



การเชื่อมเสียดทานแบบกวนของอะลูมิเนียมผสมต่างชนิดระหว่างอะลูมิเนียมหล่อกิ่ง
ของแข็ง 356 กับอะลูมิเนียมผสม AA 6061-T651 โดยใช้เครื่องจักรกลแบบอัตโนมัติ
**Friction Stir Welding of Dissimilar Joint between Semi-Solid Metal 356 and
AA 6061-T651 by Computerized Numerical Control Machine**

มุฮามัด เต๊ะยอ

Muhamad Tehyo

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

2554

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

ชื่อวิทยานิพนธ์ การเชื่อมเสียดทานแบบกวนของอะลูมิเนียมผสมต่างชนิดระหว่างอะลูมิเนียม
 หล่อทิ้งของแข็ง 356 กับอะลูมิเนียมผสม AA 6061-T651 โดยใช้เครื่องจักรกล
 แบบอัตโนมัติ

ผู้เขียน นายมูฮามัด เต๊ะยอ

สาขาวิชา วิศวกรรมอุตสาหการและระบบ

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	คณะกรรมการสอบ
..... (รองศาสตราจารย์ สมชาย ชูโณม)ประธานกรรมการ (ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชเนศ รัตนวิไล)
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วมกรรมการ (ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นภิสพร มีมงคล)
..... (ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ประกาศ เมืองจันทร์บุรี)กรรมการ (รองศาสตราจารย์ สมชาย ชูโณม)
กรรมการ (ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ประกาศ เมืองจันทร์บุรี)
กรรมการ (ดร.กนิษฐ์ ตะปะสา)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้
 เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา ตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรม
 อุตสาหการและระบบ

.....
 (ศาสตราจารย์ ดร.อมรรัตน์ พงศ์ดารา)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

ชื่อวิทยานิพนธ์	การเชื่อมเสียดทานแบบกวนของอะลูมิเนียมผสมต่างชนิดระหว่างอะลูมิเนียมหล่อกึ่งของแข็ง 356 กับอะลูมิเนียมผสม AA 6061-T651 โดยใช้เครื่องจักรกลแบบอัตโนมัติ
ผู้เขียน	นายมูหามัด เต๊ะยอ
สาขาวิชา	วิศวกรรมอุตสาหการและระบบ
ปีการศึกษา	2553

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาตัวแปรที่มีผลต่อ โครงสร้างทาง โลหะวิทยาและสมบัติทางกลของแนวเชื่อมต่อชนที่ได้จากการเชื่อมเสียดทานแบบกวนของอะลูมิเนียมผสมต่างชนิด ระหว่างอะลูมิเนียมหล่อกึ่งของแข็ง SSM 356 ในสภาพหลังการหล่อและผ่านกระบวนการทางความร้อน T6 (as-cast และ T6) กับอะลูมิเนียมผสม AA 6061-T651 โดยใช้ตัวกวนรูปทรงกระบอก ตัวแปรที่ใช้ในการทดลองมี 2 ตัวแปร คือ ความเร็วหมุนเชื่อมของตัวกวน (1,750 และ 2,000 rpm) และความเร็วเดินเชื่อม (20, 50, 80, 120, 160 และ 200 mm/min) ซึ่งตัวแปรทั้งสองมีผลโดยตรงต่อ ลักษณะโครงสร้างและสมบัติทางกลของแนวเชื่อม จากการทดลองพบว่าเมื่อเพิ่มความเร็วหมุนเชื่อมของตัวกวนส่งผลให้ค่าความต้านทานแรงดึงมีค่าเพิ่มขึ้น ในขณะที่เดียวกันเมื่อเพิ่มความเร็วเดินเชื่อมค่าความต้านทานแรงดึงจะเพิ่มขึ้นถึงค่าๆ หนึ่ง หลังจากนั้นแล้วเมื่อยังเพิ่มค่าความเร็วเดินเชื่อม ค่าความต้านทานแรงดึงของแนวเชื่อมจะยิ่งลดลง ที่ความเร็วหมุนเชื่อม 2,000 rpm ความเร็วเดินเชื่อม 80 mm/min ค่าความต้านทานแรงดึงเฉลี่ยสูงสุดของอะลูมิเนียมหล่อกึ่งของแข็ง SSM 356 ในสภาพหลังการหล่อ (as-cast) กับอะลูมิเนียมผสม AA 6061-T651 มีค่าเท่ากับ 197.1 MPa และของอะลูมิเนียมหล่อกึ่งของแข็ง SSM 356 ที่ผ่านกระบวนการทางความร้อน (T6) กับอะลูมิเนียมผสม AA 6061-T651 มีค่าเท่ากับ 206.3 MPa ความแข็งบริเวณตรงกลางแนวกวนจะสูงกว่าบริเวณอื่นและจะลดลงไปเรื่อยๆ จนถึงบริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อนทางกล หลังจากนั้นความแข็งจะเพิ่มขึ้นจนถึงค่าความแข็งเดิมของเนื้อ โลหะทั้งสองชนิด โครงสร้างทางโลหะวิทยาบริเวณแนวเชื่อมที่เกิดขึ้นใหม่จะประกอบด้วยเนื้อวัสดุของอะลูมิเนียมผสมทั้งสองชนิดที่มีความละเอียดกว่าเนื้อโลหะเดิม

Thesis Title Friction Stir Welding of Dissimilar Joint between Semi-Solid Metal 356 and AA 6061-T651 by Computerized Numerical Control Machine

Author Mr.Muhamad Tehyo

Major Program Industrial and Systems Engineering

Academic Year 2010

ABSTRACT

This research aims to investigate the effects of parameters on the metallurgical and mechanical properties of friction stir (FS) welded butt joints of dissimilar aluminum alloy sheets between Semi-Solid Metal (SSM) 356 (as-cast and T6) and AA 6061-T651. The base metals of SSM 356 and AA 6061-T651 were located on the advancing side and retreating side, respectively. The cylindrical pin was used as the welding tool geometry. Friction stir welding parameters using different tool rotation speed (1,750 and 2,000 rpm) and welding speed (20, 50, 80, 120, 160 and 200 mm/min). These parameters influence directly on the structure and mechanical properties of the FS welded joints significantly. From investigation, the increase in tool rotation speed results in the increase in tensile strength of the FS welded joints. At the same time, the increase in welding speed leads to increase in the tensile strength up to a maximum value; and further increase in welding speed results in the decrease in tensile strength of FS welded joints. The maximum average value tensile strength of 197.1 MPa (in case of SSM 356 and AA 6061-T651) and 206.3 MPa (in case of SSM 356-T6 and AA 6061-T651). The value was achieved for the joint produced at tool rotation speed 2,000 rpm, welding speed 80 mm/min. The hardness observed in the stir zone is higher than that in the thermo-mechanically affected zone. Away from the weld nugget, hardness levels increase up to the levels of the base metals. The microstructure in the welding zone of FS welded dissimilar which can be characterized both the recrystallized of SSM 356 grains and AA 6061-T651 grains layers.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี เนื่องด้วยการให้ความช่วยเหลือจากผู้ที่เกี่ยวข้องกับทุกท่าน ทั้งที่ได้ออกนามและมิได้ออกนาม ข้าพเจ้าขอขอบคุณทุกท่านที่ได้ให้ความช่วยเหลือข้าพเจ้าในทุกๆ ด้านไว้ ณ โอกาสนี้ด้วย

ขอขอบคุณคณาจารย์ในภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ และภาควิชาวิศวกรรมเหมืองแร่และวัสดุ โดยเฉพาะอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ รองศาสตราจารย์สมชาย ชูโนม และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ประภาศ เมืองจันทร์บุรี ที่ได้เสียสละเวลาในการให้คำปรึกษา แนะนำ และให้ข้อเสนอแนะอันเป็นประโยชน์ที่ดีต่อการดำเนินการวิจัย ตลอดจนสละเวลาในการตรวจสอบแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆ ของวิทยานิพนธ์ให้มีความถูกต้องสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

ขอขอบคุณคณะกรรมการสอบความก้าวหน้าและคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ที่ได้ให้ข้อเสนอแนะ คำแนะนำและความกรุณาในการตรวจทานวิทยานิพนธ์ให้เป็นไปตามวัตถุประสงค์และมีความสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

ขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ ภาควิชาวิศวกรรมเหมืองแร่และวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ที่สนับสนุนด้านเงินทุน เครื่องมือและอุปกรณ์การวิจัยและคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย ที่ให้การสนับสนุนเครื่องมือและอุปกรณ์การทดสอบทางโลหะวิทยาและทางกล และขอขอบคุณทีมงานและผู้ทำการวิจัยอะลูมิเนียมหล่อกิ่งแข็งทุกท่านที่ทำให้งานวิจัยและวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ สามารถดำเนินงานไปได้และมีความสมบูรณ์ครบถ้วนทุกประการ

ขอขอบคุณ คุณประโชติ คำสองสี คุณชุกรี แดสา และคุณสุวรรณชัย สุวรรณวงศ์ ที่ได้สละเวลาในการจัดเตรียม ให้ความสะดวกและแนะนำวิธีการใช้เครื่องจักรกลแบบอัตโนมัติ จนวิทยานิพนธ์เล่มนี้ประสบความสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

สุดท้ายนี้ ขอขอบคุณความดีทั้งหมดจากการทำวิทยานิพนธ์ครั้งนี้แก่คุณพ่อ คุณแม่ ที่ให้การดูแลและเลี้ยงดูเป็นอย่างดี ครูบาอาจารย์ทุกท่านที่ให้วิชาความรู้และปลูกฝังคุณธรรม รวมทั้งเพื่อนๆ นักศึกษาปริญญาโท มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ทุกท่าน ที่คอยเป็นกำลังใจ สนับสนุนและส่งเสริมจนสำเร็จการศึกษาในครั้งนี้มาโดยตลอด

ประโยชน์ประการใดที่เกิดจากงานวิจัยนี้ย่อมเป็นผลมาจากความกรุณาของทุกท่านที่กล่าวมาแล้วข้างต้น ผู้วิจัยมีความรู้สึกซาบซึ้งต่อพระคุณของท่านเป็นอย่างยิ่ง จึงขอขอบคุณมา ณ โอกาสนี้อีกครั้งหนึ่ง

มูหามัด เต๊ะยอ

สารบัญ

	หน้า
สารบัญ	(6)
รายการตาราง	(10)
รายการภาพประกอบ	(11)
บทที่	
1 บทนำ	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของโครงการวิจัย	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย	3
1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย	4
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	4
1.5 การตรวจเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	4
2 ทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้องกับการวิจัย	13
2.1 ทฤษฎีและความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับอะลูมิเนียม	13
2.1.1 สมบัติทั่วไปของอะลูมิเนียม	13
2.1.2 สมบัติของอะลูมิเนียม-ซิลิกอน-แมกนีเซียมหล่อผสม	13
2.1.3 อะลูมิเนียมหล่อหมายเลข A356	14
2.1.4 การหล่อโลหะแบบกึ่งของแข็ง	15
2.1.5 กรรมวิธีการผลิตโลหะกึ่งของแข็งโดยการพ่นฟองแก๊สขณะแข็งตัว	15
2.1.6 อะลูมิเนียมรีดผสม AA 6061-T651	16
2.2 กระบวนการเชื่อมเสียดทานแบบกวน	17
2.2.1 องค์ประกอบในการเชื่อมเสียดทานแบบกวน	19
2.2.2 ความร้อนจากการเสียดทานแบบกวน	20
2.2.3 แรงกดของเครื่องมือ	21
2.3 เครื่องจักรกลแบบอัตโนมัติ	21
2.3.1 ระบบซีเอ็นซี	21
2.3.1.1 การจำแนกประเภทของเครื่องซีเอ็นซี	23
2.3.1.2 พื้นฐานการควบคุมการเคลื่อนที่และการตรวจสอบการเคลื่อนที่ของเครื่องซีเอ็นซี	24

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.3.2 เครื่องกักระบบซีเอ็นซี	24
2.3.3 การโปรแกรมเครื่องจักรกลซีเอ็นซี	27
2.4 การทดสอบความแข็ง	30
2.5 การทดสอบความต้านทานแรงดึง	31
2.6 การตรวจสอบทางโลหะวิทยา	33
2.7 การวิเคราะห์ข้อมูลเชิงสถิติ	34
3 วิธีการดำเนินงานวิจัย	36
3.1 การดำเนินงานวิจัย	36
3.2 วัสดุที่ใช้ในงานวิจัย	37
3.2.1 อะลูมิเนียมหล่อกิ่งของแข็ง SSM 356	37
3.2.2 อะลูมิเนียมรีดผสม AA 6061-T651	37
3.3 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย	38
3.3.1 เครื่องจักรกลแบบอัตโนมัติ	38
3.3.2 เครื่องมือกวน	39
3.3.3 กล้องถ่ายภาพกำลังขยาย 2-10 เท่า	39
3.3.4 กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง	40
3.3.5 เครื่องทดสอบแรงดึง	40
3.3.6 เครื่องทดสอบความแข็ง	41
3.3.7 เครื่องมือและอุปกรณ์เสริมอื่นๆ	41
3.4 การกำหนดตัวแปรและการออกแบบการทดลอง	42
3.4.1 ปัจจัยหลักในการทดลอง	42
3.4.2 ปัจจัยที่กำหนดให้คงที่ในการทดลอง	42
3.4.3 การกำหนดขนาดตัวอย่าง	43
3.4.4 การวิเคราะห์ข้อมูลเชิงสถิติ	44
3.5 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย	47
3.5.1 การเตรียมชิ้นงานทดลอง	47
3.5.2 การเขียนโปรแกรมเอ็นซีสำหรับเครื่องจักรกลแบบอัตโนมัติ	47

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.5.3 ขั้นตอนการทำกระบวนการทางความร้อน T6	49
3.5.4 การเชื่อมชิ้นงานทดลอง	49
3.5.5 การเตรียมชิ้นงานสำหรับทดสอบโครงสร้างทางโลหะวิทยา	50
3.5.6 การเตรียมชิ้นงานสำหรับทดสอบสมบัติทางกล	52
3.5.6.1 การเตรียมชิ้นงานสำหรับทดสอบแรงดึง	53
3.5.6.2 การเตรียมชิ้นงานสำหรับทดสอบความแข็ง	53
4 ผลการทดลองและการอภิปรายผล	55
4.1 ลักษณะผิวด้านบนของแนวเชื่อม	55
4.2 ลักษณะโครงสร้างทางมหภาคและจุลภาคของแนวเชื่อม	58
4.2.1 ลักษณะโครงสร้างทางมหภาคของแนวเชื่อม	58
4.2.2 ลักษณะโครงสร้างทางจุลภาคของแนวเชื่อม	61
4.3 ผลการทดสอบความแข็งของบริเวณแนวเชื่อม	74
4.4 ผลการทดสอบความต้านทานแรงดึงของแนวเชื่อม	78
4.5 การวิเคราะห์ผลเชิงสถิติของค่าความต้านทานแรงดึงของแนวเชื่อม	81
4.5.1 การวิเคราะห์ผลเชิงสถิติของค่าความต้านทานแรงดึงของแนวเชื่อม เสียดทานแบบกวนของอะลูมิเนียมผสมต่างชนิดระหว่าง อะลูมิเนียมหล่อกิ่งของแข็ง SSM 356 ที่ไม่ผ่านกระบวนการทาง ความร้อน T6 กับอะลูมิเนียมผสม AA 6061-T651	82
4.5.1.1 การวิเคราะห์ความถูกต้องของตัวแบบ	82
4.5.1.2 การทดสอบสมมติฐานของการทดลอง	85
4.5.1.3 สมการถดถอย	89
4.5.1.4 พื้นผิวตอบสนอง	89
4.5.2 การวิเคราะห์ผลเชิงสถิติของค่าความต้านทานแรงดึงของแนวเชื่อม เสียดทานแบบกวนของอะลูมิเนียมผสมต่างชนิดระหว่าง อะลูมิเนียมหล่อกิ่งของแข็ง SSM 356 ที่ผ่านกระบวนการทางความ ร้อน T6 กับอะลูมิเนียมผสม AA 6061-T651	91
4.5.2.1 การวิเคราะห์ความถูกต้องของตัวแบบ	91

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.5.2.2 การทดสอบสมมติฐานของการทดลอง	94
4.5.2.3 สมการถดถอย	98
4.5.2.4 พื้นที่วัดตอบสนอง	98
5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ	100
5.1 สรุปผลการทดลอง	100
5.2 ข้อเสนอแนะ	102
บรรณานุกรม	103
ภาคผนวก	106
ภาคผนวก ก. ตาราง G Code และ M Code	107
ภาคผนวก ข. มาตรฐานการทดสอบชิ้นงาน ASTM-E8M	114
ภาคผนวก ค. ลักษณะผิวด้านบนของแนวเชื่อม	116
ภาคผนวก ง. โครงสร้างทางมหภาคและจุลภาคของแนวเชื่อม	121
ภาคผนวก จ. ผลการทดสอบความแข็งของแนวเชื่อม	134
ภาคผนวก ฉ. ผลการทดสอบความต้านทานแรงดึงของแนวเชื่อม	139
ประวัติผู้เขียน	148

รายการตาราง

ตารางที่		หน้า
2.1	รหัส G ที่มีการใช้โดยทั่วไป	28
2.2	รหัส M ที่มีการใช้โดยทั่วไป	28
3.1	ส่วนผสมทางเคมี (W.T. %) และสมบัติทางกลของอะลูมิเนียมหล่อผสมกึ่งของแข็ง SSM 356, SSM 35-T6 และ AA 6061-T651	38
3.2	การออกแบบแผนการทดลองเชื่อมชิ้นงานแบบสุ่ม	44
3.3	เอ็นซีโปรแกรมสำหรับเครื่องจักรกลแบบอัตโนมัติรุ่น Cincinnati A2100	48
4.1	ตาราง ANOVA	86
4.2	ตาราง ANOVA	95

รายการภาพประกอบ

ภาพประกอบที่	หน้า	
2.1	แผนภาพสมมูลสองธาตุ อะลูมิเนียม-แมกนีเซียมซิลิไซด์	14
2.2	ลักษณะเกรนแบบก้อนกลม	15
2.3	กรรมวิธีผลิตโลหะกึ่งของแข็งแบบใหม่ด้วยกระบวนการ GISS	16
2.4	กระบวนการเชื่อมเสียดทานแบบกวน	18
2.5	ทิศทางและการกวนของตัวกวน	19
2.6	องค์ประกอบการเชื่อมเสียดทานแบบกวน	20
2.7	ค่าแรงกดที่เกิดจากการเชื่อม FSW ในแต่ละช่วงขณะทำการเชื่อม	21
2.8	ลักษณะการควบคุมแบบลูปปิด (Closed-loop)	24
2.9	ลักษณะการควบคุมแบบลูปเปิด (Open-loop)	24
2.10	ลักษณะของเอ็นโค้ดเดอร์	24
2.11	เครื่องแมชชีนนิ่งเซ็นเตอร์แบบแนวตั้ง	25
2.12	ชุดเปลี่ยน tool อัด โนมัติแบบ Arm	26
2.13	ชุดเปลี่ยน tool อัด โนมัติแบบ Armless	27
3.1	แผนผังแสดงขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย	36
3.2	อะลูมิเนียมหล่อกึ่งของแข็ง SSM 356	37
3.3	เครื่องกัดแบบอัด โนมัติ CINCINNATI รุ่น ARROW VMC750	38
3.4	เครื่องมือกวนรูปทรงกระบอกที่ใช้ในการทดลอง	39
3.5	กล้องถ่ายภาพกำลังขยาย 2-10 เท่า	39
3.6	กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง	40
3.7	เครื่องทดสอบแรงดึง Testometric รุ่น M500-50kN	40
3.8	เครื่องทดสอบความแข็งแบบไมโครวิกเกอร์ส	41
3.9	อุปกรณ์จับยึดชิ้นงาน	42
3.10	ลำดับขั้นตอนการเตรียมชิ้นงานทดลอง	47
3.11	ลักษณะการเดินเชื่อม	48
3.12	ลำดับขั้นตอนการเชื่อมชิ้นงานทดลอง	50
3.13	การแบ่งชิ้นงานทดสอบทางโลหะวิทยาและทางกล	51
3.14	การจัดชิ้นงานทดสอบด้วยกระดาษทราย	51

รายการภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพประกอบที่	หน้า
3.15 การเตรียมชิ้นงานทดสอบแรงดึง	53
3.16 การเตรียมชิ้นงานทดสอบความแข็ง	54
4.1 ลักษณะผิวด้านบนของแนวเชื่อมที่ความเร็วหมุนเชื่อม 1,750 rpm	56
4.2 ลักษณะผิวด้านบนของแนวเชื่อมที่ความเร็วหมุนเชื่อม 2,000 rpm	57
4.3 โครงสร้างทางมหภาคของแนวเชื่อมที่ความเร็วหมุนเชื่อม 1,750 rpm	59
4.4 โครงสร้างทางมหภาคของแนวเชื่อมที่ความเร็วหมุนเชื่อม 2,000 rpm	60
4.5 โครงสร้างทางจุลภาคของแนวเชื่อมที่ความเร็วหมุนเชื่อม 1,750 rpm ความเร็วเดินเชื่อมที่ 20 mm/min	61
4.6 โครงสร้างทางจุลภาคของแนวเชื่อมที่ความเร็วหมุนเชื่อม 1,750 rpm ความเร็วเดินเชื่อมที่ 50 mm/min	62
4.7 โครงสร้างทางจุลภาคของแนวเชื่อมที่ความเร็วหมุนเชื่อม 1,750 rpm ความเร็วเดินเชื่อมที่ 80 mm/min	63
4.8 โครงสร้างทางจุลภาคของแนวเชื่อมที่ความเร็วหมุนเชื่อม 1,750 rpm ความเร็วเดินเชื่อมที่ 120 mm/min	64
4.9 โครงสร้างทางจุลภาคของแนวเชื่อมที่ความเร็วหมุนเชื่อม 1,750 rpm ความเร็วเดินเชื่อมที่ 160 mm/min	65
4.10 โครงสร้างทางจุลภาคของแนวเชื่อมที่ความเร็วหมุนเชื่อม 1,750 rpm ความเร็วเดินเชื่อมที่ 200 mm/min	66
4.11 โครงสร้างทางจุลภาคของแนวเชื่อมที่ความเร็วหมุนเชื่อม 2,000 rpm ความเร็วเดินเชื่อมที่ 20 mm/min	67
4.12 โครงสร้างทางจุลภาคของแนวเชื่อมที่ความเร็วหมุนเชื่อม 2,000 rpm ความเร็วเดินเชื่อมที่ 50 mm/min	68
4.13 โครงสร้างทางจุลภาคของแนวเชื่อมที่ความเร็วหมุนเชื่อม 2,000 rpm ความเร็วเดินเชื่อมที่ 80 mm/min	69
4.14 โครงสร้างทางจุลภาคของแนวเชื่อมที่ความเร็วหมุนเชื่อม 2,000 rpm ความเร็วเดินเชื่อมที่ 120 mm/min	70

รายการภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพประกอบที่	หน้า
4.15 โครงสร้างทางจุลภาคของแนวเชื่อมที่ความเร็วหมุนเชื่อม 2,000 rpm ความเร็วเดินเชื่อมที่ 160 mm/min	71
4.16 โครงสร้างทางจุลภาคของแนวเชื่อมที่ความเร็วหมุนเชื่อม 2,000 rpm ความเร็วเดินเชื่อมที่ 200 mm/min	72
4.17 ค่าความแข็งของแนวเชื่อมเสียดทานแบบกวนของอะลูมิเนียมผสมต่างชนิดระหว่างอะลูมิเนียมหล่อกิ่งของแข็ง SSM 356 ที่ไม่ผ่านกระบวนการทางความร้อน T6 กับอะลูมิเนียมผสม AA 6061-T651 ที่ความเร็วหมุนเชื่อม 1,750 rpm	75
4.18 ค่าความแข็งของแนวเชื่อมเสียดทานแบบกวนของอะลูมิเนียมผสมต่างชนิดระหว่างอะลูมิเนียมหล่อกิ่งของแข็ง SSM 356 ที่ผ่านกระบวนการทางความร้อน T6 กับอะลูมิเนียมผสม AA 6061-T651 ที่ความเร็วหมุนเชื่อม 1,750 rpm	75
4.19 ค่าความแข็งของแนวเชื่อมเสียดทานแบบกวนของอะลูมิเนียมผสมต่างชนิดระหว่างอะลูมิเนียมหล่อกิ่งของแข็ง SSM 356 ที่ไม่ผ่านกระบวนการทางความร้อน T6 กับอะลูมิเนียมผสม AA 6061-T651 ที่ความเร็วหมุนเชื่อม 2,000 rpm	77
4.20 ค่าความแข็งของแนวเชื่อมเสียดทานแบบกวนของอะลูมิเนียมผสมต่างชนิดระหว่างอะลูมิเนียมหล่อกิ่งของแข็ง SSM 356 ที่ผ่านกระบวนการทางความร้อน T6 กับอะลูมิเนียมผสม AA 6061-T651 ที่ความเร็วหมุนเชื่อม 2,000 rpm	77
4.21 การขาดที่เกิดจากรอยตำหนิจากกระบวนการหล่อ	79
4.22 ค่าความต้านทานแรงดึงของแนวเชื่อมเสียดทานแบบกวนของอะลูมิเนียมผสมต่างชนิดระหว่างอะลูมิเนียมหล่อกิ่งของแข็ง SSM 356 ที่ไม่ผ่านกระบวนการทางความร้อน T6 กับอะลูมิเนียมผสม AA 6061-T651	79
4.23 ค่าความต้านทานแรงดึงของแนวเชื่อมเสียดทานแบบกวนของอะลูมิเนียมผสมต่างชนิดระหว่างอะลูมิเนียมหล่อกิ่งของแข็ง SSM 356 ที่ผ่านกระบวนการทางความร้อน T6 กับอะลูมิเนียมผสม AA 6061-T651	80
4.24 กราฟแสดงการวิเคราะห์ความถูกต้องของตัวแบบ	82
4.25 กราฟ Residual Versus the Order of the Data	83
4.26 กราฟ Histogram of the Residuals	83
4.27 กราฟ Residuals Versus the Fitted Values	84

รายการภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพประกอบที่	หน้า
4.28 ผลการทดสอบความเท่ากันของค่าความแปรปรวนของข้อมูล	85
4.29 แสดงผลของปัจจัยหลักต่อค่าความต้านทานแรงดึงของแนวเชื่อม	87
4.30 แสดงผลของอันตรกิริยาระหว่างความเร็วหมุนเชื่อมกับความเร็วเดินเชื่อมต่อค่าความต้านทานแรงดึงของแนวเชื่อม	88
4.31 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วหมุนเชื่อมกับความเร็วเดินเชื่อมที่มีอิทธิพลต่อค่าความต้านทานแรงดึงในระดับต่างๆ ของ Contour plot	90
4.32 พื้นผิวตอบสนองของค่าความต้านทานแรงดึงที่ได้รับอิทธิพลจากความเร็วหมุนเชื่อมกับความเร็วเดินเชื่อม	90
4.33 กราฟแสดงการวิเคราะห์ความถูกต้องของตัวแบบ	91
4.34 กราฟ Residual Versus the Order of the Data	92
4.35 กราฟ Histogram of the Residuals	92
4.36 กราฟ Residuals Versus the Fitted Values	93
4.37 ผลการทดสอบความเท่ากันของค่าความแปรปรวนของข้อมูล	94
4.38 แสดงผลของปัจจัยหลักต่อค่าความต้านทานแรงดึงของแนวเชื่อม	96
4.39 แสดงผลของอันตรกิริยาระหว่างความเร็วหมุนเชื่อมกับความเร็วเดินเชื่อมต่อค่าความต้านทานแรงดึงของแนวเชื่อม	97
4.40 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วหมุนเชื่อมกับความเร็วเดินเชื่อมที่มีอิทธิพลต่อค่าความต้านทานแรงดึงในระดับต่างๆ ของ Contour plot	99
4.41 พื้นผิวตอบสนองของค่าความต้านทานแรงดึงที่ได้รับอิทธิพลจากความเร็วหมุนเชื่อมกับความเร็วเดินเชื่อม	99

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของโครงการวิจัย

ในปัจจุบันอะลูมิเนียมหล่อผสมกับอะลูมิเนียมรีดผสมมีการนำไปใช้งานในอุตสาหกรรมกันอย่างกว้างขวางและมีแนวโน้มสูงขึ้นเรื่อยๆ เช่น ในระบบขนส่ง อุตสาหกรรมยานยนต์ อุตสาหกรรมอากาศยาน อุตสาหกรรมการผลิตชิ้นส่วนเครื่องจักร ชิ้นส่วนยานยนต์และอื่นๆ โดยเฉพาะอะลูมิเนียมรีดผสมจะนิยมนำมาใช้เป็นชิ้นส่วนประกอบที่บริเวณส่วนที่รับน้ำหนักแรง (Load-bearing components) เนื่องจากวัสดุเหล่านี้สามารถรับแรงได้สูง มีน้ำหนักเบา ทั้งนี้เพื่อเป็นการลดน้ำหนักและเป็นกระบวนการหนึ่งที่มีประสิทธิภาพในการประหยัดพลังงานเชื้อเพลิง จากเหตุผลเหล่านี้จึงได้มีการแข่งขันทางด้านเทคโนโลยีการหล่ออะลูมิเนียมด้วยกระบวนการหล่อแบบไดคาสติงขึ้นอย่างต่อเนื่อง เพื่อเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพในตัวชิ้นงานและคุณภาพในกระบวนการผลิต

สำหรับเทคโนโลยีที่มีศักยภาพในกระบวนการหล่อแบบไดคาสติงในปัจจุบัน คือกรรมวิธีการหล่อโลหะแบบกึ่งของแข็ง (Semi-Solid Metal: SSM) ที่มีการพัฒนาแก๊สในน้ำโลหะ (Gas Induced Semi-Solid: GISS) (เจษฎา วรรณสินธุ์, 2549) ซึ่งเป็นกระบวนการสร้างโลหะกึ่งของแข็งที่คล้ายกับกรรมวิธีแบบรีโอคาสติง (Rheocasting) โดยการปล่อยแก๊สเฉื่อย (แก๊สอาร์กอนหรือไนโตรเจน) ผ่านแท่งกราฟไฟต์พูนในปริมาณที่น้อยมาก ทำให้เกิดการไหลเคลื่อนที่ของน้ำโลหะในขณะที่มีการแข็งตัวและได้โครงสร้างเกรนที่เป็นแบบก้อนกลม (Spheroidal grain) การนำอะลูมิเนียมหล่อมาใช้ในงานอุตสาหกรรมภายในประเทศ โดยเฉพาะงานอุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้องกับการขึ้นรูปและการซ่อมแซมอะลูมิเนียมหล่อก็จะมีกระบวนการเชื่อมเข้ามาเกี่ยวข้องอย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้ ทั้งการเชื่อมอะลูมิเนียมหล่อในกลุ่มเดียวกันและการเชื่อมอะลูมิเนียมหล่อกับโลหะชนิดอื่น ด้วยเหตุนี้จึงต้องมีการพัฒนาเทคโนโลยีงานเชื่อมมาใช้ในงานอุตสาหกรรมให้มีความเหมาะสมกับสภาพของงานและข้อจำกัดในการเชื่อมที่จะส่งผลกระทบต่อในด้านต่างๆ ของแนวเชื่อม

การเชื่อมอะลูมิเนียมผสมต่างชนิด (Dissimilar joint) มีการประยุกต์ใช้ในงานอุตสาหกรรมต่างๆ กันอย่างแพร่หลาย เนื่องจากเหตุผลในเชิงเทคนิคและเศรษฐกิจ การเชื่อมอะลูมิเนียมผสมต่างชนิด สามารถทำให้เกิดโครงสร้างแนวเชื่อมที่มีความยืดหยุ่น และสามารถนำข้อดีของวัสดุแต่ละชนิดมาใช้งานได้อย่างกว้างขวางและมีประสิทธิภาพมากขึ้น แต่อย่างไรก็ตามการเชื่อมอะลูมิเนียมผสมต่างชนิดเข้าด้วยกันเป็นวิธีที่ค่อนข้างลำบาก เนื่องจากอะลูมิเนียมผสมต่าง

ชนิดมีสมบัติทางเคมี ทางกายภาพและทางกลที่แตกต่างกัน เมื่อทำการเชื่อมเข้าด้วยกันมักเกิดปัญหาต่างๆ ขึ้น เช่น ส่วนผสมทางเคมีของวัสดุที่ต่างกันจะทำให้เกิดปฏิกิริยาเคมี และก่อให้เกิดสารประกอบกึ่งโลหะ (Intermetallic compound: IMC) ที่แข็งและเปราะซึ่งเป็นตัวแปรสำคัญที่ลดความแข็งแรงรอยเชื่อม ความแตกต่างของโมดูลัสอีลาสติก ก่อให้เกิดความเข้มข้นของความเค้นหรือความไม่ต่อเนื่องของความเค้น (Stress discontinuities) ที่บริเวณรอยต่อเพิ่มขึ้น ความแตกต่างการนำความร้อนของวัสดุต่างชนิด เมื่อทำการเชื่อมทำให้เกิดการกระจายความร้อนของวัสดุที่แตกต่างกัน และส่งผลให้เกิดความเค้นเนื่องจากความร้อน ทำให้วัสดุมีความสามารถในการต้านทานแรงดึงได้ต่ำ (Brandon and Kaplan, 1997) ดังนั้นการใช้กระบวนการเชื่อมที่เหมาะสมในการเชื่อมอะลูมิเนียมผสมต่างชนิดจึงมีความสำคัญในการพัฒนาอย่างต่อเนื่อง

กระบวนการเชื่อมในปัจจุบันมีอยู่มากมายหลายวิธี การเชื่อมที่ใช้ความร้อนจากการอาร์ค เรียกว่า การเชื่อมแบบหลอมละลาย (Conventional fusion welding) ซึ่งจะมีการถ่ายเทความร้อนที่ได้จากการอาร์ค ทำให้เกิดการหลอมละลายเข้าด้วยกันของเนื้อโลหะบริเวณบ่อหลอม เมื่อโลหะแข็งตัวจะเกิดโครงสร้างขึ้นมาใหม่ ซึ่งโครงสร้างใหม่นี้จะไม่เหมือนกับโครงสร้างเดิม นอกจากนี้ยังมีปัญหาสำคัญอีกประการหนึ่งในการเชื่อมอะลูมิเนียม คือ การรักษาสมบัติทางกลของบริเวณแนวเชื่อมให้ใกล้เคียงกับเนื้อโลหะเดิมมากที่สุด การเชื่อมแบบหลอมละลายจะก่อให้เกิดการเปลี่ยนโครงสร้างทางโลหะวิทยาของแนวเชื่อม (Metallurgical changes) (ประภาศ เมืองจันทร์บุรี, 2550) ซึ่งจะส่งผลให้แนวเชื่อม (Welding region) มีการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางกลไปด้วย

กระบวนการเชื่อมที่ได้รับความสนใจในการศึกษาวิจัยเพื่อพัฒนาสมบัติต่างๆ อย่างต่อเนื่องในปัจจุบัน คือ กระบวนการเชื่อมเสียดทานแบบกวน (Friction Stir Welding Process: FSWP) ซึ่งได้มีการคิดค้นขึ้นโดยสถาบันการเชื่อมของประเทศอังกฤษ (The Welding Institutes: TWI) การเชื่อมด้วยวิธีนี้นิยมใช้ในการเชื่อมวัสดุที่ยากต่อการเชื่อมแบบหลอมละลาย เนื่องจากความยากลำบากในการควบคุมความร้อนในบริเวณแนวเชื่อม เช่น อะลูมิเนียมผสม (Thomas *et al.*, 1991; Thomas and Nicholas, 1997; Midling *et al.*, 1998; Harris and Norman, 2003) การเชื่อมประเภทนี้เป็น การเชื่อมในสถานะของแข็ง (Solid State Welding) โดยที่อุณหภูมิในการเชื่อมต่ำกว่าจุดหลอมเหลวของวัสดุ ทำให้วัสดุไม่มีการหลอมละลาย ลักษณะโครงสร้างที่ได้ของบริเวณแนวเชื่อมจะมีขนาดเกรนที่เล็กและละเอียด สามารถรับแรงได้สูงขึ้น ซึ่งการเชื่อมแบบหลอมละลายไม่สามารถทำได้ (Mishra and Ma, 2005)

เมื่อไม่นานมานี้ ได้มีผู้ทำการทดลองเชื่อมต่อชนวัสดุต่างชนิด ระหว่างอะลูมิเนียมที่ได้จากการรีดกับอะลูมิเนียมหล่อ ซึ่งการเชื่อมดังกล่าวนี้ใช้งานกันอย่างแพร่หลายในชิ้นส่วนอากาศยาน โครงสร้างเครื่องบิน (Airframe) และส่วนประกอบของซีปนาอูธ อะลูมิเนียมที่นิยมนำมา

เชื่อม ได้แก่ A 356 กับ AA 6061 (Lee *et al.*, 2003a, 2003b) ได้แสดงให้เห็นว่าสมบัติทางกลของแนวเชื่อม ส่วนมากจะขึ้นอยู่กับวัสดุที่อยู่ด้านรีทรีตติง (Retreating side) เนื่องจากโครงสร้างของบริเวณแนวเชื่อมจะประกอบขึ้นจากเนื้อวัสดุที่อยู่ด้านรีทรีตติงเป็นส่วนใหญ่ นอกจากนี้ได้มีการทดลองเชื่อม A 356-T6 กับ AA 6061-T651 (Lim *et al.*, 2004) ที่แสดงผลของแนวเชื่อมที่มีค่าความต้านทานแรงดึงต่ำ อันเป็นสาเหตุมาจากการเกิดโครงสร้างใหม่ที่บริเวณแนวเชื่อม โดยมีการกระจายตัวของอนุภาคซิลิกอนตลอดความยาวของแนวเชื่อม ส่งผลให้บริเวณขอบเกรนเป็นจุดเริ่มต้นของการแตกหักจากการดึง จากการศึกษาผลของความเร็วหมุนเชื่อมและความเร็วเดินเชื่อมของแนวเชื่อม A 356 กับ AA 6061-T6 (Ghosh *et al.*, 2010) ได้ผลที่ชี้ให้เห็นว่าการเปลี่ยนค่าความเร็วหมุนเชื่อมและความเร็วเดินเชื่อม ส่งผลโดยตรงต่อโครงสร้างทางจุลภาคของบริเวณแนวเชื่อมอย่างมีนัยสำคัญ จากข้อมูลที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้นจะพบว่าอะลูมิเนียมที่หล่อแบบไดคาสต์ธรรมดาจะมีสมบัติทางกลที่ต่ำกว่าเมื่อเทียบกับอะลูมิเนียมผสมได้มาจากกระบวนการหล่อแบบกึ่งของแข็ง แต่อย่างไรก็ตามการเชื่อมระหว่างอะลูมิเนียมผสมที่ได้จากกระบวนการหล่อแบบกึ่งของแข็ง SSM 356 ซึ่งเป็นวัสดุใหม่ มีลักษณะโครงสร้างเกรนที่เป็นแบบก้อนกลมกับอะลูมิเนียมผสม AA 6061-T651 นั้น ยังไม่มีผู้ใดรายงานถึงและเป็นเทคโนโลยีที่ใหม่มาก ด้วยเหตุนี้เองผู้วิจัยจึงมีความสนใจในการเชื่อมอะลูมิเนียมผสม SSM 356 กับอะลูมิเนียมผสม AA 6061-T651 ด้วยกระบวนการเชื่อมเสียดทานแบบกวน เพื่อหาความสัมพันธ์ของตัวแปรที่มีผลต่อโครงสร้างทางโลหะวิทยาและสมบัติทางกลของแนวเชื่อมที่เหมาะสมต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

1.2.1) เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการเชื่อมโลหะที่ได้จากกระบวนการหล่อแบบกึ่งของแข็งกับโลหะต่างกลุ่ม (Dissimilar joint) ด้วยกรรมวิธีการเชื่อมเสียดทานแบบกวน

1.2.2) เพื่อศึกษาตัวแปรของความเร็วหมุนเชื่อมและความเร็วเดินเชื่อมที่มีผลต่อโครงสร้างทางโลหะวิทยาและสมบัติทางกลของแนวเชื่อมที่บริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อนทางกล (Thermo-mechanically Affected Zone; TMAZ) และเนื้อโลหะเดิมจากการเชื่อมเสียดทานแบบกวน

1.2.3) เพื่อต้องการทราบถึงโครงสร้างทางโลหะวิทยาและสมบัติทางกลของแนวเชื่อมบริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อนทางกล (TMAZ) และเนื้อโลหะเดิมจากการเชื่อมเสียดทานแบบกวน

1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย

งานวิจัยนี้มุ่งเน้นไปที่ศึกษาตัวแปรที่มีผลต่อแนวเชื่อมที่ได้จากการเชื่อมเสียดทานแบบกวนของอะลูมิเนียมผสมต่างชนิด โดยใช้เครื่องจักรกลแบบอัตโนมัติ (Computerized Numerical Control Machine) โดยมีตัวแปรและขอบเขตของการศึกษาดังนี้

1.3.1) วัสดุที่ใช้ในการทดลอง คือ อะลูมิเนียมหล่อกิ่งของแข็ง SSM 356 ที่ผ่านการ Squeeze Casting และ อะลูมิเนียมรีดผสม AA 6061-T651 ที่มีขนาด $100 \times 50 \times 4 \text{ mm}^3$ วางชิ้นงานเชื่อมต่อชนทาบ ยึดให้แน่นด้วยอุปกรณ์จับยึด ใช้ตัวกวนแบบทรงกระบอกหมุนขวา (ทิศทางการหมุนนาฬิกา)

1.3.2) ตัวแปรควบคุมที่ใช้ในการทดลองมี 2 ตัวแปร ประกอบด้วย ความเร็วหมุนเชื่อม (1,750 และ 2,000 rpm) และความเร็วเดินเชื่อม (20, 50, 80, 120, 160 และ 200 mm/min) ส่วนตัวแปรเชื่อมอื่นๆ คงที่ ประกอบด้วย แรงกด และมุมเอียงของตัวกวนกับผิวชิ้นงานที่ 3 องศา

1.3.3) ตรวจสอบโครงสร้างทางโลหะวิทยาและสมบัติทางกล ซึ่งจะประกอบด้วย ลักษณะพิกัดบนของแนวเชื่อม โครงสร้างทางมหภาค โครงสร้างทางจุลภาค ค่าความแข็งและความต้านทานแรงดึงของแนวเชื่อม

1.3.4) วิเคราะห์ผลเชิงสถิติเพื่อเป็นการยืนยันผลการทดลองให้มีความน่าเชื่อถือมากยิ่งขึ้น

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1) สร้างองค์ความรู้ที่เป็นประโยชน์ต่อการพัฒนากระบวนการเชื่อมเสียดทานแบบกวน

1.4.2) ได้ทราบถึงความเป็นไปได้เบื้องต้นของความสามารถในการเชื่อมเสียดทานแบบกวนของโลหะที่ได้จากกระบวนการหล่อแบบกิ่งของแข็งกับโลหะต่างกลุ่ม

1.4.3) ทราบถึงตัวแปรที่มีผลต่อโครงสร้างทางโลหะวิทยาและสมบัติทางกลของการเชื่อมโลหะต่างกลุ่ม ด้วยกรรมวิธีการเชื่อมเสียดทานแบบกวน

1.5 การตรวจเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

จากการศึกษาผลงานวิจัยที่ได้มีการศึกษาก่อนหน้านี้ที่ผ่านมา ได้มีผู้สนใจศึกษาเกี่ยวกับตัวแปรในการเชื่อมเสียดทานแบบกวน ชนิดวัสดุและปัจจัยอื่นๆ ที่เกี่ยวข้องอีกมากมาย ผู้วิจัยสามารถสรุปประเด็นสำคัญเพื่อนำไปใช้เป็นแนวทางในการทำวิจัยในครั้งนี้ ได้ดังนี้

เจษฎา วรรณสินธุ์ (2549) รายงานว่าการหล่อโลหะแบบกึ่งของแข็งถูกคิดค้นที่ Massachusetts Institute of Technology (MIT) เมื่อประมาณ 30 ปีที่แล้ว การหล่อโลหะแบบกึ่งของแข็ง คือ การขึ้นรูปโลหะโดยการหล่อในขณะที่โลหะมีการแข็งตัวเป็นบางส่วน ส่วนที่แข็งตัวแล้วมีโครงสร้างเกรนแบบก้อนกลม (Spheroidal หรือ Globular Grain) ด้วยเทคโนโลยีการหล่อกึ่งของแข็ง การหล่อโลหะกึ่งของแข็งซึ่งมีความหนืดมากกว่าน้ำโลหะทำให้การไหลราบเรียบ (Non-Turbulent) การประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมผลิตชิ้นส่วนยานยนต์ที่มีการใช้อย่างแพร่หลาย ประโยชน์ของการหล่อ SSM ได้มีการพัฒนากระบวนการผลิตแบบรีโอบาคาสติงหลายวิธีเพื่อการลดต้นทุน เทคโนโลยีการหล่อ SSM ได้มีการใช้งานแพร่หลายในการหล่อแบบไดคาสติง เพื่อเพิ่มคุณภาพและสมบัติเชิงกลของชิ้นงานหล่อ ลดเวลาในการผลิตต่อชิ้น (Cycle Time) การลดของเสีย เพิ่มอายุการใช้งานของแม่พิมพ์และลดต้นทุนในการอบชุบ การพัฒนากรรมวิธีรีโอบาคาสติงที่มีราคาถูกและสามารถใช้กับเครื่องไดคาสติงทั่วไปได้ ทีมวิจัยที่นำโดยนักวิจัยจากภาควิชาวิศวกรรมเหมืองแร่และวัสดุ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ และ MTEC โดยมีที่ปรึกษาจากสหรัฐอเมริกา รวมทั้ง Prof. Merton Flemings จาก MIT กำลังวิจัยและพัฒนากรรมวิธีรีโอบาคาสติงซึ่งเรียกว่าเทคนิค GISS (Gas Induced Semi-Solid) โดยการปล่อยแก๊สเฉื่อย (แก๊สอาร์กอนหรือไนโตรเจน) ผ่านแท่งกราฟไฟต์พูนในปริมาณที่น้อยมาก เพื่อให้เกิดการไหลเคลื่อนที่ของน้ำโลหะในขณะที่โลหะแข็งตัว จนได้เกรนที่มีลักษณะเป็นแบบก้อนกลม

จากการรายงานของ Linert *et al.* (2003) ที่ได้ศึกษาเกี่ยวกับการเชื่อมว่า ในปัจจุบันการเชื่อมแบบหลอมละลายจะถูกนำมาแทนที่ด้วยการเชื่อมเสียดทานแบบกวน ซึ่งจะเข้ามามีบทบาทเป็นอย่างมาก โดยเฉพาะในช่วง 10 ปีที่ผ่านมา โดยการเชื่อมด้วยวิธีนี้จะนิยมนำมาใช้ในการเชื่อมอะลูมิเนียมและอะลูมิเนียมผสม ซึ่งการเชื่อมเสียดทานแบบกวนของอะลูมิเนียมผสมจะมีข้อดีหลายอย่าง เมื่อเทียบกับการเชื่อมแบบหลอมละลาย (Fusion welding) เช่น สามารถหลีกเลี่ยงการแตกในระหว่างแข็งตัวจากของเหลวไปเป็นของแข็งและปัญหาการเกิดโพรงอากาศ (Porosity) โดยเฉพาะกับอะลูมิเนียมผสมที่หล่อโดยวิธีไดคาสติงเพราะว่าการเชื่อมเสียดทานแบบกวนเป็นการเชื่อมในสถานะของแข็ง (Solid state welding) นอกจากนี้ในการเชื่อมโลหะบางประเภทจะไม่สามารถเชื่อมด้วยกรรมวิธีเชื่อมแบบหลอมละลายได้ ดังนั้นการเชื่อมแบบนี้จึงเหมาะสมเป็นอย่างมาก โดยทั่วไปชิ้นงานที่ผ่านการเชื่อมเสียดทานแบบกวนจะมีความเค้นตกค้าง (Residual stress) และการบิดงอ (Distortion) น้อยกว่าการเชื่อมแบบหลอมละลาย ความเค้นตกค้างที่น้อยกว่าเป็นผลมาจากความร้อนนำเข้า (Heat input) จากการเชื่อมเสียดทานแบบกวนมีค่าน้อยกว่าการเชื่อมแบบหลอมละลาย การเชื่อมเสียดทานแบบกวนได้ถูกประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมสำหรับอะลูมิเนียมผสมในกลุ่ม 1xxx, 2xxx, 5xxx, 6xxx และ 7xxx รวมถึงอะลูมิเนียมผสม Al-Si-Li ด้วย

Kim *et al.* (2006a) การเชื่อมเสียดทานแบบกวนได้มีการพัฒนาขึ้นที่สถาบันการเชื่อมแห่งประเทศไทย (The Welding Institute; TWI) ในปี 1991 เป็นกระบวนการเชื่อมวัสดุในสถานะที่เป็นของแข็ง ซึ่งวัสดุจะถูกเชื่อมด้วยความร้อนจากการเสียดทาน ดังนั้น การเชื่อมเสียดทานแบบกวนทำให้สามารถเชื่อมต่อโดยปราศจากกรุปูน ความสามารถในการเชื่อมต่อสูง อย่างไรก็ตาม บริเวณที่ถูกกวนเป็นผลึกที่ละเอียดกับโครงสร้างของเนื้อโลหะเดิม สมบัติทางกลของการเชื่อมดีกว่ากระบวนการเชื่อมแบบหลอมละลาย ปัจจัยในการเชื่อมที่สำคัญจะประกอบด้วย ความเร็วหมุนเชื่อมและความเร็วเดินเชื่อม โครงสร้างในบริเวณที่ถูกกวนมีอนุภาค การกระจายของซิลิกอนในอะลูมิเนียมผสม รอยเชื่อมที่สมบูรณ์ภายใต้สถานะการเชื่อมเสียดทานแบบกวนที่สมดุล โครงสร้างจุลภาคของเนื้อโลหะเดิม (Base metal; BM) บริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อนทางกล (TMAZ) และบริเวณแนวกวน (Stir zone; SZ) ประกอบด้วยโครงสร้างเดนดริติกและเฟสของยูเทคติกในบริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อนทางกล การเสียดทานของเครื่องมือทำให้โครงสร้างเสียรูปทรง (บิดเบี้ยว) โครงสร้างของเดนดริติกแตกหักเป็นผลึกที่ละเอียดในบริเวณที่ถูกกวน และซิลิกอนยูเทคติกจะกระจายอยู่ในบริเวณที่ถูกกวน ขนาดและการกระจายตัวของอนุภาคซิลิกอนด้านรีทริทติงใกล้เคียงกับด้านแอดวานซิง (Advancing side) ขนาดของอนุภาคซิลิกอนอยู่บนพื้นฐานอิทธิพลของความร้อนของอนุภาคซิลิกอน มีลักษณะเป็นของแข็งที่เป็นผลึกเล็กๆ เสียดสีกันที่อุณหภูมิต่ำทำให้อยู่ในสภาพพลาสติกได้ยาก อิทธิพลของความร้อนที่เพิ่มขึ้นจากปัจจัยการเชื่อม ความเร็วหมุนเชื่อม และความเร็วเดินเชื่อม ส่งผลต่อขนาดและการกระจายตัวของอนุภาคซิลิกอนอย่างมีนัยสำคัญ ส่วน Zah and Eireiner (2004) ได้กล่าวว่าการเชื่อมโลหะในสถานะของแข็ง (Solid State Welding) เป็นกระบวนการเชื่อมที่ยึดโลหะเข้าด้วยกันที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิหลอมเหลวของโลหะนั้น โลหะบางประเภทจะหลีกเลี่ยงการเชื่อมต่ที่อุณหภูมิของการหลอมละลาย เพราะที่อุณหภูมิหลอมละลาย เมื่อโลหะแข็งตัวจะเกิดโครงสร้างใหม่ ซึ่งอาจจะไม่เหมือนกับโครงสร้างเริ่มต้นของโลหะนั้น จากเหตุผลดังกล่าว จึงได้มีการคิดค้นการเชื่อมเสียดทานแบบกวน ที่สถาบันการเชื่อมอังกฤษ (The Welding Institute) การเชื่อมเสียดทานแบบกวนจัดเป็นการเชื่อมในสถานะของแข็ง ซึ่งโลหะจะเชื่อมติดกันโดยความร้อนจากแรงเสียดทาน โดยมีแรงกดขณะเชื่อม ตัวแปรที่เกี่ยวข้อง คือ แรงกด (Down force) ความเร็วหมุนเชื่อมของตัวกวน (rpm) ความเร็วเดินเชื่อม (Welding speed) และมุมเอียงของตัวกวนกับผิวชิ้นงาน

กิตติพงษ์ กิมะพงษ์ และคณะ (2550) การเชื่อมรอยต่อเกยอะลูมิเนียมผสมและเหล็กกล้าด้วยการเชื่อมเสียดทานแบบกวน รอยต่อเกยอะลูมิเนียมผสม A5083 และเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ SS400 โดยทำการเชื่อมเสียดทานแบบกวน ภายใต้การเปลี่ยนแปลงตัวแปรการเชื่อม เช่น ความเร็วหมุนเชื่อม ความเร็วเดินเชื่อม และความลึกของตัวกวนที่สอดเข้าไปในเนื้อวัสดุ การ

เปลี่ยนแปลงตัวแปรในการเชื่อมทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างจุลภาคบริเวณอินเทอร์เฟซของรอยต่อและส่งผลทำให้มีการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางกล การเพิ่มความเร็วหมุนเชื่อมของตัวกวน ทำให้เกิดการก่อตัวของสารประกอบกึ่งโลหะระหว่างเหล็กกับอะลูมิเนียมชนิด FeAl₃ ที่อินเทอร์เฟซของรอยต่อ การเพิ่มความเร็วเดินเชื่อมสามารถเพิ่มความแข็งแรงของรอยต่อ เนื่องจากสารประกอบกึ่งโลหะที่มีความเปราะที่ก่อตัวบริเวณอินเทอร์เฟซมีปริมาณลดลง อย่างไรก็ตามการเพิ่มความเร็วเดินเชื่อมมากเกินไปจะทำให้เกิดจุดบกพร่องที่อินเทอร์เฟซของรอยต่อ จากความลึกของตัวกวนที่เพิ่มขึ้นจะทำให้ปริมาณของสารประกอบกึ่งโลหะและขนาดของจุดบกพร่องเพิ่มขึ้นด้วยเช่นกัน จากผลการศึกษาของ Akhter *et al.* (2006) ได้ศึกษาการเชื่อมอะลูมิเนียมผสม SSM A356 (Semi Solid Aluminum Alloy A356) โดยกรรมวิธีการเชื่อมแบบนีโอดีเมียมแย็กเลเซอร์ (Nd; YAG Laser Welding) พบว่าการเชื่อมแบบเลเซอร์ทำให้บริเวณรอยเชื่อมแคบและเล็ก โครงสร้างที่เกิดบริเวณบ่อหลอมละลายจะเป็นแบบเดนไดรต์ที่มีความละเอียด (Fine Dendritic Structure) รอยเชื่อมมีคุณภาพและความแข็งแรงสูง แต่มีต้นทุนในการผลิตที่สูงเช่นกันจึงไม่เหมาะกับการผลิตทั่วไป ในทางเดียวกันนั้น ปรภาศ เมืองจันทร์บุรี (2550) ได้รายงานผลจากการวิจัยการเชื่อมอะลูมิเนียมผสม SSM 356 ที่ได้จากการหล่อกึ่งของแข็ง ด้วยกรรมวิธีการเชื่อมแบบทิก (TIG) โดยผลจากการวิจัยพบว่า โครงสร้างบริเวณบ่อหลอมละลายจะเกิดเป็นโครงสร้างแบบกิ่งไม้ (Dendritic Structure) ในขณะที่โครงสร้างบริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อน (HAZ) ประกอบด้วยโครงสร้างแบบกิ่งไม้ผสมกับโครงสร้างแบบก้อนกลม (Equiaxed structure) ซึ่งเป็นโครงสร้างเดิมของอะลูมิเนียมที่ได้จากการหล่อแบบกึ่งของแข็ง ทั้งนี้เพราะว่าบริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อนจะไม่มีการหลอมละลายของเนื้อโลหะ จากลักษณะโครงสร้างที่เป็นแบบเดนไดรต์ที่เกิดขึ้นบริเวณแนวเชื่อม สามารถปรับปรุงให้เกรนมีความละเอียดได้ด้วยวิธีการเชื่อมเสียดทานแบบกวน โดยผลการรายงานของ Lee *et al.* (2003c) ได้ศึกษาการปรับปรุงสมบัติทางกลของการเชื่อมอะลูมิเนียมผสม A356 ด้วยวิธีการเชื่อมเสียดทานแบบกวน โดยการปรับปรุงสมบัติทางกลของบริเวณแนวเชื่อม โครงสร้างเนื้อโลหะเดิมเป็น Hypoeutectic ประกอบด้วย Al+Si Dendrite โครงสร้างของโลหะที่ถูกกวน (SZ) มีความแตกต่างจากบริเวณเนื้อโลหะเดิม (BM) จุดหลอมละลายต่ำสุด (Eutectic) อนุภาคของซิลิกอนจะเข้าไปแทนที่เป็นเนื้อเดียวกัน ในขณะที่อะลูมิเนียมเริ่มแข็งตัวบริเวณที่ได้รับอิทธิพลของความร้อนจากการเสียดทานเป็นจุดเริ่มต้นที่สำคัญ ทำให้โครงสร้างผิดรูปไปจากเดิม ลักษณะเฉพาะของโลหะด้วยอนุภาคซิลิกอนจะกระจายเป็นเส้นยาวตามลักษณะทิศทางการหมุนของเครื่องมือขณะที่มีการเชื่อมเสียดทานแบบกวน นอกเหนือจากบริเวณดังกล่าว ไม่มีผลต่อสมบัติเชิงกลบริเวณรอยเชื่อม เปรียบเทียบกับเนื้อโลหะเดิม ความแข็งแรงบริเวณรอยเชื่อมสูงกว่าเนื้อโลหะเดิม และมีบางส่วนที่มีความแข็งแรงลดลง ที่สำคัญทำให้ซิลิกอนที่เกิด

