

การหาค่าที่เหมาะสมของตัวแปรในการตัดแผ่นอลูมิเนียมเกรด

EN AW-6061 T6 ด้วย Nd-YAG เลเซอร์

Optimization of Nd-YAG Laser Cutting Variables for

EN AW-6061 T6 Aluminium Plate

จรัญ บัวชุม วรรณชัย กัลยาศิริ

ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อหาค่าที่เหมาะสมของตัวแปรในการตัดแผ่นอลูมิเนียม EN AW-6061 T6 ด้วย Nd-YAG เลเซอร์ เพื่อให้ได้ค่าความหยาบผิวของรอยตัดที่น้อยที่สุด โดยใช้วิธีการออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียล 2^k สำหรับตัวแปรที่ทำการศึกษาคือ กำลังในการตัด ความเร็วในการตัด ความถี่ในการปล่อยเลเซอร์ และระยะห่างของหัวเลเซอร์จนถึงชิ้นงาน จากการศึกษาพบว่า ตัวแปรทั้งหมดที่ได้กล่าวมามีอิทธิพลต่อความหยาบผิวของรอยตัด และค่าที่เหมาะสมของตัวแปรในระบบการตัดนี้ คือ กำลังในการตัดเท่ากับ 3000 W ความเร็วในการตัดเท่ากับ 1.4 m/min ความถี่ในการปล่อยเลเซอร์เท่ากับ 20000 Hz และระยะห่างระหว่างหัวเลเซอร์จนถึงชิ้นงานเท่ากับ 0.5 mm. และจากการทดลองเพื่อยืนยันค่าที่เหมาะสมพบว่า ได้ค่าความหยาบผิวเท่ากับ $1.86 \mu\text{m}$ ซึ่งผ่านเกณฑ์การยอมรับของลูกค้า

คำสำคัญ : การตัดด้วยเลเซอร์, โลหะผสมอลูมิเนียม, การออกแบบการทดลอง, ชิ้นส่วนยานยนต์และอากาศยาน

Abstract

The objective of this research was to optimize Nd-YAG laser cutting condition for EN AW-6061 aluminum to minimize surface roughness. A 2^k factorial design was employed to study on the effects of cutting variables, including laser power, cutting speed, frequency and nozzle distance. Results showed that all of these cutting variables significantly affect surface roughness of the specimen and the optimal cutting condition was laser power of 3000 W, cutting speed of 1.4 mm/min, frequency of 2000 Hz and nozzle distance of 0.5 mm. The confirmation test was conducted and provided the surface roughness of $1.86 \mu\text{m}$ which passed the customer requirement.

Key words: Laser cutting, Aluminium alloys, Design of experiments, Automotive and aerospace parts

