รายงานการวิจัย

สมบัติทางกลและโครงสร้างทางจุลภาคของอะลูมิเนียมหล่อกึ่งของแข็ง เกรด 356 กับ เกรด 7075 ด้วยกระบวนการเชื่อมแบบแพร่ผ่านเฟสของเหลว

Mechanical Properties and Microstructure of Semi-Solid Metal 356 with 7075 Aluminum Alloy by Transient Liquid Phase Diffusion Welding

นายชัยยุทธ มีงาม

นายศุภชัย ชัยณรงค์

งานวิจัยฉบับนี้ได้รับเงินอุดหนุนการวิจัยจากงบประมาณแผ่นดิน (วช.)

ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. ๒๕๖๐

ชื่องานวิจัย สมบัติทางกลและโครงสร้างทางจุลภาคของอะลูมิเนียมหล่อกึ่งของแข็ง เกรด 356 กับเกรด 7075 ด้วยกระบวนการเชื่อมแบบแพร่ผ่านเฟสของเหลว

ผู้วิจัย นายชัยยุทธ มีงาม
นายศุภชัย ชัยณรงค์
คณะ เทคโนโลยีอุตสาหกรรม

ปี 2560

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาลักษณะของโครงสร้างทางโลหะวิทยาและสมบัติทางกลของบริเวณรอยต่อชิ้นงาน โดยศึกษาปัจจัยที่เหมาะสมของกรรมวิธีการเชื่อมโดยการแพร่ของชิ้นงานอะลูมิเนียมหล่อกึ่งแข็ง เกรด 356 และ เกรด 7075 ชิ้นงานทดลองมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12 มิลลิเมตร ความยาว 45 มิลลิเมตร และตัวประสาน คือ สังกะสีผสมอะลูมิเนียม เกรด ZA 27 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12 มิลลิเมตร ความหนา 0.25 มิลลิเมตร ปัจจัยในกระบวนการเชื่อมโดยการแพร่ ได้แก่ เวลาในการกดแช่ 60 และ 120 นาที อุณหภูมิในการเชื่อม 450, 500 และ 550 องศาเซลเซียส ตามลำดับ แรงกด 4 MPa ใช้แก๊สอาร์กอนปกคลุมที่อัตราการไหล 4 ลิตร/นาที หลังจากการเชื่อมโดยการแพร่ จะศึกษาโครงสร้างทางโลหะวิทยาและการทดสอบสมบัติทางกลของรอยต่อของชิ้นงาน ซึ่งผลการทดลองพบว่าบริเวณรอยต่อระหว่างอะลูมิเนียมทั้งสอง พบว่าขนาดของเกรนมีขนาดที่โตขึ้นตามอุณหภูมิที่สูงและเวลาที่นานขึ้น ในทำนองเดียวกันระยะของการแพร่ของสังกะสีผสมอะลูมิเนียมมีขนาดที่กว้างตามระยะเวลาและอุณหภูมิที่สูงขึ้นเช่นกัน โดยอุณหภูมิที่ 550 องศาเซลเซียส เวลาในการเชื่อมที่ 120 นาที มีแนวโน้มที่จะเกิดโพรงอากาศได้มาก สำหรับค่าความต้านทานแรงดึงของรอยต่อ แสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิในการเชื่อม 500 องศาเซลเซียส เวลาที่ใช้เชื่อม 60 นาที พบว่าค่าความต้านทานแรงดึงเฉลี่ยสูงสุด โดยมีค่าอยู่ที่ 103.06 MPa ในทางตรงกันข้าม ที่อุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส เวลาในการเชื่อมที่ 60 นาที แสดงให้เห็นว่าค่าความต้านทานแรงดึงเฉลี่ยมีค่า 48.30 MPa ซึ่งมีค่าน้อยที่สุดจากการทดลอง อย่างไรก็ตามทุกการทดลองมีการยึดติดที่ดีของชิ้นงานหลังการเชื่อม ความร้อนส่งผลให้ชิ้นงานมีค่าความแข็งเพิ่มขึ้น จากการตกตะกอนของเฟสยูเทกติก โดยค่าความแข็งของชิ้นงานบริเวณรอยต่อมีความแข็งที่สูงกว่าบริเวณอื่นๆ เมื่อตรวจสอบตามแนวยาวของชิ้นงาน แต่เมื่อตรวจสอบตามแนวตามขวางของชิ้นงานแสดงให้เห็นว่าค่าความแข็งจะลดลงเมื่อเข้าใกล้จุดกึ่งกลางของชิ้นงาน อย่างไรก็ตามตัวแปรของอุณหภูมิและเวลาที่สูงส่งผลโดยตรงต่อการเสียรูปของชิ้นงาน ซึ่งทำให้ชิ้นงานเกิดการโก่งงอและเกิดการบวมหลังการเชื่อม

คำสำคัญ: กระบวนการเชื่อมโดยการแพร่ สมบัติทางกล โครงสร้างจุลภาค อะลูมิเนียมหล่อกึ่งแข็ง เกรด 356 อะลูมิเนียมหล่อกึ่งแข็ง เกรด 7075

Research Title	Mechanical Properties and Microstructure of Semi-Solid Metal 356 with 7075 Aluminum Alloy by Transient Liquid Phase Diffusion Welding
Researcher	Mr. Chaiyoot Meengam Mr. Suppachai Chainarong
Faculty	Industrial Technology
Year	2017

Abstract

The research aims to study microstructure and mechanical properties in bonded line, which to study appropriate parameters for transient liquid phase diffusion welding of semi-solid metal 356 with semi-solid metal 7075 aluminum alloy. The samples preparations are cylindrical in shape with Ø12x50 mm and long 45 mm and ZA 27 zinc alloy filler metal used is with a size of Ø12 mm and 25 µm. For parameters in experimental such as bonding time 60 and 120 second and bonding temperature at 450, 500 and 550 ^{o}C respectively. The performed in argon gas atmosphere at 4 l per minute. After TLP bonding study microstructure and mechanical properties tested. The experiments found that the grain size grows at higher temperatures and longer times. Likewise, the range of diffusion of zinc alloy is broader with time and temperature as well, by bonding temperature at 550 ^{o}C and bonding time 120 second tend to high porosity. The maximum tensile strength average was 103.06 MPa from bonding temperature at 500 ^{o}C and bonding time 60 second. On the other hand, from bonding temperature at 450 ^{o}C and bonding time 60 second gives minimum tensile strength average was 48.30 MPa respectively. However, after TLP bonding found that sample all experiment have good bonded and temperature increase hardness in bonded zone for longitudinal tested, when transverse tested found that hardness of near base materials. However, bonding time and bonding temperature effect to change characteristics of samples, which causes the samples to buckling and bloat after welding.

Keyword: Diffusion welding, Mechanical properties, Microstructure, Semi-solid metal 356 aluminum alloys, Semi-solid metal 7075 aluminum alloys.

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยฉบับนี้ได้ดำเนินการได้ด้วยดี เนื่องด้วยการประสิทธิประสาทวิชาความรู้และความอนุเคราะห์จากบุคคลหลายฝ่าย ตลอดจนคณาจารย์ทุกท่านในโปรแกรมวิชาวิศวกรรมศาสตร์ คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏสงขลา ในการสนับสนุนการทำงานวิจัยนี้ให้มีความสำเร็จและสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณสถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยราชภัฏสงขลา และมหาวิทยาลัยวิจัยแห่งชาติ (วช) ภายใต้สัญญาทุนเลขที่ ๖/๒๕๖๐ ที่ได้ให้การสนับสนุนเงินทุนในการวิจัยครั้งนี้

นอกจากนั้นคณะผู้วิจัยขอขอบคุณ สาขาวิชาวิศวกรรมการผลิต คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย และภาควิชาวิศวกรรมเหมืองแร่และวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ที่ให้การสนับสนุนเครื่องมือและอุปกรณ์ในการทำวิจัยจนสามารถดำเนินงานไปได้และมีความสมบูรณ์ครบถ้วนทุกประการ

คณะผู้ทำงานวิจัยขอขอบคุณทุกท่าน ทุกฝ่าย ที่สนับสนุนในการทำวิจัยด้วยใจจริง ขอขอบคุณ

ชัยยุทธ มีงาม
คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม

มหาวิทยาลัยราชภัฏสงขลา
SONGKHLA RAJABHAT UNIVERSITY

สารบัญ

เรื่อง	หน้า
บทคัดย่อ	ก
กิตติกรรมประกาศ	ข
สารบัญ	ค
สารบัญตาราง	ง
สารบัญภาพ	จ
รายการสัญลักษณ์	ช
บทที่ 1 บทนำ	1
ความสำคัญและที่มาของปัญหา	1
วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย	1
ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2
ขอบเขตของโครงการวิจัย	2
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	4
ทฤษฎี สมมุติฐาน และ/หรือกรอบแนวความคิดของการวิจัย	4
การทบทวนวรรณกรรม/งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	11
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงาน	15
กรอบความคิดในการดำเนินงานวิจัย	15
วัสดุที่ใช้ในงานวิจัย	16
เครื่องมือและอุปกรณ์	17
ขั้นตอนการทดลอง	22
บทที่ 4 ผลการทลองและวิจารณ์ผล	30
ผลการตรวจสอบลักษณะโครงสร้างทางกายภาพ	30
ผลการตรวจสอบโครงสร้างมหภาค	32
การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค	33
การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องอิเล็กตรอนแบบส่องกราด	39
ผลของการทดสอบความแข็งแรงดึง	42
ลักษณะการขาดของผิวรอยต่อ	43
ผลของการทดสอบความแข็ง	44
บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง	48
บรรณานุกรม	49
ภาคผนวก ก มาตรฐานการทดสอบแรงดึง	51
ภาคผนวก ข ผลการทดสอบความแข็ง	55
ประวัติผู้ทำวิจัย	65

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
3.1 แสดงส่วนผสมทางเคมีของอะลูมิเนียมหล่อกึ่งของแข็ง SSM 356	16
3.2 แสดงส่วนผสมทางเคมีของอะลูมิเนียมหล่อกึ่งของแข็ง SSM 7075	17
ข.1 ค่าความแข็งที่วัดด้วยไมโครวิกเกอร์ แนวตามยาวชิ้นงาน ที่อุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส เวลา 60 นาที	55
ข.2 ค่าความแข็งที่วัดด้วยไมโครวิกเกอร์ แนวตามยาวชิ้นงาน ที่อุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส เวลา 120 นาที	56
ข.3 ค่าความแข็งที่วัดด้วยไมโครวิกเกอร์ แนวตามยาวชิ้นงาน ที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เวลา 60 นาที	57
ข.4 ค่าความแข็งที่วัดด้วยไมโครวิกเกอร์ แนวตามยาวชิ้นงาน ที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เวลา 120 นาที	58
ข.5 ค่าความแข็งที่วัดด้วยไมโครวิกเกอร์ แนวตามยาวชิ้นงาน ที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส เวลา 60 นาที	59
ข.6 ค่าความแข็งที่วัดด้วยไมโครวิกเกอร์ แนวตามยาวชิ้นงาน ที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส เวลา 120 นาที	60
ข.7 ค่าความแข็งที่วัดด้วยไมโครวิกเกอร์ แนวตามขวางชิ้นงานที่อุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส เวลา 60 นาที	61
ข.8 ค่าความแข็งที่วัดด้วยไมโครวิกเกอร์ แนวตามขวางชิ้นงานที่อุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส เวลา 120 นาที	62
ข.9 ค่าความแข็งที่วัดด้วยไมโครวิกเกอร์ แนวตามขวางชิ้นงานที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เวลา 60 นาที	62
ข.10 ค่าความแข็งที่วัดด้วยไมโครวิกเกอร์ แนวตามขวางชิ้นงานที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เวลา 120 นาที	63
ข.11 ค่าความแข็งที่วัดด้วยไมโครวิกเกอร์ แนวตามขวางชิ้นงานที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส เวลา 60 นาที	63
ข.12 ค่าความแข็งที่วัดด้วยไมโครวิกเกอร์ แนวตามขวางชิ้นงานที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส เวลา 120 นาที	64

สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
2.1 แสดงกลไกการเกิดการเชื่อมโดยการแพร่	5
2.2 แสดงชิ้นงานที่ผ่านการเชื่อมด้วยกรรมวิธีการเชื่อมโดยการแพร่	7
2.3 แสดงลักษณะการแพร่ของอะตอมแบบแทรกตัว	8
2.4 แสดงลักษณะรอยกดจากหัวเพชรของ Vickers Hardness Test	10
2.5 แสดงมาตรฐานการทดสอบแรงดึง	11
3.1 แสดงกรอบขั้นตอนการดำเนินการวิจัย	15
3.2 แสดงอะลูมิเนียมหล่อกึ่งของแข็ง SSM 356 ที่ได้จากการหล่อขึ้นรูปแบบ GISS	16
3.3 แสดงอะลูมิเนียมหล่อกึ่งของแข็ง SSM 7075 ที่ได้จากการหล่อขึ้นรูปแบบ GISS	17
3.4 แสดงเครื่องเจาะแนวตั้ง	18
3.5 แสดงเครื่องเลื่อยสายพาน	18
3.6 แสดงเครื่องกลึงชิ้นงานยี่ห้อ JET รุ่น GHB-1340A	19
3.7 แสดงเครื่องมืออุปกรณ์ในกระบวนการเชื่อมโดยการแพร่	19
3.8 แสดงเครื่องทดสอบความแข็ง ยี่ห้อ Digicon รุ่น TH-320	20
3.9 แสดงเครื่องทดสอบแรงดึง	20
3.10 แสดงกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง ยี่ห้อ Olympus	21
3.11 แสดงกล้องอิเล็กตรอนแบบส่องกราด ยี่ห้อ FEI-Quanta รุ่น 400	21
3.12 แสดงการเลื่อยตัดแบ่งอะลูมิเนียมหล่อกึ่งของแข็ง	22
3.13 แสดงการกลึงเตรียมชิ้นงานอะลูมิเนียมหล่อกึ่งของแข็ง	22
3.14 แสดงการเตรียมผิวงานเชื่อมโดยการแพร่	23
3.15 แสดงชิ้นงานสำหรับเชื่อมโดยการแพร่	23
3.16 แสดงชิ้นงานเข้าเตาเชื่อม	25
3.17 แสดงลำดับการให้อุณหภูมิในการเชื่อมโดยการแพร่	26
3.18 แสดงการหล่อเรซิ่นทำเรือนหุ้มชิ้นงาน	26
3.19 แสดงขัดชิ้นงานด้วยกระดาษทราย	27
3.20 แสดงลักษณะของชิ้นงานที่พร้อมตรวจสอบโครงสร้างทางโลหะวิทยา	27
3.21 แสดงบริเวณการกดวัดความแข็ง	28
3.22 แสดงชิ้นงานทดสอบแรงดึงตามมาตรฐาน ASTM A310-10	29
4.1 แสดงลักษณะทางกายภาพของชิ้นงานหลังการเชื่อม	31
4.2 แสดงโครงสร้างมหาภาคของทุกตัวแปรในการทดลอง	33
4.3 แสดงบริเวณการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค	34
4.4 แสดงโครงสร้างจุลภาคของอะลูมิเนียมหล่อกึ่งแข็ง เกรด 356	34
4.5 แสดงโครงสร้างจุลภาคของอะลูมิเนียมหล่อกึ่งแข็ง เกรด 7075	34
4.6 แสดงโครงสร้างจุลภาคของอุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส เวลา 60 นาที	35
4.7 แสดงโครงสร้างจุลภาคของอุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส เวลา 120 นาที	36

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่ **หน้า**

4.8 แสดงโครงสร้างจุลภาคของอุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เวลา 60 นาที 37
4.9 แสดงโครงสร้างจุลภาคของอุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เวลา 120 นาที 37
4.10 แสดงโครงสร้างจุลภาคของอุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส เวลา 60 นาที 38
4.11 แสดงโครงสร้างจุลภาคของอุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส เวลา 120 นาที 39
4.12 แสดงโครงสร้างจุลภาคของอุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส เวลา 60 นาที 40
4.13 แสดงโครงสร้างจุลภาคของอุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เวลา 60 นาที 41
4.14 แสดงค่าความต้านทานแรงดึงชิ้นงานหลังการเชื่อมโดยการแพร่ 43
4.15 แสดงลักษณะการขาดของผิวรอยต่อ 44
4.16 แสดงบริเวณการกดวัดค่าความแข็งด้วยไมโครวิกเกอร์ (ตามแนวยาวชิ้นงาน) 45
4.17 แสดงบริเวณการกดวัดค่าความแข็งด้วยไมโครวิกเกอร์ (ตามแนวขวางชิ้นงาน) 45
4.18 แสดงผลการทดสอบความแข็งแนวตามยาวชิ้นงาน ที่เวลา 60 นาที 45
4.19 แสดงผลการทดสอบความแข็งแนวตามยาวชิ้นงาน ที่เวลา 120 นาที 46
4.20 แสดงผลการทดสอบความแข็งแนวตามขวางชิ้นงาน ที่เวลา 60 นาที 47
4.21 แสดงผลการทดสอบความแข็งแนวตามขวางชิ้นงาน ที่เวลา 120 นาที 47
ก.1 แสดงมาตรฐานการทดสอบแรงดึง ตามมาตรฐาน ASTM A310–10 52
ข.1 บริเวณการกดวัดค่าความแข็งด้วยไมโครวิกเกอร์ แนวตามยาวชิ้นงาน 55
ข.2 บริเวณการกดวัดค่าความแข็งด้วยไมโครวิกเกอร์ แนวตามขวางชิ้นงาน 62

SONGKHLA RAJABHAT UNIVERSITY

รายการสัญลักษณ์

SSM	โลหะกึ่งของแข็ง
GMAW	การโลหะด้วยก๊าซคลุมแบบมิก แมก
GISS	กรรมวิธีการพ่นฟองแก๊สเฉื่อย
ZA 27	สังกะสีผสมอะลูมิเนียม
SSM 356	อะลูมิเนียมหล่อกึ่งแข็ง เกรด 356
SSM 7075	อะลูมิเนียมหล่อกึ่งแข็ง เกรด 7075
HV	การทดสอบความแข็งแบบวิกเกอร์ส
MPa	หน่วยของการวัดแรงแบบความเค้น (เมกะปาสคาล)
DW	การเชื่อมโดยการแพร่
SEM	กล้องอิเล็กตรอนแบบส่องกราด
OM	กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง
ASTM	สมาคมการทดสอบวัสดุของอเมริกา

มหาวิทยาลัยราชภัฏสงขลา
SONGKHLA RAJABHAT UNIVERSITY

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา

ปัจจุบันกระบวนการเชื่อมโลหะด้วยก๊าซคลุม (Gas Metal Arc Welding : GMAW) มีก๊าซที่ใช้ในการปกคลุมแนวเชื่อมมีอยู่หลายชนิด เช่น ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO) ก๊าซอาร์กอน (Ar) และก๊าซฮีเลียม (He) ซึ่งก๊าซที่ใช้ในการปกคลุมแนวเชื่อมจะมีความสำคัญและมีประโยชน์ต่อคุณภาพของแนวเชื่อมเพราะก๊าซปกคลุมจะทำหน้าที่ป้องกันไม่ให้อากาศ และความชื้นจากภายนอกเข้าไปรวมตัวกับน้ำโลหะที่บ่อหลอมละลายในการเชื่อม ชิ้นงานที่เป็นเหล็กกล้าไร้สนิมและอะลูมิเนียมจะใช้ก๊าซอาร์กอนหรือก๊าซฮีเลียมปกคลุมแนวเชื่อม สำหรับการเชื่อมอะลูมิเนียมมักจะพบปัญหาต่างๆ ของแนวเชื่อมและชิ้นงานเชื่อมอยู่มากมาย เช่น แนวเชื่อมเกิดรูพรุน แนวเชื่อมมีความกว้างความสูง และการหลอมลึกที่ไม่สมบูรณ์เกิดความเค้นและความเครียดตกค้าง ซึ่งนำไปสู่การแตกร้าวของแนวเชื่อม [1] และการเสียรูปทรงของชิ้นงานเชื่อม เป็นต้น ดังนั้นการหาเทคนิคใหม่ๆ ในการเชื่อมอะลูมิเนียมจึงมีความน่าสนใจ การเชื่อมโดยการแพร่ เป็นการเชื่อมที่อาศัยการแพร่ของอะตอมภายในวัสดุ จากพลังงานกระตุ้น โดยการแพร่ในโลหะผสมที่เราจะพบว่าเป็นการแพร่ภายใต้ความเข้มข้นสูงไปยังความเข้มข้นต่ำ จึงทำให้เกิดการแพร่ เมื่อพิจารณาลักษณะของการละลายของโลหะที่นำมาผสมกันแล้วจะพบว่าโลหะต่างๆ สามารถผสมกันเป็นสารละลายได้สองลักษณะตามการจัดเรียงของอะตอม คือ การแพร่ของอะตอมแบบแทรกที่ และการแพร่ของอะตอมแบบแทนที่ [2] ซึ่งขึ้นอยู่กับขนาดของอะตอมภายในวัสดุที่แตกต่างกัน ทำให้กลไกการแพร่ในโลหะผสมบริเวณที่เป็นเฟสเดียวจึงต่างกัน

อย่างไรก็ตามอะลูมิเนียมก็มีการพัฒนาเทคโนโลยีเพื่อปรับปรุงคุณสมบัติไปมาก ในปัจจุบันเทคโนโลยีการหล่อกึ่งของแข็ง (Semi-Solid Metal, SSM) เป็นวิธีการหล่อที่มีศักยภาพสูงที่ใช้ในการขึ้นรูปอะลูมิเนียม เนื่องจากมีข้อดีหลายอย่าง เช่น ให้คุณสมบัติที่ดีหลังกระบวนการหล่อ ชิ้นงานลดการบิดงอ ลดโพรงอากาศจากการขึ้นรูป จุดหลอมเหลวในการหล่อต่ำ นำไปสู่การยืดอายุในการใช้งานแม่พิมพ์หล่อได้ยาวนานขึ้น [3] เป็นต้น กระบวนการหล่อกึ่งของแข็งด้วยกรรมวิธีการพ่นฟองแก๊สเฉื่อย (Gas induce Semi-Solid, GISS) ก็เป็นอีกเทคนิคที่นิยมนำมาปรับปรุงสมบัติของอะลูมิเนียมโดยอาศัยการพ่นฟองแก๊สอาร์กอนหรือไนโตรเจนผ่านแท่งกราไฟต์ ส่งผลให้มีคุณสมบัติที่ดีสำหรับอะลูมิเนียมที่ผ่านกระบวนการหล่อด้วยวิธีนี้ โดยเฉพาะอะลูมิเนียมหล่อผสม เกรด 356 และอะลูมิเนียมหล่อผสม เกรด 7075 เนื่องจากวิธีนี้ทำให้โครงสร้างจุลภาคของอะลูมิเนียมจะช่วยลดการเกิดการแตกร้อน ลดการหดตัวของโครงสร้าง รวมไปถึงเพิ่มความหนาแน่นให้กับชิ้นงาน เพิ่มสมบัติทางกลให้สูงขึ้น [4] อย่างไรก็ตามการเชื่อมที่เหมาะสมสำหรับการเชื่อมต่างวัสดุยังเป็นเรื่องที่ยากโดยเฉพาะวัสดุกลุ่มอะลูมิเนียม เนื่องจากปัญหาที่ได้กล่าวมาข้างต้นแล้ว และสมบัติของอะลูมิเนียมทั้งสองยังแตกต่างกัน จะเห็นได้ว่าการหาเทคนิคใหม่ๆ ในการเชื่อมจึงมีความน่าสนใจ โดยการงานวิจัยนี้เป็นการใช้ตัวประสานสังกะสี-อะลูมิเนียม เกรด ZA 27 ช่วยในการละลายผ่านเฟสของเหลวภายใต้การเชื่อมโดยการแพร่ ส่งผลให้ชิ้นงานเชื่อมได้รวดเร็วขึ้น มีสมบัติทางกลที่ดีขึ้นหลังจากการเชื่อมด้วยเทคนิคนี้

จากข้อมูลและเหตุผลดังกล่าวข้างต้นจึงเป็นที่มาของการศึกษา การเชื่อมอะลูมิเนียมหล่อกึ่งของแข็ง เกรด 356 กับอะลูมิเนียมหล่อกึ่งแข็ง เกรด 7075 ด้วยกระบวนการเชื่อมโดยการแพร่ ซึ่งจะใช้ประสานสังกะสี-อะลูมิเนียม เกรด ZA 27 ช่วยในการละลายผ่านเฟสของเหลว โดยศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการเชื่อมที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางโลหะวิทยา และสมบัติทางกล โดยเฉพาะบริเวณรอยต่อชิ้นงานและบริเวณเนื้อโลหะ (Base Metal) เพื่อความเหมาะสมทางด้านโครงสร้างมหภาคจุลภาค และสมบัติทางกล อีกทั้งนำผลมาปรับปรุงเพื่อเลือกใช้กรรมวิธีการเชื่อมที่เหมาะสมทั้งในแง่งานวิจัยและอุตสาหกรรมต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

- เพื่อศึกษาลักษณะของโครงสร้างทางโลหะวิทยาและสมบัติทางกลของบริเวณรอยต่อชิ้นงาน ที่ได้จากการเชื่อมโดยการแพร่ของอะลูมิเนียมต่างชนิด โดยใช้เทคนิคการผ่านเฟสของเหลว
- เพื่อศึกษาปัจจัยที่เหมาะสมของกระบวนการเชื่อมโดยการแพร่ของอะลูมิเนียมหล่อกึ่งของแข็ง เกรด 356 กับอะลูมิเนียมหล่อกึ่งแข็ง เกรด 7075 ด้วยกระบวนการเชื่อมโดยการแพร่ โดยใช้เทคนิคการผ่านเฟสของเหลว

1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- ทำให้ทราบถึงปัจจัยที่เหมาะสมในกระบวนการเชื่อมโดยการแพร่ ระหว่างอะลูมิเนียมหล่อกึ่งแข็ง เกรด 356 และเกรด 7075 โดยมีสังกะสีผสมอะลูมิเนียมเป็นตัวประสาน
- ทราบลักษณะของโครงสร้างทางโลหะวิทยาและสมบัติทางกล
- พัฒนาบุคลากรทางด้านการศึกษาและผลิตนักศึกษาในระดับ ป.ตรี

1.4 ขอบเขตของโครงการวิจัย

(1) ขอบเขตของเนื้อหา

การเชื่อมชิ้นงานทดลองใช้กระบวนการเชื่อมโดยการแพร่

(2) วัสดุที่ใช้ในการวิจัย

ชิ้นงานทดลองเชื่อมเป็นอะลูมิเนียมหล่อกึ่งแข็ง เกรด 356และอะลูมิเนียมหล่อกึ่งแข็ง เกรด 7075 ตัวประสานระหว่างชิ้นงาน ได้แก่ สังกะสีผสมอะลูมิเนียม ที่มีขนาดความหนา 0.25 มิลลิเมตร เส้นผ่านศูนย์กลาง 12 มิลลิเมตร

(3) ขอบเขตของการทดลอง

3.1 กำหนดปัจจัยในการทดลองดังนี้

ความยาวของชิ้นงาน 45 มิลลิเมตร และเส้นผ่านศูนย์กลาง 12 มิลลิเมตร

ใช้แก๊สอาร์กอนปกคลุมแนวเชื่อม 4 ลิตร/นาที

แรงกดที่ใช้ในกระบวนการเชื่อมโดยการแพร่ 4 MPa

เวลาในการกดแช่ 60 นาที และ 120 นาที

อุณหภูมิในการเชื่อมโดยการแพร่ของชิ้นงาน ได้แก่ 450, 500 และ 550 องศาเซลเซียส ตามลำดับ

3.2 ตรวจสอบโครงสร้างทางโลหะวิทยา ประกอบด้วย

โครงสร้างมหภาค (Macrostructure)

โครงสร้างจุลภาค (Microstructure)

3.3 ทดสอบสมบัติทางกล ประกอบด้วย

การทดสอบแรงดึง (Tensile Testing)

การทดสอบความแข็ง (Hardness Testing)

การทดสอบการแตกหัก (Facture Testing)

มหาวิทยาลัยราชภัฏสงขลา
SONGKHLA RAJABHAT UNIVERSITY

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การวิจัยเป็นการศึกษาวัสดุอะลูมิเนียมหล่อกึ่งแข็ง เกรด 356 กับอะลูมิเนียมหล่อกึ่งของแข็ง เกรด 7075 โดยใช้สังกะสีผสมอะลูมิเนียม ZA 27 เป็นตัวประสาน ด้วยการเชื่อมโดยการแพร่ผ่านเฟสของเหลว โดยมีการศึกษาทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ทั้งในระดับชาติและนานาชาติ ดังนั้นในการวิจัยนี้ได้มีการศึกษาทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้อง ดังต่อไปนี้

