



โครงสร้างจุลภาคและสมบัติเชิงกลของการเชื่อมซ่อมอะลูมิเนียมผสม
**Microstructure and Mechanical Properties of
Welding Repair of Aluminum Alloys**

ศุภชัย สุขเวช
Supachai Sukawet

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญา
วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมวัสดุ
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

**A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of
Master of Engineering in Materials Engineering
Prince of Songkla University**

2558

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

ชื่อวิทยานิพนธ์ โครงสร้างจุลภาคและสมบัติเชิงกลของการเชื่อมซ่อมอะลูมิเนียมผสม
 ผู้เขียน นายศุภชัย สุขเวช
 สาขาวิชา วิศวกรรมวัสดุ

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

คณะกรรมการสอบ

.....

.....ประธานกรรมการสอบ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ประภาศ เมืองจันทร์บุรี)

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชัชชัย ปลุกผล)

..... กรรมการสอบ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ประภาศ เมืองจันทร์บุรี)

..... กรรมการสอบ

(ดร.สมใจ จันทร์อุคม)

..... กรรมการสอบ

(ดร.กนิษฐ์ ตะปะสา)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยนี้เป็นส่วน
 หนึ่งของการศึกษา ตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมวัสดุ

.....

(รองศาสตราจารย์ ดร. ชีระพล ศรีชนะ)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

ขอรับรองว่า ผลงานวิจัยนี้เป็นผลมาจากการศึกษาวิจัยของนักศึกษาเอง และขอขอบคุณผู้มีส่วน
เกี่ยวข้องทุกท่านไว้ ณ ที่นี้

ลงชื่อ.....

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ประภาศ เมืองจันทร์บุรี)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

ลงชื่อ.....

(นายสุภชัย สุขเวช)

นักศึกษา

ข้าพเจ้าขอรับรองว่า ผลงานวิจัยนี้ไม่เคยเป็นส่วนหนึ่งในการอนุมัติปริญญาในระดับใดมาก่อนและ
ไม่ได้ใช้ในการยื่นขออนุมัติปริญญาในขณะนี้

ลงชื่อ.....

(นายสุภชัย สุขเวช)

นักศึกษา

ชื่อวิทยานิพนธ์	โครงสร้างจุลภาคและสมบัติเชิงกลของการเชื่อมซ่อมอะลูมิเนียมผสม
ผู้เขียน	นายศุภชัย สุขเวช
สาขาวิชา	วิศวกรรมวัสดุ
ปีการศึกษา	2557

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาตัวแปรที่เหมาะสมสำหรับการเชื่อมซ่อมด้วยสารละลายอะลูมิเนียม โดยใช้กรรมวิธีการเชื่อมมิก สำหรับอะลูมิเนียม 6082T6 เชื่อมด้วยลวดเชื่อม 4043 (4 เงื่อนไข) และอะลูมิเนียม 6082T6 เชื่อมด้วยลวดเชื่อม 5356 (4 เงื่อนไข) สำหรับอะลูมิเนียม 5083 เชื่อมด้วยลวดเชื่อม 5356 (4 เงื่อนไข) หลังจากทำการเชื่อมในแต่ละตัวแปรแล้ว นำชิ้นงานมาทำการศึกษาสมบัติเชิงโลหะวิทยาเพื่อวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพของแนวเชื่อมและโครงสร้างระดับมหภาคและจุลภาค และเปรียบเทียบข้อแตกต่างทางโครงสร้างในแต่ละตัวแปรของการเชื่อมสำหรับการศึกษาสมบัติเชิงกล ได้แก่ ทดสอบความแข็งแรงดึง ทดสอบการค้ำงอ ตามมาตรฐาน AWS D1.2 ทดสอบความแข็ง จากการศึกษา พบว่าในการเชื่อมซ่อมอะลูมิเนียมผสม 6082T6 ด้วยลวดเชื่อม 4043 แนวเชื่อมมีความสมบูรณ์ดี พบรูพรุนเพียงเล็กน้อย สำหรับการศึกษาค้นคว้าโครงสร้างจุลภาคทุกเงื่อนไข พบเกรนมีลักษณะเป็นแบบเดนไดรต์ จากการทดสอบความแข็งแรงดึงให้ค่าความแข็งแรงดึงผ่านมาตรฐาน AWS D1.2 และบริเวณที่ขาดคือ บริเวณที่ได้รับผลกระทบเนื่องจากความร้อน จากการทดสอบการค้ำงอของการเชื่อมซ่อมทุกเงื่อนไข สามารถยอมรับได้ทั้งหมดและบริเวณ HAZ อยู่ถัดจากกลางเนื้อเชื่อมประมาณ 5-8 มิลลิเมตร สำหรับการเชื่อมซ่อมอะลูมิเนียมผสม 6082T6 ด้วยลวดเชื่อม 5356 พบรูพรุนกระจายตัวในบริเวณเนื้อเชื่อมอย่างเห็นได้ชัด สำหรับการศึกษาค้นคว้าโครงสร้างจุลภาคทุกเงื่อนไข พบเกรนมีลักษณะเป็นแบบเดนไดรต์ จากการทดสอบความแข็งแรงดึงให้ค่าความแข็งแรงดึงผ่านมาตรฐาน AWS D1.2 และบริเวณที่ขาดคือ บริเวณแนวเชื่อม จากการทดสอบการค้ำงอของการเชื่อมซ่อมทุกเงื่อนไข สามารถยอมรับได้ทั้งหมดและบริเวณ HAZ อยู่ถัดจากกลางเนื้อเชื่อมประมาณ 5-8 มิลลิเมตร สำหรับการเชื่อมซ่อมอะลูมิเนียมผสม 5083 ด้วยลวดเชื่อม 5356 แนวเชื่อมมีความสมบูรณ์ดี พบรูพรุนเพียงเล็กน้อย สำหรับการศึกษาค้นคว้าโครงสร้างจุลภาคทุกเงื่อนไข พบเกรนมีลักษณะเป็นแบบเดนไดรต์ จากการทดสอบความแข็งแรงดึงให้ค่าความแข็งแรงดึงไม่ผ่านมาตรฐาน AWS D1.2 และบริเวณที่ขาดคือ บริเวณแนวเชื่อม จากการทดสอบการค้ำงอสามารถยอมรับได้เฉพาะการเชื่อมซ่อมในเงื่อนไขอะลูมิเนียมขนาด 3 มิลลิเมตร เท่านั้นและบริเวณเนื้อเชื่อมมีการอ่อนตัวมากที่สุด

Thesis Title	Microstructure and Mechanical Properties of Welding Repair of Aluminum Alloys
Author	Mr. Supachai Sukawet
Major Program	Materials Engineering
Academic Year	2014

ABSTRACT

This research is a study of welding repair of aluminum alloys for rolling stock using Metal Inert Gas welding (MIG) process. The new welds of 6082T6 aluminum alloy were welded by 4043 filler and 5356 filler (4 conditions each). In addition, 5083 aluminum alloy were also welded by 5356 filler. Then new welds were removed by grinding and repeatedly welded again for repair welding. The physical of joint and macro/microstructure were investigated. Mechanical properties such as tensile test and bend test were also studied following AWS D1.2 standard. Hardness test was also applied. The results revealed porosities for most of samples. Microstructure showed dendritic structure. For 6082T6 welded by 4043, results confirmed satisfied tensile strengths according to AWS D1.2 and all samples were fractured at HAZ. Bend tests were also satisfactory. However, for 6082T6 welded by 5356, tensile strengths and bend test were satisfied but tensile samples were fractured at weld metals. In addition, for 5083, tensile strengths were lower than AWS D1.2 and all samples were fractured at weld metals. Bend tests were also satisfied only in case of 3 mm. The weld metals also indicated lowest hardness.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จได้ด้วยดี เนื่องด้วยการประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้และความอนุเคราะห์จากบุคคลหลายฝ่าย ตลอดจนบัณฑิตศึกษาและคณาจารย์ทุกท่านในภาควิชาวิศวกรรมเหมืองแร่และวัสดุ โดยเฉพาะอย่างยิ่งอาจารย์ที่ปรึกษาหลัก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ประภาศ เมืองจันทร์บุรี ที่ให้คำปรึกษาแนะนำในการดำเนินงานวิจัย และการจัดทำวิทยานิพนธ์ให้มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบคุณคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่ให้ความกรุณาตรวจทานและให้คำแนะนำงานวิทยานิพนธ์เล่มนี้มีความสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

ขอขอบคุณคณะวิศวกรรมศาสตร์ ภาควิชาวิศวกรรมเหมืองแร่และวัสดุ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ที่ช่วยเหลือเครื่องมือและอุปกรณ์การวิจัย

ขอขอบคุณสำนักงานวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ (สวทช.) ที่ได้ให้การสนับสนุนเงินทุนและขอขอบคุณทีมงานและผู้ทำวิจัยการเชื่อมซ่อมอะลูมิเนียมผสมทุกท่านที่ทำให้งานวิจัยและวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สามารถดำเนินงานไปได้และมีความสมบูรณ์ครบถ้วนทุกประการ

ศุภชัย สุขเวช

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	(5)
Abstract	(6)
กิตติกรรมประกาศ	(7)
สารบัญ	(8)
สารบัญตาราง	(11)
สารบัญรูปประกอบ	(13)
บทที่	
1. บทนำ	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	3
1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย	3
1.4 แผนการดำเนินการวิจัย	3
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัย	4
2. ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	5
2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับวัสดุ	5
2.1.1 อะลูมิเนียมผสม	9
2.1.2 ลวดเชื่อมอะลูมิเนียม	10
2.2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับโลหะวิทยาของอะลูมิเนียมผสม	11
2.2.1 อะลูมิเนียมผสมกลุ่ม 6xxx	11
2.2.2 อะลูมิเนียมผสมกลุ่ม 5xxx	12
2.3 ทฤษฎีเกี่ยวกับการเชื่อมมิกอะลูมิเนียมและโลหะวิทยา	13
2.3.1 ทฤษฎีการเชื่อมมิกอะลูมิเนียม	13
2.3.2 โลหะวิทยาการเชื่อมมิกอะลูมิเนียม	17
2.4 ทฤษฎีเกี่ยวกับทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับสมบัติเชิงกล	18
2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	20

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3. วิธีการดำเนินการวิจัย	28
3.1 การออกแบบวิธีการดำเนินการวิจัย	28
3.1.1 เงื่อนไขการทดลอง	29
3.2 วัสดุที่ใช้ในการทดลอง	30
3.2.1 อะลูมิเนียมผสมเกรด 6082T6	30
3.2.2 อะลูมิเนียมผสมเกรด 5083	30
3.2.3 ลวดเชื่อม	31
3.2.4 การเตรียมชิ้นงานสำหรับการทดลอง	32
3.3 เครื่องมือและอุปกรณ์สำหรับการทดลอง	33
3.4 ขั้นตอนการทดลองเชื่อม	37
3.4.1 ขั้นตอนการเตรียมชิ้นงานและการเชื่อม	37
3.5 ศึกษาสมบัติเชิงโลหะวิทยา (Metallurgical Properties Investigation)	40
3.5.1 การเตรียมชิ้นงาน	40
3.5.2 การขัดชิ้นงาน	41
3.5.3 การเตรียมกรดและการกัดผิวชิ้นงาน	42
3.6 การวัดความหนาแน่นของแนวเชื่อม	44
3.7 ศึกษาคุณสมบัติเชิงกล (Mechanical Properties Investigation)	47
3.7.1 การทดสอบแรงดึงและแรงดัด (Tensile Test and Bend Test)	47
3.7.2 การทดสอบหาค่าความแข็ง (Hardness Test)	47
4. ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผล	48
4.1 ลักษณะทางกายภาพของแนวเชื่อม	48
4.2 โครงสร้างมหภาคและจุลภาคของแนวเชื่อม	52
4.3 โครงสร้างจุลภาคของแนวเชื่อมจาก	
กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)	65
4.4 ความหนาแน่นของแนวเชื่อม	68

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.5 สมบัติเชิงกล	70
5. สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ	90
5.1 สรุปผลการทดลอง	90
5.2 ข้อเสนอแนะ	92
บรรณานุกรม	93
ภาคผนวก	95
ก การเลือกวัสดุเชื่อมสำหรับอะลูมิเนียมผสม	96
ข แสดงส่วนประกอบทางเคมีของอะลูมิเนียมผสม	98
ค ส่วนประกอบทางเคมีของวัสดุเชื่อมอะลูมิเนียม	101
ง แสดงลักษณะรอยต่อชิ้นงาน	104
จ แสดงข้อมูลสำหรับการทดสอบการดัดงอ	106
ฉ ชิ้นงานทดสอบการดัดงอ ตามมาตรฐาน AWS D1.2	108
ช ชิ้นงานทดสอบความแข็งแรงดึง ตามมาตรฐาน AWS D1.2	110
ซ บทความวารสาร	112
ประวัติผู้เขียน	118

สารบัญญัตราสาร

ตารางที่	หน้า
2.1 แสดงการแบ่งประเภทของอะลูมิเนียม	8
2.2 แสดงสมบัติเชิงกลของอะลูมิเนียม 6082T6	9
2.3 แสดงปริมาณส่วนผสมทางเคมีของอะลูมิเนียมเกรด 6082T6	9
2.4 แสดงสมบัติเชิงกลของอะลูมิเนียม 5083	10
2.5 แสดงปริมาณส่วนผสมทางเคมีของอะลูมิเนียมเกรด 5083	10
2.6 แสดงปริมาณส่วนผสมทางเคมีของลวดเชื่อมอะลูมิเนียม	11
2.7 การเปรียบเทียบ การละลายของไฮโดรเจนระหว่างอะลูมิเนียมผสมและเหล็กกล้า	15
2.8 แสดงตัวแปรในการเชื่อม	22
3.1 เงื่อนไขการทดลองทั้งหมด	29
3.2 สรุปเงื่อนไขการทดลองสำหรับอะลูมิเนียมผสม 6082T6	29
3.3 สรุปเงื่อนไขการทดลองสำหรับอะลูมิเนียมผสม 5083	29
3.4 ส่วนประกอบทางเคมีของอะลูมิเนียม 6082T6 ที่ใช้ในการทดลอง	30
3.5 ส่วนประกอบทางเคมีของอะลูมิเนียม 5083 ที่ใช้ในการทดลอง	30
3.6 แสดงส่วนประกอบทางเคมีของลวดเชื่อมอะลูมิเนียมที่ใช้ในการทดลอง	31
4.1 แสดงปริมาณธาตุที่ตรวจสอบแบบจุดของการเชื่อมซ่อมอะลูมิเนียมผสม 6082T6 เชื่อมด้วยลวดเชื่อม 4043 โดยใช้สัญญาณแบบเอ็กซ์เรย์ (X-ray) เป็นสัญญาณที่ใช้เทคนิค EDX	65
4.2 แสดงปริมาณธาตุที่ตรวจสอบแบบจุดของการเชื่อมซ่อมอะลูมิเนียมผสม 6082T6 เชื่อมด้วยลวดเชื่อม 4043 โดยใช้สัญญาณแบบเอ็กซ์เรย์ (X-ray) เป็นสัญญาณที่ใช้เทคนิค EDX	66
4.3 แสดงปริมาณธาตุที่ตรวจสอบแบบจุดของการเชื่อมซ่อมอะลูมิเนียมผสม 6082T6 เชื่อมด้วยลวดเชื่อม 4043 โดยใช้สัญญาณแบบเอ็กซ์เรย์ (X-ray) เป็นสัญญาณที่ใช้เทคนิค EDX	67
4.4 แสดงการวัดความหนาแน่นของเนื้อเชื่อมอะลูมิเนียม 6082T6	68
4.5 แสดงการวัดความหนาแน่นของเนื้อเชื่อมอะลูมิเนียม 5083	69
4.6 แสดงสมบัติเชิงกลระหว่างการเชื่อมใหม่และการเชื่อมซ่อม	74

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
4.7 แสดงผลการทดสอบการค้ำองอะลูมิเนียมผสม 6082T6 เชื่อมด้วยลวดเชื่อม 4043	76
4.8 แสดงผลการทดสอบการค้ำองอะลูมิเนียมผสม 6082T6 เชื่อมด้วยลวดเชื่อม 5356	78
4.9 แสดงผลการทดสอบการค้ำองอะลูมิเนียมผสม 5083 เชื่อมด้วยลวดเชื่อม 5356	81
ก.1 แสดงการเลือกลวดเชื่อมสำหรับอะลูมิเนียมผสม	97
จ.1 แสดงขนาดของ Roller	107

สารบัญรูปประกอบ

รูปที่	หน้า
1.1 แสดงความเสียหายที่จะต้องมีการเชื่อมซ่อมของผู้โดยสารรถไฟอะลูมิเนียม	2
2.1 แผนภาพสมมูลของอะลูมิเนียม - แมกนีเซียมซิลิไซด์	11
2.2 บริเวณยูเทคติกในอะลูมิเนียมเกรด 6xxx	12
2.3 แผนภาพสมมูลของอะลูมิเนียม - แมกนีเซียม	12
2.4 บริเวณยูเทคติกในอะลูมิเนียมเกรด 5xxx	13
2.5 แสดงหลักการเชื่อมมิก	13
2.6 อิทธิพลของแก๊สคลุมต่อแนวเชื่อม	15
2.7 แสดงกราฟเปรียบเทียบระหว่างไฮโดรเจนที่ละลายกับอุณหภูมิของอะลูมิเนียมและเหล็ก	16
2.8 อัตราส่วนของไฮโดรเจนที่เข้าสู่เนื้อเชื่อม	16
2.9 แสดงขั้นตอนการเกิดเกรนของอะลูมิเนียมผสม	18
2.10 แสดงความแข็งของอะลูมิเนียมที่ผ่านการกระทำทางความร้อน	19
2.11 แสดงความแข็งของอะลูมิเนียมที่ไม่ผ่านการกระทำทางความร้อน	19
2.12 แสดงค่าความแข็งแรงดึง	21
2.13 ความแข็งของการเชื่อมครั้งที่ 1 และการเชื่อมครั้งที่ 4	21
2.14 แสดงลักษณะโครงสร้างจุลภาค	23
2.15 แสดงความแข็งบริเวณแนวเชื่อมจากการเชื่อมมิก	23
2.16 แสดงลักษณะโครงสร้างจุลภาค	24
2.17 แสดงผลการทดสอบสมบัติเชิงกล โดยลวดเชื่อม 4043, 5183, 5356	25
2.18 แสดงผลการทดสอบสมบัติเชิงกล ของอะลูมิเนียม 7020, 5083, 5059	25
2.19 แสดงการวัดความหนาแน่นของเนื้อเชื่อม	26
2.20 โครงสร้างจุลภาคของเนื้อเชื่อมและการวิเคราะห์ EDS	27
2.21 แสดงความแข็งบริเวณ BM, HAZ และ WM	27
3.1 ขั้นตอนวิธีดำเนินการวิจัย	28
3.2 ลวดเชื่อมอะลูมิเนียมขนาด 1.2 มิลลิเมตร	31
3.3 แสดงการเตรียมชิ้นงานขนาด 3-4 มิลลิเมตร	32
3.4 แสดงการเตรียมชิ้นงานขนาด 6 มิลลิเมตร	32

สารบัญรูปประกอบ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.5 แสดงเครื่องเชื่อมมิก	33
3.6 เครื่องกัดแนวตั้ง	33
3.7 เครื่องเลื่อยสายพานแนวนอน	34
3.8 ถังแก๊สอาร์กอน	34
3.9 กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง มีกำลังขยาย 4-28 เท่า	35
3.10 กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง มีกำลังขยาย 25-500 เท่า	35
3.11 เครื่องทดสอบความแข็ง	36
3.12 เครื่องทดสอบแรงดึง	36
3.13 เครื่องทดสอบการคัดงอ	37
3.14 แสดงการเตรียมชิ้นงานสำหรับเชื่อม	38
3.15 แสดงการทำความสะอาดผิวชิ้นงาน	38
3.16 แสดงการเชื่อมชิ้นงาน	39
3.17 ชิ้นงานหลังจากการเชื่อม	39
3.18 การวางตำแหน่งบนแม่พิมพ์ทำเรือนแบบร้อน (hot mounting)	40
3.19 การใส่ผงเบเคอร์ไลต์ (Bakelite)	40
3.20 ชิ้นงานทำเรือนแบบร้อน	41
3.21 แสดงการขัดชิ้นงานด้วยกระดาษทราย	41
3.22 แสดงการขัดชิ้นงานด้วยสั๊กหลอด	42
3.23 การจุ่มชิ้นงานลงในกรด	43
3.24 การเป่าผิวชิ้นงาน	43
3.25 แสดงรูปแบบการวัดความหนาแน่นของแนวเชื่อม	44
3.26 การเลือกรูปภาพสำหรับวัดความหนาแน่น	44
3.27 การเลือกพื้นที่สำหรับวัดความหนาแน่น	45
3.28 การแยกตำแหน่งของรูพรุนกับเนื้อเชื่อมใน โปรแกรม Adobe Photoshop	45
3.29 การเปิดรูปภาพที่ได้จาก โปรแกรม Adobe Photoshop	45
3.30 การแยกตำแหน่งรูพรุนออกจากเนื้อเชื่อมใน โปรแกรม Image Tool	46
3.31 การวิเคราะห์ปริมาณรูพรุนในเนื้อเชื่อม	46

สารบัญรูปประกอบ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.32 ชิ้นงานที่ผ่านการเชื่อมแล้วนำมาตัดตามแนวขวางกับรอยเชื่อม	47
3.33 แสดงตำแหน่งการกดความแข็ง	47
4.1 แสดงลักษณะทางกายภาพของอะลูมิเนียมผสม 6062T6 เชื่อมด้วยลวดเชื่อม 4043	49
4.2 แสดงลักษณะทางกายภาพของอะลูมิเนียมผสม 6062T6 เชื่อมด้วยลวดเชื่อม 5356	50
4.3 แสดงลักษณะทางกายภาพของอะลูมิเนียมผสม 5083 เชื่อมด้วยลวดเชื่อม 5356	51
4.4 แสดงโครงสร้างมหภาค/จุลภาค Al 6082T6 - 4 mm - Filler 4043 (เชื่อมใหม่)	53
4.5 แสดงโครงสร้างมหภาค/จุลภาค Al 6082T6 - 4 mm - Filler 4043 (เชื่อมซ่อม)	54
4.6 แสดงโครงสร้างมหภาค/จุลภาค Al 6082T6 - 6 mm - Filler 4043 (เชื่อมใหม่)	55
4.7 แสดงโครงสร้างมหภาค/จุลภาค Al 6082T6 - 6 mm - Filler 4043 (เชื่อมซ่อม)	56
4.8 แสดงโครงสร้างมหภาค/จุลภาค Al 6082T6 - 4 mm - Filler 5356 (เชื่อมใหม่)	57
4.9 แสดงโครงสร้างมหภาค/จุลภาค Al 6082T6 - 4 mm - Filler 5356 (เชื่อมซ่อม)	58
4.10 แสดงโครงสร้างมหภาค/จุลภาค Al 6082T6 - 6 mm - Filler 5356 (เชื่อมใหม่)	59
4.11 แสดงโครงสร้างมหภาค/จุลภาค Al 6082T6 - 6 mm - Filler 5356 (เชื่อมซ่อม)	60
4.12 แสดงโครงสร้างมหภาค/จุลภาค Al 5083 - 3 mm - Filler 5356 (เชื่อมใหม่)	61
4.13 แสดงโครงสร้างมหภาค/จุลภาค Al 5083 - 3 mm - Filler 5356 (เชื่อมซ่อม)	62
4.14 แสดงโครงสร้างมหภาค/จุลภาค Al 5083 - 6 mm - Filler 5356 (เชื่อมใหม่)	63
4.15 แสดงโครงสร้างมหภาค/จุลภาค Al 5083 - 6 mm - Filler 5356 (เชื่อมซ่อม)	64
4.16 ภาพจากสัญญาณอิเล็กตรอนที่กระเจิงกลับ (Back Scattered Electrons, BSE) บริเวณเนื้อเชื่อมของการเชื่อมซ่อมอะลูมิเนียมผสม 6082T6 เชื่อมด้วยลวดเชื่อม 4043	65
4.17 ภาพจากสัญญาณอิเล็กตรอนที่กระเจิงกลับบริเวณเนื้อเชื่อม ของการเชื่อมซ่อมอะลูมิเนียมผสม 6082T6 เชื่อมด้วยลวดเชื่อม 5356	66
4.18 ภาพจากสัญญาณอิเล็กตรอนที่กระเจิงกลับบริเวณเนื้อเชื่อม ของการเชื่อมซ่อมอะลูมิเนียมผสม 6082T6 เชื่อมด้วยลวดเชื่อม 5356	67
4.19 ค่าความแข็งแรงดึงของอะลูมิเนียมผสม 6082T6 และอะลูมิเนียมผสม 5083	70
4.20 แสดงพื้นที่หน้าตัดการแตกหักของอะลูมิเนียมผสม 6082T6 และอะลูมิเนียมผสม 5083	70
4.21 ค่าความแข็งแรงดึงของอะลูมิเนียมผสม 6082T6 เชื่อมด้วยลวดเชื่อม 4043	71
4.22 แสดงพื้นที่หน้าตัดการแตกหักของอะลูมิเนียมผสม 6082T6 เชื่อมด้วยลวดเชื่อม 4043	71

สารบัญรูปประกอบ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.23 ค่าความแข็งแรงดึงของอะลูมิเนียมผสม 6082T6 เชื่อมด้วยลวดเชื่อม 5356	72
4.24 แสดงพื้นที่หน้าตัดการแตกหักของอะลูมิเนียมผสม 6082T6 เชื่อมด้วยลวดเชื่อม 5356	72
4.25 ค่าความแข็งแรงดึงของอะลูมิเนียมผสม 5083 เชื่อมด้วยลวดเชื่อม 5356	73
4.26 แสดงพื้นที่หน้าตัดการแตกหักของอะลูมิเนียมผสม 5083 เชื่อมด้วยลวดเชื่อม 5356	73
4.27 แสดงตำแหน่งตัวอย่างที่ทดสอบการคืบงอ	75
4.28 เจ็อนไน้ A1 6082T6 - 4 mm - Filler 4043 (เชื่อมใหม่)	76
4.29 เจ็อนไน้ A1 6082T6 - 4 mm - Filler 4043 (เชื่อมซ่อม)	77
4.30 เจ็อนไน้ A1 6082T6 - 6 mm - Filler 4043 (เชื่อมใหม่)	77
4.31 เจ็อนไน้ A1 6082T6 - 6 mm - Filler 4043 (เชื่อมซ่อม)	78
4.32 เจ็อนไน้ A1 6082T6 - 4 mm - Filler 5356 (เชื่อมใหม่)	79
4.33 เจ็อนไน้ A1 6082T6 - 4 mm - Filler 5356 (เชื่อมซ่อม)	79
4.34 เจ็อนไน้ A1 6082T6 - 6 mm - Filler 5356 (เชื่อมใหม่)	80
4.35 เจ็อนไน้ A1 6082T6 - 6 mm - Filler 5356 (เชื่อมซ่อม)	80
4.36 เจ็อนไน้ A1 5083 - 3 mm - Filler 5356 (เชื่อมใหม่)	81
4.37 เจ็อนไน้ A1 5083 - 3 mm - Filler 5356 (เชื่อมซ่อม)	82
4.38 เจ็อนไน้ A1 5083 - 6 mm - Filler 5356 (เชื่อมใหม่)	82
4.39 เจ็อนไน้ A1 6082T6 - 6 mm - Filler 5356 (เชื่อมซ่อม)	83
4.40 แสดงความแข็งแรงของแนวเชื่อมระหว่างการเชื่อมใหม่กับการเชื่อมซ่อมของ อะลูมิเนียมผสม 6082T6 ขนาด 4 มิลลิเมตร เชื่อมด้วยลวดเชื่อม 4043	84
4.41 แสดงความแข็งแรงของแนวเชื่อมระหว่างการเชื่อมใหม่กับการเชื่อมซ่อมของ อะลูมิเนียมผสม 6082T6 ขนาด 6 มิลลิเมตร เชื่อมด้วยลวดเชื่อม 4043	85
4.42 แสดงความแข็งแรงของแนวเชื่อมระหว่างการเชื่อมใหม่กับการเชื่อมซ่อมของ อะลูมิเนียมผสม 6082T6 ขนาด 4 มิลลิเมตร เชื่อมด้วยลวดเชื่อม 5356	86
4.43 แสดงความแข็งแรงของแนวเชื่อมระหว่างการเชื่อมใหม่กับการเชื่อมซ่อมของ อะลูมิเนียมผสม 6082T6 ขนาด 6 มิลลิเมตร เชื่อมด้วยลวดเชื่อม 5356	87
4.44 แสดงความแข็งแรงของแนวเชื่อมระหว่างการเชื่อมใหม่กับการเชื่อมซ่อมของ อะลูมิเนียมผสม 5083 ขนาด 3 มิลลิเมตร เชื่อมด้วยลวดเชื่อม 5356	88

สารบัญรูปประกอบ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.46 แสดงความแข็งของแนวเชื่อมระหว่างการเชื่อมใหม่กับการเชื่อมซ่อมของ อะลูมิเนียมผสม 5083 ขนาด 6 มิลลิเมตร เชื่อมด้วยลวดเชื่อม 5356	89
ข.1 ส่วนประกอบทางเคมีของอะลูมิเนียมผสม 6082T6	99
ข.2 ส่วนประกอบทางเคมีของอะลูมิเนียมผสม 5083	100
ค.1 แสดงส่วนประกอบทางเคมีของลวดเชื่อม 4043 ที่ใช้ในการทดลอง	102
ค.2 แสดงส่วนประกอบทางเคมีของลวดเชื่อม 5356 ที่ใช้ในการทดลอง	103
ง.1 ลักษณะรอยต่อชิ้นงานขนาดบาง	105
ง.2 ลักษณะรอยต่อชิ้นงานขนาดหนา	105
จ.1 อุปกรณ์สำหรับการทดสอบการดัดงอ	107
ฉ.1 ชิ้นงานทดสอบการดัดงอที่เชื่อมด้วยลวดเชื่อม 4043	109
ช.1 ชิ้นงานทดสอบความแข็งแรงดึง ตามมาตรฐาน AWS D1.2	110

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา

ในปัจจุบันการคมนาคมขนส่งทางรางกำลังมีบทบาทสำคัญในการพัฒนาประเทศในหลายๆ ด้าน การขนส่งทางรางจัดเป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพสูงและประหยัด ระบบโครงสร้างพื้นฐาน โดยเฉพาะรางรถไฟ และตัวรถไฟหรือตู้โดยสาร (Track work and Rolling stocks) จึงมีความสำคัญทั้งในด้านการผลิต (Production) และการซ่อมบำรุง (Maintenance) เป็นอย่างมาก ปัจจุบันตัวรถไฟ (ตู้โดยสาร) และชิ้นส่วนอื่นๆผลิตมาจากโลหะในกลุ่มอะลูมิเนียมผสมเป็นหลัก เช่น อะลูมิเนียมผสมในกลุ่ม 5xxx และ 6xxx โดยที่อะลูมิเนียมผสมที่นำมาใช้งานมีทั้งอะลูมิเนียมผสมขึ้นรูป (Wrought Aluminum Alloys) อะลูมิเนียมผสมหล่อ (Cast Aluminum alloys) และอะลูมิเนียมผสมอัดรีด (Extruded Aluminum alloys) อย่างไรก็ตามในการนำไปใช้งานของชิ้นส่วนอะลูมิเนียมผสมที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้นได้อย่างเต็มที่ก็จะเกี่ยวข้องกับกรรมวิธีต่อเนื่อง โดยเฉพาะที่เกี่ยวข้องกับการขึ้นรูป (Materials Forming) ซึ่งก็จะมีการเชื่อม (Joining) เข้ามาเกี่ยวข้องอย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้ ทั้งการเชื่อมระหว่างอะลูมิเนียมผสมในกลุ่มเดียวกัน (Similar Joint) และการเชื่อมระหว่างอะลูมิเนียมผสมต่างกลุ่มหรือกับโลหะชนิดอื่น (Dissimilar Joint) ในโครงสร้างหรือชิ้นส่วนประกอบต่างๆ

การเชื่อมอะลูมิเนียมผสมของชิ้นส่วนรถไฟ จะใช้การเชื่อมแบบอาร์คหรือการเชื่อมโดยการหลอมละลาย (Fusion Welding) เช่น โดยเฉพาะการเชื่อมมิก ในปัจจุบันการเชื่อมซ่อมโดยกรรมวิธีการเชื่อมมิก (MIG Welding Process) มีความเหมาะสมมากสำหรับการเชื่อมโลหะ โดยเฉพาะโลหะในกลุ่มอะลูมิเนียมผสมเนื่องจากความเหมาะสมของตัวกรรมวิธีการเชื่อมและตัววัสดุเอง

อย่างไรก็ตามเมื่อรถไฟเกิดอุบัติเหตุหรือเกิดความเสียหาย (รูปที่ 1.1) ก็จะมีการเชื่อมซ่อมตามมา ซึ่งกรรมวิธีการเชื่อมซ่อมที่ไม่ถูกต้อง อาจก่อให้เกิดสิ่งบกพร่องบริเวณแนวเชื่อม เช่น การแตก (Crack) รูพรุน (Porosity) การหลอมละลายไม่สมบูรณ์ (Lack of fusion) เป็นต้น นอกจากนี้อาจเกิดการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างจากการเชื่อม ซึ่งอาจเกิดจากความร้อน(อุณหภูมิ)

ซึ่งส่งผลกระทบต่อความแข็งแรงและการใช้งานทางวิศวกรรม แนวเชื่อมอะลูมิเนียมเป็นตัวรับความแข็งแรงของชิ้นส่วนตัวถังรถไฟ มีเหตุการณ์ในอดีตซึ่งเกิดอุบัติเหตุอันเนื่องมาจากแนวเชื่อมเกิดความผิดพลาด โดยเฉพาะความผิดพลาดจากความแข็งแรงและโครงสร้างภายในของชิ้นส่วนเชื่อม จากเหตุการณ์ดังกล่าวพบว่าเกิดจากแนวเชื่อมมาจากการเชื่อมมิก ซึ่งมีความแข็งแรงและคุณภาพที่ไม่เหมาะสม

จากข้อมูลและเหตุผลดังกล่าวข้างต้นจึงเป็นที่มาของโครงการวิจัยนี้ โดยจะศึกษาการเชื่อมซ่อมอะลูมิเนียมผสมเกรด 6082T6 และเกรด 5083 โดยวิธีการเชื่อมมิกและหาสมบัติทางโลหะวิทยา (โครงสร้างทางมหภาคและจุลภาค) และสมบัติทางกลโดยเฉพาะของแนวเชื่อม (Weld Metal) และบริเวณที่มีผลกระทบอันเนื่องมาจากความร้อน (Heat Affected Zone, HAZ) เพื่อนำผลจากงานวิจัยมาปรับปรุงและเป็นฐานข้อมูลทางวิศวกรรมในการกำหนดเลือกใช้กรรมวิธีการเชื่อมและตัวแปรการเชื่อมที่เหมาะสม (Welding Procedure Specification for repair welding) เพื่อใช้ในการเชื่อมซ่อมตู้โดยสารรถไฟอะลูมิเนียมต่อไป



(ก)



(ข)



(ค)



(ง)

รูปที่ 1.1 แสดงความเสียหายที่จะต้องมีการเชื่อมซ่อมของตู้โดยสารรถไฟอะลูมิเนียม

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อวิจัยหากรรมวิธีการเชื่อมและตัวแปรการเชื่อมที่เหมาะสมกับการเชื่อมซ่อมอะลูมิเนียมผสมของตัวตู้โดยสารรถไฟ
2. เพื่อศึกษาโครงสร้างจุลภาค/มหภาคของแนวเชื่อมอะลูมิเนียมผสมจากการเชื่อมมิก เพื่อวิเคราะห์คุณภาพของแนวเชื่อม
3. เพื่อหาค่าสมบัติทางกลของแนวเชื่อม (Joint Mechanical Properties) ของการเชื่อมมิกของอะลูมิเนียมผสม

1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย

ขอบเขตของโครงการนี้จะทำการทดลองเชื่อมอะลูมิเนียมผสมเกรด A5083, A6082T6 ซึ่งเป็นวัสดุสำหรับตู้โดยสารรถไฟ ด้วยกรรมวิธีการเชื่อมมิก ด้วยตัวแปรการเชื่อมและลวดเชื่อมที่เหมาะสม ตามมาด้วยการศึกษาสมบัติเชิงโลหะวิทยาในระดับมหภาคและจุลภาคเพื่อวิเคราะห์ความสมบูรณ์ของแนวเชื่อม และสมบัติเชิงกลของแนวเชื่อม ซึ่งจะเป็นฐานข้อมูลทางวิศวกรรมในการกำหนดเลือกใช้กรรมวิธีการเชื่อมและตัวแปรการเชื่อมที่เหมาะสม (Welding Procedure Specification for repair welding) เพื่อใช้งานในการเชื่อมซ่อมตู้โดยสารรถไฟอะลูมิเนียมต่อไป โดยในงานวิจัยนี้ปัจจัยที่พิจารณาหลัก ได้แก่

- ชนิดลวดเชื่อม (4043 , 5356)
- ประเภทกระแสเชื่อม (Standard)
- การเชื่อมซ้ำ (เชื่อมซ่อม 1 ครั้ง)

1.4 แผนการดำเนินการวิจัย

1. ทบทวนเอกสาร ข้อมูล และทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง
2. ออกแบบการทดลอง
3. จัดเตรียมเครื่องมือและอุปกรณ์สำหรับงานวิจัย
4. ศึกษาสมบัติทางโลหะวิทยา
5. ทดสอบสมบัติเชิงกล
6. วิเคราะห์ผลและสรุปผลการทดลอง
7. จัดทำรายงานฉบับสมบูรณ์

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัย

1. ทราบถึงความเป็นไปได้และค่าตัวแปรการเชื่อมสำหรับการเชื่อมซ่อมอะลูมิเนียมผสม A5083 และ A6082T6 ซึ่งเป็นชิ้นส่วนของตู้โดยสารรถไฟด้วยกรรมวิธีการเชื่อมมิก
2. ทราบผลประเมินการเชื่อมมิกที่ส่งผลต่อสมบัติเชิงโลหะวิทยาในระดับมหภาคและจุลภาค และสมบัติเชิงกล
3. ได้ข้อมูลทางวิศวกรรมการเชื่อมในเรื่องข้อกำหนดการเชื่อม (Welding Procedure Specification) และการตรวจสอบข้อกำหนดการเชื่อม (Welding Procedure Record) สำหรับการเชื่อมซ่อมอะลูมิเนียมผสมโดยการเชื่อมมิก
4. องค์ความรู้ที่ได้จากการวิจัยสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานทางวิศวกรรมและอุตสาหกรรม การขนส่งระบบรางเพื่อประยุกต์สู่การใช้งานจริงในการเชื่อมซ่อมตู้โดยสารรถไฟอะลูมิเนียมผสม
5. พัฒนาบุคลากรและผลิตนักศึกษาและบัณฑิตศึกษาในระดับปริญญาตรีและปริญญาโท

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาเกี่ยวกับตัวแปรที่เหมาะสมในการเชื่อมซ่อมตู้โดยสาร อะลูมิเนียม จึงจำเป็นที่จะต้องทำความเข้าใจทฤษฎีเกี่ยวกับอะลูมิเนียมผสม โลหะวิทยาของ อะลูมิเนียมผสม การเชื่อมมิกออะลูมิเนียมและโลหะวิทยา สมบัติเชิงกล ดังนั้นในการวิจัยนี้จึงได้มีการศึกษาทฤษฎี ดังต่อไปนี้

2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับอะลูมิเนียม

โดยทั่วไปอะลูมิเนียมบริสุทธิ์ (Pure Aluminum) จะอ่อน ซึ่งธาตุผสมจะช่วยเพิ่มความแข็ง โดยสารละลายของแข็ง (Solution hardening) หรือ โดยการตกตะกอน (Precipitation hardening) ซิลิกอน (Si) ธาตุแมกนีเซียม (Mg) แมงกานีส (Mn) ทองแดง (Cu) และสังกะสี (Zn) ซึ่งธาตุเหล่านี้นิยมเติมลงไปเพื่อปรับปรุงคุณสมบัติ [1]

มาตรฐานของอะลูมิเนียมและอะลูมิเนียมผสม มาตรฐานยุโรปได้กำหนดระบบตัวเลขสำหรับอะลูมิเนียมผสม (Wrought alloys)

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

อะลูมิเนียมบริสุทธิ์ (1xxx) มีความบริสุทธิ์ของอะลูมิเนียมที่ 99.0 % ถึง 99.9 % อะลูมิเนียมในกลุ่มนี้มีความต้านทานการกัดกร่อนได้ดีสามารถนำ ไฟฟ้าและความร้อนได้ดี ยังสามารถนำไปขึ้นรูปได้ง่ายทั้งการตัดเฉือนและขึ้นรูปเย็นด้วยกระบวนการต่าง ๆ ความสามารถใน

การเชื่อมอยู่ในเกณฑ์ที่น่าพอใจ ข้อเสียคือในด้านของความแข็งแรงและคุณสมบัติทางกลที่ต่ำกว่าวัสดุอื่น

อะลูมิเนียมผสมทองแดง (2xxx) เป็นอะลูมิเนียมที่มีความแข็งแรงสูงคุณสมบัติทางกลใกล้เคียงกับเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ โดยสามารถที่ทำการปรับปรุงคุณสมบัติทางกลให้ดีขึ้นได้ด้วยกรรมวิธีทางความร้อนได้โดยทำการอบละลาย (Solution Treatment) และชุบ (Quenching) ต่อจากนั้นปล่อยให้ตกตะกอน (Precipitation) เรียกกระบวนการนี้ว่า การอบบ่มแข็ง (Aging) ซึ่งภายหลังการอบบ่มความสามารถในการต้านทานการกัดกร่อนจะลดลง แต่ความสามารถในการเชื่อมของอะลูมิเนียมชนิดนี้จะต่ำกว่าชนิดอื่นๆ

อะลูมิเนียมผสมแมงกานีส (3xxx) เป็นอะลูมิเนียมที่มีคุณสมบัติเหมือนกับอะลูมิเนียมบริสุทธิ์แต่มีความแข็งแรงและมีคุณสมบัติทางกลที่ดีกว่า จัดว่าเป็นกลุ่มที่ไม่สามารถปรับปรุงคุณสมบัติด้วยกรรมวิธีทางความร้อนได้

อะลูมิเนียมผสมซิลิกอน (4xxx) อะลูมิเนียมชนิดนี้จัดว่าเป็นกลุ่มที่ไม่สามารถปรับปรุงคุณสมบัติด้วยกรรมวิธีทางความร้อนได้แต่เมื่ออยู่ในสภาพของเหลวจะไหลตัวได้ดีและขณะแข็งตัวจะไม่เกิดความแตกร้าวทั้งในสภาพพร้อมและเย็น ดังนั้นอะลูมิเนียมจึงนิยมใช้ในการเป็นลวดเติมสำหรับเชื่อมอะลูมิเนียมผสมและอะลูมิเนียมหล่อ