1. บทนำ

อลูมิเนียมเกรด EN AW-6061 T6 ได้ถูกนำมาใช้ในอุตสาหกรรมการผลิตชิ้นส่วนยานยนต์ และชิ้นส่วนอากาศยาน เนื่องจากมีความต้านทานแรงดึงสูง ด้านทานการกัดกร่อนได้ดี มีน้ำหนักเบา และสามารถตัดเฉือนขึ้นรูปได้ง่าย [1] ในปัจจุบันวิธีการตัดด้วยเลเซอร์เป็นที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมการผลิตชิ้นส่วนยานยนต์ และอากาศยาน เนื่องจากการตัดด้วยเลเซอร์มีพลังงานสูง สามารถตัดวัสดุได้อย่างรวดเร็ว มีความเที่ยงตรง สามารถตัดรูปทรงที่ซับซ้อนได้ดี และวัสดุที่ผ่านการตัดได้รับผลกระทบจากความร้อนน้อย [2] อย่างไรก็ตามในการตัดอลูมิเนียมกับเลเซอร์นั้นมีความยากที่จะทำให้ได้ลักษณะทางคุณภาพที่ดี เช่น ความหยาบผิว ครีบ ความลาดชันของขอบตัด และขนาดของชิ้นงาน เนื่องจากอลูมิเนียมนำความร้อนได้ดี มีจุดหลอมเหลวต่ำ และสะท้อนแสงได้ดี [3] การใช้เลเซอร์ชนิด Nd-YAG แบบพัลส์ตัดวัสดุอลูมิเนียมผสมอลูมิเนียมอัลลอยด์ ที่มีความหนา 4 มม. เพื่อศึกษาอิทธิพลของกำลังแสงเลเซอร์ ความเร็วในการตัด แรงดันแก๊ส และความถี่ในการปล่อยเลเซอร์ ที่ส่งผลต่อ Heat Affected Zone (HAZ) พบว่าความถี่ในการปล่อยเลเซอร์ ความเร็วในการตัด กำลังในการตัด และความเร็วในการตัดเป็นตัวแปรที่มีความสำคัญต่อความกว้างของ HAZ อย่างมีนัยสำคัญ [4] โดยการตัดด้วยเลเซอร์ชนิด CO₂ กับเหล็กกล้า 4130 พบว่า ความกว้างของ HAZ จะลดลง เมื่อกำลังในการตัดลดลง และความเร็วในการตัดเพิ่มขึ้น [5] นอกจากนี้พบว่า การเพิ่มขึ้นของความถี่ในการปล่อยเลเซอร์ และความเร็วในการตัด ทำให้ความกว้างของรอยตัด (Kerf Width) ความลาดชันของขอบตัด (Kerf Taper) และความเบี่ยงเบนของความกว้างหลังจากการตัด (Kerf Deviation) ดีขึ้น [6] ในกระบวนการตัดด้วยเลเซอร์ชนิด CO₂ กับเหล็กกล้าเครื่องมือ AISI H13 พบว่าความเร็วในการเพิ่มขึ้นซึ่งทำให้ความหยาบผิวของรอยตัดลดลง [7] โดยมีการหาค่าที่เหมาะสมของการตัดด้วยเลเซอร์ Nd-YAG แบบพัลส์กับแผ่นอลูมิเนียม Al 8011 พบว่าความเร็วในการตัด เป็นปัจจัยที่สำคัญที่สุดสำหรับความลาดชันของขอบตัด และอัตราการกำจัดเนื้อวัสดุ [8] จากการศึกษาตัว

แปรในการตัดกับโลหะแผ่น 4130 ด้วยเลเซอร์ชนิด CO₂ โดยมีตัวแปรในการตัด คือ กำลังในการตัด ความเร็วในการตัด ความถี่ในการปล่อยแสง และแรงดันแก๊ส พบว่า เมื่อเพิ่มกำลังในการตัด และความเร็วในการตัดทำให้ได้ค่าความหยาบผิวของรอยตัดเพิ่มขึ้น [9] และยังได้มีการศึกษาตัวแปรในการตัดกับเหล็กกล้า 1020 ด้วยเลเซอร์ชนิด CO₂ โดยมีตัวแปรที่ทำการศึกษา คือ กำลังในการตัด ความเร็วในการตัด ระยะห่างจากหัวเลเซอร์จนถึงชิ้นงาน และแรงดันแก๊สพบว่า เมื่อเพิ่มแรงดันแก๊ส และความเร็วในการตัด ทำให้ความหยาบผิวของรอยตัดลดลง [10] ซึ่งจากงานวิจัยในอดีตพบว่า ผลกระทบของตัวแปรในการตัดด้วยเลเซอร์ที่มีต่อการตัดวัสดุแต่ละชนิดยังมีความแตกต่างกัน

ดังนั้นงานวิจัยนี้จะทำการหาค่าที่เหมาะสมของตัวแปรในการตัดแผ่นอลูมิเนียม EN AW-6061 T6 ด้วยเลเซอร์ Nd-YAG เพื่อให้ได้ค่าความหยาบผิวของรอยตัดที่น้อยที่สุด โดยมีตัวแปรที่จะทำการศึกษา คือ กำลังในการตัด ความเร็วในการตัด ความถี่ในการปล่อยเลเซอร์ และระยะห่างของหัวเลเซอร์จนถึงชิ้นงาน

