

การศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อรอยเชื่อมใบเลื่อยสายพานโคบอลต์ M42 ด้วยกระบวนการเชื่อมเลเซอร์

Study of factors affecting the weld of M42 cobalt band saw blades using a laser welding process

บัญญัติ พันธุ์ประสิทธิ์เวช¹, ปฏิพัทธ์ หงษ์สุวรรณ¹, ธรรมวิทย์ ประเสริฐ¹, ธนวัตติ์ เอี่ยมสำอางค์¹
และ ธนัตพร จิตตยานูรักษ์^{1*}

ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการและการจัดการ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม
มหาวิทยาลัยศิลปากร ต.พระปฐมเจดีย์ อ.เมือง จ.นครปฐม 73000

E-mail: Cittayanurak.t@gmail.com, Telephone Number: 063 1936550

Received 18 April 2025; Received in revised form 17 May 2025; Accepted 6 June 2025

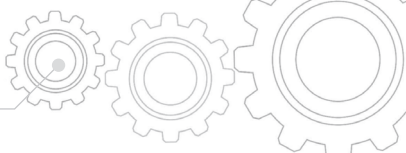
บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มุ่งศึกษาและวิเคราะห์ปัจจัยที่ส่งผลต่อค่าความเค้นแรงดึงของใบเลื่อยสายพาน Cobalt M42 ด้วยการทดสอบแรงดึง หลังจากเชื่อมด้วยเครื่องเชื่อมเลเซอร์รุ่น UG-1000LW ใช้ลวดเชื่อมแบบไส้ฟลักซ์ โดยใบเลื่อยที่นำมาใช้ในการทดลองผ่านการหาค่าความเค้นแรงดึงด้วยเครื่องทดลองแรงดึง รุ่น Waw-1000 Electro-Hydraulic Servo Tensile ตามมาตรฐาน DIN EN ISO 6892-1 โดยค่าความเค้นแรงดึงเฉลี่ย 72 เมกะปาสคาล ปัจจัยที่ใช้ในการทดลอง ได้แก่ กำลังเลเซอร์ 20%, 30% และ 40% อัตราป้อนลวดเชื่อม 6, 8 และ 10 เมตร/นาที และระยะห่างระหว่างรอยต่อในการเชื่อมต่อใบเลื่อย 0.3, 0.6 และ 0.9 มิลลิเมตร โดยออกแบบการทดลองเป็นแบบแฟกทอเรียลเต็มรูปแบบ โดยทำการทดลองทั้งหมด 81 ครั้ง ที่ค่าความเชื่อมั่น 95% จากการวิเคราะห์โดยใช้ ANOVA พบว่าปัจจัยทั้ง 3 ปัจจัยและ 1 ปฏิสัมพันธ์ระหว่างปัจจัย มีผลต่อค่าความเค้นแรงดึงอย่างมีนัยสำคัญ ได้แก่ กำลังเลเซอร์มีค่า P-value เท่ากับ 0.033 อัตราป้อนลวดเชื่อมมีค่า P-value เท่ากับ 0.00 และระยะห่างระหว่างรอยต่อในการเชื่อมต่อใบเลื่อยมีค่า P-value เท่ากับ 0.034 และ ปฏิสัมพันธ์ระหว่างปัจจัย กำลังเลเซอร์ กับ อัตราป้อนลวดเชื่อม มีค่า P-value เท่ากับ 0.00 โดยมีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจอยู่ที่ 92.86% และจากการหาสถานะที่เหมาะสม ของผลการทดลองที่ได้ พบว่าค่าที่เหมาะสมของปัจจัยแต่ละปัจจัยได้แก่ กำลังเลเซอร์ 40% อัตราป้อนลวดเชื่อม 10 เมตร/นาที และ ระยะห่างระหว่างรอยต่อในการเชื่อมต่อใบเลื่อย 0.3 มิลลิเมตร ผลที่ได้จากปัจจัยดังกล่าวนี้สามารถให้ค่าความเค้นแรงดึง 77.33 เมกะปาสคาล ซึ่งสูงกว่าค่าก่อนการเชื่อมเดิม จึงสรุปได้ว่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมสามารถเชื่อมใบเลื่อยสายพานให้มีความแข็งแรงเพียงพอที่จะนำกลับมาใช้งานได้จริง และสามารถหลีกเลี่ยงการเกิดการขาดที่จุดเดิมได้ รวมทั้งช่วยลดต้นทุนในการจัดซื้อใบเลื่อยใหม่

คำสำคัญ: การเชื่อมด้วยเลเซอร์, ใบเลื่อยสายพาน, โปรแกรมมินิแทบ, การทดสอบแรงดึง, ค่าความเค้นแรงดึง

Abstract

This study aimed to investigate and analyze the factors affecting the tensile stress of Cobalt M42 band saw blades after being welded using a UG-1000LW laser welding machine, employing flux-cored filler wire. The tensile testing was performed using a WAW-1000 Electro-Hydraulic Servo Tensile Testing Machine following the DIN EN ISO 6892-1 standard. The average



tensile stress observed was 72 MPa. The experimental factors included laser power (20%, 30%, and 40%), wire feed rate (6, 8, and 10 meters per minute), and joint gap distance (0.3, 0.6, and 0.9 millimeters). A full factorial experimental design was employed, comprising 81 trials with a confidence level of 95%. The results of an ANOVA analysis revealed that all three factors, as well as one interaction between laser power and wire feed rate, significantly affected the tensile stress. The P-values for laser power, wire feed rate, and joint gap distance were 0.033, 0.000, and 0.034, respectively. Additionally, the interaction between laser power and wire feed rate yielded a P-value of 0.000. The model showed a coefficient of determination (R^2) of 92.86%, indicating a high degree of fit. Optimal welding parameters identified using the Response Optimizer were laser power at 40%, wire feed rate at 10 m/min, and joint gap distance at 0.3 mm. These conditions yielded a maximum tensile stress of 77.33 MPa, which is higher than the pre-weld tensile stress, confirming that the optimized parameters enhance the mechanical integrity of the welded joint. Consequently, it can be concluded that the optimized welding parameters enable the reuse of band saw blades, prevent failure at the original weld joint, and reduce the cost of purchasing new blades.

