

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง

งานวิจัยนี้ได้ดำเนินการทดลองเพื่อวิเคราะห์ผลกระทบของพารามิเตอร์การเชื่อมที่แตกต่างกันต่อคุณลักษณะของแนวเชื่อม ทั้งในด้านโครงสร้างทางโลหะวิทยาในระดับมหภาคและจุลภาครวมถึงคุณสมบัติเชิงกลของชิ้นงาน โดยเฉพาะค่าความแข็งของบริเวณต่าง 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)

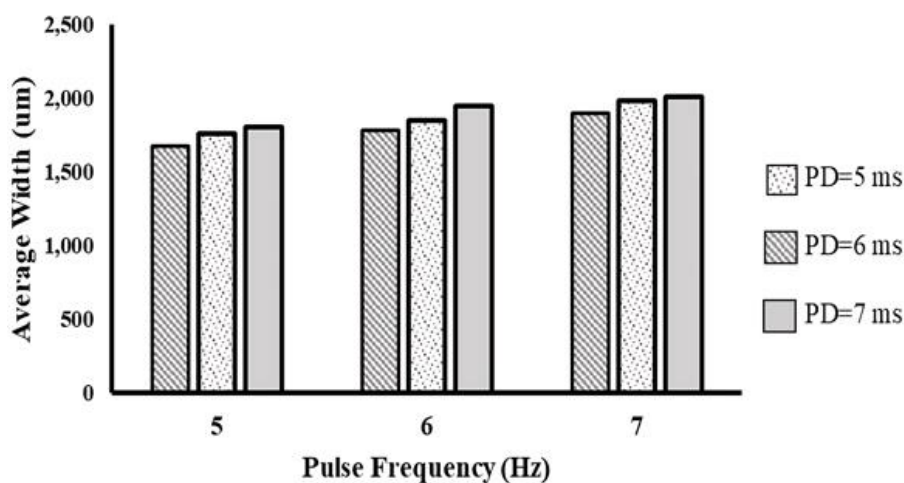
ที่	พารามิเตอร์		ภาพโครงสร้าง	ค่าเฉลี่ยความกว้างของแนวเชื่อม (μm)
	Pulse Duration (ms)	Pulse Frequency (Hz)		
1	5	5		1,672
2		7		1,781
3		9		1,895
4	6	5		1,760
5		7		1,850
6		9		1,983

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 $2,012 \mu\text{m}$

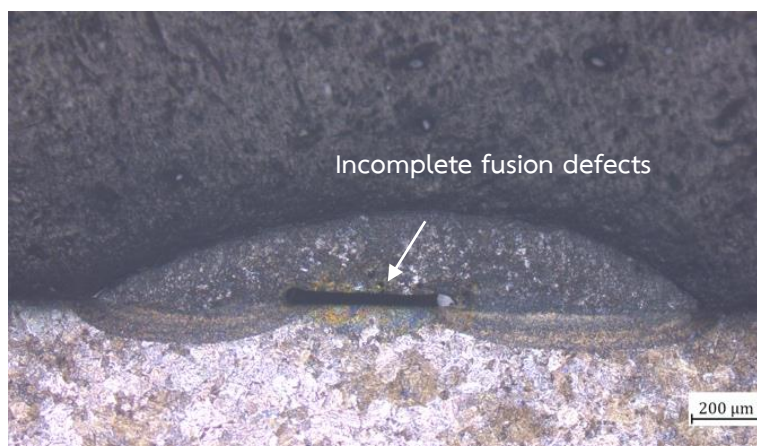


รูปที่ 4.1 ค่าเฉลี่ยความกว้างของแนวเชื่อมตามพารามิเตอร์ที่แตกต่างกัน

ซึ่งการควบคุมค่าพารามิเตอร์ PD และ PF อย่างเหมาะสมจึงเป็นสิ่งสำคัญ ที่ช่วยให้ได้แนวเชื่อมที่มีคุณลักษณะตามที่ต้องการ ทั้งในแง่ของความกว้าง ความลึก และอัตราการเงา ซึ่งส่งผลต่อคุณภาพของงานเชื่อมโดยรวม 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



