหรับรอยเชื่อม GMAW

รูปที่ 7 กราฟเปรียบเทียบอัตราการขจัดเนื้องานและอัตราการสึกหรอของอิเล็กโทรดทองเหลืองสำหรับรอยเชื่อม GMAW ที่กระแสไฟฟ้า 2.5 - 3.5 แอมแปร์ พบว่ากระแสไฟฟ้า 3 แอมแปร์ มีอัตราการขจัดเนื้องาน (MRR) สูงสุดเท่ากับ 24.854

mm²/min และอัตราการสึกหรอของอิเล็กโทรด (EWR) ต่ำสุดเท่ากับ 74.4% เมื่อปรับกระแสไฟฟ้า 2.5 และ 3.5 แอมแปร์ มีอัตราการกัดเนื้องานต่ำกว่าและอัตราการสึกหรอของอิเล็กโทรดค่อนข้างสูงอย่างชัดเจนเมื่อเปรียบเทียบกับค่ากระแสไฟฟ้า 3 แอมแปร์

สำหรับรอยเชื่อม GMAW ที่ถูกสปาร์คด้วยอิเล็กโทรดทองแดงมีอัตราการกัดเนื้องาน (MRR) สูงสุดเท่ากับ 10.471 mm²/min และอัตราการสึกหรอของอิเล็กโทรด (EWR) 155.4% ที่กระแสไฟฟ้า 2.5 แอมแปร์ เมื่อปรับกระแสไฟฟ้าเพิ่มขึ้นเป็น 3 และ 3.5 แอมแปร์ พบว่าอัตราการกัดเนื้องาน (MRR) มีแนวโน้มลดลงและอัตราการสึกหรอของอิเล็กโทรด (EWR) ลดลงและเพิ่มขึ้นจากเดิมเล็กน้อยแสดงผลการเปรียบเทียบในแต่ละสภาวะดังรูปที่ 8

จากการวิเคราะห์และเปรียบเทียบอัตราการกัดเนื้องาน (MRR) และอัตราการสึกหรอของอิเล็กโทรด (EWR) ของรอยเชื่อมและอิเล็กโทรดทั้ง 2 ประเภท สรุปได้ว่าอัตราการกัดเนื้องาน (MRR) ของรอยเชื่อม SMAW และ GMAW เมื่อใช้อิเล็กโทรดทองเหลืองมีค่าสูงกว่าการใช้อิเล็กโทรดทองแดง และเกิดอัตราการสึกหรอของอิเล็กโทรด (EWR) มีค่าต่ำกว่าทุกสภาวะการปรับค่ากระแสไฟฟ้า เนื่องจากคุณสมบัติของอิเล็กโทรดที่ใช้ในการทดลองทั้ง 2 ประเภท มีความแตกต่างกัน เช่น ค่าความต้านทานไฟฟ้า ความแข็ง ส่วนผสมทางเคมี และปัจจัยอื่นๆ ที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการกัดเซาะเนื้อโลหะและการสึกหรอของอิเล็กโทรดที่สามารถบ่งบอกได้ชัดเจนและสอดคล้องกับงานวิจัยของ Hardeep Singh และคณะ [12]

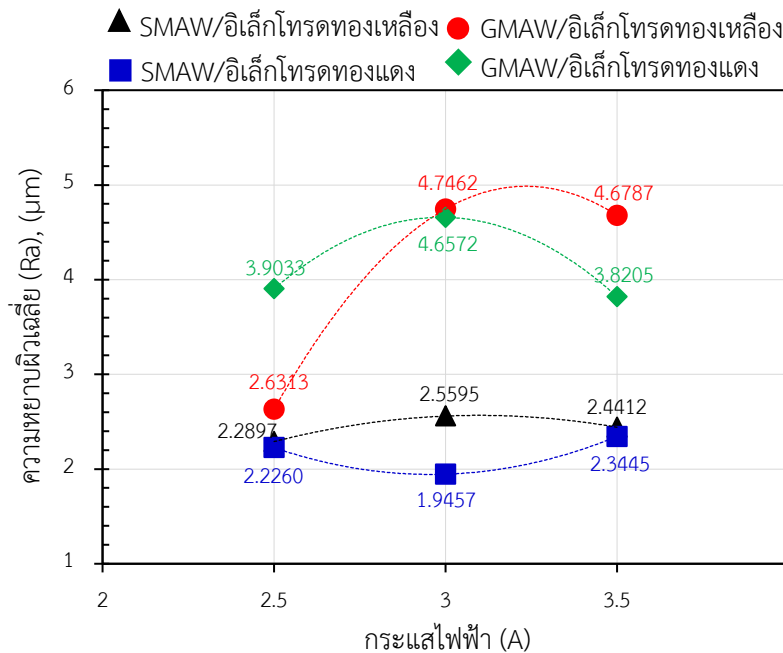
4.2 ผลความหยาบผิวเฉลี่ย (Ra) และขนาดของรูเจาะเข้า-ออก

