



ผลกระทบของจำนวนรอบการเชื่อมต่อคุณลักษณะการแตกหักและโครงสร้างจุลภาคของการเชื่อมโลหะ
ต่างชนิดระหว่างอะลูมิเนียมและเหล็กกล้าคาร์บอนโดยใช้ข้อต่อทอานซีชันแบบไบเมทัลลิก

นาวาตรีศุภกรชัย สิ้นธุ์ประสพชัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมการเชื่อม

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

ปีการศึกษา 2567

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

ผลกระทบของจำนวนรอบการซ่อมต่อคุณลักษณะการแตกหักและโครงสร้างจุลภาคของการเชื่อมโลหะ
ต่างชนิดระหว่างอะลูมิเนียมและเหล็กกล้าคาร์บอนโดยใช้ข้อต่อทรานซิชันแบบไบเมทัลลิก

นาวาตรีศุภกรชัย สิ้นธุ์ประสพชัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาลำดับ

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมเชื่อม

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

ปีการศึกษา 2567

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ



ใบรับรองวิทยานิพนธ์

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

เรื่อง ผลกระทบของจำนวนรอบการเชื่อมต่อคุณลักษณะการแตกหักและโครงสร้างจุลภาคของการเชื่อมโลหะต่างชนิดระหว่างอะลูมิเนียมและเหล็กกล้าคาร์บอนโดยใช้ข้อต่อทรานซิชันแบบไบเมทัลลิก

โดย นาวาตรีศุภรัชย์ สิ้นธุ์ประสพชัย

ได้รับอนุมัติให้นับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมการเชื่อม

..... คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย / หัวหน้าภาควิชา

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุพจน์ จันทรวีวัฒน์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

ประธานกรรมการ

.....
(รองศาสตราจารย์ ดร.อรรถพล แก้ววิลัย)

อาจารย์ที่ปรึกษา

.....
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชฎานี ทิพย์เสมอ)

กรรมการภายนอก

.....
(ดร.ธรรมนุญ ทวีชัย)

ชื่อ : นาวาตรีศุภชัย สันธุ์ประสพชัย
 ชื่อวิทยานิพนธ์ : ผลกระทบของจำนวนรอบการเชื่อมต่อคุณลักษณะการ
 แตกหักและโครงสร้างจุลภาคของการเชื่อมโลหะต่างชนิด
 ระหว่างอะลูมิเนียมและเหล็กกล้าคาร์บอนโดยใช้ข้อต่อ
 ทรานซิชั่นแบบไบเมทัลลิก
 สาขาวิชา : เทคโนโลยีวิศวกรรมการเชื่อม
 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
 อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชฎานี ทิพย์เสมอ
 ปีการศึกษา : 2567

บทคัดย่อ

การเชื่อมโลหะต่างชนิดระหว่างเหล็กกล้าคาร์บอนและอะลูมิเนียมมีข้อจำกัดด้านความแตกต่างของสมบัติทางกลและจุดหลอมเหลว ซึ่งเป็นสาเหตุสำคัญของความเปราะและข้อบกพร่องในแนวเชื่อม งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาพฤติกรรมความเปราะและโครงสร้างของรอยเชื่อมเชื่อมที่ใช้ข้อต่อทรานซิชั่นแบบไบเมทัลลิก โดยใช้วัสดุคือเหล็กกล้าคาร์บอน ASTM A131 เกรด EH36 และอะลูมิเนียม ASTM B209 เกรด 5083 ความหนา 6 มม. เชื่อมด้วยกระบวนการเชื่อมอาร์กด้วยลวด ฟลักซ์คอร์สำหรับเหล็กและกระบวนการเชื่อมโลหะโดยใช้แก๊สเฉื่อยปกคลุมสำหรับอะลูมิเนียม ในท่าขนานนอน (2F) และกำหนดรอบการเชื่อมเป็น 0 1 และ 3 รอบ ผลการตรวจสอบพบว่าข้อต่อทรานซิชั่นแบบไบเมทัลลิก บริเวณรอยต่อเหล็กกล้าคาร์บอนและอะลูมิเนียมมีค่าความแข็งประมาณ 240-250 HV ผิงเหล็กคือ 153-170 HV และผิงอะลูมิเนียมมีค่าความแข็งประมาณ 38 HV หลังการเชื่อมบริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อนของอะลูมิเนียมด้านเชื่อมต่อกับข้อต่อทรานซิชั่นแบบไบเมทัลลิก แนวเชื่อมของชิ้นงานที่ผ่านการเชื่อม 1 รอบ (R1) มีค่าความแข็งสูงสุดเท่ากับ 81.53 HV และแนวเชื่อมของชิ้นงานที่ไม่ผ่านการเชื่อม (NR) มีค่าความแข็งเท่ากับ 64.67 HV ทั้งนี้เนื่องจากผลกระทบทางความร้อนจากการเชื่อมเชื่อมผิงเหล็ก โดยพบเพิ่มเติมว่าบริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อนของเหล็กด้านเชื่อมต่อกับ TJ แนวเชื่อมที่ผ่านการเชื่อม 3 รอบ (R3) มีค่าความแข็งสูงสุดเฉลี่ยอยู่ที่ 216.15 HV ในขณะที่ NR มีค่า 185.17 HV ซึ่งพบว่าค่าความแข็งเพิ่มขึ้น 16.73% ซึ่งสอดคล้องกับโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงาน โดยชิ้นงาน R3 มีเกรนละเอียดกว่าเนื่องจากการเกิดการทำให้เกรนละเอียด ผลการวิจัยชี้ให้เห็นว่าการเชื่อมซ้ำหลายรอบได้เพิ่มความเสี่ยงต่อการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างเชิงลึกในแนวเชื่อมและรอยต่อของวัสดุต่างชนิด ซึ่ง

ส่งผลต่อความเปราะและความสมบูรณ์ของรอยเชื่อมในระยะยาว แนวทางการควบคุมจำนวนรอบ
การเชื่อมจึงเป็นปัจจัยสำคัญในการออกแบบงานเชื่อมโลหะต่างชนิดในภาคอุตสาหกรรม

(มีจำนวนทั้งสิ้น 120 หน้า)

คำสำคัญ : เหล็กกล้าคาร์บอน อะลูมิเนียม การเชื่อมโลหะต่างชนิด ข้อต่อทรานซิชันแบบไบเมทัลลิก

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก



Name : Lcdr. Supornchai Sinprasopchai
Thesis Title : Effect of Repair Cycles on Fractographic and
Microstructural Properties in Aluminum and Carbon
Steel Dissimilar Welds Using Transition Joints
Major Field : Welding Engineering Technology
King Mongkut's University of Technology North
Bangkok
Thesis Advisor : Assistant Professor Dr. Chayanee Tippayasam
Academic Year : 2024

ABSTRACT

Dissimilar welding between aluminum and carbon steel presents challenges due to differences in mechanical properties and melting points, which are key causes of brittleness and defects in the weld zone. This study aims to investigate the brittleness behavior and microstructure of repair welds utilizing bimetallic transition joints (TJ), employing ASTM A131 Grade EH36 carbon steel and ASTM B209 Grade 5083 aluminum, both with a thickness of 6 mm. The aluminum side was welded using the MIG process, while the steel side was welded using the FCAW process in the horizontal (2F) position. The number of repair cycles was set to 0, 1, and 3. Results showed that the hardness in the Al-Fe interface region of the TJ was approximately 240–250 HV, while the steel side exhibited hardness values ranging from 153–170 HV, and the aluminum side around 38 HV. After welding, the heat-affected zone (HAZ) on the aluminum side connected to the TJ in the R1 specimen (one repair cycle) exhibited the highest weld hardness of 81.53 HV, compared to 64.67 HV in the non-repaired (NR) specimen. This increase was attributed to the thermal influence of the steel-side repair welding. Additionally, in the steel HAZ near the TJ, the R3 specimen (three repair cycles) showed an average maximum hardness of 216.15 HV, while the NR specimen showed 185.17 HV—an increase of 16.73%. This result corresponds with the microstructural observation, where the R3 specimen exhibited finer grains due to grain refinement. The findings indicate that repeated repair welding may induce significant

structural changes in the weld and dissimilar metal interface, potentially compromising long-term integrity and increasing brittleness. Therefore, controlling the number of repair cycles is a critical consideration in the design of dissimilar metal repair strategies for industrial applications.

(Total 120 Pages)

Keywords: Carbon steel, Aluminum, Welding of various materials, Bimetallic transition joints

Advisor



กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ทางผู้วิจัยได้รับความอนุเคราะห์เป็นอย่างดีจากบุคคลหลายฝ่ายที่ได้ให้คำปรึกษา และคอยช่วยเหลือเกี่ยวกับการดำเนินงานในด้านต่าง ๆ ดังนั้น ผู้วิจัยวิทยานิพนธ์ ฉบับนี้ ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชญาณี ทิพยเสมอ ที่ได้ให้ความรู้ คำแนะนำ ข้อคิดเห็นต่างๆ รวมถึงการแก้ไขจุดบกพร่องของการวิจัยมาโดยตลอดจนวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เสร็จสมบูรณ์

ขอขอบพระคุณ คณะอาจารย์ เจ้าหน้าที่ภาควิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมงานเชื่อม ที่ให้ความรู้ และคำแนะนำ ตลอดจนอำนวยความสะดวกในการเรียนและการทำวิทยานิพนธ์

ขอขอบพระคุณ อู่ราชนาวิมิตล และ อู่ป้อมพระจุลจอมเกล้า กรมอุทหาเรือ ที่สนับสนุนวัสดุเครื่องมือ และสถานที่ในการทำงานวิจัย

ขอขอบพระคุณ คุณ ณัฐพงษ์ ดุษฎีวรวัธ วิศวกรประจำภาควิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมงานเชื่อม ที่ให้การช่วยเหลือ ให้คำแนะนำ ตลอดจนอำนวยความสะดวกในการใช้งานวัสดุเครื่องมือในการทำงานวิจัย

ขอขอบพระคุณ อาจารย์พรพล ศิลาคุปต์ ที่ให้การสนับสนุนการเชื่อมชิ้นงานทดสอบ สำหรับการทำงานวิจัย

สุดท้ายนี้ที่ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา และญาติมิตรของผู้วิจัย ที่สนับสนุน ส่งเสริมและให้กำลังใจ จนกระทั่งสำเร็จการศึกษา

ศุภรัชย์ สิ้นธุ์ประสพชัย

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	๗
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	๘
กิตติกรรมประกาศ	๑๑
สารบัญตาราง	๑๓
สารบัญภาพ	๑๔
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความสำคัญและความเป็นมาของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการทำวิจัย	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	4
1.5 แผนการดำเนินงานวิจัย	5
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	6
2.1 เหล็กกล้าคาร์บอน	6
2.2 อะลูมิเนียม	9
2.3 การเชื่อมโลหะต่างชนิด	11
2.4 การเชื่อมอาร์กกลวดเชื่อมไส้ฟลักซ์ (FCAW)	13
2.5 การเชื่อมอาร์กโลหะแก๊สคลุม (MIG)	16
2.6 การทดสอบความแข็งแบบวิกเกอร์ส (Vickers Hardness Test)	19
2.7 การเชื่อมด้วยการระเบิด (Explosion Welding)	20
2.8 สารประกอบอินเตอร์เมทัลลิก (Intermetallic Compounds)	23
2.9 การเชื่อมซ่อม (Welding repair)	26
2.10 พฤติกรรมที่เกิดขึ้นจากการเชื่อมซ่อม (Behavior of Welding Repair)	27
2.11 การกัด (Milling)	30
2.12 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	32
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย	40
3.1 วัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย	40
3.2 การทดลองเบื้องต้น (Preliminary Experiments) : การเชื่อมหน้างาน โดยช่างเชื่อมปฏิบัติการ ทร.	41

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.3 วิธีการดำเนินการวิจัย : ผลกระทบของการเชื่อมซ่อม (Repairing Weld)	51
บทที่ 4 ผลการทดลองและอภิปรายผลการทดลอง	58
4.1 ผลการทดลองเบื้องต้น (Preliminary Experiments) : การเชื่อมหน้างานโดยช่างเชื่อมปฏิบัติการ ทร.	58
4.2 ผลการทดลองการวิจัย : ผลกระทบของการเชื่อมซ่อม (Repairing Weld)	69
บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง	96
5.1 สรุปผลการทดลองเบื้องต้น (Preliminary Experiments) : การเชื่อมหน้างานโดยช่างเชื่อมปฏิบัติการ ทร.	96
5.2 สรุปผลการทดลองการวิจัย : ผลกระทบของการเชื่อมซ่อม (Repairing Weld)	96
บรรณานุกรม	97
ภาคผนวก ก	
ใบรับรองค่าส่วนผสมทางเคมี และคุณสมบัติทางกลของวัสดุจากทางผู้ผลิตเหล็กกล้าคาร์บอน ASTM A131 EH36/DH36	100
ภาคผนวก ข	
ใบรับรองค่าส่วนผสมทางเคมี และคุณสมบัติทางกลของวัสดุจากทางผู้ผลิตอะลูมิเนียม ASTM B209 เกรด 5083	103
ภาคผนวก ค	
ใบรับรองค่าส่วนผสมทางเคมี และคุณสมบัติทางกลของ Transition Joint	106
ภาคผนวก ง	
ใบรับรองค่าส่วนผสมทางเคมี และคุณสมบัติทางกลของลวดเชื่อมจากทางผู้ผลิต AWS A5.20 E71T-1C Dia.1.2 mm (FCAW)	108
ภาคผนวก จ	
ใบรับรองค่าส่วนผสมทางเคมี และคุณสมบัติทางกลของลวดเชื่อมจากทางผู้ผลิต AWS A5.10 ER5356 Dia.1.2 mm (MIG)	110
ภาคผนวก ฉ	
ข้อมูลสนับสนุน	112
ประวัติผู้เขียน	120

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2-1 การแบ่งประเภทของอะลูมิเนียม	11
2-2 ชนิดและโครงสร้างผลึก Al-Fe Intermetallics	24
3-1 ส่วนผสมทางเคมีของวัสดุฐาน	42
3-2 คุณสมบัติทางกลของวัสดุฐาน	42
3-3 ส่วนผสมทางเคมีของลวดเชื่อม	43
3-4 คุณสมบัติทางกลของลวดเชื่อม	43
3-5 พารามิเตอร์ในการเชื่อม	45
3-6 เงื่อนไขการเชื่อมซ่อม	52
3-7 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการเชื่อมวัสดุต่างชนิดระหว่างอะลูมิเนียมและเหล็กกล้าคาร์บอนในแต่ละรอบการเชื่อมซ่อม	53
4-1 ผลการตรวจสอบองค์ประกอบธาตุ	68
4-2 ข้อมูล XRD ของชิ้นงานเชื่อม	95
ฉ-1 ตัวแปรการเชื่อมในการทดลองเชื่อมหน้างานโดยช่างเชื่อมปฏิบัติการ ทร.	113
ฉ-2 ตัวแปรการเชื่อมเพื่อตรวจสอบผลกระทบของการเชื่อมซ่อม	113
ฉ-3 ค่าความแข็งชิ้นงานเหล็กกล้าคาร์บอนจากการทดลองเชื่อมหน้างานโดยช่างเชื่อมปฏิบัติการ ทร.	114
ฉ-4 ค่าความแข็งชิ้นงานอะลูมิเนียมจากการทดลองเชื่อมหน้างานโดยช่างเชื่อมปฏิบัติการ ทร.	115
ฉ-5 ค่าความแข็งชิ้นงานเหล็กกล้าคาร์บอนจากการเชื่อมเพื่อตรวจสอบผลกระทบของการเชื่อมซ่อม	116
ฉ-6 ค่าความแข็งชิ้นงานอะลูมิเนียมจากการเชื่อมเพื่อตรวจสอบผลกระทบของการเชื่อมซ่อม	117
ฉ-7 ค่าความแข็งของ Transition Joint	118

สารบัญญภาพ

ภาพที่	หน้า
1-1 โครงสร้างโลหะที่มีการใช้ข้อต่อทรานซิชันแบบไบเมทัลลิก	2
1-2 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย	5
2-1 โครงสร้างจุลภาคของเหล็กกล้าคาร์บอน	7
2-2 แผนภูมิเฟสระหว่างเหล็ก-คาร์บอน	8
2-3 ลักษณะกระบวนการเชื่อมฟลักซ์คอร์สามารถสร้างแก๊สปกคลุมขึ้นเองได้จากการหลอมไหม้ของฟลักซ์ (Self - Shielded)	14
2-4 ลักษณะกระบวนการเชื่อมฟลักซ์คอร์ที่ไซแกสปกคลุมจากภายนอก (Gas-Shielded)	15
2-5 ลักษณะกระบวนการเชื่อมอาร์กโลหะแก๊สปกคลุม	17
2-6 การถ่ายโอนแบบหยดขนาดใหญ่	18
2-7 ลักษณะหัวกดและรอยกดของการทดสอบความแข็ง Vickers	19
2-8 ส่วนประกอบในกระบวนการเชื่อมด้วยการระเบิดแบบขนาน	20
2-9 การเชื่อมกันของแผ่นฟลายเออร์และแผ่นฐานระหว่างกระบวนการระเบิด	21
2-10 โครงสร้างจุลภาคของรอยเชื่อมแบบคลื่น	22
2-11 ภาพถ่ายจุลทรรศน์แสดงระยะต่างๆ ของกระบวนการเกิดผลึกใหม่	28
2-12 อิทธิพลของอุณหภูมิการอบคืนตัว (ระยะเวลาอบ 1 ชั่วโมง) ต่อ ความต้านแรงดึง (Tensile Strength) และความเหนียว (Ductility) และ ขนาดของเกรนถูกแสดงเป็นฟังก์ชันของอุณหภูมิการอบคืนตัว	29
2-13 แผนภาพเชิงโครงสร้างแสดงการเติบโตของเกรนผ่านการแพร่กระจายของอะตอม	30
2-14 ลักษณะของการกัด	30
2-15 การใช้น้ำยาหล่อเย็นในการกัด	31
2-16 พื้นผิวรอยต่อของแผ่นวัสดุที่เคลือบด้วยกระบวนการเชื่อมระเบิด	34
2-17 ภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสงของอะลูมิเนียม 5083 ภายหลังกัดกรด	35
2-18 ภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดแสดงการแตกหัก และ กราฟแสดงปริมาณการก่อตัวของ IMCs	37
3-1 วัสดุฐานที่ใช้ในการทดลอง	42
3-2 ลวดเชื่อมที่ใช้ในการทดลอง	43
3-3 การเตรียมพื้นผิวด้วยการขัดด้วยเครื่องเจียร	44

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
3-4 การออกแบบบรอยต่อ	44
3-5 การตรวจสอบด้วยสายตา	46
3-6 การตรวจสอบด้วยสารแทรกซึม	47
3-7 การอัดขึ้นรูปเรซินขึ้นงานด้วย Phenolic Powder	48
3-8 การทดสอบค่าความแข็ง	49
3-9 การทดสอบ Fillet Break Test	49
3-10 การวิเคราะห์ด้วยกล้อง OM	50
3-11 แผนงานการทดลองเชื่อมซ่อม	51
3-12 ชิ้นงานทดลองหลังทำการเชื่อม	53
3-13 การกัดโลหะซ่อมชิ้นงานทดลอง และ เครื่องกัดโลหะแนวตั้ง	54
3-14 การตรวจสอบด้วยสายตา	54
3-15 การตรวจสอบด้วยสารแทรกซึม	54
3-16 ชิ้นงานสำหรับวิเคราะห์โครงสร้างมหภาคและจุลภาค	55
3-17 ชิ้นงานสำหรับวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRD	55
3-18 ชิ้นงานทดสอบค่าความแข็ง	56
3-19 ชิ้นงานทดสอบ Fillet Break Test	56
4-1 แนวเชื่อมชิ้นงาน	58
4-2 รูปตัดรอยเชื่อม พร้อมคำอธิบาย	59
4-3 ขนาดขารอยเชื่อม (Leg Size)	60
4-4 ตำแหน่งของสารแทรกซึม (Penetrant) ที่ปรากฏบนแนวเชื่อมของชิ้นงาน	60
4-5 ภาพถ่ายรังสี (RT) ของรอยเชื่อมชิ้นงาน	61
4-6 ภาพตัดขวางของชิ้นงานเชื่อมหลังการทดสอบ Fillet Break Test	62
4-7 ตำแหน่งสำหรับการทดสอบความแข็งวิกเกอร์ส	63
4-8 ค่าความแข็งวิกเกอร์ส	64
4-9 ภาพถ่ายโครงสร้างมหภาคของแนวเชื่อม	65
4-10 ภาพถ่ายโครงสร้างทางจุลภาคของแนวเชื่อมเหล็กกล้าคาร์บอน EH36	66
4-11 ภาพถ่ายโครงสร้างทางจุลภาคของแนวเชื่อมอะลูมิเนียม 5083	66

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
4-12 ตำแหน่งที่ทำการตรวจสอบชิ้นงาน Bimetallic Transition Joint	67
4-13 ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) บริเวณแนวต่อของชิ้นงาน Transition Joint	67
4-14 ตำแหน่งการวิเคราะห์ด้วย SEM	68
4-15 แนวเชื่อมชิ้นงานทดสอบ NR	70
4-16 แนวเชื่อมชิ้นงานทดสอบ R1	70
4-17 แนวเชื่อมชิ้นงานทดสอบ R3	70
4-18 ขนาดขารอยเชื่อม (Leg Size)	71
4-19 การโค้งงอของชิ้นงานทดสอบ	71
4-20 ค่ามุมที่เปลี่ยนแปลงจากการโค้งงอ	72
4-21 การทดสอบสารแทรกซึมแนวเชื่อมชิ้นงานทดสอบ NR	72
4-22 การทดสอบสารแทรกซึมแนวเชื่อมชิ้นงานทดสอบ R1	72
4-23 การทดสอบสารแทรกซึมแนวเชื่อมชิ้นงานทดสอบ R3	73
4-24 ชิ้นงานทดสอบ Fillet Break Test	73
4-25 ลักษณะความเสียหาย	74
4-26 ตำแหน่งสำหรับการทดสอบความแข็งวิกเกอร์ส	74
4-27 ค่าความแข็งวิกเกอร์สของแนวเชื่อมเหล็กกล้าคาร์บอน	75
4-28 ค่าความแข็งวิกเกอร์สของแนวเชื่อมอะลูมิเนียม	76
4-29 ค่าความแข็งวิกเกอร์สของ Transition Joint	78
4-30 ภาพถ่ายโครงสร้างมหภาคของแนวเชื่อมชิ้นงานทดสอบ	79
4-31 อัตราการเจือจางของแนวเชื่อมเหล็กกล้าคาร์บอนของชิ้นงานทดสอบ	79
4-32 อัตราการเจือจางของแนวเชื่อมอะลูมิเนียมของชิ้นงานทดสอบ	80
4-33 ภาพถ่าย OM ของวัสดุฐาน	81
4-34 ภาพถ่าย OM ภายในเนื้อเชื่อมเหล็กกล้าคาร์บอน EH36	81
4-35 ภาพถ่าย OM ภายใน HAZ ที่แผ่นเหล็กกล้าคาร์บอน EH36	83
4-36 ภาพถ่าย OM ภายใน HAZ ที่ TJ	83
4-37 ภาพถ่าย OM ภายในเนื้อเชื่อมอะลูมิเนียม 5083	85
4-38 ภาพถ่าย OM ภายใน HAZ ของอะลูมิเนียม 5083 และ TJ	85

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
4-39 โครงสร้างจุลภาคของบริเวณต่างๆ สำหรับการเชื่อมซ่อมแซมที่แตกต่างกัน	86
4-40 Test Locations	87
4-41 ค่าความแข็งของชิ้นงาน	88
4-42 ภาพการวิเคราะห์ EDS บริเวณการหลอมระหว่างโลหะ 2 ชนิดของ TJ ที่ชิ้นงาน NR	90
4-43 ภาพการวิเคราะห์ EDS บริเวณการหลอมระหว่างโลหะ 2 ชนิดของ TJ ที่ชิ้นงาน R1	90
4-44 ภาพการวิเคราะห์ EDS บริเวณการหลอมระหว่างโลหะ 2 ชนิดของ TJ ที่ชิ้นงาน R3	90
4-45 ภาพการวิเคราะห์ EDS แสดงการเกิดเฟส $FeAl_3$ บริเวณ Fusion Line ของ TJ ที่ชิ้นงาน R3	91
4-46 ภาพการวิเคราะห์ EDS การแตกหักแบบเหนียวของ TJ ชิ้นงาน NR	92
4-47 ภาพการวิเคราะห์ EDS การแตกหักแบบเปราะของ TJ ชิ้นงาน R3	92
4-48 แสดงลักษณะการเสียหายของชิ้นงานหลังการทดสอบแรงกด	93
4-49 บริเวณที่ทดสอบค่าความแข็ง TJ ของชิ้นงาน NR R1 และ R3	94
4-50 สเปกตรัม XRD ของชิ้นงานเชื่อม	95
4-51 กระบวนการเชื่อมซ่อมโครงสร้างเรือ	96
ก-1 ใบรับรองค่าส่วนผสมทางเคมี และคุณสมบัติทางกล หน้าที่ 1	101
ก-2 ใบรับรองค่าส่วนผสมทางเคมี และคุณสมบัติทางกล หน้าที่ 2	102
ข-1 ใบรับรองค่าส่วนผสมทางเคมี และคุณสมบัติทางกล หน้าที่ 1	104
ข-2 ใบรับรองค่าส่วนผสมทางเคมี และคุณสมบัติทางกล หน้าที่ 2	105
ค-1 ใบรับรองค่าส่วนผสมทางเคมี และคุณสมบัติทางกล	107
ง-1 ใบรับรองค่าส่วนผสมทางเคมี และคุณสมบัติทางกลของลวดเชื่อม AWS A5.20 E71T-1C Dia.1.2 mm (FCAW)	109
จ-1 ใบรับรองค่าส่วนผสมทางเคมี และคุณสมบัติทางกลของลวดเชื่อม AWS A5.10 ER5356 Dia.1.2 mm (MIG)	111
ฉ-1 การจำลองการกระจายตัวของอุณหภูมิจากการเชื่อมระหว่างวัสดุฐาน และข้อต่อแบบไบเมทัลลิก ทางฝั่งเหล็ก DH36	119
ฉ-2 การจำลองการกระจายตัวของอุณหภูมิจากการเชื่อมระหว่างวัสดุฐาน และข้อต่อแบบไบเมทัลลิก ทางฝั่งอะลูมิเนียม 5083	119

บทที่ 1

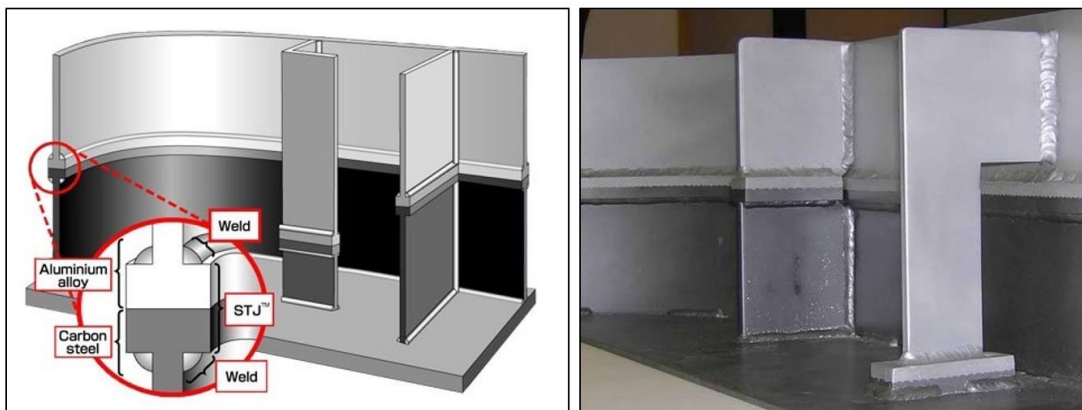
บทนำ

1.1 ความสำคัญและความเป็นมาของปัญหา

การเชื่อมโลหะต่างชนิดกัน เช่น เหล็กกล้าคาร์บอนกับอะลูมิเนียม ได้รับความนิยมนิยในอุตสาหกรรมต่อเรืออย่างมาก เนื่องจากสามารถผสมผสานข้อดีของวัสดุทั้งสองชนิด อะลูมิเนียม ซึ่งน้ำหนักเบาและมีสมบัติในการทนการกัดกร่อน ดังนั้นในอุตสาหกรรมต่อเรือที่โครงสร้างส่วนบนจากชั้นดาดฟ้า (Main Deck) ขึ้นไปจะใช้อะลูมิเนียมแทนเหล็กกล้าคาร์บอนทั้งหมด ในขณะที่เหล็กกล้าคาร์บอนมีความแข็งแรงเหมาะสมกับโครงสร้างส่วนล่าง ซึ่งต้องรับแรงภาระสูง จุดเชื่อมต่อระหว่างสองวัสดุนี้จึงมีความสำคัญอย่างยิ่ง

อย่างไรก็ตาม การเชื่อมระหว่างเหล็กกล้าคาร์บอนกับอะลูมิเนียมโดยตรงอาจเกิดการสูญเสียความแข็งแรงในรอยเชื่อมเพราะวัสดุทั้งสองชนิดมีจุดหลอมเหลวและสมบัติทางความร้อนแตกต่างกันเป็นอย่างมาก โดยเหล็กกล้าคาร์บอนมีจุดหลอมเหลวประมาณ 1370°C ซึ่งสูงกว่าอะลูมิเนียมที่จุดหลอมเหลวประมาณ 660°C ทำให้เกิดการสะสมความร้อน ผังอะลูมิเนียมหลอมก่อน ขณะที่ผังกเหล็กอาจเกิดโครงสร้างเปราะ เช่น มาร์เทนไซต์ (Martensite) หรือ สารประกอบโลหะผสม (Intermetallic Compounds) เช่น Al_3Fe และ Fe_2Al_5 ซึ่งทำให้เกิดความเปราะในแนวเชื่อม การก่อตัวของสารประกอบระหว่างโลหะทำให้ไปสู่รอยต่อหรือรอยเชื่อมที่ไม่แข็งแรง และอาจได้รับความเสียหายจากสภาพแวดล้อมที่มีความชื้นสูงและเกลือในอากาศ

เพื่อแก้ปัญหาดังกล่าว ในปัจจุบันมีการใช้ข้อต่อทรานซิชันแบบไบเมทัลลิก (Bimetallic Transition Joint, TJ) ซึ่งมีกระบวนการผลิตโดยใช้การเชื่อมจากการระเบิด (Explosion Welding) ซึ่งช่วยให้วัสดุต่างชนิดกันทั้งสองสามารถยึดติดกันอย่างแน่นหนาในระดับจุลภาค และสามารถทนต่อแรงดันสูงได้ จึงถูกนำมาใช้ในงานสร้างและซ่อมแซมเรือมาโดยตลอด เนื่องจากช่วยอำนวยความสะดวกให้ช่างเชื่อมทำการเชื่อมต่อโครงสร้างต่างชนิดกันได้ง่ายขึ้น อย่างไรก็ตาม เนื่องจากต้นทุนของ TJ นั้นมีราคาที่สูง การเสียหายเพียงบางจุดของแนวเชื่อมอาจไม่คุ้มต่อการเปลี่ยนใหม่ทั้งหมด งานจริงโดยเฉพาะอยู่ซ่อมเรือ มักพบปัญหาจากการเชื่อมด้านเหล็กซึ่งเกิดข้อบกพร่องได้ง่าย เช่น รอยกัดแห้ว (Undercut) หรือรอยแตก (Crack) ช่างเชื่อมจึงนิยมใช้วิธี “เชื่อมซ่อม” หรือ “Repair Weld” เป็นแนวปฏิบัติทั่วไปในงาน อย่างไรก็ตาม การเชื่อมซ่อมหลายรอบส่งผลต่อโครงสร้างจุลภาคและสมบัติทางกลของแนวเชื่อม ซึ่งอาจนำไปสู่ความเปราะเฉพาะตำแหน่งได้ งานวิจัยนี้จึงมุ่งศึกษาผลของจำนวนรอบการเชื่อมซ่อมต่อคุณภาพรอยเชื่อม โดยมีเป้าหมายเพื่อพัฒนาแนวทางควบคุมการซ่อมอย่างมีประสิทธิภาพในระดับอุตสาหกรรม



ภาพที่ 1-1 โครงสร้างโลหะที่มีการใช้ข้อต่อทรานซิชันแบบไบเมทัลลิก

1.2 วัตถุประสงค์ของการทำวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษาผลกระทบในการเตรียมรอยต่อที่มีต่อคุณภาพของแนวเชื่อมสำหรับการเชื่อมต่อทรานซิชันแบบไบเมทัลลิก (TJ) เข้ากับวัสดุฐาน โดยเปรียบเทียบระหว่างรอยต่อแบบฟิลเลต (Fillet) และ รอยต่อแบบเตรียมรอยบาก (Bevel)

1.2.2 เพื่อวิเคราะห์พฤติกรรมความเปราะของแนวเชื่อม โดยอาศัยการตรวจสอบการเกิดสารประกอบโลหะผสม รวมถึงสมบัติเชิงกลและลักษณะโครงสร้างระดับจุลภาคที่เปลี่ยนไปภายหลังกระบวนการเชื่อม

1.2.3 เพื่อประเมินผลกระทบของการเชื่อมซ่อมซ้ำหลายรอบต่อความสมบูรณ์ของแนวเชื่อม โดยการวิเคราะห์เปรียบเทียบสมบัติเชิงกล และบริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อนของชิ้นงานที่ทำการซ่อมในจำนวนครั้งแตกต่างกัน

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1.3.1 เตรียม Pre Welding Procedure Specification ตามมาตรฐาน AWS D1.1-2020

1.3.2 เหล็กกล้าคาร์บอน ASTM A131/A131M Grade EH36 และ อะลูมิเนียม ASTM B209 Grade 5083 ความหนา 6 มิลลิเมตร ความกว้าง 150 มิลลิเมตร ความยาว 300 มิลลิเมตร แท่ง Bimetallic Transition joint ความกว้าง 18 และ 38 ความยาว 300 มิลลิเมตร

1.3.3 กำหนดองค์ประกอบในการการทดลองเบื้องต้น (Preliminary Experiments) : การเชื่อมหน้างานโดยช่างเชื่อมปฏิบัติการ ทร. ดังนี้

1.3.3.1 การเตรียมรอยต่อของชิ้นงาน J1 ใช้รอยต่อ Fillet แบบ T-Joint และชิ้นงาน J2 ใช้รอยต่อ Fillet 1 ด้าน และ Bevel 1 ด้าน

1.3.4 กำหนดองค์ประกอบในการดำเนินการวิจัย : ผลกระทบของการเชื่อมซ่อม (Repairing Weld)

1.3.4.1 กำหนดการอุ่นชิ้นงานก่อนทำการเชื่อม ที่อุณหภูมิ 100°C

1.3.4.1 กำหนดเงื่อนไขในการซ่อมรอยเชื่อมตามระดับความลึก ได้แก่ที่ระดับพื้นผิวของวัสดุ กำหนดรอบการเชื่อมซ่อมเป็น 0 1 และ 3 รอบ เพื่อศึกษาผลของ Thermal Cycling ต่อคุณภาพแนวเชื่อม

1.3.5 กำหนดองค์ประกอบในการเชื่อมด้านเหล็กกล้าคาร์บอน ดังนี้

1.3.5.1 เครื่องเชื่อมอาร์กลวดไส้ฟลักซ์ (FCAW) กระแสไฟเชื่อม 180 Amp. ขั้วเชื่อม DCEP

1.3.5.2 ลวดเชื่อม AWS A5.20 E71T-1C ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.2 มิลลิเมตร สำหรับกระบวนการเชื่อม FCAW

1.3.5.3 แก๊สปกคลุมแนวเชื่อม คาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) บริสุทธิ์ 99.99% อัตราการไหล 20 ลิตรต่อนาที

1.3.6 กำหนดองค์ประกอบในการเชื่อมด้านอะลูมิเนียม ดังนี้

1.3.6.1 เครื่องเชื่อมอาร์กโลหะแก๊สคลุม (GMAW) แบบ MIG กระแสไฟเชื่อม 165 Amp. ขั้วเชื่อม DCEP

1.3.6.2 ลวดเชื่อม AWS A5.10 ER5356 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.2 มิลลิเมตร สำหรับกระบวนการเชื่อม MIG

1.3.6.3 แก๊สปกคลุมแนวเชื่อม อาร์กอน (Ar) บริสุทธิ์ 99.99% อัตราการไหล 20 ลิตรต่อนาที

1.3.7 ทดสอบคุณภาพงานเชื่อม ด้วยวิธีการตรวจสอบด้วยวิธีพินิจ (Visual Testing, VT) การตรวจสอบด้วยสารแทรกซึม (Liquid Penetrant Testing, PT) ตามมาตรฐาน AWS D1.1 Section 6.10 และ การตรวจสอบด้วยการถ่ายภาพรังสี (Radiographic Testing, RT) ตามมาตรฐาน AWS D1.1 Section 6.10

1.3.8 ทดสอบสมบัติทางกล ด้วยการทดสอบความแข็ง (Hardness Test) มาตรฐาน ASTM E92:2023

1.3.9 ตรวจสอบโครงสร้างมหภาคด้วยกล้องสเตอริโอ (Stereo Microscope)

1.3.10 ตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง (Optical Microscope, OM) และกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM)

1.3.11 วิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี (Chemical Compositions) โครงสร้างผลึก (Crystal Structure) ด้วยเทคนิค Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy (EDS) และ เทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ (X-Ray Diffractometer, XRD)

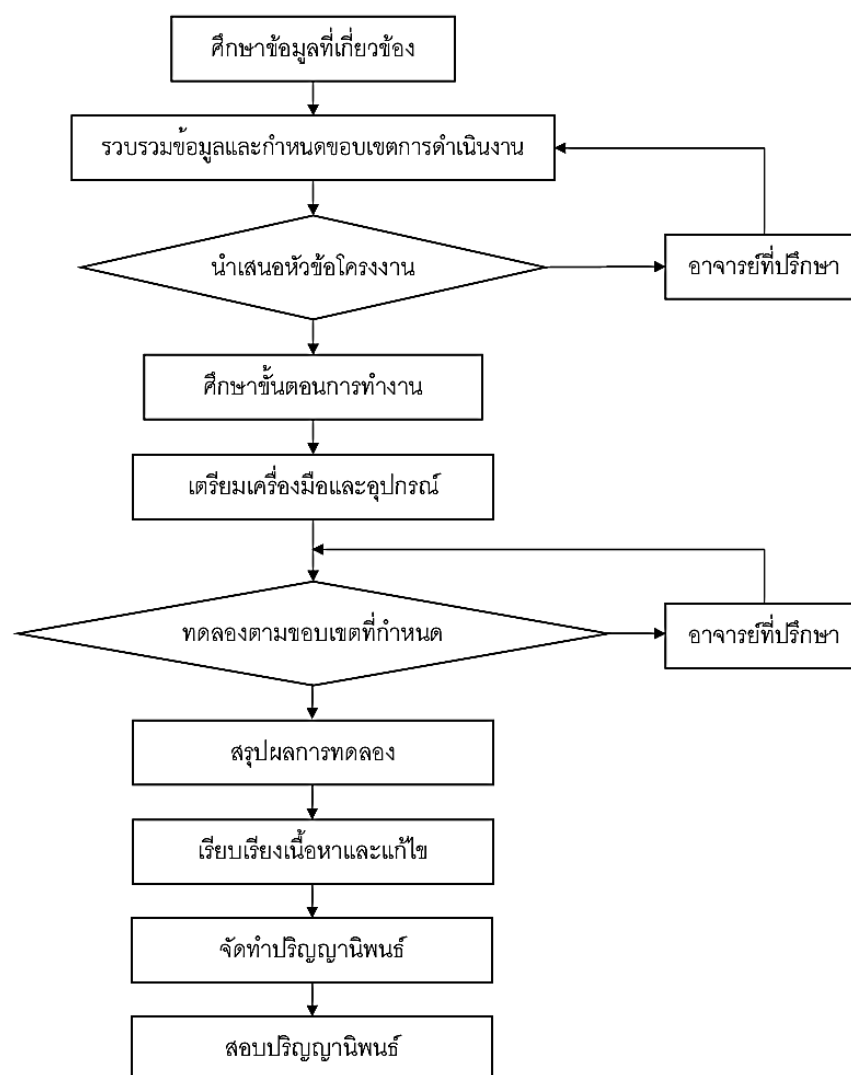
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 สามารถใช้เป็นแนวทางในการเลือกเตรียมรอยต่อในการเชื่อมต่อทรานซิชันแบบไบเมทัลลิก (TJ) เข้ากับวัสดุฐานเพื่อให้ได้แนวเชื่อมที่มีประสิทธิภาพ

1.4.2 สามารถเข้าใจกลไกการเกิดสารประกอบโลหะผสมซึ่งส่งผลกระทบต่อความเปราะที่เกิดขึ้นกับวัสดุ เพื่อที่จะสามารถกำหนดแนวทางในงานเชื่อมเพื่อหลีกเลี่ยงความเสียหายจากพฤติกรรมความเปราะที่จะเกิดขึ้นในอนาคต ทำให้มีความปลอดภัยและคงทนในการใช้งานระยะยาว

1.4.3 ได้ข้อมูลเชิงเปรียบเทียบเกี่ยวกับจำนวนรอบในการเชื่อมซ้ำที่ส่งผลกระทบต่อคุณสมบัติของแนวเชื่อม เช่น ความแข็งแรงและโครงสร้างในบริเวณผลกระทบที่เกิดจากความร้อน ซึ่งมีประโยชน์ในการวางแผนงานซ่อมและการใช้วัสดุให้มีความคุ้มค่า

1.5 แผนการดำเนินงานวิจัย



ภาพที่ 1-2 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

บทที่ 2

ทฤษฎีที่สำคัญและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 เหล็กกล้าคาร์บอน [1]

การแบ่งเหล็กกล้าตามมาตรฐาน ASTM (American Society for Testing And Materials) ผลิตภัณฑ์เหล็กที่ใช้ในปัจจุบันประกอบด้วยเหล็ก 2 ชนิดด้วยกัน ประกอบด้วย เหล็กกล้าและเหล็กหล่อ ซึ่งเหล็กกล้าจะแบ่งเป็น 2 กลุ่มใหญ่ๆ คือเหล็กกล้าคาร์บอนและเหล็กกล้าผสม

2.1.1 เหล็กกล้าคาร์บอน (Carbon Steel)

ซึ่งเป็นเหล็กกล้าคาร์บอนที่เป็นส่วนผสมหลัก ธาตุอื่นที่มีอยู่น้อย ไม่เจาะจง ส่วนผสมอื่นลงไป แต่อาจจะติดมาจากการรวมวิธีการถลุง หรือกรรมวิธีการหล่อแก๊ส เหล็กกล้าคาร์บอนแบ่งออกเป็น 3 ประเภท ตามปริมาณคาร์บอนที่ผสม คือ

- เหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ (Low Carbon Steel) เป็นเหล็กที่มีปริมาณคาร์บอนต่ำกว่า 0.2% จะมีโครงสร้างเป็นเกรนเฟอร์ไรต์ เหล็กชนิดนี้มีความแข็งแรงต่ำสามารถตีหรือตีเป็นแผ่นได้ง่าย ตัวอย่างเหล็ก เช่น เหล็กเส้นเหล็กแผ่นที่ใช้กันทั่วไป

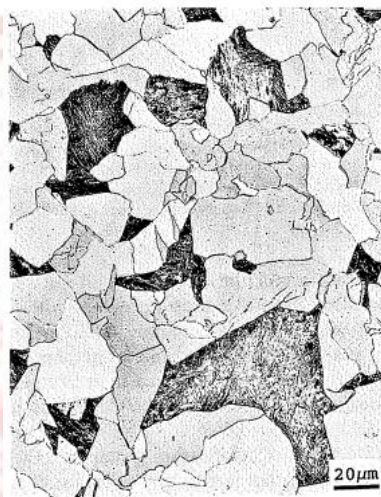
- เหล็กกล้าคาร์บอนปานกลาง (Medium Carbon Steel) เป็นเหล็กที่มีปริมาณคาร์บอนอยู่ระหว่าง 0.2-0.5% จะมีโครงสร้างเป็นเกรนเฟอร์ไรต์และเพิร์ลไลต์ ดังแสดงในภาพที่ 2-1 เป็นเหล็กที่มีความแข็งแรงสูงกว่าเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ ใช้ทำชิ้นส่วนของเครื่องจักรทั่วไป เหล็กประเภทนี้สามารถทำการอบชุบความร้อนได้

- เหล็กกล้าคาร์บอนสูง (High Carbon Steel) เป็นเหล็กที่มีปริมาณคาร์บอนสูงกว่า 0.5% จะมีโครงสร้างเป็นเกรนเพิร์ลไลต์ และโครงข่ายซีเมนไทต์ตามขอบเกรน เหล็กชนิดนี้จะมีควาแข็งแรงและความแข็งสูง สามารถทำการอบชุบความร้อนให้คุณสมบัติความแข็งเพิ่มขึ้นได้ ใช้ทำพวกเครื่องมือเครื่องใช้ต่างๆที่ต้องการผิวแข็งและความต้านทานการสึกหรอสูง

2.1.2 เหล็กกล้าผสม (Alloy Steel)

คือเหล็กกล้าคาร์บอนที่มีธาตุผสมอื่นๆผสมอยู่ เช่น โครเมียม นิกเกิล โมลิบดีนัม วาเนเดียม และโคบอลต์ สำหรับแมงกานีสและซิลิกอน ถ้ามีปริมาณสูงกว่าเหล็กกล้าคาร์บอนจะจัดเป็นธาตุผสมเช่นเดียวกัน ดังเช่น ผสมแมงกานีส หรือซิลิกอนเกินกว่า 1% การผสมธาตุต่างๆลงไปในเหล็กกล้าคาร์บอน ส่วนใหญ่มุ่งที่จะปรับปรุงคุณสมบัติความสามารถในการชุบแข็ง (Harden Ability) คุณสมบัติต้านทานการกัดกร่อนทั้งที่อุณหภูมิปกติและอุณหภูมิสูง และในบางกรณีเพื่อปรับปรุงคุณสมบัติทางไฟฟ้าและคุณสมบัติเกี่ยวกับแม่เหล็ก เหล็กกล้าผสมแบ่งออกเป็น 2 กลุ่มใหญ่ๆ คือเหล็กกล้าผสมต่ำซึ่งจะมีธาตุผสมไม่เกิน 10% และเหล็กกล้าผสมสูงซึ่งมีปริมาณธาตุผสมมากกว่า 10%

การเรียกชื่อเหล็กกล้าตามมาตรฐาน ASTM ชนิด Plain Carbon or Alloy Steel จะใช้ตัวเลข 4 ตัว 2 ตัวแรก บอกถึงโลหะผสมตัวหลัก 2 ตัวสุดท้าย บอกถึงปริมาณคาร์บอนในสัดส่วนร้อยละ Carbon Steel เช่น 1001 หมายถึง Plain Carbon Steel มี Mn ไม่เกิน 1.00% Mn



ภาพที่ 2-1 โครงสร้างจุลภาคของเหล็กกล้าคาร์บอน

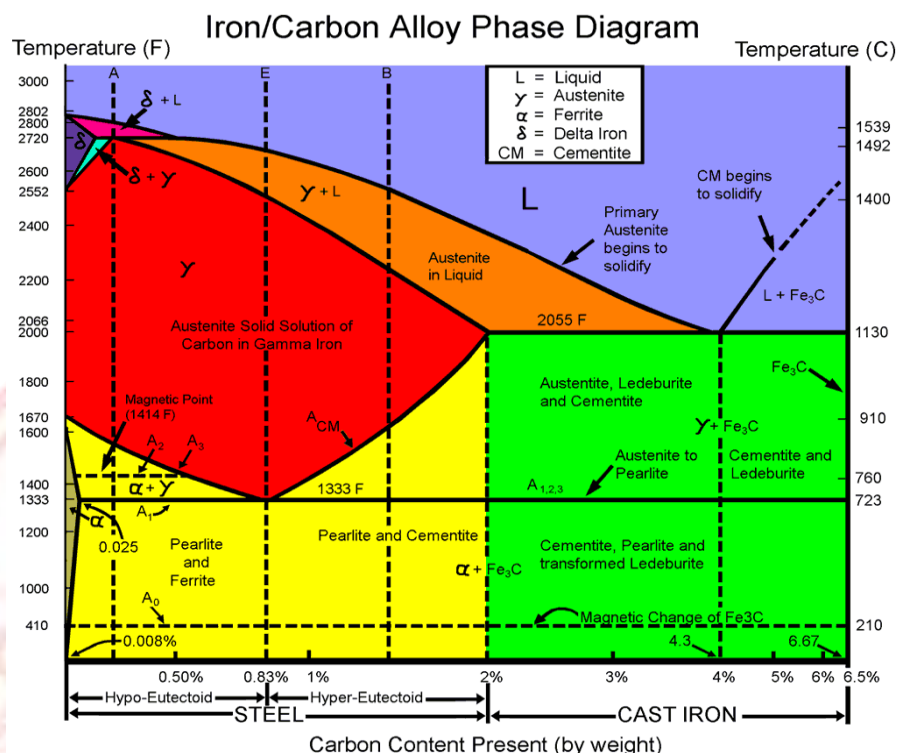
2.1.3 แผนภูมิเฟสระหว่างเหล็ก-คาร์บอน

เป็นแผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณคาร์บอน ดังแสดงในภาพที่ 2-2 ที่ผสมอยู่ในเหล็ก และอุณหภูมิว่ามีการเปลี่ยนแปลงอย่างไร เมื่อมีการเติมคาร์บอนที่ปริมาณต่างๆ ณ อุณหภูมิต่างกัน เฟสในเนื้อเหล็กจะเกิดเฟสอะไรขึ้นได้บ้าง ซึ่งเฟสที่เกิดขึ้นระหว่างการผสมกันของธาตุเหล็กกับธาตุคาร์บอนที่สนใจมีอยู่ 3 ลักษณะ ได้แก่

2.1.3.1 เหล็กที่มีธาตุคาร์บอนผสม เมื่ออยู่ที่อุณหภูมิสูงพอ เหล็กกับคาร์บอนจะมีการหลอมละลายเข้าด้วยกันในสถานะที่เป็นของเหลวเนื้อเดียว กล่าวได้ว่ามีเฟสเดียว คือสารละลายของเหลว (Liquid Solution) ระหว่างเหล็กกับคาร์บอน

2.1.3.2 ที่อุณหภูมิต่ำกว่าจุดหลอมเหลว เหล็กที่มีธาตุคาร์บอนผสมอยู่ในปริมาณต่ำ จะอยู่ในสถานะของแข็งโดยมีธาตุคาร์บอนละลายอยู่ในเนื้อเหล็กในสถานะของแข็งนี้เรียกว่าสารละลายของแข็ง (Solid Solution)

2.1.3.3 เหล็กที่มีปริมาณคาร์บอนสูงเกินกว่าจะละลายเป็นเนื้อเดียวกับเหล็กในสถานะของแข็งได้จะเกิดเฟส ที่แยกออกจากเนื้อเหล็กคือเฟสของเหล็กคาร์ไบด์ ซึ่งมีชื่อเรียกว่า ซีเมนต์ไต์ (Cementite)



ภาพที่ 2-2 แผนภูมิเฟสระหว่างเหล็ก-คาร์บอน

(ที่มา: <http://akazuhri.blogspot.com/2013/08/diagram-fe3c-karbida-besi.html>)

2.1.4 ค่าปริมาณคาร์บอนเทียบเท่าของเหล็กกล้าคาร์บอน

ค่าปริมาณคาร์บอนเทียบเท่า (CE) คือ ค่าที่พิจารณาปริมาณของธาตุที่เจือปนอยู่ในเนื้อเหล็ก และมีผลเช่นเดียวกับคาร์บอนอันประกอบด้วย Mn Cr Mo V Ni และ Cu ในการทำการเชื่อม เหล็กกล้าคาร์บอนจำเป็นอย่างยิ่งที่ต้องมีการพิจารณา ค่าปริมาณคาร์บอนเทียบเท่าของเหล็กเพื่อควบคุมปริมาณธาตุที่เจือเข้าไปในแนวเชื่อมในขณะทำการเชื่อมสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (2-1)

$$CE = \%C + \frac{\%Mn}{6} + \frac{\%Cr + \%Mo + \%V}{5} + \frac{\%Ni + \%Cu}{15} \quad (2-1)$$

2.1.5 เหล็กกล้าคาร์บอน ASTM A131 เกรด EH36/DH6 [2]

เหล็กกล้าคาร์บอน ASTM A131 เกรด EH36/DH6 จัดเป็นเหล็กกล้าคาร์บอนประเภท เหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ (Low Carbon Steel) ที่มีความต้านทานแรงดึงสูง มีความสามารถในการเชื่อม ได้ดี ขึ้นรูปง่าย และมีความสามารถในการต้านทานแรงกระแทก นอกจากนี้ เหล็กกล้าคาร์บอน เกรด EH6/DH36 ยังมีการปรับปรุงคุณสมบัติทางเทคนิคเพื่อให้เหมาะสมกับการใช้งานในสภาพแวดล้อมที่มี

ความท้าทาย เช่น การทนทานต่ออุณหภูมิต่ำ และการทนทานต่อการกัดกร่อนในสภาพแวดล้อมทะเล ซึ่งเป็นลักษณะเฉพาะของเหล็กกล้าคาร์บอนสำหรับอุตสาหกรรมต่อเรือและโครงสร้างในทะเล

2.2 อะลูมิเนียม [3]

