

การศึกษาการเชื่อมซ่อมแม่พิมพ์ฉีดพลาสติก เกรด P20 ด้วยกระบวนการ
เชื่อมเลเซอร์ ชนิด Nd: YAG



นายเกษมสันต์ แสงสาร

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมระบบอุตสาหกรรมและสิ่งแวดล้อม
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ปีการศึกษา 2566

THE STUDY OF PLASTIC INJECTION MOLD GRADE P20 REPAIRING
BY USING ND: YAG LASER WELDING PROCESS



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the
Degree of Master of Engineering in Industrial Systems And Environmental Engineering
Suranaree University of Technology
Academic 2023

การศึกษาการเชื่อมซ่อมแม่พิมพ์ฉีดพลาสติก เกรด P20 ด้วยกระบวนการเชื่อมเลเซอร์
ชนิด Nd: YAG

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตาม
หลักสูตรปริญญาโทบริหารธุรกิจ

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์


.....
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นรา สมัตถภาพงศ์)
ประธานกรรมการ


.....
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จกมล ศรีธร)
กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)


.....
(รองศาสตราจารย์ ดร.อิศรทัต พึ่งอัน)
กรรมการ


.....
(รองศาสตราจารย์ ดร.ยุพาพร รักสกุลพิวัฒน์)
รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการและประกันคุณภาพ


.....
(รองศาสตราจารย์ ดร.พรศิริ จงกล)
คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

เกษมสันต์ แสงสาร: การศึกษาการเชื่อมซ่อมแม่พิมพ์ฉีดพลาสติกเกรด P20 ด้วยกระบวนการเชื่อมเลเซอร์ ชนิด Nd: YAG (THE STUDY OF PLASTIC INJECTION MOLD GRADE P20 REPAIRING BY USING ND: YAG LASER WELDING PROCESS)

อาจารย์ที่ปรึกษา: ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จกมล ศรีธร, 75 หน้า

คำสำคัญ: การเชื่อมเลเซอร์ชนิด Nd: YAG/แม่พิมพ์ฉีดพลาสติก/เหล็ก AISI P20/เชื่อมซ่อม

กระบวนการเชื่อมด้วยเลเซอร์เป็นเทคโนโลยีที่ได้รับความนิยมอย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมสมัยใหม่ ด้วยคุณสมบัติเด่นในการควบคุมความร้อนอย่างแม่นยำและจำกัดพื้นที่ที่ได้รับผลกระทบ กระบวนการนี้จึงเหมาะสมในงานซ่อมบำรุงแม่พิมพ์ฉีดพลาสติก ซึ่งต้องการความแม่นยำ และไม่ส่งผลกระทบต่อโครงสร้างเดิมของชิ้นงานมากเกินไป โดยในการศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อวิเคราะห์ผลของพารามิเตอร์การเชื่อม ได้แก่ ความถี่ของพัลส์และระยะเวลาของพัลส์ ต่อคุณภาพของแนวเชื่อมในเหล็กแม่พิมพ์ฉีดพลาสติกเกรด AISI P20 โดยใช้กระบวนการเชื่อมเลเซอร์ชนิด Nd:YAG เพื่อทำการวิเคราะห์โครงสร้างโลหะวิทยาทั้งในระดับมหภาคและจุลภาค รวมถึงการทดสอบความแข็งแรงของแนวเชื่อมเพื่อประเมินผลกระทบจากพารามิเตอร์ที่มีการใช้ในการทดลอง

ผลการทดลองพบว่า การเพิ่มความถี่ของพัลส์และระยะเวลาของพัลส์ ช่วยให้แนวเชื่อมมีความกว้างเพิ่มขึ้น และส่งผลต่อความต่อเนื่องของแนวเชื่อมอย่างมีนัยสำคัญ โดยค่าพารามิเตอร์ที่ให้ผลดีที่สุดคือ ความถี่ของพัลส์ที่ 7 Hz และระยะเวลาของพัลส์ที่ 5, 6 และ 7 มิลลิวินาที ซึ่งสามารถลดข้อบกพร่องจากการหลอมไม่สมบูรณ์ และให้แนวเชื่อมที่ครอบคลุมพื้นที่ที่ต้องการซ่อมบำรุงได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยค่าความร้อนนำเข้าอยู่ในช่วง 116 – 468.3 จูล/มิลลิเมตร ซึ่งมีความสัมพันธ์โดยตรงกับการเปลี่ยนแปลงของพารามิเตอร์ในการทดลอง และมีผลต่อโครงสร้างโลหะในบริเวณที่เชื่อม โดยบริเวณโลหะเชื่อม (Weld Metal: WM) แสดงโครงสร้างมาร์เทนไซต์แบบอะซิคิวลาร์ (Acicular Martensitic Structure) ที่มีเกรนหยาบ ขณะที่บริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อน (Heat Affected Zone: HAZ) มีโครงสร้างที่ละเอียดกว่า อันเป็นผลมาจากอัตราการเย็นตัวที่รวดเร็ว แนวเชื่อมแสดงค่าความแข็งในช่วง 320.4 – 413 HV ซึ่งสูงกว่าวัสดุฐาน และบ่งชี้ถึงการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างจุลภาคหลังการเชื่อม การศึกษานี้แสดงให้เห็นว่าการควบคุมพารามิเตอร์การเชื่อมอย่างเหมาะสมช่วยให้คุณภาพของงานเชื่อมซ่อมแม่พิมพ์ดีขึ้นได้เป็นอย่างดี

KASEMSAN SAENGSAK: THE STUDY OF PLASTIC INJECTION MOLD GRADE P20
REPAIRING BY USING Nd: YAG LASER WELDING PROCESS.
THESIS ADVISOR: ASST. PROF. DR.JONGKOL SRITHORN. 75 PP.

Keywords: Nd: YAG Laser Welding Process/Plastic Mold Steel/AISI P20/Repair Welding

Laser welding has become a widely adopted technology in modern industry due to its precise heat control and minimal thermal impact on surrounding areas. These characteristics make it particularly suitable for repairing plastic injection molds, where precision and preservation of the original structure are critical. This study investigates the influence of welding parameters-namely pulse frequency and pulse duration-on the weld quality of AISI P20 mold steel using an Nd: YAG laser. Macro and microstructural metallographic analyses, as well as hardness testing, were conducted to assess the effects of these parameters.

The results show that increasing both pulse frequency and duration leads to wider weld beads and significantly improves weld continuity. Optimal conditions were found at a pulse frequency of 7 Hz and pulse durations of 5–7 milliseconds, which reduced incomplete fusion defects and ensured effective coverage of the repair area. Heat input values ranged from 116 to 468.3 J/mm, correlating directly with parameter changes and influencing the microstructure. The weld metal (WM) exhibited a coarse-grained acicular martensitic structure, while the heat-affected zone (HAZ) displayed finer microstructures due to rapid cooling. Weld hardness ranged from 320.4 to 413 HV, higher than that of the base material, indicating microstructural transformation post-welding. These findings demonstrate that appropriate control of laser welding parameters can significantly enhance the quality of mold repairs, making the process highly applicable for precision maintenance tasks.

School of Industrial Engineering
Academic Year 2023

Student's Signature
Advisor's Signature

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณบุคคล และกลุ่มบุคคลดังต่อไปนี้ ที่ได้กรุณาเอื้อเฟื้อในการให้คำปรึกษา ชี้แนะ และช่วยเหลืออย่างดียิ่ง ตลอดจนในด้านวิชาการและด้านการดำเนินการวิจัย

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จกมล ศรีธรรมา อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ให้คำปรึกษา ชี้แนะแนวทางในการศึกษาและการแก้ไขปัญหา อบรมสั่งสอนเป็นอย่างดีเสมอมา ตลอดจนให้คำปรึกษาในการเขียนบทความทางวิชาการ วิทยานิพนธ์ และตรวจแก้ไขจนเสร็จสมบูรณ์

ท้ายนี้ ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา ที่ให้การอุปการะ อบรมเลี้ยงดู สั่งสอน ตลอดจนการสนับสนุนด้านการศึกษา และเป็นกำลังใจอย่างดีเสมอมา จนกระทั่งวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จ

เกษมสันต์ แสงสาร



สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย).....	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ).....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง.....	ช
สารบัญรูป.....	ซ
บทที่	
1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	2
1.4 ประชากร กลุ่มตัวอย่าง และสถานที่ทำการวิจัย.....	2
1.5 แผนการดำเนินงานวิจัย.....	2
2 ปรัชญาวรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	3
2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องในงานวิจัยกระบวนการเชื่อมเลเซอร์.....	3
2.2 ประเภทของเลเซอร์.....	4
2.2.1 เลเซอร์แก๊ส (Gas Lasers).....	4
2.2.2 เลเซอร์ของแข็ง (Solid-State Lasers).....	4
2.2.3 เลเซอร์ไฟเบอร์ (Fiber Lasers).....	5
2.2.4 เลเซอร์ไดโอด (Diode Lasers).....	5
2.3 คุณสมบัติของงานเชื่อมเลเซอร์.....	6
2.4 วัสดุแม่พิมพ์เหล็ก มาตรฐาน AISI เกรด P20.....	6
2.5 การทดสอบคุณสมบัติทางกล (Mechanical Properties Test).....	7
2.5.1 การทดสอบแรงดึง (Tensile Test).....	7
2.5.2 การทดสอบความเหนียว (Impact Test).....	8
2.5.3 การทดสอบความยืดหยุ่น (Flexural Test).....	8
2.5.4 การทดสอบความแข็ง (Hardness Test).....	8
2.6 การตรวจสอบโครงสร้างทางโลหะวิทยา (Metallography Examination).....	10
2.6.1 การตรวจสอบระดับมหภาค (Macro-scopic examination).....	10

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.6.2	การตรวจสอบระดับจุลภาค (Micro-scopical examination)	10
2.7	บริเวณผลกระทบร้อน (Heat Affected Zone)	11
2.8	งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	12
3	วิธีการดำเนินงานวิจัย.....	15
3.1	เครื่องมือ วัสดุ อุปกรณ์ ที่ใช้ในการวิจัย.....	16
3.1.1	เครื่องเชื่อมเลเซอร์ EIT Laser Schweissen System รุ่น Smart 225iL.....	16
3.1.2	เหล็กแม่พิมพ์ฉีดพลาสติกเกรด P20 ตามมาตรฐาน AISI	17
3.1.3	ลวดเชื่อมเติมเนื้อ เกรด P20 ตามมาตรฐาน AISI	17
3.1.4	เครื่องตัด EDM Wire cut ยี่ห้อ Mitsubishi รุ่น MV1200R Wire EDM.....	18
3.1.5	เครื่องอัดขึ้นรูปโลหะวิทยาแบบร้อน ยี่ห้อ IMT รุ่น G1-10.....	19
3.1.6	เครื่องขัดกระดาษทรายแบบจานหมุน	19
3.1.7	เครื่องขัดผงอะลูมินา.....	20
3.1.8	กรด Nital ความเข้มข้น 2%	21
3.1.9	กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงยี่ห้อ Carl Zeiss รุ่น Axio Scope Mat.....	21
3.1.10	กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM).....	22
3.1.11	เครื่องวัดค่าความแข็งจุลภาคแบบวิกเกอร์รุ่น FM-800	23
3.2	การศึกษาค่าพารามิเตอร์ที่มีผลต่อแนวเชื่อม	24
3.2.1	การศึกษาพารามิเตอร์เบื้องต้นในการเชื่อมเลเซอร์ ชนิด Nd: YAG.....	24
3.2.2	การศึกษาพารามิเตอร์ที่มีผลกระทบต่อลักษณะของแนวเชื่อม	25
3.3	การวิเคราะห์คุณสมบัติทางโลหะวิทยา	26
3.3.1	การตรวจสอบทางโครงสร้างทางโลหะวิทยา.....	26
3.3.2	การตรวจสอบคุณสมบัติของแนวเชื่อม	28
3.4	การวิเคราะห์ผลด้วยสถิติทางคณิตศาสตร์	31
4	ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง	33
4.1	ผลการศึกษาโครงสร้างทางโลหะวิทยา	33
4.1.1	ผลการศึกษาโครงสร้างมหภาค (Macrostructure)	33
4.1.2	ผลการศึกษาโครงสร้างจุลภาค (Microstructure).....	37
4.2	ผลการศึกษาคูณสมบัติของแนวเชื่อม	41
4.2.1	ผลการวิเคราะห์ค่าความเจือจาง (%Dilution).....	41
4.2.2	ผลการวิเคราะห์ค่าความร้อนที่ป้อนเข้าสู่ชิ้นงาน (Heat Input).....	43
4.2.3	ผลการทดสอบค่าความแข็งของชิ้นงาน (Hardness Test).....	46

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.3	ผลการวิเคราะห์ผลด้วยสถิติทางคณิตศาสตร์.....	49
4.3.1	การวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance: ANOVA).....	49
4.3.2	การตรวจสอบความถูกต้องของการออกแบบการทดลอง	50
5	สรุปผลการวิจัย.....	53
5.1	สรุปผลการวิจัย	53
	รายการอ้างอิง	55
	ภาคผนวก บทความทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างศึกษา.....	58
	ประวัติผู้เขียน	75



สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1	ส่วนผสมทางเคมีของเหล็ก AISI P207
3.1	ส่วนผสมทางเคมีของเหล็กแม่พิมพ์ฉีดพลาสติก (AISI P20)..... 17
3.2	ส่วนผสมทางเคมีของลวดเชื่อมเติมเนื้อ เกรด P20 18
3.3	ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการศึกษาพารามิเตอร์ที่มีผลกระทบต่อลักษณะของแนวเชื่อม 25
4.1	การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างมหภาคของแนวเชื่อมต่อพารามิเตอร์ระยะเวลาพัลส์ (Pulse Duration: PD) และความถี่พัลส์ (Pulse Frequency: PF)..... 34
4.2	ค่าเฉลี่ยการเจือจางบริเวณเนื้อโลหะเชื่อม (%Dilution) 42
4.3	การคำนวณค่าความร้อนนำเข้า (Heat Input) ที่พารามิเตอร์ที่แตกต่างกัน 45
4.4	ผลการทดสอบค่าความแข็งแรงเฉลี่ยของแนวเชื่อม 48



สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1	แผนผังของระบบการผลิตเลเซอร์ Nd: YAG.....5
2.2	การทดสอบความแข็งแบบรอกเวลล์ (Rockwell)9
2.3	การทดสอบความแข็งแบบวิกเกอร์ส 10
2.4	กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (Optical microscope) 11
3.1	ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย 15
3.2	ส่วนประกอบเครื่องเชื่อมเลเซอร์ EIT Laser Schweissen System รุ่น Smart 225iL 16
3.3	โลหะฐาน (Base Metal) เกรด P20 ตามมาตรฐาน AISI 17
3.4	ลวดเชื่อมเติมเนื้อ เกรด P20 ตามมาตรฐาน AISI..... 18
3.5	เครื่องตัด EDM Wire cut ยี่ห้อ Mitsubishi รุ่น MV1200R Wire EDM 19
3.6	เครื่องอัดขึ้นรูปโลหะวิทยาแบบร้อน ยี่ห้อ IMT รุ่น G1-10 19
3.7	เครื่องขัดกระดาษทรายแบบจานหมุน..... 20
3.8	เครื่องขัดผงอะลูมินา..... 21
3.9	กรด Nital ความเข้มข้น 2%..... 21
3.10	กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง..... 22
3.11	กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนส่องกราด..... 22
3.12	เครื่องทดสอบวัดค่าความแข็งแบบไมโครวิกเกอร์ รุ่น FM-800 23
3.13	ตำแหน่งจุดทดสอบค่าความแข็งของแนวเชื่อม..... 24
3.14	การเชื่อมแบบเดินแนวบนชิ้นงานด้วยเครื่องเชื่อมเลเซอร์..... 26
3.15	ชิ้นงานที่ผ่านการขึ้นรูป (Mounting)..... 26
3.16	วิธีการวัดค่าความกว้างและความสูงแนวเชื่อม 27
3.17	ความเจือจางของโลหะ (Dilution)..... 27
3.18	ตำแหน่งของจุดทดสอบความแข็ง 30
4.1	ค่าเฉลี่ยความกว้างของแนวเชื่อมตามพารามิเตอร์ที่แตกต่างกัน 36
4.2	ลักษณะของแนวเชื่อมที่เกิดการเติมไม่สมบูรณ์ 37
4.3	บริเวณในการตรวจสอบโครงสร้างทางโลหะวิทยา..... 38
4.4	ลักษณะโครงสร้างทางจุลภาคบริเวณเนื้อโลหะเชื่อม (Weld Metal)..... 39
4.5	ลักษณะโครงสร้างทางจุลภาคบริเวณผลกระทบร้อน (HAZ) 40
4.6	ลักษณะโครงสร้างทางจุลภาคบริเวณโลหะฐาน (Base Metal) 40
4.7	บริเวณการคำนวณอัตราเจือจาง (Dilution Ration)..... 42

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.8	ตำแหน่งของจุดทดสอบความแข็ง 47
4.9	ผลการวัดค่าความแข็งของชิ้นงานแบบไมโครวิกเกอร์ 47
4.10	การวิเคราะห์ทางสถิติของค่าความกว้างของแนวเชื่อม 50
4.11	แผนภูมิการกระจายตัวของค่าความกว้างแนวเชื่อม 51



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

อุตสาหกรรมแม่พิมพ์ถือเป็นกลไกสนับสนุนที่สำคัญต่อแทบทุกแขนงของอุตสาหกรรมการผลิต เนื่องจากกระบวนการผลิตจำนวนมากต้องอาศัยแม่พิมพ์ในการขึ้นรูปชิ้นงาน กำหนดรูปร่าง มิติ และคุณภาพของผลิตภัณฑ์ แม่พิมพ์ที่มีคุณภาพสูงช่วยให้อุตสาหกรรมสามารถผลิตชิ้นส่วนได้อย่างรวดเร็ว มีปริมาณมาก และมีขนาดที่แม่นยำสม่ำเสมอ ซึ่งส่งผลโดยตรงต่อการลดของเสียในการผลิต และเพิ่มขีดความสามารถในการแข่งขันขององค์กร (Poli, 2001; Altan et al., 2001; Swift & Booker, 2003) โดยวัสดุที่ใช้ในการผลิตแม่พิมพ์มีความหลากหลาย แต่เหล็ก AISI P20 เป็นหนึ่งในวัสดุที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายในแม่พิมพ์ฉีดพลาสติก เนื่องจากมีคุณสมบัติทางกลที่ดีเยี่ยม ได้แก่ ความต้านทานต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอย่างฉับพลัน ความแข็งแรงที่อุณหภูมิสูง ความเหนียว และความต้านทานต่อการสึกหรอ แต่อย่างไรก็ตามเมื่อใช้งานเป็นระยะเวลานาน เหล็ก P20 อาจเกิดการเสื่อมสภาพ เช่น การแตกร้าว การบิ่น หรือความเสียหายบริเวณผิว ทำให้แม่พิมพ์ไม่สามารถใช้งานได้ตามปกติได้ การซ่อมแซมแม่พิมพ์ด้วยวัสดุประเภทเดียวกันโดยใช้กระบวนการเชื่อมเลเซอร์เป็นแนวทางที่มีประสิทธิภาพในการคืนสภาพแม่พิมพ์ให้ใกล้เคียงกับสภาพเดิมมากที่สุด โดยการเชื่อมเลเซอร์มีข้อดีหลายประการ เช่น ความแม่นยำสูง ความสามารถในการเชื่อมบริเวณที่มีรูปร่างซับซ้อนได้ดี ความเร็วในการเชื่อมสูง พื้นที่ที่ได้รับผลกระทบจากความร้อน (HAZ) มีขนาดเล็ก และลดการเสียรูปของชิ้นงาน (Adams et al., 1994; Dawes, 1992; Katayama, 2013; Steen & Mazumder, 2010; Fotovati et al., 2018) ซึ่งในประเทศไทย การเชื่อมเลเซอร์ได้รับความนิยมอย่างแพร่หลาย โดยเฉพาะในการซ่อมแซมแม่พิมพ์ การผลิตชิ้นส่วนยานยนต์ รวมถึงการผลิตเครื่องประดับและอุปกรณ์ตกแต่ง (Bridgum, 2008; Huda, 2016)

แต่ถึงแม้ว่าเทคโนโลยีการเชื่อมเลเซอร์จะถูกใช้งานอย่างกว้างขวาง ก็ยังคงมีข้อจำกัดด้านองค์ความรู้ โดยเฉพาะในแง่ของพารามิเตอร์ที่มีผลต่อความสมบูรณ์ของแนวเชื่อมสำหรับการซ่อมแม่พิมพ์ที่ทำจากเหล็ก P20 เช่น ความถี่ของพัลส์ (pulse frequency) และระยะเวลาของพัลส์ (pulse duration) ตลอดจนผลกระทบที่มีต่อโครงสร้างระดับมหภาคและจุลภาคของแนวเชื่อม รวมถึงค่าความแข็งที่เกิดขึ้นภายหลังการเชื่อม

ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของความถี่และระยะเวลาของพัลส์ในการเชื่อมเลเซอร์ Nd:YAG ต่อความสมบูรณ์ของแนวเชื่อมของเหล็ก AISI P20 โดยพิจารณาทั้งในระดับมหภาคและจุลภาค รวมถึงการวัดค่าความแข็งของแนวเชื่อม เพื่อค้นหาพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุดซึ่งสามารถสร้างแนวเชื่อมที่มีคุณภาพ ปราศจากข้อบกพร่อง และใกล้เคียงกับสภาพเดิมก่อนเกิดความเสียหาย เพื่อนำไปประยุกต์ใช้ในการซ่อมแม่พิมพ์ฉีดพลาสติกได้อย่างมีประสิทธิภาพ

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

- 1.2.1 เพื่อศึกษาการเชื่อมซ่อมแม่พิมพ์ฉีดพลาสติกด้วยกระบวนการเชื่อมเลเซอร์
- 1.2.2 เพื่อหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมในการเชื่อมซ่อมแม่พิมพ์ฉีดพลาสติกด้วยกระบวนการเชื่อมเลเซอร์

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

- 1.3.1 ทำการเชื่อมแม่พิมพ์ฉีดพลาสติกด้วยกระบวนการเชื่อมเลเซอร์ ชนิด Nd: YAG
- 1.3.2 วัสดุที่ใช้ในการทดลอง คือ เหล็กแม่พิมพ์ฉีดพลาสติก มาตรฐาน AISI เกรด P20
- 1.3.3 ลวดเชื่อมที่ใช้ในการทดลอง คือ ลวดเชื่อม มาตรฐาน AISI เกรด P20

1.4 ประชากร กลุ่มตัวอย่าง และสถานที่ทำการวิจัย

- 1.4.1 อาคารเครื่องมือ 6 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
- 1.4.2 อาคารเครื่องมือ 10 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
- 1.4.3 อาคารปฏิบัติการพื้นฐานด้านวิศวกรรมศาสตร์ (F11) ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี อาคารสิรินธรวิศวะพัฒน์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

1.5 แผนการดำเนินงานวิจัย

ในการวิจัยนี้ ใช้กระบวนการเชื่อมด้วยเลเซอร์ชนิด นีโอติเมียม-แย็ก (Nd:YAG) ในการซ่อมแซมแม่พิมพ์ฉีดพลาสติกที่ผลิตจากเหล็กกล้าเกรด AISI P20 โดยมีจุดมุ่งหมายเพื่อศึกษาผลของค่าพารามิเตอร์กระบวนการเชื่อม ได้แก่ ความถี่ของพัลส์ (pulse frequency) และระยะเวลาของพัลส์ (pulse duration) ที่มีผลต่อคุณภาพของแนวเชื่อมทั้งในเชิงโครงสร้างทางโลหะวิทยา และสมบัติเชิงกลของชิ้นงาน โดยการดำเนินงานวิจัยแบ่งออกเป็นขั้นตอนต่าง ๆ ดังนี้

- 1.5.1 ศึกษาทฤษฎี ข้อมูลและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง
- 1.5.2 รวบรวมข้อมูลวัสดุชิ้นงาน
- 1.5.3 ออกแบบการทดลองและจัดเตรียมอุปกรณ์ในการทดลอง
- 1.5.4 เตรียมชิ้นงาน
- 1.5.5 ทำการทดลองเชื่อมชิ้นงานตามที่วางแผนไว้
- 1.5.6 ปรับค่าพารามิเตอร์ในการเชื่อมเพื่อหาค่าที่เหมาะสม
- 1.5.7 วิเคราะห์โครงสร้างทางโลหะวิทยา สมบัติทางกล และวัดค่าความแข็งของชิ้นงาน
- 1.5.8 บันทึกผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง
- 1.5.9 อภิปรายผลการทดลอง
- 1.5.10 สรุปผลการทดลองและส่งรายงานวิจัย

บทที่ 2

ปริทรรศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาค้นคว้าเกี่ยวกับกระบวนการเชื่อมซ่อมแม่พิมพ์ฉีดพลาสติกชนิด AISI P20 โดยใช้กระบวนการเชื่อมเลเซอร์ชนิด นีโอติเมียม-แย็ก เลเซอร์ (Nd:YAG Laser Welding) และศึกษาผลกระทบทางโลหะวิทยา ทั้งในระดับโครงสร้างมหภาคและจุลภาค รวมไปถึงการทดสอบคุณสมบัติเชิงกลของชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการเชื่อม เพื่อใช้เป็นแนวทางในการวิเคราะห์และพัฒนากระบวนการซ่อมแม่พิมพ์ให้มีประสิทธิภาพสูงสุด บทนี้จะกล่าวถึงทฤษฎี พื้นฐาน ข้อมูลที่เกี่ยวข้อง และงานวิจัยที่เกี่ยวข้องตามหัวข้อต่อไปนี้

- 2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องในงานวิจัยกระบวนการเชื่อมเลเซอร์
- 2.2 ประเภทของเลเซอร์
- 2.3 คุณสมบัติของงานเชื่อมเลเซอร์
- 2.4 วัสดุแม่พิมพ์เหล็ก มาตรฐาน AISI เกรด P20
- 2.5 การทดสอบคุณสมบัติทางกล (Mechanical Properties Test)
- 2.6 การตรวจสอบโครงสร้างทางโลหะวิทยา (Metallography Examination)
- 2.7 บริเวณผลกระทบร้อน (Heat Affected Zone)
- 2.8 ทบทวนวรรณกรรม

2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องในงานวิจัยกระบวนการเชื่อมเลเซอร์

การเชื่อมเลเซอร์เป็นเทคนิคการเชื่อมขั้นสูง ใช้พลังงานจากลำแสงเลเซอร์เป็นแหล่งกำเนิดความร้อน มีความหนาแน่นของพลังงานสูงมากเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการเชื่อมอาร์กหรือการเชื่อมพลาสมา ทำให้สามารถ เชื่อมในลักษณะซึมลึก รอยเชื่อมแคบ เชื่อมด้วยความเร็วสูง และลดการเสียรูปของชิ้นงานจากความร้อนได้ (วัลลภ รัตนถาวร และคณะ, 2560)

การซ่อมแม่พิมพ์ด้วยการเชื่อมเลเซอร์ต้องทำความเข้าใจเกี่ยวกับการเพิ่มเนื้อของวัสดุระหว่างผิวงานที่สึกหรอ หรือเสียหาย ที่ต้องการซ่อม กับลำแสงเลเซอร์ (Laser beam) โดยการเชื่อมมี 2 แบบ คือ แบบ Manually และแบบ Automatically ซึ่งแบบ Manually ผู้เชื่อมถือลวดเชื่อมโดยให้ลวดเชื่อมติดกับผิวแม่พิมพ์บริเวณที่ต้องการเชื่อมแล้วจึง ใช้เลเซอร์เพิ่มเนื้อ กระบวนการนี้ทำไม่เร็วแต่ได้ผลดี งานที่ได้มีความละเอียดสูง และผู้เชื่อมต้องมีทักษะความชำนาญสูงแบบ Automatically การเชื่อมอัตโนมัติ ระบบจะป้อนลวดเชื่อมอัตโนมัติและปรับความเร็วอัตโนมัติ ซึ่งทำงานร่วมกัน และมีความสัมพันธ์กับการเชื่อมพัลส์เลเซอร์ ชนิด Nd: YAG ซึ่งสามารถเพิ่มความเร็วในการเชื่อมได้ และมีความสม่ำเสมอของรอยเชื่อมเป็นอย่างดี (Joseph J. Kwiatkowski และ Anthony J. Kwiatkowski,)

2.2 ประเภทของเลเซอร์

เลเซอร์ (Laser) ย่อมาจาก Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation เป็นแหล่งกำเนิดแสงที่มีลักษณะเฉพาะคือ มีความยาวคลื่นที่แน่นอน (Monochromatic), ความเข้มแสงสูง (High Intensity), การรวมตัวของแสงในทิศทางเดียว (Directionality) และการขนานกันของลำแสง (Coherence) ซึ่งคุณลักษณะเหล่านี้ทำให้เลเซอร์สามารถนำไปใช้ในงานเชื่อมโลหะที่ต้องการความแม่นยำสูงได้อย่างมีประสิทธิภาพ เลเซอร์ที่นิยมใช้ในงานอุตสาหกรรมมีอยู่หลายประเภท ซึ่งแต่ละชนิดมีลักษณะเฉพาะและข้อดีข้อเสียแตกต่างกัน โดยสามารถจำแนกตามชนิดของสารกระตุ้น (Gain Medium) ได้ดังนี้:

2.2.1 เลเซอร์แก๊ส (Gas Lasers)

เลเซอร์แก๊สเป็นเลเซอร์ชนิดแรก ๆ ที่ถูกพัฒนาเพื่อใช้งานด้านอุตสาหกรรมและการวิจัย โดยเลเซอร์คาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2 Laser) เป็นหนึ่งในประเภทที่นิยมมากที่สุด ถูกคิดค้นโดย K.C. Patel ในปี ค.ศ. 1964 ที่ Bell Telephone Laboratories เลเซอร์ CO_2 ใช้ก๊าซผสมระหว่าง คาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2), ไนโตรเจน (N_2) และฮีเลียม (He) เป็นตัวกลางกำเนิดเลเซอร์ โดยเมื่อถูกกระตุ้นด้วยแรงดันไฟฟ้าจะเกิดการเปลี่ยนแปลงระดับพลังงานของโมเลกุล CO_2 ทำให้เกิดการปล่อยแสงเลเซอร์ที่มีความยาวคลื่นประมาณ 10.6 ไมครอน ซึ่งอยู่ในช่วงอินฟราเรด

โดยเลเซอร์ชนิดนี้เหมาะสำหรับงานตัดโลหะ แกะสลัก หรือเจาะวัสดุ โดยเฉพาะวัสดุที่ไม่สะท้อนแสงสูง เช่น ไม้ หรืออะคริลิก อย่างไรก็ตาม เนื่องจากระบบมีขนาดใหญ่และต้องการการบำรุงรักษาอย่างสม่ำเสมอ เลเซอร์แก๊สจึงค่อย ๆ ถูกแทนที่ด้วยเทคโนโลยีเลเซอร์แบบใหม่ที่มีขนาดเล็กกว่าและประสิทธิภาพสูงกว่า (Patel, 1964; Steen & Mazumder, 2010)

2.2.2 เลเซอร์ของแข็ง (Solid-State Lasers)

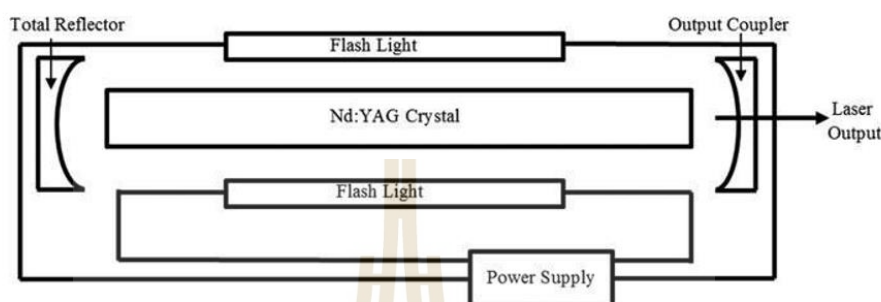
เลเซอร์ของแข็งเป็นเลเซอร์ที่ใช้วัสดุสถานะของแข็ง เช่น คริสตัล หรือแก้วเจือสารหายาก (Rare Earth Elements) เป็นตัวกลางกำเนิดแสงเลเซอร์ ตัวอย่างที่ได้รับความนิยมคือ Nd:YAG (Neodymium-doped Yttrium Aluminum Garnet) ซึ่งถูกพัฒนาโดย Geusic, Marcos และ Van Uitert ในปี พ.ศ. 2507 (ค.ศ. 1964) ระบบเลเซอร์นี้ใช้หลอดแฟลช (เช่น หลอดอาร์คริปทอน) เพื่อสูบลำแสงเข้าสู่ไอออนของนีโอดิเมียม (Nd^{3+}) ทำให้พลังงานเพิ่มขึ้นไปที่ระดับ 4 จากนั้นจะลดลงมายังระดับ 3 ซึ่งเป็นระดับปล่อยแสง ก่อนจะปล่อยแสงเลเซอร์ที่มีความยาวคลื่น 1064 นาโนเมตร

เลเซอร์ชนิดนี้ มีข้อดีคือสามารถโฟกัสลำแสงได้ดี จึงเหมาะกับการที่ต้องการความแม่นยำสูง เช่น การเชื่อมแม่พิมพ์ การตัดโลหะบาง หรือการเชื่อมวัสดุขนาดเล็ก

2.2.2.1 นีโอดิเมียม-แย็ก เลเซอร์ (Nd: YAG Laser)

Nd: YAG เป็นเลเซอร์โซลิดสเตตที่พัฒนาโดย J.E. Geusic, H.M. Marcos และ L.G. Van Vitert ในปี พ.ศ. 2507 การปั๊มของโลหะด้วยเลเซอร์ Nd-YAG เป็นกระบวนการเชื่อมแบบขั้นสูงซึ่งมีความยืดหยุ่นสูง โดยแผนผังของระบบการผลิตเลเซอร์ Nd: YAG ดังแสดงในรูปที่ 2.1 เป็นพลังงานที่ถูกสร้างขึ้นใน 4 ระดับ การสูบลำแสง Nd จากสถานะพื้นไปยังสถานะบนที่ระดับ 4 ทำได้โดยใช้โคมไพอาร์คริปทอน (หรือเรียกอีกอย่างว่าหลอดแฟลช) โดยใช้แสงของความยาวคลื่น 7200–8000 Å จากระดับที่ 4 ไอออนจะไม่แผ่รังสีซึ่งจะลดพลังงานลงไปที่ระดับ 3 ดังนั้นการปล่อย

แสงเลเซอร์จะเกิดขึ้นในระดับที่ 3 ซึ่งเป็นระดับการปล่อยแสงเลเซอร์บน และระดับที่ 2 จะเป็นระดับการปล่อยแสงเลเซอร์ที่ต่ำกว่า เลเซอร์นี้มีประสิทธิภาพของความร้อนที่ดีกว่า เลเซอร์ CO₂ เลเซอร์ประเภทนี้สามารถใช้สำหรับงานความเสียหายเล็กน้อยที่เกิดจากการใช้งานผิดวิธี วัสดุที่มีข้อบกพร่อง การปรับสภาพใหม่ การตรวจสอบและการควบคุมคุณภาพที่ไม่ดี



รูปที่ 2.1 แผนผังของระบบการผลิตเลเซอร์ Nd: YAG

2.2.3 เลเซอร์ไฟเบอร์ (Fiber Lasers)

