



อิทธิพลของความเร็วในการเชื่อมและรูปแบบของหัวพินที่มีผลต่อสมบัติทางโลหะวิทยา
และสมบัติทางกลในการเชื่อมอะลูมิเนียมผสม A 356 ที่หล่อโดยเทคโนโลยี
การหล่อกึ่งของแข็งด้วยกรรมวิธีการเชื่อมเสียดทานแบบกวน

**The Effect of Welding Speed and Tool Pin Profile on Metallurgical and
Mechanical Properties of Joining of Semi-Solid Aluminium Alloy
A 356 by Friction Stir Welding Process**

ธงชัย เครือฝื่อ

Thongchai Kruepue

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญา
วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมวัสดุ
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

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

2552

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

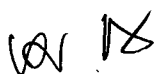
(1)

ชื่อวิทยานิพนธ์ อิทธิพลของความเร็วในการเชื่อมและรูปแบบของหัวพินที่มีผลต่อสมบัติทางโลหะวิทยาและสมบัติทางกลในการเชื่อมอะลูมิเนียมผสม A 356 ที่หล่อโดยเทคโนโลยีหล่อกิ่งของแข็งด้วยกรรมวิธีการเชื่อมเสียดทานแบบกวน

ผู้เขียน นายธงชัย เครือผือ

สาขาวิชา วิศวกรรมวัสดุ

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก



(ดร.ประภาศ เมืองจันทร์บุรี)


คณะกรรมการสอบ




.....ประธานกรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธวัชชัย ปลุกผล)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม



(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เจษฎา วรรณสินธุ์)



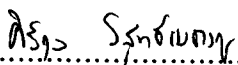
.....กรรมการ

(ดร.ประภาศ เมืองจันทร์บุรี)

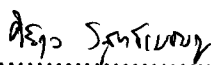


.....กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เจษฎา วรรณสินธุ์)

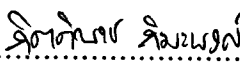


(รองศาสตราจารย์ ดร.ศิริกุล วิสุทธิเมฆางกูร)



.....กรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร.ศิริกุล วิสุทธิเมฆางกูร)



.....กรรมการ

(ดร.กิตติพงษ์ กิมะพงษ์)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อนุมัติให้นำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา ตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมวัสดุ



(รองศาสตราจารย์ ดร.เกริกชัย ทองหนู)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

ชื่อวิทยานิพนธ์	อิทธิพลของความเร็วในการเชื่อมและรูปแบบของหัวพินที่มีผลต่อสมบัติทางโลหะวิทยาและสมบัติทางกลในการเชื่อมอะลูมิเนียมผสม A356 ที่หล่อโดยเทคโนโลยีหล่อกิ่งของแข็งด้วยกรรมวิธีการเชื่อมเสียดทานแบบกวน
ผู้เขียน	นายธงชัย เครือฝื่อ
สาขาวิชา	วิศวกรรมวัสดุ
ปีการศึกษา	2552

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการเชื่อมต่อชนอะลูมิเนียมผสมที่หล่อโดยเทคโนโลยีกิ่งของแข็ง (SSM) A356 ด้วยกรรมวิธีการเชื่อมเสียดทานแบบกวน (FSW) โดยในการศึกษาจะใช้ Tool (Pin) 2 ชนิด คือ หัวพินแบบทรงกระบอกและแบบสี่เหลี่ยม มีตัวแปรคงที่ คือ ความเร็วในการหมุนของ Tool ที่ใช้ 1,750 rpm และมีตัวแปรที่เปลี่ยนแปลง คือ ความเร็วในการเดินแนวเชื่อม ที่ใช้ 80, 120 และ 160 mm/min โดยมีมุมเอียงของ Tool ที่ใช้ 3 องศา

หลังจากการเชื่อมทำการตรวจสอบ โครงสร้างทางจุลภาคของบริเวณรอยเชื่อมของหัวพินแบบทรงกระบอกและแบบสี่เหลี่ยม พบว่าทั้งสามความเร็วเดินแนวเชื่อมมีลักษณะโครงสร้างที่ละเอียดมากประกอบไปด้วยอนุภาคซิลิกอนผสมในอะลูมิเนียมแมทริกซ์ แต่อย่างไรก็ตามผลที่ให้ความแตกต่างกันอย่างเห็นได้ชัดเจน จากการตรวจสอบโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนส่องกราดซึ่งมีระบบเอ็กซ์เรย์ พบว่าโครงสร้างทั้งสามความเร็วเดินแนวเชื่อม ของหัวพินแบบทรงกระบอกให้โครงสร้างที่ละเอียดมากกว่าหัวพินแบบสี่เหลี่ยม ซึ่งประกอบไปด้วยอนุภาคซิลิกอนกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอทั่วบริเวณที่ถูกกวน

ทดสอบความแข็งบริเวณรอยเชื่อมของหัวพินแบบทรงกระบอกและแบบสี่เหลี่ยม พบว่าทั้งสามความเร็วในการเดินแนวเชื่อมมีค่าความแข็งที่ใกล้เคียงกัน โดยเฉพาะบริเวณรอยเชื่อมจะมีค่าความแข็งมากกว่าบริเวณเนื้อโลหะเดิม

ค่าความแข็งแรงดึงของชิ้นงานทดสอบที่ตัดตั้งฉากกับรอยเชื่อม ทั้งสามความเร็วเดินในการเดินแนวเชื่อมของหัวพินแบบทรงกระบอกมีค่ามากกว่าแบบสี่เหลี่ยม และค่าความแข็งแรงดึงของชิ้นงานทดสอบที่ตัดตามยาวของแนวเชื่อม โดยที่เนื้อโลหะเดิมมีค่าความแข็งแรงดึงประมาณ 185 MPa พบว่าที่ความเร็วในการเดินแนวเชื่อม 80, 120 และ 160 mm/min ค่าของหัวพินแบบทรงกระบอกมีค่ามากกว่าแบบสี่เหลี่ยม โดยเฉพาะที่ความเร็วในการเดินแนวเชื่อม 160 mm/min ของหัวพินแบบทรงกระบอกมีค่ามากกว่าความเร็วเดินในการเดินแนวเชื่อมอื่น

Thesis Title The Effect of Welding Speed and Tool Pin Profile on Metallurgical and Mechanical Properties of Joining of Semi-Solid (SSM) Aluminium Alloy A 356 by Friction Stir Welding Process (FSW)

Author Mr. Thongchai Kruepue

Major Program Material Engineering

Academic Year 2009

ABSTRACT

The effect of joining parameters and tool pin profile on microstructure and mechanical properties of semi-solid metal A356 joints produced by friction stir welding was investigated. In this work, the joints were made by using a fixed rotating speed of 1,750 rpm with varying welding speed of 80, 120 and 160 mm/min and 3⁰ of tool angle. In addition, Two different types of tool pins, cylindrical and square pin, were applied. The optical micrograph shows no voids, cracks or other weld defects. The Scanning electron microscope (SEM) reveals fine microstructure and uniform dispersion of Si (Silicon) particles obtained from cylindrical pin than that of square pin. The variation of hardness throughtout the weld also reveals slightly greater at the stir zone for every welding speed for both pin. Transverse and longitudinal tensile strengths obtained from cylindrical pin are greater than square pin. Furthermore, the joint made from 1,750 rpm, 160 mm/min with cylindrical pin shows highest strength.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จได้ด้วยดี เนื่องด้วยการประสิทธิประสาทวิชาความรู้และความอนุเคราะห์จากบุคคลหลายฝ่าย ตลอดจนบัณฑิตศึกษาและคณาจารย์ในภาควิชาวิศวกรรมเหมืองแร่และวัสดุ โดยเฉพาะอย่างยิ่งอาจารย์ที่ปรึกษาหลัก ดร.ประภาศ เมืองจันทร์บุรี และอาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ผศ.ดร.เจษฎา วรรณสินธุ์ และ รศ.ดร.ศิริกุล วิสุทธิ์เมธางกูร อาจารย์จากภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล ที่ให้คำปรึกษาแนะนำในการดำเนินงานการวิจัย และการจัดทำวิทยานิพนธ์ให้มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบคุณคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่ให้ความกรุณาตรวจทานและให้คำแนะนำจนวิทยานิพนธ์เล่มนี้มีความสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

ขอขอบคุณคณะวิศวกรรมศาสตร์ ภาควิชาวิศวกรรมเหมืองแร่และวัสดุ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ และสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) ที่ได้ให้การสนับสนุนเงินทุน เครื่องมือและอุปกรณ์การวิจัย

ขอขอบคุณคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัยที่ให้การสนับสนุนเครื่องมือและอุปกรณ์การทดสอบทางโลหะวิทยาและการทดสอบทางกล และขอขอบคุณทีมงานและผู้ทำการวิจัยอะลูมิเนียมหล่อกิ่งของแข็งทุกท่านที่ทำให้งานวิจัยและวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ สามารถดำเนินงานไปได้และมีความสมบูรณ์ครบถ้วนทุกประการ

ธงชัย เกรือฝื่อ

สารบัญ

เรื่อง	หน้า
สารบัญ	(6)
รายการตาราง	(11)
รายการภาพประกอบ	(12)
บทที่	
1 บทนำ	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของหัวข้อวิจัย	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	3
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	3
1.4 แผนการดำเนินการวิจัย	4
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัย	4
2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	5
2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย	5
2.1.1 อะลูมิเนียมหล่อหมายเลข A356	5
2.1.2 โครงสร้างทางจุลภาค (Microstructure)	5
2.2 ทฤษฎีกลไกการเกิดโลหะกิ่งของแข็งในการหล่ออะลูมิเนียม	6
2.2.1 การแตกตัวของกิ่งหรือแขนของเดนไดรต์ (Dendrite fragmentation)	6
2.2.2 ขั้นตอนการเจริญเติบโตและการ Coarsening ของอนุภาคของแข็ง	7
2.2.3 กระบวนการผลิตโลหะกิ่งของแข็งด้วยการหล่อแบบรีโอสแตตติง	8
2.2.4 การผลิตโลหะกิ่งของแข็งด้วยกรรมวิธีปล่อยฟองแก๊สระหว่างการผลิต	10
2.3 ทฤษฎีกระบวนการเชื่อมเสียดทานแบบกวน	11
2.3.1 องค์ประกอบในการเชื่อมด้วยการเสียดทานแบบกวน	12
2.3.2 ความร้อนจากการเสียดทานแบบกวน	13
2.3.3 แรงกดของเครื่องมือ	14

สารบัญ (ต่อ)

เรื่อง	หน้า
2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	15
2.4.1 โลหะที่ได้จากการหล่อแบบกึ่งของแข็ง	15
2.4.2 กระบวนการเชื่อมและโลหะวิทยาการเชื่อมอะลูมิเนียมที่ได้จากการหล่อแบบกึ่งของแข็ง	15
3 วิธีดำเนินการวิจัย	28
3.1 การออกแบบวิธีดำเนินการวิจัย	28
3.2 วัสดุที่ใช้ในการทดลอง	29
3.2.1 อะลูมิเนียมหล่อผสมแบบกึ่งของแข็ง A356	29
3.2.2 การเตรียมชิ้นงานทดสอบจากอะลูมิเนียมหล่อกึ่งของแข็ง A356	30
3.3 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย	32
3.3.1 การปรับมุมเอียงของเครื่องมือ	32
3.3.2 เครื่องมือที่ใช้ในการเชื่อม	33
3.2.3 อุปกรณ์ในการจับยึดของการเชื่อมเสียดทานแบบกวน	33
3.4 กรรมวิธีการเชื่อมเสียดทานแบบกวน	35
3.4.1 การวัดแรงกดในการเชื่อมเสียดทานแบบกวน	36
3.4.2 การวัดอุณหภูมิขณะทำการเชื่อม	37
3.4.3 การ Lay out ตัดชิ้นงานที่ได้จากการเชื่อม	38
3.5 การตรวจสอบลักษณะโครงสร้างทางโลหะวิทยาของรอยเชื่อม	38
3.5.1 การตรวจสอบผิวหน้ารอยเชื่อมด้วยสายตา	38
3.5.2 การตรวจสอบโครงสร้างมหภาค	39
3.5.3 การตรวจสอบโครงสร้างทางจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (OM)	41
3.5.4 การตรวจสอบโครงสร้างทางจุลภาคด้วยกล้องอิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ซึ่งมีระบบเอ็กซ์เรย์ด้วย (EDX)	42

สารบัญ (ต่อ)

เรื่อง	หน้า
3.6 การทดสอบสมบัติทางกล	42
3.6.1 การทดสอบความแข็ง	42
3.6.2 การทดสอบแรงดึง	44
3.6.2.1 การเตรียมชิ้นงานทดสอบของเนื้อโลหะเดิม (BM)	44
3.6.2.2 การเตรียมชิ้นงานทดสอบของงานเชื่อม	45
3.6.2.3 วิธีการทดสอบแรงดึง	46
4. ผลการทดลองและการวิจารณ์ผล	47
4.1 การวัดแรงกดและความร้อนขณะทำการเชื่อมเสียดทานแบบกวน	47
4.1.1 การวัดแรงกดในขณะที่ทำการเชื่อมเสียดทานแบบกวน	47
4.1.2 การวัดแรงกดจากการเชื่อมด้วยหัวพินแบบทรงกระบอก	48
4.1.3 การวัดแรงกดจากการเชื่อมด้วยหัวพินแบบสี่เหลี่ยม	49
4.1.4 การเปรียบเทียบค่าแรงกดจากการเชื่อมด้วยหัวพินแบบทรงกระบอก และหัวพินแบบสี่เหลี่ยม	49
4.2 การวัดอุณหภูมิขณะทำการเชื่อมเสียดทานแบบกวน	51
4.2.1 การวัดอุณหภูมิจากการเชื่อมด้วยหัวพินแบบทรงกระบอก	51
4.2.2 การวัดอุณหภูมิจากการเชื่อมด้วยหัวพินแบบสี่เหลี่ยม	52
4.2.3 การเปรียบเทียบค่าอุณหภูมิจากการเชื่อมด้วยหัวพินแบบ ทรงกระบอกและหัวพินแบบสี่เหลี่ยม	54
4.3 การตรวจสอบผิวหน้ารอยเชื่อมของหัวพินแบบทรงกระบอกและแบบสี่เหลี่ยม	54
4.3.1 ลักษณะผิวหน้ารอยเชื่อมของหัวพินแบบทรงกระบอกและ หัวพินแบบสี่เหลี่ยม	55
4.3.2 การเปรียบเทียบลักษณะผิวหน้ารอยเชื่อมของหัวพินแบบ ทรงกระบอกและแบบสี่เหลี่ยม	57
4.4 โครงสร้างมหภาคของหัวพินแบบทรงกระบอกและแบบสี่เหลี่ยม	57

สารบัญ (ต่อ)

เรื่อง	หน้า
4.4.1 โครงสร้างมหภาคของหัว핀แบบทรงกระบอกและหัว핀แบบสี่เหลี่ยม	57
4.4.2 การเปรียบเทียบโครงสร้างมหภาคของหัว핀แบบทรงกระบอกและ แบบสี่เหลี่ยม	60
4.5 โครงสร้างทางจุลภาคจากกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (OM)	60
4.5.1 โครงสร้างทางจุลภาคจากการเชื่อมด้วยหัว핀แบบทรงกระบอกและ หัว핀แบบสี่เหลี่ยม	60
4.5.2 เปรียบเทียบโครงสร้างทางจุลภาคจากการเชื่อมด้วยหัว핀แบบ ทรงกระบอกและแบบสี่เหลี่ยม	62
4.6 โครงสร้างทางจุลภาคจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) โดยมีระบบเอ็กซ์เรย์ (EDX)	64
4.6.1 โครงสร้างทางจุลภาคจากการเชื่อมด้วยหัว핀แบบทรงกระบอก	64
4.6.2 โครงสร้างทางจุลภาคจากการเชื่อมด้วยหัว핀แบบสี่เหลี่ยม	69
4.6.3 จากการเปรียบเทียบโครงสร้างทางจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์ อิเล็กตรอนแบบส่องกราด จากการเชื่อมด้วยหัว핀แบบทรงกระบอก และแบบสี่เหลี่ยม	74
4.7 การทดสอบความแข็งจากการเชื่อมเสียดทานแบบกวน	75
4.7.1 ค่าความแข็งจากการเชื่อมด้วยหัว핀แบบทรงกระบอก	75
4.7.2 ค่าความแข็งจากการเชื่อมด้วยหัว핀แบบสี่เหลี่ยม	76
4.7.3 จากการเปรียบเทียบค่าความแข็งจากการเชื่อมด้วยหัว핀แบบ ทรงกระบอกและแบบสี่เหลี่ยม	77
4.8 การทดสอบความแข็งแรงดึง	77
4.7.1 ความแข็งแรงดึงของชิ้นงานที่ตัดตามขวางกับรอยเชื่อม	78
4.7.2 ความแข็งแรงดึงของชิ้นงานที่ตัดตามยาวแนวเชื่อม	79
5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ	82
5.9 ข้อเสนอแนะ	84

สารบัญ (ต่อ)

เรื่อง	หน้า
บรรณานุกรม	85
ภาคผนวก	88
ภาคผนวก ก ข้อกำหนดการทดสอบสมบัติทางโลหะวิทยาและสมบัติทางกล	89
ก.1 ส่วนผสมทางเคมีของสารละลายเจือจาง Keller's reagent	90
ก.2 ข้อกำหนดชิ้นงานทดสอบความแข็งแรงดึงตามมาตรฐาน ASTM-E8	90
ภาคผนวก ข แผนภาพสมมูลเฟสและภาพโครงสร้างทางจุลภาค	91
ข.1 แผนภาพสมมูลเฟสของอะลูมิเนียม-ซิลิกอน-แมกนีเซียมหล่อผสม	92
ข.2 แผนภาพสมมูลเฟสของอะลูมิเนียม-ซิลิกอน-แมกนีเซียมหล่อผสม	92
ภาคผนวก ค ภาพโครงสร้างทางจุลภาคจากการเชื่อมเสียดทานแบบกวน	93
ค.1 ผิวหน้ารอยเชื่อมจากการเชื่อมเสียดทานแบบกวน	94
ค.2 โครงสร้างทางจุลภาคจากกล้อง OM ของเชื่อมเสียดทานแบบกวน	95
ค.3 โครงสร้างทางจุลภาคจากกล้อง SEM ของการเชื่อมเสียดทานแบบกวน	96
ภาคผนวก ง ค่าความแข็งจากการเชื่อมเสียดทานแบบกวน	98
ง.1 ค่าความแข็งจากการเชื่อมเสียดทานแบบกวน	99
ภาคผนวก จ ค่าความแข็งแรงดึงจากการเชื่อมเสียดทานแบบกวน	100
จ.1 ค่าความแข็งจากการเชื่อมเสียดทานแบบกวน	101
ประวัติผู้เขียน	103

รายการตาราง

ตารางที่	หน้า
3.1 ส่วนผสมทางเคมีของอะลูมิเนียมหล่อผสม A356 (wt. %)	30
4.1 แสดงค่าความแข็งแรงดึงของชิ้นงานตามขวางกับรอยเชื่อม	79
4.2 แสดงค่าความแข็งแรงดึงเฉลี่ยของชิ้นงานตามยาวกับรอยเชื่อม	80
ง.1 ค่าความแข็งของหัวพินแบบทรงกระบอกและแบบสี่เหลี่ยม	99
จ.1 แสดงค่าความแข็งแรงดึงของชิ้นงานที่ตัดตามขวางกับรอยเชื่อม	101
จ.2 แสดงค่าความแข็งแรงดึงของชิ้นงานที่ตัดตามยาวกับรอยเชื่อม	101
จ.3 แสดงค่าความแข็งแรงดึงของชิ้นงานในบริเวณเนื้อโลหะเดิม	102

รายการภาพประกอบ

รูปที่	หน้า	
2.1	แสดงโครงสร้างอะลูมิเนียมผสมหมายเลข A356	6
2.2	แสดงภาพการแตกตัวของกิ่งหรือแขนของเดนไดรต์ ทำให้มีอนุภาคหรือเกรนเพิ่มขึ้นแบบทวีคูณ	6
2.3	แสดงเส้นทางการเติบโต (Growth) และการ Coarsening ของอนุภาคของแข็ง	8
2.4	แสดงขั้นตอนการผลิตโลหะกิ่งของแข็งด้วยกรรมวิธี Semi-solid rheocasting	9
2.5	แสดงภาพอุปกรณ์ที่ใช้ในการผลิตโลหะกิ่งของแข็งด้วยกรรมวิธีการปล่อยฟองแก๊สระหว่างการแข็งตัว	10
2.6	หลักการเชื่อมเสียดทานแบบกวน (FSW)	11
2.7	การเชื่อมเสียดทานแบบกวน (FSW)	13
2.8	ค่าแรงกดที่เกิดจากการเชื่อม FSW ในแต่ละช่วงขณะทำการเชื่อม	14
2.9	แสดงลักษณะของ Tool pin แบบต่าง ๆ	20
2.10	แสดงลักษณะของ Tool pin แบบต่าง ๆ	21
2.11	แสดงลักษณะของหัวพินที่ใช้ในการเชื่อมเสียดทานแบบกวน	22
2.12	แสดงลักษณะของหัวพินที่ใช้ในการเชื่อมเสียดทานแบบกวน	23
2.13	แสดงลักษณะของหัวพินในการเชื่อมเสียดทานแบบกวน	24
2.14	ทิศทางการกวนและความร้อนจากการเสียดทาน	27
3.1	ขั้นตอนวิธีดำเนินการวิจัย	28
3.2	แสดง Mold ที่ใช้ในการอัดขึ้นรูปชิ้นงาน	29
3.3	ภาพแสดงชิ้นงานและโครงสร้างของอะลูมิเนียมหล่อกิ่งของแข็งเกรด A356 ที่ได้จากการหล่อด้วยเทคนิค GISS	30
3.4	แสดงการกัดผิวหน้าชิ้นงานทดสอบที่ได้จากการหล่อกิ่งของแข็ง	31
3.5	แสดงชิ้นทดสอบอะลูมิเนียมหล่อกิ่งของแข็ง เกรด A356 ที่ผ่านการกัดและตัดด้วยเครื่องเลื่อยสายพาน	31
3.6	ภาพแสดงการปรับมุมเอียง 3 องศา ของเครื่องมือ	32
3.7	ลักษณะของ Tool และการจับยึด Tool	33

รายการภาพประกอบ (ต่อ)

รูปที่	หน้า	
3.8	แสดงส่วนต่างๆ ที่เกี่ยวข้องในการเชื่อมเสียดทานแบบกวน	34
3.9	แสดงการจับยึดในการเชื่อมเสียดทานแบบกวน	34
3.10	กระบวนการเชื่อมเสียดทานแบบกวน	35
3.11	การวัดค่าแรงกดในการเชื่อมอะลูมิเนียม SSM A356 โดยใช้ Load cell	36
3.12	แสดงการวัดอุณหภูมิขณะทำการเชื่อม	37
3.13	การ Lay out ชิ้นงานทดสอบทางโลหะวิทยาและทางกล	38
3.14	รอยเชื่อมจากการเสียดทานแบบกวนที่มีความสมบูรณ์	39
3.15	รอยเชื่อมจากการเสียดทานแบบกวนที่ไม่สมบูรณ์	39
3.16	แสดงชิ้นงานที่เคลือบด้วยน้ำยา Epoxy	40
3.17	แสดงการเตรียมชิ้นงานเพื่อตรวจสอบ โครงสร้างทางโลหะวิทยา	40
3.18	แสดงบริเวณต่างๆ ของโครงสร้างมหภาคจากการเชื่อมเสียดทานแบบกวน	41
3.19	แสดงตำแหน่งที่ทำการตรวจสอบ โครงสร้างทางจุลภาคด้วย OM	41
3.20	แสดงตำแหน่งที่ทำการตรวจสอบ โครงสร้างทางจุลภาคด้วยกล้อง SEM และ EDX	42
3.21	แสดงตำแหน่งกดจากการวัดความแข็ง	43
3.22	แสดงแรงกดที่กระทำต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ผิวด้วยเครื่องไมโครวิกเกอร์	43
3.23	ภาพแสดงขนาดมาตรฐาน ASTM ของชิ้นทดสอบ	44
3.24	ภาพแสดงการขึ้นรูปชิ้นทดสอบแรงดึงของเนื้อโลหะเดิม	44
3.25	ภาพแสดงชิ้นทดสอบมาตรฐานของเนื้อโลหะเดิม SSM A356	45
3.26	การเตรียมชิ้นทดสอบของรอยเชื่อมเสียดทานแบบกวน	45
3.27	แสดงการทดสอบแรงดึง	46
4.1	กราฟแสดงค่าแรงกดของหัวพินแบบทรงกระบอก	48
4.2	กราฟแสดงค่าแรงกดของหัวพินแบบสี่เหลี่ยม	49
4.3	กราฟแสดงค่าแรงกดของหัวพินแบบทรงกระบอกและแบบสี่เหลี่ยม	51
4.4	กราฟแสดงค่าอุณหภูมิของหัวพินแบบทรงกระบอก	52
4.5	กราฟแสดงค่าอุณหภูมิของหัวพินแบบสี่เหลี่ยม	52

รายการภาพประกอบ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.6 กราฟแสดงค่าอุณหภูมิของหัวพินแบบทรงกระบอกและแบบสี่เหลี่ยม	54
4.7 แสดงผิวหน้ารอยเชื่อมของการเชื่อมเสียดทานแบบกวนของหัวพินแบบทรงกระบอก	56
4.8 แสดงผิวหน้ารอยเชื่อมของการเชื่อมเสียดทานแบบกวนของหัวพินแบบสี่เหลี่ยม	56
4.9 โครงสร้างมหภาคของรอยเชื่อมเสียดทานแบบกวน (FSW) (R) Retreating side, (A) Advancing side, (TMAZ) Thermo-mechanical affected zone, (SZ) Stir zone	59
4.10 โครงสร้างมหภาคของรอยเชื่อมเสียดทานแบบกวน (FSW) (R) Retreating side, (A) Advancing side, (TMAZ) Thermo-mechanical affected zone, (SZ) Stir zone	59
4.11 แสดงโครงสร้างทางจุลภาคการเชื่อมเสียดทานแบบกวนของหัวพินแบบทรงกระบอก	61
4.12 แสดงโครงสร้างทางจุลภาคการเชื่อมเสียดทานแบบกวนของหัวพินแบบสี่เหลี่ยม	62
4.13 แสดงโครงสร้างทางจุลภาคบริเวณรอยเชื่อมเสียดทานแบบกวนของ หัวพินแบบทรงกระบอก (ก) และแบบสี่เหลี่ยม (ข)	63
4.14 แสดงโครงสร้างจากกล้อง SEM ของบริเวณเนื้อโลหะเดิม	64
4.15 แสดงโครงสร้างจากกล้อง SEM ที่ความเร็วในการเดินแนวเชื่อม 80 mm/min (ก) Stir zone ด้านบน (ข) TMAZ-R (ค) Stir zone ตรงกลาง (ง) TMAZ-A (จ) Stir zone ด้านล่าง	66
4.16 แสดงการกระจายตัวของธาตุต่างๆ จาก EDX ที่ความเร็วในการเดินแนวเชื่อม 80 mm/min บริเวณรอยเชื่อม	66
4.17 แสดงโครงสร้างจากกล้อง SEM ที่ความเร็วในการเดินแนวเชื่อม 120 mm/min (ก) Stir zone ด้านบน (ข) TMAZ-R (ค) Stir zone ตรงกลาง (ง) TMAZ-A (จ) Stir zone ด้านล่าง	67
4.18 แสดงการกระจายตัวของธาตุต่างๆ จาก EDX ที่ความเร็วในการเดินแนวเชื่อม 120 mm/min บริเวณรอยเชื่อม	67
4.19 แสดงโครงสร้างจากกล้อง SEM ที่ความเร็วในการเดินแนวเชื่อม 160 mm/min (ก) Stir zone ด้านบน (ข) TMAZ-R (ค) Stir zone ตรงกลาง (ง) TMAZ-A (จ) Stir zone ด้านล่าง	68

รายการภาพประกอบ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.20 แสดงการกระจายตัวของธาตุต่างๆ จาก EDX ที่ความเร็วในการเดินแนวเชื่อม 160 mm/min บริเวณรอยเชื่อม	69
4.21 แสดงโครงสร้างจากกล้อง SEM ที่ความเร็วในการเดินแนวเชื่อม 80 mm/min (ก) Stir zone ด้านบน (ข) TMAZ-R (ค) Stir zone ตรงกลาง (ง) TMAZ-A (จ) Stir zone ด้านล่าง	70
4.22 แสดงการกระจายตัวของธาตุต่างๆ จาก EDX ที่ความเร็วในการเดินแนวเชื่อม 80 mm/min บริเวณรอยเชื่อม	71
4.23 แสดงโครงสร้างจากกล้อง SEM ที่ความเร็วในการเดินแนวเชื่อม 120 mm/min (ก) Stir zone ด้านบน (ข) TMAZ-R (ค) Stir zone ตรงกลาง (ง) TMAZ-A (จ) Stir zone ด้านล่าง	72
4.24 แสดงการกระจายตัวของธาตุต่างๆ จาก EDX ที่ความเร็วในการเดินแนวเชื่อม 120 mm/min บริเวณรอยเชื่อม	72
4.25 แสดงโครงสร้างจากกล้อง SEM ที่ความเร็วในการเดินแนวเชื่อม 160 mm/min (ก) Stir zone ด้านบน (ข) TMAZ-R (ค) Stir zone ตรงกลาง (ง) TMAZ-A (จ) Stir zone ด้านล่าง	73
4.26 แสดงการกระจายตัวของธาตุต่างๆ จาก EDX ที่ความเร็วในการเดินแนวเชื่อม 160 mm/min บริเวณรอยเชื่อม	73
4.27 แสดงโครงสร้างจากกล้อง SEM ในรอยเชื่อมเสียดทานแบบกวนของหัวพิน แบบทรงกระบอกและแบบสี่เหลี่ยม	75
4.28 แสดงการเปรียบเทียบค่าความแข็งของรอยเชื่อมเสียดทานแบบกวนของหัวพิน แบบทรงกระบอกและแบบสี่เหลี่ยม	77
4.29 แสดงชิ้นงานทดสอบความแข็งแรงดึงของชิ้นงานที่ตัดตามขวางกับรอยเชื่อม	78
4.30 แสดงชิ้นงานทดสอบความแข็งแรงดึงของชิ้นงานที่ตัดตามยาวกับรอยเชื่อม	79
4.31 แสดงค่าความแข็งแรงดึงของชิ้นงานที่ตัดตามขวางกับรอยเชื่อม	79
4.32 แสดงค่าความแข็งแรงดึงเฉลี่ยของชิ้นงานที่ตัดตามยาวกับรอยเชื่อม	81

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของหัวข้อวิจัย

ปัจจุบันนี้ความต้องการชิ้นส่วนอะลูมิเนียมที่หล่อด้วยกระบวนการไดคาสติง (Die casting) ในอุตสาหกรรมผลิตรถยนต์และชิ้นส่วนมีสูงมากรวมถึงอุตสาหกรรมอื่นๆ เช่น อุตสาหกรรมการสร้างชิ้นส่วนเครื่องจักรและชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์เพื่อช่วยลดน้ำหนักและการใช้พลังงาน ดังนั้นจึงได้มีการแข่งขันกันทางด้านเทคโนโลยีในการหล่ออะลูมิเนียมด้วยกระบวนการไดคาสติงกันอย่างกว้างขวางเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพและคุณภาพในการผลิต

เทคโนโลยีล่าสุดที่มีศักยภาพในการหล่ออะลูมิเนียมไดคาสติง คือ กรรมวิธีการหล่อโลหะกึ่งของแข็ง (Semi - Solid Metal หรือ SSM) ปัจจุบันนี้มีการใช้เทคโนโลยีการหล่อโลหะกึ่งของแข็งกันทั่วโลก ประเทศไทยก็เริ่มมีการวิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีการหล่อโลหะกึ่งของแข็งเพื่อประยุกต์ใช้กับอุตสาหกรรมภายในประเทศและที่ได้รับความสนใจและกำลังพัฒนาในขณะนี้ คือ กระบวนการหล่อโลหะกึ่งของแข็งด้วยเทคนิค GISS (Gas Induced Semi-Solid) ซึ่งเป็นกระบวนการหล่อที่สร้างโลหะกึ่งของแข็งด้วยกรรมวิธีการฟองแก๊สเฉื่อยผ่านแท่งกราฟไฟต์พูน (แก๊สอาร์กอน หรือ ไนโตรเจน) ซึ่งเป็นกรรมวิธีการหล่อแบบใหม่ที่มีเทคนิคและวิธีการคล้ายกับการหล่อแบบ Rheocasting ที่ให้โครงสร้างเกรนแบบก้อนกลม (Spheroidal grain) ซึ่งมีข้อดีคือ โครงสร้างมีการกระจายตัวของเกรนที่สม่ำเสมอและมีค่า Yield strength เพิ่มขึ้น คุณสมบัติโดยทั่วไปของการหล่อโลหะกึ่งของแข็งมีหลายประการ เช่น มีอุณหภูมิที่ต่ำกว่าจุดหลอมเหลวของโลหะนั้น โลหะเริ่มแข็งตัวบางส่วนแล้วขณะเทใส่แม่พิมพ์มีความหนืดที่สูงกว่าน้ำโลหะ มีความเค้นขณะไหลต่ำกว่าโลหะที่แข็งตัวแล้วเป็นต้นซึ่งคุณสมบัติดังกล่าวมีข้อดีหลายประการที่สามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้อย่างหลากหลายในกระบวนการผลิต เช่น ลดการเกิดของเสียจากปฏิกิริยาระหว่างออกซิเจนในขั้นตอนการหล่อโลหะลงในเบ้าและลดการเกิดโพรงหดตัว (Shrinkage) อีกทั้งยังช่วยยืดอายุการใช้งานของแม่พิมพ์เพื่อที่จะนำมาประยุกต์ใช้กับงานอุตสาหกรรมภายในประเทศ โดยเฉพาะที่เกี่ยวข้องกับการขึ้นรูป (Materials forming) และการประกอบชิ้นส่วน เช่น การเชื่อมต่อตัวถังรถยนต์ การเชื่อมซ่อมล้อแม็ก การเชื่อมต่อของชิ้นส่วนเครื่องบินหรือถังเชื้อเพลิงของจรวด และการเชื่อมตัวถังของรถไฟความเร็วสูง ซึ่งชิ้นส่วนดังกล่าวจำเป็นต้องมีการเชื่อมประกอบชิ้นส่วนและการซ่อมแซม (Repairing) เข้ามาเกี่ยวข้อง

อย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้สำหรับการเชื่อมอะลูมิเนียมผสม อีกทั้งการเชื่อมก็มีบทบาทสำคัญต่อกระบวนการผลิตในด้านการประกอบชิ้นส่วนของผลิตภัณฑ์ ดังนั้นจึงต้องมีการพัฒนาเทคโนโลยีการเชื่อมเข้ามาใช้ในงานอุตสาหกรรมให้เหมาะสมกับสภาพของงาน อีกทั้งกระบวนการเชื่อมก็มีข้อจำกัดที่จะส่งผลกระทบต่อในด้านต่างๆ ขณะเชื่อมและภายหลังการเชื่อม โดยเฉพาะชิ้นส่วนที่ทำจากอะลูมิเนียมซึ่งมีหลากหลายประเภทในการนำไปใช้งาน อีกทั้งกระบวนการเชื่อมก็มีอยู่หลากหลายวิธีเช่นกัน ดังนั้นในการเลือกกระบวนการเชื่อมมาใช้จะขึ้นอยู่กับความเหมาะสมของประเภทวัสดุและกระบวนการผลิตในงานอุตสาหกรรมนั้นๆ

การเชื่อมแบบหลอมละลาย ซึ่งจะมีการแผ่กระจายของความร้อนที่ได้จากการอาร์ค จะทำให้เกิดการหลอมละลายเข้าด้วยกันของเนื้อโลหะสองชิ้นบริเวณบ่อหลอม ขณะโลหะแข็งตัว จะเกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างใหม่ซึ่งอาจจะไม่เหมือนกับโครงสร้างเดิมของโลหะนั้น ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างทางโลหะวิทยาและคุณสมบัติทางกล ซึ่งจะมีความเค้นตกค้าง (Residual stress) และการบิดงอ (Distortion) นอกจากนี้ยังทำให้เกิดการแตกของรอยเชื่อมในระหว่างการแข็งตัวจากการหลอมละลาย อีกทั้งยังมีปัญหาการเกิดโพรงอากาศภายในรอยเชื่อม (Porosity) และส่งผลให้คุณสมบัติทางกลบริเวณรอยเชื่อมลดลง

จากปัญหาดังกล่าวนั้นจึงได้มีการหาวิธีการเชื่อมใหม่ๆ มาใช้เพื่อที่จะให้รักษาโครงสร้างทางโลหะวิทยาและคุณสมบัติทางกลไว้ให้ใกล้เคียงกับโลหะเดิมมากที่สุดภายหลังจากการเชื่อม วิธีการเชื่อมล่าสุดซึ่งกำลังเป็นที่สนใจกันมากในขณะนี้และได้มีการวิจัยและพัฒนาอย่างต่อเนื่อง คือ การเชื่อมเสียดทานแบบกวน (Friction Stir Welding หรือ FSW) ซึ่งเป็นการเชื่อมในสถานะของแข็ง (Solid State Welding) การเชื่อมเสียดทานแบบกวนเป็นกระบวนการเชื่อมที่ยึดโลหะเข้าด้วยกันที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิหลอมละลายของโลหะนั้น โดยที่โลหะยังอยู่ในสถานะของแข็งหรือบางครั้งอาจจะหลอมละลายเพียงเล็กน้อย ซึ่งโลหะจะเชื่อมติดกันโดยความร้อนจากการเสียดทานจากการกวนของหัวพินที่หมุนตลอดเวลาพร้อมกับเคลื่อนที่ไปข้างหน้าโดยมีแรงกดกระทำด้วยในขณะเดินแนวเชื่อม การเชื่อมเสียดทานแบบกวนจะมีตัวแปรหลักที่เกี่ยวข้องในการเชื่อมดังนี้ คือ ความเร็วรอบในการหมุนของหัวพิน (rpm) อัตราความเร็วในการเดินแนวเชื่อม (Welding speed) แรงกด (Down force) มุมเอียงของหัวเชื่อม (Tilt angle) และนอกจากนี้ยังมีตัวแปรอื่นๆ เช่น ขนาดและรูปแบบของหัวพิน

จากข้อมูลและเหตุผลดังกล่าวจึงเป็นที่มาของโครงการวิจัยนี้ โดยจะศึกษาตัวแปรในการเชื่อม (Joining parameters) ที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางโลหะวิทยาและสมบัติทางกล โดยเฉพาะบริเวณรอยเชื่อมหรือบริเวณที่ถูกกวน (Stir Zone หรือ SZ) และบริเวณที่ได้รับอิทธิพลจากความร้อนทางกล (Thermal Mechanical Affected Zone หรือ TMAZ) ด้วย

กระบวนการเชื่อมเสียดทานแบบกวน (FSW) เพื่อความเหมาะสมในด้านโครงสร้างทางโลหะวิทยาและสมบัติทางกล รวมถึงนำผลมาปรับปรุงเพื่อเลือกใช้กรรมวิธีการเชื่อมที่เหมาะสมทั้งในแง่งานวิจัยและอุตสาหกรรมต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1.2.1 เพื่อวิจัยหาเทคโนโลยีการเชื่อมสมัยใหม่ที่เหมาะสมกับการเชื่อมอะลูมิเนียมผสมซึ่งหล่อโดยเทคโนโลยีการหล่อกึ่งของแข็ง

1.2.2 เพื่อศึกษาอิทธิพลความเร็วของการเชื่อมและรูปแบบของหัวพินซึ่งมีผลต่อโครงสร้างทางจุลภาคสำหรับการเชื่อมอะลูมิเนียมผสมซึ่งหล่อโดยเทคโนโลยีการหล่อกึ่งของแข็ง

1.2.3 เพื่อศึกษาอิทธิพลความเร็วของการเชื่อมและรูปแบบของหัวพินซึ่งมีผลต่อสมบัติทางกลของแนวเชื่อมสำหรับการเชื่อมอะลูมิเนียมผสมซึ่งหล่อโดยเทคโนโลยีการหล่อกึ่งของแข็ง

1.2.4 เพื่อเปรียบเทียบตัวแปรในการเชื่อมและรูปแบบหัวพินที่ใช้เชื่อมอะลูมิเนียมผสมซึ่งหล่อโดยเทคโนโลยีการหล่อกึ่งของแข็ง

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

ขอบเขตของโครงการวิจัยนี้จะศึกษาการเชื่อมโลหะหล่อแบบกึ่งของแข็ง (SSM) A 356 ด้วยกรรมวิธีการเชื่อมเสียดทานแบบกวน (FSW) โดยมีตัวแปรคงที่คือ ความเร็วในการหมุนของ Tool (1,750 rpm) ส่วนตัวแปรที่มีการเปลี่ยนแปลง คือ อัตราความเร็วในการเดินแนวเชื่อม (Welding speed) 80, 120 และ 160 mm/min โดยมีมุมเอียงของ Tool (pin) 3 องศา และชนิดของ Tool (pin) จะใช้หัวพิน 2 แบบ คือ หัวพินแบบทรงกระบอก (Straight cylindrical) และหัวพินแบบสี่เหลี่ยม (Square) โดยในแต่ละกรณีจะทำการเชื่อม 3 ตัวอย่าง ท้ายสุดจะศึกษาการเปลี่ยนแปลงทางโลหะวิทยา (โครงสร้างจุลภาค) โดยใช้กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (Optical Microscope, OM) รวมถึงใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดซึ่งมีระบบเอ็กซ์เรย์ด้วย (Scanning Electron Microscope, SEM และ Energy Dispersive X-ray, EDX) และศึกษาสมบัติทางกลของรอยเชื่อมและบริเวณที่ได้รับอิทธิพลจากความร้อนทางกล (TMAZ)

1.4 แผนการดำเนินการวิจัย

1.4.1 วางแผนและดำเนินงานวิจัย

1.4.2 ศึกษาค้นคว้าเอกสารและรวบรวมข้อมูลในการดำเนินงานวิจัย

1.4.3 เตรียมเครื่องมือ อุปกรณ์ และวัสดุในการศึกษาทดลองของงานวิจัย

1.4.4 ออกแบบการทดลองปฏิบัติการทดลอง และศึกษาค้นคว้าเอกสารวิจัยเพิ่มเติม

1.4.5 สรุปและวิเคราะห์ผลการทดลอง

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัย

1.5.1 ทราบถึงผลของตัวแปรในกรรมวิธีการเชื่อมเสียดทานแบบกวน (FSW) ที่มีผลต่อสมบัติทางโลหะวิทยาและสมบัติทางกลของการเชื่อมอะลูมิเนียมผสม A356 ที่หล่อแบบกึ่งของแข็ง

