



การเปรียบเทียบสมบัติเชิงกลและโครงสร้างมหภาคของแนวเชื่อมอะลูมิเนียมผสมหล่อกิ่งแข็ง  
SSM 356 กับ SSM 6061 โดยกรรมวิธีการเชื่อมทิกและการเชื่อมเสียดทานแบบกวน  
**Comparison of Mechanical and Macrostructural Behavior of TIG and Friction Stir  
Welded Dissimilar Aluminum Alloys SSM 356 and SSM 6061**

อามีณา เมฆารัฐ

Amina Mekharat

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการและระบบ  
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

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

2560

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์



การเปรียบเทียบสมบัติเชิงกลและโครงสร้างมหภาคของแนวเชื่อมอะลูมิเนียมผสมหล่อกิ่งแข็ง  
SSM 356 กับ SSM 6061 โดยกรรมวิธีการเชื่อมทิกและการเชื่อมเสียดทานแบบกวน  
**Comparison of Mechanical and Macrostructural Behavior of TIG and Friction Stir  
Welded Dissimilar Aluminum Alloys SSM 356 and SSM 6061**

อามีณา เมฆารัฐ

Amina Mekharat

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการและระบบ  
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

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

2560

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

ชื่อวิทยานิพนธ์	การเปรียบเทียบสมบัติเชิงกลและโครงสร้างมหภาคของแนวเชื่อมอะลูมิเนียมผสมหล่อกิ่งแข็ง SSM 356 กับ SSM 6061 โดยกรรมวิธีการเชื่อมทิกและการเชื่อมเสียดทานแบบกวน
ผู้เขียน	นางสาวอามีณา เมฆารัฐ
สาขาวิชา	วิศวกรรมอุตสาหการและระบบ

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	คณะกรรมการสอบ
..... (รองศาสตราจารย์ ดร.เสกสรร สุพรรณานนท์)	.....ประธานกรรมการ (รองศาสตราจารย์ สมชาย ชูโณม)
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม	.....กรรมการ (ดร.สมใจ จันทร์อุดม)
..... (ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ประภาศ เมืองจันทร์บุรี)	.....กรรมการ (รองศาสตราจารย์ ดร.เสกสรร สุพรรณานนท์)
	.....กรรมการ (ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ประภาศ เมืองจันทร์บุรี)
	.....กรรมการ (รองศาสตราจารย์ ดร.ศุภโชค วิริยโกศล)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตาม หลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการและระบบ

.....  
(รองศาสตราจารย์ ดร.ธีระพล ศรีชนะ)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

ขอรับรองว่า ผลงานวิจัยนี้มาจากการศึกษาวิจัยของนักศึกษาเอง และได้แสดงความขอบคุณบุคคลที่มี  
ส่วนช่วยเหลือแล้ว

ลงชื่อ.....

(รองศาสตราจารย์ ดร.เสกสรร สุธรรมานนท์)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

ลงชื่อ.....

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ประภาศ เมืองจันทร์บุรี)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

ลงชื่อ.....

(นางสาวอามีณา เมฆารัฐ)

นักศึกษา

ข้าพเจ้าขอรับรองว่า ผลงานวิจัยนี้ไม่เคยเป็นส่วนหนึ่งในการอนุมัติปริญญาในระดับใดมาก่อน และ  
ไม่ได้ถูกใช้ในการยื่นขออนุมัติปริญญาในขณะนี้

ลงชื่อ.....

(นางสาวอามีณา เมฆารัฐ)

นักศึกษา

ชื่อวิทยานิพนธ์	การเปรียบเทียบสมบัติเชิงกลและโครงสร้างมหภาคของแนวเชื่อมอะลูมิเนียมผสมหล่อกิ่งแข็ง SSM 356 กับ SSM 6061 โดยกรรมวิธีการเชื่อมทิกและการเชื่อมเสียดทานแบบกวน
ผู้เขียน	นางสาวอามีณา เมฆารัฐ
สาขา	วิศวกรรมอุตสาหการและระบบ
ปีการศึกษา	2559

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาและเปรียบเทียบสมบัติเชิงกล รวมไปถึงโครงสร้างมหภาคของรอยเชื่อมต่อระหว่างอะลูมิเนียมผสมหล่อกิ่งแข็งต่างชนิดกัน คือ SSM 356 และ SSM 6061 ในสภาพที่ไม่ได้ผ่านกระบวนการทางความร้อน T6 และผ่านกระบวนการทางความร้อน T6 (as-cast และ T6) ด้วยกระบวนการเชื่อมที่แตกต่างกันระหว่างการเชื่อมเสียดทานแบบกวน การเชื่อมทิกแบบเต็มลวดและการเชื่อมทิกแบบไม่เต็มลวด เป็นการเชื่อมต่อชนชิ้นงานที่มีความหนา 4 มิลลิเมตร ในการวิจัยชิ้นงานที่ไม่ได้ผ่านกระบวนการทางความร้อน T6 นั้น เป็นการวิจัยชิ้นต้นพบว่า กระบวนการเชื่อมทิก แบบเต็มลวด การเชื่อมทิกแบบไม่เต็มลวด และการเชื่อมเสียดทานแบบกวน สามารถเชื่อมอะลูมิเนียมผสมหล่อกิ่งแข็งต่างชนิดกันได้ และจากผลการวิจัยชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการทางความร้อน T6 พบว่าทุกกระบวนการเชื่อมสามารถเชื่อมชิ้นงานได้ กระบวนการเชื่อมที่แตกต่างกันมีผลต่อค่าความแข็งแรงดึง ซึ่งกระบวนการเชื่อมเสียดทานแบบกวนมีค่าความแข็งแรงดึงเฉลี่ยสูงสุด คือ 168.3 MPa ค่าความแข็งแรงของทุกกระบวนการเชื่อมที่บริเวณตรงกลางแนวเชื่อมจะมีค่าความแข็งแรงสูงสุดและค่าความแข็งแรงค่อยๆ ลดลงต่ำสุดจนถึงบริเวณที่ได้รับผลกระทบทางความร้อน จากนั้นค่าความแข็งแรงจะเพิ่มขึ้นจนถึงบริเวณของเนื้อโลหะเดิม โดยกระบวนการเชื่อมเสียดทานแบบกวนมีค่าความแข็งแรงเฉลี่ยบริเวณตรงกลางแนวเชื่อมสูงสุด คือ 74.1 HV

<b>Thesis Title</b>	Comparison of mechanical and macrostructural behavior of TIG and friction stir welded dissimilar aluminum alloys SSM 356 and SSM 6061
<b>Author</b>	Miss Amina Mekharat
<b>Major Program</b>	Industrial and Systems Engineering
<b>Academic Year</b>	2016

### **ABSTRACT**

The objective of this research was to investigate the mechanical properties and macrostructural analysis of dissimilar aluminum alloys, SSM 356 and SSM 6061 (as-cast and T6) by using different processes: TIG (with filler), TIG (without filler) and Friction stir welding. Aluminum alloys of 4 mm. thickness was used as the base material as for preparing a butt joint welded. The preliminary results of aluminum alloys as cast condition showed that TIG (with filler), TIG (without filler) and Friction stir welding were making a good welded joint of dissimilar aluminum alloys. The result of aluminum alloys by heat treatment (T6) condition showed that different welding process could make dissimilar aluminum alloy joints. The ultimate tensile strength of dissimilar joint by FSW were 168.3 MPa superior to TIG (with filler) and TIG (without filler) welding. The hardness in the weld zone was higher than other areas and would be reduced until it reached the heat affected zone area. After that it would increase up to the base metal area. The average hardness of FSW at the weld zone was at the maximum of 74.1 HV.

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยความรู้ความช่วยเหลือและแนะนำอย่างดียิ่งจากอาจารย์ที่ปรึกษาหลัก รองศาสตราจารย์ ดร.เสกสรร สุพรรณานนท์ และอาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ประภาศ เมืองจันทร์บุรี รวมทั้งบัณฑิตศึกษา คณาจารย์และบุคลากรทุกท่าน ในคณะวิศวกรรมศาสตร์ ตลอดจนบุคคลหลายท่านที่ไม่อาจนำมากล่าวได้ทั้งหมด

ขอขอบคุณคณะกรรมการสอบผลการดำเนินงานความก้าวหน้าวิทยานิพนธ์ ที่กรุณาตรวจสอบ ให้ข้อเสนอแนะและคำแนะนำ ทำให้บรรลุวัตถุประสงค์และเพิ่มความสมบูรณ์ให้วิทยานิพนธ์เล่มนี้มากยิ่งขึ้น

ขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรมและภาควิชาวิศวกรรมเหมืองแร่และวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ที่สนับสนุนด้านเงินทุน เครื่องมือและอุปกรณ์การวิจัย และสาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย อีกทั้งคณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏสงขลา ที่ให้การสนับสนุนเครื่องมือและอุปกรณ์ในการดำเนินงานวิจัย

ขอขอบคุณทีมงานและผู้ร่วมทำการวิจัยที่ทำให้งานวิจัยและวิทยานิพนธ์เล่มนี้มีความสมบูรณ์และสำเร็จลุล่วงทุกประการ

ขอขอบคุณบัณฑิตวิทยาลัยและคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ที่ให้งบประมาณอุดหนุนในการดำเนินงานวิจัยเพื่อวิทยานิพนธ์

ประโยชน์ประการใดที่เกิดจากงานวิจัยนี้ย่อมเป็นผลจากความกรุณาของทุกท่านที่ให้ความช่วยเหลือจนงานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี

อามีณา เมฆารัฐ



## สารบัญ

	หน้า
สารบัญ	(8)
รายการตาราง	(12)
รายการภาพประกอบ	(13)
<b>บทที่</b>	
<b>1 บทนำ</b>	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา	1
1.2 การตรวจเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	3
1.3 วัตถุประสงค์	14
1.4 ขอบเขตของการวิจัย	14
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	15
<b>2 ทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้อง</b>	16
2.1 อะลูมิเนียม	16
2.1.1 ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับอะลูมิเนียมผสม	16
2.1.2 ประเภทของอะลูมิเนียมผสม	16
2.1.3 กรรมวิธีทางความร้อนของอะลูมิเนียม	17
2.2 อะลูมิเนียมผสม	18
2.2.1 อะลูมิเนียมหล่อผสม A356 (Aluminium Casting Alloys A356)	19
2.2.2 อะลูมิเนียมหล่อผสม A6061 (Aluminium Casting Alloys A6061)	20
2.3 การหล่อโลหะแบบกึ่งของแข็ง (Semi-Solid Metal Casting)	21
2.4 เทคโนโลยีการหล่อโลหะกรรมวิธีรีโอบาคาสติงด้วยกระบวนการ GISS	22
2.5 ความสามารถในการเชื่อมอะลูมิเนียมและอะลูมิเนียมผสม	23
2.6 กระบวนการเชื่อมทิก	26
2.7 กระบวนการเชื่อมเสียดทานแบบกวน	31
2.8 การวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance : ANOVA)	34

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.8.1 การคำนวณค่าเพื่อวิเคราะห์ความแปรปรวนของการทดลองแบบจำแนกทางเดียว	35
2.8.2 การเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยระหว่างกลุ่มทดลองและการเปรียบเทียบพหุนาม	39
<b>3 วิธีการดำเนินงานวิจัย</b>	<b>41</b>
3.1 วัสดุที่ใช้ในการดำเนินงานวิจัย	41
3.1.1 อะลูมิเนียมผสม	41
3.1.2 ลวดเชื่อม (Electrode)	42
3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย	42
3.2.1 อุปกรณ์ในการเชื่อมทิก	42
3.2.2 เครื่องกัดแนวตั้ง	43
3.2.3 เครื่องกลึง	44
3.2.4 เครื่องเลื่อยสายพานแนวนอน	44
3.2.5 เครื่องเลื่อยสายพานแนวตั้ง	45
3.2.6 อุปกรณ์จับยึด	45
3.2.7 เครื่องมือกวน	46
3.2.8 เครื่องขัดชิ้นงาน	46
3.2.9 กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง	47
3.2.10 เครื่องทดสอบความแข็งแรงดึง	48
3.2.11 เครื่องทดสอบความแข็ง	48
3.2.12 เครื่องมือและอุปกรณ์อื่น ๆ	49
3.3 การดำเนินงานวิจัย	49
3.4 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย	51
3.4.1 การเตรียมชิ้นงานทดสอบ	51
3.4.2 กระบวนการเชื่อม	53
3.4.3 การตรวจสอบโครงสร้างมหภาค	56
3.4.4 การตรวจสอบค่าความแข็ง	58

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.4.5 การตรวจสอบค่าความแข็งแรงดึง	59
3.4.6 การวิเคราะห์ข้อมูลค่าความแข็งแรงดึงด้วยวิธีทางสถิติ	60
<b>4 ผลและการวิเคราะห์ผลการวิจัย</b>	<b>63</b>
4.1 การตรวจสอบลักษณะทางกายภาพของแนวเชื่อม	63
4.1.1 ลักษณะทางกายภาพของแนวเชื่อมเสียดทานแบบกวน	64
4.1.2 ลักษณะทางกายภาพของแนวเชื่อมทิกแบบเต็มลวด	66
4.1.3 ลักษณะทางกายภาพของแนวเชื่อมทิกแบบไม่เต็มลวด	67
4.2 ลักษณะโครงสร้างทางมหภาคของแนวเชื่อม	68
4.2.1 ลักษณะโครงสร้างทางมหภาคของแนวเชื่อมเสียดทานแบบกวน	68
4.2.2 ลักษณะโครงสร้างทางมหภาคของแนวเชื่อมทิกแบบเต็มลวด	69
4.2.3 ลักษณะโครงสร้างทางมหภาคของแนวเชื่อมทิกแบบเต็มลวด	71
4.3 การทดสอบความแข็งของแนวเชื่อม	72
4.4 การทดสอบความแข็งแรงดึงของแนวเชื่อม	75
4.5 การวิเคราะห์ค่าความแข็งแรงดึงด้วยวิธีการทางสถิติ	80
4.5.1 การวิเคราะห์ความถูกต้องของตัวแบบ	80
4.5.2 การวิเคราะห์ ANOVA	82
4.5.3 การทดสอบสมมติฐานของการทดลอง	83
4.5.4 การเปรียบเทียบพหุคูณด้วยวิธี Turkey	84
<b>5 บทสรุป</b>	<b>89</b>
5.1 สรุปผล	89
5.2 ข้อเสนอแนะ	90
<b>บรรณานุกรม</b>	<b>92</b>
<b>ภาคผนวก</b>	
ภาคผนวก ก. ข้อกำหนดชิ้นงานทดสอบความแข็งแรงดึง	96

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
ภาคผนวก ข ค่าความแข็ง	98
ภาคผนวก ค ค่าความแข็งแรงดึง	105
ประวัติผู้เขียน	110

## รายการตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1	15
2.1	19
2.2	19
2.3	20
2.4	20
2.5	28
2.6	29
2.7	36
2.8	37
3.1	42
3.2	42
3.3	54
3.4	61
4.1	83
4.2	85
4.3	86
4.4	87

## รายการภาพประกอบ

ภาพประกอบที่	หน้า
1.1 ผลการทดสอบความแข็ง	4
1.2 ปัจจัยการเชื่อมเสียดทานแบบกวน	5
1.3 ค่าความแข็งของแนวเชื่อมความเร็วหมุนเชื่อม	7
1.4 แนวเชื่อมส่วนเบาะนั่งสำหรับผู้โดยสาร	8
1.5 บริเวณที่เกิดการแตกจากการทดสอบความแข็งแรงดึง	9
1.6 โครงสร้างจุลภาคบริเวณแนวเชื่อม	10
1.7 รอยเชื่อมเสียดทานแบบกวน	11
1.8 รอยเชื่อมทิก	11
1.9 โครงสร้างจุลภาคบริเวณเนื้อเชื่อม	12
1.10 โครงสร้างจุลภาคของแนวเชื่อมที่ความร้อนในการเชื่อมต่างกัน	13
1.11 ค่าความแข็งของแนวเชื่อม	14
2.1 แผนภาพสมดุลสองธาตุอะลูมิเนียม – แมกนีเซียมซิลิไซด์	18
2.2 โครงสร้างเกรน	21
2.3 เส้นทางวิวัฒนาการการเติบโตของอนุภาคของแข็ง	22
2.4 หลักการทำงานของกระบวนการ GISS	23
2.5 ค่าความแข็งที่กระจายอยู่บนแนวเชื่อมอะลูมิเนียมผสม 6061-T4	25
2.6 การเชื่อมทิก	26
2.7 ช่วงของกระแสไฟฟ้าในการเชื่อมทิกสำหรับความหนาต่างๆ	30
2.8 หลักการเชื่อมเสียดทานแบบกวน	32
2.9 ทิศทางและการกวนของตัวกวน	32
2.10 การเชื่อมเสียดทานแบบกวน (FSW)	33
3.1 อะลูมิเนียมหล่อผสมด้วยกระบวนการหล่อแบบกึ่งของแข็ง	44
3.2 อุปกรณ์ในการเชื่อมทิก	46
3.3 เครื่องกัดแนวตั้ง	46
3.4 เครื่องกลึง	47

## รายการภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพประกอบที่	หน้า
3.5 เครื่องเลื่อยสายพานแนวนอน	47
3.6 เครื่องเลื่อยสายพานแนวตั้ง	48
3.7 ลักษณะของอุปกรณ์จับยึด (Step clamp)	48
3.8 ลักษณะของฟิกซ์เจอร์ (Fixture)	49
3.9 ลักษณะของเครื่องมือกวน	49
3.10 เครื่องขัดชิ้นงาน	50
3.11 กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง	50
3.12 เครื่องทดสอบแรงดึง	51
3.13 เครื่องทดสอบความแข็ง	52
3.14 แผนผังแสดงขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย	53
3.15 กระบวนการทางความร้อน T6	55
3.16 การตัดชิ้นงานทดสอบด้วยเครื่องเลื่อยสายพาน	56
3.17 ชิ้นงานทดสอบที่ผ่านการกัด	56
3.18 ขั้นตอนกระบวนการเชื่อมเสียดทานแบบกวน	58
3.19 ขั้นตอนกระบวนการเชื่อมทิก	58
3.20 การแบ่งชิ้นงานทดสอบทางโลหะวิทยาและทางกล	59
3.21 การหล่อเคลือบชิ้นงานด้วยเรซิน	59
3.22 การขัดชิ้นงานด้วยกระดาษทราย	60
3.23 การขัดชิ้นงานด้วยผงอะลูมินา	61
3.24 ชิ้นงานขณะทดสอบความแข็ง	62
3.25 ขนาดมาตรฐาน ASTM E8 ของชิ้นทดสอบ	62
3.26 ชิ้นงานขณะทดสอบความแข็งแรงดึง	63
4.1 ลักษณะทางกายภาพของแนวเชื่อมเสียดทานแบบกวน	65
4.2 ลักษณะทางกายภาพของแนวเชื่อมทิกแบบเต็มลวด	66
4.3 ลักษณะทางกายภาพของแนวเชื่อมทิกแบบไม่เต็มลวด	67

## รายการภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพประกอบที่	หน้า
4.4	โครงสร้างมหภาคของแนวเชื่อมเสียดทานแบบกวน 69
4.5	โครงสร้างมหภาคของแนวเชื่อมทิกแบบเต็มลวด 70
4.6	โครงสร้างมหภาคของแนวเชื่อมทิกแบบไม่เต็มลวด 71
4.7	ค่าความแข็งแนวเชื่อมระหว่างอะลูมิเนียมผสมหล่อกิ่งแข็ง SSM 356 และ SSM 6061 73
4.8	ค่าความแข็งแนวเชื่อม 75
4.9	ค่าความแข็งแรงดึงของโลหะพื้นฐานและแนวเชื่อมในทุกกระบวนการเชื่อม 77
4.10	บริเวณที่เกิดการแตกจากการทดสอบแรงดึงของชิ้นงานทดสอบที่ไม่ได้ผ่านกระบวนการทางความร้อน T6 78
4.11	บริเวณที่เกิดการแตกจากการทดสอบแรงดึงของชิ้นงานทดสอบที่ผ่านกระบวนการ 79
4.12	กราฟการวิเคราะห์ความถูกต้องของตัวแบบการทดลอง 81
4.13	กราฟ probability plot 82



## บทที่ 1

### บทนำ

#### 1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา

ปัจจุบันอะลูมิเนียมหล่อผสมเป็นที่นิยมใช้อย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมต่าง ๆ เช่น อุตสาหกรรมยานยนต์ อุตสาหกรรมอากาศยาน อุตสาหกรรมผลิตชิ้นส่วนเครื่องจักรและอื่น ๆ (Kasman 2013 และ Rajakumar et al. 2010) เนื่องจากอะลูมิเนียมผสมมีข้อดีหลายประการ เช่น ความหนาแน่นต่ำ มีความแข็งแรงสูง ง่ายต่อการขึ้นรูป มีความต้านทานการกัดกร่อนดี มีน้ำหนักเบา และมีอัตราส่วนของความแข็งแรงต่อน้ำหนักดีกว่าเหล็กกล้าชนิดความแข็งแรงสูง (High strength steels) อีกทั้งยังสามารถนำไปประยุกต์ในกระบวนการผลิตได้หลากหลาย

เทคโนโลยีการหล่อโลหะกึ่งของแข็ง (Semi-Solid Metal หรือ SSM) เป็นเทคโนโลยีที่มีศักยภาพในการหล่ออะลูมิเนียมแบบไดคาสติ้ง (Die Casting) ซึ่งปัจจุบันมีการใช้เทคโนโลยีการหล่อโลหะกึ่งของแข็งกันทั่วโลก สำหรับประเทศไทยได้มีการวิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีการหล่อโลหะกึ่งของแข็งเช่นกัน ทั้งนี้เพื่อที่จะนำมาประยุกต์ใช้กับอุตสาหกรรมภายในประเทศ โดยเทคโนโลยีที่ได้รับความสนใจและกำลังพัฒนาในขณะนี้ คือ กระบวนการหล่อโลหะกึ่งของแข็งด้วยเทคนิค GISS (Gas Induced Semi-Solid) (เจษฎา วรรณสินธุ์ 2556) เป็นกระบวนการหล่อที่สร้างโลหะกึ่งของแข็งด้วยกรรมวิธีการพ่นฟองแก๊สเฉื่อยผ่านแท่งกราไฟต์พอร์น (แก๊สอาร์กอนหรือไนโตรเจน) เป็นกรรมวิธีการหล่อที่มีเทคนิคและวิธีการคล้ายกับกรรมวิธีการหล่อแบบ Rheocasting ที่มีโครงสร้างของเกรนเป็นแบบก้อนกลม (Spheroidal grain) มีข้อดีคือ โครงสร้างของเกรนมีการกระจายตัวสม่ำเสมอและมีค่ากำลังคราก (Yield strength) เพิ่มขึ้น สมบัติโดยทั่วไปของการหล่อโลหะกึ่งของแข็งมีหลายประการ เช่น มีอุณหภูมิที่ต่ำกว่าจุดหลอมเหลวของโลหะนั้น โลหะเริ่มแข็งตัวบางส่วนแล้วขณะที่แม่พิมพ์มีความหนืดที่สูงกว่าน้ำโลหะ มีความข้นหนืดต่ำกว่าโลหะที่แข็งตัวแล้ว เป็นต้น ซึ่งสมบัติดังกล่าวมีข้อดีหลายประการที่สามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้ อย่างหลากหลายในกระบวนการผลิต เช่น ลดการเกิดของเสียจากปฏิกิริยาระหว่างออกซิเจนในขั้นตอนการหล่อโลหะลงในเบ้าและลดการเกิดโพรงหดตัว (Shrinkage) อีกทั้งยังช่วยยืดอายุการใช้งานของแม่พิมพ์เพื่อที่จะนำมาประยุกต์ใช้กับงานอุตสาหกรรมภายในประเทศ โดยเฉพาะที่

เกี่ยวข้องกับ การขึ้นรูป (Materials forming) และการประกอบชิ้นส่วน เช่น การเชื่อมต่อดั้วถังรถยนต์ การเชื่อมซ่อมล้อแม็ก การเชื่อมต่อของชิ้นส่วนเครื่องบินหรือถังเชื้อเพลิงของจรวด และการเชื่อมตัวถังของรถไฟความเร็วสูง ซึ่งชิ้นส่วนดังกล่าวจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องมีการเชื่อมประกอบชิ้นส่วนและการซ่อมแซม (Repairing) เข้ามาเกี่ยวข้องอย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้ อีกทั้งการเชื่อมก็มีบทบาทสำคัญต่อกระบวนการผลิตในด้านการประกอบชิ้นส่วนของผลิตภัณฑ์ ดังนั้นจึงต้องมีการพัฒนาเทคโนโลยีการเชื่อมเข้ามาใช้ในงานอุตสาหกรรมให้เหมาะสมกับสภาพของงาน อีกทั้งกระบวนการเชื่อมก็มีข้อจำกัดที่จะส่งผลกระทบต่อในด้านต่าง ๆ ทั้งในขณะที่เชื่อมและภายหลังการเชื่อม โดยเฉพาะชิ้นส่วนที่ทำจากอะลูมิเนียมซึ่งมีหลายประเภทในการนำไปใช้งาน อีกทั้งกระบวนการเชื่อมก็มีอยู่หลายวิธี ดังนั้นในการเลือกกระบวนการเชื่อมมาใช้จะขึ้นอยู่กับความเหมาะสมของประเภทวัสดุและกระบวนการผลิตในงานอุตสาหกรรมนั้น ๆ

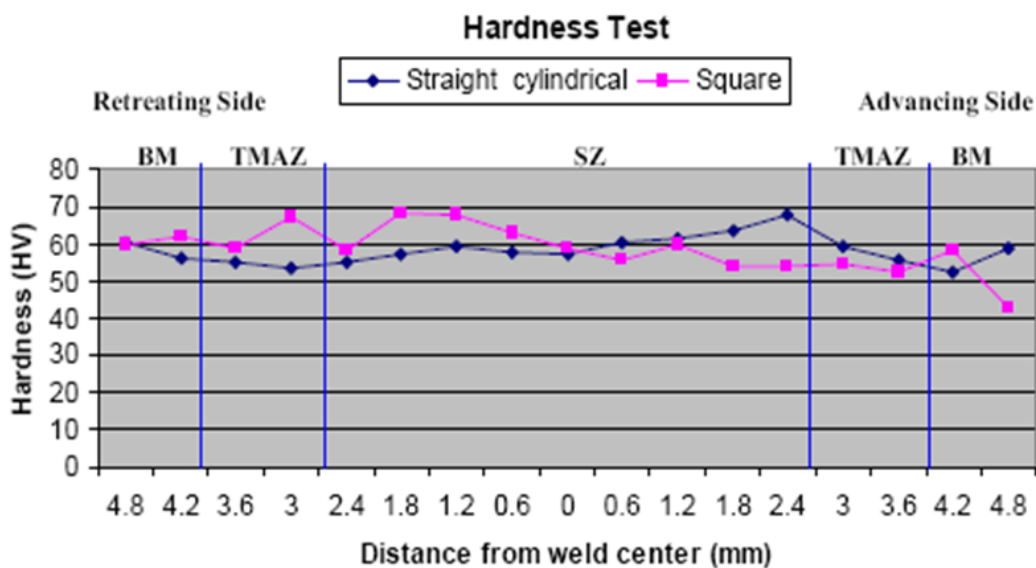
การเชื่อมอะลูมิเนียมผสมต่างชนิดกัน (Dissimilar joint) ได้มีการประยุกต์ใช้ในงานอุตสาหกรรมต่าง ๆ กันอย่างแพร่หลาย โดยการเชื่อมอะลูมิเนียมผสมต่างชนิดสามารถนำข้อดีของอะลูมิเนียมแต่ละชนิดมาใช้งานได้อย่างกว้างขวางและมีประสิทธิภาพมากขึ้น แต่อย่างไรก็ตามการเชื่อมอะลูมิเนียมผสมต่างชนิดกันยังมีความยุ่งยากอยู่เนื่องจากอะลูมิเนียมผสมแต่ละชนิดมีสมบัติทางเคมี ทางกายภาพและสมบัติทางกลที่แตกต่างกัน ซึ่งปัจจุบันการเชื่อมต่อชิ้นส่วนอะลูมิเนียมหล่อต่างชนิดกัน กำลังมีบทบาทในอุตสาหกรรม เช่น อุตสาหกรรมอากาศยาน อุตสาหกรรมยานยนต์ และอุตสาหกรรมซีพีนาวูธ เป็นต้น

สำหรับการเชื่อมอะลูมิเนียมผสมหล่อแข็ง ปัญหาที่มักพบบ่อยครั้งเมื่อเชื่อมด้วยวิธีการหลอมละลาย คือ การรักษาสมบัติทางกลของบริเวณแนวเชื่อม (Mechanical Properties of Joint) ให้ใกล้เคียงกับเนื้อโลหะเดิมให้มากที่สุด เนื่องจากการเชื่อมแบบหลอมละลายนั้นจะทำให้เกิดรูพรุนบริเวณแนวเชื่อมและทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางโลหะวิทยาที่ส่งผลต่อบริเวณแนวเชื่อมและบริเวณอิทธิพลความร้อน (Heat Affected Zone : HAZ) การเชื่อมแบบหลอมละลายที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายวิธีหนึ่ง คือ การเชื่อมทิก (Tungsten Inert Gas : TIG) เป็นการเชื่อมแบบหลอมละลายที่ใช้แก๊สเฉื่อยปกคลุมบริเวณแนวเชื่อม ส่งผลให้รอยเชื่อมที่ได้มีคุณภาพสูง อีกทั้งสามารถเชื่อมได้ในทุกตำแหน่งของการเชื่อม สำหรับกระบวนการเชื่อมวัสดุต่างชนิดที่ยากต่อการเชื่อมแบบหลอมละลาย นิยมใช้กระบวนการเชื่อมเสียดทานแบบกวน เนื่องจากการเชื่อมในภาวะของแข็ง (Solid state welding) ดังนั้นแนวเชื่อมที่ได้จะมีลักษณะของเกรนที่เล็กละเอียด สามารถรับแรงได้สูง อีกทั้งยังสามารถควบคุมความร้อนในบริเวณแนวเชื่อมได้อีกด้วย (Mishra และ Ma 2005)

จากข้อมูลที่กล่าวมาเบื้องต้นจะเห็นได้ว่าการเชื่อมทิกและการเชื่อมเสียดทานแบบกวนเป็น 2 กรรมวิธีที่ใช้เชื่อมอะลูมิเนียมผสม อย่างไรก็ตามการเชื่อมระหว่างอะลูมิเนียมผสมที่ได้จากกระบวนการหล่อแบบกึ่งของแข็ง SSM 356 กับ SSM 6061 นั้น เป็นเทคโนโลยีที่ใหม่และยังไม่มีข้อมูลเกี่ยวกับการเปรียบเทียบสมบัติเชิงกลของบริเวณแนวเชื่อมในการเชื่อมด้วยวิธีที่แตกต่างกัน ด้วยเหตุผลดังกล่าวจึงเป็นที่มาของงานวิจัยนี้ โดยจะศึกษาและเปรียบเทียบสมบัติเชิงกล รวมไปถึงโครงสร้างมห-ภาคของรอยเชื่อมระหว่างอะลูมิเนียมผสมหล่อกึ่งแข็ง SSM 356 กับ SSM 6061 เป็นการเปรียบเทียบวิธีการเชื่อมที่แตกต่างกัน 2 วิธี คือ การเชื่อมทิกและการเชื่อมเสียดทานแบบกวน รวมถึงนำผลที่ได้มาปรับปรุงเพื่อเลือกใช้กรรมวิธีการเชื่อมที่เหมาะสมทั้งในแง่ของงานวิจัยและงานอุตสาหกรรมของประเทศต่อไป

## 1.2 การตรวจเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ประกาศ เมืองจันท์บุรี และ ศิริกุล วิสุทธิ์เมธางกูร (2553) ศึกษาความเร็วของการเชื่อมและรูปแบบของหัวพินที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางโลหะวิทยาและสมบัติทางกลในการเชื่อมอะลูมิเนียมผสม A356 ซึ่งหล่อโดยเทคโนโลยีการหล่อกึ่งของแข็งด้วยกรรมวิธีการเชื่อมเสียดทานแบบกวน พบว่าหัวพินแบบทรงกระบอกและแบบสี่เหลี่ยมจะให้ลักษณะโครงสร้างทางจุลภาคของบริเวณรอยเชื่อมที่ละเอียดมาก คือ โครงสร้างที่ผสมกันระหว่างเฟส  $\alpha$  กับ Eutectic รวมถึงค่าความแข็งมีค่าที่ใกล้เคียงกันโดยที่บริเวณเนื้อเชื่อมจะมีค่าสูงกว่าบริเวณเนื้อโลหะเดิมดังแสดงในรูปที่ 1.1 โดยหัวพินแบบทรงกระบอกจะให้ค่าความแข็งบริเวณเนื้อเชื่อมมากกว่าหัวพินแบบสี่เหลี่ยม



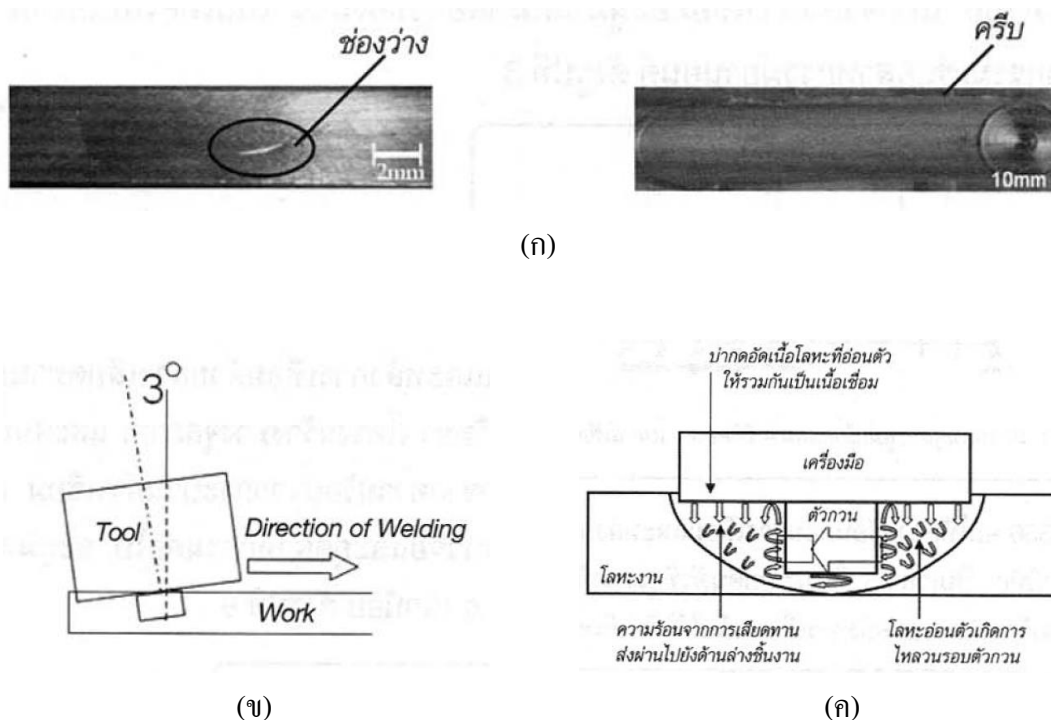
1

รูปที่ 1.1 ผลการทดสอบความแข็ง

ที่มา : ปรากฏ เมืองจันทร์บุรี และ ศิริกุล วิสุทธ์เมธานุกร (2553)

อับดุล บินระหีม (2553) พบว่าการเชื่อมเสียดทานแบบกวนเหมาะสำหรับการเชื่อม อะลูมิเนียมหล่อผสมและอะลูมิเนียมผสมหล่อกิ่งของแข็ง A356 โดยสามารถรักษาสมบัติทางกลให้ มีค่าใกล้เคียงกับเนื้อโลหะเดิม ปัจจัยสำคัญมี 4 ประการ คือ 1) ความเร็วรอบในการหมุนของ เครื่องมือ (Rotation speed, rpm) ความเร็วรอบที่เหมาะสมขึ้นอยู่กับชนิดของโลหะที่นำมาเชื่อม ความหนาของชิ้นงาน ขนาดของบ่าเครื่องมือกวน และสภาพแวดล้อมในการเชื่อม 2) ความเร็วในการเชื่อม (Welding speed, mm/min) จะมีความสัมพันธ์กันกับความเร็วรอบในการหมุนของ เครื่องมือและการอ่อนตัวของเนื้อโลหะ หากขณะเชื่อมโลหะที่อ่อนตัวมีความหนืดมากเกินไปจะ ส่งผลให้เกิดช่องว่างในเนื้อเชื่อม แต่หากเนื้อโลหะอ่อนตัวมากเกินไปส่งผลให้เกิดครีบบริเวณ ด้านข้างแนวเชื่อมดังแสดงในรูปที่ 1.2 (ก) 3) มุมเอียงของเครื่องมือ ช่วยในการกดอัดเนื้อ โลหะที่อ่อนตัวไหลวนขึ้นมายังบ่าของเครื่องมือ ทำการอัดเนื้อโลหะที่อ่อนตัวดังกล่าวลงไปยังตัวกวนที่ กำลังหมุนและเคลื่อนที่ไหลรวมเป็นเนื้อเดียวกันกับเนื้อเชื่อมดังแสดงในรูปที่ 1.2 (ข) 4) แรงกดของ เครื่องมือ เพื่อให้ความร้อนที่เกิดจากการเสียดทานส่งผ่านไปยังด้านล่างของชิ้นงาน ทำให้โลหะที่อ่อนตัวสามารถเคลื่อนที่ไหลวนและถูกอัดลงไปยังด้านล่างของตัวกวนดังแสดงในรูปที่ 1.2 (ค) ซึ่ง ข้อดีของการเชื่อมเสียดทานแบบกวน คือ ไม่มีมลภาวะที่เป็นพิษต่อร่างกาย ไม่มีแสงหรือรังสีที่เป็น อันตรายขณะเชื่อม ไม่ต้องใช้แก๊สปกคลุมแนวเชื่อมขณะที่ทำการเชื่อม อีกทั้งสามารถเชื่อมโลหะ