2. วิธีการดำเนินงานวิจัย

2.1 การออกแบบการทดลอง

ในงานวิจัยนี้ได้ใช้การออกแบบการทดลองแบบ 2^k แฟกทอเรียล (2^k Factorial Design) ในการหาค่าที่เหมาะสมของตัวแปรเพื่อให้ได้ค่าความหยาบผิว (Surface Roughness) ที่น้อยที่สุด และเพิ่มค่ากลางของตัวแปร (Addition of Centre Points) เพื่อตรวจสอบหาความเป็นส่วนโค้ง (Curvature) คือ สมการกำลังสองของการออกแบบระดับของตัวแปร เพื่อยืนยันการเป็นพื้นที่ที่ดีที่สุดของการออกแบบโดยสมการผลตอบสนอง สามารถอธิบายได้ตามสมการที่ 1 [11]

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{i < j} \beta_{ij} x_i x_j + \sum_{j=1}^k \beta_{jj} x_j^2 + \varepsilon \quad (1)$$

โดยที่

y คือ ผลตอบสนอง

β_0 คือ ค่าเฉลี่ยของอิทธิพลของผลตอบทั้งหมด

β_{ij} คือ ค่าอิทธิพลของตัวแปร

β_{jj} คือ ค่าอิทธิพลกำลังสองของตัวแปร

x_i, x_j คือ ตัวแปรที่ใช้ในการออกแบบ (i, j)

ε คือ ค่าความคลาดเคลื่อนของส่วนตกค้าง

สำหรับตัวแปรที่ทำการศึกษาในงานวิจัยนี้ ได้แก่ กำลังในการตัด (A) ความเร็วในการตัด (B) ความถี่ในการปล่อยเลเซอร์ (C) และระยะห่างของหัวเลเซอร์จนถึงชิ้นงาน (D) ซึ่งระดับของตัวแปรจะแบ่งเป็นสองระดับดังแสดงในตารางที่ 1 ทำการทดลอง 1 ครั้ง (Single Replicate) จำนวน 16 การทดลอง และทำการทดลองที่ค่ากลางของระดับของตัวแปร คือ กำลังในการตัดเท่ากับ 3500 W ความเร็วในการตัดเท่ากับ 0.78 m/min ความถี่ในการปล่อยเลเซอร์เท่ากับ 17500 Hz และระยะห่างของหัวเลเซอร์จนถึงชิ้นงานเท่ากับ 1.0 mm. จำนวน 5 การทดลอง รวมการทดลองทั้งหมด 21 การทดลอง

ตารางที่ 1 ตัวแปรและระดับของตัวแปร

ตัวแปร (หน่วย)	ค่าต่ำสุด	ค่าสูงสุด
กำลัง (W)	3000	4000
ความเร็ว (m/min)	0.15	1.40
ความถี่ (Hz)	15000	20000
ระยะห่างของหัวเลเซอร์ (mm.)	0.5	1.5

2.2 วัสดุและอุปกรณ์ในการทดลอง

วัสดุที่ใช้สำหรับการทดลองนี้ คือ แผ่นอลูมิเนียมเกรด EN-AW 6061 T6 ซึ่งเป็นอลูมิเนียมที่มีส่วนผสมของแมกนีเซียม และซิลิกอน ในปริมาณค่อนข้างสูง มีคุณสมบัติต้านทานการกัดกร่อนได้ดี สามารถนำความร้อนได้ดี และมีน้ำหนักเบา นิยมใช้ทำชิ้นส่วนยานยนต์และอากาศยาน ชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ และชิ้นส่วนหุ่นยนต์อุตสาหกรรม [1] โดยมีส่วนผสมทางเคมีดังแสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ส่วนผสมทางเคมีของวัสดุที่ใช้สำหรับการทดลอง [1]