อะลูมิเนียมผสมแมกนีเซียม (5xxx) บางครั้งจะมีการเติมแมงกานีสลงไปด้วย อะลูมิเนียมผสมชนิดนี้จัดว่าเป็นกลุ่มที่ไม่สามารถปรับปรุงคุณสมบัติได้ด้วยกรรมวิธีทางความร้อน จึงนิยมนำไปทำลวดเติม

อะลูมิเนียมแมกนีเซียมและซิลิกอน (6xxx) อะลูมิเนียมชนิดนี้จัดว่าเป็นกลุ่มที่สามารถปรับปรุงคุณสมบัติทางกลด้วยกรรมวิธีทางความร้อนได้ มีความแข็งแรงและคุณสมบัติทางกลที่ดีพอสมควรความต้านทานการกัดกร่อนและความสามารถในการแปรรูปและความสามารถในการเชื่อมอยู่ในเกณฑ์ที่พอใช้ แต่มีข้อเสียคือ เมื่อนำอะลูมิเนียมผสมชนิดนี้ไปทำการเชื่อมด้วยกรรมวิธีการให้ความร้อนแบบต่าง ๆ จะทำให้บริเวณข้างแนวเชื่อมอ่อนตัว

อะลูมิเนียมสังกะสีและแมกนีเซียม (7xxx) อะลูมิเนียมชนิดนี้มีการเจือธาตุสังกะสีเป็นธาตุหลักและแมงกานีสเป็นธาตุรองนอกจากนั้นยังมีทองแดงและโครเมียมอีกเล็กน้อย อะลูมิเนียมผสมกลุ่มนี้มีความแข็งแรงและคุณสมบัติทางกลที่ดีมากและมีน้ำหนักเบา ความต้านทานการกัดกร่อน แต่ความสามารถในการเชื่อมอยู่ในเกณฑ์ที่ค่อนข้างต่ำ

ตัวย่อของกระบวนการขึ้นรูปอะลูมิเนียมผสม

F หมายถึง สภาพโลหะที่ได้จากการหล่อ โดยยังไม่ได้ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหรือทางกล

O หมายถึง สภาพของโลหะภายหลังการอบอ่อนซึ่งโลหะจะเกิดผิวกใหม่ เป็นภาวะที่โลหะจะอ่อนและเหนียวที่สุดในการอบอะลูมิเนียมรีดทั้งหลาย

H1 หมายถึง การขึ้นรูปเย็นอย่างเดียว

H2 หมายถึง การขึ้นรูปเย็นและอบอ่อนให้เหนียวขึ้นเล็กน้อย

H3 หมายถึง การขึ้นรูปเย็นแล้วนำไปอบด้วยอุณหภูมิที่ไม่สูงนัก

T1 หมายถึง โลหะผ่านการอบละลายบางส่วนแล้วปล่อยให้แข็งตัวตามธรรมชาติ

T2 หมายถึง โลหะผ่านการอบอ่อนมาแล้ว แล้วใช้กับชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการหล่อขึ้นรูปมาเท่านั้น

T3 หมายถึง สภาพโลหะที่ผ่านการอบละลาย (Solution Heat Treatment) แล้วแปรรูปเย็นทันทีเพื่อเพิ่มคุณสมบัติทางกล

T4 หมายถึง สภาพโลหะที่ผ่านการอบละลายและปล่อยให้แข็งตัวตามธรรมชาติจนอยู่ในสภาพคงรูป

T5 หมายถึง โลหะที่ผ่านการอบละลายบางส่วนและทำให้แข็งตัวแบบเทียม (Artificial aging)

T6 หมายถึง โลหะผ่านการอบละลายมาก่อนแล้ว นำไปทำให้เย็นตัวด้วยกรรมวิธีทางความร้อน

T7 หมายถึง โลหะผ่านการอบละลายแล้วปรับให้คงสภาพ โดยการควบคุมอุณหภูมิและเวลา เพื่อให้ได้ขนาดเม็ดเกรนให้มีขนาดที่ทำให้โครงสร้างภายในมีเสถียรภาพ

T8 หมายถึง โลหะผ่านการอบละลายผ่านการแปรรูปเย็นและทำให้แข็งตัวแบบเทียม

T9 หมายถึง โลหะผ่านการอบละลายทำให้แข็งตัวแบบเทียมด้วยกระบวนการทางความร้อนแล้วจึงนำไปแปรรูปเย็น

T10 หมายถึง โลหะผ่านการอบละลายบางส่วนทำนองเดียวกับ T5 นำไปผ่านการแปรรูปเย็นก่อนทำให้แข็งตัวแบบเทียม

อะลูมิเนียมจะแบ่งกลุ่มตามวิธีการเพิ่มความแข็งแรงได้ 2 กลุ่มใหญ่ คือประเภทที่ไม่สามารถกระทำทางความร้อนได้ (Non-heat treatable) และประเภทที่กระทำทางความร้อนได้ (Heat treatable)

1) อะลูมิเนียมกลุ่มที่ไม่สามารถกระทำทางความร้อนได้

อะลูมิเนียมผสมกลุ่มนี้จะไม่สามารถเพิ่มความแข็งแรงโดยวิธีการทางความร้อนได้ ค่าความแข็งแรงเริ่มต้นจะขึ้นอยู่กับผลของธาตุผสมต่างๆ เช่น ซิลิกอน เหล็ก แมงกานีส และแมกนีเซียม ความแข็งแรงของอะลูมิเนียมในกลุ่มนี้สามารถเพิ่มขึ้นได้โดยวิธี สเตรนฮาร์ดเดนนิง ในการขึ้นรูปเย็น (Cold working) เช่น การรีด (Rolling) การอัดขึ้นรูป (Extrusion) การดึง (Drawing) และการตีขึ้นรูป (Forging) บางทีต้องทำการอบอ่อน (Annealing) ที่อุณหภูมิ 300-400 องศาเซลเซียส เพื่อลดความแข็ง และเพิ่มความเหนียว [1]

2) อะลูมิเนียมกลุ่มที่สามารถกระทำทางความร้อนได้

อะลูมิเนียมผสมที่สามารถกระทำทางความร้อนได้ ค่าความแข็งแรงเริ่มต้นจะขึ้นอยู่กับส่วนผสมทางเคมีเหมือนกับกลุ่มแรก เช่น ทองแดง แมกนีเซียม สังกะสี ซิลิกอน ซึ่งอะลูมิเนียมกลุ่มนี้สามารถเพิ่มความแข็งแรงได้โดยวิธีการอบละลาย ที่อุณหภูมิ 450-550 องศาเซลเซียส และตามมาด้วยการชุบน้ำ หลังจากนั้นก็มีกระบวนการบ่มธรรมชาติ หรือบ่มเทียม (100-250 องศาเซลเซียส) จากการทำทางความร้อนดังกล่าว อะลูมิเนียมสามารถเพิ่มความแข็งแรงได้โดยการตกตะกอน [1]

ตารางที่ 2.1 แสดงการแบ่งประเภทของอะลูมิเนียม [1]

กลุ่มอัลลอยด์	การแบ่งระบบ	เกรด
กลุ่มที่ไม่สามารถกระทำทางความร้อน	Al: 99.00%	1xxx
	Al-Mn	3xxx
	Al-Si	4xxx
	Al-Mg	5xxx
กลุ่มที่สามารถกระทำทางความร้อน	Al-Cu	2xxx
	Al-Mg-Si	6xxx
	Al-Zn-Mg	7xxx

2.1.1 อะลูมิเนียมผสม

2.1.1.1 อะลูมิเนียมผสมเกรด 6082T6

เป็นโลหะผสมของอะลูมิเนียมที่มีแมกนีเซียม (Mg) และซิลิกอน (Si) เป็นส่วนผสมสำคัญ สามารถเพิ่มความแข็งแรงได้ด้วยการผ่านกระบวนการบ่มแข็งและดึงเพื่อคลายความเค้นตามกระบวนการ T651 เพื่อให้ได้ความแข็งแรงสูงสุด อะลูมิเนียมผสมชนิดนี้นิยมใช้งานที่ต้องการทั้งความแข็งแรงสูงร่วมกับความต้านทานต่อการกัดกร่อนที่ดีเยี่ยม สำหรับงานที่ใช้ในยานพาหนะต่างๆ เช่น รถไฟ เรือ รถบรรทุก และอากาศยาน รวมทั้งงานโครงสร้างอาคาร ราวสะพาน งานท่อขนส่ง งานทางไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ เป็นต้น

ตารางที่ 2.2 แสดงสมบัติเชิงกลของอะลูมิเนียม 6082T6 [2]

Type	Tensile strength (MPa)	Yield strength (MPa)	Elongation (%)	Hardness (HV)
Al 6082T6	310 min	260 min	6 min	110

ตารางที่ 2.3 แสดงปริมาณส่วนผสมทางเคมีของอะลูมิเนียมเกรด 6082T6 [2]

Type	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Al
Al 6082T6	0.7 to 1.3	0.50 max	0.10 max	0.4 to 1.0	0.6 to 1.2	0.25 max	0.20 max	0.10 max	Bal.

2.1.1.2 อะลูมิเนียมผสมเกรด 5083

เป็นโลหะผสมของอะลูมิเนียมที่มีแมกนีเซียม (Mg) เป็นส่วนผสมสำคัญ และเป็นอะลูมิเนียมที่ไม่ผ่านกระบวนการกระทำทางความร้อน อะลูมิเนียมผสมชนิดนี้ทนต่อการกัดกร่อนได้ดีเยี่ยมและทนต่อคลอไรด์ (Chloride) นิยมใช้งานในการต่อเรือ รถยนต์ โครงสร้างอากาศยาน ถึงภาชนะบรรจุ แทนขูดเจาะ เป็นต้น [3]

ตารางที่ 2.4 แสดงสมบัติเชิงกลของอะลูมิเนียม 5083 [2]

Type	Tensile strength (MPa)	Yield strength (MPa)	Elongation (%)	Hardness (HV)
Al 5083	300	210	11	90

ตารางที่ 2.5 แสดงปริมาณส่วนผสมทางเคมีของอะลูมิเนียมเกรด 5083 [2]

Type	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Al
Al 5083	0.4	0.4	0.10	0.4 to 1.0	4.0 to 4.9	0.05 to 0.25	0.25	0.15	Bal.

2.1.2 ลวดเชื่อมอะลูมิเนียม การเลือกลวดเชื่อมตามมาตรฐาน AWS D1.2 แสดงในภาคผนวก ก [4]

ลวดเชื่อม 4043 มีส่วนผสมของซิลิกอน (Si) เป็นส่วนสำคัญ ซึ่งมีสมบัติในการต่อต้านการแตกร้อน เหมาะกับอะลูมิเนียมเกรด 6xxx และอะลูมิเนียมผสมหล่อ ข้อเสียคือ เนื้อเชื่อมมีค่าความเหนียวต่ำ ลวดเชื่อมเกรด 4043 ไม่มีความเหมาะสมสำหรับการเชื่อมกับอะลูมิเนียมผสมที่มีแมกนีเซียมสูง (3% หรือมากกว่า) เช่น อะลูมิเนียมเกรด 5xxx เพราะว่าจะเกิดสารประกอบระหว่างโลหะ Mg_2Si มากเกินไปในเนื้อเชื่อม ทำให้ความเหนียวลดลงและเสี่ยงต่อการแตกเพิ่มขึ้น

ลวดเชื่อม 5356 มีส่วนผสมของแมกนีเซียม (Mg) เป็นส่วนสำคัญ ลวดเชื่อมเกรดนี้ใช้กันมากในการเชื่อมอะลูมิเนียมผสมเกรด 5xxx และอะลูมิเนียมผสมเกรด 6xxx เช่น 5083 และ 6082 ตามลำดับ ลวดเชื่อมเกรดนี้จะผสมไทเทเนียม (Ti) เพื่อให้มีโครงสร้างละเอียด เพื่อการปรับปรุงสมบัติเชิงกลของเนื้อเชื่อม ดังนั้นลวดเชื่อมเกรด 5356 จึงมีความเหมาะสมอย่างมากในการเชื่อมอะลูมิเนียมผสมเกรด 5xxx และเกรด 6xxx [1]

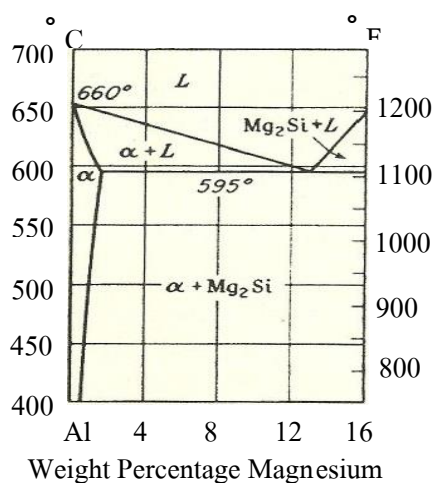
ตารางที่ 2.6 แสดงปริมาณส่วนผสมทางเคมีของลวดเชื่อมอะลูมิเนียม [2]

Type	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Al
Filler 4043	4.5 to 6.0	0.80	0.30	0.05	0.05	-	0.10	0.20	Bal.
Filler 5356	0.25	0.40	0.10	0.05 to 0.2	4.5 to 5.5	0.05 to 0.20	0.10	0.06 to 0.20	Bal.

2.2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับโลหะวิทยาของอะลูมิเนียมผสม

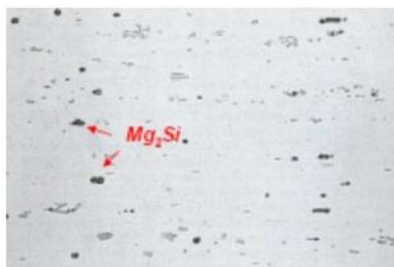
2.2.1 อะลูมิเนียมผสมกลุ่ม 6xxx

การผสมแมกนีเซียมและซิลิกอนในอะลูมิเนียม ซึ่งเป็นการจัดอยู่ในกลุ่ม 6XXX ที่ผ่านการขึ้นรูปมาก่อน ทำให้สามารถทำการบ่ม เพื่อเพิ่มความแข็งและความแข็งแรง อะลูมิเนียมผสมแมกนีเซียมและซิลิกอนบางประเภท อาจมีการเพิ่มโครเมียม เพื่อช่วยทำให้เพิ่มความแข็งแรงและควบคุมขนาดของเกรน หรืออาจจะมีการเพิ่มทองแดง เข้าไปในบางประเภท เพื่อเพิ่มความแข็งแรงเหมือนกัน แต่จะทำให้ ความต้านทาน การกัดกร่อนลดลง เมื่อพิจารณาแผนภาพสมดุลของอะลูมิเนียม - แมกนีเซียมซิลิไซด์ พบว่า อะลูมิเนียมยอมให้สารประกอบเชิงโลหะ Mg_2Si ละลายสูงสุดที่ 1.85% ที่อุณหภูมิ 595 องศาเซลเซียส และให้ปฏิกิริยายุทเทคติกที่ส่วนผสม Mg_2Si 13%



รูปที่ 2.1 แผนภาพสมดุลของอะลูมิเนียม - แมกนีเซียมซิลิไซด์ [5]

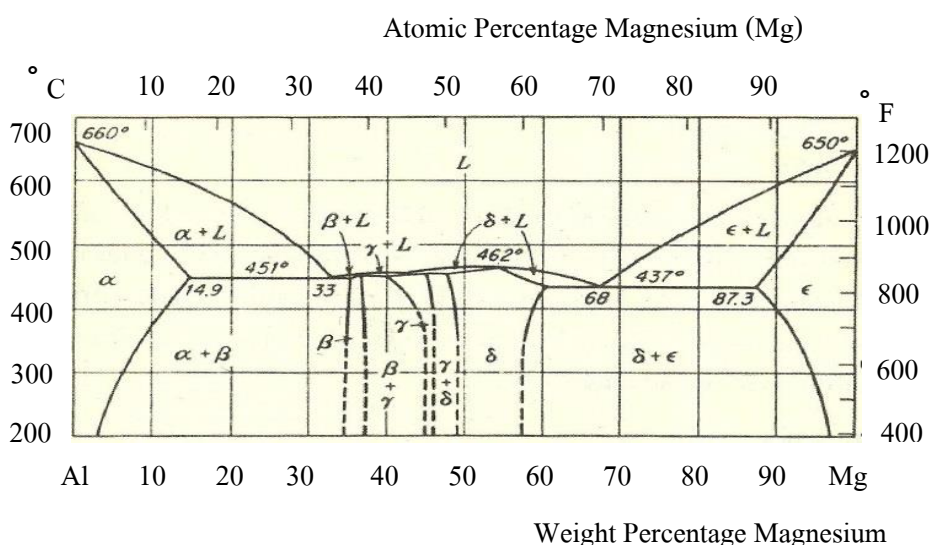
แมกนีเซียมซิลิไซด์ (Mg_2Si) ที่ปรากฏขึ้นเพราะซิลิกอน คือ ธาตุประกอบที่สำคัญ ในอะลูมิเนียมผสมเกรด 6xxx แสดงดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 บริเวณยูเทคติกในอะลูมิเนียมเกรด 6xxx [6]

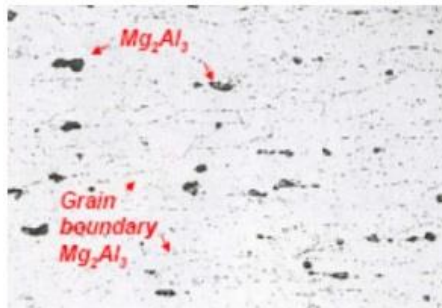
2.2.2 อะลูมิเนียมผสมกลุ่ม 5xxx

อะลูมิเนียม มีอุณหภูมิหลอมละลายที่ 660 องศาเซลเซียสและ แมกนีเซียม มีอุณหภูมิหลอมละลายที่ 650 องศาเซลเซียส ซึ่งมี อุณหภูมิหลอมละลายใกล้เคียงกันมาก แต่ แมกนีเซียม มีอุณหภูมิหลอมละลายต่ำกว่า เมื่อพิจารณาแผนภาพสมดุลของอะลูมิเนียม - แมกนีเซียม เฟส (Phase) β มีสูตรทางเคมี คือ Al_3Mg_2 โดยมีส่วนผสมของแมกนีเซียม อยู่ระหว่าง 36.1-37.8 ของ เปอร์เซ็นต์น้ำหนัก แมกนีเซียม สำหรับเฟส α มีสูตรทางเคมี คือ $Al_{12}Mg_{17}$ โดยมี ส่วนผสมของแมกนีเซียม อยู่ระหว่าง 42-58 ของเปอร์เซ็นต์น้ำหนักแมกนีเซียม ที่อุณหภูมิ 451 องศาเซลเซียส แมกนีเซียม สามารถละลายในอะลูมิเนียมได้มากที่สุด 14.9% ที่อุณหภูมิ 451 องศาเซลเซียส



รูปที่ 2.3 แผนภาพสมดุลของอะลูมิเนียม - แมกนีเซียม [5]

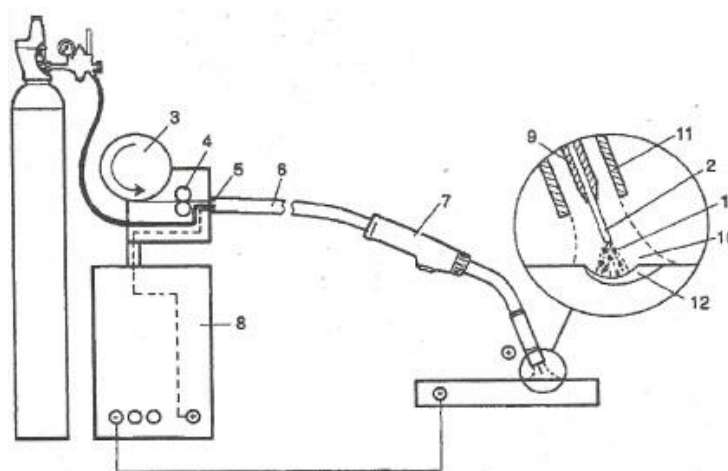
แมกนีเซียมซิลิไซด์ (Mg_2Si) อาจไม่ปรากฏในอะลูมิเนียมผสมเกรด 5xxx เนื่องจากธาตุซิลิกอน (Si) ไม่ได้เป็นองค์ประกอบที่สำคัญ แสดงดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 บริเวณยูเทคติกในอะลูมิเนียมเกรด 5xxx [6]

2.3 ทฤษฎีเกี่ยวกับการเชื่อมมิถอะลูมิเนียมและโลหะวิทยา

2.3.1 ทฤษฎีการเชื่อมมิถอะลูมิเนียม



รูปที่ 2.5 แสดงหลักการเชื่อมมิถ [1]

จากรูปที่ 2.5 อาร์ค (1) เกิดตรงบริเวณระหว่างปลายลวดเชื่อม (2) กับชิ้นงาน ภายใต้อิทธิพลของสนามแม่เหล็กที่เกิดจากขดลวดเชื่อมเป็นเส้นลวดโลหะทำหน้าที่เป็นทั้งอิเล็กโทรด และตัวเติมเนื้อเชื่อม ถูกป้อนโดยชุดป้อนลวด (Wire feeder, 4) เข้าสู่บ่อหลอมละลายอย่างต่อเนื่องและหลอมละลายรวมกับชิ้นงาน (Base Metal) ก่อตัวเป็นเนื้อเชื่อม กระแสไฟฟ้าจะมาจากเครื่องเชื่อม (8) ถูกส่งผ่านปลายลวดเชื่อมโดยผ่านท่อสัมผัส (Contact tube, 9) ซึ่งทำจากทองแดงที่ปลายหัวเชื่อม (Welding torch)

โดยทั่วไปในการเชื่อมมิก/แมก ท่อสัมผัส จะต่อกับขั้วบวกและชิ้นงานต่อเข้ากับขั้วลบ ในขณะที่เชื่อมก็จะมีแก๊สไหลคลุมบ่อหลอมละลายตลอดเวลาโดยผ่านทางแก๊สน็อชเชิล (Gas nozzle)

ความร้อนเข้า คือ ปริมาณของพลังงานหรือความร้อนที่กระทำกับชิ้นงาน ซึ่งมีสูตรในการหาความร้อนเข้าดังต่อไปนี้

$$H = \frac{ExIx60}{1000V} \times f_1 \text{ KJ/cm}$$

H = ความร้อนเข้า (KJ/mm) V = ความเร็วในการเชื่อม (mm/min)

E = แรงดัน (v) f_1 = ประสิทธิภาพ (Efficiency)

I = กระแสเชื่อม (A)

แรงดันเชื่อม (Rated voltage) แรงดันเชื่อมที่ใช้ในการเชื่อมมิก โดยกำหนดมาตรฐานด้านไฟฟ้าของยุโรป (IEC 974) จะขึ้นอยู่กับกระแสเชื่อม ดังสมการต่อไปนี้

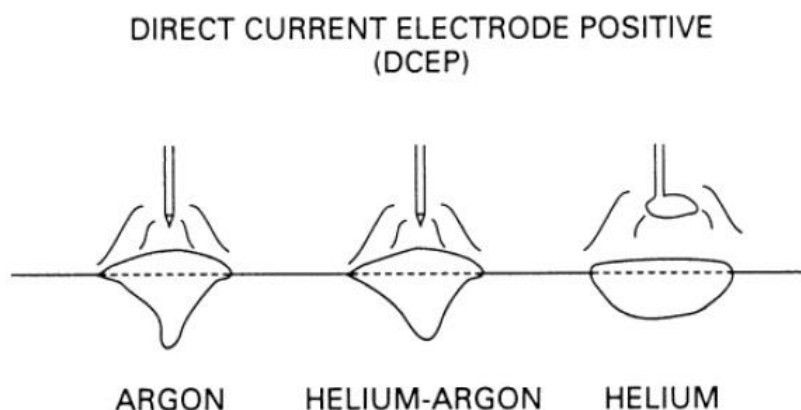
$$U = 14 + 0.05 I \text{ (กระแสเชื่อมมากกว่า 600 A ให้ใช้แรงดัน 44 V)}$$

ตัวอย่างเช่น กระแสเชื่อม (I) = 140 A

$$\text{แรงดันเชื่อม (U)} = 14 + 0.05 (140) = 21 \text{ v.}$$

การเชื่อมมิกอะลูมิเนียมและอะลูมิเนียมผสมโดยทั่วไปใช้แหล่งพลังงานชนิดกระแสตรงที่มีโวลต์คงที่ อิเล็กโทรด (ลวดเชื่อม) ต่อกับขั้วบวก (DCEP) เพราะมีการกำจัดออกไซด์ดี การซึมลึกสูง การส่งถ่าน้ำโลหะเป็นแบบสเปรย์ มีความเรียบสูง การส่งถ่าน้ำโลหะแบบสเปรย์อาร์ค ลวดตัวเต็มจะส่งถ่าน้ำโลหะอยู่ตลอดเวลา อาร์คมีขนาดเล็ก หยดน้ำโลหะมีการไหลดีเยี่ยม เป็นผลให้ได้แนวเชื่อมที่ดีในทุกท่าเชื่อม การส่งถ่าน้ำโลหะแบบสเปรย์จะมีความต่อเนื่อง โดยใช้ลวดเชื่อมขนาด 1.2 หรือ 1.6 มิลลิเมตร (ลวดขนาดใหญ่จะป้อนเนื้อเชื่อมได้ดีกว่าลวดที่มีขนาดเล็ก) ด้วยเหตุนี้ จึงมากพอที่จะทำให้แผ่นอะลูมิเนียมเกิดการหลอม [1]

โดยทั่วไปการเชื่อมมิกอะลูมิเนียมจะใช้อาร์กอนเป็นแก๊สคลุมในการส่งถ่ายน้ำโลหะแบบสเปรย์ ซึ่งจะช่วยให้การอาร์คเสถียร แนวเชื่อมสวยและซึมลึกได้ดี และการใช้แก๊สผสมฮีเลียม-อาร์กอน (50-70%) จะใช้เชื่อมในงานที่มีขนาดหนา แสดงดังรูปที่ 2.6



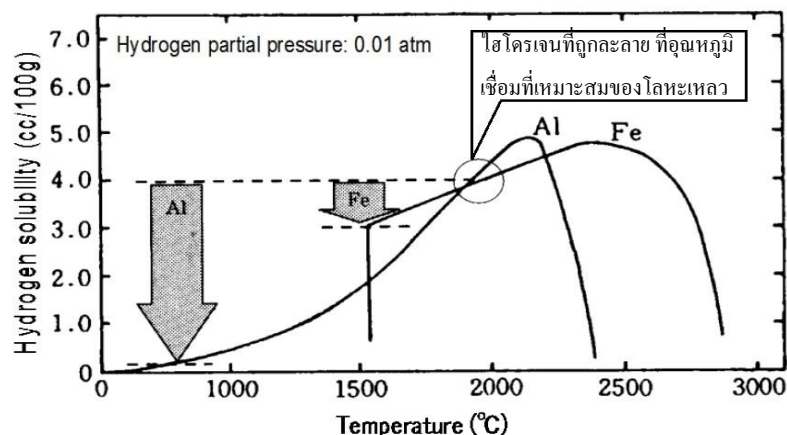
รูปที่ 2.6 อิทธิพลของแก๊สคลุมต่อแนวเชื่อม [1]

2.3.1.1 สิ่งบ่งชี้การเชื่อมมิกอะลูมิเนียมผสม มี 2 อย่างหลักๆ คือ โพรงอากาศและการแตกร้อน

1) โพรงอากาศ ในเนื้อเชื่อมอะลูมิเนียมและอะลูมิเนียมผสม เกิดจากไฮโดรเจนที่ละลายอยู่ในเนื้อเชื่อม ขณะหลอมเหลวและติดอยู่ในเนื้อเชื่อมที่แข็งตัวแล้ว เมื่อเปรียบเทียบความสามารถในการละลายไฮโดรเจนระหว่างอะลูมิเนียมผสมกับเหล็กกล้าจะแตกต่างกันอย่างมาก แสดงดังตารางที่ 2.7 และรูปที่ 2.7

ตารางที่ 2.7 การเปรียบเทียบการละลายของไฮโดรเจนระหว่างอะลูมิเนียมผสมและเหล็กกล้า [1]

ชนิดโลหะ	ไฮโดรเจนที่ถูกละลาย ที่อุณหภูมิเชื่อมที่เหมาะสมของโลหะเหลว (cc/100g)	ไฮโดรเจนที่ถูกละลาย ที่อุณหภูมิของเหลว (cc/100g)	% ไฮโดรเจนที่ถูกละลาย ที่สภาวะแข็งตัวของโลหะเหลว (%)
อะลูมิเนียม	3.7 at 1900 °C	0.07 at 660 °C	1.9
เหล็ก	4.2 at 2093 °C	3.0 at 1537 °C	71.4

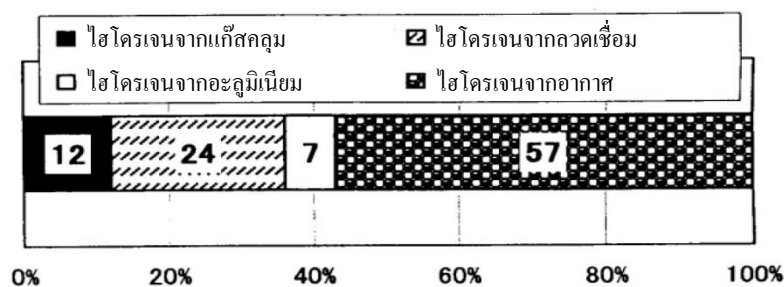


รูปที่ 2.7 แสดงกราฟเปรียบเทียบระหว่างไฮโดรเจนที่ละลายกับอุณหภูมิของอะลูมิเนียมและเหล็ก

[1]

จากรูปที่ 2.8 จะเห็นได้ว่าที่มาของไฮโดรเจนหลักๆ คือ อากาศ 57% , ลวดเชื่อม 24% , แก๊สคลุม 12% , อะลูมิเนียม 7% เป็นต้น ซึ่งสิ่งเหล่านี้จะมีบทบาทในการเชื่อมมิถอะลูมิเนียม และวิธีการลดไฮโดรเจน สามารถทำได้หลายวิธี ดังต่อไปนี้

- 1) ใช้แก๊สคลุมที่เหมาะสม
- 2) ลดความชื้นในบริเวณทำงาน
- 3) เก็บรักษาลวดเชื่อมในที่แห้ง
- 4) ควบคุมจุดที่จะกลายเป็นหยดน้ำของแก๊สคลุมที่บริเวณหัวทอร์ช
- 5) เอาฟิล์มออกจากผิวโดยการตะไบ แปรงขัดสแตนเลส หรือ หินเจียร์อะลูมิเนียม
- 6) เอาคราบน้ำมันที่ผิวรอยต่อออกให้หมด
- 7) ใช้การเชื่อมแบบเดินหน้า



รูปที่ 2.8 อัตราส่วนของไฮโดรเจนที่เข้าสู่เนื้อเชื่อม [1]

2) การแตกร้อน เกิดขึ้นจากการเลือกใช้อะลูมิเนียมและลวดเชื่อมที่ไม่เหมาะสม การออกแบบรอยต่อ สภาพการเชื่อมและเทคนิคในการเชื่อมไม่ถูกต้อง ลักษณะเหล่านี้จะทำให้เกิดการแตกร้อนได้ง่ายขึ้น วิธีแก้ไขมีดังต่อไปนี้

1. ระยะเว็นรอยต่อ (Root opening) เหมาะสม สำหรับเว็นรอยต่อที่มาก ให้การเชื่อมซ้ำลงที่ กระแสต่ำ

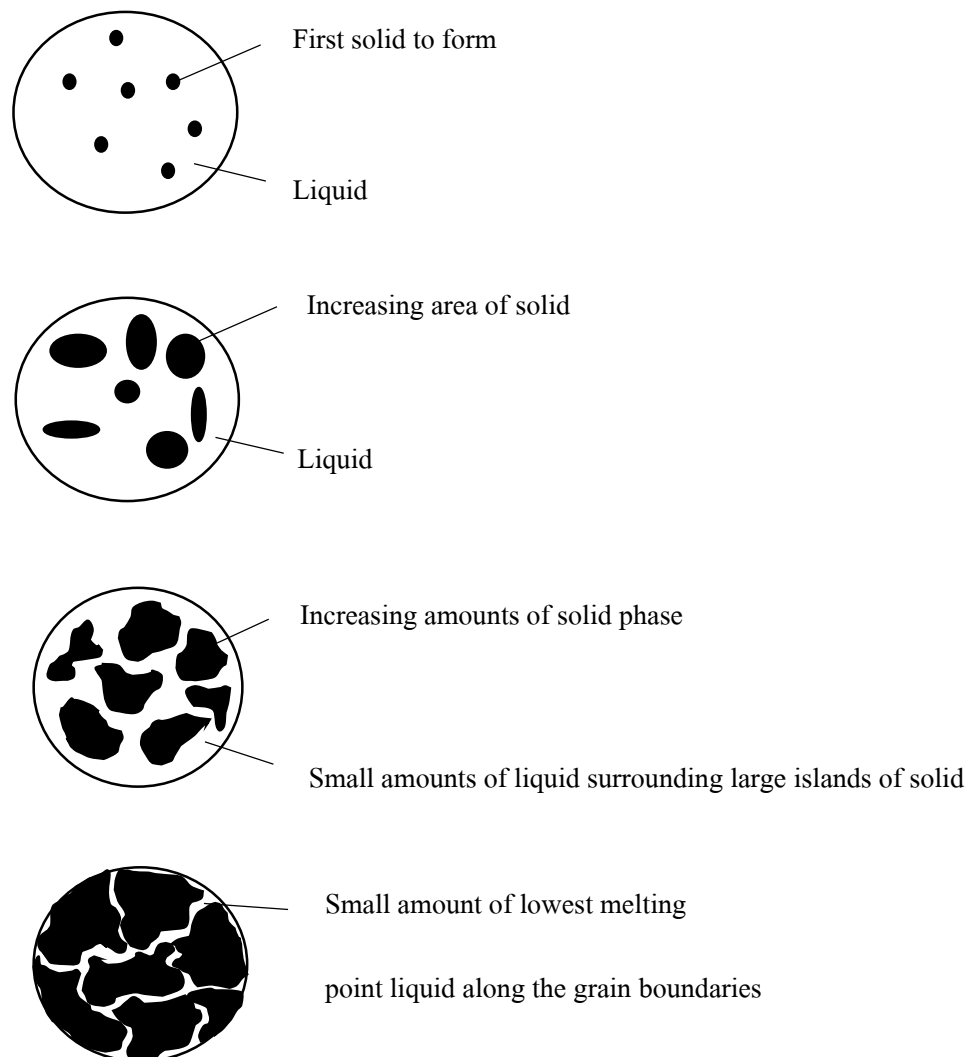
2. ควบคุมความร้อน การใช้ความร้อนที่มากเกินไป ทำให้เกิดรอยแตกจุลภาค (Microcracks) ในเนื้อเชื่อม

$$H = \frac{ExIx60}{1000V}$$

3. ไม่มีการอุ่นชิ้นงานก่อนเชื่อม (No preheat) และควบคุมอุณหภูมิในระหว่างการเชื่อมที่ 70 °C หรือต่ำกว่าเพื่อป้องกันการเกิดรอยแตกจุลภาค

2.3.2 โลหะวิทยาการเชื่อมมิกอะลูมิเนียม

การเกิดเกรนเริ่มต้นจากเซลล์ขนาดเล็ก จากนั้นเซลล์มีการขยายตัว เกิดเป็นกลุ่มก้อนของแข็งที่เรียกว่าเกรน และเมื่อมีเกรนจำนวนมากมาต่อกันหรือบริเวณขอบเกรนมาชนกัน จึงเรียกลักษณะเหล่านี้ว่า เคนไดรต์ (Dendrite) แสดงดังรูปที่ 2.9 [7]



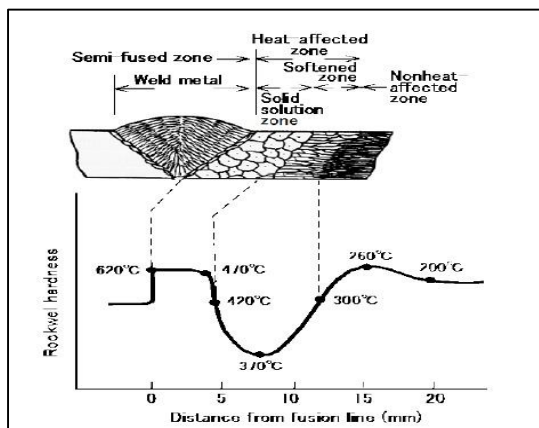
รูปที่ 2.9 แสดงขั้นตอนการเกิดเกรนของเนื้อเชื่อมอะลูมิเนียมผสม [7]

2.4 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับสมบัติเชิงกล

การเชื่อมอะลูมิเนียมที่สามารถกระทำทางความร้อนได้ (Heat treatment alloys) ค่าความแข็งบริเวณโลหะฐาน ที่ไม่ได้รับผลกระทบเนื่องจากความร้อนจะมีความแข็งมากที่สุด และบริเวณที่มีความแข็งต่ำสุดคือ บริเวณโลหะฐานที่ได้รับผลกระทบเนื่องจากความร้อน (Heat Affected Zone , HAZ) แสดงดังรูปที่ 2.10

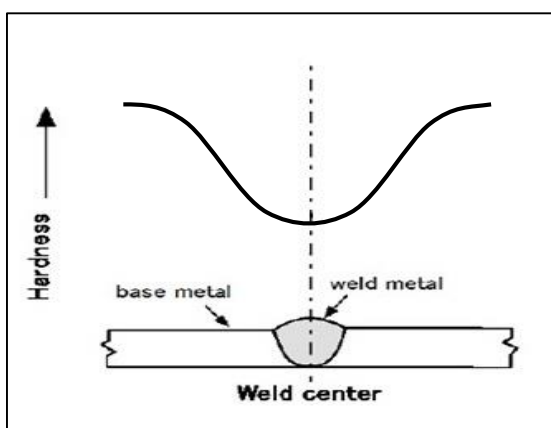
บริเวณที่ได้รับผลกระทบเนื่องจากความร้อน แบ่งเป็น 2 ส่วนคือ บริเวณสารละลายของแข็ง (Solid solution zone) และบริเวณอ่อนตัว (Softened zone) ซึ่งบริเวณสารละลายของแข็งจะเกิดขึ้นในช่วงอุณหภูมิที่มีการกระทำทางความร้อนแบบอบละลาย (Solid solution) ที่

อุณหภูมิ 450-550 องศาเซลเซียส หรือสูงกว่า ในบริเวณนี้การตกตะกอนจะถูกละลายในเนื้ออะลูมิเนียมจึงส่งผลทำให้เกรนโต สำหรับบริเวณอ่อนตัวจะเกิดขึ้นที่ช่วงอุณหภูมิสูงกว่าการบ่ม (150-250 องศาเซลเซียส) โดยการตกตะกอนมากเกินไปและบางส่วนถูกอบอ่อน (Annealed)



รูปที่ 2.10 แสดงความแข็งของอะลูมิเนียมที่ผ่านการกระทำทางความร้อน [1]

การเชื่อมอะลูมิเนียมที่ไม่สามารถกระทำทางความร้อนได้ ซึ่งค่าความแข็งที่ต่ำสุดคือ บริเวณเนื้อเชื่อม (Weld metal) กรณีของอะลูมิเนียมที่ไม่สามารถกระทำทางความร้อนได้ การอ่อนตัวของอะลูมิเนียมประเภทเวิร์คฮาร์ดเดนนิ่ง (Work hardened aluminum) จะเกิดบริเวณแนวเชื่อมที่ถูกให้ความร้อนมากกว่า 250 องศาเซลเซียส ส่งผลให้ความแข็งบริเวณเนื้อเชื่อมลดลง แสดงดังรูปที่ 2.11

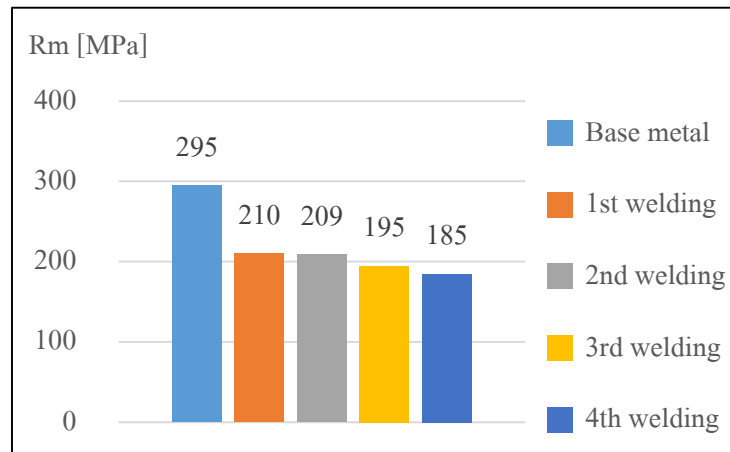


รูปที่ 2.11 แสดงความแข็งของอะลูมิเนียมที่ไม่ผ่านการกระทำทางความร้อน [1]

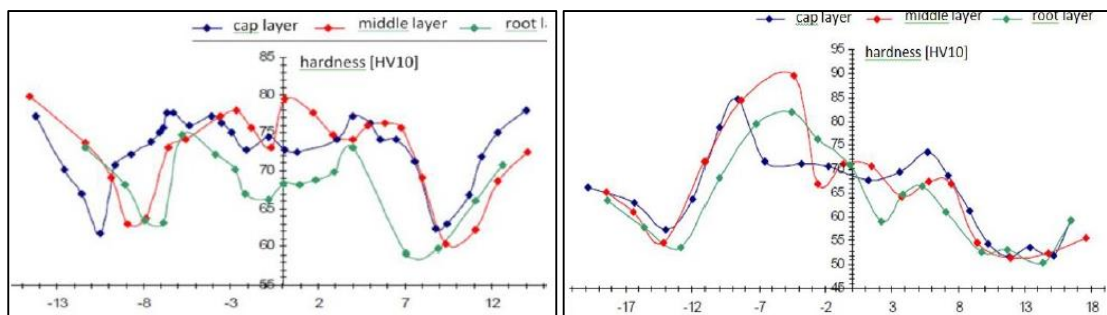
2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การศึกษาวิเคราะห์ความเสียหายของแนวเชื่อมซึ่งเกิดอุบัติเหตุของตัวรถไฟ (Rolling Stocks) [8] ซึ่งเชื่อมโดยการเชื่อมมิกเพื่อเป็นแนวทางในการแก้ปัญหาในอนาคต โดยใช้การวิเคราะห์แนวเชื่อมทางโลหะวิทยาและการทดสอบเชิงกลพบว่าจากการวิเคราะห์แนวเชื่อมทางโลหะวิทยา แนวเชื่อมมีรอยแตก (Cracks) แนวเชื่อมมีการหลอมละลายไม่สมบูรณ์ (Lack of Fusion) และเกิดการหลอมละลายลึกแค่บางส่วน (Partial Penetration) ส่วนการทดสอบเชิงกลโดยการทดสอบการตีกระทบ (Impact test) ปรากฏว่าพลังงานของการตีกระทบของเนื้อเชื่อมอะลูมิเนียมมีค่าต่ำกว่าเนื้ออะลูมิเนียมผสมเดิมประมาณครึ่งหนึ่ง การใช้ลวดเชื่อม Al-Si (4043) ก็ส่งผลให้แนวเชื่อมมีค่าด้านทานแรงกระแทกที่ต่ำทำให้มีการแตกที่รวดเร็วเมื่อมีการกระแทกและจากการทดสอบการตีกระทบของเนื้อเชื่อมที่ใช้ลวดเชื่อม Al-Mg (5356) จะทนต่อการตีกระทบได้ดีกว่าการใช้ลวดเชื่อม Al-Si (4043)

