

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

ภูเมศวร์ แสงระยับ^{1*} ประสาน แสงเชียว² ทวี หมดสี³ นิวัฒน์ มูเก็ม⁴

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

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์ วิทยาเขตวังไกลกังวล

อำเภอหัวหิน จังหวัดประจวบคีรีขันธ์ 77110

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

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

Rajamangala University of Technology Rattanakosin, Wang Klai Kangwon Campus,

Hua Hin, Prachuap Khiri Khan, 77110

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

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

บทคัดย่อ

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

คำสำคัญ: การเจาะรูในระดับไมโคร, พารามิเตอร์ที่เหมาะสม, เหล็กกล้าไร้สนิม 316L

Abstract

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

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

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

1. บทนำ

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

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

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

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

2. วิธีการดำเนินงานวิจัย

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

ตารางที่ 1 สมบัติของอิเล็กโทรด [17]

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

2.1 การออกแบบการทดลอง

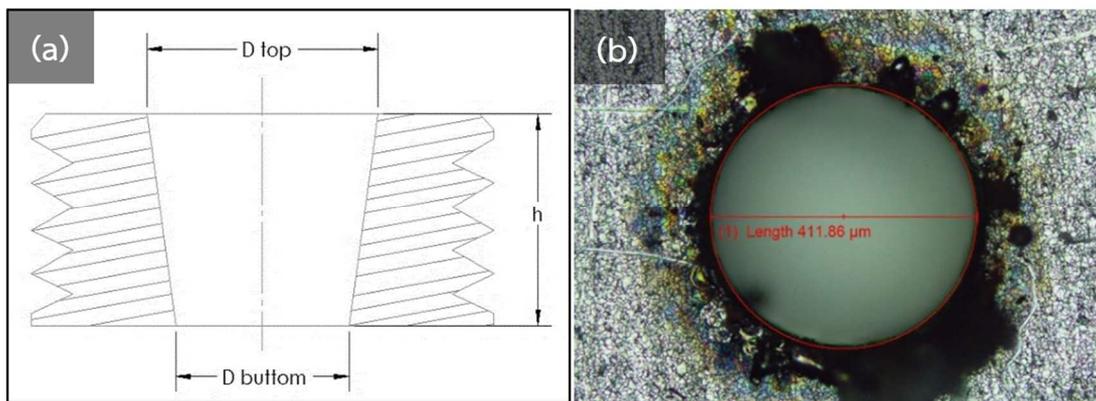
สำหรับการออกแบบการทดลอง เนื่องจากกระบวนการเจาะรูโลหะด้วยการปล่อยประจุไฟฟ้ามีตัวแปรในการดำเนินงานหลายตัวแปร กรณีการทดลองมีวัสดุและงบประมาณที่จำกัด ไม่สามารถศึกษาตัวแปรที่เหมาะสมสำหรับทุกตัวแปรได้ ดังนั้นจึงต้องมีวิธีการการคัดกรองตัวแปรที่มีผลต่อการเจาะรูด้วยเครื่องเจาะโลหะด้วยการปล่อยประจุไฟฟ้า โดยออกแบบการทดลองด้วย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

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

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

2.2 การศึกษาคุณภาพของรูเจาะ

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



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

2.2.1 การวัดระยะเจาะเกินของขนาดรู (Overcut: DOC)

การบันทึกค่าระยะเจาะเกินของขนาดรู ดำเนินการโดยใช้กล้องจุลทรรศน์แบบส่องแสงด้วยกำลังขยาย 100 เท่า วัดขนาดรูเจาะด้านบน และนำมาคำนวณหาค่า DOC ได้ดังสมการที่ 1

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

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

2.2.2 การวัดความเรียวของรูเจาะ (Taper angle: TR)

การบันทึกค่าความเรียวของรูเจาะ ดำเนินงานโดยใช้กล้องจุลทรรศน์แบบส่องแสงด้วยกำลังขยาย 100 เท่า วัดขนาดรูเจาะด้านบนและรูด้านล่าง และนำมาคำนวณหาค่า TR ได้จากสมการที่ 2