เลเซอร์ไฟเบอร์เป็นเลเซอร์ของแข็งชนิดหนึ่งที่ใช้เส้นใยแก้วนำแสงเจือสารแอกทีฟ เช่น Ytterbium (Yb) เป็นตัวกลางกำเนิดแสง โดยถูกพัฒนาให้มีประสิทธิภาพสูงและลดการสูญเสียพลังงานในระบบ แสงเลเซอร์จะถูกปล่อยออกผ่านเส้นใยที่สามารถโค้งงอได้ ทำให้มีความยืดหยุ่นสูงในการใช้งาน พลังงานถูกส่งผ่านไดโอดเลเซอร์ (Pump Diode) ไปยังเส้นใยนำแสงซึ่งจะขยายพลังงานแล้วส่งต่อไปยังวัสดุเป้าหมาย เลเซอร์ไฟเบอร์มีความยาวคลื่นโดยทั่วไปอยู่ในช่วง 1030 – 1100 นาโนเมตร มีจุดเด่นด้านขนาดที่กะทัดรัด อายุการใช้งานยาวนาน และต้องการการบำรุงรักษาต่ำ อีกทั้งยังสามารถให้พลังงานสูงและมีประสิทธิภาพเชิงแสงที่ดีกว่าเลเซอร์ชนิดอื่น เหมาะกับงานตัดโลหะ งานเชื่อมที่ต้องการความเร็วสูง และระบบอัตโนมัติในอุตสาหกรรม

2.2.4 เลเซอร์ไดโอด (Diode Lasers)

เลเซอร์ไดโอดเป็นเลเซอร์สถานะของแข็งที่ใช้สารกึ่งตัวนำในการผลิตแสงเลเซอร์ โดยมีขนาดเล็กและใช้พลังงานต่ำมากเมื่อเทียบกับเลเซอร์ชนิดอื่น ๆ การทำงานของเลเซอร์ไดโอดเกิดจากการไหลของอิเล็กตรอนระหว่างชั้น P และ N ในสารกึ่งตัวนำ ซึ่งเมื่อเกิด Recombination จะปล่อยโฟตอนออกมาเป็นลำแสงเลเซอร์ เลเซอร์ไดโอดมักใช้เป็นแหล่งกำเนิดแสงในระบบเลเซอร์อื่น เช่น ใช้เป็นตัว Pump สำหรับเลเซอร์ไฟเบอร์หรือ Nd: YAG อย่างไรก็ตาม ปัจจุบันมีการพัฒนาเลเซอร์ไดโอดกำลังสูงที่สามารถนำมาใช้ในการเชื่อมโลหะโดยตรง โดยเฉพาะในงาน Cladding, Hardfacing และ Micro-Welding จุดเด่นคือมีประสิทธิภาพด้านพลังงานสูง การควบคุมแม่นยำ และมีขนาดเล็ก ทำให้เหมาะสำหรับการเชื่อมบริเวณที่เข้าถึงยาก

2.3 คุณสมบัติของงานเชื่อมเลเซอร์

กระบวนการเชื่อมด้วยเลเซอร์เป็นหนึ่งในเทคโนโลยีการเชื่อมที่มีความแม่นยำและมีคุณภาพสูง โดยเฉพาะในงานที่ต้องการความประณีต เช่น อุตสาหกรรมแม่พิมพ์ อิเล็กทรอนิกส์ และอากาศยาน จุดเด่นของการเชื่อมด้วยเลเซอร์คือสามารถสร้างรอยเชื่อมที่มีลักษณะลึกและแคบ เนื่องจากเลเซอร์สามารถโฟกัสลำแสงให้มีขนาดจุดเล็กมาก ทำให้พลังงานที่ส่งลงไปในพื้นที่เล็ก ๆ มีความหนาแน่นสูง ส่งผลให้สามารถหลอมโลหะได้อย่างรวดเร็วและลึกภายในระยะเวลาอันสั้น (Steen & Mazumder, 2010) นอกจากนี้ งานเชื่อมเลเซอร์ยังมีเขตที่ได้รับผลกระทบจากความร้อน (Heat-Affected Zone: HAZ) ค่อนข้างแคบ เนื่องจากเลเซอร์เป็นแหล่งพลังงานที่ให้ความร้อนแบบเฉพาะจุดและใช้เวลาน้อย จึงลดผลกระทบต่อคุณสมบัติเชิงกลของวัสดุแม่ในบริเวณข้างเคียงได้อย่างมีประสิทธิภาพ (Ready, 2001) ทำให้งานเชื่อมที่ได้มีความแข็งแรงและความเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางโลหะวิทยาน้อยกว่ากระบวนการเชื่อมแบบดั้งเดิม

คุณสมบัติทางกลของแนวเชื่อมที่ได้จากกระบวนการเชื่อมเลเซอร์มักจะมี ความแข็งแรงใกล้เคียงหรือแม้กระทั่งสูงกว่าวัสดุแม่ หากมีการควบคุมพารามิเตอร์การเชื่อมอย่างเหมาะสม เช่น ความเร็วของการเชื่อม ความเข้มของพลังงาน และสภาวะการปกคลุมด้วยแก๊สเฉื่อย (Katayama, 2005) อย่างไรก็ตาม การเชื่อมด้วยเลเซอร์ยังมีข้อควรระวัง โดยเฉพาะในเรื่องของการเกิดรูพรุน (Porosity) และรอยร้าว (Cracking) ที่อาจเกิดขึ้นจากการหลอมที่ไม่สม่ำเสมอ หรือการเย็นตัวอย่างรวดเร็วเกินไป ปัญหาเหล่านี้สามารถลดลงได้ด้วยการควบคุมสภาพแวดล้อม เช่น การใช้แก๊สปกคลุมที่เหมาะสม เช่น Argon หรือ Nitrogen (Schuöcker, 2012)

อีกทั้งอัตราการเย็นตัวที่สูงในกระบวนการเชื่อมเลเซอร์ยังส่งผลต่อโครงสร้างจุลภาคของแนวเชื่อม ซึ่งมักจะเกิดโครงสร้างที่ละเอียดและหนาแน่น ส่งผลดีต่อความแข็งแรง ความเหนียว และความต้านทานต่อการสึกหรอของแนวเชื่อม (Duley, 1999)

ดังนั้นงานเชื่อมเลเซอร์มีคุณสมบัติที่โดดเด่นในด้านคุณภาพของรอยเชื่อม ความแม่นยำ ความแข็งแรงทางกล และผลกระทบต่อวัสดุโดยรอบที่น้อย แต่ต้องอาศัยการควบคุมพารามิเตอร์อย่างเหมาะสม เพื่อหลีกเลี่ยงข้อบกพร่องที่อาจเกิดขึ้นในกระบวนการเชื่อม

2.4 วัสดุแม่พิมพ์เหล็ก มาตรฐาน AISI เกรด P20

เหล็กเกรด P20 (AISI P20) เป็นเหล็กเครื่องมือที่ได้รับความนิยมอย่างมากในอุตสาหกรรมแม่พิมพ์ โดยเฉพาะในกระบวนการผลิตแม่พิมพ์สำหรับการฉีดพลาสติก เหล็ก P20 เป็นเหล็กที่มีการผสมผสานระหว่างเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำและเหล็กกล้าอัลลอยด์ ซึ่งให้สมบัติต่าง ๆ ที่เหมาะสมสำหรับการทำแม่พิมพ์ เช่น ความทนทานต่อการสึกหรอ ความแข็งแรง และความต้านทานต่อการแตกหัก เมื่อถูกใช้งานในสภาวะที่มีความเค้นสูง (จุฑาวรรณ, 2560) เหล็ก P20 มีส่วนประกอบหลัก แสดงดังตารางที่ 2.1 ส่วนผสมทางเคมีของเหล็ก AISI P20

ตารางที่ 2.1 ส่วนผสมทางเคมีของเหล็ก AISI P20

องค์ประกอบ	ช่วงปริมาณ
คาร์บอน (C)	0.28–0.40%
แมงกานีส (Mn)	0.60–1.00%
ซิลิกอน (Si)	0.60–1.00%
โครเมียม (Cr)	1.30–1.70%
โมลิบดีนัม (Mo)	0.03–0.30%

โดยที่ส่วนผสมทางเคมีของเหล็ก AISI P20 จะให้คุณสมบัติที่ดีในด้านการขึ้นรูปแม่พิมพ์ โดยสามารถรักษาความแข็งและความทนทานต่อการสึกหรอแม่ในสถานะที่มีอุณหภูมิสูง ในกระบวนการผลิต (Poli, 2001) อีกทั้งวัสดุ P20 มีคุณสมบัติที่สำคัญเช่น ความต้านทานต่อการเกิด การบิดเบี้ยวและการเปลี่ยนแปลงรูปทรงในระหว่างการใช้งาน รวมถึงสามารถรับความร้อนได้ดี ทำให้ เหล็ก P20 เป็นวัสดุที่เหมาะสมในการทำแม่พิมพ์สำหรับพลาสติกที่มีความซับซ้อน นอกจากนี้ เหล็ก P20 ยังสามารถให้ค่าความแข็งสูงเมื่อทำการอบชุบความร้อน ซึ่งช่วยเพิ่มความทนทาน ต่อการใช้งานหนักในกระบวนการขึ้นรูป (Altan et al., 2001)

แต่อย่างไรก็ตาม เหล็ก P20 มีข้อจำกัดในเรื่องของการทนทานต่อการกัดกร่อน โดยเฉพาะ ในสถานะที่มีการสัมผัสกับสารเคมีบางชนิด ซึ่งอาจส่งผลให้เกิดการเสื่อมสภาพของแม่พิมพ์ได้เร็วขึ้น ดังนั้น การใช้งานเหล็ก P20 จึงต้องคำนึงถึงสภาพแวดล้อมการใช้งานและระยะเวลาการใช้งาน เพื่อให้สามารถใช้งานได้มีประสิทธิภาพสูงสุด (Swift & Booker, 2003)

2.5 การทดสอบคุณสมบัติทางกล (Mechanical Properties Test)

การทดสอบคุณสมบัติทางกล (Mechanical Properties Test) เป็นการทดสอบในการประเมิน คุณสมบัติทางกลต่าง ๆ ของวัสดุ ซึ่งสามารถบ่งบอกถึงการตอบสนองของวัสดุต่อแรงภายนอก ที่กระทำต่อมัน การทดสอบนี้มีความสำคัญในการคัดเลือกวัสดุที่เหมาะสมสำหรับการใช้งานในสถานะ ต่าง ๆ โดยจะพิจารณาคุณสมบัติต่าง ๆ เช่น ความต้านทานแรงดึง (Tensile Strength) ความยืดหยุ่น (Elasticity) ความเหนียว (Toughness) และความแข็ง (Hardness) โดยการทดสอบคุณสมบัติทางกล ที่นิยมใช้มีดังนี้:

2.5.1 การทดสอบแรงดึง (Tensile Test)

การทดสอบแรงดึงจะใช้เพื่อหาค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุดของวัสดุ โดยการลากวัสดุ ให้ยืดออกจนกระทั่งเกิดการแตกหัก ข้อมูลที่ได้จากการทดสอบนี้จะประกอบด้วยค่าความต้านทานแรงดึง สูงสุด ค่าการยืดตัว และค่าการหดตัว ซึ่งช่วยให้เราทราบถึงความแข็งแรงและความสามารถของวัสดุ ในการต้านทานแรงภายนอก

2.5.2 การทดสอบความเหนียว (Impact Test)

การทดสอบความเหนียวจะใช้ในการประเมินความสามารถของวัสดุในการทนต่อแรงกระแทกที่เกิดขึ้นในระยะเวลาสั้น เช่น การทดสอบ Charpy หรือ Izod ซึ่งสามารถบ่งบอกถึงความสามารถของวัสดุในการรับแรงกระแทกและการแตกหัก

2.5.3 การทดสอบความยืดหยุ่น (Flexural Test)

การทดสอบความยืดหยุ่นจะใช้ในการประเมินการตอบสนองของวัสดุต่อแรงดัดหรืองอ โดยการนำวัสดุมาทดสอบภายใต้การดัดหรือแรงงอที่ใช้ในทิศทางต่าง ๆ ข้อมูลที่ได้จะช่วยบ่งชี้ความแข็งแรงและความยืดหยุ่นของวัสดุ

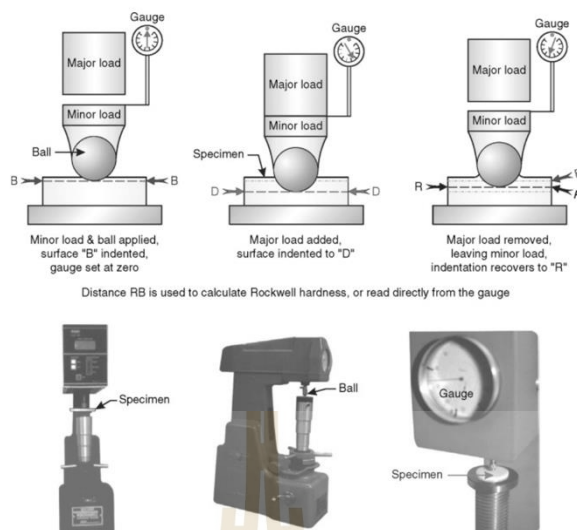
2.5.4 การทดสอบความแข็ง (Hardness Test)

การทดสอบความแข็งเป็นการทดสอบที่ประเมินความต้านทานของวัสดุต่อการขีดข่วนหรือการเจาะ โดยอาจใช้วิธีการทดสอบต่าง ๆ เช่น ร็อกเวลล์ (Rockwell) บริเนลล์ (Brinell) หรือวิกเกอร์ส (Vickers) ขึ้นอยู่กับลักษณะและประเภทของวัสดุที่ทดสอบ

โดยการทดสอบเหล่านี้มีความสำคัญในการประเมินวัสดุสำหรับการใช้งานต่าง ๆ เพื่อให้สามารถเลือกวัสดุที่เหมาะสมที่สุดในการใช้งานที่ต้องการ ความสามารถในการทดสอบคุณสมบัติทางกลช่วยให้สามารถพัฒนาและปรับปรุงวัสดุและกระบวนการผลิตได้ดียิ่งขึ้น นอกจากนี้ยังช่วยในการประเมินอายุการใช้งานและประสิทธิภาพของวัสดุในการทำงานจริงได้ แต่ในการทดลองวิจัยในครั้งนี้จะมุ่งเน้นการทดสอบคุณสมบัติเชิงกลจากการทดสอบความแข็ง (Hardness Test) ซึ่งเป็นการทดสอบที่มีลักษณะกึ่งทำลาย ซึ่งไม่เพียงแต่ช่วยประเมินค่าความแข็งของวัสดุเท่านั้น แต่ยังสามารถสะท้อนถึงคุณสมบัติอื่น ๆ ของแต่ละวัสดุ เช่น ความต้านทานการสึกหรอ ความทนทานต่อการเสียดสี ความต้านทานแรงดึง และความเหนียวของวัสดุได้อีกด้วย โดยค่าความแข็งของวัสดุจะขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย เช่น ส่วนผสมทางเคมี โครงสร้างทางโลหะวิทยา รูปแบบการขึ้นรูปชิ้นงาน และกระบวนการทางความร้อนที่ใช้ในการผลิตชิ้นงานนั้น ๆ สำหรับการทดสอบความแข็งที่ใช้กันโดยทั่วไป ได้แก่

2.5.4.1 การทดสอบความแข็งแบบร็อกเวลล์ (Rockwell)

การทดสอบแบบร็อกเวลล์ (Rockwell) เป็นการทดสอบเพื่อวัดค่าความแข็งของชิ้นงาน โดยการใช้อุปกรณ์หัวกด 2 ประเภท ได้แก่ หัวกดเพชรทรงกรวยและหัวกดลูกเหล็กทรงกลม ชนิดและขนาดของหัวกดที่ใช้ในการทดสอบจะถูกเลือกตามความแข็งของวัสดุที่นำมาทดสอบ โดยการทดสอบจะเริ่มจากการกดด้วยแรงกดทั่วไปในขั้นตอนแรก จากนั้นจะเพิ่มน้ำหนักแรงกดตามมาตรฐานที่กำหนด ดังแสดงในภาพที่ 2.2 แสดงการทดสอบความแข็งแบบร็อกเวลล์ (Rockwell) เพื่อประเมินว่าความลึกที่เกิดขึ้นบนพื้นผิววัสดุมีมากหรือน้อยเพียงใด การทดสอบนี้ช่วยให้สามารถหาค่าความแข็งของวัสดุได้อย่างแม่นยำ ซึ่งผลที่ได้จะสะท้อนถึงความต้านทานต่อการขีดข่วนและการเสียรูปของวัสดุนั้น ๆ



รูปที่ 2.2 การทดสอบความแข็งแบบรอกเวลล์ (Rockwell) (E. Alfredo Campo, 2008)

2.5.4.2 การทดสอบความแข็งแบบบริเนลล์ (Brinell)

การทดสอบความแข็งแบบบริเนลล์ (Brinell Hardness Test) เป็นการทดสอบที่ใช้วัดค่าความแข็งของวัสดุโดยการกดลูกเหล็กทรงกลมที่มีขนาดและน้ำหนักที่กำหนดลงบนพื้นผิวของวัสดุที่ต้องการทดสอบ เมื่อกดลูกเหล็กลงไปบนวัสดุ จะทำให้เกิดการยุบตัวที่พื้นผิววัสดุ การทดสอบนี้จะวัดขนาดของรอยบุ๋มที่เกิดจากการกดลูกเหล็กในวัสดุ โดยการคำนวณค่าความแข็งแบบบริเนลล์จะใช้สูตรต่อไปนี้

$$\text{Hardness (HB)} = \frac{F}{A}$$

โดยที่ F คือ แรงที่ใช้ในการกดลูกเหล็ก (N)

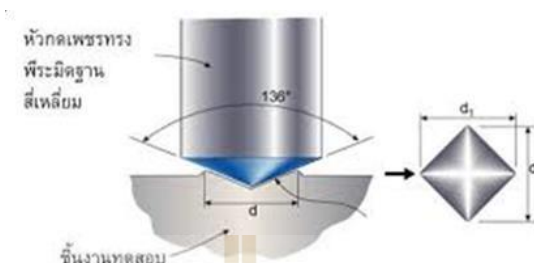
A คือ พื้นที่ของรอยบุ๋มที่เกิดจากการกดลูกเหล็ก (mm^2)

ซึ่งในการทดสอบนี้ ลูกเหล็กที่ใช้จะมีขนาดต่าง ๆ เช่น 10 มม. หรือ 5 มม. ขึ้นอยู่กับวัสดุที่ทดสอบและค่าความแข็งที่คาดหวัง โดยมักจะใช้ลูกเหล็กที่มีขนาด 10 มม. ในการทดสอบวัสดุที่มีความแข็งปานกลางหรือสูง การทดสอบความแข็งแบบบริเนลล์นั้น เหมาะสำหรับวัสดุที่มีโครงสร้างหยาบหรือมีพื้นผิวที่ไม่เรียบ เช่น เหล็กหล่อ โลหะผสม และวัสดุที่มีการกลึงไม่ละเอียด ผลการทดสอบที่ได้จากบริเนลล์มีหน่วยเป็น "HB" (Brinell Hardness), ซึ่งจะสะท้อนถึงความต้านทานต่อการขีดข่วนและการเสียรูปของวัสดุเมื่อได้รับแรงกด

2.5.4.3 การทดสอบความแข็งแบบวิกเกอร์ส (Vickers)

ใช้หลักการเดียวกับการทดสอบแบบบริเนลล์ แต่มีการเปลี่ยนแปลงหัวกดจากลูกบอลชุบแข็งเป็นหัวกดที่ทำจากเพชรเจียรไนทรงพีระมิดที่มีมุม 136 องศา ดังแสดงในรูปที่ 2.3

หลังจากนั้นกดด้วยแรง F ตั้งฉากกับชิ้นงานทดสอบ รอยกดที่เกิดขึ้นจะถูกนำไปวัดเส้นทแยงมุม d ทั้งสองด้านด้วยความละเอียด 0.002 มิลลิเมตร ค่าเฉลี่ยของเส้นทแยงมุมจะถูกนำไปคำนวณ เพื่อหาค่าความแข็งของชิ้นงาน



รูปที่ 2.3 การทดสอบความแข็งแบบวิกเกอร์ส (อภิชาติ พานิชกุล, 2562)

2.6 การตรวจสอบโครงสร้างทางโลหะวิทยา (Metallography Examination)

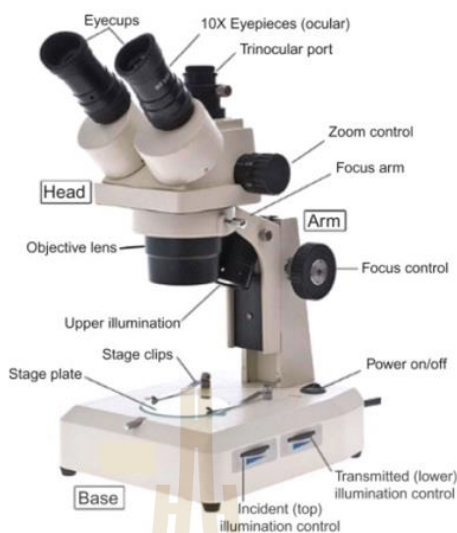
การตรวจสอบโครงสร้างทางโลหะวิทยา (Metallography Examination) เป็นกระบวนการที่สำคัญในการศึกษาคุณสมบัติของโลหะ เนื่องจากโครงสร้างทางโลหะวิทยามีผลโดยตรงต่อคุณสมบัติทางกายภาพ (Physical properties) ของวัสดุ ซึ่งรวมถึงการจัดเรียงตัวของอะตอมและเกรนของโลหะ การศึกษาโครงสร้างทางโลหะวิทยาจึงเป็นขั้นตอนพื้นฐานที่ใช้ในการตรวจสอบคุณภาพของโลหะและยังสามารถใช้ในการวิเคราะห์หาสาเหตุของคุณสมบัติที่แสดงออกของโลหะนั้น ๆ โดยในการศึกษานี้ มีการแบ่งการตรวจสอบโครงสร้างทางโลหะวิทยาออกเป็นสองระดับหลัก ได้แก่

2.6.1 การตรวจสอบระดับมหภาค (Macro-scopic examination)

การตรวจสอบในระดับมหภาคเป็นการศึกษาการจัดเรียงโครงสร้างของโลหะ โดยใช้กล้องจุลทรรศน์ที่มีกำลังขยายต่ำ ซึ่งอาจใช้การตรวจสอบด้วยตาเปล่า (Visual inspection) หรือใช้กำลังขยายไม่เกิน 10 เท่า การตรวจสอบระดับมหภาคมักใช้ในการตรวจหารอยร้าว ฟองอากาศ หรือความผิดปกติอื่น ๆ ที่มีขนาดใหญ่และมองเห็นได้ด้วยตาเปล่าหรือด้วยกำลังขยายต่ำ

2.6.2 การตรวจสอบระดับจุลภาค (Micro-scopic examination)

การตรวจสอบระดับจุลภาคจะใช้กล้องจุลทรรศน์ที่มีกำลังขยายสูง เพื่อศึกษาโครงสร้างที่มีขนาดเล็กกว่าและไม่สามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่า โดยการขยายจะอยู่ในช่วง 10-1,000 เท่า การตรวจสอบในระดับนี้ช่วยให้สามารถสังเกตเกรนโลหะ (Metal Grain) เฟสของโลหะ (Phase) หรือการกระจายตัวของสารเคมีภายในโลหะได้ ซึ่งมีความสำคัญในการประเมินคุณสมบัติที่ละเอียดของวัสดุ การใช้งานอุปกรณ์ที่เหมาะสมสำหรับการตรวจสอบ เช่น กล้องจุลทรรศน์สำหรับงานโลหะวิทยา (Metallurgical Microscope) หรือกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (Optical Microscope) ดังแสดงในรูปที่ 2.4 ซึ่งกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงจะช่วยให้การศึกษาเป็นไปอย่างแม่นยำและมีประสิทธิภาพ



รูปที่ 2.4 กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (Optical microscope) (Sina Ebnesajjad, 2014)

2.7 บริเวณผลกระทบร้อน (Heat Affected Zone)

บริเวณผลกระทบร้อน (Heat Affected Zone, HAZ) เป็นพื้นที่ในวัสดุที่ได้รับผลกระทบจากความร้อนในกระบวนการเชื่อม โดยบริเวณนี้จะเกิดขึ้นระหว่างกระบวนการที่โลหะได้รับความร้อนสูงจากแหล่งเชื่อม (เช่น เลเซอร์ อาร์ค หรือไฟฟ้า) แต่ไม่ได้ถึงระดับที่ทำให้วัสดุละลายหรือกลายเป็นของเหลว เมื่อวัสดุเย็นลง บริเวณที่ได้รับความร้อนนี้จะเกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางโลหะวิทยา (Metallurgical Structure) และคุณสมบัติทางกล (Mechanical Properties) ซึ่งมีผลต่อความแข็งแรงและความทนทานของวัสดุหลังจากการเชื่อม

การเกิด Heat Affected Zone (HAZ) เกิดขึ้นเนื่องจากการได้รับความร้อนที่สูง แต่ไม่ถึงจุดหลอมเหลว โดยบริเวณนี้จะแบ่งออกเป็นหลายโซนที่มีลักษณะต่างกันตามอุณหภูมิที่วัสดุได้รับในกระบวนการเชื่อม ประกอบด้วย:

- 1) โซนละลาย (Fusion Zone): เป็นบริเวณที่โลหะถูกหลอมละลายโดยตรงในกระบวนการเชื่อม ซึ่งเป็นส่วนที่เกิดการผสมกันระหว่างโลหะเชื่อมกับโลหะฐาน
- 2) โซนการตกผลึก (Solidification Zone): เป็นบริเวณที่โลหะเริ่มกลับสู่สถานะของแข็งอีกครั้งหลังจากการหลอมละลาย
- 3) โซนที่ไม่หลอมละลาย (Unmelted Zone): เป็นบริเวณที่ไม่ถูกหลอมละลาย แต่ได้รับความร้อนจากการเชื่อม ซึ่งจะมีการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างโลหะ เช่น การขยายตัวของเกรน หรือการปรับเปลี่ยนในเฟสของโลหะ

บริเวณผลกระทบร้อน (Heat Affected Zone, HAZ) เป็นพื้นที่ที่โลหะได้รับผลกระทบจากความร้อนในกระบวนการเชื่อม ซึ่งทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางโลหะวิทยาและคุณสมบัติทางกลของวัสดุในบริเวณนี้ โดยหนึ่งในผลกระทบที่สำคัญคือการ ขยายตัวของเกรน (Grain Growth) ที่เกิดจากความร้อนสูง ซึ่งสามารถทำให้เกรนของโลหะขยายตัวและลดความแข็งแรงของวัสดุลงได้ นอกจากนี้

ยังสามารถเกิด การเปลี่ยนแปลงของเฟส (Phase Transformation) เช่น การเกิดเฟสมาร์เทนไซต์ (Martensite) หรือเพิร์ลไลต์ (Pearlite) ซึ่งอาจทำให้วัสดุมีความแข็งสูงขึ้นแต่ลดความเหนียวลง ในขณะเดียวกัน ความแข็งในบริเวณ HAZ มักจะลดลง เมื่อเทียบกับบริเวณที่ไม่ได้รับผลกระทบจากความร้อน เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงทางโครงสร้างที่เกิดขึ้นในระหว่างกระบวนการเชื่อม การศึกษาและวิเคราะห์ HAZ จึงเป็นสิ่งสำคัญในการประเมินคุณสมบัติทางกลของวัสดุหลังการเชื่อม เพราะบริเวณนี้มีผลโดยตรงต่อความแข็งแรง ความเหนียว และความทนทานต่อการแตกหัก หรือการสึกหรอของวัสดุที่เชื่อม

2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ศิวะพงษ์ ลัมพากวิวัฒน์ ได้ทำการศึกษาความเป็นไปได้ในการซ่อมแซมแม่พิมพ์ที่ผลิตจากเหล็กกล้าเครื่องมืองานเย็น โดยใช้กระบวนการเชื่อมด้วยเลเซอร์ โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อวิเคราะห์ผลกระทบเชิงกลที่เกิดขึ้นจากกระบวนการเชื่อม โดยเน้นศึกษาค่าความแข็งของแนวเชื่อมและบริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อน (Heat Affected Zone : HAZ) รวมถึงปัญหาการแตกร้าวที่เกิดขึ้น หลังจากผ่านกระบวนการชุบแข็ง การทดลองประกอบด้วย 2 กระบวนการหลัก ได้แก่ การเชื่อมด้วยเลเซอร์และการเชื่อมแบบทิก (TIG Welding) โดยในการเชื่อมด้วยเลเซอร์ ผู้วิจัยได้ใช้ลวดเชื่อมขนาดต่าง ๆ จำนวน 6 ขนาด ตั้งแต่ 0.25 ถึง 0.7 มิลลิเมตร พร้อมทั้งกำหนดค่าความต่างศักย์ 5 ระดับ และดำเนินการทดลองเชื่อมจำนวน 3 ชั้นต่อระดับ รวมถึงการทดลองเชื่อมทิกโดยใช้ลวดเชื่อมขนาด 0.8 มิลลิเมตร ซึ่งแบ่งเป็นแบบที่มีการอุ่นชิ้นงานก่อนเชื่อม และแบบที่ไม่มีการอุ่น ผลรวมของชิ้นงานที่ใช้ในการทดลองทั้งสิ้นจำนวน 100 ชิ้น ซึ่งงานวิจัยนี้มีความสำคัญต่อหัวข้อของผู้วิจัย เนื่องจากแสดงให้เห็นถึงข้อได้เปรียบของการเชื่อมด้วยเลเซอร์ในการลดขนาด HAZ และความเสียหายในการแตกร้าว ซึ่งเป็นข้อมูลพื้นฐานสำคัญในการศึกษาการเชื่อมซ่อมแม่พิมพ์เหล็กกล้า P20

สุกัญญา เตชะไถภพ ได้ดำเนินการทดลองเพื่อศึกษาผลของรูปแบบพัลส์ของเลเซอร์ต่อกระบวนการเชื่อมโลหะในงานอัญมณีและเครื่องประดับ โดยเฉพาะโลหะผสมเงินและทอง การทดลองแบ่งออกเป็น 5 รูปแบบของพัลส์ ได้แก่ พัลส์สี่เหลี่ยม (Square Pulse Shape) พัลส์ขาขึ้นเป็นบวก (Positive Slope Leading Pulse) พัลส์ขาลงเป็นลบ (Negative Slope Trailing Pulse), พัลส์ขึ้นและลงอย่างค่อยเป็นค่อยไป (Position Bridge Pulse) และพัลส์แบบต่อเนื่อง (Sequence of Square Pulse) โดยใช้เครื่องเลเซอร์ชนิดนีโอไดเมียมแยกรายในการทดลอง การวิเคราะห์รอยเชื่อมดำเนินการโดยใช้กล้องกำลังขยาย 90 เท่า และ 500 เท่า โดยผลงานนี้ช่วยเสริมองค์ความรู้ด้านผลของรูปแบบพัลส์ต่อพฤติกรรมของการหลอมโลหะ ซึ่งสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการปรับค่าพารามิเตอร์ของเลเซอร์ Nd: YAG ให้เหมาะสมต่อการซ่อมแซมแม่พิมพ์ขนาดเล็กได้

ประสงค์ ก้านแก้ว ได้ศึกษาการเปรียบเทียบสมรรถนะของวัสดุที่ใช้ผลิตแม่พิมพ์ฉีดพลาสติก ระหว่างอลูมิเนียมเกรด A7075 กับเหล็กเกรด P20 โดยมีจุดวิเคราะห์ในด้านต้นทุนการผลิตและเวลาที่ใช้ในกระบวนการฉีดขึ้นรูป โดยการทดลองผลิตแม่พิมพ์ทั้งสองแบบเพื่อใช้ในการขึ้นรูปพรีฟอร์มพลาสติก PET ขนาด 350 มิลลิลิตร ด้วยกระบวนการเป่าแบบสองขั้นตอน (Two-Stage Blow Molding) ที่ความดัน 30–35 บาร์ ข้อมูลจากงานวิจัยนี้มีประโยชน์ในการเข้าใจบริบทการใช้งานจริง

ของแม่พิมพ์ P20 ซึ่งเป็นหัวใจสำคัญของการกำหนดแนวทางการเชื่อมซึ่งต้องคำนึงถึงต้นทุนและประสิทธิภาพการใช้งานหลังการเชื่อม

วิชาญ วีรชัยสุนทร และ รัตน์ บริสุทธิ์กุล ได้ศึกษาผลของแสงเลเซอร์ชนิด YAG ต่อกระบวนการเชื่อมติดวัสดุต่างชนิดระหว่างเหล็กกล้าไร้สนิม SUS304 ความหนา 0.5 มิลลิเมตร กับพอลิเอทิลีน เทอเรพทาเลต (PET) ความหนา 1 มิลลิเมตร โดยแบ่งการทดลองออกเป็นสองลักษณะ ได้แก่ การวางแผ่น PET ไว้ด้านบนซึ่งเลเซอร์สามารถทะลุผ่านไปยังบริเวณเชื่อมได้ และการวางแผ่น SUS304 ไว้ด้านบนซึ่งไม่สามารถให้แสงเลเซอร์ทะลุถึงรอยเชื่อมได้ ผลการศึกษานี้ชี้ให้เห็นถึงกลไกการถ่ายเทพลังงานของเลเซอร์ YAG และบทบาทของปฏิกิริยาเคมีในการเชื่อม ซึ่งช่วยให้เข้าใจกลไกการเชื่อมของวัสดุที่มีคุณสมบัติต่างกัน อันเป็นประโยชน์ต่อการออกแบบกระบวนการเชื่อมที่มีความเฉพาะเจาะจง

นอกจากนั้น Sagar H. Nikam และ Neelesh Kumar Jain ได้ศึกษาการเชื่อมแม่พิมพ์และเฟืองที่เสียหายโดยใช้เทคโนโลยีเลเซอร์ โดยเน้นที่ (1) ประเภทของความเสียหายและสาเหตุ เช่น ความเสียหายจากภัยธรรมชาติ การผลิต และการใช้งาน (2) ลำดับกระบวนการซ่อมแซม (3) วิธีการซ่อมแซม เช่น การเชื่อมอาร์ก พลาสมา และเลเซอร์ (4) การเปรียบเทียบกระบวนการต่าง ๆ เช่น เลเซอร์ อาร์ก ลำแสงอิเล็กตรอน และไมโครพลาสมา (5) รายละเอียดของกระบวนการเลเซอร์เชื่อม รวมถึงประเภทของเลเซอร์ที่ใช้ เช่น CO₂, Nd: YAG และ Yb: YAG งานวิจัยชี้ว่าเลเซอร์เป็นเทคโนโลยีที่มีความแม่นยำ ให้อายุเชื่อมคุณภาพสูง บริเวณได้รับความร้อนต่ำ และเหมาะสำหรับงานซ่อมแซมที่ซับซ้อน โดยผู้ใช้งานสามารถเลือกเทคโนโลยีที่เหมาะสมกับทรัพยากรและข้อจำกัดเฉพาะด้านได้