1.5.2 ทราบถึงความเป็นไปได้และค่าตัวแปรการเชื่อมรวมทั้งรูปแบบของหัวพินที่เหมาะสมสำหรับการเชื่อมอะลูมิเนียมผสม A356 ซึ่งหล่อโดยเทคโนโลยีการหล่อกึ่งของแข็งด้วยกรรมวิธีการเชื่อมเสียดทานแบบกวน เพื่อประโยชน์ทางด้านงานวิจัยและอุตสาหกรรมสำหรับโลหะประเภทนี้ต่อไป

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย

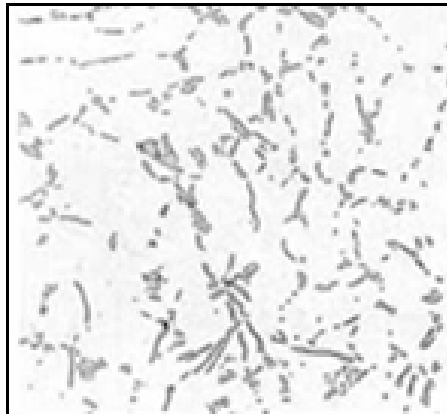
2.1.1 อะลูมิเนียมหล่อหมายเลข A356

อะลูมิเนียมหล่อหมายเลข A356 เป็นโลหะผสมอะลูมิเนียม – ซิลิกอน เป็นแบบไฮโปยูเทคติกสามารถหล่อได้ดีทั้งในแบบหล่อทรายและแบบหล่อโลหะมีความสามารถในการไหลตัวได้ดีและเกิดการหดตัวน้อยมาก ซึ่งมีผลทำให้สมบัติการต้านทานแรงดึงสูงขึ้นและมีความอ่อนเหนียวมากขึ้น การยืดตัวสูง ทนต่อแรงกระแทกได้ดี ส่วนผสมทางเคมีของอะลูมิเนียมผสมหมายเลข A356 เป็น Al, 7%Si, 0.35%Mg, 0.20%Fe, 0.20%Cu, 0.10%Mn, 0.10%Zn และ 0.230%Ti การเติมแมกนีเซียมลงไปเล็กน้อยทำให้ความสามารถในปรับปรุงสมบัติทางกลด้วยกรรมวิธีทางความร้อนได้ดี โดยการฟอร์มเฟส Mg_2Si ในเมตริกซ์ของอะลูมิเนียม กระบวนการทางความร้อนที่ใช้เพื่อปรับปรุงสมบัติทางกลมีอยู่หลายวิธีแต่ที่นิยมใช้มากที่สุด ได้แก่ กระบวนการทางความร้อน T6 คือ การนำชิ้นงานไปอบละลายแล้วนำไปชุบน้ำจางนั้นจึงนำไปทำการบ่มแข็งเทียม การนำไปใช้งานเหมาะสมที่สุดกับงานที่ต้องการความทนทานต่อการผุกร่อนและความแข็งแรงสูง มีการใช้งานอย่างกว้างขวางกับอุตสาหกรรมผลิตอุปกรณ์ชิ้นส่วนยานยนต์ต่างๆ

2.1.2 โครงสร้างทางจุลภาค (Microstructure)

สมบัติด้านความแข็งแรงของอะลูมิเนียมหล่อผสมซิลิกอน สามารถพัฒนาโดยการเติมแมกนีเซียมจำนวนเล็กน้อย (ประมาณ 0.35%) อะลูมิเนียมหล่อผสมหมายเลข A356 จะประกอบด้วยส่วนผสม 7% ซิลิกอน 0.35% แมกนีเซียม โดยซิลิกอนจะมีสมบัติทางด้านการสามารถในการหล่อและแมกนีเซียมจะทำให้สามารถปฏิบัติการทางความร้อนได้ดี

โครงสร้างทางจุลภาคของอะลูมิเนียมผสมหมายเลข A356 ในการหล่อหลายๆแบบและหลายๆ สภาพ ดังแสดงในรูปที่ 2.1 เป็นอัตราการเย็นตัวอย่างช้าๆ ของการหล่อทำให้เกิดอนุภาคของซิลิกอนในอินเตอร์เดนดริติก (Interdendritic) การทำบ่มแข็งเทียมในอะลูมิเนียมผสมหมายเลขนี้ในสภาพการหล่อจะไม่เปลี่ยนโครงสร้างทางจุลภาค แต่จะทำให้การเกิดอนุภาคของซิลิกอนมีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอซึ่งจะส่งผลทำให้มีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น



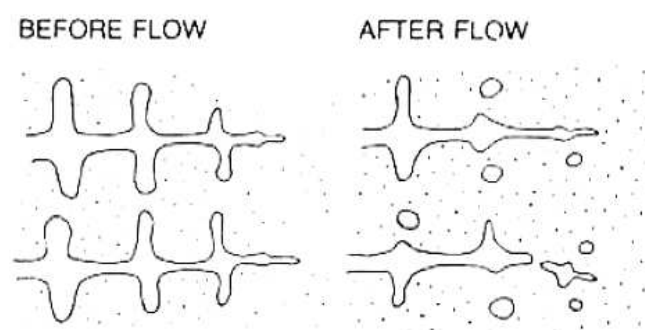
รูปที่ 2.1 แสดงโครงสร้างอะลูมิเนียมผสมหมายเลข A356

2.2 ทฤษฎีกลไกการเกิดโลหะกิ่งของแข็งในการหล่ออะลูมิเนียม

แม้ว่าจะมีผู้พยายามอธิบายถึงกลไกในการเกิดโลหะกิ่งของแข็ง แต่จนกระทั่งปัจจุบันก็ยังไม่สามารถหาข้อสรุปที่ชัดเจนเกี่ยวกับกลไกการเกิดโลหะกิ่งของแข็งได้ โดยทฤษฎีการเกิดโลหะกิ่งของแข็งที่สำคัญมีดังต่อไปนี้คือ

2.2.1 การแตกตัวของกิ่งหรือแขนของเดนไดรต์ (Dendrite fragmentation)

ทฤษฎีนี้ได้อธิบายว่าการเกิดขึ้นของโครงสร้างโลหะกิ่งของแข็ง เกิดจากการแตกตัวของกิ่งเดนไดรต์ทำให้อนุภาคที่แตกออกมามีปริมาณเพิ่มขึ้นแบบทวีคูณ (Grain multiplication) ดังแสดงในรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 แสดงภาพการแตกตัวของกิ่งหรือแขนของเดนไดรต์ ทำให้อนุภาคหรือเกรนเพิ่มขึ้นแบบทวีคูณ (Dendrite multiplication) Flemings *et al.* (1974)

โดย Flemings *et al.* (1974) ได้เสนอถึงความเป็นไปได้ของสาเหตุที่กึ่งของเดนไดรต์เกิดการแตกตัว โดยแบ่งออกเป็นสามสาเหตุหลัก คือ

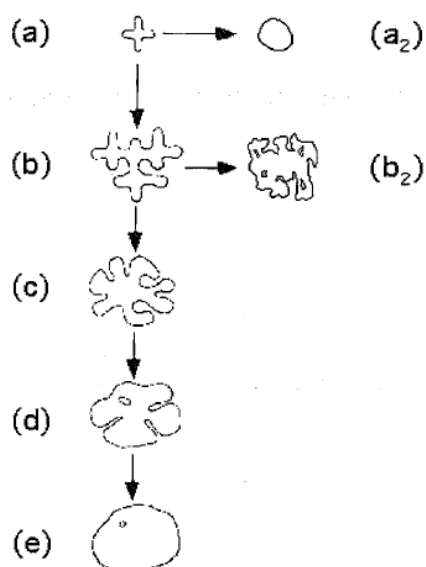
1. แขนของเดนไดรต์หักออกจากบริเวณโคน (Roots) เนื่องจากแรงเฉือน (Shear forces) ที่เกิดจากการเคลื่อนที่ของน้ำโลหะซึ่งเป็นการยากที่จะประมาณค่าของแรงที่ทำให้แขนของเดนไดรต์เกิดการหักออก และด้วยข้อจำกัดหลายประการ กล่าวคือ เดนไดรต์เริ่มต้นจะต้องเป็นผลึกที่สมบูรณ์ปราศจากข้อบกพร่อง เช่น ช่องว่าง (Void) หรือ ดิสโลเคชัน (Dislocation) เป็นต้น ซึ่งหากเดนไดรต์เริ่มต้นมีข้อบกพร่องดังกล่าวจะทำให้ยากแก่การหักออกจึงทำให้ทฤษฎีนี้เกิดข้อโต้แย้งมากมายและไม่ได้รับการยอมรับเท่าที่ควร

2. แขนของเดนไดรต์หลอมออกจากบริเวณโคนเนื่องจากกระบวนการ Ripening ทำให้ปริมาณตัวถูกละลาย (Solute) บริเวณโคนมีความเข้มข้นมากขึ้น เป็นสาเหตุทำให้จุดหลอมเหลวบริเวณนั้นลดต่ำลง จึงเป็นสาเหตุให้เกิดแขนของเดนไดรต์ถูกหลอมออกจากบริเวณโคนและหลุดออกมา

3. อีกกลไกที่นำเสนอโดย Vogel และคณะ (Vogel *et al.* 1979) ซึ่งอธิบายเพิ่มเติมโดย Doherty และคณะ (Doherty *et al.* 1984) พวกเขาได้นำเสนอกฎที่แตกต่างออกไป คือ พวกเขาเชื่อว่าแขนของเดนไดรต์จะเกิดการบิด (Bend) และมีการเสียรูปแบบพลาสติกด้วยแรงเค้น (Stress) ซึ่งความเครียดแบบพลาสติก (Plastic strain) ที่เกิดขึ้นจะทำให้เกิดการจัดเรียงตัวใหม่ของดิสโลเคชัน โดยที่อุณหภูมิหลอมเหลวดิสโลเคชันสามารถปีน (Climb) และรวมกันจนเกิดเป็นขอบเขตของเกรน โดยเมื่อมุมที่เกิดขึ้นมีค่ามากกว่า 20° จะทำให้พลังงานตรงขอบของเกรนมีค่ามากกว่าพลังงานบริเวณอินเตอร์เฟซระหว่างของแข็งและของเหลว 2 เท่า ซึ่งจะทำให้ขอบของเกรนเกิดการเป็ยด้วยน้ำโลหะทำให้แขนหรือกึ่งของเดนไดรต์หลุดออกมา

2.2.2 ขั้นตอนการเจริญเติบโตและการ Coarsening ของอนุภาคของแข็ง

แม้ว่าในขั้นตอนการเกิดอนุภาคกึ่งของแข็งยังไม่เป็นที่สรุปแน่นอน แต่เป็นที่ยอมรับกันว่าการสร้างจำนวน “นิวเคลียส” เริ่มต้นที่มีขนาดเล็กและมีจำนวนมาก จะใช้ระยะเวลาในการเกิดเกรนแบบก่อนกลมที่สั้นเพราะการเกิดจะเกิดได้โดยตรงจากเกรนแบบ Equiaxed ซึ่งแสดงตามเส้นทาง (a)-(a₂) ในรูปที่ 2.3 ในทางตรงกันข้ามหากขนาด “นิวเคลียส” เริ่มต้นที่เกิดขึ้นมีขนาดใหญ่ ซึ่งอาจเกิดจากอัตราการเย็นตัวของน้ำโลหะที่ช้าจะทำให้เกิดโครงสร้างแบบก่อนกลมที่มีขนาดใหญ่ ดังแสดงตามเส้นทาง (a) ไปยัง (e) โดยเส้นทางนี้จะใช้เวลาในการเกิดที่ยาวนานกว่าและหากจำนวน “นิวเคลียส” ที่เกิดขึ้นมีจำนวนไม่เพียงพอโครงสร้างที่ได้ก็จะไม่เป็นก่อนกลมแม้จะใช้เวลานานก็ตาม ดังแสดงตามเส้นทาง (a) ไปยัง (b₂)



รูปที่ 2.3 แสดงเส้นทางการเติบโต (Growth) และการ Coarsening ของอนุภาคของแข็ง
Flemings and Johnson *et al.* (2002)

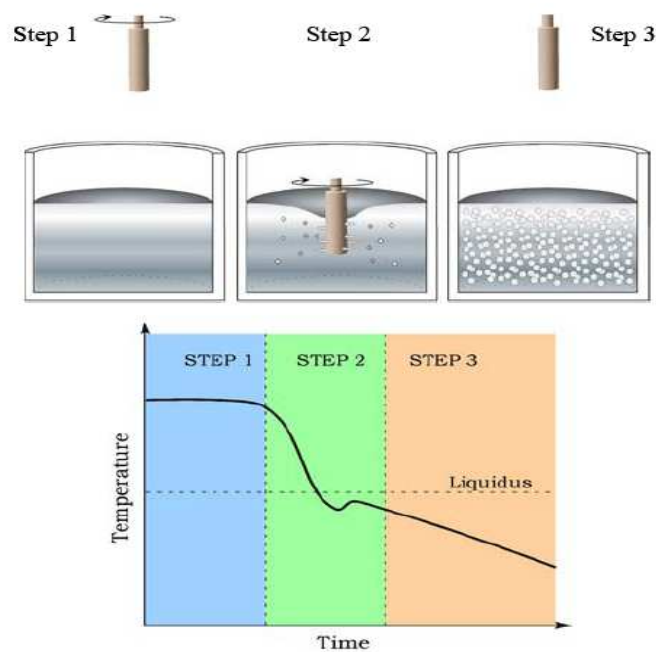
2.2.3 กระบวนการผลิตโลหะกึ่งของแข็งด้วยการหล่อแบบรีโอคาสติ้ง (Rheocasting)

เทคโนโลยีการหล่อโลหะกึ่งของแข็ง (SSM) ได้มีการพัฒนาและการประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมผลิตชิ้นส่วนยานยนต์ แต่ก็ยังไม่มีการใช้อย่างแพร่หลายทำให้ข้อได้เปรียบและประโยชน์ของการหล่อโลหะกึ่งของแข็งไม่ได้นำมาใช้อย่างเต็มที่ การพัฒนากระบวนการผลิตแบบ Rheocasting เป็นการลดต้นทุนในการผลิตโลหะกึ่งของแข็ง และเพื่อให้เทคโนโลยีการหล่อโลหะกึ่งของแข็ง ได้มีการใช้อย่างแพร่หลายในการหล่อ Die casting ทำให้สามารถลดต้นทุนในการผลิตได้นอกจากการเพิ่มคุณภาพและสมบัติเชิงกลของชิ้นงานหล่อ โดยการลดต้นทุนการผลิตได้มาจากปัจจัยต่างๆ เช่นการลดเวลาในการผลิตต่อชิ้น (Cycle time) การลดของเสีย (Reject) การเพิ่มอายุการใช้งานของแม่พิมพ์และการลดต้นทุนในการอบชุบ เป็นต้น

ในปัจจุบันมีหลากหลายกระบวนการที่สามารถทำให้โครงสร้างสุดท้ายมีลักษณะเป็นโครงสร้างแบบไม่เป็นกิ่งไม้ เช่น กรรมวิธีการกวนทางกล (Mechanical stirring) การกวนด้วยแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic stirring) การสั่นด้วยอัลตราโซนิค (Ultrasonic vibrations) ซึ่งกรรมวิธีดังกล่าวล้วนต้องอาศัยตัวกลางเพื่อให้เกิดการไหลวน (Agitation) ทั้งสิ้นโดยในกรรมวิธีการกวนทางกลจะใช้ใบพัดหรือแท่งทรงกระบอกเพื่อให้เกิดการไหลวน กรรมวิธีการกวนด้วยแม่เหล็ก ไฟฟ้าอาศัยแรงทางไฟฟ้าเป็นตัวพาให้เกิดการไหลวนของของเหลว ส่วนการสั่นก็เป็นวิธีการทำให้เกิดการไหลวนด้วยเช่นกันแต่กระบวนการดังที่กล่าวมาข้างต้นก็มีข้อเสียหลายประการ

เช่น ราคาที่สูงและการเกิดไมโครเซกกริเกรชันเนื่องจากการกวนที่สัดส่วนของแข็งสูงๆ หากมองย้อนไปดูหลักการเกิดโครงสร้างแบบไม่เป็นกึ่งไม้ เป็นที่ชัดเจนว่าหากต้องการให้เกิดการแตกตัวของกิ่งเดนไดรต์จะต้องทำให้เกิดการไหลวนในช่วงก่อนที่จะมีการแข็งตัวเท่านั้น ซึ่งเป็นช่วงที่กิ่งของเดนไดรต์มีขนาดเล็กมากและอยู่ในสถานะที่ไม่เสถียรเนื่องจากอัตราส่วนระหว่างพื้นที่ผิวต่อปริมาตรมีค่าสูง

ด้วยหลักการดังกล่าวทำให้เมื่อไม่นานมานี้ Martinez และ Flemings ได้แสดงให้เห็นว่าหากจุ่มและหมุนแท่งโลหะเย็นลงไปในน้ำโลหะที่อุณหภูมิเหนือจุดหลอมเหลว โดยใช้เวลาในการหมุนแท่งโลหะเพียงเล็กน้อยจนเริ่มมีสัดส่วนของแข็งเกิดขึ้นเพียงเล็กน้อย จึงยกแท่งโลหะขึ้นดังแสดงในรูปที่ 2.4 จะพบว่าโครงสร้างของโลหะภายหลังการเย็นตัวจะมีลักษณะเป็นแบบก้อนกลม โดยพวกเขาเรียกกระบวนการผลิตนี้ว่า Semi-Solid Rheocasting (SSR)

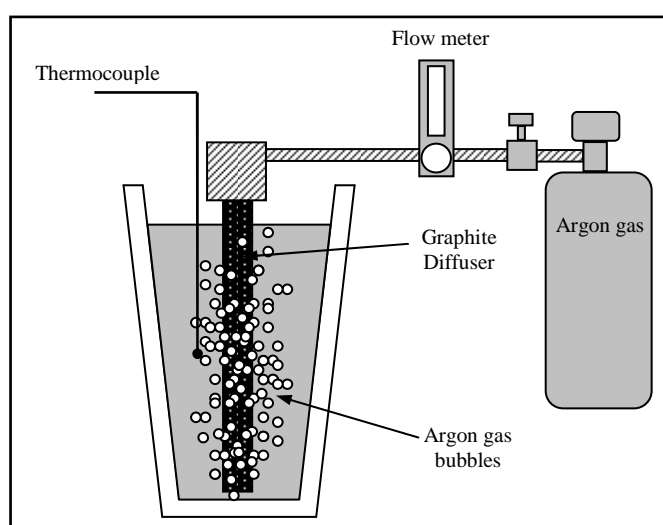


รูปที่ 2.4 แสดงขั้นตอนการผลิตโลหะกึ่งของแข็งด้วยกรรมวิธี Semi-solid rheocasting (SSR) Martinez *et al.* (2004)

ซึ่งต่อมา Martinez (2004) ได้แสดงให้เห็นในวิทยานิพนธ์ปริญญาเอกของเขาว่าการสร้างโลหะกึ่งของแข็งสามารถทำได้อย่างมีประสิทธิภาพจากการกวนน้ำโลหะเฉพาะจุดและเกิดจากการระบายความร้อนจากน้ำโลหะเฉพาะจุดอย่างรวดเร็ว (Rapid localized heat extraction)

แม้ว่ากระบวนการผลิตโลหะกึ่งของแข็งด้วยกรรมวิธีดังกล่าวจะสามารถผลิตได้อย่างมีประสิทธิภาพ แต่ก็ประสบปัญหาหลายประการในขั้นตอนของการผลิต เช่น การต่อระบบให้ความเย็นด้วยน้ำและระบบเซ็นเซอร์เข้ากับแท่งที่หมุนซึ่งเป็นวิธีที่สลับซับซ้อนและยากต่อการติดตั้ง นอกจากนี้ระหว่างที่วัตถุหมุนจะทำให้เกิดการไหลวนของน้ำโลหะ ซึ่งอาจเป็นไปได้ที่จะทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันขึ้นได้ในขั้นตอนนี้

2.2.4 การผลิตโลหะกึ่งของแข็งด้วยกรรมวิธีปล่อยฟองแก๊สระหว่างการแข็งตัว (GISS)



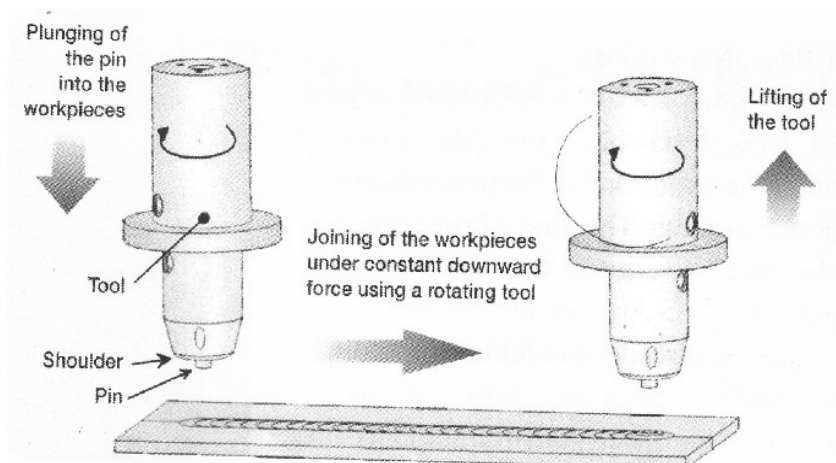
รูปที่ 2.5 แสดงภาพอุปกรณ์ที่ใช้ในการผลิตโลหะกึ่งของแข็งด้วยกรรมวิธีการปล่อยฟองแก๊สระหว่างการแข็งตัว เจษฎา วรรณสินธุ์ (2006)

กระบวนการหล่อโลหะกึ่งของแข็งด้วยเทคนิค GISS (Gas induced semi-solid) โดย เจษฎา วรรณสินธุ์ (2006) เป็นกระบวนการสร้างโลหะกึ่งของแข็งด้วยกรรมวิธีการพ่นฟองแก๊สเหนือผ่านแท่งกราฟไฟต์พูน (แก๊สอาร์กอน) ซึ่งเป็นกรรมวิธีแบบใหม่สำหรับการผลิตโลหะกึ่งของแข็งที่มีหลักการคล้ายกับวิธีการหล่อแบบ Rheocasting ที่ให้โครงสร้างเกรนแบบก้อนกลม (Spheroidal grain) คุณสมบัติของโลหะกึ่งของแข็งมีหลายประการเช่น มีอุณหภูมิที่ต่ำกว่าโลหะเหลว โลหะเริ่มแข็งตัวบางส่วนแล้วขณะที่ใส่แม่พิมพ์มีความหนืดที่สูงกว่าน้ำโลหะ มีความเย็นขณะไหลต่ำกว่าโลหะที่แข็งตัวแล้ว เป็นต้น ซึ่งคุณสมบัติดังกล่าวมีข้อดีหลายประการที่สามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้อย่างหลากหลายในกระบวนการผลิต เช่น ลดการเกิดของเสียจากปฏิกิริยา

ระหว่างออกซิเจนในขั้นตอนการหล่อโลหะลงในเบ้าและลดการเกิดโพรงหดตัว (Shrinkage) อีกทั้งยังช่วยยืดอายุการใช้งานของแม่พิมพ์ ดังแสดงในรูปที่ 2.5

2.3 ทฤษฎีกระบวนการเชื่อมเสียดทานแบบกวน

การเชื่อมเสียดทานแบบกวนเป็นการเชื่อมโลหะในสภาวะของแข็ง โดยที่โลหะจะยึดติดกันที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิหลอมเหลวของโลหะนั้น โดยที่โลหะยังอยู่ในสภาวะเป็นของแข็ง โลหะบางประเภทจะต้องมีการหลีกเลี่ยงการเชื่อมต่อที่อุณหภูมิของการหลอมละลาย เนื่องจากที่อุณหภูมิหลอมละลายเมื่อโลหะแข็งตัว จะเกิดโครงสร้างขึ้นมาใหม่ซึ่งจะแตกต่างจากโครงสร้างเริ่มต้นของโลหะนั้น จากเหตุผลข้างต้นจึงได้มีการคิดค้นการเชื่อมเสียดทานแบบกวนที่สถาบันการเชื่อมของอังกฤษ (The welding institute) การเชื่อมเสียดทานแบบกวนจัดเป็นการเชื่อมในสภาวะของแข็งซึ่งโลหะจะเชื่อมติดกันโดยความร้อนจากแรงเสียดทาน โดยที่ป้าสัมผัสแผ่นงานและหมุนด้วยความเร็วรอบตามที่กำหนดพร้อมกับความเร็วในการเชื่อม และแรงกดในขณะที่ยึด การเชื่อมเสียดทานแบบกวนจะมีตัวแปรหลักที่เกี่ยวข้องในการเชื่อมดังนี้ คือ ความเร็วรอบในการหมุนของหัวพิน (rpm) อัตราความเร็วในการเดินแนวเชื่อม (Welding speed) แรงกด (Down force) มุมเอียงของหัวเชื่อม (Tilt angle) และนอกจากนี้ยังมีตัวแปรอื่นๆ เช่น ขนาดและรูปแบบของหัวพิน ดังรูปที่ 2.6



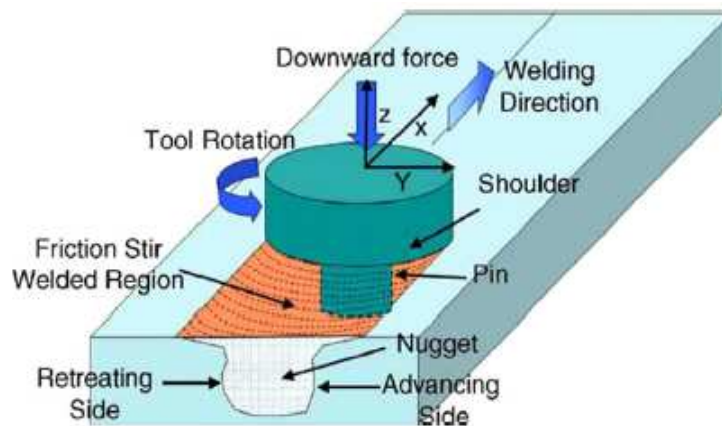
รูปที่ 2.6 หลักการเชื่อมเสียดทานแบบกวน (FSW) M.F.Zah *et al.* (2004)

การเชื่อมเสียดทานแบบกวนในอะลูมิเนียมผสมมีข้อดีหลายประการเมื่อเทียบกับการเชื่อมแบบหลอมละลาย เช่น สามารถลดและหลีกเลี่ยงการแตกในระหว่างแข็งตัวของเหลวไป

เป็นของแข็งในรอยเชื่อมและลดปัญหาการเกิดโพรงอากาศ (Porosity) โดยเฉพาะกับอะลูมิเนียมผสมที่หล่อโดยวิธีไดคาสติ้ง เนื่องจากการเชื่อมเสียดทานแบบกวนเป็นการเชื่อมในสถานะของแข็ง นอกจากนี้โลหะบางประเภทจะไม่สามารถเชื่อมด้วยกรรมวิธีการเชื่อมแบบหลอมละลายได้ ดังนั้นการเชื่อมเสียดทานแบบกวนจึงเหมาะสมเป็นอย่างมาก โดยทั่วไปชิ้นงานที่ผ่านการเชื่อมเสียดทานแบบกวนจะมีความเค้นตกค้าง (Residual stress) และการบิดงอ (Distortion) น้อยกว่าการเชื่อมแบบหลอมละลาย ความเค้นตกค้างที่น้อยกว่าเป็นผลมาจากความร้อนเข้าจากการเสียดทานแบบกวนมีค่าน้อยกว่าการเชื่อมแบบหลอมละลาย การเชื่อมเสียดทานแบบกวนได้ถูกประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมสำหรับอะลูมิเนียมผสมในกลุ่ม 1xxx 2xxx 5xxx 6xxx และ 7xxx รวมถึงอะลูมิเนียมผสม Al-Si-Li

2.3.1 องค์ประกอบในการเชื่อมด้วยการเสียดทานแบบกวน

องค์ประกอบและปัจจัยที่ทำให้รอยเชื่อมเสียดทานแบบกวนสามารถเชื่อมต่อกันได้จากการศึกษาโดย M.L. Santella *et al.* (2005) ได้กล่าวว่าจะประกอบไปด้วยความเร็วในการหมุนของ Tool และความเร็วในการเดินแนวเชื่อม ลักษณะของหัวพินก็เป็นปัจจัยที่ทำให้เกิดอุณหภูมิและส่งผลไปยังแรงกด แรงในแนวแกน F_x และ F_y แรงกดใน F_z ในการเชื่อมแบบต่อเนื่องแรงกดใน F_z ลดลงภายใต้กระบวนการเชื่อมที่ถูกควบคุมในทิศทาง การเชื่อมและจุดรวมของแรงทั้งสามแกน ดังรูปที่ 2.7 เป็นกระบวนการเชื่อมเสียดทานแบบกวนขณะทำการเชื่อมจะมีแรงกระทำในแนวแกนทั้งสามแกนที่มีมุมเอียงของ Tool กระทำกับชิ้นงานเมื่อหัวพินและบ่าของ Tool สัมผัสกับผิวหน้าชิ้นงานจะเกิดความร้อนซึ่งความร้อนที่เกิดขึ้นจะขึ้นอยู่กับลักษณะของหัวพิน ความเร็วในการหมุนของ Tool และความเร็วในการเดินแนวเชื่อม ทำให้เกิดการไหลวนของเนื้อวัสดุสองชิ้นเกิดการประสานกัน หลังจากการเชื่อมรอยเชื่อมจะประกอบไปด้วยบริเวณที่ถูกกวนและบริเวณที่ได้รับอิทธิพลจากความร้อนทางกลด้าน Advancing และ Retreating ด้าน Advancing คือด้านที่ทิศทาง การหมุนของ Tool มีทิศทางเดียวกับทิศทาง การเดินแนวเชื่อมและด้าน Retreating เป็นด้านที่ทิศทาง การหมุนของ Tool มีทิศทางสวนทางกับทิศทาง การเดินแนวเชื่อม



รูปที่ 2.7 การเชื่อมเสียดทานแบบกวน (FSW)

2.3.2 ความร้อนจากการเสียดทานแบบกวน

ความร้อนจากการเสียดทานทางกลและข้อบกพร่องในการเชื่อมเสียดทานแบบกวน จากความสัมพันธ์ของความเร็วในการหมุนของ Tool ความเร็วในการเดินแนวเชื่อมและแรงกด ก่อให้เกิดความร้อนและข้อบกพร่องในงานเชื่อม Y.G. Kim and H. Fujii (2006) กล่าวว่าผลจากความร้อนที่มากหรือน้อยเกินไป และจากความผิดปกติของการกวนที่ความเร็วในการหมุนของ Tool และความเร็วในการเดินแนวเชื่อมสูง เป็นสาเหตุทำให้เกิดความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิบริเวณผิวด้านบนและส่วนที่ถูกกวน เพราะผลของข้อบกพร่องทำให้เกิดช่องว่างในรอยเชื่อม อย่างไรก็ตาม ข้อบกพร่องที่เกิดขึ้นมีความแตกต่างกันอย่างชัดเจนระหว่างความร้อนที่ไม่เพียงพอและความผิดปกติในการกวน ดังนั้นความแตกต่างของข้อบกพร่องขึ้นอยู่กับสถานะของการเสียดทาน ครีปที่เกิดขึ้นมากในบริเวณด้านข้างรอยเชื่อมเกิดจากความร้อนที่มากเกินไป ช่องว่างที่เกิดขึ้นในรอยเชื่อมเกิดจากความร้อนที่ไม่สมดุล จากการกวนที่ผิดปกติข้อบกพร่องเพียงเล็กน้อย แรงกดของเครื่องมือสามารถทำให้ช่องว่างลดลงโดยการเพิ่มแรงกด

สมการความร้อนที่เกิดขึ้นกับกระบวนการเชื่อมเสียดทานแบบกวนดังนี้

$$Q = \frac{4}{3} \pi^2 \frac{\mu PNR^2}{V} \dots \dots \dots (2.1)$$

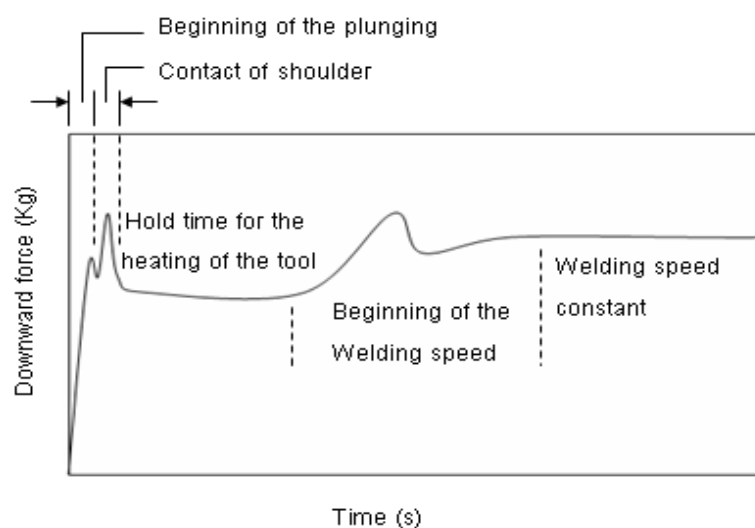
Q คือ ปริมาณความร้อนที่เกิดขึ้นในชิ้นงาน

μ คือ สัมประสิทธิ์ของการเสียดทานทางกล

- P คือ แรงกดเริ่มต้น
 N คือ ความเร็วรอบ (ความเร็วในการหมุนของหัวพิน)
 R คือ รัศมีของบ่า (ความโต)
 V คือ ความเร็วในการเดินแนวเชื่อม

ถ้าปริมาณความร้อนต่อหน่วยความยาว ปริมาณความร้อนคือการคาดว่าเกิดจากการเคลื่อนที่ของการเดินแนวเชื่อมใช้สมการที่ (2.1)

2.3.3 แรงกดของเครื่องมือ



รูปที่ 2.8 ค่าแรงกดที่เกิดจากการเชื่อมเสียดทานแบบกวนในแต่ละช่วงขณะทำการเชื่อม

Dr.-Ing.Munich *et al.* (2006)

แรงกดที่เกิดขึ้นขณะทำการเชื่อมสามารถวัดค่าได้ด้วยการใช้เครื่องมือวัด Load cell เพื่อให้ทราบพฤติกรรมของแรงกดที่เกิดขึ้นในกระบวนการเชื่อมเสียดทานแบบกวน Dr.-Ing. Munich *et al.* (2006) กล่าวว่า มีแรงเพิ่มขึ้นสามช่วงขณะทำการเชื่อม ช่วงแรกเป็นการเพิ่มแรงกดในช่วงเริ่มต้นของการเชื่อมจนบ่าสัมผัสกับผิวหน้าชิ้นงาน ช่วงที่สองเป็นการเพิ่มแรงกดขณะทำการเชื่อมก่อนเดินแนวเชื่อม ช่วงที่สามแรงกดจากความเร็วในการเดินแนวเชื่อม เป็นแรงกดที่เกิดขึ้นนอกเหนือการควบคุม ดังรูปที่ 2.8

2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.4.1 โลหะที่ได้จากการหล่อแบบกึ่งของแข็ง

การหล่อโลหะแบบกึ่งของแข็งถูกคิดค้นที่ Massachusetts institute of technology (MIT) เมื่อประมาณ 30 ปีที่แล้ว การหล่อโลหะกึ่งของแข็งคือการขึ้นรูปโลหะโดยการหล่อในที่ โลหะมีการแข็งตัวเป็นบางส่วน โดยโลหะส่วนที่แข็งตัวแล้วมีโครงสร้างเกรนแบบก้อนกลม (Spheroidal หรือ Globular grain)

เจษฎา วรรณสินธุ์ (2006) และคณะได้ทำการศึกษาการหล่อโลหะกึ่งของแข็งแบบ Semi-Solid gravity casting ซึ่งเทคโนโลยีการหล่อโลหะกึ่งของแข็งกำลังเป็นที่สนใจของนักวิจัยเพื่อการประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมการผลิตชิ้นส่วนยานยนต์ที่มีการใช้อย่างแพร่หลาย ประโยชน์ของการหล่อ โลหะกึ่งของแข็งได้มีการพัฒนากระบวนการผลิตแบบ Rheocasting หลายวิธีเพื่อเป็นการลดต้นทุนทางด้านต่างๆ อีกทั้งเทคโนโลยีการหล่อโลหะกึ่งของแข็งได้มีการใช้อย่างแพร่หลายในการหล่อ Die casting เพื่อเพิ่มคุณภาพและสมบัติทางกลของชิ้นงานหล่อ เป็นการลดเวลาในการผลิตต่อชิ้น (Cycle time) ลดของเสีย (Reject) เพิ่มอายุการใช้งานของแม่พิมพ์และการลดต้นทุนในการอบชุบ เป็นต้น การปรับเปลี่ยนกระบวนการของเครื่องจักร และการออกแบบแม่พิมพ์อย่างถูกต้อง นอกจากนี้การพัฒนาระบบวิธีการหล่อแบบ Rheocasting มีราคาสูงและใช้กับเครื่อง Die casting ทั่วไปได้

2.4.2 กระบวนการเชื่อมและโลหะวิทยาการเชื่อมอะลูมิเนียมที่ได้จากการหล่อแบบกึ่งของแข็ง

M.F.Zah and D. Eireiner (2004) ได้ทำการศึกษาการเชื่อมโลหะในสถานะของแข็ง (Solid state welding) ซึ่งเป็นกระบวนการเชื่อมที่ยึดโลหะเข้าด้วยกันที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิหลอมเหลวของโลหะนั้น โดยที่โลหะยังอยู่ในสถานะของแข็งหรือบางส่วนอาจจะหลอมเหลวเพียงเล็กน้อย โลหะบางประเภทจะต้องหลีกเลี่ยงการเชื่อมที่อุณหภูมิของการหลอมละลายเพราะว่าที่อุณหภูมินี้ขณะที่โลหะแข็งตัวจะเกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างขึ้นใหม่ ซึ่งอาจจะไม่เหมือนกับโครงสร้างเริ่มต้นของโลหะนั้น จากเหตุผลข้างต้นจึงได้มีการคิดค้นกระบวนการเชื่อมเสียดทานแบบกวน (Friction stir welding) โดยสถาบันการเชื่อมของอังกฤษ (The welding institute) การเชื่อมเสียดทานแบบกวนจัดเป็นการเชื่อมในสถานะของแข็งซึ่งโลหะจะเชื่อมติดกันโดยความร้อนจากแรงเสียดทานจากหัวพินที่หมุนตลอดเวลาพร้อมกับเคลื่อนที่ไปข้างหน้า โดยมีแรงกดขณะเดินแนวเชื่อมด้วย โดยมีตัวแปรหลักที่เกี่ยวข้องในการเชื่อมดังนี้ คือ ความเร็วรอบในการหมุนของ

หัวพิน (rpm) อัตราความเร็วในการเดินแนวเชื่อม (Welding speed) แรงกด (Down force) มุมเอียงของหัวเชื่อม (Tilt angle) และนอกจากนี้ยังมีตัวแปรอื่นๆ เช่น ขนาดและรูปแบบของหัวพิน

T.J Linert *et al.* (2005) ได้ทำการศึกษาการเชื่อมเสียดทานแบบกวน ซึ่งมีบทบาทเป็นอย่างมากในช่วง 10 ปีที่ผ่านมาโดยเฉพาะการเชื่อมอะลูมิเนียมและอะลูมิเนียมผสม การเชื่อมอะลูมิเนียมผสมมีข้อดีหลายอย่างเมื่อเทียบกับการเชื่อมแบบหลอมละลาย (Fusion welding) เช่น สามารถหลีกเลี่ยงการแตกในระหว่างการแข็งตัวและลดปัญหาเกี่ยวกับการเกิดโพรงอากาศ (Porosity) โดยเฉพาะกับการเชื่อมอะลูมิเนียมผสมที่หล่อโดยวิธีไดคาสต์ซึ่งเพราะว่าการเชื่อมเสียดทานแบบกวนเป็นการเชื่อมในสถานะของแข็ง จะไม่เกิดการหลอมละลายทำให้โครงสร้างเกิดการเปลี่ยนเฟสจากเฟสหนึ่งไปเป็นอีกเฟสหนึ่ง ดังนั้นการเชื่อมแบบนี้จึงเหมาะสมเป็นอย่างมากที่จะนำมาใช้สำหรับเชื่อมอะลูมิเนียม โดยทั่วไปชิ้นงานที่ผ่านการเชื่อมเสียดทานแบบกวนจะมีความเค้นตกค้าง (Residual stress) และการบิดงอ (Distortion) น้อยกว่าการเชื่อมแบบหลอมละลาย ความเค้นตกค้างที่น้อยกว่าเป็นผลมาจากความร้อนที่สูงในขณะเชื่อม (Heat input) การเชื่อมเสียดทานแบบกวนได้ถูกประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมสำหรับอะลูมิเนียมผสมในกลุ่ม 1xxx, 2xxx, 5xxx, 6xxx และ 7xxx อีกทั้งรวมถึงการเชื่อมอะลูมิเนียมผสม Al-Si-Li

R. Akhter, L. Ivanchev and H.P. Burger (2006) ได้ทำการศึกษาสมบัติทางโลหะวิทยาและสมบัติทางกลของการเชื่อมอะลูมิเนียมผสมที่ได้จากการหล่อกึ่งของแข็งเกรด A356 (Semi-solid aluminum alloy) โดยกรรมวิธีการเชื่อมแบบนีโอดีเมียมแฉีกเลเซอร์ (Nd: YAG laser welding) จากการศึกษาพบว่า การเชื่อมแบบเลเซอร์ทำให้บริเวณรอยเชื่อมแคบลง อันเนื่องมาจากความร้อนจากลำของเลเซอร์ที่เล็กและสูงจากการเชื่อมขณะการเย็นตัวทำให้รอยเชื่อมหดตัวไปด้วย อย่างไรก็ตาม โครงสร้างทางจุลภาคในบริเวณที่มีการหลอมละลายและบริเวณที่มีผลกระทบอันเนื่องมาจากความร้อนจะมีโครงสร้างที่แตกต่างไปจากเนื้อโลหะเดิม (Base metal) บริเวณที่มีการหลอมละลาย โครงสร้างจะเป็นแบบเดนไดรต์ละเอียดเล็กๆ (Fine dendrite structure) กระจายตัวในรอยเชื่อม อันเนื่องมาจากความร้อนที่ในรอยเชื่อมมากกว่าจุดหลอมเหลว ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจากก่อนกลมเป็นโครงสร้างแบบเดนไดรต์ นอกจากนี้ค่าความแข็งของบริเวณรอยเชื่อมจะมีค่าสูงมากกว่าบริเวณเนื้อโลหะเดิมมาก ทำให้เปราะและเกิดการแตกบริเวณรอยเชื่อม