Keywords: Laser welding, Band saw blades, Minitab, Tensile Test, Tensile Stress

บทนำ

ในปัจจุบัน อุตสาหกรรมการผลิตมีการพัฒนาอย่างต่อเนื่อง โดยเฉพาะด้านเทคโนโลยีการแปรรูปวัสดุ ซึ่งกระบวนการตัดโลหะเป็นหนึ่งในขั้นตอนพื้นฐานที่มีความสำคัญต่อการจัดเตรียมวัตถุดิบหรือชิ้นส่วนสำหรับผลิตภัณฑ์ ใบเลื่อยสายพาน (Band Saw Blade) เป็นเครื่องมือตัดที่นิยมใช้อย่างแพร่หลายในภาคอุตสาหกรรม เนื่องจากสามารถตัดวัสดุได้อย่างต่อเนื่อง มีความแม่นยำ และให้ผิวตัดที่ดี โดยเฉพาะใบเลื่อยชนิด Bi-metal ที่ผลิตจากเหล็กโคบอลต์ M42 ซึ่งประกอบด้วยธาตุ Cobalt (Co), Chromium (Cr), Tungsten (W) และ Carbon (C) ช่วยเพิ่มความแข็งแรง ความต้านทานต่อการสึกหรอ และความทนทานต่ออุณหภูมิสูง [1]

แม้ว่าใบเลื่อยสายพานจะมีคุณสมบัติทางกลที่ดี แต่ในการใช้งานจริงยังคงมีโอกาสดังกล่าวหรือขาดก่อนหมดอายุการใช้งาน ซึ่งอาจเกิดจากการตัดวัสดุที่มีความแข็งหรือความหนาสูง การตั้งค่าความเร็วและแรงตึงไม่เหมาะสม การขาดการบำรุงรักษาเครื่องจักร หรือปัญหาด้านคุณภาพของใบเลื่อยเอง สภาวะเหล่านี้ส่งผลให้เกิดความเสียหายต่อใบเลื่อย

ก่อนเวลาอันควร และก่อให้เกิดต้นทุนในการเปลี่ยนใบเลื่อยใหม่อย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้ การศึกษาที่ผ่านมาระบุว่า การเชื่อมเลเซอร์สามารถใช้กับวัสดุความแข็งสูง เช่น M42 โดยให้คุณสมบัติเชิงกลของแนวเชื่อมอยู่ในระดับที่ใช้งานได้จริง นอกจากนี้ การใช้เทคนิคการเชื่อมเลเซอร์ยังช่วยลดผลกระทบจากความร้อนที่เกิดขึ้นในบริเวณรอบแนวเชื่อม สามารถปรับปรุงคุณสมบัติของรอยเชื่อมให้มีความแข็งแรงและทนต่อความล้าได้ดี ช่วยยืดอายุการใช้งานของใบเลื่อย ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อความแข็งแรงและความทนทานของใบเลื่อยที่ได้รับการซ่อมแซม [2-4]

อย่างไรก็ตาม แม้ว่าจะมีงานวิจัยจำนวนมากที่ศึกษาเทคนิคการเชื่อมเลเซอร์ในวัสดุประเภทโลหะผสมพิเศษ เช่น โลหะผสมไทเทเนียม หรือ สแตนเลสที่มีความแข็งสูง [5-6] แต่ยังมีจำนวนน้อยมากที่มุ่งศึกษาไปยังใบเลื่อยสายพาน Bi-metal ที่ผลิตจากเหล็ก Cobalt M42 โดยเฉพาะในประเด็นเกี่ยวกับการซ่อมแซมใบเลื่อยที่ชำรุดผ่านกระบวนการเชื่อมเลเซอร์ งานวิจัยส่วนใหญ่ให้ความสำคัญกับคุณสมบัติเชิงกลของรอยเชื่อมในวัสดุเนื้อเดียว หรือ รอยเชื่อมในชิ้นงานใหม่ มากกว่าการนำชิ้นงานที่ผ่าน

การใช้งานแล้วกลับมาใช้ใหม่ นอกจากนี้ ยังไม่มีงานวิจัยที่เปรียบเทียบผลของพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของกระบวนการเชื่อมเลเซอร์ เช่น กำลังเลเซอร์ อัตราป้อนลวดเชื่อม และระยะห่างระหว่างชิ้นงาน ต่อความแข็งแรงของแนวเชื่อมในใบเลื่อย Cobalt M42 โดยตรง ซึ่งถือเป็นปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อคุณภาพของการเชื่อมแซม

ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อเติมเต็มช่องว่างดังกล่าว โดยการออกแบบการทดลองที่เป็นระบบ เพื่อศึกษาปัจจัยที่ใช้ในการเชื่อมใบเลื่อยสายพานที่ขาดจากการใช้งานแต่ยังไม่หมดอายุการใช้งานด้วยกระบวนการเชื่อมเลเซอร์ โดยหาปัจจัยที่มีผลต่อความแข็งแรงของแนวเชื่อมผ่านการทดสอบแรงดึงเพื่อนำไปใช้ในการประเมินความเป็นไปได้ในการนำใบเลื่อยกลับมาใช้งานใหม่ โดยมีค่าใกล้เคียงของเดิม ซึ่งจะช่วยลดต้นทุนในกระบวนการผลิต และเพิ่มความคุ้มค่าทางเศรษฐกิจในภาคอุตสาหกรรม

วัตถุประสงค์

เพื่อศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อความแข็งแรงดึงของใบเลื่อยสายพาน Cobalt M42 ที่เชื่อมด้วยเครื่องเชื่อมเลเซอร์ UG-1000LW โดยมีค่าใกล้เคียงของเดิมเพื่อนำใบเลื่อยกลับมาใช้งานใหม่ได้ และเป็นการลดต้นทุนในการจัดซื้อใบเลื่อยใหม่

1. วิธีดำเนินงาน

งานวิจัยนี้มุ่งศึกษาและวิเคราะห์ปัจจัยที่ส่งผลต่อค่าความแข็งแรงของค่าความแข็งแรงดึงของใบเลื่อยสายพาน Cobalt M42 ด้วยการทดสอบแรงดึง (Tensile Testing) หลังจากเชื่อมด้วยเครื่องเชื่อมเลเซอร์ UG-1000LW

1.1 เครื่องมือ อุปกรณ์ และวัสดุ

- เครื่องเชื่อมเลเซอร์รุ่น UG-1000LW Hand-held Fiber Laser Welding และหัวเชื่อม ดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 เครื่องเชื่อมเลเซอร์รุ่น UG-1000LW Hand-held Fiber Laser Welding และหัวเชื่อม

- เครื่อง Tensile Testing รุ่น Waw-1000 Electro-Hydraulic Servo Tensile ใช้ความเร็วหัวจับในการทดสอบแรงดึง 5 มิลลิเมตรต่อนาที ดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 เครื่อง Tensile Testing

- รางเลื่อน มีมอเตอร์สำหรับขับเคลื่อนรางเลื่อนให้เข้า-ออก ด้านบนมีที่จับยึดชิ้นงานให้แน่นทั้งสองฝั่งโดยการขันเกลียว โดยรางเลื่อนมีความเร็ว 0.003 เมตรต่อนาที ดังรูปที่ 3



รูปที่ 3 รางเลื่อน

- ใบเลื่อยสายพาน M42 Cobalt ความกว้าง 27 มิลลิเมตร หนา 0.9 มิลลิเมตร ดังรูปที่ 4



รูปที่ 4 ใบเลื่อยสายพาน

การทดลองในครั้งนี้ทางผู้วิจัยได้นำใบเลื่อยสายพานสภาพเดิม ไม่ผ่านการใช้งาน เข้ากระบวนการทดสอบแรงดึงตามมาตรฐาน DIN EN ISO 6892-1 เพื่อหาความเค้นแรงดึง ผลลัพธ์ที่ได้จะถูกนำไปใช้เปรียบเทียบกับความเค้นแรงดึงของใบเลื่อยหลังเชื่อมด้วยเลเซอร์ โดยกำหนดตำแหน่งการดึง 2 ส่วน