อะลูมิเนียม เป็นธาตุเคมีที่มีสัญลักษณ์ Al เป็นโลหะสีขาวเงิน น้ำหนักเบา ทนต่อการกัดกร่อน มีความนำความร้อนและไฟฟ้าได้ดี ไม่เป็นแม่เหล็ก และมีความเหนียว สามารถกลึง หล่อ และรีดได้ง่าย อะลูมิเนียมเป็นโลหะที่พบมากที่สุดในโลก คิดเป็นมากกว่า 8% ของเปลือกโลก รองจากออกซิเจนและซิลิกอน อะลูมิเนียมเป็นโลหะชนิด Non-Ferrous ที่มีการผลิตมากที่สุดเนื่องจากมีคุณสมบัติที่ดีและมีปริมาณที่มาก มีการใช้กันอย่างแพร่หลายในหลายอุตสาหกรรม รวมถึงการขนส่ง การก่อสร้าง บรรจุก๊าซ การผลิตเครื่องจักร และสินค้าอุปโภคบริโภค

โดยทั่วไปอะลูมิเนียมบริสุทธิ์ (Pure Aluminum) จะมีสมบัติที่อ่อน ซึ่งธาตุผสมจะช่วยเพิ่มความแข็งแรง โดยสารละลายของแข็ง (Solution Hardening) หรือโดยการตกตะกอน (Precipitation Hardening) ธาตุเจือที่นิยมเติมลงไปเพื่อปรับปรุงคุณสมบัติ ได้แก่ ซิลิกอน (Si) ธาตุแมกนีเซียม (Mg) แมงกานีส (Mn) ทองแดง (Cu) และสังกะสี (Zn)

มาตรฐานของอะลูมิเนียมและอะลูมิเนียมผสม มาตรฐานยุโรปได้กำหนดระบบตัวเลขสำหรับอะลูมิเนียมผสม (Wrought Alloys)

1xxx	อะลูมิเนียมบริสุทธิ์
2xxx	อะลูมิเนียมผสมทองแดง
3xxx	อะลูมิเนียมผสมแมงกานีส
4xxx	อะลูมิเนียมผสมซิลิกอน
5xxx	อะลูมิเนียมผสมแมกนีเซียม
6xxx	อะลูมิเนียมผสมซิลิกอนและแมกนีเซียม
7xxx	อะลูมิเนียมผสมสังกะสีและแมกนีเซียม
8xxx	อะลูมิเนียมประเภทอื่นๆ

แสดงรายละเอียดดัง ต่อไปนี้

อะลูมิเนียมบริสุทธิ์ (1xxx) มีความบริสุทธิ์ของอะลูมิเนียมที่ 99.0% ถึง 99.9% อะลูมิเนียมในกลุ่มนี้มีความต้านทานการกัดกร่อนได้ดีสามารถนำ ไฟฟ้าและความร้อนได้ดี ยังสามารถนำไปขึ้นรูปได้ง่าย ทั้งการตัดเฉือนและขึ้นรูปเย็นด้วยกระบวนการต่าง ๆ ความสามารถในการเชื่อมอยู่ในเกณฑ์ที่น่าพอใจ ข้อเสียคือในด้านของความแข็งแรงและคุณสมบัติทางกลที่ต่ำกว่าวัสดุอื่น

อะลูมิเนียมผสมทองแดง (2xxx) เป็นอะลูมิเนียมที่มีความแข็งแรงสูงคุณสมบัติทางกลใกล้เคียงกับเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ โดยสามารถที่ทำการปรับปรุงคุณสมบัติทางกลให้ดีขึ้นได้ด้วยกรรมวิธีทาง

ความร้อนได้โดยทำการอบละลาย (Solution Treatment) และชุบ (Quenching) ต่อจากนั้นปล่อยให้ตกตะกอน (Precipitation) เรียกกระบวนการนี้ว่า การอบบ่มแข็ง (Aging) ซึ่งภายหลัง การอบบ่มความสามารถในการต้านทานการกัดกร่อนจะลดลง แต่ความสามารถในการเชื่อมของอะลูมิเนียมชนิดนี้จะต่ำกว่าชนิดอื่น ๆ

อะลูมิเนียมผสมแมงกานีส (3xxx) เป็นอะลูมิเนียมที่มีคุณสมบัติเหมือนกับอะลูมิเนียมบริสุทธิ์ แต่มีความแข็งแรงและมีคุณสมบัติทางกลที่ดีกว่า จัดว่าเป็นกลุ่มที่ไม่สามารถปรับปรุงคุณสมบัติด้วยการวิธีทางความร้อนได้

อะลูมิเนียมผสมซิลิกอน (4xxx) อะลูมิเนียมชนิดนี้จัดว่าเป็นกลุ่มที่ไม่สามารถปรับปรุงคุณสมบัติด้วยการวิธีทางความร้อนได้ แต่เมื่ออยู่ในสภาพของเหลวจะไหลตัวได้ดี และขณะแข็งตัวจะไม่เกิดความแตกร้าวทั้งในสภาพร้อนและเย็น ดังนั้นจึงนิยมใช้ในการเป็นลวดเติมสำหรับเชื่อมอะลูมิเนียมผสมและอะลูมิเนียมหล่อ

อะลูมิเนียมผสมแมกนีเซียม (5xxx) บางครั้งจะมีการเติมแมงกานีสลงไปด้วย อะลูมิเนียมผสมชนิดนี้จัดว่าเป็นกลุ่มที่ไม่สามารถปรับปรุงคุณสมบัติได้ด้วยการวิธีทางความร้อนจึงนิยมนำไปทำลวดเติม

อะลูมิเนียมผสมแมกนีเซียมและซิลิกอน (6xxx) อะลูมิเนียมชนิดนี้จัดว่าเป็นกลุ่มที่สามารถปรับปรุงคุณสมบัติทางกลด้วยการวิธีทางความร้อนได้ มีความแข็งแรงและคุณสมบัติทางกลที่ดีพอสมควร ความต้านทานการกัดกร่อน ความสามารถในการแปรรูป และความสามารถในการเชื่อมอยู่ในเกณฑ์ที่พอใช้ แต่มีข้อเสียคือเมื่อนำอะลูมิเนียมผสมชนิดนี้ไปทำการเชื่อมด้วยการวิธีทำให้ความร้อนแบบต่างๆ จะทำให้บริเวณข้างแนวเชื่อมอ่อนตัว

อะลูมิเนียมสังกะสีและแมกนีเซียม (7xxx) อะลูมิเนียมชนิดนี้มีการเจือธาตุสังกะสีเป็นธาตุหลัก และแมงกานีสเป็นธาตุรอง นอกจากนั้นยังมีทองแดง และโครเมียมอีกเล็กน้อย อะลูมิเนียมผสมกลุ่มนี้มีความแข็งแรงและคุณสมบัติทางกลที่ดีมาก นอกจากนี้ยังมีน้ำหนักเบาและความต้านทานการกัดกร่อน แต่ความสามารถในการเชื่อมอยู่ในเกณฑ์ที่อ่อนข้างต่ำ

อะลูมิเนียมจะแบ่งกลุ่มตามวิธีการเพิ่มความแข็งแรงได้ 2 กลุ่มใหญ่ คือประเภทที่ไม่สามารถบำบัดทางความร้อนได้ (Non-Heat Treatable) และประเภทที่สามารถบำบัดทางความร้อนได้ (Heat Treatable)

1) อะลูมิเนียมกลุ่มที่ไม่สามารถบำบัดทางความร้อนได้

อะลูมิเนียมผสมกลุ่มนี้จะไม่สามารถเพิ่มความแข็งแรงโดยวิธีการทางความร้อนได้ค่าความแข็งแรงเริ่มต้นจะขึ้นอยู่กับผลของธาตุผสมต่างๆ เช่นซิลิกอน เหล็ก แมงกานีส และแมกนีเซียม ความแข็งแรงของอะลูมิเนียมในกลุ่มนี้สามารถเพิ่มขึ้นได้โดยวิธี สเตรนฮาร์ดเทนนิ่ง ในการขึ้นรูปเย็น (Cold Working) เช่น การรีด (Rolling) การอัดขึ้นรูป (Extrusion) การดึง (Drawing) และการตีขึ้นรูป

(Forging) บางที่ต้องทำการอบอ่อน (Annealing) ที่อุณหภูมิ 300-400 องศาเซลเซียส เพื่อลดความแข็ง และเพิ่มความเหนียว แสดงดังตารางที่ 2-1

2) อะลูมิเนียมกลุ่มที่สามารถบำบัดทางความร้อนได้

อะลูมิเนียมผสมที่สามารถกระทำทางความร้อนได้ ค่าความแข็งแรงเริ่มต้นจะขึ้นอยู่กับส่วน ผสมทางเคมีเหมือนกับกลุ่มแรก เช่น ทองแดง แมกนีเซียม สังกะสี ซิลิกอน ซึ่งอะลูมิเนียมกลุ่มนี้ สามารถเพิ่มความแข็งแรงได้โดยวิธีการอบละลาย ที่อุณหภูมิ (450-550 องศาเซลเซียส) แล้วตามด้วยการชุบน้ำ หลังจากนั้นก็มีกระบวนการบ่มธรรมชาติ หรือบ่มเทียม (100-250 องศาเซลเซียส) จากการบำบัดทางความร้อนดังกล่าวอะลูมิเนียมสามารถเพิ่มความแข็งแรงได้โดยการตกตะกอน

ตารางที่ 2-1 การแบ่งประเภทของอะลูมิเนียม [3]

กลุ่มอัลลอย	การแบ่งระบบ	เกรด
กลุ่มที่ไม่สามารถบำบัดทางความร้อนได้	Al : 99.00%	1xxx
	Al-Mn	3xxx
	Al-Si	4xxx
	Al-Mg	5xxx
กลุ่มที่สามารถบำบัดทางความร้อนได้	Al-Cu	2xxx
	Al-Mg-Si	6xxx
	Al-Zn-Mg	7xxx

2.2.1 อะลูมิเนียม ASTM B209 เกรด 5083 [4]

อะลูมิเนียม ASTM B209 เกรด 5083 เป็นโลหะผสม Al และ Mg เป็นอะลูมิเนียมกันสนิมที่ใช้กันอย่างแพร่หลายมาก มีความสามารถในการยืดหยุ่นที่ดี แปรรูปได้ มีความแข็งแรงปานกลาง มีความสามารถในการเชื่อม และทนต่อการกัดกร่อนได้ดี นอกจากนี้ยังสามารถเพิ่มความแข็งแรงจากการชุบแข็งโดยไม่ต้องผ่านกระบวนการอบชุบ นิยมใช้ในอุตสาหกรรมทางทะเลสำหรับตัวเรือและโครงสร้างทางทะเลอื่นๆ เนื่องจากมีคุณสมบัติต้านทานการกัดกร่อนที่สูงเมื่อเทียบกับโลหะผสมอื่นๆ

2.3 การเชื่อมโลหะต่างชนิด [5]

การเชื่อมโลหะต่างชนิด (Dissimilar Metal Welding) เป็นกระบวนการที่เชื่อมโลหะสองชนิดขึ้นไป ที่มีองค์ประกอบและคุณสมบัติต่างกัน เพื่อให้ได้รอยเชื่อมที่มีความแข็งแรงและทนทาน ซึ่งมีความท้าทายของความแตกต่างของวัสดุซึ่งส่งผลกระทบต่อทั้งในเรื่องของคุณสมบัติทางความร้อน และคุณสมบัติทางโลหะวิทยา โดยมีปัจจัยที่ต้องพิจารณา ดังนี้

2.3.1 ความแตกต่างของค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อน (Coefficient of Thermal Expansion)

ความแตกต่างของค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนระหว่างสองวัสดุที่นำมาซึ่งการกระจายความร้อนที่ไม่สม่ำเสมอทำให้เกิดความไม่สมดุลของอุณหภูมิในระหว่างทำการเชื่อม ส่งผลทำให้เกิดความเค้นเชิงความร้อน (Thermal Stress) โดยเฉพาะภายในบริเวณเขตกระทบร้อน (Heat-Affected Zone, HAZ) ซึ่งนำมาซึ่งความเปราะของวัสดุ ทำให้เกิดการบิดเบี้ยว (Distortion) และการแตกร้าวได้ (Cracking)

2.3.2 ความเข้ากันได้ทางโลหะวิทยา (Metallurgical Compatibility)

ความแตกต่างกันของคุณสมบัติทางโลหะวิทยา และโครงสร้างจุลภาคของวัสดุทั้งสองชนิด นั้นส่งผลต่อความแข็งแรงของรอยเชื่อม ความแตกต่างนี้ส่งผลกระทบต่อความสามารถในการละลายร่วมกัน ซึ่งจะทำให้เกิดการก่อตัวขึ้นของสารประกอบโลหะที่มีความเปราะภายในบริเวณรอยเชื่อมและเขตกระทบร้อน เฟสสารประกอบเหล่านี้ส่งผลให้รอยเชื่อมมีความเสี่ยงต่อการแตกร้าว ลดความเหนียว และเร่งปฏิกิริยาการกัดกร่อนในรอยเชื่อม การจัดการเพื่อให้เกิดความเข้ากันได้ทางโลหะวิทยานั้น ได้แก่ การเลือกวัสดุเดิม เนื่องจากเป็นตัวที่ช่วยลดความต่างของโครงสร้างและคุณสมบัติของวัสดุทั้งสอง การอุ่นล่วงหน้าเพื่อลดความเค้นตกค้าง และการเลือกใช้กระบวนการเชื่อมที่เหมาะสม

2.3.3 การแพร่และพันธะโซลิดสเตต (Diffusion and Solid-State Bonding)

กระบวนการที่อาศัยการแพร่ของอะตอมในระดับจุลภาคระหว่างผิวสัมผัสของวัสดุภายใต้แรงกดดันและอุณหภูมิสูง โดยการแพร่ของอะตอมช่วยให้เกิดการสร้างพันธะโลหะระหว่างวัสดุสองชนิด ซึ่งอาจเป็นพันธะโลหะ (Metallic Bonding) หรือพันธะอื่น ๆ เช่น พันธะโควาเลนต์หรือไอออนิก ขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของวัสดุ การแพร่ช่วยให้การเคลื่อนที่ของอะตอมผ่านส่วนต่อประสานสะดวกขึ้น ส่งเสริมการผสมอะตอมและการสร้างพันธะทางโลหะวิทยาระหว่างวัสดุ กลไกการยึดเกาะโซลิดสเตต รวมถึงการเคลื่อนตัวของขอบเขตเกรนและการตกผลึกซ้ำ (Recrystallization) มีส่วนช่วยอย่างมากในการสร้างโครงสร้างจุลภาคที่สอดคล้องกันตลอดรอยเชื่อม

2.3.4 การควบคุมอัตราการเย็นตัว (Cooling Rate Control)

การควบคุมอัตราการเย็นตัวในการเชื่อมวัสดุต่างชนิดมีความสำคัญอย่างยิ่งต่อคุณภาพและสมบัติทางกลของรอยเชื่อมและโครงสร้างโลหะรอบๆ (Heat-Affected Zone, HAZ) เนื่องจากอัตราการเย็นตัวส่งผลต่อโครงสร้างจุลภาค ความแข็งแรง ความเหนียว และความต้านทานต่อการแตกร้าวของชิ้นงาน การเย็นตัวเร็วเกินไปอาจทำให้เกิดความเค้นตกค้างสูง และการเกิดโครงสร้างมาร์เทนไซต์ที่มีความเปราะ ซึ่งเพิ่มความเสี่ยงต่อการแตกร้าว ในขณะที่การเย็นตัวช้าช่วยลดปัญหาการแตกร้าวที่เกิดจากไฮโดรเจน (Hydrogen-Induced Cracking) โดยปล่อยให้ไฮโดรเจนมีเวลาออกจากรอยเชื่อม และช่วยให้เกิดโครงสร้างที่เหมาะสม วิธีในการควบคุมอัตราการเย็นตัวนั้น สามารถทำได้โดยการใช้

เทคนิคการให้ความร้อนก่อนหรือหลังจากทำการเชื่อม (Pre- or Post-Weld Heat Treatment) รวมถึงการควบคุมพารามิเตอร์การเชื่อมโดยการลดความเร็วในการเชื่อม (Travel Speed) หรือเพิ่ม Heat Input เพื่อลดอัตราการเย็นตัวและลดความเค้นตกค้าง กระบวนการเหล่านี้อาจช่วยลดการไล่ระดับความร้อนและลดการสะสมความเครียดระหว่างการเย็นตัวทำให้สามารถควบคุมการเย็นตัวในระหว่างกระบวนการเชื่อมได้อย่างมีประสิทธิภาพ

2.4 การเชื่อมอาร์กลดเชื่อมไส้ฟลักซ์ (FCAW) [6]

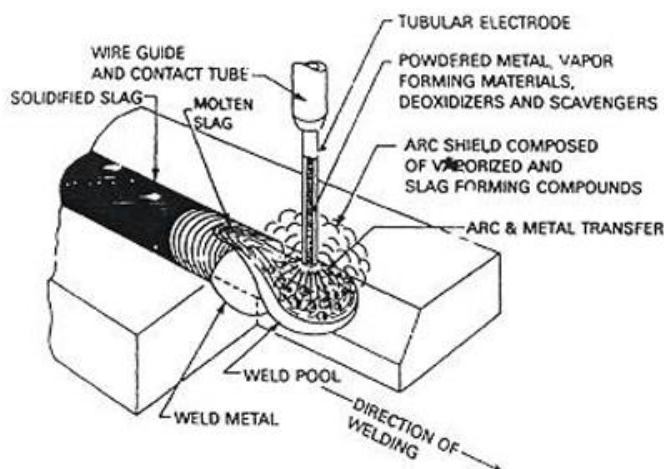
2.4.1 หลักการเบื้องต้น

กระบวนการเชื่อมอาร์กลดเชื่อมไส้ฟลักซ์ หรือ การเชื่อมฟลักซ์คอร์ (FCAW) เป็นกระบวนการเชื่อมอาร์กแบบหลอมเหลวใช้ลวดอิเล็กโทรดเป็นม้วนเชื่อมอาร์กได้ต่อเนื่องในกระบวนการเชื่อมนี้สามารถใช้สารปกคลุมที่มาจากฟลักซ์ ที่ถูกบรรจุอยู่ภายใน ท่อแกนลวดอิเล็กโทรด ซึ่งสามารถใช้แก๊สคลุม (Shielding Gas) จากภายนอกมาใช้รวมหรือไม่ใช้ก็ได้ลวดอิเล็กโทรดของฟลักซ์คอร์ถูกผลิตจากแถบแผ่นเหล็กกล้าบางและถูกม้วนทอกลงภายในท่อกลางจะบรรจุฟลักซ์ที่ทำจากวัสดุหลายชนิดเข้าไว้ เมื่อนำไปทำการเชื่อมฟลักซ์ที่อยู่ภายในลวดก็จะเปลี่ยนสภาพกลายเป็นสแลค ทำหน้าที่ปกคลุมผิวหน้ารอยเชื่อมได้ลักษณะเด่นที่สำคัญของกระบวนการเชื่อมฟลักซ์คอร์ (FCAW) เหนือกระบวนการเชื่อมอื่นๆก็คือ ฟลักซ์จะถูกเก็บบรรจุไว้อย่างมิดชิดภายในท่อแกนลวดเชื่อมอย่างต่อเนื่อง เป็นสมบัติพิเศษของกระบวนการเชื่อมนี้ที่สามารถทำให้คุณภาพของการเชื่อมดีเยี่ยม เป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้เกิดการพัฒนาลวดเชื่อมแบบนี้ขึ้น

การเชื่อมฟลักซ์คอร์ (FCAW) จะมีวิธีการแตกต่างกันอยู่ 2 รูปแบบในการสร้างแก๊สปกคลุม เปลวอาร์กและบ่อหลอมละลาย เพื่อมีให้สารมลทินในบรรยากาศ เช่น ออกซิเจนและไนโตรเจนเข้าผสมรวม

วิธีการแรกก็คือ การสร้างแก๊สปกคลุมขึ้นเอง (Self-Shielded) ได้จากการเกิดควัน ไอระเหยที่ เกิดจากการหลอมละลายของฟลักซ์ที่ได้รับความร้อนจากเปลวอาร์กทำหน้าที่เป็นแก๊สปกคลุมบ่อหลอมละลายและเปลวอาร์กไว้ได้เอง ตามภาพที่ 2-3

วิธีการที่สองคือ ใช้แก๊สปกคลุมจากภายนอก (Gas-Shielded) ปลอ่ยให้ไหลลงปกคลุมน้ำโลหะเชื่อมขณะกำลังจะแข็งตัวให้ชิ้นตัวได้ช้าๆและปราศจากสารมลทินเข้าร่วมผสม



ภาพที่ 2-3 ลักษณะกระบวนการเชื่อมฟลักซ์คอร์สามารถสร้างแก๊สปกคลุมขึ้นเองได้จากการหลอมไหม้ของฟลักซ์ (Self-Shielded)

2.4.2 หลักการเชื่อมที่มีลักษณะเด่น (Principle Features)

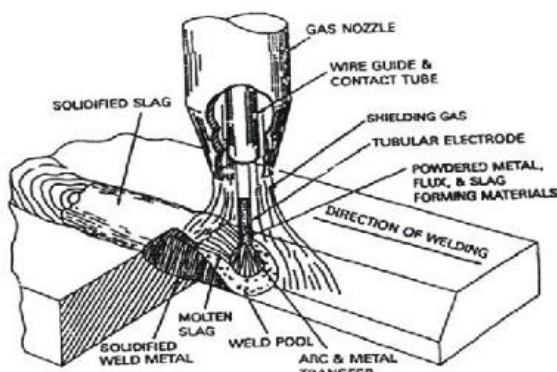
กระบวนการเชื่อมฟลักซ์คอร์นี้ได้ถูกพัฒนาอย่างต่อเนื่องอย่างเช่นเครื่องเชื่อมและชุดอุปกรณ์ป้อนลวด ในปัจจุบันนี้ได้ถูกออกแบบให้ได้อย่างสะดวกมากขึ้นกว่าช่วงต้นๆ โดยเฉพาะป็นเชื่อม มีน้ำหนักเบาและทัดรัด แข็งแรงทนทาน การป้อนลวดอิเล็กทรอนิกส์ก็ทำได้อย่างต่อเนื่องสม่ำเสมอไม่มีการสะดุดขณะการป้อนลวดอิเล็กทรอนิกส์สามารถใช้ได้ขนาดเล็กลงถึง 0.9 มม. ผลดีของกระบวนการเชื่อมฟลักซ์คอร์ (FCAW) สามารถสรุปรวมได้ดังนี้

- สามารถผลิตงานโดยการเชื่อมด้วยอิเล็กทรอนิกส์ได้อย่างต่อเนื่อง
- โลหะวิทยาของรอยเชื่อมที่มีผลดีมาก ทั้งนี้มาจากสมบัติที่ดีของฟลักซ์
- มีสแลกที่ช่วยทำหน้าที่ปกคลุมรอยเชื่อมและช่วยสร้างรูปทรงที่ต้องการที่แนวเชื่อม
- เป็นกระบวนการที่เกิดขึ้นจากการผสมของกระบวนการเชื่อมโลหะด้วยไฟฟ้า (SMAW)

กระบวนการเชื่อมโลหะโดยใช้แก๊สเฉื่อยปกคลุม (MIG) และกระบวนการเชื่อมโลหะใต้ฟลักซ์ (SAW) เข้าด้วยกันทำให้เกิดผลดีมากยิ่งขึ้น

- ลักษณะเด่นอีกอย่างหนึ่งของฟลักซ์คอร์ (FCAW) ก็คือ สามารถแบ่งกรรมวิธีออกเป็น 2 รูปแบบ ซึ่งได้แสดงไว้ตามภาพที่ 2-3 เป็นกรรมวิธีที่ไม่ต้องใช้แก๊สปกคลุมจากภายนอก จะได้แก๊สปกคลุมที่เกิดขึ้นเองจากการเผาไหม้แก๊สจากภายนอกเข้ามาทำหน้าที่ปกคลุมบริเวณบ่อหลอมละลายและอีกกรรมวิธีหนึ่งจะต้องใช้แก๊สปกคลุมจากภายนอกช่วยทำหน้าที่ปกคลุมโลหะหลอมและบ่อหลอม ตามภาพที่ 2-4 อย่างไรก็ตาม การแตกต่างของทั้ง 2 รูป ก็จะทำให้แนวเชื่อมที่ทั้งสองกรรมวิธี มีการเน้นให้เห็นถึงปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่างโลหะอิเล็กทรอนิกส์ ฟลักซ์ และโลหะขึ้นงานได้อย่างมี

ประสิทธิภาพและปลอดภัยต่อกันต่อกันเมื่อเกิดสะเก็ด ฟอรัมขึ้นเป็นส่วนหนึ่งของแนวเชื่อมให้ช่าง
ลักษณะกรรมวิธี



ภาพที่ 2-4 ลักษณะกระบวนการเชื่อมฟลักซ์คอร์ที่ใช้แก๊สปกคลุม
จากภายนอก (Gas-Shielded)

กรรมวิธีที่เกิดแก๊สปกคลุมขึ้นเอง (Self-Shield) ตามภาพที่ 2-3 แก๊สปกคลุมที่เกิดขึ้นจะเกิดจากการหลอมไหม้ของฟลักซ์กลายเป็นไอระเหยหรือเป็นควัน ทำหน้าที่เข้าไปแทนที่อากาศบริเวณรอยบัพอาร์กและการหลอมละลายของฟลักซ์ส่วนหนึ่งที่มีได้ไหม้ไฟก็จะทำหน้าที่ปกคลุมบ่อหลอมละลายและหยอดน้ำโลหะในขณะทำการเชื่อม แก๊สปกคลุมที่เกิดขึ้นได้จากการทำปฏิกิริยาของสารที่ผสมของฟลักซ์เกิดคาร์บอนไดออกไซด์เป็นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ปกคลุมอยู่บนผิวของบ่อหลอมละลายโลหะ เป็นกรรมวิธีที่มีสามารถเลือกใช้ให้เหมาะสมกับสถานที่ เช่น ในภาคสนามหรือสถานที่ๆ มีลมแรง แสดงตามภาพที่ 2-3

กรรมวิธีการเชื่อมที่จำเป็นต้องใช้แก๊สปกคลุมจากภายนอก (Gas-Shield) ตามภาพที่ 2-4 แก๊สปกคลุมที่นำมาใช้ส่วนใหญ่จะเป็นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ หรือแก๊สผสมระหว่างอาร์กอน คาร์บอนไดออกไซด์ที่อยู่ภายในอากาศเข้ามาร่วมทำปฏิกิริยารอบ เปลวอาร์ก และบริเวณส่วนบนของบ่อหลอมละลายอย่างไรก็ตาม ปริมาณของออกซิเจนบางส่วนสามารถที่จะเข้ามามีปฏิกิริยาร่วมกับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ทำให้เกิดแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ได้บ้าง

2.4.3 แก๊สปกคลุมสำหรับการเชื่อมฟลักซ์คอร์

แก๊สทำหน้าที่ปกคลุมแนวเชื่อมและบ่อหลอมละลายเพื่อไม่ให้อากาศโดยรอบเข้าไปทำปฏิกิริยาในขณะเชื่อม

2.4.3.1 แก๊สอาร์กอน (Argon)

เป็นแก๊สเฉื่อยที่ได้จากการบรรจุออกซิเจน ซึ่งจะมีอยู่ในอากาศประมาณ 0.9% แก๊สอาร์กอนช่วยทำให้การเริ่มต้นเชื่อมง่าย ใช้กำลังเปลวอาร์กน้อย และนำไฟฟ้าดี แก๊สอาร์กอนมีความหนาแน่น

มากกว่าอากาศ จึงเหมาะสำหรับเชื่อมโลหะบาง จะมีความบริสุทธิ์ที่ดีสามารถเก็บแก๊สอาร์กอนไว้ในภาชนะโลหะที่มีแรงดันในปริมาณมาก มีความบริสุทธิ์ 99.95%

2.4.3.2 แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂)

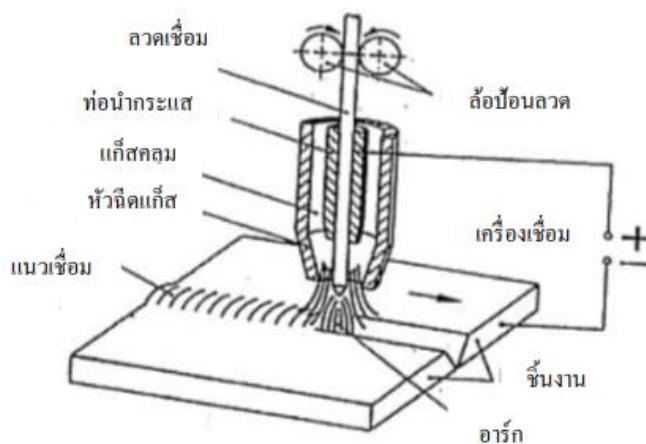
คาร์บอนไดออกไซด์ เป็นแก๊สที่มีปฏิกิริยา มีน้ำหนักมากกว่าอากาศถึง 1.5 เท่า ไม่มีสี ไม่มีกลิ่น และละลายในน้ำได้ดี คาร์บอนไดออกไซด์ที่อุตสาหกรรมใช้ในการดับเพลิง การหล่อโลหะ นอกจากนี้ยังนิยมใช้เป็นแก๊สปกคลุมในกระบวนการเชื่อม GMAW คาร์บอนไดออกไซด์นิยมใช้ในงานเชื่อม อะลูมิเนียม ทองแดง แมกนีเซียม และนิกเกิล

2.4.3.3 แก๊สอาร์กอน (Ar) ผสมออกซิเจน (O₂)

เมื่อพิจารณาการใช้ ออกซิเจนในอัตราส่วนร้อยละ 1-12 ผสมกับอาร์กอนในการเชื่อมเหล็ก จะพบว่าผลลัพธ์ดีกว่าการใช้อาร์กอนบริสุทธิ์เพียงอย่างเดียว การเพิ่มปริมาณออกซิเจนจะช่วยลดแรงตึงผิวของบ่อหลอม ทำให้การไหลของโลหะหลอมเหลวดีขึ้น ส่งผลให้แนวเชื่อมมีลักษณะแบนราบและตะเข็บเชื่อมเรียบขึ้น นอกจากนี้ การผสมออกซิเจนยังช่วยปรับปรุงการถ่ายโอนโลหะหลอมเหลวให้เป็นแบบลัดวงจร ซึ่งช่วยควบคุมการเชื่อมได้ดีขึ้นและลดการบิดเบี้ยวของชิ้นงาน

2.5 การเชื่อมอาร์กโลหะแก๊สคลุม (GMAW) [7]

กระบวนการเชื่อมอาร์กโลหะแก๊สคลุม หรือ การเชื่อม Gas Metal Arc Welding เป็นกระบวนการเชื่อมโดยใช้ลวดเส้นเปลือยขนาดเล็กจากม้วนลวด ซึ่งจะถูกป้อนผ่านหัวเชื่อมหรือปืนเชื่อม (Torch or Welding Gun) ออกมาอย่างต่อเนื่องผ่านท่อนำลวดและนำกระแส (Contact Tip) ลวดเชื่อมจะสัมผัสกับผิวท่อนำกระแสทำให้กระแสเชื่อมไหลเข้าสู่ลวด เมื่อปลายลวดแตะกับผิวโลหะ ชิ้นงานจะเกิดการอาร์กขึ้น ความร้อนจากอาร์กจะหลอมผิวบริเวณโลหะชิ้นงานและปลายลวดเชื่อมให้เป็นหยดโลหะถ่ายโอนไปยังบ่อหลอมเหลวของรอยเชื่อม ขณะเดียวกันแก๊สจากท่อบรรจุจะไหลเข้าสู่ท่อจ่ายสู่หัวฉีดพุ่งออกมาปกคลุมบ่อหลอมเหลวและบริเวณรอยเปลาอาร์กเพื่อทำหน้าที่เป็นม่านป้องกันไม่ให้ ออกซิเจนหรือแก๊สอื่นในบรรยากาศเข้าไปทำปฏิกิริยากับเปลวอาร์กและโลหะที่กำลังหลอมเหลว แก๊สคลุมที่เลือกใช้ได้แก่ แก๊สเฉื่อย (Inert Gas) แก๊สกึ่งเฉื่อยหรือแก๊สปฏิกิริยา (Active Gas) และแก๊สผสม (Mixed Gas) ดังภาพที่ 2-5



ภาพที่ 2-5 ลักษณะกระบวนการเชื่อมอาร์กโลหะแก๊สปกคลุม

การใช้อุปกรณ์การเชื่อมทำได้ไม่ยาก เพียงต่อสายดินเข้ากับงานเชื่อม ปรับแต่งกระแส อัตราเร็วป้อนลวดเชื่อม และอัตราไหลของแก๊สปกคลุมให้ตรงตามข้อกำหนดที่ระบุไว้บนตัวเครื่องหรือ หนังสือคู่มือก็สามารถปฏิบัติการเชื่อมได้

2.5.1 ข้อดีของกระบวนการเชื่อมอาร์กโลหะแก๊สปกคลุม

1. เชื่อมได้รวดเร็วกว่าวิธีอื่นที่ใช้มือเช่นเดียวกัน
2. ลวดเชื่อมป้อนอย่างต่อเนื่อง ไม่เสียเวลาเปลี่ยนลวดใหม่
3. ให้สมบัติต่อการซึมลึกดี
4. ตะเข็บแนวเชื่อมมีขนาดเล็กกว่าที่ได้จากการเชื่อมธรรมดาทั่วไป
5. ใช้ลวดเชื่อมขนาดเล็กทำให้ความหนาแน่นของกระแสที่ไหลผ่านลวดสูง การอาร์กจึงมีเสถียรภาพดี และเชื่อมได้นุ่มนวล
6. เปลวอาร์ก และบ่อหลอมเหลวสุกใส มองผ่านกระจกงานเชื่อมได้ดี
7. สามารถทำการเชื่อมได้เร็วกว่าการเชื่อมชนิดใช้ลวดหุ้มฟลักซ์ถึง 60%
8. สามารถเชื่อมได้ทั้งโลหะ และอโลหะ
9. ลดต้นทุนเชื่อมถึง 40%
10. ตะเข็บเชื่อมเรียบสวย

2.5.2 ข้อเสียของกระบวนการเชื่อม MIG (Metal Inert Gas)

1. เครื่องเชื่อมมีราคาแพงกว่าเครื่องธรรมดาทั่วไป เนื่องจากมีส่วนประกอบมากและต้องมีความเข้าใจและฝึกฝนการปรับแต่งตัวแปรในการเชื่อม
2. หัวเชื่อมแก๊สมีขนาดใหญ่ ทำให้บ่อหลอมละลายและทิศทางการเคลื่อนที่ของหัวเชื่อมได้ไม่ชัดเจน
3. รอยต่อที่อยู่ในบริเวณค้ำแคบ ยากต่อการควบคุมหัวเชื่อม

4. สายเชื่อมมีระยะจำกัด จึงเชื่อมงานที่อยู่ห่างไกลหรือสูงมากไม่ได้ เว้นแต่จะใช้ตัวต่อเพิ่มเติม

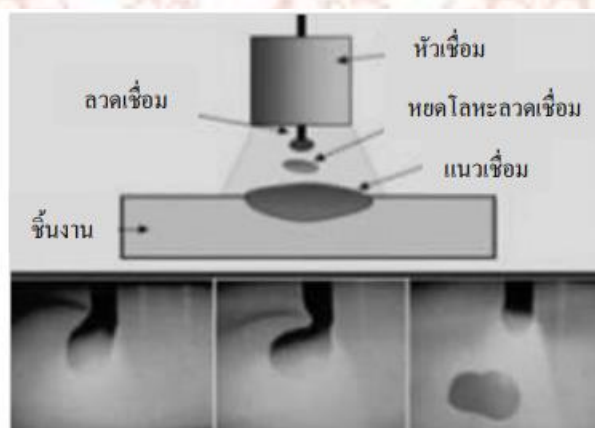
5. บริเวณที่มีลมแรง ต้องมีอุปกรณ์ป้องกันไม่ให้ลมพัดพาแก๊สปกคลุมออกจากบริเวณอาร์ก

2.5.3 การถ่ายโอนโลหะ

การเชื่อมอาร์กโลหะแก๊สคลุม เป็นกระบวนการเชื่อมที่มีความสามารถสูงเมื่อเปรียบเทียบกับกระบวนการเชื่อมอื่น สามารถใช้เชื่อมโลหะและอโลหะได้หลากหลายขนาดความหนา เนื่องจากมีรูปแบบการถ่ายโอนโลหะที่แตกต่างกันหลายประเภท การถ่ายโอนโลหะ หมายถึง การทำให้ลวดเชื่อมหลอมเป็นหยดหลุดออกจากปลายลวดเชื่อมผ่านอาร์กเข้าสู่บ่อหลอมเหลวบนโลหะชิ้นงาน ซึ่งการถ่ายโอนของหยดโลหะเกิดจาก แรงที่กระทำต่อหยดโลหะที่ปลายลวดเชื่อม โดยปฏิกิริยาระหว่าง แรงดันกระแสเชื่อม ชนิดของแก๊สคลุม และขนาดของลวดเชื่อม

2.5.4 การถ่ายโอนแบบหยดขนาดใหญ่ (Globular Transfer)

วัฏจักรการถ่ายโอนแบบหยดขนาดใหญ่จะเริ่มเมื่อปลายลวดเชื่อมถูกหลอมเป็นหยดโลหะ ซึ่งจะมีขนาดใหญ่กว่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของลวดเชื่อมประมาณ 1.5 - 2 เท่า ก่อนที่หยดโลหะจะหลุดออกจากปลายลวดเชื่อมและถ่ายโอนผ่านการอาร์กสู่บ่อหลอมเหลวด้วยแรงโน้มถ่วง และแรงตึงผิว ซึ่งให้อัตราการเติมเนื้อโลหะสูง และสร้างความร้อนสูงกว่าการถ่ายโอนแบบอื่น ดังภาพที่ 2-6



ภาพที่ 2-6 การถ่ายโอนแบบหยดขนาดใหญ่

(ที่มา www.slideshare.net/NakharinMuangbunKID/mag-71242362)

2.6 การทดสอบความแข็งแบบวิกเกอร์ส (Vickers Hardness Test) [8]

ความแข็งเป็นการแสดงสมบัติของวัสดุที่บ่งบอกถึงความต้านทานในการเกิดรอยกดที่พื้นผิว หลักการเกี่ยวกับการทดสอบความแข็งจะเกี่ยวข้องกับการวัดความต้านทานต่อการเกิดเป็นรอยกด ซึ่งใช้เป็นหลักการพื้นฐานของเครื่องมือวัดความแข็งแบบต่างๆ หัวกดมีทั้งที่เป็นแบบหัวบอล แบบกระบอก หรือแบบกรวยปลายมนหรือพีระมิด ซึ่งปกติทำจากเหล็กกล้าแข็งหรือเพชรและใช้ทดสอบภายใต้ สภาวะน้ำหนักกดที่ โดยการวัดน้ำหนักที่จะทำให้เกิดรอยกดตามที่กำหนดหรือวัดรอยกดที่เกิดขึ้นภายใต้แรงกระทำนั้น สภาวะการทดสอบต้องเป็นไปตามมาตรฐาน และนำรอยกดที่เกิดขึ้นบนชิ้นทดสอบ มาคำนวณหาความแข็ง

การทดสอบความแข็ง Vickers เป็นการทดสอบความแข็งโดยใช้หัวกดเพชรรูปพีระมิดฐานสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาดเล็ก ซึ่งมีมุมจางปลายแหลม 136° ดังแสดงในภาพที่ 2-7 และน้ำหนักกดที่ใช้จะอยู่ระหว่าง 5-120 กิโลกรัม โดยจะเพิ่มครั้งละ 5 กิโลกรัม การทดสอบนี้มีหลักการเดียวกันกับการทดสอบความแข็ง Brinell คือค่าความแข็งที่ได้คิดจากน้ำหนักกดที่กระทำต่อพื้นที่ของรอยกด และสามารถหาพื้นที่รอยกดได้ดังสมการที่ (2-2)

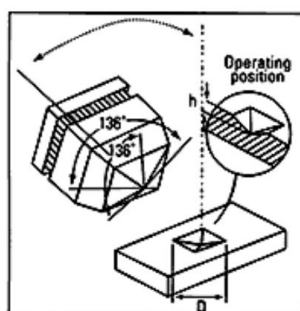
$$\text{พื้นที่รอยกด} = \frac{d^2}{2\sin(136^\circ/2)} \quad \text{ซึ่งจะมีค่าโดยประมาณ} = \frac{d^2}{1.8544} \quad (2-2)$$

ดังนั้นค่าความแข็ง Vickers หัวกดเพชรพีระมิดฐานสี่เหลี่ยมจัตุรัส DPH (Vickers Diamond Pyramid Hardness) หรือ HV (Vickers Hardness) จะมีค่าดังสมการ (2-3)

$$\text{จากความแข็ง Vickers} = \frac{\text{แรงกด}}{\text{พื้นที่รอยกด}} \quad (2-3)$$

$$\text{จะได้} \quad \text{DPH} = \frac{1.8544 F}{d^2} \quad (2-4)$$

จากสมการ (2-4) เมื่อ DPH คือความแข็ง Vickers (kg/mm^2) F คือ น้ำหนักกด (kg) และ d คือ ความยาวเส้นทแยงมุมเฉลี่ย (mm)



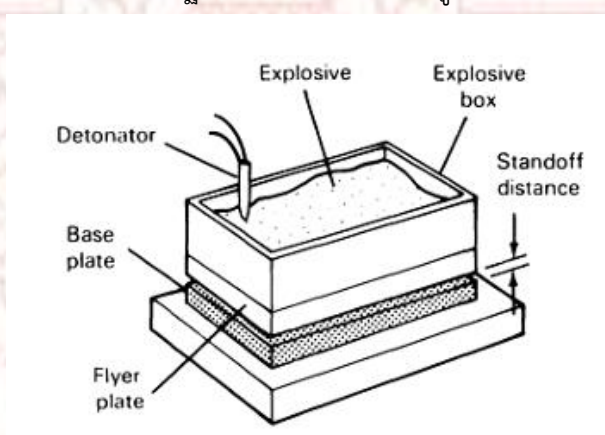
ภาพที่ 2-7 ลักษณะหัวกดและรอยกดของการทดสอบความแข็ง Vickers

2.7 การเชื่อมด้วยการระเบิด (Explosion Welding) [9]

2.7.1 หลักการพื้นฐาน (Fundamentals)

การเชื่อมด้วยการระเบิด (Explosion Welding) หรือที่เรียกว่า Explosive Bonding เป็นกระบวนการเชื่อมโลหะในสถานะของแข็ง (Solid State Welding) ซึ่งเกิดขึ้นที่อุณหภูมิที่ต่ำกว่าจุดหลอมเหลวของวัสดุที่นำมาเชื่อม ในการเชื่อมจะใช้การระเบิดทำให้เกิดแรงกระแทกระหว่างโลหะสองชนิด ซึ่งทำให้เกิดการเชื่อมกันของวัสดุจากการแพร่ของอะตอมที่พื้นผิวสัมผัสภายใต้แรงดันสูง ข้อได้เปรียบที่เห็นได้ชัดเจนของเทคนิคการเชื่อมนี้คือความสามารถในการเชื่อมโลหะที่มีคุณสมบัติต่างกัน เช่น การเชื่อมโลหะที่มีจุดหลอมเหลวต่างกัน หรือในกรณีที่ต้องการเชื่อมโลหะที่ไม่สามารถเชื่อมได้ด้วยกระบวนการแบบดั้งเดิม

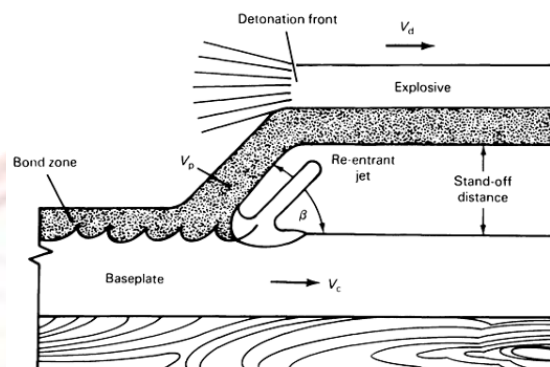
ในการทำการเชื่อมด้วยการระเบิดแบบขนาน (Parallel Gap Explosive Bonding Process) จากรูปที่ แสดงการติดตั้งแผ่นโลหะและอุปกรณ์ทำการเชื่อมโดยจัดวางแผ่นโลหะทั้ง 2 แผ่นให้ขนานกัน โดยมีช่องว่างเล็กๆ (Gap) ระหว่างแผ่น จากนั้นจะวางวัสดุระเบิดไว้บนแผ่นฟลายเออร์ (Flyer Plate) ซึ่งเป็นแผ่นโลหะด้านบน เมื่อจุดระเบิด จะเกิดแรงดันมหาศาลดันให้แผ่นฟลายเออร์ให้เคลื่อนที่ลงอย่างรวดเร็วและชนกับแผ่นฐาน (Base Plate) ที่อยู่ด้านล่าง ตามภาพที่ 2-8



ภาพที่ 2-8 ส่วนประกอบในกระบวนการเชื่อมด้วยการระเบิดแบบขนาน

พลังงานจากการระเบิดทำให้เกิดการขยายตัวอย่างรวดเร็วของผลิตภัณฑ์การระเบิด ส่งผลให้แผ่นฟลายเออร์ถูกเร่งความเร็วด้วยแรงดันสูง บริเวณด้านหลังแนวระเบิด (Detonation Front) การเร่งความเร็วนี้ทำให้เกิดมุมโค้งแบบไดนามิก (β) ส่งผลให้เกิดการชนในลักษณะเอียงระหว่างแผ่นฟลายเออร์และแผ่นฐาน ซึ่งช่วยส่งเสริมการไหลแบบไฮโดรไดนามิกส์ (Hydrodynamics) ของพื้นผิวโลหะและก่อให้เกิดการไหลย้อนกลับในลักษณะการเกิดเจ็ต (Jetting Actions) ซึ่งการเกิดเจ็ตนี้มีบทบาทสำคัญในการทำให้พื้นผิวโลหะสะอาด ไม่ให้มีสิ่งปนเปื้อนหรือออกไซด์ระหว่างแผ่นโลหะทั้ง

สอง และส่งเสริมพื้นผิวโลหะสัมผัสกันในระดับอะตอม ทำให้เกิดการเชื่อมที่แข็งแรง ดังแสดงในภาพที่ 2-9



ภาพที่ 2-9 การเชื่อมกันของแผ่นฟลายเออร์และแผ่นฐานระหว่างกระบวนการระเบิด [9]

2.7.2 สัณฐานวิทยาและคุณสมบัติของรอยเชื่อม (Bond Morphology and Properties)

ในการเชื่อมด้วยการระเบิดทำให้เกิดรอยต่อที่สามารถแบ่งตามรูปร่างได้ 3 แบบ ดังนี้

1. รอยเชื่อมแบบเรียบ (Laminar Interface)

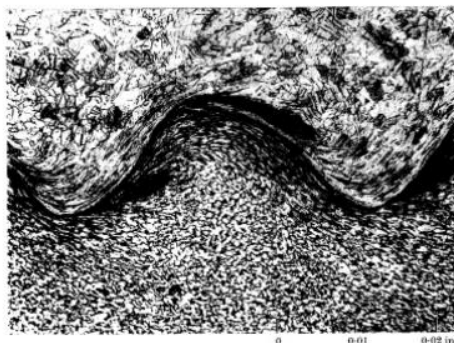
พบได้เมื่อปรับพารามิเตอร์ของกระบวนการเชื่อมทำให้เกิดการชนในระดับพลังงานต่ำ โครงสร้างนี้มีพื้นผิวที่เรียบและไม่มีคลื่น ซึ่งเหมาะสำหรับการใช้งานที่ต้องการลดความไม่ต่อเนื่องของรอยเชื่อม เช่น ในการเชื่อมวัสดุที่บอบบางหรือมีความแตกต่างทางกายภาพสูง

2. รอยเชื่อมแบบคลื่น (Wavy Interface)

รอยต่อแบบคลื่นเป็นรูปแบบที่พบได้บ่อยที่สุดในกระบวนการเชื่อมด้วยการระเบิด ตามที่แสดงในภาพที่ 2-10 โดยเกิดจากการชนที่ความเร็วและแรงดันที่เหมาะสม คลื่นที่เกิดขึ้นช่วยเพิ่มพื้นที่สัมผัสระหว่างโลหะ ทำให้รอยเชื่อมมีความแข็งแรงสูง นอกจากนี้ รอยต่อแบบนี้ยังช่วยลดการเกิดความไม่ต่อเนื่องภายในรอยเชื่อม เช่น รูพรุน (Porosity) หรือรอยแตก (Crack)

3. รอยเชื่อมที่มีชั้นหลอมเหลว (Molten Layer Interface)

ในบางกรณี อาจพบชั้นหลอมเหลวที่เกิดขึ้นระหว่างรอยต่อโลหะ การเกิดชั้นหลอมเหลวนี้นักเป็นผลจากการชนที่มีพลังงานสูงเกินไป ซึ่งอาจนำไปสู่การลดความแข็งแรงของรอยเชื่อมหากไม่สามารถควบคุมได้อย่างเหมาะสม



ภาพที่ 2-10 โครงสร้างจุลภาคของรอยเชื่อมแบบคลื่น [9]

2.7.3 การวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาค (Microstructural Analysis)

การวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคของรอยเชื่อมแสดงให้เห็นการเปลี่ยนแปลงที่ชัดเจนในบริเวณรอยต่อ ความดันและอุณหภูมิสูงที่เกิดขึ้นในระหว่างกระบวนการเชื่อมทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างผลึกในบริเวณรอยต่อ โดยโครงสร้างผลึกที่อาจมีความแตกต่างจากโครงสร้างของโลหะฐานมีดังนี้

1. บริเวณรอยต่อ (Interface Zone) : โครงสร้างของบริเวณนี้มักแสดงให้เห็นการเรียงตัวใหม่ของผลึกที่มีความหนาแน่นสูงและปราศจากสิ่งแปลกปลอม
2. บริเวณที่ได้รับผลกระทบจากแรงดัน (Plastic Deformation Zone) : บริเวณนี้เกิดจากการเสียรูปแบบพลาสติกที่รุนแรง ซึ่งช่วยเสริมความแข็งแรงของรอยเชื่อม
3. การแพร่ของอะตอม (Atomic Diffusion) : การแพร่ของอะตอมระหว่างโลหะสองชนิดช่วยสร้างพันธะที่แข็งแรงในระดับอะตอม

2.7.4 ข้อดีและข้อจำกัด (Advantages and Limitations)

ข้อดีของการเชื่อมด้วยการระเบิดนั้น ส่วนใหญ่ที่เห็นได้ชัดเจนคือคุณสมบัติทางกลที่ดีเนื่องจากพันธะที่เกิดขึ้นในระดับอะตอมและการปรับสัณฐานวิทยาของรอยต่อให้เหมาะสม ได้แก่

1. ความสามารถในการรับแรงเฉือน (Shear Strength) : รอยเชื่อมแบบคลื่นมักมีค่าความแข็งแรงเฉือนสูง เนื่องจากการกระจายแรงที่ดีในบริเวณรอยต่อ
2. ความต้านทานการล้า (Fatigue Resistance) : รอยเชื่อมที่ได้มีความต้านทานต่อความล้าได้ดี แม้จะอยู่ภายใต้สภาวะการสั่นสะเทือนหรือโหลดแบบซ้ำๆ
3. ความต้านทานการกัดกร่อน (Corrosion Resistance) : คุณสมบัตินี้ขึ้นอยู่กับวัสดุที่เลือกใช้และสภาพแวดล้อมการทำงาน โดยรอยเชื่อมที่สมบูรณ์จะลดโอกาสการเกิดรอยร้าวหรือจุดอ่อนที่อาจทำให้เกิดการกัดกร่อน

ในส่วนข้อจำกัดของการเชื่อมด้วยการระเบิดที่ต้องพิจารณานั้นคือการควบคุมพารามิเตอร์ของกระบวนการให้มีความเหมาะสม เพื่อหลีกเลี่ยงการเกิดขึ้นหลอมเหลวหรือรอยต่อที่ไม่สมบูรณ์

รวมถึงการเกิดความเค้นตกค้าง (Residual Stress) ซึ่งอาจทำให้รอยเชื่อมเกิดการแตกร้าวในภายหลัง นอกจากนี้การเชื่อมโลหะต่างชนิดกันนั้นมีความเสี่ยงที่จะเกิดสารประกอบระหว่างโลหะ (Intermetallic Compounds) ซึ่งอาจลดความแข็งแรงของรอยเชื่อม จึงต้องมีการป้องกันที่ดี

2.8 สารประกอบอินเตอร์เมทัลลิก (Intermetallic Compounds) [10]

สารประกอบอินเตอร์เมทัลลิก (Intermetallic Compounds) เป็นวัสดุที่เกิดจากการรวมตัวกันของโลหะสองชนิดขึ้นไปในอัตราส่วนที่คงที่หรือใกล้เคียงกัน โดยมีโครงสร้างผลึกที่แตกต่างจากธาตุโลหะตั้งต้น ซึ่งส่งผลให้วัสดุเหล่านี้มีคุณสมบัติพิเศษที่ไม่สามารถพบได้ในโลหะบริสุทธิ์หรือโลหะผสมทั่วไป โดยทั่วไปแล้วสารประกอบอินเตอร์เมทัลลิกจะมีช่วงองค์ประกอบที่จำกัด ซึ่งเรียกว่า ช่วงความเป็นเอกพันธุ์ (Homogeneity Range) และโครงสร้างของพวกมันมีแนวโน้มที่จะเป็น Ordered Structure ซึ่งแตกต่างจากโลหะทั่วไปที่มีโครงสร้าง Disordered

