การหาพารามิเตอร์ที่เหมาะสมในการตัดสเตนเลส เกรด 304 ด้วยเครื่องเลเซอร์ CO_2

To Find the Optimal Cutting Parameters Stainless Grade 304 Laser CO_2

ฤทธิชัย สังฆทิพย์* เฉลิมศักดิ์ ถาวรวัตร์ ประยูร สุรินทร์
สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีปทุมวัน กรุงเทพมหานคร 10330
E-mail: namieptwit@hotmail.co.th*

Rittichai Sangkatip* Chalermsak Thavornwat Prayoon Surin
Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Panhuman Institute of Technology, Bangkok 10330
E-mail: namieptwit@hotmail.co.th*

บทคัดย่อ

ปัจจุบันเหล็กกล้าไร้สนิม หรือสเตนเลสถูกนำมาใช้งานอย่างกว้างขวาง เนื่องจากคุณสมบัติที่ไม่เหมือนเหล็กกล้าทั่วไปคือ ยากต่อการขึ้นสนิม ค่าบำรุงรักษาต่ำ ง่ายต่อการเชื่อมและการขึ้นรูป ระยะเวลาการใช้งานคุ้มค่ากับราคา และยังสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ทั้งหมด อีกทั้งสามารถปรับปรุงคุณสมบัติในการต้านทานการกัดกร่อน และคุณสมบัติอื่นๆ ที่ต้องการให้สูงขึ้นได้โดยการเพิ่มส่วนผสมของโครเมียม หรือเพิ่มธาตุอื่น เช่น โมลิบดิบนัม นิกเกิล และไนโตรเจนเข้าไป ทำให้สเตนเลสมีอยู่มากกว่า 60 ชนิด โดยประมาณ 70% ของการผลิตสเตนเลสทั่วโลกเป็นสเตนเลสตระกูลออสเทนนิติค หรือที่เรียก “ซีรี่ส 300” และที่ถูกนำมาใช้งานอย่างแพร่หลายคือ เกรด 304 งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อหาพารามิเตอร์ที่เหมาะสมในการตัดสเตนเลสเกรด 304 ด้วยเครื่องเลเซอร์ CO_2 สำหรับความเร็วตัดสูงสุดเพื่อลดเวลาการตัด โดยค่าความหยาบผิวที่ลูกค้ายอมรับได้ สำหรับการศึกษาวิจัยนี้ใช้วิธีการทดลองตัดชิ้นงานสเตนเลสเกรด 304 ความหนา 6 มิลลิเมตร ด้วยเครื่องตัดเลเซอร์ CO_2 โดยกำหนดตัวแปรที่นำมาศึกษาคือ พลังงานของเลเซอร์ (Power) ความดันของแก๊สไนโตรเจน (Pressure Gas) และความเร็วตัด (Cutting Speeds) ตัวแปรตามคือ ค่าความหยาบผิวที่ลูกค้ายอมรับได้ (Surface Roughness) โดยใช้เทคนิคการออกแบบการทดลองเชิงแฟคทอเรียล (2^3Factorial Design) จากผลการทดลองและวิเคราะห์ทางสถิติพบว่าพลังงาน ความดัน และความเร็วตัดมีอิทธิพลต่อความหยาบผิวที่ลูกค้ายอมรับได้ อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05 จากผลการทดลองพบว่าค่าที่ให้ความหยาบผิวที่ลูกค้ายอมรับได้ไม่เกิน 1.4 ไมครอน เพื่อความรวดเร็วในการตัดตามความต้องการของลูกค้าคือ การตัดโดยใช้ค่าพลังงานของเลเซอร์ที่ 3800 W ความดันของแก๊สไนโตรเจนที่ 12 bar และค่าความเร็วตัดที่ 1800 มิลลิเมตรต่อนาทีมีค่าเท่ากับ 1.4 ไมครอน

คำหลัก กระบวนการตัดสเตนเลส การทดลองเชิงแฟคทอเรียล ค่าความหยาบผิว เครื่องเลเซอร์ CO_2