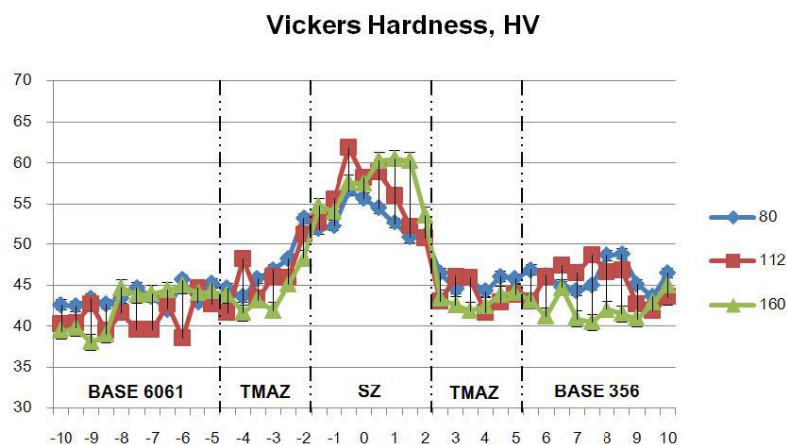
ต่างชนิดกันได้ แต่ข้อเสียของการเชื่อมเสียดทานแบบกวน คือ รอยเชื่อมมีช่องว่างเกิดขึ้นบริเวณ  
สุดท้ายของรอยเชื่อม โดยมีขนาดเท่ากับตัวกวน (Pin) และไม่เหมาะกับแนวเชื่อมที่มีความซับซ้อน



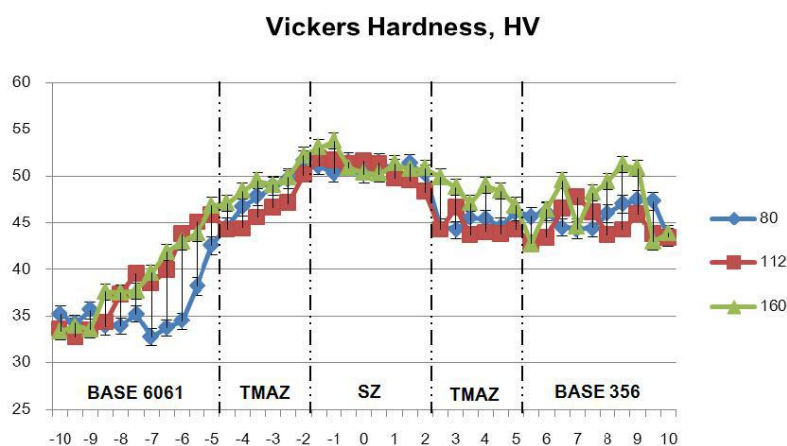
รูปที่ 1.2 ปัจจัยการเชื่อมเสียดทานแบบกวน (ก) ลักษณะการเกิดข้อบกพร่องในแนวเชื่อม  
(ข) ลักษณะมุมเอียงของเครื่องมือ (ค) ลักษณะการกกดตัวกวนในเนื้อโลหะ  
ที่มา : อับดุล บินระหีม (2553)

วรพงศ์ บุญช่วยแทน และคณะ (2556) พบว่ากระบวนการเชื่อมเสียดทานแบบกวนโดยใช้  
ตัวกวนทรงกระบอก สามารถเชื่อมต่อชนอะลูมิเนียมผสมหล่อกิ่งของแข็ง SSM 356 กับ SSM 6061  
ได้อย่างมีประสิทธิภาพ มีปัจจัยในการทดลอง 2 ปัจจัย คือ ความเร็วหมุนเชื่อม (710 1,000 และ  
1,400 รอบ/นาที) และความเร็วเดินเชื่อม (80 112 และ 160 มิลลิเมตร/นาที) จากการศึกษาพบว่า  
ลักษณะโครงสร้างบริเวณแนวเชื่อมจะเป็นโครงสร้างที่เกิดขึ้นใหม่ซึ่งจะประกอบด้วยเนื้อวัสดุทั้ง  
สองชนิดผสมกัน โดยที่เกรนบริเวณแนวเชื่อมจะมีขนาดเล็กและมีความละเอียดที่เพิ่มขึ้น เมื่อ  
เปรียบเทียบกับโครงสร้างของบริเวณเนื้อโลหะเดิม จากการทดสอบค่าความแข็งแรงดึงพบว่าที่  
ความเร็วหมุนเชื่อม 1,400 rpm ความเร็วเดินเชื่อมที่ 112 mm/min จะให้ค่าความแข็งแรงดึงสูงสุด

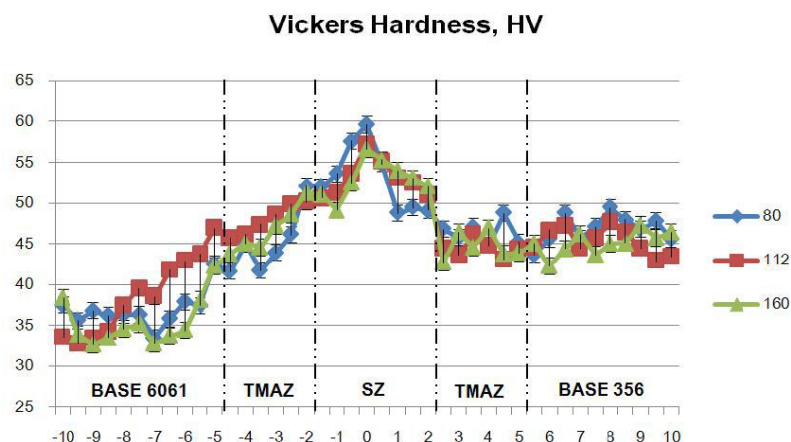
คือ 175.40 MPa โดยเมื่อความเร็วหมุนเชื่อมเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ความร้อนจากการเสียดทานระหว่างตัวกวนกับชิ้นงานทดสอบมากขึ้น ทำให้การประสานกันและการกระจายตัวของอะลูมิเนียมทั้งสองชนิดมีความสมบูรณ์มากขึ้น และจากผลการทดสอบสมบัติทางกลพบว่าที่ความเร็วหมุนเชื่อม 1,000 rpm ความเร็วเดินเชื่อม 112 mm/min ให้ค่าความแข็งสูงสุด คือ 61.90 HV โดยค่าความแข็งบริเวณตรงกลางแนวเชื่อมจะมีค่าสูงสุดและจะค่อยๆ ลดลงเมื่อถึงบริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อนทางกล (Thermo-Mechanically Affected Zone, TMAZ) ของทั้งสองด้านของแนวเชื่อมและค่าความแข็งจะลดลงเรื่อยๆ ไปจนถึงค่าความแข็งเดิมของอะลูมิเนียมทั้งสองชนิด เนื่องจากบริเวณดังกล่าวเป็นบริเวณที่ไม่ได้รับผลกระทบจากการกวนดังแสดงในรูปที่ 1.3



(ก)



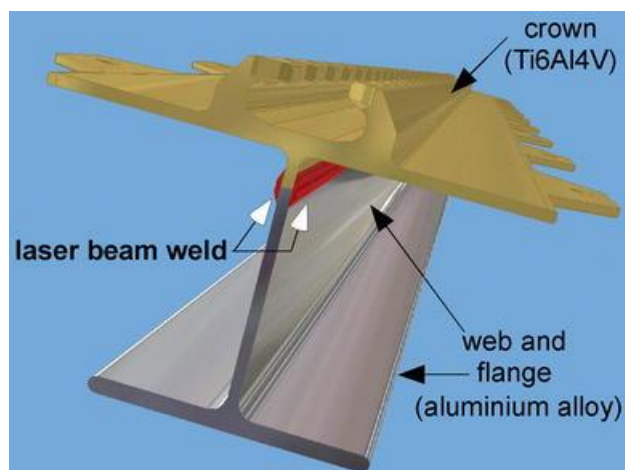
(ข)



(ค)

รูปที่ 1.3 ค่าความแข็งของแนวเชื่อมความเร็วหมุน (ก) 710 rpm (ข) 1,000 rpm และ (ค) 1,400 rpm  
ที่มา : วรพงศ์ บุญช่วยแทน และคณะ (2556)

W. V. Vaidya และคณะ (2010) ได้ศึกษาเกี่ยวกับการปรับปรุงสมบัติของแนวเชื่อมต่อระหว่างอะลูมิเนียม AA6056 และไทเทเนียม Ti6Al4V สำหรับการใช้งานด้านการบิน ด้วยกระบวนการเชื่อมเลเซอร์ ดังแสดงรูปที่ 1.4 ข้อดีของอะลูมิเนียม AA6056 คือ ช่วยลดน้ำหนัก ส่วนไทเทเนียม Ti6Al4V ช่วยเพิ่มความแข็งแรง รวมไปถึงด้านทานการกัดกร่อน โดยการเชื่อมต่อระหว่างวัสดุต่างชนิดกันหรือการเชื่อมต่อระหว่างอะลูมิเนียมต่างชนิดกันนั้น เป็นการนำข้อดีของวัสดุแต่ละชนิดมาประยุกต์ใช้ให้เหมาะสมกับประเภทการนำไปใช้งาน เช่น การเชื่อมต่อระหว่างอะลูมิเนียม A 356-T6 กับอะลูมิเนียม Al 6061-T651 ที่มักนำไปใช้ในชิ้นส่วนของเครื่องบิน องค์ประกอบของปีกนารูร ชิ้นส่วนรถยนต์ เป็นต้น (Lim et al. 2004)

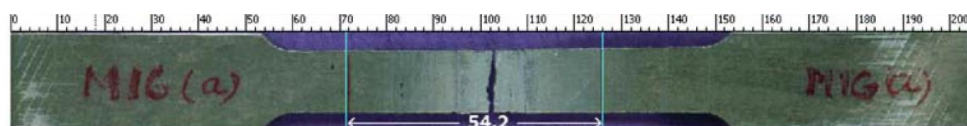


รูปที่ 1.4 แนวเชื่อมส่วนเบาะนั่งสำหรับผู้โดยสาร  
ที่มา : Vaidya et al. (2010)

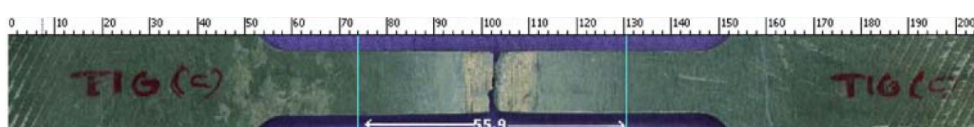
A. K. Lakshminarayanan และคณะ (2009) ได้ศึกษาสมบัติแรงดึง ความแข็งแรงไมโครโครงสร้างจุลภาคและลักษณะพื้นผิวการแตกหักของรอยเชื่อมในอะลูมิเนียมชนิด AA6061 โดยเปรียบเทียบจากกระบวนการเชื่อม 3 กระบวนการ คือ การเชื่อมทิก (GTAW) การเชื่อมมิก (GMAW) และการเชื่อมเสียดทานแบบกวน (FSW) วัสดุที่ใช้เป็นอะลูมิเนียมผสมเกรด AA6061 ชนิดแผ่นรีด ความหนา 6 มิลลิเมตร ทำการเชื่อมแบบต่อชน ใช้อะลูมิเนียมเกรด AA4043 (Al-5Si% โดยน้ำหนัก) เป็นโลหะเติมในรอยเชื่อม ซึ่งในงานวิจัยนี้พบว่า จากการทดสอบความแข็งแรงดึงบริเวณที่เกิดการขาดของชิ้นงานทดสอบจะเกิดบริเวณเนื้อเชื่อมในทุกกระบวนการเชื่อมดังแสดงในรูปที่ 1.5 ในการตรวจสอบโครงสร้างมหภาคจึงเน้นศึกษาที่บริเวณเนื้อเชื่อมจะเห็นว่าที่บริเวณเนื้อโลหะเติมมีลักษณะของเกรนที่หยาบและกระจายตัวสม่ำเสมอแสดงในรูปที่ 1.6 (ง) สำหรับเนื้อเชื่อมของกระบวนการเชื่อมมิก (GMAW) และการเชื่อมทิก (GTAW) มีลักษณะของเกรนแบบกิ่งไม้ (Dendrite) ดังแสดงในรูปที่ 1.6 (ก) และ (ข) เนื่องจากการเย็นตัวอย่างรวดเร็วของเนื้อเชื่อม แต่ที่บริเวณเนื้อเชื่อมของการเชื่อมเสียดทานแบบกวนเกรนมีลักษณะค่อนข้างกลม (Equiaxed) เนื่องจากการตกตะกอนใหม่ในกระบวนการเชื่อมเสียดทานแบบกวนดังแสดงในรูปที่ 1.6 (ค) เมื่อตรวจสอบความแข็งแรงพบว่าบริเวณเนื้อเชื่อมมีค่าความแข็งแรงต่ำสุดเมื่อเปรียบเทียบกับบริเวณที่ได้รับผลกระทบทางความร้อน (HAZ) และบริเวณเนื้อโลหะเดิม (BM) ซึ่งการเชื่อมมิก (GMAW) มีค่าความแข็งแรงต่ำสุดและการเชื่อมเสียดทานแบบกวน (FSW) มีค่าความแข็งแรงสูงสุด เมื่อเปรียบเทียบความแข็งแรง



ของแนวเชื่อมพบว่ากระบวนการเชื่อมเสียดทานแบบกวน (FSW) ให้สมบัติเชิงกลที่ดีกว่าเมื่อเทียบกับ  
การเชื่อมมิก (GMAW) และการเชื่อมทิก (GTAW)



(ก)

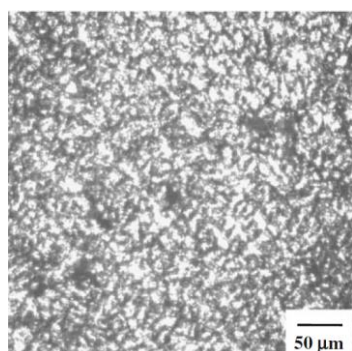


(ข)

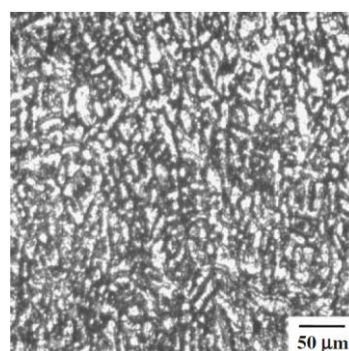


(ค)

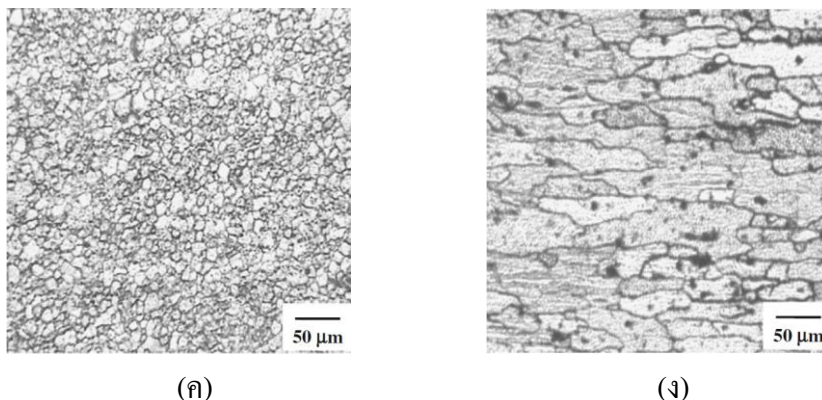
รูปที่ 1.5 บริเวณที่เกิดการแตกจากการทดสอบความแข็งแรงดึง (ก) GMAW (ข) GTAW (ค) FSW  
ที่มา : Lakshminarayanan et al. (2009)



(ก)

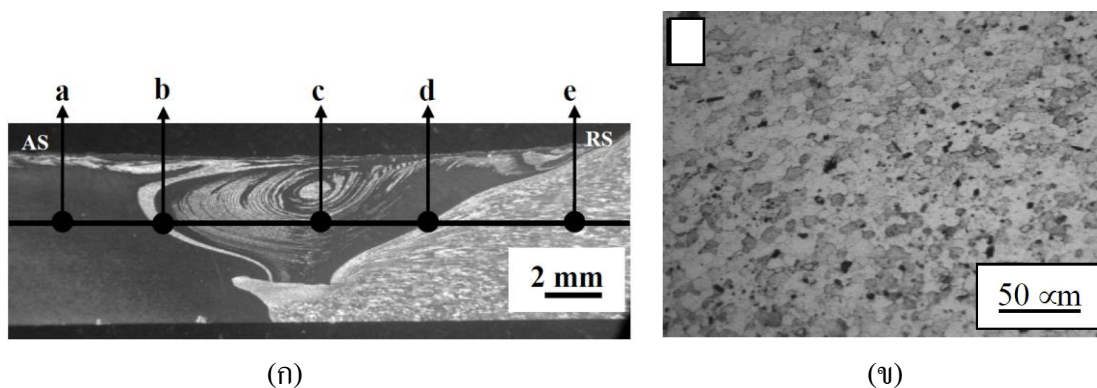


(ข)

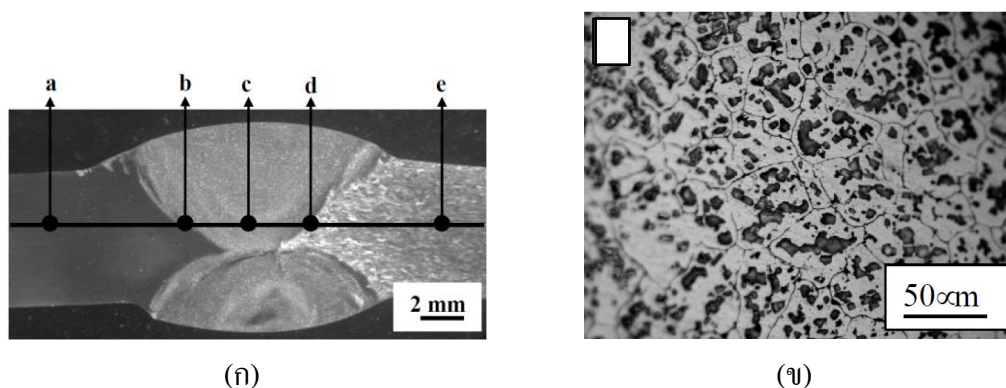


รูปที่ 1.6 โครงสร้างจุลภาคบริเวณแนวเชื่อม (ก) GMAW (ข) GTAW (ค) FSW (ง) Base metal  
ที่มา : Lakshminarayanan et al. (2009)

S. Sayer และคณะ (2011) ใช้วิธีการเชื่อมที่แตกต่างกัน 2 วิธี ในการเชื่อมชิ้นงานระหว่างอะลูมิเนียมผสม AA2014 และ AA5083 กำหนดให้กระบวนการเชื่อมเสียดทานแบบกวน (FSW) ใช้ความเร็วเดินเชื่อม 106 มม./นาที และความเร็วหมุนเชื่อมของตัวกวน 1,600 rpm วางชิ้นงานแบบต่อชน เปรียบเทียบกับกระบวนการเชื่อมทิก (TIG) ใช้ลวดเติมชนิด Magmaweld TAL 4043 ขนาด 2.4 มิลลิเมตร วางชิ้นงานแบบต่อชนและบากร่องตัววี (V-shape) โดยศึกษาและวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาค ความแข็งและสมบัติเชิงกลของรอยเชื่อม จากการตรวจสอบพบว่าการเชื่อมเสียดทานแบบกวนมีโครงสร้างมหภาคบริเวณเนื้อเชื่อมมีลักษณะคล้ายหัวหอมผ่าครึ่ง (Onion ring) ดังแสดงในรูปที่ 1.7 (ก) และบริเวณที่ถูกกวน (Nugget zone, NZ) จะมีการเรียงตัวของเกรนที่ดีและเกรนมีขนาดเล็ก เนื่องจากการเกิดผลึกใหม่ดังแสดงในรูปที่ 1.7 (ข) แต่การเชื่อมทิกเป็นการเชื่อมสองด้านดังแสดงในรูปที่ 1.8 (ก) เกรนมีลักษณะบุดเบี้ยวและไม่เป็นเนื้อเดียวกันดังแสดงในรูปที่ 1.8 (ข) และเมื่อเปรียบเทียบขนาดของเกรนทั้งสองกระบวนการเชื่อมพบว่า การเชื่อมเสียดทานแบบกวนมีขนาดเกรนที่เล็กกว่าการเชื่อมทิก และจากผลการทดสอบสมบัติเชิงกลพบว่า การเชื่อมเสียดทานแบบกวนให้ค่าจุดคราก (yield) และค่าความแข็งแรงดึงที่ดีกว่าการเชื่อมทิก โดยเมื่อทดสอบความแข็งแรงดึงในกระบวนการเชื่อมเสียดทานแบบกวนเกิดการขาดของชิ้นงานบริเวณที่ได้รับผลกระทบทางความร้อนด้าน AA 5083 และในกระบวนการเชื่อมทิกเกิดการขาดของชิ้นงานที่บริเวณเนื้อเชื่อม



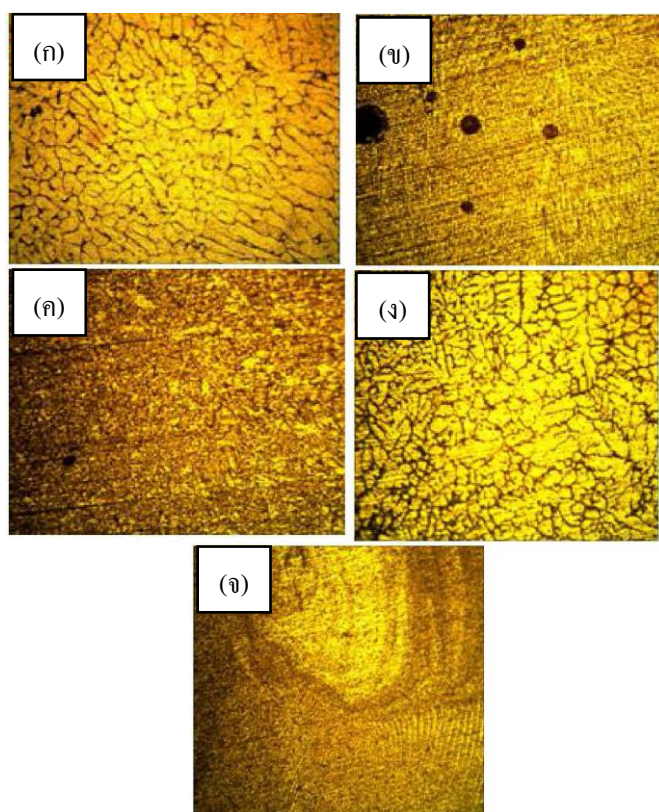
รูปที่ 1.7 รอยเชื่อมเสียดทานแบบกวน (ก) โครงสร้างมหภาค (ข) โครงสร้างจุลภาคบริเวณที่ถูกรบกวน  
ที่มา : Sayer et al. (2011)



รูปที่ 1.8 รอยเชื่อมทิก (ก) โครงสร้างมหภาค และ (ข) โครงสร้างจุลภาคบริเวณเนื้อเชื่อม  
ที่มา : Sayer et al. (2011)

S. Jannet และคณะ (2014) ศึกษาแนวเชื่อมระหว่างอะลูมิเนียมผสม AA 5083-O และ 6061-T6 โดยการเชื่อม 3 วิธี คือ การเชื่อมเสียดทานแบบกวน (FSW) การเชื่อมทิก (TIG) และการเชื่อมมิก (MIG) จากการศึกษาเบื้องต้นพบว่าการเชื่อมเสียดทานแบบกวนนั้น มีขนาดความกว้างของบริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อน (HAZ) น้อยกว่าเมื่อเทียบกับการเชื่อมแบบหลอมละลาย (การเชื่อมทิกและการเชื่อมมิก) รวมไปถึงสมบัติเชิงกลและสมบัติทางโลหะวิทยาที่ดีกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับ การเชื่อมด้วยวิธีการทั่ว ๆ ไป ในงานวิจัยได้นำแนวเชื่อมที่ได้ ไปผ่านกระบวนการอบอ่อน (Aging treatment) แม้ว่ากระบวนการดังกล่าวจะใช้เวลานานและเพิ่มค่าใช้จ่ายแต่มีประโยชน์ต่อแนวเชื่อม เนื่องจากการปรับปรุงสมบัติแรงดึงและส่งผลต่อการเรียงตัวของเกรนที่ดีขึ้น จากรูปที่ 1.9 เป็นการตรวจสอบ โครงสร้างจุลภาคบริเวณเนื้อเชื่อม พบว่าในการเชื่อมมิกจะมีลักษณะของเกรนแบบ

เสาและมีการเรียงตัวที่เป็นระเบียบดังแสดงในรูปที่ 1.9 (ก) และ (ค) การเชื่อมทิกดังรูปที่ 1.9 (ข) มีลักษณะของเกรนเป็นแบบเสาและมีการเรียงตัวของเกรนที่ดีขึ้นดังแสดงในรูปที่ 1.9 (ค) และการเชื่อมเสียดทานแบบกวน (FSW) เกรนจะมีลักษณะที่ค่อนข้างกลมดังแสดงในรูปที่ 1.9 (จ) เนื่องจากการตกผลึกใหม่ของเนื้อโลหะในกระบวนการเชื่อม และจากผลของการอบอ่อนหลังการเชื่อม สามารถปรับปรุงค่าความแข็งแรงดึงและความเหนียวเพิ่มขึ้น ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับแนวเชื่อมในทุกกระบวนการเชื่อม พบว่าแนวเชื่อมด้วยวิธีเชื่อมเสียดทานแบบกวนให้สมบัติเชิงกลที่ดีที่สุด



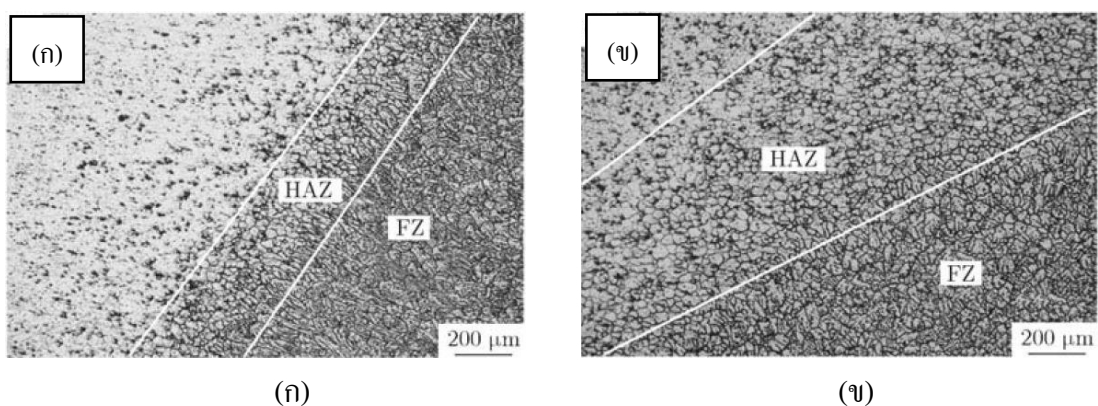
รูปที่ 1.9 โครงสร้างจุลภาคบริเวณเนื้อเชื่อม (ก) CC-MIG (ข) CC-TIG (ค) PC-MIG

(ง) PC-TIG และ (จ) FSW

ที่มา : Jannet et al. (2014)

D. Peng และคณะ (2013) ศึกษาผลของการอบอ่อนและความร้อนในการเชื่อมที่ส่งผลต่อโครงสร้างมหภาคและสมบัติเชิงกลในการเชื่อมทิก (TIG) ของอะลูมิเนียมผสม 6061-T6 จากการศึกษาพบว่าหากความร้อนที่ป้อนเข้าไปในขณะที่เชื่อมเพิ่มขึ้นส่งผลให้ขนาดความกว้างของบริเวณที่ได้รับผลกระทบทางความร้อน (HAZ) เพิ่มขึ้นดังแสดงในรูปที่ 1.10 (ก) จะเห็นได้ว่าชิ้นงานที่ให้

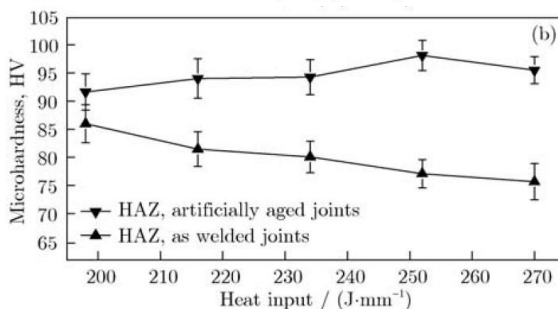
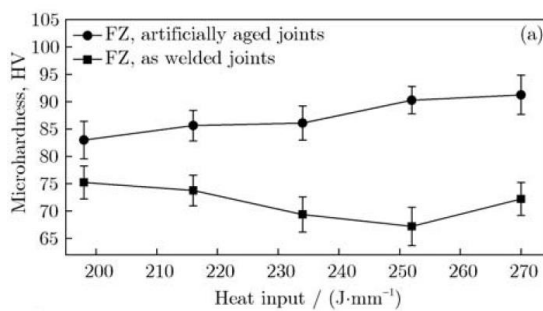
ความร้อน 198 J/mm มีขนาดของบริเวณที่ได้รับผลกระทบทางความร้อน (HAZ) แคบกว่าชิ้นงานที่ให้ความร้อน 270 J/mm ดังแสดงในรูปที่ 1.10 (ข) และเมื่อความร้อนในการเชื่อมเพิ่มขึ้นค่าความแข็งบริเวณที่ได้รับผลกระทบทางความร้อน (HAZ) มีค่าลดลง ซึ่งจากการทดลองพบว่าการอบอ่อนชิ้นงานหลังการเชื่อมจะไม่มีผลต่อขนาดของเกรน แต่สามารถปรับปรุงสมบัติทางกลให้ดีขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 1.11 พบว่าการอบอ่อนชิ้นงานหลังเชื่อมสามารถปรับปรุงความแข็งให้ดีขึ้นทั้งบริเวณเนื้อเชื่อมและบริเวณที่ได้รับผลกระทบทางความร้อน (HAZ) เนื่องจากการอบอ่อนหลังเชื่อมทำให้เกิดกระบวนการหลอมและการแข็งตัวของเนื้อโลหะบริเวณนั้นอีกครั้ง



รูปที่ 1.10 โครงสร้างจุลภาคของแนวเชื่อมที่ความร้อนในการเชื่อมต่างกัน

(ก) 198 J/mm และ (ข) 270 J/mm

ที่มา : Peng et al. (2013)



(ก)

(ข)

รูปที่ 1.11 ค่าความแข็งของแนวเชื่อม (ก) บริเวณเนื้อเชื่อม และ

(ข) บริเวณที่ได้รับผลกระทบทางความร้อน

ที่มา : Peng et al. (2013)

### 1.3 วัตถุประสงค์

เพื่อเปรียบเทียบโครงสร้างมหภาคและสมบัติทางกลของบริเวณเนื้อเชื่อม บริเวณที่ได้รับผลกระทบทางความร้อน บริเวณเขตอิทธิพลของความร้อนทางกล และเนื้อโลหะเดิมจากการเชื่อมเสียดทานแบบกวนและการเชื่อมทิกของอะลูมิเนียมหล่อผสมต่างชนิดกัน (Dissimilar Joint)

### 1.4 ขอบเขตของการวิจัย

- 1) วัสดุที่ใช้ในงานวิจัย คือ แผ่นอะลูมิเนียมผสมหล่อด้วยกระบวนการหล่อแบบกึ่งของแข็ง SSM 356 และ SSM 6061 ขนาดกว้าง 50 มิลลิเมตร ยาว 100 มิลลิเมตร หนา 4 มิลลิเมตร
- 2) ทดสอบสมบัติทางกลของรอยเชื่อม ทางด้านความแข็งและทดสอบแรงดึง
- 3) ศึกษาโครงสร้างมหภาคของแนวเชื่อมต่อชนที่ได้จากการเชื่อม
- 4) เงื่อนไขการเชื่อมทิกและการเชื่อมเสียดทานแบบกวน ดังแสดงในตารางที่ 1.1
- 5) วิเคราะห์ค่าความแข็งแรงดึงโดยใช้วิธีการทางสถิติ

ตารางที่ 1.1 ปัจจัย ระดับ และขอบเขตของการเชื่อม

Welding conditions		No filler	Filler
TIG	Current	140 A	140 A
	Arc voltage	15.6 V	15.6 V
	Shield gas	Argon	Argon
	Welding speed	350 mm/min	250 mm/min
	Gas flow rate	15 l/min	15 l/min
	Filler rod type	-	AA 4043
	Filler rod diameter	-	2.4 mm.
FSW	Rotation speed	1,400 rpm	
	Welding speed	112 mm/min	
	Shoulder diameter	Ø 20 mm.	
	Pin diameter	Ø 5 mm.	
	Tool tilt angle	3 degrees	

### 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1) สร้างองค์ความรู้ซึ่งจะเป็นประโยชน์ต่อการพัฒนากระบวนการเชื่อมอะลูมิเนียมผสมหล่อกิ่งแข็งต่างชนิด เพื่อเป็นพื้นฐานในการพัฒนางานวิจัยต่อไป
- 2) ทำให้ทราบถึงโครงสร้างทางมหภาคและสมบัติทางกล ในการเชื่อมทิกและการเชื่อมเสียดทานแบบกวน ส่งผลให้สามารถเลือกวิธีการเชื่อมอะลูมิเนียมผสมหล่อด้วยกระบวนการหล่อแบบกิ่งของแข็ง SSM 356 และSSM 6061 ได้อย่างเหมาะสม
- 3) เพิ่มประสิทธิภาพในการผลิตโดยสร้างทางเลือกในการนำข้อมูลจากงานวิจัย เพื่อใช้ในการตัดสินใจเลือกกระบวนการเชื่อมที่เหมาะสมและทำให้ได้แนวเชื่อมที่มีประสิทธิภาพที่ตรงตามความต้องการ

## บทที่ 2

### ทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 อะลูมิเนียม

อะลูมิเนียมเป็นโลหะเบาในกลุ่มเหล็กที่มีความสำคัญและนิยมใช้งานมากที่สุดรองจากเหล็ก เนื่องจากมีสมบัติเด่นหลายประการ เช่น มีน้ำหนักเบา มีความหนาแน่นน้อย ( $2.70 \text{ g/cm}^3$ ) หรือคิดเป็น 1 ใน 3 ของความหนาแน่นของเหล็กกล้า ไม่มีพิษต่อร่างกายและสามารถนำความร้อนสูง มีความแข็งแรงสูง มีความเหนียวมาก มีจุดหลอมเหลวต่ำ (658 องศาเซลเซียส) สามารถขึ้นรูปได้ง่าย ต้านทานต่อการสึกหรอ จึงนิยมใช้อย่างแพร่หลายในงานอุตสาหกรรม เช่น อุตสาหกรรมยานยนต์ อุตสาหกรรมเครื่องจักรต่าง ๆ รวมทั้งยังนิยมใช้ทำภาชนะหุงต้มอาหาร เป็นต้น

##### 2.1.1 ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับอะลูมิเนียมผสม

อะลูมิเนียมผสมเป็นโลหะที่จัดอยู่ในกลุ่มโลหะยูเทคติก โดยมีสารประกอบอินเทอร์เมทัลลิก (Intermetallic compounds) หรือธาตุต่าง ๆ เป็นเฟสที่เสริมในเนื้อโลหะ ซึ่งในอะลูมิเนียมผสมหนึ่งชนิดอาจประกอบไปด้วยเฟสโลหะหลายชนิด เฟสโลหะเหล่านี้ละลายได้ง่ายเมื่ออุณหภูมิใกล้จุดยูเทคติก ทำให้สามารถปรับปรุงคุณสมบัติต่าง ๆ ของอะลูมิเนียมผสมโดยการเพิ่มความแข็งแรงโดยการตกตะกอน (Precipitation strengthening) เป็นกระบวนการทางความร้อนที่ประกอบไปด้วยกระบวนการอบละลาย (Solution treatment) และการบ่มแข็ง (Aging) ซึ่งเป็นหนึ่งในกรรมวิธีที่ใช้เพิ่มสมบัติทางกลให้กับอะลูมิเนียมผสม อีกทั้งอะลูมิเนียมผสมยังสามารถเพิ่มความแข็งแรงด้วยการแปรรูป (Work hardening) เพิ่มความแข็งแรงด้วยการทำให้เป็นสารละลายของแข็ง (Solid solution strengthening) และเพิ่มความแข็งแรงด้วยการใช้การกระจายอนุภาค (Dispersion strengthening) ซึ่งกระบวนการทั้ง 4 วิธีนี้ช่วยเพิ่มความแข็งแรงอย่างมีประสิทธิภาพให้กับอะลูมิเนียมผสม เนื่องจากมีการสร้างสภาวะที่ขัดขวางการเคลื่อนที่ของดิสโลเคชัน (Dislocation)

##### 2.1.2 ประเภทของอะลูมิเนียมผสม

อะลูมิเนียมสามารถผสมกับโลหะอื่น ๆ ได้หลายชนิด เช่น ซิลิกอน แมกนีเซียม สังกะสี ทองแดง โดยโลหะที่ผสมแต่ละชนิดจะให้สมบัติที่แตกต่างกันออกไป สามารถเลือกใช้งาน



ได้ตามลักษณะและชนิดของการนำไปใช้งานอย่างกว้างขวาง โดยอะลูมิเนียมผสมสามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภทดังนี้

ก) อะลูมิเนียมผสมใช้แรงขึ้นรูป (Wrought aluminium alloys)

เป็นอะลูมิเนียมผสมที่ใช้แรงขึ้นรูป กล่าวคือการขึ้นรูปด้วยการรีด การอัดขึ้นรูปออกมาแบบแผ่น หรือเป็นแท่ง ซึ่งอะลูมิเนียมผสมที่ได้จะมีทั้งสามารถอบชุบแข็งด้วยความร้อนได้ (Heat treatable) และที่ไม่สามารถอบชุบได้ ส่วนใหญ่โลหะที่นำมาผสมด้วยจะประกอบด้วย ซิลิกอน แมกนีเซียม และทองแดง

ข) อะลูมิเนียมผสมหล่อ (Cast aluminium alloys)

เป็นอะลูมิเนียมผสมชนิดที่มีสมบัติพิเศษ ซึ่งมีความสามารถในการไหลที่ดี ช่วยในการหล่อขึ้นรูปได้ง่าย อะลูมิเนียมผสมชนิดนี้ส่วนใหญ่สามารถอบชุบแข็งด้วยความร้อนได้ โดยมีซิลิกอนเป็นโลหะผสมที่สำคัญ