Element	Mg	Si	Fe	Cu	Cr	Zn	Mn	Ti	Al
%Wt	1.2	0.8	0.7	0.4	0.35	0.25	0.15	0.15	96

ชิ้นงานในการทดลองมีขนาด (กว้าง x ยาว x หนา) 30 x 30 x 3 mm. โดยจะทำการตัดด้วยเครื่องตัดเลเซอร์แบบ Neodymium YAG Laser System รุ่น TurLaser 3030 fiber ผลิตโดยบริษัท TRUMPF ประเทศเยอรมนี สำหรับเครื่องวัดความหยาบผิวของรอยตัดด้วยเลเซอร์ คือ Surface Roughness Testing รุ่น SR400 ผลิตโดยบริษัท Starrett ประเทศสหรัฐอเมริกา แบบเข็มหัวเพชรเส้นผ่านศูนย์กลาง 4 μ m (Stylus Type) โดยใช้ Cut-off Length และ Scan Length เท่ากับ 2.5 และ 20.0 mm. ตามลำดับ โดยค่าความหยาบผิวที่ศึกษาในงานวิจัยนี้ คือ ค่าความหยาบผิวเฉลี่ย (Roughness Average : Ra)

3. ผลการทดลอง และการอภิปรายผล

จากการทดลองตัดชิ้นงานด้วยเลเซอร์ที่ได้ทำการออกแบบการทดลอง จำนวนทั้งหมด 21 ชิ้น และทำการวัดความหยาบผิวของชิ้นงานบริเวณด้านข้าง ซึ่งถูกตัดด้วยเลเซอร์ และนำข้อมูลที่ได้จากการวัดมาทำการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม MINITAB 18 โดยใช้ระดับนัยสำคัญ $\alpha = 0.05$ จากผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่าความหยาบผิว ดังแสดงในตารางที่ 3 พบว่า ตัวแปรหลัก คือ กำลังในการตัด (A) ความเร็วในการตัด (B) ความถี่ในการปล่อยเลเซอร์ (C) และระยะห่างของหัวเลเซอร์จนถึงชิ้นงาน (D) มีค่า p-value เท่ากับ 0.008, 0.017, 0.006 และ <0.001 ตามลำดับ อันตรกิริยา 2-Way Interaction ระหว่าง B*D มีค่า p-value เท่ากับ 0.017 B*C มีค่า p-value เท่ากับ 0.008 และ อันตรกิริยา 3-Way Interaction A*B*D มีค่า p-value มีค่าเท่ากับ 0.012 และ B*C*D มีค่า p-value เท่ากับ 0.004 ซึ่งค่า p-value มีค่าน้อยกว่า ค่า $\alpha = 0.05$ ซึ่งสามารถสรุปได้ว่าตัวแปรหลัก และอันตรกิริยาเหล่านี้มีอิทธิพลต่อความหยาบผิว สำหรับการวิเคราะห์ค่าความแปรปรวนใน

การตัดสินใจ (R^2) ซึ่งค่า R^2 เท่ากับ 91.79% และ p-value ของ Lack-of-Fit เท่ากับ 0.567 ซึ่งมีค่ามากกว่า $\alpha = 0.05$ สรุปได้ว่าข้อมูลที่ได้จากการทดลองมีความเหมาะสมกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่สร้างขึ้น สามารถนำไปใช้งานได้จริง

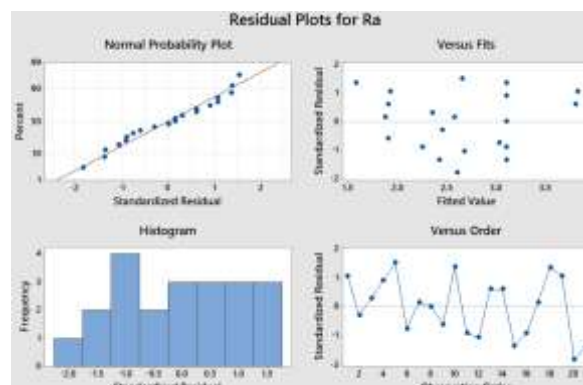
ตารางที่ 3 ผลวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance for Surface Roughness : ANOVA)