จากปฏิกิริยาอุทกคิกที่เป็นบริเวณที่นอกเหนือบริเวณที่ถูกกวนความแข็งแรงของโลหะบริเวณที่ถูกกวนจะสูงขึ้นเมื่อเทียบกับเนื้อโลหะเดิม เพราะฉะนั้นการเชื่อมอะลูมิเนียม A356 ด้วยการเชื่อมเสียดทานแบบกวน มีข้อดีในการประยุกต์ใช้กับการออกแบบรอยต่อระหว่างอะลูมิเนียมหล่อผสมกับอะลูมิเนียมหล่อผสมหรืออะลูมิเนียมเกรดอื่นๆ และอะลูมิเนียมกับโลหะต่างชนิดกัน เช่น เหล็กกล้า เป็นต้น

สำหรับปัจจัยที่มีผลต่อคุณภาพของแนวเชื่อมเสียดทานแบบกวนที่ได้รับการรายงานจาก Hong *et al.* (2004) เขาได้อธิบายไว้ว่าการเชื่อมเสียดทานแบบกวนเป็นกระบวนการที่มีความซับซ้อนและมีหลายปัจจัยที่ส่งผลต่อคุณภาพของแนวเชื่อม ปัจจัยหลักๆ ที่มีผลประกอบด้วยวัสดุและรูปแบบที่ใช้ในการทำตัวกวน ความเร็วหมุนเชื่อม ความเร็วเดินเชื่อม และแรงกดของตัวกวนที่ตกลงไปบนชิ้นงาน โดยการปรับเปลี่ยนตัวแปรที่กล่าวมาแล้วข้างต้นจะส่งผลต่อคุณภาพของแนวเชื่อมดังนี้ คือ วัสดุและรูปแบบที่ใช้ในการทำตัวกวน ตัวกวนจะแบ่งออกเป็นสองส่วน คือ tool body และ probe ซึ่งการเลือกชนิดของวัสดุและรูปแบบในการทำตัวกวนเป็นเทคโนโลยีหนึ่งที่จะช่วยในการพัฒนาการก่อความร้อนในขณะมีการเชื่อมเสียดทานแบบกวน รูปแบบของตัวกวนจะช่วยในการกำเนิดความร้อน การไหลวนเชิงพลาสติกและการบีบอัดเนื้อวัสดุที่บริเวณแนวกวน ซึ่งแนวเชื่อมที่ได้จะมีขนาดและรูปร่างที่แตกต่างกันไป ส่วนการเลือกวัสดุที่ใช้ในการทำตัวกวนนั้นจะมีผลต่ออัตราการเกิดความร้อน การนำพาความร้อนในวัสดุรวมทั้งอายุการใช้งานของตัวกวนด้วยความเร็วหมุนเชื่อมเป็นหนึ่งในปัจจัยสำคัญที่จะให้คุณภาพแนวเชื่อม โดยมีผลต่อการกำเนิดความร้อนจากการเสียดทานแบบกวน ถ้าความเร็วหมุนเชื่อมต่ำ ความร้อนจากการเสียดทานจะมีไม่พอต่อการไหลวนเชิงพลาสติกของวัสดุ เนื้อวัสดุบริเวณแนวเชื่อมไม่สามารถแพร่กระจายและเกิดผลึกใหม่ได้ จนก่อให้เกิดรูโพรงขึ้นในแนวเชื่อม เมื่อเพิ่มความเร็วหมุนเชื่อมจะช่วยลดขนาดของรูโพรงลงได้ เมื่อความเร็วหมุนเชื่อมอยู่ในช่วงที่เหมาะสมรูโพรงจะถูกบีบอัดจนแน่นและหายไปในที่สุด ความเร็วเดินเชื่อมเป็นตัวแปรหนึ่งที่ส่งผลต่อค่าความร้อนจากการเสียดทานสุทธิ ยิ่งความเร็วเดินเชื่อมที่ต่ำลงความร้อนจากการเสียดทานจะมีมากขึ้นถ้าความร้อนมีมากเกินไปหรือมีมากกว่าจุดหลอมเหลวของวัสดุ แนวเชื่อมจะมีรูขึ้นและเป็นสาเหตุให้เกิดการแตกจากการไหลตัว (fluidification crack) ผิวแนวเชื่อมจะไม่เรียบ มีความขรุขระ แต่ในทางกลับกันเมื่อความเร็วเดินเชื่อมมากไป ความร้อนจากการเสียดทานที่เกิดขึ้นไม่เพียงพอทำให้ผิวชิ้นงานเกิดรอยแยกและไม่สามารถประสานกัน และปัจจัยสุดท้าย คือ แรงกดของตัวกวนที่ตกลงไปบนชิ้นงาน แรงกดที่ไม่เพียงพอจะทำให้วัสดุกระจายตัวออกมาอยู่ด้านบนของผิวแนวเชื่อมส่งผลให้เกิดรูขึ้นที่แนวเชื่อม แต่ถ้าแรงกดมากเกินไปแรงเสียดทานที่เกิดขึ้นระหว่างบ่ากับผิวของชิ้นงานจะเพิ่มขึ้นด้วย ส่งผลให้เกิดครีปที่บริเวณขอบของแนวเชื่อม ในขณะเดียวกันปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการเชื่อมเสียดทานแบบกวนที่

ได้จากการอธิบายของ Kim *et al.* (2006b) ว่า กระบวนการเชื่อมเสียดทานแบบกวนสามารถต่อวัสดุที่อุณหภูมิต่ำกว่าจุดหลอมเหลว (T_M) และ โครงสร้างเดิมถูกกวนให้เป็นเกรนที่ละเอียด ไม่มีลักษณะของรูพรุนและ โครงสร้างแบบเดนไดรท์ขึ้นในแนวเชื่อม ดังนั้น การเชื่อมต่อโลหะผสมอื่นๆ สามารถเชื่อมต่อกับกระบวนการเชื่อมเสียดทานแบบกวน อะลูมิเนียมหล่อผสมมีความเกี่ยวข้องกับวัสดุที่ใช้อย่างเหมาะสม มีปัจจัยสำคัญหลายอย่างในการกำหนดค่าที่ดีที่สุดของการเชื่อมเสียดทานแบบกวน โดยการควบคุมแรงกด ความเร็วหมุนเชื่อมและความเร็วเดินเชื่อมของการเชื่อมเสียดทาน ปัจจัยในการเชื่อมที่ไม่เหมาะสมจะส่งผลโดยตรงต่อคุณภาพของรอยต่อและมีข้อบกพร่องจากการเชื่อมเสียดทานแบบกวนของอะลูมิเนียมหล่อผสม ลักษณะข้อบกพร่องที่เกิดขึ้นมีสาเหตุหลัก 3 ประการ ประการแรก ปริมาณความร้อนจากการเสียดทานที่มากเกินไปส่งผลให้เกิดครีปปริมาณมากที่บริเวณขอบผิวด้านบนของแนวเชื่อม ประการที่สอง ความร้อนจากการเสียดทานที่ไม่เพียงพอเป็นสาเหตุที่ทำให้การผสมผสานกันของเนื้อวัสดุไม่สมบูรณ์และนำไปสู่การเกิดช่องว่างในแนวเชื่อม ประการที่สาม ลักษณะการกวนที่ผิดปกติเป็นสาเหตุที่ทำให้แนวเชื่อมเกิดช่องว่างขึ้นได้เช่นกัน ดังนั้น ข้อบกพร่องที่เกิดขึ้นจากความร้อนของการเสียดทานและลักษณะการกวน มีผลโดยตรงต่อความสมบูรณ์ของแนวเชื่อมอย่างมีนัยสำคัญ ถึงแม้จะมีการรายงานถึงปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการเชื่อมมากมาย แต่การเชื่อมเสียดทานแบบกวนก็ได้มีผู้สนใจทดลองศึกษาปัจจัยในการเชื่อมต่างๆ มากมาย เช่น Khodir *et al.* (2007) ได้ทดลองเชื่อมอะลูมิเนียมผสมต่างชนิด เขากล่าวว่าคุณสมบัติทางกลของการเชื่อมอะลูมิเนียมผสมต่างชนิดระหว่าง AA2024 ที่ผ่านกระบวนการทางความร้อน T3 และ AA7075 ที่ผ่านกระบวนการทางความร้อน T6 ด้วยกรรมวิธีการเชื่อมเสียดทานแบบกวน โดยใช้ชิ้นงานตัวอย่างที่มีความหนา 3 มม จากปัจจัยของความเร็วเดินเชื่อมซึ่งจะพบว่าความเร็วเดินเชื่อมที่เหมาะสมนั้นสามารถให้ค่าความต้านทานแรงดึงที่สูงขึ้นได้ แต่ในทางกลับกันเมื่อเพิ่มความเร็วเดินเชื่อมที่มีค่าสูงมากเกินไปจะทำให้ค่าความต้านทานแรงดึงลดลง และจากการตรวจสอบ โครงสร้างทางโลหะวิทยา จะพบว่าโครงสร้างที่บริเวณตรงกลางแนวกวนจะมีการเกิดผลึกของโครงสร้างใหม่ที่มีความสลับซับซ้อนเนื่องจากการผสมผสานกันของเนื้อโลหะเดิมของอะลูมิเนียมผสมทั้งสองชนิด จากความผิดปกติของค่าความต้านทานแรงดึงที่ลดลงนั้น Lim *et al.* (2004) ก็ได้รายงานถึงกลไกความผิดปกติของค่าความต้านทานแรงดึงที่ลดต่ำลงเกี่ยวกับแนวเชื่อมของอะลูมิเนียมต่างชนิดกัน คือ อะลูมิเนียมผสมหล่อ A356 ที่ผ่านกระบวนการทางความร้อน T6 กับ AA 6061 ที่ผ่านการบ่มแข็งและดึงคลายความเค้น (T651) ด้วยกรรมวิธีการเชื่อมเสียดทานแบบกวน โดยใช้ตัวกวนรูปทรงกระบอก กำหนดความเร็วหมุนเชื่อมและความเร็วเดินเชื่อมให้คงที่ จากการทดสอบทำให้ทราบว่ากลไกที่ทำให้คุณสมบัติทางกลมีการเปลี่ยนแปลงนั้นมาจากการที่อนุภาคซิลิกอนแบบเข็มซึ่งมีการกระจายตัวทั่วบริเวณแนวเชื่อมตลอดทิศทางการเดินของตัวกวนนั้นมีส่วนในการก่อให้เกิดการขาด

ขึ้นจากการดึง เมื่อนำแนวเชื่อมไปทดสอบแรงดึงปรากฏว่าบริเวณที่เริ่มขาดของชิ้นทดสอบ จะเกิดขึ้นที่ขอบของอนุภาคซิลิกอนแบบเข็ม จากลักษณะพฤติกรรมของการขาดดังกล่าว สามารถสรุปได้ว่าลักษณะการแยกตัวของเนื้อวัสดุเป็นกลไกหนึ่งอันเป็นสาเหตุที่นำไปสู่ความผิดปกติของค่าความต้านทานแรงดึงที่ต่ำของแนวเชื่อมอะลูมิเนียมผสมต่างชนิดระหว่าง A356-T6 กับ AA 6061-T651 ทำนองเดียวกันผลการทดลองเชื่อมของ Lee *et al.* (2003a) ได้ศึกษาคุณสมบัติการเชื่อมอะลูมิเนียมต่างชนิดกัน (Dissimilar joint) โดยใช้กระบวนการเชื่อมเสียดทานแบบกวนระหว่างอะลูมิเนียมหล่อ A 356 กับอะลูมิเนียมรีด 6061 โดยใช้มุมเอียงระหว่างตัวกวนกับผิวชิ้นงานที่ 3 องศา หมุนไปในทิศทางตามเข็มนาฬิกา ใช้ความเร็วหมุนเชื่อมที่คงที่ในการเชื่อมคือ 1,600 rpm และได้มีการปรับเปลี่ยนความเร็วในการเดินเชื่อมอยู่ที่ค่าระหว่าง 87-267 mm/min จากการศึกษาพบว่าคุณสมบัติของแนวเชื่อมส่วนใหญ่จะขึ้นอยู่กับวัสดุที่ถูกกำหนดไว้ที่ด้านรีทริทติง เพราะโครงสร้างทางจุลภาคของแนวเชื่อมส่วนใหญ่จะประกอบด้วยวัสดุที่อยู่ด้านรีทริทติงเป็นหลัก เมื่อกำหนดให้อะลูมิเนียมรีด 6061 อยู่ด้านรีทริทติงสมบัติทางกลของแนวเชื่อมจะสูงกว่า เนื่องจากสมบัติทางกลเดิมของอะลูมิเนียมรีด 6061 จะสูงกว่าอยู่แล้วจึงสอดคล้องกัน คือ เมื่อเนื้อวัสดุของวัสดุที่มีสมบัติสูงกว่ามีปริมาณที่มากกว่าในบริเวณแนวเชื่อม ค่าความต้านทานแรงดึงก็ย่อมสูงขึ้นเช่นกัน ตรงกลางแนวเชื่อมจะมีลักษณะเป็นวงแหวนรีที่มีการเรียงตัวสลับกันเป็นชั้นๆ ของเนื้อวัสดุทั้งสองชนิด แนวเชื่อมไม่มีรูพรุนและรอยตำหนิปรากฏขึ้น อนุภาคของวัสดุแต่ละชนิดที่บริเวณรอยเชื่อมมีการหลอมรวมเข้าด้วยกัน คุณสมบัติทางกลของแนวเชื่อมจะขึ้นอยู่กับอะลูมิเนียมผสมที่อยู่ด้านรีทริทติง และผลการเชื่อมของ Ghosh *et al.* (2010) ที่ได้เชื่อมอะลูมิเนียมผสมที่ได้จากกระบวนการรีด (AA 6061) และการหล่อ (A 356) นั้น ปรากฏว่าการปรับเปลี่ยนความเร็วหมุนเชื่อมและความเร็วเดินเชื่อมจะส่งผลให้ความร้อนจากการเสียดทานระหว่างตัวกวนกับผิวชิ้นงานและอัตราการเย็นตัวมีการเปลี่ยนแปลงไปด้วย คุณลักษณะโครงสร้างของแนวเชื่อมที่เกิดขึ้นใหม่หลังจากการเชื่อม จะพบว่าโครงสร้างผลึกบริเวณแนวกวนจะเป็นโครงสร้างใหม่และมี Al-Si ยูเทคติกกระจายตัวที่บริเวณขอบเกรน ขนาดของเกรน AA 6061 มีความละเอียด ความเค้นตกค้างต่ำซึ่งช่วยให้การยึดเกาะของเนื้อวัสดุในบริเวณแนวเชื่อมมีความแข็งแรงขึ้น ผลของความเร็วหมุนเชื่อมและความเร็วเดินเชื่อมที่น้อย การเปลี่ยนแปลงจะเห็นแตกต่างได้เด่นชัดกว่า ดังนั้นรอยเชื่อมที่ได้จากตัวแปรเชื่อมที่ความเร็วหมุนเชื่อมและความเร็วเดินเชื่อมที่ต่ำ แสดงผลให้เห็นว่าการยึดเกาะของความแข็งแรงของแนวเชื่อมนี้มีค่าสูงกว่าที่ตัวแปรอื่น

อับดุล บินระหิม (2553) ได้ศึกษาการเชื่อมต่อชนอะลูมิเนียมหล่อกึ่งแข็ง SSM 356 ด้วยวิธีการเชื่อมเสียดทานแบบกวน โดยมีปัจจัยในการเชื่อมที่สามารถควบคุมได้ 2 ปัจจัย คือ ความเร็วหมุนเชื่อม มี 2 ระดับ คือ 1,320 และ 1,750 rpm และความเร็วเดินเชื่อม มี 3 ระดับ คือ 80,

120, 160 mm/min ความเร็วหมุนเชื่อม ความเร็วในการเดินเชื่อมและความสมดุลของแรงกดเป็นปัจจัยสำคัญที่จะทำให้ค่าความร้อนจากการเสียดทานระหว่างบ่าของตัวกวนกับผิวชิ้นงาน การเพิ่มความเร็วหมุนเชื่อมและความเร็วเดินเชื่อม ส่งผลให้ค่าความต้านทานแรงดึงสูงขึ้นด้วย จากการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคและการทดสอบสมบัติทางกลที่ความเร็วหมุนเชื่อม 1,750 rpm ความเร็วในการเดินเชื่อมที่ 160 mm/min ให้ความสมบูรณ์ของแนวเชื่อมดีที่สุดรวมทั้งค่าความต้านทานแรงดึงสูงขึ้นด้วย ส่วนที่ความเร็วรอบ 1,320 rpm ความร้อนจากการเสียดทานไม่เพียงพอทำให้เกิดช่องว่างบริเวณแนวเชื่อม จากผลที่ได้จากตัวแปรดังกล่าว ชงชัย เครือผือ และประภาส เมืองจันทร์บุรี (2553) ได้ทดลองเปลี่ยนลักษณะของรูปแบบตัวกวนระหว่างทรงกระบอกกับทรงสี่เหลี่ยม จากการรายงานพบว่าเกรนบริเวณที่ถูกกวนจะมีความละเอียด ค่าความต้านทานแรงดึงของตัวกวนรูปทรงกระบอกจะสูงกว่ารูปทรงสี่เหลี่ยม

นอกจากการเชื่อมอะลูมิเนียมต่างชนิดระหว่างเกรด 356 กับ 6061 แล้วยังมีผู้สนใจเชื่อมเกรดอื่นๆ อีกด้วย เช่น Moreira *et al.* (2008) ได้ศึกษาคูณลักษณะทางกลของแนวเชื่อมเสียดทานแบบกวนระหว่างอะลูมิเนียมหล่อผสม AA 6061 และอะลูมิเนียมหล่อผสม AA 6082 ซึ่งทั้งสองได้ผ่านกระบวนการทางความร้อน T6 ผลการทดลองที่ได้พบว่า ความแข็งของแนวเชื่อมที่ได้จะมีความสัมพันธ์กับลักษณะโครงสร้างทางจุลภาคของแนวเชื่อม โดยความแข็งโดยเฉลี่ยที่ตรงกลางแนวเชื่อมจะสูงกว่าบริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อนทางกล และความแข็งจะมีค่าเพิ่มสูงขึ้นเรื่อยๆ ไปจนถึงค่าความแข็งของเนื้อโลหะเดิม แต่ความแข็งโดยเฉลี่ยที่บริเวณตรงกลางแนวเชื่อมจะต่ำกว่า เมื่อเทียบกับค่าความแข็งเดิมของเนื้อโลหะเดิมทั้งสอง ซึ่งผลการรายงานดังกล่าวจะมีความสอดคล้องเช่นเดียวกันกับ Harris and Norman (2003) ที่ได้อธิบายความผันแปรของค่าความแข็งที่บริเวณตรงกลางแนวเชื่อมว่ามาจากความแตกต่างระหว่างโครงสร้างของแนวเชื่อมกับเนื้อโลหะเดิมที่เปลี่ยนแปลงขณะกวน ความแข็งของแนวเชื่อมที่ได้จากวัสดุต่างชนิดส่วนใหญ่จะต่ำกว่าความแข็งของเนื้อโลหะเดิม โดยที่ความแข็งที่ต่ำจะปรากฏขึ้นที่ด้านของอะลูมิเนียมหล่อผสม AA 6082 และจากการทดสอบความต้านทานแรงดึงของแนวเชื่อมจะพบว่าบริเวณที่ขาดจากการดึงนั้นจะตรงกับจุดเดียวกันกับที่ค่าความแข็งที่ต่ำ ลักษณะการกระจายของความแข็งที่ตรงกลางแนวเชื่อมจะมีความเหมือนกันหมดทุกแนวเชื่อม คือ จะมีค่าที่สูงกว่าบริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อนทางกลแต่จะมีความแข็งที่ต่ำกว่าเมื่อเทียบกับความแข็งของเนื้อโลหะเดิม

Kapranos *et al.* (2004) รายงานการเชื่อมโลหะอะลูมิเนียมกึ่งของแข็ง ที่ผ่านการขึ้นรูปด้วยกรรมวิธีทิกโซฟอร์มและรีโอคาสต์ พบว่าจุดสัมผัสของบ่าของตัวกวน และความยาวของตัวกวนที่อยู่ภายใต้บ่าจำเป็นต้องรักษาระยะของการแทรกซึมตามความลึกของตัวกวนที่ต้องการและควรให้ความสำคัญในการเลือกใช้ตัวกวน การเชื่อมเสียดทานแบบกวนของชิ้นส่วนอะลูมิเนียมอย่าง

มาก ผลจากการวิจัยแสดงให้เห็นว่าการเชื่อมเสียดทานแบบกวนมีศักยภาพและความเป็นไปได้สูงในการนำมาประยุกต์ใช้ในการเชื่อมชิ้นงานอะลูมิเนียมที่ได้จากการหล่อแบบกึ่งของแข็งทั้งที่ผลิตจากกรรมวิธีทิกโซฟอร์มและรีโอคาสต์ จากลักษณะรูปแบบของตัวกวนที่ Elangovan and Blasubramanian (2008) ได้ศึกษาวิจัยผลของรูปร่างของหัวพินและขนาดของบ่าต่อลักษณะของแนวเชื่อมในการเชื่อมเสียดทานแบบกวนของอะลูมิเนียมผสม AA6061 ปัจจัยในการเชื่อมที่สำคัญจะประกอบด้วย ความเร็วหมุนเชื่อมของตัวกวน แรงที่ใช้กดและลักษณะของตัวกวนที่มีผลต่อคุณภาพการเชื่อม การตรวจสอบผลการทดลองภายใต้อิทธิพลของตัวกวนตามลักษณะและเส้นผ่านศูนย์กลางที่ทำขึ้น สำหรับบริเวณที่ผ่านกระบวนการเสียดทานแบบกวนอะลูมิเนียมผสม AA 6061 ด้วยลักษณะของตัวกวน 5 ลักษณะ คือ ทรงกระบอก รูปกรวย เกลียวทรงกระบอก สามเหลี่ยมและสี่เหลี่ยม ซึ่งผลของโครงสร้างที่ได้จะมีความแตกต่างกัน ในการวิเคราะห์โครงสร้าง สมบัติทางกลของรอยต่อของแต่ละลักษณะตัวกวนตามดังกล่าว พบว่าตัวกวนที่มีลักษณะสี่เหลี่ยมมีข้อบกพร่องเกิดขึ้นในรอยเชื่อม นอกจากรูปแบบตัวกวนแล้วนี้ยังมีตัวแปรอื่นที่มีผลต่อคุณภาพแนวเชื่อม Sundaram and Murugan (2010) ได้ศึกษาพฤติกรรมแรงดึงของแนวเชื่อมวัสดุต่างชนิดระหว่าง AA 2024 และ AA5083 คุณภาพของแนวเชื่อมเสียดทานแบบกวนนั้น จะขึ้นอยู่กับตัวแปรเชื่อมหลักๆ ที่สำคัญดังนี้ เช่น รูปแบบของตัวกวน ความเร็วหมุนเชื่อม ความเร็วเดินเชื่อมและแรงกดของตัวกวนบนชิ้นงาน โดยตัวแปรที่กล่าวมาทั้งหมดนี้มีผลโดยตรงต่อคุณสมบัติทางกลของแนวเชื่อมอย่างมีนัยสำคัญ รูปแบบตัวกวนที่ใช้ในการทดลองมี 5 รูปแบบ ประกอบด้วย ทรงกระบอกมีบ่าร่อง หัวสี่เหลี่ยม หัวหกเหลี่ยม หัวเรียวยทรงรูปไข่ และรูปทรงกระบอก จากการทดลองผลของรูปแบบตัวกวนต่อคุณสมบัติแนวเชื่อมปรากฏว่า ตัวกวนรูปทรงหัวหกเหลี่ยม จะให้คุณสมบัติทางกลของแนวเชื่อมสูงกว่าตัวกวนที่มีรูปทรงแบบอื่นๆ เนื่องจากลักษณะตัวกวนรูปแบบดังกล่าวจะทำให้การไหลวนของเนื้อวัสดุที่เป็นจังหวะห้วงๆ (Pulsating) ที่ดีกว่า ส่งผลให้การผสานของเนื้อวัสดุสมบูรณ์กว่ารูปแบบอื่นๆ อิทธิพลของความเร็วหมุนเชื่อมกับความเร็วเดินเชื่อมจะพบว่าเมื่อความเร็วหมุนเชื่อมและความเร็วเดินเชื่อมมีค่าสูงขึ้น ค่าความแข็งแรงดึงของแนวเชื่อมจะเพิ่มสูงขึ้นถึงค่าๆ หนึ่ง เมื่อยังเพิ่มค่าความเร็วทั้งสองส่งผลให้ค่าความแข็งแรงดึงยิ่งลดลง เนื่องจากผลของความร้อนจากการเสียดทานนั้นจะมีมากและน้อยเกินไปตามลำดับ สำหรับอิทธิพลของแรงกดบนชิ้นงาน จะพบว่าเมื่อค่าแรงกดมากขึ้นส่งผลให้ค่าความแข็งแรงดึงสูงขึ้น และเมื่อถึงค่าๆ หนึ่งแล้วแรงกดที่เพิ่มจะทำให้ค่าความแข็งแรงดึงยิ่งลดลง เนื่องจากแรงกดที่มากเกินไปจะทำให้ตัวกวนไปกระทบกับแผ่นรองชิ้นงาน เนื้อวัสดุด้านล่างที่ติดกับแผ่นรองชิ้นงานจะไหลวนมากเกินไปไม่เป็นระเบียบ เนื้อวัสดุจะผสานกันไม่สมบูรณ์ส่งผลให้ค่าความแข็งแรงดึงต่ำ

บทที่ 2

ทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย

เพื่อให้การดำเนินงานวิจัยในครั้งนี้บรรลุตามวัตถุประสงค์ที่ได้วางไว้ ผู้วิจัยได้กำหนดเนื้อหาของทฤษฎีและหลักการต่างๆ ตลอดจนความรู้ทั่วไปที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยในครั้งนี้ ดังนี้

2.1 ทฤษฎีและความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับอะลูมิเนียม

2.1.1 สมบัติทั่วไปของอะลูมิเนียม

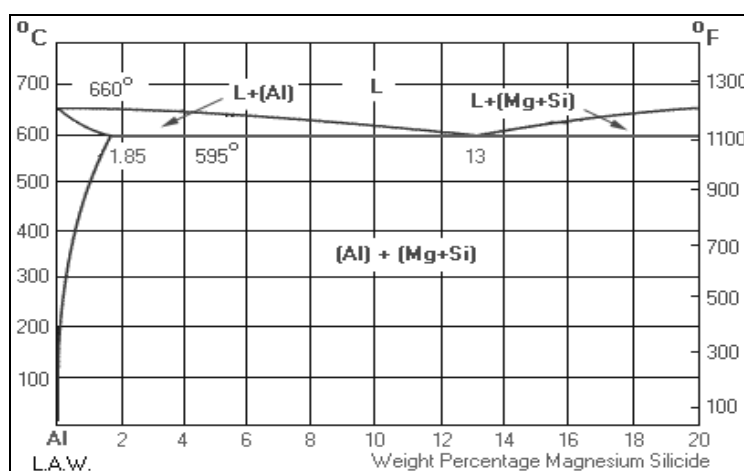
อะลูมิเนียมเป็น โลหะสำคัญที่ได้รับการใช้งานมากที่สุดในกลุ่มโลหะที่มีน้ำหนักเบา (Light Metals) ทั้งนี้เพราะอะลูมิเนียมมีสมบัติเด่นหลายประการ (พยูร เกตุกราย, 2523) เช่น มีความหนาแน่นน้อยและมีกำลังวัสดุต่อหน่วยน้ำหนักสูงจึงนิยมใช้ทำเครื่องใช้และชิ้นส่วนบางอย่างในเครื่องบิน จรวด และขีปนาวุธ สามารถขึ้นรูปด้วยกรรมวิธีต่างๆ ได้ง่าย จุดหลอมเหลวต่ำ หลอมง่าย และมีอัตราการไหลตัวสูง ค่าการนำไฟฟ้าไม่สูงมากนักแต่เนื่องจากน้ำหนักเบาจึงนิยมใช้เป็นตัวนำไฟฟ้า ไม่เป็นพิษต่อร่างกายมนุษย์ มีดัชนีในการสะท้อนกลับของแสงสูงมาก ทนทานต่อการเกิดสนิมและการกัดกร่อนในบรรยากาศใช้งานทั่วไปได้ดีมาก แต่ไม่ทนการกัดกร่อนต่อกรดและด่าง หาซื้อได้ง่ายและราคาไม่แพงมากนัก

2.1.2 สมบัติของอะลูมิเนียม-ซิลิกอน-แมกนีเซียมหล่อผสม

เป็นอะลูมิเนียมหล่อผสมที่ชุบแข็งได้ โดยผสมแมกนีเซียมในลักษณะแมกนีเซียมซิลิไซด์ (Mg_2Si) ใช้หล่อได้ทั้งแบบหล่อทรายและแบบหล่อถาวรที่เป็นเหล็กหรือบรอนซ์ กัดกัด เจาะ ได้ดีมาก และสามารถเชื่อมประสานได้ดี สมบัติทางกลดีมากโดยเฉพาะหากผ่านกระบวนการทางความร้อนโดยการอบชุบแบบ Solution Heat Treatment และเอจจิ้ง (Aging) อะลูมิเนียม-ซิลิกอน-แมกนีเซียมหล่อผสม เนื้อแน่นทนแรงอัดได้ดี สามารถชุบ Anodized ได้สีเทา มันสวยงามมาก อะลูมิเนียมหล่อผสมกลุ่มนี้ใช้กับงานประเภทที่ต้องการความแข็งแรงสูง เช่น อุตสาหกรรมยานอวกาศและชิ้นส่วนยานยนต์ และเหมาะสำหรับงานหล่อที่มีรูปร่างซับซ้อน ประณีต และความแข็งแรงสูง

แผนภาพสมดุล (Phase Diagram) ดังแสดงในภาพประกอบที่ 2.1 จากแผนภาพสมดุลสองธาตุอะลูมิเนียม-แมกนีเซียมซิลิไซด์ สามารถอธิบายได้ดังนี้

1. อะลูมิเนียมมีอุณหภูมิหลอมละลายที่ 660°C
2. แมกนีเซียมซิลิไซด์จะละลายในอะลูมิเนียมได้สูงสุดที่ 1.85% ที่อุณหภูมิ 595°C
3. เกิดปฏิกิริยายุทเทคติกที่ 13% แมกนีเซียมซิลิไซด์ และที่อุณหภูมิ 595°C ดังนั้น ได้เส้นอุณหภูมิ 595°C หรืออุณหภูมियุทเทคติก จะให้ของแข็งสองชนิด คือ อะลูมิเนียม (Al) ผสมกับแมกนีเซียมซิลิไซด์ (Mg_2Si)



ภาพประกอบที่ 2.1 แผนภาพสมดุลสองธาตุ อะลูมิเนียม-แมกนีเซียมซิลิไซด์
(ที่มา: http://www.aluminiumlearning.com/html/index_c3xx_x.html)

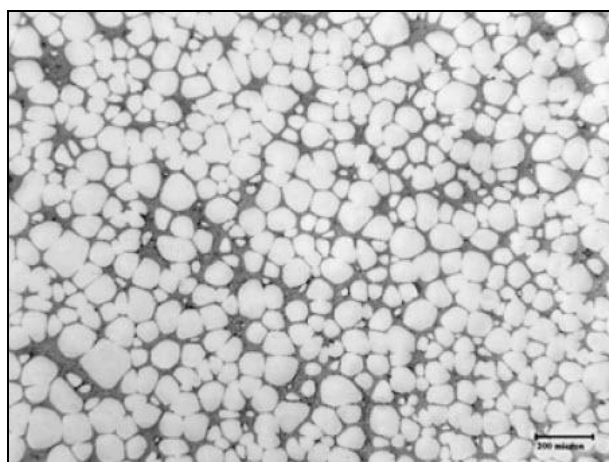
2.1.3 อะลูมิเนียมหล่อหมายเลข A356

อะลูมิเนียมหล่อหมายเลข A356 เป็นโลหะผสมอะลูมิเนียม-ซิลิกอน เป็นแบบไฮโปยูเทคติกสามารถหล่อได้ดีทั้งในแบบหล่อทรายและแบบหล่อโลหะ มีความสามารถในการไหลตัวได้ดีและการหดตัวน้อยมาก ซึ่งมีผลทำให้สมบัติการต้านแรงดึงสูงขึ้นและมีความอ่อนเหนียวมากขึ้น การยึดตัวสูง ทนต่อแรงกระแทกได้สูง ส่วนผสมทางเคมีของอะลูมิเนียมผสมหมายเลข A356 เป็น Al, 7% Si, 0.35% Mg, 0.20% Fe, 0.20% Cu, 0.10% Mn, 0.10% Zn และ 0.23% Ti การเติมแมกนีเซียมลงไปเล็กน้อย ทำให้สามารถปรับปรุงสมบัติทางกลด้วยกรรมวิธีทางความร้อนได้ดี โดยการฟอร์มเฟส Mg_2Si ในเมตริกซ์ของอะลูมิเนียม กระบวนการทางความร้อนที่ใช้เพื่อปรับปรุงสมบัติทางกลมีอยู่หลายวิธี แต่ที่นิยมใช้มากที่สุด ได้แก่ ชนิด T6 คือ การนำชิ้นงานไปอบละลายแล้ว

นำไปสูบน้ำจากนั้นจึงนำไปทำการบ่มแข็งเทียม การนำไปใช้งานเหมาะที่สุดกับงานที่ต้องการความทนทานต่อการผุกร่อนและความแข็งแรงสูง ใช้งานอย่างกว้างขวางกับอุตสาหกรรมผลิตอุปกรณ์และชิ้นงานยานยนต์ต่างๆ

2.1.4 การหล่อโลหะแบบกึ่งของแข็ง (Semi-Solid Metal Casting)

การหล่อโลหะแบบกึ่งของแข็ง (Semi-Solid Metal Casting) จากในอดีตที่มีการค้นพบเป็นครั้งแรกในช่วงต้นปี ค.ศ.1970 โดย Spencer และ Flemings ที่สถาบันเทคโนโลยีแห่งรัฐแมสซาชูเซตส์ (Massachusetts Institute of Technology, MIT) (Spencer, 1971) จนถึงปัจจุบันก็นับเป็นเวลาเกือบ 40 ปีแล้วที่ได้มีการวิจัยและพัฒนากันมาตลอดระยะเวลาที่ผ่านมา โดยการหล่อโลหะแบบกึ่งของแข็งนี้เป็นการขึ้นรูปโลหะด้วยการหล่อในขณะที่โลหะอยู่ในสถานะกึ่งแข็งกึ่งเหลว (Mushy State) ซึ่งโลหะจะมีการแข็งตัวเป็นบางส่วน โดยโลหะส่วนที่แข็งตัวแล้วจะมีโครงสร้างเกรนไม่เป็นเดนไดรติก (Non-Dendritic Grain) หรือบางที่เรียกว่าเกรนแบบก้อนกลม (Spheroidal หรือ Globular Grain) ดังแสดงในภาพประกอบที่ 2.2

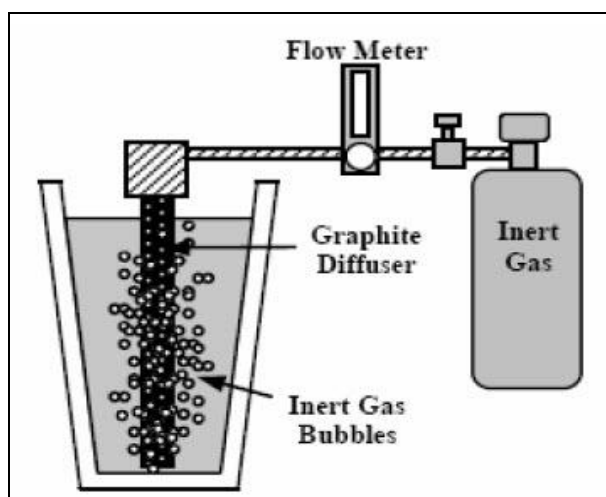


ภาพประกอบที่ 2.2 ลักษณะเกรนแบบก้อนกลม (Wannasin, 2006)

2.1.5 กรรมวิธีการผลิตโลหะกึ่งของแข็งโดยการฟุ้งองแก๊สขณะแข็งตัว (Gas Induced Semi-Solid, GISS Process)

ปัจจุบันมีการวิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีการผลิตโลหะกึ่งของแข็งแบบใหม่ขึ้นในประเทศไทย นำโดย ผศ.ดร.เจษฎา วรรณสินธุ์ อาจารย์และนักวิจัยจากภาควิชาวิศวกรรมเหมืองแร่และวัสดุ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ โดยมีที่ปรึกษาจากสหรัฐอเมริกาหลายคน รวมทั้ง Prof.

Merton Flemings จาก MIT กำลังวิจัยและพัฒนากรรมวิธีรีโอบาคติงแบบใหม่ ภายใต้การสนับสนุนของโครงการสมองไหลกลับ สวทช. ซึ่งได้ยื่นจดสิทธิบัตรในประเทศและในต่างประเทศแล้ว โดยกระบวนการนี้จะใช้การฟุ้งฟองแก๊สเฉื่อย เช่น แก๊สอาร์กอนหรือไนโตรเจน ผ่านแท่งกราไฟต์พูนในปริมาณที่น้อยมากให้ไหลลงไปในน้ำโลหะเพื่อผลิตโลหะกึ่งของแข็ง โดยใช้หลักการเคลื่อนย้ายของน้ำโลหะและการดูดความร้อนเฉพาะจุด ซึ่งวิธีการนี้ฟุ้งแก๊สจะเป็นตัวกลางในการกวนและแท่งกราไฟต์พูนจะเป็นตัวดูดระบายความร้อน ดังแสดงในภาพประกอบที่ 2.3 และเรียกกรรมวิธีแบบใหม่นี้ว่ากระบวนการ Gas Induced Semi-Solid หรือเรียกสั้นๆ ว่า กระบวนการ GISS ซึ่งผลจากการวิจัยและพัฒนากระบวนการที่ผ่านมา แสดงให้เห็นว่าเทคนิคนี้สามารถผลิตโลหะกึ่งของแข็งที่มีโครงสร้างเกรนแบบก้อนกลมได้ คุณสมบัติของโลหะกึ่งของแข็งมีหลายประการ เช่น มีอุณหภูมิที่ต่ำกว่าโลหะเหลว โลหะเริ่มแข็งตัวบางส่วนแล้วขณะเทใส่แม่พิมพ์มีความหนืดที่สูงกว่าน้ำโลหะ มีความเค้นขณะไหลต่ำกว่าโลหะที่แข็งตัวแล้ว เป็นต้น ซึ่งคุณสมบัติดังกล่าวมีข้อดีหลายประการที่สามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้อย่างหลากหลายในกระบวนการผลิต เช่น ลดการเกิดของเสียจากปฏิกิริยาระหว่างออกซิเจนในขั้นตอนการหล่อโลหะลงในเบ้าและลดการเกิดโพรงหดตัว (Shrinkage) อีกทั้งยังช่วยยืดอายุการใช้งานของแม่พิมพ์ได้อีกด้วย



ภาพประกอบที่ 2.3 กรรมวิธีผลิตโลหะกึ่งของแข็งแบบใหม่ด้วยกระบวนการ GISS

(Wannasin *et al.*, 2006)

2.1.6 อะลูมิเนียมรีดผสม AA 6061-T651

อะลูมิเนียมผสม AA 6061 เป็นโลหะผสมของอะลูมิเนียมที่มีแมกนีเซียมและซิลิกอนเป็นส่วนผสมสำคัญ สามารถเพิ่มความแข็งแรงได้ด้วยการผ่านกระบวนการบ่มแข็งและดึง

เพื่อคลายความเค้นตามกระบวนการ T651 (Solution heat treatment 532°C follow by quenching, Annealing 414°C 2-3 hours, Aging 177°C 8 hours) เพื่อให้ได้ความแข็งแรงสูงสุด อะลูมิเนียมผสมชนิดนี้นิยมใช้งานที่ต้องการทั้งความแข็งแรงสูงร่วมกับความต้านทานต่อการกัดกร่อนที่ดีเยี่ยม เช่น งานแม่พิมพ์เป่าพลาสติก งาน โครงสร้างอาคาร (หมุดยึด) ราวสะพาน งานท่อขนส่ง สกีของเครื่องบินน้ำและเรือแคนู ท่อดูดของเครื่องดูดฝุ่น รางเลื่อนของรถยนต์ของ อุปกรณ์จับยึดชิ้นงาน งานทางไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ รวมทั้งงานในยานพาหนะต่างๆ เช่น เรือ รถบรรทุก และอากาศยาน เป็นต้น

สมบัติทั่วไปของอะลูมิเนียมผสม AA 6061-T651

สมบัติทางฟิสิกส์ (Physical Properties)

- ความหนาแน่น (g.cm ⁻³)	2.7
- อุณหภูมิหลอมเหลว (°C)	580-650
- การนำความร้อน ที่ 20°-100°C (W.m ⁻¹ .K ⁻¹)	150-170
- สัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนระหว่าง 20°-100°C (μm.m ⁻¹ .K ⁻¹)	23.6
- การนำไฟฟ้า ที่ 20°-100°C (m.Ω ⁻¹ .mm ⁻²)	24-26
- โมดูลัสของการยืดหยุ่น ที่ 20°-100°C (10 ³ N.mm ⁻²)	69

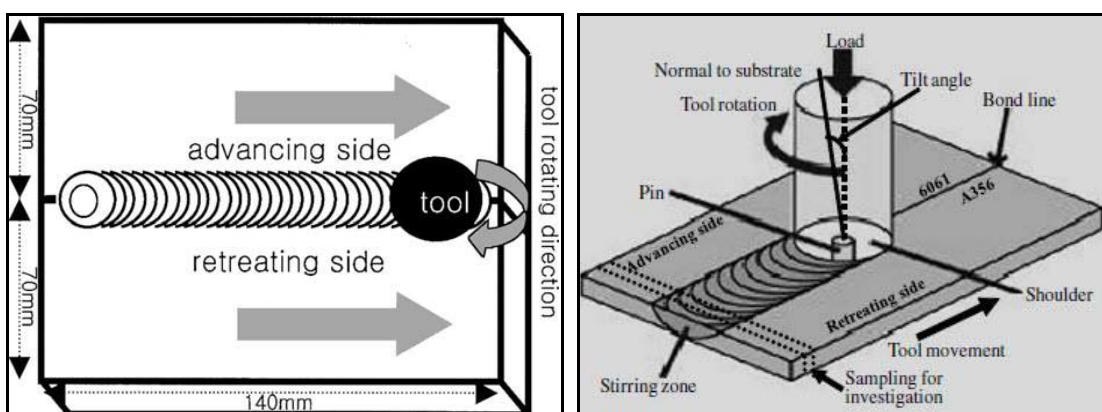
สมบัติทางกล (Mechanical Properties)

- Tensile strength (MPa)	≥ 290
- Yield strength (MPa)	≥ 240
- Shear strength (MPa)	≥ 190
- Elongation (%)	≥ 10
- Hardness (HB)	≥ 90

2.2 กระบวนการเชื่อมเสียดทานแบบกวน (Friction Stir Welding Process; FSWP)

กระบวนการเชื่อมเสียดทานแบบกวนเป็นการเชื่อมโลหะในสถานะของแข็ง โดยโลหะยึดติดกันที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิหลอมเหลวของโลหะนั้น โดยที่โลหะยังอยู่ในสถานะกึ่งของแข็ง โลหะบางประเภทจะหลีกเลี่ยงการเชื่อมต่อที่อุณหภูมิของการหลอมละลาย เนื่องจากที่อุณหภูมิหลอมละลายเมื่อโลหะแข็งตัว จะเกิดโครงสร้างขึ้นมาใหม่ ซึ่งจะแตกต่างจากโครงสร้างเริ่มต้นของโลหะนั้น จากเหตุผลข้างต้น จึงได้มีการคิดค้นการเชื่อมเสียดทานแบบกวน ที่สถาบันการเชื่อมของอังกฤษ (The Welding Institute) การเชื่อมเสียดทานแบบกวนจัดเป็นการเชื่อมใน

สถานะของแข็งซึ่งโลหะจะเชื่อมติดกัน โดยความร้อนจากแรงเสียดทาน โดยที่บ่าสัมผัสแผ่นงานและหมุนด้วยความเร็วหมุนเชื่อมตามที่กำหนดพร้อมกับความเร็วเดินเชื่อม และแรงกดในขณะที่เชื่อม การเชื่อมเสียดทานแบบกวนมีตัวแปรสำคัญที่เกี่ยวข้องในการเชื่อม คือ แรงกด (Down force) ความเร็วหมุนเชื่อม ความเร็วเดินเชื่อมและมุมเอียงของตัวกวน (Tilt Angle) ดังแสดงในภาพประกอบที่ 2.4



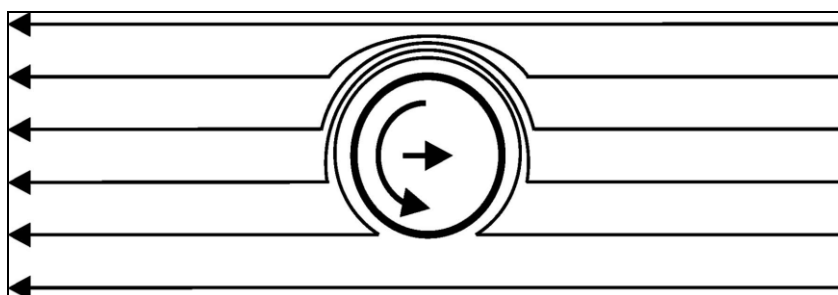
ภาพประกอบที่ 2.4 กระบวนการเชื่อมเสียดทานแบบกวน (Lee *et al.*, 2003 (ซ้าย); Ghosh *et al.*, 2010 (ขวา))

การเชื่อมเสียดทานแบบกวนนั้นแนวเชื่อมจะเกิดจากการเคลื่อนที่ของตัวกวนหรือชิ้นงานก็ได้ จากภาพประกอบที่ 2.4 (ซ้าย) จะเป็นกรณีที่ชิ้นงานมีการเคลื่อนที่ โดยจะเรียกวัดูดที่อยู่ด้านทิศทางการหมุนของตัวกวนและทิศทางการเคลื่อนที่ในการเชื่อมไปในทิศทางตรงข้ามกันว่าด้านแอดวานซิง ส่วนวัดูดที่อยู่ด้านทิศทางการหมุนของตัวกวนและทิศทางการเคลื่อนที่ในการเชื่อมไปในทิศทางเดียวกันจะเรียกว่าด้านรีทริทติง ส่วนกรณีที่ตัวกวนมีการเคลื่อนที่ดังภาพประกอบที่ 2.4 (ขวา) จะเรียกวัดูดที่อยู่ด้านทิศทางการหมุนของตัวกวนและทิศทางการเคลื่อนที่ในการเชื่อมไปในทิศทางตรงข้ามกันว่าด้านรีทริทติง ส่วนวัดูดที่อยู่ด้านทิศทางการหมุนของตัวกวนและทิศทางการเคลื่อนที่ในการเชื่อมไปในทิศทางเดียวกันจะเรียกว่าด้านแอดวานซิง ตามลำดับ

การเชื่อมเสียดทานแบบกวนของอะลูมิเนียมผสมมีข้อดีหลายประการเมื่อเทียบกับการเชื่อมแบบหลอมละลาย เช่น สามารถหลีกเลี่ยงการแตกในระหว่างแข็งตัวของเหลวไปเป็นของแข็งและปัญหาการเกิดโพรงอากาศ (Porosity) โดยเฉพาะกับอะลูมิเนียมผสมที่หล่อโดยวิธีไดคาสติง เนื่องจากการเชื่อมเสียดทานแบบกวนเป็นการเชื่อมในสถานะของแข็ง นอกจากนี้โลหะบางประเภทจะไม่สามารถเชื่อมด้วยกรรมวิธีการเชื่อมแบบหลอมละลายได้ ดังนั้นการเชื่อมเสียดทาน

แบบกวน จึงเหมาะสมเป็นอย่างมาก โดยทั่วไปชิ้นงานที่ผ่านการเชื่อมเสียดทานแบบกวนจะมีความเค้นตกค้าง (Residual Stress) และการบิดงอ (Distortion) น้อยกว่าการเชื่อมแบบหลอมละลาย ความเค้นตกค้างที่น้อยกว่าเป็นผลมาจากความร้อนเข้าจากการเชื่อมเสียดทานแบบกวนมีค่าน้อยกว่าการเชื่อมแบบหลอมละลาย การเชื่อมเสียดทานแบบกวนได้ถูกประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมสำหรับอะลูมิเนียมผสมในกลุ่ม 1xxx 2xxx 5xxx 6xxx และ 7xxx รวมถึงอะลูมิเนียมผสม Al-Si-Li (Linert *et al.*, 2003)

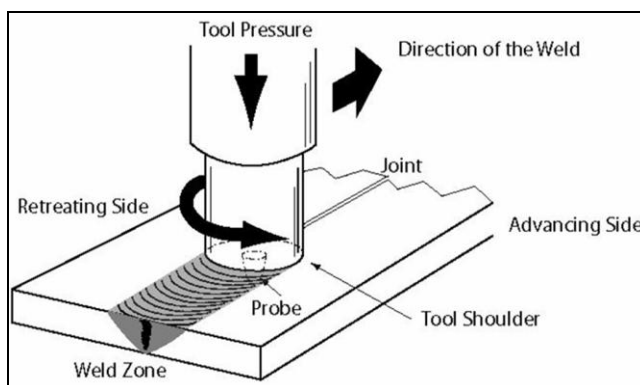
การเชื่อมเสียดทานแบบกวน ทิศทางและการเคลื่อนที่ของเครื่องมือ เมื่อปาดสัมผัสแผ่นงาน เกิดการเสียดทานก่อให้เกิดความร้อนและเนื้อโลหะอยู่ในสถานะที่เป็นกึ่งของแข็ง การไหลวนของโลหะกึ่งของแข็งรอบตัวกวน ขณะที่เครื่องมือหมุนด้วยความเร็วรอบ และเคลื่อนที่ด้วยความเร็วในการเชื่อม ทำให้เนื้อโลหะประสานติดกันด้วยการกวน ดังแสดงในภาพประกอบที่ 2.5



ภาพประกอบที่ 2.5 ทิศทางและการกวนของตัวกวน (Linert *et al.*, 2003)

2.2.1 องค์ประกอบในการเชื่อมเสียดทานแบบกวน

จากการรายงานของ Santella *et al.* (2005) องค์ประกอบและปัจจัยในกระบวนการเชื่อมที่ทำให้วัสดุสามารถเชื่อมต่อกันได้มีดังนี้ ปัจจัยนำเข้า จะประกอบด้วยความเร็วหมุนเชื่อมของ Tool และความเร็วเดินเชื่อม ลักษณะของตัวกวนเป็นปัจจัยหนึ่งที่มีผลต่อคุณภาพแนวเชื่อม ในการเชื่อมเสียดทานแบบกวน ขณะที่ทำการเชื่อมจะมีแรงกดเกิดขึ้นในแนวแกนที่มาจากแรงเอียงของตัวกวนกระทำกับชิ้นงานเมื่อตัวกวนและปาดสัมผัสกับผิวชิ้นงานจะเกิดความร้อน ซึ่งความร้อนที่เกิดขึ้นจะขึ้นอยู่กับลักษณะของตัวกวน ความเร็วหมุนเชื่อม และความเร็วเดินเชื่อม ทำให้เกิดการไหลวนของเนื้อวัสดุทั้งสองชิ้นจนติดประสานกันเป็นแนวเชื่อมขึ้น หลังจากเชื่อมแนวเชื่อมจะประกอบด้วยบริเวณที่ถูกกวน บริเวณเขตที่ได้รับผลกระทบจากความร้อนทางกล และเนื้อเชื่อม ภาพประกอบที่ 2.6 จะเป็นองค์ประกอบในการเชื่อมเสียดทานแบบกวน



ภาพประกอบที่ 2.6 องค์ประกอบของการเชื่อมเสียดทานแบบกวน (Santella *et al.*, 2005)

2.2.2 ความร้อนจากการเสียดทานแบบกวน

ความร้อนจากการเสียดทานทางกล และข้อบกพร่องในการเชื่อมเสียดทานแบบกวน จากความสัมพันธ์ของความเร็วรอบ ความเร็วในการเชื่อม และแรงกดก่อให้เกิดความร้อน และข้อบกพร่องในงานเชื่อม ผลจากความร้อนที่มากหรือน้อยเกินไป และจากความผิดปกติของการกวน ที่ความเร็วรอบและความเร็วในการเชื่อมสูง เป็นสาเหตุทำให้เกิดความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิ บริเวณผิวด้านบนและส่วนที่ถูกกวน เพราะผลของข้อบกพร่อง ทำให้เกิดช่องว่างในรอยเชื่อม อย่างไรก็ตาม ข้อบกพร่องที่เกิดขึ้นมีความแตกต่างกันอย่างชัดเจนระหว่างความร้อนที่ไม่เพียงพอ และความผิดปกติในการกวน (Kim *et al.*, 2006b) ดังนั้น ความแตกต่างของข้อบกพร่อง ขึ้นอยู่กับสถานะของการเสียดทาน มวลของครีปที่เกิดขึ้นมาก เกิดจากความร้อนที่มากเกินไป ช่องว่างที่เกิดขึ้นความร้อนที่ไม่สมดุล จากการกวนที่ผิดปกติ ข้อบกพร่องเพียงเล็กน้อย แรงกดของเครื่องมือสามารถทำให้ช่องว่างลดลงโดยการเพิ่มแรงกด

สมการความร้อนที่เกิดขึ้นกับกระบวนการเชื่อมเสียดทานแบบกวนจะมีความสัมพันธ์ตามสมการที่ 2.1 ดังนี้

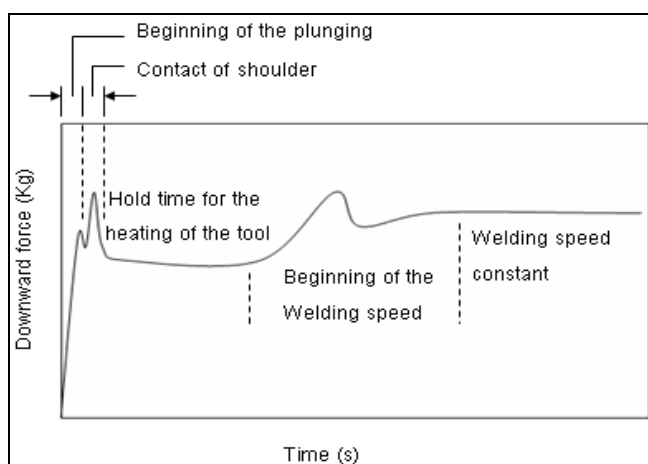
$$Q = \frac{4\phi^2 \zeta \sigma PNR^3}{3V} \dots\dots\dots(2.1)$$

