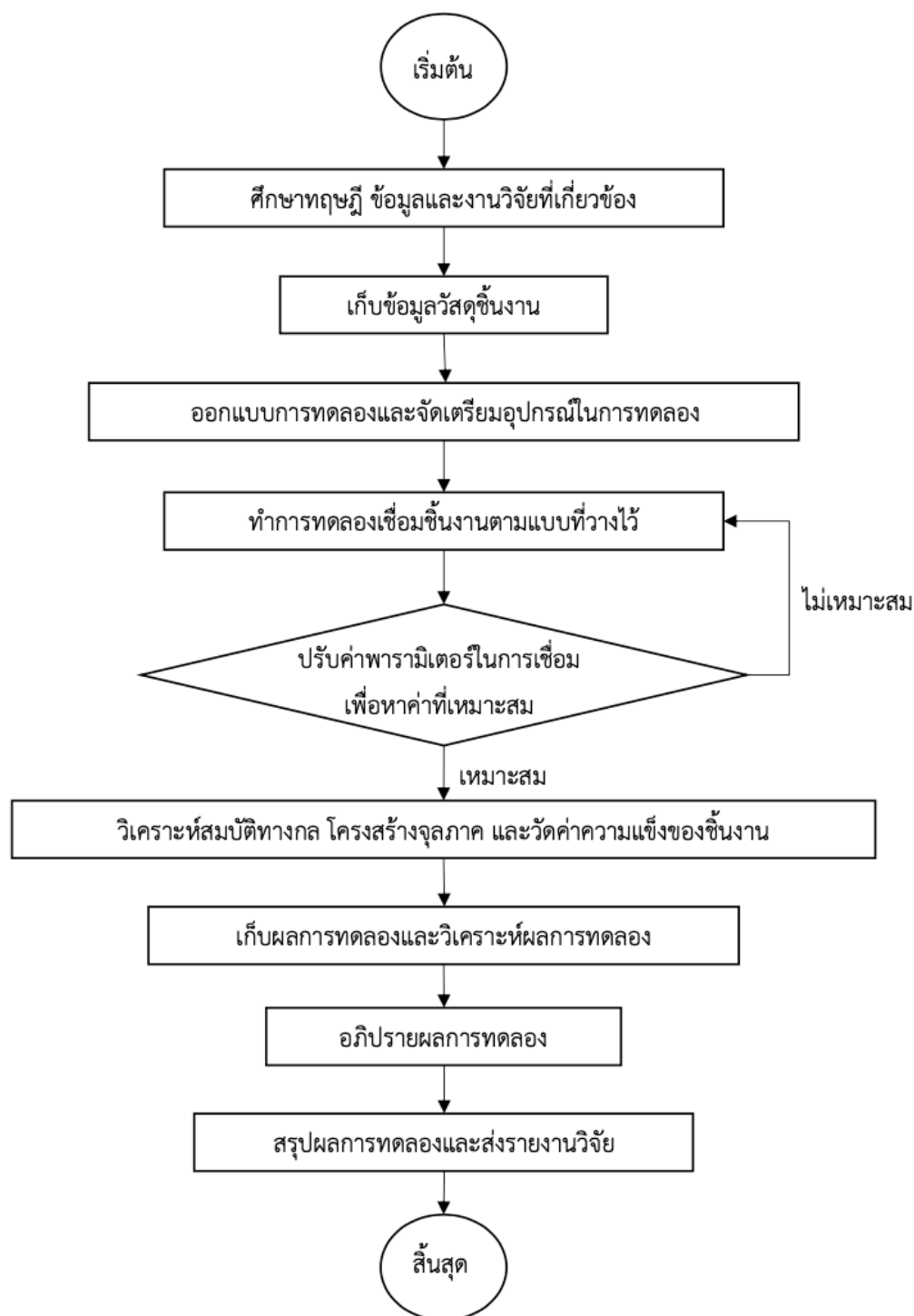


บทที่ 3

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



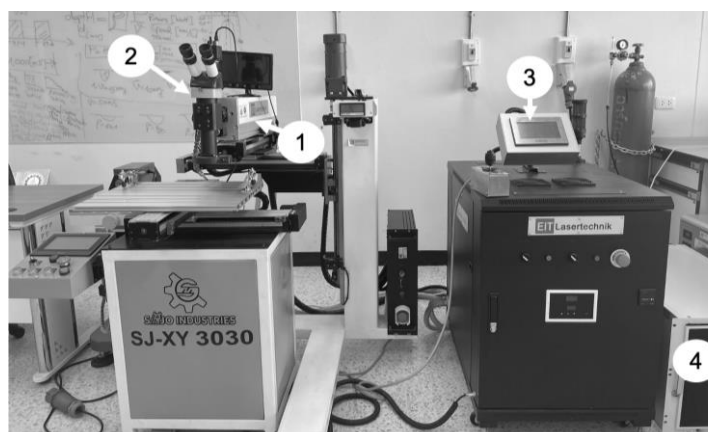
รูปที่ 3.1 ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย

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 ในที่นี้ใช้ตัวกลางที่เป็นผลึกของแร่ 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

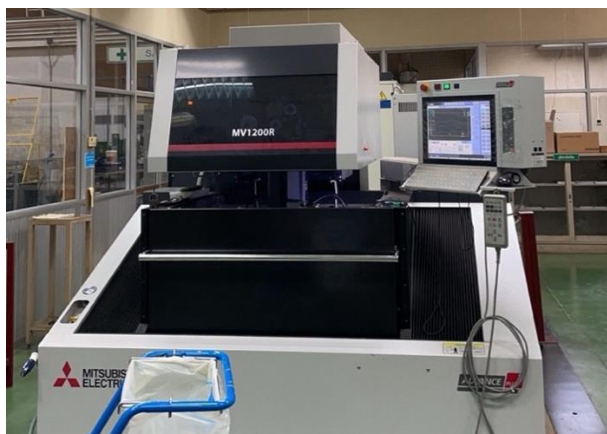
โดยลวดเชื่อมเติมเนื้อนี้มีส่วนผสมทางเคมีที่ใกล้เคียงกับโลหะฐานเหล็กแม่พิมพ์ฉีดพลาสติก เกรด P20 โดยส่วนผสมทางเคมีของลวดเชื่อมเติมเนื้อ แสดงดังตารางที่ 3.2

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

ในกระบวนการเตรียมชิ้นงานเพื่อให้นำไปประกอบในเรือนชิ้นงาน 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

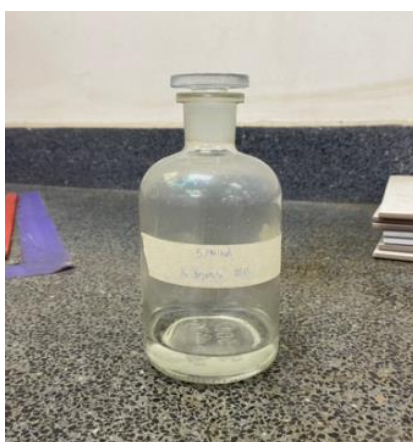