Ladislav Kolarik และคณะ [9] ได้ศึกษาการเชื่อมซ่อมอะลูมิเนียมผสม 6082T6 ซึ่งเป็นกลุ่มที่สามารถกระทำทางความร้อนได้ เชื่อมด้วยลวดเชื่อม 5087 พบว่าจากการเชื่อมซ่อมจะทำให้ค่าสมบัติเชิงกล (ความแข็งแรงดึง) ของแนวเชื่อมลดลงเรื่อยๆ ตามจำนวนครั้งการเชื่อมซ่อม แต่การเชื่อมครั้งแรก พบว่าความแข็งแรงดึงจะลดลงอย่างเห็นได้ชัด แสดงดังรูปที่ 2.12 งานวิจัยนี้ยังได้ศึกษาเกี่ยวกับความแข็ง ซึ่งได้เปรียบเทียบความแข็งจากการเชื่อม 1 ครั้ง และเชื่อม 4 ครั้ง แสดงดังรูปที่ 2.13 จากการเชื่อมซ่อมหลายครั้งจะส่งผลให้คุณภาพของแนวเชื่อมแย่ลง นอกจากนี้ยังกล่าวด้วยว่างานเชื่อมซ่อมเป็นงานที่ยากที่จะให้คุณภาพได้เหมือนเดิมหรือใกล้เคียง เนื่องมาจากการเชื่อมซ่อมทำให้ชิ้นงานได้รับความร้อนซ้ำซึ่งอาจไม่เหมาะสมกับอะลูมิเนียมผสมบางประเภท โดยเฉพาะอะลูมิเนียมผสมในกลุ่มที่สามารถกระทำทางความร้อนได้ และสำหรับการทดสอบการดัดงอ ได้กล่าวไว้ว่าการทดสอบการดัดงอ จะต้องทดสอบให้ผ่าน 3 ใน 4 ของชิ้นงานทั้งหมด จึงสามารถยอมรับได้ ซึ่งผลจากการทดสอบการดัดงอพบว่า การเชื่อมครั้งที่ 3 เป็นต้นไป ไม่สามารถยอมรับได้



รูปที่ 2.12 แสดงค่าความแข็งแรงดึง [9]



รูปที่ 2.13 ความแข็งของการเชื่อมครั้งที่ 1 และการเชื่อมครั้งที่ 4 [9]

ประเทศญี่ปุ่นในอดีต ในกรณีที่ผู้โดยสารเป็นอะลูมิเนียมผสม เช่น 5083, 5052 และ 6063 นิยมใช้การเชื่อม MIG (Metal Inert Gas) โดยเกรดลวดเชื่อมที่นิยมกันมาก คือ 5356 นอกจากนี้ยังพบว่ารอยเชื่อมของโลหะอะลูมิเนียมผสมมีแนวโน้มที่จะเกิดรูพรุน จึงต้องใช้วิธีการเชื่อมที่เหมาะสม เช่น อัตราการไหลของแก๊สปกคลุมแนวเชื่อมที่เหมาะสม เป็นต้น [10]

ในกรณีของอะลูมิเนียมที่สามารถกระทำทางความร้อน ค่าความแข็งบริเวณแนวเชื่อมจะมีความซับซ้อน ซึ่งขึ้นอยู่กับช่วงอุณหภูมิค่าต่างๆ ที่กระทำกับบริเวณแนวเชื่อม บริเวณสารละลายของแข็ง จะเกิดขึ้นในช่วงอุณหภูมิที่มีการกระทำทางความร้อนแบบอบละลาย ที่อุณหภูมิ 450-550 °C หรือสูงกว่า ในบริเวณนี้ การตกตะกอนถูกละลายในเนื้ออะลูมิเนียมจึงส่งผลทำให้เกิดเกรนโต บริเวณอ่อนตัว จะเกิดขึ้นในช่วงของอุณหภูมิสูงกว่าการบ่ม (150-250 °C) โดยการ

ตกตะกอนมากเกินไปและบางส่วนถูกอบอ่อน อันเนื่องมาจากการอ่อนตัว ค่าความแข็งของแนวเชื่อมในสภาพภายหลังการเชื่อม (as-welded condition) จึงลดต่ำลง [11]

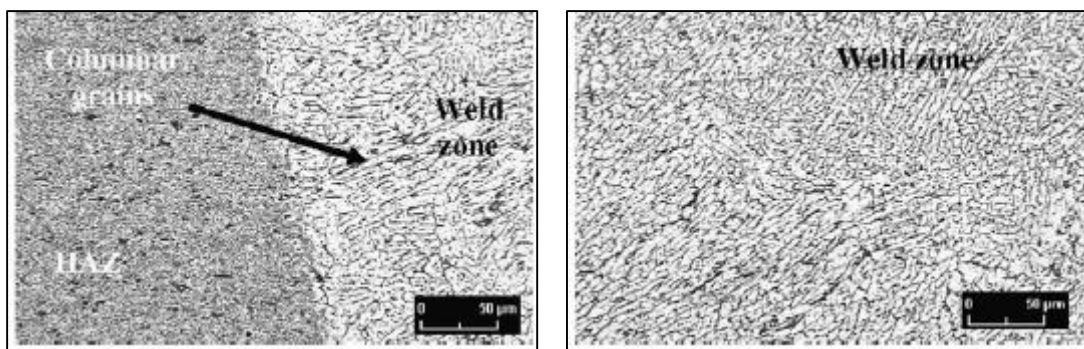
งานวิจัยของ S. Missori และ A. Sili [12] ได้ศึกษาการเชื่อมอะลูมิเนียมผสม 6082T6 ด้วยลวดเชื่อม 4043 ด้วยตัวแปรดังตารางที่ 2.8 และได้ศึกษาความแข็งแรงดึง ความแข็งบริเวณเนื้อเชื่อมและบริเวณที่ได้รับผลกระทบอันเนื่องมาจากความร้อน จากการทดสอบค่าความแข็งแรงดึง ได้ค่าความแข็งแรงดึงของแนวเชื่อม เท่ากับ 154-180 MPa. จากผลการทดสอบชิ้นงานทั้งหมดขาดที่บริเวณ HAZ และมี 1 ชิ้นงานที่ขาดบริเวณ WM ซึ่งค่าความแข็งแรงดึงของเนื้อโลหะเดิม เท่ากับ 269-276 MPa. และค่าความแข็งจะลดลงต่ำสุดที่บริเวณที่ได้รับผลกระทบเนื่องจากความร้อน ถัดจากเส้นหลอมละลายประมาณ 5-7 มิลลิเมตร เช่นเดียวกับงานวิจัยของ M. H. Scott และ M. F. Gittos [13] ได้ศึกษาเกี่ยวกับความแข็งแรงดึงของแนวเชื่อม (แผ่นอะลูมิเนียมขนาด 3 มิลลิเมตร และ 13 มิลลิเมตร) อะลูมิเนียมผสม 6082 เชื่อมด้วยลวดเชื่อม 5556A และ 4043A จากผลการทดสอบความแข็งแรงดึงของแนวเชื่อม แสดงให้เห็นว่าอะลูมิเนียมผสม 6082 ที่เชื่อมด้วยลวดเชื่อม 5556A จะขาดบริเวณที่ได้รับผลกระทบอันเนื่องมาจากความร้อน (HAZ) สำหรับอะลูมิเนียมผสม 6082 ที่เชื่อมด้วยลวดเชื่อม 4043 ขนาด 3 มิลลิเมตร จะขาดบริเวณที่ได้รับผลกระทบอันเนื่องมาจากความร้อน แต่สำหรับขนาด 13 มิลลิเมตร จะขาดที่บริเวณแนวเชื่อม (WM)

ตารางที่ 2.8 แสดงตัวแปรในการเชื่อม [12]

No. of pass		I	II	III	IV
Argon flow rate	l/min			20	
Voltage	V	20	22	22	22
Current	A	190	200	200	200
Wire feeding speed	m/min	5.1	5.5	5.5	5.5
Welding speed	m/min	0.381	0.414	0.407	0.387

Rakesh Kumar และคณะ [14] ได้ทำการทดลองเชื่อมอะลูมิเนียมผสม 6082 ขนาดบางเชื่อมด้วยลวดเชื่อม 4047 และได้ศึกษาลักษณะของเกรนที่เกิดขึ้นในบริเวณเนื้อเชื่อมที่ติดกับเนื้อเดิม จะมีลักษณะป็นแท่งยาว (Columnar grains) และบริเวณกลางเนื้อเชื่อมจะพบเกรนที่มีลักษณะหยาบ แสดงดังรูปที่ 2.14 ในขณะเดียวกัน J.da Silva และคณะ [15] ได้ทำการทดลองการ

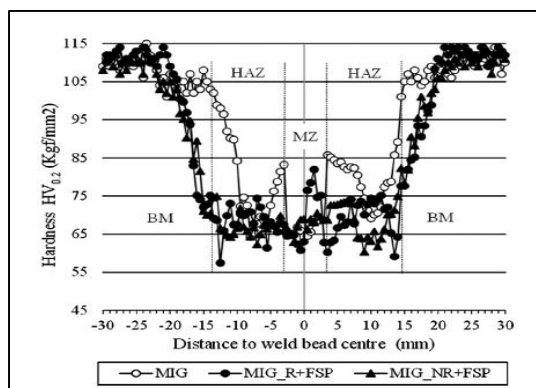
เชื่อมอะลูมิเนียมผสม 6082T6 ด้วยลวดเชื่อม 5356 และมีการพัฒนาแนวเชื่อมจากการเชื่อมมิกด้วยกรรมวิธีการกวน ซึ่งจากการเชื่อมมิก แสดงความแข็งดังรูปที่ 2.15 จากการเชื่อมมิกจะเห็นว่าบริเวณข้างแนวเชื่อมจะมีการอ่อนตัวและจากการทดสอบความแข็งแรงดึง พบว่าขนาดที่บริเวณ HAZ



ก) บริเวณที่ได้ความร้อนอันเนื่องมาจากความร้อน

ข) บริเวณเนื้อเชื่อม

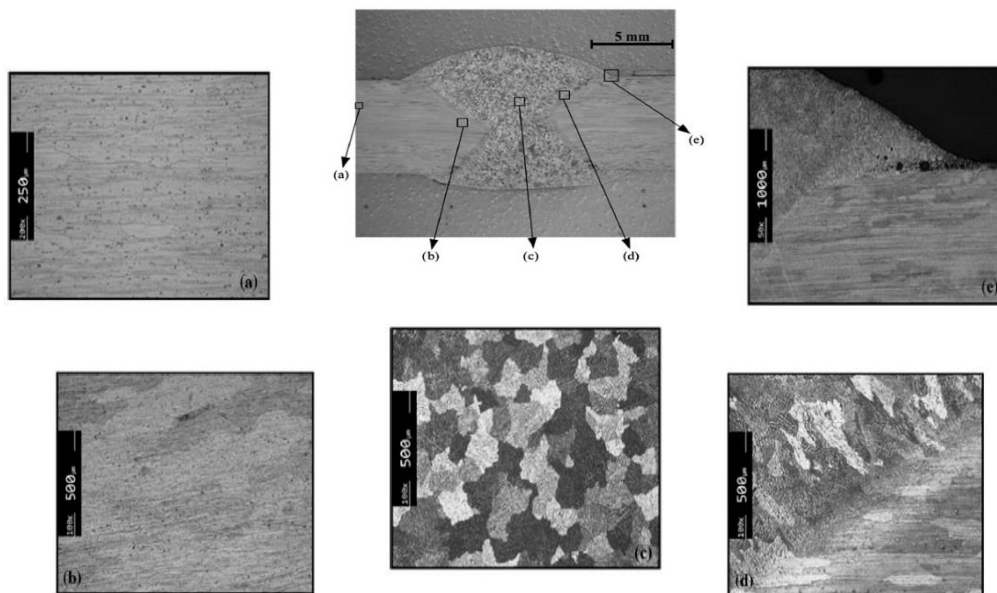
รูปที่ 2.14 แสดงลักษณะโครงสร้างจุลภาค [14]



รูปที่ 2.15 แสดงความแข็งบริเวณแนวเชื่อมจากการเชื่อมมิก [15]

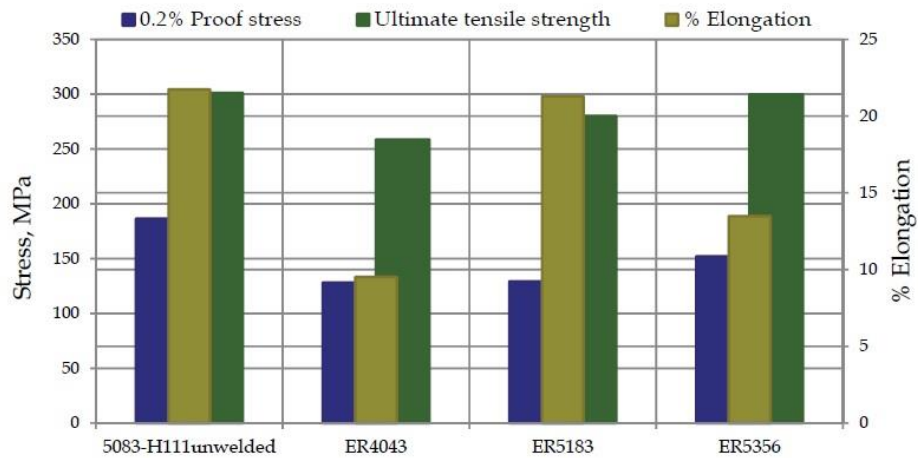
จากนั้นได้ศึกษาโครงสร้างจุลภาคจากการเชื่อมมิก แสดงดังรูปที่ 2.16 จากรูปที่ 2.16 (a) แสดงลักษณะโครงสร้างจุลภาคของเนื้อโลหะเดิม สำหรับรูปที่ 2.16 (b) เป็นบริเวณที่ถูกทำลายด้วยความร้อนจากการเชื่อมเพียงบางส่วน จากรูปที่ 2.16 (c) บริเวณเนื้อเชื่อมจะมีการสร้างเกรนที่มีลักษณะเป็นก้อนกลม (Equiaxed grains) มีขนาดประมาณ 100-120 ไมโครเมตร และเกรนบริเวณ

เส้นหลอมละลายจะมีลักษณะตามยาว (Elongated grains) เข้าไปในบริเวณกลางเนื้อเชื่อม แสดงดังรูปที่ 2.16 (d) และจากรูปที่ 2.16 (e) แสดงลักษณะการหลอมละลายไม่สมบูรณ์



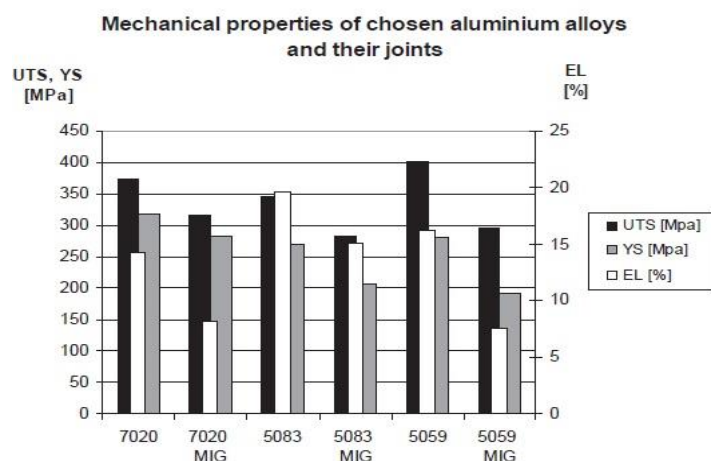
รูปที่ 2.16 แสดงลักษณะ โครงสร้างจุลภาค [15]

สำหรับการเชื่อมอะลูมิเนียมผสม 5083 โดยใช้ลวด 4043, 5183, 5356 Kalenda และคณะ [3] ได้ศึกษาเกี่ยวกับค่าความแข็งแรงดึง พบว่าการเชื่อมอะลูมิเนียมผสม 5083 ด้วยลวดเชื่อม 4043 พบว่าค่าความแข็งแรง ค่าความเหนียวและค่าความแข็งแรง ณ จุดครากต่ำที่สุด และการเชื่อมอะลูมิเนียมผสม 5083 ด้วยลวดเชื่อม 5183 จะให้ค่าความเหนียวที่ดีที่สุด แต่ค่าความแข็งแรง ณ จุดครากต่ำ และสำหรับการเชื่อมอะลูมิเนียมผสม 5083 ด้วยลวดเชื่อม 5356 ให้ค่าความแข็งแรงที่สูง ซึ่งใกล้เคียงกับเนื้อโลหะเดิม แต่ค่าความเหนียวลดลงอย่างเห็นได้ชัด แสดงดังรูปที่ 2.17



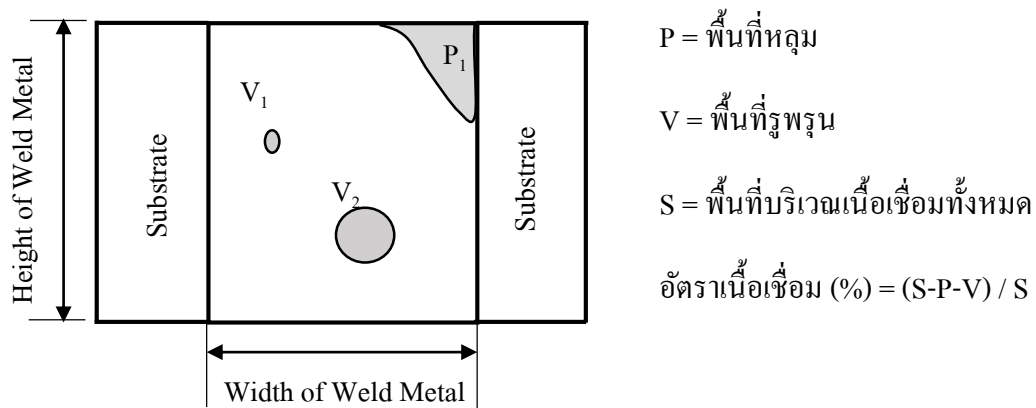
รูปที่ 2.17 แสดงผลการทดสอบสมบัติเชิงกล โดยลวดเชื่อม 4043 , 5183 , 5356 ตามลำดับ [3]

จากงานวิจัยนี้ได้สรุปว่า ลวดเชื่อม 5356 หรือ 5183 แนะนำให้เชื่อมอะลูมิเนียมผสม 5083 ได้ ซึ่งลวดเชื่อม 5356 ให้ค่าความแข็งแรงดึงและความแข็งแรง ณ จุดครากสูง และลวดเชื่อม 5183 ให้ค่าความแข็งแรงดึงและความเหนียวสูงเช่นกัน แต่เมื่อ Krzysztof Dudzik [16] ได้ทำการทดลองเชื่อมอะลูมิเนียมผสม 5083 ด้วยลวดเชื่อม 5383 เปรียบเทียบกับอะลูมิเนียมผสม 7020 เชื่อมด้วยลวดเชื่อม 5356 และอะลูมิเนียมผสม 5059 เชื่อมด้วยลวดเชื่อม 5183 พบว่าค่าความแข็งแรงดึงของการเชื่อมอะลูมิเนียมผสม 5083 มีค่าต่ำกว่าเล็กน้อยประมาณ 14-33 MPa. แต่ให้ค่าความเหนียวที่ดีที่สุด แสดงดังรูปที่ 2.18



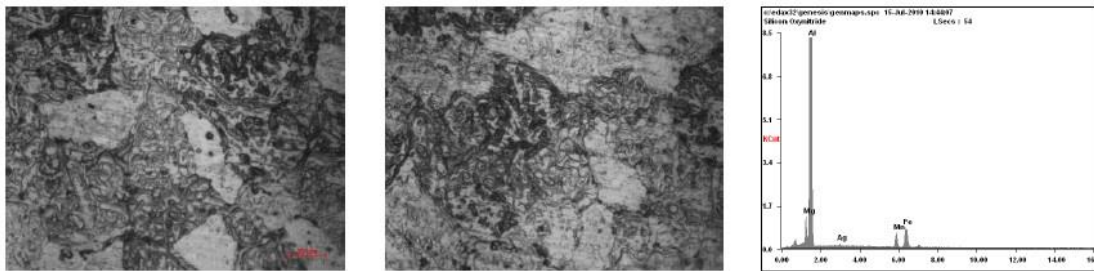
รูปที่ 2.18 แสดงผลการทดสอบสมบัติเชิงกล ของอะลูมิเนียม 7020 , 5083 , 5059 ตามลำดับ [16]

การเชื่อมอะลูมิเนียมผสมด้วยกรรมวิธีการเชื่อมมิก สิ่งที่เกิดขึ้นในบริเวณเนื้อเชื่อมอย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้ คือ รูพรุน หรืออาจมีการหลอมละลายที่ไม่สมบูรณ์ สิ่งเหล่านี้จะมีผลต่อสมบัติเชิงกล เนื่องจากการเกิดรูพรุนหรือการหลอมละลายที่ไม่สมบูรณ์นี้ จะทำให้สูญเสียพื้นที่รับแรงหรือเนื้อเชื่อมนั่นเอง ดังนั้น Huibin Xu และคณะ [17] ได้ศึกษาการวัดความหนาแน่นของเนื้อเชื่อมซึ่งมีผลต่อสมบัติเชิงกล และมีสมการดังต่อไปนี้

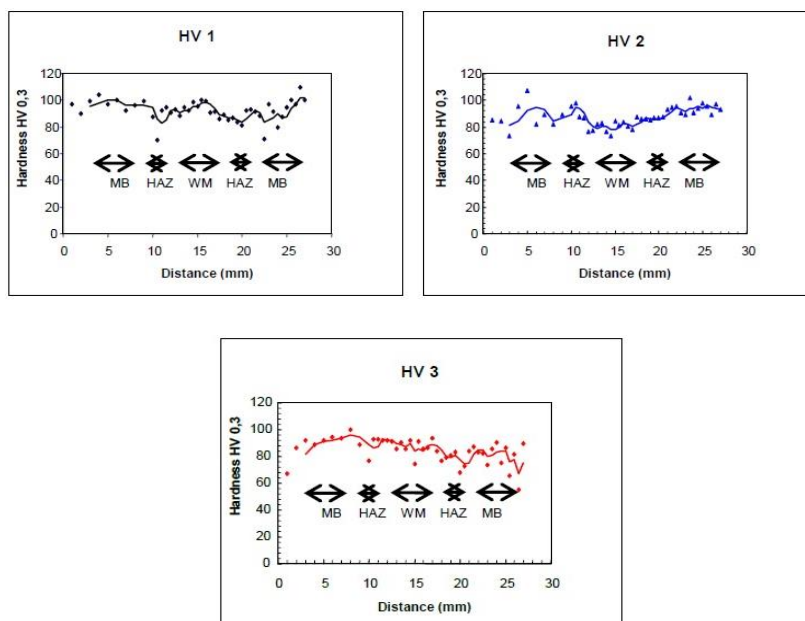


รูปที่ 2.19 แสดงการวัดความหนาแน่นของเนื้อเชื่อม [17]

งานวิจัยของ N. Coniglio และคณะ [18] ได้ศึกษาเกี่ยวกับเฟสของการหล่ออะลูมิเนียมผสม 6060 กับ 4043 และได้เชื่อมอะลูมิเนียมผสม 6060 เชื่อมด้วยลวด 4043 พบว่าในการหล่ออะลูมิเนียมผสม 6060 กับ 4043 ที่ทำให้เย็นตัวอย่างรวดเร็ว พบเฟส β - Al_5FeSi , Mg_2Si , Si และ α - $Al_8FeMg_3Si_6$ เป็นต้น สำหรับเนื้อเชื่อมที่เชื่อมด้วยลวดเชื่อม 4043 จะพบ α - Al_8Fe_2Si และที่บริเวณขอบเกรนจะพบเฟส β และเฟส α และในทำนองเดียวกัน Maamar HAKEM และคณะ [19] ได้ทำงานการทดลองเชื่อมอะลูมิเนียม 5083 ด้วยลวดเชื่อม 5356 และได้ศึกษาเกี่ยวกับโครงสร้างที่เกิดขึ้น จากการวิเคราะห์ด้วย EDS-SEM พบว่า โครงสร้างจุลภาคในบริเวณเนื้อเชื่อมที่เป็นบริเวณยูเทคติก จะมีองค์ประกอบหลัก คือ Al_3Mg_2 และสารประกอบอินเทอร์เมทัลลิก $Al_6(Fe, Mn)$ หรือ Al_6Mn และ Al_3Fe แสดงดังรูปที่ 2.20 และยังได้ทำการศึกษาความแข็งบริเวณ BM, HAZ, WM โดยทำการวัดความแข็ง 3 แนว ซึ่งผลจากการทดสอบความแข็งพบว่า บริเวณ HAZ และบริเวณ WM จะมีความแข็งอยู่ที่ 80-100 HV แสดงดังรูปที่ 2.21



รูปที่ 2.20 โครงสร้างจุลภาคของเนื้อเชื่อมและการวิเคราะห์ EDS [19]



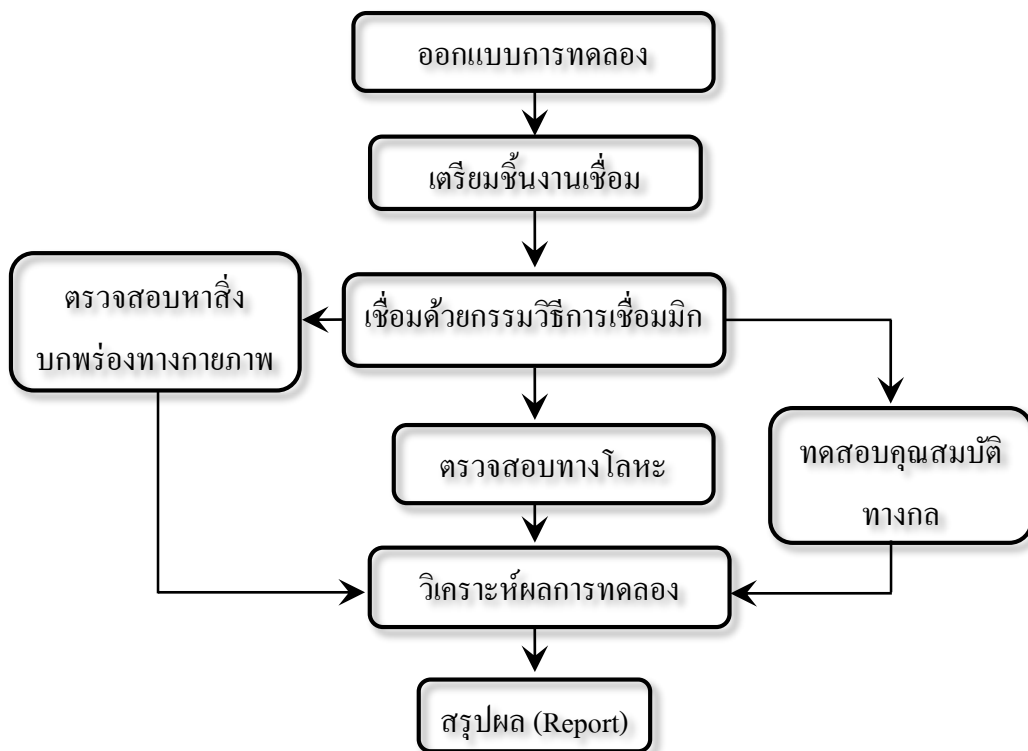
รูปที่ 2.21 แสดงความแข็งบริเวณ BM, HAZ และ WM [19]

บทที่ 3

วิธีการดำเนินการวิจัย

การดำเนินการวิจัยเพื่อศึกษาการเชื่อมช่องของอะลูมิเนียมผสม 2 ประเภท ได้แก่ 6082T6 และ 5083 ด้วยกรรมวิธีการเชื่อมมิก จากนั้นนำชิ้นงานเชื่อมไปศึกษาและวิเคราะห์ผล การเชื่อมใหม่กับการเชื่อมซ่อม ซึ่งจะส่งผลอย่างไรต่อลักษณะทางกายภาพ โครงสร้างมหภาค โครงสร้างจุลภาค ความหนาแน่นของเนื้อเชื่อม รวมถึงสมบัติเชิงกล โดยกำหนดการทดลองดังต่อไปนี้

3.1 การออกแบบวิธีการดำเนินการวิจัย



รูปที่ 3.1 ขั้นตอนวิธีดำเนินการวิจัย

3.1.1 เงื่อนไขการทดลอง

ตารางที่ 3.1 เงื่อนไขการทดลองทั้งหมด

อะลูมิเนียมประเภท	ขนาด (mm)	ลวดเชื่อม	ประเภทเชื่อม
Al 6082T6	4	4043	เชื่อมใหม่
	6	5356	เชื่อมซ่อม
Al 5083	3	5356	เชื่อมใหม่
	6		เชื่อมซ่อม

ตารางที่ 3.2 สรุปเงื่อนไขการทดลองสำหรับอะลูมิเนียมผสม 6082T6

ลำดับ	เงื่อนไข
1	Al 6082T6 - 4 mm - Filler 4043 (เชื่อมใหม่)
2	Al 6082T6 - 4 mm - Filler 4043 (เชื่อมซ่อม)
3	Al 6082T6 - 6 mm - Filler 4043 (เชื่อมใหม่)
4	Al 6082T6 - 6 mm - Filler 4043 (เชื่อมซ่อม)
5	Al 6082T6 - 4 mm - Filler 5356 (เชื่อมใหม่)
6	Al 6082T6 - 4 mm - Filler 5356 (เชื่อมซ่อม)
7	Al 6082T6 - 6 mm - Filler 5356 (เชื่อมใหม่)
8	Al 6082T6 - 6 mm - Filler 5356 (เชื่อมซ่อม)

ตารางที่ 3.3 สรุปเงื่อนไขการทดลองสำหรับอะลูมิเนียมผสม 5083

ลำดับ	เงื่อนไข
1	Al 5083 - 3 mm - Filler 5356 (เชื่อมใหม่)
2	Al 5083 - 3 mm - Filler 5356 (เชื่อมซ่อม)
3	Al 5083 - 6 mm - Filler 5356 (เชื่อมใหม่)
4	Al 5083 - 6 mm - Filler 5356 (เชื่อมซ่อม)

3.2 วัสดุที่ใช้ในการทดลอง

การทดลองการเชื่อมซ่อมอะลูมิเนียมผสมแมกนีเซียม 6082T6 เชื่อมด้วยลวดเชื่อม 4043 และลวดเชื่อม 5356 สำหรับอะลูมิเนียมเกรด 5083 เชื่อมด้วยลวดเชื่อม 5356 ซึ่งการกระบวนการเชื่อมนี้เรียกว่า เชื่อมมิก (MIG Welding) ปัจจุบันนิยมใช้ในอุตสาหกรรม รถไฟ รถยนต์ เป็นต้น

3.2.1 อะลูมิเนียมผสมเกรด 6082T6

อะลูมิเนียมเกรด 6082T6 เป็นโลหะผสมของอะลูมิเนียมที่มีแมกนีเซียม ซิลิกอน และแมงกานีสเป็นส่วนผสมสำคัญ สามารถเพิ่มความแข็งแรงได้ด้วยการผ่านกระบวนการบ่มแข็ง อะลูมิเนียมผสมชนิดนี้นิยมใช้งานที่ตรงความต้องการทั้งความแข็งแรงสูงร่วมกับความต้านต่อการกัดกร่อน เช่น งานในยานพาหนะต่างๆ เช่น รถไฟ รถบรรทุก และปริมาณแมงกานีสยังเป็นตัวควบคุมลักษณะโครงสร้างของเกรนซึ่งส่งผลให้มีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น

ตารางที่ 3.4 ส่วนประกอบทางเคมีของอะลูมิเนียม 6082T6 ที่ใช้ในการทดลอง [2]

Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Al
0.7	0.50	0.10	0.4	0.6	0.25	0.20	0.10	Bal.
to	max	max	to	to	max	max	max	
1.3			1.0	1.2				

3.2.2 อะลูมิเนียมผสมเกรด 5083

เป็นโลหะผสมของอะลูมิเนียมที่มีแมกนีเซียม แมงกานีส และโครเมียม เป็นส่วนผสมสำคัญ ซึ่งผ่านกระบวนการขึ้นรูปเย็นเพื่อให้มีความแข็งแรงสูงสุด และอบเสถียรเพื่อช่วยรักษาคุณสมบัติทางกลให้คงที่ และเพื่อให้มีความต้านทานต่อการกัดกร่อนที่ดีเยี่ยม นิยมใช้ในโครงสร้างที่ต้องการความแข็งแรงสูง มีความทนต่อการกัดกร่อนดี และอาจมีการเชื่อมร่วมด้วยหรือขึ้นส่วนในยานพาหนะต่างๆ รวมทั้งชิ้นส่วนในงานที่ต้องทนต่ออุณหภูมิต่ำ เป็นต้น

ตารางที่ 3.5 ส่วนประกอบทางเคมีของอะลูมิเนียม 5083 ที่ใช้ในการทดลอง [2]

Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Al
0.4	0.4	0.10	0.4	4.0	0.05	0.25	0.15	Bal.
			to	to	to			
			1.0	4.9	0.25			

3.2.3 ลวดเชื่อม แบ่งเป็น 2 ชนิด คือ ลวดเชื่อม 4043 และลวดเชื่อม 5356

1. ลวดเชื่อม 4043 มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.2 มิลลิเมตร ใช้สำหรับเชื่อม อะลูมิเนียมเกรด 6082T6

2. ลวดเชื่อม 5356 มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.2 มิลลิเมตร ใช้สำหรับเชื่อม อะลูมิเนียมเกรด 6082T6 และอะลูมิเนียมเกรด 5083 แสดงดังรูป 3.2 และแสดงส่วนประกอบทางเคมีดังตารางที่ 3.6

ตารางที่ 3.6 แสดงส่วนประกอบทางเคมีของลวดเชื่อมอะลูมิเนียม แสดงในภาคผนวก ก.

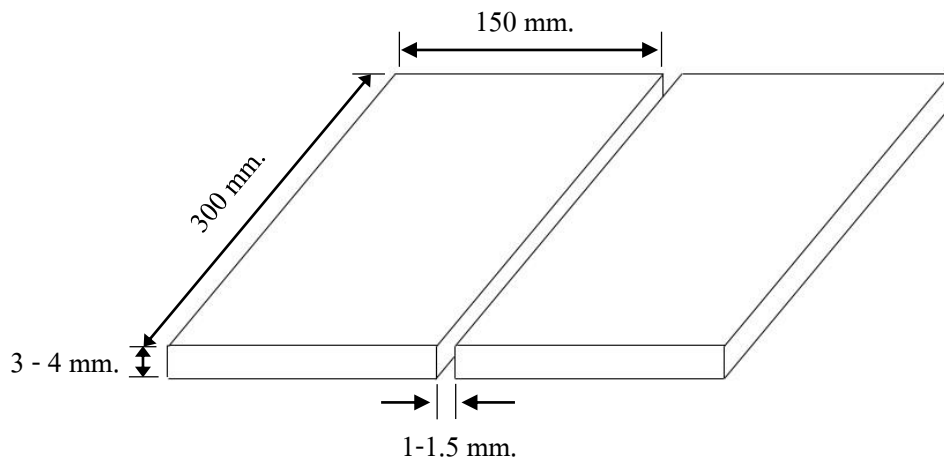
Type	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Al
4043	4.91	0.15	0.03	0.007	0.003	0.001	0.004	0.01	Bal.
5356	0.05	0.10	0.006	0.13	4.88	0.12	0.006	0.09	Bal.