ประภาส เมืองจันทร์บุรี (2007) ได้กล่าวถึงผลของการวิจัยในการเชื่อมอะลูมิเนียมผสม A356 ที่ได้จากการหล่อกึ่งของแข็งด้วยกรรมวิธีการเชื่อมแบบทิก (TIG) จากการศึกษาพบว่า โครงสร้างบริเวณบ่อหลอมจะเกิดเป็นโครงสร้างแบบกิ่งไม้ (Dendritic structure) ในขณะที่โครงสร้างบริเวณที่มีผลกระทบอันเนื่องมาจากความร้อน (HAZ) ประกอบไปด้วยโครงสร้างแบบ

กิ่งไม้ (Dendritic structure) ผสมกับโครงสร้างแบบก้อนกลม (Equiaxed structure) ซึ่งเป็นโครงสร้างเดิมของอะลูมิเนียมที่ได้จากการหล่อกิ่งของแข็ง ทั้งนี้เพราะว่าบริเวณที่มีผลกระทบบันเนื่องมาจากความร้อนจะไม่มีการหลอมละลายของเนื้อโลหะ

W.B. Lee, Y.M. Yeon and S.B Jung (2003) ได้ทำการศึกษาการปรับปรุงสมบัติทางกลของการเชื่อมอะลูมิเนียมผสม A356 ด้วยการเชื่อมเสียดทานแบบกวน โดยใช้หัวพินแบบเกลียววนรอบกำหนดให้ความเร็วในการหมุนของ Tool คงที่ 1,600 rpm และความเร็วในการเดินแนวเชื่อมที่ 87 ถึง 342 mm/min จากการศึกษาพบว่าโครงสร้างจากกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงในบริเวณเนื้อโลหะเดิมประกอบไปด้วยเฟสแอลฟา (Al) กับเฟส Eutectic ประกอบไปด้วย Al+Si โครงสร้างของโลหะบริเวณที่ถูกกวน (SZ) จะมีลักษณะอนุภาคซิลิกอนเล็กๆ กระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ อันเนื่องมาจากการกวนของหัวพินซึ่งเป็นจุดเริ่มต้นสำคัญที่ทำให้โครงสร้างผิดรูปไปจากเดิม ด้วยอนุภาคซิลิกอนกระจายเป็นเส้นยาวตามลักษณะทิศทางการกวนของหัวพิน และโครงสร้างจากกล้อง SEM ในบริเวณเนื้อโลหะเดิมอนุภาคซิลิกอนมีรูปร่างเป็นแท่งยาว กระจายตัวในเฟสแอลฟา (Al) และเฟส Eutectic แต่ในบริเวณที่ถูกกวนจะมีอนุภาคซิลิกอนเล็กๆ กระจายตัวอย่างสม่ำเสมออันเนื่องมาจากการแตกหักของอนุภาคซิลิกอนที่เป็นแท่งในเนื้อโลหะเดิม และที่สำคัญการเปรียบเทียบความแข็งแรงบริเวณเนื้อโลหะเดิมและบริเวณรอยเชื่อม โดยการเปรียบเทียบแล้วสูงกว่าบริเวณเนื้อโลหะเดิม และที่สำคัญอนุภาคซิลิกอนที่เกิดจากปฏิกิริยา Eutectic ในบริเวณที่นอกเหนือจากบริเวณที่ถูกกวน (SZ) ความเค้นแรงดึงของโลหะบริเวณที่ถูกกวนสูงขึ้นและได้พิสูจน์ให้เห็นค่าที่มากกว่า 178 MPa เกือบ 120% ของโลหะเดิมเพราะฉะนั้นการเชื่อมอะลูมิเนียม A356 ด้วยการเชื่อมเสียดทานแบบกวนมีข้อดีในการประยุกต์กับการเชื่อมอะลูมิเนียมหล่อผสม

Y.G. Kim and H. Fujii (2006) ได้ทำการศึกษาวิจัยการเชื่อมอะลูมิเนียมผสม ADC12 ซึ่งหล่อด้วยกรรมวิธีไดคาสติงโดยใช้การเชื่อมเสียดทานแบบกวน (FSW) จากการศึกษาพบว่าจากการตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง ในบริเวณเนื้อโลหะเดิมประกอบไปด้วยโครงสร้างแบบเดนไดรต์ (เฟสแอลฟา) และเฟส Eutectic (Al+Si) บริเวณที่ได้รับอิทธิพลจากความร้อนทางกลประกอบไปด้วยโครงสร้างที่บิดเบี้ยวผิดรูปไปจากเดิมของโครงสร้างเดนไดรต์ และ Eutectic ซึ่งเป็นอิทธิพลมาจากความร้อนทางกล และบริเวณรอยเชื่อมจะมีผลึกใหม่เกิดขึ้น (Recrystallized) โดยจะไม่มีโครงสร้างหล่อ (Cast structure) อยู่ด้วยโครงสร้างประกอบไปด้วยอนุภาคซิลิกอนเล็กๆ กระจายตัวอย่างสม่ำเสมอในอะลูมิเนียมเมทริกซ์ อันเนื่องมาจากอิทธิพลจากความร้อนทางกล จากการตรวจสอบด้วยกล้อง SEM พบว่าขนาดอนุภาคซิลิกอน บริเวณด้านล่างรอยเชื่อมมีขนาดเล็กกว่าด้านบนและตรงกลางรอยเชื่อม อันเนื่องมาจากด้านล่างรอยเชื่อมมี

อุณหภูมิจากการเสียดทานของหัวพินมากกว่าด้านบนและตรงกลางรอยเชื่อม นอกจากนี้ค่าความแข็งแรงดึงของอะลูมิเนียมที่เชื่อมโดยการเชื่อมเสียดทานแบบกวนมีค่ามากกว่าการเชื่อมแบบหลอมละลายทั่วไป ในรายงานยังได้กล่าวถึงผลของตัวแปรในการเชื่อมเสียดทานแบบกวนต่อโครงสร้างทางจุลภาคของอะลูมิเนียม ADC12 ซึ่งเป็นตัวแปรที่ใช้ในการเชื่อม ได้แก่ แรงกด (Downforce) ความเร็วในการหมุนของ Tools (rpm) ความเร็วในการเดินแนวเชื่อม (Welding speed) และมุมเอียงของ Tools (Tilt angle) ได้ข้อสรุปว่าตัวแปรในการเชื่อมเสียดทานแบบกวนส่งผลให้โครงสร้างทางจุลภาคบริเวณรอยเชื่อม เช่น โครงสร้างเกรนและอนุภาคซิลิกอนเล็กกระจายตัวไปในบริเวณที่ถูกกวนรวมถึงค่าความแข็งแรงและความแข็งแรงดึงมากกว่าบริเวณโลหะเดิม

C.G. Kang, J.W. Bae and B.M. Kim (2007) ได้ทำการศึกษาขนาดของเกรนอะลูมิเนียมหล่อ A356 โดยการกระตุ้นด้วยสนามแม่เหล็ก สำหรับการไหลตัวของการหล่อโลหะอะลูมิเนียม A356 การเปลี่ยน Phase ของอะลูมิเนียม A356 โดยการกระตุ้นด้วยสนามแม่เหล็กในแนวระนาบ จากการศึกษาพบว่า การกวนด้วยสนามแม่เหล็กสมบัติที่ดีช่วงที่มีความหนืด โครงสร้างเป็นก้อนกลม อนุภาคเริ่มแข็งตัวจะมีการกระจายของเกรนบนคาร์บอนโดยการหลอมบางส่วนที่เริ่มแข็งตัวจะถูกกระตุ้นด้วยการกวน โครงสร้างของเดนไดรต์เกิดการแตกตัวโดยการกวน ดังนั้นกลไกในช่วงเริ่มต้นของการแข็งตัวของเกรนบนคาร์บอน ปัจจัยการกวนในช่วงที่ยังหลอมคือกระแสไฟฟ้า เวลาในการกวน อุณหภูมิเหนี่ยวนำโลหะ Holding time กระแสที่ใช้ในการกวนและเวลาในการกวน Phase ของอะลูมิเนียมที่ละเอียด อย่างไรก็ตามกระแสไฟฟ้าและเวลาที่สูงเกินไปไม่เกิดผลดี สภาพที่ดีในการกวนด้วยสนามแม่เหล็กตามแนวนอน (Horizontal) จากการศึกษาเกี่ยวกับการไหลตัวกับการควบคุมการแข็งตัวของโครงสร้างเป็นแบบก้อนกลม

Z.Y. Ma and S.R. Sharma (2006) ได้ทำการศึกษาโครงสร้างจากการเชื่อมเสียดทานแบบกวนในอะลูมิเนียมหล่อ A356 ที่ผ่านการหล่อในสถานะปกติ โดยจะเปลี่ยนแปลงความเร็วในการหมุนของ Tool และความเร็วในการเดินแนวเชื่อม จากการตรวจสอบโครงสร้างมหภาคพบว่าที่ความเร็วในการหมุนของหัวพินต่ำจะมีลักษณะรอยเชื่อมกว้างและที่ความเร็วในการหมุนของหัวพินสูงจะมีลักษณะคล้ายกับวงรี จากการตรวจสอบไม่พบความบกพร่องในรอยเชื่อม โครงสร้างจากกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงพบว่าโครงสร้างบริเวณเนื้อโลหะเดิมประกอบด้วยเฟสแอลฟา (Al) หรือเดนไดรต์ และเฟส Eutectic (Al+Si) บริเวณรอยเชื่อมมีความหนาแน่นสูงมาก ประกอบไปด้วยโครงสร้างที่ละเอียดและอนุภาคซิลิกอนประมาณ 0.25-0.42 ไมครอน กระจายตัวในอะลูมิเนียมเมทริกซ์ อันเนื่องมาจากเกิดจากการแตกหักของเดนไดรต์ โครงสร้างจากกล้อง SEM พบว่าที่ความเร็วในการหมุนของ Tool และความเร็วในการเดินแนวเชื่อมสูงจะมีการกระจายตัวของอนุภาคซิลิกอนเป็นแบบกลุ่มก้อนในบริเวณด้านบนและตรงกลางรอยเชื่อมแต่จะ

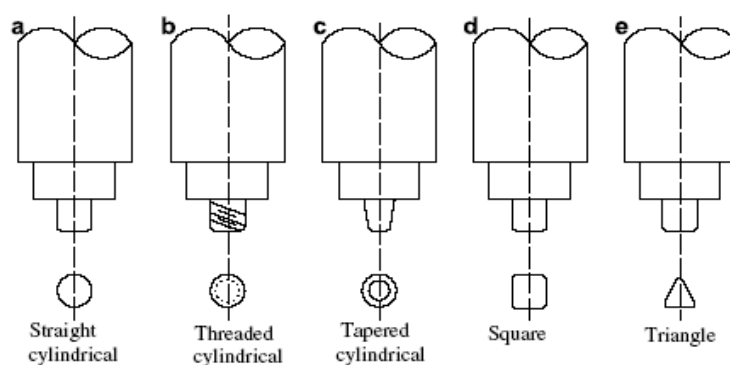
พบว่าอนุภาคซิลิกอนมีขนาดเล็กๆ อยู่ในบริเวณด้านซ้ายขวา และด้านล่าง ของรอยเชื่อม อันเนื่องมาจากบริเวณด้านซ้ายขวา และด้านล่างได้รับการเสียดทานและแรงอัดมากกว่าด้านบนและตรงกลางรอยเชื่อม จึงทำให้ที่ความเร็วในการหมุนของ Tool สูงเกิดความร้อนในการเสียดทานมากกว่าความเร็วในการหมุนของ Tool ต่ำ ส่งผลให้อนุภาคซิลิกอนมีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ และที่ความเร็วในการหมุนของ Tool ต่ำจะมีความหนาแน่นในการกระจายตัวของอนุภาคน้อยและเป็นกลุ่มก้อนในบริเวณที่ถูกกวาด อย่างไรก็ตามอนุภาคเหล่านี้จะยังไม่มียผลมากนัก แต่จะมีผลมากก็ต่อเมื่อผ่านกระบวนการทางความร้อน T6 ก่อน

อัปคูล บินระหีม (2008) ได้ทำการศึกษาการเชื่อมอะลูมิเนียมหล่อทิ้งของแข็ง (SSM) A356 ด้วยกรรมวิธีการเชื่อมเสียดทานแบบกวน (FSW) โดยการศึกษาความเร็วในการหมุนของ Tool และความเร็วในการเดินแนวเชื่อม จากการศึกษาพบว่าโครงสร้างบริเวณเนื้อโลหะเดิมเป็นโครงสร้างเกรนแบบก่อนกลบประกอบไปด้วยเฟสแอลฟา (Al) ผสมกับเฟส Eutectic (Al+Si) ส่วนบริเวณที่ถูกกวาดของความเร็วในการหมุนของ Tool สูงจะมีโครงสร้างใหม่เกิดขึ้น (Recrystallized) เกิดการแตกหักของอนุภาคซิลิกอนกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอไม่พบข้อบกพร่องในรอยเชื่อม แต่ในขณะที่เดียวกันที่ความเร็วในการหมุนของ Tool ต่ำจะเกิดช่องว่างในรอยเชื่อมอันเนื่องมาจากความร้อนในรอยเชื่อมยังไม่มากพอที่จะทำให้เนื้อวัสดุอยู่ในสภาวะพลาสติกเกิดการไหลวนรอบตัวกวาด ค่าความแข็งบริเวณรอยเชื่อมมากกว่าบริเวณเนื้อโลหะเดิม และค่าความแข็งแรงของอะลูมิเนียมที่เชื่อมมีค่ามากกว่าการเชื่อมแบบหลอมละลายทั่วไป นอกจากนี้ยังสามารถที่จะเชื่อมต่อกับโลหะอื่นๆ ได้เช่น อลูมิเนียมกับเหล็กกล้าเป็นต้น

M.L.Santella *et al.* (2005) ได้ทำการศึกษาถึงคุณสมบัติทางกลในอะลูมิเนียมหล่อผสม A319 และ A356 ที่ได้จากการหล่อแบบธรรมดา ด้วยกระบวนการเชื่อมเสียดทานแบบกวน (Friction stir process) โดยใช้หัวพินแบบทรงกระบอกไม่มีเกลียว จากการศึกษาพบว่าจะมีการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างเมื่อผ่านกระบวนการ Friction stir และโครงสร้างจุลภาคบริเวณที่ถูกกวาดจะมีความสัมพันธ์กับรูปแบบการกระจายตัวของอนุภาคซิลิกอนและยังมีความสัมพันธ์กับรูปร่างอนุภาค ซิลิกอนอีกด้วย นอกจากนี้รูพรุนที่สามารถมองเห็นได้รวมทั้งโครงสร้างแบบเดนไดรต์ก็หมดไปเช่นกัน การกระจายตัวของความแข็งในระดับจุลภาคจะมีรูปแบบเดียวกันมากขึ้น จากการทดสอบความแข็งแรงดึงพบว่าอะลูมิเนียม A319 มีค่าความแข็งแรงดึงเพิ่มขึ้นเป็นสองเท่าเมื่อเทียบกับค่าที่ได้จากเนื้อโลหะเดิมแต่ในขณะที่เดียวกันค่าจากอะลูมิเนียม A356 มีค่าเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยเมื่อเทียบกับค่าที่ได้จากเนื้อโลหะเดิม จากการวิเคราะห์น่าจะเกิดจากอิทธิพลของการหล่อหลังจากการหล่อมีโพรงอากาศน้อยที่สุด ความสามารถที่โลหะผสมทั้ง 2 ชนิดจะทนความล้าได้มีค่าเพิ่มสูงขึ้นเพียงเล็กน้อยเมื่อเทียบกับค่าจากเนื้อโลหะเดิม

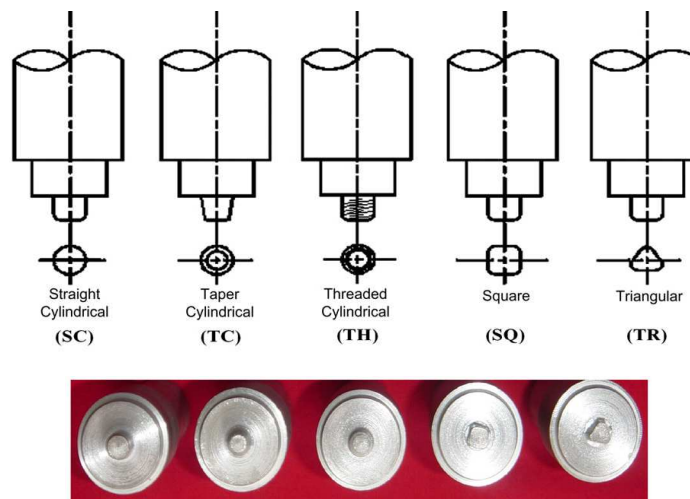
M. Amirizad and A.H. Kokabi (2005) และคณะทำการศึกษาโครงสร้างและสมบัติทางกลจากการเชื่อมเสียดทานแบบกวนในอะลูมิเนียมผสม A356+15%SiCp พบว่าบริเวณเนื้อโลหะเดิมจะมี SiC รวมกันเป็นกลุ่มก้อนกลมๆ ส่วนบริเวณที่ได้รับอิทธิพลจากความร้อนทางกลจะมีอนุภาค SiC ในลักษณะยาวและโค้งผสมกัน ในบริเวณที่ถูกกวนเป็นบริเวณที่มีความเค้นและความร้อนสูงจากการกวนของหัวพินทำให้เนื้อวัสดุอยู่ในสภาวะพลาสติก เกิดความเค้นเฉือนทำให้อนุภาค SiC เกิดการแตกตัวเล็กๆ กระจายตัวอย่างสม่ำเสมอในบริเวณที่ถูกกวน ค่าความแข็งแรงในบริเวณรอยเชื่อมมากกว่าบริเวณเนื้อโลหะเดิม อันเนื่องมาจากอนุภาค SiC เกิดการแตกหักเล็กๆ กระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ ซึ่งจากการที่อนุภาค SiC เล็กกลงนั้นและมีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอจะส่งผลให้ค่า Elongation ของการแตกหักและค่าความแข็งแรงดึงดีขึ้น โมดูลัส 57%, อีลาสติก 26%, ความแข็งแรงดึง 34% และ อีลองเคชัน 154%

K. Elangovan and V. Blasubramanian (2007) ได้ทำการศึกษาอิทธิพลรูปแบบของหัวพินและความเร็วในการเดินแนวเชื่อมด้วยการเชื่อมเสียดทานแบบกวนของอะลูมิเนียมผสม AA2219 โดยทำการศึกษาหัวพินแบบต่างๆ มี 5 ลักษณะคือ ทรงกระบอก รูปกรวย เกลียว ทรงกระบอก สามเหลี่ยมและสี่เหลี่ยม ดังรูปที่ 2.9 ได้กล่าวว่าการเชื่อมแบบหลอมละลายก่อให้เกิดข้อบกพร่อง เช่น โพรงอากาศ รอยแตกจากการแข็งตัวอย่างรวดเร็วส่งผลไปยังสมบัติทางกล จากการศึกษาพบว่าผลจากการเชื่อมเสียดทานแบบกวนในโครงสร้างมหภาคหัวพินแบบสี่เหลี่ยมไม่มีข้อบกพร่องใดๆ เกิดขึ้นในรอยเชื่อมอีกทั้งโครงสร้างทางจุลภาคบริเวณรอยเชื่อมมีขนาดเล็กกว่าหัวพินอื่นๆ ค่าความแข็งแรงของหัวพินแบบสี่เหลี่ยมมีค่ามากกว่าหัวพินอื่นๆ ด้วยเนื่องจากโครงสร้างเกรนที่ละเอียดในรอยเชื่อม อีกทั้งค่าความแข็งแรงดึงของหัวพินแบบสี่เหลี่ยมก็มีค่ามากกว่าค่าความแข็งแรงดึงจากการเชื่อมด้วยหัวพินแบบอื่นๆ อันเนื่องมาจากความสมบูรณ์ของรอยเชื่อมและโครงสร้างเกรนที่ละเอียด



รูปที่ 2.9 แสดงลักษณะของ Tool pin แบบต่างๆ

K. Elangovan and V. Blasubramanian (2008) ได้ทำการศึกษาการประมาณค่าความแข็งแรงดึงด้วยการเชื่อมเสียดทานแบบกวนของอลูมิเนียมผสม AA6061 โดยวิธีการคำนวณของหัวพินแบบต่างๆ มี 5 ลักษณะคือ ทรงกระบอก รูปกรวย เกลียวทรงกระบอก สามเหลี่ยม และสี่เหลี่ยม ดังรูปที่ 2.10 จากการศึกษาพบว่าโครงสร้างทางจุลภาคที่สมบูรณ์ส่งผลให้ค่าความแข็งแรงดึงสูง และทนต่อการกัดกร่อน ที่ความเร็วในการหมุนของ Tool ต่ำและสูงมากเกินไปจะทำให้ค่าความแข็งแรงดึงต่ำและในขณะเดียวกันที่ความเร็วในการหมุนของ Tool ปานกลางจะทำให้ค่าความแข็งแรงดึงสูงขึ้น ซึ่งเหตุที่เป็นเช่นนี้รูปร่างของหัวพินไม่ได้มีผลเลย แต่มาจากความเร็วในการหมุนของ Tool ปานกลางไม่มีข้อบกพร่องเกิดขึ้นในรอยเชื่อม



รูปที่ 2.10 แสดงลักษณะของ Tool pin แบบต่างๆ

ที่ความเร็วในการเดินแนวเชื่อมสูงความอ่อนตัวของเนื้อวัสดุจะน้อยกว่าที่ความเร็วในการเดินแนวเชื่อมต่ำเนื่องจากความร้อนสะสมมากกว่า แต่ในขณะเดียวกันที่ความเร็วในการเดินแนวเชื่อมต่ำหรือสูงเกินไปจะมีค่าความแข็งแรงดึงต่ำและที่ความเร็วในการเดินแนวเชื่อมปานกลางจะมีค่าความแข็งแรงดึงสูง อันเนื่องมาจากที่ความเร็วในการเดินแนวเชื่อมต่ำหรือสูงเกินไปจะทำให้เกิดข้อบกพร่องในรอยเชื่อม รวมไปถึงแรงที่ใช้กดขณะทำการเชื่อมต่ำและสูงมากเกินไปค่าความแข็งแรงดึงก็จะต่ำ และที่แรงกดขณะทำการเชื่อมปานกลางจะทำให้ค่าความแข็งแรงดึงสูงมาก อันเนื่องมาจากแรงกดที่สูงจะทำให้การซึมลึกในรอยเชื่อมสมบูรณ์มากขึ้น ความเร็วในการหมุนของ Tool และรูปแบบของหัวพินเป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่ทำให้เนื้อวัสดุอยู่ในสภาวะพลาสติกเกิดการไหลวนหรือเกิดการเคลื่อนที่รอบตัวกวน ซึ่งจากการศึกษาหัวพินแบบสี่เหลี่ยมและแบบสามเหลี่ยม

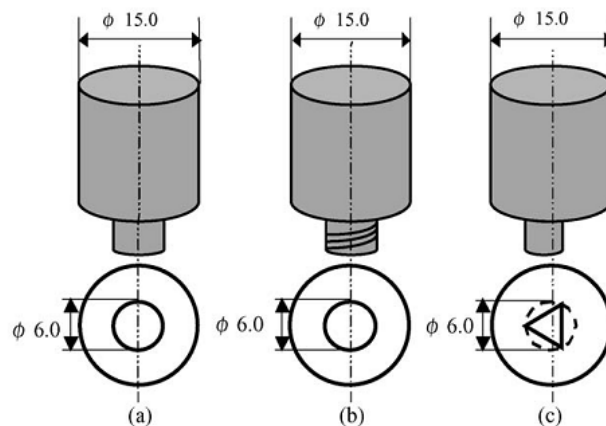
ให้ค่าความแข็งแรงดึงมากกว่าหัวพินอื่นๆ อันเนื่องมาจากหัวพินมีผลทำให้เนื้อวัสดุเกิดการเคลื่อนที่ไหลวนรอบตัวกวนมากกว่าหัวพินแบบอื่นๆ

Yan-hua and Zhao (2005) ได้ทำการศึกษาลักษณะของหัวพินที่ใช้ในการเชื่อมเสียดทานแบบกวน สี่ชนิด คือ หัวพินแบบทรงกระบอกไม่มีเกลียว หัวพินแบบทรงกระบอกมีเกลียววนรอบ หัวพินแบบเทเปอร์ไม่มีเกลียวและหัวพินแบบเทเปอร์มีเกลียววนรอบ ดังรูปที่ 2.11 ในการเชื่อมอลูมิเนียมผสม 2014 จากการศึกษาพบว่าผิวหน้ารอยเชื่อมสะอาดไม่มีความบกพร่องเกิดขึ้น จากโครงสร้างมหภาคของการเชื่อมด้วยหัวพินแบบทรงกระบอกมีเกลียวและหัวพินแบบเทเปอร์มีเกลียวไม่พบข้อบกพร่องในรอยเชื่อม แต่จะพบว่าหัวพินแบบทรงกระบอกไม่มีเกลียวและหัวพินแบบเทเปอร์ไม่มีเกลียวในรอยเชื่อมเกิดช่องว่าง อันเนื่องมาจากหัวพินทั้งสองไม่มีเกลียวทำให้การไหลวนของเนื้อวัสดุไม่สมบูรณ์ระหว่างการเชื่อม เพราะว่าเกลียวจะช่วยให้เกิดความร้อนและเนื้อวัสดุอยู่ในสภาวะพลาสติกมากกว่าแบบไม่มีเกลียว โครงสร้างทางจุลภาคแสดงให้เห็นว่ารอยเชื่อมเป็นบริเวณที่ได้รับความร้อนมากที่สุดที่ทำให้เนื้อวัสดุอยู่ในสภาวะพลาสติกจากการเชื่อมจึงทำให้โครงสร้างมีลักษณะที่ละเอียดมากกว่าบริเวณอื่นๆ โดยเฉพาะโครงสร้างที่เกิดจากการเชื่อมด้วยหัวพินแบบเทเปอร์มีเกลียวมีโครงสร้างที่ละเอียดและเล็กกว่าจากการเชื่อมด้วยหัวพินแบบอื่นๆ และจากการทดสอบค่าความแข็งแรงและค่าแรงตัด ค่าของหัวพินแบบเทเปอร์มีเกลียวจะให้ค่าที่สูงกว่าหัวพินแบบอื่นๆ อันเนื่องมาจากภายในรอยเชื่อมไม่มีข้อบกพร่องและโครงสร้างทางจุลภาคมีลักษณะที่ละเอียดมากกว่าหัวพินแบบอื่นๆ



รูปที่ 2.11 แสดงลักษณะของหัวพินที่ใช้ในการเชื่อมเสียดทานแบบกวน

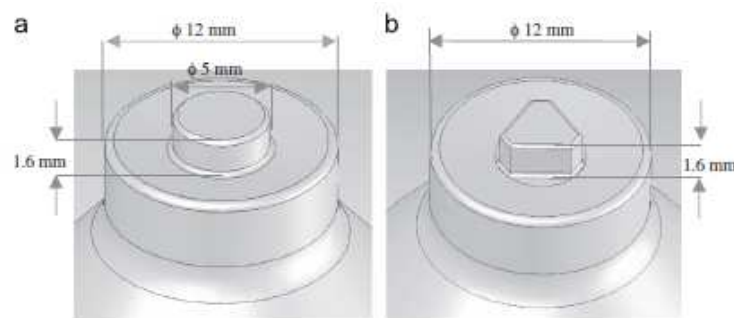
Hidetoshi Fujii *et al.* (2005) ได้ทำการศึกษาอิทธิพลรูปแบบของหัวพินที่มีผลต่อโครงสร้างทางจุลภาคและสมบัติทางกล ทำการเชื่อมโดยใช้หัวพินสามชนิด คือ หัวพินแบบทรงกระบอกไม่มีเกลียว หัวพินแบบทรงกระบอกมีเกลียวและหัวพินแบบสามเหลี่ยม ดังรูปที่ 2.12 วัสดุที่ใช้ในการเชื่อมเป็นอลูมิเนียมผสม 1050-H24, 5083-O และ 6061-T6 จากการศึกษาพบว่า ผลจากการเชื่อมในวัสดุอลูมิเนียมผสม 1050-H24 และ 6061-T6 ให้ผลเป็นไปในทิศทางเดียวกัน คือ ที่ความเร็วในการเดินแนวเชื่อมสูงค่าความแข็งแรงดึงจะสูงเช่นกัน โดยเฉพาะจากการเชื่อมด้วยหัวพินแบบทรงกระบอกไม่มีเกลียว อันเนื่องมาจากภายในรอยเชื่อมไม่มีข้อบกพร่องเกิดขึ้นเลย แต่ในขณะเดียวกันที่ความเร็วในการเดินแนวเชื่อมสูงจากการเชื่อมวัสดุอลูมิเนียมผสม 5083-O จะให้ค่าความแข็งแรงดึงสูงกว่าหัวพินแบบอื่นๆ อันเนื่องมาจากภายในรอยเชื่อมไม่มีข้อบกพร่องเกิดขึ้นเลย และจากการวัดอุณหภูมิรอยเชื่อมของวัสดุทั้งสามชนิดให้ค่าไปในทิศทางเดียวกันคือที่ความเร็วในการเดินแนวเชื่อมสูงจะมีค่าอุณหภูมิต่ำลง โดยเฉพาะจากการเชื่อมด้วยหัวพินแบบสามเหลี่ยมมีค่าอุณหภูมิต่ำกว่าหัวพินแบบอื่นๆ เพราะที่พื้นที่การสัมผัสระหว่างหัวพินกับเนื้อวัสดุในรอยเชื่อมมีน้อยกว่าหัวพินแบบอื่นๆ จึงทำให้ความร้อนจากการเสียดทานมีน้อยตามไปด้วย



รูปที่ 2.12 แสดงลักษณะของหัวพินที่ใช้ในการเชื่อมเสียดทานแบบกวน

H. Badarinarayan and Q. Yang (2008) และคณะทำการศึกษารูปแบบของหัวพินที่มีผลต่อการเชื่อมแบบจุดในอะลูมิเนียมผสม 5083 ลักษณะของหัวพินที่ใช้มีสองแบบ คือ แบบทรงกระบอกและแบบสามเหลี่ยม ดังรูปที่ 2.13 จากการศึกษาตรวจสอบโครงสร้างจากการเชื่อมแบบจุดของหัวพินแบบทรงกระบอกจะมีลักษณะหยาบกว่าโครงสร้างของหัวพินแบบสามเหลี่ยม และมีการเชื่อมต่อไม่สมบูรณ์เท่ากับหัวพินแบบสามเหลี่ยม อันเนื่องมาจากหัวพินแบบทรงกระบอกมี

เฉพาะการเชื่อมเกิดขึ้นเท่านั้น แต่หัวพินแบบสามเหลี่ยมมีการพาของเนื้อวัสดุเกิดการไหลวนดีกว่า ค่าความแข็งแสดงให้เห็นว่าบริเวณที่ถูกกวนมีความแข็งมากกว่าเนื้อโลหะเดิม และการทดสอบความแข็งแรงดึงซึ่งงานหัวพินแบบทรงกระบอกจะมีค่าความแข็งแรงน้อยกว่าหัวพินแบบสามเหลี่ยมอันเนื่องมาจากโครงสร้างที่ละเอียดกว่าและการเชื่อมต่อที่สมบูรณ์



รูปที่ 2.13 แสดงลักษณะของหัวพินในการเชื่อมเสียดทานแบบกวน

H. Lambard *et al.* (2007) ได้ทำการศึกษาปัจจัยในกระบวนการเชื่อมเสียดทานแบบกวน เพื่อลดปัญหาข้อบกพร่องและความยุ่งยากในการเชื่อมอะลูมิเนียมผสม 5083-H321 อย่างเป็นระบบ ปัจจัยในกระบวนการเชื่อมเสียดทานแบบกวน คือ ความเร็วรอบของ Tool และความเร็วจนการเดินแนวเชื่อม แรงกดที่ใช้ในขณะการเชื่อมเสียดทานแบบกวน แรงเสียดทานส่งผลถึงความแข็งแรงและความยุ่งยากในการเชื่อมอะลูมิเนียมผสม 5083-H321 เกิดข้อบกพร่องในสภาพ Plastic flow processes ในบริเวณเขตอิทธิพลความร้อนของการเชื่อม (TMAZ) อย่างไรก็ตามความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งแรงกับพฤติกรรมรักษาสมบัติทางกล จากการเชื่อมเสียดทานแบบกวนข้อบกพร่องที่เกิดขึ้นในกระบวนการเชื่อมกึ่งแข็งและความแข็งที่ทำให้เกิดการแตกร้าวในกระบวนการเชื่อมเสียดทานอะลูมิเนียมผสม 5083-H321 ความเค้นตกค้างในรอยเชื่อมตรวจสอบด้วยการ X-Ray สามารถควบคุมด้วยความร้อนเข้าของการเชื่อม ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสูงสุดของความเค้นที่ตกค้างและการปฏิบัติที่ซับซ้อน แรงกดและอุณหภูมิเป็นปัจจัยสำคัญที่ควบคุมด้วย Tool จากการหมุนด้วยความเร็วรอบและความเร็วในการเชื่อม

กิตติพงษ์ กิมะพงษ์ และคณะ (2007) ได้ทำการศึกษาการเชื่อมรอยต่อของอะลูมิเนียมผสมและเหล็กกล้าด้วยการเชื่อมเสียดทานแบบกวน รอยต่ออะลูมิเนียมผสม A5083 และเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ SS400 โดยทำการเชื่อมภายใต้การเปลี่ยนแปลงตัวแปรการเชื่อม เช่น ความเร็วรอบ ความเร็วในการเชื่อมและความลึกของตัวกวนที่สอดเข้าไปในเนื้อวัสดุ การ

เปลี่ยนแปลงตัวแปรการเชื่อม ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างจุลภาคบริเวณอินเทอร์เฟซของรอยต่อและส่งผลทำให้มีการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางกล การเพิ่มความเร็วรอบของตัวกวน ทำให้เกิดการก่อตัวของสารประกอบกึ่งโลหะระหว่างเหล็กกับอะลูมิเนียมชนิด FeAl₃ ที่อินเทอร์เฟซของรอยต่อ การเพิ่มความเร็วในการเชื่อมสามารถเพิ่มความแข็งแรงของรอยต่อเนื่องจากสารประกอบกึ่งโลหะที่มีความเปราะที่ก่อตัวบริเวณอินเทอร์เฟซมีปริมาณลดลง อย่างไรก็ตามการเพิ่มความเร็วในการเชื่อมมากเกินไปทำให้เกิดจุดบกพร่องที่อินเทอร์เฟซของรอยต่อ จากความลึกของตัวกวนที่เพิ่มขึ้นทำให้ปริมาณของสารประกอบกึ่งโลหะและขนาดของจุดบกพร่องเพิ่มขึ้น

P. Cavaliere and A. Squillace (2007) ได้ทำการศึกษาดัชนีแปรในการเชื่อมที่มีผลต่อโครงสร้างและสมบัติทางกลในการเชื่อมอะลูมิเนียมผสม AA6082 โดยใช้ความเร็วในการหมุนของ Tool ที่ 1,600 rpm และความเร็วในการเดินแนวเชื่อม 40 ถึง 460 mm/min ด้วยการเชื่อมเสียดทานแบบกวน จากการศึกษาพบว่าความร้อนจะเพิ่มขึ้นที่ความเร็วในการหมุนของ Tool เพิ่มขึ้น อีกทั้งความร้อนจะลดลงที่ความเร็วในการหมุนของ Tool ต่ำซึ่งจะส่งผลทำให้การไหลวนของเนื้อวัสดุไม่ดีพอ แต่ในการศึกษาพบว่าที่ทุกๆ ความเร็วในการเดินแนวเชื่อมในบริเวณรอยเชื่อมมีลักษณะเป็นพลาสติกไหลวนรอบตัวกวน และทุกๆ ความเร็วในการเดินแนวเชื่อมจะมีโครงสร้างที่ไม่แตกต่างกันคือเป็นเกรนแบบกลมเล็กๆ กระจายตัวอย่างสม่ำเสมอในรอยเชื่อม แต่จะแตกต่างจากบริเวณเนื้อโลหะเดิมที่มีโครงสร้างเกรนแบบแบนยาวตามทิศทางการรีด และในขณะที่ความเร็วในการเดินแนวเชื่อมสูงจะมีการกระจายตัวของโครงสร้างที่สม่ำเสมอมากกว่าที่ความเร็วในการเดินแนวเชื่อมต่ำ อันเนื่องมาจากความร้อนในชิ้นงานและความเร็วในการเสียดทานทางกล จากการทดสอบความแข็งแรงดึงที่อุณหภูมิห้องค่า Yield strength จะเพิ่มขึ้นที่ความเร็วในการเดินแนวเชื่อมต่ำ จากการดูด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด จะสังเกตเห็นว่ารอยแตกจะเริ่มเกิดขึ้นจากด้านในของรอยเชื่อม จากการทดสอบด้วยการทดสอบความกล้า

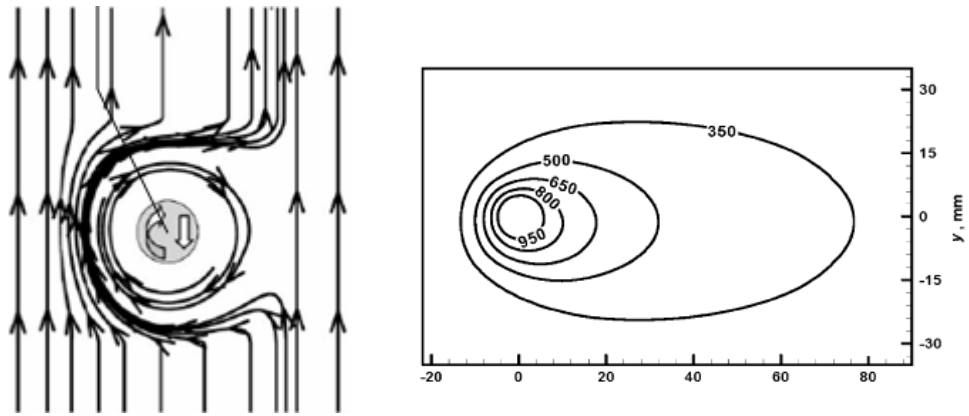
P. Kapranos¹ *et al.* (2007) ได้ทำการศึกษาการเชื่อมโลหะกึ่งของแข็งของอะลูมิเนียม (Semi-Solid Aluminium) ที่หล่อด้วยกรรมวิธี Thixoformed และ Rheocast จากการศึกษาพบว่า การจุดสัมผัสผิวของบ่า (Shoulder) ของ Tool และความยาวของตัวกวนที่อยู่ใต้บ่า จำเป็นที่จะต้องรักษาระยะของการแทรกซึมตามความลึกของตัวกวนที่ต้องการและให้ความสำคัญในการเลือกใช้ Tool ในการเชื่อมเสียดทานแบบกวนของชิ้นส่วนอะลูมิเนียมอย่างมาก ผลการวิจัยแสดงให้เห็นว่าการเชื่อมเสียดทานแบบกวนมีศักยภาพและความเป็นไปได้ในการนำมาประยุกต์ใช้ในการเชื่อมชิ้นงานหล่ออะลูมิเนียมกึ่งของแข็งทั้งที่ผลิตจากกรรมวิธี Thixoformed และ Rheocast

Y.G. Kim *et al.* (2005) ได้ทำการศึกษาข้อบกพร่องมี 3 ประการของรอยเชื่อมด้วยกระบวนการเชื่อมเสียดทานแบบกวนในอะลูมิเนียมผสม A415 จากการศึกษาพบว่าสามารถ

เชื่อมต่่วัตถุที่อุณหภูมิต่ำกว่าจุดหลอมเหลวและโครงสร้างของเนื้อโลหะเดิมถูกกวนให้เป็นเกรนที่ละเอียด ไม่มีลักษณะของรูพรุนและโครงสร้างของเดนไดรต์เกิดขึ้นในรอยเชื่อม มีปัจจัยสำคัญหลายอย่างในการกำหนดค่าที่ดีที่สุดของการเชื่อมเสียดทานแบบกวน โดยการควบคุมแรงกด ความเร็วรอบและความเร็วในการเชื่อมของการเสียดทานแบบกวน ปัจจัยในการเชื่อมคุณภาพของรอยต่อและข้อบกพร่องจากการเชื่อมเสียดทานแบบกวนอะลูมิเนียมหล่อผสมมีผลต่อคุณภาพของรอยเชื่อมลักษณะข้อบกพร่องมี 3 ประการ ประการแรก ปริมาณความร้อนที่ได้รับมากเกินไปทำให้เกิดครีบในปริมาณมาก ประการที่สอง ความร้อนที่ได้รับไม่เพียงพอ เป็นสาเหตุทำให้เกิดช่องว่างในรอยเชื่อม เนื่องจากความร้อนจากการเสียดทานที่ได้รับน้อยเกินไป ประการที่สาม การกวนที่ผิดปกติเป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดช่องว่าง ดังนั้นข้อบกพร่องที่เกิดจากความร้อนและการกวน มีผลต่อความสมบูรณ์ของรอยเชื่อม

Dr.-Ing. Michael *et al.* (2006) แรงกดที่เกิดขึ้นขณะทำการเชื่อมสามารถวัดค่าได้ด้วย Load Cell เพื่อให้ทราบพฤติกรรมของแรงกดที่เกิดขึ้นในกระบวนการเชื่อม แรงที่เกิดขึ้นในขณะเชื่อม มีสามช่วง ช่วงแรกเป็นการเพิ่มแรงกดในช่วงเริ่มต้นของการเชื่อมจนบ่าสัมผัสแผ่นงาน ช่วงที่สอง เป็นการเพิ่มแรงกดขณะทำการเชื่อมก่อนเดินแนวเชื่อม ช่วงที่สาม เป็นแรงที่เกิดจากความเร็วในการเชื่อมซึ่งเป็นแรงที่เกิดขึ้นนอกเหนือการควบคุม แต่จะถูกควบคุมด้วยปัจจัยในการทดลอง ความเร็วรอบและความเร็วในการเชื่อม

