



การปรับปรุงการเชื่อมในสถานะกึ่งแข็งของอะลูมิเนียมผสมหล่อกึ่งแข็ง
Improvement of Semi-Solid State Joining of Semi-Solid Metal Aluminum Alloys

ภัศพล บิลหรือหิม
Patsapon Binrohim

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญา
วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมวัสดุ
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

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

2561

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

ชื่อวิทยานิพนธ์ การปรับปรุงการเชื่อมในสถานะกึ่งแข็งของอะลูมิเนียมผสมหล่อกึ่งแข็ง
ผู้เขียน นายภัสพล บิลหรือหิม
สาขาวิชา วิศวกรรมวัสดุ

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

คณะกรรมการสอบ

.....ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ประภาศ เมืองจันทร์บุรี) (ดร.สมใจ จันทร์อุดม)

.....กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ประภาศ เมืองจันทร์บุรี)

.....กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.รัชชัย ปลุกผล)

.....กรรมการ
(ดร.กนิษฐ์ ตะปะสา)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ เป็นส่วน
หนึ่งของการศึกษา ตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมวัสดุ

.....
(ศาสตราจารย์ ดร.ดำรงศักดิ์ ฟ้ารุ่งแสง)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

ขอรับรองว่า ผลงานวิจัยนี้มาจากการศึกษาวิจัยของนักศึกษาเอง และได้แสดงความขอบคุณบุคคลที่มีส่วนเกี่ยวข้องทุกท่านไว้ ณ ที่นี้

ลงชื่อ.....
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ประภาศ เมืองจันทร์บุรี)
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

ลงชื่อ.....
(นายภัสพล บิลหรือหิม)
นักศึกษา

(4)

ข้าพเจ้าขอรับรองว่า ผลงานวิจัยนี้ไม่เคยเป็นส่วนหนึ่งในการอนุมัติปริญญาในระดับใดมาก่อน และ
ไม่ได้ถูกใช้ในการยื่นขออนุมัติปริญญาในขณะนี้

ลงชื่อ.....

(นายภัสพล บิลห่อหิม)

นักศึกษา

ชื่อวิทยานิพนธ์	การปรับปรุงการเชื่อมในสถานะกึ่งแข็งของอะลูมิเนียมผสมหล่อกึ่งแข็ง
ผู้เขียน	นายภัสพล บิลหรือหิม
สาขาวิชา	วิศวกรรมวัสดุ
ปีการศึกษา	2560

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อปรับปรุงสมบัติของแนวเชื่อมของอะลูมิเนียมผสมหล่อกึ่งแข็งให้ดียิ่งขึ้นจากงานวิจัยที่ผ่านมาเป็นการใช้หัวทวน (Pin) เป็นอุปกรณ์ในการเชื่อมซึ่งงานพบว่า แนวเชื่อมมีรูพรุนที่ทำให้ค่าสมบัติเชิงกลของแนวเชื่อมลดลง ในงานวิจัยนี้จึงเปลี่ยนอุปกรณ์เป็น ส่วนไฟฟ้าและดอกสว่านที่มีขนาดเท่ากับ 4 mm โดยใช้ตัวแปรในการเชื่อมเดียวกันกับงานวิจัยที่ผ่านมาคือ ความเร็วเดินแนวเชื่อม 75 mm/min ให้อุณหภูมิความร้อนด้วยขดลวดเหนี่ยวนำและควบคุมอุณหภูมิให้อยู่ระหว่าง 580 - 590 °C ตลอดจนการเชื่อม แบ่งการทดลองเป็น 2 การทดลอง ได้แก่ การทดลองที่ 1 การเชื่อมภายใต้บรรยากาศปกติ เป็นศึกษาค้นคว้าเพื่อหาอิทธิพลจากความเร็วรอบดอกสว่านไฟฟ้าที่ให้สมบัติเชิงกลของแนวเชื่อมสูงสุดโดยมีความเร็วรอบดอกสว่าน ได้แก่ 1100 1750 และ 2200 rpm ทิศดอกสว่านหมุนตามเข็มนาฬิกา ผลการวิเคราะห์พบว่า ชิ้นงานที่ความเร็วรอบดอกสว่าน 1750 rpm ให้สมบัติเชิงกลของแนวเชื่อมสูงสุด (เปอร์เซ็นต์รูพรุนน้อยที่สุด ค่าความแข็งแรงดึงและค่าความแข็งสูงสุด) จากนั้นทำการทดลองต่อโดยการเปลี่ยนทิศทางการหมุนดอกสว่านจากเข็มนาฬิกาเป็นทวนเข็มนาฬิกาเพื่อดูอิทธิพลของทิศทางการหมุนดอกสว่านที่มีผลต่อสมบัติของแนวเชื่อมพบว่า การเปลี่ยนทิศทางการหมุนดอกสว่านไม่ส่งผลกระทบต่อสมบัติเชิงกลของแนวเชื่อมแต่ชิ้นงานสลัดด้านด้านเคลื่อนที่และด้านเสริมการเคลื่อนที่ ในส่วนการทดลองที่ 2 นำตัวแปรที่ให้ค่าสมบัติเชิงกลสูงสุดในการทดลองที่ 1 คือ ความเร็วรอบดอกสว่านที่ 1750 rpm ความเร็วเดินแนวเชื่อมที่ 75 mm/min ทิศทางการหมุนตามเข็มนาฬิกา อุณหภูมิการเชื่อมระหว่าง 580 - 590 °C เชื่อมภายใต้แก๊สในโตรเจน ปล่องแก๊สที่อัตราการไหล 5 L/min อุณหภูมิแก๊ส 300 °C เชื่อมกับวัสดุ 2 ชนิดคือ ชิ้นงานที่ไม่ผ่านกระบวนการทางความร้อน (SSM 356) และชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการทางความร้อน (SSM 356-T6) ผลการวิเคราะห์ผลการทดลองพบว่า โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานที่ไม่ผ่านกระบวนการทางความร้อน (SSM 356) มีเปอร์เซ็นต์รูพรุนเฉพาะผิวบนแนวเชื่อม แต่ชิ้นงานที่ไม่ผ่านกระบวนการทางความร้อน (SSM 356) กลับมีการลดลงของเปอร์เซ็นต์ค่าความแข็งแรงแนวเชื่อมน้อยกว่าชิ้นงานเชื่อมที่ผ่านกระบวนการทางความร้อน (SSM 356-T6) กล่าวคือ ตัวแปรที่ใช้ในการเชื่อมชิ้นงานที่ไม่ผ่านกระบวนการทางความร้อน ไม่เหมาะสมที่จะนำมาเชื่อมชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการทางความร้อน (T6)

จากการทดลองชิ้นงานเชื่อมทั้งหมดในงานวิจัยนี้ลักษณะเกรนยังคงสภาพเป็นก้อนกลมแต่ขยายขนาดโตกว่าเกรนของโลหะเดิม ชิ้นงานที่มีสมบัติเชิงกลสูงที่สุดคือ การเชื่อมภายใต้สเปกคลุ่มของชิ้นงานที่ไม่ผ่านกระบวนการทางความร้อน (SSM 356) เชื่อมที่ความเร็วรอบดอกสว่าน 1750 rpm ความเร็วเดินแนวเชื่อมที่ 75 mm/min ทิศทางดอกสว่านหมุนตามเข็มนาฬิกา และควบคุมอุณหภูมิการเชื่อมให้อยู่ในช่วง 580 – 590 °C ในส่วนความแตกต่างระหว่างด้านด้านการเคลื่อนที่ (Retreating Side, RS) และด้านเสริมการเคลื่อนที่ (Advancing Side, AS) พบว่า ขนาดเกรนของด้านด้านการเคลื่อนที่มีขนาดโตกว่าด้านเสริมการเคลื่อนที่เนื่องจาก อิทธิพลทางความร้อนของดอกสว่านที่ทำให้ด้านด้านการเคลื่อนที่มีอุณหภูมิสูงกว่าด้านเสริมการเคลื่อนที่ ด้วยความแตกต่างนี้จึงทำให้ด้านด้านการเคลื่อนที่มีความแข็งแรงน้อยกว่าด้านเสริมการเคลื่อนที่

Thesis Title	Improvement of Semi-Solid State Joining of Semi-Solid Metal Aluminum Alloys
Author	Patsapon Binrohim
Major Program	Materials Engineering
Academic Year	2017

ABSTRACT

The objective of this research is to improve properties of the butt-joint of SSM 356 joint seam. In this study, the welding stirrer was changed from the pin to the portable drill-tip 4 mm in diameter. The welding speed used was at 75 mm/min. The sample was heated by induction coil in the range of 580 – 590 °C during joining. The experiments were divided into 2 parts. The 1st experiment (preliminary test) studied the effect of the stirring rate (1100 1750 and 2200 rpm) and the direction of the drill (clockwise and counter clockwise) under atmosphere. The results showed that the welded sample at stirring rate 1750 rpm with clockwise direction of drill had the best properties of joint seam (the lowest porosity, the highest tensile strength and hardness). Moreover, the direction of the drill did not affect to the tensile strength of welded sample. The 2nd experiment employed the most appropriate welding parameters from the previous section; stirring rate 1750 rpm welding speed at 75 mm/min with clockwise direction of drill and welding temperature in the range of 580 – 590 °C. The samples were welded under nitrogen shielding gas condition with gas flow rate 5 l/min and gas temperature 300 °C. Two types of welded specimens studied were SSM 356 and SSM 356-T6. The results showed that the percent of porosity in the weldment of both specimens was similar. From all condition, the α -Al particle of the weld metal zone has globular microstructure. The retreating side revealed larger grain size than the advancing side. The best result in this research is joining SSM 356 under nitrogen gas with stirring rate 1750 rpm welding speed at 75 mm/min clockwise direction of drill and welding temperature in the range 580 – 590 °C. However, SSM 356-T6 sample gave higher tensile strength compared to SSM 356 sample.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จได้ด้วยดี เนื่องด้วยการประสิทธิประสาทความรู้และความอนุเคราะห์จากบุคคลหลายฝ่าย ตลอดจนคณาจารย์ทุกท่านในภาควิชาวิศวกรรมเหมืองแร่และวัสดุ โดยเฉพาะอย่างยิ่งอาจารย์ที่ปรึกษาหลัก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ประภาศ เมืองจันทร์บุรี ที่ให้คำปรึกษาแนะนำในการดำเนินงานวิจัย และการจัดทำวิทยานิพนธ์ให้มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบคุณคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่ให้ความกรุณาตรวจทานและให้คำแนะนำเกี่ยวกับวิทยานิพนธ์เล่มนี้จนมีความสมบูรณ์มากขึ้น

ขอขอบคุณ คณะวิศวกรรมศาสตร์ ภาควิชาวิศวกรรมเหมืองแร่และวัสดุ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ในการเอื้อเฟื้อสถานที่ อุปกรณ์ และเครื่องมือในการทำการวิจัยและให้การสนับสนุนเงินทุน

ภัสพล บิลห่อหิม

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	(5)
Abstract	(7)
กิตติกรรมประกาศ	(8)
สารบัญ	(9)
รายการตาราง	(13)
รายการรูปภาพ	(14)
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ที่มาและความสำคัญ	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	2
1.4 แผนการดำเนินงานวิจัย	3
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัย	5
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	
2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	
2.1.1 การหล่อโลหะสเตอริ่งของแข็ง	6
2.1.2 อะลูมิเนียมหล่อผสมกึ่งแข็งเกรด SSM 356	7
2.1.3 กระบวนการบ่มแข็งโลหะผสมอะลูมิเนียม	8
2.1.4 การเชื่อมในสถานะกึ่งของแข็ง	8
2.1.5 การคำนวณหาค่าสัดส่วนของแข็ง	9
2.1.6 หลักการให้ความร้อนโดยขดลวดเหนี่ยวนำ	10
2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	10
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย	
3.1 ขั้นตอนการดำเนินการวิจัยและสถานะการทดลอง	16
3.2 อะลูมิเนียมผสมเกรด SSM 356	18
3.3 การเตรียมชิ้นงานทดลอง	19
3.4 เครื่องมือและอุปกรณ์ในการทำวิจัย	20
3.5 ขั้นตอนการทดลอง	29

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.6 การเตรียมชิ้นงานเชื่อมสำหรับการทดสอบ	33
3.7 การหาเปอร์เซ็นต์รั่วพรุน	36
3.8 การหาขนาดเกรน	39
บทที่ 4 ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผล	
4.1 การทดลองที่ 1 การเชื่อมภายใต้บรรยากาศปกติ	
4.1.1 ลักษณะทางกายภาพของชิ้นงานเชื่อมที่ความเร็วรอบดอกสว่าน 1100 1750 และ 2200 rpm หมุนตามเข็มนาฬิกา	41
4.1.2 โครงสร้างมหภาคของแนวเชื่อมชิ้นงานที่ความเร็วรอบดอกสว่าน 1100 1750 และ 2200 rpm หมุนตามเข็มนาฬิกา	43
4.1.3 โครงสร้างจุลภาคของแนวเชื่อมชิ้นงานที่ความเร็วรอบดอกสว่าน 1100 1750 และ 2200 rpm หมุนตามเข็มนาฬิกา	45
4.1.4 เปอร์เซ็นต์รั่วพรุนของแนวเชื่อมชิ้นงานที่ความเร็วรอบดอกสว่าน 1100 1750 และ 2200 rpm หมุนตามเข็มนาฬิกา	48
4.1.5 สมบัติเชิงกลของแนวเชื่อมชิ้นงานที่ความเร็วรอบสว่านดอก 1100 1750 และ 2200 rpm หมุนตามเข็มนาฬิกา	49
4.1.6 ลักษณะทางกายภาพของชิ้นงานเชื่อมที่ความเร็วรอบดอกสว่าน 1750 rpm หมุนทวนเข็มนาฬิกา	52
4.1.7 โครงสร้างมหภาคของแนวเชื่อมชิ้นงานที่ความเร็วรอบดอกสว่าน 1750 rpm หมุนทวนเข็มนาฬิกา	53
4.1.8 โครงสร้างจุลภาคของแนวเชื่อมชิ้นงานที่ความเร็วรอบดอกสว่าน 1750 rpm หมุนทวนเข็มนาฬิกา	55
4.1.9 เปอร์เซ็นต์รั่วพรุนของแนวเชื่อมชิ้นงานที่ความเร็วรอบดอกสว่าน 1750 rpm หมุนทวนเข็มนาฬิกา	57
4.1.10 สมบัติเชิงกลของแนวเชื่อมชิ้นงานที่ความเร็วรอบสว่าน ดอก 1750 rpm หมุนทวนเข็มนาฬิกา	57
4.2 การทดลองที่ 2 การเชื่อมภายใต้แก๊สปกคลุม	
4.2.1 ลักษณะทางกายภาพของชิ้นงานเชื่อม SSM 356 และ SSM 356-T6	60

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.2.2 โครงสร้างมหภาคของชิ้นงานเชื่อม SSM 356 และ SSM 356-T6	61
4.2.3 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานเชื่อม SSM 356 และ SSM 356-T6	62
4.2.4 เปอร์เซนต์รูพรุนของชิ้นงานเชื่อม SSM 356 และ SSM 356-T6	63
4.2.5 สมบัติเชิงกลของแนวเชื่อมชิ้นงาน SSM356 และ SSM 356-T6	65
4.3 โครงสร้างจุลภาคจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)	67
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	
5.1 การทดลองที่ 1 การเชื่อมภายใต้บรรยากาศปกติ	71
5.2 การทดลองที่ 2 การเชื่อมภายใต้แก๊สปกคลุม	72
5.3 ข้อเสนอแนะ	72
5.4 งานวิจัยในอนาคต	72
บรรณานุกรม	73
ภาคผนวก	
ก. ส่วนผสมทางเคมีของสารละลาย Keller's Reagent และกราฟแสดงเฟสของโลหะผสมระหว่างอะลูมิเนียมและซิลิกอน	77
ข. ข้อกำหนดชิ้นงานทดสอบความแข็งแรงดึงตามมาตรฐาน ASTM-E8M	79
ค. จำนวนรูพรุน	
ค.1 เปอร์เซนต์รูพรุนของบริเวณเนื้อเชื่อมของทุกๆ สภาวะ	82
ค.2 เปอร์เซนต์รูพรุนด้านด้านการเคลื่อนที่ของทุกๆ สภาวะ	84
ค.3 เปอร์เซนต์รูพรุนด้านเสริมการเคลื่อนที่ของทุกๆ สภาวะ	86
ง. ค่าความแข็งแรงดึงของแนวเชื่อม	88
จ. ค่าจุดครากของแนวเชื่อม	91
ฉ. ระยะยืดตัวของแนวเชื่อม	94
ช. ค่าความแข็งแรงแนวเชื่อม	97
ซ. มอเตอร์แกน A	100
ฅ. แบบเครื่อง Min CNC และขาจับท่อแก๊สปกคลุม	
ฅ 1. ภาพเครื่อง Mini CNC ก่อนทำการปรับปรุงและหลังปรับปรุง	104
ฅ 2. ภาพขาจับท่อแก๊สปกคลุม	103

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
ญ. กราฟแสดงอุณหภูมิระหว่างการเชื่อม	105
ฎ. บทความวารสาร	107
ประวัติผู้เขียน	146

รายการตาราง

	หน้า
ตารางที่ 1.1 ระยะเวลาแผนการดำเนินงานวิจัย	4
ตารางที่ 2.1 ส่วนผสมทางเคมีของอะลูมิเนียมหล่อกิ่งแข็ง SSM 356	7
ตารางที่ 2.2 อุณหภูมิหลอมเหลวของอะลูมิเนียมหล่อกิ่งแข็ง SSM 356	8
ตารางที่ 2.3 ค่าสัดส่วนของแข็งของอะลูมิเนียมหล่อผสม SSM 356	9
ตารางที่ 3.1 ตัวแปรที่ใช้ในการทดลองที่ 1 การเชื่อมภายใต้บรรยากาศปกติ	17
ตารางที่ 3.2 ตัวแปรที่ใช้ในการทดลองเพื่อวิเคราะห์ทิศทางการคอกสว่าน	17
ตารางที่ 3.3 ตัวแปรที่ใช้ในการทดลองที่ 2 การเชื่อมภายใต้แก๊สปกคลุม	18
ตารางที่ 4.1 เปอร์เซ็นต์รูพรุนของชิ้นงานเชื่อมทุกๆ บริเวณ	48
ตารางที่ 4.2 ค่าความแข็งแรงดึงของแนวเชื่อมในแต่ละความเร็วรอบคอกสว่าน	50
ตารางที่ 4.3 ตัวแปรในการทำวิจัยหลังได้ความเร็วรอบคอกสว่านที่เหมาะสม	52
ตารางที่ 4.4 เปอร์เซ็นต์รูพรุนของชิ้นงานหมุนตามเข็มนาฬิกาและหมุนทวนเข็มนาฬิกา	57
ตารางที่ 4.5 ค่าความแข็งแรงดึงของชิ้นงานเชื่อมหมุนตามเข็มนาฬิกาและหมุนทวน นาฬิกา	58
ตารางที่ 4.6 เปอร์เซ็นต์รูพรุนของชิ้นงาน SSM 356 และ SSM 356-T6	64
ตารางที่ 4.7 ค่าความแข็งแรงดึงของแนวเชื่อมชิ้นงาน SSM 356 และ SSM 356-T6	66
ตารางที่ 4.8 ธาตุในจุดต่าง ๆ ของชิ้นงานที่ความเร็วรอบคอกสว่าน 1750 rpm คอกสว่านหมุนตามเข็มนาฬิกา เชื่อมภายใต้บรรยากาศปกติ	68
ตารางที่ 4.9 ธาตุในจุดต่าง ๆ ของชิ้นงานที่ความเร็วรอบคอกสว่าน 1750 rpm คอกสว่านหมุนตามเข็มนาฬิกา เชื่อมภายใต้แก๊สปกคลุม	68
ตารางที่ ค 1. เปอร์เซ็นต์รูพรุนของบริเวณเนื้อเชื่อมของทุกๆ เงื่อนไข	83
ตารางที่ ค 2. เปอร์เซ็นต์รูพรุนด้านด้านการเคลื่อนที่ของทุกๆ เงื่อนไข	85
ตารางที่ ค 3. จำนวนรูพรุนด้านเสริมการเคลื่อนที่ของทุกๆ เงื่อนไข	87
ตารางที่ ง 1. ค่าความแข็งแรงดึงของแนวเชื่อมในทุกๆ เงื่อนไข	90
ตารางที่ จ 1. ค่าความแรงดึง ณ จุดครากของแนวเชื่อม	93
ตารางที่ ฉ 1. ค่าระยะยึดตัวของแนวเชื่อม	96
ตารางที่ ช 1. ค่าความแข็งของแนวเชื่อมในทุก ๆ บริเวณ (ทั้งหมด 40 จุด, HV _{0.1})	99

รายการรูปภาพ

	หน้า
รูปที่ 2.1 กรรมวิธีการปล่อยฟองแก๊สในการหล่อแบบ GISS	6
รูปที่ 2.2 โครงสร้างจุลภาคของอะลูมิเนียมหล่อผสมเกรด SSM 356	7
รูปที่ 3.1 ขั้นตอนการวิจัย	16
รูปที่ 3.2 กระบวนการทางความร้อน	19
รูปที่ 3.3 (ก) ชิ้นงานอะลูมิเนียม SSM 356 หลังจากการหล่อ (ข) โครงสร้างอะลูมิเนียม SSM 356 19	
(ค) ชิ้นงานหลังปรับขนาด	20
รูปที่ 3.4 (ก) แผนผังของอุปกรณ์การเชื่อมในสถานะกึ่งแข็ง	20
(ข) อุปกรณ์การเชื่อมในสถานะกึ่งแข็ง	21
รูปที่ 3.5 (ก) สว่านไฟฟ้า (ข) ดอกสว่านขนาด 4 mm	21
รูปที่ 3.6 (ก) เครื่อง Mini CNC ก่อนการปรับปรุง (ข) เครื่อง Mini CNC หลังการปรับปรุง	24
รูปที่ 3.7 เครื่องให้ความร้อนโดยขดลวดเหนี่ยวนำ (Induction Heater)	26
รูปที่ 3.8 ตำแหน่งทั้ง 3 ตำแหน่งของขดลวด	26
รูปที่ 3.9 กล้องจุลทรรศน์แบบสเตอริโอ (Stereo Microscope)	27
รูปที่ 3.10 กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (Optical Microscope, OM)	28
รูปที่ 3.11 การติดตั้งอุปกรณ์ก่อนเริ่มการทดลอง	29
รูปที่ 3.12 การวัดรอบด้วยตัววัดความเร็วรอบแบบหน้าสัมผัส	30
รูปที่ 3.13 (ก) การป้อนโค้ด (code) เข้าเครื่อง Mini CNC	30
(ข) ดารจับยึดของหัวแก๊สใน เชื่อมภายใต้แก๊สปกคลุม	31
รูปที่ 3.14 การเริ่มต้นการทดลองโดยเปิดเครื่องให้ความร้อนโดยขดลวดเหนี่ยวนำ	31
รูปที่ 3.15 (ก) กระแสไฟในขณะที่เพิ่มอุณหภูมิชิ้นงาน (ข) การควบคุมอุณหภูมิระหว่างทดลอง	32
รูปที่ 3.16 ชิ้นงานหลังการเชื่อมแล้วปล่อยชิ้นงานให้เย็นตัวในบรรยากาศปกติ	33
รูปที่ 3.17 การตัดแบ่งชิ้นงานหลังการเชื่อม	33
รูปที่ 3.18 ชิ้นงานในการทดสอบ โครงสร้างจุลภาค	34
รูปที่ 3.19 การขัดเตรียมผิวชิ้นงาน	34

รายการรูปภาพ (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 3.20 การเตรียมชิ้นงานเพื่อทดสอบความแข็งแรงดึง	35
รูปที่ 3.21 การทดสอบหาค่าความแข็ง	36
รูปที่ 3.22 การใช้โปรแกรม Adobe Photoshop	37
รูปที่ 3.23 การใช้โปรแกรม Image J	38
รูปที่ 3.24 ขั้นตอนการหาขนาดเกรน	40
รูปที่ 4.1 ลักษณะทางกายภาพชิ้นงานเชื่อม (ก) 1100 rpm (ข) 1750 rpm (ค) 2200 rpm	42
รูปที่ 4.2 โครงสร้างมหภาคของชิ้นงานแนวเชื่อมเริ่มต้นการเชื่อม (ก) 1100 rpm (รูปบน) และตอนสิ้นสุดการเชื่อม (รูปล่าง) (ข) 1750 rpm (ค) 2200 rpm	44
รูปที่ 4.3 โครงสร้างจุลภาคแนวเชื่อมของชิ้นงานที่ความเร็วรอบดอกสว่าน 1100 rpm	45
รูปที่ 4.4 โครงสร้างจุลภาคแนวเชื่อมของชิ้นงานที่ความเร็วรอบดอกสว่าน 1750 rpm	46
รูปที่ 4.5 โครงสร้างจุลภาคแนวเชื่อมของชิ้นงานที่ความเร็วรอบดอกสว่าน 2200 rpm	47
รูปที่ 4.6 ค่าความแข็งชิ้นงานในแต่ละความเร็วรอบดอกสว่าน (1100 1750 2200 rpm) ทั้ง 3 บริเวณ	51
รูปที่ 4.7 ลักษณะทางกายภาพด้านหน้าและด้านหลังของชิ้นงานที่ความเร็วรอบ ดอกสว่าน 1750 rpm (ก) หมุนตามเข็มนาฬิกา (ข) หมุนทวนเข็มนาฬิกา	53
รูปที่ 4.8 โครงสร้างมหภาคของชิ้นงานความเร็วรอบสว่าน 1750 rpm ชิ้นงาน เริ่มต้นการเชื่อม (รูปบน) ชิ้นงานสิ้นสุดการเชื่อม (ตอนปลาย) (ก) ดอกสว่าน หมุนตามเข็มนาฬิกา (ข) ดอกสว่านหมุนทวนเข็มนาฬิกา	54
รูปที่ 4.9 โครงสร้างทางจุลภาคของชิ้นงานหมุนตามเข็มนาฬิกา	55
รูปที่ 4.10 โครงสร้างทางจุลภาคของชิ้นงานหมุนทวนเข็มนาฬิกา	56
รูปที่ 4.11 ค่าความแข็งของแนวเชื่อมชิ้นงานหมุนตามเข็มนาฬิกา และชิ้นงานหมุนทวนเข็มนาฬิกา	59
รูปที่ 4.12 ลักษณะทางกายภาพของชิ้นงานหน้าและหลัง (ก) SSM 356 (ข) SSM 356-T6	60 61
รูปที่ 4.13 โครงสร้างมหภาคของชิ้นงาน (ก) SSM 356 (ข) SSM 356-T6	61 62
รูปที่ 4.14 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานเชื่อม SSM 356	63

รายการรูปภาพ (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.15 โครงสร้างทางจุลภาคของชิ้นงานเชื่อม SSM 356-T6	64
รูปที่ 4.16 ค่าความแข็งแนวเชื่อมของชิ้นงาน SSM 356 และ SSM 356-T6	67
รูปที่ 4.17 รูปภาพ SEM ชิ้นงานที่ความเร็วรอบดอกสว่าน 1750 rpm (ก) ภายใต้บรรยากาศปกติ (ข) ภายใต้แก๊สปกคลุม	69
รูปที่ ก 1. กราฟแสดงเฟสของโลหะผสมระหว่างอะลูมิเนียมและซิลิกอน	78
รูปที่ ข 1. ข้อกำหนดชิ้นงานทดสอบความแข็งแรงดึง ASTM-E8M	80
รูปที่ ซ 1. ค่าลักษณะของมอเตอร์แกน A ที่นำมาใช้งานกับ Mini CNC	101
รูปที่ ฉ 1. (ก) ภาพเครื่อง Mini CNC ก่อนทำการปรับปรุง (ข) ภาพเครื่อง Mini CNC หลังทำการปรับปรุง	103
รูปที่ ฉ 2. (ก) ภาพขาจับท่อแก๊ส (ข) ภาพเครื่อง Mini CNC ประกอบกับขาจับท่อแก๊ส	104
รูปที่ ญ 1. กราฟแสดงอุณหภูมิระหว่างการเชื่อม (1) การให้ความร้อนชิ้นงาน (2) การเชื่อม (3) การปล่อยให้ชิ้นงานเย็นตัวในบรรยากาศปกติ	106

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

อะลูมิเนียมและอะลูมิเนียมผสมถูกนำมาทำชิ้นส่วนเครื่องจักรและชิ้นงานมากขึ้น โดยเฉพาะในอุตสาหกรรมเครื่องจักรต่าง ๆ ด้วยสมบัติทางด้านความแข็งแรงที่ดี น้ำหนักเบา ทนการกัดกร่อนได้มากกว่าเหล็กกล้าและสามารถขึ้นรูปได้ง่าย อะลูมิเนียมหล่อผสมสามารถหล่อได้หลายกรรมวิธีเช่น กระบวนการหล่อขึ้นรูปด้วยแรงดันสูง (High Pressure Die Casting, HPDC) กระบวนการหล่อโลหะหล่อด้วยแรงดันต่ำ (Low Pressure Die Casting, LPDC) กระบวนการหล่อโลหะด้วยแม่พิมพ์ทราย (Sand Casting) และกระบวนการหล่อแบบไดแคสติ้ง (Die Casting) โดยวัสดุที่ได้จากการหล่อดังกล่าวจะมีโครงสร้างแบบกิ่งไม้ (Dendrite) ต่อมา มีการปรับปรุงการหล่อเพื่อปรับโครงสร้างและสมบัติของอะลูมิเนียมผสมให้สมบัติเชิงกลที่ดีขึ้น โดยการปรับปรุงกรรมวิธีการหล่อใช้แก๊สอาร์กอน (Ar_2) เพื่อปรับโครงสร้างเกรนให้เป็นสถานะกึ่งแข็งก่อนเทน้ำโลหะเข้าสู่แม่พิมพ์ซึ่งกรรมวิธีนี้คือ Gas Induce Semi Solid Process หรือ GISS เป็นกรรมวิธีที่ถูกพัฒนาเพื่อหล่ออะลูมิเนียมผสมให้เกรนมีก้อนกลม (Spherical หรือ Globular Grain) ซึ่งให้สมบัติเชิงกลสูง [1-3] ชิ้นส่วนอะลูมิเนียมเมื่อถูกนำมาใช้ในงานที่หลากหลายรูปแบบ ซึ่งต้องใช้กรรมวิธีการเชื่อม (Welding Process) เพื่อประสานชิ้นส่วนอะลูมิเนียมให้มีแบบตามต้องการและซับซ้อนมากยิ่งขึ้น การเชื่อมถือได้ว่าเป็นวิธีที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายในปัจจุบัน

การเชื่อม คือ การประสานโลหะ 2 ชิ้นให้ติดกันด้วยความร้อน การเชื่อมสามารถแบ่งตามสถานะของการเชื่อมได้ 3 สถานะดังต่อไปนี้ 1. การเชื่อมในสถานะของเหลว (Liquid State Welding) หรือแบบหลอมละลาย (Fusion Welding) เป็นกรรมวิธีที่ให้ความร้อนกับโลหะจนโลหะเกิดการหลอมละลายและประสานติดกันเป็นกรรมวิธีที่นิยมใช้มากที่สุดเช่น การเชื่อมทิก (Gas Tungsten Arc Welding, GTAW) เป็นต้น 2. การเชื่อมในสถานะของแข็ง (Solid State Welding) เป็นการเชื่อมที่ไม่มีการหลอมละลายโลหะ นิยมใช้ในการเชื่อมที่ไม่ต้องการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างภายใน อาศัยหลักการเสียดสีให้เกิดความร้อนเฉพาะจุด โดยการเชื่อมในสถานะของแข็งมีกรรมวิธีที่นิยมใช้คือ การเชื่อมเสียดทานแบบกวน (Friction Stir Welding, FSW) 3. การเชื่อมในสถานะกึ่งของแข็ง (Semi-Solid State Welding) เป็นการเชื่อมที่พียงคิดค้นล่าสุดเป็นการเชื่อมเฉพาะในโลหะที่

ผ่านกระบวนการหล่อแบบกึ่งของแข็งเท่านั้นเพื่อต้องการเปลี่ยนแปลงลักษณะ โครงสร้างก่อนกลมน้อยที่สุดและรักษาสมบัติเชิงกลให้มีค่าลดลงน้อยที่สุด จึงมีความจำเป็นในการเชื่อมที่อุณหภูมิ กึ่งแข็งของวัสดุชนิดนั้นๆ [4]

โดยจากการค้นคว้างานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการเชื่อมอะลูมิเนียมในสถานะกึ่งแข็งพบว่า ตัวแปรที่มีผลต่อแนวเชื่อมและสมบัติเชิงกลได้แก่ อุณหภูมิในการเชื่อม ($^{\circ}\text{C}$) ความเร็วในการเดินแนวเชื่อม (mm/min) ความเร็วรอบการหมุนของหัวกวน (rpm) ทั้งนี้จากการค้นคว้าวิจัยที่ทดลองเชื่อมอะลูมิเนียมกึ่งแข็งหล่อผสมเกรด SSM 356 ในสถานะกึ่งแข็งโดยใช้หัวกวน (Pin) พบว่า ตัวแปรที่ให้สมบัติแนวเชื่อมสูงที่สุดในการเชื่อมโดยการใช้หัวกวนคือ ใช้อุณหภูมิระหว่างการเชื่อมชิ้นงานในช่วง $580 - 590^{\circ}\text{C}$ ตลอดเวลา ความเร็วเดินแนวเชื่อมที่ 75 mm/min ความเร็วรอบกวนอยู่ที่ 1750 rpm [5] อย่างไรก็ตามเมื่อตรวจสอบโครงสร้างมหภาคพบรูพรุนในเนื้อเชื่อมจำนวนมาก ทำให้ค่าสมบัติเชิงกลลดลงไม่เป็นไปตามที่ตั้งไว้ จึงเกิดงานวิจัยนี้ขึ้น โดยมีแนวคิดในการปรับปรุงสมบัติแนวเชื่อมของอะลูมิเนียมหล่อผสมกึ่งแข็งเกรด SSM 356 ให้สูงขึ้นด้วยการเปลี่ยนอุปกรณ์จากหัวกวนเป็นดอกสว่านที่มีขนาดเดียวกับหัวกวนและยังใช้ตัวแปรการเชื่อมเดียวกัน ทำการวิเคราะห์โครงสร้างเพื่อเปรียบเทียบกับ การเชื่อมด้วยหัวกวนเพื่อดูว่าอุปกรณ์แบบใดให้ผลสมบัติแนวเชื่อมดีที่สุด

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

- 1.2.1 เพื่อประยุกต์อุปกรณ์ที่ใช้ในการเชื่อมอะลูมิเนียมผสมหล่อกึ่งแข็งในสถานะกึ่งแข็ง
- 1.2.2 เพื่อศึกษาตัวแปรที่มีผลต่อสมบัติแนวเชื่อมและหาตัวแปรที่ให้สมบัติแนวเชื่อมที่ดีที่สุดของการเชื่อมอะลูมิเนียมผสมหล่อกึ่งแข็งในสถานะกึ่งแข็ง
- 1.2.3 เพื่อประเมินอิทธิพลของทิศทางการหมุนดอกสว่านที่มีผลต่อลักษณะทางกายภาพ โครงสร้างมหภาค จุลภาคและสมบัติเชิงกลของแนวเชื่อมอะลูมิเนียมผสมหล่อกึ่งแข็ง

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

ขอบเขตของงานวิจัยนี้เพื่อศึกษาตัวแปรที่มีผลต่อสมบัติของอะลูมิเนียมผสมหล่อกึ่งแข็งเกรด SSM 356 ผ่านการเชื่อมในสถานะกึ่งแข็งและเพื่อหาตัวแปรที่ให้สมบัติแนวเชื่อมสูงที่สุด โดยให้ความร้อนด้วยขดลวดเหนี่ยวนำ (Induction Heating) ใช้ดอกสว่านไฟฟ้าแทนหัวกวนและใช้ Mini CNC (Mini Computer Numerical Control) เป็นฐานรองรับชิ้นงาน ซึ่งกำหนดให้ความเร็วเดิน

แนวเชื่อมเท่ากับ 75 mm/min ควบคุมอุณหภูมิจุดเชื่อมระหว่างการเชื่อมอยู่ในช่วง 580 – 590 °C ตลอดเวลา ปล่อยชิ้นงานเย็นตัวในบรรยากาศปกติ นำผลการทดลองที่ได้มาวิเคราะห์โครงสร้างมหภาค โครงสร้างจุลภาค และสมบัติเชิงกล (ค่าความแข็งแรงดึงและค่าความแข็ง) โดยแบ่งการทดลองออกเป็น 2 การทดลองได้แก่

1. การเชื่อมภายใต้บรรยากาศปกติ เป็นการทดลองเริ่มต้นเพื่อหาความเร็วรอบดอกสว่านที่ให้สมบัติของแนวเชื่อมดีที่สุด โดยกำหนดความเร็วรอบดอกสว่านที่ 1100 1750 และ 2200 rpm ในทิศทางหมุนดอกสว่านตามเข็มนาฬิกา นำความเร็วรอบดอกสว่านที่ให้สมบัติเชิงกลที่ดีที่สุดของแนวเชื่อมมาทดลองต่อ โดยการเปลี่ยนทิศทางของดอกสว่านเป็นหมุนทวนเข็มนาฬิกาและนำผลจากการทดลองทั้ง 2 แบบมาเปรียบเทียบกัน เพื่อค้นหาตัวแปรที่ให้สมบัติแนวเชื่อมเชิงกลสูงที่สุด แล้วนำตัวแปรดังกล่าวไปใช้ต่อในการทดลองที่ 2

2. การเชื่อมภายใต้สภาวะแก๊สปกคลุม โดยนำตัวแปรควบคุมที่ให้ผลสมบัติเชิงกลแนวเชื่อมที่ดีที่สุดจากการทดลองที่ 1 มาเชื่อมภายใต้แก๊สไนโตรเจนที่อัตราการไหล 5 L/min แก๊สมีอุณหภูมิที่ 300 °C นอกจากนี้ยังเพิ่มชิ้นงานมาเพิ่มความแข็งแรงด้วยกรรมวิธีกระบวนการทางความร้อน T6 นำมาเชื่อมภายใต้แก๊สปกคลุมแนวเชื่อมเพื่อเปรียบเทียบค่าสมบัติเชิงกลแนวเชื่อมระหว่างชิ้นงานที่ไม่ผ่านกระบวนการทางความร้อนและชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการทางความร้อน

1.4 แผนการดำเนินงานวิจัย

แผนการดำเนินงานวิจัย จะประกอบด้วย 8 ขั้นตอนระยะเวลาการดำเนินงานวิจัยแสดงในตารางที่ 1.1 เพื่อทำให้งานวิจัยลุล่วงตามเป้าหมายดังนี้

- 1.4.1 ศึกษาค้นคว้าเอกสาร ข้อมูลและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย
- 1.4.2 ออกแบบแนวทางการทดลอง
- 1.4.3 เตรียมเครื่องมือและอุปกรณ์สำหรับงานวิจัย
- 1.4.4 ปฏิบัติการทดลองและศึกษาค้นคว้างานวิจัยเพิ่มเติม
- 1.4.5 ศึกษาสมบัติทางโลหะวิทยา (ลักษณะทางกายภาพ โครงสร้างมหภาค และโครงสร้างจุลภาค)
- 1.4.6 ทดสอบสมบัติเชิงกล (ค่าความแข็งแรงดึงและค่าความแข็ง)
- 1.4.7 วิเคราะห์และสรุปผลการทดลอง
- 1.4.8 จัดทำรูปเล่มรายงานฉบับสมบูรณ์

ตารางที่ 1.1 ระยะเวลาแผนการดำเนินงานวิจัย

แผนการดำเนินงานวิจัย	ปี									
	2556 - 2557		2557 - 2558		2558 - 2559			2559- 2560	2560- 2561	
	พ.ย.- ธ.ค.	ม.ค.- ก.พ.	มี.ค.- เม.ย.	พ.ค.- ต.ค.	พ.ย.- มี.ค.	เม.ย.- ต.ค.	พ.ย.- ก.พ.	มี.ค.- ธ.ค.	ม.ค.- มี.ค.	
1.4.1 ศึกษาค้นคว้าเอกสาร ข้อมูลและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับ งานวิจัย	←-----→									
1.4.2 ออกแบบแนวทางการ ทดลอง		←-----→								
1.4.3 เตรียมเครื่องมือและ อุปกรณ์สำหรับงานวิจัย		←-----→								
1.4.4 ปฏิบัติการทดลองและ ศึกษาค้นคว้างานวิจัยเพิ่มเติม			←-----→							
1.4.5 ศึกษาสมบัติทางโลหะ วิทยา (ลักษณะทางกายภาพ โครงสร้างมหภาค และ โครงสร้างจุลภาค)			←-----→							
1.4.6 ทดสอบสมบัติเชิงกล (ค่า ความแข็งแรงดึงและค่าความ แข็ง)			←-----→							
1.4.7 วิเคราะห์และสรุปผลการ ทดลอง				←-----→						
1.4.8 จัดทำรูปเล่มรายงานฉบับ สมบูรณ์						←-----→				

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัย

- 1.5.1 ได้เครื่องมือประยุกต์ในการเชื่อมในสถานะกึ่งแข็ง (Welding in Semi-Solid State)
- 1.5.2 ทราบถึงความเป็นไปได้และค่าตัวแปรการเชื่อม สำหรับการเชื่อมอะลูมิเนียมผสมหล่อกึ่งแข็ง ด้วยกรรมวิธีการเชื่อมในสถานะกึ่งแข็งด้วยสว่านไฟฟ้า
- 1.5.3 ทราบผลประเมินการเชื่อมในสถานะกึ่งแข็งตามตัวแปรที่กำหนด
- 1.5.4 เพื่อสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับงานวิจัย และอุตสาหกรรมต่าง ๆ ต่อไป
- 1.5.5 นำผลงานวิจัยไปเผยแพร่ในระดับชาติ

บทที่ 2

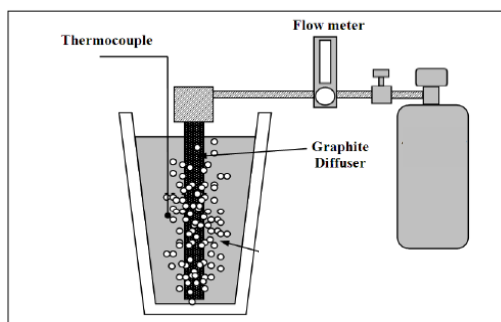
ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

งานวิจัยเรื่อง การปรับปรุงการเชื่อมในสถานะกึ่งแข็งของอะลูมิเนียมผสมหล่อกึ่งแข็ง โดยแนวต่อชนของชิ้นงาน ได้รับความร้อนจากขดลวดเหนี่ยวนำ (Induction Heater) เกิดเป็นบ่อหลอมสถานะกึ่งแข็งแล้วทำการกวาดด้วยดอกสว่าน หลังการเชื่อมนำชิ้นงานเชื่อมมาศึกษาลักษณะทางกายภาพ โครงสร้างมหภาค โครงสร้างจุลภาค เปรอร์เซ็นต์รูพรุน การทดสอบสมบัติเชิงกล โดยก่อนการทดลองได้ศึกษาค้นคว้าทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องดังต่อไปนี้

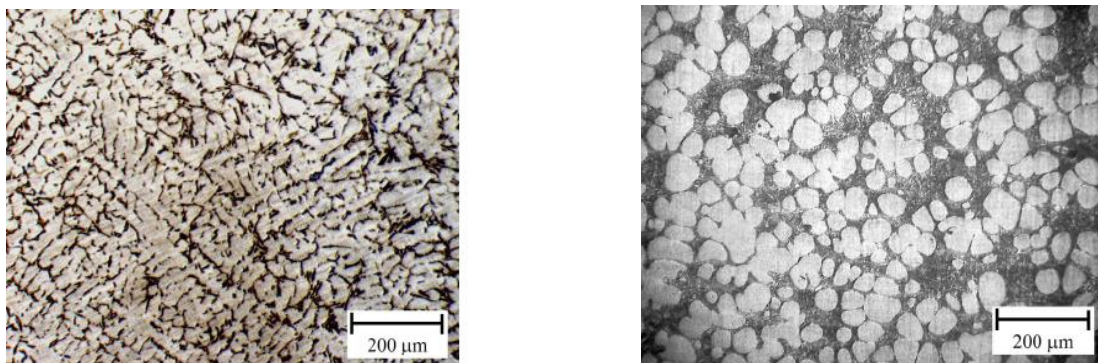
2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1.1 การหล่อโลหะสเลอรัร์กึ่งแข็ง

กระบวนการหล่อโลหะสเลอรัร์แบบกึ่งแข็งด้วยกรรมวิธีแบบ GISS (Gas Induce Semi-Solid) นับว่าเป็นกระบวนการหล่อสมัยใหม่สำหรับการผลิตโลหะผสมกึ่งแข็ง ซึ่งเป็นการเปลี่ยนโครงสร้างของโลหะกึ่งแข็งโดยการพ่นแก๊สในโตรเจนผ่านแท่งกราไฟต์พรุนในปริมาณน้อยเพื่อเปลี่ยนโครงสร้างเกรนของโลหะก่อนเทน้ำโลหะลงสู่เบ้าหลอมจากที่มีโครงสร้างแบบกิ่งไม้ (Dendrite) แสดงดังรูปที่ 2.1 ให้เป็นโครงสร้างก้อนกลม (Spheroidal or Globular Grain) แสดงดังรูปที่ 2.2 ที่ให้ค่าสมบัติเชิงกลที่ดีกว่า [1-3] ด้วยเหตุนี้จึงทำให้โลหะผสมที่ผ่านการหล่อสเลอรัร์แบบกึ่งแข็งได้รับความนิยมมากขึ้นในปัจจุบัน



รูปที่ 2.1 กรรมวิธีการปล่อยฟองแก๊สในโตรเจนในการหล่อแบบ GISS [1]



รูปที่ 2.2 โครงสร้างของอะลูมิเนียมผสมหล่อเกรด SSM 356 [1]

2.1.2 อะลูมิเนียมผสมหล่อกึ่งแข็งเกรด SSM 356

อะลูมิเนียมจัดเป็นโลหะที่มีสัดส่วนความแข็งแรงต่อน้ำหนักที่สูง ด้านทานการกัดกร่อนได้ดีกว่าเหล็กกล้า และยังสามารถหล่อขึ้นรูปได้ง่าย โดยเฉพาะอะลูมิเนียมหล่อผสมกึ่งแข็งเกรด SSM 356 ถือได้ว่าเป็นอะลูมิเนียมที่สามารถหล่อขึ้นรูปได้ง่ายด้วย สมบัติเหล่านี้ทำให้อะลูมิเนียมจัดเป็นวัสดุที่ได้รับความนิยมสูงขึ้นในอุตสาหกรรมขนาดใหญ่ โดยอะลูมิเนียมบริสุทธิ์มีค่าสมบัติเชิงกลที่ไม่สูง ทำให้ปัจจุบันมีการเพิ่มธาตุบางชนิดเข้าไปเช่น แมกนีเซียม ซิลิกอน ทองแดง และแมงกานีส เพื่อเพิ่มสมบัติเชิงกลให้กับอะลูมิเนียมให้มีความเหมาะสมกับการใช้งานในแต่ละประเภท [1-3] โดยงานวิจัยนี้ได้นำเอาอะลูมิเนียมผสมหล่อกึ่งแข็ง SSM 356 ที่ขึ้นรูปด้วยกรรมวิธี GISS (ขนาดเกรนเท่ากับ 49 μm) โดยมีส่วนผสมทางเคมีดังแสดงในตารางที่ 2.1 ซึ่งจะมีความแตกต่างจากอะลูมิเนียมผสมหล่อกึ่งแข็ง SSM A356 ที่เปอร์เซ็นต์ของธาตุซิลิกอน ($\text{Si} = 7.9$) เพียงเล็กน้อยเท่านั้น

ตารางที่ 2.1 ส่วนผสมทางเคมีของอะลูมิเนียมผสมหล่อกึ่งแข็ง SSM 356 [1-3]

วัสดุ	Si	Mg	Ti	Fe	Al
SSM 356	7.5	0.32	0.05	0.57	Bal

ในส่วนอุณหภูมิหลอมเหลวของอะลูมิเนียมผสมหล่อกึ่งแข็ง SSM 356 ในตารางที่ 2.2 โดยที่ T_L คือ อุณหภูมิที่จุดหลอมเหลวของโลหะที่ใช้ในการทดลอง T_E คือ อุณหภูมิจุดยูเทกติก T_M คือ อุณหภูมิจุดหลอมเหลวของอะลูมิเนียมบริสุทธิ์และ k คือ ค่าสัมประสิทธิ์เฉพาะสำหรับโลหะผสมแต่ละชนิด โดยจากการศึกษาสามารถทราบถึงช่วงอุณหภูมิที่สามารถใช้ในการเชื่อมอะลูมิเนียมผสมหล่อกึ่งแข็ง SSM 356 ในสถานะกึ่งแข็งคือ 574 - 612 $^{\circ}\text{C}$ [6]

ตารางที่ 2.2 อุณหภูมิหลอมเหลวของอะลูมิเนียมผสมหล่อแข็ง SSM 356 [4]

วัสดุ	T_L (°C)	T_E (°C)	T_M (°C)	k
SSM 356	612	574	660	0.13

2.1.3 กระบวนการป้อนแข็งโลหะผสมอะลูมิเนียม

เป็นการนำอะลูมิเนียมมาผ่านกรรมวิธีการทำให้เกิดการตกผลึกของสารประกอบอะลูมิเนียมในสภาพของแข็งที่เรียกว่า กระบวนการป้อนแข็งอะลูมิเนียมหรือกระบวนการทางความร้อนสามารถทำได้หลากหลายกรรมวิธี ซึ่งในงานวิจัยครั้งนี้ได้นำชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการทางความร้อน T6 โดยนำชิ้นงานมาทำการอบละลาย จากนั้นนำออกมาจุ่มน้ำแล้วนำมาบ่มต่อที่อุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิห้อง กรรมวิธีนี้จะแตกต่างกับ T5 ตรงที่กรรมวิธีนี้อบละลายชิ้นงานที่อุณหภูมิสูงกว่า ทำให้ได้สมบัติเชิงกลที่ดีขึ้น ซึ่งประกอบด้วย 2 ขั้นตอน

1. การอบละลาย (Solution Heat Treatment) คือ การนำชิ้นงานไปอบด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 500 – 550 °C จนเปลี่ยนเป็นเฟส α ทั้งหมด จากนั้นจุ่มน้ำ (Quenching) เพื่อให้เกิดการรวมเป็นเนื้อเดียวกัน

2. การบ่ม (Aging) เป็นการนำชิ้นงานที่ผ่านการจุ่มน้ำ มาทิ้งไว้ที่อุณหภูมิเหมาะสมระยะหนึ่ง โดยการบ่มแบ่งออกเป็น 2 แบบคือ การบ่มที่อุณหภูมิห้อง (Natural Aging) และ การบ่มที่อุณหภูมิที่สูงกว่าอุณหภูมิห้อง (Artificial Age) [7]

2.1.4 การเชื่อมในสถานะกึ่งแข็ง

การเชื่อมแบ่งออกตามสถานะของชิ้นงานได้ 3 แบบคือ 1. การเชื่อมในสถานะของเหลวหรือหลอมละลาย (Fusion Welding or Liquid State Welding) เป็นการเชื่อมโดยให้ความร้อนอุณหภูมิสูงกว่าวัสดุจนเกิดการหลอมละลายรวมเป็นเนื้อเดียวกันถือว่าเป็นกรรมวิธีการเชื่อมที่ได้รับความนิยม อาทิเช่น การเชื่อมไฟฟ้า (Shielded Metal Arc Welding, SMAW) การเชื่อมทิก (Tungsten Inert Gas Welding, TIG) เป็นต้น 2. การเชื่อมในสถานะของแข็ง (Solid State Welding) เป็นการเชื่อมโดยไม่เปลี่ยนแปลงสถานะของวัสดุ การเชื่อมประเภทนี้จะเหมาะที่จะเชื่อมในวัสดุที่มีจุดหลอมเหลวไม่สูงมากนักเช่น อะลูมิเนียม ซึ่งวิธีที่นิยมได้แก่ การเชื่อมกวน (Friction Stir Welding) 3. การเชื่อมในสถานะกึ่งแข็ง (Semi-Solid State Welding) เป็นการเชื่อมสมัยใหม่ที่เหมาะสมเฉพาะวัสดุที่ผ่านการหล่อแบบกึ่งแข็งเท่านั้น เนื่องจากวัสดุประเภทนี้มีลักษณะ

โครงสร้างแบบก้อนกลมซึ่งหากนำมาเชื่อมด้วยกรรมวิธีการเชื่อมแบบปกติ (การเชื่อมในสถานะของเหลวและการเชื่อมในสถานะของแข็ง) ทำให้โครงสร้างแบบก้อนกลมเปลี่ยนแปลงส่งผลต่อสมบัติเชิงกลมีค่าลดลง การเชื่อมในสถานะกึ่งแข็งเป็นการเชื่อมในอุณหภูมิที่แข็งของวัสดุนั้นๆ เพื่อรักษาโครงสร้างของเกรนให้ใกล้เคียงกับวัสดุเดิมมากที่สุด การเชื่อมในสถานะกึ่งแข็งจะมีลักษณะการเชื่อมที่คล้ายคลึงกับการเชื่อมในสถานะของแข็งแตกต่างกันเพียงอุณหภูมิที่ใช้ในการเชื่อมเท่านั้น [4, 8]

2.1.5 การคำนวณหาค่าสัดส่วนของแข็ง

การคำนวณหาค่าสัดส่วนของแข็งจะนำข้อมูลความร้อนและค่าตัวแปรต่างๆ ที่จำเป็น อาทิ เช่น จุดหลอมเหลว ค่าสัมประสิทธิ์เฉพาะ เป็นต้น นำมาแทนลงในสมการของไซล์ (Scheil Equation) [1-3] ดังนี้

$$\text{สัดส่วนของแข็ง } (f_s) = 1 - \left(\frac{T_M - T^*}{T_M - T_L} \right)^{\frac{1}{1-k}} \quad \text{---- [1]}$$