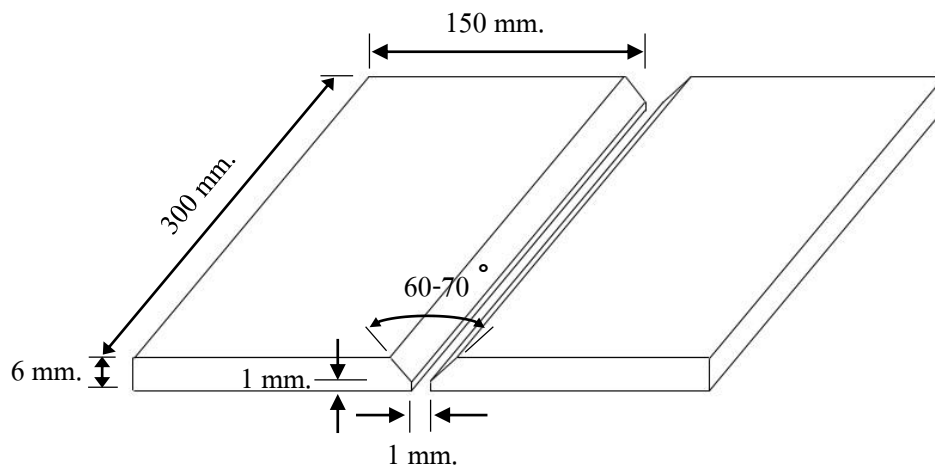
รูปที่ 3.2 ลวดเชื่อมอะลูมิเนียมขนาด 1.2 มิลลิเมตร

3.2.4 การเตรียมชิ้นงานสำหรับการทดลอง

ขั้นตอนการเตรียมชิ้นงานก่อนการเชื่อม ตามมาตรฐาน AWS D1.2 แสดงดังรูปที่ 3.3 และรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.3 แสดงการเตรียมชิ้นงานขนาด 3-4 มิลลิเมตร



รูปที่ 3.4 แสดงการเตรียมชิ้นงานขนาด 6 มิลลิเมตร

3.3 เครื่องมือและอุปกรณ์สำหรับการทดลอง

3.3.1 เครื่องเชื่อมมิกระบบอินเวอร์เตอร์ เชื่อมได้ทั้งกระแสธรรมดา (Standard) และกระแสพัลส์ (Pulse) ให้กระแสเชื่อมสูงถึง 270 แอมป์ แสดงดังรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 แสดงเครื่องเชื่อมมิก

3.3.2 เครื่องกัดแนวตั้ง ยี่ห้อ HELLER รุ่น 2S ใช้ในการกัดอะลูมิเนียม ให้มีขนาดตามแบบในการทดลองและใช้ในการเตรียมตัวอย่างทดสอบ แสดงดังรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 เครื่องกัดแนวตั้ง

3.3.3 เครื่องเลื่อยสายพานแนวนอน รุ่น UE-712A ใช้ในการตัดแบ่งชิ้นงานให้มีขนาดความกว้างและความยาวใกล้เคียงขนาดจริงหลังจากการกัดให้ได้ขนาดความหนา แสดงดังรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.7 เครื่องเลื่อยสายพานแนวนอน

3.3.4 ถังบรรจุแก๊สอาร์กอน ใช้สำหรับปกคลุมแนวเชื่อม แสดงดังรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.8 ถังแก๊สอาร์กอน

3.3.5 กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (Optical Microscope) มีกำลังขยาย 4-28 เท่า สำหรับศึกษาโครงสร้างมหภาค แสดงดังรูปที่ 3.9



รูปที่ 3.9 กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง มีกำลังขยาย 4-28 เท่า

3.3.6 กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง มีกำลังขยาย 25-500 เท่า สำหรับศึกษาโครงสร้างจุลภาค แสดงดังรูปที่ 3.10



รูปที่ 3.10 กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง มีกำลังขยาย 25-500 เท่า

3.3.7 เครื่องทดสอบความแข็ง ยี่ห้อ Zwick/Roell ZHU วัดค่าความแข็งแบบวิกเกอร์ (Vicker) หัวกดเป็นรูปปิรามิด 136 มีแรงกดตั้งแต่ 3-100 kgf แสดงดังรูปที่ 3.11



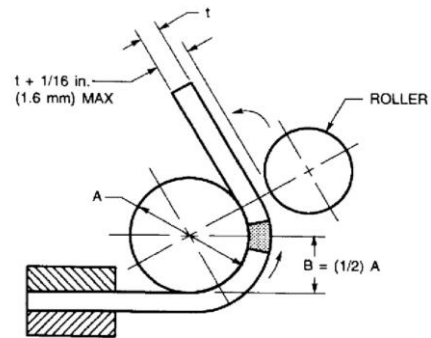
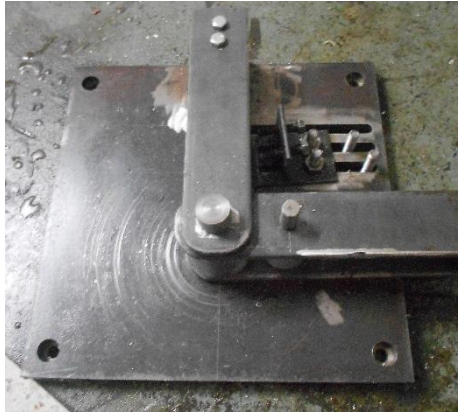
รูปที่ 3.11 เครื่องทดสอบความแข็ง

3.3.8 เครื่องทดสอบแรงดึง แนวตั้ง สามารถปรับแรงดึงได้ตั้งแต่ 1-100000 นิวตัน แสดงดังรูปที่ 3.12



รูปที่ 3.12 เครื่องทดสอบแรงดึง

3.3.9 เครื่องทดสอบแรงดัด ตามมาตรฐาน AWS D15.1:2001 An American National Standard
แสดงดังรูปที่ 3.13



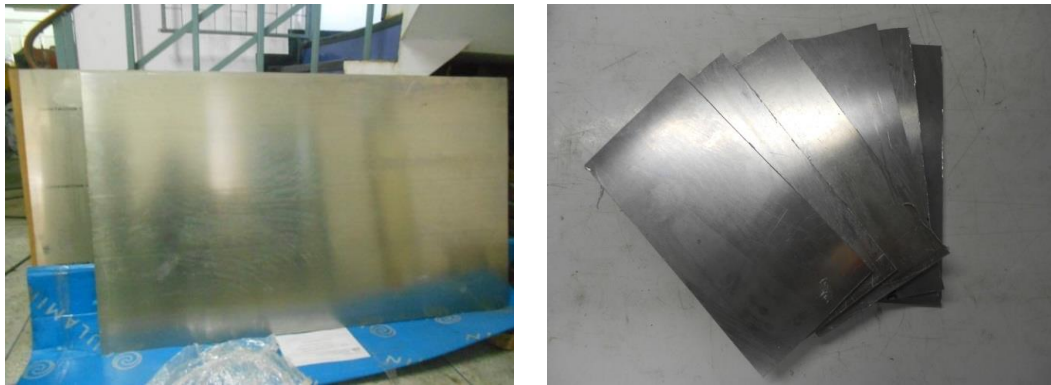
รูปที่ 3.13 เครื่องทดสอบการดัดงอ

3.4 ขั้นตอนการทดลองเชื่อม

ทำการทดลองปฏิบัติการเชื่อมชิ้นงานทดสอบด้วยกรรมวิธีการเชื่อมมิก โดยการจำลองการเชื่อมซ่อม โดยทำการเชื่อมครั้งแรก และทำการเชื่อมซ้ำชิ้นงานเดิมอีก 1 ครั้ง (ก่อนเชื่อมซ้ำจะมีการเจียร์แนวเชื่อมเดิมออกก่อน) โดยจะเชื่อมด้วยตัวแปรที่เหมาะสม เช่น กระแสเชื่อม แรงดันเชื่อม อัตราเร็วในการเดินแนวเชื่อม (Welding Speed) อัตราการไหลของแก๊สคลุม ตามที่ได้ ออกแบบการทดลองไว้

3.4.1 ขั้นตอนการเตรียมชิ้นงานและการเชื่อม

1. การเตรียมชิ้นงานสำหรับเชื่อม ขนาด กว้าง 150 มิลลิเมตร ยาว 300 มิลลิเมตร สำหรับชิ้นงานที่มีขนาดบางไม่ต้องการบาก เช่น อะลูมิเนียมที่มีความหนา 3 มิลลิเมตร และ 4 มิลลิเมตร เป็นต้น แต่สำหรับอะลูมิเนียมที่มีความหนา 6 มิลลิเมตร ต้องการบาก



รูปที่ 3.14 แสดงการเตรียมชิ้นงานสำหรับเชื่อม

2. การทำความสะอาดผิวชิ้นงานก่อนการเชื่อม เนื่องจากอะลูมิเนียมมีฟิล์มมาปกคลุมผิวทำให้เชื่อมได้ยาก จึงต้องมีการทำความสะอาดผิว โดยการขัดด้วยแปรงสแตนเลสหรือเจียร์ ด้วยลวดสแตนเลส จากนั้นทำความสะอาดผิวด้วยแอลกอฮอล์หรืออะซิโตน



รูปที่ 3.15 แสดงการทำความสะอาดผิวชิ้นงาน

3. เชื่อมแผ่นอะลูมิเนียมด้วยท่าราบ (Flat, 1G) การเชื่อมมักจะต่อเชื่อมไปด้านหน้า (Forward) เพื่อให้แก๊สที่ไหลออกมาจากหัวเชื่อม ได้ปกคลุมแนวเชื่อม ซึ่งช่วยให้เชื่อมได้ง่ายขึ้น ลดอุณหภูมิที่เกิดขึ้นในแนวเชื่อม และช่วยไม่ให้เกิดการแตกร้าวบริเวณเนื้อเชื่อม



รูปที่ 3.16 แสดงการเชื่อมชิ้นงาน

4. ชิ้นงานที่เสร็จสมบูรณ์ หลังจากการเชื่อมเสร็จสมบูรณ์ ต้องผ่านการตรวจสอบขั้นแรกด้วยสายตา เช่น สังเกตรอยแตกร้าว แนวเชื่อมมีความสมบูรณ์ ไม่พบการกักขบหรือแนวเชื่อมนูนเกินไป เป็นต้น



รูปที่ 3.17 ชิ้นงานหลังจากการเชื่อม

3.5 ศึกษาสมบัติเชิงโลหะวิทยา (Metallurgical Properties Investigation)

หลังจากทำการเชื่อมในแต่ละตัวแปรแล้ว จะนำชิ้นงานมาทำการศึกษาคูณสมบัติเชิงโลหะวิทยาเพื่อวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพของแนวเชื่อมและโครงสร้างในระดับมหภาค (Macrostructure) และจุลภาค (Microstructure) และเปรียบเทียบข้อแตกต่างทางโครงสร้างในแต่ละตัวแปรของการเชื่อมโดยใช้กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง

3.5.1 การเตรียมชิ้นงาน

1. ตัดชิ้นงานให้มีขนาด 2.5-3 เซนติเมตร สำหรับใส่แม่พิมพ์หล่อชิ้นงาน แสดงดังรูปที่ 3.18



รูปที่ 3.18 การวางตำแหน่งบนแม่พิมพ์ทำเรือนแบบร้อน (hot mounting)

2. ใส่ผงเบเคอร์ไลต์ (Bakelite) เพื่อทำเรือนแบบร้อน แสดงดังรูปที่ 3.19



รูปที่ 3.19 การใส่ผงเบเคอร์ไลต์ (Bakelite)

3. การทำเรือนแบบร้อนเสร็จสมบูรณ์ แสดงดังรูปที่ 3.20



รูปที่ 3.20 ชิ้นงานทำเรือนแบบร้อน

3.5.2 การขัดชิ้นงาน

1. เริ่มขัดชิ้นงานด้วยกระดาษทราย 320, 400, 800, 1200, 2500 แสดงดังรูปที่ 3.21



รูปที่ 3.21 แสดงการขัดชิ้นงานด้วยกระดาษทราย

2. จัดชิ้นงานด้วยแผ่นสั๊กหลาดและผงอลูมินา (Alumina) ขนาด 5, 3, 0.3 ไมโครเมตร แสดงดังรูปที่ 3.22



(ก)



(ข)

รูปที่ 3.22 แสดงการจัดชิ้นงานด้วยสั๊กหลาด

3.5.3 การเตรียมกรดและการกัดผิวชิ้นงาน

1. ส่วนประกอบของกรด Keller ที่ใช้กัดผิวชิ้นงาน คือ

- Distilled water 190 ml.
- Nitric acid 5 ml.
- Hydrochloric acid 3 ml.
- Hydrofluoric acid 2 ml.

2. จุ่มชิ้นงานลงในกรดที่เตรียมไว้ ประมาณ 90-120 วินาที แสดงดังรูปที่ 3.23



รูปที่ 3.23 การจุ่มชิ้นงานลงในกรด

3. ล้างด้วยน้ำให้สะอาด

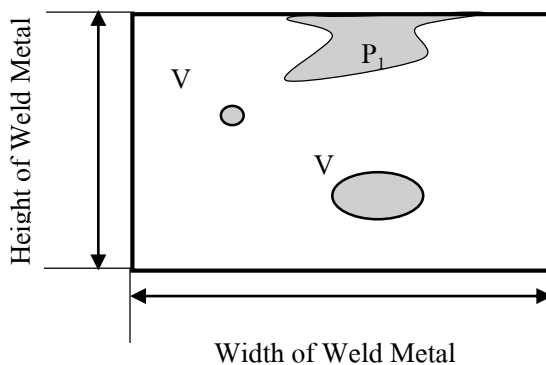
4. เป่าให้แห้ง แสดงดังรูปที่ 3.24



รูปที่ 3.24 การเป่าผิวชิ้นงาน

3.6 การวัดความหนาแน่นของแนวเชื่อม

การวัดความหนาแน่นจากโครงสร้างมหภาคของแนวเชื่อม เป็นการวิเคราะห์ในส่วนของเนื้อเชื่อมเท่านั้น แสดงหลักการวัดความหนาแน่น ดังต่อไปนี้



รูปที่ 3.25 แสดงรูปแบบการวัดความหนาแน่นของแนวเชื่อม [17]

$$\text{ความหนาแน่นของแนวเชื่อม (\%)} = (S - P - V) / S$$

S คือ พื้นที่ทั้งหมดของแนวเชื่อม

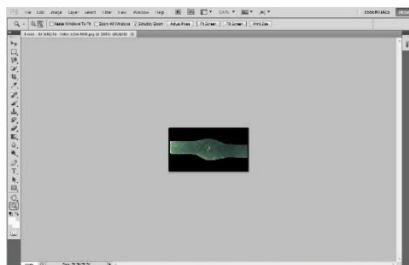
P คือ พื้นที่ของหลุม

V คือ พื้นที่ของโพรงอากาศ

การวัดความหนาแน่นของเนื้อเชื่อม จะใช้โปรแกรมในการคำนวณโพรงอากาศหรือรูพรุน แสดงวิธีการใช้โปรแกรมหาดังต่อไปนี้ [20]

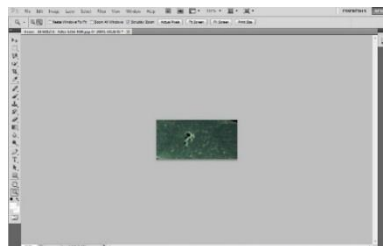
1) เปิดโปรแกรม Adobe Photoshop

1.1) เลือกคำสั่ง File → Open เลือกภาพที่ต้องการ แสดงดังรูปที่ 3.26



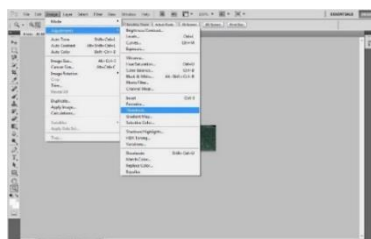
รูปที่ 3.26 การเลือกรูปภาพสำหรับวัดความหนาแน่น

1.2) เลือกคำสั่ง Crop Tool เพื่อตัดภาพส่วนเกินออก แสดงดังรูปที่ 3.27

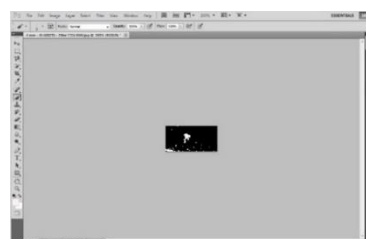


รูปที่ 3.27 การเลือกพื้นที่สำหรับวัดความหนาแน่น

1.3) เลือกคำสั่ง Image → Adjustment → Threshold เพื่อแยกตำแหน่งรูพรุนกับเนื้อเชื่อม แสดงดังรูปที่ 3.28



(ก)



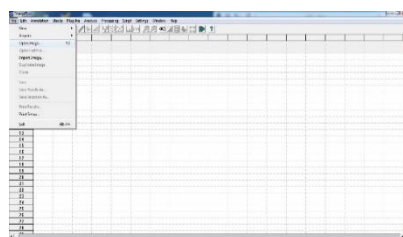
(ข)

รูปที่ 3.28 การแยกตำแหน่งของรูพรุนกับเนื้อเชื่อมใน โปรแกรม Adobe Photoshop

1.4) เลือกคำสั่ง File → Save As บันทึกภาพเป็น JPG File (.jpg)

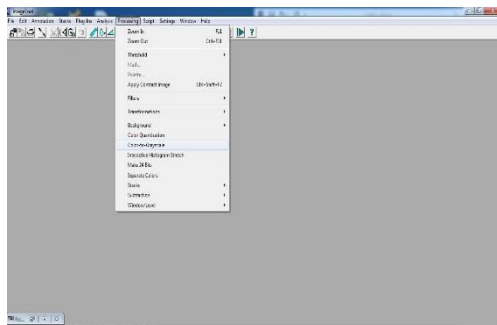
2) เปิดโปรแกรม Image Tool

2.1) เลือกคำสั่ง File → Open Image เปิดรูปภาพที่ได้จากโปรแกรม Adobe Photoshop แสดงดังรูปที่ 3.29

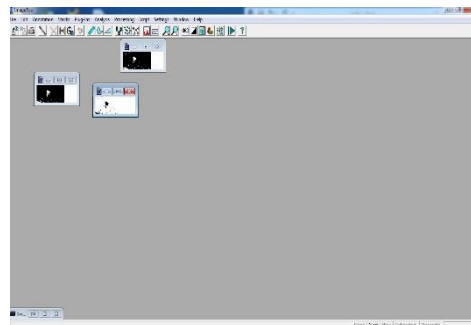


รูปที่ 3.29 การเปิดรูปภาพที่ได้จากโปรแกรม Adobe Photoshop

2.2) เลือกคำสั่ง Processing → Color-to-Grayscale จากนั้นเลือกคำสั่ง Processing → Threshold Manual เพื่อแยกรูพรุนกับเนื้อเชื่อม แสดงดังรูปที่ 3.30



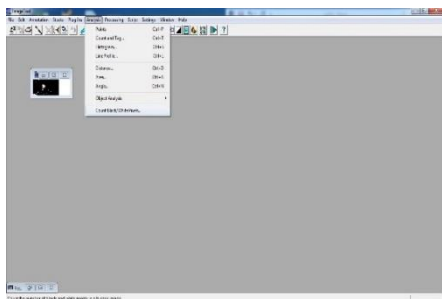
(ก)



(ข)

รูปที่ 3.30 การแยกตำแหน่งรูพรุนออกจากเนื้อเชื่อมใน โปรแกรม Image Tool

2.3) เลือกคำสั่ง Analysis → Count Black/White Pixels เพื่อวิเคราะห์ปริมาณรูพรุน



(ก)

	Black Count	White Count	Black %	White %
Mean	154.00	2966.00	4.94	95.06
Std. Dev.	0.00	0.00	0.00	0.00
1	154	2966	4.94	95.06
2				
3				
4				
5				

(ข)

รูปที่ 3.31 การวิเคราะห์ปริมาณรูพรุนในเนื้อเชื่อม

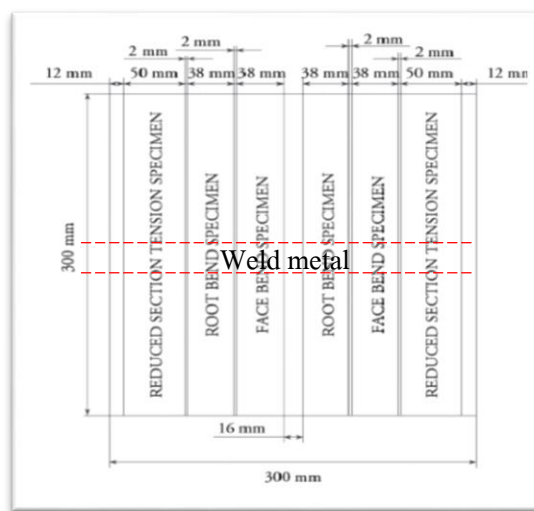
แสดงวิธีการคำนวณดังต่อไปนี้

$$\begin{aligned}
 \text{ความหนาแน่นของแนวเชื่อม (\%)} &= (S - P - V) / S \\
 &= [(154+2966) - 154] / (154+2966) \\
 &= 0.9506 \\
 &= 95.06 \%
 \end{aligned}$$

3.7 ศึกษาคุณสมบัติเชิงกล (Mechanical Properties Investigation)

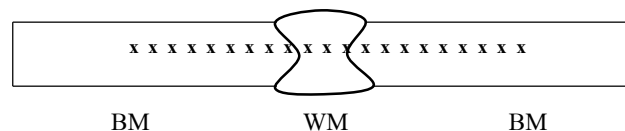
ได้แก่ ค่าความแข็งแรงดึงสูงสุดของแนวเชื่อม (Ultimate tensile strength) ค่าความแข็งแรงครากของแนวเชื่อม (Yield strength) ค่าการยืดตัวของแนวเชื่อม (Elongation)

3.7.1 การทดสอบแรงดึงและแรงดัด (Tensile Test and Bend Test) ของชิ้นงานที่ผ่านการเชื่อมของแต่ละตัวแปรการเชื่อม โดยการตัดตัวอย่างตามแนวขวางกับรอยเชื่อม แสดงดังรูปที่ 3.32



รูปที่ 3.32 ชิ้นงานที่ผ่านการเชื่อมแล้วนำมาตัดตามแนวขวางกับรอยเชื่อม

3.7.2 การทดสอบหาค่าความแข็ง (Hardness Test) บริเวณที่จะทำการวิเคราะห์ค่าความแข็ง, บริเวณเนื้อโลหะเดิม (Base Metal, BM), บริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อน (Heat Affected Zone, HAZ), บริเวณเนื้อเชื่อม (Weld Metal, WM) แสดงดังรูปที่ 3.33



รูปที่ 3.33 แสดงตำแหน่งการทดสอบความแข็ง

บทที่ 4

ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผล

การทดลองการเชื่อมซ่อมอะลูมิเนียมผสม 2 ประเภท คือ 6082T6 และ 5083 เชื่อมด้วยลวดเชื่อม 4043 และลวดเชื่อม 5356 การเชื่อมจะต้องใช้ตัวแปรที่เหมาะสม เช่น กระแสเชื่อม แรงดันเชื่อม อัตราการไหลของแก๊ส ความเร็วในการเชื่อม เป็นต้น การเชื่อมด้วยกรรมวิธีการเชื่อมมีจำเป็นต้องมีแก๊สอาร์กอน สำหรับปกคลุมแนวเชื่อม เพื่อช่วยให้การอาร์คดีขึ้นและป้องกันรูพรุนที่จะเกิดขึ้นในเนื้อเชื่อม ซึ่งการทดลองจะแบ่งเป็น 3 การทดลองใหญ่ๆ คือ การทดลองที่ 1 เชื่อมอะลูมิเนียมผสม 6082T6 เชื่อมด้วยลวดเชื่อม 4043 การทดลองที่ 2 เชื่อมอะลูมิเนียมผสม 6082T6 เชื่อมด้วยลวดเชื่อม 5356 การทดลองที่ 3 เชื่อมอะลูมิเนียมผสม 5083 เชื่อมด้วยลวดเชื่อม 5356

งานวิจัยนี้เป็นการเปรียบเทียบการเชื่อมใหม่กับการเชื่อมซ่อม เช่น โครงสร้างมหภาค โครงสร้างจุลภาค สมบัติเชิงกล เป็นต้น ซึ่งแสดงผลการทดลองดังต่อไปนี้

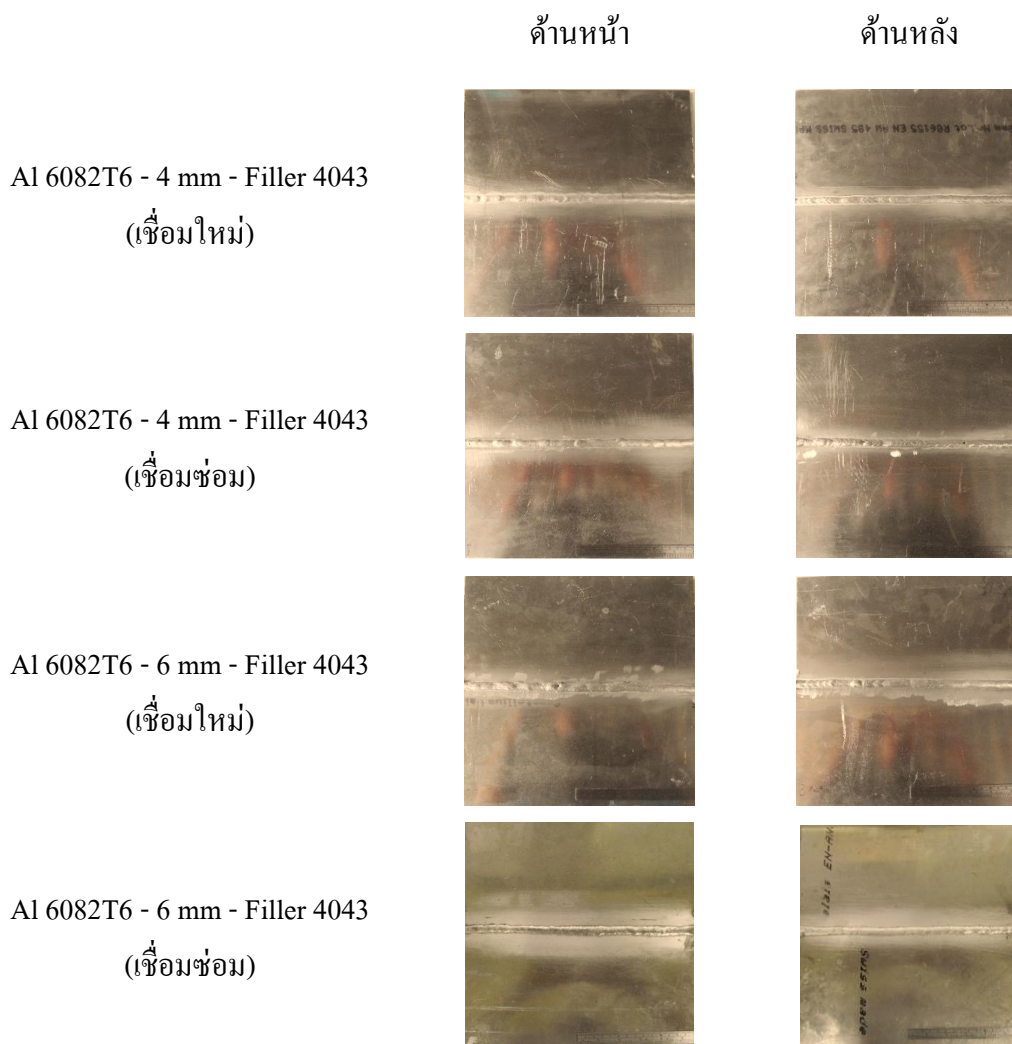
4.1 ลักษณะทางกายภาพของแนวเชื่อม

จากลักษณะทางกายภาพ แสดงให้เห็นว่า การเชื่อมใหม่กับการเชื่อมซ่อมไม่มีความแตกต่างกัน ซึ่งลักษณะทางกายภาพจะเป็นตัวบ่งชี้สมบัติอื่นๆ ได้ระดับหนึ่ง เช่น แนวเชื่อมเกิดการกัดขอบ มีการเอียงของแนวเชื่อม ลักษณะเหล่านี้จะส่งผลให้สมบัติทางกลลดลง การเชื่อมอะลูมิเนียมผสม ควรใช้ตัวแปรที่เหมาะสม เพื่อให้แนวเชื่อมมีความสมบูรณ์ ไม่เกิดรอยแตกร้าวบนแนวเชื่อม แนวเชื่อมไม่นูนเกินไป (Excessive convexity) ไม่เกิดการกัดขอบ (Excessive undercut) ไม่มีการเอียงของแนวเชื่อม (Overlap) และแนวเชื่อมหลอมไม่สมบูรณ์ (Incomplete fusion) เป็นต้น [4] แสดงลักษณะทางกายภาพดังต่อไปนี้

1) อะลูมิเนียมผสม 6062T6 เชื่อมด้วยลวดเชื่อม 4043

จากรูปที่ 4.1 แสดงลักษณะทางกายภาพของแนวเชื่อม โดยขั้นตอนการตรวจสอบด้วยสายตา (Visual test) พบว่าแนวเชื่อมมีความสมบูรณ์ดี ทั้งด้านหน้าและด้านหลัง แนวเชื่อมไม่

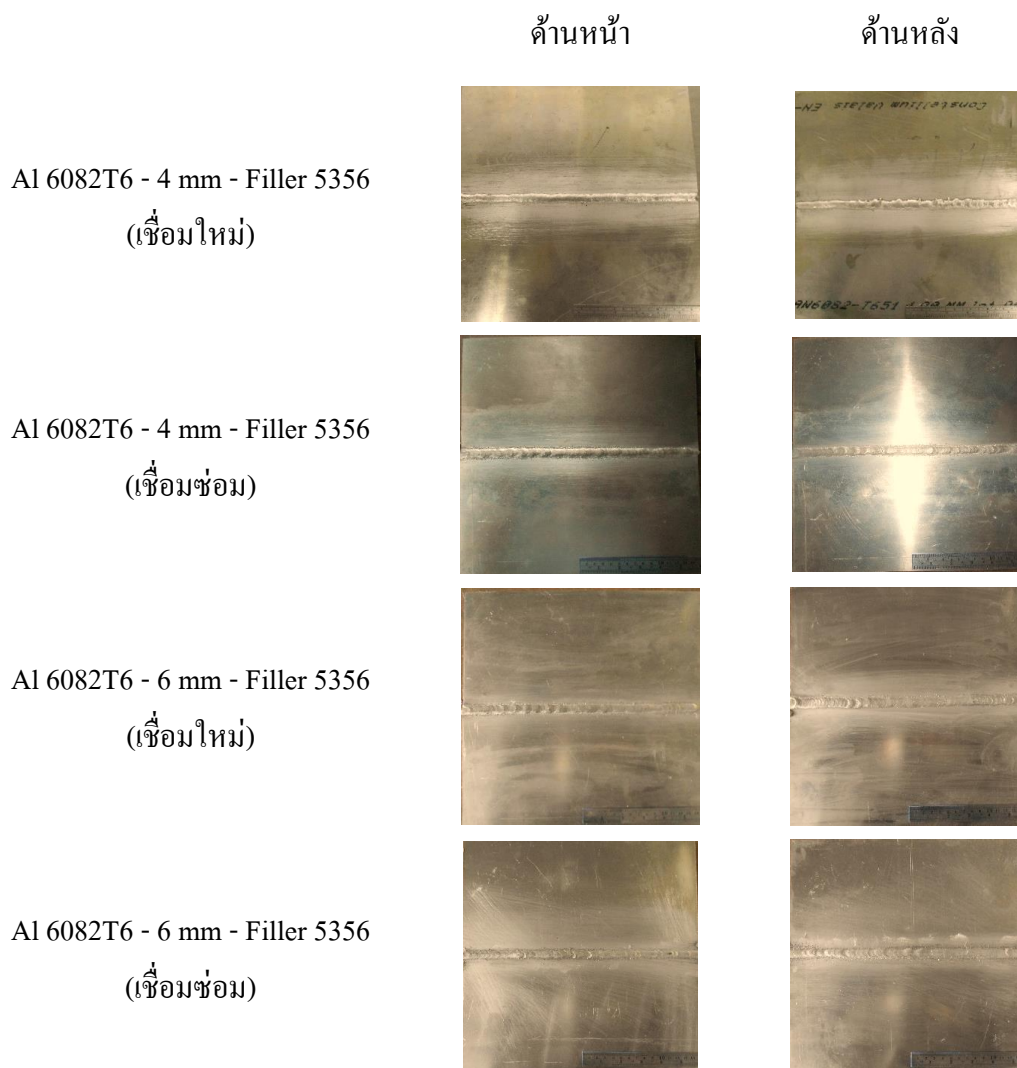
นูนเกินไป ไม่เกิดการกัดขอบ และไม่มีการเกยของแนวเชื่อม [4] จากการทดลองการเชื่อม อะลูมิเนียมผสม 6062T6 เชื่อมด้วยลวดเชื่อม 4043 ระหว่างการเชื่อมใหม่กับการเชื่อมซ่อมแสดงให้เห็นว่า แนวเชื่อมไม่มีความแตกต่างกัน



รูปที่ 4.1 แสดงลักษณะทางกายภาพของอะลูมิเนียมผสม 6062T6 เชื่อมด้วยลวดเชื่อม 4043

2) อะลูมิเนียมผสม 6062T6 เชื่อมด้วยลวดเชื่อม 5356

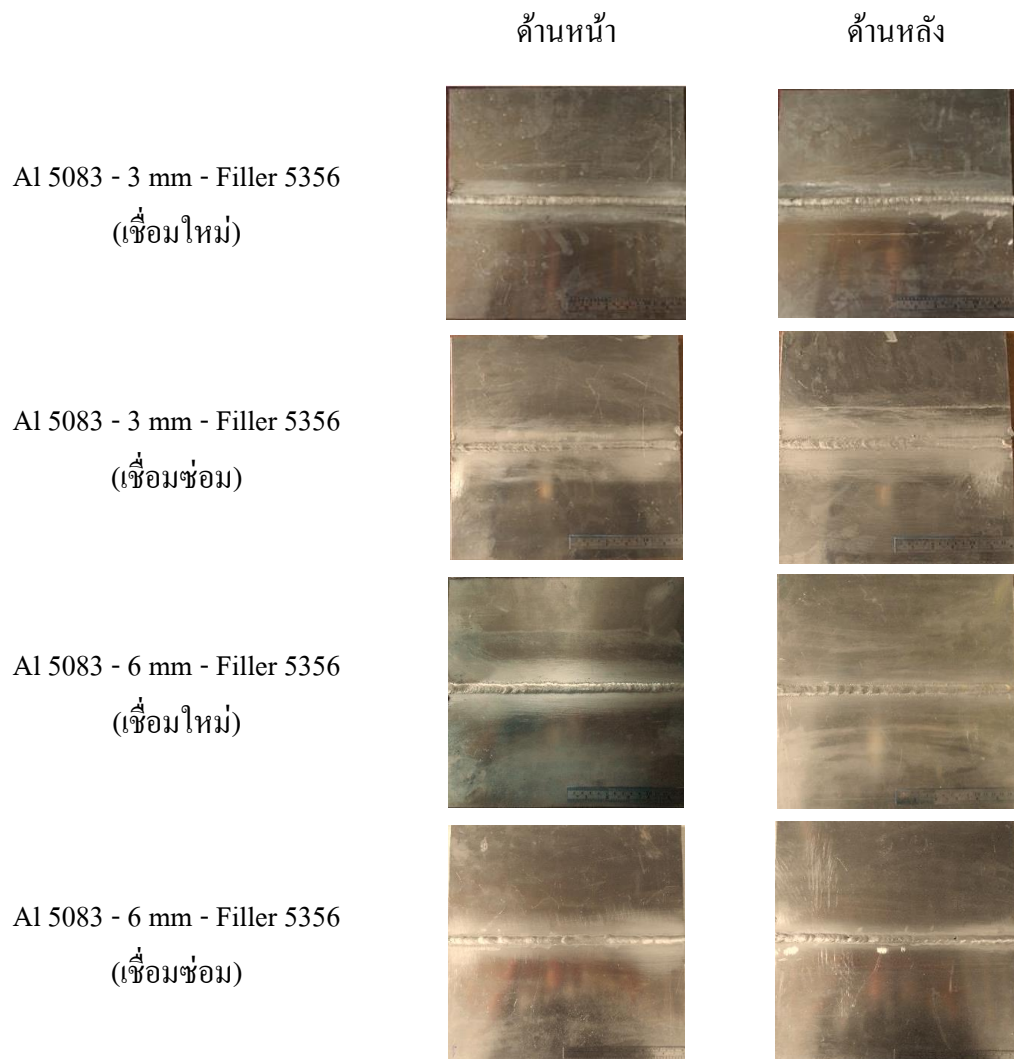
จากรูปที่ 4.2 แสดงลักษณะทางกายภาพของแนวเชื่อม โดยขั้นตอนการตรวจสอบด้วยสายตา พบว่าแนวเชื่อมมีความสมบูรณ์ดี ทั้งด้านหน้าและด้านหลัง แนวเชื่อมไม่นูนเกินไป ไม่เกิดการกัดขอบ และไม่มีการเกย จากการทดลองการเชื่อมอะลูมิเนียมผสม 6062T6 เชื่อมด้วยลวดเชื่อม 5356 ระหว่างการเชื่อมใหม่กับการเชื่อมซ่อมแสดงให้เห็นว่า แนวเชื่อมไม่มีความแตกต่างกัน



รูปที่ 4.2 แสดงลักษณะทางกายภาพของอะลูมิเนียมผสม 6062T6 เชื่อมด้วยลวดเชื่อม 5356

3) อะลูมิเนียมผสม 5083 เชื่อมด้วยลวดเชื่อม 5356

จากรูปที่ 4.3 แสดงลักษณะทางกายภาพของแนวเชื่อม โดยขั้นตอนการตรวจสอบด้วยสายตา พบว่าแนวเชื่อมมีความสมบูรณ์ดี ทั้งด้านหน้าและด้านหลัง แนวเชื่อมไม่นูนเกินไป ไม่เกิดการกัดขอบ และไม่มีการเกย [4] จากการทดลองการเชื่อมอะลูมิเนียมผสม 5083 เชื่อมด้วยลวดเชื่อม 5356 ระหว่างการเชื่อมใหม่กับการเชื่อมซ่อมแสดงให้เห็นว่า แนวเชื่อมไม่มีความแตกต่างกัน



รูปที่ 4.3 แสดงลักษณะทางกายภาพของอะลูมิเนียมผสม 5083 เชื่อมด้วยลวดเชื่อม 5356

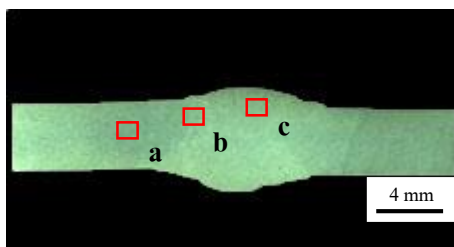
4.2 โครงสร้างมหภาคและจุลภาคของแนวเชื่อม

เงื่อนไขการเชื่อมอะลูมิเนียม 6082T6 เชื่อมด้วยลวดเชื่อม 4043 จากรูปที่ 4.4 ก) - 4.7 ก) แสดงโครงสร้างมหภาค แนวเชื่อมมีการซึมลึกที่ดี ไม่พบรูพรุนที่เห็นได้ชัด รูปที่ 4.4 ข) - 4.7 ข) แสดงลักษณะเฉพาะของเนื้อโลหะเดิม รูปที่ 4.4 ค) - 4.7 ค) แสดงลักษณะบริเวณที่ได้รับผลกระทบเนื่องจากความร้อน (Heat Affected Zone) พบว่าเกรนของเนื้อโลหะเดิมที่ติดกับเนื้อเชื่อม จะเกิดการขยายตัวและเกรนของเนื้อเชื่อมในบริเวณนี้จะมีลักษณะเป็นแท่งยาว (Columnar grains) รูปที่ 4.4 ง) - 4.7 ง) แสดงลักษณะของเนื้อเชื่อม เกรนจะมีลักษณะเป็นแบบเดนไดรต์ (Dendrite) มีลักษณะค่อนข้างกลม (Equiaxed grain)

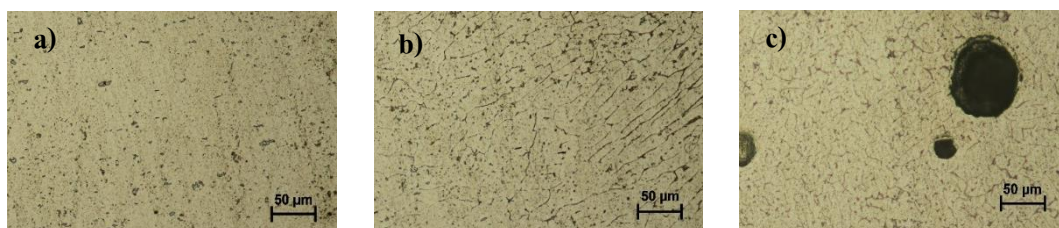
เงื่อนไขการเชื่อมอะลูมิเนียม 6082T6 เชื่อมด้วยลวดเชื่อม 5356 จากรูปที่ 4.8 ก) - 4.11 ก) แสดงโครงสร้างมหภาค แนวเชื่อมมีการซึมลึกที่ดี พบรูพรุนในบริเวณเนื้อเชื่อมอย่างชัดเจน รูปที่ 4.8 ข) - 4.11 ข) แสดงลักษณะเฉพาะของเนื้อโลหะเดิม รูปที่ 4.8 ค) - 4.11 ค) แสดงลักษณะบริเวณที่ได้รับผลกระทบเนื่องจากความร้อน พบว่าเกรนของเนื้อโลหะเดิมที่ติดกับเนื้อเชื่อมจะเกิดการขยายตัวและเกรนของเนื้อเชื่อมในบริเวณนี้จะมีลักษณะเป็นแท่งยาว รูปที่ 4.8 ง) - 4.11 ง) แสดงลักษณะของเนื้อเชื่อม เกรนจะมีลักษณะเป็นแบบเดนไดรต์ มีลักษณะค่อนข้างกลม

เงื่อนไขการเชื่อมอะลูมิเนียม 5083 เชื่อมด้วยลวดเชื่อม 5356 จากรูปที่ 4.12 ก) - 4.15 ก) แสดงโครงสร้างมหภาค แนวเชื่อมมีการซึมลึกที่ดี ไม่พบรูพรุนที่เห็นได้ชัด รูปที่ 4.12 ข) - 4.15 ข) แสดงลักษณะเฉพาะของเนื้อโลหะเดิม รูปที่ 4.12 ค) - 4.15 ค) แสดงลักษณะบริเวณที่ได้รับผลกระทบเนื่องจากความร้อน พบว่าลักษณะเกรนของเนื้อโลหะเดิมที่ติดกับเนื้อเชื่อม มีลักษณะที่คล้ายกัน รูปที่ 4.8 ง) - 4.11 ง) แสดงลักษณะของเนื้อเชื่อม เกรนจะมีลักษณะเป็นแบบเดนไดรต์ มีลักษณะคล้ายกับการตกตะกอนเป็นก้อนกลมขนาดเล็กเป็นจำนวนมาก

1) เจ็อนไซ Al 6082T6 - 4 mm - Filler 4043 (เชื่อมใหม่)



ก) โครงสร้างมหภาค



ข) เนื้อโลหะเดิม

ค) บริเวณที่ได้รับผลกระทบ

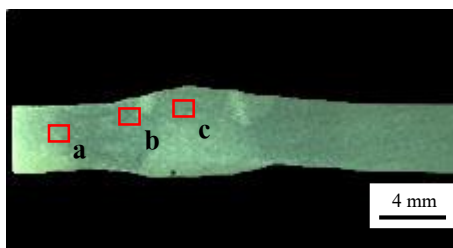
ง) เนื้อเชื่อม

เนื่องจากความร้อน

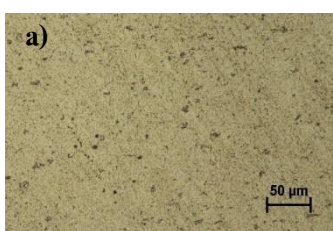
รูปที่ 4.4 แสดงโครงสร้างมหภาค/จุลภาค Al 6082T6 - 4 mm - Filler 4043 (เชื่อมใหม่)

จากรูปที่ 4.4 แสดงโครงสร้างมหภาค/จุลภาคของอะลูมิเนียม 6082T6 (4 มิลลิเมตร) เชื่อมด้วยลวดเชื่อม 4043 (เชื่อมใหม่) รูปที่ 4.4 (ก) แสดงลักษณะโครงสร้างมหภาคที่ กำลังขยาย 4 เท่า แสดงให้เห็นว่ามีการเชื่อมที่ดี พบรูพรุนบริเวณเนื้อเชื่อมเล็กน้อย รูปที่ 4.4 (ข) แสดงลักษณะเฉพาะของโครงสร้างจุลภาคของเนื้อโลหะเดิม ที่กำลังขยาย 200 เท่า ซึ่งมีลักษณะเกรนตามยาว ตามทิศทางการรีด รูปที่ 4.4 (ค) แสดงลักษณะบริเวณที่ได้รับผลกระทบทางความร้อน ที่กำลังขยาย 200 เท่า ซึ่งจะสังเกตเห็นบริเวณเนื้อโลหะเดิม ที่ติดกับบริเวณแนวเชื่อม ซึ่งเป็นบริเวณที่ได้รับผลกระทบทางความร้อนขณะเชื่อมที่อุณหภูมิประมาณ 450-550 องศาเซลเซียส [1] ซึ่งส่งผลให้บริเวณเนื้อโลหะเดิมที่ติดกับแนวเชื่อมเกิดเกรนโต และบริเวณแนวเชื่อมติดเส้นหลอมละลาย (Fusion line) จะมีลักษณะโครงสร้างตามยาวเข้าไปในบริเวณกลางเนื้อเชื่อม รูปที่ 4.4 (ง) แสดงลักษณะโครงสร้างจุลภาคบริเวณเนื้อเชื่อม ที่กำลังขยาย 200 เท่า ซึ่งมีลักษณะเกรนเป็นแบบเดนไดรต์ ที่มีลักษณะค่อนข้างกลม ขนาดประมาณ 10-20 ไมโครเมตร และในบริเวณนี้พบรูพรุนขนาดประมาณ 10 – 50 ไมโครเมตร 2-3 รู

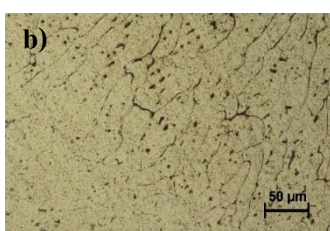
2) เจ็อนไซ Al 6082T6 - 4 mm - Filler 4043 (เชื่อมซ่อม)



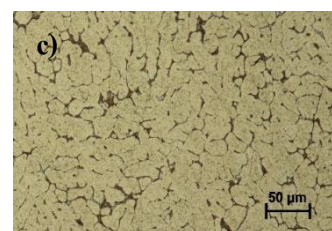
ก) โครงสร้างมหภาค



จ) เนื้อโลหะเดิม



ค) บริเวณที่ได้รับผลกระทบ



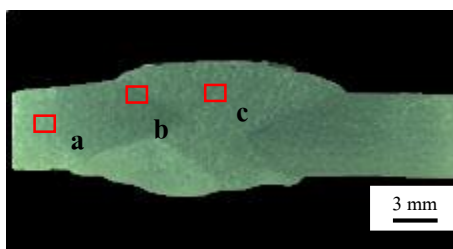
ง) เนื้อเชื่อม

เนื่องจากความร้อน

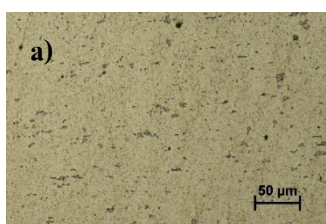
รูปที่ 4.5 แสดงโครงสร้างมหภาค/จุลภาค Al 6082T6 - 4 mm - Filler 4043 (เชื่อมซ่อม)