Abstract

The stainless steel the unique features such as hard-to-rust steel Low maintenance cost Easy to connect and form. Time to value for money and can be recycled at all. It can improve the corrosion resistance properties. And other features to increase it by adding a mixture of chromium. And add other elements

such as Mo, raw platinum, nickel and nitrogen into the austenitic stainless there are over 60 species, about 70% of the production of stainless steel in the world as a stainless family Maryland. The laws Also known as "Series 300" and is used widely for the purpose of this paper Grade 304. Parameters that is appropriate to the grade 304 stainless steel with a CO_2 laser for cutting up to the time of cutting. By the surface roughness, the client can accept. For this study were cut using a stainless steel grade 304 thickness 6 mm with a CO_2 laser cutting machine with the variables in the study. Energy of the laser (Power), the pressure of nitrogen gas (Pressure Gas) and cutting (Cutting Speeds) the dependent variable is the surface roughness, the client can accept (Surface Roughness) using the techniques of experimental design-oriented Factory Area. Time (2^3 Factorial Design) from the experiments and statistical analysis showed that the energy, pressure and speed influence the surface roughness, the client can accept. The statistical significance level of 0.05 the results showed that the surface roughness less than 1.4 microns, the Customer agrees not to cut the speed of the needs of customers. Cut using a laser power of 3800 W and pressure of nitrogen gas at 12 bar and the cutting speed of 1800 mm per minute is equal to 1.4 microns.

Keywords: Cutting process, Factorial Design, surface roughness, Laser CO_2

1. บทนำ

สเตนเลส หรือชื่ออย่างเป็นทางการคือ “เหล็กกล้าไร้สนิม” เป็นศัพท์ทั่วไปที่ใช้เรียกเหล็กในกลุ่มที่มีความต้านทานการกัดกร่อนสูง สเตนเลสเป็นโลหะผสมระหว่างเหล็กและคาร์บอน ซึ่งส่วนประกอบจะมีปริมาณคาร์บอนต่ำ มีโครเมียมเป็นส่วนผสมหลักประมาณ 10.5% หรือมากกว่าทำให้เกิดการสร้างฟิล์มโครเมียมออกไซด์ (Chromium Oxide Film : CrO2 หรือเรียกว่า Passive Film) ที่มองไม่เห็นเกาะติดแน่นอยู่ที่ผิวหน้าทำให้เหล็กกล้ามีความต้านทานการกัดกร่อน ถ้าฟิล์มที่ผิวหน้านั้นถูกทำลายไม่ว่าจากแรงกล สารเคมี หรือออกซิเจนที่มีอยู่ในบรรยากาศ แม้จำนวนน้อยนิดจะเข้าทำปฏิกิริยากับโครเมียม สร้างฟิล์มโครเมียมออกไซด์ทดแทนขึ้นใหม่ด้วยตัวมันเอง สเตนเลสมีอยู่มากกว่า 60 ชนิด เนื่องจากคุณสมบัติที่ไม่เหมือนใคร เช่น ยากต่อการขึ้นสนิมเมื่อเทียบกับโลหะหรือวัสดุชนิดอื่นๆ ค่าบำรุงรักษาต่ำ ง่ายต่อการเชื่อมและการขึ้นรูป ระยะเวลาการใช้งานคุ้มค่ากับราคา และสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ทั้งหมด จึงทำให้สเตนเลสเป็นโลหะที่ทรงคุณค่า คุณสมบัติและประโยชน์ใช้สอยที่ไร้ขีดจำกัดสเตนเลส แบ่งออกเป็น 5 กลุ่มใหญ่ตามโครงสร้างคือ ออสเทนนิติค เฟอร์ริติค ดูเพล็กซ์ มาร์เทนซิติค และเหล็กกล้าชุบแข็งแบบตกผลึกโดยตระกูลออสเทนนิติค (Austenitic) หรือที่รู้จักกันใน “ซีรี่ส 300” ซึ่งประมาณได้ว่า 70% ของการผลิตสเตนเลสในโลกนี้เป็นสเตนเลสตระกูลออสเทนนิติค ที่ประกอบด้วยคาร์บอนอย่างน้อย 0.15% มีส่วนผสมของโครเมียมอย่างน้อย 16% และนิกเกิล ซึ่งช่วยปรับปรุงคุณสมบัติในการขึ้นรูปประกอบและเพิ่มความทนทานต่อการกัดกร่อน สเตนเลสตระกูลนี้ถูกนำมาใช้งานอย่างกว้างขวาง ไม่ว่าจะเป็นอุปกรณ์เครื่องครัว เครื่องใช้ไฟฟ้า งานตกแต่งอาคาร งานสถาปัตยกรรม อุปกรณ์การผลิตเครื่องดื่มและอาหารที่มีสมบัติต้านทานที่เกี่ยวข้องกับความสะอาดและสุขศาสตร์อนามัย เช่น เครื่องมือในโรงพยาบาล เวชภัณฑ์ สามารถใช้งานที่อุณหภูมิต่ำติดลบ สำหรับถังเก็บแก๊สเหลวและสามารถใช้งานที่อุณหภูมิสูง เช่น ทำท่อแลกเปลี่ยนอุปกรณ์ความร้อน ทำอุปกรณ์ควบคุมหรือกำจัดมลภาวะ และควันพิษ งานท่อ ถังเก็บ ภาชนะที่ใช้ในงานอุตสาหกรรมและภาชนะความดันที่ใช้ในอุตสาหกรรมเคมี ปิโตรเคมี ผลิตภัณฑ์ปิโตรเลียม อุตสาหกรรมเหมืองแร่ อีกทั้งอัตราการบริโภคสเตนเลสตอประชากรของประเทศไทยเพิ่มจาก 1.5 กิโลกรัมในป 2543 เปน 3.3 กิโลกรัมในป 2553 โดยเฉลี่ยยังต่ำกวาอัตราการบริโภคสเตนเลสของโลกที่ 4.5 กิโลกรัม แตจัดเปนประเทศที่บริโภคสเตนเลสตอประชากรสูงเป็นอันดับที่ 12 ของโลก