สารประกอบอินเตอร์เมทัลลิกถูกค้นพบครั้งแรกโดย Karl Karsten ในปี ค.ศ. 1839 เมื่อเขาสังเกตเห็นว่าปฏิกิริยาของกรดที่มีต่อโลหะผสมทองแดง-สังกะสี (Copper-Zinc Alloys) เปลี่ยนแปลงอย่างชัดเจนที่อัตราส่วนเท่ากับ 1:1 ซึ่งบ่งบอกถึงการก่อตัวของสารประกอบชนิดใหม่ที่เรียกกันในปัจจุบันว่า β -Brass (CuZn) การค้นพบนี้แสดงให้เห็นว่าสารประกอบอินเตอร์เมทัลลิกมีพฤติกรรมทางเคมีและทางกายภาพที่แตกต่างไปจากโลหะผสมธรรมดา

คุณสมบัติของ Intermetallics

1. ความแข็งและความแข็งแรงสูง (High Hardness & Strength) – ด้วยโครงสร้างผลึกที่เป็นระเบียบทำให้พวกมันมีความแข็งและความแข็งแรงสูงกว่าธาตุโลหะตั้งต้น
2. จุดหลอมเหลวสูง (High Melting Point) – สารประกอบอินเตอร์เมทัลลิกส่วนใหญ่มีจุดหลอมเหลวสูงกว่าโลหะผสมทั่วไป ทำให้เหมาะสำหรับการใช้งานที่ต้องเผชิญกับอุณหภูมิสูง
3. ความเปราะ (Brittleness) – เนื่องจากโครงสร้างผลึกที่มีระเบียบสูง ส่วนใหญ่จึงมีความเปราะและมีความสามารถในการเสียรูปต่ำ
4. ทนต่อการกัดกร่อนและการออกซิเดชัน (Corrosion & Oxidation Resistance) – สารประกอบอินเตอร์เมทัลลิกบางชนิด เช่น FeAl, NiAl, TiAl มีความสามารถในการต้านทานการเกิดออกซิเดชันที่อุณหภูมิสูงได้ดี
5. มีความหนาแน่นต่ำ (Low Density) – สารประกอบอินเตอร์เมทัลลิก เช่น Al-Fe, Ti-Al มีน้ำหนักเบากว่าโลหะผสมทั่วไป ทำให้เหมาะสำหรับการใช้งานที่ต้องการวัสดุที่มีอัตราส่วนความแข็งแรงต่อน้ำหนักสูง

ในปัจจุบัน สารประกอบอินเตอร์เมทัลลิกมีบทบาทสำคัญในการใช้งานหลากหลายด้าน และมีศักยภาพในการพัฒนาคุณสมบัติที่ก้าวหน้ากว่าเดิม เช่น

- วัสดุโครงสร้างทนความร้อนสูง (High-Temperature Structural Materials)
- วัสดุแม่เหล็ก (Magnetic Materials)
- วัสดุสำหรับเก็บไฮโดรเจน (Hydrogen Storage Materials)

2.8.1 Al-Fe Intermetallics (สารประกอบอินเทอร์เมทัลลิกในระบบอะลูมิเนียม-เหล็ก)

Al-Fe Intermetallics เป็นกลุ่มวัสดุที่ได้รับความสนใจในอุตสาหกรรม เนื่องจากสามารถให้ความแข็งแรงสูง น้ำหนักเบา และทนต่อการกัดกร่อนได้ดี โดยเฉพาะอย่างยิ่งในการใช้งานด้านอากาศยานและยานยนต์ โครงสร้างผลึกของ Al-Fe Intermetallics มีหลายรูปแบบ เช่น Al_5Fe_2 (Orthorhombic), Al_3Fe (Monoclinic), Al_2Fe (Triclinic) ซึ่งแต่ละชนิดมีคุณสมบัติที่แตกต่างกันไป เช่น ความแข็ง ความเสถียรของโครงสร้าง และอุณหภูมิใช้งาน

ชนิดของ Al-Fe Intermetallics และโครงสร้างผลึก Al-Fe Intermetallics มีหลายเฟสที่มีโครงสร้างผลึกแตกต่างกัน โดยสามารถสรุปได้ดังตารางที่ 2-2

ตารางที่ 2-2 ชนิดและโครงสร้างผลึก Al-Fe Intermetallics [10]

สารประกอบ	โครงสร้างผลึก	ช่วงองค์ประกอบ (at.%)	ความแข็ง (HV)
AlFe	BCC (Ordered)	23–55	491–667
AlFe_3	DO_3	23–34	344–368
Al_2Fe	Triclinic	66–67	1058–1070
Al_5Fe_2	Orthorhombic	70–73	1000–1158
Al_3Fe	Monoclinic	74.5–76.5	772–1017

การผลิต Al-Fe Intermetallics สามารถทำได้โดยกระบวนการ Mechanical Alloying (MA) หรือ High-Energy Ball Milling ซึ่งสามารถลดขนาดเกรนให้เล็กลงจนถึงระดับนาโน ทำให้วัสดุมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตาม การลดขนาดเกรนมากเกินไปอาจทำให้เกิด Inverse Hall-Petch Effect ซึ่งทำให้วัสดุมีแนวโน้มอ่อนตัวลงแทนที่จะเพิ่มความแข็งแรง ความเข้าใจเกี่ยวกับกลไกการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างเหล่านี้เป็นสิ่งสำคัญสำหรับการออกแบบวัสดุให้เหมาะสมกับการใช้งาน

2.8.2 พฤติกรรมความเปราะใน Al-Fe Intermetallics

ขณะที่ สารประกอบอินเทอร์เมทัลลิกในระบบอะลูมิเนียม-เหล็ก (Al-Fe Intermetallics) เป็นวัสดุที่มีความแข็งแรงสูงและมีคุณสมบัติทางกลที่โดดเด่น อย่างไรก็ตาม ปัญหาหลักของวัสดุเหล่านี้คือความเปราะ (Brittleness) ซึ่งเป็นข้อจำกัดสำคัญที่ทำให้การใช้งานเชิงโครงสร้างถูกจำกัด ความเปราะของวัสดุเหล่านี้เกิดจากโครงสร้างจุลภาคและลักษณะของพันธะระหว่างอะตอมที่แข็งแกร่ง ทำให้วัสดุ

มีความสามารถในการเสียรูปแบบยืดหยุ่นต่ำเมื่อได้รับแรงกระทำสูง วัสดุมีแนวโน้มที่จะแตกหักแทนที่จะเปลี่ยนรูป ซึ่งแตกต่างจากโลหะทั่วไปที่สามารถเสียรูปได้ก่อนแตก

สาเหตุของความเปราะใน Al-Fe Intermetallics มาจากหลายปัจจัยหลัก ดังนี้

1. โครงสร้างผลึกแบบ Ordered Structure – พบในเฟสต่าง ๆ ของสารประกอบอินเทอร์เมทัลลิก เช่น Al_3Fe , Al_5Fe_2 และ Al_2Fe เฟสเหล่านี้มีการจัดเรียงอะตอมในรูปแบบที่เป็นระเบียบสูง ทำให้การเคลื่อนที่ของโพลีดีสโลเคชัน (Dislocation Pile-Up) เป็นไปได้ยาก ส่งผลให้วัสดุมีแนวโน้มที่จะแตกหักแทนที่จะเกิดการเสียรูป

2. พลังงานพันธะสูงระหว่างอะตอม (High Bonding Energy) – เป็นลักษณะสำคัญของสารประกอบอินเทอร์เมทัลลิก โดยพันธะในวัสดุเหล่านี้มีลักษณะเป็นพันธะโลหะที่แข็งแกร่ง ผสมกับพันธะไอออนิกบางส่วน ซึ่งทำให้วัสดุมีความแข็งแรงมากแต่ขาดความเหนียว

3. การก่อตัวของรอยร้าวภายในวัสดุ (Microcrack Formation) – เกิดขึ้นเนื่องจากความไม่สมบูรณ์ในโครงสร้างของวัสดุ การทดลองพบว่าเฟสที่มีโครงสร้างผลึกที่ไม่สมมาตร เช่น Al_2Fe และ Al_5Fe_2 มีแนวโน้มที่จะแตกหักบริเวณขอบเกรน หรือเกิด Grain Boundary Cracking ได้ง่าย ซึ่งเป็นผลมาจากความเค้นสะสมภายในโครงสร้างจุลภาค

นอกจากนี้ ยังพบว่าเมื่อขนาดเกรนลดลงถึงระดับนาโนเมตร วัสดุจะเกิด Inverse Hall-Petch Effect ซึ่งหมายความว่า เมื่อขนาดเกรนลดลงถึงค่าหนึ่ง ความแข็งแรงของวัสดุจะลดลงแทนที่จะเพิ่มขึ้น ส่งผลให้วัสดุเปราะขึ้น

ผลของความเปราะใน Al-Fe Intermetallic ทำให้วัสดุเหล่านี้มี ค่าความเหนียวต่ำ (Low Toughness) และ ค่าการยืดตัวต่ำ (Low Ductility) ซึ่งหมายความว่า เมื่อวัสดุได้รับแรงดึงหรือแรงกระแทก จะเกิดการแตกหักแทนที่จะแสดงพฤติกรรมการเสียรูปแบบยืดหยุ่น จากการทดลองที่ผ่านมาพบว่าเฟส Al_3Fe และ Al_5Fe_2 มีค่าความแข็งสูงถึง 1000–1158 HV แต่มีค่าความเหนียวต่ำมาก ทำให้ไม่สามารถนำไปใช้ในโครงสร้างที่ต้องการความทนทานต่อแรงกระแทกหรือแรงดัดงอ เช่น ชิ้นส่วนเครื่องยนต์ที่ต้องรับแรงดึงสูงได้ แม้ว่าความเปราะจะเป็นข้อจำกัดของวัสดุ Al-Fe Intermetallic แต่สามารถแก้ไขได้ด้วยเทคนิคต่างๆ เช่น

1. การลดขนาดเกรน (Grain Refinement) – การทำให้โครงสร้างเป็นนาโนคริสตัลช่วยลดความเปราะของวัสดุได้โดยการเพิ่มจำนวนขอบเกรน ซึ่งสามารถช่วยป้องกันการเกิดรอยร้าวและทำให้วัสดุสามารถเสียรูปได้ดีขึ้น

2. การเติมธาตุผสม (Alloying Elements) – การเติมธาตุเช่น Ti, Nb, Cr หรือ Si สามารถช่วยปรับปรุงโครงสร้างจุลภาคและลดความเปราะของวัสดุได้

3. การใช้กระบวนการผลิตที่เหมาะสม (Optimized Processing Techniques) – การใช้ Mechanical Alloying (MA), High-Energy Ball Milling (HEBM), และ Thermomechanical Processing สามารถช่วยลดข้อบกพร่องในโครงสร้างและเพิ่มความสามารถในการเสีรบุของวัสดุ

4. การควบคุมเฟสในวัสดุ (Phase Control) – เฟส Al_3Fe และ Al_5Fe_2 มีความเปราะสูง ในขณะที่เฟส Al_2Fe มีความเหนียวมากขึ้น ดังนั้นการควบคุมองค์ประกอบทางเคมีและอุณหภูมิการผลิตให้เหมาะสมสามารถช่วยให้เกิดเฟสที่มีความเหนียวสูงขึ้นได้

5. การทำให้เกิดเฟสอะมอร์ฟัส (Amorphization) – วัสดุที่มีโครงสร้างอะมอร์ฟัสสามารถช่วยลดความเปราะได้ เนื่องจากไม่มีระนาบผลึกที่ชัดเจนสำหรับการเกิดรอยร้าว ซึ่งเทคนิค High-Energy Ball Milling สามารถช่วยให้เกิดเฟสอะมอร์ฟัสใน Al-Fe

2.9 การเชื่อมซ่อม (Welding repair)

การเชื่อมซ่อม (Welding Repair) เป็นกระบวนการที่ใช้ในการซ่อมแซมและฟื้นฟูชิ้นงานโลหะหรือวัสดุอื่น ๆ ที่เกิดความเสียหายหรือมีข้อบกพร่อง เพื่อให้สามารถกลับมาใช้งานได้อย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งเมื่อมีการตรวจพบความเสียหาย เช่น รอยแตก รอยพูน หรือการเสียหายอื่น ๆ ที่เกิดขึ้นในระหว่างการผลิตหรือการใช้งาน การซ่อมจะดำเนินการโดยการกำจัดเนื้อโลหะเชื่อมหรือส่วนของโลหะฐาน (Base Metal) โดยใช้วิธีการกัด (Machining) การเจียร (Grinding) การสกัด (Chipping) หรือการเกา (Gouging) โดยการดำเนินการเหล่านี้จะต้องทำในลักษณะที่ไม่ทำให้โลหะเชื่อมที่อยู่ติดกันหรือโลหะฐานเกิดรอยบิ่น (Nick) หรือรอยเกา (Gouge) ส่วนที่ไม่เหมาะสมของรอยเชื่อมออกโดยไม่ทำให้เกิดความเสียหายต่อส่วนของโลหะฐานที่มากเกินไป หลังจากนั้นจึงทำการเติมเนื้อโลหะเชื่อมเพื่อชดเชยการขาดส่วนใด ๆ ของขนาดที่ต้องการ

ข้อดีของการเชื่อมซ่อม

1. สามารถซ่อมแซม และฟื้นฟูโครงสร้างส่วนที่เสียหายให้สามารถกลับมาใช้งานได้อย่างมีประสิทธิภาพ
2. สามารถปรับปรุงคุณภาพงานเชื่อมที่ไม่ผ่านตามที่มาตรฐานกำหนด เช่น รูปทรง หรือข้อบกพร่องที่ผิวและภายในงานเชื่อม
3. ยืดอายุการใช้งานวัสดุ โดยลดความจำเป็นในการเปลี่ยนชิ้นใหม่ หรือการสร้างใหม่
4. ลดต้นทุนและเพิ่มความคุ้มค่าในการผลิตโดยรวม
5. ลดความเสี่ยงความเสียหายจากการหยุดทำงานของเครื่องจักรหรือระบบ (Downtime) ที่เกิดจากการซ่อมบำรุง

ข้อจำกัดของการเชื่อมซ่อม

1. ความเสี่ยงต่อการเสียรูปและความเครียดที่เกิดจากการให้ความร้อนซ้ำแก่ชิ้นงานระหว่างการเชื่อมซ่อม
2. ความร้อนที่เกิดจากการเชื่อมซ่อมทำให้ได้รับความร้อนซ้ำซ้อนอาจส่งผลกระทบต่อโครงสร้างจุลภาค เช่น การเปลี่ยนเฟสของวัสดุหรือการเกิดมาร์เทนไซต์ (ในเหล็กกล้า) ซึ่งอาจทำให้เกิดความเปราะหรือการแตกร้าว
3. กรณีที่ต้องทำการเชื่อมในพื้นที่จำกัดหรือเข้าถึงยาก อาจทำให้ดำเนินการเชื่อมยากลำบากและอาจส่งผลกระทบต่อคุณภาพรอยเชื่อม

2.10 พฤติกรรมที่เกิดขึ้นจากการเชื่อมซ่อม (Behavior of Welding Repair) [11]

ในการเสียรูปแบบยืดหยุ่นของโลหะหลายผลึก (Polycrystalline Metal) ที่อุณหภูมิต่ำเมื่อเทียบกับอุณหภูมิหลอมเหลวสมบูรณ์ (Absolute Melting Temperature) จะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงในโครงสร้างจุลภาคและสมบัติของวัสดุ ซึ่งรวมถึง :

1. การเปลี่ยนแปลงรูปร่างของเกรน
2. การเพิ่มขึ้นของความแข็งแรงจากความเค้น (Strain Hardening)
3. การเพิ่มขึ้นของความหนาแน่นของความไม่ต่อเนื่อง (Dislocation Density)

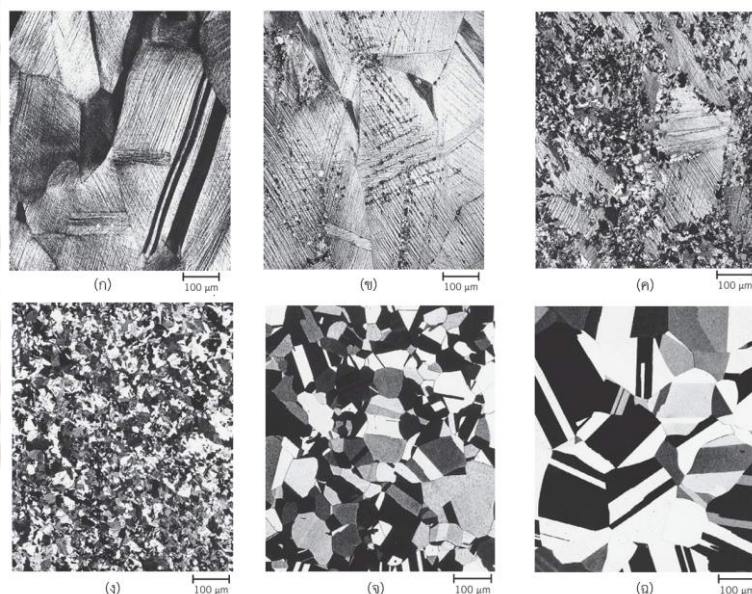
พลังงานบางส่วนที่ใช้ไปในการเสียรูปจะถูกเก็บสะสมในโลหะในรูปของ พลังงานความเค้นภายใน (Strain Energy) ซึ่งเกิดขึ้นบริเวณที่มีแรงดึง แรงอัด และแรงเฉือนรอบๆความไม่ต่อเนื่องที่เกิดขึ้นใหม่ นอกจากนี้คุณสมบัติอื่นๆ เช่น ค่าการนำไฟฟ้าและความต้านทานการกัดกร่อน อาจมีการเปลี่ยนแปลงเนื่องจากการเสียรูปพลาสติก คุณสมบัติและโครงสร้างของโลหะอาจกลับคืนสู่สภาพก่อนการแปรรูปเย็นได้ผ่านกระบวนการอบชุบความร้อนที่เหมาะสม (Annealing Treatment) การคืนสภาพของโครงสร้างนี้เกิดจากกระบวนการที่เกิดขึ้นที่อุณหภูมิสูง ซึ่งประกอบด้วย การอบคืนตัว (Recovery) และการเกิดผลึกใหม่ (Recrystallization) และอาจตามมาด้วย การเติบโตของเกรน (Grain Growth)

2.10.1 การเกิดผลึกใหม่ (Recrystallization)

การเกิดผลึกใหม่เป็นกระบวนการที่ทำให้เกิด เกรนชุดใหม่ที่ปราศจากความเครียด (Strain-Free) และมีขนาดใกล้เคียงกันในทุกทิศทาง (Equiaxed Grain) เกรนเหล่านี้มีความหนาแน่นของความไม่ต่อเนื่องต่ำ ซึ่งเป็นลักษณะเฉพาะของโลหะที่ผ่านการแปรรูปเย็นมาก่อน แรงขับเคลื่อนของกระบวนการนี้เกิดจากความแตกต่างของพลังงานภายในระหว่างวัสดุที่มีความเครียดและวัสดุที่ไม่มีความเครียด เกรนใหม่จะเริ่มก่อตัวจากจุดกำเนิดเล็กๆ (Nuclei) และเติบโตขึ้นจนกระทั่งแทนที่โครงสร้างเก่าทั้งหมด หลายขั้นตอนในกระบวนการตกผลึกซ้ำแสดงไว้ใน ภาพที่ 2-11 จากภาพ

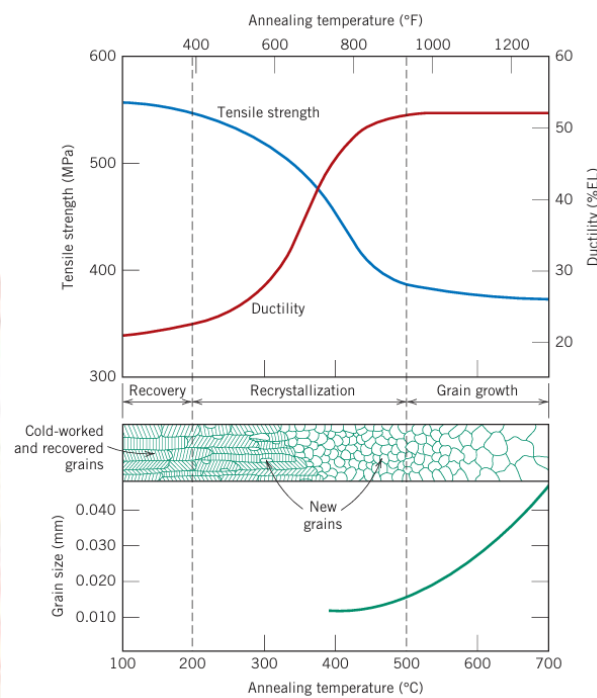
โครงสร้างจุลภาค เม็ดที่มีจุดเล็กๆ คือเม็ดที่มีการตกผลึกใหม่ ดังนั้นการตกผลึกใหม่ของโลหะงานเย็นจึงอาจถูกนำมาใช้เพื่อปรับปรุงโครงสร้างเกรนได้ นอกจากนี้ ในระหว่างการเกิดผลึกใหม่ สมบัติเชิงกลที่เปลี่ยนไปจากการแปรรูปเย็นจะถูกฟื้นคืนสู่ค่าก่อนการแปรรูปเย็น ซึ่งหมายความว่าโลหะจะอ่อนตัวลงแต่มีความเหนียวเพิ่มขึ้น การอบชุบความร้อนบางประเภทถูกออกแบบมาเพื่อให้เกิดกระบวนการเกิดผลึกใหม่และส่งผลกระทบต่อสมบัติเชิงกลที่ปรับเปลี่ยนไป ปริมาณของการเกิดผลึกใหม่ขึ้นอยู่กับเวลาและอุณหภูมิ อัตราส่วนของการเกิดผลึกใหม่จะเพิ่มขึ้นเมื่อเวลาผ่านไป ดังที่เห็นในภาพถ่ายจุลทรรศน์ภาพที่ 2-11ก ถึง 2-11ง

อิทธิพลของอุณหภูมิแสดงให้เห็นในภาพที่ 2-12 ซึ่งพล็อตค่าความต้านแรงดึงและความเหนียว (ที่อุณหภูมิห้อง) ของโลหะผสมทองเหลืองเป็นฟังก์ชันของอุณหภูมิสำหรับระยะเวลาการอบชุบที่คงที่ 1 ชั่วโมง โครงสร้างของเกรนที่พบในแต่ละช่วงของกระบวนการก็มีการแสดงในแผนภาพโครงสร้างเช่นกัน พฤติกรรมของการเกิดผลึกใหม่ของโลหะผสมบางประเภทบางครั้งถูกกำหนดในรูปของอุณหภูมิการเกิดผลึกใหม่ (Recrystallization Temperature) ซึ่งหมายถึงอุณหภูมิที่กระบวนการเกิดผลึกใหม่เสร็จสมบูรณ์ภายใน 1 ชั่วโมง ดังนั้น อุณหภูมิการเกิดผลึกใหม่ของโลหะผสมทองเหลืองในภาพที่ 2-12 จะอยู่ที่ประมาณ 450°C (850°F) โดยทั่วไป อุณหภูมินี้จะอยู่ระหว่าง หนึ่งในสามถึงครึ่งหนึ่งของอุณหภูมิหลอมเหลวสมบูรณ์ของโลหะ (T_m)



ภาพที่ 2-11 ภาพถ่ายจุลทรรศน์แสดงระยะต่างๆ ของกระบวนการเกิดผลึกใหม่

และการเติบโตของเกรน (ก) โครงสร้างเกรนของโลหะที่ผ่านการแปรรูปเย็น (ข) ระยะเริ่มต้นของการเกิดผลึกใหม่ (ค) การแทนที่บางส่วนของเกรนที่เกิดผลึกใหม่ (ง) การเกิดผลึกใหม่สมบูรณ์ (จ) การเติบโตของเกรน และ (ฉ) การเติบโตของเกรนหลังจากผ่านไป 10 นาที

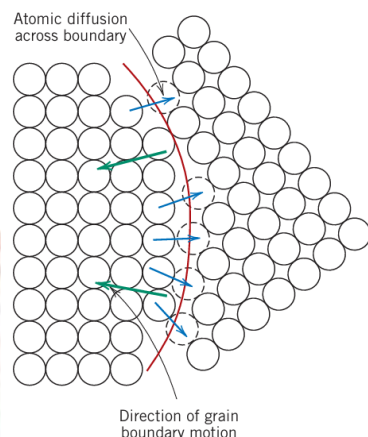


ภาพที่ 2-12 อิทธิพลของอุณหภูมิการอบคืนตัว (ระยะเวลาอบ 1 ชั่วโมง) ต่อ ความต้านแรงดึง (Tensile Strength) และความเหนียว (Ductility) และ ขนาดของเกรนที่แสดง เป็นฟังก์ชันของอุณหภูมิการอบคืนตัว

2.10.2 การเติบโตของเกรน (Grain Growth)

หลังจากกระบวนการเกิดผลึกใหม่ (Recrystallization) เสร็จสมบูรณ์แล้ว เกรนที่ปราศจากความเครียด (Strain-Free Grains) จะยังคงเติบโตต่อไปหากตัวอย่างโลหะถูกปล่อยไว้ที่อุณหภูมิสูง (ดังแสดงในภาพที่ 2-11ง ถึง 2-11จ) ปรากฏการณ์นี้เรียกว่า การเติบโตของเกรน (Grain Growth) ซึ่งสามารถเกิดขึ้นได้ในวัสดุหลายผลึกทุกประเภท รวมถึงโลหะและเซรามิก โดยไม่จำเป็นต้องมีการคืนตัว (Recovery) หรือการเกิดผลึกใหม่ (Recrystallization) มาก่อน

เมื่อขนาดของเกรนเพิ่มขึ้น พื้นที่รวมของขอบเกรนทั้งหมดจะลดลง ส่งผลให้พลังงานรวมของวัสดุลดลงตามไปด้วย ซึ่งเป็นแรงขับเคลื่อนสำคัญของกระบวนการเติบโตของเกรน การเติบโตของเกรนเกิดจากการเคลื่อนที่ของขอบเกรน (Grain Boundary Migration) อย่างไรก็ตาม ไม่ใช่เกรนทั้งหมดที่สามารถขยายตัวได้ โดยทั่วไป เกรนขนาดใหญ่จะเติบโตขึ้นโดยอาศัยการหดตัวของเกรนขนาดเล็ก ซึ่งทำให้ค่าเฉลี่ยของขนาดเกรนเพิ่มขึ้นเมื่อเวลาผ่านไป และในช่วงเวลาใดก็ตามจะมีการกระจายของขนาดเกรนที่แตกต่างกัน การเคลื่อนที่ของขอบเกรนเป็นกระบวนการที่เกี่ยวข้องกับการแพร่กระจายของอะตอมระยะสั้นจากด้านหนึ่งของขอบเกรนไปยังอีกด้านหนึ่ง ทิศทางของการเคลื่อนที่ของขอบเกรนและการแพร่กระจายของอะตอมจะสวนทางกัน ดังที่แสดงในภาพที่ 2-13

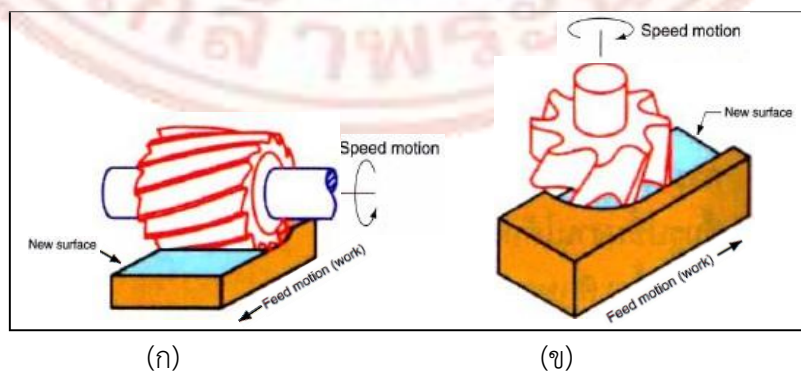


ภาพที่ 2-13 แผนภาพเชิงโครงสร้างแสดงการเติบโตของเกรนผ่านการแพร่กระจายของอะตอม

2.11 การกัด (Milling) [12,13]

การกัด (Milling) คือ การตัดเฉือนวัสดุที่เครื่องมือตัดหมุนรอบตัวเองอยู่กับที่ จากนั้นเลื่อนโต๊ะงานที่ใช้จับชิ้นงานให้เคลื่อนที่เข้าไปหาเครื่องมือตัดเพื่อให้เครื่องมือตัดที่กำลังหมุนอยู่นั้นตัด เฉือนวัสดุตามรูปร่างที่ต้องการ โดยเครื่องมือตัดจะหมุนและเคลื่อนที่ซ้ำๆ สัมพันธ์กับการเคลื่อนที่ของชิ้นงาน ทำให้เกิดระนาบของผิวงานใหม่ ทิศทางการป้อน (Feed Direction) ของชิ้นงานจะตั้งฉากกับแกนการหมุนของเครื่องมือตัด ในขณะที่การหมุนของเครื่องมือตัดถูกกำหนดด้วยความเร็ว (Speed) ขั้นตอนหลักในกระบวนการกัดเกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนรูปโดยการเฉือน (Shear Deformation) ทำให้เกิดเศษตัด (Chip) เมื่อเศษตัดถูกกัดออกจากชิ้นงานจะเกิดผิวชิ้นงานใหม่ กระบวนการกัดนี้ใช้ในการผลิตชิ้นงานให้ตามรูปร่างที่ต้องการและถือว่าเป็นกระบวนการผลิตที่สำคัญมากอย่างหนึ่ง

การกัดขึ้นรูปมีหลายประเภท แต่จำแนกการกัดเป็น 2 ชนิดใหญ่ คือ งานกัดในแนวนอน (Peripheral Milling) และงานกัดในแนวตั้ง (Face Milling) ดังภาพที่ 2-14



ภาพที่ 2-14 ลักษณะของการกัดแบบ (ก) งานกัดในแนวนอน (Peripheral Milling) และ

(ข) งานกัดในแนวตั้ง (Face Milling)

ความสำคัญในเชิงพาณิชย์และเชิงเทคโนโลยีของกระบวนการกัด มีดังนี้

- สามารถประยุกต์ใช้ได้อย่างกว้างขวางกับวัสดุหลายประเภท โดยส่วนใหญ่ใช้ได้กับ โลหะแข็ง รวมถึง พลาสติกและพลาสติกผสม
- สามารถใช้ในการทำชิ้นงานที่มีรูปร่างหลากหลาย รวมถึงชิ้นงานที่มีรูปร่างซับซ้อน โดยการใช้วิธีการกัดหลาย ๆ แบบและหลาย ๆ ขั้นตอนตามรายละเอียดชิ้นงาน
- สามารถผลิตชิ้นงานที่มีขนาดความคลาดเคลื่อนหรือพิสัยความเผื่อ (Tolerance) น้อยกว่า 0.001 นิ้ว (0.025 มิลลิเมตร) ซึ่งมีความถูกต้องมากกว่ากระบวนการผลิตส่วนใหญ่
- มีความสามารถผลิตผิวสำเร็จ (Surface Finish) ของชิ้นงานให้มีความเรียบ 16 μin (0.4 μm) หรือดีกว่า

ด้วยคุณสมบัติเบื้องต้น กระบวนการกัดจึงมักนิยมใช้กับชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการผลิตแบบอื่น ๆ มาแล้ว เช่น งานหล่อ (Casting) หรือการขึ้นรูปขนาดใหญ่ ตัวอย่างเช่น การตีขึ้นรูป (Forging) โดยรูปร่างทั่วไปของชิ้นงานจะถูกผลิตโดยกระบวนการอื่นและใช้กระบวนการกัดในการ ผลิตชิ้นงานสำเร็จให้มีขนาดรูปร่างที่ถูกต้องและมีผิวงานตามที่ต้องการ

ในกระบวนการกัด ความร้อนเกิดจากแรงเฉือน (Shear Stress) และแรงเสียดทานระหว่างเครื่องมือตัดและวัสดุ ซึ่งอาจก่อให้เกิดปัญหาการเสียคุณสมบัติและการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของวัสดุได้ จึงต้องมีการจัดการความร้อนด้วยการใช้น้ำยาหล่อเย็นหรือสารหล่อลื่น (Cutting Fluids) ตามภาพที่ 2-15 สามารถลดอุณหภูมิบริเวณที่ทำการกัดให้ไม่เกินจุดที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางโครงสร้าง รวมถึงหล่อลื่นวัสดุของเครื่องมือตัดทำให้ตัดได้อย่างมีประสิทธิภาพ นอกจากนี้ การตั้งค่าพารามิเตอร์การกัดให้เหมาะสม เช่น ลดความเร็วรอบในวัสดุที่ไวต่อความร้อน ก็สามารถช่วยได้เช่นกัน



ภาพที่ 2-15 การใช้น้ำยาหล่อเย็นในการกัด

2.12 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.12.1 Li, L.-L., Su, Y., Beyerlein, I. J., Han, W.-Z. [14] งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ในการพัฒนาโลหะผสม Fe-Al ซึ่งปกติจะมีความเปราะที่อุณหภูมิห้อง โดยใช้โครงสร้างชั้นบางระดับนาโนเมตร (Nanolayered FeAl/FeAl₂) เพื่อปรับปรุงสมบัติเชิงกลและเพิ่มความเหนียวของวัสดุ การทดลองพบว่าเมื่อความหนาของชั้น FeAl₂ ลดลงต่ำกว่า 1 μm โครงสร้างชั้นบางนี้สามารถลดแนวโน้มของการแตกร้าว และเปลี่ยนโหมดการเสียรูปจากการแตกร้าวแบบเปราะไปเป็น การลื่นไหลของโพล์ (Slip Deformation) ที่สามารถกระจายพลังงานได้ดีขึ้น ในชั้นบางระดับนาโนเมตร (259 nm) การเคลื่อนที่ของความไม่ต่อเนื่อง (Dislocation) ใน FeAl₂ เปลี่ยนไปเป็นแบบ Unimodal Slip ซึ่งช่วยลดการเกิดรอยร้าวและทำให้โครงสร้างสามารถรองรับการเสียรูปได้มากขึ้น นอกจากนี้ ชั้น FeAl ที่อยู่ติดกันยังช่วยดูดซับพลังงานและกระจายแรงเค้น ทำให้วัสดุสามารถรับแรงดึงสูงขึ้นโดยไม่แตกหักง่าย งานวิจัยนี้แสดงให้เห็นว่าโครงสร้างชั้นบางในโลหะผสม Fe-Al สามารถทำให้วัสดุเปลี่ยนจากเปราะเป็นเหนียวที่อุณหภูมิห้องได้ ซึ่งเปิดโอกาสในการนำ Fe-Al Alloys ไปใช้ในอุตสาหกรรมที่ต้องการวัสดุที่เบา แข็งแรง และทนต่อสภาพแวดล้อมที่รุนแรง เช่น อุตสาหกรรมพลังงาน นิวเคลียร์ และโครงสร้างอากาศยาน นอกจากนี้ ผลการศึกษายังชี้ให้เห็นว่าการออกแบบโครงสร้างโลหะระดับนาโนเมตรสามารถปรับแต่งสมบัติเชิงกลของวัสดุได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยไม่ต้องพึ่งพาการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบทางเคมี ทำให้เป็นแนวทางใหม่ที่สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการออกแบบวัสดุเชิงวิศวกรรมขั้นสูงในอนาคต

2.12.2 Böhm, M., & Kowalski, M. [15] งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ในการประมาณอายุความล้าของรอยต่อแบบเชื่อมระเบิด (Explosive Cladded Transition Joints) ที่อยู่ภายใต้สภาวะการไหลแบบสุ่มในสภาวะทะเล (Random Sea State) โดยใช้วิธีเชิงสเปกตรัม (Spectral Method) งานวิจัยนำเสนอผลการทดสอบความล้าโดยใช้แบบจำลองสเปกตรัม Pierson-Moskowitz และพบว่าสเปกตรัมที่ได้มีลักษณะเป็นแบบ Non-Gaussian วัสดุที่ใช้ในการทดสอบเป็นชิ้นส่วนรอยต่อที่ประกอบด้วยชั้นของโลหะผสมอะลูมิเนียม A5083 A1050 ไทเทเนียมเกรด 1 และเหล็กกล้าเกรด D การวิเคราะห์ความเค้นตกค้าง (Residual Stress) ถูกดำเนินการผ่านการทดลองเจาะรูและการจำลองด้วย ANSYS โดยใช้แบบจำลองการกระจายความร้อนของ Goldak ค่าความเค้นตกค้างที่ได้รับจากการคำนวณถูกนำมาใช้ในกระบวนการประมาณอายุความล้าโดยใช้แบบจำลองการชดเชยค่าเฉลี่ยของความเค้น Goodman และการแก้ไข Non-Gaussianity ด้วยสมการของ Bracessi ผลการคำนวณอายุความล้าถูกเปรียบเทียบกับผลการทดสอบภาคสนามและพบว่าค่าที่คำนวณได้อยู่ในช่วงค่าที่กระจายตัว (Scatter Band) โดยค่าความผิดพลาดเฉลี่ยถูกคำนวณด้วยวิธี Root Mean Square (RMS) นอกจากนี้ยังมีการศึกษาผลกระทบของค่าความเค้นตกค้างและการแก้ไข Gaussianity ต่อผลลัพธ์ พบว่าในกรณีที่ไม่มี การแก้ไข Gaussianity หรือค่าความเค้นตกค้าง ผลการคำนวณจะมี

แนวโน้มที่แตกต่างจากผลการทดลองจริง งานวิจัยยังได้เสนอว่าการแตกร้าที่พบเกิดขึ้นส่วนใหญ่ที่ด้านอะลูมิเนียมของรอยต่อ แต่มีบางกรณีที่รอยร้าเกิดขึ้นภายในชั้นตัวกลาง ซึ่งต้องมีการศึกษาต่อไป เพื่อป้องกันปัญหาการแยกชั้นของวัสดุเคลือบ งานวิจัยนี้ได้พัฒนาแนวทางการประเมินอายุความล้าของรอยต่อเชื่อมระเบิดภายใต้สภาวะโหลดสั่นในทะเล โดยใช้วิธีเชิงสเปกตรัมร่วมกับการปรับค่าต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับความเค้นตกค้างและลักษณะ non-Gaussian ของโหลด ซึ่งช่วยเพิ่มความแม่นยำในการคาดการณ์อายุความล้าของโครงสร้างทางทะเล

2.12.3 Carvalho, G. H. S. F. L., et al. [16] งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ในการศึกษาการก่อตัวของ โครงสร้างอินเตอร์เมทัลลิก (Intermetallic Structures) ที่เกิดขึ้นที่บริเวณรอยต่อของรอยเชื่อมระหว่าง เหล็กกล้า AISI 304 และอะลูมิเนียม AA1050 ซึ่งเป็นโลหะที่มีความแตกต่างกันในด้านสมบัติเชิงกลและอุณหภูมิหลอมเหลว ทำให้เกิดปัญหาความเปราะของรอยต่อเนื่องจากการก่อตัวของชั้นอินเตอร์เมทัลลิก ในการศึกษาลักษณะทางจุลภาคของรอยต่อ และพบว่าชั้นอินเตอร์เมทัลลิกที่เกิดขึ้นประกอบด้วยเฟส Fe_2Al_5 และ $FeAl_3$ ซึ่งเป็นเฟสเปราะที่อาจทำให้รอยเชื่อมมีความแข็งแรงสูงแต่เปราะและแตกหักได้ง่าย นอกจากนี้ ยังพบว่าความหนาของชั้นอินเตอร์เมทัลลิกมีความสัมพันธ์โดยตรงกับพารามิเตอร์ของกระบวนการเชื่อม โดยเฉพาะ ความเร็วระเบิด (Explosion Velocity) และมุมกระทบ (Collision Angle) เมื่อใช้ความเร็วระเบิดที่สูงขึ้น ชั้นอินเตอร์เมทัลลิกจะหนาขึ้น ส่งผลให้ความเปราะเพิ่มขึ้น และลดความสามารถในการรับแรงของรอยต่อ ในทางกลับกัน หากลดพลังงานของการเชื่อมลง ชั้นอินเตอร์เมทัลลิกจะบางลง ส่งผลให้รอยต่อมีความเหนียวและสามารถรองรับแรงดึงได้ดีขึ้น ผลการทดสอบเชิงกลชี้ให้เห็นว่าบริเวณที่มีชั้นอินเตอร์เมทัลลิกหนา มีค่าความแข็งแรงแต่มีความเหนียวต่ำ ทำให้เกิดการแตกร้าได้ง่าย ในขณะที่บริเวณที่มีชั้นบางลงสามารถเสียรูปได้มากกว่าโดยไม่แตกหักง่าย งานวิจัยนี้สรุปว่า การควบคุมพารามิเตอร์ของกระบวนการเชื่อมเป็นปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อการก่อตัวของเฟสอินเตอร์เมทัลลิก และแนะนำแนวทางในการลดผลกระทบของชั้นอินเตอร์เมทัลลิก เช่น การใช้กระบวนการอบคืนตัว (Post-Weld Heat Treatment) หรือการเพิ่มชั้นตัวกลาง (Interlayer) อย่างไทเทเนียมหรือทองแดง เพื่อลดการก่อตัวของเฟสเปราะและเพิ่มความเหนียวของรอยต่อ

2.12.4 Wang, J., & Zhang, Y. [17] งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ในการศึกษาความสามารถในการเชื่อมของ ข้อต่ออะลูมิเนียมอัลลอย-อะลูมิเนียม-เหล็ก (Aluminum alloy-Aluminum-Steel Transition joints) ที่ผลิตโดยกระบวนการเชื่อมระเบิด (Explosive Welding) ซึ่งเป็นเทคนิคสำคัญในการเชื่อมโลหะที่มีคุณสมบัติต่างกันอย่างสิ้นเชิง โดยมุ่งเน้นการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคและสมบัติทางกลของรอยต่อหลังจากการเชื่อมเพิ่มเติมด้วยกระบวนการ MIG สำหรับอะลูมิเนียม และการเชื่อมอาร์กโดยใช้แก๊ส CO_2 สำหรับเหล็ก จากการศึกษาพบว่ารอยต่ออะลูมิเนียมอัลลอย-อะลูมิเนียมมีโครงสร้างเป็นคลื่น (Wavy Interface) ขณะที่รอยต่ออะลูมิเนียม-เหล็กเป็นเส้นตรง

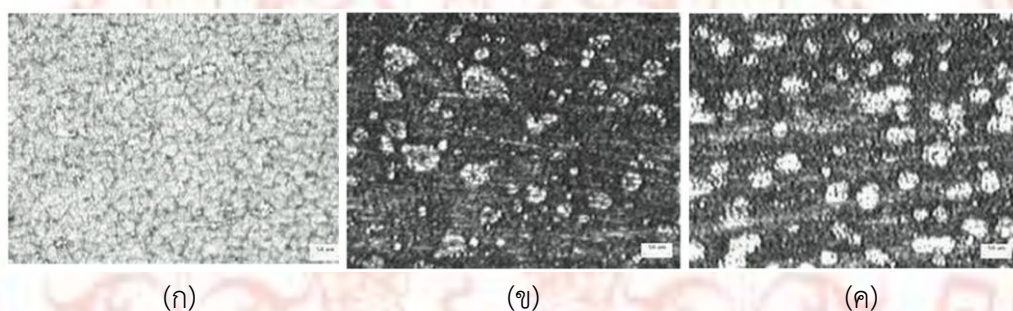
(Linear Interface) ซึ่งบ่งบอกถึงพฤติกรรมการหลอมรวมของวัสดุที่แตกต่างกัน ตามที่แสดงในภาพที่ 2-16 การวิเคราะห์ชี้ให้เห็นว่าโครงสร้างอินเทอร์เฟสที่เกิดขึ้นสามารถรองรับแรงเฉือนได้สูงถึง 77 MPa และมีค่าความแข็งแรงของรอยต่อสูงถึง 150 MPa นอกจากนี้ผลการทดสอบหลังจากผ่านกระบวนการเชื่อมเสริมระบุว่าโครงสร้างของรอยต่อไม่ได้เปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญ แต่ค่าความแข็งแรงลดลงเล็กน้อยเนื่องจากผลกระทบจากอุณหภูมิการเชื่อม ในแง่ของโครงสร้างจุลภาค พบว่าเกิดการคืนตัวของเกรน (Recovery and Recrystallization) ในบริเวณใกล้รอยต่อ โดยเฉพาะในชั้นเหล็กซึ่งมีการสะสมความไม่ต่อเนื่อง (Dislocation) ที่ขอบเกรน งานวิจัยยังระบุว่าหากอุณหภูมิของรอยต่อระหว่างการเชื่อมเกิน 300°C อาจทำให้เกิดเฟสอินเทอร์เมทัลลิกที่เปราะ ส่งผลให้รอยต่อมีความแข็งแรงลดลงและมีแนวโน้มเกิดการแตกร้าวได้ง่าย ด้วยเหตุนี้ การควบคุมอุณหภูมิในการเชื่อมเป็นปัจจัยสำคัญในการรักษาสมบัติของรอยต่อ โดยแนะนำให้ใช้ความร้อนต่ำและเวลาการเชื่อมที่สั้นที่สุด เพื่อลดผลกระทบของกระบวนการเชื่อมต่อรอยต่อ นอกจากนี้ ยังเสนอว่าการใช้ ชั้นตัวกลาง (Interlayer) เช่น ไทเทเนียมหรือทองแดง อาจช่วยลดผลกระทบของเฟสเปราะและเพิ่มความแข็งแรงของรอยต่อเพื่อการใช้งานที่ยาวนานขึ้น



ภาพที่ 2-16 พื้นผิวรอยต่อของแผ่นวัสดุที่เคลือบด้วยกระบวนการเชื่อมระเบิด

2.12.5 Phengsakul, S., & Rodchanarowan, A. [18] งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ในการศึกษาผลกระทบของการอบชุบด้วยความร้อน (Thermal Treatment) ที่อุณหภูมิ 300°C ต่อการก่อตัวของเฟสอินเทอร์เมทัลลิก (Intermetallic Phases) ในรอยต่อเชื่อมระเบิดของโครงสร้าง Fe-Al Structural Transition Joints (STJs) โดยรอยต่อ STJs ที่ใช้ในการทดลองนี้ประกอบด้วย เหล็กกล้า St.52-3N อะลูมิเนียมบริสุทธิ์ 1050A และอะลูมิเนียมอัลลอย 5083 ซึ่งถูกเชื่อมเข้าด้วยกันโดยกระบวนการเชื่อมระเบิด (Explosive Welding) จากนั้นจึงนำไปผ่านกระบวนการอบที่อุณหภูมิ 300°C เป็นเวลา 5 และ 15 นาที เพื่อศึกษาผลของอุณหภูมิต่อการก่อตัวของเฟสอินเทอร์เมทัลลิก ผลการวิเคราะห์แสดงให้เห็นว่า หลังจากผ่านการอบชุบที่อุณหภูมิ 300°C ปริมาณเฟสอินเทอร์เมทัลลิกในชั้นอะลูมิเนียมอัลลอย 5083 เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ดังแสดงในภาพที่ 2-17 ขณะที่ชั้นอะลูมิเนียม 1050A และเหล็ก St.52-3N ไม่ได้รับผลกระทบมากนัก การเปรียบเทียบระหว่างตัวอย่างที่ไม่ผ่านการอบ กับตัวอย่างที่ผ่านการอบ 5 และ 15 นาที พบว่าปริมาณเฟสอินเทอร์เมทัลลิกเพิ่มขึ้นตาม

ระยะเวลาที่สัมผัสกับอุณหภูมิสูง โดยเฉพาะบริเวณที่มีธาตุแมกนีเซียมสูง คาดการณ์ว่าเฟสที่เกิดขึ้นส่วนใหญ่คือ Al_2Mg_3 ซึ่งเป็นเฟสที่มักเกิดขึ้นในโลหะอะลูมิเนียมซีรีส์ 5XXX และอาจส่งผลต่อสมบัติทางกลของรอยต่อ นอกจากนี้ยังพบว่า เฟสอินเตอร์เมทัลลิกมีการกระจายตัวมากขึ้นและครอบคลุมพื้นที่มากขึ้นในตัวอย่างที่ผ่านการอบ 15 นาที่ เมื่อเทียบกับตัวอย่างที่ผ่านการอบ 5 นาที่ ซึ่งหมายความว่า การเพิ่มระยะเวลาการอบชุบจะส่งผลให้ปริมาณเฟสอินเตอร์เมทัลลิกเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง แม้ว่าการเกิดเฟสอินเตอร์เมทัลลิกจะช่วยเสริมความแข็งแรงของรอยต่อได้ในระดับหนึ่ง แต่หากมีปริมาณมากเกินไปจะทำให้รอยต่อเกิดความเปราะ (Brittle Failure) ซึ่งเป็นปัญหาสำคัญที่อาจทำให้เกิดการแตกหักภายใต้สภาวะโหลดเชิงกลในระยะยาว ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงเสนอว่า การควบคุมอุณหภูมิและระยะเวลาการอบชุบเป็นปัจจัยสำคัญในการลดผลกระทบของเฟสเปราะในรอยต่อ STJs และแนะนำให้ทำการศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับ ผลของอุณหภูมิและระยะเวลาการอบต่อสมบัติทางกลของรอยต่อ Fe-Al STJs เพื่อกำหนดเงื่อนไขที่เหมาะสมที่สุดในการใช้งาน

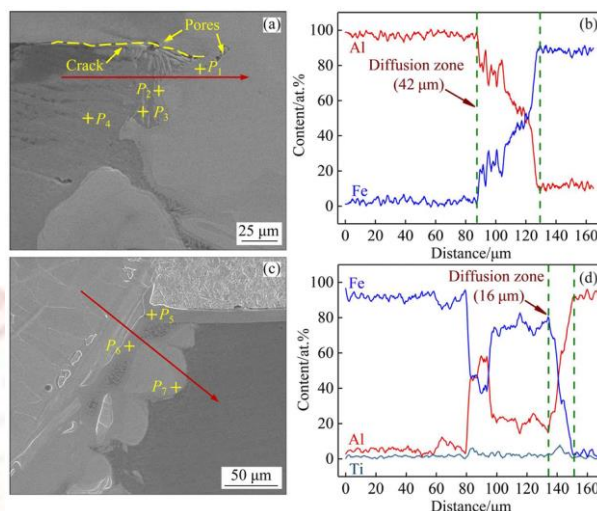


ภาพที่ 2-17 ภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสงของอะลูมิเนียม 5083 ภายหลังกักรด ในกรณี (ก) ไม่ผ่านการอบ (ข) ผ่านการอบที่ความร้อน 300°C เป็นเวลา 5 นาที่ (ค) ผ่านการอบที่ความร้อน 300°C เป็นเวลา 15 นาที่

2.12.6 Tricarico, L., Spina, R., Sorgente, D., & Brandizzi, M. [19] งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ในการศึกษาผลกระทบของการอบชุบด้วยความร้อน (Thermal Treatment) ในรอยต่อเชื่อมระเบิดของโครงสร้าง Fe-Al Structural Transition Joints (STJs) โดยรอยต่อ STJs โดยมุ่งเน้นกับการวิเคราะห์ การเปลี่ยนแปลงของเฟสอินเตอร์เมทัลลิก (Intermetallic Phases) ที่เกิดขึ้นระหว่างเหล็กและอะลูมิเนียม เนื่องจากสารประกอบเหล่านี้ส่งผลโดยตรงต่อคุณสมบัติทางกลของรอยต่อ การก่อตัวของเฟสอินเตอร์เมทัลลิก เช่น $FeAl$ และ Fe_3Al ทำให้รอยต่อมีความแข็งแรงสูงขึ้น แต่มีความเปราะเพิ่มขึ้น ซึ่งอาจลดทอนความสามารถในการรับแรงของรอยต่อในระยะยาว จากการวิเคราะห์พบว่า ความหนาของเฟสอินเตอร์เมทัลลิกเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญเมื่ออุณหภูมิและระยะเวลาในการอบร้อนเพิ่มขึ้น โดยเฉพาะบริเวณที่มีการแพร่กระจายของอะตอมเหล็กเข้าสู่ชั้นอะลูมิเนียม นอกจากนี้ ยังพบว่าการอบชุบที่อุณหภูมิสูงทำให้เกิด การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของเฟส

ระหว่างโลหะ (Interfacial Phases) จากโครงสร้างที่มีเสถียรภาพไปเป็นโครงสร้างที่เปราะมากขึ้น ส่งผลต่อค่าความแข็งแรงและความสามารถในการรับแรงเฉือน (Shear Strength) ของรอยต่อ ในการเปรียบเทียบระหว่างรอยต่อที่ไม่ได้ผ่านการอบชุบกับรอยต่อที่ผ่านการอบ พบว่าตัวอย่างที่ผ่านการอบ มีค่าความแข็งแรงเฉือนลดลงเนื่องจากการก่อตัวของเฟสเปราะที่มากขึ้น อย่างไรก็ตาม ในกรณีที่มีการอบชุบถูกควบคุมอย่างเหมาะสม อาจช่วยเพิ่มความสามารถในการยึดติดระหว่างเหล็กและอะลูมิเนียม โดยไม่ทำให้เกิดการสูญเสียสมบัติเชิงกลมากเกินไป นอกจากนี้ยังศึกษาการใช้ กระบวนการเชื่อมด้วย เลเซอร์ (Laser Welding) ร่วมกับเทคนิค Explosion Welding เพื่อลดผลกระทบของเฟสอินเตอร์เมทัลลิก โดยใช้เลเซอร์เพื่อจำกัดพื้นที่ที่ได้รับความร้อนและลดอัตราการแพร่กระจายของธาตุเหล็ก เข้าสู่ชั้นอะลูมิเนียม ผลการทดลองพบว่าการเชื่อมด้วยเลเซอร์ช่วยลดปริมาณเฟสอินเตอร์เมทัลลิกที่ ก่อตัวขึ้นในรอยต่อได้ แต่ยังคงต้องมีการปรับแต่งพารามิเตอร์ให้เหมาะสมเพื่อหลีกเลี่ยงการแตกร้าวที่ เกิดจากความเค้นตกค้าง (Residual Stress) ในรอยต่อ

