

การหาพารามิเตอร์ที่เหมาะสมในกระบวนการแกะสลักสีด้วยเลเซอร์
ด้วยวิธีการออกแบบการทดลองเชิงวิศวกรรม

**Determining the Optimal Parameters of Laser Color Engraving Processing
Using Engineering Experimental Design Techniques**

ศุภภัทร ศิลาลอย^{1*} ธรรมวิทย์ ประเสริฐ² และ จิรวัฒน์ ณ พัทลุง¹

¹สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรมและโลจิสติกส์ สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์และนวัตกรรม

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก อ.ศรีราชา จ.ชลบุรี 20110

²ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรมและการจัดการ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม

มหาวิทยาลัยศิลปากร อ.เมือง จ.นครปฐม 73000

E-mail: supat_si@rmutto.ac.th*

Supat Silalay^{1*} Thammawit Prasert² and Chirawat na-Badalong¹

¹Department of Industrial Engineering and Logistics, Faculty of Engineering and Industrial Technology,

Rajamangala University of Technology Tawan-ok, Sriracha, Chonburi, 20110

²Department of Industrial Engineering and Management, Faculty of Engineering and Industrial

Technology, Silpakorn University, Mueang District, Nakhon Pathom, 73000

E-mail: supat_si@rmutto.ac.th*

Received 5 Jul 2024; Revised 20 Dec 2024

Accepted 26 Dec 2024; Available online 30 Dec 2024

บทคัดย่อ

การศึกษากระบวนการแกะสลักสีด้วยเลเซอร์ เป็นกระบวนการที่ใช้วัสดุเหล็กกล้าไร้สนิม เกรด 304 ทดลองกับเครื่องต้นแบบไฟเบอร์เลเซอร์สี (Color Fiber Laser Prototype) เนื่องจากบริษัทผู้ผลิตเครื่องต้นแบบไฟเบอร์เลเซอร์สีต้องการทำคู่มือแนะนำการใช้งานให้กับลูกค้า ได้กำหนดความลึกที่ยอมรับของการแกะสลักสีด้วยเลเซอร์ อยู่ที่ 10 – 15 μm ซึ่งหลังจากสร้างเครื่องสำเร็จยังไม่พารามิเตอร์ที่ใช้ในกระบวนการแกะสลัก ผู้วิจัยจึงได้ออกแบบวิธีการทดลอง โดยการประยุกต์ใช้หลักการวิเคราะห์การออกแบบการทดลอง (DOE) ด้วยเทคนิคการออกแบบส่วนประสมกลาง เพื่อหาพารามิเตอร์ที่เหมาะสมในกระบวนการแกะสลักสีด้วยเลเซอร์ กำหนดพารามิเตอร์ที่สำคัญ ได้แก่ กำลังไฟที่ใช้ในการตัดเฉือน (Power) ระดับ 10-30 W และอัตราความเร็วในการตัดเฉือน (Speed) ระดับ 300-800 mm/s หลังจากนั้นดำเนินการทดลองพบว่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสม กำลังไฟที่ใช้ในการตัดเฉือน (Power) = 17 W และอัตราความเร็วในการตัดเฉือน (Speed) = 500 mm/s ซึ่งได้ความลึกประมาณ 13 μm อยู่ในความลึกที่ยอมรับได้ของบริษัทผู้ผลิตเครื่องต้นแบบไฟเบอร์เลเซอร์สี เมื่อหาพารามิเตอร์ที่เหมาะสมมาทดลองใช้งานจริง พบว่าพารามิเตอร์ที่ได้สามารถใช้งานได้จริงและทำคู่มือสำหรับแนะนำลูกค้า