โดยที่ T_M คือ อุณหภูมิหลอมเหลวของโลหะบริสุทธิ์ ($^{\circ}\text{C}$) T_L คือ อุณหภูมิหลอมเหลวของโลหะผสมที่ใช้ในการทดลอง ($^{\circ}\text{C}$) T^* คือ อุณหภูมิที่ต้องการทำการวิจัยของโลหะผสม ($^{\circ}\text{C}$) และ k คือ ค่าสัมประสิทธิ์เฉพาะสำหรับโลหะผสมแต่ละชนิดซึ่งเป็นค่าที่ได้จากการคำนวณจากความเข้มข้นของธาตุในแต่ละวัสดุ โดยเมื่อนำค่าต่างๆ แทนลงไปสมการ ค่าที่ได้จากสมการนั้นจะเป็นค่าเปอร์เซ็นต์ของของแข็งที่มีอยู่ในวัสดุในช่วงอุณหภูมินั้นๆ ตามที่เราต้องการ เมื่อนำสมบัติของอะลูมิเนียมเกรด SSM 356 มาแทนค่าในสมการไซล์แสดงดังตารางที่ 2.3 พบว่าอุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับการเชื่อมอะลูมิเนียมหล่อผสมเกรด SSM 356 ในสถานะกึ่งแข็งอยู่ในช่วงระหว่าง 580 - 590 $^{\circ}\text{C}$ เพราะหากมีอุณหภูมิมากกว่านี้ทำให้บ่อหลอมกลายเป็นของเหลวส่งผลต่อโครงสร้างของวัสดุ

ตารางที่ 2.3 ค่าสัดส่วนของแข็งของอะลูมิเนียมหล่อผสม SSM 356

อุณหภูมิใช้งาน ($^{\circ}\text{C}$)	ค่าสัดส่วนของแข็ง
577	46.7
580	44.3
590	35.2
600	22.6
610	0

2.1.6 หลักการให้ความร้อนโดยการเหนี่ยวนำ (Induction Heating)

(1) หลักการพื้นฐานของการให้ความร้อนโดยการเหนี่ยวนำ

การให้ความร้อนโดยการเหนี่ยวนำเป็นวิธีการหนึ่งในการถ่ายทอดพลังงานซึ่งหลักการทำงานใกล้เคียงหม้อแปลงไฟฟ้าโดยให้กระแสไฟฟ้าสลับไหลผ่านขดลวดและก่อให้เกิดสนามแม่เหล็ก เมื่อใส่ชิ้นโลหะเข้าไปในสนามแม่เหล็กนี้ทำให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำขึ้นและเกิดกระแสไฟฟ้าไหลผ่านในโลหะ โดยทิศทางการไหลของกระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นนี้จะมีทิศทางตรงกันข้ามกับทิศทางของกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านขดลวด เนื่องจากโลหะทุกชนิดมีค่าความต้านทานไฟฟ้าทำให้เกิดความร้อนขึ้น ความร้อนที่เกิดขึ้นคือ พลังงานไฟฟ้าที่ถูกถ่ายทอดออกไปเป็นความร้อนในชิ้นโลหะ

(2) ขดลวดเหนี่ยวนำ (Induction Coil)

ขดลวดเหนี่ยวนำทำด้วยลวดตัวนำไฟฟ้า เช่น ทองแดง เมื่อมีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านทำให้เกิดสนามแม่เหล็กและเกิดการเหนี่ยวนำในชิ้นงานโลหะเกิดเป็นพลังงานความร้อน ซึ่งในขดลวดจำเป็นต้องมีระบบระบายความร้อนด้วยน้ำภายในขดลวดเหนี่ยวนำเพื่อลดกำลังสูญเสียที่ขดลวด รูปแบบการเหนี่ยวนำจะแตกต่างกันตามรูปแบบของขดลวดและแตกต่างกันที่การใช้งานในแต่ละประเภท ทั้งนี้ขนาดของขดลวดก็มีผลต่อการให้ความร้อนแก่ชิ้นงาน ซึ่งหากขดลวดขนาดใหญ่จะให้พื้นที่ความร้อนในบริเวณที่กว้างมากขึ้น

(3) หลักการเกิดความร้อนโดยการเหนี่ยวนำ

การเกิดความร้อนจากความต้านทานสนามแม่เหล็กในตัวของวัสดุแต่ละชนิด โดยสนามแม่เหล็กที่สร้างจากขดลวดเหนี่ยวนำจะมีทิศทางของขั้วที่สลับไปมาตามทิศทางของกระแสไฟฟ้าสลับที่เข้ามา ซึ่งโมเลกุลภายในวัสดุที่มีความต้านทานเกิดการเคลื่อนที่ตามทิศทางของขั้วที่เปลี่ยนไปมานี้ทำให้เกิดการเสียดสีและเกิดความร้อน อย่างไรก็ตามหลักการนี้จะเกิดขึ้นเฉพาะโลหะที่มีคุณสมบัติเป็นสารแม่เหล็กเท่านั้น [9]

2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Hosseini V.A. และคณะ [10] ศึกษาการเชื่อม AZ91 โดยกระบวนการเชื่อมแบบกวนในสถานะกึ่งแข็งซึ่งมี Mg-25 %Zn เป็นตัวประสานโดยใช้ส่วนไฟฟ้า วิธีการทดลองจะให้ความร้อนของชิ้นงานจาก 0 °C จนถึงอุณหภูมิ 575 °C จากนั้นรักษาอุณหภูมิ (Holding) ไว้ที่ 575 °C เป็นเวลา 3 นาที จึงเริ่มทำการเชื่อมโดยใช้ส่วนความเร็วรอบ 1600 rpm ความเร็วในการเดินแนวเชื่อมเท่ากับ

4.6 cm/min และใช้ดอกสว่านขนาด 5 mm โดยรักษาอุณหภูมิให้คงที่ 575 °C เมื่อเชื่อมสมบูรณ์ ลดอุณหภูมิชิ้นงานด้วยวิธีการระบายความร้อนด้วยน้ำ (Water Cooling) จนชิ้นงานมีอุณหภูมิอยู่ที่ 300 °C ปล่อยให้เย็นตัวในอุณหภูมิห้อง ผลการวิจัยพบว่าโครงสร้างของ AZ91 และ Mg-25 %Zn นั้นมีการเปลี่ยนแปลง โดยทั้งสองวัสดุเมื่ออยู่ในอุณหภูมิ 530 °C เกรนจะมีขนาดที่กลมและโตกว่าเดิม หลังจากนั้นได้นำชิ้นงานมาทดสอบ ค่าความแข็งแรงดึง (Tensile Strength) พบว่าค่าความแข็งแรงดึงที่ได้นั้นมีค่าตามมาตรฐาน SPT Test (Standard Penetration Test) ในส่วนของความแข็งนั้นก็ทำการทดสอบค่าความแข็ง (Hardness Test) ผลปรากฏว่า บริเวณที่แข็งที่สุดคือ บริเวณเนื้อเชื่อม (Weld Metal Zone, WM) ซึ่งงานวิจัยชิ้นนี้ได้ให้ผลสรุปว่า สามารถใช้สว่านไฟฟ้าในการเชื่อมในสถานะกึ่งแข็งได้ ทั้งนี้ **Hosseini V.A. และคณะ** [11] ได้ทำการศึกษาการพอร์มตัวของแนวต่อในการเชื่อมแมกนีเซียมผสม AZ91 ในสถานะกึ่งแข็ง ซึ่งได้ทำการทดลองโดยแบ่งตัวอย่างเป็นทั้งหมด 7 กรณี โดยจะทำการเปลี่ยนรูปแบบของตัวช่วยกวนและอุณหภูมิในการกวนดังนี้ กรณีที่ 1 ไม่มีตัวประสาน ใช้รูปแบบตัวกวนแบบทรงกระบอก (Round) ความเร็วรอบการกวนที่ 1200 rpm อุณหภูมิ 575 °C กรณีที่ 2 มีตัวประสานเป็น Mg-25 %Zn ใช้รูปแบบตัวกวนแบบร่อง (Groove) ความเร็วรอบการกวนที่ 1200 rpm อุณหภูมิ 515 °C กรณีที่ 3 มีตัวประสานเป็น Mg-25 %Zn ใช้รูปแบบตัวกวนแบบร่อง ความเร็วรอบการกวนที่ 1600 rpm อุณหภูมิ 515 °C กรณีที่ 4 มีตัวประสานเป็น Mg-25 %Zn ใช้รูปแบบตัวกวนแบบร่อง ความเร็วรอบการกวนที่ 800 rpm อุณหภูมิ 530 °C กรณีที่ 5 มีตัวประสานเป็น Mg-25%Zn ใช้รูปแบบตัวกวนแบบร่อง ความเร็วรอบการกวนที่ 1200 rpm อุณหภูมิ 530 °C กรณีที่ 6 มีตัวประสานเป็น Mg-25 %Zn ใช้รูปแบบตัวกวนแบบทรงกระบอก ความเร็วรอบการกวนที่ 800 rpm อุณหภูมิ 530 °C กรณีที่ 7 มีตัวประสานเป็น Mg-25 %Zn ใช้รูปแบบตัวกวนแบบทรงกระบอก ความเร็วรอบการกวนที่ 2000 rpm อุณหภูมิ 530 °C ผลการวิจัยพบว่าที่ความเร็วรอบสูงขึ้นไปทำให้บริเวณของเนื้อเชื่อมเพิ่มขึ้นด้วย และจากภาพโครงสร้างจุลภาค พบว่าที่ความเร็วรอบน้อยจะมีขนาดเกรนที่ใหญ่ เมื่อความเร็วรอบสูงขึ้นขนาดเกรนมีขนาดเล็กลง และยังพบว่าที่ความเร็วรอบต่ำนั้นมีโอกาสเกิดรูพรุนมากขึ้นด้วย ในส่วนของกลุ่มวิจัย **Alvani S. M. J. และคณะ** [12] ค้นคว้าเกี่ยวกับการเชื่อมกึ่งแข็งเช่นเดียวกัน แต่เปลี่ยนวัสดุเป็นอะลูมิเนียมผสม A356 โดยใช้แก๊สไนโตรเจนให้ความร้อนตามแนวเชื่อม เพื่อศึกษาอุณหภูมิที่บ่อหลอมและศึกษาสถานะในอุณหภูมิต่างๆ พบว่ายิ่งอุณหภูมิสูงขึ้นอะลูมิเนียมผสม A356 มีสถานะของเหลวมากขึ้นทำให้เกิดรูพรุนมากขึ้นด้วย และยังส่งผลกระทบต่อความร้อนในพื้นที่และการบิดของชิ้นงานเชื่อมมากขึ้นด้วย ทั้งนี้ในการวิจัยได้ทดสอบค่าสมบัติพบว่า อะลูมิเนียมผสม A356 มีค่าสมบัติเชิงกลสูงสุดที่อุณหภูมิ

589 °C และบริเวณที่มีค่าสมบัติเชิงกลสูงสุดคือบริเวณเนื้อเชื่อม ต่อมานำชิ้นงานมาตรวจสอบด้านโครงสร้างมหภาคและจุลภาคพบว่า ขนาดเกรนในช่วงเนื้อเชื่อมมีขนาดเกรนที่กลมและโตกว่าในบริเวณอื่นๆ ซึ่งนั่นทำให้บริเวณเนื้อเชื่อม มีค่าสมบัติเชิงกลที่สูงที่สุด ในปัจจุบันมีการศึกษาสมบัติเชิงกลของอะลูมิเนียมผสม A356 มากขึ้น ซึ่ง **Tahamtan M.A. และคณะ** [13] ศึกษาสมบัติเชิงกลด้านแรงดึงของอะลูมิเนียมผสม A356 ซึ่งผ่านกระบวนการขึ้นรูปชิ้นงานที่มีรูปร่างใกล้เคียงรูปร่างสุดท้าย (Thixoformed) โดยแบ่งเป็น 4 กรณี คือ 1. อะลูมิเนียมผสมที่ผ่านการหล่อที่อุณหภูมิ 600 °C มีค่าสัดส่วนของแข็ง (Solid Fraction) เท่ากับ 30 % 2. อะลูมิเนียมผสมที่ผ่านการหล่อที่อุณหภูมิ 600 °C มีค่าสัดส่วนของแข็งเท่ากับ 50 % 3. อะลูมิเนียมผสมที่ผ่านการหล่อที่อุณหภูมิ 610 °C มีค่าสัดส่วนของแข็งเท่ากับ 30 % 4. อะลูมิเนียมผสมที่ผ่านการหล่อที่อุณหภูมิ 610 °C มีค่าสัดส่วนของแข็งเท่ากับ 50 % โดยนำชิ้นงานทั้ง 4 ไปตรวจสอบหารูพรุนพบว่าชิ้นงานที่ 2 มีรูพรุนในสัดส่วนน้อยที่สุด และชิ้นงานที่ 3 มีรูพรุนในแนวเชื่อมน้อยที่สุด แต่เมื่อนำมาเทียบกับอะลูมิเนียมที่ผ่านการหล่อมาแบบใช้แรงโน้มถ่วง (Gravity Cast) และการหล่อแบบโดยตรง (Rheocasting) พบว่ารูพรุนในชิ้นงานที่ 3 นั้นมีค่ามากกว่าชิ้นงานอื่นๆ ในส่วนค่าความแข็งแรงดึง ผู้ทำวิจัยได้ทดสอบชิ้นงานเพียง 3 ชิ้น เป็นชิ้นงานที่มาจากการหล่อ 3 ประเภทคือ 1. การหล่อมาแบบใช้แรงโน้มถ่วง 2. การหล่อแบบโดยตรง และ 3. กระบวนการขึ้นรูปชิ้นงานที่มีรูปร่างใกล้เคียงรูปร่างสุดท้าย ได้ผลสรุปว่า อะลูมิเนียมที่มีการหล่อแบบกระบวนการขึ้นรูปชิ้นงานที่มีรูปร่างใกล้เคียงรูปร่างสุดท้ายให้ค่าแรงดึงมากที่สุด ทั้งนี้ได้มีการศึกษาแก้ไขมาใช้ปกคลุมแนวเชื่อมเพื่อปรับปรุงแนวเชื่อมให้มีสมบัติที่ดีขึ้น โดย **Zheng Q. และ Reddy R.G.** [14] ได้ทดลองโดยนำอะลูมิเนียมบริสุทธิ์ 99.9 % หลอมที่อุณหภูมิ 700 °C จากนั้นปล่อยแก๊ส 2 ชนิดคือ ไนโตรเจน (Nitrogen Gas) และอาร์กอน (Argon Gas) เข้าไปยังเตาหลอมเพื่อไล่แก๊สออกซิเจนออกจากน้ำอะลูมิเนียม อัตราการไหลของแก๊สที่ 0.1 L/min พบว่าแก๊สไนโตรเจนไม่ทำปฏิกิริยากับน้ำอะลูมิเนียมและยังสามารถไล่แก๊สออกซิเจนออกจากน้ำโลหะได้ดีกว่าแก๊สอาร์กอน (Argon Gas) และทำให้ลดจำนวนรูพรุนในน้ำโลหะได้ดีขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ **Hou Q. และคณะ** [15] ได้ทดลองโดยใช้แก๊สไนโตรเจนและแก๊สแอมโมเนีย (Ammonia Gas) ส่งผ่านไปยังน้ำอะลูมิเนียม โดยมีอุณหภูมิระหว่าง 700 ถึง 1000 °C และเพิ่มอุณหภูมิขึ้นมากกว่า 1000 °C พบว่า แก๊สแอมโมเนียทำให้น้ำอะลูมิเนียมแยกชั้นโดยชั้นบนสุดเป็นสิ่งบกพร่อง ชั้นกลางเป็นช่องว่างที่แก๊สสร้างขึ้นและชั้นล่างสุดเป็นน้ำอะลูมิเนียม ซึ่งทำให้เสียน้ำโลหะปริมาณมากเมื่อเทียบกับการใช้แก๊สไนโตรเจน

จากงานวิจัยทั้งสองทำให้สรุปได้ว่า แก๊สไนโตรเจนเป็นแก๊สที่สามารถลดจุดบกพร่องในวัสดุได้ดี และสามารถเพิ่มสมบัติต่างๆ ของวัสดุได้

Narimannezhad A. และคณะ [16] ศึกษาโครงสร้างในระดับจุลภาคและสมบัติเชิงกลของสังกะสีหล่อผสม AG40A ใช้การเชื่อมแบบกวนในสถานะกึ่งแข็ง ข้อดีของการเชื่อมแบบกวนในสถานะกึ่งแข็งคือ ช่วยลดการบิดงอของชิ้นงานเชื่อมได้อย่างมาก เนื่องจากอุณหภูมิการเชื่อมต่ำกว่า อุณหภูมิหลอมเหลว และอุณหภูมิที่ต่างกันระหว่างบ่อการเชื่อมกับพื้นผิวส่วนใหญ่ของวัสดุน้อยกว่าวิธีการเชื่อมแบบหลอมละลาย ทั้งนี้ตลอดกระบวนการเชื่อมไม่มีควันและน้ำโลหะกระเด็น มีการวิเคราะห์เกี่ยวกับลักษณะเกรนว่ามีผลต่อสมบัติเชิงกลอย่างไร โดย **Camillus A. และคณะ** [17] ทดลองโดยใช้โลหะบริสุทธิ์ที่มีขนาดเกรนต่างกัน 4 ขนาดคือ 14.1 28.1 29.6 และ 168 ไมโครเมตร (μm) นำชิ้นงานทดสอบหาค่าความแข็งแรงดึง (Tensile Strength) ค่าแข็งแรงดึง ณ จุดคราก (Yield Strength) และหาเปอร์เซ็นต์การยืดตัวของชิ้นงาน (Elongation Percentage) พบว่า เมื่อขนาดเกรนของชิ้นงานมีค่าเพิ่มมากขึ้นทำให้ค่าความแข็งแรงดึง ค่าความแข็งแรง ณ จุดคราก มีค่าน้อยลง ทำให้ทราบว่ายิ่งเกรนมีขนาดใหญ่ความแข็งแรงยิ่งน้อยลง ในส่วนของการยืดตัวของชิ้นงานพบว่า เมื่อชิ้นงานมีเกรนใหญ่ขึ้นการยืดตัวยิ่งมากขึ้น จากงานวิจัยที่กล่าวมาพบว่า ค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญสำหรับการเชื่อมให้ได้ตามที่ต้องการคือ อัตราการไหลของแก๊สและการควบคุมอุณหภูมิ ความเร็วรอบของหัวกวน ความเร็วในการเดินแนวเชื่อม โดย **อภิฤทธิ์ เพชรขวัญ** [5] ได้นำตัวแปรต่างๆ ที่กล่าวมาทำการศึกษาและทดลองเชื่อมในสถานะกึ่งแข็งของแนวเชื่อมต่อชนเกรด SSM 356 ซึ่งมีความเร็วรอบ 1100 1320 1750 และ 2200 rpm โดยมีความเร็วเดินแนวเชื่อมคงที่ 70 mm/min ใช้ อุณหภูมิ 580-590 °C โดยการทดลองแบ่งเป็น 2 ประเภทใหญ่คือ เชื่อมภายใต้บรรยากาศปกติและเชื่อมภายใต้แก๊สปกคลุม จากผลการทดลองพบว่า การเชื่อมทั้ง 2 ประเภทที่ความเร็วรอบ 1750 rpm ให้ค่าคุณสมบัติเชิงกลและทางด้าน โครงสร้างสูงที่สุด ต่อมาได้มีการเพิ่มวัสดุเพื่อเพิ่มสมบัติของแนวเชื่อมโดย **ธรรมบุญ พลอินทร์** [18] ทดลองนำ ZA27 ที่ผ่านกระบวนการหล่อโดยกรรมวิธี GISS เข้ามาเป็นตัวประสาน (Interlayer) ระหว่าง SSM 356 เชื่อมในสถานะกึ่งแข็ง โดยใช้ความเร็วเดินแนวเชื่อมที่ 15 25 40 และ 70 mm/min ใช้ความเร็วการหมุนของหัวกวนที่ 1750 rpm ใช้หัวกวน (Pin) ขนาด 3.5 mm พบว่าที่ความเร็วเดินแนวเชื่อมที่ 15 mm/min ให้ค่าสมบัติต่าง ๆ ของแนวเชื่อมดีที่สุด และพบว่าหากเพิ่มความเร็วเดินแนวเชื่อมจะยิ่งทำให้รอยต่อระหว่าง ZA27 และ SSM 356 ชัดเจนขึ้นและพบรูพรุนด้านด้านเคลื่อนที่ (Retreating Side, RS) มากกว่าบริเวณอื่นๆ เนื่องด้วยอิทธิพลจากหัวกวนจึงได้ทำการค้นคว้าข้อมูลโดย **Threadgill P.L. และคณะ** [19] ทดลองเกี่ยวกับ

อิทธิพลของหัวกววนของบริเวณเนื้อเชื่อม (Weld Metal Zone, WM) ด้านด้านการเคลื่อนที่ ด้านเสริมการเคลื่อนที่ (Advancing Side, AS) ใช้หัวกววน 3 แบบคือ หัวกววนแบบปกติ หัวกววนที่มีเกลียวขนาด 25 mm และหัวกววนที่มีเกลียวขนาด 50 mm เพื่อดูผลกระทบของหัวกววนที่มีเกลียวต่อการเชื่อมชิ้นงานในสถานะของแข็งพบว่า บริเวณด้านการเคลื่อนที่ จะมีรอยแยกที่เกิดจากการเสียดสีกันคนละทิศทางกับการเดินของชิ้นงาน ทำให้บริเวณนี้มีจุดบกพร่องได้ง่ายกว่าบริเวณอื่นๆ จึงทำให้สมบัติต่างๆ ในบริเวณนี้มีค่าต่ำกว่าในบริเวณอื่น ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ **Javaranan M. และคณะ** [20] ได้ศึกษาความแตกต่างระหว่างด้านด้านการเคลื่อนที่และด้านเสริมด้านเคลื่อนที่โดยเชื่อมเสียดทานแบบกวนพบว่า ด้านด้านการเคลื่อนที่พบรูพรุนและหลุมมากกว่าด้านเสริมการเคลื่อนที่ ทั้งนี้ยังมีค่าสมบัติน้อยกว่าอีกด้วย ในส่วนของ **Modigell M. และ Alexandrou A.N.** [21] จำลองการไหลของโลหะ SSM A356 โดยใช้การกวนโลหะในสถานะกึ่งแข็ง ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดของโลหะกึ่งแข็ง (Viscosity) กับอัตราการเฉือนที่เกิดจากหัวกววน (Shear Rate) พบว่าเมื่อเพิ่มรอบการหมุนของหัวกววน ทำให้อัตราการเฉือนจากหัวกววนที่กระทำต่อชิ้นงานมากขึ้น ส่งผลให้ความหนืดของน้ำโลหะลดลง ส่งผลต่อสัดส่วนของแข็งลดลงเช่นกัน จากผลงานวิจัยที่ได้กล่าวแสดงได้ว่า หัวกววนหรืออุปกรณ์ที่ใช้ในการกวนมีผลต่อแนวเชื่อมของชิ้นงาน ซึ่งสอดคล้องกับผลงานวิจัยของ **Llangovan M. และคณะ** [22] ที่ศึกษาเกี่ยวกับรูปร่างของหัวกววนที่แตกต่างกันทั้งหมด 5 แบบคือ 1. หัวกววนแบบกลม 2. หัวกววนแบบเรียว 3. หัวกววนแบบเกลียว 4. หัวกววนแบบสี่เหลี่ยม 5. หัวกววนแบบสามเหลี่ยม มาเชื่อมเสียดทานกับอะลูมิเนียมเกรด 6061 ที่ความเร็วรอบที่ 800 1000 1200 1400 และ 1600 rpm ความเร็วเดินแนวเชื่อมที่ 0.25 0.75 1.25 และ 2.25 mm/s แรงกดที่ 5 6 7 8 และ 9 kN รวมทั้งหมด 31 เงื่อนไข นำชิ้นงานมาทดสอบหาค่าความแข็งแรงดึงพบว่า หัวกววนแบบสี่เหลี่ยมให้ค่าความแข็งแรงดึงมากที่สุด ในส่วนของรอบการหมุนที่ให้ค่าความแข็งแรงดึงมากที่สุดคือ 1400 rpm ความเร็วเดินแนวเชื่อมที่ให้ค่าความแข็งแรงดึงมากที่สุดคือ 1.25 mm/s แรงกดที่ให้ค่าความแข็งแรงดึงมากที่สุดคือ 7 kN จากผลงานวิจัยนี้ทำให้ทราบได้ว่าลักษณะรูปร่างของหัวกววนมีผลต่อแนวเชื่อม จึงศึกษาเกี่ยวกับทิศทางการหมุนของหัวกววน โดย **Panneerselvan K. และ Lenin K.** [23] เชื่อมไนลอน 6 (Nylon 6) ด้วยการเชื่อมเสียดทานแบบกวน โดยทำการเปรียบเทียบกันระหว่างหัวกววนที่หมุนตามเข็มนาฬิกาและทวนเข็มนาฬิกา ที่ความเร็วรอบ 1000 rpm ความเร็วเดินแนวเชื่อมที่ 10 mm/min พบว่าชิ้นงานที่เชื่อม โดยให้หัวกววนหมุนทวนเข็มนาฬิกามีคุณสมบัติที่ดีกว่าใช้หัวกววนแบบตามเข็มนาฬิกาเพียงเล็กน้อย ในส่วนของโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการทางความร้อน (T6) ได้ศึกษางานวิจัยของ **Pio L.Y.** [24] ศึกษา

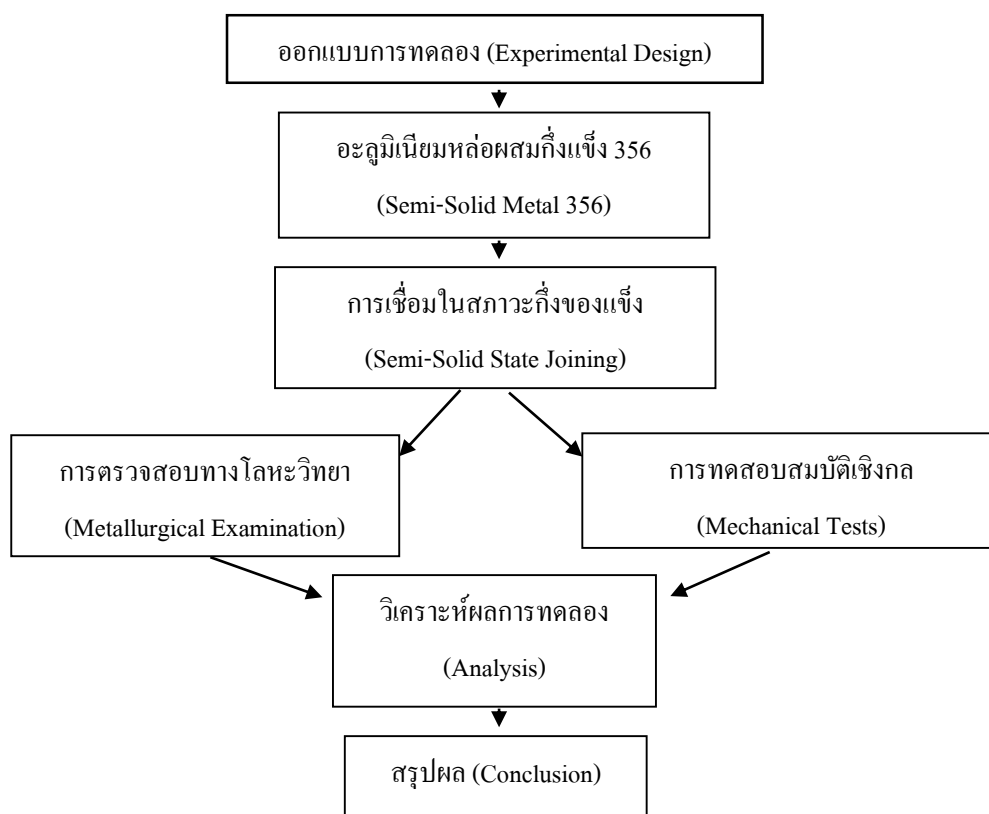
เกี่ยวกับการทำกระบวนการทางความร้อนของอะลูมิเนียม A356 นำชิ้นงานไปทำกระบวนการทางความร้อนมาเปรียบเทียบความแตกต่างกับชิ้นงานที่ไม่ได้ผ่านกระบวนการทางความร้อน พบว่าชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการทางความร้อนมีสมบัติเชิงกลที่สูงกว่าและในโครงสร้างจุลภาคยังมองเห็นเฟสยูเทคติก (Eutectic Phase) น้อยกว่าเฟสอัลฟา (α -Al) จึงทำให้มีความแข็งแรงที่สูงกว่า และ **Akhter R. และคณะ** [25] ศึกษาเกี่ยวกับความแตกต่างของชิ้นงานซึ่งประกอบด้วย 1. ชิ้นงานที่หล่อเสร็จนำมาเชื่อมด้วยวิธีเลเซอร์ (Laser Welding) 2. นำชิ้นงานมาทำกระบวนการทางความร้อน (T6) ก่อนการเชื่อม และ 3. เชื่อมชิ้นงานที่ได้จากการหล่อจากนั้นนำไปทำกระบวนการทางความร้อน (T6) จากผลการวิเคราะห์พบว่า โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานที่เชื่อมแล้วนำมาทำกระบวนการทางความร้อนมีขนาดเกรนโตที่สุดและยังมีค่าความแข็งแรงดึงแนวเชื่อมสูงที่สุดด้วยเช่นกัน ในส่วนของงานวิจัยของขนาดเกรนที่ส่งผลต่อสมบัติเชิงกลโดย **Jung B. และคณะ** [26] ได้ศึกษาอิทธิพลขนาดเกรนต่อค่าความแข็งแรงด้วยวิธีการปรับปรุงความเครียด (Strain Gradient) พบว่า เมื่อขนาดเกรนโตขึ้น ค่าความเครียดในเกรนมีค่ามากขึ้น ทำให้เกิดการดิสโลเคชันของเกรนเมื่อมีแรงภายนอกมากระทำได้ง่ายขึ้น จึงทำให้ค่าความแข็งแรงของชิ้นงานที่มีเกรนขนาดใหญ่มีค่าลดลง ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ **Muszka K. และคณะ** [27] ที่ได้ศึกษาขนาดเกรนที่ส่งผลต่อสมบัติเชิงกลในเหล็กกล้าผสมด้วยการทดสอบชิ้นงานที่มีขนาดเกรนที่ต่างขนาดกันและผ่านกระบวนการทางความร้อนที่แตกต่างกันมาทดสอบสมบัติเชิงกล (ค่าความแข็งแรงดึงและค่าความแข็ง) พบว่า หากขนาดเกรนมีขนาดเล็กหรือใหญ่มากเกินไปทำให้ค่าสมบัติเชิงกลลดลง ซึ่งโครงสร้างจุลภาคมีส่วนต่อความแข็งแรงของวัสดุโดย **Amir B. และคณะ** [28] ได้ศึกษาโครงสร้างจุลภาคโดยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (SEM) ของอะลูมิเนียมแต่ละชนิดแต่พบว่า ในอะลูมิเนียมแต่ละชนิดจะมีเฟส 3 เฟส ได้แก่ 1. เฟส α -Al ซึ่งเป็นเฟสหลักของอะลูมิเนียมที่มีเหนียวและให้ตัวได้ดี 2. เฟสยูเทคติก เป็นเฟสธาตุที่ผสมเข้าไปในอะลูมิเนียมเพื่อเพิ่มสมบัติการใช้งานและ 3. สารประกอบอินเตอร์เมทัลลิก เป็นสารประกอบที่เกิดขึ้นในแต่ละเกรดของอะลูมิเนียมจะไม่เหมือนกัน สารประกอบนี้ให้สมบัติค่าความแข็งแรงที่สูงแต่หากมีมากเกินไปในวัสดุทำให้วัสดุแข็งแต่เปราะ เกิดการแตกหักง่ายขึ้น

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

งานวิจัยเพื่อปรับปรุงการเชื่อมในสถานะกึ่งแข็งของอะลูมิเนียมผสมหล่อกึ่งแข็ง การทดลองโดยใช้กระบวนการเชื่อมในสถานะกึ่งแข็งโดยใช้หลักการเหนี่ยวนำเป็นตัวให้ความร้อนแก่ชิ้นงานให้อยู่ในสถานะกึ่งแข็ง ใช้ดอกสว่านคววนให้เนื้อโลหะสองชิ้นประสานเข้าด้วยกัน เป็นการเชื่อมแบบแนวต่อชนในท่าราบ ซึ่งมีตัวแปรหลักที่มีผลต่อแนวเชื่อมคือ ความเร็วรอบดอกสว่าน ความเร็วเดินแนวเชื่อม อุณหภูมิระหว่างการเชื่อม วิเคราะห์และสรุปผลการทดลอง อันได้แก่ ลักษณะกายภาพ การตรวจสอบโครงสร้างทางโลหะวิทยา และสมบัติเชิงกลของแนวเชื่อม โดยขั้นตอนการดำเนินแสดงดังรูปที่ 3.1

3.1 ขั้นตอนการดำเนินการวิจัยและเงื่อนไขการทดลอง



รูปที่ 3.1 ขั้นตอนการการวิจัย

ตารางที่ 3.1 ตัวแปรที่ใช้ในการทดลองที่ 1 การเชื่อมภายใต้บรรยากาศปกติ

ชิ้นงาน	ความเร็วรอบ ดอกสว่าน (rpm)	ความเร็วในการ เดินแนวเชื่อม (mm/min)	อุณหภูมิในขณะ การเชื่อม (°C)	บรรยากาศ ปกคลุม แนวเชื่อม	ทิศการ หมุนของ ดอกสว่าน
SSM 356	1100	75	580 - 590	ภายใต้ บรรยากาศ ปกติ	ตามเข็มนาฬิกา
	1750				
	2200				

เมื่อวิเคราะห์ผลการทดลองของการทดลองในตารางที่ 3.1 หาหาภาวะความเร็วรอบที่ทำให้สมบัติแนวเชื่อมสูงที่สุด และนำมาทดลองต่อดังตารางที่ 3.2 ซึ่งเป็นการเปลี่ยนเฉพาะทิศทางการหมุนของดอกสว่านจากตามเข็มนาฬิกาเป็นทวนเข็มนาฬิกาเพื่อวิเคราะห์ทิศทางการส่งผลกระทบต่อสมบัติแนวเชื่อมหรือไม่

ตารางที่ 3.2 ตัวแปรที่ใช้ในการทดลองเพื่อศึกษาทิศทางของดอกสว่าน

ชิ้นงาน	ความเร็วรอบ ดอกสว่าน (rpm)	ความเร็วในการ เดินแนวเชื่อม (mm/min)	อุณหภูมิในขณะ การเชื่อม (°C)	บรรยากาศ ปกคลุม แนวเชื่อม	ทิศการ หมุนของ ดอกสว่าน
SSM 356	สภาวะที่ดีที่สุด	75	580 - 590	ภายใต้ บรรยากาศ ปกติ	ทวนเข็มนาฬิกา

เมื่อสิ้นสุดการทดลองที่ 1 ทำการวิเคราะห์ผลการทดลองเพื่อหาสภาวะที่ดีที่สุด และนำตัวแปรทั้งหมดที่ส่งผลต่อสมบัติแนวเชื่อมมาทดลองต่อในการทดลองที่ 2 โดยเปลี่ยนบรรยากาศการปกคลุมแนวเชื่อมจากบรรยากาศปกติเป็นการเชื่อมภายใต้บรรยากาศแก๊สในโตรเจนปกคลุม ดังแสดงในตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 ตัวแปรที่ใช้ในการทดลองที่ 2 การเชื่อมภายใต้แก๊สปกคลุม

ชิ้นงาน	ความเร็วรอบ ดอกสว่าน (rpm)	ความเร็วในการ เดินแนวเชื่อม (mm/min)	อุณหภูมิในขณะ การเชื่อม (°C)	บรรยากาศ ปกคลุม แนวเชื่อม	ทิศการ หมุนของ ดอกสว่าน
SSM 356	สถานะที่ดี ที่สุด	75	580 - 590	ภายใต้ แก๊สปก คลุม	สถานะที่ดี ที่สุด
SSM 356- T6					

3.2 อะลูมิเนียมผสมเกรด SSM 356

(1) การหล่ออะลูมิเนียมผสมเกรด SSM 356

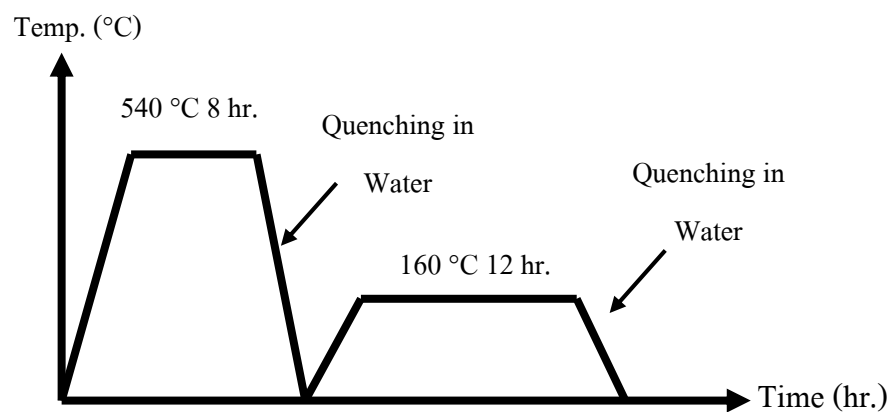
อะลูมิเนียมหล่อผสม SSM 356 เป็นวัสดุที่ใช้ในงานวิจัย ซึ่งได้ผ่านกรรมวิธีการขึ้นรูปด้วยเทคนิคการหล่อแบบกึ่งแข็งด้วยกระบวนการ GISS (Gas Induced Semi-Solid) ซึ่งจะหลอมโลหะที่อุณหภูมิ 650°C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง จากนั้นตักน้ำโลหะมาพ่นแก๊สไนโตรเจนแรงดัน 5 bar ลงไปยังน้ำโลหะผ่านแท่งแกรไฟต์พอร์ซเลนเพื่อให้เกิดการไหลวนของน้ำโลหะจนน้ำโลหะเข้าสู่สถานะกึ่งแข็งเป็นเวลา 20 s หลังจากนั้นนำน้ำโลหะอะลูมิเนียมเทลงไปในแม่พิมพ์อัด (Mold) โดยมีขนาด 100 x 100 x 10 mm ซึ่งอุณหภูมิของน้ำโลหะในขณะเทลงแม่พิมพ์อัดอยู่ที่ 580°C จากนั้นอัดขึ้นรูป (Squeeze Mold) ที่ความดันไม่น้อยกว่า 2000 psi ซึ่งโดยโครงสร้างที่ได้จากหล่อแบบกึ่งแข็งดังกล่าวจะประกอบไปด้วย α -Al แบบก่อนกลมและเฟสยูเทคติกซิลิกอน (Si Eutectic Phase) ซึ่งจะมีขนาดเกรนหรือขนาด α -Al ประมาณ 49 μm [1]

(2) กรรมวิธีชุบแข็งอะลูมิเนียมหล่อผสม SSM 356 (Heat Treatment Process) ดังแสดงในรูปที่ 3.2

(2.1) นำชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการหล่อแบบ GISS เข้าสู่เตาอบที่อุณหภูมิ 540 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง 7 นาที

(2.2) เมื่ออุณหภูมิเตาอบสูงถึง 540 °C อบต่ออีก 8 ชั่วโมง ซึ่งเป็นการอบละลาย เมื่อครบ 8 ชั่วโมง นำชิ้นงานออกจากเตาแล้วจุ่มน้ำทันที

(2.3) นำชิ้นงานมาบ่ม (Aging) ที่อุณหภูมิ 160 °C เป็นเวลา 12 ชั่วโมง เมื่อครบ 12 ชั่วโมง นำออกจากเตา ปล่อยให้เย็นตัวในบรรยากาศปกติ ให้ชิ้นงานเย็นตัวก่อนนำไปปรับขนาดตามที่ต้องการ เพื่อใช้ในการทดลองต่อไป



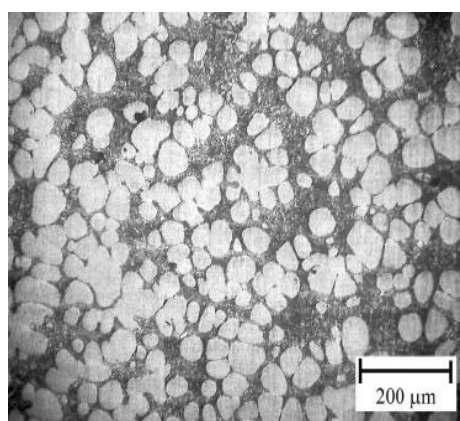
รูปที่ 3.2 กระบวนการทางความร้อน T6

3.3 การเตรียมชิ้นงานทดลอง

เมื่อหล่ออะลูมิเนียมหล่อผสมกึ่งแข็ง SSM 356 แล้วจะมีขนาดเท่ากับ 100 x 100 x 50 mm โดยขั้นตอนการเตรียมชิ้นงานเพื่อให้ได้ขนาดตามที่ต้องการในงานวิจัยจะตัดแบ่งชิ้นงานที่ได้จากการหล่อออกเป็น 2 ชิ้นด้วยเครื่องเลื่อยสายพาน นำชิ้นงานมาปรับขนาดผิวของชิ้นงานด้วยเครื่องกัดแนวตั้ง (Vertical Milling Machine) ให้มีขนาด 100 x 50 x 4 mm ดังแสดงในรูปที่ 3.3

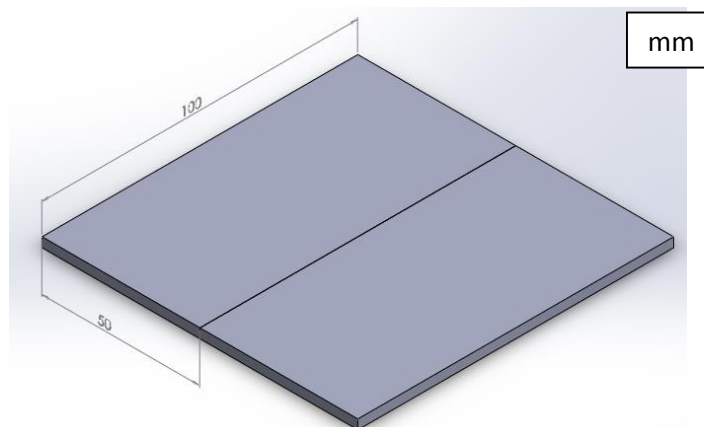


(ก)



(ข)

รูปที่ 3.3 (ก) ชิ้นงานอะลูมิเนียม SSM 356 หลังจากการหล่อ (ข) โครงสร้างจุลภาคของอะลูมิเนียม

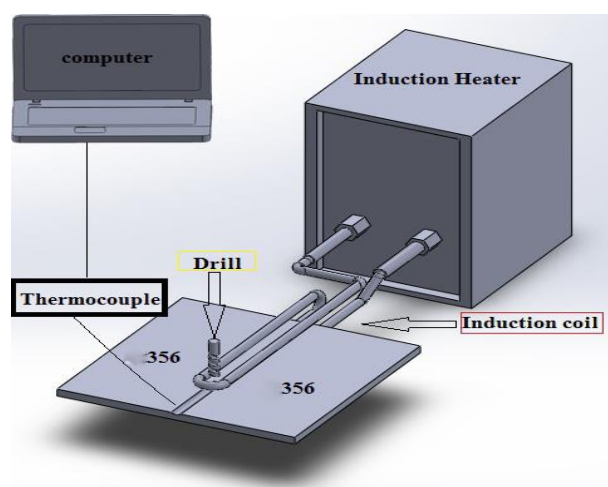


(ค)

รูปที่ 3.3 (ค) ชิ้นงานหลังปรับขนาด

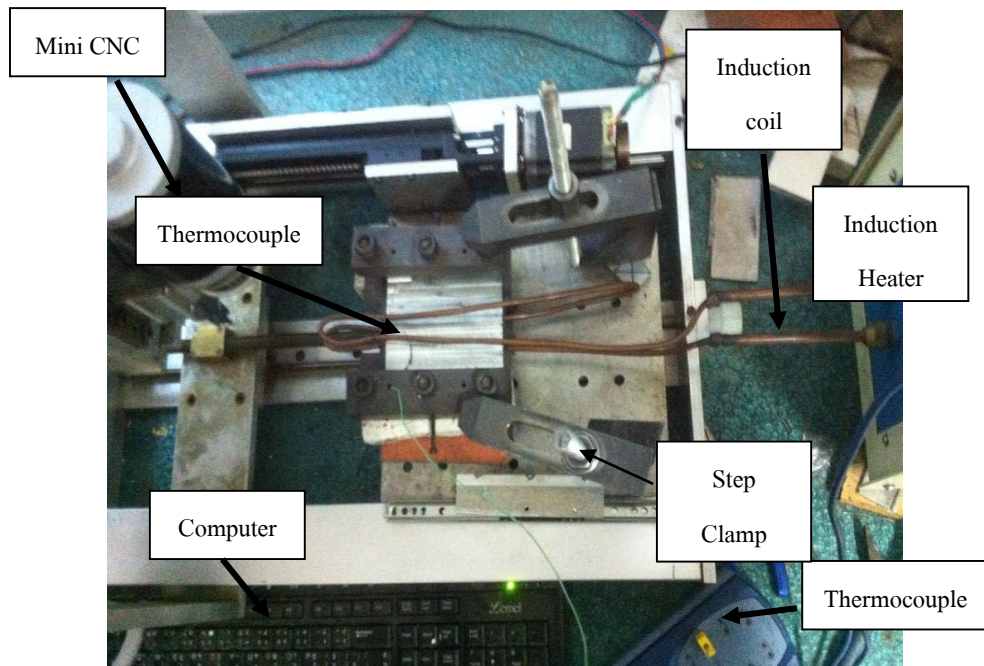
3.4 เครื่องมือและอุปกรณ์ในการทำวิจัย

ในการทดลองสำหรับการปรับปรุงการเชื่อมในสถานะกึ่งแข็งของอะลูมิเนียมผสมหล่อกึ่งแข็งประกอบด้วยเครื่องมือและอุปกรณ์ดังรูปที่ 3.4 ต่อไปนี้



(ก)

รูปที่ 3.4 (ก) แผนผังของอุปกรณ์การเชื่อมในสถานะกึ่งแข็ง



(ข)

รูปที่ 3.4 (ข) อุปกรณ์การเชื่อมในสถานะกึ่งแข็ง

(1) สว่านไฟฟ้า (Semi-Auto Drilling Machine)

สว่านไฟฟ้า คือเครื่องมือที่ใช้ในการเจาะ มีส่วนประกอบหลักๆ คือ หัวจับดอกสว่านและตัวของสว่าน แสดงดังรูปที่ 3.4 สว่านไฟฟ้าจะใช้กำลังจากแรงขับของมอเตอร์แบบยูนิเวอร์ เพื่อให้สว่านหมุน รอบการหมุนของสว่านไฟฟ้าโดยทั่วไปเท่ากับ 1000-5000 rpm ซึ่งแต่ละความเร็วรอบมีความสามารถในการเจาะไม่เท่ากัน ซึ่งสว่านไฟฟ้านั้นมีหลายประเภท อาทิเช่น สว่านกระแทก สว่านโรตารี สว่านแบบไร้สาย เป็นต้น [29] ในกรวิจัยนี้ใช้สว่านไฟฟ้ามาดัดแปลงเป็นอุปกรณ์ช่วยกวนในการเชื่อมอะลูมิเนียมผสมให้รวมตัวกัน



(ก)



(ข)

รูปที่ 3.5 (ก) สว่านไฟฟ้า (ข) ดอกสว่านขนาด 4 mm

จากรูปที่ 3.5 คือ ส่วนไฟฟ้าที่ใช้ในการทดลองเป็นส่วนยี่ห้อ Makita รุ่น DP 2010 ซึ่งมีสมรรถภาพดังนี้

- ความเร็วรอบ (min^{-1})	=	0-4200 rpm
- ความยาวทั้งหมด	=	209 mm
- น้ำหนักส่วน	=	1.0 kg

(2) Mini CNC (Mini Computer Numerical Machine)

CNC ขนาดเล็กหรือ Mini CNC เป็นอุปกรณ์ที่ทางทีมผู้วิจัยเลือกและนำมาประยุกต์ใช้แทนเครื่องกัดแนวตั้ง เนื่องจาก Mini CNC เป็นอุปกรณ์ที่มีขนาดกะทัดรัด มีคุณภาพสูง สามารถกำหนดตัวแปรต่างๆที่ใช้ในการวิจัยได้อย่างแม่นยำ ใช้เป็นฐานที่ใช้รองรับชิ้นงานและใช้กำหนดความเร็วเดินชิ้นงานตามที่กำหนดของงานวิจัย ทั้งนี้ก่อนนำมาใช้การทดลองได้พัฒนาเพื่อให้เหมาะสมสำหรับการใช้งานในงานวิจัยนี้ โดยการปรับปรุง Mini CNC มีขั้นตอนดังนี้

(2.1) ศึกษาหลักการทำงานของ Mini CNC ศึกษาถึงการใช้งานและหลักการทำงานของ Mini CNC รวมทั้งทดลองใช้งานเพื่อให้เกิดความชำนาญก่อนทำการทดลองจริง

(2.2) ออกแบบ Mini CNC โดยเริ่มจากการเขียนแบบฐานรองรับใหม่ที่จะนำมาติดตั้งกับมอเตอร์ของแนวแกนใหม่เพื่อให้ชิ้นงานเคลื่อนที่ได้ โดยลดขนาดจากฐานรองรับเดิมเพื่อลดภาระของมอเตอร์ทำให้มอเตอร์ที่นำมาใช้นั้นมีขนาดเล็กลง ในส่วนการเพิ่มมอเตอร์แกน A ได้คำนวณเพื่อหาแรงที่มอเตอร์ต้องการต่ำสุดในการเคลื่อนที่ ซึ่งจะอ้างอิงจากการเลือกมอเตอร์เพื่องานกัดอะลูมิเนียม โดยมีการคำนวณดังนี้

$$\text{Torque} = \frac{F \times p}{2\pi e} \text{ ---- [31]}$$

โดยที่ Torque คือ แรงบิดที่ต้องใช้

F คือ แรงที่ต้องชนะแรงฝืด (Nm)

p คือ ระยะ pitch (mm)

e คือ ประสิทธิภาพของ ball screw

โดยปกติหากต้องการกัดแรงไม้จะมีแรงต้านเท่ากับ 5 นิวตัน ในขณะที่เมื่อกัดอะลูมิเนียมจะมีแรงต้านที่ 20 นิวตัน และหากกัดเหล็กจะมีแรงต้านที่ 75 นิวตัน จากนั้นหา F โดยใช้สูตร

$$F = (M \times g \times F_c) + \text{แรงต้านทานในวัสดุต่างๆ} \text{ ---- [31]}$$

โดยที่ M คือ มวลของแกนและมอเตอร์ที่เคลื่อนที่

g คือ แรงโน้มถ่วงของโลก (9.81 m/s^2)

F_c คือ สัมประสิทธิ์ความเสียดทานของรางสไลด์ (ball screw 0.01)

โดย M จะมีค่าเท่ากับ 20 กิโลกรัมแทนค่าต่าง ๆ ลงในสูตรได้ดังนี้

$$F = (20 \times 9.81 \times 0.01) + 20$$

$$F = 22 \text{ N}$$

แทนค่าลงในสูตรของการหา Torque จะได้

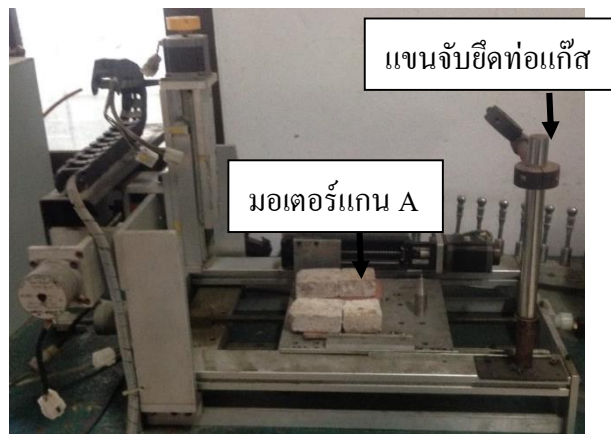
$$\begin{aligned} \text{Torque} &= \frac{22 \times 0.003}{2 \times 3.14 \times 0.3} \\ &= 0.035 \text{ N}\cdot\text{m} \end{aligned}$$

จากการคำนวณทราบได้ว่าต้องการมอเตอร์ที่มี แรงบิด (Torque) มากกว่า 0.035 N·m จึงได้เลือกมอเตอร์ Sanyo denki รุ่น 103-H7123-0440 ซึ่งมีแรงบิดอยู่ที่ 1.9 Nm และมีขนาดที่เหมาะสมกับตัวฐาน Mimi CNC หลังจากเลือกมอเตอร์ติดตั้ง ในส่วนของแท่นจับท่อแก๊สปกคลุมจะใช้เหล็กสแตนเลสและเหล็กกล้า เนื่องจากสามารถทนความร้อนของท่อแก๊สได้ ซึ่งแท่นจับท่อจะสามารถปรับมุมและระดับของท่อแก๊สได้อย่างอิสระ ทำให้ง่ายต่อการจับยึดและติดตั้งท่อแก๊สปกคลุม

(2.3) การปรับปรุง Mimi CNC ตามรูปแบบ ในขั้นแรกได้เปลี่ยนพื้นที่รองรับชิ้นงานจากพื้นที่ไม่สามารถเคลื่อนที่ได้ให้เป็นพื้นที่ที่สามารถเคลื่อนที่ได้ (แบบอยู่ในภาคผนวก ญ) นำชิ้นงานเข้าเครื่องกัด CNC จากนั้นตัดเหล็ก เพื่อนำมาทำเป็นตัวจับยึดท่อแก๊ส โดยใช้เครื่องสายพาน เจาะรูตรงกลางให้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับแท่นจับแก๊ส เมื่อเตรียมฐานรองรับและแท่นจับท่อแก๊สก็นำทั้งหมดมาประกอบกัน แสดงดังรูปที่ 3.6



(ก)



(ข)

รูปที่ 3.6 (ก) เครื่อง Mini CNC ก่อนการปรับปรุง (ข) เครื่อง Mini CNC หลังการปรับปรุง