2.1 ทฤษฎี สมมุติฐาน และ/หรือกรอบแนวความคิดของการวิจัย

2.1.1 กระบวนการเชื่อมโดยการแพร่

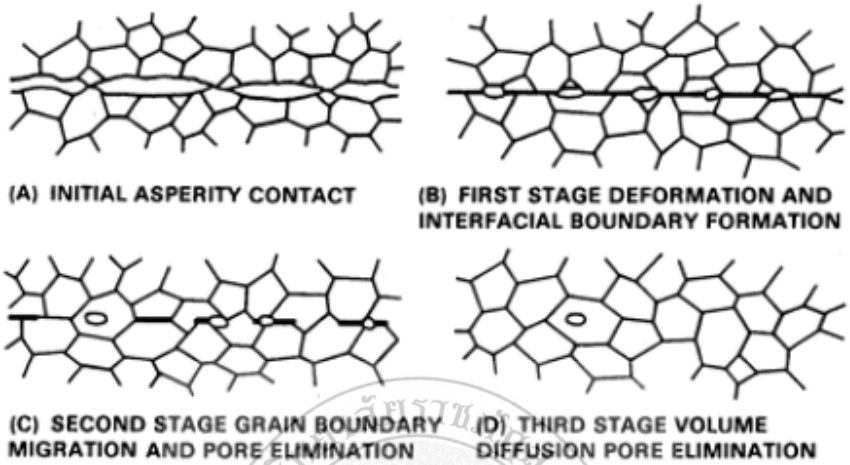
กรรมวิธีการเชื่อมโดยการแพร่เป็นการเชื่อมในสถานะของแข็ง สามารถเชื่อมต่อวัสดุได้หลายชนิด เช่น เซรามิค (Ceramic) วัสดุผสม (Composites) และโลหะ เป็นต้น กรรมวิธีการเชื่อมโดยการแพร่ต้องอาศัยตัวแปรที่เกี่ยวข้อง คือ แรงกดขณะเชื่อม (Pressure) เวลาในการกดแช่ (Time) และอุณหภูมิในการเชื่อม (Temperature) นอกจากนั้นยังมีตัวแปรอื่นๆ เช่น ความราบเรียบของผิวรอยต่อ(Surface Roughness) ความสะอาดของผิวรอยต่อ (Cleaning Surface) เป็นต้น โดยกลไกของการเชื่อมต่อจะอาศัยการแพร่ของอะตอมระหว่างวัสดุที่เชื่อมต่อกัน ดังแสดงในภาพที่ 1 โดยมีอัตราการแพร่ดังสมการที่ 1การเชื่อมโดยการแพร่สามารถเชื่อมต่อวัสดุต่างชนิด (Dissimilar) วัสดุชนิดเดียวกัน (Similar) หรือเชื่อมหลายๆ ชิ้นพร้อมกันได้ (Sandwich) ซึ่งในการเชื่อมด้วยวิธีการนี้จะใช้ในอุตสาหกรรมหลายชนิดด้วยกัน เช่น ชิ้นส่วนเครื่องปฏิกรณ์ในอุตสาหกรรมพลังงานปรมาณู อุตสาหกรรมการบินและอวกาศ เป็นต้น ในการเชื่อมโดยการแพร่การเตรียมผิวงานเชื่อมมีความสำคัญมาก โดยผิวหน้าที่เชื่อมต้องมีความราบเรียบของผิวที่เชื่อมต่อกัน นอกจากนั้นในการเชื่อมต้องมีการควบคุมบรรยากาศในขณะเชื่อมเพื่อป้องกันการเกิดออกไซด์ ซึ่งอาจทำภายใต้ระบบสุญญากาศหรือบรรยากาศที่มีก๊าซปกคลุม

$$D = Ae^{-(Q/RT)} \qquad (1)$$

เมื่อ D คือ สัมประสิทธิ์การแพร่ (cm^2)
T คือ อุณหภูมิ (Kelvin)
R คือ ค่าคงที่ของก๊าซ
A คือ ค่าคงที่
Q คือ พลังงานกระตุ้น

ในการแพร่ สัมประสิทธิ์การแพร่ (D) จะเร็วหรือช้าขึ้นอยู่กับ อุณหภูมิ กล่าวคือ ที่อุณหภูมิที่สูงยิ่งทำให้สัมประสิทธิ์ของการแพร่ที่รวดเร็ว ในทางตรงกันข้ามอุณหภูมิต่ำทำให้สัมประสิทธิ์การแพร่ช้าตามไปด้วย ซึ่งอุณหภูมิที่ช่วยในการแพร่จะบ่งบอกให้เห็นปริมาณพลังงานกระตุ้นว่ามีปริมาณต่ำหรือ

สูง หากเกิดพลังงานกระตุ้นที่สูงเป็นผลมาจากอุณหภูมิสูง ที่อุณหภูมิต่ำพลังงานกระตุ้นก็น้อยทำให้เกิดการแพร่ได้ช้า ในการเชื่อมโดยการแพร่มีกลไกการแพร่อยู่ด้วยกัน 4 ช่วง คือ ช่วงเริ่มต้นของผิวสัมผัส (Initial Asperity Contact) เป็นช่วงที่ขึ้นกับแรงกด เพราะแรงกดที่สูงเกินไปส่งผลให้โครงสร้างบิดเบี้ยวและหากแรงกดที่ต่ำเกินไป ส่งผลให้เกิดช่องว่างระหว่างผิวสัมผัสที่สูง



ภาพที่ 2.1 แสดงกลไกการเกิดการเชื่อมโดยการแพร่ [15]

ในช่วงแรกของการแพร่ (First Stage Deformation And Interfacial Boundary Formation) จะเป็นการเปลี่ยนรูปอย่างช้าๆ บริเวณขอบเกรนของชิ้นงาน โดยที่ขอบเกรนจะเชื่อมต่อกัน ปริมาณช่องว่าง(Void)จะเริ่มลดลง ช่วงที่สองของการแพร่ (Second Stage Grain Boundary Migration And Pore Elimination) เป็นช่วงที่เกิดการเคลื่อนย้ายของขอบเกรนเพื่อมาเชื่อมต่อกัน ซึ่งส่งผลให้กำจัดช่องว่างที่ผิวสัมผัส ส่วนในช่วงสุดท้ายหรือช่วงที่สามของการเชื่อม (Third Stage Volume Diffusion Pore Elimination) ช่วงนี้จะเกิดการแพร่ที่สมบูรณ์ ปริมาณช่องว่างจะหายไป ในการเชื่อมยังมีตัวแปรที่สำคัญดังต่อไปนี้

อุณหภูมิในการเชื่อม (Temperature) เป็นตัวแปรที่สำคัญในการเชื่อมโดยการแพร่ การเปลี่ยนอุณหภูมิเพียงเล็กน้อยจะส่งผลอย่างชัดเจนต่อลักษณะโครงสร้างทางโลหะวิทยาและสมบัติทางกล อุณหภูมิที่เหมาะสมในการเชื่อมโดยการแพร่อยู่เหนือช่วง 0.5 เท่า ของจุดหลอมเหลววัสดุ (Melting Point) ในอุณหภูมิระบบสัมบูรณ์ (Kelvin) ที่นำมาเชื่อม ซึ่งจะไม่เกินจุดหลอมเหลวของวัสดุ เพราะกรรมวิธีโดยการแพร่เป็นการเชื่อมในสถานะของแข็ง โดยช่วงอุณหภูมิที่เหมาะสมในการเชื่อม คือ 0.6-0.8เท่า ของจุดหลอมเหลวของวัสดุ ตัวแปรด้านอุณหภูมิเป็นตัวแปรที่สามารถควบคุมได้ง่าย มีความแม่นยำในการควบคุม และที่สำคัญลักษณะโครงสร้างที่เกิดขึ้นจะส่งผลมาจากการควบคุมอุณหภูมิ โดยเฉพาะในช่วงของการเย็นตัวหลังจากการเชื่อม การควบคุมอุณหภูมิที่ไม่ดีพอจะส่งผลให้ลักษณะโครงสร้างเปลี่ยนแปลงไป เกิดการเปลี่ยนเฟสหลังจากการเชื่อม

เวลาในการกดแช่ (Holding Time) เวลาเป็นอีกตัวแปรที่มีความสำคัญไม่น้อยไปกว่าอุณหภูมิ โดยเวลาที่ใช้จะสัมพันธ์กับอุณหภูมิโดยตรง เพราะเวลาจะส่งผลต่อสัมประสิทธิ์การแพร่ และส่งผลมายังระยะทาง (x) ที่แพร่ เวลาที่สูงทำให้การแพร่มีระยะทางในการแพร่ที่มากขึ้น ดังสมการที่ 2 ระยะเวลาที่สูงมากเกินไปยังส่งผลให้ชิ้นงานเกิดการเสียรูปหลังจากการเชื่อม นอกจากนั้นเวลายัง

ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างเช่นกัน โดยเวลาในการเชื่อมที่นานเกินไปอาจนำไปสู่การเติบโตของเกรนและเสียสมบัติทางกลหลังจากการเชื่อม เวลาในการเชื่อมที่นานเกินไปยังส่งผลต่อการเสียรูปของชิ้นงานเชื่อมได้ง่าย และการสูญเสียพลังงาน ดังนั้นตัวแปรทางด้านเวลาจึงมีความสำคัญในการเชื่อมโดยการแพร่

$$X=C(Dt)^{\frac{1}{2}} \qquad (2)$$

เมื่อ X คือ ระยะที่เกิดการแพร่
D คือ สัมประสิทธิ์การแพร่ (cm^2)
T คือ เวลา
C คือ ค่าคงที่

แรงกดขณะเชื่อม (Contact Pressure) เป็นตัวแปรที่สำคัญ ซึ่งสามารถแสดงเป็นปริมาณได้ และยังขึ้นอยู่กับอุณหภูมิและเวลาแรงกดจะมีอิทธิพลโดยตรงต่อสมบัติทางโลหะวิทยา การยึดติดของชิ้นงานและการเสียรูปของชิ้นงาน (Deformation) ในการเชื่อม แรงกดที่สูงทำให้ผิวสัมผัสแน่นเกินไป ช่วงแรกของการเชื่อมโดยการแพร่ เกิดความเครียดที่สูงระหว่างผิวสัมผัส อาจทำให้โครงสร้างทางจุลภาคก่อนที่จะเชื่อมเสียรูป แต่แรงกดที่น้อยเกินไปส่งผลให้การยึดติดไม่ดี เนื่องจากมีช่องว่างระหว่างหน้าผิวสัมผัสเยอะ ดังนั้นแรงกดจึงมีความสัมพันธ์ต่ออุณหภูมิและเวลา เวลาในการเชื่อมที่นานและอุณหภูมิเชื่อมสูงแรงกดก็จะน้อยลงในทางตรงกันข้ามแรงกดที่สูงมากต้องใช้อุณหภูมิในการเชื่อมที่น้อย เวลาที่ใช้ต้องนานๆ เพื่อชิ้นงานเกิดการยึดติดที่ดี

นอกจากนั้นยังมีปัจจัยอื่นที่ส่งผลต่อกรรมวิธีการเชื่อมโดยการแพร่ เช่นการเตรียมผิวชิ้นงานก่อนการเชื่อมขนาดโครงสร้างทางจุลภาคการทำความสะอาดผิวงานเชื่อม เป็นต้น ซึ่งปัจจัยเหล่านี้ล้วนแล้วแต่ส่งผลต่อกระบวนการเชื่อมโดยการแพร่ แต่ปัญหาหลักในการเชื่อมโดยการแพร่คือการเกิดฟิล์มออกไซด์ (Oxides Film) ระหว่างการเชื่อมฟิล์มออกไซด์จะมีจุดหลอมเหลวที่สูงส่งผลให้เกิดการแพร่ระหว่างชิ้นงานได้ยาก ซึ่งเป็นสาเหตุหลักที่ทำให้สมบัติทางกลของชิ้นงานลดลง ในกรรมวิธีการเชื่อมโดยการแพร่จึงต้องอาศัยการควบคุมบรรยากาศในการเชื่อม โดยในขณะเชื่อมต้องควบคุมบรรยากาศให้อยู่ในระบบสุญญากาศหรือบรรยากาศอาร์กอน นอกจากนั้นยังมีวิธีกำจัดออกไซด์อื่นๆ อีกเช่น การใช้สารเคมี การใช้กระดาษทราย ในการเตรียมผิวงานก่อนการเชื่อม กรรมวิธีการเชื่อมโดยการแพร่สามารถเชื่อมชิ้นงานได้หลากหลาย มีรูปร่างที่ซับซ้อนได้ ดังแสดงในภาพที่ 2 แต่อาจมีข้อจำกัดด้านขนาดของชิ้นงานที่มีขนาดใหญ่ การเชื่อมโดยการแพร่มีตัวแปรหลัก 3 ตัว ด้วยกัน ซึ่งเมื่อปรับลดตัวแปรด้านใดด้านหนึ่งก็จะทำให้ชิ้นงานหลังจากการเชื่อมไม่สมบูรณ์ ดังนั้นจึงต้องอาศัยตัวแปรที่เหมาะสมในการเชื่อม

ภาพที่ 2.2 แสดงชิ้นงานที่ผ่านการเชื่อมด้วยกรรมวิธีการเชื่อมโดยการแพร่ [16]

ข้อดีในการเชื่อมโดยการแพร่

1) รอยเชื่อมมีสมบัติทางกลที่ดี
2) หลังจากการเชื่อมโครงสร้างไม่เกิดการเปลี่ยนแปลง
3) สามารถเชื่อมชิ้นงานซ้อนทับกันได้หลายๆ ชิ้น
4) การเชื่อมนี้เหมาะสำหรับเชื่อมโลหะที่แตกต่างกันและสามารถเชื่อมเซรามิคได้
5) สามารถเชื่อมจำนวนหลายๆ แนวเชื่อมพร้อมกันได้

ข้อจำกัดของการเชื่อมโดยการแพร่

1) การกำจัดออกไซด์ในระหว่างการเชื่อม
2) การเตรียมผิวงานก่อนการเชื่อม โดยผิวชิ้นงานต้องปราศจากคราบไขมัน ความชื้น และต้องมีผิวที่ราบเรียบของชิ้นงานเชื่อมสูง
3) ต้องใช้เวลานานในการเชื่อม
4) มีข้อจำกัดในด้านความโตของชิ้นงานเชื่อม
5) การเชื่อมโดยการแพร่ไม่สามารถเชื่อมได้ครั้งละหลายๆ ชิ้น

2.1.2 กลไกการแพร่ของอะตอม (Diffusion Mechanism)

การแพร่ของอะตอม หมายถึง การเคลื่อนที่ของอะตอมจากบริเวณหนึ่งไปยังอีกบริเวณหนึ่ง ภายใต้พลังงานกระตุ้น ซึ่งระบบการแพร่ของอะตอมสามารถแบ่งออกเป็น 2 ลักษณะ คือ การแพร่แบบแทรกตัว (Interstitial Diffusion) และ การแพร่แบบแทนที่ (Substitution Diffusion)

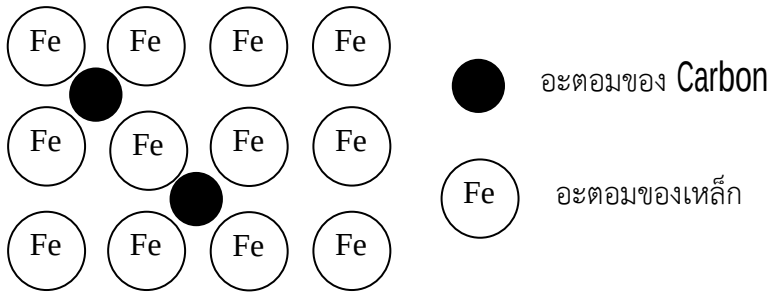
การแพร่แบบแทรกตัว (Interstitial Diffusion)

การแพร่ของอะตอมต่างชนิดกันที่เกิดขึ้นในกรณีที่ขนาดของอะตอมตัวถูกละลายมีขนาดเล็กกว่าอะตอมของตัวทำละลายมากๆ อาทิเช่น อะตอมของคาร์บอนซึ่งมีขนาดเล็กกว่าอะตอมเหล็กมากทำให้อะตอมของคาร์บอนสามารถแทรกตัวในโครงสร้างผลึกได้ ดังนั้นการแพร่ของอะตอมแบบแทรกตัวจึงเกิดขึ้นได้ง่ายและรวดเร็ว ดังแสดงในภาพที่ 3

การแพร่แบบแทนที่ (Substitution Diffusion)

ในกรณีของอะตอมของตัวทำละลายและตัวถูกละลายมีขนาดใกล้เคียงกัน การแพร่ที่เกิดขึ้นจะเป็นการแพร่แบบแทนที่ กล่าวคือการแพร่จะเกิดได้ก็ต่อเมื่อจะต้องมีวาเคนซี คือตำแหน่งช่องว่างในโครงสร้างผลึก (Vacancy) ในตำแหน่งข้างเคียงอะตอมจึงสามารถแพร่ได้ ดังนั้นความเร็ว

ในการแพร่ชนิดนี้ขึ้นอยู่กับปริมาณช่องว่างภายในโครงสร้างผลึก จากความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับจำนวนวาเคนซีที่เกิดขึ้นพบว่าเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น อะตอมต่างๆ ภายในโครงสร้างมีพลังงานเพิ่มขึ้น สามารถเอาชนะพลังงานยึดเหนี่ยวและหลุดเป็นอะตอมอิสระ ทำให้เกิดวาเคนซีเป็นจำนวนมาก ดังนั้นการแพร่แบบแทนที่ ณ อุณหภูมิสูงจะเกิดขึ้นได้รวดเร็วกว่าการแพร่แบบแทนที่ ณ อุณหภูมิต่ำ ตัวแปรที่มีผลต่อการแพร่ได้แก่



ภาพที่ 2.3 แสดงลักษณะการแพร่ของอะตอมแบบแทรกตัว [17]

1) อุณหภูมิ เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นทำให้อะตอมต่างๆ มีพลังงานภายในสูงขึ้น ทำให้เกิดการสั่นมากขึ้น เมื่ออะตอมใดๆ ที่มีพลังงานมากกว่าพลังงานยึดเหนี่ยวจะหลุดออกจากโครงสร้างผลึก ทำให้เกิดเป็นวาเคนซี และตอมต่างๆ เกิดการแพร่ได้ง่าย

2) ขนาดของอะตอมของตัวทำละลายและตัวถูกละลาย ในกรณีที่มีขนาดแตกต่างกันมากเช่นอะตอมของเหล็กและคาร์บอนจะมีลักษณะการแพร่แบบแทรก แต่กรณีที่อะตอมทั้งสองมีขนาดใกล้เคียงกันจะมีลักษณะการแพร่แบบแทนที่

3) ค่าสัมประสิทธิ์ของการแพร่ (Diffusivity, D_0) โดยวัสดุแต่ละชนิดมีโครงสร้างผลึกและพลังงานยึดเหนี่ยวอะตอมที่แตกต่างกัน ซึ่งส่งผลต่อการ แพร่ของอะตอม โดยพบว่าธาตุที่มีจุดหลอมเหลวต่ำมีค่าสัมประสิทธิ์ของการแพร่ของอะตอมสูงกว่าธาตุที่มีจุดหลอมเหลวสูง ซึ่งหมายถึงอะตอมของธาตุที่มีจุดหลอมเหลวต่ำกว่าสามารถแพร่ได้เร็วกว่าธาตุที่มีจุดหลอมเหลวสูง

4) จุดบกพร่องในโครงสร้างผลึก ซึ่งจุดบกพร่องที่เกิดขึ้นจะมีหลายลักษณะ อาทิ เช่น วาเคนซี ดิสโลเคชันและบริเวณขอบเกรน ซึ่งบริเวณเหล่านี้อะตอมต่างๆ สามารถแพร่ได้ง่าย

2.1.3 การตรวจสอบโครงสร้างทางโลหะวิทยา

เป็นการตรวจสอบโครงสร้างทางกายภาพ ลักษณะและขนาดของเกรนที่เกิดจากรอยเชื่อม รวมทั้งบริเวณเขตอิทธิพลของความร้อน ใช้ร่วมกับการตรวจสอบด้วยสายตา ตรวจสอบโครงสร้างมหภาคและจุลภาค โดยเตรียมงานทดสอบ กัดผิวชิ้นทดสอบด้วยสารละลาย และนำไปตรวจสอบโครงสร้างด้วยกล้องจุลทรรศน์ การตรวจสอบโครงสร้างทางโลหะวิทยามีจุดประสงค์ เพื่อศึกษาพฤติกรรมการเปลี่ยนแปลงของเนื้อโลหะหลังจากผ่านกระบวนการเชื่อม

โครงสร้างของโลหะวิทยาสามารถแบ่งออกเป็น 2 ชนิด คือ การศึกษาโครงสร้างมหาภาค และการศึกษาโครงสร้างจุลภาค

(1) โครงสร้างมหาภาค (Macrostructure) เป็นการตรวจสอบทางกายภาพหรือใช้กล้องจุลทรรศน์ที่มีกำลังขยายต่ำกว่า 10 เท่า จุดประสงค์เพื่อดูความสมบรูณ์ของรอยต่อ การซึมลึก บริเวณที่ได้อิทธิพลกระทบร้อน ตลอดจนลักษณะจุดบกพร่องต่างๆ ของรอยเชื่อม

(2) โครงสร้างจุลภาค (Microstructure) กระทำได้โดยการใช้กล้องจุลทรรศน์ที่มีกำลังขยายสูงกว่า 10 เท่า ถ้าเป็นกล้องที่ใช้แสดงจากหลอดไฟจะให้กำลังขยายไม่เกิน 2000 เท่า แต่ถ้าเป็นกล้องที่ใช้ลำแสงอิเล็กตรอนจะสามารถให้กำลังขยายได้สูงถึง 100000 เท่า หรือมากกว่านี้ จุดประสงค์ของการตรวจสอบเพื่อดูการกระจายตัวและลักษณะเกรนของโครงสร้างบริเวณรอยต่อ บริเวณที่ได้รับอิทธิพลกระทบร้อน และบริเวณเนื้อโลหะเดิม

ขั้นตอนการตรวจสอบโครงสร้างทางโลหะวิทยา มีดังนี้

1) การทำเรือนแบบเย็น ชิ้นงานจะวางอยู่ในแบบหล่อ จากนั้นเทเรซิ่น ซึ่งผสมชนิดตามอัตราส่วนน้ำหนัก หรือปริมาณที่กำหนดและคนจนเป็นเนื้อเดียวกันลงในแบบหล่อเรซิ่นที่ใช้ คือ อะคริลิก มีความสะดวกในการใช้งานเวลาในการเซทตัวและการหดตัวน้อย จะแข็งตัวโดยการเติมสารทำให้แข็งตัว และเมื่อแข็งตัวแล้วจะเป็นเทอร์โมและทนสารเคมี

2) การขัดผิวชิ้นงานตรวจสอบควรขัดด้วยกระดาษทรายที่ทำจากผงซิลิกอนคาร์ไบด์ ตั้งแต่เบอร์ 220, 320, 400 และขัดจนถึงเบอร์ 600 ตามลำดับ ในการขัดควรวางกระดาษทรายลงบนกระจกหน้าเรียบแล้วขัดผิวตรวจสอบลงบนกระดาษทรายนั้น ในขณะขัดจะต้องเปิดน้ำอยู่ตลอดเวลา เพื่อให้น้ำชำระสิ่งสกปรกซึ่งได้ผงโลหะและซิลิกอนคาร์ไบด์ออกให้หมด เมื่อต้องการเปลี่ยนกระดาษทรายแผ่นต่อไปควรขัดชิ้นตรวจสอบไปอีกแนวทางหนึ่งสลับกันเป็นตารางกับแนวเดิม ทำเช่นนี้จนถึงกระดาษทรายแผ่นสุดท้าย การขัดผิวตรวจสอบควรใช้แรงพอประมาณไม่ควรออกแรงขัดมากเกินไป ทั้งนี้จะส่งผลให้โครงสร้างของชิ้นตรวจสอบเกิดความบกพร่องจนทำให้การตรวจสอบโครงสร้างเกิดข้อผิดพลาด

3) การขัดผิวด้วยผงขัด (Polishing) การขัดผิวในขั้นตอนนี้ เป็นการขัดผิวของมันชิ้นตรวจสอบด้วยผงขัดที่ทำจากผงอลูมินา (Alumina Oxide) และแมกนีซียม (Magnesium Oxide) หรืออาจจะใช้กากเพชรขัดผิวของชิ้นตรวจสอบที่มีความแข็งสูงมาก โดยผงขัดเหล่านี้จะมีขนาดตั้งแต่ 0.05-0.3 ไมครอน

4) การกัดด้วยน้ำยาชิ้นตรวจสอบชิ้นงานที่ถูกขัดจนเป็นมันแล้วนั้นจะต้องล้างด้วยแอลกอฮอล์จากนั้นจะถูกนำไปกัดด้วยน้ำยา ซึ่งจะเป็นน้ำยาอะไรนั้นต้องขึ้นอยู่กับชนิดของโลหะที่ต้องการตรวจสอบ เช่น ถ้าเป็นเหล็กก็จะใช้กรดไนตริก ร้อยละ 2-4 ผสมกับแอลกอฮอล์ โดยโครงสร้างมหภาคตามมาตรฐาน ASTM E304-00 โครงสร้างจุลภาคตามมาตรฐาน ASTM E407-99 [21]

2.1.4 การทดสอบความแข็ง (Hardness Test)

ความต้านทานต่อแรงกด การขัดสีและการกลึงของวัสดุ ดังนั้นการทดสอบความแข็งจึงสามารถทำได้หลายวิธี แต่ในเชิงโลหะวิทยา การวัดความแข็งจะเป็นการทดสอบความสามารถของโลหะในการต้านทานต่อการแปรรูปถาวร เมื่อถูกแรงกดจากหัวกดกระทำลงบนชิ้นงานทดสอบ โดยมีวิธีในการทดสอบที่นิยมใช้งาน ดังนี้

การทดสอบความแข็งแบบวิกเกอร์ (Vickers Hardness Test) เป็นการวัดความแข็งโดยใช้หัวกดเพชรมีลักษณะเป็นปิรามิดฐานสี่เหลี่ยม ที่ปลายหัวกดทำมุม 136° เป็นมุมที่มีองศาใกล้เคียงกับหัวกดลักษณะกลมมากที่สุด เป็นเวลา 10-15 วินาที ค่าความแข็งจะคำนวณจากแรงกดที่กระทำต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ผิวเช่นเดียวกับการทดสอบแบบ Brinell แต่วิธีนี้หัวกดเป็นเพชรซึ่งมีความแข็งสูงมากๆ ดังนั้นในการใช้งานจึงสามารถวัดค่าความแข็งได้ตั้งแต่โลหะที่นิ่มมาก HV ประมาณ 5 จนถึงโลหะที่แข็งมากๆ VHN ประมาณ 1500 โดยไม่ต้องเปลี่ยนหัวกด จะเปลี่ยนก็เฉพาะแรงกดเท่านั้น โดยมีตั้งแต่ 1-120 kgf ขึ้นอยู่กับความแข็งของโลหะที่ทดสอบ ซึ่งทำให้วิธีนี้มีข้อได้เปรียบกว่า Brinell คือ ไม่ต้องคำนึงถึง อัตราส่วน P/D^2 และข้อจำกัดในด้านความหนาของชิ้นงานทดสอง เนื่องจากหัวกดเพชรมีขนาดเล็กมาก [22]

$$HV = \frac{1.854P}{d^2} \tag{3}$$

โดยที่ HV คือ ค่าความแข็งแบบ (Vicker (kgf/mm^2)

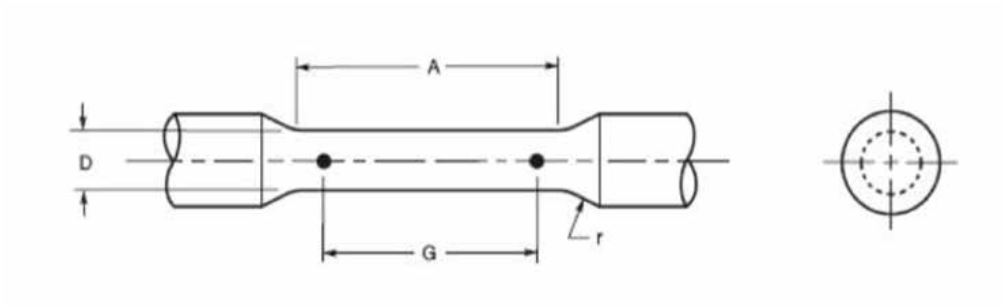
P คือ แรงกด(kgf)

d คือ ขนาดเส้นทแยงมุม d_1 และ d_2 เฉลี่ย (mm.)