### 2.1.3 กรรมวิธีทางความร้อนของอะลูมิเนียม

อะลูมิเนียมเป็นโลหะที่สามารถปรับปรุงคุณสมบัติทางกล โดยสามารถเพิ่มความแข็งแรงให้มากขึ้นหรือทำให้อ่อนตัวลง โดยเฉพาะอย่างยิ่งอะลูมิเนียมผสมทองแดง ซิลิกอน แมกนีเซียม และสังกะสี โดยสามารถแบ่งกรรมวิธีทางความร้อนของอะลูมิเนียมได้ 3 ลักษณะดังนี้ (ชวลิต เขียงกุล 2544)

ก) การอบอ่อน (Annealing) อะลูมิเนียมบางชนิดผ่านกระบวนการผลิตที่ก่อให้เกิดความเครียด เช่น งานขึ้นรูปเย็น ความเครียดดังกล่าวส่งผลให้ความแข็งแรงอะลูมิเนียมลดลง ทำให้เกิดการแตกหักเสียรูปได้ง่ายเมื่อมีการรับแรง ดังนั้น การอบอ่อนจะช่วยลดความเครียดและเพิ่มความเหนียวให้กับอะลูมิเนียม ซึ่งจะสามารถนำไปใช้งานได้ต่อไป

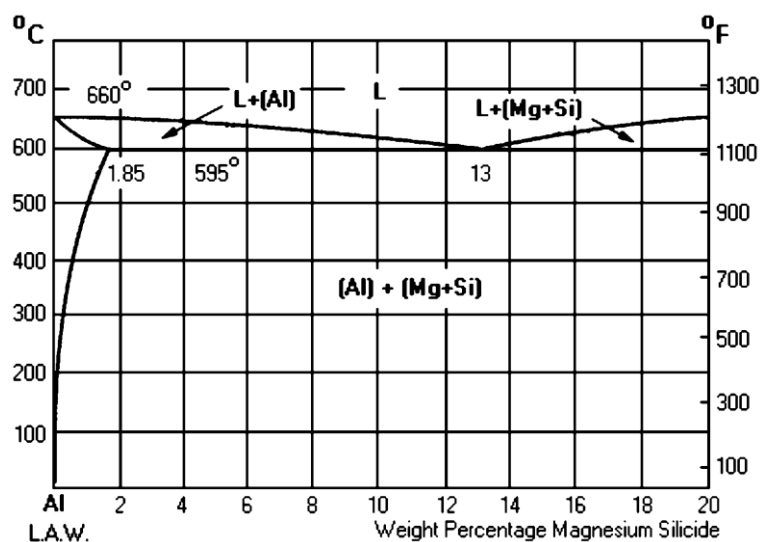
การอบอ่อนอะลูมิเนียมสามารถทำได้โดยการอบอะลูมิเนียมที่อุณหภูมิตั้งแต่ 350 - 410 องศาเซลเซียส ระยะเวลาในการอบขึ้นอยู่กับขนาดของชิ้นงาน โดยทั่วไปแล้วจะยึดหลักการเช่นเดียวกับการอบเหล็ก คือใช้เวลา 30 - 60 นาทีต่อความหนาของอะลูมิเนียม 25 มิลลิเมตร หลังจากนั้นปล่อยให้เย็นตัวลงช้า ๆ จะทำให้อะลูมิเนียมอ่อนตัวลงได้ตามต้องการ

ข) การอบละลาย (Solid Solution Heat Treatment) มีวัตถุประสงค์เพื่อให้โลหะผสมในอะลูมิเนียมละลายเป็นเนื้อเดียวกันกับอะลูมิเนียม โดยการอบที่อุณหภูมิสูงตั้งแต่ 500 - 520 องศาเซลเซียส เป็นเวลานานจนทำให้โลหะผสมละลายเข้าเป็นเนื้อเดียวกันกับอะลูมิเนียมได้

หมด หลังจากนั้นนำไปชุบลงในตัวกลางที่ให้อัตราการเย็นตัวที่รวดเร็ว เช่น น้ำ ซึ่งการเย็นตัวอย่างรวดเร็ว นั้นส่งผลให้โลหะผสมที่ละลายอยู่ในอะลูมิเนียมแยกตัวออกมาไม่ทัน เมื่อถึงอุณหภูมิห้อง ด้วยเหตุผลดังกล่าวจึงทำให้โครงสร้างของอะลูมิเนียมเกิดการบิดตัวไม่เป็นระเบียบ ส่งผลให้มีความแข็งแรงสูงขึ้น

ค) การทำให้แข็งโดยการแยกเฟสใหม่ (Precipitation Hardening) การทำให้อะลูมิเนียมแข็งแรงขึ้นโดยการอบละลาย จะพบว่าโลหะผสมที่ละลายในอะลูมิเนียมนั้นพยายามจะแยกตัวออกจากอะลูมิเนียม แต่ไม่สามารถทำได้ เนื่องจากเกิดการเย็นตัวอย่างรวดเร็วจนทำให้อะตอมของโลหะผสมและอะลูมิเนียมหยุดการเคลื่อนที่ ทำให้อะตอมของโลหะผสมละลายอยู่กับอะลูมิเนียม ดังนั้น หากต้องการทำให้เกิดเฟสใหม่ในอะลูมิเนียมผสม ต้องนำอะลูมิเนียมผสมที่ผ่านการอบละลายไปอบที่อุณหภูมิ 150 – 180 องศาเซลเซียส เพื่อให้อะตอมของโลหะผสมและอะตอมของอะลูมิเนียมเกิดการเคลื่อนที่จนเกิดผลึกใหม่และผลึกใหม่ที่เกิดขึ้นจะมีขนาดแตกต่างไปจากผลึกเดิม ผลการดึงดูคกันของผลึกที่มีขนาดแตกต่างกันทำให้อะลูมิเนียมที่มีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น

## 2.2 อะลูมิเนียมผสม



รูปที่ 2.1 แผนภาพสมดุลสองธาตุอะลูมิเนียม – แมกนีเซียมซิลิไซด์

ที่มา : The WebPage Assisted Instruction for Aluminium (2000)

จากแผนภาพสมดุลของธาตุอะลูมิเนียม – แมกนีเซียมซิลิไซด์ดังรูปที่ 2.1 สามารถอธิบายได้ดังนี้

- 1) อะลูมิเนียมสามารถหลอมละลายได้ที่อุณหภูมิ 660°C
- 2) แมกนีเซียมซิลิไซด์สามารถละลายได้ในอะลูมิเนียมสูงสุดที่ 1.85% ที่อุณหภูมิ 595°C
- 3) จะเกิดปฏิกิริยายูเทคติกที่ 13% ของแมกนีเซียมซิลิไซด์ ที่อุณหภูมิ 595°C ดังนั้นได้เส้นอุณหภูมิ 595°C หรืออุณหภูมิยูเทคติก จะให้ของแข็งสองชนิด คือ อะลูมิเนียม(Al) ผสมกับแมกนีเซียมซิลิไซด์ ( $Mg_2Si$ )

### 2.2.1 อะลูมิเนียมหล่อผสม A356 (Aluminium Casting Alloys A356)

อะลูมิเนียมหล่อผสม A356 เป็นอะลูมิเนียมหล่อผสมซิลิกอน โดยเติมแมกนีสิสจำนวนเล็กน้อย (ประมาณ 0.35%) เพื่อเพิ่มสมบัติด้านความแข็งแรง อะลูมิเนียมหล่อผสมหมายเลข 356.0 ประกอบด้วย ซิลิกอน 7% แมกนีเซียม 0.35% โดยซิลิกอนมีสมบัติในการเพิ่มความสามารถในการหล่อ และแมกนีเซียมจะทำให้อะลูมิเนียมชนิดนี้สามารถปฏิบัติทางความร้อนได้ ซึ่งโดยมาตรฐานของอะลูมิเนียมหล่อผสม A356 มีส่วนผสมทางเคมีดังแสดงในตารางที่ 2.1 และมีค่าสมบัติเชิงกลดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.1 ส่วนผสมทางเคมีของอะลูมิเนียมผสม SSM 356

Element	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Ti	Cr	Ni	Al
SSM 356	7.74	0.57	0.05	0.06	0.32	0.01	0.05	0.02	0.01	Bal.

ที่มา : Tehyo et al. (2011)

ตารางที่ 2.2 ค่าสมบัติเชิงกลของอะลูมิเนียมหล่อแข็ง SSM 356

Hardness (HV)	Yield Strength (MPa)	Tensile Strength (MPa)	Elongation (%)
68.5	96.15	168.50	1.92

เนื่องจากสมบัติของอะลูมิเนียม-ซิลิกอน-แมกนีเซียมหล่อผสมนั้น มีคุณสมบัติที่เหมาะสมกับการใช้งานมากมาย เช่น สามารถเพิ่มความแข็งแรงโดยการทำเอจจิ้ง หรือความสามารถ

ต้านทานต่อการกัดกร่อน จึงทำให้อะลูมิเนียม-ซิลิกอน-แมกนีเซียมหล่อผสมกลุ่มนี้ จึงนิยมนำไปใช้งานประเภทชิ้นส่วนเครื่องยนต์ ชิ้นส่วนเรือเดินสมุทร หรือชิ้นส่วนอากาศยาน เป็นต้น

### 2.2.2 อะลูมิเนียมหล่อผสม A6061 (Aluminium Casting Alloys A6061)

อะลูมิเนียมหล่อผสม A6061 คือการผสมแมกนีเซียม (0.6 - 1.2%) และซิลิกอน (0.4 - 1.3%) ในอะลูมิเนียม เป็นการจัดอะลูมิเนียมให้อยู่ในกลุ่ม 6XXX อะลูมิเนียมผสมแมกนีเซียมและซิลิกอนที่ผ่านการขึ้นรูปมาก่อน ทำให้สามารถทำการเองจิ้งเพื่อเพิ่มความแข็งแรงและความแข็งแรงสาเหตุที่นิยมทำการเองจิ้งเนื่องจากแมกนีเซียมและซิลิกอนเป็นธาตุในจำนวนธาตุทั่วไปในปัจจุบันที่สามารถรวมตัวกันในรูปแบบของสารประกอบเชิงโลหะ  $Mg_2Si$  ซึ่งสารประกอบเชิงโลหะ  $Mg_2Si$  นี้ เป็นสภาพกึ่งเสถียร (Metastable) ที่เกิดขึ้นในอะลูมิเนียมผสมแมกนีเซียมและซิลิกอน บางหมายเลขอาจมีการเพิ่มโครเมียมเพื่อช่วยทำให้เพิ่มความแข็งแรงและควบคุมขนาดของเกรนหรืออาจจะมีการเพิ่มทองแดงเข้าไปในบางหมายเลข เพื่อเพิ่มความแข็งแรงเหมือนกัน แต่จะทำให้ความต้านทานการกัดกร่อนลดลง หากพิจารณาจากแผนภาพสมดุลกึ่งสมดุลสอง Al-  $Mg_2Si$  ดังรูปที่ 2.1 จะพบว่าอะลูมิเนียมยอมให้สารประกอบเชิงโลหะ  $Mg_2Si$  ละลายสูงสุดที่ 1.85% ที่อุณหภูมิ  $595^{\circ}C$  และให้ปฏิกิริยาแยกตัวที่ส่วนผสม  $Mg_2Si$  13% แต่เมื่ออุณหภูมิลดต่ำลงมาจาก  $595^{\circ}C$  จะปรากฏการละลายของ  $Mg_2Si$  ในอะลูมิเนียมต่ำลงจนเหลือ 0.2% ที่อุณหภูมิ  $200^{\circ}C$  ซึ่งในวัสดุอะลูมิเนียมหล่อผสม A6061 จะมีปริมาณส่วนผสมทางเคมีแตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับผู้ผลิต แต่โดยทั่วไปแล้วตามมาตรฐานของเกรด 6061 จะมีรายละเอียดส่วนผสมทางเคมีดังแสดงในตารางที่ 2.3 และมีค่าสมบัติเชิงกลดังแสดงในตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.3 ส่วนผสมทางเคมีของอะลูมิเนียมผสม SSM 6061

Element	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Ti	Cr	Ni	Al
SSM 6061	0.60	0.70	0.28	0.15	1.00	0.25	0.15	0.20	-	Bal.

ที่มา : Tehyo et al. (2011)

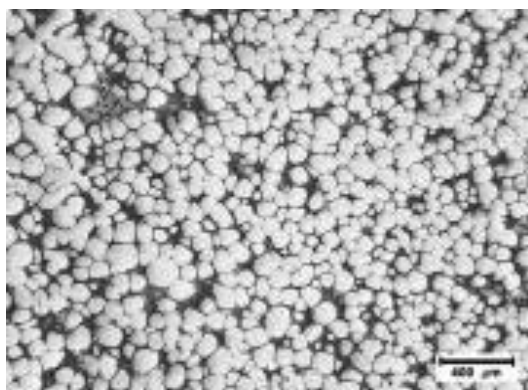
ตารางที่ 2.4 ค่าสมบัติเชิงกลของอะลูมิเนียมหล่อแข็ง SSM 6061

Hardness (HV)	Yield Strength (MPa)	Tensile Strength (MPa)	Elongation (%)
56.0	83.72	138.90	2.67

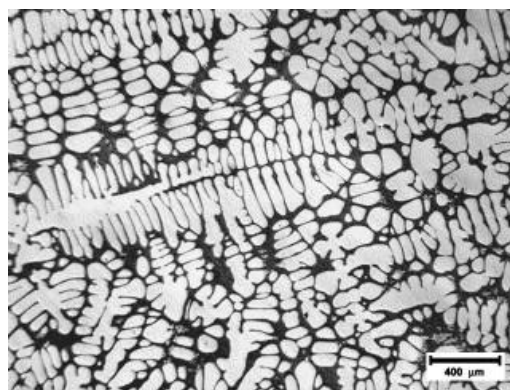
การนำไปใช้งานของอะลูมิเนียมผสมแมกนีเซียมและซิลิกอน มักนิยมใช้ในชิ้นส่วนเครื่องจักร ที่ต้องการความแข็งแรง เนื่องจากสามารถทำการบ่มแข็ง (aging) ได้ นอกจากนี้แล้วยังใช้กับชิ้นส่วนที่ต้องการความทนทานการกัดกร่อน ตัวอย่างการใช้งาน เช่น โครงสร้างของเรือเดินสมุทร สายไฟฟ้าที่ต้องการความแข็งแรงสูง สกรูที่ต้องการทนทานการกัดกร่อน

### 2.3 การหล่อโลหะแบบกึ่งของแข็ง (Semi-Solid Metal Casting)

การหล่อโลหะแบบกึ่งของแข็ง เป็นการขึ้นรูปโลหะโดยการหล่อในขณะที่โลหะมีการแข็งตัวเป็นบางส่วน โดยที่โลหะส่วนที่แข็งตัวแล้วมีโครงสร้างเกรนไม่เป็นแบบเดนไดรต์ (Non-dendritic grain) หรือเรียกว่าเกรนแบบก้อนกลม (Spheroidal หรือ Globular grain) ดังแสดงใน รูปที่ 2.2 (ก) เกรนก้อนกลมที่แขวนลอยอยู่ในน้ำโลหะนี้ทำให้โลหะกึ่งของแข็ง (Semi-Solid Metal หรือ SSM) มีความเหนียวมากกว่าน้ำโลหะหลายเท่า และการที่โครงสร้างเกรนเป็นก้อนกลมทำให้มีความเหนียวน้อยกว่าโลหะในสถานะกึ่งแข็งกึ่งเหลวที่มีโครงสร้างเกรนแบบเดนไดรต์มากดังแสดงใน รูปที่ 2.2 (ข) และทำให้โลหะไหลได้ดีด้วยแรงกระทำที่น้อยกว่า



(ก)



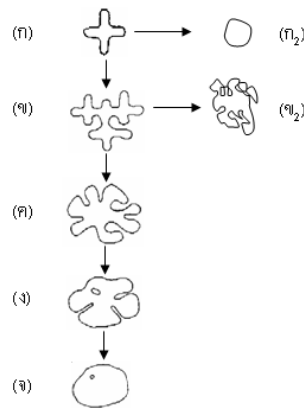
(ข)

รูปที่ 2.2 โครงสร้างเกรน (ก) โครงสร้างแบบก้อนกลม (ข) โครงสร้างแบบเดนไดรต์

ที่มา : Wannasin et al. (2006)

การเกิดโครงสร้างแบบก้อนกลมมีขั้นตอนการสร้าง คือ เริ่มจากการเกิดของอนุภาคของแข็ง (solid particle) ขนาดเล็ก ที่มีรูปร่างแบบอควิวแอกซ์ (equiaxed) จำนวนมาก ซึ่งอาจจะเกิด

จากกระบวนการเกิดนิวเคลียสและการเติบโต (nucleation and growth) หรือกระบวนการแตกหักของเดนไดรต์ (dendrite fragmentation) หรือเป็นผลจากทั้งสองกระบวนการผสมกัน จากนั้นอนุภาคของแข็งเหล่านี้ก็เติบโตด้วยการแพร่ของอะตอม หรือเกิดการเติบโตแบบคอรัสเซนนิง (coarsening) ทำให้รูปร่างแบบอควิแอกซ์ของเกรนเหล่านี้กลายเป็นเกรนแบบก้อนกลม



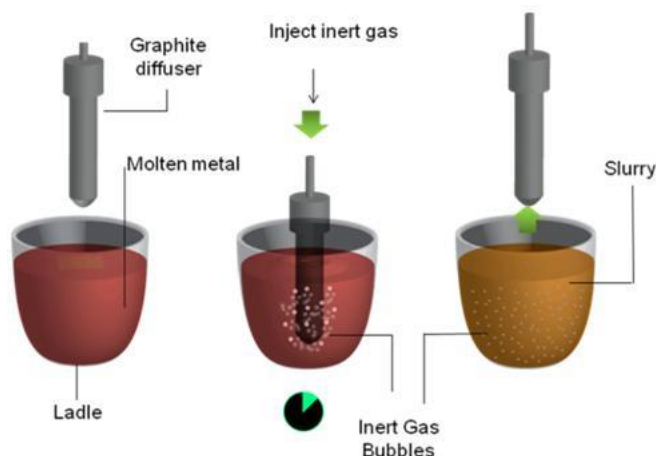
รูปที่ 2.3 เส้นทางวิวัฒนาการการเติบโตของอนุภาคของแข็ง  
ที่มา : เจษฎา วรรณสินธุ์ (2556)

โดยหากอนุภาคของแข็งที่เกิดเริ่มแรกนั้นมีขนาดเล็กมากและมีปริมาณมาก เกรนแบบก้อนกลมสามารถเกิดได้โดยตรงจากเกรนแบบอควิแอกซ์ซึ่งแสดงได้โดยเส้นทางวิวัฒนาการ จาก (ก) ไป (ก<sub>2</sub>) ดังแสดงในรูปที่ 2.3 แต่หากขนาดอนุภาคใหญ่เกินไปการเกิดเกรนแบบก้อนกลมก็จะเป็นไปตามเส้นทางวิวัฒนาการจาก (ก) ไป (จ) และหากสภาวะไม่ได้ตามที่จำเป็นก็จะไม่เกิดเกรนแบบก้อนกลม ดังแสดงในวิวัฒนาการ จาก (ก) ไป (ข<sub>2</sub>)

#### 2.4 เทคโนโลยีการหล่อโลหะกรรมวิธีรีโอบาคติงด้วยกระบวนการ GISS (Gas Induced Semi-Solid)

กระบวนการ GISS เป็นกรรมวิธีใหม่ในการผลิตโลหะกึ่งของแข็งโดยนักวิจัยจากภาควิชาวิศวกรรมเหมืองแร่และวัสดุ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ และนักวิจัยจากสถาบันเทคโนโลยีแห่งรัฐแมสซาชูเซตส์ (MIT) ประเทศสหรัฐอเมริกา กรรมวิธีนี้เป็นการปล่อยแก๊สเฉื่อย เช่น แก๊สอาร์กอน หรือ ไนโตรเจน ผ่านแท่งกราฟไฟต์พูนในปริมาณที่น้อยมาก เพื่อให้เกิดการเคลื่อนที่ของ

น้ำโลหะในขณะที่โลหะแข็งตัว ซึ่งกระบวนการ GISS ดังแสดงในรูปที่ 2.4 ทำให้โครงสร้างเกรนที่ผลิตได้เป็นแบบก้อนกลม โดยกระบวนการนี้สามารถผลิตโลหะกิ่งของแข็งที่มีคุณภาพได้อย่างมีประสิทธิภาพ



รูปที่ 2.4 หลักการทำงานของกระบวนการ GISS  
ที่มา : เจษฎา วรรณสินธุ์ (2556)

## 2.5 ความสามารถในการเชื่อมอะลูมิเนียมและอะลูมิเนียมผสม

อะลูมิเนียมและอะลูมิเนียมผสมสามารถเชื่อมต่อกันด้วยกระบวนการเชื่อมแบบหลอมละลายได้ ยกเว้นอะลูมิเนียมผสมบางประเภทเท่านั้น โดยสิ่งที่ควรทราบเบื้องต้นเกี่ยวกับสมบัติทางกายภาพและสมบัติทางโลหะวิทยามีดังนี้ (ประกาศ เมืองจันทร์บุรี 2555)

- 1) มีความร้อนจำเพาะสูง การนำความร้อนสูง ความร้อนแฝงสูง

ในการเชื่อมอะลูมิเนียมและอะลูมิเนียมผสมจำเป็นต้องใช้ความร้อนที่มากในช่วงระยะเวลาสั้น ๆ เนื่องจากอะลูมิเนียมและอะลูมิเนียมผสมมีจุดหลอมเหลวต่ำ แต่มีความร้อนจำเพาะสูง ค่าการนำความร้อนสูงและค่าความร้อนแฝงสูง เมื่อเทียบกับเหล็กกล้า (Steel)

- 2) มีฟิล์มออกไซด์ที่ติดแน่นอยู่บริเวณผิว

อะลูมิเนียมและอะลูมิเนียมผสมจะสร้างฟิล์มออกไซด์ขึ้นมาเคลือบผิว ซึ่งฟิล์มออกไซด์จะขัดขวางการหลอมละลายระหว่างลวดเชื่อมและโลหะอะลูมิเนียม (โลหะฐาน)

### 3) มีการบิดงอสูง

อะลูมิเนียมและอะลูมิเนียมผสมจะมีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนที่สูงเมื่อเปรียบเทียบกับเหล็กกล้า ทำให้การเชื่อมอะลูมิเนียมมีการบิดงอมากเมื่อเทียบกับการเชื่อมเหล็กกล้า

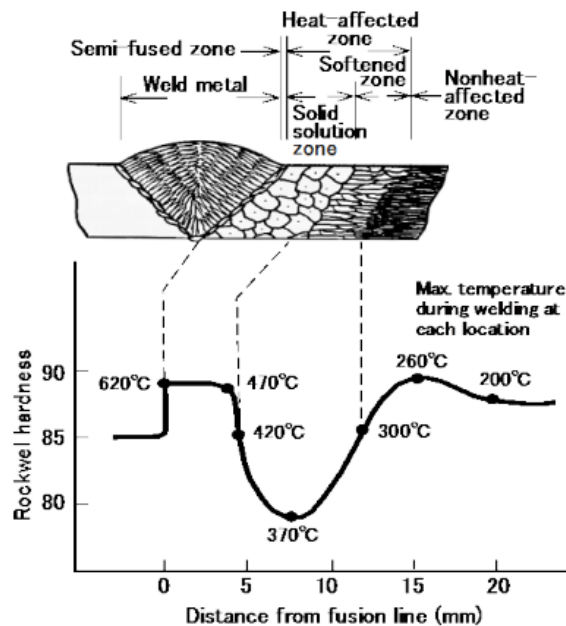
### 4) การอ่อนตัวบริเวณที่มีผลกระทบเนื่องมาจากความร้อน (HAZ)

การเชื่อมแบบหลอมละลายในอะลูมิเนียมและอะลูมิเนียมผสม [ยกเว้นเฉพาะอะลูมิเนียมชนิดที่ผ่านการอบอ่อน (Annealed)] ความร้อนจากเปลวอาร์คจะไปทำลายสภาพเวิร์คฮาร์ดเดนนิง (Work hardening) และการบ่ม (Aging) ทำให้บริเวณที่มีผลกระทบเนื่องมาจากความร้อนกลายเป็นสภาพถูกอบอ่อน ส่งผลให้บริเวณดังกล่าวเกิดการอ่อนตัวหลังจากทำการเชื่อม

ในกรณีของอะลูมิเนียมที่สามารถกระทำทางความร้อนได้ (Heat-treatable alloys) ค่าความแข็งบริเวณแนวเชื่อมจะมีความซับซ้อนมากกว่าดังแสดงในรูปที่ 2.5 โดยค่าความแข็งจะขึ้นอยู่กับช่วงอุณหภูมิค่าต่าง ๆ ที่กระทำกับบริเวณแนวเชื่อม บริเวณสารละลายของแข็ง (Solid solution zone) จะเกิดขึ้นที่ช่วงอุณหภูมิที่มีการกระทำทางความร้อนแบบอบละลายในเนื้ออะลูมิเนียมจึงส่งผลให้เกิดเกรนโต บริเวณอ่อนตัวจะเกิดขึ้นที่ช่วงของอุณหภูมิสูงกว่าการบ่ม (150 - 250°C) โดยการตกตะกอนมากเกินไปและบางส่วนถูกอบอ่อน (Annealed)

การอ่อนตัวของแนวเชื่อมในสภาพภายหลังการเชื่อม (as-welded condition) ส่งผลให้ค่าความแข็งลดต่ำลง โดยค่าการอ่อนตัวจะขึ้นอยู่กับชนิดของอะลูมิเนียมผสมและปริมาณความร้อนเข้า ในกรณี Al-Zn-Mg (e.g. Alloy 7N01) ค่าความแข็งสามารถเพิ่มขึ้นได้ขึ้นอยู่กับเวลาที่ผ่านไปหลังจากเชื่อม เนื่องมาจากการบ่มแข็งธรรมชาติ





รูปที่ 2.5 ค่าความแข็งที่กระจายอยู่บนแนวเชื่อมอะลูมิเนียมผสม 6061-T4 (Yamamoto 2008)  
ที่มา : ปรากฏ เมืองจันทร์บุรี (2555)

##### 5) วัตถุประสงค์การแตกร้อนมากกว่า

การแตกร้อนจะเกิดขึ้นบ่อยในการเชื่อมอะลูมิเนียมและอะลูมิเนียมผสม มักเกิดขึ้นที่อุณหภูมิใกล้กับเส้นของแข็ง (Solidus line) โดยเกิดการแตกในระหว่างการแข็งตัวของแนวเชื่อม หากกรรมวิธีการเชื่อมไม่เหมาะสม (ซึ่งประกอบไปด้วยอะลูมิเนียม ลวดเชื่อมและตัวแปรในการเชื่อม) การแตกร้อนของแนวเชื่อมจะเกิดขึ้น ซึ่งมีสาเหตุมาจากการแยกตัวออกมาของธาตุเจือและธาตุที่มีจุดหลอมเหลวต่ำลงที่บริเวณขอบเกรน

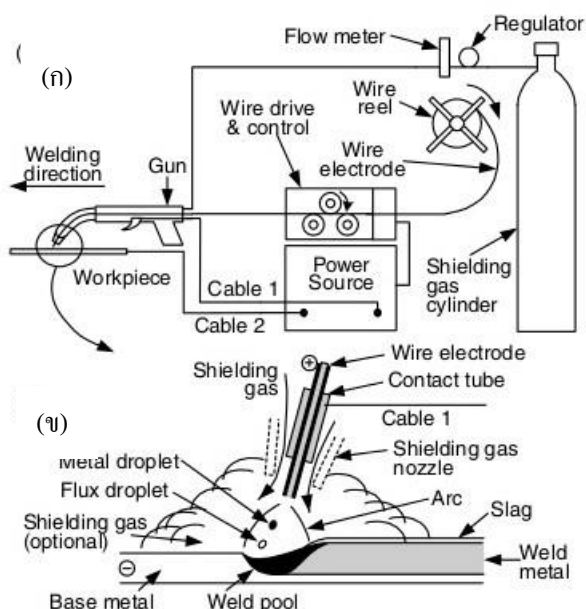
##### 6) การเกิดโพรงอากาศ

การเชื่อมแบบหลอมละลายในอะลูมิเนียมและอะลูมิเนียมผสม จะมีโอกาสเกิดโพรงอากาศในเนื้อเชื่อม เนื่องจากขณะที่อะลูมิเนียมเกิดการหลอมละลาย ไฮโดรเจนจะเข้าไปในเนื้อเชื่อม เมื่อเนื้อเชื่อมเกิดการแข็งตัวทำให้เกิดเป็นโพรงอากาศ

## 2.6 กระบวนการเชื่อมทิก

การเชื่อมแบบหลอมละลาย จะมีการแผ่กระจายของความร้อนที่ได้จากการอาร์คจนทำให้เกิดการหลอมละลายเข้าด้วยกันของเนื้อโลหะสองชิ้นบริเวณบ่อหลอม ในขณะที่โลหะแข็งตัวจะเกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างใหม่ซึ่งอาจจะไม่เหมือนกับโครงสร้างเดิมของโลหะนั้น ซึ่งกระบวนการเชื่อมอะลูมิเนียมแบบหลอมละลายที่นิยมใช้วิธีหนึ่งคือ กระบวนการเชื่อมทิก (Tungsten Inert gas หรือ TIG หรือในบางมาตรฐาน/ประเทศ ใช้คำว่า Gas Tungsten Arc welding หรือ GTAW) โดยใช้เชื่อมวัสดุจำพวกแมกนีเซียม อะลูมิเนียม และสแตนเลส นอกจากนี้ กระบวนการเชื่อมทิกยังสามารถเชื่อมได้ทั้งโลหะประเภทเหล็ก (Ferrous metals) และโลหะที่ไม่ใช่เหล็ก (Non Ferrous metal) ซึ่งถือว่าเป็นโลหะพิเศษที่ใช้กระบวนการเชื่อมอื่น ๆ ได้ยาก

การเชื่อมทิก (Tungsten Inert Gas, TIG หรือ Gas Tungsten Arc Welding, GTAW) เป็นกรรมวิธีการเชื่อมอาร์คแก๊สปกคลุมแบบไม่สิ้นเปลืองอิเล็กโทรด (Non-consumable electrode) แสดงดังรูปที่ 2.6 โดยที่รูปที่ 2.6 (ก) แสดงอุปกรณ์และวงจรของการเชื่อมทิก ส่วนรูปที่ 2.6 (ข) แสดงการอาร์คและแก๊สคลุม



รูปที่ 2.6 การเชื่อมทิก (ก) วงจรและอุปกรณ์การเชื่อมทิก (ข) หลักการเชื่อมทิก (Kou 2003)

ที่มา : ภาสกร เมืองจันทร์บุรี (2555)

การเชื่อมทิกจากรูปที่ 2.6 (ข) การอาร์คจะเกิดขึ้นระหว่างปลายอิเล็กโทรดทั้งสองกับโลหะงาน โดยมีแก๊สปกคลุมทำหน้าที่ป้องกันอิเล็กโทรดและบ่อหลอมจากบรรยากาศข้างนอก การเชื่อมทิกจะมีการป้อนลวดเชื่อมเข้าไปในบริเวณอาร์ค แต่ในบางกรณีที่เชื่อมโลหะบาง ๆ อาจไม่จำเป็นต้องเติมลวดเชื่อมก็ได้ โดยทั่วไปลวดเชื่อมจะมีลักษณะเป็นแท่งเปลือย (Rod) การเชื่อมทิกจะมีทั้งการเชื่อมบังคับด้วยมือกึ่งอัตโนมัติและอัตโนมัติ

### ตัวแปรของกระบวนการเชื่อมทิก ประกอบด้วยตัวแปรดังต่อไปนี้

- 1) กระแสไฟฟ้า (Arc current) เป็นตัวที่ควบคุมการซึมลึกของการเชื่อม ซึ่งกระแสไฟฟ้าที่ใช้เชื่อมนั้นจะมากหรือน้อยก็ขึ้นอยู่กับความหนาของชิ้นงานที่ต้องการเชื่อมด้วยและประเภทของกระแสไฟฟ้าที่ใช้ก็มีผลต่อลักษณะของบ่อหลอมด้วยเช่นกัน
- 2) แรงดันไฟฟ้า (Arc voltage) เป็นแรงดันไฟฟ้าระหว่างหัวทั้งสองกับชิ้นงาน ค่าแรงดันไฟฟ้าจะขึ้นอยู่กับกระแสไฟฟ้า ลักษณะรูปร่างของหัวทั้งสอง ระยะห่างระหว่างหัวทั้งสองกับชิ้นงานและชนิดของแก๊สปกคลุมที่ใช้
- 3) ความเร็วในการเชื่อม (Travel speed) มีผลกระทบต่อการซึมลึกในการเชื่อม ถ้าความเร็วในการเชื่อมเร็วเกินไปอาจทำให้ลวดเชื่อมไม่สามารถหลอมรวมเข้ากับชิ้นงานได้ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับอัตราการป้อนลวดด้วย
- 4) อัตราการป้อนลวด (Wire feed rate) เป็นความเร็วในการป้อนลวดเชื่อมลงไปบ่อหลอม ถ้าป้อนลวดช้าเกินไปจะทำให้ลวดเชื่อมไม่สามารถหลอมรวมเข้ากับชิ้นงาน (undercut) หรือเกิดการแตกร้าว (cracking)
- 5) แก๊สสำหรับใช้ปกคลุมแนวเชื่อม

### การเลือกลวดเชื่อมในกระบวนการเชื่อมทิก (Selection of filler metal)

ลวดเชื่อมที่เหมาะสมควรสามารถปรับปรุงสมบัติของโลหะแนวเชื่อมให้ดีขึ้นด้วยการเพิ่มธาตุบางอย่างลงไปแนวเชื่อม ในการเลือกลวดเชื่อมที่เหมาะสมนั้น ควรพิจารณาถึงความเสี่ยงในการแตก ความแข็งของแนวเชื่อม ค่าความเหนียว การทนต่อการกัดกร่อน และสีของแนวเชื่อมที่ไม่แตกต่างกันระหว่างโลหะพื้นฐานกับแนวเชื่อม ตารางที่ 2.5 แสดงชนิดของลวดเชื่อมที่เหมาะสมกับอะลูมิเนียมแต่ละเกรด โดยการเชื่อมอะลูมิเนียมนิยมลวดเชื่อมเกรด 4043 และ เกรด 5356 เป็นหลัก

ตารางที่ 2.5 สมบัติทางเคมีและทางกลของลวดเชื่อม<sup>(1)</sup> (Yamamoto 2008)

เกรดลวด เชื่อม	%ของส่วนผสมทางเคมีในลวดเชื่อม <sup>(2)</sup>								ทดสอบการดึง	
	Si	Cu	Mn	Mg	Cr	V	Zr	Ti	เกรดอะลูมิเนียม ที่ทดสอบ	ความแข็งแรงดึง <sup>(3)</sup> (N/mm <sup>2</sup> )
1070									1100-O or 1200-O	55 min
1100		0.13								75 min
1200										
2319		6.3	0.30			0.10	0.18	0.15	2219-T62 or 2014-T6	245 min
4043	5.3								6061-T6	165 min
4047	12.0									
5554			0.75	2.7	0.13			0.13	5454-O	215 min
5654				3.5	0.25			0.10	5254-O	205 min
5356			0.13	5.0	0.13			0.13	5083-O	265 min
5556			0.75	5.1	0.13			0.13		275 min
5183			0.75	4.8	0.15					

หมายเหตุ (1) ตัดมาจากมาตรฐาน JIS Z 3232<sub>-2000</sub>

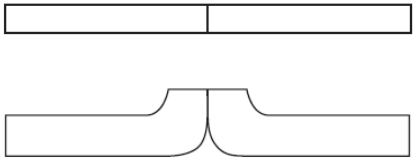
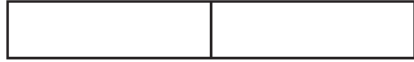
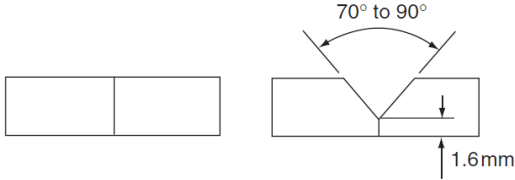
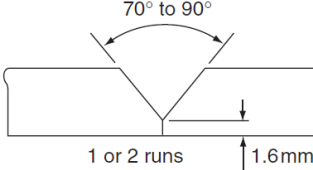
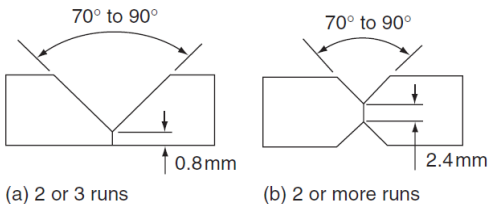
(2) อะลูมิเนียมอย่างน้อย 99.70% เกรด 1070; อะลูมิเนียมอย่างน้อย 99.00% เกรด 1100; อะลูมิเนียมอย่างน้อย 99.00% เกรด 1200

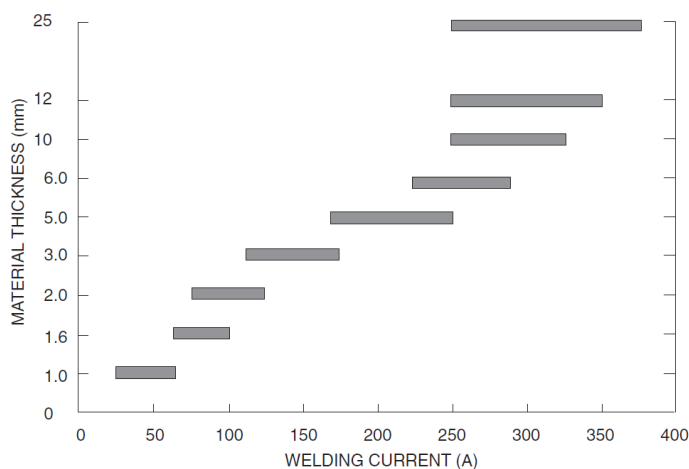
(3) ในสถานะเชื่อม (As-Welded Condition)

ที่มา : ปรึกษา เมืองจันทร์บุรี (2555)