ผลการประเมินค่าความหยาบผิวเฉลี่ย (Ra) ของผนังรูเจาะรอยเชื่อม SMAW จากการสปาร์คด้วยอิเล็กโทรดทองเหลืองและทองแดงเมื่อปรับค่ากระแสไฟฟ้า 2.5 - 3.5 แอมแปร์ มีค่าความหยาบผิวเฉลี่ยประมาณ 2.2897 - 2.5595 μm และ 1.9457 - 2.3445 μm สำหรับรอยเชื่อม GMAW ที่ถูกเจาะรูด้วยอิเล็กโทรดทองเหลืองและทองแดงที่กระแสไฟฟ้า 2.5 - 3.5 แอมแปร์ มีค่าความหยาบผิวเฉลี่ยประมาณ 2.6313 - 4.7462 μm และ 3.8205 - 4.6572 μm ดังตารางที่ 5

ตารางที่ 5 ความหยาบผิวเฉลี่ย (Ra) ของผนังรูเจาะรอยเชื่อมด้วยอิเล็กโทรดทองเหลืองและทองแดง

กระแสไฟฟ้า (A)	ความหยาบผิวเฉลี่ย (Ra), (μm)			
	รอยเชื่อม SMAW/ อิเล็กโทรดทองเหลือง	รอยเชื่อม SMAW/ อิเล็กโทรดทองแดง	รอยเชื่อม GMAW / อิเล็กโทรดทองเหลือง	รอยเชื่อม GMAW / อิเล็กโทรดทองแดง
2.5	2.2897	2.226	2.6313	3.9033
3	2.5595	1.9457	4.7462	4.6572
3.5	2.4412	2.3445	4.6787	3.8205

รูปที่ 9 กราฟแสดงการเปรียบเทียบความหยาบผิวเฉลี่ย (Ra) จากการเจาะรูชิ้นงานทดสอบรอยเชื่อม SMAW และ GMAW ด้วยอิเล็กโทรดและการปรับกระแสไฟฟ้าที่แตกต่างกัน พบว่ารอยเชื่อม SMAW ที่ถูกเจาะรูด้วยอิเล็กโทรดทองแดงมีแนวโน้มความหยาบผิวเฉลี่ย (Ra) ค่อนข้างน้อยเมื่อใช้กระแสไฟฟ้า 2.5, 3 และ 3.5 แอมแปร์ ตามลำดับ ซึ่งมีค่าต่ำสุดเท่ากับ 1.9457 μm ที่กระแสไฟฟ้า 3 แอมแปร์ เมื่อเปรียบเทียบกับรอยเชื่อม GMAW ที่ถูกเจาะด้วยอิเล็กโทรดทองเหลืองที่กระแสไฟฟ้า 2.5 แอมแปร์ พบว่าค่าความหยาบผิวเฉลี่ย (Ra) มีค่าต่ำสุดเท่ากับ 2.6313 μm นั้นแสดงให้เห็นว่าความหยาบผิวเฉลี่ย (Ra) ของผนังรูเจาะที่มีค่าค่อนข้างน้อยได้รับผลกระทบจากอัตราการกัดเนื้องาน (MRR) และอัตราการสึกหรอของอิเล็กโทรด (EWR) ที่ค่อนข้างต่ำจากอิทธิพลหรือความรุนแรงของกระแสไฟฟ้าที่เหมาะสมและสอดคล้องกับคุณสมบัติทางไฟฟ้าของอิเล็กโทรดแต่ละชนิดที่ถูกนำมาทดลอง