(2.4) การควบคุม Mini CNC จะใช้รหัสที่มีชื่อว่า G-code หรือ M-code ซึ่งในแต่ละรหัสจะมีคำสั่งที่แตกต่างกันไปดังนี้

G-code: G00 เป็นคำสั่งให้เคลื่อนที่เป็นเส้นตรงแบบเร็ว โดยส่วนใหญ่จะไม่มีการทำงานอื่น โดยใช้คำสั่งนี้ [30-32]

G01 เป็นคำสั่งให้เคลื่อนที่เป็นเส้นตรงที่สามารถเพิ่มความเร็วหรือรอบการหมุนของมอเตอร์แกนต่าง ๆ ได้ โดยส่วนใหญ่จะใช้คำสั่งนี้ในการกัดชิ้นงาน

G02 เป็นคำสั่งให้เคลื่อนที่เป็นเส้นโค้งตามรัศมีที่กำหนด หมุนตามเข็มนาฬิกา

G03 เป็นคำสั่งให้เคลื่อนที่เป็นเส้นโค้งตามรัศมีที่กำหนด หมุนทวนเข็มนาฬิกา

G04 เป็นคำสั่งให้หยุดทำงานชั่วขณะในลักษณะของการหน่วง (Dwell)

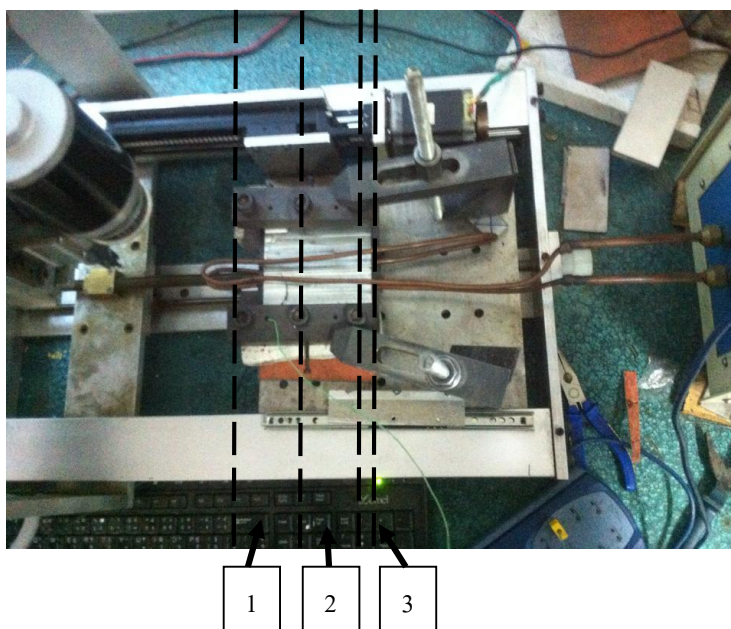
- G09 เป็นการสั่งให้หยุดทำงาน
- G10 สามารถตั้งค่าข้อมูลของการเดินด้วยความเร็ว
- G17 เลือกระนาบในการทำงาน XY
- G18 เลือกระนาบในการทำงาน XZ
- G19 เลือกระนาบในการทำงาน ZY
- G20 ป้อนข้อมูลหน่วยเป็นนิ้ว
- G21 ป้อนข้อมูลเป็น มิลลิเมตร
- G28 เลื่อนหัวกลับไปยังจุดอ้างอิง
- G40 ยกเลิกการชดเชยขนาดรัศมีของเครื่องมือตัด
- G41 การชดเชยขนาดรัศมีของเครื่องมือตัดทางด้านซ้าย
- G42 การชดเชยขนาดรัศมีของเครื่องมือตัดทางด้านขวา
- G43 การชดเชยขนาดความยาวของเครื่องมือตัด (ค่าบวก)
- G44 การชดเชยขนาดความยาวของเครื่องมือตัด (ค่าลบ)
- G49 ยกเลิกการชดเชยขนาดความยาวของเครื่องมือตัด
- G54 ปรับตั้งโคออร์ดิเนตของชิ้นงาน
- G80 ยกเลิกการทำวัฏจักร (Cycle)

(3) เครื่องให้ความร้อน โดยการเหนี่ยวนำ (Induction Heater)

เครื่องให้ความร้อนโดยการเหนี่ยวนำ มีหน้าที่ในการเพิ่มอุณหภูมิชิ้นงาน โดยอาศัยหลักเหนี่ยวนำความร้อนของขดลวดที่ปล่อยกระแสไฟฟ้าสลับผ่านก่อให้เกิดสนามแม่เหล็กและเมื่อนำชิ้นงานเข้าไปในสนามแม่เหล็กนี้ จะทำให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าในทิศทางที่ตรงข้ามกับขดลวด เนื่องจากในตัววัสดุจะมีค่าความต้านทานไฟฟ้า ด้วยแรงต้านที่เกิดขึ้นนี้ทำให้เกิดความร้อนขึ้นที่ชิ้นงาน ทั้งนี้เครื่องให้ความร้อนโดยการเหนี่ยวนำต้องมีการระบายความร้อนด้วยน้ำตลอดเวลา ขดลวดแบ่งเป็น 3 ตำแหน่งแสดงในรูปที่ 3.8 คือ ตำแหน่งที่ 1 เป็นตำแหน่งจุดเชื่อมจุดนี้จะเป็นตำแหน่งที่มีอุณหภูมิสูงกว่าทุกจุดในขดลวดเพราะขดลวดถูกออกแบบให้แคบจึงทำให้อุณหภูมิบริเวณดังกล่าวสูงที่สุด ตำแหน่งที่ 2 เป็นตำแหน่งกึ่งกลางของขดลวดเป็นจุดที่อุณหภูมิต่ำที่สุดของขดลวด ตำแหน่งที่ 3 เป็นตำแหน่งปลายขดลวดมีอุณหภูมิลดลงใกล้เคียงกับตำแหน่งที่ 1 จึงออกแบบให้ขดลวดช่วงปลายกว้างกว่าบริเวณอื่น ๆ เพื่อไม่ให้ช่วงนี้อุณหภูมิสูงกว่าตำแหน่งอื่นๆ แสดงดังรูปที่ 3.7 และรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.7 เครื่องให้ความร้อนโดยการเหนี่ยวนำ (Induction Heater)



รูปที่ 3.8 ตำแหน่งทั้ง 3 ตำแหน่งของขดลวด

(4) เครื่องกัดแนวตั้ง (Vertical Milling Machine)

เครื่องกัดแนวตั้ง ทำหน้าที่ปรับผิวขนาดชิ้นงานให้มีความหนาตามที่ต้องการและยังปรับผิวชิ้นงานให้เรียบยิ่งขึ้น เพื่อเป็นชิ้นงานทดสอบของการทดสอบสมบัติเชิงกลอีกด้วย

(5) เครื่องเลื่อยสายพานแนวนอน

เครื่องเลื่อยสายพานแนวนอนรุ่น UE-712A ใช้ตัดแบ่งชิ้นงานที่ได้จากการหล่อขึ้นรูปก่อนนำไปปรับผิวชิ้นงานด้วยเครื่องกัดแนวตั้ง โดยขณะที่ตัดแบ่งชิ้นงานได้เป็ระบบน้ำหล่อเย็นเพื่อ

ระบายความร้อนออกจากชิ้นงาน อันเป็นการป้องกันการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาคจากอิทธิพลทางความร้อนในขณะตัดแบ่งชิ้นงาน

6) เครื่องขัดกระดาษทรายและขัดผ้าสักหลาด

เครื่องขัดกระดาษทรายและขัดผ้าสักหลาด รุ่น NANO 200T GRINDER POLISHER ใช้ในการขัดเตรียมผิวหน้าชิ้นงาน เพื่อนำไปตรวจสอบในระดับโครงสร้างมหภาคและจุลภาคของชิ้นงาน เชื่อม โดยเครื่องขัดสามารถปรับรอบได้ด้วยระบบอัตโนมัติ

(7) สารละลาย Keller's Reagent

สารละลาย Keller's Reagent เป็นสารเคมีที่มีฤทธิ์เป็นกรด ใช้ในการกัดผิวชิ้นงานเพื่อเตรียมชิ้นงานนำไปตรวจสอบโครงสร้างมหภาคและจุลภาคของชิ้นงาน ซึ่งมีอัตราส่วนผสมดังแสดงใน ภาคผนวก ก

(8) กล้องจุลทรรศน์แบบสเตอริโอ (Stereo Microscope)

กล้องจุลทรรศน์แบบสเตอริโอยี่ห้อ Zeiss ใช้ถ่ายภาพโครงสร้างมหภาค โดยกล้องมีกำลังขยายอยู่ในช่วง 2-15 เท่า ในตัวกล้องมีไฟส่องสว่างมาจากข้างล่างชิ้นงานเพื่อป้องกันการสะท้อนกลับของแสงจากผิวชิ้นงาน



รูปที่ 3.9 กล้องจุลทรรศน์สำหรับวิเคราะห์โครงสร้างมหภาค

(9) กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (Optical Microscope, OM)

กล้องจุลทรรศน์ยี่ห้อ Zeiss ใช้ในการถ่ายภาพโครงสร้างระดับจุลภาคโดยตัวกล้องมีกำลังขยาย 25-500 เท่า ซึ่งตัวกล้องจะต่อเข้ากับระบบคอมพิวเตอร์เพื่อจัดเก็บข้อมูลภาพถ่ายตามที่ต้องการ



รูปที่ 3.10 กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง

(10) ชุดอุปกรณ์สำหรับตรวจวัดอุณหภูมิ

ในขณะที่ทดลอง ต้องวัดอุณหภูมิของบ่อหลอมเหลวตลอดเวลา โดยใช้เทอร์โมคัปเปิล (Thermocouple) ซึ่งทำจากเส้นโลหะตัวนำที่ต่างชนิดกัน 2 ตัว (แตกต่างกันทางโครงสร้างของอะตอม) และนำปลายด้านหนึ่งของโลหะรวมกันหรือเกี่ยวพันกันเรียกว่า ตัววัดอุณหภูมิ ส่วนปลายอีกข้างปล่อยให้เปิดไว้เรียกว่า จุดอ้างอิง โดยด้านวัดอุณหภูมิจะเป็นด้านที่จุ่มลงไปบ่อหลอมเหลว ทำให้อุณหภูมิที่จุดอ้างอิงกับตัววัดอุณหภูมิมีค่าที่แตกต่างกันทำให้มีการนำกระแสในเทอร์โมคัปเปิลเข้าสู่ Data Logger รุ่น USB TC-08 ของบริษัท PICO Technology ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการเก็บข้อมูล ประกอบด้วย Scanner หรือ Multiplexerdigital-Votmeter และตัวบันทึกข้อมูล ซึ่งเชื่อมต่อเข้ากับคอมพิวเตอร์และเก็บข้อมูลเพื่อนำไปใช้งานต่อไป ซึ่งในการทดลองนี้ปลายของเทอร์โมคัปเปิลจะอยู่ในตำแหน่งที่ 1 ของขดลวด (จากรูปที่ 3.8) เนื่องจากเป็นตำแหน่งที่มีอุณหภูมิสูงที่สุดของขดลวดจึงได้ทำการวัดตำแหน่งที่ 1 เพื่อไม่ให้ชิ้นงานเกิดการหลอมละลายจนกลายเป็นของเหลวมากเกินไปนั่นเอง (กราฟอุณหภูมิอยู่ในภาคผนวก ญ)

(11) ชุดอุปกรณ์สำหรับปล่อยแก๊สในโตรเจน

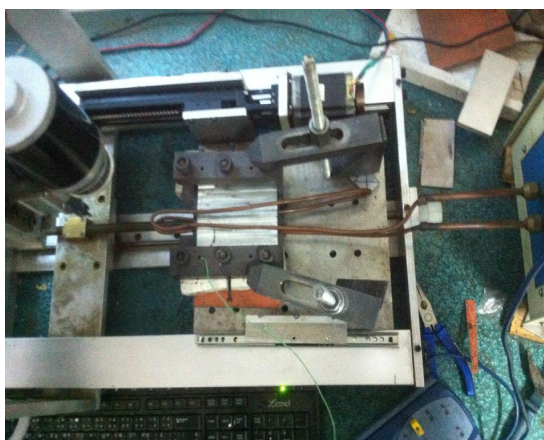
ชุดอุปกรณ์สำหรับปล่อยแก๊สในโตรเจน ใช้ในการทดลองที่ 2 ประกอบด้วย ท่อพ่นแก๊สในโตรเจน กล้องควบคุมอุณหภูมิ ชุดกรองฝุ่นและปรับความดัน เกจวัดความดันและถังในโตรเจน

(12) อุปกรณ์จับยึดชิ้นงาน (Step Clamping) และจิกจับยึดชิ้นงาน(Jig)

ชุดจับยึดชิ้นงาน เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการยึดชิ้นงานแบบขั้นบันได โดยจะจับยึดชิ้นงานเข้ากับ Mini CNC ทำหน้าที่ป้องกันไม่ให้ชิ้นงานเลื่อนที่ในขณะที่ทดลอง ในส่วนของจิก เป็นอุปกรณ์ที่ทำจากเหล็ก ใช้จับยึดชิ้นงานเพื่อให้สอดเทอร์โมคัปเปิลเข้าไป ทำให้วัดอุณหภูมิของบ่อเหลวได้ตลอดเวลา

3.5 ขั้นตอนการทดลอง

3.5.1 นำชิ้นงานที่ผ่านการปรับผิวชิ้นงาน มายึดกับตัวจิก (Jig) และยึดกับตัวฐาน Mini CNC โดยใช้ชุดจับยึดชิ้นงาน ยึดจิกเข้ากับตัว Mini CNC จากนั้นนำชิ้นงานติดตั้งไว้ภายในขดลวดของเครื่องให้ความร้อนโดยการเหนี่ยวนำ (Induction Heater) ดังรูปที่ 3.11



รูปที่ 3.11 การติดตั้งอุปกรณ์ก่อนเริ่มการทดลอง

3.5.2 เตรียมสว่านไฟฟ้าและดอกสว่านขนาด 4 mm โดยวัดรอบของสว่านไฟฟ้าเพื่อให้ได้รอบตามที่ต้องการในแต่ละสภาวะดังรูปที่ 3.12 โดยรอบที่ได้จะมีค่าใกล้เคียงกับความเร็วรอบที่กำหนด (± 7 rpm)



รูปที่ 3.12 การวัดรอบด้วยตัววัดรอบแบบหน้าสัมผัส

3.5.3 เตรียม Mini CNC โดยป้อนค่าโค้ด (Code) คำสั่งเพื่อให้ฐานของ Mini CNC เคลื่อนที่ตามความเร็วเดินแนวเชื่อมที่ต้องการ นอกจากนี้ได้ตัดแปลงเพิ่มชุดจับยึดท่อแก๊สในโตรเจนเพื่อการทดลองภายใต้แก๊สปกคลุม โดยท่อแก๊สสูงจากบ่อหลอมเหลว 5 mm และปรับท่อแก๊สในโตรเจนทำมุม 45° กับผิวชิ้นงานเพื่อให้แก๊สปกคลุมทั่วตำแหน่งเชื่อม ดังรูปที่ 3.13



(ก)

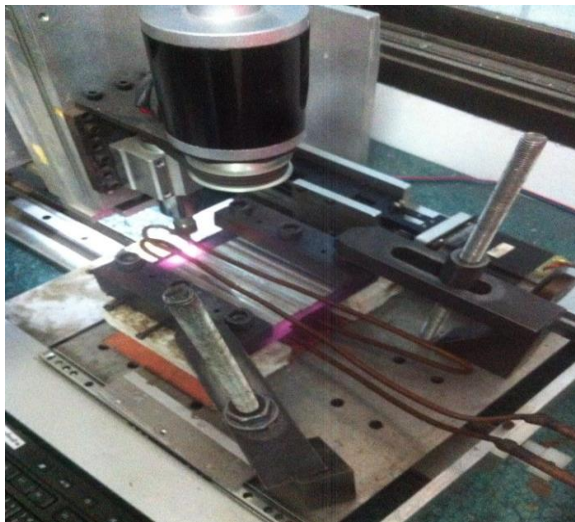
รูปที่ 3.13 (ก) การป้อนโค้ด (code) เข้าเครื่อง Mini CNC



(ข)

รูปที่ 3.13 (ข) การจับยึดของหัวแก๊สในการเชื่อมภายใต้แก๊สปกคลุม

3.5.4 เปิดเครื่องให้ความร้อนโดยการเหนี่ยวนำ ตั้งกระแสที่ 542 A ให้ความร้อนแก่ชิ้นงาน โดยใช้เทอร์โมคัปเปิ้ลวัดอุณหภูมิตลอดเวลา โดยจะให้ความร้อนถึงอุณหภูมิ 570 – 580 °C โดยใช้เวลา 3 นาที ดังรูปที่ 3.14



รูปที่ 3.14 การเริ่มต้นการทดลอง โดยการเปิดเครื่องให้ความร้อน โดยการเหนี่ยวนำ

3.5.5 เมื่ออุณหภูมิของชิ้นงานถึง 450 -460 °C จึงเริ่มเคลื่อนที่ชิ้นงาน โดยป้อนโค้ด (Code) เข้าเครื่อง Mini CNC เพื่อให้มีความเร็วเดินแนวเชื่อม 75 mm/min แล้วนำส่วนที่มีความเร็วรอบเท่ากับ 1100 1750 และ 2200 rpm เป็นตัวแกน ซึ่งจะมีการควบคุมกระแสไฟฟ้าของเครื่องให้ความร้อนโดยขดลวดเหนี่ยวนำ (Induction Heater) ให้อยู่ที่ 542 A แล้วค่อยๆ ลดปริมาณ

กระแสลงเรื่อยๆ ในส่วนของการทดลองภายใต้สเปคคุมจะปล่อยแก๊สที่อัตราการไหล 5 L/min ใช้อุณหภูมิแก๊สที่ 300 °C ซึ่งจะปล่อยแก๊สก่อนการเชื่อม 1 นาที เพื่อให้อุณหภูมิของชิ้นงานได้ตามความต้องการ ดังแสดงในรูปที่ 3.15



(ก)



(ข)

รูปที่ 3.15 (ก) กระแสไฟในขณะที่เพิ่มอุณหภูมิชิ้นงาน (ข) การควบคุมอุณหภูมิระหว่างการทดลอง

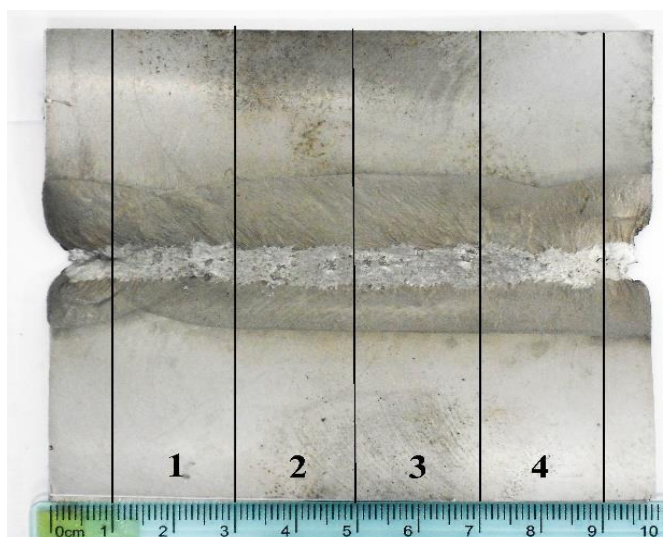
3.5.6 เมื่อเสร็จสิ้นการทดลอง นำส่วานออกจากชิ้นงานและปล่อยชิ้นงานเย็นตัวในบรรยากาศปกติ ดังแสดงในรูปที่ 3.16



รูปที่ 3.16 ชิ้นงานที่ปล่อยให้เย็นตัวภายใต้บรรยากาศปกติหลังการเชื่อม

3.6 การเตรียมชิ้นงานเชื่อมสำหรับการทดสอบ

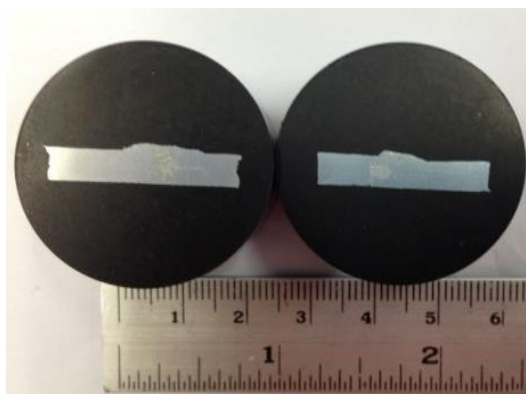
การเตรียมชิ้นงานที่ผ่านการเชื่อมสำหรับการทดสอบทางโลหะวิทยา แบ่งชิ้นงานเป็น 4 ส่วน ซึ่งทั้ง 4 ส่วน นำไปทดสอบ 2 ลักษณะคือ การทดสอบทางโลหะวิทยา (โครงสร้างมหภาคและโครงสร้างจุลภาค) กับการทดสอบสมบัติเชิงกล (ทดสอบความแข็งแรงดึงและทดสอบความแข็ง) ดังแสดงในรูปที่ 3.17



รูปที่ 3.17 การตัดแบ่งชิ้นงานหลังการเชื่อม

3.6.1 สำหรับการทดสอบสมบัติทางโลหะวิทยา แสดงดังรูปที่ 3.18 นำชิ้นงานหมายเลข 1 และ 4 ซึ่งเป็นตำแหน่งเริ่มต้นแนวเชื่อมและจุดสิ้นสุดของแนวเชื่อม โดยในการตัดแบ่งจะหลีกเลี่ยง

การทำให้เกิดความร้อนต่อหน้าผิวชิ้นงานให้น้อยที่สุด เพื่อหลีกเลี่ยงการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างบริเวณผิวหน้าตัด อาจทำให้ผลการตรวจสอบนั้นคลาดเคลื่อนได้ จากนั้นนำชิ้นงานที่ได้มาขัดผิวชิ้นงาน โดยมีขั้นตอนดังต่อไปนี้



รูปที่ 3.18 ชิ้นงานในการทดสอบ โครงสร้างจุลภาค

(1) การขัดชิ้นงานจะขัด โดยใช้กระดาษทรายที่ทำจากผงซิลิคอนคาร์ไบด์โดยใช้ตั้งแต่เบอร์ P180 360 600 800 1200 และ 2400 ตลอดการขัดควรเปิดน้ำอยู่ตลอดเวลา เพื่อชำระเศษโลหะและสิ่งสกปรกที่หลุดออกมาจากผิวชิ้นงาน เมื่อต้องการเปลี่ยนเบอร์กระดาษทรายที่สูงขึ้น ควรเปลี่ยนทิศทางการขัดชิ้นงาน เพื่อเป็นจุดสังเกตได้ง่ายว่าชิ้นงานที่ขัดนั้นมีผิวที่เรียบที่เท่ากันทั้งชิ้นงาน แสดงดังรูปที่ 3.19



รูปที่ 3.19 การขัดเตรียมผิวชิ้นงาน

(2) เมื่อขัดกระดาษทรายเบอร์ P2400 เสร็จเรียบร้อยแล้ว เปลี่ยนแผ่นขัดจากกระดาษทรายเป็นผ้าสักหลาดและใช้ผงอะลูมินา (Alumina Powder) แทนน้ำในการขัด โดยจะใช้ผง

อะลูมินาขนาด 5 μ m และ 0.1 μ m ผสมน้ำและเทลงบนผ้าสักหลาดเรื่อย ๆ ตลอดการขัดจนกว่าผิวชิ้นงานจะเงา มันวาวคล้ายกระจก จึงนำชิ้นงานไปทำความสะอาดด้วยการล้างน้ำและเป่าลม เพื่อไล่น้ำออกจากผิวชิ้นงาน

(3) นำชิ้นงานมากัดสารละลาย (Keller's Reagent) ซึ่งมีฤทธิ์เป็นกรดเป็นเวลา 3 - 5 วินาที เมื่อจุ่มเสร็จนำมาล้างน้ำแล้วเป่าด้วยลมเพื่อชำระล้างสิ่งสกปรกและเปิดผิวชิ้นงาน ซึ่งจะทำการตรวจสอบโครงสร้างด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (Optical Microscope, OM) ตรวจสอบได้ง่ายและมีความละเอียดมากขึ้น

3.6.2 การเตรียมชิ้นงานเพื่อทดสอบสมบัติเชิงกล การทดสอบเชิงกลเป็นการทดสอบเพื่อศึกษาพฤติกรรมของวัสดุโดยแบ่งออกเป็น 2 การทดสอบ ดังนี้

(1) การทดสอบความแข็งแรงดึง นำชิ้นงานหมายเลข 2 มากัดด้วยเครื่องกัดแนวตั้ง เพื่อเตรียมชิ้นงานทดสอบตามมาตรฐาน ASTM-E8M โดยมีการทดสอบ ณ อุณหภูมิห้อง ใช้ความเร็วขณะดึงที่ 1.002 mm/min แสดงดังรูป 3.20



รูปที่ 3.20 การเตรียมชิ้นงานเพื่อทดสอบความแข็งแรงดึง

(2) การทดสอบความแข็ง นำชิ้นงานหมายเลข 1 มาทำชิ้นงานทดสอบโดยการเตรียมชิ้นงานจะมีลักษณะเดียวกันกับการทดสอบทางโลหะวิทยา แต่ไม่มีการขัดชิ้นงานด้วยผ้าสักหลาด เนื่องจากการทดสอบความแข็งต้องการเพียงผิวที่เรียบเสมอกันทั้งชิ้นงาน และเพื่อการป้องกันการชนกันของหัวกดกับผิวชิ้นงาน ซึ่งอาจทำให้หัวกดชิ้นงานชำรุดได้ โดยใช้แรงขนาด 100 g กดเวลา 10 วินาที ระยะห่างจุดละ 0.5 มิลลิเมตร ทั้งหมด 40 จุด แสดงดังรูปที่ 3.21



รูปที่ 3.21 การทดสอบหาค่าความแข็ง

3.7 การหาเปอร์เซ็นต์รูพรุน

การหาเปอร์เซ็นต์รูพรุนได้โดย การคำนวณพื้นที่ของเนื้อโลหะภาพในแนวเชื่อมในแต่ละเงื่อนไขโดยใช้โปรแกรม Image J ในการคำนวณหาพื้นที่ทั้งหมดก่อนจะนำมาแทนค่าลงในสมการ ทั้งนี้การหาเปอร์เซ็นต์รูพรุนของแนวเชื่อมจะทำให้ทราบถึงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบดอกสว่านและเปอร์เซ็นต์รูพรุนว่ามีความสัมพันธ์กันหรือไม่ โดยมีวิธีการคำนวณดังนี้

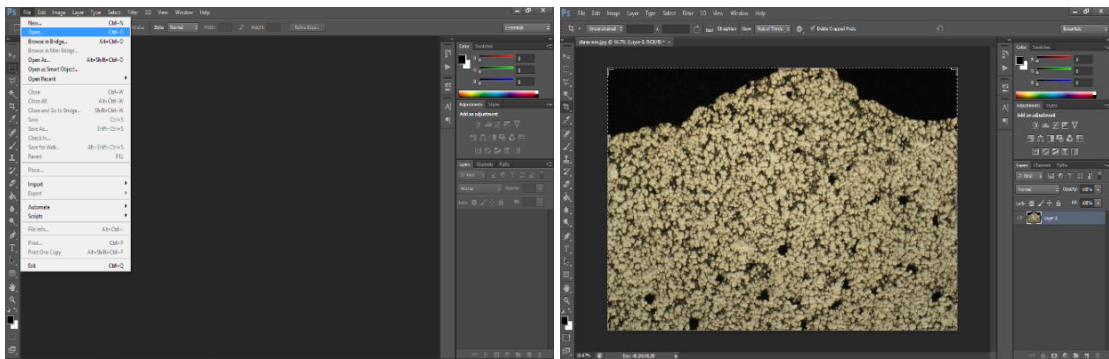
ตัวอย่างการคำนวณ กรณีความเร็วรอบดอกสว่าน 1750 rpm หมุนตามเข็มนาฬิกา แสดงดังรูปที่ 3.22

(1) เปิดโปรแกรม Adobe Photoshop

(1.1) เลือกคำสั่ง Files จากนั้นเลือกคำสั่ง Open เพื่อเปิดภาพที่ต้องการนำมาคำนวณหาเปอร์เซ็นต์รูพรุนแนวเชื่อม

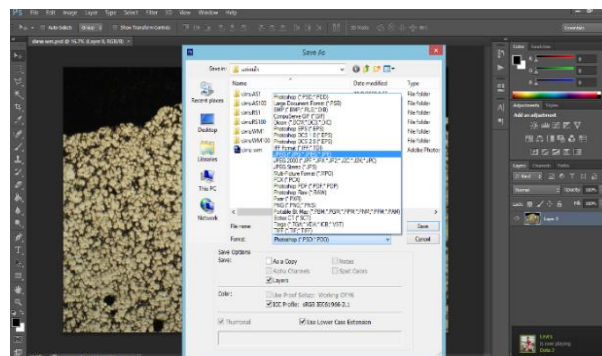
(1.2) เลือกใช้คำสั่ง Crop Tool เพื่อตัดรูปภาพบริเวณส่วนเกินออก โดยตัดให้มีความสูงเท่ากับบริเวณเนื้อโลหะเดิม

(1.3) เลือกคำสั่ง Files จากนั้นเลือก Save As เพื่อบันทึกภาพเป็น JPG Files (.jpg)



(ก)

(ข)



(ค)

รูปที่ 3.22 การใช้โปรแกรม Adobe Photoshop

(2) เปิดโปรแกรม Image J แสดงดังรูปที่ 3.23

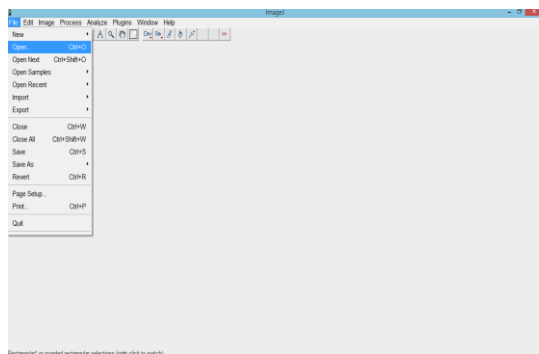
(2.1) เลือกคำสั่ง Files จากนั้นเลือกคำสั่ง Open เพื่อเปิดรูปภาพที่บันทึกจากโปรแกรม Adobe Photoshop

(2.2) เลือกคำสั่ง Image จากนั้นเลือกใช้คำสั่ง Type เลือก 8 bit เพื่อเปลี่ยนภาพให้เป็นขาว - ดำ ทั้งภาพ

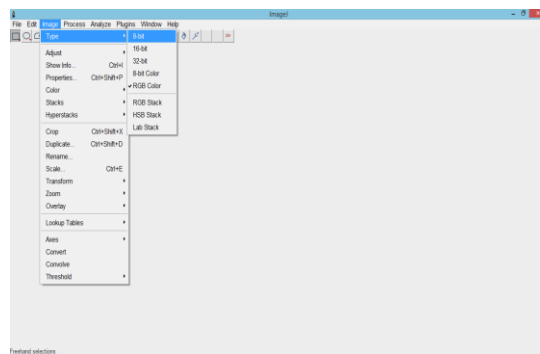
(2.3) เลือกคำสั่ง Image เลือกใช้คำสั่ง Threshold เพื่อต้องการแยกพื้นที่ที่เป็นแนวเชื่อมและรูพรุนออกจากกัน โดยสีขาวจะเป็นเนื้อเชื่อมและสีดำจะเป็นรูพรุน เมื่อได้ตามที่ต้องการแล้วกด Apply และปิดหน้าต่าง Threshold

(2.4) จากนั้นเลือกคำสั่ง Analyze ไปที่ฟังก์ชัน Tools เลือก ROI Manager.... มีหน้าต่างเล็กขึ้นมา จากนั้นกดคำสั่ง Wand Tool แล้วคลิกที่บริเวณสีขาวแล้วเลือกคำสั่ง Add it ในหน้าต่างของ ROI Manager จากนั้นก็นำเมาส์ไปคลิกบริเวณสีดำให้รอบๆสีดำภายในบริเวณแนว

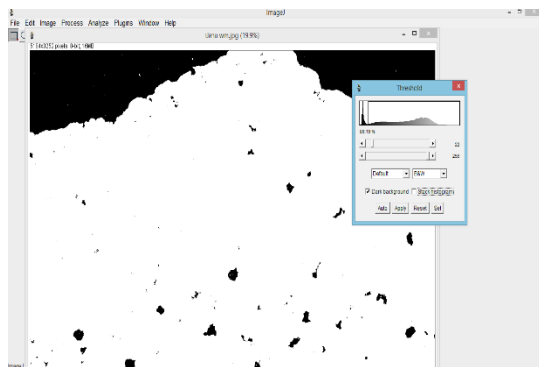
เชื่อมเกินเป็นเส้นสีเหลืองล้อมรอบจากนั้นก็กดคำสั่ง Add it อีกครั้ง ทำไปจนกว่าสีดำภายในแนวเชื่อมทุกวง



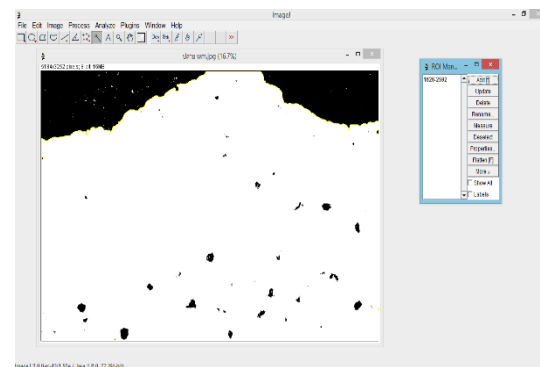
(ก)



(ข)



(ค)



(ง)

Area	Perim	CentX	CentY	Area	Perim	Perim	Perim	CentX	CentY	Perim	Perim		
1421845	269381	0	265	3426	822498	36208	0	202	2170	152	1736	3486	0.92
1700	3460	0	265	3261	85756	3235	368	2219	4708	11820	1110	1811	0.94
54242	1438	0	265	3281	8136	3496	421	1977	4167	21424	1100	3296	0.96
8919	5426	0	265	3282	84182	2135	4318	1623	71294	22324	1437	349	0.98
4155	2102	0	265	3200	83928	2485	4895	1525	38269	18365	1452	349	0.98
8054	1242	0	265	3296	854172	3430	4834	2341	2482	36305	1441	3462	0.91

(จ)

รูปที่ 3.23 การใช้โปรแกรม Image J

(2.5) เมื่อครบทุกวงแล้วก็กดคำสั่ง Measure เพื่อสั่งให้โปรแกรมวัดพื้นที่ที่เราต้องการออกมา จากนั้นจึงนำไปแทนในสูตรการหาความหนาแน่นของแนวเชื่อม [25] คือ

$$\frac{\text{พื้นที่แนวเชื่อมทั้งหมด(สีขาว) - พื้นที่รูพรุนทั้งหมด(สีดำ)}}{\text{พื้นที่แนวเชื่อมทั้งหมด(สีขาว)}} \times 100 \text{ ---- [25]}$$

จากกรณีตัวอย่างสามารถหาพื้นที่แนวเชื่อมทั้งหมด (สีขาว) = 1389557 พื้นที่รูพรุนทั้งหมด (สีดำ) = 412283 แทนค่าในสมการข้างต้นจะได้

$$\frac{1389557 - 412283}{1389557} \times 100 = 97.03 \%$$

จึงทำให้ทราบได้ว่าชิ้นงานชิ้นนี้มีความหนาแน่นของแนวเชื่อม = 97.03 %

(2.6) นำผลความหนาแน่นแนวเชื่อมมาหาเปอร์เซ็นต์รูพรุนโดยนำ 100 - ความหนาแน่นของแนวเชื่อม = จำนวนรูพรุน (%) จากกรณีตัวอย่างจะได้ 100 - 97.03 = 2.97%

3.7 การหาขนาดเกรน

การหาขนาดเกรนจะใช้โปรแกรม 2 โปรแกรมนั่นคือ Photoshop CS6 และ Image J โดยมีขั้นตอนแสดงดังรูปที่ 3.24 ดังนี้

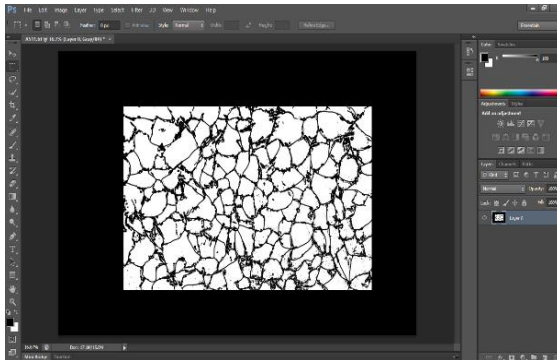
3.7.1 เปิดโปรแกรม Photoshop CS6 จากนั้นเลือกไฟล์รูปที่ต้องการจะหาขนาดเกรน ทำรูปให้เป็นขาว-ดำ จากนั้นใช้เครื่องมือเขียนเส้นของขอบเกรนให้ชัดเจนขึ้นเนื่องด้วยโปรแกรม Image J จะมีการวิเคราะห์ที่แม่นยำขึ้นหากกำหนดระยะขอบเกรนให้ชัดขึ้น จากนั้น Save ไฟล์

3.7.2 เปิดโปรแกรม Image J เปิดไฟล์ที่ได้ Save จากโปรแกรม Photoshop CS6 จากนั้นปรับสีของภาพให้เป็นขาว-ดำเพื่อให้ง่ายต่อการแยกเกรน (สีขาว) กับขอบเกรน (สีดำ)

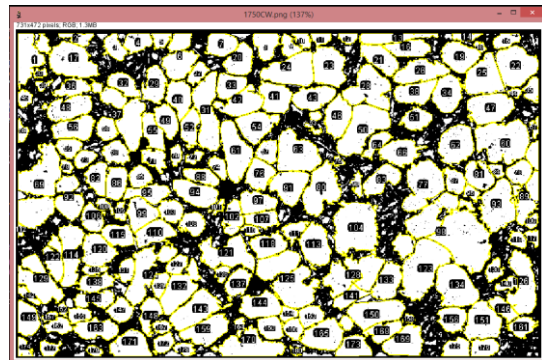
3.7.3 เมื่อปรับรูปเสร็จแล้ว ก็กดฟังก์ชัน Analyze เพื่อวิเคราะห์บริเวณที่เป็นสีขาวทั้งหมด จากนั้น save ข้อมูลที่ได้จากตารางการวิเคราะห์นำมาลงสู่โปรแกรม Microsoft Excel เพื่อคำนวณเนื่องจากข้อมูลที่ออกมาจากโปรแกรม Image J จะเป็นข้อมูลของพื้นที่ ซึ่งสามารถแปลงได้โดยใช้สูตร

$$\text{ขนาด} = 2 \times \sqrt{\frac{\text{Area} \times 7}{2}} \text{ ---- [39]}$$

3.7.4 เมื่อได้ค่าขนาดของเกรนแต่ละเกรน ก็นำมาเฉลี่ยจึงได้ขนาดเกรนเฉลี่ยของบริเวณนั้น



(ก)



(ข)

Microsoft Excel spreadsheet showing a list of particle measurements. The formula bar displays $=2*\text{SQRT}(C2*7/22)$.

Label	Area	Mean	Min	Max	Circ.	Feret	%Area	FeretX	FeretY	FeretAngle	MinFeret	AR	Round	Solidty	ขนาดเกรน	ขนาดเกรนเฉลี่ย
2	4924.966	255	255	255	0.196	132.023	100	184.702	226.061	66.075	70.255	1.76	0.568	0.818	79.17158	55.68563818
3	1157.852	255	255	255	0.312	75.175	100	267.138	105.949	176.976	26.912	2.66	0.376	0.842	38.38789	
4	1769.601	255	255	255	0.371	61.92	100	382.718	105.382	107.026	48.384	1.594	0.627	0.801	47.45755	
5	1862.451	255	255	255	0.57	63.3	100	404.248	131.161	8.493	43.753	1.542	0.648	0.903	48.68667	
6	954.418	255	255	255	0.383	49.718	100	470.253	139.093	42.691	34.277	1.261	0.793	0.843	34.85274	
7	4730.92	255	255	255	0.26	107.682	100	508.78	205.382	68.227	69.506	1.678	0.596	0.817	77.5962	
8	2619.372	255	255	255	0.549	75.391	100	575.635	146.458	25.602	50.141	1.33	0.752	0.92	57.7386	
9	2328.224	255	255	255	0.511	66.385	100	699.714	164.872	63.654	55.657	1.2	0.834	0.884	54.43523	
10	1230.559	255	255	255	0.436	53.708	100	742.773	105.382	136.71	39.195	1.485	0.674	0.835	39.57482	
11	833.079	255	255	255	0.342	47.56	100	761.187	105.382	141.287	30.219	1.549	0.645	0.856	32.56198	
12	820.159	255	255	255	0.592	44.136	100	800.28	105.382	158.54	27.195	1.666	0.6	0.911	32.30849	
13	694.808	255	255	255	0.588	42.466	100	857.787	115.014	13.109	23.513	1.742	0.574	0.92	29.7372	
14	2524.115	255	255	255	0.186	166.708	100	902.829	122.379	5.265	23.229	7.826	0.128	0.855	56.67901	
15	742.958	255	255	255	0.326	66.134	100	1098.296	112.747	6.394	17.564	3.744	0.267	0.875	30.75033	
16	1309.124	255	255	255	0.514	61.285	100	1185.548	134.56	21.703	31.792	2.092	0.478	0.882	40.8186	
17	2656.047	255	255	255	0.454	103.082	100	951.554	130.311	171.625	37.969	2.627	0.381	0.909	58.14141	
18	5690.234	255	255	255	0.433	117.324	100	247.025	148.441	157.274	74.703	1.485	0.674	0.894	85.10062	
19	373.325	255	255	255	0.372	29.414	100	1145.604	125.212	151.213	19.945	1.642	0.609	0.829	21.79773	
20	3793.034	255	255	255	0.618	84.874	100	1074.783	143.342	174.061	63.727	1.275	0.784	0.932	69.4802	
21	2947.918	255	255	255	0.472	75.147	100	626.626	191.501	64.787	57.425	1.364	0.733	0.903	61.25272	
22	3185.539	255	255	255	0.384	95.352	100	905.945	129.178	134.519	47.016	2.114	0.473	0.883	63.67356	
23	5635.583	255	255	255	0.624	95.61	100	1209.91	222.379	47.041	84.63	1.042	0.96	0.928	84.69097	
24	4855.71	255	255	255	0.493	99.866	100	813.028	134.277	118.092	68.995	1.32	0.758	0.899	78.61294	
25	5690.153	255	255	255	0.464	122.419	100	693.482	200.849	29.531	75.414	1.72	0.581	0.914	85.10002	

(ค)

รูปที่ 3.24 ขั้นตอนการหาขนาดเกรน (ก) การทำให้ขอบเกรนชัดขึ้นด้วยโปรแกรม Photoshop CS6 (ข) การคำนวณหาพื้นที่ทั้งหมดของเกรนด้วยโปรแกรม Image J (ค) การใช้สูตรและการเฉลี่ยขนาดเกรนใน โปรแกรม Microsoft excel

บทที่ 4

ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผล

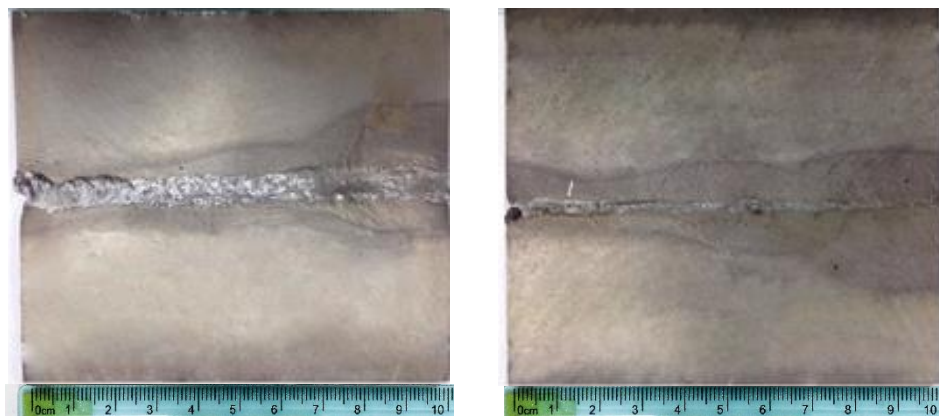
การปรับปรุงการเชื่อมในสถานะกึ่งแข็งของอะลูมิเนียมผสมหล่อกึ่งแข็งด้วยการเชื่อมโดยใช้ดอกสว่าน แนวต่อชนของชิ้นงานได้รับความร้อนจากขดลวดเหนี่ยวนำเกิดเป็นบ่อหลอมสถานะกึ่งแข็ง ทำการเชื่อมทั้งหมด 6 สภาวะ สภาวะละ 3 ชั้น รวมทั้งหมด 18 ชั้น หลังจากนั้นนำชิ้นงานเชื่อมทั้งหมดมาศึกษาลักษณะทางกายภาพ โครงสร้างมหภาค โครงสร้างจุลภาค เปอร์เซ็นต์จำนวนรูพรุน การทดสอบสมบัติเชิงกล และทำการเก็บผลการทดลอง และนำมาวิเคราะห์ผล เพื่อหาตัวแปรที่เหมาะสมที่สุดของการเชื่อมในสถานะกึ่งแข็งของอะลูมิเนียมผสมหล่อกึ่งแข็ง

4.1 การทดลองที่ 1 การเชื่อมภายใต้บรรยากาศปกติ

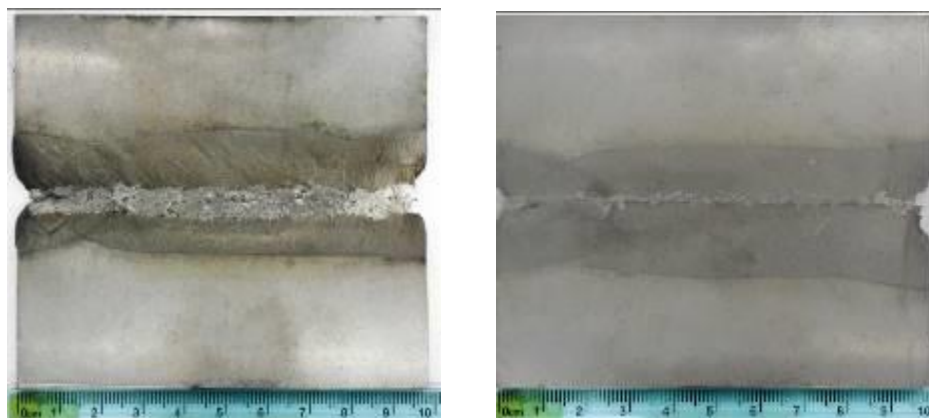
งานวิจัยดำเนินการเชื่อมในสถานะกึ่งแข็งของอะลูมิเนียมผสมหล่อกึ่งแข็งภายใต้บรรยากาศปกติ แนวต่อชนของวัสดุได้รับความร้อนจากขดลวดเหนี่ยวนำเพื่อสร้างบ่อหลอมกึ่งแข็งที่อุณหภูมิ 580 – 590 °C ใช้สว่านไฟฟ้าและดอกสว่านขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4 mm ทิศดอกสว่านหมุนตามเข็มนาฬิกา ความเร็วเดินแนวเชื่อมที่ 75 mm/min มีรอบของดอกสว่านที่แตกต่างกันตามที่กำหนดดังนี้ 1100 1750 และ 2200 rpm ซึ่งมีผลดังนี้

4.1.1 ลักษณะทางกายภาพของแนวเชื่อมชิ้นงานที่ความเร็วรอบดอกสว่าน 1100 1750 และ 2200 rpm หมุนตามเข็มนาฬิกา

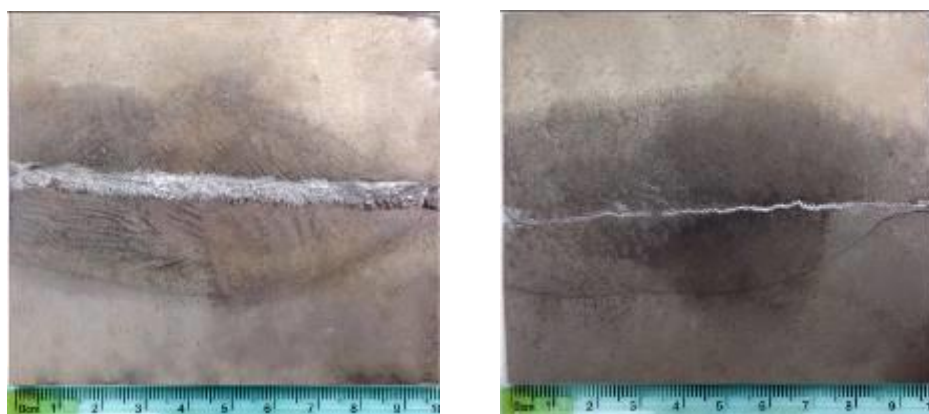
ลักษณะทางกายภาพของแนวเชื่อม เมื่อวิเคราะห์โดยการสังเกตด้วยตาถึงลักษณะของแนวเชื่อมหลังผ่านการเชื่อมและปล่อยให้เย็นตัวที่บรรยากาศปกติ ซึ่งมีผลดังแสดงในรูปที่ 4.1



(ก)



(ข)



ด้านหน้า

(ค)

ด้านหลัง

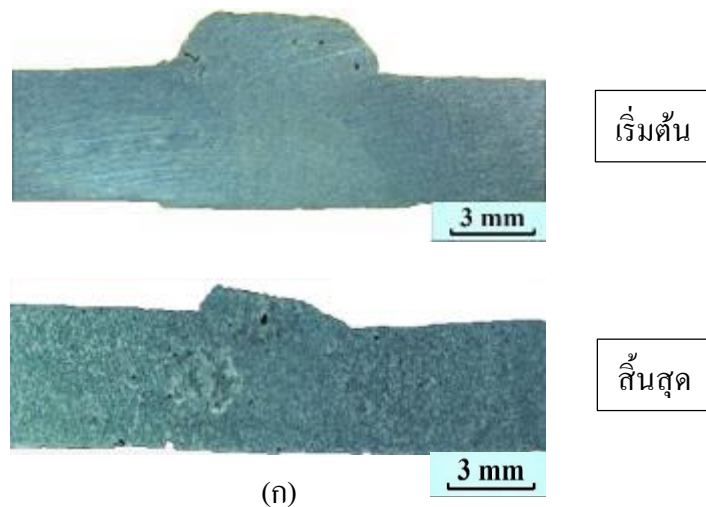
รูปที่ 4.1 ลักษณะทางกายภาพทั้งด้านหน้าและด้านหลัง (ก) 1100 rpm (ข) 1750 rpm (ค) 2200 rpm

จากรูปที่ 4.1 เห็นได้ว่า ลักษณะของแนวเชื่อมในแต่ละชิ้นงานมีความกว้างที่ใกล้เคียงกัน สิ่งที่แตกต่างกันอย่างเห็นได้ชัดคือ ส่วนที่ได้รับผลกระทบจากความร้อน (Heat Affected Zone,

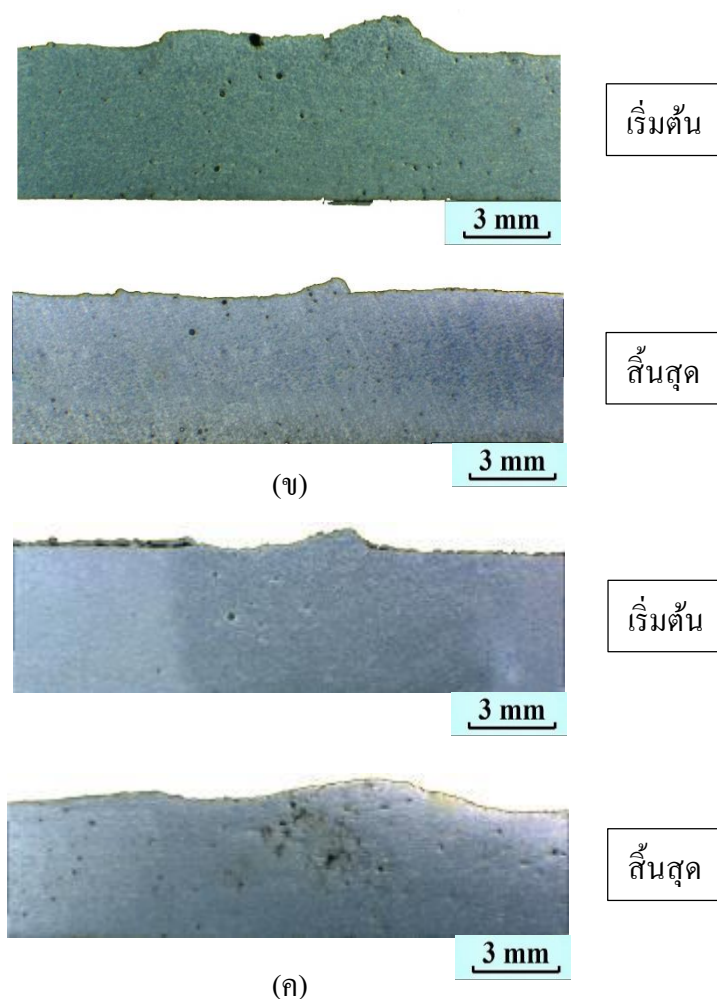
HAZ) ซึ่งสังเกตได้จากในรูปคือแถบสีดำรอบๆ แนวเชื่อม โดยเฉพาะชิ้นงานที่เชื่อมด้วยความเร็วรอบดอกสว่าน 2200 rpm พบว่า มีความกว้างของบริเวณที่ได้รับผลกระทบทางความร้อนมากที่สุด และมีความเรียบของแนวเชื่อมมากที่สุด เนื่องจากอิทธิพลของดอกสว่านเมื่อเพิ่มความเร็วรอบดอกสว่านทำให้แรงหนีคของน้ำโลหะลดน้อยลง [19] ด้วยเหตุนี้เมื่อแรงหนีคน้ำโลหะลดลงทำให้การกระจายของน้ำโลหะดีกว่าความเร็วรอบต่ำ ทำให้ความร้อนสามารถตีแผ่เป็นวงกว้างได้มากกว่า ส่งผลให้บริเวณที่ได้รับผลกระทบทางความร้อนของชิ้นงานความเร็วรอบ 2200 rpm กว้างมากที่สุด ซึ่งอาจจะทำให้ชิ้นงานมีความแข็งแรงลดลงด้วย