สำหรับการออกแบบการวางชิ้นงานอะลูมิเนียมผสมในการเชื่อมต่อชนโดยใช้วิธีการเชื่อมทิกนั้น ดังแสดงในตารางที่ 2.6 เป็นการแสดงเงื่อนไขในการเตรียมชิ้นงานเชื่อมอะลูมิเนียมผสม โดยอ้างอิงจากความหนาของชิ้นงานนำไปสู่การเลือกลักษณะการต่อชนและมุมของชิ้นงานก่อนทำการเชื่อมทิกตามมาตรฐาน BS 3019 และจากรูปที่ 2.7 แสดงเงื่อนไขการเลือกกระแสไฟฟ้าในการเชื่อมทิกกับชิ้นงานอะลูมิเนียมผสม

ตารางที่ 2.6 การเตรียมการสำหรับเชื่อมทิกตามมาตรฐาน BS 3019

Thickness (mm)	Edge preparation	Remarks
20 swg = 0.9 mm และ 16 swg = 1.6 mm		Flanging should be used only where square edge close butt welds are impracticable
3.8 mm		Where a backing bar cannot be used, welding from both sides is recommended
4.8 mm		
6.4 mm		If no backing bar is used, it is good practice to chip back to sound metal and add sealing run
9.5 mm		(a) If no backing bar is used, chip back to sound metal and add sealing run  (b) Chip back first run to sound metal before welding underside



รูปที่ 2.7 ช่วงของกระแสไฟฟ้าในการเชื่อมทิกสำหรับความหนาต่าง ๆ

ที่มา : Mathers (2002)

### สมบัติพื้นฐานของแก๊สปกคลุมรอยเชื่อม ได้แก่

- 1) สามารถปกคลุมบริเวณอาร์ค ป้องกันอากาศภายนอกเข้ามาทำปฏิกิริยาและความสกปรกกับโลหะหลอมเหลว เช่น ไนโตรเจน ออกซิเจนและความชื้น
- 2) สมบัติทางความร้อน ได้แก่ การนำความร้อน การพาความร้อน ซึ่งมีอิทธิพลต่อแรงเคลื่อนอาร์คและมีผลต่อรูปร่างรอยเชื่อม
- 3) การเกิดปฏิกิริยา บริเวณผิวหน้าชิ้นงาน เช่น ปฏิกิริยาทำความสะอาดชิ้นงานเพื่อกำจัดออกไซด์ออก

แก๊สคลุมที่ใช้สำหรับการเชื่อมอะลูมิเนียมและอะลูมิเนียมผสม โดยปกติจะใช้แก๊สอาร์กอนเป็นหลัก หรืออาจจะมีการผสมแก๊สฮีเลียมไปด้วย แก๊สฮีเลียมจะช่วยเพิ่มการส่งถ่ายความร้อน (Heat transfer) และเหมาะสำหรับในกรณีการเชื่อมโลหะหนา กระแสเชื่อมที่ใช้ จะเป็นกระแสสลับ (AC) ที่ช่วงกระแสเชื่อมต่ำ หรืออาจจะเป็นกระแสตรงโดยที่อิเล็กโทรดเป็นขั้วบวก การใช้กระแสตรงเชื่อมโดยใช้แก๊สฮีเลียมเป็นแก๊สคลุม โดยที่อิเล็กโทรดเป็นขั้วลบสามารถเชื่อมในท่าขนานนอน (Horizontal) และท่าขนานนอน-ทำตั้ง (Horizontal - vertical) ได้ โดยที่แรงดันเชื่อมที่สูงขึ้นจะเป็นผลมาจากการใช้ฮีเลียมเป็นแก๊สคลุม จึงสามารถเพิ่มอัตราการเชื่อมได้ ค่าแรงดันวงจรเปิด (Open - circuit voltage) ของเครื่องเชื่อมจะต้องมีค่าสูงพอที่จะป้องกันอาร์คดับ การใช้

แก๊สอาร์กอนเป็นแก๊สคลุมสามารถช่วงทำให้การทำความสะดวกผิวออกไซด์ดีขึ้น และยังช่วยทำให้ อาร์คเสถียรและเพิ่มคุณภาพของงานเชื่อมด้วย

### ข้อดีของการเชื่อมทิก

- 1) ให้อาร์คที่เสถียรภาพ
- 2) ให้งานเชื่อมที่มีคุณภาพดี

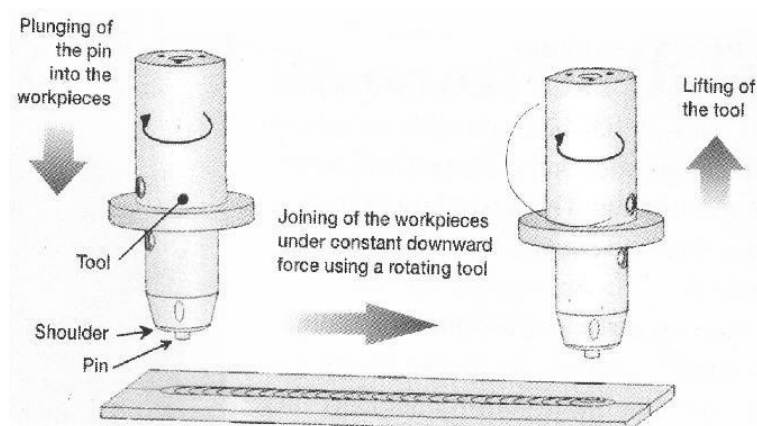
การเชื่อมทิกเหมาะกับการเชื่อมโลหะคุณภาพสูง เช่น เหล็กกล้าไร้สนิม (Stainless steel) เหล็กกล้าเจือต่ำทนความร้อน (Heat resistance low alloy steel) และการเชื่อมโลหะนอกกลุ่ม เหล็ก เช่น อะลูมิเนียมและอะลูมิเนียมผสม แมกนีเซียมและแมกนีเซียมผสม ทองแดงและทองแดงผสม เป็นต้น การเชื่อมทิกมีความเหมาะสมมากกับการเชื่อมโลหะแผ่นบาง (0.5 - 3 มม.)

## 2.7 กระบวนการเชื่อมเสียดทานแบบกวน

การเชื่อมเสียดทานแบบกวน (Friction Stir Welding หรือ FSW) เป็นกระบวนการเชื่อมในสถานะของแข็ง (Solid state welding) ที่คิดค้นโดยสถาบันการเชื่อมอังกฤษ (The Welding Institute หรือ TWI) ในปี ค.ศ.1991 เพื่อเชื่อมวัสดุที่ยากต่อการเชื่อมด้วยกระบวนการเชื่อมแบบหลอมละลาย เช่น อะลูมิเนียมผสมเกรดต่าง ๆ มากมาย กระบวนการเชื่อมเสียดทานแบบกวน ทำให้เกิดโครงสร้างของแนวเชื่อมที่มีเกรนเล็กละเอียด สามารถรับแรงได้สูง ซึ่งข้อดีของการเชื่อมเสียดทานแบบกวนอีกทางหนึ่ง คือ ไม่ต้องใช้โลหะเติมและแก๊สปกคลุมขณะเชื่อม โดยไม่ก่อให้เกิดควันหรือฝุ่นละอองขณะเชื่อม นอกจากนี้กระบวนการเชื่อมเสียดทานแบบกวนนี้ ได้มีการประยุกต์ใช้ในการเชื่อมวัสดุต่างชนิดที่ยากต่อการเชื่อมแบบหลอมละลาย เนื่องจากความยากลำบากในการควบคุมความร้อนในบริเวณแนวเชื่อม

การเชื่อมเสียดทานแบบกวนจัดเป็นการเชื่อมในสถานะของแข็งซึ่งโลหะจะเชื่อมติดกันโดยความร้อนจากแรงเสียดทาน โดยที่บ่าสัมผัสแผ่นงานและหมุนด้วยความเร็วยังอยู่ในสถานะกึ่งของแข็ง โลหะบางประเภทจะหลีกเลี่ยงการเชื่อมต่อที่อุณหภูมิของการหลอมละลาย เนื่องจากที่อุณหภูมิหลอมละลายเมื่อโลหะแข็งตัวจะเกิดโครงสร้างขึ้นมาใหม่ ซึ่งจะแตกต่างจากโครงสร้างเริ่มต้นของโลหะนั้น จากรอบตามที่กำหนดพร้อมกับความเร็วในการเชื่อม และแรงกดในขณะที่

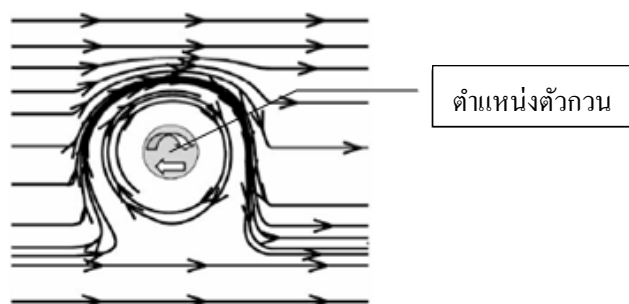
เชื่อม การเชื่อมเสียดทานแบบกวนมีตัวแปรที่เกี่ยวข้องในการเชื่อมคือ แรงกด (Down force) ความเร็วรอบของ Tool ความเร็วในการเชื่อมและมุมเอียงของ Tool (Tilt Angle) ดังรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 หลักการเชื่อมเสียดทานแบบกวน

ที่มา : Zah et al. (2004)

การเชื่อมเสียดทานแบบกวน ทิศทางและการเคลื่อนที่ของเครื่องมือ เมื่อปาดสัมผัสแผ่นงาน ทำให้เกิดการเสียดทานก่อให้เกิดความร้อนและเนื้อโลหะอยู่ในสถานะที่เสียรูป (Plastic deformation) และเกิดการไหลวนของโลหะรอบตัวกวน ขณะที่เครื่องมือหมุนด้วยความเร็วรอบและเคลื่อนที่ด้วยความเร็วในการเชื่อม ทำให้เนื้อโลหะประสานติดกันด้วยการกวน ดังรูปที่ 2.9



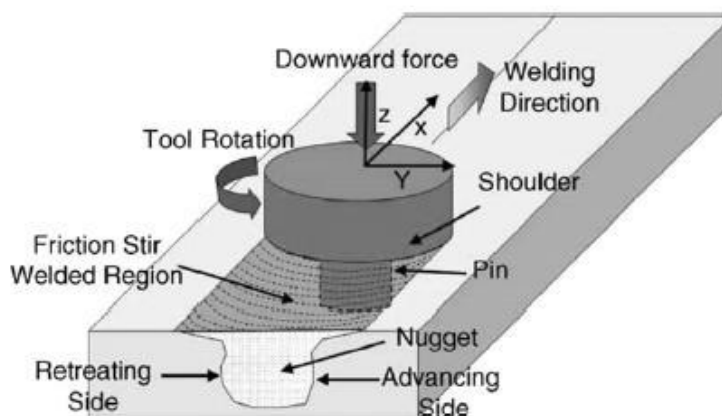
รูปที่ 2.9 ทิศทางและการกวนของตัวกวน

ที่มา : Zah et al. (2004)



### องค์ประกอบในการเชื่อมด้วยการเสียดทานแบบกวน

ปัจจัย กระบวนการ และผลของการเชื่อมด้วยการเสียดทานแบบกวน ปัจจัยหลักในการเชื่อมประกอบด้วยความเร็วรอบของ Tool และความเร็วในการเชื่อม กระบวนการ อุณหภูมิ และแรงกดของ Tool แรงปัดและแรงในแนวแกน  $F_x$  และ  $F_y$  แรงกดใน  $F_z$  ในการเชื่อมแบบต่อเนื่อง แรงกดใน  $F_z$  ลดลง ภายใต้กระบวนการเชื่อมที่ถูกควบคุมในทิศทางของการเชื่อมเสียดทานแบบกวน และจุดรวมของแรงทั้งสามแกนดังรูปที่ 2.10 ผลที่ได้สมบัติทางกล คือ ความแข็งแรง ความแข็งของรอยเชื่อม บริเวณอิทธิพลความร้อนและเนื้อเชื่อม โครงสร้างทางโลหะวิทยาด้าน Advancing Side และ Retreating Side



รูปที่ 2.10 การเชื่อมเสียดทานแบบกวน (FSW)

ที่มา : Zah และคณะ (2004)

ปัจจัยที่มีผลต่อแนวเชื่อมประกอบด้วย ความเร็วรอบ ความเร็วเชื่อม แรงกด และมุมเอียงของหัวทูล โดยจะส่งผลกระทบต่อลักษณะของผิวแนวเชื่อม รวมไปถึงข้อบกพร่อง (Defect) ที่เกิดขึ้นในแนวเชื่อม เนื่องจากการเลือกปัจจัยในการเชื่อมที่ไม่เหมาะสมและความร้อนเข้า (Heat input) ที่ส่งผลกระทบต่อแนวเชื่อมสามารถทำให้เกิดข้อบกพร่องได้เช่นกัน สามารถคำนวณค่าความร้อนเข้าได้จากสมการที่ 2.1

$$Q = \frac{4}{3} \pi^2 \frac{\mu \alpha N P r^3}{v} \quad (2.1)$$

เมื่อ	Q	คือ ความร้อนเข้า (Heat input)
	$\mu$	คือ สัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน (Friction coefficient)
	$\alpha$	คือ สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน
	N	คือ ความเร็วรอบ (Rotation speed, rpm)
	P	คือ แรงกด (Pressure, N)
	r	คือ รัศมีของบ่า (Radius of shoulder, mm)
	v	คือ ความเร็วเชื่อม (Welding speed, mm/min)

ข้อดีของการเชื่อมเสียดทานแบบกวน (ประกาศ เมื่อจันทร์บุรี 2555)

1. ไม่ต้องใช้วัสดุสิ้นเปลือง เช่น ลวดเชื่อมหรือแก๊สคลุม
2. โครงสร้างจุลภาคเปลี่ยนแปลงเล็กน้อย เนื่องจากเนื้อเชื่อมไม่เกิดการหลอม

ละลาย

3. ไม่มีควันที่เป็นอันตรายต่อผู้ปฏิบัติงานหรือสิ่งแวดล้อม
4. เนื้อเชื่อมให้สมบัติทางกลที่ดี เนื่องจากไม่สูญเสียธาตุเจือเนื่องจากความร้อน
5. สามารถเชื่อมชิ้นงานขนาดบางได้ดี

## 2.8 การวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance: ANOVA)

การวิเคราะห์ความแปรปรวน คือ วิธีการทางสถิติเพื่อใช้ยืนยันความแตกต่างระหว่างค่าเฉลี่ยของประชากร ( $\mu_i$ ) ตั้งแต่ 2 กลุ่มขึ้นไป รูปแบบของการตั้งสมมติฐานของการวิเคราะห์ความแปรปรวนสามารถเขียนได้ดังนี้ (ภัทรสินี ภัทร โภศล 2550)

$$H_0: \mu_1 = \mu_2 = \dots = \mu_n$$

$H_1$  : มี  $\mu_i$  อย่างน้อยหนึ่งค่าที่แตกต่างจากค่า  $\mu_j$  อื่น อย่างมีนัยสำคัญ

เมื่อ  $i, j = 1, 2, 3, \dots, n$  และ  $i \neq j$

ความแตกต่างของกลุ่มประชากรนั้นมักพิจารณาจากการใส่ปัจจัยต่าง ๆ ให้กับกลุ่มประชากรหลัก เพื่อให้เกิดความเปลี่ยนแปลงของกลุ่มประชากร ซึ่งโดยทั่วไปนั้นมักนิยมทดลองจากการเลือกกลุ่มตัวอย่างเพื่อทดลองเสมอ และปัจจัยที่ใส่แก่กลุ่มตัวอย่างที่เลือกจากกลุ่มประชากรหลักนั้นเรียกว่า ทรีตเมนต์ (Treatment) เช่น หากทดสอบประสิทธิภาพของยาควบคุมระดับน้ำตาลในเลือด

โดยการให้ผู้ป่วยโรคเบาหวานจำนวน 300 คน แบ่งออกเป็น 3 กลุ่ม กลุ่มละ 100 คน ได้รับความควบคุมระดับน้ำตาลในเลือดที่แตกต่างกัน จะเรียกยาที่ให้แก่ผู้ป่วยกลุ่มอาสาสมัครนี้ว่าทรีตเมนต์ เนื่องจากยาที่ให้จะส่งผลให้ระดับน้ำตาลในเลือดของผู้ป่วยกลุ่มอาสาสมัครแตกต่างกันไปจากระดับน้ำตาลในเลือดปกติของผู้ป่วย เป็นต้น

โดยทั่วไปแล้วการตั้งสมมติฐานในการวิเคราะห์ความแปรปรวนมักจะทำเพื่อพิสูจน์ว่าค่าเฉลี่ยของผลการทดลองภายใต้ทรีตเมนต์ต่าง ๆ มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญหรือไม่ ซึ่งผลที่ได้จะสามารถสรุปได้ว่าการใช้ทรีตเมนต์ที่แตกต่างกันนั้นจะให้ผลกระทบต่อกลุ่มประชากรแตกต่างกันหรือไม่นั่นเอง

ดังนั้น วิธีการพิจารณาการตั้งสมมติฐานเบื้องต้น คือ การพิจารณาว่าค่าเฉลี่ยของค่าสังเกตภายใต้ทรีตเมนต์ต่าง ๆ นั้นแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญหรือไม่ สมมติฐานเบื้องต้นหรือเรียกว่าสมมติฐานหลัก จะอยู่ในรูปของ  $H_0$  (Main hypothesis, Null hypothesis) และสมมติฐานที่คิดว่าจะขัดแย้งกับสมมติฐานเบื้องต้นหรือเรียกว่า สมมติฐานรอง (Alternative hypothesis) ที่ตั้งจะอยู่ในรูปของ  $H_1$  ดังนี้

$H_0$ : ค่าเฉลี่ยค่าสังเกตที่ได้จากการทดลองของทรีตเมนต์ที่ต่างกัน ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ

$H_1$ : ค่าเฉลี่ยของค่าสังเกตที่ได้จากการทดลองอย่างน้อยหนึ่งค่าที่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญกับค่าเฉลี่ยค่าสังเกตที่ใช้ทรีตเมนต์อื่น

การพิจารณาความแตกต่างนั้นจะต้องมีคำว่า “อย่างมีนัยสำคัญ” อยู่เสมอ ทั้งนี้เนื่องจากการพิจารณากระทำโดยวิธีการคำนวณค่าทางสถิติจากกลุ่มตัวอย่างเพื่อแทนคุณสมบัติของกลุ่มประชากร โดยทั่วไปความแปรปรวนของข้อมูลจากการทดลองสามารถพิจารณาได้ 2 รูปแบบ คือ ความแปรปรวนของข้อมูลภายในกลุ่มทดลอง (Within-sample variation) และความแปรปรวนของข้อมูลระหว่างกลุ่มทดลอง (Between-sample variation)

### 2.8.1 การคำนวณค่าเพื่อวิเคราะห์ความแปรปรวนของการทดลองแบบจำแนกทางเดียว

การทดลองแบบจำแนกทางเดี่ยวนี้อาจมีจำนวนค่าสังเกตการทดลองในแต่ละกลุ่มเท่ากันหรือไม่ก็ได้ อย่างไรก็ตาม จำนวนค่าสังเกตการทดลองในแต่ละกลุ่มไม่ควรแตกต่างกันมากนัก

เนื่องจากจะมีผลค่าความแปรปรวนของค่าสังเกตภายในกลุ่มการทดลองแตกต่างกันและไม่สามารถนำค่าสังเกตมาวิเคราะห์ได้

กำหนดให้ การทดลองมีจำนวนทริตเมนต์เท่ากับ  $t$

ขนาดของกลุ่มทดลอง คือ  $n_1, n_2, \dots, n_t$  ภายใต้ทริตเมนต์ที่  $1, 2, \dots, t$  ตามลำดับ

สามารถเขียนตารางค่าสังเกตได้ดังตารางที่ 2.7

สมมติฐานของการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบจำแนกทางเดียวเขียนได้

ดังนี้

$$H_0: \mu_1 = \mu_2 = \dots = \mu_t$$

$H_1$ : มี  $\mu_i$  อย่างน้อยหนึ่งค่าที่แตกต่างจากค่า  $\mu_j$  อื่น อย่างมีนัยสำคัญ

เมื่อ  $\mu_i$  หรือ  $\mu_j$  คือ ค่าเฉลี่ยค่าสังเกตภายใต้ทริตเมนต์ที่  $i, j$  และค่าของ  $i \neq j$

หรือสามารถเขียนได้ว่า

$H_0$ : ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญของค่าเฉลี่ยค่าสังเกตจากการทดลองเมื่อใช้ทริตเมนต์ที่ต่างกัน

$H_1$ : มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญของค่าเฉลี่ยค่าสังเกตจากการทดลองเมื่อใช้ทริตเมนต์ที่ต่างกันอย่างน้อยหนึ่งทริตเมนต์

ตารางที่ 2.7 ค่าสังเกตจากการทดลองแบบจำแนกทางเดียว

ทริตเมนต์								
	Tr-1	Tr-2	Tr-3	.	.	.	Tr-t	
	$y_{11}$	$y_{21}$	$y_{31}$	.	.	.	$y_{t1}$	
	$y_{12}$	$y_{22}$	$y_{32}$	.	.	.	$y_{t2}$	
	.	.		.	.	.		
	.	.		.	.	.		
	.	.		.	.	.		
	$y_{1n_1}$	$y_{2n_2}$	$y_{3n_3}$	.	.	.	$y_{tn_t}$	
ผลรวม	$y_1$	$y_2$	$y_3$	.	.	.	$y_t$	$y_{\cdot}$
ค่าเฉลี่ย	$\bar{y}_1$	$\bar{y}_2$	$\bar{y}_3$				$\bar{y}_t$	$\bar{y}_{\cdot}$

สูตรในการคำนวณเพื่อหาตารางการวิเคราะห์ความแปรปรวนของการทดลองมี  
ดังนี้

จำนวนค่าสังเกตรวม

$$N = \sum_{i=1}^t n_i \quad (2.2)$$

ผลรวมกำลังของค่าเฉลี่ย

$$c = \frac{(\sum_{i=1}^t \sum_{j=1}^{n_i} y_{ij})^2}{N} \quad (2.3)$$

ผลรวมกำลังสองระหว่างทรีตเมนต์

$$SSTR = \sum_{i=1}^t \frac{y_i^2}{n_i} - c \quad (2.4)$$

ผลรวมของค่าสังเกตทั้งหมด

$$SSTOT = \sum_{i=1}^t \sum_{j=1}^{n_i} y_{ij}^2 - c \quad (2.5)$$

ผลรวมกำลังสองของค่าความคลาดเคลื่อนการทดลอง (Sumsquare error) หรือ  
ผลรวมกำลังสองของค่าสังเกตภายในทรีตเมนต์ (Sumsquare within treatments)

$$SSER = SSTOT - SSTR \quad (2.6)$$

ตารางที่ 2.8 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของการทดลองแบบจำแนกทางเดียว

แหล่งต้นทางความแปรปรวน	องศาอิสระ	ค่าผลรวมกำลังสอง	ค่าเฉลี่ยกำลังสอง
ทรีตเมนต์	t-1	SSTR	$MSTR = \frac{SSTR}{(t-1)}$
ความคลาดเคลื่อน	N-t	SSER	$MSER = \frac{SSER}{(N-t)}$
รวม	N-1	SSTOT	

ค่าเฉลี่ยกำลังสองของทรีตเมนต์เรียกว่า ค่าความแปรปรวนระหว่างทรีตเมนต์ (between treatment variances) นอกจากนี้แล้ว ค่าเฉลี่ยกำลังสองของความคลาดเคลื่อน เรียกอีกนัย

หนึ่งว่าค่าความแปรปรวนภายในทรีตเมนต์ (within treatment variances) ค่าของ  $F$  จะสามารถพิจารณาได้จากค่าเฉลี่ยของค่าคาดคะเนต่าง ๆ ดังนี้

กรณีการทดลองเป็น โมเดลครึ่ง

$$E(\text{MSTR}) = \sigma^2 + \frac{n}{(t-1)} \sum_{i=1}^t \tau_i^2 \quad (2.7)$$

$$E(\text{MSER}) = \sigma^2 \quad (2.8)$$

$$F = \frac{\text{MSTR}}{\text{MSER}} \quad (2.9)$$

$$DF = (t-1, N-t) \quad (2.10)$$

กรณีการทดลองเป็น โมเดลแบบเลือก

$$E(\text{MSTR}) = \sigma^2 + n\sigma_{\tau}^2 \quad (2.11)$$

$$E(\text{MSER}) = \sigma^2 \quad (2.12)$$

$$F = \frac{\text{MSTR}}{\text{MSER}} \quad (2.13)$$

$$DF = (t-1, N-t) \quad (2.14)$$

### การสรุปผล

การพิจารณายอมรับหรือปฏิเสธสมมติฐานที่ได้ตั้งไว้จะสามารถพิจารณาโดยการเทียบค่า  $F$  ที่คำนวณได้กับค่า  $F$  ที่หาได้จากตารางเมื่อระดับนัยสำคัญเท่ากับ  $\alpha$  หรือความผิดพลาดในการทดลองไม่เกิน  $\alpha$  และองศาอิสระ  $(t-1, N-t)$  ตามที่กำหนดไว้ดังนี้

- หากค่า  $F$  ที่คำนวณได้มีค่ามากกว่าค่า  $F$  ที่หาได้จากตาราง หรือเรียกว่าค่าของ  $F$  ที่คำนวณตกในบริเวณวิกฤติ จะสรุปผลว่ามีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญระหว่างค่าเฉลี่ยค่าสังเกตที่ได้จากการทดลองเมื่อใช้ทรีตเมนต์ต่างกัน หรือเป็นการปฏิเสธสมมติฐาน  $H_0$  ยอมรับ  $H_1$

- หากค่า  $F$  ที่คำนวณได้มีค่าน้อยกว่าค่า  $F$  ที่หาได้จากตาราง จะสรุปผลว่า ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญระหว่างค่าเฉลี่ยค่าสังเกตที่ได้จากการทดลองเมื่อใช้ทรีตเมนต์ต่างกัน หรือเป็นการยอมรับสมมติฐาน  $H_0$  ที่ได้ตั้งไว้

นอกจากการพิจารณาสรุปผลจากค่า  $F$  ที่ได้จากการคำนวณแล้ว ยังสามารถพิจารณาสรุปผลจากพื้นที่ใต้กราฟ (P-value) ที่คำนวณได้อีกด้วย กล่าวคือ

- หาก  $P$  ที่คำนวณได้มีค่ามากกว่าค่า  $\alpha$  แล้วจะสรุปผลว่า ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญระหว่างค่าเฉลี่ยค่าสังเกตที่ได้จากการทดลองเมื่อใช้ทรีตเมนต์ต่างกัน หรือเป็นการยอมรับสมมติฐาน  $H_0$  ที่ได้ตั้งไว้

- หาก  $P$  ที่คำนวณได้มีค่าน้อยกว่าค่า  $\alpha$  แล้วจะสรุปผลว่า มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญระหว่างค่าเฉลี่ยค่าสังเกตที่ได้จากการทดลองเมื่อใช้ทรีตเมนต์ต่างกัน หรือเป็นการปฏิเสธสมมติฐาน  $H_0$  ยอมรับ  $H_1$

### 2.8.2 การเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยระหว่างกลุ่มทดลองและการเปรียบเทียบพหุนาม

การเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยระหว่าง 2 ค่าเฉลี่ยการทดลองว่ามีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญหรือไม่ จัดเป็นกระบวนการที่ต้องทำหลังจากได้พิสูจน์แล้วว่า ค่าเฉลี่ยของค่าสังเกตจากการทดลองเมื่อใช้ทรีตเมนต์ต่าง ๆ กัน มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ วิธีการพิจารณาหาข้อสรุปว่าค่าเฉลี่ยคู่ใดมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งเป็นการส่งเสริมข้อสรุปจากการวิเคราะห์ความแปรปรวนที่ได้กระทำไปแล้ว

#### วิธีของตุรกี (Turkey)

การคำนวณเพื่อเปรียบเทียบระหว่างค่าเฉลี่ยค่าสังเกต 2 ค่า ว่ามีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญหรือไม่นั้นจะขึ้นกับค่าของ  $t$ -test โดยมีหลักการพื้นฐานดังนี้

1. กลุ่มตัวอย่างเป็นอิสระต่อกัน
2. การกระจายของประชากรเป็นการแจกแจงปกติ
3. ความแปรปรวนของทุกกลุ่มตัวอย่างมีค่าเท่ากับค่าความแปรปรวนของกลุ่มประชากร
4. ขนาดของกลุ่มทดลองกลุ่มที่  $i$  และกลุ่มที่  $j$  คือ  $n_i$  และ  $n_j$  ตามลำดับ
5. ค่าเฉลี่ยของกลุ่มการทดลอง 2 กลุ่มคือ  $\bar{y}_i$  และ  $\bar{y}_j$

### สมมติฐานการทดสอบ

$$H_0: \mu_i = \mu_j$$

$$H_1: \mu_i \neq \mu_j$$

### การวิเคราะห์

กำหนดให้  $t$  คือ จำนวนทริตเมนต์ที่ใช้ในการทดลอง และ  $N$  คือ จำนวนค่าสังเกตทั้งหมดในการทดลอง

พิจารณาหาค่าของ Studentized-Range หรือค่า  $q$  ที่ระดับนัยสำคัญ  $\alpha$  และพารามิเตอร์แรก ( $K$ ) และพารามิเตอร์สอง ( $V$ ) มีค่า  $t$  และ  $N - t$  ตามลำดับ

กำหนดให้ค่าเฉลี่ยสังเกตของกลุ่มทดลองที่นำมาพิจารณา คือ  $\bar{y}_i$  และ  $\bar{y}_j$

จำนวนค่าสังเกตภายใต้ทริตเมนต์ที่  $i$  และ  $j$  ที่  $n_i$  และ  $n_j$  ตามลำดับ

คำนวณช่วงของความเชื่อมั่นที่ใช้ในการพิจารณาค่า  $\mu_i - \mu_j$  ดังนี้

$$\left(\bar{y}_i - \bar{y}_j\right) \pm q_{\alpha, (K, V)} \sqrt{\left[\left(\frac{MSER}{2}\right) \times \left[\left(\frac{1}{n_i}\right) + \left(\frac{1}{n_j}\right)\right]\right]} \quad (2.15)$$

### การสรุปผล

การยอมรับสมมติฐาน ( $H_0$ ) หรือกล่าวว่า ค่าเฉลี่ยสังเกตของผลการทดลองด้วยทริตเมนต์ที่  $i$  และ  $j$  ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญเมื่อช่วงความเชื่อมั่นที่คำนวณได้มีค่า 0 ปรากฏในช่วงดังกล่าว มิฉะนั้นแล้วจะปฏิเสธสมมติฐาน หรือกล่าวว่า ค่าเฉลี่ยสังเกตของผลการทดลองด้วยทริตเมนต์ที่  $i$  และ  $j$  มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ



### บทที่ 3

#### วิธีการดำเนินงานวิจัย

งานวิจัยนี้ทำการศึกษาเพื่อเปรียบเทียบ โครงสร้างมหภาคและสมบัติทางกลของรอยเชื่อม จากกระบวนการเชื่อมเสียดทานแบบกวน การเชื่อมทิกแบบเต็มลวด และการเชื่อมทิกแบบไม่เต็มลวด โดยในบทนี้จะกล่าวถึงขั้นตอนและกระบวนการดำเนินงานวิจัย เริ่มตั้งแต่ขั้นตอนการเตรียมวัสดุ อุปกรณ์และเครื่องจักรที่ใช้ในงานวิจัย ขั้นตอนการเชื่อมในแต่ละกระบวนการ รวมถึงการนำชิ้นงานไปทดสอบสมบัติต่าง ๆ

#### 3.1 วัสดุที่ใช้ในการดำเนินงานวิจัย

##### 3.1.1 อะลูมิเนียมผสม

วัสดุที่นำมาใช้ในงานวิจัยประกอบด้วยอะลูมิเนียมผสมสองชนิด คือ อะลูมิเนียมผสมหล่อกิ่งแข็ง SSM 356 และอะลูมิเนียมผสมหล่อกิ่งแข็ง SSM 6061 ที่ได้จากการหล่อแบบกิ่งของแข็งด้วยเทคนิค GISS (Gas Induced Semi-Solid) ดังรูปที่ 3.1 ขนาดกว้าง 50 มิลลิเมตร ยาว 100 มิลลิเมตร หนา 4 มิลลิเมตร มีส่วนผสมทางเคมีตามตารางที่ 3.1



(ก)



(ข)

รูปที่ 3.1 อะลูมิเนียมหล่อผสมด้วยกระบวนการหล่อแบบกิ่งของแข็ง

ตารางที่ 3.1 ส่วนผสมทางเคมีของวัสดุทดลอง (wt%)

Element	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Ti	Cr	Ni	Al
SSM 356	7.74	0.57	0.05	0.06	0.32	0.01	0.05	0.02	0.01	Bal.
SSM 6061	0.60	0.70	0.28	0.15	1.00	0.25	0.15	0.20	-	Bal.

ที่มา : Tehyo et al. (2011)

### 3.1.2 ลวดเชื่อม (Electrode)

ลวดเชื่อมเกรด 4043 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.4 มิลลิเมตร เป็นวัสดุเนื้อเต็มในกระบวนการเชื่อมทิกแบบเติมลวด โดยมีธาตุซิลิกอนเป็นองค์ประกอบหลักและมีธาตุอื่น ๆ ผสมอยู่ ดังแสดงในตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 ส่วนผสมทางเคมีของโลหะเติม (wt%)

Filler metal	Si	Mg	Cu	Fe	Mn	Zn	Ti	Cr	Al
AA4043	5.0	0.05	0.30	0.80	0.05	0.10	0.2	-	Bal.