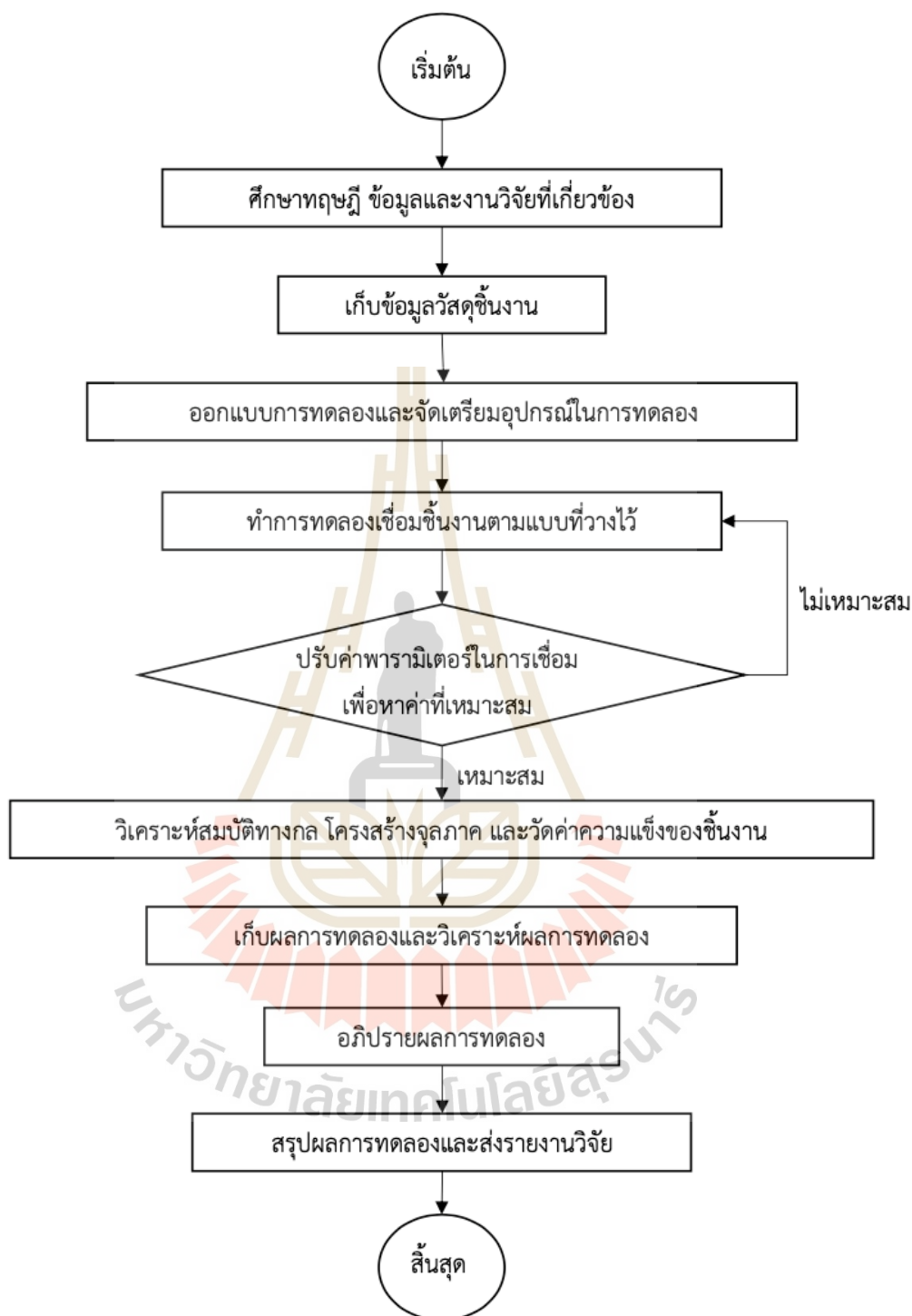
ขณะเดียวกัน Ventrella V. ได้ศึกษาการใช้เลเซอร์พัลส์ชนิด Nd:YAG สำหรับการเชื่อมงานขนาดเล็ก โดยมีวัตถุประสงค์ในการเชื่อมเพลสแตนเลส AISI 316L ความหนา 100 μm ทั้งในลักษณะปิดผนึกพอยต์บางในสภาพแวดล้อมกักความร้อน และการเชื่อมข้อต่อที่มีความหนาไม่เท่ากัน งานวิจัยนี้เน้นการศึกษาผลของพลังงานพัลส์ (1.0–3.0 J) ต่อคุณภาพรอยเชื่อมฟิลเลต โดยใช้กล้องจุลทรรศน์ ทดสอบแรงเฉือน แรงดึง และความแข็งแรงระดับจุลภาค ผลการทดลองชี้ให้เห็นว่าการควบคุมพลังงานพัลส์มีผลสำคัญต่อคุณสมบัติเชิงกลของรอยเชื่อม โดยเฉพาะอย่างยิ่งในกรณีที่มีช่องว่างระหว่างชิ้นงาน

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

ในการศึกษาวิจัยครั้งนี้ใช้กระบวนการเชื่อมเลเซอร์ชนิดนีโอติเมียมแยมแย็กเลเซอร์ (Nd: YAG) สำหรับการเชื่อมซ่อมเหล็กแม่พิมพ์ฉีดพลาสติกเกรด P20 โดยกระบวนการเชื่อมเลเซอร์ Nd: YAG มีความแม่นยำสูงและสามารถควบคุมความร้อนที่ใช้ในการเชื่อมได้ดี จึงเหมาะสมสำหรับการซ่อมแซมชิ้นงานที่ต้องการการควบคุมความร้อนอย่างละเอียด เพื่อหลีกเลี่ยงความเสียหายจากความร้อนที่เกินไป ในการทดลองนี้ใช้เครื่องเชื่อมเลเซอร์ EIT Laser Schweissen System รุ่น Smart 225iL และเลือกใช้ลวดเชื่อมที่เป็นวัสดุเดียวกันกับแม่พิมพ์ P20 เพื่อให้ได้ผลลัพธ์ที่มีความเหมาะสมที่สุดในการเชื่อมชิ้นงาน จากนั้นทำการเชื่อมในรูปแบบ BOP (Bead-On-Plate) เพื่อตรวจสอบผลกระทบจากกระบวนการเชื่อมต่อคุณสมบัติของชิ้นงาน หลังจากการเชื่อมแล้ว ชิ้นงานจะถูกทดสอบคุณสมบัติทางกล รวมทั้งทำการวิเคราะห์โครงสร้างทางมหภาคและจุลภาคของชิ้นงาน โดยการดำเนินการวิจัยในครั้งนี้ สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.1 และมีรายละเอียดขั้นตอนการทำงาน ดังนี้

1. ศึกษาทฤษฎี ข้อมูลและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง
2. ออกแบบการทดลอง
3. เตรียมชิ้นงานและอุปกรณ์ในการทดลอง
4. ทำการทดลองเชื่อมชิ้นงานตามที่วางแผนไว้
5. ปรับค่าพารามิเตอร์ในการเชื่อมเพื่อหาค่าที่เหมาะสม
6. เตรียมชิ้นงานเพื่อทดสอบ
7. ทดสอบชิ้นงาน
8. บันทึกผลและวิเคราะห์ผลการทดลอง
9. สรุปผลการทดลองและส่งรายงานวิจัย



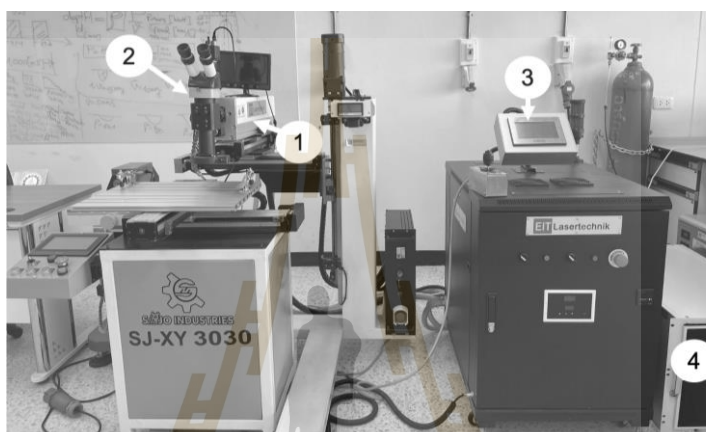
รูปที่ 3.1 ขั้นตอนการการดำเนินการวิจัย

3.1 เครื่องมือ วัสดุ อุปกรณ์ ที่ใช้ในการวิจัย

เครื่องมือ วัสดุ อุปกรณ์ ที่ใช้ในการดำเนินงานวิจัย ได้รับการสนับสนุนและอำนวยความสะดวกจากอาคารเครื่องมือ 6 อาคารเครื่องมือ 10 และอาคารเครื่องมือ 11 ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี โดยในการดำเนินงานวิจัยในครั้งนี้ มีวัสดุ อุปกรณ์ ดังต่อไปนี้

3.1.1 เครื่องเชื่อมเลเซอร์ EIT Laser Schweissen System รุ่น Smart 225iL

มีส่วนประกอบของเครื่อง ดังแสดงในรูปที่ 3.2 และเครื่องเชื่อมเลเซอร์ประกอบด้วยส่วนสำคัญ 4 ส่วน ดังนี้



รูปที่ 3.2 ส่วนประกอบเครื่องเชื่อมเลเซอร์ EIT Laser Schweissen System รุ่น Smart 225iL

ส่วนที่ 1 ประกอบด้วย 3 ส่วนย่อย ได้แก่ 1.1 วัสดุตัวกลางเลเซอร์ (Laser Medium) วัสดุที่ใช้ในการกระตุ้นเพื่อให้เกิดแสงเลเซอร์ ในที่นี้ใช้ตัวกลางที่เป็นผลึกของแข็ง Yttrium-Aluminium Garnet (YAG, Y3Al5O12) 1.2 ออปติคัลเรโซเนเตอร์ (Optical Resonator) ส่วนที่ทำให้เกิดการปล่อยแสงเลเซอร์โดยการกระตุ้นซ้ำ มีโครงสร้างประกอบด้วยกระจกสองแผ่นที่หันหน้าเข้าหากัน โดยมีวัสดุตัวกลาง YAG อยู่ภายใน 1.3 แหล่งกำเนิดพลังงาน (Energy Source) ใช้เพื่อกระตุ้นอะตอมในวัสดุตัวกลางให้เกิดการปล่อยแสงเลเซอร์

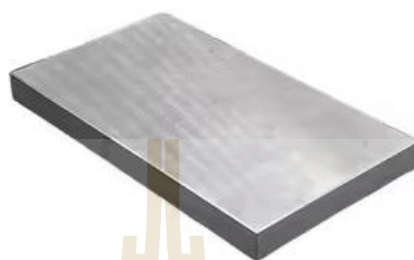
ส่วนที่ 2 ระบบสังเกตรอยเชื่อม (Dual System CCD & Microscope Welding Pattern Recognition) ประกอบด้วยจอ CCD สีและกล้องจุลทรรศน์ที่มีความสามารถในการปรับระยะโฟกัสได้เพื่อสังเกตรอยเชื่อม

ส่วนที่ 3 ระบบทัชสกรีนและอินเทอร์เฟซผู้ใช้แบบกราฟิก (Touchscreen & Graphical User Interface) ใช้สำหรับการสั่งงานและควบคุมรูปร่างและความถี่ของเลเซอร์

ส่วนที่ 4 เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนอากาศ-น้ำภายนอก (External Air Water Heat Exchanger) สำหรับแลกเปลี่ยนความร้อนและตรวจวัดค่าอุณหภูมิ อัตราการไหล

3.1.2 เหล็กแม่พิมพ์ฉีดพลาสติกเกรด P20 ตามมาตรฐาน AISI

โลหะฐาน (Base Metal) สำหรับใช้ในการทดลองครั้งนี้ คือแผ่นเหล็กสำหรับการสร้างเป็นแม่พิมพ์ฉีดพลาสติกเกรด AISI P20 โดยชิ้นงานที่นำมาใช้ในการทดลองมีขนาดกว้าง 100 มิลลิเมตร ยาว 200 มิลลิเมตร และหนา 10 มิลลิเมตร ดังแสดงในรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 โลหะฐาน (Base Metal) เกรด P20 ตามมาตรฐาน AISI

ซึ่งมีส่วนผสมทางเคมีของชิ้นงานโลหะฐาน สามารถแสดงได้ดังตารางที่ 3.1 โดยก่อนการดำเนินการทดลอง ผู้วิจัยเตรียมชิ้นงานตามกระบวนการเพื่อให้ชิ้นงานมีความเหมาะสมก่อนการนำไปทดลอง โดยการเตรียมชิ้นงานจะเริ่มจากการใช้แปรงขัดลวดเหล็กขัดทำความสะอาดผิวหน้าของชิ้นงานเพื่อขจัดสิ่งสกปรกที่อาจเกาะติดอยู่ จากนั้นได้ใช้สารละลายอะซิโตน (Acetone) เช็ดทำความสะอาดพื้นผิวของชิ้นงานและพักชิ้นงานให้แห้งก่อนนำมาใช้ในการทดลอง

ตารางที่ 3.1 ส่วนผสมทางเคมีของเหล็กแม่พิมพ์ฉีดพลาสติก (AISI P20)

เหล็กแม่พิมพ์พลาสติก AISI P20 (ร้อยละโดยมวล)	
อะลูมิเนียม (Al)	0.84
วานาเดียม (V)	0.03
โครเมียม (Cr)	1.37
แมงกานีส (Mn)	1.13
เหล็ก (Fe)	96.20
นิกเกิล (Ni)	0.30
ทองแดง (Cu)	0.09

3.1.3 ลวดเชื่อมเติมเนื้อ เกรด P20 ตามมาตรฐาน AISI

ลวดเชื่อมที่ใช้ในการทดลองในครั้งนี้เป็นลวดเชื่อมเกรด AISI P20 เช่นเดียวกับโลหะฐานโดยลวดเชื่อมมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.6 มิลลิเมตร ดังแสดงในรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 ลวดเชื่อมเติมเนื้อ เกรด P20 ตามมาตรฐาน AISI

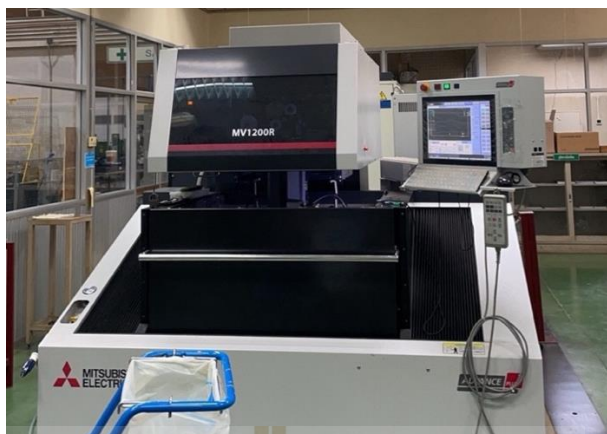
โดยลวดเชื่อมเติมเนื้อนี้มีส่วนผสมทางเคมีที่ใกล้เคียงกับโลหะฐานเหล็กแม่พิมพ์ฉีดพลาสติก เกรด P20 โดยส่วนผสมทางเคมีของลวดเชื่อมเติมเนื้อ แสดงดังตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 ส่วนผสมทางเคมีของลวดเชื่อมเติมเนื้อ เกรด P20

ลวดเชื่อมเติมเนื้อเหล็ก เกรด P20 (ร้อยละโดยมวล)	
อะลูมิเนียม (Al)	1.29
วานาเดียม (V)	0.04
ซิลิกอน (Si)	1.18
แมงกานีส (Mn)	1.43
เหล็ก (Fe)	89.27
นิกเกิล (Ni)	0.59
ทองแดง (Cu)	6.20
โมลิบดีนัม (Mo)	–

3.1.4 เครื่องตัด EDM Wire cut ยี่ห้อ Mitsubishi รุ่น MV1200R Wire EDM

ในกระบวนการเตรียมชิ้นงานเพื่อนำไปประกอบในเรือนชิ้นงาน ด้วยเครื่องขึ้นเรือนชิ้นงาน เริ่มด้วยการใช้เครื่องตัดโลหะด้วยลวดไฟฟ้า (Electrical Discharge Machining, EDM Wire Cut) ดังแสดงในรูปที่ 3.5 ในการตัดตามขวางของแนวเชื่อม ให้ได้ขนาดกว้าง 10 มิลลิเมตร ยาว 15 มิลลิเมตร จำนวน 9 ชิ้น



รูปที่ 3.5 เครื่องตัด EDM Wire cut ยี่ห้อ Mitsubishi รุ่น MV1200R Wire EDM

3.1.5 เครื่องอัดขึ้นเรือนโลหะวิทยาแบบร้อน ยี่ห้อ IMT รุ่น G1-10

ในขั้นตอนการเตรียมชิ้นงาน จะนำชิ้นงานที่ผ่านการตัดแล้วมาใช้ในการกระบวนการขึ้นเรือนชิ้นงาน จำนวน 9 ชิ้น โดยใช้เครื่องอัดขึ้นเรือนชิ้นงานยี่ห้อ IMT รุ่น G1-10 (รูปที่ 3.6) ซึ่งมีการใช้งานร่วมกับผงเรซิน (Phenolic Resin) เพื่อให้ได้ชิ้นงานที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการขัดด้วยกระดาษทรายในขั้นตอนต่อไป



รูปที่ 3.6 เครื่องอัดขึ้นเรือนโลหะวิทยาแบบร้อน ยี่ห้อ IMT รุ่น G1-10

3.1.6 เครื่องขัดกระดาษทรายแบบจานหมุน

ในการตรวจสอบโครงสร้างทางโลหะวิทยา จะมีการใช้เครื่องขัดกระดาษทรายแบบจานหมุน (รูปที่ 3.7) ในกระบวนการเตรียมพื้นผิวชิ้นงานเพื่อนำไปวิเคราะห์โครงสร้างทางจุลภาคและมหภาค โดยการเตรียมพื้นผิวนี้นี้มีความสำคัญเนื่องจากจะช่วยให้สามารถเห็นรายละเอียดของโครงสร้างชิ้นงานได้อย่างชัดเจน เครื่องขัดกระดาษทรายแบบจานหมุนจะถูกใช้งานร่วมกับกระดาษทรายที่มีความหยาบและละเอียดแตกต่างกัน โดยเริ่มจากกระดาษทรายที่มีความหยาบมาก

ที่สุดไปจนถึงกระดาษทรายที่มีความละเอียดที่สุด เพื่อให้ได้พื้นผิวชิ้นงานที่เรียบเนียนและพร้อมสำหรับการวิเคราะห์ทางจุลภาคและมหภาค กระดาษทรายที่ใช้งานประกอบด้วยเบอร์ 80, 100, 320, 400, 600, 800, 1000 และ 1200 ซึ่งแต่ละเบอร์จะมีลักษณะเฉพาะในการขัดที่แตกต่างกัน โดยเริ่มจากเบอร์ที่หยาบที่สุด (เบอร์ 80) จนถึงเบอร์ที่ละเอียดที่สุด (เบอร์ 1200) เพื่อสร้างพื้นผิวที่เรียบเนียนและปราศจากรอยขีดข่วนขั้นตอนนี้เป็นขั้นตอนสำคัญในการเตรียมชิ้นงานสำหรับการตรวจสอบโครงสร้างทางจุลภาคและมหภาค เนื่องจากพื้นผิวที่ได้รับการเตรียมอย่างดีจะช่วยให้สามารถมองเห็นลักษณะทางจุลภาคและโครงสร้างมหภาคได้อย่างชัดเจน ช่วยให้การวิเคราะห์เป็นไปอย่างถูกต้องและมีประสิทธิภาพ



รูปที่ 3.7 เครื่องขัดกระดาษทรายแบบจานหมุน

3.1.7 เครื่องขัดผงอะลูมินา

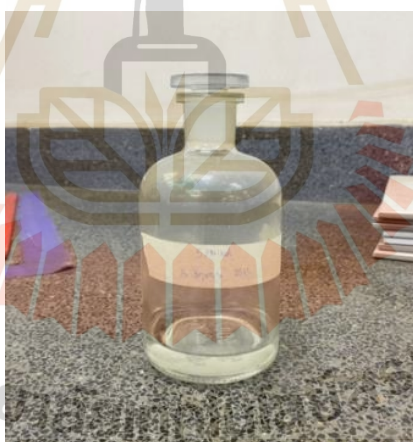
หลังจากเตรียมพื้นผิวชิ้นงานด้วยกระดาษทรายแล้ว จะนำชิ้นงานมาขัดชิ้นงาน โดยใช้เครื่องขัดเงาแบบจานหมุนที่มีผ้าสักหลาดติดอยู่ ดังแสดงในรูปที่ 3.8 การขัดเงานี้จะทำการร่วมกับการใช้ผงอะลูมินา ขนาด 0.3 ไมครอน ซึ่งมีลักษณะเป็นผงละเอียด เพื่อขัดพื้นผิวของชิ้นงานโลหะจนกระทั่งมีลักษณะเป็นเงาและไม่มีรอยขีดข่วนหรือรอยที่ผิวหน้า ซึ่งการขัดเงาด้วยเครื่องขัดแบบจานหมุน และผงอะลูมินาจะช่วยให้ได้พื้นผิวที่เรียบเนียนและเงา โดยผ้าสักหลาดจะช่วยในการกระจายแรงขัดให้สม่ำเสมอ และผงอะลูมินาที่มีขนาดเล็กจะช่วยให้การขัดที่ละเอียด ทำให้รอยขีดข่วนและรอยขีดที่เกิดจากการใช้กระดาษทรายขั้นต้นหายไป ขั้นตอนนี้มีความสำคัญเป็นอย่างมากในการเตรียมพื้นผิวชิ้นงานก่อนการตรวจสอบทางจุลภาคและมหภาค เนื่องจากพื้นผิวที่เรียบเนียนไร้รอยขีดข่วนจะช่วยให้สามารถมองเห็นรายละเอียดของโครงสร้างภายในชิ้นงานได้อย่างชัดเจนและถูกต้อง เมื่อการขัดเงาเสร็จ จะนำชิ้นงานไปผ่านขั้นตอนการกัดผิวหน้าด้วยกรดซึ่งจะช่วยให้การเปิดผิวโครงสร้างโลหะภายในของชิ้นงาน ทำให้สามารถเห็นรายละเอียดของโครงสร้างจุลภาคและมหภาคได้ชัดเจนยิ่งขึ้น การเตรียมและการขัดผิวที่ดีจึงมีผลโดยตรงต่อความถูกต้องและความชัดเจนของการวิเคราะห์โครงสร้างทางจุลภาคและมหภาคของโลหะวิทยา



รูปที่ 3.8 เครื่องกัดผงอะลูมินา

3.1.8 กรด Nital ความเข้มข้น 2%

หลังจากเสร็จสิ้นกระบวนการเตรียมพื้นผิว (Surface Preparation) ด้วยการขัดกระดาษทรายและขัดเงา ขั้นตอนถัดไปคือการนำชิ้นงานมากัด (Etching) ด้วยกรด Nital 2% ดังแสดงในรูปที่ 3.9 เป็นระยะเวลา 5 วินาทีและล้างออกด้วยแอลกอฮอล์และเป่าให้ชิ้นงานแห้งสนิทเพื่อเตรียมพร้อมสำหรับขั้นตอนการตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์



รูปที่ 3.9 กรด Nital ความเข้มข้น 2%

3.1.9 กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงยี่ห้อ Carl Zeiss รุ่น Axio Scope Mat

โดยนำชิ้นงานที่เตรียมผิวเรียบร้อยแล้วมาส่องโครงสร้างมหภาคของแนวเชื่อมด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง ดังแสดงที่รูป 3.10 โดยใช้กำลังขยาย 10-50 เท่า เพื่อสังเกตโครงสร้างและรายละเอียดของแนวเชื่อมผ่านเลนส์ของกล้องจุลทรรศน์ บันทึกภาพและข้อมูลที่ได้ เพื่อการวิเคราะห์แนวเชื่อม พร้อมทั้งวัดค่าความกว้าง ความสูงของแต่ละแนวเชื่อม ด้วยโปรแกรม ImageJ



รูปที่ 3.10 กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง

3.1.10 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)

หลังจากที่ได้ทำการเตรียมผิวหน้าของชิ้นงานเรียบร้อยแล้ว จึงนำชิ้นงานทั้งหมดไปดำเนินการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคบริเวณแนวเชื่อม โดยใช้กล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope) ดังแสดงในรูปที่ 3.11 เพื่อสังเกตลักษณะของโครงสร้างจุลภาคในแต่ละแนวเชื่อมอย่างละเอียด การตรวจสอบดังกล่าวครอบคลุมทั้งบริเวณแนวเชื่อม เนื้อโลหะเดิม (Base Metal) และเขตหลอมละลาย (Fusion Zone) รวมถึงเขตรอยต่อระหว่างโลหะทั้งสองส่วน (Heat Affected Zone) จากนั้นได้ทำการบันทึกภาพถ่ายจากการส่องกล้อง พร้อมจดบันทึกรายละเอียดของโครงสร้างจุลภาคที่พบในแต่ละชิ้นงาน เพื่อใช้เป็นข้อมูลในการวิเคราะห์คุณภาพของแนวเชื่อม และเปรียบเทียบผลที่เกิดจากค่าพารามิเตอร์การเชื่อมที่แตกต่างกัน



รูปที่ 3.11 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนส่องกราด

3.1.11 เครื่องวัดค่าความแข็งจุลภาคแบบวิกเกอร์รุ่น FM-800

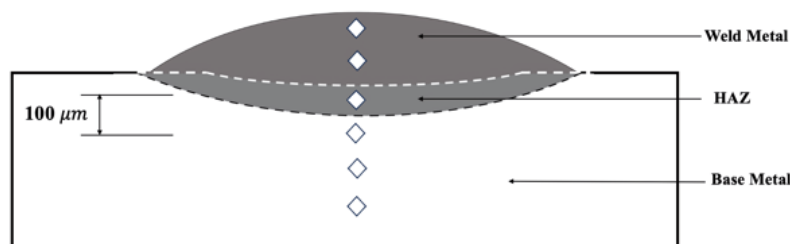
การทดสอบค่าความแข็งแบบไมโครวิกเกอร์ดำเนินการโดยใช้เครื่องทดสอบรุ่น FM-800 ดังแสดงในรูปที่ 3.12 เครื่องทดสอบความแข็งแบบไมโครวิกเกอร์ โดยทำการกดหัวทดสอบลงบนแนวเชื่อมของชิ้นงานในแต่ละตำแหน่งทั้งหมดจำนวน 6 จุด แบ่งออกเป็น บริเวณโลหะเชื่อม (Weld Metal) จำนวน 2 จุด บริเวณเขตกระทบร้อน (Heat Affected Zone: HAZ) จำนวน 1 จุด และบริเวณโลหะฐาน (Base Metal) จำนวน 3 จุด โดยใช้แรงกด (Test Load) ที่ 1000 gf และระยะเวลาในการกด (Dwell Time) เท่ากับ 10 วินาที

โดยตำแหน่งการกดจะเริ่มจากบริเวณกระทบร้อน (HAZ) ขึ้นไปยังโลหะเชื่อม (Weld Metal) และจากนั้นจึงกดลงไปยังบริเวณโลหะฐาน (Base Metal) โดยมีระยะห่างระหว่างจุดที่ทำการกดแต่ละตำแหน่งเท่ากับ 100 ไมโครเมตร ดังแสดงในรูปที่ 3.1.12 การทดสอบนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินค่าความแข็งผิวในแต่ละบริเวณของแนวเชื่อมอย่างแม่นยำ โดยอ้างอิงตามมาตรฐาน ASTM E92-82

ซึ่งการทดสอบวัดค่าความแข็งแบบไมโครวิกเกอร์ รุ่น FM-800 (รูปที่ 3.12) ทำโดยการกดชิ้นงาน จำนวน 6 จุด ต่อแนวเชื่อม ประกอบด้วย บริเวณโลหะเชื่อม (Weld Metal) จำนวน 2 จุด บริเวณกระทบร้อน (Heat Affected Zone หรือ HAZ) จำนวน 1 จุด, และบริเวณโลหะฐาน (Base Metal) จำนวน 3 จุด โดยใช้แรงในการกด (Test Load) ที่ 1000 gf เป็นเวลา (Dwell Time) 10 วินาที โดยเริ่มจากบริเวณกระทบร้อน (HAZ) และขึ้นไปยังโลหะเชื่อม (Weld Metal) จากนั้นลงมาที่บริเวณโลหะฐาน (Base Metal) โดยมีระยะห่างในการกดแต่ละจุดที่ 100 ไมโครเมตร ตามรูปที่ 3.13 เพื่อประเมินค่าความแข็งของพื้นผิวของชิ้นงานที่ต้องการวัดในแต่ละบริเวณ



รูปที่ 3.12 เครื่องทดสอบวัดค่าความแข็งแบบไมโครวิกเกอร์ รุ่น FM-800



รูปที่ 3.13 ตำแหน่งจุดทดสอบค่าความแข็งของแนวเชื่อม

3.2 การศึกษาค่าพารามิเตอร์ที่มีผลต่อแนวเชื่อม

ในการทดลองศึกษาค่าพารามิเตอร์ที่มีผลต่อแนวเชื่อม การเลือกและควบคุมค่าพารามิเตอร์ กระบวนการเชื่อมมีความสำคัญอย่างยิ่งต่อคุณภาพของแนวเชื่อม โดยในการศึกษาค่าพารามิเตอร์ที่มีผลต่อแนวเชื่อมจะมีหัวข้อในการดำเนินการศึกษา ดังต่อไปนี้

3.2.1 การศึกษาพารามิเตอร์เบื้องต้นในการเชื่อมเลเซอร์ ชนิด Nd: YAG

การศึกษาค่าพารามิเตอร์เบื้องต้นในการเชื่อมด้วยเลเซอร์ชนิด Nd:YAG มุ่งเน้นที่การกำหนดค่าพารามิเตอร์หลักที่มีผลต่อกระบวนการเชื่อม ซึ่งประกอบด้วย กระแสไฟฟ้าของเครื่องเชื่อม ระยะเวลาพัลส์ (Pulse Duration) และความถี่พัลส์ (Pulse Frequency) โดยผู้วิจัยได้ดำเนินการศึกษานำร่อง (Pilot Study) เพื่อหาขอบเขตที่เหมาะสมสำหรับพารามิเตอร์เหล่านี้

ผลการศึกษานำร่องพบว่า หากค่าพารามิเตอร์ต่ำกว่าระดับที่กำหนดจะส่งผลให้การหลอมลวดเชื่อมไม่สมบูรณ์ ขณะที่หากพารามิเตอร์สูงเกินไปจะทำให้เกิดปัญหาการกระเด็นของโลหะ (Spatter) ซึ่งส่งผลเสียต่อคุณภาพของแนวเชื่อม ดังนั้นการกำหนดค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมจึงเป็นสิ่งจำเป็นสำหรับการควบคุมคุณภาพการเชื่อม ซึ่งในการศึกษานี้ ผู้วิจัยได้กำหนดค่าพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับการเชื่อมเลเซอร์ดังต่อไปนี้

1. กระแสไฟฟ้าของเครื่องเชื่อม (Current) : มีค่า 3 ระดับ ได้แก่ 120, 140 และ 160 แอมแปร์ (A) เพิ่มขึ้นทีละ 20 แอมแปร์
2. ระยะเวลาของพัลส์ (Pulse Duration) : กำหนดไว้ที่ 3, 4 และ 5 มิลลิวินาที (ms) เพิ่มขึ้นทีละ 1 มิลลิวินาที
3. ความถี่ของพัลส์ (Pulse Frequency) : กำหนดที่ 5, 7 และ 9 เฮิร์ต (Hz) เพิ่มขึ้นทีละ 2 เฮิร์ต

โดยการทดลองใช้เครื่องเชื่อมเลเซอร์ชนิด Nd: YAG ที่มีผลึก Yttrium-Aluminium Garnet ($Y_3Al_5O_{12}$) เป็นตัวกลางเลเซอร์ และใช้แก๊สอาร์กอนสำหรับปกคลุมแนวเชื่อมและป้องกันการเกิดออกซิเดชัน อัตราการไหลของแก๊สอาร์กอนถูกตั้งไว้ที่ 8 ลิตรต่อนาที (L/min) ขณะที่ความเร็วในการเชื่อมถูกกำหนดที่ 50 มิลลิเมตรต่อนาที (mm/min) วัสดุที่ใช้ในการทดลองเบื้องต้นคือ เหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ (Low Carbon Steel) เกรด SS400 ตามมาตรฐานอุตสาหกรรมญี่ปุ่น และลวดเชื่อมสแตนเลสเกรด 316 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.4 มิลลิเมตร (mm) วิธีการเชื่อมที่ใช้คือการเชื่อมแบบเดินแนวบนชิ้นงาน (Bead-on-Plate)

3.2.2 การศึกษาพารามิเตอร์ที่มีผลกระทบต่อลักษณะของแนวเชื่อม

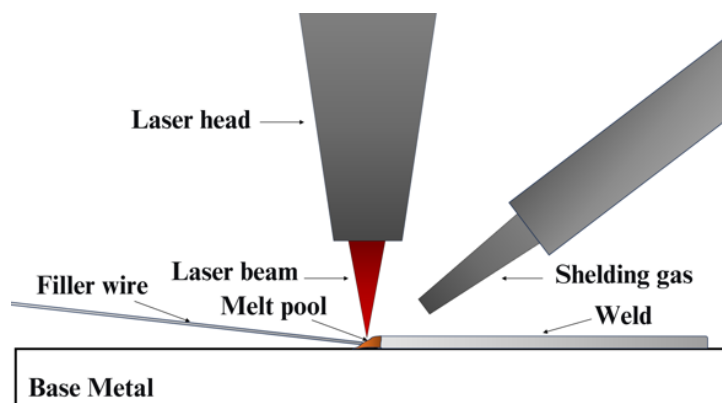
หลังจากที่ผู้วิจัยได้ทำการศึกษาค่าพารามิเตอร์เบื้องต้นในการเชื่อมเลเซอร์ชนิด Nd:YAG ในหัวข้อ 3.2.1 และได้ดำเนินการศึกษานำร่องเพื่อคัดเลือกระดับพารามิเตอร์ที่เหมาะสม พบว่า หากค่าของพารามิเตอร์ต่ำกว่าค่าที่กำหนด จะส่งผลให้ลวดเชื่อมหลอมละลายได้ไม่ดี แต่ก็ยังไม่เกินกว่าข้อจำกัดของเครื่องเชื่อมเลเซอร์ EIT Laser Schweissen System รุ่น Smart 225iL ซึ่งเป็นเครื่องที่ใช้ในการทดลองนี้ จากผลการศึกษานำร่อง ผู้วิจัยได้กำหนดขอบเขตค่าพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับการเชื่อมเลเซอร์ ดังนี้

- 1) ระยะเวลาของพัลส์ (Pulse Duration, PD) กำหนดที่ 5, 6 และ 7 มิลลิวินาที (ms)
- 2) ความถี่ของพัลส์ (Pulse Frequency, PF) กำหนดที่ 5, 7 และ 9 เฮิร์ต (Hz)

การทดลองใช้เครื่องเชื่อมเลเซอร์ชนิด Nd:YAG ซึ่งใช้ผลึก Yttrium-Aluminium Garnet ($Y_3Al_5O_{12}$) เป็นตัวกลางเลเซอร์ และมีลักษณะการเชื่อมแบบเดินแนวบนชิ้นงาน (Bead-on-Plate) โดยค่ากระแสไฟฟ้าที่เหมาะสมสำหรับการเชื่อมที่ให้การหลอมละลายที่ดี คือ 160 แอมแปร์ (A) การเชื่อมนี้ใช้แก๊สอาร์กอนเพื่อปกคลุมแนวเชื่อมและลดการเกิดออกซิเดชัน โดยการไหลของแก๊ส ถูกกำหนดที่ 8 ลิตรต่อนาที (L/min) และความเร็วในการเชื่อมถูกตั้งไว้ที่ 50 มิลลิเมตรต่อนาที (mm/min) ดังแสดงค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการศึกษาทดลองในตารางที่ 3.3 ซึ่งวัสดุที่ใช้ในการทดลองนี้คือเหล็กเกรด P20 ตามมาตรฐาน AISI ซึ่งเป็นเหล็กที่ใช้ในการผลิตเป็นแม่พิมพ์ฉีดพลาสติก ซึ่งชิ้นงานในการทดลองมีขนาดชิ้นงานกว้าง 100 มิลลิเมตร ยาว 200 มิลลิเมตร และหนา 10 มิลลิเมตร สำหรับการทดลองนี้ ลวดเชื่อมที่ใช้เป็นเหล็กเกรด P20 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.6 มิลลิเมตร (mm) โดยการเชื่อมใช้วิธีการเดินแนวบนชิ้นงาน (Bead-on-Plate) ซึ่งลักษณะการเดินแนวเชื่อมนี้ได้มีการแสดงดังรูปที่ 3.14

ตารางที่ 3.3 ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการศึกษาพารามิเตอร์ที่มีผลกระทบต่อลักษณะของแนวเชื่อม

พารามิเตอร์	ค่า	หมายเหตุ
ระยะเวลาของพัลส์ (ms)	5, 6 และ 7	เปลี่ยนแปลง
ความถี่ของพัลส์ (Hz)	5, 7 และ 9	เปลี่ยนแปลง
ค่ากระแสไฟฟ้าของเครื่องเชื่อมเลเซอร์ (A)	160	คงที่
อัตราการไหลของแก๊สอาร์กอน (L/min)	8	คงที่
ความเร็วในการเชื่อม (mm/min)	50	คงที่