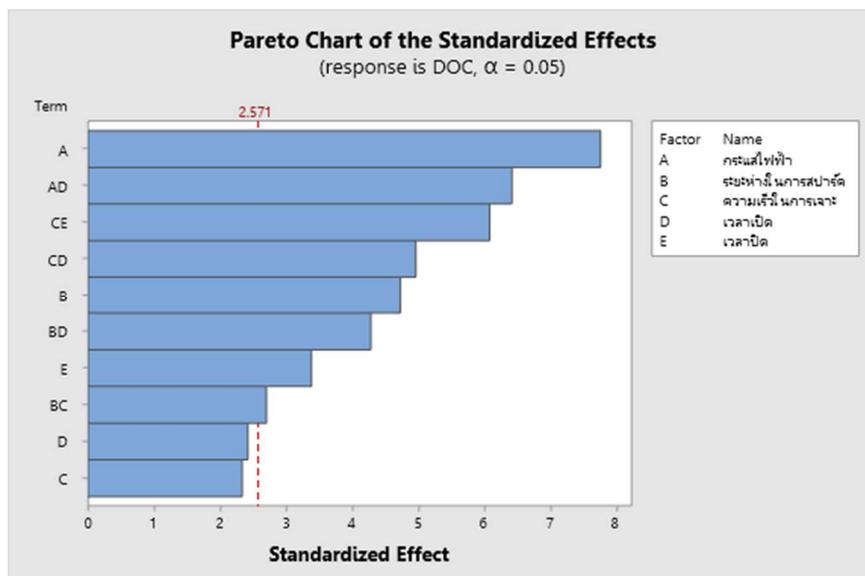
$$\text{ความเริ้วของรูเจาะ TR (deg.)} = \tan^{-1} \left(\frac{D_{\text{top}} - D_{\text{bottom}}}{(2) \times (h)} \right) \quad (2)$$

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

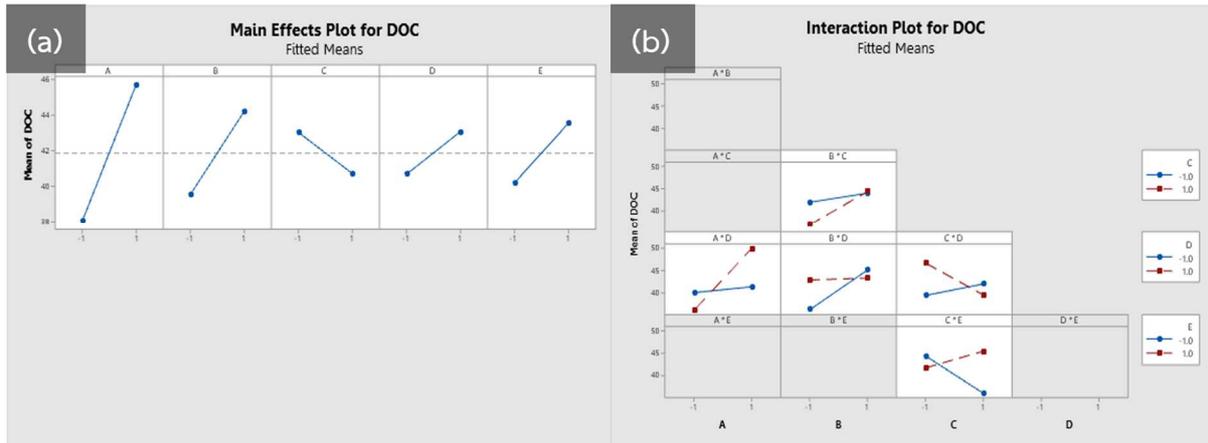
หลังจากที่ทราบอิทธิพลของตัวแปรที่มีผลต่อระยะเจาะเกินของขนาดรูเจาะแล้ว นำตัวแปรที่มีผลสามอันดับแรก (Coef.) มาหาเงื่อนไขที่เหมาะสมด้วยการออกแบบการทดลอง Box Behnken Design ต่อไป