2.12.7 Li, T., Zhou, D., Yan, Y., Peng, P., & Liu, J. [20] งานวิจัยนี้ศึกษาพฤติกรรมของ สารประกอบอินเตอร์เมทัลลิก (IMCs) ที่เกิดขึ้นระหว่างกระบวนการเชื่อมเหล็ก-อะลูมิเนียมด้วย เลเซอร์ โดยใช้แนวทาง การคำนวณเชิงทฤษฎีระดับกลศาสตร์ควอนตัม (First-Principles Calculations) และ การทดลองจริง เพื่อวิเคราะห์ผลกระทบของเฟส IMCs ต่อความแข็งแรงและ ความเปราะของรอยต่อ จากการคำนวณพบว่าเฟส Fe_2Al_5 และ FeAl มีค่า G/B ratio สูง ซึ่งบ่งชี้ว่า เป็นเฟสที่เปราะและมีแนวโน้มเกิดการแตกร้าวง่าย ขณะที่ Fe_3Al มีค่า G/B ratio ต่ำกว่า ทำให้มีความเหนียวและเหมาะสมต่อการเชื่อมมากกว่า ผลการทดลองโดยใช้กระบวนการ Laser Welding พบว่าชั้น IMCs ที่เกิดขึ้นบริเวณรอยต่อมีเฟสหลักเป็น Fe_2Al_5 และ FeAl ซึ่งสอดคล้องกับการคำนวณ เชิงทฤษฎี นอกจากนี้ การใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) และการวิเคราะห์ องค์ประกอบทางเคมีด้วย EDS แสดงให้เห็นว่า เฟส Fe_2Al_5 มีโครงสร้างเป็นแถบยาว (Needle-Like Structure) และกระจายตัวในแนวต่อของโลหะทั้งสองฝั่ง ดังแสดงในภาพที่ 2-18 ซึ่งเป็นปัจจัยที่ทำให้ รอยต่อมีแนวโน้มเปราะเพิ่มขึ้น การทดสอบแรงดึงของรอยเชื่อมแสดงให้เห็นว่า เมื่อความหนาของ ชั้น IMCs มีค่ามากกว่า $5\text{ }\mu\text{m}$ ความแข็งแรงของรอยต่อจะลดลงอย่างมีนัยสำคัญ โดยค่าความ แข็งแรงเฉื่อยของรอยต่ออยู่ในช่วง 90-120 MPa ซึ่งต่ำกว่าความแข็งแรงของโลหะพื้นฐานมาก นอกจากนี้การทดสอบแรงเฉือนพบว่า รอยต่อที่มี IMCs หนาเกิน $5\text{ }\mu\text{m}$ จะแตกหักที่แนวต่อระหว่าง เหล็กกับอะลูมิเนียม (Interface Failure) ซึ่งหมายความว่าชั้น IMCs ที่เกิดขึ้นมีอิทธิพลโดยตรงต่อ การลดทอนความแข็งแรงของรอยต่อ อย่างไรก็ตาม การปรับพารามิเตอร์การเชื่อมเลเซอร์ เช่น การลด พลังงานอินพุต การใช้เทคนิคพัลส์เลเซอร์ (Pulsed Laser Welding) หรือการใช้สารเคลือบผิวเพื่อลด ปริมาณ IMCs ที่เกิดขึ้น ซึ่งพบว่าสามารถควบคุมการก่อตัวของชั้น IMCs ให้บางลงและช่วยเพิ่มความ แข็งแรงของรอยต่อได้อย่างมีประสิทธิภาพ



ภาพที่ 2-18 ภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดแสดงการแตกหัก และ กราฟแสดงปริมาณการก่อตัวของ IMCs

2.12.8 พชรพล ศิลาคุปต์ [21] งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ในการศึกษาผลกระทบของกระบวนการเชื่อมซ่อม (Repair Welding) ต่อโครงสร้างจุลภาคและสมบัติเชิงกลของเหล็กกล้า ASTM A516 Gr.70 โดยการเชื่อมหลักใช้กระบวนการเชื่อมอาร์กทั้งสแตนแก๊สปกคลุม (GTAW) สำหรับแนวราก และกระบวนการเชื่อมใต้ฟลักซ์ (SAW) สำหรับแนวเต็มและแนวปิดผิว แล้วทำการเชื่อมซ่อมโดยขัดแนวเชื่อมที่มีปัญหาออกและทำการเชื่อมใหม่หลายรอบ (สูงสุด 5 ครั้ง) เพื่อศึกษาผลของจำนวนรอบการเชื่อมซ่อมที่มีต่อโครงสร้างจุลภาคและสมบัติเชิงกลของแนวเชื่อมและบริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อน (Heat Affected Zone, HAZ) ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า ขนาดเกรนในแนวเชื่อมและ HAZ มีขนาดใหญ่ขึ้นอย่างมีนัยสำคัญเมื่อจำนวนครั้งของการเชื่อมซ่อมเพิ่มขึ้น โดยเฉพาะบริเวณที่ได้รับความร้อนซ้ำหลายรอบ นอกจากนี้ยังพบว่าโครงสร้างเฟอร์ไรต์แบบแถบ (Banded Ferrite) และเพิร์ลไลต์ (Pearlite) ในแนวเชื่อมมีปริมาณเพิ่มขึ้น ซึ่งอาจส่งผลกระทบต่อความแข็งแรงของแนวเชื่อมโดยรวม การทดสอบแรงดึงแสดงให้เห็นว่า ค่าความแข็งแรงดึงสูงสุดของแนวเชื่อมลดลงเพียงเล็กน้อยเมื่อจำนวนครั้งของการเชื่อมซ่อมเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตาม ค่าความต้านทานแรงกระทำของบริเวณ HAZ มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นจนถึงรอบการเชื่อมซ่อมครั้งที่ 3 ก่อนที่จะลดลงอย่างมากในการเชื่อมซ่อมครั้งที่ 4 และ 5 ซึ่งเป็นผลมาจากการเติบโตของเกรนและการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของเฟสในเหล็กกล้า สอดคล้องกับผลการทดสอบความแข็งแรงที่พบว่าค่าความแข็งแรงลดลงเล็กน้อยเมื่อจำนวนรอบของการเชื่อมซ่อมเพิ่มขึ้น งานวิจัยนี้สรุปว่า จำนวนครั้งของการเชื่อมซ่อมที่เหมาะสมไม่ควรเกิน 3 ครั้ง เพื่อหลีกเลี่ยงการลดลงของสมบัติทางกลอย่างมีนัยสำคัญ และแนะนำว่าการควบคุมอุณหภูมิพรีฮีท (Preheat Temperature) และการอบคืนตัวหลังเชื่อม (Post-Weld Heat Treatment) อาจช่วยลดผลกระทบจากการเชื่อมซ่อมได้ นอกจากนี้ ควรมีการศึกษาเทคนิคการเชื่อม

ทางเลือกที่ลดผลกระทบต่อโครงสร้างจุลภาค เช่น การเชื่อมด้วยเลเซอร์ (Laser Welding) หรือการเชื่อมแบบ Friction Stir Welding (FSW) ซึ่งอาจช่วยเพิ่มอายุการใช้งานของรอยต่อและลดความเสียหายที่เกิดจากความร้อนซ้ำในกระบวนการเชื่อม

2.12.9 O. E. Vega, et al. [22] งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ในการศึกษาผลกระทบของการเชื่อมต่อการเชื่อมตามแนวเส้นรอบวงของระบบท่อต่อสมบัติทางกล โดยใช้ท่อเหล็กกล้าไร้ตะเข็บ (เกรด API X-52 Micro alloyed) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 219.10 มิลลิเมตร ความหนาแน่นท่อ 11.10 มิลลิเมตร เป็นวัสดุในการทดลอง จากนั้นทำการเชื่อมด้วยกระบวนการเชื่อมไฟฟ้าด้วยลวดหุ้มฟลักซ์ (Shielded Metal Arc Welding : SMAW) AWS A5.1 E6010 ขนาด 3.1 มิลลิเมตร ในแนวเชื่อมแนวนอน และลวดเชื่อม AWS A5.1 E7010G ขนาด 4.7 มิลลิเมตร ในแนวเชื่อมเดิม และแนวเชื่อมทับหน้า โดยควบคุมความร้อนที่เข้าสู่ชิ้นงาน (Heat Input) อยู่ที่ 1.2-1.5 kJ/mm การศึกษาโครงสร้างจุลภาคในรอยต่อของเหล็กกล้า API X52 ที่มีการเชื่อมด้วยกระบวนการเชื่อม SMAW ครั้งที่ 1, 2, 3 และ 4 การวัดขนาดของเกรน มีแนวทางที่โตขึ้นในบริเวณ HAZ ความเหนียวลดลงเนื่องจากจำนวนของการเชื่อมเพิ่มขึ้น ค่าความแข็งและค่าการต้านทานแรงดึงเป็นไปตามมาตรฐานขั้นต่ำของมาตรฐาน API 5L แม้ว่าจะมีการเชื่อมแซมถึง 4 ครั้ง การเชื่อมแนวทำให้ช่วยเพิ่มคุณสมบัติทางกล จึงแสดงให้เห็นว่าการเชื่อมแซมจำนวน 4 ครั้ง สามารถทำได้

2.12.10 อุเทน พุดเพ็ง [23] งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลกระทบของการเชื่อมต่อการสมบัติทางกลของท่อไร้ตะเข็บเหล็กกล้าโครเมียม-โมลิบดีนัม SA-213 เกรด T91 โดยกระบวนการเชื่อมแก๊สอาร์กทั้งสแตน โดยการออกแบบลักษณะการเชื่อมและการเชื่อมที่แตกต่างกัน 5 แบบ คือ ชิ้นงานเชื่อมที่ไม่มีการเชื่อม โดยมีการอบให้ความร้อนหลังเชื่อม การเชื่อมที่มีความหนาและอบให้ความร้อนหลังการเชื่อม การเชื่อมที่มีความหนาโดยไม่อบให้ความร้อนหลังการเชื่อม การเชื่อมที่มีความหนาและอบให้ความร้อนหลังการเชื่อม และ การเชื่อมจุดความหนาไม่อบให้ความร้อนหลังการเชื่อม และศึกษาผลกระทบของการให้ความร้อนหลังการเชื่อมต่อการสร้างและสมบัติทางกลในการเชื่อมโลหะโดยใช้ลวดเชื่อมชนิด ER90S-B9 ผลจากการทดสอบและตรวจสอบด้วยวิธีทางภาพถ่ายรังสีและภาพถ่ายโครงสร้างทางกลพบว่ารอยเชื่อมมีการหลอมละลายอย่างสมบูรณ์ ผลการทดสอบแรงดึงของการเชื่อมทั้ง 5 แบบ พบว่าค่าความต้านทานแรงดึงของชิ้นงานทดสอบที่ไม่มีการอบให้ความร้อนหลังการเชื่อมมีค่าสูงที่สุดและมีค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุดโดยมีค่าความต้านทานแรงดึงอยู่ที่ 760-854 MPa ผลการทดสอบความแข็งแบบ HV พบว่าบริเวณแนวเชื่อมที่ผ่านการอบให้ความร้อนหลังการเชื่อมมีค่าความแข็ง (243-280 HV) มากกว่าบริเวณ HAZ ที่มีค่าความแข็ง (192-247 HV) และบริเวณเนื้อโลหะพื้น (198-213 HV) และพบว่าค่าความแข็งในบริเวณที่ไม่มีการอบให้ความร้อนหลังการเชื่อมมีค่าความแข็ง (357-383 HV) มากกว่าบริเวณ HAZ (312-382 HV) และมากกว่าโลหะพื้น (204-211 HV) ตามลำดับ โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานที่

ไม่มีการอบให้ความร้อนหลังเชื่อมซ่อมพบเพิร์ลไทต์ เหมือนบริเวณโลหะพื้น และอนุภาคของคาร์ไบด์ และยังพบว่าแนวเชื่อมที่ไม่มีการอบให้ความร้อนหลังการเชื่อมซ่อมมีขนาดเม็ดเกรนที่โตขึ้น ซึ่งส่งผลทำให้แนวเชื่อมมีแนวโน้มในการเกิดรอยแตกร้าว งานวิจัยนี้จึงสามารถนำไปใช้เป็นแนวทางในการเชื่อมซ่อมท่อเหล็กกล้าโครเมียม-โมลิบดีนัม SA213 เกรด T91 โดยจุดประสงค์เพื่อการเชื่อมซ่อมใช้งานซ่อมบำรุงอุตสาหกรรมได้



บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

3.1 วัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย

3.1.1 วัสดุ

3.1.1.1 เหล็กกล้าคาร์บอน ASTM A131 เกรด EH36

3.1.1.2 อะลูมิเนียม ASTM B209 เกรด 5083

3.1.1.3 ข้อต่อทรานซิชันแบบไบเมทัลลิก (Aluminum to Steel Bimetallic Transition Joint)

3.1.1.4 ลวดเชื่อมฟลักซ์คอร์ (FCAW) ตามมาตรฐาน AWS A5.20 คือ E71T-1C ชื่อทางการค้า KOBE

3.1.1.5 ลวดเชื่อมโลหะโดยใช้แก๊สเฉื่อยปกคลุม (MIG) ตามมาตรฐาน AWS A5.20 คือ ER5356 ชื่อทางการค้า UMINI

3.1.2 เครื่องมือและอุปกรณ์สำหรับเตรียมและเชื่อมชิ้นงานทดสอบ

3.1.2.1 เครื่องเชื่อมแก๊สปกคลุม ชื่อทางการค้า พลัง รุ่น PM-500

3.1.2.2 เครื่องกัดแนวตั้ง

3.1.2.3 เครื่องเลื่อยสายพานตัดโลหะ Manual รุ่น UE-916A (9") ชื่อทางการค้า DIN machine

3.1.2.4 เครื่องอัดชิ้นงาน ชื่อทางการค้า METKON รุ่น Ecopress 50

3.1.2.5 เครื่องมือวัดอุณหภูมิแบบ Infrared Thermometer

3.1.2.6 เครื่องเจียรไฟฟ้า

3.1.2.7 กระดาษทราย เบอร์ 80 120 200 400 600 800 1000 1500 และ 2000

3.1.3 เครื่องมือและอุปกรณ์สำหรับวิเคราะห์ชิ้นงานทดสอบ

3.1.3.1 กล้องสเตอริโอไมโครสโคป ชื่อทางการค้า NIKON รุ่น SMZ800

3.1.3.2 กล้องจุลทรรศน์แบบแสง

3.1.3.3 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ชื่อทางการค้า HITACHI รุ่น TM4000Plus

3.1.3.4 เครื่องทดสอบความแข็งแบบไมโคร ชื่อทางการค้า FUTURE-TECH รุ่น FM-310e

3.1.3.5 เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-Ray Diffraction, XRD)

3.1.3.6 เครื่องกดอัดไฮดรอลิกส์

3.1.3.7 เครื่องมือวัดขนาดเวอร์เนียร์คาลิปเปอร์ (Vernier Caliper)

3.1.3.8 เกจวัดรอยเชื่อม (Welding Gauge)

3.1.3.9 ไม้บรรทัด

3.1.4 สารเคมี

3.1.4.1 น้ำยาสำหรับตรวจสอบโดยใช้สารแทรกซึม (Penetrant/Developer/Remover)

3.1.4.2 กรดไนตริก (HNO_3) 5%

3.1.4.3 กรดไฮโดรคลอริก (HCl) 0.5%

3.1.4.4 เอทิลแอลกอฮอล์ ($\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$)

3.1.4.5 น้ำกลั่น (H_2O)

3.1.4.6 อะซิโตน ($\text{C}_3\text{H}_6\text{O}$)

3.2 การทดลองเบื้องต้น (Preliminary Experiments) : การเชื่อมหน้างานโดยช่างเชื่อมปฏิบัติการ ทร.

การทดลองเบื้องต้นมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของรูปแบบรอยต่อในการเชื่อมวัสดุต่างชนิดระหว่างเหล็กกล้าคาร์บอน ASTM A131 เกรด EH36 และอะลูมิเนียม ASTM B209 เกรด 5083 กับข้อต่อไบเมทัลลิก (Bimetallic Transition Joint, TJ) ที่ใช้งานในอุตสาหกรรมต่อเรือ โดยมุ่งเปรียบเทียบพฤติกรรมของแนวเชื่อมในกรณีที่ออกแบบรอยต่อด้านเหล็กและอะลูมิเนียมเป็นแบบ Fillet ทั้งสองด้าน (J1) และแบบ Bevel/Fillet (J2)

การเชื่อมดำเนินการโดยช่างเชื่อมของกรมอุทกหารเรือ ณ พื้นที่ปฏิบัติงานจริง เพื่อสะท้อนสภาพแวดล้อมการใช้งานหน้างานจริง และช่วยให้ผลการทดลองสามารถใช้เป็นแนวทางประยุกต์ใช้งานได้ในอุตสาหกรรมจริง

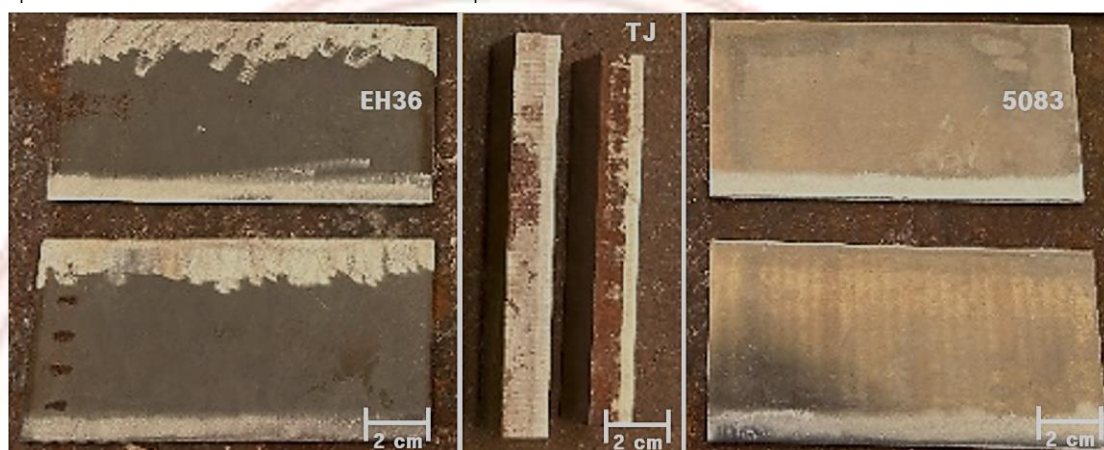
3.2.1 การเตรียมวัสดุ

3.2.1.1 วัสดุที่ใช้ในการทดลอง

ภาพที่ 3-1 แสดงการเตรียมแผ่นโลหะวัสดุฐาน 2 ชนิด สำหรับเชื่อมแต่ละด้านของ Bimetallic transition joint (TJ) ได้แก่ แผ่นเหล็กกล้าคาร์บอน ASTM A131 เกรด EH36 ขนาดความหนา 6 มม. และ อะลูมิเนียม ASTM B209 เกรด 5083 ขนาดความหนา 6 มม. สำหรับข้อต่อ TJ ที่ใช้เป็นวัสดุเชื่อมระหว่างโลหะต่างชนิด ประกอบด้วยฝั่งอะลูมิเนียมที่มีสมบัติทางเคมีและกลตามมาตรฐาน JIS H4000 Alloy No.5083 และฝั่งเหล็กที่ตรงตามคุณสมบัติของ LR Grade DH36 หรือ CCS Grade DH36 ซึ่งอยู่ในกลุ่มเหล็กความแข็งแรงสูงชนิด HSLA (High-Strength Low-Alloy Steel) ที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรมต่อเรือและโครงสร้างนอกชายฝั่ง

โดยเหล็กกล้าคาร์บอนชนิด EH36 และ DH36 มีองค์ประกอบทางเคมีและสมบัติเชิงกลที่ใกล้เคียงกัน และอยู่ภายใต้มาตรฐาน ASTM A131 เช่นเดียวกัน จึงสามารถทดแทนและทำการเชื่อมร่วมกันได้

ขนาดของ TJ ที่ใช้ในงานทดลองมีขนาด 38×35 มิลลิเมตร และความยาว 300 มิลลิเมตร คุณสมบัติทางเคมีและสมบัติเชิงกลของวัสดุแสดงในตารางที่ 3-1 และ 3-2 ตามลำดับ [2, 4]



ภาพที่ 3-1 วัสดุฐานที่ใช้ในการทดลอง

ตารางที่ 3-1 ส่วนผสมทางเคมีของวัสดุฐาน

Materials	Fe (%)	C (%)	Mn (%)	Si (%)	Al (%)	Mg (%)	Zn (%)	Others (%)
EH36 / DH36	96.4 – 97.6	≤ 0.18	0.90 – 1.60	≤ 0.50	–	–	–	$S \leq 0.035, P \leq 0.035$
Al 5083	–	–	–	≤ 0.40	92.4 – 95.6	4.0 – 4.9	–	$Cr \leq 0.25$

ตารางที่ 3-2 คุณสมบัติทางกลของวัสดุฐาน

Materials	Tensile Strength (MPa)	Yield Strength (MPa)	Elongation (%)	Vickers Hardness (HV)
EH36 / DH36	490-620	355	22	170-240
Al 5083	317	228	16	96

3.2.1.2 ลวดเชื่อมที่ใช้ในการทดลอง

ในการทดลองใช้ลวดเชื่อม 2 ชนิดสำหรับการเชื่อมวัสดุแต่ละด้านของข้อต่อไบเมทัลลิก (TJ) ดังนี้

1. ลวดเชื่อมฟลักซ์คอร์ (Flux Cored Arc Welding, FCAW) ใช้สำหรับการเชื่อมฝั่งเหล็กกล้าคาร์บอน ASTM A131 เกรด EH36 กำหนดตามมาตรฐาน AWS A5.20 คือ E71T-1C ชื่อในทางการค้า KOBE

2. ลวดเชื่อมอะลูมิเนียมแบบโลหะโดยใช้แก๊สเฉื่อยปกคลุม (Metal Inert Gas, MIG) ใช้สำหรับการเชื่อมฝัองอะลูมิเนียม ASTM B209 เกรด 5083 กำหนดตามมาตรฐาน AWS A5.20 คือ ER5356 ชื่อในทางการค้า UMINI

ภาพของลวดเชื่อมแสดงในภาพที่ 3-2 ส่วนผสมทางเคมี และสมบัติทางกลของลวดเชื่อม แสดงดังตารางที่ 3-3 และตารางที่ 3-4 ตามลำดับ



ภาพที่ 3-2 ลวดเชื่อมที่ใช้ในการทดลอง

ตารางที่ 3-3 ส่วนผสมทางเคมีของลวดเชื่อม

Materials	Fe (%)	C (%)	Mn (%)	Si (%)	Al (%)	Mg (%)	Zn (%)	Others (%)
E71T-1C	Bal.	0.05	1.35	0.45	–	–	–	S=0.01, P=0.01
ER5356	–	–	–	≤ 0.25	Bal.	4.5-5.5	≤0.25	Cr≤0.10, Ti≤0.20

ตารางที่ 3-4 คุณสมบัติทางกลของลวดเชื่อม

Materials	Tensile Strength (MPa)	Yield Strength (MPa)	Elongation (%)
E71T-1C	490-620	355	22
ER5356	317	228	16

3.2.2 การเตรียมชิ้นงาน

ในการเตรียมชิ้นงานทดสอบก่อนทำการเชื่อมได้ดำเนินการเตรียมชิ้นงานตามขั้นตอนต่อไปนี้ (1) ตัดแผ่นเหล็กกล้าคาร์บอน EH36 และแผ่นอะลูมิเนียม 5083 ให้มีขนาดความกว้าง×ความยาว คือ 150×300 มิลลิเมตร จำนวนอย่างละ 2 แผ่น และ ข้อต่อ TJ ความยาว 300 มม. จำนวน 2 ชิ้น (2) เตรียมพื้นผิวก่อนการเชื่อมโดยใช้ตะไบครีบบริเวณรอยตัดให้ได้นาก จากนั้นทำความสะอาดพื้นผิวด้วยการขัดด้วยเครื่องเจียร และขัดซ้ำด้วยกระดาษทราย (ภาพที่ 3-2) หลังจากนั้นเช็ดด้วยอะซิโตน (Acetone) เพื่อขจัดคราบไขมัน สี ผุ่น และออกไซด์ที่อาจส่งผลต่อคุณภาพแนวเชื่อม (3) ประกอบชิ้นงานก่อนการเชื่อม (Tack Weld) โดยวางแผ่นโลหะทั้งสองด้านของ TJ ให้อยู่ในแนวฉาก โดยใช้

แนวเชื่อมเป็นแบบ T-Joint และเชื่อมยึดมุมด้วย Tack Weld เพื่อคงรูปทรงของชิ้นงานก่อนเริ่มกระบวนการเชื่อมจริง

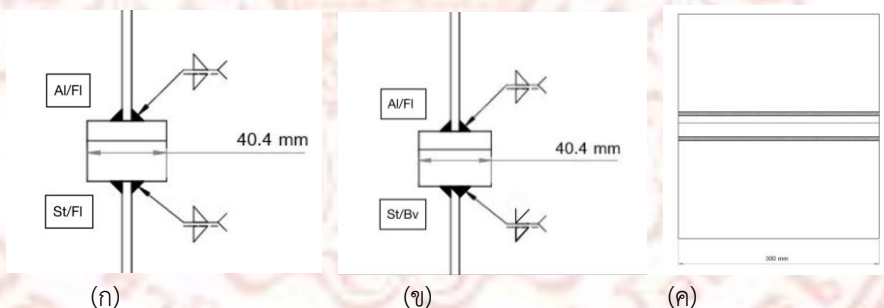
โดยได้ทำการออกแบบรอยต่อ (Joint Design) ด้านอะลูมิเนียม: ใช้รอยต่อแบบ Fillet Weld ทั้ง 2 ด้านในทั้งสองชิ้นงานส่วนด้านเหล็กกล้าคาร์บอน แบ่งเป็น 2 รูปแบบ ดังนี้

- ชั้นที่ 1 (J1) คือเชื่อมแบบ Fillet Weld (FI) ทั้ง 2 ด้าน
- ชั้นที่ 2 (J2) คือเชื่อมแบบ Fillet Weld 1 ด้าน และ Bevel (BV) 1 ด้าน

สำหรับท่าที่ใช้เชื่อม คือ ท่าขนานนอน (2F) แสดงดังภาพที่ 3-3



ภาพที่ 3-3 การเตรียมพื้นผิวด้วยการขัดด้วยเครื่องเจียร



ภาพที่ 3-4 การออกแบบรอยต่อ (ก) ชิ้นงาน J1 (ข) ชิ้นงาน J2 และ (ค) ความยาวของชิ้นงานทดสอบ

3.2.3 การเชื่อมชิ้นงาน

การเชื่อมชิ้นงานทดสอบแบ่งออกเป็น 2 ส่วนหลัก ได้แก่ ด้านอะลูมิเนียม และด้านเหล็กกล้าคาร์บอน ซึ่งใช้กระบวนการเชื่อมต่างชนิดกัน ตามลักษณะวัสดุ ดังนี้

1) การเชื่อมด้านอะลูมิเนียมของชิ้นงาน J1 และ J2 แบบ Fillet Weld ทั้ง 2 ด้าน กระบวนการ Metal Inert Gas (MIG) ด้วยลวดเชื่อม ER5356 ใช้แก๊สคลุม คืออาร์กอน (Ar) บริสุทธิ์ 99.99% อัตราการไหล 20 ลิตร/นาที

2) การเชื่อมด้านเหล็กกล้าคาร์บอนด้วยกระบวนการ Flux Cored Arc Welding (FCAW) ลวดเชื่อมที่ใช้คือ E71T-1C แก๊สคลุมที่ใช้คือ คาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) บริสุทธิ์ 99.99% อัตราการไหล 18 ลิตร/นาที่ โดยในการเชื่อมชิ้นงาน J1 แบบ Fillet weld ทั้ง 2 ด้าน แล้วเชื่อมชิ้นงาน J2 แบบ Fillet Weld 1 ด้าน และ Bevel 1 ด้าน

ใช้ทำขานานอน (2F) และสำหรับทั้งสองวัสดุในแต่ละตำแหน่งให้คงที่เพื่อให้สามารถเปรียบเทียบผลได้ชัดเจน โดยมีรายละเอียดดังแสดงในตารางที่ 3-5

ตารางที่ 3-5 พารามิเตอร์ในการเชื่อม

Material / Joint	Name	Current Type	Welding Current (A)	Arc Voltage (V)	Travel Speed (mm/min)	Heat Input (kJ/mm)	Gas Flow rate (L/min)
Carbon Steel/Fillet	St-J1-L	DCEP	175	27.1	240	1.186	18
	St-J1-R	DCEP	175	27.1	240	1.186	18
Aluminum/Fillet	Al-J1-L	DCEP	170	23.2	290	0.816	20
	Al-J1-R	DCEP	170	23.2	290	0.816	20
Carbon Steel/Bevel	St-J2-L	DCEP	175	27.1	240	1.186	18
	St-J2-R	DCEP	175	27.1	240	1.186	18
Aluminum/Fillet	Al-J2-L	DCEP	170	23.2	290	0.816	20
	Al-J2-R	DCEP	170	23.2	290	0.816	20

3.2.4 กระบวนการตรวจสอบชิ้นงานแบบไม่ทำลายสภาพ (Non-Destructive Testing : NDT)

3.2.4.1 การตรวจสอบด้วยสายตา VT (Visual Testing)

ในการตรวจสอบคุณภาพแนวเชื่อมด้วยสายตานี้ สำหรับแนวเชื่อมเหล็กกล้าคาร์บอนจะอ้างอิงจากมาตรฐาน AWS D1.1 ส่วนแนวเชื่อมอะลูมิเนียมจะอ้างอิง มาตรฐาน AWS D1.2 โดยพื้นที่ตรวจสอบจะต้องสะอาด ไม่มีสิ่งสกปรก เช่น คราบน้ำมัน จารบี หรือคราบสนิม จะต้องมองเห็นพื้นที่รอบรอยเชื่อมอย่างน้อย 25 มม. ได้ชัดเจน และมีแสงสว่างเพียงพอ โดยความสว่างไม่ควรต่ำกว่า 1,000 ลักซ์ ก่อนตรวจสอบจะต้องขจัดสะเก็ดจากการเชื่อม (Spatter) หลังจากนั้นจึงทำการตรวจสอบ ขนาด รูปทรง และสิ่งบกพร่องของแนวเชื่อม โดยใช้ Welding Gauge และ Vernier Caliper เพื่อวัดขนาดรอยเชื่อม ความสูงของบ่าเชื่อม และรูปร่างแนวเชื่อม ดังที่แสดงภาพที่ 3-5 จากนั้นตรวจสอบความสมบูรณ์ของรอยเชื่อม เช่น มีรอยแตก (Crack) รูพรุน (Porosity) รอยกัดขอบ (Undercut) และการเชื่อมไม่สมบูรณ์ (Incomplete Fusion) หรือไม่ จากนั้นเปรียบเทียบขนาดและลักษณะของแนวเชื่อมกับเกณฑ์ที่กำหนดในมาตรฐานที่เกี่ยวข้อง



ภาพที่ 3-5 การตรวจสอบด้วยสายตา

3.2.4.2 การตรวจสอบด้วยสารแทรกซึม PT (Liquid Penetrant Testing)

การตรวจสอบด้วยสารแทรกซึมสามารถตรวจสอบข้อบกพร่องที่เปิดสู่ผิวหน้า (Surface-Breaking Defects) เช่น รอยร้าวเล็ก ๆ (Microcracks) รูพรุน รอยกัดขอบ หรือการหลุดล่อนบริเวณแนวเชื่อมที่ไม่สามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่าได้โดยการตรวจสอบ มีขั้นตอนดังนี้

- 1) ใช้น้ำยาทำความสะอาด (Remover) ทำความสะอาดพื้นผิวของแนวเชื่อม
- 2) ฉีดพ่นน้ำยาแทรกซึม (Penetrant) ลงตลอดพื้นผิวของแนวเชื่อม แล้วทิ้งไว้ประมาณ 5-10 นาที เพื่อให้ น้ำยาซึมเข้าสู่ข้อบกพร่อง
- 3) หลังจากครบเวลาแล้ว ใช้น้ำยาทำความสะอาด (Remover) ฉีดบนผ้าสะอาด แล้วเช็ดน้ำยาแทรกซึมบนพื้นผิวแนวเชื่อมออกให้ได้มากที่สุด โดยห้ามใช้น้ำยาทำความสะอาดฉีดลงบนแนวเชื่อมโดยตรง
- 4) ใช้น้ำยาทำปฏิกิริยา (Developer) ฉีดพ่นลงบนแนวเชื่อม ทิ้งไว้ประมาณ 10 นาที น้ำยาจะทำปฏิกิริยากับสารแทรกซึม ทำให้สามารถระบุตำแหน่งของสิ่งบกพร่องได้
- 5) ทำการตรวจสอบสิ่งบกพร่อง โดยใช้เกณฑ์การยอมรับ (Acceptance Criteria) ที่ระบุตามมาตรฐาน AWS D1.1 และ AWS D1.2 ตามประเภทวัสดุ
- 6) ทำความสะอาดชิ้นงานทดสอบหลังจากทำการตรวจสอบเสร็จเรียบร้อยแล้ว โดยใช้น้ำยาทำความสะอาด

การตรวจสอบชิ้นงานด้วยสารแทรกซึมแสดงในภาพที่ 3-6



ภาพที่ 3-6 การตรวจสอบด้วยสารแทรกซึม ประกอบด้วย

(ก) ชุดตรวจสอบ Pt และ (ข) ขั้นตอนการตรวจข้อบกพร่อง

3.2.5 กระบวนการวิเคราะห์และการทดสอบ

เพื่อประเมินคุณภาพของแนวเชื่อมและรอยต่อของวัสดุต่างชนิดระหว่างอะลูมิเนียมกับเหล็กกล้าคาร์บอนอย่างครอบคลุม งานวิจัยนี้ได้ดำเนินการวิเคราะห์และทดสอบใน 3 ด้านหลัก ได้แก่ (1) การวิเคราะห์โครงสร้าง (2) การทดสอบความแข็ง และ (3) การทดสอบความสมบูรณ์ของรอยเชื่อม

3.2.5.1 การวิเคราะห์โครงสร้างมหภาคและจุลภาค (Macro- and Micro-structure analysis)

มีขั้นตอนการเตรียมชิ้นงาน ดังนี้

1) ตัดชิ้นงานเฉพาะส่วน จากชิ้นงาน J1 และ J2 ของเหล็กกล้าคาร์บอน EH36 และอะลูมิเนียม 5083 โดยตัดเป็นรูปตัว T โดยตัดห่างออกมาจากรอยเชื่อม 2 ซม. และมีความหนา 2 ซม. อย่างละ 1 ชิ้น รวมเป็น 4 ชิ้น

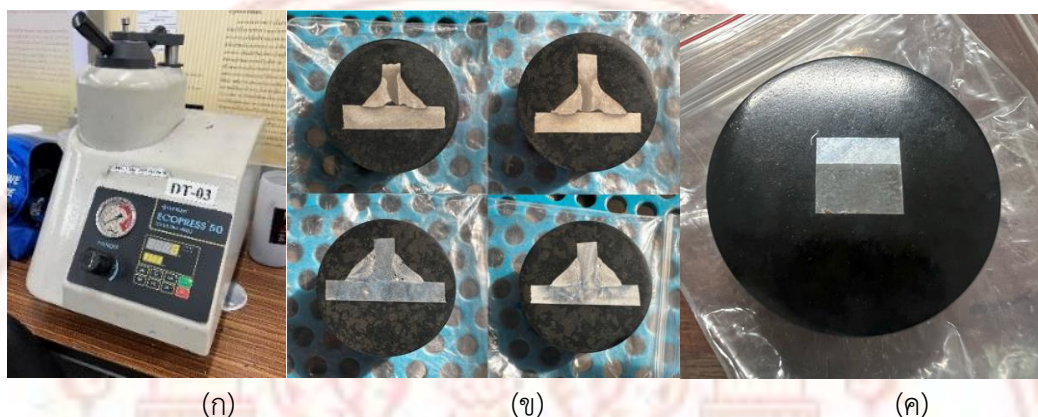
2) ตัดชิ้นงาน TJ เป็นทรงลูกบาศก์ ขนาดด้านละ 20 มม. 1 ชิ้น

3) ทำการอัดขึ้นรูปเรซินชิ้นงานด้วย Phenolic Powder แสดงในภาพที่ 3-7

4) ทำการปรับระดับผิวหน้าให้เรียบโดยขัดกระดาษทรายเพื่อปรับผิวโดยเริ่มจากกระดาษทรายเบอร์ 80 120 220 400 600 800 1000 1200 1500 และ 2000 ตามลำดับ หลังจากนั้นจึงขัดให้ขึ้นเงาด้วยผงอะลูมิเนียมออกไซด์ (Alumina Powder)

5) ทำการกัดกรด อ้างอิงตามมาตรฐาน ASTM E407-99 โดยส่วนของเหล็กกล้าคาร์บอนกัดกรดโดยใช้สารละลายกรดไนตริก (5 ml HNO_3 + 95 ml Ethanol) โดยจุ่ม 5-10 วินาที แล้วล้างน้ำจนสามารถเห็นโครงสร้าง ส่วนกรดที่ใช้ในส่วนอะลูมิเนียมคือสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก (1 ml HF + 200 ml Water) ใช้การปาดที่ผิวหน้าโลหะเป็นเวลา 15 วินาทีแล้วล้างน้ำจนสามารถเห็นโครงสร้าง

6) ชิ้นงานทดลองที่ผ่านการกัดกรดจนเห็นโครงสร้างแล้ว ชิ้นงานทดลองจะถูกวิเคราะห์โครงสร้างมหภาคด้วยกล้องสเตอริโอไมโครสโคป (Stereo Microscope) ส่วนการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคทำการวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง (Optical Microscope: OM) และอิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope: SEM)



ภาพที่ 3-7 การอัดขึ้นรูปเรซินชิ้นงานด้วย Phenolic Powder ประกอบด้วย
(ก) เครื่องอัดเรซิน (ข) ชิ้นงานเชื่อม และ (ค) ชิ้นงาน TJ

3.2.5.2 การทดสอบค่าความแข็ง (Vicker Hardness Test)

ในการทดสอบค่าความแข็ง อ้างอิงตามมาตรฐาน ASTM E92:2023 มีขั้นตอนการเตรียมชิ้นงานและการทดสอบ ดังนี้

1) ตัดชิ้นงาน จากชิ้นงาน J1 และ J2 ตามความยาว ความหนาชิ้นงานละ 20 มม. เป็นรูปทรง Cruciform ตามที่แสดงในภาพที่ 3-8(ข) จากนั้น ชัดกระดาดทรายและขัดผิวด้วย Alumina powder สุดท้ายกัดกรดตามชนิดวัสดุ เหมือนดังแสดงในหัวข้อก่อนหน้า (3.2.5.1)

2) ทำการทดสอบค่าความแข็ง โดยการทดสอบแบ่งเป็น 2 ส่วน คือ ด้านบนของแนวเชื่อม (Cover) และด้านล่างของแนวเชื่อม (Root) การทดสอบจะทำการทดสอบบริเวณแนวเชื่อม (Weld Bead) บริเวณกระแทบร้อน (HAZ) และวัสดุฐาน (Base Material) ของชิ้นงานเชื่อม ส่วนการทดสอบความแข็งของ TJ จะทำการทดสอบบริเวณพื้นที่ด้านเหล็กกล้าคาร์บอน ด้านอะลูมิเนียม และบริเวณรอยต่อ (Interface Zone) บริเวณละ 3 จุดแล้วหาค่าเฉลี่ยต่อ 1 ตำแหน่ง ในการทดสอบใช้หัวกดแบบวิกเกอร์ (Vickers Hardness : HV) บริเวณเหล็กกล้าคาร์บอนจะใช้น้ำหนัก 300 Kgf และอะลูมิเนียม จะใช้น้ำหนัก 100 Kgf ในการทดสอบ ดังแสดงในภาพที่ 3-8(ก)



(ก)



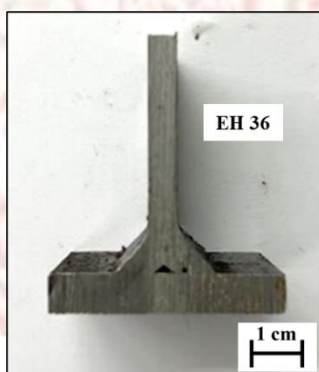
(ข)

ภาพที่ 3-8 การทดสอบค่าความแข็ง ประกอบด้วย

(ก) เครื่องทดสอบค่าความแข็ง (ข) ชิ้นงานทดสอบ

3.2.5.3 การทดสอบ Fillet Break Test

ตัดชิ้นงานเฉพาะส่วน โดยตัดเป็นรูปตัว T ความยาวชิ้นงานละ 40 มม. จากชิ้นงาน J1 และ J2 ของด้านเหล็กกล้าคาร์บอน EH36 จากชิ้นงาน J1 และ J2 อย่างละ 2 ชิ้น และด้านอะลูมิเนียม 5083 2 ชิ้น รวมเป็นจำนวน 6 ชิ้น ถูกทดสอบความสมบูรณ์ของรอยเชื่อม โดยใช้เครื่องกดอัดไฮดรอลิกส์ การวางชิ้นงานบนแท่นวาง จะวางตะแคงโดยให้แนวเชื่อมที่จะทำการวิเคราะห์ไว้ด้านบน ชิ้นงานทดสอบและตำแหน่งวางแสดงในภาพที่ 3-9



(ก)



(ข)

ภาพที่ 3-9 การทดสอบ Fillet Break Test กำหนดโดยมี

(ก) ชิ้นงานทดสอบ (ข) ตำแหน่งที่ทดสอบ

3.2.6 การใช้เครื่องมือวิเคราะห์

3.2.6.1 การวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง (Optical Microscope, OM)

การวิเคราะห์ด้วยกล้อง OM ทำให้สามารถวิเคราะห์โครงสร้างเฟสและตรวจหาสิ่งบกพร่องได้ในระดับจุลภาค โดยทำการวิเคราะห์ชิ้นงาน J1 และ J2 ของเหล็กกล้าคาร์บอน EH36 และ อะลูมิเนียม 5083 ที่ทำการกัดกรดแล้ว มีขั้นตอนดังนี้

- 1) เมื่อวางชิ้นงานบนแท่นวางแล้ว ทำการปรับกำลังขยาย โดยเริ่มจากกำลังขยายต่ำที่ 10X เพื่อดูภาพโดยรวม
- 2) ทำการปรับรูรับแสงความเข้มของแสงตามความเหมาะสมของภาพ
- 3) ปรับโฟกัส โดยใช้ปุ่มปรับโฟกัสหยาบ (Coarse Focus) เพื่อหาภาพเบื้องต้น แล้วจึงใช้ปุ่มปรับโฟกัสละเอียด (Fine Focus) เพื่อปรับภาพให้คมชัด รวมถึงปรับคอนทราสต์เพื่อให้รายละเอียดของภาพมีความชัดเจน
- 4) ทำการใส่ Scale ภาพ แล้วบันทึกภาพ
- 5) เพิ่มกำลังขยายให้สูงขึ้น (50X และ 100X) เพื่อตรวจสอบโครงสร้างโดยละเอียดบริเวณแนวเชื่อม (Weld Bead) บริเวณกระแทกร้อน (HAZ) และวัสดุฐาน (Base Material)

การวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง แสดงในภาพที่ 3-10

3.2.6.2 การวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)

- 1) ใช้ตรวจสอบโครงสร้างละเอียดระดับ sub-micron และจุดที่สงสัยมีการเกิด intermetallic phase
- 2) ทำการวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุ (EDS) โดยใช้โปรแกรม Oxford instruments โดยใช้การวิเคราะห์แบบ วิเคราะห์จุดเดียว (Point Analysis) วิเคราะห์ตามเส้น (Line Scan) และ วิเคราะห์การกระจายตัวของธาตุในภาพสี (Elemental Mapping)



ภาพที่ 3-10 การวิเคราะห์ด้วยกล้อง OM

3.3 วิธีการดำเนินการวิจัย : ผลกระทบของการเชื่อมซ่อม (Repairing Weld)

3.3.1 การเตรียมวัสดุ

3.3.1.1 วัสดุที่ใช้ในการทดลอง

วัสดุฐานที่ใช้ในการทดลอง ใช้วัสดุเดียวกันกับ หัวข้อ 3.2.1.1 ได้แก่ เหล็กกล้าคาร์บอน ASTM A131 เกรด EH36 และอะลูมิเนียม ASTM B209 เกรด 5083 ซึ่งเชื่อมเข้ากับข้อต่อ Bimetallic Transition Joint (TJ) ขนาด $38 \times 35 \times 300$ มิลลิเมตร

3.3.1.2 ลวดเชื่อมที่ใช้ในการทดลอง

ลวดเชื่อมที่ใช้ในการทดลอง ใช้วัสดุเดียวกันกับ หัวข้อ 3.2.1.2 ได้แก่ ลวดเชื่อมฟลักซ์คอร์ (FCAW) สำหรับเชื่อมเหล็กกล้าคาร์บอนและเชื่อมซ่อม กำหนดตามมาตรฐาน AWS A5.20 คือ E71T-1C ชื่อในทางการค้า KOBE ชื่อในทางการค้า KOBE และลวดเชื่อมโลหะโดยใช้แก๊สเฉื่อยปกคลุม (MIG) สำหรับเชื่อมอะลูมิเนียม กำหนดตามมาตรฐาน AWS A5.20 คือ ER5356 ชื่อในทางการค้า UMINI

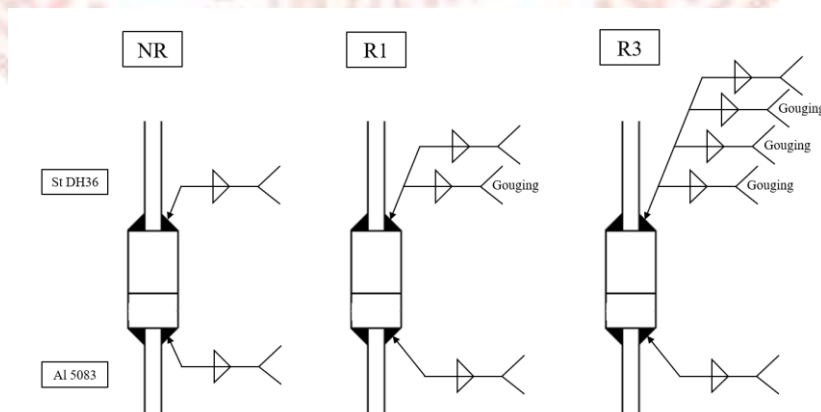
3.3.2 การเตรียมชิ้นงานเชื่อม

การเตรียมชิ้นงานสำหรับการทดลองเชื่อมซ่อมดำเนินการโดยใช้วัสดุฐานเดียวกับหัวข้อ 3.3.1.1 แต่เพิ่มจำนวนแผ่นและวางแผนเพื่อรองรับการซ่อมซ้ำหลายรอบ ดังรายละเอียดต่อไปนี้

1) จำนวนและขนาดของวัสดุ ตัดแผ่นเหล็กกล้าคาร์บอนและแผ่นอะลูมิเนียม ขนาด 150×300 มม. อย่างละ 12 แผ่น ใช้ TJ ความยาว 300 มม. จำนวน 6 ชิ้น สำหรับการทดลองตามจำนวนรอบการซ่อม 3 เงื่อนไข คือ NR (ไม่ซ่อม), R1 (ซ่อม 1 ครั้ง), และ R3 (ซ่อม 3 ครั้ง)

2) เตรียมพื้นผิวก่อนเชื่อมใช้สะอาดก่อนใช้งานดังหัวข้อ 3.2.2

3) เตรียมรอยต่อ T-Joint ประกอบแผ่นโลหะกับ TJ โดยยึดที่มุมให้เป็นแนวฉากด้วยการเชื่อมจุด (Tack Weld) รอยต่อแบบ Fillet Weld ทั้งสองด้านในทุกรอยเชื่อม และทั้งสองวัสดุเชื่อมแบบเดียวกัน ทำทางการเชื่อม 2F โดยภาพชิ้นงานทดสอบแสดงดัง ภาพที่ 3-11



ภาพที่ 3-11 แผนงานการทดลองเชื่อมซ่อม

3.3.3 การทำ Preheat และการเชื่อมแบบ Fillet weld

ก่อนทำการเชื่อมในแต่ละแนว เพื่อควบคุมคุณภาพการเชื่อมและลดความเสี่ยงจากการแตกร้าวในฝั่งเหล็กกล้าคาร์บอน จึงมีการกำหนดอุณหภูมิการอุ่นขึ้นงาน (Preheat) และควบคุมพารามิเตอร์การเชื่อมอย่างรัดกุม ทั้งฝั่งอะลูมิเนียมและเหล็กกล้าคาร์บอน

- การคำนวณ Carbon Equivalent (CE) จากสมการการกำหนดอุณหภูมิ Preheat สำหรับเหล็กกล้าคาร์บอนใช้หลักการคำนวณ ค่า CE ตามสมการที่ (3-1)

$$CE = \%C + \frac{\%Mn}{6} + \frac{\%Cr + \%Mo + \%V}{5} + \frac{\%Ni + \%Cu}{15} \quad (3-1)$$

โดยจากค่าปริมาณธาตุในเหล็กกล้าคาร์บอน ASTM A131 เกรด EH36/DH36 ที่ใช้จริง พบว่า CE = 0.45 จึงนำมาอ้างอิงกราฟจาก มาตรฐาน BS EN 1011-2 เพื่อกำหนด อุณหภูมิ Preheat ที่เหมาะสม

- กระบวนการเชื่อมครั้งที่ 1 (NR) ไม่มีการเชื่อมซ่อม
- การเชื่อมด้านอะลูมิเนียมด้วย MIG ใช้ลวดเชื่อม ER5356 ใช้แก๊สคลุม คืออาร์กอน (Ar) บริสุทธิ์ 99.99% อัตราการไหล 20 ลิตร/นาที
- การเชื่อมด้านเหล็กกล้าคาร์บอนด้วย FCAW ลวดเชื่อมที่ใช้คือ E71T-1C แก๊สคลุมที่ใช้ คือ คาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) บริสุทธิ์ 99.99% อัตราการไหล 18 ลิตร/นาที
- โดยทำการเชื่อมด้านหนึ่งให้เสร็จก่อน แล้วพักให้ถึง 100°C ก่อนเชื่อมอีกด้านหนึ่งเพื่อจำลอง Thermal Cycle ตามสภาพจริง

3.3.4 การเชื่อมซ่อม (Repairing Welding)

หลังจากดำเนินการเชื่อมเสร็จสมบูรณ์ในแต่ละชิ้นงาน จะมีการซ่อมเฉพาะฝั่งเหล็กกล้าคาร์บอน EH36 ตามเงื่อนไขของรอบการซ่อมที่ออกแบบไว้ เพื่อศึกษาผลกระทบจากการเชื่อมซ้ำ (Repair Welding) ต่อโครงสร้างและคุณสมบัติเชิงกลของแนวเชื่อม โดยด้านอะลูมิเนียมไม่มีการเชื่อมซ่อม

ตารางที่ 3-6 เงื่อนไขการเชื่อมซ่อม

เงื่อนไข	คำอธิบาย
NR (No Repair)	ไม่มีการซ่อมแซมหลังการเชื่อม
R1 (1 Repair)	เชื่อมเสร็จ → กัดแนวเชื่อมออก → เชื่อมซ่อม 1 รอบ

R3 (3 Repairs) เชื่อมเสร็จ → กัดแนวเชื่อมออก → เชื่อมซ่อม 3 รอบ โดยทำซ้ำกระบวนการกัด-เชื่อม-พักจนครบ

สำหรับกลุ่มที่มีการซ่อม (R1 และ R3) ดำเนินการซ่อมโดยใช้ เครื่องกัดโลหะแนวตั้ง (Vertical Milling Machine) กัดเอาแนวเชื่อมเดิมออก แล้วทำการเชื่อมใหม่ในรอยเดิมแบบ Fillet Weld ทั้ง 2 ด้าน โดยแต่ละรอบประกอบด้วย ให้ดอกกัดชนิด 4 ร่อง ขนาด 10 มม. กัดตลอดแนวเชื่อมจนถึงแผ่นวัสดุทั้ง 2 ด้าน แล้วทำการให้ความร้อนและทำการเชื่อมตามกระบวนการทั้ง 2 ด้าน นับเป็นการซ่อม 1 รอบ ทำจนครบตามจำนวนรอบ ตามที่แสดงในภาพที่ 3-13

กำหนดค่าพารามิเตอร์ในการเชื่อมตาม ตารางที่ 3-7 และทำการเชื่อมตามกระบวนการดังกล่าวรวมทั้งหมด 6 ชิ้นงาน ตามภาพที่ 3-12

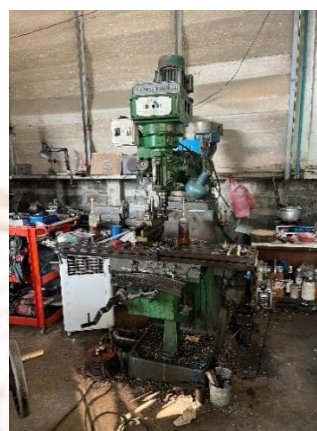
ตารางที่ 3-7 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการเชื่อมวัสดุต่างชนิดระหว่างอะลูมิเนียมและเหล็กกล้าคาร์บอนในแต่ละรอบการเชื่อมซ่อม

Material	Round	Specimen	Current Type	Welding Current (A)	Arc Voltage (V)	Wire Feed Speed (m/min)	Travel Speed (mm/min)	Heat Input (KJ/mm)	Gas Flow rate (L/min)
Al 5083	1	NR R1 R3	DCEP	165	19.7	9.8	462-721	0.27-0.422	20
St EH36	1	NR R1 R3	DCEP	180	26.2	6.2	225-429	0.66-1.258	20
	2	R1 R3	DCEP	180	26.2	6.2	225-429	0.66-1.258	20
	3	R3	DCEP	180	26.2	6.2	225-429	0.66-1.258	20
	4	R3	DCEP	180	26.2	6.2	225-429	0.66-1.258	20