R. Nandan *et al.* (2006) ได้ทำการศึกษาความร้อนจากขนาดของ Tool และการเคลื่อนตัวของเนื้อวัสดุระหว่างการเชื่อมเสียดทานแบบกวนในเหล็ก AISI 1018 จากการศึกษาพบว่าความร้อนจะเกิดขึ้นบริเวณบ่าของ Tool และจะขึ้นอยู่กับรูปแบบของหัวพิน ความร้อนจะเกิดขึ้นเมื่อ Tool สัมผัสกับชิ้นงานและจะมีความสัมพันธ์กับทิศทางการเคลื่อนที่ของชิ้นงานและระยะของแนวแกน ความร้อนจะเพิ่มขึ้นจากบริเวณที่สัมผัสกับบ่าและหัวพินจะลดลงตามระยะห่างของบ่าและหัวพินเช่นกัน ซึ่งมีการเปลี่ยนแปลงคล้ายกับเป็นมุม อันเนื่องมาจากความร้อนที่ทำให้เนื้อโลหะอยู่ในสภาวะพลาสมาจะเกิดขึ้นใกล้กับหัวพินได้เร็วมาก อีกทั้งความร้อนและความเร็วในการหมุนของ Tool ทำให้วัสดุเกิดการเคลื่อนที่ไหลวนรอบตัวกวน ดังรูปที่ 2.14 ทิศทางการกวนและความร้อนจากการเสียดทาน



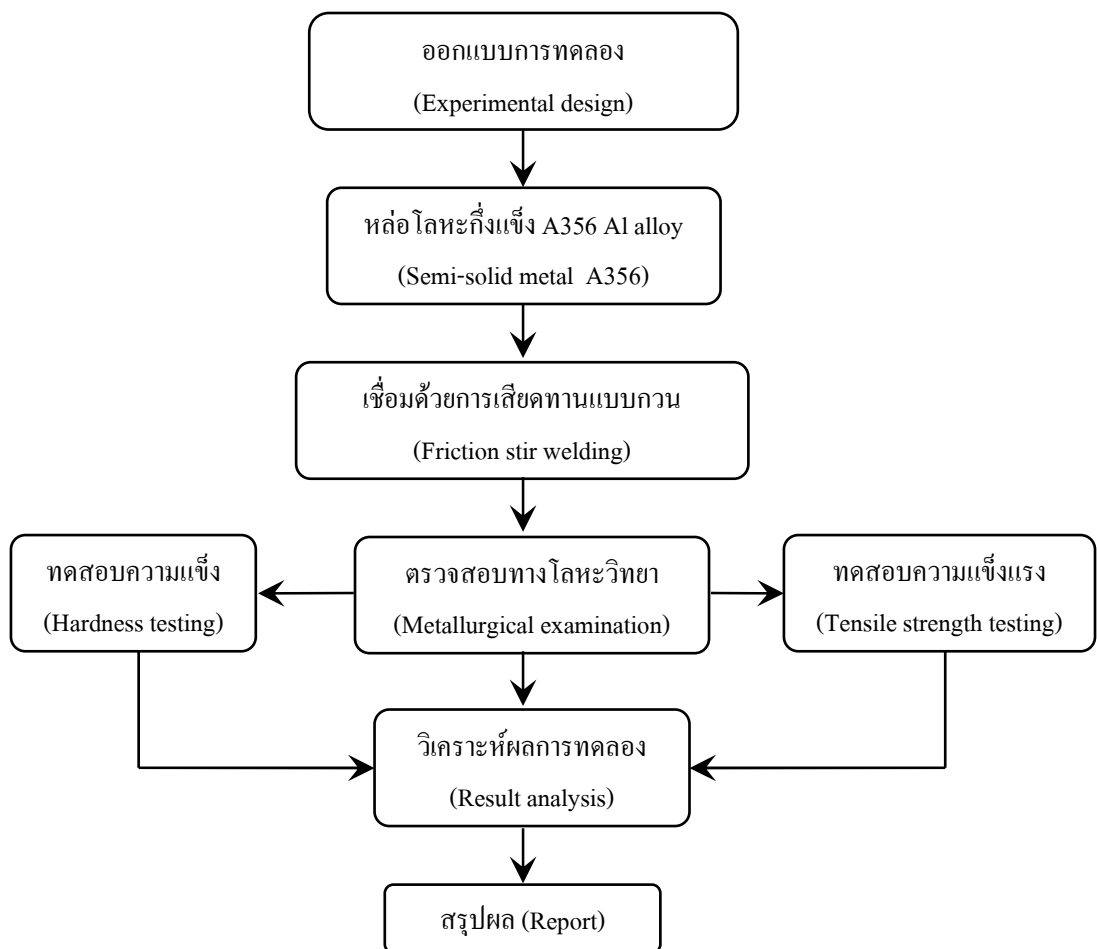
รูปที่ 2.14 ทิศทางการกวนและความร้อนจากการเสียดทาน

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

วัตถุประสงค์ในการดำเนินการวิจัยเพื่อมุ่งศึกษาผลของการปรับเปลี่ยนตัวแปรในการเชื่อม ลักษณะรูปแบบของหัวพิน และความเร็วในการเดินแนวเชื่อมในการเชื่อมอะลูมิเนียมผสมเกรด A356 ที่หล่อโดยกรรมวิธีการหล่อกึ่งของแข็ง (SSM) ด้วยกระบวนการเชื่อมเสียดทานแบบกวนที่มีผลต่อสมบัติทางโลหะวิทยาและสมบัติทางกลโดยกำหนดการทดลองดังนี้

3.1 การออกแบบวิธีดำเนินการวิจัย



รูปที่ 3.1 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

3.2 วัสดุที่ใช้ในการทดลอง

วัสดุที่นำมาใช้ในการทดลองเชื่อมเสียดทานแบบกวนเป็นวัสดุประเภทใหม่ที่ได้กำลังมีการพัฒนาและได้ทำการศึกษาในขณะนี้โดยทีมวิจัยของ เจษฎา วรรณสินธุ์ และทีมวิจัยของภาควิชาวิศวกรรมเหมืองแร่และวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ซึ่งเป็นวัสดุที่ได้จากการหล่อขึ้นรูปแบบกึ่งของแข็งด้วยเทคนิค GISS ปัจจุบันนี้มีการใช้เทคโนโลยีการหล่อโลหะกึ่งของแข็งกันทั่วโลก ประเทศไทยก็เริ่มมีการวิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีการหล่อโลหะกึ่งของแข็งเพื่อประยุกต์ใช้กับอุตสาหกรรมภายในประเทศ

3.2.1 อะลูมิเนียมหล่อผสมแบบกึ่งของแข็ง A356

วัสดุที่นำมาใช้ในการทดลองเป็นวัสดุอะลูมิเนียมผสมเกรด A356 ซึ่งมีส่วนผสมทางเคมีดังตารางที่ 3.1 ผ่านการหล่อขึ้นรูปแบบกึ่งของแข็งด้วยเทคนิค GISS (Gas induced semi-solid) ที่คล้ายกับการหล่อแบบ Rheocasting ซึ่งเทคนิค GISS จะทำการหล่อที่อุณหภูมิประมาณ 700°C เมื่ออุณหภูมิลดลงถึง 620°C จะใช้แก๊สเฉื่อยผ่านแท่งกราฟไฟท์พูน (แก๊สอาร์กอน หรือ ไนโตรเจน) เพื่อทำให้เกิดการไหลวนของน้ำโลหะเกิดการแตกหักของแกนเดนไดรต์ ใช้เวลาในการพ่นฟองแก๊สประมาณ 20 วินาที จากนั้นนำน้ำโลหะอะลูมิเนียมไปเทลงใน Mold แบบทรงกลมดังรูปที่ 3.2 (ก) และ (ข) แล้วอัด (Squeeze) ที่ความดันไม่น้อยกว่า 2,000 Psi ค้างไว้จนโลหะแข็งตัวได้เป็นชิ้นงานแบบแผ่นกลมที่มีความหนาประมาณ 6-8 มิลลิเมตร ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 20 เซนติเมตร ดังรูปที่ 3.3 (ก), (ข) และรูปที่ 3.3 (ค) เป็นโครงสร้างที่ได้จากการหล่อกึ่งของแข็งซึ่งประกอบไปด้วยโครงสร้างเกรนแบบก้อนกลม (ก้อนสีขาว) เป็นเฟสอะลูมิเนียม (α) และบริเวณเฟสยูเทคติกส์ ประกอบด้วยเฟสอะลูมิเนียมผสมกับเฟสซิลิกอน (สีดำสลับขาว)



(ก)



(ข)

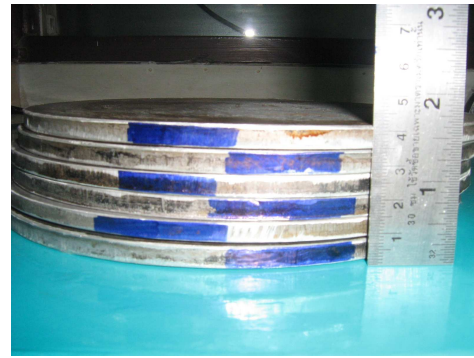
รูปที่ 3.2 แสดง Mold ที่ใช้ในการอัดขึ้นรูปชิ้นงาน

ตารางที่ 3.1 ส่วนผสมทางเคมีของอะลูมิเนียมหล่อผสม A356 (W.T.%)

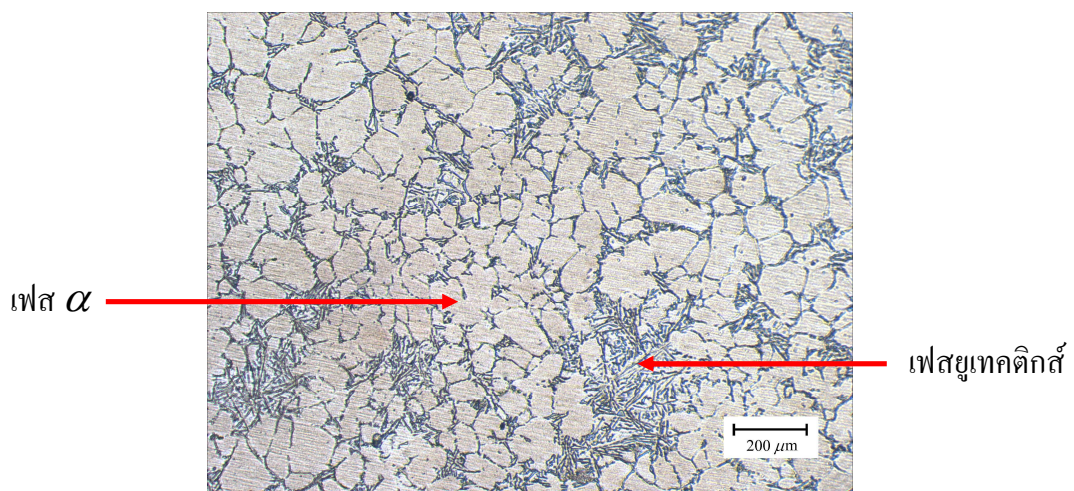
วัสดุ	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Ti	Cr	Ni	Al
A356	7.74	0.57	0.05	0.06	0.32	0.01	0.05	0.02	0.01	Bal.



(ก)



(ข)



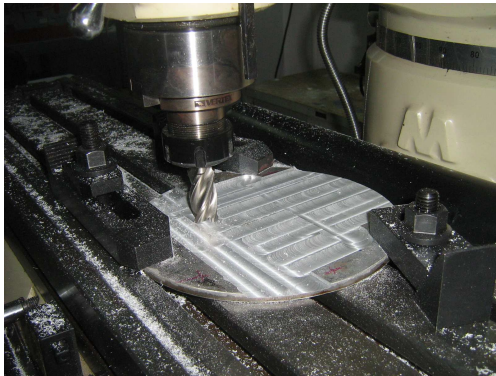
(ค)

รูปที่ 3.3 ภาพแสดงชิ้นงานและโครงสร้างของอะลูมิเนียมหล่อทิ้งของแข็งเกรด A356 ที่ได้จากการหล่อด้วยเทคนิค GISS

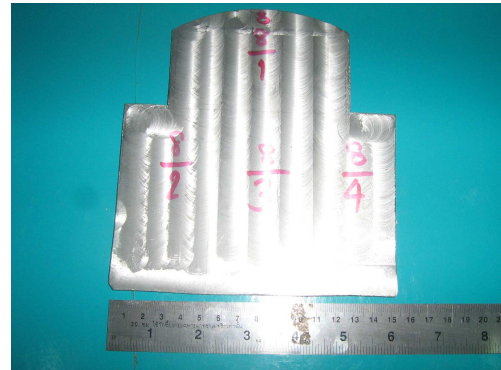
3.2.2 การเตรียมชิ้นงานทดสอบจากอะลูมิเนียมหล่อทิ้งของแข็ง A356

อะลูมิเนียมผสมหล่อทิ้งของแข็งเกรด A356 ที่ผ่านการหล่อแบบอัด (Squeeze casting) นำไปทำการปรับขนาดผิวชิ้นงานทั้งสองด้านด้วยเครื่องกัดแนวตั้ง (Milling) ให้มีขนาดความหนา 4 มิลลิเมตร ดังรูปที่ 3.4 (ก) และ (ข) แล้วตัดชิ้นงานด้วยเครื่องเลื่อยสายพานให้มีขนาดความยาว x กว้าง x หนา 100 x 50 x 4 มิลลิเมตร จะได้ชิ้นทดสอบจำนวน 4 ชิ้นต่อ

หนึ่งแผ่นที่หล่อ ชิ้นทดสอบไม่มีการบากหน้าชิ้นงาน ซึ่งการทดลองจะทำการทดลองทั้งหมด 5 ซ้ำ โดยมีตัวแปรการทดลอง คือ รูปแบบของหัวพินสองชนิดและความเร็วในการเชื่อมสามระดับ ดังนั้นในหนึ่งซ้ำจะต้องใช้ชิ้นทดสอบ 12 ชิ้น รวมการทดลองทั้งหมด 5 ซ้ำ จะต้องใช้ชิ้นทดสอบ 60 ชิ้น การเตรียมชิ้นงานดังรูปที่ 3.5 (ก) และ (ข)



(ก)

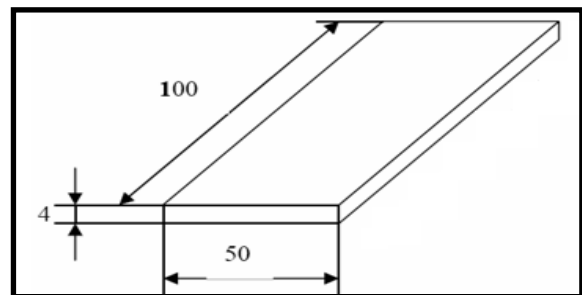


(ข)

รูปที่ 3.4 แสดงการกัดผิวหน้าชิ้นงานทดสอบที่ได้จากการหล่อทิ้งของแข็ง



(ก)



(ข)

รูปที่ 3.5 แสดงชิ้นทดสอบอะลูมิเนียมหล่อทิ้งของแข็งเกรด A356 ที่ผ่านการกัดขึ้นรูปและตัดด้วยเครื่องเลื่อยสายพาน

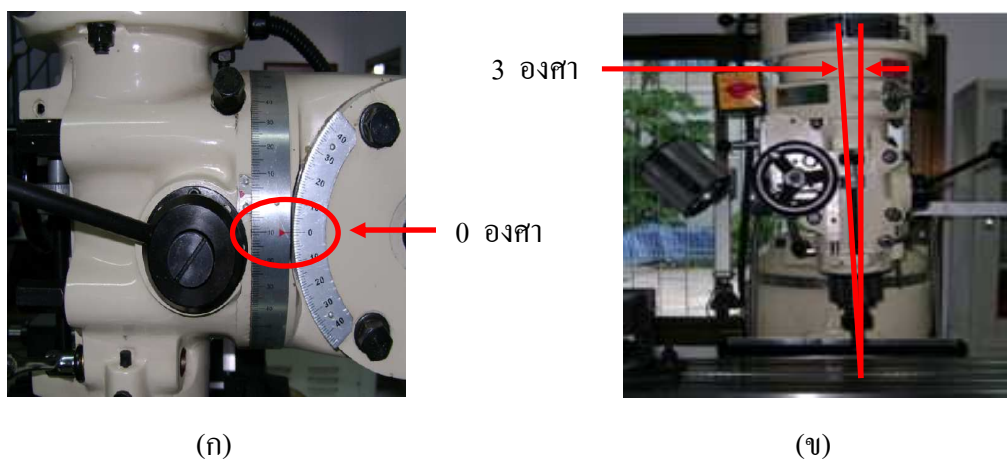
3.3 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย

หลังจากออกแบบการทดลองเสร็จสิ้นและได้ทำการจัดเตรียมวัสดุที่จะนำมาทำการเชื่อมเสร็จสิ้นแล้ว ก่อนการดำเนินงานในการทดลองจะทำการตรวจสอบเครื่องมือและอุปกรณ์ให้มีความเตรียมความพร้อมต่อการทดลอง ดังนี้

1. เครื่องกัดแนวตั้ง (Milling machine)
2. เครื่องเลื่อยสายพาน
3. เครื่องตัดกระดาษทราย ขัดสักลาด
4. น้ำยาเคมีที่ใช้ในการเตรียมชิ้นงานตรวจสอบโครงสร้าง
5. เครื่องทดสอบความแข็ง (Hardness test)
6. เครื่องทดสอบแรงดึง (Tensile strength)
7. กล้องถ่ายภาพกำลังขยาย 2-10 เท่า
8. กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (Optical Microscope, OM)
9. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนส่องกราดซึ่งมีระบบเอ็กซ์เรย์ด้วย (Scanning Electron Microscope, SEM และ Energy Dispersive X-ray analysis , EDX)

3.3.1 การปรับมุมเอียงของเครื่องมือ

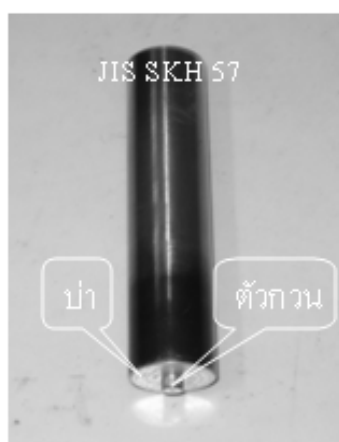
การปรับมุมเอียงของเครื่องมือเชื่อม โดยการประยุกต์เอาเครื่องกัดแนวตั้งมาเป็นเครื่องเชื่อมเสียดทานแบบกวนซึ่งจะต้องปรับให้เครื่องมือเอียงทำมุม 3 องศา กับผิวหน้าชิ้นทดสอบ และปรับระดับอุปกรณ์จับยึดชิ้นทดสอบให้ได้ระดับคงที่ตลอดความยาวของชิ้นทดสอบงานเชื่อมด้วยการเชื่อมเสียดทานแบบกวนของอะลูมิเนียมหล่อผสม ดังรูปที่ 3.6 (ก) และ (ข)



รูปที่ 3.6 ภาพแสดงการปรับมุมเอียง 3 องศา ของหัวเชื่อม

3.3.2 เครื่องมือที่ใช้ในการเชื่อม

ลักษณะของเครื่องมือหรือ Tools ที่นำมาใช้ในการทดลองมีสองแบบ คือ แบบทรงกระบอกและแบบสี่เหลี่ยม ขนาดของบ่า \varnothing 20 มิลลิเมตร ตัวกวนมีขนาด \varnothing 5 มิลลิเมตร ความยาว 3.2 มิลลิเมตร ทำจากเหล็กเครื่องมือความเร็วสูงมาตรฐาน JIS วัสดุ SKH 57 รูปที่ 3.7 (ก) ความยาวของตัวกวนจะมีค่าน้อยกว่าความหนาของแผ่นงานประมาณ 80% ในการเชื่อม เครื่องมือจะถูกจับยึดด้วยอุปกรณ์ของเครื่องกัดที่มีการเอียงมุม 3 องศา รูปที่ 3.7 (ข)



(ก) เครื่องมือวัสดุ JIS SKH 57



(ข) อุปกรณ์จับยึดเครื่องมือ

รูปที่ 3.7 ลักษณะของ Tool และการจับยึด Tool

3.2.3 อุปกรณ์ในการจับยึดของการเชื่อมเสียดทานแบบกวน

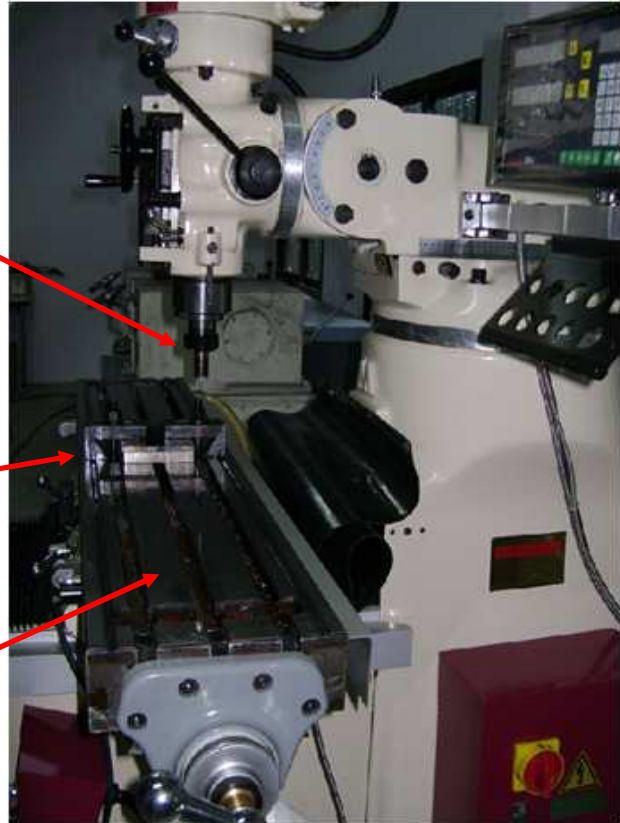
ส่วนต่างๆ ของเครื่องเชื่อมเสียดทานแบบกวน ดังรูปที่ 3.8 แสดงส่วนชุดของหัวเชื่อมที่ใช้จับยึดหัวพิน และชุดจับยึดชิ้นงานในการเชื่อมโดยจะวางยึดติดกับแท่นรองเลื่อน

ในการติดตั้งอุปกรณ์จับยึดและการจับยึดเครื่องมือ ดังรูปที่ 3.9 ของการเชื่อมเสียดทานแบบกวนจะทำการจับยึดชิ้นงานสองชิ้นติดกับแท่นรองชิ้นงาน โดยใช้ตัวล็อกชิ้นงานด้านล่างชิ้นงานรองด้วยแผ่นเหล็กหนาสองชิ้น โดยมีแผ่นประเก็นรองอยู่ตรงกลางแผ่นเหล็กทั้งสองชิ้น และ Tools ยึดติดกับเหลาแกนหมุน จากการทดลองจะกำหนดให้ Tools หมุนอยู่กับที่ และชิ้นงานเคลื่อนที่ขณะเดินแนวเชื่อม

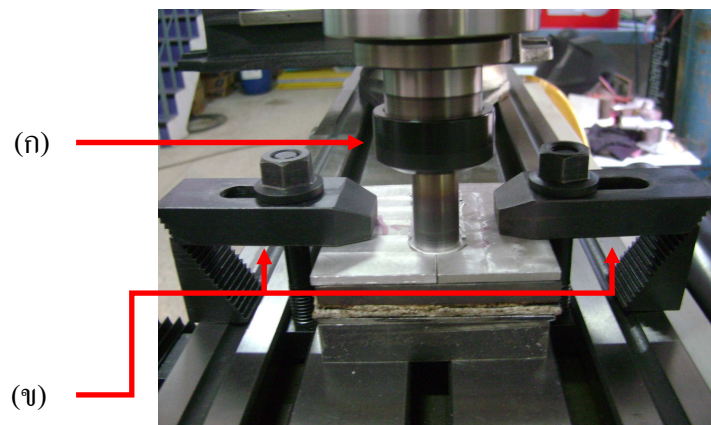
หัวเชื่อม หรือ Tools เียง 3 องศา (Rotation speed) ยึดด้วย ตัวยึดคอกกัก ดังรูปที่ 3.9 (ก)

อุปกรณ์จับยึดชิ้นงานทดสอบ ยึดอยู่กับที่ติดกับแท่นรอง เลื่อน ดังรูปที่ 3.9 (ข)

แท่นรองเลื่อน (Welding speed)



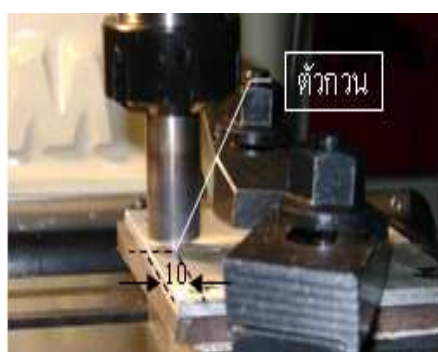
รูปที่ 3.8 แสดงตำแหน่งต่างๆ ที่เกี่ยวข้องในการเชื่อมเสียดทานแบบกวน



รูปที่ 3.9 แสดงการจับยึดชิ้นงานในการเชื่อมเสียดทานแบบกวน

3.4 กรรมวิธีการเชื่อมเสียดทานแบบกวน

หลังจากการเตรียมวัสดุ เครื่องมือและอุปกรณ์ต่างๆ เสร็จสิ้นแล้ว จากนั้นจะทำการเชื่อมเสียดทานแบบกวนที่อุณหภูมิห้อง โดยใช้ Tool สองแบบ คือ หัวพินแบบทรงกระบอกและแบบสี่เหลี่ยม ที่ความเร็วในการหมุนของ Tool คงที่ 1,750 rpm และเปลี่ยนแปลงความเร็วในการเดินเชื่อมสามระดับ 80, 120 และ 160 mm/min จับยึดชิ้นทดสอบให้แน่นกับแท่นรองชิ้นงาน หัวพินห่างจากขอบชิ้นทดสอบ 10 มิลลิเมตร ดังรูปที่ 3.10 (ก) และ (ข) เริ่มต้นการเชื่อมโดยการเพิ่มแรงกดด้วยอัตราป้อนคงที่อย่างสม่ำเสมอจนบ่าของ Tool สัมผัสกับผิวหน้าชิ้นงานพร้อมกับกำหนดให้แรงกดเริ่มต้นสูงสุดในขณะนั้นคงที่ประมาณ 450 กิโลกรัม ใช้เวลาในการกดจนบ่าของ Tools สัมผัสกับผิวหน้าชิ้นงานขณะนั้นประมาณ 28 วินาที กำหนดให้การเสียดทานคงที่ ณ จุดเริ่มต้นค้างไว้ประมาณ 20 วินาที หลังจากนั้นก็เริ่มป้อนเดินแนวเชื่อมอัตโนมัติ ตามเงื่อนไขของแต่ละตัวแปรที่ได้ออกแบบไว้ใน การทดลอง ดังรูปที่ 3.10 (ค) และ (ง) เมื่อสิ้นสุดการเชื่อมก่อนยกตัวกวนออกจากรอยเชื่อม ให้การเสียดทานคงที่ ณ ตำแหน่งสุดท้ายของการเชื่อม 10 วินาที ก่อนยก Tool ออกจากชิ้นทดสอบ



(ก) บ่าของ Tool ห่างจากขอบชิ้นงาน 10 มม. (ข) แรงกดเริ่มต้น 450 กก. ก่อนเดินแนวเชื่อม 28 วินาที

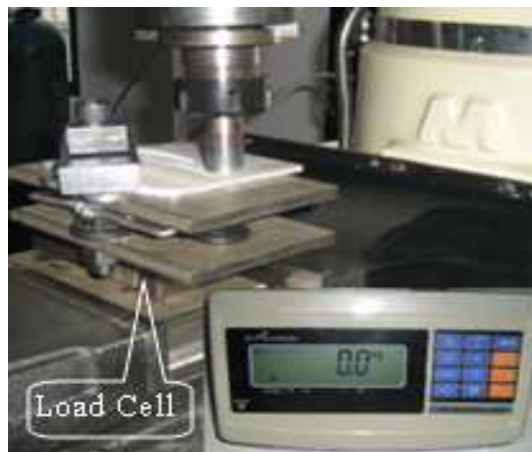
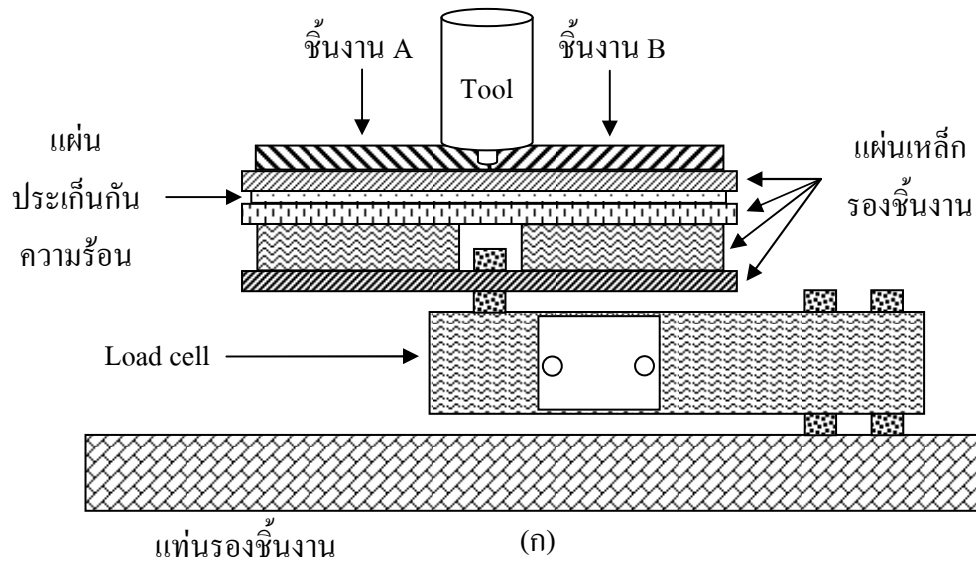


(ค) เดินแนวเชื่อมอัตโนมัติ

(ง) สิ้นสุดการเดินแนวเชื่อม

รูปที่ 3.10 กระบวนการเชื่อมเสียดทานแบบกวน

3.4.1 การวัดแรงกดในการเชื่อมเสียดทานแบบกวน



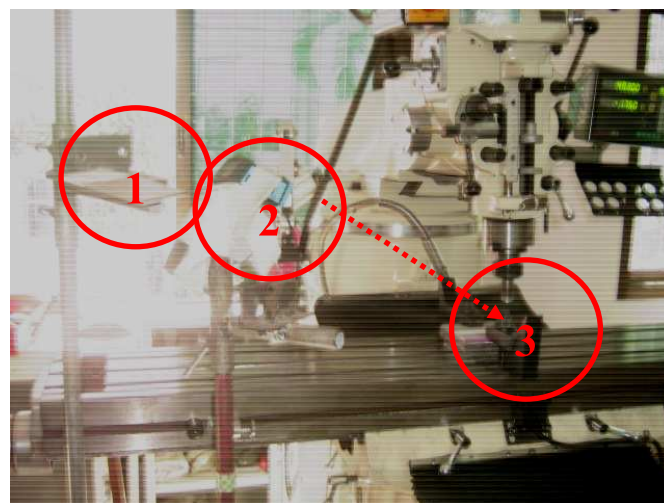
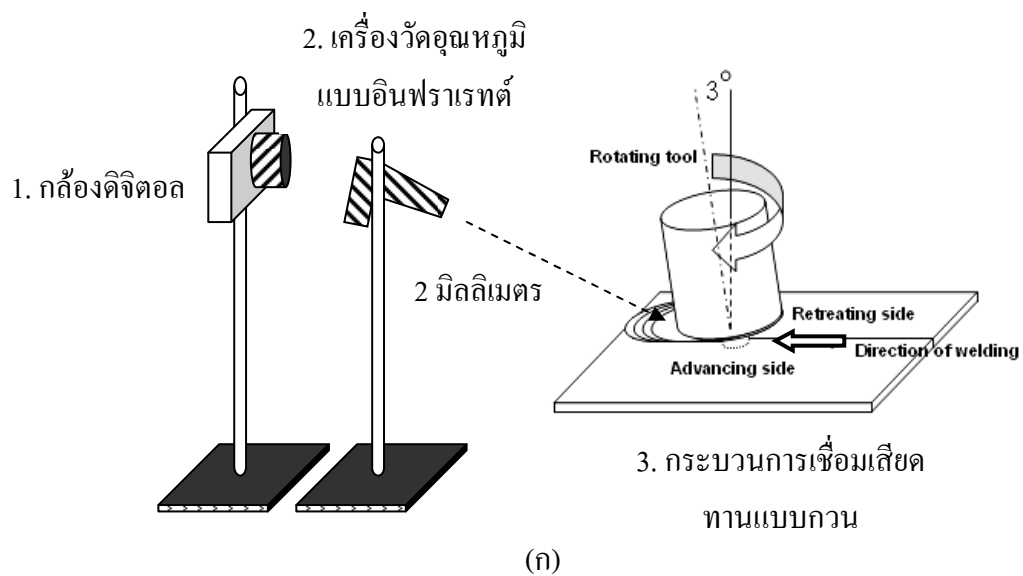
(ข)

รูปที่ 3.11 การวัดค่าแรงกดในการเชื่อมอะลูมิเนียม SSM A356 โดยใช้ Load cell

แรงกดที่เกิดขึ้นขณะทำการเชื่อมสามารถวัดค่าได้ด้วยเครื่องมือวัด Load cell เพื่อให้ทราบพฤติกรรมของแรงกดที่เกิดขึ้นในกระบวนการเชื่อมเสียดทานแบบกวนของอะลูมิเนียมหล่อทิ้งของแข็ง A356 จากการทดลองโดยใช้ Tool (หัวพิน) สองชนิดด้วยกัน คือ หัวพินแบบทรงกระบอกและแบบสี่เหลี่ยม มีความเร็วในการหมุนของ Tool คงที่ 1,750 rpm และเปลี่ยนแปลงความเร็วในการเดินเชื่อมสามระดับ 80, 120 และ 160 mm/min แรงกดขณะทำการ

เชื่อมมีแรงที่เกิดขึ้นสามช่วง ช่วงแรกเป็นการเพิ่มแรงกดในขณะที่เริ่มต้นของการเชื่อมจนปัสสัมผัสกับผิวหน้าชิ้นงาน ช่วงที่สองเป็นการเพิ่มแรงกดขณะทำการเชื่อมก่อนเดินแนวเชื่อม ช่วงที่สามแรงกดเพิ่มขึ้นจากความเร็วในการเชื่อม ซึ่งเป็นแรงที่เกิดขึ้นนอกเหนือการควบคุมจนสิ้นสุดรอยเชื่อม ดังรูปที่ 3.11 (ก) และ (ข) จะทำการบันทึกค่าด้วยกล้องดิจิทัลแบบบันทึกวิดีโอได้ มาช่วยในการบันทึกค่าจากจอแสดงผลของเครื่องวัดแล้วจึงนำมาพล็อตกราฟ

3.4.2 การวัดอุณหภูมิขณะทำการเชื่อม



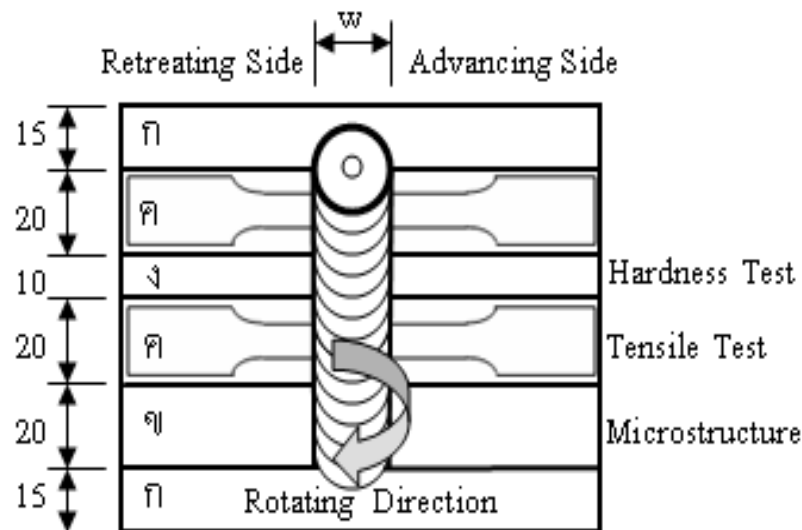
รูปที่ 3.12 แสดงการวัดอุณหภูมิขณะทำการเชื่อม

จากการทดลองจะทำการวัดอุณหภูมิขณะทำการเชื่อมเสียดทานแบบกวนของหัวพินแบบทรงกระบอกและแบบสี่เหลี่ยม ความเร็วในการหมุนของ Tool ที่ 1,750 rpm และความเร็วในการเดินแนวเชื่อม 80, 120 และ 160 mm/min ด้วยเครื่องวัดอุณหภูมิแบบอินฟราเรด ดังแสดงในรูปที่ 3.12 โดยการวัดจะทำการวัดห่างจากบ่าของ Tools ประมาณ 2 มิลลิเมตร ซึ่งจะทำให้การบันทึกค่าด้วยกล้องดิจิทัลแบบบันทึกวิดีโอได้ มาช่วยในการบันทึกค่าจากจอแสดงผลของเครื่องวัด แล้วจึงนำมาพล็อตกราฟ

3.4.3 การ Lay out ตัดชิ้นงานที่ได้จากการเชื่อม

หลังจากทำการเชื่อมชิ้นงานเสร็จแล้วนำแผ่นงานที่เชื่อมไป Lay out เพื่อตัดชิ้นงานไปเตรียมเป็นชิ้นทดสอบทางโลหะวิทยาและทดสอบทางกล ดังรูปที่ 3.13

รูปที่ 3.13 แสดงลักษณะของการตัดชิ้นทดสอบ (A) ตำแหน่งเริ่มต้นและจุดสิ้นสุดรอยเชื่อม (B) ชิ้นงานตรวจสอบโครงสร้างทางจุลภาค (C) ชิ้นงานทดสอบแรงดึง (D) ชิ้นงานทดสอบความแข็งและตรวจสอบโครงสร้างทางจุลภาค (W) ตามยาวของรอยเชื่อม



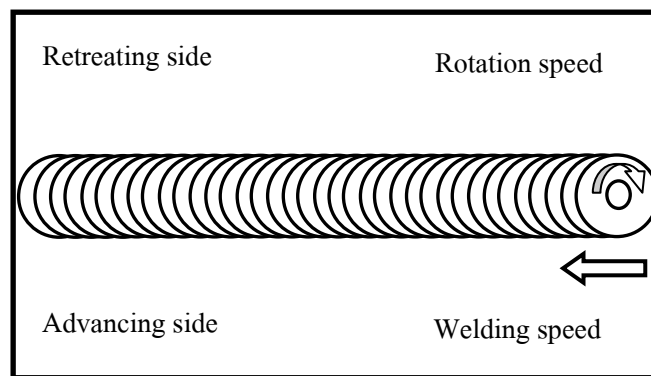
รูปที่ 3.13 การ Lay out ชิ้นงานทดสอบทางโลหะวิทยาและทางกล

3.5 การตรวจสอบลักษณะโครงสร้างทางโลหะวิทยาของรอยเชื่อม

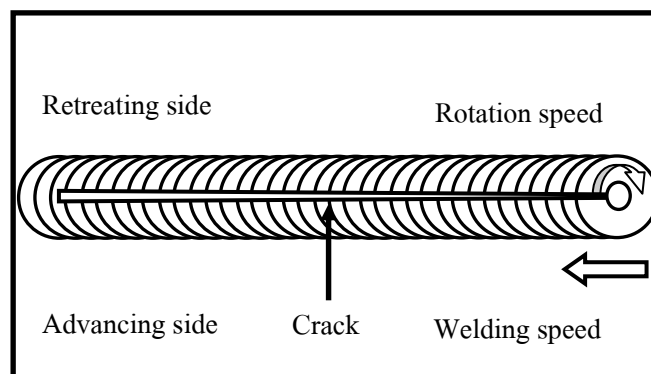
3.5.1 การตรวจสอบผิวหน้ารอยเชื่อมด้วยสายนตา

การตรวจสอบผิวหน้าของรอยเชื่อมจากภาพถ่ายด้วยกล้องถ่ายภาพดิจิทัลกำลังขยายต่ำในแต่ละตัวแปรของการเชื่อม เพื่อตรวจสอบลักษณะทางกายภาพ และความสมบูรณ์

ของรอยเชื่อม ลักษณะของรอยเชื่อมที่เกิดจากบ่าของ Tool ตรวจสอบการซึมลึกของรอยเชื่อม หลังจากการเชื่อมจะทำการตรวจสอบรอยเชื่อมบริเวณด้านบนและด้านล่าง ด้วยสายตาเพื่อดูว่ารอยเชื่อมมีการประสานกันของชิ้นงานทั้งสองชิ้นที่นำมาเชื่อมต่อกันได้ดีเพียงใด ดังรูปที่ 3.14 มีการประสานกันที่ดีของชิ้นงานเชื่อมทั้งสองชิ้น หรืออีกในกรณีหนึ่ง เมื่อทำการตรวจสอบด้วยสายตาแล้วหากพบว่ารอยเชื่อมไม่ประสานกันหลังจากการเชื่อมแสดงว่ารอยเชื่อมนั้นไม่สามารถใช้งานได้ จะต้องทำการศึกษาและปรับเปลี่ยนตัวแปรต่างๆ ใหม่ ดังรูปที่ 3.15



รูปที่ 3.14 รอยเชื่อมจากการเสียดทานแบบกวนที่มีความสมบูรณ์



รูปที่ 3.15 รอยเชื่อมจากการเสียดทานแบบกวนที่ไม่สมบูรณ์

3.5.2 การตรวจสอบโครงสร้างมหภาค

หลังจากการตรวจสอบด้วยสายตาแล้วไม่พบข้อบกพร่องใดๆ ของรอยเชื่อม ก็นำชิ้นงานไป Lay out และตัด ดังรูปที่ 3.13 จากนั้นนำไปเคลือบด้วยน้ำยา Epoxy ดังรูปที่ 3.16 ขัดด้วยกระดาษทรายที่ทำจากผงซิลิคอนคาร์ไบด์ ตั้งแต่เบอร์ 150, 320, 400, 600, 800, 1,000 ถึงเบอร์ 1,200 ตามลำดับ ในการขัดวางกระดาษทรายลงบนแผ่นงานขัดหน้าเรียบแล้วขัดผิว