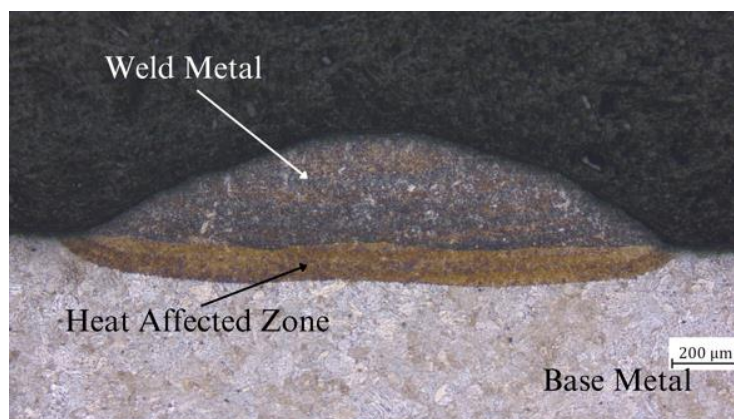
รูปที่ 4.2 ลักษณะของแนวเชื่อมที่เกิดการเติมไม่สมบูรณ์

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

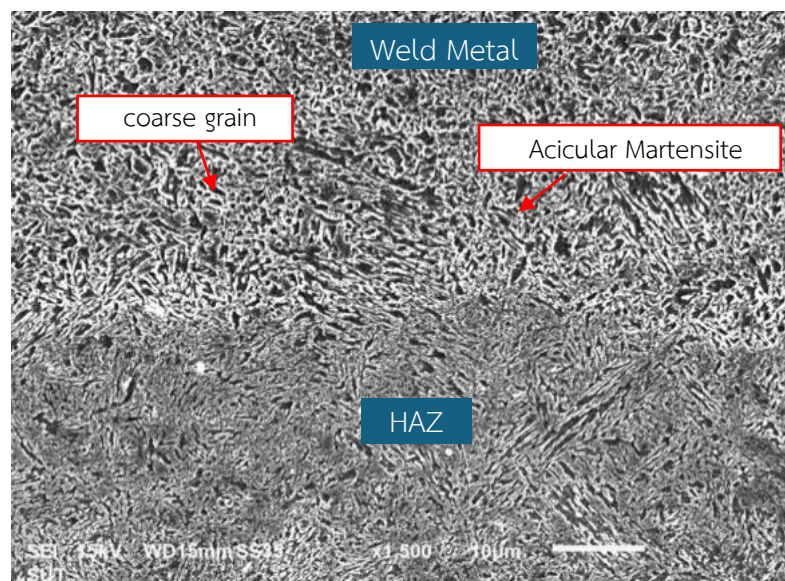
2) บริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อน (Heat Affected Zone: HAZ) เป็นบริเวณที่ไม่ได้ถูกหลอมละลายโดยตรง แต่ได้รับผลกระทบจากความร้อนในระหว่างการเชื่อม ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาค ซึ่งมีผลต่อสมบัติเชิงกลของชิ้นงาน

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)

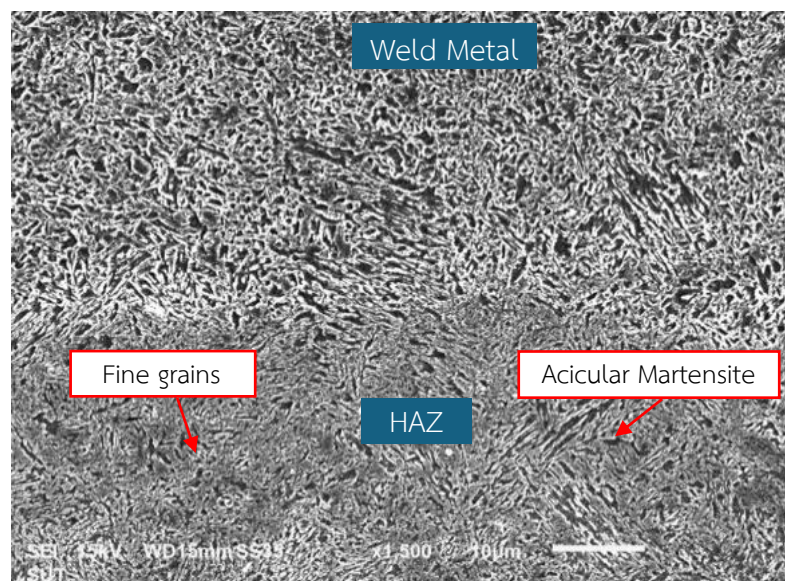


รูปที่ 4.4 ลักษณะโครงสร้างทางจุลภาคบริเวณเนื้อโลหะเชื่อม (Weld Metal)

4.1.2.2 บริเวณผลกระทบร้อน (Heat Affected Zone: HAZ)