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F	P
Model	9	7.607	0.845	13.67	<0.001
Linear	4	3.675	0.919	14.86	<0.001
A	1	0.640	0.640	10.35	0.008
B	1	0.490	0.490	7.93	0.017
C	1	0.723	0.723	11.69	0.006
D	1	1.823	1.823	29.48	<0.001
2-Way	2	1.130	0.565	9.14	0.005
B*C	1	0.490	0.490	7.93	0.017
B*D	1	0.640	0.640	10.35	0.008
3-Way	2	1.373	0.686	11.10	0.002
A*B*D	1	0.563	0.563	9.10	0.012
B*C*D	1	0.810	0.810	13.10	0.004
Curvature	1	1.429	1.429	23.12	0.001
Error	11	0.680	0.062		
Lack-of-Fit	7	0.420	0.060	0.92	0.567
Pure Error	4	0.260	0.065		
Total	20	8.287			

$S = 0.248633$, $R^2 = 91.79\%$, $R^2(\text{adj}) = 85.08\%$,
 $R^2(\text{pred}) = 68.62\%$

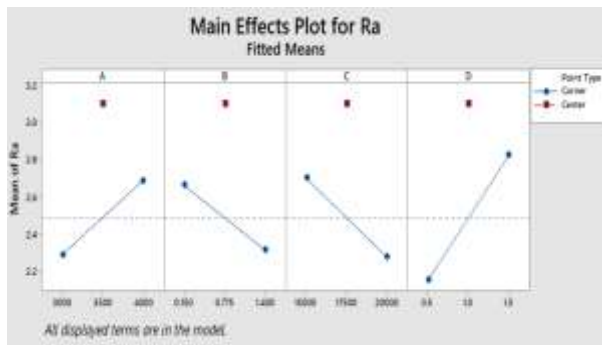
จากการวิเคราะห์ความเหมาะสมของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ด้วยกราฟ Residual Plots ดังแสดงในรูปที่ 1 พบว่าข้อมูลจากกราฟ Normal Probability Plot ของส่วนที่ตกค้าง (Residual) มีแนวโน้มกระจายตัวเป็นเส้นตรง ซึ่งถือได้ว่าเป็นการกระจายตัวแบบปกติ เมื่อพิจารณาจากกราฟส่วนตกค้างกับค่าการทำนาย (Versus Fits) พบว่าส่วนตกค้างมีการกระจายตัวแบบอิสระไม่ขึ้นอยู่กับการทำนาย ซึ่งถือได้ว่าไม่พบข้อมูลใดผิดปกติ และเมื่อพิจารณาจากกราฟส่วนตกค้างกับลำดับของการทดลอง

(Versus order) พบว่าส่วนตกค้างมีการกระจายตัวแบบสุ่ม ซึ่งถือได้ว่าการทดลองไม่ขึ้นอยู่กับการทดลอง จากการวิเคราะห์ Residual Plots สามารถสรุปได้ว่าการทดลองนี้มีความเหมาะสมกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์



รูปที่ 1 Residual Plots เพื่อตรวจสอบความเหมาะสมของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