ภาพที่ 2.4 แสดงลักษณะรอยกดจากหัวเพชรของ Vickers Hardness Test [22]

2.1.5 การทดสอบแรงดึง (Tensile Test)

วิธีการทดสอบนั้น เราจะนำตัวอย่างที่จะทดสอบมาดึงอย่างช้าๆ แล้วบันทึกค่าของความเค้นและความเครียดที่เกิดขึ้นไว้ แล้วมาพล็อตเป็นเส้นโค้ง ขนาดและรูปร่างของชิ้นทดสอบมีต่างๆ กันขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุนั้นๆ มาตรฐานต่างๆ ของการทดสอบ เช่น มาตรฐานของ ASTM (American Society of Testing and Materials), BS (British Standards), JIS (Japanese Industrial Standards) หรือมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมไทย: มอก. ได้กำหนดขนาดและรูปร่างของชิ้นทดสอบไว้ ทั้งนี้เพื่อให้ผลของการทดสอบเชื่อถือได้ พร้อมกับกำหนดความเร็วในการเพิ่มแรงกระทำเอาไว้ด้วยโดยปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ทางผู้จัดทำได้ใช้มาตรฐาน ASTM (A370) เพื่อดูค่าความต้านทานแรงดึงโดยการเตรียมชิ้นงานจะแสดงดังภาพที่ 5



ภาพที่ 2.5 แสดงมาตรฐานการทดสอบแรงดึง [22]

เมื่อ D คือ ความกว้างของส่วนที่ลดลง
A คือ ความยาวของส่วนที่ลดลง
G คือ ความยาวของพิกัดวัดความยืด
R คือ รัศมีส่วนโค้ง

การทดสอบแรงดึงเป็นการทดสอบสมบัติเชิงกลเพื่อหาค่าความแข็งแรงดึงของกรรมวิธี โดยการแพร่จะทดสอบแรงดึงของรอยยึดติดจากการต่อใช้ชิ้นทดสอบแบบลดขนาดตามมาตรฐานงานกลมนำมาขึ้นรูปเป็นชิ้นทดสอบแรงดึงตามยาวกับแนวเชื่อมนำไปทดสอบแรงดึงที่อุณหภูมิห้อง ความเร็วในการดึง1.67 x 10^{-2} มิลลิเมตร/วินาที โดยใช้มาตรฐาน ASTM (A370) เพื่อดูค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุดและค่าเปอร์เซ็นต์การยืดหลังจากการเสียรูป

2.2 การทบทวนวรรณกรรม/งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

นิธิ บุรณจันทร์ กษิตติ์ ทิพยมนตรี ปิยฉัตร บูรวัฒน์ พงษ์ศักดิ์ หล่อพิทักษ์ และศุภสิทธิ์ สมสาย [5] ได้ศึกษาเกี่ยวกับการศึกษาความเป็นไปได้ของกระบวนการเชื่อมแบบแพร่ โดยงานวิจัยนี้เป็นการเชื่อมวิธีการหนึ่งที่วัสดุชิ้นงานยังอยู่ในสภาวะของแข็ง การเชื่อมเกิดขึ้นจากการที่อะตอมของวัสดุชิ้นงานแพร่เข้าผิวสัมผัส จนทำให้ผิวสัมผัสนั้นกลายเป็นเนื้อเดียวกัน โดยที่ตัวแปรสำคัญที่ทำให้เกิดการเชื่อม คือ อุณหภูมิ เวลา ความดันบริเวณสัมผัส ความเรียบผิว และสภาพแวดล้อม ในการวิจัยนี้ได้กำหนดให้ชิ้นทดสอบทำจากวัสดุ SS400 ผ่านการเจียรนัยผิวหน้า ทำการเชื่อมภายใต้บรรยากาศปกติตัวแปรที่ใช้ในการวิจัยนี้ คือ อุณหภูมิ เวลา ความดันบริเวณสัมผัสการประเมินผลการทดสอบทำโดยตัดชิ้นทดสอบเพื่อทำการศึกษาโครงสร้างจุลภาคของรอยเชื่อมหากพบว่าเกิดเกรนใหม่บริเวณผิวสัมผัสตลอดแนวเชื่อม แสดงว่าการเชื่อมในสภาวะนั้นเกิดขึ้นได้เป็นอย่างดี จากผลการทดลองพบว่า อุณหภูมิมีผลต่อการเกิดรอยเชื่อมมากที่สุด รองลงมาคือเวลาและความดันเป็นลำดับสุดท้าย โดยมีสภาวะที่เริ่มเกิดรอยเชื่อมได้ คือที่อุณหภูมิ 700 °C ความดันที่ 2.8 KPa โดยใช้เวลา 4 ชั่วโมง ในการเชื่อมส่วนสภาวะเริ่มต้นที่ทำให้เกิดรอยเชื่อมได้โดยสมบูรณ์ คือที่อุณหภูมิ 800 °C ความดันที่ 2.8 KPa โดยใช้เวลา 5 ชั่วโมง และที่อุณหภูมิ 990 °C การเชื่อมเกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์ แม้ว่าจะใช้ความดันเพียง 1.4 KPa และเวลาเพียง 3 ชั่วโมงเท่านั้น

เจษฎา วรรณสินธุ์ [6] จากมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ได้ค้นพบและศึกษาการหล่อโลหะกึ่งของแข็งแบบเทคนิคการพ่นฟองแก๊ส (GISS) ซึ่งเทคโนโลยีการหล่อโลหะกึ่งของแข็งด้วยวิธีการนี้กำลังเป็นที่สนใจของนักวิจัยอย่างมากเพราะเป็นเทคนิคใหม่ที่สะดวกให้ความเป็นโครงสร้างก้อนกลมที่สูงและยังสามารถประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมการผลิตชิ้นส่วนได้เป็นอย่างดีโดยเฉพาะอุตสาหกรรมยานยนต์ที่มีการใช้อย่างแพร่หลายประโยชน์ของการหล่อโลหะกึ่งของแข็งที่สำคัญคือเป็นการลดต้นทุนในทางด้านการผลิตเนื่องจากสามารถหล่อชิ้นงานที่อุณหภูมิต่ำทำให้ประหยัดเวลาในการทำงานเป็นการลดเวลาในการผลิตต่อชิ้น (Cycle time) ลดของเสีย (Reject) เพิ่มคุณภาพและสมบัติทางกลของชิ้นงานหล่อเพิ่มอายุการใช้งานของแม่พิมพ์และการลดต้นทุนในการอบชุบ เป็นต้น อีกทั้งเทคโนโลยีการหล่อโลหะกึ่งของแข็งได้มีการใช้อย่างแพร่หลายในการหล่อไดคาสติ้งโดยเฉพาะอะลูมิเนียมผสมเกรด A356 เนื่องจากคุณสมบัติที่ดีของอะลูมิเนียมเกรดนี้ เช่น การไหลตัวที่ดีในการหล่อ เหมาะกับงานหล่อที่มีรูปร่างซับซ้อนประณีตและความแข็งแรงสูง คุณสมบัติทางกลดีขึ้นมากโดยเฉพาะถ้าได้ผ่านการอบชุบแบบผ่านกระบวนการทางความร้อนT6 สามารถกลึงกัดตัดเจาะได้ดี

อับดุล บิลละหีม และประภาศ เมืองจันทร์บุรี [7] ได้ศึกษาการเชื่อมเสียดทานแบบกวนอะลูมิเนียมกึ่งของแข็ง 7075 งานวิจัยนี้เป็นการเชื่อมต่อชนอะลูมิเนียมผสมซึ่งหล่อโดยเทคโนโลยีกึ่งของแข็ง 7075 ด้วยกรรมวิธีการเชื่อมเสียดทานแบบกวนที่ความเร็วเชื่อม 70, 90 และ 110 mm/min ภายใต้ความเร็วรอบ 1110 และ 1320 rpm ปรากฏว่าชิ้นงานเชื่อมที่ความเร็วรอบ 1320 rpm เกิดเป็นโพรงตรงส่วนล่างของบริเวณที่ถูกกวนส่วนงานเชื่อมที่ความเร็วรอบ 1110 rpm มีความสมบรูณ์ดีโครงสร้างมหภาคและโครงสร้างจุลภาคบริเวณแนวเชื่อมมีลักษณะทั่วไปคล้ายกันทุกสภาวะการทดลองเช่นกัน

ชัยยุทธ มีงาม [8] งานวิจัยนี้ศึกษาการเชื่อมต่อชนอะลูมิเนียมผสมที่หล่อโดยเทคโนโลยีกึ่งของแข็ง 356 ที่ไม่ผ่านกระบวนการทางความร้อน (As Cast) และผ่านกระบวนการทางความร้อน T6 ด้วยกรรมวิธีการเชื่อมโดยการแพร่ (Diffusion Bonding Process) โดยมีตัวแปรที่ศึกษาคือแรงกด 0.4, 0.9, 1.8, 2.4 และ 2.7 MPa เวลากดแช่ 3 ชั่วโมง และอุณหภูมิในการเชื่อม 495 องศาเซลเซียส ทดลองภายใต้บรรยากาศอาร์กอนที่ปกคลุม 4 ลิตรต่อนาที หลังจากการเชื่อมทำการวิเคราะห์โครงสร้างมหภาคโครงสร้างจุลภาคและทดสอบสมบัติทางกลผลจากการทดลองพบว่าโครงสร้างบริเวณรอยต่อชน (Bond Line) ลักษณะโครงสร้างจุลภาคบริเวณรอยต่อเป็นก้อนกลมซึ่งคล้ายโครงสร้างเดิมของวัสดุและอนุภาคซิลิกอนเกิดการแตกหักจากแรงกดค่าความแข็งแรงดึงสูงสุดของอะลูมิเนียมที่ไม่ผ่านกระบวนการทางความร้อน T6 อยู่ที่ 129.30 MPa ที่ตัวแปร 1.8 MPa ประสิทธิภาพการเชื่อมต่อ 76 เปอร์เซ็นต์และที่ตัวแปร 2.4 MPa ค่าความแข็งแรงดึงสูงสุดอยู่ที่ 123.12 MPa ประสิทธิภาพการเชื่อมต่อ 72 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเปรียบเทียบกับเนื้อโลหะเดิมที่มีค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุด 168 MPa ส่วนค่าความแข็งแรงดึงสูงสุดของอะลูมิเนียมที่ผ่านกระบวนการทางความร้อน T6 อยู่ที่ 182.20 MPa ที่ตัวแปร 2.4 MPa ประสิทธิภาพการเชื่อมต่อ 61 เปอร์เซ็นต์เมื่อเปรียบเทียบกับเนื้อโลหะเดิมที่ผ่านกระบวนการทางความร้อน T6 มีค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุด 297 MPa และค่าความแข็งหลังการเชื่อมของชิ้นงานที่ไม่ผ่านกระบวนการทางความร้อนเพิ่มขึ้นโดยเฉพาะที่บริเวณรอยต่อโดยมีค่าเฉลี่ย 91 HV ส่วนอะลูมิเนียมที่ผ่านกระบวนการทางความร้อน T6 มีค่าความแข็งลดลงโดยมีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 124 HV ตามลำดับ

เดช เหมือนขาว ยงยุทธ ดุลยกุล และชัยยุทธ มีงาม [9] ได้ศึกษาเกี่ยวกับปัจจัยที่มีผลต่อความแข็งแรงของรอยเชื่อมสำหรับเหล็กกล้าคาร์บอนโดยกระบวนการเชื่อมแพร่ พบว่าการเชื่อมเหล็กกล้าคาร์บอนเกรด SS 400 โดยการแพร่ จะพบว่ารูปร่างทางกายภาพของรอยต่อความกว้างของต่อของรอยเชื่อมจะลดลงเมื่ออุณหภูมิในการเชื่อมสูงขึ้นค่าความแข็งแรงเฉือน พบว่าที่ค่าความแข็งแรงเฉือนให้ค่าความแข็งแรงเฉือนสูงขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นแต่รูปร่างอาจมีการเปลี่ยนแปลงหรือไม่คงรูปเดิมจากทดสอบความเข็งบริเวณรอยต่อ พบว่าจากผิวนอกของงานจนเข้าใกล้รอยต่อจะให้ค่าความแข็งที่ใกล้เคียงกันและหากเปรียบเทียบความแข็งแรงดึงของวัสดุดังกล่าวโดยผ่านกระบวนการเชื่อมมิก/แม็กและกระบวนการเชื่อมอาร์คจะมีค่าโดยประมาณ 0.45-0.5 เท่า

Urena, A. &Gomez De Salazar, J.M. [10] ได้ทำการทดลองเชื่อมโดยการแพร่ของวัสดุต่างชนิดเข้าด้วยกันระหว่างอะลูมิเนียมเกรด AA2124 กับอะลูมิเนียมเกรด AA8090 ก่อนการเชื่อมมีการขัดผิวด้วยกระดาษทรายเบอร์ 1200 กริด เชื่อมภายใต้อุณหภูมิ 470 – 520 องศาเซลเซียส ที่แรงกด 3 และ 6 MPa การเชื่อมทดลองในระบบสุญญากาศที่ความดัน $2x10^{-4}$Torr ชิ้นงานที่เชื่อมผ่านกระบวนการความร้อน T6 ที่อุณหภูมิอบละลาย 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4-8 ชั่วโมง หลังจากนั้นบ่มเทียมชิ้นงานที่อุณหภูมิ191 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 16 ชั่วโมง หลังจากการทดลองครั้งนี้ผลปรากฏว่าอนุภาคของทองแดงที่มีรูปร่างลักษณะเป็นแบบแท่ง (Rod) ในเกรด AA2124 แพร่เข้าไปสู่อะลูมิเนียมเกรด AA8090 โดยบริเวณรอยต่อเชื่อม (Bond line) พบว่ามีความเข้มข้นของทองแดงที่สูงซึ่งอนุภาคทองแดงจะฟอร์มตัวในรูปสารประกอบ

Sunwoo, A. และ Lum, R. [11] ได้ทำการทดลองอะลูมิเนียม เกรด 7475 ทำการเชื่อมด้วยกรรมวิธีการเชื่อมโดยการแพร่ในการทดลองเชื่อมใช้ตัวแปรอุณหภูมิ 510°C แรงกดที่ใช้มีค่าต่ำกว่า 1.4 MPa โดยมีความเร็วในการกดที่อัตรา $2x10^{-4}$ s^{-1} มีการเตรียมชิ้นงานเชื่อมที่ความหนา 3 มิลลิเมตร ซึ่งในการเชื่อมมีการเชื่อมภายใต้บรรยากาศอาร์กอน พบว่าที่แรงกด 0.55 MPa เริ่มให้ค่าความเครียดและฟิล์มอะลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) ส่งผลอย่างมากต่อการเชื่อมอะลูมิเนียม เกรด 7475 จึงมีการเชื่อมภายใต้บรรยากาศอาร์กอนจะช่วยลดฟิล์มอะลูมิเนียมออกไซด์ที่ผิวอะลูมิเนียมในขณะการเชื่อม

Zuruzi, A.S., Li, H. และ Dong, G. [12] ได้ทำการเชื่อมโดยการแพร่อะลูมิเนียมในสภาวะบรรยากาศทั่วไปโดยมีการศึกษาความราบเรียบของผิวเชื่อมที่มีอิทธิพลต่อการเชื่อมอะลูมิเนียม เกรด 6061 ในการทดลองจะเชื่อมในสภาวะของบรรยากาศอากาศทั่วไป ทำภายในเตาอบชิ้นงานซึ่งมีการใช้อุณหภูมิ 450°C แรงกดที่ 8.08 MPa เวลาที่ใช้ในการกดแช่ 30, 45, 60,75, และ 90 นาที ขนาดชิ้นงานที่เชื่อมมีขนาด 15.8x15.8 มิลลิเมตร มีการเตรียมผิวชิ้นงานที่กระดาษทรายเบอร์ P180 grit และ P1000 grit หลังจากการทดสอบสมบัติทางกลพบว่าชิ้นงานที่ผ่านการขัดด้วยกระดาษทรายเบอร์ P180 grit เวลาในการกดแช่ 75 นาที ให้ค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุดประสิทธิภาพการยึดติดหลังจากการเชื่อม 76 เปอร์เซ็นต์

Huang, Y. and other [13] ศึกษาพันธะแพร่กระจายของอะลูมิเนียม 7075 โดยศึกษาปัจจัยการแพร่พันธะ (Diffusion bonding, DB) ของอะลูมิเนียม 7075 ได้ทำการตรวจสอบอุณหภูมิต่างๆ แรงกดในการเชื่อมแพร่และเวลาที่ใช้ในการเชื่อมแพร่ โดยใช้เครื่องทดสอบ Gleeble 1500 หลังจากการกำจัดออกไซด์ของพื้นผิว มีการแก้ปัญหาทางอินทรีย์ที่ถูกใช้ในการปกป้องพื้นผิว พันธะตรงจุดแข็งขึ้นอยู่กับอินเตอร์เฟซในระหว่างกระบวนการภายใต้สภาวะที่เหมาะสมที่มีแรงเฉือนและอุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับการเชื่อมแพร่ คือ 510-520 องศาเซลเซียส

Huibin, X.and other [14] ได้ศึกษาการเชื่อมอะลูมิเนียมคอมโพสิต เกรด A356 ในการทดลองใช้ตัวแปรดังต่อไปนี้อะลูมิเนียมคอมโพสิตที่มีปริมาณซิลิกอนคอมโพสิตผสมอยู่ในสัดส่วน 20 เปอร์เซ็นต์ โดยชิ้นงานเชื่อมเป็นทรงกระบอกขนาด 10x40 มิลลิเมตร จากนั้นใช้ตัวเติมสังกะสีอะลูมิเนียม (Zn-Al) ขนาด10x5 มิลลิเมตร เป็นตัวประสานระหว่างชิ้นงานในการทดลองใช้อุณหภูมิที่ 530 องศาเซลเซียส แรงกด 4 MPa เวลาที่ใช้ 2 นาที โดยให้ชิ้นงานเกิดการสั่นที่ความถี่ 50 Hz ด้วยเวลา 5, 10, 20, 30 และ 45 วินาทีการทดลองครั้งนี้ทำในบรรยากาศทั่วไป จากการทดลองพบว่าสังกะสีอะลูมิเนียมที่เป็นตัวประสานระหว่างชิ้นงานมีจุดหลอมเหลวที่ต่ำกว่าจึงหลอมละลายเป็นตัวประสานให้ชิ้นงานยึดติดกัน และเมื่อนำไปทดสอบแรงดึงพบว่าที่เวลาในการสั่น 30 วินาที ให้ค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุดมีค่าอยู่ที่ 175 MPa จากนั้นได้ศึกษาลักษณะรอยต่อด้วยระบบ EPMA พบว่าบริเวณรอยต่อมีออกไซด์แทรกตัวอยู่ระหว่างช่องว่างหลังจากเชื่อม นอกจากนั้นยังพบสัดส่วนของสังกะสีอะลูมิเนียมและทองแดงที่สูงบริเวณรอยต่อซึ่งเป็นผลมาจากตัวเติมปริมาณออกไซด์ที่มาก ทำให้ชิ้นงานยึดติดได้ไม่ดี อะลูมิเนียมคอมโพสิตเป็นวัสดุที่เชื่อมด้วยวิธีการหลอมละลายได้ยากมาก เนื่องจากลักษณะการเปลี่ยนแปลงทางโครงสร้างอย่างรวดเร็ว การแตกร้าวนักวิจัยจึงได้สนใจศึกษาการเชื่อมอะลูมิเนียมคอมโพสิตด้วยการเชื่อมโดยการแพร่

มหาวิทยาลัยราชภัฏสงขลา
SONGKHLA RAJABHAT UNIVERSITY

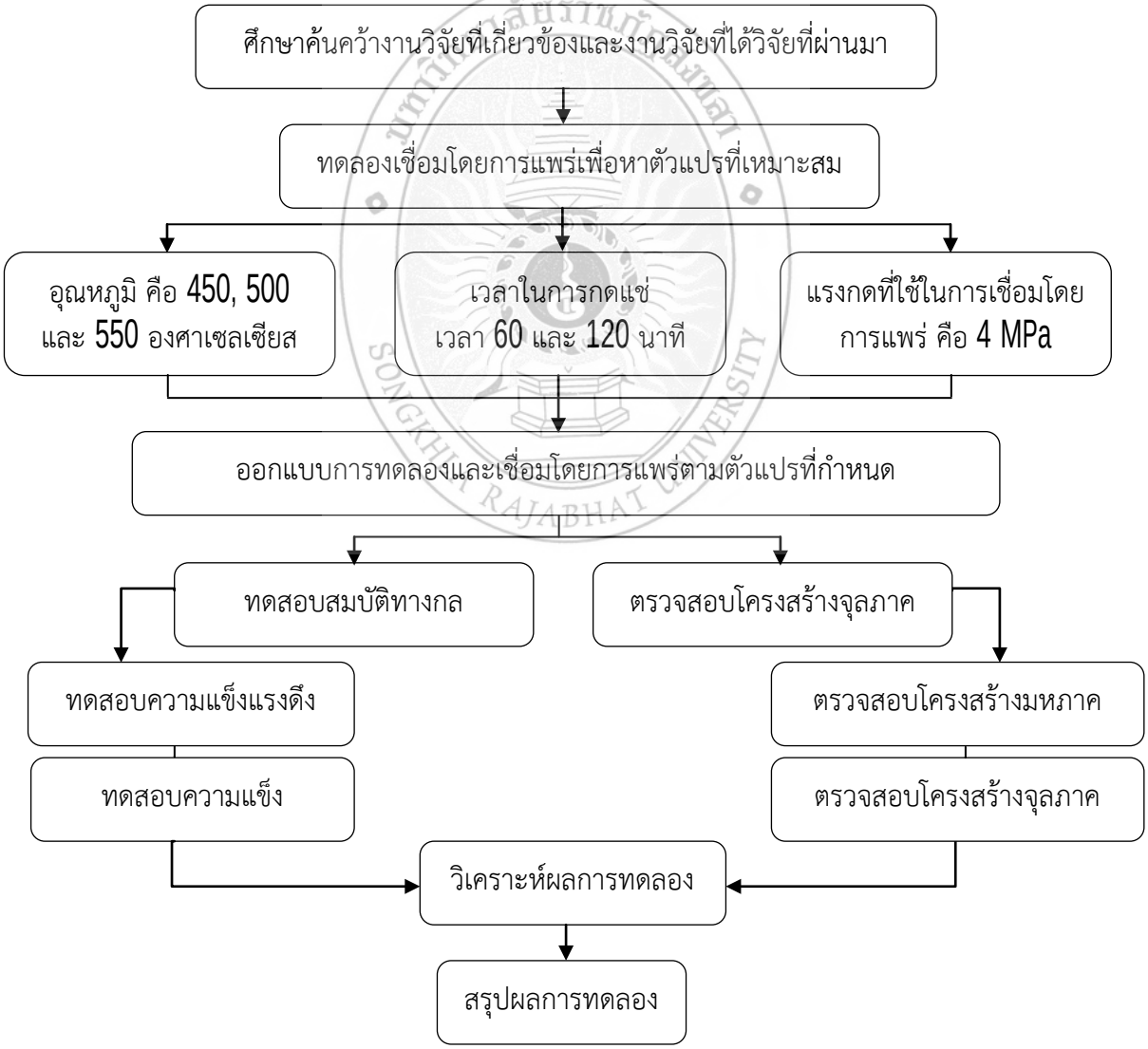
บทที่ 3

วิธีการดำเนินงาน

งานวิจัยนี้ได้ดำเนินการวิจัยเพื่อมุ่งศึกษาสมบัติทางกลและโครงสร้างโลหะวิทยาของรอยต่อระหว่างวัสดุอะลูมิเนียมหล่อกึ่งแข็ง เกรด 356 กับอะลูมิเนียมหล่อกึ่งของแข็ง เกรด 7075 โดยใช้สังกะสีผสมอะลูมิเนียม ZA 27 เป็นตัวประสาน ซึ่งในบทนี้จะกล่าวถึงวิธีการดำเนินงาน ซึ่งมีวิธีการดำเนินงานวิจัย ดังต่อไปนี้

3.1 กรอบแนวคิดในการดำเนินงานวิจัย

กรอบแนวความคิดในการดำเนินงานของการเชื่อมโดยการแพร่ระหว่างวัสดุอะลูมิเนียมหล่อกึ่งแข็ง เกรด 356 กับอะลูมิเนียมหล่อกึ่งของแข็ง เกรด 7075 และใช้สังกะสีผสมอะลูมิเนียม ZA 27 เป็นตัวประสานผ่านเฟสของเหลว ดังแสดงในภาพที่ 3.1



ภาพที่ 3.1 แสดงกรอบขั้นตอนการดำเนินการวิจัย

3.2 วัสดุที่ใช้ในการทดลอง

วัสดุที่นำมาใช้ในการทดลองเชื่อมโดยการแพร่ระหว่างวัสดุอะลูมิเนียมหล่อกึ่งแข็ง เกรด 356 กับอะลูมิเนียมหล่อกึ่งของแข็ง เกรด 7075 และใช้สังกะสีผสมอะลูมิเนียม ZA 27 เป็นตัวประสานผ่านเฟสของเหลวเป็นวัสดุอะลูมิเนียมที่ได้พัฒนาจากการหล่อขึ้นรูปด้วยเทคนิคการหล่อแบบกึ่งของแข็งด้วยวิธีการ GISS คือ การใช้แก๊สเฉื่อยพ่นผ่านแท่งกราไฟต์พรุนในน้ำโลหะที่มีสถานะกึ่งแข็งกึ่งเหลว ซึ่งกลุ่มนักวิจัยของมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ได้ผลิตเพื่อประยุกต์ใช้งานในประเทศ โดยงานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนวัสดุที่ใช้ในการทดลองวิจัยที่ทั้งสองเกรด ดังนั้นผู้วิจัยจึงขอขอบคุณผู้ให้การสนับสนุนวัสดุในการทดลองเป็นอย่างยิ่ง

3.2.1 อะลูมิเนียมหล่อกึ่งของแข็ง SSM 356

อะลูมิเนียมหล่อกึ่งของแข็ง SSM 356 ซึ่งมีส่วนผสมทางเคมี ดังแสดงในตารางที่ 3.1 โดยวัสดุอะลูมิเนียมหล่อกึ่งของแข็ง SSM 356 ผ่านการหล่อขึ้นรูปแบบกึ่งของแข็งด้วยเทคนิค GISS (Gas Induce Semi Solid) ซึ่งเทคนิค GISS จะทำการหล่อที่อุณหภูมิประมาณ 700 องศาเซลเซียส เมื่ออุณหภูมิลดลงถึง 650 องศาเซลเซียส จะใช้แก๊สเฉื่อยพ่นผ่านแท่งกราไฟต์พรุน (แก๊สอาร์กอนหรือไนโตรเจน) เพื่อให้เกิดการไหลวนของน้ำโลหะเกิดการแตกตัวของโครงสร้างเดนไดรต์เป็นเวลา 20 วินาที จากนั้นนำน้ำโลหะอะลูมิเนียมไปเทลงใน Mold แล้วอัด (Squeeze) ที่ความดันไม่น้อยกว่า 2,000 psi ค้างไว้จนโลหะแข็งตัว ได้เป็นชิ้นงานแบบแผ่นสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่มีความหนา 30 มิลลิเมตร และมีความกว้าง ความยาว 100x100 มิลลิเมตร ดังแสดงในภาพที่ 3.2

ตารางที่ 3.1 แสดงส่วนผสมทางเคมีของอะลูมิเนียมหล่อกึ่งของแข็ง SSM 356

Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Ti	Cr	Ni	Al
7.74	0.57	0.05	0.06	0.32	0.01	0.05	0.02	0.01	Balance

ภาพที่ 3.2 แสดงอะลูมิเนียมหล่อกึ่งของแข็ง SSM 356 ที่ได้จากการหล่อขึ้นรูปแบบ GISS

3.2.2 อะลูมิเนียมหล่อกึ่งของแข็ง SSM 7075

วัสดุที่ใช้เป็นอะลูมิเนียมหล่อผสมกึ่งของแข็งเกรด 7075 ผ่านการขึ้นรูปแบบอัด (Squeeze casting) ด้วยเทคโนโลยีหล่อแบบกึ่งของแข็งแบบพ่นฟองแก๊ส GISS ซึ่งเทคนิค GISS จะทำการหลอมอะลูมิเนียมที่อุณหภูมิประมาณ 700-750 ^{o}C เมื่ออุณหภูมิลดลงถึง 641 ^{o}C จะใช้แก๊สเฉื่อยพ่นผ่านแท่งกราไฟต์พรุน (แก๊สอาร์กอนหรือไนโตรเจน) เพื่อทำให้เกิดการไหลวนของน้ำโลหะ ส่งผลให้น้ำโลหะเกิดการแตกตัวของโครงสร้างเดนไดรต์เป็นเวลา 10 วินาที จากนั้นนำน้ำโลหะอะลูมิเนียมเทลงบนเบ้าหล่อ แล้วอัดที่ความดันไม่น้อยกว่า 2500 psi ค้างไว้จนโลหะแข็งตัว ได้เป็นชิ้นงานแบบแผ่นสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่มีความหนา 20 มิลลิเมตร และมีความกว้าง ความยาว 100x100 มิลลิเมตร ดังแสดงในภาพที่ 3.3 และส่วนผสมทางเคมีของอะลูมิเนียมหล่อกึ่งของแข็ง SSM 7075 ดังแสดงในตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 แสดงส่วนผสมทางเคมีของอะลูมิเนียมหล่อกึ่งของแข็ง SSM 7075

Zn	Mg	Cu	Fe	Si	Mn	Cr	Ti	Al
6.08	2.5	1.93	0.46	0.4	0.03	0.19	0.02	Balance

ภาพที่ 3.3 แสดงอะลูมิเนียมหล่อกึ่งของแข็ง SSM 7075 ที่ได้จากการหล่อขึ้นรูปแบบ GISS

3.3 เครื่องมือและอุปกรณ์

3.3.1 เครื่องกัดแนวตั้ง (Vertical Milling Machine)