หลังจากเตรียมพื้นผิวชิ้นงานด้วยกระดาษทรายแล้ว จะนำชิ้นงานมาขัดชิ้นงาน โดยใช้เครื่องขัดแบบจานหมุนที่มีผ้าสักหลาดติดอยู่ ดังแสดงในรูปที่ 3.8 การขัดเงานี้จะทำการร่วมกับการใช้ผงอะลูมินา ขนาด 0.3 ไมครอน ซึ่งมีลักษณะเป็นผงละเอียด เพื่อขัดพื้นผิวของชิ้นงานโลหะจนกระทั่งมีลักษณะเป็นเงาและไม่มีรอยขีดข่วนหรือรอยที่ผิวหน้า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



รูปที่ 3.8 เครื่องขัดผงอะลูมินา

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

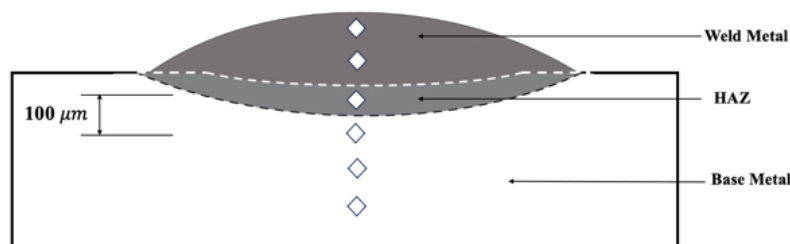
การทดสอบค่าความแข็งแบบไมโครวิกเกอร์ดำเนินการโดยใช้เครื่องทดสอบรุ่น FM-800 ดังแสดงในรูปที่ 3.12 เครื่องทดสอบความแข็งแบบไมโครวิกเกอร์ โดยทำการกดหัวทดสอบลงบนแนวเชื่อมของชิ้นงานในแต่ละตำแหน่งทั้งหมดจำนวน 6 จุด แบ่งออกเป็น บริเวณโลหะเชื่อม (Weld Metal) จำนวน 2 จุด บริเวณเขตกระทบร้อน (Heat Affected Zone: HAZ) 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) จากนั้นลงมาถึงบริเวณโลหะฐาน (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