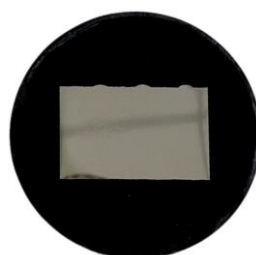
รูปที่ 3.14 การเชื่อมแบบเดินแนวบนชิ้นงานด้วยเครื่องเชื่อมเลเซอร์

3.3 การวิเคราะห์คุณสมบัติทางโลหะวิทยา

ในการศึกษาครั้งนี้ การวิเคราะห์คุณสมบัติทางโลหะวิทยาของชิ้นงานที่ทำการทดลองที่ได้รับการเชื่อมด้วยเลเซอร์ชนิด Nd: YAG เป็นขั้นตอนสำคัญในการประเมินผลกระทบของกระบวนการเชื่อมต่อโครงสร้างและคุณสมบัติของวัสดุ โดยการวิเคราะห์จะประกอบไปด้วยหัวข้อดังต่อไปนี้

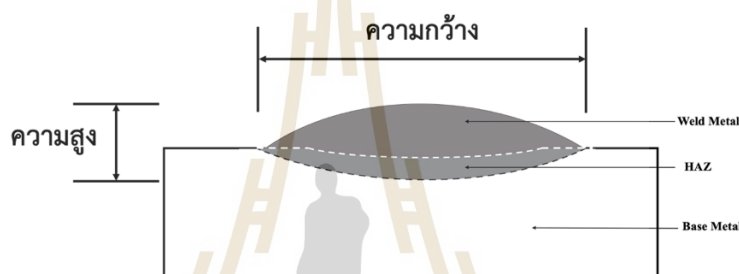
3.3.1 การตรวจสอบทางโครงสร้างทางโลหะวิทยา

การศึกษาโครงสร้างทางโลหะวิทยาในงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อวิเคราะห์โครงสร้างมหภาค (Macrostructure) และโครงสร้างจุลภาค (Microstructure) ของแนวเชื่อมและโลหะฐาน ซึ่งจะช่วยในการประเมินผลกระทบของกระบวนการเชื่อมที่เกิดขึ้นในวัสดุได้อย่างถูกต้อง การเตรียมตัวอย่างสำหรับการศึกษาดังกล่าวเริ่มจากการตัดชิ้นงานที่ได้รับการเชื่อมตามค่าพารามิเตอร์ที่กำหนด โดยใช้เครื่อง EDM Wire cut รุ่น Mitsubishi MV1200R Wire EDM เพื่อให้ได้ชิ้นงานที่มีขนาดเหมาะสมสำหรับการตรวจสอบทางโลหะวิทยา โดยชิ้นงานจะถูกขึ้นเรือน (Mounting) ดังแสดงในรูปที่ 3.15 เพื่อป้องกันการแตกหักหรือเสียรูปของชิ้นงานในระหว่างการขัดและกัดกรด ต่อไป ชิ้นงานที่ผ่านการขึ้นเรือนจะถูกขัดหยาบ (Grinding) ด้วยกระดาษทรายเพื่อให้ผิวเรียบ ก่อนจะขัดเงา (Polishing) ด้วยผ้าสักหลาดและผงอะลูมินาขนาด 0.3 ไมครอน เพื่อเตรียมพื้นผิวให้เหมาะสมสำหรับการกัดกรด (Etching) ด้วยกรดไนตริก (2% Nital) ซึ่งจะช่วยเปิดเผยโครงสร้างทางโลหะวิทยาของแนวเชื่อมและโลหะฐาน



รูปที่ 3.15 ชิ้นงานที่ผ่านการขึ้นเรือน (Mounting)

เมื่อชิ้นงานเสร็จสิ้นกระบวนการเตรียมตัวอย่างแล้ว จะถูกนำไปตรวจสอบโครงสร้างมหภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงยี่ห้อ Carl Zeiss รุ่น Axio Scope Mat เพื่อศึกษาลักษณะของโครงสร้างในระดับมหภาค โดยเฉพาะโครงสร้างของแนวเชื่อมและการแยกแยะระหว่างโลหะฐานและโลหะเชื่อม รวมถึงการประเมินความสมบูรณ์ของแนวเชื่อม ในขั้นตอนต่อไป จะทำการวัดค่าความกว้างและความสูงของแนวเชื่อมโดยใช้โปรแกรม ImageJ ดังแสดงในรูปที่ 3.16 เพื่อหาค่าความเจือจาง (%Dilution) ซึ่งเป็นหนึ่งในตัวบ่งชี้ที่สำคัญในการประเมินผลกระทบของกระบวนการเชื่อม รวมถึงการคำนวณค่าความร้อนที่นำเข้าสู่ชิ้นงาน (Heat Input) ซึ่งเป็นปัจจัยที่มีผลต่อคุณสมบัติทางโลหะวิทยาของวัสดุที่เชื่อม ซึ่งการตรวจสอบโครงสร้างมหภาคและการคำนวณค่าต่าง ๆ เหล่านี้จะช่วยให้สามารถประเมินคุณภาพและประสิทธิภาพของกระบวนการเชื่อมได้อย่างละเอียดและเป็นระบบ



รูปที่ 3.16 วิธีการวัดค่าความกว้างและความสูงแนวเชื่อม

3.3.1.1 โครงสร้างมหภาค (Macrostructure)

การตรวจสอบโครงสร้างทางมหภาค (Macrostructure) มีความสำคัญอย่างยิ่งในงานวิจัยนี้ เนื่องจากโครงสร้างมหภาคช่วยให้เราสามารถประเมินลักษณะและคุณสมบัติของแนวเชื่อมในระดับที่สามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่า เช่น ขนาด ความเรียบเนียน รวมถึงความสมบูรณ์ของแนวเชื่อม การศึกษาโครงสร้างมหภาคจะช่วยให้สามารถประเมินคุณภาพของการเชื่อม เช่น การแยกแยะระหว่างโลหะฐานและโลหะเชื่อม ตลอดจนรวมถึงการตรวจสอบการเกิดข้อบกพร่องในแนวเชื่อม เช่น การแตกหรือการหลอมไม่สมบูรณ์ (Incompletely Fused Areas) หรือการเกิดรูพรุน (Porosity) ซึ่งอาจส่งผลกระทบต่อความแข็งแรงของชิ้นงาน

การตรวจสอบโครงสร้างมหภาคยังสามารถช่วยในการวิเคราะห์ผลกระทบของพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ใช้ในการเชื่อม เช่น กระแสไฟฟ้า ความถี่ของพัลส์ และระยะเวลาของพัลส์ ที่อาจมีผลต่อความสมบูรณ์ของแนวเชื่อม โดยการศึกษาลักษณะของโครงสร้างทางมหภาคที่ปรากฏในแนวเชื่อม จะช่วยให้สามารถประเมินการกระจายของความร้อนในพื้นที่ต่าง ๆ ของชิ้นงาน และตรวจสอบความสัมพันธ์ระหว่างพารามิเตอร์ที่ใช้และคุณภาพของการเชื่อม

นอกจากนี้ยังสามารถใช้โครงสร้างมหภาคเพื่อประเมินการเจือจางของโลหะ (Dilution) ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญในการวิเคราะห์ประสิทธิภาพของกระบวนการเชื่อม เพราะการเจือจาง

ที่เหมาะสมจะช่วยให้การเชื่อมมีความแข็งแรงและคุณสมบัติที่ดีตามที่ต้องการ การตรวจสอบโครงสร้างทางมหภาคจึงมีบทบาทสำคัญในการประเมินคุณภาพโดยรวมของการเชื่อมและการพัฒนาเทคนิคในการควบคุมคุณสมบัติของวัสดุที่เชื่อม

3.3.1.2 โครงสร้างจุลภาค (Microstructure)

การศึกษาทางโลหะวิทยาในระดับจุลภาค (Microstructure) มีบทบาทสำคัญในการวิเคราะห์ผลกระทบของกระบวนการเชื่อมที่มีต่อโครงสร้างภายในของโลหะ โดยเฉพาะในบริเวณแนวเชื่อม เขตที่ได้รับผลกระทบจากความร้อน (Heat-Affected Zone: HAZ) และโลหะฐาน (Base Metal: BM) ซึ่งโครงสร้างจุลภาคเหล่านี้ส่งผลโดยตรงต่อคุณสมบัติเชิงกล ความแข็งแรง และความทนทานของชิ้นงานหลังการเชื่อม

โดยในการศึกษานี้ ผู้วิจัยได้ใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy: SEM) ในการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของแนวเชื่อม โดย SEM เป็นเครื่องมือที่ให้ภาพความละเอียดสูงกว่ากล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (Optical Microscope) ช่วยในการวิเคราะห์รายละเอียดของโครงสร้างผลึก รูปแบบการเย็นตัวของโลหะ และลักษณะของเนื้อวัสดุในระดับจุลภาคได้อย่างชัดเจนมากยิ่งขึ้น การตรวจสอบด้วย SEM ช่วยให้สามารถประเมินคุณภาพของแนวเชื่อมได้อย่างแม่นยำ เช่น การกระจายตัวของเฟสในแนวเชื่อม การเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างผลึก และการเกิดเขตการตกผลึกที่อาจส่งผลต่อความแข็งแรง หรือความเปราะของวัสดุ ทั้งนี้ การเปรียบเทียบโครงสร้างจุลภาคที่ได้จากพารามิเตอร์การเชื่อมที่แตกต่างกัน จะช่วยในการเลือกเงื่อนไขที่เหมาะสมที่สุดสำหรับกระบวนการเชื่อมเชื่อมแม่พิมพ์ P20 ด้วยเลเซอร์ Nd: YAG ให้ได้คุณภาพสูงสุด

3.3.2 การตรวจสอบคุณสมบัติของแนวเชื่อม

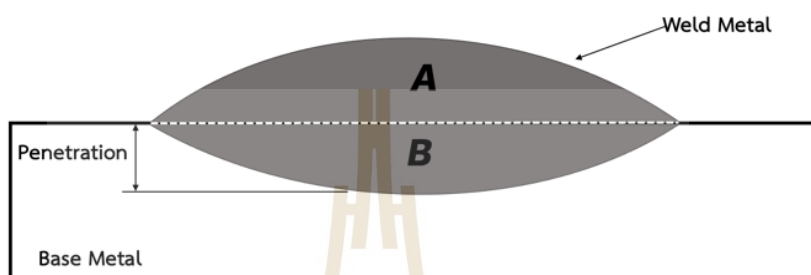
นอกจากการวิเคราะห์โครงสร้างทางโลหะวิทยาทั้งในระดับมหภาคและจุลภาคแล้ว การตรวจสอบคุณสมบัติเชิงกลของแนวเชื่อมยังมีความสำคัญอย่างยิ่งในการประเมินประสิทธิภาพของกระบวนการเชื่อม โดยคุณสมบัติเชิงกลสามารถสะท้อนถึงความแข็งแรง ความทนทาน และคุณภาพของรอยเชื่อมที่ได้จากการปรับเปลี่ยนพารามิเตอร์ต่าง ๆ ในกระบวนการเชื่อม ในการศึกษานี้จึงได้ทำการวิเคราะห์ค่าความเจือจาง (Dilution) ค่าความร้อนที่ป้อนเข้าสู่ชิ้นงาน (Heat Input) และศึกษาค่าความแข็งแรงของชิ้นงานที่ผ่านการเชื่อม เพื่อใช้เป็นเกณฑ์ในการประเมินและเปรียบเทียบผลของสภาวะการเชื่อมที่แตกต่างกันอย่างเป็นระบบ

3.3.2.1 การวิเคราะห์ค่าความเจือจาง (%Dilution)

ค่าความเจือจางของโลหะ (%Dilution) เป็นตัวชี้วัดปริมาณโลหะฐานที่ผสมเข้าสู่โลหะเติมภายหลังการเชื่อม ซึ่งส่งผลต่อคุณสมบัติทางกลของแนวเชื่อม เช่น ความแข็งแรง และความเหนียว การทราบค่าดังกล่าวช่วยให้สามารถควบคุมกระบวนการเชื่อมให้ได้คุณภาพตามต้องการ และปรับพารามิเตอร์ให้เหมาะสมได้ โดยค่าความเจือจางของโลหะ (%Dilution) สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (1) และบริเวณพื้นที่การคำนวณ แสดงดังรูปที่ 3.17

$$\% \text{ Dilution} = \frac{B}{(A+B)} (100) \quad (1)$$

โดยที่ A คือ พื้นที่ที่ชิ้นงานเกิดการหลอมละลาย (Area of Molten Parent Plate)
B คือ พื้นที่ทั้งหมดที่เกิดการหลอมละลาย (Area Enclosed By Red Line)



รูปที่ 3.17 ความเจือจางของโลหะ (Dilution)

3.3.2.2 การวิเคราะห์ค่าความร้อนที่ป้อนเข้าสู่ชิ้นงาน (Heat Input)

ในการเชื่อมด้วยเลเซอร์ Nd: YAG ปริมาณความร้อนที่ป้อนเข้าสู่ชิ้นงาน (Heat Input) มีบทบาทสำคัญต่อคุณภาพของแนวเชื่อมและคุณสมบัติทางกลของชิ้นงาน เช่น ความแข็งแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโลหะ และโครงสร้างจุลภาค การควบคุมปริมาณความร้อนให้อยู่ในระดับที่เหมาะสมช่วยลดการเกิดข้อบกพร่อง เช่น การแตกร้าว หรือรูพรุน และส่งผลให้แนวเชื่อมมีคุณภาพสูงและสม่ำเสมอ (Bhardwaj et al., 2019) การคำนวณค่าความร้อนในงานวิจัยนี้ใช้สำหรับกระบวนการเชื่อมแบบ Nd: YAG Pulsed Laser ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (2)

$$HI = \left(\frac{P \times T \times f}{v} \right) \times \eta \quad (2)$$

โดยที่ HI คือ ปริมาณความร้อนเข้าสู่ชิ้นงาน (Heat Input; J/mm)

P คือ กำลังไฟฟ้าสูงสุด (Peak Power; kW)

T คือ ระยะเวลาของพัลส์ (Pulse Duration; ms)

F คือ ความถี่ของพัลส์ (Pulse Frequency; Hz)

V คือ ความเร็วในการเดินแนวเชื่อม (Scanning Speed; mm/S)

η คือ ประสิทธิภาพการเชื่อม (Welding Efficiency) เท่ากับ 1

ในการทดลอง ผู้วิจัยทำการวัดกระแสไฟฟ้าของเครื่องเลเซอร์ด้วยแคลมป์มิเตอร์ (Clamp Meter) รุ่น Keysight Technologies U1213A ซึ่งค่าที่ได้จะอยู่ในหน่วยแอมแปร์ (A) แต่เนื่องจากสมการคำนวณ Heat Input ต้องการค่ากำลังไฟฟ้าในหน่วยกิโลวัตต์ (kW) จึงต้องคำนวณเพื่อแปลงหน่วยของกระแสไฟฟ้า โดยสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (3)

$$P = V \times I \quad (3)$$

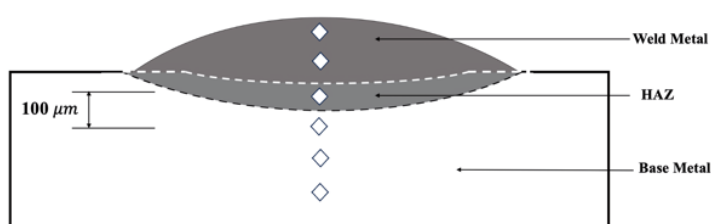
โดยที่ P = กำลังไฟฟ้า (W)
 V = แรงดันไฟฟ้า (V) ของเครื่องเชื่อม
 I = กระแสไฟฟ้า (A)

3.3.2.3 การทดสอบค่าความแข็งของชิ้นงาน (Hardness Test)

การศึกษาคุณสมบัติทางกลของแนวเชื่อมเป็นขั้นตอนสำคัญในการประเมินคุณภาพของกระบวนการเชื่อมด้วยเลเซอร์ โดยเฉพาะอย่างยิ่งค่าความแข็ง ซึ่งสะท้อนถึงความสามารถในการต้านทานการเสียรูปของวัสดุภายใต้แรงกดที่กำหนด ในการศึกษาครั้งนี้ ผู้วิจัยได้ดำเนินการทดสอบความแข็งของแนวเชื่อมด้วยวิธีไมโครวิกเกอร์ (Micro Vickers Hardness Test) เพื่อเปรียบเทียบความแข็งในแต่ละบริเวณของแนวเชื่อมจากชุดพารามิเตอร์การเชื่อมที่แตกต่างกัน

ชิ้นงานสำหรับการทดสอบประกอบด้วยจำนวนทั้งหมด 9 ชิ้น โดยดำเนินการทดสอบด้วยเครื่องวัดค่าความแข็งจุลภาคแบบวิกเกอร์ รุ่น FM-800 ซึ่งใช้หัวกดเพชรทรงพีรามิดที่มีมุมยอด 136 องศา ทำการกดลงบนผิวชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการเตรียมพื้นผิว ได้แก่ การฝักรีด การขัดหยาบ และขัดละเอียดจนได้ผิวหน้าที่เรียบสม่ำเสมอและสะท้อนแสงได้ดีตามมาตรฐาน ASTM E384

การทดสอบความแข็งดำเนินการภายใต้แรงกด 1000 กรัมแรง (gf) โดยมีระยะเวลาในการกด (Dwell time) เท่ากับ 10 วินาที สำหรับแต่ละชิ้นงานจะทำการวัดค่าความแข็งจำนวน 6 จุด ในแนวขวางของแนวเชื่อม โดยเริ่มต้นจากบริเวณอิทธิพลความร้อน (Heat Affected Zone; HAZ) จำนวน 1 จุด ถัดไปยังบริเวณเนื้อเชื่อม (Weld Metal; WM) จำนวน 2 จุด และบริเวณโลหะฐาน (Base Metal; BM) จำนวน 3 จุด โดยเว้นระยะห่างระหว่างแต่ละจุดเท่ากับ 100 ไมโครเมตร ดังแสดงในรูปที่ 3.18



รูปที่ 3.18 ตำแหน่งของจุดทดสอบความแข็ง

ข้อมูลค่าความแข็งที่ได้จากการวัดในแต่ละจุดจะถูกนำมาคำนวณค่าเฉลี่ยและแสดงผลในรูปแบบโปรไฟล์ความแข็งจุลภาค (Microhardness Profile) เพื่อแสดงแนวโน้มและการเปลี่ยนแปลงของค่าความแข็งตลอดแนวขวางของแนวเชื่อม การวิเคราะห์ค่าความแข็งในบริเวณต่าง ๆ ดังกล่าวช่วยให้สามารถประเมินผลกระทบจากพารามิเตอร์การเชื่อมต่อโครงสร้างจุลภาคและคุณสมบัติทางกลของรอยเชื่อมได้อย่างแม่นยำ ซึ่งเป็นข้อมูลสำคัญสำหรับการปรับปรุงและเพิ่มประสิทธิภาพของกระบวนการเชื่อมด้วยเลเซอร์ Nd: YAG

3.4 การวิเคราะห์ผลด้วยสถิติทางคณิตศาสตร์

ในการวิจัยครั้งนี้ ผู้วิจัยได้ดำเนินการวิเคราะห์ข้อมูลเชิงสถิติด้วยวิธีการวิเคราะห์การทดลองแบบแฟกทอเรียล (Factorial Experiment) เพื่อประเมินผลกระทบของตัวแปรต้นแต่ละตัว รวมถึงปฏิสัมพันธ์ระหว่างกันที่มีผลต่อคุณภาพของแนวเชื่อมที่ได้จากกระบวนการเชื่อมด้วยเลเซอร์ Nd: YAG โดยการวิเคราะห์ข้อมูลดำเนินการผ่านโปรแกรม Minitab เวอร์ชัน 21.4.2 ซึ่งเป็นเครื่องมือทางสถิติที่ได้รับการยอมรับในงานวิจัยทางวิศวกรรมอย่างแพร่หลาย โดยการทดลองออกแบบมาในรูปแบบแฟกทอเรียลเต็มรูปแบบ (Full Factorial Design) ซึ่งเป็นแบบ 2^3 ซึ่งหมายถึงเป็นการทดลองที่พิจารณาตัวแปรต้นจำนวน 3 ปัจจัย ได้แก่

ปัจจัย A: ระยะเวลาของพัลส์ (Pulse Duration; PD) ที่ระดับ 5, 6 และ 7 มิลลิวินาที

ปัจจัย B: ความถี่ของพัลส์ (Pulse Frequency; PF) ที่ระดับ 5, 7 และ 9 เฮิร์ตซ์

ปัจจัย C (หากมี): จะสามารถระบุเพิ่มเติมได้จากบริบทการทดลอง

การวิเคราะห์ผลทางสถิติพิจารณาที่ระดับความเชื่อมั่น 95% โดยยึดเกณฑ์ค่า P-Value < 0.05 เพื่อใช้ในการตัดสินใจว่าปัจจัยหรือปฏิสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยนั้นมีผลกระทบอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติหรือไม่ และในการวิเคราะห์ผลลัพธ์ ผู้วิจัยได้ใช้กราฟทางสถิติต่าง ๆ เพื่อประเมินความถูกต้องของแบบจำลองและตรวจสอบสมมติฐานพื้นฐาน ดังนี้

1) กราฟ Normal Probability Plot

ใช้สำหรับตรวจสอบการแจกแจงของข้อมูลว่าเป็นไปตามการแจกแจงแบบปกติ (Normal Distribution) หรือไม่ ซึ่งเป็นข้อสมมติสำคัญของการวิเคราะห์ความแปรปรวนและการวิเคราะห์การถดถอย

2) กราฟ Versus Fits

ใช้สำหรับตรวจสอบความแปรปรวนของข้อมูลว่ามีความสม่ำเสมอหรือไม่ (Homoscedasticity) โดยดูจากการกระจายตัวของค่าคลาดเคลื่อน (Residuals) รอบค่าที่คาดการณ์ (Fitted Values)

3) กราฟ Histogram

เพื่อตรวจสอบลักษณะการกระจายของค่าคลาดเคลื่อนว่าใกล้เคียงกับการแจกแจงแบบปกติหรือไม่

4) กราฟ Versus Order

เพื่อตรวจสอบความเป็นอิสระของข้อมูล โดยดูการกระจายของค่าคลาดเคลื่อนตามลำดับการทดลอง

ซึ่งการวิเคราะห์ดังกล่าวมีวัตถุประสงค์เพื่อระบุปัจจัยที่ส่งผลต่อผลลัพธ์ของกระบวนการเชื่อมอย่างมีนัยสำคัญ ตลอดจนสามารถนำข้อมูลไปใช้ในการพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อทำนายผลลัพธ์ และใช้เป็นแนวทางในการกำหนดพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุดในกระบวนการเชื่อมต่อไป



บทที่ 4

ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง

งานวิจัยนี้ได้ดำเนินการทดลองเพื่อวิเคราะห์ผลกระทบของพารามิเตอร์การเชื่อมที่แตกต่างกันต่อคุณลักษณะของแนวเชื่อม ทั้งในด้านโครงสร้างทางโลหะวิทยาในระดับมหภาคและจุลภาครวมถึงคุณสมบัติเชิงกลของชิ้นงาน โดยเฉพาะค่าความแข็งแรงของบริเวณต่าง ๆ ของแนวเชื่อม การศึกษาครั้งนี้ได้วิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพของแนวเชื่อม เช่น ความกว้าง ความสูง และความลึกของบริเวณที่เกิดการหลอมละลาย และขนาดของบริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อน (Heat Affected Zone: HAZ) เพื่อประเมินคุณภาพของแนวเชื่อมที่ได้จากการใช้พารามิเตอร์ที่หลากหลาย ทั้งในด้านระยะเวลาของพัลส์ (Pulse Duration) และความถี่ของพัลส์ (Pulse Frequency) โดยรายละเอียดของผลการทดลองและการวิเคราะห์ผลจะนำเสนอในหัวข้อดังต่อไปนี้

4.1 ผลการศึกษาโครงสร้างทางโลหะวิทยา

ในการศึกษานี้ได้ดำเนินการวิเคราะห์ผลกระทบของกระบวนการเชื่อมด้วยเลเซอร์ชนิด Nd:YAG ต่อโครงสร้างโลหะวิทยาของเหล็กแม่พิมพ์ฉีดพลาสติก AISI P20 โดยมุ่งเน้นศึกษาการเปลี่ยนแปลงที่เกิดกับลักษณะแนวเชื่อมทั้งในระดับมหภาค (Macrostructure) และระดับจุลภาค (Microstructure) เพื่อประเมินผลของค่าพารามิเตอร์การเชื่อมที่มีความแตกต่างกันต่อคุณภาพของแนวเชื่อม

4.1.1 ผลการศึกษาโครงสร้างมหภาค (Macrostructure)

ในการศึกษาลักษณะทางกายภาพของแนวเชื่อมในการทดลองนี้ ได้พิจารณาผลของพารามิเตอร์ที่สำคัญ ได้แก่ ระยะเวลาพัลส์ (Pulse Duration: PD) และความถี่พัลส์ (Pulse Frequency: PF) โดยมีการกำหนดค่าพารามิเตอร์ตามตารางการออกแบบการทดลอง โดยมีการคงที่ค่ากระแสไฟฟ้าที่เหมาะสมสำหรับการเชื่อมที่ทำให้การหลอมละลายที่ดี คือ 160 แอมแปร์ (A) แก๊สอาร์กอนปกคลุมแนวเชื่อมมีการไหลของแก๊สที่ 8 ลิตรต่อนาที (L/min) และความเร็วในการเชื่อมถูก 50 มิลลิเมตรต่อนาที (mm/min) โดยลักษณะทางกายภาพของแนวเชื่อมนั้นจะมีการวิเคราะห์และตรวจสอบเพิ่มเติมด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง เพื่อให้เห็นภาพโครงสร้างภายในชิ้นงานอย่างชัดเจน โดยรายละเอียดของภาพโครงสร้างที่ได้จากการทดลองดังแสดงในตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างมหภาคของแนวเชื่อมต่อพารามิเตอร์ระยะเวลาพัลส์ (Pulse Duration: PD) และความถี่พัลส์ (Pulse Frequency: PF)

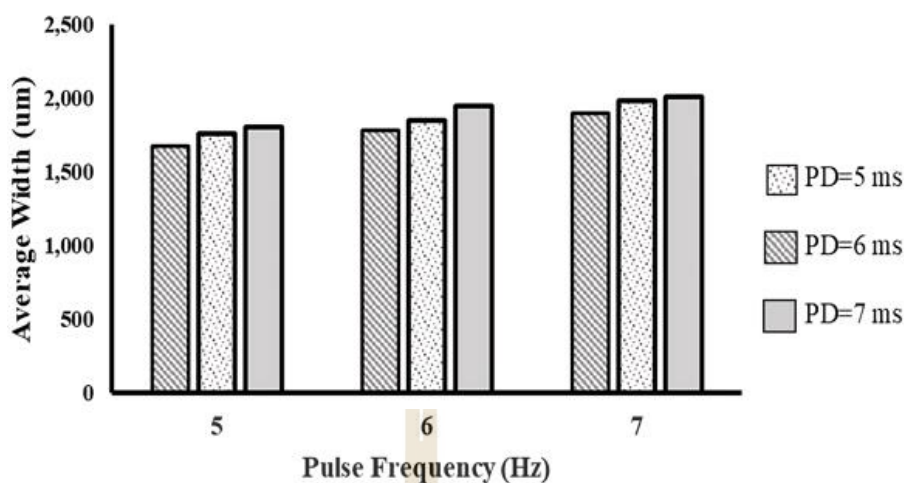
ที่	พารามิเตอร์		ภาพโครงสร้าง	ค่าเฉลี่ยความกว้างของแนวเชื่อม (μm)
	Pulse Duration (ms)	Pulse Frequency (Hz)		
1	5	5		1,672
2		7		1,781
3		9		1,895
4	6	5		1,760
5		7		1,850
6		9		1,983

ตารางที่ 4.1 การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างมหภาคของแนวเชื่อมต่อพารามิเตอร์ระยะเวลาพัลส์ (Pulse Duration: PD) และความถี่พัลส์ (Pulse Frequency: PF) (ต่อ)

ที่	พารามิเตอร์		ภาพโครงสร้าง	ค่าเฉลี่ยความกว้างของแนวเชื่อม (μm)
	Pulse Duration (ms)	Pulse Frequency (Hz)		
7	7	5		1,801
8		7		1,945
9		9		2,012

จากการศึกษาในตารางที่ 4.1 ซึ่งแสดงผลของการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ระยะเวลาพัลส์ (Pulse Duration: PD) และความถี่พัลส์ (Pulse Frequency: PF) ต่อโครงสร้างมหภาคของแนวเชื่อม พบว่าทั้งสองพารามิเตอร์มีอิทธิพลโดยตรงต่อรูปร่างและขนาดของแนวเชื่อม โดยเฉพาะในด้านความกว้างและความลึกของแนวเชื่อม ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญที่สะท้อนถึงประสิทธิภาพของกระบวนการเชื่อมด้วยเลเซอร์ Nd:YAG

โดยเมื่อมีการเพิ่มค่า PD ดังแสดงในรูปที่ 4.1 แสดงค่าเฉลี่ยความกว้างของแนวเชื่อม เปลี่ยนแปลงจากค่าระยะเวลาของพัลส์จาก 5 มิลลิวินาที เป็น 7 มิลลิวินาที พบว่าความกว้างของแนวเชื่อมมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน อันเนื่องมาจากระยะเวลาของพัลส์ความร้อนที่ยาวนานขึ้น ทำให้โลหะมีเวลาในการดูดซับพลังงานและหลอมละลายเพิ่มมากขึ้น ในขณะที่การเพิ่มค่า PF จาก 5 เฮิร์ตซ์ เป็น 9 เฮิร์ตซ์ ส่งผลให้จำนวนพัลส์ความร้อนที่ปล่อยออกมาต่อหน่วยเวลาสูงขึ้น ซึ่งนำไปสู่การสะสมพลังงานความร้อนบริเวณแนวเชื่อมมากยิ่งขึ้น ผลลัพธ์ดังกล่าวทำให้เกิดแนวเชื่อมที่มีขนาดใหญ่ขึ้น ทั้งในแง่ของความกว้างและความลึก โดยเฉพาะเมื่อใช้ค่า PD และ PF ที่ระดับสูงร่วมกัน เช่น PD เท่ากับ 7 มิลลิวินาที และ PF เท่ากับ 9 เฮิร์ตซ์ จะส่งผลให้แนวเชื่อมมีขนาดใหญ่ที่สุด คือ $2,012 \mu\text{m}$

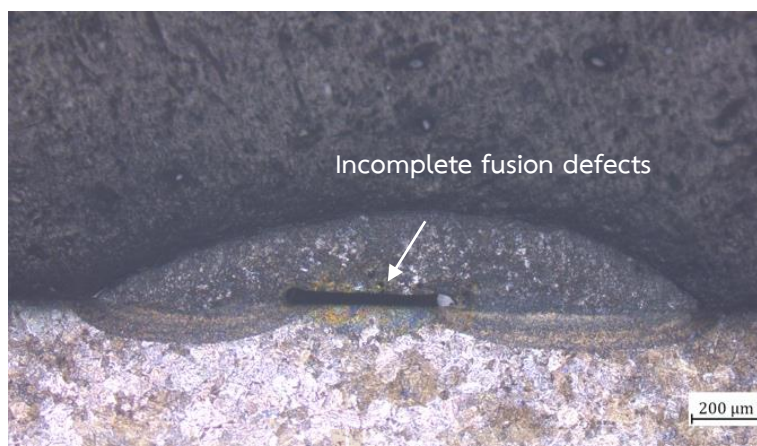


รูปที่ 4.1 ค่าเฉลี่ยความกว้างของแนวเชื่อมตามพารามิเตอร์ที่แตกต่างกัน

ซึ่งการควบคุมค่าพารามิเตอร์ PD และ PF อย่างเหมาะสมจึงเป็นสิ่งสำคัญ ที่ช่วยให้ได้แนวเชื่อมที่มีคุณลักษณะตามที่ต้องการ ทั้งในแง่ของความกว้าง ความลึก และอัตราการเจือจาง ซึ่งจะส่งผลต่อคุณภาพของงานเชื่อมโดยรวม สำหรับงานเชื่อมซ่อมแม่พิมพ์ฉีดพลาสติกเกรด P20 ที่ต้องการความแม่นยำและความแข็งแรงของแนวเชื่อมสูง การปรับค่าพารามิเตอร์ให้เหมาะสม จึงมีบทบาทสำคัญอย่างยิ่งในการเพิ่มประสิทธิภาพและยืดอายุการใช้งานของแม่พิมพ์หลังการซ่อมแซม

โดยนอกจากผลของการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ Pulse Duration (PD) และ Pulse Frequency (PF) ที่ส่งผลต่อขนาดความกว้างและความลึกของแนวเชื่อมแล้ว ยังพบว่า การเลือกใช้พารามิเตอร์บางชุดอาจก่อให้เกิดข้อบกพร่อง (Defect) ในแนวเชื่อม ซึ่งสะท้อนถึงความไม่เหมาะสมของค่าพารามิเตอร์ในการใช้งานจริง โดยในการตรวจสอบโครงสร้างมหภาคของแนวเชื่อมด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง ผู้วิจัยได้พิจารณาความสมบูรณ์ของแนวเชื่อมในแต่ละกรณีอย่างละเอียด

จากผลการวิเคราะห์ พบว่าแนวเชื่อมที่มีลักษณะสมบูรณ์ ปราศจากข้อบกพร่องของโครงสร้างมหภาค จะเกิดขึ้นเมื่อใช้ค่า PD ที่ 5, 6 และ 7 มิลลิวินาที ร่วมกับค่า PF ที่ 7 เฮิร์ตซ์ ซึ่งเป็นช่วงค่าที่ส่งผลให้การหลอมและการเติมเนื้อโลหะมีความต่อเนื่องและสม่ำเสมอ อย่างไรก็ตาม เมื่อใช้ค่า PF ที่ 5 เฮิร์ตซ์ และ 9 เฮิร์ตซ์ ไม่ว่าจะจับคู่กับค่า PD ใดก็ตาม พบว่าแนวเชื่อมที่ได้มีข้อบกพร่องทางโครงสร้าง ซึ่งระบุได้ว่าเป็นลักษณะของการเติมเต็มไม่สมบูรณ์ (Incomplete Fusion) ดังแสดงในรูปที่ 4.2



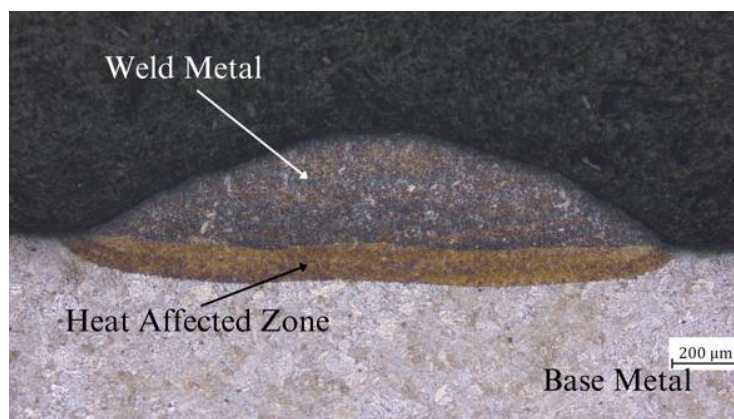
รูปที่ 4.2 ลักษณะของแนวเชื่อมที่เกิดการเติมไม่สมบูรณ์