เครื่องกัดแนวตั้ง ยี่ห้อ T-TECH ใช้ในการกัดอะลูมิเนียมหล่อกึ่งของแข็งทั้งสองเกรดให้มีผิวชิ้นงานที่ราบเรียบ และมีขนาดของชิ้นงานตามความต้องการที่ใช้ในการทดลอง โดยเครื่องเป็นระบบ 3 แกน ควบคุมความเร็วรอบด้วยมอเตอร์ ขนาด 3 HR ซึ่งมีความเร็วรอบหลายระดับในการใช้งาน ตั้งแต่ความเร็วรอยที่ 80 ถึง 5440 รอบต่อนาที ใช้ระบบการจ่ายไฟแบบ 3 เฟสที่แรงดัน 380 โวลต์ ชิ้นงานหลังการเลื่อยแบ่งออกเป็นชิ้นงานย่อยด้วยเครื่องเลื่อยสายพานจะถูกนำมาเตรียมผิวงานด้วยเครื่องกัดแบบแนวตั้ง เพื่อให้ได้ผิวชิ้นงานที่ราบเรียบก่อนนำไปกลึงเป็นชิ้นงานทรงกระบอก ซึ่งเครื่องกัดแนวตั้ง ยี่ห้อ T-TECH ดังแสดงในภาพที่ 3.4

ภาพที่ 3.4 แสดงเครื่องกัดแนวตั้ง ยี่ห้อ T-TECH

3.3.2 เครื่องเลื่อยสายพาน (Band Saw)

เครื่องเลื่อยสายพาน ยี่ห้อ Hero รุ่น HR-14 ใช้สำหรับการตัดแบ่งชิ้นงานที่ผ่านการหล่อแบบกึ่งของแข็งด้วยเทคโนโลยีแบบ GISS โดยเครื่องเลื่อยสายพานใช้ระบบการจ่ายไฟแบบ 3 เฟส ที่แรงดัน 380 โวลต์ สามารถเลื่อยชิ้นงานได้หลากหลายวัสดุ นอกจากนั้นยังมีระบบน้ำหล่อเย็นในการระบายความร้อนในขณะเลื่อยชิ้นงาน เพื่อป้องกันการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาคจากความร้อนที่เกิดขึ้นในระหว่างการเลื่อยชิ้นงาน และชิ้นงานที่ได้หลังจากการเลื่อยจะถูกนำไปเตรียมผิวชิ้นงานด้วยเครื่องกัดแนวตั้ง ดังแสดงเครื่องเลื่อยสายพาน ยี่ห้อ Hero รุ่น HR-14 ในภาพที่ 3.5

ภาพที่ 3.5 แสดงเครื่องเลื่อยสายพาน ยี่ห้อ Hero รุ่น HR-14

3.3.3 เครื่องกลึง (Lathe Machine)

เครื่องกลึง ยี่ห้อ JET รุ่น GHB-1340A เป็นเครื่องกลึงที่ใช้สำหรับการกลึงอะลูมิเนียมหล่อกึ่งของแข็งทั้งสองชนิดให้เป็นชิ้นงานรูปทรงกระบอก เพื่อใช้ในการทดลอง เครื่องกลึงสามารถปรับการทำงานให้อยู่ในรูปแบบกึ่งอัตโนมัติได้ มีการจ่ายไฟควบคุมในระบบแบบ 3 เฟส ที่แรงดัน 380

โวลต์ ความเร็วรอบในการกลึงชิ้นงานสามารถปรับเปลี่ยนได้หลายระดับ และยังสามารถกลึงชิ้นงานได้ทั้งชิ้นงานกลมและชิ้นงานแบบแบนอีกด้วย นอกจากนั้นเครื่องกลึงยังถูกนำไปเตรียมชิ้นงานทดสอบแรงดึงตามมาตรฐานการทดสอบแรงดึงอีกด้วย ดังแสดงในภาพที่ 3.6

ภาพที่ 3.6 แสดงเครื่องกลึงชิ้นงานยี่ห้อ JET รุ่น GHB-1340A

3.3.4 ชุดให้ความร้อนในการเชื่อมโดยการแพร่ (Diffusion Bonding Heating Set)

ชุดให้ความร้อนในการเชื่อมโดยการแพร่ถูกออกแบบให้เป็นระบบปิด เพื่อสะสมความร้อนให้อยู่ภายในการทดลอง ซึ่งจะใช้ขดลวดเหนี่ยวนำความร้อนเป็นแหล่งกำเนิดความร้อน ชุดสร้างความร้อนถูกใช้ร่วมกับเครื่องกดในการกดอัดชิ้นงาน (Compression Machine) และหัวกดชิ้นงาน นอกจากนั้นจะใช้โปรแกรมในการควบคุมแรงกด อุณหภูมิในการทดลองถูกควบคุมด้วยตัวปรับตั้งอุณหภูมิ ดังแสดงในภาพที่ 3.7

ภาพที่ 3.7 แสดงเครื่องมืออุปกรณ์ในกระบวนการเชื่อมโดยการแพร่

3.3.5 เครื่องทดสอบความแข็ง (Microhardness Machine)

เครื่องทดสอบความแข็ง ยี่ห้อ Digicon รุ่น TH-320 เป็นเครื่องทดสอบความแข็งแบบอเนกประสงค์ (Universal Testing) ที่สามารถทดสอบความแข็งได้ 3 แบบด้วยกัน ได้แก่ การทดสอบความแข็งแบบบริเนลล์ (Brinell Hardness) การทดสอบความแข็งแบบรอคเวลล์ (Rockwell Hardness) และการทดสอบความแข็งแบบวิกเกอรส์ (Vickers Hardness) ลักษณะของเครื่องทดสอบเป็นแบบตั้งโต๊ะ มีกล้องติดกับเครื่อง ซึ่งสามารถมองเห็นโครงสร้างบริเวณที่ต้องการวัดความแข็งได้ ดังแสดงในภาพที่ 3.8

ภาพที่ 3.8 แสดงเครื่องทดสอบความแข็ง ยี่ห้อ Digicon รุ่น TH-320

3.3.6 เครื่องทดสอบความแข็งแรงดึง (Tensile Testing Machine)

เครื่องทดสอบความแข็งแรงดึง ใช้สำหรับทดสอบค่าความแข็งแรงดึงบริเวณรอยต่อของชิ้นงานหลังการเชื่อมหลังจากโดยการแพร่ระหว่างวัสดุอะลูมิเนียมหล่อกึ่งแข็ง เกรด 356 กับอะลูมิเนียมหล่อกึ่งของแข็ง เกรด 7075 และใช้สังกะสีผสมอะลูมิเนียม ZA 27 เป็นตัวประสานผ่านเฟสของเหลว ซึ่งเครื่องสมารถรับแรงดึงสูงสุดได้ที่ขนาด 50 กิโลนิวตัน สามรถควบคุมความเร็วในการดึงได้ด้วยโปรแกรมควบคุมแบบอัตโนมัติ ดังแสดงในภาพที่ 3.9

ภาพที่ 3.9 แสดงเครื่องทดสอบแรงดึง

3.3.7 กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (Optical Microscope)

กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง ยี่ห้อ Olympus มีกำลังขยายอยู่ที่ช่วงระหว่าง 50-1000 เท่า ใช้สำหรับการดูลักษณะโครงสร้างระดับจุลภาคและโครงสร้างระดับมหภาค เพื่อตรวจดูลักษณะการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างหลังการเชื่อม นอกจากนั้นยังใช้สำหรับตรวจหาจุดบกพร่อง (Defect) บริเวณเนื้อเชื่อม โดยกล้องจะเชื่อมต่อกับระบบคอมพิวเตอร์ เพื่อส่งถ่ายข้อมูลที่ได้รับจากการถ่ายภาพผ่านโปรแกรมถ่ายภาพ ทำให้สามารถเก็บภาพได้อย่างชัดเจน ดังแสดงในภาพที่ 3.10

ภาพที่ 3.10 แสดงกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง ยี่ห้อ Olympus

3.3.8 กล้องอิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope)

กล้องอิเล็กตรอนแบบส่องกราด ยี่ห้อ FEI-Quanta รุ่น 400 เป็นกล้องที่มีกำลังขยายที่สูง โดยมีกำลังขยายอยู่ที่ช่วงระหว่าง 10-50000 เท่า ใช้สำหรับการตรวจสอบลักษณะโครงสร้างจุลภาคขนาดเล็ก เพื่อดูลักษณะการแพร่ของอะตอม ที่นำไปสู่การเปลี่ยนแปลงของโครงสร้าง และใช้สำหรับวิเคราะห์ปริมาณธาตุที่เกิดจากการแพร่ของอะตอมในระหว่างการเชื่อม สำหรับการใช้กล้องอิเล็กตรอนแบบส่องกราด ยี่ห้อ FEI-Quanta รุ่น 400 ได้รับการสนับสนุนจากศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ซึ่งลักษณะของเครื่อง ดังแสดงในภาพที่ 3.11

ภาพที่ 3.11 แสดงกล้องอิเล็กตรอนแบบส่องกราด ยี่ห้อ FEI-Quanta รุ่น 400

3.4 ขั้นตอนการทดลอง

3.4.1 การเลื่อยชิ้นงานอะลูมิเนียมหล่อกึ่งของแข็ง

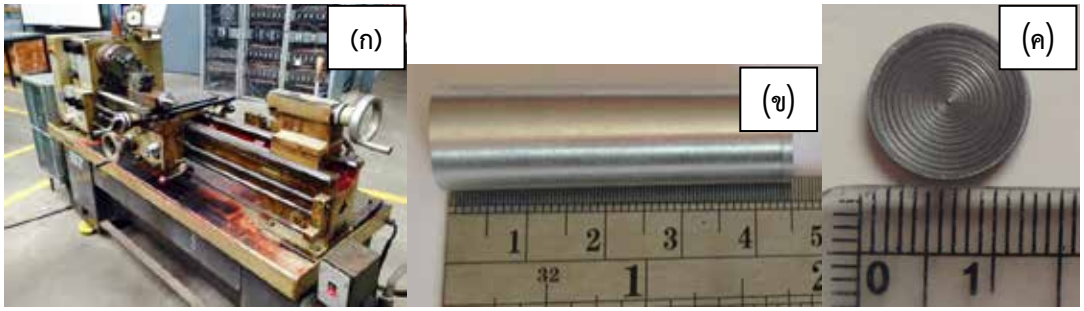
อะลูมิเนียมผสมหล่อกึ่งแข็ง เกรด 356 กับอะลูมิเนียมผสมหล่อกึ่งแข็ง เกรด 7075 ที่ผ่านการหล่อแบบอัด (Squeeze Casting) ดังแสดงในภาพที่ 3.12 (ก) แล้วนำไปทำการตัดให้เป็นชิ้นงานทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาด 15×50 มิลลิเมตร ด้วยเครื่องเลื่อยสายพาน ดังแสดงในภาพที่ 3.12 (ข) สำหรับการเลื่อยจะใช้น้ำหล่อเย็นในการระบายความร้อนของชิ้นงาน ซึ่งจะทำให้เป็นการรักษาคุณสมบัติทางโละวิทยาของชิ้นงาน ในการเลื่อยแบ่งชิ้นงานจะได้ชิ้นงาน 6 ชิ้นต่อ 1 แผ่นชิ้นงานที่ผ่านการหล่อขึ้นรูปมา ดังแสดงในภาพที่ 3.12 (ค)

(ก) ชิ้นงานจากการหล่อ (ข) การตัดแบ่งชิ้นงานด้วยเลื่อยสายพาน (ค) ชิ้นงานที่ถูกแบ่งเสร็จ

ภาพที่ 3.12 แสดงการเลื่อยตัดแบ่งอะลูมิเนียมหล่อกึ่งของแข็ง

3.4.2 การกลึงชิ้นงานอะลูมิเนียมหล่อกึ่งของแข็ง

หลังจากนั้นนำชิ้นงานที่ตัดเรียบร้อยถูกนำไปกัดเป็นแท่งสี่เหลี่ยมเพื่อให้ง่ายในการกลึงชิ้นงาน ชิ้นงานที่ผ่านการกัดจะถูกกลึงปอกผิวด้วยเครื่องกลึง ซึ่งจะกลึงด้วยความเร็วรอบที่ 265 รอบต่อนาที อัตราการป้อนลึก ครั้งละ 1 มิลลิเมตรต่อนาที ใช้ความเร็วในการเดินกลึง 10 เมตรต่อนาที เพื่อให้ได้ชิ้นงานที่มีผิวเรียบและเป็นทรงกระบอก ดังแสดงในภาพที่ 3.13 (ก) โดยชิ้นงานที่ได้มีลักษณะเป็นทรงกระบอกขนาดความโต มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12 มิลลิเมตร ยาว 45 มิลลิเมตร ตามลำดับ ดังแสดงในภาพที่ 3.13 (ข) และในทำนองเดียวกันการเตรียมนำสังกะสีผสมอะลูมิเนียม ZA 27ไปกลึงให้ได้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12 มิลลิเมตร แล้วตัดด้วยเลื่อยมือให้ได้ขนาดความหนา 0.5 มิลลิเมตร ดังแสดงในภาพที่ 3.13 (ค)



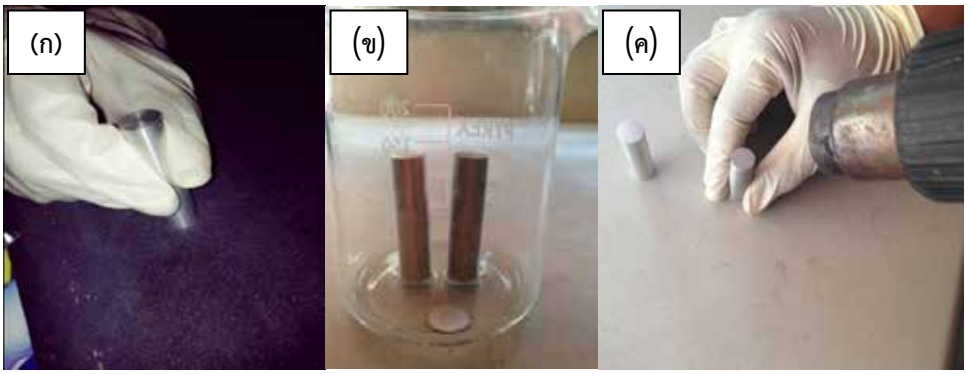
(ก) การกลึงอะลูมิเนียมหล่อกึ่งของแข็ง (ข) ชิ้นงานทรงกระบอก (ค) สังกะสีผสมอะลูมิเนียม ZA 27

ภาพที่ 3.13 แสดงการกลึงเตรียมชิ้นงานอะลูมิเนียมหล่อกึ่งของแข็ง

3.4.3 การเตรียมผิวงานเชื่อมโดยการแพร่

ก่อนการเชื่อมโดยการแพร่ ชิ้นงานจะถูกกลึงล้างผิวหน้าเพื่อให้ได้ระนาบในการเชื่อม และขัดด้วยกระดาษทรายหยาบ เบอร์ 220 กริด และสำหรับสังกะสีผสมอะลูมิเนียมจะขัดชิ้นงานให้มีความหนาที่ 0.25 มิลลิเมตร มีปริมาณน้ำหนัก 13 กรัม สำหรับการขัดผิวชิ้นงานก่อนการเชื่อมโดยการแพร่ เพื่อกำจัดฟิล์มอะลูมิเนียมออกไซด์ที่ผิวของชิ้นงาน ดังแสดงในภาพที่ 3.14 (ก) ในขั้นตอนการขัดผิวชิ้นงานจำเป็นต้องมีการสวมถุงมือยาง เพื่อป้องกันคราบไขมันและสิ่งสกปรกที่เกิดขึ้นจากมือผู้ปฏิบัติงาน เนื่องจากสิ่งสกปรกหรือคราบไขมันเหล่านี้ส่งผลต่อการแพร่ของอะตอม โดยสิ่งเหล่านี้จะขัดขวางการแพร่ของอะตอม จากนั้นนำชิ้นงานที่ผ่านการเตรียมผิวและขัดด้วยกระดาษทราย เบอร์ 220 กริด แล้วทำความสะอาดผิวหน้าด้านที่จะเชื่อมด้วยน้ำยาอะซิโตน (Acetones) ดังแสดงในภาพที่ 3.14 (ข) โดยในการทำความสะอาดผิวหน้าจะแช่ไว้ 30 วินาที เพื่อทำความสะอาดผิวงานเชื่อมจากคราบสกปรกและคราบไขมันที่ติดผิวงานก่อนการเชื่อม แล้วใช้ลมร้อนเป่าจนผิวชิ้นงานจนแห้ง ขั้นตอนนี้ถือได้ว่าเป็นขั้นตอนที่สำคัญ มือผู้ปฏิบัติงานไม่ควรสัมผัสชิ้นงานโดยตรงและควรสวมหน้ากากปิดจมูกเพื่อป้องกันการสูดดมน้ำยาอะซิโตน นำไปสู่ความปลอดภัยของผู้ปฏิบัติงานเอง ดังแสดงในภาพที่ 3.14 (ค) อย่างไรก็ตามสังกะสีผสมอะลูมิเนียมก็มีลักษณะการเตรียมงานที่คล้ายๆ กัน โดยต้องมีการทำความสะอาดผิวหน้ารอยต่อทั้งสองด้าน เพื่อป้องกันคราบสกปรกและไขมันที่ผิวรอยต่อ ซึ่งนำไปสู่สมบัติทางกลของชิ้นงานหลังการเชื่อมโดยการแพร่

หลังจากนั้นนำอะลูมิเนียมหล่อกึ่งของแข็งหล่อกึ่งแข็ง เกรด 356 และอะลูมิเนียมหล่อกึ่งของแข็งหล่อกึ่งแข็ง เกรด 7075 โดยมีสังกะสีผสมอะลูมิเนียมอยู่ระหว่างชิ้นงานทั้งสองชิ้น ดังแสดงในภาพที่ 3.15 ก็เป็นอันเสร็จสิ้นการเตรียมชิ้นงานสำหรับการเชื่อมโดยการแพร่ระหว่างวัสดุอะลูมิเนียมหล่อกึ่งแข็ง เกรด 356 กับอะลูมิเนียมหล่อกึ่งของแข็ง เกรด 7075 และใช้สังกะสีผสมอะลูมิเนียม ZA 27 เป็นตัวประสานผ่านเฟสของเหลว



(ก) ขัดกระดาษทรายหยาบ เบอร์ 220 กริด (ข) ทำความสะอาดผิวชิ้นงานด้วยน้ำยาอะซิโตน
(ค) ใช้ลมร้อนเป่าจนผิวชิ้นงานจนแห้ง

ภาพที่ 3.14 แสดงการเตรียมผิวงานเชื่อมโดยการแพร่

ภาพที่ 3.15 แสดงชิ้นงานสำหรับเชื่อมโดยการแพร่

3.4.4 การกำหนดตัวแปรในการเชื่อมโดยการแพร่

ปัจจัยหลักที่เลือกศึกษาในงานวิจัยครั้งนี้มี 3 ปัจจัย แต่ละปัจจัยมีระดับการทดลอง ดังนี้

(1) อุณหภูมิในการเชื่อมมี 3 ระดับ คือ 400, 450 และ 500 องศาเซลเซียส

(2) เวลาในการกดแช่มี 2 ระดับ คือ 60, และ 120 นาที

(3) แรงกดคงที่ คือ 4 MPa

ปัจจัยรองในการทดลองงานวิจัยครั้งนี้มี 5 ปัจจัย แต่ละปัจจัยมีระดับการทดลอง ดังนี้

(1) อะลูมิเนียมหล่อกึ่งของแข็งหล่อกึ่งแข็งมีรูปทรงกระบอก ขนาด Ø 12 มิลลิเมตร ยาว 45 มิลลิเมตร

(2) สังกะสีผสมอะลูมิเนียม ZA 27 มีขนาด Ø 12 มิลลิเมตร หนา 0.25 มิลลิเมตร มีปริมาณน้ำหนัก 13 กรัม

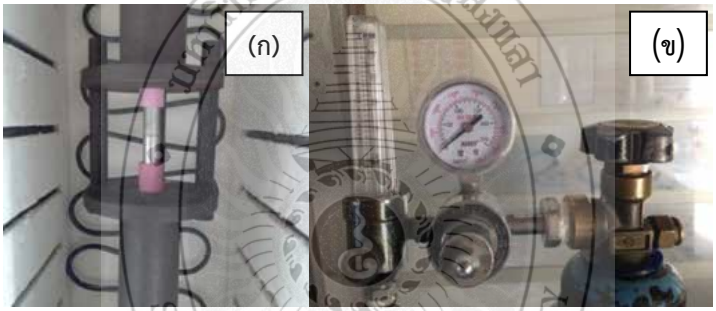
(3) การเชื่อมปกคลุมด้วยบรรยากาศอาร์กอนที่ 4 ลิตรต่อนาที

(4) ผิวหน้าชิ้นงานเชื่อมขัดด้วยกระดาษทรายหยาบ เบอร์ 220 กริด

(5) ผิวชิ้นงานเชื่อมทำความสะอาดด้วยน้ำยาอะซิโตน 30 วินาที

3.4.5 ขั้นตอนในการเชื่อมโดยการแพร่

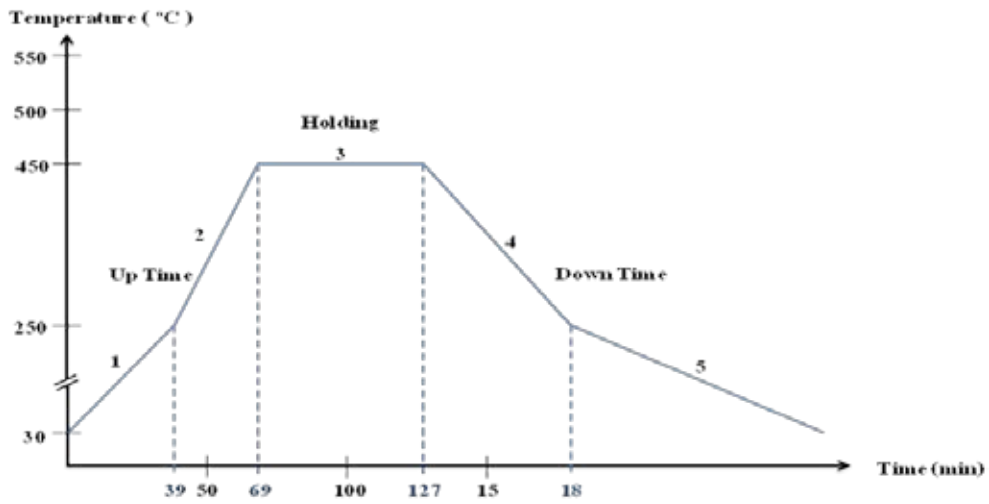
การนำชิ้นงานเข้าเตาจะใส่ชิ้นงานไปยังบริเวณหัวกดทั้งด้านบนและด้านล่าง โดยให้อะลูมิเนียมหล่อกึ่งแข็ง เกรด 356 อยู่ด้านบน และอะลูมิเนียมหล่อกึ่งแข็ง เกรด 7075 อยู่ด้านล่าง ดังแสดงในภาพที่ 3.16 (ก) จากนั้นตั้งชิ้นงานให้ตั้งฉากซึ่งกันและกัน กดชิ้นงานตามแรงที่ตั้งไว้ในโปรแกรมของเครื่องกด โดยแรงกดจะเป็นตัวแปรคงที่ คือ 4 MPa เมื่อตั้งแรงกดเสร็จ ก็เปิดก๊าซอาร์กอนให้ไหลเข้าเตาด้วยอัตราการไหล 4 ลิตรต่อนาที ดังแสดงในภาพที่ 3.16 (ข) จากนั้นเปิดอุณหภูมิตามโปรแกรมที่ได้ตั้งไว้ โดยอุณหภูมิที่ใช้จะเป็นตัวแปรที่ปรับเปลี่ยนไปตามการทดลอง ได้แก่ 450, 500 และ 550 องศาเซลเซียส และใช้เวลาการกดแช่ชิ้นงาน 60 และ 120 นาที ควบคุมการทดลองจนครบเวลา 4-5 ชั่วโมง ตามลำดับ อย่างไรก็ตามชิ้นงานที่ถูกกดด้วยแรง เมื่อได้รับความร้อนอาจเกิดการแพร่ของอะตอมระหว่างชิ้นงานเชื่อมกับหัวกดชิ้นงาน ดังนั้นจึงได้นำแท่งเซรามิกกลวงมาป้องกัน โดยการใส่ไว้ระหว่างผิวกดและชิ้นงานเชื่อม เพื่อป้องกันการยึดติดกันของหัวกดและชิ้นงานหลังการเชื่อมโดยการแพร่



(ก) การปรับตั้งชิ้นงาน (ข) ก๊าซอาร์กอนให้ไหลเข้าเตา

ภาพที่ 3.16 แสดงชิ้นงานเข้าเตาเชื่อม

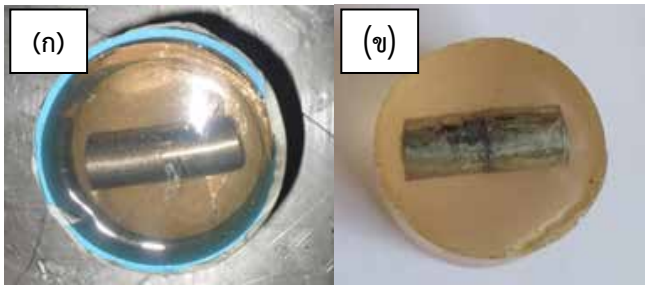
การให้อุณหภูมิในขณะเชื่อม เริ่มจากที่อุณหภูมิห้อง ในช่วงอุณหภูมิที่ 1 เมื่ออุณหภูมิขึ้นไปถึง 250 องศาเซลเซียส (เข้าสู่ช่วงอุณหภูมิที่ 2) ให้เปิดก๊าซอาร์กอนให้ไหลเข้าเตาด้วยอัตราการไหล 4 ลิตรต่อนาที เพื่อเป็นก๊าซปกคลุมในการเชื่อม นำไปสู่การป้องกันการเกิดออกไซด์ในระหว่างการเชื่อม และเมื่ออุณหภูมิขึ้นไปจนถึงอุณหภูมิ 450, 500 และ 550 องศาเซลเซียส ตามลำดับ ในช่วงอุณหภูมิที่ 3 จากนั้นคงอุณหภูมิที่ 450, 500 และ 550 องศาเซลเซียส ไว้ตามตัวแปรที่กำหนด ด้วยเวลา 60 และ 120 นาที จนถึงในช่วงอุณหภูมิที่ 4 เพื่อให้ชิ้นงานเข้าสู่กลไกของการแพร่ นำไปสู่การยึดติดของชิ้นงาน เมื่ออุณหภูมิเริ่มลงมาจนถึง 250 องศาเซลเซียส ในช่วงอุณหภูมิที่ 5 จึงปิดการไหลเข้าของก๊าซอาร์กอนที่เป็นก๊าซปกคลุม อุณหภูมิภายในเตาจะเริ่มลดลงภายในเวลาประมาณ 4 ชั่วโมง ก็ให้เตาเย็นตัวจนถึงอุณหภูมิห้อง ในช่วงอุณหภูมิสุดท้ายที่ 6 ซึ่งลำดับการให้อุณหภูมิในการเชื่อมโดยการแพร่ ดังแสดงในภาพที่ 3.17



ภาพที่ 3.17 แสดงลำดับการให้อุณหภูมิในการเชื่อมโดยการแพร่

3.4.6 การตรวจสอบลักษณะโครงสร้างทางโลหะวิทยา

ชิ้นงานที่ได้จากการเชื่อมถูกนำมาตัดปลายของชิ้นงานทั้งสองด้าน เพื่อลดความยาวให้น้อยลง โดยตัดออกด้านละ 3 เซนติเมตร การตัดจะใช้เลื่อยมือ จากนั้นนำชิ้นงานที่ได้จากการตัดไปหล่อเรือนครอบชิ้นงาน โดยการทำเรือนครอบชิ้นงาน เพราะชิ้นงานมีขนาดเล็ก ไม่สามารถจับด้วยมือได้ จึงต้องใช้อุปกรณ์จับยึดด้วยการหล่อเรซิ่น โดยใช้อัตราส่วนผสมของน้ำยาเรซิ่นและตัวเร่งปฏิกิริยาที่อัตราส่วน 10:1 ตัวเร่งปฏิกิริยาจะทำปฏิกิริยากับสารเรซิ่น ทำให้เรซิ่นเกิดการแข็งตัวครอบชิ้นงาน โดยนำชิ้นงานวางลงในท่อพีวีซี (PVC Pipe) ที่ได้ตัดไว้ ขนาดความโต 50 มิลลิเมตร และความยาว 25 มิลลิเมตร ดังแสดงในภาพที่ 3.18 (ก) จากนั้นทำการเทเรซิ่นที่ผสมไว้ลงในท่อพีวีซีให้ท่วมชิ้นงาน รอจนกระทั่งเรซิ่นเกิดการแข็งตัว แล้วจึงแกะท่อพีวีซีออกจากชิ้นงาน ดังแสดงในภาพที่ 3.18 (ข)