3. ผลการวิจัย

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



รูปที่ 2 Pareto chart สำหรับสัมประสิทธิ์ของตัวแปรที่ส่งผลต่อ DOC



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

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

3.1 การหาพารามิเตอร์ที่เหมาะสม

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

ตารางที่ 3 ตัวแปรและระดับในการทดลอง Bok Behnken Design

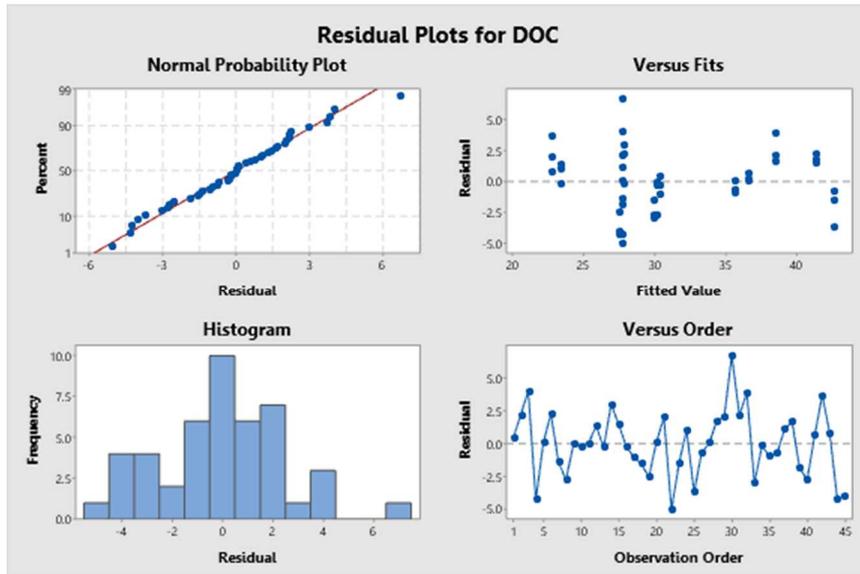
ลำดับ	ตัวแปร	ระดับ		
		ต่ำ (-1)	กลาง (0)	สูง (1)
1	A: กระแสไฟฟ้า (steps)	1	2	3
2	B: ระยะห่างในการสปาร์ค (steps)	4	5	6
3	C: เวลาเปิด (steps)	1	2	3

3.1.1 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติสำหรับ DOC

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

ตารางที่ 4 สัมประสิทธิ์ของตัวแปรสำหรับ DOC

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

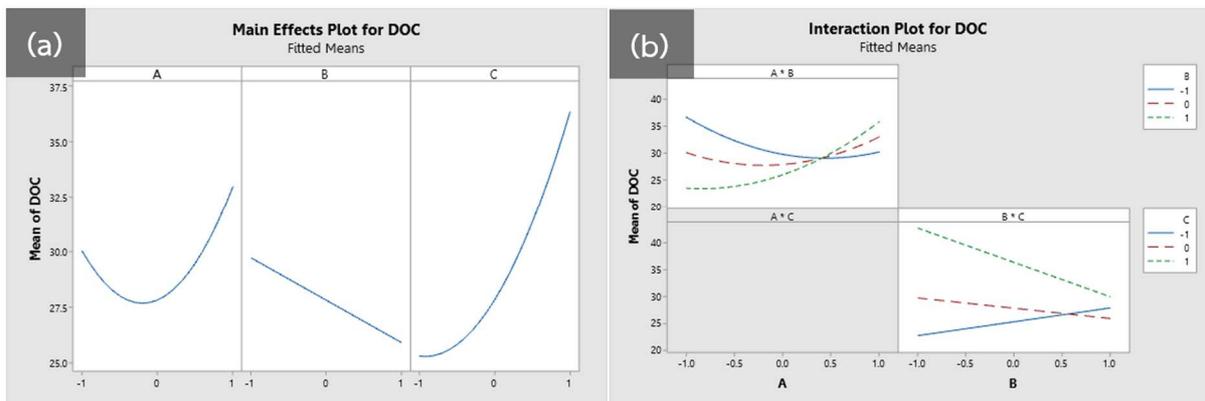


รูปที่ 4 กราฟแสดงส่วนตกค้างจากการทดลองสำหรับ DOC

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

$$Y_{DOC} = 27.821 + 1.458 A - 1.901 B + 5.514 C + 3.679 A^2 + 2.992 C^2 + 4.703 A^2B - 4.468 B^2C \quad (3)$$