คำหลัก: เลเซอร์ การแกะสลัก กำลังไฟ อัตราความเร็ว

Abstract

This study investigates the laser color engraving process on 304 stainless steel using a color fiber laser prototype. The prototype's manufacturer, intending to create an instructional manual for customers, specified an acceptable engraving depth of 10–15 μm . However, after the prototype's completion, no specific parameters were established for the engraving process. Therefore, the researcher designed an experimental procedure, utilizing the Design of Experiments (DOE) methodology, specifically employing the Central Composite Design (CCD) technique to identify optimal parameters for laser color engraving. The primary parameters evaluated were laser power, ranging from 10 to 30 W, and engraving speed, ranging from 300 to 800 mm/s. The experiment indicated that optimal parameters included a power setting of 17 W and an engraving speed of 500 mm/s, achieving an engraving depth of approximately 13 μm , which met the manufacturer's specified range. Applying these optimized parameters in practical testing confirmed their effectiveness and facilitated the development of a comprehensive user manual for future customers.

Keywords: Laser, engraving, laser power, speed

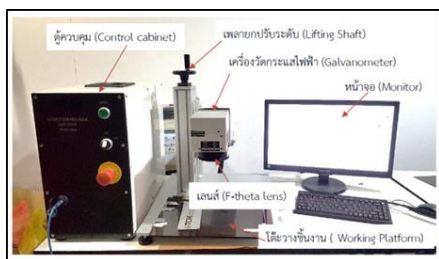
1. บทนำ

เทคโนโลยีการแกะสลักด้วยเลเซอร์ เป็นหนึ่งความนิยมที่ใช้ประโยชน์มากที่สุดในปัจจุบันของกระบวนการเลเซอร์ โดยใช้พลังงานแสงเลเซอร์ที่บ่งชี้ฉายแสงไปสู่ชิ้นงานเฉพาะจุด เพื่อให้พื้นผิววัตถุเกิดโอหรือเปลี่ยนสี ทำให้เกิดรอยถาวร การแกะสลักด้วยเลเซอร์สามารถทำเครื่องหมาย อักษร ตัวเลข สัญลักษณ์ และลวดลายได้หลากหลายรูปแบบรวมถึงขนาดของตัวอักษร[1-3] สามารถเริ่มจากระดับความละเอียดมิลลิเมตร(mm) จนถึงไมครอน(Micron) ซึ่งธุรกิจที่นิยมใช้ประโยชน์ จากเทคโนโลยีการแกะสลักด้วยเลเซอร์มากที่สุด คือ การทำเนมเพลท(Name Plate) คิวอาร์โค้ด(QR Code) บาร์โค้ด (Bar Code) และโลโก้(Logo) สินค้าในการสร้างรหัสหรือสัญลักษณ์เพื่อป้องกันการปลอมแปลงผลิตภัณฑ์[4] การเลือกเลเซอร์ที่ดีที่สุดสำหรับการสร้างเครื่องแกะสลักเลเซอร์ อาจมีความท้าทาย เนื่องจากประเภทของเลเซอร์ที่มีอยู่ และวัสดุที่เกี่ยวข้อง การเข้าใจลักษณะของเลเซอร์ คุณสมบัติของวัสดุ วิธีที่วัสดุจะถูกทำการแกะสลักด้วยการดูดซึมแสงเลเซอร์ และช่วงความยาวคลื่นของเลเซอร์ที่เลือก เป็นสิ่งที่มีความสำคัญอย่างมากในการตัดสินใจเลือกใช้งานได้อย่างเหมาะสม