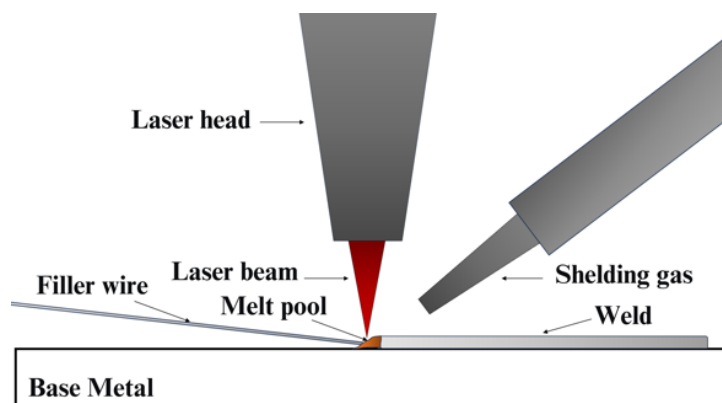
หลังจากที่ผู้วิจัยได้ทำการศึกษาค่าพารามิเตอร์เบื้องต้นในการเชื่อมเลเซอร์ชนิด Nd:YAG ในหัวข้อ 3.2.1 และได้ดำเนินการศึกษานำร่องเพื่อคัดเลือกระดับพารามิเตอร์ที่เหมาะสม พบว่า หากค่าของพารามิเตอร์ต่ำกว่าค่าที่กำหนด จะส่งผลให้ลวดเชื่อมหลอมละลายได้ไม่ดี แต่ก็ยังไม่เกินกว่าข้อจำกัดของเครื่องเชื่อมเลเซอร์ EIT 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 โดยการไหลของแก๊สถูกกำหนดที่ 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



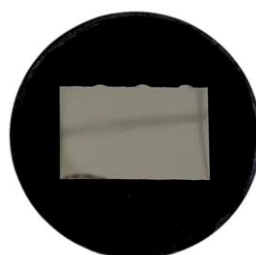
รูปที่ 3.14 การเชื่อมแบบเดินแนวบนชิ้นงานด้วยเครื่องเชื่อมเลเซอร์

3.3 การวิเคราะห์คุณสมบัติทางโลหะวิทยา

ในการศึกษาครั้งนี้ การวิเคราะห์คุณสมบัติทางโลหะวิทยาของชิ้นงานที่ทำการทดลองที่ได้รับการเชื่อมด้วยเลเซอร์ชนิด Nd: YAG เป็นขั้นตอนสำคัญในการประเมินผลกระทบของกระบวนการเชื่อมต่อโครงสร้างและคุณสมบัติของวัสดุ โดยการวิเคราะห์จะประกอบไปด้วยหัวข้อดังต่อไปนี้

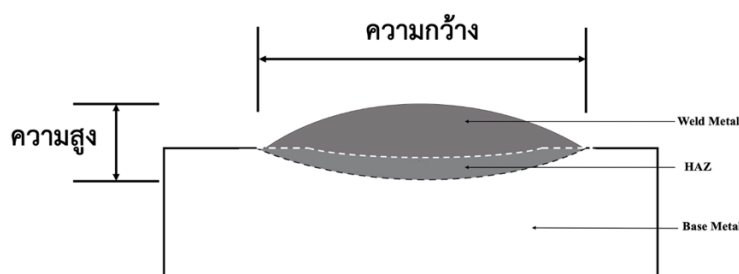
3.3.1 การตรวจสอบทางโครงสร้างทางโลหะวิทยา