สำหรับการตัดวัสดุในงานอุตสาหกรรม สามารถแบ่งออกได้ 4 ประเภทคือ เครื่องตัดแก๊ส (Oxyfuel Cutting) เครื่องตัดพลาสม่า (Plasma Arc Cutting) เครื่องตัดพลังงานน้ำ (Waterjet Cutting) เครื่องตัดเลเซอร์ (Laser Cutting) แต่ด้วยคุณสมบัติที่โดดเด่นของการตัดด้วยเครื่องตัดเลเซอร์ เช่น ความเร็วในการตัดสูง รอยตัดแคบ เกิดความร้อนน้อยทำให้ชิ้นงานบิดตัวต่ำ เกิดการสั่นสะเทือนต่ำ เกิดแก๊สน้อย อีกทั้งมีความแม่นยำสูง ทำให้ไม่มีความจำเป็นต้องไปเพิ่มขั้นตอนอื่น หลังการตัด และเหมาะกับงานที่มีจำนวนไม่มากถึงระดับที่จะคุ้มค่าในการทำแม่พิมพ์ LASER เป็นคำที่ย่อมาจาก Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation หมายถึง กระบวนการที่ทำให้รังสีมีการแผ่แบบกระตุ้น คือ มีทิศทางและการถ่ายทอดพลังงานที่แน่นอน เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงชั้นพลังงานของอิเลคตรอนจากชั้นที่สูงกว่าลงสู่วงโคจรของอิเลคตรอนปกติ โดยมีช่วงคลื่นแบบเดียวกันเป็นรังสีขนาน และมีกำลังสูงกว่ารังสีทั่วๆไป กระบวนการสร้างลำแสงเลเซอร์นี้ประกอบไปด้วย แหล่งพลังงาน สารกำเนิดเลเซอร์ (สารตัวกลางเลเซอร์) ท่อเลเซอร์ ระบบนำรังสี ซึ่งจะให้ช่วงคลื่นและกำลังต่างกันไป ขึ้นอยู่กับการนำไปประยุกต์ใช้งาน ซึ่งในปัจจุบันก็มีการนำไปประยุกต์ใช้งานหลากหลาย เช่น Laser Pointer, Laser Printer อีกทั้งมีการนำเลเซอร์ไปใช้อย่างแพร่หลายในวงการต่างๆ มากมาย ตั้งแต่การแพทย์ การทหาร อุตสาหกรรมต่างๆ และหนึ่งในนั้นคือ งานตัดโลหะแผ่น การตัดโลหะด้วยเลเซอร์เป็นการสร้างลำแสงเลเซอร์โดยใช้สารกำเนิดเลเซอร์เป็นแก๊สคือ CO_2 Laser และใช้ระบบนำรังสีเป็นระบบกระจกเงา CO_2 Laser มีประสิทธิภาพในการเปลี่ยนแปลงพลังงานไฟฟ้าสูงถึง 15% หรือมากกว่า จึงมีจุดเด่นที่ประสิทธิภาพสูง ให้กำลังสูง และการปล่อยแสงใช้งานอย่างต่อเนื่อง ดังนั้นจึงพบว่ามีการนำ CO_2 Laser มาใช้งานอย่างมากมายในเครื่องจักรและงานหลายประเภท โดยเฉพาะในงานแปรรูปโลหะแผ่น ซึ่งในปัจจุบันนิยมใช้กันอยู่ในช่วง 1000 – 4000 W เครื่องตัดเลเซอร์สามารถตัดวัสดุได้หลายประเภท เช่น เหล็ก สเตนเลส อลูมิเนียม ทองเหลือง อะครีลิค ฯลฯ แต่ที่เหมาะสมคือ เหล็กและสเตนเลส เนื่องจากคุณสมบัติทางเนื้อวัสดุและพื้นผิว