บริษัทกรณีศึกษา เป็นผู้ผลิตและจำหน่าย

เครื่องเลเซอร์ เครื่องจักรระบบอัตโนมัติเครื่องจักรขนาดเล็กความแม่นยำสูง รวมทั้งมีบริการรับยิงเลเซอร์ ได้คิดค้นสร้างเครื่องต้นแบบไฟเบอร์เลเซอร์สี (Color Fiber Laser Prototype) ที่ใช้กำลังไฟฟ้า ± 15 โวลต์(V) กระแสไฟฟ้า 5 แอมป์(A) และรูรับแสง (Aperture) 10 mm โดยตัวเครื่องสามารถเชื่อมต่อเข้ากับคอมพิวเตอร์ และใช้คอมพิวเตอร์ควบคุมการทำงาน[5] ดังรูปที่ 1 ซึ่งสามารถแกะสลักชิ้นงานให้มีสีสันสวยงาม ได้แก่ สีแดง สีเหลืองและสีน้ำเงิน เป็นตัวเลข ตัวอักษร ลวดลาย หรือรูปภาพต่างๆได้ หลักการทำงานนั้น ตัวเครื่องต้นแบบไฟเบอร์เลเซอร์สี(Color Fiber Laser Prototype) จะมีแกนปล่อยลำแสงเลเซอร์เพื่อไปสะท้อนกับกระจกเลนส์ โดยต้องหมุนปรับระดับขึ้นลงให้เหมาะสมกับความหนาของชิ้นงาน[6] ซึ่งเหมาะสำหรับการแกะสลักชิ้นงานที่เป็นโลหะผสมที่มีคุณสมบัติทนต่อการกัดกร่อน คือ เหล็กกล้าไร้สนิม เกรด 304[7]

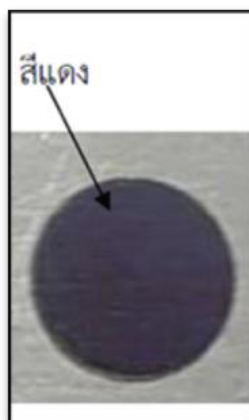
จากเหตุผลดังกล่าวข้างต้น ทำให้ผู้วิจัยมีความสนใจจะศึกษาพารามิเตอร์ที่เหมาะสม ที่ใช้แกะสลักสีด้วยเครื่องต้นแบบไฟเบอร์เลเซอร์สี (Color Fiber Laser Prototype)[8-9] กับ ชิ้นงานที่เป็นแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม เกรด 304 โดยประยุกต์ใช้หลักการออกแบบและวิเคราะห์การทดลอง(DOE)



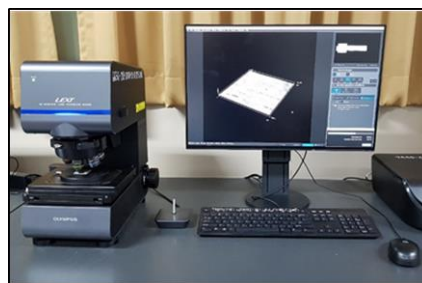
รูปที่ 1 เครื่องต้นแบบไฟเบอร์เลเซอร์สี

2. การดำเนินงานวิจัย

ปัจจุบันเครื่องต้นแบบไฟเบอร์เลเซอร์สี (Color Fiber Laser Prototype) ได้ดำเนินการสร้างสำเร็จแล้ว แต่การจะผลิตชิ้นงานออกไปให้ได้คุณภาพนั้น จำเป็นต้องมีการทดสอบพารามิเตอร์ที่ใช้ในการผลิตจริง[10] กำหนดระยะห่างระหว่างลำกล้องเลเซอร์กับชิ้นงาน (Focus) แกน X = 21 mm. แกน Y = 14 mm. และพารามิเตอร์ที่สำคัญ 2 พารามิเตอร์ที่ได้มาจากการวิเคราะห์เบื้องต้น (Pre-test) ของบริษัทผู้ผลิต [11] ได้แก่ กำลังไฟที่ใช้ในการตัดเฉือน (Power) และอัตราความเร็วในการตัดเฉือน (Speed) แนวทางในการวิเคราะห์พารามิเตอร์ที่เหมาะสม จะประยุกต์ใช้หลักการออกแบบ การทดลอง (Design of Experiment : DOE) ด้วยเทคนิคการออกแบบส่วนประสมกลาง (Central Composite Design : CCD) กำหนดสิ่งที่ใช้ในการทดลอง คือ สีแดง ดังรูปที่ 2 และกำหนดความลึกที่ยอมรับได้ของบริษัทผู้ผลิต อยู่ที่ 10 – 15 μm โดยใช้เครื่องมือวัดความลึกด้วยเครื่อง 3D Measuring Laser Microscope ที่กำลังขยาย 20x ดังรูปที่ 3 ใช้ข้อมูลที่เกี่ยวข้องจากข้อกำหนดของผู้ผลิตเครื่อง ดังตารางที่ 1 หลังจากนั้นนำพารามิเตอร์ที่กำหนดไปใส่ในแผนการทดลองและดำเนินการทดลองตามแผนพร้อมทั้งเก็บผลค่าความลึกที่ได้จากการทดลอง ดังตารางที่ 2