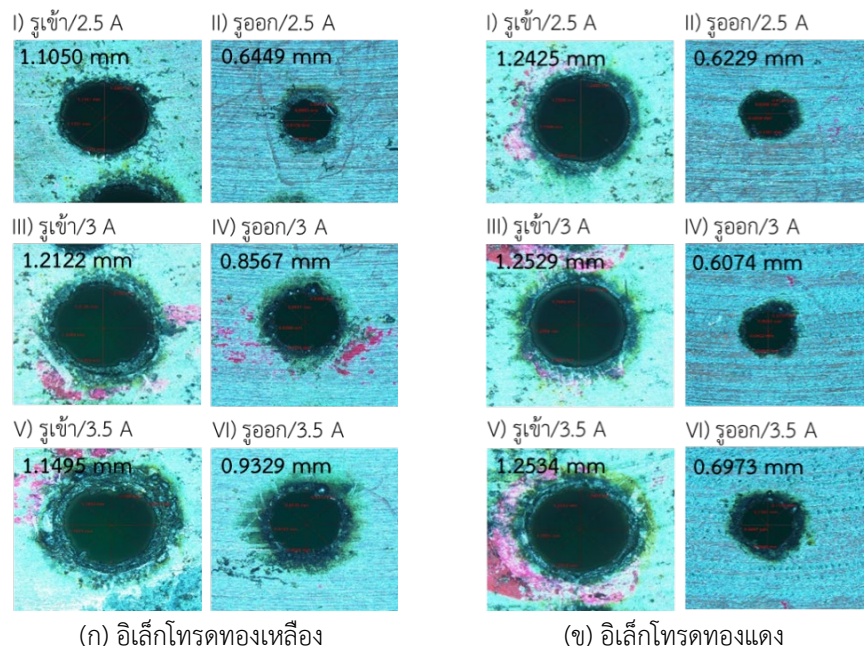


รูปที่ 9 ความหยาบผิวเฉลี่ย (Ra) ของผนังรูเจาะด้วยอิเล็กโทรดทองเหลืองและทองแดงในกระแสไฟฟ้าที่แตกต่างกัน

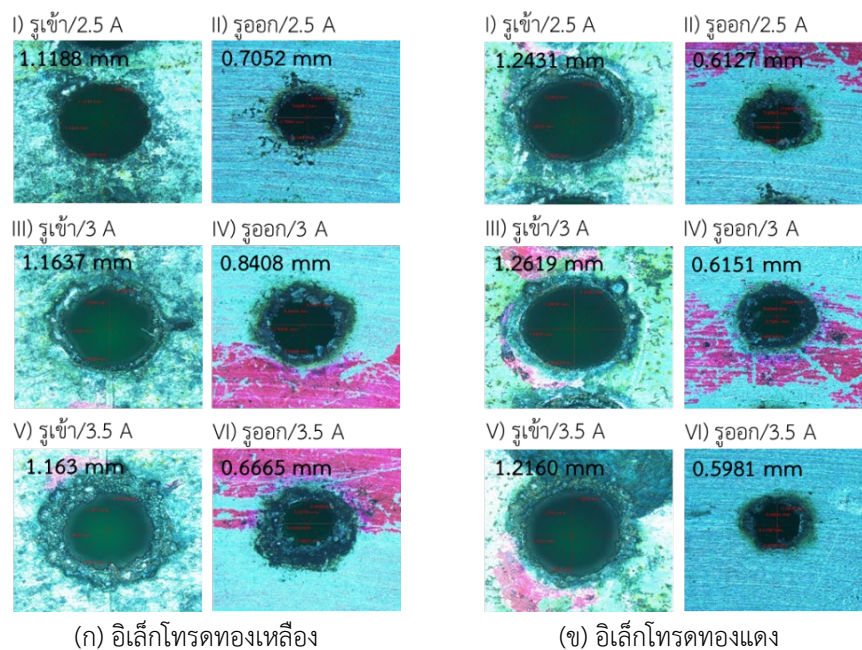
รูเจาะของชิ้นงานทดสอบถูกวัดขนาดบริเวณด้านบน (รูเข้า) และด้านล่าง (รูออก) เพื่อวิเคราะห์ลักษณะของรูเจาะที่ได้รับอิทธิพลจากปัจจัยหลักที่กำหนด ได้แก่ รอยเชื่อม อิเล็กโทรด และกระแสไฟฟ้า สำหรับวัสดุเหล็กกล้าเครื่องมือเกรด JIS SKD61 จากการเจาะด้วยกระบวนการกัดเซาะด้วยไฟฟ้าแสดงขนาดรูเจาะเข้าและออกของรอยเชื่อมดังตารางที่ 6 พบว่ารูเข้ามีขนาดมากกว่า 1 มม. ซึ่งเป็นขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางอิเล็กโทรดที่ใช้ในการทดลองและมีขนาดรูออกค่อนข้างเล็กกว่าขนาดของรูเข้าทุกเงื่อนไขการทดลอง แสดงลักษณะรูเจาะเข้าและออกของรอยเชื่อม SMAW และ GMAW ดังรูปที่ 10 และรูปที่ 11