ที่มา : Tehyo et al. (2011)

## 3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย

3.2.1 อุปกรณ์ในการเชื่อมทิก ประกอบด้วยอุปกรณ์ที่สำคัญ คือ เครื่องเชื่อม (Power source) ระบบระบายความร้อน (Cooling system) แก๊สปกคลุม (Shielding gas) หัวเชื่อมและอุปกรณ์ประกอบ (Welding Torch & Equipment) ดังแสดงในรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 อุปกรณ์ในการเชื่อมทิก

3.2.2 เครื่องกัดแนวตั้ง ซีท้อ KATO ดังแสดงในรูปที่ 3.3 ใช้ในการกัดอะลูมิเนียมผสมหล่อ กิ่งแข็ง SSM 356 และ SSM 6061 ให้มีขนาดตามแบบในการทดลอง และใช้ในการเชื่อมเสียดทานแบบกวน



รูปที่ 3.3 เครื่องกัดแนวตั้ง

3.2.3 เครื่องกลึง ยี่ห้อ CMZ 360 ดังแสดงในรูปที่ 3.4 ใช้ในการขึ้นรูปเครื่องมือกลึงสำหรับใช้ในการเชื่อมเสียดทานแบบกวน และใช้สำหรับกลึงปากหน้าเตรียมชิ้นงานทดสอบก่อนนำไปจัดละเอียดเพื่อนำไปตรวจสอบโครงสร้างมหภาคและทดสอบความแข็ง



รูปที่ 3.4 เครื่องกลึง

3.2.4 เครื่องเลื่อยสายพานแนวนอน รุ่น carif 260 ดังแสดงในรูปที่ 3.5 ใช้ในการตัดแบ่งชิ้นงานให้มีขนาดใกล้เคียงกับขนาดจริงเพื่อเตรียมชิ้นงานไปสู่ขั้นตอนการกัดให้ได้ขนาดที่ต้องการตามที่ระบุไว้ในการทดลอง

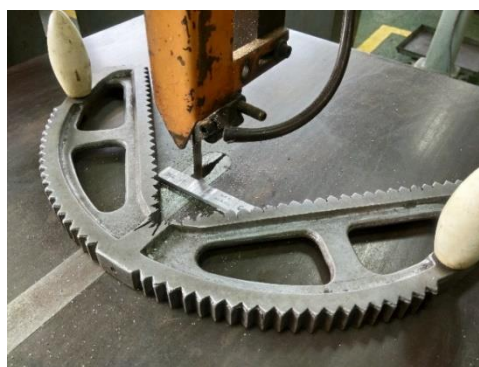


รูปที่ 3.5 เครื่องเลื่อยสายพานแนวนอน

3.2.5 เครื่องเลื่อยสายพานแนวตั้ง ยี่ห้อ PEHAKA ดังแสดงในรูปที่ 3.6 (ก) ใช้ในการตัดแบ่งชิ้นงานที่ผ่านการเชื่อมแล้วให้มีขนาดเล็กลงตามความต้องการดังแสดงในรูปที่ 3.6 (ข) เพื่อนำชิ้นงานที่ได้ไปเตรียมในขั้นตอนการทดสอบคุณสมบัติต่าง ๆ



(ก)



(ข)

รูปที่ 3.6 เครื่องเลื่อยสายพานแนวตั้ง

3.2.6 อุปกรณ์จับยึด ใช้ในการจับยึดชิ้นงานเชื่อมชิ้นงานทดสอบ เพื่อป้องกันการหลุดออกของแผ่นอะลูมิเนียมขณะดำเนินการเชื่อมเสียดทานแบบกวน ประกอบด้วยอุปกรณ์จับยึด (Step clamp) ดังแสดงในรูปที่ 3.7 และฟิกซ์เจอร์ (Fixture) ดังแสดงในรูปที่ 3.8

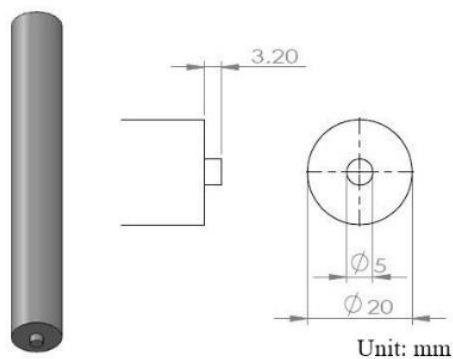


รูปที่ 3.7 ลักษณะของอุปกรณ์จับยึด (Step clamp)



รูปที่ 3.8 ลักษณะของฟิกซ์เจอร์ (Fixture)

**3.2.7 เครื่องมือกวน** มีลักษณะเป็นทรงกระบอกผลิตจากเหล็กเครื่องมือตามมาตรฐาน JIS-SKH โดยมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของบ่า (shoulder) 20 มิลลิเมตร ตัวกวน (Pin) มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 5 มิลลิเมตร และความยาว 3.2 มิลลิเมตร ดังแสดงในรูปที่ 3.9



รูปที่ 3.9 ลักษณะของเครื่องมือกวน

**3.2.8 เครื่องขัดชิ้นงาน (Grinder-polisher)** ยี่ห้อ PACE TECHNOLOGIES รุ่น NANO 1000T GRIDER-POLISHER ใช้ในการขัดผิวหน้าชิ้นงานทดสอบเพื่อเตรียมชิ้นงานตัวอย่างสำหรับศึกษาโครงสร้างมหภาค สามารถปรับความเร็วและทิศทางการหมุนได้ ดังแสดงในรูปที่ 3.10



รูปที่ 3.10 เครื่องขัดชิ้นงาน

3.2.9 กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (Optical microscope) ยี่ห้อ Olympus รุ่น SZ2-ET มีกำลังขยาย 4 - 28 เท่า ดังแสดงในรูปที่ 3.11 ใช้ในการตรวจสอบโครงสร้างมหภาค



รูปที่ 3.11 กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง

**3.2.10 เครื่องทดสอบความแข็งแรงดึง (Tensile testing)** ยี่ห้อ HOUNSFIELD ดังแสดงในรูปที่ 3.12 โดยทำการทดสอบแรงดึงตามแนวขวางของแนวเชื่อม เตรียมชิ้นงานตามมาตรฐาน ASTM E8 ดังแสดงในภาคผนวก ก การทดสอบสามารถกำหนดค่าตัวแปรต่าง ๆ ผ่านโปรแกรมในอุปกรณ์บันทึกข้อมูล โดยโปรแกรมสามารถประมวลผลออกมาในรูปแบบกราฟและตัวเลข ในงานวิจัยนี้ทำการทดสอบเพื่อหาค่าความแข็งแรงดึงสูงสุดของแนวเชื่อม (Ultimate Tensile Strength) ค่าความแข็งแรงที่จุดคราก (Yield Strength) และเปอร์เซ็นต์ในการยืดตัว (Percent Elongation)



รูปที่ 3.12 เครื่องทดสอบแรงดึง

**3.2.11 เครื่องทดสอบความแข็ง (Hardness testing)** เป็นเครื่องทดสอบความแข็งแบบหัวกดเพชรยี่ห้อ MATSUZAWA รุ่น MMT-X7 TYPE B ใช้ในการทดสอบเพื่อหาค่าความแข็งระดับจุลภาคของชิ้นงานทดสอบแบบ Micro Hardness Vickers Test ดังแสดงในรูปที่ 3.13





รูปที่ 3.13 เครื่องทดสอบความแข็ง

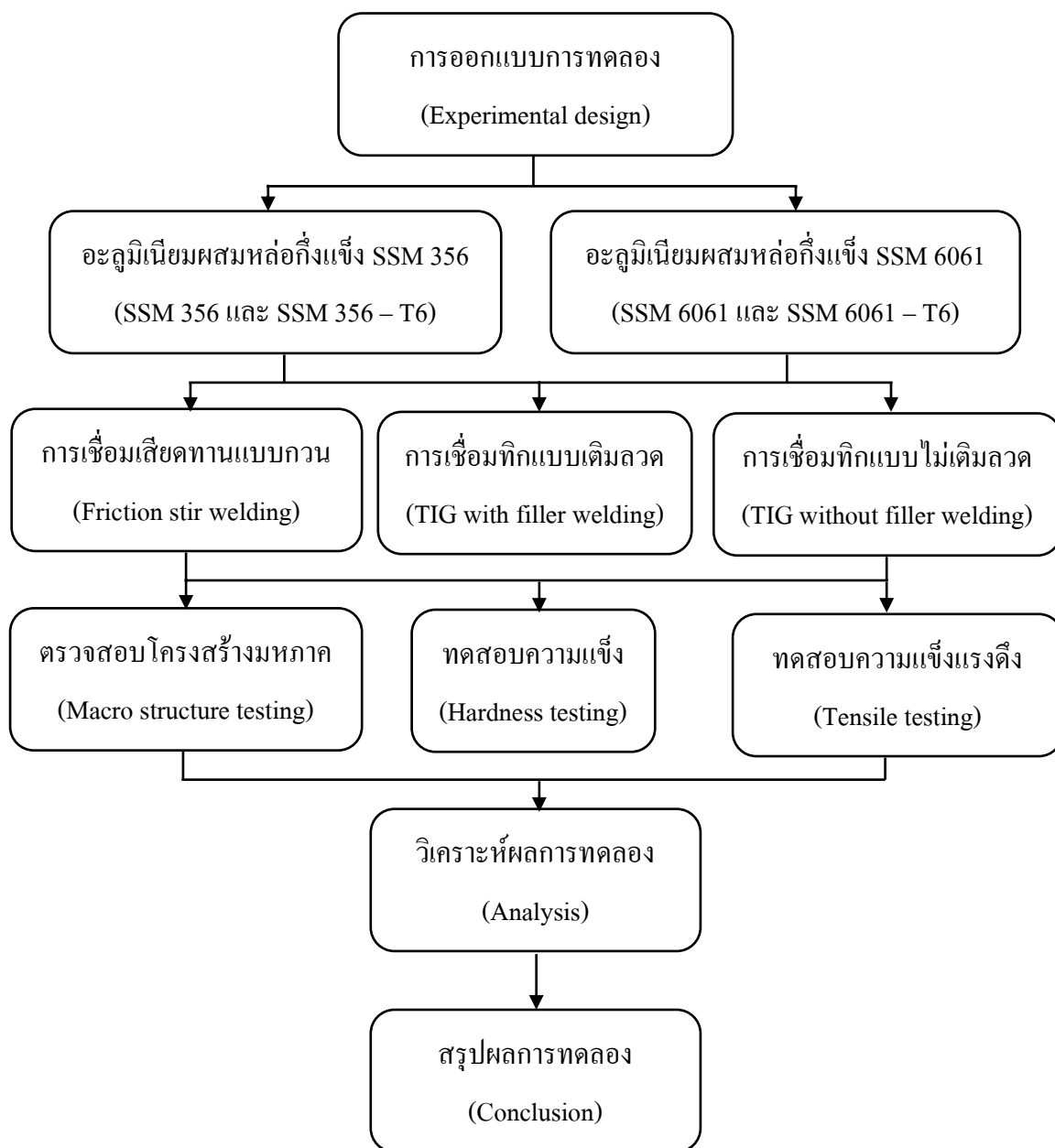
### 3.2.12 เครื่องมือและอุปกรณ์อื่น ๆ

เครื่องมือและอุปกรณ์อื่น ๆ ที่ใช้ในงานวิจัยมีดังนี้

- (1) กระดาษทราย (SiC paper)
- (2) แผ่นสักหลาด (Polish pad)
- (3) ผงอะลูมินา (Alumina oxide powder)
- (4) เครื่องเป่าลม (Blower)
- (5) หินเจียร์ (Grinder)
- (6) เตาอบชิ้นงานอุณหภูมิต่ำ

### 3.3 การดำเนินงานวิจัย

ในงานวิจัยนี้ทำการเชื่อม 3 กระบวนการ คือ การเชื่อมเสียดทานแบบกวน การเชื่อมทิกแบบเติมลวด และการเชื่อมทิกแบบไม่เติมลวด โดยใช้อะลูมิเนียมหล่อผสมสองชนิด คือ อะลูมิเนียมผสมหล่อแข็ง SSM 356 และอะลูมิเนียมผสมหล่อแข็ง SSM 6061 โดยแบ่งอะลูมิเนียมออกเป็นสองกลุ่ม คือ อะลูมิเนียมที่ไม่ได้ผ่านกระบวนการทางความร้อน T6 (As cast) และผ่านกระบวนการทางความร้อน T6 ทำการเชื่อมต่อชนทำราบ ทำการเชื่อมแต่ละกระบวนการตามเงื่อนไขที่กำหนด หลังจากนั้นวิเคราะห์และสรุปผลการทดลองจากลักษณะ โครงสร้างทางมหภาคและการทดสอบสมบัติทางกล โดยมีขั้นตอนการดำเนินงานวิจัยตามขั้นตอนดังนี้



รูปที่ 3.14 แผนผังแสดงขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

### 3.4 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

#### 3.4.1 การเตรียมชิ้นงานทดสอบ

อะลูมิเนียมผสมหล่อกิ่งแข็ง SSM 356 และ SSM 6061 เป็นวัสดุที่ใช้ในงานวิจัย แบ่งออกเป็น 2 ลักษณะ คือ อะลูมิเนียมผสมหล่อกิ่งแข็งที่ไม่ได้ผ่านกระบวนการทางความร้อน T6 และอะลูมิเนียมผสมหล่อกิ่งแข็งที่ผ่านกระบวนการทางความร้อน T6 สำหรับอะลูมิเนียมที่ไม่ได้ผ่านกระบวนการทางความร้อน T6 สามารถเตรียมชิ้นงานทดสอบได้ทันที สำหรับอะลูมิเนียมที่ผ่านกระบวนการทางความร้อน T6 ก่อนทำการปรับขนาดชิ้นงานทดสอบให้ได้ขนาดที่ต้องการจะมีขั้นตอนดังนี้

##### (1) กระบวนการทางความร้อน T6

เป็นกระบวนการทางความร้อน T6 ใช้สำหรับปรับปรุงคุณสมบัติเชิงกลของอะลูมิเนียมหล่อกิ่งของแข็งก่อนนำไปเชื่อม เช่น ความแข็งแรงและความเหนียวให้สูงขึ้น โดยมีขั้นตอนการทำกระบวนการทางความร้อน T6 ดังต่อไปนี้

1. นำชิ้นงานทดสอบใส่ในเตาอบดังแสดงในรูปที่ 3.15 (ก) และเพิ่มอุณหภูมิจากอุณหภูมิห้องจนกระทั่งถึงอุณหภูมิของเตาที่ต้องการ 540°C (สำหรับอะลูมิเนียมผสมหล่อกิ่งของแข็ง SSM 356) และ 530°C (สำหรับอะลูมิเนียมผสมหล่อกิ่งของแข็ง SSM 6061) ภายในเวลา 1 ชั่วโมง 7 นาที เมื่อได้อุณหภูมิที่ต้องการแล้วจึงเริ่มจับเวลาการอบชิ้นงานทดสอบในขั้นตอนการอบละลาย (Solid Solution Treatment) เป็นระยะเวลา 8 ชั่วโมง (สำหรับอะลูมิเนียมผสมหล่อกิ่งของแข็ง SSM 356) และ 1 ชั่วโมง (สำหรับอะลูมิเนียมผสมหล่อกิ่งของแข็ง SSM 6061) (Boonchouytan et al. 2014)

2. เมื่อทำการอบชิ้นงานทดสอบตามระยะเวลาต่าง ๆ ตามขั้นตอนการทดลองและรุ่มชิ้นงานทดสอบลงในน้ำดังแสดงในรูปที่ 3.15 (ข)

3. เมื่อผ่านในขั้นตอนที่ 1 และขั้นตอนที่ 2 แล้ว นำชิ้นงานทดสอบไปป้อมที่อุณหภูมิ 160°C (สำหรับอะลูมิเนียมหล่อผสมกิ่งของแข็ง SSM 356) และ 185°C (สำหรับอะลูมิเนียมผสมหล่อกิ่งของแข็ง SSM 6061) ภายในเวลา 21 นาที เมื่อได้อุณหภูมิที่ต้องการแล้วจึงเริ่มจับเวลาการอบชิ้นงานทดสอบในขั้นตอน Aging เป็นระยะเวลา 12 ชั่วโมง (สำหรับอะลูมิเนียมผสมหล่อกิ่งของแข็ง SSM 356) และ 6 ชั่วโมง (สำหรับอะลูมิเนียมผสมหล่อกิ่งของแข็ง SSM 6061)

4. เมื่อทำการบ่มชิ้นงานทดสอบตามระยะเวลาต่าง ๆ ของการทดลองแล้ว นำชิ้นงานไปจุ่มลงในน้ำ



(ก)



(ข)

รูปที่ 3.15 กระบวนการทางความร้อน T6 (ก) ชิ้นงานทดสอบใส่ในเตาอบ (ข) ชิ้นงานทดสอบจุ่มน้ำ

#### (2) กระบวนการขึ้นรูปชิ้นงานทดสอบ

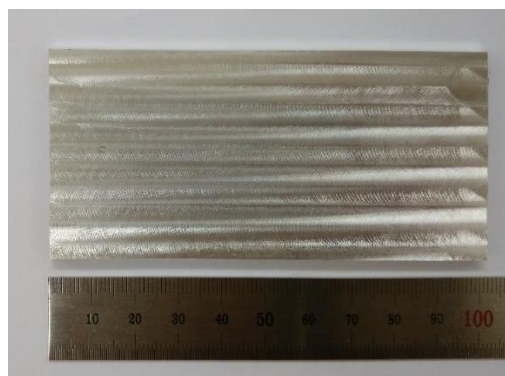
อะลูมิเนียมผสมหล่อกิ่งของแข็ง SSM 356 และ SSM 6061 ที่ผ่านการขึ้นรูปด้วยวิธี GISS ขนาด  $100 \times 100 \times 2.5$  มิลลิเมตร นำไปตัดแบ่งด้วยเครื่องเลื่อยสายพานแนวนอนเพื่อให้ได้ขนาดใกล้เคียงกับขนาดที่ต้องการดังแสดงในรูปที่ 3.16 หลังจากนั้นนำไปทำการปรับขนาดผิวชิ้นงานด้วยเครื่องกัดแนวตั้งดังแสดงในรูปที่ 3.17 (ก) ให้มีขนาดความกว้าง 50 มิลลิเมตร ยาว 100 มิลลิเมตร และหนา 4 มิลลิเมตรดังแสดงในรูปที่ 3.17 (ข)



รูปที่ 3.16 การตัดชิ้นงานทดสอบด้วยเครื่องเลื่อยสายพาน



(ก)



(ข)

รูปที่ 3.17 ชิ้นงานทดสอบที่ผ่านการกัด (ก) การกัดชิ้นงานด้วยเครื่องกัดแนวตั้ง (ข) ชิ้นงานทดสอบ

### 3.4.2 กระบวนการเชื่อม

การเชื่อมชิ้นงานแบบต่อชน (Butt joint) ในท่าราบ (Flat position) โดยทำการตั้งค่าปัจจัยต่าง ๆ ตามตารางที่ 3.3 สามารถแบ่งกระบวนการเชื่อมออกเป็นสองกระบวนการหลัก คือ กระบวนการเชื่อมเสียดทานแบบกวนและกระบวนการเชื่อมทิก ดังนี้

ตารางที่ 3.3 ปัจจัย ระดับ และขอบเขตของการเชื่อม

Process	FSW	TIG เต็มลวด	TIG ไม่เต็มลวด
ขนาด Ø ทั้งสแตนเลสอิเล็กโทรด ( มม.)	-	3.2	3.2
ขนาด Ø ลวดเติม ( มม.)	-	2.4	-
แรงดันไฟฟ้า (โวลต์)	-	15.6	15.6
กระแสไฟฟ้า (แอมป์)	-	140	140
ความเร็วเดินเชื่อม ( มม./นาที)	112	250	350
แก๊สคลุม	-	อาร์กอน	อาร์กอน
อัตราการไหลของแก๊ส (ลิตร/นาที)	-	15	15
ความเร็วหมุนหัวทูล ( รอบ/นาที)	1400	-	-
มุมเอียงหัวทูล (องศา)	3	-	-
ขนาด Ø บ่าของหัวทูล ( มม.)	20	-	-
ขนาด Ø ตัวกวน ( มม.)	5	-	-
ความยาวตัวกวน ( มม.)	3.2	-	-

## (1) กระบวนการเชื่อมเสียดทานแบบกวน

การเชื่อมเสียดทานแบบกวนด้วยเครื่องกัดแนวตั้ง โดยการติดตั้งเครื่องมือกวนเข้ากับชุดจับและจับยึดชิ้นงานทดสอบเข้ากับฟิกซ์เจอร์ (Fixture) ที่ติดตั้งอยู่บนเครื่องกัดแนวตั้งแล้ว เช็ดทำความสะอาดผิวหน้าชิ้นงานดังแสดงในรูปที่ 3.18 (ก) ทำการเชื่อมชิ้นงานทดสอบตามค่าตัวแปรที่กำหนดไว้ในตารางที่ 3.3 โดยหัวพินจะจุ่มลงในชิ้นงาน 80-90% ของความหนาชิ้นงานและเอียงทำมุมกับชิ้นงานทดสอบ 3 องศา ดังแสดงในรูปที่ 3.18 (ข) ทำการเชื่อมจนสุดความยาวของชิ้นงานดังแสดงในรูปที่ 3.18 (ค)



(ก)



(ข)



(ค)

### รูปที่ 3.18 ขั้นตอนกระบวนการเชื่อมเสียดทานแบบกวน

(ก) การจับยึดชิ้นงานด้วยฟิกซ์เจอร์ (Fixture) (ข) ปรับเอียงเครื่องมือกวน และ (ค) ขณะทำการเชื่อม

### (2) กระบวนการเชื่อมทิก

การเชื่อมทิกขั้นแรกทำการจัดเตรียมอุปกรณ์การเชื่อมดังแสดงในรูปที่ 3.19 (ก) ทำการจับยึดชิ้นงานบนแท่นรองชิ้นงานและเช็ดทำความสะอาดผิวหน้าชิ้นงานดังแสดงในรูปที่ 3.19 (ข) เชื่อมชิ้นงานทดสอบตามค่าตัวแปรที่กำหนดไว้ในตารางที่ 3.3 ทำการเชื่อมชิ้นงานทดสอบดังแสดงในรูปที่ 3.19 (ค) เชื่อมโดยการบังคับด้วยมือ ทิศทางการเชื่อมด้านหน้า (Forward)



(ก)



(ข)



(ค)

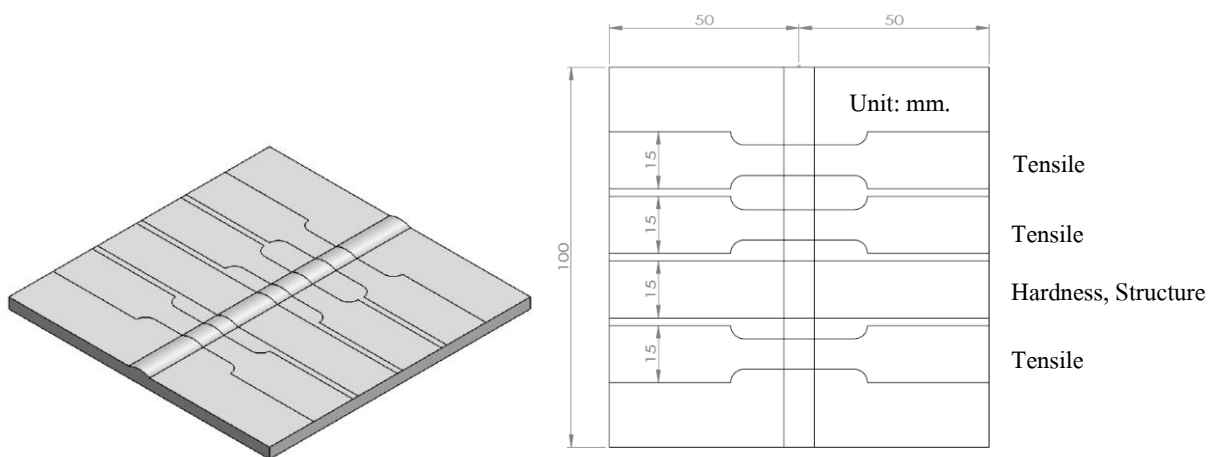
### รูปที่ 3.19 ขั้นตอนกระบวนการเชื่อมทิก (ก) จัดเตรียมอุปกรณ์ในการเชื่อม

(ข) การจับยึดและทำความสะอาดชิ้นงานทดสอบ และ (ค) การเชื่อมทิกแบบเต็มลวด

### 3.4.3 การตรวจสอบโครงสร้างมหภาค

การเตรียมชิ้นงานเพื่อศึกษาโครงสร้างมหภาคมีขั้นตอนดังนี้

(1) ตัดชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการเชื่อมในแต่ละตัวแปรเชื่อมเรียบร้อยแล้ว มาตัดแบ่งในแนวตั้งฉากกับแนวเชื่อมออกเป็นส่วน ๆ ดังแสดงในรูปที่ 3.20

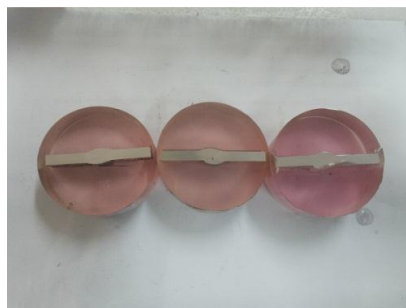


รูปที่ 3.20 การแบ่งชิ้นงานทดสอบทางโลหะวิทยาและทางกล

(2) ทำเรือนแบบเย็น (Cold mounting) ด้วยเรซินเป็นตัวเรือนในแต่ละตัวแปรของชิ้นงานทดสอบ เพื่อสะดวกในการจับถือ โดยการวางชิ้นงานทดสอบลงในแม่พิมพ์จากนั้นเทเรซินลงไปให้เต็มแม่พิมพ์ดังแสดงในรูปที่ 3.21 (ก) จากนั้นรอให้เรซินแข็งตัวจึงนำชิ้นงานทดสอบออกมาจากแม่พิมพ์ดังแสดงในรูปที่ 3.21 (ข)



(ก)



(ข)

รูปที่ 3.21 การหล่อเคลือบชิ้นงานด้วยเรซิน (ก) เทเรซินลงในแม่พิมพ์ (ข) ชิ้นงานทำเรือนแบบเย็น

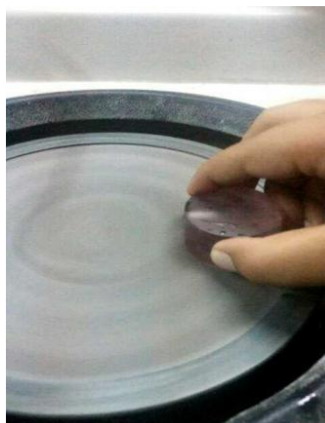


(3) ขัดชิ้นงานทดสอบด้วยกระดาษทรายที่ทำจากผงซิลิคอนคาร์ไบด์ (SiC paper) โดยเริ่มจากเบอร์ P180 P320 P600 P800 P1200 และ P2400 ตามลำดับ การขัดผิวชิ้นงานจะวางกระดาษทรายบนแผ่นงานขัดหน้าเรียบและเปิดน้ำอยู่ตลอดเวลา เพื่อชำระสิ่งสกปรกและเป็นการระบายความร้อนที่เกิดจากการเสียดสีระหว่างผิวชิ้นงานทดสอบกับกระดาษทรายดังแสดงในรูปที่ 3.22 เมื่อเปลี่ยนกระดาษทรายไปยังเบอร์ที่ละเอียดมากขึ้นควรขัดชิ้นงานในทิศทางที่สลับกันและไม่ควรใช้แรงในการกดมากเกินไป เนื่องจากจะส่งผลให้เกิดความเสียหายต่อผิวหน้าชิ้นงานทดสอบ ทำให้การตรวจสอบ โครงสร้างเกิดความผิดพลาดได้



รูปที่ 3.22 การขัดชิ้นงานด้วยกระดาษทราย

(4) ขัดชิ้นงานทดสอบด้วยผ้าสักหลาดและผงอะลูมินาขนาดอนุภาค 5 และ 1 ไมครอน ตามลำดับ โดยวางแผ่นสักหลาดบนแผ่นงานขัดหน้าเรียบ ผสมอะลูมินากับน้ำแล้วฉีดลงบนผ้าสักหลาดทำการขัดผิวหน้าชิ้นงานทดสอบจนเป็นมันดังแสดงในรูปที่ 3.23



รูปที่ 3.23 การขัดชิ้นงานด้วยผงอะลูมินา

(5) กัดผิวหน้าชิ้นงานทดสอบด้วยสารละลาย (Keller's reagent) ที่มีส่วนผสมทางเคมี คือ กรดไฮโดรฟลูออริกความเข้มข้น 48% 2 ml, กรดไฮโดรคลอริก (เข้มข้น) 3 ml, กรดไนตริก 5 ml, และน้ำ 190 ml. เป็นระยะเวลา 5 วินาที จากนั้นล้างออกด้วยน้ำเปล่าและเป่าลมด้วยเครื่องเป่าลม (Blower) ให้แห้ง

(6) ถ่ายภาพโครงสร้างมหภาคในแต่ละตัวแปรและกระบวนการเชื่อมด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง

#### 3.4.4 การตรวจสอบค่าความแข็ง

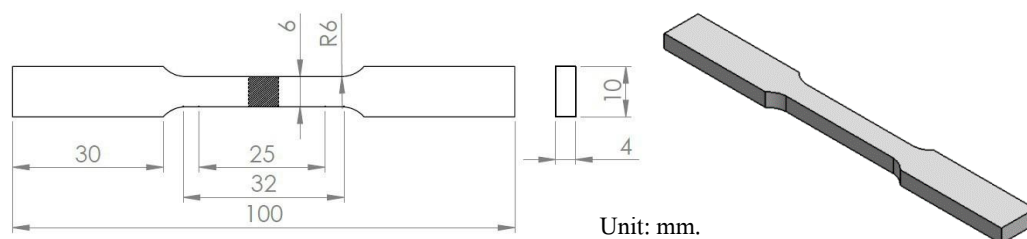
การตรวจสอบค่าความแข็งเป็นการตรวจสอบในระดับไมโครมีหน่วยเป็น Vickers ใช้ชิ้นงานทดสอบชิ้นเดียวกับชิ้นงานทดสอบที่ใช้ในการตรวจสอบ โครงสร้างมหภาค เมื่อชิ้นงานทดสอบนำไปตรวจสอบโครงสร้างมหภาคเรียบร้อยแล้ว จึงนำชิ้นงานทดสอบดังกล่าวมาทดสอบความแข็งโดยวัดค่าความแข็งบริเวณภาคตัดขวางของแนวเชื่อมตั้งแต่บริเวณโลหะฐาน บริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อน (HAZ) บริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อนทางกล (TMAZ) บริเวณแนวทวน (SZ) และ บริเวณแนวเชื่อม (Weld zone) ออกแรงกดในแนวตั้งฉากกับผิวหน้าชิ้นงานทดสอบด้วยน้ำหนักกด 100 กรัม เวลากด 10 วินาที ระยะห่างของแต่ละจุดที่กด 0.5 มิลลิเมตร โดยค่าที่ได้จากการทดสอบถูกบันทึกและส่งมายังคอมพิวเตอร์ดังแสดงในรูปที่ 3.24



รูปที่ 3.24 ชิ้นงานขณะทดสอบความแข็ง

### 3.4.5 การตรวจสอบค่าความแข็งแรงดึง

การเตรียมชิ้นงานทดสอบความแข็งแรงดึง โดยนำชิ้นงานที่ได้จากการตัดตามขวางกับแนวเชื่อมดังแสดงในรูปที่ 3.20 กำหนดให้แนวเชื่อมอยู่ตรงกลางชิ้นงานทดสอบทำการกัดผิวทุกด้านให้มีความเรียบสม่ำเสมอและกัดให้ได้ขนาดตามมาตรฐาน ASTM-E8 ด้วยเครื่องกัดแนวตั้งให้ได้ขนาดดังแสดงในรูปที่ 3.25 จากนั้นนำชิ้นงานไปทดสอบแรงดึงดังแสดงในรูปที่ 3.26 และบันทึกผลเพื่อนำไปวิเคราะห์ในขั้นตอนต่อไป



รูปที่ 3.25 ขนาดมาตรฐาน ASTM E8 ของชิ้นทดสอบ



รูปที่ 3.26 ชิ้นงานขณะทดสอบความแข็งแรงดึง

#### 3.4.6 การวิเคราะห์ข้อมูลค่าความแข็งแรงดึงด้วยวิธีทางสถิติ

งานวิจัยนี้มีปัจจัยหลักที่สำคัญ 2 ปัจจัย คือ กระบวนการเชื่อมและสภาวะชิ้นงาน โดยกระบวนการเชื่อมมี 3 ระดับ คือ กระบวนการเชื่อมเสียดทานแบบกวน กระบวนการเชื่อมทิกแบบเติมลวด และกระบวนการเชื่อมทิกแบบไม่เติมลวด สภาวะชิ้นงานมี 2 ระดับ คือ สภาวะชิ้นงานที่ไม่ได้ผ่านกระบวนการทางความร้อน T6 และสภาวะชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการทางความร้อน T6 ทำการเชื่อมชิ้นงานและกำหนดค่าพารามิเตอร์ในการเชื่อมเป็นแผนการทดลองแบบสุ่ม ทำการเชื่อม 3 ซ้ำ จำนวน 18 ชิ้น ดังแสดงในตารางที่ 3.4 หลังจากนั้นนำชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการเชื่อมไปเตรียมเป็นชิ้นงานเพื่อตรวจสอบ โครงสร้างมหภาค ทดสอบความแข็ง และทดสอบแรงดึงตามมาตรฐาน ASTM-E8 ต่อไป

ตารางที่ 3.4 การออกแบบแผนการทดลองเชื่อมชิ้นงานแบบสุ่ม

StdOrder	RunOrder	Welding	Material
6	1	FSW	T6
2	2	TIG1	T6
1	3	TIG1	As Cast
4	4	TIG2	T6
3	5	TIG2	As Cast
5	6	FSW	As Cast
9	7	TIG2	As Cast
7	8	TIG1	As Cast
12	9	FSW	T6
11	10	FSW	As Cast
10	11	TIG2	T6
8	12	TIG1	T6
16	13	TIG2	T6
17	14	FSW	As Cast
18	15	FSW	T6
15	16	TIG2	As Cast
14	17	TIG1	T6
13	18	TIG1	As Cast
17	14	FSW	Not T6
18	15	FSW	T6
15	16	TIG2	Not T6
14	17	TIG1	T6
13	18	TIG1	Not T6

หมายเหตุ: TIG1 คือ การเชื่อมทิกแบบเติมลวด , TIG2 คือ การเชื่อมทิกแบบไม่เติมลวด และ FSW คือ การเชื่อมเสียดทานแบบกวน

การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ โดยใช้ผลของค่าความแข็งแรงดึงมาทำการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ Minitab release 16 เพื่อช่วยในการคำนวณค่าทางสถิติและทำการวิเคราะห์ผลการทดลอง general full factorial ที่ค่าระดับความเชื่อมั่น 95% โดยการแสดงผลการวิเคราะห์การทดสอบความถูกต้องของตัวแบบ เป็นการวิเคราะห์ด้วยวิธี ANOVA และการพิจารณาสัมประสิทธิ์แสดงการตัดสินใจ

เมื่อทำการทดสอบด้วยวิธี ANOVA หาตัวแปรที่มีผลต่อการทดลองแล้ว สามารถนำข้อมูลมาเปรียบเทียบพหุคูณด้วยวิธี Turkey's HSD test เพื่อหาความแตกต่างในแต่ละระดับของตัวแปรต้น โดยทำการเปรียบเทียบทีละคู่ เพื่อตรวจสอบหาความแตกต่างระหว่างคู่ตัวแปรที่แตกต่างกันที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

## บทที่ 4

### ผลและการวิเคราะห์ผลการวิจัย

การนำข้อมูลในงานวิจัยมาทำการวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพ โครงสร้างมหภาค ความแข็งและความแข็งแรงดึงของแนวเชื่อมที่ได้จากการเชื่อมเสียดทานแบบกวน การเชื่อมทิกแบบเติมลวด และการเชื่อมทิกแบบไม่เติมลวดระหว่างอะลูมิเนียมผสมหล่อกิ่งแข็งต่างชนิดกัน คือ SSM 356 และ SSM 6061 ที่ไม่ได้ผ่านกระบวนการทางความร้อน T6 และระหว่างอะลูมิเนียมผสมหล่อกิ่งแข็งต่างชนิดกัน คือ SSM 356 และ SSM 6061 ที่ผ่านกระบวนการทางความร้อน T6 ซึ่งในบทนี้จะแสดงผลการทดลองในงานวิจัยที่สามารถแบ่งออกเป็น 2 ส่วนคือ ลักษณะโครงสร้างทางมหภาคและเปรียบเทียบสมบัติเชิงกลของแนวเชื่อม โดยมีผลการวิจัยดังต่อไปนี้

การเชื่อมเสียดทานแบบกวนในเบื้องต้นได้เลือกปัจจัยในการเชื่อมที่ดีที่สุดสำหรับการเชื่อมระหว่างอะลูมิเนียมผสมต่างชนิดกัน SSM 356 กับ SSM 6061 ที่ความเร็วหมุนหัวทูล 1,400 รอบ/นาที และความเร็วเดินเชื่อม 112 มิลลิเมตร/นาที เมื่อนำไปตรวจสอบสมบัติทางกลพบว่ารอยเชื่อมของชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการทางความร้อน T6 เกิดการหลอมละลายไม่สมบูรณ์ กล่าวคือชิ้นงานไม่สามารถเชื่อมติดกันได้ตลอดทั้งความหนาของชิ้นงาน จึงได้มีการเพิ่มปัจจัยในการทดลอง โดยการเชื่อมชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการทางความร้อน T6 ความเร็วหมุนของหัวทูลจะมี 2 ปัจจัย คือ ความเร็วหมุนของหัวทูล 1,400 รอบ/นาที และ 1,750 รอบ/นาที การเพิ่มความเร็วหมุนของหัวทูลนั้น เป็นการเพิ่มความร้อนในกระบวนการเชื่อม ซึ่งมีวัตถุประสงค์เพื่อให้รอยเชื่อมสามารถเชื่อมติดกันได้ตลอดทั้งความหนาของชิ้นงาน

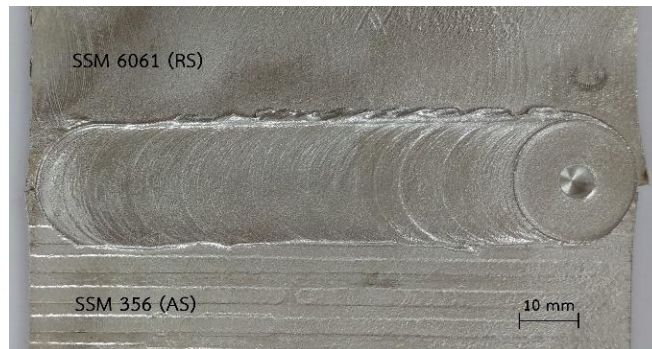
#### 4.1 การตรวจสอบลักษณะทางกายภาพของแนวเชื่อม (Welding surface of weld)

จากกระบวนการเชื่อมเสียดทานแบบกวน การเชื่อมทิกแบบเติมลวด และการเชื่อมทิกแบบไม่เติมลวดของอะลูมิเนียมผสมหล่อกิ่งแข็งต่างชนิดกันระหว่าง SSM 356 และ SSM 6061 ที่ไม่ได้ผ่านกระบวนการทางความร้อน T6 และอะลูมิเนียมผสมหล่อกิ่งแข็งต่างชนิดกันที่ผ่านกระบวนการทางความร้อน T6 ระหว่าง SSM 356 T6 และ SSM 6061 T6 โดยมีลักษณะทางกายภาพของแนวเชื่อมในแต่ละกระบวนการเชื่อมดังนี้

#### 4.1.1 ลักษณะทางกายภาพของแนวเชื่อมเสียดทานแบบกวน

การเชื่อมเสียดทานแบบกวนระหว่างอะลูมิเนียมผสมหล่อกิ่งแข็งต่างชนิดกันระหว่าง SSM 356 และ SSM 6061 ที่ไม่ได้ผ่านกระบวนการทางความร้อน T6 แนวเชื่อมจะได้รับอิทธิพลจากความเร็วหมุนหัวทูล 1,400 รอบ/นาที และความเร็วเดินเชื่อม 112 มม./นาที และการเชื่อมเสียดทานแบบกวนอะลูมิเนียมผสมหล่อกิ่งแข็งต่างชนิดกันที่ผ่านกระบวนการทางความร้อน T6 ระหว่าง SSM 356 T6 และ SSM 6061 T6 แนวเชื่อมจะได้รับอิทธิพลจากความเร็วหมุนหัวทูล 1,400 และ 1,750 รอบ/นาที และความเร็วเดินเชื่อม 112 มม./นาที มีลักษณะทางกายภาพที่แตกต่างกันดังรูปที่ 4.1 (ก) (ข) และ (ค) ผลจากการทดลองพบว่าลักษณะทางกายภาพของแนวเชื่อมของชิ้นงานที่ไม่ได้ผ่านกระบวนการทางความร้อน T6 ก่อนข้างราบเรียบ จากความร้อนในแนวเชื่อมที่มีมากพอทำให้เกิดการอ่อนตัวและเกิดการเสียรูปในภาวะพลาสติกมาก ส่งผลให้เกิดเป็นครีบด้านอะลูมิเนียมผสมหล่อกิ่งแข็ง SSM 6061 (Retreating side) และเกิดเป็นเกล็ดตามรอยป่าของหัวทูลบริเวณด้านบนแนวเชื่อมอย่างสม่ำเสมอดังรูปที่ 4.1 (ก) สำหรับชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการทางความร้อน T6 ลักษณะทางกายภาพของแนวเชื่อมมีความราบเรียบสม่ำเสมอและไม่มีครีบเกิดขึ้นบริเวณด้านข้างแนวเชื่อม เนื่องจากมีความแข็งมากกว่าชิ้นงานที่ไม่ได้ผ่านกระบวนการทางความร้อน T6 ทำให้ความร้อนสะสมในแนวเชื่อมค่อนข้างน้อยส่งผลให้อะลูมิเนียมเกิดภาวะพลาสติกน้อยลงด้วยดังรูปที่ 4.1 (ข) และ (ค)





(ก)



(ข)