จากกราฟ Main Effects Plot ดังแสดงในรูปที่ 2 เมื่อพิจารณากำลังในการตัด (A) พบว่ากำลังในการตัดลดลง จะทำให้ความหยาบผิวลดลง เมื่อพิจารณาความเร็วในการตัด (B) พบว่าความเร็วในการตัดเพิ่มขึ้น จะทำให้ความหยาบผิวลดลง เมื่อพิจารณาความถี่ในการปล่อยเลเซอร์ (C) พบว่าความถี่ในการปล่อยเลเซอร์เพิ่มขึ้น จะทำให้ความหยาบผิวลดลง เมื่อพิจารณาระยะห่างของหัวเลเซอร์จนถึงชิ้นงาน (D) พบว่าระยะห่างของหัวเลเซอร์จนถึงชิ้นงานลดลง จะทำให้ความหยาบผิวลดลง เมื่อพิจารณาอันตรกิริยา (Interaction) ดังแสดงในตารางที่ 3 B*C พบว่าเมื่อความเร็วการตัดเพิ่มขึ้น และความถี่ในการปล่อยเลเซอร์เพิ่มขึ้น จะทำให้ความหยาบผิวลดลง และเมื่อพิจารณา B*D พบว่าเมื่อความเร็วในการตัดเพิ่มขึ้น และระยะห่างระหว่างหัวเลเซอร์จนถึงชิ้นงานลดลง จะทำให้ความหยาบผิวลดลง พิจารณา A*B*D พบว่าเมื่อกำลังในการตัดลดลง ความเร็วในการตัดเพิ่มขึ้น และระยะห่างระหว่างหัวเลเซอร์จนถึงชิ้นงานลดลง ซึ่งจะทำให้ความหยาบผิวลดลง และเมื่อพิจารณา B*C*D เมื่อความเร็วในการตัดเพิ่มขึ้น ความถี่ในการปล่อยเลเซอร์เพิ่มขึ้น และระยะห่างระหว่างหัวเลเซอร์จนถึงชิ้นงานลดลง ซึ่งจะทำให้ความหยาบผิวลดลง



รูปที่ 2 ตัวแปรหลักที่มีอิทธิพลต่อความหยาบผิว

โดยผลการทดลองที่ได้มีความสอดคล้องกับผลการวิจัยของ Mandal และคณะ [12] ที่ทำการตัดอูมิเนียมเกรด 7075 ด้วยเลเซอร์ชนิด Nd:YVO₄ ซึ่งพบว่า กำลัง ความถี่และความเร็วในการตัด มีผลต่อค่าความหยาบผิวอย่างมีนัยสำคัญ และมีแนวโน้มเหมือนกันกับผลการทดลองในงานวิจัยนี้ อย่างไรก็ตามในงานวิจัยของ Mandal และคณะไม่ได้ทำการศึกษาผลของระยะห่างของหัวเลเซอร์เหมือนในงานวิจัยนี้ นอกจากนี้ในงานวิจัยของ Jankovic และคณะ [13] ได้ทำการตัดอูมิเนียมเกรด AA5754 ด้วยเลเซอร์ชนิด CO₂ ก็ได้ผลการวิจัยที่สอดคล้องกับงานวิจัยนี้ โดยพบว่า กำลัง และความเร็วในการตัด มีผลต่อค่าความหยาบผิวอย่างมีนัยสำคัญ และผลการศึกษาที่ได้มีแนวโน้มเหมือนกันกับผลการทดลองในงานวิจัยนี้ อย่างไรก็ตามในการศึกษาเกี่ยวกับการตัดด้วยเลเซอร์ยังมีตัวแปรอื่นที่อาจทำการศึกษาเพิ่มเติมได้ เช่น แรงดันก๊าซ (Gas Pressure) เส้นผ่านศูนย์กลางของหัวเลเซอร์ (Nozzle Diameter) ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้ตั้งค่าตัวแปรดังกล่าวเป็นค่าคงที่

3.1 การหาค่าที่เหมาะสมของตัวแปร

จากการใช้ฟังก์ชัน Response Optimizer ในโปรแกรม MINITAB 18 วิเคราะห์ข้อมูลที่ได้จากการทดลอง ดังแสดงในตารางที่ 4 โดยผู้วิจัยได้กำหนดเป้าหมายเป็นผลตอบน้อยที่สุด (Minimum) เนื่องจากต้องการได้ค่าความหยาบผิวน้อยที่สุด กำหนดค่าที่ต้องการ (Target) เท่ากับ 2.5 μm ซึ่งเป็นค่าความหยาบผิวที่ถูกค่ากำหนด และกำหนดค่ามากที่สุด (Upper) เท่ากับ 4.0 μm ซึ่งเป็นค่ามากที่สุดที่ได้จากการทดลอง จากการวิเคราะห์พบว่า ค่าทำนายสำหรับค่า