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

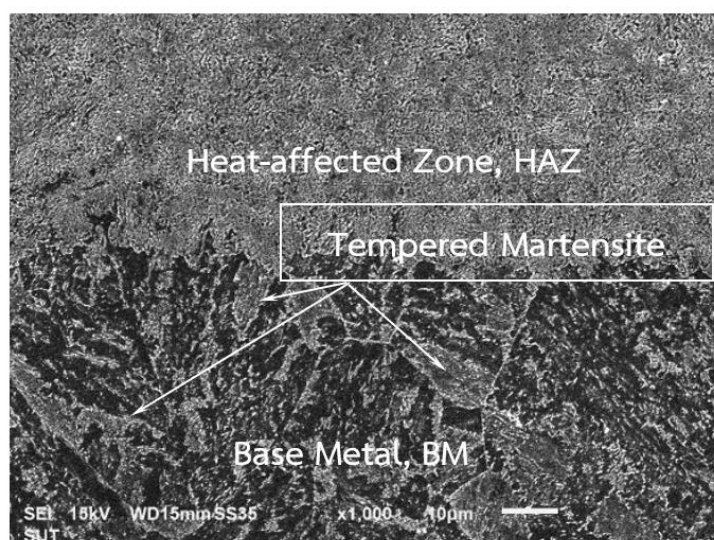
โครงสร้างมาร์เทนไซต์ที่มีเกรนละเอียดใน HAZ มีแนวโน้มที่จะให้ความแข็งแรงที่สูงเช่นเดียวกับบริเวณเนื้อเชื่อม แต่จะมีความเปราะน้อยกว่าเล็กน้อยเมื่อเทียบกับบริเวณที่มีเกรนหยาบ เนื่องจากเกรนที่ละเอียดสามารถช่วยกระจายความเค้นและต้านทานการเกิดรอยร้าวได้ดีขึ้น



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

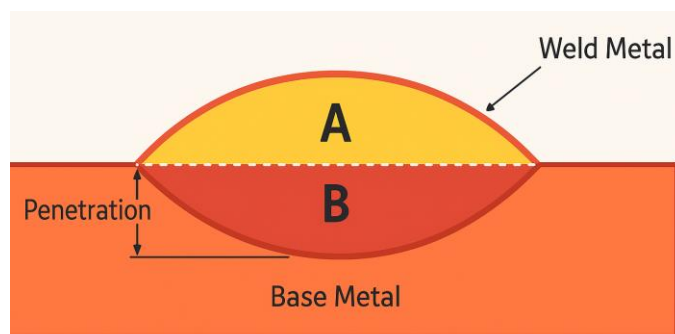
4.2.1 ผลการวิเคราะห์ค่าความเจือจาง (%Dilution)

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

ในงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยใช้โปรแกรมประมวลผลภาพจุลทรรศน์ในการวัดพื้นที่แนวเชื่อม โดยแบ่งออกเป็นสองส่วน ได้แก่ พื้นที่ของโลหะเดิมที่พอกอยู่เหนือผิวโลหะฐาน (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 ได้ทำการคำนวณค่าความร้อนนำเข้าสู่ชิ้นงานเชื่อมจากค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ โดยใช้สมการดังกล่าวในการคำนวณ ซึ่งผลการคำนวณแสดงได้ในตารางที่ 4.3 ตารางแสดงการคำนวณค่าความร้อนนำเข้าสู่พารามิเตอร์ที่แตกต่างกัน 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

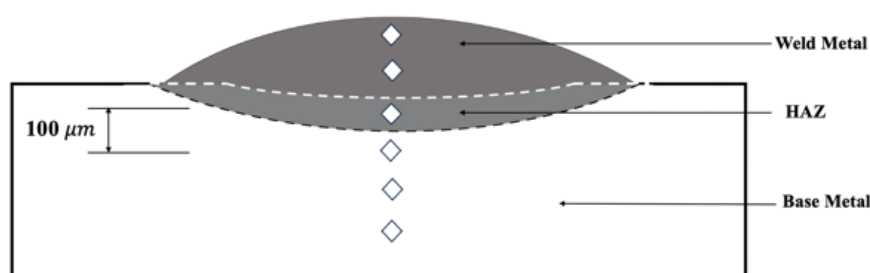
ดังนั้นการเพิ่มค่าของ Peak Power, Pulse Duration และ Pulse Frequency จะส่งผลให้ค่าความร้อนนำเข้าเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน ซึ่งสอดคล้องกับหลักการของการถ่ายเทพลังงานในกระบวนการเชื่อมด้วยเลเซอร์ อย่างไรก็ตาม การเลือกใช้พารามิเตอร์เหล่านี้ควรอยู่บนพื้นฐานของความสมดุลระหว่างประสิทธิภาพของการหลอมละลายกับการควบคุมคุณภาพของแนวเชื่อม

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

4.2.3 ผลการทดสอบค่าความแข็งของชิ้นงาน (Hardness Test)