1. ใบเลื่อยสายพานบริเวณที่ไม่มีการเชื่อม
2. ใบเลื่อยสายพานบริเวณที่ถูกเชื่อม

โดยค่าความเค้นแรงดึงของใบเลื่อยสายพานสภาพเดิมเฉลี่ยอยู่ที่ 72 เมกะปาสคาล

1.2 ปัจจัยที่ศึกษา

1.2.1 ปัจจัยคงที่

- แรงดันก๊าซ ใช้ก๊าซ CO₂ เป็นแก๊สป้องกัน โดยกำหนดอัตราการไหลของก๊าซ CO₂ ที่ 8 ลิตรต่อนาที
- ลวดเชื่อม ใช้ลวดเชื่อมชนิดไส้ฟลักซ์ขนาดความหนา 1.2 มิลลิเมตร
- ความเร็วหัวจับในการทดสอบแรงดึง 5 มิลลิเมตรต่อนาที
- ความถี่ ที่ใช้ในการเชื่อมกำหนดไว้ที่ 3000 เฮิร์ตซ์
- ความเร็วของรางเลื่อน 0.003 เมตรต่อนาที

1.2.2 ปัจจัยอิสระ

- กำลังเลเซอร์ ในที่นี้จะใช้คำว่า Power โดยกำหนดค่า 20%, 30% และ 40%
- อัตราป้อนลวดเชื่อม ในที่นี้จะใช้คำว่า Feeds โดยกำหนดค่า 6, 8 และ 10 เมตรต่อนาที

- ระยะห่างระหว่างรอยต่อในการเชื่อมต่อใบเลื่อย ในที่นี้จะใช้คำว่า Distance โดยกำหนดค่า 0.3, 0.6 และ 0.9 มิลลิเมตร

1.3 การทดลอง

1.3.1 การออกแบบทดลอง

การทดลองจะทำการเชื่อมต่อชิ้นงาน 2 แผ่นด้วยการเชื่อมเลเซอร์ ชิ้นงานเป็นใบเลื่อยสายพาน Cobalt M42 มีลักษณะเป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้าความกว้าง 27 มิลลิเมตร หนา 0.9 มิลลิเมตร และเนื่องจากข้อจำกัดทางวัสดุ ตัวชิ้นงานจึงถูกตัดให้มีความยาว 50 มิลลิเมตรต่อชิ้น โดยใช้เครื่องเชื่อมเลเซอร์ รุ่น UG-1000LW ลวดเชื่อมชนิดไส้ฟลักซ์ขนาด 1.2 มิลลิเมตร โดยเชื่อมตามแนวของรอยต่อชิ้นงาน



รูปที่ 5 ใบเลื่อยหลังทำการเชื่อม

หลังทำการเชื่อมลักษณะที่ได้เป็นดังรูปที่ 5 นำชิ้นงานเข้าเครื่อง Tensile Testing รุ่น Waw-1000 Electro-Hydraulic Servo Tensile ความเร็วหัวจับในการทดสอบแรงดึง 5 มิลลิเมตรต่อนาที และเว้นระยะเกจ (Gauge length) 50 มิลลิเมตร เพื่อทดสอบแรงดึง แล้วนำข้อมูลที่ได้ไปใช้ในการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม Minitab โดยใบเลื่อยหลังดึงมีลักษณะดังรูปที่ 6



รูปที่ 6 ใบเลื่อยหลังทำการดึง

การทดลองนี้ใช้แผนการทดลองแบบแฟกทอเรียลเต็มรูปแบบ (Full Factorial Design) ที่มี 3 ปัจจัย และแต่ละปัจจัยมี 3 ระดับ ดังตารางที่ 1 โดยมีการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง ส่งผลให้มีจำนวนการ

ทดลองทั้งหมด 81 ครั้ง [7] และใช้การสุ่มตัวอย่างในการดำเนินการทดลอง ดังรูปที่ 7 ตัวอย่างตารางสุ่มการทดลอง

StdOrder	RunOrder	PtType	Blocks	Power	Feed	Distance	Stress
53	1	1	1	40	10	0.6	
47	2	1	1	40	6	0.6	
62	3	1	1	20	10	0.6	
18	4	1	1	30	10	0.9	
36	5	1	1	20	10	0.9	
35	6	1	1	20	10	0.6	
61	7	1	1	20	10	0.3	
59	8	1	1	20	8	0.6	
51	9	1	1	40	8	0.9	
38	10	1	1	30	6	0.6	
2	11	1	1	20	6	0.6	
41	12	1	1	30	8	0.6	
15	13	1	1	30	8	0.9	
9	14	1	1	20	10	0.9	
56	15	1	1	20	6	0.6	
40	16	1	1	30	8	0.3	
23	17	1	1	40	8	0.6	
55	18	1	1	20	6	0.3	
72	19	1	1	30	10	0.9	
48	20	1	1	40	6	0.9	
1	21	1	1	20	6	0.3	
43	22	1	1	30	10	0.3	
8	23	1	1	20	10	0.6	
44	24	1	1	30	10	0.6	
65	25	1	1	30	6	0.6	
80	26	1	1	40	10	0.6	
49	27	1	1	40	8	0.3	
34	28	1	1	20	10	0.3	
21	29	1	1	40	6	0.9	

รูปที่ 7 ตัวอย่างตารางสุ่มการทดลอง

ตารางที่ 1 ตารางแสดงปัจจัยและระดับปัจจัยที่ใช้ในการทดลอง

ปัจจัย	ระดับปัจจัย			หน่วย	สัญลักษณ์
	Low (-1)	Medium (0)	High (+1)		
Power	20	30	40	%	α
Feeds	6	8	10	m/min	β
Distance	0.3	0.6	0.9	mm	γ

1.3.2 การตั้งสมมติฐาน

ในการวิเคราะห์ผลการทดลอง จะมีการตั้งสมมติฐานเพื่อตรวจสอบว่าปัจจัยต่าง ๆ ส่งผลต่อค่าความเค้นแรงดึงหรือไม่ โดยใช้ การวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) ในการตรวจสอบผลกระทบ โดยกำหนดสมมติฐานดังนี้

สมมติฐานที่ใช้ในการทดสอบประกอบด้วย

1.3.2.1 สมมติฐานหลัก (Main Hypothesis)

- สมมติฐานที่ 1: Power (α)

H_0 : Power (α) ไม่มีผลกระทบอย่างมีนัยสำคัญต่อค่าความเค้นแรงดึง ของรอยเชื่อม

$$H_0 : \alpha_1 = \alpha_2 = \dots \alpha_i \text{ } i=1,2,\dots$$

H_1 : Power (α) มีผลกระทบอย่างมีนัยสำคัญต่อค่าความเค้นแรงดึง ของรอยเชื่อม

$H_1 : \alpha_1 \neq \alpha_2 \neq \dots \alpha_i$ อย่างน้อย 1 ตัวไม่เท่ากับ 0

- สมมติฐานที่ 2: Feeds (β)

H_0 : Feeds (β) ไม่มีผลกระทบอย่างมีนัยสำคัญต่อค่าความเค้นแรงดึง ของรอยเชื่อม

$$H_0 : \beta_1 = \beta_2 = \dots \beta_j \text{ } j=1,2,\dots$$

H_1 : Feeds (β) มีผลกระทบอย่างมีนัยสำคัญต่อค่าความเค้นแรงดึง ของรอยเชื่อม

$H_1 : \beta_1 \neq \beta_2 \neq \dots \beta_j$ อย่างน้อย 1 ตัวไม่เท่ากับ 0

- สมมติฐานที่ 3: Distance (γ)