หมายเหตุ : โดยฝั่งอะลูมิเนียมทำการเชื่อมเพียงรอบเดียวทุกกรณี ส่วนฝั่งเหล็กกล้าคาร์บอนมีการเชื่อมซ้ำหลายรอบตามเงื่อนไขที่กำหนด (NR, R1, R3)



ภาพที่ 3-12 ชิ้นงานทดลองหลังทำการเชื่อม



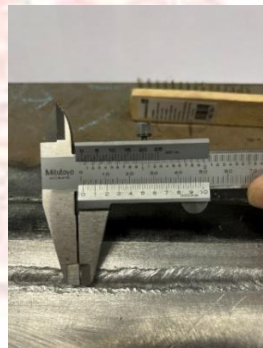
ภาพที่ 3-13 การกัดโลหะซ่อมชิ้นงานทดลอง และ เครื่องกัดโลหะแนวตั้ง

3.3.5 กระบวนการตรวจสอบชิ้นงานแบบไม่ทำลายสภาพ (Non-Destructive Testing, NDT)

3.3.5.1 การตรวจสอบด้วยสายตา VT (Visual Testing)

ในการตรวจสอบคุณภาพแนวเชื่อมด้วยสายตาจะปฏิบัติตามหัวข้อที่ 3.2.4.1 ดังที่แสดงภาพที่

3-14



ภาพที่ 3-14 การตรวจสอบด้วยสายตา

3.3.5.2 การตรวจสอบด้วยสารแทรกซึม PT (Liquid Penetrant Testing)

การตรวจสอบด้วยสารแทรกซึมจะปฏิบัติตามหัวข้อที่ 3.2.4.2 ดังที่แสดงภาพที่ 3-15



ภาพที่ 3-15 การตรวจสอบด้วยสารแทรกซึม

3.3.6 กระบวนการวิเคราะห์และการทดสอบ

3.3.6.1 การวิเคราะห์โครงสร้างมหภาคและจุลภาค (Macrostructure & Microstructure Analysis)

การเตรียมชิ้นงานสำหรับวิเคราะห์โครงสร้างทางโลหะวิทยา มี 2 ส่วน

1) ส่วนที่ 1 มีขั้นตอนการเตรียมชิ้นงาน ดังนี้

ตัดชิ้นงานเฉพาะส่วนของเหล็กกล้าคาร์บอน EH36 จากชิ้นงาน NR R1 และ R3 อย่างละ 1 ชิ้น และส่วนของอะลูมิเนียมจากชิ้นงาน NR โดยตัดเป็นรูปตัว T โดยตัดห่างออกมาจากรอยเชื่อม 2 ซม. และมีความหนา 2 ซม. ทำการเตรียมชิ้นงานโดยปฏิบัติตามหัวข้อที่ 3.2.5.1 ดังที่แสดงภาพที่ 3-16



ภาพที่ 3-16 ชิ้นงานสำหรับวิเคราะห์โครงสร้างมหภาคและจุลภาค

2) ส่วนที่ 2 มีขั้นตอนการเตรียมชิ้นงาน ดังนี้

- ตัดชิ้นงานจากบริเวณรอยเชื่อม (Weld) และ ส่วนกระทบร้อน (HAZ) ของเหล็กกล้าคาร์บอน จากชิ้นงาน NR R1 และ R3 อย่างละ 1 ชิ้น และส่วนของอะลูมิเนียมจากชิ้นงาน NR จำนวน 1 ชิ้น ดังที่แสดงภาพที่ 3-17

- ทำการปรับพื้นผิวที่จะทำการทดสอบให้เรียบด้วยกระดาษทราย เบอร์ 400 และ 1000

- หลังจากทำการเตรียมชิ้นงานแล้ว ทำการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างผลึกด้วยเทคนิค XRD (X-Ray Diffraction)



ภาพที่ 3-17 ชิ้นงานสำหรับวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRD

3.3.6.2 การทดสอบค่าความแข็ง (Vicker Hardness Test)

ในการทดสอบค่าความแข็ง อ้างอิงตามมาตรฐาน ASTM E92:2023 มีขั้นตอนการเตรียมชิ้นงานและการทดสอบ โดยตัดชิ้นงานตามความยาว ความยาวชิ้นงานละ 20 มม. จากชิ้นงาน NR R1 และ R3 อย่างละ 1 ชิ้น จากนั้นตัดส่วนแผ่นโลหะด้านไกลจาก TJ ให้เป็นรูปทรง Cruciform ตามที่แสดงในภาพที่ 3-18 หลังจากนั้นทำการเตรียมชิ้นงาน และทำการทดสอบค่าความแข็ง โดยปฏิบัติตามหัวข้อที่ 3.2.5.2



ภาพที่ 3-18 ชิ้นงานทดสอบค่าความแข็ง

3.3.6.3 การทดสอบ Fillet Break Test

เตรียมชิ้นงานโดยตัดชิ้นงานตามความยาว ความยาวชิ้นงานละ 50 มม. จากชิ้นงาน NR R1 และ R3 อย่างละ 2 ชิ้น รวมจำนวน 6 ชิ้น จะถูกทดสอบความสมบูรณ์ของรอยเชื่อม โดยใช้เครื่องกดอัดไฮดรอลิกส์ การวางชิ้นงานบนแท่นวาง จะวางโดยให้ตัว TJ อยู่บริเวณกึ่งกลางของแท่นวางแล้วจับยึดบริเวณปลายของแผ่นโลหะทั้ง 2 ด้าน ชิ้นงานทดสอบแสดงในภาพที่ 3-19



ภาพที่ 3-19 ชิ้นงานทดสอบ Fillet Break Test

3.3.7 การใช้เครื่องมือวิเคราะห์

3.3.7.1 การวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง (Optical Microscope, OM)

การวิเคราะห์ด้วยกล้อง OM ทำให้สามารถวิเคราะห์โครงสร้างเฟสและตรวจหาสิ่งบกพร่องได้ในระดับจุลภาค โดยทำการวิเคราะห์ชิ้นงานเหล็กกล้าคาร์บอน NR R1 R3 และชิ้นงานอะลูมิเนียม NR ที่ทำการกัดกรดแล้ว ทำการวิเคราะห์ด้วยกล้อง OM โดยปฏิบัติตามหัวข้อที่ 3.2.6.1

3.3.7.2 การวิเคราะห์ด้วยกล้องอิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM) และ สเปกโตรเมตรีรังสีเอกซ์แบบกระจายพลังงาน (Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy, EDS)

ทำการวิเคราะห์ชิ้นงานเหล็กกล้าคาร์บอน NR R1 R3 และชิ้นงานอะลูมิเนียม NR ที่กัดกรดแล้วทำการวิเคราะห์ด้วยกล้อง OM โดยปฏิบัติตามหัวข้อที่ 3.2.6.2

3.3.7.3 การวิเคราะห์ด้วยเครื่อง X-Ray diffractometer (XRD)

การวิเคราะห์ด้วยเทคนิค X-Ray Diffraction (XRD) ถูกนำมาใช้เพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างผลึก (crystalline structure) เพื่อตรวจสอบว่า การให้ความร้อนซ้ำ (R1, R3) ก่อให้เกิดการ เปลี่ยนแปลงเฟสหรือการเจริญของผลึก ซึ่งอาจส่งผลต่อความเปราะหรือความแข็งแรงของแนวเชื่อมหรือไม่ โดยเปรียบเทียบผลลัพธ์ระหว่างชิ้นงาน ที่ไม่เชื่อม (NR) กับที่เชื่อมหลายรอบ (R1/R3)

เตรียมงานโดยการตัดชิ้นงานจากบริเวณ รอยเชื่อม (Weld Bead) และ บริเวณกระแทกร้อน (HAZ) ของเหล็กกล้าคาร์บอน จากชุด NR, R1 และ R3 อย่างละ 1 ชิ้น ผิวหน้าชิ้นงานถูกเตรียมให้เรียบด้วยการขัดกระดาษทรายเบอร์ 400 และ 1000 ก่อนทำการวิเคราะห์

เงื่อนไขการวิเคราะห์ใช้ Cu-K α Radiation ($\lambda = 1.54 \text{ \AA}$) ช่วงการสแกน มุม $2\theta = 30^\circ$ ถึง 90° ความเร็วในการสแกน: 0.2° ต่อวินาที วิเคราะห์ พื้นที่ใต้พีคการเลี้ยวเบน (Diffraction Peak Area) และ ความกว้างที่ครึ่งหนึ่งของความสูงพีค (FWHM) โดยใช้ฟังก์ชัน Pearson 7 ในโปรแกรม Fityk

ใช้ สมการของ Scherrer เพื่อคำนวณขนาดผลึก (Crystallite Size) ดังสมการที่ (3-2)

$$D = \frac{K\lambda}{\beta \cos\theta} \quad (3-2)$$

โดยที่ D = ขนาดผลึก (Crystallite size)

K = ค่าคงที่ของ Scherrer (ปกติใช้ประมาณ 0.9)

λ = ความยาวคลื่นของรังสีเอกซ์

β = ความกว้างเต็มที่ครึ่งหนึ่งของพีค (Full Width at Half Maximum, FWHM)

θ = มุมเลี้ยวเบน

บทที่ 4

ผลการทดลองและอภิปรายผลการทดลอง

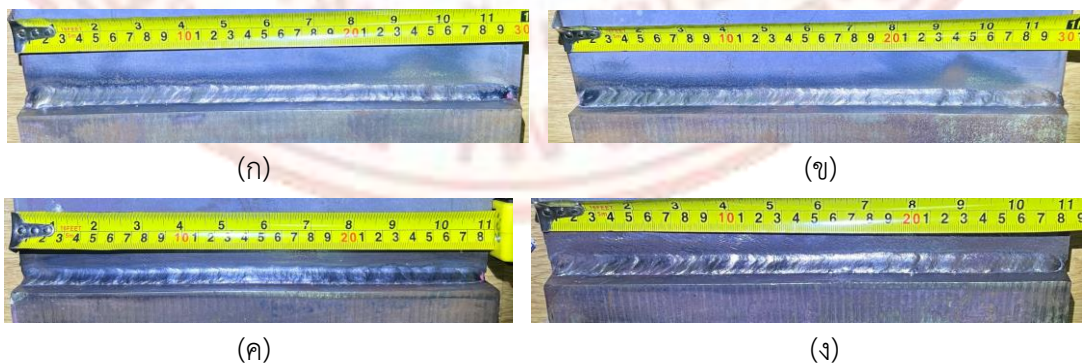
4.1 ผลการทดลองเบื้องต้น (Preliminary Experiments) : การเชื่อมหน้างานโดยช่างเชื่อมปฏิบัติการ ทร.

ในการทดลองการเชื่อมระหว่างแผ่น เหล็กกล้าคาร์บอน ASTM A131 เกรด EH36 และ อะลูมิเนียม ASTM B209 เกรด 5083 เชื่อมกับ Bimetallic Transition Joint โดยมีการออกแบบ รอยต่อของวัสดุเหล็กกล้าคาร์บอน EH36 ระหว่างรอยต่อ Fillet แบบ T-Joint และ Bevel นั้น ได้ จำแนกผลการทดลองได้ดังต่อไปนี้

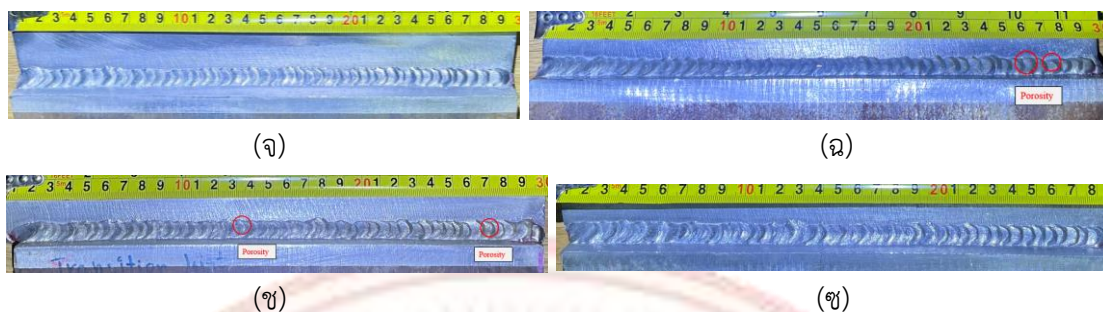
4.1.1 ผลการตรวจสอบโดยไม่ทำลาย

4.1.1.1 ผลการตรวจสอบด้วยสายตา (Visual Inspection)

การตรวจสอบด้วยสายตา (Visual Inspection) จะใช้สำหรับการประเมินคุณภาพรอยเชื่อมซึ่ง จะแบ่งออกเป็น 2 ลักษณะคือ 1) รูปร่างและขนาดของแนวเชื่อม (Weld Geometry or Weld Profile) และ 2) ข้อบกพร่อง (Defect or Imperfect) โดยจะพิจารณาที่บริเวณผิวของแนวเชื่อม รวมถึงบริเวณรอบข้างซึ่งอาจส่งผลกระทบต่อความแข็งแรงของแนวเชื่อม การตรวจสอบพื้นผิวทั้ง 8 แนว เชื่อมพบว่า รอยเชื่อมเหล็กกล้าคาร์บอนทั้งหมดอยู่ในสภาพดี ไม่พบรอยบกพร่องใด ๆ เมื่อสังเกตด้วย ตาเปล่า ดังแสดงในภาพที่ 4-1(ก) 4-1(ข) 4-1(ค) และ 4-1(ง) สำหรับรอยเชื่อมอะลูมิเนียม พบรูพรุน (Pore) บนผิวรอยเชื่อมของ AL-J1-R และ AL-J2-L ขนาดประมาณ 1 มิลลิเมตร ดังแสดงในภาพที่ 4-1(ฉ) และ 4-1(ช) ส่วนรอยเชื่อม AL-J1-L และ AL-J2-R ไม่พบรอยบกพร่องใด ๆ ดังแสดงในภาพที่ 4-1(จ) และ 4-1(ซ) ซึ่งผลการตรวจสอบผ่านตามเกณฑ์มาตรฐาน AWS D1.1 และ AWS D1.2

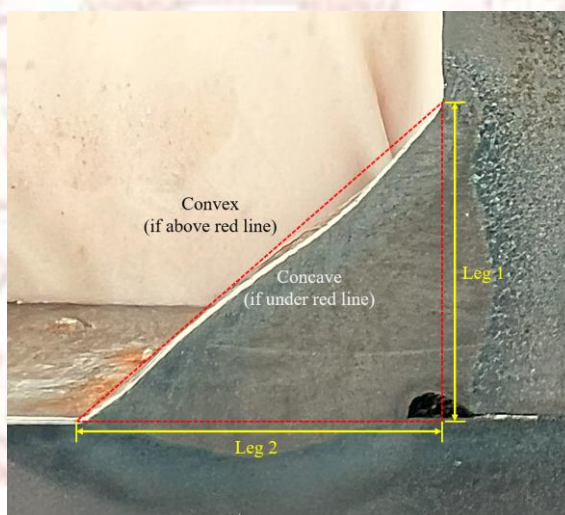


ภาพที่ 4-1 แนวเชื่อมขึ้นงาน (ก) St-J1-L (ข) St-J1-R (ค) St-J2-L (ง) St-J2-R (จ) AL-J1-L (ฉ) AL-J1-R (ช) AL-J2-L และ (ซ) AL-J2-R

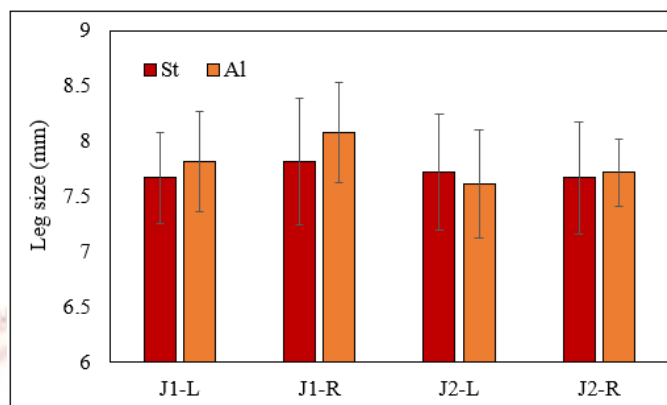


ภาพที่ 4-1 (ต่อ)

การตรวจสอบรูปทรงของแนวเชื่อม ได้สุ่มตรวจสอบจำนวน 6 ตำแหน่งตลอดแนวเชื่อม ในภาพที่ 4-2 แสดงการวัดขนาดขารอยเชื่อม (Leg Size) และความนูนของรอยเชื่อม (Weld Convexity) สำหรับเหล็กคาร์บอน พบว่าขนาดขารอยเชื่อมอยู่ในช่วง 7–8.5 มม. (ค่าเฉลี่ย 7.72 มม.) และค่าความนูนของรอยเชื่อมต่ำกว่า 0.1 มม. ซึ่งเป็นไปตามมาตรฐาน AWS D1.1 โดยรอยเชื่อม Bevel Weld และแบบ Fillet Weld มีลักษณะใกล้เคียงกัน สำหรับอะลูมิเนียม ขนาดขารอยเชื่อมอยู่ในช่วงเดียวกันคือ 7–8.5 มม. (ค่าเฉลี่ย 7.80 มม.) โดยมีค่าความนูนสูงสุด 1 มม. ที่รอยเชื่อม AL-J1-R และ AL-J2-R ซึ่งยังคงอยู่ภายในขีดจำกัด 2 มม. ตามที่ระบุในมาตรฐาน AWS D1.2 จึงถือว่าผ่านตามข้อกำหนดของมาตรฐาน ตามที่แสดงในภาพที่ 4-3



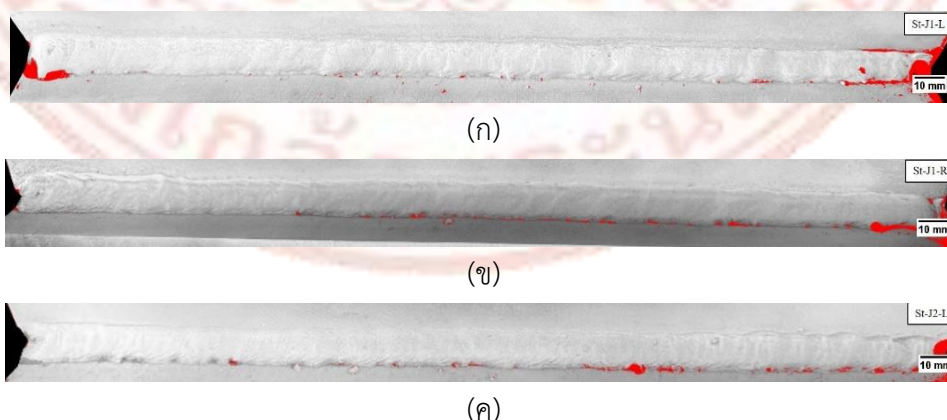
ภาพที่ 4-2 รูปตัดรอยเชื่อม พร้อมคำอธิบายบริเวณโค้งนูน (Convex) และโค้งเว้า (Concave)



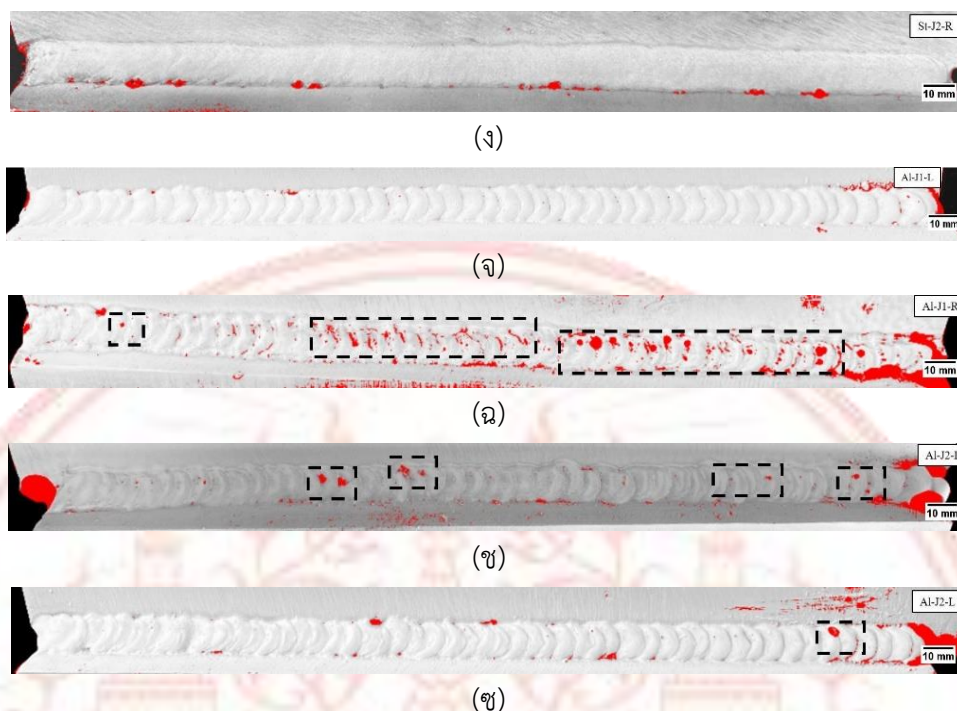
ภาพที่ 4-3 ขนาดขารอยเชื่อม (Leg Size)

4.1.1.2 ผลการตรวจสอบด้วยสารแทรกซึม (Penetration Testing)

การตรวจสอบด้วยสารแทรกซึมสามารถตรวจสอบตำแหน่งของลักษณะจุดบกพร่องบนผิวหน้าของชิ้นงานเชื่อมที่มีขนาดเล็กเกินกว่าสายตาดูจะเห็นได้ เช่น รอยแตกร้าว หรือรูพรุน โปรแกรม ImageJ ได้ถูกใช้ในการวิเคราะห์ขนาดของจุดบกพร่องที่ปรากฏบนผิวรอยเชื่อมของตัวอย่างทดสอบทุกชิ้น โดยไม่รวมบริเวณเริ่มต้นและสิ้นสุดของแนวเชื่อม (Run-on and Run-off) สำหรับชิ้นงานเหล็กคาร์บอน พบว่าคราบ Penetrant ที่ติดอยู่บริเวณขอบแนวเชื่อมนั้นเป็นสแลก (slag) ดังแสดงในภาพที่ 4-4(ก-ง) จึงไม่ถือว่าเป็นตำหนิ นอกจากนั้นไม่พบตำหนิใดๆบนผิวรอยเชื่อม จึงถือว่าผ่านเกณฑ์ ในส่วนของชิ้นงานอะลูมิเนียม จากภาพที่ 4-4(จ) และ 4-4(ข) แสดงชิ้นงาน Al-J1-L และ Al-J2-R พบว่ามีรูพรุนที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางรวมไม่เกิน 10 มม. ภายในระยะ 1 นิ้ว จึงถือว่าผ่านเกณฑ์ ในขณะที่จากภาพที่ 4-4(ฉ) และ 4-4(ค) ชิ้นงาน Al-J1-R และ Al-J2-L พบว่ามีรูพรุนที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางรวมกันมากกว่า 10 มม. ภายในระยะ 1 นิ้ว จึงไม่ผ่านตามเกณฑ์ที่กำหนด



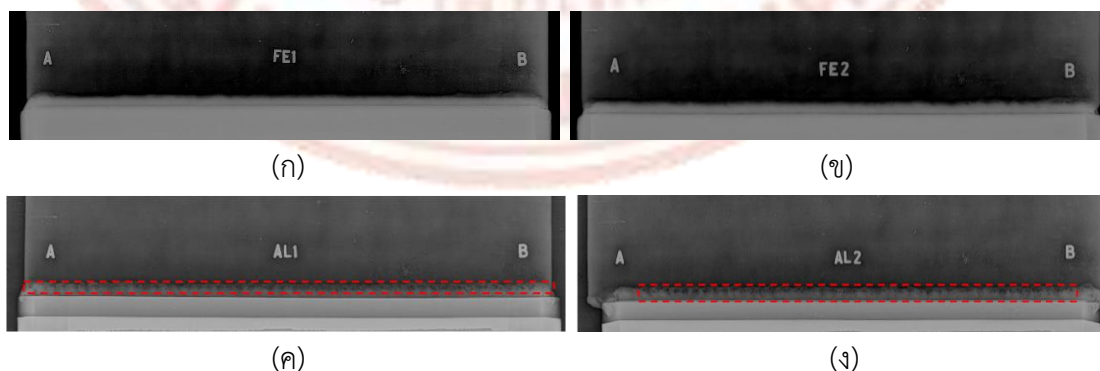
ภาพที่ 4-4 ตำแหน่งของสารแทรกซึม (Penetrant) ที่ปรากฏบนแนวเชื่อมของชิ้นงาน
(ก) St-J1-L (ข) St-J1-R (ค) St-J2-L (ง) St-J2-R (จ) Al-J1-L (ฉ) Al-J1-R
(ช) Al-J2-L และ (ซ) Al-J2-R



ภาพที่ 4-4 (ต่อ)

4.1.1.3 ผลการทดสอบด้วยรังสี (Radiographic Testing: RT)

จากการทดสอบ RT (Radiographic Testing) พบว่ารอยเชื่อมจากทั้งสองด้านมีการทับซ้อนกัน ทำให้สามารถตรวจจับตำหนิภายในโดยรวมได้ แต่ไม่สามารถระบุได้ว่าตำหนินั้นอยู่ด้านใดของแนวเชื่อม จากในภาพที่ 4-5 (ก และ ข) ภายในแนวเชื่อมเหล็กคาร์บอนไม่พบข้อบกพร่องภายใน อย่างไรก็ตาม สามารถสังเกตเห็นรอยต่อของวัสดุในบริเวณขอบด้านล่างของรอยเชื่อมที่ ส่วนแนวเชื่อมอะลูมิเนียมพบว่าการกระจายตัวของรูพรุน (Porosity) ซึ่งมีจำนวนและขนาดของตำหนิสูงเกินกว่าข้อกำหนดการยอมรับตามมาตรฐาน AWS D1.2 ดังที่แสดงในภาพที่ 4-5 (ค และ ง)



ภาพที่ 4-5 ภาพถ่ายรังสี (RT) ของรอยเชื่อมชิ้นงาน (ก) St-J1 (ข) St-J2 (ค) Al-J1 และ (ง) Al-J2

4.1.2 ผลการทดสอบสมบัติทางกล หรือการทดสอบแบบทำลายสภาพ

4.1.2.1 ผลการทดสอบ Fillet Break Testing

ผลการทดสอบ Fillet Break Test โดยใช้เครื่องเครื่องกดอัดแบบระบบไฮดรอลิกส์ กดเพื่อดูความแข็งแรงของรอยเชื่อม โดยขึ้นงานทดสอบเหล็กกล้าคาร์บอน 4 ชั้น และขึ้นงานทดสอบอะลูมิเนียม 4 ชั้น สามารถกดจนแผ่นวัสดุฐานแนวตั้งพับลงไปหาแผ่นในแนวนอนได้โดยที่แนวเชื่อมฝั่งที่ทำการวิเคราะห์ไม่เกิดความเสียหาย ดังแสดงในภาพที่ 4-6



(ก)

(ข)

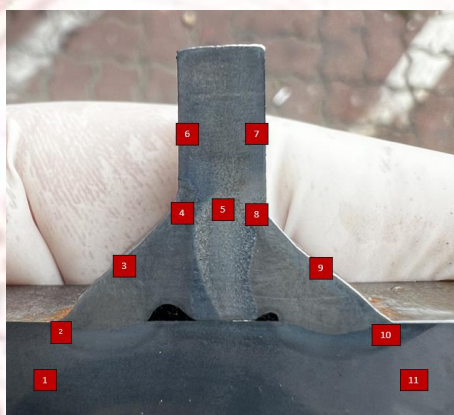
ภาพที่ 4-6 ภาพตัดขวางของขึ้นงานเชื่อมหลังการทดสอบ Fillet Break Test

(ก) ขึ้นงานเหล็กกล้าคาร์บอน และ (ข) ขึ้นงานอะลูมิเนียม

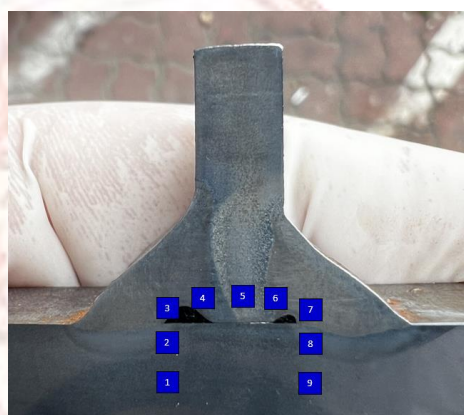
4.1.2.2 ผลทดสอบความแข็งแบบวิกเกอร์ส (Hardness Test)

ได้ทำการทดสอบความแข็งกับขึ้นงาน St-J1 St-J2 AL-J1 และ AL-J2 โดยทำการวัดบริเวณวัสดุฐาน (Base Metal) เขตผลกระทบจากความร้อน (HAZ) และบริเวณเนื้อเชื่อม (Weldment) ทั้งบริเวณผิวของแนวเชื่อม (Cover) และด้านรากของแนวเชื่อม (Root) ดังแสดงในภาพที่ 4-7 (ก และ ข) โดยใช้แรงกด 500 กรัมสำหรับเหล็กกล้าคาร์บอน และ 100 กรัมสำหรับอะลูมิเนียม สำหรับขึ้นงาน Transition Joint (TJ) ได้ทำการวัดความแข็งในหลายตำแหน่ง ดังแสดงในภาพที่ 4-7 (ค) เพื่อวิเคราะห์พฤติกรรมของเฟสของโลหะต่างชนิดกัน (Bimetallic Phase) จากภาพที่ 4-8 (ก) พบว่าค่าความแข็งของด้านเหล็กกล้าคาร์บอนมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นจากบริเวณวัสดุฐาน (ประมาณ 160–190 HV) ไปยังเขต HAZ (200–230 HV) และบริเวณโลหะเชื่อม (220–240 HV) นอกจากนี้ พบว่าบริเวณเฉพาะจุด เช่น ตำแหน่ง No.8 ในแนวเชื่อมด้านผิวและตำแหน่ง No.6 ในแนวเชื่อมด้านรากของ St-J1 อาจมีความแข็งเกิน 330 HV ซึ่งคาดว่าเกิดจากการให้ความร้อนซ้ำ (Thermal Cycling) จากภาพที่ 4-8 (ข) แสดงในส่วนของด้านอะลูมิเนียม พบว่ามีค่าความแข็งต่ำกว่า (ประมาณ 65–90 HV) และบริเวณโลหะเชื่อมมีค่าความแข็งลดลงเล็กน้อยเมื่อเทียบกับโลหะฐาน โดยสันนิษฐานว่าเกิดจากการหยาบของเกรน (Grain Coarsening) หรือผลของการอบอ่อนเฉพาะจุด (Localized Annealing) ระหว่างกระบวนการเชื่อม สำหรับ TJ พบว่าค่าความแข็งมีความซับซ้อน โดยด้านอะลูมิเนียม

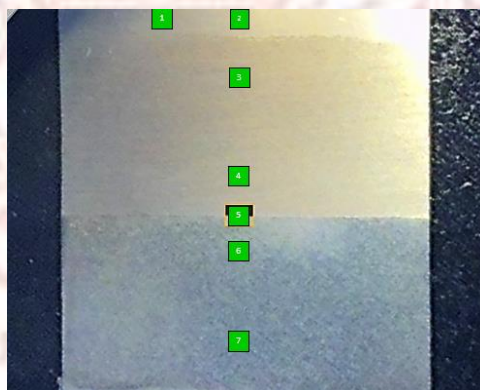
(ตำแหน่งที่ 1 และ 2) มีค่าใกล้เคียงกับโลหะฐาน (ประมาณ 90–100 HV) ส่วนด้านเหล็กกล้า (ตำแหน่งที่ 6 และ 7) อยู่ระหว่าง 170–200 HV ขณะที่บริเวณรอยต่อ Al-Fe มีค่าความแข็งประมาณ 131.6 HV อย่างไรก็ตาม ที่ชั้นเชื่อมแบบระเบิด (Explosive Weld Layer) ระหว่างอะลูมิเนียมกับรอยต่อ Al-Fe พบว่าความแข็งต่ำมาก (ประมาณ 38–40 HV) ซึ่งคาดว่าเป็นผลมาจากการเกิดสารประกอบระหว่างโลหะ (Intermetallic Phases) ที่มีความเปราะ หรือเกิดการเสียรูปพลาสติก (Plastic Deformation) จากกระบวนการระเบิดในขั้นตอนการเชื่อม ดังที่แสดงในภาพที่ 4-8(ค)



(ก)

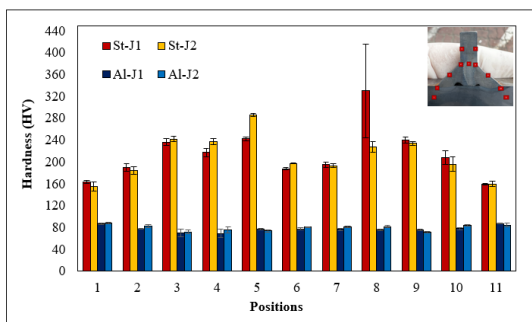


(ข)

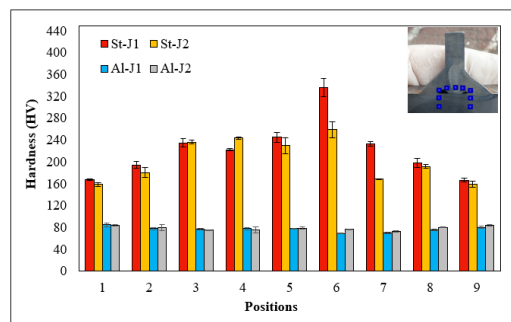


(ค)

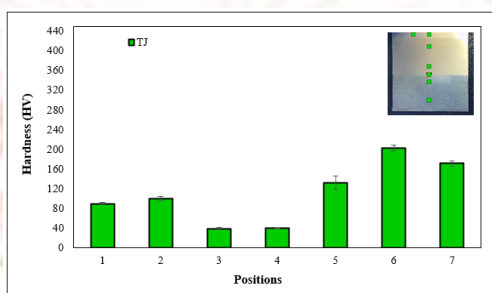
ภาพที่ 4-7 ตำแหน่งสำหรับการทดสอบความแข็งวิกเกอร์สของ (ก) บริเวณผิวของแนวเชื่อม (Cover) (ข) ด้านรากของแนวเชื่อม (Root) ของชิ้นงานเชื่อม และ (ค) บริเวณ TJ



(ก)



(ข)



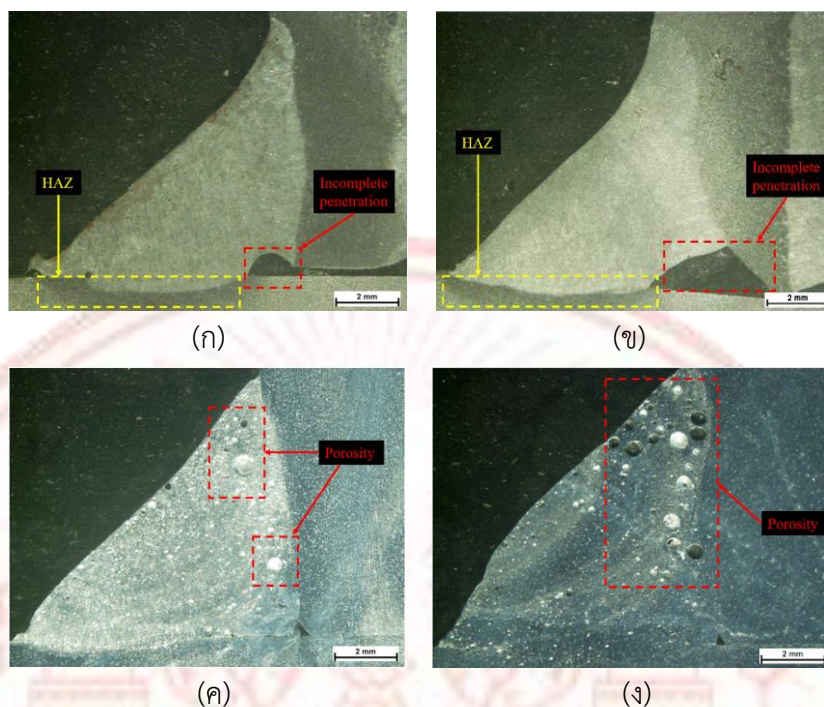
(ค)

ภาพที่ 4-8 ค่าความแข็งวิกเกอร์สของ (ก) บริเวณผิวของแนวเชื่อม (Cover) (ข) ด้านรากของแนวเชื่อม (Root) ของชิ้นงานเชื่อม และ (ค) บริเวณ Transition Joint

4.1.3 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างมหภาค และจุลภาค (Macro and Micro Structure Analysis)

4.1.3.1 ผลตรวจสอบโครงสร้างมหภาค (Macrostructure)

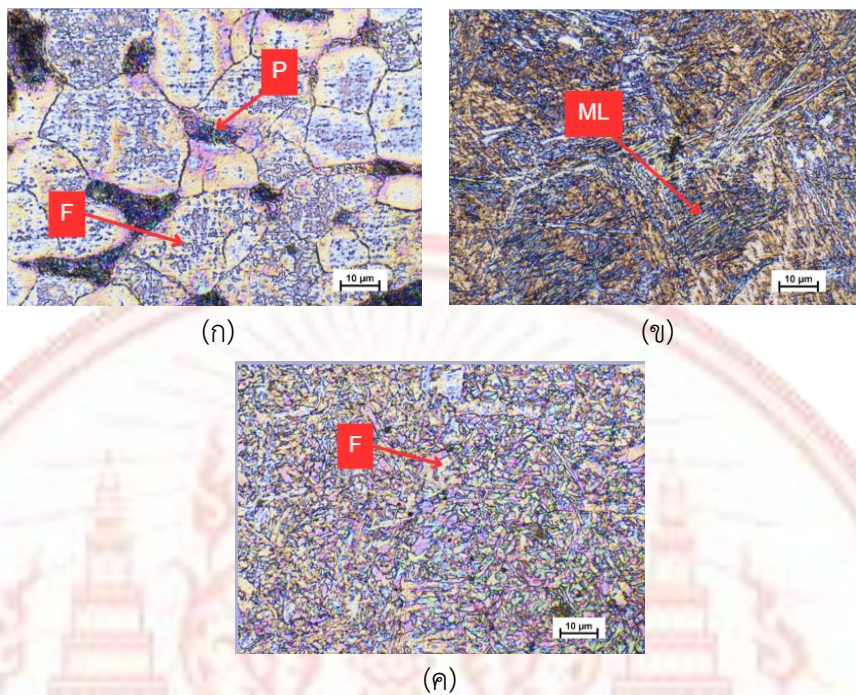
ผลการตรวจโครงสร้างมหภาค (Macrostructure) เพื่อดูรูปลักษณะการหลอมละลายของแนวเชื่อมและจุดบกพร่องที่อาจเกิดในรอยเชื่อม ดังแสดงในภาพที่ 4-9 (ก) (St-J1) และ 4-9 (ข) (St-J1) สำหรับแนวเชื่อมเหล็กกล้าคาร์บอนสามารถเห็นลักษณะรูปร่างของแนวเชื่อมมีการหลอมละลายประสานเข้ากันกับวัสดุฐานได้เป็นอย่างดีและสามารถสังเกตเห็นบริเวณกระทบจากความร้อน (HAZ) ได้ชัดเจน แต่จะพบการแพร่ไม่สมบูรณ์ (Incomplete Penetration) ที่บริเวณรากแนวเชื่อม ในส่วนของแนวเชื่อมอะลูมิเนียมพบว่ามีโพรงอากาศ (Porosity) จำนวนมาก ซึ่งอาจมีสาเหตุมาจากความชื้นในสภาพแวดล้อมบริเวณที่ทำการเชื่อมหรือคุณภาพของลวดเชื่อม ดังแสดงในภาพที่ 4-9 (ค) (Al-J1) และ 4-9 (ง) (Al-J2)



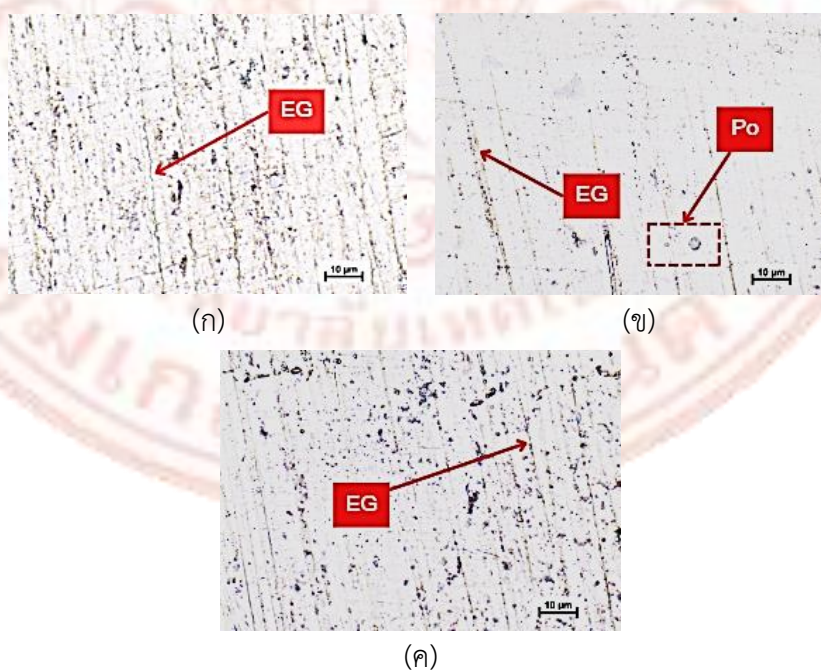
ภาพที่ 4-9 ภาพถ่ายโครงสร้างมหภาคของแนวเชื่อม (ก) St-J1 (ข) St-J2 (ค) Al-J1 และ (ง) Al-J2

4.1.3.2 ผลตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค (Micro Structure)

การวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์ชนิดแสง (Optical Microscope, OM) ได้ทำการวิเคราะห์โครงสร้างของชิ้นงานทดสอบที่ตำแหน่งวัสดุฐาน (Base Metal) บริเวณผลกระทบทางความร้อน (HAZ) และบริเวณเนื้อเชื่อม (Weld Metal) ของชิ้นงานเชื่อมเหล็กกล้าคาร์บอน EH36 และอะลูมิเนียม 5083 ในภาพที่ 4-10 ในส่วนเหล็กกล้าคาร์บอน EH36 โครงสร้างจุลภาคที่ได้มีลักษณะใกล้เคียงกันในการออกแบบรอยต่อทั้ง 2 แบบ ในเนื้อวัสดุฐานมีการกระจายตัวของโครงสร้างเฟอร์ไรต์ (Ferrite) และเพิร์ลไลต์ (Pearlite) รวมกันประมาณ 20% ของพื้นที่ การเย็นตัวอย่างรวดเร็วในเขต HAZ ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงเป็นโครงสร้างผสมลักษณะลาถมาร์เทนไซต์ (Lath Martensite) ซึ่งอาจส่งผลต่อค่าความแข็งและความเปราะ ส่วนในเนื้อเชื่อมพบเฟอร์ไรต์แบบแอซิคูลาร์ (Acicular Ferrite) ขนาดละเอียดเป็นโครงสร้างหลัก โดยมีลักษณะเป็นแท่งสั้นและไม่สม่ำเสมอ ซึ่งคาดว่าเกิดจากอัตราการเย็นตัวที่อยู่ในระดับปานกลาง ในภาพที่ 4-11 แสดงโครงสร้างจุลภาคของอะลูมิเนียมในเนื้อวัสดุฐานและเนื้อเชื่อมมีลักษณะเป็นเกรนที่ยืดยาว (Elongated Grains) เรียงตัวในแนวเดียวกัน และมีโครงสร้างที่กระจายตัวมากกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับบริเวณ HAZ นอกจากนี้ ยังพบรูพรุน (Pores) ในเขต HAZ ซึ่งบ่งชี้ถึงความไม่สมบูรณ์เฉพาะจุดที่อาจเกิดจากปริมาณความร้อนที่ใส่เข้าไปหรือคุณสมบัติของวัสดุ ซึ่งอาจส่งผลต่อความสมบูรณ์ของการเชื่อมโดยรวม

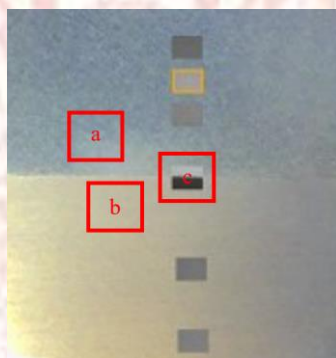


ภาพที่ 4-10 ภาพถ่ายโครงสร้างทางจุลภาคของแนวเชื่อมเหล็กกล้าคาร์บอน EH36 บริเวณ
(ก) วัสดุฐาน (ข) HAZ และ (ค) เนื้อเชื่อม
หมายเหตุ F=Ferrite P= Pearlite ML= Lath Martensite

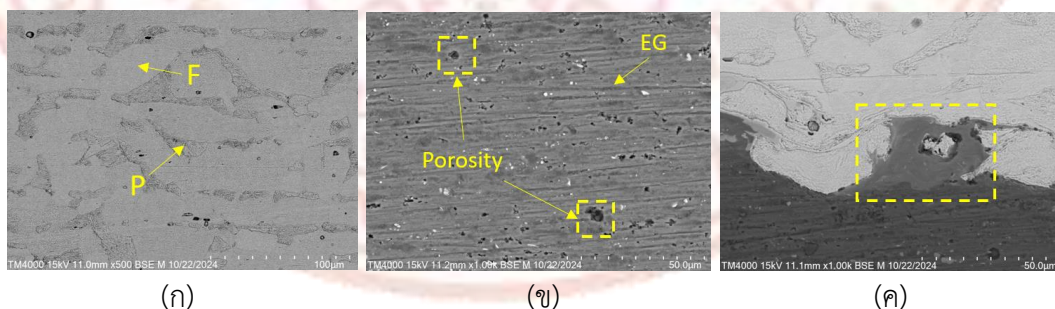


ภาพที่ 4-11 ภาพถ่ายโครงสร้างทางจุลภาคของแนวเชื่อมอะลูมิเนียม 5083 บริเวณ
(ก) วัสดุฐาน (ข) HAZ และ (ค) เนื้อเชื่อม
หมายเหตุ EG= Elongated Grains Po= Pores

ในการวิเคราะห์โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ที่กำลังขยาย 1000 เท่าเพื่อวิเคราะห์รายละเอียดผิวของบริเวณ TJ โดยเน้นการตรวจสอบบริเวณเหล็กกล้าคาร์บอน อะลูมิเนียม และชั้นรอยต่อของเหล็ก/อะลูมิเนียม โดยได้กำหนดตำแหน่งการทดสอบเป็นพื้นที่ a b และ c ตามลำดับ ตามที่แสดงในภาพที่ 4-12 ในภาพที่ 4-13 (ก) แสดงบริเวณเหล็กกล้าคาร์บอนที่ปรากฏโครงสร้างเฟอร์ไรต์ซึ่งมีสีอ่อน และมีโครงสร้างเพิร์ลไลต์สีเข้มกระจายตัวอยู่เป็นจุดๆ ในขณะที่บริเวณอะลูมิเนียมในภาพที่ 4-13(ข) พบเกรนที่เรียงตัวยืดยาวในแนวเส้นตรง มีรูพรุนค่อนข้างน้อย และมีการกระจายตัวของธาตุสิ่งเจือปนเล็กน้อย สำหรับภาพที่ 4-13 (ค) บริเวณรอยต่อของ Bimetallic Transition พบชั้นกลาง (Intermediate Layer) ที่มีสีของโครงสร้างแตกต่างจากเนื้อโลหะฐานทั้งสองอย่างชัดเจน บริเวณขอบของชั้นดังกล่าวมีตำหนิที่ยังไม่สามารถระบุประเภทได้อย่างชัดเจน และคาดว่าบริเวณนี้อาจมีสารประกอบระหว่างโลหะ (Intermetallic Compounds) ที่มีความเปราะ เช่น Fe_3Al หรือ $FeAl$ อยู่เป็นจำนวนมาก



ภาพที่ 4-12 ตำแหน่งที่ทำการตรวจสอบชิ้นงาน Bimetallic Transition Joint

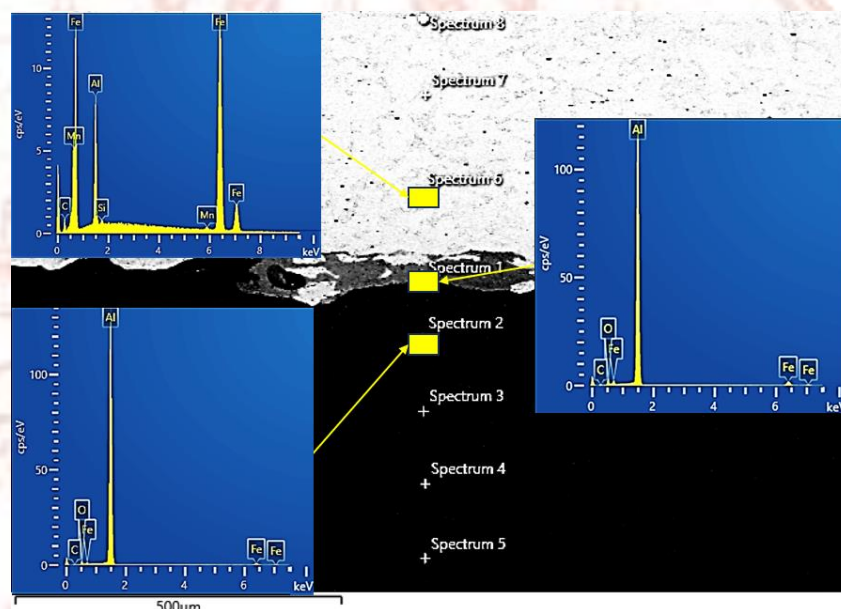


ภาพที่ 4-13 ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) บริเวณแนวต่อของชิ้นงาน Transition Joint ที่ (ก) ด้านเหล็กกล้าคาร์บอน (ข) ด้านอะลูมิเนียม และ (ค) บริเวณรอยต่อโลหะสองชนิด

หมายเหตุ F=Ferrite P= Pearlite ML= Lath Martensite EG= Elongated Grains

4.1.3.31 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี

ผลการวิเคราะห์ EDS ในบริเวณที่ทำการตรวจสอบด้วย SEM ตามที่แสดงในภาพที่ 4-14 โดยสรุปผลไว้ในตารางที่ 4-1 พบว่าในทุกบริเวณมีธาตุ Fe และ Al ปรากฏอยู่ โดยเฉพาะในบริเวณโซนหลอมเหลว (fusion zone) มีค่า Al ถึง 74.14% และ Fe 10.27% ซึ่งบ่งชี้ถึงลักษณะของการมีอะลูมิเนียมเป็นองค์ประกอบหลัก และมีแนวโน้มทำให้เกิดเฟสสารเชิงซ้อนระหว่างโลหะ (intermetallic) ที่มีความเปราะ ส่งผลต่อสมบัติเชิงกลของชิ้นงาน ส่วนเนื้อโลหะฐานแต่ละชนิดมีธาตุหลักของตนเอง (Fe สำหรับเหล็กกล้าคาร์บอน และ Al สำหรับอะลูมิเนียม) อยู่ประมาณ 80% เป็นส่วนใหญ่



ภาพที่ 4-14 ตำแหน่งการวิเคราะห์ด้วย SEM

ตารางที่ 4-1 ผลการตรวจสอบองค์ประกอบธาตุ

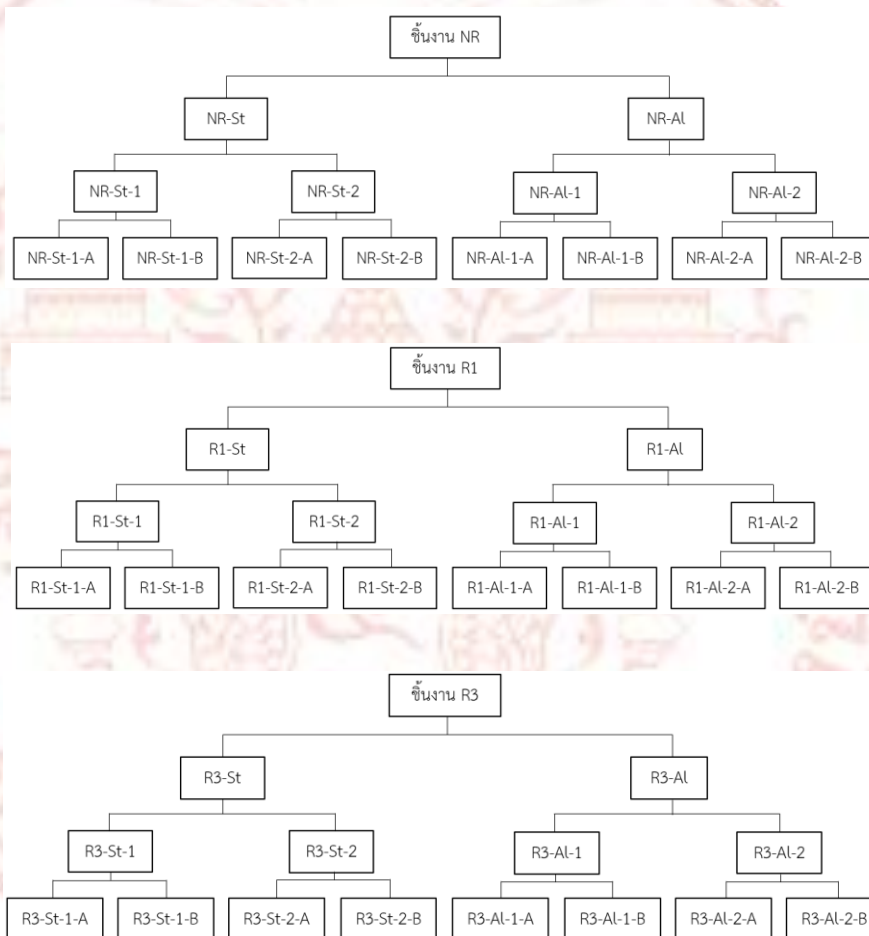
Position	Fe	Al	C	O	Si	Mn
พื้นที่ Fusion zone (เทาเข้ม)	10.27	74.14	8.64	6.95	-	-
พื้นที่ด้านอะลูมิเนียม (ดำ)	5.4	79.02	10.13	5.45	-	-
พื้นที่ด้านเหล็กกล้าคาร์บอน (ขาว)	81.31	9.61	8.06	9.61	0.27	0.75