ตรวจสอบลงบนกระดาษทรายนั้น ในขณะที่นั้นจะต้องเปิดน้ำอยู่ตลอดเวลา เพื่อให้ น้ำชำระสิ่งสกปรกซึ่งได้แก่ผงโลหะรวมถึงซิลิคอนคาร์ไบด์ออกให้หมด และเมื่อต้องการเปลี่ยนกระดาษทรายแผ่นต่อไปควรขัดขึ้นตรวจสอบไปอีกแนวทางหนึ่งสลับกันเป็นตารางกับแนวเดิมจนกว่าจะถึงกระดาษทรายแผ่นสุดท้าย ดังรูปที่ 3.17



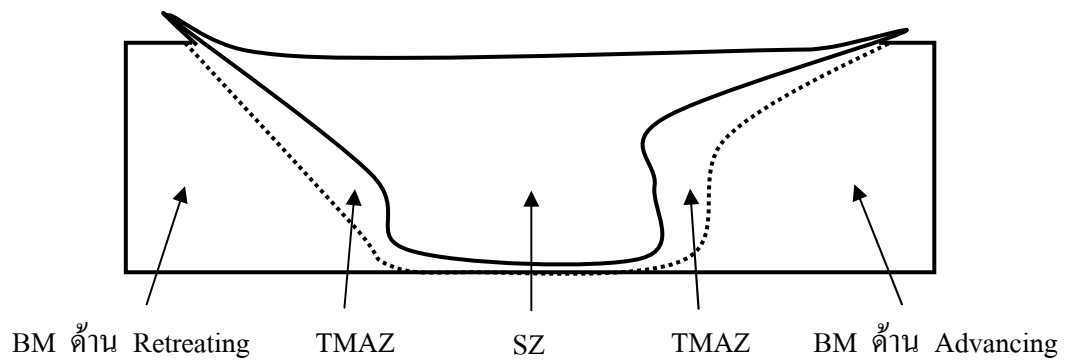
รูปที่ 3.16 แสดงชิ้นงานที่เคลือบด้วยน้ำยา Epoxy



รูปที่ 3.17 แสดงการเตรียมชิ้นงานเพื่อตรวจสอบ โครงสร้างทางโลหะวิทยา

จากนั้นนำไปขัดผิวด้วยผงขัด (Polishing) การขัดผิวในขั้นตอนนี้ เป็นการขัดผิวมันของชิ้นตรวจสอบด้วยผงขัดที่ทำจากอะลูมินา (Alumina oxide) และแมกนีเซียม (Magnesium

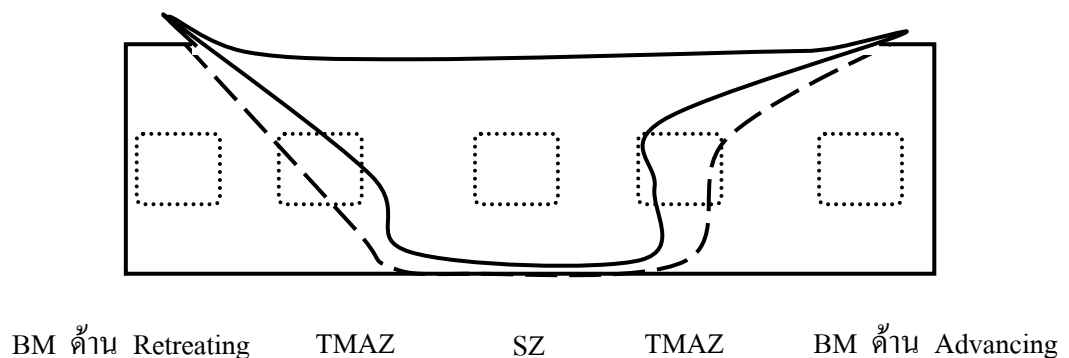
oxide) ที่มีขนาดตั้งแต่ 5 - 1 ไมครอน กัดผิวชิ้นทดสอบด้วยสารละลายเจือจาง Keller's reagent และนำชิ้นงานไปล้างด้วยแอลกอฮอล์และน้ำเคลือบป้องกันออกไซด์ ตรวจสอบโครงสร้างมหภาค ด้วยกล้องกำลังขยาย 2-4 เท่า เพื่อดูลักษณะการไหลวนของเกรนภายในรอยเชื่อม ดังรูปที่ 3.18



รูปที่ 3.18 แสดงบริเวณต่างๆ ของโครงสร้างมหภาคจากการเชื่อมเสียดทานแบบกวน

3.5.3 การตรวจสอบโครงสร้างทางจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (OM)

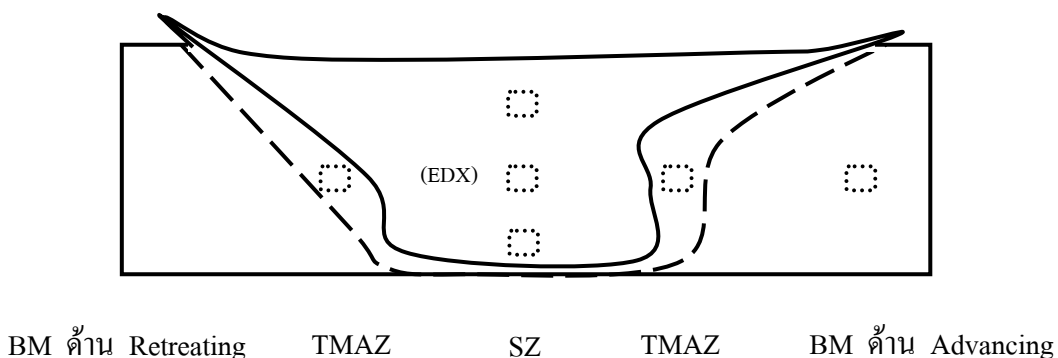
ชิ้นงานตรวจสอบโครงสร้างทางจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง เป็นชิ้นงานทดสอบเดียวกันกับชิ้นงานทดสอบโครงสร้างมหภาค ซึ่งหลังจากการตรวจสอบโครงสร้างมหภาคแล้วก็นำไปทำการตรวจสอบโครงสร้างทางจุลภาค (Micro-specimen) ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงที่กำลังขยาย 50 ถึง 200 เท่า เพื่อตรวจสอบโครงสร้างบริเวณเนื้อโลหะเดิม บริเวณที่ได้รับอิทธิพลจากความร้อนทางด้าน Retreating กับ Advancing และบริเวณที่ถูกกวนของรอยเชื่อม ตรวจสอบข้อบกพร่องและความสมบูรณ์ของรอยเชื่อมแต่ละตัวแปรของการเชื่อม อีกทั้งดูการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างเกรนหลังจากการเชื่อมเสียดทานแบบกวน ดังรูปที่ 3.19



รูปที่ 3.19 แสดงตำแหน่งที่ทำการตรวจสอบโครงสร้างทางจุลภาคด้วย OM

3.5.4 การตรวจสอบโครงสร้างทางจุลภาคด้วยกล้องอิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ซึ่งมีระบบเอ็กซ์เรย์ด้วย (EDX)

ชิ้นงานตรวจสอบโครงสร้างทางจุลภาคด้วยกล้องอิเล็กตรอนแบบส่องกราด และ EDX เป็นชิ้นงานทดสอบเดียวกันกับชิ้นงานทดสอบโครงสร้างมหภาคและชิ้นงานตรวจสอบโครงสร้างทางจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง การตรวจสอบโครงสร้างทางจุลภาคด้วยกล้องอิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่มีกำลังขยาย 5,000 เท่า 20 kV เพื่อตรวจสอบโครงสร้างบริเวณเนื้อโลหะเดิม บริเวณที่ได้รับอิทธิพลจากความร้อนทางกลด้าน Retreating กับ Advancing และบริเวณที่ถูกกวนของรอยเชื่อม ตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างเกรน การกระจายตัวของอนุภาคซิลิกอนและธาตุผสมอื่นๆ หลังจากการเชื่อมเสียดทานแบบกวน และการตรวจสอบด้วย EDX จะทำการตรวจสอบเพียงจุดเดียวในบริเวณที่ถูกกวน เพื่อดูว่าเฟสดังกล่าวเป็นธาตุอะไร ดังรูปที่ 3.20



รูปที่ 3.20 แสดงตำแหน่งที่ทำการตรวจสอบโครงสร้างทางจุลภาคด้วยกล้อง SEM และ EDX

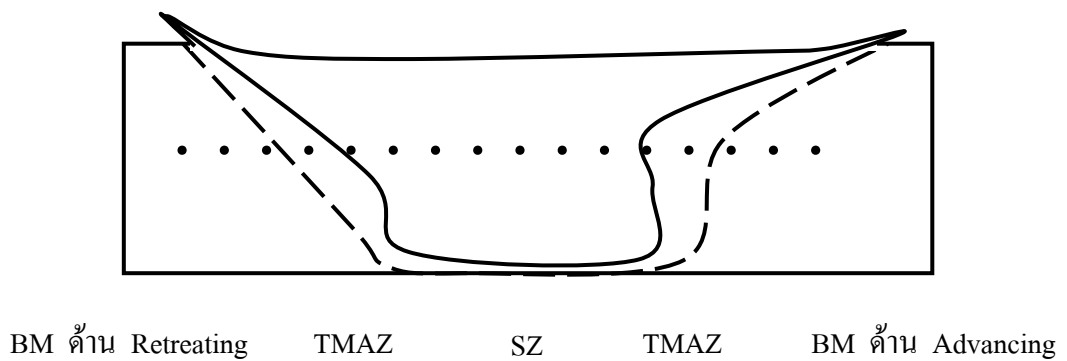
3.6 การทดสอบสมบัติทางกล

เป็นการทดสอบความสามารถในการต้านทานต่อการแปรรูปถาวร โดยการกดผิวหน้าของชิ้นทดสอบด้วยเครื่องมือโครวิกเกอร์ เพื่อทดสอบความสามารถในการต้านทานแรงกด เป็นค่าความแข็งของชิ้นทดสอบ และการดึงเพื่อทดสอบความสามารถในการต้านทานแรงดึงของชิ้นทดสอบด้วยเครื่องทดสอบแรงดึง เป็นค่าความแข็งแรงของชิ้นทดสอบ ดังนี้

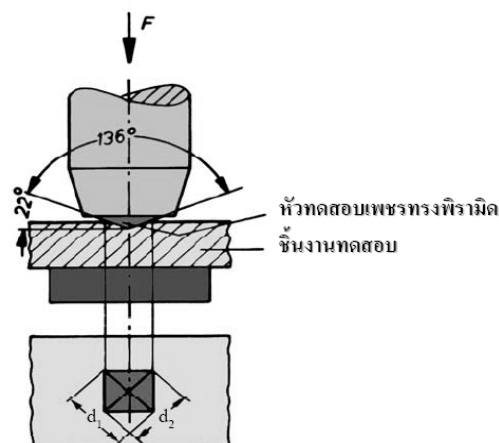
3.6.1 การทดสอบความแข็ง

ชิ้นงานทดสอบความแข็งเป็นชิ้นงานเดียวกันกับชิ้นงานตรวจสอบโครงสร้างซึ่งหลังจากการตรวจสอบโครงสร้างมหภาคและโครงสร้างทางจุลภาคเสร็จสิ้นแล้ว ก็นำชิ้นงานไป

ทดสอบความแข็งเพื่อหาความสามารถในการต้านทานต่อการแปรรูปถาวร เมื่อถูกแรงกดกระทำลงบนชิ้นทดสอบ โดยใช้การทดสอบแบบไมโครวิกเกอร์ กดบริเวณพื้นที่หน้าตัดของรอยเชื่อม ระยะห่างรอยกด 60–70 μm ดังรูปที่ 3.21 แรงกดที่ใช้ 100 gf กดเป็นเวลา 10 วินาที หัวกดเพชรมีลักษณะเป็นปิระมิดฐานสี่เหลี่ยม ที่ปลายหัวกดทำมุม 136 องศา ค่าความแข็งคำนวณจากแรงกดที่กระทำต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ผิว ดังรูปที่ 3.22 สามารถวัดค่าความแข็งได้ตั้งแต่โลหะที่นิ่มมากประมาณ 5 kgf/mm^2 จนถึงโลหะที่แข็งมากๆ ประมาณ 1,500 kgf/mm^2 โดยไม่ต้องเปลี่ยนหัวกด จะเปลี่ยนก็เฉพาะแรงกดเท่านั้น โดยมีตั้งแต่ 1-120 kgf ขึ้นอยู่กับความแข็งของโลหะที่ทดสอบ



รูปที่ 3.21 แสดงตำแหน่งกดจากการวัดความแข็ง



รูปที่ 3.22 แสดงแรงกดที่กระทำต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ผิวด้วยเครื่องไมโครวิกเกอร์

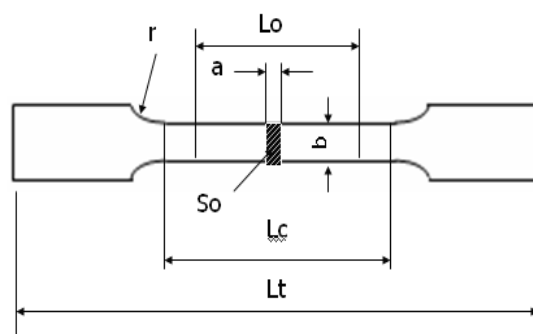
การวัดค่าความแข็งด้วยเครื่องวัดความแข็งแบบไมโครวิกเกอร์ บริเวณภาคตัดขวางรอยเชื่อม เพื่อหาว่าในแต่ละบริเวณของชิ้นงานเชื่อมมีค่าความแข็งภายในเนื้อวัสดุที่แตกต่างกันมากน้อยเพียงใด ดังรูปที่ 3.22 และจากการคำนวณโดยใช้สมการ 3.1

สมการ
$$HV = \frac{1.854P}{d^2} \dots\dots\dots (3.1)$$

โดยที่ HV คือ ค่าความแข็งแบบ Vickers (kgf/mm²)
 P คือ แรงกด (kgf)
 d คือ ขนาดเส้นทแยงมุม d₁ และ d₂ เฉลี่ย (mm)

3.6.2 การทดสอบแรงดึง

3.6.2.1 การเตรียมชิ้นงานทดสอบของเนื้อโลหะเดิม (BM)



รูปที่ 3.23 ภาพแสดงขนาดมาตรฐาน ASTM ของชิ้นทดสอบ



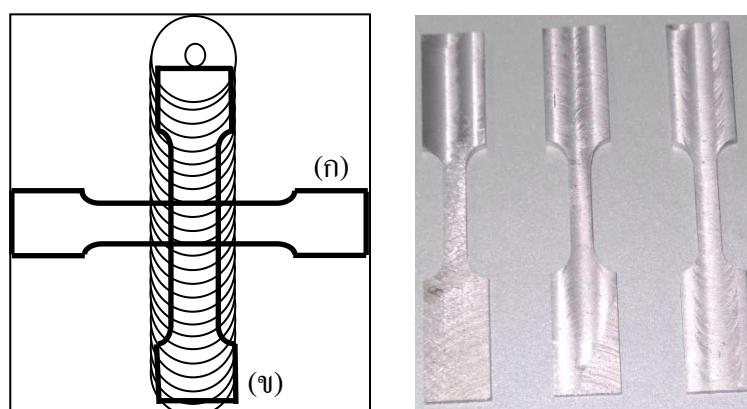
รูปที่ 3.24 ภาพแสดงการขึ้นรูปชิ้นทดสอบแรงดึงของเนื้อโลหะเดิม



รูปที่ 3.25 ภาพแสดงชิ้นทดสอบมาตรฐานของเนื้อโลหะเดิม SSM A356

การเตรียมชิ้นทดสอบแรงดึงของอะลูมิเนียมผสม SSM A356 ซึ่งหลังจากการหล่อ กิ่งของแข็ง (BM) เพื่อนำค่าจากการทดสอบแรงดึงของเนื้อโลหะเดิมไปเปรียบเทียบกับค่าความ แข็งแรงดึงที่ทำการเชื่อม โดยการนำไปลดขนาดด้วยเครื่องกัดแนวตั้งและตัดเป็นชิ้นเล็กๆ เพื่อที่จะ นำไปกัดขึ้นรูปดังรูปที่ 3.24 เตรียมเป็นชิ้นงานทดสอบความแข็งแรงดึงตามมาตรฐาน ASTM (E8) ดังรูปที่ 3.25 ขนาดของชิ้นทดสอบดังรูปที่ 3.23 ดังนี้ $a = 4$, $b = 6$, $r = 12$, $L_0 = 24$, $L_t = 100$, $L_c = 27$ mm. และ $S_0 = 24$ mm²

3.6.2.2 การเตรียมชิ้นงานทดสอบของงานเชื่อม



รูปที่ 3.26 การเตรียมชิ้นทดสอบของรอยเชื่อมเสียดทานแบบทวน

การเตรียมชิ้นทดสอบแรงดึงของรอยเชื่อมเสียดทานแบบกวน จะมีสองลักษณะ คือ เตรียมชิ้นทดสอบโดยการตัดตามขวางกับรอยเชื่อมและตัดตามยาวกับรอยเชื่อม โดยการเตรียมจะใช้วิธีการเดียวกันกับการเตรียมชิ้นงานทดสอบของเนื้อโลหะเดิม ชิ้นงานทดสอบสมบัติทางกลเป็นการทดสอบเพื่อหาค่าความแข็งแรงของรอยเชื่อม (Strength of weld) จากชิ้นงานเชื่อมต่อชนด้วยการเชื่อมเสียดทานแบบกวน ดังรูปที่ 3.26 (ก) ชิ้นทดสอบตัดตามขวางรอยเชื่อม (ข) ชิ้นทดสอบตัดตามยาวรอยเชื่อมตามมาตรฐาน ASTM (E8)

3.6.2.3 วิธีการทดสอบแรงดึง

การทดสอบแรงดึงเพื่อหาค่าความแข็งแรงของงานเชื่อม (Strength of weld) โดยการทดสอบแรงดึงในงานเชื่อมเสียดทานแบบกวน นำชิ้นทดสอบที่เตรียมโดยการตัดตามขวางกับรอยเชื่อมและตัดตามยาวกับรอยเชื่อมไปทดสอบแรงดึงที่อุณหภูมิห้อง ความเร็วในการดึง 1.67×10^{-2} mm/s ดังรูปที่ 3.27



รูปที่ 3.27 แสดงการทดสอบแรงดึง

ผลการทดลองและการวิเคราะห์ ผล

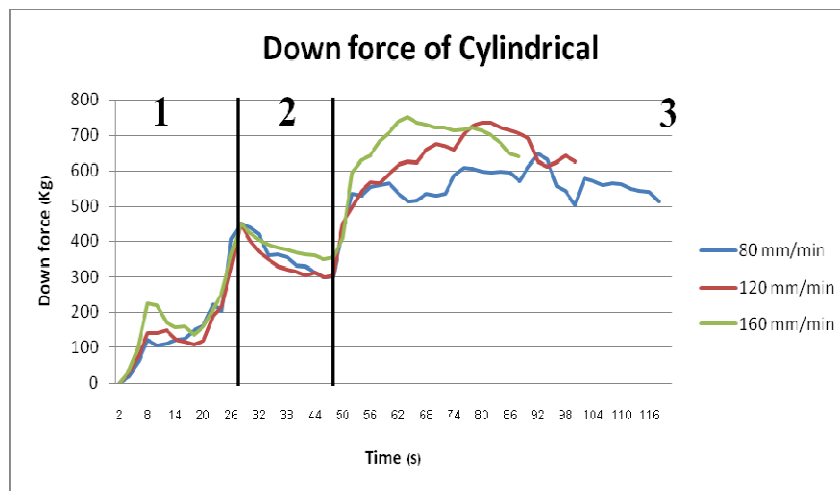
จากการศึกษาและทำการทดลองในเบื้องต้น โดยการนำเอาเครื่องกัดแนวตั้งแบบ กึ่งอัตโนมัติมาประยุกต์เป็นเครื่องเชื่อมเสียดทานแบบกวน ในการทดลองจะทำการปรับเปลี่ยน รูปแบบของ Tool (หัวพิน) และความเร็วในการเดินแนวเชื่อมของการเชื่อมอะลูมิเนียมผสมที่หล่อ โดยเทคโนโลยีกึ่งของแข็งเกรด A356 ด้วยกรรมวิธีการเชื่อมเสียดทานแบบกวน กำหนดให้ ความเร็วในการหมุนของ Tool คงที่และแรงกดเริ่มต้นคงที่ 450 กิโลกรัม จากการศึกษาเบื้องต้น โดย อับดุล บินระหีม (2008) พบว่าที่ความเร็วในการหมุนของ Tool มากกว่าหรือน้อยกว่า 1,750 rpm และความเร็วในการเดินเชื่อมน้อยกว่า 80 mm/min หรือมากกว่า 160 mm/min หลังจากการเชื่อมพบว่ารอยเชื่อมไม่ประสานเป็นเนื้อเดียวกันและเกิดช่องว่างในรอยเชื่อม ทำให้ เป็นข้อมูลในการกำหนดปัจจัยการทดลองครั้งนี้ คือ รูปแบบของ Tools ที่ใช้ในการทดลองมี 2 แบบ คือ หัวพินแบบทรงกระบอกและหัวพินแบบสี่เหลี่ยม กำหนดความเร็วในการหมุนของ Tool (หัวพิน) คงที่ 1,750 rpm แต่จะทำการเปลี่ยนแปลงความเร็วในการเดินแนวเชื่อม มี 3 ระดับ คือ 80, 120 และ 160 mm/min ในหนึ่งการทดลองจะเชื่อมทั้งหมด 6 ชิ้น และจะทำการ ทดลอง 5 การทดลองรวมทั้งหมด 30 ชิ้น ตัวแปรที่กล่าวมามีผลต่อกระบวนการเชื่อมซึ่งเป็น ปัจจัยสำคัญที่ทำให้เกิดความร้อนจากการเสียดทาน ซึ่งมีผลต่อเนื้อโลหะบริเวณที่ถูกกวนและ สมบัติทางกลของรอยเชื่อม ผลที่ได้จากการทดลองทั้งหมดค่าที่ได้เป็นไปในทิศทางเดียวกัน ทั้งผล ในทางด้านโลหะวิทยาและผลทางสมบัติทางกล ผู้ทำการทดลองจึงได้นำเอามาแสดงเพื่อเป็น ตัวแทนเพียง 1 การทดลอง ดังต่อไปนี้

4.1 การวัดแรงกดขณะทำการเชื่อมเสียดทานแบบกวน

4.1.1 การวัดแรงกดในขณะที่ทำการเชื่อมเสียดทานแบบกวน

จากการทดลองโดยการวัดแรงขณะทำการเชื่อมซึ่งจะเห็นได้ว่าความสัมพันธ์ ระหว่างรูปแบบของหัวพิน และความเร็วในการเดินแนวเชื่อมมีผลต่อแรงกดขณะทำการเชื่อมของ การเชื่อมเสียดทานแบบกวนในอะลูมิเนียมหล่อกึ่งของแข็ง A356 จากรูปที่ 4.1 และ 4.2 ในช่วง ที่ 1 เป็นช่วงป้อนแรงกดเริ่มต้นกำหนดให้มีค่าคงที่ 450 กิโลกรัม ด้วยเวลาที่ใช้ในการกดจนป่า

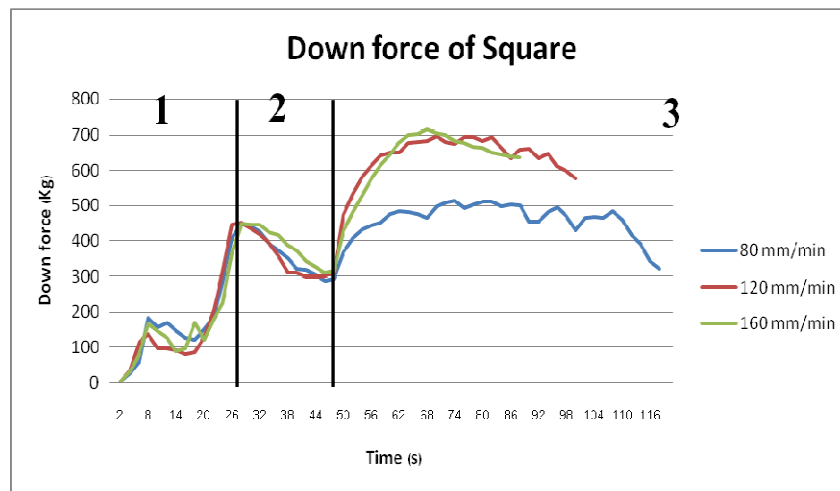
ของ Tool สัมผัสกับผิวหน้าชิ้นงานประมาณ 28 วินาที ช่วงที่ 2 เป็นช่วงของการหยุดป้อนแรงกดและค้างไว้ประมาณ 20 วินาที เพื่อให้เกิดการสะสมของความร้อนแผ่กระจายทั่วทั้งชิ้นงาน หลังจากนั้นช่วงที่ 3 จะเป็นช่วงของการป้อนเดินอัตโนมัติ ซึ่งแรงในช่วงนี้จะอยู่นอกเหนือการควบคุม



รูปที่ 4.1 ภาพแสดงค่าแรงกดของหัวพินแบบทรงกระบอก

4.1.2 การวัดแรงกดจากการเชื่อมด้วยหัวพินแบบทรงกระบอก

จากการวัดแรงกดของหัวพินแบบทรงกระบอกขณะเชื่อม ที่ความเร็วในการหมุนของหัวพิน 1,750 rpm และความเร็วในการเดินแนวเชื่อม 80, 120 และ 160 mm/min พบว่าแรงกดบนชิ้นงานทดสอบขณะเดินแนวเชื่อม คือในช่วงที่ 3 มีค่าเฉลี่ยประมาณ 558, 637 และ 680 กิโลกรัม ตามลำดับ แต่ในขณะที่เดินแนวเชื่อม คือในช่วงที่ 3 จะมีค่าคงที่อยู่ช่วงหนึ่งซึ่งมีค่าเฉลี่ยประมาณ 605, 718 และ 723 กิโลกรัม ตามลำดับดังรูปที่ 4.1 จะเห็นได้ว่าที่ความเร็วในการเดินแนวเชื่อมสูง จะมีค่าของแรงกดเพิ่มสูงขึ้นเช่นกัน อันเนื่องมาจากที่ความเร็วในการเดินแนวเชื่อมสูงความร้อนที่เกิดสะสมในรอยเชื่อมยังไม่มากพอที่จะทำให้ภายในเนื้อของวัสดุเกิดความอ่อนตัวหรืออยู่ในสภาวะพลาสติก จึงทำให้เกิดแรงต้านระหว่างหัวพินกับเนื้อวัสดุมากตามไปด้วย เมื่อเทียบกับที่ความเร็วในการเดินแนวเชื่อมต่ำหัวพินจะมีลักษณะของการหมุนอยู่กับที่เป็นเวลานานกว่าที่ความเร็วในการเดินแนวเชื่อมสูง ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงภายในเนื้อของวัสดุอยู่ในสภาวะพลาสติกมากกว่าทำให้ลดแรงต้านทานระหว่างหัวพินกับเนื้อวัสดุขณะเชื่อม



รูปที่ 4.2 ภาพแสดงค่าแรงกดของหัวพินแบบสี่เหลี่ยม

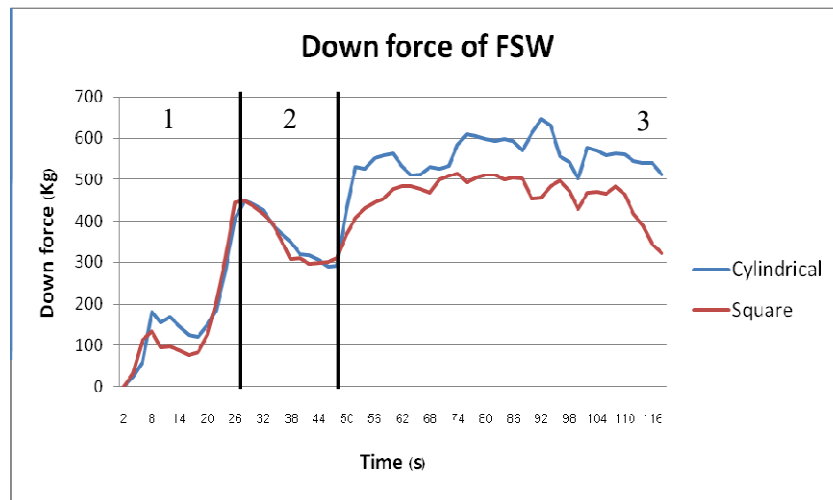
4.1.3 การวัดแรงกดจากการเชื่อมด้วยหัวพินแบบสี่เหลี่ยม

จากการวัดแรงกดของหัวพินแบบสี่เหลี่ยม ที่ความเร็วในการหมุนของหัวพิน 1,750 rpm และความเร็วในการเดินแนวเชื่อม 80, 120 และ 160 mm/min พบว่าแรงกดบนชิ้นทดสอบขณะเดินแนวเชื่อม คือ ช่วงที่ 3 มีค่าเฉลี่ยประมาณ 461, 633 และ 643 กิโลกรัม ตามลำดับ แต่ในขณะที่เดินเชื่อมจะมีค่าคงที่ในช่วงหนึ่งซึ่งมีค่าเฉลี่ยประมาณ 485, 689 และ 691 กิโลกรัม ตามลำดับดังรูปที่ 4.2 จะเห็นได้ว่าที่ความเร็วในการเดินแนวเชื่อมสูง จะมีค่าของแรงกดเพิ่มสูงขึ้นเช่นกัน อันเนื่องมาจากที่ความเร็วในการเดินแนวเชื่อมสูงความร้อนที่เกิดสะสมในรอยเชื่อมยังไม่มากพอที่จะทำให้ภายในเนื้อของวัสดุเกิดความอ่อนตัวหรืออยู่ในสภาวะพลาสติก จึงทำให้เกิดแรงต้านระหว่างหัวพินกับเนื้อวัสดุมากตามไปด้วย เมื่อเทียบกับที่ความเร็วในการเดินแนวเชื่อมต่ำหัวพินจะมีลักษณะของการหมุนอยู่กับที่เป็นเวลานานกว่าที่ความเร็วในการเดินแนวเชื่อมสูง ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงภายในเนื้อของวัสดุอยู่ในสภาวะพลาสติกมากกว่าทำให้ลดแรงต้านระหว่างหัวพินกับเนื้อวัสดุขณะเชื่อม

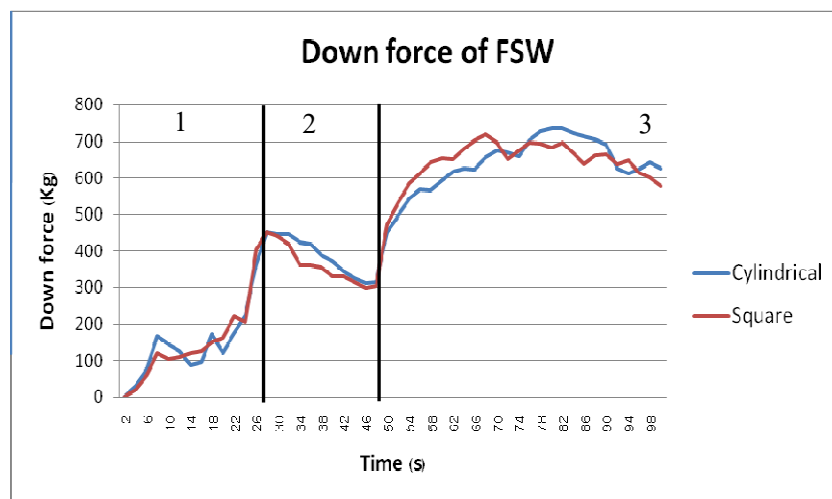
4.1.4 การเปรียบเทียบค่าแรงกดจากการเชื่อมด้วยหัวพินทรงกระบอกและหัวพินแบบสี่เหลี่ยม

จากการเปรียบเทียบค่าแรงกดจากการเชื่อมเสียดทานแบบกวนของหัวพินแบบทรงกระบอกและหัวพินแบบสี่เหลี่ยมดังรูปที่ 4.3 (ก), (ข) และ (ค) พบว่าค่าแรงกดบนชิ้นงานทดสอบขณะทำการเชื่อมที่ความเร็วในการเดินแนวเชื่อม 120 และ 160 mm/min ของหัวพินแบบทรงกระบอกมีค่าแรงกดมากกว่าหัวพินแบบสี่เหลี่ยมเล็กน้อยประมาณ 5% แต่ในขณะเดียวกันที่

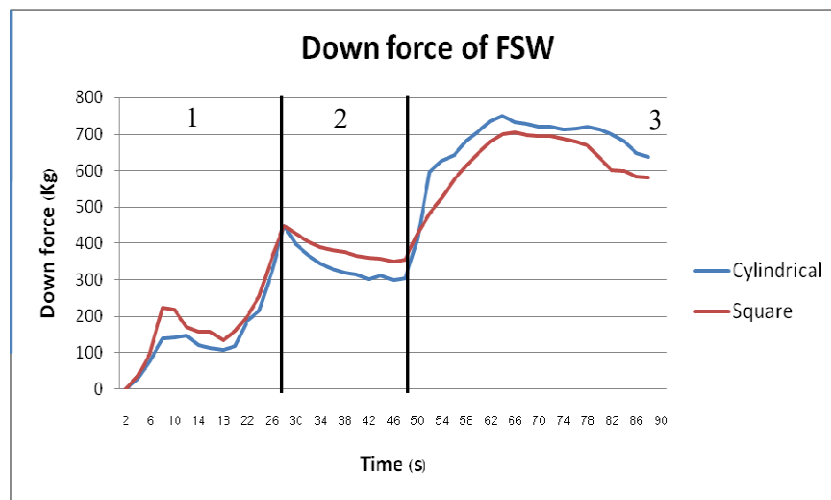
ความเร็วในการเดินแนวเชื่อม 80 mm/min ของหัวพินแบบทรงกระบอกมีค่าแรงกดมากกว่าหัวพินแบบสี่เหลี่ยมอย่างเห็นได้ชัดคิดเป็นประมาณ 25 % อันเนื่องมาจากลักษณะของหัวพินแบบทรงกระบอกมีพื้นที่การเสียดทานที่สัมผัสกับเนื้อวัสดุขณะเชื่อมมากกว่าลักษณะของหัวพินแบบสี่เหลี่ยมส่งผลให้การเชื่อมด้วยหัวพินแบบทรงกระบอกเกิดแรงต้านภายในเนื้อวัสดุมากกว่าการเชื่อมด้วยหัวพินแบบสี่เหลี่ยม



(ก) 80 mm/min



(ข) 120 mm/min



(ค) 160 mm/min

รูปที่ 4.1 กราฟแสดงค่าแรงกดของหัวพินแบบทรงกระบอกและแบบสี่เหลี่ยม

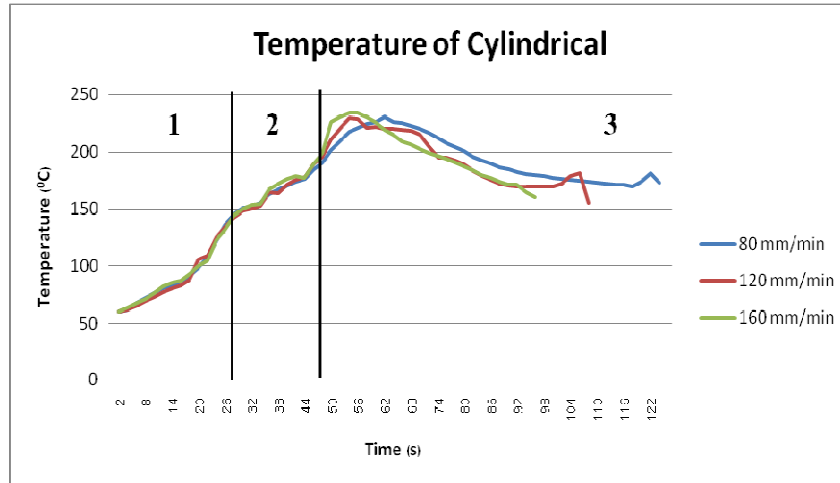
4.2 การวัดอุณหภูมิขณะทำการเชื่อมเสียดทานแบบกวน

จากการทดลองโดยการวัดอุณหภูมิขณะทำการเชื่อมซึ่งจะเห็นได้ถึงความสัมพันธ์ระหว่างรูปแบบของหัวพินและความเร็วในการเดินแนวเชื่อมมีผลต่ออุณหภูมิขณะทำการเชื่อมเสียดทานแบบกวนในอะลูมิเนียมหล่อทิ้งของแข็ง A356 เชื่อมด้วยหัวพินแบบทรงกระบอกและหัวพินแบบสี่เหลี่ยม ความเร็วในการหมุนของหัวพินที่ 1,750 rpm และความเร็วในการเดินแนวเชื่อม 80, 120 และ 160 mm/min ช่วงที่ 1 เป็นช่วงอุณหภูมิเพิ่มขึ้นจากการป้อนแรงกดเริ่มต้นจนป่าของ Tool สัมผัสกับผิวหน้าชิ้นงานใช้เวลาประมาณ 28 วินาที ในช่วงที่ 2 เป็นช่วงของอุณหภูมิที่ได้จากการหยุดป้อนแรงกดและค้างไว้ประมาณ 20 วินาที อุณหภูมิจะลดลง ในช่วงที่ 3 เป็นช่วงอุณหภูมิที่ทำการเดินแนวเชื่อมโดยอัตโนมัติ

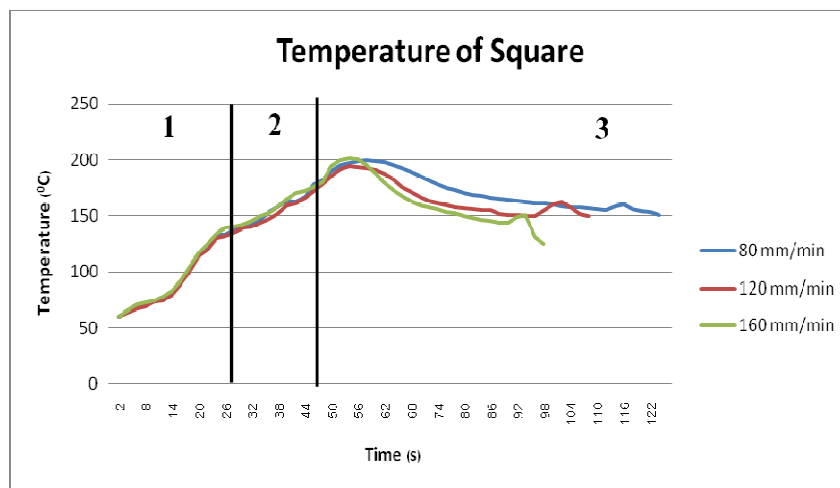
4.2.1 การวัดอุณหภูมิจากการเชื่อมด้วยหัวพินแบบทรงกระบอก

จากการทดลองดังรูปที่ 4.4 แสดงค่าอุณหภูมิของหัวพินแบบทรงกระบอกหลังจากการเชื่อมพบว่าอุณหภูมิจนขณะเดินแนวเชื่อม คือในช่วงที่ 3 มีค่าเฉลี่ยประมาณ 210, 205 และ 197 องศาเซลเซียส ตามลำดับ จากกราฟจะเห็นได้ว่าที่ความเร็วในการเดินแนวเชื่อมสูงจะมีค่าอุณหภูมิต่ำกว่าที่ความเร็วในการเดินแนวเชื่อมต่ำ อันเนื่องมาจากที่ความเร็วในการเดินแนวเชื่อมต่ำจะมีลักษณะของการหมุนวนของหัวพินในรอยเชื่อมเป็นเวลานานกว่าที่ความเร็วในการเดินแนวเชื่อมสูง จึงทำให้ความร้อนเกิดการสะสมมากกว่า แต่อย่างไรก็ตามอุณหภูมิที่แตกต่างกันไม่ได้มีค่ามากนัก

ของความเร็วเดินแนวเชื่อมที่ 120 และ 160 mm/min แต่จะแตกต่างกันมากของความเร็วในการเดินแนวเชื่อมที่ 80 และ 160 mm/min อันเนื่องมาจากความเร็วในการเดินแนวเชื่อมต่างกันมาก



รูปที่ 44 ภาพแสดงค่าอุณหภูมิของหัวพินแบบทรงกระบอก

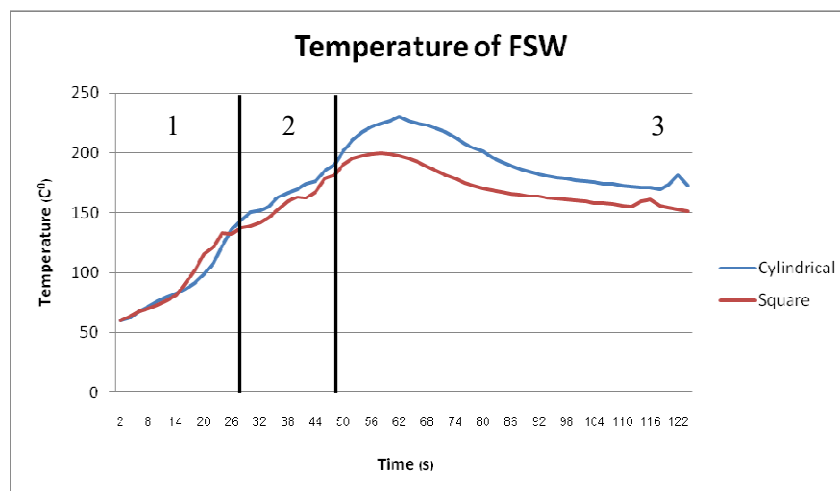


รูปที่ 45 ภาพแสดงค่าอุณหภูมิของหัวพินแบบสี่เหลี่ยม

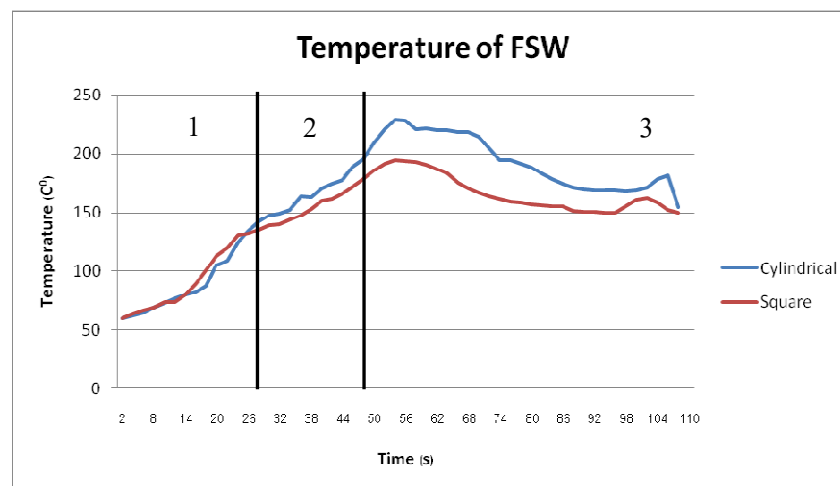
4.2.2 การวัดอุณหภูมิจากการเชื่อมด้วยหัวพินแบบสี่เหลี่ยม