H_0 : Distance (γ) ไม่มีผลกระทบอย่างมีนัยสำคัญต่อค่าความเค้นแรงดึง ของรอยเชื่อม

$$H_0 : \gamma_1 = \gamma_2 = \dots \gamma_k \text{ } k=1,2,\dots$$

H_1 : Distance (γ) มีผลกระทบอย่างมีนัยสำคัญต่อค่าความเค้นแรงดึง ของรอยเชื่อม

$H_1 : \gamma_1 \neq \gamma_2 \neq \dots \gamma_k$ อย่างน้อย 1 ตัวไม่เท่ากับ 0

1.3.2.2 สมมติฐานปฏิสัมพันธ์ (Interaction Hypothesis)

- สมมติฐานที่ 4: ปฏิสัมพันธ์ระหว่างปัจจัย Power (α) และ Feeds (β)

H_0 : ไม่มีปฏิสัมพันธ์อย่างมีนัยสำคัญระหว่าง Power (α) และ Feeds (β) ต่อค่าความเค้นแรงดึง ของรอยเชื่อม

H_1 : มีปฏิสัมพันธ์อย่างมีนัยสำคัญระหว่าง Power (α) และ Feeds (β) ต่อค่าความเค้นแรงดึงของรอยเชื่อม

- สมมติฐานที่ 5: ปฏิสัมพันธ์ระหว่างปัจจัย Power (α) และ Distance (γ)

H_0 : ไม่มีปฏิสัมพันธ์อย่างมีนัยสำคัญระหว่าง Power (α) และ Distance (γ) ต่อค่าความเค้นแรงดึงของรอยเชื่อม

H_1 : มีปฏิสัมพันธ์อย่างมีนัยสำคัญระหว่าง Power (α) และ Distance (γ) ต่อค่าความเค้นแรงดึงของรอยเชื่อม

- สมมติฐานที่ 6: ปฏิสัมพันธ์ระหว่างปัจจัย Feeds (β) และ Distance (γ)

H_0 : ไม่มีปฏิสัมพันธ์อย่างมีนัยสำคัญระหว่าง Feeds (β) และ Distance (γ) ต่อค่าความเค้นแรงดึงของรอยเชื่อม

H_1 : มีปฏิสัมพันธ์อย่างมีนัยสำคัญระหว่าง Feeds (β) และ Distance (γ) ต่อค่าความเค้นแรงดึงของรอยเชื่อม

- สมมติฐานที่ 7: ปฏิสัมพันธ์ระหว่างปัจจัย Power (α), Feeds (β) และ Distance (γ)

H_0 : ไม่มีปฏิสัมพันธ์อย่างมีนัยสำคัญระหว่าง Power (α), Feeds (β) และ Distance (γ) ต่อค่าความเค้นแรงดึงของรอยเชื่อม

H_1 : มีปฏิสัมพันธ์อย่างมีนัยสำคัญระหว่าง Power (α), Feeds (β) และ Distance (γ) ต่อค่าความเค้นแรงดึงของรอยเชื่อม

ในการวิเคราะห์ผลการทดลองนี้ ใช้ระดับความเชื่อมั่น 95% หรือระดับนัยสำคัญ $\alpha = 0.05$

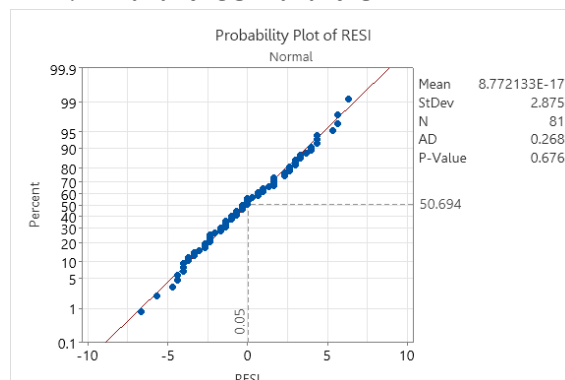
2. ผลการทดลอง

ผลการศึกษาเชื่อมชิ้นงานใบเลื่อยสายพาน Cobalt M42 ความหนา 0.9 มิลลิเมตร จำนวนสองแผ่นเข้าด้วยกัน เป็นดังแสดงในตารางที่ 2 ซึ่งเป็นตารางบันทึกผลการทดลอง เป็นผลการทดลองแบบแฟกทอเรียลเต็มรูปแบบ (Full Factorial Design) 3 ปัจจัย 3 ระดับ และทดลองซ้ำ 3 ครั้ง รวมทั้งหมด 81 ครั้ง ดังแสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ผลการทดลองความเค้นแรงดึง

ผลการทดลอง ที่ระดับปัจจัย Power 20%										
		Distance (mm)								
		0.3			0.6			0.9		
Feeds (m/min)	6	69	60	61	47	46	56	51	43	43
	8	56	65	64	46	51	48	32	35	38
	10	41	46	46	39	31	43	41	41	51
ผลการทดลอง ที่ระดับปัจจัย Power 30%										
		Distance (mm)								
		0.3			0.6			0.9		
Feeds (m/min)	6	69	61	65	44	41	40	35	32	40
	8	68	66	59	57	62	66	54	56	64
	10	64	65	56	61	52	63	37	46	42
ผลการทดลอง ที่ระดับปัจจัย Power 40%										
		Distance (mm)								
		0.3			0.6			0.9		
Feeds (m/min)	6	36	30	37	30	30	31	32	31	30
	8	60	57	61	69	62	59	54	50	49
	10	76	75	81	67	72	74	67	61	60

2.1 การตรวจสอบการกระจายตัว



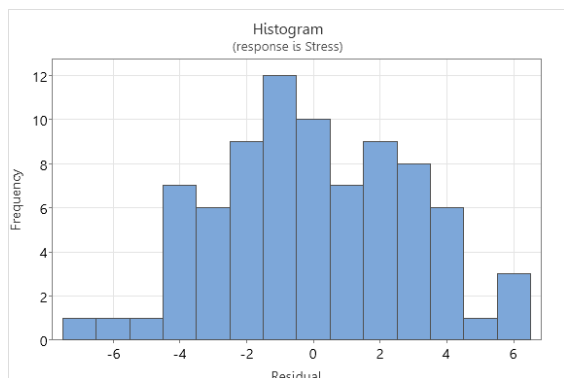
รูปที่ 8 การทดสอบ Normality test ค่าความเค้นที่ได้จากการดึง

จากรูปที่ 8 แสดงการทดสอบ Normality test ค่าความเค้น ได้ทำการทดสอบ Normality test เป็นการตรวจสอบการกระจายตัวแบบปกติ ซึ่งพบว่า P-value = 0.676 > 0.05 ซึ่งสรุปได้ว่าการกระจายตัวของ Residual มีการกระจายตัวตามแนวเส้นตรง ข้อมูลอยู่ในแนวเส้น ทำให้ประมาณได้ว่าข้อมูลมีการแจกแจงแบบปกติ