ข้อบกพร่องดังกล่าวสะท้อนให้เห็นถึงการหลอมละลายที่ไม่เพียงพอหรือไม่ต่อเนื่องระหว่างโลหะฐานและโลหะเติม ซึ่งอาจเกิดจากพลังงานความร้อนที่กระจายตัวไม่เหมาะสมหรือไม่สม่ำเสมอตลอดกระบวนการเชื่อม ส่งผลให้บริเวณแนวเชื่อมไม่สามารถเชื่อมประสานกันได้อย่างสมบูรณ์ ดังนั้น พารามิเตอร์ที่ก่อให้เกิด Defect ดังกล่าวจึงถือว่าไม่เหมาะสม และจะไม่ถูกนำไปใช้ในการทดสอบค่าความแข็งแรงของแนวเชื่อมในขั้นตอนต่อไปของการวิจัย

ซึ่งการพิจารณาข้อบกพร่องของแนวเชื่อมนี้มีความสำคัญในการคัดเลือกพารามิเตอร์ที่มีประสิทธิภาพและให้ผลลัพธ์ที่เหมาะสมที่สุดต่อคุณภาพของงานเชื่อม โดยเฉพาะในกระบวนการเชื่อมซ่อมแม่พิมพ์ที่ต้องการความแม่นยำสูงและปราศจากความบกพร่องทางโครงสร้าง ทั้งนี้เพื่อให้แนวเชื่อมมีความแข็งแรงและสามารถรองรับแรงทางกลได้ในระยะยาว

4.1.2 ผลการศึกษาโครงสร้างจุลภาค (Microstructure)

ในการศึกษาลักษณะโครงสร้างทางจุลภาค (Microstructure Investigation) ของแนวเชื่อม ผู้วิจัยได้ดำเนินการเตรียมพื้นผิวของชิ้นงานตามขั้นตอนมาตรฐานทางโลหะวิทยา โดยเริ่มจากการขัดผิวหน้าด้วยกระดาษทรายที่มีความหยาบระดับต่าง ๆ ไล่จากหยาบไปละเอียด จากนั้นทำการขัดชิ้นงานด้วยผงอะลูมินา (Alumina) ที่มีขนาดอนุภาค 0.3 ไมโครเมตร และผ่านกระบวนการกัดกรด (Etching) เพื่อเผยให้เห็นลักษณะของโครงสร้างจุลภาคอย่างชัดเจน ก่อนจะนำตัวอย่างที่เตรียมเสร็จแล้วเข้าสู่การตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope: SEM) เพื่อวิเคราะห์ลักษณะโครงสร้างจุลภาคในบริเวณต่าง ๆ ของแนวเชื่อมอย่างละเอียด การตรวจสอบโครงสร้างทางจุลภาคสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 บริเวณหลัก ดังแสดงในรูปที่ 4.3 ตัวอย่างบริเวณในการตรวจสอบโครงสร้างทางโลหะวิทยาระดับจุลภาคของชิ้นงาน



รูปที่ 4.3 บริเวณในการตรวจสอบโครงสร้างทางโลหะวิทยา

1) บริเวณเนื้อโลหะเชื่อม (Weld Metal) เป็นบริเวณที่เกิดลวดเชื่อมละลายรวมกับโลหะฐาน และแข็งตัวเป็นแนวเชื่อมใหม่ โดยลักษณะโครงสร้างในบริเวณนี้มักแสดงให้เห็นการเกิดผลึกใหม่ที่มีลักษณะเฉพาะ

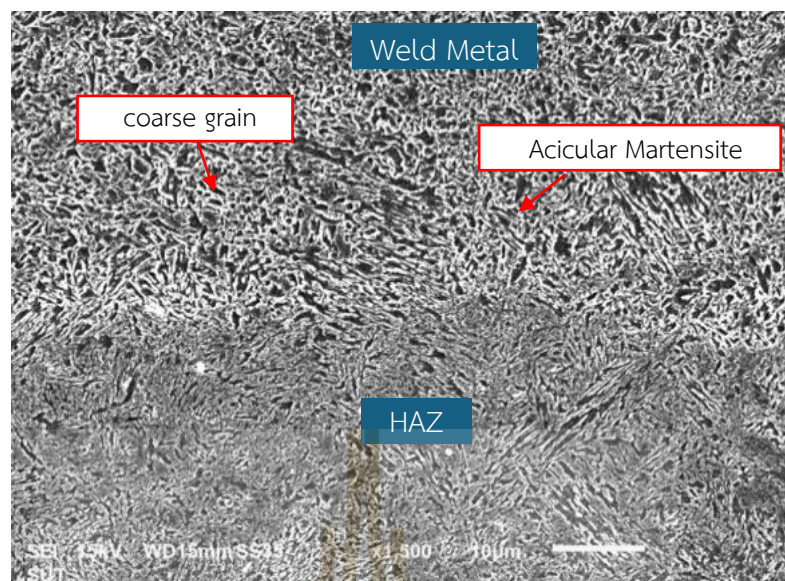
2) บริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อน (Heat Affected Zone: HAZ) เป็นบริเวณที่ไม่ได้ถูกหลอมละลายโดยตรง แต่ได้รับผลกระทบจากความร้อนในระหว่างการเชื่อม ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาค ซึ่งมีผลต่อสมบัติเชิงกลของชิ้นงาน

3) บริเวณโลหะฐาน (Base Metal) เป็นบริเวณของวัสดุแม่พิมพ์เดิมที่ได้รับผลกระทบจากความร้อนน้อยที่สุด จึงยังคงรักษาโครงสร้างจุลภาคเดิมไว้ได้ในสภาพเดิมมากที่สุด

จากการแบ่งพื้นที่ออกเป็นบริเวณต่าง ๆ ตามลักษณะของกระบวนการเชื่อม ทำให้สามารถวิเคราะห์และเปรียบเทียบความเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นได้อย่างชัดเจน ซึ่งข้อมูลที่ได้จากการศึกษานี้จะมีประโยชน์ต่อการทำความเข้าใจกลไกของกระบวนการเชื่อม รวมถึงผลกระทบต่อสมบัติเชิงกลของชิ้นงานหลังการซ่อมบำรุง โดยเมื่อทำการตรวจสอบโครงสร้างทางจุลภาคของชิ้นงานกล้องจุลภาคอิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) มีรายละเอียดดังนี้

4.1.2.1 บริเวณเนื้อโลหะเชื่อม (Weld Metal)

โครงสร้างจุลภาคในบริเวณนี้ปรากฏเป็น อะซิควิลาร์ มาร์เทนไซต์ (Acicular Martensite) ที่มีลักษณะเกรนค่อนข้างหยาบ (Coarse Grains) ดังแสดงในรูปที่ 4.4 ลักษณะโครงสร้างทางจุลภาคบริเวณเนื้อโลหะเชื่อม ซึ่งเกิดจากการที่โลหะหลอมละลายแล้วแข็งตัวในอัตราการเย็นตัวที่สูงมากภายใต้พลังงานความร้อนที่จำกัดเฉพาะจุดของแหล่งกำเนิดเลเซอร์ โครงสร้างอะซิควิลาร์ มาร์เทนไซต์ในบริเวณนี้ให้คุณสมบัติที่มีความแข็งและความเปราะสูง เนื่องจากการเปลี่ยนเฟสอย่างรวดเร็วจากออสเทนไนต์ไปเป็นมาร์เทนไซต์โดยไม่มีการแพร่กระจายของอะตอม (Diffusionless Transformation)

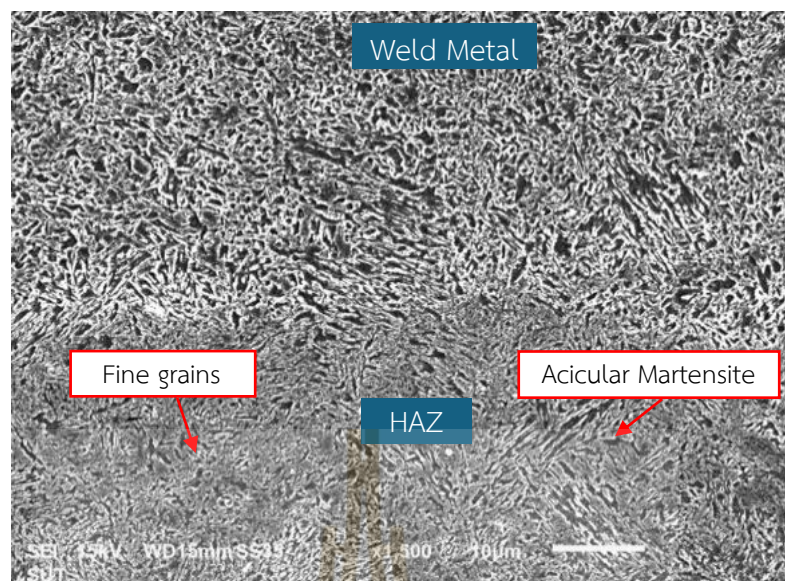


รูปที่ 4.4 ลักษณะโครงสร้างทางจุลภาคบริเวณเนื้อโลหะเชื่อม (Weld Metal)

4.1.2.2 บริเวณผลกระทบร้อน (Heat Affected Zone: HAZ)

บริเวณ HAZ แสดงลักษณะโครงสร้างที่คล้ายคลึงกันกับเนื้อโลหะเชื่อม คือ อะซิควิลาร์ มาร์เทนไซต์ เช่นกัน แต่มีความแตกต่างในเรื่องของ ขนาดของเกรนที่ละเอียดกว่า (Fine Grains) ซึ่งเป็นผลจากการที่บริเวณนี้ไม่ได้ถูกหลอมละลายโดยตรง แต่ได้รับความร้อนจนถึงระดับ ที่เกิดการเปลี่ยนเฟส และเป็นตัวในลักษณะคล้ายกันกับโลหะเชื่อม แม้อัตราการเย็นจะใกล้เคียงกัน แต่เนื่องจาก HAZ ไม่มีการเปลี่ยนสถานะจากของแข็งเป็นของเหลว จึงทำให้มีจุดเริ่มต้นการก่อตัวของผลึกมากขึ้น ส่งผลให้เกิดเกรนที่เล็กกว่า ดังแสดงในภาพที่ 4.5

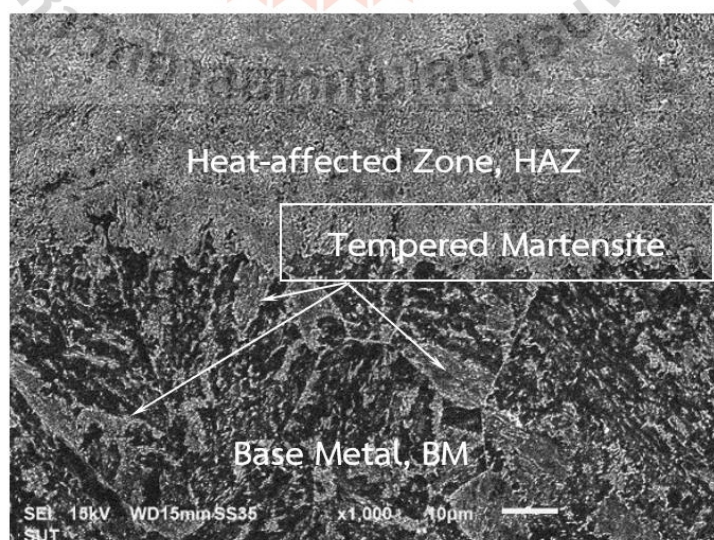
โครงสร้างมาร์เทนไซต์ที่มีเกรนละเอียดใน HAZ มีแนวโน้มที่จะให้ความแข็งแรงที่สูงเช่นเดียวกับบริเวณเนื้อเชื่อม แต่จะมีความเปราะน้อยกว่าเล็กน้อยเมื่อเทียบกับบริเวณที่มีเกรนหยาบ เนื่องจากเกรนที่ละเอียดสามารถช่วยกระจายความเค้นและต้านทานการเกิดรอยร้าวได้ดีขึ้น



รูปที่ 4.5 ลักษณะโครงสร้างทางจุลภาคบริเวณผลกระทบร้อน (HAZ)

4.1.2.3 บริเวณโลหะฐาน (Base Metal)

การตรวจสอบทางโลหะวิทยาระดับจุลภาคของชิ้นงานเชื่อม แสดงโครงสร้างจุลภาคของเหล็กแม่พิมพ์พลาสติก AISI P20 ในบริเวณโลหะฐาน (Base Metal: BM) ภายใต้กำลังขยาย 1,000 เท่า โดยปรากฏลักษณะโครงสร้างเป็น มาร์เทนไซต์คิ่นไฟ (Tempered Martensite) ดังแสดงในรูปที่ 4.6 ซึ่งเป็นโครงสร้างที่ได้จากกระบวนการชุบแข็งและคิ่นไฟ ในกระบวนการผลิตเดิมของวัสดุ โดยโครงสร้างนี้มีลักษณะเป็นผลึกละเอียดที่ผ่านการกลายสภาพมาจากมาร์เทนไซต์ดิบ ทำให้มีคุณสมบัติเด่นในด้านความแข็งแรงสูงร่วมกับความเหนียวที่ดีในระดับหนึ่ง เหมาะสมกับการใช้งานที่ต้องการความทนทานต่อแรงกระแทก เช่น แม่พิมพ์ฉีดพลาสติก



รูปที่ 4.6 ลักษณะโครงสร้างทางจุลภาคบริเวณโลหะฐาน (Base Metal)

ซึ่งบริเวณโลหะฐาน (BM) ที่อยู่ห่างจากแนวเชื่อมมากพอ จึงไม่ได้รับผลกระทบจากความร้อนของกระบวนการเชื่อม ส่งผลให้โครงสร้างจุลภาควงยังคงอยู่ในสภาพเดิมหรือเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อย กล่าวคือ ยังคงเป็น tempered martensite เช่นเดียวกับวัสดุเดิมก่อนการเชื่อม ซึ่งแสดงถึงเสถียรภาพของวัสดุภายใต้กระบวนการเชื่อมด้วยเลเซอร์ Nd:YAG ที่ควบคุมพลังงานความร้อนได้อย่างจำกัดเฉพาะจุด

4.2 ผลการศึกษาคุณสมบัติของแนวเชื่อม

หลังจากที่ได้ทำการศึกษาลักษณะทางโครงสร้างของแนวเชื่อมในระดับจุลภาคและมหภาคแล้ว ขั้นตอนต่อไปคือการวิเคราะห์คุณสมบัติทางกลและเชิงกระบวนการของแนวเชื่อม ซึ่งมีบทบาทสำคัญต่อการประเมินคุณภาพของรอยเชื่อมที่ได้จากกระบวนการเชื่อมด้วยเลเซอร์ Nd: YAG โดยเฉพาะในงานซ่อมแม่พิมพ์ที่ต้องการความแม่นยำสูงและความเสียหายต่ำที่สุด

4.2.1 ผลการวิเคราะห์ค่าความเจือจาง (%Dilution)

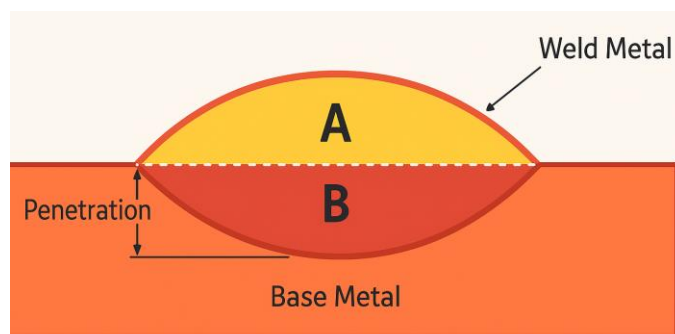
การวิเคราะห์ค่าความเจือจาง (%Dilution) มีความสำคัญในการประเมินคุณภาพแนวเชื่อม โดยเฉพาะในกระบวนการเชื่อมซ่อมแม่พิมพ์ด้วยเลเซอร์ ซึ่งต้องควบคุมอัตราส่วนการผสมระหว่างโลหะพื้นฐาน (Base Metal) และลวดเติม (Filler Metal) ให้อยู่ในระดับที่เหมาะสม ค่าความเจือจางที่สูงเกินไปอาจทำให้โครงสร้างของแนวเชื่อมคล้ายโลหะพื้นฐานมากเกินไป ขณะที่ค่าที่ต่ำเกินไปอาจบ่งชี้ถึงการหลอมรวมที่ไม่สมบูรณ์

ในงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยใช้โปรแกรมประมวลผลภาพจุลทรรศน์ในการวัดพื้นที่แนวเชื่อม โดยแบ่งออกเป็นสองส่วน ได้แก่ พื้นที่ของโลหะเติมที่พอกอยู่เหนือผิวโลหะฐาน (บริเวณ A) และพื้นที่ของโลหะฐานที่ถูกหลอมรวม (บริเวณ B) ดังแสดงในรูปที่ 4.7 ซึ่งข้อมูลดังกล่าวนำมาใช้ในการคำนวณอัตราการเจือจางตามสมการที่ (1) เพื่อดูผลกระทบต่อสมบัติเชิงกลและโครงสร้างของแนวเชื่อม

$$\% \text{ Dilution} = \frac{B}{(A+B)} (100) \quad (1)$$

โดยที่ A คือ พื้นที่ที่ชิ้นงานเกิดการหลอมละลาย (Area of Molten Parent Plate)

B คือ พื้นที่ทั้งหมดที่เกิดการหลอมละลาย (Area Enclosed by Red Line)



รูปที่ 4.7 บริเวณการคำนวณอัตราเจือจาง (Dilution Ratio)

โดยในการทดลองผู้วิจัยได้ทำการวัดขนาดพื้นที่ A และ B ตามสมการเพื่อนำมาคำนวณอัตรา
การเจือจางของชิ้นงานในแต่ละค่าพารามิเตอร์ ได้ผลการคำนวณดังแสดงในตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 ค่าเฉลี่ยการเจือจางบริเวณเนื้อโลหะเชื่อม (%Dilution)

พารามิเตอร์	ค่าเฉลี่ยการเจือจางบริเวณเนื้อโลหะเชื่อม Dilution (%)
PD=5 ms, PF=5 Hz	28.7
PD=5 ms, PF=7 Hz	32.5
PD=5 ms, PF=9 Hz	32.5
PD=6 ms, PF=5 Hz	32.8
PD=6 ms, PF=7 Hz	28.5
PD=6 ms, PF=9 Hz	36.1
PD=7 ms, PF=5 Hz	31.0
PD=7 ms, PF=7 Hz	36.5
PD=7 ms, PF=9 Hz	33.2
ค่าเฉลี่ย	32.4

โดยจากผลการคำนวณในตารางที่ 4.2 แสดงให้เห็นค่าความเจือจางเฉลี่ยบริเวณเนื้อโลหะ
เชื่อม (%Dilution) ภายใต้พารามิเตอร์ที่แตกต่างกันของค่าช่วงพัลส์ (Pulse Duration: PD) และ
ความถี่ของพัลส์ (Pulse Frequency: PF) ซึ่งค่าความเจือจางเฉลี่ยทั้งหมดอยู่ในช่วงระหว่าง 28.5%
ถึง 36.5% โดยมีค่าเฉลี่ยรวมอยู่ที่ 32.4% เมื่อพิจารณาแยกตามช่วงพัลส์ (PD) จะพบว่า

1) ที่ PD = 5 ms ค่า Dilution อยู่ในช่วง 28.7–32.5% โดยมีแนวโน้มว่าเมื่อเพิ่มความถี่ PF
จาก 5 Hz เป็น 7 Hz ค่าการเจือจางเพิ่มขึ้น แต่เมื่อเพิ่มไปที่ 9 Hz ค่าไม่เปลี่ยนแปลงมากนัก

2) ที่ PD = 6 ms พบว่าค่า Dilution มีความผันผวนมากขึ้น โดยที่ PF = 7 Hz มีค่าต่ำสุดคือ 28.5% ขณะที่ PF = 9 Hz ให้ค่าสูงสุดในกลุ่มนี้ที่ 36.1%

3) ที่ PD = 7 ms ค่าการเจือจางอยู่ในช่วง 31.0–36.5% โดยพบว่า PF = 7 Hz ให้ค่าการเจือจางสูงที่สุดเมื่อเทียบกับพารามิเตอร์อื่นทั้งหมด

ซึ่งจากแนวโน้มข้างต้น สามารถวิเคราะห์ได้ว่า ค่าการเจือจางมีความสัมพันธ์กับทั้งระยะเวลาช่วงพัลส์และความถี่ของพัลส์ โดยเฉพาะในช่วง PD ที่ยาวขึ้น (เช่น 6–7 ms) และความถี่ที่สูงขึ้น (เช่น 7–9 Hz) จะส่งผลให้พลังงานรวมที่ส่งเข้าสู่ชิ้นงานต่อหน่วยเวลามากขึ้น ซึ่งอาจทำให้เกิดการหลอมลึกมากขึ้น ส่งผลให้ปริมาณโลหะฐานที่หลอมผสมกับลวดเติมมีสัดส่วนเพิ่มขึ้นตาม ส่งผลให้ค่าการเจือจางเพิ่มสูงขึ้น

อย่างไรก็ตาม ค่า Dilution ที่สูงเกินไปอาจส่งผลให้โครงสร้างแนวเชื่อมมีลักษณะใกล้เคียงกับโลหะฐานมากเกินไป ซึ่งอาจไม่เหมาะสมต่อคุณสมบัติเฉพาะทางของลวดเติม ในทางกลับกัน ค่าที่ต่ำเกินไปก็อาจส่งผลให้แนวเชื่อมไม่มีความแข็งแรงเพียงพอ ดังนั้นการควบคุมพารามิเตอร์การเชื่อมให้ได้ค่าการเจือจางในช่วงที่เหมาะสมจึงเป็นสิ่งสำคัญต่อคุณภาพของการเชื่อมซ่อมแม่พิมพ์ ดังนั้นพารามิเตอร์ที่ให้ค่าการเจือจางอยู่ในช่วงที่เหมาะสมกับการเชื่อมซ่อมแม่พิมพ์ ได้แก่

1) PD = 5 ms, PF = 7 Hz (Dilution = 32.5%)

2) PD = 7 ms, PF = 5 Hz (Dilution = 31.0%)

3) PD = 7 ms, PF = 9 Hz (Dilution = 33.2%)

โดยเฉพาะในกรณีของพารามิเตอร์ PD = 7 ms, PF = 5 Hz ซึ่งให้ค่าการเจือจางต่ำที่สุดในกลุ่มที่มีค่าความเจือจางอยู่ในช่วงเหมาะสม ทั้งนี้ ค่าการเจือจางในช่วงประมาณ 30–33% ถือเป็นระดับที่เหมาะสมต่อการเชื่อมซ่อมแม่พิมพ์ เนื่องจากสามารถควบคุมอัตราส่วนการผสมระหว่างโลหะฐานและลวดเติมให้อยู่ในระดับที่ไม่กระทบต่อคุณสมบัติเชิงกลและโครงสร้างของแนวเชื่อมมากเกินไป อีกทั้งยังลดโอกาสในการเกิดปัญหาจากผลกระทบของความร้อน เช่น การแตกร้าวจากการหดตัวของโลหะเชื่อมและการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาคในบริเวณผลกระทบร้อน (Heat-Affected Zone) จึงสามารถกล่าวได้ว่าพารามิเตอร์ PD = 7 ms, PF = 5 Hz มีความเหมาะสมต่อกระบวนการเชื่อมซ่อมแม่พิมพ์มากที่สุดในงานวิจัยนี้

4.2.2 ผลการวิเคราะห์ค่าความร้อนที่ป้อนเข้าสู่ชิ้นงาน (Heat Input)

ค่าความร้อนนำเข้า (Heat Input) เป็นพารามิเตอร์สำคัญที่ใช้ประเมินปริมาณพลังงานความร้อนที่ถูกส่งเข้าสู่ชิ้นงานในระหว่างกระบวนการเชื่อม โดยสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (2) ดังต่อไปนี้

$$HI = \left(\frac{P \times T \times f}{v} \right) \times \eta \quad (2)$$

โดยที่	HI	คือ ปริมาณความร้อนเข้าสู่ชิ้นงาน (Heat Input; J/mm)
	P	คือ กำลังไฟฟ้าสูงสุด (Peak Power; kW)
	T	คือ ระยะเวลาของพัลส์ (Pulse Duration; ms)
	F	คือ ความถี่ของพัลส์ (Pulse Frequency; Hz)
	V	คือ ความเร็วในการเดินแนวเชื่อม (Scanning Speed; mm/s)
	η	คือ ประสิทธิภาพการเชื่อม (Welding Efficiency) เท่ากับ 1

โดยมีการคำนวณแปลงหน่วยค่ากระแสไฟฟ้าของเครื่องเลเซอร์จากหน่วยแอมแปร์ (A) เป็นหน่วยกิโลวัตต์ (kW) ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (3) ดังต่อไปนี้

$$P = V \times I \quad (3)$$

โดยที่	P = กำลังไฟฟ้า (W)
	V = แรงดันไฟฟ้า (V) ของเครื่องเชื่อม
	I = กระแสไฟฟ้า (A)

ซึ่งสูตรดังกล่าวใช้ในการประมาณค่าความร้อนที่ถูกถ่ายเทจากแหล่งกำเนิดเลเซอร์เข้าสู่พื้นที่แนวเชื่อมต่อมิลลิเมตร โดยพิจารณาทั้งกำลังพลังงาน ระยะเวลาการปล่อยพลังงาน และความถี่ในการยิงพัลส์ที่สัมพันธ์กับความเร็วในการเดินแนวเชื่อม ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อการหลอมละลายของโลหะฐานและวัสดุเติม รวมถึงคุณภาพของแนวเชื่อมที่เกิดขึ้น และในศึกษาทดลองนี้ ได้ทำการคำนวณค่าความร้อนนำเข้าไปสู่ชิ้นงานเชื่อมจากค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ โดยใช้สมการดังกล่าวในการคำนวณ ซึ่งผลการคำนวณแสดงได้ในตารางที่ 4.3 ตารางแสดงการคำนวณค่าความร้อนนำเข้าไปที่พารามิเตอร์ที่แตกต่างกัน ดังต่อไปนี้

ตารางที่ 4.3 การคำนวณค่าความร้อนนำเข้า (Heat Input) ที่พารามิเตอร์ที่แตกต่างกัน

No.	Peak Power (kW)	Scanning Speed (mm/s)	Pulse Duration (ms)	Pulse Frequency (Hz)	Heat Input (J/mm)
1	5.3	1.2	5	5	110.4
2	6.7	1.2	5	7	195.4
3	7.5	1.2	5	9	281.3
4	5.7	1.2	6	5	142.5
5	7.2	1.2	6	7	252.0
6	8.2	1.2	6	9	369.0
7	6.2	1.2	7	5	180.8
8	7.7	1.2	7	7	314.4
9	8.8	1.2	7	9	462.0

จากตารางการคำนวณที่ 4.3 พบว่าค่าความร้อนนำเข้าในแต่ละชุดพารามิเตอร์อยู่ในช่วงระหว่าง 110.4 – 462.0 จูล/มิลลิเมตร (J/mm) โดยมีแนวโน้มที่ชัดเจนว่า ค่าความร้อนนำเข้าจะเพิ่มขึ้นเมื่อมีการเพิ่มค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุด (Peak Power) ระยะเวลาพัลส์ (Pulse Duration: PD) และความถี่ของพัลส์ (Pulse Frequency: PF) ซึ่งแสดงถึงความสัมพันธ์โดยตรงระหว่างพารามิเตอร์เหล่านี้กับปริมาณพลังงานที่ส่งเข้าสู่ชิ้นงาน

โดยค่าความร้อนนำเข้าที่มีความเหมาะสมกับงานเชื่อมซ่อมแม่พิมพ์ที่ทำจากวัสดุ P20 นั้นควรมีค่าความร้อนนำเข้าที่ไม่สูงเกินไปหรือต่ำเกินไป เพราะหากค่าความร้อนนำเข้า สูงเกินไป จะทำให้การหลอมละลายของโลหะเกิดขึ้นมากเกินไป ซึ่งอาจทำให้เกิดการขยายตัวของบริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อน (HAZ) หรือการละลายลึกเกินความจำเป็น ส่งผลให้เกิดความเสี่ยงในการเกิดข้อบกพร่อง เช่น การแตกร้าวหรือความแข็งแรงลดลง ขณะที่ถ้าค่าความร้อนนำเข้าต่ำเกินไป อาจทำให้การหลอมรวมไม่สมบูรณ์ ส่งผลให้แนวเชื่อมมีคุณภาพต่ำและไม่สามารถประสานวัสดุได้ดีเท่าที่ควร การควบคุมค่าความร้อนนำเข้าให้เหมาะสมจึงเป็นสิ่งสำคัญในการเชื่อมซ่อมแม่พิมพ์ ดังนั้นค่าพารามิเตอร์ที่ให้ค่าความร้อนนำเข้าอยู่ในช่วงที่เหมาะสมสำหรับการเชื่อมซ่อมแม่พิมพ์ ได้แก่:

1) Pulse Duration = 5 ms, Pulse Frequency = 7 Hz ซึ่งให้ค่า Heat Input เท่ากับ 195.4 J/mm

2) Pulse Duration = 6 ms, Pulse Frequency = 7 Hz ซึ่งให้ค่า Heat Input เท่ากับ 252.0 J/mm

3) Pulse Duration = 7 ms, Pulse Frequency = 9 Hz ซึ่งให้ค่า Heat Input เท่ากับ 462.0 J/mm

โดยการวิเคราะห์ค่าความร้อนนำเข้า (Heat Input) เป็นปัจจัยสำคัญในการประเมินคุณภาพของการเชื่อม ดังนั้นการทำความเข้าใจความสัมพันธ์ระหว่างพารามิเตอร์ต่าง ๆ เช่น กำลังไฟฟ้าสูงสุด (Peak Power), ระยะเวลาพัลส์ (Pulse Duration), และความถี่พัลส์ (Pulse Frequency) กับค่าความร้อนนำเข้า จึงเป็นสิ่งสำคัญในการกำหนดเงื่อนไขการเชื่อมที่เหมาะสม ซึ่งการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างพารามิเตอร์กับค่าความร้อนนำเข้า มีรายละเอียดดังนี้

4.2.1.1 ความสัมพันธ์ระหว่าง Peak Power และค่า Heat Input

ค่าความร้อนนำเข้าเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญเมื่อค่า Peak Power สูงขึ้น โดยมีความสัมพันธ์โดยตรง เช่น เมื่อ Peak Power เท่ากับ 5.3 kW จะได้ค่า Heat Input เท่ากับ 110.4 J/mm และเมื่อเพิ่มเป็น 8.8 kW ค่า Heat Input เพิ่มขึ้นเป็น 462.0 J/mm

4.2.1.2 ผลของ Pulse Duration ต่อค่า Heat Input

การเพิ่มค่าระยะเวลาของพัลส์ (Pulse Duration) ส่งผลให้พลังงานต่อหนึ่งพัลส์เพิ่มขึ้น ซึ่งจะเพิ่มค่า Heat Input ตามไปด้วย ตัวอย่างเช่น ในกรณีที่ Pulse Duration เท่ากับ 5 ms (ขั้นที่ 1-3) จะให้ค่า Heat Input ในช่วง 110.4-281.3 J/mm ขณะที่เมื่อ Pulse Duration เพิ่มขึ้นเป็น 7 ms (ขั้นที่ 7-9) ค่า Heat Input จะเพิ่มขึ้นเป็นช่วง 180.8-462.0 J/mm

4.2.1.3 ผลของ Pulse Frequency ต่อค่า Heat Input

การเพิ่มความถี่ของพัลส์ (Pulse Frequency) หมายถึงจำนวนพัลส์ที่เกิดขึ้นต่อวินาทีมีมากขึ้น ซึ่งนำไปสู่การเพิ่มพลังงานรวมที่ส่งเข้าสู่ชิ้นงาน ตัวอย่างเช่น เมื่อกำหนด Pulse Duration คงที่ที่ 5 ms และเพิ่ม Pulse Frequency จาก 5 Hz เป็น 9 Hz ค่า Heat Input จะเพิ่มจาก 110.4 J/mm เป็น 281.3 J/mm

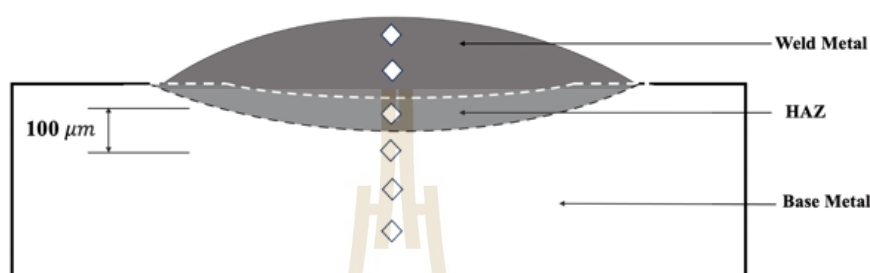
ดังนั้นการเพิ่มค่าของ Peak Power, Pulse Duration และ Pulse Frequency จะส่งผลให้ค่าความร้อนนำเข้าเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน ซึ่งสอดคล้องกับหลักการของการถ่ายเทพลังงาน ในกระบวนการเชื่อมด้วยเลเซอร์ อย่างไรก็ตาม การเลือกใช้พารามิเตอร์เหล่านี้ควรอยู่บนพื้นฐานของความสมดุลระหว่างประสิทธิภาพของการหลอมละลายกับการควบคุมคุณภาพของแนวเชื่อม

โดยสรุปแล้วการควบคุมค่าความร้อนนำเข้าให้อยู่ในช่วงที่เหมาะสมถือเป็นปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อคุณภาพของแนวเชื่อมในกระบวนการเชื่อมซ่อมแม่พิมพ์ จากผลการทดลองพบว่า พารามิเตอร์ที่ให้ค่า Heat Input ในช่วงประมาณ 195-260 J/mm ให้ผลลัพธ์ที่เหมาะสม ทั้งในแง่ของการหลอมละลายที่เพียงพอและลดความเสี่ยงต่อข้อบกพร่องทางโลหะวิทยา จึงสามารถใช้เป็นแนวทางในการกำหนดเงื่อนไขการเชื่อมที่เหมาะสมสำหรับการใช้งานจริงในภาคอุตสาหกรรม

4.2.3 ผลการทดสอบค่าความแข็งของชิ้นงาน (Hardness Test)

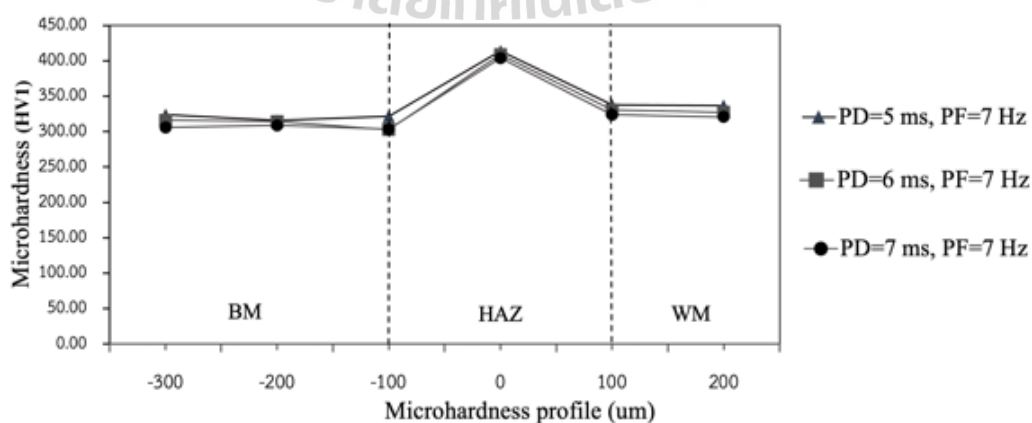
การทดสอบวัดค่าความแข็งของชิ้นงานที่ผ่านการเชื่อมด้วยกระบวนการเชื่อมเลเซอร์ชนิด Nd:YAG นั้น เป็นการทดสอบเพื่อดูคุณสมบัติเชิงกลของแนวเชื่อมที่มีค่าพารามิเตอร์แตกต่างกัน