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อหาพารามิเตอร์ที่เหมาะสมในการตัดสเตนเลส เกรด 304 ด้วยเครื่องเลเซอร์ CO_2 สำหรับความเร็วตัดสูงสุดเพื่อลดเวลาการตัด โดยค่าความหยาบผิวที่ลูกค้ายอมรับได้

2. การทดลอง

2.1 การออกแบบการทดลอง

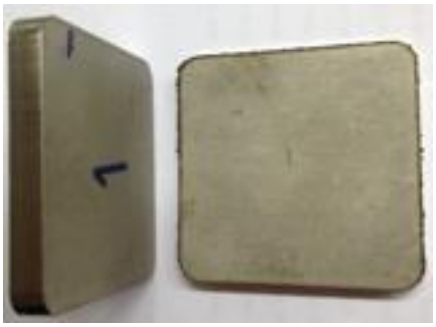
งานวิจัยนี้ใช้วิธีการออกแบบการทดลองเป็นแบบ General Factorial Design (การทดลองแฟคทอเรียล 3 ปัจจัย) ซึ่งได้แบ่งตัวแปรการทดสอบออกเป็น 2 ตัวแปร ได้แก่ ตัวแปรอิสระและตัวแปรตาม ตัวแปรอิสระประกอบด้วย 3 ปัจจัยหลัก ได้แก่ พลังงานของเลเซอร์ มี 2 ระดับคือ 3400 W, 3800 W ความเร็วตัด มี 2 ระดับ คือ 1500 mm/min, 1800 mm/min และความดันของแก๊สไนโตรเจนมี 2 ระดับคือ 12 bar และ 14 bar ใช้วิธีวิเคราะห์ข้อมูลเชิงสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ตัวแปรตามในงานวิจัยนี้คือ ค่าความหยาบผิว โดยทำการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง เพื่อเพิ่มความน่าเชื่อถือให้กับงานวิจัย ผู้วิจัยได้ทำการทดลองรวมทั้งสิ้น 24 การทดลอง

ตารางที่ 1 ปัจจัยและระดับที่ใช้ในการทดลอง

ปัจจัย(Factor)	ระดับ(Level)
พลังงานของเลเซอร์ (Power)	3400 w
	3800 w
ความเร็วตัด (Cutting Speeds)	1500 mm/min
	1800 mm/min
ความดันของแก๊สไนโตรเจน (Pressure Gas)	12 bar
	14 bar