2.2 การตรวจผลการทดลอง

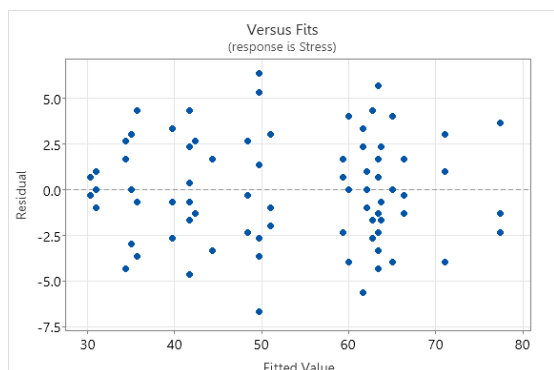
จากผลการทดลองนำมาตรวจสอบความเหมาะสมและความถูกต้องของข้อมูลที่ได้จากการ

ทดลอง พบว่า กราฟ Histogram ดังรูปที่ 9 ที่สามารถลากเส้นโค้งที่มีลักษณะใกล้เคียงกับรูประฆังคว่ำแสดงว่าเศษตกค้างของข้อมูลมีการแจกแจงแบบปกติ ลักษณะกราฟกระจายแบบธรรมชาติ จุดที่มีความสูงที่สุดคล้ายโค้งระฆังคว่ำ ข้อมูลส่วนมากเข้าใกล้ศูนย์กลางและมีการกระจายออกด้านซ้ายและขวาอย่างสมมาตร



รูปที่ 9 กราฟ Histogram

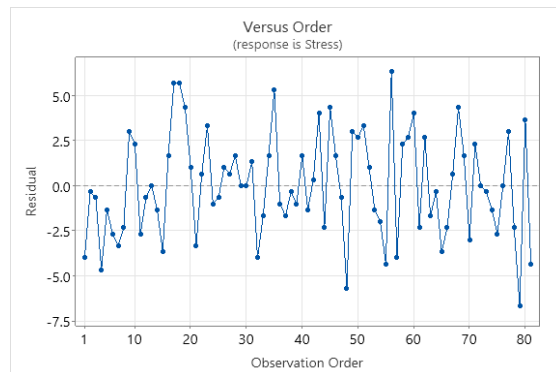
กราฟ Versus Fits ดังรูปที่ 10 แสดงการกระจายตัวของส่วนตกค้าง (Residual) เทียบกับ Fitted Value มีลักษณะกระจัดกระจายอยู่รอบเส้นกลางและไม่มีรูปแบบที่แน่นอน แสดงว่าเศษตกค้างเป็นแบบสุ่มและมีความแปรปรวนที่เท่ากันหรือคงที่สามารถนำข้อมูลดังกล่าวไปทำการวิเคราะห์ความถดถอยเชิงเส้นอย่างง่ายในขั้นตอนต่อไปได้



รูปที่ 10 กราฟ Versus Fits

กราฟ Versus order เป็นกราฟที่ใช้ตรวจสอบดูว่าส่วนตกค้างนั้นขึ้นอยู่กับเวลาที่เปลี่ยนไปในการเก็บข้อมูลหรือไม่ ซึ่งบนกราฟนี้ไม่ควรปรากฏลักษณะของ

แนวโน้มหรือรูปแบบใดๆ อย่างชัดเจน ซึ่งควรมีการกระจายตัวขึ้นลงอย่างสม่ำเสมอ ดังนั้นจากรูปที่ 11 สามารถสรุปได้ว่าข้อมูลที่ได้นำมาวิเคราะห์ สามารถให้ผลการวิเคราะห์ที่ถูกต้องและเชื่อถือได้



รูปที่ 11 กราฟ Versus order

2.3 การวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA)

การวิเคราะห์ความแปรปรวนของข้อมูลค่าของช่องว่างที่เกิดจากรอยตัด ผลการวิเคราะห์ความถดถอยของข้อมูล (General Factorial Regression) โดยโปรแกรม Minitab ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ได้ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของข้อมูล ดังรูปที่ 12

Factor Information

Factor	Type	Levels	Values
Power	Fixed	3	20, 30, 40
Feed	Fixed	3	6, 8, 10
Distance	Fixed	3	0.3, 0.6, 0.9

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	26	9309.1	358.04	2.93	0.000
Linear	6	3945.5	657.58	5.37	0.000
Power	2	887.4	443.72	3.63	0.033
Feed	2	2177.4	1088.68	8.90	0.000
Distance	2	880.7	440.35	3.60	0.034
2-Way Interactions	12	4738.0	394.83	3.23	0.002
Power*Feed	4	3423.8	855.96	7.00	0.000
Power*Distance	4	736.0	184.01	1.50	0.214
Feed*Distance	4	578.1	144.53	1.18	0.329
3-Way Interactions	8	625.6	78.20	0.64	0.741
Power*Feed*Distance	8	625.6	78.20	0.64	0.741
Error	54	6606.7	122.35		
Total	80	15915.7			

Model Summary

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
9.88889	92.86%	89.42%	83.93%

รูปที่ 12 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวน

2.3.1 ค่าความเหมาะสมของแบบจำลอง (Model Summary)

จากรูปที่ 12 ค่า $R^2 = 92.86\%$ บ่งชี้ว่าแบบจำลองที่ใช้สามารถอธิบายความแปรปรวนของค่าแรงดึงได้ถึง 92.86% ซึ่งแสดงให้เห็นว่าแบบจำลองสามารถอธิบายความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยที่ศึกษา (Power, Feeds, Distance) และค่าความเค้นแรงดึงของการเชื่อมได้อย่างมีประสิทธิภาพ

ค่า $R^2(\text{adj}) = 89.42\%$ และ $R^2(\text{pred}) = 83.93\%$ เป็นตัวชี้วัดความสอดคล้องของแบบจำลองกับข้อมูลใหม่ที่ไม่ได้ใช้ในการสร้างแบบจำลอง ซึ่งแสดงให้เห็นว่าแบบจำลองนี้สามารถทำนายค่าผลลัพธ์ได้แม่นยำ และสามารถทำนายค่าแรงดึงจากการทดลองในอนาคตได้อย่างน่าเชื่อถือ

ค่า $S = 9.89$ คือค่าเฉลี่ยของส่วนเหลือ (Residuals) ซึ่งแสดงถึงค่าความคลาดเคลื่อนระหว่างค่าที่ได้จากการทำนายและค่าจริงที่ได้จากการทดลอง แม้ว่าแบบจำลองจะมีความแม่นยำสูง แต่ยังคงมีความคลาดเคลื่อนอยู่ในระดับที่สามารถยอมรับได้

ทั้งนี้ผลลัพธ์ที่ได้แสดงถึงความเหมาะสมของแบบจำลองในการอธิบายและทำนายค่าแรงดึงที่เกิดจากกระบวนการเชื่อมด้วยเลเซอร์

2.3.2 วิเคราะห์ความแปรปรวนโดยโปรแกรม Minitab (ANOVA) เพื่อทดสอบสมมติฐาน

สมมติฐานที่ 1: Power (α)

- กำลังเลเซอร์ (Power) มีผลต่อค่าความเค้นแรงดึงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ Reject H_0 และ Accept H_1 ($P=0.033 < \alpha=0.05$)