โดยใช้วิธีการวัดค่าความแข็งแบบไมโครวิกเกอร์ (Micro Vickers hardness test) โดยการทดสอบนี้ ดำเนินการบนชิ้นงานเหล็กแม่พิมพ์ฉีดพลาสติกมาตรฐาน AISI P20 ที่ผ่านการเชื่อม โดยทำการทดสอบที่บริเวณแนวตั้งของแนวเชื่อมและชิ้นงาน ดังแสดงในรูปที่ 4.8 โดยเริ่มวัดค่าความแข็งของชิ้นงานจากบริเวณผลกระทบร้อน (Heat Affected Zone หรือ HAZ) บริเวณเนื้อโลหะเชื่อม (Weld Metal หรือ WB) และบริเวณโลหะฐาน (Base Metal หรือ BM) ตามลำดับ ซึ่งแต่ละบริเวณจะมีค่าความแข็งที่แตกต่างกันเนื่องจากผลกระทบจากกระบวนการเชื่อม



รูปที่ 4.8 ตำแหน่งของจุดทดสอบความแข็ง

ซึ่งการวิเคราะห์ผลการวัดค่าความแข็งแบบไมโครวิกเกอร์จะช่วยตรวจสอบว่าค่าพารามิเตอร์ในการเชื่อมส่งผลต่อค่าความแข็งในแต่ละบริเวณอย่างไร และเป็นการเปรียบเทียบค่าความแข็งของแนวเชื่อม ซึ่งผลการทดสอบความแข็งของแนวเชื่อมที่ได้ดำเนินการโดยเลือกแนวเชื่อมที่มีค่าระยะเวลาพัลส์ (Pulse Duration, PD) ที่ 5, 6 และ 7 มิลลิวินาที และความถี่พัลส์ (Pulse Frequency, PF) ที่ 7 เฮิร์ตซ์ โดยชิ้นงานที่มี PF เท่ากับ 5 และ 9 Hz จะไม่ได้นำมาทดสอบความค่าความแข็งของชิ้นงาน เนื่องจากพบข้อบกพร่องจากการหลอมละลายไม่สมบูรณ์ (Incomplete Fusion Defects) โดยชิ้นงานที่นำมาทดสอบค่าความแข็งของชิ้นงานมีค่าความแข็งของแนวเชื่อมดังแสดงในรูปที่ 4.9



รูปที่ 4.9 ผลการวัดค่าความแข็งของชิ้นงานแบบไมโครวิกเกอร์

โดยค่าเฉลี่ยผลการทดสอบค่าความแข็งของชิ้นงานแต่ในบริเวณเนื้อโลหะเชื่อม (WM) บริเวณผลกระทบร้อน (HAZ) และบริเวณโลหะฐาน (BM) สามารถแสดงได้ดังตารางที่ 4.4 ผลการทดสอบค่าความแข็งเฉลี่ยของแนวเชื่อม ดังต่อไปนี้

ตารางที่ 4.4 ผลการทดสอบค่าความแข็งเฉลี่ยของแนวเชื่อม

No.	พารามิเตอร์	ค่าความแข็งเฉลี่ย (HV)		
		WM	HAZ	BM
2	PD=5 ms PF=7 Hz	337.2	413.8	320.4
5	PD=6 ms PF=7 Hz	328.9	408.7	311.0
8	PD=7 ms PF=7 Hz	322.4	403.8	306.0

จากผลการวัดค่าความแข็งของชิ้นงานในรูปที่ 4.4 และค่าเฉลี่ยความแข็งของชิ้นงานในตารางที่ 4.4 แสดงให้เห็นการทดสอบค่าความแข็งเฉลี่ยของแนวเชื่อม (Weld Metal: WM), บริเวณผลกระทบจากความร้อน (Heat-Affected Zone: HAZ) และโลหะฐาน (Base Metal: BM) ภายใต้เงื่อนไขที่กำหนดให้ความถี่พัลส์ (Pulse Frequency: PF) คงที่ที่ 7 Hz และเปลี่ยนแปลงระยะเวลาพัลส์ (Pulse Duration: PD) ในช่วง 5, 6 และ 7 ms จะสามารถสังเกตได้ว่า

4.2.3.1 บริเวณผลกระทบจากความร้อน (HAZ) มีค่าความแข็งเฉลี่ยสูงที่สุด

ในทุกชุดการทดลอง โดยค่าความแข็งเฉลี่ยที่ได้มีแนวโน้มลดลงเมื่อค่า PD เพิ่มขึ้น กล่าวคือ มีค่าความแข็งเฉลี่ยเท่ากับ 413.8, 408.7 และ 403.8 HV สำหรับค่า PD เท่ากับ 5, 6 และ 7 ms ตามลำดับ แนวโน้มดังกล่าวสามารถอธิบายได้ว่า การใช้ค่า PD ที่ต่ำทำให้อัตราการเย็นตัวของวัสดุบริเวณ HAZ สูง ส่งผลให้เกิดโครงสร้างมาร์เทนไซต์ที่มีลักษณะละเอียดและมีความแข็งสูง

4.2.3.2 บริเวณเนื้อโลหะเชื่อม (WM) จะพบว่ามีค่าความแข็งเฉลี่ยลดลงตามการเพิ่มขึ้นของค่า PD

โดยค่าความแข็งเฉลี่ยมีค่าเท่ากับ 337.2, 328.9 และ 322.4 HV ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าเมื่อค่า PD เพิ่มขึ้น พลังงานความร้อนที่ถูกส่งเข้าสู่ชิ้นงานมีปริมาณมากขึ้น ส่งผลให้อัตราการเย็นตัวลดลง และเกิดโครงสร้างจุลภาคที่หยาบกว่าเดิม จึงส่งผลให้ค่าความแข็งลดลง

4.2.3.3 บริเวณโลหะฐาน (BM) มีค่าความแข็งเฉลี่ยต่ำที่สุด

โดยมีค่าความแข็งเฉลี่ยอยู่ในช่วง 320.4 – 306.0 HV ซึ่งสอดคล้องกับค่าความแข็งของเหล็ก AISI P20 ที่ผ่านกระบวนการอบคืนไฟมาแล้ว และแสดงให้เห็นว่าโครงสร้างโลหะฐานไม่มีการเปลี่ยนแปลงจากกระบวนการเชื่อมอย่างมีนัยสำคัญ

จากแนวโน้มที่ปรากฏ สามารถสรุปได้ว่า ระยะเวลาพัลส์ (Pulse Duration) มีอิทธิพลต่อค่าความแข็งของทั้งแนวเชื่อมและบริเวณ HAZ อย่างชัดเจน โดยค่า PD ที่ต่ำจะช่วยให้ อัตราการเย็นตัว ส่งผลให้เกิดโครงสร้างที่แข็งแรงมากขึ้น ผลการทดลองในครั้งนี้สอดคล้องกับผล การศึกษาในอดีต เช่น รายงานของ Silva et al. (2008) ซึ่งระบุว่าความร้อนนำเข้าไปที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ อัตราการเย็นตัวลดลง และนำไปสู่การก่อตัวของโครงสร้างมาร์เทนไซต์แบบหยาบที่มีค่าความแข็ง ต่ำกว่า และจากการศึกษาของ Vedani (2004) ยังได้ชี้ให้เห็นว่า บริเวณ HAZ มักมีค่าความแข็งสูง กว่าบริเวณอื่น เนื่องจากได้รับผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิอย่างรวดเร็ว ดังนั้น การกำหนดพารามิเตอร์การเชื่อมให้มีค่า PD ต่ำในขณะที่ PF คงที่ ส่งผลให้เกิดค่าความแข็ง ของแนวเชื่อมและบริเวณ HAZ ที่สูงขึ้น ซึ่งมีความเหมาะสมต่อการใช้งานในแม่พิมพ์ฉีดพลาสติก ที่ต้องการความแข็งเพื่อทนต่อการสึกหรอระหว่างการใช้งาน

4.3 ผลการวิเคราะห์ผลด้วยสถิติทางคณิตศาสตร์

การทดลองนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของปัจจัยจำนวนสองปัจจัย ได้แก่ ระยะเวลา ของพัลส์ (Pulse Duration) และความถี่ของพัลส์ (Pulse Frequency) ต่อค่าความกว้างของแนวเชื่อม (Weld Bead Width) โดยใช้การออกแบบการทดลองแบบแฟกทอเรียล (Factorial Design) จำนวน 9 การทดลอง และทำการทดลองซ้ำจำนวน 3 ครั้งต่อชุดการทดลอง เพื่อให้ได้ข้อมูลที่มีความน่าเชื่อถือ โดยผู้วิจัยได้ทำการวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) และตรวจสอบความถูกต้องของการออกแบบ การทดลอง โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

4.3.1 การวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance: ANOVA)

โดยจากการวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) ด้วยโปรแกรม Minitab 19 ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ผลการวิเคราะห์ปรากฏในตาราง ANOVA ดังแสดงในรูปที่ 4.3.1 ซึ่งแสดง ให้เห็นว่าทั้งปัจจัยหลัก A (ระยะเวลาของพัลส์) และ B (ความถี่ของพัลส์) มีผลกระทบอย่างมีนัยสำคัญ ทางสถิติต่อค่าความกว้างของแนวเชื่อม เนื่องจากมีค่า P-Value เท่ากับ 0.000 ซึ่งน้อยกว่า 0.05 นอกจากนี้ ปัจจัยร่วมระหว่าง A และ B (AB หรือ PulseFrequency) ก็แสดงผลกระทบอย่างมีนัยสำคัญ ทางสถิติต่อค่าความกว้างเช่นกัน โดยมีค่า P-Value เท่ากับ 0.000 ซึ่งสะท้อนว่ามีการเกิดปฏิสัมพันธ์ กันระหว่างสองปัจจัยนี้ในการกำหนดค่าความกว้างของแนวเชื่อม

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	8	304823	38103	485.92	0.000
Linear	4	300943	75236	959.47	0.000
Pulse	2	85201	42601	543.28	0.000
Frequency	2	215742	107871	1375.67	0.000
2-Way Interactions	4	3880	970	12.37	0.000
Pulse*Frequency	4	3880	970	12.37	0.000
Error	18	1411	78		
Total	26	306234			

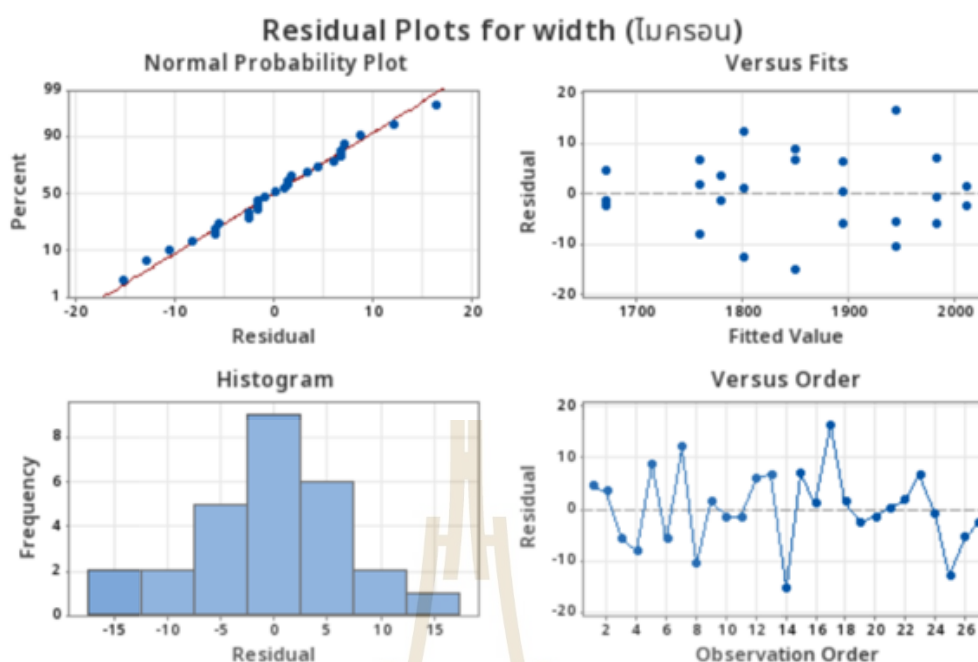
Model Summary			
S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
8.85515	99.54%	99.33%	98.96%

รูปที่ 4.10 การวิเคราะห์ทางสถิติของค่าความกว้างของแนวเชื่อม

โดยค่าความแปรปรวนที่อธิบายได้โดยโมเดลมีค่าสูง โดยค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R-squared) อยู่ที่ 99.54% ซึ่งบ่งชี้ว่าโมเดลสามารถอธิบายความแปรปรวนของข้อมูลได้เกือบทั้งหมด และเมื่อทำการปรับค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (Adjusted R-squared) แล้ว ยังคงมีค่าสูงถึง 99.33% และค่า R-squared (Predicted) เท่ากับ 98.96% ซึ่งแสดงว่าโมเดลสามารถคาดการณ์ค่าที่ไม่ได้อยู่ในชุดข้อมูลการทดลองได้อย่างแม่นยำ

4.3.2 การตรวจสอบความถูกต้องของการออกแบบการทดลอง

เพื่อประเมินความถูกต้องและความเหมาะสมของโมเดลเชิงสถิติที่ได้จากการวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance: ANOVA) ในการทดลองครั้งนี้ ได้ทำการตรวจสอบสมมติฐานพื้นฐานของโมเดลผ่านการวิเคราะห์แผนภูมิค่าคงเหลือ (Residual Plots) ซึ่งประกอบด้วยแผนภูมิหลักจำนวน 4 ประเภท ได้แก่ Normal Probability Plot, Histogram, Residuals versus Fits Plot และ Residuals versus Order Plot ดังแสดงในภาพที่ 4.11



รูปที่ 4.11 แผนภูมิการกระจายตัวของค่าความกว้างแนวเชื่อม

จากการวิเคราะห์ข้อมูลการทดลองเพื่อศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อค่าความกว้างของแนวเชื่อม ได้มีการจัดทำแผนภูมิการกระจายตัวของค่าความกว้างของแนวเชื่อม เพื่อประเมินลักษณะของการแจกแจงข้อมูล และตรวจสอบความถูกต้องของสมมติฐานทางสถิติที่เกี่ยวข้องกับการวิเคราะห์ค่าตอบสนอง โดยแผนภูมิการกระจายตัวที่นำเสนอมีจุดประสงค์เพื่อแสดงลักษณะของข้อมูลเชิงปริมาณ และใช้ประกอบการตัดสินใจว่าค่าตอบสนองที่ได้จากการทดลองมีลักษณะเหมาะสมต่อการนำไปวิเคราะห์ทางสถิติหรือไม่ ซึ่งรายละเอียดและการแปลความหมายของแต่ละแผนภูมิสามารถอธิบายได้ดังต่อไปนี้

4.3.2.1 Normal Probability Plot

แผนภูมินี้ใช้ตรวจสอบสมมติฐานว่าค่าคงเหลือ (Residuals) มีการแจกแจงแบบปกติ (Normal Distribution) หรือไม่ ซึ่งเป็นหนึ่งในสมมติฐานสำคัญของการวิเคราะห์ ANOVA หากจุดข้อมูลเรียงตัวอยู่ใกล้เส้นทแยงมุมจากซ้ายล่างไปขวาบน แสดงถึงการแจกแจงแบบปกติของค่าคงเหลือ ซึ่งจากแผนภูมิที่ปรากฏ พบว่าจุดส่วนใหญ่มีแนวโน้มวางตัวตามแนวเส้นตรง แสดงให้เห็นว่าค่าคงเหลือมีลักษณะเป็นไปตามการแจกแจงแบบปกติ สนับสนุนความถูกต้องของโมเดลที่ใช้ในการวิเคราะห์

4.3.2.2 Histogram of Residuals

แผนภูมิฮิสโตแกรมช่วยยืนยันรูปแบบการแจกแจงของค่าคงเหลือ โดยคาดหวังว่าค่าคงเหลือจะกระจายตัวในลักษณะสมมาตรคล้ายรูปประฆังคว่ำ (Bell-Shaped Curve)

อันเป็นลักษณะเฉพาะของการแจกแจงแบบปกติ จากแผนภูมิที่ได้ แสดงลักษณะของการกระจายที่ใกล้เคียงกับการแจกแจงปกติ โดยมีความสมมาตรของการกระจายทั้งด้านซ้ายและขวาของค่ากลางอย่างเหมาะสม ซึ่งเป็นอีกหลักฐานหนึ่งที่สนับสนุนสมมติฐานการแจกแจงปกติของค่าคงเหลือ

4.3.2.3 Residuals versus Fitted Values Plot

แผนภูมินี้ใช้เพื่อตรวจสอบสมมติฐานว่าความแปรปรวนของค่าคงเหลือมีความสม่ำเสมอ (Homoscedasticity) กล่าวคือ ค่าคงเหลือควรจะกระจายตัวแบบสุ่มและไม่มีรูปแบบหรือลวดลายที่ชัดเจนรอบค่าศูนย์ ซึ่งจากแผนภูมิพบว่าจุดต่าง ๆ กระจายตัวแบบสุ่มอย่างไม่มีรูปแบบที่แน่นอน สะท้อนถึงความสม่ำเสมอของความแปรปรวน ซึ่งเป็นข้อบ่งชี้ถึงความถูกต้องของโมเดลในแง่ของความแปรปรวนที่ไม่ขึ้นกับค่าที่ทำนายได้ (Fitted Values)

4.3.2.4 Residuals versus Observation Order Plot

แผนภูมินี้มีวัตถุประสงค์เพื่อตรวจสอบความเป็นอิสระกันของค่าคงเหลือ (Independence) โดยหากค่าคงเหลือมีความสัมพันธ์กันตามลำดับของการทดลอง จะพบรูปแบบหรือแนวโน้มเฉพาะในแผนภูมิ แต่จากแผนภูมิที่ได้พบว่าค่าคงเหลือกระจายตัวแบบสุ่ม โดยไม่มีแนวโน้มใด ๆ ที่ชัดเจน แสดงว่าค่าคงเหลือเป็นอิสระจากกัน ซึ่งเป็นไปตามสมมติฐานของโมเดลเชิงสถิติ

จากการวิเคราะห์แผนภูมิค่าคงเหลือทั้ง 4 ประเภทตามที่แสดงในรูปที่ 4.11 สามารถสรุปได้ว่า โมเดลเชิงสถิติที่ใช้ในงานวิจัยนี้มีความเหมาะสมและมีความถูกต้องตามสมมติฐานพื้นฐานทางสถิติอย่างครบถ้วน ไม่พบปัญหาเรื่องการแจกแจงของค่าคงเหลือ ความไม่สม่ำเสมอของความแปรปรวน หรือความไม่เป็นอิสระของข้อมูล ซึ่งบ่งชี้ว่าโมเดลที่สร้างขึ้นมีความน่าเชื่อถือสูง และสามารถใช้ในการพยากรณ์หรือวิเคราะห์ผลกระทบของปัจจัยที่เกี่ยวข้องได้อย่างมีประสิทธิภาพ

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัย

5.1 สรุปผลการวิจัย

การวิจัยครั้งนี้เป็นการศึกษาการเชื่อมซ่อมแม่พิมพ์ฉีดพลาสติกที่ผลิตจากเหล็กเกรด AISI P20 โดยใช้กระบวนการเชื่อมเลเซอร์ชนิด Nd:YAG เพื่อวิเคราะห์ผลกระทบที่เกิดขึ้นต่อโครงสร้างทางโลหะวิทยาและคุณสมบัติเชิงกลของแนวเชื่อม ซึ่งประกอบด้วยการศึกษาทั้งในระดับโครงสร้างมหภาค (Macrostructure) และระดับจุลภาค (Microstructure) รวมถึงการวัดค่าความแข็งของชิ้นงานที่ผ่านการเชื่อม เพื่อกำหนดพารามิเตอร์การเชื่อมที่เหมาะสมต่อการประยุกต์ใช้งานจริงในการซ่อมแม่พิมพ์ฉีดพลาสติก

จากการวิเคราะห์โครงสร้างในระดับมหภาค พบว่า บริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อน (Heat Affected Zone: HAZ) มีลักษณะแคบและจำกัดพื้นที่น้อยกว่าบริเวณโลหะเชื่อม (Weld Metal: WM) ซึ่งสะท้อนให้เห็นถึงลักษณะเฉพาะของกระบวนการเชื่อมเลเซอร์ Nd:YAG ที่ให้พลังงานในพื้นที่เฉพาะจุด (Narrow Spot Size) และบริเวณโฟกัสของลำแสงแคบ (Narrow Focus Area) ส่งผลให้ขอบเขตของ HAZ มีขนาดเล็กลงเมื่อเทียบกับกระบวนการเชื่อมแบบอื่น ๆ ซึ่งถือเป็นข้อได้เปรียบของกระบวนการเชื่อมเลเซอร์ในการลดผลกระทบทางความร้อนต่อชิ้นงาน

ในด้านโครงสร้างจุลภาค พบว่า โลหะฐาน (Base Metal) ของเหล็ก P20 ยังคงรักษาโครงสร้างแบบเทมเปอร์มาร์เทนไซต์ (Tempered Martensite) ได้อย่างมีเสถียรภาพ โดยมีการเปลี่ยนแปลงค่าความแข็งเพียงเล็กน้อย สะท้อนถึงการเปลี่ยนแปลงทางโครงสร้างที่ไม่มากนักจากกระบวนการเชื่อม ในขณะที่บริเวณโลหะเชื่อม (WM) พบโครงสร้างแบบอะซิควิลาร์มาร์เทนไซต์ (Acicular Martensitic Structure) ที่มีขนาดเกรนค่อนข้างหยาบ (Coarse Grains) อันเป็นผลมาจากการหลอมละลายและการเย็นตัวอย่างรวดเร็ว ส่วนบริเวณ HAZ กลับพบว่าโครงสร้างมีลักษณะเกรนละเอียด (Fine Grains) ซึ่งเป็นผลโดยตรงจากอัตราการเย็นตัวที่สูง และส่งผลให้ค่าความแข็งในบริเวณ HAZ สูงกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับบริเวณโลหะเชื่อม

ค่าพลังงานความร้อนที่เข้าสู่ชิ้นงาน (Heat Input) มีความแปรผันในช่วงระหว่าง 116.0 ถึง 468.3 J/mm โดยขึ้นอยู่กับระยะเวลาของพัลส์ (Pulse Duration: PD) และความถี่ของพัลส์ (Pulse Frequency: PF) ซึ่งมีความสัมพันธ์ในเชิงบวก กล่าวคือ เมื่อค่าทั้งสองเพิ่มขึ้น ค่าความร้อนที่ถูกส่งเข้าสู่ชิ้นงานจะเพิ่มขึ้นตาม ส่งผลโดยตรงต่อรูปร่าง ลักษณะ และความกว้างของแนวเชื่อม

จากผลการทดลอง พบว่าการเพิ่มค่าระยะเวลาของพัลส์ (PD) และความถี่ของพัลส์ (PF) ส่งผลให้แนวเชื่อมมีแนวโน้มกว้างขึ้น โดยมีลักษณะของแนวเชื่อมที่ต่อเนื่องและสมบูรณ์ขึ้น ซึ่งชี้ให้เห็นถึงผลกระทบร่วมกันของสองพารามิเตอร์นี้ต่อคุณภาพของแนวเชื่อม ทั้งนี้ พารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการเชื่อมในงานวิจัยนี้ คือ ความถี่ของพัลส์ที่ 7 Hz และระยะเวลาของพัลส์ระหว่าง 5 ถึง 7 มิลลิวินาที โดยพารามิเตอร์ดังกล่าวสามารถให้แนวเชื่อมที่ปราศจากข้อบกพร่อง

จากการหลอมไม่สมบูรณ์ และมีค่าความแข็งแรงใกล้เคียงกับค่ามาตรฐานของเหล็กแม่พิมพ์ฉีดพลาสติกเกรด P20

ผลการวิจัยนี้จึงชี้ให้เห็นถึงความสำคัญของการควบคุมค่าพารามิเตอร์หลัก ได้แก่ ระยะเวลาของพัลส์ (PD) และความถี่ของพัลส์ (PF) เพื่อให้ได้แนวเชื่อมที่มีคุณภาพสูง มีลักษณะทางโลหะวิทยาที่เหมาะสม และค่าความแข็งแรงที่สอดคล้องกับวัสดุฐาน ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Adams และ Kwiatkowski ที่แสดงให้เห็นว่าพารามิเตอร์ของกระบวนการเชื่อมเลเซอร์มีผลโดยตรงต่อลักษณะโครงสร้างและคุณสมบัติเชิงกลของแนวเชื่อม



รายการอ้างอิง

- กมลพงศ์ แจ่มกมล และพิชัย จันทน์มณี (2555). การปรับปรุงคุณภาพผิวงานแม่พิมพ์พลาสติก AISIP20 โดยการกัดอาร์คไฟฟ้า. (รายงานการวิจัย). กรุงเทพฯ: มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ.
- ฉัตรทอง ไสทอง และคณะ. (2554). โลหะวิทยาการเชื่อม. กรุงเทพฯ : บริษัทซีเอ็ดดูเคชั่นจำกัด (มหาชน)
- ชานนท์ ศรีจันทร์. (2554). การศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อความเรียบผิวในกระบวนการกัดเหล็กเครื่องมือ (AISI P20) ที่ผ่านการชุบแข็ง (วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี). กรุงเทพฯ.
- ประสงค์ ก้านแก้ว. (2556). การเปรียบเทียบวัสดุที่ใช้ทำแม่พิมพ์ฉีดที่ทำจากอลูมิเนียมเกรด A7075 กับเหล็กเกรด P20. (รายงานการวิจัย). กรุงเทพฯ: มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร.
- วิชาญ วีระชัยสุนทร และ รัตน์ บริสุทธิ์กุล. (2557). ผลของแสงเลเซอร์ YAG ที่มีต่อการเชื่อมติดด้วยเหล็กกล้าไร้สนิม กับ พอลิเอทิลีนเทอพาทาเลท. วารสารวิจัยและพัฒนา มจร, 37(3), (389-398).
- สุกัญญา เตชะไทรภพ. (2558). การทดสอบและทดลองผลกระทบของชนิดเลเซอร์พัลส์ต่อการเชื่อมในงานอัญมณีและเครื่องประดับ. (รายงานการวิจัย). นครราชสีมา : มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.
- ศิวะพงษ์ ลัมพาภิวัฒน์. (2550). การศึกษาความเป็นไปได้ในการซ่อมแม่พิมพ์ที่ทำจากเหล็กกล้าเครื่องมืองานเย็นด้วยการเชื่อมเลเซอร์. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ. กรุงเทพฯ : มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ.
- Adams, J. T., & Kwiatkowski, J. J. (1994). Nd-YAG laser welding of the fiber optic connector to the header shell on the 2SL actuator (No. MLM-3790). EG and G Mound Applied Technologies, Miamisburg, OH (United States). DOI: <https://doi.org/10.2172/10122837>
- Altan, T., Lilly, B., & Yen, Y. C. (2001). Manufacturing of dies and molds. CIRP Annals, 50(2), 404-422. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0007-8506\(07\)62988-6](https://doi.org/10.1016/S0007-8506(07)62988-6)
- Bridgum, T. (2008). How to weld. Motorbooks.
- Buddery, A., Dargusch, M. S., StJohn, D. H., Drennan, J., & Nabulsi, S. (2009, August). Laser welding of titanium and its alloys for medical applications: Current knowledge and future direction. In Materials Science Forum (Vol. 618, pp. 291-294). Trans Tech Publications Ltd. DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.618-619.291>
- Caiazza, F., & Caggiano, A. (2018). Investigation of laser welding of Ti alloys for cognitive process parameters selection. Materials, 11(4), 632. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma11040632>
- Dawes, C. (1992). Laser Welding. Abington Publishing.

- Fotovvati, B., Wayne, S. F., Lewis, G., & Asadi, E. (2018). A review on melt-pool characteristics in laser welding of metals. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1155/2018/4920718>
- Hekmatjou, H., and Naffakh-Moosavy, H. (2018). Hot cracking in pulsed Nd: YAG laser welding of AA5456. *Optics & Laser Technology*, 103, 22-32. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2018.01.020>
- Huda, Z. (2016). Welding and Joining Processes. *Mater. Process. Eng. Manuf*, 159.
- Jiang, D., Alsagri, A. S., Akbari, M., Afrand, M., & Alrobaian, A. A. (2019). Numerical and experimental studies on the effect of varied beam diameter, average power and pulse energy in Nd: YAG laser welding of Ti6Al4V. *Infrared Physics & Technology*, 101, 180-188. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.infrared.2019.06.006>
- Junkes, R., Howarth, J. L. L., Becker, D., & Bond, D. (2020). Properties evaluation of semi-crystalline and amorphous polymers injected in AISI P20 molds repaired by welding. *Matéria (Rio de Janeiro)*, 25, e-12786.
- Kapil, S., Legesse, F., Negi, S., Karunakaran, K. P., & Bag, S. (2020). Hybrid layered manufacturing of a bimetallic injection mold of P20 tool steel and mild steel with conformal cooling channels. *Progress in Additive Manufacturing*, 5, 183-198.
- Katayama, S. (2013). Introduction: fundamentals of laser welding. In *Handbook of laser welding technologies* (pp. 3-16). Woodhead Publishing. DOI: <https://doi.org/10.1533/9780857098771.1.3>
- Kramár, T., Michalec, I., & Kovacoc, P. (2012). The laser beam welding of titanium grade 2 alloy. *GRANT J*, 1, 77-79.
- Kumar, P., & Sinha, A. N. (2019). Effect of heat input in pulsed Nd: YAG laser welding of titanium alloy (Ti6Al4V) on microstructure and mechanical properties. *Welding in the World*, 63, 673-689. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40194-018-00694-w>
- Kumar, U., Chattopadhyaya, S., Das, A. K., Seikh, A. H., Sharma, S., Dwivedi, S. P., ... & Singh, S. (2023, March). Effect of pulsation in microstructure and mechanical properties of titanium alloy-annealed welded joints at different temperatures. In *Photonics* (Vol. 10, No. 4, p. 372). MDPI. DOI: <https://doi.org/10.3390/photonics1004037>
- Li, H. X., Qi, H. L., Song, C. H., Li, Y. L., & Yan, M. J. P. M. (2018). Selective laser melting of P20 mould steel: investigation on the resultant microstructure, high-temperature hardness and corrosion resistance. *Powder Metallurgy*, 61(1), 21-27. DOI: <https://doi.org/10.1080/00325899.2017.1368965>

- Poli, C. (2001). Design for manufacturing: a structured approach. Butterworth-Heinemann.
- Preciado, W. T., & Bohorquez, C. E. N. (2006). Repair welding of polymer injection molds manufactured in AISI P20 and VP50IM steels. *Journal of Materials Processing Technology*, 179(1-3), 244-250. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2006.03.101>
- Sagar H. Nikam and Neelesh Kumar Jain. (2017). Laser-Based Repair of Damaged Dies, Molds, and Gears. Springer International Publishing AG 2017, 137-159 DOI 10.1007/978-3-319-56099-1_6
- Silva, B., Pires, I., & Quintino, L. (2008, September). Welding technologies for repairing plastic injection moulds. In *Materials Science Forum* (Vol. 587, pp. 936-940). Trans Tech Publications Ltd. DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.587->
- Silva, B., Pires, I., Quintino, L., & Miranda, R. (2008). New welding procedures for repairing H13 and P20 tool steels. In *5th Luso-Mozambican International Engineering Congress*.
- Strithorn, J., Saengsan, K., (2023). The Study of Parameters Affecting Weld Bead by Welding SS400 Grade Carbon Steel Materials with Nd: YAG Laser Welding Process.
- Steen, W. M., & Mazumder, J. (2010). *Laser Material Processing*. Springer.
- Swift, K. G., & Booker, J. D. (2003). *Process selection: from design to manufacture*. Elsevier.
- Vedani, M. (2004). Microstructural evolution of tool steels after Nd-YAG laser repair welding. *Journal of Materials Science*, 39, 241-249.
- Ventrella V. (2012). Pulsed Nd: YAG Laser Applied in Microwelding. UNESP - São Paulo State University, Mechanical Engineering Department Brazil, 255-277 DOI: 10.5772/3661116
- Worldwide Guide to Equivalent Irons and Steels, 4th Ed., ASM Material Data Series, ASM International, Materials Park, OH, (2000)

ภาคผนวก
บทความทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างศึกษา

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

รายชื่อบทความที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างศึกษา

จنگล ศรีธร, เกษมสันต์ แสงสาร การศึกษาพารามิเตอร์ที่มีผลต่อแนวเชื่อมโดยการเชื่อมวัสดุ เหล็กกล้าคาร์บอนเกรด SS400 ด้วยกระบวนการเชื่อมไนโอติเมียมแย็กเลเซอร์. การประชุมวิชาการข่ายงานวิศวกรรมอุตสาหกรรม ประจำปี 2566, ชลบุรี, 11-12 พฤษภาคม 2566.

Saengsan, K., Srithorn, J., (2024). EFFECT OF PARAMETERS IN REPAIR WELDING OF PLASTIC MOLD STEEL WITH ND: YAG LASER WELDING PROCESS. Suranaree Journal of Science and Technology.



**การศึกษาพารามิเตอร์ที่มีผลต่อแนวเชื่อมโดยการเชื่อมวัสดุเหล็กกล้าคาร์บอน
เกรด SS400 ด้วยกระบวนการเชื่อมชนิดเลเซอร์ Nd:YAG**
**The study of parameters affecting weld bead by welding SS400 grade carbon steel materials
with Nd:YAG laser welding process.**

จงกล ศรีธร¹, เกษมสันต์ แสงสาร^{1*}

¹ สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

E-mail: kasemsan3631@gmail.com*

Jongkol Srithorn¹, Kasemsan Saengsan^{1*}

¹School of Industrial Engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology

E-mail: kasemsan3631@gmail.com*

บทคัดย่อ

ปัจจุบันการเชื่อมเลเซอร์ถูกนำมาใช้หลายลักษณะงาน เช่น การผลิตชิ้นส่วนยานยนต์ อากาศยาน ตลอดจนการเชื่อมอัญมณี โดยเฉพาะอย่างยิ่ง การเชื่อมซ่อมแซมพิมพ์ในอุตสาหกรรม เพื่อให้มีประสิทธิภาพในการทำงานใกล้เคียงกับแม่พิมพ์ก่อนที่จะมีการชำรุดเสียหาย โดยการศึกษาในครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อ 1) ศึกษาพารามิเตอร์ที่มีผลต่อแนวเชื่อม ได้แก่ ค่ากระแสไฟฟ้าในการเชื่อม ความถี่ของพัลส์ และระยะเวลาของพัลส์ 2) ศึกษาโครงสร้างจุลภาค และโครงสร้างจุลภาคของแนวเชื่อม โดยการศึกษาที่ใช้วัสดุเหล็กกล้าคาร์บอน เกรด SS400 ด้วยชนิดเลเซอร์ Nd:YAG กับลวดเชื่อมสเตนเลส เกรด 316 ผลจากการศึกษาโครงสร้างจุลภาคของแนวเชื่อมมีขนาดเล็กในระดับไมโครเมตร มีค่าเฉลี่ยความสูงของแนวเชื่อม เท่ากับ $332.01 \pm 36.06 \mu\text{m}$ ซึ่งมีขนาดเล็กกว่าการเชื่อมประเภทอื่น ๆ ผลจากการศึกษาโครงสร้างจุลภาคพบว่า บริเวณโลหะฐานของการเชื่อมมีโครงสร้างเป็นแบบเฟอร์ไรต์ (Ferrite) และเพิร์ลไลต์ (Pearlite) ซึ่งไม่ได้รับผลกระทบจากความร้อนในการเชื่อม จึงทำให้โครงสร้างจุลภาคของเหล็กกล้าคาร์บอน เกรด SS400 นั้นไม่มีการเปลี่ยนแปลง และพบว่าโครงสร้างจุลภาคของแนวเชื่อมมีลักษณะประกอบด้วยโครงสร้างที่หลากหลาย โดยที่บริเวณของแนวเชื่อมมีลักษณะของเกรนแบบแท่ง (Columnar grain) และ Dendritic ferrite มีขนาดที่เท่า ๆ กันกระจายในโครงสร้าง Austenite ซึ่งโครงสร้างของ Dendritic มีลักษณะที่เป็นเกรนละเอียดที่บริเวณแนวเชื่อม (Weld zone) และเกรนของ Dendritic มีการเติบโตในทิศทางแบบสุ่ม (Random direction) ซึ่งจากการศึกษาโครงสร้างนี้เมื่อนำไปเชื่อมมีค่าความแข็งเพิ่มขึ้นและสามารถต้านทานการสึกหรอได้ และผลการศึกษาพารามิเตอร์ที่มีผลต่อแนวเชื่อม พบว่าค่ากระแสไฟฟ้าในการเชื่อม ระยะเวลาของพัลส์ และความถี่ของพัลส์ต่ำ จะส่งผลให้แนวเชื่อมมีขนาดเล็ก แต่ค่ากระแสไฟฟ้าในการเชื่อม ระยะเวลาของพัลส์ และความถี่ของพัลส์สูง จะส่งผลให้แนวเชื่อมมีขนาดกว้างขึ้น สามารถใช้เป็นแนวทางในการเชื่อมซ่อมแซมพิมพ์ในอุตสาหกรรมในการศึกษาวิจัยในอนาคตในระดับต่อไป

คำสำคัญ: ชนิดเลเซอร์ Nd:YAG, โครงสร้างจุลภาค, โครงสร้างมหัพภาค, เหล็กกล้าคาร์บอน

Abstract

Nowadays, laser welding is used in a wide variety of applications, including the production of automotive parts, aircraft, and jewelry. Especially in advanced manufacturing mold repair welding, for close sufficient for the mold to be effective before it is damaged. The objectives of this study were 1) to study the parameters affecting the weld bead, such as the arc current, pulse frequency, pulse duration. 2) to study the macrostructure and the microstructure of the weld bead. In this study, SS400 grade carbon steel was used with a Nd:YAG laser and stainless-steel welding wire grade 316. The results from the study of the macrostructure of the weld bead are small at the micrometer level. The average height of the weld bead was $332.01 \pm 36.06 \mu\text{m}$, which is smaller than other types of welding. The base metal area of the weld consisted of a ferrite and pearlite structure, which was unaffected by the welding heat, according to the results of the microstructure study. As a result, the microstructure of carbon steel of the SS400 grade is unchanged. It was found that the microstructure of the weld bead consisted of a variety of structures, where the weld region is characterized by columnar grains and dendritic ferrites are evenly distributed in the austenite structure. The dendritic structure is fine grain at the weld zone and the dendritic grain grows in a random direction. According to research on this type of structure, the hardness and wear resistance of the weld line tends to increase, and the results of the study of parameters affecting the welding line found that if the welding current, Pulse Duration, and pulse frequency are low it will result in a smaller tendency of the weld line. But on the other hand, if the welding current, Pulse Duration, and pulse frequency are higher, the larger the tendency of the weld line will be. This can be used as a guideline for repairing the welding of industrial molds in future research studies.