- เมื่อ Q คือ ปริมาณความร้อนที่ชิ้นงานได้รับ (J/mm)
 σ คือ สัมประสิทธิ์ของการเสียดทานทางกล
 ζ คือ ประสิทธิภาพของการส่งถ่ายความร้อน

P	คือ แรงกด (N)
N	คือ ความเร็วหมุนเชื่อม (rpm)
R	คือ รัศมีของบ่า (mm)
V	คือ ความเร็วเดินเชื่อม (mm/min)

2.2.3 แรงกดของเครื่องมือ

แรงกดที่เกิดขึ้นขณะทำการเชื่อมสามารถวัดค่าได้ด้วย Load Cell เพื่อให้ทราบพฤติกรรมของแรงกดที่เกิดขึ้นในกระบวนการเชื่อมเสียดทานแบบกวน มีแรงเพิ่มขึ้นสามช่วง ช่วงแรกเป็นการเพิ่มแรงกดในช่วงเริ่มต้นของการเชื่อมจนบ่าสัมผัสแผ่นงาน ช่วงที่สองเป็นการเพิ่มแรงกดขณะทำการเชื่อมก่อนเดินแนวเชื่อม ช่วงที่สามแรงกดจากความเร็วในการเดินแนวเชื่อม ซึ่งเป็นแรงกดที่เกิดขึ้นนอกเหนือการควบคุม (Munich, 2006) ดังแสดงในภาพประกอบที่ 2.7



ภาพประกอบที่ 2.7 ค่าแรงกดที่เกิดจากการเชื่อม FSW ในแต่ละช่วงขณะทำการเชื่อม

(Munich, 2006)

2.3 เครื่องจักรกลแบบอัตโนมัติ

2.3.1 ระบบซีเอ็นซี

เครื่องจักรกลซีเอ็นซี (CNC) ย่อมาจากคำว่า Computerized Numerical Control Machine หมายถึง เครื่องจักรกลที่ควบคุมการทำงานด้วยระบบคอมพิวเตอร์ ซึ่งรับคำสั่งเป็น โค้ดตัวเลขและตัวอักษร โดยได้รับการพัฒนามาจากระบบเอ็นซี เครื่องจักรกลซีเอ็นซีเป็นเครื่องจักรกล

การผลิตที่เข้ามาทดแทนเครื่องจักรกลแบบธรรมดาที่ใช้มนุษย์ควบคุม โดยเฉพาะงานที่มีความ สลับซับซ้อน มีความเที่ยงตรงสูง และมีความรวดเร็ว

การควบคุมด้วยระบบเอ็นซีนี้เกิดขึ้นครั้งแรกเมื่อปี ค.ศ.1947 โดยนักวิทยาศาสตร์ ของสถาบันเทคโนโลยีแห่งรัฐแมสซาชูเซตส์ (Massachusetts Institute of Technology, MIT) และ จอห์น พาสัน (John Pason) ซึ่งมีแนวความคิดที่จะสร้างเครื่องจักรชนิด 3 แกนขึ้น จึงได้นำเสนอ แนวความคิดดังกล่าวกับกองทัพอากาศสหรัฐอเมริกา ในปี ค.ศ.1948 ขณะนั้นกองทัพอากาศ สหรัฐอเมริกามีความต้องการเครื่องจักรที่มีความแม่นยำสูง เพื่อใช้งานในการผลิตชิ้นส่วนต่างๆ ด้วยเช่นกัน จนกระทั่งในปี ค.ศ.1949 จอห์น พาสัน (John Pason) ได้รับเงินสนับสนุนในการวิจัย เพื่อสร้างเครื่องจักรกลที่มีการควบคุมด้วยระบบเอ็นซี จากกองทัพอากาศสหรัฐอเมริกาเป็นจำนวน 200,000 ดอลลาร์ โดยโครงการนี้ใช้ระยะเวลาทั้งสิ้น 21 เดือน

กระทั่งปี ค.ศ.1952 เครื่องจักรที่ควบคุมด้วยระบบเอ็นซีเครื่องแรกก็ถูกสร้างเสร็จ สมบูรณ์ โดยใช้ชื่อว่า Cincinnati Hydrotel Vertical-Spindle Milling Machine หลังจากสร้างเครื่อง เอ็นซีเสร็จสมบูรณ์แล้วในปี ค.ศ.1954 สถาบัน MIT ได้มีการวิจัยและพัฒนาภาษาคอมพิวเตอร์ที่ใช้ สำหรับเขียนโปรแกรมเอ็นซี โดยเรียกชื่อว่า Automatically Programmed Tool (APT) ซึ่งภาษา APT นี้จะเป็นภาษาคอมพิวเตอร์ที่ใช้เขียนโปรแกรมสำหรับควบคุมการทำงานของเครื่องจักรในระบบ เอ็นซีโดยเฉพาะ และนอกจากนี้แล้วภาษา APT ยังช่วยทำหน้าที่คำนวณค่าต่างๆ เพื่อให้ได้ตำแหน่ง ที่ถูกต้องของชิ้นงานอีกด้วย

ลักษณะของภาษา APT นี้จะแบ่งคำสั่งออกเป็น 3 กลุ่ม คือ

1. กลุ่มคำสั่งที่เกี่ยวข้องกับการกำหนดรูปทรงเรขาคณิตของชิ้นงาน (Geometric statement)
2. กลุ่มคำสั่งที่เกี่ยวข้องกับการเคลื่อนที่ของเครื่องมือตัด (Cutter motion statement)
3. ชุดคำสั่งที่เกี่ยวข้องกับการแปลงคำสั่ง (Postprocessor statement)

ปี ค.ศ.1970 ได้มีการสร้างชุดควบคุมการทำงานของเครื่อง (MCU) ขึ้นเป็นครั้งแรก โดยใช้ชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์เข้ามาแทนระบบท่อสุญญากาศ และควบคุมการทำงานของเครื่องด้วย คำสั่งที่ถูกเก็บไว้ในเทปกระดาษเจาะรู หลังจากนั้นเครื่องเอ็นซีก็ได้รับการพัฒนามาเรื่อยๆ จากการ บันทึกลับคำสั่งไว้ในกระดาษเจาะรูมาเป็นการบันทึกไว้ในไมโครคอนโทรลเลอร์ (Micro Controller)

เครื่องซีเอ็นซี (CNC Machine) จะมีชุดควบคุมคอมพิวเตอร์ที่สามารถเข้าใจตัวเลข และตัวอักษรหรือโปรแกรมที่ป้อนเข้าไป และในขณะเดียวกันจะใช้ชุดควบคุมคอมพิวเตอร์สำหรับการ ควบคุมเครื่องจักรจากคำสั่งหรือโค้ดในโปรแกรมที่ป้อนเข้าไป การป้อนโปรแกรมดังกล่าว

สามารถป้อนได้ โดยใช้แป้นพิมพ์ (Keyboard) สื่อบันทึกความจำ เช่น แผ่นดิสก์ เทปแม่เหล็กและ เทปกระดาษ และระบบสายสื่อสารเชื่อมโยงข้อมูล เช่น RS232, RS485 และระบบ LAN เป็นต้น

เครื่องจักรกลซีเอ็นซีมีองค์ประกอบ 3 ส่วนด้วยกัน ได้แก่

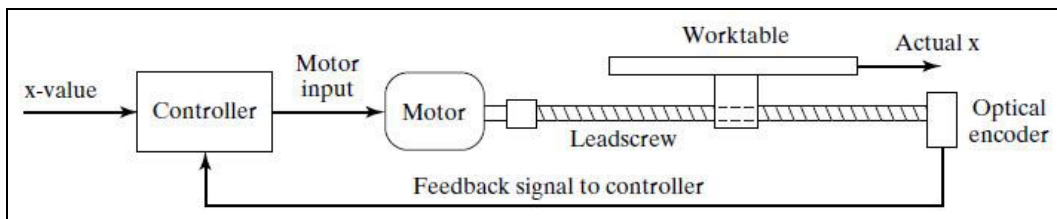
1. **ชุดควบคุม** เครื่องจักรกลซีเอ็นซีจะมีระบบคอมพิวเตอร์ที่สามารถจัดเก็บ โปรแกรม (Memory) และแก้ไขตัดแปลงโปรแกรมได้ คอมพิวเตอร์เข้าใจโปรแกรมที่ป้อนเข้าไป และทำการควบคุมเครื่องจักรให้ทำงานตามคำสั่งในโปรแกรมหดดังกล่าว โดยชุดควบคุมจะ ประกอบด้วยแผงควบคุม (Control panel) จอภาพ (Monitor) แป้นพิมพ์ (Keyboard หรือ Keypad) และปุ่มสวิตช์ควบคุมต่างๆ เช่น ความเร็วฟีด (Feed) และความเร็วสปินเดิล (Spindle) เป็นต้น

2. **กลไกการเคลื่อนที่** ได้แก่ ฟีดมอเตอร์ (Feed motor) โดยทั่วไปใช้เซอร์โว มอเตอร์ (Servo motor) ในการควบคุมการเคลื่อนที่ของแกนต่างๆ โดยมีบอลสกรู (Ball screw) แปลงการเคลื่อนที่เชิงมุม (Angular motion) เป็นการเคลื่อนที่เชิงเส้น (Linear motion) โดยตำแหน่ง และระยะการเคลื่อนที่จะถูกควบคุมโดยการรับสัญญาณจากคอนโทรลเลอร์ นอกจากนี้ยังมีรางนำ เลื่อน (Guide way) รองรับการเคลื่อนที่ของแกนต่างๆ

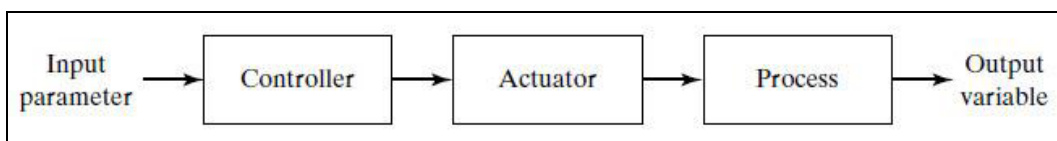
3. **ตัวเครื่องจักร** คือ โครงสร้างที่ประกอบเป็นรูปร่างที่เหมาะสมสำหรับการทำงานตามประเภทของเครื่องจักรนั้นๆ ตัวเครื่องจักรมีส่วนประกอบหลัก เช่น แท่นเครื่อง (Machine base) โต๊ะจับยึดชิ้นงาน (Table-สำหรับงานกัด) ชุดสปินเดิล (Spindle) และมอเตอร์สปินเดิล (Spindle motor) เป็นต้น

2.3.1.1 การจำแนกประเภทของเครื่องซีเอ็นซี

เครื่องซีเอ็นซีสามารถจำแนกตามลักษณะการเคลื่อนที่ของเครื่องมือตัดได้ 2 ประเภท คือ แบบจุดต่อจุด (Point-to-Point) และแบบเส้นทางเดินต่อเนื่อง (Continuous path) ซึ่ง จำแนกตามลักษณะการควบคุมได้เป็นลูปปิด (Closed-loop) และลูปเปิด (Open-loop) ดังแสดงใน ภาพประกอบที่ 2.8 และ 2.9 ตามลำดับ จำแนกตามระบบแหล่งจ่ายต้นกำลังได้เป็น ระบบไฟฟ้า (Electric) ระบบไฮดรอลิก (Hydraulic) และระบบนิวเมติกส์ (Pneumatic) และจำแนกตามระบบ พิกัดตำแหน่งได้เป็น ระบบพิกัดสัมบูรณ์ (Absolute) และระบบพิกัดต่อเนื่อง (Incremental)



ภาพประกอบที่ 2.8 ลักษณะการควบคุมแบบลูปปิด (Closed-loop) (ที่มา : วนิตา รัตนมณี, 2545)



ภาพประกอบที่ 2.9 ลักษณะการควบคุมแบบลูปเปิด (Open-loop) (ที่มา : วนิตา รัตนมณี, 2545)

2.3.1.2 พื้นฐานการควบคุมการเคลื่อนที่และการตรวจสอบการเคลื่อนที่ของเครื่องซีเอ็นซี (Basic of motion control and feedback for CNC machine)

เครื่องซีเอ็นซีสมัยใหม่ส่วนใหญ่ใช้เซอร์โวมอเตอร์ในการขับเคลื่อนและควบคุมระบบเป็นแบบลูปปิดซึ่งมีเอ็นโค้ดเดอร์เป็นอุปกรณ์ตรวจสอบสัญญาณและตำแหน่งการเคลื่อนที่ของโต๊ะงาน นอกจากนี้สัญญาณ feedback ยังควบคุมความเร็วของการเคลื่อนที่อีกด้วย ดังแสดงในภาพประกอบที่ 2.10



ภาพประกอบที่ 2.10 ลักษณะของเอ็นโค้ดเดอร์ (ที่มา: Mfg Engg & Tech, Kalpakjian)

2.3.2 เครื่องกัดระบบซีเอ็นซี

เครื่องกัดแบบดั้งเดิมมีการออกแบบโครงสร้างตามลักษณะการใช้งาน 2 ลักษณะ คือ เครื่องกัดแนวตั้ง (Vertical milling machine) และเครื่องกัดแนวนอน (Horizontal milling

machine) โดยทั้งสองอาศัยหลักการทำงานที่ให้เครื่องมือตัด (Cutting tool) หมุนตัดชิ้นงานในส่วนที่ไม่ต้องการออกให้ได้รูปร่างและขนาดตามที่ต้องการ โดยทั่วไปเครื่องกัดจะมีแนวแกนการเคลื่อนที่ 3 แนวแกน คือ แกน X แกน Y และแกน Z

เครื่องกัดซีเอ็นซี (CNC milling machine) และเครื่องแมชชีนนิ่งเซ็นเตอร์ (Machining center) เครื่องจักรทั้งสองชนิดนี้มีลักษณะการทำงานที่เหมือนกัน แต่จะมีความแตกต่างกันที่เครื่องแมชชีนนิ่งเซ็นเตอร์มีอุปกรณ์เปลี่ยน tool อัตโนมัติ (Automatic Tool Changer, ATC) ดังนั้นเครื่องแมชชีนนิ่งเซ็นเตอร์จึงเป็นที่นิยมใช้ในปัจจุบัน เพราะไม่ต้องเสียเวลาหยุดสปีนเดิลเพื่อเปลี่ยน tool ทั้งเครื่องกัดซีเอ็นซีและเครื่องแมชชีนนิ่งเซ็นเตอร์ สามารถแยกตามแกนของการติดตั้งสปีนเดิลได้เป็นแบบแนวตั้ง (Vertical) และแบบแนวนอน (Horizontal) ดังแสดงในภาพประกอบที่ 2.11



ภาพประกอบที่ 2.11 เครื่องแมชชีนนิ่งเซ็นเตอร์แบบแนวตั้ง (ที่มา: Mfg Engg & Tech, Kalpakjian)

ส่วนประกอบหลักของเครื่องกัดแนวตั้ง มีดังนี้

1. แท่นเครื่อง (Machine base) เป็นโครงสร้างหลักของตัวเครื่องจักรสำหรับรองรับชิ้นส่วนต่างๆ ของเครื่อง
2. หมอนรอง (Saddle) เคลื่อนที่ได้ 1 แกนบนแท่นเครื่อง เช่น แกน X หรือแกน Y
3. โต๊ะงาน (Table) สำหรับวางชิ้นงาน โดยทั่วไปโต๊ะงานจะเคลื่อนที่อยู่บนหมอนรอง มีร่องรูปตัวที (T-slot) ไว้สำหรับจับยึดชิ้นงานให้แนบติดกับโต๊ะ โดยระนาบของโต๊ะจะตั้งฉากกับระนาบของเสา
4. เสา (Column) เป็นโครงสร้างหลักสำหรับติดตั้งชุดสปีนเดิล เครื่องแมชชีนนิ่งเซ็นเตอร์รุ่นใหม่นิยมสร้างแบบเสาคู่ (Double column) เพราะให้ความแม่นยำที่ดีกว่า

5. **สปินเดิล (Spindle)** เป็นแกนเพลลาหมุนสำหรับจับ tool โดยมีมอเตอร์สปินเดิลเป็นต้นกำลังในการขับเคลื่อนผ่านชุดเฟือง หรือสายพาน หรือต่อตรงรวมเป็นชุดเดียวกัน

6. **อุปกรณ์ขับเคลื่อน** ประกอบด้วยชุดฟีดมอเตอร์ ในปัจจุบันใช้เอซีเซอร์โวมอเตอร์ (AC servo motor) ขับเคลื่อนการเคลื่อนที่ในแกน X, Y และ Z โดยมีบอลสกรู (Ball screw) และรางเลื่อน (Slide way) หรือรางนำทาง (Guide way) ควบคุมการเคลื่อนที่เชิงเส้น (Linear motion) ของแกนนั้นๆ สำหรับเครื่องที่ต้องการความแม่นยำสูงจะมีลิเนียร์สเกล (Linear scale) เป็นอุปกรณ์ตรวจสอบการเคลื่อนที่หรือเซ็นเซอร์บอกตำแหน่งการเคลื่อนที่ของแต่ละแกน

7. **อุปกรณ์การเปลี่ยน tool อัตโนมัติ (Automatic Tool Changer, ATC)** มีการติดตั้งในเครื่องแมชชีนนิ่งเซ็นเตอร์แบบแนวตั้ง (Vertical machining center หรือ VMC) และแบบแนวนอน (Horizontal machining center) สามารถเก็บ tool จากที่เก็บ tool (Tool storage) หรือ tool แมกกาซีน (Tool magazine) ประเภทของ ATC สามารถแยกได้เป็นแบบโซ่ (Chain-type) และแบบจานหมุน (Carousel-type) โดยแบบโซ่สามารถเก็บ tool ได้มากกว่าแบบจานหมุน โดยทั้งสองแบบจะมีแขนจับ tool (Tool changing arm) ระหว่างที่เก็บ tool กับสปินเดิล (ดูภาพประกอบที่ 2.12) หรือบางรุ่นอาจจะไม่ใช้แขนจับ tool (Armless) แต่ใช้วิธีการเลื่อนชุดจับ tool ทั้งชุดมาที่ตำแหน่งของสปินเดิล (ดูภาพประกอบที่ 2.13)



ภาพประกอบที่ 2.12 ชุดเปลี่ยน tool อัตโนมัติแบบ Arm
(ที่มา: [http://www.kmitnb.ac.th/nc and cnc machine/i1.pdf](http://www.kmitnb.ac.th/nc_and_cnc_machine/i1.pdf))



ภาพประกอบที่ 2.13 ชุดเปลี่ยน tool อัตโนมัติแบบ Armless
(ที่มา: [http://www.kmitnb.ac.th/nc and cnc machine/il.pdf](http://www.kmitnb.ac.th/nc_and_cnc_machine/il.pdf))

2.3.3 การโปรแกรมเครื่องจักรกลซีเอ็นซี (CNC Machine Programming)

ระบบควบคุมเครื่องจักรกล CNC เป็นส่วนที่ทำหน้าที่ควบคุมให้เครื่องจักรทำงานตามที่ผู้ปฏิบัติการต้องการ ซึ่งการที่เครื่องจักรกลเหล่านี้จะสามารถทำงานได้ตามที่กำหนดไว้ นั้นระบบควบคุมดังกล่าวต้องได้รับการบอกถึงกรรมวิธีการทำงานตั้งแต่ต้นจนจบ ข้อมูลที่ใช้ในการบอกถึงสิ่งเหล่านี้จะถูกเขียนอยู่ในรูปของโปรแกรม NC ซึ่งโปรแกรมนี้อาจจำเป็นต้องถูกป้อนเข้าไปในตัวเครื่องจักร หรือคอมพิวเตอร์ซึ่งติดต่อกับเครื่องจักรเหล่านี้ได้ ระบบควบคุมจะอ่านโปรแกรม NC และเปลี่ยนภาษาโปรแกรมเหล่านี้เป็นภาษาเครื่องซึ่งเครื่องจักรกลสามารถที่จะเข้าใจได้ และทำงานได้ตามที่ผู้ป้อนโปรแกรมต้องการ (วนิดา รัตนมณี, 2545)

หน้าที่เฉพาะเกี่ยวกับการทำงานระบบการควบคุม NC หนึ่งหน้าที่อาจจะถูกโปรแกรมโดยคำในระบบ NC หนึ่งคำหรือเป็นการรวมกันของคำหลายคำได้ในหนึ่งข้อความของหนึ่งโปรแกรม หน้าที่ของคำต่างๆ ภายในคำ NC และหน้าที่การใช้งานสามารถอธิบายได้ดังต่อไปนี้

รหัส G (G Code) รหัส G เป็นรหัสหรือคำสั่งสำหรับการเตรียมการเพื่อการปฏิบัติงาน มันจะใช้ในการเตรียมหน่วยควบคุมเครื่องจักร สำหรับหน้าที่การควบคุม รหัส G เป็นตัวบอกว่าหน้าที่สำหรับการควบคุมอะไรบางอย่างที่จำเป็นต้องมี หรือเป็นการกำหนดหน่วยภายในโปรแกรมหรือรูปแบบที่มีการใช้ในโปรแกรม รหัส G มีทั้งโมเดลฟังก์ชัน (Modal Function) และนั่นโมเดลฟังก์ชัน (Nonmodal Function) โมเดลฟังก์ชันเป็นฟังก์ชันที่กำหนดเพียงครั้งเดียวก็มีผลบังคับใช้ทั้งโปรแกรม เช่น การกำหนดหน่วยที่ใช้ภายในโปรแกรม กำหนดเพียงครั้งเดียวทั้งโปรแกรมก็จะใช้หน่วยเดียวกันทั้งหมด แต่สำหรับนั่นโมเดลฟังก์ชันเป็นฟังก์ชันที่มีผลกับการทำงานของเครื่องจักรเฉพาะบรรทัดที่เขียนฟังก์ชันนี้ลงไป ในโปรแกรมเท่านั้น รหัส G ที่มีการใช้

โดยทั่วไปที่แสดงไว้ในตารางที่ 2.1 สำหรับตัวอย่างคำสั่งรหัส G เครื่อง Cincinnati A2100 จะมีแสดงไว้ในภาคผนวก ก เป็นตัวอย่างการใช้งานฟังก์ชันเพิ่มเติมสำหรับเครื่องจักรชนิดนี้เท่านั้น

ตารางที่ 2.1 รหัส G ที่มีการใช้โดยทั่วไป

G00	การเดินของใบมีด โดยไม่มีการตัดชิ้นงาน	G41	การเผื่อทางเดินของใบมีดตัดไปด้านซ้าย
G01	การหาจุดศูนย์กลางบนเส้นตรง	G42	การเผื่อทางเดินของใบมีดตัดไปด้านขวา
G02	การหาจุดศูนย์กลางบนวงกลม ทิศตามเข็มนาฬิกา	G43	กำหนดระยะเพื่อความยาวใบมีด (ทิศทาง +)
G03	การหาจุดศูนย์กลางบนวงกลม ทิศทวนเข็มนาฬิกา	G70	หน่วยที่ใช้เป็นนิ้ว
G04	การหยุดรอ	G71	หน่วยที่ใช้เป็นระบบเมตริก
G08	การเร่ง	G74	การหาค่าลำดับเพียง ¼ ของวงกลม
G09	การหน่วง	G75	การหาค่าลำดับบนวงกลมเต็มทั้งวง
G17	ระนาบ X-Y	G80	ยกเลิกรอบการทำงานที่กำหนดไว้
G18	ระนาบ Z-X	G81-89	กำหนดรอบโปรแกรมการทำงาน
G19	ระนาบ Y-Z	G90	การกำหนดตัวเลขแบบสัมบูรณ์
G28	กลับไปยังจุดอ้างอิง	G91	การกำหนดตัวเลขแบบขยับทีละขั้น
G40	การยกเลิกการเผื่อทางเดินของใบมีดตัด	G92	การกำหนดจุดศูนย์ใหม่วัดจากตำแหน่งมีด

(ที่มา : วนิดา รัตนมณี, 2545)

ตารางที่ 2.2 รหัส M ที่มีการใช้โดยทั่วไป

M00	หยุดโปรแกรม และสามารถเริ่มใหม่โดยการกดปุ่มบางปุ่ม
M01	หยุดโดยทางเลือก
M02	ตอนสุดท้ายของ โปรแกรมปิดน้ำยาหล่อเย็น และหน่วยความจำจะถูกลบออก
M03	เพลลาหมุนตามเข็มนาฬิกา
M04	เพลลาหมุนทวนเข็มนาฬิกา
M05	เพลลาหยุดหมุน
M06	หยุดสำหรับการเปลี่ยนเครื่องมือ เพลลาหยุดหมุน
M07	เปิดน้ำหล่อเย็นแบบน้ำไหล
M08	เปิดน้ำหล่อเย็นแบบเป็นฝอย
M09	ปิดน้ำหล่อเย็น
M30	จบ โปรแกรม

(ที่มา : วนิดา รัตนมณี, 2545)

รหัส M (M Code) เป็นรหัสที่ใช้สำหรับงานหน้าที่เบ็ดเตล็ด เช่น หน้าที่ให้เพลลาเครื่องจักรหมุนหรือหยุดหมุน เปิดหรือปิดเครื่องจักร เปิดหรือปิดน้ำหล่อเย็น การเปลี่ยนเครื่องมือ และการหมุนเทปใหม่ ซึ่งคำที่ใช้กันค่อนข้างบ่อยมีแสดงในตารางที่ 2.2 นอกจากนี้สำหรับตัวอย่างคำสั่งรหัส M เครื่อง Cincinnati A2100 มีแสดงไว้ในภาคผนวก ก

รหัส N (N Code) โดยปกติแล้วข้อความในส่วนของโปรแกรมเริ่มต้นด้วยคำ “N” ซึ่งเป็นการบ่งบอกถึงตัวเลขลำดับที่อยู่ในโปรแกรม มันใช้เป็นตัวบ่งบอกถึงข้อความที่อยู่ในโปรแกรม ซึ่งจะเป็นประโยชน์ในการแก้ไขโปรแกรม เช่น N0010 มันเป็นสิ่งที่ดีในการเขียนโปรแกรมและให้ค่า N เพิ่มขึ้นทีละ 10 หรือมากกว่า เพื่อว่าจะมีการเพิ่มเติมลำดับการทำงานระหว่างลำดับที่ของ N เหล่านี้

รหัส X-, Y-, Z-, A-, B-, และ C รหัสกลุ่มนี้เป็นคำสั่งที่ใช้ในการเตรียมตำแหน่งคู่ลำดับของเครื่องมือหรือใบมีดตัด แกน X, Y และ Z เป็นแกนการเคลื่อนที่ของเครื่องจักรโดยทั่วไป ส่วน A, B และ C เป็นแกนที่ใช้สำหรับบอกการหมุนรอบแกน X, Y และ Z ตามลำดับ สำหรับเครื่องจักร 3 แกนก็จะมีเฉพาะทิศทางเคลื่อนที่ในแกน X, Y และ Z เท่านั้น ซึ่งการใช้งานส่วนใหญ่เพื่อต้องการการเคลื่อนที่ภายในทิศทางแกน X, Y และ Z ก็เพียงพอ

รหัส F (F Code) เป็นตัวกำหนดค่าของอัตราการป้อนการเคลื่อนที่ของเครื่องมือ ซึ่งเป็นความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วใบมีดตัดกับชิ้นงาน โดยทั่วไปเป็นหน่วยอัตราการป้อนจะเป็นนิ้วต่อนาที หรือนิ้วต่อรอบ สำหรับค่าอัตราการป้อนที่เหมาะสมนั้นจะเป็นการป้อนโปรแกรมด้วยมือ หรือให้เครื่องเป็นตัวกำหนดเองก็ได้ รหัส F ต้องมีการกำหนดก่อน G01, G02, G03 ความเร็วของอัตราการป้อนสามารถที่จะเปลี่ยนได้บ่อยครั้งใน 1 โปรแกรม เมื่อรหัส F ปรากฏในข้อความหนึ่งๆ ต้องมีการปฏิบัติโดยทันที

รหัส S (S Code) เป็นรหัสบอกความเร็วในการตัด ความเร็วในการตัดเป็นค่าเฉพาะของความสัมพันธ์ความเร็วพื้นผิวของคมมีดเทียบกับชิ้นงาน ซึ่งเป็นผลของการหมุนเครื่องมือหรือใบมีด ดังนั้นหน่วยในการโปรแกรมจึงเป็นรอบต่อนาที รหัส S เป็นการกำหนดก่อนที่จะมีการหมุนเพลลา แต่รหัส S ไม่ได้เป็นรหัสที่จะใช้เปิด-ปิดการหมุนของเพลลาเครื่องจักร

รหัส T (T Code) เป็นการใช้ในการกำหนดลำดับที่ของใบมีด มันจำเป็นต้องใช้เมื่อเครื่องจักรมีเครื่องมือการเปลี่ยนใบมีดแบบอัตโนมัติ เป็นการกำหนดตัวเลขที่อยู่ในช่องเก็บใบมีด การเปลี่ยนใบมีดจริงๆ จะยังไม่เกิดจนกว่าจะมีการกำหนดด้วยรหัส M

รหัส R (R Code) ใช้สำหรับค่าพารามิเตอร์ของวงกลม หรือเมื่อมีการกำหนดรอบการทำงานของการเจาะ สิ่งหนึ่งที่จำเป็นต้องมี คือ ระยะเผื่อของความสูงดอกสว่าน

2.4 การทดสอบความแข็ง (Hardness Test)

ความแข็งของวัสดุเกี่ยวพันกับการจับตัวของอะตอมและโมเลกุลภายในเนื้อวัสดุ เช่นเดียวกันกับความแข็งแรง ดังนั้นความแข็งมักจะเพิ่มขึ้นเมื่อวัสดุมีความแข็งแรงสูงขึ้น นั่นคือพวกโลหะและเซรามิกจะแข็งกว่าพวกโพลีเมอร์

การทดสอบความแข็งมีอยู่หลายวิธีแต่ที่ใช้กันมากที่สุดมี 3 วิธี คือ

1. การทดสอบความแข็งแบบบริเนล (Brinell Hardness Test) วิธีการ คือ ใช้ลูกบอลเหล็กที่ผ่านการชุบมาอย่างดี ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มม. กดลงบนผิวเรียบของวัสดุที่จะวัด โดยใช้แรง 3000 กก. สำหรับวัสดุแข็ง และ 500 กก. สำหรับวัสดุอ่อน โดยใช้เวลา 30 วินาที เป็นมาตรฐาน จากนั้นวัดเส้นผ่านศูนย์กลางของรอยบุ๋ม (Indentation) นำค่าที่ได้ไปคำนวณ จะได้ค่าความแข็งแบบบริเนล (Brinell hardness number) การทดสอบความแข็งแบบบริเนลนี้ไม่เหมาะสมกับวัสดุแข็ง เนื่องจากความแข็งของหัวกดไม่มากนัก นอกจากนี้ยังไม่เหมาะกับชิ้นทดสอบที่บางกว่าขนาดของรอยบุ๋ม

2. การทดสอบความแข็งแบบร็อคเวล (Rockwell Hardness Test) การทดสอบแบบนี้คล้ายกับการทดสอบแบบบริเนล แต่ใช้หัวกดเล็กกว่าและแรงกดที่น้อยกว่า ค่าของแรงที่ใช้และชนิด หรือขนาดของหัวกดจะเปลี่ยนได้ ขึ้นอยู่กับสเกลของความแข็งแบบร็อคเวลที่เราจะเลือกใช้ให้เหมาะสมกับชนิดของวัสดุที่จะทดสอบ การอ่านค่าของความแข็งจะอ่านโดยตรงจากเครื่อง กล่าวคือ ถ้าความลึกของรอยกดลงไปตื้น ค่าของตัวเลขจะสูง แสดงว่าวัสดุมีความแข็งมาก วิธีการทดสอบจะให้แรงกระทำเล็กน้อย คือ 10 กก. จากนั้นจะเพิ่มแรงที่กระทำขึ้น ซึ่งอาจจะมีตั้งแต่ 60-100 กก. ขึ้นอยู่กับขนาดและชนิดของหัวกด นอกจากนี้ยังขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุที่จะทดสอบด้วย หัวกดที่ใช้ อาจจะเป็นลูกบอลเหล็กหรือเพชรที่มีรูปกรวย การทดสอบแบบร็อคเวลนี้นิยมใช้กันอย่างกว้างขวาง เพราะสามารถใช้วัดความแข็งของวัสดุชนิดต่างๆ ได้มากกว่า สามารถวัดความแข็งของวัสดุที่การทดสอบแบบบริเนลวัดไม่ได้ การใช้งานสะดวกอ่านค่าได้รวดเร็ว เพราะสามารถอ่านค่าได้โดยตรงจากเครื่องและเนื่องจากรอยบุ๋มมีขนาดเล็กจึงไม่ทำลายผิวของชิ้นทดสอบ

3. การทดสอบความแข็งแบบวิกเกอร์ (Vickers Hardness Test) การทดสอบแบบวิกเกอร์นี้คล้ายกับบริเนลในแง่ที่ว่าค่าที่ได้เป็นอัตราส่วนระหว่างแรงที่ใช้ต่อพื้นที่ของรอยกด แต่จะต่างกันที่หัวกดที่ใช้เป็นเพชรรูปปิระมิด แรงที่ใช้มีตั้งแต่ 5-120 กก. ขึ้นอยู่กับความแข็งของวัสดุ

2.5 การทดสอบความต้านทานแรงดึง (Tensile Test)

วิธีการทดสอบนั้น เราจะนำตัวอย่างที่จะทำการทดสอบมาดึงอย่างช้าๆ แล้วบันทึกค่าของความเค้นและความเครียดที่เกิดขึ้น แล้วนำมาพล็อตเป็นเส้นโค้ง โดยที่ขนาดและรูปร่างของชิ้นทดสอบมีความแตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุต่างๆ และมาตรฐานของการทดสอบ เช่น มาตรฐานของ ASTM (American Society of Testing and Materials), BS (British Standards), JIS (Japanese Industrial Standards) หรือแม้แต่ มอก. (มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมไทย) ได้กำหนดขนาดและรูปร่างของชิ้นทดสอบไว้ ทั้งนี้เพื่อให้ผลของการทดสอบเชื่อถือได้ พร้อมกับกำหนดความเร็วในการเพิ่มแรงกระทำเอาไว้ด้วย

จากการศึกษาเส้นโค้งความเค้น-ความเครียด พบว่า เมื่อเราดึงชิ้นทดสอบอย่างช้าๆ ชิ้นทดสอบจะค่อยๆ ยืดออกจนถึงจุดๆ หนึ่ง ซึ่งในช่วงนี้ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น-ความเครียดจะเป็นสัดส่วนคงที่ ทำให้เราได้กราฟที่เป็นเส้นตรง ตามกฎของฮุก (Hook's law) ซึ่งกล่าวว่าความเค้นเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเครียดเรียกว่าพิสัยสัดส่วน (Proportional Limit) และภายใต้พิสัยสัดส่วนนี้ วัสดุจะแสดงพฤติกรรมการคืนรูปแบบยืดหยุ่น (Elastic Behavior) นั่นคือเมื่อปล่อยแรงกระทำ ชิ้นทดสอบจะกลับไปมีขนาดเท่าเดิม

เมื่อเราเพิ่มแรงกระทำต่อไปจนเกินพิสัยสัดส่วน เส้นกราฟจะค่อยๆ โค้งออกจากเส้นตรงวัสดุหลายชนิดจะยังคงแสดงพฤติกรรมการคืนรูปได้อีกเล็กน้อยจนถึงจุดๆ หนึ่งเรียกว่าพิสัยยืดหยุ่น (Elastic Limit) ซึ่งจุดนี้จะเป็นจุดกำหนดว่าความเค้นสูงสุดที่จะไม่ทำให้เกิดการแปรรูปถาวร (Permanent Deformation or Offset) กับวัสดุนั้น เมื่อผ่านจุดนี้ไปแล้ววัสดุจะมีการเปลี่ยนรูปอย่างถาวร (Plastic Deformation) ลักษณะการเริ่มต้นของความเครียดแบบพลาสติกนี้ จะเปลี่ยนแปลงไปตามชนิดของวัสดุในโลหะหลายชนิด เช่น พวกเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ (Low Carbon Steel) จะเกิดการเปลี่ยนรูปอย่างรวดเร็ว โดยไม่มีการเพิ่มความเค้น (บางครั้งอาจจะลดลงก็มี) ซึ่งเป็นจุดที่เกิดการเปลี่ยนรูปแบบพลาสติกนี้เรียกว่าจุดคราก (Yield Point) และค่าของความเค้นที่จุดนี้เรียกว่า ความเค้นจุดคราก (Yield Stress) หรือ Yield Strength ค่า Yield Strength นี้มีประโยชน์กับวิศวกรมาก เพราะเป็นจุดแบ่งระหว่างพฤติกรรมการคืนรูปกับพฤติกรรมการคงรูป และในกรณีของโลหะจะเป็นค่าความแข็งแรงสูงสุดที่เราคงใช้ประโยชน์ได้โดยไม่เกิดการเสียหาย

หลังจากจุดครากแล้ว วัสดุจะเปลี่ยนรูปแบบพลาสติกโดยความเค้นจะค่อยๆ เพิ่มขึ้นอย่างช้าๆ หรืออาจจะคงที่จนถึงจุดสูงสุด ค่าความเค้นที่จุดนี้เรียกว่า Ultimate Strength หรือความเค้นแรงดึง (Tensile Strength) ซึ่งเป็นค่าความเค้นสูงสุดที่วัสดุจะทนได้ก่อนที่จะขาดหรือแตกออกจากกัน (Fracture) เนื่องจากวัสดุหลายชนิดสามารถเปลี่ยนรูปแบบพลาสติกได้มากๆ ค่าความเค้นสูงสุดนี้สามารถนำมาคำนวณใช้งานได้ นอกจากนี้ ค่านี้ยังใช้เป็นดัชนีเปรียบเทียบคุณสมบัติของ

วัสดุได้ด้วย คำว่า ความแข็งแรงของวัสดุ หรือกำลังวัสดุนั้น โดยทั่วไปจะหมายถึงค่าความเค้นสูงสุดที่วัสดุทนได้นี้เอง

ที่จุดสุดท้ายของกราฟ เป็นจุดที่วัสดุเกิดการแตกหรือขาดออกจากกัน (Fracture) สำหรับโลหะบางชนิด เช่น เหล็กกล้าคาร์บอนต่ำหรือโลหะเหนียว ค่าความเค้นประลัย (Rupture Strength) นี้จะต่ำกว่าความเค้นสูงสุด เพราะเมื่อเลยจุดแตกหักไป พื้นที่ภาคตัดขวางของตัวอย่างทดสอบลดลง ทำให้พื้นที่ที่จะต้านทานแรงดึงลดลงด้วย ในขณะที่เรายังคงคำนวณค่าของความเค้นจากพื้นที่หน้าตัดเดิมของวัสดุก่อนที่จะทำการสอบแรงดึง ดังนั้นค่าของความเค้นจึงลดลง ส่วนโลหะอื่นๆ เช่น โลหะที่ผ่านการขึ้นรูปเย็น (Cold Work) มาแล้ว มันจะแตกหักที่จุดความเค้นสูงสุด โดยไม่มีการลดขนาดพื้นที่ภาคตัดขวาง ทำนองเดียวกับพวกวัสดุเปราะ (Brittle Materials) เช่น เซรามิก ที่มีการเปลี่ยนรูปอย่างพลาสติกน้อยมากหรือไม่มีเลย ส่วนกรณีของวัสดุที่เป็นพลาสติกจะเกิดการแตกหักโดยที่ต้องการความเค้นสูงขึ้น

เส้นโค้งความเค้น-ความเครียด นอกจากจะใช้บอกค่าความแข็งแรง ณ จุดคราก (Yield Strength) ความเค้นสูงสุดและความเค้นประลัยแล้ว ยังจะใช้บอกค่าต่างๆ ได้อีกดังนี้ คือ

- ความเหนียว (Ductility) คือ ค่าที่ใช้วัดจะบอกเป็นเปอร์เซ็นต์ของการยืดตัว (Percentage Elongation) และการลดพื้นที่ภาคตัดขวาง (Reduction of Area) โดยมีความสัมพันธ์ตามสมการที่ 2.2 และ 2.3 ตามลำดับ

$$\text{เปอร์เซ็นต์การยืดตัว (\%E1)} = \frac{L_f - L_o}{L_o} \Delta 100\% \quad \dots\dots\dots(2.2)$$

เมื่อ L_f = ความยาวของเกจหลังจากดึงจนขาด

L_o = ความยาวของเกจเริ่มต้น

$$\text{การลดพื้นที่ภาคตัดขวาง (\%R.A.)} = \frac{A_o - A_f}{A_o} \Delta 100\% \quad \dots\dots\dots(2.3)$$

เมื่อ A_o = พื้นที่หน้าตัดก่อนดึง

A_f = พื้นที่หน้าตัดหลังจากดึงขาด

ในทางปฏิบัติเรามักใช้ค่า %E1 มากกว่าเพราะสะดวกในการวัด ความเหนียวของวัสดุนี้จะเป็นตัวบอกความสามารถในการขึ้นรูปของมัน คือ ถ้าวัสดุมีความเหนียวดี (%E1 สูง) ก็สามารถนำไปขึ้นรูป เช่น รีด ตีขึ้นรูป ดึงเป็นลวด ฯลฯ ได้ง่าย แต่ถ้ามีความเหนียวต่ำหรือมีความเปราะ (Brittle) ก็จะนำไปขึ้นรูปยาก หรือทำไม่ได้ เป็นต้น

- Modulus of Elasticity or Stiffness

ภายใต้พิศกัศส่วนซึ่งวัสดุมีพฤติกรรมเป็นอิลาสติก อัตราส่วนระหว่างความเค้นต่อความเครียดจะเท่ากับค่าคงที่ ค่าคงที่นี้เรียกว่า Modulus of Elasticity (E) หรือ Young's Modulus หรือ Stiffness โดยทั่วไปมักมีหน่วยเป็น ksi (1 ksi = 1000 psi) หรือ kgf/mm² หรือ GPa (สังเกตว่าเป็นหน่วยเดียวกับหน่วยของความเค้น) ซึ่งจะมีความสัมพันธ์ตามสมการที่ 2.4

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon} = \frac{PL}{A\delta L} \quad \dots\dots\dots(2.4)$$

ถ้าแรงที่มากกระทำเป็นแรงเฉือนเราเรียกค่าคงที่นี้ว่า Shear Modulus หรือ Modulus of Rigidity (G) โดยมีความสัมพันธ์ตามสมการที่ 2.5

$$G = \frac{\tau}{\gamma} = \frac{Ph}{Aa} \quad \dots\dots\dots(2.5)$$

ค่า E และ G ของวัสดุแต่ละชนิดจะมีค่าเฉลี่ยคงที่ และเป็นตัวบอกความสามารถในการคงรูป (Stiffness, Rigidity) ของวัสดุ นั่นคือ ถ้า E และ G มีค่าสูง วัสดุจะเปลี่ยนรูปอย่างอิลาสติกได้น้อย แต่ถ้า E และ G ต่ำ มันก็จะเปลี่ยนรูปอย่างอิลาสติกได้มาก ค่า E และ G นี้มีประโยชน์มากสำหรับงานออกแบบวัสดุที่ต้องรับแรงต่างๆ

2.6 การตรวจสอบทางโลหะวิทยา

การตรวจสอบทางโลหะวิทยาเป็นการตรวจสอบโครงสร้างทางกายภาพ ลักษณะ และขนาดของเกรนที่เกิดจากการเชื่อมเสียดทานแบบกวนของรอยเชื่อม รวมทั้งบริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อนทางกล (Thermo-mechanically Affected Zone; TMAZ) ที่ด้านรีทรีทดิ้งและด้านแอดวานซิง ใช้ร่วมกับการตรวจสอบด้วยสายตา ตรวจสอบโครงสร้างมหภาคและจุลภาค โดยเตรียมชิ้นงานทดสอบ (Macro and Micro Specimen) กัดผิวขึ้นทดสอบด้วยสารละลาย Keller's

Reagent และนำไปตรวจสอบโครงสร้างด้วยกล้องจุลทรรศน์ การตรวจสอบโครงสร้างทางโลหะวิทยา มีจุดประสงค์เพื่อศึกษาถึงพฤติกรรมการเปลี่ยนแปลงของเนื้อโลหะหลังจากผ่านกระบวนการเชื่อมด้วยการเสียดทานแบบกวน ดังนี้

2.6.1 ตรวจสอบความสมบูรณ์ของผิวงานเชื่อมที่แต่ละตัวแปรเชื่อมว่ามีรอยตำหนิหรือลักษณะจุดบกพร่องต่างๆ อย่างไรบ้าง

2.6.2 ตรวจสอบลักษณะและการกระจายตัวของเกรนที่บริเวณแนวเชื่อมหรือเป็นการตรวจสอบลักษณะ โครงสร้างทางมหภาค โดยการใช้น้ำกล้องจุลทรรศน์ที่มีกำลังขยายต่ำกว่า 10 เท่า เพื่อดูความสมบูรณ์ของแนวเชื่อม

2.6.3 ตรวจสอบโครงสร้างบริเวณที่ถูกกวน และเนื้อโลหะเดิมของวัสดุด้วยกล้องจุลทรรศน์ที่มีกำลังขยายสูงกว่า 10 เท่า ถ้าเป็นกล้องที่ใช้แสงจากหลอดไฟจะให้กำลังขยายไม่เกิน 2,000 เท่า แต่ถ้าเป็นกล้องที่ใช้ลำแสงอิเล็กตรอนจะสามารถให้กำลังขยายได้สูงถึง 100,000 เท่า หรือมากกว่านี้

2.7 การวิเคราะห์ข้อมูลเชิงสถิติ

การวิเคราะห์ข้อมูลเชิงสถิติเป็นการนำวิธีการทางสถิติมาใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้มาจากการทดลอง เพื่อให้ผลลัพธ์และข้อสรุปที่เกิดขึ้นเป็นไปตามวัตถุประสงค์ของการทดลอง เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการตัดสินใจที่มีประสิทธิภาพ ข้อสรุปที่ได้มีเหตุผลและความน่าเชื่อถือ การวิเคราะห์ผลการทดสอบแรงดึงของชิ้นทดสอบ บันทึกผลการทดลอง สถิติที่ใช้ในการวิจัย ซึ่งต้องใช้ในการวิเคราะห์ค่าทดสอบของชิ้นงานที่ใช้ในงานวิจัย คือ สถิติเชิงพรรณนา (Descriptive Statistics) เพื่อหาค่าเฉลี่ย ค่าสูงสุด ค่าต่ำสุด สถิติเชิงอนุมาน (Inferential Statistics) เพื่อหาค่าความแปรปรวนและอิทธิพลของตัวแปรที่เกี่ยวข้องในการทดลอง

ในการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติจะใช้โปรแกรมประมวลผลทางสถิติ มาช่วยในการวิเคราะห์ โดยการวิเคราะห์ความถูกต้องของตัวแบบจะประกอบด้วย 3 ส่วน ดังนี้

1) ความเป็นอิสระของข้อมูล โดยข้อมูลแต่ละตัวต้องเป็นอิสระต่อกันเนื่องจากการสุ่ม ทั้งนี้ถ้าหากข้อมูลไม่เป็นแบบสุ่มแล้วทำให้การวิเคราะห์ข้อมูลไม่สามารถทำได้ โดยเฉพาะการหาค่าเฉลี่ยหรือค่าคาดหมายของตัวแปรตอบสนอง ดังนั้น ถ้าหากข้อมูลไม่เป็นแบบสุ่มแล้วแสดงว่าข้อมูลมีความลำเอียง จำเป็นที่จะต้องค้นหาสาเหตุเพื่อการแก้ไขก่อนการวิเคราะห์

2) ความเป็นปกติของข้อมูล ข้อมูลแต่ละตัวที่เป็นตัวแปรสุ่มต้องมีแนวโน้มที่เข้าหาค่าคงที่ค่าหนึ่ง แล้วมีการกระจายรอบค่าในลักษณะสมมาตร ทั้งนี้ถ้าหากข้อมูลมิได้มีรูปแบบปกติแล้วไม่สามารถจะทำการวิเคราะห์ข้อมูลได้ ดังนั้นถ้าหากข้อมูลมิได้เป็นแบบตัวแปรสุ่มปกติแล้ว แสดงว่าข้อมูลที่ได้มิได้มาจากกระบวนการที่เป็นมาตรฐาน จึงจำเป็นต้องค้นหาสาเหตุเพื่อการแก้ไขก่อนการวิเคราะห์

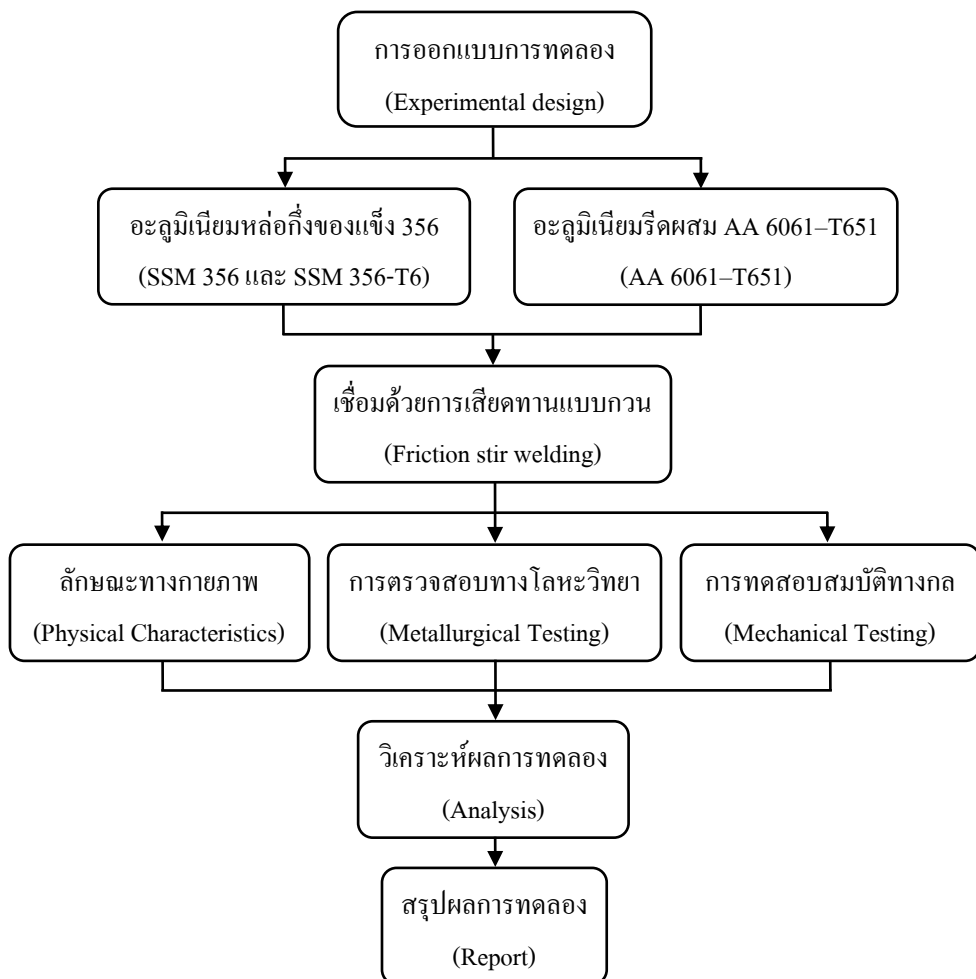
3) ความมีเสถียรภาพของค่าความแปรปรวนของข้อมูล คือ ข้อมูลต้องมีการเก็บมาจากกระบวนการที่ได้มีการจัดทำเป็นมาตรฐานแล้ว จึงทำให้เกิดความแตกต่างของข้อมูล เกิดจากสาเหตุที่ไม่สามารถควบคุมได้ในระบบที่ทำการเก็บรวบรวมข้อมูลเท่านั้น ดังนั้น ถ้าหากข้อมูลมีความแปรปรวนที่ไม่มีเสถียรภาพแล้ว แสดงว่าข้อมูลเกิดจากสาเหตุที่สามารถควบคุมได้ แต่ไม่ได้รับการควบคุม จึงมีความจำเป็นที่ต้องค้นหาสาเหตุเพื่อการแก้ไขก่อนการวิเคราะห์ต่อไป

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

3.1 การดำเนินงานวิจัย

ในงานวิจัยนี้เป็นการเชื่อมด้วยกรรมวิธีการเชื่อมเสียดทานแบบกวน (Friction Stir Welding Process ; FSWP) โดยใช้อะลูมิเนียมผสมสองเกรด คือ อะลูมิเนียมหล่อกิ่งของแข็ง SSM 356 (as-cast และ T6) กับอะลูมิเนียมรีดผสม AA 6061-T651 เป็นชิ้นงานทดลองเชื่อม กำหนดรอยเชื่อมเป็นแบบต่อชนทำราบ การเชื่อมจะเป็นแบบอัตโนมัติ โดยใช้เครื่องจักรกลแบบอัตโนมัติที่มีการปรับเปลี่ยนตัวแปรในการเชื่อม คือ ความเร็วหมุนเชื่อมและความเร็วเดินเชื่อม หลังจากนั้นวิเคราะห์และสรุปผลการทดลองจากลักษณะทางกายภาพ การตรวจสอบโครงสร้างทางโลหะวิทยา และการทดสอบสมบัติทางกล ดังนั้นการดำเนินงานวิจัยครั้งนี้ได้ดำเนินงานตามขั้นตอน ดังนี้



ภาพประกอบที่ 3.1 แผนผังแสดงขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

3.2 วัสดุที่ใช้ในงานวิจัย

โลหะที่นำมาใช้ในงานวิจัยครั้งนี้ ประกอบด้วยอะลูมิเนียมผสมสองชนิด คือ

3.2.1 อะลูมิเนียมหล่อกิ่งของแข็ง SSM 356

อะลูมิเนียมหล่อกิ่งของแข็ง SSM 356 ซึ่งมีส่วนผสมทางเคมีดังตารางที่ 3.1 โดยวัสดุอะลูมิเนียมหล่อกิ่งของแข็ง SSM 356 ผ่านการหล่อขึ้นรูปแบบกิ่งของแข็งด้วยเทคนิค GISS (Gas induced semi-solid) ซึ่งเทคนิค GISS จะทำการหล่อที่อุณหภูมิประมาณ 700°C เมื่ออุณหภูมิลดลงถึง 650°C จะใช้แก๊สเฉื่อยผ่านแท่งกราฟไฟต์พรุณ (แก๊สอาร์กอนหรือไนโตรเจน) เพื่อให้เกิดการไหลวนของน้ำโลหะเกิดการแตกตัวของโครงสร้างเดนไดรต์เป็นเวลา 20 วินาที จากนั้นนำน้ำโลหะอะลูมิเนียมไปเทลงใน Mold แล้วอัด (Squeeze) ที่ความดันไม่น้อยกว่า 2,000 psi ค้างไว้จนโลหะแข็งตัว ได้เป็นชิ้นงานแบบแผ่นกลมที่มีความหนาประมาณ 1-1.5 เซนติเมตร เส้นผ่านศูนย์กลาง 20 เซนติเมตร ดังแสดงในภาพประกอบที่ 3.2



ภาพประกอบที่ 3.2 อะลูมิเนียมหล่อกิ่งของแข็ง SSM 356

3.2.2 อะลูมิเนียมรีดผสม AA 6061-T651

อะลูมิเนียมผสม AA 6061 เป็นโลหะผสมของอะลูมิเนียมที่มีแมกนีเซียมและซิลิกอนเป็นส่วนผสมสำคัญ สามารถเพิ่มความแข็งแรงได้ด้วยการผ่านกระบวนการบ่มแข็งและดึงเพื่อคลายความเค้นตามกระบวนการ T651 เพื่อให้ได้ความแข็งแรงสูงสุด อะลูมิเนียมผสมชนิดนี้นิยมใช้งานที่ต้องการทั้งความแข็งแรงสูงร่วมกับความต้านทานต่อการกัดกร่อนที่ดีเยี่ยม

โดยส่วนผสมทางเคมีและสมบัติทางกลของอะลูมิเนียมผสมทั้งสองชนิดจะแสดงไว้ในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 ส่วนผสมทางเคมี (W.T. %) และสมบัติทางกลของอะลูมิเนียมหล่อผสมกึ่งของแข็ง SSM 356, SSM 356-T6 และ AA 6061-T651