สมมติฐานที่ 2: Feeds (β)

- อัตราป้อนลวดเชื่อม (Feeds) มีผลต่อค่าความเค้นแรงดึงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ Reject H_0 และ Accept H_1 ($P=0.000 < \alpha=0.05$)

สมมติฐานที่ 3: Distance (γ)

- ระยะห่างระหว่างรอยต่อในการเชื่อมต่อใบเลื่อย (Distance) มีผลต่อค่าความเค้นแรงดึงอย่างมี

นัยสำคัญทางสถิติ Reject H_0 และ Accept H_1 ($P=0.034 < \alpha=0.05$)

สมมติฐานที่ 4: ปฏิสัมพันธ์ระหว่างปัจจัย Power (α) และ Feeds (β)

- ปัจจัยร่วมระหว่าง กำลังเลเซอร์ (Power) และ อัตราป้อนลวดเชื่อม (Feeds) มีผลต่อค่าความเค้นแรงดึงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ Reject H_0 และ Accept H_1 ($P=0.000 < \alpha=0.05$)

สมมติฐานที่ 5: ปฏิสัมพันธ์ระหว่างปัจจัย Power (α) และ Distance (γ)

- ปัจจัยร่วมระหว่าง กำลังเลเซอร์ (Power) และ ระยะห่างระหว่างรอยต่อในการเชื่อมต่อใบเลื่อย (Distance) ไม่มีผลต่อค่าความเค้นแรงดึงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ Accept H_0 และ Reject H_1 ($P=0.214 > \alpha=0.05$)

สมมติฐานที่ 6: ปฏิสัมพันธ์ระหว่างปัจจัย Feeds (β) และ Distance (γ)

- ปัจจัยร่วมระหว่าง อัตราป้อนลวดเชื่อม (Feeds) และ ระยะห่างระหว่างรอยต่อในการเชื่อมต่อใบเลื่อย (Distance) ไม่มีผลต่อค่าความเค้นแรงดึงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ Accept H_0 และ Reject H_1 ($P=0.329 > \alpha=0.05$)

สมมติฐานที่ 7: ปฏิสัมพันธ์ระหว่างปัจจัย Power (α), Feeds (β) และ Distance (γ)

- ปัจจัยร่วมระหว่าง กำลังเลเซอร์ (Power) และ อัตราป้อนลวดเชื่อม (Feeds) และ ระยะห่างระหว่างรอยต่อในการเชื่อมต่อใบเลื่อย (Distance) ไม่มีผลต่อค่าความเค้นแรงดึงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ Accept H_0 และ Reject H_1 ($P=0.741 > \alpha=0.05$)

2.4 การวิเคราะห์อันตรกิริยา

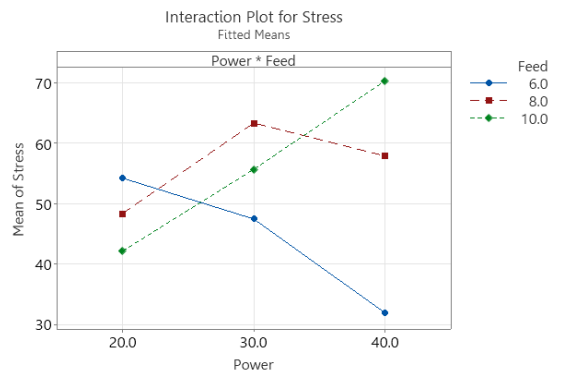
จากรูปที่ 13 แสดงกราฟ Interaction Plot สำหรับค่าเฉลี่ยของ Stress ภายใต้การเปลี่ยนแปลงของสามปัจจัย ได้แก่ Power, Feed, Distance โดยวัตถุประสงค์เพื่อวิเคราะห์ปฏิสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยแต่ละคู่ ซึ่งมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของค่าความเค้นแรงดึง (Stress)

ปฏิสัมพันธ์ระหว่าง Power และ Feed จากกราฟดังรูปที่ 13(ก) พบว่าเส้นแสดงค่าเฉลี่ยของ Stress สำหรับระดับ Feed ต่าง ๆ มีลักษณะไม่ขนานกัน และตัดกันในช่วง ซึ่งเป็นลักษณะของการเกิดปฏิสัมพันธ์อย่างมีนัยสำคัญ ระหว่างปัจจัย Power และ Feed กล่าวคือ ผลของการเปลี่ยนแปลงค่า Power ต่อค่า Stress ขึ้นอยู่กับระดับของ Feed ที่ใช้

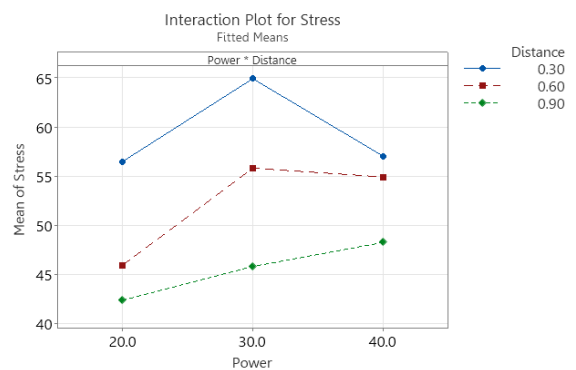
ปฏิสัมพันธ์ระหว่าง Power และ Distance จากกราฟดังรูปที่ 13(ข) พบว่าเส้นของระดับ Distance ทั้งสามมีลักษณะเกือบขนานกัน และไม่มีการตัดกันอย่างชัดเจน แสดงให้เห็นว่า ไม่มีปฏิสัมพันธ์ระหว่าง Power และ Distance ในการส่งผลต่อค่า Stress ผลของการเปลี่ยนแปลงค่า Power ต่อ Stress จึงสามารถพิจารณาได้โดยไม่ต้องคำนึงถึงค่า Distance ที่ใช้

ปฏิสัมพันธ์ระหว่าง Feed และ Distance จากกราฟดังรูปที่ 13(ค) เส้นกราฟไม่ขนานกันอย่างสมบูรณ์ โดยเฉพาะในระดับ Feed 6.0 ที่มีความแตกต่างระหว่างค่า Distance ชัดเจนมากขึ้น อย่างไรก็ตาม ไม่มีการตัดกันของเส้นกราฟ จึงอาจกล่าวได้ว่า มีแนวโน้มของการเกิดปฏิสัมพันธ์ระหว่าง Feed และ Distance แต่ไม่รุนแรงเท่าคู่ของ Power และ Feed การพิจารณาผลของ Feed ควรคำนึงถึงระดับของ Distance ด้วย แต่ความสัมพันธ์อาจไม่ถึงขั้นมีนัยสำคัญทางสถิติ