ความหยาบผิวน้อยที่สุดมีค่าเท่ากับ 1.575 μm ค่าฟังก์ชันพึงพอใจ (Composite Desirability) มีค่าเท่ากับ 1.000 และค่าทำนายที่ระดับความเชื่อมั่น 95% อยู่ในช่วง 0.891-2.259 μm ซึ่งได้ค่าที่เหมาะสมของตัวแปรที่ทำให้ได้ค่าความหยาบผิวน้อยที่สุด คือ กำลังในการตัดเท่ากับ 3000 W ความเร็วในการตัดเท่ากับ 1.4 m/min ความถี่ในการปล่อยเลเซอร์เท่ากับ 20000 Hz และระยะห่างของหัวเลเซอร์จนถึงชิ้นงานเท่ากับ 0.5 mm.

3.2 การตรวจสอบเพื่อยืนยันผล

การตรวจสอบเพื่อยืนยันผลการออกแบบการทดลอง และการหาค่าที่เหมาะสมของตัวแปรที่ได้จากฟังก์ชัน Response Optimizer โดยใช้ กำลังในการตัดเท่ากับ 3000 W ความเร็วในการตัดเท่ากับ 1.4 m/min ความถี่ในการปล่อยเลเซอร์เท่ากับ 20000 Hz และระยะห่างของหัวเลเซอร์จนถึงชิ้นงานเท่ากับ 0.5 mm. ทำการทดลองซ้ำ 5 ครั้ง ผลการทดลองเพื่อยืนยันค่าตัวแปรที่เหมาะสมดังแสดงในตารางที่ 5 ได้ค่าความหยาบผิวเฉลี่ยเท่ากับ 1.86 μm ซึ่งผลการทดลองทั้ง 5 ครั้ง อยู่ในช่วงค่าทำนายที่ระดับความเชื่อมั่น 95% คือ 0.891-2.259 μm

ตารางที่ 4 ค่าทำนายของตัวแปรที่เหมาะสมที่ทำให้ค่าความหยาบผิวน้อยที่สุด

Response Optimization of Ra (μm)			
Response Ra (μm)		Parameter Prediction	
Goal	Minimum	A	3000 W
Lower	1.6	B	1.4 m/min
Target	2.5	C	20000 Hz
Upper	4.0	D	0.5 mm.
Response Ra Fit = 1.575 μm			
95% Predicted Ra 0.891-2.259 μm			
Composite Desirability 1.0000			

ตารางที่ 5 ผลการทดลองเพื่อขึ้นชั้นผลค่าตัวแปรที่เหมาะสม

เหมาะสม

การทดลอง	ตัวแปรในการตัด				Ra (μm)
	A (W)	B (m/min)	C (Hz)	D (mm)	
1	3000	1.4	20000	0.5	1.9
2	3000	1.4	20000	0.5	2.0
3	3000	1.4	20000	0.5	1.7
4	3000	1.4	20000	0.5	1.8
5	3000	1.4	20000	0.5	1.9
ค่าเฉลี่ยของค่าความหยาบผิว					1.86
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน					0.11

4. สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาอิทธิพลของตัวแปรในกระบวนการตัดแผ่นอลูมิเนียมเกรด EN AW-6061 T6 ด้วย Nd-YAG เลเซอร์ เพื่อหาค่าที่เหมาะสมของตัวแปรในการตัด ที่ทำให้ค่าความหยาบผิวน้อยที่สุด โดยใช้วิธีการออกแบบการทดลองแบบ 2^k แฟกทอเรียล ซึ่งพบว่า กำลังในการตัด ความเร็วในการตัด ความถี่ในการปล่อยเลเซอร์ และระยะห่างของหัวเลเซอร์จนถึงชิ้นงาน มีอิทธิพลต่อความหยาบผิว และค่าที่เหมาะสมของตัวแปร คือ กำลังในการตัดเท่ากับ 3000 W ความเร็วในการตัดเท่ากับ 1.4 m/min ความถี่ในการปล่อยเลเซอร์เท่ากับ 20000 Hz และระยะห่างของหัวเลเซอร์จนถึงชิ้นงานเท่ากับ 0.5 mm. จากการขึ้นชั้นผลค่าตัวแปรที่เหมาะสม พบว่าค่าความหยาบผิวน้อยที่สุดเท่ากับ $1.86 \mu m$ ซึ่งผ่านเกณฑ์การยอมรับของลูกค้า

5. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณ บริษัทจีพีวีเอเซีย (ประเทศไทย) จำกัด สำหรับวัสดุและอุปกรณ์ และขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ทุกท่านทุกหน่วยงานที่สนับสนุนในการทำวิจัยในครั้งนี้

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] J. Priyanka, S. Amit, "Simultaneous optimization of kerf taper and heat affected zone in ND-YAG

laser of Al 6061-T6 sheet using hybrid approach of grey relational analysis and fuzzy logic," Journal of Precision Engineering, vol. 54, pp. 302-312, 2018.

- [2] M. Milos, A. Jurgita, R. Miroslav, P. Dusan. "Determination of laser cutting process conditions using the preference selection index method," Optic & Laser Technology, vol. 89, pp. 214-220, 2017.
- [3] R. Adalarasan, M. Santhanakumar, M. Rajmohan, "Optimization of laser cutting parameters for Al6061/SiCp/Al₂O₃ composite using grey based response surface methodology (GRSM)," Journal of Measurement, vol. 73, pp. 569-606, 2015.
- [4] F. Quintero, J. Pou, F. Lusquinos, M. Boutinguiza, R. Soto, M. Perez-Amor, "Quantitative evaluation of the quality of the cuts performed on mullite-alumina by Nd: YAG laser," Optics and Laser in Engineering, vol. 42, pp. 327-340, 2004.
- [5] N. Rajaram, J. Sheikh-Ahmad, S. H. Cheraghi, "CO₂ laser cut quality of 4130 steel," International Journal of Machine Tool and Manufacture, vol. 43, pp. 351-358, 2003.
- [6] K. Abdel Ghany, M. Newishy, "Cutting of 1.2 mm thick austenitic stainless steel sheet using pulsed and CW Nd: YAG laser," Journal of Material Processing Technology, vol. 168, pp. 438-447 2005.
- [7] K. Sefika, S. I. Etem, "Determination of process parameters in the laser micromilling application using Taguchi method a case study for AISI H13 tool steel," International Journal Advanced Manufacturing Technology, vol. 58, pp. 201-209, 2012.

-
- [8] K. D. Avanish, Y. Vinod, "Multi-objective optimisation of laser beam cutting process," *Optic & Laser Technology*, vol. 40, pp. 562–570, 2008.
 - [9] N. Rajaram, J. Sheikh-Ahmad, S. H. Cheraghi, "CO₂ laser cut quality of 4130 steel," *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol 43, pp. 351-358, 2003.
 - [10] R. Neimeyer, R.N. Smith, D.A. Kaminski, "Effects of operating parameters on surface quality laser cutting of mild steel," *Journal of Engineering for Industry*, Vol. 115, pp. 359-366, 1993.
 - [11] Douglas C. Montgomery, "Design and Analysis of Experiments," Eighth Edition, New York, John Wiley and Sons, 2013.
 - [12] K.K. Mandal, A.S. Kuar, S. Mitar, "Experimental investigation on laser micro-machining of Al 7075 alloy," *Optics and Laser Technology*, Vol. 107, pp. 260-267, 2018.
 - [13] P. Jankovic, M. Modic, M. Radovanovic, D. Petkovic, S. Mladenovic, "Optimization of Surface Roughness from Different Aspects in High-Power CO₂ Laser Cutting of AA5754 Aluminum Alloy," *Arabian Journal for Science and Engineering*, Vol. 44, pp. 10245-10256, 2019.