Materials	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.
AA 6061-T651	0.60	0.70	0.28	0.15	1.00	0.25	0.15	0.20	-	Bal.
Properties	Ultimate tensile strength (MPa)			Yield strength (MPa)			Elongation (%)			
SSM 356	198			131			9.7			
SSM 356-T6	268			184			10.6			
AA 6061-T651	290			240			10.2			

3.3 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย

เครื่องมือและอุปกรณ์หลักต่างๆ ที่ใช้ในการทดลองครั้งนี้ จะประกอบไปด้วย

3.3.1 เครื่องจักรกลแบบอัตโนมัติ (Computerized Numerical Control Machine: CNC)

ในการทดลองครั้งนี้จะใช้เครื่องกัดแบบอัตโนมัติ CINCINNATI รุ่น ARROW VMC750 ดังแสดงในภาพประกอบที่ 3.3 เป็นเครื่องจักรที่มีการเคลื่อนที่ 3 แกน คือ แกน X, Y และ Z ระยะการเคลื่อนที่ของแกน X 762 มม. แกน Y 510 มม. และแกน Z 510 มม. ขนาดของโต๊ะจับยึดชิ้นงานยาว 950 มม. กว้าง 520 มม. รับน้ำหนักได้ 750 กิโลกรัม ความเร็วของสปินเดิล (Spindle) 60-6,000 รอบต่อนาที ความเร็วฟีด (Feed) สูงสุด 16 เมตรต่อนาที มีระบบการเปลี่ยนเครื่องมือตัดอัตโนมัติแบบรุ่ม (Tool Drum) บรรจุเครื่องมือตัดได้ 21 ตัว โปรแกรมที่ใช้ควบคุมเครื่องรุ่น Acramatic 2100

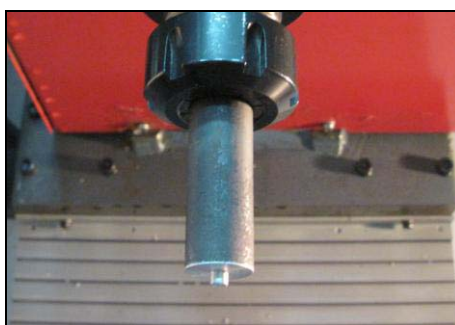


ภาพประกอบที่ 3.3 เครื่องกัดแบบอัตโนมัติ CINCINNATI รุ่น ARROW VMC750

เครื่องกัดแบบอัตโนมัติ CINCINNATI รุ่น ARROW VMC750 มีความสามารถในการกัด เจาะ ทำเกลียวบนชิ้นงานได้ทั้งในแนวระนาบ 2 มิติ และ 3 มิติ โดยการรับคำสั่งจากแป้นพิมพ์ของเครื่องหรือจากคอมพิวเตอร์ มีพิสัยความละเอียดในการกัดถึง 0.001 มม. ซึ่งถือได้ว่าเป็นเครื่องจักรที่มีความละเอียดเที่ยงตรงสูงมาก

3.3.2 เครื่องมือกวน

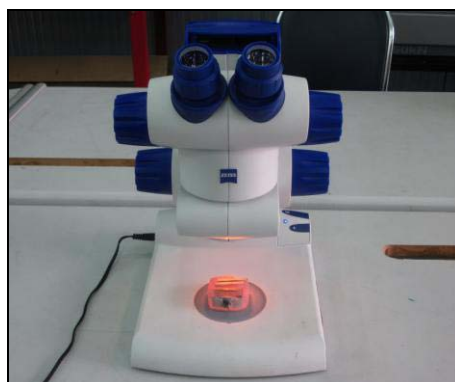
เครื่องมือกวนที่ใช้ในการทดลองมีลักษณะเป็นรูปทรงกระบอกที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของบ่า 20 มม. ตัวกวนมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 มม. และความยาวของตัวกวนมีขนาด 3.2 มม. ผลผลิตจากเหล็กเครื่องมือตามมาตรฐาน JIS-SKH 57 ดังแสดงในภาพประกอบที่ 3.4 โดยทั่วไปความยาวของตัวกวนจะมีค่าน้อยกว่าความหนาของแผ่นงานที่ใช้ในการเชื่อม ในการเชื่อมเครื่องมือกวนจะถูกจับยึดด้วยอุปกรณ์ของเครื่องจักร CNC



ภาพประกอบที่ 3.4 เครื่องมือกวนรูปทรงกระบอกที่ใช้ในการทดลอง

3.3.3 กล้องถ่ายภาพกำลังขยาย 2-10 เท่า

ใช้ในการดูภาพโครงสร้างมหภาคของแนวเชื่อม ดังแสดงในภาพประกอบที่ 3.5



ภาพประกอบที่ 3.5 กล้องถ่ายภาพกำลังขยาย 2-10 เท่า

3.3.4 กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (Optical Microscope: OM)

กล้องจุลทรรศน์ที่ใช้เป็นชนิดที่เหมาะสมกับงานด้าน โลหะวิทยา เป็นเครื่องมือที่ใช้ดูโครงสร้างทางจุลภาค ซึ่งจะประกอบด้วยส่วนหลักๆ 2 ส่วน คือ ส่วนที่เป็นลำกล้องจุลทรรศน์ และส่วนที่เป็นอุปกรณ์บันทึกข้อมูล ดังแสดงในภาพประกอบที่ 3.6 โดยมีกำลังขยายตั้งแต่ 50-800 เท่า ยี่ห้อ Nikon



ภาพประกอบที่ 3.6 กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง

3.3.5 เครื่องทดสอบแรงดึง

เครื่องทดสอบแรงดึง เครื่องหมายการค้า Testometric รุ่น M500-50kN เป็นเครื่องสำหรับทดสอบแรงดึงในแนวขวางของแนวเชื่อม โดยเตรียมชิ้นงานทดสอบแบบลดขนาด การทดสอบสามารถป้อนค่าพารามิเตอร์ได้โดยตรงจากหน้าจอ การประมวลผลการทดสอบจะเป็นลักษณะตัวเลขและกราฟ โดยในงานวิจัยครั้งนี้ใช้ทดสอบเพื่อหาค่าความแข็งแรงดึงสูงสุดของแนวเชื่อม (Ultimate Tensile Strength) ค่าความแข็งแรงที่จุดคราก (Yield Strength) และเปอร์เซ็นต์ในการยืดตัว (Percent Elongation) ดังแสดงในภาพประกอบที่ 3.7



ภาพประกอบที่ 3.7 เครื่องทดสอบแรงดึง Testometric รุ่น M500-50kN

3.3.6 เครื่องทดสอบความแข็ง

เป็นเครื่องที่ใช้ในการทดสอบเพื่อหาค่าความแข็งระดับจุลภาคของชิ้นงานทดสอบแบบ Micro Hardness Vickers Test รุ่น HWDM-3 Type A สามารถอ่านค่าการทดสอบได้จากเครื่องโดยตรงเป็นแบบตัวเลข การวัดความแข็งจะใช้หัวกดเพชรที่มีลักษณะเป็นปิรามิดฐานสี่เหลี่ยมปลายหัวกดทำมุม 136 องศา สามารถปรับค่าแรงกดได้ตั้งแต่ 5-1,000 kgf โดยในงานวิจัยครั้งนี้ได้กำหนดน้ำหนักกดของหัวกดคงที่ (Load Fixed) ไว้ที่ 100 กรัม กดเป็นเวลา 10 วินาที เพื่อหาค่าความแข็งที่บริเวณแนวแกน บริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อนทางกลและบริเวณเนื้อ โลหะเดิม ดังแสดงในภาพประกอบที่ 3.8



ภาพประกอบที่ 3.8 เครื่องทดสอบความแข็งแบบ ไมโครวิกเกอร์ส

3.3.7 เครื่องมือและอุปกรณ์เสริมอื่นๆ

เครื่องมือและอุปกรณ์เสริมอื่นๆ ที่จำเป็นต้องใช้ในงานวิจัยครั้งนี้ มีดังนี้

3.3.7.1 เครื่องกัดแนวตั้ง (Milling machine)

3.3.7.2 เครื่องเลื่อยสายพาน

3.3.7.3 เครื่องขัดกระดาษทรายและสักหลาด เครื่องที่ใช้เป็นของบริษัท METKON รุ่น DIGISET-2V เป็นแบบจานกลมเส้นผ่านศูนย์กลาง 8 นิ้ว สามารถปรับความเร็วรอบและทิศทางการหมุนของจานขัดได้

3.3.7.4 โตะเอียงองศา HSAP-2 ที่มีช่วงของมุมเอียง 50-0-90 องศา

3.3.7.5 อุปกรณ์จับยึด ใช้ในการจับยึดชิ้นงานขณะเชื่อม เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดการเคลื่อนที่และหลุดออกของชิ้นงานทดลองขณะเชื่อม ดังแสดงในภาพประกอบที่ 3.9

3.3.7.6 เตอบชิ้นงานอุณหภูมิต่ำ ใช้สำหรับทำกระบวนการทางความร้อน T6 ของอะลูมิเนียมหล่อกิ่งของแข็ง SSM 356 ก่อนเชื่อม



ภาพประกอบที่ 3.9 อุปกรณ์จับยึดชิ้นงาน

3.4 การกำหนดตัวแปรและการออกแบบการทดลอง

ปัจจัยที่มีผลต่อคุณภาพของแนวเชื่อมที่ได้จากการเชื่อมเสียดทานแบบกวนนั้น มีหลายปัจจัยด้วยกัน ซึ่งปัจจัยหลักที่มีผลโดยตรงต่อคุณภาพของแนวเชื่อมจะประกอบด้วย รูปแบบของตัวกวน ความเร็วหมุนเชื่อม ความเร็วเดินเชื่อม แรงกดและชนิดของวัสดุตัวกวน แต่ในงานวิจัยครั้งนี้ ผู้วิจัยมีความสนใจที่จะศึกษาถึงปัจจัยที่ควบคุมได้สองปัจจัย คือ ความเร็วหมุนเชื่อมและความเร็วเดินเชื่อมที่แตกต่างกันว่าจะส่งผลต่อลักษณะ โครงสร้างทางจุลภาคและสมบัติทางกลของแนวเชื่อมอย่างไร โดยผู้วิจัยได้กำหนดระดับของแต่ละปัจจัยหลักในการทดลองที่สำคัญ ดังนี้

3.4.1 ปัจจัยหลักในการทดลอง

ปัจจัยที่เลือกศึกษาในงานวิจัยครั้งนี้มีสองปัจจัย แต่ละปัจจัยมีระดับการทดลอง ดังนี้

3.4.1.1 ความเร็วหมุนเชื่อม มีสองระดับ คือ 1,750 และ 2,000 รอบต่อนาที

3.4.1.2 ความเร็วเดินเชื่อม มีหกกระดับ คือ 20, 50, 80, 120, 160 และ 200 มิลลิเมตร

ต่อนาที

3.4.2 ปัจจัยที่กำหนดให้คงที่ในการทดลอง

ปัจจัยที่กำหนดให้คงที่ในงานวิจัยครั้งนี้ จะประกอบด้วยปัจจัยดังนี้

3.4.2.1 รูปแบบของตัวกวน จะใช้ตัวกวนรูปทรงกระบอก

3.4.2.2 ชนิดของวัสดุตัวกวน ผลิตจากเหล็กเครื่องมือความเร็วสูงเกรด SKH 57

ตามมาตรฐาน JIS

3.4.2.3 แรงกด ในการทดลองจะกำหนดแรงกดให้คงที่ประมาณ 450 กิโลกรัม

3.4.2.4 ลักษณะการกำหนดด้านของวัสดุ โดยกำหนดให้ SSM 356 อยู่ด้าน advancing side (ด้านที่ทิศทางการหมุนของตัวกวนและทิศทางการเคลื่อนที่ในการเชื่อมไปในทิศทางตรงข้ามกัน) และ AA 6061-T651 อยู่ด้าน retreating side (ด้านที่ทิศทางการหมุนของตัวกวนและทิศทางการเคลื่อนที่ในการเชื่อมไปในทิศทางเดียวกัน)

3.4.2.5 การหมุนของตัวกวน ตัวกวนจะหมุนตามเข็มนาฬิกา

3.4.2.6 เครื่องจักรกลแบบอัตโนมัติและชุดอุปกรณ์จับยึดต่างๆ

3.4.3 การกำหนดขนาดตัวอย่าง

การกำหนดขนาดตัวอย่าง (n) เพื่อที่จะได้ขนาดของตัวอย่างที่สามารถเป็นตัวแทนของประชากรได้ ซึ่งในการกำหนดขนาดตัวอย่าง ถ้าสามารถกำหนดได้พอเหมาะก็จะทำให้การวิจัยนั้นมีประสิทธิภาพและน่าเชื่อถือ ดังนั้นในการกำหนดขนาดตัวอย่างจึงมีการกำหนดค่าต่างๆ ตามทฤษฎีที่แนะนำ ดังนี้

3.4.3.1 Type I Error ($\alpha; \zeta$) = 0.05

3.4.3.2 Power ($1 - \eta$) = 0.95

3.4.3.3 Number of Center Point = 0

3.4.3.4 Estimate (ω)

3.4.3.5 Minimum Effect (D)

สำหรับค่า Estimate (ω) และ Minimum Effect (D) สามารถหาค่าได้จากผลของการทดลองที่เกี่ยวข้องหรือค่าที่มีการแนะนำให้ใช้หรือการทดลองเบื้องต้น ในกรณีของงานวิจัยครั้งนี้ ไม่มีข้อมูลของการทดลองอื่นหรือมีข้อมูลอื่นๆ มาสนับสนุนในการประมาณค่าที่ต้องการ จึงเลือกวิธีการทดลองเชื่อมชิ้นงานเบื้องต้นก่อนเพื่อหาค่าดังกล่าว โดยทำการทดลองเชื่อมชิ้นงานและกำหนดค่าพารามิเตอร์ในการเชื่อมเหมือนกับแผนการทดลองแบบสุ่มและเชื่อมเบื้องต้น 1 ชั่วโมง จำนวน 12 ชิ้น ดังแสดงในตารางที่ 3.2 หลังจากนั้นนำชิ้นงานที่ผ่านขั้นตอนการเชื่อม ไปเตรียมเป็นชิ้นงานทดสอบแรงดึงตามมาตรฐาน ASTM-E8M และทดสอบชิ้นงานด้วยแรงดึง เก็บข้อมูลในส่วน of ค่าแรงดึงสูงสุด (Ultimate Tensile Strength) เพื่อหาค่าความแตกต่างของข้อมูลและใช้สำหรับกำหนดค่า Minimum Effect (D) หลังจากนั้นนำค่าดังกล่าวมาประมวลผลด้วยโปรแกรมประมวลผลทางสถิติ เพื่อหาค่า Estimate (ω) และขนาดของตัวอย่าง (n) ที่จะใช้สำหรับการทดลองจริงต่อไป

ตารางที่ 3.2 การออกแบบแผนการทดลองเชื่อมชิ้นงานแบบสุ่ม

Run Order	Std. Order	Rotation Speed (rpm)	Welding Speed (mm/min)
1	11	2,000	160
2	9	2,000	80
3	4	1,750	120
4	1	1,750	20
5	10	2,000	120
6	8	2,000	50
7	7	2,000	20
8	6	1,750	200
9	12	2,000	200
10	2	1,750	50
11	5	1,750	160
12	3	1,750	80

3.4.4 การวิเคราะห์ข้อมูลเชิงสถิติ

จากปัจจัยหลักที่สำคัญในการทดลองครั้งนี้ คือ ความเร็วหมุนเชื่อมและความเร็วเดินเชื่อมที่แตกต่างกัน ดังนั้น การวิเคราะห์ข้อมูลด้วยวิธีการทางสถิติจะพิจารณาจากผลการทดสอบสมบัติทางกลของแนวเชื่อม ด้วยแรงดึงในส่วนที่เป็นค่าความแข็งแรงดึงสูงสุด (Ultimate Tensile Strength) เนื่องจากเป็นค่าที่นิยมนำมาใช้ในการออกแบบ โดยข้อมูลที่ได้จากการทดสอบจะสามารถอธิบายถึงความแปรปรวนของข้อมูล รวมถึงสามารถอธิบายจากสมมติฐานในการทดลองถึงผลของความเร็วหมุนเชื่อมและความเร็วเดินเชื่อมที่แตกต่างกันจะให้ค่าความแข็งแรงดึงสูงสุดของแนวเชื่อมที่แตกต่างกันหรือไม่ ดังนั้น เพื่อให้เห็นผลสรุปของข้อมูลที่ชัดเจนจึงแบ่งการวิเคราะห์ผลทางสถิติได้เป็นสามกลุ่ม ดังนี้

กลุ่มที่ 1 วิเคราะห์ค่าความแข็งแรงดึงสูงสุดของแนวเชื่อมที่ได้จากการเชื่อมด้วยความเร็วหมุนเชื่อมที่แตกต่างกัน 2 ค่า คือ 1,750 และ 2,000 รอบต่อนาที

กลุ่มที่ 2 วิเคราะห์ค่าความแข็งแรงดึงสูงสุดของแนวเชื่อมที่ได้จากการเชื่อมด้วยความเร็วเดินเชื่อมที่แตกต่างกัน 6 ค่า คือ 20, 50, 80, 120, 160 และ 200 มิลลิเมตรต่อนาที

กลุ่มที่ 3 วิเคราะห์ค่าความแข็งแรงดึงสูงสุดของแนวเชื่อมที่เป็นอันตรกิริยากันระหว่างความเร็วหมุนเชื่อมกับความเร็วเดินเชื่อม (Interaction Effect)

ดังนั้น จากปัจจัย (Factor) หลักที่สำคัญในการทดลอง คือ ความเร็วหมุนเชื่อม (A) กับความเร็วเดินเชื่อม (B) จึงเลือกวิธีการออกแบบการออกแบบเชิงแฟกทอเรียล 2 ปัจจัย คือ A และ B ปัจจัย A จะประกอบด้วย a ระดับ และปัจจัย B จะประกอบด้วย b ระดับ ซึ่งทั้งหมดอยู่ในรูปของการออกแบบเชิงแฟกทอเรียล คือ ในแต่ละซ้ำของการทดลองประกอบด้วย การทดลองร่วมปัจจัยทั้งหมด $a * b$ การทดลอง โดยปกติจะมีจำนวนทำซ้ำทั้งหมด n ครั้ง กำหนดให้ y_{ijk} คือ ผลตอบที่สังเกตได้เมื่อปัจจัย A อยู่ที่ระดับ i ($i = 1, 2, \dots, a$) และปัจจัย B อยู่ที่ระดับ j ($j = 1, 2, \dots, b$) สำหรับซ้ำที่ k ($k = 1, 2, \dots, n$) รูปแบบทั่วไปของการออกแบบเชิงแฟกทอเรียล 2 ปัจจัย เนื่องจากลำดับของการสังเกตทั้ง $a * b * n$ ครั้ง ถูกเลือกมาอย่างสุ่ม ซึ่งเป็นการออกแบบสุ่มบริบูรณ์ (Completely Randomized Design) แบบจำลองสถิติเชิงเส้น (Linear Statistical Model) ดังแสดงในสมการที่ 3.1

$$y_{ijk} = \mu + \sigma_i + \eta_j + \omega_{ij} + \kappa_{ijk} \quad \dots\dots\dots(3.1)$$

โดยที่ σ คือ ผลเฉลี่ยทั้งหมด σ_i คือ ผลที่เกิดจากระดับที่ i ของแถวของปัจจัย A; η_j คือ ผลที่เกิดจากระดับที่ j ของคอลัมน์ ของปัจจัย B; ω_{ij} คือ ผลที่เกิดจากอันตรกิริยาระหว่าง σ_i และ η_j และ κ_{ijk} คือ องค์ประกอบของความผิดพลาดแบบสุ่ม สมมติว่าปัจจัยทั้งคู่มีค่าตายตัว (Fixed) และผลจากการทดลอง (Treatment Effect) คือ ส่วนที่เบี่ยงเบนจากค่าเฉลี่ยทั้งหมด

1. ข้อกำหนดของการทดสอบสมมติฐาน เป็นการกำหนดค่าทดสอบในทางสถิติของปัจจัยที่ได้จากการทดลอง เพื่อตรวจสอบค่าทางสถิติ

- 1) Error Type I (Alpha; ζ) = 0.05
- 2) Error Type II (Beta; η) = 0.05
- 3) Factor A = ความเร็วหมุนเชื่อมของเครื่องมือ (Rotation speed)
- 4) Factor B = ความเร็วเดินเชื่อม (Welding speed)

2. สมมติฐานสำหรับการทดลอง เป็นการทดสอบตัวแปรที่ถูกกำหนดในการทดลองว่ามีอิทธิพลต่อการทดลองหรือไม่ โดยตั้งสมมติฐานหลักและความสัมพันธ์ของตัวแปรตรวจสอบผลด้วยค่าทางสถิติ ดังนี้

1) พิจารณา Main Effect

ทดสอบสมมติฐาน อิทธิพลของความเร็วหมุนเชื่อม

$H_0 : \psi_1 | \psi_2$ สำหรับทุกระดับ อิทธิพลของความเร็วหมุนเชื่อมไม่แตกต่างกัน

$H_1 : \psi \neq \psi_2$ สำหรับบางระดับ อิทธิพลของความเร็วหมุนเชื่อมแตกต่างกัน

ทดสอบสมมติฐาน อิทธิพลของความเร็วเดินเชื่อม

$H_0 : \eta_1 | \eta_2 | \eta_3 | \eta_4 | \eta_5 | \eta_6$ สำหรับทุกระดับ อิทธิพลของความเร็วเดินเชื่อมไม่แตกต่างกัน

$H_1 : \eta_1 \neq \eta_2 \neq \eta_3 \neq \eta_4 \neq \eta_5 \neq \eta_6$ สำหรับบางระดับ อิทธิพลของความเร็วเดินเชื่อมแตกต่างกัน

2) พิจารณา Factor Interaction Effect

ทดสอบอันตรกิริยาระหว่างความเร็วหมุนเชื่อมกับความเร็วเดินเชื่อม

$H_0 : \psi\eta_{ij} | 0$ for all i, j ทุกระดับ i, j ไม่มีอิทธิพลของอันตรกิริยาระหว่างความเร็วหมุนเชื่อมกับความเร็วเดินเชื่อม ($i = 1, 2; j = 1, 2, 3, 4, 5, 6$)

$H_1 : \text{at least one } \psi\eta_{ij} \neq 0$ มีบาง i, j มีอิทธิพลของอันตรกิริยาระหว่างความเร็วหมุนเชื่อมกับความเร็วเดินเชื่อม ($i = 1, 2; j = 1, 2, 3, 4, 5, 6$)

3. วิธีการวิเคราะห์ข้อมูล

1) วิเคราะห์โดยความถูกต้องของตัวแบบ (Model Adequacy Checking) ซึ่งใช้โปรแกรมประมวลผลทางสถิติ ช่วยในการวิเคราะห์

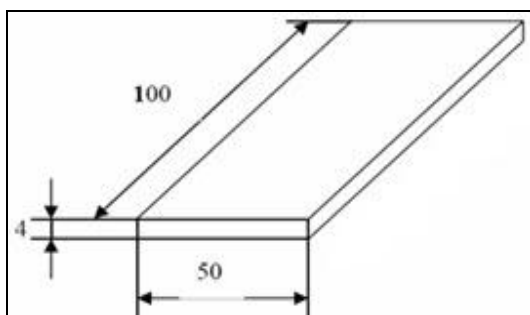
2) ทดสอบความแปรปรวนของข้อมูล

3) ประมวลผลด้วยโปรแกรมทางสถิติ เพื่อวิเคราะห์ข้อมูลและยืนยันสมมติฐานในการทดลอง ว่าอิทธิพลของความเร็วหมุนเชื่อมและความเร็วเดินเชื่อมที่แตกต่างกันมีผลต่อความแข็งแรงดึงสูงสุดของแนวเชื่อมหรือไม่

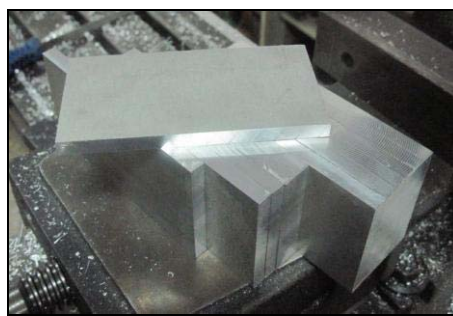
3.5 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

3.5.1 การเตรียมชิ้นงานทดลอง

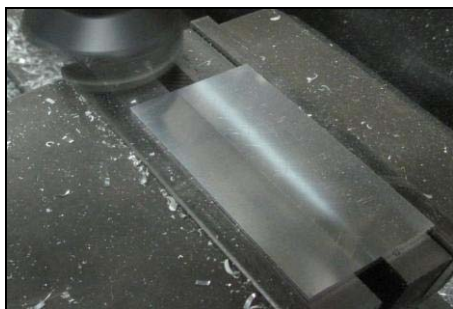
การเตรียมชิ้นงานทดลองในงานวิจัยครั้งนี้ ซึ่งวัสดุที่ใช้จะประกอบด้วยอะลูมิเนียมผสมสองเกรด คือ อะลูมิเนียมหล่อกิ่งของแข็ง SSM 356 กับอะลูมิเนียมรีดผสม AA 6061-T651 ซึ่งอะลูมิเนียมทั้งสองเกรดจะถูกเตรียมด้วยวิธีการเดียวกัน โดยทำการปรับขนาดผิวของชิ้นงานด้วยเครื่องกัดแนวตั้ง (Vertical milling machine) และนำไปตัดด้วยเลื่อยสายพานให้มีขนาดความกว้าง 50 มม. ยาว 100 มม. และหนา 4 มม. ชิ้นงานทดลองจะไม่มีการบากหน้าชิ้นงาน โดยผิวหน้าชิ้นงานทุกด้านจะถูกปาดให้มีความเรียบ ดังแสดงในภาพประกอบที่ 3.10 (ก)-(ง)



(ก) การกำหนดขนาดชิ้นงานทดลอง



(ข) การกัดขนาดตามความกว้างและยาว



(ค) การปาดผิวหน้าชิ้นงานให้มีความเรียบ

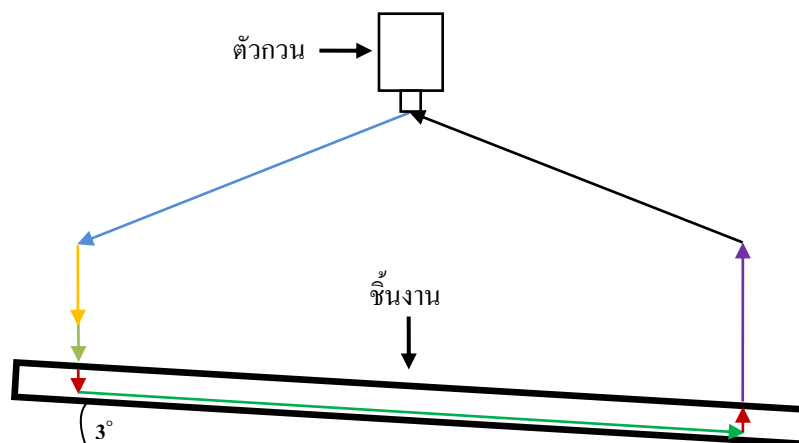


(ง) ขนาดชิ้นงานทดลองก่อนเชื่อม

ภาพประกอบที่ 3.10 ลำดับขั้นตอนการเตรียมชิ้นงานทดลอง

3.5.2 การเขียนโปรแกรมเอ็นซีสำหรับเครื่องจักรกลแบบอัตโนมัติ

ในส่วนของระบบควบคุมเครื่องจักรกลแบบอัตโนมัติเป็นส่วนที่ถูกเขียนอยู่ในรูปของเอ็นซีโปรแกรม ซึ่งเอ็นซีโปรแกรมนี้จำเป็นต้องถูกป้อนไปในตัวเครื่องจักร ในงานวิจัยครั้งนี้ ลักษณะการเดินเชื่อมจะเป็นไปตามภาพประกอบที่ 3.11 และเอ็นซีโปรแกรมสำหรับเครื่องจักรกลแบบอัตโนมัติรุ่น Cincinnati A2100 ถูกเขียนขึ้นตามที่ได้แสดงไว้ในตารางที่ 3.3



ภาพประกอบที่ 3.11 ลักษณะการเดินเชื่อม

ตารางที่ 3.3 เอ็นซีโปรแกรมสำหรับเครื่องจักรกลแบบอัตโนมัติรุ่น Cincinnati A2100

ส่วนของโปรแกรม	คำอธิบายโปรแกรม
N0010 :G90 G94 G17 G71 G40	ตั้งเครื่องในหน่วยเมตริกและอ้างอิงตำแหน่งแบบสัมบูรณ์
N0020 T05 M06	ใช้เครื่องมือลำดับที่ 5 หยุคเปลี่ยนเครื่องมือและเครื่องมือหยุดหมุน
N0030 S** M03	ใช้ความเร็วหมุนเชื่อม ** rpm และเครื่องมือหมุนตามเข็มนาฬิกา
N0040 G00 X0.00 Y0.00 Z100	เคลื่อนที่อย่างรวดเร็วไปที่ตำแหน่ง X0.00 Y0.00 Z100
N0050 G01 Z10.0 F1000	เคลื่อนที่ด้วยความเร็ว 1,000 mm/min ไปที่ตำแหน่ง Z10.0
N0060 G01 Z0.00 F100	เคลื่อนที่ด้วยความเร็ว 100 mm/min ไปที่ตำแหน่ง Z0.00
N0070 G01 Z-3.70 F12	เคลื่อนที่ด้วยความเร็ว 12 mm/min ไปที่ตำแหน่ง Z-3.70
N0080 G04 F55	เครื่องมือหมุนอยู่กับที่นาน 55 วินาที
N0090 G01 Z-7.87 Y-79.89 F*	เคลื่อนที่ด้วยความเร็ว * mm/min ไปที่ตำแหน่ง Z-7.87 Y-79.89
N0100 G04 F10	เครื่องมือหมุนอยู่กับที่นาน 10 วินาที
N0110 G01 Z-4.17 F12	เคลื่อนที่ด้วยความเร็ว 12 mm/min ไปที่ตำแหน่ง Z-4.17
N0120 G01 Z100 F1000	เคลื่อนที่ด้วยความเร็ว 1,000 mm/min ไปที่ตำแหน่ง Z100
N0130 M05	เครื่องมือหยุดหมุน
N0140 M30	จบโปรแกรม

หมายเหตุ : ** คือ ความเร็วหมุนเชื่อมที่ 1,750 และ 2,000 rpm.

* คือ ความเร็วเดินเชื่อมที่ 20, 50, 80, 120, 160 และ 200 mm/min.

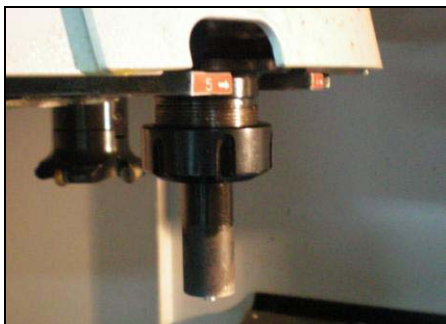
3.5.3 ขั้นตอนการทำกระบวนการทางความร้อน T6

กระบวนการทางความร้อน T6 จะใช้สำหรับปรับปรุงคุณสมบัติของชิ้นงาน อะลูมิเนียมหล่อกิ่งของแข็ง SSM 356 ก่อนนำไปเชื่อม หลังการเชื่อมเรียบร้อยแล้ว นำสมบัติของ แนวเชื่อมที่ได้มาเปรียบเทียบกับแนวเชื่อมที่ได้จากเชื่อมแบบธรรมดา โดยไม่ได้นำมาผ่าน กระบวนการทางความร้อน T6 โดยขั้นตอนการทำกระบวนการทางความร้อน T6 มีดังนี้

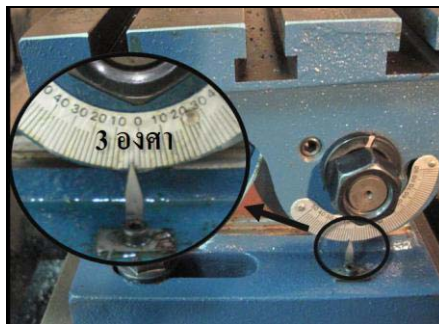
- 1) นำชิ้นงานอะลูมิเนียมหล่อกิ่งของแข็ง SSM 356 ใส่ในเตาเผาและเพิ่มอุณหภูมิ จากอุณหภูมิห้องจนกระทั่งถึงอุณหภูมิของเตาที่ต้องการ 540°C ภายในเวลา 1.07 ชั่วโมง เมื่อได้ อุณหภูมิที่ต้องการแล้วจึงเริ่มจับเวลาการเผาชิ้นทดสอบในขั้นตอน Solution Treatment เป็น ระยะเวลา 8 ชั่วโมง
- 2) เมื่อทำการเผาชิ้นทดสอบตามระยะเวลาต่างๆ ของการทดลองแล้ว นำชิ้น ทดสอบไปจุ่มลงในน้ำ
- 3) เมื่อผ่านขั้นตอนในขั้นที่ 1 และ 2 แล้ว นำชิ้นทดสอบไปบ่มที่อุณหภูมิ 165°C เป็นระยะเวลา 12 ชั่วโมง
- 4) เมื่อทำการบ่มชิ้นทดสอบตามระยะเวลาต่างๆ ของการทดลองแล้ว นำชิ้นงานไป จุ่มลงในน้ำ

3.5.4 การเชื่อมชิ้นงานทดลอง

ในการเชื่อมเสียดทานแบบกวนด้วยเครื่องจักรกลแบบอัตโนมัติ มีขั้นตอนและ วิธีการดังนี้ คือ ทำการติดตั้งตัวกวนเข้ากับชุดจับ tool ของ tool แมคคาซีน ดังแสดงในภาพประกอบ ที่ 3.12 (ก) ปรับมุมเอียงของโต๊ะเอียงองศาให้มีขนาด 3 องศาและไปติดตั้งบนโต๊ะงานของ เครื่องจักรกลแบบอัตโนมัติ ขึ้นให้แน่นด้วยสกรู ดังแสดงในภาพประกอบที่ 3.12 (ข) หลังจากนั้น ทำการป้อนโปรแกรมเอ็นซีเข้าสู่หน้าจอกอมพิวเตอร์ ดังแสดงในภาพประกอบที่ 3.12 (ค)-(ง) และ จับยึดชิ้นงานทดลองให้แน่นด้วยอุปกรณ์จับยึดชิ้นงาน เมื่อทำการติดตั้งชิ้นงานและป้อนโปรแกรม การทดลองเรียบร้อยแล้ว ทำการกดปุ่มสตาร์ทเพื่อให้เครื่องจักรทำงานตามตัวแปรเชื่อมที่ได้กำหนด อย่างอัตโนมัติ ดังแสดงในภาพประกอบที่ 3.12 (จ)-(ฉ)



(ก) ติดตั้งตัวกวนเข้ากับชุดจับ tool



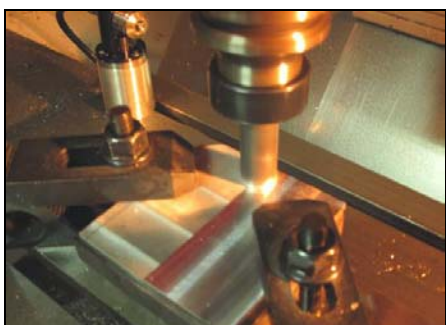
(ข) ปรับตั้งมุมโต๊ะเอียงองศา



(ค) จอคอมพิวเตอร์สำหรับป้อนเอ็นซีโปรแกรม



(ง) เอ็นซีโปรแกรมสำหรับการทดลอง



(จ) ตัวกวนหมุนและเริ่มต้นเชื่อม

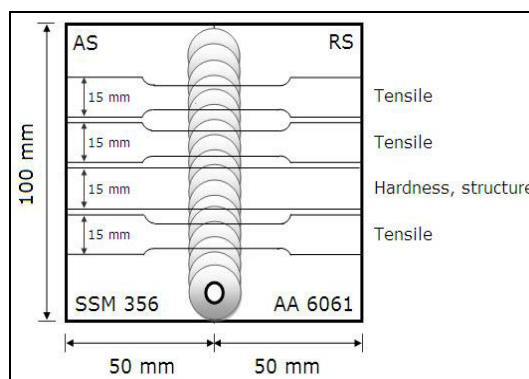


(ฉ) ขณะทำการเชื่อม

ภาพประกอบที่ 3.12 ลำดับขั้นตอนการเชื่อมชิ้นงานทดลอง

3.5.5 การเตรียมชิ้นงานสำหรับทดสอบโครงสร้างทางโลหะวิทยา

การตรวจสอบโครงสร้างทางโลหะวิทยานั้น จะใช้วิธีการตรวจสอบอยู่ 2 ลักษณะ คือ การตรวจสอบโครงสร้างทางมหภาคและจุลภาค โดยชิ้นงานที่ใช้ในการตรวจสอบจะเป็นชิ้นงานเดียวกัน การเตรียมชิ้นงานเพื่อนำไปทดสอบนั้นมีวิธีการ คือ นำชิ้นงานที่ผ่านการเชื่อมในแต่ละตัวแปรเชื่อมเรียบร้อยแล้ว มาตัดแบ่งเป็นชิ้นทดสอบแต่ละอย่างออกเป็นส่วนๆ ดังแสดงในภาพประกอบที่ 3.13 เมื่อได้ชิ้นงานทดสอบที่ถูกตัดเรียบร้อยแล้ว จากนั้นนำไปตรวจสอบตามลำดับต่อไป



ภาพประกอบที่ 3.13 การแบ่งชิ้นงานทดสอบทางโลหะวิทยาและทางกล

การเตรียมชิ้นงานสำหรับตรวจสอบโครงสร้างทางโลหะวิทยา โดยการนำชิ้นงานที่ตัดได้ขนาดแล้วมาเตรียมเป็นชิ้นงานตรวจสอบ โดยมีวิธีการตัดชิ้นงานเชื่อมที่ต้องการตรวจสอบ โครงสร้างทางโลหะวิทยา ต้องหลีกเลี่ยงให้เกิดความร้อนน้อยที่สุดเท่าที่จะทำได้ เนื่องจากความร้อนดังกล่าวจะทำให้โครงสร้างที่ผิวหน้าตัดเกิดการเปลี่ยนแปลงและส่งผลให้การตรวจสอบนั้นเกิดข้อผิดพลาด จากนั้นนำชิ้นงานที่ได้ไปหล่อเคลือบด้วยเรซิน ทั้งนี้เพื่อให้การขัดผิวสามารถกระทำได้ง่าย สำหรับขั้นตอนการขัดผิวชิ้นงานสามารถอธิบายขั้นตอนเป็นข้อๆ ดังนี้

1) ขัดชิ้นงานทดสอบด้วยกระดาษทรายที่ทำจากผงซิลิคอนคาร์ไบด์ ตั้งแต่เบอร์ 180, 360, 600, 800, และ 1,200 ตามลำดับ ดังแสดงในภาพประกอบที่ 3.14 (ก)-(ข) ในการขัดวางกระดาษทรายลงบนแผ่นงานขัดหน้าเรียบแล้วขัดผิวชิ้นงานทดสอบบนกระดาษทรายนั้น ในขณะเดียวกันให้เปิดน้ำอยู่ตลอดเวลา เพื่อชำระสิ่งสกปรกซึ่งได้แก่ ผงโลหะและซิลิคอนคาร์ไบด์ ออกให้หมด เมื่อต้องการเปลี่ยนกระดาษทรายแผ่นต่อไป ควรขัดชิ้นงานไปอีกแนวทางหนึ่งสลับกันไป ขณะขัดผิวงานไม่ควรใช้แรงกดมากเกินไป เพราะจะส่งผลให้โครงสร้างของชิ้นงานเกิดความบกพร่องจนนำไปสู่การตรวจสอบโครงสร้างที่ผิดพลาดได้



(ก) ชิ้นงานที่หล่อเคลือบด้วยเรซิน



(ข) งานขัดกระดาษทรายหน้าเรียบ

ภาพประกอบที่ 3.14 การขัดชิ้นงานทดสอบด้วยกระดาษทราย

2) นำชิ้นงานทดสอบไปทำความสะอาดด้วยเครื่องทำความสะอาดโดยใช้คลื่นอัลตราโซนิก

3) ขัดชิ้นงานทดสอบด้วยผงขัดที่ทำจากอะลูมินา (Alumina oxide) โดยใช้จานขัดที่หุ้มด้วยผ้าสักหลาดที่มีน้ำผสมกับผงอะลูมินาขนาดอนุภาค 5, 1 และ 0.3 ไมครอน ตามลำดับ เกลบบนผ้าสักหลาดแล้วขัดผิวจนเป็นมัน และนำชิ้นงานไปทำความสะอาดด้วยเครื่องทำความสะอาดโดยใช้คลื่นอัลตราโซนิก

4) กัดผิวหน้าชิ้นงานด้วยสารละลาย (Keller's reagent) ที่มีส่วนผสมทางเคมี ดังนี้

กรดไฮโดรฟลูออริก ความเข้มข้น 48% 2 ml.

กรดไฮโดรคลอริก (เข้มข้น) 3 ml.

กรดไนตริก 5 ml. และน้ำ 190 ml.

เป็นระยะเวลา 5 วินาที ล้างด้วยน้ำและเป่าให้แห้ง นำชิ้นงานไปส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (Optical microscope) เพื่อตรวจสอบโครงสร้างทางโลหะวิทยาต่อไป

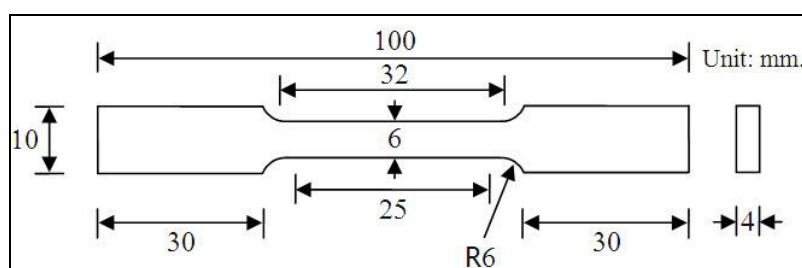
ในส่วนของการวิเคราะห์ผลการตรวจสอบจะแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนแรกเป็นการตรวจสอบลักษณะทางกายภาพและโครงสร้างทางมหภาค เพื่อดูลักษณะความแตกต่างที่บริเวณแนวเชื่อมและภายในรอยเชื่อม เช่น ลักษณะผิวด้านบน การเกิดครีบ ความกว้าง การเรียงตัวของเนื้อวัสดุและจุดบกพร่องอื่นๆ ส่วนที่สองเป็นการตรวจสอบโครงสร้างทางจุลภาค เพื่อตรวจสอบขนาดและลักษณะของเกรนที่ผ่านการเชื่อมที่บริเวณแนวแกน บริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อนทางกล และเนื้อโลหะเดิม

3.5.6 การเตรียมชิ้นงานสำหรับทดสอบสมบัติทางกล

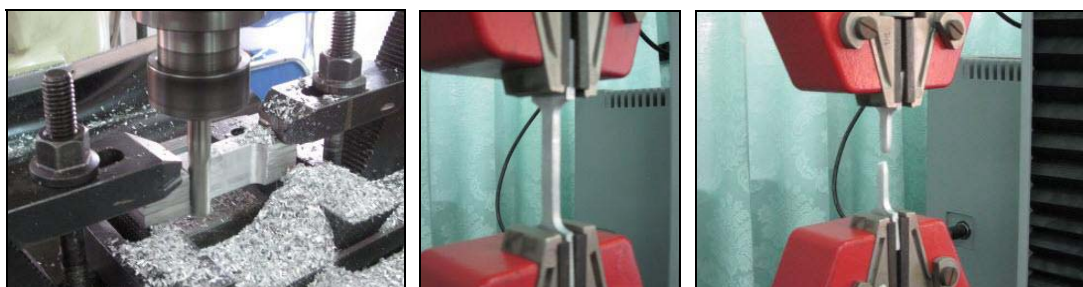
การทดสอบสมบัติทางกลเป็นการทดสอบความสามารถในการต้านทานต่อการแปรรูปถาวรของชิ้นงาน สำหรับงานวิจัยในครั้งนี้จะทดสอบสมบัติทางกล 2 สมบัติ คือ สมบัติในการต้านทานแรงดึงเพื่อทดสอบความสามารถในการต้านทานแรงดึงของชิ้นทดสอบ ด้วยการทดสอบกับเครื่องทดสอบแรงดึง ซึ่งจะได้เป็นค่าความแข็งแรงดึงของชิ้นงานทดสอบ และการทดสอบสมบัติด้านความแข็งแรงกดของผิวหน้าชิ้นทดสอบด้วยเครื่อง ไมโครวิกเกอร์เพื่อทดสอบความสามารถในการต้านทานแรงกด ซึ่งจะได้เป็นค่าความแข็งแรงของชิ้นงานทดสอบ โดยมีวิธีการเตรียมชิ้นงานทดสอบทั้งสอง ดังนี้

3.5.6.1 การเตรียมชิ้นงานสำหรับทดสอบแรงดึง

การเตรียมชิ้นงานสำหรับทดสอบแรงดึงของแนวเชื่อม จะเตรียมโดยการตัดชิ้นทดสอบตามขวางกับแนวเชื่อมให้ผิวงานทุกด้านมีความเรียบและสม่ำเสมอ กำหนดให้แนวเชื่อมอยู่ตรงกลางของชิ้นทดสอบกัลดขนาดด้วยเครื่องกัดแนวตั้งให้ได้ตามมาตรฐาน ASTM-E8M ดังแสดงในภาพประกอบที่ 3.15 (ก)-(ข) หลังจากนั้นนำชิ้นงานไปทดสอบแรงดึงที่อุณหภูมิต่ำ ดังแสดงในภาพประกอบที่ 3.15 (ค)-(ง) โดยกำหนดพารามิเตอร์ในการทดสอบให้เป็นไปตามมาตรฐาน ทำการบันทึกข้อมูลต่างๆ ที่เกี่ยวข้องเพื่อนำไปใช้ในการวิเคราะห์ผลต่อไป สำหรับการทดลองในครั้งนี้ใช้อัตราการดึงที่ 1.67×10^{-2} mm/s.



(ก) ขนาดชิ้นงานทดสอบตามมาตรฐาน ASTM-E8M



(ข) การกัดขนาดชิ้นงานมาตรฐาน

(ค) ชิ้นงานก่อนทดสอบ

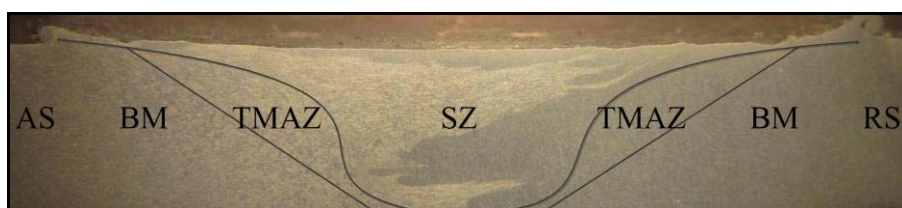
(ง) ชิ้นงานหลังทดสอบ

ภาพประกอบที่ 3.15 การเตรียมชิ้นงานทดสอบแรงดึง

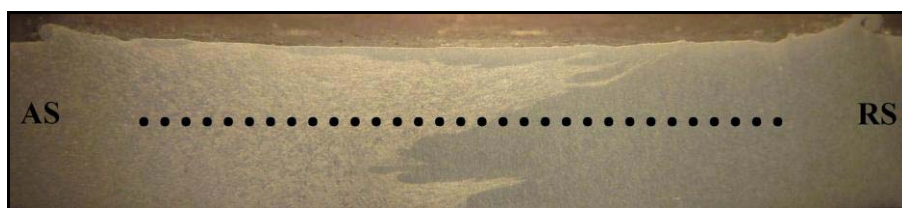
3.5.6.2 การเตรียมชิ้นงานสำหรับทดสอบความแข็ง (Hardness Testing)

ชิ้นงานทดสอบที่ใช้ในการทดสอบความแข็งจะเป็นชิ้นเดียวกันกับชิ้นงานที่ใช้ในการตรวจสอบโครงสร้างทางโลหะวิทยา เมื่อชิ้นงานดังกล่าวเสร็จสิ้นจากการตรวจสอบโครงสร้างทางจุลภาคและมหภาคแล้ว นำชิ้นงานไปทดสอบความแข็งเพื่อหาความสามารถในการต้านทานการแปรรูปถาวรของชิ้นงานที่บริเวณต่างๆ ดังแสดงในภาพประกอบที่ 3.16 (ก) ซึ่งจะประกอบด้วยบริเวณแนวทวน (Stir Zone; SZ) บริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อนทางกล (Thermo-

mechanically Affected Zone; TMAZ) และเนื้อโลหะเดิม (Base Metal; BM) โดยการวัดความแข็งนั้น ใช้วิธีวัดความแข็งในหน่วย Vickers ด้วยเครื่องทดสอบแบบ Micro Hardness Vickers Test รุ่น HWDM-3 Type A กำหนดน้ำหนักกดของหัวกดคงที่ 100 กรัม กดเป็นเวลา 10 วินาที ใช้หัวกดเพชร มีลักษณะเป็นทรงปิระมิดฐานสี่เหลี่ยมที่ปลายหัวกดทำมุม 136 องศา และหาค่าความแข็งของชิ้นงานที่ดีที่สุดในแต่ละตัวแปรเชื่อม ชิ้นงานทดสอบ 1 ชิ้น จะกดตรงกลางแนวเชื่อม ระยะห่างแต่ละจุด 0.4 มิลลิเมตร ดังแสดงในภาพประกอบที่ 3.16 (ข)



ภาพประกอบที่ 3.16 (ก) บริเวณต่างๆ ของแนวเชื่อม



ภาพประกอบที่ 3.16 (ข) ตำแหน่งวัดค่าความแข็งของแนวเชื่อม

ภาพประกอบที่ 3.16 การเตรียมชิ้นงานทดสอบความแข็ง

บทที่ 4

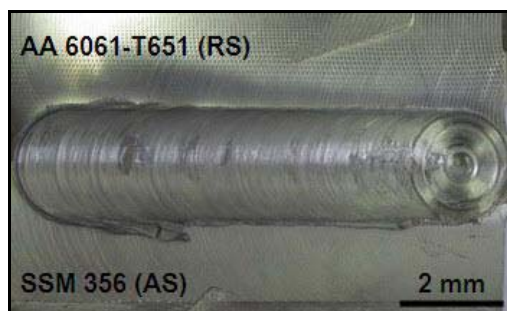
ผลการทดลองและการอภิปรายผล

เนื้อหาในบทนี้จะกล่าวถึงผลการทดลองและอภิปรายผลการทดลองที่ได้จากการเชื่อมเสียดทานแบบกวนของอะลูมิเนียมผสมต่างชนิดระหว่างอะลูมิเนียมหล่อกิ่งของแข็ง SSM 356 ที่ไม่ได้ผ่านกระบวนการทางความร้อน T6 กับอะลูมิเนียมผสม AA 6061-T651 และจากการเชื่อมเสียดทานแบบกวนของอะลูมิเนียมผสมต่างชนิดระหว่างอะลูมิเนียมหล่อกิ่งของแข็ง SSM 356 ที่ผ่านกระบวนการทางความร้อน T6 กับอะลูมิเนียมผสม AA 6061-T651 ซึ่งผลการทดลองที่จะรายงานในบทนี้จะประกอบด้วย ลักษณะผิวด้านบนของแนวเชื่อม ลักษณะโครงสร้างทางมหภาคและจุลภาคของแนวเชื่อม ผลการทดสอบความแข็งของบริเวณแนวเชื่อม ผลการทดสอบความต้านทานแรงดึงของแนวเชื่อม และการวิเคราะห์ผลเชิงสถิติของค่าความต้านทานแรงดึงของแนวเชื่อม โดยมีรายละเอียดต่อไปนี้

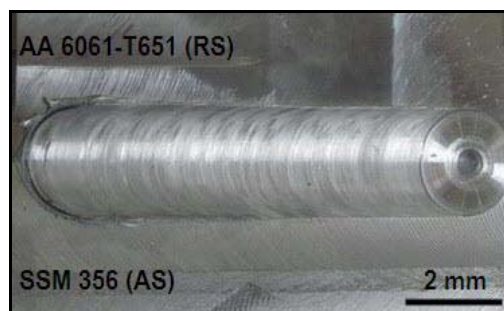
4.1 ลักษณะผิวด้านบนของแนวเชื่อม (Welding surface of welded)

จากการทดลองพบว่า ลักษณะผิวด้านบนของแนวเชื่อม โดยทั่วไปที่ทุกๆ ตัวแปรเชื่อม ความเร็วหมุนเชื่อม 1,750 และ 2,000 rpm และความเร็วเดินเชื่อม 20, 50, 80, 120, 160 และ 200 mm/min ผิวด้านบนของแนวเชื่อมจะมีความเรียบ เกล็ดของแนวเชื่อมจะมีความละเอียด มีการเกิดครีบบนบริเวณขอบของตัวบนผิวแนวเชื่อม โดยผิวด้านบนของแนวเชื่อมที่ได้ไม่มีข้อบกพร่องใดๆ เกิดขึ้น เช่น การเสียรูป รอยแตกหรือรอยแยก แต่อย่างไรก็ตามลักษณะผิวด้านบนของแนวเชื่อมบ่งบอกถึงผลที่เกิดขึ้นในกระบวนการเชื่อมและสมบัติของแนวเชื่อมด้วย ซึ่งจะส่งผลโดยตรงต่อสมบัติทางกล ที่ความเร็วหมุนเชื่อมเดียวกันจะพบว่าลักษณะผิวด้านบนของแนวเชื่อมที่ได้จากการเชื่อมที่ความเร็วเดินเชื่อมต่ำความเรียบของผิวจะน้อยกว่าเมื่อเทียบกับผิวที่ความเร็วเดินเชื่อมสูง เพราะที่ความเร็วเดินเชื่อมต่ำ ความร้อนจากการเสียดทานระหว่างตัวกวนกับผิวชิ้นงานมีมาก ส่งผลให้การอ่อนตัวและการเสียรูปเชิงพลาสติกของวัสดุมีมาก จึงทำให้เกิดครีบบนผิวมากขึ้นและความเรียบของผิวจะน้อยลง ในขณะที่ความเร็วเดินเชื่อมเดียวกัน แต่ความเร็วหมุนเชื่อมมีค่ามากขึ้น ความร้อนจากการเสียดทานระหว่างตัวกวนกับผิวชิ้นงานก็จะมากขึ้น จึงทำให้การเสียรูปเชิงพลาสติกของวัสดุมีมากขึ้นด้วย จากค่าความร้อนที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้เกิดครีบบนผิวแนวเชื่อมมีมากขึ้นและความเรียบของผิวก็จะน้อยลง นอกจากนี้ยังพบว่า แนวเชื่อมที่มีความร้อนจากการเสียด

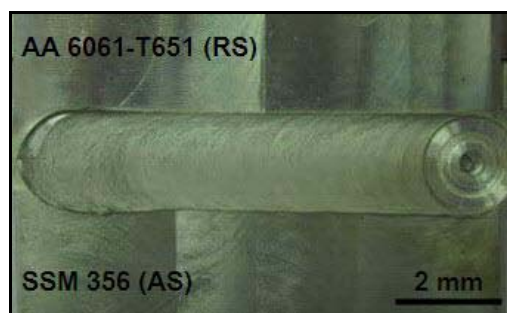
ทานที่มากพอ สามารถทำให้เกิดการซึมลึกที่ดี ไม่พบรอยแยกที่เกิดจากการไม่ประสานกันของแนวเชื่อม แต่จะเกิดรูขึ้นที่บริเวณจุดสิ้นสุดของแนวเชื่อมอันเนื่องมาจากปลายของตัวแกน