4.2 ผลการทดลองการวิจัย : ผลกระทบของการเชื่อมซ่อม (Repairing Weld)

ภายหลังการทดลองการเชื่อมชิ้นงาน NR R1 และ R3 จำนวนอย่างละ 2 ชิ้น เรียบร้อยแล้ว ชิ้นงานทั้งหมดได้ถูกตรวจสอบคุณภาพ และทดสอบ โดยได้จำแนกผลการทดลองได้ดังต่อไปนี้

4.2.1 ผลการตรวจสอบโดยไม่ทำลาย

ในการตรวจสอบโดยไม่ทำลาย แนวเชื่อมแต่ละแนว แบ่งเป็นด้านหลักกล้าคาร์บอน และ อะลูมิเนียมจากชิ้นงาน NR R1 และ R3 ได้ถูกกำหนดชื่อเพื่อความสะดวกและความถูกต้องแม่นยำในการตรวจสอบ ดังนี้

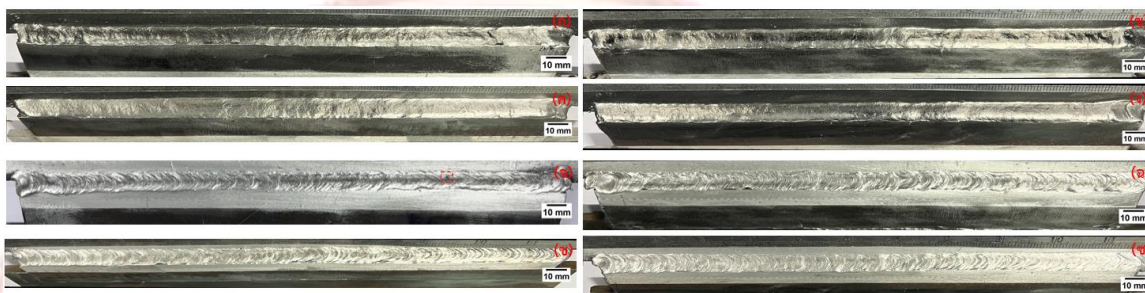


4.2.1.1 ผลการตรวจสอบด้วยสายตา (Visual Inspection)

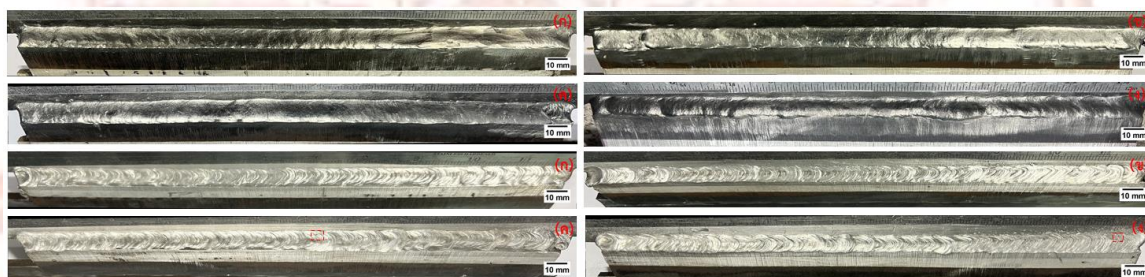
การตรวจสอบด้วยสายตา (Visual Inspection) จะใช้สำหรับการประเมินคุณภาพรอยเชื่อมในลักษณะเดียวกันกับการทดลองเบื้องต้น ในการตรวจสอบพื้นผิวของทั้ง 24 แนวเชื่อม พบว่ามีรูพรุน เล็ก (Pore) ขนาดไม่เกิน 1 มม. ปรากฏขึ้นที่แนวเชื่อม NR-AL-1-A R1-AL-2-A R1-AL-2-B R3-St-1-B และ R3-AL-2-B ซึ่งผ่านตามเกณฑ์มาตรฐาน AWS D1.1 และ AWS D1.2 ในขณะที่มีรอยบาก

(Undercut) ปรากฏขึ้นที่แนวเชื่อม R3-AL-1-A และ R3-AL-2-B ซึ่งมีลึกเกิน 1 มม. จึงไม่ผ่านเกณฑ์มาตรฐาน AWS D1.2 โดยแนวเชื่อมอื่นๆที่เหลืออยู่ในสภาพดี ไม่พบรอยบกพร่องใด ๆ

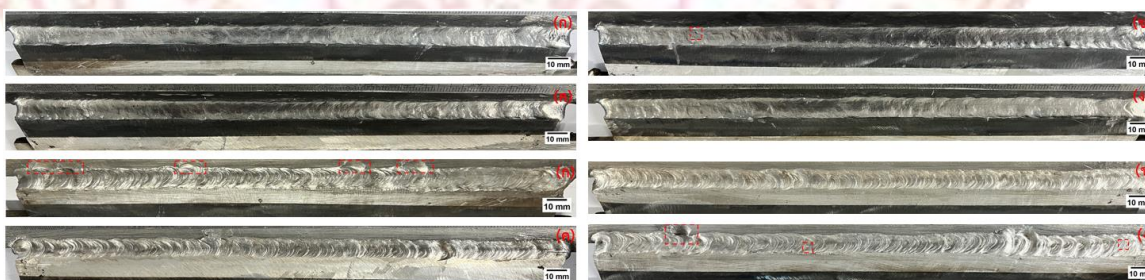
แนวเชื่อมเหล็กกล้าคาร์บอน และอะลูมิเนียมของชิ้นงานทดสอบ NR R1 และ R3 แสดงในภาพที่ 4-15 4-16 และ 4-17 ตามลำดับ



ภาพที่ 4-15 แนวเชื่อมชิ้นงานทดสอบ NR (ก) NR-St-1-A (ข) NR-St-1-B (ค) NR-St-2-A (ง) NR-St-2-B (จ) NR-AL-1-A (ฉ) NR-AL-1-B (ช) NR-AL-2-A และ (ซ) NR-AL-2-B



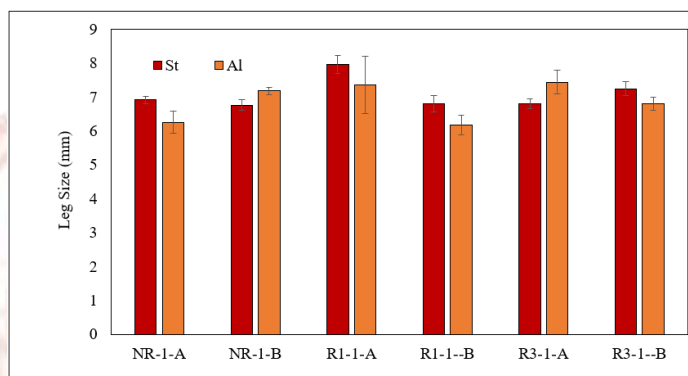
ภาพที่ 4-16 แนวเชื่อมชิ้นงานทดสอบ R1 (ก) R1-St-1-A (ข) R1-St-1-B (ค) R1-St-2-A (ง) R1-St-2-B (จ) R1-AL-1-A (ฉ) R1-AL-1-B (ช) R1-AL-2-A และ (ซ) R1-AL-2-B



ภาพที่ 4-17 แนวเชื่อมชิ้นงานทดสอบ R3 (ก) R3-St-1-A (ข) R3-St-1-B (ค) R3-St-2-A (ง) R3-St-2-B (จ) R3-AL-1-A (ฉ) R3-AL-1-B (ช) R3-AL-2-A และ (ซ) R3-AL-2-B

การตรวจสอบรูปทรงของแนวเชื่อม ได้ทำการสุ่มตรวจสอบขนาดขารอยเชื่อม (Leg Size) โดยเก็บข้อมูลเป็นค่าเฉลี่ยของทั้งตลอดแนวเชื่อม สำหรับเหล็กกล้าคาร์บอนมีขนาดขารอยเชื่อม 6.7-7.9

มม. (ค่าเฉลี่ย 7.10 มม.) ส่วนอะลูมิเนียมมีขนาดขารอยเชื่อม 6.2-7.4 มม. (ค่าเฉลี่ย 6.86 มม.) ในขณะที่ในส่วนของความนูนของรอยเชื่อม (Weld Convexity) สามารถวัดได้มีค่าต่ำกว่า 0.1 มม. ซึ่งเป็นไปตามมาตรฐาน AWS D1.1 และ AWS D1.2 ตามที่แสดงในภาพที่ 4-18

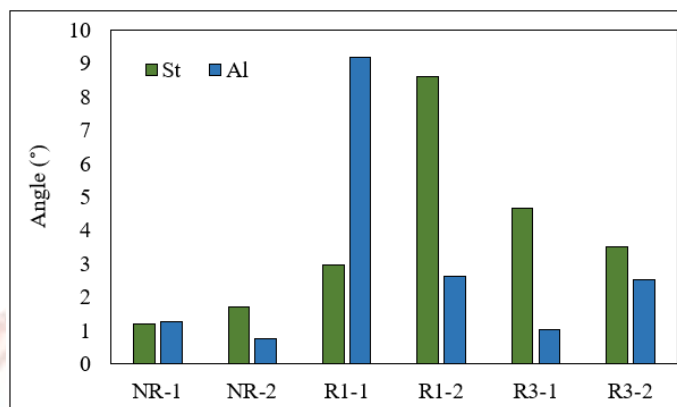


ภาพที่ 4-18 ขนาดขารอยเชื่อม (Leg Size)

นอกจากนี้ ภายหลังทำการเชื่อมได้พบว่าชิ้นงานเชื่อมมีการโก่งงอ (Distortion) ของแผ่นวัสดุฐาน ดังแสดงในภาพที่ 4-19 โดยเป็นผลกระทบจากการขยายตัวและหดตัวของโลหะที่ได้รับความร้อน ในระหว่างกระบวนการเชื่อมทำให้เกิดการเปลี่ยนรูปร่าง นอกจากนี้ยังอาจมีผลมาจากในระหว่างการเตรียมชิ้นงานได้เช่นกัน อย่างไรก็ตาม ถึงแม้จะมีการเชื่อมทั้ง 2 ด้านเพื่อชดเชยการได้รับความเค้นตกค้าง (Residual Stress) ในด้านเดียวแล้วก็ยังยากในการควบคุม โดยในการทดลองนี้ไม่ได้มีการเคาะตัด เพื่อให้แผ่นวัสดุฐานกลับมาตั้งตรง โดยผลการวัดมุมที่เปลี่ยนแปลงไป แสดงในภาพที่ 4-20



ภาพที่ 4-19 การโก่งงอของชิ้นงานทดลอง

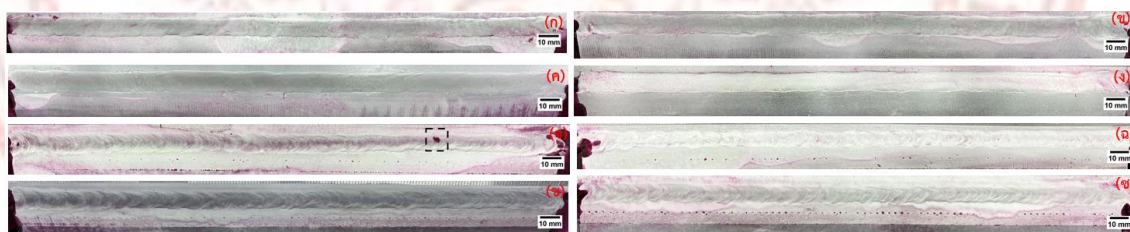


ภาพที่ 4-20 ค่ามุมที่เปลี่ยนแปลงจากการโค้งงอ

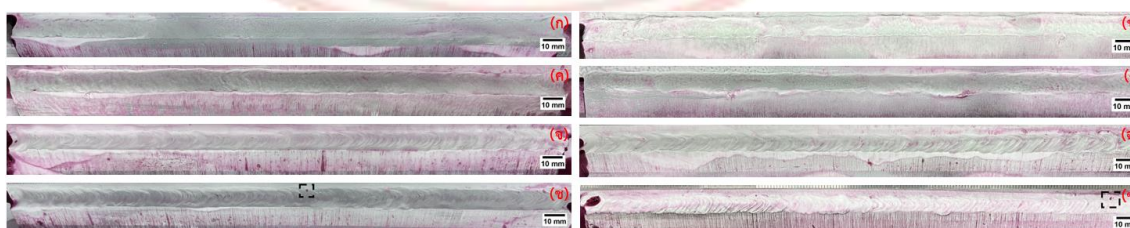
4.2.1.2 ผลการตรวจสอบด้วยสารแทรกซึม (Penetration Testing)

ภายหลังการทำการทดสอบด้วยสารแทรกซึม พบว่าแนวเชื่อม NR-AL-1-A R1-AL-2-A R1-AL-2-B R3-St-1-B R3-AL-2-A และ R3-AL-2-B ซึ่งปรากฏสารแทรกซึมออกมาจากสิ่งบกพร่อง หลังจากทำการวัดขนาดด้วยเทคนิค ImageJ พบว่ามีรูพรุนที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางรวมไม่เกิน 10 มม. ภายในระยะ 1 นิ้ว ซึ่งเป็นไปตามมาตรฐาน AWS D1.1 และ AWS D1.2 ส่วนแนวเชื่อมอื่นๆนอกจากนี้ ไม่ปรากฏสิ่งบกพร่องใดๆ

ภาพการตรวจสอบด้วยสารแทรกซึมแนวเชื่อมเหล็กกล้าคาร์บอน และอะลูมิเนียมของชิ้นงานทดสอบ NR R1 และ R3 แสดงในภาพที่ 4-21 4-22 และ 4-23 ตามลำดับ

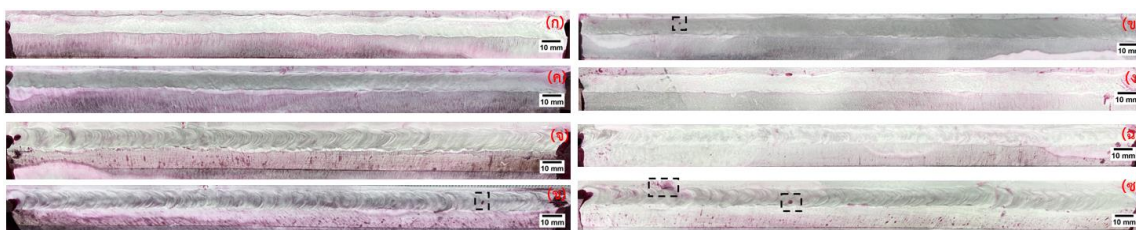


ภาพที่ 4-21 การทดสอบสารแทรกซึมแนวเชื่อมชิ้นงานทดสอบ NR (ก) NR-St-1-A (ข) NR-St-1-B (ค) NR-St-2-A (ง) NR-St-2-B (จ) NR-AL-1-A (ฉ) NR-AL-1-B (ช) NR-AL-2-A และ (ซ) NR-AL-2-B



ภาพที่ 4-22 การทดสอบสารแทรกซึมแนวเชื่อมชิ้นงานทดสอบ R1 (ก) R1-St-1-A (ข) R1-St-1-B (ค) R1-St-2-A (ง) R1-St-2-B (จ) R1-AL-1-A (ฉ) R1-AL-1-B (ช) R1-AL-2-A และ (ซ) R1-AL-2-B

(ช) R1-AL-2-B



ภาพที่ 4-23 การทดสอบสารแทรกซึมแนวเชื่อมชิ้นงานทดสอบ R3 (ก) R3-St-1-A (ข) R3-St-1-B (ค) R3-St-2-A (ง) R3-St-2-B (จ) R3-AL-1-A (ฉ) R3-AL-1-B (ช) R3-AL-2-A และ (ซ) R3-AL-2-B

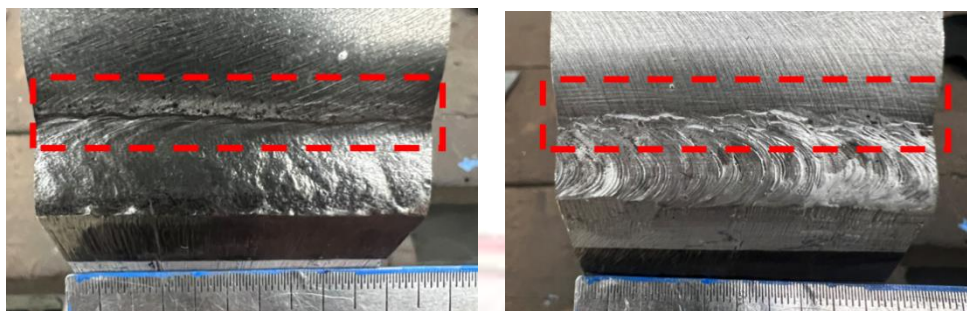
4.2.2 ผลการทดสอบสมบัติทางกล หรือการทดสอบแบบทำลายสภาพ

4.2.2.1 ผลการทดสอบ Fillet Break Testing

ในการทดสอบ Fillet Break Testing โดยใช้เครื่องเครื่องกดอัดแบบระบบไฮดรอลิกส์ ทดสอบ ชิ้นงานทดสอบ NR R1 และ R3 จำนวนอย่างละ 2 ชิ้น โดยมุงเน้นทางด้านเหล็กกล้าคาร์บอน 1 ชิ้น และมุงเน้นทางด้านอะลูมิเนียม 1 ชิ้น รวมทั้งหมด 6 ชิ้น ผลการทดสอบพบว่าภายหลังทำการทดสอบ จนถึงตำแหน่งมุมวิกฤติของชิ้นงานแล้ว ตามที่แสดงในภาพที่ 4-24 ชิ้นงานทดลองเหล็กกล้าคาร์บอน ทั้ง NR R1 และ R3 มีการยึดตัวของด้านบนแนวเชื่อมในลักษณะเดียวกัน แสดงถึงคุณสมบัติความเหนียวของแนวเชื่อมชิ้นงานทั้ง 3 ชิ้น ในขณะที่ชิ้นงานอะลูมิเนียมสามารถสังเกตเห็นความเสียหายเป็นลักษณะรอยแตกที่เกิดขึ้นบริเวณด้านบนของรอยเชื่อม ดังที่แสดงในภาพที่ 4-25



ภาพที่ 4-24 ชิ้นงานทดสอบ Fillet Break Testing



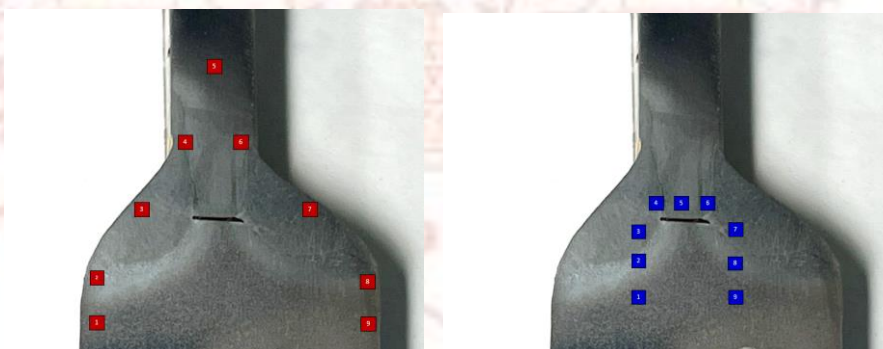
(ก)

(ข)

ภาพที่ 4-25 ลักษณะความเสียหายของ (ก) ชิ้นงานเหล็กกล้าคาร์บอน และ (ข) ชิ้นงานอะลูมิเนียม

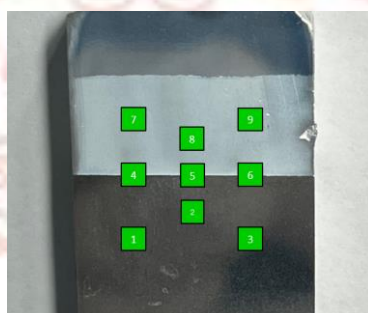
4.2.2.2 ผลทดสอบความแข็งแบบวิกเกอร์ส (Hardness Test)

การทดสอบความแข็งชิ้นงานทดสอบ NR R1 และ R3 โดยมีตำแหน่งการทดสอบของด้านเหล็กกล้าคาร์บอน ด้านอะลูมิเนียม และพื้นที่ในส่วน TJ ดังแสดงในภาพที่ 4-26 และโดยใช้แรงกด 500 กรัมสำหรับเหล็กกล้าคาร์บอน และ 100 กรัมสำหรับอะลูมิเนียม



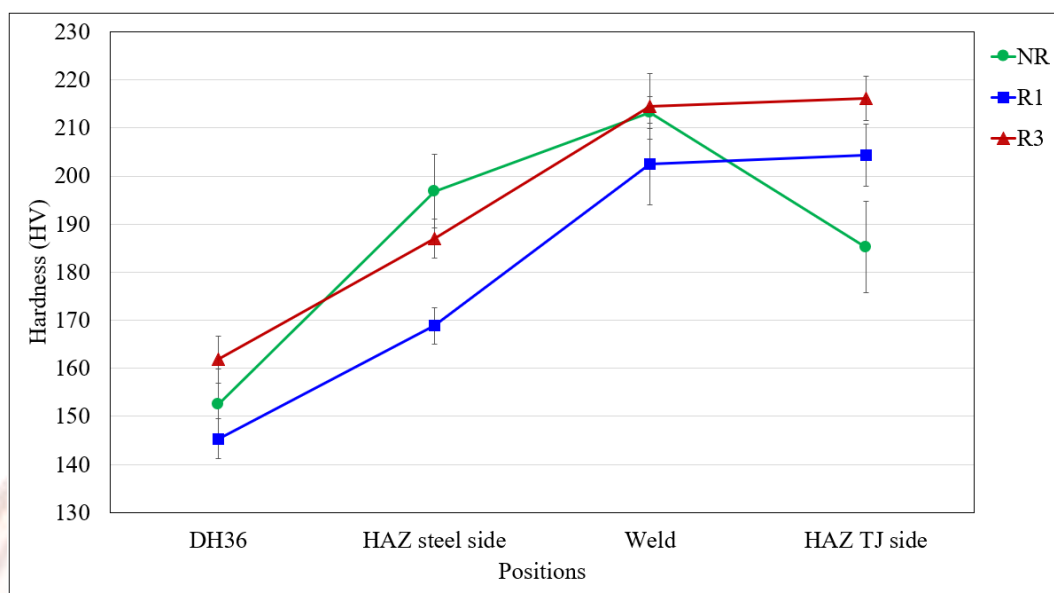
(ก)

(ข)

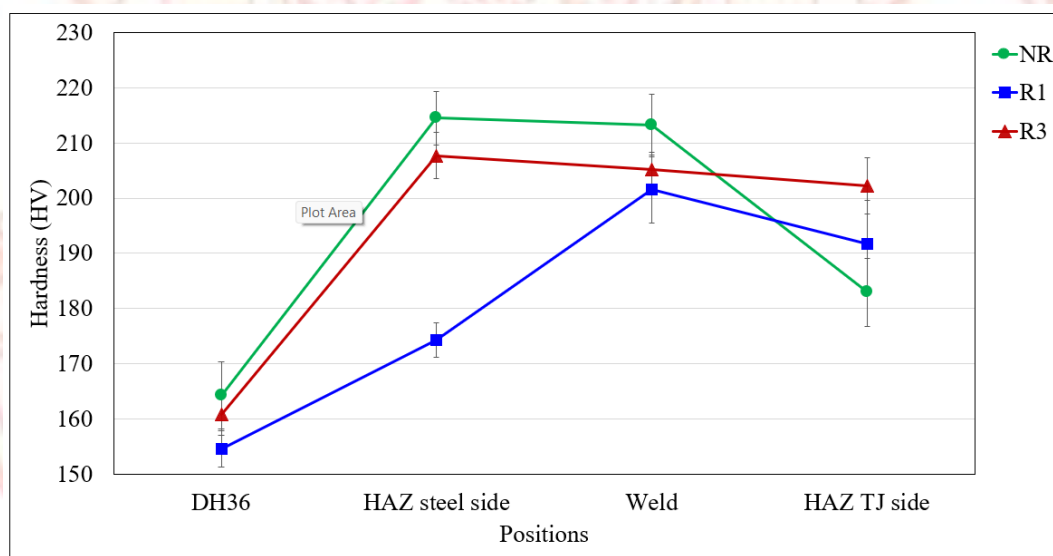


(ค)

ภาพที่ 4-26 ตำแหน่งสำหรับการทดสอบความแข็งวิกเกอร์สของ (ก) บริเวณผิวของแนวเชื่อม (Cover) (ข) ด้านรากของแนวเชื่อม (Root) ของชิ้นงานเชื่อม และ (ค) บริเวณ Transition joint



(ก)

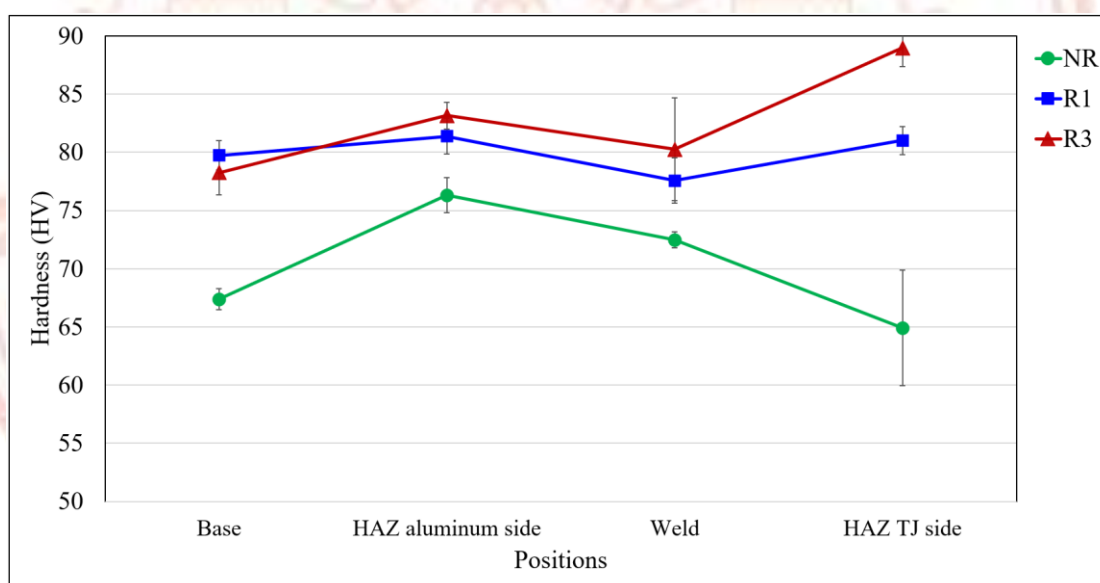


(ข)

ภาพที่ 4-27 ค่าความแข็งวิกเกอร์ของแนวเชื่อมเหล็กกล้าคาร์บอนบริเวณต่างๆ ที่
(ก) ผิวของแนวเชื่อม (Cover) และ (ข) ด้านรากของแนวเชื่อม (Root)

การแสดงผลการทดสอบค่าความแข็งแนวเชื่อมเหล็กกล้าคาร์บอนและอะลูมิเนียม จะใช้การเปรียบเทียบระหว่างชิ้นงาน NR R1 และ R3 โดยการเปรียบเทียบค่าระหว่างบริเวณวัสดุฐาน (Base) บริเวณผลกระทบร้อนของทางวัสดุ (HAZ Steel Side) และบริเวณผลกระทบร้อนของทาง TJ (HAZ TJ Side) และบริเวณเนื้อเชื่อม (Weld)

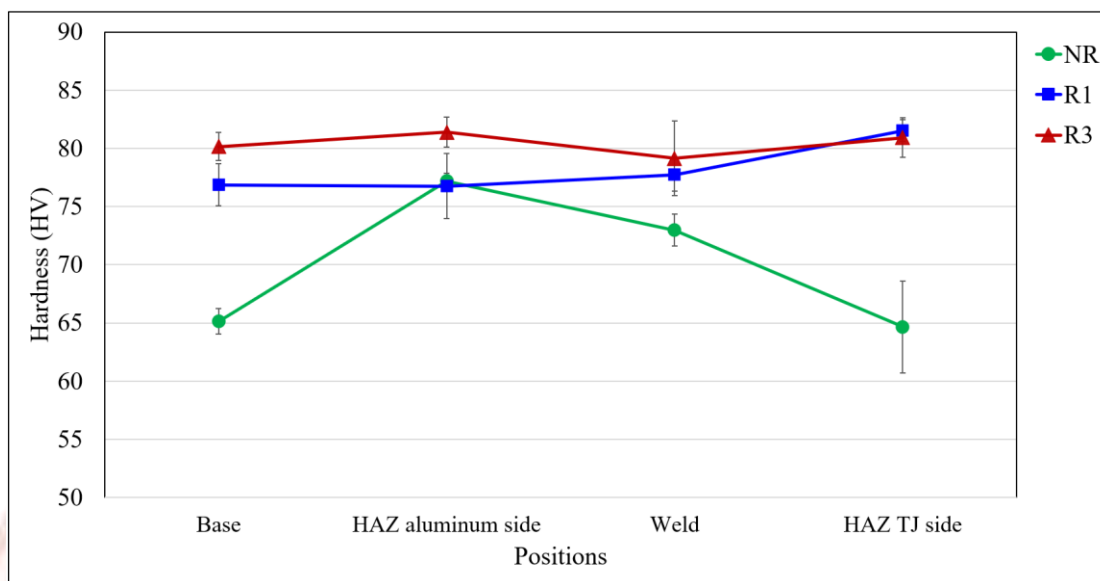
จากภาพที่ 4-27 การแสดงผลการทดสอบค่าความแข็งแนวเชื่อมเหล็กกล้าคาร์บอน พบว่าเมื่อพิจารณาโดยใช้ค่าความแข็งที่วัดฐานของทั้ง 3 ชั้นงาน (ประมาณ 145-165 HV) สำหรับอ้างอิง ค่าความแข็งที่เนื้อเชื่อมของทั้ง 3 ชั้นงาน ทั้งตำแหน่งผิวและด้านรากของแนวเชื่อมนั้นมีค่าที่สูงขึ้นแบบเกาะกลุ่มกันอยู่ที่ค่าประมาณ 200-215 HV ซึ่งหากเปรียบเทียบกับรูปถ่ายจุลภาคแล้วจะเห็นความสอดคล้องถึงรูปแบบโครงสร้าง Spheroidite Ferrite ที่พบในเนื้อเชื่อมของชั้นงาน R1 ซึ่งส่งผลให้ความเหนียวว่าเล็กน้อย สำหรับค่าความแข็งที่ HAZ Steel Side ทั้งตำแหน่งผิวและด้านรากของแนวเชื่อม พบว่าชั้นงาน NR มีค่าสูงที่สุด ซึ่งสอดคล้องกับการพบโครงสร้าง Bainite ในชั้นงาน NR เป็นผลมาจากการเย็นตัวที่มีความรวดเร็วปานกลาง ทำให้มีความแข็งที่สูง ในขณะที่ค่าความแข็งของ R3 ที่รองลงมา และ R1 ที่มีค่าน้อยสุด ที่สอดคล้องกับการกระจายตัวของโครงสร้างเพิร์ลไลต์ (Pearlite) ที่มีความแข็งแรงมากกว่า อย่างไรก็ตามผลการทดสอบค่าความแข็งที่ HAZ TJ Side นั้น พบว่าชั้นงาน R3 มีค่าสูงที่สุด และ ชั้นงาน NR มีค่าน้อยที่สุด ซึ่งให้ผลลัพธ์สลับกันจาก HAZ Steel Side การกระจายตัวของโครงสร้างเพิร์ลไลต์ (Pearlite) ในภาพโครงสร้างจุลภาคเช่นกัน



(ก)

ภาพที่ 4-28 ค่าความแข็งวิกเกอร์สของแนวเชื่อมอะลูมิเนียมบริเวณต่างๆ ที่

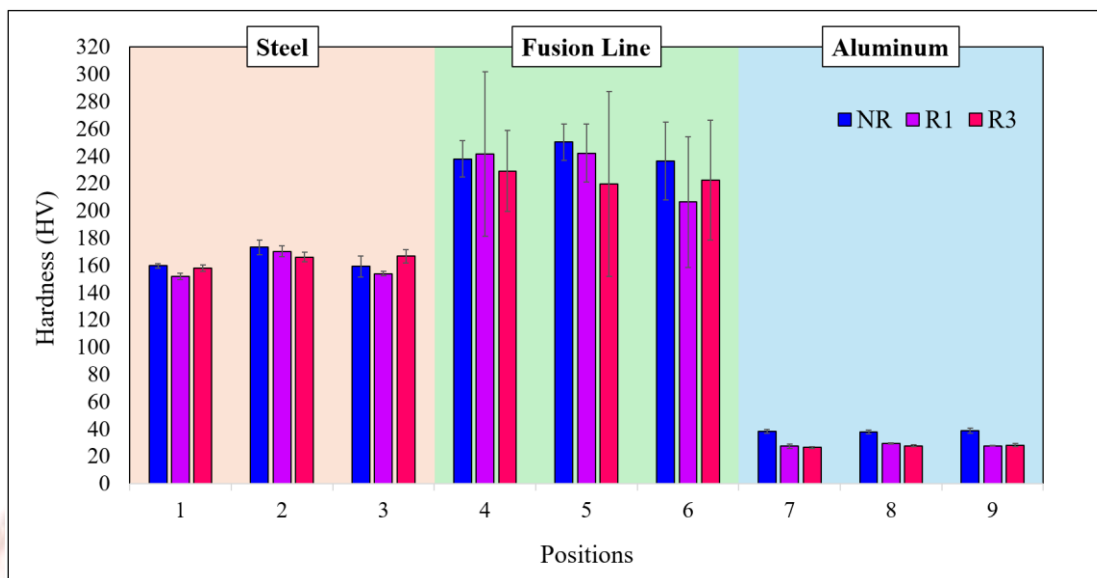
(ก) ผิวของแนวเชื่อม (cover) และ (ข) ด้านรากของแนวเชื่อม (root)



(ข)

ภาพที่ 4-28 (ต่อ)

จากภาพที่ 4-28 แสดงผลการทดสอบค่าความแข็งของชิ้นงานอะลูมิเนียม เมื่อเปรียบเทียบชิ้นงาน NR R1 และ R3 โดยในบริเวณเนื้อเชื่อมที่ตำแหน่งที่ 3 และ 7 ชิ้นงานทั้ง 3 ชิ้นมีค่าใกล้เคียงกันทั้งที่ส่วนผิว และที่ส่วนรากมีค่าในช่วง 72-83 HV ในบริเวณ HAZ ที่วัสดุฐานที่ตำแหน่งที่ 4 และ 6 มีค่าความแข็งทุกชิ้นใกล้เคียงกันอยู่ในช่วง 75-84 HV ส่วนที่ HAZ ในส่วนของ TJ ที่ตำแหน่งที่ 2 และ 8 ชิ้นงาน NR มีค่าความแข็งในช่วง 63-66 HV ชิ้นงาน R1 มีค่าความแข็งในช่วง 75-83 HV และชิ้นงาน R3 มีค่าความแข็งในช่วง 80-84 HV แต่มีค่าความแข็งที่ตำแหน่งที่ 2 สูงกว่าตำแหน่งอื่นอยู่ที่ประมาณ 95 HV ส่วนตำแหน่งที่ 5 ของส่วนราก ชิ้นงานทั้ง 3 ชิ้นมีค่าในช่วง 73-83 HV ในส่วนของวัสดุฐานที่ตำแหน่ง 1 5 9 ของผิว และ 5 ของราก ชิ้นงานทั้ง 3 มีค่าใกล้เคียงกันในช่วง 60-80 HV



ภาพที่ 4-29 ค่าความแข็งวิเคอร์สของ Transition joint

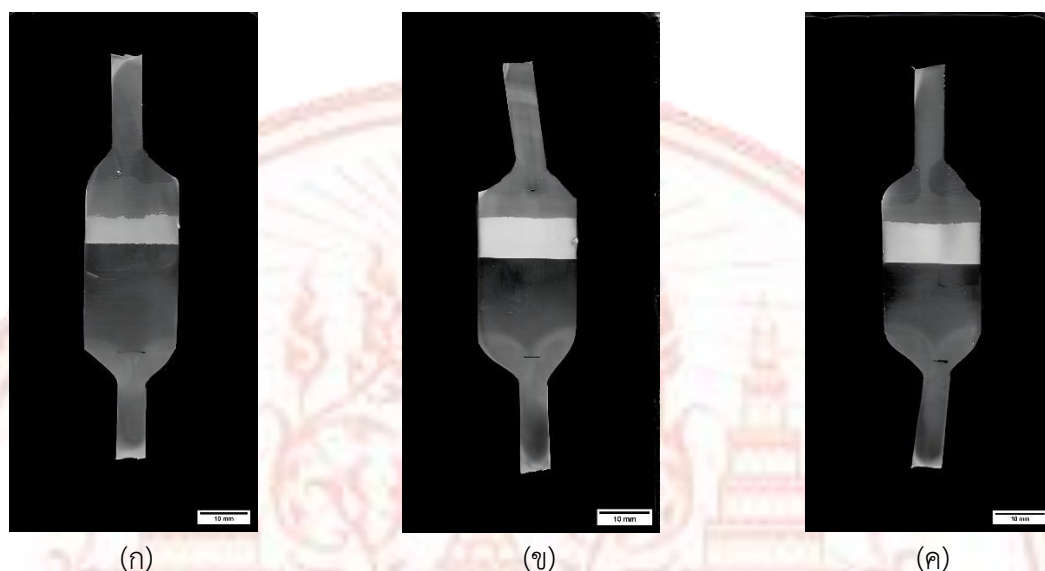
จากภาพที่ 4-29 แสดงผลการทดสอบค่าความแข็งของ TJ โดยในบริเวณเหล็กกล้าคาร์บอน ที่ตำแหน่งที่ 1 2 และ 3 ขึ้นงานทั้ง 3 ขึ้นมีค่าใกล้เคียงกันโดยมีค่าในช่วง 151-173 HV ที่ตำแหน่งที่ 4 5 และ 6 คือบริเวณเส้นรอยต่อระหว่างเหล็กกล้าคาร์บอนและอะลูมิเนียม มีค่าความแข็งในช่วง 220-250 HV ยกเว้นชิ้นงาน R1 ที่ตำแหน่ง 6 มีค่า 206 HV ส่วนบริเวณอะลูมิเนียมที่ตำแหน่ง 7 8 และ 9 ขึ้นงานทั้ง 3 ขึ้นมีค่าใกล้เคียงกันโดยมีค่าในช่วง 26-38 HV

4.2.3 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างมหภาค และจุลภาค Macro and Microstructure Analysis)

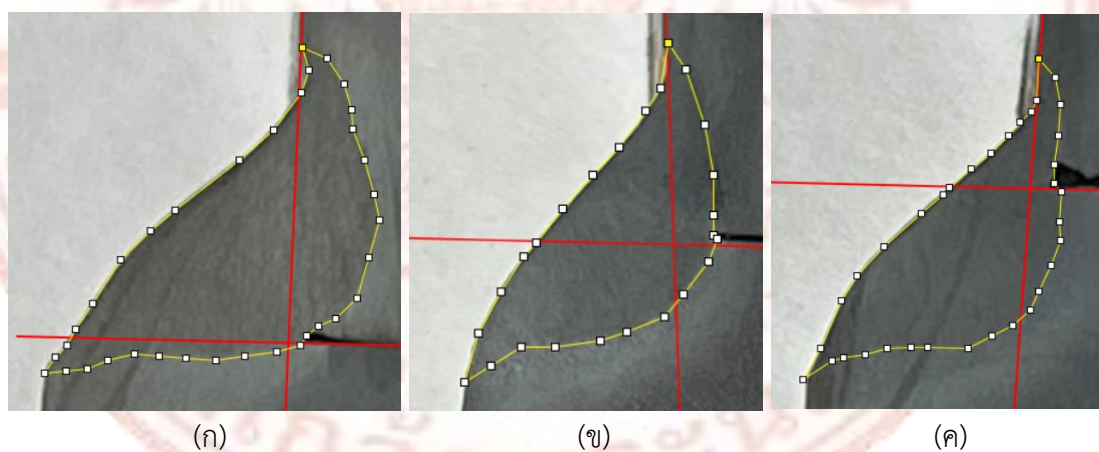
4.2.3.1 ผลตรวจสอบโครงสร้างมหภาค (Macrostructure)

ผลการตรวจสอบโครงสร้างมหภาค (Macrostructure) ชิ้นงาน NR R1 และ R3 พบว่าด้านเหล็กกล้าคาร์บอนมีการหลอมละลายประสานเข้ากับวัสดุฐานได้เป็นอย่างดีและสามารถสังเกตเห็นบริเวณกระทบจากความร้อน (HAZ) ได้ชัดเจน แต่จะเห็นช่องว่างรอยต่อ (Joint Gap) และไม่มีข้อบกพร่องภายในเนื้อของแนวเชื่อม ทางด้านอะลูมิเนียมนั้นมีการหลอมละลายได้ดีเช่นกัน ชิ้นงาน R1 สามารถเห็นช่องว่างรอยต่อเช่นกัน และพบข้อบกพร่องเป็นรูพรุน (Porosity) ภายในบริเวณเนื้อของรอยเชื่อม ดังที่แสดงในภาพที่ 4-30 อัตราการเจือจาง (Dilution) ได้ถูกคำนวณโดยการวัดพื้นที่ด้วยโปรแกรม ImageJ โดยแนวเชื่อมเหล็กกล้าคาร์บอนของชิ้นงานเชื่อม NR อยู่ที่อัตราการเจือจางประมาณ ร้อยละ 40 ชิ้นงานเชื่อม R1 อยู่ที่ประมาณ ร้อยละ 68 และชิ้นงานเชื่อม R3 อยู่ที่ประมาณ ร้อยละ 89 ซึ่งชี้ให้เห็นว่า จำนวนในการเชื่อมหรือการให้ความร้อนซ้ำนั้นมีผลทำให้แนวโน้มของอัตราการเจือจางในแนวเชื่อมเพิ่มขึ้นโดยเฉพาะบริเวณพื้นที่ของ TJ ดังแสดงในภาพที่ 4-31 ในขณะที่

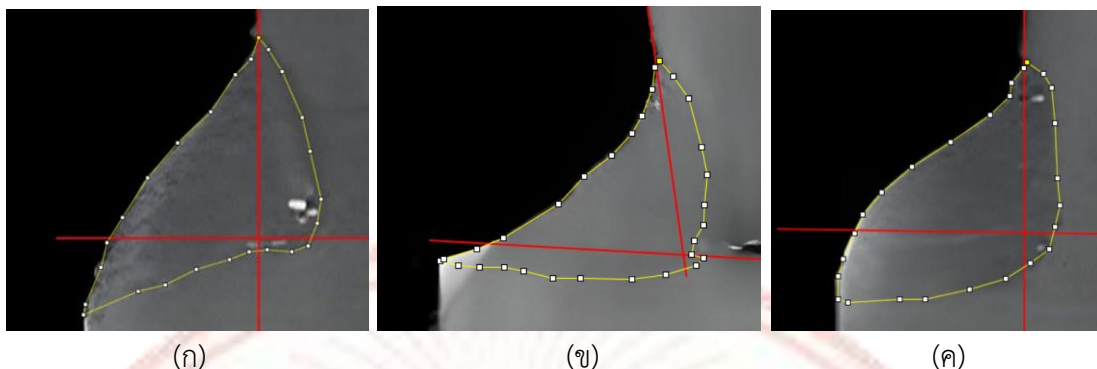
แนวเชื่อมอะลูมิเนียมของชิ้นงานทั้ง 3 ชิ้นซึ่งมีการเชื่อมครั้งเดียวนั้นมีค่าใกล้เคียงกันที่ประมาณ ร้อยละ 47-57 ดังแสดงในภาพที่ 4-32



ภาพที่ 4-30 ภาพถ่ายโครงสร้างมหภาคของแนวเชื่อมชิ้นงานทดลอง (ก) NR (ข) R1 และ (ค) R3



ภาพที่ 4-31 อัตราการเจือจางของแนวเชื่อมเหล็กกล้าคาร์บอนของชิ้นงานทดลอง
(ก) NR (ข) R1 และ (ค) R3



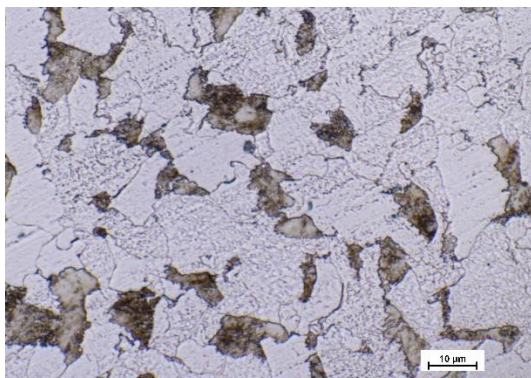
ภาพที่ 4-32 อัตราการเงาของแนวเชื่อมอะลูมิเนียมของชิ้นงานทดลอง

(ก) NR (ข) R1 และ (ค) R3

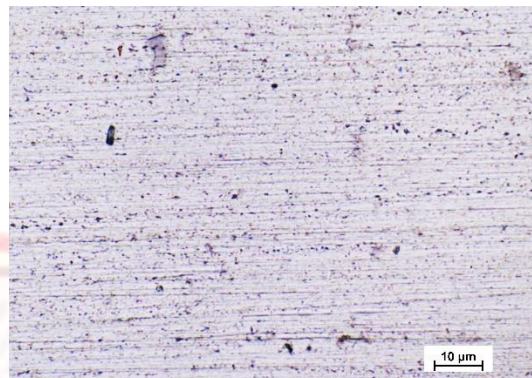
4.2.3.2 ผลตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค (Micro structure)

การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคได้มีการใช้เทคนิคการวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์ชนิดแสง (Optical Microscope, OM) การวิเคราะห์โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) และการวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุด้วยเทคนิค Energy Dispersive Spectroscopy (EDS) ซึ่งได้ผลลัพธ์การตรวจสอบดังนี้

ผลการวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์ชนิดแสง (Optical Microscope, OM) ภาพที่ 4-33 (ก) ได้แสดงภาพโครงสร้างจุลภาคของพื้นที่วัสดุฐาน (Base Metal) ที่ไม่ได้รับผลกระทบจากความร้อนของการเชื่อมของเหล็กกล้าคาร์บอน EH36 แสดงโครงสร้างเพอริโกนอลเฟอร์ไรต์ (Polygonal Ferrite, PF) และโครงสร้างเพิร์ลไลต์ (Pearlite, P) โดยมีพื้นที่การกระจายตัวประมาณ 20% ของพื้นที่โดยรวม ภาพที่ 4-33(ข) ได้แสดงวัสดุฐานของอะลูมิเนียม 5083 แสดงโครงสร้างลักษณะที่ยืดยาว (Elongated Grains, EG) เรียงตัวในแนวเดียวกัน และการกระจายตัวของเฟสสารประกอบ (Compound Phase, CP) ที่มีความละเอียด ในขณะที่ภาพที่ 4-33(ค) แสดงภาพ TJ พบรูพรุนบริเวณรอยต่อ (Interface Zone) และบริเวณใกล้เคียง



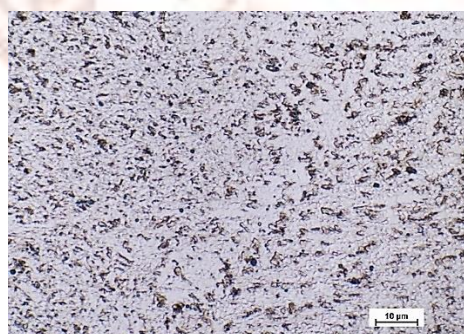
(ก)



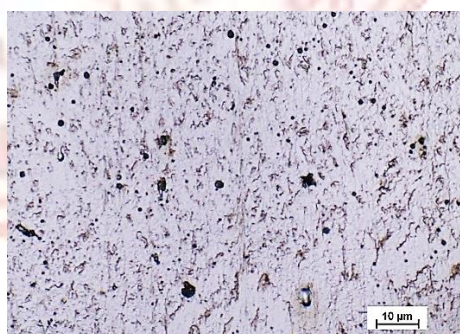
(ข)

ภาพที่ 4-33 ภาพถ่าย OM ของวัสดุฐานของ (ก) เหล็กกล้าคาร์บอน EH36 และ (ข) อะลูมิเนียม 5083

ผลการวิเคราะห์บริเวณเนื้อเชื่อมของเหล็กกล้าคาร์บอน EH36 แสดงดังภาพที่ 4-34 โดยชิ้นงาน NR และ R3 พบโครงสร้าง Spheroidite Ferrite (SF) สลับกับโครงสร้างแบบ Widmanstätten Ferrite (WF) ซึ่งเป็นผลมาจากการเย็นตัวหลังเชื่อมด้วยอัตราเร็วปานกลาง ทำให้เอื้อต่อการเกิดเฟอไรต์แบบ Widmanstätten และการรวมตัวของคาร์ไบด์ในรูปแบบ Spheroidite ส่งผลให้แนวเชื่อมมีความสมดุลระหว่างความแข็งแรงและความเหนียว อย่างไรก็ตามการกระจายตัวของ Widmanstätten Ferrite อาจทำให้เกิดความเปราะเพิ่มขึ้นในแนวเชื่อม สำหรับชิ้นงาน R1 พบโครงสร้างที่ประกอบด้วย เฟอไรต์ทั่วไปและ Spheroidite Ferrite ในปริมาณใกล้เคียงกัน ซึ่งอาจส่งผลให้มีความเหนียวสูงกว่าชิ้นงาน NR และ R3 อย่างไรก็ตามพบว่ามีรูพรุน (Porosity, Po) กระจายตัวอยู่มากในทั้งชิ้นงาน R1 และ R3 ซึ่งอาจเกิดจากก๊าซที่ถูกดักจับในระหว่างกระบวนการเชื่อมและไม่สามารถระบายออกได้ทันก่อนที่โลหะจะเย็นตัวและแข็งตัว

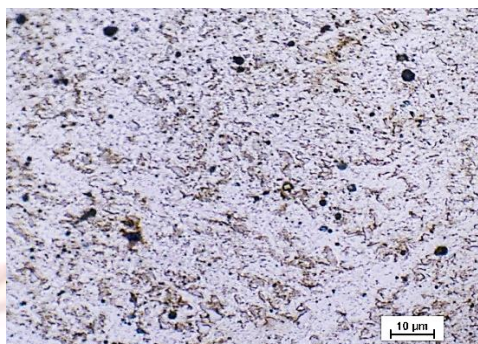


(ก)



(ข)

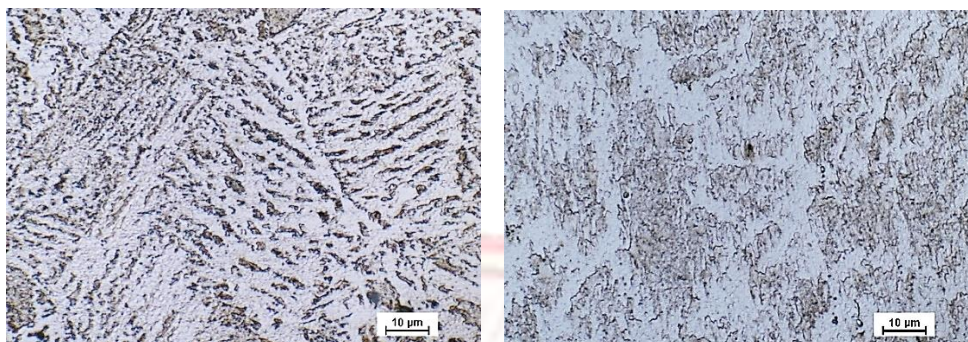
ภาพที่ 4-34 ภาพถ่าย OM ภายในเนื้อเชื่อมเหล็กกล้าคาร์บอน EH36 ของชิ้นงาน (ก) NR (ข) R1 และ (ค) R3



(ค)

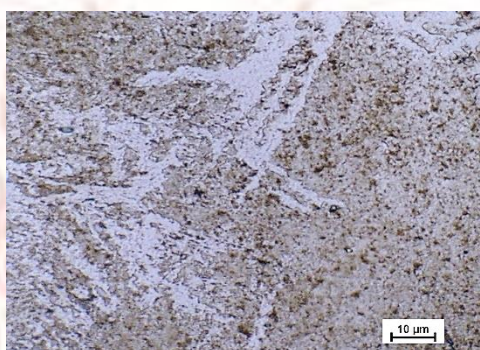
ภาพที่ 4-34 (ต่อ)

