

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

ทนงศักดิ์ 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 ปิจจัยประสิทธิภาพ และช่องว่างระหว่างอิเล็กโทรด ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนพบว่าตัวแปรทั้ง 4 มีอิทธิพลอย่างมีนัยสำคัญต่อค่าอัตราการขจัดเนื้องาน โดยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่สร้างขึ้นมีความแม่นยำสูงด้วยค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ R^2 เท่ากับ 99.38% จากการวิเคราะห์เพื่อหาค่าที่เหมาะสมที่สุด (Optimization) พบว่าสภาวะที่ให้ค่าอัตราการขจัดเนื้องานสูงสุด คือ กระแสไฟฟ้า 18 A, เวลาเปิด 150 μ s, ปิจจัยประสิทธิภาพ 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 ยังมียังอยู่อย่างจำกัด 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 แต่ละตัวแปรมี 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

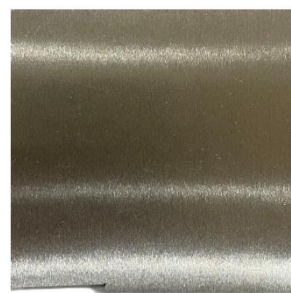
ในงานวิจัยนี้เครื่องกัดเซาะโลหะด้วยไฟฟ้า (Electrical Discharge Machine: EDM) ควบคุมด้วยระบบคอมพิวเตอร์ (CNC) ยี่ห้อ ARISTECH รุ่น Model 430 ถูกนำมาใช้สำหรับการเก็บผลการทดลอง ทั้งนี้ในกระบวนการแปรรูปกำหนดตัวแปรคงที่ประกอบด้วย การใช้อิเล็กโตรดวัสดุทองแดง (Copper) ความบริสุทธิ์ร้อยละ 96 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 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

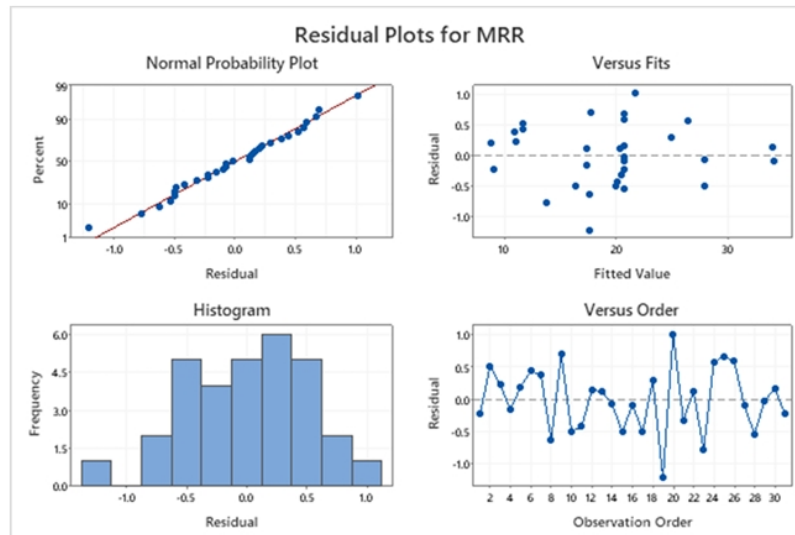
3.1 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

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% ซึ่งมีค่ามากกว่า $\alpha = 0.05$ สรุปได้ว่าข้อมูลที่ได้จากการทดลองมีความเหมาะสมกับแบบจำลองคณิตศาสตร์ที่สร้างขึ้น สามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้จริง