4.1.2 โครงสร้างมหภาคของแนวเชื่อมชิ้นงานที่ความเร็วรอบดอกสว่าน 1100 1750 และ 2200 rpm หมุนตามเข็มนาฬิกา

โครงสร้างมหภาคเป็นการเก็บภาพถ่ายของชิ้นงานด้วยการส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์ที่ กำลังขยาย 4 เท่า จากนั้นสังเกตลักษณะภายในโครงสร้าง โดยเปรียบเทียบในแต่ละชิ้นงานว่ามีความแตกต่างกันมากน้อยเพียงใดซึ่งจะทำการเก็บภาพจำนวน 6 รูปด้วยกัน ดังแสดงในรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 โครงสร้างมหภาคของชิ้นงานแนวเชื่อมด้านที่เริ่มต้นการเชื่อม (รูปบน) และตอนสิ้นสุดการเชื่อม (รูปล่าง) (ก) 1100 rpm



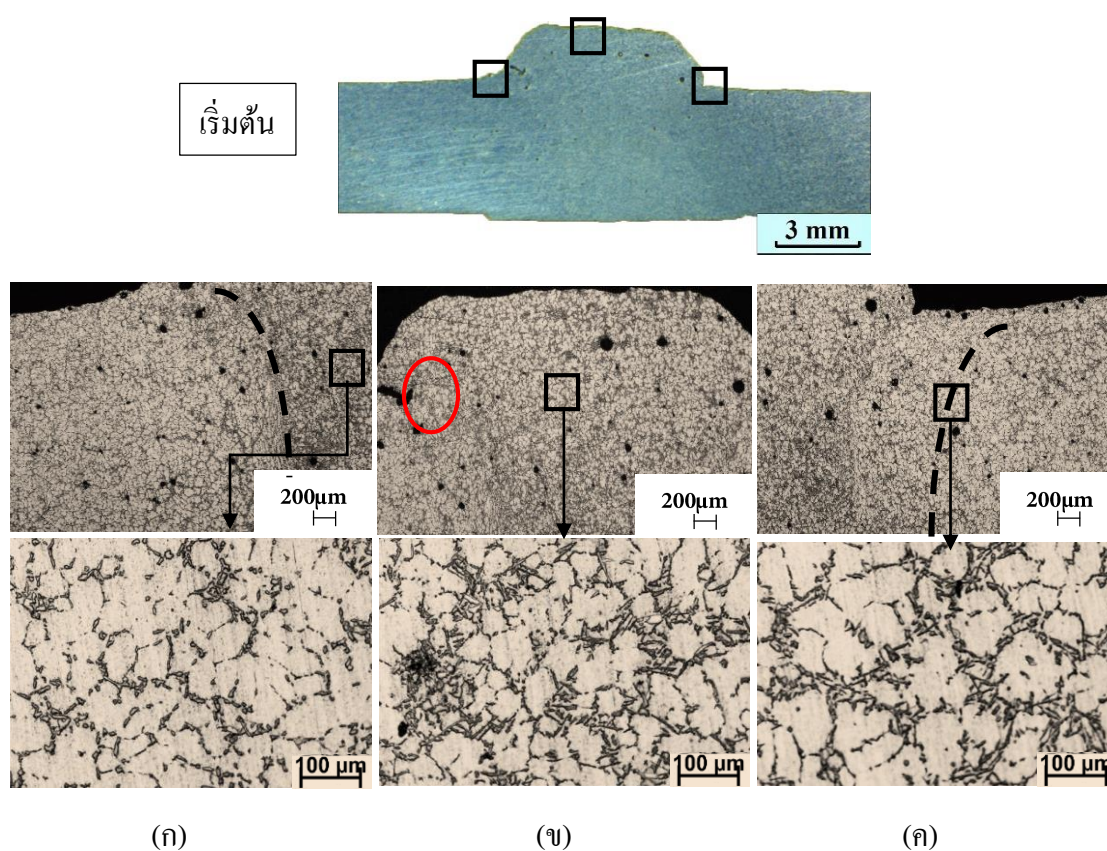
รูปที่ 4.2 โครงสร้างมหภาคของชิ้นงานแนวเชื่อมเริ่มต้นการเชื่อม (รูปบน) และตอนสิ้นสุดการเชื่อม (รูปล่าง) (ข) 1750 rpm (ค) 2200 rpm

จากรูปที่ 4.2 เห็นได้ว่าชิ้นงานเชื่อมติดกันทุกชิ้นงาน และเมื่อพิจารณาความสูงของแนวเชื่อมพบว่า ชิ้นงานเชื่อมที่ความเร็วรอบดอกสว่าน 1100 rpm มีความสูงมากที่สุด (ชิ้นงานเริ่มต้นการเชื่อมมีความสูงของแนวเชื่อมที่ 1.5 mm และชิ้นงานสิ้นสุดการเชื่อมมีความสูงแนวเชื่อมที่ 0.8 mm) เนื่องจากความเร็วรอบดอกสว่านที่ต่ำ ทำให้ความหนืดของน้ำโลหะมีค่ามาก ส่งผลให้น้ำโลหะเคลื่อนตัวเข้าสู่แนวเชื่อมได้ยากหรือการไหลเข้าแนวเชื่อมได้ไม่ดี [21] อีกทั้งดอกสว่านที่ใช้โดยปกติถูกออกแบบมาเพื่อเจาะและคายเศษโลหะออกจากชิ้นงาน ทำให้ผิวเชื่อมของทั้ง 3 ความเร็วรอบมีผิวที่ขรุขระและสูงกว่าชิ้นงาน นอกจากนี้ยังพบรูพรุนในบริเวณแนวเชื่อม ซึ่งพบในชิ้นงานตอนสิ้นสุดการเชื่อมชัดเจนมากที่สุด (รูปที่ 4.2 ค) เพราะความเร็วรอบดอกสว่านที่มากขึ้น

ส่งผลต่อน้ำโลหะในบ่อกึ่งแข็งโดยตรง ด้วยสมบัติเฉพาะของดอกสว่านที่เป็นเกลียว เมื่อรอบสูงขึ้น เกลียวจะนำน้ำโลหะออกมาจากบ่อกึ่งแข็งได้ง่ายขึ้น

4.1.3 โครงสร้างจุลภาคของแนวเชื่อมชิ้นงานที่ความเร็วรอบดอกสว่าน 1100 1750 และ 2200 rpm หมุนตามเข็มนาฬิกา

(1) โครงสร้างจุลภาคแนวเชื่อมของชิ้นงานที่ความเร็วรอบดอกสว่าน 1100 rpm

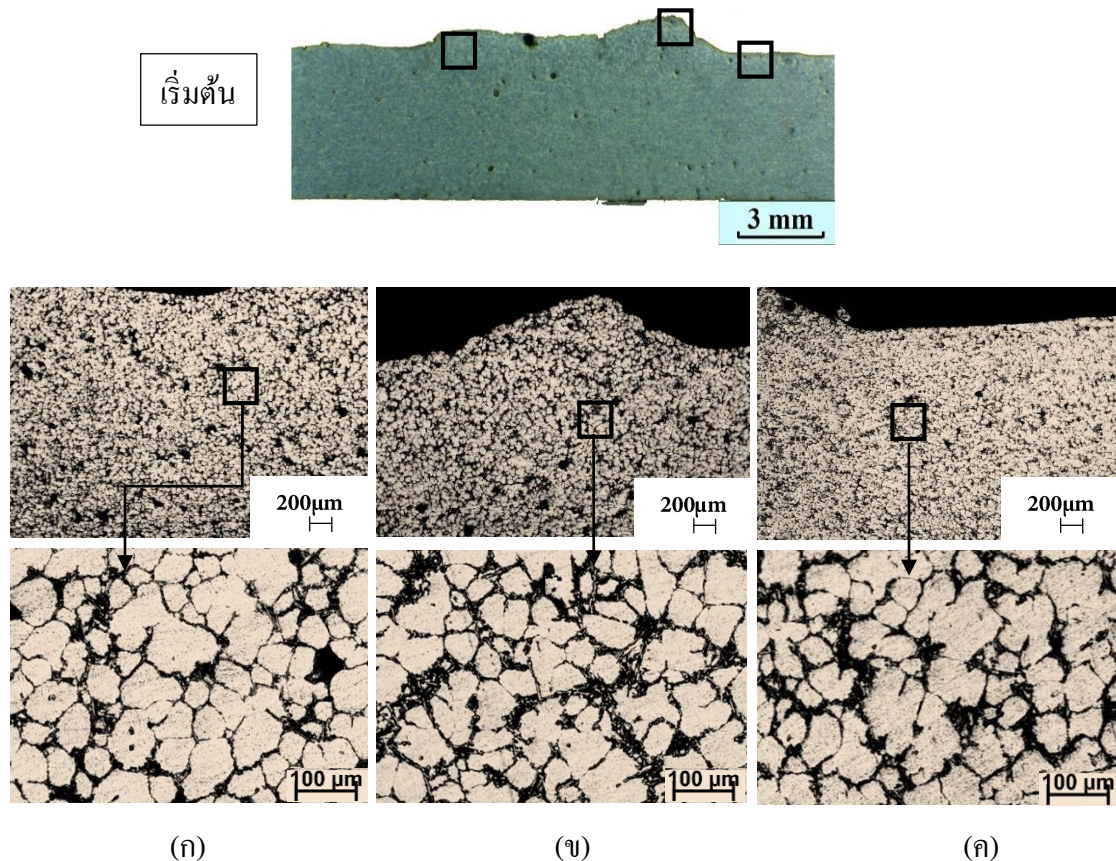


รูปที่ 4.3 โครงสร้างจุลภาคแนวเชื่อมของชิ้นงานที่ความเร็วรอบดอกสว่าน 1100 rpm (ก) ด้านด้านการเคลื่อนที่ (Retreating Side, RS) (ข) บริเวณแนวเชื่อม (Weld Metal Zone, WM) (ค) ด้านเสริมการเคลื่อนที่ (Advancing Side, AS)

จากรูปที่ 4.3 แสดงถึงลักษณะโครงสร้างทางจุลภาคของชิ้นงานที่ความเร็วรอบดอกสว่าน 1100 rpm ผลการวิเคราะห์พบว่า มีหลุม (Pit) ขนาดใหญ่เกิดขึ้นบริเวณแนวเชื่อมด้านบน (ในวงกลม) และยังพบอีกว่ามีรูพรุนจำนวนมาก โดยพบในบริเวณเนื้อเชื่อมมากกว่าบริเวณอื่น และยังสามารถมองเห็นการแยกชั้น (Interface) บริเวณเนื้อเชื่อมกับด้านด้านการเคลื่อนที่และบริเวณแนว

เชื่อมกับด้านเสริมการเคลื่อนที่อย่างชัดเจนโดยขนาดเกรน (α -Al) เฉลี่ยมีค่าเท่ากับ 52 65 และ 65 μm ตามลำดับ (บริเวณเนื้อเชื่อม ด้านด้านการเคลื่อนที่ และด้านเสริมการเคลื่อนที่) ซึ่งขนาดเกรนบริเวณเนื้อเชื่อมมีขนาดใกล้เคียงกับโลหะเดิม (49 μm)

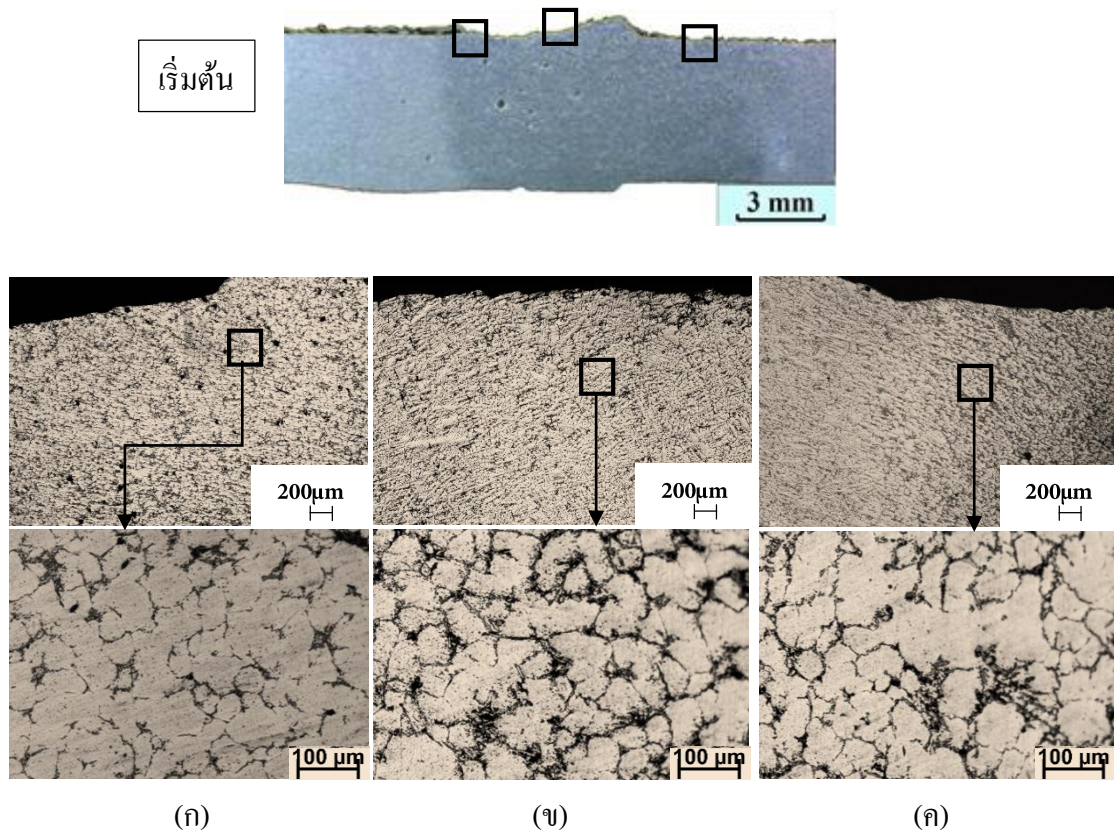
2) โครงสร้างจุลภาคแนวเชื่อมของชิ้นงานที่ความเร็วรอบดอกสว่าน 1750 rpm



รูปที่ 4.4 โครงสร้างจุลภาคแนวเชื่อมของชิ้นงานที่ความเร็วรอบดอกสว่าน 1750 rpm (ก) ด้านด้านการเคลื่อนที่ (Retreating Side, RS) (ข) บริเวณแนวเชื่อม (Weld Metal Zone, WM) (ค) ด้านเสริมการเคลื่อนที่ (Advancing Side, AS)

จากรูปที่ 4.4 แสดงถึงลักษณะโครงสร้างทางจุลภาคของชิ้นงานที่ความเร็วรอบดอกสว่าน 1750 rpm พบว่า ไม่มีหลุมในแนวเชื่อม พบรูพรุนในบริเวณเนื้อเชื่อมมากกว่าบริเวณอื่นๆ ไม่พบการแยกชั้นระหว่างชิ้นงาน โดยขนาดเกรนเฉลี่ยมีค่าเท่ากับ 56 63 60 μm ตามลำดับ (บริเวณเนื้อเชื่อม ด้านด้านการเคลื่อนที่ และด้านเสริมการเคลื่อนที่) ซึ่งทั้ง 3 บริเวณมีขนาดเกรนที่โตกว่าชิ้นงานที่ความเร็วรอบดอกสว่าน 1100 rpm

(3) โครงสร้างจุลภาคแนวเชื่อมของชิ้นงานที่ความเร็วรอบดอกสว่าน 2200 rpm



รูปที่ 4.5 แสดงโครงสร้างจุลภาคแนวเชื่อมของชิ้นงานที่ความเร็วรอบดอกสว่าน 2200 rpm (ก) ด้านด้านการเคลื่อนที่ (Retreating Side, RS) (ข) บริเวณแนวเชื่อม (Weld Metal Zone, WM) (ค) ด้านเสริมการเคลื่อนที่ (Advancing Side, AS)

จากรูปที่ 4.5 แสดงถึงลักษณะ โครงสร้างทางจุลภาคของชิ้นงานที่ความเร็วรอบดอกสว่าน 2200 rpm ผลการวิเคราะห์พบว่า ไม่มีหลุม มีรูพรุนบริเวณเนื้อเชื่อมมากที่สุดเช่นเดียวกับความเร็วรอบอื่น ไม่พบการแยกชั้นระหว่างชิ้นงาน โดยขนาดเกรนเฉลี่ยมีค่าเท่ากับ 65 68 67 μm ตามลำดับ (บริเวณเนื้อเชื่อม ด้านด้านการเคลื่อนที่ และด้านเสริมการเคลื่อนที่) ซึ่งถือได้ว่าเป็นความเร็วรอบดอกสว่านที่มากที่สุดและมีขนาดเกรนที่โตที่สุด

จากผลการตรวจสอบโครงสร้างมหภาคและโครงสร้างจุลภาคทั้ง 3 สภาวะพบว่า ความเร็วรอบการหมุนดอกสว่านมีผลต่อความเรียบและการเกิดหลุม (Pit) ที่แนวเชื่อม เนื่องจากความเร็วรอบที่น้อยเกินไป ทำให้อัตราการเฉือนที่ส่งผลต่อการไหลของโลหะในบ่อกึ่งแข็งเคลื่อนตัวเข้ามายังแนวเชื่อมได้ไม่ดีเท่ากับความเร็วรอบการหมุนดอกสว่านที่เร็วกว่า แต่หากความเร็วที่มาก

เกินไปก็ทำให้มีอัตราการเหือนที่มากเกินไป ส่งผลให้แรงเหือนที่กระทำต่อเกรนมีมากขึ้น ความหนืดน้อยลงเช่นกัน [6,21,33] ด้วยแรงเหือนที่มากขึ้นส่งผลให้เกรนมีขนาดที่ใหญ่ขึ้นเช่นกัน ซึ่งยังไม่สามารถสรุปได้ว่าชิ้นงานใดที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการเชื่อมในสถานะกึ่งแข็งของอะลูมิเนียมผสมหล่อกึ่งแข็ง จึงได้ทำการวิเคราะห์เปอร์เซ็นต์รูพรุน

4.1.4 เปอร์เซนต์รูพรุนในแนวเชื่อมชิ้นงานที่ความเร็วรอบดอกสว่าน 1100 1750 และ 2200

rpm หมุนตามเข็มนาฬิกา

ตารางที่ 4.1 ผลจากการคำนวณเปอร์เซนต์รูพรุนทุกๆ บริเวณ

สถานะ	เปอร์เซนต์รูพรุน(%)		
	ด้านด้านการเคลื่อนที่	บริเวณเนื้อเชื่อม	ด้านเสริมการเคลื่อนที่
1100rpm	5.6 ± 0.5	6.4 ± 0.5	5.4 ± 0.5
1750rpm	2.5 ± 0.5	3.0 ± 0.5	2.3 ± 0.5
2200rpm	4.7 ± 0.5	5.2 ± 0.5	4.8 ± 0.5

จากตารางที่ 4.1 เห็นได้ว่า ชิ้นงานที่ความเร็วรอบดอกสว่าน 1100 rpm มีเปอร์เซนต์รูพรุนมากที่สุด รองลงมาคือ ชิ้นงานของ 2200 rpm ทำให้ทราบได้ว่า หากรอบการหมุนของดอกสว่านที่ต่ำเกินไป อัตราแรงเหือนมีไม่มากพอที่จะทำให้ น้ำโลหะกึ่งแข็งไหลเข้าสู่แนวเชื่อมได้สะดวก ซึ่งส่งผลต่อการแทรกตัวของอากาศที่สามารถแทรกเข้าไปยังแนวเชื่อมได้ง่าย และเมื่อเพิ่มก็จะทำให้แรงเหือนเพิ่มความหนืดจะลดลงทำให้น้ำโลหะไหลเข้าแนวเชื่อมได้ดีขึ้น [21] แต่หากเพิ่มมากเกินไปก็จะทำให้น้ำโลหะมีความปั่นป่วนในการไหลเข้าแนวเชื่อมมาก เมื่อน้ำโลหะมีความปั่นป่วนมากทำให้อากาศสามารถแทรกตัวเข้าไปยังแนวเชื่อม ทำให้เกิดจุดบกพร่องได้ง่ายขึ้น และยังพบว่าในบริเวณเนื้อเชื่อมมีเปอร์เซนต์รูพรุนมากกว่าด้านอื่น สอดคล้องกับผลการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาค เนื่องจากในบริเวณเนื้อเชื่อมเป็นบริเวณที่โดนดอกสว่านกวาดประสานเกิดรอยแยกจึงทำให้เกิดรูพรุนได้ง่ายเช่นกัน [19]

4.1.5 สมบัติเชิงกลของแนวเชื่อมชิ้นงานที่ความเร็วรอบดอกสว่าน 1100 1750 และ 2200

rpm หมุนตามเข็มนาฬิกา

(1) ความแข็งแรงดึงแนวเชื่อม

ตารางที่ 4.2 แสดงผลการทดลองความแข็งแรงดึงของทั้ง 6 ชิ้นงาน (ทดสอบสถานะละ 2 ชิ้นงาน) โดยพบว่า ชิ้นงานที่มีค่าความแข็งแรงดึงมากที่สุดคือ ชิ้นงานที่ความเร็วรอบดอกสว่าน 1750 rpm คือ 111.24 MPa (67.90 % ของโลหะเดิม) ซึ่งสอดคล้องกับค่าของเปอร์เซ็นต์รุกรานที่พบในชิ้นงานที่ความเร็วรอบดอกสว่าน 1750 rpm น้อยที่สุด และยังพบอีกว่า รอยขาดทั้งหมดจะเกิดขึ้นในด้านด้านเคลื่อนที่ (Retreating side, RS) ทั้งหมด ซึ่งโดยปกติบริเวณที่ได้รับผลกระทบทางความร้อนจะมีความแข็งแรงน้อยกว่าบริเวณเนื้อเชื่อม [4] ทั้งนี้ด้านด้านการเคลื่อนที่ยังมีอุณหภูมิสูงกว่าด้านเสริมการเคลื่อนที่จึงทำให้ขนาดเกรนโตกว่า เมื่อมีขนาดเกรนโตจึงส่งผลต่อความแข็งแรงของแนวเชื่อมโดยตรงกล่าวคือ เกรนขนาดโตจะให้ค่าความแข็งแรงแนวเชื่อมลดลง [17,19] จากผลได้แสดงให้เห็นได้ว่า สิ่งบกพร่องมีบทบาทสำคัญต่อค่าความแข็งแรงดึงมาก ถ้าหากพบสิ่งบกพร่องหรือรุกรานมากจะทำให้ค่าความแข็งแรงดึงน้อยลง

(2) จุดครากของแนวเชื่อม

จุดครากของแนวเชื่อมเป็นค่าที่บอกถึงค่าความเค้นสูงสุดที่วัสดุสามารถรับได้ก่อนจะเสียรูปแบบถาวร โดยการวิจัยในครั้งนี้เป็นการใช้อะลูมิเนียม SSM 356 ซึ่งกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดจะไม่มีจุดครากในกราฟ โดยทั่วไปเพื่อความปลอดภัยในการนำไปใช้งานที่ 0.2 % Offset หรือค่าความเครียดอยู่ที่ 0.2 ซึ่งสามารถหาค่าได้ดังแสดงในตารางที่ 4.2 พบว่าชิ้นงานที่ความเร็วรอบดอกสว่าน 1750 rpm มีจุดครากของแนวเชื่อมมากที่สุด (77.50 MPa คิดเป็น 59.6 % ของโลหะเดิม) เนื่องจากพบสิ่งบกพร่องในแนวเชื่อมน้อยกว่าความเร็วรอบดอกสว่านอื่นๆ และสอดคล้องกับความแข็งแรงดึงที่ชิ้นงานที่ความเร็วรอบดอกสว่าน 1750 rpm มีค่าสูงสุด

(3) ระยะเวลายึดตัวของแนวเชื่อม

ระยะเวลายึดตัวของแนวเชื่อมเป็นค่าที่บ่งบอกถึงการให้ตัวหรืออ่อนตัวของวัสดุก่อนชิ้นงานจะขาดหรือเสียรูปแบบถาวร จากผลการทดลองพบว่า ชิ้นงาน 1750 rpm มีค่าระยะการยึดตัวของแนวเชื่อมมากที่สุด (2.58 %) ทำให้ทราบว่า หากเปอร์เซ็นต์รุกรานน้อยจะทำให้ค่าการยึดตัวของแนวเชื่อมมากขึ้น เนื่องจากมีปริมาณสิ่งบกพร่องและโพรงอากาศน้อย จึงเป็นเหตุผลให้ค่าการยึดตัวของชิ้นงาน 1750 rpm มีค่ามากกว่าความเร็วรอบดอกสว่านอื่น

ตารางที่ 4.2 ค่าความแข็งแรงดึงของแนวเชื่อมชิ้นงานในแต่ละความเร็วรอบดอกสว่าน

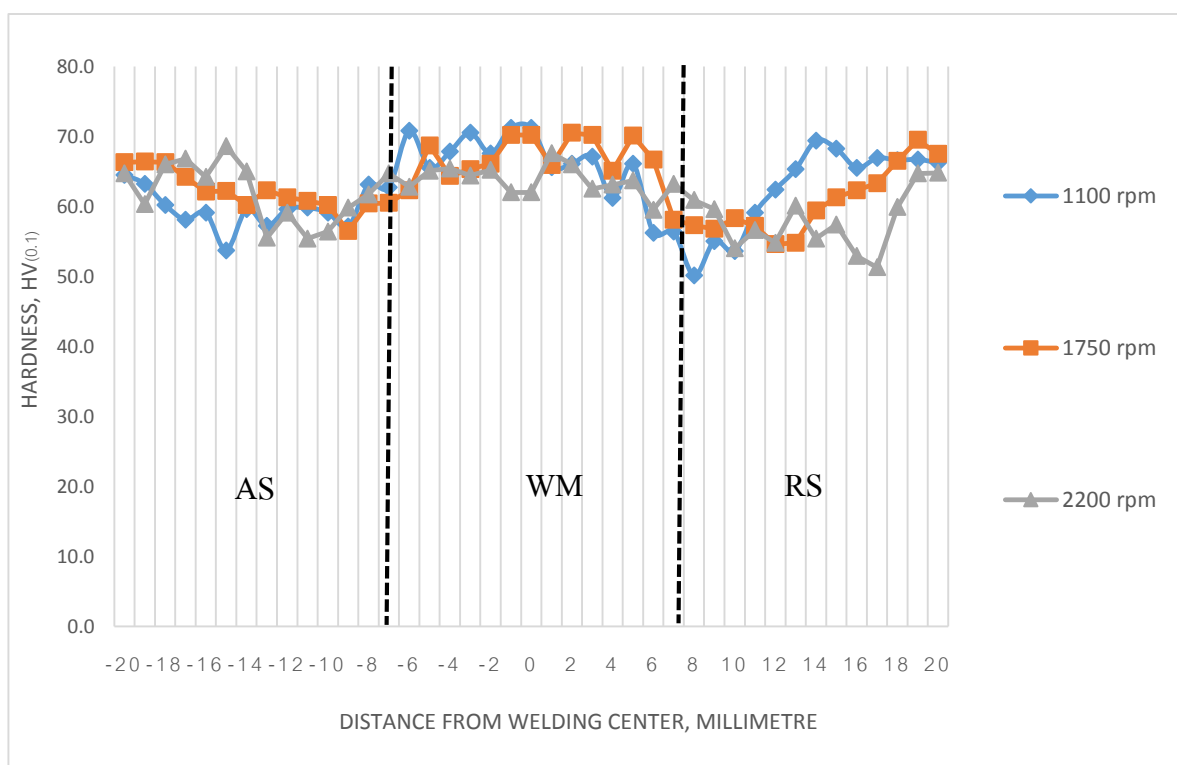
วัสดุ	ความเร็วรอบ ดอกสว่าน (rpm)	ค่าเฉลี่ยความ แข็งแรงดึง (MPa)	ค่าเฉลี่ยจุด ครากแนวเชื่อม (MPa)	ระยะยึดตัว ของแนวเชื่อม (%)	บริเวณที่ ชิ้นงานขาด
SSM 356	1100	83.6 (50.7 %)	64.4 (49.5 %)	1.6	ด้านด้าน การเคลื่อนที่
	1750	111.2 (67.9 %)	77.5 (59.6 %)	2.6	ด้านด้าน การเคลื่อนที่
	2200	98.6 (59.8 %)	56.1 (43.1 %)	1.7	ด้านด้าน การเคลื่อนที่

(4) ความแข็งของแนวเชื่อม

ค่าความแข็งจะทำการวัดโดยใช้แรงกด 100 g ระยะเวลากด 10 วินาที ระยะห่างแต่ละจุด 0.5 มิลลิเมตร กดทั้งหมด 40 ตำแหน่ง ตลอดทั้งชิ้นงาน ซึ่งจะทำให้การกดสภาวะละ 1 ชิ้นงาน โดยพบว่าค่าความแข็งในบริเวณเนื้อเชื่อม (Weld Metal Zone, WM) มีค่ามากที่สุดในทุกๆ สภาวะ เนื่องจากบริเวณเนื้อเชื่อมมีขนาดเกรนที่เล็ก ทำให้มีค่าความแข็งมาก เนื่องจากมีขอบเกรนจำนวนมาก ทำให้ดิสโลเคชันมีการเคลื่อนที่ได้ยากกว่าเกรนขนาดใหญ่ [34] โดยชิ้นงานที่ความเร็วรอบดอกสว่าน 1750 rpm มีค่าความแข็งเฉลี่ยมากที่สุด (63.2 HV_{0.1}) แต่โดยรวมแล้วพบว่าค่าเฉลี่ยความแข็งจะมีค่าต่างกันเพียงเล็กน้อยเท่านั้น ในส่วนของความแตกต่างของทั้ง 3 บริเวณพบว่า บริเวณแนวเชื่อมมีความแข็งเฉลี่ยสูงกว่าด้านด้านการเคลื่อนที่และด้านเสริมการเคลื่อนที่ ซึ่งเป็นอิทธิพลมาจากขนาดของเกรนที่โตกว่า สิ่งที่ทำให้ขนาดเกรนของทั้ง 2 บริเวณนี้มีขนาดโตกว่าบริเวณเนื้อเชื่อม เนื่องจากผลกระทบจากความร้อนที่มีอุณหภูมิสูงกว่าเส้นโซลิวัสของเฟส θ ของอะลูมิเนียม SSM 356 เกิดการตกตะกอนของเฟส θ เข้าสู่เนื้อโลหะเดิม จึงทำให้บริเวณนี้มีขนาดเกรนที่โตกว่าบริเวณที่ถูกกวาด เมื่อมีขนาดเกรนที่โตขึ้น ทำให้ค่าความแข็งของแนวเชื่อมมีค่าลดลง [4,36,37] นอกจากนี้ยังพบว่าด้านเสริมการเคลื่อนที่ (Advancing side, AS) มีค่าความแข็งเฉลี่ยมากกว่าด้านด้านความเคลื่อนที่ (Retreating side, RS) เล็กน้อย เพราะขนาดเกรนด้านเสริมการเคลื่อนที่มีขนาดเล็กกว่าด้านด้านความเคลื่อนที่ อันเกิดจากความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างด้านทั้ง 2 ข้าง โดยพบว่าด้านด้าน

การเคลื่อนที่มีอุณหภูมิสูงกว่าด้านเสริมการเคลื่อนที่ 50 °C [19] ส่งผลให้ขนาดเกรนด้านด้านการเคลื่อนที่โตกว่า ทำให้ค่าความแข็งลดลง แสดงดังรูปที่ 4.6

จากผลการวิจัยข้างต้นทำให้ทราบถึงสภาวะที่เหมาะสมที่สุดในการเชื่อมในสถานะกึ่งแข็งของอะลูมิเนียมผสมหล่อกึ่งแข็งภายใต้บรรยากาศปกติ โดยแนวต่อชนของวัสดุได้รับความร้อนจากขดลวดเหนี่ยวนำคือ การเชื่อมที่ความเร็วรอบดอกสว่าน 1750 rpm เนื่องจากมีสมบัติเชิงกลที่ดีกว่าความเร็วรอบดอกสว่านอื่น ทั้งค่าความแข็งแรงดึงและค่าความแข็ง ทำให้ทราบได้ว่าลักษณะโครงสร้างมหภาคและจุลภาคของชิ้นงาน 1750 rpm เหมาะสมที่สุด จากนั้นจึงนำตัวแปรทั้งหมดมาทำการทดลองต่อโดยเปลี่ยนตัวแปร ดังแสดงในตารางที่ 4.3 เป็นการเปลี่ยนทิศทางการหมุนของดอกสว่านจากตามเข็มนาฬิกาเป็นทวนเข็มนาฬิกาเพื่อหาอิทธิพลของดอกสว่านที่ส่งผลต่อแนวเชื่อม



รูปที่ 4.6 ค่าความแข็งชิ้นงานในแต่ละความเร็วรอบดอกสว่านทั้ง 3 บริเวณ 1. ด้านเสริมการเคลื่อนที่ (AS) 2. บริเวณเนื้อเชื่อม (WM) 3. ด้านด้านการเคลื่อนที่ (RS)

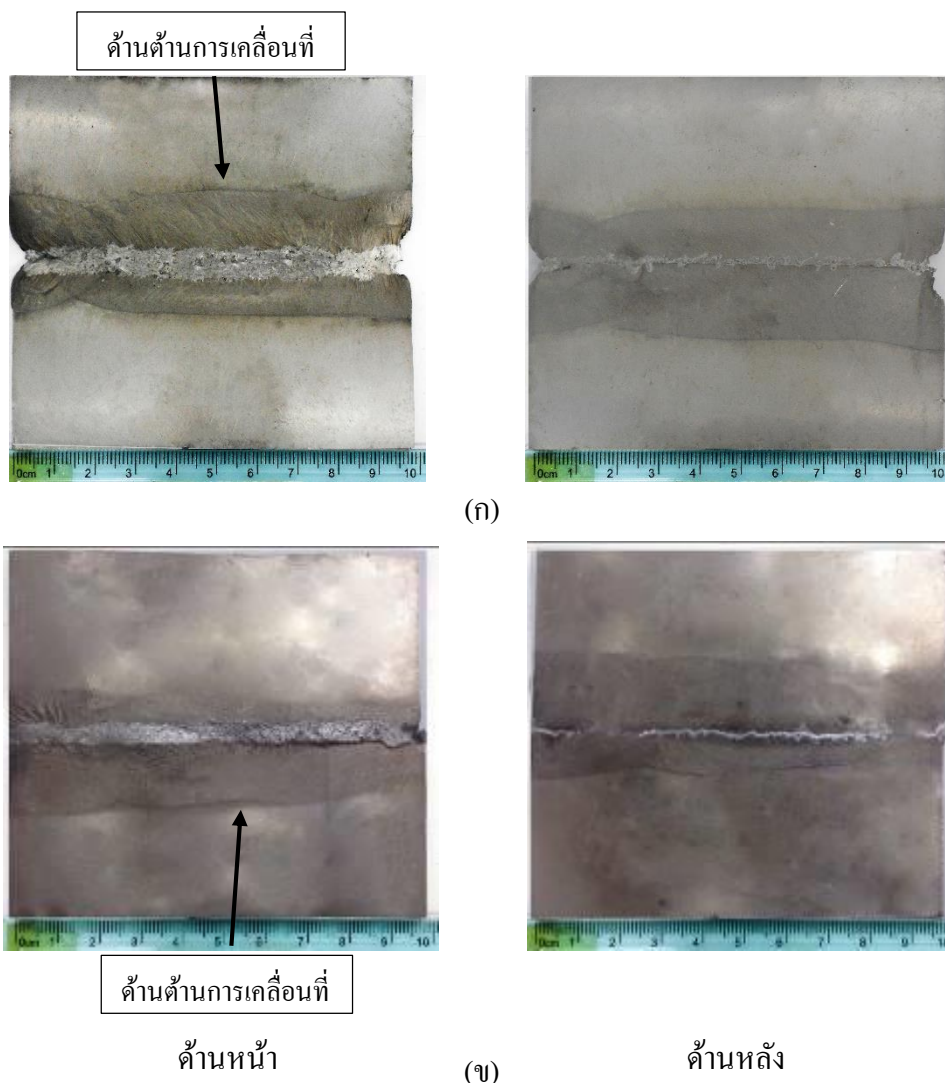
ตารางที่ 4.3 ตัวแปรในการทำวิจัยหลังได้ความเร็วรอบดอกสว่านที่เหมาะสม

วัสดุ	ความเร็วรอบดอกสว่าน (rpm)	ความเร็วในการเดินแนวเชื่อม (mm/min)	อุณหภูมิในขณะการเชื่อม (°C)	บรรยากาศปกคลุมแนวเชื่อม	ทิศการหมุนของดอกสว่าน
SSM 356	1750	75	580 - 590	ภายใต้บรรยากาศปกติ	ทวนเข็มนาฬิกา

4.1.6 ลักษณะทางกายภาพของแนวเชื่อมชิ้นงานที่ความเร็วรอบดอกสว่าน 1750 rpm ทวนเข็มนาฬิกา

การทำวิจัยของชิ้นงานที่ความเร็วรอบดอกสว่าน 1750 rpm เมื่อดอกสว่านหมุนทวนเข็มนาฬิกา ดำเนินการเชื่อมในสถานะกึ่งแข็งของอะลูมิเนียมผสมหล่อกึ่งแข็งภายใต้บรรยากาศปกติ โดยที่แนวต่อชนของวัสดุได้รับความร้อนจากขดลวดเหนี่ยวนำเพื่อสร้างบ่อหลอมเหลวกึ่งแข็งมีอุณหภูมิ 580-590 °C ซึ่งใช้สว่านไฟฟ้าและดอกสว่าน 4 mm ทิศทางหมุนทวนเข็มนาฬิกาเป็นตัวกวนที่บ่อหลอมกึ่งแข็งให้ชิ้นงานประสานเป็นเนื้อเดียวกัน โดยกำหนดให้รอบของสว่านไฟฟ้าเท่ากับ 1750 rpm (จากผลการวิเคราะห์ในงานวิจัยข้างต้น) ซึ่งมีผลโครงสร้างทางกายภาพดังแสดงในรูปที่ 4.7

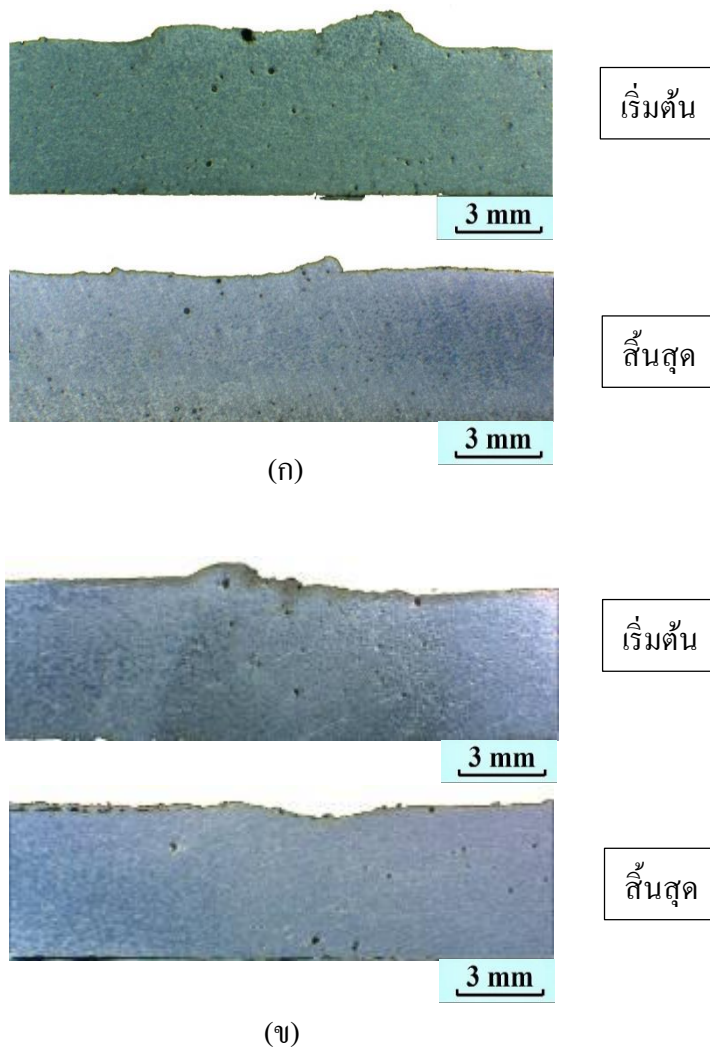
ลักษณะทางกายภาพชิ้นงานหมุนทวนเข็มนาฬิกา เมื่อเปรียบเทียบกับชิ้นงานหมุนตามเข็มนาฬิกาที่ความเร็วรอบสว่าน 1750 rpm พบว่า แนวเชื่อมมีลักษณะใกล้เคียงกันทั้งความราบเรียบของแนวเชื่อม ความสูงของแนวเชื่อมและความกว้างของบริเวณที่ได้รับผลกระทบทางความร้อน (Heat Affected Zone, HAZ) เพียงแค่สลับด้านด้านการเคลื่อนที่และด้านเสริมการเคลื่อนที่ เห็นได้ว่าความกว้างของบริเวณที่ได้รับผลกระทบทางความร้อนด้านด้านการเคลื่อนที่จะกว้างกว่าด้านเสริมการเคลื่อนที่ ซึ่งเกิดข้อสันนิษฐานว่า ทิศทางการหมุนของดอกสว่านไม่มีผลต่อลักษณะแนวเชื่อมโดยตรง เพื่อให้เป็นที่แน่ชัดจึงได้วิเคราะห์ผลโครงสร้างจุลภาคและสมบัติเชิงกลของชิ้นงาน



รูปที่ 4.7 ลักษณะทางกายภาพด้านหน้าและด้านหลังของชิ้นงานที่ความเร็วรอบดอกสว่าน 1750 rpm (ก) หมุนตามเข็มนาฬิกา (ข) หมุนทวนเข็มนาฬิกา

4.1.7 โครงสร้างมหภาคของแนวเชื่อมชิ้นงานที่ความเร็วรอบดอกสว่าน 1750 rpm ทวนเข็มนาฬิกา

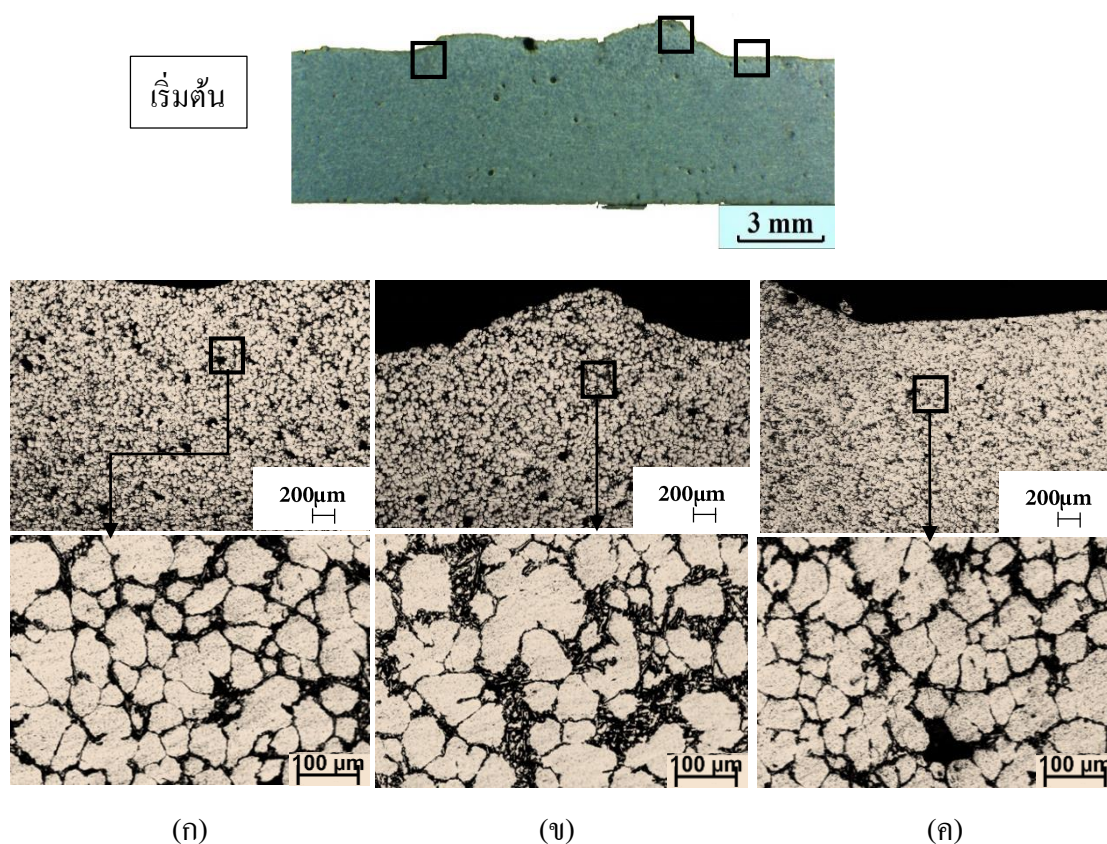
โครงสร้างมหภาคของชิ้นงานที่ความเร็วหมุนทวนเข็มนาฬิกาแสดงดังรูปที่ 4.8 พบว่า ความสูงของแนวเชื่อมมีความใกล้เคียงกัน โดยสภาวะหมุนตามเข็มนาฬิกามีความสูงของแนวเชื่อมที่มากที่สุด (เท่ากับ 1 mm) และสภาวะหมุนทวนเข็มนาฬิกามีความสูงของแนวเชื่อมที่มากที่สุด (เท่ากับ 0.5 mm) ทำให้ข้อสันนิษฐานที่ว่า ทิศทางการหมุนของดอกสว่านไม่ส่งผลกระทบต่อแนวเชื่อมมีความชัดเจนขึ้น



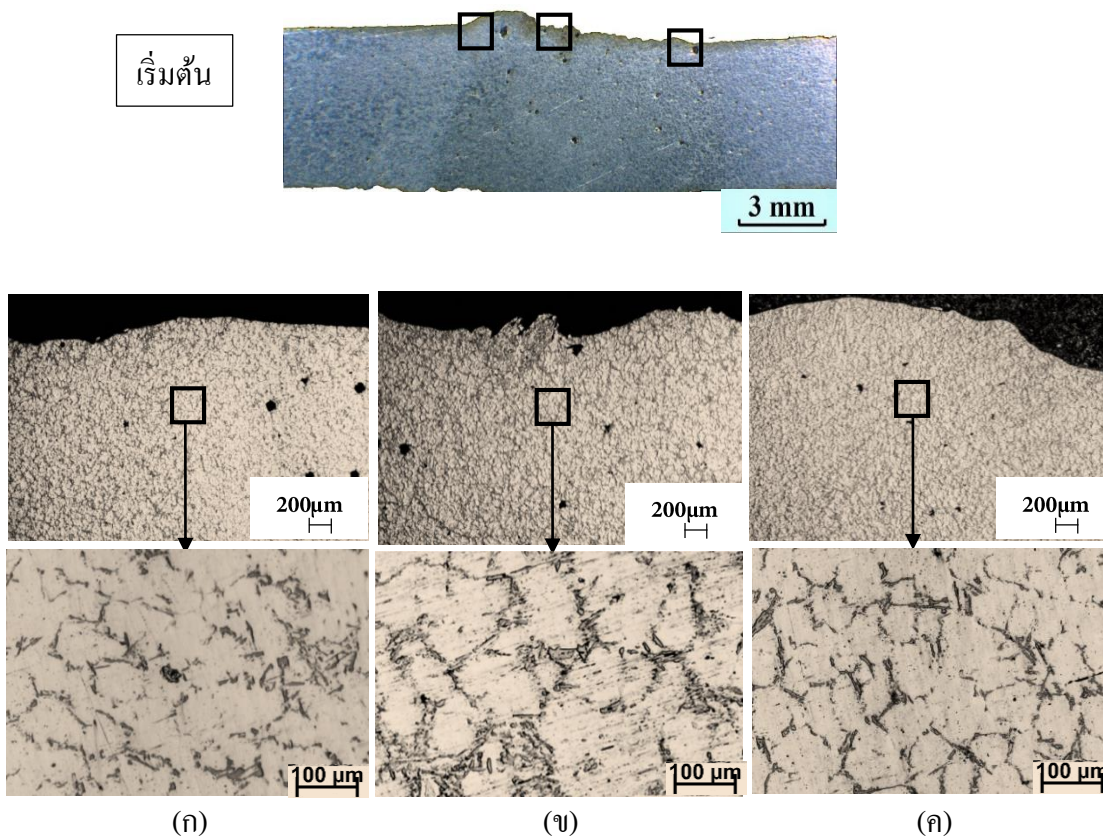
รูปที่ 4.8 โครงสร้างมหภาคของชิ้นงานความเร็วรอบส่วน 1750 rpm ชิ้นงานเริ่มต้นการเชื่อม (รูปบน) ชิ้นงานสิ้นสุดการเชื่อม (ตอนปลาย) (ก) ดอกสว่านหมุนตามเข็มนาฬิกา (ข) ดอกสว่านหมุนทวนเข็มนาฬิกา

4.1.8 โครงสร้างจุลภาคของแนวเชื่อมชิ้นงานที่ความเร็วรอบดอกสว่าน 1750 rpm ทวนเข็มนาฬิกา

โครงสร้างจุลภาคนำเอาผลสถานะของดอกสว่านหมุนตามเข็มนาฬิกาและหมุนทวนเข็มนาฬิกา มาเปรียบเทียบกับความแตกต่างลักษณะทางโครงสร้างจุลภาคของทั้ง 3 บริเวณ ได้แก่ 1. บริเวณเนื้อเชื่อม (Weld zone, WM) 2. ด้านเสริมการเคลื่อนที่ (Advancing side, AS) 3. ด้านต้านการเคลื่อนที่ (Retreating side, RS) เพื่อนำไปวิเคราะห์ประกอบกับผลการทดสอบสมบัติเชิงกลต่อไป



รูปที่ 4.9 โครงสร้างทางจุลภาคของชิ้นงานดอกสว่านหมุนตามเข็มนาฬิกา (ก) ด้านต้านการเคลื่อนที่ (Retreating Side, RS) (ข) บริเวณแนวเชื่อม (Weld Metal Zone, WM) (ค) ด้านเสริมการเคลื่อนที่ (Advancing Side, AS)



รูปที่ 4.10 โครงสร้างทางจุลภาคของชิ้นงานดอกสว่านหมุนทวนเข็มนาฬิกา (ก) บริเวณด้านการเคลื่อนที่ (Retreating Side, RS) (ข) บริเวณแนวเชื่อม (Weld Metal Zone, WM) (ค) บริเวณเสริมการเคลื่อนที่ (Advancing Side, AS)

จากรูปโครงสร้างจุลภาคของทั้ง 2 ชิ้นงานพบว่า ชิ้นงานหมุนทวนเข็มนาฬิกาสังเกตเห็นรูพรุนได้ชัดเจนกว่าชิ้นงานหมุนตามเข็มนาฬิกา และพบรูพรุนบริเวณเนื้อเชื่อมได้ชัดเจนกว่าบริเวณอื่น โดยที่ขนาดเกรนของชิ้นงานหมุนตามเข็มนาฬิกาเท่ากับ 56 63 60 μm ตามลำดับ (บริเวณเนื้อเชื่อม ด้านด้านการเคลื่อนที่ และด้านเสริมการเคลื่อนที่) และขนาดเกรนของชิ้นงานหมุนทวนเข็มนาฬิกาเท่ากับ 63 65 66 μm ตามลำดับ (บริเวณเนื้อเชื่อม ด้านด้านการเคลื่อนที่ และด้านเสริมการเคลื่อนที่) ซึ่งชิ้นงานเชื่อมมีด้านด้านการเคลื่อนที่และด้านเสริมการเคลื่อนที่สลับด้านกัน โดยจากการหาขนาดเกรนพบว่า ขนาดเกรนของชิ้นงานหมุนทวนเข็มนาฬิกามีขนาดโตกว่าเพียงเล็กน้อย เนื่องด้วยการเปลี่ยนทิศทางการหมุนของดอกสว่านแต่แรงเฉือนที่ส่งผลต่อขนาดเกรนนั้นมีค่าใกล้เคียงกันซึ่งเกิดจากการใช้ความเร็วดอกสว่านที่ความเร็วเดียวกัน (1750 rpm)

4.1.9 เพอร์เซ็นต์รูพรุนของแนวเชื่อมชิ้นงานที่ความเร็วรอบดอกสว่าน 1750 rpm ทวนเข็มนาฬิกา

เมื่อนำผลการคำนวณเปอร์เซ็นต์รูพรุนของทั้ง 2 สภาวะมาเปรียบเทียบ จากตารางที่ 4.4 แสดงจำนวนรูพรุนพบว่า ทั้ง 2 สภาวะมีจำนวนรูพรุนที่ใกล้เคียงกัน ซึ่งเป็นการแสดงให้เห็นว่า ทิศทางการหมุนของดอกสว่าน ไม่มีผลกระทบต่อ โครงสร้างจุลภาคและเปอร์เซ็นต์รูพรุนในแนวเชื่อม ตารางที่ 4.4 เพอร์เซ็นต์ของรูพรุนชิ้นงานหมุนตามเข็มนาฬิกาและหมุนทวนเข็มนาฬิกา

วัสดุ	ความเร็วรอบดอกสว่าน (rpm)	ทิศการหมุนดอกสว่าน	เปอร์เซ็นต์รูพรุน(%)		
			ด้านด้านการเคลื่อนที่	บริเวณเนื้อเชื่อม	ด้านเสริมการเคลื่อนที่
SSM 356	1750	ตามเข็มนาฬิกา	2.5 ± 0.5	3.0	2.3
		ทวนเข็มนาฬิกา	2.7 ± 0.5	3.1	2.5

4.1.10 สมบัติเชิงกลของแนวเชื่อมชิ้นงานที่ความเร็วรอบดอกสว่าน 1750 rpm ทวนเข็มนาฬิกา