ตารางที่ 6 ขนาดรูเจาะเข้าและออกของรอยเชื่อมด้วยอิเล็กโทรดทองเหลืองและทองแดง

กระแสไฟฟ้า (A)	ขนาดรูเจาะ (mm)							
	รอยเชื่อม SMAW				รอยเชื่อม GMAW			
	อิเล็กโทรดทองเหลือง		อิเล็กโทรดทองแดง		อิเล็กโทรดทองเหลือง		อิเล็กโทรดทองแดง	
	รูเข้า	รูออก	รูเข้า	รูออก	รูเข้า	รูออก	รูเข้า	รูออก
2.5	1.1050	0.6449	1.2425	0.6229	1.1188	0.7052	1.2431	0.6127
3	1.2122	0.8567	1.2529	0.6074	1.1637	0.8408	1.2619	0.6151
3.5	1.1495	0.9329	1.2534	0.6973	1.163	0.6665	1.2160	0.5981



รูปที่ 10 ลักษณะรูเจาะเข้าและออกของรอยเชื่อม SMAW



รูปที่ 11 ลักษณะรูเจาะเข้าและออกของรอยเชื่อม GMAW

รูปที่ 10 (ก) แสดงลักษณะรูเจาะเข้าและออกของรอยเชื่อม SMAW โดยการใช้อิเล็กโทรดทองเหลืองและทองแดงที่ถูกปรับค่ากระแสไฟฟ้า 2.5 - 3.5 แอมแปร์ พบว่ารูเจาะเข้ามีขนาด 1.1050 - 1.2122 มม. และขนาดรูออกมีค่าเท่ากับ 0.6449 - 0.9323 มม. ซึ่งมีขนาดใกล้เคียงกับรูเจาะของอิเล็กโทรดทองแดงแสดงลักษณะรูเจาะดังรูปที่ 10 (ข) สำหรับรูเจาะเข้าและออกของ

รอยเชื่อม GMAW แสดงดังรูปที่ 11 เมื่อเปรียบเทียบระหว่างอิเล็กโทรดที่ใช้ในการทดลองเดียวกันพบว่าลักษณะรูเจาะเข้าและออกมีความคล้ายกันกับรูเจาะของรอยเชื่อม SMAW ที่มีขนาดรูเข้ามากกว่า 1 มม. ซึ่งมีขนาดเท่ากับ 1.1188 - 1.2619 มม. เนื่องจากความรุนแรงของกระแสไฟฟ้าที่ใช้ในกระบวนการกัดเซาะเนื้องานและช่วงเวลาที่อิเล็กโทรดจะสัมผัสผิวชิ้นงานยาวนานกว่าบริเวณอื่นและมีโอกาสทำให้เกิดสภาวะการสปาร์มากกว่าบริเวณด้านล่างรูเจาะซึ่งมีขนาดค่อนข้างเล็ก สาเหตุจากการสึกหรอในขณะสปาร์บริเวณปลายแท่งอิเล็กโทรดที่มีลักษณะเป็นส่วนโค้งจึงทำให้ขนาดของรูเข้าและออกมีขนาดไม่เท่ากันและรูเจาะมีลักษณะเป็นความเรียว [13,14]

5. สรุป

- 1) รอยเชื่อม SMAW ที่ถูกสปาร์ด้วยอิเล็กโทรดทองเหลือง การปรับค่ากระแสไฟฟ้า 3 แอมแปร์ มีอัตราการขจัดเนื้องานสูงสุด $21.458 \text{ mm}^2/\text{min}$, อัตราการสึกหรอของอิเล็กโทรด 82.1% และรอยเชื่อม GMAW ที่ถูกสปาร์ด้วยอิเล็กโทรดทองเหลือง การปรับค่ากระแสไฟฟ้า 3 แอมแปร์ มีอัตราการขจัดเนื้องานสูงสุด $24.854 \text{ mm}^2/\text{min}$, อัตราการสึกหรอของอิเล็กโทรด 74.4%
- 2) ความหยาบผิวเฉลี่ย (Ra) ต่ำสุดของรอยเชื่อม SMAW ที่ถูกสปาร์ด้วยอิเล็กโทรดทองแดง การปรับค่ากระแสไฟฟ้า 3 แอมแปร์ มีค่า $1.9457 \mu\text{m}$ และรอยเชื่อม GMAW ที่ถูกสปาร์ด้วยอิเล็กโทรดทองแดง การปรับค่ากระแสไฟฟ้า 2.5 แอมแปร์ มีค่า $2.6313 \mu\text{m}$
- 3) รูเจาะของรอยเชื่อม SMAW และ GMAW จากการสปาร์ด้วยอิเล็กโทรดทองเหลืองและทองแดงที่ปรับค่ากระแสไฟฟ้า 2.5, 3 และ 3.5 แอมแปร์ ตามลำดับ มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางรูเข้ามากกว่า 1 มม. และมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางรูออกน้อยกว่า 1 มม. ทุกๆ เงื่อนไขการทดลอง

6. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจาก สถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] B. Thongyindee and S. Danchaivijit, "High Temperature Tensile Properties of Hot-Pressed Inconel 718," *Department of Metallurgical Engineering, Faculty of Engineer, Chulalongkorn University*, 1999.
- [2] Y. Keskin, H. S. Halkaci, and M. Kizil, "An Experimental Study for Determination of The Effects of Machining Parameters on Surface Roughness in Electrical Discharge Machining (EDM)," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 28, no. 11-12, pp. 1118–1121, 2005.
- [3] B. Thomas, "Technology of Electrical Discharge Machining," *Druckerei Helene, 6102, Pfunstste*, pp. 11–53, 1991.
- [4] G. Bissacco, J. Valentincic, H. N. Hansen, and B. D. Wiwe, "Towards the Effective Tool Wear Control in Micro-EDM Milling," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 47, no. 1-4, pp. 3–9, 2009.

- [5] N. Takatsuji, Y. Kakutani, T. Aida, S. Murakami, J. Shinmura, and H. Matsui, “Sliding Characteristics in Hot Working Tool Steel at High Pressure,” *Procedia Engineering*, vol. 81, pp. 1976–1981, 2014.
- [6] S.-S. Shin, S.-K. Lee, D.-K. Kim, and B. Lee, “Enhanced Cooling Channel Efficiency of High-Pressure Die-Casting Molds with Pure Copper Linings in Cooling Channels Via Explosive Bonding,” *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 297, p. 117235, 2021.
- [7] L.-H. Chiu, C.-H. Wu, and H. Chang, “Wear Behavior of Nitrocarburized JIS SKD61 Tool Steel,” *Wear*, vol. 253, no. 7-8, pp. 778–786, 2002.
- [8] Y. Meng, S. Sugiyama, and J. Yanagimoto, “Microstructural Evolution During Rap Process and Deformation Behavior of Semi-Solid SKD61 Tool Steel,” *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 212, no. 8, pp. 1731–1741, 2012.
- [9] F. C. Tsai, B. H. Yan, C. Y. Kuan, and F. Y. Huang, “A Taguchi and Experimental Investigation into The Optimal Processing Conditions for The Abrasive Jet Polishing of SKD61 Mold Steel,” *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 48, no. 7-8, pp. 932–945, 2008.
- [10] K. Jamkamon and et al., “Effects of EDM On Changes in Surface Hardness of AISI P20 Steel,” in *Proceeding of The 29th Conference of Industrial Engineering Network 2011 (IE Network 2011)*, Rajamangala University of Technology Thanyaburi, Thailand, 2011. (in Thai)
- [11] P. Chanmanee and A. Muttara, “Study of Factors Affecting Tungsten Carbide EDM by Taguchi Technique,” in *Proceeding of The 8th Engineering Academic Conference*, Prince of Songkla University, 2010. (in Thai)
- [12] H. Singh, J. Singh, S. Sharma, and J. Singh Chohan, “Parametric Optimization of MRR & TWR of The AL6061/Sic Mmcs Processed During Die-Sinking EDM Using Different Electrodes,” *Materials Today: Proceedings*, vol. 48, pp. 1001–1008, 2022.
- [13] T. T. Öpöz, “Manufacturing of Micro Holes by Using Micro Electric Discharge Machining (Micro-EDM),” thesis, Mechatronics Engineering, Atılım University, Kızılcaşar, Gölbaşı, Turkey, 2008.
- [14] N. Devarani and S. N. Joshi, “Electric Discharge Alloying of Titanium and Aluminium on AISI P20 Mold Steel,” *Surface and Coatings Technology*, vol. 405, p. 126515, 2021.