จากรูปที่ 4.5 แสดงโครงสร้างมหภาค/จุลภาคของอะลูมิเนียม 6082T6 (4 มิลลิเมตร) เชื่อมด้วยลวดเชื่อม 4043 (เชื่อมซ่อม) รูปที่ 4.5 (ก) แสดงลักษณะโครงสร้างมหภาคที่ กำลังขยาย 4 เท่า แสดงให้เห็นว่ามีการซึมลึกที่ดี พบรูพรุนบริเวณเนื้อเชื่อมเพียงเล็กน้อย รูปที่ 4.5 (จ) แสดงลักษณะเฉพาะของโครงสร้างจุลภาคของเนื้อโลหะเดิม ที่กำลังขยาย 200 เท่า ซึ่งมีลักษณะเกรนตามยาว ตามทิศทางการรีด รูปที่ 4.5 (ค) แสดงลักษณะบริเวณที่ได้รับผลกระทบทางความร้อน ที่กำลังขยาย 200 เท่า ซึ่งจะสังเกตเห็นบริเวณเนื้อโลหะเดิม ที่ติดกับบริเวณแนวเชื่อม ซึ่งเป็นบริเวณที่ได้รับผลกระทบทางความร้อนขณะเชื่อมที่อุณหภูมิประมาณ 450-550 องศาเซลเซียส ซึ่งส่งผลให้ บริเวณเนื้อโลหะเดิม ที่ติดกับแนวเชื่อมเกิดเกรนโต และบริเวณแนวเชื่อมติดเส้นหลอมละลาย จะมี ลักษณะโครงสร้างตามยาวเข้าไปในบริเวณกลางเนื้อเชื่อม รูปที่ 4.5 (ง) แสดงลักษณะโครงสร้าง จุลภาคบริเวณเนื้อเชื่อม ที่กำลังขยาย 200 เท่า ซึ่งมีลักษณะเกรนเป็นแบบเดนไดรต์ ที่มีลักษณะค่อนข้างกลม ขนาดประมาณ 10-30 ไมโครเมตร

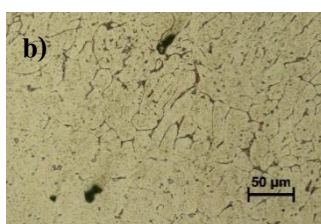
3) เจ็อนไซ Al 6082T6 - 6 mm - Filler 4043 (เชื่อมใหม่)



ก) โครงสร้างมหภาค



ข) เนื้อโลหะเดิม



ค) บริเวณที่ได้รับผลกระทบ
เนื่องจากความร้อน

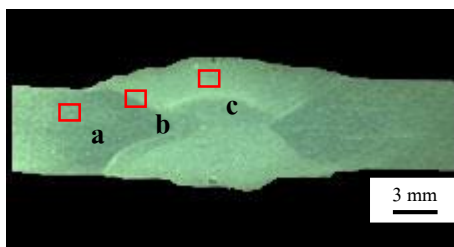


ง) เนื้อเชื่อม

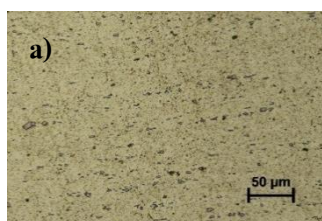
รูปที่ 4.6 แสดงโครงสร้างมหภาค/จุลภาค Al 6082T6 - 6 mm - Filler 4043 (เชื่อมใหม่)

จากรูปที่ 4.6 แสดงโครงสร้างมหภาค/จุลภาคของอะลูมิเนียม 6082T6 (6 มิลลิเมตร) เชื่อมด้วยลวดเชื่อม 4043 (เชื่อมใหม่) รูปที่ 4.6 (ก) แสดงลักษณะโครงสร้างมหภาคที่กำลังขยาย 4 เท่า แสดงให้เห็นว่ามีการซึมลึกที่ดี พบรูพรุนบริเวณเนื้อเชื่อมเล็กน้อย รูปที่ 4.6 (ข) แสดงลักษณะเฉพาะของโครงสร้างจุลภาคของเนื้อโลหะเดิม ที่กำลังขยาย 200 เท่า ซึ่งมีลักษณะเกรนตามยาว ตามทิศทางการรีด รูปที่ 4.6 (ค) แสดงลักษณะบริเวณที่ได้รับผลกระทบทางความร้อน ที่กำลังขยาย 200 เท่า ซึ่งจะสังเกตเห็นบริเวณเนื้อโลหะเดิม ที่ติดกับบริเวณแนวเชื่อม ซึ่งเป็นบริเวณที่ได้รับผลกระทบทางความร้อนขณะเชื่อมที่อุณหภูมิประมาณ 450-550 องศาเซลเซียส ซึ่งส่งผลให้บริเวณเนื้อโลหะเดิมที่ติดกับแนวเชื่อมเกิดเกรนโต และบริเวณแนวเชื่อมติดเส้นหลอมละลาย จะมีลักษณะโครงสร้างตามยาวเข้าไปในบริเวณกลางเนื้อเชื่อม และพบรูพรุนขนาดประมาณ 20 – 30 ไมโครเมตร 2-3 รู รูปที่ 4.6 (ง) แสดงลักษณะโครงสร้างจุลภาคบริเวณเนื้อเชื่อม ที่กำลังขยาย 200 เท่า ซึ่งมีลักษณะเกรนเป็นแบบเดนไดรต์ ที่มีลักษณะค่อนข้างกลม ขนาดประมาณ 10-30 ไมโครเมตร และพบรูพรุนขนาดประมาณ 10 – 40 ไมโครเมตร 2 รู

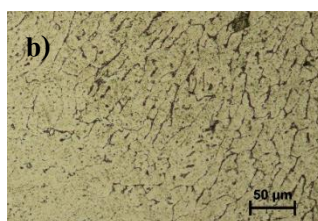
4) เจ็อนไซ Al 6082T6 - 6 mm - Filler 4043 (เชื่อมซ่อม)



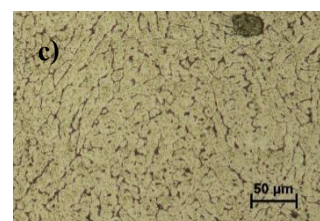
ก) โครงสร้างมหภาค



ข) เนื้อโลหะเดิม



ค) บริเวณที่ได้รับผลกระทบ



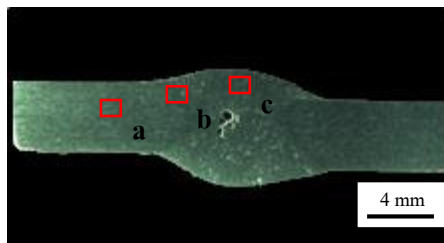
ง) เนื้อเชื่อม

เนื่องจากความร้อน

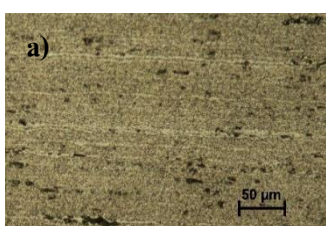
รูปที่ 4.7 แสดงโครงสร้างมหภาค/จุลภาค Al 6082T6 - 6 mm - Filler 4043 (เชื่อมซ่อม)

จากรูปที่ 4.7 แสดงโครงสร้างมหภาค/จุลภาคของอะลูมิเนียม 6082T6 (6 มิลลิเมตร) เชื่อมด้วยลวดเชื่อม 4043 (เชื่อมซ่อม) รูปที่ 4.7 (ก) แสดงลักษณะโครงสร้างมหภาคที่กำลังขยาย 4 เท่า แสดงให้เห็นว่ามีการเชื่อมที่ที่ดี พบรูพรุนบริเวณเนื้อเชื่อมเพียงเล็กน้อย รูปที่ 4.7 (ข) แสดงลักษณะเฉพาะของโครงสร้างจุลภาคของเนื้อโลหะเดิม ที่กำลังขยาย 200 เท่า ซึ่งมีลักษณะเกรนตามยาว ตามทิศทางการรีด รูปที่ 4.7 (ค) แสดงลักษณะบริเวณที่ได้รับผลกระทบทางความร้อน ที่กำลังขยาย 200 เท่า ซึ่งจะสังเกตเห็นบริเวณเนื้อโลหะเดิม ที่ติดกับบริเวณแนวเชื่อม ซึ่งเป็นบริเวณที่ได้รับผลกระทบทางความร้อนขณะเชื่อมที่อุณหภูมิประมาณ 450-550 องศาเซลเซียส ซึ่งส่งผลให้บริเวณเนื้อโลหะเดิมที่ติดกับแนวเชื่อมเกิดเกรนโต และบริเวณแนวเชื่อมติดเส้นหลอมละลาย จะมีลักษณะโครงสร้างตามยาวเข้าไปในบริเวณกลางเนื้อเชื่อม และพบรูพรุนขนาด 10-20 ไมโครเมตร 1 รู รูปที่ 4.7 (ง) แสดงลักษณะโครงสร้างจุลภาคบริเวณเนื้อเชื่อม ที่กำลังขยาย 200 เท่า ซึ่งมีลักษณะเกรนเป็นแบบเดนไดรต์ ที่มีลักษณะค่อนข้างกลม ขนาดประมาณ 10-30 ไมโครเมตร และพบรูพรุนขนาด 20-30 ไมโครเมตร 1 รู

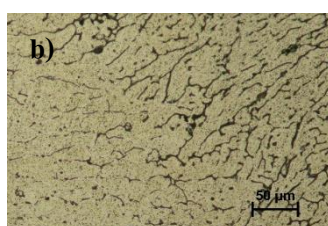
5) เจ็อนไซ Al 6082T6 - 4 mm - Filler 5356 (เชื่อมใหม่)



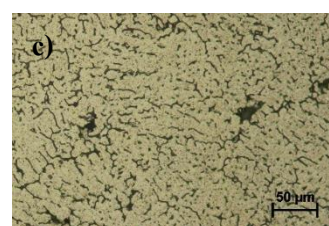
ก) โครงสร้างมหภาค



ข) เนื้อโลหะเดิม



ค) บริเวณที่ได้รับผลกระทบ



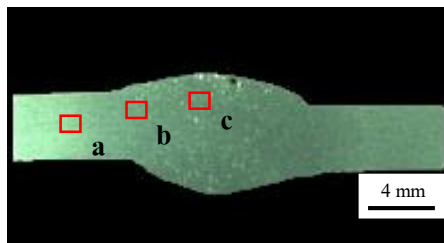
ง) เนื้อเชื่อม

เนื่องจากความร้อน

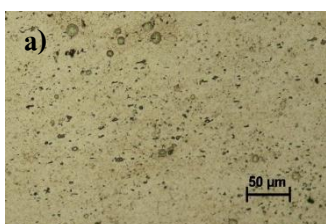
รูปที่ 4.8 แสดงโครงสร้างมหภาค/จุลภาค Al 6082T6 - 4 mm - Filler 5356 (เชื่อมใหม่)

จากรูปที่ 4.8 แสดงโครงสร้างมหภาค/จุลภาคของอะลูมิเนียม 6082T6 (4 มิลลิเมตร) เชื่อมด้วยลวดเชื่อม 5356 (เชื่อมใหม่) รูปที่ 4.8 (ก) แสดงลักษณะ โครงสร้างมหภาคที่กำลังขยาย 4 เท่า แสดงให้เห็นว่ามีการซึมลึกที่ดี พบรูพรุนกระจายบริเวณเนื้อเชื่อมอย่างชัดเจนและมีรูพรุนขนาดใหญ่อยู่บริเวณกลางเนื้อเชื่อม รูปที่ 4.8 (ข) แสดงลักษณะเฉพาะของ โครงสร้างจุลภาคของเนื้อโลหะเดิม ที่กำลังขยาย 200 เท่า ซึ่งมีลักษณะเกรนตามยาว ตามทิศทางการรีด รูปที่ 4.8 (ค) แสดงลักษณะบริเวณที่ได้รับผลกระทบทางความร้อน ที่กำลังขยาย 200 เท่า ซึ่งจะสังเกตเห็นบริเวณเนื้อโลหะเดิม ที่ติดกับบริเวณแนวเชื่อม ซึ่งเป็นบริเวณที่ได้รับผลกระทบทางความร้อนขณะเชื่อมที่อุณหภูมิประมาณ 450-550 องศาเซลเซียส ซึ่งส่งผลให้บริเวณเนื้อโลหะเดิมที่ติดกับแนวเชื่อมเกิดเกรนโต และบริเวณแนวเชื่อมติดเส้นหลอมละลาย จะมีลักษณะ โครงสร้างตามยาวเข้าไปในบริเวณกลางเนื้อเชื่อม รูปที่ 4.8 (ง) แสดงลักษณะ โครงสร้างจุลภาคบริเวณเนื้อเชื่อม ที่กำลังขยาย 200 เท่า ซึ่งมีลักษณะเกรนเป็นแบบเดนไดรต์ ที่มีลักษณะค่อนข้างกลม ขนาดประมาณ 10-30 ไมโครเมตร และพบรูพรุนขนาด 10-20 ไมโครเมตร 2-3 รู

6) เจ็อนไซ Al 6082T6 - 4 mm - Filler 5356 (เชื่อมซ่อม)



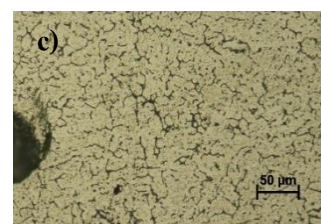
ก) โครงสร้างมหภาค



ข) เนื้อโลหะเดิม



ค) บริเวณที่ได้รับผลกระทบ
เนื่องจากความร้อน

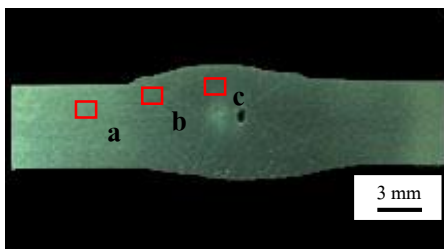


ง) เนื้อเชื่อม

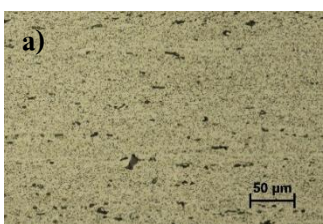
รูปที่ 4.9 แสดงโครงสร้างมหภาค/จุลภาค Al 6082T6 - 4 mm - Filler 5356 (เชื่อมซ่อม)

จากรูปที่ 4.9 แสดงโครงสร้างมหภาค/จุลภาคของอะลูมิเนียม 6082T6 (4 มิลลิเมตร) เชื่อมด้วยลวดเชื่อม 5356 (เชื่อมซ่อม) รูปที่ 4.9 (ก) แสดงลักษณะโครงสร้างมหภาคที่ กำลังขยาย 4 เท่า แสดงให้เห็นว่ามีการซึมลึกที่ดี พบรูพรุนกระจายตัวบริเวณเนื้อเชื่อมอย่างชัดเจน รูปที่ 4.9 (ข) แสดงลักษณะเฉพาะของโครงสร้างจุลภาคของเนื้อโลหะเดิม ที่กำลังขยาย 200 เท่า ซึ่งมีลักษณะเกรนตามยาว ตามทิศทางการรีด รูปที่ 4.9 (ค) แสดงลักษณะบริเวณที่ได้รับผลกระทบทาง ความร้อน ที่กำลังขยาย 200 เท่า ซึ่งจะสังเกตเห็นบริเวณเนื้อ โลหะเดิม ที่ติดกับบริเวณแนวเชื่อม ซึ่งเป็นบริเวณที่ได้รับผลกระทบทางความร้อนขณะเชื่อมที่อุณหภูมิประมาณ 450-550 องศาเซลเซียส ซึ่งส่งผลให้บริเวณเนื้อ โลหะเดิมที่ติดกับแนวเชื่อมเกิดเกรนโต และบริเวณแนวเชื่อมติดเส้นหลอม ละลาย จะมีลักษณะโครงสร้างตามยาวเข้าไปในบริเวณกลางเนื้อเชื่อม รูปที่ 4.9 (ง) แสดงลักษณะ โครงสร้างจุลภาคบริเวณเนื้อเชื่อม ที่กำลังขยาย 200 เท่า ซึ่งมีลักษณะเกรนเป็นแบบเดนไดรต์ ที่มี ลักษณะค่อนข้างกลม ขนาดประมาณ 10-30 ไมโครเมตร และพบรูพรุนขนาดประมาณ 50 ไมโครเมตร 1 รู

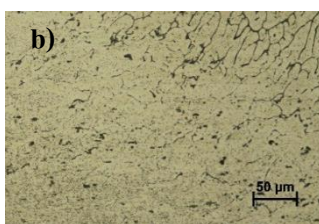
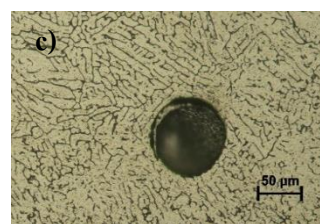
7) เจ็อนไซ Al 6082T6 - 6 mm - Filler 5356 (เชื่อมใหม่)



ก) โครงสร้างมหภาค



ข) เนื้อโลหะเดิม

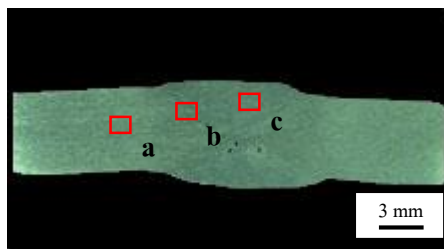
ค) บริเวณที่ได้รับผลกระทบ
เนื่องจากความร้อน

ง) เนื้อเชื่อม

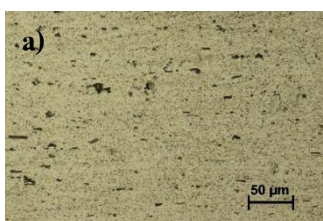
รูปที่ 4.10 แสดงโครงสร้างมหภาค/จุลภาค Al 6082T6 - 6 mm - Filler 5356 (เชื่อมใหม่)

จากรูปที่ 4.10 แสดงโครงสร้างมหภาค/จุลภาคของอะลูมิเนียม 6082T6 (6 มิลลิเมตร) เชื่อมด้วยลวดเชื่อม 5356 (เชื่อมใหม่) รูปที่ 4.10 (ก) แสดงลักษณะโครงสร้างมหภาคที่ กำลังขยาย 4 เท่า แสดงให้เห็นว่าการเชื่อมที่ตี พบรูพรุนกระจายบริเวณเนื้อเชื่อมอย่างชัดเจนและมีรูพรุนขนาดใหญ่อยู่บริเวณกลางเนื้อเชื่อม รูปที่ 4.10 (ข) แสดงลักษณะเฉพาะของโครงสร้างจุลภาคของเนื้อโลหะเดิม ที่กำลังขยาย 200 เท่า ซึ่งมีลักษณะเกรนตามยาว ตามทิศทางการรีด รูปที่ 4.10 (ค) แสดงลักษณะบริเวณที่ได้รับผลกระทบทางความร้อน ที่กำลังขยาย 200 เท่า ซึ่งจะสังเกตเห็นบริเวณเนื้อโลหะเดิม ที่ติดกับบริเวณแนวเชื่อม ซึ่งเป็นบริเวณที่ได้รับผลกระทบทางความร้อนขณะเชื่อมที่อุณหภูมิประมาณ 450-550 องศาเซลเซียส ซึ่งส่งผลให้บริเวณเนื้อโลหะเดิมที่ติดกับแนวเชื่อมเกิดเกรนโต และบริเวณแนวเชื่อมติดเส้นหลอมละลาย จะมีลักษณะโครงสร้างตามยาวเข้าไปในบริเวณกลางเนื้อเชื่อม รูปที่ 4.10 (ง) แสดงลักษณะโครงสร้างจุลภาคบริเวณเนื้อเชื่อม ที่กำลังขยาย 200 เท่า ซึ่งมีลักษณะเกรนเป็นแบบเดนไดรต์ ที่มีลักษณะค่อนข้างกลม ขนาดประมาณ 10-30 ไมโครเมตร และพบรูพรุนขนาดประมาณ 50 ไมโครเมตร 1 รู

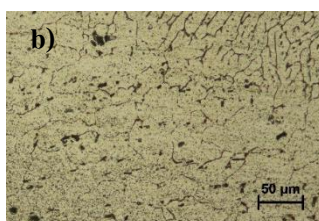
8) เจ็อนไซ Al 6082T6 - 6 mm - Filler 5356 (เชื่อมซ่อม)



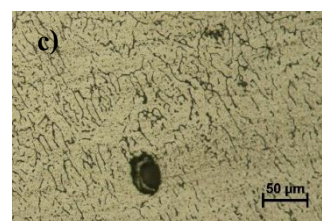
ก) โครงสร้างมหภาค



ข) เนื้อโลหะเดิม



ค) บริเวณที่ได้รับผลกระทบ



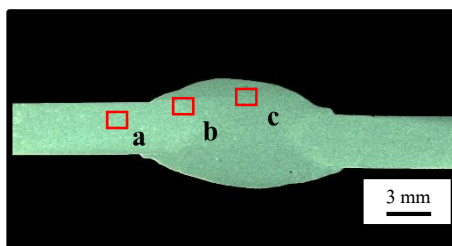
ง) เนื้อเชื่อม

เนื่องจากความร้อน

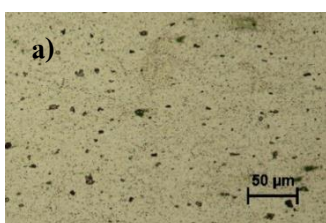
รูปที่ 4.11 แสดง โครงสร้างมหภาค/จุลภาค Al 6082T6 - 6 mm - Filler 5356 (เชื่อมซ่อม)

จากรูปที่ 4.11 แสดงโครงสร้างมหภาค/จุลภาคของอะลูมิเนียม 6082T6 (6 มิลลิเมตร) เชื่อมด้วยลวดเชื่อม 5356 (เชื่อมซ่อม) รูปที่ 4.11 (ก) แสดงลักษณะโครงสร้างมหภาคที่ กำลังขยาย 4 เท่า แสดงให้เห็นว่ามีการซึมลึกที่ดี พบรูพรุนกระจายตัวบริเวณกลางเนื้อเชื่อม 2-3 รู รูปที่ 4.11 (ข) แสดงลักษณะเฉพาะของโครงสร้างจุลภาคของเนื้อโลหะเดิม ที่กำลังขยาย 200 เท่า ซึ่งมีลักษณะเกรนตามยาว ตามทิศทางการรีด รูปที่ 4.11 (ค) แสดงลักษณะบริเวณที่ได้รับผลกระทบทางความร้อน ที่กำลังขยาย 200 เท่า ซึ่งจะสังเกตเห็นบริเวณเนื้อโลหะเดิม ที่ติดกับบริเวณแนวเชื่อม ซึ่งเป็นบริเวณที่ได้รับผลกระทบทางความร้อนขณะเชื่อมที่อุณหภูมิประมาณ 450-550 องศาเซลเซียส ซึ่งส่งผลให้บริเวณเนื้อโลหะเดิมที่ติดกับแนวเชื่อมเกิดเกรนโต และบริเวณแนวเชื่อมติดเส้นหลอมละลาย จะมีลักษณะโครงสร้างตามยาวเข้าไปในบริเวณกลางเนื้อเชื่อม รูปที่ 4.11 (ง) แสดงลักษณะโครงสร้างจุลภาคบริเวณเนื้อเชื่อม ที่กำลังขยาย 200 เท่า ซึ่งมีลักษณะเกรนเป็นแบบเดนไดรต์ ที่มีลักษณะค่อนข้างกลม ขนาดประมาณ 10-30 ไมโครเมตร และพบรูพรุนขนาดประมาณ 20-30 ไมโครเมตร 1 รู

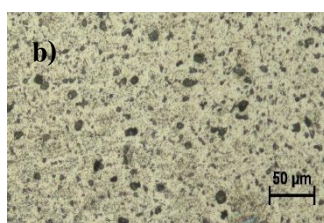
9) เจ็อนไซ Al 5083 - 3 mm - Filler 5356 (เชื่อมใหม่)



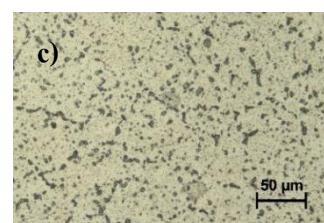
ก) โครงสร้างมหภาค



ข) เนื้อโลหะเดิม



ค) บริเวณที่ได้รับผลกระทบ



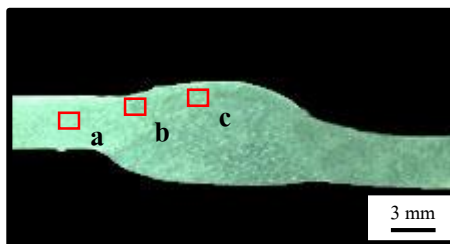
ง) เนื้อเชื่อม

เนื่องจากความร้อน

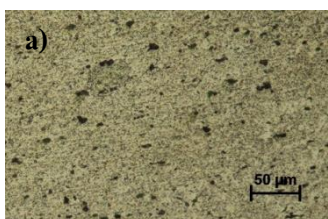
รูปที่ 4.12 แสดง โครงสร้างมหภาค/จุลภาค Al 5083 - 3 mm - Filler 5356 (เชื่อมใหม่)

รูปที่ 4.12 แสดง โครงสร้างมหภาค/จุลภาคของอะลูมิเนียม 5083 (3 มิลลิเมตร) เชื่อมด้วยลวดเชื่อม 5356 (เชื่อมใหม่) จากรูปที่ 4.12 (ก) แสดงลักษณะโครงสร้างมหภาคที่ กำลังขยาย 4 เท่า แสดงให้เห็นว่ามีการซึมลึกที่ดี พบรูพรุนบริเวณเนื้อเชื่อมเล็กน้อย รูปที่ 4.12 (ข) แสดงลักษณะเฉพาะของโครงสร้างจุลภาคของเนื้อโลหะเดิม ที่กำลังขยาย 200 เท่า ซึ่งมีลักษณะ เกรนตามยาว ตามทิศทางการรีด รูปที่ 4.12 (ค) แสดงลักษณะบริเวณที่ได้รับผลกระทบทางความร้อน ที่กำลังขยาย 200 เท่า และรูปที่ 4.12 (ง) แสดงลักษณะโครงสร้างจุลภาคบริเวณเนื้อเชื่อม ที่ กำลังขยาย 200 เท่า ตามลำดับ จากภาพโครงสร้างจุลภาค ซึ่งบริเวณระหว่างโลหะฐานและเนื้อเชื่อม จะมีลักษณะที่คล้ายกัน และบริเวณเนื้อเชื่อมจะมีลักษณะเป็นการตกตะกอนเป็นก้อนกลมขนาดเล็ก เป็นจำนวนมาก

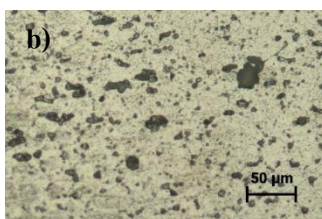
10) เจ็อนไซ Al 5083 - 3 mm - Filler 5356 (เชื่อมซ่อม)



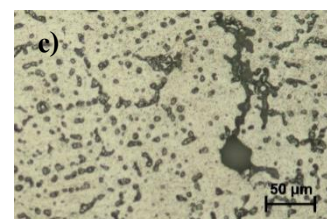
ก) โครงสร้างมหภาค



ข) เนื้อโลหะเดิม



ค) บริเวณที่ได้รับผลกระทบ



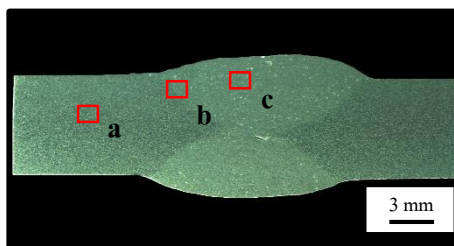
ง) เนื้อเชื่อม

เนื่องจากความร้อน

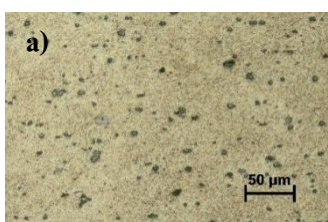
รูปที่ 4.13 แสดงโครงสร้างมหภาค/จุลภาค Al 5083 - 3 mm - Filler 5356 (เชื่อมซ่อม)

รูปที่ 4.13 แสดงโครงสร้างมหภาค/จุลภาคของอะลูมิเนียม 5083 (3 มิลลิเมตร) เชื่อมด้วยลวดเชื่อม 5356 (เชื่อมซ่อม) จากรูปที่ 4.13 (ก) แสดงลักษณะโครงสร้างมหภาคที่กำลังขยาย 4 เท่า แสดงให้เห็นว่ามีการซึมลึกที่ดี พบรูพรุนกระจายตัวบริเวณเนื้อเชื่อมอย่างชัดเจน รูปที่ 4.13 (ข) แสดงลักษณะเฉพาะของโครงสร้างจุลภาคของเนื้อโลหะเดิมที่กำลังขยาย 200 เท่า ซึ่งมีลักษณะเกรนตามยาว ตามทิศทางการรีด รูปที่ 4.13 (ค) แสดงลักษณะบริเวณที่ได้รับผลกระทบทางความร้อนที่กำลังขยาย 200 เท่า และรูปที่ 4.13 (ง) แสดงลักษณะโครงสร้างจุลภาคบริเวณเนื้อเชื่อมที่กำลังขยาย 200 เท่า ตามลำดับ จากภาพโครงสร้างจุลภาค ซึ่งบริเวณระหว่างโลหะฐานและเนื้อเชื่อมจะมีลักษณะที่คล้ายกัน และบริเวณเนื้อเชื่อมจะมีลักษณะเป็นการตกตะกอนเป็นก้อนกลมขนาดเล็กเป็นจำนวนมาก

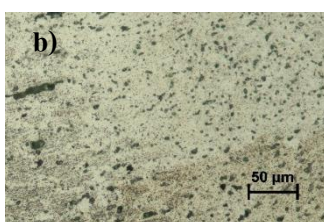
11) เจ็อนไซ Al 5083 - 6 mm - Filler 5356 (เชื่อมใหม่)



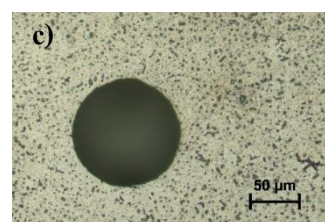
ก) โครงสร้างมหภาค



ข) เนื้อโลหะเดิม



ค) บริเวณที่ได้รับผลกระทบ



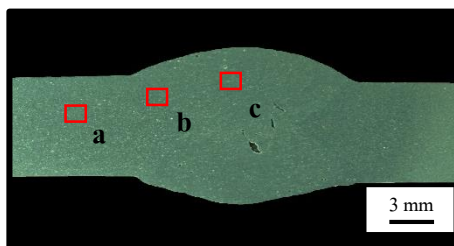
ง) เนื้อเชื่อม

เนื่องจากความร้อน

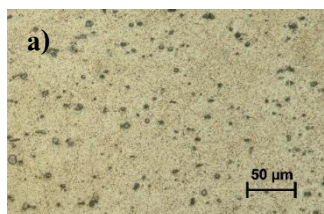
รูปที่ 4.14 แสดงโครงสร้างมหภาค/จุลภาค Al 5083 - 6 mm - Filler 5356 (เชื่อมใหม่)

รูปที่ 4.14 แสดงโครงสร้างมหภาค/จุลภาคของอะลูมิเนียม 5083 (6 มิลลิเมตร) เชื่อมด้วยลวดเชื่อม 5356 (เชื่อมใหม่) จากรูปที่ 4.14 (ก) แสดงลักษณะโครงสร้างมหภาคที่กำลังขยาย 4 เท่า แสดงให้เห็นว่ามีการซึมลึกที่ดี พบรูพรุนกระจายบริเวณเนื้อเชื่อมตัวเล็กน้อย รูปที่ 4.14 (ข) แสดงลักษณะเฉพาะของโครงสร้างจุลภาคของเนื้อโลหะเดิมที่กำลังขยาย 200 เท่า ซึ่งมีลักษณะเกรนตามยาว ตามทิศทางการรีด รูปที่ 4.14 (ค) แสดงลักษณะบริเวณที่ได้รับผลกระทบทางความร้อนที่กำลังขยาย 200 เท่า และรูปที่ 4.14 (ง) แสดงลักษณะโครงสร้างจุลภาคบริเวณเนื้อเชื่อมที่กำลังขยาย 200 เท่า ตามลำดับ จากภาพโครงสร้างจุลภาค ซึ่งบริเวณระหว่างโลหะฐานและเนื้อเชื่อมจะมีลักษณะที่คล้ายกัน และบริเวณเนื้อเชื่อมจะมีลักษณะเป็นการตกตะกอนเป็นก้อนกลมขนาดเล็กเป็นจำนวนมาก และพบรูพรุนขนาดประมาณใหญ่กว่า 50 ไมโครเมตร 1 รู

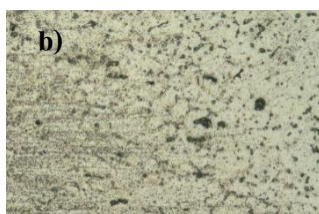
12) เจ็อนไซ Al 5083 - 6 mm - Filler 5356 (เชื่อมซ่อม)



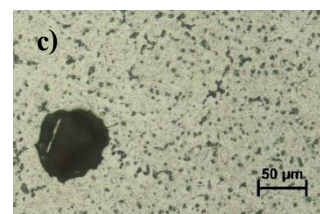
ก) โครงสร้างมหภาค



ข) เนื้อโลหะเดิม



ค) บริเวณที่ได้รับผลกระทบ
เนื่องจากความร้อน



ง) เนื้อเชื่อม

รูปที่ 4.15 แสดงโครงสร้างมหภาค/จุลภาค Al 5083 - 6 mm - Filler 5356 (เชื่อมซ่อม)

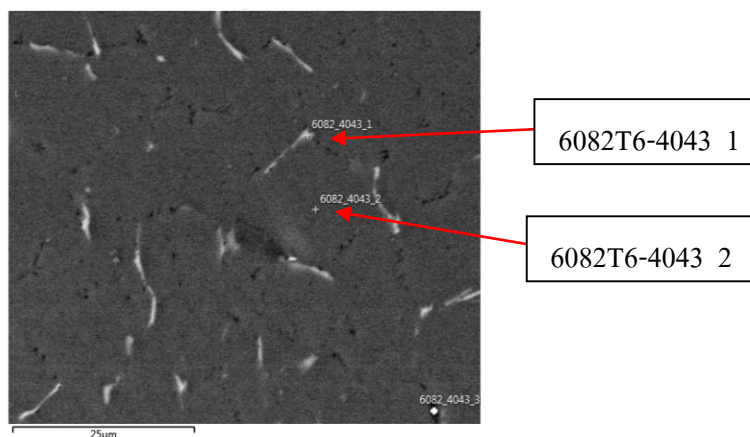
รูปที่ 4.15 แสดงโครงสร้างมหภาค/จุลภาคของอะลูมิเนียม 5083 (6 มิลลิเมตร) เชื่อมด้วยลวดเชื่อม 5356 (เชื่อมซ่อม) จากรูปที่ 4.15 (ก) แสดงลักษณะโครงสร้างมหภาคที่กำลังขยาย 4 เท่า แสดงให้เห็นว่ามีการซึมลึกที่ดี พบรูพรุนบริเวณเนื้อเชื่อมเล็กน้อย และมีรูพรุนขนาดใหญ่บริเวณกลางเนื้อเชื่อม 1-2 รู รูปที่ 4.15 (ข) แสดงลักษณะเฉพาะของโครงสร้างจุลภาคของเนื้อโลหะเดิมที่กำลังขยาย 200 เท่า ซึ่งมีลักษณะเกรนตามยาว ตามทิศทางการรีด รูปที่ 4.15 (ค) แสดงลักษณะบริเวณที่ได้รับผลกระทบทางความร้อนที่กำลังขยาย 200 เท่า และรูปที่ 4.15 (ง) แสดงลักษณะโครงสร้างจุลภาคบริเวณเนื้อเชื่อมที่กำลังขยาย 200 เท่า ตามลำดับ จากภาพโครงสร้างจุลภาคซึ่งบริเวณระหว่างโลหะฐานและเนื้อเชื่อมจะมีลักษณะที่คล้ายกัน และบริเวณเนื้อเชื่อมจะมีลักษณะเป็นการตกตะกอนเป็นก้อนกลมขนาดเล็กเป็นจำนวนมาก และพบรูพรุนขนาดประมาณ 50 ไมโครเมตร 1 รู

4.3 โครงสร้างจุลภาคของแนวเชื่อมจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)

ชิ้นงานอะลูมิเนียมผสม 6082T6 เชื่อมด้วยลวดเชื่อม 4043 ได้นำมาถ่ายภาพโดยใช้สัญญาณอิเล็กตรอนที่กระเจิงกลับ (Back Scattered Electrons, BSE) ที่บริเวณเนื้อเชื่อม แสดงดังรูปที่ 4.16 โดยใช้กำลังขยาย 2000x จากการทดลองเฟสที่มี “ธาตุหนัก” เป็นองค์ประกอบหรือมีเลขอะตอมมาก ($Mn = 25$, $Fe = 26$) จะให้เฟสที่สว่าง ส่วนเฟสที่มี “ธาตุเบา” เป็นองค์ประกอบหรือมีเลขอะตอมน้อยกว่า ($Mg = 12$, $Al = 13$, $Si = 14$) จะให้เฟสที่ดำกว่า และการตรวจสอบหาปริมาณธาตุของแต่ละจุด (Point Scan) โดยใช้สัญญาณแบบเอ็กซ์เรย์ เป็นสัญญาณที่ใช้เทคนิค EDX โดยตรวจสอบ 2 จุด จากผลการทดสอบพบว่า ตำแหน่ง 6082-4043_1 พบเฟสที่เป็นสีขาวสว่างซึ่งเป็นสารประกอบอินเทอร์เมทัลลิก (Intermetallic Compounds) เนื่องจากมีธาตุเหล็กและแมงกานีสรวมอยู่ด้วย เช่น Al-Fe-Si, Al-(FeMn)-Si เป็นต้น [18] และตำแหน่ง 6082-4043_2 จากการทดลองพบเฟส α -Al ซึ่งพบธาตุอะลูมิเนียม 99 % โดยน้ำหนัก

ตารางที่ 4.1 แสดงปริมาณธาตุที่ตรวจสอบแบบจุดของการเชื่อมซ่อมอะลูมิเนียมผสม 6082T6 เชื่อมด้วยลวดเชื่อม 4043 โดยใช้สัญญาณแบบเอ็กซ์เรย์ (X-ray) เป็นสัญญาณที่ใช้เทคนิค EDX

ตำแหน่ง	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Al
6082T6-4043_1	14.8	6.4	-	3.4	0.5	-	-	-	74.9
6082T6-4043_2	0.7	0.1	0.1	-	0.2	-	-	-	99.0

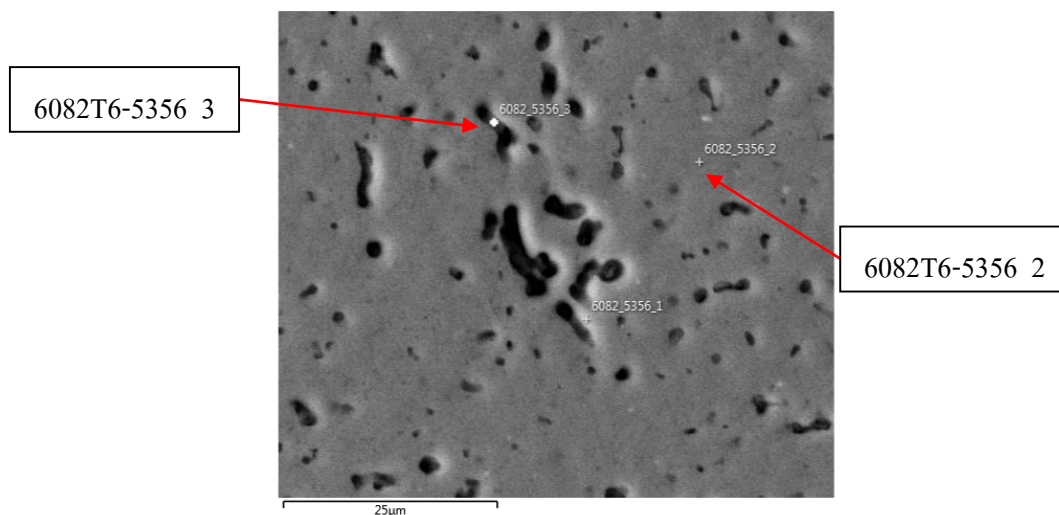


รูปที่ 4.16 ภาพจากสัญญาณอิเล็กตรอนที่กระเจิงกลับ บริเวณเนื้อเชื่อมของการเชื่อมซ่อมอะลูมิเนียมผสม 6082T6 เชื่อมด้วยลวดเชื่อม 4043

ชิ้นงานอะลูมิเนียมผสม 6082T6 เชื่อมด้วยลวดเชื่อม 5356 ได้นำมาถ่ายภาพโดยใช้สัญญาณอิเล็กทรอนิกส์ที่กระเจิงกลับ ที่บริเวณเนื้อเชื่อม แสดงดังรูปที่ 4.17 โดยใช้กำลังขยาย 2000x จากการทดลองเฟสที่มี “ ชาติหนัก ” เป็นองค์ประกอบหรือมีเลขอะตอมมาก ($M_n = 25$) จะให้เฟสที่สว่าง ส่วนเฟสที่มี “ ชาติเบา ” เป็นองค์ประกอบหรือมีเลขอะตอมน้อยกว่า ($M_g = 12$, $Al = 13$, $Si = 14$) จะให้เฟสที่ดำกว่า และการตรวจสอบหาปริมาณธาตุของแต่ละจุด โดยใช้สัญญาณแบบเอ็กซ์เรย์ เป็นสัญญาณที่ใช้เทคนิค EDX จากผลการทดสอบพบว่า ตำแหน่ง 6082T6-5356_2 พบเฟส α -Al มีธาตุอะลูมิเนียม 96.7% โดยน้ำหนัก พบธาตุแมกนีเซียมและซิลิกอนผสมอยู่ด้วย สำหรับตำแหน่ง 6082T6-5356_3 พบเฟส β - Mg_2Al_3 ซึ่งมีลักษณะเป็นเฟสสีดำ

ตารางที่ 4.2 แสดงปริมาณธาตุที่ตรวจสอบแบบจุดของการเชื่อมซ่อมอะลูมิเนียมผสม 6082T6 เชื่อมด้วยลวดเชื่อม 5356 โดยใช้สัญญาณแบบเอ็กซ์เรย์ เป็นสัญญาณที่ใช้เทคนิค EDX

ตำแหน่ง	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Al
6082T6-5356_1	0.1	-	-	0.3	2.7	-	-	-	96.8
6082T6-5356_2	0.2	-	-	-	3.2	-	-	-	96.7
6082T6-5356_3	0.1	-	-	0.3	3.2	-	-	-	96.4