(1) ความแข็งแรงดึงแนวเชื่อม

จากผลการทดสอบการดึงชิ้นงานทั้ง 2 สภาวะพบว่า ชิ้นงานหมุนตามเข็มนาฬิกา (111.2 MPa คิดเป็น 67.8 % ของโลหะเดิม) มีค่าความแข็งแรงดึงแนวเชื่อมเฉลี่ยที่สูงกว่าชิ้นงานหมุนทวนเข็มนาฬิกา (108.9 MPa คิดเป็น 66.4 % ของโลหะเดิม) เพียงเล็กน้อยและชิ้นงานทดสอบขาดด้านด้านเคลื่อนที่ทั้งหมด ซึ่งสอดคล้องกับผล โครงสร้างจุลภาคและจำนวนรูพรุนในแนวเชื่อมที่มีค่าใกล้เคียงกันมากจึงส่งผลให้ค่าความแข็งแรงดึงแนวเชื่อมมีค่าใกล้เคียงกัน ด้วยเหตุนี้จึงสามารถวิเคราะห์ได้ว่า ทิศทางการหมุนของดอกสว่านมีผลต่อค่าความแข็งแรงของแนวเชื่อมเพียงเล็กน้อย ทั้งนี้ด้านด้านการเคลื่อนที่ยังมีอุณหภูมิสูงกว่าด้านเสริมการเคลื่อนที่จึงทำให้ขนาดเกรนโตกว่า เมื่อมีขนาดเกรนโตจึงส่งผลต่อความแข็งแรงของแนวเชื่อมโดยตรง กล่าวคือ เกรนขนาดโตจะให้ความแข็งแรงแนวเชื่อมลดลง [17,19] จากผลแสดงให้เห็นว่า สิ่งบกพร่องมีบทบาทสำคัญต่อค่าความแข็งแรงดึงมาก หากพบสิ่งบกพร่องหรือรูพรุนมากจะทำให้ค่าความแข็งแรงดึงน้อยลง

(2) จุดครากของแนวเชื่อม

จุดครากของแนวเชื่อมพบว่า สภาวะหมุนตามเข็มนาฬิกา (77.5 MPa คิดเป็น 59.2 % ของโลหะเดิม) มีจุดครากที่สูงกว่าสภาวะหมุนทวนเข็มนาฬิกา (77.3 MPa คิดเป็น 59 % ของโลหะเดิม) เพียงเล็กน้อย ซึ่งสอดคล้องกับผลค่าความแข็งแรงดึงของแนวเชื่อมที่มีผลใกล้เคียงกัน เห็นได้ชัดเจนว่า การเปลี่ยนทิศทางการหมุนของดอกสว่านไม่ส่งผลกระทบต่อสมบัติเชิงกลของแนวเชื่อม

(3) ระยะเวลาของแนวเชื่อม

ระยะเวลาของแนวเชื่อมเป็นการคำนวณระยะเวลาความยาวของชิ้นงานหลังจากทดสอบการดึงแล้ว จากผลการคำนวณพบว่า ระยะเวลาของแนวเชื่อมของทั้ง 2 สภาวะมีค่าที่ใกล้เคียงกันสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ความแข็งแรงดึงและจุดครากของแนวเชื่อมที่มีค่าใกล้เคียงเช่นเดียวกัน

ตารางที่ 4.5 ค่าความแข็งแรงดึงของชิ้นงานเชื่อมหมุนตามเข็มนาฬิกาและหมุนทวนเข็มนาฬิกา

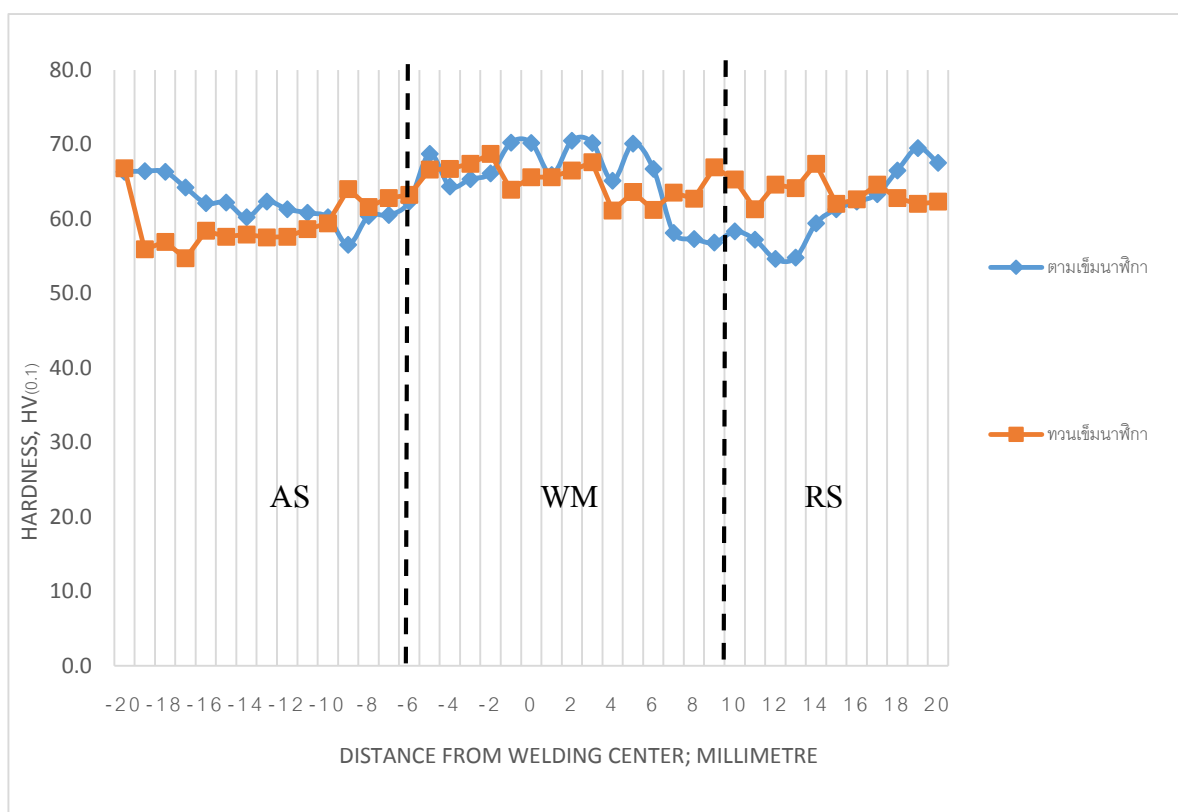
วัสดุ	ความเร็วรอบดอกสว่าน (rpm)	ทิศทางการหมุนดอกสว่าน	ค่าเฉลี่ยความแข็งแรงดึง (MPa)	ค่าเฉลี่ยจุดครากแนวเชื่อม (MPa)	ระยะยัดตัวของแนวเชื่อม (%)	บริเวณที่ชิ้นงานขาด
SSM 356	1750	ตามเข็มนาฬิกา	111.2 (67.9 %)	77.5 (59.2 %)	2.6	ด้านต้านการเคลื่อนที่
		ทวนเข็มนาฬิกา	109.8 (66.4 %)	77.3 (59 %)	2.5	ด้านต้านการเคลื่อนที่

(4) ความแข็งของแนวเชื่อม

พบว่าค่าความแข็งในบริเวณแนวเชื่อม (Weld Metal Zone, WM) มีค่ามากที่สุดเนื่องจากในส่วนของผลกระทบทางความร้อน (Advancing Side, AS, Retreating Side, RS) ได้รับอุณหภูมิที่สูงกว่าเส้นโซลิวัสของเฟส θ ของอะลูมิเนียม SSM 356 เกิดการตกตะกอนของเฟส θ เข้าสู่เนื้อโลหะเดิมจึงทำให้บริเวณนี้มีขนาดเกรนที่โตกว่าบริเวณที่ถูกควน เมื่อมีขนาดเกรนที่โตขึ้น สมบัติเชิงกลของแนวเชื่อมก็จะมีค่าลดลง [4,36,37] สภาวะหมุนตามเข็มนาฬิกามีค่าเฉลี่ยความแข็งแรงของแนวเชื่อม (63.2 HV_{0.1}) มากกว่าสภาวะหมุนทวนเข็มนาฬิกา (62.7 HV_{0.1}) เพียงเล็กน้อย ซึ่งสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ที่ผ่านมามีทั้งหมดของการเชื่อมด้วยการเปลี่ยนทิศทางการหมุนของดอกสว่าน

จากผลการทดลองที่ 1 สรุปได้ว่า ตัวแปรการเชื่อมอะลูมิเนียมหล่อผสมเกรด SSM 356 ในสถานะกึ่งแข็งที่ให้สมบัติของแนวเชื่อมดีที่สุดคือ การเชื่อมโดยใช้ความเร็วรอบดอกสว่านที่ 1750 rpm ทิศดอกสว่านหมุนตามเข็มนาฬิกา ความเร็วเดินแนวเชื่อมที่ 75 mm/min รักษาอุณหภูมิแนวเชื่อมที่ 580 - 590 °C ตลอดการเชื่อม นอกจากนี้ยังพบว่า ทิศทางการหมุนของดอกสว่านไม่ส่งผลกระทบต่อสมบัติของแนวเชื่อม จึงนำตัวแปรที่กล่าวมาข้างต้นมาทำการทดลองต่อในการทดลองที่

2



รูปที่ 4.11 ค่าความแข็งของแนวเชื่อมโดยสภาวะหมุนตามเข็มนาฬิกาและสภาวะหมุนทวนเข็มนาฬิกา

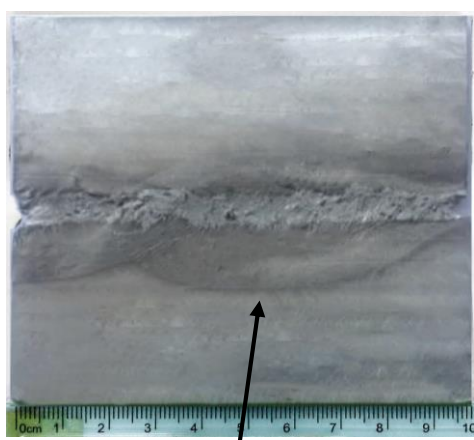
4.2 การทดลองที่ 2 การเชื่อมภายใต้แก๊สปกคลุม

การเชื่อมภายใต้แก๊สปกคลุมเป็นการนำชิ้นงานอะลูมิเนียม SSM 356 ที่ไม่ผ่านกระบวนการทางความร้อน (SSM 356) จำนวน 3 ชิ้น และชิ้นงานอะลูมิเนียมที่ผ่านกระบวนการทางความร้อน (SSM 356-T6) จำนวน 3 ชิ้น รวมทั้งหมด 6 ชิ้น นำเอาตัวแปรที่ได้จากการทดลองที่ 1 ที่มีสมบัติเหมาะสมที่สุดมาใช้ในการทดลองที่ 2 คือ ความเร็วรอบดอกสว่านที่ 1750 rpm โดยที่ดอกสว่านหมุนตามเข็มนาฬิกา ความเร็วเดินแนวเชื่อมที่ 75 mm/min เชื่อมภายใต้แก๊สใน โตรเจนที่อัตราการ

ไหลเท่ากับ 5 L/min ซึ่งจะปล่อยก่อนการเดินขึ้นงานเป็นเวลา 1 นาที โดยอุณหภูมิแก๊สเท่ากับ 300 °C นำชิ้นงานต่อชนและให้ความร้อนด้วยขดลวดเหนี่ยวนำ ควบคุมอุณหภูมิให้อยู่ระหว่าง 580 - 590 °C ตลอดการเชื่อม ทำการวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพ โครงสร้างมหภาค โครงสร้างจุลภาค และสมบัติเชิงกล โดยมีผลดังต่อไปนี้

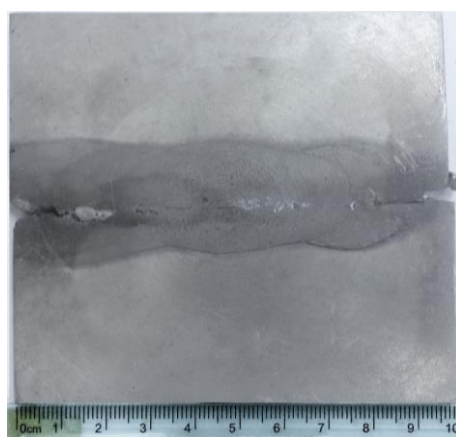
4.2.1 ลักษณะทางกายภาพของชิ้นงาน SSM 356 และ SSM 356-T6

การวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพพบว่า แนวเชื่อมชิ้นงาน SSM 356-T6 มีความสูงกว่าแนวเชื่อมของ SSM 356 โดยสังเกตได้ชัดเจนที่สุดในช่วงสิ้นสุดของชิ้นงาน SSM 356-T6 เนื่องจากในโครงสร้างของชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการทางความร้อนมีเฟสยูเทคติก (Eutectic Phase) น้อยกว่าชิ้นงานที่ไม่ผ่านกระบวนการทางความร้อน ซึ่งเฟสยูเทคติกมีอุณหภูมิหลอมเหลวต่ำกว่าเฟสอัลฟา (α -Al Phase) [24] เฟสยูเทคติกเกิดการหลอมเหลวก่อน ทำให้ในระหว่างเชื่อมเฟสอัลฟาที่ยังไม่เกิดการหลอมเท่าที่ควร จึงมีความหนืดมากกว่า เกิดการบีบอัดตัวของเนื้อโลหะ แนวเชื่อมของชิ้นงาน SSM 356-T6 จึงมีความสูงมากกว่าแนวเชื่อมของชิ้นงาน SSM 356



บริเวณที่ได้รับผลกระทบทางความร้อน

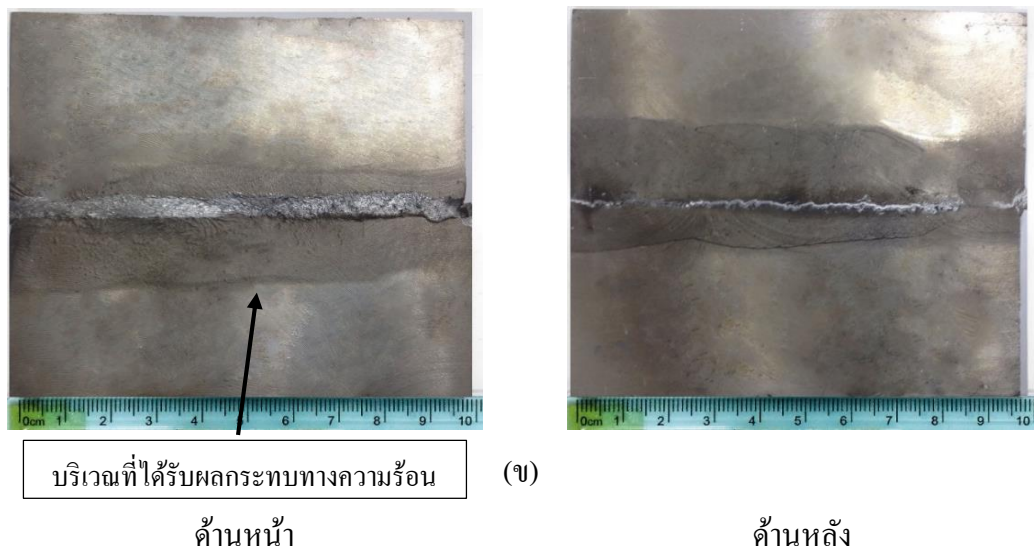
ด้านหน้า



(ก)

ด้านหลัง

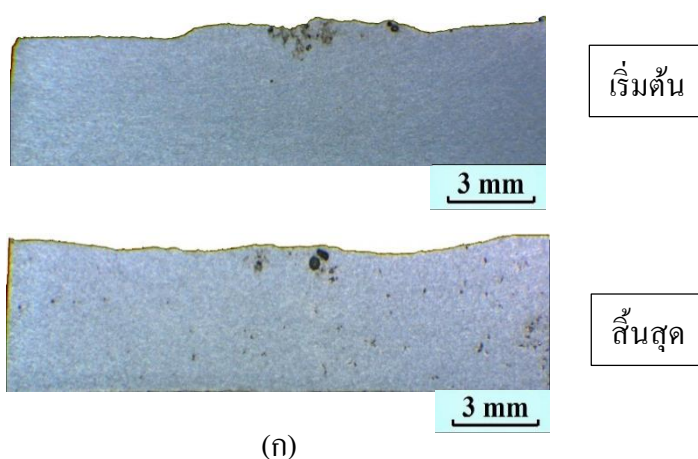
รูปที่ 4.12 ลักษณะทางกายภาพของชิ้นงานด้านหน้าและด้านหลัง (ก) SSM 356



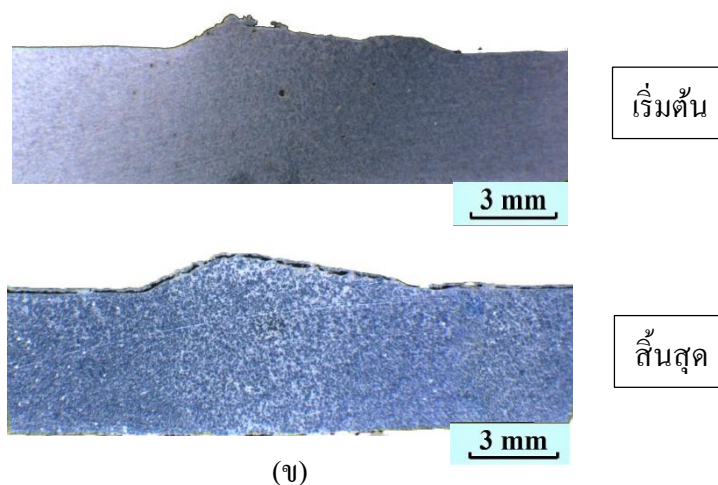
รูปที่ 4.12 ลักษณะทางกายภาพของชิ้นงานด้านหน้าและด้านหลัง (ข) SSM 356-T6

4.2.2 โครงสร้างมหภาคของชิ้นงาน SSM 356 และ SSM 356-T6

โครงสร้างมหภาคแสดงให้เห็นถึงรูพรุนที่พบบริเวณผิวบนของชิ้นงานทั้ง 2 ชิ้นงานเชื่อม (SSM 356 และ SSM 356-T6) ซึ่งเกิดจากแก๊สในโตรเจนปกคลุมแนวเชื่อม เพื่อป้องกันอากาศแทรกเข้าไปสู่แนวเชื่อม ทำให้อากาศสัมผัสได้เพียงผิวบนเท่านั้น ในส่วนความสูงแนวเชื่อมพบว่า ชิ้นงานเชื่อม SSM 356-T6 (ความสูงแนวเชื่อมเท่ากับ 0.5 mm) มีความสูงแนวเชื่อมมากกว่าชิ้นงานเชื่อม SSM 356 (ความสูงแนวเชื่อมเท่ากับ 0.2 mm) ซึ่งสอดคล้องกับการวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพ



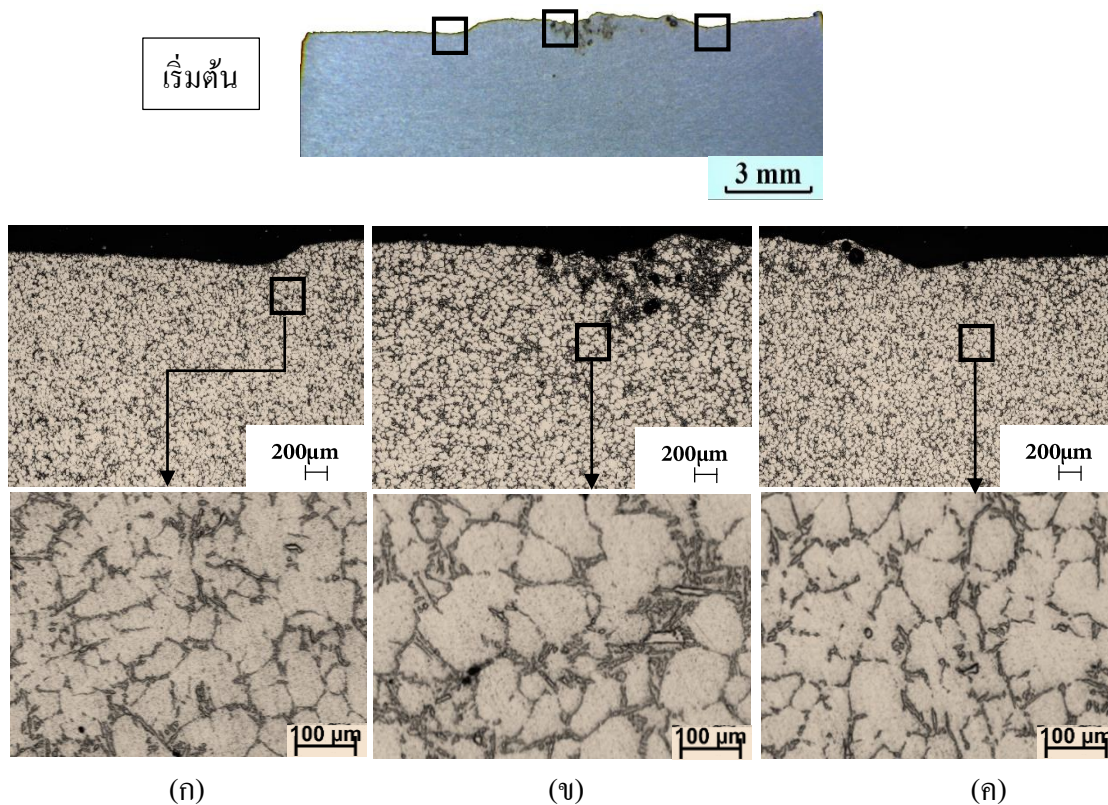
รูปที่ 4.13 โครงสร้างมหภาคของชิ้นงาน (ก) SSM 356



รูปที่ 4.13 โครงสร้างมหภาคของชิ้นงาน (ข) SSM 356-T6

4.2.3 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงาน SSM 356 และ SSM 356-T6

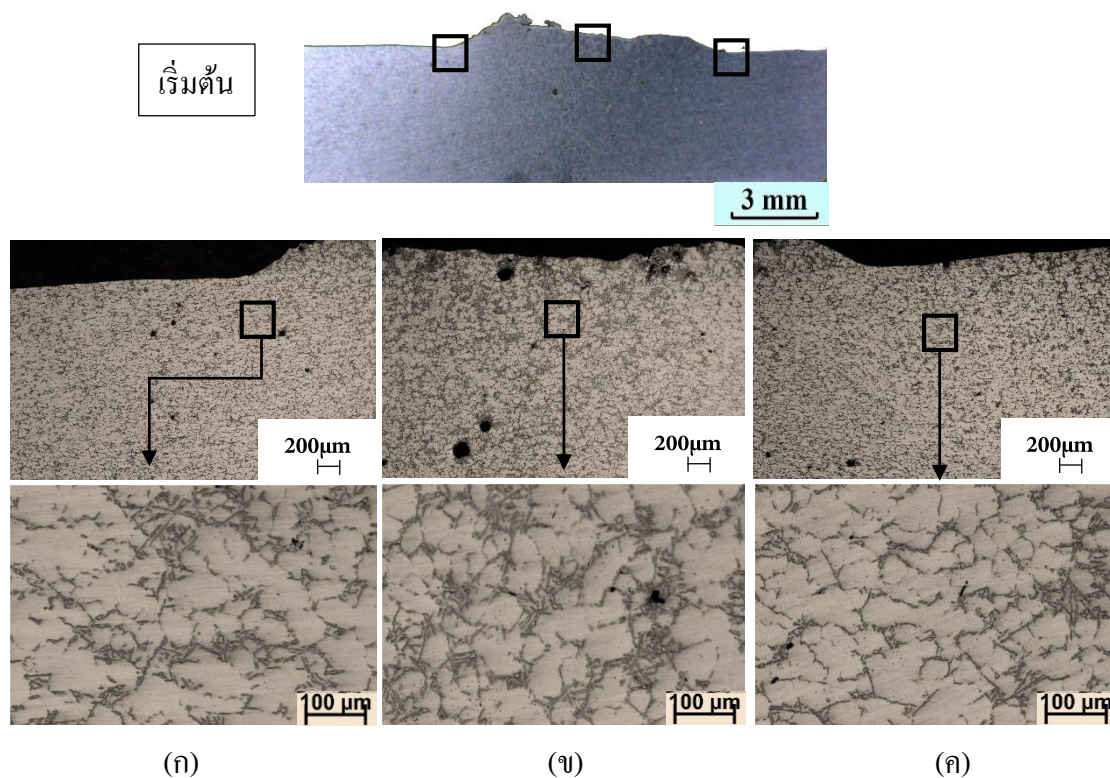
การวิเคราะห์พบว่า ชิ้นงานเชื่อม SSM 356 มีรูพรุนมากในบริเวณผิวบนแนวเชื่อม ในส่วนชิ้นงาน SSM 356-T6 กลับพบรูพรุนในเนื้อเชื่อมด้วย เกิดจากการหลอมที่ไม่สมบูรณ์ของชิ้นงาน SSM 356-T6 ที่มีอนุภาคอัลฟามากกว่า ทำให้จุดหลอมเหลวของชิ้นงาน SSM 356-T6 สูงกว่าชิ้นงาน SSM 356 [24] ในขณะที่เชื่อมในอุณหภูมิเดียวกันและตัวแปรเดียวกัน ทำให้การหลอมเหลวของชิ้นงาน SSM 356-T6 ไม่สมบูรณ์กล่าวคือ ชิ้นงาน SSM 356-T6 ยังไม่เข้าสู่สภาวะกึ่งแข็งและมีค่าสัดส่วนของแข็งที่ไม่เหมาะสม ส่งผลให้รูพรุนเกิดขึ้นในบริเวณเนื้อเชื่อมได้ง่ายกว่าชิ้นงาน SSM 356 ทำการหาขนาดเกรนของทั้ง 2 ชิ้นงาน โดยชิ้นงาน SSM 356 มีขนาดเกรนเท่ากับ 60 62 61 μm ตามลำดับ (บริเวณเนื้อเชื่อม ด้านด้านการเคลื่อนที่ และด้านเสริมการเคลื่อนที่) และชิ้นงาน SSM 356-T6 มีขนาดเกรนเท่ากับ 70 70 72 μm ตามลำดับ (บริเวณเนื้อเชื่อม ด้านด้านการเคลื่อนที่ และด้านเสริมการเคลื่อนที่)



รูปที่ 4.14 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานเชื่อม SSM 356 (ก) ด้านเสริมการเคลื่อนที่ (Advancing Side, AS) (ข) บริเวณเนื้อเชื่อม (Weld Metal Zone, WZ) (ค) ด้านด้านการเคลื่อนที่ (Retreating Side, RS)

4.2.4 เปรียบเทียบรูพรุนของชิ้นงานเชื่อม SSM 356 และ SSM 356-T6

ผลการวิเคราะห์แสดงดังตารางที่ 4.6 พบว่าชิ้นงาน SSM 356 มีจำนวนรูพรุนน้อยกว่าชิ้นงาน SSM 356-T6 สอดคล้องกับโครงสร้างจุลภาคที่พบรูพรุนในชิ้นงาน SSM 356-T6 มากในบริเวณเนื้อเชื่อม จึงเกิดข้อสันนิษฐานว่าตัวแปรที่ใช้สำหรับการเชื่อมชิ้นงานที่ไม่ผ่านกระบวนการทางความร้อน (SSM 356) ไม่เหมาะสมที่จะนำมาเชื่อมชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการทางความร้อน (SSM 356-T6) ซึ่งข้อสันนิษฐานนี้จะสามารถสรุปได้ชัดเจนก็ต่อเมื่อทำการวิเคราะห์สมบัติเชิงกลของแนวเชื่อมต่อไป



รูปที่ 4.15 โครงสร้างทางจุลภาคของชิ้นงานหมุนตามเข็มนาฬิกา (ก) ด้านด้านการเคลื่อนที่ (Retreating Side, RS) (ข) บริเวณแนวเชื่อม (Weld Metal Zone, WM) (ค) ด้านเสริมการเคลื่อนที่ (Advancing Side, AS)

ตารางที่ 4.6 เปอร์เซนต์รูพรุนของชิ้นงาน SSM 356 และ SSM 356-T6

วัสดุ	ความเร็วรอบ ดอกสว่าน (rpm)	ทิศการหมุน ดอกสว่าน	เปอร์เซนต์รูพรุน (%)		
			ด้านด้านการ เคลื่อนที่	บริเวณเนื้อ เชื่อม	ด้านเสริมการ เคลื่อนที่
SSM 356	1750	ตามเข็ม	1.3 ± 0.5	1.3 ± 0.5	0.5 ± 0.5
SSM 356-T6		นาฬิกา	1.7 ± 0.5	1.9 ± 0.5	1.4 ± 0.5

4.2.5 สมบัติเชิงกลของชิ้นงานเชื่อม SSM 356 และ SSM 356-T6

(1) ค่าความแข็งแรงดึงแนวเชื่อม

ผลการทดสอบพบว่า ชิ้นงาน SSM 356 มีค่าความแข็งแรงดึงที่ 121.7 MPa (คิดเป็น 73.5 % ของโลหะเดิม) และชิ้นงาน SSM 356-T6 มีค่าความแข็งแรงดึงที่ 157 MPa (คิดเป็น 67 % ของโลหะเดิม) เมื่อวิเคราะห์เปอร์เซ็นต์การลดลงเทียบกับค่าความแข็งแรงดึงของโลหะเดิมพบว่า ชิ้นงาน SSM 356-T6 กลับมีค่าเปอร์เซ็นต์การลดลงเมื่อเทียบกับโลหะเดิมมากกว่าชิ้นงาน SSM 356 ซึ่งสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์เปอร์เซ็นต์รูพรุนที่พบรูพรุนในชิ้นงาน SSM 356-T6 มากกว่าชิ้นงาน SSM 356 จึงทำให้ข้อสันนิษฐานที่ว่า การนำตัวแปรในการเชื่อมชิ้นงานที่ไม่ผ่านกระบวนการทางความร้อน (SSM 356) อาจไม่เหมาะสมสำหรับการเชื่อมชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการทางความร้อน (SSM 356-T6) ชัดเจนมากยิ่งขึ้น

(2) จุดครากของแนวเชื่อม

จุดครากของแนวเชื่อมจะสอดคล้องกับค่าความแข็งแรงดึงของแนวเชื่อม ซึ่งจากผลการวิเคราะห์พบว่า ค่าจุดครากของแนวเชื่อมมีแนวโน้มไปทางเดียวกันกับค่าความแข็งแรงดึงของแนวเชื่อม กล่าวคือ เปอร์เซ็นต์การลดลงของจุดครากเทียบกับโลหะเดิมของชิ้นงาน SSM 356-T6 จะลดลงมากกว่าชิ้นงาน SSM 356 ซึ่งสอดคล้องกับค่าความแข็งแรงดึงของแนวเชื่อมและเปอร์เซ็นต์รูพรุนของแนวเชื่อมพบว่า ชิ้นงาน SSM 356 มีแนวโน้มที่ดีกว่าชิ้นงาน SSM 356-T6

(3) ระยะเวลาของแนวเชื่อม

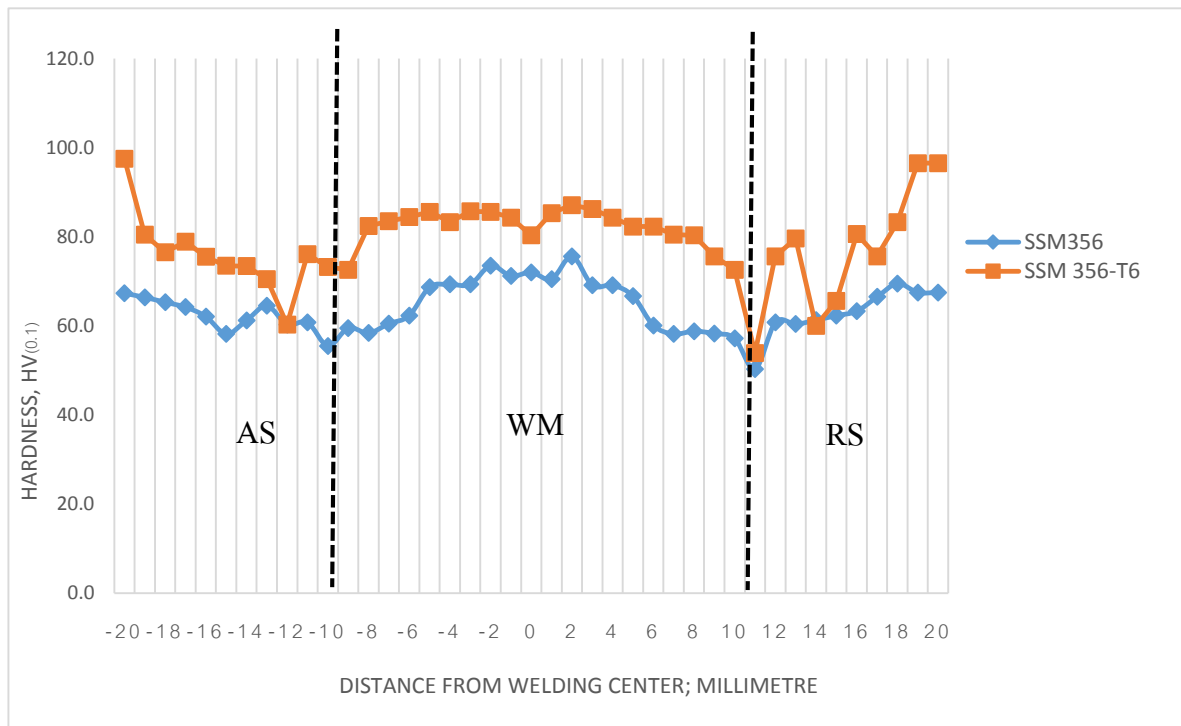
ระยะเวลา โดยปกติชิ้นงานเดิมของ SSM 356-T6 มีระยะยืดที่น้อยกว่า เนื่องจากชิ้นงานมีความแข็งที่สูงกว่าซึ่งผลการทดลองในงานวิจัยนี้มีแนวโน้มเช่นเดียวกัน ระยะเวลาของชิ้นงาน SSM 356 มีระยะยืดตัวที่สูงกว่าชิ้นงาน SSM 356-T6 ดังแสดงในตารางที่ 4.7

ตารางที่ 4.7 ค่าความแข็งแรงดึงของแนวเชื่อม SSM 356 และ SSM 356-T6

วัสดุ	ความเร็วรอบ ดอกล้วน (rpm)	ค่าเฉลี่ย ความ แข็งแรงดึง (MPa)	ค่าเฉลี่ยจุด ครากแนว เชื่อม (MPa)	ระยะยืดตัว ของแนว เชื่อม (%)	บริเวณที่ ชิ้นงานขาด
SSM 356	1750	121.7 (73.5 %)	91.8 (70.6 %)	3.6	ด้านด้านการ เคลื่อนที่
SSM 356 – T6		157 (67 %)	135.4 (82.1 %)	0.2	ด้านด้านการ เคลื่อนที่

(4) ค่าความแข็งแรงแนวเชื่อม

ค่าความแข็งแรงแนวเชื่อมแสดงดังรูปที่ 4.12 ซึ่งค่าความแข็งแรงมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกันกับเปอร์เซ็นต์รูพรุน ค่าความแข็งแรงดึงและจุดครากของแนวเชื่อมคือ ค่าความแข็งแรงของแนวเชื่อม SSM 356-T6 (78.8 HV_{0.1} คิดเป็น 79.6 % ของโลหะเดิม) มีแนวโน้มลดลงมากกว่าชิ้นงาน SSM 356 (64 HV_{0.1} คิดเป็น 94.1 % ของโลหะเดิม) เมื่อเทียบเปอร์เซ็นต์ของโลหะเดิม โดยเฉพาะบริเวณที่ได้รับผลกระทบทางความร้อน (Advancing Side, AS และ Retreating Side, RS) ของชิ้นงาน SSM 356-T6 มีค่าลดลงค่อนข้างมาก เนื่องจากชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการทางความร้อนได้ผ่านการบ่มมาก่อน จากนั้นการเชื่อมเป็นการเพิ่มอุณหภูมิของชิ้นงาน ทำให้บริเวณที่ไม่โดนกวาดประสานได้รับความร้อนทำให้อุณหภูมิสูงกว่าเส้นโซลิวัส ทำให้ชิ้นงานเกิดการบ่มอีกครั้ง (Over Aging) ทำให้เฟส θ เกิดการหลอมรวมกับเฟส α -Al จึงทำให้ขนาดเกรนโตขึ้น เมื่อขนาดเกรนโตขึ้นส่งผลให้สมบัติเชิงกลต่างๆ ของชิ้นงานลดลงเช่นกัน [4,36,37] จึงเป็นเหตุผลให้ค่าสมบัติต่างๆ ของ SSM 356-T6 ลดลงมากกว่าชิ้นงาน SSM 356



รูปที่ 4.16 ค่าความแข็งแนวเชื่อมของชิ้นงาน SSM 356 และ SSM 356-T6

จากการทดลองทั้งหมด 2 การทดลอง การปรับปรุงการเชื่อมของอะลูมิเนียมผสมกึ่งของแข็งในสถานะกึ่งแข็ง พบว่าการเชื่อมภายใต้แก๊สปกคลุมสามารถเพิ่มความแข็งแรงของแนวเชื่อมได้ จึงนำชิ้นงาน SSM 356 ที่เชื่อมภายใต้แก๊สปกคลุมและภายใต้บรรยากาศปกติมาส่งด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) เพื่อหาความแตกต่างของทั้ง 2 ชิ้นงาน

4.3 โครงสร้างจุลภาคจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)

การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคโดยใช้กล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราดเป็นการใช้สัญญาณแบบอิเล็กตรอนที่กระเจิงกลับ (Back Scattered Electrons, BSE) และใช้สัญญาณแบบเอกซเรย์ (X-Ray) เป็นสัญญาณที่ใช้เทคนิค EDX โดยมีการเตรียมชิ้นงานแบบเดียวกับการเตรียมชิ้นงานเพื่อดูโครงสร้างจุลภาค โดยใช้กำลังขยาย 1000 เท่า โดยทำการถ่ายภาพ 2 ชิ้นงานคือ ชิ้นงานเชื่อมที่ความเร็วรอบดอกสว่าน 1750 rpm ภายใต้บรรยากาศปกติและภายใต้แก๊สปกคลุม ตรวจสอบบริเวณเนื้อเชื่อม (Weld Metal Zone, WM) เพื่อสังเกตความแตกต่างของลักษณะภายในเนื้อเชื่อมของทั้งสองสภาวะ โดยใช้สัญญาณแบบกระเจิงกลับ (Back Scattered Electrons, BSE) เพื่อดูลักษณะภายในซึ่งพื้นที่ที่มีสีสว่างจะเป็น “ธาตุหนัก” คือธาตุที่มีเลขอะตอมมาก (Fe = 26, Mn = 25) และในพื้นที่ที่

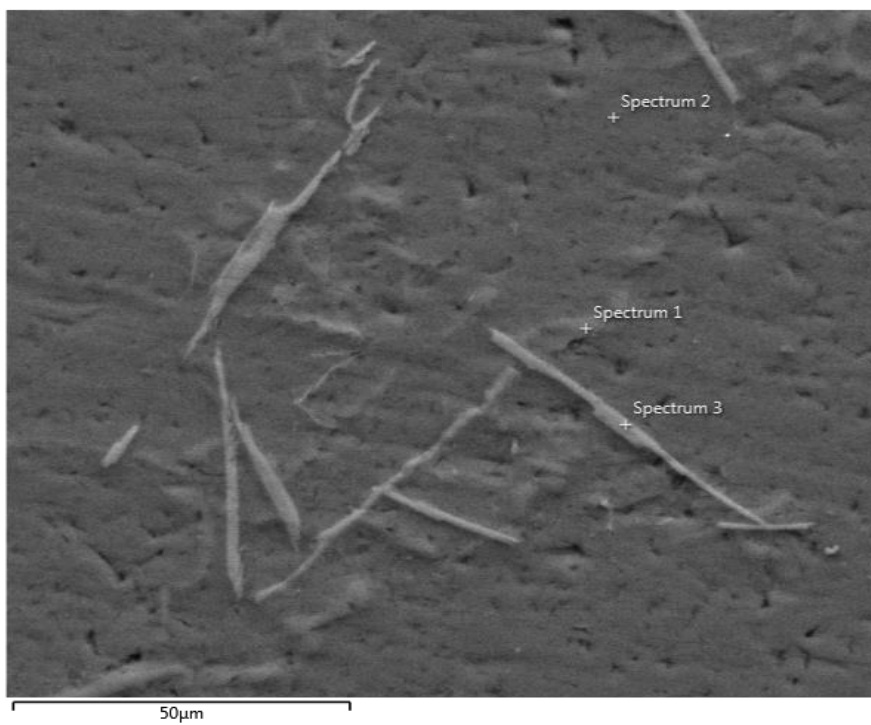
มีสีเข้มจะเป็น “ธาตุเบา” คือธาตุที่มีเลขอะตอมน้อย (Al = 13, Si = 14) รวมอยู่ในนั้นด้วย หลังจากนั้นได้ทำการวิเคราะห์เพื่อหาปริมาณธาตุในแต่ละจุดด้วยวิธี Point Scan โดยใช้สัญญาณแบบเอกซเรย์ (X-Ray) หรือเทคนิค EDX โดยทำการวิเคราะห์ทั้งหมด 3 จุดด้วยกัน ซึ่งผลที่ได้แสดงดังรูปที่ 4.14 และผลของปริมาณธาตุดังแสดงในตารางที่ 4.8 และตารางที่ 4.9 โดยพบว่าจุดที่ 1 หรือ Spectrum 1 เป็นตำแหน่งระหว่างเกรน คือขอบเกรนหรือ เฟสยูเทคติกซิลิกอน (Si Eutectic Phase) โดยตำแหน่งนี้มีธาตุซิลิกอนค่อนข้างสูงซึ่งมีมากกว่าอะลูมิเนียม เป็นเหตุทำให้ทราบว่าในจุดนี้คือเฟสยูเทคติกซิลิกอนหรือขอบเกรน ซึ่งสามารถพบได้ทั้ง 2 สภาวะ ในจุดที่ 2 หรือ Spectrum 2 เป็นตำแหน่งของเกรนหรืออนุภาค α -Al ซึ่งในจุดนี้พบอะลูมิเนียมปริมาณมาก และพบปริมาณของซิลิกอนและแมงกานีสอยู่เล็กน้อย ในจุดที่ 3 หรือ Spectrum 3 ซึ่งเป็นจุดที่มีความสว่างมากที่สุดในรูปที่ 4.15 จากการวิเคราะห์พบว่า มีธาตุเหล็กและแมงกานีสรวมอยู่ด้วยทำให้ทราบว่าจุดนี้คือสารประกอบอินเทอร์เมทัลลิก (Intermetallic Compounds)

ตารางที่ 4.8 ธาตุในจุดต่าง ๆ ของชิ้นงานที่ความเร็วรอบดอกสว่าน 1750 rpm ในบรรยากาศปกติ

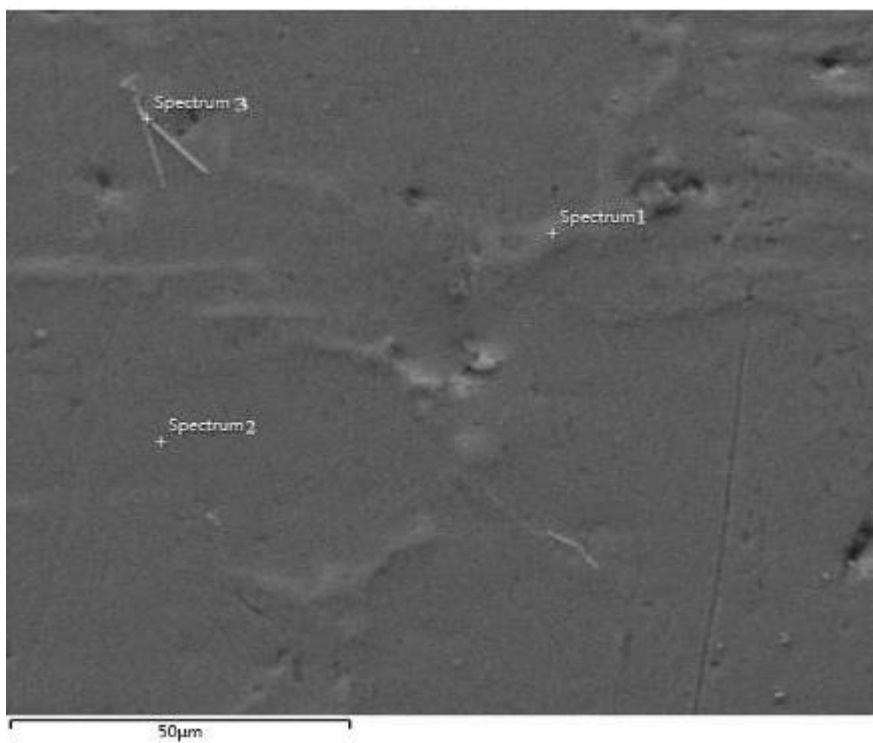
Spectrum	Al	Si	Fe	Mn	Mg
1	12.9	71.3	-	-	-
2	84.9	1.3	-	-	0.1
3	51.6	18.9	15.6	1.0	0.1

ตารางที่ 4.9 ธาตุในจุดต่าง ๆ ของชิ้นงานที่ความเร็วรอบดอกสว่าน 1750 rpm ภายใต้แก๊สปกคลุม

Spectrum	Al	Si	Fe	Mn	Mg
1	21.6	66.6	-	-	-
2	84.2	1.4	-	-	-
3	66.6	17.3	2.9	1.0	0.1



(ก)



(ข)

รูปที่ 4.17 รูปภาพ SEM ชิ้นงานที่ความเร็วรอบดอกสว่าน 1750 rpm (ก) ภายใต้บรรยากาศปกติ
(ข) ภายใต้แก๊สปกคลุม

จากรูปที่ 4.17 ตารางที่ 4.8 และ 4.9 เป็นบริเวณเนื้อเชื่อมของชิ้นงานทั้ง 2 สภาวะพบว่า ชิ้นงานที่เชื่อมภายใต้บรรยากาศปกติ และชิ้นงานที่เชื่อมภายใต้แก๊สปกคลุม มีความแตกต่างที่เห็นได้ชัดเจนคือ รูปร่างของสารประกอบอินเทอร์เมทัลลิก (Intermetallic Compounds) คือ Al_2Mn_3Si ซึ่งพบได้ในอะลูมิเนียมเกรด 3xxx เท่านั้น ซึ่งมีสมบัติความแข็งแรงที่สูงมาก [34] โดยชิ้นงานที่เชื่อมภายใต้บรรยากาศปกติพบว่า มีขนาดใหญ่กว่าชิ้นงานที่เชื่อมภายใต้แก๊สปกคลุม เนื่องจากชิ้นงานที่เชื่อมภายใต้บรรยากาศปกติซึ่งมีอัตราการเย็นตัวของชิ้นงานที่ช้ากว่าชิ้นงานที่เชื่อมภายใต้แก๊สปกคลุม ทำให้เฟสอินเทอร์เมทัลลิกมีระยะเวลาในการฟอร์มตัวที่ยาวนานกว่าการเชื่อมภายใต้แก๊สปกคลุม ทำให้มีขนาดที่ใหญ่กว่า ซึ่งการที่มีสารประกอบอินเทอร์เมทัลลิกที่ใหญ่ส่งผลให้ชิ้นงานมีความเปราะมากขึ้นไป [28]

จากผลการส่องกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) พบว่า หากชิ้นงานมีสารประกอบอินเทอร์เมทัลลิกจำนวนมากจะส่งผลต่อความแข็งแรงของชิ้นงาน เมื่อชิ้นงานแข็งแรงมากขึ้นไปอาจทำให้ชิ้นงานเปราะมากขึ้น

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

การปรับปรุงการเชื่อมในสถานะกึ่งแข็งของอะลูมิเนียมหล่อผสมกึ่งแข็งเป็นงานวิจัยโดยการเชื่อมอะลูมิเนียมผสมหล่อกึ่งแข็ง SSM 356 ด้วยสว่านและดอกสว่าน 4 mm ให้ความร้อนขึ้นงานด้วยเครื่องให้ความร้อนเหนี่ยวนำ ขึ้นงานต่อชนกันและรักษาอุณหภูมิ 580 – 590 °C ตลอดการเชื่อม ความเร็วเดินแนวเชื่อมที่ 75 mm/min ทำการทดลอง 2 การทดลองคือ 1. การทดลองภายใต้บรรยากาศปกติ 2. การทดลองภายใต้แก๊สปกคลุมซึ่งทั้ง 2 การทดลองทำให้ทราบได้ว่า การเชื่อมโดยใช้สว่านและดอกสว่านยังคงรักษาโครงสร้างเฉพาะตัวของอะลูมิเนียมผสมหล่อกึ่งแข็ง SSM 356 ซึ่งจากผล โครงสร้างจุลภาคของขึ้นงานทดลองทั้งหมด 18 ขึ้นงานยังคงรักษาสภาพเกรนก่อนกลมไว้ได้ ในส่วนผลการทดลองทั้งหมดสามารถสรุปได้ดังนี้

5.1 การทดลองที่ 1 การเชื่อมภายใต้บรรยากาศปกติ

- (1) ลักษณะเกรนของทุกๆ ขึ้นงานเชื่อมยังคงสภาพก่อนกลมแต่ขยายขนาดโตขึ้นมากกว่าขนาดเกรนของโลหะเดิม
- (2) ที่ความเร็วรอบดอกสว่าน 1750 rpm ให้โครงสร้างมหภาค จุลภาคและค่าเปอร์เซ็นต์รูพรุนเหมาะสมกว่าความเร็วรอบอื่น
- (3) ค่าสมบัติเชิงกลของความเร็วรอบดอกสว่าน 1750 rpm ให้ค่าสูงที่สุดสอดคล้องกับโครงสร้างมหภาค จุลภาค และค่าเปอร์เซ็นต์รูพรุน
- (4) ทิศทางของดอกสว่าน (หมุนตามเข็มนาฬิกาและหมุนทวนเข็มนาฬิกา) ไม่ส่งผลต่อโครงสร้างมหภาค จุลภาค เปอร์เซ็นต์และค่าสมบัติเชิงกลของแนวเชื่อม
- (5) ด้านด้านการเคลื่อนที่ (Retreating Side, RS) มีค่าสมบัติเชิงกล (ค่าความแข็งแรงดึงและค่าความแข็ง) น้อยกว่าด้านเสริมการเคลื่อนที่ (Advancing Side, AS)
- (6) ความเร็วรอบดอกสว่านที่เหมาะสมในการเชื่อมในสถานะกึ่งแข็งของอะลูมิเนียมหล่อผสมกึ่งแข็งภายใต้บรรยากาศปกติคือ 1750 rpm เชื่อมที่อุณหภูมิ 580 – 590 °C ความเร็วเดินแนวเชื่อมที่ 75 mm/min ทิศทางดอกสว่านหมุนตามเข็มนาฬิกา

5.2 การทดลองที่ 2 การเชื่อมภายใต้แก๊สปกคลุม

- (1) ลักษณะเกรนของชิ้นงาน SSM 356 และ SSM 356-T6 หลังการเชื่อมยังคงสภาพเป็นก้อนกลม และมีขนาดโตขึ้นกว่าขนาดเกรนเดิม
- (2) การเชื่อมภายใต้แก๊สปกคลุมให้โครงสร้างมหภาค จุดภาค เปอร์เซ็นต์รูพรุน และค่าสมบัติเชิงกลของแนวเชื่อมสูงกว่าการเชื่อมภายใต้บรรยากาศปกติ
- (3) ด้านต้านการเคลื่อนที่ของชิ้นงาน SSM 356 และ SSM 356-T6 มีค่าสมบัติเชิงกล (ค่าความแข็งแรงดึงและค่าความแข็ง) น้อยกว่าด้านเสริมการเคลื่อนที่
- (4) การนำชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการทางความร้อน (SSM 356-T6) ไม่เหมาะสมที่จะนำมาเชื่อมในตัวแปรเดียวกับชิ้นงานที่ไม่ผ่านกระบวนการทางความร้อน
- (5) สภาพการเชื่อมที่ความเร็วรอบดอกสว่านที่ 1750 rpm ทิศทางดอกสว่านหมุนตามเข็มนาฬิกา เชื่อมภายใต้แก๊สปกคลุม ความเร็วเดินแนวเชื่อมที่ 75 mm/min อุณหภูมิระหว่างการเชื่อมที่ 580-590°C ตลอดการเชื่อม เป็นสถานะที่เหมาะสมมากที่สุดในการเชื่อมในสถานะกึ่งของแข็งของอะลูมิเนียมหล่อผสมกึ่งแข็ง

5.3 ข้อเสนอแนะ

- (1) การเชื่อมด้วยดอกสว่าน หากจุ่มดอกสว่านขึ้นหรือลึกลงไปทำให้แนวเชื่อมไม่สมบูรณ์ ควรแก้ไขโดยการสร้างหัวจับสว่านที่สามารถกำหนดระยะของดอกสว่านได้
- (2) การเชื่อมด้วย mini CNC ควรเลือกมอเตอร์ที่มีกำลังมากกว่าความหนืดของโลหะ
- (3) การวัดอุณหภูมิและการควบคุมอุณหภูมิระหว่างการเชื่อมมีความแม่นยำไม่มาก เพราะมีเทอร์โมคัปเปิลไม่เพียงพอ ควรเพิ่มเทอร์โมคัปเปิลอีก 2 จุด คือ บริเวณช่วงกลางและช่วงท้ายชิ้นงาน เพื่อเพิ่มความแม่นยำ
- (4) การวัดความเร็วรอบ ควรใช้อุปกรณ์เปรียบเทียบการวัดรอบของสว่านเพื่อนเพิ่มแม่นยำมากขึ้น

5.4 งานวิจัยในอนาคต

- (1) การเชื่อมในสถานะกึ่งแข็งของอะลูมิเนียมผสมหล่อกึ่งแข็งสามารถนำไปประยุกต์การเชื่อมโดยในเครื่อง CNC ได้
- (2) การปรับปรุงคุณภาพชิ้นงานเชื่อมที่ผ่านกระบวนการทางความร้อน (T6)

บรรณานุกรม

- [1] Wanasin, J. & Thanabumrunkul, S. (2008). Development of a Semi - Solid Metal Processing Technique for Aluminium Casting Applications, Songklanakarin J. Sci. Technol 30(2).
- [2] เจษฎา วรรณสินธุ์ รอมภูอน, และบุรพา รังสิณี แคนยุกต์. (2552). การปรับปรุง การหล่อ ด้วยกรรมวิธีการหล่อแบบ GISS เพื่ออะลูมิเนียมผสม A356. การประชุม วิชาการทางวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
- [3] เจษฎา วรรณสินธุ์. (2555). การหล่อโลหะสำหรับวิศวกรรม. ภาควิชาวิศวกรรม เหมือนแร่และวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
- [4] ประกาศ เมืองจันทร์บุรี. (2555). วิศวกรรม การเชื่อม. ภาควิชาวิศวกรรมเหมือนแร่ และวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
- [5] Petkwan, A., Muangjanburee, P., & Wanasin, J. (2014). Investigation of Microstructure and Mechanical Properties of Semi-Solid State Joining of SSM Aluminum Alloys. Mechanics and Materials. VOL 496-500.
- [6] WANG, Y., SCHMIDT, V., SENZ, S., & GOSELE, U. (2006) Epitaxial Growth of Silicon Nanowires Using an Aluminum Catalyst. Nature Nanotechnology, VOL 1.
- [7] Satinjinda, M. Iron & Steel Heat-Treatment Engineering. ISBN 974-937-193-2.
- [8] Mohammed M.N., Omar M.Z., Saguri Z., Salleh M.S., & Alhawari K.S. (2015). Trend and Development of Semisolid Metal Joining Processing. Hindaiw Pubilshing Corporation. Advances in Materials Science and Engineering.
- [9] Induction heating, [Online]. (2017). Available <http://www.richieburnett.co.uk/indheat.html>
- [10] Hossini V.A., Aashuri H., & Kokabi A.H. (2013). Characterization of Newly Developed Semi-Solid Stir Welding Method for AZ91 Magnesium Alloy by Using Mg-25 %Zn Interlayer. Material Science and Engineering Department. Sharif University of Technology: Azad Ave, Iran.