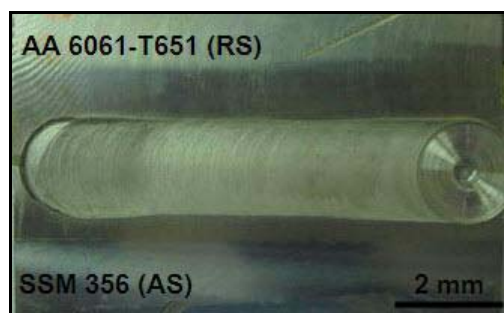
(ก) ความเร็วเดินเชื่อม 20 mm/min



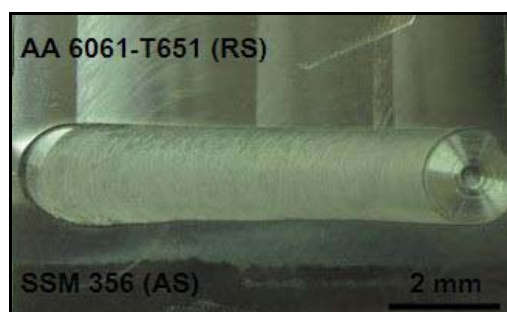
(ข) ความเร็วเดินเชื่อม 50 mm/min



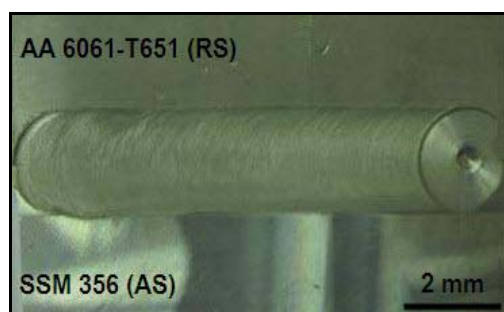
(ค) ความเร็วเดินเชื่อม 80 mm/min



(ง) ความเร็วเดินเชื่อม 120 mm/min



(จ) ความเร็วเดินเชื่อม 160 mm/min

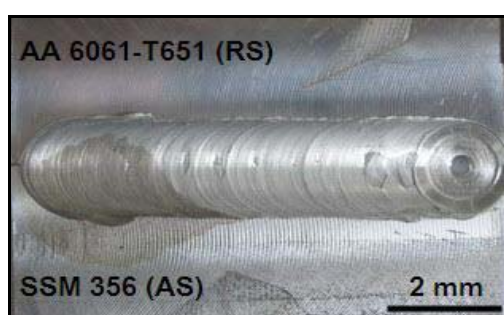


(ฉ) ความเร็วเดินเชื่อม 200 mm/min

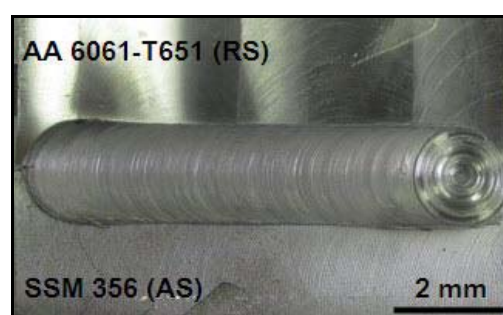
ภาพประกอบที่ 4.1 ลักษณะผิวด้านบนของแนวเชื่อมที่ความเร็วหมุนเชื่อม 1,750 rpm

จากความสัมพันธ์ระหว่างความกว้างของแนวเชื่อมกับความเร็วเดินเชื่อมที่ความเร็วหมุนเชื่อม 1,750 rpm ดังภาพประกอบที่ 4.1 และที่ความเร็วหมุนเชื่อม 2,000 rpm ดังภาพประกอบที่ 4.2 จะพบว่าที่ความเร็วเดินเชื่อมที่ต่ำ ความกว้างของแนวเชื่อมจะมีมากกว่าเมื่อเทียบกับที่ความเร็วเดินเชื่อมที่สูง และจะสังเกตเห็นได้ชัดเจนว่าที่ความเร็วเดินเชื่อมที่ต่ำ (20 mm/min) การเกิดครีปและผิวแนวเชื่อมมีความขรุขระมากขึ้นด้วยเมื่อเทียบกับที่ความเร็วเดินเชื่อมที่สูงๆ (200

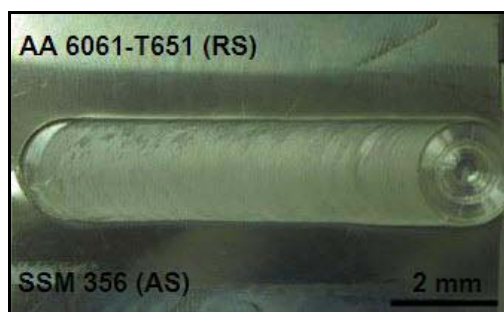
mm/min) การเกิดครีปที่ทั้งสองด้านของบริเวณขอบของแนวเชื่อมส่งผลให้แนวเชื่อมกว้างขึ้น เนื่องจากผลของความร้อนจากการเสียดทานที่มาก ทำให้ความร้อนที่จะส่งผลให้วัสดุเกิดการเสียรูปมีมากขึ้นด้วยและถูกขับออกมาเป็นครีปขึ้นในระหว่างกระบวนการเชื่อม ในทางกลับกันเมื่อค่าความเร็วเดินเชื่อมยิ่งสูงขึ้นขนาดของแนวเชื่อมจะแคบลง การเกิดครีปที่บริเวณขอบของแนวเชื่อมทั้งสองด้านมีน้อย เนื่องจากการที่ค่าความเร็วเดินเชื่อมเพิ่มขึ้นนั้นความร้อนและระยะเวลาของสัมผัสระหว่างตัวกวนกับผิวชิ้นงานมีน้อย การกระจายตัวของความร้อนและโอกาสที่จะเกิดการเสียรูปของวัสดุมีน้อยลงด้วย วัสดุที่จะถูกขับออกขณะที่ตัวกวนมีการเคลื่อนที่นั้นจึงน้อยลง สำหรับลักษณะผิวอื่นๆ ของแนวเชื่อมสามารถดูประกอบในภาคผนวก ค.1 และ ค.2



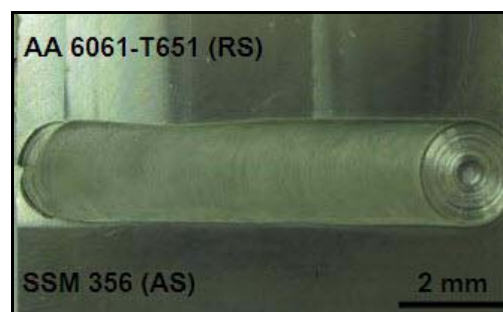
(ก) ความเร็วเดินเชื่อม 20 mm/min



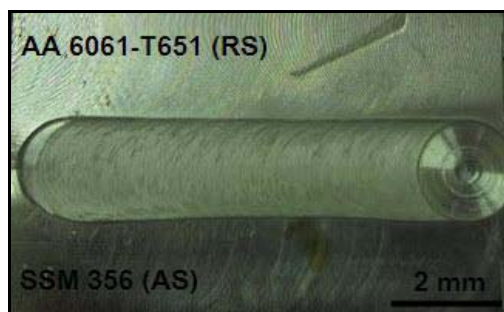
(ข) ความเร็วเดินเชื่อม 50 mm/min



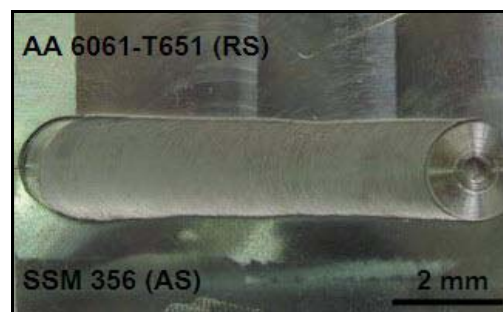
(ค) ความเร็วเดินเชื่อม 80 mm/min



(ง) ความเร็วเดินเชื่อม 120 mm/min



(จ) ความเร็วเดินเชื่อม 160 mm/min



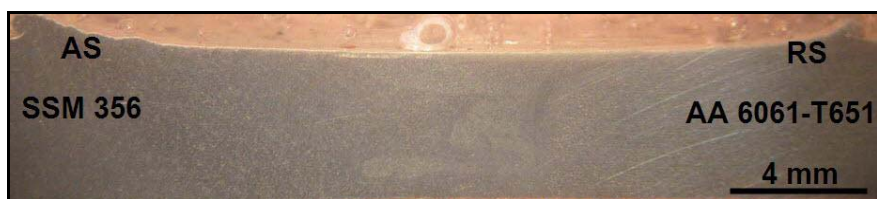
(ฉ) ความเร็วเดินเชื่อม 200 mm/min

ภาพประกอบที่ 4.2 ลักษณะผิวด้านบนของแนวเชื่อมที่ความเร็วหมุนเชื่อม 2,000 rpm

4.2 ลักษณะโครงสร้างทางมหภาคและจุลภาคของแนวเชื่อม (Macro and microstructure of welded)

4.2.1 ลักษณะโครงสร้างทางมหภาคของแนวเชื่อม

การตรวจสอบโครงสร้างทางมหภาคของแนวเชื่อมอะลูมิเนียมผสมต่างชนิด โดยการตัดชิ้นทดสอบในทิศทางตั้งฉากกับแนวเชื่อมและให้แนวเชื่อมอยู่ตรงกลางชิ้นทดสอบ ทำการขัดตามขั้นตอนที่ได้อธิบายในบทที่ 3 เพื่อตรวจสอบโครงสร้างทางมหภาคของแนวเชื่อมที่บริเวณตรงกลางแนวเชื่อม บริเวณเขตที่ได้รับผลกระทบจากความร้อนทางกล และบริเวณเนื้อโลหะเดิม ที่แต่ละตัวแปรเชื่อมดังแสดงในภาพประกอบที่ 4.3 ซึ่งจะเป็นลักษณะโครงสร้างทางมหภาคที่ความเร็วหมุนเชื่อม 1,750 rpm และภาพประกอบที่ 4.4 จะเป็นลักษณะโครงสร้างทางมหภาคที่ความเร็วหมุนเชื่อม 2,000 rpm จากผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าโครงสร้างของแนวเชื่อมส่วนใหญ่จะผันแปรไปตามตัวแปรเชื่อมในการทดลอง โดยจะพบว่าการปรับเปลี่ยนความเร็วหมุนเชื่อมและความเร็วเดินเชื่อมจะส่งผลให้การจัดเรียงตัวของเนื้อวัสดุที่บริเวณแนวเชื่อมเปลี่ยนไป เมื่อพิจารณาความเร็วหมุนเชื่อมที่เพิ่มขึ้นจะพบว่าลักษณะโครงสร้างทางมหภาคของแนวเชื่อมจะขยายตัวกว้างขึ้น โดยสามารถเปรียบเทียบได้จากภาพประกอบที่ 4.3(ค) และ 4.4(ค) เพราะความเร็วหมุนเชื่อมที่สูงขึ้นนั้นจะส่งผลให้ความร้อนจากการเสียดทานในเนื้อวัสดุมีค่าเพิ่มขึ้นด้วย ในขณะที่ความเร็วดำเนินเชื่อมเพิ่มขึ้นการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างที่บริเวณแนวเชื่อมจะกว้างขึ้นด้วยเมื่อเทียบกับโครงสร้างที่ความเร็วหมุนเชื่อมที่ต่ำ ความเร็วดำเนินเชื่อมของตัวกวนก็มีผลโดยตรงต่อการเปลี่ยนโครงสร้างของแนวเชื่อมเช่นกัน จากการทดลองพบว่าที่ความเร็วหมุนเชื่อมเดียวกันแต่ค่าความเร็วดำเนินเชื่อมเพิ่มขึ้น การเปลี่ยนโครงสร้างของแนวเชื่อมจะมีขนาดที่แคบและเล็กลง เพราะที่ความเร็วดำเนินเชื่อมยิ่งมาก ความร้อนจากการเสียดทานของตัวกวนกับเนื้อวัสดุจะยิ่งลดลง การกระจายตัวของความร้อนในวัสดุมีค่าน้อยจึงส่งผลให้การเปลี่ยนโครงสร้างของเนื้อวัสดุน้อยลงด้วย จากภาพประกอบที่ 4.3 จะสังเกตเห็นว่าแนวเชื่อมมีการผสมกันของอะลูมิเนียมผสมทั้งสองชนิด มีการเกิดครีปที่ขึ้นที่บริเวณขอบของแนวเชื่อม ซึ่งครีปที่เกิดขึ้นนั้นจะมีปริมาณน้อยลงเมื่อความเร็วดำเนินเชื่อมเพิ่มขึ้น ที่ตัวแปรเชื่อมบางค่าจะมีการเกิดรูโพรงขึ้น โดยเฉพาะที่ความเร็วดำเนินเชื่อม 160 และ 200 mm/min เนื่องจากผลของความร้อนจากการเสียดทานที่ไม่เพียงพอทำให้การผสมกันของเนื้อวัสดุไม่สมบูรณ์จึงก่อให้เกิดรูโพรงขึ้นในแนวเชื่อมและจะส่งผลต่อสมบัติทางกลของแนวเชื่อมด้วย สำหรับภาพประกอบที่ 4.4 แนวเชื่อมไม่มีรูโพรงเกิดขึ้น เนื่องจากที่ค่าความเร็วดำเนินเชื่อม 2,000 rpm จะเป็นช่วงความเร็วหมุนเชื่อมที่สามารถให้ค่าความร้อนจากการเสียดทานที่เหมาะสมและสามารถเพิ่มค่าความเร็วดำเนินเชื่อมได้ โดยที่ไม่มีรูโพรงเกิดขึ้นในแนวเชื่อม



(ก) ความเร็วเดินเชื่อมที่ 20 mm/min



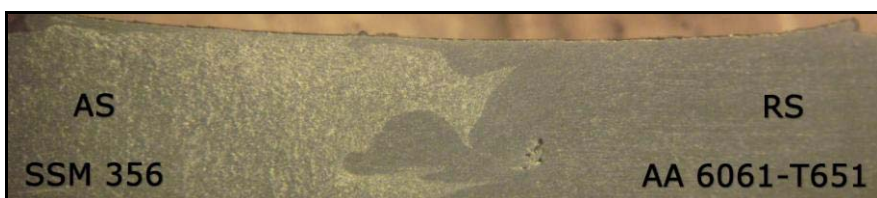
(ข) ความเร็วเดินเชื่อมที่ 50 mm/min



(ค) ความเร็วเดินเชื่อมที่ 80 mm/min



(ง) ความเร็วเดินเชื่อมที่ 120 mm/min

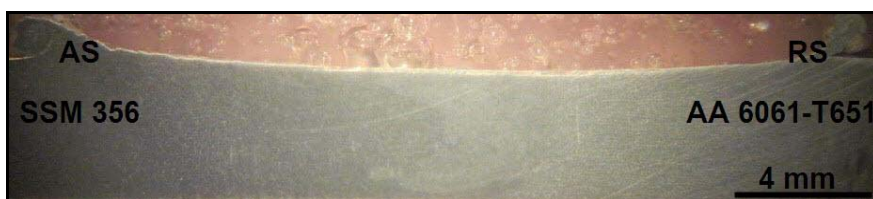


(จ) ความเร็วเดินเชื่อมที่ 160 mm/min



(ฉ) ความเร็วเดินเชื่อมที่ 200 mm/min

ภาพประกอบที่ 4.3 โครงสร้างทางมหภาคของแนวเชื่อมที่ความเร็วหมุนเชื่อม 1,750 rpm



(ก) ความเร็วเดินเชื่อมที่ 20 mm/min



(ข) ความเร็วเดินเชื่อมที่ 50 mm/min



(ค) ความเร็วเดินเชื่อมที่ 80 mm/min



(ง) ความเร็วเดินเชื่อมที่ 120 mm/min



(จ) ความเร็วเดินเชื่อมที่ 160 mm/min



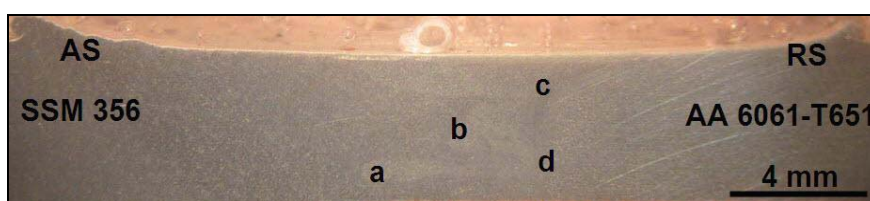
(ฉ) ความเร็วเดินเชื่อมที่ 200 mm/min

ภาพประกอบที่ 4.4 โครงสร้างทางมหภาคของแนวเชื่อมที่ความเร็วหมุนเชื่อม 2,000 rpm

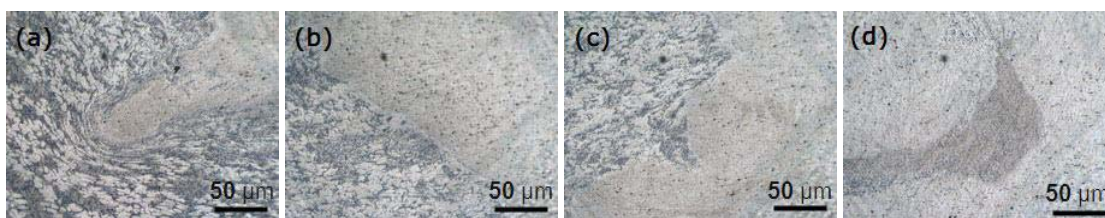
4.2.2 ลักษณะโครงสร้างทางจุลภาคของแนวเชื่อม

4.2.2.1 โครงสร้างทางจุลภาคของแนวเชื่อมที่ความเร็วหมุนเชื่อม 1,750 rpm ความเร็วเดินเชื่อมที่ 20 mm/min

จากการทดลองพบว่า โครงสร้างจุลภาคที่ความเร็วหมุนเชื่อม 1,750 rpm และความเร็วเดินเชื่อมที่ 20 mm/min โครงสร้างบริเวณที่ถูกกวนจะมีการเกิดผลึกใหม่ที่มาจากการรวมตัวกันของวัสดุทั้งสองชนิดอย่างชัดเจน โดยจะมีการเรียงตัวสลับกันของวัสดุทั้งสอง (ซิกแซก) จะสังเกตเห็นว่าพื้นที่โดยรวมของพื้นที่ซิกแซกจะมีขนาดกว้าง เนื่องจากการหมุนกวนในขณะเชื่อมที่นานขึ้น ทำให้การไหลวนของเนื้อวัสดุมีความสมบูรณ์ขึ้นและพื้นที่การกระจายตัวของความร้อนมีการแผ่กระจายเพิ่มขึ้นด้วย จากภาพประกอบที่ 4.5(ข) เป็นบริเวณด้านแอดวานซิงของแนวเชื่อม จะพบว่ามีเนื้อวัสดุของ AA 6061 ผสมอยู่โดยเนื้อวัสดุมีความละเอียดมากขึ้นเนื่องจากถูกบดและไหลกระแทกกับเครื่องมือในขณะกวน เกรนของ SSM 356 จะมีลักษณะยาวเรียวยาวเนื่องจากการเสีรูปร่างพลาสติกเนื่องจากตัวกวน ภาพประกอบที่ 4.5(ค) เป็นโครงสร้างของผลึกใหม่ระหว่างเนื้อวัสดุของสองชนิดโดยเกรนจะมีความละเอียดและมีขนาดเล็กกว่าเนื้อโลหะเดิม ภาพประกอบที่ 4.5(ง) เกรนจะมีความละเอียดมากโดยเฉพาะ AA 6061 ซึ่งด้านบนของบริเวณแนวกวนจะมีเนื้อโลหะชนิดนี้ผสมอยู่เป็นจำนวนมากเนื่องจากพัดพาในขณะกวน ภาพประกอบที่ 4.5(จ) เป็นบริเวณด้านรีทริทิงของแนวกวนโดยเนื้อวัสดุส่วนใหญ่จะเป็นเนื้อวัสดุของโลหะที่ถูกกำหนดให้อยู่ด้านรีทริทิงและเนื้อวัสดุบางส่วนจะมีการเรียงตัวสลับกันไประหว่าง SSM 356 กับ AA 6061



(ก) โครงสร้างทางมหภาค



(ข) จุด a

(ค) จุด b

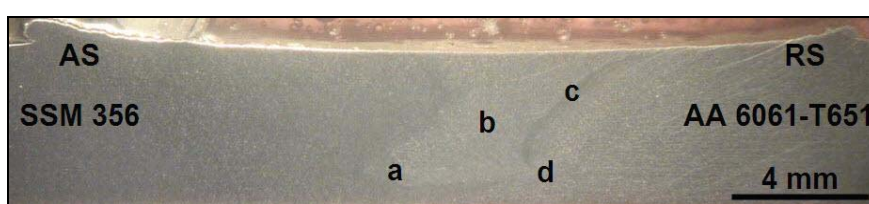
(ง) จุด c

(จ) จุด d

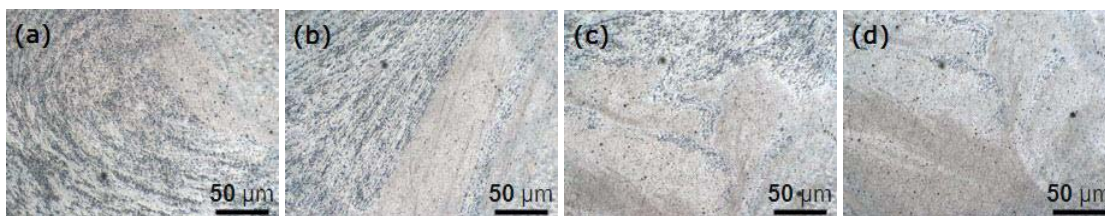
ภาพประกอบที่ 4.5 โครงสร้างทางจุลภาคของแนวเชื่อมที่ความเร็วหมุนเชื่อม 1,750 rpm ความเร็วเดินเชื่อมที่ 20 mm/min

4.2.2.2 โครงสร้างทางจุลภาคของแนวเชื่อมที่ความเร็วหมุนเชื่อม 1,750 rpm ความเร็วเดินเชื่อมที่ 50 mm/min

จากการทดลองพบว่า โครงสร้างจุลภาคที่ความเร็วหมุนเชื่อม 1,750 rpm และความเร็วเดินเชื่อมที่ 50 mm/min โครงสร้างบริเวณที่ถูกกวนจะมีการเกิดผลึกใหม่ที่มาจากการรวมตัวกันของวัสดุทั้งสองชนิดอย่างชัดเจน โดยจะมีการเรียงตัวสลับกันของวัสดุทั้งสอง (ซิกแซก) ที่ตรงกลางเนื้อเชื่อมมีเนื้อวัสดุด้านรีทริทติงอยู่ด้านล่างและด้านบนจะมีเนื้อของวัสดุด้านแอควานซิง เนื่องจากเนื้อวัสดุถูกขับมาในขณะที่กวน จะสังเกตเห็นว่าพื้นที่โดยรวมของพื้นที่ซิกแซกจะมีขนาดแคบกว่าที่ความเร็วเดินเชื่อม 20 mm/min เนื่องจากการหมุนกวนในขณะที่เชื่อมที่นานขึ้นทำให้การไหลวนของเนื้อวัสดุมีความสมบูรณ์ขึ้นและพื้นที่การกระจายตัวของความร้อนมีการแผ่กระจายเพิ่มขึ้นด้วย จากภาพประกอบที่ 4.6(ข) เป็นบริเวณด้านแอควานซิงของแนวเชื่อม จะพบว่ามีเนื้อวัสดุของ AA 6061 ผสมอยู่โดยเนื้อวัสดุมีความละเอียดมากขึ้นเนื่องจากถูกบิดและไหลกระแทกกับเครื่องมือในขณะที่กวน เกรนของ SSM 356 จะมีลักษณะยาวเรียวเนื่องจากการเสียรูปเชิงพลาสติกเนื่องจากตัวกวน ภาพประกอบที่ 4.6(ค) เป็นโครงสร้างของผลึกใหม่ระหว่างเนื้อวัสดุของสองชนิดโดยเกรนจะมีความละเอียดและมีขนาดเล็กกว่าเนื้อโลหะเดิม ภาพประกอบที่ 4.6(ง) เกรนจะมีความละเอียดมาก โดยเฉพาะ AA 6061 ซึ่งด้านบนของบริเวณแนวกวนจะมีเนื้อโลหะชนิดนี้ผสมอยู่เป็นจำนวนมาก เนื่องจากการพัดพาในขณะที่กวน ภาพประกอบที่ 4.5(จ) เป็นบริเวณด้านรีทริทติงของแนวกวนโดยเนื้อวัสดุส่วนใหญ่จะเป็นเนื้อวัสดุของโลหะที่ถูกกำหนดให้อยู่ด้านรีทริทติงและเนื้อวัสดุบางส่วนจะมีการเรียงตัวสลับกันไประหว่าง SSM 356 กับ AA 6061



(ก) โครงสร้างทางมหภาค



(ข) จุด a

(ค) จุด b

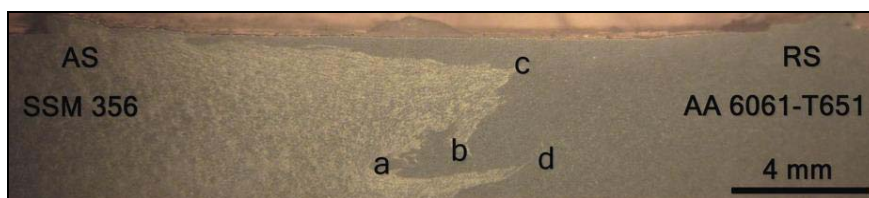
(ง) จุด c

(จ) จุด d

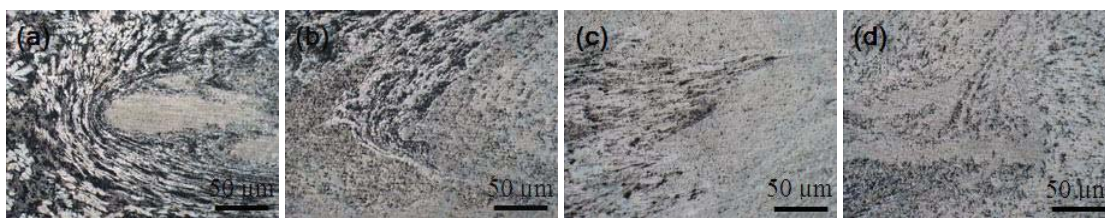
ภาพประกอบที่ 4.6 โครงสร้างทางจุลภาคของแนวเชื่อมที่ความเร็วหมุนเชื่อม 1,750 rpm ความเร็วเดินเชื่อมที่ 50 mm/min

4.2.2.3 โครงสร้างทางจุลภาคของแนวเชื่อมที่ความเร็วหมุนเชื่อม 1,750 rpm ความเร็วเดินเชื่อมที่ 80 mm/min

จากการทดลองพบว่า โครงสร้างจุลภาคที่ความเร็วหมุนเชื่อม 1,750 rpm และความเร็วเดินเชื่อมที่ 80 mm/min โครงสร้างบริเวณเนื้อเชื่อมที่ถูกกวจะมีเกิดการเกิดผลึกใหม่ที่มาจากการรวมตัวกันของวัสดุทั้งสองชนิดอย่างชัดเจน โดยจะมีการเรียงตัวสลับกันของวัสดุทั้งสอง (ซิกแซก) ที่ตรงกลางเนื้อเชื่อมมีเนื้อวัสดุด้านรีทริทติงอยู่ด้านล่างและด้านบนจะมีเนื้อของวัสดุด้านแอควาซิง เนื่องจากเนื้อวัสดุถูกขับมาในขณะที่กว จากภาพประกอบที่ 4.7(ข) เป็นบริเวณด้านแอควาซิงของแนวเชื่อมจะพบว่ามีเนื้อวัสดุของ AA 6061 ผสมอยู่โดยเนื้อวัสดุมีความละเอียดมากขึ้นเนื่องจากถูกบดและไหลกระแทกกับเครื่องมือในขณะที่กว เกรนของ SSM 356 จะมีลักษณะยาวเรียวยาวเนื่องจากมีการเสีรูปร่างพลาสติกเนื่องจากตัวกว ภาพประกอบที่ 4.7(ค) เป็นโครงสร้างของผลึกใหม่ระหว่างเนื้อวัสดุของสองชนิดโดยเกรนจะมีความละเอียดและมีขนาดเล็กกว่าเนื้อโลหะเดิม ภาพประกอบที่ 4.7(ง) เกรนจะมีความละเอียดมากโดยเฉพาะ AA 6061 ซึ่งด้านบนของบริเวณแนวกวจะมีเนื้อโลหะชนิดนี้ผสมอยู่เป็นจำนวนมากเนื่องจากพัดพาในขณะที่กว ภาพประกอบที่ 4.7(จ) เป็นบริเวณด้านรีทริทติงของแนวกว โดยเนื้อวัสดุส่วนใหญ่จะเป็นเนื้อวัสดุของโลหะที่ถูกกำหนดให้อยู่ด้านรีทริทติงและเนื้อวัสดุบางส่วนจะมีการเรียงตัวสลับกันไประหว่าง SSM 356 กับ AA 6061



(ก) โครงสร้างทางมหภาค



(ข) จุด a

(ค) จุด b

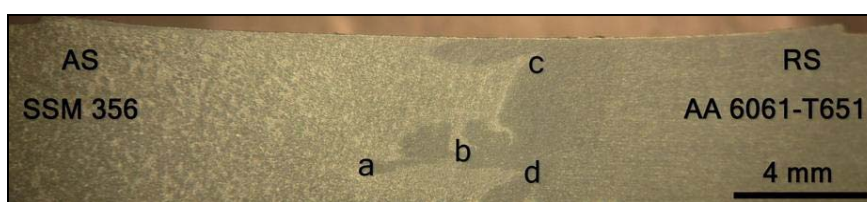
(ง) จุด c

(จ) จุด d

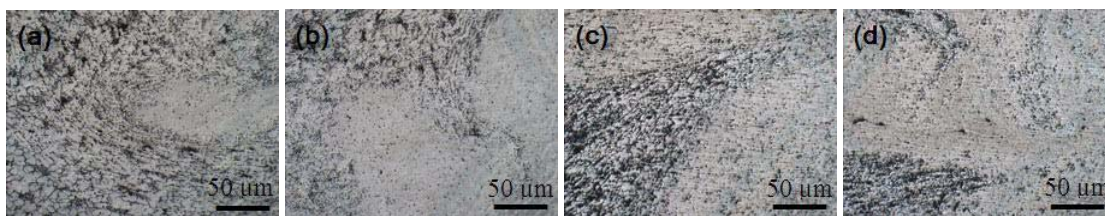
ภาพประกอบที่ 4.7 โครงสร้างทางจุลภาคของแนวเชื่อมที่ความเร็วหมุนเชื่อม 1,750 rpm ความเร็วเดินเชื่อมที่ 80 mm/min

4.2.2.4 โครงสร้างทางจุลภาคของแนวเชื่อมที่ความเร็วหมุนเชื่อม 1,750 rpm ความเร็วเดินเชื่อมที่ 120 mm/min

จากการทดลองพบว่า โครงสร้างจุลภาคที่ความเร็วหมุนเชื่อม 1,750 rpm และความเร็วเดินเชื่อมที่ 120 mm/min โครงสร้างบริเวณเนื้อเชื่อมที่ถูกกวนจะมีการเกิดผลึกใหม่ที่มาจากการรวมตัวกันของวัสดุทั้งสองชนิดอย่างชัดเจน โดยจะมีการเรียงตัวสลับกันของวัสดุทั้งสอง (ซิกแซก) ที่ตรงกลางเนื้อเชื่อมมีเนื้อวัสดุด้านรีทริทติงอยู่ด้านล่างและด้านบนจะมีเนื้อของวัสดุด้านแอควานซิง เนื่องจากเนื้อวัสดุถูกขับมาในขณะที่กวน จะสังเกตเห็นว่าพื้นที่โดยรวมของพื้นที่ซิกแซกจะมีแคบกว่าก่อนหน้า เนื่องจากเคลื่อนที่ในขณะที่เดินเชื่อมที่เร็วขึ้นทำให้การไหลวนของเนื้อวัสดุน้อยลงด้วย และไม่พบข้อบกพร่องใดๆ ในรอยเชื่อม จากภาพประกอบที่ 4.8(ข) ซึ่งจะเป็นบริเวณด้านแอควานซิงของแนวเชื่อมจะพบว่ามีเนื้อวัสดุของ AA 6061 ผสมอยู่โดยเนื้อวัสดุมีความละเอียดมากขึ้นเนื่องจากถูกบดและไหลกระแทกกับเครื่องมือในขณะที่กวน เกรนของ SSM 356 จะมีลักษณะยาวเรียวเนื่องจากมีการเสีรูปร่างพลาสติกเนื่องจากตัวกวน ภาพประกอบที่ 4.8(ค) แสดงโครงสร้างของผลึกใหม่ระหว่างเนื้อวัสดุของสองชนิด โดยเกรนจะมีความละเอียดและมีขนาดเล็กกว่าเนื้อโลหะเดิม ภาพประกอบที่ 4.8(ง) เกรนจะมีความละเอียดมากโดยเฉพาะ AA 6061 ซึ่งด้านบนของบริเวณแนวกวนจะมีเนื้อโลหะชนิดนี้ผสมอยู่เป็นจำนวนมากเนื่องจากพัดพาในขณะที่กวน ภาพประกอบที่ 4.8(จ) เป็นบริเวณด้านรีทริทติงของแนวกวนโดยเนื้อวัสดุส่วนใหญ่จะเป็นเนื้อวัสดุของโลหะที่ถูกกำหนดให้อยู่ด้านรีทริทติง และเนื้อวัสดุบางส่วนจะมีการเรียงตัวสลับกับไประหว่าง SSM 356 กับ AA 6061



(ก) โครงสร้างทางมหภาค



(ข) จุด a

(ค) จุด b

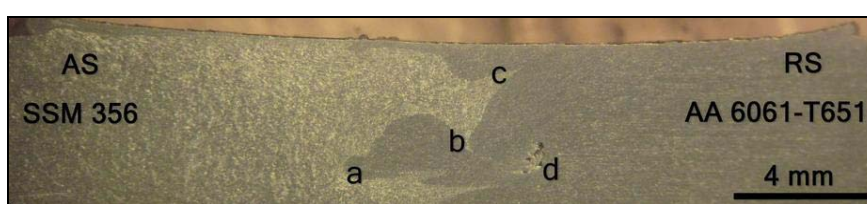
(ง) จุด c

(จ) จุด d

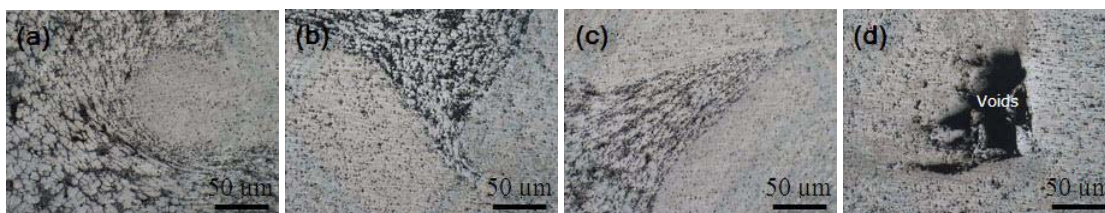
ภาพประกอบที่ 4.8 โครงสร้างทางจุลภาคของแนวเชื่อมที่ความเร็วหมุนเชื่อม 1,750 rpm ความเร็วเดินเชื่อมที่ 120 mm/min

4.2.2.5 โครงสร้างทางจุลภาคของแนวเชื่อมที่ความเร็วหมุนเชื่อม 1,750 rpm ความเร็วเดินเชื่อมที่ 160 mm/min

จากการทดลองพบว่า โครงสร้างจุลภาคที่ความเร็วหมุนเชื่อม 1,750 rpm และความเร็วเดินเชื่อมที่ 160 mm/min โครงสร้างบริเวณเนื้อเชื่อมที่ถูกกวนจะมีการเกิดผลึกใหม่ที่มาจากการรวมตัวกันของวัสดุทั้งสองชนิดอย่างชัดเจน โดยจะมีการเรียงตัวสลับกันของวัสดุทั้งสองชั้นที่ตรงกลางเนื้อเชื่อมมีเนื้อวัสดุด้านรีทริทติงอยู่ด้านล่างและด้านบนจะมีเนื้อของวัสดุด้านแอควานซึ่งเนื่องจากเนื้อวัสดุถูกขับมาในขณะที่กวน ที่ตัวแปรเชื่อมค่านี้จะพบข้อบกพร่องเกิดขึ้นในรอยเชื่อมที่บริเวณปลายตัวกวนด้านรีทริทติง จากภาพประกอบที่ 4.9(จ) เป็นบริเวณด้านแอควานซึ่งของแนวเชื่อมจะพบว่ามีเนื้อวัสดุของ AA 6061 ผสมอยู่โดยเนื้อวัสดุมีความหยาบกว่าเพราะถูกบดและการไหลกระทบกับตัวกวนในขณะที่เชื่อม เกรนของ SSM 356 ที่บริเวณนี้จะมีลักษณะเรียวยาวน้อยลงเนื่องจากการเสีรูปร่างพลาสติกที่เกิดขึ้นจะน้อยลง ภาพประกอบที่ 4.9(ค) เป็นโครงสร้างของผลึกใหม่ระหว่างเนื้อวัสดุของสองชนิดโดยเกรนจะมีความละเอียดและมีขนาดเล็กกว่าเนื้อโลหะเดิม ภาพประกอบที่ 4.9(ง) เกรนจะมีความละเอียดโดยเฉพาะ AA 6061 และเนื้อโลหะที่มีความแหลมคมแทรกจะตัวอยู่ที่บริเวณกลางของพื้นที่ ภาพประกอบที่ 4.9(จ) เป็นบริเวณที่ได้รับผลจากความร้อนทางกลด้านรีทริทติงของแนวกวน โดยมีรูโพรงเกิดขึ้น เนื่องจากความเร็วเดินที่สูงขึ้น เนื้อวัสดุที่บริเวณดังกล่าวมีการไหลวนที่ไม่สมบูรณ์พอ ความร้อนนำเข้าไปจะส่งผลให้วัสดุมีความเป็นพลาสติกมีน้อยทำให้การประสานกันของเนื้อวัสดุไม่สมบูรณ์จึงเป็นเหตุให้เกิดโพรงขึ้นที่บริเวณดังกล่าว



(ก) โครงสร้างทางมหภาค



(ข) จุด a

(ค) จุด b

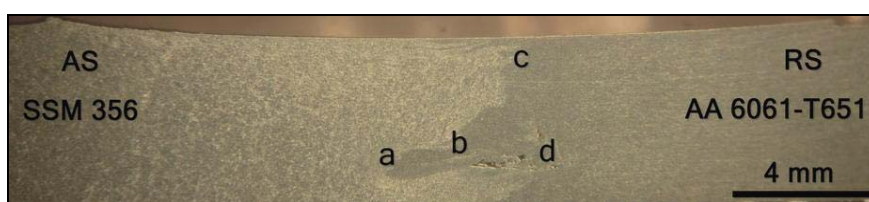
(ง) จุด c

(จ) จุด d

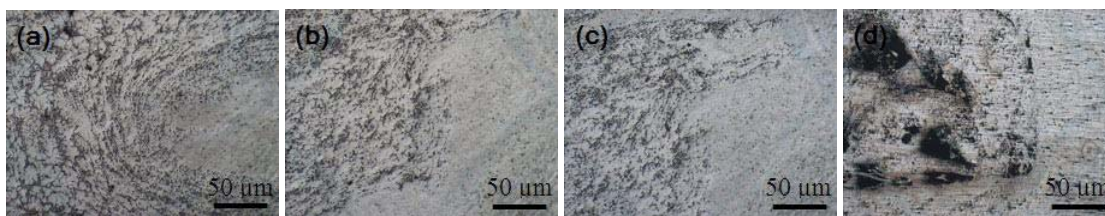
ภาพประกอบที่ 4.9 โครงสร้างทางจุลภาคของแนวเชื่อมที่ความเร็วหมุนเชื่อม 1,750 rpm ความเร็วเดินเชื่อมที่ 160 mm/min

4.2.2.6 โครงสร้างทางจุลภาคของแนวเชื่อมที่ความเร็วหมุนเชื่อม 1,750 rpm ความเร็วเดินเชื่อมที่ 200 mm/min

จากการทดลองพบว่า โครงสร้างจุลภาคที่ความเร็วหมุนเชื่อม 1,750 rpm และความเร็วเดินเชื่อมที่ 200 mm/min โครงสร้างบริเวณเนื้อเชื่อมที่ถูกกวนจะมีการเกิดผลึกใหม่ที่เกิดจากการรวมตัวกันของวัสดุทั้งสองชนิดอย่างชัดเจน โดยจะมีการเรียงตัวสลับกันของวัสดุทั้งสองที่ตรงกลางเนื้อเชื่อมมีเนื้อวัสดุด้านรีทริทติงอยู่ด้านล่างและด้านบนจะมีเนื้อของวัสดุด้านแอควานซิง เนื่องจากเนื้อวัสดุถูกขับมาในขณะที่กวน จะสังเกตเห็นว่ามีรูโพรงเกิดขึ้นและขนาดของรูโพรงจะใหญ่กว่าที่ตัวแปรเชื่อมของความเร็วหมุนเชื่อมที่ 1,750 rpm และความเร็วในการเชื่อมที่ 160 mm/min จากภาพประกอบที่ 4.10(ข) เป็นบริเวณด้านแอควานซิงของแนวเชื่อมจะพบว่ามีเนื้อวัสดุของ AA 6061 ผสมอยู่โดยเนื้อวัสดุมีความละเอียดมากขึ้นเนื่องจากถูกบดและไหลกระทบกับเครื่องมือในขณะที่กวนเกรนของ SSM 356 จะมีลักษณะยาวเรียวเนื่องจากการเสีรูปร่างเชิงพลาสติกเนื่องจากตัวกวน ภาพประกอบที่ 4.10(ค) แสดงโครงสร้างของผลึกใหม่ระหว่างเนื้อวัสดุของสองชนิดโดยเกรนจะมีความละเอียดและมีขนาดเล็กกว่าเนื้อโลหะเดิม ภาพประกอบที่ 4.10(ง) เกรนจะมีความละเอียดโดยเฉพาะ AA 6061 และเนื้อโลหะที่มีความแหลมคมแทรกอยู่ที่บริเวณกลาง ภาพประกอบที่ 4.10(จ) เป็นบริเวณด้านรีทริทติงของแนวเชื่อมโดยมีรูโพรงเกิดขึ้นเนื่องจากเนื้อวัสดุที่บริเวณดังกล่าวมีการไหลวนที่ไม่เพียงพอ ความร้อนนำเข้าไปจะส่งผลให้วัสดุมีความเป็นพลาสติกมีน้อยทำให้การประสานกันของเนื้อวัสดุไม่สมบูรณ์จึงเป็นเหตุให้เกิดโพรงขึ้นที่บริเวณดังกล่าว อีกทั้งยังพบว่าเมื่อความเร็วเดินเชื่อมยิ่งเพิ่มขึ้นขนาดของรูโพรงมีแนวโน้มที่จะขยายใหญ่ขึ้นตามไปด้วย



(ก) โครงสร้างทางมหภาค



(ข) จุด a

(ค) จุด b

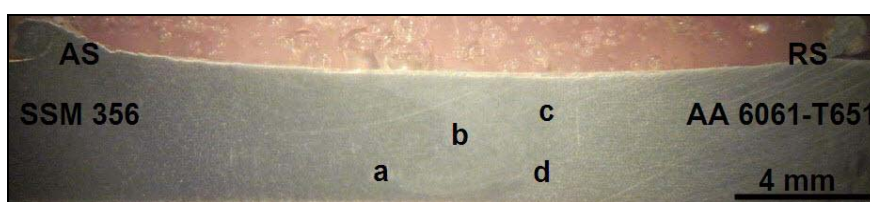
(ง) จุด c

(จ) จุด d

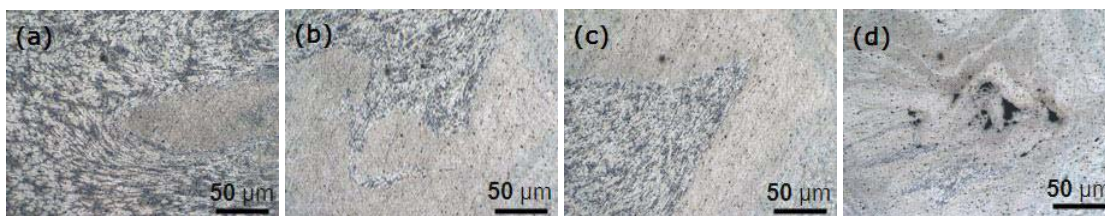
ภาพประกอบที่ 4.10 โครงสร้างทางจุลภาคของแนวเชื่อมที่ความเร็วหมุนเชื่อม 1,750 rpm ความเร็วเดินเชื่อมที่ 200 mm/min

4.2.2.7 โครงสร้างทางจุลภาคของแนวเชื่อมที่ความเร็วหมุนเชื่อม 2,000 rpm ความเร็วเดินเชื่อมที่ 20 mm/min

จากการทดลองพบว่า โครงสร้างจุลภาคที่ความเร็วหมุนเชื่อม 2,000 rpm และความเร็วเดินเชื่อมที่ 20 mm/min โครงสร้างบริเวณที่ถูกกวนจะมีการเกิดผลึกใหม่ที่มาจากการรวมตัวกันของวัสดุทั้งสองชนิดอย่างชัดเจน โดยจะมีการเรียงตัวสลับกันของวัสดุทั้งสอง (ซิกแซก) ที่ตรงกลางเนื้อเชื่อมมีเนื้อวัสดุด้านรีทริทติงอยู่ด้านล่างและด้านบนจะมีเนื้อของวัสดุด้านแอควานซิง เนื่องจากเนื้อวัสดุถูกขับมาในขณะที่กวน เนื่องจากการหมุนกวนในขณะที่เชื่อมที่เพิ่มและนานขึ้นทำให้การไหลวนของเนื้อวัสดุมีความสมบูรณ์ขึ้นและพื้นที่การกระจายตัวของความร้อนมีการแผ่กระจายเพิ่มขึ้นด้วย จากภาพประกอบที่ 4.11(ข) เป็นบริเวณด้านแอควานซิงของแนวเชื่อมจะพบว่ามีเนื้อวัสดุของ AA 6061 ผสมอยู่โดยเนื้อวัสดุมีความละเอียดมากขึ้นเนื่องจากถูกบดและไหลกระแทกกับเครื่องมือในขณะที่กวน เกรนของ SSM 356 จะมีลักษณะยาวเรียวเนื่องจากการเสีรูปร่างพลาสติกเนื่องจากตัวกวน ภาพประกอบที่ 4.11(ค) แสดงโครงสร้างของผลึกใหม่ระหว่างเนื้อวัสดุของสองชนิด โดยเกรนจะมีความละเอียดและมีขนาดเล็กกว่าเนื้อโลหะเดิม ภาพประกอบที่ 4.11(ง) เกรนจะมีความละเอียดมากโดยเฉพาะ AA 6061 ซึ่งด้านบนของบริเวณแนวกวนจะมีเนื้อโลหะชนิดนี้ผสมอยู่เป็นจำนวนมากเนื่องจากพัดพาในขณะที่กวน ภาพประกอบที่ 4.11(จ) เป็นบริเวณด้านรีทริทติงของแนวกวนโดยมีรูโพรงเกิดขึ้นเนื่องจากเนื้อวัสดุที่บริเวณดังกล่าวมีการไหลวนที่ไม่เพียงพอ เนื่องจากความร้อนที่มากเกินไปจะส่งผลให้วัสดุมีความเป็นพลาสติกมากขึ้นด้วยเช่นกัน ทำให้การประสานกันของเนื้อวัสดุไม่สมบูรณ์จึงเป็นเหตุให้เกิดโพรงขึ้นที่บริเวณดังกล่าว



(ก) โครงสร้างทางมหภาค



(ข) จุด a

(ค) จุด b

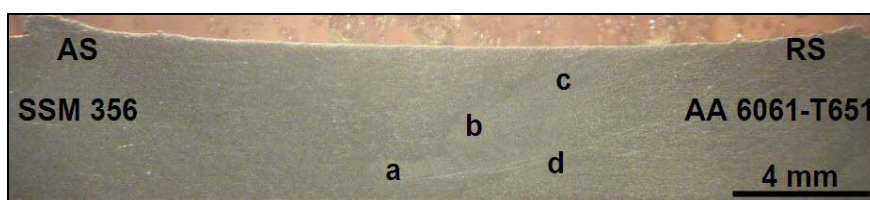
(ง) จุด c

(จ) จุด d

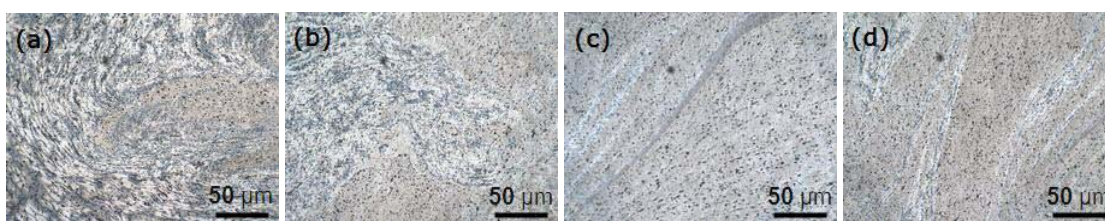
ภาพประกอบที่ 4.11 โครงสร้างทางจุลภาคของแนวเชื่อมที่ความเร็วหมุนเชื่อม 2,000 rpm ความเร็วเดินเชื่อมที่ 20 mm/min

4.2.2.8 โครงสร้างทางจุลภาคของแนวเชื่อมที่ความเร็วหมุนเชื่อม 2,000 rpm ความเร็วเดินเชื่อมที่ 50 mm/min

จากการทดลองพบว่า โครงสร้างจุลภาคที่ความเร็วหมุนเชื่อม 2,000 rpm และความเร็วเดินเชื่อมที่ 50 mm/min โครงสร้างบริเวณเนื้อเชื่อมซึ่งเป็นบริเวณที่ถูกกวนจะมีการเกิดผลึกใหม่ที่มาจากการรวมตัวกันของวัสดุทั้งสองชนิดอย่างชัดเจน โดยจะมีการเรียงตัวสลับกันของวัสดุทั้งสอง (ซิกแซก) ที่ตรงกลางเนื้อเชื่อมมีเนื้อวัสดุด้านรีทริทติงอยู่ด้านล่างและด้านบนจะมีเนื้อของวัสดุด้านแอดวานซิง เนื่องจากเนื้อวัสดุถูกขับมาในขณะที่กวน เนื่องจากการหมุนกวนในขณะที่เชื่อมที่เร็วขึ้นทำให้การไหลวนของเนื้อวัสดุมีความสมบูรณ์ขึ้นและพื้นที่การกระจายตัวของความร้อนมีการแผ่กระจายเพิ่มขึ้นด้วย จากภาพประกอบที่ 4.12(ข) เป็นบริเวณด้านแอดวานซิงของแนวเชื่อมจะพบว่ามีเนื้อวัสดุของ AA 6061 ผสมอยู่โดยเนื้อวัสดุมีความละเอียดมากขึ้นเนื่องจากถูกบดและไหลกระแทกกับเครื่องมือในขณะที่กวน เกรนของ SSM 356 จะมีลักษณะยาวเรียวเนื่องจากการเสียรูปเชิงพลาสติกเนื่องจากตัวกวน ภาพประกอบที่ 4.12(ค) แสดงโครงสร้างของผลึกใหม่ระหว่างเนื้อวัสดุของสองชนิดโดยเกรนจะมีความละเอียดและมีขนาดเล็กกว่าเนื้อโลหะเดิม ภาพประกอบที่ 4.12(ง) เกรนจะมีความละเอียดมากโดยเฉพาะ AA 6061 ซึ่งด้านบนของบริเวณแนวกวนจะมีเนื้อโลหะชนิดนี้ผสมอยู่เป็นจำนวนมากเนื่องจากพัดพาในขณะที่กวน ภาพประกอบที่ 4.12(จ) เป็นบริเวณด้านรีทริทติงของแนวกวน โดยเนื้อวัสดุส่วนใหญ่จะเป็นเนื้อวัสดุของโลหะที่ถูกกำหนดให้อยู่ด้านรีทริทติงของและเนื้อวัสดุบางส่วนจะมีแทรกตัวสลับกันไประหว่าง SSM 356 กับ AA 6061



(ก) โครงสร้างทางมหภาค



(ข) จุด a

(ค) จุด b

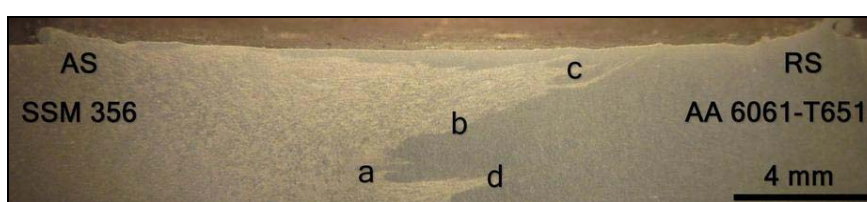
(ง) จุด c

(จ) จุด d

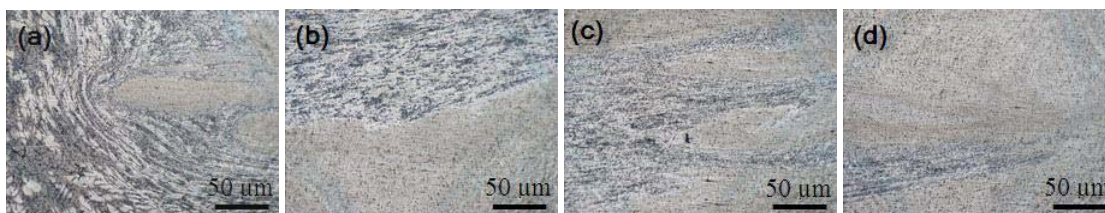
ภาพประกอบที่ 4.12 โครงสร้างทางจุลภาคของแนวเชื่อมที่ความเร็วหมุนเชื่อม 2,000 rpm ความเร็วเดินเชื่อมที่ 50 mm/min

4.2.2.9 โครงสร้างทางจุลภาคของแนวเชื่อมที่ความเร็วหมุนเชื่อม 2,000 rpm ความเร็วเดินเชื่อมที่ 80 mm/min

จากการทดลองพบว่า โครงสร้างจุลภาคที่ความเร็วหมุนเชื่อม 2,000 rpm และความเร็วเดินเชื่อมที่ 80 mm/min จะพบว่าลักษณะโครงสร้างมหภาคของบริเวณที่ถูกกวนจะมีการเกิดผลึกใหม่ที่มาจากการรวมตัวกันของเนื้อวัสดุทั้งสองชนิดขึ้นอย่างเห็นได้ชัด โดยจะมีการเรียงตัวสลับกันของวัสดุทั้งสอง (ซิกแซก) ที่ตรงกลางเนื้อเชื่อมมีเนื้อวัสดุด้านรีทริทติงอยู่ด้านล่างและด้านบนจะมีเนื้อของวัสดุด้านแอดวานซิง เนื่องจากเนื้อวัสดุมีการไหลวนและถูกขับมาในขณะที่เชื่อม จากภาพประกอบ 4.13(ข) เป็นบริเวณที่ได้รับผลจากความร้อนทางกลด้านแอดวานซิงของแนวเชื่อม จะพบว่ามีเนื้อวัสดุของ AA 6061 ผสมอยู่โดยเนื้อวัสดุมีความละเอียดเนื่องจากถูกบดและไหลกระแทกกับตัวกวนในขณะที่กวน เกรนของ SSM 356 จะมีลักษณะยาวเรียวยาวเนื่องจากมีการเสียรูปเชิงพลาสติกเนื่องจากตัวกวน ภาพประกอบ 4.13(ค) แสดงโครงสร้างของผลึกใหม่ที่ตรงกลางของแนวเชื่อมระหว่างเนื้อวัสดุของสองชนิด โดยเกรนจะมีความละเอียดและมีขนาดเล็กกว่าเนื้อโลหะเดิม ภาพประกอบ 4.13(ง) แสดงลักษณะเกรนที่มีความละเอียดมาก โดยเฉพาะ AA 6061 ซึ่งด้านบนของบริเวณแนวกวนจะมีเนื้อโลหะชนิดนี้ผสมอยู่เป็นจำนวนมากเนื่องจากพัดพาของตัวกวนในขณะที่กวน การสัมผัสระหว่างผิวชิ้นงานด้านบนกับบ่าของตัวกวนจะใกล้กว่าด้านล่าง ส่งผลให้เกรนมีความละเอียดขึ้น ภาพประกอบ 4.13(จ) เป็นบริเวณที่ได้รับผลจากความร้อนทางกลด้านรีทริทติงของแนวกวน โดยเนื้อวัสดุส่วนใหญ่จะเป็นเนื้อวัสดุของโลหะที่ถูกกำหนดให้อยู่ด้านรีทริทติง เนื้อวัสดุบางส่วนจะมีการเรียงตัวกันเป็นชั้นๆ สลับกันไป