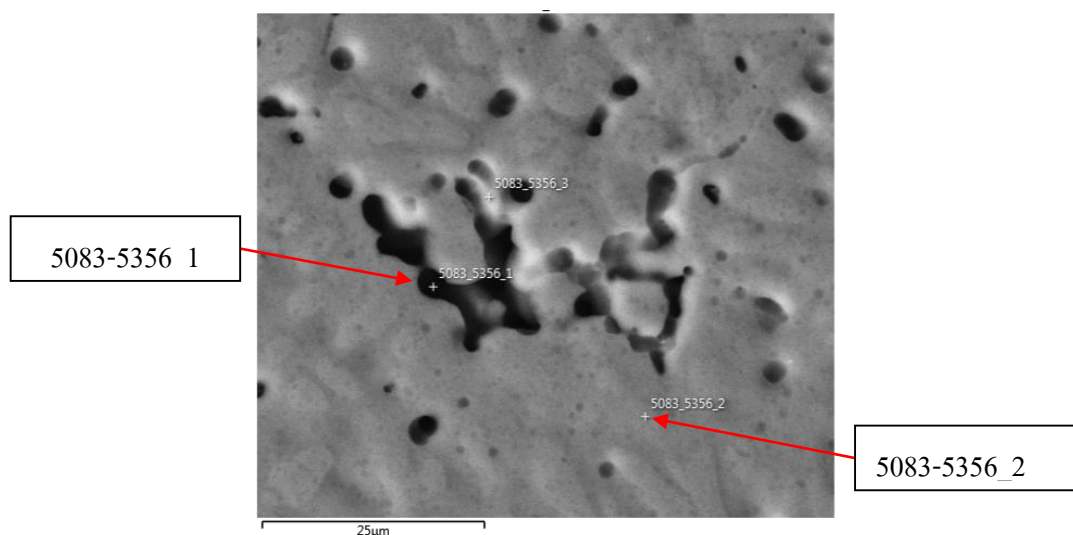


รูปที่ 4.17 ภาพจากสัญญาณอิเล็กทรอนิกส์ที่กระเจิงกลับ บริเวณเนื้อเชื่อมของการเชื่อมซ่อมอะลูมิเนียมผสม 6082T6 เชื่อมด้วยลวดเชื่อม 5356

ชิ้นงานอะลูมิเนียมผสม 5083 เชื่อมด้วยลวดเชื่อม 5356 ได้นำมาถ่ายภาพโดยใช้สัญญาณอิเล็กทรอนิกส์ที่กระเจิงกลับ ที่บริเวณเนื้อเชื่อม แสดงดังรูปที่ 4.18 โดยใช้กำลังขยาย 2000x ซึ่งเฟสที่มี “ ชาติหนัก ” เป็นองค์ประกอบจะให้เฟสที่สว่างกว่า ส่วนเฟสที่มี “ ชาติเบา ” เป็นองค์ประกอบจะให้เฟสที่สว่างน้อยกว่า และได้ตรวจสอบหาปริมาณธาตุของแต่ละจุด โดยใช้สัญญาณแบบเอ็กซ์เรย์ เป็นสัญญาณที่ใช้เทคนิค EDX จากผลการทดสอบพบว่า ตำแหน่ง 5083-5356_1 พบเฟส β - Mg_2Al_3 แสดงให้เห็นเป็นเฟสสีดำ ตำแหน่ง 5083-5356_2 พบเฟส α -Al มีธาตุอะลูมิเนียม 96.6 % โดยน้ำหนัก พบธาตุแมกนีเซียมและไทเทเนียมผสมอยู่ด้วย [19]

ตารางที่ 4.3 แสดงปริมาณธาตุที่ตรวจสอบแบบจุดของการเชื่อมซ่อมอะลูมิเนียมผสม 5083 เชื่อมด้วยลวดเชื่อม 5356 โดยใช้สัญญาณแบบเอ็กซ์เรย์ เป็นสัญญาณที่ใช้เทคนิค EDX

Position in Fig. 4.xx	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Al
5083-5356_1	-	-	-	0.4	5.3	-	-	-	94.4
5083-5356_2	-	-	-	-	3.1	-	-	0.4	96.6
5083-5356_3	-	-	-	0.3	4.3	0.2	-	0.3	94.9



รูปที่ 4.18 ภาพจากสัญญาณอิเล็กทรอนิกส์ที่กระเจิงกลับ บริเวณเนื้อเชื่อมของการเชื่อมซ่อมอะลูมิเนียมผสม 5083 เชื่อมด้วยลวดเชื่อม 5356

4.4 ความหนาแน่นของแนวเชื่อม

การวิเคราะห์ความหนาแน่นของเนื้อเชื่อมแบบ 2 มิติ จะมีความน่าเชื่อถือได้ในระดับหนึ่ง แสดงดังตารางต่อไปนี้

กรณี 6082T6

การเชื่อมอะลูมิเนียมผสม 6082T6 ด้วยลวดเชื่อม 4043 แสดงให้เห็นว่า การเชื่อมใหม่และการเชื่อมซ่อมมีค่าความหนาแน่นใกล้เคียงกัน สำหรับการเชื่อมอะลูมิเนียมผสม 6082T6 ด้วยลวดเชื่อม 5356 พบว่าในเงื่อนไข Al 6082T6 - 4 mm - Filler 5356 การเชื่อมซ่อมมีค่าความหนาแน่นที่ดีกว่าการเชื่อมใหม่ ซึ่งอาจเป็นความผิดพลาดจากกรรมวิธีการเชื่อม และในเงื่อนไข Al 6082T6 - 6 mm - Filler 5356 พบว่าการเชื่อมใหม่มีค่าความหนาแน่นที่ดีกว่าการเชื่อมซ่อมเล็กน้อย

ตารางที่ 4.4 แสดงการวัดความหนาแน่นของเนื้อเชื่อมอะลูมิเนียม 6082T6

เงื่อนไข	Density of Weld Metal Zone, %
Al 6082T6 - 4 mm - Filler 4043 (เชื่อมใหม่)	99.96
Al 6082T6 - 4 mm - Filler 4043 (เชื่อมซ่อม)	99.85
Al 6082T6 - 6 mm - Filler 4043 (เชื่อมใหม่)	99.87
Al 6082T6 - 6 mm - Filler 4043 (เชื่อมซ่อม)	99.9
Al 6082T6 - 4 mm - Filler 5356 (เชื่อมใหม่)	95.06
Al 6082T6 - 4 mm - Filler 5356 (เชื่อมซ่อม)	97.25
Al 6082T6 - 6 mm - Filler 5356 (เชื่อมใหม่)	99.35
Al 6082T6 - 6 mm - Filler 5356 (เชื่อมซ่อม)	98.69

กรณี 5083

การเชื่อมอะลูมิเนียมผสม 5083 ด้วยลวดเชื่อม 5356 แสดงให้เห็นว่า การเชื่อมใหม่มีค่าความหนาแน่นที่ดีกว่าการเชื่อมซ่อมทุกเงื่อนไข ซึ่งการเชื่อมซ่อมในเงื่อนไข Al 5083 - 3 mm - Filler 5356 จะมีความหนาแน่นลดลงชัดเจนกว่าการเชื่อมซ่อมในเงื่อนไข Al 5083 - 6 mm - Filler 5356

ตารางที่ 4.5 แสดงการวัดความหนาแน่นของเนื้อเชื่อมอะลูมิเนียม 5083

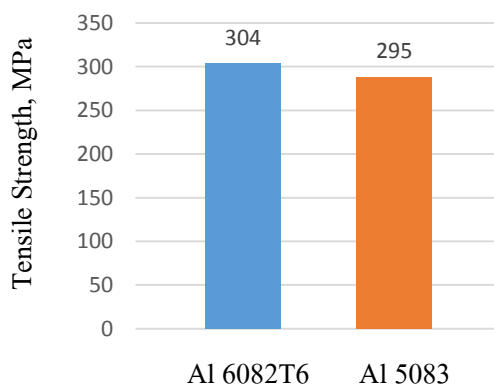
เงื่อนไข	Density of Weld Metal Zone, %
Al 5083 - 3 mm - Filler 5356 (เชื่อมใหม่)	99.89
Al 5083 - 3 mm - Filler 5356 (เชื่อมซ่อม)	96.74
Al 5083 - 6 mm - Filler 5356 (เชื่อมใหม่)	99.61
Al 5083 - 6 mm - Filler 5356 (เชื่อมซ่อม)	99.1

4.5 สมบัติเชิงกล

การทดสอบสมบัติเชิงกลเป็นตัวบ่งชี้ถึงคุณภาพของแนวเชื่อม เช่น การทดสอบความแข็งแรงดึงของแนวเชื่อม (Tensile Strength) การทดสอบการดัดงอ (Bend test) การทดสอบความแข็งของแนวเชื่อม (Hardness) เป็นต้น และสิ่งที่ทำให้สมบัติเชิงกลลดลง อาจเกิดจากรูพรุน (Porosity) หรือการหลอมละลายไม่สมบูรณ์ (Lack of fusion) อยู่ในเนื้อเชื่อม แสดงผลการทดสอบดังต่อไปนี้

4.5.1 ค่าความแข็งแรงดึง

ความแข็งแรงดึงของโลหะฐานแสดงดังรูป 4.19 ซึ่งค่าความแข็งแรงดึงของอะลูมิเนียม 6082T6 เท่ากับ 304 MPa ส่วนความแข็งแรงดึงของอะลูมิเนียม 5083 มีค่าต่ำกว่า ซึ่งมีค่าเท่ากับ 295 MPa



รูปที่ 4.19 ค่าความแข็งแรงดึงของอะลูมิเนียมผสม 6082T6 และอะลูมิเนียมผสม 5083

จากการทดสอบความแข็งแรงดึงของอะลูมิเนียมผสม 6082T6 และอะลูมิเนียมผสม 5083 แสดงพื้นที่ผิวแตก ดังรูปที่ 4.20

Al 6082T6



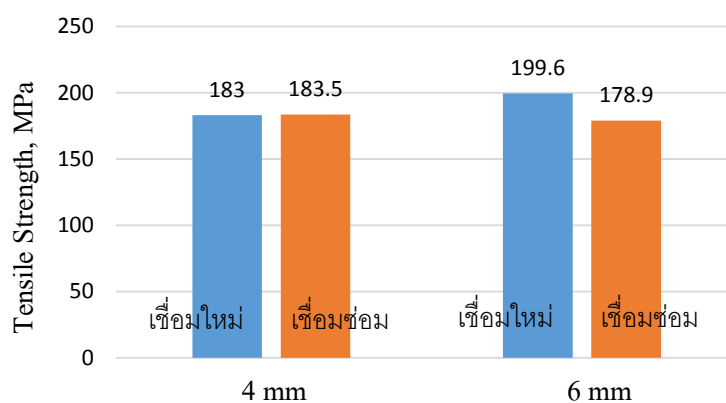
Al 5083



รูปที่ 4.20 แสดงพื้นที่หน้าตัดการแตกหักของอะลูมิเนียมผสม 6082T6 และอะลูมิเนียมผสม 5083

1) อะลูมิเนียมผสม 6082T6 เชื่อมด้วยลวดเชื่อม 4043

จากรูปที่ 4.21 แสดงผลการทดสอบความแข็งแรงดึงของแนวเชื่อม พบว่า เ็ื่อนไข 4 mm - Al 6082T6 - Filler 4043 ในการเชื่อมใหม่มีค่าความแข็งแรงดึงใกล้เคียงกับการเชื่อมซ่อม และเ็ื่อนไข 6 mm - Al 6082T6 - Filler 4043 การเชื่อมใหม่มีค่าความแข็งแรงดึงสูงกว่าการเชื่อมซ่อม



รูปที่ 4.21 ค่าความแข็งแรงดึงของอะลูมิเนียมผสม 6082T6 เชื่อมด้วยลวดเชื่อม 4043

จากรูปที่ 4.22 แสดงพื้นที่หน้าตัดของการแตกหักจากการทดสอบอะลูมิเนียมผสม 6082T6 เชื่อมด้วยลวดเชื่อม 4043 พบว่าการแตกหักของทุกเ็ื่อนไขเกิดที่บริเวณที่ได้รับผลกระทบเนื่องจากความร้อน

Al 6082T6 - 4 mm - Filler 4043 (เชื่อมใหม่)



Al 6082T6 - 4 mm - Filler 4043 (เชื่อมซ่อม)



Al 6082T6 - 6 mm - Filler 4043 (เชื่อมใหม่)



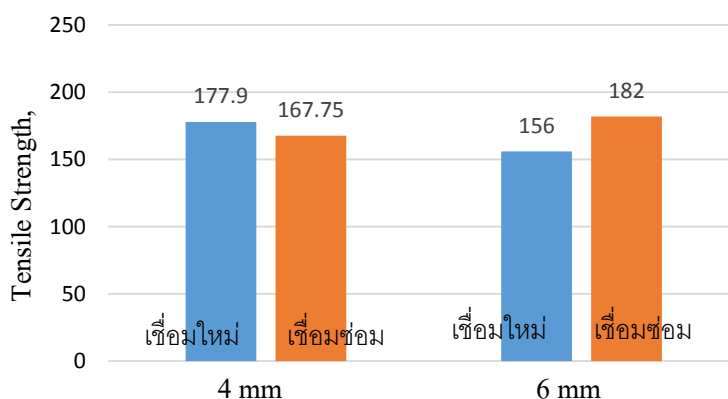
Al 6082T6 - 6 mm - Filler 4043 (เชื่อมซ่อม)



รูปที่ 4.22 แสดงพื้นที่หน้าตัดการแตกหักของอะลูมิเนียมผสม 6082T6 เชื่อมด้วยลวดเชื่อม 4043

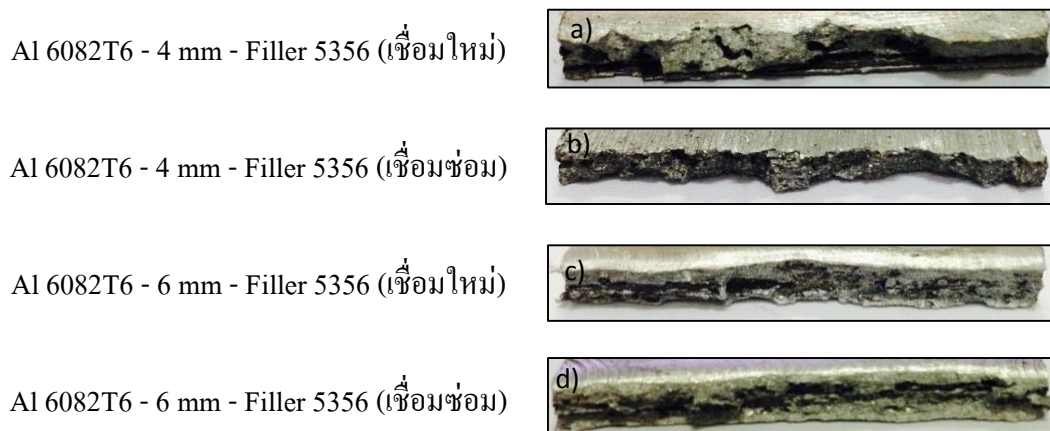
2) อะลูมิเนียมผสม 6082T6 เชื่อมด้วยลวดเชื่อม 5356

จากรูปที่ 4.23 แสดงผลการทดสอบความแข็งแรงดึงของแนวเชื่อม พบว่า เงานไข 4 mm - Al 6082T6 - Filler 5356 ในการเชื่อมใหม่มีค่าความแข็งแรงดึงสูงกว่าการเชื่อมซ่อม และ เงานไข 6 mm - Al 6082T6 - Filler 5356 การเชื่อมใหม่มีค่าความแข็งแรงดึงต่ำกว่าการเชื่อมซ่อม ซึ่งจากทฤษฎีอะลูมิเนียมผสมที่สามารถกระทำทางความร้อนได้ เมื่อได้รับความร้อนจากการเชื่อม บริเวณที่ติดกับแนวเชื่อมจะเกิดการอ่อนตัว



รูปที่ 4.23 ค่าความแข็งแรงดึงของอะลูมิเนียมผสม 6082T6 เชื่อมด้วยลวดเชื่อม 5356

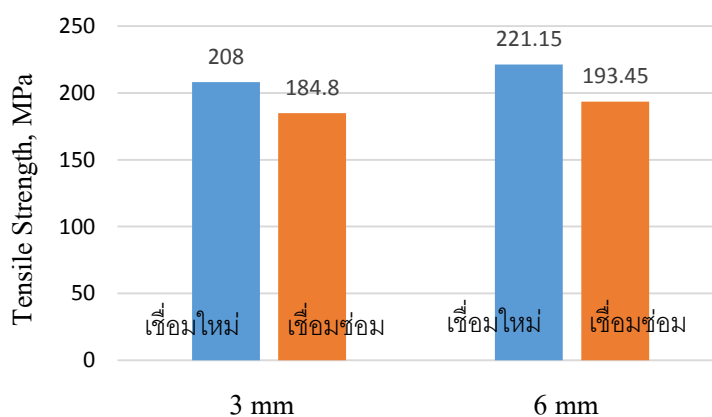
จากรูปที่ 4.24 แสดงพื้นที่หน้าตัดของการแตกหักจากการทดสอบอะลูมิเนียมผสม 6082T6 เชื่อมด้วยลวดเชื่อม 5356 พบว่าการแตกหักของทุกเงานไขเกิดที่บริเวณเนื้อเชื่อม เนื่องจาก มีรูพรุนและการหลอมละลายไม่สมบูรณ์ที่อยู่ในเนื้อเชื่อม



รูปที่ 4.24 แสดงพื้นที่หน้าตัดการแตกหักของอะลูมิเนียมผสม 6082T6 เชื่อมด้วยลวดเชื่อม 5356

3) อะลูมิเนียมผสม 5083 เชื่อมด้วยลวดเชื่อม 5356

จากรูปที่ 4.25 แสดงผลการทดสอบความแข็งแรงดึงของแนวเชื่อมของอะลูมิเนียมผสม 5083 เชื่อมด้วยลวดเชื่อม 5356 พบว่าการเชื่อมใหม่มีค่าความแข็งแรงดึงสูงกว่าการเชื่อมซ่อม



รูปที่ 4.25 ค่าความแข็งแรงดึงของอะลูมิเนียมผสม 5083 เชื่อมด้วยลวดเชื่อม 5356

จากรูปที่ 4.26 แสดงพื้นที่หน้าตัดของการแตกหักจากการทดสอบอะลูมิเนียมผสม 5083 เชื่อมด้วยลวดเชื่อม 5356 ในเงื่อนไข Al 5083 - 6 mm - Filler 5356 (เชื่อมซ่อม) พบรูพรุนและการหลอมละลายไม่สมบูรณ์ในเนื้อเชื่อมอย่างชัดเจน และการทดสอบค่าความแข็งแรงดึงของทุกเงื่อนไข การแตกหักเกิดที่บริเวณเนื้อเชื่อม

Al 5083 - 3 mm - Filler 5356 (เชื่อมใหม่)



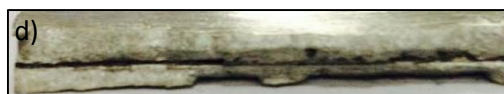
Al 5083 - 3 mm - Filler 5356 (เชื่อมซ่อม)



Al 5083 - 6 mm - Filler 5356 (เชื่อมใหม่)



Al 5083 - 6 mm - Filler 5356 (เชื่อมซ่อม)



รูปที่ 4.26 แสดงพื้นที่หน้าตัดการแตกหักของอะลูมิเนียมผสม 5083 เชื่อมด้วยลวดเชื่อม 5356

สรุปผลการทดสอบความแข็งแรงดึง ดังตารางที่ 4.6 แสดงค่าความแข็งแรงดึง ความแข็งแรง ณ จุดคราก (Yield Strength) ค่าการยืดตัว (Elongation) และตำแหน่งที่แตกหักจากการทดสอบแรงดึง

ตารางที่ 4.6 แสดงสมบัติเชิงกลระหว่างการเชื่อมใหม่และการเชื่อมเชื่อมซ่อม

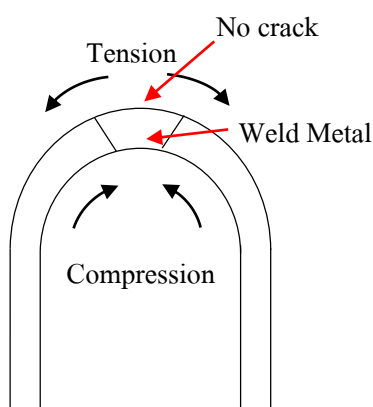
เงื่อนไข	Tensile Strength (MPa)	Yield Strength (MPa)	Elongation, % on 100 mm gauge length	Rupture
Al 6082T6 - 4 mm - Filler 4043 (เชื่อมใหม่)	183	132.5	6.05	HAZ
Al 6082T6 - 4 mm - Filler 4043 (เชื่อมซ่อม)	183.5	136	5.15	HAZ
Al 6082T6 - 6 mm - Filler 4043 (เชื่อมใหม่)	199.6	152.5	6.65	HAZ
Al 6082T6 - 6 mm - Filler 4043 (เชื่อมซ่อม)	178.9	145	7.1	HAZ
Al 6082T6 - 4 mm - Filler 5356 (เชื่อมใหม่)	177.9	160	3.85	WM
Al 6082T6 - 4 mm - Filler 5356 (เชื่อมซ่อม)	167.75	139.5	4.8	WM
Al 6082T6 - 6 mm - Filler 5356 (เชื่อมใหม่)	156	142.5	4.7	WM
Al 6082T6 - 6 mm - Filler 5356 (เชื่อมซ่อม)	182	152.5	4.05	WM
Al 5083 - 3 mm - Filler 5356 (เชื่อมใหม่)	208	105	23	WM
Al 5083 - 3 mm - Filler 5356 (เชื่อมซ่อม)	184.8	102.5	16	WM
Al 5083 - 6 mm - Filler 5356 (เชื่อมใหม่)	221.15	145	10.8	WM
Al 5083 - 6 mm - Filler 5356 (เชื่อมซ่อม)	193.45	142.5	12.9	WM

4.5.2 การทดสอบการดัดงอ (Bend test)

ผลการทดสอบการดัดงอแสดงดังตารางที่ 4.7 – 4.9 จากการทดสอบการดัดงอภายในชิ้นงานเชื่อมเสร็จสมบูรณ์ 1 ตัวอย่าง สามารถแบ่งการทดสอบการดัดงอได้เป็น 4 ตัวอย่างคือ ชิ้นงานดัดงอด้านหน้าชั้นที่ 1 (Face bend 1) ชิ้นงานดัดงอด้านหลังชั้นที่ 1 (Root bend 1) ชิ้นงานดัดงอด้านหน้าชั้นที่ 2 (Face bend 2) ชิ้นงานดัดงอด้านหลังชั้นที่ 2 (Root bend 2) แสดงดังรูปที่ 4.27 (ก) การทดสอบการดัดงอ ตัวอย่างจะต้องมีลักษณะเป็นรูปตัวยู แสดงดังรูปที่ 4.27 (ข) และชิ้นงานที่ทดสอบต้องไม่พบรอยแตกริ้วหรือแตกหักบริเวณแนวเชื่อม

Weld metal					
Tensile test 1	Face bend 1	Root bend 1	Face bend 2	Root bend 2	Tensile test 2

(ก)



(ข)

รูปที่ 4.27 แสดงตำแหน่งตัวอย่างที่ทดสอบการดัดงอ

4.1) เงื่อนไขอะลูมิเนียมผสม 6082T6 เชื่อมด้วยลวดเชื่อม 4043

จากการทดสอบการตัดงอการเชื่อมซ่อมอะลูมิเนียมผสม 6082T6 เชื่อมด้วยลวดเชื่อม 4043 พบว่า เงื่อนไขการเชื่อมซ่อมสามารถยอมรับได้ แสดงผลการทดสอบดังตารางที่ 4.7 และรูปที่ 4.28 – รูปที่ 4.31

ตารางที่ 4.7 แสดงผลการทดสอบการตัดงออะลูมิเนียมผสม 6082T6 เชื่อมด้วยลวดเชื่อม 4043

เงื่อนไข	จำนวนชิ้นงานทดสอบ	จำนวนชิ้นงานที่ทดสอบผ่าน
Al 6082T6 - 4 mm - Filler 4043 (เชื่อมใหม่)	4	4
Al 6082T6 - 4 mm - Filler 4043 (เชื่อมซ่อม)	4	4
Al 6082T6 - 6 mm - Filler 4043 (เชื่อมใหม่)	4	4
Al 6082T6 - 6 mm - Filler 4043 (เชื่อมซ่อม)	4	4

จากการทดสอบการตัดงอ เงื่อนไข Al 6082T6 - 4 mm - Filler 4043 (เชื่อมใหม่) สามารถยอมรับได้ 4 ตัวอย่าง คือ ชิ้นงานตัดงอด้านหน้าชั้นที่ 1 ชิ้นงานตัดงอด้านหลังชั้นที่ 1 ชิ้นงานตัดงอด้านหน้าชั้นที่ 2 ชิ้นงานตัดงอด้านหลังชั้นที่ 2 ซึ่งไม่พบรอยแตกร้าวบริเวณแนวเชื่อมจากการตัดงอ แสดงดังรูปที่ 4.28



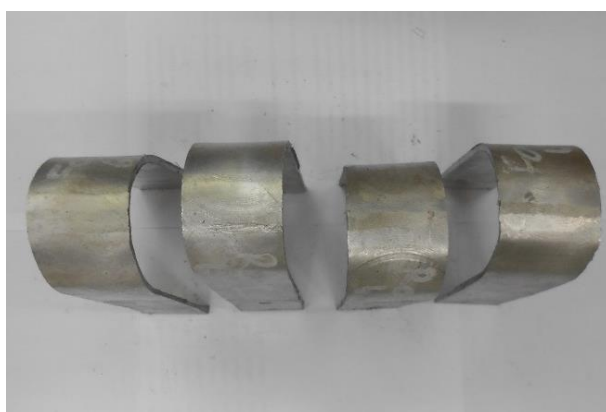
รูปที่ 4.28 เงื่อนไข Al 6082T6 - 4 mm - Filler 4043 (เชื่อมใหม่)

จากการทดสอบการดัดงอ เ็ื่อนไข Al 6082T6 - 4 mm - Filler 4043 (เชื่อมซ่อม) สามารถยอมรับได้ 4 ตัวอย่าง คือ ชิ้นงานดัดงอด้านหน้าชั้นที่ 1 ชิ้นงานดัดงอด้านหลังชั้นที่ 1 ชิ้นงานดัดงอด้านหน้าชั้นที่ 2 ชิ้นงานดัดงอด้านหลังชั้นที่ 2 ซึ่งไม่พบรอยแตกร้าวบริเวณแนวเชื่อมจากการดัดงอ แสดงดังรูปที่ 4.29



รูปที่ 4.29 เ็ื่อนไข Al 6082T6 - 4 mm - Filler 4043 (เชื่อมซ่อม)

จากการทดสอบการดัดงอ เ็ื่อนไข Al 6082T6 - 6 mm - Filler 4043 (เชื่อมใหม่) สามารถยอมรับได้ 4 ตัวอย่าง คือ ชิ้นงานดัดงอด้านหน้าชั้นที่ 1 ชิ้นงานดัดงอด้านหลังชั้นที่ 1 ชิ้นงานดัดงอด้านหน้าชั้นที่ 2 ชิ้นงานดัดงอด้านหลังชั้นที่ 2 ซึ่งไม่พบรอยแตกร้าวบริเวณแนวเชื่อมจากการดัดงอ แสดงดังรูปที่ 4.30



รูปที่ 4.30 เ็ื่อนไข Al 6082T6 - 6 mm - Filler 4043 (เชื่อมใหม่)

จากการทดสอบการดัดงอ เจ็อนไซ Al 6082T6 - 6 mm - Filler 4043 (เชื่อมซ่อม) สามารถยอมรับได้ 4 ตัวอย่าง คือ ชิ้นงานดัดงอด้านหน้าชั้นที่ 1 ชิ้นงานดัดงอด้านหลังชั้นที่ 1 ชิ้นงานดัดงอด้านหน้าชั้นที่ 2 ชิ้นงานดัดงอด้านหลังชั้นที่ 2 ซึ่งไม่พบรอยแตกร้าวบริเวณแนวเชื่อมจากการดัดงอ แสดงดังรูปที่ 4.31



รูปที่ 4.31 เจ็อนไซ Al 6082T6 - 6 mm - Filler 4043 (เชื่อมซ่อม)

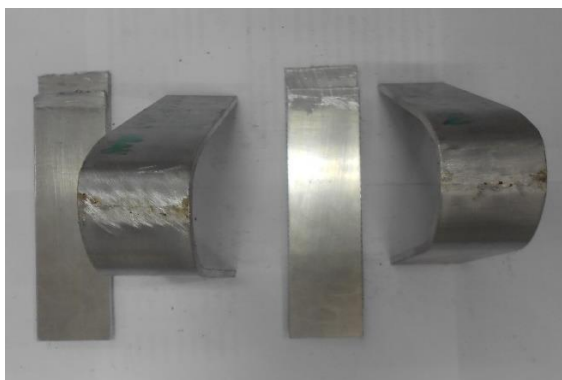
4.2) เจ็อนไซอะลูมิเนียมผสม 6082T6 เชื่อมด้วยลวดเชื่อม 5356

จากการทดสอบการดัดงอการเชื่อมซ่อมอะลูมิเนียมผสม 6082T6 เชื่อมด้วยลวดเชื่อม 5356 พบว่า เจ็อนไซการเชื่อมซ่อมสามารถยอมรับได้ แสดงผลการทดสอบดังตารางที่ 4.8 และรูปที่ 4.32 – รูปที่ 4.35

ตารางที่ 4.8 แสดงผลการทดสอบการดัดงออะลูมิเนียมผสม 6082T6 เชื่อมด้วยลวดเชื่อม 5356

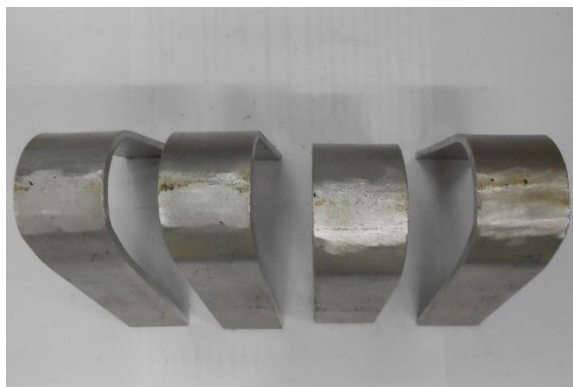
เจ็อนไซ	จำนวนชิ้นงานทดสอบ	จำนวนชิ้นงานที่ทดสอบผ่าน
Al 6082T6 - 4 mm - Filler 5356 (เชื่อมใหม่)	4	2
Al 6082T6 - 4 mm - Filler 5356 (เชื่อมซ่อม)	4	4
Al 6082T6 - 6 mm - Filler 5356 (เชื่อมใหม่)	4	1
Al 6082T6 - 6 mm - Filler 5356 (เชื่อมซ่อม)	4	4

จากการทดสอบการดัดงอ เเงื่อนไข Al 6082T6 - 4 mm - Filler 5356 (เชื่อมใหม่) สามารถยอมรับได้ 2 ตัวอย่าง คือ ชิ้นงานดัดงอด้านหลังที่ 1 และชิ้นงานดัดงอด้านหลังที่ 2 ซึ่งไม่พบรอยแตกร้าวบริเวณแนวเชื่อมจากการดัดงอ แต่จากการทดสอบตัวอย่างชิ้นงานดัดงอด้านหน้า ชั้นที่ 1 และชิ้นงานดัดงอด้านหน้าชั้นที่ 2 พบว่าชิ้นงานเกิดการแตกหักบริเวณแนวเชื่อม ซึ่งมีการหลอมละลายที่ไม่สมบูรณ์เป็นเส้นตามยาวตลอดแนวเชื่อมและพบรูพรุนกระทั่วตัวเนื้อเชื่อม แสดงดังรูปที่ 4.32



รูปที่ 4.32 เเงื่อนไข Al 6082T6 - 4 mm - Filler 5356 (เชื่อมใหม่)

จากการทดสอบการดัดงอ เเงื่อนไข Al 6082T6 - 4 mm - Filler 5356 (เชื่อมซ่อม) สามารถยอมรับได้ 4 ตัวอย่าง คือ ชิ้นงานดัดงอด้านหน้าชั้นที่ 1 ชิ้นงานดัดงอด้านหลังชั้นที่ 1 ชิ้นงานดัดงอด้านหน้าชั้นที่ 2 ชิ้นงานดัดงอด้านหลังชั้นที่ 2 ซึ่งไม่พบรอยแตกร้าวบริเวณแนวเชื่อมจากการดัดงอ แสดงดังรูปที่ 4.33



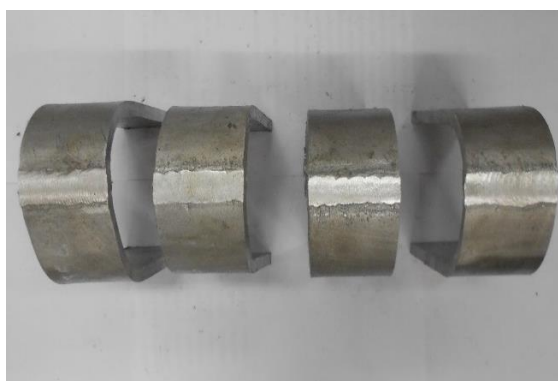
รูปที่ 4.33 เเงื่อนไข Al 6082T6 - 4 mm - Filler 5356 (เชื่อมซ่อม)

จากการทดสอบการดัดงอ เงานโซ่ Al 6082T6 - 6 mm - Filler 5356 (เชื่อมใหม่) สามารถยอมรับได้ 1 ตัวอย่าง คือ ชิ้นงานดัดงอด้านหลังชั้นที่ 2 ซึ่งไม่พบรอยแตกร้าวบริเวณแนวเชื่อมจากการดัดงอ แต่จากการทดสอบตัวอย่างชิ้นงานดัดงอด้านหน้าชั้นที่ 1 ชิ้นงานดัดงอด้านหลังชั้นที่ 1 ชิ้นงานดัดงอด้านหน้าชั้นที่ 2 พบว่าชิ้นงานเกิดการแตกหักบริเวณแนวเชื่อม ซึ่งสาเหตุหลักคือมีการหลอมละลายที่ไม่สมบูรณ์ตลอดแนวเชื่อมและพบรูพรุนกระจายตัวทั่วแนวเชื่อม แสดงดังรูปที่ 4.34



รูปที่ 4.34 เงานโซ่ Al 6082T6 - 6 mm - Filler 5356 (เชื่อมใหม่)

จากการทดสอบการดัดงอ เงานโซ่ Al 6082T6 - 6 mm - Filler 5356 (เชื่อมซ่อม) สามารถยอมรับได้ 4 ตัวอย่าง คือ ชิ้นงานดัดงอด้านหน้าชั้นที่ 1 ชิ้นงานดัดงอด้านหลังชั้นที่ 1 ชิ้นงานดัดงอด้านหน้าชั้นที่ 2 ชิ้นงานดัดงอด้านหลังชั้นที่ 2 ซึ่งไม่พบรอยแตกร้าวบริเวณแนวเชื่อมจากการดัดงอ แสดงดังรูปที่ 4.35



รูปที่ 4.35 เงานโซ่ Al 6082T6 - 6 mm - Filler 5356 (เชื่อมซ่อม)

4.3) เจ็อนไขอะลูมิเนียมผสม 5083 เชื่อมด้วยลวดเชื่อม 5356

จากการทดสอบการตัดงอการเชื่อมซ่อมอะลูมิเนียมผสม 5083 เชื่อมด้วยลวดเชื่อม 5356 พบว่า เจ็อนไข Al 5083 - 3 mm - Filler 5356 (เชื่อมซ่อม) สามารถยอมรับได้ แต่สำหรับ เจ็อนไข Al 5083 - 6 mm - Filler 5356 (เชื่อมซ่อม) ไม่สามารถยอมรับได้ แสดงผลการทดสอบดังตารางที่ 4.9 และรูปที่ 4.36 – รูปที่ 4.39

ตารางที่ 4.9 แสดงผลการทดสอบการตัดงออะลูมิเนียมผสม 5083 เชื่อมด้วยลวดเชื่อม 5356

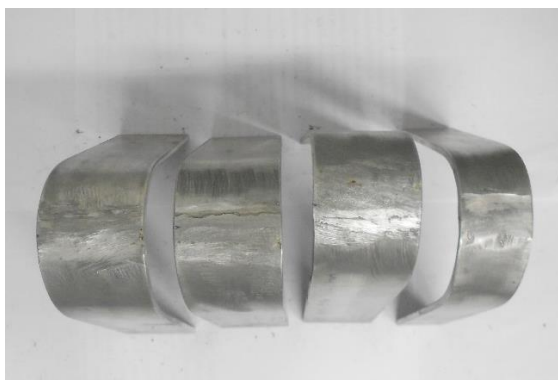
เจ็อนไข	จำนวนชิ้นงานทดสอบ	จำนวนชิ้นงานที่ทดสอบผ่าน
Al 5083 - 3 mm - Filler 5356 (เชื่อมใหม่)	4	4
Al 5083 - 3 mm - Filler 5356 (เชื่อมซ่อม)	4	4
Al 5083 - 6 mm - Filler 5356 (เชื่อมใหม่)	4	3
Al 5083 - 6 mm - Filler 5356 (เชื่อมซ่อม)	4	1

จากการทดสอบการตัดงอ เจ็อนไข Al 5083 - 3 mm - Filler 5356 (เชื่อมใหม่) สามารถยอมรับได้ 4 ตัวอย่าง คือ ชิ้นงานตัดงอด้านหน้าชั้นที่ 1 ชิ้นงานตัดงอด้านหลังชั้นที่ 1 ชิ้นงานตัดงอด้านหน้าชั้นที่ 2 ชิ้นงานตัดงอด้านหลังชั้นที่ 2 ซึ่งไม่พบรอยแตกบริเวณแนวเชื่อมจากการตัดงอ แสดงดังรูปที่ 4.36



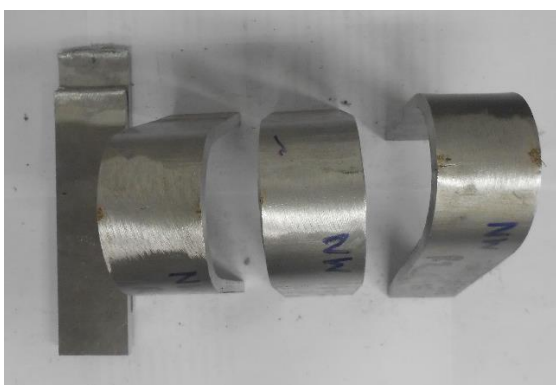
รูปที่ 4.36 เจ็อนไข Al 5083 - 3 mm - Filler 5356 (เชื่อมใหม่)

จากการทดสอบการดัดงอ เจ็อนไซ Al 5083 - 3 mm - Filler 5356 (เชื่อมซ่อม) สามารถยอมรับได้ 4 ตัวอย่าง คือ ชิ้นงานดัดงอด้านหน้าชั้นที่ 1 ชิ้นงานดัดงอด้านหลังชั้นที่ 1 ชิ้นงานดัดงอด้านหน้าชั้นที่ 2 ชิ้นงานดัดงอด้านหลังชั้นที่ 2 ซึ่งไม่พบรอยแตกกว้างบริเวณแนวเชื่อมจากการดัดงอ แสดงดังรูปที่ 4.37



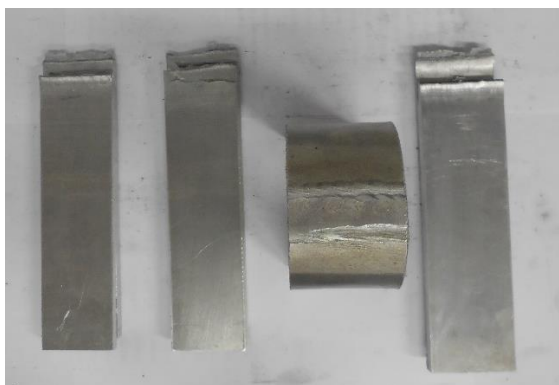
รูปที่ 4.37 เจ็อนไซ Al 5083 - 3 mm - Filler 5356 (เชื่อมซ่อม)

จากการทดสอบการดัดงอ เจ็อนไซ Al 5083 - 6 mm - Filler 5356 (เชื่อมใหม่) สามารถยอมรับได้ 3 ตัวอย่าง คือ ชิ้นงานดัดงอด้านหลังชั้นที่ 1 ชิ้นงานดัดงอด้านหน้าชั้นที่ 2 ชิ้นงานดัดงอด้านหลังชั้นที่ 2 ซึ่งไม่พบรอยแตกกว้างบริเวณแนวเชื่อมจากการดัดงอ แต่จากการทดสอบตัวอย่าง ชิ้นงานดัดงอด้านหน้าชั้นที่ 1 พบว่าชิ้นงานเกิดการแตกหักบริเวณแนวเชื่อม ซึ่งพบรูพรุนกระจายตัวทั่วบริเวณเนื้อเชื่อมและพบการหลอมละลายไม่สมบูรณ์ตลอดเนื้อเชื่อม แสดงดังรูปที่ 4.38



รูปที่ 4.38 เจ็อนไซ Al 5083 - 6 mm - Filler 5356 (เชื่อมใหม่)

จากการทดสอบการตัดงอ เจ็อนไซ Al 6082T6 - 6 mm - Filler 5356 (เชื่อมซ่อม) สามารถยอมรับได้ 1 ตัวอย่าง คือ ชิ้นงานตัดงอด้านหน้าชั้นที่ 2 ซึ่งไม่พบรอยแตกร้าวบริเวณแนวเชื่อมจากการตัดงอ แต่จากการทดสอบตัวอย่าง ชิ้นงานตัดงอด้านหน้าชั้นที่ 1 ชิ้นงานตัดงอด้านหลังชั้นที่ 1 ชิ้นงานตัดงอด้านหลังชั้นที่ 2 พบว่าชิ้นงานเกิดการแตกหักบริเวณแนวเชื่อม ซึ่งสาเหตุหลักคือมีการหลอมละลายที่ไม่สมบูรณ์ตามยาวตลอดเนื้อเชื่อมและพบรูพรุน แสดงดังรูปที่ 4.39

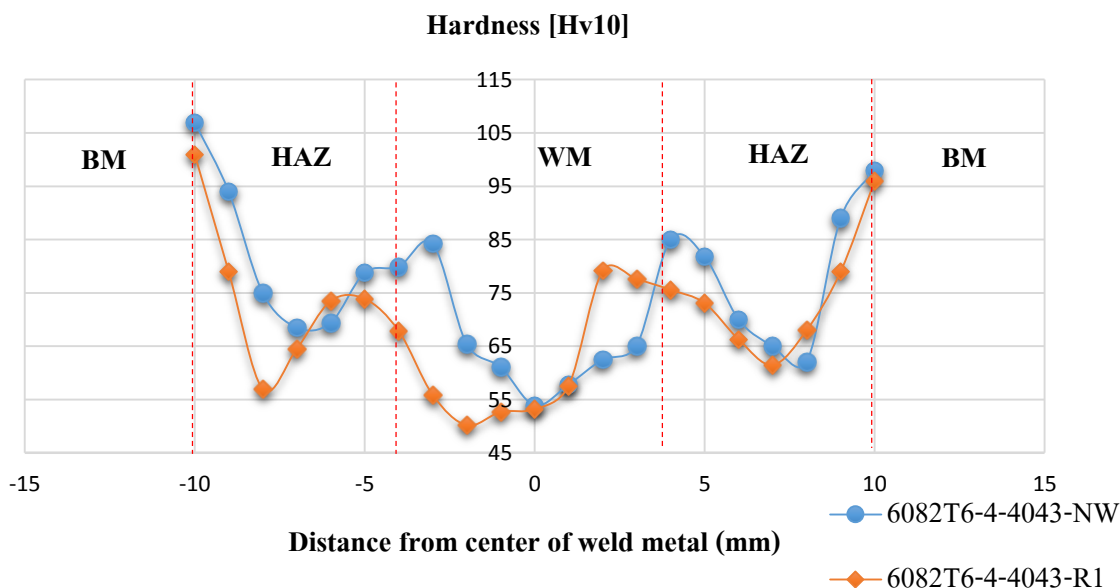


รูปที่ 4.39 เจ็อนไซ Al 6082T6 - 6 mm - Filler 5356 (เชื่อมซ่อม)