- [11] Hosseini V.A., Aashuri H., & Akokabi. (2013). Mechanisms of Joint Formation Throughout Semi-Solid Stir Welding of AZ91 Magnesium Alloy. Material Science and Engineering Department. Sharif University of Technology: Azad Ave, Iran.
- [12] Alvani, S.M.J., Aashuri, H., Kokabi, A., & Betgi, R. (2010). Semi-solid Joining of Aluminum A356 Alloy by Partial Remelting and Mechanical Stirring. Transaction of Nonferrous Metal Society of China 20.
- [13] Tahamtan, M.A., Golozar, F., Karimzadeh, B., & Niroumand. (2006). Macrostructure and Tensile Properties of Thixoformed A356 Alloy. University of Techlogy, Iran.
- [14] Zheng, Q., & Reddy, R.G. (2004). Mechanism of In SITU Formation of AlN in Al Melt Using Nitrogen Gas. Journal of materials science, VOL 39.
- [15] Hou, Q., Mutharasan, R., & Koczal, M. (1995). Feasibility of Aluminum Nitride Formatin in Aluminum Alloys. Materials of Science and Engineering.
- [16] Narimanezhad, A., Aashuri, H., Kokabi, A.H., & Khosravani, A. (2009). Microstructural Evolution and Mechanical Properties of Semi-Solid Stir Weld Zinc AG40A Die Cast Alloy. Journal of Materials Processing Technology, 209.
- [17] Camillus, A., Obayi, S., Tolouei, R., Mostavan, A., Paternoster, C., Turgeon, S., Adeleh, B., Daniel, O., Obikwelu, O., & Antovani, D. (2016). Effect of Grain Size on Mechanical Properties and Biodegradation Behavior of Pure Iron for Cardiovascular Stent Application. Biomatter. VOL 6.
- [18] Phonin, T., & Mungjunburee, P. (2016). Semi-Solid State Joining of SSM Aluminum Alloys Using Brazing AZ27. Chiang Mai J. Sci. 43(2).
- [19] Threadgill, P.L., Leonard, A.J., Shercliff, H.R., & Withers, P.J. (2009). Friction Stir Welding of Aluminum Alloys. International Materials Reviews. VOL 54. No 2.

- [20] Jayaraman, M., & Balasubramanian, V. (2013). Effect of Process Parameters on Tensile of Friction Stir Welded Cast A356 Aluminum Alloy Joints. Transaction of Nonferrous Metals Society of China. VOL 23.
- [21] Modigell, M., & Alexandrou, A.N. (2014) Rheological Modeling of Semi-solid Suspension. Mechanics and Materials. VOL 496-500.
- [22] Llangovan, M., Boopathy, S.R., & Balasubramanian, V. (2015). Effect of Tool Pin Profile on Microstructure and Tensile Properties of Friction Stir Welded Dissimilar AA6061-AA5086 Aluminium Alloys Joints. Defence Technology. VOL 11.
- [23] Panneerselvam, K., & Lenin, K. (2014). Joining of Nylon 6 plate by Friction Stir Welding Process Using Threaded Pin Profile. Materials and Design. VOL 53.
- [24] Pio L.Y. (2011). Effect of T6 Heat Treatment on the Mechanical Properties of Gravity Die Cast A356 Aluminum Alloy. Journal of Applied Sciences. VOL 11.
- [25] Akhter, R., Ivanchev, L., & Burger, H.P. (2017). Effect of Pre/Post T6 Heat Treatment on the Mechanical Properties of Laser Welded SSM Cast A356 Aluminum Alloy. Materials Science and Engineering. VOL 447.
- [26] Jung, B., Lee, H., & Park, H. (2013). Effect of Grain Size on the Indentation Hardness for Polycrystalline Materials by the Modified Strain Gradient Theory. International Journal of Solid and Structures 50.
- [27] Muszka, K., Majta, J., & Bienias, L. (2006). Effect of Grain Refinement on Mechanical Properties of Microalloyed Steels. Metallurgy and Foundry Engineering. Vol 32.
- [28] Amir, B., Esgandari, B., Nami, M., Shahmiri, A., & Abedi. (2013). Effect of Mg and Semi solid Processing on Microstructure and Impression Creep Properties of A356 Alloy. Transactions of Nonferrous Metals Society of china 23.
- [29] Electric drill, [Online]. (2017). <http://www.atom.rmutphysics.com/charud/invention/invention2/electric-drill/index.htm>.

- [30] การเขียนโปรแกรม CNC เบื้องต้น: [ออนไลน์]. (2560). <http://www.cncroom.com/forum/index.php?topic=3426>.
- [31] Chamrunworakiat, T., Tavato, I. (2014). Mini CNC by Mach 3 Program. Mechanical Engineering Project. No. P2ME5610
- [32] CNC G-Code and M-Code Reference List for Milling, [Online].(2017).Available <http://www.cnccookbook.com/CCCNCGCodeList.html>
- [33] Xuibin, X., Quanxiang, L., Bofang, Z., Youliang, Z., & Changhua, D. (2012). The Effect of Stirring Rate on Semisolid Stirring Brazing of SiCp/A356 Composites in Air.
- [34] Birbilis, N., & Buchheit, R.G. (2005). Electrochemical Characteristics of Intermetallic Phase in Aluminum Alloys. Journal of the Electrochemical Society. VOL. 152(4).
- [35] American Association state. Standard Test Method for Tension Testing Metallic Materials, High and Transportation Officials Standard.
- [36] เล็ก สีคง. (2551). วัสดุวิศวกรรมอุตสาหกรรม. ภาควิชาวิศวกรรมเหมืองแร่และวัสดุ หน่วยเทคโนโลยีการศึกษา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
- [37] ฉัตรทอง ไสแสง, อนุชาติ มากกลาง, และวิทยา กองตระกูล. (2554). โลหะวิทยาการเชื่อม. กรุงเทพฯ: ซีเอ็ดดูเคชั่น
- [38] Sanyo Denki. Summation 5-Phase Stepping System F5. Sanyo Denki Co., LTD.VOL 5.1
- [39] How to use ImageJ for nanoparticle size distribution analysis, [Online]. (2014). <https://www.youtube.com/watch?v=JQAZ--c9Yfi>

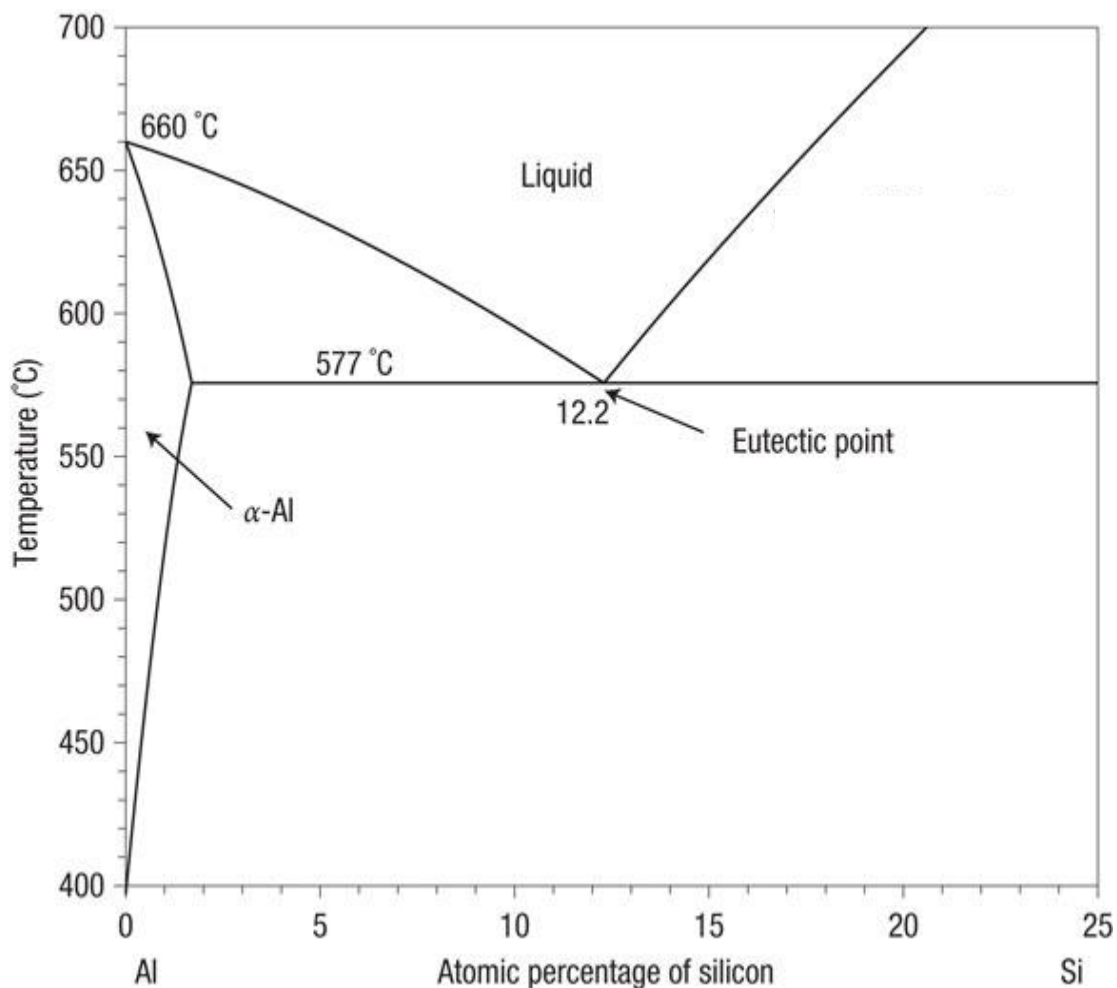
ภาคผนวก ก.

ส่วนผสมทางเคมีของสารละลาย Keller's Reagent
และกราฟแสดงเฟสของโลหะผสมระหว่างอลูมิเนียมและซิลิกอน

ก 1. ส่วนผสมทางเคมีของสารละลายเจือจาง Keller's Reagent

กรดไฮโดรฟลูออริก	ความเข้มข้น 48 %	ปริมาณ 2 ml
กรดไฮโดรคลอริก	ความเข้มข้นสูง	ปริมาณ 3 ml
กรดไนตริก	-	ปริมาณ 5 ml
น้ำ	-	ปริมาณ 190 ml

ก 2. กราฟแสดงเฟสของโลหะผสมระหว่างอะลูมิเนียมและซิลิกอน

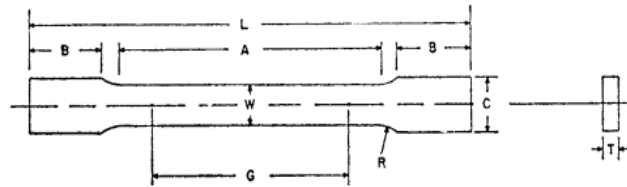
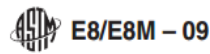


รูปที่ ก 1. กราฟแสดงเฟสของโลหะผสมระหว่างอะลูมิเนียมและซิลิกอน [5]

ภาคผนวก ข.

ข้อกำหนดชิ้นงานทดสอบความแข็งแรงดึงตามมาตรฐาน ASTM-E8M

ข 1. ข้อกำหนดชิ้นงานทดสอบความแข็งแรงดึง ASTM-E8M



	Dimensions		
	Standard Specimens		Subsize Specimen
	Plate-Type, 40 mm [1.500 in.] Wide	Sheet-Type, 12.5 mm [0.500 in.] Wide	6 mm [0.250 in.] Wide
	mm [in.]	mm [in.]	mm [in.]
G—Gage length (Note 1 and Note 2)	200.0 ± 0.2 [8.00 ± 0.01]	50.0 ± 0.1 [2.00 ± 0.005]	25.0 ± 0.1 [1.000 ± 0.003]
W—Width (Note 3 and Note 4)	40.0 ± 2.0 [1.500 ± 0.125, -0.250]	12.5 ± 0.2 [0.500 ± 0.010]	6.0 ± 0.1 [0.250 ± 0.005]
T—Thickness (Note 5)		thickness of material	
R—Radius of fillet, min (Note 6)	25 [1]	12.5 [0.500]	6 [0.250]
L—Overall length, min (Note 2, Note 7, and Note 8)	450 [18]	200 [8]	100 [4]
A—Length of reduced section, min	225 [9]	57 [2.25]	32 [1.25]
B—Length of grip section, min (Note 9)	75 [3]	50 [2]	30 [1.25]
C—Width of grip section, approximate (Note 4 and Note 9)	50 [2]	20 [0.750]	10 [0.375]

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

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

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

NOTE 4—For each of the three sizes of specimens, narrower widths (W and C) may be used when necessary. In such cases the width of the reduced section should be as large as the width of the material being tested permits; however, unless stated specifically, the requirements for elongation in a product specification shall not apply when these narrower specimens are used.

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

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

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

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

NOTE 9—It is desirable, if possible, to make the length of the grip section large enough to allow the specimen to extend into the grips a distance equal to two thirds or more of the length of the grips. If the thickness of 12.5 mm [0.500-in.] wide specimens is over 10 mm [0.375 in.], longer grips and correspondingly longer grip sections of the specimen may be necessary to prevent failure in the grip section.

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

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

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

FIG. 1 Rectangular Tension Test Specimens

รูปที่ ข 1. ข้อกำหนดชิ้นงานทดสอบความแข็งแรงดึง ASTM-E8M [33]

ภาคผนวก ค.
เปอร์เซ็นต์ฐาน

ค 1. เปอร์เซ็นต์รูพรุนของบริเวณเนื้อเชื่อมของทุกๆ เงื่อนไข

ความเร็วรอบการหมุนดอก สว่าน (rpm)	เปอร์เซ็นต์รูพรุน (%)	ค่าเฉลี่ยเปอร์เซ็นต์รูพรุน (%)
1100 (ดอกสว่านหมุนตามเข็มนาฬิกาเชื่อมภายใต้บรรยากาศปกติ)	5.5 ± 0.5	5.5 ± 0.5
	5.7 ± 0.5	
	5.4 ± 0.5	
	5.6 ± 0.5	
	5.5 ± 0.5	
	5.6 ± 0.5	
1750 (ดอกสว่านหมุนตามเข็มนาฬิกาเชื่อมภายใต้บรรยากาศปกติ)	2.9 ± 0.5	3.0 ± 0.5
	3.2 ± 0.5	
	2.5 ± 0.5	
	3.5 ± 0.5	
	2.5 ± 0.5	
	3.5 ± 0.5	
2200 (ดอกสว่านหมุนตามเข็มนาฬิกาเชื่อมภายใต้บรรยากาศปกติ)	4.8 ± 0.5	5.2 ± 0.5
	5.5 ± 0.5	
	4.6 ± 0.5	
	4.9 ± 0.5	
	5.8 ± 0.5	
	5.5 ± 0.5	
1750 (ดอกสว่านทวนตามเข็มนาฬิกาเชื่อมภายใต้บรรยากาศปกติ)	2.9 ± 0.5	3.1 ± 0.5
	3.1 ± 0.5	
	2.9 ± 0.5	
	3.5 ± 0.5	
	2.8 ± 0.5	
	3.5 ± 0.5	

ความเร็วรอบการหมุนดอก ส่วน (rpm)	เปอร์เซ็นต์รัฐพูน (%)	ค่าเฉลี่ยเปอร์เซ็นต์รัฐพูน (%)
SSM 356 (ดอกส่วนหมุนตามเข็มนาฬิกาเชื่อมภายใต้แก๊สปกคลุม)	0.4 ± 0.5	1.3 ± 0.5
	0.5 ± 0.5	
	1.4 ± 0.5	
	1.5 ± 0.5	
	1.7 ± 0.5	
	2.5 ± 0.5	
SSM 356-T6 (ดอกส่วนหมุนตามเข็มนาฬิกาเชื่อมภายใต้แก๊สปกคลุม)	2 ± 0.5	1.9 ± 0.5
	2.1 ± 0.5	
	1.9 ± 0.5	
	2 ± 0.5	
	1.5 ± 0.5	
	1.9 ± 0.5	

ค 2. เปอร์เซ็นต์รูพรุนด้านด้านการเคลื่อนที่ของทุกๆ เงื่อนไข

ความเร็วรอบการหมุนดอก สว่าน (rpm)	เปอร์เซ็นต์รูพรุน (%)	ค่าเฉลี่ยเปอร์เซ็นต์รูพรุน (%)
1100 (ดอกสว่านหมุนตามเข็มนาฬิกาเชื่อมภายใต้บรรยากาศปกติ)	5.5 ± 0.5	5.6 ± 0.5
	5.7 ± 0.5	
	5.4 ± 0.5	
	5.6 ± 0.5	
	5.5 ± 0.5	
	5.6 ± 0.5	
1750 (ดอกสว่านหมุนตามเข็มนาฬิกาเชื่อมภายใต้บรรยากาศปกติ)	2.1 ± 0.5	2.5 ± 0.5
	2.3 ± 0.5	
	2.4 ± 0.5	
	2.6 ± 0.5	
	2.5 ± 0.5	
	3 ± 0.5	
2200 (ดอกสว่านหมุนตามเข็มนาฬิกาเชื่อมภายใต้บรรยากาศปกติ)	4.5 ± 0.5	4.7 ± 0.5
	4.9 ± 0.5	
	4.5 ± 0.5	
	4.7 ± 0.5	
	4.6 ± 0.5	
	4.7 ± 0.5	
1750 (ดอกสว่านทวนตามเข็มนาฬิกาเชื่อมภายใต้บรรยากาศปกติ)	2.4 ± 0.5	2.7 ± 0.5
	2.8 ± 0.5	
	2.7 ± 0.5	
	2.8 ± 0.5	
	2.5 ± 0.5	
	2.7 ± 0.5	

ความเร็วรอบการหมุนดอก ส่วน (rpm)	เปอร์เซ็นต์รัฐพูน (%)	ค่าเฉลี่ยเปอร์เซ็นต์รัฐพูน (%)
SSM 356 (ดอกส่วนหมุนตามเข็มนาฬิกาเชื่อมภายใต้แก๊สปก คลุม)	0.5 ± 0.5	0.5 ± 0.5
	0.6 ± 0.5	
	0.4 ± 0.5	
	0.5 ± 0.5	
	0.3 ± 0.5	
	0.5 ± 0.5	
SSM 356-T6 (ดอกส่วนหมุนตามเข็มนาฬิกาเชื่อมภายใต้แก๊สปก คลุม)	1.5 ± 0.5	1.7 ± 0.5
	1.9 ± 0.5	
	1.7 ± 0.5	
	1.9 ± 0.5	
	1.5 ± 0.5	
	1.9 ± 0.5	

ค 3. จำนวนรูปพรรณด้านเสริมการเคลื่อนที่ของทุกๆ เงื่อนไข

ความเร็วรอบการหมุนดอก สว่าน (rpm)	เปอร์เซ็นต์รูปพรรณ (%)	ค่าเฉลี่ยเปอร์เซ็นต์รูปพรรณ (%)
1100 (ดอกสว่านหมุนตามเข็มนาฬิกาเชื่อมภายใต้บรรยากาศปกติ)	5.2 ± 0.5	5.4 ± 0.5
	5.4 ± 0.5	
	5.4 ± 0.5	
	5.4 ± 0.5	
	5.5 ± 0.5	
	5.7 ± 0.5	
1750 (ดอกสว่านหมุนตามเข็มนาฬิกาเชื่อมภายใต้บรรยากาศปกติ)	2.2 ± 0.5	2.3 ± 0.5
	2.3 ± 0.5	
	2.1 ± 0.5	
	2.5 ± 0.5	
	2.1 ± 0.5	
	2.3 ± 0.5	
2200 (ดอกสว่านหมุนตามเข็มนาฬิกาเชื่อมภายใต้บรรยากาศปกติ)	4.5 ± 0.5	4.8 ± 0.5
	4.9 ± 0.5	
	4.7 ± 0.5	
	4.9 ± 0.5	
	4.8 ± 0.5	
	5 ± 0.5	
1750 (ดอกสว่านทวนตามเข็มนาฬิกาเชื่อมภายใต้บรรยากาศปกติ)	2.3 ± 0.5	2.5 ± 0.5
	2.5 ± 0.5	
	2.4 ± 0.5	
	2.5 ± 0.5	
	2.4 ± 0.5	
	2.6 ± 0.5	

ความเร็วรอบการหมุนดอก ส่วน (rpm)	เปอร์เซ็นต์รัฐพูน (%)	ค่าเฉลี่ยเปอร์เซ็นต์รัฐพูน (%)
SSM 356 (ดอกส่วนหมุนตามเข็มนาฬิกาเชื่อมภายใต้แก๊สปก คลุม)	1.3 ± 0.5	1.4 ± 0.5
	1.4 ± 0.5	
	1.3 ± 0.5	
	1.5 ± 0.5	
	1.2 ± 0.5	
	1.4 ± 0.5	
SSM 356-T6 (ดอกส่วนหมุนตามเข็มนาฬิกาเชื่อมภายใต้แก๊สปก คลุม)	1.2 ± 0.5	1.3 ± 0.5
	1.5 ± 0.5	
	1.2 ± 0.5	
	1.5 ± 0.5	
	1.1 ± 0.5	
	1.4 ± 0.5	

ภาคผนวก ง.

ค่าความแข็งแรงดึงของแนวเชื่อม

ง 1. ค่าความแข็งแรงดึงของแนวเชื่อมในทุกๆ เงื่อนไข

ความเร็วรอบการหมุนดอก สว่าน (rpm)	ค่าความแข็งแรงดึง (MPa)	ค่าเฉลี่ยค่าความแข็งแรงดึง (MPa)
1100 (ดอกสว่านหมุนตามเข็มนาฬิกาเชื่อมภายใต้บรรยากาศปกติ)	80.2	83.6
	94.2	
	72.9	
	75.1	
	87.7	
	91.8	
1750 (ดอกสว่านหมุนตามเข็มนาฬิกาเชื่อมภายใต้บรรยากาศปกติ)	115.8	111.2
	103.2	
	114.9	
	111.9	
	111.4	
	110.3	
2200 (ดอกสว่านหมุนตามเข็มนาฬิกาเชื่อมภายใต้บรรยากาศปกติ)	94.0	98.6
	82.4	
	107.6	
	94.2	
	109.5	
	103.5	
1750 (ดอกสว่านทวนตามเข็มนาฬิกาเชื่อมภายใต้บรรยากาศปกติ)	111.9	109.8
	102.0	
	108.5	
	105.7	
	113.2	
	117.3	

ความเร็วรอบการหมุนดอก ส่วน (rpm)	ค่าความแข็งแรงดึง (MPa)	ค่าเฉลี่ยค่าความแข็งแรงดึง (MPa)
SSM 356 (ดอกส่วนหมุนตามเข็มนาฬิกาเชื่อมภายใต้แก๊สปกคลุม)	113.3	121.7
	107.4	
	120.9	
	115.6	
	141.5	
	131.6	
SSM 356-T6 (ดอกส่วนหมุนตามเข็มนาฬิกาเชื่อมภายใต้แก๊สปกคลุม)	180.3	157
	159.7	
	155.2	
	132.8	

ภาคผนวก จ.

ค่าความแรงดึง ณ จุดครากของแนวเชื่อม

จ 1. ค่าความแรงดึง ณ จุดครากของแนวเชื่อม

ความเร็วรอบการหมุนดอก สว่าน (rpm)	ค่าจุดครากของแนวเชื่อม (MPa)	ค่าเฉลี่ยจุดครากของแนวเชื่อม (MPa)
1100 (ดอกสว่านหมุนตามเข็มนาฬิกาเชื่อมภายใต้บรรยากาศปกติ)	69.1	64.4
	57.7	
	69.3	
	61.2	
	65.8	
	63.5	
1750 (ดอกสว่านหมุนตามเข็มนาฬิกาเชื่อมภายใต้บรรยากาศปกติ)	77.8	77.5
	77.5	
	78.5	
	77.8	
	76.9	
	76.5	
2200 (ดอกสว่านหมุนตามเข็มนาฬิกาเชื่อมภายใต้บรรยากาศปกติ)	56.4	56.1
	55.8	
	57.2	
	56.9	
	55.3	
	55.1	
1750 (ดอกสว่านทวนตามเข็มนาฬิกาเชื่อมภายใต้บรรยากาศปกติ)	77.5	77.3
	77.2	
	77.4	
	77.3	
	77.5	
	77.1	

ความเร็วรอบการหมุนดอก สว่าน (rpm)	ค่าจุดครากของแนวเชื่อม (MPa)	ค่าเฉลี่ยจุดครากของแนวเชื่อม (MPa)
SSM 356 (ดอกสว่านหมุนตามเข็มนาฬิกาเชื่อมภายใต้แก๊สปกคลุม)	92.5	91.8
	90.5	
	92.3	
	91.6	
	92.5	
	91.6	
SSM 356-T6 (ดอกสว่านหมุนตามเข็มนาฬิกาเชื่อมภายใต้แก๊สปกคลุม)	152.6	112.5
	131.7	
	135.6	
	121.5	

ภาคผนวก ฉ.
ระยะยัดตัวของแนวเชื่อม

ฉ 1. ค่าระยะยึดตัวของแนวเชื่อม

ความเร็วรอบการหมุนดอก สว่าน (rpm)	ระยะยึดแนวเชื่อม (%)	ค่าเฉลี่ยระยะยึดแนวเชื่อม (%)
1100 (ดอกสว่านหมุนตามเข็มนาฬิกาเชื่อมภายใต้บรรยากาศปกติ)	0.9	1.6
	1.9	
	1.9	
	1.9	
	1.7	
	1.5	
1750 (ดอกสว่านหมุนตามเข็มนาฬิกาเชื่อมภายใต้บรรยากาศปกติ)	3.7	2.6
	2.5	
	2	
	2.4	
	2.3	
	2.6	
2200 (ดอกสว่านหมุนตามเข็มนาฬิกาเชื่อมภายใต้บรรยากาศปกติ)	2.5	1.7
	1.7	
	1.9	
	1.6	
	1.6	
	1.7	
1750 (ดอกสว่านทวนตามเข็มนาฬิกาเชื่อมภายใต้บรรยากาศปกติ)	2.4	2.5
	2.2	
	2.2	
	2.5	
	2.7	
	2.7	

ความเร็วรอบการหมุนดอก ส่วน (rpm)	ระยะยึดแนวเชื่อม (%)	ค่าเฉลี่ยระยะยึดแนวเชื่อม (%)
SSM 356 (ดอกส่วนหมุนตามเข็มนาฬิกาเชื่อมภายใต้แก๊สปกคลุม)	3.5	3.6
	3.7	
	5.7	
	5.7	
	3.7	
	3.5	
SSM 356-T6 (ดอกส่วนหมุนตามเข็มนาฬิกาเชื่อมภายใต้แก๊สปกคลุม)	0.2	0.2
	0.2	
	0.1	
	0.2	
	0.1	
	0.2	

ภาคผนวก ข.
ค่าความแข็งแรงเชื่อม

ช 1. ค่าความแข็งของแนวเชื่อมในทุก ๆ บริเวณ (ทั้งหมด 40 จุด, HV_{0.1})

จุด/สภาวะ	1100 rpm	1750 rpm หมุนตาม เข็มนาฬิกา	2200 rpm	1750 rpm หมุนทวน เข็มนาฬิกา	1750 rpm ภายใต้แก๊ส ปกคลุม	1750 rpm SSM356- T6
-20	64.5	66.3	64.7	66.8	67.3	97.5
-19	63.2	66.4	60.3	55.9	66.4	80.5
-18	60.2	66.3	66.0	67.7	65.3	76.5
-17	58.1	64.2	66.8	54.7	64.2	78.9
-16	59.1	62.1	64.2	65.1	62.1	75.5
-15	53.7	62.2	68.6	67.1	58.2	73.5
-14	59.6	62.2	65.0	67.8	61.2	73.4
-13	57.2	60.2	55.5	67.1	64.5	70.5
-12	59.6	61.3	59.1	68.8	60.3	60.3
-11	59.8	60.8	55.4	63.0	60.8	76.1
-10	59.1	60.2	56.4	59.4	55.5	73.2
-9	57.1	56.5	59.8	64.0	59.5	72.6
-8	63.1	60.4	61.7	61.6	58.4	82.4
-7	62.7	60.5	64.7	62.8	60.5	83.5
-6	70.8	62.3	62.8	63.2	62.3	84.4
-5	65.5	68.7	65.1	66.6	68.7	85.6
-4	67.8	64.3	65.4	68.1	69.3	83.3
-3	70.5	65.3	64.4	67.4	69.3	85.7
-2	67.6	66.1	65.2	68.7	73.5	85.6
-1	71.2	70.2	62.0	63.9	71.2	84.3
0	71.2	70.2	62.0	68.4	72.0	80.3
1	65.6	65.1	67.6	71.1	70.5	85.3
2	66.1	70.1	66.0	65.9	75.6	87.1
3	67.1	66.7	62.5	71.0	69.1	86.2
4	61.2	58.1	63.1	61.1	69.1	84.3

5	66.1	57.3	63.7	63.6	66.7	82.3
6	56.2	56.8	59.5	61.2	60.1	82.3
7	56.4	58.3	63.2	63.5	58.2	80.5
8	50.1	57.3	60.9	67.1	58.8	80.3
9	55.0	56.8	59.6	66.9	58.3	75.6
10	53.6	58.3	54.0	67.3	57.3	72.6
11	59.1	57.2	56.6	61.3	50.3	53.9
12	62.4	54.6	54.8	64.6	60.8	75.6
13	65.3	54.8	60.1	64.1	60.4	79.6
14	69.4	59.4	55.4	67.4	61.3	60.0
15	68.3	61.3	57.4	62.0	62.3	65.6
16	65.5	62.3	52.9	62.6	63.3	80.6
17	66.9	63.3	51.3	64.6	66.5	75.6
18	66.6	66.5	59.9	62.8	69.5	83.3
19	66.7	69.5	64.7	62.0	67.5	96.5
20	66.2	67.5	64.8	62.3	67.5	96.5
ค่าเฉลี่ย	62.8	63.2	61.3	64.6	64.0	79.2

ภาคผนวก ซ.

มอเตอร์แกน A

ข 1. ค่าต่างๆ ของมอเตอร์แกน A



60mm sq. (2.36inch sq.)

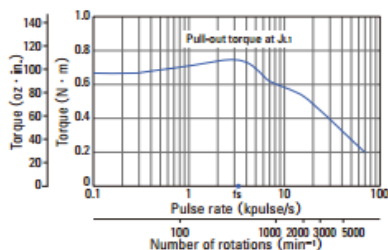
0.72° /step
Motor with connector

Model number		Holding torque at 5-phase energization	Rated current	Wiring resistance	Winding inductance	Rotor inertia	Mass(Weight)
Single shaft	Double shaft	[N · m (oz · in) MIN.]	A/phase	Ω /phase	mH/phase	[× 10 ⁻⁴ kg · m ² (oz · in ²)]	kg (lbs)
103H7851-7051	103H7851-7021	0.65 (92.0)	0.75	2.75	4.75	0.275 (1.50)	0.6 (1.32)
103H7851-8051	103H7851-8021	0.65 (92.0)	1.5	0.64	1.2	0.275 (1.50)	0.6 (1.32)
103H7852-7051	103H7852-7021	0.98 (138.8)	0.75	3.4	7.75	0.4 (2.19)	0.78 (1.72)
103H7852-8051	103H7852-8021	0.98 (138.8)	1.5	0.8	2	0.4 (2.19)	0.78 (1.72)
103H7853-7051	103H7853-7021	1.86 (263.4)	0.75	5.5	15	0.84 (4.59)	1.36 (3.00)
103H7853-8051	103H7853-8021	1.86 (263.4)	1.5	1.28	3.85	0.84 (4.59)	1.36 (3.00)

Optional Accessories : motor cable model number : 4837847-1

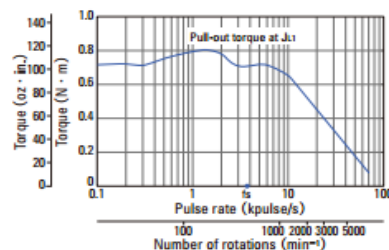
Characteristics

103H7851-7051
103H7851-7021



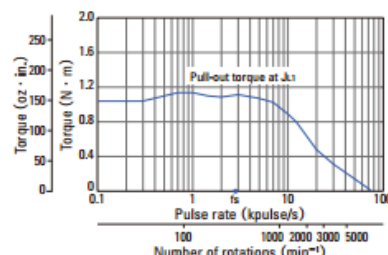
Constant current circuit
Source voltage : AC100V · operating current : 0.75A/phase
5-phase excitation (full step)

103H7851-8051
103H7851-8021



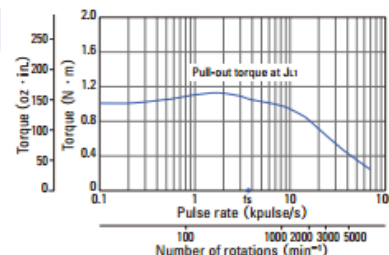
Constant current circuit
Source voltage : AC100V · operating current : 1.5A/phase
5-phase excitation (full step)

103H7852-7051
103H7852-7021



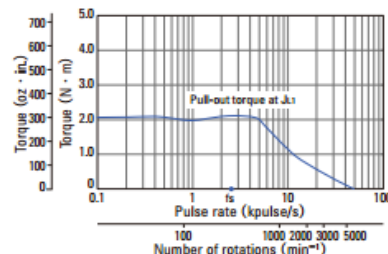
Constant current circuit
Source voltage : AC100V · operating current : 0.75A/phase
5-phase excitation (full step)
JL1= [2.6 × 10⁻⁴kg · m² (40.46 oz · in²) use the rubber coupling]
fs: Maximum self - start frequency when not loaded

103H7852-8051
103H7852-8021



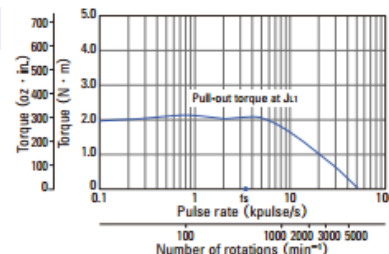
Constant current circuit
Source voltage : AC100V · operating current : 1.5A/phase
5-phase excitation (full step)
JL1= [2.6 × 10⁻⁴kg · m² (5.14 oz · in²) use the rubber coupling]
fs: Maximum self - start frequency when not loaded

103H7853-7051
103H7853-7021



Constant current circuit
Source voltage : AC100V · operating current : 0.75A/phase
5-phase excitation (full step)
JL1= [7.4 × 10⁻⁴kg · m² (14.22 oz · in²) use the rubber coupling]
fs: Maximum self - start frequency when not loaded

103H7853-8051
103H7853-8021



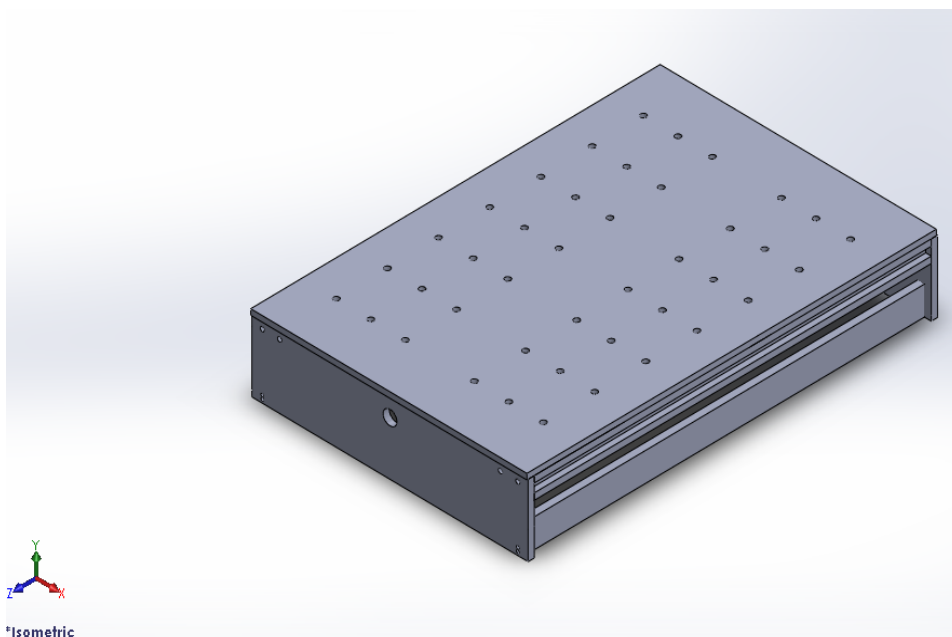
Constant current circuit
Source voltage : AC100V · operating current : 1.5A/phase
5-phase excitation (full step)
JL1= [7.4 × 10⁻⁴kg · m² (40.46 oz · in²) use the rubber coupling]
fs: Maximum self - start frequency when not loaded

รูปที่ ข 1. ค่าลักษณะของมอเตอร์แกน A ที่นำมาใช้งานกับ Mini CNC [34]

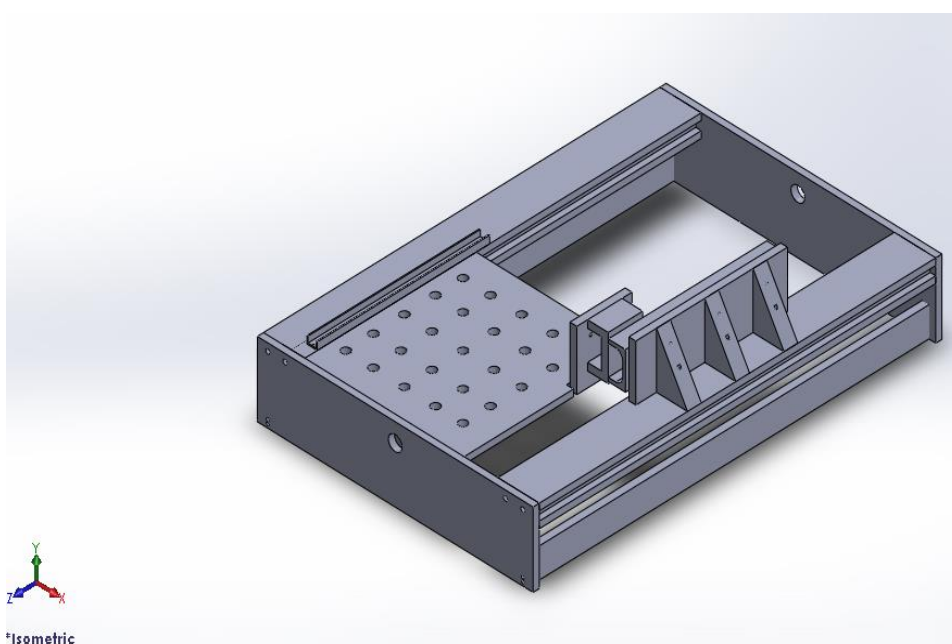
ภาคผนวก ฉ.

แบบเครื่อง Mimi CNC และขาจับท่อแก๊สปกคลุม

ณ 1. ภาพเครื่อง Mini CNC ก่อนทำการปรับปรุงและหลังปรับปรุง



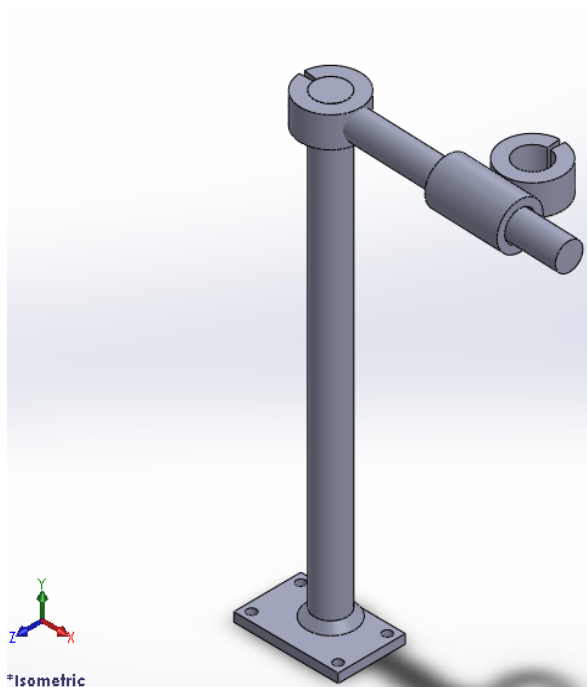
(ก)



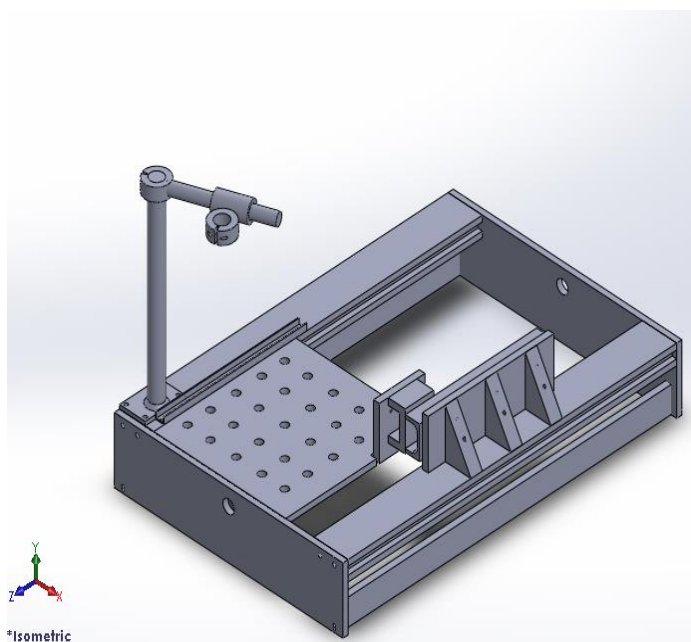
(ข)

รูปที่ ณ 1. (ก) ภาพเครื่อง Mini CNC ก่อนทำการปรับปรุง (ข) ภาพเครื่อง Mini CNC หลังทำการปรับปรุง

ณ 2. ภาพขาจับท่อแก๊สปกคลุม



(ก)

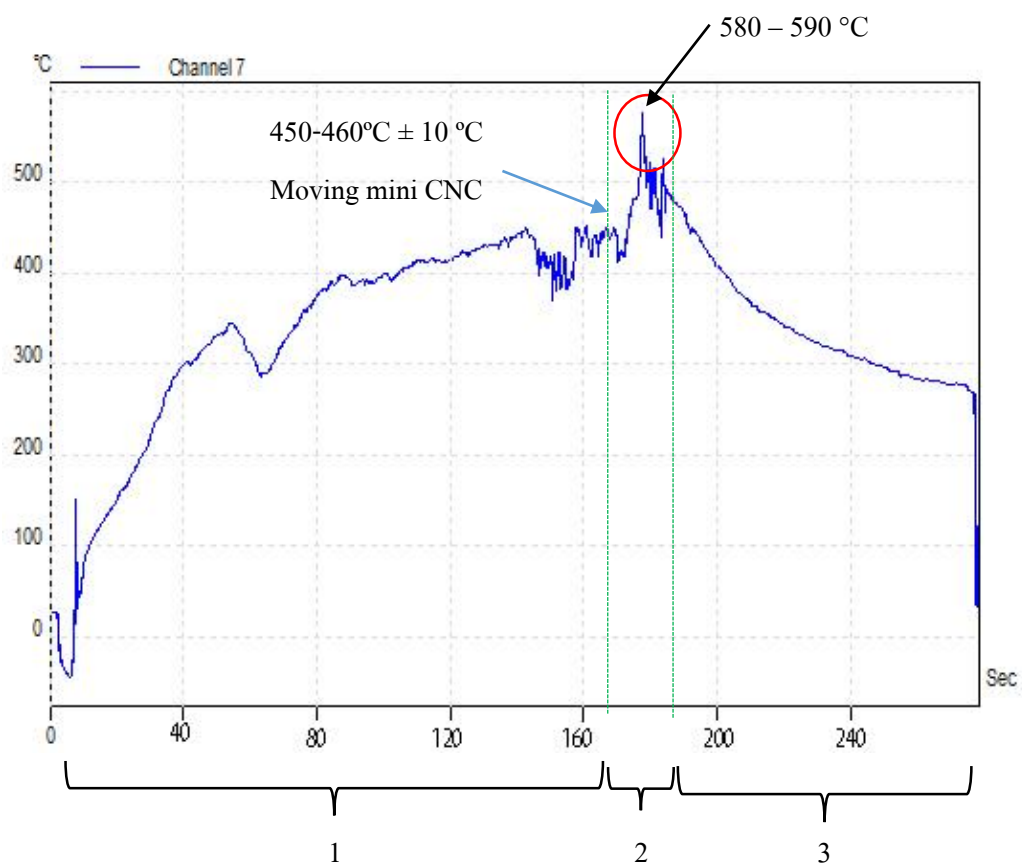


(ข)

รูปที่ ณ 2. (ก) ภาพขาจับท่อแก๊ส (ข) ภาพเครื่อง Mini CNC ประกอบกับขาจับท่อแก๊ส

ภาคผนวก ญ.

กราฟแสดงอุณหภูมิระหว่างการเชื่อม



รูปที่ ๑. กราฟแสดงอุณหภูมิระหว่างการเชื่อม (1) การให้ความร้อนชิ้นงาน (2) การเชื่อม (3) การปล่อยให้ชิ้นงานเย็นตัวในบรรยากาศปกติ

ภาคผนวก ฎ.

บทความวารสาร

การปรับปรุงการเชื่อมในสถานะกึ่งของแข็งของอะลูมิเนียมหล่อกึ่งแข็ง Improvement of semisolid state joining of SSM aluminum alloys

นายภัสพล บิลหรือทิม¹, นายประภาศ เมืองจันทร์บุรี²

¹ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกลและวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ หาดใหญ่ สงขลา 90112

*Lucifer_559@hotmail.com, mprapas@eng.psu.ac.th, 08-8828-0476

บทคัดย่อ

การปรับปรุงการเชื่อมในสถานะกึ่งของแข็งของอะลูมิเนียมหล่อกึ่งแข็งเป็นงานวิจัยเพื่อต้องการศึกษาสมบัติทางมหภาค, จุลภาคและสมบัติเชิงกลของอะลูมิเนียมหล่อกึ่งแข็ง A356 การเชื่อมกวนในสภาวะกึ่งของแข็งซึ่งอุปกรณ์ในการเชื่อมกวนจะประยุกต์ใช้อุปกรณ์ที่มีสมบัติคล้ายคลึงกับหัวกวนคือ สว่านไฟฟ้าและใช้ดอกสว่าน 4 มิลลิเมตร โดยจะทำการเชื่อมแบบดอกสว่านหมุนตามเข็มนาฬิกา มีความเร็วรอบการหมุนของดอกสว่านที่แตกต่างกันคือ 1100 รอบ/นาที, 1750 รอบ/นาทีและ 2200 รอบ/นาที, ความเร็วเดินขึ้นงานที่ 75 มิลลิเมตร/นาที และควบคุมอุณหภูมิตลอดเวลา (570-580 °C) จากการทดลองและศึกษาพบว่าสภาวะที่ให้ค่าสมบัติทางมหภาค, จุลภาคและสมบัติเชิงกล (Tensile Test) ที่ดีที่สุดสำหรับการเชื่อมกวนในสภาวะกึ่งของแข็งของอะลูมิเนียมหล่อกึ่งของแข็ง SSM A356 คือ ความเร็วรอบการหมุนของสว่าน 1750 รอบ/นาที, ความเร็วของหัวเชื่อม 75 มิลลิเมตร/นาที

คำหลัก: การเชื่อมในสภาวะกึ่งของแข็ง, การเชื่อมอะลูมิเนียมหล่อกึ่งของแข็ง

Abstract

Improvement of semisolid state joining of SSM aluminum alloys was studied for macrostructure, microstructure and mechanical properties of SSM A356. The butt-joint of SSM A356 was weld using portable drill-tip stirrer with diameter 4 mm drill clockwise rotation. The samples were heated by induction heating coil. The controlling temperature during joining was measured. The joining process studied 3 conditions were 1100 rpm, 1750 rpm, 2200 rpm of stirring rate, speed of welding was 75 mm/min. The best condition for semisolid state joining of SSM aluminum alloys was 1750 rpm of stirring rate and speed of welding 75 mm/min. The result of best condition was obtained from analysis macrostructure, microstructure and mechanical properties compare with other condition of joinings.