รูปที่ 2 ชิ้นงานการแกะสลักสีแดง



รูปที่ 3 3D Measuring Laser Microscope ยี่ห้อ Olympus รุ่น OLS5000

ตารางที่ 1 ข้อมูลพารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดลอง

สี	แกน X (mm.)	แกน Y (mm.)	Power (W.)	Speed (mm/s)
แดง	20	15	10-30	300-800

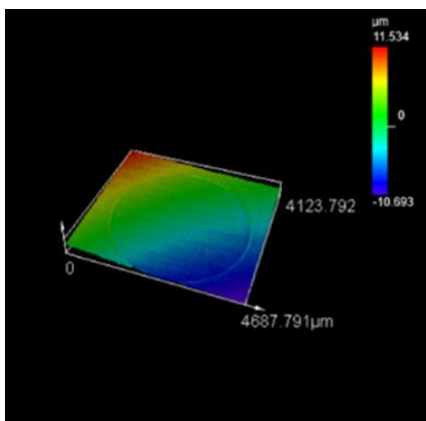
ตารางที่ 2 ข้อมูลสำหรับวิเคราะห์การทดลอง CCD

ลำดับ	Power (W.)	Speed (mm/s)	Depth (μm)
1	34	550	20.341
2	20	550	13.882
3	20	550	13.917
4	20	900	14.074
5	20	200	13.825
6	6	550	8.994
7	20	550	13.542

8	10	800	9.763
9	20	550	13.291
10	30	300	18.726
11	20	550	14.100
12	10	300	11.534
13	20	550	13.657
14	30	800	17.953

3. ผลการวิจัย

เมื่อทดลองตามแผนการทดลองนำชิ้นงานมาวัดระดับความลึกด้วยเครื่อง 3D Measuring Laser Microscope ยี่ห้อ Olympus รุ่น OLS5000 เครื่องจะแสดงกราฟระดับสีบอกความลึกของชิ้นงานที่แกะสลักเลเซอร์ แสดงดังรูปที่ 4 นำผลการวัดความลึกวิเคราะห์ผลเชิงสถิติ (Statistical Analysis) ตามการออกแบบการทดลอง CCD สามารถแสดงผลการวิเคราะห์ที่ได้ดังรูปที่ 5 โดยเมื่อพิจารณาอิทธิพลหลัก (Main Effect) ในรูป พบว่า Power จะมีอิทธิพลผลตอบสนองต่อความลึกของชิ้นงานอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95% เนื่องจากมีค่า P-Value < α หรือ $0.001 < 0.05$ นั่นเอง ยกเว้นอิทธิพลหลัก Speed ที่ไม่มีผลต่อความลึกของชิ้นงาน และในรูปที่ 6 เป็นกราฟที่แสดงให้เห็นว่า Power มีอิทธิพลผลตอบสนองต่อความลึกของชิ้นงาน

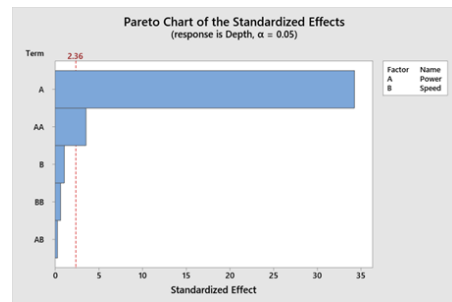


รูปที่ 4 กราฟระดับสีบอกความลึกของชิ้นงานที่แกะสลักเลเซอร์

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	6	134.641	22.440	198.21	0.000
Blocks	1	0.044	0.044	0.39	0.554
Linear	2	133.146	66.573	588.04	0.000
Power	1	133.019	133.019	1174.94	0.000
Speed	1	0.128	0.128	1.13	0.324
Square	2	1.446	0.723	6.39	0.026
Power*Power	1	1.428	1.428	12.61	0.009
Speed*Speed	1	0.046	0.046	0.40	0.545
2-Way Interaction	1	0.009	0.009	0.08	0.784
Power*Speed	1	0.009	0.009	0.08	0.784
Error	7	0.792	0.113		
Lack-of-Fit	3	0.378	0.126	1.22	0.411
Pure Error	4	0.414	0.104		
Total	13	135.433			