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



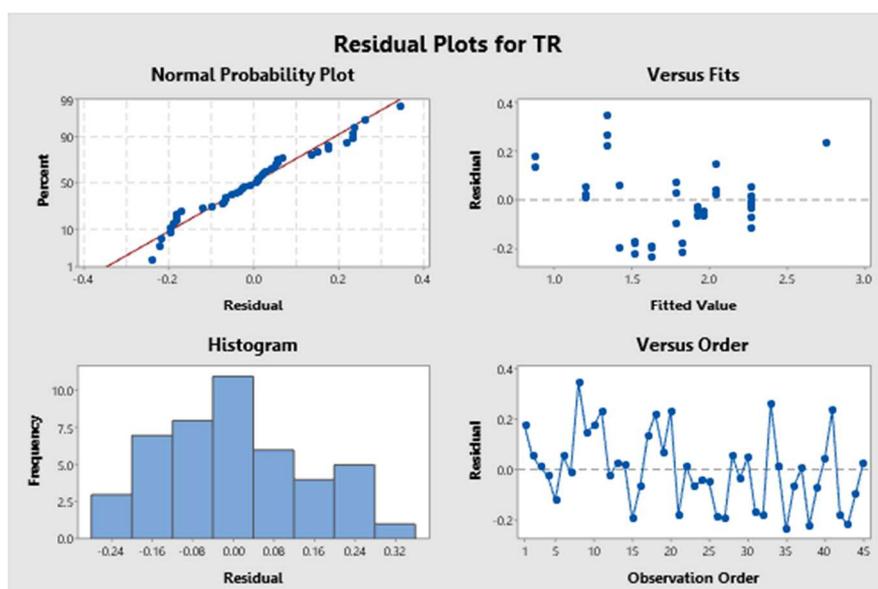
รูปที่ 5 (a) Main effects plot และ (b) Interaction plot สำหรับ DOC