Keywords: Semisolid, Semisolid joining, SSM A356 joining

1. บทนำ

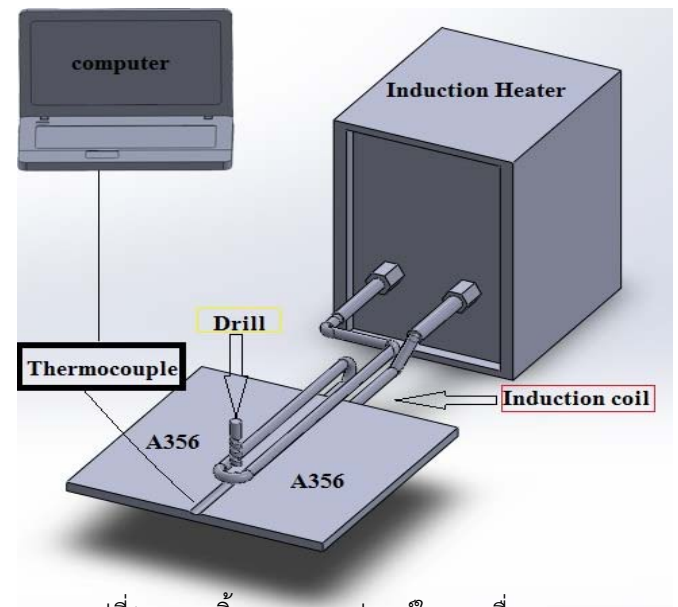
ปัจจุบันชิ้นส่วนอะลูมิเนียมผสมขึ้นรูปด้วยวิธีการหล่อเป็นที่ต้องการมากขึ้นในอุตสาหกรรมต่างๆ เช่น อุตสาหกรรมรถยนต์ อุตสาหกรรมเครื่องจักร เป็นต้น เพราะอะลูมิเนียมเป็นวัสดุที่มีความแข็งแรงสูงหรือเทียบเท่าเหล็กแต่น้ำหนักเบากว่าเหล็กอุตสาหกรรมขนาดใหญ่จึงให้ความสนใจอะลูมิเนียมมากขึ้น อะลูมิเนียมส่วนใหญ่จะผ่านการหล่อขึ้นมา วิธีที่นิยมใช้มากที่สุดคือ การหล่ออะลูมิเนียมแบบไดคาสต์ติ้ง (Die casting) ไดคาสต์ติ้ง (Die Casting) คือกรรมวิธีการหล่อ Rheocasting ซึ่งเป็น การหล่อโลหะกึ่งของแข็ง (Semi-Solid Metal หรือ SSM) การหล่อโลหะแบบกึ่งของแข็งคือ การขึ้นรูปโลหะขณะที่โลหะมีการแข็งตัวบางส่วน โดยโลหะที่มีการแข็งตัวแล้วจะมีโครงสร้างเกรนแบบก้อนกลม (Spherical หรือ Globular grain) ซึ่งมีสมบัติต่าง ๆ ดีกว่า โครงสร้างเกรนแบบกิ่งไม้ (Dendrite)

Semi-Solid State หรือสถานะกึ่งของแข็ง โดยส่วนใหญ่วัสดุทุกชนิดนั้นจะประกอบด้วย 3 สถานะหลักคือ ของแข็ง (Solid), ของเหลว (Liquid), ก๊าซ (Gas) ซึ่งแต่ละสถานะของแต่ละวัสดุนี้มีอุณหภูมิที่ไม่เท่ากันในงานวิจัยชิ้นนี้เราศึกษาพฤติกรรมของ Aluminum A356 Alloys (SSM A356 Alloys) ซึ่งจะมีอุณหภูมิการหลอมเหลวอยู่ที่อุณหภูมิ 612°C และมีอุณหภูมิการแข็งตัวอยู่ที่ 557°C ดังนั้นจึงทำให้ Semi-solid State ของ Aluminum SSM A356 Alloys (SSM A356 Alloys) อยู่ในช่วง $557-612^{\circ}\text{C}$ ซึ่งจากงานวิจัยที่ผ่านมาทำให้สามารถสรุปช่วงที่เหมาะสมของ Semi-Solid ในงานวิจัยคือ $575-610^{\circ}\text{C}$ การเชื่อมในสถานะกึ่งของแข็งของ Aluminum A356 Alloys (SSM A356 Alloys) เป็นการเชื่อมโลหะผสมหล่อกึ่งแข็งเพื่อต้องการรักษาสมบัติต่างๆในตัววัสดุนั้นให้มีค่าใกล้เคียงกับค่าคุณสมบัติเดิมของโลหะนั้นๆ จึงได้มีการศึกษาวิจัยการเชื่อมในสถานะกึ่งแข็งเกิดขึ้น การวิจัยนั้นได้นำเอา Aluminum A356 Alloys (SSM A356 Alloys) มาทำการเชื่อมในสถานะกึ่งของแข็งโดย ได้มีการควบคุมตัวแปรต่างๆที่มีผลต่อแนวเชื่อม อาทิเช่น อุณหภูมิในการเชื่อม ความเร็วในการเดินแนวเชื่อมและความเร็วรอบในการหมุนของตัวกวน เป็นต้น

ในงานวิจัยนี้จะสนใจการเชื่อมในสถานะกึ่งของแข็งโดยใช้อุปกรณ์ทางเลือกมาประยุกต์ใช้ในการเชื่อมนั้นคือ ส่วนไฟฟ้า ที่สามารถปรับรอบได้

2. ขั้นตอนการทดลอง

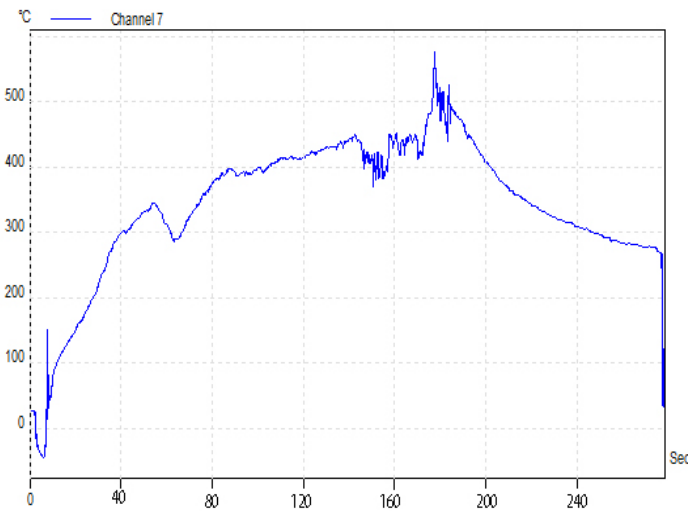
การเชื่อมอะลูมิเนียม A356 จะเชื่อมแบบต่อชน ชิ้นงานมีขนาด 100 มิลลิเมตร \times 50 มิลลิเมตร \times 4 มิลลิเมตร โดยจะใช้ดอกสว่าน 4 มิลลิเมตรและส่วนไฟฟ้าที่รอบต่างๆ เป็นตัวกวน โดยใช้ความเร็วรอบการหมุนของดอกสว่านที่ $1,100$ รอบ/นาที $1,750$ รอบ/นาที $2,200$ รอบ/นาที ทั้งนี้ยังจำกัดความเร็วเดินชิ้นงานที่ 75 มิลลิเมตร/นาที ดังแสดงในตารางที่ 1 หลังจากนั้นทำการเพิ่มอุณหภูมิชิ้นงานด้วยขดลวดเหนี่ยวนำ 3 นาทีโดยใช้กระแสของเครื่อง Induction heater ที่ 542A จนอุณหภูมิของชิ้นงานมีค่าประมาณ $480-500^{\circ}\text{C}$ จึงได้ทำการเริ่มเชื่อมโดยกำหนดความในการเดินชิ้นงานที่ 75 มิลลิเมตร/นาที ใช้เวลาเชื่อม 2 นาทีโดยในขณะที่เชื่อมได้ทำการรักษาและวัดอุณหภูมิให้อยู่ระหว่าง $575-580^{\circ}\text{C}$ หลังจากนั้นทำการปล่อยให้ชิ้นงานเย็นตัวในบรรยากาศปกติ



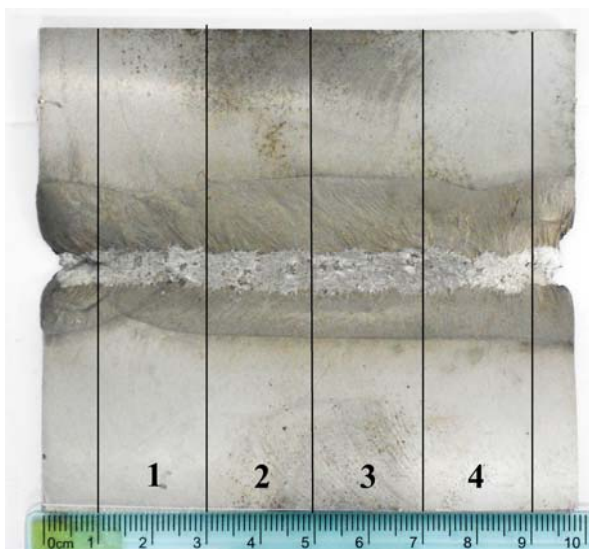
รูปที่ 1. แสดงชิ้นงานและอุปกรณ์ในการเชื่อม

ตารางที่1. แสดงสภาวะที่กำหนดในการเชื่อมด้วยสว่านไฟฟ้า

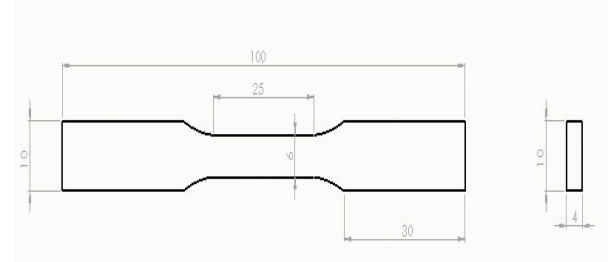
สภาวะ	ความเร็วรอบการหมุนของดอกสว่าน(รอบ/นาท)	ความเร็วเดินชิ้นงานที่ (มิลลิเมตร/นาท)
1	1,100	75
2	1,750	75
3	2,200	75



รูปที่ 2. กราฟอุณหภูมิของชิ้นงานในขณะที่ทำการทดลอง หลังจากการเชื่อมได้นำชิ้นงานแบ่งออกเป็น 4 ส่วน เพื่อนำมาวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพ,สมบัติทางจุลภาค, สมบัติทางจุลภาคและสมบัติเชิงกล



รูปที่3. แสดงลักษณะการตัดแบ่งชิ้นงาน
ชั้นที่ 1 และ ชั้นที่ 4 จะทำการวิเคราะห์สมบัติทางมหภาคและจุลภาค ในส่วนชั้นที่ 2 และชั้นที่ 3 วิเคราะห์สมบัติเชิงกลโดยชั้นที่2 จะทำการทดสอบ Tensile Test กัดชิ้นงานทดสอบตามมาตรฐาน ASTM-E8Mและใช้อัตราการดึงที่1.002มิลลิเมตร/นาทและชั้นที่ 3 จะทำการทดสอบ Hardness Test

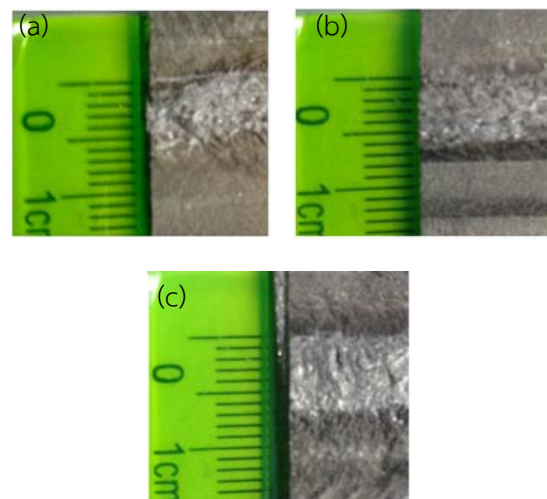


รูปที่4.ขนาดชิ้นงานทดสอบตามมาตรฐาน ASTM-E8M (mm)

3.ผลการทดลองและวิเคราะห์ผล

3.1 ลักษณะทางกายภาพ

การวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพจะเป็นการสังเกตรอยเชื่อมของชิ้นงานหลังจากการปล่อยให้เย็นตัวในบรรยากาศพบว่า จำนวนรอบการหมุนของดอกสว่านจะส่งผลต่อความกว้างของแนวเชื่อม จำนวนรอบที่สูงขึ้นจะทำให้ความกว้างของแนวเชื่อมมากขึ้นด้วย จากการทดลองพบว่าที่รอบการหมุนของดอกสว่านสว่าน 2,200 รอบ/นาท จะทำให้ความกว้างของแนวเชื่อมที่มากกว่าสภาวะอื่นๆ

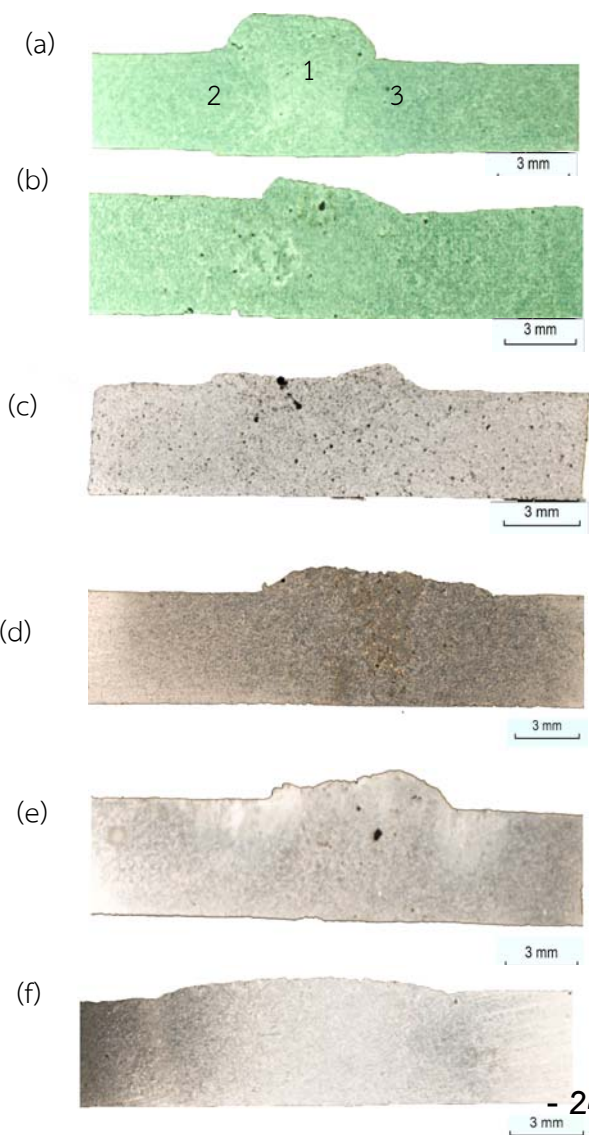


ที่5.แสดงลักษณะทางกายภาพของสภาวะต่างๆ,(a)1,100 รอบ/นาท,(b)1,750 รอบ/นาท,(c)2,200 รอบ/นาท ความกว้างของแนวเชื่อมส่งผลต่อความแข็งแรงของแนวเชื่อมเนื่องจากความกว้างของแนวเชื่อมจะแสดงถึง

ขนาดของเกรนที่มีขนาดใหญ่โดยจากรูป จะเห็นได้ว่าที่สภาวะที่ 1 (1,100รอบ/นาที่) มีความกว้างของแนวเชื่อมเท่ากับ 5 มิลลิเมตร,สภาวะที่ 2 (1,750รอบ/นาที่)จะมีความกว้างของแนวเชื่อมเท่ากับ 6 มิลลิเมตร,สภาวะที่ 3(2,200รอบ/นาที่)จะมีความกว้างของแนวเชื่อมเท่ากับ 7 มิลลิเมตร

3.2 ลักษณะโครงสร้างมหภาค

จากรูป6. จะเป็นการแสดงลักษณะโครงสร้างมหภาคในสภาวะต่างๆ โดยจะแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ 1. ตอนต้น 2.ตอนปลาย และได้แบ่งเป็น 3 บริเวณ ได้แก่ 1. บริเวณแนวเชื่อม (Weld zone: WM), 2.บริเวณด้านการเคลื่อนที่ (Retreating Side RS), 3.บริเวณเสริมการเคลื่อนที่ (Advancing Side: AS) พบว่า จำนวนรอบการหมุนของดอกสว่านจะส่งผลต่อความเรียบของรอยเชื่อม จำนวนรอบการหมุนของสว่านที่สูงจะส่งผลให้ความเรียบของรอยเชื่อมมากขึ้นด้วย ซึ่งจากการทดลองพบว่าที่รอบการหมุนของดอกสว่าน 2,200 รอบ/นาที่ จะทำให้ความเรียบของรอยเชื่อมที่สูงกว่าสภาวะอื่นๆ



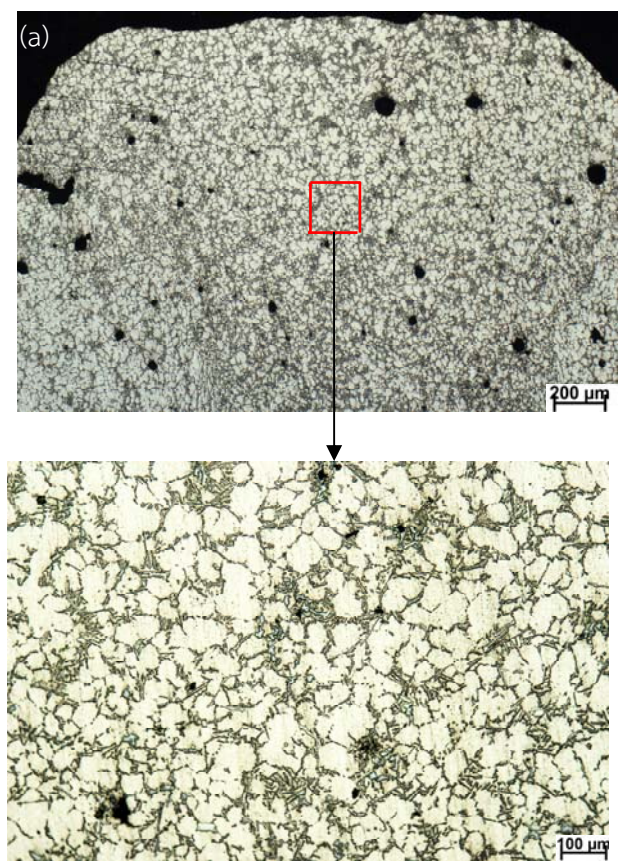
รูปที่6. แสดงลักษณะโครงสร้างมหภาคตามสภาวะต่างๆ,(a) (b)1,100 รอบ/นาที่,(c)(d)1,750 รอบ/นาที่,(e)(f)2,200 รอบ/นาที่

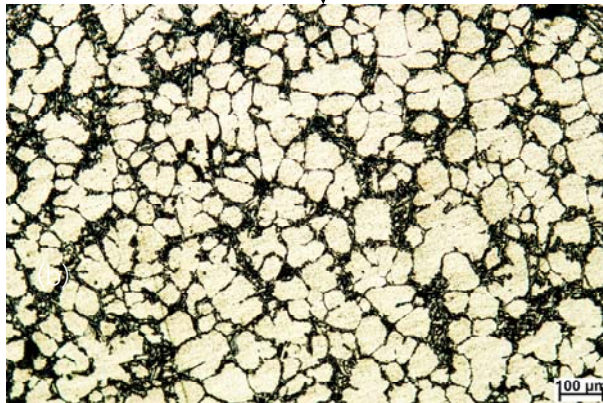
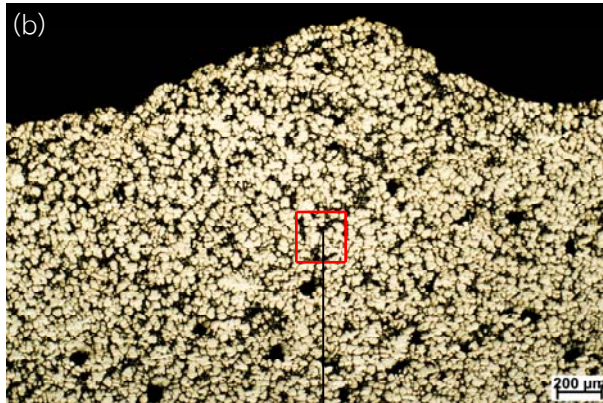
ความเรียบของรอยเชื่อมจะบ่งบอกถึงแรงเหวี่ยงของดอกสว่านซึ่งแรงเหวี่ยงจะทำให้เกิดแรงมากพอที่จะทำให้เนื้อของอะลูมิเนียมบริเวณแนวเชื่อมเหวี่ยงตัวออกไปรอบๆแทนที่จะเกาะกันขึ้นมาข้างบนจากรูปจะเห็นได้ว่าลักษณะของแนวเชื่อมสภาวะที่ 3 (2,200รอบ/นาที่)ตอนปลาย จะมีแนวเชื่อมที่เรียบที่สุด

3.3 ลักษณะโครงสร้างจุลภาค

การวิเคราะห์ลักษณะโครงสร้างทางจุลภาคสามารถทำได้ทำการวิเคราะห์โดยใช้เครื่อง Optical Microscope (OM) ที่กำลังขยาย 2.5x และ 10x แสดงผลดังนี้

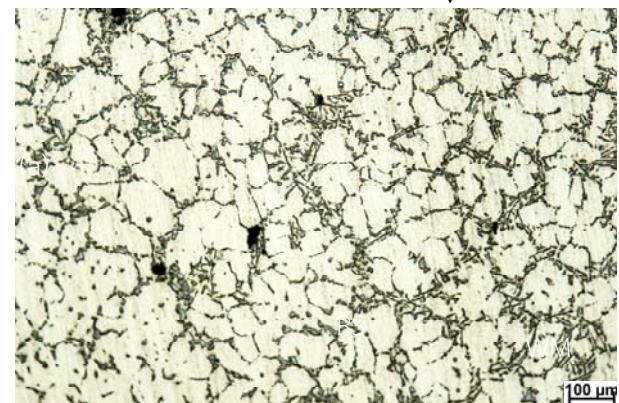
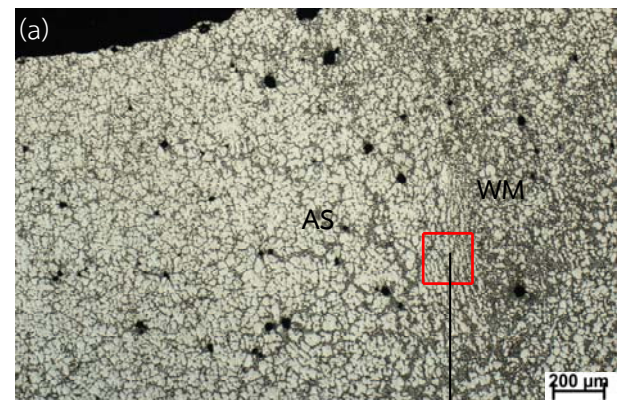
3.3.1.บริเวณแนวเชื่อม(Weld zone: WM)



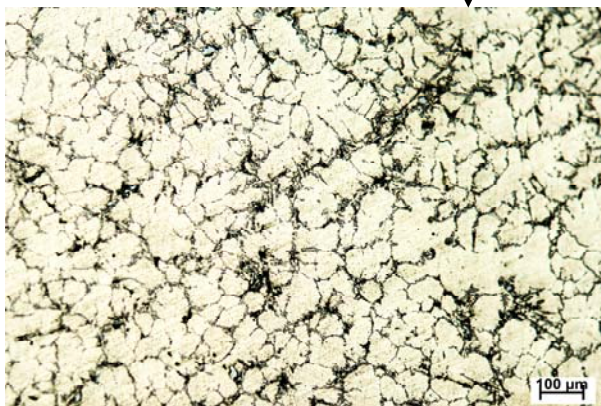
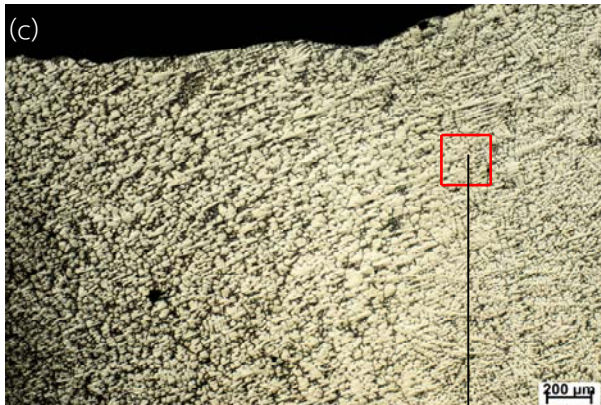
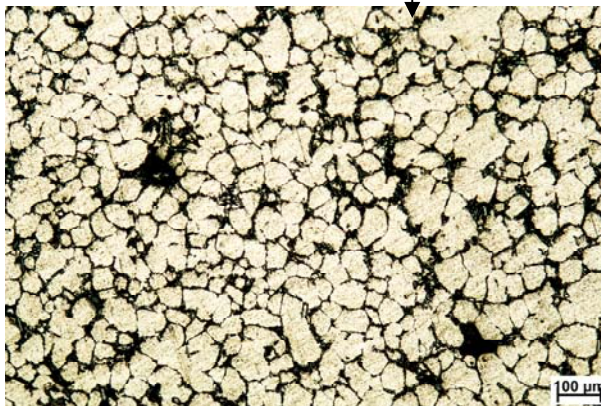
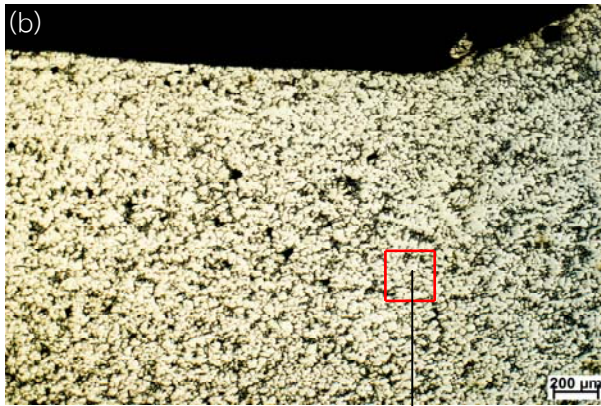


จากนั้นได้ทำการคำนวณหาขนาดของเกรนได้ผลดังนี้
ขนาดเกรนของสภาวะที่ 1 มีขนาด 54 μm ,ขนาดเกรน
ของสภาวะที่ 2 มีขนาด 57 μm ,ขนาดเกรนของสภาวะที่
3 มีขนาด 75 μm เพราะฉะนั้นในบริเวณรอยเชื่อม
สภาวะที่ 3 มีขนาดเกรนที่ใหญ่ที่สุด

3.3.2.บริเวณเสริมการเคลื่อนที่ (Advancing Side: AS)



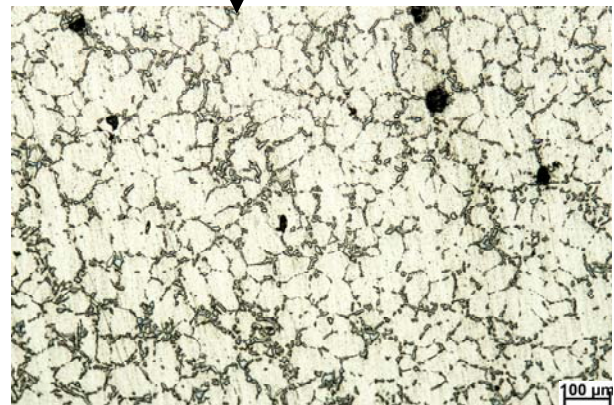
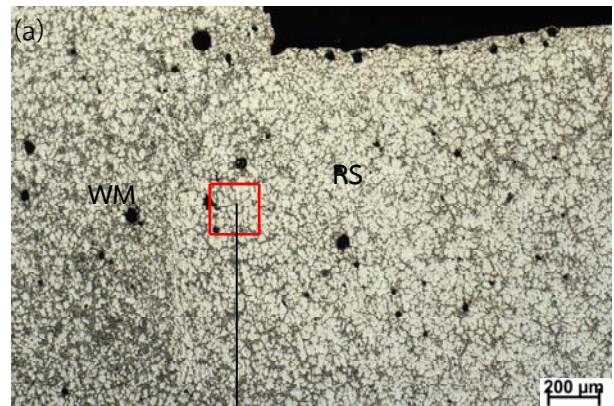
รูปที่7.แสดงลักษณะเกรนในบริเวณแนวเชื่อม(WM)ที่รอบ
การหมุนดอกสว่านรอบ (a)1,100 รอบ/นาที,(b)1,750
รอบ/นาที,(c)2,200 รอบ/นาที

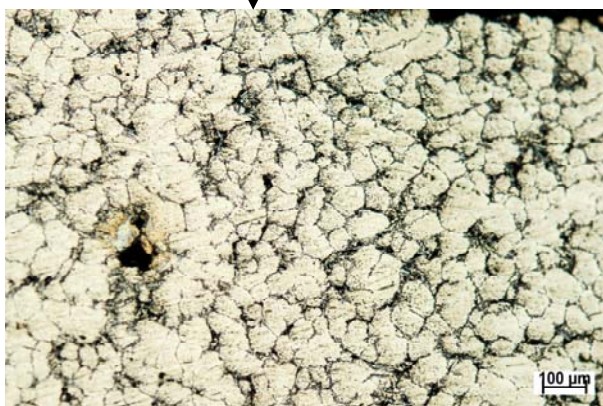
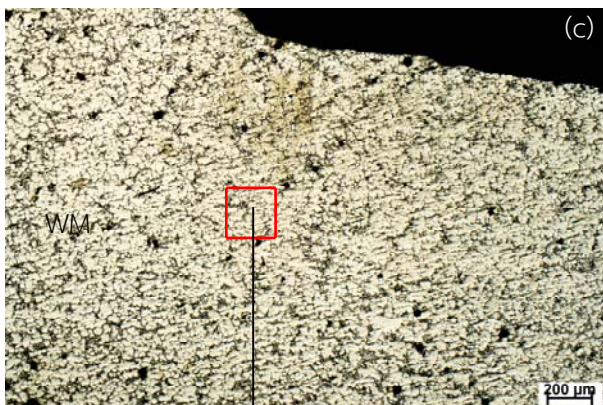
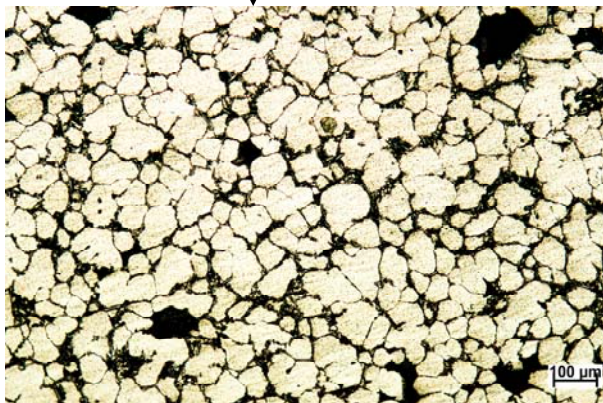
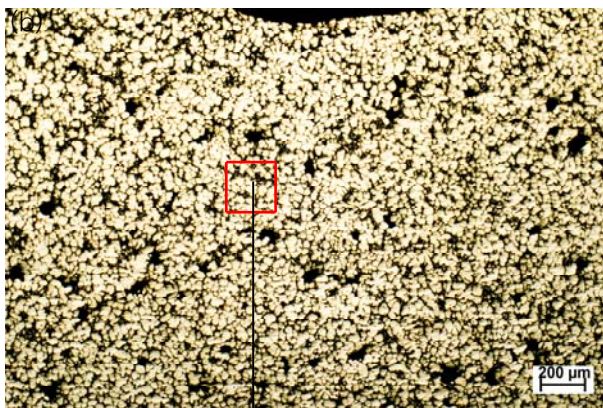


รูปที่ 8 แสดงลักษณะเกรนในบริเวณด้านการเคลื่อนที่ (RS) ที่รอบการหมุนดอกสว่านรอบ (a) 1,100 รอบ/นาที, (b) 1,750 รอบ/นาที, (c) 2,200 รอบ/นาที

จากนั้นได้ทำการคำนวณหาขนาดของเกรนได้ผลดังนี้ ขนาดเกรนของสภาวะที่ 1 มีขนาด 65µm, ขนาดเกรนของสภาวะที่ 2 มีขนาด 60µm, ขนาดเกรนของสภาวะที่ 3 มีขนาด 68µm เพราะฉะนั้นในบริเวณรอยเชื่อมสภาวะที่ 3 มีขนาดเกรนที่ใหญ่ที่สุด

3.3.3. บริเวณด้านการเคลื่อนที่ (Retreating Side: RS)





รูปที่9.แสดงลักษณะเกรนในบริเวณเสริมการเคลื่อนที่ (AS) ที่รอบการหมุนดอกสว่านรอบ(a)1,100รอบ/นาที ,(b)1,750 รอบ/นาที,(c)2,200 รอบ/นาที

จากนั้นได้ทำการคำนวณหาขนาดของเกรนได้ผล ดังนี้ ขนาดเกรนของสภาวะที่ 1 มีขนาด61 μm ,ขนาดเกรนของสภาวะที่ 2 มีขนาด63 μm ขนาดเกรนของสภาวะที่ 3 มีขนาด71 μm เพราะฉะนั้นในบริเวณรอยเชื่อมสภาวะที่3 มีขนาดเกรนที่ใหญ่ที่สุด

จากผลการคำนวณขนาดเกรนในแต่ละบริเวณของทั้ง 3 สภาวะพบว่า เกรนของสภาวะที่ 2 บริเวณแนวเชื่อมจะมีขนาดเกรนที่ใกล้เคียงกับขนาดเกรนเดิมของอะลูมิเนียมหล่อผสมเกรด356 นั่นคือ 57 μm (ขนาดเดิม 49 μm) และสภาวะที่ 3 มีขนาดเกรนเฉลี่ยทั้ง 3 บริเวณมากที่สุด

3.4 สมบัติเชิงกล

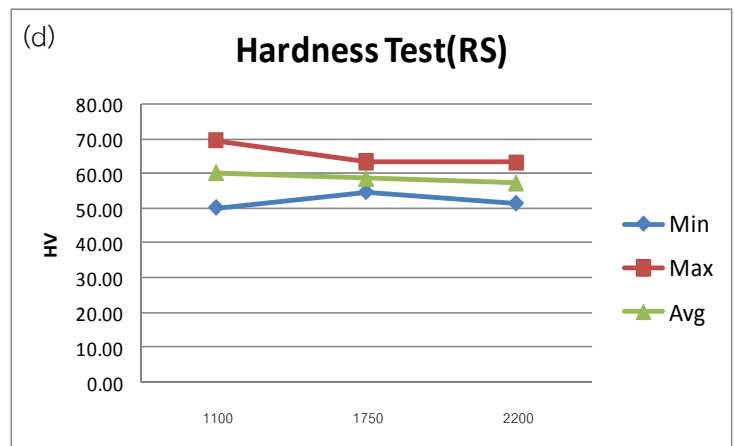
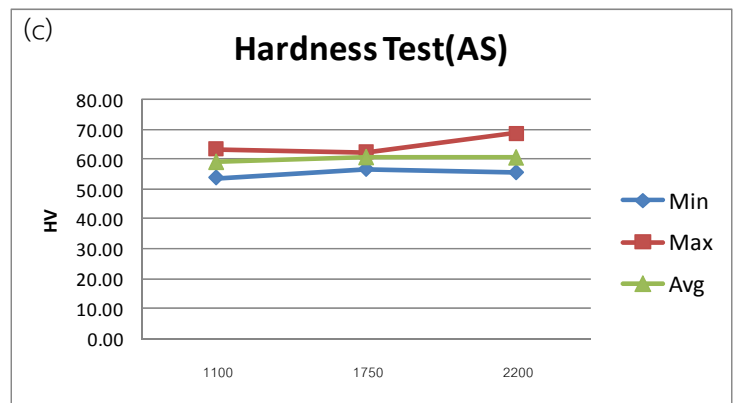
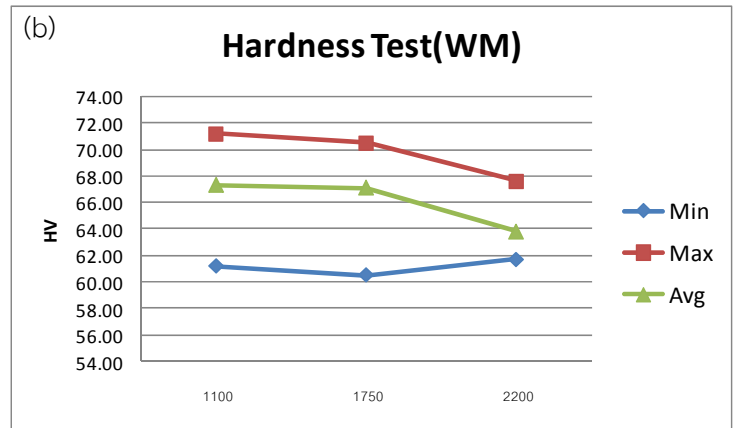
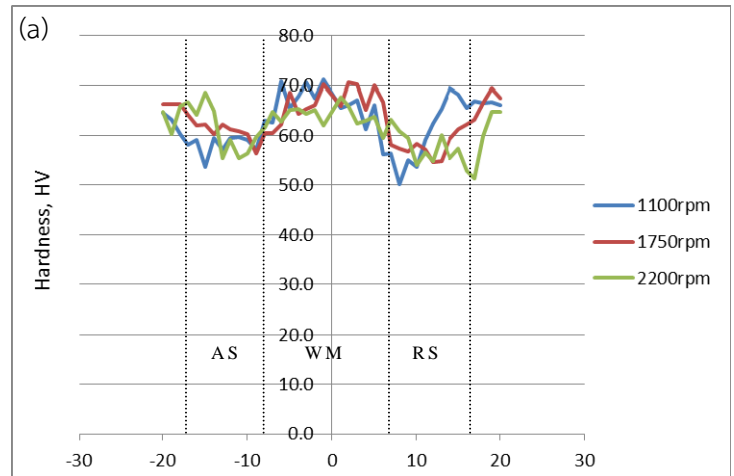
จากการทดสอบ Tensile Test ได้ผลการทดลองดังแสดงในตารางที่ 2.

สภาวะ	ค่าความแข็งแรงดึงของแนวเชื่อม (MPa)	ค่าเฉลี่ยค่าความแข็งแรงดึงของแนวเชื่อม(MPa)
1	80.6 (RS)	83.23
	94.02 (RS)	
	75.05 (AS)	
2	103.2 (AS)	111.30
	115.8 (RS)	
	114.9 (RS)	
3	94.05 (AS)	103.92
	115.3 (RS)	
	100.6 (RS)	

ตารางที่2.แสดงค่าความแข็งแรงดึงของแนวเชื่อม

จากการทดสอบ Tensile Test ทั้ง 3 สภาวะได้ผลดังตารางโดยทุกชิ้นงานจะมีการแตกหักตรงบริเวณที่ได้รับผลกระทบทางความร้อน (Heat affected zone, HAZ) ทั้งหมดและสภาวะที่มีค่าเฉลี่ยค่าความแข็งแรงดึงมากที่สุดคือสภาวะที่ 2 (1,750รอบ/นาที) ซึ่งมีค่าเท่ากับ 111.30 MPa คิดเป็น 67.25% ของโลหะเดิม(164 MPa)

การทดสอบ Hardness Test โดยจะนำชิ้นงานในส่วนที่ 2 มาทดสอบจะทำการทดสอบด้วยแรง 100g กดเป็นเวลา 10 วินาที ระยะห่างระหว่างจุดจุดละ 0.5 มิลลิเมตรทั้งหมด 40 จุดและได้คำนวณค่าความแข็งแรงต่อละบริเวณได้ผลดังรูปที่10.



รูปที่10.(a) แสดงค่าความแข็งทั้ง 40 จุดของชิ้นงาน, แสดงค่าสูงสุด-ต่ำสุดและค่าเฉลี่ยของค่าความแข็งโดย (b) บริเวณแนวเชื่อม, (c) บริเวณเสริมการเคลื่อนที่, (d) บริเวณด้านการเคลื่อนที่

จากรูป 10(a). จะแสดงถึงค่าความแข็งของบริเวณต่างๆ โดยค่าเฉลี่ยความแข็งของชิ้นงานโดยสภาวะที่ 2 มีค่าเฉลี่ยความแข็งสูงสุดคือ 63.1HV และสภาวะที่ 3 มีค่าเฉลี่ยความแข็งต่ำที่สุด คือ 61.3HV

รูปที่ 10(b). แสดงถึงค่าเฉลี่ยบริเวณแนวเชื่อม พบว่าที่สภาวะที่มีค่าเฉลี่ยความแข็งมากที่สุดคือ สภาวะที่ 1 (67.3HV)

รูปที่ 10(c). แสดงถึงค่าเฉลี่ยบริเวณเสริมการเคลื่อนที่ พบว่าที่สภาวะที่มีค่าเฉลี่ยความแข็งมากที่สุดคือ สภาวะที่ 2 (60.6HV)

รูปที่ 10(d). แสดงถึงค่าเฉลี่ยบริเวณด้านการเคลื่อนที่ พบว่าที่สภาวะที่มีค่าเฉลี่ยความแข็งมากที่สุดคือ สภาวะที่ 1 (60.1HV)

4. สรุป

การปรับปรุงการเชื่อมในสถานะกึ่งของแข็งของ อะลูมิเนียมหล่อกึ่งแข็งเป็นการเชื่อมโดยใช้สว่านไฟฟ้าทำการทดลองได้ผลสรุปดังนี้

4.1 โครงสร้างทางมหภาค

จากการทดลองพบว่า รอบความเร็วการหมุนของ ดอกสว่านมีผลต่อลักษณะแนวเชื่อม โดยความเร็วรอบการหมุนสว่านที่สูงจะทำให้แนวเชื่อมมีความราบเรียบยิ่งขึ้น

4.2 โครงสร้างทางจุลภาค

จากการทดลองพบว่า สภาวะที่ 1บริเวณแนวเชื่อมมีขนาดเกรน(54µm) ที่ใกล้เคียงกับโลหะเดิม (49µm) มากที่สุดและสภาวะที่ 3 มีขนาดเกรนที่ใหญ่ที่สุด แสดงว่าความเร็วรอบการหมุนของดอกสว่านมีผลต่อขนาดเกรน ความเร็วการหมุนดอกสว่านที่มากขึ้นจะทำให้ขนาดเกรนใหญ่ขึ้นด้วย

4.3 การทดสอบ Tensile Testและ Hardness Test

สภาวะที่มีผลการทดลอง Tensile Test ที่ดีที่สุดคือ สภาวะที่ 2 คือ ความเร็วรอบการหมุนของสว่าน 1750 รอบ/นาที, ความเร็วของหัวเชื่อม 75 มิลลิเมตร/นาที เนื่องจากสภาวะที่ 2 มีค่าเฉลี่ยความแข็งแรงดึงที่ดีที่สุดคือ 111.30 MPa

ในส่วนของ Hardness Test พบว่าสภาวะที่ 2 มีค่าเฉลี่ยความแข็งสูงสุด คือ 61.3HV และยังพบว่า บริเวณเนื้อเชื่อม (WM) มีค่าความแข็งแรงมากที่สุด ถัดมาคือบริเวณเสริมการเคลื่อนที่ (AS) และบริเวณด้านการเคลื่อนที่ (RS) มีค่าต่ำที่สุด

เพราะฉะนั้นจากผลการทดลองทั้งหมดทำให้สรุปได้ว่าสภาวะที่เหมาะสมกับการเชื่อมในสถานะกึ่งของแข็งของอะลูมิเนียมหล่อกึ่งแข็งโดยใช้สว่านไฟฟ้า คือ สภาวะที่ 2

5.กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้สำเร็จไปได้ด้วยดีด้วยความช่วยเหลือของทางวิศวกรรมเหมืองแร่และวัสดุ ในการเอื้อเฟื้อ เครื่องมือ อุปกรณ์และสถานที่ในการทำการวิจัย,ผศ.ดร.ประกาศ เมืองจันทร์บุรี อาจารย์ที่ปรึกษาการทำวิจัยในการช่วยแก้ปัญหาและข้อเสนอแนะต่าง ๆ ที่มีประโยชน์ในงานวิจัยเป็นอย่างมาก นอกจากนี้ขอขอบคุณ ผศ.ดร.ชยุต นันทดุสิต ในการเอื้อเฟื้อเครื่อง Mini CNC ในการทำวิจัย

อีกทั้งขอขอบคุณ เพื่อน ๆ น้อง ๆ ทุกคนที่คอยช่วยเหลือและเป็นกำลังใจในการทำวิจัยในครั้งนี้

6. เอกสารอ้างอิง

6.1 บทความจากวารสาร (Journal)

[1]A.Narimanezhad,H.Aashuri, A.H.Kokabi,A.Khosravani. “Microstructural evolution and mechanical properties of semisolid stir welded zinc AG40A die cast alloy.” Journal of Materials Processing Technology 209 (2009), Page 4112-4121s.

[2]Huibin Xu, Quanxiang Luo, Bofang Zhou, Youliang Zeng, Changhua Du. “The effect of stirring rate on semisolid stirring brazing of SiCp/A356 composites in air.” Materials and Design 34 (2012), Page 452-458.

[3]V.A. Hossini, H. Aashuri, A.H. Kokabi. “Characterization of newly developed semisolid stir welding method for AZ91 magnesium alloy by using Mg-25%Zn interlayer”, material Science and Engineering Department, Sharif University of Technology, AzadAve., Tehran, Iran.

[4]V.A.Hosseini,H.Aashuri,Akokabi. “Mechanisms of joint formation throughout semisolid stir welding of AZ91 magnesium alloy”,Material Science and Engineering Department,Sharif University of Technology,Azad Ave.,Tehran,Iran (2013)

[5]S.M.J.ALVANI,H.AASHURI,A.KOKABI,R.BEYGI. “Semisolid joining of aluminum A356 alloys by partial remelting and mechanicalstirring”,Material Science and Engineering Department, Sharif University of Technology,Azadi Ave.,Tehran,Iran (2010)

[6]S.Tahamtan,M.A.Golozar,F.Karimzadeh,B.Niroumand. “Microstructure and tensile properties of thixoformed A356 alloys.”,Isahan University of Technology,Iran(2006)

6.2 บทความจากเอกสารประกอบการประชุม (Proceedings)

[1] เจษฎา วรณสินธุ์, เทคโนโลยีการหล่ออะลูมิเนียมใต้แรงดันแบบกึ่งของแข็ง การประชุมวิชาการงานหล่อไทย ครั้งที่ 3 กรุงเทพฯ 23 พ.ย. 2549

6.3 รายงาน

[1] C.Teerajet,T.Isaraphong. “Mini CNC by Mach3 Program.” Mechanical Engineering Department, Prince of Sonkla University (2013)

[2] P.Apirit. “การศึกษาโครงสร้างและคุณสมบัติทางกลของการเชื่อมในสถานะกึ่งแข็งของอะลูมิเนียมหล่อกึ่งแข็ง”, วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมวัสดุมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ (2013)

6.4 เว็บไซต์

[1]matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=d524d6bf305c4ce99414cabd1c7ed070&ckck=1, สืบค้นเมื่อ18/03/2558

[2](2014).Induction Heating, [Online].Available:http://www.heattechadvance.com/288489/knowledge, สืบค้นเมื่อ 24/02/2558

การปรับปรุงแนวเชื่อมอะลูมิเนียมผสมหล่อแข็งด้วยวิธีการเชื่อมกึ่งแข็ง

Improvement Butt Weld of SSM aluminum alloys by Semi-solid State Joining

ภัสพล บิลห่อหิม¹, ประภาส เมืองจันทร์บุรี¹, มุฮามัด เต๊ะยอ²
Patsapon Binrohim¹, Prapas Muangjunburee¹, Muhamad Tehyo²

บทคัดย่อ

การปรับปรุงแนวเชื่อมอะลูมิเนียมผสมหล่อแข็งด้วยวิธีการเชื่อมกึ่งแข็งเป็นงานวิจัยเพื่อศึกษาโครงสร้างทางกายภาพ มหภาค จุลภาค และสมบัติเชิงกลของอะลูมิเนียมหล่อผสมกึ่งแข็งเกรด SSM356 ที่ผ่านการเชื่อมในสถานะกึ่งแข็ง โดยให้ความร้อนบริเวณแนวต่อชนด้วยเครื่องให้ความร้อนแบบขดลวด (Induction Heater) มีการควบคุมอุณหภูมิให้อยู่ในช่วงระหว่าง 580-590°C ตลอดการเชื่อม เชื่อมด้วยสว่านไฟฟ้า ดอกสว่าน 4 mm ที่ความเร็วรอบดอกสว่าน 1,750 rpm มีความเร็วเดินแนวเชื่อมที่ 75 mm/min โดยทำการวิจัยที่ 3 สภาวะแตกต่างกันซึ่ง 2 สภาวะแรกจะเป็นการเชื่อมภายใต้บรรยากาศปกติ โดยจะเชื่อมเพื่อหาทิศทางดอกสว่านที่ให้สมบัติเชิงกลของแนวเชื่อมดีที่สุด ได้แก่ 1. การเชื่อมโดยใช้ดอกสว่านทิศทางหมุนตามเข็มนาฬิกา 2. การเชื่อมโดยใช้ดอกสว่านทิศทางหมุนทวนเข็มนาฬิกา จากผลการวิเคราะห์พบว่า สภาวะการเชื่อมโดยใช้ดอกสว่านหมุนตามเข็มนาฬิกาให้ผลโครงสร้างทางกายภาพ มหภาค จุลภาคและสมบัติเชิงกลให้ค่ามากกว่าเพียงเล็กน้อย จึงได้นำตัวแปรนี้ไปเชื่อมในสภาวะภายใต้แก๊สปกคลุม (แก๊สไนโตรเจน) อัตราการไหล 5 l/min อุณหภูมิแก๊ส 300°C นำผลการวิเคราะห์โครงสร้างทางกายภาพ มหภาค จุลภาคและสมบัติเชิงกลมาเปรียบเทียบกับชิ้นงานที่เชื่อมในบรรยากาศปกติด้วยดอกสว่านหมุนตามเข็มนาฬิกา พบว่าชิ้นงานที่เชื่อมภายใต้แก๊สปกคลุมจะให้ค่าสมบัติ (ค่าความแข็งแรงดึงเท่ากับ 121.7 MPa และมีค่าความแข็งเท่ากับ 63.9 Hv_(0.1)) สูงกว่าชิ้นงานที่เชื่อมภายใต้บรรยากาศปกติ (ค่าความแข็งแรงดึงเท่ากับ 111.2 MPa และมีค่าความแข็งเท่ากับ 63.2 Hv_(0.1))

คำสำคัญ: การเชื่อมในสถานะกึ่งของแข็ง อะลูมิเนียมผสมเกรด SSM356 การเชื่อมด้วยสว่านไฟฟ้า

¹ภาควิชาวิศวกรรมเหมืองแร่และวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

¹Department of Mining and Materials Engineering, Faculty of Engineering, Prince of Songkla University.

²สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนราธิวาสราชนครินทร์

²Program in Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Princess of Naradhiwas University.

Abstract

Improvement butt weld of SSM aluminum alloy by semi-solid state joining is a research for studying physical properties, macro/microstructure and mechanical properties of SSM 356 weld by semi-solid state. The butt-joint of SSM356 was heated by induction heater. During welding, the temperature was controlled in range of 580-590°C. The samples were weld by portable drill-tip stirring with 4 mm diameter. The stirring rate and welding speed were 1,750 rpm and 75 mm/min, respectively. The welded specimens composed of three conditions. Firstly, the 1st and 2nd conditions were welded under normal atmosphere in order to investigate which direction of drill could give the best mechanical properties of weld joints, clockwise and counter clockwise. The result showed that the clockwise direction provided slightly higher physical properties, macro/microstructure and mechanical properties. Therefore the 3rd condition was welded under sledding gas (nitrogen gas) with the same welding parameter of clockwise direction. The gas flow rate and gas temperature were 5 L/min and 300°C, respectively. Then, compare the result with previous experiment under normal atmospheres. The results presented that welded sample under nitrogen gas (Tensile strength 121.7 MPa and Hardness 63.9 Hv_(0.1)) gave better mechanical properties compared to that of under normal atmosphere (Tensile strength 111.2 MPa and Hardness 63.2 Hv_(0.1)).

Keywords: Semi-solid state joining, SSM356, Joining by portable drill-tip.