รูปที่ 5 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวน



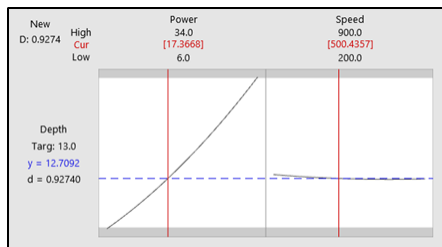
รูปที่ 6 กราฟของปัจจัยที่มีผลกระทบกับชิ้นงาน

สมการแสดงความลึกจากการยิงเลเซอร์ เป็นผลลัพธ์ของการยิงเลเซอร์สีแดง ซึ่งมีปัจจัยที่เกี่ยวข้องได้แก่ กำลังไฟที่ใช้ในการตัดเฉือน (Power) และอัตราความเร็วในการตัดเฉือน (Speed) สามารถแสดงสมการได้ ดังนี้

$$\text{Depth} = 7.77 + 0.2419 \text{ Power} - 0.00153 \text{ Speed} + 0.00446 \text{ Power*Power} + 0.000001 \text{ Speed*Speed} - 0.000019 \text{ Power*Speed} \quad (1)$$

ในส่วนของการวิเคราะห์พารามิเตอร์ที่เหมาะสม (Parameters Optimization) ผู้ผลิตเครื่องได้กำหนดเป้าหมายความลึกที่ 13 μm ดังแสดงในรูปที่ 7 จะเห็นว่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมในกระบวนการแกะสลักสีแดงด้วยเลเซอร์ คือ กำลังไฟที่ใช้ในการตัดเฉือน (Power) 17 W. และอัตราความเร็วในการตัดเฉือน (Speed) 500 mm/s ซึ่งจะทำให้ชิ้นงานได้ความลึกที่ $13 \pm 2 \mu\text{m}$ ผู้วิจัยจึงใช้พารามิเตอร์ที่ได้ ทดลอง

แกะสลักด้วยเลเซอร์อีกครั้งเพื่อใช้ยืนยันผลการทดลอง จำนวน 30 ตัวอย่าง ดังแสดงในตารางที่ 3 หลังจากนั้นวิเคราะห์ความถูกต้องที่ได้มาของข้อมูล ดังรูปที่ 8 การทดสอบค่าเฉลี่ยการทดลอง 30 ตัวอย่างกับเกณฑ์ความลึก 13 μm การประมวลผลของโปรแกรม Minitab พบว่าค่า P-Value อยู่ที่ 0.124 ซึ่งมีค่ามากกว่า α 0.05 ซึ่งยอมรับ H_0 นั้นหมายความว่าข้อมูลยืนยันความถูกต้องที่ได้มาจาก 30 ข้อมูล คือ ประชากรกลุ่มเดียวกันกับความลึกที่กำหนด 13 μm



รูปที่ 7 พารามิเตอร์ที่เหมาะสมของกระบวนการแกะสลักด้วยเลเซอร์

Test	
Null hypothesis	$H_0: \mu = 13$
Alternative hypothesis	$H_1: \mu \neq 13$
T-Value	P-Value
-1.58	0.124

รูปที่ 8 การทดสอบค่าเฉลี่ยกับเกณฑ์ความลึก 13 μm

ตารางที่ 3 ข้อมูลการทดลองซ้ำ จำนวน 30 ตัวอย่าง

ลำดับ	Power (W.)	Speed (mm/s)	Depth (μm)
1	17	500	12.912
2	17	500	12.931
3	17	500	12.946
4	17	500	12.998
5	17	500	13.153
6	17	500	13.084
7	17	500	12.947