3.1.2 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติสำหรับ TR

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

ตารางที่ 5 สัมประสิทธิ์ของตัวแปรสำหรับ TR

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

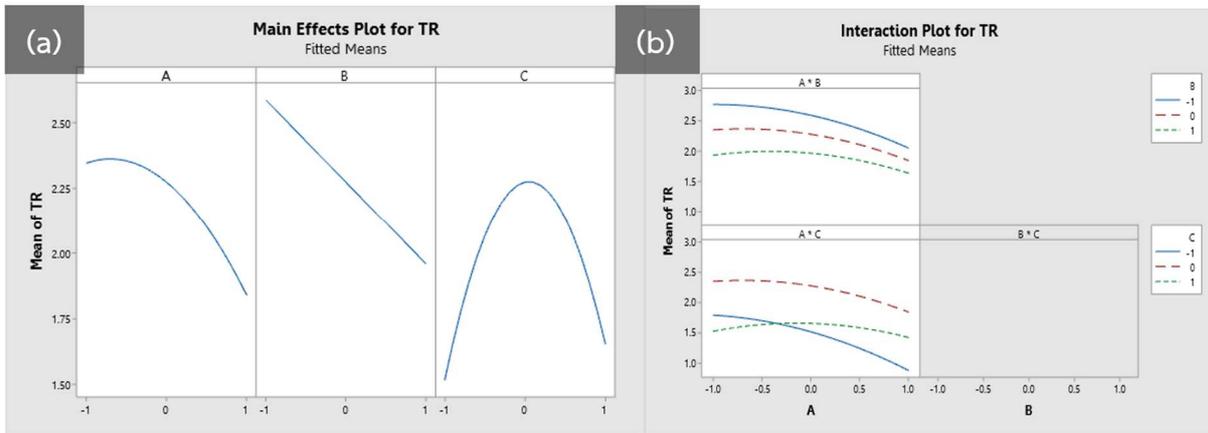


รูปที่ 6 กราฟแสดงส่วนตกค้างจากการทดลองสำหรับ TR

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

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

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



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

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

ตารางที่ 6 เป้าหมายของผลตอบสนอง

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

ตารางที่ 7 ผลการทำนายค่าที่เหมาะสมสำหรับ DOC และ TR

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

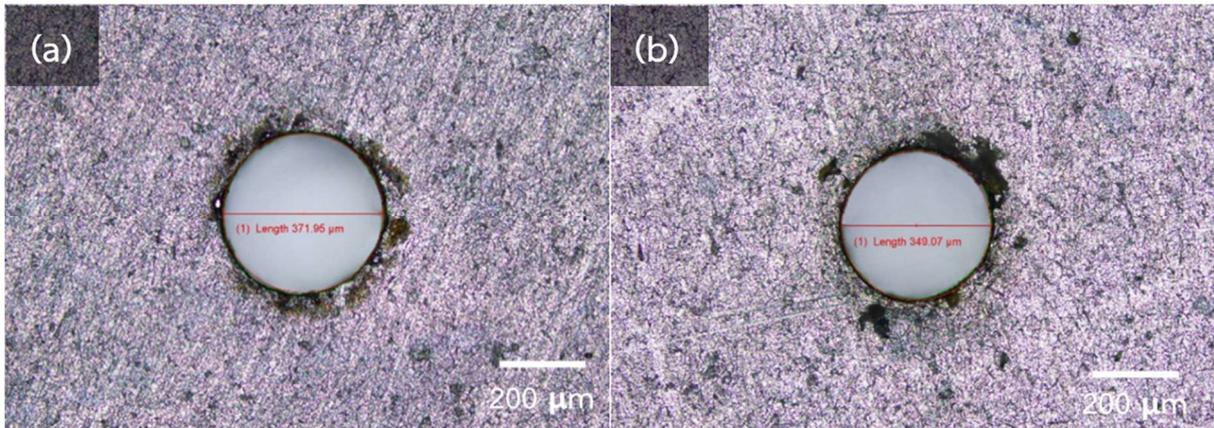
3.1.3 การทดลองเพื่อยืนยันผลการทำนาย

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

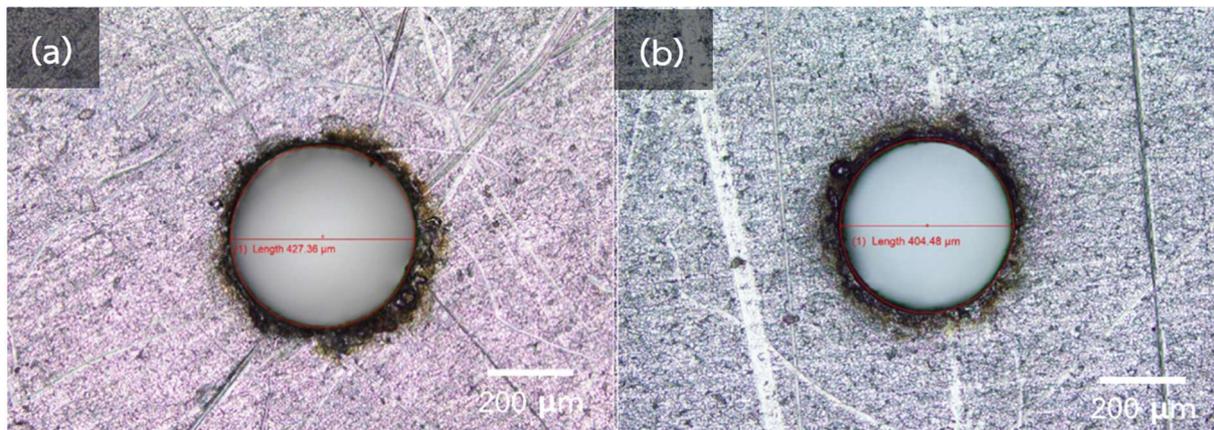
ตารางที่ 8 การทดสอบเพื่อยืนยันผลจากการทำนาย

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

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



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



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

4. สรุป

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

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

5. กิติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์ และศูนย์บริการวิชาการด้านการผลิตและการทดสอบ สำหรับอุตสาหกรรมสำหรับการสนับสนุนเครื่องมือและอุปกรณ์ในการวิจัยนี้

6. ข้อเสนอแนะ

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

7. เอกสารอ้างอิง

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

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