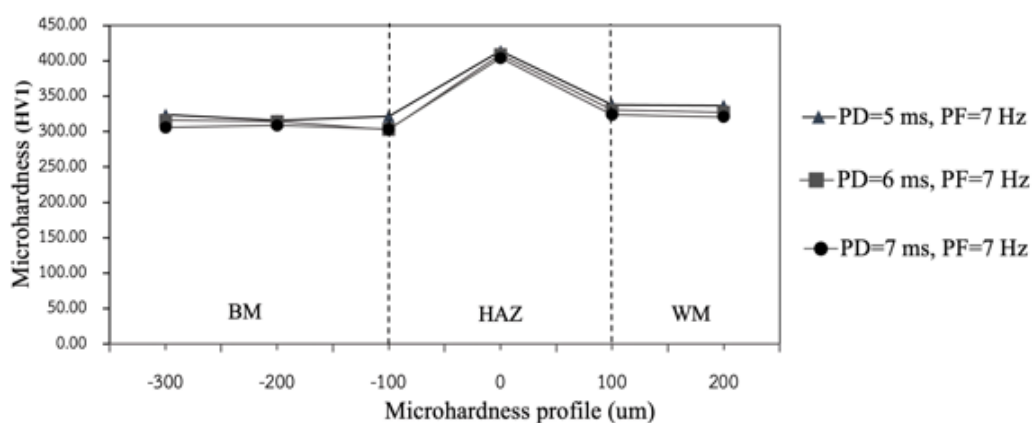
การทดสอบวัดค่าความแข็งของชิ้นงานที่ผ่านการเชื่อมด้วยกระบวนการเชื่อมเลเซอร์ชนิด Nd:YAG นั้น เป็นการทดสอบเพื่อดูคุณสมบัติเชิงกลของแนวเชื่อมที่มีค่าพารามิเตอร์แตกต่างกัน

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 เฮิรตซ์ 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) จะพบว่ามีความแข็งเฉลี่ยลดลงตามการเพิ่มขึ้นของค่า 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) โดยการใช้การออกแบบการทดลองแบบแฟกทอเรียล (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			

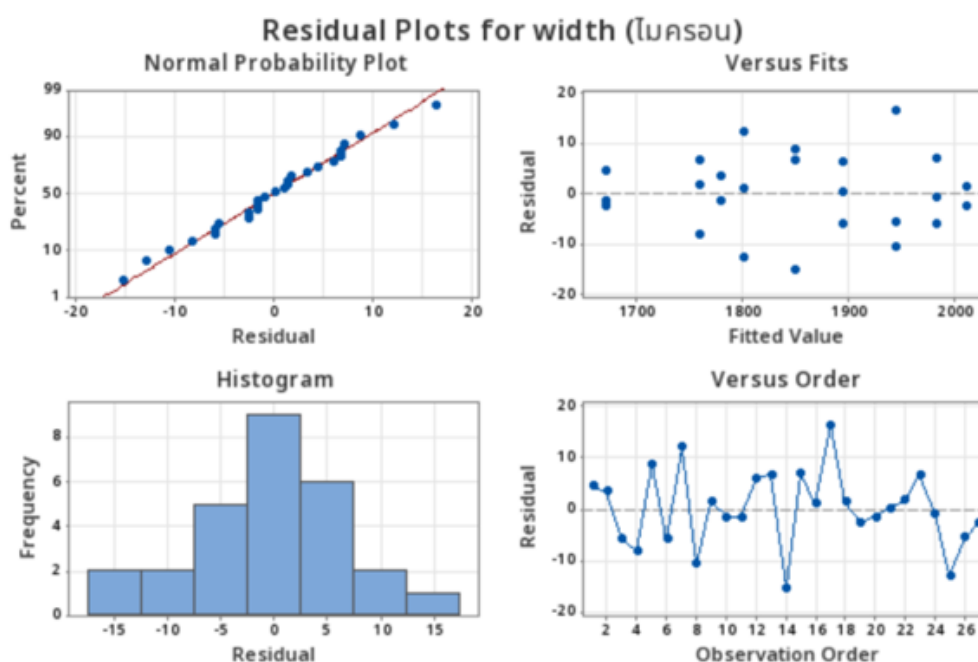
Model Summary			
S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
8.85515	99.54%	99.33%	98.96%

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 ซึ่งบ่งชี้ว่าโมเดลที่สร้างขึ้นมีความน่าเชื่อถือสูงและสามารถใช้ในการพยากรณ์หรือวิเคราะห์ผลกระทบของปัจจัยที่เกี่ยวข้องได้อย่างมีประสิทธิภาพ