จากการทดลองดังรูปที่ 4.5 แสดงค่าอุณหภูมิของหัวพินแบบสี่เหลี่ยมหลังจากการเชื่อมพบว่าอุณหภูมิขณะเดินแนวเชื่อมมีค่าเฉลี่ยประมาณ 171, 166 และ 162 องศาเซลเซียสตามลำดับ จากกราฟจะเห็นได้ว่าที่ความเร็วในการเดินแนวเชื่อมสูงจะมีค่าอุณหภูมิต่ำกว่าที่

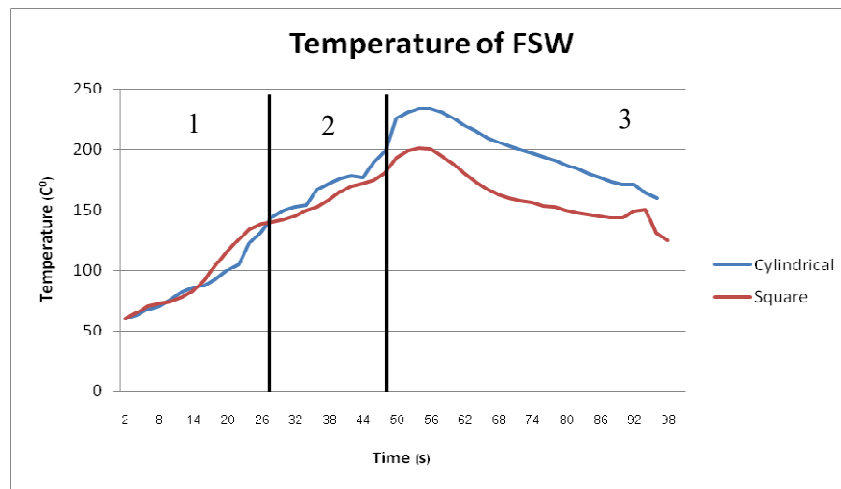
ความเร็วในการเดินแนวเชื่อมต่ำ อันเนื่องมาจากที่ความเร็วในการเดินแนวเชื่อมต่ำจะมีลักษณะของการหมุนวนของหัวพินในรอยเชื่อมเป็นเวลานานกว่าที่ความเร็วในการเดินแนวเชื่อมสูงจึงทำให้ความร้อนเกิดการสะสมมากกว่า แต่อย่างไรก็ตามอุณหภูมิที่แตกต่างกันไม่ได้มีค่ามากนักในแต่ละความเร็วเดินแนวเชื่อม แต่จะแตกต่างกันมากของความเร็วในการเดินแนวเชื่อมที่ 80 และ 160 mm/min อันเนื่องมาจากความเร็วในการเดินแนวเชื่อมต่างกันมาก



(ก) 80 mm/min



(ข) 120 mm/min



(ค) 160 mm/min

รูปที่ 4.6 แสดงค่าอุณหภูมิของหัวพินแบบทรงกระบอกและแบบสี่เหลี่ยม

4.2.3 การเปรียบเทียบค่าอุณหภูมิจากการเชื่อมด้วยหัวพินแบบทรงกระบอกและหัวพินแบบสี่เหลี่ยม

จากการเปรียบเทียบค่าของอุณหภูมิจากการเชื่อมเสียดทานแบบกวนดังรูปที่ 4.6 (ก), (ข) และ (ค) พบว่าอุณหภูมิในช่วงที่ 1 และ 2 ของหัวพินแบบทรงกระบอกและแบบสี่เหลี่ยมไม่มีความแตกต่างกัน อุณหภูมิจะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ อย่างต่อเนื่องในช่วงที่ 1 และจะลดลงเล็กน้อยในช่วงที่ 2 อย่างไรก็ตามในช่วงที่มีความแตกต่างกันก็คือในช่วงที่ 3 ซึ่งเป็นช่วงของการเดินแนวเชื่อม จากการเชื่อมด้วยหัวพินแบบทรงกระบอกจะมีค่าอุณหภูมิมากกว่าการเชื่อมด้วยหัวพินแบบสี่เหลี่ยมคิดเป็นประมาณ 10 % ของทั้งสามความเร็วในการเดินแนวเชื่อม อันเนื่องมาจากหัวพินแบบทรงกระบอกมีพื้นที่สัมผัสและการเสียดทานภายในเนื้อวัสดุตลอดเวลา อีกทั้งแรงกดขณะเดินแนวเชื่อมของหัวพินแบบทรงกระบอกมีค่ามากกว่าหัวพินแบบสี่เหลี่ยม จึงทำให้การเสียดทานเกิดความร้อนมากกว่าหัวพินแบบสี่เหลี่ยมเช่นกัน

4.3 การตรวจสอบผิวหน้ารอยเชื่อมของหัวพินแบบทรงกระบอกและสี่เหลี่ยม

จากการเชื่อมเสียดทานแบบกวน ลักษณะผิวหน้ารอยเชื่อมของอะลูมิเนียมหล่อทิ้งของแข็ง A356 ของหัวพินแบบทรงกระบอกและแบบสี่เหลี่ยม ที่ความเร็วในการหมุนของ Tool 1,750 rpm และความเร็วในการเดินแนวเชื่อม 80, 120 และ 160 mm/min ใช้การสังเกตด้วยสายตาเพื่อตรวจสอบดูว่ารอยเชื่อมมีลักษณะการเปลี่ยนแปลงเป็นอย่างไรบ้างหลังจากการเชื่อม

4.3.1 ลักษณะผิวหน้ารอยเชื่อมของหัวพินแบบทรงกระบอกและขั้วสี่เหลี่ยม

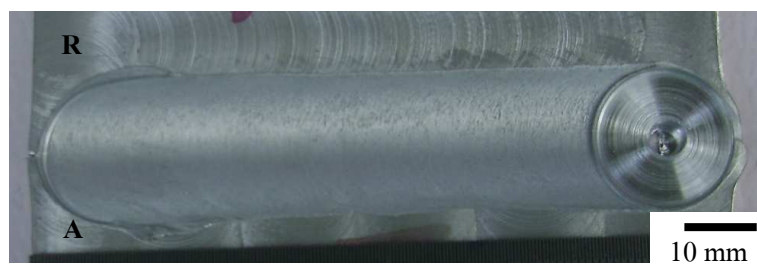
ผลจากการเชื่อมเสียดทานแบบกวน ดังรูปที่ 4.7 และ 4.8 (ก), (ข) และ (ค) จากการเชื่อมด้วยหัวพินแบบทรงกระบอกและหัวพินแบบสี่เหลี่ยม พบว่าผิวหน้าด้านบนของรอยเชื่อมมีลักษณะเรียบที่ความเร็วในการเดินแนวเชื่อมสูง อันเนื่องมาจากที่ความเร็วในการเดินแนวเชื่อมสูง ความร้อนที่สะสมในรอยเชื่อมยังน้อยที่จะทำให้เนื้อวัสดุอยู่ในสภาวะพลาสติก เมื่อเทียบกับที่ความเร็วในการเดินแนวเชื่อมต่ำ จะมีลักษณะผิวหน้ารอยเชื่อมที่ขรุขระเป็นริ้วรอยที่เกิดจากบ่าของ Tool สัมผัสกับผิวหน้ารอยเชื่อม อันเนื่องมาจากที่ความเร็วในการเดินแนวเชื่อมต่ำ ความร้อนที่สะสมในรอยเชื่อมมีมากพอที่จะทำให้เนื้อวัสดุอยู่ในสภาวะพลาสติก เนื้อวัสดุในรอยเชื่อมเกิดการอ่อนตัวทำให้มีริ้วรอยเกิดขึ้น อีกทั้งที่ความเร็วในการเดินแนวเชื่อมต่ำจะเกิดครีบมากกว่าที่ความเร็วในการเดินแนวเชื่อมสูง โดยเฉพาะด้าน Retreating อันเนื่องมาจากความร้อนที่สะสมในรอยเชื่อมมีมากพอที่จะทำให้เนื้อวัสดุอยู่ในสภาวะพลาสติกเกิดการเคลื่อนตัวได้สะดวกลื่นออกจากบ่าของ Tool เกิดเป็นครีบด้าน Retreating เพราะด้าน Retreating เป็นด้านที่ทิศทางการหมุนของ Tool สวนทางกับทิศทางการเดินแนวเชื่อม พบว่าบริเวณผิวหน้ารอยเชื่อมเกิดการประสานกันที่ดีในรอยเชื่อมต่อชน และบริเวณด้านล่างของรอยเชื่อมมีการซึมลึกที่ดี ไม่พบรอยแยกที่ไม่ประสานกันของรอยเชื่อม แต่จะเกิดรูบริเวณจุดสิ้นสุดของรอยเชื่อมอันเนื่องมาจากปลายของหัวพิน



(ก) 80 mm/min



(ข) 120 mm/min



(ค) 160 mm/min

รูปที่ 4 แสดงผิวหน้ารอยเชื่อมของการเชื่อมเสียดทานแบบกวนของหัว핀แบบทรงกระบอก



(ก) 80 mm/min



(ข) 120 mm/min



(ค) 160 mm/min

รูปที่ 4 แสดงผิวหน้ารอยเชื่อมของการเชื่อมเสียดทานแบบกวนของหัว핀แบบสี่เหลี่ยม

4.3.2 การเปรียบเทียบที ยบลิ ักษณะผิว หน้ารอยเชื่อมของหน้าบดทั้งกระบอกและแบบ สี่ เหลี่ยม

จากการเปรียบเทียบผิวหน้าด้านบนของรอยเชื่อมเสียดทานแบบกวนของหัวพินแบบ ทรงกระบอกและแบบสี่เหลี่ยม ดังรูปที่ 4.7 และ 4.8 (ก), (ข) และ (ค) พบว่าผิวหน้ารอยเชื่อม ของหัวพินแบบทรงกระบอกมีลักษณะที่หยาบและเกิดริ้วรอยมากกว่ารอยเชื่อมของหัวพินแบบ สี่เหลี่ยมอย่างเห็นได้ชัดที่ความเร็วในการเดินเชื่อมต่ำ และจากการเชื่อมด้วยหัวพินแบบ ทรงกระบอกจะเกิดครีบกมากกว่าจากการเชื่อมด้วยหัวพินแบบสี่เหลี่ยมโดยเฉพาะในด้าน Retreating อันเนื่องมาจากความร้อนและแรงกดที่มากกว่าหัวพินแบบสี่เหลี่ยม ความร้อนที่ มากกว่าทำให้เนื้อวัสดุอยู่ในสภาวะพลาสติกมากกว่าด้วยเช่นกัน อีกทั้งยังมีแรงกดที่มากกว่ามา กระทำขณะเชื่อมจึงทำให้มีลักษณะผิวหน้ารอยเชื่อมที่ขรุขระเป็นรอยที่เกิดจากบ่าของ Tool มากกว่าการเชื่อมด้วยหัวพินแบบสี่เหลี่ยม เหตุผลที่เกิดเป็นครีบด้าน Retreating เพราะทางด้าน Retreating เป็นด้านที่ทิศทางการหมุนของ Tool สวนทางกับทิศทางการเดินแนวเชื่อม พบว่า บริเวณผิวหน้ารอยเชื่อมของหัวพินทั้งสองแบบเกิดการประสานกันที่ดีของรอยเชื่อมต่อชน และ บริเวณด้านล่างของรอยเชื่อมมีการซึมลึกที่ดี ไม่พบรอยแยกที่ไม่ประสานกันของรอยเชื่อม แต่จะ เกิดบริเวณจุดสิ้นสุดของรอยเชื่อมอันเนื่องมาจากปลายของหัวพิน

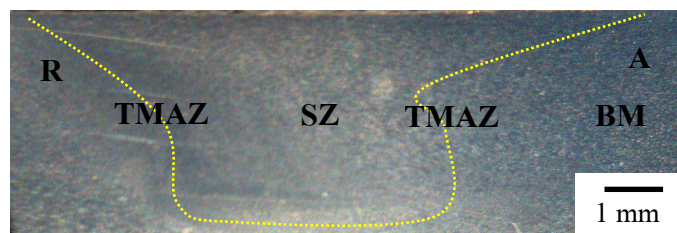
4.4 โครงสร้างมหภาคของหัว พินแบบทรงกระบอกและแบบสี่ เหลี่ยม

การตรวจสอบโครงสร้างมหภาคของรอยเชื่อมเสียดทานแบบกวนในอะลูมิเนียม หล่อทิ้งของแข็ง A356 โดยการตัดชิ้นทดสอบในทิศทางตั้งฉากกับรอยเชื่อมและให้รอยเชื่อมอยู่ ตำแหน่งกลางของชิ้นทดสอบขัดตามขั้นตอนของการเตรียมชิ้นทดสอบ กัดกรด (Etching) ด้วย สารละลายเจือจาง Keller's reagent เพื่อตรวจสอบโครงสร้างมหภาคในบริเวณรอยเชื่อม และ บริเวณที่ได้รับอิทธิพลจากความร้อนทางกลด้าน Retreating และด้าน Advancing ด้วยกล้องที่มี กำลังขยายต่ำ 2-8 เท่าของความเร็วในการหมุนของ Tools ที่ 1,750 rpm และความเร็วในการ เดินแนวเชื่อมที่ระดับ 80, 120 และ 160 mm/min ดังนี้

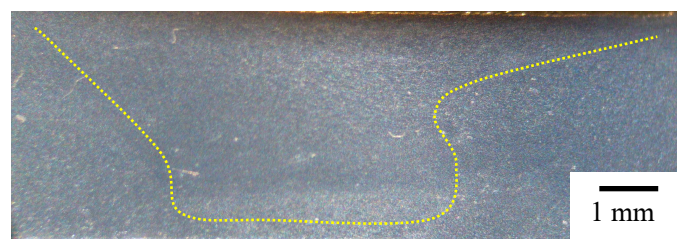
4.4.1 โครงสร้างมหภาคของหัว พินแบบทรงกระบอกและหัว พิน นีแบบสี่ เหลี่ยม

จากการตรวจสอบโครงสร้างมหภาคของการเชื่อมเสียดทานแบบกวนของ อะลูมิเนียมหล่อทิ้งของแข็ง A356 แสดงในรูปที่ 4.9 และ 4.10 (ก), (ข) และ (ค) พบว่าบริเวณ ที่ถูกกวนของหัวพินแบบทรงกระบอกทั้งสามความเร็วในการเดินแนวเชื่อมไม่มีข้อบกพร่องใดๆ เกิดขึ้นกับรอยเชื่อม รอยเชื่อมมีลักษณะที่ประสานกันเป็นอย่างดีของชิ้นงานทั้งสองชิ้น ที่ความเร็ว

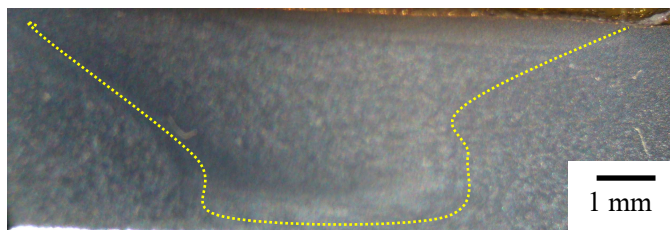
ในการเดินแนวเชื่อมต่ำรอยเชื่อมจะมีลักษณะรูปร่างคล้ายกับหัวหอมรีที่มีรูปแบบเด่นชัดมากกว่าที่ความเร็วในการเดินแนวเชื่อมสูง [Z.Y. Ma et al. (2006)] อันเนื่องมาจากที่ความเร็วในการเดินแนวเชื่อมต่ำความร้อนที่เกิดขึ้นภายในรอยเชื่อมมีมากกว่าที่ความเร็วในการเดินแนวเชื่อมสูง จึงทำให้เนื้อวัสดุอยู่ในสภาวะพลาสติกมากกว่าเกิดการไหลวนซ้ำๆ รอบตัวกวน จากการสังเกตดูในบริเวณที่ถูกกวนของทั้งสามความเร็วเดินแนวเชื่อมจะมีลักษณะโครงสร้างรอยเชื่อมที่เรียกว่าบริเวณเนื้อโลหะเดิม อันเนื่องมาจากการกวนของหัวพิน อีกทั้งในบริเวณที่ได้รับอิทธิพลจากความร้อนทางกลด้าน Retreating จะมีช่วงการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างที่แคบและเรียบมากกว่าบริเวณที่ได้รับอิทธิพลจากความร้อนทางกลด้าน Advancing อันเนื่องมาจากด้าน Retreating เป็นทิศทางที่ความเร็วในการหมุนของหัวพินสวนทางกับทิศทางเดินแนวเชื่อม จึงทำให้โครงสร้างเกิดการไหลวนสวนทางกันคล้ายกับถูกอัด และด้าน Advancing มีโครงสร้างที่คล้ายกับถูกดึงเป็นบริเวณกว้าง อันเนื่องมาจากเป็นด้านที่ทิศทางหมุนของหัวพินกับทิศทางเดินแนวเชื่อมเป็นไปในทิศทางเดียวกัน



(ก) 80 mm/min



(ข) 120 mm/min



(ค) 160 mm/min

รูปที่ 4. โครงสร้างมหภาคจากการเชื่อมด้วยหัวพินแบบทรงกระบอก (R) Retreating side, Advancing side, (TMAZ) Thermo-mechanical affected zone และ (SZ) Stir zone



(ก) 80 mm/min



(ข) 120 mm/min



(ค) 160 mm/min

รูปที่ 4. โครงสร้างมหภาคจากการเชื่อมด้วยหัวพินแบบสี่เหลี่ยม (R) Retreating side, Advancing side, (TMAZ) Thermo-mechanical affected zone และ (SZ) Stir zone

4.4.2 การเปรียบเทียบโครงสร้างมหภาคของหัวพินแบบทรงกระบอกและแบบสี่เหลี่ยมคี่เหลี่ยม

จากโครงสร้างมหภาคของหัวพินแบบทรงกระบอกและแบบสี่เหลี่ยมคี่เหลี่ยมรูปที่ 4.9 และ 4.10 พบว่าทั้งสามความเร็วในการเดินแนวเชื่อมไม่มีข้อบกพร่องใดๆ เกิดขึ้นในรอยเชื่อม รอยเชื่อมมีลักษณะที่ประสานเข้าด้วยกันเป็นอย่างดีของทั้งสองชิ้น จากการเชื่อมด้วยหัวพินแบบทรงกระบอกจะมีลักษณะรูปร่างของรอยเชื่อมคล้ายกับหัวหอมรีที่มีรูปแบบปรากฏเด่นชัดและมีรูปร่างรอยเชื่อมที่แน่นนอนมากกว่ารอยเชื่อมที่เกิดจากการเชื่อมด้วยหัวพินแบบสี่เหลี่ยม อันเนื่องมาจากแรงกดและความร้อนที่มากกว่า รวมไปถึงรูปแบบของหัวพินที่เรียบไม่มีเหลี่ยม ทำให้การไหลวนของเนื้อวัสดุรอบหัวพินมีทิศทางการไหลวนในลักษณะที่แน่นนอน เมื่อเทียบกับการเชื่อมด้วยหัวพินแบบสี่เหลี่ยมลักษณะของหัวพินที่เป็นแบบเหลี่ยมทำให้เกิดการไหลวนของเนื้อวัสดุรอบหัวพินไม่มีลักษณะที่แน่นนอน อีกทั้งพบว่ารอยเชื่อมของหัวพินแบบทรงกระบอกมีลักษณะรอยเชื่อมที่กว้างกว่ารอยเชื่อมของหัวพินแบบสี่เหลี่ยม อันเนื่องมาจากความร้อนที่มากกว่าทำให้เนื้อวัสดุอยู่ในสภาวะพลาสติกเป็นบริเวณกว้างกว่ารอยเชื่อมของหัวพินแบบสี่เหลี่ยม [Z.Y. Ma et al. (2006)] แต่ในขณะเดียวกันบริเวณที่ได้รับอิทธิพลจากความร้อนทางกลด้าน Advancing ของหัวพินแบบทรงกระบอกจะมีลักษณะที่แคบกว่าหัวพินแบบสี่เหลี่ยม อันเนื่องมาจากหัวพินแบบสี่เหลี่ยมมีลักษณะหัวพินเป็นเหลี่ยมทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างที่ผิดปกติ (กว้างขึ้น)

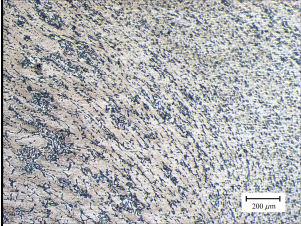
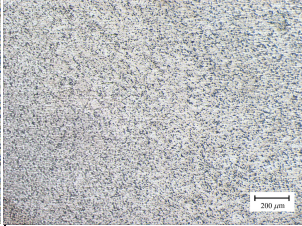
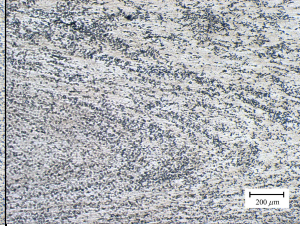
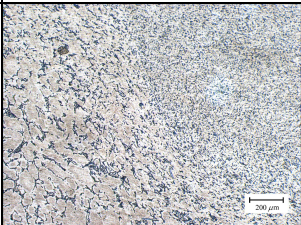
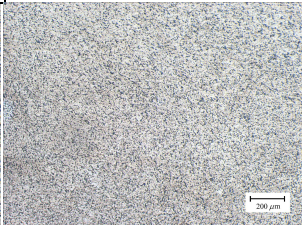
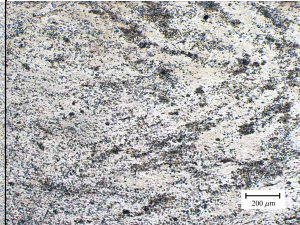
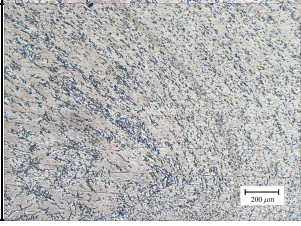
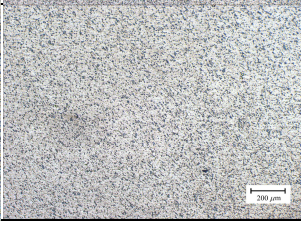
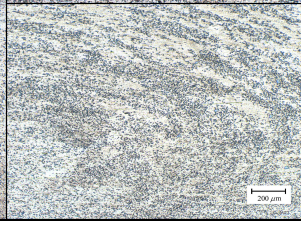
4.5 โครงสร้างทางจุลภาคจากกล้องจุลทรรศน์ แบบใช้แสง (OM)

จากการตรวจสอบโครงสร้างทางจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง พบว่าบริเวณเนื้อโลหะเดิมประกอบไปด้วยเฟสแอลฟา (Al) แบบก่อนกลมผสมกับเฟส Eutectic ประกอบไปด้วย Al+Si จากการวัดขนาดเกรนโดยใช้ Image tool ในบริเวณเนื้อโลหะเดิมพบว่าขนาดเกรนเฉลี่ยประมาณ 62 ไมครอน

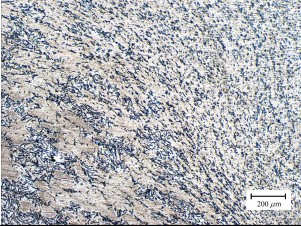
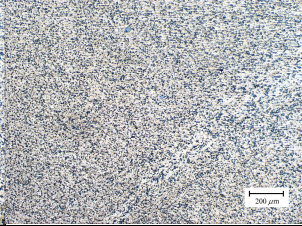
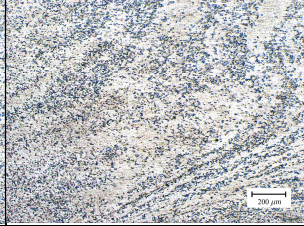
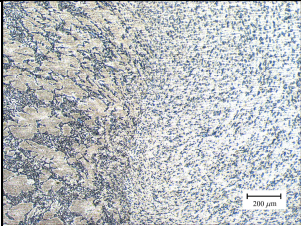
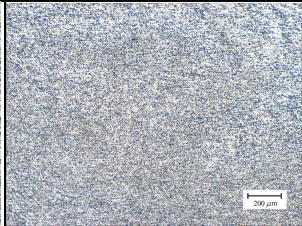
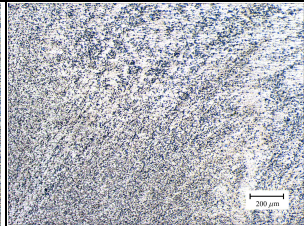
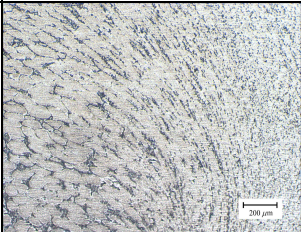
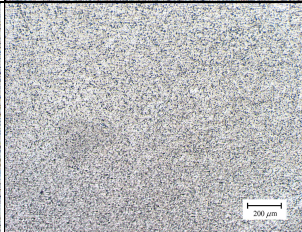
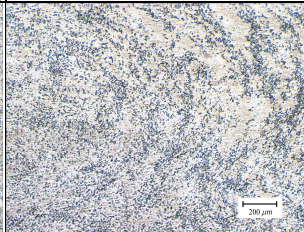
4.5.1 โครงสร้างทางจุลภาคจากการเชื่อมด้วยหัวพินแบบทรงกระบอกและหัวพินแบบสี่เหลี่ยมคี่เหลี่ยม

จากรูปที่ 4.11 และ 4.12 แสดงโครงสร้างทางจุลภาคของหัวพินแบบทรงกระบอกและหัวพินแบบสี่เหลี่ยมคี่เหลี่ยมจากกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง พบว่าที่ความเร็วในการเดินแนวเชื่อม 80, 120 และ 160 mm/min โครงสร้างรอยเชื่อมมีการประสานเข้าด้วยกันเป็นอย่างดีของเนื้อวัสดุทั้งสองชิ้น อันเนื่องมาจากการกวนของหัวพินและแรงกดทำให้เกิดความร้อนในรอยเชื่อม เนื้อวัสดุเกิดการเคลื่อนตัวรอบหัวพินเกิดการประสานกัน จากการตรวจสอบไม่พบข้อบกพร่องใดๆ ในรอยเชื่อม บริเวณรอยเชื่อมมีลักษณะโครงสร้างที่ละเอียดมากซึ่งประกอบไปด้วยอนุภาคซิลิกอน

ผสมในอะลูมิเนียมเมตริกซ์กระจายตัวอย่างสม่ำเสมอทั่วบริเวณที่ถูกกวน อันเนื่องมาจากการกวนของหัวพินและการเสียดทานระหว่างหัวพินกับเนื้อวัสดุเกิดการแตกละเอียดของโครงสร้างเกรนแบบก้อนกลม (Al) และเฟส Eutectic (Al+Si) ในบริเวณที่ได้รับอิทธิพลจากความร้อนทางกลด้าน Retreating จะเกิดความแตกต่างจากโครงสร้างระหว่างบริเวณเนื้อโลหะเดิมและบริเวณที่ถูกกวนเป็นลักษณะของโครงสร้างที่ค่อนข้างละเอียดคล้ายกับถูกอัดและแคบกว่าบริเวณที่ได้รับอิทธิพลจากความร้อนทางกลด้าน Advancing เนื่องจากด้าน Retreating มีทิศทางการเดินแนวเชื่อมตรงข้ามกับทิศทางการหมุนของ Tool และบริเวณที่ได้รับอิทธิพลจากความร้อนทางกลด้าน Advancing มีลักษณะโครงสร้างแบนยาวคล้ายกับถูกดึงเป็นบริเวณกว้างกว่าด้าน Retreating ตามทิศทางการกวนของหัวพิน เนื่องจากด้าน Advancing เป็นด้านที่ทิศทางการหมุนของ Tool มีทิศทางเดียวกันกับทิศทางการเดินแนวเชื่อม อย่างไรก็ตามบริเวณที่ถูกกวนของทั้งสามความเร็วเดินแนวเชื่อมของทั้งสองหัวพินจากการสังเกตไม่พบว่าโครงสร้างจะมีลักษณะที่แตกต่างกันอย่างเห็นได้ชัด อันเนื่องมาจากโครงสร้างมีลักษณะที่ละเอียดมาก

รูปแบบหัวพิน และความเร็ว เดินแนวเชื่อม	โครงสร้างจุลภาค		
	TMAZ Retreating	SZ	TMAZ Advancing
แบบ ทรงกระบอก 80 mm/min			
แบบ ทรงกระบอก 120 mm/min			
แบบ ทรงกระบอก 160 mm/min			

รูปที่ 4.11 แสดงโครงสร้างทางจุลภาคการเชื่อมเสียดทานแบบกวนของหัวพินแบบทรงกระบอก

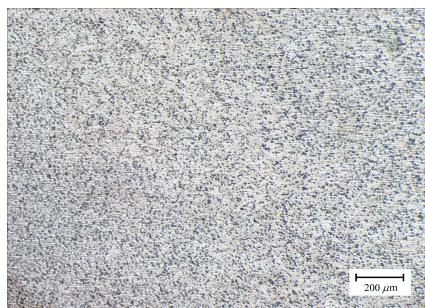
รูปแบบหัวพิน และความเร็ว เดินแนวเชื่อม	โครงสร้างจุลภาค		
	TMAZ Retreating	SZ	TMAZ Advancing
แบบสี่เหลี่ยม 80 mm/min			
แบบสี่เหลี่ยม 120 mm/min			
แบบสี่เหลี่ยม 160 mm/min			

รูปที่ 4.12 โครงสร้างทางจุลภาคการเชื่อมเสียดทานแบบกวนของหัวพินแบบสี่เหลี่ยม

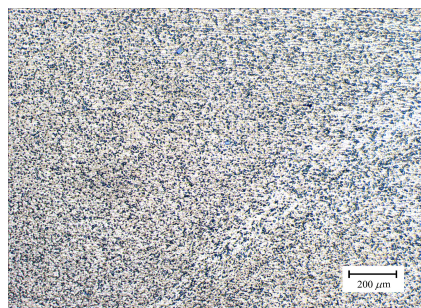
4.5.2 เปรียบเทียบโครงสร้างทางจุลภาคจากการเชื่อมด้วยหัวพินทรงกระบอกและแบบสี่เหลี่ยม

จากการเปรียบเทียบโครงสร้างทางจุลภาคโดยใช้กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง ของหัวพินแบบทรงกระบอกและแบบสี่เหลี่ยม ดังรูปที่ 4.13 (ก) และ (ข) พบว่าที่ความเร็วในการเดินแนวเชื่อม 80, 120 และ 160 mm/min บริเวณรอยเชื่อมของหัวพินแบบทรงกระบอกและบริเวณรอยเชื่อมของหัวพินแบบสี่เหลี่ยมมีขนาดเกรนที่ละเอียดมากกว่าบริเวณเนื้อโลหะเดิม แต่อย่างไรก็ตามจากการเชื่อมด้วยหัวพินแบบทรงกระบอกจะมีลักษณะโครงสร้างที่ละเอียดมากกว่าจากการเชื่อมด้วยหัวพินแบบสี่เหลี่ยม บริเวณรอยเชื่อมประกอบไปด้วยอนุภาคซิลิกอนผสมในอะลูมิเนียมเมตริกซ์กระจายตัวอย่างสม่ำเสมอทั่วบริเวณที่ถูกกวน อันเนื่องมาจากความร้อนและแรงกดทำให้เกิดการเสียดทานระหว่างหัวพินกับเนื้อวัสดุที่มากกว่าการเชื่อมด้วยหัวพินแบบสี่เหลี่ยมเกิดการแตกละเอียดของโครงสร้างเกรนแบบก้อนกลม (Al) และเฟส Eutectic (Al+Si)

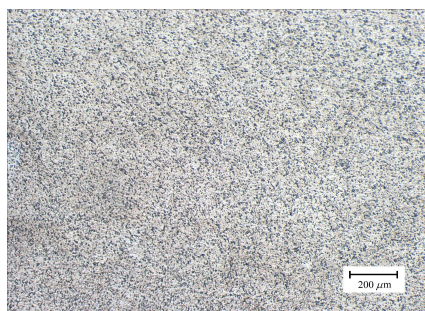
ในรอยเชื่อมจากรูปที่ 4.11 และ 4.12 บริเวณที่ได้รับอิทธิพลจากความร้อนทางกลด้าน Retreating และด้าน Advancing ของหัวพินทั้งสองแบบไม่มีความแตกต่างกันอย่างเห็นได้ชัด



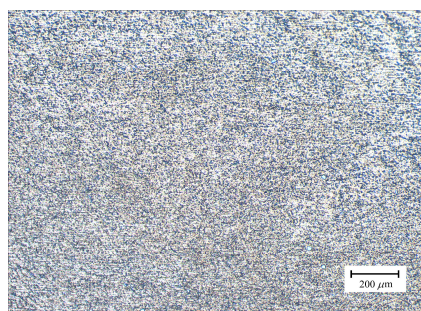
(ก) 80 mm/min



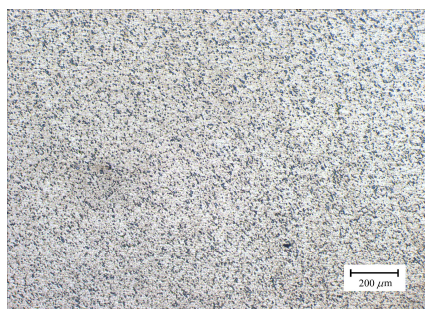
(ข) 80 mm/min



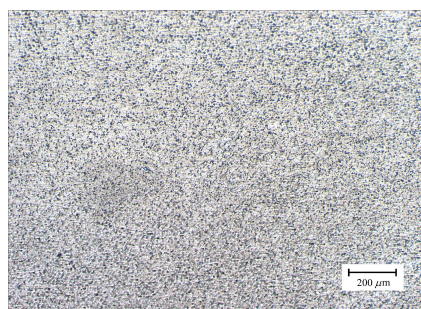
(ก) 120 mm/min



(ข) 120 mm/min



(ก) 160 mm/min

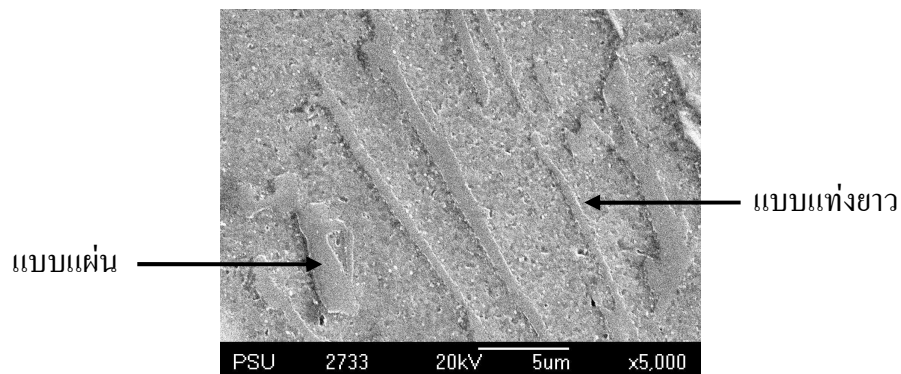


(ข) 160 mm/min

รูปที่ 4.13 โครงสร้างทางจุลภาคบริเวณรอยเชื่อมเสียดทานแบบกวนของหัวพิน (ก) แบบทรงกระบอกและ (ข) แบบสี่เหลี่ยม

4.6 โครงสร้างทางจุลภาคจากกล้องจุลทรรศน์ อิเล็กตรอนแบบส่อง (SEM) โดยมี ระบบ เอ็ดกซ์เรย์ (EDX)

จากรูปที่ 4.14 แสดงโครงสร้างทางจุลภาคจากการตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ในบริเวณเนื้อโลหะเดิมของอะลูมิเนียม A356 ที่ได้จากการหล่อแบบกึ่งของแข็ง พบว่าลักษณะของโครงสร้างประกอบไปด้วยอนุภาคซิลิกอน (Si) กระจายตัวทั่วไปในอลูมิเนียมเมทริกซ์ ซึ่งอนุภาคซิลิกอนเป็นธาตุผสมหลักมีลักษณะเป็นแบบแท่งยาว มีความโตประมาณ $1.5 \mu\text{m}$ และแบบแผ่น มีความโตประมาณ $2.5 \mu\text{m}$ มีความยาวประมาณ $5\text{-}20 \mu\text{m}$ ผสมอยู่ในอลูมิเนียมเมทริกซ์

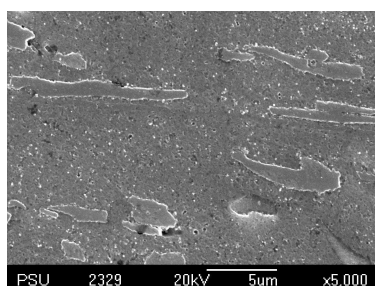


รูปที่ 4.14 แสดงโครงสร้างจากกล้อง SEM ของบริเวณเนื้อโลหะเดิม

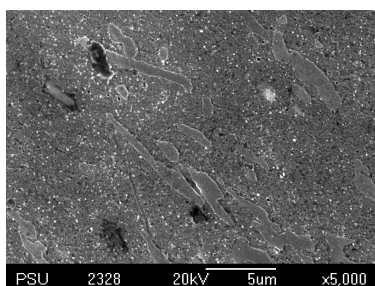
4.6.1 โครงสร้างทางจุลภาคจากการเชื่อมด้วยหัวพินแบบทรงกระบอก

จากรูปที่ 4.15, 4.17 และ 4.19 ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของหัวพินแบบทรงกระบอก พบว่าขนาดของธาตุซิลิกอน (สี่เหลี่ยม) ในรอยเชื่อมเกิดการแตกหักและเล็กลงมีขนาดความโตประมาณ 1-2 ไมครอน และมีความยาวประมาณ 2-4 ไมครอน เมื่อเทียบกับขนาดของธาตุซิลิกอนในบริเวณเนื้อโลหะเดิม อันเนื่องมาจากการกวนของหัวพินทำให้โครงสร้างเกรนแบบก้อนกลมและอนุภาคซิลิกอนบริเวณเฟสยูเทคติกส์เกิดการแตกหัก อีกทั้งพบว่าที่ความเร็วในการเดินแนวเชื่อม 80 และ 120 mm/min จากรูปที่ 4.15 และ 4.17 ในบริเวณรอยเชื่อมทั้งด้านบน ตรงกลางและด้านล่าง มีลักษณะโครงสร้างประกอบไปด้วยธาตุซิลิกอนที่มีขนาดเล็กกว่าในบริเวณที่ได้รับอิทธิพลจากความร้อนทางกลด้าน Retreating และด้าน Advancing กระจายตัวอยู่ทั่วไปในอลูมิเนียมเมทริกซ์ ในบริเวณที่ได้รับอิทธิพลจากความร้อนทางกลด้าน Retreating และด้าน Advancing จะมีลักษณะการแตกหักของอนุภาคซิลิกอนที่ยาวกว่าบริเวณที่รอยเชื่อมเล็กน้อย แต่ในขณะเดียวกันที่ความเร็วในการเดินแนวเชื่อมทั้งสอง ในบริเวณ

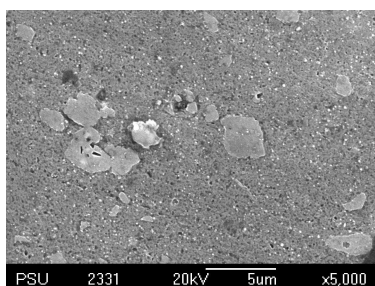
รอยเชื่อม บริเวณที่ได้รับอิทธิพลจากความร้อนทางกลด้าน Retreating และด้าน Advancing ไม่ได้มีความแตกต่างของขนาดอนุภาคซิลิกอนอย่างเห็นได้ชัด แต่จากการวิเคราะห์ด้วย EDX ในรูปที่ 4.16 และ 4.18 พบว่าที่ความเร็วในการเดินแนวเชื่อม 120 mm/min ในบริเวณตรงกลางรอยเชื่อมจะมีลักษณะการกระจายตัวของอนุภาคซิลิกอนที่สม่ำเสมอมากกว่าเล็กน้อยของความเร็วในการเดินแนวเชื่อม 80 mm/min เนื่องจากที่ความเร็วในการเดินแนวเชื่อมสูงทำให้เกิดการกระจายตัวของอนุภาคที่ดีกว่าของความเร็วในการเดินแนวเชื่อมต่ำ จากรูปที่ 4.19 ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด พบว่าที่ความเร็วในการเดินแนวเชื่อม 160 mm/min ในบริเวณที่ได้รับอิทธิพลจากความร้อนทางกลด้าน Retreating และด้าน Advancing มีลักษณะอนุภาคซิลิกอนคล้ายกับที่ความเร็วในการเดินแนวเชื่อม 80 และ 120 mm/min แต่ที่แตกต่างกันอย่างเห็นได้ชัด คือ จากการวิเคราะห์ด้วย EDX ในบริเวณตรงกลางรอยเชื่อมมีขนาดอนุภาคซิลิกอนที่เล็กกว่าความเร็วในการเดินแนวเชื่อม 80 และ 120 mm/min และมีการกระจายตัวของอนุภาคซิลิกอนที่ดีกว่าเช่นกัน อันเนื่องมาจากที่ความเร็วในการเดินแนวเชื่อมสูงทำให้เกิดการกระจายตัวของอนุภาคที่ดีกว่าของความเร็วในการเดินแนวเชื่อมต่ำ



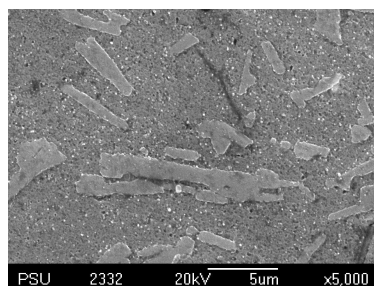
(ก)