(ก) โครงสร้างทางมหภาค



(ข) จุด a

(ค) จุด b

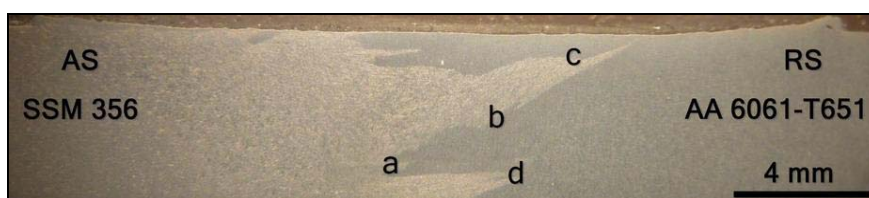
(ง) จุด c

(จ) จุด d

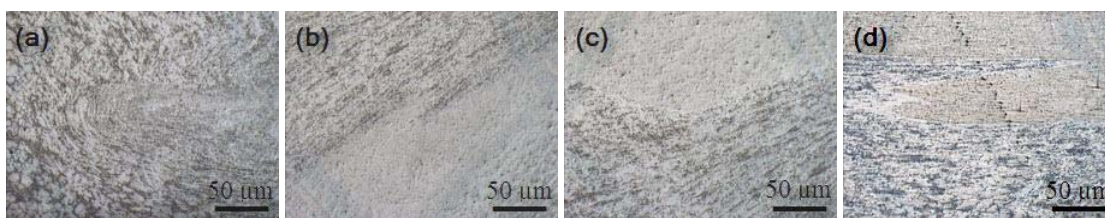
ภาพประกอบที่ 4.13 โครงสร้างทางจุลภาคของแนวเชื่อมที่ความเร็วหมุนเชื่อม 2,000 rpm ความเร็วเดินเชื่อมที่ 80 mm/min

4.2.2.10 โครงสร้างทางจุลภาคของแนวเชื่อมที่ความเร็วหมุนเชื่อม 2,000 rpm ความเร็วเดินเชื่อมที่ 120 mm/min

จากการทดลองพบว่า โครงสร้างจุลภาคที่ความเร็วหมุนเชื่อม 2,000 rpm และความเร็วเดินเชื่อมที่ 120 mm/min โครงสร้างบริเวณเนื้อเชื่อมซึ่งเป็นบริเวณที่ถูกกวจะมีเกิดการเกิดผลึกใหม่ที่มาจากการรวมตัวกันของวัสดุทั้งสองชนิดอย่างชัดเจน โดยจะมีการเรียงตัวสลับกันของวัสดุทั้งสอง (ซิกแซก) ที่ตรงกลางเนื้อเชื่อมมีเนื้อวัสดุด้านรีทริทติงอยู่ด้านล่างและด้านบนจะมีเนื้อของวัสดุด้านแอดวานซิง เนื่องจากเนื้อวัสดุถูกขับมาในขณะที่กว จากภาพประกอบที่ 4.14(ข) เป็นบริเวณด้านแอดวานซิงของแนวเชื่อมจะพบว่ามีเนื้อวัสดุของ AA 6061 ผสมอยู่โดยเนื้อวัสดุมีความละเอียดมากขึ้นเนื่องจากถูกกดและไหลกระแทกกับเครื่องมือในขณะที่กว เกรนของ SSM 356 จะมีลักษณะยาวเรียวเนื่องจากการเสียรูปเชิงพลาสติกเนื่องจากตัวกว ภาพประกอบที่ 4.14(ค) แสดงโครงสร้างของผลึกใหม่ระหว่างเนื้อวัสดุของสองชนิดโดยเกรนจะมีความละเอียดและมีขนาดเล็กกว่าเนื้อโลหะเดิม ภาพประกอบที่ 4.14(ง) เกรนจะมีความละเอียดมากโดยเฉพาะ AA 6061 ซึ่งด้านบนของบริเวณแนวกวจะมีเนื้อโลหะชนิดนี้ผสมอยู่เป็นจำนวนมากเนื่องจากพัดพาในขณะที่กว ภาพประกอบที่ 4.14(จ) เป็นบริเวณด้านรีทริทติงของแนวกวโดยเนื้อวัสดุส่วนใหญ่จะเป็นเนื้อวัสดุของโลหะที่ถูกกำหนดให้อยู่ด้านรีทริทติง และเนื้อวัสดุบางส่วนจะมีแทรกตัวสลับกันไประหว่าง SSM 356 กับ AA 6061



(ก) โครงสร้างทางมหภาค



(ข) จุด a

(ค) จุด b

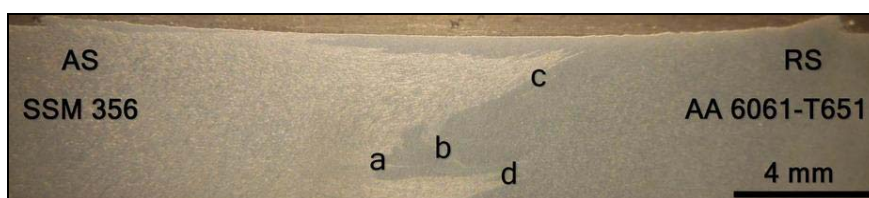
(ง) จุด c

(จ) จุด d

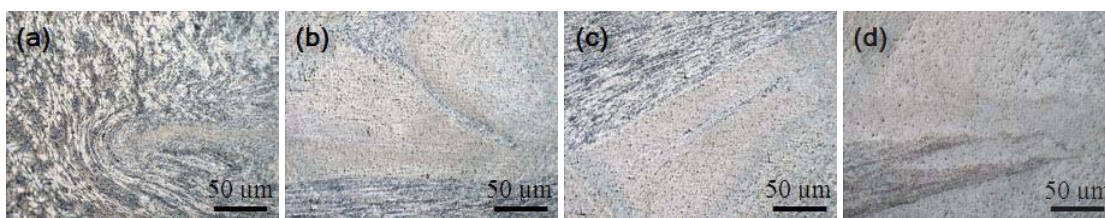
ภาพประกอบที่ 4.14 โครงสร้างทางจุลภาคของแนวเชื่อมที่ความเร็วหมุนเชื่อม 2,000 rpm ความเร็วเดินเชื่อมที่ 120 mm/min

4.2.2.11 โครงสร้างทางจุลภาคของแนวเชื่อมที่ความเร็วหมุนเชื่อม 2,000 rpm ความเร็วเดินเชื่อมที่ 160 mm/min

จากการทดลองพบว่า โครงสร้างจุลภาคที่ความเร็วหมุนเชื่อม 2,000 rpm และความเร็วเดินเชื่อมที่ 160 mm/min โครงสร้างบริเวณเนื้อเชื่อมซึ่งเป็นบริเวณที่ถูกกววนจะมีการเกิดผลึกใหม่ที่มาจากการรวมตัวกันของวัสดุทั้งสองชนิดอย่างชัดเจน โดยจะมีการเรียงตัวสลับกันของวัสดุทั้งสอง (ซิกแซก) ที่ตรงกลางเนื้อเชื่อมมีเนื้อวัสดุด้านรีทริทติงอยู่ด้านล่างและด้านบนจะมีเนื้อของวัสดุด้านแอดวานซิง เนื่องจากเนื้อวัสดุถูกขับมาในขณะที่กววน จากภาพประกอบที่ 4.15(ข) เป็นบริเวณด้านแอดวานซิงของแนวเชื่อมจะพบว่ามีเนื้อวัสดุของ AA 6061 ผสมอยู่โดยเนื้อวัสดุมีความละเอียดมากขึ้นเนื่องจากถูกบดและไหลกระแทกกับเครื่องมือในขณะที่กววน เกรนของ SSM 356 จะมีลักษณะยาวเรียวเนื่องจากการเสีรูปร่างพลาสติกเนื่องจากตัวกววน ภาพประกอบที่ 4.15(ค) แสดงโครงสร้างของผลึกใหม่ระหว่างเนื้อวัสดุของสองชนิดโดยเกรนจะมีความละเอียดและมีขนาดเล็กกว่าเนื้อโลหะเดิม ภาพประกอบที่ 4.15(ง) เกรนจะมีความละเอียดมากโดยเฉพาะ AA 6061 ซึ่งด้านบนของบริเวณแนวกววนจะมีเนื้อโลหะชนิดนี้ผสมอยู่เป็นจำนวนมากเนื่องจากพัดพาในขณะที่กววน ภาพประกอบที่ 4.15(จ) เป็นบริเวณด้านรีทริทติงของแนวกววนโดยเนื้อวัสดุส่วนใหญ่จะเป็นเนื้อวัสดุของโลหะที่ถูกกำหนดให้อยู่ด้านรีทริทติง และเนื้อวัสดุบางส่วนจะมีแทรกตัวสลับกันไประหว่าง SSM 356 กับ AA 6061



(ก) โครงสร้างทางมหภาค



(ข) จุด a

(ค) จุด b

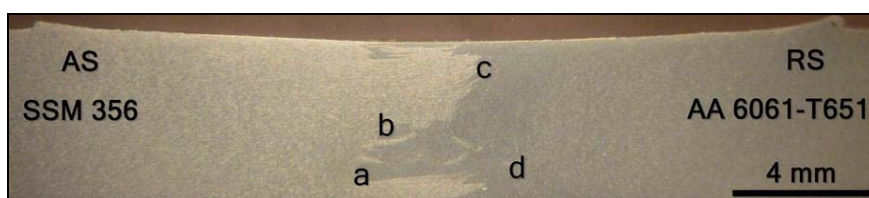
(ง) จุด c

(จ) จุด d

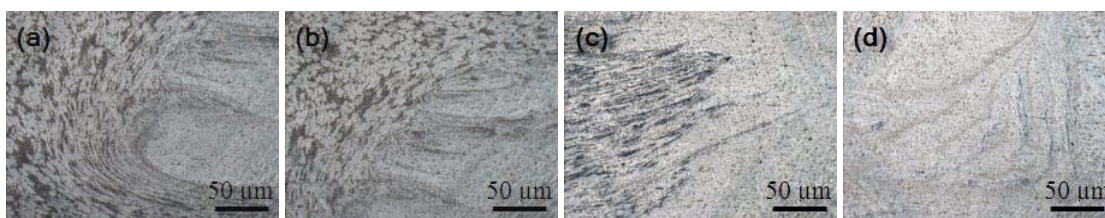
ภาพประกอบที่ 4.15 โครงสร้างทางจุลภาคของแนวเชื่อมที่ความเร็วหมุนเชื่อม 2,000 rpm ความเร็วเดินเชื่อมที่ 160 mm/min

4.2.2.12 โครงสร้างทางจุลภาคของแนวเชื่อมที่ความเร็วหมุนเชื่อม 2,000 rpm ความเร็วเดินเชื่อมที่ 200 mm/min

จากการทดลองพบว่า โครงสร้างจุลภาคที่ความเร็วหมุนเชื่อม 2,000 rpm และความเร็วเดินเชื่อมที่ 200 mm/min โครงสร้างบริเวณเนื้อเชื่อมซึ่งเป็นบริเวณที่ถูกกววนจะมีการเกิดผลึกใหม่ที่มาจากการรวมตัวกันของวัสดุทั้งสองชนิดอย่างชัดเจน โดยจะมีการเรียงตัวสลับกันของวัสดุทั้งสอง (ซิกแซก) ที่ตรงกลางเนื้อเชื่อมมีเนื้อวัสดุด้านรีทริทติงอยู่ด้านล่างและด้านบนจะมีเนื้อของวัสดุด้านแอดวานซิง เนื่องจากเนื้อวัสดุถูกขับมาในขณะที่กววน จากภาพประกอบที่ 4.16(ข) เป็นบริเวณด้านแอดวานซิงของแนวเชื่อมจะพบว่ามีเนื้อวัสดุของ AA 6061 ผสมอยู่โดยเนื้อวัสดุมีความละเอียดมากขึ้นเนื่องจากถูกบดและไหลกระแทกกับเครื่องมือในขณะที่กววน เกรนของ SSM 356 จะมีลักษณะยาวเรียวเนื่องจากการเสีรูปร่างพลาสติกเนื่องจากตัวกววน ภาพประกอบที่ 4.16(ค) แสดงโครงสร้างของผลึกใหม่ระหว่างเนื้อวัสดุของสองชนิดโดยเกรนจะมีความละเอียดและมีขนาดเล็กกว่าเนื้อโลหะเดิม ภาพประกอบที่ 4.16(ง) เกรนจะมีความละเอียดมากโดยเฉพาะ AA 6061 ซึ่งด้านบนของบริเวณแนวกววนจะมีเนื้อโลหะชนิดนี้ผสมอยู่เป็นจำนวนมากเนื่องจากพัดพาในขณะที่กววน ภาพประกอบที่ 4.16(จ) เป็นบริเวณด้านรีทริทติงของแนวกววนโดยเนื้อวัสดุส่วนใหญ่จะเป็นเนื้อวัสดุของโลหะที่ถูกกำหนดให้อยู่ด้านรีทริทติง และเนื้อวัสดุบางส่วนจะมีการเรียงตัวกันเป็นชั้นๆ สลับกันไประหว่าง SSM 356 กับ AA 6061



(ก) โครงสร้างทางมหภาค



(ข) จุด a

(ค) จุด b

(ง) จุด c

(จ) จุด d

ภาพประกอบที่ 4.16 โครงสร้างทางจุลภาคของแนวเชื่อมที่ความเร็วหมุนเชื่อม 2,000 rpm ความเร็วเดินเชื่อมที่ 200 mm/min

สำหรับลักษณะ โครงสร้างทางมหภาคและจุลภาคของแนวเชื่อมที่ตัวแปรเชื่อมอื่นๆ จะแสดงไว้ในภาคผนวก ง.1 และ ง.2

อิทธิพลของความเร็วมุมเชื่อมและความเร็วเดินเชื่อมที่มีต่อลักษณะ โครงสร้างทางมหภาคและจุลภาคของแนวเชื่อม จากการทดลองจะพบว่าค่าความเร็วมุมเชื่อมที่สูงขึ้นการเปลี่ยน โครงสร้างที่บริเวณแนวทวนจะเปลี่ยนไปด้วย ที่ความเร็วเดินเชื่อมเดียวกันแต่ความความเร็วมุมเชื่อมสูงขึ้นไปทำให้โครงสร้างบริเวณที่ถูกมีลักษณะเกรนที่ละเอียดขึ้น เนื่องจากความร้อนจากการเสียดทานแบบทวนมีมาก การเสียดทานของเนื้อวัสดุที่เกิดขึ้นมีมากตามไปด้วย ในทางกลับกันเมื่อความเร็วมุมเชื่อมที่ต่ำลงการเปลี่ยน โครงสร้างบริเวณแนวเชื่อมจะมีพื้นที่แคบกว่าเนื่องจากความร้อนและการกระจายตัวที่ขึ้นงานลดลง

ความเร็วเดินเชื่อมมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของ โครงสร้างที่บริเวณแนวทวน จากการทดลองพบว่า ที่ค่าความเร็วมุมเชื่อมเดียวกันแต่ค่าความเร็วเดินเชื่อมเพิ่มขึ้นลักษณะการเปลี่ยนแปลง โครงสร้างของแนวเชื่อมจะเห็น ได้ชัดเจน โดยจะมีการผสมกันของเนื้อวัสดุทั้งสองชนิด กล่าวคือ ที่ความเร็วเดินเชื่อมต่ำจะพบว่าบริเวณแนวทวนจะมีการผสมกันของวัสดุได้สมบูรณ์กว่าที่บริเวณแนวเชื่อมที่สูง อีกทั้งยังพบว่าลักษณะรอยเชื่อมก็จะมี ความกว้างกว่าด้วย อันเนื่องมาจากความเร็วเดินเชื่อมที่ต่ำความร้อนจากการเสียดทานจะมากกว่าทำให้วัสดุที่อยู่ในสภาวะพลาสติกจะมากขึ้นด้วย ที่ความเร็วเดินเชื่อมที่สูงความร้อนจากการเสียดทานจะเกิดขึ้นน้อยทำให้การไหลวนและความเป็นพลาสติกของเนื้อวัสดุเกิดขึ้นไม่สมบูรณ์ ที่ความเร็วมุมเชื่อม 1,750 rpm จะพบว่า เมื่อเพิ่มความเร็วเดินเชื่อมแนวเชื่อมจะเกิดรูโพรงขึ้น ที่บริเวณขอบของตัวทวนด้านรีทริคติง โดยเฉพาะที่ความเร็วเดินเชื่อม 160 และ 200 mm/min ความร้อนจากการเสียดทานที่ไม่เพียงพอทำให้เนื้อวัสดุเกิดการผสมกันไม่สมบูรณ์จึงปรากฏให้เกิดรูโพรงดังกล่าวขึ้น ยิ่งความเร็วเดินเชื่อมสูงขึ้นขนาดของรูโพรงก็จะขยายให้ขึ้นด้วย โดยลักษณะ โครงสร้างทั้งหมดจะแสดงไว้ในภาคผนวก ที่ความเร็วมุมเชื่อม 2,000 rpm จะพบว่าที่ความเร็วเดินเชื่อมที่ต่ำ (20 mm/min) รูโพรงจะเกิดขึ้นที่ขอบของตัวทวนด้านรีทริคติง เนื่องจากที่ความเร็วมุมเชื่อมสูงขึ้น แต่ความเร็วเดินเชื่อมต่ำ ความร้อนจากการเสียดทานจะมีมากเกินไปทำให้วัสดุเกิดการเสียดทานในเชิงพลาสติกมากขึ้น เมื่อตัวทวนเคลื่อนที่ในขณะที่เนื้อวัสดุอยู่ในสภาพพลาสติกมากเกินไป การผสมกันของเนื้อวัสดุจึงเกิดขึ้นไม่สมบูรณ์และก่อให้เกิดรูโพรงขึ้นในที่สุด โดยลักษณะ โครงสร้างทั้งหมดจะแสดงไว้ในภาคผนวก ง

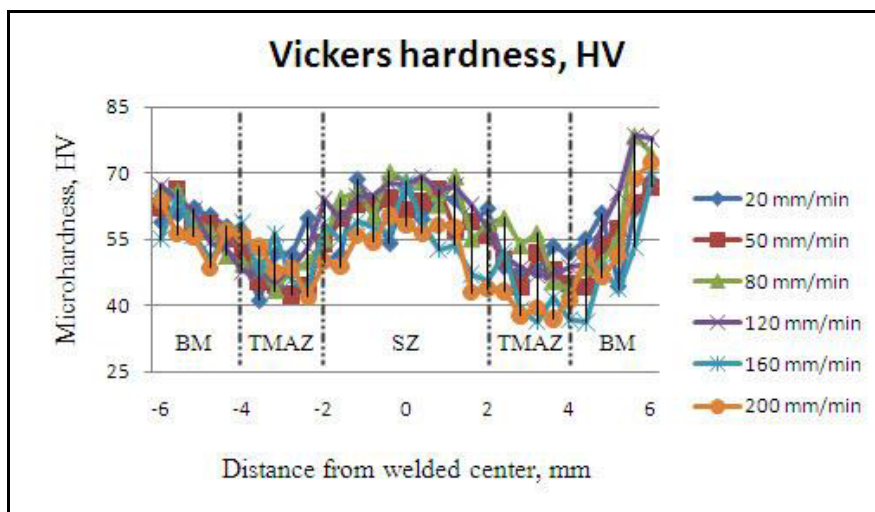
4.3 ผลการทดสอบความแข็งของบริเวณแนวเชื่อม (Hardness of welded)

จากการทดลองเชื่อมอะลูมิเนียมผสมต่างชนิดระหว่างอะลูมิเนียมหล่อกิ่งของแข็ง SSM 356 กับอะลูมิเนียมผสม AA 6061-T651 จะพบว่าการกระจายตัวของค่าความแข็งของแนวเชื่อมที่บริเวณตรงกลางจะมีค่าสูงสุดและจะลดลงไปเรื่อยๆ จนถึงบริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อนทางกล (Thermo-mechanically Affected Zone; TMAZ) ของทั้งสองด้านของแนวเชื่อม สาเหตุดังกล่าวจะมาจากผลของวัฏจักรทางความร้อนของวัสดุที่เกิดขึ้นระหว่างกระบวนการเชื่อม เสียทานแบบกวนและการตกตะกอนของเกรนที่มีความหยาบ (Colligan *et al.*, 2003) หลังจากบริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อนทางกลในการกวนแล้ว ความแข็งของแนวเชื่อมจะมีค่าเพิ่มสูงขึ้นเรื่อยๆ ไปจนถึงค่าความแข็งเดิมของเนื้อโลหะทั้งสองชนิด เนื่องจากบริเวณดังกล่าวเป็นบริเวณที่ไม่ได้รับผลกระทบจากการกวน โดยค่าความแข็งดังกล่าวจะผันแปรไปตามแต่ละตัวแปรเชื่อม สิ่งที่น่าสังเกตอีกประการหนึ่งจากค่าความแข็งที่มากที่สุดบริเวณตรงกลางแนวเชื่อม คือ ขณะที่ตัวกวนมีการหมุนและเคลื่อนที่นั้น ที่ตรงกลางส่วน โคนของบ่าด้านหลังจะเป็นตัวช่วยในการบีบอัดเนื้อโลหะมากที่สุด ทำให้เนื้อโลหะบริเวณนั้นถูกบีบอัดให้แน่นจากบ่าของตัวกวนมากที่สุดเช่นกัน ผลกระทบที่ได้จากกรรมวิธีดังกล่าวจะเป็นเหตุให้ค่าความแข็งบริเวณนั้นมากกว่าบริเวณอื่น

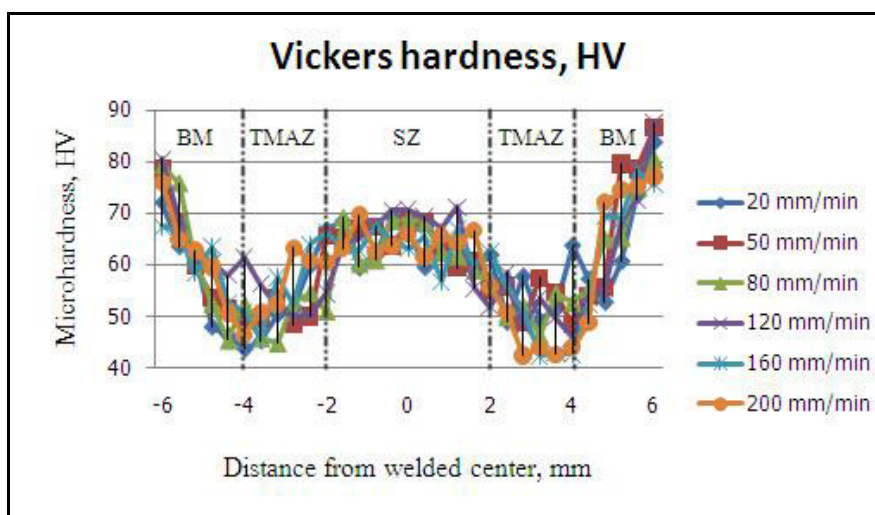
จากการรายงานของ Khodir and Shidayanagi (2008) เหตุผลที่ทำให้โลหะมีการอ่อนตัวเป็นผลพวงมาจากการเกิดโครงสร้างผลึกใหม่ในบริเวณแนวกวนและมีการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างเชิงซ้อนของรูปร่างของเกรน ลักษณะและการกระจายตัวของเฟสต่างๆ ในโครงสร้างจุลภาคของบริเวณที่ถูกกวน การกระจายตัวและความหนาแน่นของเนื้อวัสดุที่ลดลงทำให้มีการอ่อนตัวของเนื้อวัสดุส่งผลให้ค่าความแข็งลดน้อยลง จากเหตุผลที่กล่าวมาแล้วข้างต้นนั้นสามารถให้คำยืนยันถึงผลของความแข็งที่ลดลงได้

ค่าความแข็งของแนวเชื่อมที่ความเร็วหมุนเชื่อม 1,750 rpm ดังแสดงในภาพประกอบที่ 4.17 เป็นค่าความแข็งของแนวเชื่อมเสียทานแบบกวนของอะลูมิเนียมผสมต่างชนิดระหว่างอะลูมิเนียมหล่อกิ่งของแข็ง SSM 356 ที่ไม่ผ่านกระบวนการทางความร้อน T6 กับอะลูมิเนียมผสม AA 6061-T651 ความแข็งเฉลี่ยที่ตรงกลางแนวเชื่อมประมาณ 61 HV และเมื่อเทียบกับภาพประกอบที่ 4.18 เป็นค่าความแข็งของแนวเชื่อมเสียทานแบบกวนของอะลูมิเนียมผสมต่างชนิดระหว่างอะลูมิเนียมหล่อกิ่งของแข็ง SSM 356 ที่ผ่านกระบวนการทางความร้อน T6 กับอะลูมิเนียมผสม AA 6061-T651 ความแข็งเฉลี่ยที่ตรงกลางแนวเชื่อมประมาณ 67 HV โดยความแข็งบริเวณตรงกลางแนวเชื่อมจะเพิ่มสูงขึ้นเนื่องจากได้รับอิทธิพลจากกระบวนการทางความร้อน T6 สำหรับลักษณะการกระจายตัวโดยทั่วไปจะพบว่าที่ตรงกลางของแนวเชื่อมจะมีค่าความแข็งมากที่สุดกว่าบริเวณอื่นของแนวเชื่อม ความแข็งจะลดลงเรื่อยๆ ไปจนถึงบริเวณเขตที่ได้รับผลกระทบ

จากความร้อนทางกล หลังจากนั้นความแข็งของแนวเชื่อมจะเพิ่มขึ้นไปจนถึงค่าความแข็งเดิมของเนื้อโลหะเดิมทั้งสองชนิด



ภาพประกอบที่ 4.17 ค่าความแข็งของแนวเชื่อมเสียดทานแบบกวนของอะลูมิเนียมผสมต่างชนิด ระหว่างอะลูมิเนียมหล่อกิ่งของแข็ง SSM 356 ที่ไม่ผ่านกระบวนการทางความร้อน T6 กับอะลูมิเนียมผสม AA 6061-T651 ที่ความเร็วหมุนเชื่อม 1,750 rpm



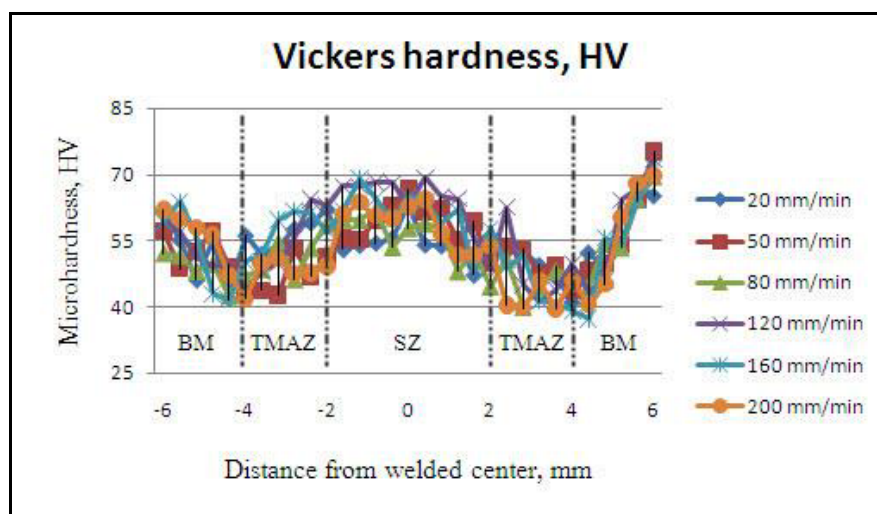
ภาพประกอบที่ 4.18 ค่าความแข็งของแนวเชื่อมเสียดทานแบบกวนของอะลูมิเนียมผสมต่างชนิด ระหว่างอะลูมิเนียมหล่อกิ่งของแข็ง SSM 356 ที่ผ่านกระบวนการทางความร้อน T6 กับอะลูมิเนียมผสม AA 6061-T651 ที่ความเร็วหมุนเชื่อม 1,750 rpm

ค่าความแข็งของแนวเชื่อมเสียดทานแบบกวนของอะลูมิเนียมผสมต่างชนิดระหว่างอะลูมิเนียมหล่อกิ่งของแข็ง SSM 356 ที่ไม่ผ่านกระบวนการทางความร้อน T6 กับอะลูมิเนียมผสม AA 6061-T651 จะสังเกตเห็นว่าผลต่างระหว่างค่าสูงสุดกับค่าต่ำสุดที่บริเวณแนวกวนของแนวเชื่อมจะต่ำกว่าเมื่อเทียบกับค่าความแข็งของแนวเชื่อมเสียดทานแบบกวนของอะลูมิเนียมผสมต่างชนิดระหว่างอะลูมิเนียมหล่อกิ่งของแข็ง SSM 356 ที่ผ่านกระบวนการทางความร้อน T6 กับอะลูมิเนียมผสม AA 6061-T651 ซึ่งผลของค่าความแข็งที่เพิ่มขึ้นนั้นเป็นผลมาจากการได้รับอิทธิพลจากกระบวนการทางความร้อน T6 เป็นที่น่าสังเกตของค่าความแข็งของแนวเชื่อมที่ความเร็วเดินเชื่อม 160 และ 200 mm/min ที่ต่ำกว่าที่ค่าความเร็วเดินเชื่อมอื่นๆ เนื่องจากที่ค่าความเร็วเดินเชื่อมทั้งสองจะมีโพรงเกิดขึ้นเพราะการหลอมละลายที่ไม่สมบูรณ์ของเนื้อวัสดุจนเกิดรูโพรงขึ้นที่บริเวณขอบของตัวกวนด้านรีทริคติงและจะเป็นจุดเริ่มต้นของการขาดจากการทดสอบค่าความต้านทานแรงดึง โดยรายละเอียดของการขาดจะกล่าวในหัวข้อของผลการทดสอบความต้านทานแรงดึงของแนวเชื่อมต่อไป

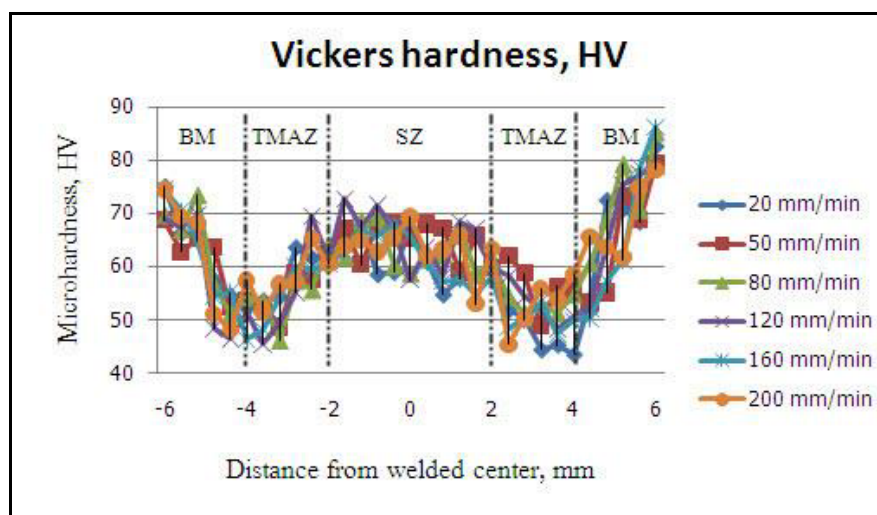
ค่าความแข็งของแนวเชื่อมที่ความเร็วหมุนเชื่อม 2,000 rpm ดังแสดงในภาพประกอบที่ 4.19 เป็นค่าความแข็งของแนวเชื่อมเสียดทานแบบกวนของอะลูมิเนียมผสมต่างชนิดระหว่างอะลูมิเนียมหล่อกิ่งของแข็ง SSM 356 ที่ไม่ผ่านกระบวนการทางความร้อน T6 กับอะลูมิเนียมผสม AA 6061-T651 ความแข็งเฉลี่ยที่ตรงกลางแนวเชื่อมประมาณ 60 HV และเมื่อเทียบกับภาพประกอบที่ 4.20 เป็นค่าความแข็งของแนวเชื่อมเสียดทานแบบกวนของอะลูมิเนียมผสมต่างชนิดระหว่างอะลูมิเนียมหล่อกิ่งของแข็ง SSM 356 ที่ผ่านกระบวนการทางความร้อน T6 กับอะลูมิเนียมผสม AA 6061-T651 ความแข็งเฉลี่ยที่ตรงกลางแนวเชื่อมประมาณ 65 HV จะพบว่าลักษณะการกระจายตัวของค่าความแข็งจะคล้ายกับค่าความแข็งที่กล่าวมาแล้วข้างต้นของความแข็งที่ความเร็วหมุนเชื่อม 1,750 rpm แต่ลักษณะการกระจายตัวของความแข็งที่ความเร็วหมุนเชื่อม 2,000 rpm จะมีการกระจายตัวที่กว้างกว่า เนื่องจากความเร็วหมุนเชื่อมที่เพิ่มสูงขึ้นจะทำให้การกระจายตัวของเนื้อวัสดุมีความสมบูรณ์และละเอียดขึ้น การกระจายตัวของวัสดุที่มีมากกว่าและมีสมบูรณ์ขึ้นนั้น ส่งผลให้ความแข็งของแนวเชื่อมมีการกระจายตัวมากและมีพื้นที่ที่กว้างขึ้นด้วย

อิทธิพลของความเร็วหมุนเชื่อมกับความเร็วเดินเชื่อมจะมีความสัมพันธ์โดยตรงกับการกระจายตัวของค่าความแข็งที่บริเวณแนวเชื่อม จากการทดลองเราจะสังเกตเห็นว่ายิ่งความเร็วหมุนเชื่อมสูงขึ้นการกระจายตัวของความแข็งจะมีมากขึ้น ความเร็วเดินเชื่อมที่สูงขึ้นจะทำให้ความแข็งมีการกระจายตัวที่ลดลง แต่เมื่อความเร็วเดินเชื่อมมีค่าสูงมากเกินไป จะส่งผลให้การประสานกันของเนื้อวัสดุมีความไม่สมบูรณ์และจะก่อให้เกิดรูโพรงขึ้นในบริเวณแนวเชื่อม ความแข็งบริเวณ

ดังกล่าวจะมีค่าต่ำ ทั้งนี้ความสัมพันธ์ของค่าทั้งสองกับความแข็งจะมีผลอย่างไรไม่มีนัยสำคัญ สำหรับรายละเอียดของค่าความแข็งที่ตัวแปรต่างๆ จะแสดงไว้ในภาคผนวก จ ต่อไป



ภาพประกอบที่ 4.19 ค่าความแข็งของแนวเชื่อมเสียดทานแบบกวนของอะลูมิเนียมผสมต่างชนิด ระหว่างอะลูมิเนียมหล่อกิ่งของแข็ง SSM 356 ที่ไม่ผ่านกระบวนการทางความร้อน T6 กับอะลูมิเนียมผสม AA 6061-T651 ที่ความเร็วหมุนเชื่อม 2,000 rpm



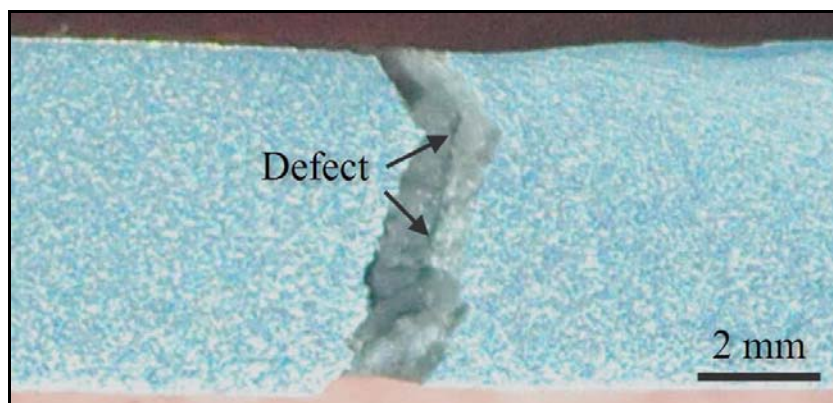
ภาพประกอบที่ 4.20 ค่าความแข็งของแนวเชื่อมเสียดทานแบบกวนของอะลูมิเนียมผสมต่างชนิด ระหว่างอะลูมิเนียมหล่อกิ่งของแข็ง SSM 356 ที่ผ่านกระบวนการทางความร้อน T6 กับอะลูมิเนียมผสม AA 6061-T651 ที่ความเร็วหมุนเชื่อม 2,000 rpm

4.4 ผลการทดสอบความต้านทานแรงดึงของแนวเชื่อม (Tensile strength of welded)

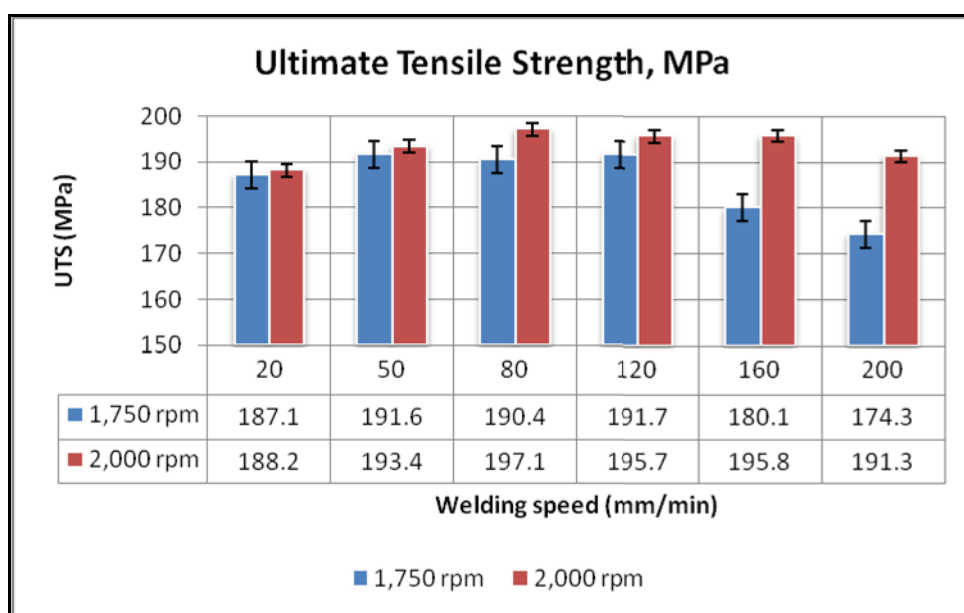
จากผลการทดสอบค่าความต้านทานแรงดึงดังแสดงในภาคผนวก ฉ ของแนวเชื่อมเสียดทานแบบกวนของอะลูมิเนียมผสมต่างชนิดระหว่างอะลูมิเนียมหล่อกิ่งของแข็ง SSM 356 ที่ไม่ผ่านกระบวนการทางความร้อน T6 กับอะลูมิเนียมผสม AA 6061-T651 พบว่าการปรับเปลี่ยนความเร็วหมุนเชื่อมและความเร็วเดินเชื่อมมีผล โดยตรงต่อค่าความต้านทานแรงดึงของแนวเชื่อม การเพิ่มความเร็วหมุนเชื่อมจะส่งผลให้ค่าความต้านทานแรงดึงของแนวเชื่อมเพิ่มขึ้นด้วย เพราะความเร็วหมุนเชื่อมที่สูงขึ้น ส่งผลให้ความร้อนจากการเสียดทานระหว่างตัวกวนกับผิวชิ้นงานมีค่าเพิ่มขึ้น การเสียดทานของเนื้อวัสดุจะมีความสมบูรณ์มากขึ้นและการผสานเป็นเนื้อเดียวกันของวัสดุมีมากขึ้นด้วยเช่นกัน จากเหตุผลที่กล่าวมาแล้วข้างต้น จึงเป็นที่มาของค่าความต้านทานแรงดึงที่สูงขึ้น

จากการทดลองพบว่า ความเร็วเดินเชื่อมมีอิทธิพลต่อค่าความต้านทานแรงดึงของแนวเชื่อม เมื่อเพิ่มความเร็วเดินเชื่อม ค่าความต้านทานแรงดึงของแนวเชื่อมจะมีค่าเพิ่มมากขึ้นถึงค่าๆ หนึ่ง หลังจากนั้น เมื่อยิ่งเพิ่มความเร็วเดินเชื่อมต่อไปค่าความต้านทานแรงดึงก็จะมีค่าลดน้อยลง เนื่องจากที่ความเร็วเดินเชื่อมต่ำ (20 mm/min) และความเร็วเดินเชื่อมสูง (160 mm/min ขึ้นไป) จะสังเกตเห็นว่าความต้านทานแรงดึงมีค่าต่ำ เนื่องจากผลของความร้อนจากการเสียดทานที่มากเกินไปและความร้อนจากการเสียดทานที่ไม่เพียงพอ ตามลำดับ ความเร็วเดินเชื่อมที่ต่ำจะส่งผลให้โครงสร้างทางโลหะวิทยาของวัสดุมีการเปลี่ยนแปลงที่บริเวณแนวกวนและนำไปสู่ค่าความต้านทานแรงดึงที่ต่ำกว่าปกติ การเพิ่มความเร็วเดินเชื่อมส่งผลให้ความสามารถในการเกาะตัวของวัสดุลดลง โดยมีผลมาจากการตกตะกอนของกลุ่มความแข็งแรง การไหลวนเชิงพลาสติกของวัสดุมีค่าน้อยลงจึงนำไปสู่ค่าความต้านทานแรงดึงของแนวเชื่อมที่ลดลง (Colligan *et al.*, 2003) หลังจากผ่านการทดสอบความต้านทานแรงดึง ลักษณะการขาดของชิ้นทดสอบจะเกิดขึ้นหลายบริเวณด้วยกันซึ่งจะขึ้นอยู่กับความสมบูรณ์ของแนวเชื่อมที่แต่ละตัวแปร การขาดของชิ้นทดสอบที่ตัวแปรเชื่อมที่ให้ค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุดของแนวเชื่อม จะพบว่าประมาณ 2 ใน 3 ของชิ้นทดสอบส่วนใหญ่จะขาดที่บริเวณเขตที่ได้รับผลกระทบจากความร้อนทางกลของอะลูมิเนียมหล่อกิ่งของแข็ง SSM 356 (TMAZ of SSM 356) เนื่องจากบริเวณดังกล่าวจะเป็นบริเวณที่ค่าความแข็งแรงจะต่ำกว่าบริเวณอื่น และอีก 1 ใน 3 ส่วนจะขาดที่บริเวณเนื้อโลหะเดิมของอะลูมิเนียมหล่อกิ่งของแข็ง SSM 356 เนื่องจากผลของรอยตำหนิ (defect) ที่เกิดในเนื้อวัสดุที่มาจากกระบวนการหล่อ ดังแสดงในภาพประกอบที่ 4.21 สำหรับการขาดของแนวเชื่อมที่ชิ้นทดสอบที่มีรูโพรง (voids) ส่วนใหญ่จะขาดที่บริเวณเขตที่ได้รับผลกระทบจากความร้อนทางกลของอะลูมิเนียมผสม AA 6061-T651 (TMAZ of AA 6061-T651) เนื่องจากบริเวณดังกล่าวเป็นบริเวณที่มีรูโพรงเกิดขึ้นและค่าความแข็งแรงจะต่ำกว่า

บริเวณอื่น ในส่วนของบริเวณการขาดของชิ้นทดสอบของแต่ละตัวแปรเชื่อมอื่นๆ จะแสดงไว้ในภาคผนวก จ



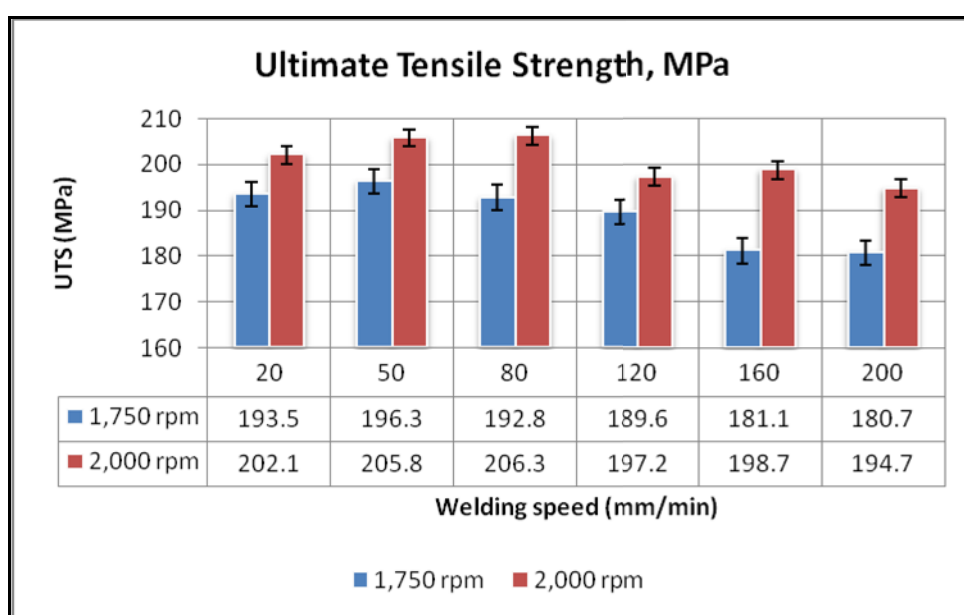
ภาพประกอบที่ 4.21 การขาดที่เกิดจากรอยตำหนิจากกระบวนการหล่อ



ภาพประกอบที่ 4.22 ค่าความต้านทานแรงดึงของแนวเชื่อมเสียดทานแบบกวนของอะลูมิเนียมผสมต่างชนิดระหว่างอะลูมิเนียมหล่อกิ่งของแข็ง SSM 356 ที่ไม่ผ่านกระบวนการทางความร้อน T6 กับอะลูมิเนียมผสม AA 6061-T651

จากภาพประกอบที่ 4.22 เป็นผลของค่าความต้านทานแรงดึงเฉลี่ย (3 ซ้ำ) ของแนวเชื่อมที่ตัวแปรเชื่อมต่างๆ ของแนวเชื่อมเสียดทานแบบกวนของอะลูมิเนียมผสมต่างชนิดระหว่าง

อะลูมิเนียมหล่อกิ่งของแข็ง SSM 356 ที่ไม่ผ่านกระบวนการทางความร้อน T6 กับอะลูมิเนียมผสม AA 6061-T651 โดยจะพบว่าค่าความต้านทานแรงดึงเฉลี่ยสูงสุดของแนวเชื่อมอยู่ที่ 197.1 MPa ที่ความเร็วหมุนเชื่อม 2,000 rpm ความเร็วเดินเชื่อมที่ 80 mm/min ซึ่งมีค่าต่ำกว่าค่าความต้านทานแรงดึงเฉลี่ยของเนื้อโลหะเดิม SSM 356 ที่ไม่ผ่านกระบวนการทางความร้อน T6 (198.4 MPa) แต่ค่าความต้านทานแรงดึงเฉลี่ยจะสูงกว่าเมื่อเทียบกับผลงานวิจัยของ Lee *et al.* (2003a) ที่ได้เชื่อมอะลูมิเนียมผสม A356 หล่อแบบไดคาสต์ธรรมดา กับ AA6061 โดยมีค่าความต้านทานแรงดึงเฉลี่ยอยู่ที่ 192 MPa ซึ่งสามารถชี้ให้เห็นว่าแนวเชื่อมของ SSM 356 กับ AA 6061-T651 จะให้ค่าความต้านทานแรงดึงที่สูงกว่าเนื่องจากผลของกระบวนการหล่อที่มีคุณภาพส่งผลให้สมบัติทางกลของวัสดุมีค่าเพิ่มสูงขึ้นด้วย รวมทั้งผลจากการตัวแปรเชื่อมที่มีความเหมาะสมซึ่งจะช่วยส่งผลให้แนวเชื่อมมีประสิทธิภาพมากขึ้นด้วยเช่นกัน



ภาพประกอบที่ 4.23 ค่าความต้านทานแรงดึงของแนวเชื่อมเสียดทานแบบกวนของอะลูมิเนียมผสมต่างชนิดระหว่างอะลูมิเนียมหล่อกิ่งของแข็ง SSM 356 ที่ผ่านกระบวนการทางความร้อน T6 กับอะลูมิเนียมผสม AA 6061-T651

จากภาพประกอบที่ 4.23 เป็นผลของค่าความต้านทานแรงดึงเฉลี่ย (3 ซ้ำ) ที่ตัวแปรเชื่อมต่างๆ ของแนวเชื่อมเสียดทานแบบกวนของอะลูมิเนียมผสมต่างชนิดระหว่างอะลูมิเนียมหล่อกิ่งของแข็ง SSM 356 ที่ผ่านกระบวนการทางความร้อน T6 กับอะลูมิเนียมผสม AA 6061-T651 โดยจะพบว่าความต้านทานแรงดึงเฉลี่ยสูงสุดอยู่ที่ 206.3 MPa ที่ความเร็วหมุนเชื่อม 2,000 rpm ความเร็ว

เดินเชื่อมที่ 80 mm/min ซึ่งต่ำกว่าค่าความต้านทานแรงดึงเฉลี่ยของเนื้อโลหะเดิม SSM 356 ที่ผ่านกระบวนการทางความร้อน T6 (268 MPa) เมื่อเทียบกับงานวิจัยก่อนหน้านี้ที่ Lim *et al.* (2004) ได้เชื่อม A356-T6 ซึ่งหล่อแบบไดคาสต์ธรรมดาแล้วนำมาผ่านกระบวนการทางความร้อน T6 กับ AA 6061-T651 ให้ผลของค่าความต้านทานแรงดึงเฉลี่ยประมาณ 206 MPa จะพบว่าความต้านทานแรงดึงเฉลี่ยของแนวเชื่อม SSM 356 ที่ผ่านกระบวนการทางความร้อน T6 กับอะลูมิเนียมผสม AA 6061-T651 จะให้ค่าที่ใกล้เคียงกันมาก นอกจากนี้เราจะสังเกตเห็นว่าผลต่างของค่าความต้านทานแรงดึงของทั้งสองความเร็วหมุนเชื่อมจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อความเร็วเดินเชื่อมสูงขึ้น เนื่องจากผลของรูโพรงที่เกิดขึ้นในแนวเชื่อม โดยเฉพาะที่ความเร็วเดินเชื่อม 160 และ 200 mm/min ความเร็วหมุนเชื่อม 1,750 rpm ที่มีรูโพรงเกิดขึ้นอย่างเห็นได้ชัดเจน แต่ที่ความเร็วเดินเชื่อมเดียวกัน ความเร็วหมุนเชื่อม 2,000 rpm ไม่มีรูโพรงเกิดขึ้น เนื่องจากความเร็วหมุนเชื่อมที่สูงขึ้นจะมีช่วงของความเร็วเดินเชื่อมที่มากกว่า จึงทำให้ผลต่างของค่าความต้านทานแรงดึงมีค่ายิ่งเพิ่มขึ้นตามลำดับ

อิทธิพลของกระบวนการทางความร้อน T6 มีส่วนช่วยในการเพิ่มสมบัติทางกลของแนวเชื่อมให้สูงขึ้น เมื่อเปรียบเทียบค่าความต้านทานแรงดึงเฉลี่ยของแนวเชื่อมระหว่าง (อะลูมิเนียมหล่อทิ้งของแข็ง SSM 356 ที่ไม่ผ่านกระบวนการทางความร้อน T6 กับอะลูมิเนียมผสม AA 6061-T651 ที่มีค่าเท่ากับ 197.1 MPa) กับ (อะลูมิเนียมหล่อทิ้งของแข็ง SSM 356 ที่ผ่านกระบวนการทางความร้อน T6 กับอะลูมิเนียมผสม AA 6061-T651 ที่มีค่าเท่ากับ 206.3 MPa) จะพบว่าค่าความต้านทานแรงดึงเฉลี่ยจะเพิ่มขึ้นจากเดิมประมาณ 4.67 % สำหรับรายละเอียดค่าความต้านทานแรงดึงของแนวเชื่อมที่แต่ละตัวแปรเชื่อมสามารถศึกษาเพิ่มเติมได้จากผลในภาคผนวก จ.1 และ จ.2

4.5 การวิเคราะห์ผลเชิงสถิติของค่าความต้านทานแรงดึงของแนวเชื่อม (Statistical analysis of ultimate tensile strength of welded)

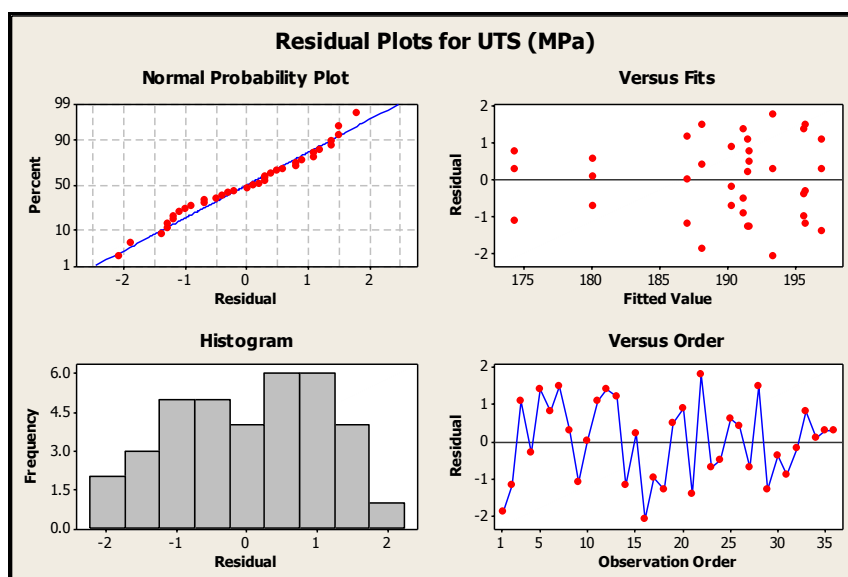
การวิเคราะห์ผลเชิงสถิติของค่าความต้านทานแรงดึงของแนวเชื่อมจะแบ่งออกเป็นสองส่วนดังนี้ คือ ส่วนแรกจะเป็นการวิเคราะห์ผลเชิงสถิติของค่าความต้านทานแรงดึงของแนวเชื่อมเสียดทานแบบกวนของอะลูมิเนียมผสมต่างชนิดระหว่างอะลูมิเนียมหล่อทิ้งของแข็ง SSM 356 ที่ไม่ผ่านกระบวนการทางความร้อน T6 กับอะลูมิเนียมผสม AA 6061-T651 และส่วนที่สองจะเป็นการวิเคราะห์ผลเชิงสถิติของค่าความต้านทานแรงดึงของแนวเชื่อมเสียดทานแบบกวนของอะลูมิเนียมผสมต่างชนิดระหว่างอะลูมิเนียมหล่อทิ้งของแข็ง SSM 356 ที่ผ่านกระบวนการทางความร้อน T6 กับอะลูมิเนียมผสม AA 6061-T651 โดยรายละเอียดของแต่ละส่วนมีดังนี้

4.5.1 การวิเคราะห์ผลเชิงสถิติของค่าความต้านทานแรงดึงของแนวเชื่อมเสียดทานแบบกวนของอะลูมิเนียมผสมต่างชนิดระหว่างอะลูมิเนียมหล่อกิ่งของแข็ง SSM 356 ที่ไม่ผ่านกระบวนการทางความร้อน T6 กับอะลูมิเนียมผสม AA 6061-T651

การวิเคราะห์ผลเชิงสถิติของค่าความต้านทานแรงดึงของแนวเชื่อมเสียดทานแบบกวนของอะลูมิเนียมผสมต่างชนิดระหว่างอะลูมิเนียมหล่อกิ่งของแข็ง SSM 356 ที่ไม่ผ่านกระบวนการทางความร้อน T6 กับอะลูมิเนียมผสม AA 6061-T651 จะประกอบด้วยส่วนต่างๆ ดังนี้