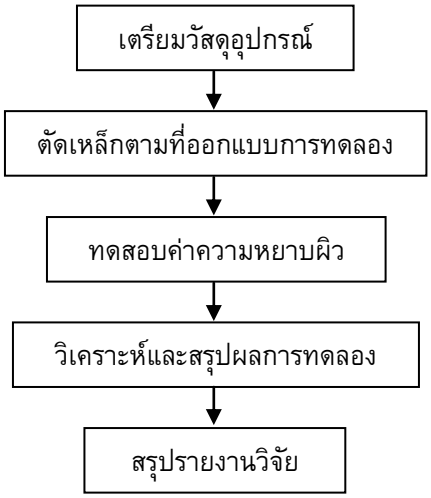
2.2 ชิ้นงานในการทดสอบ

ชิ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิม (สเตนเลส) ตระกูลออสเทนนิติคเกรด 304 ความหนา 6 มม. โดยมีส่วนผสมทางเคมีหลักเป็น C≤0.08% Cr 18-20% Ni 8.0-10.5% Si (Max.) 0.75% ตามมาตรฐาน มอก. (TIS) 1378-2539 ขนาดความกว้าง 300 มม. ความยาว 300 มม.



ภาพที่ 1 ชิ้นงานในการทดสอบ

2.3 ขั้นตอนการทดลอง



ภาพที่ 2 แสดงขั้นตอนการทดลอง

2.4 การเตรียมชิ้นงานทดสอบ

2.4.1 เตรียมเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 304 ความหนา 6 มม. ขนาดความกว้าง 300 มม. ความยาว 300 มม. โดยในการทดสอบนำมาตัดเป็นขนาดความกว้าง 50 มม. ความยาว 50 มม. ภาพที่ 1

2.4.2 เตรียมความพร้อมของเครื่องตัดเลเซอร์ CO_2 Laser

2.4.3 เขียนโปรแกรมการตัดเลเซอร์ ให้ตัดชิ้นงานตามขนาดที่กำหนดไว้ในข้อ 2.4.1

2.5 เครื่องมือและอุปกรณ์ในงานวิจัย

2.5.1 เครื่องตัดเลเซอร์ CO_2 Laser

2.5.2 เครื่องวัดความเรียบผิว (Surface Roughness Tester Gauge Meter)

2.5.3 เวอร์เนียคาร์ลิปเปอร์แบบดิจิตอล ยี่ห้อ Mitutoyo)

2.6 การดำเนินการทดลอง

2.6.1 ตัดชิ้นงานทดสอบตามค่าพารามิเตอร์ที่กำหนดไว้ ตามตารางที่ 1 ตัดโดยวิธีการสุ่มจากโปรแกรม Minitab ที่ออกแบบการทดลองไว้

2.6.2 นำชิ้นงานที่ตัดแล้วมาทำความสะอาด

2.6.3 ทำการวัดขนาดความกว้าง ความยาวของชิ้นงานทดสอบ และบันทึกผล

2.6.4 ทำการวัดค่าความเรียบผิวของชิ้นงานทดสอบและบันทึกผล

2.6.5 นำข้อมูลที่ได้จากการทดลอง มาวิเคราะห์ผล

3. ผลการทดลอง

จากผลการทดลองและวิเคราะห์ทางสถิติ พบว่าพลังงานความถี่ในการปล่อยแสงของเลเซอร์และความเร็วตัดมีอิทธิพลต่อความหยาบผิวที่ลูกค้ายอมรับได้ อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05 จากผลการทดลองพบว่าค่าที่ให้ความหยาบผิวที่ลูกค้ายอมรับได้เพื่อความรวดเร็วในการตัดตามความต้องการของลูกค้าการตัดโดยใช้ค่าพลังงานเลเซอร์ 3800(W) ความดันของแก๊สไนโตรเจน (Pressure Gas) ที่ 12 bar และค่าความเร็วตัด 1800 มิลลิเมตรต่อนาที