Keywords: Nd:YAG laser process, Microstructure, Macrostructure, Carbon steel

1. บทนำ

ปัจจุบันการเชื่อมเลเซอร์ถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลาย เนื่องจากมีข้อดีคือลำแสงเลเซอร์มีขนาดเล็ก และเป็นเส้นตรง ทำให้การเชื่อมบริเวณที่ลึกและซับซ้อนได้ดี ไม่เกิดการบิดงอของชิ้นงานในบริเวณใกล้เคียงของแนวเชื่อม อีกทั้งพื้นที่ที่อิทธิพลความร้อน (Heat affected zone) มีขนาดเล็กเป็นผลให้รอยเชื่อมมีความแข็งแรง แคบและเล็ก [1,2] สำหรับประเทศไทยการเชื่อมเลเซอร์ถูกนำมาใช้หลายลักษณะงาน เช่น การเชื่อมซ่อมแม่พิมพ์ (Mold) การผลิตชิ้นส่วนยานยนต์ อากาศยาน ตลอดจนอัญมณีหรือเครื่องประดับ โดยเฉพาะวัสดุทองคำและเงินที่มีราคาสูง เป็นต้น การเชื่อมเลเซอร์ได้รับความนิยมเนื่องจากสามารถเชื่อมอัตโนมัติได้ มีความเร็วในการเชื่อมสูง บริเวณผลกระทบมีขนาดเล็ก อันตราส่วนการซึมลึกต่อความกว้างของแนวเชื่อมสูง และการเสียรูปจากความร้อนของชิ้นงานต่ำ [3,4,5] ในประเทศไทยกระบวนการเชื่อมด้วยเลเซอร์ถูกนำมาใช้หลายชนิด โดยแบ่งเป็นตามชนิดของตัวกลาง ตัวกลางที่เป็นก๊าซ เช่น อาร์กอนเลเซอร์ (Ar Laser) คาร์บอนไดออกไซด์เลเซอร์ (CO₂ laser) ชนิดที่ใช้ตัวกลางเป็นของเหลว เช่น Rhodamin 6G Lasera เป็นต้น ชนิดตัวกลางที่ใช้เป็นของแข็ง ได้แก่ Nd:YAG Laser, Ruby Laser เป็นต้น สำหรับในอุตสาหกรรมแม่พิมพ์มักใช้ชนิดไอติมแย็กเลเซอร์ (Nd:YAG) ซึ่งมีผลึกของแข็งเป็นแบบ Yttrium-aluminium garnet (Y₃Al₅O₁₂) สามารถให้แสงได้ทั้งแบบพัลส์ (Pulse) และแบบต่อเนื่อง (continuous) ในการเชื่อมแม่พิมพ์ เพราะมีข้อดีหลายประการเนื่องจากสามารถควบคุมพารามิเตอร์ของเลเซอร์อย่างแม่นยำ รวมถึงสามารถกำหนดค่าพารามิเตอร์ได้อย่างชัดเจน เช่น สามารถกำหนดค่าพารามิเตอร์เกี่ยวกับลำแสงเลเซอร์ (Laser Beam) ได้ ประกอบด้วยระยะเวลาของพัลส์ (Pulse Duration) ความถี่ของพัลส์ (Pulse Frequency) พลังเลเซอร์ (Laser power) [6,7,8] สำหรับการเชื่อมด้วยเลเซอร์นี้จะมีโครงสร้างจุลภาคในบริเวณที่มีการหลอมละลายและบริเวณที่มีผลกระทบอันเนื่องมาจากความร้อน (Heat affected zone: HAZ) จะมีโครงสร้างที่แตกต่างไปจากเนื้อโลหะเดิม (Base Metal) [2,9] ซึ่งมีประโยชน์ต่อการปรับปรุงคุณสมบัติทางกลของโลหะ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาพารามิเตอร์ที่มีผลต่อแนวเชื่อม ได้แก่ ค่ากระแสไฟฟ้าในการเชื่อม ความถี่ของพัลส์ และระยะเวลาของพัลส์ ศึกษาโครงสร้างจุลภาค และโครงสร้างจุลภาคของแนวเชื่อม โดยใช้วัสดุเหล็กกล้าคาร์บอนเกรด SS400 ด้วยชนิดไอติมแย็กเลเซอร์ กับหลอดเชื่อมสแตนเลส เกรด 316 เพื่อเป็นแนวทางในการนำไปใช้ในการเชื่อมซ่อมแม่พิมพ์ในอุตสาหกรรม ให้มีประสิทธิภาพในการทำงานใกล้เคียงกับแม่พิมพ์ก่อนที่จะมีการชำรุดเสียหาย ทำให้มีการใช้งานที่ยาวนานขึ้น และมีต้นทุนในการซ่อมบำรุงที่ต่ำ รวมถึงการศึกษาที่สามารถใช้ในการต่อยอดงานวิจัยในอนาคตต่อไป

2. วิธีการศึกษา

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาพารามิเตอร์ที่มีผลกระทบต่อลักษณะของแนวเชื่อมและโครงสร้างทางโลหะวิทยา ด้วยกระบวนการเชื่อมเลเซอร์ชนิดไอติมแย็กเลเซอร์ (Nd:YAG) โดยใช้เครื่องเชื่อมเลเซอร์ EIT Laser Schweissen System รุ่น Smart 225iL ดังแสดงได้ในรูปที่ 1 โดยเครื่องเชื่อมมีส่นประกอบ ดังนี้ ส่วนที่ 1 ประกอบด้วย 3 ส่วนย่อย

ได้แก่ 1) ส่วนวัสดุตัวกลาง (Laser medium) โดยวัสดุที่ถูกกระตุ้นแล้วให้แสงเลเซอร์ออกมาในครั้งนี้อคือ ตัวกลางที่เป็นผลึกของแข็งเป็นแบบ Yttrium-aluminium garnet (Y₃Al₅O₁₂) 2) ออปติคัลเรโซเนเตอร์ (Optical resonator) เป็นส่วนที่ทำให้เครื่องกำเนิดเลเซอร์เกิดการปล่อยแสงแบบถูกกระตุ้นซ้ำแล้วซ้ำอีก ซึ่งประกอบด้วยกระจก 2 แผ่น วางหันหน้าเข้าหากัน โดยมีตัวกลางชนิดในส่วนที่ 1 คือ YAG อยู่ และ 3) ส่วนที่กำเนิดพลังงาน (Energy source) เพื่อกระตุ้นให้เกิดอะตอม ส่วนที่ 2 คือ ระบบส่งเลเซอร์เชื่อม (Dual system CCD & Micro scope welding pattern recognition) มีทั้ง CCD จอสี และกล้องจุลทรรศน์กำลังขยายสูง ปรับระยะโฟกัสได้ ส่วนที่ 3 ระบบทัชสกรีน (Touchscreen & Graphical user interface) สำหรับสั่งงาน ควบคุมรูปร่าง และคุณภาพเลเซอร์ และส่วนที่ 4 ระบบแลกเปลี่ยนความร้อน และระบบตรวจจ่ายอุณหภูมิ อัตราการไหล และค่าความนำไฟฟ้า (External air water heat exchanger)



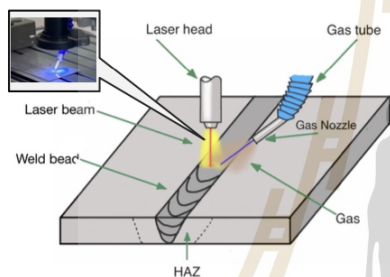
รูปที่ 1 EIT Laser Schweissen System รุ่น Smart 225iL

การศึกษาส่วนที่ 1 การศึกษาผลกระทบของค่าพารามิเตอร์ที่มีผลกระทบต่อแนวเชื่อมด้วยเครื่องเชื่อมด้วยชนิดไอติมแย็กเลเซอร์ (Nd:YAG) โดยเลือกพารามิเตอร์ที่ส่งผลกระทบต่อแนวเชื่อม ได้แก่ กระแสไฟฟ้าในการเชื่อม ระยะเวลาของพัลส์ และความถี่ของพัลส์ [6,7,8] ซึ่งผู้วิจัยได้ทำการศึกษานำร่อง (pilot study) เพื่อคัดเลือกระดับพารามิเตอร์ ผลจากการศึกษานำร่องพบว่าค่าของพารามิเตอร์ต่ำกว่าค่าที่กำหนด จะส่งผลให้ลดเชื่อมหลอมได้ไม่ดี และถ้ามากกว่าพารามิเตอร์ที่กำหนด จะเกิด spatter เยอะ ซึ่งมีผลต่อการวิเคราะห์ผลกระทบของค่าพารามิเตอร์ต่อแนวเชื่อม ผู้วิจัยจึงมีการกำหนดขอบเขตค่าพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับการเชื่อมเลเซอร์ตามการศึกษานำร่อง (pilot study) ได้แก่ กำหนดค่ากระแสไฟฟ้าในการเชื่อม (Welding Current) ซึ่งเป็นพลังงานเลเซอร์ (Laser power) ทั้งหมด 3 ค่าคือ 120, 140 และ 160 แอมแปร์ (A) โดยเพิ่มทีละ 20 แอมแปร์ ระยะเวลาของพัลส์ (Pulse Duration) ได้แก่ 3, 4 และ 5 มิลลิวินาที (ms) โดยเพิ่มทีละ 1 มิลลิวินาที ความถี่ของพัลส์ (Pulse Frequency) เป็น 5,7 และ 9 เฮิร์ต (Hz) โดยเพิ่มทีละ 2 เฮิร์ต ซึ่งสามารถสรุปค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการศึกษาได้ตามตารางที่ 1 โดยใช้การเชื่อมเลเซอร์ชนิดไอติมแย็กเลเซอร์ (Nd:YAG) ที่ใช้ผลึกของแข็งเป็นแบบ Yttrium-aluminium garnet (Y₃Al₅O₁₂) ลักษณะการเชื่อมตามรูปที่ 2 และใช้แก๊สอาร์กอนสำหรับปกคลุมแนวเชื่อมและเพื่อลดการเกิดออกไซด์ขึ้น [10,11] ด้วยอัตราการไหลของแก๊ส (Gas Flow rate) เท่ากับ 8 ลิตรต่อนาที (L/min) ใช้ความเร็วในการเชื่อมที่ 50 มิลลิเมตรต่อนาที (mm/min) รวมไปถึงการใช้วัสดุในการทดลองเป็นเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ (Low Carbon Steel) ตามมาตรฐานอุตสาหกรรมของญี่ปุ่น หรือ Japanese Industrial Standard เกรด SS400

และใช้ลวดเชื่อมสแตนเลส เกรด 316 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของลวด เท่ากับ 0.4 มิลลิเมตร (mm) มีส่วนผสมทางเคมีตามตารางที่ 2 และใช้วิธีการเชื่อมแบบเดินแนวบนชิ้นงาน (Bead-on-Plate)

ตารางที่ 1 ค่าพารามิเตอร์เกี่ยวกับการเชื่อมเลเซอร์

การศึกษา	พารามิเตอร์	ค่า
ผลกระทบของกระแสไฟฟ้าในการเชื่อม	กระแสไฟฟ้า(A)	120, 140 และ 160
	ระยะเวลาของพัลส์ (ms)	3
	ความถี่ของพัลส์(Hz)	7
ผลกระทบของความถี่ของพัลส์	กระแสไฟฟ้า(A)	140
	ระยะเวลาของพัลส์ (ms)	3
	ความถี่ของพัลส์(Hz)	5, 7 และ 9
ผลกระทบของระยะเวลาของพัลส์	กระแสไฟฟ้า(A)	140
	ระยะเวลาของพัลส์ (ms)	3, 4 และ 5
	ความถี่ของพัลส์(Hz)	7



รูปที่ 2 ลักษณะการเชื่อมด้วยเครื่องเชื่อมเลเซอร์

ตารางที่ 2 ส่วนผสมทางเคมีของลวดเชื่อมสแตนเลสเกรด 316

ธาตุ	Fe	C	Cr	Ni	Mo	Mn
ร้อยละ	68.06	0.02	16.20	11.00	2.18	1.71
ธาตุ	Si	P	S	N	Cu	
ร้อยละ	0.50	0.03	0.02	0.07	0.35	

ในการศึกษาส่วนแรก เป็นการศึกษาผลกระทบของพารามิเตอร์ 3 ค่าพารามิเตอร์ คือ กระแสไฟฟ้าในการเชื่อม ความถี่ของพัลส์ และระยะเวลาของพัลส์ที่มีต่อแนวเชื่อม ทั้งนี้ในการศึกษาได้มีการกำหนดค่าพารามิเตอร์ที่คงที่ (Fixed Parameters) ได้แก่ อัตราการไหลของแก๊ส 8 ลิตรต่อนาที (L/min) ความเร็วในการเดินแนวเชื่อม 50 มิลลิเมตรต่อนาที (mm/min) ซึ่งเป็นค่าที่ทำการศึกษาทดลองแล้วว่าลวดเชื่อมสามารถหลอมละลายได้อย่างเหมาะสม และนำไปวิเคราะห์แบบไม่ทำลายโดยการทดสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง เพื่อดูลักษณะและความกว้างของแนวเชื่อม

การศึกษาผลกระทบของกระแสไฟฟ้าในการเชื่อม (Welding Current) ต่อแนวเชื่อม โดยกำหนดค่ากระแสไฟฟ้าที่แตกต่างกัน 3 ค่า ประกอบด้วย 120, 140 และ 160 หน่วยแอมแปร์ (A) โดยกำหนดค่าระยะเวลาของพัลส์ (Pulse Duration) เท่ากันทั้งหมดคือ 3 มิลลิวินาที

(ms) และกำหนดค่าความถี่ของพัลส์ (Pulse Frequency) เท่ากันทั้งหมดเป็น 7 เฮิร์ต (Hz)

การศึกษาผลกระทบของความถี่ของพัลส์ (Pulse Frequency)

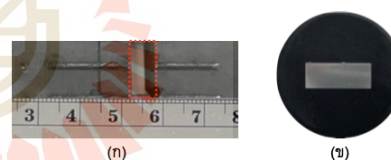
ต่อแนวเชื่อม โดยกำหนดค่าที่แตกต่างกัน 3 ค่า ประกอบด้วย 5, 7 และ 9 หน่วยเป็นเฮิร์ต (Hz) โดยกำหนดค่าระยะเวลาของพัลส์ (Pulse Duration) เท่ากันทั้งหมดคือ 3 มิลลิวินาที (ms) และกำหนดค่ากระแสไฟฟ้า (Welding Current) เท่ากันทั้งหมดเป็น 140 แอมแปร์ (A)

การศึกษาผลกระทบของระยะเวลาของพัลส์ (Pulse Duration)

ต่อแนวเชื่อม โดยกำหนดระยะเวลาของพัลส์ที่แตกต่างกัน 3 ค่า ประกอบด้วย 3, 4 และ 5 หน่วยมิลลิวินาที (ms) โดยกำหนดค่ากระแสไฟฟ้า (Welding Current) เท่ากันทั้งหมดเป็น 140 แอมแปร์ (A) และกำหนดค่าความถี่ของพัลส์ (Pulse Frequency) เท่ากันทั้งหมดเป็น 7 เฮิร์ต (Hz)

การศึกษาส่วนที่ 2 การศึกษาโครงสร้างทางโลหะวิทยา

เพื่อตรวจสอบโครงสร้างมหภาค (Macrostructure) และโครงสร้างจุลภาค (Microstructure) ของแนวเชื่อมและโลหะฐาน เมื่อเตรียมชิ้นงานที่ผ่านการเชื่อมตามค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ในส่วนที่ 1 เรียบร้อยแล้ว เลือกชิ้นงานที่มีความเหมาะสมที่สุดของแต่ละพารามิเตอร์ไปตัดตามขวางของแนวเชื่อม (Cross-sectional) ด้วยเครื่อง EDM Wire cut รุ่น Mitsubishi MV1200R Wire EDM ดังแสดงได้ใน รูปที่ 3(ก) จากนั้นจึงนำชิ้นงานไปขึ้นเรือน (Mounting) ตามรูปที่ 3(ข) และนำชิ้นงานที่ผ่านการขึ้นเรือนแล้วไปขัดหยาบ (Grinding process) ด้วยกระดาษทรายเบอร์ 80, 100, 320, 400, 600, 800, 1000 และ 1,200 หลังจากนั้นจึงนำชิ้นงานขัดเงา (Polishing process) ด้วยผ้าสักหลาดและผงอะลูมินา ขนาด 0.3 ไมครอน และทำการกัดผิว (Etching) ด้วย กรด 5% Nitral โดยกัดเป็นเวลา 10 วินาที แล้วล้างออกด้วยเอทิลแอลกอฮอล์ และเป่าลมให้แห้งจึงนำชิ้นงานไปตรวจสอบโครงสร้างทางโลหะวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์ยี่ห้อ Carl Zeiss รุ่น Axio Scope Mat เพื่อศึกษาโครงสร้างมหภาค (Macrostructure) และโครงสร้างจุลภาค (Microstructure) ของแนวเชื่อมและโลหะฐาน



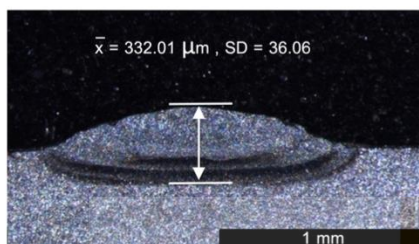
รูปที่ 3 (ก) ชิ้นงานที่ตัดด้วยเครื่อง EDM wire cut
(ข) ชิ้นงานที่ผ่านการขึ้นเรือน (Mounting)

3. ผลการศึกษา

3.1. การศึกษาโครงสร้างมหภาค (Macrostructure)

จากการศึกษาโครงสร้างมหภาคของชิ้นงาน เมื่อนำชิ้นงานที่ได้ไปผ่านกระบวนการทดสอบตามขั้นตอนต่าง ๆ แล้ว และนำชิ้นงานไปตรวจสอบโครงสร้างทางโลหะวิทยาดูด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง เพื่อศึกษาโครงสร้างมหภาค (Macrostructure) ของแนวเชื่อม จะได้ภาพโครงสร้างมหภาคของแนวเชื่อม ค่าเฉลี่ยความสูงทุกแนวเชื่อม ทุกพารามิเตอร์คือ 332.01 μm ค่าต่ำสุดเท่ากับ 259.68 μm ในส่วนของ

ค่าที่สูงที่สุดคือ 412.84 μm และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 36.06 μm ดังแสดงในรูปที่ 4



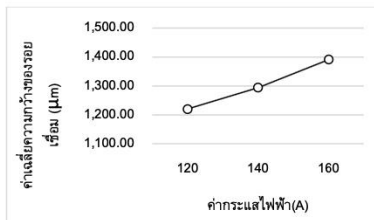
รูปที่ 4 โครงสร้างมหภาคที่ผ่านการตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์

3.1.1 การศึกษาผลกระทบของกระแสไฟฟ้าในการเชื่อม (Welding Current) ต่อแนวเชื่อม

ผลการศึกษาโดยใช้ค่ากระแสไฟฟ้าในการเชื่อมที่มีความแตกต่างกัน คือ 120, 140 และ 160 แอมแปร์ (A) และกำหนดค่าระยะเวลาของพัลส์ เท่ากับ 3 มิลลิวินาที (ms) และค่าความถี่ของพัลส์ เท่ากับ 7 เฮิร์ต (Hz) ด้วยอัตราการไหลของแก๊สอาร์กอน (Gas Flow rate) เท่ากับ 2 ลิตรต่อนาที (L/min) ใช้ความเร็วในการเชื่อมที่ 50 มิลลิเมตรต่อนาที (mm/min) ดังแสดงในรูปที่ 5 และลักษณะแนวเชื่อมและโครงสร้างจุลภาคตามตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ลักษณะแนวเชื่อมและโครงสร้างจุลภาคจากการศึกษาผลกระทบของกระแสไฟฟ้าในการเชื่อม

กระแสไฟฟ้าในการเชื่อม (A)	Bead on plate	โครงสร้างมหภาค (Macrostructure)
120		
140		
160		

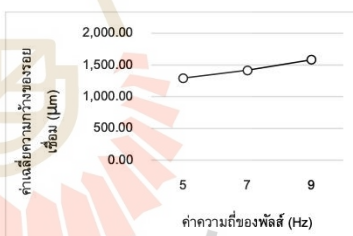


รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างความกว้างของแนวเชื่อมกับค่ากระแสไฟฟ้า

จากการศึกษาพบว่า เมื่อมีการเพิ่มกระแสไฟฟ้าในการเชื่อม ขนาดความกว้างของแนวเชื่อมมีแนวโน้มที่กว้างขึ้นเมื่อกระแสไฟฟ้าในการเชื่อมเพิ่มขึ้น โดยที่กระแสไฟฟ้าในการเชื่อม 120 A ขนาดความกว้างของแนวเชื่อมเท่ากับ 1,220.14 μm และเมื่อเพิ่มกระแสไฟฟ้าในการเชื่อมเป็น 140 จะได้ขนาดความกว้างของแนวเชื่อม 1,293.76 μm และเมื่อเพิ่มกระแสไฟฟ้าในการเชื่อมเป็น 160 A จะได้ขนาดความกว้างของแนวเชื่อมที่กว้างที่สุดคือ 1,390.84 μm

3.1.2 การศึกษาผลกระทบของความถี่ของพัลส์ (Pulse Frequency) ต่อแนวเชื่อม

ผลการศึกษาโดยใช้ค่าความถี่ของพัลส์ที่มีความแตกต่างกัน คือ 5, 7 และ 9 เฮิร์ต (Hz) และกำหนดค่าระยะเวลาของพัลส์ เท่ากับ 3 มิลลิวินาที (ms) และค่ากระแสไฟฟ้าในการเชื่อม (Welding Current) เท่ากันทั้งหมดเป็น 140 แอมแปร์ (A) ด้วยอัตราการไหลของแก๊สอาร์กอน (Gas Flow rate) เท่ากับ 2 ลิตรต่อนาที (L/min) ใช้ความเร็วในการเชื่อมที่ 50 มิลลิเมตรต่อนาที (mm/min) ดังแสดงในรูปที่ 6

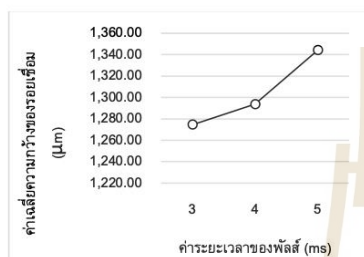


รูปที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างความกว้างของแนวเชื่อมกับค่าความถี่ของพัลส์

จากการศึกษาพบว่า เมื่อมีการเพิ่มความถี่ของพัลส์ ขนาดความกว้างของแนวเชื่อมมีแนวโน้มที่กว้างขึ้นเมื่อความถี่ของพัลส์เพิ่มขึ้น โดยที่ความถี่ของพัลส์ 5 Hz ขนาดความกว้างของแนวเชื่อมเท่ากับ 1,293.76 μm และเมื่อเพิ่มความถี่ของพัลส์เป็น 7 Hz จะได้ขนาดความกว้างของแนวเชื่อม 1,417.15 μm และเมื่อเพิ่มความถี่ของพัลส์เป็น 9 Hz จะได้ขนาดความกว้างของแนวเชื่อมที่กว้างที่สุดคือ 1,582.06 μm

3.1.3 การศึกษาที่ 3 การศึกษาผลกระทบของระยะเวลาของพัลส์ (Pulse Duration) ต่อแนวเชื่อม

ผลการศึกษาโดยใช้ค่าระยะเวลาของพัลส์ที่มีความแตกต่างกัน คือ 3, 4 และ 5 มิลลิวินาที (ms) ค่าความถี่ของพัลส์ เท่ากับ 7 เฮิร์ต ค่ากระแสไฟฟ้าในการเชื่อม (Welding Current) เท่ากันทั้งหมดเป็น 140 แอมแปร์ (A) ด้วยอัตราการไหลของแก๊สอาร์กอน (Gas Flow rate) เท่ากับ 2 ลิตรต่อนาที (L/min) ใช้ความเร็วในการเชื่อมที่ 50 มิลลิเมตรต่อนาที (mm/min) ดังแสดงในรูปที่ 7

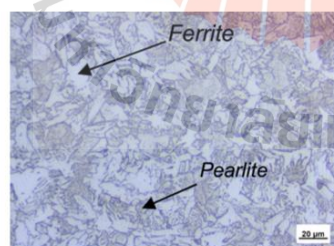


รูปที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่างความกว้างของแนวเชื่อมกับค่าระยะเวลาของพัลส์

การศึกษพบว่า เมื่อมีการเพิ่มระยะเวลาของพัลส์ ขนาดความกว้างของแนวเชื่อมมีแนวโน้มที่กว้างขึ้นเมื่อระยะเวลาของพัลส์เพิ่มขึ้น โดยที่ระยะเวลาของพัลส์ 3 ms ขนาดความกว้างของแนวเชื่อมเท่ากับ 1,274.50 μm และเมื่อเพิ่มระยะเวลาของพัลส์ 4 ms จะได้ขนาดความกว้างของแนวเชื่อม 1,293.76 μm และเมื่อเพิ่มระยะเวลาของพัลส์เป็น 5 ms จะได้ขนาดความกว้างของแนวเชื่อมที่กว้างที่สุดคือ 1,344.12 μm

3.2 การศึกษาโครงสร้างจุลภาค (Microstructure)

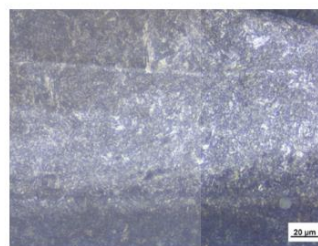
จากการทดลองในการศึกษาโครงสร้างจุลภาค (Microstructure) ของชิ้นงาน เมื่อนำชิ้นงานที่ได้ไปผ่านกระบวนการทดสอบตามขั้นตอนต่างๆ แล้ว และนำชิ้นงานไปตรวจสอบโครงสร้างทางโลหะวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงเพื่อศึกษาโครงสร้างจุลภาค (Microstructure) ของแนวเชื่อมและโลหะฐาน จะได้ภาพโครงสร้างจุลภาค (รูปที่ 8) เป็นโครงสร้างของโลหะฐาน (Base Metal) เหล็กกล้าคาร์บอนเกรด SS400



รูปที่ 8 โครงสร้างจุลภาคของโลหะฐาน (Base Metal)

จากการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคของโลหะฐาน (Base Metal) เหล็กกล้าคาร์บอนเกรด SS400 พบว่าลักษณะโครงสร้างจุลภาคประกอบด้วย โครงสร้างเฟอร์ไรต์ (Ferrite) และเพิร์ลไลต์ (Pearlite) เนื่องจากเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำเกรด SS400 มีปริมาณคาร์บอนประมาณ 0.13 - 0.18% ซึ่งมีคาร์บอนน้อยกว่า 0.8% จึงเป็นเหล็กกล้าประเภทเหล็กกล้าไฮโปยูเทคตอยด์ (Hypo eutectoid) [12] โดยบริเวณโลหะฐาน (Base Metal) ไม่ได้รับผลกระทบจากความร้อนในการเชื่อม จึงทำให้โครงสร้างจุลภาคของเหล็กกล้าคาร์บอนเกรด SS400 นั้นไม่มีการเปลี่ยนแปลง [13]

และจากการศึกษาโครงสร้างจุลภาคของบริเวณแนวเชื่อม เพื่อดูลักษณะของเกรน (Grain) ของโลหะเชื่อม ผ่านกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง ที่มีกำลังขยาย 20 เท่า ดังแสดงในรูปที่ 9



รูปที่ 9 โครงสร้างจุลภาคของแนวเชื่อม

จากการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคบริเวณแนวเชื่อมที่เชื่อมด้วยลวดเชื่อมสเตนเลสเกรด 316 พบว่าโครงสร้างจุลภาคของแนวเชื่อมมีลักษณะประกอบด้วยโครงสร้างที่หลากหลาย โดยที่บริเวณของแนวเชื่อมมีลักษณะของเกรนแบบแท่ง (Columnar grain) และ Dendritic ferrite มีขนาดที่เท่า ๆ กันกระจายในโครงสร้าง Austenite ซึ่งโครงสร้างของ Dendritic มีลักษณะที่เป็นเกรนละเอียดที่บริเวณแนวเชื่อม (Weld zone) และเกรนของ Dendritic มีการเติบโตในทิศทางแบบสุ่ม (Random direction) ซึ่งจากการศึกษา โครงสร้างนี้มีแนวโน้มให้แนวเชื่อมมีความต้านทานแรงดึงเพิ่มขึ้นและสามารถต้านทานการสึกหรอได้ [14,15]

4. สรุปผลการศึกษาและอภิปรายผล

จากการศึกษาพารามิเตอร์ที่มีผลต่อแนวเชื่อมโดยการเชื่อมวัสดุเหล็กกล้าคาร์บอนด้วยเลเซอร์ Nd:YAG Laser โดยใช้โลหะฐาน SS400 กับลวดเชื่อมสเตนเลสเกรด 316 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของลวดเท่ากับ 0.4 มิลลิเมตรโดยผ่านกรรมวิธีในการเตรียมชิ้นงานเพื่อตรวจสอบโครงสร้างทางมหภาคและจุลภาคของชิ้นงาน ซึ่งเป็นการศึกษาเบื้องต้น โดยพิจารณาแยกแต่ละพารามิเตอร์ สรุปผล ดังนี้ การศึกษาผลกระทบของกระแสไฟฟ้าในการเชื่อม (Welding Current) ต่อแนวเชื่อม จากการศึกษพบว่า เมื่อมีการเพิ่มกระแสไฟฟ้าในการเชื่อม ขนาดความกว้างของแนวเชื่อมมีแนวโน้มที่กว้างขึ้นเมื่อกระแสไฟฟ้าในการเชื่อมเพิ่มขึ้น โดยที่กระแสไฟฟ้าในการเชื่อม 120A ขนาดความกว้างแนวเชื่อมเท่ากับ 1,220.14 μm และเมื่อเพิ่มกระแสไฟฟ้าในการเชื่อมเป็น 140 A จะได้ขนาดความกว้างของแนวเชื่อม 1,293.76 μm และเมื่อเพิ่มกระแสไฟฟ้าในการเชื่อมเป็น 160 A จะได้ขนาดความกว้างของแนวเชื่อมที่กว้างที่สุดคือ 1,390.84 μm

การศึกษาผลกระทบของความถี่ของพัลส์ (Pulse Frequency) ต่อแนวเชื่อม จากการศึกษาพบว่า เมื่อมีการเพิ่มความถี่ของพัลส์ในการเชื่อม ขนาดความกว้างของแนวเชื่อมมีแนวโน้มที่กว้างขึ้นเมื่อความถี่ของพัลส์ในการเชื่อมเพิ่มขึ้น โดยที่ความถี่ของพัลส์ในการเชื่อม 5 Hz ขนาดความกว้างของแนวเชื่อมเท่ากับ 1,293.76 μm และเมื่อเพิ่มความถี่ของพัลส์ในการเชื่อมเป็น 7 Hz จะได้ขนาดความกว้างของแนวเชื่อม 1,417.15 μm และเมื่อเพิ่มกระแสไฟฟ้าในการเชื่อมเป็น 9 Hz จะได้ขนาดความกว้างของแนวเชื่อมที่กว้างที่สุดคือ 1,390.84 μm ซึ่งมีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้น

การศึกษาผลกระทบของระยะเวลาของพัลส์ (Pulse Duration) ต่อแนวเชื่อม จากการศึกษาพบว่า เมื่อมีการเพิ่มระยะเวลาของพัลส์ในการเชื่อม ขนาดความกว้างของแนวเชื่อมมีแนวโน้มที่กว้างขึ้นเมื่อระยะเวลาของพัลส์ในการเชื่อมเพิ่มขึ้น โดยที่ระยะเวลาของพัลส์ ในการเชื่อม 3 ms ขนาดความกว้างของแนวเชื่อมเท่ากับ 1,274.50 μm และเมื่อเพิ่มระยะเวลาของพัลส์ในการเชื่อมเป็น 4 ms จะได้ขนาดความกว้างของแนวเชื่อม 1,293.76 μm และเมื่อเพิ่มกระแสไฟฟ้าในการเชื่อมเป็น 9 ms จะได้ขนาดความกว้างของแนวเชื่อมที่กว้างที่สุดคือ 1,344.12 μm ซึ่งมีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้น

จากการศึกษาดังกล่าวสรุปได้ว่าถ้ากระแสไฟฟ้าในการเชื่อมระยะเวลาของพัลส์ และความถี่ของพัลส์ต่ำ จะส่งผลให้แนวโน้มของแนวเชื่อมมีขนาดเล็ก แต่ถ้ากระแสไฟฟ้าในการเชื่อม ระยะเวลาของพัลส์ และความถี่ของพัลส์สูง จะส่งผลให้แนวโน้มของแนวเชื่อมมีขนาดกว้างขึ้น ซึ่งสามารถใช้เป็นแนวทางในการวิจัยด้านการเชื่อมเชื่อมแม่พิมพ์ในอนาคตต่อไป