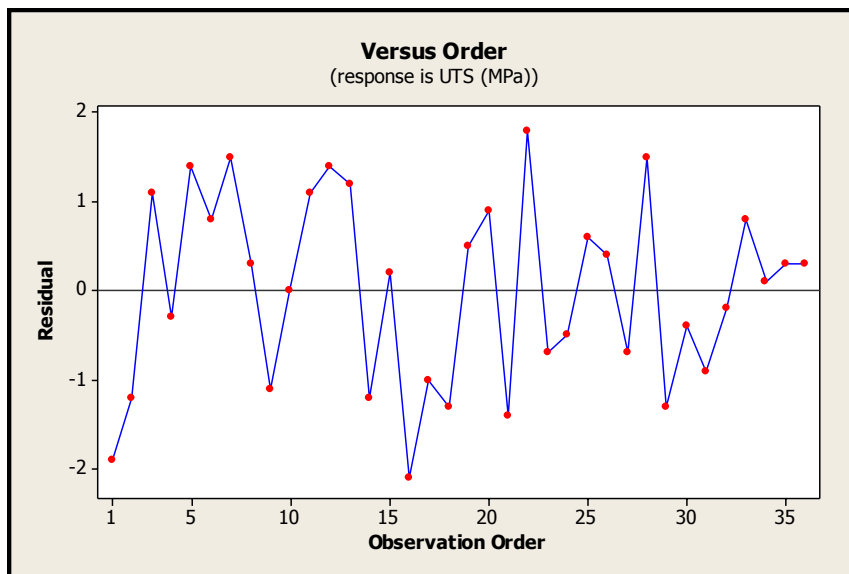
4.5.1.1 การวิเคราะห์ความถูกต้องของตัวแบบ

การวิเคราะห์ความถูกต้องของตัวแบบทางสถิติที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 จะประกอบด้วย ความเป็นอิสระของข้อมูล ความเป็นปกติของข้อมูล และความมีเสถียรภาพของค่าความแปรปรวนของข้อมูล โดยทำการทดสอบความถูกต้องของตัวแบบทางสถิติของค่าความต้านทานแรงดึงของแนวเชื่อมในตาราง น.1 ของภาคผนวก น ซึ่งจะมีการพิจารณาจากกราฟแสดงการวิเคราะห์ความถูกต้องของตัวแบบในภาพประกอบที่ 4.24 ดังนี้



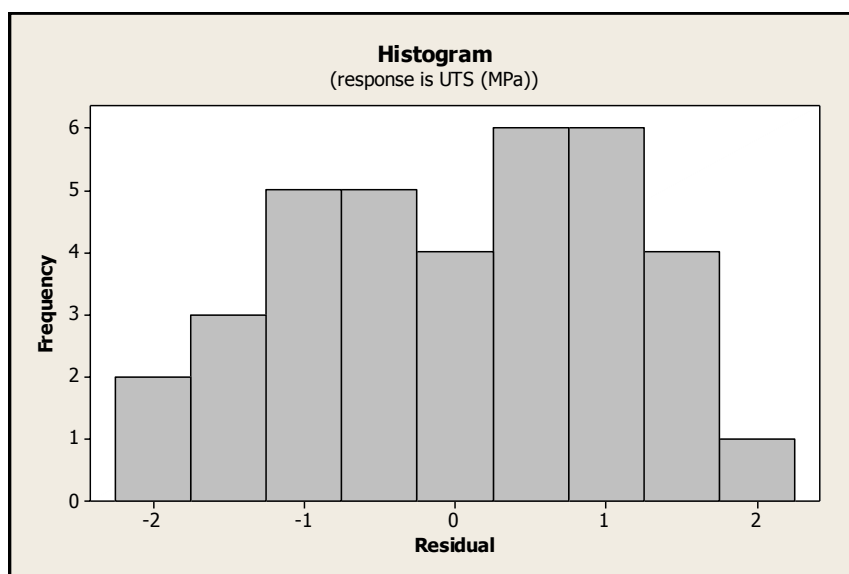
ภาพประกอบที่ 4.24 กราฟแสดงการวิเคราะห์ความถูกต้องของตัวแบบ

1) ความเป็นอิสระของข้อมูล การที่ข้อมูลจะเป็นอิสระหรือไม่นั้นให้พิจารณาจากลักษณะกราฟ Residual Versus the Order of the Data ว่าข้อมูลมีการกระจายตัวที่ไม่สามารถทำนายหรือคาดเดาได้ว่ามีทิศทางหรือแนวโน้มเป็นอย่างไร จากภาพประกอบที่ 4.25 พบว่าข้อมูลแต่ละค่าที่ได้มาจากการทดลองมีความเป็นอิสระต่อกัน เนื่องจากลักษณะกราฟที่ได้ไม่สามารถทำนายหรือคาดเดาได้ว่ามีทิศทางหรือแนวโน้มเป็นอย่างไร



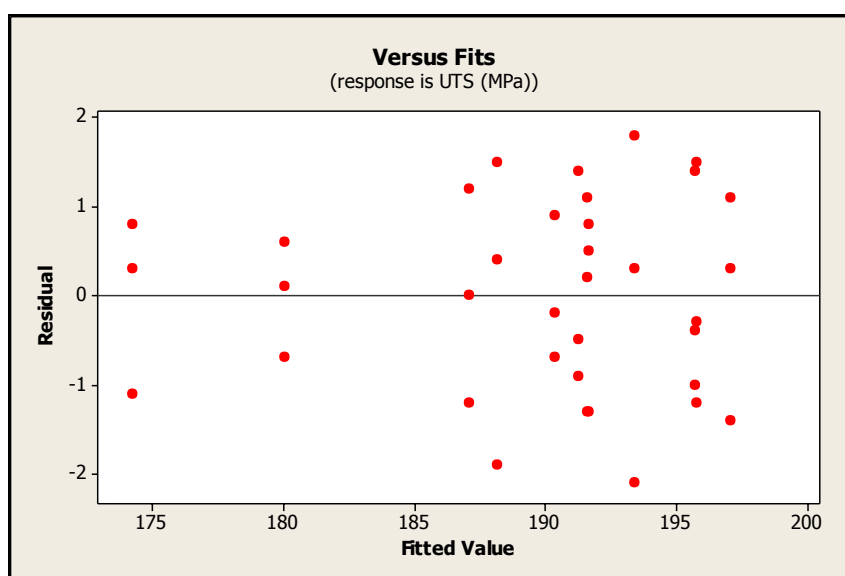
ภาพประกอบที่ 4.25 กราฟ Residual Versus the Order of the Data

2) ความเป็นปกติของข้อมูล เป็นการพิจารณาว่าข้อมูลที่ได้มาจากการทดลองเป็นแบบปกติหรือไม่ โดยพิจารณาจากกราฟการกระจายตัวของข้อมูลว่าเป็นเส้นตรงหรือไม่ (กรณีข้อมูลน้อยกว่า 30 ข้อมูล) ถ้าข้อมูลมีมากกว่า 30 ข้อมูล ให้พิจารณาจากกราฟ Histogram of the Residuals ว่ามีลักษณะกราฟเป็นแบบระฆังคว่ำหรือไม่ จากภาพประกอบที่ 4.26 จะพบว่าลักษณะกราฟเป็นแบบระฆังคว่ำ แสดงว่าข้อมูลมีความเป็นปกติ



ภาพประกอบที่ 4.26 กราฟ Histogram of the Residuals

3) ความมีเสถียรภาพของค่าความแปรปรวนของข้อมูล เป็นการสังเกตค่าความแปรปรวนของข้อมูลว่ามีการกระจายตัวรอบค่าศูนย์กลางคลาดเคลื่อนสม่ำเสมอมากขึ้นหรือไม่ โดยพิจารณาจาก Residuals Versus the Fitted Values จากภาพประกอบที่ 4.27 พบว่าข้อมูลมีการกระจายตัวแปรผัน ไม่สม่ำเสมอรอบค่าศูนย์กลางทำให้ไม่มั่นใจในความมีเสถียรภาพของค่าความแปรปรวนของข้อมูล จึงต้องมีการทดสอบความเท่ากันของค่าความแปรปรวนของข้อมูล เพื่อให้เกิดความมั่นใจในความมีเสถียรภาพของค่าความแปรปรวนของข้อมูลที่ได้จากการทดลอง



ภาพประกอบที่ 4.27 กราฟ Residuals Versus the Fitted Values

จากภาพประกอบที่ 4.28 แสดงการทดสอบความเท่ากันของค่าความแปรปรวนของข้อมูล ช่วงความเชื่อมั่น ความเบี่ยงเบนมาตรฐานของความต้านทานแรงดึงของแนวเชื่อมจากปัจจัยต่างๆ มีความเหลื่อมล้ำกัน แสดงว่าความเบี่ยงเบนมาตรฐานในการทดลองทั้ง 12 ครั้ง มีความแตกต่างกัน การทดลองที่ความเร็วหมุนเชื่อม 2,000 rpm และความเร็วเดินเชื่อม 50 mm/min มีความแปรปรวนสูงกว่าการทดลองอื่นๆ ที่ความเร็วหมุนเชื่อม 1,750 rpm และความเร็วเดินเชื่อม 160 mm/min มีความแปรปรวนน้อยที่สุด

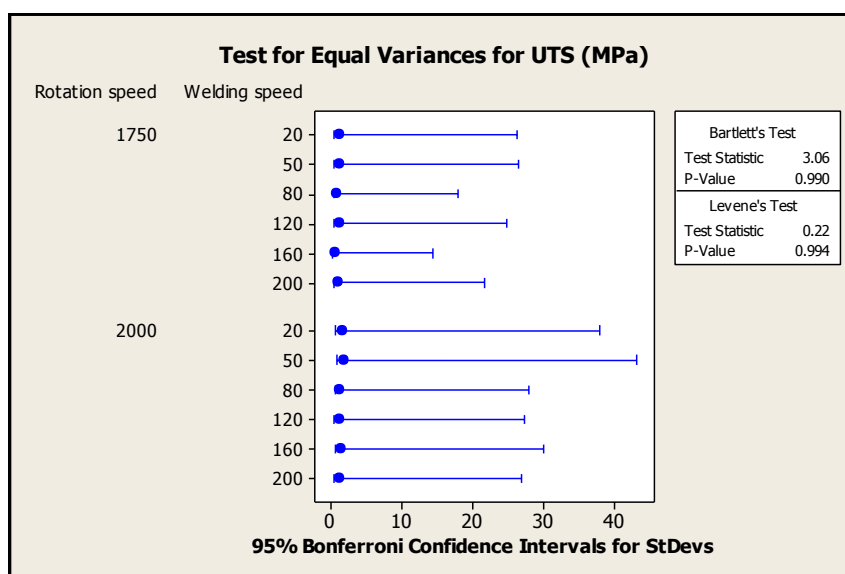
ทดสอบความเท่ากันของความแปรปรวนของข้อมูล จากสมมติฐาน

$H_0: \sigma_1^2 = \sigma_2^2 = \sigma_3^2 = \sigma_4^2 = \sigma_5^2 = \sigma_6^2 = \sigma_7^2 = \sigma_8^2 = \sigma_9^2 = \sigma_{10}^2 = \sigma_{11}^2 = \sigma_{12}^2$ ความแปรปรวนของการทดลองทั้ง 12 มีค่าเท่ากัน

$H_1: \sigma_1^2 \neq \sigma_2^2 \neq \sigma_3^2 \neq \sigma_4^2 \neq \sigma_5^2 \neq \sigma_6^2 \neq \sigma_7^2 \neq \sigma_8^2 \neq \sigma_9^2 \neq \sigma_{10}^2 \neq \sigma_{11}^2 \neq \sigma_{12}^2$ ความแปรปรวนของการทดลองทั้ง 12 มีค่าไม่เท่ากัน

ที่ระดับ Error Type I (Alpha: ζ) = 0.05

จาก Bartlett's Test ผลการคำนวณที่ได้ดังแสดงในภาพประกอบที่ 4.28 ค่า P-Value = 0.990 ซึ่งมีค่ามากกว่า $\zeta = 0.05$ แสดงว่าสัดส่วนของความแปรปรวนในรูป F มีค่าน้อย ความแปรปรวนของการทดลองทั้ง 12 ครั้งมีค่าเท่ากัน เราจึงสรุปได้ว่าค่าความแปรปรวนของข้อมูลมีค่าเท่ากันที่ระดับความเชื่อมั่น 95%



ภาพประกอบที่ 4.28 ผลการทดสอบความเท่ากันของค่าความแปรปรวนของข้อมูล

4.5.1.2 การทดสอบสมมติฐานของการทดลอง

อิทธิพลของความเร็วหมุนเชื่อม ความเร็วเดินเชื่อม และอันตรกิริยาระหว่างความเร็วหมุนเชื่อมกับความเร็วเดินเชื่อม มีผลต่อค่าความต้านทานแรงดึงของแนวเชื่อมอย่างไร มีนัยสำคัญหรือไม่ โดยจะพิจารณาจากผลการคำนวณที่แสดงไว้ในตารางที่ 4.1 ดังนี้

ตารางที่ 4.1 ตาราง ANOVA

<i>Analysis of Variance for UTS (MPa), using Adjusted SS for Tests</i>						
Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Rotation speed	1	535.92	535.92	535.92	325.79	0.000
Welding speed	5	570.68	570.68	114.14	69.38	0.000
Rotation speed*Welding speed	5	365.32	365.32	73.06	44.42	0.000
Error	24	39.48	39.48	1.64	-	-
Total	35	1511.41	-	-	-	-

S = 1.28258, R-Sq = 97.39%, R-Sq(adj) = 96.19%

1) Main effect

การพิจารณาสมมติฐานจะประกอบด้วย อิทธิพลของความเร็วหมุนเชื่อมและ อิทธิพลของความเร็วเดินเชื่อม โดยจะพิจารณาจากการทดสอบดังนี้

- ทดสอบสมมติฐานของอิทธิพลของความเร็วหมุนเชื่อม

$H_0 : \psi_1 | \psi_2$ สำหรับทุกระดับ อิทธิพลของความเร็วหมุนเชื่อมไม่แตกต่างกัน

$H_1 : \psi_1 \cap \psi_2$ สำหรับบางระดับ อิทธิพลของความเร็วหมุนเชื่อมแตกต่างกัน

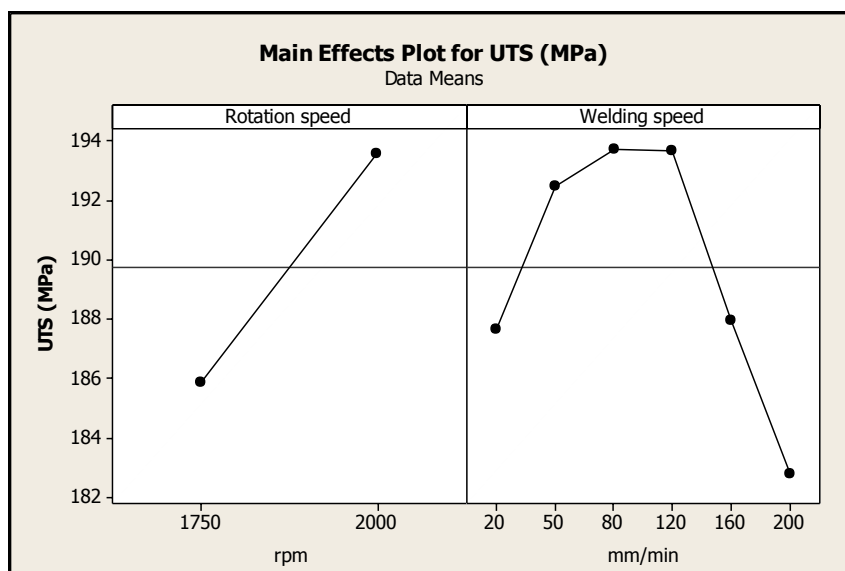
จากข้อมูลในตาราง 4.1 ตาราง ANOVA ปฏิเสธ H_0 เนื่องจากค่า P-Value มีค่าน้อยกว่า 0.000 ซึ่งมีค่าน้อยเมื่อเทียบกับค่า Alpha $\zeta = 0.05$ ทำให้มีข้อมูลสนับสนุนได้ว่าอิทธิพลของความเร็วหมุนเชื่อม มีผลต่อค่าความต้านทานแรงดึงของแนวเชื่อมอย่างมีนัยสำคัญ ที่ระดับ $\zeta = 0.05$

- ทดสอบสมมติฐานของอิทธิพลของความเร็วเดินเชื่อม

$H_0 : b_1 = b_2 = b_3 = b_4 = b_5 = b_6$ สำหรับทุกระดับ อิทธิพลของความเร็วเดินเชื่อมไม่แตกต่างกัน

$H_1 : b_1 \neq b_2 \neq b_3 \neq b_4 \neq b_5 \neq b_6$ สำหรับบางระดับ อิทธิพลของความเร็วเดินเชื่อมแตกต่างกัน

จากข้อมูลในตาราง 4.1 ตาราง ANOVA ปฏิเสธ H_0 เนื่องจากค่า P-Value = 0.000 ซึ่งมีค่าน้อยเมื่อเทียบกับค่า Alpha $\zeta = 0.05$ ทำให้มีข้อมูลสนับสนุนได้ว่าอิทธิพลของความเร็วเดินเชื่อม มีผลต่อค่าความต้านทานแรงดึงของแนวเชื่อมอย่างมีนัยสำคัญ ที่ระดับ $\zeta = 0.05$



ภาพประกอบที่ 4.29 แสดงผลของปัจจัยหลักต่อค่าความต้านทานแรงดึงของแนวเชื่อม

ความเร็วหมุนเชื่อมและความเร็วเดินเชื่อมเป็นปัจจัยหลักที่มีผลโดยตรงต่อค่าความต้านทานแรงดึงของแนวเชื่อม จากภาพประกอบที่ 4.29 จะพบว่าเมื่อค่าความเร็วหมุนเชื่อมเพิ่มขึ้นจะทำให้ค่าความต้านทานแรงดึงของแนวเชื่อมเพิ่มขึ้นด้วย สำหรับปัจจัยของความเร็วเดินเชื่อม จะพบว่าเมื่อค่าความเร็วเดินเชื่อมเพิ่มขึ้นจาก 20 ถึง 80 mm/min ค่าความต้านทานแรงดึงของแนวเชื่อมจะมีค่าเพิ่มขึ้น แต่เมื่อยังเพิ่มค่าความเร็วเดินเชื่อมจาก 80 ถึง 200 mm/min ค่าความต้านทานแรงดึงของแนวเชื่อมจะยิ่งลดลง

2) Factor interaction effect

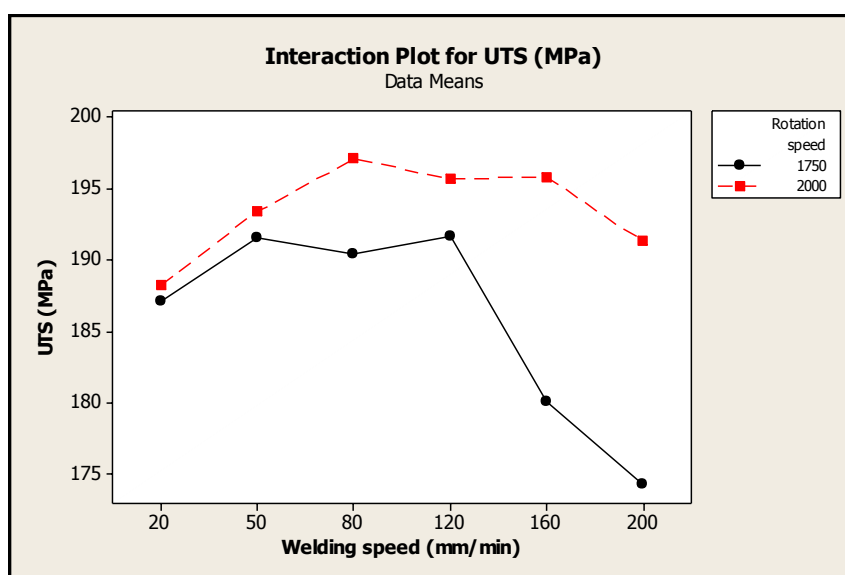
การพิจารณาสมมติฐานจะเป็นการทดสอบอันตรกิริยาระหว่างอิทธิพลของความเร็วหมุนเชื่อมกับความเร็วเดินเชื่อม โดยจะพิจารณาจากการทดสอบดังนี้

- ทดสอบอันตรกิริยาระหว่างความเร็วหมุนเชื่อมกับความเร็วดินเชื่อม

$H_0 : \mu_{ij} = 0$ for all i, j ทุกระดับ i, j ไม่มีอิทธิพลของอันตรกิริยาระหว่างความเร็วหมุนเชื่อมกับความเร็วดินเชื่อม ($i = 1, 2; j = 1, 2, 3, 4, 5, 6$)

$H_1 : \text{at least one } \mu_{ij} \neq 0$ มีบาง i, j มีอิทธิพลของอันตรกิริยาระหว่างความเร็วหมุนเชื่อมกับความเร็วดินเชื่อม ($i = 1, 2; j = 1, 2, 3, 4, 5, 6$)

จากข้อมูลในตาราง 4.1 ตาราง ANOVA ผลการวิเคราะห์อิทธิพลของอันตรกิริยาระหว่างความเร็วหมุนเชื่อมกับความเร็วดินเชื่อม ปฏิเสธ H_0 เนื่องจากค่า P-Value = 0.000 ซึ่งมีน้อยกว่าเมื่อเทียบกับค่า Alpha $\zeta = 0.05$ ทำให้มีข้อมูลสนับสนุนได้ว่ามีอิทธิพลของอันตรกิริยาระหว่างความเร็วหมุนเชื่อมกับความเร็วดินเชื่อม มีผลต่อค่าความต้านทานแรงดึงของแนวเชื่อมอย่างมีนัยสำคัญ ที่ระดับ $\zeta = 0.05$



ภาพประกอบที่ 4.30 แสดงผลของอันตรกิริยาระหว่างความเร็วหมุนเชื่อมกับความเร็วดินเชื่อมต่อค่าความต้านทานแรงดึงของแนวเชื่อม

อันตรกิริยาระหว่างความเร็วหมุนเชื่อมกับความเร็วดินเชื่อมมีผลต่อค่าความต้านทานแรงดึงของแนวเชื่อม จากภาพประกอบที่ 4.30 จะพบว่าเมื่อค่าความเร็วหมุนเชื่อมเพิ่มขึ้น ค่าความต้านทานแรงดึงของแนวเชื่อมจะเพิ่มขึ้นทุกๆ ค่าความเร็วดินเชื่อม โดยที่ความเร็วหมุน

เชื่อม 2,000 rpm ความเร็วเดินเชื่อม 80 mm/min จะให้ค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุด ส่วนที่ความเร็วหมุนเชื่อม 1,750 rpm ความเร็วเดินเชื่อม 200 mm/min ให้ค่าความต้านทานแรงดึงที่ต่ำสุด

4.5.1.3 สมการถดถอย

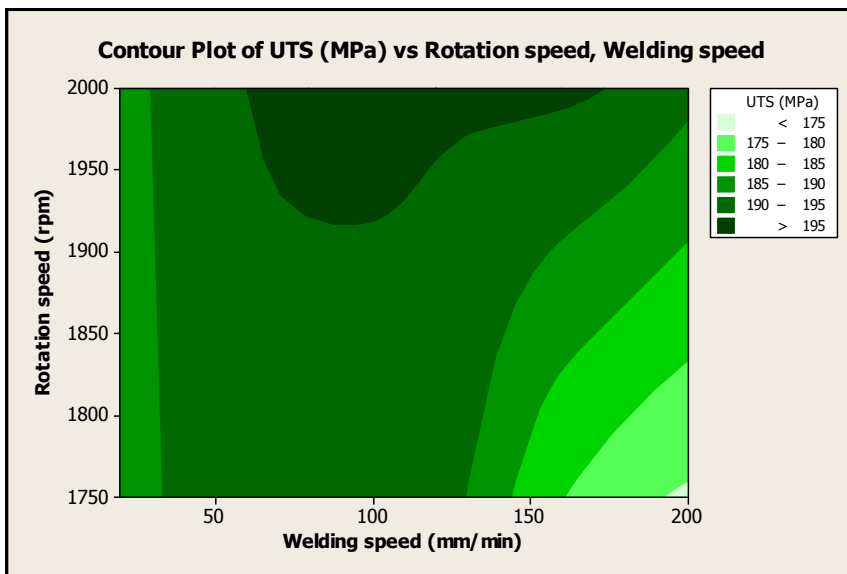
สมการถดถอยที่ได้จากการทดลองมีความถูกต้อง โดยพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (Determination; R^2) จากข้อมูลในตาราง 4.1 ตาราง ANOVA ค่า R^2 ที่ได้มีค่าเท่ากับ 97.39% แสดงว่าความผันแปรที่เกิดขึ้น 100 หน่วย เป็นความผันแปรที่เกิดจากการปรับค่าความเร็วหมุนเชื่อมและความเร็วเดินเชื่อม 97.39 หน่วย และเกิดจากปัจจัยที่ไม่สามารถควบคุมได้ 2.61 หน่วย พิจารณาค่า R^2_{Adj} เท่ากับ 96.19% ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับค่า R^2 แสดงว่าจำนวนข้อมูล 36 ชุด ที่นำมาใช้ในการสร้างความสัมพันธ์มีค่าเพียงพอ

จากการคำนวณด้วยโปรแกรมประมวลผลทางสถิติ เมื่อกำหนดปัจจัย A คือ ความเร็วหมุนเชื่อม และปัจจัย B คือ ความเร็วเดินเชื่อม ซึ่งจะมีอิทธิพลต่อค่าความต้านทานแรงดึงของแนวเชื่อมตามความสัมพันธ์ดังสมการถดถอย (4.1) ที่ได้ดังนี้ คือ

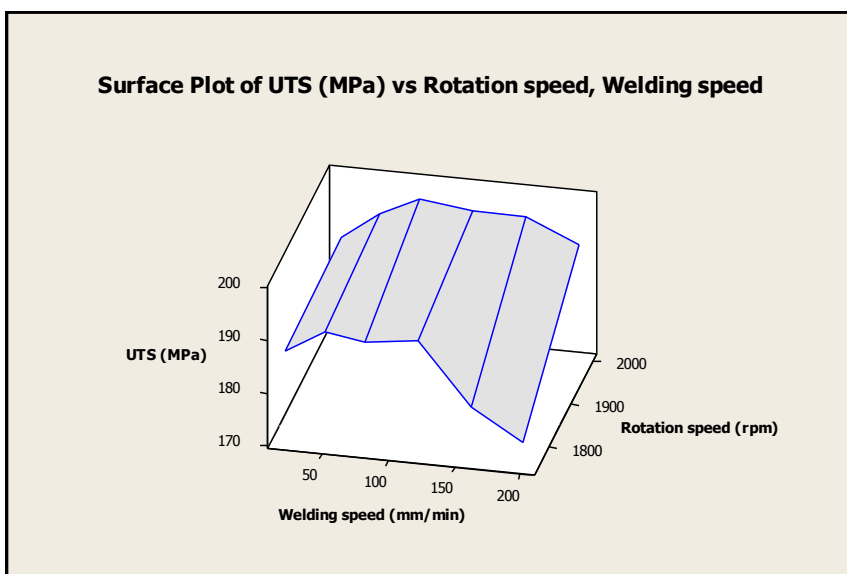
$$UTS \text{ (MPa)} = 135 + 0.0309 \text{ (Rotation speed)} - 0.0334 \text{ (Welding speed)} \quad \dots\dots\dots (4.1)$$

4.5.1.4 พื้นผิวตอบสนอง

จากผลการคำนวณข้อมูลการทดลองด้วยโปรแกรมประมวลผลทางสถิติ เมื่อกำหนดปัจจัยความเร็วหมุนเชื่อม และความเร็วเดินเชื่อมที่มีอิทธิพลต่อค่าความต้านทานแรงดึงของแนวเชื่อม Contour Plot ดังภาพประกอบที่ 4.31 ความเร็วหมุนเชื่อมสูงขึ้น ค่าความต้านทานแรงดึงของแนวเชื่อมจะเพิ่มมากขึ้น และในขณะที่ความเร็วเดินเชื่อมเพิ่มขึ้นค่าความต้านทานดึงของแนวเชื่อมจะเพิ่มขึ้นถึงค่าๆ หนึ่งแล้ว เมื่อยังเพิ่มความเร็วเดินเชื่อมค่าความต้านทานแรงดึงของแนวเชื่อมจะยิ่งลดลง ภาพประกอบที่ 4.32 แสดงพื้นผิวตอบสนองของค่าความต้านทานแรงดึงของแนวเชื่อมที่ได้รับอิทธิพลจากความเร็วหมุนเชื่อมกับความเร็วเดินเชื่อม ที่ความเร็วหมุนเชื่อม 2,000 rpm ความเร็วเดินเชื่อม 80 mm/min จะให้ค่าความต้านทานแรงดึง 197.1 MPa.



ภาพประกอบที่ 4.31 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วหมุนเชื่อมกับความเร็วเดินเชื่อมที่มีอิทธิพลต่อค่าความต้านทานแรงดึงในระดับต่างๆ ของ Contour plot



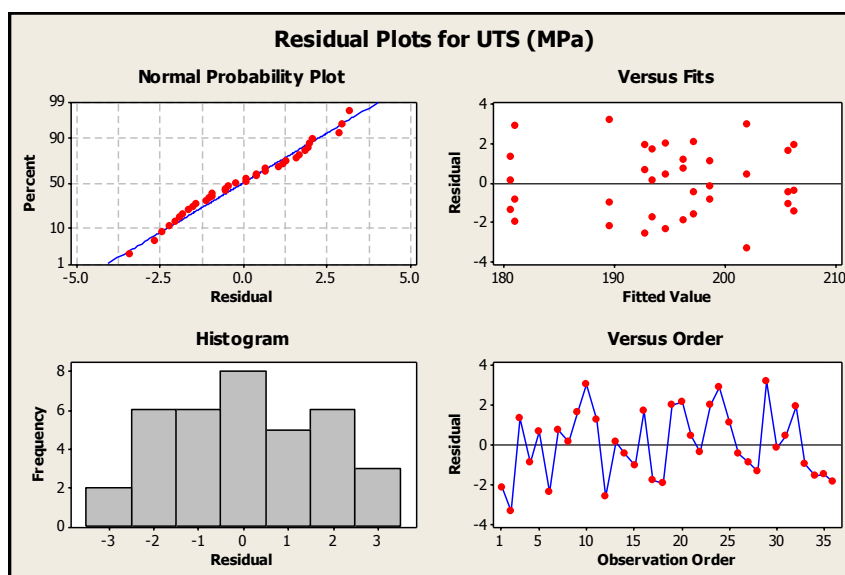
ภาพประกอบที่ 4.32 พื้นผิวตอบสนองของค่าความต้านทานแรงดึงที่ได้รับอิทธิพลจากความเร็วหมุนเชื่อมกับความเร็วเดินเชื่อม

4.5.2 การวิเคราะห์ผลเชิงสถิติของค่าความต้านทานแรงดึงของแนวเชื่อมเสียดทานแบบกวนของอะลูมิเนียมผสมต่างชนิดระหว่างอะลูมิเนียมหล่อกิ่งของแข็ง SSM 356 ที่ผ่านกระบวนการทางความร้อน T6 กับอะลูมิเนียมผสม AA 6061-T651

การวิเคราะห์ผลเชิงสถิติของค่าความต้านทานแรงดึงของแนวเชื่อมเสียดทานแบบกวนของอะลูมิเนียมผสมต่างชนิดระหว่างอะลูมิเนียมหล่อกิ่งของแข็ง SSM 356 ที่ผ่านกระบวนการทางความร้อน T6 กับอะลูมิเนียมผสม AA 6061-T651 จะประกอบด้วยส่วนต่างๆ ดังนี้

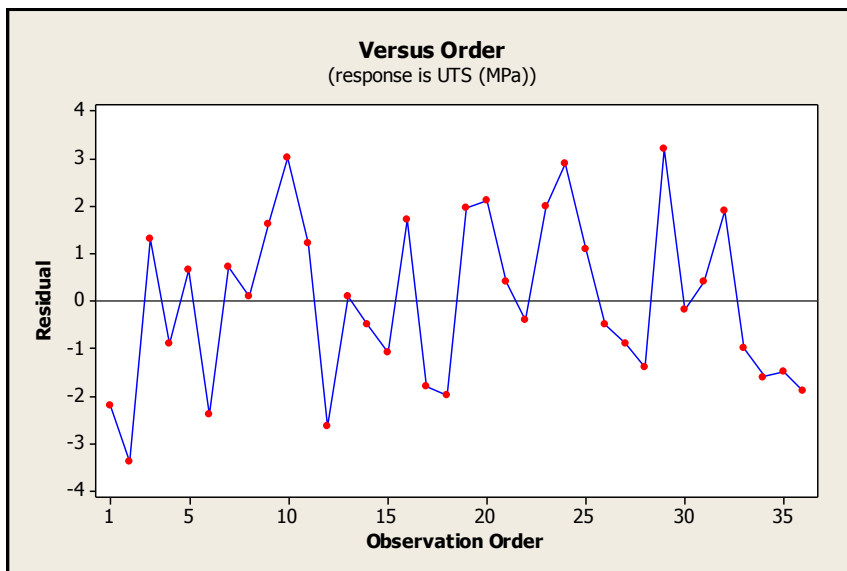
4.5.2.1 การวิเคราะห์ความถูกต้องของตัวแบบ

การวิเคราะห์ความถูกต้องของตัวแบบทางสถิติที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 จะประกอบด้วย ความเป็นอิสระของข้อมูล ความเป็นปกติของข้อมูล และความมีเสถียรภาพของค่าความแปรปรวนของข้อมูล โดยทำการทดสอบความถูกต้องของตัวแบบทางสถิติของค่าความต้านทานแรงดึงของแนวเชื่อมในตาราง จ.2 ของภาคผนวก จ ซึ่งจะมีการพิจารณาจากกราฟแสดงการวิเคราะห์ความถูกต้องของตัวแบบในภาพประกอบที่ 4.33 ดังนี้



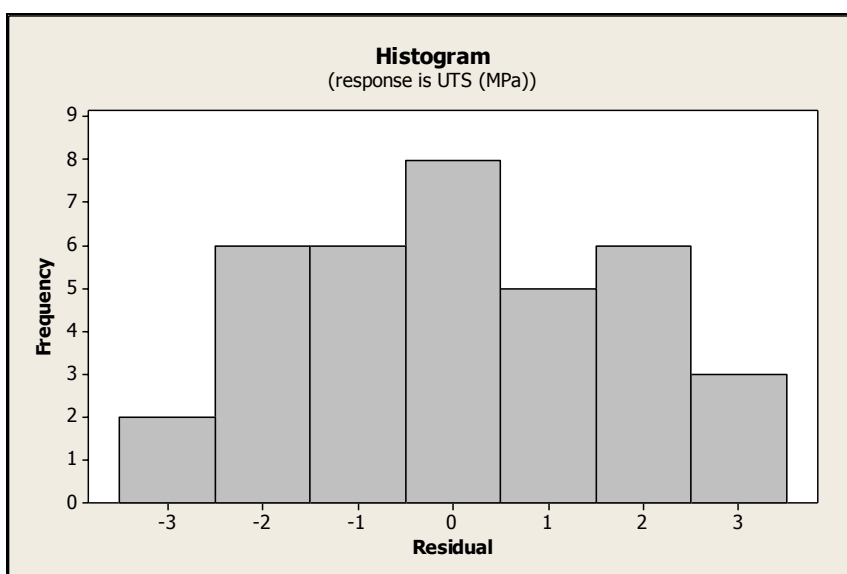
ภาพประกอบที่ 4.33 กราฟแสดงการวิเคราะห์ความถูกต้องของตัวแบบ

1) ความเป็นอิสระของข้อมูล การที่ข้อมูลจะเป็นอิสระหรือไม่นั้นให้พิจารณาจากลักษณะกราฟ Residual Versus the Order of the Data ว่าข้อมูลมีการกระจายตัวที่ไม่สามารถทำนายหรือคาดเดาได้ว่ามีทิศทางหรือแนวโน้มเป็นอย่างไร จากภาพประกอบที่ 4.34 พบว่าข้อมูลแต่ละค่าที่ได้มาจากการทดลองมีความเป็นอิสระต่อกัน เนื่องจากลักษณะกราฟที่ได้ไม่สามารถทำนายหรือคาดเดาได้ว่ามีทิศทางหรือแนวโน้มเป็นอย่างไร



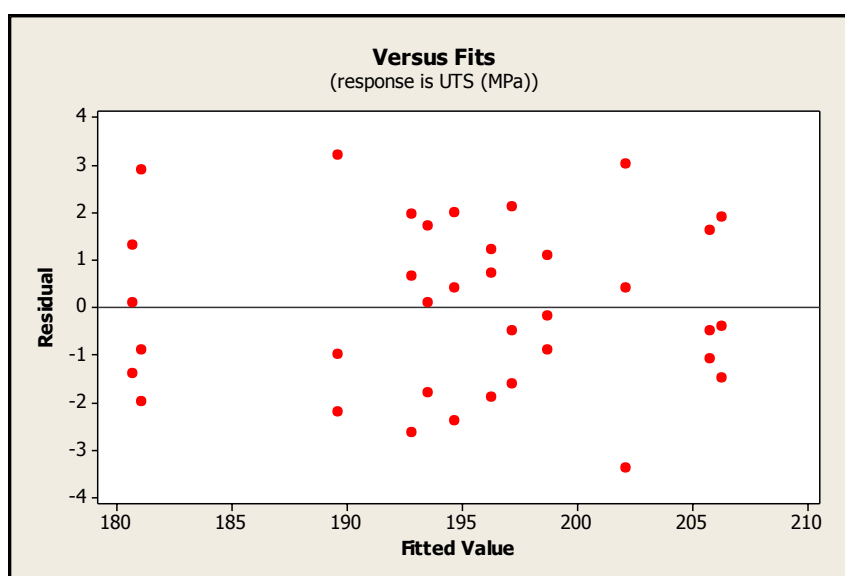
ภาพประกอบที่ 4.34 กราฟ Residual Versus the Order of the Data

2) ความเป็นปกติของข้อมูล เป็นการพิจารณาว่าข้อมูลที่ได้มาจากการทดลองเป็นแบบปกติหรือไม่ โดยพิจารณาจากกราฟการกระจายตัวของข้อมูลว่าเป็นเส้นตรงหรือไม่ (กรณีข้อมูลน้อยกว่า 30 ข้อมูล) ถ้าข้อมูลมีมากกว่า 30 ข้อมูล ให้พิจารณาจากกราฟ Histogram of the Residuals ว่ามีลักษณะกราฟเป็นแบบระฆังคว่ำหรือไม่ จากภาพประกอบที่ 4.35 จะพบว่าลักษณะกราฟเป็นแบบระฆังคว่ำ แสดงว่าข้อมูลมีความเป็นปกติ



ภาพประกอบที่ 4.35 กราฟ Histogram of the Residuals

3) ความมีเสถียรภาพของค่าความแปรปรวนของข้อมูล เป็นการสังเกตค่าความแปรปรวนของข้อมูลว่ามีการกระจายตัวรอบค่าศูนย์กลางคลาดเคลื่อนสม่ำเสมอมากขึ้นหรือไม่ โดยพิจารณาจาก Residuals Versus the Fitted Values จากภาพประกอบที่ 4.36 พบว่าข้อมูลมีการกระจายตัวแปรผัน ไม่สม่ำเสมอรอบค่าศูนย์กลางทำให้ไม่มั่นใจในความมีเสถียรภาพของค่าความแปรปรวนของข้อมูล จึงต้องมีการทดสอบความเท่ากันของค่าความแปรปรวนของข้อมูล เพื่อให้เกิดความมั่นใจในความมีเสถียรภาพของค่าความแปรปรวนของข้อมูลที่ได้จากการทดลอง



ภาพประกอบที่ 4.36 กราฟ Residuals Versus the Fitted Values

จากภาพประกอบที่ 4.37 แสดงการทดสอบความเท่ากันของค่าความแปรปรวนของข้อมูล ช่วงความเชื่อมั่น ความเบี่ยงเบนมาตรฐานของความต้านทานแรงดึงของแนวเชื่อมจากปัจจัยต่างๆ มีความเหลื่อมล้ำกัน แสดงว่าความเบี่ยงเบนมาตรฐานในการทดลองทั้ง 12 ครั้ง มีความแตกต่างกัน การทดลองที่ความเร็วหมุนเชื่อม 2,000 rpm และความเร็วเดินเชื่อม 20 mm/min มีความแปรปรวนสูงกว่าการทดลองอื่นๆ ที่ความเร็วหมุนเชื่อม 2,000 rpm และความเร็วเดินเชื่อม 160 mm/min มีความแปรปรวนน้อยที่สุด

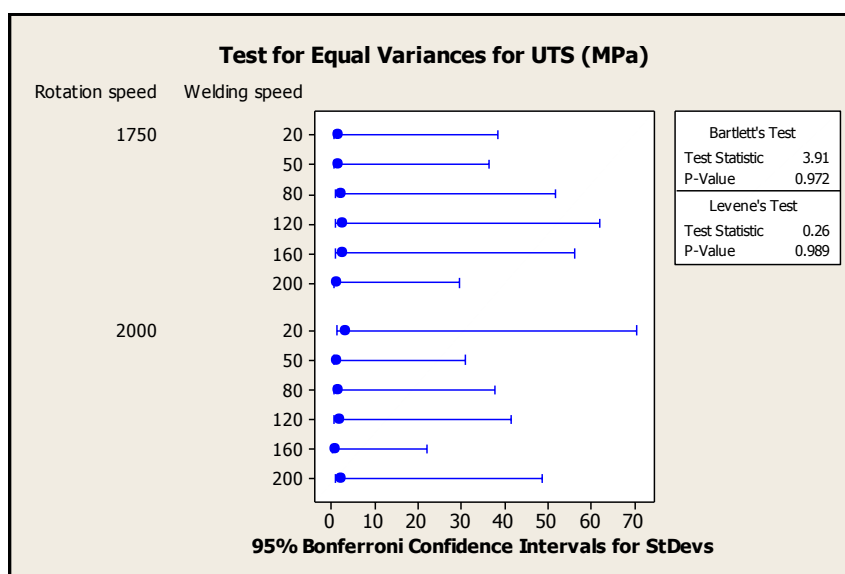
ทดสอบความเท่ากันของความแปรปรวนของข้อมูล จากสมมติฐาน

$H_0: \sigma_1^2 = \sigma_2^2 = \sigma_3^2 = \sigma_4^2 = \sigma_5^2 = \sigma_6^2 = \sigma_7^2 = \sigma_8^2 = \sigma_9^2 = \sigma_{10}^2 = \sigma_{11}^2 = \sigma_{12}^2$ ความแปรปรวนของการทดลองทั้ง 12 มีค่าเท่ากัน

$H_1: \sigma_1^2 \neq \sigma_2^2 \neq \sigma_3^2 \neq \sigma_4^2 \neq \sigma_5^2 \neq \sigma_6^2 \neq \sigma_7^2 \neq \sigma_8^2 \neq \sigma_9^2 \neq \sigma_{10}^2 \neq \sigma_{11}^2 \neq \sigma_{12}^2$ ความแปรปรวนของการทดลองทั้ง 12 มีค่าไม่เท่ากัน

ที่ระดับ Error Type I (Alpha: ζ) = 0.05

จาก Bartlett's Test ผลการคำนวณที่ได้ดังแสดงในภาพประกอบที่ 4.37 ค่า P-Value = 0.972 ซึ่งมีค่ามากกว่า $\zeta = 0.05$ แสดงว่าสัดส่วนของความแปรปรวนในรูป F มีค่าน้อย ความแปรปรวนของการทดลองทั้ง 12 ครั้งมีค่าเท่ากัน เราจึงสรุปได้ว่าค่าความแปรปรวนของข้อมูลมีค่าเท่ากันที่ระดับความเชื่อมั่น 95%



ภาพประกอบที่ 4.37 ผลการทดสอบความเท่ากันของค่าความแปรปรวนของข้อมูล

4.5.2.2 การทดสอบสมมติฐานของการทดลอง

อิทธิพลของความเร็วหมุนเชื่อม ความเร็วเดินเชื่อม และอันตรกิริยาระหว่างความเร็วหมุนเชื่อมกับความเร็วเดินเชื่อม มีผลต่อความต้านทานแรงดึงของแนวเชื่อมอย่างมีนัยสำคัญหรือไม่ โดยจะพิจารณาจากผลการคำนวณที่แสดงไว้ในตารางที่ 4.2 ดังนี้

ตารางที่ 4.2 ตาราง ANOVA

<i>Analysis of Variance for UTS (MPa), using Adjusted SS for Tests</i>						
Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Rotation speed	1	1251.98	1251.98	1251.98	283.88	0.000
Welding speed	5	882.60	882.60	176.52	40.02	0.000
Rotation speed*Welding speed	5	111.64	111.64	22.33	5.06	0.003
Error	24	105.85	105.85	4.41	-	-
Total	35	2352.07	-	-	-	-
S = 2.10007, R-Sq = 95.50%, R-Sq(adj) = 93.44%						

1) Main effect

การพิจารณาสมมติฐานจะประกอบด้วย อิทธิพลของความเร็วหมุนเชื่อมและอิทธิพลของความเร็วเดินเชื่อม โดยจะพิจารณาจากการทดสอบดังนี้

- ทดสอบสมมติฐานของอิทธิพลของความเร็วหมุนเชื่อม

$H_0 : \vartheta_1 | \vartheta_2$ สำหรับทุกระดับ อิทธิพลของความเร็วหมุนเชื่อมไม่แตกต่างกัน

$H_1 : \vartheta_1 \prod \vartheta_2$ สำหรับบางระดับ อิทธิพลของความเร็วหมุนเชื่อมแตกต่างกัน

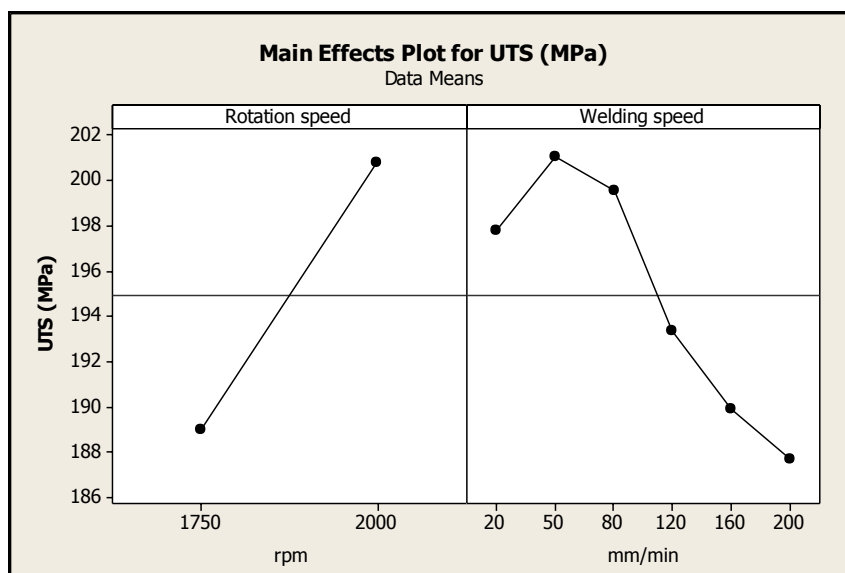
จากข้อมูลในตาราง 4.2 ตาราง ANOVA ปฏิเสธ H_0 เนื่องจากค่า P-Value มีค่าน้อยกว่า 0.000 ซึ่งมีค่าน้อยเมื่อเทียบกับค่า Alpha $\zeta = 0.05$ ทำให้มีข้อมูลสนับสนุนได้ว่าอิทธิพลของความเร็วหมุนเชื่อม มีผลต่อค่าความต้านทานแรงดึงของแนวเชื่อมอย่างมีนัยสำคัญ ที่ระดับ $\zeta = 0.05$

- ทดสอบสมมติฐานของอิทธิพลของความเร็วเดินเชื่อม

$H_0 : \beta_1 = \beta_2 = \beta_3 = \beta_4 = \beta_5 = \beta_6$ สำหรับทุกระดับ อิทธิพลของความเร็วเดินเชื่อมไม่แตกต่างกัน

$H_1 : \beta_1 \neq \beta_2 \neq \beta_3 \neq \beta_4 \neq \beta_5 \neq \beta_6$ สำหรับบางระดับ อิทธิพลของความเร็วเดินเชื่อมแตกต่างกัน

จากข้อมูลในตาราง 4.2 ตาราง ANOVA ปฏิเสธ H_0 เนื่องจากค่า P-Value = 0.000 ซึ่งมีค่าน้อยเมื่อเทียบกับค่า Alpha $\zeta = 0.05$ ทำให้มีข้อมูลสนับสนุนได้ว่าอิทธิพลของความเร็วเดินเชื่อม มีผลต่อค่าความต้านทานแรงดึงของแนวเชื่อมอย่างมีนัยสำคัญ ที่ระดับ $\zeta = 0.05$



ภาพประกอบที่ 4.38 แสดงผลของปัจจัยหลักต่อค่าความต้านทานแรงดึงของแนวเชื่อม

ความเร็วหมุนเชื่อมและความเร็วเดินเชื่อมเป็นปัจจัยหลักที่มีผลโดยตรงต่อค่าความต้านทานแรงดึงของแนวเชื่อม จากภาพประกอบที่ 4.38 จะพบว่าเมื่อค่าความเร็วหมุนเชื่อมเพิ่มขึ้นจะทำให้ค่าความต้านทานแรงดึงของแนวเชื่อมเพิ่มขึ้นด้วย สำหรับปัจจัยของความเร็วเดินเชื่อม จะพบว่าเมื่อค่าความเร็วเดินเชื่อมเพิ่มขึ้นจาก 20 ถึง 50 mm/min ค่าความต้านทานแรงดึงของแนวเชื่อมจะมีค่าเพิ่มขึ้น แต่เมื่อยังเพิ่มค่าความเร็วเดินเชื่อมจาก 50 ถึง 200 mm/min ค่าความต้านทานแรงดึงของแนวเชื่อมจะยิ่งลดลง

2) Factor interaction effect

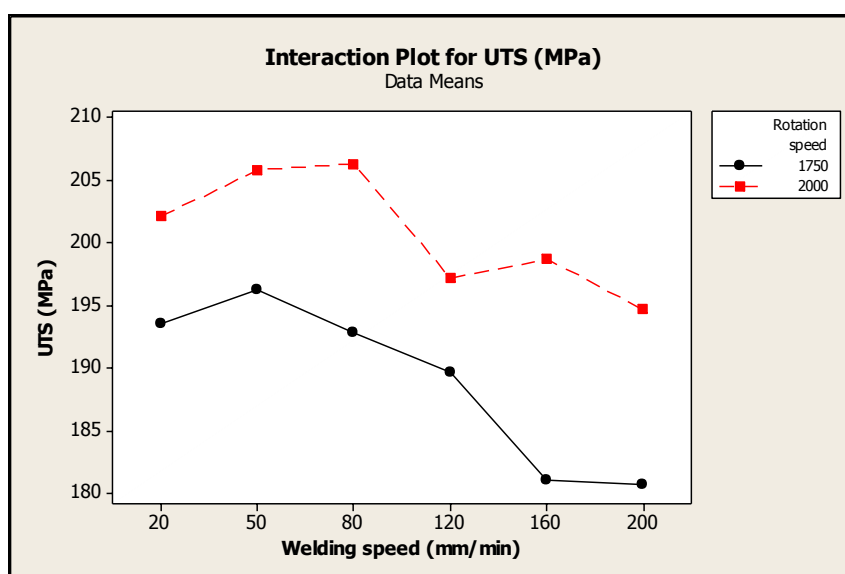
การพิจารณาสมมติฐานจะเป็นการทดสอบอันตรกิริยาระหว่างอิทธิพลของความเร็วหมุนเชื่อมกับความเร็วเดินเชื่อม โดยจะพิจารณาจากการทดสอบดังนี้

- ทดสอบอันตรกิริยาระหว่างความเร็วหมุนเชื่อมกับความเร็วดิ้นเชื่อม

$H_0 : \tau_{ij} = 0$ for all i, j ทุกระดับ i, j ไม่มีอิทธิพลของอันตรกิริยาระหว่างความเร็วหมุนเชื่อมกับความเร็วดิ้นเชื่อม ($i = 1, 2; j = 1, 2, 3, 4, 5, 6$)

$H_1 : \text{at least one } \tau_{ij} \neq 0$ มีบาง i, j มีอิทธิพลของอันตรกิริยาระหว่างความเร็วหมุนเชื่อมกับความเร็วดิ้นเชื่อม ($i = 1, 2; j = 1, 2, 3, 4, 5, 6$)

จากข้อมูลในตาราง 4.2 ตาราง ANOVA ผลการวิเคราะห์อิทธิพลของอันตรกิริยาระหว่างความเร็วหมุนเชื่อมกับความเร็วดิ้นเชื่อม ปฏิเสธ H_0 เนื่องจากค่า P-Value = 0.003 ซึ่งมีน้อยกว่าเมื่อเทียบกับค่า Alpha $\zeta = 0.05$ ทำให้มีข้อมูลสนับสนุนได้ว่ามีอิทธิพลของอันตรกิริยาระหว่างความเร็วหมุนเชื่อมกับความเร็วดิ้นเชื่อม มีผลต่อค่าความต้านทานแรงดึงของแนวเชื่อมอย่างมีนัยสำคัญ ที่ระดับ $\zeta = 0.05$



ภาพประกอบที่ 4.39 แสดงผลของอันตรกิริยาระหว่างความเร็วหมุนเชื่อมกับความเร็วดิ้นเชื่อมต่อค่าความต้านทานแรงดึงของแนวเชื่อม

อันตรกิริยาระหว่างความเร็วหมุนเชื่อมกับความเร็วดิ้นเชื่อมมีผลต่อค่าความต้านทานแรงดึงของแนวเชื่อม จากภาพประกอบที่ 4.39 จะพบว่าเมื่อค่าความเร็วหมุนเชื่อมเพิ่มขึ้น ค่าความต้านทานแรงดึงของแนวเชื่อมจะเพิ่มขึ้นทุกๆ ค่าความเร็วดิ้นเชื่อม โดยที่ความเร็วหมุน

เชื่อม 2,000 rpm ความเร็วเดินเชื่อม 80 mm/min จะให้ค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุด ส่วนที่ความเร็วหมุนเชื่อม 1,750 rpm ความเร็วเดินเชื่อม 200 mm/min ให้ค่าความต้านทานแรงดึงที่ต่ำสุด

4.5.2.3 สมการถดถอย

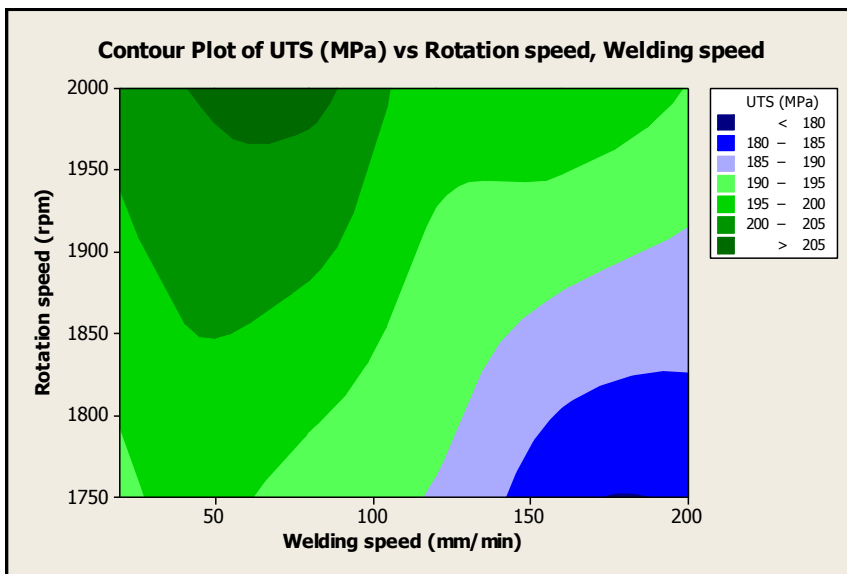
สมการถดถอยที่ได้จากการทดลองมีความถูกต้อง โดยพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (Determination; R^2) จากข้อมูลในตาราง 4.2 ตาราง ANOVA ค่า R^2 ที่ได้มีค่าเท่ากับ 95.50% แสดงว่าความผันแปรที่เกิดขึ้น 100 หน่วย เป็นความผันแปรที่เกิดจากการปรับค่าความเร็วหมุนเชื่อมและความเร็วเดินเชื่อม 95.50 หน่วย และเกิดจากปัจจัยที่ไม่สามารถควบคุมได้ 4.50 หน่วย พิจารณาค่า R^2_{Adj} เท่ากับ 93.44% ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับค่า R^2 แสดงว่าจำนวนข้อมูล 36 ชุด ที่นำมาใช้ในการสร้างความสัมพันธ์มีค่าเพียงพอ

จากการคำนวณด้วยโปรแกรมประมวลผลทางสถิติ เมื่อกำหนดปัจจัย A คือ ความเร็วหมุนเชื่อม และปัจจัย B คือ ความเร็วเดินเชื่อม ซึ่งจะมีอิทธิพลต่อค่าความต้านทานแรงดึงของแนวเชื่อมตามความสัมพันธ์ดังสมการถดถอย (4.2) ที่ได้ดังนี้ คือ

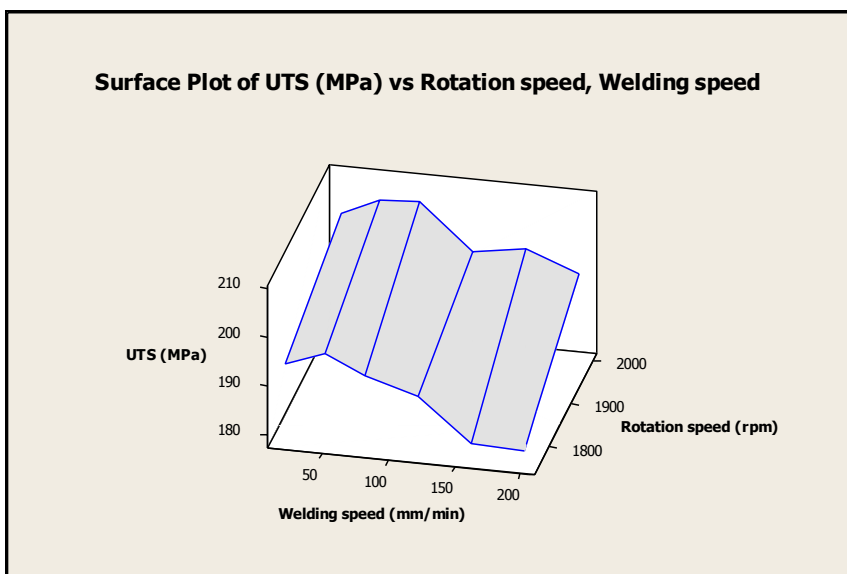
$$UTS \text{ (MPa)} = 114 + 0.0472 \text{ (Rotation speed)} - 0.0727 \text{ (Welding speed)} \quad \dots\dots\dots (4.2)$$

4.5.2.4 พื้นผิวตอบสนอง

จากผลการคำนวณข้อมูลการทดลองด้วยโปรแกรมประมวลผลทางสถิติ เมื่อกำหนดปัจจัยความเร็วหมุนเชื่อม และความเร็วเดินเชื่อมที่มีอิทธิพลต่อค่าความต้านทานแรงดึงของแนวเชื่อม Contour Plot ดังภาพประกอบที่ 4.40 ความเร็วหมุนเชื่อมสูงขึ้น ค่าความต้านทานแรงดึงของแนวเชื่อมจะเพิ่มมากขึ้น และในขณะที่ความเร็วเดินเชื่อมเพิ่มขึ้นค่าความต้านทานดึงของแนวเชื่อมจะเพิ่มขึ้นถึงค่าๆ หนึ่งแล้ว เมื่อยังเพิ่มความเร็วเดินเชื่อมค่าความต้านทานแรงดึงของแนวเชื่อมจะยิ่งลดลง ภาพประกอบที่ 4.41 แสดงพื้นผิวตอบสนองของค่าความต้านทานแรงดึงของแนวเชื่อมที่ได้รับอิทธิพลจากความเร็วหมุนเชื่อมกับความเร็วเดินเชื่อม ที่ความเร็วหมุนเชื่อม 2,000 rpm ความเร็วเดินเชื่อม 80 mm/min จะให้ค่าความต้านทานแรงดึง 206.3 MPa.