บทนำ

ในภาคอุตสาหกรรมขนาดใหญ่ อาทิเช่น อุตสาหกรรมรถยนต์ อุตสาหกรรมเครื่องจักร นิยมใช้ชิ้นส่วนอะลูมิเนียมมากยิ่งขึ้น เนื่องจากอะลูมิเนียมมีสมบัติที่มีความแข็งแรงสูง น้ำหนักเบา ทนการกัดกร่อนได้ดี จึงทำให้อะลูมิเนียมเป็นที่สนใจมากขึ้น อะลูมิเนียมผสมที่นิยมนำมาใช้จะเป็นอะลูมิเนียมรีดและอะลูมิเนียมหล่อ การหล่อขึ้นรูปอะลูมิเนียมผสมมีหลากหลายกรรมวิธี โดยส่วนใหญ่จะให้โครงสร้างแบบกิ่งไม้ (Dendrite) ต่อมาได้มีการปรับปรุงการหล่ออะลูมิเนียมผสมให้มีโครงสร้างที่มีสมบัติดียิ่งขึ้นคือ กรรมวิธี GISS (Gas induce semi solid process) เป็นการหล่อโลหะแบบกึ่งของแข็ง (Semi-solid metal หรือ SSM) ซึ่งการหล่อด้วยกรรมวิธีนี้จะให้โครงสร้างอะลูมิเนียมผสมเป็นแบบก้อนกลม (Spherical หรือ Globular grain) ทำให้อะลูมิเนียมมีสมบัติทางโครงสร้างที่ดีกว่าการหล่อที่ให้โครงสร้างแบบกิ่งไม้ (Wanasin & Thanabumrunikul, 2008, Wanasin et al., 2009)

การเชื่อมเป็นกรรมวิธีเชื่อมแบบชิ้นส่วนอะลูมิเนียมที่นิยมใช้กันในปัจจุบัน การเชื่อมจะอาศัยความร้อนส่งผ่านไปยังชิ้นงานเพื่อให้เกิดการหลอมละลายติดกัน (Muangjumburee, 2012) ซึ่งเมื่อนำมาใช้กับอะลูมิเนียมหล่อผสมกึ่งแข็งกลับทำให้รูปแบบโครงสร้างของอะลูมิเนียมหล่อผสมกึ่งแข็งเปลี่ยนไปจึงทำให้สมบัติต่ำลงเช่นกัน ด้วยเหตุนี้ได้มีการเชื่อมในสถานะกึ่งของแข็งเพื่อคงสภาพรูปแบบโครงสร้างก่อนกลมของอะลูมิเนียมหล่อผสมไว้คือ การเชื่อมในสถานะกึ่งของแข็ง ซึ่งกรรมวิธีการเชื่อมในสถานะกึ่งของแข็งจะทำการให้ความร้อนสู่ชิ้นงานให้อยู่ระหว่างช่วงอุณหภูมิของแข็งในชิ้นงานแต่ละชนิดเพื่อรักษาโครงสร้างก่อนกลมของวัสดุไว้

งานวิจัยที่ผ่านมาเป็นการนำเอาอะลูมิเนียมหล่อผสมกึ่งแข็งเกรด SSM356 มาเชื่อมในสถานะกึ่งของแข็ง โดยใช้หัวกวน (pin) ทำหน้าที่ในการกวนประสานชิ้นงานให้เป็นเนื้อเดียวกัน เชื่อมที่อุณหภูมิ 580-590°C (Petkwan et al., 2014) ซึ่งการวิจัยพบว่าการเชื่อมหล่อผสมกึ่งแข็งเกรด SSM356 ในสถานะกึ่งของแข็งโดยใช้หัวกวนสามารถคงสภาพโครงสร้างที่เป็นก่อนกลมที่เป็นลักษณะเฉพาะของวัสดุที่ผ่านกรรมวิธีการหล่อแบบ GISS เมื่อวิเคราะห์ผลการทดลองพบว่า ค่าความแข็งแรงดึงของชิ้นงานเชื่อมในสถานะที่ดีที่สุดมีค่าเท่ากับ 103.4 MPa (คิดเป็น 60.8% ของค่าโลหะเดิม) ซึ่งถือได้ว่าเป็นค่าที่ยังไม่เป็นที่น่าพอใจจึงได้เกิดงานวิจัยชิ้นนี้ขึ้น

งานวิจัย การปรับปรุงการเชื่อมในสถานะกึ่งของแข็งของอะลูมิเนียมหล่อผสมกึ่งแข็ง เป็นอีกหนึ่งงานวิจัยที่เกิดขึ้นเพื่อปรับปรุงแนวเชื่อมของอะลูมิเนียมหล่อผสมกึ่งแข็ง เป็นการเปลี่ยนอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่กวนประสานเนื้อชิ้นงานจากหัวกวนเป็นสว่านไฟฟ้าและดอกสว่าน จากวิจัยที่ผ่านมาพบว่า สว่านไฟฟ้าและดอกสว่านยังคงรักษาโครงสร้างก่อนกลมไว้ได้ ทั้งยังยังลดปริมาณรูพรุนในแนวเชื่อมทำให้มีค่าความแข็งแรงดึงเพิ่มขึ้นเป็น 111.2 MPa (คิดเป็น 67.9% จากโลหะเดิม) ซึ่งถือได้ว่าการปรับปรุงครั้งนี้ให้ค่าสมบัติเชิงกลที่ดีขึ้น (Binrohaim & Muangjumburee, 2015) ทางทีมวิจัยจึงได้นำค่าพารามิเตอร์ที่ให้ค่าสมบัติเชิงกลสูงที่สุดมาปรับปรุงอีกครั้งเพื่อเพิ่มสมบัติเชิงกลของแนวเชื่อมให้สูงขึ้น

วัตถุประสงค์การวิจัย

1. เพื่อปรับปรุงแนวเชื่อมอะลูมิเนียมผสมหล่อกึ่งแข็งด้วยการเชื่อมในสถานะกึ่งแข็ง
2. เพื่อหาสถานะที่ให้ค่าแนวเชื่อมอะลูมิเนียมผสมหล่อกึ่งแข็งสูงที่สุด

ระเบียบวิธีวิจัย

การทดลองจะทำการทดลองทั้งหมด 3 สถานะ ได้แก่ 1. การเชื่อมในสถานะกึ่งของแข็งของอะลูมิเนียมหล่อผสม SSM356 ด้วยสว่านไฟฟ้าและดอกสว่านทิสหมุนตามเข็มนาฬิกา 2. การเชื่อมในสถานะกึ่งของแข็งของอะลูมิเนียมหล่อผสม SSM356 ด้วยสว่านไฟฟ้าและดอกสว่านทิสหมุนทวนเข็มนาฬิกา

นาฬิกา 3. การเชื่อมในสถานะกึ่งของแข็งของอะลูมิเนียมหล่อผสม SSM356 ด้วยส่วนไฟฟ้าและดอกสว่าน ทิศหมุนตามเข็มนาฬิกา ภายใต้แก๊สปกคลุมซึ่งมีอุปกรณ์และขั้นตอนการทดลองดังนี้

1. ขั้นตอนการเตรียมชิ้นงาน

อะลูมิเนียมหล่อผสมเกรด SSM356 มีส่วนประกอบทางเคมีและสมบัติเชิงกลดังแสดงในตารางที่ 1 และตารางที่ 2 โดยจะทำการปรับขนาดของอะลูมิเนียมหล่อผสมที่ผ่านการหล่อด้วยกรรมวิธี GISS จะทำโดยใช้เครื่องเลื่อยตัดให้มีขนาด 50x100x40 mm. จากนั้นนำมากัดด้วยเครื่องกัดให้มีขนาดเท่ากับ 50x100x4 mm. เพื่อให้ผิวหน้าของชิ้นงานเรียบมากที่สุด

ตารางที่ 1 ส่วนประกอบทางเคมีของอะลูมิเนียมหล่อผสมเกรด SSM356

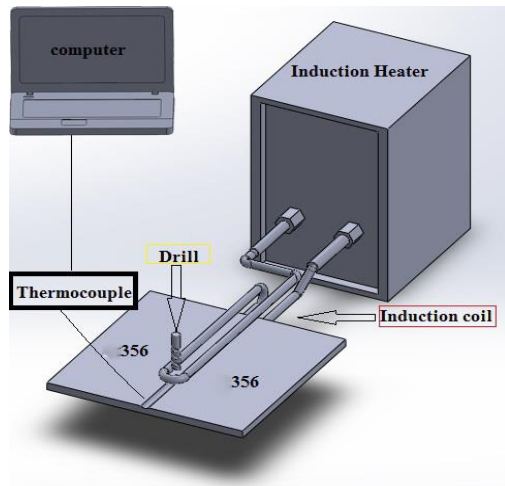
ส่วนประกอบ	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Ti	Cr	Ni	Al
SSM356	7.5	0.57	0.05	0.06	0.32	0.01	0.05	0.02	0.01	Balance

ตารางที่ 2 สมบัติเชิงกลของ SSM356

ชิ้นงาน	ค่าความแข็งแรงดึง (MPa)	ค่าความเค้นวิกฤติ (MPa)	ค่าความแข็ง Hv _(0.1)
SSM356	165.3	130	68

2. ขั้นตอนการเชื่อม

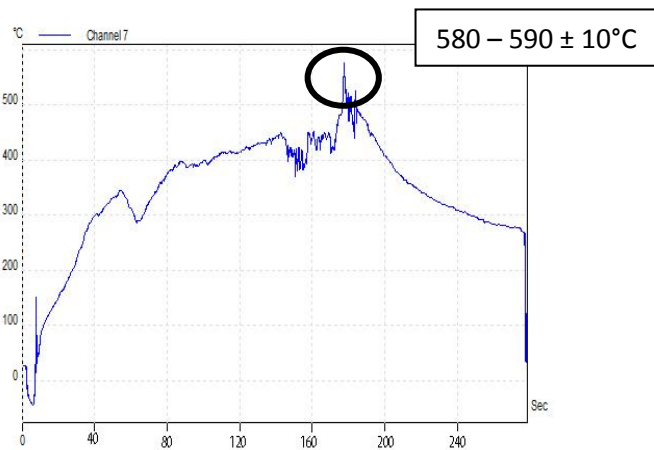
การเชื่อมอะลูมิเนียมเกรด SSM356 โดยการนำชิ้นงานมาเชื่อมต่อแบบชน ให้ความร้อนด้วยขดลวดเหนี่ยวนำ (Induction heater) จนอุณหภูมิชิ้นงานสูงขึ้นถึง $560 \pm 10^{\circ}\text{C}$ จากนั้นให้ชิ้นงานเคลื่อนที่ด้วยความเร็ว 75 mm/min เมื่อชิ้นงานอุณหภูมิ 580-590 $^{\circ}\text{C}$ ทำการเชื่อมชิ้นงานด้วยส่วนไฟฟ้าและดอกสว่าน 4 mm ที่ความเร็วรอบ 1,750 rpm ดอกสว่านทำมุม 90 $^{\circ}$ กับชิ้นงานเชื่อม ตลอดการเชื่อมจะควบคุมอุณหภูมิด้วยการลดกระแสของเครื่องให้ความร้อนด้วยขดลวดเหนี่ยวนำ ในส่วนการเชื่อมภายใต้แก๊สปกคลุมจะปล่อยแก๊สไนโตรเจนที่อัตราการไหล 5 L/min และปล่อยแก๊สก่อนทำการปล่อยชิ้นงานเชื่อม 1 นาที หลังจากเชื่อมปล่อยให้ชิ้นงานเย็นตัวในบรรยากาศปกติ



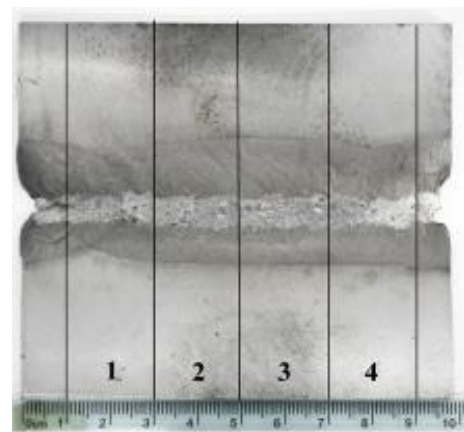
รูปที่ 1 อุปกรณ์ในการเชื่อมสถานะกึ่งแข็ง



รูปที่ 2 จัดอุปกรณ์ก่อนการเชื่อม



รูปที่ 3 กราฟอุณหภูมิขณะเชื่อม



รูปที่ 4 การตัดแบ่งชิ้นงานเชื่อมเพื่อทดสอบ

3. การเตรียมชิ้นงานเพื่อทดสอบ

1) โครงสร้างทางกายภาพ การเตรียมชิ้นงานเพื่อทดสอบ โครงสร้างทางกายภาพจะนำชิ้นงานหลังจากการเชื่อมมาทำความสะอาดด้วยแอลกอฮอล์ก่อนจะสังเกตด้วยตาเปล่าถึงความสมบูรณ์ของชิ้นงานเชื่อม

2) โครงสร้างมหภาคและโครงสร้างจุลภาค นำชิ้นงานที่ผ่านการวิเคราะห์โครงสร้างทางกายภาพมาตัดแบ่งเป็น 4 ส่วน ดังแสดงตามรูปที่ 4 ซึ่งการทดสอบโครงสร้างมหภาคและจุลภาคจะนำชิ้นงานหมายเลข 1 และ 4 ซึ่งเป็นช่วงเริ่มต้นและช่วงสิ้นสุดของการเชื่อมเพื่อสังเกตความแตกต่าง ในการเตรียมชิ้นงานเมื่อตัดแบ่งนำชิ้นงานมาขัดด้วยกระดาษทรายเบอร์ 180-2,500 เปิดน้ำตลอดการขัด จากนั้นนำมาขัดด้วยผ้าสักหลาดด้วยอะลูมินา 5 0.3 และ 0.1 μm เมื่อเสร็จสิ้นการขัดชิ้นงานได้ชิ้นงานที่เรียบและมัน

เงาที่นำชิ้นงาน ไปจุ่มในสารละลาย Keller's reagent เป็นเวลา 40s แล้วนำชิ้นงาน ไปส่องดูลักษณะ โครงสร้าง และขนาดเกรน

3) การหาขนาดเกรนและเปอร์เซ็นต์รูพรุน นำรูปถ่ายโครงสร้างจุลภาคของแต่ละสถานะมา วิเคราะห์ขนาดเกรนและเปอร์เซ็นต์รูพรุนด้วย โปรแกรม Image J

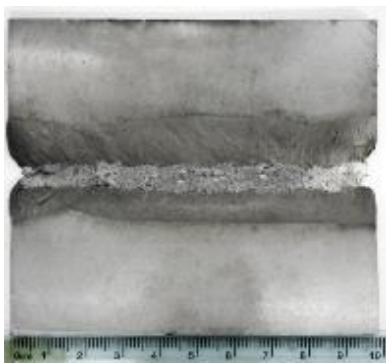
4) การทดสอบค่าความแข็งแรงดึง นำชิ้นงานทดสอบหมายเลข 2 และ 3 แสดงในรูปที่ 4 มา กัดโดยใช้เครื่องกัดแนวตั้ง ชิ้นงานทดสอบตามมาตรฐาน ASEM-E8M และใช้ความเร็วดึงที่ 1.004 mm/min รวมสถานะละ 6 ชิ้น

5) การทดสอบความแข็ง นำชิ้นงานที่ผ่านการทดสอบโครงสร้างมหภาคและโครงสร้าง จุลภาค มาทดสอบความแข็ง โดยกดชิ้นงานที่แรง 100gf ใช้เวลากด 10s ระยะห่างแต่ละจุด 0.5 mm ทั้งหมด 40 จุด รวมสถานะละ 1 ชิ้น

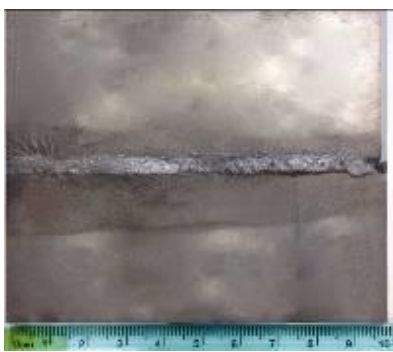
ผลการวิจัย

1. โครงสร้างทางกายภาพ

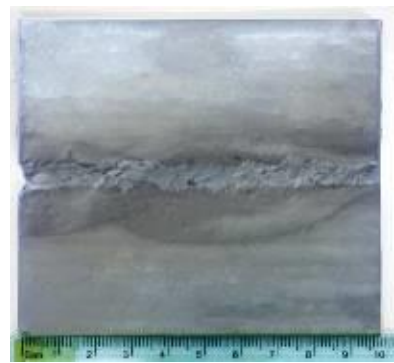
จากการวิเคราะห์โครงสร้างทางกายภาพพบว่า ชิ้นงานเชื่อมทุกสถานะประสานติดกันดี ระหว่างชิ้นงานดอกสว่านหมุนตามเข็มนาฬิกาเชื่อมภายใต้บรรยากาศปกติกับชิ้นงานดอกสว่านหมุนทวน เข็มนาฬิกาภายใต้บรรยากาศปกติ มีลักษณะที่ใกล้เคียงกันทั้งความกว้างของแนวเชื่อมและความกว้างของ บริเวณที่ได้รับผลกระทบทางความร้อน (Heat affected zone; HAZ) ดังแสดงในรูปที่ 5 (ก) และ 5 (ข) คือ บริเวณที่เป็นรอยค้ำรอบแนวเชื่อม ในส่วนชิ้นงานภายใต้แก๊สปกคลุมพบว่า บริเวณที่ได้รับผลกระทบทาง ความร้อนมีความกว้างที่น้อยกว่าอีก 2 สถานะ เนื่องจากการเชื่อมภายใต้แก๊สปกคลุม อุณหภูมิของแก๊สมีค่าน้อยกว่าชิ้นงานจึงทำให้ชิ้นงานเย็นตัวเร็วกว่าการเชื่อมในบรรยากาศปกติจึงทำให้มีบริเวณที่ได้รับ ผลกระทบทางความร้อนน้อยลงดังแสดงในรูปที่ 5 (ค)



ด้านหน้า



ด้านหน้า



ด้านหน้า



ด้านหลัง

(ก)

ด้านหลัง

(ข)

ด้านหลัง

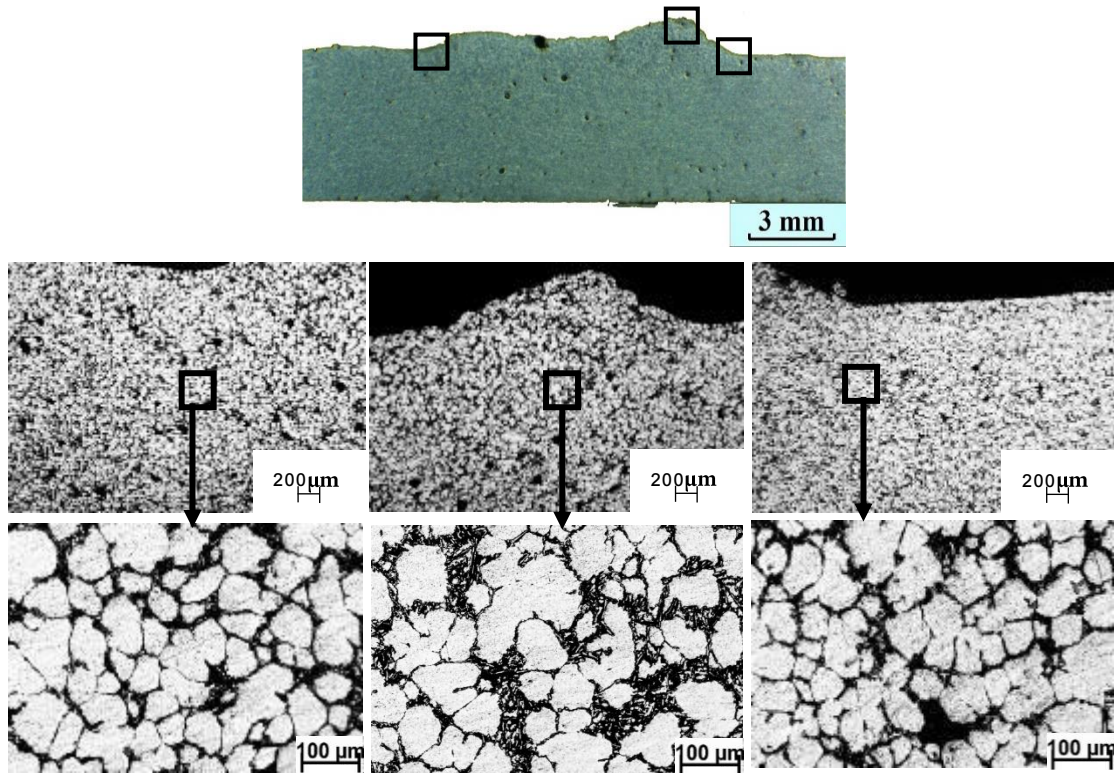
(ค)

รูปที่ 5 ลักษณะโครงสร้างทางกายภาพ (ก) สภาวะดอกสว่านหมุนตามเข็มนาฬิกาภายใต้บรรยากาศปกติ (ข) สภาวะดอกสว่านหมุนทวนเข็มนาฬิกาภายใต้บรรยากาศปกติ (ค) สภาวะดอกสว่านหมุนตามเข็มนาฬิกา ภายใต้แก๊สปกคลุม

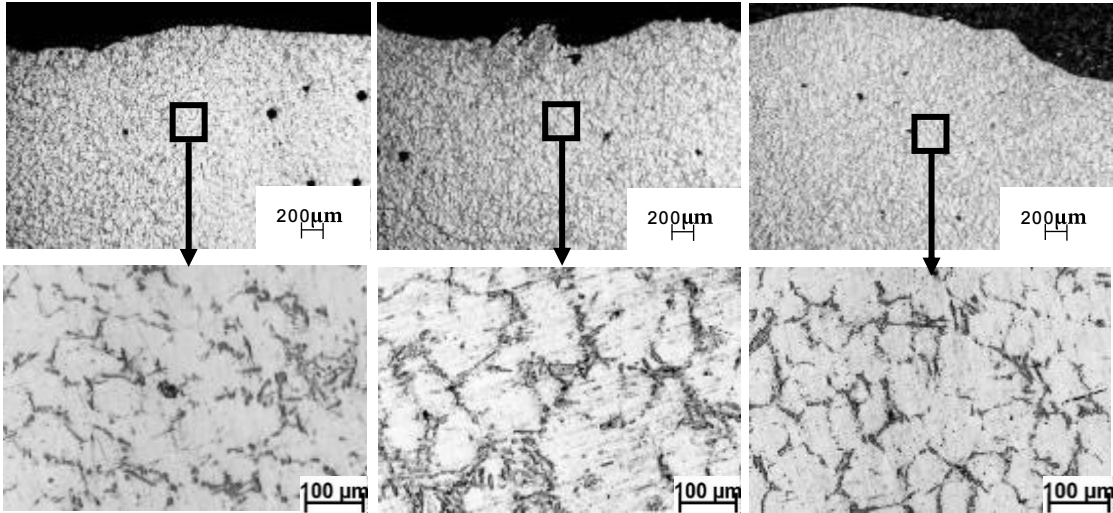
2. โครงสร้างมหภาคและโครงสร้างจุลภาค

เลือกชิ้นงานที่มีแนวเชื่อมที่สมบูรณ์ที่สุด (รอยเชื่อมซึมลึกทั่วทั้งชิ้น แนวเชื่อมไม่มีรอยขาด) มาเปรียบเทียบ โครงสร้างมหภาคของชิ้นงานจะแบ่งชิ้นงานเป็น 3 บริเวณเพื่อวิเคราะห์ถึงอิทธิพล ความเร็วรอบของดอกสว่านที่ส่งผลต่อแนวเชื่อมได้แก่ 1. บริเวณเนื้อเชื่อม (Weld Zone; WZ) 2. ด้านด้านการเคลื่อนที่ (Retreating side; RS) 3. ด้านเสริมการเคลื่อนที่ (Advancing side; AS) พบว่า ชิ้นงานดอกสว่าน หมุนตามเข็มนาฬิกาภายใต้แก๊สปกคลุมสังเกตเห็นรูพรุน (จุดสีดำในแนวเชื่อม) ได้ชัดเจนที่บริเวณผิวบนของ แนวเชื่อมแสดงในรูปที่ 8 ซึ่งแตกต่างจากอีก 2 สภาวะที่สามารถสังเกตเห็นรูพรุนได้ชัดเจนในบริเวณเนื้อ เชื่อม เนื่องด้วยการเชื่อมในสภาวะใต้แก๊สปกคลุม แก๊สจะทำหน้าที่ป้องกันอากาศจากภายนอกไหลเข้าสู่เนื้อ เชื่อมได้ดีกว่าการเชื่อมภายใต้บรรยากาศปกติ (How et al., 1995) จากการคำนวณหาจำนวนรูพรุนได้ค่าตาม ตารางที่ 3 พบว่าดอกสว่านหมุนตามเข็มนาฬิกาภายใต้แก๊สปกคลุมมีจำนวนรูพรุนน้อยที่สุดสอดคล้องกับ ภาพโครงสร้างจุลภาคที่พบรูพรุนเฉพาะผิวบนแนวเชื่อมเท่านั้นและบริเวณเนื้อเชื่อมเป็นบริเวณที่ถูกกวาด หรือเนื้อเชื่อมจะมีรูพรุนมากที่สุด ทั้งนี้ด้านด้านการเคลื่อนที่จะมีรูพรุนมากกว่าด้านเสริมการเคลื่อนที่เล็กน้อย ซึ่งเกิดจากอิทธิพลของดอกสว่านที่เป็นลักษณะเกลียวทำให้ด้านด้านการเคลื่อนที่เกิดรอยแยกมากกว่าด้าน เสริมการเคลื่อนที่ในขณะที่เชื่อมเป็นเหตุให้อากาศสามารถแทรกซึมเข้าไปได้ (Threadgill et al., 2009) ใน ส่วนของโครงสร้างจุลภาคพบว่า โครงสร้างยังคงลักษณะก้อนกลมและมีขนาดเกรน (α -Al) แสดงในตาราง ที่ 4 ซึ่งขนาดเกรนมีขนาดใกล้เคียงกันทั้งหมดเป็นผลมาจากในขณะที่เชื่อมใช้ตัวแปรในการเชื่อมที่

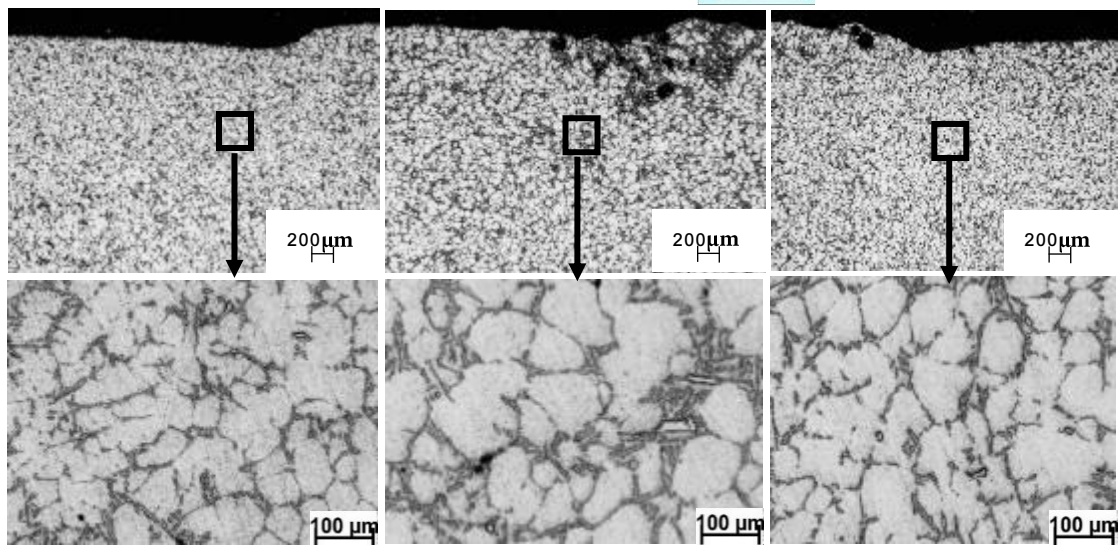
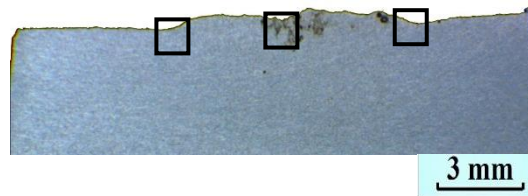
เหมือนกันทั้งความเร็วรอบดอกสว่าน (rpm) ความเร็วเดินแนวเชื่อม (mm/min) และอุณหภูมิในขณะการเชื่อม (°C)



รูปที่ 6 โครงสร้างมหภาคและจุลภาคของชิ้นงานเชื่อมดอกสว่านหมุนตามเข็มนาฬิกาภายใต้บรรยากาศปกติ โดย (รูปซ้าย) ด้านด้านการเคลื่อนที่ (รูปกลาง) บริเวณแนวเชื่อม (รูปขวา) ด้านเสริมการเคลื่อนที่



รูปที่ 7 โครงสร้างมหภาคและจุลภาคของชิ้นงานเชื่อมดอกสว่านหมุนทวนเข็มนาฬิกาภายใต้บรรยากาศปกติ โดย (รูปซ้าย) ด้านด้านการเคลื่อนที่ (รูปกลาง) บริเวณแนวเชื่อม (รูปขวา) ด้านเสริมการเคลื่อนที่



รูปที่ 8 โครงสร้างมหภาคและจุลภาคของชิ้นงานเชื่อมดอกสว่านหมุนตามเข็มนาฬิกาภายใต้แก๊สปกคลุม โดย (รูปซ้าย) ด้านด้านการเคลื่อนที่ (รูปกลาง) บริเวณแนวเชื่อม (รูปขวา) ด้านเสริมการเคลื่อนที่

ตารางที่ 3 จำนวนรูพรุนของชิ้นงานแต่ละสภาวะ

ความเร็วรอบ ดอกสว่าน (rpm)	ทิศทางการ หมุนดอก สว่าน	บรรยากาศปก คลุม	จำนวนรูพรุน ด้านด้านการ เคลื่อนที่ (%)	จำนวนรูพรุน บริเวณเนื้อ เชื่อม (%)	จำนวนรูพรุน ด้านเสริมการ เคลื่อนที่ (%)
1,750	หมุนตามเข็มนาฬิกา	ภายใต้ บรรยากาศ	2.5 ± 0.5	3.0 ± 0.5	2.3 ± 0.5
	หมุนทวนเข็มนาฬิกา	ปกติ	2.7 ± 0.5	3.1 ± 0.5	2.5 ± 0.5
	หมุนตามเข็มนาฬิกา	ภายใต้แก๊ส ปกคลุม	1.3 ± 0.5	1.3 ± 0.5	0.5 ± 0.5

ตารางที่ 4 ขนาดเกรนเฉลี่ยของชิ้นงานแต่ละสภาวะ

ความเร็วรอบ ดอกสว่าน (rpm)	ทิศทางการ หมุนดอก สว่าน	บรรยากาศปก คลุม	ขนาดเกรน ด้านด้านการ เคลื่อนที่ (μm)	ขนาดเกรน บริเวณเนื้อ เชื่อม (μm)	ขนาดเกรน ด้านเสริมการ เคลื่อนที่ (μm)
1,750	หมุนตามเข็มนาฬิกา	ภายใต้ บรรยากาศ	60 ± 2	56 ± 2	63 ± 2
	หมุนทวนเข็มนาฬิกา	ปกติ	66 ± 2	63 ± 2	65 ± 2
	หมุนตามเข็มนาฬิกา	ภายใต้แก๊สปก คลุม	62 ± 2	60 ± 2	61 ± 2

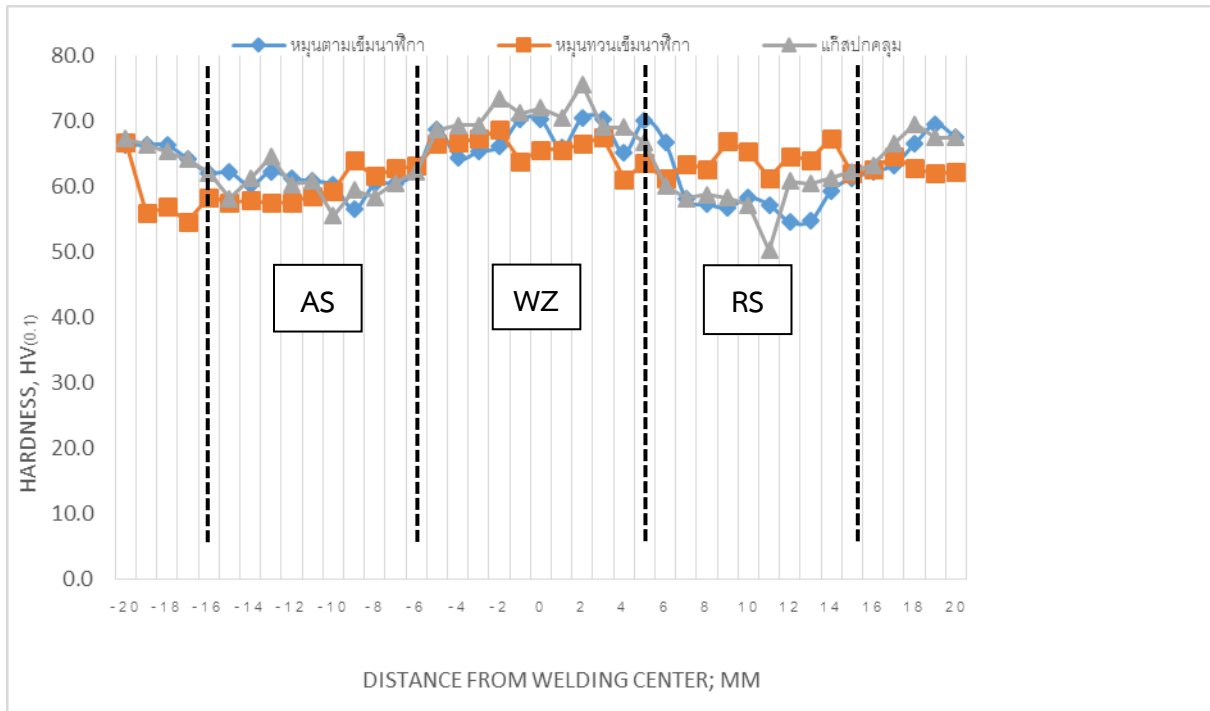
3. สมบัติเชิงกลของแนวเชื่อม

1) ค่าความแข็งแรงดึง จากตารางที่ 5 แสดงค่าความแข็งแรงดึงของแนวเชื่อมพบว่า ชิ้นงานเชื่อมดอกสว่านหมุนตามเข็มนาฬิกาภายใต้แก๊สปกคลุมมีค่าความแข็งแรงดึงของแนวเชื่อมสูงที่สุด สอดคล้องกับผลจำนวนรูพรุนที่พบรูพรุนในเนื้อเชื่อมน้อย ในส่วนของชิ้นงานดอกสว่านเชื่อมหมุนตามเข็มนาฬิกาและหมุนทวนเข็มนาฬิกาภายใต้บรรยากาศปกติมีค่าความแข็งแรงดึงของแนวเชื่อมที่ใกล้เคียงกันเป็นไปตามผลการวิเคราะห์จำนวนรูพรุนที่มีค่าใกล้เคียงกัน ซึ่งค่าจุดครากและระยะยึดตัวของแนวเชื่อมก็เป็นไปตามค่า

ความแข็งแรงดึง ชี้นงานทดสอบทุกชิ้นของทุกสภาวะขาด้านด้านเคลื่อนที่ทั้งหมด ซึ่งในผลการวิเคราะห์ชี้ให้เห็นว่า ชี้นงานด้านด้านการเคลื่อนที่มีจำนวนรูพรุนที่มากที่สุด จึงทำให้ค่าความแข็งแรงดึงของด้านด้านความเคลื่อนที่มีค่าน้อยที่สุด ซึ่งเกิดจากอิทธิพลของเกลียวในดอกสว่านที่สามารถสร้างรอยแยกระหว่างบ่อน้ำโลหะและดอกสว่านในขณะที่เชื่อมตรงด้านด้านเคลื่อนที่ได้มากกว่าบริเวณอื่น (Threadgill et al., 2009) ทำให้เกิดจุดบกพร่องได้ง่ายขึ้นจึงเป็นผลให้ด้านด้านการเคลื่อนที่มีค่าความแข็งแรงดึงต่ำ

ตารางที่ 5 แสดงสมบัติเชิงกลของแนวเชื่อม

ความเร็ว รอบดอก สว่าน (rpm)	ทิศทางการ หมุนดอก สว่าน	บรรยากาศ ปกคลุม	ค่าเฉลี่ย ความ แข็งแรงดึง (MPa)	ค่าเฉลี่ยจุด คราก (MPa)	ระยะยืดของ แนวเชื่อม (%)	ค่าเฉลี่ย ความแข็ง (Hv _{0.1})
1,750	หมุนตาม เข็มนาฬิกา	ภายใต้ บรรยากาศ	111.2	77.5	2.6	63.2
	หมุนทวน เข็มนาฬิกา	ปกติ	109.8	77.3	2.5	62.7
	หมุนตาม เข็มนาฬิกา	ภายใต้แก๊ส ปกคลุม	121.7	91.8	3.6	64.0

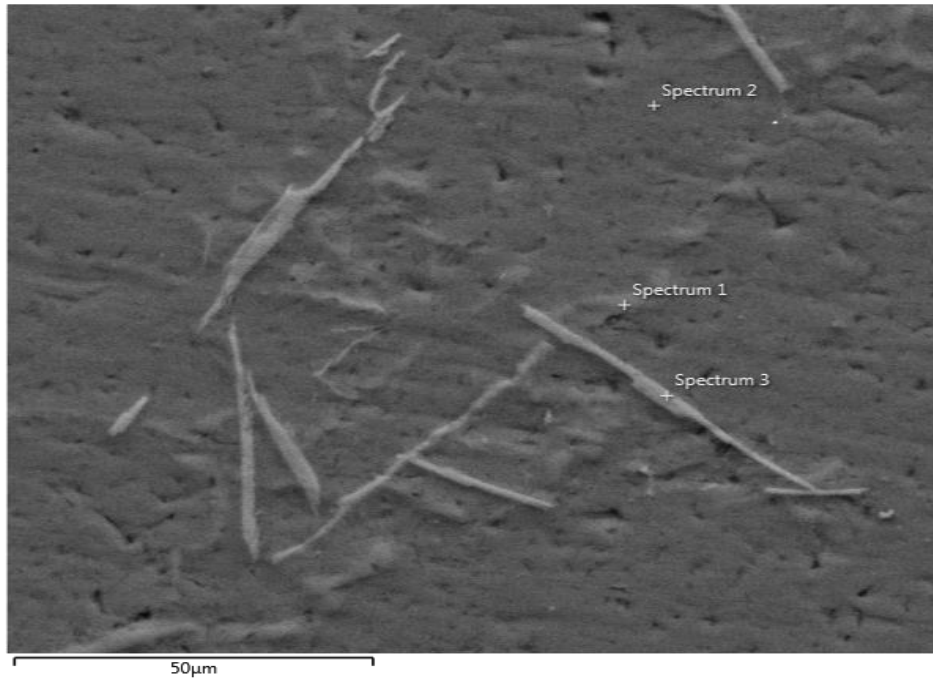


รูปที่ 9 ค่าความแข็งแนวเชื่อมของชิ้นงานเชื่อม

2) ค่าความแข็งแนวเชื่อม จากรูปที่ 9 แสดงค่าความแข็งแนวเชื่อมของชิ้นงานเชื่อมดอกสว่านหมุนตามเข็มนาฬิกา ดอกสว่านหมุนทวนเข็มนาฬิกา ภายใต้บรรยากาศปกติและ ดอกสว่านหมุนตามเข็มนาฬิกาภายใต้แก๊สปกคลุมมีค่าที่ใกล้เคียงกันมาก (ค่าเฉลี่ยความแข็งแนวเชื่อมเท่ากับ 63.2 62.7 64.0 Hv_{0.1}) เนื่องจากชิ้นงานเชื่อมของทั้ง 3 สภาวะมีขนาดเกรนที่ใกล้เคียงกัน ซึ่งการที่ขนาดเกรนใกล้เคียงกันทำให้ดิสโลเคชันมีการเคลื่อนที่ระหว่างการคดที่ใกล้เคียงกัน (Jung et al., 2013) ทั้งนี้ยังพบว่าบริเวณที่ได้รับผลกระทบทางความร้อน (Heat affected zone; HAZ) ทั้ง 2 ด้าน (ชิ้นงานด้านด้านการเคลื่อนที่และด้านเสริมการเคลื่อนที่) มีค่าความแข็งที่น้อยกว่าบริเวณเนื้อเชื่อม เนื่องจากความร้อนที่มีอุณหภูมิสูงกว่าเส้นโซลิวสของเฟส θ ของอะลูมิเนียม SSM356 จึงทำให้เกิดการตกตะกอนของเฟส θ เข้าสู่เนื้อโลหะเดิมจึงทำให้บริเวณนี้มีขนาดเกรนที่โตกว่าบริเวณที่ถูกควน เมื่อมีขนาดเกรนที่โตขึ้น (Muangjunburee, 2012, Sikon, 2008, Saisang, Makklang & Kongtrakul, 2011)

3) โครงสร้างจุลภาคจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคโดยใช้กล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราดเป็นการใช้สัญญาณแบบอิเล็กตรอนที่กระเจิงกลับ (Back Scattered Electrons, BSE) และใช้สัญญาณแบบเอกซเรย์ (X-Ray) เป็นสัญญาณที่ใช้เทคนิค EDX ซึ่งจะมีการเตรียมชิ้นงานที่เหมือนกับการเตรียมชิ้นงานเพื่อดูโครงสร้างจุลภาค โดยใช้กำลังขยาย 1000 เท่า โดยทำการถ่าย 2 ชิ้นงานนั้นคือ ชิ้นงานเชื่อมที่ความเร็วรอบดอกสว่าน 1750 rpm ภายใต้บรรยากาศปกติและภายใต้แก๊สปกคลุม ตรวจสอบบริเวณเนื้อเชื่อม เพื่อความแตกต่างของลักษณะภายในเนื้อเชื่อมของทั้งสอง

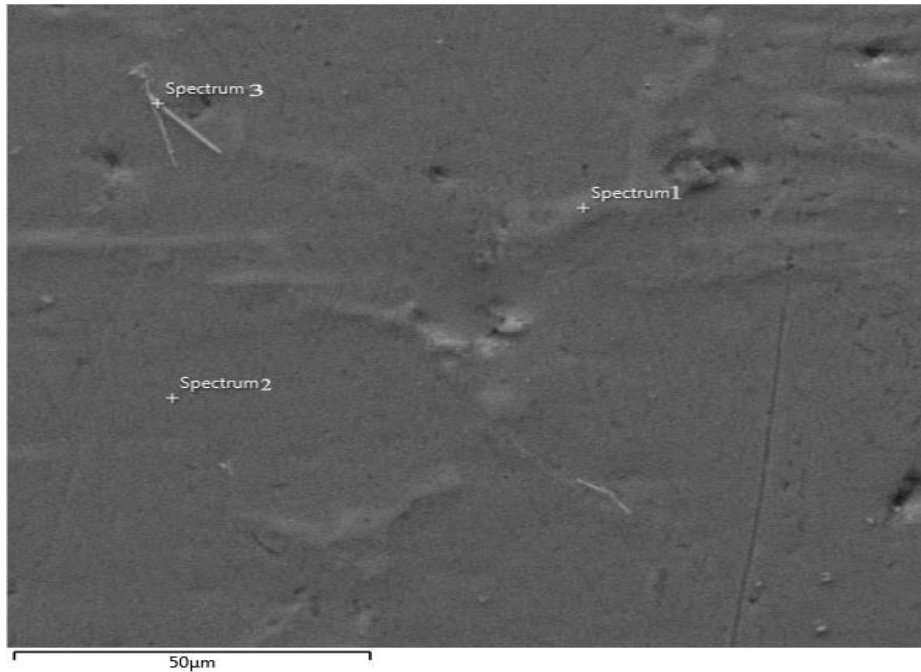
สภาวะ โดยใช้สัญญาณแบบกระเจิงกลับ (Back Scattered Electrons, BSE) เพื่อคุณลักษณะภายใน ซึ่งพื้นที่ที่มีสีสว่างจะเป็น “ธาตุหนัก” คือธาตุที่มีเลขอะตอมมาก (Fe =26, Mn = 25) และในพื้นที่ที่มีสีเข้มจะเป็น “ธาตุเบา” คือธาตุที่มีเลขอะตอมน้อย (Al = 13 , Si = 14) รวมอยู่ในนั้นด้วย หลังจากนั้นได้ทำการวิเคราะห์เพื่อหาปริมาณธาตุในแต่ละจุดด้วยวิธี Point Scan โดยใช้สัญญาณแบบเอกซเรย์ (X-Ray) หรือเทคนิค EDX โดยทำการวิเคราะห์ทั้งหมด 3 จุดด้วยกัน ซึ่งผลที่ได้แสดงดังรูปที่ 10 และ 11 ผลของปริมาณธาตุแสดงในตารางที่ 6 และตารางที่ 7 โดยพบว่าที่จุดที่ 1 หรือ Spectrum 1 เป็นตำแหน่งระหว่างเกรน คือขอบเกรนหรือ เฟสยูเทคติกซิลิกอน (Si Eutectic phase) โดยตำแหน่งนี้มีธาตุซิลิกอนค่อนข้างสูงซึ่งมีมากกว่าอลูมิเนียม ซึ่งเป็นสาเหตุทำให้ทราบว่าในจุดนี้คือ เฟสยูเทคติกซิลิกอนหรือขอบเกรนซึ่งสามารถพบได้ทั้ง 2 สภาวะ ในจุดที่ 2 หรือ Spectrum 2 เป็นตำแหน่งของเกรนหรืออนุภาค α -Al ซึ่งในบริเวณจุดนี้พบอลูมิเนียมปริมาณมากแต่ยังพบปริมาณของซิลิกอนและแมงกานีสอยู่เล็กน้อย ในจุดที่ 3 หรือ Spectrum 3 ซึ่งเป็นจุดที่มีความสว่างมากที่สุด ในรูปที่ 10 และ 11 จากการวิเคราะห์พบว่า มีธาตุเหล็กและแมงกานีสรวมอยู่ด้วยทำให้ทราบว่าจุดนี้คือ สารประกอบอินเทอร์เมทัลลิก (Intermetallic Compounds) ชิ้นงานที่เชื่อมภายใต้บรรยากาศปกติและชิ้นงานที่เชื่อมภายใต้แก๊สปกคลุม มีความแตกต่างที่เห็นได้ชัดเจนคือ รูปร่างของสารประกอบอินเทอร์เมทัลลิกคือ Al_2Mn_3Si ซึ่งพบได้ในอลูมิเนียมเกรด 3xxx เท่านั้น ซึ่งมีสมบัติความแข็งแรงที่สูงมาก (Birbilis & Buchheit, 2005) โดยชิ้นงานที่เชื่อมภายใต้บรรยากาศปกติ พบว่ามีขนาดใหญ่กว่าที่เชื่อมภายใต้แก๊สปกคลุม เนื่องจากชิ้นงานที่เชื่อมภายใต้บรรยากาศปกติซึ่งมีอัตราการเย็นตัวของชิ้นงานที่ช้ากว่าชิ้นงานที่เชื่อมภายใต้แก๊สปกคลุม ทำให้เฟสอินเทอร์เมทัลลิก มีระยะเวลาในการฟอร์มตัวที่ยาวนานกว่าการเชื่อมภายใต้แก๊สปกคลุม ทำให้มีขนาดที่ใหญ่กว่า ซึ่งการที่มีสารประกอบอินเทอร์เมทัลลิกที่ใหญ่ทำให้ชิ้นงานเปราะจนเกินไป (Merlin & Garagnani, 2009)



รูปที่ 10 โครงสร้างจุลทรรศน์แบบส่องกราด (SEM) ของชิ้นงานเชื่อมตามเข็มนาฬิกาภายใต้บรรยากาศปกติ

ตารางที่ 6 ธาตุในชิ้นงานของ Spectrum ทั้ง 3 จุด

Spectrum	Al	Si	Fe	Mn	Mg
1	12.9	71.3	-	-	-
2	84.9	1.3	-	-	0.1
3	51.6	18.9	15.6	1.0	0.1



รูปที่ 11 โครงสร้างจุลทรรศน์แบบส่องกราด (SEM) ของชิ้นงานเชื่อมตามเข็มนาฬิกาภายใต้แก๊สปกคลุม

ตารางที่ 7 ธาตุในชิ้นงานของ Spectrum ทั้ง 3 จุด

Spectrum	Al	Si	Fe	Mn	Mg
1	21.6	66.6	-	-	-
2	84.2	1.4	-	-	-
3	66.6	17.3	2.9	1.0	0.1

อภิปรายผล

จากผลการวิจัยพบว่า แนวเชื่อมของชิ้นงานเชื่อมทั้ง 3 สภาวะมีความซึมลึกและความสมบูรณ์ของแนวเชื่อมประสานกันอย่างดี แนวเชื่อมมีแนวขรุขระอันเนื่องมาจากอิทธิพลของเกลียวดอกสว่านพบรูพรุนในแนวเชื่อมมากที่สุด เกิดจากความร้อนทำให้เนื้อเชื่อมมีการกวนด้วยดอกสว่าน จึงทำให้อากาศสามารถแทรกตัวลงไปยังเนื้อเชื่อมได้ อย่างไรก็ตามการเชื่อมภายใต้แก๊สปกคลุมสามารถลดรูพรุนในเนื้อเชื่อมได้ เนื่องจากแก๊สที่ใช้เป็นแก๊สเฉื่อยที่ไม่ทำปฏิกิริยากับอากาศ (How et al., 1995) ในส่วนของรูพรุนของการเคลื่อนที่เมื่อเปรียบเทียบกับด้านเสริมการเคลื่อนที่ พบว่าด้านการเคลื่อนที่จะมีรูพรุนมากกว่าด้านเสริมการเคลื่อนที่ที่เกิดจากอิทธิพลของดอกสว่านที่ทำให้เกิดรอยแยกด้านชิ้นงานด้านการเคลื่อนที่มากกว่าด้านเสริมการเคลื่อนที่ จึงทำให้อากาศแทรกตัวเข้าไปได้ง่ายกว่า ทั้งนี้จากการค้นคว้าข้อมูลพบว่าในขณะที่ดอก

ส่วนกวนแนวเชื่อม การเสียดสีระหว่างดอกสว่านกับด้านด้านการเคลื่อนที่ทำให้ด้านด้านการเคลื่อนที่มีอุณหภูมิสูงกว่าด้านเสริมการเคลื่อนที่ประมาณ 50°C เป็นเหตุให้ด้านด้านการเคลื่อนที่มีค่าความแข็งต่ำกว่าด้านเสริมการเคลื่อนที่ (Threadgill et al., 2009) นอกจากนี้ขนาดเกรนในด้านการเคลื่อนที่และด้านเสริมการเคลื่อนที่มีขนาดโตกว่าในบริเวณเนื้อเชื่อมเกิดจากเมื่อให้ความร้อนขณะการเชื่อมจะทำให้ความร้อนในบริเวณใกล้เคียงที่ไม่ถูกกวนประสานมีค่าความร้อนที่มากกว่าเส้น โชนวัตทำให้เฟส θ ในชิ้นงานเชื่อมหลอมละลายรวมเข้ากับเฟส α -Al ขนาดเกรนในบริเวณดังกล่าวจึงขยายโตขึ้นและทำให้ค่าความแข็งลดลง (Muangjumburee, 2012, Sikon, 2008, Saisang, Makklang & Kongtrakul, 2011) และจากภาพถ่ายโครงสร้างจุลทรรศน์แบบส่องกราด (SEM/EDX) พบว่าชิ้นงานที่เชื่อมภายใต้แก๊สปกคลุมมีอินเทอร์เมทัลลิกรูปร่างเล็กกว่าชิ้นงานที่เชื่อมภายใต้บรรยากาศปกติทำให้ชิ้นงานที่เชื่อมภายใต้แก๊สเหนียวกว่าซึ่งส่งผลต่อค่าความแข็งแรงดึง

สมบัติทางกลของแนวเชื่อมพบว่า ทิศทางการหมุนของดอกสว่านไม่มีอิทธิพลต่อค่าสมบัติทางกลของแนวเชื่อมเพราะผลการทดสอบค่าความแข็งแรงดึงและผลการทดสอบค่าความแข็งมีค่าใกล้เคียงกันเพียงแต่สลับด้านเคลื่อนที่และด้านเสริมการเคลื่อนที่ของชิ้นงานเท่านั้น (Panneerselvam & Lenin, 2014) ในส่วนของชิ้นงานเชื่อมภายใต้แก๊สปกคลุมพบว่า มีค่าสมบัติที่ดีกว่าการเชื่อมในบรรยากาศปกติ เนื่องจากแก๊สสามารถลดรูพุนของเนื้อเชื่อมได้ เมื่อรูพุนในเนื้อเชื่อมลดลงทำให้ค่าสมบัติเชิงกลนั้นดีขึ้นตามไปด้วย

สรุป

1) การเปลี่ยนทิศทางการหมุนของดอกสว่านไม่ได้ส่งผลต่อโครงสร้างทางโลหะวิทยา (โครงสร้างทางกายภาพ โครงสร้างมหภาค จุลภาคและจำนวนรูพุน) และสมบัติเชิงกลของแนวเชื่อม (ค่าความแข็งแรงดึงของแนวเชื่อมและค่าความแข็งของแนวเชื่อม) เพียงแค่ทำให้ชิ้นงานมีชิ้นงานด้านด้านการเคลื่อนที่และด้านเสริมการเคลื่อนที่สลับด้านกัน

2) การเชื่อมภายใต้แก๊สปกคลุมสามารถลดรูพุนได้และส่งผลให้ค่าความแข็งแรงดึงของแนวเชื่อม (สมบัติเชิงกล) เพิ่มขึ้นด้วย

3) สภาวะที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการเชื่อมในสถานะกึ่งแข็งของอะลูมิเนียมหล่อผสมกึ่งของแข็ง SSM356 คือ การเชื่อมที่ใช้ความเร็วรอบดอกสว่าน 1,750 rpm ความเร็วเดินแนวเชื่อมที่ 75 mm/min ดอกสว่านหมุนตามเข็มนาฬิกา ภายใต้ในโตรเจนแก๊สอัตราการไหล 5 l/min อุณหภูมิแก๊สที่ 300°C ควบคุมอุณหภูมิชิ้นงานให้อยู่ในช่วง 580-590°C ตลอดการเชื่อม

ข้อเสนอแนะ

การเชื่อมโดยใช้สว่านไฟฟ้าอาจจะมีภาระสิ้นเปลืองชิ้นงานมากกว่าการเชื่อมโดยใช้หัวถั่ว เพราะบางชิ้นงานมีความซึมลึกที่ไม่เพียงพอ ส่งผลให้สมบัติของแนวเชื่อมลดลง จึงแนะนำให้สร้างตัวจับยึดสว่านไฟฟ้าที่มั่นคงเพื่อให้ได้แนวเชื่อมที่มีการซึมลึกเท่ากันทั่วทั้งแนวเชื่อม

รายการอ้างอิง

- Birbilis, N. & Buchheit, R.G. (2005). *Electrochemical Characteristics of Intermetallic Phase in Aluminum Alloys*. Journal of the Electrochemical Society, 152(4), 140-151
- Binrohini, P & Muangjunburee, P. (2015). *Improvement of Semi-Solid State of SSM Aluminum Alloys*. The 30th Conference of Mechanical Engineering Network of Thailand, Prince of Songkla University.
- Jung, B., Lee, H., & Park H. (2013). *Effect of grain size on the indentation hardness for polycrystalline materials by the modified strain gradient theory*. International Journal of Solid and Structure, Vol. 50, 2719-2724
- Merlin, M & Garagnani, G. (2009). *Mechanical and microstructure characterization of A356 casting realized with full and empty cores*. Metallurgical Science and Technology, Vol. 27-1, 21-30
- Muangjunburee, P. (2012). *Welding Engineering*. Songkla: Education Technology, Faculty of Engineering, Prince of Songkla University.
- Panneerselvam, K & Lenin, K. (2014). *Joining of Nylon 6 plate by friction stir welding process using threaded pin profile*. Materials and Design, Vols. 53, 302-307
- Petkhwan, A., Muangjunburee, P & Wannasin, J. (2014). *Investigation of microstructure and mechanical properties of semi-solid state joining SSM aluminum alloys*. Mechanics and Materials, Vols. 496-500, 371-375.
- Threadgill, P.L., Leonard, A.J., Shercliff, H.R & Withers, P.J. (2009). *Friction stir welding of aluminum alloys*. International Review, Vols. 54 (2), 49-93.
- How, Q., Mutharasan, R. & Kozal, M. (1995). *Feasibility of aluminum nitride formation in aluminum alloys*. Materials of Science and Engineering.
- Saisang, C., Makklang, A & Kongtrakul, W. (2011). *Welding Metallurgy*. Bangkok: Se-education.

Sikon, L. (2008). *Materials Engineering*. Songkla: Education Technology, Faculty of Engineering, Prince of Songkla University.

Wanasin, J & Thanabumrunkul, S. (2008). *Development of a Semi-Solid metal processing technique for aluminium casting application*. Songklanakarin J. Sci. Technol 30(2), 215-220.

Wanasin, J., Burapa, R & Canyut, R. (2009). *Improvement of aluminum A356 Casting by GISS process*. 7th Engineering Conference, Prince of Songkla University.

รายการอ้างอิง (ภาษาไทย)

ภัสพล บิลห่อหิม ประภาส เมืองจันทร์บุรี. (2558). การปรับปรุงการเชื่อมในสถานะกึ่งของแข็งของอะลูมิเนียมหล่อผสมกึ่งแข็ง, การประชุมเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 30, มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.

ประภาส เมืองจันทร์บุรี. (2555). วิศวกรรมการเชื่อม, ภาควิชาวิศวกรรมเหมืองแร่และวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.

ฉัตรทอง ไสแสง, อนุชาติ มากกลาง, วิทยา กองตระกูล. (2554). โลหะวิทยาการเชื่อม, กรุงเทพฯ: ซีเอ็ดดูเคชั่น. เล็ก สีคง. (2551). วัสดุวิศวกรรม อุตสาหกรรม, ภาควิชาวิศวกรรมเหมืองแร่และวัสดุ, หน่วยเทคโนโลยีการศึกษา, คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.

เจษฎา วรรณสินธุ์ รอมภูอน บูรพา รังสินี แคนยุดต์. (2552). การปรับปรุงการหล่อด้วยกรรมวิธีการหล่อแบบ GISS เพื่ออะลูมิเนียมผสม A356, การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ครั้งที่ 7.

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ สกุล นายภัสพล บิลห่อหิม

รหัสประจำตัวนักศึกษา 5710120044

วุฒิการศึกษา

วุฒิ	ชื่อสถาบัน	ปีที่สำเร็จการศึกษา
วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมเครื่องกล)	มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์	2556

ทุนการศึกษา

ทุนอุดหนุนการวิจัยเพื่อวิทยานิพนธ์ ปีงบประมาณ 2558

การตีพิมพ์เผยแพร่ผลงาน

ภัสพล บิลห่อหิม ประภาส เมืองจันทร์บุรี. การปรับปรุงการเชื่อมในสถานะกึ่งของแข็งของ อะลูมิเนียมหล่อผสมกึ่งแข็ง, การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกล แห่งประเทศไทย ครั้งที่ 30, 5-8 กรกฎาคม 2559.

ภัสพล บิลห่อหิม ประภาส เมืองจันทร์บุรี. การปรับปรุงการเชื่อมในสถานะกึ่งของแข็งของ อะลูมิเนียมหล่อผสมกึ่งแข็ง, วารสารมหาวิทยาลัยนราธิวาสราชนครินทร์, สาขา วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ปีที่ 11, ฉบับที่ 1 ประจำเดือนมกราคม-เมษายน 2562