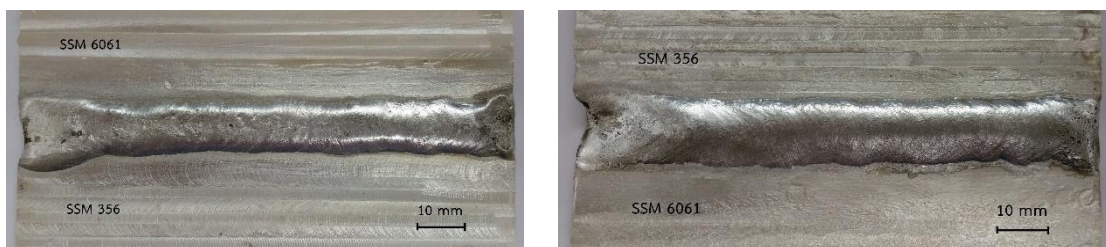


(ค)

- รูปที่ 4.1 ลักษณะทางกายภาพของแนวเชื่อมเสียดทานแบบกวน
- (ก) ชิ้นงานที่ไม่ได้ผ่านกระบวนการทางความร้อน T6 ความเร็วหมุนหัวทูล 1,400 รอบ/นาที
- (ข) ชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการทางความร้อน T6 ความเร็วหมุนหัวทูล 1,400 รอบ/นาที และ
- (ค) ชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการทางความร้อน T6 ความเร็วหมุนหัวทูล 1,750 รอบ/นาที

#### 4.1.2 ลักษณะทางกายภาพของแนวเชื่อมทิกแบบเติมลวด

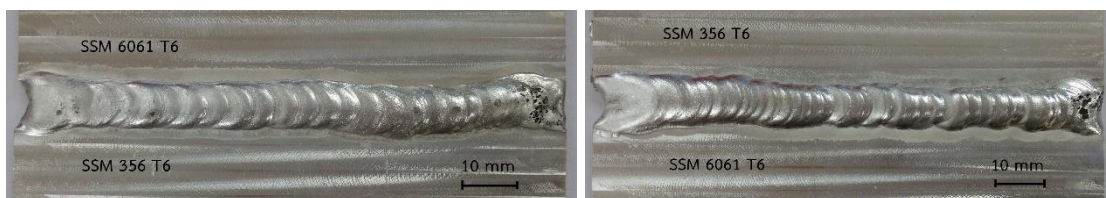
ผลจากการเชื่อมทิกแบบเติมลวดระหว่างอะลูมิเนียมผสมหล่อแข็ง SSM 356 และ SSM 6061 ที่ไม่ได้ผ่านกระบวนการทางความร้อน T6 ดังแสดงในรูปที่ 4.2 (ก) พบว่า อะลูมิเนียมผสมหล่อแข็ง SSM 356 และ SSM 6061 สามารถเชื่อมติดกันได้ แนวเชื่อมมีความสมบูรณ์ เกิดลวดของแนวเชื่อมละเอียดและมีความเรียบสม่ำเสมอ และผลการเชื่อมอะลูมิเนียมผสมหล่อแข็งต่างชนิดกันระหว่าง SSM 356 กับ SSM 6061 ที่ผ่านกระบวนการทางความร้อน T6 ดังแสดงในรูปที่ 4.2 (ข) พบว่าสามารถเชื่อมอะลูมิเนียมผสมต่างชนิดกันได้ แนวเชื่อมมีขนาดแคบกว่า แนวเชื่อมของอะลูมิเนียมผสมหล่อแข็งที่ไม่ได้ผ่านกระบวนการทางความร้อน T6 การเรียงตัวของเกล็ดแนวเชื่อมสม่ำเสมอ มีการเรียงตัวของเกล็ดแนวเชื่อมที่หยาบกว่าอะลูมิเนียมผสมหล่อแข็งที่ไม่ได้ผ่านกระบวนการทางความร้อน T6 เนื่องจากอะลูมิเนียมที่ผ่านกระบวนการทางความร้อน T6 มีสมบัติทางกลที่ดีกว่าอะลูมิเนียมที่ไม่ได้ผ่านกระบวนการทางความร้อน T6 ในขณะที่ความร้อนในการเชื่อมเท่ากัน (ปัจจัยการเชื่อมเดียวกัน) แต่อัตราการเย็นตัวของชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการทางความร้อน T6 จะเร็วกว่าส่งผลให้เกล็ดของแนวเชื่อมมีลักษณะเกล็ดที่หยาบกว่า ชิ้นงานที่ไม่ได้ผ่านกระบวนการทางความร้อน T6



ด้านหน้า

ด้านหลัง

(ก)



ด้านหน้า

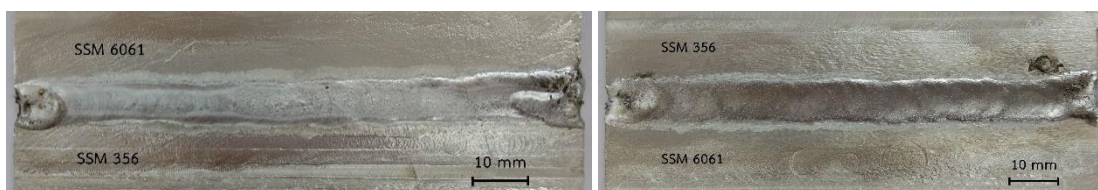
ด้านหลัง

(ข)

รูปที่ 4.2 ลักษณะทางกายภาพของแนวเชื่อมทิกแบบเติมลวด (ก) ชิ้นงานที่ไม่ได้ผ่านกระบวนการทางความร้อน T6 และ (ข) ชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการทางความร้อน T6

#### 4.1.3 ลักษณะทางกายภาพของแนวเชื่อมทิกแบบไม่เต็มลวด

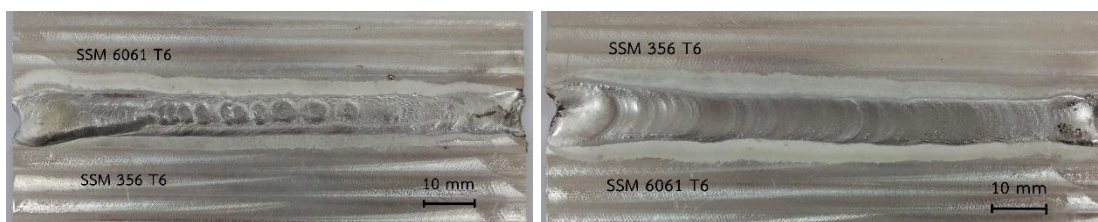
จากการเชื่อมทิกแบบไม่เต็มลวดระหว่างอะลูมิเนียมผสมหล่อกิ่งแข็ง SSM 356 กับ SSM 6061 สามารถเปรียบเทียบลักษณะทางกายภาพของชิ้นงานที่ไม่ได้ผ่านกระบวนการทางความร้อนและชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการทางความร้อน T6 ดังแสดงในรูปที่ 4.3 (ก) และ (ข) พบว่าสามารถเชื่อมระหว่างอะลูมิเนียมผสมหล่อกิ่งแข็ง SSM 356 และ SSM 6061 ได้ แนวเชื่อมของชิ้นงานที่ไม่ได้ผ่านกระบวนการทางความร้อน T6 ดังแสดงในรูปที่ 4.3 (ก) มีความสมบูรณ์ เกิดแนวเชื่อมเรียบสม่ำเสมอทั้งทางด้านหน้าของแนวเชื่อมที่บริเวณต้นแนวเชื่อมมีการบวมเกิดขึ้นเล็กน้อย เนื่องจากความร้อนที่เกิดจากการเชื่อมด้านหลัง และแนวเชื่อมของชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการทางความร้อน T6 ดังแสดงในรูปที่ 4.3 (ข) มีลักษณะของเกล็ดแนวเชื่อมค่อนข้างชัดเจนกว่าแนวเชื่อมของชิ้นงานที่ไม่ได้ผ่านกระบวนการทางความร้อน T6 ทางด้านหน้าของแนวเชื่อมเกิดการบวมเกือบตลอดแนวเชื่อมเนื่องจากความร้อนจากการเชื่อมด้านหลัง



ด้านหน้า

ด้านหลัง

(ก)



ด้านหน้า

ด้านหลัง

(ข)

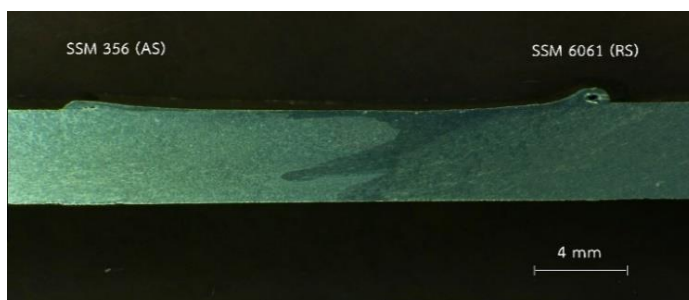
รูปที่ 4.3 ลักษณะทางกายภาพของแนวเชื่อมทิกแบบไม่เต็มลวด (ก) ชิ้นงานที่ไม่ได้ผ่านกระบวนการทางความร้อน T6 และ (ข) ชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการทางความร้อน T6

#### 4.2 ลักษณะโครงสร้างทางมหภาคของแนวเชื่อม (Macrostructure of weld)

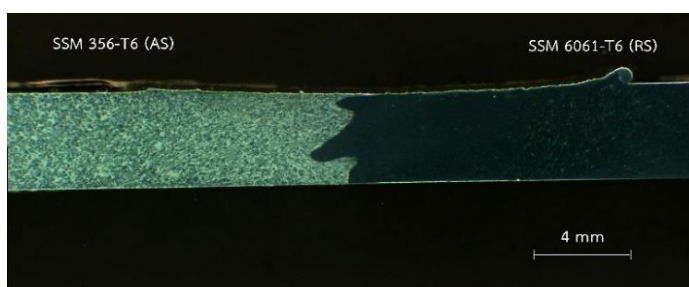
การตรวจสอบโครงสร้างทางมหภาคของแนวเชื่อมระหว่างอะลูมิเนียมผสมหล่อกิ่งแข็ง SSM 356 และ SSM 6061 โดยการตัดชิ้นงานทดสอบในทิศตั้งฉากกับแนวเชื่อมและให้แนวเชื่อมอยู่ตรงกลางชิ้นงานทดสอบ ทำการเตรียมชิ้นงานทดสอบตามขั้นตอนที่กล่าวไว้ในบทที่ 3 เพื่อทำการตรวจสอบโครงสร้างมหภาคของทุกกระบวนการเชื่อม

##### 4.2.1 ลักษณะโครงสร้างทางมหภาคของแนวเชื่อมเสียดทานแบบกวน

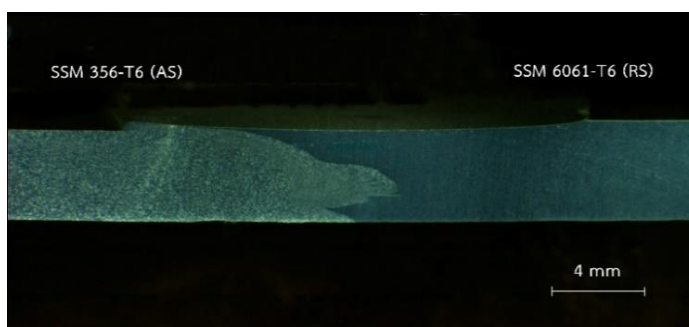
จากการตรวจสอบโครงสร้างมหภาคของแนวเชื่อมเสียดทานแบบกวนระหว่างอะลูมิเนียมผสมหล่อกิ่งแข็ง SSM 356 กับ SSM 6061 ที่ไม่ได้ผ่านกระบวนการทางความร้อน T6 และที่ผ่านกระบวนการทางความร้อน T6 สามารถเชื่อมประสานกันได้ดี มีความแตกต่างของสีเนื้ออะลูมิเนียมผสมทั้งสองชนิดอย่างชัดเจนตรงบริเวณแนวเชื่อม โดยอะลูมิเนียมผสมหล่อกิ่งแข็ง SSM 6061 มีสีที่ทึบกว่าอะลูมิเนียมผสมหล่อกิ่งแข็ง SSM 356 และพบว่าอะลูมิเนียมผสมหล่อกิ่งแข็งที่ไม่ได้ผ่านกระบวนการทางความร้อน T6 และที่ผ่านกระบวนการทางความร้อน T6 ความเร็วหมุนหัวทูล 1,400 รอบ/นาที ดังแสดงในรูปที่ 4.4 (ก) และ (ข) มีการประสานกันของอะลูมิเนียมผสมทั้งสองชนิดได้ดี บริเวณเนื้อเชื่อมเกิดการเรียงตัวสลับกันของอะลูมิเนียมทั้งสองชนิดเป็นรูปฟันปลาอย่างชัดเจน มีริบเกิดขึ้นทั้งสองด้านและมีมากทางด้านอะลูมิเนียมผสมหล่อกิ่งแข็ง SSM 6061 (RS) และไม่พบรูพรุนในเนื้อเชื่อมที่มักจะเกิดขึ้นเมื่อเชื่อมอะลูมิเนียมด้วยวิธีการเชื่อมแบบหลอมละลาย และจากรูปที่ 4.4 (ค) พบว่าเมื่อความเร็วหมุนหัวทูลเพิ่มขึ้นลักษณะโครงสร้างมหภาคบริเวณที่ถูกกวน (Stir zone, SZ) มีขนาดกว้างขึ้น เนื่องจากความเร็วหมุนที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ความร้อนจากการเสียดทานในเนื้อเชื่อมมีค่าเพิ่มขึ้นด้วย บริเวณเนื้อเชื่อมเกิดการเรียงตัวของอะลูมิเนียมเป็นชั้น ๆ คล้ายกับหัวหอมและไม่พบรูพรุนในเนื้อเชื่อม



(ก)



(ข)



(ค)

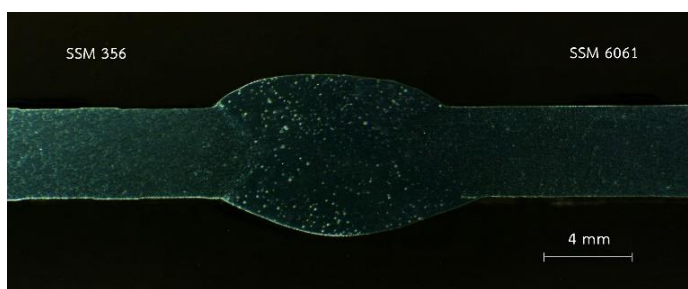
#### รูปที่ 4.4 โครงสร้างมหภาคของแนวเชื่อมเสียดทานแบบกวน

- (ก) ชิ้นงานที่ไม่ได้ผ่านกระบวนการทางความร้อน T6 ความเร็วหมุนหัวทูล 1,400 รอบ/นาที
- (ข) ชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการทางความร้อน T6 ความเร็วหมุนหัวทูล 1,400 รอบ/นาที และ
- (ค) ชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการทางความร้อน T6 ความเร็วหมุนหัวทูล 1,750 รอบ/นาที

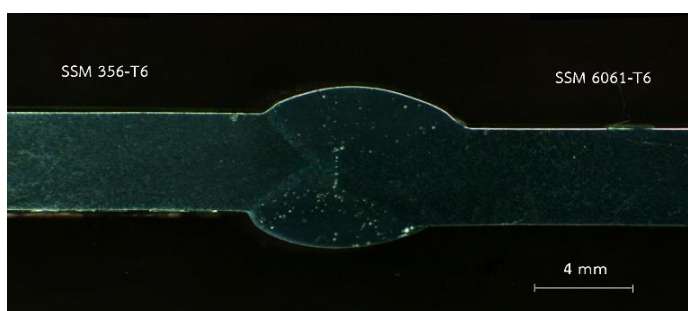
#### 4.2.2 ลักษณะโครงสร้างทางมหภาคของแนวเชื่อมทิกแบบเติมลวด

จากการตรวจสอบ โครงสร้างมหภาคของแนวเชื่อมทิกแบบเติมลวดระหว่าง อะลูมิเนียมผสมหล่อกิ่งแข็ง SSM 356 กับ SSM 6061 ที่ไม่ได้ผ่านกระบวนการทางความร้อน T6

และที่ผ่านกระบวนการทางความร้อน T6 จากรูปที่ 4.5 (ก) และ (ข) พบว่าอะลูมิเนียมทั้งสองชนิดสามารถประสานกันได้ดี บริเวณแนวเชื่อมมีลักษณะนูนสูงกว่าบริเวณโลหะฐาน เนื่องจากโลหะที่เติมเข้าไปขณะทำการเชื่อม และมีรูพรุนกระจายตัวในเนื้อเชื่อม เนื่องจากขณะเชื่อมเมื่ออะลูมิเนียมหลอมละลายจะมีไฮโดรเจนเข้าไปอยู่ในเนื้อเชื่อมและติดอยู่เมื่อเนื้อเชื่อมแข็งตัวทำให้เกิดเป็นรูพรุน โดยชิ้นงานอะลูมิเนียมผสมหล่อกิ่งแข็งที่ไม่ได้ผ่านกระบวนการทางความร้อน T6 ดังแสดงในรูปที่ 4.5 (ก) มีรูพรุนกระจายตัวอยู่มาก และแนวเชื่อมมีขนาดกว้างกว่าแนวเชื่อมของชิ้นงานอะลูมิเนียมผสมหล่อกิ่งแข็งที่ผ่านกระบวนการทางความร้อน T6 ดังแสดงในรูปที่ 4.5 (ข) ประมาณ 1-2 มิลลิเมตร



(ก)



(ข)

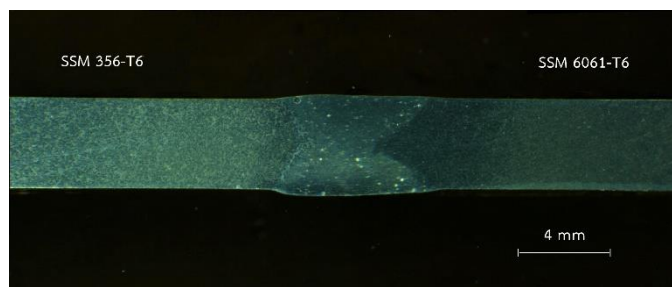
รูปที่ 4.5 โครงสร้างมหภาคของแนวเชื่อมทิกแบบเติมลวด (ก) ชิ้นงานที่ไม่ได้ผ่านกระบวนการทางความร้อน T6 และ (ข) ชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการทางความร้อน T6

#### 4.2.3 ลักษณะโครงสร้างทางมหภาคของแนวเชื่อมทิกแบบไม่เติมลวด

จากการตรวจสอบโครงสร้างมหภาคของแนวเชื่อมทิกแบบไม่เติมลวดระหว่าง อะลูมิเนียมผสมหล่อกิ่งแข็ง SSM 356 กับ SSM 6061 ที่ไม่ได้ผ่านกระบวนการทางความร้อน T6 และที่ผ่านกระบวนการทางความร้อน T6 พบว่าบริเวณเนื้อเชื่อมมีความหนาเท่ากับความหนาของ โลหะฐาน อะลูมิเนียมทั้งสองชนิดสามารถประสานกันได้ดีและมีรูพรุนกระจายตัวในเนื้อเชื่อม เล็กน้อย โดยชิ้นงานอะลูมิเนียมผสมหล่อกิ่งแข็งที่ไม่ได้ผ่านกระบวนการทางความร้อน T6 ดัง แสดงในรูปที่ 4.6 (ก) มีรูพรุนกระจายตัวอยู่มากและแนวเชื่อมมีความกว้างเท่ากับแนวเชื่อมของ ชิ้นงานอะลูมิเนียมผสมหล่อกิ่งแข็งที่ผ่านกระบวนการทางความร้อน T6 ดังแสดงในรูปที่ 4.6 (ข)



(ก)



(ข)

รูปที่ 4.6 โครงสร้างมหภาคของแนวเชื่อมทิกแบบไม่เติมลวด

(ก) ชิ้นงานที่ไม่ได้ผ่านกระบวนการทางความร้อน T6 และ

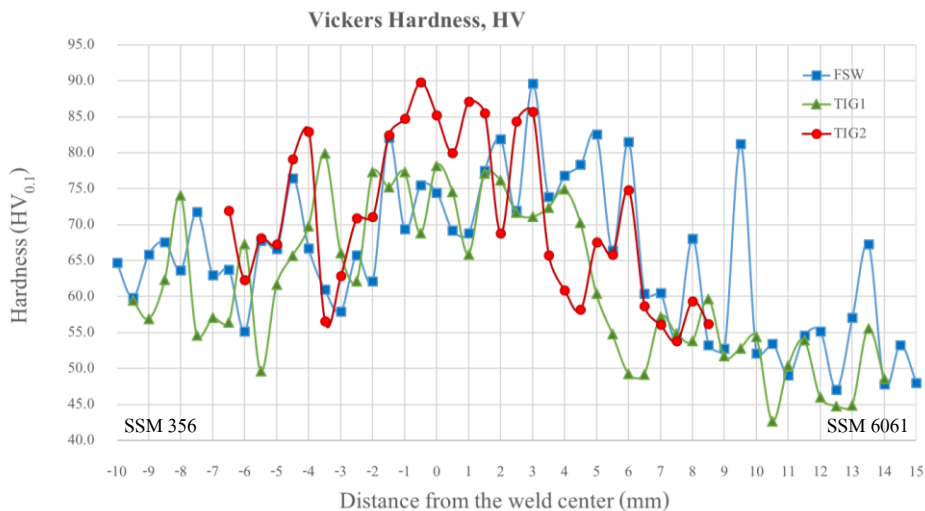
(ข) ชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการทางความร้อน T6

### 4.3 การทดสอบความแข็งของแนวเชื่อม (Hardness of weld)

จากการทดสอบความแข็งของแนวเชื่อมระหว่างอะลูมิเนียมผสมหล่อกิ่งแข็ง SSM 356 และ SSM 6061 ที่ไม่ได้ผ่านกระบวนการทางความร้อน T6 และที่ผ่านกระบวนการทางความร้อน T6 ด้วยเครื่องทดสอบแบบไมโครวิกเกอร์ พบว่าค่าความแข็งของทุกกระบวนการเชื่อมบริเวณตรงกลางแนวเชื่อมมีค่าสูงที่สุดและบริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อน (HAZ) มีค่าความแข็งต่ำที่สุด เนื่องจากการเชื่อมอะลูมิเนียมผสมที่บริเวณเนื้อเชื่อมเกิดการตกผลึกใหม่และในการเชื่อมทิกจะมีบริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อน (HAZ) จากเปลวอาร์คทำให้บริเวณดังกล่าวกลายเป็นสภาพอ่อนลง ส่งผลให้อะลูมิเนียมผสมเกิดการอ่อนตัวและบริเวณแนวเชื่อมมีค่าความแข็งมากกว่า (ประกาศ เมืองจันทร์บุรี 2555)

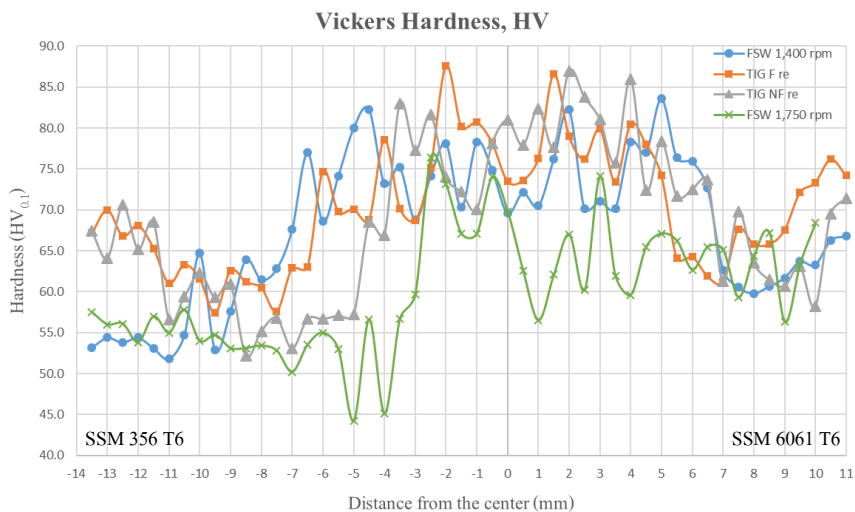
ค่าความแข็งแนวเชื่อมอะลูมิเนียมผสมหล่อกิ่งแข็งต่างชนิดกันระหว่าง SSM 356 กับ SSM 6061 ที่ไม่ได้ผ่านกระบวนการทางความร้อน T6 ดังแสดงในรูปที่ 4.7 (ก) ค่าความแข็งเฉลี่ยบริเวณเนื้อโลหะเดิมของอะลูมิเนียมผสมหล่อกิ่งแข็ง SSM 356 ประมาณ 68.5 HV และบริเวณเนื้อโลหะเดิมของอะลูมิเนียมผสมหล่อกิ่งแข็ง SSM 6061 ประมาณ 56 HV บริเวณตรงกลางแนวเชื่อมในกระบวนการเชื่อมทิกแบบไม่เติมลวดมีค่าความแข็งเฉลี่ยสูงสุดประมาณ 83.4 HV และบริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อน (HAZ) ที่ติดกับเนื้อโลหะเดิมของอะลูมิเนียมผสมหล่อกิ่งแข็ง SSM 6061 ในกระบวนการเชื่อมทิกแบบเติมลวดมีค่าความแข็งเฉลี่ยต่ำสุดประมาณ 51.1 HV เมื่อเปรียบเทียบค่าความแข็งเฉลี่ยบริเวณตรงกลางแนวเชื่อมระหว่างชิ้นงานที่ไม่ได้ผ่านกระบวนการทางความร้อน T6 ดังแสดงในรูปที่ 4.7 (ก) กับชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการทางความร้อน T6 ดังแสดงในรูปที่ 4.7 (ข) ค่าความแข็งเฉลี่ยบริเวณตรงกลางแนวเชื่อมของอะลูมิเนียมที่ไม่ได้ผ่านกระบวนการทางความร้อน T6 จะมีค่าความแข็งที่สูงกว่าอะลูมิเนียมที่ผ่านกระบวนการทางความร้อน T6 เนื่องจากการเชื่อมแบบหลอมละลายกับอะลูมิเนียมผสมทำให้เกิดลักษณะการบ่มเทียม (Artificial Age) อีกครั้ง ส่งผลให้ค่าความแข็งบริเวณแนวเชื่อมมีค่าลดลง ซึ่งค่าความแข็งเฉลี่ยบริเวณตรงกลางแนวเชื่อมในชิ้นงานเชื่อมที่ผ่านกระบวนการทางความร้อน T6 ดังแสดงในรูปที่ 4.7 (ข) กระบวนการเชื่อมเสียดทานแบบกวนที่ความเร็วหมุนเชื่อม 1,400 รอบ/นาที มีค่าความแข็งสูงสุดประมาณ 74.9 HV และบริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อน (HAZ) ที่ติดกับเนื้อโลหะเดิมของอะลูมิเนียมผสมหล่อกิ่งแข็ง SSM 356 T6 ในกระบวนการเชื่อมเสียดทานแบบกวนที่ความเร็วหมุนเชื่อม 1,750 รอบ/นาที มีค่าความแข็งเฉลี่ยต่ำสุดประมาณ 44.6 HV





(ก)

หมายเหตุ : TIG1 คือ การเชื่อมทิกแบบเติมลวด , TIG2 คือ การเชื่อมทิกแบบไม่เติมลวด และ FSW คือ การเชื่อมเสียดทานแบบกวนความเร็วหมุนเชื่อม 1,400 รอบ/นาที



(ข)

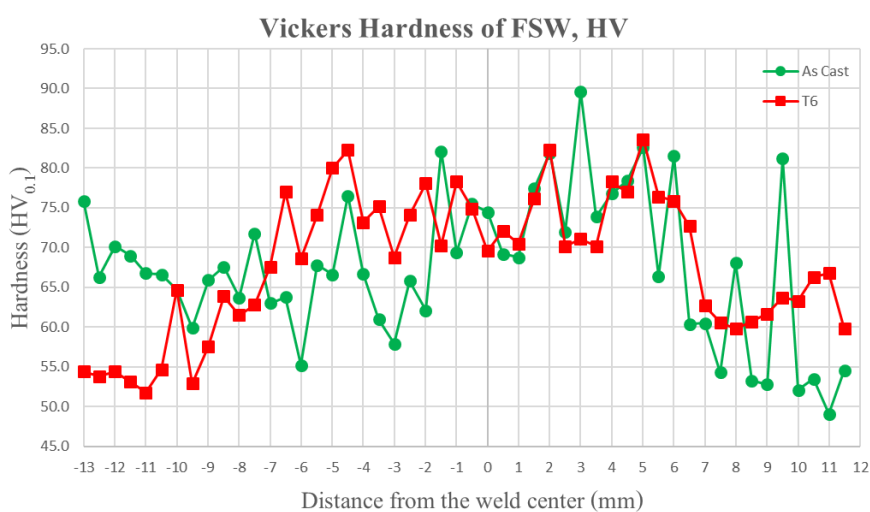
หมายเหตุ : TIG1 คือ การเชื่อมทิกแบบเติมลวด , TIG2 คือ การเชื่อมทิกแบบไม่เติมลวด และ FSW 1,400 rpm คือ การเชื่อมเสียดทานแบบกวนความเร็วหมุนเชื่อม 1,400 รอบ/นาที FSW 1,750 rpm คือ การเชื่อมเสียดทานแบบกวนความเร็วหมุนเชื่อม 1,750 รอบ/นาที

รูปที่ 4.7 ค่าความแข็งแนวเชื่อมระหว่างอะลูมิเนียมผสมหล่อแข็ง SSM 356 และ SSM 6061

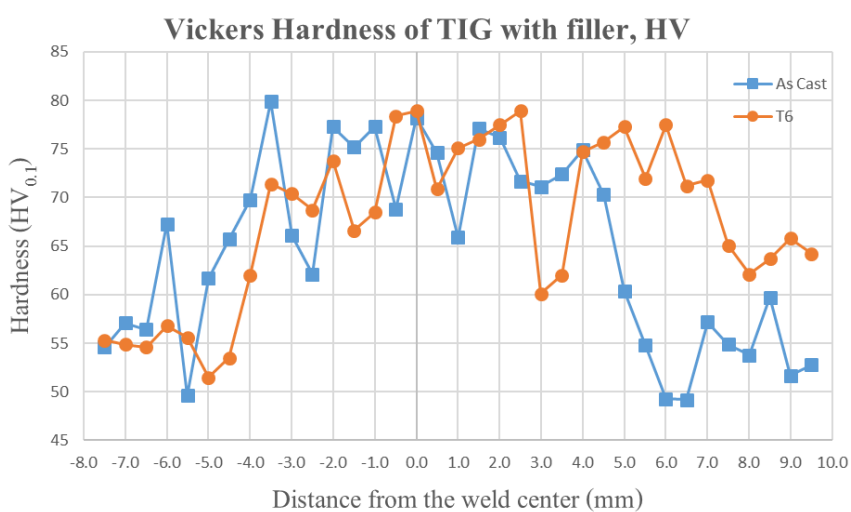
(ก) ชิ้นงานที่ไม่ได้ผ่านกระบวนการทางความร้อน T6 และ

(ข) ชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการทางความร้อน T6

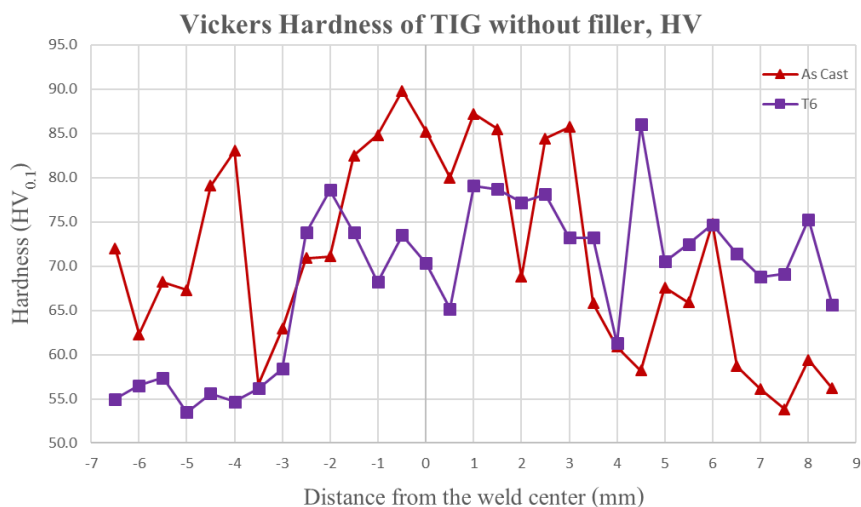
เมื่อพิจารณาค่าความแข็งบริเวณเนื้อเชื่อมโดยแยกตามกระบวนการเชื่อม พบว่าการเชื่อมเสียดทานแบบกวนในชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการทางความร้อน T6 และชิ้นงานที่ไม่ได้ผ่านกระบวนการทางความร้อน T6 ให้ค่าความแข็งของแนวเชื่อมที่ใกล้เคียงกันดังแสดงในรูปที่ 4.8 (ก) เช่นเดียวกับการเชื่อมทิกแบบเติมลวดดังแสดงในรูปที่ 4.8 (ข) สำหรับการเชื่อมทิกแบบไม่เติมลวดในชิ้นงานที่ไม่ได้ผ่านกระบวนการทางความร้อน T6 มีค่าความแข็งที่เนื้อเชื่อมสูงกว่าชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการทางความร้อน T6 ดังแสดงในรูปที่ 4.8 (ค)



(ก)



(ข)



(ค)

รูปที่ 4.8 ค่าความแข็งแนวเชื่อม (ก) การเชื่อมเสียดทานแบบกวน (ข) การเชื่อมทิกแบบเติมลวด และ (ค) การเชื่อมทิกแบบไม่เติมลวด

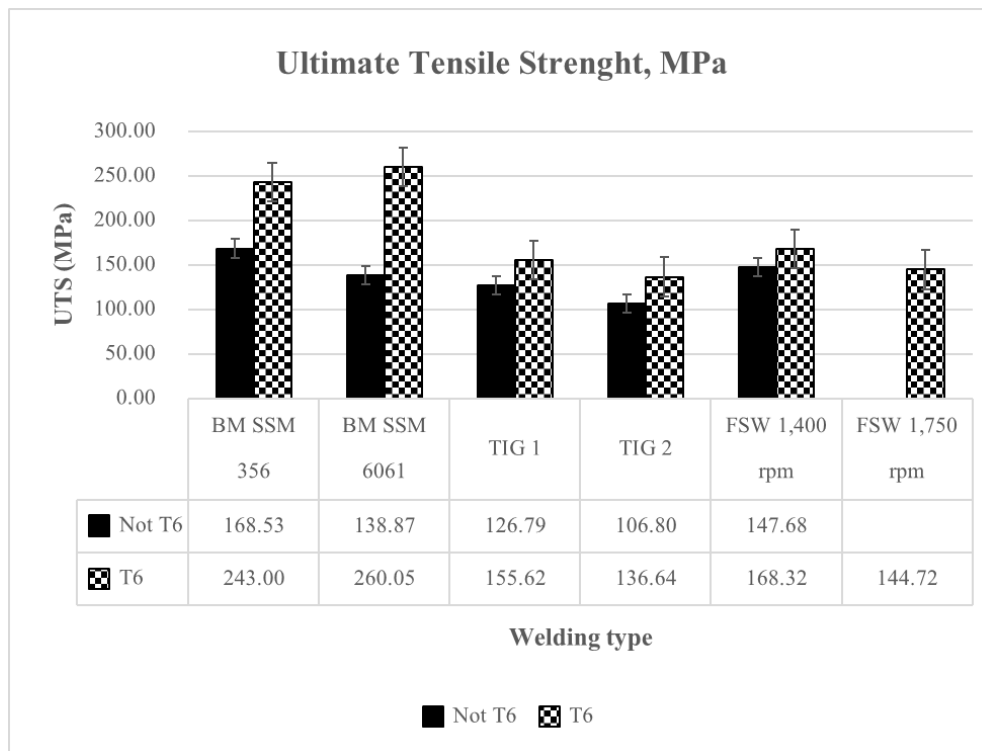
#### 4.4 การทดสอบความแข็งแรงดึงของแนวเชื่อม (Tensile strength of weld)

แนวเชื่อมระหว่างอะลูมิเนียมผสมหล่อกิ่งแข็งต่างชนิดกัน SSM 356 และ SSM 6061 ที่ไม่ได้ผ่านกระบวนการทางความร้อน T6 และที่ผ่านกระบวนการทางความร้อน T6 ด้วยกระบวนการเชื่อมเสียดทานแบบกวน (FSW) การเชื่อมทิกแบบเติมลวด (TIG1) และการเชื่อมทิกแบบไม่เติมลวด (TIG2) โดยเตรียมชิ้นงานทดสอบตามมาตรฐาน ASTM (E8) ดังแสดงในภาคผนวก ก ซึ่งผลการทดสอบความแข็งแรงดึงทั้งหมดดังแสดงในภาคผนวก ก

จากรูปที่ 4.9 แสดงผลการทดสอบความแข็งแรงดึงพบว่าค่าความแข็งแรงดึงของอะลูมิเนียมผสมหล่อกิ่งแข็งที่ผ่านกระบวนการทางความร้อน T6 ในทุกกระบวนการเชื่อมมีค่าความแข็งแรงดึงสูงกว่าแนวเชื่อมของอะลูมิเนียมผสมหล่อกิ่งแข็งที่ไม่ได้ผ่านกระบวนการทางความร้อน T6 เนื่องจากอะลูมิเนียมที่ผ่านกระบวนการทางความร้อน T6 มีสมบัติความแข็งแรงดึงที่เพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน โดยสังเกตได้จากค่าความแข็งแรงดึงของโลหะเดิมของอะลูมิเนียมผสมหล่อกิ่งแข็ง SSM 356 T6 ที่มีค่าความแข็งแรงดึงเพิ่มขึ้นคิดเป็นร้อยละ 44.2 และค่าความแข็งแรงดึงของโลหะเดิมของอะลูมิเนียมผสมหล่อกิ่งแข็ง SSM 6061 T6 มีค่าความแข็งแรงดึงเพิ่มขึ้นคิดเป็นร้อยละ 87.3 เมื่อเปรียบเทียบกับโลหะพื้นฐานที่ไม่ได้ผ่านกระบวนการทางความร้อน T6 จากการทดสอบ

