

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 กระบวนการนี้ทำไม่เร็ว แต่ได้ผลดี 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 (CO₂ Laser) เป็นหนึ่งในประเภทที่นิยมมากที่สุด ถูกคิดค้นโดย K.C. Patel ในปี ค.ศ. 1964 ที่ Bell Telephone Laboratories เลเซอร์ CO₂ ใช้ก๊าซผสมระหว่าง คาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂), ไนโตรเจน (N₂) และฮีเลียม (He) เป็นตัวกลางกำเนิดเลเซอร์ โดยเมื่อถูกกระตุ้นด้วยแรงดันไฟฟ้าจะเกิดการเปลี่ยนแปลงระดับพลังงานของโมเลกุล CO₂ 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)

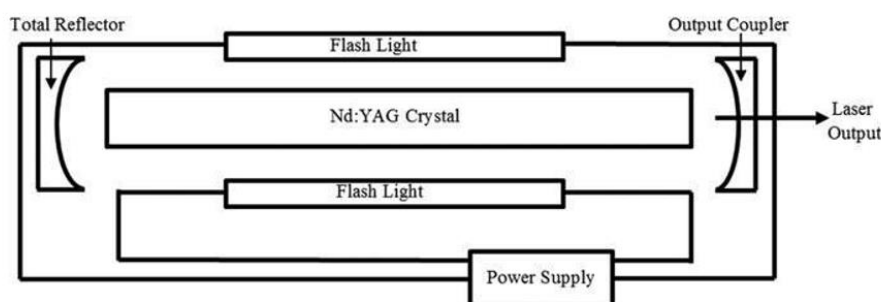
เลเซอร์ของแข็งเป็นเลเซอร์ที่ใช้วัสดุสถานะของแข็ง เช่น คริสตัล หรือแก้วเจือสารหายาก (Rare Earth Elements) เป็นตัวกลางกำเนิดแสงเลเซอร์ ตัวอย่างที่ได้รับความนิยมคือ Nd:YAG (Neodymium-doped Yttrium Aluminum Garnet) ซึ่งถูกพัฒนาโดย Geusic, Marcos และ Van Uitert ในปี พ.ศ. 2507 (ค.ศ. 1964) ระบบเลเซอร์นี้ใช้หลอดแฟลช (เช่น หลอดอาร์คริปทอน) เพื่อสูบลำแสงเข้าสู่ไอออนของนีโอดิเมียม (Nd³⁺) 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 จะให้คุณสมบัติที่ดีในการขึ้นรูปแม่พิมพ์ โดยสามารถรักษาความแข็งและความทนทานต่อการสึกหรอแม่ในสถานะที่มีอุณหภูมิสูง ในกระบวนการผลิต (Poli, 2001) อีกทั้งวัสดุ P20 มีคุณสมบัติที่สำคัญเช่น ความต้านทานต่อการเกิด การบิดเบี้ยวและการเปลี่ยนแปลงรูปทรงในระหว่างการใช้งาน รวมถึงสามารถรับความร้อนได้ดี ทำให้เหล็ก P20 เป็นวัสดุที่เหมาะสมในการทำแม่พิมพ์สำหรับพลาสติกที่มีความซับซ้อน นอกจากนี้เหล็ก P20 ยังสามารถให้ค่าความแข็งสูงเมื่อทำการอบชุบความร้อน ซึ่งช่วยเพิ่มความทนทานต่อการใช้งานหนักในกระบวนการขึ้นรูป (Altan et al., 2001)

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

2.5 การทดสอบคุณสมบัติทางกล (Mechanical Properties Test)

การทดสอบคุณสมบัติทางกล (Mechanical Properties Test) เป็นการทดสอบในการประเมินคุณสมบัติทางกลต่าง ๆ ของวัสดุ ซึ่งสามารถบ่งบอกถึงการตอบสนองของวัสดุต่อแรงภายนอกที่กระทำต่อมัน การทดสอบนี้มีความสำคัญในการคัดเลือกวัสดุที่เหมาะสมสำหรับการใช้งานในสถานะต่าง ๆ โดยจะพิจารณาคุณสมบัติต่าง ๆ เช่น ความต้านทานแรงดึง (Tensile Strength) ความยืดหยุ่น (Elasticity) ความเหนียว (Toughness) และความแข็ง (Hardness) โดยการทดสอบคุณสมบัติทางกลที่นิยมใช้มีดังนี้:

2.5.1 การทดสอบแรงดึง (Tensile Test)

การทดสอบแรงดึงจะใช้เพื่อหาค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุดของวัสดุ โดยการลากวัสดุให้ยืดออกจนกระทั่งเกิดการแตกหัก ข้อมูลที่ได้จากการทดสอบนี้จะประกอบด้วยค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุด ค่าการยืดตัว และค่าการหดตัว ซึ่งช่วยให้เราทราบถึงความแข็งแรงและความสามารถของวัสดุในการต้านทานแรงภายนอก

2.5.2 การทดสอบความเหนียว (Impact Test)

การทดสอบความเหนียวจะใช้ในการประเมินความสามารถของวัสดุในการทนต่อแรงกระแทกที่เกิดขึ้นในระยะเวลาสั้น เช่น การทดสอบ Charpy หรือ Izod ซึ่งสามารถบ่งบอกถึงความสามารถของวัสดุในการรับแรงกระแทกและการแตกหัก