8	17	500	12.833
9	17	500	12.829
10	17	500	12.974
11	17	500	13.119
12	17	500	13.156
13	17	500	12.951
14	17	500	12.883
15	17	500	12.972
16	17	500	13.124
17	17	500	12.875
18	17	500	13.001
19	17	500	12.881
20	17	500	13.176
21	17	500	12.936
22	17	500	12.874
23	17	500	12.902
24	17	500	13.065
25	17	500	12.881
26	17	500	12.835
27	17	500	12.942
28	17	500	13.134
29	17	500	12.936
30	17	500	12.800

4. สรุปและการอภิปรายผล

หลังจากดำเนินการทดลองตามแผนการทดลองพบว่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมในกระบวนการแกะสลักด้วยเลเซอร์สีแดง ได้แก่ กำลังไฟที่ใช้ในการตัดเฉือน (Power) 17 W. และอัตราความเร็วในการตัดเฉือน (Speed) 500 mm/s ซึ่งหลังจากวิเคราะห์ อัตราความเร็วในการตัดเฉือนไม่มีผลต่อความลึกต่อชิ้นงาน แต่ทางบริษัทให้กำหนดอัตราความเร็วที่ใช้ในการตัดเฉือน 500 mm/s และความลึก 10-15 μm ทำให้ชิ้นงานมีความลึกอยู่ที่ประมาณ 13 μm เมื่อได้พารามิเตอร์ที่เหมาะสม จึงดำเนินการทดลองแกะสลักด้วยเลเซอร์สีแดง ใช้กำลังไฟในการตัดเฉือน (Power) 17 W. และอัตราความเร็วในการตัดเฉือน (Speed)

500 mm/s จำนวน 30 ตัวอย่าง เพื่อยืนยันพารามิเตอร์ที่เหมาะสม ซึ่งพบว่าข้อมูลความถูกต้องที่ได้มาจาก 30 ข้อมูล คือ ประชากรกลุ่มเดียวกันกับความลึกที่กำหนด 13 μm สรุปบริษัทผู้ผลิตเครื่องแกะสลักด้วยเลเซอร์ ได้เขียนข้อมูลการใช้งานของพารามิเตอร์ที่เหมาะสมในคู่มือการใช้งานเครื่อง การยิงเลเซอร์สีแดง กำลังไฟที่ใช้ในการตัดเฉือน (Power) 17 W. และอัตราความเร็วในการตัดเฉือน (Speed) 500 mm/s วัสดุที่ใช้งาน คือ เหล็กกล้าไร้สนิม เกรด 304 เพื่อให้ลูกค้านำไปใช้งาน สามารถใช้พารามิเตอร์ที่แนะนำในการสร้างสรรค์ผลงานให้ลูกค้าได้ทันที ซึ่งลูกค้าไม่ต้องไปทดลองหาพารามิเตอร์การใช้งานเอง ผลจากการวิจัยในครั้งนี้ยังสามารถนำไปใช้หาพารามิเตอร์ที่เหมาะสมในกระบวนการแกะสลักด้วยเลเซอร์สีน้ำเงินและสีเหลืองได้ และสามารถนำไปทดลองปรับใช้กับวัสดุอื่นๆ เช่น เซรามิก โพลีเมอร์ แก้ว เป็นต้น ซึ่งการขยายงานวิจัยไปยังวัสดุเหล่านี้จะช่วยให้เกิดความเข้าใจในการปรับใช้พารามิเตอร์เลเซอร์ เช่น กำลังไฟและความเร็ว ให้เหมาะสมกับคุณสมบัติเฉพาะของแต่ละวัสดุ ส่งผลให้การแกะสลักด้วยเลเซอร์มีคุณภาพและตอบสนองต่อความต้องการในอุตสาหกรรมต่างๆ ได้ดียิ่งขึ้น