กระบวนการเชื่อมเสียดทานแบบกวนที่ความเร็วหมุนเชื่อม 1,400 รอบ/นาที ในอะลูมิเนียมผสมหล่อแข็งที่ผ่านกระบวนการทางความร้อน T6 มีค่าความแข็งแรงดึงเฉลี่ยสูงสุด คือ 168.32 MPa เมื่อเปรียบเทียบกับค่าความแข็งแรงดึงในแต่ละกระบวนการเชื่อมของอะลูมิเนียมผสมหล่อแข็งที่ไม่ได้ผ่านกระบวนการทางความร้อน T6 พบว่ากระบวนการเชื่อมเสียดทานแบบกวนที่ความเร็วหมุนเชื่อม 1,400 รอบ/นาที มีค่าสูงสุดเช่นกัน คือ 147.68 MPa และการเชื่อมทิกแบบไม่เติมลวดมีค่าความแข็งแรงดึงต่ำสุด คือ 106.80 MPa ในขณะเดียวกันเมื่อเปรียบเทียบกับค่าความแข็งแรงดึงในแต่ละกระบวนการเชื่อมของอะลูมิเนียมผสมหล่อแข็งที่ผ่านกระบวนการทางความร้อน T6 พบว่าการเชื่อมทิกแบบไม่เติมลวดมีค่าความแข็งแรงดึงต่ำสุดเช่นกัน คือ 136.64 MPa เนื่องจากการเชื่อมแบบหลอมละลายกับอะลูมิเนียมผสมทำให้เกิดลักษณะการบ่มเทียม (Artificial Age) อีกครั้ง ส่งผลให้สมบัติทางกลของแนวเชื่อมลดลง แต่การเชื่อมทิกแบบเติมลวดมีสมบัติทางกลดีกว่าการเชื่อมทิกแบบไม่เติมลวดเนื่องจากการเติมลวดชนิด 4043 ที่มีธาตุซิลิกอนผสมอยู่ซึ่งมีสมบัติในการต้านการแตกร้อน ส่งผลให้ค่าความแข็งแรงดึงของอะลูมิเนียมผสมหล่อแข็งด้วยกระบวนการเชื่อมทิกแบบเติมลวดมีค่าสูงกว่าการเชื่อมทิกแบบไม่เติมลวด

เมื่อนำทุกกระบวนการเชื่อมมาเปรียบเทียบพบว่าการเชื่อมเสียดทานแบบกวนมีค่าความแข็งแรงดึงสูงสุดในทุกลักษณะชิ้นงาน เนื่องจากการเชื่อมเสียดทานแบบกวนเป็นการเชื่อมที่สภาวะกึ่งของแข็ง เนื้อเชื่อมไม่เกิดการหลอมละลายทำให้โครงสร้างจุลภาคเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อย ส่งผลให้มีสมบัติทางกลที่ดี ซึ่งแตกต่างจากการเชื่อมทิกที่เป็นการเชื่อมแบบหลอมละลายจะมีบริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อน (HAZ) เนื่องจากเปลวอาร์คไปทำลายสภาพเวิร์คฮาร์ดเดนนิง (Work hardening) และการบ่ม ทำให้บริเวณดังกล่าวมีสภาพเหมือนถูกอบอ่อนส่งผลให้เกิดการอ่อนตัวของชิ้นงาน (เชิดเชลง ชิตชวนกิจ และคณะ 2524)



หมายเหตุ : TIG1 คือ การเชื่อมทิกแบบเติมลวด , TIG2 คือ การเชื่อมทิกแบบไม่เติมลวด

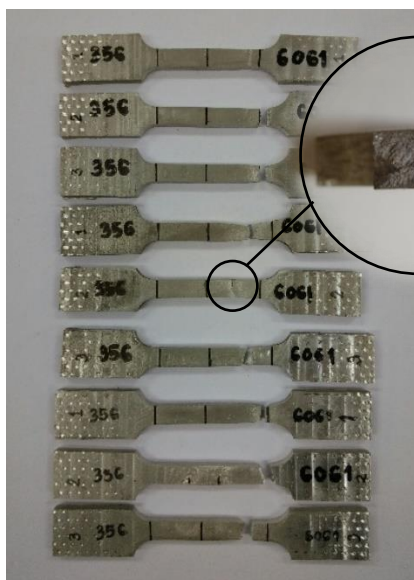
FSW 1,400 rpm คือ การเชื่อมเสียดทานแบบกวนความเร็วหมุนเชื่อม 1,400 รอบ/นาที

FSW 1,750 rpm คือ การเชื่อมเสียดทานแบบกวนความเร็วหมุนเชื่อม 1,750 รอบ/นาที

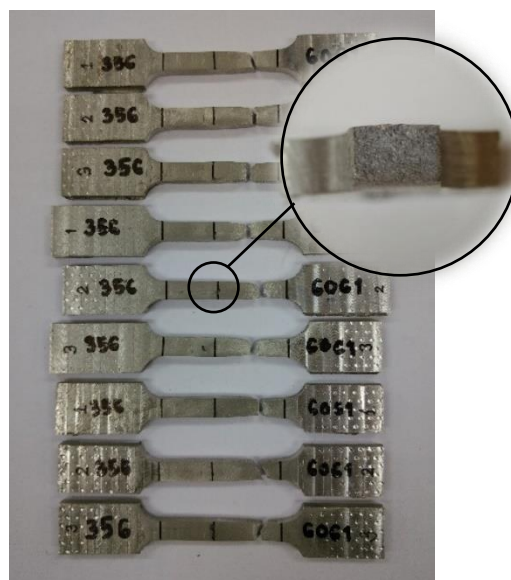
รูปที่ 4.9 ค่าความแข็งแรงดึงของโลหะพื้นฐานและแนวเชื่อมในทุกกระบวนการเชื่อม

พิจารณาลักษณะการขาดของชิ้นงานจากการทดสอบความแข็งแรงดึงจากรูปที่ 4.10 และรูปที่ 4.11 พบว่าชิ้นงานที่ไม่ได้ผ่านกระบวนการทางความร้อน T6 ในทุกกระบวนการเชื่อมเกิดการขาดที่บริเวณด้านข้างแนวเชื่อมทางด้านอะลูมิเนียมผสมหล่อกิ่งแข็ง SSM 6061 ซึ่งมีความแข็งแรงน้อยกว่าอะลูมิเนียมผสมหล่อกิ่งแข็ง SSM 356 ตรงบริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อน (HAZ) ดังแสดงในรูปที่ 4.10 การขาดของชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการทางความร้อน T6 ในกระบวนการเชื่อมทิกแบบเติมลวดและการเชื่อมทิกแบบไม่เติมลวด การขาดของชิ้นงานทดสอบเกิดขึ้น 2 ตำแหน่ง คือ บริเวณเนื้อเชื่อมและบริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อน (HAZ) ของอะลูมิเนียมผสมหล่อกิ่งแข็ง SSM 356 T6 ซึ่งมีความแข็งแรงดึงน้อยกว่าอะลูมิเนียมผสมหล่อกิ่งแข็ง SSM 6061 T6 ดังแสดงในรูปที่ 4.11 (ก) และ (ข) สำหรับกระบวนการเชื่อมเสียดทานแบบกวนการขาดของชิ้นงานทดสอบเกิดขึ้นเพียงตำแหน่งเดียว คือ บริเวณเนื้อเชื่อม ดังแสดงในรูปที่ 4.11 (ค) ซึ่งเกิด

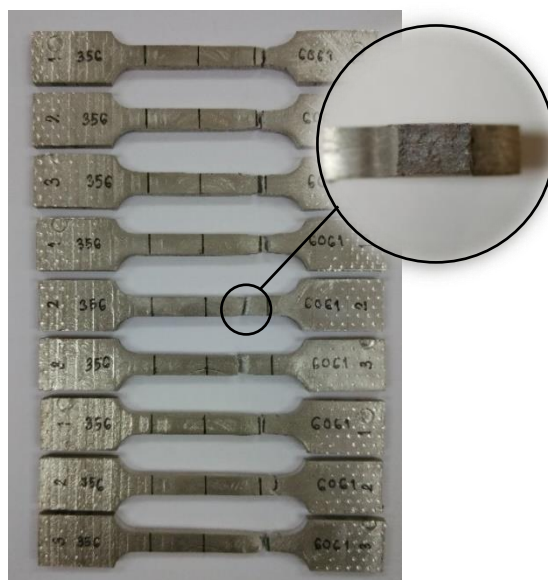
การหลอมละลายไม่สมบูรณ์ ไม่สามารถเชื่อมติดกันได้ตลอดทั้งความหนาของชิ้นงาน เนื่องจาก ความร้อนสะสมในการเชื่อมไม่เพียงพอ



(ก)

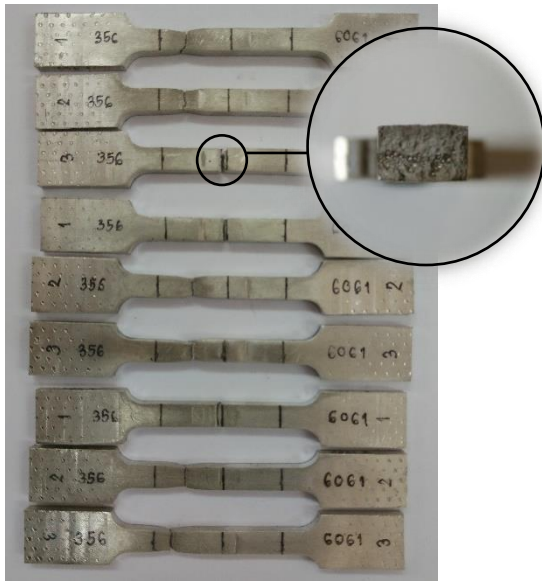


(ข)

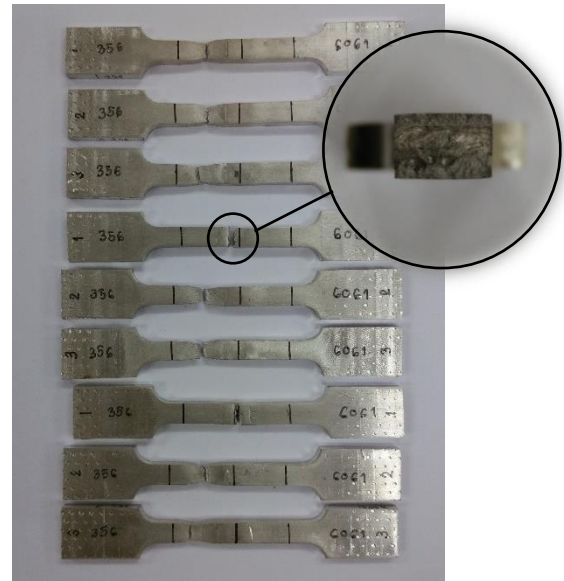


(ค)

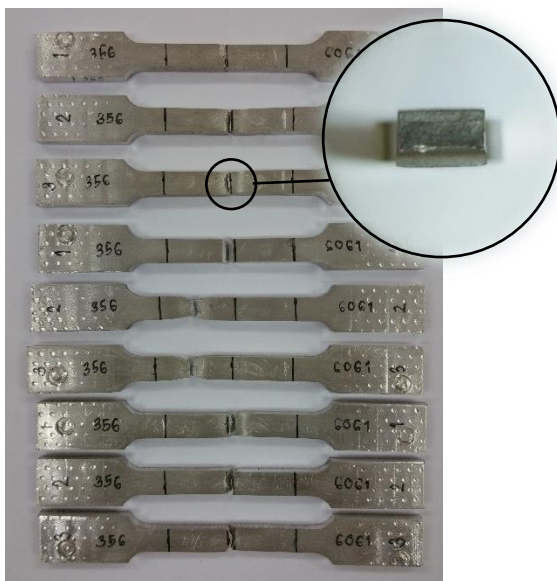
รูปที่ 4.10 บริเวณที่เกิดการแตกจากการทดสอบแรงดึงของชิ้นงานทดสอบที่ไม่ได้ผ่านกระบวนการทางความร้อน T6 (ก) การเชื่อมทิกแบบเต็มลวด (ข) การเชื่อมทิกแบบไม่เต็มลวด และ (ค) การเชื่อมเสียดทานแบบกวน



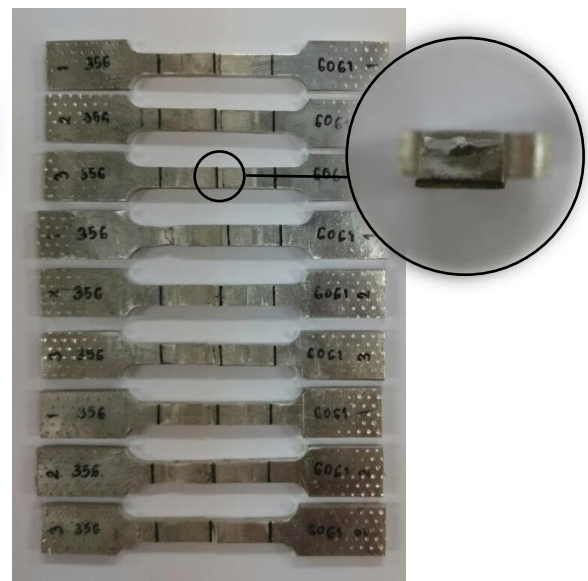
(ก)



(ข)



(ค)



(ง)

รูปที่ 4.11 บริเวณที่เกิดการแตกจากการทดสอบแรงดึงของชิ้นงานทดสอบที่ผ่านกระบวนการทางความร้อน T6 (ก) การเชื่อมทิกแบบเต็มลวด (ข) การเชื่อมทิกแบบไม่เต็มลวด (ค) การเชื่อมเสียดทานแบบกวน 1,400 rpm และ (ง) การเชื่อมเสียดทานแบบกวน 1,750 rpm

#### 4.5 การวิเคราะห์ค่าความแข็งแรงดึงด้วยวิธีการทางสถิติ (Statistical analysis of ultimate tensile strength of weld)

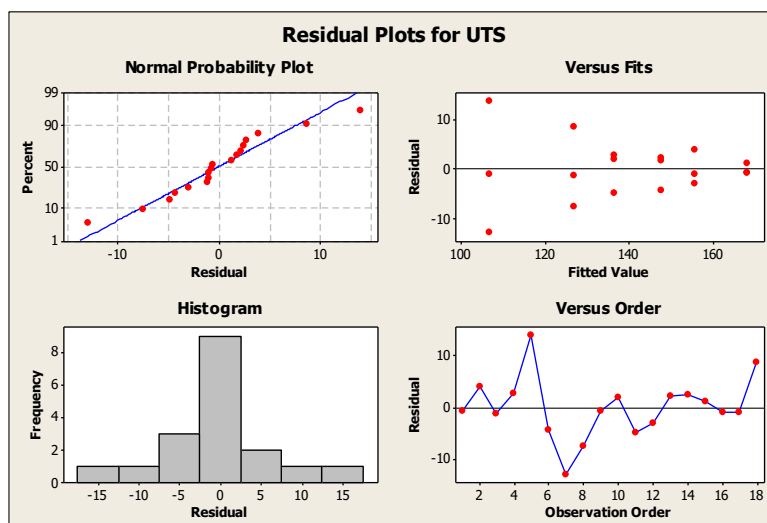
จากการวิเคราะห์ความแข็งแรงดึงของกระบวนการเชื่อมเสียดทานแบบกวนในชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการทางความร้อน T6 พบว่าที่ความเร็วหมุนหัวทูล 1,400 รอบ/นาที ให้ผลการทดสอบสมบัติเชิงกล (ค่าความแข็งแรงดึง) ที่ดีกว่าความเร็วหมุนหัวทูล 1,750 รอบ/นาที ดังนั้น ในขั้นตอนการวิเคราะห์ค่าความแข็งแรงดึงด้วยวิธีทางสถิติสำหรับกระบวนการเชื่อมเสียดทานแบบกวนในชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการทางความร้อน T6 จะกำหนดเพียงปัจจัยเดียว คือ ที่ความเร็วหมุนหัวทูล 1,400 รอบ/นาที เท่านั้น

การวิเคราะห์ค่าความแข็งแรงดึงของแนวเชื่อมด้วยวิธีทางสถิติประกอบด้วยสองปัจจัยคือ กระบวนการเชื่อมและประเภทของอะลูมิเนียมผสมหล่อกิ่งแข็ง ซึ่งกระบวนการเชื่อมมี 3 กระบวนการ คือ การเชื่อมเสียดทานแบบกวน (FSW) การเชื่อมทิกแบบเติมลวด (TIG1) และการเชื่อมทิกแบบไม่เติมลวด (TIG2) สำหรับประเภทของอะลูมิเนียมผสมหล่อกิ่งแข็งมี 2 ประเภท คือ อะลูมิเนียมผสมหล่อกิ่งแข็งที่ไม่ได้ผ่านกระบวนการทางความร้อน T6 และที่ผ่านกระบวนการทางความร้อน T6 ทำการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ Minitab release 16 ในการคำนวณค่าทางสถิติประกอบด้วยส่วนต่าง ๆ ดังนี้

##### 4.5.1 การวิเคราะห์ความถูกต้องของตัวแบบ

การวิเคราะห์ความถูกต้องของตัวแบบทางสถิติที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ประกอบด้วยความเป็นอิสระของข้อมูล ความเป็นปกติของข้อมูล และความมีเสถียรภาพของค่าความแปรปรวนของข้อมูล โดยทำการทดสอบความถูกต้องของตัวแบบทางสถิติของค่าความแข็งแรงดึงในตาราง ค.1 และตาราง ค.2 ของภาคผนวก ค สามารถพิจารณาได้จากกราฟแสดงการวิเคราะห์ความถูกต้องของตัวแบบดังแสดงในรูปที่ 4.12





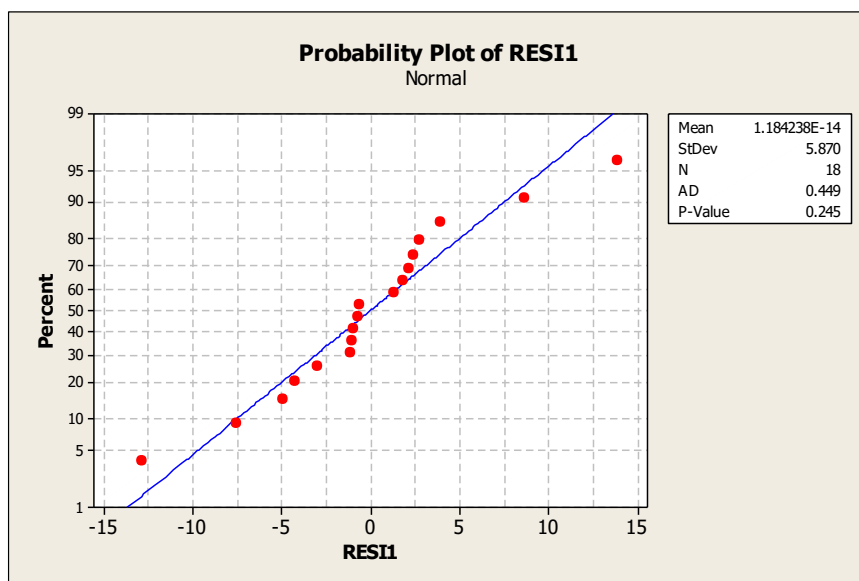
รูปที่ 4.12 กราฟการวิเคราะห์ความถูกต้องของตัวแบบการทดลอง

#### 1) ความเป็นอิสระของข้อมูล

ความเป็นอิสระของข้อมูลสามารถพิจารณาได้จากกราฟดังแสดงในรูปที่ 4.12 (กราฟด้านล่างขวา) พบว่าลักษณะของกราฟไม่สามารถคาดเดาหรือทำนายทิศทาง การเคลื่อนที่ของข้อมูลได้อย่างชัดเจน ไม่เกาะตัวไปในทิศทางเดียวกัน หมายความว่าข้อมูลที่ได้จากการทดลองมีความเป็นอิสระต่อกัน

#### 2) ความเป็นปกติของข้อมูล

ความเป็นปกติของข้อมูลเป็นการพิจารณาว่ามีการเก็บข้อมูลมาแบบปกติหรือไม่ โดยพิจารณาจากกราฟแท่งว่ามีลักษณะเป็นระฆังคว่ำหรือไม่ (กรณีข้อมูลมากกว่า 30 ข้อมูล) แต่หากมีข้อมูลน้อยกว่า 30 ข้อมูล ให้พิจารณาลักษณะของกราฟการกระจายตัวของข้อมูลว่าเป็นเส้นตรงหรือไม่ จากรูปที่ 4.13 พบว่ากราฟมีลักษณะการกระจายตัวเป็นแบบเส้นตรง และค่า P-value ที่ได้มีค่าเท่ากับ 0.245 ที่ระดับความเชื่อมั่น 0.05 หมายความว่าข้อมูลที่พิจารณามีการแจกแจงแบบปกติ



รูปที่ 4.13 กราฟ probability plot

### 3) ความมีเสถียรภาพของค่าความแปรปรวนของข้อมูล

ความมีเสถียรภาพของค่าความแปรปรวนเป็นการสังเกตค่าความแปรปรวนของข้อมูลว่ามีการกระจายตัวรอบค่าศูนย์คลาดเคลื่อนสม่ำเสมอมากน้อยหรือไม่ สามารถพิจารณาได้จากรูปที่ 4.12 (กราฟด้านบนขวา) พบว่าข้อมูลมีการกระจายตัวแปรผันสม่ำเสมอรอบค่าศูนย์ ดังนั้นข้อมูลจึงมีความเสถียรภาพของค่าความแปรปรวน

### 4.5.2 การวิเคราะห์ ANOVA

การวิเคราะห์ ANOVA เพื่อหาอิทธิพลของกระบวนการเชื่อม ลักษณะชิ้นงาน และอันตรกิริยาร่วมระหว่างกระบวนการเชื่อมกับลักษณะชิ้นงาน มีผลต่อความแข็งแรงดึงของแนวเชื่อมอย่างมีนัยสำคัญหรือไม่ โดยมีแบบจำลองเชิงเส้นสำหรับการออกแบบ two – factor factorial คือ

$$Y_{ijk} = \mu + \tau_i + \beta_j + (\tau\beta)_{ij} + \varepsilon_{ijk} \begin{cases} i=1, 2, 3 \\ j=1, 2 \end{cases} \quad (4.1)$$

โดยที่  $\mu$ : ค่าเฉลี่ยรวมของ Response

$\tau_i$ : อิทธิพลของกระบวนการเชื่อม

$\beta_j$ : อิทธิพลของลักษณะชิ้นงาน

$(\tau\beta)_{ij}$ : อิทธิพลร่วมระหว่างกระบวนการเชื่อมและลักษณะชิ้นงานระดับที่  $i^{\text{th}}$  และ  $j^{\text{th}}$

$\epsilon_{ijk}$ : ความคลาดเคลื่อนแบบสุ่มของการทดลองที่ระดับ  $i^{\text{th}}$  และ  $j^{\text{th}}$  ครั้งที่  $k^{\text{th}}$

สมมติฐานที่ใช้ทดสอบ

$$1. H_0: \tau_1 = \tau_2 = \tau_3$$

$$H_1: \text{At least one } \tau_i \neq 0$$

$$2. H_0: \beta_1 = \beta_2$$

$$H_1: \beta_1 \neq \beta_2$$

$$3. H_0: (\tau\beta)_{ij} = 0$$

$$H_1: \text{At least one } (\tau\beta)_{ij} \neq 0$$

#### 4.5.3 การทดสอบสมมติฐานของการทดลอง

อิทธิพลของกระบวนการเชื่อม ลักษณะชิ้นงาน และอันตรกิริยาร่วมระหว่างกระบวนการเชื่อมกับลักษณะชิ้นงาน มีผลต่อความแข็งแรงดึงของแนวเชื่อมอย่างมีนัยสำคัญหรือไม่ สามารถพิจารณาจากการวิเคราะห์ผลด้วยโปรแกรม Minitab ดังแสดงในตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 วิเคราะห์ความแปรปรวนของค่าความแข็งแรงดึง

General Linear Model: Tensile versus Welding, Material							
Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P	
Welding	2	3954.9	3954.9	1977.4	40.51	0.000	
Material	1	3144.5	3144.5	3144.5	64.41	0.000	
Welding*Material	2	76.3	76.3	38.2	0.78	0.480	
Error	12	585.8	585.8	48.8			
Total	17	7761.5					

S = 6.98702    R-Sq = 92.45%    R-Sq(adj) = 89.31%

จากตารางที่ 4.1 ทำการตรวจสอบค่าสัมประสิทธิ์ในการตัดสินใจ (R-Sq) มีค่าเท่ากับ 92.45% แสดงให้เห็นว่าความแปรปรวนที่เกิดขึ้นเกิดจากการเปลี่ยนแปลงปัจจัยที่ต้องการทดสอบ คือ กระบวนการเชื่อมและลักษณะของชิ้นงาน โดยคิดเป็นร้อยละ 92.45 นอกจากนี้เกิดจากปัจจัยที่ไม่สามารถควบคุมได้ (Uncontrollable) เช่น สภาพอากาศขณะทำการทดสอบ เป็นต้น โดยคิดเป็นร้อยละ 7.55

เมื่อพิจารณาค่า P-value กล่าวคือ ถ้า  $P\text{-value} < \alpha$  ให้ปฏิเสธ  $H_0$  แต่ถ้า  $P\text{-value} > \alpha$  ให้ยอมรับ  $H_0$  ที่ระดับนัยสำคัญ 95% ( $\alpha = 0.05$ ) พบว่าค่า P-value ของอิทธิพลร่วมระหว่างกระบวนการเชื่อมและลักษณะชิ้นงาน (Welding\*Material) มีค่าเท่ากับ 0.480 ซึ่งค่า  $P\text{-value} > 0.05$  หมายความว่าอิทธิพลร่วมระหว่างกระบวนการเชื่อมและลักษณะชิ้นงานมีผลต่อค่าความแข็งแรงดังอย่างไม่มีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95% และเมื่อวิเคราะห์ค่า P-value ของกระบวนการเชื่อม (Welding) และลักษณะชิ้นงาน (Material) มีค่าเท่ากับ 0.000 และ 0.000 ตามลำดับ ซึ่งค่า  $P\text{-value} < 0.05$  หมายความว่ากระบวนการเชื่อมและลักษณะชิ้นงานมีผลต่อค่าความแข็งแรงดังอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

#### 4.5.4 การเปรียบเทียบพหุคูณด้วยวิธี Turkey

การเปรียบเทียบพหุคูณเพื่อหาความแตกต่างในแต่ละระดับของตัวแปรต้นโดยทำการเปรียบเทียบทีละคู่ สามารถพิจารณาจากค่า P-value ที่วิเคราะห์ด้วยวิธี Turkey's HSD test เป็นการจับคู่ตัวแปรภายในปัจจัยเดียวกัน เพื่อตรวจสอบหาความแตกต่างระหว่างคู่ตัวแปรที่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ( $\alpha = 0.05$ )

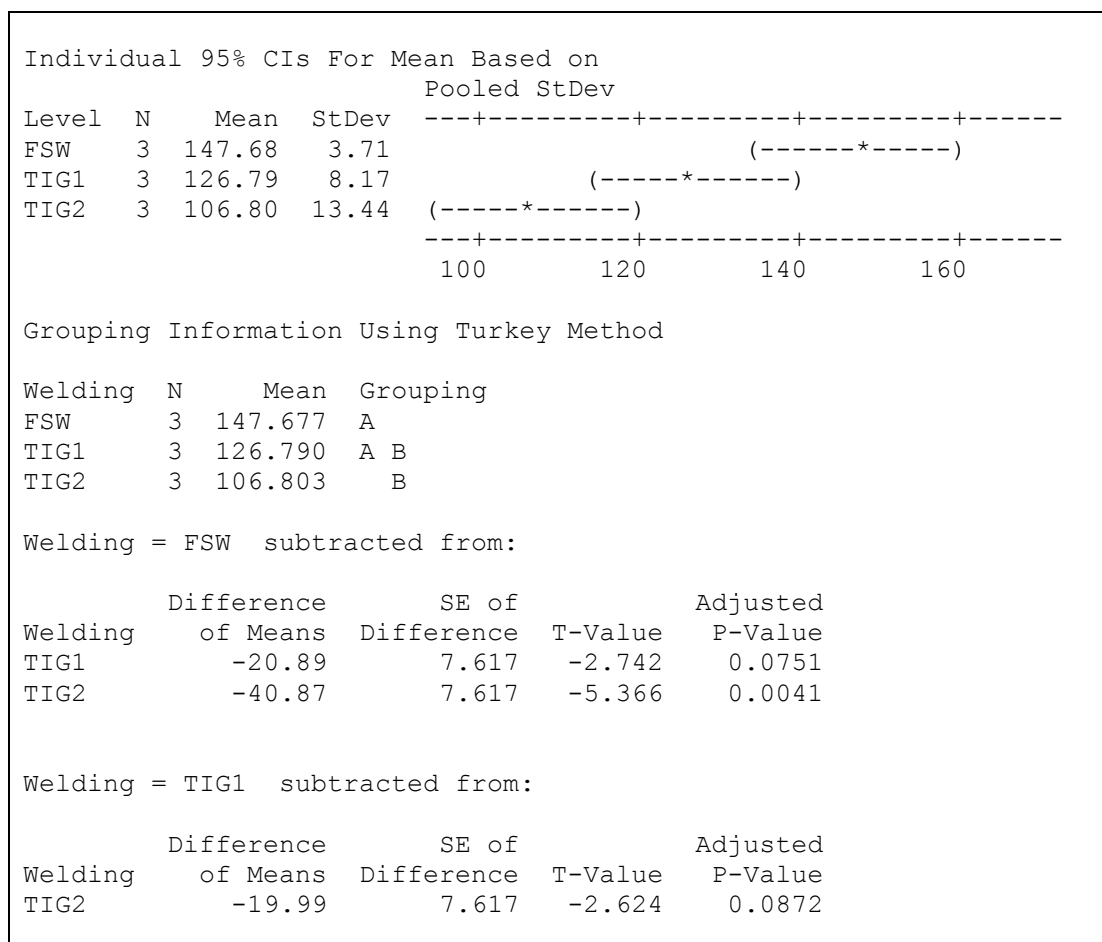
ตารางที่ 4.2 วิเคราะห์ความแตกต่างภายในปัจจัยของลักษณะชิ้นงานด้วยวิธี Turkey's HSD test

Individual 95% CIs For Mean Based on Pooled StDev				
Level	N	Mean	StDev	
Not T6	9	127.09	19.46	(-----*-----)
T6	9	153.52	14.09	(-----*-----)
-----+-----+-----+-----+-----				
120                    135                    150                    165				
Grouping Information Using Turkey Method				
Material	N	Mean	Grouping	
T6	9	153.52	A	
Not T6	9	127.09	B	
Material	Difference of Means	SE of Difference	T-Value	Adjusted P-Value
T6	26.43	8.008	3.301	0.0045

การวิเคราะห์ผลจากตารางที่ 4.1 พบว่าค่า P-value ของกระบวนการเชื่อม (Welding) และลักษณะชิ้นงาน (Material)  $< 0.05$  หมายความว่ากระบวนการเชื่อมและลักษณะของชิ้นงานมีผลต่อค่าความแข็งแรงดึง เมื่อวิเคราะห์จับคู่ตัวแปรเพื่อหาความแตกต่างของตัวแปรภายในปัจจัยของลักษณะชิ้นงานด้วยวิธี Turkey's HSD test ดังแสดงในตารางที่ 4.2 พบว่าค่า P-value ระหว่างชิ้นงานทดสอบที่ผ่านกระบวนการทางความร้อน T6 และชิ้นงานทดสอบที่ไม่ได้ผ่านกระบวนการทางความร้อน T6 มีค่าเท่ากับ 0.0045 ซึ่ง  $< 0.05$  หมายความว่าชิ้นงานทดสอบที่ผ่านกระบวนการทางความร้อน T6 จะให้ค่าความแข็งแรงดึงที่แตกต่างจากชิ้นงานทดสอบที่ไม่ได้ผ่านกระบวนการทางความร้อน T6 อย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

เมื่อทราบผลการวิเคราะห์จากตารางที่ 4.2 จึงทำการวิเคราะห์หาความแตกต่างของกระบวนการเชื่อม โดยการจับคู่ตัวแปรเพื่อหาความแตกต่างภายในปัจจัยหลักด้วยวิธี Turkey's HSD test เช่นเดียวกันกับวิธีข้างต้น ในการวิเคราะห์จะพิจารณาแยกเป็น 2 กรณีคือ วิเคราะห์หาความแตกต่างระหว่างกระบวนการเชื่อมในชิ้นงานทดสอบที่ไม่ได้ผ่านกระบวนการทางความร้อน T6 และวิเคราะห์หาความแตกต่างระหว่างกระบวนการเชื่อมในชิ้นงานทดสอบที่ผ่านกระบวนการทางความร้อน T6 สามารถวิเคราะห์ผลได้ดังตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 วิเคราะห์ความแตกต่างภายในปัจจัยของกระบวนการเชื่อมชิ้นงานที่ไม่ได้ผ่านกระบวนการทางความร้อน T6 ด้วยวิธี Turkey's HSD test



จากตารางที่ 4.3 เป็นการวิเคราะห์จับคู่ตัวแปรเพื่อหาความแตกต่างของตัวแปรภายในปัจจัยของกระบวนการเชื่อมชิ้นงานทดสอบที่ไม่ได้ผ่านกระบวนการทางความร้อน T6 ด้วยวิธี Turkey's HSD test เมื่อพิจารณาจากค่า P-value ในแต่ละคู่ตัวแปร พบว่าสามารถแบ่งเป็น 2 กลุ่มประกอบด้วย กลุ่ม A หมายถึง การเชื่อมเสียดทานแบบกวน (FSW) ให้ค่าความแข็งแรงดึงแตกต่างกับกระบวนการเชื่อมทิกแบบเต็มลวด (TIG1) อย่างไม่มีนัยสำคัญ แต่ให้ค่าความแข็งแรงดึงแตกต่างกับกระบวนการเชื่อมทิกแบบไม่เต็มลวด (TIG2) อย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95% และกลุ่ม B หมายถึง การเชื่อมทิกแบบไม่เต็มลวด (TIG2) ให้ค่าความแข็งแรงดึงแตกต่างกับกระบวนการเชื่อมทิกแบบเต็มลวด (TIG1) อย่างไม่มีนัยสำคัญ แต่ให้ค่าความแข็งแรงดึงแตกต่างกับการเชื่อมเสียดทานแบบกวน (FSW) อย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95% หรือสามารถสรุปได้ว่าการเชื่อมเสียดทานแบบกวน (FSW) ให้ค่าความแข็งแรงดึงที่ไม่แตกต่างกับการเชื่อมทิกแบบเต็ม

ลวด (TIG1) แต่ให้ค่าความแข็งแรงดึงที่แตกต่างกับการเชื่อมทิกแบบไม่เติมลวด (TIG2) และการเชื่อมทิกแบบเติมลวด (TIG1) ให้ค่าความแข็งแรงดึงที่ไม่แตกต่างกับการเชื่อมทิกแบบไม่เติมลวด (TIG2)

ตารางที่ 4.4 วิเคราะห์ความแตกต่างภายในปัจจัยของกระบวนการเชื่อมชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการทางความร้อน T6 ด้วยวิธี Turkey's HSD test

Individual 95% CIs For Mean Based on Pooled StDev				
Level	N	Mean	StDev	
FSW	3	168.32	1.11	+-----+-----+-----+----- (---*---)
TIG1	3	155.62	3.55	(---*---)
TIG2	3	136.64	4.24	(---*---) +-----+-----+-----+-----
				132      144      156      168
Grouping Information Using Turkey Method				
Welding	N	Mean	Grouping	
FSW	3	168.317	A	
TIG1	3	155.617	B	
TIG2	3	136.640	C	
Welding = FSW subtracted from:				
Welding	Difference of Means	SE of Difference	T-Value	Adjusted P-Value
TIG1	-12.70	2.661	-4.77	0.0074
TIG2	-31.68	2.661	-11.91	0.0001
Welding = TIG1 subtracted from:				
Welding	Difference of Means	SE of Difference	T-Value	Adjusted P-Value
TIG2	-18.98	2.661	-7.132	0.0009

จากตารางที่ 4.4 เป็นการวิเคราะห์จับคู่ตัวแปรเพื่อหาความแตกต่างของตัวแปรภายในปัจจัยของกระบวนการเชื่อมชิ้นงานทดสอบที่ผ่านกระบวนการทางความร้อน T6 ด้วยวิธี Turkey's HSD test เมื่อพิจารณาจากค่า P-value ในแต่ละคู่ตัวแปร พบว่าสามารถแบ่งได้เป็น 3 กลุ่มประกอบด้วย กลุ่ม A B และ C หมายถึง กระบวนการเชื่อมเสียดทานแบบกวน (FSW) ให้ค่าความแข็งแรงดึงแตกต่างกับกระบวนการเชื่อมทิกแบบเติมลวด (TIG1) อย่างมีนัยสำคัญและให้ค่าความแข็งแรงดึงแตกต่างกับกระบวนการเชื่อมทิกแบบไม่เติมลวด (TIG2) อย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความ

เชื่อมัน 95% รวมทั้งการเชื่อมทิกแบบเติมลวด (TIG1) ให้ค่าความแข็งแรงดึงแตกต่างกับกระบวนการเชื่อมทิกแบบไม่เติมลวด (TIG2) อย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมัน 95% หรือสามารถสรุปได้ว่าทุกกระบวนการเชื่อมให้ค่าความแข็งแรงดึงที่แตกต่างกัน โดยที่กระบวนการเชื่อมเสียดทานแบบกวนมีค่าความแข็งแรงดึงเฉลี่ยสูงสุด คือ 168.3 MPa รองลงมาคือกระบวนการเชื่อมทิกแบบเติมลวดมีค่าความแข็งแรงดึงเฉลี่ย 155.6 MPa และกระบวนการเชื่อมทิกแบบไม่เติมลวดมีค่าความแข็งแรงดึงเฉลี่ยต่ำสุด คือ 136.6 MPa



## บทที่ 5

### บทสรุป

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาและเปรียบเทียบสมบัติเชิงกล รวมไปถึง โครงสร้างมหภาคของรอยเชื่อมระหว่างอะลูมิเนียมผสมหล่อกึ่งแข็ง SSM 356 กับ SSM 6061 เป็นการเปรียบเทียบวิธีการเชื่อมที่แตกต่างกัน 3 วิธี คือ การเชื่อมเสียดทานแบบกวน การเชื่อมทิกแบบเต็มลวดและการเชื่อมทิกแบบไม่เต็มลวด โดยชิ้นงานทดสอบแบ่งออกเป็น 2 ลักษณะ คือ ชิ้นงานที่ไม่ได้ผ่านกระบวนการทางความร้อน T6 และชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการทางความร้อน T6