(ก) การหล่อเรซิ่น (ข) ชิ้นงานหลังหล่อเรซิ่น

ภาพที่ 3.18 แสดงการหล่อเรซิ่นทำเรือนหุ้มชิ้นงาน

นำชิ้นงานที่หล่อเรซิ่นเรียบร้อยแล้วมากลึงปาดหน้าชิ้นงาน โดยกลึงเข้าไปครึ่งหนึ่งของความโตชิ้นงานที่ผ่านการเชื่อมโดยการแพร่ เพื่อนำชิ้นงานไปขัดและดูโครงสร้างจุลภาค สำหรับการขัดชิ้นงานจะเริ่มจากการขัดหยาบด้วยกระดาษทราย โดยจะขัดชิ้นงานด้วยกระดาษทราย เบอร์ 220, 400, 600, 800, 1000 และ 1200 ตามลำดับ ดังแสดงในภาพที่ 3.19

ภาพที่ 3.19 แสดงขัดชิ้นงานด้วยกระดาษทราย

ผิวงานที่ผ่านการขัดหยาบด้วยกระดาษทรายเบอร์ต่างๆ จะถูกขัดละเอียดบนจานหมุนที่หุ้มด้วยผ้าสักหลาดอีกครั้ง โดยระหว่างการขัดจะใช้ผงขัดอะลูมิน่า ที่มีขนาดอนุภาค 5.0, 1.0 และ 0.3 ไมโครเมตร ตามลำดับ เพื่อช่วยขัดผิวของชิ้นงานทดสอบให้เรียบ แล้วจึงนำชิ้นงานไปทำความสะอาดด้วยเครื่องทำความสะอาดเพื่อกำจัดผงอะลูมิน่าที่ติดที่ผิวในระหว่างการขัดชิ้นงาน โดยนำชิ้นงานไปทำความสะอาดด้วยเครื่องทำความสะอาดด้วยคลื่นความถี่อัลตราโซนิคเป็นเวลา 3 นาที การสั่นจะทำให้ผงอะลูมิน่าที่มีขนาดเล็กหลุดออกจากผิวหน้าของชิ้นงาน ดังแสดงในภาพที่ 3.20

ภาพที่ 3.20 แสดงลักษณะของชิ้นงานที่พร้อมตรวจสอบโครงสร้างทางโลหะวิทยา

ก่อนการตรวจสอบโครงสร้างทางโลหะวิทยา ชิ้นงานถูกกัดกรดบริเวณผิวหน้ารอยขัดด้วยสารละลาย (Keller's reagent) เพื่อให้เกิดการขรุขระ และทำให้เกดการหักเหของแสงในการใช้กล้อง

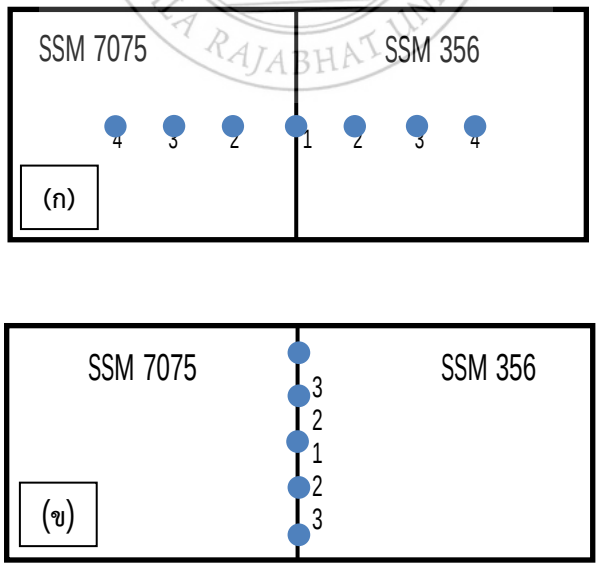
จุลทรรศน์ตรวจสอบ สารละลายกรดเจือจางที่ใช้สำหรับกัดผิวชิ้นงานก่อนการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค ประกอบด้วย น้ำ, ไฮโดรคลอริก, ไนตริก และไฮโดรฟลูออริค มาผสมในสัดส่วน 190: 3: 5: 2 ส่วน โดยใช้เวลาในการกัดผิวหน้ารอยต่อเป็นระยะเวลา 5-10 วินาที และทำให้ลมเป่าให้ชิ้นงานแห้ง ชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการเหล่านี้ก็จะพร้อมจะนำไปตรวจดูโครงสร้างจุลภาคต่อไป

3.4.7 การทดสอบความแข็ง

การวัดความแข็งนั้นจะใช้วิธีการวัดความแข็งในหน่วยวิกเกอร์ (Vickers) ด้วยเครื่องทดสอบแบบ Micro Hardness Vickers Test เป็นการทดสอบความสามารถในการต้านทานต่อการแปรรูปถาวร เมื่อถูกแรงกดกระทำต่อชิ้นทดสอบ หัวกดเพชรมีลักษณะเป็นปิรามิดฐานสี่เหลี่ยม ที่ปลายหัวกดทำมุม 136 องศา วิธีการทดสอบความแข็ง ได้กำหนดน้ำหนักกดของหัวกดคงที่ (Load Fixed) ไว้ที่ 100 กรัม กดเป็นเวลา 10 วินาที แต่ละชิ้นงานจะทำการหาค่าความแข็งของชิ้นงานโดยการวัดค่าความแข็ง 2 แนว ได้แก่ แนวตามยาวของชิ้นงานเชื่อมจำนวน 7 ตำแหน่ง ดังแสดงในภาพที่ 3.21 (ก) และแนวตามขวางของชิ้นงานเชื่อม (Bond line) จำนวน 5 ตำแหน่ง ดังแสดงในภาพที่ 3.21 (ข) โดยระยะห่างระหว่างรอยกด 2 มิลลิเมตร แล้วคำนวณหาค่าความแข็งจากสมการที่ 3.1

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

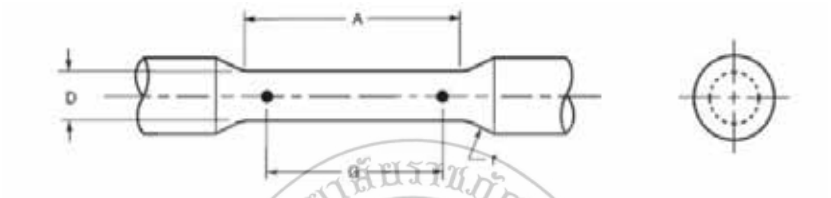
โดยที่ HV คือ ค่าความแข็งแบบ Vickers (kgf/mm^2)
P คือ แรงกด (kgf)
D คือ ขนาดเส้นทแยงมุม d_1 และ d_2 เฉลี่ย



ภาพที่ 3.21 แสดงบริเวณการกดวัดความแข็ง

3.4.8 การทดสอบแรงดึง

การทดสอบแรงดึงจะกำหนดขนาดและรูปร่างของชิ้นงานตามมาตรฐาน ASTM A310-10 (American Society of Testing and Materials) ในการกำหนดขนาดและรูปร่างของชิ้นงาน โดยชิ้นงานทดสอบเป็นแบบชิ้นงานกลม การทดสอบแรงดึงเป็นการทดสอบสมบัติทางกล เพื่อหาค่าความแข็งแรงดึงของรอยต่อชิ้นงานที่ผ่านการเชื่อมด้วยกรรมวิธีการเชื่อมโดยการแพร่ จะทดสอบแรงดึงของรอยยึดติดจากการต่อ ใช้ชิ้นทดสอบแบบลดขนาดตามมาตรฐานงานกลม นำมาขึ้นรูปเป็นชิ้นทดสอบแรงดึงตามยาวกับแนวเชื่อม แล้วนำไปทดสอบแรงดึงที่อุณหภูมิห้องความเร็วในการดึง 1.67x10 มิลลิเมตร/วินาที เพื่อดูค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุด ดังแสดงในภาพที่ 3.22



ภาพที่ 3.22 แสดงชิ้นงานทดสอบแรงดึงตามมาตรฐาน ASTM A310-10

SONGKHLA RAJABHAT UNIVERSITY

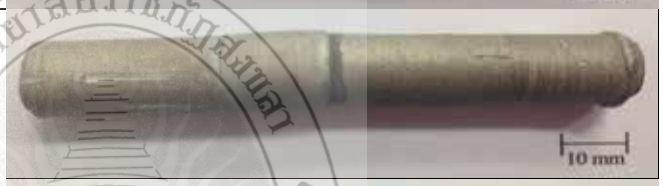
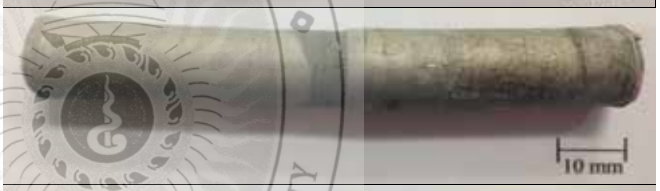
บทที่ 4

ผลการทดลองและวิจารณ์ผล

ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผลจากกระบวนการเชื่อมโดยการแพร่ มีผลการทดลองที่น่าสนใจ ซึ่งประกอบไปด้วยผลการตรวจสอบลักษณะทางกายภาพของชิ้นงานหลังการเชื่อม การตรวจสอบโครงสร้างทางโลหะวิทยา ทั้งโครงสร้างมหภาคและโครงสร้างจุลภาค และการทดสอบสมบัติทางกล ซึ่งจะมีทั้งการทดสอบแรงดึงและการทดสอบความแข็ง จากการทดลองได้ผลการทดลองดังนี้

4.1 ผลการตรวจสอบลักษณะโครงสร้างทางกายภาพ

จากการเชื่อมโดยการแพร่ระหว่างอะลูมิเนียมหล่อกึ่งแข็ง เกรด 356 กับอะลูมิเนียมหล่อกึ่งแข็ง เกรด 7075 โดยใช้อะลูมิเนียมผสมสังกะสีเป็นตัวประสานพบว่าชิ้นงานทุกชิ้นมีการยึดติดที่ดีในทุกการทดลอง ซึ่งลักษณะทางกายภาพของชิ้นงานหลังการเชื่อมก็แตกต่างกันไป ซึ่งที่อุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส เวลาในการเชื่อมที 60 นาที แสดงให้เห็นว่าชิ้นงานอะลูมิเนียมหล่อกึ่งแข็ง เกรด 7075 มีลักษณะบวมเล็กน้อยที่บริเวณรอยต่อของชิ้นงาน โดยพบว่าที่อุณหภูมิในการทดลองนี้ไม่เกิดการโก่งงอของชิ้นงานหลังการเชื่อม แต่เมื่อเพิ่มเวลาที่ใช้ในการเชื่อมไปสู่ 120 นาที แสดงให้เห็นว่าชิ้นงานอะลูมิเนียมหล่อกึ่งแข็ง เกรด 356 เริ่มมีการบวมของชิ้นงานอย่างชัดเจน นอกจากนั้นชิ้นงานมีลักษณะโก่งอีกด้วย เนื่องจากอุณหภูมิและเวลาในการเชื่อมที่น้อย ส่งผลให้อะลูมิเนียมสังกะสีไม่เกิดเป็นของเหลวมากนัก ความร้อนและเวลาที่เป็นพลังงานกระตุ้นของอะตอมในการแพร่เกิดการแพร่อย่างไม่สมบูรณ์ ทำให้ชิ้นงานไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงมากนัก ซึ่งทำให้ชิ้นงานเสียรูปได้น้อย อย่างไรก็ตามการเพิ่มอุณหภูมิในการเชื่อมให้สูงขึ้น จากอุณหภูมิที่ 450 องศาเซลเซียส ไปสู่อุณหภูมิในการเชื่อมที่ 500 องศาเซลเซียส ส่งผลต่อการเสียรูปอย่างชัดเจนขึ้น โดยที่เวลาในการเชื่อมที่ 60 นาที ชิ้นงานอะลูมิเนียมหล่อกึ่งแข็ง เกรด 7075 ชิ้นงานเกิดการบวมและชิ้นงานเกิดการโก่งงออย่างชัดเจน เนื่องจากอุณหภูมิที่สูงขึ้นส่งผลให้ชิ้นงานรับแรงกระทำได้น้อย นอกจากนั้นแรงกดยังเป็นอีกปัจจัยหลักที่ส่งผลต่อการโก่งงอของชิ้นงาน ในทำนองเดียวกันการเพิ่มเวลาในการเชื่อมโดยการแพร่ไปยังเวลา 120 นาที ส่งผลต่อการแพร่ที่ดีของอะตอม แต่มีความเสี่ยงต่อการเสียรูปของชิ้นงานหลังการเชื่อม โดยเฉพาะการบวนและการโก่งของชิ้นงานเชื่อม ชิ้นงานเชื่อมเริ่มมีการบวนบริเวณปลายทั้งสองด้านของชิ้นงานอย่างชัดเจน การเชื่อมโดยการแพร่ที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส ทั้งเวลาในการเชื่อมที่เวลา 60 และเวลา 120 นาที แสดงให้เห็นว่าชิ้นงานอะลูมิเนียมหล่อกึ่งแข็งทั้งสองชนิดเกิดการเสียรูปอย่างถาวร เนื่องจากความร้อนที่สูงทำให้วัสดุเกิดการอ่อนตัวได้ง่าย ส่งผลให้เมื่อรับแรงกดที่อุณหภูมิสูง จะเกิดการเสียรูปได้ง่าย ลักษณะการเสียรูปจะเป็นแบบการบวมทั้งกึ่งกลางชิ้นงาน และบริเวณปลายทั้งสองด้านของชิ้นงานและชิ้นงานมีลักษณะการเสียรูปแบบโก่งงอ เนื่องจากแรงกดที่กระทำในขณะที่อุณหภูมิเชื่อมสูง จึงทำให้ชิ้นงานเกิดการโก่งงอ ดังแสดงในภาพที่ 4.1

ปัจจัยในการเชื่อม		ลักษณะชิ้นงาน
อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	เวลา (นาที)	
450	60	
500		
550		
450	120	
500		
550		

มหาวิทยาลัยราชภัฏสงขลา SONGKHLA RAJABHAT UNIVERSITY

ภาพที่ 4.1 แสดงลักษณะทางกายภาพของชิ้นงานหลังการเชื่อม

อย่างไรก็ตาม สาเหตุที่ชิ้นงานเกิดการเสียรูปได้ง่าย เนื่องมาจากอะลูมิเนียมผสมสังกะสี เกรด ZA 27 ที่ทำหน้าที่เป็นตัวประสานระหว่างชิ้นงานทั้งสองชิ้น อะลูมิเนียมผสมสังกะสี เกรด ZA 27 จะเกิดการละลายตัวเป็นเฟสของเหลว เนื่องจากอะลูมิเนียมผสมสังกะสีหลอมที่อุณหภูมิเพียง 390 องศาเซลเซียส เมื่อเชื่อมที่อุณภูมิที่สูงจะส่งผลต่อเฟสของเหลวทีสูงขึ้นเช่นกัน การเกิดเฟสของเหลวจะทำให้อะตอมมีพลังงานอิสระในการเคลื่อนที่ดี แต่ในทางตรงกันข้าม ยิ่งทำให้มีความเสียต่อการเสียรูปที่มากได้เช่นกัน นอกจากนั้นการเกิดเฟสของเหลวของอะลูมิเนียมผสมสังกะสี เกรด ZA 27 อาจนำไปสู่การเกิดจุดบกพร่องแบบโพรงอากาศในบริเวณรอยต่อได้เช่นกัน

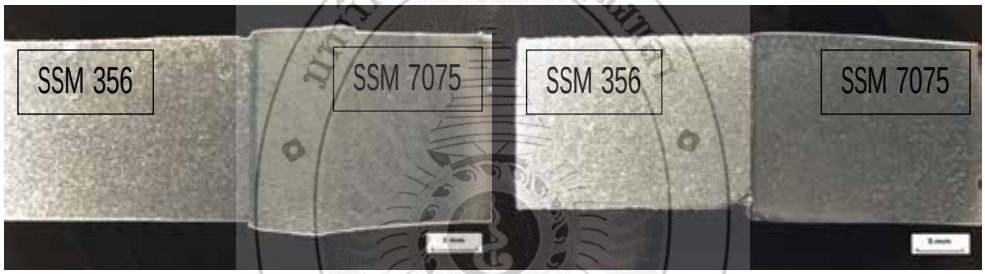
4.2 ผลการตรวจสอบโครงสร้างมหภาค

ภาพที่ 4.2 แสดงโครงสร้างมหาภาคของทุกตัวแปรที่ได้ทดลอง โดยแสดงให้เห็นว่าโครงสร้างมหภาคของรอยต่อจากการทดลองเชื่อมทุกการทดลองมีการยึดติดที่ดี ไม่พบโพรงอากาศหรือช่องว่างหลังจากการเชื่อม โดยที่อุณหภูมิเชื่อม 450 องศาเซลเซียส เวลาในการเชื่อมที่ 60 นาที ดังแสดงในภาพที่ 4.2 (ก) พบว่าชิ้นงานอะลูมิเนียมหล่อกึ่งแข็งทั้งสองชิ้นประสานติดกันดี ไม่พบการบวม แต่มีลักษณะการโก่งของชิ้นงานเล็กน้อย บริเวณรอยต่อสังเกตเห็นรอยเส้นต่อระหว่างอะลูมิเนียมทั้งสองอย่างชัดเจน เนื่องจากอุณหภูมิในการเชื่อมน้อยเกินไป ส่งผลให้อะลูมิเนียมผสมสังกะสี เกรด ZA 27 ละลายได้น้อย ทำให้เห็นเส้นรอยเส้นต่อที่แคบและเล็กมาก สำหรับการเพิ่มเวลาในการเชื่อมจาก 60 นาที ไปยัง 120 นาที ที่อุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส มีผลการทดลองคล้ายๆ กันกับเวลาในการเชื่อมที่ 60 นาที ซึ่งแสดงให้เห็นว่าไม่พบข้อบกพร่องใดๆ ในรอยเชื่อม สังเกตได้ว่าเส้นรอยต่อระหว่างอะลูมิเนียมทั้งสองอย่างชัดเจนและมีขนาดที่กว้างขึ้น เนื่องจากมีเวลาในการแพร่ที่สูงขึ้น ดังแสดงในภาพที่ 4.2 (ข) อย่างไรก็ตาม เวลาในการเชื่อมที่สูงขึ้นส่งผลต่อการบวนของชิ้นงานอย่างชัดเจน โดยจะเกิดการบวมแบบช้าๆ จากการสะสมของความร้อนในชิ้นงานจากการเชื่อม

ปัจจัยของความร้อนที่ได้จากอุณหภูมิที่สูงขึ้น แสดงให้เห็นว่าโครงสร้างมหภาคของรอยต่อมีการยึดติดที่ดี บริเวณกึ่งกลางของชิ้นงานมีการประสานที่ดีของรอยต่อ โดยที่อุณหภูมิในการเชื่อมที่ 500 องศาเซลเซียส เวลา 60 นาที พบว่าชิ้นงานเกิดการโก่งงอเล็กน้อย ดังแสดงในภาพที่ 4.2 (ค) ลักษณะชิ้นงานมีการบวนเล็กน้อย โดยเฉพาะด้านอะลูมิเนียมหล่อกึ่งแข็ง เกรด 7075 เนื่องจากอะลูมิเนียมเกรดนี้มีการนำความร้อนที่ดี เมื่อเปรียบเทียบกับอะลูมิเนียมหล่อกึ่งแข็ง เกรด 356 ทำให้เกิดการบวนที่ง่ายกว่าเมื่อได้รับความร้อน ในทำนองเดียวกันโครงสร้างมหภาคของรอยต่อจากการทดลองที่อุณหภูมิเชื่อม 500 องศาเซลเซียส เวลา 120 นาที พบว่าชิ้นงานด้านอะลูมิเนียมหล่อกึ่งแข็ง เกรด 7075 เกิดการบวนของชิ้นงาน ซึ่งมีผลการทดลองที่คล้ายๆ กัน ในหลายๆ การทดลอง เนื่องจากสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของชิ้นงานและตัวแปรที่ใช้ในการทดลอง ดังแสดงในภาพที่ 4.2 (ง) ลักษณะรอยต่อของชิ้นงานเกิดการโก่งงออย่างชัดเจน แต่โครงสร้างมหภาคของรอยต่อจากการทดลองที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส เวลา 60 และ 120 นาที แสดงให้เห็นว่าชิ้นงานมีลักษณะการโก่งงอแบบการโค้งหนีแนวแกน และมีการบวมของชิ้นงานหลังการเชื่อมอย่างชัดเจน เนื่องจากการรับอุณหภูมิในการเชื่อมที่สูงเป็นเวลานาน ส่งผลให้เฟสที่อยู่ในสถานะของแข็งบางส่วนเกิดการละลายตัวเป็นเฟสของเหลว เมื่อปริมาณเฟสของเหลวเพิ่มขึ้น ทำให้ชิ้นงารับพฤติกรรมทางกลได้ไม่ดีมากนัก เมื่อสังเกตเส้นรอยต่อระหว่างอะลูมิเนียมทั้งสองแสดงให้เห็นอย่างชัดเจนว่า ลักษณะเส้นรอยต่อมีขนาดที่กว้างขึ้น ดังแสดงในภาพที่ 4.2 (จ) และ (ฉ) อย่างไรก็ตามลักษณะโครงสร้างมหภาคของชิ้นงานหลังการเชื่อมทุกการทดลองมีแนวโน้มที่ดี โดยแสดงให้เห็นถึงการยึดติดที่ดีของชิ้นงาน และจุดพกพร่องหลังจากการเชื่อมที่น้อย

(ก) อุณหภูมิ 450 ◦C เวลา 60 นาที (ข) อุณหภูมิ 450 ◦C เวลา 120 นาที

(ค) อุณหภูมิ 500 ◦C เวลา 60 นาที (ง) อุณหภูมิ 500 ◦C เวลา 120 นาที

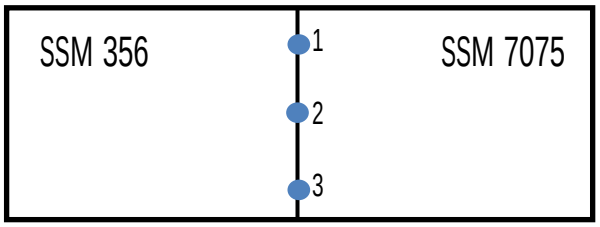


(จ) อุณหภูมิ 550 ◦C เวลา 60 นาที (ฉ) อุณหภูมิ 550 ◦C เวลา 120 นาที

ภาพที่ 4.2 แสดงโครงสร้างมหาภาคของทุกตัวแปรในการทดลอง

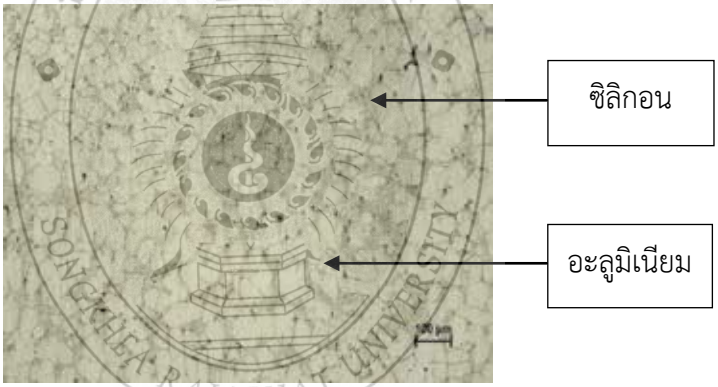
4.3 การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค

ชิ้นงานตรวจสอบโครงสร้างทางจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง เป็นชิ้นงานทดสอบเดียวกันกับชิ้นงานผ่านการตรวจสอบลักษณะโครงสร้างมหภาค ซึ่งหลังจากการตรวจสอบโครงสร้างมหภาคแล้วก็นำไปตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงที่กำลังขยายในช่วง 50 ถึง 1000 เท่า เพื่อตรวจสอบลักษณะการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างบริเวณรอยต่อของชิ้นงาน ตรวจสอบข้อบกพร่องและความสมบูรณ์ของรอยต่อของแต่ละตัวแปร และแต่ละสภาวะที่ได้จากการเชื่อม อีกทั้งดูการเปลี่ยนแปลงของเกรนหลังจากการเชื่อมโดยการแพร่ โดยได้กำหนดตำแหน่งในการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคไว้ทั้งหมด 3 ตำแหน่ง ซึ่งในตำแหน่งที่ 1 จะตรวจสอบบริเวณรอยต่อด้านบนของรอยต่อ บริเวณตำแหน่งที่ 2 จะตรวจสอบบริเวณกึ่งกลางของรอยต่อ และในตำแหน่งที่ 3 จะตรวจสอบบริเวณรอยต่อด้านล่างของชิ้นงาน ดังแสดงในภาพที่ 4.3

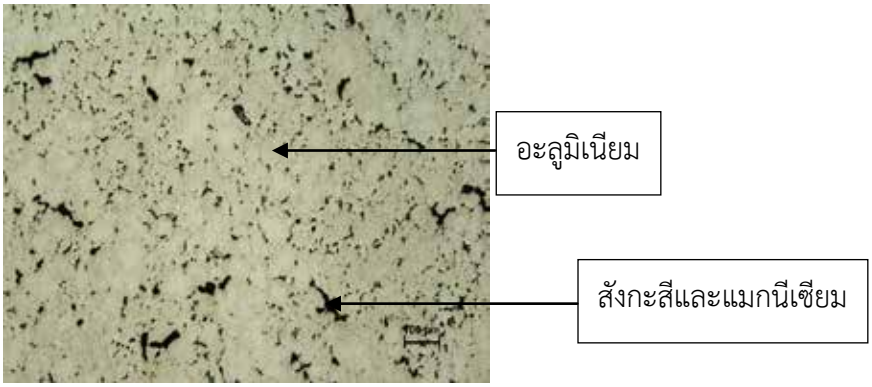


ภาพที่ 4.3 แสดงบริเวณการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค

สำหรับโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานที่ไม่ผ่านการเชื่อม (เนื้อโลหะเดิมของวัสดุ) โดยอะลูมิเนียมหล่อกึ่งแข็ง เกรด 356 ประกอบไปด้วยเฟสแอลฟ่า (α) แบบก้อนกลมผสมกับเฟสยูเทกติก (Mg_2si) ประกอบไปด้วย อะลูมิเนียมกับซิลิกอน โดยอยู่รอบๆ บริเวณโครงสร้างที่เป็นเฟสแอลฟ่า ซึ่งมีการกระจายตัวของเฟสทั้งสองสลับกัน นอกจากนั้นยังมีเฟสเหล็ก (Fe) และแมกนีเซียม (Mg) จับกลุ่มรอบเฟสแอลฟ่า ดังแสดงในภาพที่ 4.4 ส่วนอะลูมิเนียมหล่อกึ่งแข็ง เกรด 7075 เป็นลักษณะเกรนก้อนกลมที่ล้อมรอบด้วยเฟสยูเทกติกที่มีสังกะสี (Zn) และแมกนีเซียม (Mg) เป็นเฟสยูเทกติกหลัก ($MgZn_2$) ลักษณะการกระจายตัวของเฟสเป็นแบบแผ่นและเข็มสลับกันไป ดังแสดงในภาพที่ 4.5



ภาพที่ 4.4 แสดงโครงสร้างจุลภาคของอะลูมิเนียมหล่อกึ่งแข็ง เกรด 356



ภาพที่ 4.5 แสดงโครงสร้างจุลภาคของอะลูมิเนียมหล่อกึ่งแข็ง เกรด 7075

4.3.1 โครงสร้างจุลภาคที่ตัวแปรของอุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส เวลา 60 นาที

จากภาพที่ 4.6 แสดงลักษณะโครงสร้างจุลภาคหลังการเชื่อมโดยการแพร่ของอุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส เวลา 60 นาที ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการแพร่ของอะตอมในสภาวะเฟสของเหลวไม่สมบูรณ์ เนื่องจากบริเวณรอยต่อ (Bond line) ยังมีบริเวณที่ยังไม่เกิดการแพร่ของอะตอม ซึ่งจะเห็นช่องว่างขนาดเล็กขนานตามยาวรอยต่อของชิ้นงาน ดังแสดงในภาพที่ 4.6 (ตำแหน่งที่ 1 และ 3) สาเหตุมาจากที่อุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส และเวลาที่ใช้ในการเชื่อมที่ 60 นาที ยังเป็นเวลาและอุณหภูมิที่น้อยในการเชื่อมโดยการแพร่ ซึ่งเทคนิคการเชื่อมโดยการแพร่อาศัยเวลาและอุณหภูมิที่เหมาะสมในการเชื่อม ทำให้กระบวนการแพร่ยังเกิดไม่สมบูรณ์ และยังพบว่าเฟสยูเทกติกทางด้านอะลูมิเนียมหล่อกึ่งแข็ง เกรด 7075 หรือที่เรียกว่า “เฟส $MgZn_2$” ยังมีการตกตะกอน (Precipitation Phase) ที่น้อยมาก เฟสบางส่วนยังไม่เกิดการลาย ในทำนองเดียวกัน พบว่าเฟสยูเทกติกทางด้านอะลูมิเนียมหล่อกึ่งแข็ง เกรด 356 ที่เรียกว่า “เฟส Mg_2si” ก็ยังไม่เกิดการแตกตัวของอนุภาคเฟสให้มีขนาดที่เล็กลง รอยต่อซึ่งเป็นบริเวณที่เกิดเฟสของเหลวจากสังกะสี (Zinc Diffusion Zone) ยังมีช่วงของการแพร่ที่แคบ ดังแสดงในภาพที่ 4.6 (ตำแหน่งที่ 2)