ภาพประกอบที่ 4.40 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วหมุนเชื่อมกับความเร็วเดินเชื่อมที่มีอิทธิพลต่อค่าความต้านทานแรงดึงในระดับต่างๆ ของ Contour plot



ภาพประกอบที่ 4.41 พื้นผิวตอบสนองของค่าความต้านทานแรงดึงที่ได้รับอิทธิพลจากความเร็วหมุนเชื่อมกับความเร็วเดินเชื่อม

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

จากผลการศึกษาปัจจัยของตัวแปรเชื่อมที่มีผลต่อลักษณะ โครงสร้างทางโลหะวิทยาและสมบัติทางกลของแนวเชื่อมที่ได้จากการเชื่อมเสียดทานแบบกวนของอะลูมิเนียมผสมต่างชนิดระหว่างอะลูมิเนียมหล่อของแข็ง SSM 356 (as-cast และ T6) กับอะลูมิเนียมผสม AA 6061-T651 พบว่าแนวเชื่อมสามารถเชื่อมต่อกันได้ และผลของการปรับเปลี่ยนตัวแปรเชื่อมจะส่งผลให้สมบัติของแนวเชื่อมเปลี่ยนแปลงไปด้วย โดยผลดังกล่าวสามารถสรุปได้ดังนี้

1) ลักษณะผิวด้านบนของแนวเชื่อมที่ความเร็วเดินเชื่อมที่สูงจะมีความเรียบมากกว่าที่ความเร็วเดินเชื่อมต่ำ และที่ความเร็วเดินเชื่อมที่ลดลงลักษณะผิวด้านบนของแนวเชื่อมจะมีความขรุขระเพิ่มขึ้น ที่ความเร็วเดินเชื่อมเดียวกันเมื่อเพิ่มความเร็วหมุนเชื่อมการเกิดครีปที่ผิวด้านบนของแนวเชื่อมจะมีมากขึ้น เนื่องจากผลของความร้อนจากการเสียดทานที่เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้การเสียดรูปของวัสดุมีมากขึ้น การเพิ่มความเร็วหมุนเชื่อมและลดความเร็วเดินเชื่อมจะส่งผลให้แนวเชื่อมมีความกว้างเพิ่มขึ้นด้วย

2) โครงสร้างทางมหภาคของแนวเชื่อมที่ความเร็วหมุนเชื่อม 1,750 rpm จะมีความสมบูรณ์และมีการประสานกันของเนื้อวัสดุของอะลูมิเนียมทั้งสองชนิดขึ้นมาอย่างเห็นได้ชัดเจน แต่จะมีรูโพรงเกิดขึ้นที่บริเวณแนวเชื่อมตรงขอบปลายของตัวกวนที่ความเร็วเดินเชื่อม 160 และ 200 mm/min เนื่องจากผลของความเร็วเดินเชื่อมที่มากเกินไปทำให้ความร้อนจากการเสียดทานไม่เพียงพอ

3) โครงสร้างทางมหภาคของแนวเชื่อมที่ความเร็วหมุนเชื่อม 2,000 rpm จะมีความสมบูรณ์และมีการประสานกันของเนื้อวัสดุของอะลูมิเนียมทั้งสองชนิดขึ้นมาอย่างเห็นได้ชัดเจน แต่จะมีรูโพรงเกิดขึ้นที่บริเวณแนวเชื่อมตรงขอบปลายของตัวกวนขึ้นที่ความเร็วเดินเชื่อม 20 mm/min เนื่องจากผลของความเร็วเดินเชื่อมที่ต่ำจะทำความร้อนจากการเสียดทานมีมากเกินไป

4) โครงสร้างทางจุลภาคของแนวเชื่อมจะมีความละเอียดมากกว่า เมื่อเทียบกับโครงสร้างเดิมของเนื้อโลหะเดิม ยิ่งความเร็วหมุนเชื่อมที่สูงขึ้น โครงสร้างของเกรนจะมีความละเอียดมากขึ้น ที่ความเร็วเดินเชื่อมลดลง โครงสร้างเกรนก็จะมีความละเอียดเพิ่มขึ้นด้วยเช่นกัน และจะสังเกตเห็นว่าโครงสร้างเกรนที่ด้านบนซึ่งใกล้กับบ่าของตัวกวนจะมีความละเอียดมากกว่า

เมื่อเทียบกับด้านล่างของแนวเชื่อม เนื่องจากความร้อนด้านบนที่สูงกว่าส่งผลให้เกรนมีความละเอียดมากกว่าด้วย

5) ความแข็งที่บริเวณตรงกลางแนวเชื่อมจะสูงกว่าบริเวณอื่นๆ และจะลดลงไปเรื่อยๆ จนถึงบริเวณเขตที่ได้รับผลกระทบจากความร้อนทางกลของแนวเชื่อม หลังจากนั้นความแข็งจะค่อยเพิ่มขึ้น ไปจนถึงค่าความแข็งเดิมของเนื้อโลหะเดิม การกระจายตัวของความแข็งที่ความเร็วหมุนเชื่อมที่สูงจะมีมากกว่าเนื่องจากการกระจายตัวของเนื้อวัสดุที่มากกว่า แต่ความเร็วเดินเชื่อมที่สูงขึ้นจะให้ค่าความแข็งที่มากขึ้น แต่ผลของความเร็วมีผลอย่างไม่มีนัยสำคัญ

6) ความเร็วหมุนเชื่อมที่สูงขึ้นจะให้ค่าความต้านทานแรงดึงสูงขึ้น เมื่อเพิ่มความเร็วเดินเชื่อมค่าความต้านทานแรงดึงจะมีค่าเพิ่มขึ้นถึงค่าๆ หนึ่ง และหลังจากนั้นเมื่อเพิ่มความเร็วเดินเชื่อมขึ้นเรื่อยๆ ค่าความต้านทานแรงดึงจะยิ่งลดลง ความต้านทานแรงดึงที่ได้จากแนวเชื่อมเสียดทานแบบกวนของอะลูมิเนียมผสมต่างชนิดระหว่างอะลูมิเนียมหล่อกิ่งของแข็ง SSM 356 ที่ไม่ได้ผ่านกระบวนการทางความร้อน T6 กับอะลูมิเนียมผสม AA 6061-T651 และจากแนวเชื่อมเสียดทานแบบกวนของอะลูมิเนียมผสมต่างชนิดระหว่างอะลูมิเนียมหล่อกิ่งของแข็ง SSM 356 ที่ผ่านกระบวนการทางความร้อน T6 กับอะลูมิเนียมผสม AA 6061-T651 ที่ความเร็วหมุนเชื่อม 2,000 rpm ความเร็วเดินเชื่อม 80 mm/min จะให้ค่าความต้านทานแรงดึงเฉลี่ยสูงสุดที่ 197.1 และ 206.3 MPa ตามลำดับ หรือมีค่าเพิ่มขึ้นจากเดิมประมาณ 4.67 เปอร์เซ็นต์

7) การวิเคราะห์ผลเชิงสถิติของค่าความต้านทานแรงดึงของแนวเชื่อม จะพบว่าความเร็วหมุนเชื่อมมีผลโดยตรงต่อค่าความต้านทานแรงดึงของแนวเชื่อมอย่างมีนัยสำคัญ ความเร็วเดินเชื่อมมีผลโดยตรงต่อค่าความต้านทานแรงดึงของแนวเชื่อมอย่างมีนัยสำคัญ และอันตรกิริยาระหว่างความเร็วหมุนเชื่อมกับความเร็วเดินเชื่อมมีผลโดยตรงต่อค่าความต้านทานแรงดึงของแนวเชื่อมอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับ 0.05

8) ค่าความต้านทานแรงดึงของแนวเชื่อมเสียดทานแบบกวนของอะลูมิเนียมผสมต่างชนิดระหว่างอะลูมิเนียมหล่อกิ่งของแข็ง SSM 356 ที่ไม่ได้ผ่านกระบวนการทางความร้อน T6 กับอะลูมิเนียมผสม AA 6061-T651 ที่ความเร็วหมุนเชื่อม 1,750 rpm จะมีช่วงของความเร็วเดินเชื่อมที่เหมาะสมคือ 50, 80 และ 120 mm/min เนื่องจากค่าความต้านทานแรงดึงในช่วงความเร็วเดินเชื่อมดังกล่าวให้ค่าเฉลี่ยที่ใกล้เคียงกัน สำหรับที่ความเร็วหมุนเชื่อม 2,000 rpm จะมีช่วงของความเร็วเดินเชื่อมที่เหมาะสมคือ 80, 120 และ 160 mm/min เนื่องจากค่าความต้านทานแรงดึงในช่วงความเร็วเดินเชื่อมดังกล่าวให้ค่าเฉลี่ยที่ใกล้เคียงกัน ถ้าต้องการนำตัวแปรเชื่อมไปใช้งานจริงผู้วิจัยแนะนำให้ใช้ตัวแปรเชื่อมที่ความเร็วหมุนเชื่อม 2,000 rpm ความเร็วเดินเชื่อมที่ 160 mm/min เพราะสามารถลดเวลาในกระบวนการผลิต แม้ค่าความต้านทานแรงดึงจะน้อยกว่าแต่ก็มีค่าที่ไม่แตกต่างกันมากนัก

9) ค่าความต้านทานแรงดึงของแนวเชื่อมเสียดทานแบบกวนของอะลูมิเนียมผสมต่างชนิดระหว่างอะลูมิเนียมหล่อกิ่งของแข็ง SSM 356 ที่ผ่านกระบวนการทางความร้อน T6 กับอะลูมิเนียมผสม AA 6061-T651 ที่ความเร็วหมุนเชื่อม 1,750 rpm ความเร็วเดินเชื่อมที่เหมาะสมคือ 50 mm/min เนื่องจากค่าความต้านทานแรงดึงที่ความเร็วเดินเชื่อมดังกล่าวให้ค่าเฉลี่ยที่สูงที่สุดสำหรับที่ความเร็วหมุนเชื่อม 2,000 rpm จะมีช่วงของความเร็วเดินเชื่อมที่เหมาะสมคือ 50 และ 80 mm/min เนื่องจากค่าความต้านทานแรงดึงในช่วงความเร็วเดินเชื่อมดังกล่าวให้ค่าเฉลี่ยที่ใกล้เคียงกัน ถ้าต้องการนำตัวแปรเชื่อมไปใช้งานจริงผู้วิจัยแนะนำให้ใช้ตัวแปรเชื่อมที่ความเร็วหมุนเชื่อม 2,000 rpm ความเร็วเดินเชื่อมที่ 80 mm/min เพราะสามารถให้เวลาในกระบวนการผลิตที่น้อยกว่าเมื่อเทียบกับที่ความเร็วเดินเชื่อม 50 mm/min ถึงแม้ค่าความต้านทานแรงดึงจะน้อยกว่าแต่ค่าที่ได้มีค่าไม่แตกต่างกันมากนัก

5.2 ข้อเสนอแนะ

- 1) ก่อนเชื่อมทุกครั้งควรตรวจสอบผิวของชิ้นงานที่จะนำมาเชื่อมทุกครั้ง เพื่อป้องกันสิ่งสกปรกที่ติดอยู่ที่ผิวชิ้นงาน เพราะคราบสกปรกต่างๆ อาจจะทำให้เกิดข้อบกพร่องขึ้นในชิ้นงาน ควรจับยึดชิ้นงานให้แน่นก่อนเชื่อม เพื่อป้องกันการไหลเคลื่อนขณะทำการเชื่อม
- 2) ก่อนทำการเชื่อมควรเชื่อมชิ้นงานทดลองเพื่อไล่ความชื้นในแผ่นรองชิ้นงาน
- 3) การเก็บชิ้นงานที่ได้หลังการเชื่อมหากยังไม่ต้องการนำชิ้นงานไปขึ้นรูปขึ้นทดสอบอื่นๆ ไม่ควรทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้อง ควรแช่ตู้เย็นเพื่อป้องกันการเปลี่ยนโครงสร้างและสมบัติทางกล
- 4) การเชื่อมเสียดทานแบบกวนของอะลูมิเนียมผสมต่างชนิดในสถานะที่สมดุลและเหมาะสม แนวเชื่อมจะมีความสมบูรณ์ที่ความเร็วหมุนเชื่อม 2,000 rpm ที่ทุกความเร็วเดินเชื่อม ค่าความต้านทานแรงดึงจะต่ำกว่าเนื้อโลหะเดิมของอะลูมิเนียมผสมทั้งสองชนิด
- 5) ตัวแปรเชื่อมเสียดทานแบบกวนที่มีผลต่อคุณภาพของแนวเชื่อมมีอยู่มากมายหลายชนิด เช่น ความเร็วหมุนเชื่อม ความเร็วเดินเชื่อม แรงกด รูปแบบของตัวกวนและอื่นๆ หากมีผู้สนใจที่จะศึกษาต่อ ควรมีการศึกษาค่าแรงกดและรูปแบบของตัวกวนที่มีรูปทรงอื่นๆ เช่น หัวหกเหลี่ยม หัวสามเหลี่ยม รูปกรวย เป็นต้น เนื่องจากรูปแบบของตัวกวนที่แตกต่างกันจะส่งผลให้การไหลวนของเนื้อวัสดุแตกต่างกัน
- 6) การตรวจสอบโครงสร้างทางโลหะวิทยาของแนวเชื่อมด้วยวิธี SEM จะสามารถช่วยให้การวิเคราะห์โครงสร้างทางจุลภาคได้สมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

บรรณานุกรม

- กิตติพงษ์ กิมะพงศ์, อนินท์ มีมนต์ และประกอบ บุญยงค์. (2550). “การเชื่อมรอยต่ออะลูมิเนียมผสมและเหล็กกล้าด้วยการเชื่อมเสียดทานแบบกวน”. การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ครั้งที่ 5, 10-11 พฤษภาคม 2550.
- เจษฎา วรรณสินธุ์. (2549). “เทคโนโลยีการหล่ออะลูมิเนียมไดแคสติงแบบกึ่งของแข็ง”. ภาควิชาวิศวกรรมเหมืองแร่และวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์, การประชุมวิชาการงานหล่อไทย ครั้งที่ 3. สงขลา, ประเทศไทย, 1-12.
- ธงชัย เครือฝื่อ และประภาส เมืองจันทร์บุรี. (2550). “อิทธิพลของความเร็วในการเชื่อมและรูปแบบของหัวพินที่มีผลต่อสมบัติทางโลหะวิทยาและสมบัติทางกลในการเชื่อมอะลูมิเนียมผสม A356 ที่หล่อโดยเทคโนโลยีหล่อกึ่งของแข็งด้วยกรรมวิธีการเชื่อมเสียดทานแบบกวน”. การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ครั้งที่ 5, 10-11 พฤษภาคม 2550.
- ประภาส เมืองจันทร์บุรี. (2550). “การเชื่อมและโลหะวิทยาการเชื่อมอะลูมิเนียม”. ภาควิชาวิศวกรรมเหมืองแร่และวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์. รายงานการทดลองภายใน การเชื่อมอะลูมิเนียม SSM 356.
- พยูร เกตุกราย. (2523). “การหล่อโลหะภาคการผลิต”. สมาคมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น) กรุงเทพมหานคร.
- แม่น อมรสิทธิ์ และสมชาย อัครทิวา. (2544). “วัสดุวิศวกรรม”. McGraw-Hill. กรุงเทพมหานคร.
- วนิดา รัตนมณี. (2545). “การผลิตแบบอัตโนมัติ”. พิมพ์ครั้งที่ 1. สำนักพิมพ์คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์. สงขลา.
- อับดุล บินระหีม. (2553). “ศึกษาสมบัติทางโลหะวิทยาและทางกลของอะลูมิเนียม A356 ซึ่งหล่อโดยเทคโนโลยีการหล่อกึ่งของแข็งด้วยกรรมวิธีการเชื่อมเสียดทานแบบกวน”. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการและระบบ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
- Akhter, R. et al. (2006). “Nd: YAG Laser Welding.” vols. 116-117: 173- 176.
- ASTM E8M - 00 METRIC. “Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials.” [Metric].
- Brandon, D. and Kaplan, W.D. (1997). “Joining Processes, An introduction.” John Wiley&Sons, New York, No. 364p.

- Colligan, J. et al. (2003). "Friction stir welding demonstrated for combat vehicle construction." *Welding Journal*: 1-6.
- Elangovan, K. and Blasubramanian, V. (2008). "Influences of tool pin profile and tool shoulder diameter on the formation of friction stir processing zone in AA6061 aluminum alloy." *Material and Design*, vols. 29: 362-373.
- Ghosh, M. et al. (2010). "Optimization of friction stir welding parameter for dissimilar aluminum alloys." *Materials and Design* 31: 3033-3037.
- Harris, D. and Norman, A.F. (2003). "Properties of Friction Stir Welded Joints: A Review of the Literature." EUROSTIR, Progress report presented at the 6th PSG Meeting, 17-18 June 2003.
- Hong, F.Z., Qui, H.D. and Hong, W. (2004) "Friction Stir Welding of Aluminum Alloys." *Journal of Wuhan University of Technology-Mater. Sci. Ed.* vols. 19: 61-64.
- Kapranos, P. et al. (2004). "Friction Stir Welding (FSW) of Thixoformed and Rheocast Plates." 8th SSM Conference, Cyprus, September 2004.
- Khodir, S.A. and Shidayanagi, T. (2008). "Friction stir welding of dissimilar AA2024 and AA7075 aluminum alloys." *Materials Science and Engineering B148*: 82-87.
- Kim, Y.G. et al. (2006a). "Effect of Welding parameter on Microstructure in stir zone of FSW joints of Aluminum die casting alloy." *Materials Letters* 60: 3830-3837.
- Kim, Y.G. et al. (2006b). "Three defect types in friction stir welding of aluminum die casting alloy." *Material Science and Engineering A415*: 250-254.
- Lee, W.B., Yeon, Y.M. and Jung, S.B. (2003a). "The joint properties of dissimilar formed Al alloys by Friction stir welding according to the fixed location of materials." *Scripta Materialia* 49: 423-428.
- Lee, W.B., Yeon, Y.M. and Jung, S.B. (2003b). "The mechanical properties related to the dominant microstructure in the weld zone of dissimilar formed Al alloy joints by friction stir welding." *Materials Science* 38: 4183-4191.
- Lee, W.B., Yeon, Y.M. and Jung, S.B. (2003c). "The improvement of mechanical properties of friction-stir-welded A356 Al alloy." *Material Science and Engineering A356*: 154-159.
- Lim, S.G. et al. (2004). "Tensile Behavior of Friction Stir Welding A356-T6/Al6061-T651 Bi-Alloy Plate." *Metallurgical and Materials Transaction A35A*: 2837-2843.

- Linert, T.J. et al. (2003). "Friction Stir Welding Studies on Mild Steel." *Welding Journal*, vols. 83: 1S-9S.
- Midling, O.T. and Morley, E.J. (1998). "Friction Stir Welding." International patent application, No.PCT/NO95/00005.
- Mishra, R.S. and Ma, Z.Y. (2005). "Friction Stir Welding and Processing." *Materials Science and Engineering* 50: 1-78.
- Moreira, P.M.G.P. et al. (2008). "Mechanical Characterization of Friction Stir Welds of Two Dissimilar Aluminum Alloys of the 6xxx Series." *Materials Science Forum*, vols. 587-588: 430-434.
- Munich. (2006). "Downforce of friction stir.", 223p.
- Santella, M.L. et al. (2005). "Effects of friction stir processing on mechanical properties of the cast aluminum alloys A319 and A356." *Scripta Material* 53: 201-206.
- Spencer, D.B. (1971). "Rheology of Liquid-Solid Mixtures of Lead Tin." Ph.D. Thesis, Professor M.C. Flemings advisor, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA, (June).
- Sundaram, N.S. and Murugan, N., (2010). "Tensile behavior of Dissimilar Friction-Stir-Welded joints of aluminum alloys." *Materials and Design*: 4184–4193.
- Thomas, W.M. et al. (1991). "Friction Stir Butt Welding." International Patent application, No. PCT/GB92/02203 and GB patent application, No.9125978.8.
- Thomas, W.M. and Nicholas, E.D. (1997). "Friction Stir Welding for the Transportation Industries." *Materials and Design* 18: 269-273.
- Wannasin, J. (2006). "Semi-Solid Die Casting Technology." Proceeding of the Third Thai Foundry Conference, Bitec Bangna, Bangkok, Thailand, and November 23.
- Wannasin, J., Martinez, R.A. and Flemings, M.C. (2006). "A Novel Technique to Produce Metal Slurries for Semi-Solid Metal Processing." *Solid State Phenomena*, vols. 116-117: 366-369.
- Zah, M.F. and Eireiner, D., (2004). "Friction stir of parameters." No. 4: pp. 223.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก. ตาราง G Code และ M Code

ตาราง ก.1 G Code

G Code		Group
G0*	Rapid Traverse (linear)	Interpolation
G1*	Linear Interpolation	Interpolation
G2	Circular / Helical CW	Interpolation
G2.01	Circular / Helical CW (absolute)	Interpolation
G2.02	Circular / Helical CW (incremental)	Interpolation
G3	Circular / Helical CCW	Interpolation
G3.01	Circular / Helical CCW (absolute)	Interpolation
G3.02	Circular / Helical CCW (incremental)	Interpolation
G4	Dwell	Non-modal
G7.1	Cylindrical Interpolation	Interpolation
G8	Suppress Interpolation	Interpolation
G9	Extract Stop	Non-modal Modifier
G12	Contouring rotary Axis Unwind	Non-modal
G13.1**	Cylindrical Interpolation Off	Interpolation
G15.1*	Polar Coordinate Programming (bolt Circle)	
G15.2*	Polar Coordinate Programming (part Contour)	
G17*	XY Plane Select	Plane Select
G18*	YZ Plane Select	Plane Select
G19*	ZX Plane Select	Plane Select
G22,G22.1	Milling Cycle Rectangular Face	Interpolation
G23,G23.1	Milling Cycle Rectangular Pocket	Interpolation
G24,G24.1	Milling Cycle Rectangular Inside Frame	Interpolation
G25,G25.1	Milling Cycle Rectangular Outside Frame	Interpolation
G26	Milling Cycle Rectangular Face	Interpolation
G26.1	Milling Cycle Rectangular Pocket	Interpolation
G27	Milling Cycle Rectangular Inside Frame	Interpolation
G27.1	Milling Cycle Rectangular Outside Frame	Interpolation

G Code		Group
G28	Auto Return to Reference Point	Non-model
G29	Auto From Reference Point	Non-model
G36	Move to Next Operation Location	Non-model
G36.1	Test for End of Pattern	Non-model
G37	Cancel Pattern	Pattern Cycles
G38	Rectangular pattern	Pattern Cycles
G39	Circle Pattern	Pattern Cycles
G40**	Cutter Diameter Compensation OFF	CDC
G41	Cutter Diameter Compensation On LEFT	CDC
G42	Cutter Diameter Compensation On RIGHT	CDC
G43	PQP cutter diameter compensation On	CDC
G45	Acceleration/Deceleration ON	Acceleration/Deceleration
G45.01,G45.02	User Specific Acceleration	Acceleration/Deceleration
G45.03	User Specific Acceleration	Acceleration/Deceleration
G45.1	Acceleration/Deceleration ON (Die Roughing)	Acceleration/Deceleration
G45.2	Acceleration/Deceleration ON (Die Finishing)	Acceleration/Deceleration
G46*	Acceleration/Deceleration OFF	Acceleration/Deceleration
G50	Pallet Coordinate	Non-modal Modifier
G51	Probe Multiple Axes	
G51.1	Vector probe Surface and Set Offsets	
G51.2	Rotary Axis measurement	
G51.3	Angle Measurement in X or Y plane	
G51.4	Measure feature to XY plane	
G51.5	Measure feature to feature Z plane	
G52	Local Coordinate System	Local Coordinate
G60*	Positioning Mode	Cornering
G61*	Contouring Mode	Cornering

G Code		Group
G61.1	Automatic Comer Speed Override (Left)	Cornering
G61.2	Automatic Comer Speed Override (Right)	Cornering
G68	Tool Probe Cycle Set Tool Length	Non-modal
G69	Tool Probe Cycle Check Tool Length	Non-modal
G70*	Inch Programming	Inch/ Metric
G71*	Metric Programming	Inch /Metric
G72	Set Stylus and Tip Dimension	Non-modal
G73	Set Probe Stylus and Tip Dimension	Non-modal
G74	Set Probe Length	Non-modal
G75	Locate Internal Corner	Non-modal
G76	Locate External Corner	Non-modal
G77	Locate Surface	Non-modal
G77.1	Stock Allowance	Non-modal
G78	Locate and Measure Bore or Boss	Non-modal
G79	Measure pocket or Web	Non-modal
G80	Reset Fix cycle	Interpolation Hole making Cycle
G81	Drill Cycle	Interpolation Hole making Cycle
G82	Counter bore/Spot Drill with Dwell Cycle	Interpolation Hole making Cycle
G83	Deep Hole drill (Peck Drill) Cycle	Interpolation Hole making Cycle
G84	Tap Cycle (Conventional)	Interpolation Hole making Cycle
G85	Rapid Tap Cycle	Interpolation Hole making Cycle
G86	Bore / Ream Cycle	Interpolation Hole making Cycle
G87	Bore Cycle	Interpolation Hole making Cycle
G88	Web Drill / Bore Cycle	Interpolation Hole making Cycle
G89	Bore / Ream with Dwell Cycle	Interpolation Hole making Cycle
G90*	Absolute Dimension Input	Absolute/ Dimension
G91*	Incremental Dimension Input	Absolute/ Dimension
G92	Position Set	Non-modal
G92.1	Position Set Setup Offset	Non-modal

G Code		Group
G92.2	Position Set pallet Offset	Non-modal
G93	Inverse Time Feed rate(1/T)	Feed rate
G94*	Feed Per Minute Feed rate Mode	Feed rate
G95	Feed Per Revolution Feed rate Mode	Feed rate
G96	Constant Surface Speed	Spindle
G97*	Constant Spindle Speed (S=RPM)	Spindle
G97.1*	Constant Spindle Speed (S=Surface Speed)	Spindle
G98	Machine Coordinate (Tool Tip)	Non-modal Modifier
G98.1	Machine Coordinate	Non-modal Modifier
G99	Positioning Cancel	Non-modal
G150**	Scaling Off	Scaling
G151	Scaling On	Scaling

ตาราง ก.2 M Code

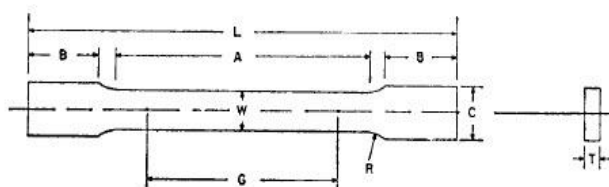
M Code	Group	Function	Start/End Of Block	Model
M0	Prog Control	Program Stop	End	No
M1	Prog Control	Optional Stop	End	No
M2	Prog Control	End Of Program (not put tool away)	End	No
M3	Spindle Start	Spindle ON CW	Start	Yes
M4	Spindle Start	Spindle ON CCW	Start	Yes
M5	Spindle Stop	Spindle and Coolant OFF	End	Yes
M6	Tool Control	Tool Change	End	No
M8		External Flood Coolant ON	Start	Yes
M8.1 - M8.8	Coolant Jet	Coolant Jet Position Control (Option)	Start	Yes
M9		Coolant OFF	End	Yes
M10/10.x		Clamp Rotary Axis # 1-4	End	Yes
M11/11.x		Unclamp Rotary Axis # 1-4	Start	Yes
M13	Spindle Start	Spindle ON CW , External Flood Coolant ON	Start	Yes
M14	Spindle Start	Spindle ON CCW , External Flood Coolant ON	Start	Yes
M19	Spindle Stop	Oriented Spindle Stop	End	Yes
M26		Spindle Axis Full Retract	End	No
M27		Through Spindle Coolant	Start	Yes
M30	Prog control	End of Program (put tool)	End	No
M34		Enable Data Acquisition	Start	Yes
M35		Enable Data Acquisition	End	Yes
M41	Spindle Mode	Select Spindle Constant Power Mode	Start	Yes
M42	Spindle Mode	Select Spindle Constant Torque Mode	Start	Yes

M Code	Group	Function	Start/End Of Block	Model
M48	Override	Feed rate & Spindle Speed Override Enable	Start	Yes
M49	Override	Feed rate & Spindle Speed Override Disable	Start	Yes
M58	Probe	Disarm Spindle Probe (Option)	Start	Yes
M59	Probe	Arm Spindle Probe (Option)		
M60	Swarf	Swarf Wash ON	Start	Yes
M61		Swarf Wash OFF	Start	Yes
M70 - M79	User	User Definable M Code (Option)	Start	
M83		Part Complete		
M91	Swarf	Swarf Conveyor ON	Start	Yes
M92	Conveyor	Swarf Conveyor OFF	Start	Yes

ภาคผนวก ข. มาตรฐานการทดสอบชิ้นงาน ASTM-E8M

ข้อกำหนดมาตรฐานการทดสอบชิ้นงาน ASTM-E8M

E 8 M



Nominal Width	Dimensions, mm		
	Plate-Type 40 mm	Standard Specimens Sheet-Type 12.5 mm	Subsize Specimen 6 mm
G— Gage length (Note 1 and Note 2)	200.0 ± 0.2	50.0 ± 0.1	25.0 ± 0.1
W— Width (Note 3 and Note 4)	40.0 ± 2.0	12.5 ± 0.2	6.0 ± 0.1
T— Thickness (Note 5)		thickness of material	
R— Radius of fillet, min (Note 6)	25	12.5	6
L— Overall length, min (Note 2 and Note 7)	450	200	100
A— Length of reduced section, min	225	57	32
B— Length of grip section, min (Note 8)	75	50	30
C— Width of grip section, approximate (Note 4 and Note 9)	50	20	10

NOTE 1—For the 40-mm 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 apart, or one or more pairs of punch marks 200 mm apart, may be used.

NOTE 2—When elongation measurements of 40-mm wide specimens are not required, a minimum length of reduced section (*A*) of 75 mm may be used with all other dimensions similar to 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, 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 wide specimens shall be 5 mm. Maximum thickness of 12.5-mm and 6-mm wide specimens shall be 19 mm and 6 mm, respectively.

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

NOTE 7—To aid in obtaining axial force application during testing of 6-mm wide specimens, the overall length should be as large as the material will permit, up to 200 mm.

NOTE 8—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 wide specimens is over 10 mm, longer grips and correspondingly longer grip sections of the specimen may be necessary to prevent failure in the grip section.

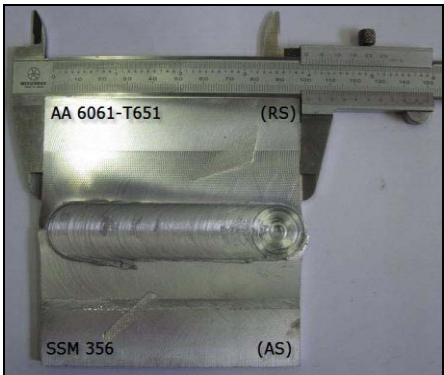
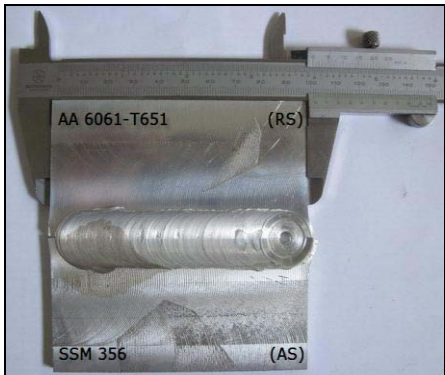
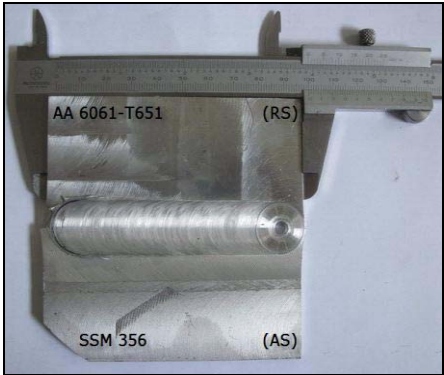
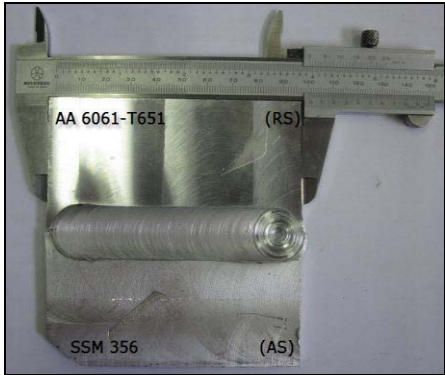
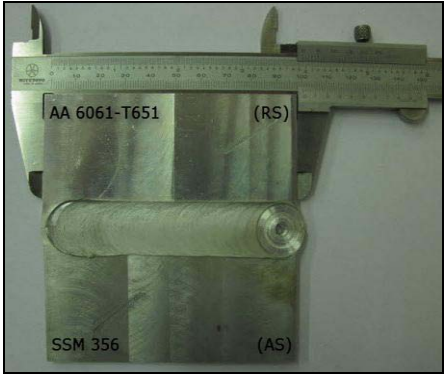
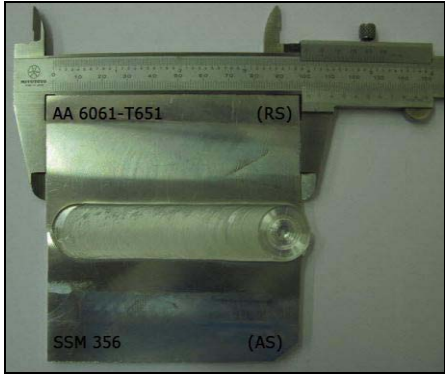
NOTE 9—For the three sizes of specimens, the ends of the specimen shall be symmetrical in width with the center line of the reduced section within 2.5, 0.25, and 0.13 mm, respectively. However, for referee testing and when required by product specifications, the ends of the 12.5-mm wide specimen shall be symmetrical within 0.2 mm.

NOTE 10—For each specimen type, the radii of all fillets shall be equal to each other within a tolerance of 1.25 mm, 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 2.5 mm.

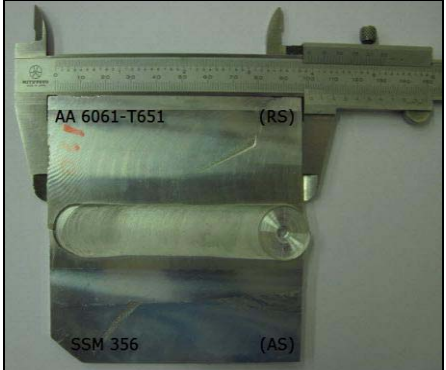
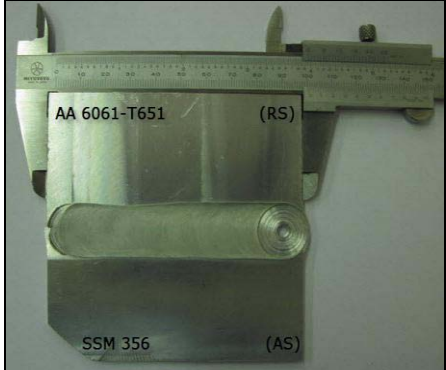
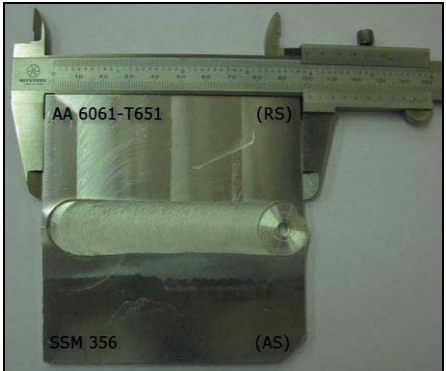
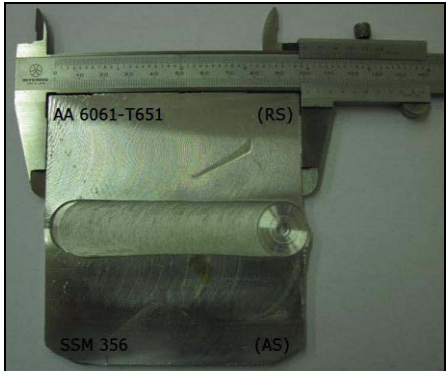
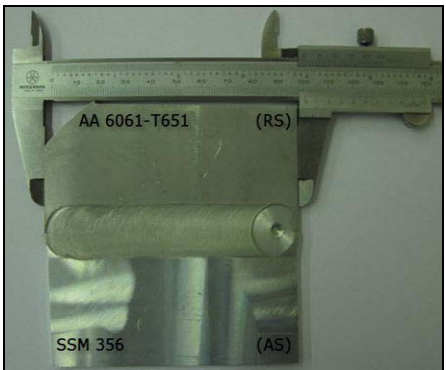
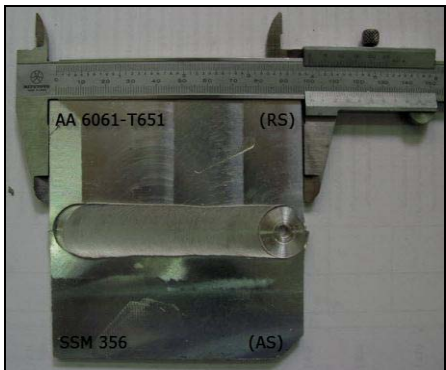
NOTE 11—Specimens with sides parallel throughout their length are permitted, except for referee testing, provided: (a) the above tolerances are used; (b) an adequate number of marks are provided for determination of elongation; and (c) when yield strength is determined, a suitable extensometer is used. If the fracture occurs at a distance of less than $2W$ 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 ค. ลักษณะพื้นฐานของแนวเชื่อม

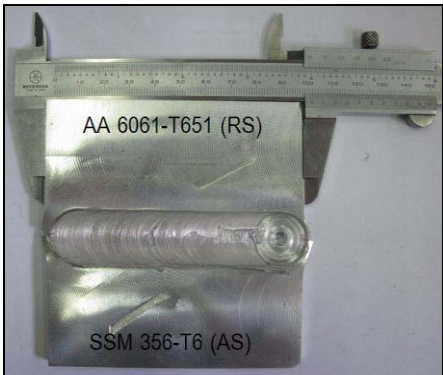
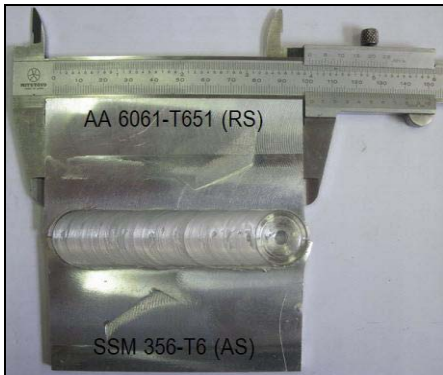

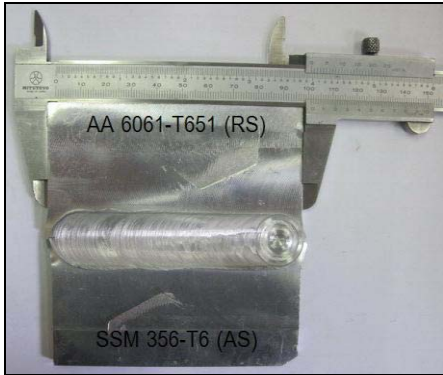

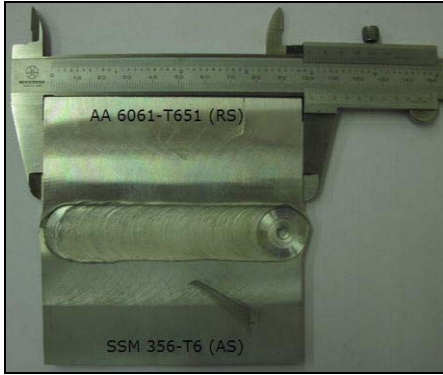
ตาราง ค.1 ลักษณะผิวด้านบนของแนวเชื่อมอะลูมิเนียมผสมต่างชนิดระหว่าง SSM 356 กับ AA 6061-T651

Welding speed (mm/min)	Rotation speed (rpm)	
	1,750	2,000
20		
50		
80		






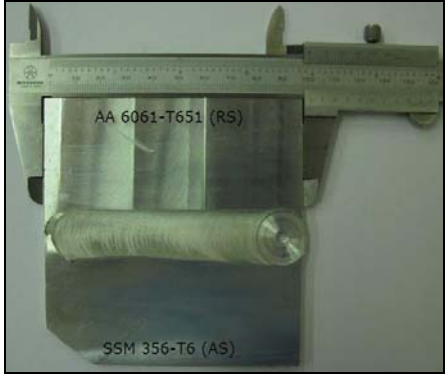
ตาราง ค.1 ลักษณะพิวด้านบนของแนวเชื่อมอะลูมิเนียมผสมต่างชนิดระหว่าง SSM 356 กับ AA 6061-T651 (ต่อ)

Welding speed (mm/min)	Rotation speed (rpm)	
	1,750	2,000
120		
160		
200		

ตาราง ค.2 ลักษณะผิวด้านบนของแนวเชื่อมอะลูมิเนียมผสมต่างชนิดระหว่าง SSM 356-T6 กับ AA 6061-T651

Welding speed (mm/min)	Rotation speed (rpm)	
	1,750	2,000
20		
50		
80		

ตาราง ค.2 ลักษณะผิวด้านบนของแนวเชื่อมอะลูมิเนียมผสมต่างชนิดระหว่าง SSM 356-T6 กับ AA 6061-T651 (ต่อ)

Welding speed (mm/min)	Rotation speed (rpm)	
	1,750	2,000
120		
160		
200		

ตาราง ๑.1 ค่าความต้านทานแรงดึงตามขวางของแนวเชื่อมอะลูมิเนียมผสมต่างชนิดระหว่าง SSM 356 กับ AA 6061-T651

Welding speed (mm/min)	Rotation speed (rpm)							
	1,750							
	Rep	Yield Strength (MPa)	Average (MPa)	Ultimate Tensile Strength (MPa)	Average (MPa)	Elongation (%)	Average (%)	Fracture
20	1	89.40		187.1		5.803		(4)
	2	101.7	96.21	188.3	187.1	6.712	6.013	(1)
	3	97.53		185.9		5.524		(3)
50	1	100.7		192.7		9.436		(1)
	2	103.7	102.6	191.8	191.6	7.942	8.924	(4)
	3	103.4		190.3		9.394		(1)
80	1	96.30		191.3		12.66		(4)
	2	103.2	100.2	189.7	190.4	5.846	8.206	(4)
	3	101.1		190.2		6.112		(1)

หมายเหตุ : (1) Base metal of SSM 356, (2) Base metal of AA 6061-T651, (3) Stir Zone, (4) TMAZ of SSM 356, (5) TMAZ of AA 6061-T651

ตาราง ฉ.1 ค่าความต้านทานแรงดึงตามขวางของแนวเชื่อมอะลูมิเนียมผสมต่างชนิดระหว่าง SSM 356 กับ AA 6061-T651 (ต่อ)

Welding speed (mm/min)	Rotation speed (rpm)							
	1,750							
	Rep	Yield Strength (MPa)	Average (MPa)	Ultimate Tensile Strength (MPa)	Average (MPa)	Elongation (%)	Average (%)	Fracture
120	1	99.52		192.5		10.46		(2)
	2	93.57	98.33	190.4	191.7	5.881	7.926	(4)
	3	101.9		192.2		7.437		(1)
160	1	83.39		180.7		4.838		(4)
	2	91.13	88.84	179.4	180.1	7.105	5.926	(5)
	3	92.01		180.2		5.835		(3)
200	1	86.42		173.2		4.977		(5)
	2	79.36	84.53	175.1	<u>174.3</u>	6.238	5.208	(3)
	3	87.81		174.6		4.409		(5)

หมายเหตุ : (1) Base metal of SSM 356, (2) Base metal of AA 6061-T651, (3) Stir Zone, (4) TMAZ of SSM 356, (5) TMAZ of AA 6061-T651

ตาราง ๑.1 ค่าความต้านทานแรงดึงตามขวางของแนวเชื่อมอะลูมิเนียมผสมต่างชนิดระหว่าง SSM 356 กับ AA 6061-T651 (ต่อ)

Welding speed (mm/min)	Rotation speed (rpm)							
	2,000							
	Rep	Yield Strength (MPa)	Average (MPa)	Ultimate Tensile Strength (MPa)	Average (MPa)	Elongation (%)	Average (%)	Fracture
20	1	94.82	98.03	186.3	188.2	5.487	7.153	(4)
	2	103.0		189.7		8.051		(5)
	3	96.27		188.6		7.921		(1)
50	1	103.4	101.8	193.7	193.4	5.660	6.936	(3)
	2	104.7		191.3		5.515		(1)
	3	97.30		195.2		9.633		(1)
80	1	106.1	105.4	198.2	197.1	11.66	8.451	(1)
	2	106.6		195.7		6.262		(4)
	3	103.5		197.4		7.431		(4)

หมายเหตุ : (1) Base metal of SSM 356, (2) Base metal of AA 6061-T651, (3) Stir Zone, (4) TMAZ of SSM 356, (5) TMAZ of AA 6061-T651

ตาราง ๑.1 ค่าความต้านทานแรงดึงตามขวางของแนวเชื่อมอะลูมิเนียมผสมต่างชนิดระหว่าง SSM 356 กับ AA 6061-T651 (ต่อ)

Welding speed (mm/min)	Rotation speed (rpm)							
	2,000							
	Rep	Yield Strength (MPa)	Average (MPa)	Ultimate Tensile Strength (MPa)	Average (MPa)	Elongation (%)	Average (%)	Fracture
120	1	105.5	103.7	197.1	195.7	9.809	7.796	(1)
	2	104.8		194.7		6.425		(4)
	3	100.8		195.3		7.154		(2)
160	1	102.3	104.2	194.6	195.8	7.150	8.109	(4)
	2	106.1		195.5		8.154		(5)
	3	104.2		197.3		9.023		(2)
200	1	96.31	99.47	192.7	191.3	8.490	7.663	(3)
	2	101.2		190.8		6.637		(2)
	3	100.9		190.4		7.862		(4)

หมายเหตุ : (1) Base metal of SSM 356, (2) Base metal of AA 6061-T651, (3) Stir Zone, (4) TMAZ of SSM 356, (5) TMAZ of AA 6061-T651

ตาราง ๑.2 ค่าความต้านทานแรงดึงตามขวางของแนวเชื่อมอะลูมิเนียมผสมต่างชนิดระหว่าง SSM 356-T6 กับ AA 6061-T651

Welding speed (mm/min)	Rotation speed (rpm)							
	1,750							
	Rep	Yield Strength (MPa)	Average (MPa)	Ultimate Tensile Strength (MPa)	Average (MPa)	Elongation (%)	Average (%)	Fracture
20	1	105.2	105.1	193.6	193.5	4.582	5.071	(3)
	2	107.3		195.2		6.306		(4)
	3	102.8		191.7		4.325		(5)
50	1	116.9	112.6	197.0	196.3	7.372	4.952	(4)
	2	109.5		197.5		3.627		(3)
	3	111.4		194.4		3.857		(3)
80	1	98.40	102.4	193.5	192.8	4.615	5.289	(1)
	2	103.1		190.2		5.049		(4)
	3	105.7		194.8		6.203		(4)

หมายเหตุ : (1) Base metal of SSM 356-T6, (2) Base metal of AA 6061-T651, (3) Stir Zone, (4) TMAZ of SSM 356-T6, (5) TMAZ of AA 6061-T651

ตาราง ๑.2 ค่าความต้านทานแรงดึงตามขวางของแนวเชื่อมอะลูมิเนียมผสมต่างชนิดระหว่าง SSM 356-T6 กับ AA 6061-T651 (ต่อ)

Welding speed (mm/min)	Rotation speed (rpm)							
	1,750							
	Rep	Yield Strength (MPa)	Average (MPa)	Ultimate Tensile Strength (MPa)	Average (MPa)	Elongation (%)	Average (%)	Fracture
120	1	104.6		187.4		2.657		(5)
	2	104.1	102.6	192.8	189.6	4.121	3.609	(4)
	3	99.14		188.6		4.049		(4)
160	1	96.72		180.2		2.115		(4)
	2	94.98	97.80	179.1	181.1	1.747	2.389	(5)
	3	101.7		184.0		3.305		(4)
200	1	95.03		182.0		2.023		(5)
	2	95.43	94.01	180.8	<u>180.7</u>	2.615	2.007	(5)
	3	91.57		179.3		1.383		(5)

หมายเหตุ : (1) Base metal of SSM 356-T6, (2) Base metal of AA 6061-T651, (3) Stir Zone, (4) TMAZ of SSM 356-T6, (5) TMAZ of AA 6061-T651

ตาราง ๑.2 ค่าความต้านทานแรงดึงตามขวางของแนวเชื่อมอะลูมิเนียมผสมต่างชนิดระหว่าง SSM 356-T6 กับ AA 6061-T651 (ต่อ)

Welding speed (mm/min)	Rotation speed (rpm)							
	2,000							
	Rep	Yield Strength (MPa)	Average (MPa)	Ultimate Tensile Strength (MPa)	Average (MPa)	Elongation (%)	Average (%)	Fracture
20	1	103.8	103.6	198.7	202.1	3.941	4.006	(3)
	2	101.1		205.1		4.974		(3)
	3	105.9		202.5		3.103		(5)
50	1	103.2	104.8	207.4	205.8	5.724	5.036	(5)
	2	100.8		204.7		6.005		(4)
	3	110.4		205.3		3.379		(5)
80	1	114.9	116.2	205.9	206.3	6.187	5.519	(4)
	2	118.3		208.2		5.497		(2)
	3	115.4		204.8		4.873		(4)

หมายเหตุ : (1) Base metal of SSM 356-T6, (2) Base metal of AA 6061-T651, (3) Stir Zone, (4) TMAZ of SSM 356-T6, (5) TMAZ of AA 6061-T651

ตาราง ๑.2 ค่าความต้านทานแรงดึงตามขวางของแนวเชื่อมอะลูมิเนียมผสมต่างชนิดระหว่าง SSM 356-T6 กับ AA 6061-T651 (ต่อ)

Welding speed (mm/min)	Rotation speed (rpm)							
	2,000							
	Rep	Yield Strength (MPa)	Average (MPa)	Ultimate Tensile Strength (MPa)	Average (MPa)	Elongation (%)	Average (%)	Fracture
120	1	113.1		196.7		4.769		(1)
	2	107.4	110.2	199.3	197.2	3.731	4.563	(4)
	3	110.1		195.6		5.189		(5)
160	1	112.6		199.8		4.671		(3)
	2	114.9	113.8	197.8	198.7	4.212	4.748	(5)
	3	113.9		198.5		5.361		(1)
200	1	115.1		192.3		2.708		(4)
	2	113.5	111.4	195.1	194.7	4.041	3.224	(1)
	3	105.6		196.7		2.923		(3)

หมายเหตุ : (1) Base metal of SSM 356-T6, (2) Base metal of AA 6061-T651, (3) Stir Zone, (4) TMAZ of SSM 356-T6, (5) TMAZ of AA 6061-T651

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ สกุล	นายหม่อมคำ เต๊ะยอ	
รหัสประจำตัวนักศึกษา	5110120034	
วุฒิการศึกษา		
วุฒิ	ชื่อสถาบัน	ปีที่สำเร็จการศึกษา
วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมการผลิต)	มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์	2550

ทุนการศึกษา (ที่ได้รับในระหว่างการศึกษา)

- ทุนค่าเล่าเรียน ของนักศึกษาระดับบัณฑิตศึกษา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

การตีพิมพ์เผยแพร่ผลงาน

หม่อมคำ เต๊ะยอ, สมชาย ชูโถม และประภาส เมืองจันทร์บุรี. 2553. “การเชื่อมต่อทวนแบบกวนของอะลูมิเนียมผสมต่างชนิดระหว่างอะลูมิเนียมหล่อกิ่งของแข็ง 356 กับอะลูมิเนียมผสม AA 6061-T651 โดยใช้เครื่องจักรกลแบบอัตโนมัติ”. การประชุมวิชาการข่ายงานวิศวกรรมอุตสาหกรรม 2553. ระหว่างวันที่ 13-15 ตุลาคม 2553. ณ โรงแรม สุณีย์แกรนด์แอนด์คอนเวนชันเซ็นเตอร์. อุบลราชธานี, หน้า 426.

หม่อมคำ เต๊ะยอ, สมชาย ชูโถม และประภาส เมืองจันทร์บุรี. 2554. “อิทธิพลของตัวแปรเชื่อมต่อทวนแบบกวนต่อโครงสร้างทางโลหะวิทยาและสมบัติทางกลของแนวเชื่อมอะลูมิเนียมผสมต่างชนิดระหว่างอะลูมิเนียมหล่อกิ่งของแข็ง SSM 356-T6 กับอะลูมิเนียมผสม AA 6061-T651”. การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ครั้งที่ 9. ระหว่างวันที่ 2-3 พฤษภาคม 2554. ณ โรงแรมเมอร์ลิน บีช รีสอร์ท (หาดไทรตรังค์). ภูเก็ต, หน้า 477-483.