ผลการวิเคราะห์บริเวณ Heat-Affected Zone (HAZ) ที่เกิดขึ้นที่แผ่นเหล็กกล้าคาร์บอน EH36 ดังที่แสดงในภาพที่ 4-35 พบว่า ชิ้นงาน NR ประกอบด้วยโครงสร้างเบไนต์ (Bainite, B) และเพิร์ลไลต์ (Pearlite, P) โดยเบไนต์เป็นโครงสร้างที่เกิดจากการเย็นตัวในอัตราปานกลาง ทำให้เกิดการจับเรียงตัวของซีเมนไทต์ (Cementite) ในลักษณะเป็นชั้นๆ แทรกอยู่ในโครงสร้างเฟอร์ไรต์ (Ferrite) ซึ่งช่วยเพิ่มความแข็งแรงของเนื้อวัสดุ แต่ยังคงมีความเหนียวพอสมควร ในขณะที่เพิร์ลไลต์ที่พบร่วมกันมีผลต่อการเพิ่มความแข็งแรงของโครงสร้างสำหรับ ชิ้นงาน R1 พบโครงสร้างหลักเป็นเพิร์ลไลต์ และเฟอร์ไรต์ในอัตราส่วนประมาณ 60:40 ซึ่งบ่งชี้ว่าภายหลังจากได้รับความร้อนจากการเชื่อม มีการเกิดการกระจายตัวของซีเมนไทต์ที่มากขึ้นเมื่อเทียบกับ NR โครงสร้างเพิร์ลไลต์ที่เพิ่มขึ้นนี้แสดงให้เห็นว่า HAZ ของชิ้นงาน R1 ได้รับผลกระทบจากความร้อนที่สูงขึ้น ส่งผลให้เฟสออสเทนไนต์ (Austenite) ที่เกิดขึ้นระหว่างกระบวนการให้ความร้อนถูกเปลี่ยนเป็นเพิร์ลไลต์ในปริมาณที่มากขึ้น หลังจากเย็นตัว เช่นเดียวกันกับชิ้นงาน R3 ที่มีการเพิ่มขึ้นของปริมาณเพิร์ลไลต์ (Pearlite) และการปรากฏของ Widmanstätten Ferrite (WF) ซึ่งคาดว่าเกิดจากอัตราการเย็นตัวที่สูงกว่าชิ้นงานอื่น แผ่ขยายออกมาจากบริเวณขอบเกรน ซึ่งเป็นตัวบ่งชี้ว่าเขต HAZ ใน R3 ได้รับผลกระทบจากความร้อนสูงและมีอัตราการเย็นตัวที่เร็วขึ้นกว่า NR และ R1 นอกจากนี้ ปริมาณเพิร์ลไลต์ใน R3 มีค่าสูงขึ้นอย่างมีนัยสำคัญเมื่อเทียบกับชิ้นงานอื่น (อัตราส่วนประมาณ 80:20) ซึ่งอาจเป็นผลมาจากการเชื่อมซ่อม 3 รอบ ทำให้โครงสร้างได้รับความร้อนซ้ำหลายครั้ง ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนเฟสไปเป็นออสเทนไนต์มากขึ้นและเย็นตัวลงเป็นเพิร์ลไลต์ในปริมาณที่มากขึ้น



(ก)

(ข)

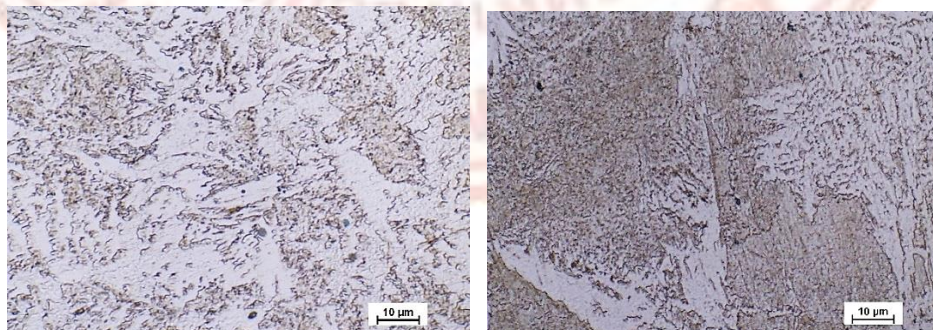


(ค)

ภาพที่ 4-35 ภาพถ่าย OM ภายใน HAZ ที่แผ่นเหล็กกล้าคาร์บอน EH36 ของชิ้นงาน

(ก) NR (ข) R1 และ (ค) R3

ที่บริเวณผลกระทบทางความร้อน (HAZ) ที่เกิดขึ้นที่ TJ ส่วนบริเวณเหล็กกล้าคาร์บอน ผลการวิเคราะห์ที่ชิ้นงานทั้ง 3 พบว่ามีโครงสร้างเพิร์ลไลต์ (Pearlite) สลับกับโครงสร้างสเฟอรอยด์ไดต์ (Spheroidite) แต่ยังสามารถพบโครงสร้างเฟอร์ไรต์แบบวิดมันสแตทเทน (Widmanstätten ferrite) ได้ ชิ้นงาน R1 นอกจากนี้ยังสามารถตรวจพบรูพรุนขนาดเล็กได้เล็กน้อย ดังที่แสดงในภาพที่ 4-36

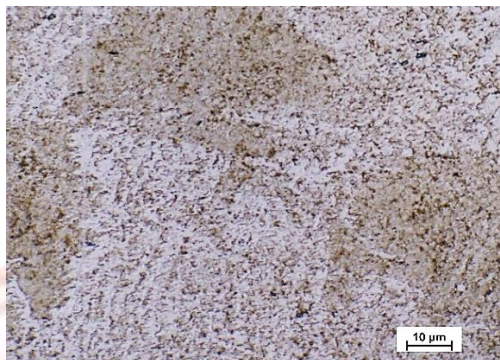


(ก)

(ข)

ภาพที่ 4-36 ภาพถ่าย OM ภายใน HAZ ที่ TJ ของชิ้นงาน (ก) NR (ข) R1

และ (ค) R3



(ค)

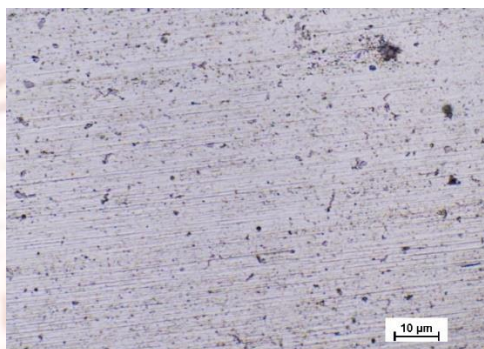
ภาพที่ 4-36 (ต่อ)

ที่บริเวณผลกระทบทางความร้อน (HAZ) ที่เกิดขึ้นที่ TJ ส่วนบริเวณเหล็กกล้าคาร์บอน ผลการวิเคราะห์ที่ชิ้นงานทั้ง 3 พบว่ามีแนวโน้มของการเกิดโครงสร้างเพิร์ลไลต์ (Pearlite) ที่มากขึ้นตามจำนวนครั้งในการเชื่อมซ่อมตามลำดับเช่นเดียวกับบริเวณ HAZ ที่แผ่นเหล็กกล้าคาร์บอน EH36 ข้อแตกต่างอย่างการปรากฏของโครงสร้างสเฟอรอยด์ไดต์ (Spheroidite) อาจเป็นผลจากอัตราการเย็นตัวที่ช้ากว่านั้นเกิดขึ้นได้จากการถูกให้ความร้อนก่อนการเชื่อม TJ ซึ่งรวมถึงการเชื่อมด้านอะลูมิเนียม ในชิ้นงาน R1 พบ Widmanstätten Ferrite ซึ่งแผ่ขยายออกจากขอบเกรน ซึ่งบ่งชี้ว่าอัตราการเย็นตัวในบริเวณ HAZ ของ R1 สูงกว่าชิ้นงานอื่น นอกจากนี้ยังสามารถพบ รูพรุนขนาดเล็ก (Porosity) ได้ในทุกชิ้นงาน โดยเฉพาะใน R3 ดังที่แสดงในภาพที่ 4-36

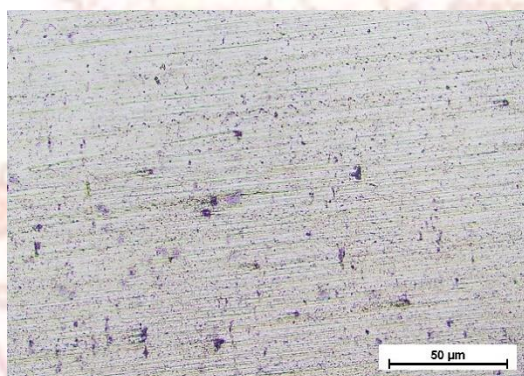
จากภาพที่ 4-37 แสดงให้เห็นโครงสร้างภายในเนื้อเชื่อมของอะลูมิเนียม 5083 ซึ่งมี เฟสสารประกอบ (Compound Phase, CP) กระจายตัวอยู่ประมาณ 2.6% ของพื้นที่ และพบว่ามี รูพรุนขนาดเล็ก (Porosity, Po) กระจายตัวอยู่เป็นจำนวนมาก ซึ่งเป็นลักษณะทั่วไปที่พบในกระบวนการเชื่อมอะลูมิเนียม สาเหตุหลักของการเกิดโครงสร้างนี้มาจากกระบวนการแข็งตัวของโลหะหลอมเหลวที่เกิดการแยกตัวของธาตุผสม (Segregation) และการสะสมตัวของสารประกอบระหว่างเฟส เช่น Al-Mg หรือ Al-Fe-Si ที่เกิดขึ้นระหว่างการเย็นตัวของรอยเชื่อม นอกจากนี้ รูพรุนที่พบอาจเกิดจากการดักจับไฮโดรเจนในระหว่างการเชื่อม ซึ่งเป็นปัญหาที่พบได้บ่อยในอะลูมิเนียม

เมื่อวิเคราะห์โครงสร้างในเขตผลกระทบทางความร้อน (HAZ) ตามภาพที่ 4-38 พบว่า ที่แผ่นอะลูมิเนียม 5083 มีการกระจายตัวของ Compound Phase อยู่ที่ประมาณ 4.5% ของพื้นที่ ซึ่งมากกว่าที่พบในเนื้อเชื่อม ในขณะที่ ที่บริเวณ TJ (Transition Joint) พบ Compound Phase เพียง 2% ของพื้นที่ และยังพบว่ามี รูพรุนขนาดเล็กกระจายตัวอยู่เป็นจำนวนมากในทั้งสองบริเวณ การที่ HAZ ของแผ่นอะลูมิเนียม 5083 มีปริมาณเฟสสารประกอบมากกว่าบริเวณ TJ อาจเกิดจาก อุณหภูมิ

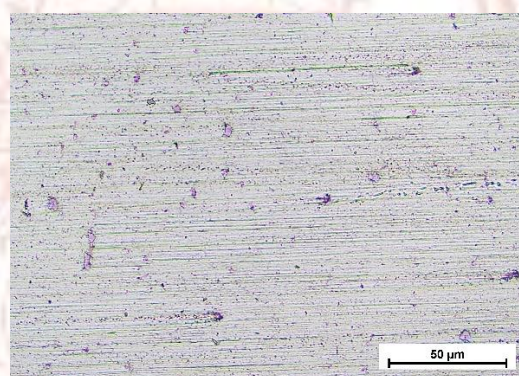
สูงในระหว่างการเชื่อมส่งผลให้เกิดการตกผลึกของสารประกอบในลักษณะที่ต่างกัน โดยในบริเวณแผ่นอะลูมิเนียม อาจมีการกระจายตัวของสารประกอบที่ตกผลึกใหม่มากกว่า เนื่องจากได้รับความร้อนโดยตรงและมีโอกาสเกิดการเปลี่ยนแปลงของเฟสมากกว่า



ภาพที่ 4-37 ภาพถ่าย OM ภายในเนื้อเชื่อมอะลูมิเนียม 5083
หมายเหตุ CP= Compound Phase Po=Pores



(ก)



(ข)

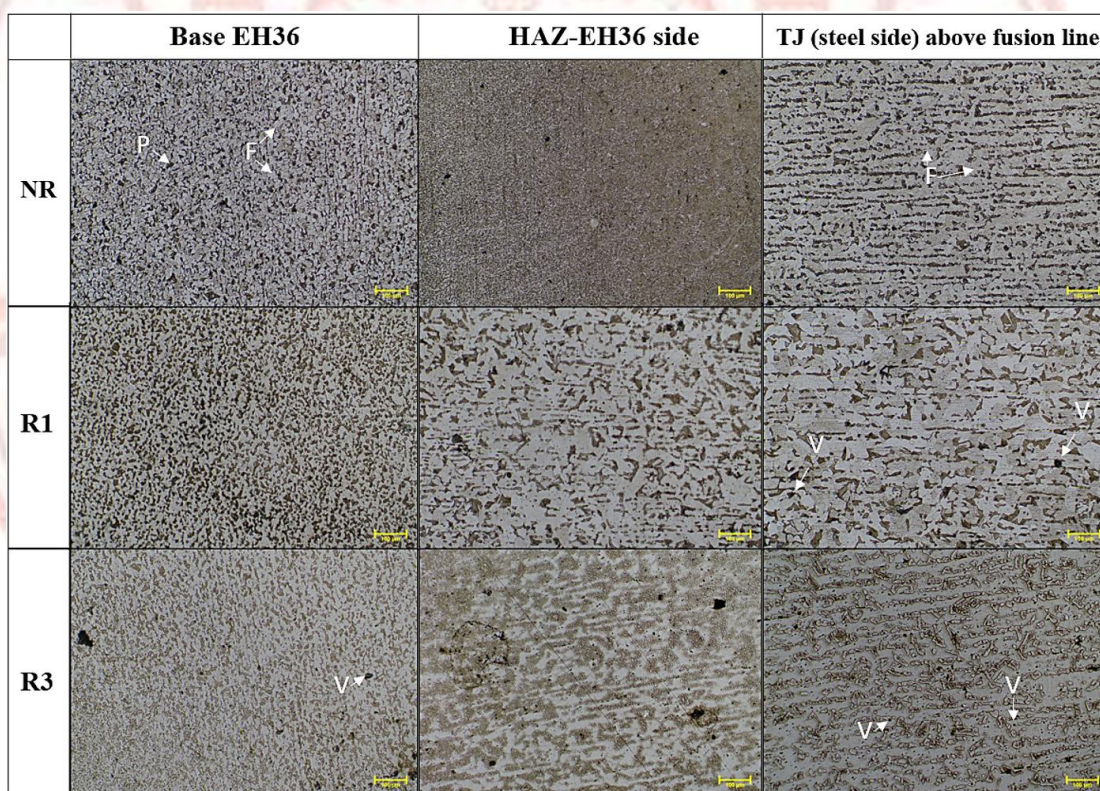
ภาพที่ 4-38 ภาพถ่าย OM ภายใน HAZ ของ (ก) อะลูมิเนียม 5083 (ข) TJ
หมายเหตุ CP= Compound Phase Po=Pores

4.2.3.3 ผลกระทบของจำนวนการเชื่อมต่อการก่อสร้างจุลภาคและความแข็งของชิ้นงาน

จากการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคด้วย OM ใน 3 ตำแหน่งหลักของชิ้นงานเชื่อม NR R1 และ R3 คือ 1) เนื้อโลหะฐาน (Base Metal, EH36) 2) พื้นที่ได้รับผลกระทบจากความร้อน (HAZ) ด้าน EH36 และ 3) ฟองเหล็กของข้อต่อไบเมทัล (TJ – Steel Side)

โดยพบว่า EH36 ของทุกชิ้นงานยังคงมีโครงสร้างหลักเป็น โครงสร้างละเอียดแบบเฟอร์ไรต์-เพิร์ลไลท์ ที่มีลักษณะสม่ำเสมอ โดย NR มีเกรนกลมเล็ก เรียงตัวสม่ำเสมอ เป็นลักษณะทั่วไปของ

เหล็กกล้า R1 และ R3 มีการการขยายตัวของเกรนเล็กน้อย แสดงว่าบริเวณนี้ไม่ได้รับผลกระทบจากการเชื่อมหรือการซ่อมมากนัก ซึ่งแตกต่างจาก HAZ ฝั่ง EH36 พบการเปลี่ยนแปลงชัดเจนเมื่อจำนวนการซ่อมเพิ่มขึ้น โดย NR เริ่มมีเกรนขยายตัวใกล้แนวหลอมละลาย ในขณะที่ R1 เกรนโตขึ้นชัดเจนบางส่วนเริ่มเกิดโครงสร้างไม่สม่ำเสมอ และ R3 มีการเปลี่ยนแปลงอย่างชัดเจน แสดงถึงการเกิด Over-Tempering และบางจุดพบ Voids ขนาดเล็ก นอกจากนี้บริเวณข้อต่อไบเมทัล (TJ) – ฝั่งเหล็กเนื้อเส้นหลอมละลาย (Steel/Aluminium) พบว่ามีการเสื่อมสภาพเพิ่มขึ้นตามรอบการซ่อม โดย NR มีโครงสร้างละเอียดแบบเฟอร์ไรต์ แนวเรียงตัวดี ส่วน R1 โครงสร้างชัดเจนและเริ่มยืดออกเล็กน้อย เกิดจากการเรียงตัวใหม่จากการให้ความร้อน ในขณะที่ R3 พบโครงสร้างไม่สม่ำเสมอ มีรอยแตกเล็กๆ และแนวขอบเกรนและขอบเกรนที่ไม่สม่ำเสมอ ซึ่งบ่งบอกถึงการเริ่มต้นของความล้าหรือพฤติกรรมเปราะซึ่งอาจส่งผลต่อความแข็งแรงในระยะยาว



ภาพที่ 4-39 โครงสร้างจุลภาคของบริเวณต่างๆ สำหรับการเชื่อมซ่อมแซมที่แตกต่างกันไม่มีการซ่อมแซม (NR) การซ่อมแซมหนึ่งครั้ง (R1) และการซ่อมแซมสามครั้ง (R3)

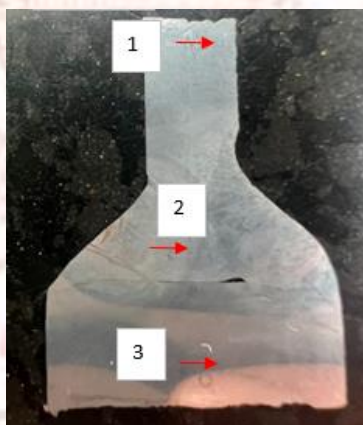
ผลการทดสอบค่าความแข็งตามบริเวณที่ถ่ายภาพโครงสร้างก่อนหน้า พบว่าชิ้นงาน NR มีค่าความแข็งบริเวณ Base Metal (EH36) อยู่ในช่วง 158–177 HV ซึ่งถือว่าอยู่ในเกณฑ์ปกติ โดยบริเวณ HAZ ด้านเหล็กมีค่าความแข็งสูงขึ้นในบางจุด โดยเฉพาะค่าที่ 224.8 HV บ่งบอกถึงการเกิด Work

Hardening เล็กน้อยใกล้แนวเชื่อม และบริเวณ TJ (Steel Side) มีค่าความแข็งลดลงมาอยู่ในช่วง 147–167 HV สะท้อนถึงการสูญเสียความแข็งบางส่วนจากผลของความร้อน

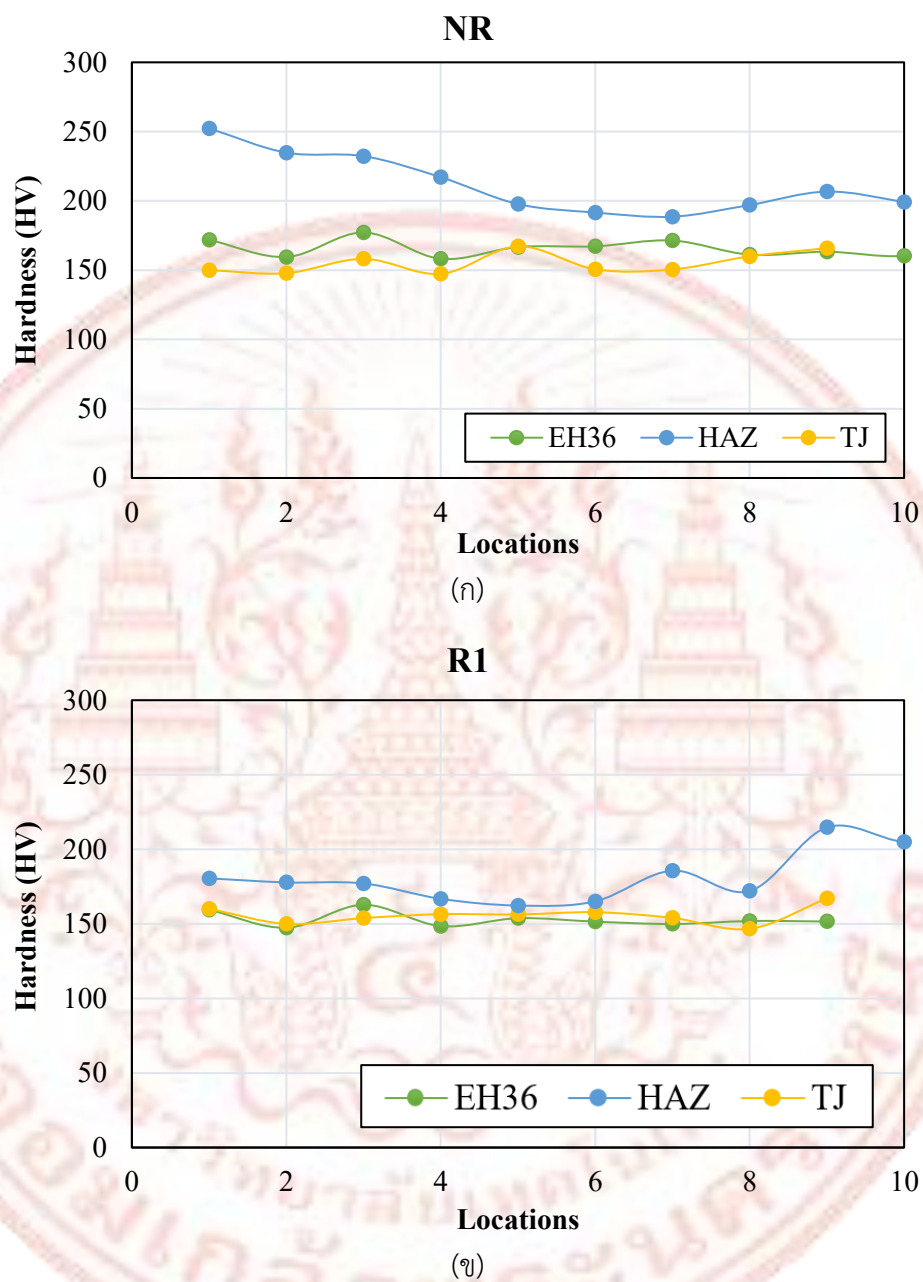
ชิ้นงาน R1 base metal ยังคงความแข็งใกล้เคียง NR แต่ลดลงเล็กน้อย (147–162 HV) ค่าความแข็งเฉลี่ยใน HAZ ด้านเหล็กลดลงจาก NR แต่ยังมีบางจุดแข็งกว่า (~214.7 HV) แสดงถึงการมีผลกระทบจาก Thermal Cycle บางส่วนจากการเชื่อม ส่วน TJ มีค่าความแข็งค่อนข้างคงที่ (~146–157 HV) ไม่พบจุดที่อ่อนหรือแข็งผิดปกติ

ชิ้นงาน R3 ความแข็งลดลงอย่างชัดเจนในทุกบริเวณ โดยเฉพาะ Base และ HAZ แสดงถึงผลกระทบสะสมของความร้อนจากการเชื่อมซ้ำ HAZ แสดงค่าความแข็งที่สูงผิดปกติในบางจุด เช่น 225.5 และ 245.9 HV ซึ่งอาจเกิดจากการตกผลึกใหม่ (Recrystallization) ไม่สมบูรณ์ หรือการสะสมความเครียดจากการเชื่อมหลายรอบ โดย TJ มีแนวโน้มความแข็งลดลง และกระจายตัวไม่สม่ำเสมอ อาจเกิดจากความแปรปรวนของโครงสร้างโลหะผสมในรอยต่อ

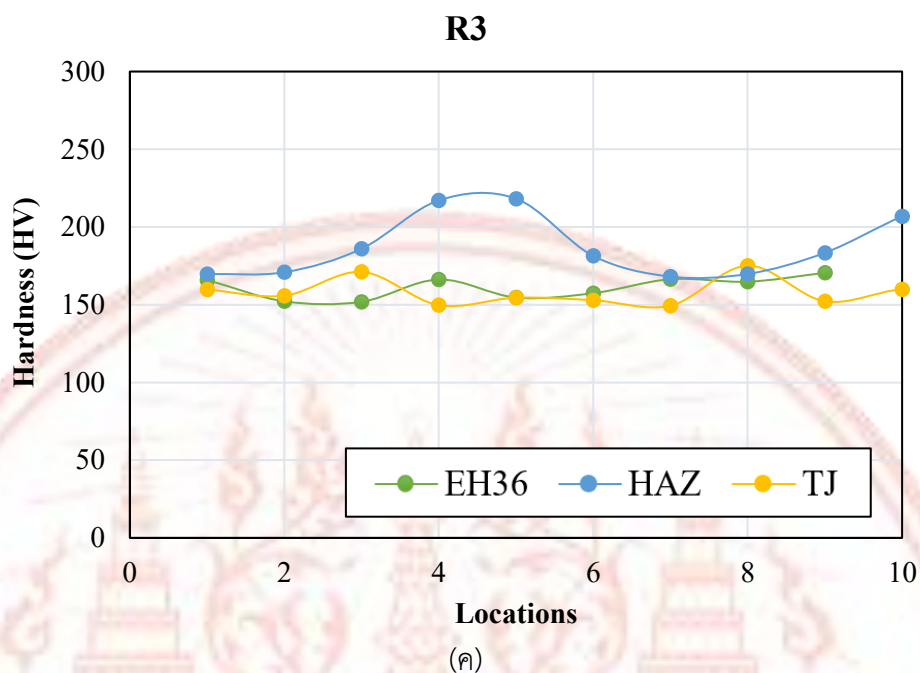
โดยรวมพบว่าการเชื่อม 1 ครั้ง (R1) ส่งผลให้โครงสร้างยังคงค่าความแข็งไว้ในเกณฑ์ยอมรับได้ แต่เมื่อเชื่อมถึง 3 ครั้ง (R3) จะเกิดการเสื่อมสภาพของโครงสร้างทางกลและความแข็ง โดยเฉพาะใน HAZ และ TJ ที่อาจสะสมความเครียดและสร้างความไม่สม่ำเสมอในโครงสร้าง ส่งผลต่อสมรรถนะโดยรวมของรอยเชื่อม



ภาพที่ 4-40 Test Locations



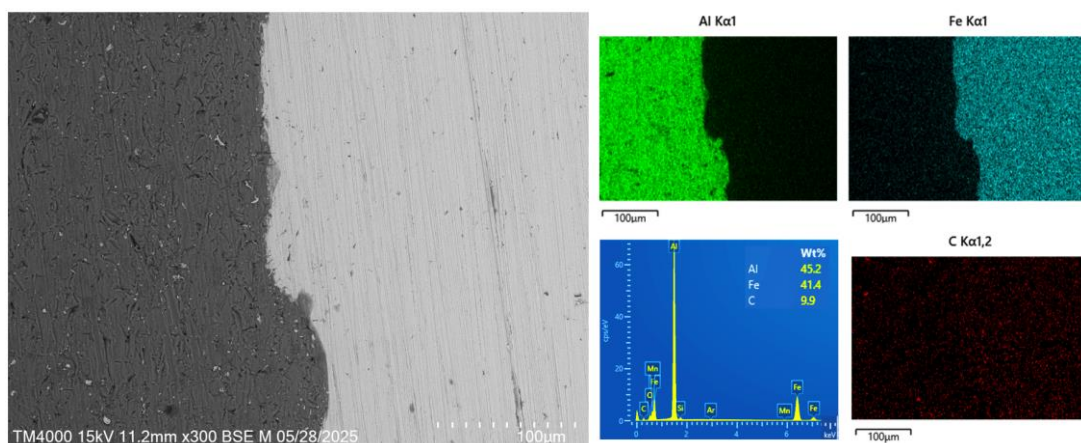
ภาพที่ 4-41 ค่าความแข็งของชิ้นงานที่ (ก) ไม่มีการซ่อมแซม (NR) (ข) การซ่อมแซมหนึ่งครั้ง (R1) และ (ค) การซ่อมแซมสามครั้ง (R3)



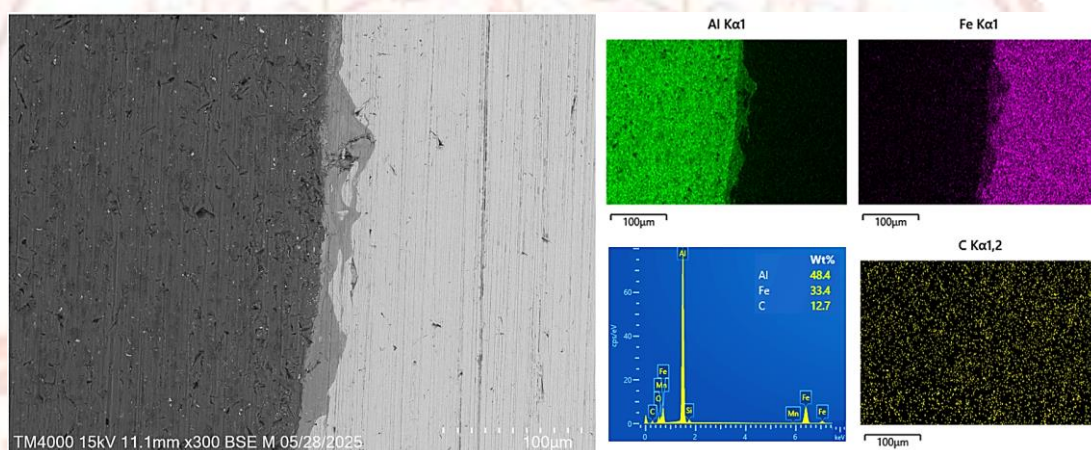
ภาพที่ 4-41 (ต่อ)

4.2.3.4 การวิเคราะห์พื้นผิวรอยแตกและการกระจายธาตุ (Fracture Surface and EDS Mapping)

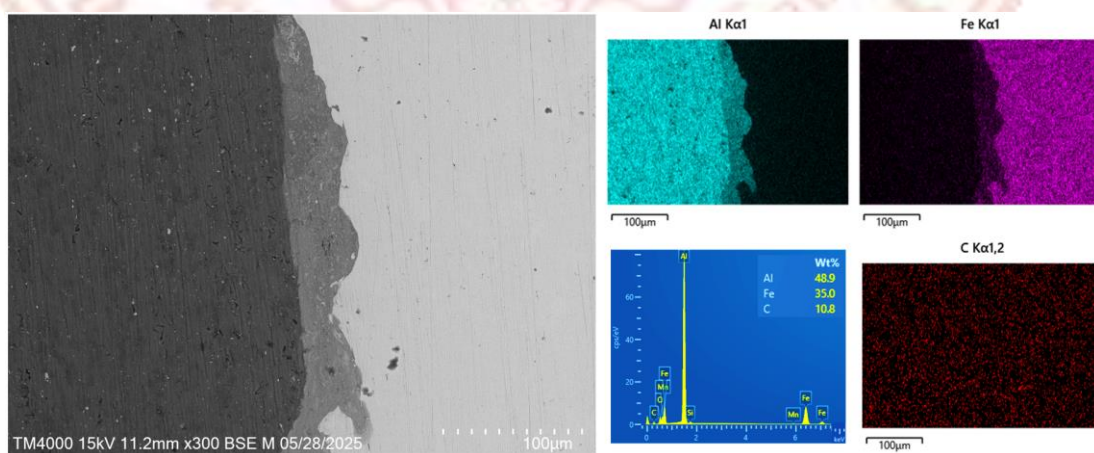
เพื่อศึกษาเชิงลึกถึงพฤติกรรมของธาตุและลักษณะการแตกหักในบริเวณรอยเชื่อมของ Bimetallic TJ จึงได้ทำการวิเคราะห์ด้วย SEM และ EDS Mapping ดังแสดงในภาพที่ 4-42 ถึง 4-47 ภาพที่ 4-42 แสดงภาพบริเวณรอยต่อ (Interface Zone) ของโลหะสองชนิด (Al และ Fe) ก่อนทำการเชื่อมซ่อม โดยพบว่าขอบเขตการผสมผสานของโลหะทั้งสองยังชัดเจน และการกระจายตัวของธาตุ Al และ Fe ยังแยกกันอยู่ อย่างไรก็ตาม ในภาพที่ 4-43 และ 4-44 แสดงการเกิดชั้นสารประกอบระหว่างโลหะ (Intermetallic) โดยพบว่ามีแนวโน้มเพิ่มขึ้นจากการได้รับความร้อนจากการเชื่อมซ่อมที่มากขึ้นตั้งแต่ R1 และ R3 ตามลำดับอย่างชัดเจน ซึ่งอาจเกิดจากการที่วัสดุได้รับความร้อนสูงเกิน 400°C ทำให้สารประกอบระหว่างโลหะแพร่เข้าสู่พื้นที่ของอะลูมิเนียมซึ่งภายในสารประกอบโลหะมีการกระจายตัวของธาตุ Al ประมาณ 40-50% รวมถึงมีรูปร่างของการขยายตัวในรูปแบบคล้ายลิ้นหรือ Tongue-Like ซึ่งสามารถระบุได้ว่าเป็นเฟส Fe_2Al_5 นอกจากนี้ ในภาพที่ 4-45 ชิ้นงาน R3 ยังพบการก่อตัวของสารประกอบโลหะร่วมทางฝั่ง Fe ซึ่งมีความเป็นไปได้ที่จะเกิดเป็นเฟส $FeAl_3$ ได้เช่นกัน นอกจากนี้การพบการกระจายตัวของคาร์บอนอาจสัมพันธ์กับการเกิดโพรงหรือเฟสของคาร์ไบด์ ซึ่งสอดคล้องกับการเกิดความเสียหายแบบเปราะของชิ้นงาน R3 อันเนื่องจากการมีอยู่ของสารประกอบระหว่าง 2 โลหะ



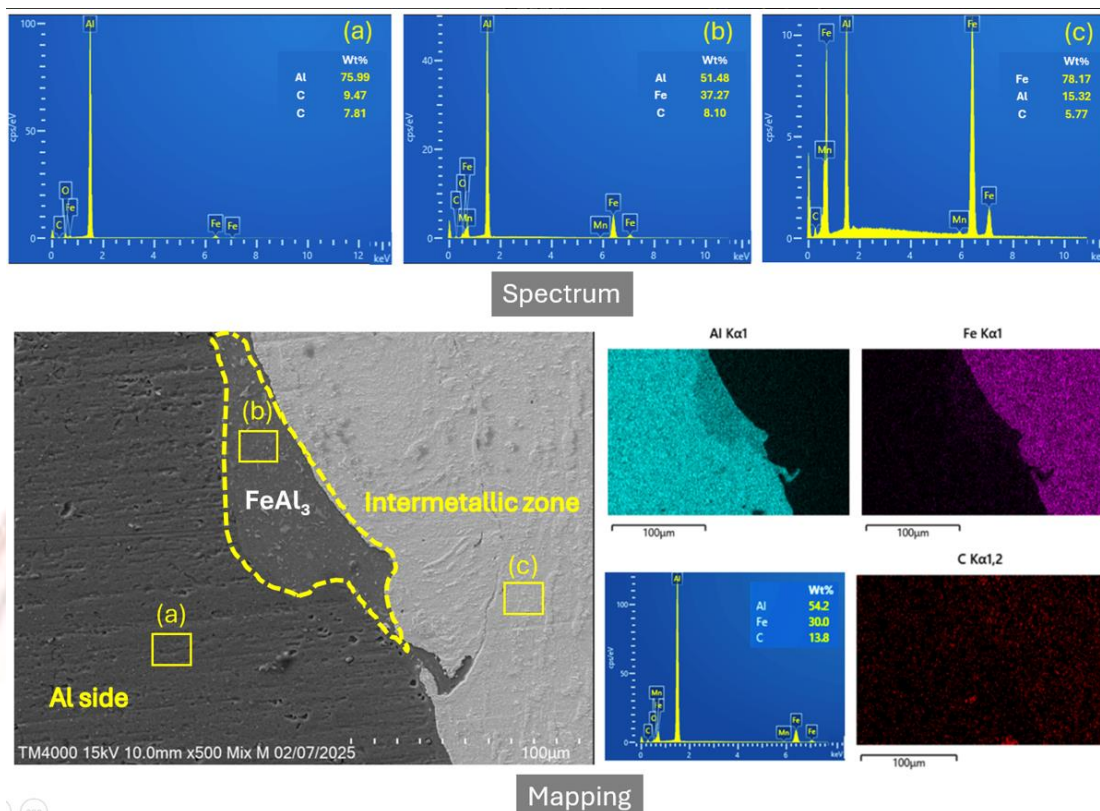
ภาพที่ 4-42 ภาพการวิเคราะห์ EDS บริเวณการหลอมระหว่างโลหะ 2 ชนิดของ TJ ที่ชิ้นงาน NR



ภาพที่ 4-43 ภาพการวิเคราะห์ EDS บริเวณการหลอมระหว่างโลหะ 2 ชนิดของ TJ ที่ชิ้นงาน R1



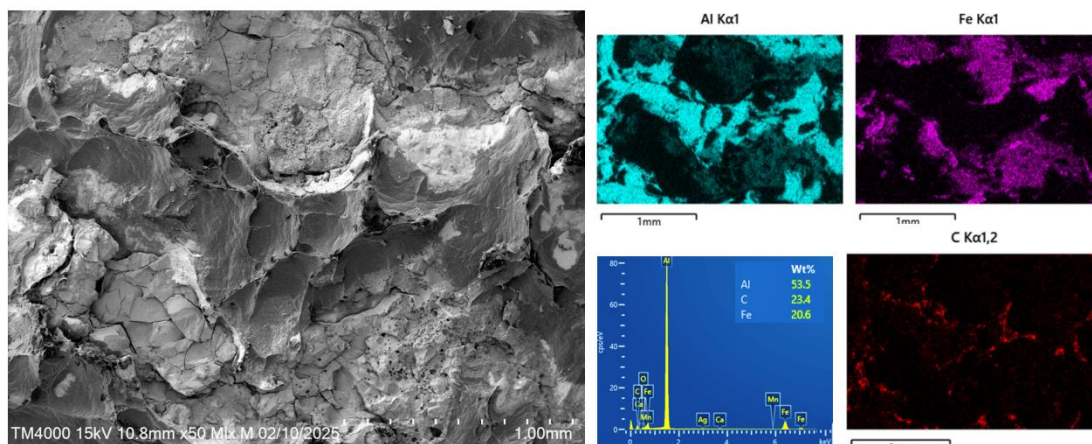
ภาพที่ 4-44 ภาพการวิเคราะห์ EDS บริเวณการหลอมระหว่างโลหะ 2 ชนิดของ TJ ที่ชิ้นงาน R3



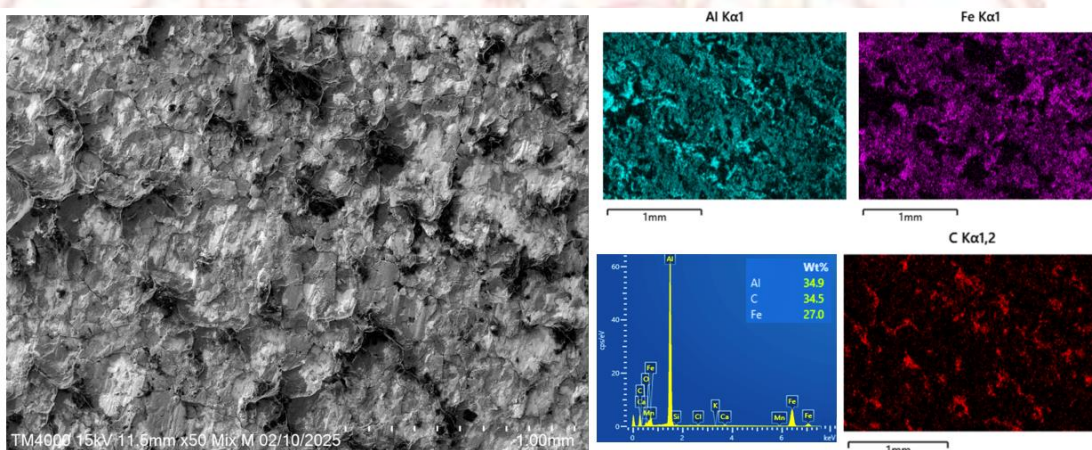
ภาพที่ 4-45 ภาพการวิเคราะห์ EDS แสดงการเกิดเฟส FeAl_3 บริเวณ Fusion Line ของ TJ ที่ชิ้นงาน R3

ภาพที่ 4-43 เป็นการวิเคราะห์รอยแตกของชิ้นงาน NR ที่ไม่ผ่านการเชื่อมซ่อม พบพื้นผิวลักษณะหยาบ แสดงลักษณะการแตกแบบเหนียว (Ductile Fracture) มีรอย Dimple ชัดเจน การกระจายของธาตุ Al, Fe และ C ในปริมาณ 53%, 23.4% และ 20.6% ตามลำดับ แสดงว่าการแตกหักเกิดบริเวณรอยต่ออะลูมิเนียมเป็นส่วนใหญ่ ซึ่งมีการแทรกซึมของธาตุทั้งสองบ้าง แต่ยังไม่รุนแรง

ภาพที่ 4-44 เป็นรอยแตกของชิ้นงาน R3 ที่ผ่านการเชื่อมซ่อม 3 ครั้ง พื้นผิวรอยแตกแสดงลักษณะเปราะ (Brittle Fracture) ที่เกิดขึ้นนั้นอยู่ที่บริเวณกึ่งกลางของการหลอมของโลหะ 2 ชนิดอย่างชัดเจน คือมีลักษณะหักเป็นแผ่น ไม่มี dimple หรือรูพรุนแบบ ductile การกระจายตัวของธาตุแสดงถึงธาตุ C (34.5%) และ Fe (27.0%) ที่แทรกซึมเข้าไปในโครงสร้าง Al (34.9%) มากกว่าชิ้นงาน NR ซึ่งสะท้อนถึงผลกระทบของความร้อนสะสมที่อาจก่อให้เกิด Intermetallic หรือสารประกอบเปราะอื่น ๆ หรือมีแนวโน้มเกิดการฟอร์มตัวเป็นคาร์ไบด์เนื่องจากคาร์บอนสูงขึ้นซึ่งเป็นตัวส่งผลให้เกิดความเปราะ และลดความสามารถในการต้านการแตกร้าวของวัสดุ



ภาพที่ 4-46 ภาพการวิเคราะห์ EDS การแตกหักแบบเหนียวของ TJ ชิ้นงาน NR



ภาพที่ 4-47 ภาพการวิเคราะห์ EDS การแตกหักแบบเปราะของ TJ ชิ้นงาน R3

4.2.3.5 ผลการทดสอบการรับแรงกด (Compressive Loading) และความแข็ง (Hardness) ที่บริเวณ TJ

การทดสอบแรงกดที่กระทำต่อแนวเชื่อมในบริเวณ Bimetallic Transition Joint (TJ) ของชิ้นงานที่ไม่ผ่านการซ่อม (NR) ซ่อม 1 ครั้ง (R1) และซ่อม 3 ครั้ง (R3) พบพฤติกรรมการเสียหายของวัสดุที่แตกต่างกันอย่างชัดเจน โดยในภาพที่ 4-45 ชิ้นงาน NR และ R1 ยังคงสามารถรับแรงกดได้ในระดับที่ส่งผลให้เกิดการยืดตัวก่อนขาด ซึ่งเป็นพฤติกรรมของการเสียหายแบบเหนียว (Ductile Failure) โดยชิ้นงานจะฉีกขาดในบริเวณที่โครงสร้างรองรับน้อยที่สุดคือบริเวณเหนือ Fusion Line ด้านอะลูมิเนียม สำหรับ R3 ที่ผ่านการซ่อมหลายรอบ เกิดความเสียหายแบบเปราะ (Brittle Failure) โดยแตกหักที่ Fusion Line ซึ่งสะท้อนถึงความเปราะบางของบริเวณแนวเชื่อมหลังผ่านความร้อนสะสมหลายรอบ



(ก)

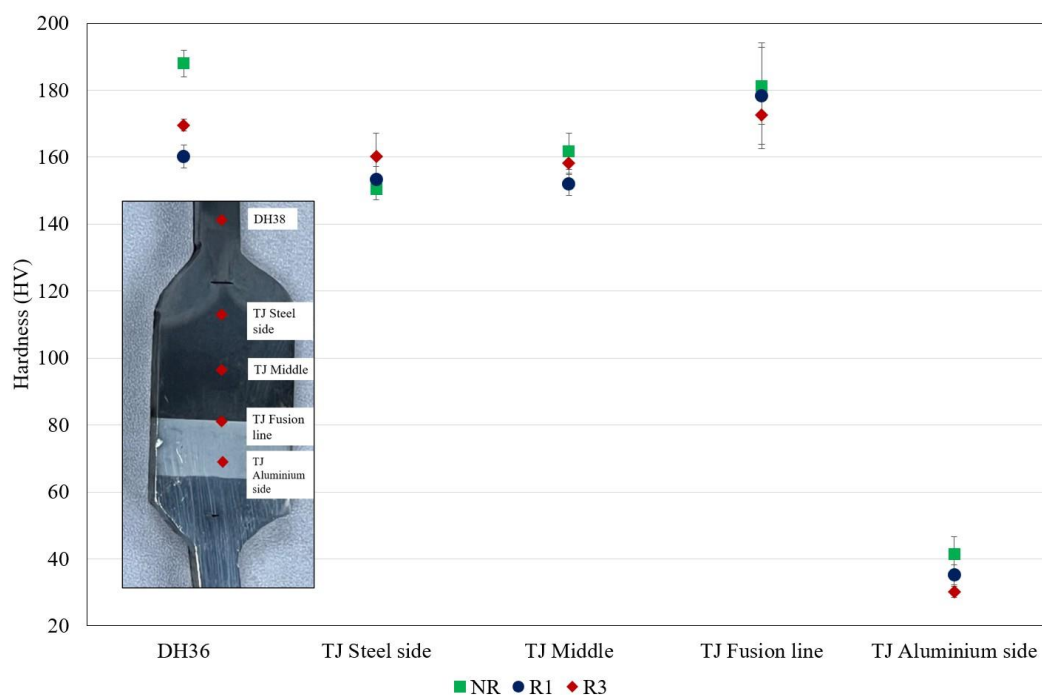


(ข)

ภาพที่ 4-48 แสดงลักษณะการเสียหายของชิ้นงานหลังการทดสอบแรงกด (ก) ชิ้นงาน NR และ R1 แตกอย่างช้า ๆ ด้วยการยืดตัวและ (ข) ชิ้นงาน R3 แตกทันทีด้วยลักษณะเปราะ

ภาพที่ 4-46 ได้แสดงค่าความแข็งที่ถูพบเมื่อทำการทดสอบเปรียบเทียบกันระหว่างชิ้นงาน NR R1 และ R3 ผลการกระจายตัวของค่าความแข็งของชิ้นงานทั้งสาม มีความใกล้เคียงกัน โดยที่ Base DH36 ค่าจะใกล้เคียงกันที่ 160-190 HV ซึ่งอยู่ในเกณฑ์ปกติ และมีแนวโน้มลดลงที่บริเวณ TJ ที่ค่าประมาณ 140-160 HV หลังจากนั้นจึงเริ่มมีแนวโน้มที่สูงขึ้นอีกครั้งที่บริเวณ Fusion Line ซึ่งแสดงให้เห็นแนวโน้มการก่อตัวของสารประกอบที่มีความแข็งเปราะที่เกิดขึ้นบริเวณ Fusion Line

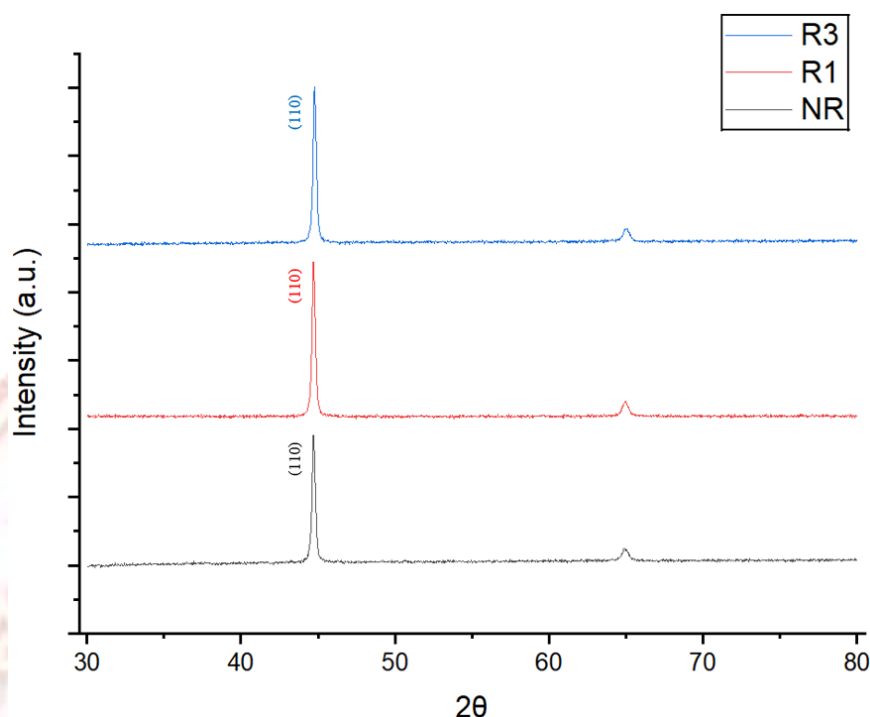
อย่างไรก็ตาม ยังคงเห็นความผันผวนของค่าที่ได้ซึ่งอาจเกิดจากโครงสร้างที่ไม่สม่ำเสมอจากการได้รับความร้อนทำให้มีโครงสร้างที่ไม่สม่ำเสมอ



ภาพที่ 4-49 บริเวณที่ทดสอบค่าความแข็ง TJ ของชิ้นงาน NR R1 และ R3

4.2.3.6 ผลการวิเคราะห์ทางโครงสร้าง

จากการวิเคราะห์ตัวอย่างที่ทำการเชื่อม A, B และ C ด้วยเทคนิค XRD พบว่าในสเปกตรัม XRD มีพีคปรากฏที่ตำแหน่งมุม 2θ ประมาณ 44.8° ดังแสดงในรูปที่ 4-47 ซึ่งเป็นพีคที่เกิดจากระนาบผลึก (110) ของโครงสร้าง BCC (Body Center Cubic) ดังแสดงในตารางที่ 4-2 จากผลการคำนวณขนาดผลึกที่ระนาบ (110) รวมถึงสมการของ Scherrer พบว่าค่าเฉลี่ยของขนาดผลึกคริสตัลของทั้งชิ้นงาน NR R1 และ R3 นั้น อยู่ที่ประมาณ 30-31 นาโนเมตร ซึ่งบ่งชี้ว่าการเชื่อมเชื่อมรวมถึงจำนวนครั้งในการเชื่อมที่มากขึ้นนั้นส่งผลต่อขนาดของผลึกโครงสร้างเพียงเล็กน้อยและไม่มีนัยยะสำคัญและไม่ก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงต่อโครงสร้างผลึกแต่อย่างใด



ภาพที่ 4-50 สเปกตรัม XRD ของชิ้นงานเชื่อม

ตารางที่ 4-2 ข้อมูล XRD ของชิ้นงานเชื่อม

ชิ้นงาน	ระนาบ	K	$l(\text{\AA})$	FWHM (rad)	$\theta(^{\circ})$	$\theta(^{\circ})$	$\theta(^{\circ})$	ขนาด ($\text{\AA}$)	ขนาด (nm)
NR	(110)	0.89	1.54	0.0048249627	44.71953	22.359765	0.9248134	307.16	30.7
R1	(110)	0.89	1.54	0.0048713885	44.71946	22.35973	0.9248136	304.23	30.4
R3	(110)	0.89	1.54	0.0047293187	44.78325	22.391625	0.9246017	313.44	31.3

4.2.3.7 การประยุกต์ใช้งานจริงในการเชื่อมซ่อมโครงสร้างเรือ ณ กรมอุทกหารเรือ สัตหีบ

เพื่อประเมินประสิทธิภาพของกระบวนการเชื่อมและการซ่อมจริงในสภาพแวดล้อมภาคสนาม ได้มีการนำเทคนิคและพารามิเตอร์การเชื่อมที่พัฒนาขึ้นจากห้องปฏิบัติการไปประยุกต์ใช้กับการซ่อมโครงสร้างของเรือเหล็ก ณ กรมอุทกหารเรือ สัตหีบ โดยดำเนินการเชื่อมซ่อมในบริเวณที่เกิดความเสียหายบนผิวตัวเรือ ซึ่งต้องอาศัยการจัดท่าทางในการเชื่อมในพื้นที่จำกัด และมีข้อจำกัดด้านความปลอดภัย การดำเนินการดังกล่าวทำให้เห็นว่าเทคนิคที่ศึกษาในระดับห้องทดลองสามารถนำมาปรับใช้จริงในสภาพงานภาคสนามที่มีข้อจำกัดหลายประการได้อย่างมีประสิทธิภาพ และช่วยลดโอกาสการเกิดความล้มเหลวในแนวเชื่อม โดยเฉพาะในบริเวณรอยต่อที่ใช้วัสดุไบเมทัลลิก



ภาพที่ 4-51 กระบวนการเชื่อมซ่อมโครงสร้างเรือ (ก) การเตรียมพื้นผิวและแนวเชื่อมก่อนการเชื่อมจริง (ข) กระบวนการเชื่อมในแนวตั้ง (Vertical Position) (ค) ชิ้นงานเชื่อมที่ตัดออกมาเชื่อมซ่อม



บทที่ 5

สรุปผลการทดลอง

5.1 สรุปผลการทดลองเบื้องต้น (Preliminary Experiments) : การเชื่อมหน้างานโดยช่างเชื่อมปฏิบัติการ ทร.