ภาพที่ 4.6 แสดงโครงสร้างจุลภาคของอุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส เวลา 60 นาที

4.3.2 โครงสร้างจุลภาคที่ตัวแปรของอุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส เวลา 120 นาที

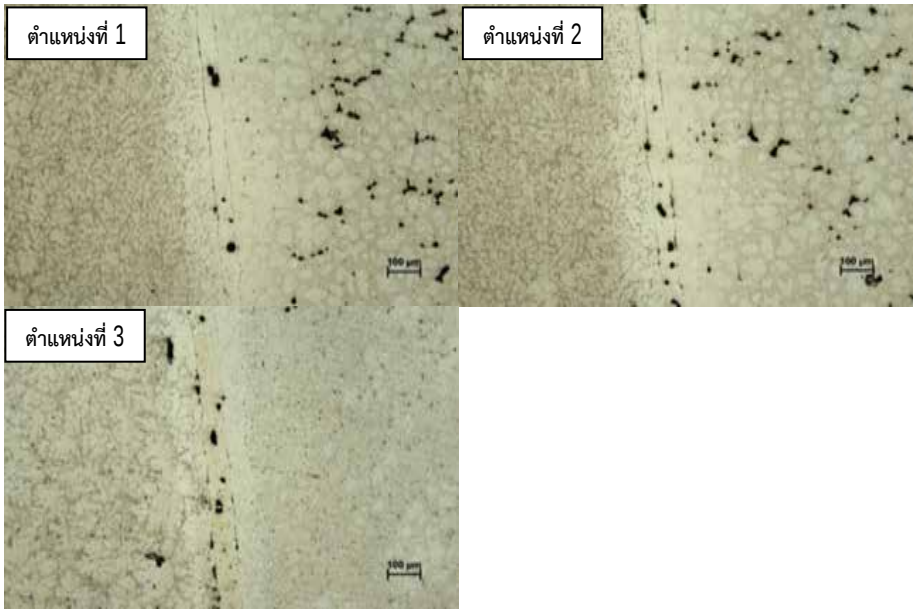
ลักษณะโครงสร้างจุลภาคหลังการเชื่อมโดยการแพร่ของอุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส เวลา 120 นาที ดังแสดงในภาพที่ 4.7 พบว่าเวลาในการเชื่อมที่เพิ่มขึ้นเพียง 60 นาที ส่งผลให้รอยต่อของชิ้นงานมีความสมบูรณ์มากขึ้น จะเห็นได้ว่าการแพร่ของอะตอมในสภาวะเฟสของเหลวมีความสมบูรณ์อย่างต่อเนื่อง ซึ่งบริเวณรอยต่อพบว่าช่องว่างขนาดเล็กที่ขนานตามยาวรอยต่อของชิ้นงานเริ่มถูกกำจัด ซึ่งเหลืองเพียงช่องว่างขนาดเล็ก (Micro Void) ดังแสดงในภาพที่ 4.7 (ตำแหน่งที่ 2) สาเหตุมาจากเวลาที่ใช้ในการเชื่อมที่ 120 นาที มีเวลามากพอที่จะทำให้เกิดการแพร่ของอะตอม ส่งผลให้การแพร่สมบูรณ์มากขึ้น และยังพบว่าเฟสยูเทกติกของอะลูมิเนียมหล่อกึ่งของแข็งทั้งสองเกรดมีการ

ตกตะกอน เฟสยูเทกติกมีการละลายเข้าไปในเฟสอะลูมิเนียมเมตริกซ์ ดังแสดงในภาพที่ 4.7 (ตำแหน่งที่ 1, 2 และ 3) อย่างไรก็ตาม เฟสอะลูมิเนียมเมตริกซ์ของอะลูมิเนียมทั้งสองเกรดเกิดการเติบโตของเกรนอย่างชัดเจน เนื่องจากความร้อนที่เกิดจากการเชื่อม อะลูมิเนียมเมตริกซ์มีการเติบโตในทุกทิศทาง โดยเกิดการกลืนเกรนขนาดเล็กของเกรนที่มีขนาดใหญ่ จนเกรนมีขนาดที่โตขึ้น ที่เรียกว่า เกรนแบบดอกไม้ (Flower Grain) นอกจากนั้นยังพบว่ารอยต่อซึ่งเป็นบริเวณที่เกิดเฟสของเหลวจากสังกะสี เกรด ZA 27 มีช่วงของการแพร่ที่กว้างขึ้น

ภาพที่ 4.7 แสดงโครงสร้างจุลภาคของอุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส เวลา 120 นาที

4.3.3 โครงสร้างจุลภาคที่ตัวแปรของอุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เวลา 60 นาที

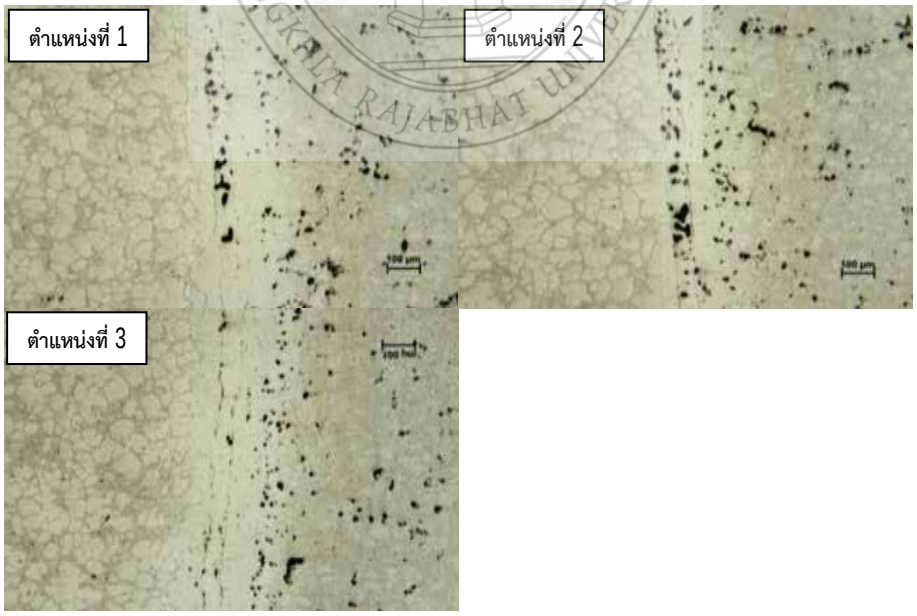
การเพิ่มอุณหภูมิในการเชื่อมโดยการแพร่ ส่งผลโดยตรงต่อการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างจุลภาค โดยลักษณะโครงสร้างจุลภาคหลังการเชื่อมโดยการแพร่ของอุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เวลา 60 นาที ผลการทดลองมีผลในทิศทางเดียวกับการทดลองที่ตัวแปรอื่นๆ โดยจะเห็นว่าการแพร่ของอะตอมในสภาวะเฟสของเหลวสมบูรณ์ขึ้น อุณหภูมิที่สูงจาก 450 ไปสู่ 500 องศาเซลเซียส จะเพิ่มความเร็วในการเป็นเฟสของเหลวของตัวประสานตรงกลาง ทำให้การแพร่เกิดขึ้นในสภาวะที่รวดเร็ว สังเกตได้จากเฟสของเหลวจากสังกะสี-อะลูมิเนียมมีการแพร่ไปยังอะลูมิเนียมหล่อกึ่งของแข็งเกรด 7075 และอะลูมิเนียมหล่อกึ่งของแข็ง เกรด 356 เป็นบริเวณที่กว้าง ดังแสดงในภาพที่ 4.8 (ตำแหน่งที่ 1, 2 และ 3) นอกจากนั้นยังพบว่าเฟสโครงสร้างแบบก้อนกลมมีการตกตะกอนของเฟส Mg_2si และเฟส $MgZn_2$ รอบๆ ขอบเกรน ซึ่งทำให้เกิดการแพร่แบบภายในของอะตอมด้วย อย่างไรก็ตามการเกิดเฟสของเหลวที่มาก มีความเสี่ยงต่อการเกิดโพรงอากาศที่เกิดจากการแทรกตัวของออกซิเจนระหว่างการเชื่อม ถึงกระนั้นก๊าซอาร์กอนที่ใช้ในการปกคลุมบรรยากาศเชื่อม จะช่วยป้องกันออกซิเจนที่เข้าไปแทรกตัวได้



ภาพที่ 4.8 แสดงโครงสร้างจุลภาคของอุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เวลา 60 นาที

4.3.4 โครงสร้างจุลภาคที่ตัวแปรของอุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เวลา 120 นาที

จากภาพที่ 4.9 แสดงลักษณะโครงสร้างจุลภาคหลังการเชื่อมโดยการแพร่ของอุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เวลา 120 นาที ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าการแพร่ของอะตอมในสภาวะเฟสของเหลวสมบูรณ์ แต่มีเฟสอะลูมิเนียมเมตริกซ์ที่มีการเติบโตของเกรนที่ใหญ่ขึ้น ในทั้งสามตำแหน่งที่มีการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค ซึ่งเวลาที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ เกรนมีเวลาในการแพร่เชื่อมต่อกัน โดยเป็นการแพร่บริเวณขอบเกรนของอะลูมิเนียมเมตริกซ์

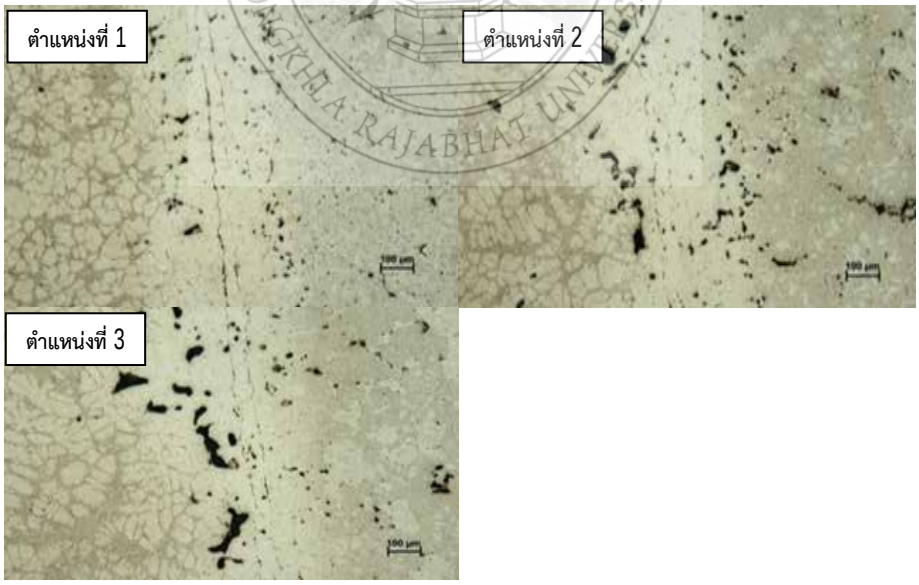


ภาพที่ 4.9 แสดงโครงสร้างจุลภาคของอุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เวลา 120 นาที

ภาพที่ 4.9 (ตำแหน่งที่ 2) ซึ่งเป็นตำแหน่งกึ่งกลางของชิ้นงาน พบโพรงอากาศ (Porosity) ขนาดเล็กแทรกตัวตามรอยต่อของชิ้นงาน ซึ่งมีผลการทดลองคล้ายๆ กับบริเวณด้านบนของชิ้นงาน ในตำแหน่งที่ 1 ซึ่งเกิดโพรงอากาศเช่นกัน ซึ่งเกิดจากการแทรกตัวของอากาศ ซึ่งเป็นสภาพแวดล้อมที่เกิดขึ้นจากการเชื่อม ซึ่งโพรงอากาศเหล่านี้นำไปสู่ค่าความด้านทานแรงดึง (Tensile Strength Property) หลังการเชื่อมที่ต่ำลง และยังทำให้ชิ้นงานหลังการเชื่อมมีสมบัติทางกล (Mechanical Properties) ด้านอื่นๆ ที่ต่ำด้วย

4.3.5 โครงสร้างจุลภาคที่ตัวแปรของอุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส เวลา 60 นาที

จากภาพที่ 4.10 แสดงลักษณะโครงสร้างจุลภาคหลังการเชื่อมโดยการแพร่ของอุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส เวลา 60 นาที พบว่าอะลูมิเนียมเมตริกซ์ของอะลูมิเนียมหล่อกึ่งของแข็งเกรด 356 ที่มีการเติบโตของเกรนที่ใหญ่ขึ้นอย่างมาก โดยมีการเติบโตของเฟสจนมีขนาดเกรนที่ใหญ่มากขึ้นทั้งสามตำแหน่ง สังกะสี-อะลูมิเนียมมีการแพร่ไปยังอะลูมิเนียมที่เชื่อมทั้งสองเกรดเป็นบริเวณกว้าง เฟสยูเทกติกมีการตกตะกอนจนมีขนาดที่เล็กลง ซึ่งส่งผลให้เกิดสมบัติทางด้านความแข็งที่ดีขึ้น นอกจากนั้นโพรงอากาศที่เกิดขึ้นหลังจากการเชื่อมโดยการแพร่มีขนาดที่ใหญ่ขึ้นด้วยเช่นกัน ดังแสดงในภาพที่ 4.10 (ตำแหน่งที่ 2) เนื่องจากในบริเวณกึ่งกลางของชิ้นงาน อากาศที่เข้าไปในระหว่างการหลอมละลาย เมื่อชิ้นงานเชื่อมเย็นตัวทำให้อากาศที่แทรกตัวในรอยต่อไม่สามารถออกมาได้ ส่งผลให้เกิดโพรงอากาศในบริเวณดังกล่าวมากกว่าบริเวณอื่นๆ อย่างไรก็ตามเวลาก็เป็นอีกสาเหตุที่ทำให้ปริมาณโพรงอากาศมากหรือน้อย โดยพบว่าที่เวลาในการเชื่อมนานมีแนวโน้มที่ทำให้เกิดโพรงอากาศที่มากด้วยเช่นกัน ในทางตรงกันข้ามโพรงอากาศจะมีปริมาณที่น้อยเมื่อเวลาในหารเชื่อมน้อยลงด้วย แต่การเชื่อมโดยการแพร่ต้องอาศัยการแพร่ของอะตอมเพื่อนแทนที่หรือแทรกที่อะตอมในตำแหน่งอื่นๆ จึงจำเป็นต้องใช้เวลาในการเชื่อมที่นานกว่า เมื่อเปรียบเทียบกับการเชื่อมด้วยวิธีการอื่นๆ



ภาพที่ 4.10 แสดงโครงสร้างจุลภาคของอุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส เวลา 60 นาที

4.3.6 โครงสร้างจุลภาคที่ตัวแปรของอุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส เวลา 120 นาที

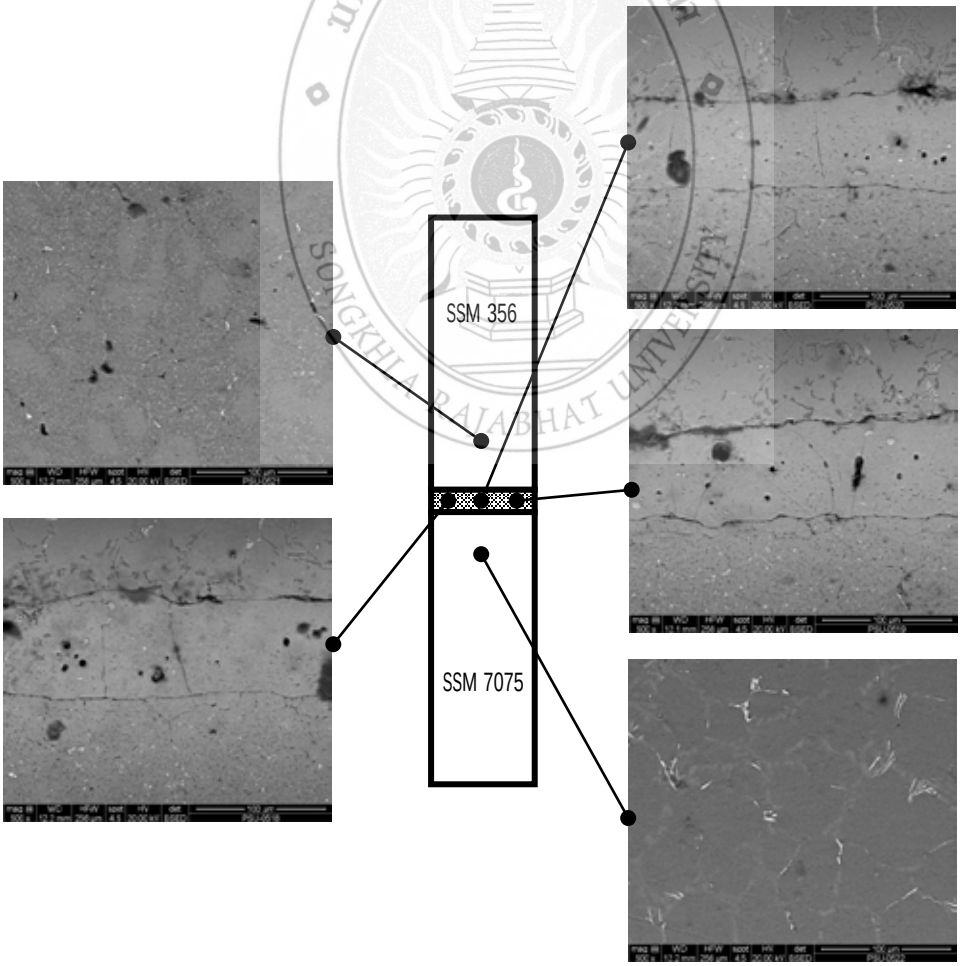
ลักษณะโครงสร้างจุลภาคหลังการเชื่อมโดยการแพร่ของอุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส เวลา 120 นาที ดังแสดงในภาพที่ 4.11 พบว่าเฟสสังกะสี-อะลูมิเนียมมีการแพร่ไปยังอะลูมิเนียมที่เชื่อมทั้งสองเกรดเป็นบริเวณกว้างมาก เมื่อเปรียบเทียบกับการทดลองที่ตัวแปรอื่นๆ เฟสยูเทกติกของอะลูมิเนียมทั้งสองเกรดเกิดการตกตะกอนจนมีขนาดที่เล็กลง และเกิดการละลายปะปนกับเฟสอะลูมิเนียมเมตริกซ์ เป็นที่น่าสังเกตว่าอะลูมิเนียมหล่อกึ่งของแข็ง เกรด 7075 มีการตกตะกอนของเฟสยูเทกติก เนื่องจากอะลูมิเนียมหล่อกึ่งของแข็ง เกรด 7075 มีสัมประสิทธิ์ของความร้อนที่ดี การเกิดเฟสของเหลวของสังกะสี-อะลูมิเนียมที่เป็นตัวประสานกึ่งกลางชิ้นงานเชื่อม ส่งผลให้ชิ้นงานเชื่อมมีการกระตุ้นของพลังงานความร้อนได้เร็วขึ้น ซึ่งทำให้เวลาในการเชื่อมลดลง เมื่อเปรียบเทียบกับการเชื่อมโดยการแพร่แบบเทคนิคเดิมๆ จะเห็นได้ว่าเฟสสังกะสี-อะลูมิเนียมมีการแพร่ที่ดี ซึ่งแนวรอยต่อมีพื้นที่เป็นบริเวณกว้าง ดังแสดงในภาพที่ 4.11 (ตำแหน่งที่ 1, 2 และ 3) อย่างไรก็ตามอุณหภูมิที่สูงในการเชื่อมและเวลาในการเชื่อมที่ยาวนาน ส่งผลให้ชิ้นงานในระหว่างการเชื่อมเกิดความเค้นที่สูงด้วย ทำให้ชิ้นงานหลังการเชื่อมเกิดการเสียรูปได้ง่ายเช่นกัน

ภาพที่ 4.11 แสดงโครงสร้างจุลภาคของอุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส เวลา 120 นาที

4.4 การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องอิเล็กตรอนแบบส่องกราด

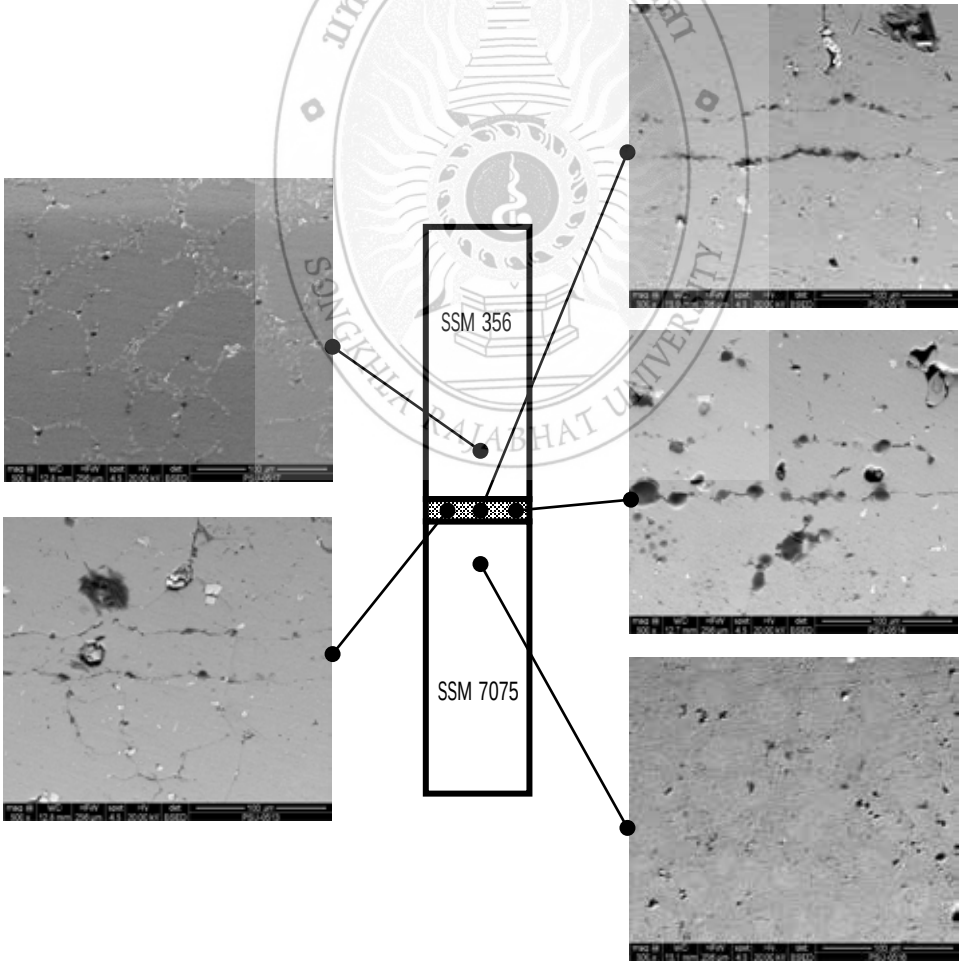
ชิ้นงานบางส่วนนำไปตรวจสอบโครงสร้างทางจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด ที่กำลังขยายช่วง 1000 ถึง 2500 เท่า ซึ่งภาพที่ 4.12 เป็นภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคบริเวณรอยต่อของชิ้นงานที่ตัวแปรอุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส เวลา 60 นาที ผลการทดลองแสดงให้เห็นอย่างชัดเจนว่าบริเวณรอยต่อของชิ้นงานเชื่อมสามารถมองเห็นแนวรอยต่อ (Bond Line) ไม่อย่างชัดเจนเป็นผลมาจากเวลาในการเชื่อมที่น้อยเกินไปส่งผลให้การประสานกันของวัสดุทั้งสองเกรดไม่สามารถเกิดการแพร่ระหว่างอะตอมด้วยกันได้ดี อย่างไรก็ตามเป็นที่น่าสังเกตว่าบริเวณด้านอะลูมิเนียมหล่อกึ่งของแข็ง เกรด SSM 7075 มีการแพร่ได้ดีกว่าด้านอะลูมิเนียมหล่อกึ่งของแข็ง เกรด SSM 356

เนื่องจากอะลูมิเนียมหล่อกึ่งของแข็ง เกรด SSM 7075 มีสัมประสิทธิ์การแพร่ที่ดีกว่า ส่งผลให้เกิดการแพร่ที่รวดเร็วกว่า เป็นเหตุผลที่ทำให้มีรอยเชื่อมที่แคบและเล็กกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับรอยต่อด้านอะลูมิเนียมหล่อกึ่งของแข็ง เกรด SSM 356 นอกจากตัวแปรด้านเวลาในการเชื่อมที่ส่งผลต่อการแพร่ของอะตอม จากการทดลองยังพบว่าอุณหภูมิที่ใช้ในการเชื่อมก็เป็นอีกตัวแปรที่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานหลังการเชื่อม โดยผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าเฟสยูเทกติก (Eutectic Phase) เกิดการละลายเฟสจากขนาดใหญ่ให้มีขนาดที่เล็กลง โดยเมื่อเฟสยูเทกติกได้รับความร้อนก็จะเกิดพลังงานกระตุ้น ส่งผลให้ธาตุผสมเกิดการเคลื่อนที่ของอะตอมแบบภายในเนื้อวัสดุ การละลายของเฟสทำให้ธาตุผสมเกิดการแทรกตัวผสมในเนื้อวัสดุอะลูมิเนียมหลัก (Aluminium Matrix) และเฟสยูเทกติกบางส่วนที่อยู่ใกล้รอยต่อจะแพร่ไปยังอีกเกรด นอกจากนั้นเฟสสังกะสีเป็นเฟสที่มีความเข้มข้นสูง เนื่องจากเป็นตัวประสานระหว่างชิ้นงานทั้งสองชิ้น ส่งผลให้เกิดการแพร่แบบธาตุที่มีความเข้มข้นสูงไปหาบริเวณที่มีความเข้มข้นต่ำของบริเวณอื่นๆ กลไกการเย็นตัวหลังจากการรับอิทธิพลทางความร้อนในการเชื่อมแพร่แบบผ่านเฟสของเหลวจะส่งผลให้โครงสร้างจุลภาคภายในชิ้นงานเกิดการตกตะกอน (Supersaturated) จนเป็นสารประกอบใหม่ขึ้นมา (New Intermetallic compounds) ดังแสดงในภาพที่ 4.12



ภาพที่ 4.12 แสดงโครงสร้างจุลภาคของอุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส เวลา 60 นาที

การเชื่อมด้วยการแพร่แบบผ่านเฟสของเหลวที่เหมาะสมจะส่งผลให้สมบัติทางกลของชิ้นงานมีค่าที่ดีและลดการเกิดจุดบกพร่องจาการเชื่อมได้ นอกจากนั้นยังส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาคในทางที่ดีด้วย ตัวอย่างเช่น ภาพที่ 4.13 แสดงโครงสร้างจุลภาคของอุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เวลา 60 นาที พบว่าบริเวณรอยต่อของชิ้นงานเชื่อมรอยต่อสามารถประสานกันได้ดี จนเห็นเส้นรอยต่อได้น้อยมาก โครงสร้างทางจุลภาคบริเวณรอยต่อเกิดการตกตะกอนแบบสมบูรณ์ โดยผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าความร้อนและเวลาทำให้ธาตุผสมเกิดการรวมตัวเป็นสารประกอบใหม่ เฟสยูเทกติกมีการละลายเฟสและกระจายตัวสม่ำเสมอในบริเวณรอยต่อ ซึ่งส่งผลให้ชิ้นงานมีสมบัติทางกลที่ดีขึ้น ในขณะเดียวกันการกระจายตัวที่ดีของเฟสแสดงให้เห็นว่ากลไกการแพร่ผ่านเฟสของเหลวมีความเหมาะสม โดยสังกะสีมีจุดหลอมเหลวที่ต่ำกว่าอะลูมิเนียมและสัมประสิทธิ์การแพร่ที่ดีด้วยส่งผลให้กลไกการแพร่บริเวณรอยต่อเกิดการแพร่ได้รวดเร็วกว่าการแพร่แบบปกติ ที่อาศัยการแพร่จากการเกิดพลังงานกระตุ้นจากความร้อนในการเชื่อม จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่ากลไกการแพร่ที่สมบูรณ์มาจากตัวแปรต่างๆ ที่ได้จากการทดลอง ซึ่งเป็นปัจจัยที่ควบคุมได้และไม่สามารถควบคุมได้ในบางตัวแปร อย่างไรก็ตามการเชื่อมชิ้นงานต่างวัสดุ โดยใช้สังกะสี เกรด ZA 27 เป็นตัวประสานมีผลการทดลองที่ดี โดยแสดงให้เห็นจากโครงสร้างจุลภาค ดังแสดงในภาพที่ 4.13