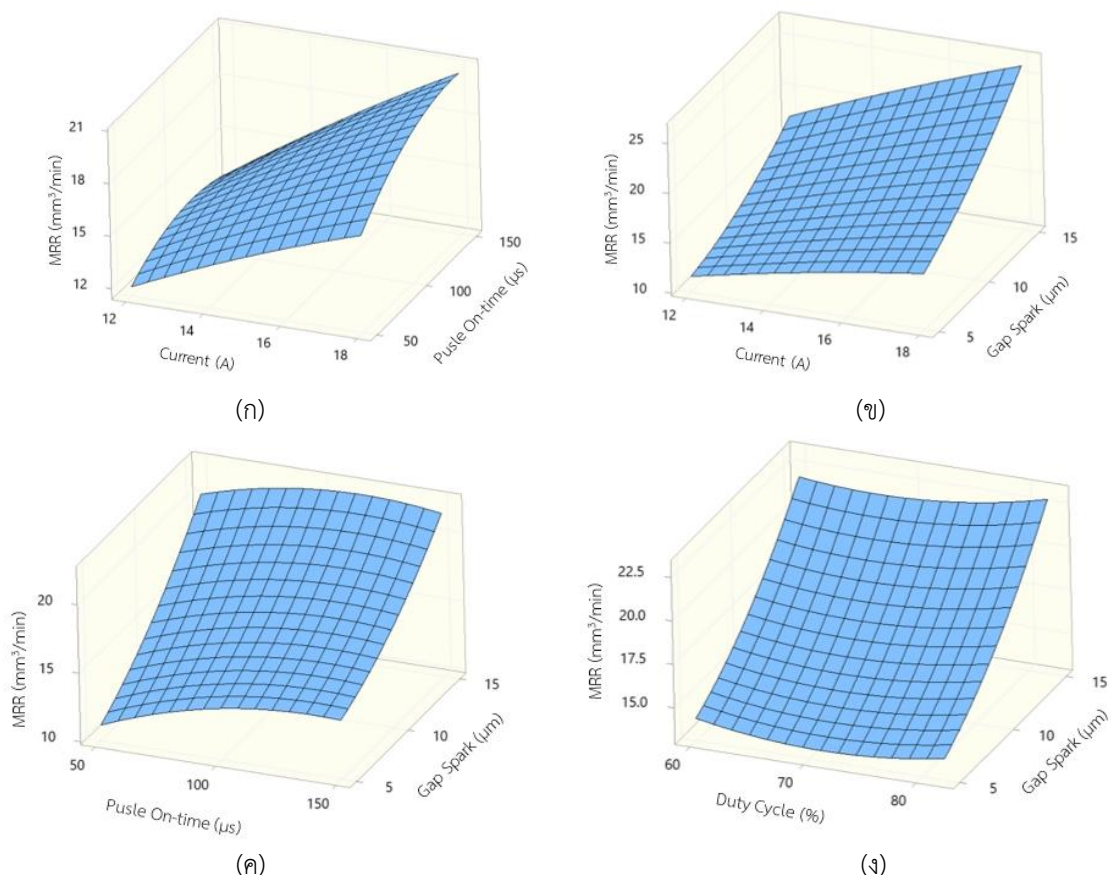
ตารางที่ 3 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance for MRR : ANOVA)

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 ผนวกกับเวลาปล่อยประจุไฟฟ้าที่ยาวนานขึ้นทำให้ได้อัตราการขจัดเนื้องานที่สูงขึ้น ดังรูปที่ 3 (ข) (ค) และ (ง) ซึ่งเป็นผลมาจากการปล่อยกระแสไฟฟ้าที่มีความเข้มข้นสูงทำให้เกิดความร้อนสะสมมากเพียงพอทำให้เกิดการสปาร์คเป็นบริเวณที่กว้าง นอกจากนี้อุณหภูมิโลหะที่หลุดออกมาจำนวนมาก ผนวกกับระยะ Gap Spark ที่สูง (15 μ s) ทำให้สามารถขจัดเนื้องานออกไปได้ในจำนวนมาก [8] นอกจากนี้ระยะ Gap Spark ที่สูงทำให้สารไดอิเล็กตริกพัดพาอนุภาคออกจากบริเวณสปาร์คได้มากขึ้นเช่นเดียวกัน ทั้งนี้เมื่อมีการปล่อยประจุกระแสไฟฟ้าเป็นเวลานานจะเกิดการหลอมละลายและเย็นตัวกับมาใหม่ของผิวชิ้นงาน ซึ่งเรียกกระบวนการนี้ว่าการเกิด Recast Layer บนผิวชิ้นงาน [9] การที่อุณหภูมิหลงเหลืออยู่จำนวนมากและระยะเวลาการปล่อยกระแสไฟฟ้าที่ยาวนาน จนความร้อนสะสมเพียงพอที่จะเกิดการหลอมละลายและเย็นตัวใหม่ หรือเกิดการสปาร์คติดกับชิ้นงานอีกครั้งทำให้เวลาในการสปาร์คนานขึ้นส่งผลให้อัตราการขจัดเนื้องานลดต่ำลง [10] ดังรูปที่ 3 (ก) และ (ค) จากการศึกษาพื้นผิวตอบสนองแสดงผลกระทบร่วมที่มีต่ออัตราการขจัดเนื้องาน แสดงให้เห็นว่าค่าอัตราการขจัดเนื้องานสูงสุดสามารถได้จากการปรับค่าพารามิเตอร์ กระแสไฟฟ้า 18 A เวลาเปิด 150 μ s ระยะห่างระหว่างชิ้นงานกับอิเล็กโตรด 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 % และช่องว่างระหว่างอิเล็กโตรดกับชิ้นงาน (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.