ในการวิจัยชิ้นงานเชื่อมที่ไม่ได้ผ่านกระบวนการทางความร้อน T6 เป็นการศึกษาเบื้องต้นเกี่ยวกับความเป็นไปได้ในการเชื่อมอะลูมิเนียมผสมต่างชนิดกัน อีกทั้งในการทำงานบางประเภทชิ้นงานไม่จำเป็นต้องผ่านกระบวนการทางความร้อนก่อนนำไปใช้งาน แต่ในการทำงานส่วนใหญ่อะลูมิเนียมจะถูกนำไปผ่านกระบวนการทางความร้อน T6 ก่อนไปใช้งาน เนื่องจากเป็นการปรับปรุงสมบัติทางกลให้ดีขึ้น ดังนั้นในการสรุปผลการวิจัยจึงขอกว่าสรุปในชิ้นงานอะลูมิเนียมผสมที่ผ่านกระบวนการทางความร้อน T6 เป็นหลัก ซึ่งจากผลการวิจัยสามารถสรุปผลและประมวลผลเป็นข้อเสนอแนะสำหรับงานวิจัยในอนาคตได้ดังต่อไปนี้

#### 5.1 สรุปผล

จากการศึกษาสามารถสรุปผลได้ดังต่อไปนี้

- 1) ลักษณะทางกายภาพของแนวเชื่อมในทุกกระบวนการเชื่อมมีความสมบูรณ์ดี สามารถเชื่อมระหว่างอะลูมิเนียมผสมต่างชนิดกัน SSM 356 และ SSM 6061 ได้
- 2) ลักษณะ โครงสร้างมหภาคของการเชื่อมเสียดทานแบบกวนมีการประสานกันของอะลูมิเนียมผสมทั้งสองชนิดอย่างชัดเจน แนวเชื่อมมีความสมบูรณ์ดีและแนวเชื่อมมีขนาดกว้างมากกว่าการเชื่อมทิก สำหรับการเชื่อมทิกแบบเต็มลวดและไม่เต็มลวดมีรูพรุนเกิดขึ้นบริเวณเนื้อเชื่อม
- 3) ค่าความแข็งบริเวณตรงกลางแนวเชื่อมมีค่าสูงสุดและค่อย ๆ ลดลงจนถึงบริเวณที่ได้รับผลกระทบทางความร้อน ซึ่งบริเวณนี้จะมีค่าความแข็งต่ำสุดจากนั้นค่าความแข็งเพิ่มขึ้นจนถึง

บริเวณ โลหะพื้นฐาน โดยค่าความแข็งบริเวณตรงกลางแนวเชื่อมในกระบวนการเชื่อมเสียดทานแบบกวนที่ความเร็วหมุนตัวกวน 1,400 รอบ/นาที มีค่าความแข็งเฉลี่ยสูงสุด คือ 74.9 HV รองลงมาคือกระบวนการเชื่อมทิกแบบไม่เติมลวดมีค่าความแข็งเฉลี่ย คือ 74.1 HV การเชื่อมทิกแบบเติมลวดมีค่าความแข็งเฉลี่ย คือ 73.5 HV และการเชื่อมเสียดทานแบบกวนที่ความเร็วหมุนตัวกวน 1,750 รอบ/นาที มีค่าความแข็งเฉลี่ยต่ำสุด คือ 67.5 HV

4) ค่าความแข็งแรงดึงของแนวเชื่อม โดยกระบวนการเชื่อมเสียดทานแบบกวนมีค่าความแข็งแรงดึงสูงสุด คือ 168.3 MPa การเชื่อมทิกแบบเติมลวดมีค่าความแข็งแรงดึงรองลงมา คือ 155.6 MPa และการเชื่อมทิกแบบไม่เติมลวด มีค่าความแข็งแรงดึงต่ำสุด คือ 136.6 MPa

5) การวิเคราะห์ค่าความแข็งแรงดึงด้วยวิธีทางสถิติพบว่า ลักษณะชิ้นงานและกระบวนการเชื่อมมีผลต่อค่าความแข็งแรงดึงอย่างมีนัยสำคัญ เมื่อนำแต่ละกระบวนการเชื่อมมาจับคู่ตัวแปรเพื่อหาความแตกต่างภายในปัจจัยหลักด้วยวิธี Turkey's HSD test พบว่ากระบวนการเชื่อมเสียดทานแบบกวนให้ค่าความแข็งแรงดึงที่แตกต่างกับการเชื่อมทิกอย่างมีนัยสำคัญ

จากการวิจัยสามารถสรุปได้ว่าในทุกกระบวนการเชื่อมสามารถเชื่อมอะลูมิเนียมหล่อผสมต่างชนิดกันระหว่าง SSM 356 กับ SSM 6061 ได้ สำหรับลักษณะชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการทางความร้อน T6 ให้สมบัติเชิงกลที่ดีกว่าชิ้นงานที่ไม่ได้ผ่านกระบวนการทางความร้อน T6 และกระบวนการเชื่อมเสียดทานแบบกวนให้สมบัติเชิงกลที่ดีที่สุด โดยกระบวนการเชื่อมเสียดทานแบบกวนและการเชื่อมทิกสามารถเชื่อมอะลูมิเนียมหล่อผสมต่างชนิดกันได้ เป็นผลให้สามารถเลือกกระบวนการเชื่อมไปประยุกต์ใช้งานตามสภาวะงานเชื่อมที่เหมาะสมต่อไปได้

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

1) ระยะเวลาในการเตรียมอะลูมิเนียมผสมหล่อกึ่งแข็งและการทำกระบวนการทางความร้อน T6 ก่อนขึ้นงาน รวมถึงต้นทุนในการผลิตค่อนข้างสูง ควรมีการวางแผนการขึ้นรูปชิ้นงานให้เหมาะสมกับระยะเวลาและเพียงพอต่อการใช้งาน

2) ควรเพิ่มความยาวของตัวกวนในกระบวนการเชื่อมเสียดทานแบบกวน เนื่องจากแนวเชื่อมเกิดการหลอมละลายไม่ทั่วทั้งความหนาของชิ้นงาน ควรเพิ่มความยาวจากเดิมคิดเป็น 80% ของความหนาชิ้นงาน (3.2 มิลลิเมตร) ควรเพิ่มความยาวเป็น 90% ของความหนาชิ้นงาน (3.6 มิลลิเมตร)

3) งานวิจัยครั้งนี้ใช้อะลูมิเนียมหล่อผสมในการทดลอง ซึ่งอะลูมิเนียมแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ อะลูมิเนียมหล่อผสม (Cast aluminium alloys) และอะลูมิเนียมผสมใช้แรงขึ้นรูป (Wrought aluminium alloys) ดังนั้นในงานวิจัยครั้งต่อไปผู้สนใจสามารถทดลองกับอะลูมิเนียมผสมที่ใช้แรงขึ้นรูป เพื่อขยายขอบเขตขององค์ความรู้ต่อไป

## บรรณานุกรม

- เจษฎา วรรณสินธุ์. (กุมภาพันธ์-มีนาคม 2554). การขึ้นรูปโลหะด้วยกระบวนการหล่อโลหะกึ่งของแข็ง. วารสารส่งเสริมเทคโนโลยี, 37(215), 077-081.
- เจษฎา วรรณสินธุ์. (2556). โลหะผสมนอกกลุ่มเหล็ก. การหล่อโลหะสำหรับวิศวกร (หน้า 46-111).  
สงขลา: บริษัท มิสเตอร์ก๊อปปี้ (ประเทศไทย) จำกัด.
- เชิดเชลง ชิตชวนกิจ, ยงยุทธ เสริมสุธีอนุวัฒน์, อรรถกร กลั่นความดี, และ ไทชิเอ โอกูมูระ. (2524). วิศวกรรมการเชื่อม. กรุงเทพฯ: สมาคมส่งเสริมความรู้ด้านเทคนิคระหว่างประเทศ.
- กิตติพงษ์ กิมะพงษ์, อนินท์ มีมนต์, และ ประกอบ บุญยงค์. (10-11 พฤษภาคม 2550). การเชื่อมรอยต่ออะลูมิเนียมผสมและเหล็กกล้าด้วยการเชื่อมเสียดทานแบบกวน. การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ครั้งที่ 5.
- ชวลิต เชียงกุล. (2544). โลหะวิทยา. กรุงเทพฯ: สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น).
- วรพงศ์ บุญช่วยแทน, ธนศ รัตนวิไล, ประภาศ เมืองจันทร์บุรี, และ กนิษฐ์ ตะปะสา. (2554). การเชื่อมอะลูมิเนียมผสม 356 หล่อกึ่งของแข็งโดยกรรมวิธีการเชื่อมเสียดทานแบบกวนในสภาพของกระบวนการทางความร้อน T6. KCU Engineering Journal, 38(3), 219-232.
- ประภาศ เมืองจันทร์บุรี. (2555). วิศวกรรมการเชื่อม WELDING ENGINEERING. สงขลา: เทคโนโลยีการศึกษา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
- ประภาศ เมืองจันทร์บุรี, และ ศิริกุล วิสุทธิเมธางกูร. (2553). อิทธิพลของความเร็วในการเชื่อมและรูปแบบของหัวพินที่มีผลต่อโครงสร้างทางจุลภาคและสมบัติทางกลในการเชื่อมอะลูมิเนียมผสม A356 ซึ่งหล่อโดยเทคโนโลยีการหล่อกึ่งของแข็งด้วยกรรมวิธีการเชื่อมเสียดทานแบบกวน. คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
- ภัทรสินี ภัทรโกศล. (2550). สถิติเพื่อการวิจัยทางวิทยาศาสตร์. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- วรพงศ์ บุญช่วยแทน, จักรนรินทร์ นัทรทอง, สุรสิทธิ์ ระวีวงศ์, และ รอมฎอน บูรพา. (2556). การเชื่อมอะลูมิเนียมผสมหล่อกึ่งของแข็ง SSM 356 กับ SSM 6061 โดยกรรมวิธีการเชื่อมเสียดทานแบบกวน. วิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม, 9(3), 47-62.
- วัชรพงษ์ มุขเชิด. (2010). กระบวนการเชื่อม TIG. Retrieved August 18, 2015, from Divinity Welder: <http://www.meeboard.com/users/weld/imgupload/4-4.pdf>

- อัปเดต บินระหีม. (2553). การเชื่อมอะลูมิเนียมผสมหล่อกิ่งของแข็ง A356 ด้วยกรรมวิธีการเชื่อมเสียดทานแบบกวน และการปรับปรุงสมบัติทางกลด้วยความร้อน. *พัฒนาเทคนิคศึกษา*, 22(73), 10-15.
- Lakshminarayanan, A. K., Balasubramanian, V., & Elangovan, K. (2009, January). Effect of welding processes on tensile properties of AA6061 aluminium alloy joints. 40(3-4), 286-296.
- Bang, H., Bang, H., Song, H., & Joo, S. (2013). Joint properties of dissimilar Al6061-T6 aluminum alloy/Ti-6%Al-4%V titanium alloy by gas tungsten arc welding assisted hybrid friction stir welding. *Materials and Design*, 51, 544-551.
- Benedyk, J. (2010). Aluminum alloys for lightweight automotive structures. *Materials, Design and Manufacturing for Lightweight Vehicles*, Woodhead Publishing Series in Composites Science and Engineering, 79-113.
- Bergant, Z., & Grum, J. (2014). Heat Treatment Effects of Laser Cladded 12 Ni Maraging Tool Steel with Ni-Co-Mo Alloys. *Journal of Heat Treatment and Materials*, 69(2), 114-123.
- Boonchouytan, W., Chatthong, J., Rawangwong, S., & Burapa, R. (2014, September ). Effect of Heat Treatment T6 on the Friction Stir Welded SSM 6061 Aluminum Alloys. *Energy Procedia*, 56, 172-180.
- Jannet, S., Mathews, P., & Raja, R. (2014). Comparative investigation of friction stir welding and fusion welding of 6061 T6 – 5083 O aluminum alloy based on mechanical properties and microstructure. *Bulletin of the Polish Academy of Sciences Technical Sciences*, 62(4), 791-795.
- Kasman, S. (2013, September). Multi-response optimization using the Taguchi-based grey relational analysis: a case study for dissimilar friction stir butt welding of AA6082-T6/AA5754-H111. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 68(1), 795-804.
- Kou, S., (2003). *Welding Metallurgy*. 2nd Edition. USA: A John Willey & Sons, Inc., u

- Lim, S., Kim, S., Lee, C., & Kim, S. (2004, September). Tensile Behavior of Friction-Stir-Welded A356-T6/Al 6061-T651 Bi-Alloy Plate. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 35(9), 2837-2843.
- Mathers, G. (2002). *The welding of aluminium and its alloys*. Woodhead Publishing Limited.
- Mishra, R. S., & Ma, Z. Y. (2005). *Friction stir welding and processing* (Vol. 50). Mater. Sci. Eng. R.
- Nandan, R., DebRoy, T., & Bhadeshia, H. (2008). Recent advances in friction-stir welding – Process, weldment structure and properties. *Progress in Materials Science*, 53(6), 980-1023.
- Peng, D., Shen, J., Tang, Q., Wu, C. p., & Zhou, Y. b. (2013, March). Effects of aging treatment and heat input on the microstructures and mechanical properties of TIG-welded 6061-T6 alloy joints. *International Journal of Minerals, Metallurgy, and Materials*, 20(3), 259-265.
- Podrzaj, P., Jerman, B., & Klobcar, D. (2015). Welding Defects at Friction Stir Welding. *Metalurgija*, 54(2), 387-389.
- Rajakumar, S., Muralidharan, C., & Balasubramanian, V. (2010, August 1). Optimization of the friction-stir-welding process and tool parameters to attain a maximum tensile strength of AA7075–T6 aluminium alloy. *Journal of Engineering Manufacture*, 224(8), 1175-1191.
- Sayer, S., Yeni, C., & Ertugrul, O. (2011, April). Comparison of mechanical and microstructural behaviors of tungsten inert gas welded and friction stir welded dissimilar aluminum alloys AA 2014 and AA 5083. *KOVOVE MATERIALY*, 49(2), 155-162.
- Vaidya, W. V., Horstmann, M., Ventske, V., Petrovsk, B., Kocak, M., Kocik, R., & Tempus, G. (2010, November). Improving interfacial properties of a laser beam welded dissimilar joint of aluminium AA6056 and titanium Ti6Al4V for aeronautical applications. *Journal of Materials Science*, 45(22), 6242–6254.
- Wannasin, J., Martinezb, R., & Flemings, M. (2006). Grain refinement of an aluminum alloy by introducing gas bubbles during solidification. *Scripta Materialia*, 55(2), 115-118.
- Welders Universe. (2012). (California Community College) Retrieved July 27, 2015, from [http://www.weldersuniverse.com/TIG\\_rod\\_tungsten.html](http://www.weldersuniverse.com/TIG_rod_tungsten.html)

Yamamoto, S. (2008). Arc Welding of Specific Steels and Cast Irons. (3rd). Japan: Shinko Welding Service Co., Ltd.

Zah, M., & Eireiner, D. (2004). Friction stir of parameter.

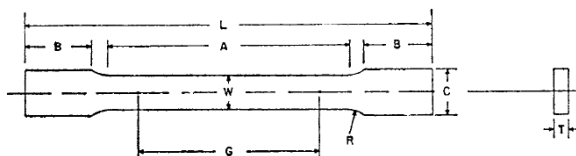
### ภาคผนวก ก

ข้อกำหนดชิ้นงานทดสอบความแข็งแรงดึง



## ข้อกำหนดมาตรฐานการทดสอบความแข็งแรงดึง ASTM-E8

## E8/E8M - 09



	Dimensions		
	Standard Specimens		Subsize Specimen
	Plate-Type, 40 mm [1.500 in.] Wide	Sheet-Type, 12.5 mm [0.500 in.] Wide	6 mm [0.250 in.] Wide
	mm [in.]	mm [in.]	mm [in.]
G—Gage length (Note 1 and Note 2)	200.0 ± 0.2 [8.00 ± 0.01]	50.0 ± 0.1 [2.000 ± 0.005]	25.0 ± 0.1 [1.000 ± 0.003]
W—Width (Note 3 and Note 4)	40.0 ± 2.0 [1.500 ± 0.125, -0.250]	12.5 ± 0.2 [0.500 ± 0.010]	6.0 ± 0.1 [0.250 ± 0.005]
T—Thickness (Note 5)		thickness of material	
R—Radius of fillet, min (Note 6)	25 [1]	12.5 [0.500]	6 [0.250]
L—Overall length, min (Note 2, Note 7, and Note 8)	450 [18]	200 [8]	100 [4]
A—Length of reduced section, min	225 [9]	57 [2.25]	32 [1.25]
B—Length of grip section, min (Note 9)	75 [3]	50 [2]	30 [1.25]
C—Width of grip section, approximate (Note 4 and Note 9)	50 [2]	20 [0.750]	10 [0.375]

NOTE 1—For the 40 mm [1.500 in.] wide specimen, punch marks for measuring elongation after fracture shall be made on the flat or on the edge of the specimen and within the reduced section. Either a set of nine or more punch marks 25 mm [1 in.] apart, or one or more pairs of punch marks 200 mm [8 in.] apart may be used.

NOTE 2—When elongation measurements of 40 mm [1.500 in.] wide specimens are not required, a minimum length of reduced section (A) of 75 mm [2.25 in.] may be used with all other dimensions similar to those of the plate-type specimen.

NOTE 3—For the three sizes of specimens, the ends of the reduced section shall not differ in width by more than 0.10, 0.05 or 0.02 mm [0.004, 0.002 or 0.001 in.], respectively. Also, there may be a gradual decrease in width from the ends to the center, but the width at each end shall not be more than 1 % larger than the width at the center.

NOTE 4—For each of the three sizes of specimens, 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; however, unless stated specifically, the requirements for elongation in a product specification shall not apply when these narrower specimens are used.

NOTE 5—The dimension T is the thickness of the test specimen as provided for in the applicable material specifications. Minimum thickness of 40 mm [1.500 in.] wide specimens shall be 5 mm [0.188 in.]. Maximum thickness of 12.5 and 6 mm [0.500 and 0.250 in.] wide specimens shall be 19 and 6 mm [0.750 and 0.250 in.], respectively.

NOTE 6—For the 40 mm [1.500 in.] wide specimen, a 13 mm [0.500 in.] minimum radius at the ends of the reduced section is permitted for steel specimens under 690 MPa [100 000 psi] in tensile strength when a profile cutter is used to machine the reduced section.

NOTE 7—The dimension shown is suggested as a minimum. In determining the minimum length, the grips must not extend in to the transition section between Dimensions A and B, see Note 9.

NOTE 8—To aid in obtaining axial force application during testing of 6-mm [0.250-in.] wide specimens, the overall length should be as large as the material will permit, up to 200 mm [8.00 in.].

NOTE 9—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. If the thickness of 12.5 mm [0.500-in.] wide specimens is over 10 mm [0.375 in.], longer grips and correspondingly longer grip sections of the specimen may be necessary to prevent failure in the grip section.

NOTE 10—For the three sizes of specimens, the ends of the specimen shall be symmetrical in width with the center line of the reduced section within 2.5, 0.25 and 0.13 mm [0.10, 0.01 and 0.005 in.], respectively. However, for referee testing and when required by product specifications, the ends of the 12.5 mm [0.500 in.] wide specimen shall be symmetrical within 0.2 mm [0.01 in.].

NOTE 11—For each specimen type, the radii of all fillets shall be equal to each other within a tolerance of 1.25 mm [0.05 in.], and the centers of curvature of the two fillets at a particular end shall be located across from each other (on a line perpendicular to the centerline) within a tolerance of 0.2 mm [0.01 in.].

NOTE 12—Specimens with sides parallel throughout their length are permitted, except for referee testing, provided: (a) the above tolerances are used; (b) an adequate number of marks are provided for determination of elongation; and (c) when yield strength is determined, a suitable extensometer is used. If the fracture occurs at a distance of less than 2 W from the edge of the gripping device, the tensile properties determined may not be representative of the material. In acceptance testing, if the properties meet the minimum requirements specified, no further testing is required, but if they are less than the minimum requirements, discard the test and retest.

ภาคผนวก ข

ค่าความแข็ง

ตาราง ข.1 ค่าความแข็งของแนวเชื่อมระหว่างอะลูมิเนียมหล่อผสม SSM 356 กับ SSM 6061 ที่  
ไม่ได้ผ่านกระบวนการทางความร้อน T6

Hardness, HV									
Point (from center)	Welded								
	FSW (Part No.)			TIG1 (Part No.)			TIG2 (Part No.)		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3
-11.5	65.9	58.6	67.4						
-11.0	67.6	59.7	62.2						
-10.5	63.7	75.2	68.2						
-10.0	71.8	63.9	63.7						
-9.5	63.0	61.9	68.4						
-9.0	63.8	68.5	62.9						
-8.5	55.2	65.3	67.8	54.8	54.6	72.7			
-8.0	67.8	63.6	57.4	57.8	57.1	69.2			
-7.5	66.6	59.1	59.5	67.4	56.4	71.4			
-7.0	76.5	66.6	70.3	72.4	67.3	63.8			
-6.5	66.7	77.0	61.3	53.4	49.6	87.3	60.5	74.2	68.2
-6	61.0	59.3	70.1	63.0	61.7	80.1	65.0	63.9	67.3
-5.5	57.9	75.5	51.6	61.8	65.7	73.5	75.0	79.4	79.1
-5	65.8	70.6	61.1	70.8	69.8	59.9	62.7	64.9	83.0
-4.5	62.1	58.2	53.8	86.1	79.9	78.5	62.3	80.7	56.6
-4	82.1	60.9	68.6	77.7	66.1	74.3	66.5	60.9	62.9
-3.5	69.4	64.0	55.9	71.9	62.1	78.0	73.7	65.1	70.9
-3	75.5	64.6	62.9	71.1	77.3	72.3	79.1	98.0	71.1
-2.5	74.5	58.6	76.2	73.3	75.2	71.1	64.9	57.1	82.5
-2	69.2	62.8	61.1	77.4	77.3	67.2	90.8	67.9	84.8
-1.5	68.8	67.5	59.1	67.3	68.8	74.2	94.8	80.2	89.8

ตาราง ข.1 ค่าความแข็งของแนวเชื่อมระหว่างอะลูมิเนียมหล่อผสม SSM 356 กับ SSM 6061 ที่ไม่ได้ผ่านกระบวนการทางความร้อน T6 (ต่อ)

Hardness, HV									
Point (from center)	Welded								
	FSW (Part No.)			TIG1 (Part No.)			TIG2 (Part No.)		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3
-1	77.5	63.0	52.0	67.4	78.2	76.6	95.7	88.6	85.2
-0.5	81.9	59.6	55.8	74.5	74.6	80.7	60.2	92.7	80.0
0	72.0	67.3	69.1	72.4	65.9	76.7	93.3	91.5	87.2
0.5	89.6	61.5	82.8	75.3	77.1	79.2	91.3	84.3	85.5
1	73.9	80.1	65.5	78.7	76.2	77.2	90.6	88.4	68.8
1.5	76.8	75.0	63.1	71.9	71.7	77.5	93.6	46.8	84.4
2	78.4	71.2	62.3	82.0	71.1	76.4	73.4	63.3	85.7
2.5	82.6	77.6	83.1	72.5	72.4	83.0	80.3	59.7	65.8
3	66.4	77.7	82.0	66.3	74.9	79.5	78.4	59.8	60.9
3.5	81.5	76.9	47.4	58.3	70.3	80.8	63.3	66.3	58.2
4	60.4	59.6	75.5	68.2	60.4	61.5	45.7	75.6	67.6
4.5	60.5	58.2	62.0	58.3	54.8	48.9	59.4	70.4	65.9
5	54.3	62.5	84.7	56.9	49.3	63.5	50.6	63.5	74.8
5.5	68.1	58.6	65.8	73.3	49.2	70.0	51.0	46.1	58.7
6	53.3	65.0	53.7	66.9	57.2	50.2	49.3	47.8	56.1
6.5	52.8	86.6	53.6	53.1	54.9	51.1	59.9	55.8	53.8
7	81.2	48.9	51.5	60.5	53.8	62.6	49.2	50.3	59.4
7.5	52.1	51.1	79.1	67.3	59.7	63.8	54.6	47.0	56.2
8	53.5	56.8	77.2	61.3	51.7	55.8			
8.5	49.1	61.1	72.2	74.2	52.8	63.9			
9	54.6	62.4	59.1						

ตาราง ข.1 ค่าความแข็งของแนวเชื่อมระหว่างอะลูมิเนียมหล่อผสม SSM 356 กับ SSM 6061 ที่ไม่ได้ผ่านกระบวนการทางความร้อน T6 (ต่อ)

Hardness, HV									
Point (from center)	Welded								
	FSW (Part No.)			TIG1 (Part No.)			TIG2 (Part No.)		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3
9.5	55.2	50.0	69.1						
10	47.1	52.9	52.0						
10.5	57.1	48.6	53.1						
11	67.3	44.1	49.0						
11.5	47.8	55.6	54.2						
12	53.3	52.2	51.7						
12.5	48.0	53.5	44.3						

หมายเหตุ : TIG1 คือ การเชื่อมทิกแบบเติมลวด , TIG2 คือ การเชื่อมทิกแบบไม่เติมลวด และ FSW คือการเชื่อมเสียดทานแบบกวน

ตาราง ข.2 ค่าความแข็งของแนวเชื่อมระหว่างอะลูมิเนียมหล่อผสม SSM 356 กับ SSM 6061 ที่ผ่านกระบวนการทางความร้อน T6

Hardness, HV									
Point (from center)	Welded								
	FSW (Part No.)			TIG1 (Part No.)			TIG2 (Part No.)		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3
-11.5	61.9	53.7	53.2						
-11.0	52.1	39.3	54.4						
-10.5	53.1	48.9	53.8						
-10.0	58.7	63.9	54.4						
-9.5	57.2	48.8	53.1						
-9.0	58.5	50.7	51.8						
-8.5	57.5	54.5	54.7						
-8.0	58.5	49.9	64.7						
-7.5	62.2	57.1	52.9	52.0	61.1	55.3	53.2	56.5	50.6
-7.0	71.3	53.5	57.6	52.6	58.7	54.9	56.6	57.4	53.2
-6.5	73.7	59.2	63.9	53.0	60.3	54.6	51.3	53.5	53.4
-6	70.9	62.3	61.5	55.7	57.4	56.8	52.6	55.6	57.0
-5.5	74.7	64.8	62.8	69.1	56.8	55.6	55.9	54.7	54.6
-5	77.0	61.7	67.6	65.8	53.5	51.5	53.4	56.2	55.1
-4.5	80.4	77.8	77.0	79.2	53.2	53.5	62.3	58.4	57.9
-4	81.1	76.3	68.6	88.6	56.6	62.0	79.2	73.8	66.8
-3.5	77.1	82.5	74.1	82.9	57.2	71.4	83.2	78.6	78.9
-3	86.3	87.1	80.0	74.5	64.1	70.4	79.9	73.8	75.7
-2.5	90.1	78.9	82.3	68.4	80.1	68.7	78.5	68.2	67.0
-2	74.0	80.5	73.2	76.0	74.5	73.8	82.1	73.5	73.0
-1.5	68.4	83.8	75.2	68.8	80.7	66.6	82.9	70.3	73.0

ตาราง ข.2 ค่าความแข็งของแนวเชื่อมระหว่างอะลูมิเนียมหล่อผสม SSM 356 กับ SSM 6061 ที่ผ่านกระบวนการทางความร้อน T6 (ต่อ)

Hardness, HV									
Point (from center)	Welded								
	FSW (Part No.)			TIG1 (Part No.)			TIG2 (Part No.)		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3
-1	66.7	80.6	68.8	69.1	68.2	68.5	81.2	65.2	84.2
-0.5	73.2	81.7	74.1	67.5	67.8	78.4	79.4	79.1	64.5
0	77.3	68.7	78.1	72.5	65.0	78.9	84.4	78.7	62.9
0.5	72.6	67.5	70.3	70.2	71.4	70.9	78.4	77.2	83.3
1	69.7	75.8	78.3	74.1	67.7	75.1	74.7	78.1	79.0
1.5	68.4	73.2	74.9	70.3	72.0	76.0	80.3	73.2	78.7
2	70.1	75.5	69.6	55.3	68.0	77.5	77.3	73.2	80.3
2.5	71.8	70.7	72.1	64.8	67.3	78.9	80.5	61.3	79.3
3	74.2	61.7	70.5	77.1	67.6	60.1	84.1	86.0	79.5
3.5	69.5	85.3	76.2	80.7	73.5	62.5	79.0	70.5	82.6
4	66.0	74.3	82.3	69.9	72.9	74.7	68.5	72.5	82.7
4.5	70.3	84.7	70.2	64.3	68.6	75.7	74.7	74.7	64.5
5	81.6	77.7	71.1	70.9	70.5	77.3	75.2	71.4	68.8
5.5	67.8	70.9	70.2	65.2	66.7	72.0	68.6	68.8	72.9
6	68.6	72.0	78.3	63.0	68.8	77.5	64.9	69.1	70.8
6.5	72.2	75.3	77.0	65.9	67.4	71.2	64.0	75.3	73.6
7	74.1	68.4	83.6	62.1	73.9	71.8	62.7	65.6	72.3
7.5	68.1	78.0	76.4	68.5	65.7	65.1	61.4	61.5	68.9
8	71.7	74.9	75.9	65.0	57.4	62.1			
8.5	67.9	68.9	72.7	64.4	58.9	63.7			

ตาราง ข.2 ค่าความแข็งของแนวเชื่อมระหว่างอะลูมิเนียมหล่อผสม SSM 356 กับ SSM 6061 ที่ผ่านกระบวนการทางความร้อน T6 (ต่อ)

Hardness, HV									
Point (from center)	Welded								
	FSW (Part No.)			TIG1 (Part No.)			TIG2 (Part No.)		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3
9	66.4	69.8	62.7	62.5	62.2	65.8			
9.5	56.7	62.4	60.6						
10	61.9	61.9	59.8						
10.5	57.9	65.0	60.7						
11	61.1	62.4	61.7						
11.5	59.9	63.2	63.7						
12	62.6	64.5	63.3						
12.5	56.4	80.9	66.3						
13	62.9	66.3	66.8						

หมายเหตุ : TIG1 คือ การเชื่อมทิกแบบเติมลวด , TIG2 คือ การเชื่อมทิกแบบไม่เติมลวด และ FSW คือการเชื่อมเสียดทานแบบกวน



ภาคผนวก ค

ค่าความแข็งแรงดึง

ตาราง ก.1 ค่าความแข็งแรงดึงของแนวเชื่อมระหว่างอะลูมิเนียมหล่อผสม SSM 356 กับ SSM 6061  
ที่ไม่ได้ผ่านกระบวนการทางความร้อน T6

Joint	Part No.	Sub. No.	YS (MPa)	UTS (MPa)	Elongation (%)	Fracture Area
TIG1	1	1	85.12	102.10	6.25	SSM 6061
TIG1	1	2	93.70	124.00	9.37	SSM 6061
TIG1	1	3	99.65	127.30	9.37	SSM 6061
TIG1	2	1	101.39	117.30	10.63	SSM 6061
TIG1	2	2	86.53	93.32	8.12	SSM 6061
TIG1	2	3	117.51	121.20	10.63	SSM 6061
TIG1	3	1	108.16	146.00	11.25	SSM 6061
TIG1	3	2	136.08	138.10	8.12	SSM 6061
TIG1	3	3	108.71	122.30	9.37	SSM 6061
TIG2	1	1	74.55	128.30	10.63	SSM 6061
TIG2	1	2	86.08	115.90	11.25	SSM 6061
TIG2	1	3	97.62	118.00	6.25	SSM 6061
TIG2	2	1	67.48	87.81	11.88	SSM 6061
TIG2	2	2	73.95	97.56	11.25	SSM 6061
TIG2	2	3	79.50	96.39	9.37	SSM 6061
TIG2	3	1	100.43	121.60	12.50	SSM 6061
TIG2	3	2	85.79	98.87	9.37	SSM 6061
TIG2	3	3	76.91	96.81	11.25	SSM 6061
FSW	1	1	125.28	137.20	8.00	SSM 6061
FSW	1	2	122.02	145.40	10.00	SSM 6061
FSW	1	3	117.59	147.60	12.00	SSM 6061
FSW	2	1	121.66	153.00	10.00	SSM 6061
FSW	2	2	95.04	152.10	6.67	SSM 6061
FSW	2	3	74.33	143.50	8.00	SSM 6061
FSW	3	1	84.31	151.20	5.33	SSM 6061

ตาราง ก.1 ค่าความแข็งแรงดึงของแนวเชื่อมระหว่างอะลูมิเนียมหล่อผสม SSM 356 กับ SSM 6061  
ที่ไม่ได้ผ่านกระบวนการทางความร้อน T6 (ต่อ)

Joint	Part No.	Sub. No.	YS (MPa)	UTS (MPa)	Elongation (%)	Fracture Area
FSW	3	2	113.52	156.90	4.67	SSM 6061
FSW	3	3	106.49	142.20	12.00	SSM 6061

หมายเหตุ : TIG1 คือ การเชื่อมทิกแบบเติมลวด , TIG2 คือ การเชื่อมทิกแบบไม่เติมลวด และ FSW  
คือการเชื่อมเสียดทานแบบกวน

ตาราง ก.2 ค่าความแข็งแรงดึงของแนวเชื่อมระหว่างอะลูมิเนียมหล่อผสม SSM 356 กับ SSM 6061 ที่ผ่านกระบวนการทางความร้อน T6

Joint	Part No.	Sub. No.	YS (MPa)	UTS (MPa)	Elongation (%)	Fracture Area
TIG1	1	1	125.38	155.40	10.00	SSM 356 T6
TIG1	1	2	149.58	163.70	8.67	SSM 356 T6
TIG1	1	3	139.39	157.00	5.33	WM
TIG1	2	1	76.91	91.37	1.33	WM
TIG1	2	2	87.60	155.50	8.00	SSM 356 T6
TIG1	2	3	104.91	149.80	4.67	SSM 356 T6
TIG1	3	1	81.42	99.72	1.33	WM
TIG1	3	2	110.52	157.30	6.67	SSM 356 T6
TIG1	3	3	128.78	152.00	6.67	SSM 356 T6
TIG2	1	1	135.73	144.50	6.67	SSM 356 T6
TIG2	1	2	111.75	136.20	12.00	SSM 356 T6
TIG2	1	3	116.47	137.40	11.33	SSM 356 T6
TIG2	2	1	36.39	90.41	1.33	WM
TIG2	2	2	99.54	128.60	10.00	SSM 356 T6
TIG2	2	3	105.57	134.90	12.00	SSM 356 T6
TIG2	3	1	36.98	114.20	1.33	WM
TIG2	3	2	119.87	139.90	11.33	SSM 356 T6
TIG2	3	3	109.03	137.70	11.67	SSM 356 T6
FSW 1,400 rpm	1	1	104.53	126.20	3.33	SZ
FSW 1,400 rpm	1	2	120.71	169.20	8.67	SZ
FSW 1,400 rpm	1	3	119.44	166.20	6.67	SZ
FSW 1,400 rpm	2	1	121.35	137.40	5.33	SZ
FSW 1,400 rpm	2	2	136.84	168.90	10.00	SSM 356 T6
FSW 1,400 rpm	2	3	141.51	166.40	10.00	SSM 356 T6
FSW 1,400 rpm	3	1	116.89	169.50	8.67	SZ

ตาราง ค.2 ค่าความแข็งแรงดึงของแนวเชื่อมระหว่างอะลูมิเนียมหล่อผสม SSM 356 กับ SSM 6061 ที่ผ่านกระบวนการทางความร้อน T6

Joint	Part No.	Sub. No.	YS (MPa)	UTS (MPa)	Elongation (%)	Fracture Area
FSW 1,400 rpm	3	2	119.44	169.70	4.67	SZ
FSW 1,400 rpm	3	3	88.66	139.10	6.67	SZ
FSW 1,750 rpm	1	1	78.61	126.10	3.33	SZ
FSW 1,750 rpm	1	2	118.05	144.10	4.00	SZ
FSW 1,750 rpm	1	3	122.44	164.30	5.33	SZ
FSW 1,750 rpm	2	1	100.82	114.30	6.67	SSM 356 T6
FSW 1,750 rpm	2	2	96.35	139.40	4.00	SZ
FSW 1,750 rpm	2	3	104.86	126.10	3.33	SZ
FSW 1,750 rpm	3	1	97.48	111.80	1.33	SZ
FSW 1,750 rpm	3	2	133.58	155.20	6.00	SZ
FSW 1,750 rpm	3	3	114.79	139.20	4.67	SZ

หมายเหตุ : TIG1 คือ การเชื่อมทิกแบบเติมลวด , TIG2 คือ การเชื่อมทิกแบบไม่เติมลวด และ FSW คือการเชื่อมเสียดทานแบบกวน

## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ สกุล นางสาวอามีณา เมฆารัฐ

รหัสประจำตัวนักศึกษา 5710120063

## วุฒิการศึกษา

วุฒิ	ชื่อสถาบัน	ปีที่สำเร็จการศึกษา
วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมการผลิต)	มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์	2550

## ทุนการศึกษา

- ทุนศึกษย์ก้นกุฎี ปีงบประมาณ 2557
- ทุนอุดหนุนการวิจัยเพื่อวิทยานิพนธ์ ปีงบประมาณ 2559

## การตีพิมพ์เผยแพร่ผลงาน

อามีณา เมฆารัฐ, ประภาศ เมืองจันทร์บุรี เสกสรร สุธรรมานนท์ คำรณ พิทักษ์ และ ศิวศิษย์ วิทยศิลป์. 2559. “การเปรียบเทียบสมบัติเชิงกลและโครงสร้างมหภาคของ แนวเชื่อมอะลูมิเนียมผสมหล่อกิ่งแข็ง SSM 356 กับ SSM 6061 โดยกรรมวิธีการเชื่อมทิก และการเชื่อมเสียดทานแบบกวน”. การประชุมวิชาการข่ายงานวิศวกรรมอุตสาหกรรม ประจำปี พ.ศ. 2559 ระหว่างวันที่ 7-8 กรกฎาคม 2559. ณ โรงแรมโฆษะ. ขอนแก่น, หน้า 1,469-1,474.