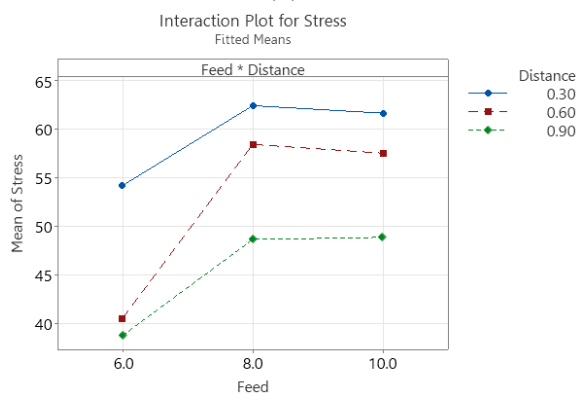
กราฟ Main Effects Plot for Stress ดังรูปที่ 14 แสดงผลกระทบหลักเพื่อตรวจสอบความแตกต่างระหว่างค่าเฉลี่ยระดับสำหรับปัจจัยทั้ง 3 ปัจจัย ผลกระทบหลักจะเกิดขึ้นเมื่อปัจจัยต่างระดับส่งผลต่อการตอบสนองต่างกัน กราฟผลกระทบหลักจะแสดงค่าเฉลี่ยการตอบสนองสำหรับปัจจัยแต่ละระดับที่เชื่อมต่อกันด้วยเส้นตรง



(ก)

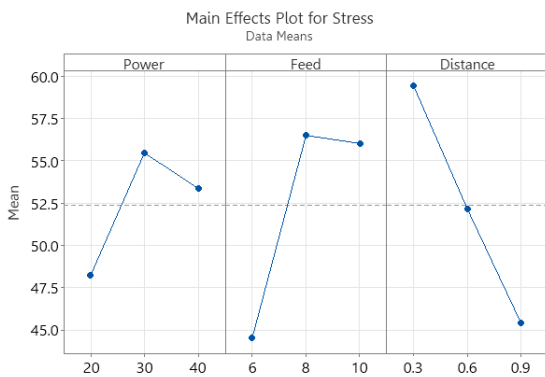


(ข)



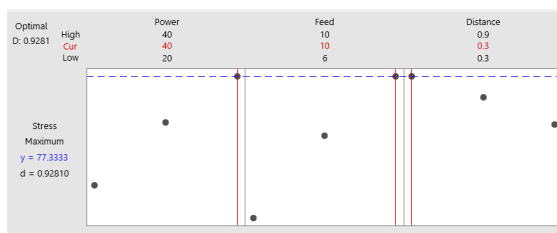
(ค)

รูปที่ 13 อันตรกิริยาแบบ 3 ปัจจัย ปฏิสัมพันธ์ระหว่าง (ก) Power และ Feed (ข) Power และ Distance (ค) Feed และ Distance



รูปที่ 14 กราฟ Main Effects Plot for Stress

2.5 การหาค่าที่เหมาะสมของปัจจัย



รูปที่ 15 การวิเคราะห์ค่าที่เหมาะสมสำหรับค่าความเค้นแรงดึง

จากการวิเคราะห์ Response optimizer โปรแกรม Minitab ที่ระดับความเชื่อมั่นที่ 95% ดังรูปที่ 15 ในการวิเคราะห์ข้อมูลพบว่าค่าที่เหมาะสมที่สุดสำหรับค่าความเค้นแรงดึง คือ 77.33 MPa จากปัจจัยที่ใช้ ได้แก่ กำลังเลเซอร์ 40% อัตราป้อนลวดเชื่อม 10 m/min ระยะห่างระหว่างชิ้นงาน 0.3 mm

2.6 การวิเคราะห์ผลเชิงสถิติด้วย Regression

จากผลการวิเคราะห์ ได้สมการถดถอยเชิงเส้นที่ใช้พยากรณ์ค่าการรับแรงดึงดังนี้

Regression Equation

$$\text{Stress} = 35.60 + 0.257 \text{ Power} + 2.880 \text{ Feed} - 23.33 \text{ Distance}$$

การตีความสมการ

ค่าสัมประสิทธิ์ของ Power (0.257) หมายถึง ยิ่งเพิ่มกำลังเลเซอร์ ค่าความเค้นจะ เพิ่มขึ้นเล็กน้อย

ค่าสัมประสิทธิ์ของ Feed (2.880) หมายถึง ยิ่งเพิ่มอัตราป้อนลวดเชื่อม ค่าความเค้นจะ เพิ่มขึ้นมาก

ค่าสัมประสิทธิ์ของ Distance (-23.33) หมายถึง ยิ่งระยะห่างมาก ค่าความเค้นจะ ลดลงอย่างชัดเจน

จากสมการถดถอยเชิงเส้นที่ได้นำมากำหนดค่าปัจจัยตามสถานะที่เหมาะสมจาก Response Optimizer คือ Power = 40 (%), Feed = 10 (เมตร/นาที), Distance = 0.3 (มิลลิเมตร)

เมื่อนำค่าดังกล่าวเข้าสมการ จะได้

$$\text{Stress} = 35.60 + (0.257 \times 40) + (2.880 \times 10) - (23.33 \times 0.3)$$

$$\text{Stress} = 35.60 + 10.28 + 28.80 - 6.999$$

$$\text{Stress} = 67.681 \text{ MPa}$$

ดังนั้น ค่าความเค้นแรงดึงที่ได้จากการคำนวณตามสมการถดถอยข้างต้น เท่ากับ 67.681 MPa ซึ่งต่ำกว่าค่าที่ได้จาก Response optimization อยู่ประมาณ 9.65 เมกะปาสคาล หรือคิดเป็นการคลาดเคลื่อน 12.48%

ความคลาดเคลื่อนดังกล่าวสามารถอธิบายได้จากข้อจำกัดของสมการถดถอยเชิงเส้น ซึ่งเป็นแบบจำลองที่อาศัยสมมติฐานว่าความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรต้นและตัวแปรตามเป็นเชิงเส้น (linear relationship) ขณะที่กระบวนการเชื่อมด้วยเลเซอร์ในความเป็นจริงมีลักษณะที่ซับซ้อน และมักมีพฤติกรรมแบบไม่เชิงเส้น (non-linear behavior) ทำให้แบบจำลองเชิงเส้นไม่สามารถอธิบายผลตอบแทนได้ครบถ้วนในทุกกรณี ผลการศึกษานี้สอดคล้องกับงานวิจัยของ Kumar et al. (2022) [8] ได้กล่าวถึงการใช้วิธีการเพิ่มประสิทธิภาพแบบหลายวัตถุประสงค์ (Multi-objective optimization) เพื่อเพิ่มสมบัติทางกลของชิ้นส่วนที่เชื่อมด้วยเลเซอร์ โดยใช้วิธีการ Response Surface Methodology (RSM) ซึ่งเป็นแนวทางที่คล้ายคลึงกับการใช้ Response Optimizer ในโปรแกรม Minitab บทความนี้ชี้ให้เห็นว่าการใช้เครื่องมือเพิ่มประสิทธิภาพสามารถให้ค่าที่เหมาะสม

ที่สุดสำหรับพารามิเตอร์การเชื่อม แต่ผลลัพธ์ที่ได้อาจแตกต่างจากค่าที่ได้จากสมการถดถอยเชิงเส้น เนื่องจากความซับซ้อนของกระบวนการเชื่อม นอกจากนี้ยังสอดคล้องกับ Singh et al. (2021)[9] ได้ทำการวิจัยเกี่ยวกับการพยากรณ์ค่าความเค้นแรงดึงสูงสุดในรอยเชื่อม และรายงานว่าการค่าที่ได้จากสมการถดถอยมักมีความคลาดเคลื่อนจากค่าจริง โดยเฉพาะเมื่อมีตัวแปรแฝงหรือความซับซ้อนของกระบวนการที่แบบจำลองไม่สามารถจับได้ แนะนำให้ใช้เครื่องมือการเพิ่มประสิทธิภาพควบคู่กับการพยากรณ์เพื่อให้ผลที่แม่นยำและเหมาะสมสำหรับการใช้งานจริงมากยิ่งขึ้น