การศึกษาโครงสร้างทางโลหะวิทยาในงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อวิเคราะห์โครงสร้างมหภาค (Macrostructure) และโครงสร้างจุลภาค (Microstructure) ของแนวเชื่อมและโลหะฐาน ซึ่งจะช่วยให้สามารถประเมินผลกระทบของกระบวนการเชื่อมที่เกิดขึ้นในวัสดุได้อย่างถูกต้อง การเตรียมตัวอย่างสำหรับการศึกษาทางโครงสร้างเริ่มจากการตัดชิ้นงานที่ได้รับการเชื่อมตามค่าพารามิเตอร์ที่กำหนด 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) ช่วยให้เห็นรายละเอียดของโครงสร้างผลึก รูปแบบการเย็นตัวของโลหะ และลักษณะของเนื้อวัสดุในระดับจุลภาคได้อย่างชัดเจนมากยิ่งขึ้น การตรวจสอบด้วย SEM ช่วยให้สามารถประเมินคุณภาพของแนวเชื่อมได้อย่างแม่นยำ เช่น การกระจายตัวของเฟสในแนวเชื่อม การเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างผลึก และการเกิดเขตการตกผลึกที่อาจส่งผลต่อความแข็งแรง หรือความเปราะของวัสดุ ทั้งนี้ การเปรียบเทียบโครงสร้างจุลภาคที่ได้จากพารามิเตอร์การเชื่อมที่แตกต่างกัน จะช่วยในการเลือกเงื่อนไขที่เหมาะสมที่สุดสำหรับกระบวนการเชื่อมเชื่อมแม่พิมพ์ P20 ด้วยเลเซอร์ Nd: YAG ให้ได้คุณภาพสูงสุด

3.3.2 การตรวจสอบคุณสมบัติของแนวเชื่อม

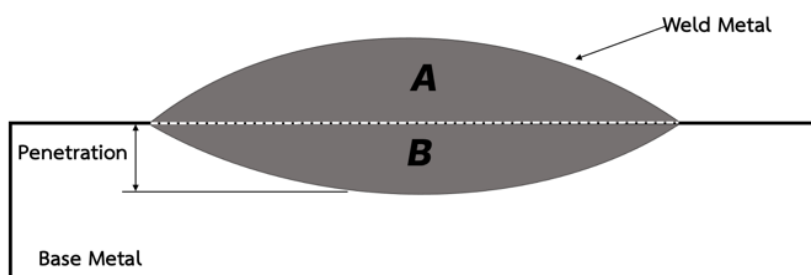
นอกจากการวิเคราะห์โครงสร้างทางโลหะวิทยาทั้งในระดับมหภาคและจุลภาคแล้ว การตรวจสอบคุณสมบัติเชิงกลของแนวเชื่อมยังมีความสำคัญอย่างยิ่งในการประเมินประสิทธิภาพของกระบวนการเชื่อม โดยคุณสมบัติเชิงกลสามารถสะท้อนถึงความแข็งแรง ความทนทาน และคุณภาพของรอยเชื่อมที่ได้จากการปรับเปลี่ยนพารามิเตอร์ต่าง ๆ ในกระบวนการเชื่อม 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)

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

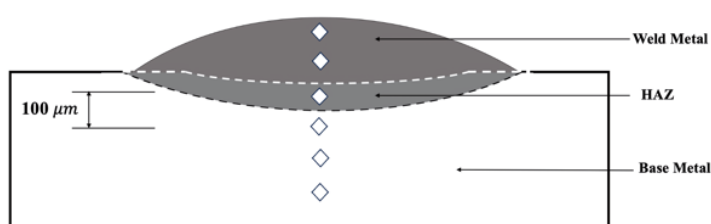
โดยที่ P = กำลังไฟฟ้า (W)
 V = แรงดันไฟฟ้า (V) ของเครื่องเชื่อม
 I = กระแสไฟฟ้า (A)

3.3.2.3 การทดสอบค่าความแข็งของชิ้นงาน (Hardness Test)

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

ชิ้นงานสำหรับการทดสอบประกอบด้วยจำนวนทั้งหมด 9 ชิ้น โดยดำเนินการทดสอบด้วยเครื่องวัดค่าความแข็งจุลภาคแบบวิกเกอร์ รุ่น FM-800 ซึ่งใช้หัวกดเพชรทรงพีรามิดที่มีมุมยอด 136 องศา ทำการกดลงบนผิวชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการเตรียมพื้นผิว ได้แก่ การผึงเรือน 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