5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจากบริษัทสร้างเครื่องแกะสลักเลเซอร์ และสาขาวิศวกรรมอุตสาหกรรมและโลจิสติกส์ สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์และนวัตกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก

เอกสารอ้างอิง

[1] จุฬาลักษณ์ บัวศรี และธนกร ชาววงจักร. อิทธิพลของพารามิเตอร์ต่อคุณภาพผิวในกรรมวิธีการแกะสลักอะคริลิกด้วยเลเซอร์ [ปริญญาณิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตร์บัณฑิต]. กรุงเทพฯ; มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ; 2554

[2] บริษัท วรภาสดี จำกัด. เรื่องเกี่ยวกับสี [อินเทอร์เน็ต]. 2564 [เข้าถึงเมื่อ 9 พฤศจิกายน 2566]. เข้าถึงจาก <http://www.vorabhasd.co.th>.

[3] WIKIPEDIA. การแกะสลัก [อินเทอร์เน็ต]. 2562 [เข้าถึงเมื่อ 9 พฤศจิกายน 2566]. เข้าถึงจาก <http://th.m.wikipedia.org/wiki/การแกะสลัก>

[4] พจนานุกรมศัพท์วิทยาศาสตร์ คณิตศาสตร์และเทคโนโลยี. โฟกัส [อินเทอร์เน็ต]. 2565 [เข้าถึงเมื่อ 1 ธันวาคม 2566]. เข้าถึงจาก https://dekgenius.com/dictionary/science/focus-focal-point--2668.htm#google_vignette

[5] Electric-mart Solution for Electricians. กำลังไฟฟ้า [อินเทอร์เน็ต]. 2565 [เข้าถึงเมื่อ 1 ธันวาคม 2566]. เข้าถึงจาก <http://www.electric-mart.com>

[6] ตงกวน Mactron เทคโนโลยี จำกัด. ความแตกต่างไฟเบอร์เลเซอร์ CO2 เครื่องจักรและเครื่องแกะสลักเลเซอร์ [อินเทอร์เน็ต]. 2563 [เข้าถึงเมื่อ 18 ธันวาคม 2566]. เข้าถึงจาก <http://www.mactron-tech.com/th>

[7] สมาคมสแตนเลสไทย. ความรู้เกี่ยวกับสแตนเลส [อินเทอร์เน็ต]. 2565 [เข้าถึงเมื่อ 15 มกราคม 2567]. เข้าถึงจาก <http://www.tssda.org>

[8] LPHITECH. ผู้คิดค้นเลเซอร์ [อินเทอร์เน็ต]. 2564 [เข้าถึงเมื่อ 10 มกราคม 2567]. เข้าถึงจาก <http://www.lphitech.wordpress.com>

[9] บริษัท คีย์เอ็นซ์ (ไทยแลนด์) จำกัด. ความรู้พื้นฐาน [อินเทอร์เน็ต]. 2564 [เข้าถึงเมื่อ 10 มกราคม 2567]. เข้าถึงจาก <http://www.keyence.co.th>

- [10] อรจิตร แจ่มแสง และนิวัฒน์ มูแก้ม. การแก้ปัญหาตอบสนองหลายอย่างของการตัดเลเซอร์สำหรับเหล็ก SM490 โดยใช้การวิเคราะห์ความสัมพันธ์แบบเกรย์. วารสารวิจัย UTK ราชมณฑลกรุงเทพ 2561; 12: 132-143
- [11] Krystian L. Włodarczyk, Marcus Ardrón, Andrew J. Waddie, Andrew Dunn, Matthew D. Kidd, Nicholas J. Weston and Duncan P. Hand. Laser microsculpting for the generation of robust diffractive security markings on the surface of metals. Journal of Materials Processing Technology. 2015; 222: 206-218.
- [12] Jon Inaki Arrizubieta, Aitzol Lamikiz, Magdalena Cortina, Eneko Ukar and Amaia Alberdi. Hardness, grain size and porosity formation prediction on the Laser Metal Deposition of AISI 304 stainless steel. International Journal of Machine Tools and Manufacture. 2018; 135: 53-64.