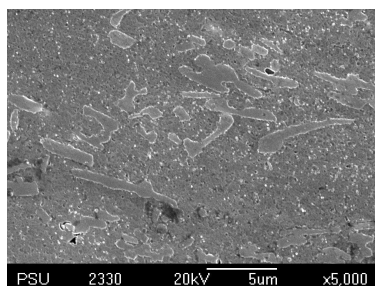
(ข)



(ค)

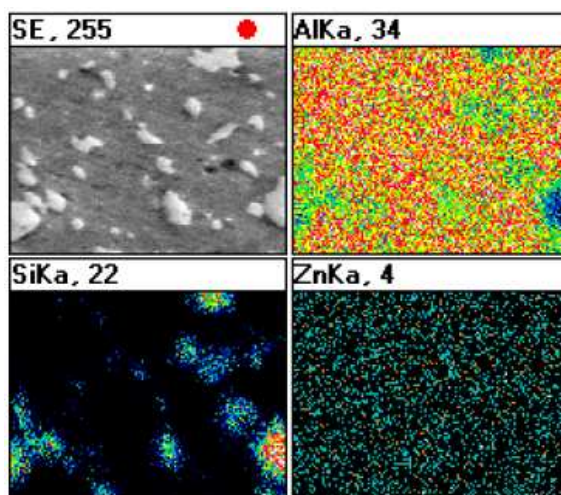


(ง)

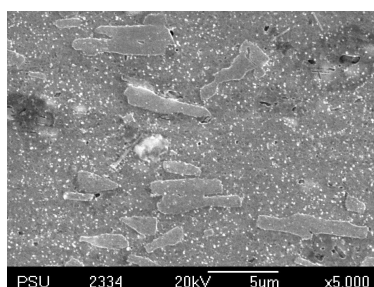


(จ)

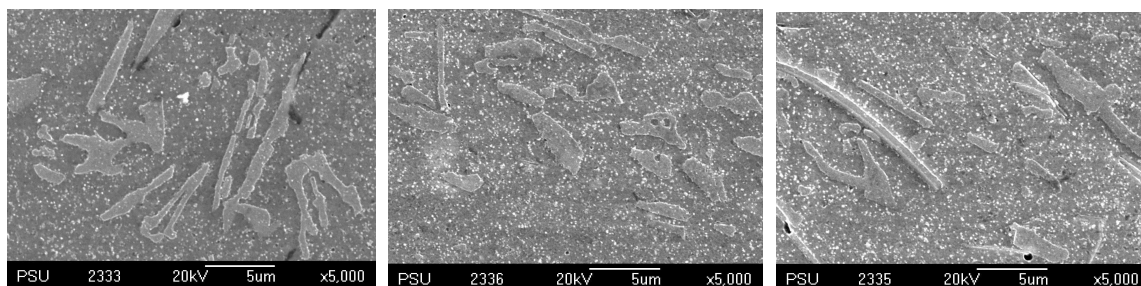
รูปที่ 4.๑๕ แสดงโครงสร้างจากกล้อง SEM ที่ความเร็วในการเดินแนวเชื่อม 80 mm/min
 (ก) Stir zone ด้านบน (ข) TMAZ-R (ค) Stir zone ตรงกลาง (ง) TMAZ-A
 และ (จ) Stir zone ด้านล่าง



รูปที่ 4.๑๖ แสดงการกระจายตัวของธาตุต่างๆ จาก EDX ที่ความเร็วในการเดินแนวเชื่อม
 80 mm/min บริเวณรอยเชื่อม



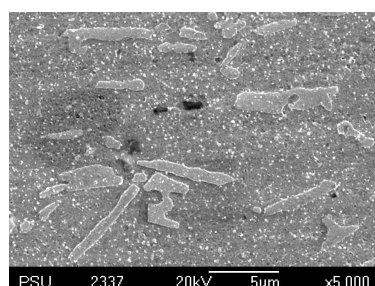
(ก)



(ข)

(ค)

(ง)

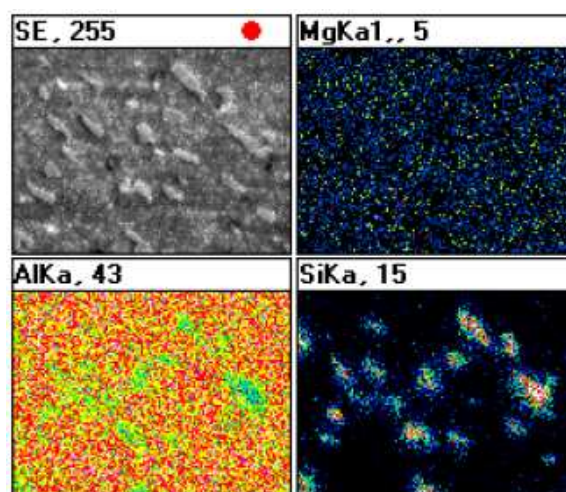


(จ)

รูปที่ 4.17 แสดงโครงสร้างจากกล้อง SEM ที่ความเร็วในการเดินแนวเชื่อม 120 mm/min

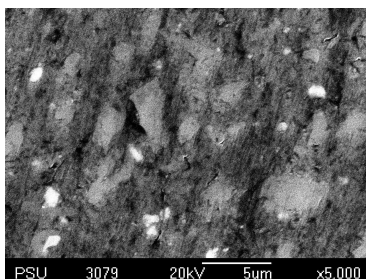
(ก) Stir zone ด้านบน (ข) TMAZ-R (ค) Stir zone ตรงกลาง (ง) TMAZ-A

และ (จ) Stir zone ด้านล่าง

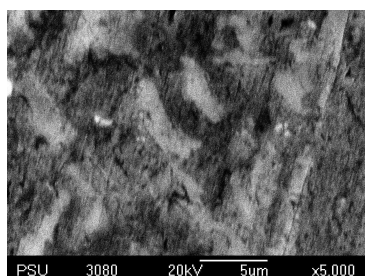


รูปที่ 4.18 แสดงการกระจายตัวของธาตุต่างๆ จาก EDX ที่ความเร็วในการเดินแนวเชื่อม

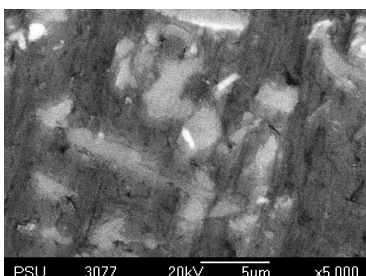
120 mm/min บริเวณรอยเชื่อม



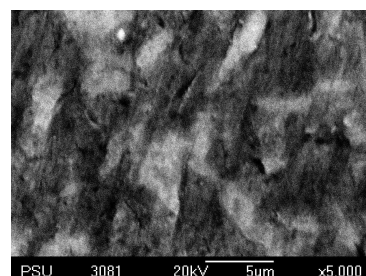
(ก)



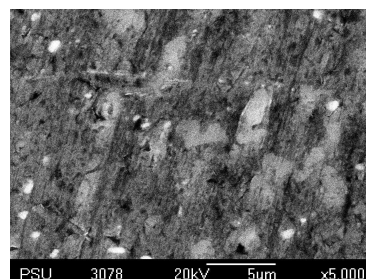
(ข)



(ค)



(ง)

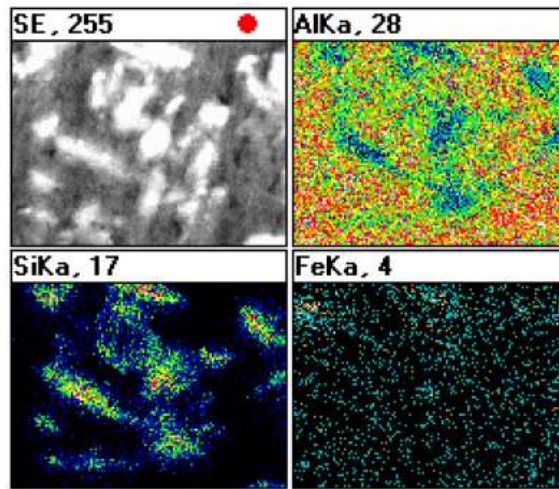


(จ)

รูปที่ 4.11 แสดงโครงสร้างจากกล้อง SEM ที่ความเร็วในการเดินแนวเชื่อม 160 mm/min

(ก) Stir zone ด้านบน (ข) TMAZ-R (ค) Stir zone ตรงกลาง (ง) TMAZ-A

และ (จ) Stir zone ด้านล่าง

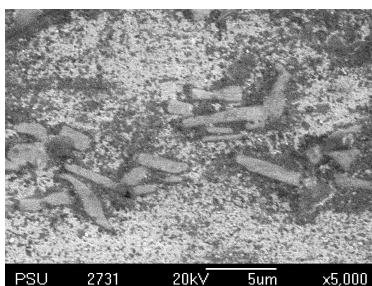


รูปที่ 4.20 แสดงการกระจายตัวของธาตุต่างๆ จาก EDX ที่ความเร็วในการเดินแนวเชื่อม 160 mm/min บริเวณรอยเชื่อม

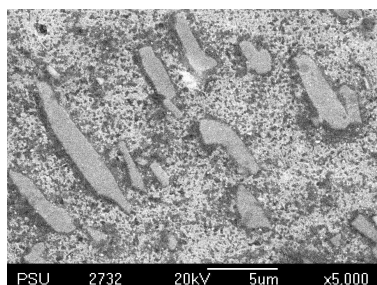
4.6.2 โครงสร้างทางจุลภาคจากการเชื่อมด้วยหัวพินแบบสตีลเหล็ยม

จากรูปที่ 4.21, 4.23 และ 4.25 ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของหัวพินแบบทรงกระบอก พบว่าขนาดของธาตุซิลิกอน (สีเทาขาว) ในบริเวณรอยเชื่อมเกิดการแตกหักและเล็กลงมีขนาดความโตประมาณ 2-4 ไมครอน และมีความยาวประมาณ 4-6 ไมครอน เมื่อเทียบกับขนาดของธาตุซิลิกอนในบริเวณเนื้อโลหะเดิม อันเนื่องมาจากการกวนของหัวพินทำให้โครงสร้างเกรนแบบก้อนกลมและอนุภาคซิลิกอนบริเวณเฟสยูเทคติกส์เกิดการแตกหัก อีกทั้งพบว่าที่ความเร็วในการเดินแนวเชื่อม 80 mm/min จากรูปที่ 4.21 บริเวณรอยเชื่อมทั้งด้านบนตรงกลางและด้านล่าง มีลักษณะโครงสร้างประกอบไปด้วยธาตุซิลิกอนที่ไม่ได้มีความแตกต่างของขนาดอนุภาคและการกระจายตัวอย่างเห็นได้ชัดเมื่อเทียบกับบริเวณที่ได้รับอิทธิพลจากความร้อนทางกลด้าน Retreating และด้าน Advancing บริเวณที่ได้รับอิทธิพลจากความร้อนทางกลด้าน Retreating และด้าน Advancing จะมีลักษณะการแตกหักของอนุภาคซิลิกอนที่เป็นแผ่นยาวไม่มีรูปทรงที่แน่นอน อีกทั้งเมื่อเปรียบเทียบกับที่ความเร็วในการเดินแนวเชื่อม 120 และ 160 mm/min ที่ความเร็วในการเดินแนวเชื่อมทั้งสองนี้ ในบริเวณรอยเชื่อม บริเวณที่ได้รับอิทธิพลจากความร้อนทางกลด้าน Retreating และด้าน Advancing มีความแตกต่างของขนาดอนุภาคซิลิกอนและมีการกระจายตัวอย่างเห็นได้ชัด คือ มีขนาดเล็กและมีการกระจายตัวที่ดีกว่าที่ความเร็วในการเดินแนวเชื่อม 80 mm/min จากการวิเคราะห์ด้วย EDX ดังในรูปที่ 4.22 เนื่องจากที่ความเร็วในการเดินแนวเชื่อมต่ำทำให้เกิดการกระจายตัวของอนุภาคซิลิกอนน้อยลงเช่นกัน อย่างไรก็ตามใน

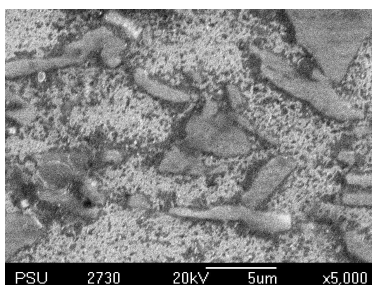
รูปที่ 4.23 และ 4.25 ที่ความเร็วในการเดินแนวเชื่อม 120 และ 160 mm/min ในบริเวณรอยเชื่อม บริเวณที่ได้รับอิทธิพลจากความร้อนทางกลด้าน Retreating และด้าน Advancing ไม่ได้มีความแตกต่างของขนาดอนุภาคซิลิกอนอย่างเห็นได้ชัด แต่จากการวิเคราะห์ด้วย EDX ในรูปที่ 4.24 และ 4.26 พบว่าที่ความเร็วในการเดินแนวเชื่อม 160 mm/min ในบริเวณตรงกลางรอยเชื่อม จะมีลักษณะการกระจายตัวของอนุภาคซิลิกอนที่สม่ำเสมอมากกว่าเล็กน้อยของความเร็วในการเดินแนวเชื่อม 120 mm/min เนื่องจากที่ความเร็วในการเดินแนวเชื่อมสูงทำให้เกิดการกระจายตัวของอนุภาคที่ดีกว่าของความเร็วในการเดินแนวเชื่อมต่ำ



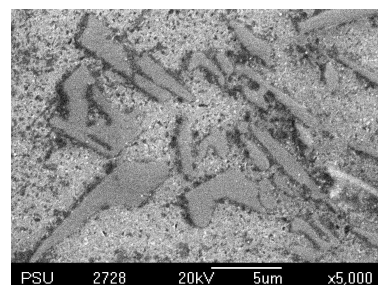
(ก)



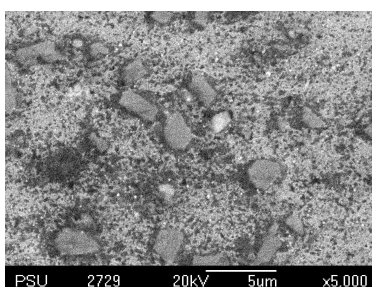
(ข)



(ค)



(ง)

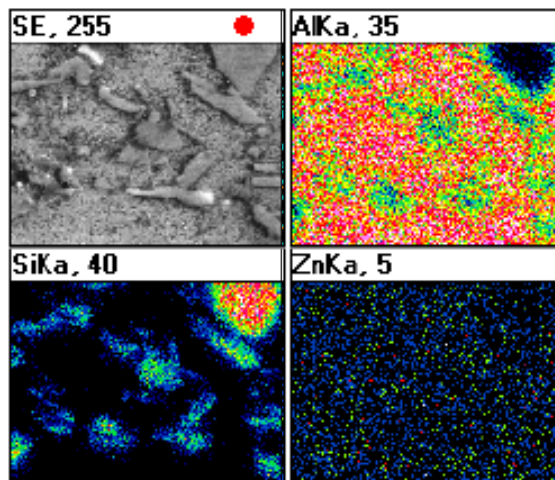


(จ)

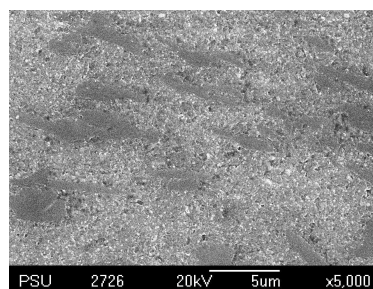
รูปที่ 4.27 แสดงโครงสร้างจากกล้อง SEM ที่ความเร็วในการเดินแนวเชื่อม 80 mm/min

(ก) Stir zone ด้านบน (ข) TMAZ-R (ค) Stir zone ตรงกลาง (ง) TMAZ-A

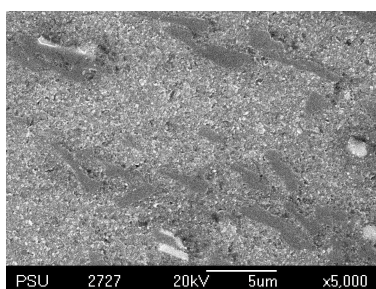
และ (จ) Stir zone ด้านล่าง



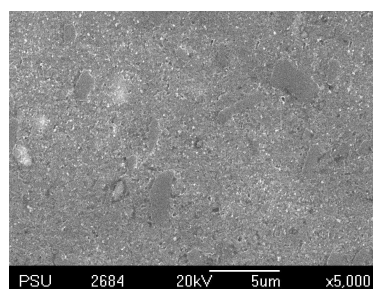
รูปที่ 4.๑๕ แสดงการกระจายตัวของธาตุต่างๆ จาก EDX ที่ความเร็วในการเดินแนวเชื่อม 80 mm/min บริเวณรอยเชื่อม



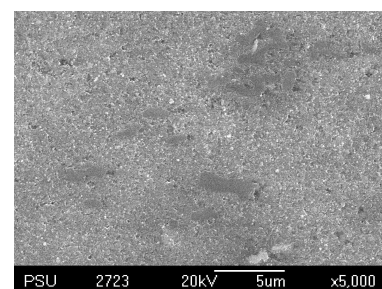
(ก)



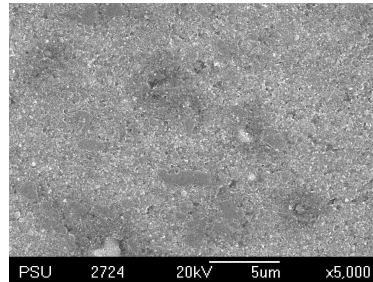
(ข)



(ค)

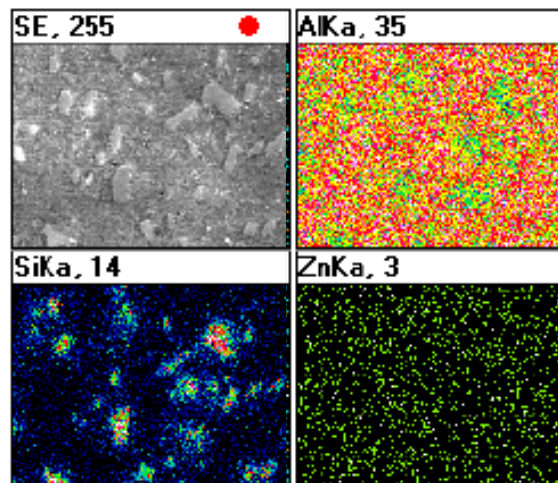


(ง)

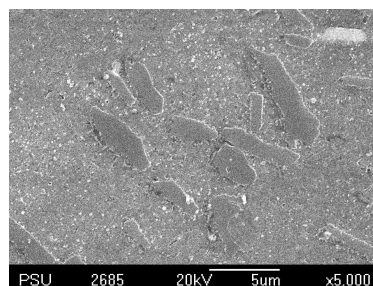


(จ)

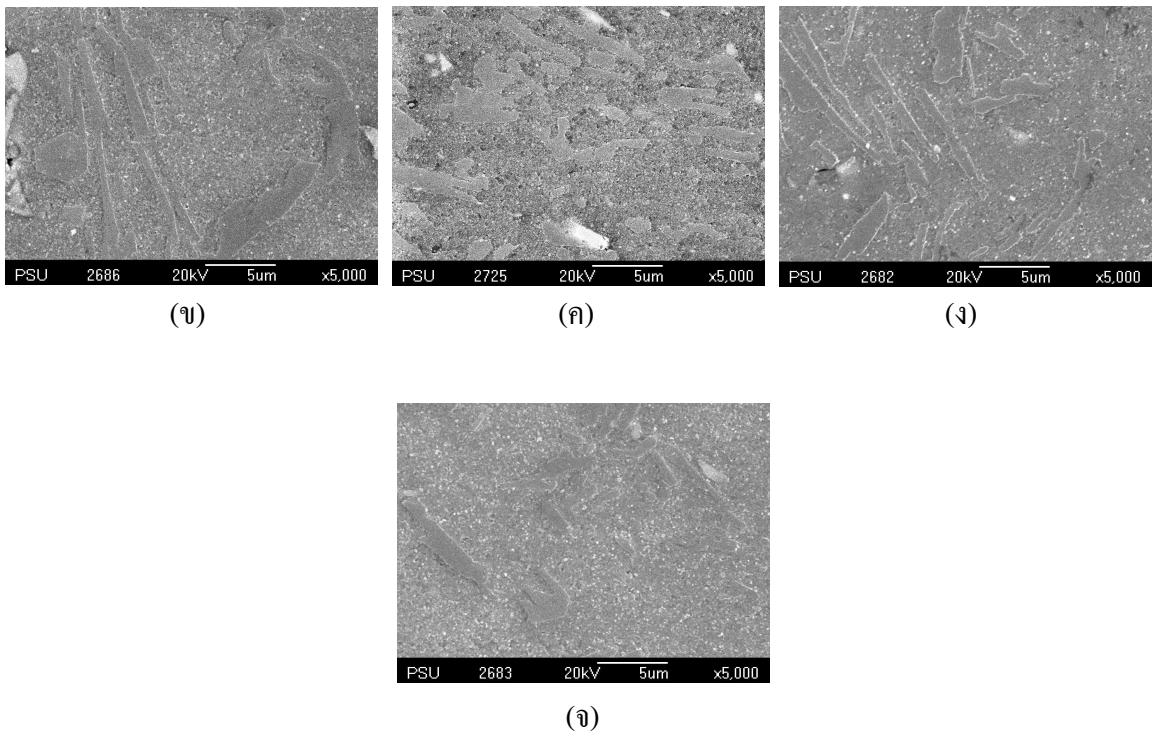
รูปที่ 4.23 แสดงโครงสร้างจากกล้อง SEM ที่ความเร็วในการเดินแนวเชื่อม 120 mm/min
 (ก) Stir zone ด้านบน (ข) TMAZ-R (ค) Stir zone ตรงกลาง (ง) TMAZ-A
 และ (จ) Stir zone ด้านล่าง



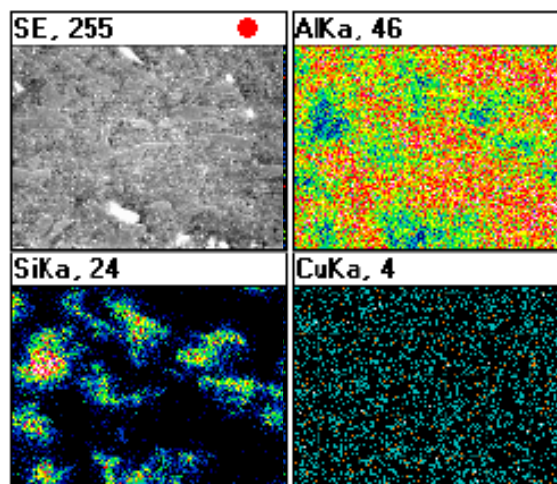
รูปที่ 4.24 แสดงการกระจายตัวของธาตุต่างๆ จาก EDX ที่ความเร็วในการเดินแนวเชื่อม
 120 mm/min บริเวณรอยเชื่อม



(ก)



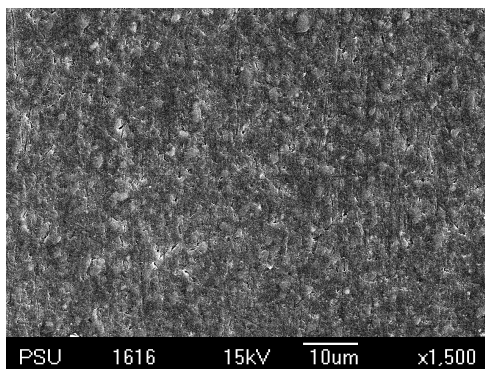
รูปที่ 4.๑๕ แสดงโครงสร้างจากกล้อง SEM ที่ความเร็วในการเดินแนวเชื่อม 160 mm/min
 (ก) Stir zone ด้านบน (ข) TMAZ-R (ค) Stir zone ตรงกลาง (ง) TMAZ-A
 และ (จ) Stir zone ด้านล่าง



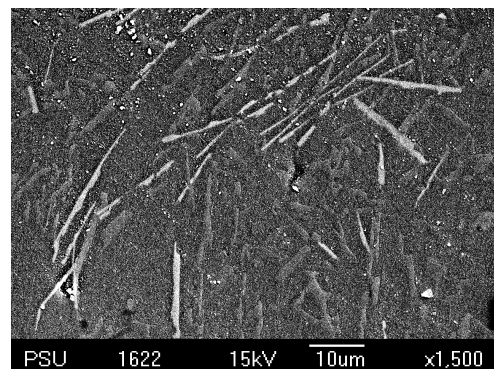
รูปที่ 4.๑๖ แสดงการกระจายตัวของธาตุต่างๆ จาก EDX ที่ความเร็วในการเดินแนวเชื่อม
 160 mm/min บริเวณรอยเชื่อม

4.6.3 จากการเปรียบเทียบที่ ยบโครงสร้างทางจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์ อิเล็กตรอนแบบส่องกราด จากการเชื่อมด้วยหัวพินแบบทรงกระบอกและแบบสี่เหลี่ยม

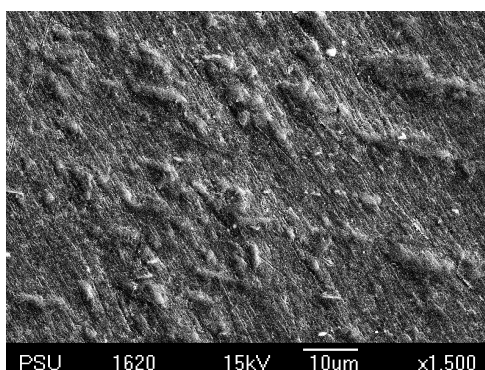
จากการเปรียบเทียบโครงสร้างทางจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ดังรูปที่ 4.27 (ก) และ (ข) จากการเชื่อมด้วยหัวพินแบบทรงกระบอกและหัวพินแบบสี่เหลี่ยม พบว่าทั้งสามความเร็วในการเดินแนวเชื่อมของหัวพินแบบทรงกระบอกจะมีลักษณะของอนุภาคซิติคอนที่เล็กกว่าหัวพินแบบสี่เหลี่ยม และมีการกระจายตัวของอนุภาคซิติคอนที่ดีกว่าเช่นกัน อันเนื่องมาจากความร้อนและแรงกดจากการเสียดทานของหัวพินภายในเนื้อของวัสดุมีมากกว่าหัวพินแบบสี่เหลี่ยม รวมไปถึงพื้นที่การเสียดทานระหว่างหัวพินกับเนื้อวัสดุในรอยเชื่อมจากการเชื่อมด้วยหัวพินแบบทรงกระบอกมีมากกว่าจากการเชื่อมด้วยหัวพินแบบสี่เหลี่ยมส่งผลให้เนื้อวัสดุเกิดการไหลวนรอบตัวจนทำให้อนุภาคซิติคอนเกิดการแตกหักและเล็กลง



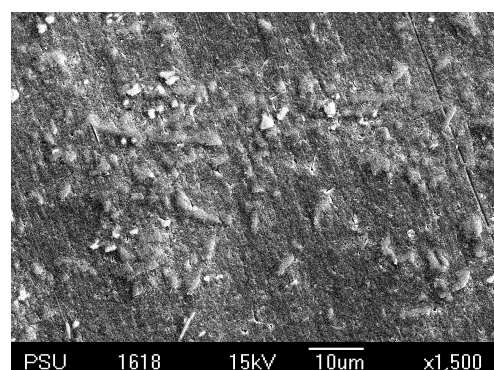
(ก) 80 mm/min



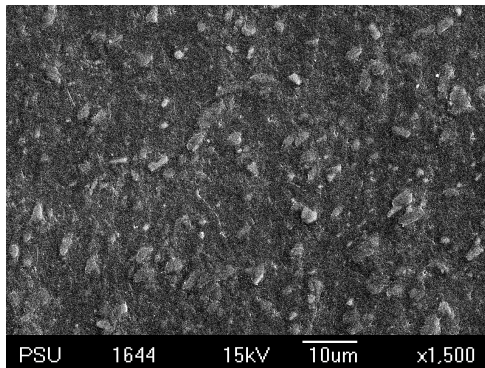
(ข) 80 mm/min



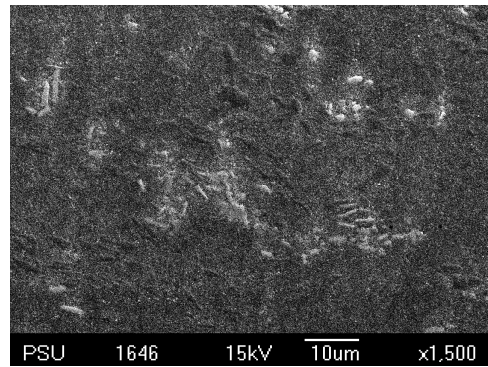
(ค) 120 mm/min



(ด) 120 mm/min



(ก) 160 mm/min



(ข) 160 mm/min

รูปที่ 4.๑๗ โครงสร้างจากกล้อง SEM ในรอยเชื่อมเสียดทานแบบกวนของหัวพิน (ก) แบบทรงกระบอกและ (ข) แบบสี่เหลี่ยม

4.7 การทดสอบความแข็งแรงจากการเชื่อมเสียดทานแบบกวน

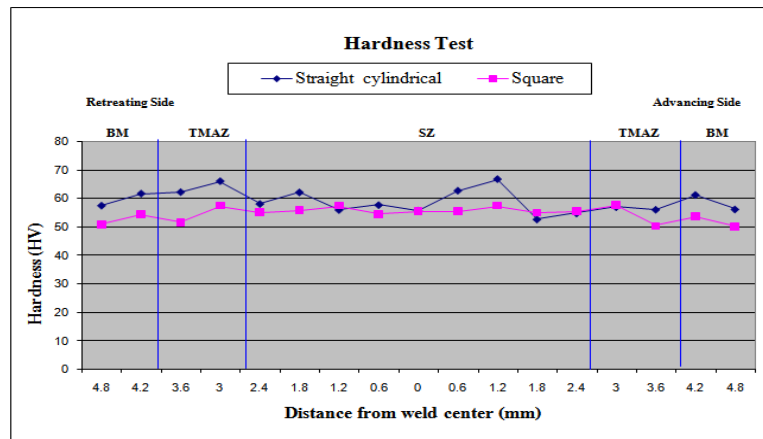
การทดสอบความแข็งแรงแบบไมโครวิกเกอร์ โดยการกดบริเวณพื้นที่หน้าตัดรอยเชื่อม ซึ่งถูกตัดตามขวางกับรอยเชื่อมขัดให้เรียบ ขณะทดสอบใช้แรงกด 100 กรัม ใช้เป็นเวลาในการกด 10 วินาที เพื่อหาค่าความแข็งแรงในบริเวณรอยเชื่อม บริเวณที่ได้รับอิทธิพลจากความร้อนทางกลและเนื้อโลหะเดิม รอยกดมีระยะห่างกันประมาณ 60 ถึง 70 μm

4.7.1 ค่าความแข็งแรงจากการเชื่อมด้วยหัวพินแบบทรงกระบอก

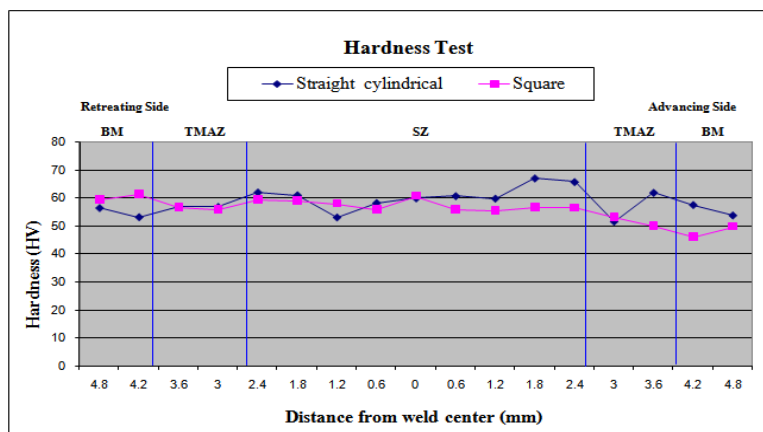
จากรูปที่ 4.28 (ก), (ข) และ (ค) แสดงค่าความแข็งแรงจากการเชื่อมด้วยหัวพินแบบทรงกระบอกของทั้งสามความเร็วเดินแนวเชื่อม ในบริเวณรอยเชื่อม บริเวณที่ได้รับอิทธิพลจากความร้อนทางกลและบริเวณเนื้อโลหะเดิมมีค่าความแข็งแรงที่ใกล้เคียงกัน โดยเฉพาะบริเวณรอยเชื่อมมีค่าความแข็งแรงประมาณ 60.6, 62.7 และ 61.8 HV ตามลำดับ มากกว่าบริเวณที่ได้รับอิทธิพลจากความร้อนทางกลและบริเวณเนื้อโลหะเดิมเล็กน้อยซึ่งมีค่าประมาณ 58.5 และ 55.3 HV ตามลำดับอันเนื่องมาจากบริเวณรอยเชื่อมมีลักษณะโครงสร้างที่ละเอียดประกอบไปด้วยอนุภาคซิลิกอนที่เล็กกว่าและมีการกระจายตัวที่ดีกว่าบริเวณอื่นๆ อนุภาคซิลิกอนที่เล็กและมีการกระจายตัวที่ดีเนื่องจากจากการกวนของหัวพินทำให้เกิดการแตกหักของโครงสร้าง

4.7.2 ค่าความแข็งจากการเชื่อมด้วยหัวพินแบบสี่เหลี่ยม

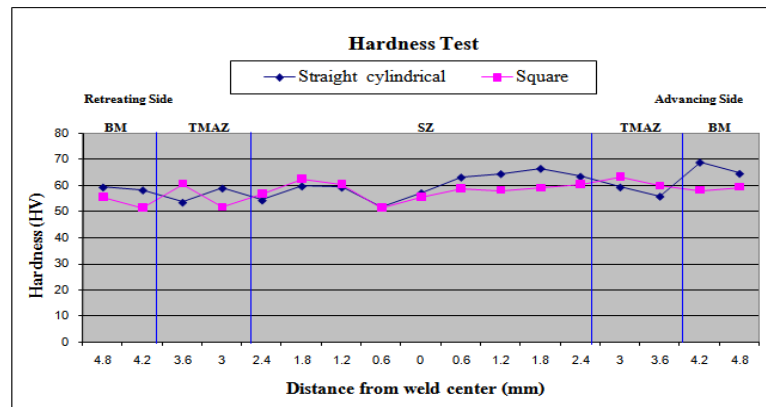
จากรูปที่ 4.28 (ก), (ข) และ (ค) แสดงค่าความแข็งจากการเชื่อมด้วยหัวพินแบบสี่เหลี่ยมของทั้งสามความเร็วเดินแนวเชื่อม ในบริเวณรอยเชื่อม บริเวณที่ได้รับอิทธิพลจากความร้อนทางกลและบริเวณเนื้อโลหะเดิมมีค่าความแข็งที่ใกล้เคียงกัน โดยเฉพาะบริเวณรอยเชื่อมมีค่าความแข็งประมาณ 58.8, 59.4 และ 59.9 HV ตามลำดับ มากกว่าบริเวณที่ได้รับอิทธิพลจากความร้อนทางกลและบริเวณเนื้อโลหะเดิมเล็กน้อยซึ่งมีค่าประมาณ 57.6 และ 55.3 HV ตามลำดับ อันเนื่องมาจากบริเวณรอยเชื่อมมีลักษณะโครงสร้างที่ละเอียดประกอบไปด้วยอนุภาคซิลิกอนที่เล็กกว่าและมีการกระจายตัวที่ดีกว่าบริเวณอื่นๆ อนุภาคซิลิกอนที่เล็กและมีการกระจายตัวที่ดีเนื่องจากจากการกวนของหัวพินทำให้เกิดการแตกหักของโครงสร้าง



(ก)



(ข)



(ก)

รูปที่ 4.28 การเปรียบเทียบค่าความแข็งของรอยเชื่อมเสียดทานแบบกวนของหัวพินแบบทรงกระบอกและแบบสี่เหลี่ยม

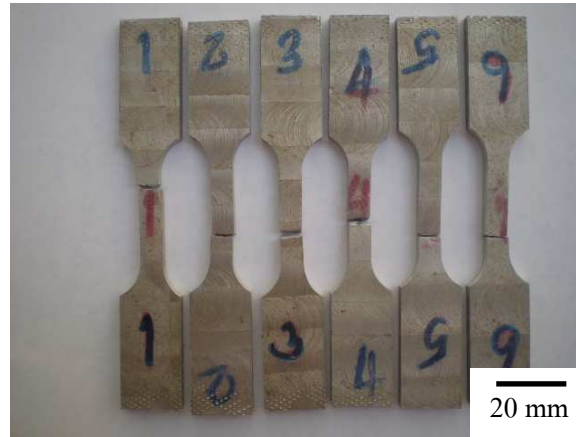
4.7.3 จากการเปรียบเทียบค่าความแข็งจากการเชื่อมด้วยหัวแบบทรงกระบอกและแบบสี่เหลี่ยม

จากรูปที่ 4.28 (ก), (ข) และ (ค) แสดงค่าความแข็งของหัวพินแบบทรงกระบอกและหัวพินแบบสี่เหลี่ยม พบว่าค่าความแข็งบริเวณรอยเชื่อมของหัวพินแบบทรงกระบอกมีค่ามากกว่าค่าความแข็งของหัวพินแบบสี่เหลี่ยมเล็กน้อยประมาณ 5-10 % อันเนื่องมาจากหัวพินแบบทรงกระบอกมีแรงเสียดทานทางกลและมีพื้นที่การเสียดทานระหว่างหัวพินกับเนื้อวัสดุที่มากกว่าทำให้เนื้ออะลูมิเนียมเกิดการไหลวนและเกิดการแตกหักของอนุภาคซิลิกอนที่ละเอียดมากกว่าหัวพินแบบสี่เหลี่ยม อย่างไรก็ตามค่าความแข็งบริเวณที่ได้รับอิทธิพลจากความร้อนทางกลและบริเวณเนื้อโลหะเดิมของหัวพินแบบทรงกระบอกและหัวพินแบบสี่เหลี่ยมมีค่าความแข็งไม่แตกต่างกัน

4.8 การทดสอบความแข็งแรงดึง

จากการทดสอบค่าความแข็งแรงดึงของรอยเชื่อมอะลูมิเนียมหล่อกิ่งของแข็งเกรด A356 ที่ตัดตามขวางกับรอยเชื่อม ดังรูปที่ 4.29 และชิ้นงานที่ตัดตามยาวกับรอยเชื่อม ดังรูปที่ 4.30 โดยให้รอยเชื่อมอยู่ตำแหน่งกลางของชิ้นทดสอบนำไปกัดขึ้นรูปตามมาตรฐาน ASTM (E8) และทดสอบแรงดึงที่อุณหภูมิห้อง ความเร็วในการดึง 1.67×10^{-2} mm/s ผลการทดสอบค่าความแข็งแรงดึงดังนี้

4.8.1 ความแข็งแรงดึงของชิ้นงานที่ตัดตามขวางกับรอยเชื่อม

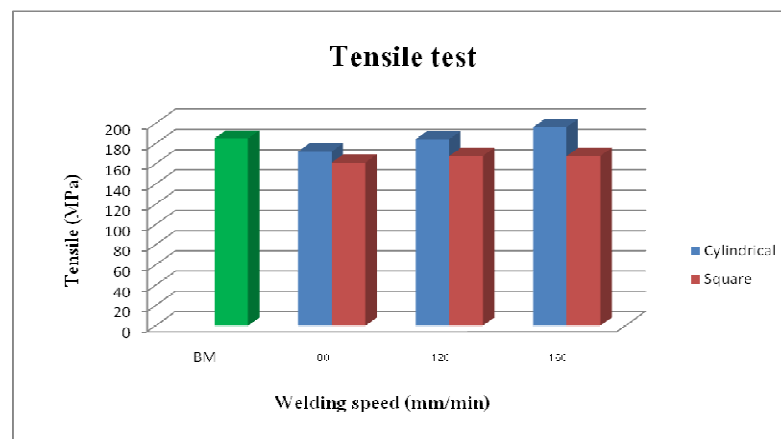


รูปที่ 4.29 ชิ้นงานทดสอบความแข็งแรงดึงของชิ้นงานที่ตัดตามขวางกับรอยเชื่อม

จากรูปที่ 4.30 และจากตารางที่ 4.1 ของชิ้นงานทดสอบที่ตัดตามขวางกับรอยเชื่อม พบว่าที่ความเร็วในการเดินแนวเชื่อมสูงของหัว핀แบบทรงกระบอกและหัว핀แบบสี่เหลี่ยม จะมีค่าความแข็งแรงดึงมากกว่าที่ความเร็วในการเดินแนวเชื่อมต่ำ เนื่องจากที่ความเร็วในการเดินแนวเชื่อมสูงมีโครงสร้างที่ละเอียดประกอบไปด้วยอนุภาคซิลิกอนที่เล็กกว่าและมีการกระจายตัวที่ดีกว่าความเร็วในการเดินแนวเชื่อมต่ำ อย่างไรก็ตามจากทั้งสามความเร็วในการเดินแนวเชื่อมของหัว핀แบบทรงกระบอกมีค่าความแข็งแรงดึงมากกว่าจากการเชื่อมด้วยหัว핀แบบสี่เหลี่ยม โดยเฉพาะที่ความเร็วเดินแนวเชื่อม 160 mm/min ของหัว핀แบบทรงกระบอกมีค่าความแข็งแรงดึงมากกว่าทุกๆ ความเร็วในการเดินแนวเชื่อม อันเนื่องมาจากแรงกดและความร้อนจากการเสียดทานที่มากกว่าหัว핀แบบสี่เหลี่ยมทำให้เนื้อวัสดุในรอยเชื่อมอยู่ในสถานะพลาสติกโครงสร้างเกิดการเคลื่อนตัวได้สะดวกและถูกอัดแน่นด้วยแรงกด ทำให้โครงสร้างละเอียดและมีการกระจายตัวที่ดีกว่าจากการเชื่อมด้วยหัว핀แบบสี่เหลี่ยม ทำให้บริเวณรอยเชื่อมมีค่าความต้านทานต่อแรงดึงและมีค่าความแข็งแรงดึงเพิ่มขึ้น หัว핀แบบสี่เหลี่ยมที่ความเร็วในการเดินแนวเชื่อม 80, 120 mm/min ชิ้นงานขาดบริเวณรอยเชื่อมและที่ 160 mm/min ชิ้นงานขาดบริเวณเนื้อโลหะเดิม อันเนื่องมาจากขนาดของอนุภาคซิลิกอนมีลักษณะหยาบกว่าหัว핀แบบทรงกระบอก มีการกระจายตัวเป็นกลุ่มก้อนทำให้บริเวณรอยเชื่อมมีค่าความต้านทานต่อแรงดึงและมีค่าความแข็งแรงดึงน้อยกว่าหัว핀แบบทรงกระบอก