ในการทดสอบโครงสร้างทางจุลภาคพบว่า โครงสร้างของโลหะฐาน SS400 เป็นโครงสร้างเฟอร์ไรต์ (Ferrite) และเพิร์ลไลท์ (Pearlite) ซึ่งมีคาร์บอนน้อยกว่า 0.8% โดยบริเวณโลหะฐาน (Base Metal) ไม่ได้รับผลกระทบจากความร้อนในการเชื่อม จึงทำให้โครงสร้างจุลภาคของเหล็กกล้าคาร์บอนเกรด SS400 นั้นไม่มีการเปลี่ยนแปลงจากการทดสอบด้วยการเชื่อมเลเซอร์ พบว่าโครงสร้างจุลภาคของแนวเชื่อมมีลักษณะประกอบด้วยโครงสร้างที่หลากหลาย โดยที่บริเวณของแนวเชื่อมมีลักษณะของเกรนแบบแท่ง (Columnar grain) และ Dendritic ferrite มีขนาดที่เท่า ๆ กันกระจายในโครงสร้าง Austenite ซึ่งโครงสร้างของ Dendritic มีลักษณะที่เป็นเกรนละเอียดที่บริเวณแนวเชื่อม (Weld zone) และเกรนของ Dendritic มีการเติบโตในทิศทางแบบสุ่ม (Random direction) ซึ่งจากการศึกษา โครงสร้างนี้มีแนวโน้มให้แนวเชื่อมมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้นและสามารถต้านทานการสึกหรอได้

เอกสารอ้างอิง

- [1] Adams, John T., and Joseph J. Kwiatkowski. Nd-YAG laser welding of the fiber optic connector to the header shell on the 2SL actuator. No. MLM-3790. EG and G Mound Applied Technologies, Miamisburg, OH (United States), 1994.
- [2] F. Behzad, F. W. Steven, L. Gladius and A. Ebrahim, A Review on Melt-Pool Characteristics in Laser Welding of Metals, Adv. Mater. Sci. Eng., 2018, 1-18.
- [3] Sharma R S & Molian P (2011) Weldability of advanced high strength steels using an Yb: YAG disk laser. Journal of

Materials Processing Technology, 211(11), 1888–1897. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2011.06.009

- [4] Yuce C, Tutar M, Karpat F, Yavuz N & Tekin G (2017). The effect of process parameters on the microstructure and mechanical performance of fiber laser-welded AA5182 aluminium alloys. Strojinski Vestnik/Journal of Mechanical Engineering, 63, 510–518.
- [5] Mohammadpour M, Yazdian N, Yang G, Wang H P, Carlson B & Kovacevic, R (2018). Effect of dual laser beam on dissimilar welding-brazing of aluminum to galvanized steel. Optics and Laser Technology, 98, 214–228. DOI: 10.1016/j.optlastec.2017.07.035
- [6] Hekmatjou H & Naffakh-Moosavy H (2018). Hot cracking in pulsed Nd:YAG laser welding of AA5456. Optics and Laser Technology, 103, 22–32. DOI: 10.1016/j.optlastec.2018.01.020
- [7] B. Alex, D. Matt, S. David, D. John, N. Samih, Laser Welding of Titanium and its Alloys for Medical Applications: Current Knowledge and Future Direction, Mater. Sci. Forum, 618-619, 2009, 291- 294.
- [8] J. Dezhil, S.A. Ali, A. Mohammad, A. Masoud, A.A. Abdulrahman, Numerical and Experimental Studies on the Effect of Varied Beam Diameter, Average Power and Pulse Energy in Nd: YAG Laser Welding of Ti6Al4V, Infrared Phys. Technol., 101, 2019, 180-18
- [9] S. Katayama, in S. Katayama (Ed), Introduction: Fundamentals of Laser Welding, Handbook of Laser Welding Technologies, Woodhead Publishing Limited, India, 2013, 3-16.
- [10] C. Fabrizia, C. Alessandra, Investigation of Laser Welding of Ti Alloys for Cognitive Process Parameters Selection, Mater., 11, 632, 2018, 1-11.
- [11] K. Tomáš, M. Ivan, K. Pavel, The Laser Beam Welding of Titanium Grade 2 Alloy, Grant J., 2012, 77-79.
- [12] ณรงค์ศักดิ์ ธรรมโชติ. โลหะวิทยา. พิมพ์ครั้งที่ 2 กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. 2560.
- [13] เอกราช ชื่นสัน. การศึกษาการเชื่อมพอกผิวด้วยลวดเชื่อม Alloy C276 โดยกระบวนการเชื่อมพัลส์เลเซอร์. วิทยานิพนธ์มหาบัณฑิต. 2562. 69-74
- [14] Alali, M., Todd, I., & Wynne, B. P. (2017). Through-thickness microstructure and mechanical properties of electron beam welded 20 mm thick AISI 316L austenitic stainless steel. *Materials & Design*, 130, 488-500.
- [15] Wu, D., Liang, X., Li, Q., & Jiang, L. (2010). Laser rapid manufacturing of stainless steel 316L/Inconel718 functionally graded materials: Microstructure evolution and mechanical properties. *International Journal of Optics*, 2010

EFFECT OF PARAMETERS IN REPAIR WELDING OF PLASTIC MOLD STEEL WITH Nd: YAG LASER WELDING PROCESS

Kasemsan Saengsan¹, and Jongkol Srithorn^{1*}

Received:; Revised:; Accepted:

Abstract

Laser welding is widely used across various industries, including automotive, aerospace, and jewelry manufacturing. Mold repair welding, in particular, has become a critical focus, aiming to efficiently restore molds to their original state before any damage occurs. This study investigates the parameters that influence weld integrity, specifically pulse frequency and pulse duration, while examining the macro and microstructural aspects of the welds and evaluating their hardness values. By employing a combination of plastic injection mold steel (AISI P20) and Nd: YAG laser welding, the research reveals that increasing these parameters expanded the weld bead, with optimal settings identified as a pulse frequency of 7 Hz and a pulse duration of 5, 6, and 7 ms, ensuring comprehensive welds while minimizing incomplete fusion defects. The heat input ranged from 116 to 468.3 J/mm, directly correlating with pulse duration and pulse frequency. The welds exhibited acicular martensitic structures, with coarse grains in the weld metal (WM) and fine grains in the heat-affected zone (HAZ) due to rapid cooling, resulting in increased hardness. The hardness values ranged from 320.4 to 413 HV.

Keywords: Nd: YAG laser welding process; Plastic mold steel; AISI P20; Repair welding

Introduction

The mold industry is a crucial supporting sector that caters to almost every type of manufacturing industry, as various manufacturing processes rely on molds to shape and define the quality and size of products. A well-made mold enables manufacturing industries to produce parts rapidly and in large quantities with standardized shapes and sizes, reducing losses incurred during manufacturing and enhancing competitiveness (Poli., 2001; Altan *et al.*, 2001; Swift and Booker., 2003). Among the different materials used for molds, P20 steel is widely employed for making plastic injection molds due to its desirable properties, including rapid resistance to temperature changes, high strength at elevated temperatures, toughness, and wear resistance. However, prolonged usage of P20 steel molds

can lead to deterioration, resulting in cracking, chipping, or surface damage, rendering the mold unusable.

Repair welding of molds using the same material (P20) via laser welding is an effective method to restore molds to near-original condition. Laser welding offers several advantages, including the capability for automated welding, high welding speeds, minimal heat-affected zones, and the ability to weld in deep and intricate areas without distorting nearby workpieces (Adams *et al.*, 1994; Fotovvati *et al.*, 2018; Katayama., 2013; Dawes., 1992; Steen and Mazumder., 2010). In Thailand, laser welding is extensively used in mold repair, automotive component

manufacturing, and even jewelry or accessory production (Bridgum., 2008; Huda., 2016).

Despite its widespread use, there is a need for detailed studies on the specific parameters that influence weld integrity in the laser welding process, particularly for repair welding of plastic injection molds made of P20 steel. Previous research has primarily focused on the general advantages of laser welding and its applications in various industries. However, there is limited information on the optimal welding parameters, such as pulse frequency and pulse duration, their effects on the weld's macrostructural and microstructural characteristics, and the resulting hardness values.

This study aims to address this research gap by investigating the effects of pulse frequency and pulse duration on weld integrity using Nd: YAG laser welding of AISI P20 steel. By examining both macrostructural and microstructural aspects of the welds and evaluating their hardness values, this research seeks to identify the optimal welding parameters that ensure comprehensive and defect-free welds. The findings of this study will provide valuable insights and guidelines for effectively utilizing these parameters in repairing plastic injection molds, ensuring operational efficiency comparable to or close to the original condition before the damage occurred. Additionally, this research builds on previous work by providing a detailed analysis of the influence of specific laser welding parameters, thus contributing to the broader body of knowledge in the field of laser welding technology.

Materials and Methods

Experimental Setup

The Nd: YAG laser welding process was utilized to repair plastic injection mold steel (AISI P20). The experimental setup is depicted in Figure 1. The Nd: YAG laser emits pulsed light using the generated heat to melt the material. The laser operates in a square pulsed wave mode, with a nominal output power of 200 W and a peak power of 9 kW. The pulse duration range is 0.5-20 ms, and the pulse frequency range is 1-50 Hz. Argon gas was used as a shielding gas to reduce oxidation with a flow rate of 8 L/min. The welding speed was set to 50 mm/min (as shown in Table 1).

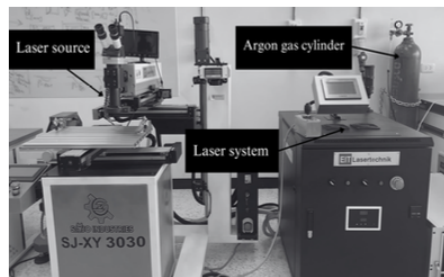


Figure 1. Experimental setup of Nd: YAG laser welding

Table 1. Experimental condition of the laser Welding

Specification	Value
Laser mode	Square pulsed wave
Nominal output Power (W)	200
Peak power (kW)	9
Pulse duration range (ms)	0.5-20
Pulse frequency range (Hz)	1-50 Hz
Shielding gas	Argon
Gas flow rate (L/min)	8
Welding speed (mm/min)	50

Materials

The base material used was plastic mold steel (AISI P20) with workpiece dimensions of 100 x 200 mm and 10 mm thickness. The chemical compositions were analyzed by an Energy Dispersive X-ray Fluorescence Spectrometer (ED-XRF) and are listed in Table 2. P20-grade steel welding wire with a diameter of 0.6 mm was used for welding. ED-XRF also analyzed the chemical composition of the welding wire

Table 2. Chemical Composition of Plastic Injection Mold Steel (AISI P20)

Plastic Injection Mold Steel AISI P20 (%mass)	
Aluminum (Al)	0.84
Vanadium(V)	0.03
Chromium (Cr)	1.37
Manganese (Mn)	1.13
Iron (Fe)	96.2
Nickel (Ni)	0.30
Copper (Cu)	0.09
Molybdenum (Mo)	0.20
Welding wire grade P20 (%mass)	
Aluminum (Al)	1.29
Vanadium(V)	0.04
Silicon (Si)	1.18
Manganese (Mn)	1.43
Iron (Fe)	89.27
Nickel (Ni)	0.59

Copper (Cu)

6.20

Furthermore, the research methodology was divided into several parts according to the research objectives as follows: 2.1 Parameter value investigation affecting welds, 2.2 Study of the metallurgical structure of welds 2.3 Heat input Calculation 2.4 Testing the hardness of the weld, and 2.5 Analysis of the effects of parameters on welds using statistical methods.

2.1 Study of parameters affecting welds

Pulse duration (PD) and pulse frequency (PF) were varied. Preliminary experiments indicated that parameter values below the specified range did not melt the welding wire while exceeding the range was limited by machine constraints. Based on these findings, the study was conducted with PD values of 5, 6, and 7 ms and PF values of 5, 7, and 9 Hz (Srithorn and Saengsan., 2023).

Bead-on-Plate Welding: The bead-on-plate welding method was used, as depicted in Figure 2. An appropriate laser welding machine current of 160 A was set for effective melting. Argon gas was used as a shielding gas with a flow rate of 8 L/min, and the welding speed was 50 mm/min.

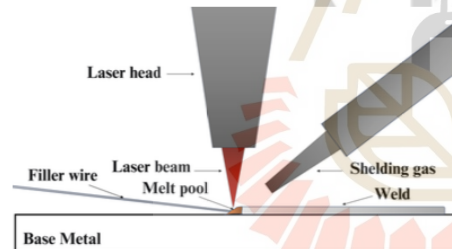


Figure 2. Bead-on-plate welding with P20 steel

2.2 Study of the metallurgical structure of the welding

Welded specimens were prepared, cut along the cross-section using an EDM wire cut machine, mounted, and polished. Polishing was done using alumina powder with a particle size of 0.3 microns, followed by etching with 2% Nital acid solution (Silva et al., 2008). The macrostructure and microstructure of the welds were examined using optical microscopy and scanning electron microscopy (SEM).

For the % dilution, which indicates the extent to which the original metal area mixes with the welding wire, increasing dilution alters the properties of the welded metal area. Dilution

is calculated using Equation (1) and shown in Figure 3

$$\% \text{ dilution} = \frac{B}{(A+B)} (100) \quad (1)$$

Where: A represents the area of the molten parent plate, and B represents the area enclosed by the bottom line.

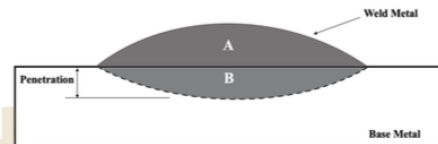


Figure 3. The dilution of the metal

2.3 Heat Input Calculation

The heat input calculation in this research, which involves welding with Nd: YAG laser welding process, is represented by Equation (2) (Kumar and Sinha, 2019). The current value is measured using a clamp meter, in units of amperes (A).

$$HI = \left(\frac{P \times T \times f}{V} \right) \times \eta \quad (2)$$

Where: HI is the heat input into the workpiece (J/mm), P is the peak power (kW), T is the pulse duration (ms), f is the pulse frequency (Hz), V is the scanning speed (mm/s), and η is the welding efficiency, assumed to be 1 (or 100%) for practical purposes and to simplify calculations.

2.4 Testing the hardness of the weld.

Vickers hardness tests were conducted using an FM-800 Vickers hardness tester. A pyramidal diamond-shaped indenter with an angle of 136° was used to apply a test load of 1000 gf with a dwell time of 10 seconds. Indentations were made at six points along the weld seam to create a microhardness profile, starting from the HAZ, moving to the WM, and descending to the BM, with 100 μ m between points (Figure 4).

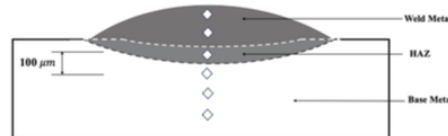


Figure 4. The position of the hardness test points.

The micro vickers hardness test aims to compare the hardness of the weld metal (WM), heat-affected zone (HAZ), and base metal (BM) using different experimental parameters.

2.5 Statistical analysis of parameter effects on welding characteristics

Statistical parameter analysis using Minitab software to analyze statistical data, demonstrating the relationship between each variable in welding. It analyzes the 27 factorial experiments at a confidence level of 95% ($P\text{-Value} < .05$), considering pulse duration factors of 5, 6, and 7 ms and frequency factors of 5, 7, and 9. The analysis is conducted based on Pareto Chart graphs showing whether Factor A (pulse duration) influences Factor B (pulse frequency), along with an examination of Normal Probability Plot graphs for data distribution. Versus Fits graphs examine data dispersion from the mean, indicating data variability as a measure of data deviation. Histogram and versus-order graphs also observe continuous distribution patterns, assessing data independence, as shown in Figure 5.

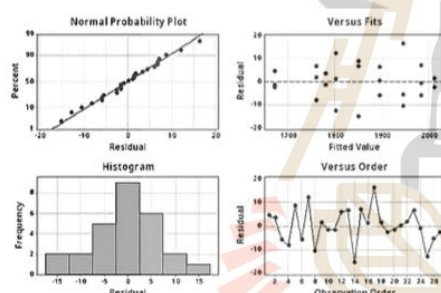


Figure 5. Residual Plots Analysis Graph

By following this detailed methodology, the study aimed to investigate the optimal welding parameters for repairing plastic injection molds made of AISI P20 steel using the Nd: YAG laser welding process. The experimental setup and procedures were designed to ensure reproducibility and accuracy in the results.

Results and Discussion

3.1 Impact of parameters on weld profile

Figure 6 displays weld beads obtained with different pulse durations (PD) and pulse frequencies (PF) using an Nd: YAG laser welding process. Each sample demonstrates the

impact of varying these parameters on the weld characteristics.

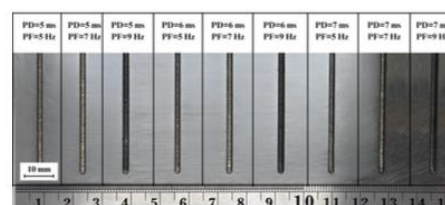


Figure 6. Shows the welding characteristics obtained from pulse duration (PD) and pulse frequency (PF)

The effect of welding parameters on the weld was determined by setting parameters and calculating the average weld width, as shown in Figure 7. The average weld height was 437 μm , while the average weld width was determined to be 1,855 μm , and the average % dilution of the metal was calculated to be 32.43% according to Equation (1).

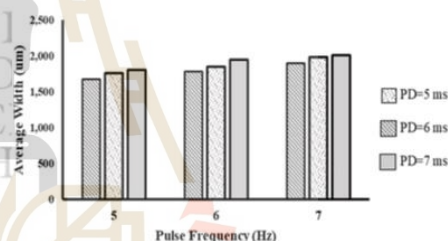


Figure 7. The average width of the weld for each parameter

Table 3. Bead-on-plate welding and macrostructure of complete welds

Parameters	Bead-on plate	Macrostructure
PD=5 ms PF=7 Hz		
PD=6 ms PF=7 Hz		
PD=7 ms PF=7 Hz		

The average width of the weld for each parameter is observed. It is found that increasing the pulse duration (PD) and pulse frequency (PF) leads to a corresponding increase in the weld width (Srithorn and Saengsan, 2023), as shown in Figure 7. An example of the bead-on-plate weld characteristics using laser welding and similar macrostructure features is shown in Table 3. Moreover, there is a close similarity in the average %dilution, with an average of 32.43 and a standard deviation of 2.79.

Increasing Pulse Duration (PD) leads to wider weld beads due to the higher amount of energy delivered per pulse, resulting in more material melting. Similarly, increasing Pulse Frequency (PF) also results in wider weld beads as the number of pulses per second increases, thus increasing the overall heat input. The combined effect of higher pulse duration and higher pulse frequency maximizes the energy input, resulting in the widest weld beads. The image shows that both pulse duration and frequency significantly influence the weld characteristics, and their effects are cumulative.

Macrostructure analysis of the welds was conducted using a microscope, providing magnified images of the weld structure produced by various welding parameters, as shown in Figure 8, magnified 50X. This image reveals the regions of the Weld Metal (WM), Heat-Affected Zone (HAZ), and Base Metal (BM). The HAZ appears narrower and smaller than the weld metal region (Adams *et al.*, 1994; Fotovvati *et al.*, 2018; Katayama *et al.*, 2013).

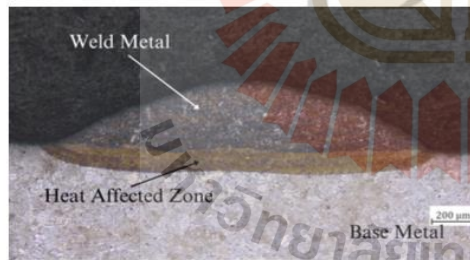


Figure 8. Macrostructure of the workpiece with a pulse duration of 7 ms and pulse frequency of 7 Hz, examined under a microscope.

While examining the macrostructure under a microscope, researchers observed welds. They found that these complete welds occurred when the pulse duration (PD) was set between 5 and 7 ms and the pulse frequency (PF) was 7 Hz. Furthermore, defective welds were observed to occur at parameters where the pulse frequency was set at 5 and 9 Hz, indicating incomplete fusion defects. (Silva *et al.*, 2008;

Vedani.,2004), as shown in Figure 9. These parameters are inappropriate and will not be considered in the weld hardness testing.

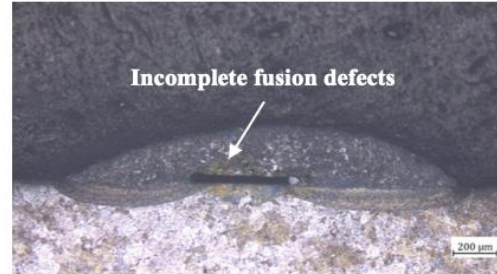


Figure 9. The characteristics of welds with incomplete fusion defects.

3.2 Effects of heat input on welded workpieces

When calculating the heat input into the welded workpieces, with parameters related in Table 4, it is found that the heat input for all nine experiments ranges between 116.0 – 468.3 J/mm. It is observed that there is a direct correlation with both pulse duration and pulse frequency, where an increase in these parameters increases heat input. Therefore, the parameters affecting laser welding are pulse duration and pulse frequency. In this experiment, the optimal welding conditions yield a heat input of 204.8 J/mm (PD=5, PF=7), 262.5 J/mm (PD=6, PF=7), and 329.1 J/mm (PD=7, PF=9), respectively.

Table 4. Heat input values corresponding to various parameters

No	Peak power (kW)	Scanning speed (mm/s)	PD (ms)	PF (Hz)	Heat input (J/mm)
1	5.3	1.2	5	5	116
2	6.7	1.2	5	7	204.8
3	7.5	1.2	5	9	295.9
4	5.7	1.2	6	5	150.0
5	7.2	1.2	6	7	262.5
6	8.2	1.2	6	9	387.5
7	6.2	1.2	7	5	187.8
8	7.7	1.2	7	7	329.1
9	8.8	1.2	7	9	468.3

3.3 Metallographic microstructure analysis

Metallographic examination at the microscopic level of the workpiece, conducted after various testing processes and using scanning electron microscopy (SEM), yields microstructure images, as shown in Figure 10. The weld metal (WM) microstructure and the

heat-affected zone (HAZ) are depicted. The weld metal (WM) exhibits an acicular martensitic structure characterized by coarse grains (Li *et al.*, 2017), while the heat-affected zone (HAZ) shows an acicular martensitic structure with fine grains, primarily due to rapid cooling.

Figure 11 shows the heat-affected zone (HAZ) microstructure and the base metal (BM) of AISI P20 plastic mold steel magnified 1,000 times. It reveals a tempered martensite structure (Silva *et al.*, 2008). The HAZ shows a transition from the coarse-grained structure of the WM to fine grains. This fine-grained structure results from the thermal gradient experienced in the HAZ, where the metal is heated to temperatures below the melting point but high enough to cause recrystallization and grain refinement upon cooling. The rapid cooling in this zone leads to the formation of fine acicular martensite. The base metal (BM) appears unaffected by the welding heat, resulting in minimal to no alteration in the microstructure of the AISI P20 plastic mold steel.



Figure 10. The weld metal (WM) microstructure and the heat-affected zone (HAZ).

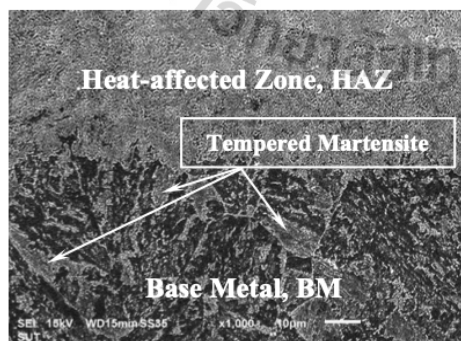


Figure 11. Shows the microstructure of the base metal (BM) and the heat-affected Zone (HAZ).

3.4 Hardness testing results of the welds

Hardness testing results of the welds were obtained using a Micro Vickers hardness test to compare the hardness of the weld metal (WM), heat-affected zone (HAZ), and base metal (BM). The tests were conducted with pulse durations (PD) set at 5, 6, and 7 ms and a pulse frequency (PF) set at 7 Hz, with measurements taken at six points along the weld. The average hardness values of the welds, as shown in Figure 12, are consistent with those in Table 5. The HAZ with PD = 5 ms and PF = 7 Hz exhibited the highest hardness, with the weld metal being harder than the base metal. However, hardness testing was not performed for welds with pulse frequencies set at 5 and 9 Hz due to incomplete fusion, rendering these parameters unsuitable, as shown in Figure 9.

Table 5. Results of the average hardness testing of the welds

Parameters	Average hardness (HV1.0)		
	WM	HAZ	BM
PD=5 ms PF=7 Hz	337.2	413.8	320.4
PD=6 ms PF=7 Hz	328.9	408.7	311.0
PD=7 ms PF=7 Hz	322.4	403.8	306.0

Table 5 and Figure 12 show that as the pulse duration increases, it leads to a corresponding increase in heat input. Higher heat input values result in lower cooling rates, affecting the hardness. This is evidenced by the fact that the hardness at a pulse duration of 7 ms is lower than at pulse durations of 6 and 5 ms, respectively. All hardness values exhibit a base metal (BM) tempered martensite microstructure. The heat-affected zone (HAZ) displays a microstructure of fine-grained acicular martensite, while the weld metal (WM) exhibits a microstructure of coarse-grained acicular martensite, as illustrated in Figures 10 and 11.

The highest hardness values in the HAZ are consistent with the rapid cooling effect, which increases the hardness due to the formation of fine martensitic structures (Vedani, 2004). The observed decrease in hardness with increased pulse duration is due to lower cooling rates from higher heat input, leading to softer microstructures, as also reported by Silva *et al.* (2008).

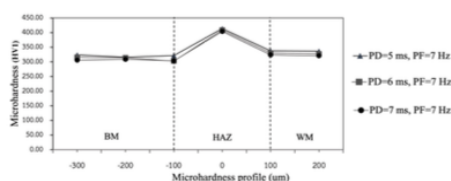


Figure 12. Microhardness profile of the welds under different parameters

The appropriate hardness values for both WM and HAZ are within the range of 30 – 34 HRC (302 – 336 HV 1.0 kgf) (Silva et al., 2008). Table 5 and Figure 12 show that the parameters recommended for all three welding adaptations have suitable hardness values, making them applicable for repairing plastic injection molds.

3.5 Statistical analysis results of parameters impact on welds

The analysis of weld width was conducted by considering two factors: pulse duration and pulse frequency. Weld width was measured according to the experimental design conditions, totaling nine experiments, with each experiment repeated three times to determine the main factors significantly affecting weld width. Statistical analysis of factors A (pulse duration) and B (pulse frequency) at a 95% confidence level revealed that the main factors affecting the experimental response or weld width were factors A (pulse duration) and B (pulse frequency), as they had P-values less than 0.05. Furthermore, the combined effects of these factors were analyzed, and it was found that the interaction factor A*B (pulse duration * pulse frequency) also had a P-value less than 0.05, indicating that these combined factors influenced the weld width in the experiment. Statistical values of weld width were analyzed using Minitab 19 software. The decision-making coefficients were analyzed for variance concerning the experimental response. The decision-making coefficient during the experiment was 99.54%, and after adjustment, it was 99.33%, as shown in Table 7. This high coefficient indicates the reliability of the response values resulting from the experimental factors. A decision-making coefficient approaching 100% signifies greater reliability.

Table 6. The value obtained from the analysis using MINITAB software

Source	DF	F-Value	P-Value
Model	8	485.92	0.000
Linear	4	959.47	0.000
Pulse	2	543.28	0.000
Frequency	2	1375.67	0.000
2-Way	4	12.37	0.000
Interactions			
Pulse*Frequency	4	12.37	0.000

Model Summary

S	R-sq	R-sq (adj)	R-sq (prwd)
8.85515	99.54%	99.33%	98.96%

This analysis demonstrates the significant impact of pulse duration and pulse frequency on weld width and their interaction, thereby ensuring the reliability and validity of the experimental results.

Conclusions

This research investigated the influence of various welding parameters on the weld profile of plastic injection mold steel (AISI P20) using an Nd: YAG laser and P20 grade steel wire (0.6 mm diameter). Both macrostructural and microstructural examinations were conducted on the workpieces.

The metallographic analysis of the macrostructure revealed that the heat-affected zone (HAZ) was narrower and smaller in dimension than the weld metal (WM) area, indicating a localized thermal impact from the laser welding process.

At the microstructural level, the base metal (AISI P20 steel) maintained a tempered martensite structure with negligible changes in hardness, suggesting minimal microstructural alterations. In contrast, the weld metal (WM) exhibited acicular martensitic structures with coarse grains, while the HAZ featured fine grains due to rapid cooling, resulting in higher hardness in the HAZ compared to the WM.

The heat input to the welded workpieces, ranging from 116.0 to 468.3 J/mm, was directly proportional to pulse duration and pulse frequency. Increased pulse duration and frequency led to higher heat input, thereby affecting the weld profile and characteristics.

The study found that increasing the pulse duration and frequency resulted in a wider weld profile. These two parameters had a combined effect on the weld profile.

Optimal welding parameters were identified as a pulse frequency of 7 Hz and pulse durations between 5 to 7 ms, which achieved complete welds without incomplete fusion defects. These settings produced welds that closely matched the standard hardness values for P20 plastic injection molds.

In conclusion, the optimal welding parameters for Nd: YAG laser welding of AISI P20 steel are a pulse frequency of 7 Hz and pulse durations between 5 and 7 ms. These parameters ensure complete, defect-free welds with appropriate hardness for repairing plastic injection molds. The findings underscore the significance of controlling pulse duration and frequency to achieve desired weld characteristics and structural integrity. This conclusion is supported by Adams and Kwiatkowski's investigation, which demonstrated the critical impact of laser welding parameters on weld quality, and Fotovvati et al.'s review, which detailed the influence of process parameters on melt-pool dynamics and microstructure formation.

Acknowledgment

The researchers would like to express their sincere gratitude to everyone involved and to Suranaree University of Technology for their support, which contributed to the successful completion of the research.

References

- Adams, J. T., & Kwiatkowski, J. J. (1994). Nd-YAG laser welding of the fiber optic connector to the header shell on the 2SL actuator (No. MLM-3790). EG and G Mound Applied Technologies, Miamisburg, OH (United States). DOI: <https://doi.org/10.2172/10122837>
- Altan, T., Lilly, B., & Yen, Y. C. (2001). Manufacturing of dies and molds. *CiRP Annals*, 50(2), 404-422. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0007-8506\(07\)62988-6](https://doi.org/10.1016/S0007-8506(07)62988-6)
- Bridgman, T. (2008). How to weld. Motorbooks.
- Buddery, A., Dargusch, M. S., StJohn, D. H., Drennan, J., & Nabulsi, S. (2009, August). Laser welding of titanium and its alloys for medical applications: Current knowledge and future direction. In *Materials Science Forum* (Vol. 618, pp. 291-294). Trans Tech Publications Ltd. DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.618-619.291>
- Caiazza, F., & Caggiano, A. (2018). Investigation of laser welding of Ti alloys for cognitive process parameters selection. *Materials*, 11(4), 632. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma11040632>
- Dawes, C. (1992). *Laser Welding*. Abington Publishing.
- Fotovvati, B., Wayne, S. F., Lewis, G., & Asadi, E. (2018). A review on melt-pool characteristics in laser welding of metals. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1155/2018/4920718>
- Hekmatjou, H., and Naffakh-Moosavy, H. (2018). Hot cracking in pulsed Nd: YAG laser welding of AA5456. *Optics & Laser Technology*, 103, 22-32. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2018.01.020>
- Huda, Z. (2016). *Welding and Joining Processes*. Mater. Process. Eng. Manuf, 159.
- Jiang, D., Alsagri, A. S., Akbari, M., Afrand, M., & Alrobaian, A. A. (2019). Numerical and experimental studies on the effect of varied beam diameter, average power and pulse energy in Nd: YAG laser welding of Ti6Al4V. *Infrared Physics & Technology*, 101, 180-188. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.infrared.2019.06.006>
- Junkes, R., Howarth, J. L. L., Becker, D., & Bond, D. (2020). Properties evaluation of semi-crystalline and amorphous polymers injected in AISI P20 molds repaired by welding. *Matéria (Rio de Janeiro)*, 25, e-12786.
- Kapil, S., Legesse, F., Negi, S., Karunakaran, K. P., & Bag, S. (2020). Hybrid layered manufacturing of a bimetallic injection mold of P20 tool steel and mild steel with conformal cooling channels. *Progress in Additive Manufacturing*, 5, 183-198.
- Katayama, S. (2013). Introduction: fundamentals of laser welding. In *Handbook of laser welding technologies* (pp. 3-16). Woodhead Publishing. DOI: <https://doi.org/10.1533/9780857098771.1.3>
- Kramár, T., Michalec, I., & Kovácov, P. (2012). The laser beam welding of titanium grade 2 alloy. *GRANT J*, 1, 77-79.
- Kumar, P., & Sinha, A. N. (2019). Effect of heat input in pulsed Nd: YAG laser welding of titanium alloy (Ti6Al4V) on microstructure and mechanical properties. *Welding in the World*, 63, 673-689. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40194-018-00694-w>
- Kumar, U., Chattopadhyaya, S., Das, A. K., Seikh, A. H., Sharma, S., Dwivedi, S. P., ... & Singh, S. (2023, March). Effect of pulsation in microstructure and mechanical properties of titanium alloy-annealed welded joints at different temperatures. In *Photonics* (Vol. 10, No. 4, p. 372). MDPI. DOI: <https://doi.org/10.3390/photonics1004037>
- Li, H. X., Qi, H. L., Song, C. H., Li, Y. L., & Yan, M. J. P. M. (2018). Selective laser melting of P20 mould steel: investigation on the resultant microstructure, high-temperature hardness and corrosion resistance. *Powder Metallurgy*, 61(1), 21-27. DOI: <https://doi.org/10.1080/00325899.2017.1368965>
- Poli, C. (2001). *Design for manufacturing: a structured approach*. Butterworth-Heinemann.
- Preciado, W. T., & Bohorquez, C. E. N. (2006). Repair welding of polymer injection molds manufactured in AISI P20 and VP50IM steels. *Journal of Materials Processing Technology*, 179(1-3), 244-250. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2006.03.101>
- Silva, B., Pires, I., & Quintino, L. (2008, September). Welding technologies for repairing plastic injection moulds. In *Materials Science Forum* (Vol. 587, pp. 936-940). Trans Tech Publications Ltd. DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.587-936-940>
- Silva, B., Pires, I., Quintino, L., & Miranda, R. (2008). New welding procedures for repairing H13 and P20 tool steels. In *5th Luso-Mozambican International Engineering Congress*.
- Srithorn, J., Saengsan, K., (2023). The Study of Parameters Affecting Weld Bead by Welding SS400 Grade Carbon Steel Materials with Nd: YAG Laser Welding Process.
- Steen, W. M., & Mazumder, J. (2010). *Laser Material Processing*. Springer.
- Swift, K. G., & Booker, J. D. (2003). *Process selection: from design to manufacture*. Elsevier.

Vedani, M. (2004). Microstructural evolution of tool steels after Nd-YAG laser repair welding. Journal of Materials Science, 39, 241-249.

Worldwide Guide to Equivalent Irons and Steels, 4th Ed., ASM Material Data Series, ASM International, Materials Park, OH, (2000)



ประวัติผู้เขียน

นายเกษมสันต์ แสงสาร เกิดเมื่อวันที่ 29 เมษายน พ.ศ. 2539 เกิดที่ จังหวัดกาฬสินธุ์ สำเร็จการศึกษาในระดับปริญญาตรีวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมอุตสาหการ) จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา เมื่อ พ.ศ. 2562 ได้ศึกษาต่อในระดับปริญญาโทวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมระบบอุตสาหกรรมและสิ่งแวดล้อม) โดยได้รับทุนกิตติบัตินิตจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ผลงานวิจัย: ได้นำเสนอบทความ เรื่อง การศึกษาพารามิเตอร์ที่มีผลต่อแนวเชื่อมโดยการเชื่อมวัสดุเหล็กกล้าคาร์บอน เกรด SS400 ด้วยกระบวนการเชื่อมไนโอติเมียมแก็กเลเซอร์ ในการประชุมวิชาการขำงานวิศวกรรมอุตสาหการ ครั้งที่ 41 ในวันที่ 11-12 พฤษภาคม 2566 โรงแรม ไบรท์ตัน แกรนด์ พัทยา จังหวัดชลบุรี