การเปรียบเทียบระหว่างวิธีการเตรียมรอยต่อแบบปากกับการเชื่อมแบบฟิลเลตปกติ พบว่าไม่ได้ทำให้เกิดผลลัพธ์ที่ดีกว่าอย่างมีนัยยะสำคัญต่อคุณภาพของแนวเชื่อมโดยรวมในการเชื่อมข้อต่อแบบไบเมทัลลิกเข้ากับโลหะฐาน อย่างไรก็ตามข้อจำกัดในเรื่องกระบวนการและสภาพแวดล้อมที่ไม่ดีสำหรับงานเชื่อมจากการเชื่อมหน้างานอาจนำไปสู่การเกิดข้อบกพร่อง ดังนั้นจึงต้องพิจารณาในเรื่องการเชื่อมซ่อมเพื่อแก้ไข

5.2 สรุปผลการทดลองการวิจัย : ผลกระทบของการเชื่อมซ่อม (Repairing Weld)

ในการวิเคราะห์บริเวณ Interface ระหว่าง Al และ Fe พบการก่อตัวของสารประกอบระหว่างโลหะ (Intermetallic Compounds, IMCs) ได้แก่ Fe_2Al_5 ทางด้านเหล็ก และ FeAl_3 ซึ่งเป็นสารประกอบที่มีความเปราะ โดยพบการเชื่อมซ่อมหรือได้รับความร้อนสูงเกิน 400°C เป็นจำนวนหลายครั้ง มีแนวโน้มที่จะเร่งการเติบโตของชั้น IMCs เหล่านี้ ซึ่งจะส่งผลเสียให้แก่ความแข็งแรงเชิงกลและโครงสร้างจุลภาค

การเชื่อมซ่อมหลายรอบ (3 รอบขึ้นไป) ส่งผลกระทบในทางลบต่อความสมบูรณ์ของแนวเชื่อมและทำให้บริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อน (HAZ) ขยายพื้นที่กว้างมากขึ้น ซึ่งทำให้ความเหนียวของวัสดุลดลงและทำให้แนวเชื่อมมีความเสี่ยงต่อการแตกร้าวมากยิ่งขึ้น

นอกจากนี้จากผลการศึกษาโดยรวม ยังชี้ให้เห็นถึงความสำคัญของการควบคุมความร้อนให้น้อยที่สุดในระหว่างกระบวนการเชื่อม และการกำหนดเงื่อนไขของกระบวนการอย่างเข้มงวด โดยเฉพาะในกรณีการเชื่อมหน้างาน เพื่อหลีกเลี่ยงความเสี่ยงในการเกิดความเสียหายแก่ชิ้นงานเชื่อม

บรรณานุกรม

- [1] ประกาศ เกตุไทย. งานเชื่อมโลหะ 2-3-4. พิมพ์ครั้งที่ 3. ปทุมธานี : สกายบุ๊กส์, 2554.
- [2] ASTM International. ASTM A131/A131M-04 : Standard specification for structural steel for ships, ASTM International, 2004.
- [3] ณรงค์ศักดิ์ ธรรมโชติ. โลหวิทยา. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพมหานคร: โรงพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย; 2556
- [4] ASTM International. ASTM B209/B209M-21: Standard specification for aluminum and aluminum-alloy sheet and plate, ASTM International, 2021.
- [5] American Welding Society (AWS), Welding handbook, volume 4 : Materials and applications, part 1, FL: American Welding Society, 2011.
- [6] วัลลภ พัฒนพงศ์. “กระบวนการเชื่อมฟลักซ์คอร์”. วารสารวิทยาศาสตร์ประยุกต์. ปีที่ 2, ฉบับที่ 1 : 67-72.
- [7] มานะศิษฐ์ พิมพ์สาร. คู่มือการเชื่อม มิก-แม็ก. GMAW-Welding. กรุงเทพฯ : สำนักพิมพ์เอ็ม แอนด์อีจำกัด, 2542.
- [8] อรรถพล ตะเระ. (2551). คุณสมบัติและการทดสอบวัสดุ. กรุงเทพมหานคร : มหาวิทยาลัยรามคำแหง, 2551.
- [9] American Society for Metals (ASM), ASM Handbook Volume 6 : Welding, Brazing, and Soldering. ASM International, 1993.
- [10] Basariya, M. I. R. and Mukhopadhyay, N. K. (2018). Structural and mechanical behaviour of Al-Fe intermetallics. In M. Aliofkhazraei (Ed.), Intermetallic Compounds - Formation and Applications. IntechOpen.

- [11] Callister, W. D., Jr. and Rethwisch, D. G. (2018). Materials science and engineering: An introduction (10th ed.). Wiley.
- [12] สมศักดิ์ ศิวดำรงพงศ์ และ อังศุมารินทร์ ประภาสพงษ์. รายงานการวิจัยการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อความหยาบผิวและการสึกหรอของเครื่องมือตัดในกระบวนการกัดวัสดุอะลูมิเนียมหล่อแบบกึ่งของแข็ง A356. วิทยานิพนธ์สาขาวิชาวิศวกรรมการผลิต สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, 2560.
- [13] ASM International, ASM Handbook, Volume 16 : Machining. ASM International, 1989.
- [14] Li, L.-L., et al. (2020). Achieving room-temperature brittle-to-ductile transition in ultrafine layered Fe-Al alloys. Science Advances, 6(39), eabb6658.
- [15] Böhm, M. and Kowalski, M. (2020). Fatigue life estimation of explosive clad transition joints with the use of the spectral method for the case of a random sea state. Marine Structures, 71, 102739.
- [16] Carvalho, G. H. S. F. L., et al. (2018). Formation of intermetallic structures at the interface of steel-to-aluminum explosive welds. Materials Characterization, 142, 432–442.
- [17] Wang, J. and Zhang, Y. (2013). A study on weldability of aluminum alloy-aluminum-steel transition joints. Advanced Materials Research, 631-632, 713-716.
- [18] Phengsakul, S. and Rodchanarowan, A. (2013). Effect of thermal treatment on intermetallic phases of Fe/Al structural transition joints. Energy Procedia, 34, 782-790.
- [19] Tricarico, L., et al. (2009). Effects of heat treatments on mechanical properties of Fe/Al explosion-welded structural transition joints. Materials & Design, 30(7), 2693–2700.

- [20] Li, T., et al. (2021). First-principles and experimental investigations on ductility/brittleness of intermetallic compounds and joint properties in steel/aluminum laser welding. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 31(2021), 2962–2977.
- [21] พชรพล ศีลาคุปต์. (2560). ผลกระทบจากการเชื่อมซ่อมต่อโครงสร้างทางโลหะวิทยาและสมบัติทางกลบนวัสดุ ASTM A516 Gr.70 โดยกระบวนการเชื่อม GTAW และ SAW. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมการเชื่อม คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ.
- [22] O. E. Vega, et al. (2008). Effect of multiple repairs in girth welds of pipelines on the mechanical properties. Material Characterization, 59: 1498-1507.
- [23] อุเทน พุ่มเพ็ง. (2559). ผลกระทบของการเชื่อมซ่อมต่อสมบัติทางกลของเหล็กกล้าผสมโครเมียม-โมลิบดีนัม SA-213 เกรด T91 ด้วยกระบวนการเชื่อมอาร์คทังสเตน. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมการเชื่อม คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ.

ภาคผนวก ก

ใบรับรองค่าส่วนผสมทางเคมี และคุณสมบัติทางกลของวัสดุจากทางผู้ผลิต
เหล็กกล้าคาร์บอน ASTM A131 EH36/DH36



เอกสารประกอบพิจารณาตามข้อ 5.2 ส่วนที่ 2 (ข้อ 5.2.4)
In the event of any discrepancy between this printout and the original electronic document, the electronic document shall prevail.



MATERIALS QUALITY SCHEME APPROVED
MQS 016

Certificate No: MQ00/2204/0014/1

Belgium

has been approved as a manufacturer in accordance with the requirements of
Lloyd's Register for :-

Steel Plates

This approval is subject to compliance with the Rules for the Manufacture, Testing
and Certification of Materials. The full details of the processes and grades to
which this approval applies are given in the Appendix of this certificate.

Lloyd's Register is to be notified of any change that may affect the validity of this
Certificate.

This Certificate is issued to the above manufacturer and is valid until the date
given below,

Valid Until : 22 June 2021
Date of Issue : 05 September 2018

Clive Arnold
Senior Metallurgical Specialist to Lloyd's Register EMEA
A member of the Lloyd's Register group



Lloyd's Register and variants of it are trading names of Lloyd's Register Group Limited, its subsidiaries and affiliates. Lloyd's Register EMEA (Reg. no. 28592 R) is a registered society under the Co-operative and Community Benefit Societies Act 2014 in England and Wales. Registered office: 71 Fenchurch Street, London, EC3M 4BS, UK. A member of the Lloyd's Register group. Lloyd's Register Group Limited, its affiliates and subsidiaries and their respective officers, employees or agents are, individually and collectively, referred to in this clause as 'Lloyd's Register'. Lloyd's Register assumes no responsibility and shall not be liable to any person for any loss, damage or expense caused by reliance on the information or advice in this document or howsoever provided, unless that person has signed a contract with the relevant Lloyd's Register entity for the provision of this information or advice and in that case any responsibility or liability is exclusively on the terms and conditions set out in that contract.

ภาพที่ ก-1 ใบรับรองค่าส่วนผสมทางเคมี และคุณสมบัติทางกล หน้า ที่ 1

เอกสารประกอบการพิจารณาตามข้อ 5.2 ส่วนที่ 2 (ข้อ 5.2.4)
 iquity between this printout and the original electronic document, the electronic document shall prevail



MATERIALS QUALITY SCHEME APPROVED
 MQS 016

Certificate No: MQ00/2204/0014/1

Appendix 1

Belgium

Plates	Normal Strength	Grades	Thickness Maximum
As Rolled	Fine Grain Al	A, B	50.0
As Rolled	Killed	A	25.0
Normalized	Fine Grain Al	A, B, D, E	120.0
Normalized	Killed	A	50.0
Normalizing Rolled	Fine Grain Al	A, B, D	90.0
Thermo Mechanical	Fine Grain Al	A, B, D, E	35.0
Plates	Higher Strength	Grades	mm thickness Maximum
As Rolled	Fine Grain Al	AH27S, AH32, DH27S, DH32	12.5
Normalized	Fine Grain Al+Nb	AH27S, AH32, AH36, DH27S, DH32, DH36, EH27S, EH32, EH36	120.0
Normalized	Fine Grain Al	AH27S, AH32, AH36, DH27S, DH32, DH36, EH27S, EH32, EH36	50.0
Normalizing Rolled	Fine Grain Al+Nb+V	AH27S, AH32, AH36, DH27S, DH32, DH36	25.0
TM+Acc	Fine Grain Al+Nb	AH27S, AH32, AH36, DH27S, DH32, DH36, EH27S, EH32, EH36	25.0
TM+Acc	Fine Grain Al	AH27S, AH32, AH36, DH27S, DH32, DH36, EH27S, EH32, EH36	25.0
Thermo Mechanical	Fine Grain Al+Nb	AH27S, AH32, AH36, DH27S, DH32, DH36, EH27S, EH32, EH36	25.0
Plates	Boiler & Pressure Vessel	Grades	
As Rolled	Killed	360AR, 410AR	
Normalized	Fine Grain Al+Nb	360F, 410F, 410F, 410F, 410F, 410F	
Normalized	Fine Grain Al	460F, 460F, 460F, 460F, 460F, 460F	
Normalized	Fine Grain Al	360F, 360F, 360F, 360F, 360F, 360F	

Valid Until : 22 June 2021
 Date of Issue : 05 September 2018

Lloyd's Register and variants of it are trading names of Lloyd's Register Group Limited, its subsidiaries and affiliates. Lloyd's Register EMEA (Reg. no. 29592 R) is a registered society under the Co-operative and Community Benefit Societies Act 2014 in England and Wales. Registered office: 71 Fenchurch Street, London, EC3M 4BS, UK. A member of the Lloyd's Register group. Lloyd's Register Group Limited, its affiliates and subsidiaries and their respective officers, employees or agents are, individually and collectively, referred to in this clause as 'Lloyd's Register'. Lloyd's Register assumes no responsibility and shall not be liable to any person for any loss, damage or expense caused by reliance on the information or advice in this document or howsoever provided, unless that person has signed a contract with the relevant Lloyd's Register entity for the provision of this information or advice and in that case any responsibility or liability is exclusively on the terms and conditions set out in that contract.

Clive Arnold
 Senior Metallurgical Specialist to Lloyd's Register EMEA
 A member of the Lloyd's Register group



ภาพที่ ก-2 ใบรับรองค่าส่วนผสมทางเคมี และคุณสมบัติทางกล หน้า ที่ 2



ภาคผนวก ข

ใบรับรองค่าส่วนผสมทางเคมี และคุณสมบัติทางกลของวัสดุจากทางผู้ผลิต

อะลูมิเนียม ASTM B209 เกรด 5083

12/28/23, 11:23 AM 5083 Aluminum Properties, Alloy 5083 H116 H111 H321

World Material
www.theworldmaterial.com

Home > US ASTM AISI and SAE Standards > @ X

5083 operties, Alloy 5083 H116 H111 H321

By World Material

Bring home your best break
Take home a memory of your best with KIT K
Nestle Trav Retail
Shop Now

Bring home your best break
Take home a memory of your best with KIT K
Nestle Trav Retail
Shop Now

5083 Aluminum Alloy – Al 5083 H116 H111 H321

5083 aluminum is essentially a non-heat treatable alloy containing 4–4.9% Mg and 0.4–1.0% Mn. With moderate strength, excellent cold forming, welding and spot welding properties, and good corrosion resistance, this attractive combination of properties has led to the increasing use of its superplasticity in non-structural applications that do not involve substantial forming strains. Commonly used temper conditions are H111, H112, etc.

5083 Aluminum Properties

The following tables summarize 5083 aluminum properties including chemical composition, physical and mechanical properties, etc.

Chemical Composition

The chemical composition of 5083 aluminum alloy is given in the data sheet below.

Chemical Composition, %						
Aluminum	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	
5083	0.40	0.40	0.10	0.40-1.00	4.0-4.9	

5083 Aluminum Alloy Physical Properties

Aluminum 5083 physical properties are listed in the data sheet below, including the aluminum density, modulus of elasticity, Young's modulus, thermal conductivity, specific heat, electrical conductivity, and electrical resistivity, etc.

Note:

- $10^{-6} \text{ K}^{-1} = 10^{-6} / \text{K} = 1 \mu\text{m}/\text{m} \cdot ^\circ\text{C}$
- $1 \Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m} = 1 \mu\Omega \cdot \text{m}$
- $1 \text{ g}/\text{cm}^3 = 1 \text{ kg}/\text{dm}^3 = 1000 \text{ kg}/\text{m}^3$
- $1 \text{ GPa} = 1 \text{ kN}/\text{mm}^2$
- $1 \text{ MPa} = 1 \text{ N}/\text{mm}^2$
- $\text{MS}/\text{m} = 0.58 \text{ } \mu\text{ACS}$

We use cookies to enhance your browsing experience, to analyze site usage, and to assist in our marketing efforts. (Click here to learn more about our use of cookies.)

Accept Read More

https://www.theworldmaterial.com/5083-aluminum/ 1/3

ภาพที่ ข-1 ใบรับรองค่าส่วนผสมทางเคมี และคุณสมบัติทางกล หน้าที่ 1

12/28/23, 11:23 AM

5083 Aluminum Properties, Alloy 5083 H116 H111 H321

5083-O Aluminum Physical Properties	
Density, g/cm ³ (lb/in. ³)	2.66 (0.096)
Melting point, °C (°F)	580-640 (1095-1180)
Specific heat capacity, J/kg·K (Btu/lb·°F)	899 (0.215)
Coefficient of thermal expansion, 10 ⁻⁶ /K (μin./in.·°F)	23.8 (13.2) at 20-100 °C (69-212 °F)
Thermal conductivity at 25 °C (77 °F), W/m·°C (BTU-in/h-ft ² ·°F)	117 (810)
Electrical conductivity at 20 °C (68 °F), MS/m Equal volume (Equal weight)	17 (57)
Electrical conductivity at 20 °C (68 °F), % IACS Equal volume (Equal weight)	29 (98)
Electrical resistivity at 20 °C (68 °F), Ω·mm ² /m (Ω·circ mil/ft)	0.059 (36)

เดกคอร์ด

5

5083 Aluminum Mechanical Properties

Aluminum 5083 mechanical properties are listed in the table below, including tensile strength, yield strength, elongation, hardness, etc.

ASTM B209/B209M

5083 aluminum sheet and plate mechanical properties according to ASTM B209/B209M

Aluminum 5083 Mechanical Properties – Plate and Sheet					
Standard	Aluminum Alloy and Temper	Specified Thickness (over-thru), In. (mm)	Tensile Strength, ksi (MPa)	Yield Strength (0.2 % offset), ksi (MPa)	Elongation in 2 In. (5mm) or 4xDiameter, %
ASTM B209/B209M	5083-O	0.05-1.5 (1.2-40)	40-51 (276-352)	18-29 (124-200)	16
		1.5-3.0 (40-80)	39-50 (270-345)	17-29 (117-100)	16
		3.0-4.0 (80-100)	40-80 (276-550)	≥16 (110)	16
		4.0-5.0 (100-120)	≥38 (262)	≥16 (110)	14
		5.0-7.0 (120-180)	≥37 (255)	≥15 (103)	14
	5083-H32	7.0-8.0 (180-200)	≥36 (248)	≥14 (97)	12
		0.125-0.187 (3.2-5.0)	44-56 (303-386)	≥31 (214)	10
		0.188-1.500 (5-40)	44-56 (303-386)	≥31 (214)	12
	5083-H112	1.5-3.0 (40-80)	41-56 (283-386)	≥29 (200)	12
		0.25-1.50 (6.35-38)	≥40 (276)		
	5083 F	1.5-3.0 (30-80)	≥39 (269)		
		0.25-8 (6.35-203)	-		

ASTM B221

Standard Specification for Aluminum and Aluminum-Alloy Extruded Bars, Rods, Wire, Profiles

Aluminum 5083 Mechanical Properties – Extruded Bars, Rods, Wire, Profiles, and Tubes					
Standard	Aluminum Alloy and Temper	Product	Specified Diameter or Thickness (t), In. (mm)	Area, In ² (mm ²)	Tensile Strength, ksi (MPa)
ASTM B221	5083-O	Wire, Rod, Bar, and Profiles	≤5 (130)	≤32 (20 000)	39-51 (270-350)
	5083-H111		≤5 (130)	≤32 (20 000)	≥31 (214)
	5083-H112		≤5 (130)	≤32 (20 000)	≥31 (214)
	5083-O	Tube	<3 (70)	≤32 (20 000)	39-51 (270-350)
	5083-H111		<3 (70)	≤32 (20 000)	≥31 (214)
	5083-H112		<3 (70)	≤32 (20 000)	≥31 (214)

ASTM B241/B241M

ASTM B241/B241M: Aluminum and Aluminum-Alloy Seamless Pipe and Seamless Extruded Tube

Aluminum 5083 Mechanical Properties – Seamless Extruded Tube
We use cookies to ensure that we give you the best experience on our website to personalize content and adverts and to analyze our traffic using Google Analytics. [Accept](#) [Read More](#)

<https://www.theworldmaterial.com/5083-aluminum/>

2/3

ภาพที่ ข-2 ใบรับรองค่าส่วนผสมทางเคมี และคุณสมบัติทางกล หน้า ที่ 2



ภาคผนวก ค

ใบรับรองค่าส่วนผสมทางเคมี และคุณสมบัติทางกลของ Transition Joint

ที่	รายการ	จำนวน	หน่วยนับ	หน่วยซื้อ	รายละเอียดคุณสมบัติเฉพาะของวัสดุ
28	เหล็กฉาก ขนาด 100 มม. x 100 มม. ความหนา 10 มม. ยาว 6 เมตร	13	เส้น	ธรม.ธ. 13 เส้น	รายการที่ 36-40 มีคุณสมบัติทางเคมีและทางกล (Chemical and Mechanical Properties) เป็นไปตามมาตรฐาน LR GRADE A หรือ CCS GRADE A
29	เหล็กฉาก ขนาด 130 มม. x 130 มม. ความหนา 9 มม. ยาว 6 เมตร	5	เส้น	ธรม.ธ. 5 เส้น	
30	เหล็กกล่องสี่เหลี่ยม ขนาด 1 นิ้ว x 1 นิ้ว ความหนา 2.3 มม. ยาว 6 เมตร	8	เส้น	ธรม.ธ. 8 เส้น	
31	เหล็กกล่องสี่เหลี่ยม ขนาด 2 นิ้ว x 2 นิ้ว ความหนา 2.3 มม. ยาว 6 เมตร	2	เส้น	ธรม.ธ. 2 เส้น	
32	เหล็กสี่เหลี่ยมแบน ขนาด 1 นิ้ว x 1 นิ้ว ยาว 6 เมตร	12	เส้น	ธรม.ธ. 12 เส้น	รายการที่ 41-42 มีคุณสมบัติ ดังนี้ 1. Aluminum มีคุณสมบัติทางเคมีและทางกล (Chemical and Mechanical Properties) เป็นไปตามมาตรฐาน JIS H 4000 Alloy No.5083 2. Steel มีคุณสมบัติทางเคมีและทางกล (Chemical and Mechanical Properties) เป็นไปตามมาตรฐาน LR GRADE DH36 หรือ CCS GRADE DH36
33	เหล็กบุพรอบขนาด C-Channel ขนาด 180 มม. x 75 มม. ความหนา 7 มม. ยาว 6 เมตร	2	ฟุต	ธรม.ธ. 2 ฟุต	
34	เหล็กบุพรอบ H-Beam ขนาด 175 มม. x 90 มม. ความหนา 8 มม. ยาว 6 เมตร	2	ฟุต	ธรม.ธ. 2 ฟุต	
35	เหล็กบุพรอบ I-Beam ขนาด 150 มม. x 75 มม. ความหนา 9.5 มม. ยาว 6 เมตร	1	ฟุต	ธรม.ธ. 1 ฟุต	
36	เหล็กบุพรอบลักษณะปัทม BU.B FLATS ขนาด A ขนาด 80 มม. x 6 มม. ยาว 6,000 มม.	12	เส้น	ธรม.ธ. 12 เส้น	
37	เหล็กบุพรอบลักษณะปัทม BU.B FLATS ขนาด A ขนาด 100 มม. x 8 มม. ยาว 6,000 มม.	20	เส้น	ธรม.ธ. 20 เส้น	
38	เหล็กบุพรอบลักษณะปัทม BU.B FLATS ขนาด A ขนาด 120 มม. x 8 มม. ยาว 6,000 มม.	12	เส้น	ธรม.ธ. 12 เส้น	
39	เหล็กบุพรอบลักษณะปัทม BU.B FLATS ขนาด A ขนาด 180 มม. x 10 มม. ยาว 6,000 มม.	16	เส้น	ธรม.ธ. 16 เส้น	
40	เหล็กบุพรอบลักษณะปัทม BU.B FLATS ขนาด A ขนาด 80 มม. x 6 มม. ยาว 6,000 มม.	12	เส้น	ธรม.ธ. 12 เส้น	
41	Aluminum to steel transition joint ขนาดความกว้าง 18 มม. ความหนา 34 มม. ยาว 3.0 เมตร	8	เส้น	ธรม.ธ. 8 เส้น	
42	Aluminum to steel transition joint ขนาดความกว้าง 38 มม. ความหนา 64 มม. ยาว 3.0 เมตร	4	เส้น	ธรม.ธ. 4 เส้น	

ภาพที่ ค-1 ใบรับรองค่าส่วนผสมทางเคมี และคุณสมบัติทางกล





ภาคผนวก ง

ใบรับรองค่าส่วนผสมทางเคมี และคุณสมบัติทางกลของลวดเชื่อมจากทางผู้ผลิต

AWS A5.20 E71T-1C Dia.1.2 mm (FCAW)

FCAW

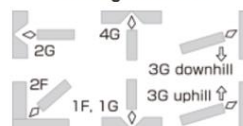
FAMILIARC™ DW-100**Flux cored wire**

Features: • Soft and stable arc, less fume and spattering, smooth bead appearance, and good slag removal

Classification: AWS A5.20 E71T-1C

Shielding gas: CO₂

Polarity: DCEP

Welding Positions:**Packaging data**

φ mm	Spool			Drum	
1.2	12.5kg	15kg	20kg	250kg	-
1.4	-	15kg	20kg	250kg	350kf
1.6	-	15kg	20kg	-	350kg
Volume mm	300W, 110H, 300L			530φ, 820H	680φ, 770H

Composition (all-weld metal mass %)

	Typical	Guaranty ^a
C	0.05	0.12
Si	0.45	0.90
Mn	1.35	1.75
P	0.01	0.03
S	0.01	0.03
Ni	0.01	0.50
Cr	0.02	0.20
Mo	0.01	0.30
V	0.01	0.80
Cu	0.02	0.35

Note: ^aSingle values are maximum.**Welding parameters (A)**

φ mm	1F, 1G, 2F	2G	3G uphill, 4G	3G downhill
1.2	120-300	120-280	120-260	200-300
1.4	160-350	160-320	160-270	220-300
1.6	200-400	200-350	200-280	250-300

All-weld mechanical properties

	Typical	Guaranty
0.2%YS (MPa)	510	400min.
TS (MPa)	570	490-655
El on 4d (%)	30	22min.
IV -18°C (J)	85	27min.

Approvals / [Click here for certificates](#)

ABS	2YSA, 2Y400SA, H10
LR	2YS, 2YM H10
DNV	IIYMS, IIY40MS, H10
BV	SA2M, SA2YM, SA2Y40M H10
NK	KSW52Y40G (C) H10
CR	2YS-HH
KR	2YSG (C)
CCS	2SH10, 2YSH10

ภาพที่ ง-1 ใบรับรองค่าส่วนผสมทางเคมี และคุณสมบัติทางกลของลวดเชื่อม
AWS A5.20 E71T-1C Dia.1.2 mm (FCAW)



ภาคผนวก จ

ใบรับรองค่าส่วนผสมทางเคมี และคุณสมบัติทางกลของลวดเชื่อมจากทางผู้ผลิต

AWS A5.10 ER5356 Dia.1.2 mm (MIG)



ลวดเชื่อมอลูมิเนียม MIG 5356

มาตรฐานอ้างอิง AWS : A5.10 ER5356
ขนาดลวดเชื่อม



ขนาด	น้ำหนัก (กก.)
0.8 มม.	0.5 , 7 กก.
1.0 มม.	0.5 , 7 กก.
1.2 มม.	0.5 , 7 กก.

- เนื่องจากอลูมิเนียมมีน้ำหนักเบากว่าลวดเชื่อมโลหะชนิดอื่น จึงทำให้น้ำหนักต่อม้วนเบากว่า
- ลวดเชื่อมอลูมิเนียมเกรด 5356 ทนทานการกัดกร่อนและทนต่อความร้อน ใช้ในงานเชื่อมอลูมิเนียมทั่วไป
- มีความแข็งแรงสูงกว่า จึงให้ความสามารถในการกลึงแต่งได้ดี โดยมากใช้ในการเชื่อมต่อโครงสร้างรถยนต์ ชิ้นส่วนเครื่องยนต์ เครื่องจักรกลที่เป็นอลูมิเนียม งานต่อเรือ และงานอากาศยาน เป็นต้น



รายละเอียดสินค้า

5610

ลวดเชื่อมอลูมิเนียม MIG 5356

Other		Al
Single	Total	
≤0.05	≤0.15	Rem.

ส่วนผสมทางเคมีในเนื้อโลหะเชื่อม(%)

Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Be
≤0.25	≤0.4	≤0.1	0.05-0.2	4.5-5.5	0.05-0.20	≤0.1	0.06-0.20	≤0.0003

Typical Characteristics

Melting range	Conductivity	Density	Corrosion resistance	Coefficient of thermal	Heat conductivity (20 °C)
1065 – 1170 °F	29%IACS (O);27%IACS (H18)	2.66g/mm ³	A(Gen) A(SCC)	23.7x10 ⁻⁶ /K	110-150 W/m·K

ภาพที่ จ-1 ใบรับรองค่าส่วนผสมทางเคมี และคุณสมบัติทางกลของลวดเชื่อม
AWS A5.10 ER5356 Dia.1.2 mm (MIG)



ภาคผนวก ฉ
ข้อมูลสนับสนุน

ตารางที่ ฉ-1 ตัวแปรการเชื่อมในการทดลองเชื่อมหน้างานโดยช่างเชื่อมปฏิบัติการ ทร.

Material / Joint	Name	Current Type	Welding Current (A)	Arc Voltage (V)	Travel Speed (mm/min)	Heat Input (KJ/mm)	Shielding Gas	Gas Flow rate (L/min)
Carbon Steel/Fillet	St-J1-L	DCEP	175	27.1	240	1.186	99% CO ₂	18
	St-J1-R	DCEP	175	27.1	240	1.186	99% CO ₂	18
Aluminum/Fillet	Al-J1-L	DCEP	170	23.2	290	0.816	99% Ar	20
	Al-J1-R	DCEP	170	23.2	290	0.816	99% Ar	20
Carbon Steel/Bevel	St-J2-L	DCEP	175	27.1	240	1.186	99% CO ₂	18
	St-J2-R	DCEP	175	27.1	240	1.186	99% CO ₂	18
Aluminum/Fillet	Al-J2-L	DCEP	170	23.2	290	0.816	99% Ar	20
	Al-J2-R	DCEP	170	23.2	290	0.816	99% Ar	20

ตารางที่ ฉ-2 ตัวแปรการเชื่อมเพื่อตรวจสอบผลกระทบของการเชื่อมซ่อม

Specimen	Material	Side	Round	Current Type	Welding Current (A)	Arc Voltage (V)	Wire Feed Speed (m/min)	Travel Speed (mm/min)	Heat Input (KJ/mm)	Shielding Gas	Gas Flow rate (L/min)	Time (min)
NR-1	Al 5083	A	1	DCEP	165	19.7	9.8	667	0.292	99% Ar	20	0.45
		B	1	DCEP	165	19.7	9.8	600	0.325	99% Ar	20	0.5
	St EH36	A	1	DCEP	180	26.2	6.2	346	0.818	99% CO ₂	20	0.867
		B	1	DCEP	180	26.2	6.2	300	0.943	99% CO ₂	20	1
NR-2	Al 5083	A	1	DCEP	165	19.7	9.8	721	0.27	99% Ar	20	0.416
		B	1	DCEP	165	19.7	9.8	621	0.314	99% Ar	20	0.483
	St EH36	A	1	DCEP	180	26.2	6.2	283	1	99% CO ₂	20	1.06
		B	1	DCEP	180	26.2	6.2	310	0.913	99% CO ₂	20	0.967
R1-1	Al 5083	A	1	DCEP	165	19.7	9.8	563	0.346	99% Ar	20	0.533
		B	1	DCEP	165	19.7	9.8	642	0.304	99% Ar	20	0.467
	St EH36	A	1	DCEP	180	26.2	6.2	265	1.068	99% CO ₂	20	1.133
			2	DCEP	180	26.2	6.2	277	1.022	99% CO ₂	20	1.083
		B	1	DCEP	180	26.2	6.2	277	1.022	99% CO ₂	20	1.083
			2	DCEP	180	26.2	6.2	286	0.989	99% CO ₂	20	1.05
R1-2	Al 5083	A	1	DCEP	165	19.7	9.8	563	0.346	99% Ar	20	0.533
		B	1	DCEP	165	19.7	9.8	667	0.292	99% Ar	20	0.45
	St EH36	A	1	DCEP	180	26.2	6.2	225	1.258	99% CO ₂	20	1.333
			2	DCEP	180	26.2	6.2	247	1.146	99% CO ₂	20	1.216
		B	1	DCEP	180	26.2	6.2	429	0.66	99% CO ₂	20	0.7
			2	DCEP	180	26.2	6.2	286	0.989	99% CO ₂	20	1.05
R3-1	Al 5083	A	1	DCEP	165	19.7	9.8	462	0.422	99% Ar	20	0.65
		B	1	DCEP	165	19.7	9.8	529	0.369	99% Ar	20	0.567
	St EH36	A	1	DCEP	180	26.2	6.2	254	1.114	99% CO ₂	20	1.18
			2	DCEP	180	26.2	6.2	257	1.101	99% CO ₂	20	1.167
			3	DCEP	180	26.2	6.2	286	0.989	99% CO ₂	20	1.05
			4	DCEP	180	26.2	6.2	333	0.85	99% CO ₂	20	0.9
		B	1	DCEP	180	26.2	6.2	234	1.209	99% CO ₂	20	1.283
			2	DCEP	180	26.2	6.2	269	1.052	99% CO ₂	20	1.116
			3	DCEP	180	26.2	6.2	257	1.101	99% CO ₂	20	1.167
			4	DCEP	180	26.2	6.2	286	0.989	99% CO ₂	20	1.05
R3-2	Al 5083	A	1	DCEP	165	19.7	9.8	563	0.346	99% Ar	20	0.533
		B	1	DCEP	165	19.7	9.8	487	0.4	99% Ar	20	0.616
	St EH36	A	1	DCEP	180	26.2	6.2	265	1.068	99% CO ₂	20	1.133
			2	DCEP	180	26.2	6.2	231	1.225	99% CO ₂	20	1.3
			3	DCEP	180	26.2	6.2	265	1.068	99% CO ₂	20	1.133
			4	DCEP	180	26.2	6.2	310	0.913	99% CO ₂	20	0.967
		B	1	DCEP	180	26.2	6.2	286	0.989	99% CO ₂	20	1.05
			2	DCEP	180	26.2	6.2	261	1.084	99% CO ₂	20	1.15
			3	DCEP	180	26.2	6.2	261	1.084	99% CO ₂	20	1.15
			4	DCEP	180	26.2	6.2	277	1.022	99% CO ₂	20	1.083

ตารางที่ ฉ-3 ค่าความแข็งชิ้นงานเหล็กกล้าคาร์บอนจากการทดลองเชื่อมหน้างานโดยช่างเชื่อมปฏิบัติการ ทร.

Point	Location	Fillet (HV)						Bevel (HV)					
		Cover	Average	SD	Root	Average	SD	Cover	Average	SD	Root	Average	SD
1	Base TJ 1	161	163.33 3	2.843	167	167.80 0	1.929	160.3	155.93 3	8.444	163.1	159.30 0	3.305
		166.5			170			146.2			157.7		
		162.5			166.4			161.3			157.1		
2	HAZ low 1	198.1	190.26 7	7.116	195.7	195.06 7	6.174	178.1	184.90 0	7.063	172.3	181.13 3	9.393
		184.2			188.6			184.4			180.1		
		188.5			200.9			192.2			191		
3	Weld 1	239.8	236.76 7	5.960	226.6	234.96 7	7.617	240.7	242.43 3	5.220	233.1	236.36 7	3.408
		240.6			236.8			248.3			236.1		
		229.9			241.5			238.3			239.9		
4	HAZ high 1	209.9	217.40 0	7.451	222.6	222.63 3	1.850	240.9	237.53 3	5.573	242.9	244.33 3	2.228
		217.5			220.8			240.6			243.2		
		224.8			224.5			231.1			246.9		
5	Base Mat (mid)	245.8	242.60 0	3.151	249.5	245.70 0	9.208	288.1	285.80 0	2.787	213.6	230.10 0	14.42 2
		242.5			235.2			286.6			240.3		
		239.5			252.4			282.7			236.4		
6	Base Mat 1	186.9	188.00 0	2.081	332.6	336.23 3	16.94 5	196.8	197.53 3	0.643	242.8	259.20 0	14.75 5
		190.4			354.7			198			263.4		
		186.7			321.4			197.8			271.4		
7	Base Mat 2	190.4	195.33 3	4.900	238.2	233.33 3	4.219	194.7	193.46 7	3.326	168.6	168.70 0	0.854
		200.2			230.7			189.7			167.9		
		195.4			231.1			196			169.6		
8	HAZ high 2	234.4	330.30 0	85.77 7	189.8	199.03 3	8.456	228	227.76 7	9.352	196.5	192.13 3	3.855
		399.7			200.9			218.3			190.7		
		356.8			206.4			237			189.2		
9	Weld 2	237.1	240.50 0	5.717	169.2	166.70 0	3.422	235.7	234.50 0	3.270	154.6	159.46 7	5.060
		247.1			168.1			230.8			164.7		
		237.3			162.8			237			159.1		
10	HAZ low 2	215.5	208.43 3	12.41 3				209.7	196.16 7	13.16 7			
		215.7						183.4					
		194.1						195.4					
11	Base TJ 2	160.9	159.30 0	1.442				165.7	160.03 3	5.194			
		158.1						158.9					
		158.9						155.5					

ตารางที่ ฉ-4 ค่าความแข็งชิ้นงานอะลูมิเนียมจากการทดสอบเชื่อมหน้างานโดยช่างเชื่อมปฏิบัติการ
ทร.

Point	Location	Fillet (HV)						Bevel (HV)					
		Cover	Average	SD	Root	Average	SD	Cover	Average	SD	Root	Average	SD
1	Base TJ 1	88.3	86.767	1.332	85.4	85.400	3.661	88.2	88.767	1.250	84	84.133	1.206
		86.1			90.5			87.9			85.4		
		85.9			83.4			90.2			83		
2	HAZ low 1	79	77.833	1.012	78.1	78.100	1.501	82.5	82.400	2.951	87	80.367	5.762
		77.2			79.5			85.3			77.5		
		77.3			81.1			79.4			76.6		
3	Weld 1	74.8	70.400	7.108	76.7	76.700	1.400	72.2	71.933	3.508	75.6	76.133	0.473
		74.2			77.1			68.3			76.3		
		62.2			74.5			75.3			76.5		
4	HAZ high 1	70.3	69.467	8.182	78.4	78.400	1.795	69.5	75.633	5.313	79	76.233	5.499
		60.9			77.7			78.8			79.8		
		77.2			75.0			78.6			69.9		
5	Base Mat (mid)	76.4	77.533	1.060	78.4	78.400	0.954	72	74.033	1.818	81.7	79.367	2.043
		77.7			76.8			74.6			77.9		
		78.5			76.7			75.5			78.5		
6	Base Mat 1	77.7	77.733	1.950	69.6	69.600	0.451	80.7	81.167	0.569	77.4	77.100	0.361
		79.7			70.1			81.8			76.7		
		75.8			69.2			81			77.2		
7	Base Mat 2	79	76.800	1.947	70.5	70.500	1.345	82.9	81.767	1.026	72.1	73.500	1.706
		75.3			69.8			80.9			73		
		76.1			67.9			81.5			75.4		
8	HAZ high 2	74.9	76.133	1.069	76.1	76.100	1.050	79.5	82.000	2.193	80	80.467	0.416
		76.7			78.2			83.6			80.6		
		76.8			77.2			82.9			80.8		
9	Weld 2	77	75.367	1.422	80.3	80.300	1.940	71.9	71.767	0.808	85.8	84.133	1.563
		74.7			80			70.9			82.7		
		74.4			83.5			72.5			83.9		
10	HAZ low 2	80.2	78.333	1.955				84.2	84.233	1.350			
		76.3						85.6					
		78.5						82.9					
11	Base TJ 2	87.1	87.467	0.351				80.7	84.633	3.478			
		87.5						85.9					
		87.8						87.3					

ตารางที่ ๕-5 ค่าความแข็งแรงชิ้นงานเหล็กกล้าคาร์บอนจากการเชื่อมเพื่อตรวจสอบผลกระทบของการเชื่อมซ่อม

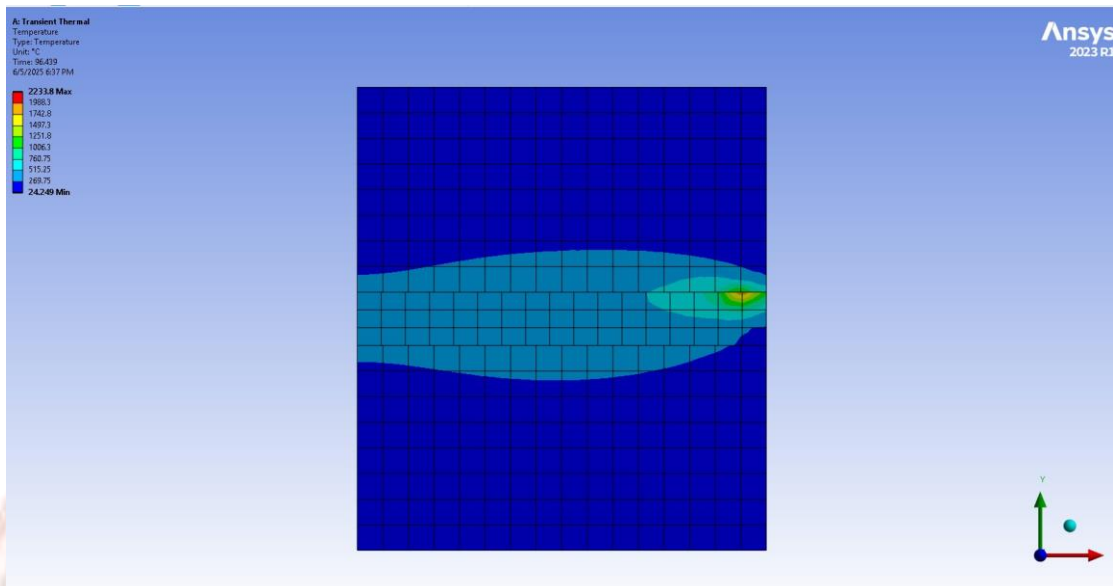
Point	Steel								
	NR			R1			R3		
	Cover	Average	SD	Cover	Average	SD	Cover	Average	SD
1	139.2	147.3	7.39797	148.3	145.267	9.71202	160.9	159.733	1.5308
	153.7			134.4			158		
	149			153.1			160.3		
2	157.3	171.4	13.6275	191.1	197.6	6.87677	206.8	210.767	5.01232
	184.5			196.9			216.4		
	172.4			204.8			209.1		
3	207.6	210.5	2.51595	207.8	196.7	10.3552	222.7	215.3	11.1301
	212.1			187.3			202.5		
	211.8			195			220.7		
4	194.5	189.167	8.3865	163.3	166.467	2.75379	202.9	197.9	4.90306
	193.5			168.3			193.1		
	179.5			167.8			197.7		
5	156.4	160.033	5.05008	144.3	145.133	1.2741	159.1	162.333	3.15331
	157.9			144.5			162.5		
	165.8			146.6			165.4		
6	204.4	204.433	6.95006	176.9	171.2	4.93862	178.3	176.2	3.21403
	197.5			168.2			172.5		
	211.4			168.5			177.8		
7	216.3	215.867	4.16693	211.3	208.267	6.59571	216.6	213.667	2.63502
	219.8			200.7			211.5		
	211.5			212.8			212.9		
8	192.7	198.933	5.40956	215.6	210.933	6.04842	217.5	221.533	4.38444
	201.7			213.1			226.2		
	202.4			204.1			220.9		
9	140.8	150.033	9.84903	144.4	145.733	1.52753	171.2	163.4	10.1681
	148.9			147.4			167.1		
	160.4			145.4			151.9		
10	146	148.833	7.27622	150	150.833	3.23161	157.9	156.1	2.77849
	157.1			154.4			157.5		
	143.4			148.1			152.9		
11	193.5	188.267	4.59384	193.2	187.367	6.53784	207.2	203.267	5.40771
	184.9			188.6			205.5		
	186.4			180.3			197.1		
12	203.9	207.5	3.6	196.3	197.6	3.34515	194.1	197.6	4.22966
	211.1			195.1			202.3		
	207.5			201.4			196.4		
13	200.7	198.933	2.17792	169.5	167.1	2.45153	203.5	208.167	5.15493
	199.6			167.2			207.3		
	196.5			164.6			213.7		
14	201	191.933	8.40555	160.6	158.233	2.12211	170.2	166.633	6.35164
	190.4			156.5			159.3		
	184.4			157.6			170.4		
15	238.4	230.033	7.45408	186	181.567	3.8397	209.6	207.233	3.19427
	227.6			179.4			203.6		
	224.1			179.3			208.5		
16	227.3	219.133	7.33644	198.2	205.4	8.79318	210.7	212.7	2
	217			215.2			212.7		
	213.1			202.8			214.7		
17	177.7	177.7	7.7	206.6	196.067	9.20072	202.5	201.233	4.72899
	170			192			205.2		
	185.4			189.6			196		
18	150.6	152.167	2.45832	155	154.6	4.31393	158.1	159.767	2.2301
	155			150.1			158.9		
	150.9			158.7			162.3		

ตารางที่ ฉ-6 ค่าความแข็งชั้นงานอะลูมิเนียมจากการเชื่อมเพื่อตรวจสอบผลกระทบของการเชื่อม

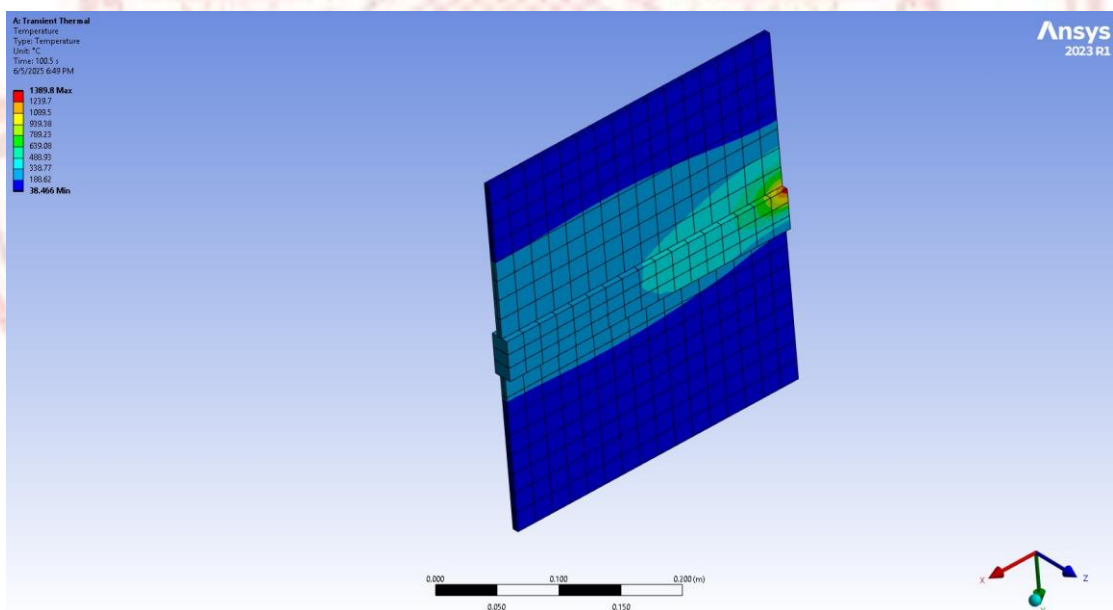
Point	Aluminum								
	NR			R1			R3		
	Cover	Average	SD	Cover	Average	SD	Cover	Average	SD
1	64 63.8 64	63.9333	0.11547	75.3 77 76.7	76.3333	0.90738	79.1 76.7 75.6	77.1333	1.78979
2	63.6 70.5 63	65.7	4.16773	81.4 82.6 82.7	82.2333	0.72342	97.4 94.9 94.8	95.7	1.47309
3	71.8 71.6 73	72.1333	0.75719	76.6 79 77.5	77.7	1.21244	77 80.3 92.3	83.2	8.05171
4	73.8 77.3 74.1	75.0667	1.93993	83 80.2 82.2	81.8	1.44222	83 80.1 81.6	81.5667	1.45029
5	70.8 68.5 70.6	69.9667	1.2741	83.4 84.6 81.8	83.2667	1.40475	76.9 83.6 81.4	80.6333	3.41516
6	77.2 76.7 78.8	77.5667	1.09697	79.1 82 81.8	80.9667	1.61967	83.9 85.5 84.8	84.7333	0.80208
7	73.5 72.6 72.3	72.8	0.6245	75.8 76.1 80.5	77.4667	2.63122	76.5 77.5 78	77.3333	0.76376
8	70.7 60.2 61.5	64.1333	5.72393	78 81.4 80	79.8	1.7088	82.4 80.4 84	82.2667	1.8037
9	69.1 66.7 68.8	68.2	1.30767	81.2 78.3 79.4	79.6333	1.46401	77.5 76.5 76.9	76.9667	0.50332
10	57.7 59.8 58.1	58.5333	1.11505	75 75.7 78.9	76.5333	2.07926	78.2 76.2 76	76.8	1.21655
11	66.7 67.9 64	66.2	1.9975	79.1 80.2 80.1	79.8	0.60828	83.8 78.9 79.7	80.8	2.62869
12	73.6 70.6 70.8	71.6667	1.6773	77.1 75.7 77	76.6	0.78102	74.1 79.5 81.2	78.2667	3.7072
13	77.7 78.1 78.2	78	0.26458	73.2 73.2 80.1	75.5	3.98372	81.7 82.4 80.3	81.4667	1.06927
14	72.9 74.1 72.9	73.3	0.69282	78.9 74.7 76.9	76.8333	2.10079	83.6 84 82.6	83.4	0.72111
15	75.6 77.6 75.9	76.3667	1.07858	77.8 79.7 76.5	78	1.60935	82.6 81.7 79.7	81.3333	1.48436
16	75.5 73.4 74	74.3	1.08167	77.2 78.3 81.1	78.8667	2.0108	78.1 78.9 83.1	80.0333	2.68576
17	69.9 60.4 59.1	63.1333	5.89604	84.7 82.4 82.7	83.2667	1.25033	81.9 80.7 80.5	81.0333	0.75719
18	64.7 64.2 61.9	63.6	1.49332	76.3 76.7 78.7	77.2333	1.28582	80.8 78.4 81.6	80.2667	1.66533

ตารางที่ จ-7 ค่าความแข็งของ Transition Joint

TJ Line										
Area	Point	NR			R1			R3		
		Cover	Average	SD	Cover	Average	SD	Cover	Average	SD
Steel	1	157.9	159.667	1.5308	150.2	151.867	2.15484	158	157.833	2.35443
		160.5			151.1			155.4		
		160.6			154.3			160.1		
	2	179.2	173.2	5.23068	172.4	170.267	3.95769	162	166	3.55528
		170.8			165.7			168.8		
		169.6			172.7			167.2		
	3	163.1	159.3	7.64461	155.3	153.933	1.58219	164.4	166.667	4.72687
		164.3			152.2			163.5		
		150.5			154.3			172.1		
Line	4	242.3	238	13.2827	305.6	241.467	60.3471	234.8	229.2	29.6
		248.6			185.8			255.6		
		223.1			233			197.2		
	5	263.2	250.4	13.2729	266.3	242.267	21.305	162	219.567	67.7323
		251.3			234.8			294.2		
		236.7			225.7			202.5		
	6	232.7	236.333	28.5241	242.5	206.467	47.9834	219.6	222.567	43.8254
		266.5			224.9			267.8		
		209.8			152			180.3		
Alu	7	39.9	38.2	1.47309	25.7	27.4	1.53948	25.9	26.5333	0.56862
		37.4			28.7			27		
		37.3			27.8			26.7		
	8	36.7	37.9667	1.35769	29.7	29.4667	0.32146	28.2	27.8333	0.63509
		37.8			29.1			27.1		
		39.4			29.6			28.2		
	9	40.6	38.8	2.02978	27.7	27.8333	0.32146	27.8	28.3	1.22882
		39.2			27.6			27.4		
		36.6			28.2			29.7		



ภาพที่ ฉ-1 การจำลองการกระจายตัวของอุณหภูมิจากการเชื่อมระหว่างวัสดุฐาน และข้อต่อแบบ ไบเมทัลลิก ทางฝั่งเหล็ก DH36



ภาพที่ ฉ-2 การจำลองการกระจายตัวของอุณหภูมิจากการเชื่อมระหว่างวัสดุฐาน และข้อต่อแบบ ไบเมทัลลิก ทางฝั่งอะลูมิเนียม 5083

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ	น.ต.ศุภรัชย์ สิ้นธุ์ประสพชัย
ชื่อวิทยานิพนธ์	ผลกระทบของจำนวนรอบการเชื่อมต่อคุณลักษณะการแตกหักและโครงสร้างจุลภาคของรอยเชื่อมเชื่อมโลหะต่างชนิดระหว่างอะลูมิเนียมกับเหล็กกล้าคาร์บอนโดยใช้ข้อต่อไบเมทัลลิก
สาขาวิชา	เทคโนโลยีวิศวกรรมเชื่อม
ประวัติ	ประวัติการศึกษา 2551 – 2554 มัธยมศึกษาตอนปลาย โรงเรียนเตรียมทหาร 2554 – 2558 ปริญญาตรี คณะวิศวกรรมเครื่องกลเรือ โรงเรียนนายเรือ ประวัติการทำงาน 2558 – 2563 รองต้นกล ร.ล.มกุฎราชกุมาร กองเรือฟริเกตที่ 1 กองเรือยุทธการ 2563 – 2565 ต้นกล ร.ล.ล่องลม กองเรือฟริเกตที่ 1 กองเรือยุทธการ ผลงานทางวิชาการ เผยแพร่งานวิจัย ในหัวข้อ Investigation of Welding Carbon Steel EH36 and Aluminum 5083 by Using Bimetallic Steel/Aluminum Transition Joints: Microstructure and Hardness ในงานประชุมวิชาการระดับชาติ International Conference on Smart Materials and Nanotechnology 2024 (Smartmat2024) ณ โรงแรม Chiangmai Grandview จังหวัดเชียงใหม่

สถานที่ติดต่อปัจจุบัน

21/1176 หมู่ที่ 2 กองเรื้อยทุทรการ ตำบลสตั้หีบ อำเภอสตั้หีบ

จั้งหวดัชลบุรี รหัสไปรษณีย์ 20180

เบอร์โทรศัฟฟที่สามารถดัดต่อได้ 097-2522062

E-mail : glowtoon@gmail.com