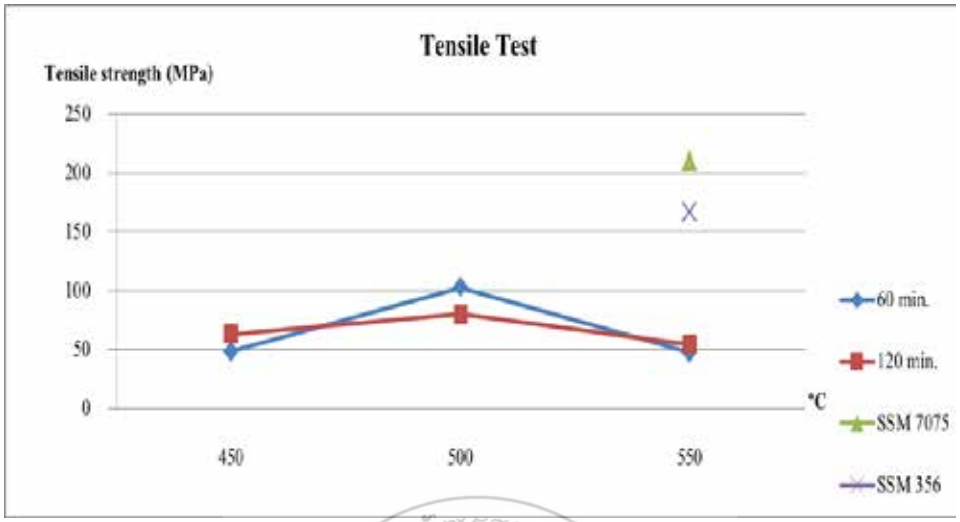
ภาพที่ 4.13 แสดงโครงสร้างจุลภาคของอุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เวลา 60 นาที

4.5 ผลของการทดสอบความแข็งแรงดึง

การทดสอบค่าความแข็งแรงดึงของรอยเชื่อมระหว่างอะลูมิเนียมหล่อกึ่งแข็ง เกรด 356 กับอะลูมิเนียมหล่อกึ่งแข็ง เกรด 7075 โดยมีอะลูมิเนียมผสมสังกะสีเป็นตัวประสาน ให้รอยเชื่อมอยู่ตำแหน่งกลางของชิ้นทดสอบนำไปกัดขึ้นรูปตามมาตรฐาน ASTM A310-10 แบบงานกลมและทดสอบแรงดึงที่อุณหภูมิห้อง เพื่อหาค่าความต้านทานแรงดึง ซึ่งผลการทดสอบค่าความแข็งแรงดึงดังนี้

เมื่อเตรียมชิ้นงานแล้วนำมาทดสอบค่าความต้านทานแรงดึง พบว่าค่าความต้านทานแรงดึงหลังจากการเชื่อมยังมีค่าต่ำกว่าเนื้อโลหะเดิมในทุกการทดลอง เนื่องจากชิ้นงานที่เชื่อมไม่สามารถยึดติดได้เต็มหน้าผิวสัมผัส เพราะชิ้นงานเกิดการเสียรูปก่อนหากมีการปรับเปลี่ยนตัวแปรที่ไม่เหมาะสม เช่น เวลาในการเชื่อมน้อยเกินไป อุณหภูมิในการเชื่อม เป็นต้น ดังนั้นตัวแปรที่เหมาะสมในการเชื่อมจึงมีความสำคัญในการเชื่อมเพื่อรักษาสมบัติทางกลที่ดีและชิ้นงานหลังจากการเชื่อมไม่เกิดความเสียหายจากการเชื่อม โดยที่อุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส เวลาในการเชื่อมที่ 60 นาที เมื่อนำชิ้นงานมาทดสอบค่าความต้านทานแรงดึง พบว่าค่าความต้านทานแรงดึงเฉลี่ยมีค่า 48.30 MPa ซึ่งคิดเป็น 28.92 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุเดิมของอะลูมิเนียมหล่อกึ่งแข็ง เกรด 356 และคิดเป็น 23 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุเดิมของอะลูมิเนียมหล่อกึ่งแข็ง เกรด 7075 ซึ่งเมื่อออกแรงกดที่น้อยในการเชื่อม จะต้องใช้เวลาในการเชื่อมที่นานขึ้น จะเห็นได้จากที่ตัวแปรที่อุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส เวลาในการเชื่อม 120 นาที ได้ค่าความต้านทานแรงดึง 63.25 MPa ซึ่งคิดเป็น 37.87 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุเดิมของอะลูมิเนียมหล่อกึ่งแข็ง เกรด 356 และคิดเป็น 30.12 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุเดิมของอะลูมิเนียมหล่อกึ่งแข็ง เกรด 7075 ตามลำดับ การเพิ่มอุณหภูมิในการเชื่อมที่สูงขึ้นถึง 500 องศาเซลเซียส เวลาที่ใช้เชื่อม 60 นาที พบว่าค่าความต้านทานแรงดึงเฉลี่ยเพิ่มขึ้น โดยมีค่าอยู่ที่ 103.06 MPa คิดเป็น 61.71 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุเดิมของอะลูมิเนียมหล่อกึ่งแข็ง เกรด 356 และคิดเป็น 49.08 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุเดิมของอะลูมิเนียมหล่อกึ่งแข็ง เกรด 7075 แต่ที่อุณหภูมิในการเชื่อมที่ 500 องศาเซลเซียส เวลา 120 นาที ได้ค่าความต้านทานแรงดึง 80.14 MPa ซึ่งคิดเป็น 47.99 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุเดิมของอะลูมิเนียมหล่อกึ่งแข็ง เกรด 356 และคิดเป็น 38.16 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุเดิมของอะลูมิเนียมหล่อกึ่งแข็ง เกรด 7075 การทดลองที่ตัวแปรนี้พบว่ามีค่าความต้านทานแรงดึงเฉลี่ยที่ลดลง เนื่องจากเกิดจุดบกพร่องหลังการเชื่อม ซึ่งเป็นอีกสาเหตุที่ทำให้ค่าความต้านทานแรงดึงของชิ้นงานลดลง คล้ายๆ กันกับการทดลองที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส เวลาในการเชื่อมที่ 60 นาที พบว่าค่าความต้านทานแรงดึงเฉลี่ยเพียง 47.51 MPa ซึ่งคิดเป็น 28.45 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุเดิมของอะลูมิเนียมหล่อกึ่งแข็ง เกรด 356 และคิดเป็น 22.62 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุเดิมของอะลูมิเนียมหล่อกึ่งแข็ง เกรด 7075 ซึ่งเป็นค่าความต้านทานแรงดึงที่น้อยมากที่ได้จากการทดลอง และที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส เวลา 120 นาที ได้ค่าความต้านทานแรงดึงเฉลี่ยที่ 54.32 MPa ซึ่งคิดเป็น 32.53 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุเดิมของอะลูมิเนียมหล่อกึ่งแข็ง เกรด 356 และคิดเป็น 25.87 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุเดิมของอะลูมิเนียมหล่อกึ่งแข็ง เกรด 7075 ตามลำดับ อีกสาเหตุที่ทำให้ค่าความต้านทานแรงดึงลดลง เนื่องจากขณะเชื่อมที่อุณหภูมิและเวลาสูงเริ่มส่งผลให้ชิ้นงานเกิดการเสียรูปของชิ้นงาน ทำใช้ชิ้นงานเกิดการโก่งงอและเกิดการบวมของชิ้นงาน เมื่อได้รับอุณหภูมิที่สูงขึ้นเรื่อยๆ นี้ก็เป็นอีกสาเหตุที่ทำให้สมบัติทางกลด้านความต้านทานแรงดึงลดลง นอกจากนั้นยังมีสาเหตุอื่นๆ ที่ส่งผลต่อความต้านทานแรงดึงที่ต่ำลง เช่น แรง

กด ระนาบของชิ้นงานในการเชื่อม ความสะอาดของผิวรอยต่อของชิ้นงานเชื่อมและสัมประสิทธิ์การแพร่ของวัสดุนั้นๆ ซึ่งปัจจัยเหล่านี้ ล้วนส่งผลต่อสมบัติทางกลของชิ้นงาน ดังแสดงในภาพที่ 4.14

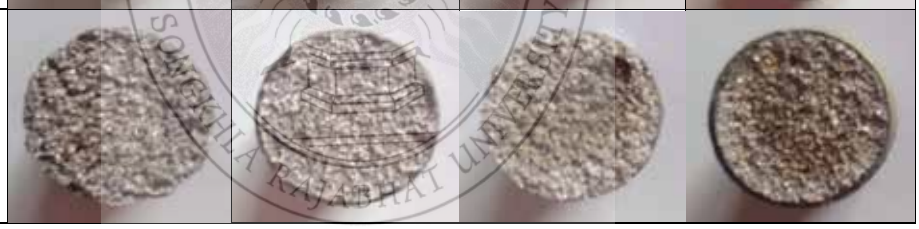


ภาพที่ 4.14 แสดงค่าความต้านทานแรงดึงชิ้นงานหลังการเชื่อมโดยการแพร่

4.6 ลักษณะการขาดของผิวรอยต่อ

ลักษณะการขาดของผิวรอยต่อจะขึ้นกับลักษณะของการยึดติดของผิวงานเชื่อม ชิ้นงานที่มีการยึดติดผิวที่ดีจะได้ร่องลึกเมื่อดูจากลักษณะการขาดที่บริเวณผิวรอยต่อ ส่วนชิ้นงานที่ผิวรอยต่อยึดติดไม่ดีก็จะยังเจอร่องของรอยขัดจากกระดาษทรายและในการยึดติดของผิวรอยต่อที่ดียังส่งผลมาจากการที่ไม่มีจุดบกพร่องหลังจากการเชื่อม ซึ่งสิ่งเหล่านี้มาจากตัวแปรที่ใช้ในการทดลองและในการทดลองที่มีตัวแปรที่เหมาะสมจะนำไปสู่สมบัติทางกลที่ดีของชิ้นงานหลังจากการเชื่อม ที่อุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส เวลา 60 นาที เมื่อดูผิวรอยขาดของชิ้นงานพบว่า อุณหภูมิและเวลาที่น้อยไม่ส่งผลให้ชิ้นงานเกิดการบิดเบี้ยว พื้นที่การยึดติดน้อยเพราะยังเหลือรอยเส้นขัดจากการขัดของกระดาษทราย นอกจากนั้นยังพบจุดบกพร่อง หลังจากการเชื่อมทำให้เกิดการแพร่ที่ไม่สมบูรณ์ ที่อุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส เวลา 120 นาที พื้นที่เริ่มยึดติดจะอยู่บริเวณขอบๆ ของชิ้นงานส่วนตำแหน่งกลางชิ้นงานให้พื้นที่การยึดติดที่น้อยกว่าด้านข้างของชิ้นงาน เมื่อเพิ่มอุณหภูมิและเวลาที่สูงขึ้น พบว่าผิวหน้าที่สัมผัสมีการยึดติดที่ดีขึ้นโดยที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เวลา 60 นาที อันเนื่องมาจากอุณหภูมิและเวลาที่สูงขึ้นทำให้ผิวรอยต่อสัมผัสกันได้ดี ในสภาพการทดลองภายใต้ตัวแปรที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เวลา 120 นาที ไม่พบเส้นรอยขัดจากกระดาษทรายหลังจากการเชื่อมแต่รูปทรงของผิวสัมผัสเกิดการบิดเบี้ยวไปจากเดิม การยึดติดเกิดขึ้นกระจายทั่วทั้งผิวงาน สังเกตได้ว่าบริเวณด้านข้างมีปริมาณการแพร่ที่มากกว่าบริเวณตรงกลางผิวงาน ส่วนบริเวณตรงกลางผิวงานพบจุดบกพร่องเล็กน้อย อย่างไรก็ตาม การเพิ่มอุณหภูมิและเวลาที่สูงขึ้น เห็นได้ชัดเจนว่าเกิดการบิดเบี้ยวจนเสียรูปของผิวรอยต่อ เนื่องมาจากอุณหภูมิและเวลาที่สูงส่งผลให้ชิ้นงานเกิดการบวมตามแรงกดที่กระทำภายใต้อุณหภูมิที่สูง ทำให้มีโอกาสสูงที่ผิวเชื่อมต่อแพร่ได้สมบูรณ์และมีการยึดติดที่สม่ำเสมอกว่าตัวแปรจากการทดลองตัวแปรอื่น แต่เมื่อมองผิวที่แตกหักจากการดึงที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส เวลา 60 นาที แสดงให้เห็นว่ามีการยึดติดของผิวงานที่สูง ตัวแปรทางด้านอุณหภูมิและ

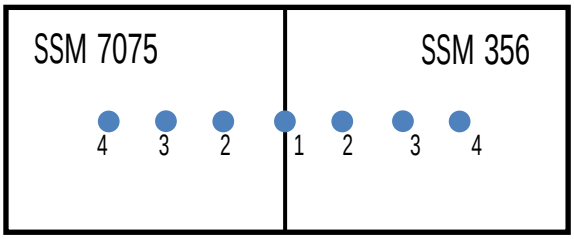
เวลาที่สูงทำให้เกิดช่องว่างระหว่างผิวสัมผัส แต่อุณหภูมิและเวลาที่สูงเกินไปก็ส่งผลให้ชิ้นงานเสียรูปอย่างชัดเจน ชิ้นงานเกิดการบวมจนเห็นได้ชัดเจน บริเวณกลางผิวงานพบจุดบกพร่อง หากอุณหภูมิและเวลาที่สูงเกินไปจะทำให้ชิ้นงานมีผิวสัมผัสที่สูงตามไปด้วยในช่วงแรก ซึ่งเมื่ออุณหภูมิและเวลาสูงย่อมส่งผลให้ต้องใช้พลังงานความร้อนที่สูงตามไปด้วย ที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส เวลา 120 นาที ตัวแปรนี้ทำให้เกิดการสัมผัสระหว่างผิวงานที่สูงที่เกิดขึ้นช่วงแรกของการเชื่อมโดยการแพร่ ภายใต้ตัวแปรในการทดลองนี้ ชิ้นงานพบจุดบกพร่องบริเวณผิวตรงกลางชิ้นงาน แต่ไม่พบรอยขัดจากกระดาษทราย ถึงแม้ว่าอุณหภูมิและเวลาที่เปลี่ยนไปไม่มากก็ตามแต่เมื่ออยู่ในสภาวะภายใต้อุณหภูมิที่สูงทำให้เกิดอัตราการเสียรูปที่เร็วขึ้น ดังแสดงในภาพที่ 4.15

อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	เวลา (นาที)			
	60		120	
	SSM 356	SSM 7075	SSM 356	SSM 7075
450				
500				
550				

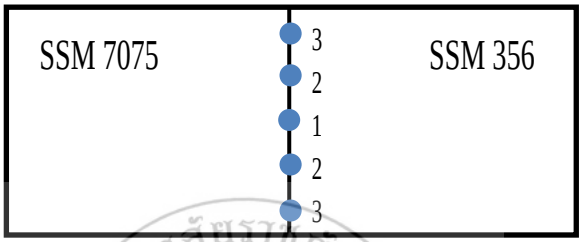
ภาพที่ 4.15 แสดงลักษณะการขาดของผิวรอยต่อ

4.7 ผลของการทดสอบความแข็ง

การทดสอบความแข็งด้วยไมโครวิกเกอร์ โดยการกดบริเวณแนวตามยาวของชิ้นงาน ดังแสดงในภาพที่ 4.16 และการบริเวณแนวตามขวางของชิ้นงาน ดังแสดงในภาพที่ 4.17 ของรอยต่อระหว่างอะลูมิเนียมหล่อกึ่งแข็ง เกรด 7075 กับอะลูมิเนียมหล่อกึ่งแข็ง เกรด 356 ซึ่งถูกตัดขวางตั้งฉากกับแนวเชื่อม ขัดให้ผิวเรียบ โดยใช้แรงกด 100 กรัม เป็นเวลา 10 วินาที ของรอยต่อและบริเวณใกล้เคียง โดยรอยกดมีระยะห่างประมาณ 2 มิลลิเมตร ที่อุณหภูมิในการเชื่อม 450, 500 และ 550 องศาเซลเซียส ที่เวลาในการเชื่อม 60 และ 120 นาที



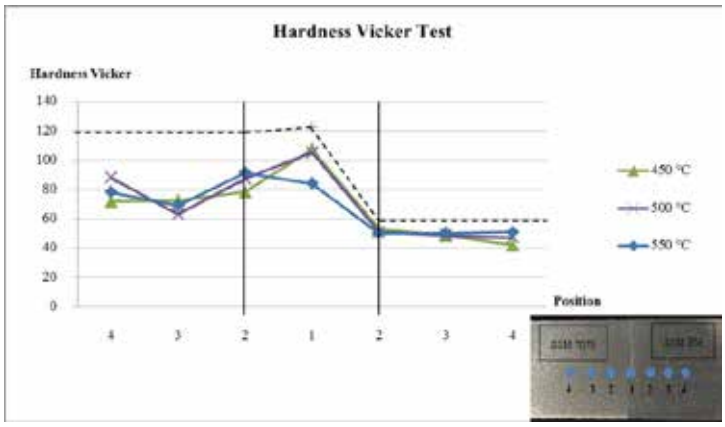
ภาพที่ 4.16 แสดงบริเวณการกดวัดค่าความแข็งด้วยไมโครวิกเกอร์ (ตามแนวยาวชิ้นงาน)



ภาพที่ 4.17 แสดงบริเวณการกดวัดค่าความแข็งด้วยไมโครวิกเกอร์ (ตามแนวขวางชิ้นงาน)

4.6.1 ความแข็งของชิ้นงานที่เวลา 60 นาที (ตามแนวยาวชิ้นงาน)

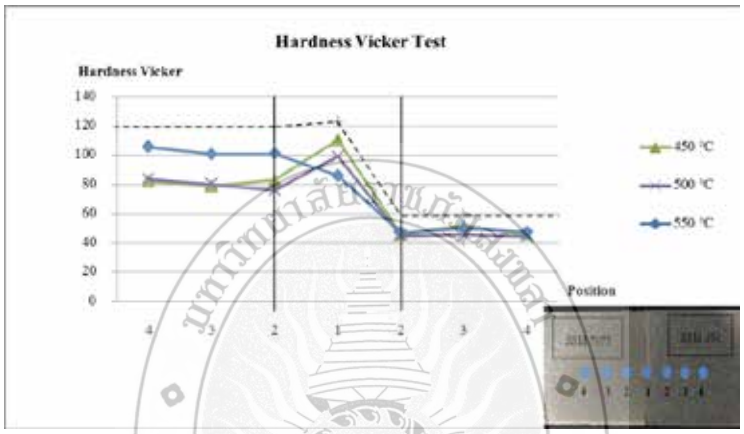
ผลของการทดสอบความแข็งของบริเวณแนวตามยาวของชิ้นงาน หลังกระบวนการเชื่อมโดยการแพร่ จากการทดลองที่อุณหภูมิ 450, 500 และ 550 องศาเซลเซียส เวลาในการเชื่อมที่ 60 นาที พบว่าค่าความแข็งเนื้อโลหะเดิมของอะลูมิเนียมหล่อกึ่งแข็ง เกรด 7075 ตำแหน่งที่ 2, 3 และ 4 ของแต่ละอุณหภูมิมีความแปรปรวนไม่แตกต่างกัน เฉลี่ย 79.41 HV แต่มีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นเมื่อเข้าสู่บริเวณรอยต่อระหว่างอะลูมิเนียมทั้งสอง ตำแหน่งที่ 1 ส่วนบริเวณด้านอะลูมิเนียมหล่อกึ่งแข็ง เกรด 356 ตำแหน่งที่ 2, 3 และ 4 ค่าความแข็งมีความแปรปรวนน้อยกว่าด้านอะลูมิเนียมหล่อกึ่งแข็ง เกรด 7075 เฉลี่ย 46.83 HV และค่าความแข็งจะเพิ่มขึ้นเมื่อเข้าสู่บริเวณรอยต่อระหว่างอะลูมิเนียมทั้งสอง ตำแหน่งที่ 1 ดังนั้นบริเวณที่มีความแปรปรวนสูง ค่าความแข็งก็จะสูง ดังแสดงในภาพที่ 4.18



ภาพที่ 4.18 แสดงผลการทดสอบความแข็งแนวตามยาวชิ้นงาน ที่เวลา 60 นาที

4.6.2 ความแข็งของชิ้นงานที่เวลา 120 นาที (ตามแนวยาวชิ้นงาน)

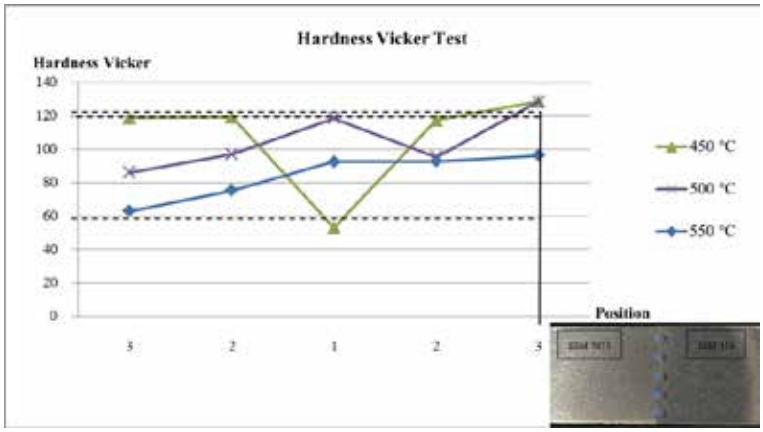
ผลของการทดสอบความแข็งของบริเวณแนวตามยาวของชิ้นงาน หลังกระบวนการเชื่อม จากการทดลองที่อุณหภูมิ 450, 500 และ 550 องศาเซลเซียส เวลา 120 นาที พบว่าค่าความแข็งบริเวณเนื้อโลหะเดิมด้านอะลูมิเนียมหล่อกึ่งแข็ง เกรด 7075 ตำแหน่งที่ 2, 3 และ 4 มีความแปรปรวนแตกต่างกัน เฉลี่ย 90.47 HV ส่วนบริเวณเนื้อโลหะเดิมด้านอะลูมิเนียมหล่อกึ่งแข็ง เกรด 356 ตำแหน่งที่ 2, 3 และ 4 ค่าความแข็งของแต่ละอุณหภูมิมีความแปรปรวนน้อยเฉลี่ย 45.83 HV จะสังเกตเห็นว่า ที่ตำแหน่งที่ 1 จะมีความแข็งใกล้เคียงกับเนื้อโลหะเดิมด้านอะลูมิเนียมหล่อกึ่งแข็ง เกรด 7075 อย่างไรก็ตามบริเวณเนื้อเชื่อมและเขตอิทธิพลความร้อนสูงกว่าบริเวณเนื้อโลหะเดิม ดังแสดงในภาพที่ 4.19



ภาพที่ 4.19 แสดงผลการทดสอบความแข็งแนวตามยาวชิ้นงาน ที่เวลา 120 นาที

4.6.3 ความแข็งของชิ้นงานที่เวลา 60 นาที (ตามแนวขวางชิ้นงาน)

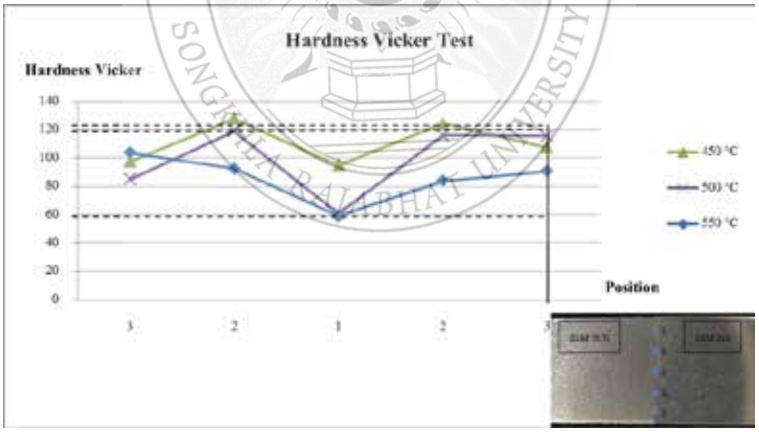
ผลของการทดสอบความแข็งของบริเวณแนวตามขวางของชิ้นงาน หลังกระบวนการเชื่อม จากการทดลองที่อุณหภูมิ 450, 500 และ 550 องศาเซลเซียส ในเวลา 60 นาที พบว่าที่อุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส ในตำแหน่งที่ 2 และ 3 จะมีค่าความแข็งไม่แตกต่างกันมาก เฉลี่ย 121.12 HV แต่ตำแหน่งที่ 1 จะมีค่าความแข็งแตกต่างจากตำแหน่งอื่นมาก เกิดจากอิทธิพลของอุณหภูมิและเวลาในการเชื่อมต่ำ เพราะหลักในการแพร่จะแพร่จากขอบชิ้นงานไปยังจุดกึ่งกลางของชิ้นงาน จึงทำให้ความร้อนแพร่เข้าถึงตำแหน่งที่ 1 ได้ยาก เป็นสาเหตุให้เกิดการแพร่ของอะตอมได้ยากเช่นกัน แต่ที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส และ 550 องศาเซลเซียส ที่ตำแหน่ง 1, 2, และ 3 มีค่าความแข็งแปรปรวนไม่แตกต่างกันมากนัก เฉลี่ย 94.75 HV เนื่องจากอุณหภูมิและเวลาในการแพร่มากพอที่จะแพร่เข้าสู่ตำแหน่งที่ 3 ได้ ดังแสดงในภาพที่ 4.20



ภาพที่ 4.20 แสดงผลการทดสอบความแข็งแนวตามขวางชิ้นงาน ที่เวลา 60 นาที

4.6.4 ความแข็งของชิ้นงานที่เวลา 120 นาที (ตามแนวขวางชิ้นงาน)

ผลของการทดสอบความแข็งของบริเวณแนวตามขวางของชิ้นงาน หลังกระบวนการเชื่อม จากการทดลองที่อุณหภูมิ 450, 500 และ 550 องศาเซลเซียส ในเวลา 120 นาที พบว่าค่าความแข็งบริเวณตำแหน่งที่ 2 และ 3 เฉลี่ยมีค่าเท่ากับ 105.28 HV แต่ตำแหน่งที่ 1 จะมีค่าความแข็งแตกต่างจากตำแหน่งอื่นมาก เฉลี่ยมีค่าเท่ากับ 71.57 HV เพราะในการแพร่จะแพร่จากขอบชิ้นงาน จึงทำให้อิทธิพลในการแพร่เข้าถึงตำแหน่งที่ 1 ได้น้อย ทำให้บริเวณดังกล่าวได้รับอิทธิพลทางความร้อนที่น้อย ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างได้น้อย นำไปสู่การเปลี่ยนแปลงของความแข็งได้น้อยเช่นกัน ดังแสดงในภาพที่ 4.21



ภาพที่ 4.21 แสดงผลการทดสอบความแข็งแนวตามขวางชิ้นงาน ที่เวลา 120 นาที

บทที่ 5

สรุปผลการทดลอง

งานวิจัยนี้ได้วิจัยศึกษาสมบัติทางกลและโครงสร้างโลหะวิทยาของรอยต่อระหว่างวัสดุอะลูมิเนียมหล่อกึ่งแข็ง เกรด 356 กับอะลูมิเนียมหล่อกึ่งของแข็ง เกรด 7075 โดยใช้สังกะสีผสมอะลูมิเนียม ZA 27 เป็นตัวประสาน ซึ่งในบทนี้จะกล่าวถึงวิธีการสรุปผลการทดลอง ซึ่งผลการทดลองทั้งหมดสามารถสรุปได้ดังนี้

5.1 สรุป

การเชื่อมโดยการแพร่ระหว่างอะลูมิเนียมหล่อกึ่งแข็ง เกรด 356 กับอะลูมิเนียมหล่อกึ่งแข็ง เกรด 7075 โดยใช้อะลูมิเนียมผสมสังกะสี ZA 27 เป็นตัวประสานแสดงผลการทดลองมีแนวโน้มในทางที่ดี ซึ่งความร้อนและเวลาในการเชื่อมเป็นตัวแปรสำคัญที่เป็นพลังงานกระตุ้นของการแพร่อะตอมทำให้เฟสก้อนกลมมีการตกตะกอนของเฟส Mg_2Si และเฟส $MgZn_2$ รอบๆ ขอบเกรน และอิทธิพลทางความร้อนในการเชื่อมแพร่แบบผ่านเฟสของเหลวจะส่งผลให้โครงสร้างจุลภาคภายในชิ้นงานเกิดการตกตะกอนจนเป็นสารประกอบใหม่ขึ้นมา ทำให้สมบัติทางกลของชิ้นงานเปลี่ยนแปลง โดยค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุดเฉลี่ยมีค่าอยู่ที่ 103.06 MPa จากตัวแปรอุณหภูมิในการเชื่อมที่ 500 องศาเซลเซียส เวลาที่ใช้เชื่อม 60 นาที ในทางตรงกันข้ามอุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส เวลาในการเชื่อมที่ 60 นาที พบว่าค่าความต้านทานแรงดึงเฉลี่ยน้องสุด มีค่าเฉลี่ยที่ 47.51 MPa และผลของการทดสอบความแข็งของบริเวณแนวตามยาวของชิ้นงานแสดงให้เห็นว่าอิทธิพลความร้อนส่งผลให้ค่าความแข็งของชิ้นงานเพิ่มขึ้นจากความแข็งเดิมของเนื้อโลหะ ในทำนองเดียวกันผลของการทดสอบความแข็งของบริเวณแนวตามขวางของชิ้นงาน ก็มีผลการทดลองไปในทิศทางเดียวกัน แต่ความร้อนแพร่เข้าไปในบริเวณรอยต่อของชิ้นงานได้ยากจึงทำให้ค่าความแข็งเพิ่มขึ้นไม่มากนัก นอกจากนั้นพบว่าลักษณะการเสียรูปจะเป็นแบบการบวมเกิดจากการเชื่อมแพร่ผ่านเฟสของเหลวที่อุณหภูมิสูงเกินไป แต่การเกิดการโก่งงอจากการเชื่อมเกิดจากแรงกดชิ้นงานและเวลาที่นานเกินไป

บรรณานุกรม

[1] ไพบูลย์หาญมนต์. (2552). การศึกษาอิทธิพลความร้อนในงานเชื่อมที่มีผลต่อการหลอมลึก ความกว้าง ความสูงและบริเวณกระทบร้อน ของแนวเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิม โดยกระบวนการเชื่อมมิก สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล.