2.5.3 การทดสอบความยืดหยุ่น (Flexural Test)

การทดสอบความยืดหยุ่นจะใช้ในการประเมินการตอบสนองของวัสดุต่อแรงดัดหรืองอ โดยการนำวัสดุมาทดสอบภายใต้การดัดหรือแรงงอที่ใช้ในทิศทางต่าง ๆ ข้อมูลที่ได้จะช่วยบ่งชี้ความแข็งแรงและความยืดหยุ่นของวัสดุ

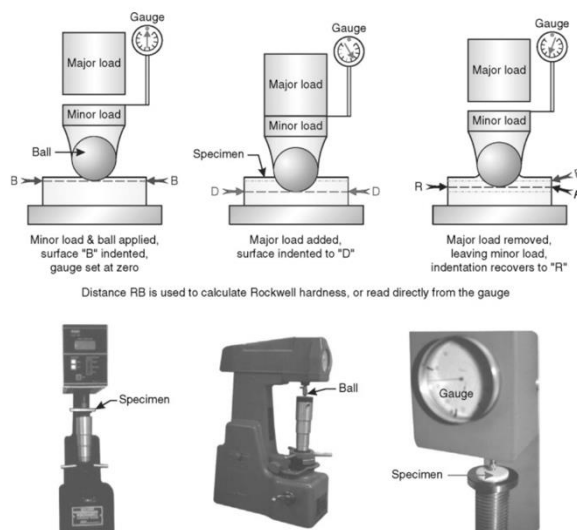
2.5.4 การทดสอบความแข็ง (Hardness Test)

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)

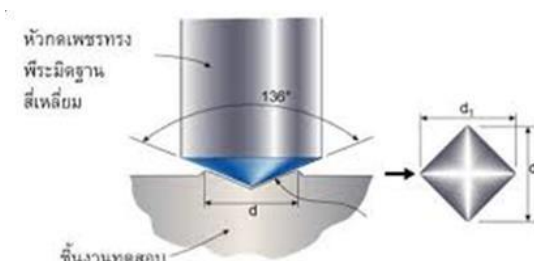
A คือ พื้นที่ของรอยบุ๋มที่เกิดจากการกดลูกเหล็ก (mm^2)

ซึ่งในการทดสอบนี้ ลูกเหล็กที่จะใช้จะมีขนาดต่าง 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)

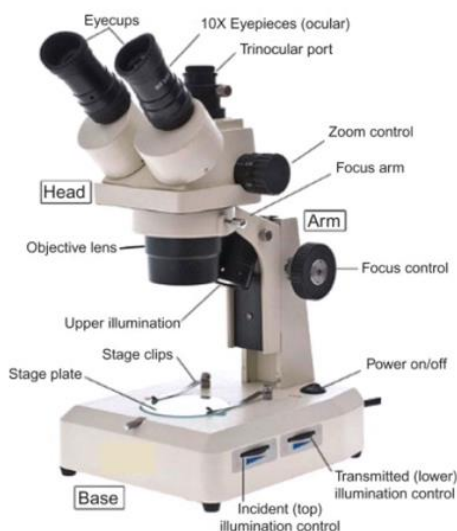
การตรวจสอบโครงสร้างทางโลหะวิทยา (Metallography Examination) เป็นกระบวนการที่สำคัญในการศึกษาคุณสมบัติของโลหะ เนื่องจากโครงสร้างทางโลหะวิทยามีผลโดยตรงต่อคุณสมบัติทางกายภาพ (Physical properties) ของวัสดุ ซึ่งรวมถึงการจัดเรียงตัวของอะตอมและเกรนของโลหะ การศึกษาโครงสร้างทางโลหะวิทยาจึงเป็นขั้นตอนพื้นฐานที่ใช้ในการตรวจสอบคุณภาพของโลหะและยังสามารถใช้ในการวิเคราะห์หาสาเหตุของคุณสมบัติที่แสดงออกของโลหะนั้น 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 ลัมพาทิวัฒน์ ได้ทำการศึกษาความเป็นไปได้ในการซ่อมแซมแม่พิมพ์ที่ผลิตจากเหล็กกล้าเครื่องมืองานเย็น โดยใช้กระบวนการเชื่อมด้วยเลเซอร์ โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อวิเคราะห์ผลกระทบเชิงกลที่เกิดขึ้นจากกระบวนการเชื่อม โดยเน้นศึกษาค่าความแข็งแรงของแนวเชื่อมและบริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อน (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) โดยใช้เครื่องเลเซอร์ชนิดนีโอดีเมียมแยกรายในการทดลอง 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 ซึ่งเป็นหัวใจสำคัญของการกำหนดแนวทางการซ่อมซึ่งต้องคำนึงถึงต้นทุน และประสิทธิภาพการใช้งานหลังการซ่อม

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 ไว้ด้านบน ซึ่งไม่สามารถให้แสงเลเซอร์ทะลุถึงรอยเชื่อมได้ ผลการศึกษานี้ชี้ให้เห็นถึงกลไกการถ่ายเทพลังงานของเลเซอร์ YAG และบทบาทของปฏิกิริยาเคมีในการเชื่อม ซึ่งช่วยให้เข้าใจกลไกการเชื่อมของวัสดุที่มีคุณสมบัติต่างกัน อันเป็นประโยชน์ต่อการออกแบบกระบวนการเชื่อมที่มีความเฉพาะเจาะจง

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