4) ความแข็ง

ผลการทดสอบค่าความแข็ง เจ็อนโซ 6082T6-4-4043 เชื่อมใหม่และเชื่อมซ่อม จากรูปที่ 4.40 พบว่าในช่วงถัดจากบริเวณกลางเนื้อเชื่อม (Distance from center of weld metal) ประมาณ 0-3 มิลลิเมตร จะมีความแข็งลดลง และบริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อนถัดจากบริเวณกลางเนื้อเชื่อมประมาณ 2-5 มิลลิเมตร พบว่าค่าความแข็งในบริเวณนี้สูงกว่าบริเวณเนื้อเชื่อม ซึ่งเป็นบริเวณที่ได้รับอุณหภูมิขณะเชื่อมประมาณ 450-550 องศาเซลเซียสหรือสูงกว่า ซึ่งเรียกบริเวณนี้ว่า บริเวณสารละลายของแข็ง (Solid solution zone) และถัดจากบริเวณกลางเนื้อเชื่อม ประมาณ 6-7 มิลลิเมตร พบว่าบริเวณนี้ได้รับความร้อนที่อุณหภูมิต่ำกว่า 300-420 องศาเซลเซียส ค่าความแข็งบริเวณนี้จึงลดลง เนื่องจากบริเวณอ่อนตัว (Softened zone) จะเกิดขึ้นที่อุณหภูมิสูงกว่า 150-250 องศาเซลเซียสและบริเวณถัดจากกลางเนื้อเชื่อมประมาณ 9-10 มิลลิเมตร เป็นต้นไป จะเป็นบริเวณโลหะฐาน ซึ่งจะมีความแข็งประมาณ 110 HV

จากการเปรียบเทียบทั้งการเชื่อมใหม่และการเชื่อมซ่อม พบว่าความแข็งมีค่าใกล้เคียงกันและค่าความแข็งที่ลดลงจะอยู่ในบริเวณเนื้อเชื่อมกับบริเวณถัดจากกลางเนื้อเชื่อมประมาณ 6-7 มิลลิเมตร

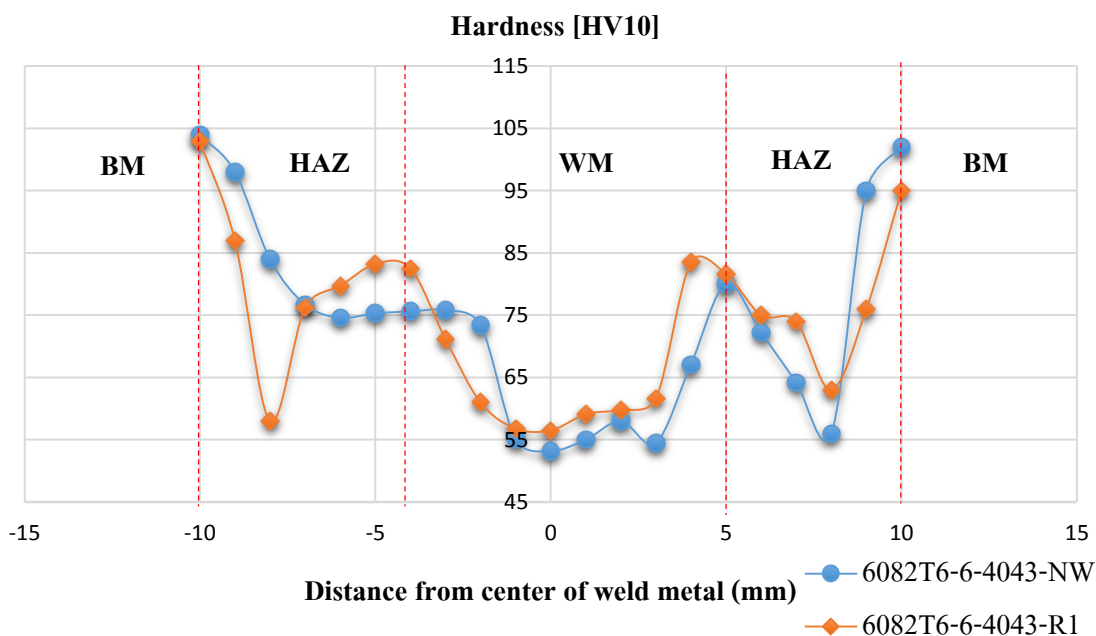


รูปที่ 4.40 แสดงความแข็งของแนวเชื่อมระหว่างการเชื่อมใหม่กับการเชื่อมซ่อมของอะลูมิเนียม

ผสม 6082T6 ขนาด 4 มิลลิเมตร เชื่อมด้วยลวดเชื่อม 4043

ผลการทดสอบค่าความแข็ง เจ็อนโซ 6082T6-6-4043 เชื่อมใหม่และเชื่อมซ่อม จากรูปที่ 4.41 พบว่าในช่วงถัดจากบริเวณกลางเนื้อเชื่อม ประมาณ 0-3 มิลลิเมตร จะมีความแข็งลดลง และบริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อนถัดจากบริเวณกลางเนื้อเชื่อมประมาณ 3-5 มิลลิเมตร พบว่าค่าความแข็งในบริเวณนี้สูงกว่าบริเวณเนื้อเชื่อม ซึ่งเป็นบริเวณที่ได้รับอุณหภูมิขณะเชื่อมประมาณ 450-550 องศาเซลเซียสหรือสูงกว่า ซึ่งเรียกบริเวณนี้ว่า บริเวณสารละลายของแข็ง และถัดจากบริเวณกลางเนื้อเชื่อมประมาณ 6-8 มิลลิเมตร พบว่าบริเวณนี้ได้รับความร้อนที่อุณหภูมิประมาณ 300-420 องศาเซลเซียส ค่าความแข็งบริเวณนี้จึงลดลง เนื่องจากบริเวณอ่อนตัวจะเกิดขึ้นที่อุณหภูมิสูงกว่า 150-250 องศาเซลเซียสและบริเวณถัดจากกลางเนื้อเชื่อมประมาณ 9-10 มิลลิเมตร เป็นต้นไป จะเป็นบริเวณโลหะฐาน ซึ่งจะมีความแข็งประมาณ 110 HV

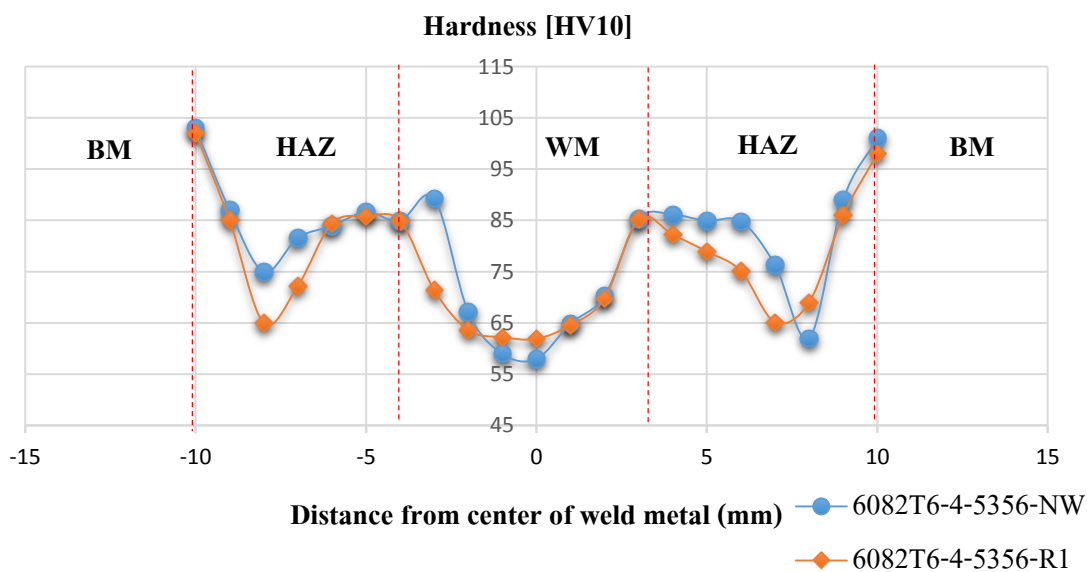
จากการเปรียบเทียบทั้งการเชื่อมใหม่และการเชื่อมซ่อม พบว่าความแข็งมีค่าใกล้เคียงกันและค่าความแข็งมีความใกล้เคียงกัน และค่าความแข็งที่ลดลงจะอยู่ในบริเวณเนื้อเชื่อมกับบริเวณถัดจากกลางเนื้อเชื่อม ประมาณ 6-8 มิลลิเมตร



รูปที่ 4.41 แสดงความแข็งของแนวเชื่อมระหว่างการเชื่อมใหม่กับการเชื่อมซ่อมของอะลูมิเนียมผสม 6082T6 ขนาด 6 มิลลิเมตร เชื่อมด้วยลวดเชื่อม 4043

ผลการทดสอบค่าความแข็ง เจ็อนโซ 6082T6-4-5356 เชื่อมใหม่และเชื่อมซ่อม จากรูปที่ 4.42 พบว่าในช่วงถัดจากบริเวณกลางเนื้อเชื่อม ประมาณ 0-3 มิลลิเมตร จะมีความแข็งลดลง และบริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อนถัดจากบริเวณกลางเนื้อเชื่อมประมาณ 3-5 มิลลิเมตร พบว่าค่าความแข็งในบริเวณนี้สูงกว่าบริเวณเนื้อเชื่อม ซึ่งเป็นบริเวณที่ได้รับอุณหภูมิขณะเชื่อม ประมาณ 450-550 องศาเซลเซียสหรือสูงกว่า ซึ่งเรียกบริเวณนี้ว่า บริเวณสารละลายของแข็ง และถัดจากบริเวณกลางเนื้อเชื่อม ประมาณ 6-8 มิลลิเมตร พบว่าบริเวณนี้ได้รับความร้อนที่อุณหภูมิต่ำกว่า 300-420 องศาเซลเซียส ค่าความแข็งบริเวณนี้จึงลดลง เนื่องจากบริเวณอ่อนตัวจะเกิดขึ้นที่อุณหภูมิสูงกว่า 150-250 องศาเซลเซียสและบริเวณถัดจากกลางเนื้อเชื่อมประมาณ 9-10 มิลลิเมตร เป็นต้นไปจะเป็นบริเวณโลหะฐาน ซึ่งจะมีความแข็งประมาณ 110 HV

จากการเปรียบเทียบทั้งการเชื่อมใหม่และการเชื่อมซ่อม พบว่าความแข็งมีค่าใกล้เคียงกันและค่าความแข็งที่ลดลงจะอยู่ในบริเวณเนื้อเชื่อมกับบริเวณถัดจากกลางเนื้อเชื่อมประมาณ 6-8 มิลลิเมตร

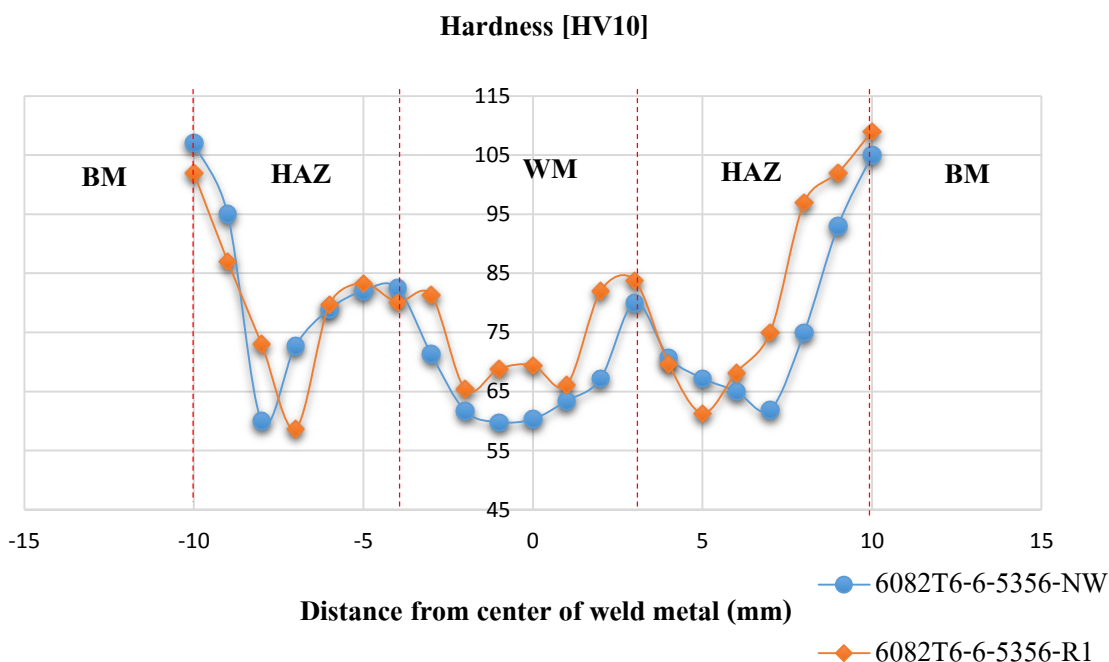


รูปที่ 4.42 แสดงความแข็งของแนวเชื่อมระหว่างการเชื่อมใหม่กับการเชื่อมซ่อมของอะลูมิเนียม

ผสม 6082T6 ขนาด 4 มิลลิเมตร เชื่อมด้วยลวดเชื่อม 5356

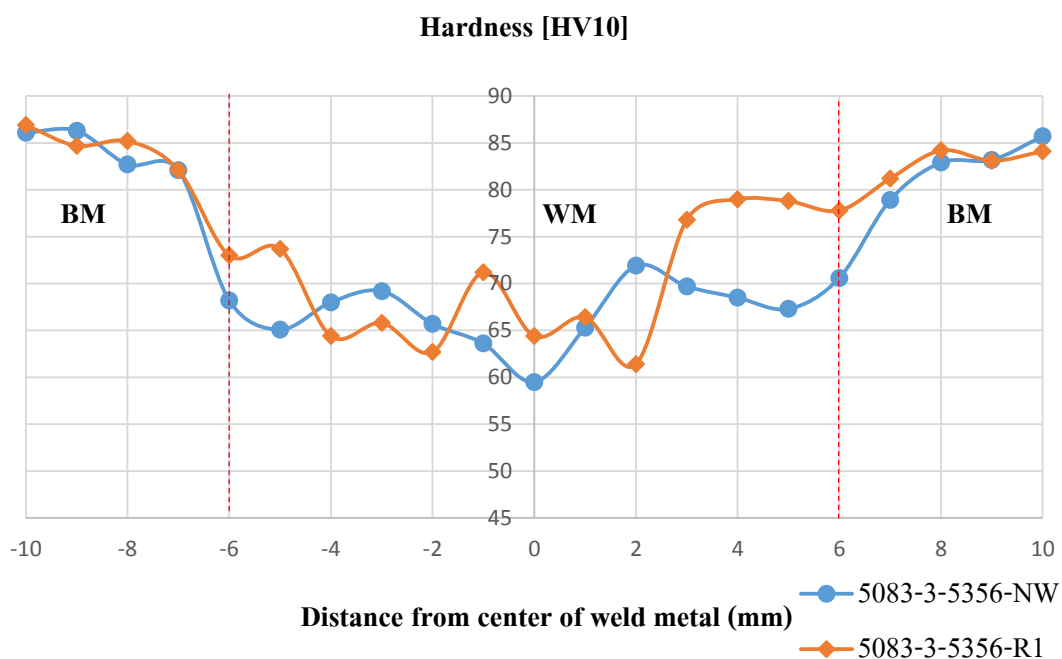
ผลการทดสอบค่าความแข็ง เจ็อนไอ 6082T6-6-5356 เชื่อมใหม่และเชื่อมซ่อม จากรูปที่ 4.43 พบว่าในช่วงถัดจากบริเวณกลางเนื้อเชื่อมประมาณ 0-3 มิลลิเมตร จะมีความแข็งลดลง และบริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อนถัดจากบริเวณกลางเนื้อเชื่อมประมาณ 3-6 มิลลิเมตร พบว่าค่าความแข็งในบริเวณนี้สูงกว่าบริเวณเนื้อเชื่อม ซึ่งเป็นบริเวณที่ได้รับอุณหภูมิขณะเชื่อมประมาณ 450-550 องศาเซลเซียสหรือสูงกว่า ซึ่งเรียกบริเวณนี้ว่า บริเวณสารละลายของแข็ง และถัดจากบริเวณกลางเนื้อเชื่อม ประมาณ 5-8 มิลลิเมตร พบว่าบริเวณนี้ได้รับความร้อนที่อุณหภูมิประมาณ 300-420 องศาเซลเซียส ค่าความแข็งบริเวณนี้จึงลดลง เนื่องจากบริเวณอ่อนตัวจะเกิดขึ้นที่อุณหภูมิสูงกว่า 150-250 องศาเซลเซียส และบริเวณถัดจากกลางเนื้อเชื่อมประมาณ 9-10 มิลลิเมตร เป็นต้นไป จะเป็นบริเวณโลหะฐาน ซึ่งจะมีความแข็งประมาณ 110 HV

จากการเปรียบเทียบทั้งการเชื่อมใหม่และการเชื่อมซ่อม พบว่าความแข็งมีค่าใกล้เคียงกันและค่าความแข็งที่ลดลงจะอยู่ในบริเวณเนื้อเชื่อมกับบริเวณถัดจากกลางเนื้อเชื่อมประมาณ 5-8 มิลลิเมตร



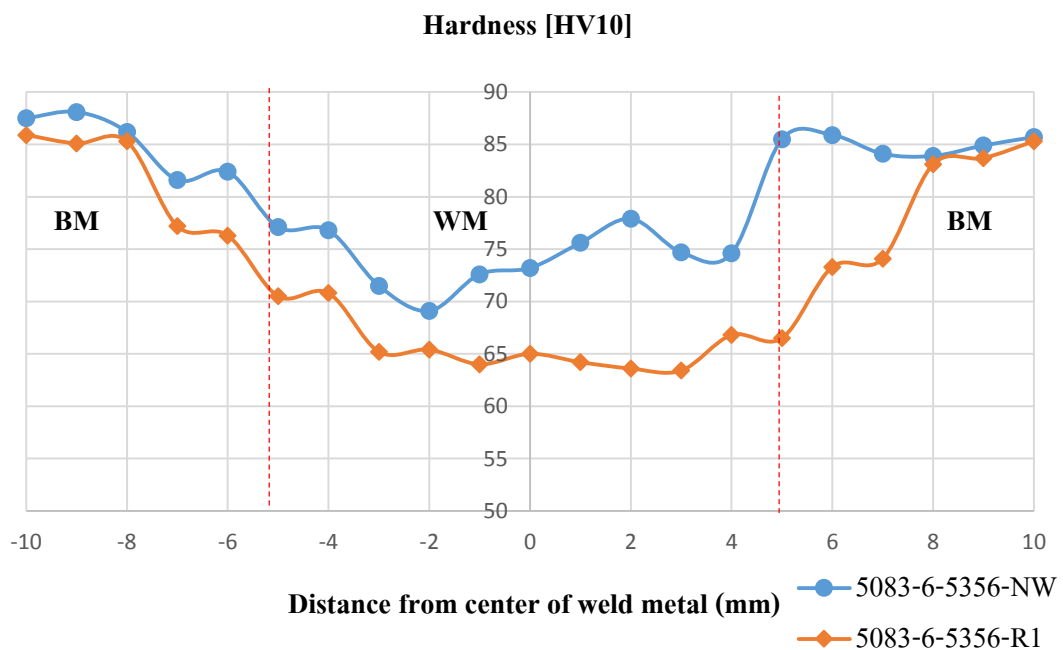
รูปที่ 4.43 แสดงความแข็งของแนวเชื่อมระหว่างการเชื่อมใหม่กับการเชื่อมซ่อมของอะลูมิเนียมผสม 6082T6 ขนาด 6 มิลลิเมตร เชื่อมด้วยลวดเชื่อม 5356

ผลการทดสอบค่าความแข็ง เงื่อนไข 5083-3-5356 เชื่อมใหม่และเชื่อมซ่อม จากรูปที่ 4.44 พบว่าบริเวณกลางเนื้อเชื่อมจะมีความแข็งลดลง ซึ่งการอ่อนตัวของอะลูมิเนียมประเภทเวิร์คฮาร์ดเดน (work-hardened aluminum) จะเกิดขึ้นในบริเวณเนื้อเชื่อมเมื่อถูกความร้อนสูงกว่า 250 องศาเซลเซียส ดังนั้นบริเวณที่อ่อนตัวที่สุดคือบริเวณเนื้อเชื่อม และจากการเปรียบเทียบระหว่างการเชื่อมใหม่และการเชื่อมซ่อม พบว่าค่าความแข็งบริเวณเนื้อเชื่อมไม่แตกต่างกัน



รูปที่ 4.44 แสดงความแข็งของแนวเชื่อมระหว่างการเชื่อมใหม่กับการเชื่อมซ่อมของอะลูมิเนียมผสม 5083 ขนาด 3 มิลลิเมตร เชื่อมด้วยลวดเชื่อม 5356

ผลการทดสอบค่าความแข็ง เจ็อนไอ 5083-6-5356 เชื่อมใหม่และเชื่อมซ่อม จากรูปที่ 4.45 พบว่าบริเวณกลางเนื้อเชื่อมทั้งเชื่อมใหม่และเชื่อมซ่อมจะมีความแข็งลดลง และค่าความแข็งของการเชื่อมซ่อมจะต่ำกว่าการเชื่อมใหม่ ซึ่งการอ่อนตัวของอะลูมิเนียมประเภทเวิร์คฮาร์ดเดน (work-hardened aluminum) จะเกิดขึ้นในบริเวณเนื้อเชื่อมเมื่อถูกความร้อนสูงกว่า 250 องศาเซลเซียส ดังนั้นบริเวณที่อ่อนตัวที่สุดคือบริเวณเนื้อเชื่อม และจากการเปรียบเทียบระหว่างการเชื่อมใหม่และการเชื่อมซ่อม พบว่าค่าความแข็งต่ำสุดบริเวณเนื้อเชื่อมของการเชื่อมใหม่อยู่ที่ 69 HV และค่าความแข็งต่ำสุดบริเวณเนื้อเชื่อมของการเชื่อมซ่อมอยู่ที่ 63 HV ซึ่งพบว่ามีค่าความแตกต่างกันเพียงเล็กน้อย



รูปที่ 4.45 แสดงความแข็งของแนวเชื่อมระหว่างการเชื่อมใหม่กับการเชื่อมซ่อมของอะลูมิเนียมผสม 5083 ขนาด 6 มิลลิเมตร เชื่อมด้วยลวดเชื่อม 5356

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

จากการศึกษาการเชื่อมซ่อมของอะลูมิเนียมผสม 6082T6 เชื่อมด้วยลวดเชื่อม 4043 และลวดเชื่อม 5356 และอะลูมิเนียมผสม 5083 เชื่อมด้วยลวดเชื่อม 5356 จากนั้นศึกษาลักษณะทางกายภาพ โครงสร้างมหภาค โครงสร้างจุลภาค และสมบัติเชิงกล ซึ่งผลการทดลองสรุปได้ดังต่อไปนี้

5.1 สรุปผลการทดลอง

กรณี 6082T6

1) การเชื่อมอะลูมิเนียมผสม 6082T6 ทุกเงื่อนไข ลักษณะทางกายภาพระหว่างการเชื่อมใหม่กับการเชื่อมซ่อมไม่มีความแตกต่างกัน แนวเชื่อมมีความสมบูรณ์ดี

2) โครงสร้างมหภาค/จุลภาค

2.1) โครงสร้างมหภาคทุกเงื่อนไข แนวเชื่อมมีการซึมลึกที่ดี เงื่อนไขอะลูมิเนียมผสม 6082T6 เชื่อมด้วยลวดเชื่อม 4043 จะสังเกตเห็นรูพรุนที่ปรากฏบริเวณเนื้อเชื่อมเพียงเล็กน้อย และเงื่อนไขอะลูมิเนียมผสม 6082T6 เชื่อมด้วยลวดเชื่อม 5356 จะสังเกตเห็นรูพรุนที่ปรากฏบริเวณเนื้อเชื่อมค่อนข้างชัดเจน

2.2) โครงสร้างจุลภาคที่บริเวณเนื้อเชื่อมทุกเงื่อนไข จะสังเกตเห็นเกรนมีลักษณะเป็นแบบเดนไดรต์ การเชื่อมซ่อมอะลูมิเนียมผสม 6082T6 ด้วยลวดเชื่อม 4043 และ 5356 บริเวณเนื้อเชื่อม เกรนจะมีขนาดประมาณ 10-30 ไมโครเมตร

3) สมบัติเชิงกล (Mechanical Properties)

3.1) การเชื่อมซ่อมด้วยลวดเชื่อม 4043 ให้ค่าความแข็งแรงดึงผ่านมาตรฐาน AWS D1.2 มีค่าประมาณ 178.9 - 183.5 MPa. และจากการทดสอบแรงดึง เกิดการแตกหักที่บริเวณที่ได้รับผลกระทบเนื่องจากความร้อน (Heat Affected Zone, HAZ) สำหรับการเชื่อมซ่อมด้วยลวดเชื่อม 5356 ให้ค่าความแข็งแรงดึงผ่านมาตรฐาน AWS D1.2 มีค่าประมาณ 167.75 - 182 MPa. และจากการทดสอบแรงดึง เกิดการแตกหักที่บริเวณแนวเชื่อม (Weld Metal)

3.2) การเชื่อมซ่อมอะลูมิเนียม 6082T6 ด้วยลวดเชื่อม 4043 และลวดเชื่อม 5356 มีค่าการยึดตัวใกล้เคียงกัน

3.3) การทดสอบการดัดงอการเชื่อมซ่อมอะลูมิเนียมผสม 6082T6 ด้วยลวดเชื่อม 4043 และลวดเชื่อม 5356 สามารถยอมรับได้ทั้งหมด

3.4) ความแข็งของการเชื่อมอะลูมิเนียมผสม 6082T6 ด้วยลวดเชื่อม 4043 และลวดเชื่อม 5356 ส่งผลให้บริเวณเนื้อเชื่อมและบริเวณที่ได้รับผลกระทบเนื่องจากความร้อนมีความแข็งลดลง (50-70 HV) จากเนื้อโลหะเดิม (110 HV) ซึ่งบริเวณที่ได้รับผลกระทบเนื่องจากความร้อน จะอยู่ห่างจากกึ่งกลางเนื้อเชื่อมประมาณ 5-8 มิลลิเมตร

กรณี 5083

1) การเชื่อมอะลูมิเนียมผสม 5083 ทุกเงื่อนไข ลักษณะทางกายภาพระหว่างการเชื่อมใหม่กับการเชื่อมซ่อมไม่มีความแตกต่างกัน แนวเชื่อมมีความสมบูรณ์ดี

2) โครงสร้างมหภาค/จุลภาค

2.1) โครงสร้างมหภาคในเงื่อนไข Al 5083 - 3 mm - Filler 5356 (เชื่อมซ่อม) พบรูพรุนกระจายตัวบริเวณเนื้อเชื่อมค่อนข้างชัดเจน

2.2) โครงสร้างจุลภาคของการเชื่อมซ่อมอะลูมิเนียมผสม 5083 ด้วยลวดเชื่อม 5356 บริเวณเนื้อเชื่อม เกรนจะมีขนาดประมาณ 30-50 ไมโครเมตร

3) สมบัติเชิงกล

3.1) การเชื่อมซ่อมอะลูมิเนียมผสม 5083 ด้วยลวดเชื่อม 5356 ให้ค่าความแข็งแรงดึงไม่ผ่านมาตรฐาน AWS D1.2 มีค่าประมาณ 184.8 – 193.45 MPa. และจากการทดสอบแรงดึง เกิดการแตกหักที่บริเวณแนวเชื่อม

3.2) การเชื่อมซ่อมอะลูมิเนียม 5083 ด้วยลวดเชื่อม 5356 มีค่าการยึดตัวประมาณ 12.9 – 16 %

3.3) การทดสอบการดัดงอการเชื่อมซ่อมในเงื่อนไข Al 5083 - 3 mm - Filler 5356 สามารถยอมรับได้ แต่สำหรับการเชื่อมซ่อมในเงื่อนไข Al 5083 - 6 mm - Filler 5356 ไม่สามารถยอมรับได้

3.4) การเชื่อมอะลูมิเนียมผสม 5083 ด้วยลวดเชื่อม 5356 บริเวณเนื้อเชื่อมมีความแข็งลดลง (60-70 HV) จากเนื้อโลหะเดิม (90 HV) บริเวณที่ได้รับผลกระทบเนื่องจากความร้อนมีแข็งสูงกว่าบริเวณเนื้อเชื่อมและการแตกหักเกิดขึ้นที่บริเวณเนื้อเชื่อม

5.2 ข้อเสนอแนะ

- (1) การเตรียมชิ้นงานควรทำตามมาตรฐาน AWS D1.2
- (2) การเชื่อมซ่อมควรปฏิบัติตามข้อกำหนดการเชื่อม (Welding Procedure Specification) อย่างเคร่งครัด เพื่อหลีกเลี่ยงปัญหาการเชื่อมซ่อมไม่สมบูรณ์
- (3) ควรทำการเชื่อมในสภาวะแวดล้อมที่มีความชื้นสัมพัทธ์ไม่เกิน 70 %
- (4) ในการเชื่อมอะลูมิเนียมผสมควรใช้แก๊สอาร์กอนบริสุทธิ์ ตั้งแต่ 99.99 % ขึ้นไป
- (5) ก่อนทำการเชื่อมซ่อมควรมีการทดสอบช่างเชื่อม วิธีที่ง่ายที่สุดคือ เชื่อมชิ้นส่วนทดสอบแล้ว ทาการดัดงอชิ้นงานเชื่อม Face bend 2 ชั้น และ Root bend 2 ชั้น โดยอย่างน้อยควรผ่าน 3 ชั้น อย่างไรก็ตามถ้าต้องการคุณภาพที่ดีที่สุด ต้องมีการทดสอบ X-ray ประกอบด้วย
- (6) งานวิจัยในอนาคต ควรทำการเชื่อมซ่อมด้วยกระแสพัลส์ (Pulse) เพื่อเปรียบเทียบสมบัติทางกายภาพ โครงสร้างมหภาคและจุลภาค และสมบัติเชิงกล

บรรณานุกรม

- [1] ประกาศ เมืองจันทบุรี. วิศวกรรมการเชื่อม. สงขลา: ภาควิชาวิศวกรรมเหมืองแร่และวัสดุ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์; 2555.
- [2] WORLDWIDE GUIDE TO EQUIVALENT NONFERROUS METALS AND ALLOYS. 4th ed. America: ASM International; 2001.
- [3] Prof. Wladislav Sudnik, editor. Arc Welding. Croatia: In Tech; 2011.
- [4] Standard Specification for Structural welding Code - Aluminum. 3rded. ANSI/AWS D1.2-97.
- [5] เจษฎา วรรณสินธุ์. การหล่อโลหะสำหรับวิศวกร.พิมพ์ครั้งที่ 2. สงขลา: มิสเตอร์ก๊อปปี; 2556.
- [6] Ahmad Danial Bin Abdullah. Mechanical properties of dissimilar aluminum-base alloy joints by mig welding. Malaysia: University Malaysia Pahang; 2012
- [7] Gene Mathers. The welding of aluminium and its alloys. England: TJ Internation; 2002.
- [8] G.Kotsikos. Benchmarking weld performance in aluminium joints. University of Newcastle Upon Tyne. 2005.
- [9] Ladislav KOLARIK, Marie KOLAŘÍKOVÁ, Karel KOVANDA, Petr VONDROUŠ, Jiří DUNOVSKÝ. Influence of repair welding on weld quality of Al Alloy EN AW 6082-T6. Metal 2012; 5.
- [10] ชิตเชลง ชิตชวนกิจ. วิศวกรรมการเชื่อม. กรุงเทพมหานคร; สมาคมส่งเสริมความรู้ด้านเทคนิคระหว่างประเทศ; 2544.
- [11] Shigeaki Yamamoto. Arc Welding of Nonferrous Metals. 3rded. Kanagawa: Shinko Welding Service; 2008.
- [12] S. Missori, A. Sili. Mechanical behavior of 6082-T6 aluminium alloy welds. Metallurgical Science and Technology 2000; 18: 12-8
- [13] M. H. SCOTT, M. F. GITTO. Tensile and Toughness Properties of Arc-Welded 5083 and 6082 Aluminum Alloys. Welding Journal 1983; 62(9): 243s-52s.
- [14] Rakesh Kumar, Ulrich Dilthey, D.K. Dwivedi, P.K. Ghosh. Thin sheet welding of Al 6082 alloy by AC pulse-GMA and AC wave pulse-GMA welding. Materials and Design 2009; 30: 306-13.

- [15] J. da Silva, J.M. Costa, A. Loureiro, J.M. Ferreira. Fatigue behavior of AA6082-T6 MIG welded butt joints improved. *Materials and Design* 2013; 51: 315–22.
- [16] Krzysztof Dudzik. Mechanical Properties of 5083, 5059 and 7020 Aluminium alloys and their joints welded by MIG. *Journal of KONES Powertrain and Transport* 2011; 18(3): 73-7.
- [17] Huibin Xu, Quanxiang Luo, Bofang Zhou, Youliang Zeng, Changhua Du. The effect of stirring rate on semisolid stirring brazing of SiC_p/A356 composites in air. *Materials and Design* 2012; 34: 452-58.
- [18] N. Coniglio, C.E. Crossb, I. Dorfel, W. Osterleb. Phase formation in 6060/4043 aluminum weld solidification. *Materials Science and Engineering A* 2009; 517: 321-27.
- [19] Maamar HAKEM, S. LEBAILI, J. MIROUD, A. BENTALEB, S. TOUKALI. Welding and characterization of 5083 aluminum alloy. *Metal* 2012; 5.
- [20] อภิสิทธิ์ เพชรขวัญ. การศึกษาโครงสร้างและสมบัติทางกลของการเชื่อมในสถานะกึ่งของแข็งของอลูมิเนียมผสมหล่อกึ่งแข็ง [วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต]. สงขลา: มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์; 2557.
- [21] Division of Lincoln Electric. Certificate of inspection and test results. 3.1 Certificate (DIN EN 10204)

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

การเลือกลดเชื่อมสำหรับอะลูมิเนียมผสม

ตารางที่ ก.1 แสดงการเลือกวัสดุเชื่อมสำหรับอะลูมิเนียมผสม [4]

Recommended Aluminum Alloy Fillet Metals For Structural Welding of Various Base Aluminum Alloys^{1,2,3} (see 1.3.2.1)

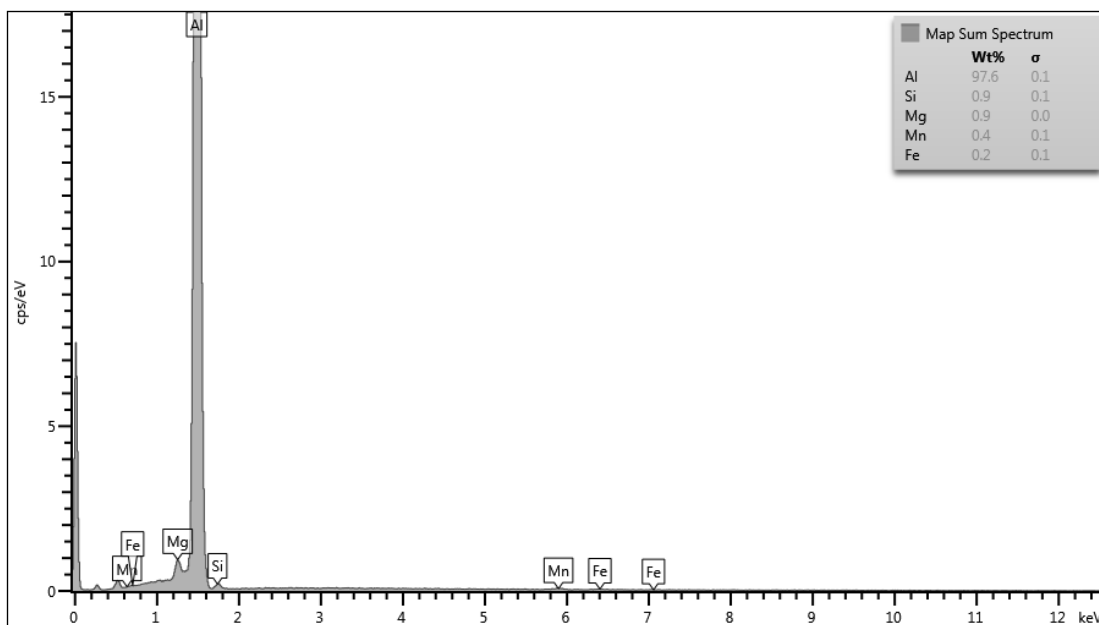
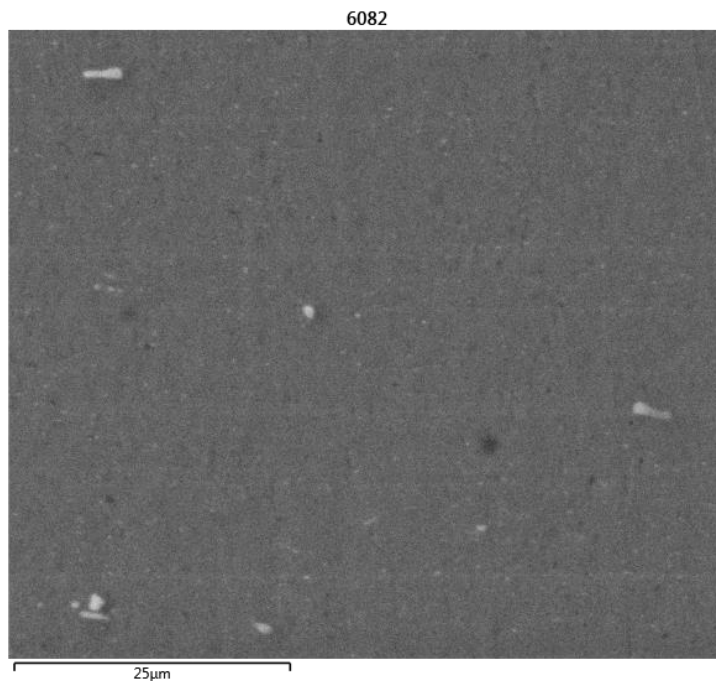
Base Metal to Base Metal	1060	1100	3003	2219	3004	5005	5052	5083	5086	6001	354.0	354.0	356.0
	A1clad 3003	A201.0	A1clad 3004	4145	4043	4043	4043	4043	4043	Alclad 6001	7005	7005	A444.0
356.0, A356.0, 357.0, A357.0, 359.0, 443.0, A444.0, 354.0, C355.0	4043 (8)	(5), (8)	(8)	4145 (5), (8), (10)	4145 (5), (8)	4043 (8)	4043 (8)	4043 (7)	4043 (4)	4043 (8), (9)	4043 (8)	4145 (5), (6), (8), (6), (8), (9)	4043 (5), (6), (8), (6), (8), (9)
7005	4145 (5), (7)	4145 (5), (8)	4145 (5), (7)	4145 (5), (7)	4145 (5), (7)	4145 (5), (7)	4145 (5), (7)	4145 (5), (7)	4145 (5), (7)	4145 (5), (8)	4145 (5), (8)	4145 (5), (6), (8)	4145 (5), (6), (8)
6005, 6061, Alclad 6061, 6063, 6351	4043 (8)	4145 (5), (8)	4145 (5), (8)	4145 (5), (8)	4145 (5), (8)	4145 (5), (8)	4145 (5), (8)	4145 (5), (8)	4145 (5), (8)	4145 (5), (8)	4145 (5), (8)	4145 (5), (8)	4145 (5), (8)
5454	4043 (7), (8)	4043 (8)	4043 (4), (5)	4043 (4), (5)	4043 (4), (5)	4043 (4), (5)	4043 (4), (5)	4043 (4), (5)	4043 (4), (5)	4043 (4), (5)	4043 (4), (5)	4043 (4), (5)	4043 (4), (5)
5154, 5254 ³	4043 (7), (8)	NR	4043 (4), (5)	4043 (4), (5)	4043 (4), (5)	4043 (4), (5)	4043 (4), (5)	4043 (4), (5)	4043 (4), (5)	4043 (4), (5)	4043 (4), (5)	4043 (4), (5)	4043 (4), (5)
5086, 514.0, 535.0	4043 (7), (8)	NR	4043 (4), (5)	4043 (4), (5)	4043 (4), (5)	4043 (4), (5)	4043 (4), (5)	4043 (4), (5)	4043 (4), (5)	4043 (4), (5)	4043 (4), (5)	4043 (4), (5)	4043 (4), (5)
5083, 5456	4043 (7)	NR	4043 (7)	4043 (7)	4043 (7)	4043 (7)	4043 (7)	4043 (7)	4043 (7)	4043 (7)	4043 (7)	4043 (7)	4043 (7)
5052, 5652 ³	4043 (7)	NR	4043 (7)	4043 (7)	4043 (7)	4043 (7)	4043 (7)	4043 (7)	4043 (7)	4043 (7)	4043 (7)	4043 (7)	4043 (7)
5005, 5050	4043 (8)	4043 (8)	4043 (7), (8)	4043 (7), (8)	4043 (7), (8)	4043 (7), (8)	4043 (7), (8)	4043 (7), (8)	4043 (7), (8)	4043 (7), (8)	4043 (7), (8)	4043 (7), (8)	4043 (7), (8)
3004, Alclad 3004	4043 (8), (11)	4043 (5)	4043 (7), (8)	4043 (7), (8)	4043 (7), (8)	4043 (7), (8)	4043 (7), (8)	4043 (7), (8)	4043 (7), (8)	4043 (7), (8)	4043 (7), (8)	4043 (7), (8)	4043 (7), (8)
2219, A201.0	4043 (7), (8)	4145 (5)	4043 (7), (8)	4043 (7), (8)	4043 (7), (8)	4043 (7), (8)	4043 (7), (8)	4043 (7), (8)	4043 (7), (8)	4043 (7), (8)	4043 (7), (8)	4043 (7), (8)	4043 (7), (8)
1060, 1100, 3003, Alclad 3003	4043 (5), (8)	4145 (5), (8), (9)	4043 (5), (8), (9)	4043 (5), (8), (9)	4043 (5), (8), (9)	4043 (5), (8), (9)	4043 (5), (8), (9)	4043 (5), (8), (9)	4043 (5), (8), (9)	4043 (5), (8), (9)	4043 (5), (8), (9)	4043 (5), (8), (9)	4043 (5), (8), (9)

Note: Numbers in parentheses refer to Notes 1 through 13.
 1. The filler alloy shown for each combination of base metals is that most commonly used and will satisfy the tensile strength requirements of Table 4.2. However, the specific filler alloy depends upon usage and type of joint, and in a number of cases, acceptable alternates may be used [Notes (4)-(13)], but they may not satisfy the tensile strength requirement of Table 4.2. When NR is indicated, welding that combination of base alloys is not recommended.
 2. Filler metals shall conform to the requirements of ANSI/AWS A5.10.
 3. Exposure to specific chemicals or a sustained high temperature [over 150°F (66°C)] may limit the choice of filler metals. Filler alloys 5183, 5356, 5556, and 5654 should not be used for sustained elevated temperature service. Filler alloy 5654 is suitable for use with base alloys 5652 and 5254 for hydrogen peroxide service.
 4. 5183, 5356, 5554, 5556, 5654 may be used. In some cases, they provide (1) improved color match after anodizing treatment, (2) higher weld ductility, and (3) higher weld strength. 5554 is suitable for elevated temperature service.
 5. 4043 may be used for some applications.
 6. Filler with the same analysis as the base-metal alloy is sometimes used.
 7. 5183, 5356, or 5556 may be used.
 8. 4047 may be used for some applications.
 9. 4145 may be used.
 10. 2319 may be used.
 11. 1100 may be used.
 12. 1188 may be used.
 13. 4643 may be used. This is useful primarily where 1/2 in. (13 mm) and thicker weldments are post weld solution heat treated and precipitation hardened.