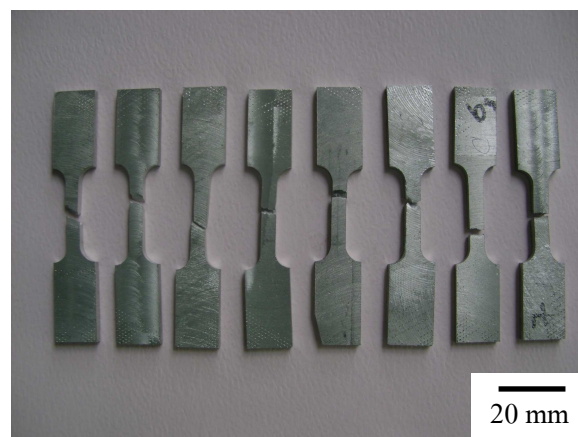
ตารางที่ 4.1 แสดงค่าความแข็งแรงดึงของชิ้นงานตามขวางกับรอยเชื่อม

Welding speed (mm/min)	Tensile test (MPa)			
	Cylindrical	Failure location	Square	Failure location
80	176.22	Base	143.23	Weld
120	190.85	Base	171.73	Weld
160	193.89	Base	173.61	Base
BM	185			



รูปที่ 4.8 แสดงค่าความแข็งแรงดึงของชิ้นงานที่ตัดตามขวางกับรอยเชื่อม

4.8.2 ความแข็งแรงดึงของชิ้นงานที่ตัดตามยาวแนวเชื่อม

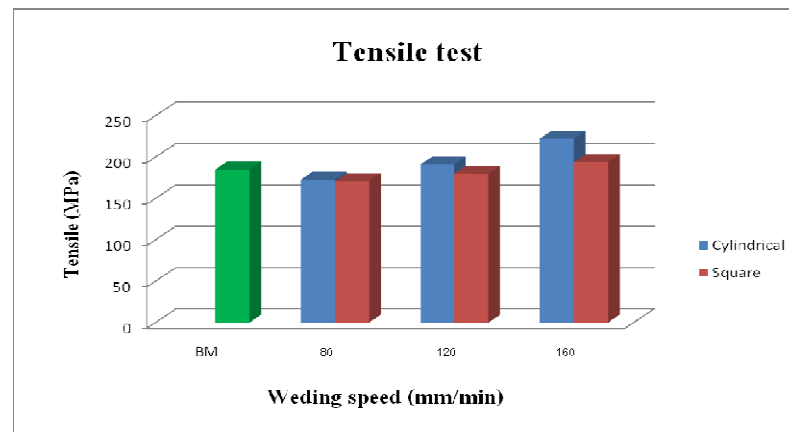


รูปที่ 4.8 แสดงชิ้นงานทดสอบความแข็งแรงดึงของชิ้นงานที่ตัดตามยาวกับรอยเชื่อม

จากรูปที่ 4.32 และจากตารางที่ 4.2 ของชิ้นงานทดสอบที่ตัดตามยาวกับรอยเชื่อม โดยที่เนื้อโลหะเดิมค่าความแข็งแรงดึงจาก SSM A356 หลังจากการหล่อเฉลี่ย 185 MPa จากการทดสอบค่าความแข็งแรงดึงพบว่าที่ความเร็วในการเดินแนวเชื่อมสูงของหัวพินแบบทรงกระบอก และหัวพินแบบสี่เหลี่ยม จะมีค่าความแข็งแรงดึงมากกว่าที่ความเร็วในการเดินแนวเชื่อมต่ำ อันเนื่องมาจากที่ความเร็วในการเดินแนวเชื่อมสูงมีโครงสร้างที่ละเอียดประกอบไปด้วยอนุภาคซิลิกอนที่เล็กกว่าและมีการกระจายตัวที่ดีกว่าความเร็วในการเดินแนวเชื่อมต่ำ อย่างไรก็ตามที่ความเร็วในการเดินแนวเชื่อม 80 mm/min จากการเชื่อมด้วยหัวพินแบบทรงกระบอกมีค่าความแข็งแรงดึงมากกว่าเล็กน้อยจากการเชื่อมด้วยหัวพินแบบสี่เหลี่ยม ในขณะที่ความเร็วก่อนตามความเร็วในการเดินแนวเชื่อม 120 และ 160 mm/min ของหัวพินแบบทรงกระบอกมีค่าความแข็งแรงดึงมากกว่าจากการเชื่อมด้วยหัวพินแบบสี่เหลี่ยมอย่างเห็นได้ชัด โดยเฉพาะที่ความเร็วเดินแนวเชื่อม 160 mm/min ของหัวพินแบบทรงกระบอกมีค่าความแข็งแรงดึงมากกว่าความเร็วเดินแนวเชื่อมอื่นๆ อันเนื่องมาจากหัวพินแบบสี่เหลี่ยมอนุภาคของซิลิกอนมีลักษณะเป็นก้อนหยาบกว่าอนุภาคซิลิกอนที่ได้จากการเชื่อมด้วยหัวพินแบบทรงกระบอกและมีการกระจายตัวที่ไม่สม่ำเสมอจึงทำให้ค่าความแข็งแรงดึงต่ำ

ตารางที่ 4.2 แสดงค่าความแข็งแรงดึงเฉลี่ยของชิ้นงานตามยาวกับรอยเชื่อม

Welding speed (mm/min)	Tensile test (MPa)	
	Cylindrical	Square
80	172.57	170.67
120	190.79	179.83
160	222.23	193.67
BM	185	



รูปที่ 4.3 แสดงค่าความแข็งแรงดึงเฉลี่ยของชิ้นงานที่ตัดตามยาวกับรอยเชื่อม

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้มุ่งเน้นศึกษาการเปลี่ยนแปลงของรอยเชื่อม ด้วยกรรมวิธีการเชื่อมเสียดทานแบบกวน ในอลูมิเนียมหล่อผสม A356 ที่หล่อโดยเทคโนโลยีกึ่งของแข็ง โดยมีตัวแปรที่เกี่ยวข้องดังนี้ Tool ที่ใช้ในการศึกษามีสองแบบ คือ หัว핀แบบทรงกระบอกและแบบสี่เหลี่ยม กำหนดให้ความเร็วในการหมุนของ Tool คงที่ 1,750 rpm และเปลี่ยนแปลงความเร็วในการเดินเชื่อมสามระดับ 80, 120 และ 160 mm/min หลังจากการเชื่อมทำการตรวจสอบสมบัติทางโลหะวิทยาและสมบัติทางกลเพื่อหาบทสรุปจากการเชื่อมด้วยตัวแปรที่แตกต่างกัน ดังนี้

1) แรงกดของหัว핀แบบทรงกระบอกและหัว핀แบบสี่เหลี่ยม พบว่าที่ความเร็วในการเดินแนวเชื่อมต่ำจะมีค่าน้อยกว่าที่ความเร็วในการเดินแนวเชื่อมสูง อย่างไรก็ตามที่ความเร็วในการเดินแนวเชื่อม 120 และ 160 mm/min แรงกดบนชิ้นงานทดสอบขณะทำการเชื่อมด้วยหัว핀แบบทรงกระบอกมีค่าแรงกดมากกว่าหัว핀แบบสี่เหลี่ยมเล็กน้อยประมาณ 5 % และที่ความเร็วในการเดินแนวเชื่อม 80 mm/min แรงกดบนชิ้นงานทดสอบขณะทำการเชื่อมของหัว핀แบบทรงกระบอกมีค่าแรงกดมากกว่าหัว핀แบบสี่เหลี่ยมอย่างเห็นได้ชัดประมาณ 25 %

2) ผิวหน้าด้านบนของรอยเชื่อมจากการเชื่อมด้วยหัว핀แบบทรงกระบอกและแบบสี่เหลี่ยม มีลักษณะเรียบที่ความเร็วในการเดินเชื่อมสูง และที่ความเร็วในการเดินแนวเชื่อมต่ำมีลักษณะผิวหน้ารอยเชื่อมที่ขรุขระเป็นรอยที่เกิดจากบ่าของ Tool อย่างไรก็ตามผิวหน้ารอยเชื่อมของหัว핀แบบทรงกระบอกจะเกิดครีบและเกิดเป็นรอยหยาบมากกว่าหัว핀แบบสี่เหลี่ยมของทั้งสามความเร็วเดินแนวเชื่อม

3) โครงสร้างมหภาคของหัว핀แบบทรงกระบอกและแบบสี่เหลี่ยม พบว่าทั้งสามความเร็วในการเดินแนวเชื่อมไม่มีข้อบกพร่องใดๆ และมีลักษณะที่ประสานเข้าด้วยกันเป็นอย่างดี โครงสร้างบริเวณรอยเชื่อมของหัว핀แบบทรงกระบอกจะมีลักษณะรูปร่างคล้ายกับหัวหอมรีแสดงรูปร่างชัดเจนและมีรูปแบบที่แน่นอนอนมากกว่าโครงสร้างรอยเชื่อมที่เกิดจากการเชื่อมด้วยหัว핀แบบสี่เหลี่ยม อีกทั้งพบว่ารอยเชื่อมของหัว핀แบบทรงกระบอกมีลักษณะรอยเชื่อมที่กว้างกว่ารอยเชื่อมของหัว핀แบบสี่เหลี่ยม

4) จากการตรวจสอบโครงสร้างทางจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงของหัว핀แบบทรงกระบอกและแบบสี่เหลี่ยม พบว่าทั้งสามความเร็วในการเดินแนวเชื่อมบริเวณรอย

เชื่อมมีลักษณะ โครงสร้างที่ละเอียดมากซึ่งประกอบไปด้วยอนุภาคซิลิกอนผสมในอะลูมิเนียม เมตริกซ์กระจายตัวอย่างสม่ำเสมอทั่วบริเวณที่ถูกควน อย่างไรก็ตามจากการตรวจสอบไม่พบข้อบกพร่องใดๆ ในรอยเชื่อม บริเวณรอยเชื่อมของหัวพินแบบทรงกระบอกจะมีลักษณะที่ละเอียด และเรียบมากกว่ารอยเชื่อมของหัวพินแบบสี่เหลี่ยมเล็กน้อย บริเวณที่ได้รับอิทธิพลจากความร้อนทางกลด้าน Retreating จะมีลักษณะของโครงสร้างที่ค่อนข้างละเอียดและแคบคล้ายกับถูกอัด และบริเวณที่ได้รับอิทธิพลจากความร้อนทางกลด้าน Advancing มีลักษณะโครงสร้างแบนยาว คล้ายกับถูกดึงเป็นบริเวณกว้างกว่าด้าน Retreating

5) โครงสร้างทางจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของหัวพินแบบทรงกระบอกและหัวพินแบบสี่เหลี่ยม พบว่าบริเวณตรงกลางรอยเชื่อมจะมีอนุภาคซิลิกอนที่เล็กกว่าบริเวณอื่นๆ และที่ความเร็วในการเดินแนวเชื่อมสูงจะมีลักษณะการกระจายตัวของอนุภาคซิลิกอนที่สม่ำเสมอมากกว่าเล็กน้อยของความเร็วในการเดินแนวเชื่อมต่ำ อย่างไรก็ตามทั้งสามความเร็วในการเดินแนวเชื่อมของหัวพินแบบทรงกระบอกจะมีลักษณะของอนุภาคซิลิกอนที่เล็กกว่าและมีการกระจายตัวที่ดีกว่าหัวพินแบบสี่เหลี่ยม

6) ค่าความแข็งของหัวพินทั้งสองชนิด ของทั้งสามความเร็วในการเดินแนวเชื่อมมีลักษณะที่ใกล้เคียงกันในบริเวณเนื้อโลหะเดิม บริเวณที่ได้รับอิทธิพลจากความร้อนทางกลและบริเวณที่ถูกควน จากการทดสอบพบว่าค่าความแข็งของหัวพินแบบทรงกระบอกมีค่ามากกว่าค่าความแข็งของหัวพินแบบสี่เหลี่ยมเล็กน้อยประมาณ 5-10 % อย่างไรก็ตามที่บริเวณที่ถูกควนของหัวพินทั้งสองแบบมีค่าความแข็งมากกว่าบริเวณที่ได้รับอิทธิพลจากความร้อนทางกลและบริเวณเนื้อโลหะเดิม (BM)

7) ค่าความแข็งแรงดึงของชิ้นงานทดสอบที่ตัดตามขวางและตัดตามยาวกับรอยเชื่อม พบว่าทั้งสามความเร็วในการเดินแนวเชื่อมของหัวพินแบบทรงกระบอกและหัวพินแบบสี่เหลี่ยมที่ความเร็วในการเดินแนวเชื่อมสูงจะมีค่าความแข็งแรงดึงมากกว่าที่ความเร็วในการเดินแนวเชื่อมต่ำ อย่างไรก็ตามจากการเชื่อมด้วยหัวพินแบบทรงกระบอกจะมีค่าความแข็งแรงดึงมากกว่าการเชื่อมด้วยหัวพินแบบสี่เหลี่ยมในทั้งสามความเร็วเดินแนวเชื่อม โดยเฉพาะที่ความเร็วในการเดินแนวเชื่อม 160 mm/min มีค่าความแข็งแรงดึงมากกว่าทุกๆ ความเร็วในการเดินแนวเชื่อม

5.9 ข้อเสนอแนะ

5.9.1 ก่อนการเชื่อมควรตรวจสอบผิวของแผ่นงานเชื่อมก่อนทำการเชื่อมเพื่อป้องกันคราบสกปรกต่างๆ ติดกับผิว เพราะคราบสกปรกต่างๆ อาจจะทำให้เกิดความบกพร่องในรอยเชื่อมได้

5.9.2 ก่อนทำการเชื่อมควรเชื่อมชิ้นงานทดลองเพื่อที่จะให้ความร้อนเกิดการสะสมในแผ่นรองชิ้นงานก่อน อีกทั้งเพื่อไล่ความชื้นในแผ่นรองชิ้นงานด้วย

5.9.3 หลังจากการเชื่อมหากยังไม่ต้องการนำชิ้นงานไปทำการขึ้นรูปขึ้นทดสอบต่างๆ ไม่ควรทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้อง ควรนำไปแช่ในตู้เย็น เพื่อป้องกันการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างและสมบัติทางกลภายในเนื้อวัสดุ

5.9.4 ที่ความเร็วในการหมุนของ Tool มากกว่าหรือน้อยกว่า 1,750 rpm หลังจากการเชื่อมรอยเชื่อมจะไม่ประสานเป็นเนื้อเดียวกันและเกิดช่องว่างในรอยเชื่อม

5.9.5 ที่ความเร็วในการเดินเชื่อมน้อยกว่า 80 mm/min หรือมากกว่า 160 mm/min หลังจากการเชื่อมรอยเชื่อมจะไม่ประสานเป็นเนื้อเดียวกันและเกิดช่องว่างในรอยเชื่อม

5.9.6 การเชื่อมจากชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการทางความร้อน จะทำให้ได้ค่าความแข็งแรงที่สูงมาก จากการทดลองเบื้องต้นซึ่งจะเป็นข้อมูลในการศึกษาต่อไป

บรรณานุกรม

- กิตติพงษ์ กิมะพงษ์ และคณะ (2007) “การเชื่อมรอยต่อเกย อะลูมิเนียมผสมและเหล็กกล้า ด้วยการเชื่อมเสียดทานแบบกวน” ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ครั้งที่ 5 วันที่ 10-11 พฤษภาคม 2550
- เจษฎา วรรณสินธุ์ และคณะ (2006) เทคโนโลยีการหล่ออะลูมิเนียมไดแคสติงแบบกึ่งของแข็ง ภาควิชาวิศวกรรมเหมืองแร่และวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์การประชุมวิชาการงานหล่อไทย ครั้งที่ 3
- ประภาศ เมืองจันทร์บุรี (2007) การเชื่อมและโลหะวิทยาการเชื่อมอะลูมิเนียม ภาควิชาวิศวกรรมเหมืองแร่และวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ รายงานการทดลองภายในของการเชื่อมอะลูมิเนียม SSM A356
- อัปคุล บินระหีม (2008) “ศึกษาสมบัติทางโลหะวิทยาและทางกลของอะลูมิเนียม A356 ซึ่งหล่อโดยเทคโนโลยีการหล่อกึ่งแข็งด้วยกรรมวิธีการเชื่อมเสียดทานแบบกวน” ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
- Akhter R., Lvanchev L. and Burger H.P. (2006) “Nd: YAG Laser Welding.”, vols 116-117, PP. 173- 176
- Amirizad M. and Kokabi A.H. (2005) “Evaluation of microstructure and mechanical properties in friction stir welded A356+15%SiCp cast composite.”
- Badarinarayan H. and Yang Q. (2008) “Effect of tool geometry on static strength of friction stir spot-welded aluminum alloy.”
- Cavaliere P. and Squillace A. (2007) “Effect of welding parameter on mechanical and microstructural properties of AA6082 joints produced by friction stir welding.”
- Doherty R.D., Lee H.I. and Feest E.A. (1984). Mater.Sci.Eng, 65, 1981-1989.
- Dr.-Ing. Munich et al. (2006) “Downforce of friction stir” PP. 223
- Elangovan K. and Blasubramanian V. (2007) “Influences of tool pin profile and welding speed on the formation of friction stir processing zone in AA2219 aluminium alloy.”
- Elangovan K. and Blasubramanian V. (2008) “Predicting tensile strength of friction stir welding AA6061 aluminium alloy joints by a mathematical model.”

- Flemings M.C. (1974) Solidification processing. McGraw-Hill, Inc.146-154
- Flemings M.C. and Johnson W.L. (2002) "High viscosity liquid and semi-solid metal casting: Processes and products." Plenary lecture world foundry conference 2002, KyongJu, Korea, October 20-24.
- Hidetoshi Fujii et al. (2005) "Effect of tool shape on mechanical properties and microstructure of friction stir welded aluminum alloys."
- Kang C.G., Bae J.W. and Kim B.M. (2007) "The grain size control of A356 aluminum alloy by horizontal electromagnetic stirring for rheology forging." Journal of Materials processing Technology 2007 pp. 187-188
- Kapranos P. et al. (2004) "Friction Stir Welding (FSW) of Thixofrmed and Rheocast Plates." PP 535-8585
- Kim Y.G. et al. (2005) "Three defect types in friction stir welding of aluminum die casting alloy." Material Science and Engineering A 415 (2006) 250-254
- Kim Y.G. and Fujii H. (2006) "Effect of Welding parameter on Microstructure in stir zone of FSW joints of Aluminum die casting alloy" Material Science and Engineering A 415 (2006) 250-254
- Lambard H. et al. (2007) "Optimising FSW process parameters to minimize defects and maximize fatiguelife in 5083-h321 aluminium alloy." Engineering Fracture Mechanics. pp 1-14
- Lee W.B., Yeon Y.M. and Jung S.B. (2003) "The improvement of mechanical properties of friction-stir-welded A356 Al alloy." Material Science and Engineering A356 (2003) pp. 154-159
- Linert T.J et al. (2005) "Friction Stir Welding Studies on Mild Steel, Welding Journal" Vol.83, 2003, pp. 1S-9S
- Ma Z.Y. and Sharma S.R. (2006) "Effect of friction stir processing on the microstructure of cast A356 aluminum."
- Martinez R.A. (2004) Ph.D.Thesis, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, Ma, USA
- Nandan R. et al. (2006) "Three-Dimensional heat and material flow during friction stir welding of mild steel."

- 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 (2005) 201-206
- Vogel A., Doherty R.D. and Carton B. (1979) *Solidification and casting metal*, the metal Society, London, England.
- Yan-hua and Zhao (2005) "The influence of pin geometry on bonding and mechanical properties in friction stir weld 2014 Al alloy."
- Zah M.F. and Eireiner D. (2004) "Friction stir of parameters." No. PP. 223

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

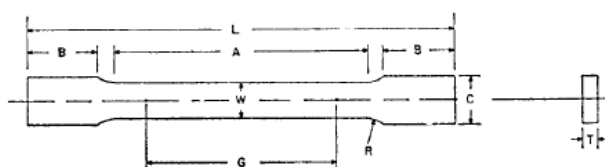
ข้อกำหนดการทดสอบสมบัติทางโลหวิทยาและสมบัติทางกล

ก.1 ส่วนผสมทางเคมีของสารละลายเจือจาง Keller's reagent

กรดไฮโดรฟลูออริก	ความเข้มข้น 48% 2 ml
กรดไฮโดรคลอริก	เข้มข้น 3 ml
กรดไนตริก	5 ml
น้ำ	190 ml

ก.2 ข้อกำหนดชิ้นงานทดสอบความแข็งแรงดึงตามมาตรฐาน ASTM-E

ASTM E 8



	Dimensions		
	Standard Specimens		Subsize Specimen
	Plate-Type, 1½-in. Wide	Sheet-Type, ½-in. Wide	¼-in. Wide
	in.	in.	in.
G—Gage length (Note 1 and Note 2)	8.00 ± 0.01	2.000 ± 0.005	1.000 ± 0.003
W—Width (Note 3 and Note 4)	1½ + ⅛, - ¼	0.500 ± 0.010	0.250 ± 0.005
T—Thickness (Note 5)		thickness of material	
R—Radius of fillet, min (Note 6)	1	½	¼
L—Over-all length, min (Note 2 and Note 7)	18	8	4
A—Length of reduced section, min	9	2¼	1¼
B—Length of grip section, min (Note 8)	3	2	1¼
C—Width of grip section, approximate (Note 4 and Note 9)	2	¾	¾

NOTE 1—For the 1½-in. wide specimen, punch marks for measuring elongation after fracture shall be made on the flat or on the edge of the specimen and within the reduced section. Either a set of nine or more punch marks 1 in. apart, or one or more pairs of punch marks 8 in. apart may be used.

NOTE 2—When elongation measurements of 1½-in. wide specimens are not required, a minimum length of reduced section (A) of 2¼ in. may be used with all other dimensions similar to those of the plate-type specimen.

NOTE 3—For the three sizes of specimens, the ends of the reduced section shall not differ in width by more than 0.004, 0.002 or 0.001 in., respectively. Also, there may be a gradual decrease in width from the ends to the center, but the width at each end shall not be more than 0.015, 0.005, or 0.003 in., respectively, 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 1½-in. wide specimens shall be ⅜ in. Maximum thickness of ½-in. and ¼-in. wide specimens shall be ¾ in. and ¼ in., respectively.

NOTE 6—For the 1½-in. wide specimen, a ½-in. minimum radius at the ends of the reduced section is permitted for steel specimens under 100 000 psi 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 ¼-in. wide specimens, the over-all length should be as large as the material will permit, up to 8.00 in.

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 ½-in. wide specimens is over ¾ in., 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 0.10, 0.05 and 0.005 in., respectively. However, for referee testing and when required by product specifications, the ends of the ½-in. wide specimen shall be symmetrical within 0.01 in.

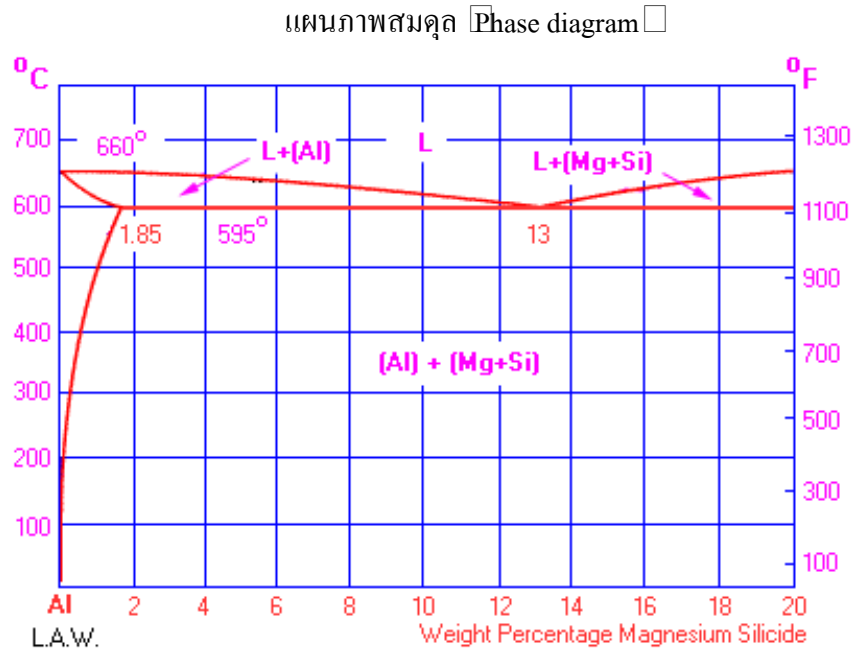
NOTE 10—For each specimen type, the radii of all fillets shall be equal to each other within a tolerance of 0.05 in., and the centers of curvature of the two fillets at a particular end shall be located across from each other (on a line perpendicular to the centerline) within a tolerance of 0.10 in.

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 ข

แผนภาพสมดุลเฟสและภาพโครงสร้างทางจุลภาค

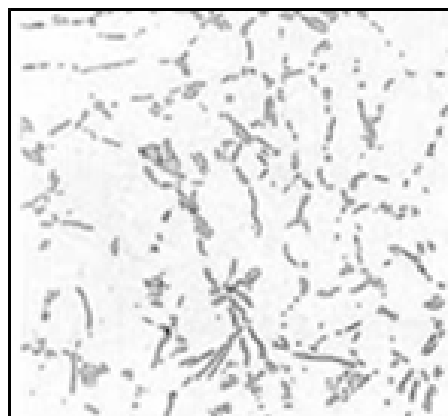
ข.1 แผนภาพสมดุลเฟสของอะลูมิเนียม-ซิลิกอน-แมกนีเซียมหล่อผสม



แผนภาพสมดุลสองธาตอะลูมิเนียม-แมกนีเซียม-ซิลิไซด์

Aluminum - Magnesium - Silicide phase diagram

ข.2 แผนภาพสมดุลเฟสของอะลูมิเนียม-ซิลิกอน-แมกนีเซียมหล่อผสม



รูปที่ ข.1 แสดงโครงสร้างอะลูมิเนียมผสมหมายเลข 356

ภาคผนวก ค

ภาพโครงสร้างทางจุลภาคจากการเชื่อมเสียดทานแบบกวน

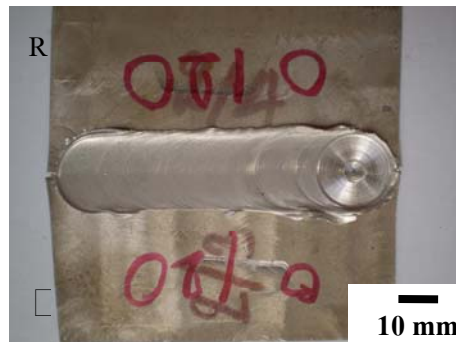
ค.1 ผิวหน้ารอยเชื่อมจากการเชื่อมเสียดทานแบบกวน



ก 80 mm/min



ข 80 mm/min



ก 120 mm/min



ข 120 mm/min

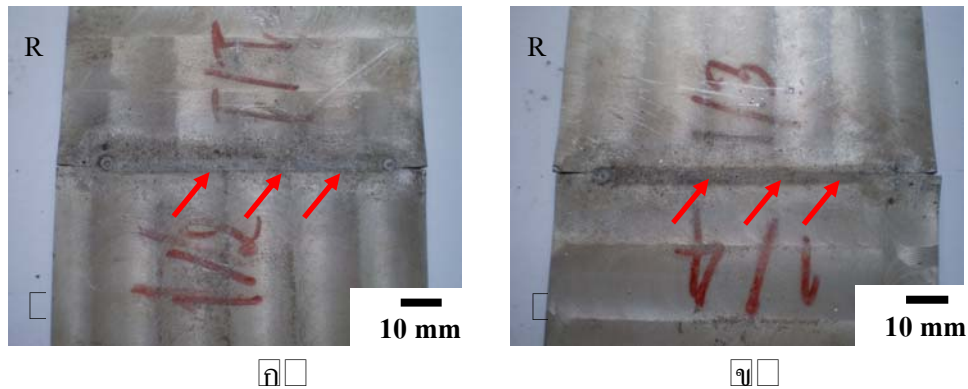


ก 160 mm/min



ข 160 mm/min

รูปที่ ค.1 ผิวหน้ารอยเชื่อมจากการเชื่อมด้วยหัวพิน ก แบบทรงกระบอกและ ข แบบสี่เหลี่ยม



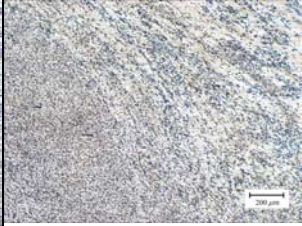
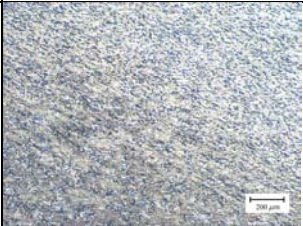
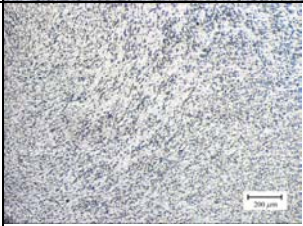
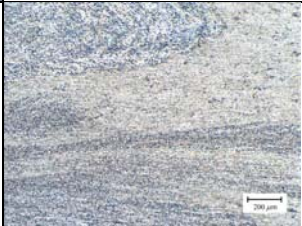
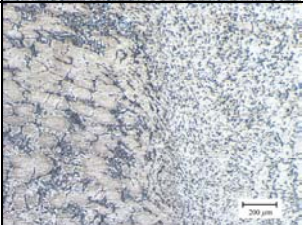
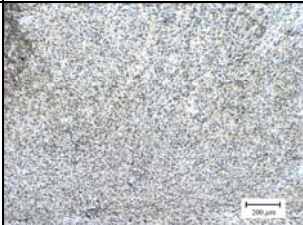
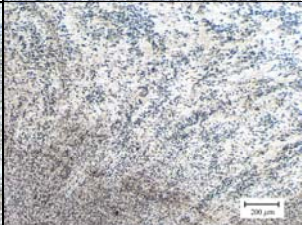


รูปที่ ค.2 ผิวหน้ารอยเชื่อมจากการเชื่อมเสียดทานแบบกวน ก รอยเชื่อมจากการเชื่อมด้วยหัวพินแบบทรงกระบอกและ ข รอยเชื่อมจากการเชื่อมด้วยหัวพินแบบสี่เหลี่ยม

ค.2 โครงสร้างทางจุลภาคจากกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงในการเชื่อมเสียดทานแบบกวน

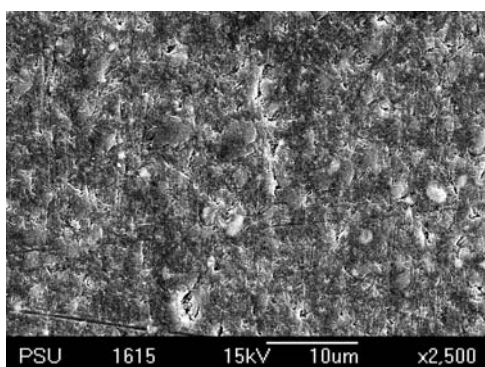
รูปแบบหัวพิน และความเร็ว เดินแนวเชื่อม	โครงสร้างจุลภาค		
	TM ^ก Z Retreating	SZ	TM ^ข Z Advancing
แบบ ทรงกระบอก 80 mm/min			
แบบ ทรงกระบอก 120 mm/min			
แบบ ทรงกระบอก 160 mm/min			

รูปที่ ค.3 โครงสร้างทางจุลภาคของหัวพินแบบทรงกระบอก

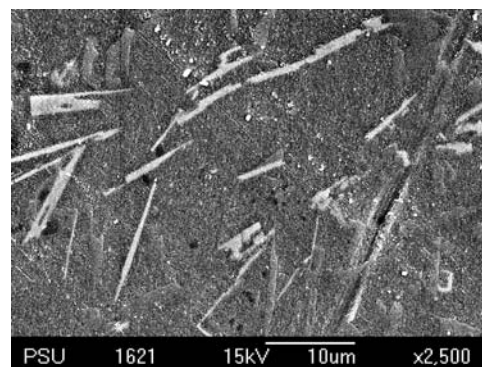
รูปแบบหัวพิน และความเร็ว เดินแนวเชื่อม	โครงสร้างจุลภาค		
	TM ◻ Z Retreating	SZ	TM ◻ Z ◻ dvancing
แบบสี่เหลี่ยม 80 mm/min			
แบบสี่เหลี่ยม 120 mm/min			
แบบสี่เหลี่ยม 160 mm/min			

รูปที่ ค.4 โครงสร้างทางจุลภาคของหัวพินแบบสี่เหลี่ยม

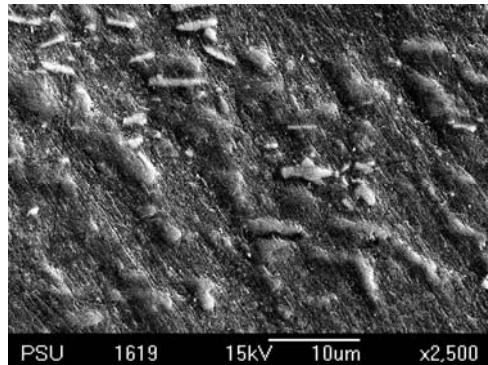
ค.3 โครงสร้างทางจุลภาคจากกล้อง SEM ของการเชื่อมเลียดทานแบบกวน



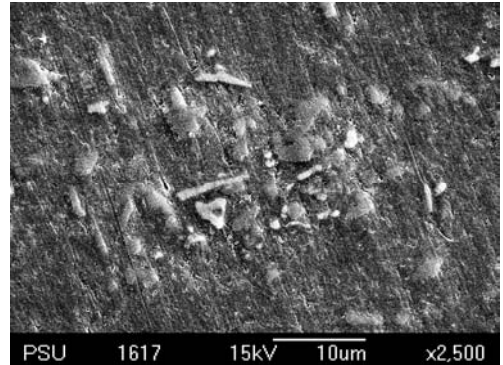
ก ◻ 80 mm/min



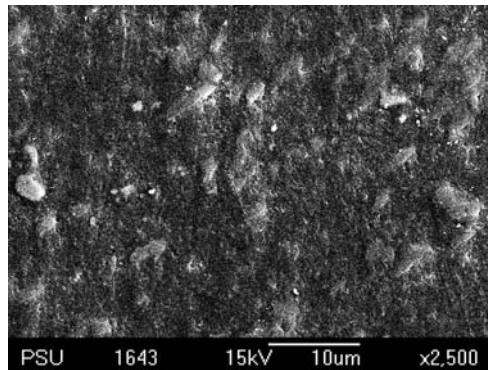
ข ◻ 80 mm/min



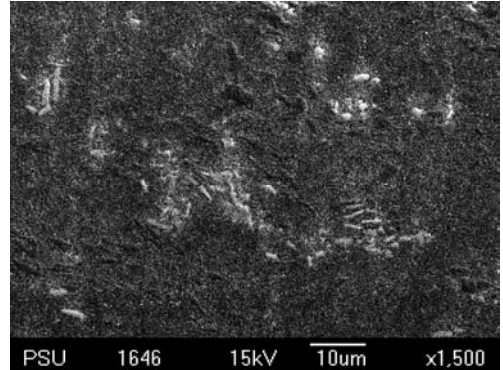
ก 120 mm/min



ข 120 mm/min



ก 160 mm/min



ข 160 mm/min

รูปที่ ค.5 โครงสร้างทางจุลภาคจากกล้อง SEM ของหัวพิน

ก แบบทรงกระบอกและ ข แบบสี่เหลี่ยม

ภาคผนวก ง

ค่าความแข็งจากการเชื่อมเสียดทานแบบกวน

ง.1 ค่าความแข็งจากการเชื่อมเสียดทานแบบกวน

ตารางที่ ง.1 ค่าความแข็งของหัวพินแบบทรงกระบอกและแบบสี่เหลี่ยม

ระยะห่าง จากจุด กึ่งกลาง	รูปแบบของหัวพินและความเร็วในการเดินแนวเชื่อม					
	Cylindrical	Square	Cylindrical	Square	Cylindrical	Square
	80	80	120	120	160	160
4.8	57.6	50.9	56.3	59.2	59.2	55.4
4.2	61.8	54.4	53	61.3	58.1	51.4
3.6	62.3	51.7	56.8	56.5	53.4	60.5
3	66.1	57.5	56.7	55.7	58.8	51.5
2.4	58.2	55.1	61.9	59.4	54.2	56.5
1.8	62.2	55.9	60.9	59	59.6	62.2
1.2	56.1	57.5	52.9	57.9	59.1	60.3
0.6	57.8	54.6	58.1	55.7	51.2	51.2
0	55.9	55.6	59.8	60.7	57	55.4
0.6	62.8	55.4	60.6	55.9	63	58.5
1.2	66.8	57.5	59.7	55.5	64.3	58
1.8	52.8	55	67	56.5	66.3	58.9
2.4	54.9	55.6	65.7	56.4	63.3	60.2
3	57.1	57.7	51.4	53	59.2	63.2
3.6	56.2	50.4	61.8	49.9	55.7	59.7
4.2	61.3	53.7	57.4	46	68.7	58
4.8	56.3	50.2	53.6	49.7	64.4	59.2

ภาคผนวก จ

ค่าความแข็งแรงดึงจากการเชื่อมเสียดทานแบบกวน

จ.1 ค่าความแข็งแรงจากการเชื่อมเสียดทานแบบกวน

จ.1.1 ค่าความแข็งแรงดึงของชิ้นงานที่ตัดตามขวางกับรอยเชื่อม

ตารางที่ จ.1 แสดงค่าความแข็งแรงดึงของชิ้นงานที่ตัดตามขวางกับรอยเชื่อม

การทดลองที่	Welding speed mm/min	Tensile test					
		Cylindrical Mpa	% Elongation	ขาด	Square Mpa	% Elongation	ขาด
1	80	173.84	15.73	Base	170.57	21.52	Base
	120	168.35	14.79	Base	164.89	9.12	Weld
	160	210.25	13.75	Base	178.44	10.75	Weld
2	80	176.22	13.39	Base	143.23	9.66	Weld
	120	190.85	13.2	Base	171.73	7.67	Weld
	160	193.89	12.97	Base	173.61	16.74	Base

จ.1.2 ค่าความแข็งแรงดึงของชิ้นงานที่ตัดตามยาวกับรอยเชื่อม

ตารางที่ จ.2 แสดงค่าความแข็งแรงดึงของชิ้นงานที่ตัดตามยาวกับรอยเชื่อม

การทดลองที่	Welding speed mm/min	Tensile test			
		Cylindrical Mpa	% Elongation	Square Mpa	% Elongation
3	80	175.2	9.91	149.16	5.54
	120	175.37	10.88	167.84	6.6
	160	238.4	19.90	191.31	10.37
4	80	144.84	1.66	176.63	3.01
	120	201.32	3.83	194.13	3.09
	160	216.11	4.04	202.32	3.98

การทดลองที่	Welding speed □mm/min□	Tensile test			
		Cylindrical □Mpa□	% Elongation	Square □Mpa□	% Elongation
5	80	197.69	11.22	186.22	12.17
	120	195.69	10.75	177.52	14.21
	160	212.2	17.93	193.4	18.94
ค่าเฉลี่ย ของการ ทดลองที่ 3, 4 และ 5	80	172.57	-	170.67	-
	120	190.79	-	179.83	-
	160	222.23	-	193.67	-

ตารางที่ จ.3 แสดงค่าความแข็งแรงดึงของชิ้นงานในบริเวณเนื้อโลหะเดิม

ชิ้นที่	Tensile test of base metal	
	Tensile □Mpa□	% Elongation
1	186.14	8.77
2	202.43	14.42
3	175.62	10.2
4	130	8.67
5	195.31	11.74
6	193.98	14.05
7	194.8	12.41
8	202.63	12.12
รวม	185.11	-

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ สกุล นายธงชัย เครือผือ

รหัสประจำตัวนักศึกษา 5010120026

วุฒิการศึกษา

วุฒิ	ชื่อสถาบัน	ปีที่สำเร็จการศึกษา
ครุศาสตร์อุตสาหกรรมบัณฑิต (ค.อ.บ.วิศวกรรมอุตสาหกรรม)	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยี ราชมงคลศรีวิชัย	2549

ทุนการศึกษา

- ทุนค่าเล่าเรียน ของนักศึกษาระดับบัณฑิตศึกษา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ปีงบประมาณ พ.ศ. 2552
- ทุนจากสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.)

การตีพิมพ์เผยแพร่ผลงาน

- ธงชัย เครือผือ และ ประภาส เมืองจันทร์บุรี (2551) “อิทธิพลของความเร็วในการเชื่อมและรูปแบบของหัวพินที่มีผลต่อสมบัติทางโลหะวิทยาและสมบัติทางกลในการเชื่อมอะลูมิเนียมผสม A356 ที่หล่อโดยเทคโนโลยีหล่อกึ่งของแข็งด้วยกรรมวิธีการเชื่อมเสียดทานแบบกวน” การประชุมข่ายงานวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ณ บีพี สมิหลา บีช โฮเต็ล แอนด์ รีสอร์ท อ.เมือง จ.สงขลา ระหว่างวันที่ 20 ถึง 22 ตุลาคม 2551
- ธงชัย เครือผือ และ ประภาส เมืองจันทร์บุรี (2552) “อิทธิพลของความเร็วในการเชื่อมและรูปแบบของหัวพินที่มีผลต่อสมบัติทางโลหะวิทยาและสมบัติทางกลในการเชื่อมอะลูมิเนียมผสม A356 ที่หล่อโดยเทคโนโลยีหล่อกึ่งของแข็งด้วยกรรมวิธีการเชื่อมเสียดทานแบบกวน” การประชุมวิชาการทางโลหะวิทยาแห่งประเทศไทยครั้งที่ 3 จัดโดยภาควิชาวิศวกรรมวัสดุ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ร่วมกับสถาบันเหล็กและเหล็กกล้าแห่งประเทศไทย (ISIT) และศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ (MTEC) ณ โรงแรมเซ็นจูรี่ พาร์ค ระหว่างวันที่ 26-27 ตุลาคม 2552