จากการวิเคราะห์ดังกล่าว จึงสามารถสรุปได้ว่าเครื่องมือ Response Optimizer เป็นเครื่องมือที่มีประสิทธิภาพสูงในการหาเงื่อนไขที่เหมาะสมที่สุดในกระบวนการเชื่อม โดยเฉพาะเมื่อเป้าหมายคือการเพิ่มค่าความเค้นแรงดึงสูงสุด ขณะที่สมการถดถอยควรถูกใช้เพื่อวิเคราะห์แนวโน้มภาพรวม

3. สรุปผลการทดลอง

การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อวิเคราะห์ปัจจัยที่ส่งผลต่อความเค้นแรงดึง ด้วยการเชื่อมเลเซอร์ ผลการวิเคราะห์ ANOVA แสดงให้เห็นว่า ปัจจัยหลักทั้งสาม ได้แก่ กำลังเลเซอร์ (Power), อัตราการป้อนลวดเชื่อม (Feed), ระยะห่างระหว่างรอยต่อในการเชื่อมต่อใบบน (Distance) มีผลต่อความเค้นแรงดึง (Stress) ของรอยเชื่อมอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% รวมถึงปฏิสัมพันธ์ระหว่างกำลังเลเซอร์และอัตราการป้อนลวดเชื่อม มีผลอย่างมีนัยสำคัญ โดยมีค่า $R^2 = 92.86\%$ แสดงว่าโมเดลสามารถอธิบายความแปรปรวนของค่า Stress ได้ดี และจากการวิเคราะห์ค่าที่เหมาะสมที่สุด (Response optimization) พบว่าเงื่อนไขที่ให้ค่าความเค้นแรงดึง (Stress) สูงสุดเท่ากับ 77.33 เมกะปาสคาล คือ Power = 40%, Feed = 10 เมตรต่อนาที และ Distance = 0.3 มิลลิเมตร และจากแบบจำลองสมการถดถอยเชิงเส้นสามารถเขียนเป็นสมการดังนี้ $Stress = 35.60 + 0.257(Power) + 2.880(Feed) - 23.33(Distance)$

เมื่อนำเงื่อนไขจากการวิเคราะห์ค่าที่เหมาะสมที่สุด (Response optimization) ที่ให้ค่าความเค้นแรงดึงสูงสุด ใส่ลงในสมการถดถอยเชิงเส้น ผลลัพธ์ที่ได้ $Stress = 67.681$ เมกะปาสคาล จึงสรุปได้ว่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมสามารถเชื่อมใบบนได้อย่างมีประสิทธิภาพให้มีความแข็งแรงเพียงพอที่จะนำกลับมาใช้งานได้จริง และสามารถหลีกเลี่ยงการเกิดการขาดที่จุดเดิมได้ รวมทั้งช่วยลดต้นทุนในการจัดซื้อใบบนใหม่

3.1 ข้อเสนอแนะ

3.1.1 ข้อเสนอแนะเชิงเทคนิค

ในกระบวนการเชื่อมใบบน เลื่อยสายพาน ควรควบคุมระยะห่างระหว่างชิ้นงานให้น้อยที่สุดเท่าที่เป็นไปได้ (ไม่เกิน 0.3 มิลลิเมตร) เพื่อให้เกิดรอยเชื่อมที่แข็งแรงและต่อเนื่อง

- ควรเลือกใช้ค่ากำลังเลเซอร์และอัตราการป้อนลวดที่เหมาะสมร่วมกัน เพื่อให้การเติมลวดและการหลอมเกิดขึ้นอย่างมีประสิทธิภาพสูงสุด
- หากมีความต้องการที่จะได้ค่าความเค้นแรงดึงที่สูงขึ้น จากงานวิจัยของ Lazarchuk, K., & Rebezniuk, I. (2022).[10] ได้สรุปว่าการตัดชิ้นงานให้ทำมุมก่อนนำมาเชื่อมต่อกันนั้นสามารถเพิ่มค่าความเค้นแรงดึงให้มากขึ้นได้

3.1.2 ข้อเสนอแนะสำหรับการศึกษารั้งต่อไป

- ควรศึกษาลักษณะจุลโครงสร้างของรอยเชื่อม (Microstructure) และความแข็ง (Hardness) เพื่อยืนยันคุณภาพของรอยเชื่อมทั้งในเชิงกลศาสตร์และเชิงวัสดุศาสตร์
- ควรขยายการทดลองไปยังใบบนชนิดอื่นหรือวัสดุฐานอื่น เพื่อประเมินความเหมาะสมของกระบวนการเชื่อมเลเซอร์ในบริบทที่หลากหลายยิ่งขึ้น

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณคณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ และการจัดการ มหาวิทยาลัยศิลปากร ที่เอื้อเฟื้อสถานที่ งบประมาณ วัสดุอุปกรณ์ และสิ่งต่าง ๆ สำหรับการทํารายงานในครั้งนี้

เอกสารอ้างอิง

- [1] Carpenter Technology, "M42® Specialty Alloy," [Online]. Available: <https://www.carpentertechnology.com/alloy-finder/m42>. [Accessed: March 7, 2024].
- [2] Zhang, H., Chen, G., Zhang, Y., Zhang, H., & Liu, J. (2016). Study of the microstructure and properties of m42x32 dissimilar metal CO₂ laser welding joints. *Optik*, 127(4), 2052–2056.
- [3] Bergmann, J. P., & Stambke, M. (2014). Fatigue of laserbeam welded joints of high-carbon steel strips. *Physics Procedia*, 56, 435–443.
- [4] Materials Science and Metallurgy Department, University of Cambridge, England. July (2002) LASER WELDING - Literature Review.
- [5] Cao, Y., et al. (2018). Optimizing pulsed Nd:YAG laser beam welding process for thin AISI 316L sheet. *Optics & Laser Technology*, 108, 347–356.
- [6] Patel, P., et al. (2019). Parameter Optimization for Laser Welding of High-Strength Dissimilar Materials. *Materials Today: Proceedings*, 18, 1573–1580.
- [7] Montgomery, D. C. (2017). Design and analysis of experiments (9th ed.). Wiley.
- [8] Kumar, A., Patel, R., & Singh, S. (2022). Multi-objective optimization of laser welding parameters using response surface methodology. *Journal of Manufacturing Processes*, 76, 123-135.
- [9] Singh, M., Sharma, P., & Gupta, V. (2021). Modeling and prediction of tensile strength in laser welded joints using regression and optimization techniques. *Materials Today: Proceedings*, 45(5), 982-990.
- [10] Lazarchuk, K., & Rebezniuk, I. (2022). Increasing the strength of the welded joint in band saws. *PRO LIGNO*, 18(2), 29–38.