ภาคผนวก ข

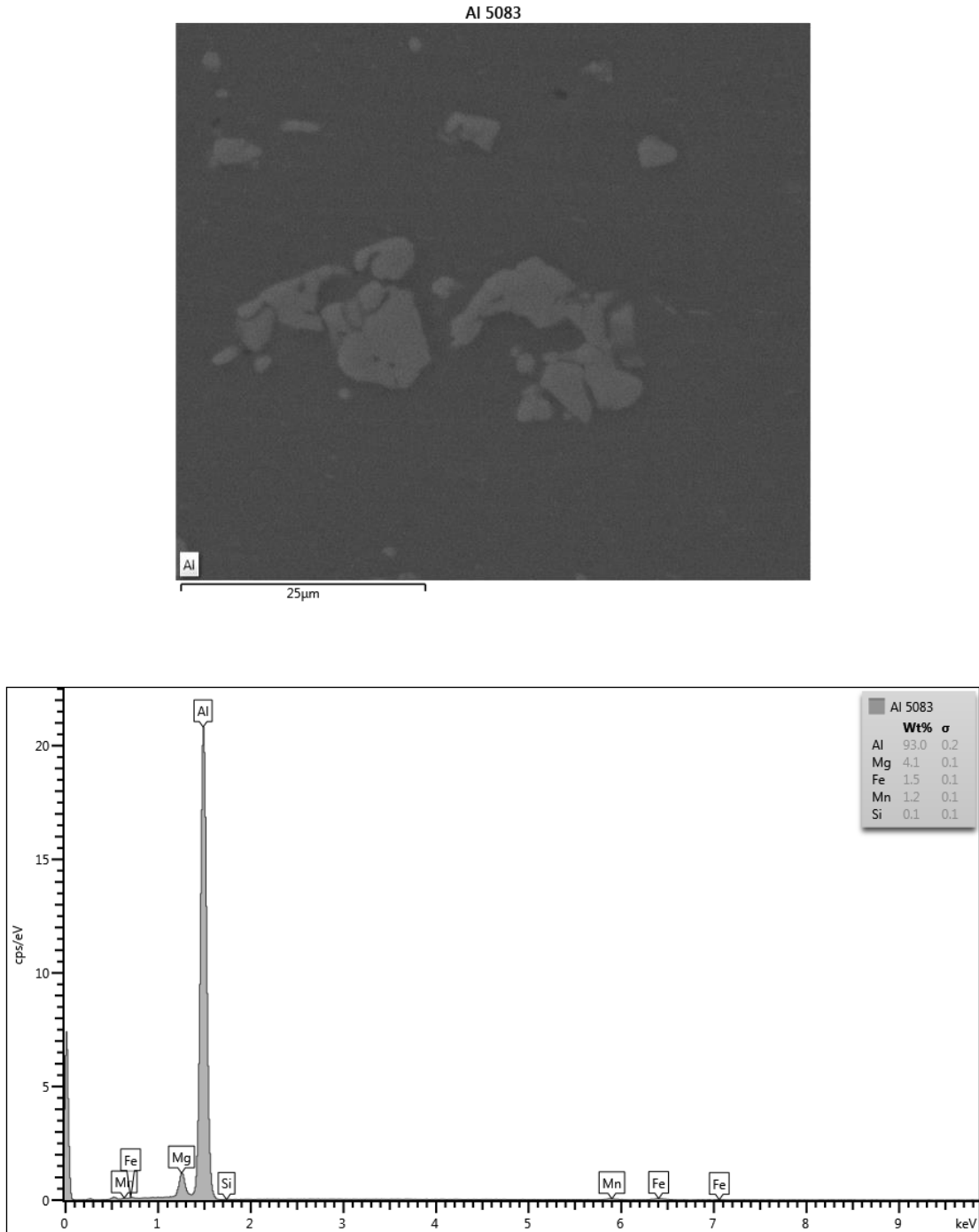
แสดงส่วนประกอบทางเคมีของอะลูมิเนียมผสม

ข.1 แสดงส่วนประกอบทางเคมีของอะลูมิเนียมผสม 6082T6



รูปที่ ข.1 ส่วนประกอบทางเคมีของอะลูมิเนียมผสม 6082T6

ข.2 แสดงส่วนประกอบทางเคมีของอะลูมิเนียมผสม 5083



รูปที่ ข.2 ส่วนประกอบทางเคมีของอะลูมิเนียมผสม 5083

ภาคผนวก ค

ส่วนประกอบทางเคมีของลวดเชื่อมอะลูมิเนียม

ค.1 ส่วนประกอบทางเคมีของลวดเชื่อม 4043 [21]

Indalco Alloys

A Division of Lincoln Electric Company of Canada LP
939 Gana Court, Mississauga, Ontario L5S 1N9 Canada

CERTIFICATE OF INSPECTION AND TEST RESULTS

3.1 Certificate (DIN EN 10204)

Customer:	Laenthong	Date:	December 20, 2014
Diameter:	1.2 mm MIG	P. O. No.	N/A
Designation Indalco:	4043	Coil No.	N/A
Designation Client:	4043	Lot No.	28814

SPECIFICATION OF CHEMICAL COMPOSITION LIMITS (Weight percent %) :EN ISO 18273:2004										Unspecified Elements	
	Si	Fe	Cu	Mn	Cr	Zn	Ti	Mg		Each	Total
Max.	6.0	0.8	0.30	0.05	-	0.10	0.20	0.05		0.05	0.15
Min.	4.5										
Be ≤ 0.0003 Aluminum : Remainder											

RESULTS OF CHEMICAL ANALYSIS (Weight Percent %)											
	Si	Fe	Cu	Mn	Cr	Zn	Ti	Mg		Be	Al.
	4.91	0.15	0.03	0.007	0.001	0.004	0.010	0.003		0.0000	Remainder

RESULTS OF MECHANICAL PROPERTIES, Temper "H18"							
Cast (mm/in)	13.5"	Helix (mm/in)	0.2"	UTS (Mpa/psi)	237Mpa	Elongation %	1.2%

The following tests have been performed on the above material:			
Smoke Test:	N/A	Feed Test:	N/A

CLASSIFICATIONS

EN ISO 18273	EN 573.3	AWS A5.10/A5.10M	Aluminum Association
S Al 4043	EN AW AISi5(A)	ER4043/R4043	4043

We hereby certify that the material described above has been tested and complies with the terms of the order and / or purchase specification.

NOTES:		NAME :	Lloyd Bridgemohan
1) Results listed as an average (Avg.) for UTS & ELONGATION for Aluminum Rod Shipments are calculated by adding the individual results of each coil and dividing by the number of coils being shipped.		TITLE :	Quality Assurance Manager
2) Results listed for UTS & ELONGATION for Aluminum Wire Shipments are averages (Avg.).		SIGNATURE:	<i>Lloyd Bridgemohan</i>
3) Elongation sample is over 10" or 250mm.			
4) Shelf life has an effect on Cast value (decreases).			

รูปที่ ค.1 แสดงส่วนประกอบทางเคมีของลวดเชื่อม 4043 ที่ใช้ในการทดลอง

ค.2 ส่วนประกอบทางเคมีของลวดเชื่อม 5356 [21]

Indalco Alloys

A Division of Lincoln Electric Company of Canada LP
939 Gana Court, Mississauga, Ontario L5S 1N9 Canada

CERTIFICATE OF INSPECTION AND TEST RESULTS

3.1 Certificate (DIN EN 10204)

Customer:	Laemthong	Date:	December 20, 2014
Diameter:	1.2 mm MIG	P. O. No.:	N/A
Designation Indalco:	5356	Coil No.:	N/A
Designation Client:	5356	Lot No.:	32614

SPECIFICATION OF CHEMICAL COMPOSITION LIMITS (Weight percent %) :EN ISO 18273:2004										Unspecified Elements	
	Si	Fe	Cu	Mn	Cr	Zn	Ti	Mg		Each	Total
Max.	0.25	0.40	0.10	0.20	0.20	0.10	0.20	5.5		0.05	0.15
Min.				0.05	0.05		0.06	4.5			
Be ≤ 0.0003 Aluminum : Remainder											

RESULTS OF CHEMICAL ANALYSIS (Weight Percent %)											
	Si	Fe	Cu	Mn	Cr	Zn	Ti	Mg		Be	Al.
	0.05	0.10	0.006	0.13	0.12	0.006	0.09	4.88		.0002	Remainder


RESULTS OF MECHANICAL PROPERTIES, Temper "H18"							
Cast (mm/in)	23"	Helix (mm/in)	0.5"	UTS (Mpa/psi)	445Mpa	Elongation %	4.0%

The following tests have been performed on the above material:			
Smoke Test:	N/A	Feed Test:	N/A

CLASSIFICATIONS

EN ISO 18273	EN 573.3	AWS A5.10/A5.10M	Aluminum Association
S Al 5356	EN AW-5356	ER5356/R5356	5356

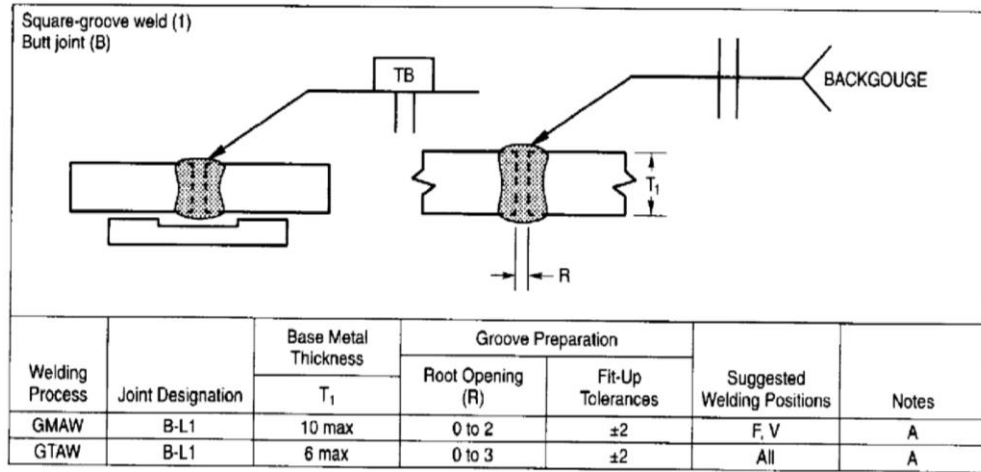
We hereby certify that the material described above has been tested and complies with the terms of the order and / or purchase specification.

NOTES: 1) Results listed as an average (Avg.) for UTS & ELONGATION for Aluminum Rod Shipments are calculated by adding the individual results of each coil and dividing by the number of coils being shipped. 2) Results listed for UTS & ELONGATION for Aluminum Wire Shipments are averages (Avg.). 3) Elongation sample is over 10" or 250mm. 4) Shelf life has an effect on Cast value (decreases).	NAME :	Lloyd Bridgemohan
	TITLE :	Quality Assurance Manager
	SIGNATURE:	

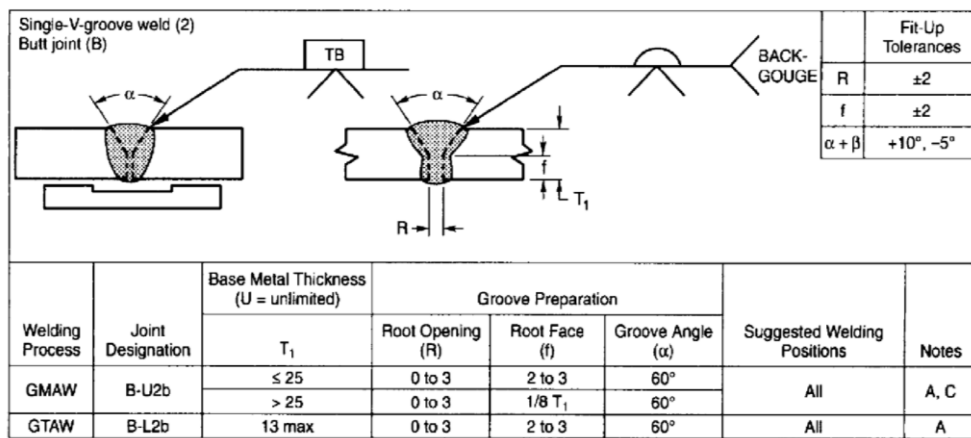
รูปที่ ค.2 แสดงส่วนประกอบทางเคมีของลวดเชื่อม 5356 ที่ใช้ในการทดลอง

ภาคผนวก ง
แสดงลักษณะรอยต่อชิ้นงาน

ง.1 แสดงลักษณะรอยต่อชิ้นงานขนาดบาง [4]



รูปที่ ง.1 ลักษณะรอยต่อชิ้นงานขนาดบาง [4] (ภาพขาว)

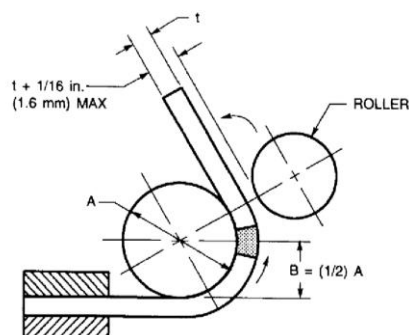


รูปที่ ง.2 แสดงลักษณะรอยต่อชิ้นงานขนาดหนา [4] (ภาพขาว)

ภาคผนวก จ

แสดงข้อมูลสำหรับการทดสอบการคัดงอ

จ.1 ข้อมูลสำหรับการทดสอบการดัดงอ [4]



รูปที่ จ.1 อุปกรณ์สำหรับการทดสอบการดัดงอ [4]

ตารางที่ จ.1 แสดงขนาดของ Roller

Thickness of Specimen (mm)	A, mm	B, mm	Materials ⁴
10 t	38 4t	19 2t	M21 and M22
3 T(<3)	52 16-1/2t	26 8-1/4t	M23 and F23 Welds
10 T	64 6-2/3t	32 3-1/3t	M25 and Annealed M23
10 t	75 8t	38 4t	M27 and Annealed M24

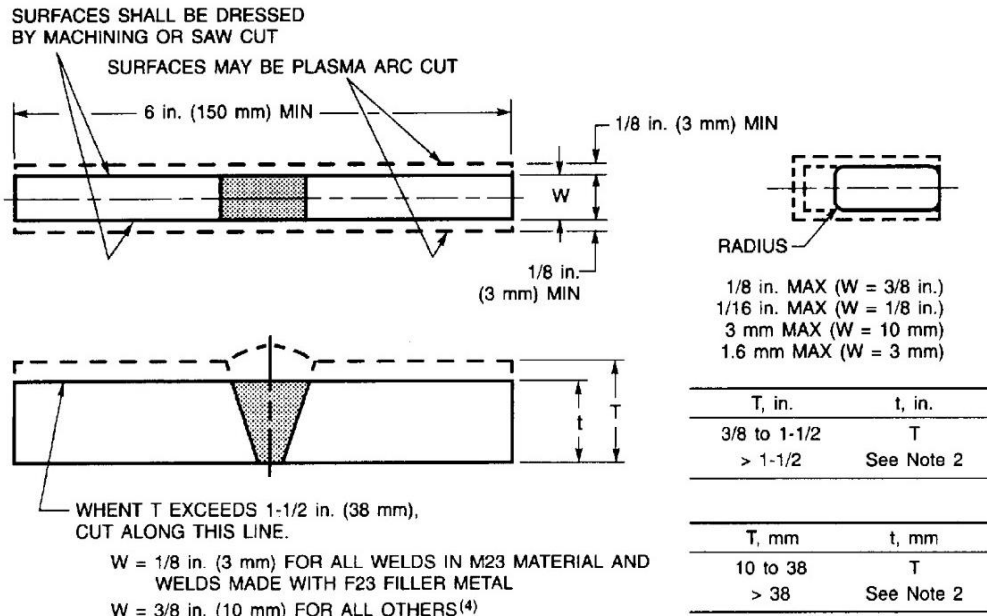
Notes:

1. Dimensions not shown are the option of the designer. The essential consideration is to have adequate rigidity so that the jig part will not spring
2. The specimen shall be firmly clamped on one end so that there is no sliding of the specimen during the bending operation
3. Test specimen shall be removed from the jig when the outer roll has been removed 180 degrees from the starting point.

ภาคผนวก จ

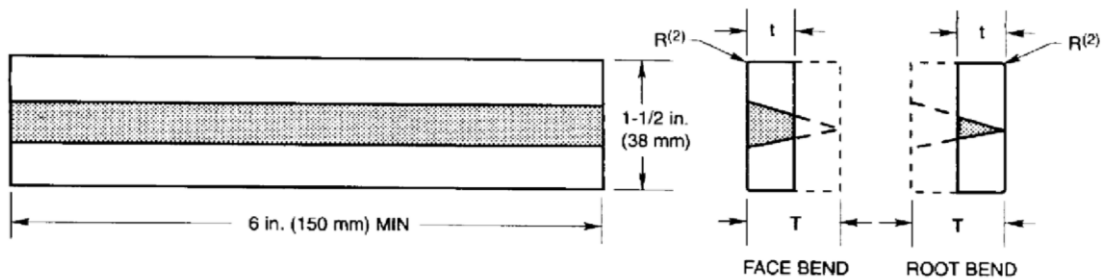
ชิ้นงานทดสอบการติดตั้ง ตามมาตรฐาน AWS D1.2

ฉ.1 ชิ้นงานทดสอบการดัดงอที่เชื่อมด้วยลวดเชื่อม 4043 [4]



Notes:

1. Saw cut along line indicated.
2. For plates over 1-1/2 in. (38 mm) thick, cut the specimen into approximately equal strips with T between 3/4 in. (19.0 mm) and 1-1/2 in. and test each strip.
3. May be bent full width (see requirements on jig width, 4.8.2.3).
4. If M23 materials are annealed before testing they shall be tested in this thickness category.



T, in.	t, in.	
	WELDS IN M23 MATERIAL AND WELDS MADE WITH F23 FILLER METAL	ALL OTHER MATERIALS ⁽³⁾
< 1/8	T	T
1/8 - 3/8	1/8	T
> 3/8	1/8	3/8

T, mm	t, mm	
	WELDS IN M23 MATERIAL AND WELDS MADE WITH F23 FILLER METAL	ALL OTHER MATERIALS ⁽³⁾
< 3	T	T
3 - 10	3	T
> 10	3	10

Notes:

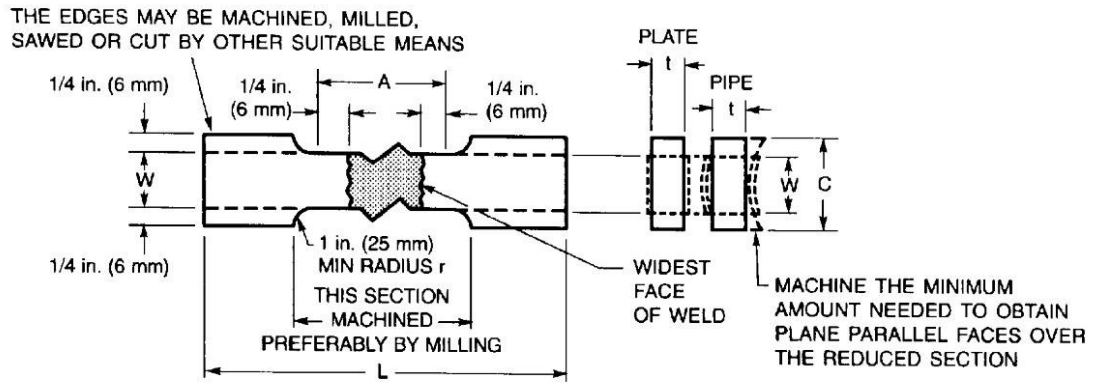
1. Weld reinforcements and backing strip or backing ring, if any, shall be removed essentially flush with the undisturbed surface of the base material. If a recessed strip is used, this surface of the specimen may be machined to a depth not exceeding the depth of the recess to remove the strip, except that in such cases the thickness of the finished specimen shall be that specified above.
2. R = 1/2 t max for t ≤ 1/4 in. (6 mm)
R = 1/8 in. (3 mm) max for t > 1/4 in. (6 mm)
3. If M23 materials are annealed before testing they shall be tested in this thickness category.

รูปที่ ฉ.1 ชิ้นงานทดสอบการดัดงอที่เชื่อมด้วยลวดเชื่อม 4043

ภาคผนวก ข

ชิ้นงานทดสอบความแข็งแรงดึง ตามมาตรฐาน AWS D1.2

ข.1 ชิ้นงานทดสอบความแข็งแรงดึง ตามมาตรฐาน AWS D1.2 [4]



	Dimensions (in.)		Test Pipe	
	Test Plate		3 in. or Smaller Diameter (Note 7)	Greater than 3 in. Diameter or Larger Job Size Pipe
	Thickness ≤ 1 in.	Thickness > 1 in.		
A—Length of reduced section	Widest face of weld + 1/2 in., 2-1/4 min		Widest face of weld + 1/2 in.	
L—Overall length, min (Note 2)	As required by testing equipment		As required by testing equipment	
W—Width of reduced section (Notes 3, 4)	1-1/2 in. ± 0.01	1 ± 0.01	1/2 ± 0.01	3/4 ± 0.01
C—Width of grip section, min (Notes 4, 5)	2	1-1/2	1 approx.	1-1/4 approx.
t—Specimen thickness (Notes 6, 7)	Thickness	Thickness/n (Note 7)	Maximum possible with plane parallel faces within length A	
r—Radius of fillet, min	1	1	1	1

	Dimensions (mm)		Test Pipe	
	Test Plate		75 mm or Smaller Diameter (Note 7)	Greater than 75 mm Diameter or Larger Job Size Pipe
	Thickness ≤ 25 mm	Thickness > 25 mm		
A—Length of reduced section	Widest face of weld + 13 mm, 58 min		Widest face of weld + 13 mm	
L—Overall length, min (Note 2)	As required by testing equipment		As required by testing equipment	
W—Width of reduced section (Notes 3, 4)	38 ± .25	38 ± .25	13 ± .25	19 ± .25
C—Width of grip section, min (Notes 4, 5)	51	38	25 approx.	32 approx.
t—Specimen thickness (Notes 6, 7)	Thickness	Thickness/n (Note 7)	Maximum possible with plane parallel faces within length A	
r—Radius of fillet, min	25	25	25	25

Notes:

1. It is desirable, if possible, to make the length of the grip section large enough to allow the specimen to extend into the grips a distance equal to two-thirds or more of the length of the grips.
2. The ends of the reduced section shall not differ in width by more than 0.004 in. (.102 mm). Also, there may be a gradual decrease in width from the ends to the center, but the width of either end shall not be more than 0.015 in. (.381 mm) larger than the width at the center.
3. Narrower widths (W and C) may be used when necessary. In such cases, the width of the reduced section should be as large as the width of the material being tested permits. If the width of the material is less than W, the sides may be parallel throughout the length of the specimen.
4. For standard plate-type specimens, the ends of the specimen shall be symmetrical with the center line of the reduced section within 0.25 in. (6 mm) except for referee testing, in which case the ends of the specimen shall be symmetrical with the center line of the reduced section within 0.10 in. (2.5 mm).
5. The dimension t is the thickness of the specimen as provided for in the applicable material specifications. The minimum nominal thickness of 1-1/2 in. (38 mm) wide specimens shall be 3/16 in. (5 mm) except as permitted by the product specification.
6. For plates over 1 in. (25 mm) thick, specimens may be cut into the minimum number (n) of approximately equal strips not exceeding 1 in. in thickness. Test each strip and each strip must meet the tensile requirements.
7. Refer to 4.7.1.2(2) for alternate test specimen.

รูปที่ ข.1 ชิ้นงานทดสอบความแข็งแรงดึง ตามมาตรฐาน AWS D1.2

ภาคผนวก ข
บทความวารสาร

Microstructure and Mechanical Properties of Welding repair of 5083 Aluminum alloy

Supachai Sukawet^{1,a}, Prapas Muangjunburee^{1, b*}

¹Department of Mining and Materials Engineering, Faculty of Engineering, Prince of Songkla University, Hatyai, Songkhla, 90112 Thailand

^ao_superman@hotmail.com, ^bmprapas@eng.psu.ac.th

Keywords GMAW, Al alloy, 5083, Repair

Abstract. The repair welding of aluminum alloy 5083 was studied using Gas Metal Arc welding (GMAW) process. The effect of heat cycles from welding was investigated in some details. Butt joints of 6 mm and 3 mm thick were welded with 5356 filler metal. Then weld was removed by grinding and repeatedly welded again for 2 times. After each repair weld, the weld was assessed by macrostructure, microstructure and mechanical tests. The results revealed porosities of all weld samples. The repair welds indicated lower tensile strength compared with the new welds. In addition, all tensile strengths were much lower than the base metal. All samples were fractured at the weld metal.

Introduction

In the present, aluminum alloys are extensively utilized in transportation industry, for example rolling stocks, car bodies and ship building. Aluminum alloy 5083 exhibits excellent mechanical and corrosion properties. It is a type of non-heat treatable aluminum alloys. Production and Maintenance using welding are extremely important [1]. However, when accidents or damages encounter to structural parts. Then, welding repair is necessary. If welding repair is incorrect, defect may occur in weld metal which lead to weaker in joint strength compared to the original weld.

This research focuses on repair welding of aluminum alloy 5083 by GMAW in order to study and compare the macro/microstructure and mechanical properties of Al5083 after repair welding.

Experimental

This research was designed for repair aluminum alloys 5083 by Gas Metal Arc Welding (GMAW) using filler 5356. Plates were prepared for butt joint. New weld (NW), 1st repair (R1) and 2nd repair (R2) were made, respectively. First, new welds were made. Then new weld has been removed by grinding and welded again for 1st repair. The 1st repair weld has been removed and welded again for 2nd repair. After each step, analyze of appearance, macrostructure, microstructure and mechanical properties was assessed.

Materials

In this work, 5083 and 5356 were used as base metal and filler. The base metal thickness was 3 and 6 mm. The filler diameter was 1.2 mm. Chemical composition are stated in Table 1. Mechanical properties are shown in Table 2.

TABLE 1
Chemical composition [3].

Type	Size (mm)	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Al
Al 5083	3, 6	0.40	0.40	0.10	0.4-1.0	4.0-4.9	0.05-0.25	0.25	0.15	Bal
Filler 5356		0.05	0.11	0.002	0.14	4.88	0.11	0.002	0.1	Bal

TABLE 2
Mechanical properties of 5083 Aluminum alloy.

Type	Tensile strength [MPa]	Yield strength [MPa]	Hardness [HV]
Al 5083	275 – 350	125 Min	96
Filler 5356	240 - 296	110 - 120	-

GMAW

Plates of 3 mm and 6 mm thickness were butt-joint welded in flat position as depicted in Fig.1. Welding was performed manually by a qualified welder. All welding parameters are shown in Table 3.

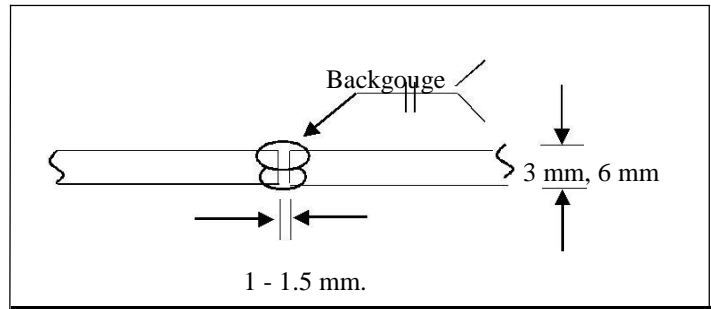


Fig. 1- Characteristics of joint (dimension in mm). [4]

TABLE 3
Parameters of welding

Size	Current (A)	Voltage(V)	Gas flow (l/min)	Humidity(%)	Speed (cm/min)
3 mm	85 - 92	18.0 -18.5	15 - 25	45 - 55	45 – 60
6 mm	140 - 160	21.0 - 22.0	15 - 25	45 - 55	45 - 60

Welding testing

Welding test was non-destructive testing (NDT) and destructive testing (DT). Non-destructive testing was visual test and destructive testing were tensile strength and bend test [2]. Position of tested samples is shown in Fig. 2 according to AWS - D1.2.

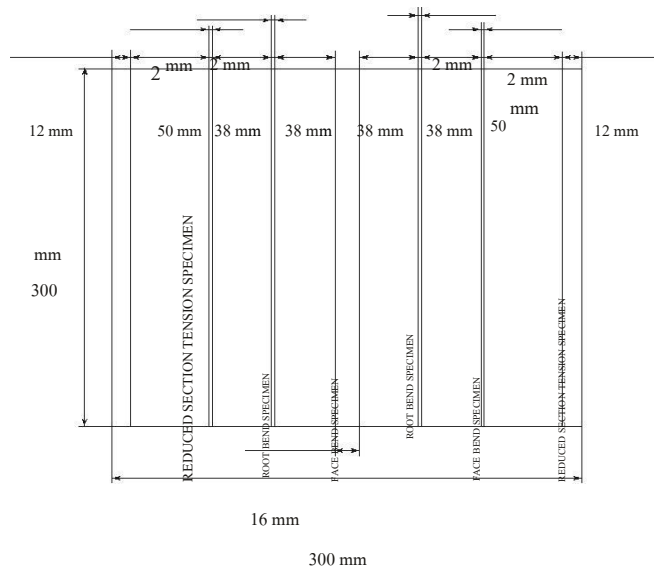


Fig. 2 – Specimens from welded plates [AWS - D1.2]

Results and discussion

Visual

Fig.3 shows physical appearance of front and back surfaces of the weld bead. It was found that the weld bead is continuous throughout the work piece for both sides. In addition, there is no undercut, overlap and crack.

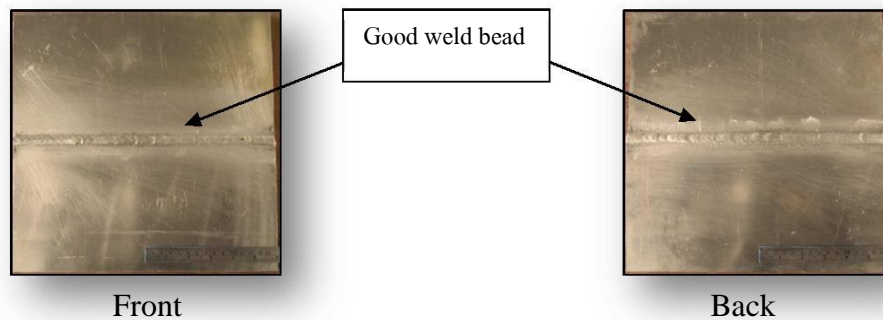
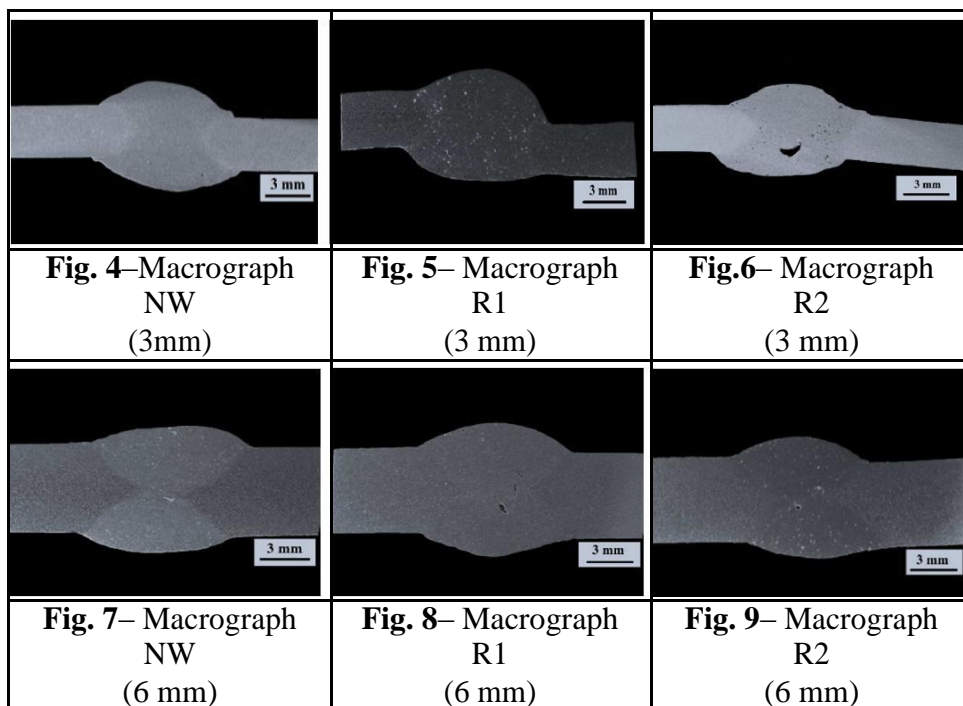


Fig.3–Appearance of weld metal

Macrostructure

Macrostructure of base metal and weld metal revealed a little different in color. It was found that the new weld revealed less porosity. However, for the 1st repair (R1) and 2nd repair (R2), porosities distributed throughout the weld metal as shown in Fig. 4-6 for 3 mm thickness and Fig. 7-9 for 6 mm thickness. In addition, big hole was also observed (Fig.6). Repeated of welding can cause increasing in such hydrogen due to less cleanliness.



Microstructure

Fig. 10 shows microstructure in different locations such as base metal, fusion line and weld metal of the new weld. Base metal indicated a much smaller grain size compared to the weld metal. The weld metal in Fig.(10c) revealed coarse grain with an average grain size of about 50 - 60 μm . Grains started to form from liquid and led to increasing area of solid and small amounts of liquid surrounding large islands of solid, then create grain boundary networks known as a *dendrite* [3,5,6].

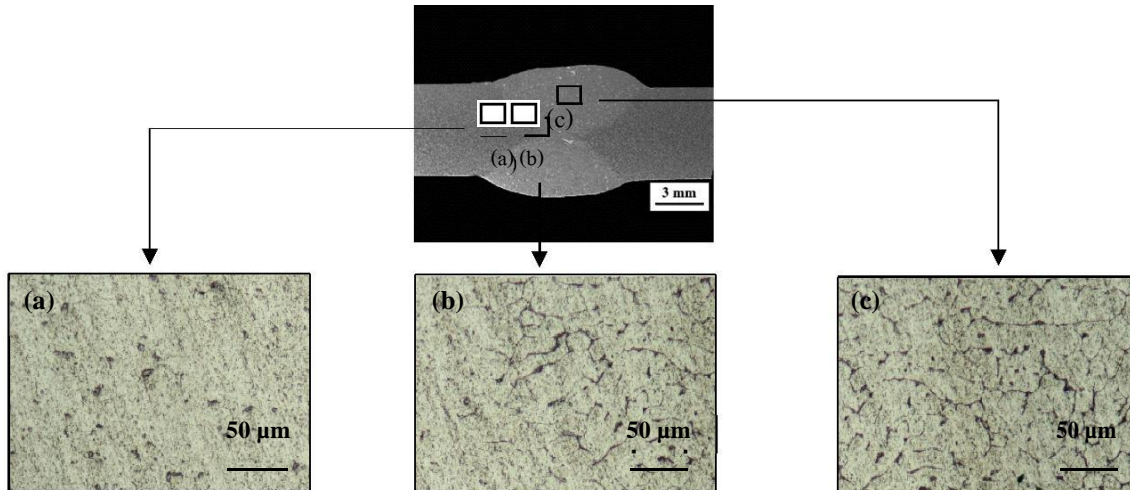


Fig. 10- Microstructure of base metal, fusion line and weld Metal

Tensile test

Results of tensile strength test are stated in Tab. 4 and 5. From tensile strength test, it appeared that all specimens had fractured in the weld metal (WM). Tensile strength decreased with increasing numbers of repair welding. The decrease in comparison of tensile strength of new weld, 1st repair, 2nd was obvious. From the result, tensile test of new weld, 1st repair, 2nd repair were 208, 185 and 178 MPa, respectively for 3 mm thickness and similar trend for 6 mm thickness. The decrease in tensile strength can be attributed to the porosities and weak in hardness in the weld metal.

TABLE 4
Tensile strength test results of 5083 (3 mm)

Specimen	Tensile strength [MPa]	Difference from of Base (%)	Rupture
NW	208	29.5	WM
R1	185	37	WM
R2	117	60	WM

TABLE 5
Tensile strength test results of 5083 (6 mm)

Specimen	Tensile strength [MPa]	Difference from of Base (%)	Rupture
NW	221	25	WM
R1	193	35	WM
R2	163	45	WM

*Tensile strength of base metal 295 MPa.

Hardness

Hardness profiles across the base metal, heat affected zone and weld metal of new weld, 1st repair, 2nd repair are illustrated in Fig. 11. The typical hardness profile was observed. The lowest hardness of all 3 conditions was located at the weld metals. The 2nd repair showed the lowest hardness, slightly lower than the 1st repair. In addition, the new weld revealed the highest hardness in the weld metal. The values of 2nd repair, 1st repair and new weld were 62 HV, 63 HV and 69 HV, respectively. The weak in weld metal's hardness were in conjunction with the fractured location in tensile test [1]. The reduction of hardness can be due to microstructural changes during the repeated heat cycles.

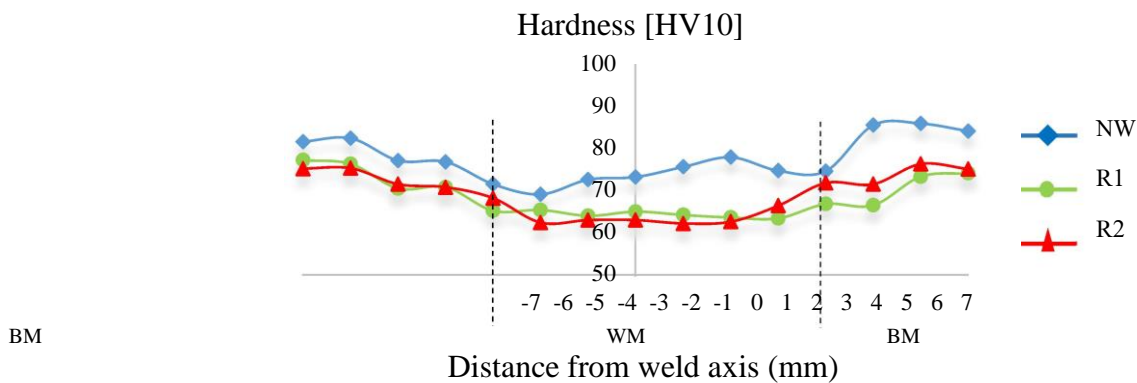


Fig. 11 – Hardness of WM and BM

Summary

The work can be summarized as follows.

1. The repeated heat cycles cause decrease in tensile and hardness of the weld metal.
2. The porosities tend to increase with a number of welding.
3. The 1st repair is possible, however 2nd repair is not recommended.

Acknowledgments

This work was supported by The office of the National Research Council of Thailand (NRCT) and National Science and technology Development Agency (NSTDA), and the Department of Mining and Materials Engineering, Prince of Songkla University.

Reference

- [1] S. Missori and, A. Sili., Mechanical behavior of 6082-T6 aluminium alloy welds. *Metallurgical Science and Technology*. 2000; 18(1): 12-18.
- [2] Ladislav Kolarik, Marie Kolarikova, Karel Kovanda, Petr Vondrous, Jiri Dunovsky., Influence of repair welding on weld quality of Al alloy EN AW 6082-T6. Brno, Czech Republic, EU, 23. – 25.5.2012.
- [3] Kalenda Mutombo and, Madeleine Du Toit., Mechanical Properties of 5083 Aluminum Welds After Manual and Automatic Pulsed Gas Metal Arc welding Using E5356 Filler., *Materials Science Forum Vols. 654-56* (2010). Pp 2560-2563.
- [4] AWS D15.1:2001 An American National Standard.
- [5] *Welding Handbook Seventh Edition, Volume 4.*
- [6] *Corrosion Fatigue Behaviour of Aluminium 5083-H111 Welded Using Gas Metal Arc Welding Method.*

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ สกุล	นายศุภชัย สุขเวช		
รหัสประจำตัวนักศึกษา	5610120075		
วุฒิการศึกษา			
	วุฒิ	ชื่อสถาบัน	ปีที่สำเร็จการศึกษา
	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมเครื่องกล)	มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์	2555

ทุนการศึกษา

ทุนจากสำนักงานวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ (สวทช)
ทุนอุดหนุนการวิจัยเพื่อวิทยานิพนธ์ปีงบประมาณ 2557

การตีพิมพ์เผยแพร่ผลงาน

Supachai Sukawet, Prapas Muangjunburee. “Microstructure and Mechanical Properties of
Welding repair of 5083 Aluminum alloy”, Key Engineering Materials, Vol
658 (2015), pp. 151-155.