3.1 ผลจากการวัดค่าความหยาบผิว

จากการนำชิ้นงานที่ได้จากการตัดด้วยเครื่องตัดเลเซอร์ทั้งหมดนำมาวัดหาค่าความหยาบผิว ภาพที่ 3 จากชิ้นงานทั้งหมดพบว่ามีชิ้นงานที่ให้ค่าความหยาบผิวที่เหมาะสมที่สุดคือในระดับ 1.40 ไมครอน โดยได้จากสภาวะการตัดคือ ใช้ค่าพลังงานเลเซอร์ 3800 W ความดันของแก๊สไนโตรเจน (Pressure Gas) ที่ 12 bar และค่าความเร็วตัด 1800 มิลลิเมตรต่อนาที

ภาพที่ 3 เครื่องวัดค่าความเรียบผิว

3.2 การวิเคราะห์ทางสถิติ

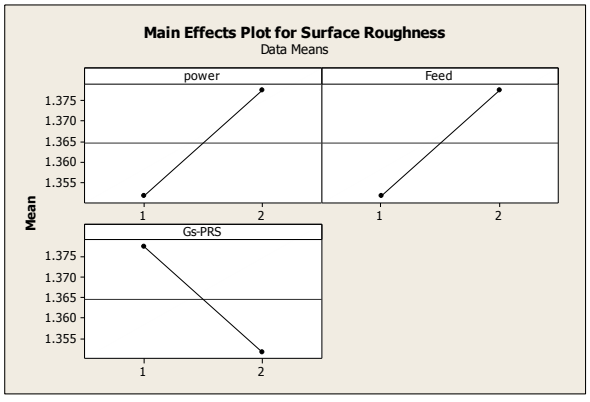
กาวิเคราะห์ผล ANOVA โดยการอ่านค่า P-Value ได้จากตาราง ANOVA ว่าค่า P-Value ของปัจจัยหลักและปัจจัย ร่วมปัจจัยใดที่มีค่าน้อยกว่า ค่า α = 0.05 แสดงว่าปัจจัยตัวนั้น มีอิทธิพลต่อความหยาบผิวหรือหากค่ามากกว่า α = 0.05 แสดงว่าปัจจัยนั้นไม่มีอิทธิพลต่อค่าความหยาบผิว เพื่อเป็นการพิสูจน์ว่าการตัดด้วยลำแสงเลเซอร์ด้วยปัจจัยหลักและปัจจัยร่วมมีอิทธิพลต่อค่าความหยาบผิวอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับ 0.05 หรือ ไม่

ตารางที่ 2 การวิเคราะห์ ANOVA ของค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดลอง

Factor	P-Value
Power	0.000
Feed	0.000
Gs-PRS	0.000
power*Feed	0.000
power*Gs-PRS	0.000
Feed*Gs-PRS	0.000
power*Feed*Gs-PRS	0.000

S = 0.00912871 R-Sq = 99.19%

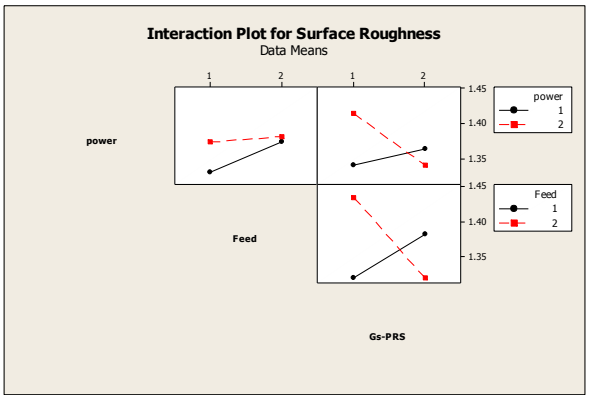
R-Sq (adj) = 98.84%



ภาพที่ 4 กราฟแสดงการทดสอบความเหมาะสมของปัจจัยหลัก

จากผลการทดลอง การทดสอบความเหมาะสมของปัจจัยหลักทั้ง 3 ปัจจัยได้แก่ พลังงานเลเซอร์ ความดันของแก๊สไนโตรเจน ละค่าความเร็วตัด สังเกตจากภาพที่ 4 จะพบว่ากราฟเส้นแต่ล่ะปัจจัยจะมีค่าความเหมาะสมคือค่าพลังงานเลเซอร์ที่ 2 เท่ากับ 3800(W) ความดันของแก๊สไนโตรเจนที่ 1 เท่ากับ12 bar และค่าความเร็วตัดที่ 2 เท่ากับ1800 มิลลิเมตรต่อนาที

จากผลการทดลองการทดสอบความเหมาะสมของปัจจัยหลักทั้ง 3 ปัจจัยได้แก่ ค่าพลังงานเลเซอร์ คู่กับ ค่าความเร็วตัด ค่าพลังงานเลเซอร์ คู่กับ ความดันของแก๊สไนโตรเจน และค่าความเร็วตัด คู่กับ ความดันของแก๊สไนโตรเจน สังเกตจากภาพที่ 5



ภาพที่ 5 การทดสอบความเหมาะสมของปัจจัยร่วม

4. สรุปผลการทดลอง

จากผลการทดลองและวิเคราะห์ทางสถิติ พบว่าพลังงาน ความดัน และความเร็วตัดมีอิทธิพลต่อความหยาบผิวที่ลูกค้ายอมรับได้ อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05 โดยจากการใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ (Minitab) ช่วยในการทดลอง โดยอ่านค่าจาก ค่า P-Value นั้นทั้ง 3 ปัจจัยหลักมีค่าต่ำกว่า α = 0.05 แสดงว่าปัจจัยทั้ง 3 มีอิทธิพลต่อการตัดการตัดสเตนเลส เกรด 304 ที่ส่งผลต่อความเรียบผิว โดยค่าที่ให้ความหยาบผิวที่ลูกค้ายอมรับได้เพื่อความรวดเร็วในการตัดตามความต้องการของลูกค้าคือในระดับ 1.40 ไมครอน ตัดโดยใช้ค่าพลังงานเลเซอร์ 3800(W) ความดันของแก๊สไนโตรเจน (Pressure Gas) ที่ 12 bar และค่าความเร็วตัด 1800 มิลลิเมตรต่อนาที

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ขอขอบคุณสาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีปทุมวัน และคณาจารย์ทุกท่าน ที่ให้ความอนุเคราะห์ข้อมูลและเครื่องมือ เครื่องจักรในการทำวิจัย

เอกสารอ้างอิง

[1] ฆนนัช พระพุทธคุณ, 2552. การศึกษาหาระดับปัจจัยที่เหมาะสมในการผลิตคอนกรีตผสมเสร็จโดยใช้วิธีการออกแบบการทดลอง, วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, สาขาวิศวกรรมอุตสาหการ, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

[2] จักรพันธ์ ตันศรีวงษ์, 2553. การศึกษาหาปัจจัยที่เหมาะสมในการขึ้นรูปบรรจุภัณฑ์พลาสติกชนิดพอลีเอทิลีนสำหรับเครื่องขึ้นรูปแบบสุญญากาศโดยวิธีการออกแบบการทดลอง, วิทยานิพนธ์ สาขาวิศวกรรมอุตสาหการ, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

[3] อภิชาติ ชยานุภัทร์กุล .วารสารเพื่อนสเตนเลส ปีที่ 1 ฉบับที่ 10-11/ มกราคม-กุมภาพันธ์ 2550, วารสารเพื่อนสเตนเลส ปีที่ 7 ฉบับที่ 62/ พฤษภาคม 2554

[4] เลเซอร์ ทฤษฎีละการประยุกต์ Wilson, J.F.B. Hawke's, รศ.สุรพล รักวิจัย เรียบเรียง

[5] T Dobrev, D T Pham and S S Dimov, Electro-chemical Polishing: a technique for surface improvements after Laser milling

[6] ประพล เปี่ยมศักดิ์, การศึกษาตัวแปรที่มีผลต่อความเรียบผิวในการกัดเหล็กกล้าเครื่องมืองานเย็น วิทยานิพนธ์ ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี, 2551