[2] การแพร่ในของแข็ง: http://eng.sut.ac.th/metal/images/stories/Diffusion_book.pdf (วันที่ค้นข้อมูล: 2 มกราคม 2560)

[3] Hong min, G., Xiang jie, Y.,Jia xuan, W., Bin, H.Guang lei, Z. (2010). Effect of rheoforming on microstructures and mechanical properties of 7075 wrounght aluminum alloy, Trans Nonferrous Met. Soc, Vol. 20, PP. 355–356.

[4] Linert, T.J. and other. (2005) .Friction Stir Welding Studies on Mild Steel, Welding Journal. Vol. 83, 2003, pp. 1S-9S.

[5] เดช เหมือนขาว, ยงยุทธ ดุลยกุล และชัยยุทธ มีงาม. (2556). ปัจจัยที่มีผลต่อความแข็งแรงของรอยเชื่อมสำหรับเหล็กกล้าคาร์บอนโดยกระบวนการเชื่อมแพร่. สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย สงขลา สาขาวิชาวิศวกรรมการจัดการ โปรแกรมวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏสงขลา

[6] นิธิ บุรณจันทร์, กษิตติ์ทิพยมนตรี, ปิยฉัตร บูรวัฒน์, พงษ์ศักดิ์ หล่อพิทักษ์ และศุภสิทธิ์ สมสาย (2543). การศึกษาความเป็นไปได้ของกระบวนการเชื่อมแบบแพร่ การประชุมวิชาการข่ายงานวิศวกรรมอุตสาหการ, 2-3 พฤศจิกายน 2543, โรงแรมโกลเด้นแซนด์ส, ชะอำ, จ. เพชรบุรี, หน้า 468-475.

[7] ชัยยุทธ มีงาม (2555) การเชื่อมอะลูมิเนียมผสมหล่อกึ่งของแข็งโดยการแพร่ สาขาวิชาวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์.มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.

[8] เจษฎา วรรณสินธุ์ และคณะ (2549) เทคโนโลยีการหล่ออะลูมิเนียมไดคาสติงแบบกึ่งของแข็ง การประชุมวิชาการงานหล่อไทย ครั้งที่ 3. สงขลา, ประเทศไทย, 1-12.

[9] อับดุล บินระหีม และประภาศ เมืองจันทร์บุรี (2551) ศึกษาสมบัติทางโลหะวิทยา และทางกลของการเชื่อมอะลูมิเนียม A356 ซึ่งหล่อโดยเทคโนโลยี การหล่อกึ่งของแข็ง ด้วยกรรมวิธีการเชื่อมเสียดทานแบบกวน.การประชุมวิชาการข่ายงานวิศวกรรมอุตสาหการ สงขลา, ประเทศไทย หน้า 1111-1116.

[10] Zuruzi A.S., Li H. Dong, G. (1999). Effects of surface roughness on the diffusion bonding of Al alloy 6061 in air. Materials Science and Engineering A270. pp. 244–248.

[11] Sunwoo, A. Lum, R. (1995). Superplastic Deformation Enhanced Diffusion Bonding of Aluminum alloy 7475. Volume 33, No 4, pp. 639-644.

[12] Huibin, X., Jiuchun, Y.Zhiwu, X. (2006). Interface structure changes during vibration liquid phase bonding of SiCp/A356 composites in air. Composites: Part A 37. pp. 1458–1463.

บรรณานุกรม (ต่อ)

[13]Urena, A.&Gomez De Salazar, J.M. (1993). Bonding of aluminium matrix composites for application in the transport industry. Journal de Physique 111, Volume 3, pp. 1037-1042.

[14]Huang, Y. and other. (1999). Diffusion bonding of superplastic 7075 aluminium alloy.

[15] Smith, W. Hashemi, J. (1992). Foundations of Materials Science and Engineering 4 edition. 40/27 ซอยอินทามาระ 8 ถนนสุทธิสาร พญาไท กรุงเทพฯ 10400.

[16] หลักการและกรรมวิธีการเชื่อมในสถานะของแข็ง [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก: http://www.pressuretechnology.com/hip-applications-cladding.php (วันที่ค้นข้อมูล: 10 พฤษภาคม 2559)

[17] แม้น อมรสิทธิ์ และสมชัย อัครทิวา. (2554). วัสดุวิศวกรรม. McGraw-Hil, กรุงเทพมหานคร.

[18] The Webpage Assisted Instruction for Aluminum (2000). อะลูมิเนียม ซิลิกอน แมกนีเซียมหล่อผสม (Aluminium-Silicon-Magnesium casting) คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี. pp. 1-5

[19] มนัส สถิรจินดา. (2536) โลหะนอกกลุ่มเหล็ก. พิมพ์ครั้งที่ 1.กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

[20] มณฑล ฉายอรุณ. (2537) วัสดุอุตสาหกรรม กรุงเทพฯ: โรงพิมพ์เจริญธรรม 93-95 ถนนมหรรณพ เสาชิงช้า. สถาบันเทคโนโลยีราชมงคล.

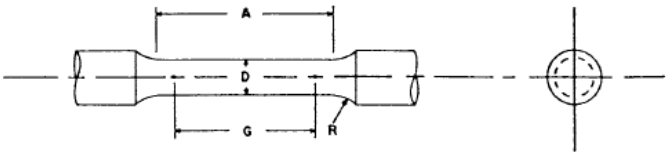
[21] มานพ ตันตระบัณฑิตย์. (2537). งานทดสอบวัสดุอุตสาหกรรม.พิมพ์ครั้งที่ 3 กรุงเทพฯ: บริษัทดวงกมลสมัย จำกัด. 90/21-25 ถนนราชปรารภ มักกะสัน เขตราชเทวี. สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น).

[22] Donald R. Askeland, Pradeep P.Phule. (1992). The Science and Engineering of Materials.เซนเกจเลินนิ่ง (ประเทศไทย) จำกัด 408/32 ตึกพหลโยธินเพลส พญาไท กรุงเทพฯ 10400.

ภาคผนวก ก
(มาตรฐานการทดสอบแรงดึง)

มหาวิทยาลัยราชภัฏสงขลา
SONGKHLA RAJABHAT UNIVERSITY

A370 – 10



DIMENSIONS

Nominal Diameter	Standard Specimen		Small-Size Specimens Proportional to Standard							
	in.	mm	in.	mm	in.	mm	in.	mm	in.	mm
	0.500	12.5	0.350	8.75	0.250	6.25	0.160	4.00	0.113	2.50
G—Gauge length	2.00± 0.005	50.0 ± 0.10	1.400± 0.005	35.0 ± 0.10	1.000± 0.005	25.0 ± 0.10	0.640± 0.005	16.0 ± 0.10	0.450± 0.005	10.0 ± 0.10
D—Diameter (Note 1)	0.500± 0.010	12.5± 0.25	0.350± 0.007	8.75 ± 0.18	0.250± 0.005	6.25 ± 0.12	0.160± 0.003	4.00 ± 0.08	0.113± 0.002	2.50 ± 0.05
R—Radius of fillet, min	3/8	10	1/4	6	3/16	5	5/32	4	3/32	2
A—Length of reduced section, min (Note 2)	2 1/4	60	1 3/4	45	1 1/4	32	3/4	20	5/8	16

ภาพที่ ก.1 แสดงมาตรฐานการทดสอบแรงดึง ตามมาตรฐาน ASTM A310–10

NOTE 1-The reduced section may have a gradual taper from the ends toward the center, with the ends not more than 1 percent larger in diameter than the center (controlling dimension).

NOTE 2-If desired, the length of the reduced section may be increased to accommodate an extensometer of any convenient gauge length. Reference marks for the measurement of elongation should, nevertheless, be spaced at the indicated gauge length.

NOTE 3-The gauge length and fillets shall be as shown, but the ends may be of any form to fit the holders of the testing machine in such a way that the load shall be axial (see Fig. 9). If the ends are to be held in wedge grips it is desirable, if possible, to make the length of the grip section great enough to allow the specimen to extend into the grips a distance equal to two thirds or more of the length of the grips.

NOTE 4-On the round specimens in Fig. 5 and Fig. 6, the gauge lengths are equal to four times the nominal diameter. In some product specifications other specimens may be provided for, but unless the 4-to-1 ratio is maintained within dimensional tolerances, the elongation values may not be comparable with those obtained from the standard test specimen.

NOTE 5-The use of specimens smaller than 0.250-in. (6.25-mm) diameter shall be restricted to cases when the material to be tested is of insufficient size to obtain larger specimens or when all parties agree to their use for acceptance testing. Smaller specimens require suitable equipment and greater skill in both machining and testing.

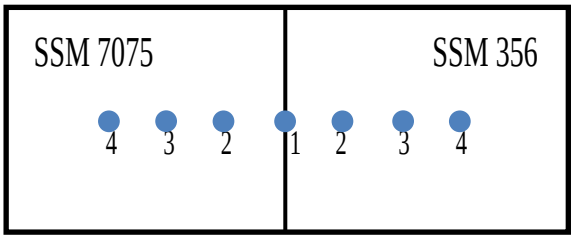
NOTE 6-Five sizes of specimens often used have diameters of approximately 0.505, 0.357, 0.252, 0.160, and 0.113 in., the reason being to permit easy calculations of stress from loads, since the corresponding cross sectional areas are equal or close to

0.200, 0.100, 0.0500, 0.0200, and 0.0100 in.2, respectively. Thus, when the actual diameters agree with these values, the stresses (or strengths) may be computed using the simple multiplying factors 5, 10, 20, 50, and 100, respectively. (The metric equivalents of these fixed diameters do not result in correspondingly convenient cross sectional area and multiplying factors.)

มหาวิทยาลัยราชภัฏสงขลา
SONGKHLA RAJABHAT UNIVERSITY

ภาคผนวก ข
(ผลการทดสอบความแข็ง)

มหาวิทยาลัยราชภัฏสงขลา
SONGKHLA RAJABHAT UNIVERSITY



ภาพที่ ข.1 บริเวณการกดวัดค่าความแข็งด้วยไมโครวิกเกอร์ แนวตามยาวชิ้นงาน

ตารางที่ ข.1 ค่าความแข็งที่วัดด้วยไมโครวิกเกอร์ แนวตามยาวชิ้นงานที่อุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส เวลา 60 นาที

	ตำแหน่ง	ครั้งที่	D_1	D_2	ค่าความแข็ง	ค่าเฉลี่ย
อะลูมิเนียมกึ่งแข็ง เกรด 7075	4	1	50.27	50.87	72.5	72.05
		2	50.54	51.24	71.6	
	3	1	49.90	51.12	72.6	72.70
		2	49.60	51.32	72.8	
	2	1	49.30	47.85	78.5	78.40
		2	49.15	48.15	78.3	
รอยต่อ	1	1	58.70	59.44	53.1	53.25
		2	58.75	59.04	53.4	
อะลูมิเนียมกึ่งแข็ง เกรด 356	2	1	61.10	57.05	53.1	53.05
		2	61.16	57.13	53.0	
	3	1	62.27	61.65	48.3	48.55
		2	61.59	61.62	48.8	
	4	1	66.05	66.32	42.3	42.10
		2	66.00	66.91	41.9	

ตารางที่ ข.2 ค่าความแข็งที่วัดด้วยไมโครวิกเกอร์ แนวตามยาวชิ้นงานที่อุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส เวลา 120 นาที

	ตำแหน่ง	ครั้งที่	D_1	D_2	ค่าความแข็ง	ค่าเฉลี่ย
อะลูมิเนียมกึ่งแข็ง เกรด 7075	4	1	47.69	47.01	87.2	84.45
		2	48.05	47.19	81.7	
	3	1	47.87	49.09	78.9	78.90
		2	47.67	49.27	78.9	
	2	1	47.11	47.56	82.7	83.00
		2	46.88	47.45	83.3	
รอยต่อ	1	1	44.46	44.18	94.4	94.80
		2	44.38	43.88	95.2	
อะลูมิเนียมกึ่งแข็ง เกรด 356	2	1	62.80	64.23	45.9	45.85
		2	62.89	64.29	45.8	
	3	1	59.75	59.78	51.9	51.75
		2	60.00	59.78	51.6	
	4	1	62.45	64.94	45.7	45.60
		2	62.95	64.63	45.5	

SONGKHLA RAJABHAT UNIVERSITY

ตารางที่ ข.3 ค่าความแข็งที่วัดด้วยไมโครวิกเกอร์ แนวตามยาวชิ้นงานที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เวลา 60 นาที

	ตำแหน่ง	ครั้งที่	D_1	D_2	ค่าความแข็ง	ค่าเฉลี่ย
อะลูมิเนียมกึ่งแข็ง เกรด 7075	4	1	45.40	46.22	88.3	88.05
		2	45.83	46.07	87.8	
	3	1	54.17	53.85	63.5	63.30
		2	54.58	53.76	63.1	
	2	1	46.05	45.98	87.5	87.40
		2	46.07	46.07	87.3	
รอยต่อ	1	1	39.95	39.08	118.7	118.70
		2	39.86	39.16	118.7	
อะลูมิเนียมกึ่งแข็ง เกรด 356	2	1	61.14	59.32	51.1	51.05
		2	61.09	59.45	51.0	
	3	1	61.91	60.96	49.1	48.90
		2	62.34	61.01	48.7	
	4	1	62.78	62.43	47.3	47.40
		2	62.73	62.17	47.5	

SONGKHLA RAJABHAT UNIVERSITY

ตารางที่ ข.4 ค่าความแข็งที่วัดด้วยไมโครวิกเกอร์ แนวตามยาวชิ้นงานที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เวลา 120 นาที

	ตำแหน่ง	ครั้งที่	D_1	D_2	ค่าความแข็ง	ค่าเฉลี่ย
อะลูมิเนียมกึ่งแข็ง เกรด 7075	4	1	47.07	47.07	83.6	83.60
		2	47.22	46.94	83.6	
	3	1	47.77	48.07	80.7	80.25
		2	47.98	48.49	79.8	
	2	1	50.01	48.88	75.8	76.05
		2	49.82	48.75	76.3	
รอยต่อ	1	1	55.16	55.22	60.8	60.85
		2	55.19	55.10	60.9	
อะลูมิเนียมกึ่งแข็ง เกรด 356	2	1	65.20	63.30	44.9	45.00
		2	65.02	63.09	45.1	
	3	1	63.63	63.61	45.8	45.70
		2	63.60	63.92	45.6	
	4	1	64.14	64.64	44.7	44.60
		2	64.44	64.66	44.5	

SONGKHLA RAJABHAT UNIVERSITY

ตารางที่ ข.5 ค่าความแข็งที่วัดด้วยไมโครวิกเกอร์ แนวตามยาวชิ้นงานที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส เวลา 60 นาที

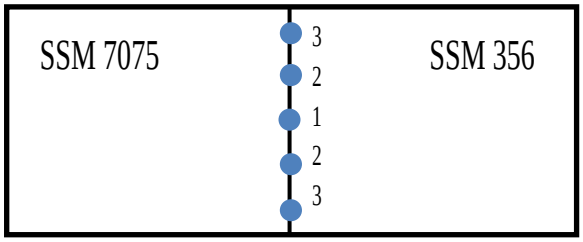
	ตำแหน่ง	ครั้งที่	D_1	D_2	ค่าความแข็ง	ค่าเฉลี่ย
อะลูมิเนียมกึ่งแข็ง เกรด 7075	4	1	48.15	48.96	78.6	78.15
		2	48.69	48.99	77.7	
	3	1	51.13	52.28	69.3	69.25
		2	51.25	52.22	69.2	
	2	1	44.89	45.09	91.6	91.55
		2	44.89	45.10	91.5	
รอยต่อ	1	1	45.02	44.32	92.9	92.70
		2	45.04	44.48	92.5	
อะลูมิเนียมกึ่งแข็ง เกรด 356	2	1	60.70	60.83	50.2	50.40
		2	60.38	60.63	50.6	
	3	1	59.68	61.75	50.3	50.40
		2	59.22	61.94	50.5	
	4	1	59.78	61.03	50.8	51.00
		2	59.76	60.57	51.2	

SONGKHLA RAJABHAT UNIVERSITY

ตารางที่ ข.6 ค่าความแข็งที่วัดด้วยไมโครวิกเกอร์ แนวตามยาวชิ้นงานที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส เวลา 120 นาที

	ตำแหน่ง	ครั้งที่	D_1	D_2	ค่าความแข็ง	ค่าเฉลี่ย
อะลูมิเนียมกึ่งแข็ง เกรด 7075	4	1	41.91	41.98	105.4	105.80
		2	41.78	41.78	106.2	
	3	1	43.14	42.71	100.6	100.75
		2	43.03	42.67	100.9	
	2	1	42.53	43.03	101.3	101.10
		2	42.66	43.04	100.9	
รอยต่อ	1	1	56.12	55.95	59.0	59.05
		2	56.21	55.76	59.1	
อะลูมิเนียมกึ่งแข็ง เกรด 356	2	1	62.47	63.57	46.6	47.10
		2	61.37	63.41	47.6	
	3	1	58.74	63.04	50.0	50.10
		2	58.80	62.70	50.2	
	4	1	63.81	61.40	47.3	47.30
		2	64.15	61.05	47.3	

SONGKHLA RAJABHAT UNIVERSITY



ภาพที่ ข.2 บริเวณการกดวัดค่าความแข็งด้วยไมโครวิกเกอร์ แนวตามขวางชิ้นงาน

ตารางที่ ข.7 ค่าความแข็งที่วัดด้วยไมโครวิกเกอร์ แนวตามขวางชิ้นงานที่อุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส เวลา 60 นาที

ตำแหน่ง	ครั้งที่	D_1	D_2	ค่าความแข็ง	ค่าเฉลี่ย
3	1	39.19	39.86	118.7	118.90
	2	39.06	39.83	119.1	
2	1	39.39	39.55	119.0	119.05
	2	39.06	39.83	119.1	
1	1	58.70	59.44	53.1	53.25
	2	58.75	59.04	53.4	
2	1	39.89	39.90	116.5	117.60
	2	39.96	39.07	118.7	
3	1	37.64	38.13	129.2	128.60
	2	37.67	38.44	128.0	

ตารางที่ ข.8 ค่าความแข็งที่วัดด้วยไมโครวิกเกอร์ แนวตามขวางชิ้นงานที่อุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส เวลา 120 นาที

ตำแหน่ง	ครั้งที่	D_1	D_2	ค่าความแข็ง	ค่าเฉลี่ย
3	1	45.10	42.33	97.0	97.50
	2	44.47	42.51	98.0	
2	1	38.16	37.75	128.7	127.90
	2	38.44	37.94	127.1	
1	1	44.46	44.18	94.4	94.80
	2	44.38	43.88	95.2	
2	1	39.02	38.07	124.8	124.30
	2	39.23	38.17	123.8	
3	1	41.61	41.23	108.0	107.35
	2	42.07	41.27	106.7	

ตารางที่ ข.9 ค่าความแข็งที่วัดด้วยไมโครวิกเกอร์ แนวตามขวางชิ้นงาน ที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เวลา 60 นาที

ตำแหน่ง	ครั้งที่	D_1	D_2	ค่าความแข็ง	ค่าเฉลี่ย
3	1	46.65	46.09	86.2	86.35
	2	46.73	45.84	86.5	
2	1	43.65	43.68	97.2	97.25
	2	43.69	43.60	97.3	
1	1	39.95	39.08	118.7	118.70
	2	39.86	39.16	118.7	
2	1	45.49	42.57	95.6	95.60
	2	45.74	42.34	95.6	
3	1	37.93	38.18	128.0	128.60
	2	37.88	37.88	129.2	

ตารางที่ ข.10 ค่าความแข็งที่วัดด้วยไมโครวิกเกอร์ แนวตามขวางชิ้นงาน ที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เวลา 120 นาที

ตำแหน่ง	ครั้งที่	D_1	D_2	ค่าความแข็ง	ค่าเฉลี่ย
3	1	47.04	46.26	85.2	84.90
	2	47.30	46.30	84.6	
2	1	39.46	39.69	118.4	118.90
	2	39.44	39.37	119.4	
1	1	55.16	55.22	60.8	60.85
	2	55.19	55.10	60.9	
2	1	40.86	39.10	116.0	116.00
	2	40.69	39.25	116.0	
3	1	40.64	39.65	115.0	115.50
	2	40.64	39.30	116.0	

ตารางที่ ข.11 ค่าความแข็งที่วัดด้วยไมโครวิกเกอร์ แนวตามขวางชิ้นงาน ที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส เวลา 60 นาที

ตำแหน่ง	ครั้งที่	D_1	D_2	ค่าความแข็ง	ค่าเฉลี่ย
3	1	54.41	53.62	63.5	63.20
	2	54.65	53.88	62.9	
2	1	49.20	49.94	75.4	75.65
	2	49.17	49.65	75.9	
1	1	45.02	44.32	92.9	92.70
	2	45.04	44.48	92.5	
2	1	44.64	44.34	93.6	92.95
	2	44.81	44.81	92.3	
3	1	43.53	44.19	96.3	96.45
	2	43.56	44.05	96.6	

ตารางที่ ข.12 ค่าความแข็งที่วัดด้วยไมโครวิกเกอร์ แนวตามขวางชิ้นงาน ที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส เวลา 120 นาที

ตำแหน่ง	ครั้งที่	D_1	D_2	ค่าความแข็ง	ค่าเฉลี่ย
3	1	41.86	42.57	104.0	103.65
	2	42.54	42.17	103.3	
2	1	44.17	44.75	93.8	92.55
	2	44.71	45.37	91.3	
1	1	56.12	55.95	59.0	59.05
	2	56.21	55.76	59.1	
2	1	46.77	47.21	83.9	84.05
	2	47.04	46.82	84.2	
3	1	45.16	45.26	90.7	90.80
	2	45.11	45.19	90.9	

หมายเหตุ ค่าความแข็งที่วัดด้วยไมโครวิกเกอร์ของอะลูมิเนียมหล่อกึ่งแข็ง เกรด 7075 คือ 119.9 HV

ค่าความแข็งที่วัดด้วยไมโครวิกเกอร์ของอะลูมิเนียมหล่อกึ่งแข็ง เกรด 356 คือ 59.93 HV

ค่าความแข็งที่วัดด้วยไมโครวิกเกอร์ของสังกะสีผสมอะลูมิเนียม คือ 122.48 HV

SONGKHLA RAJABHAT UNIVERSITY

ประวัติผู้ทำวิจัย

หัวหน้าโครงการวิจัย

ชื่อ นายชัยยุทธ มีงาม
เลขที่บัตรประจำตัวประชาชน (13 หลัก) 19099 00044 231
วัน/เดือน/ปีเกิด 12 มกราคม 2528
วุฒิการศึกษา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (ป.โท) สาขาวิชา วิศวกรรมวัสดุ
คณะ เทคโนโลยีอุตสาหกรรม สังกัด โปรแกรมวิชาวิศวกรรมศาสตร์
ตำแหน่ง พนักงานมหาวิทยาลัย
ที่อยู่ที่สามารถติดต่อได้ 110/5 หมู่ที่ 10 ต. น้ำน้อย อ. หาดใหญ่ จ. สงขลา 90110
โทรศัพท์ 083-1715652 E-mail Chaiyoot_thailand@hotmail.co.th

ประสบการณ์ในงานวิจัย

<u>ผลงานวิจัยที่ทำสำเร็จแล้ว</u>

ศิวะ สิทธิพงศ์, **ชัยยุทธ มีงาม** และประภาศ เมืองจันทร์บุรี "การเปรียบเทียบกรรมวิธีการเชื่อมซ่อมเพื่อยืดอายุการใช้งานของเพลาสวิง" วารสารการเชื่อมไทย ฉบับที่ 54 มกราคม-เมษายน 2554, 11-18.

เดช เหมือนขาว ยงยุทธ ดุลยกุล และ**ชัยยุทธ มีงาม** "โครงสร้างจุลภาคและสมบัติทางกลของทองเหลืองโดยกระบวนการเชื่อมแพร่" วารสารวิชาการและวิจัย มทร.พระนคร, ครั้งที่ 5, 499-509.

Chaiyoot Meengam, Muhamad Tehyo, Prapas Muangjunburee and Jessada Wannasin "Dissimilar Materials Joining between SSM356-T6 and AA6061-T651 by Friction Stir Welding" Applied Mechanics and Materials Vol. 372, pp 478-485.

Chaiyoot Meengam, Prapas Muangjunburee, Suppachai Chainarong "Investigation on Mechanical Properties and Microstructure of SSM 356-T6 Aluminium Alloy by Diffusion Bonding" Advanced Materials Research Vols. 881-883, pp 1301-1306.

Kulyuth Boonseng, Chaiyoot Meengam, Suppachai Chainarong, and Prapas Muangjunburee "Microstructure and Hardness of Friction Welded SSM 356 Aluminium Alloy" Advanced Materials Research Vols. 887-888, pp 1273-1279.

Chaiyoot Meengam, Prapas Muangjunburee, Jessada Wannasin "Diffusion Bonding of Semi-Solid (SSM 356) Cast Aluminum Alloy" International Journal of Modern Engineering Research (IJMER) Vols.4 (5), pp 5-11.

Suppachai Chainarong, Prapas Muangjunburee and Chaiyoot Meengam "Friction Welding of SSM356 with SSM7075 Aluminium Alloys" Australian Journal of Basic and Applied Sciences Vols.8 (15), pp 277-284.

Suppachai Chainarong, Chaiyoot Meengam and Kulyuth Boonseng "Effect of Friction Welding on tensile strength of Polymethyl Methacrylate (PMMA) by

Computerized Numerical Control Machine" วารสารวิจัย มข. ปีที่ 20 ฉบับที่ 1 มกราคม – มีนาคม 2558.

Siva Sitthipong, Prawit Towatana, Amnuay Sitticharoenchai, Chaiyoot Meengam. "Life Extension of Propeller Shafts by Hardfacing Welding" Materials Science Forum. Vol. 872, pp 62-66.

Y.DUNYAKUL, C.MEENGAM, D.MAUNKHAW and S.CHAINARONG "Evolution of Diffusion Bonding Parameters on Microstructure and Mechanical Properties of Dissimilar SSM7075 with SSM356 Aluminum Alloy Joints" Engineering Journal, Vol 20 (3) pp.135-144.

ชัยยุทธ มีงาม ศุภชัย ชัยณรงค์ และประภาศ เมืองจันทร์บุรี "อิทธิพลของความเร็วรอบที่ส่งผลต่อสมบัติทางกลของการเชื่อมอะลูมิเนียมต่างชนิด ระหว่าง SSM7075 กับ SSM356 ด้วยการเชื่อมเสียดทาน" วารสารวิชาการและวิจัย มทร.พระนคร ปีที่ 10 ฉบับที่ 1 ปี 2559 หน้า 94-105

Suppachai Chainarong, Siva Sitthipong, Chaiyoot Meengam "Influence of stress to mechanical failure of long tail shaft in the power transmission system on local fishing boat" S NRU Journal of Science and Technology 8 (1) January – April (2016) pp.127-132.

ชัยยุทธ มีงาม และประภาศ เมืองจันทร์บุรี (2555) "การเชื่อมอะลูมิเนียมผสมหล่อกึ่งของแข็งโดยการแพร่" การประชุมวิชาการทางโลหะวิทยาแห่งประเทศไทยครั้งที่ 5 จัดโดยภาควิชาวิศวกรรมวัสดุ มหาวิทยาลัยพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ร่วมกับสถาบันเหล็กและเหล็กกล้าแห่งประเทศไทย (ISIT) และศูนย์เทคโนโลยีและวัสดุแห่งชาติ (MTEC) ณ โรงแรมมิราเคิลแกรนด์ คอนเวอร์ชั่น ระหว่างวันที่ 19-20 มกราคม 2555

เดช เหมือนขาว ยงยุทธ ดุลยกุล และ**ชัยยุทธ มีงาม** (2556) "การศึกษาและออกแบบการผลิตน้ำมันดิบจากขยะพลาสติก" การประชุมวิชาการ การพัฒนาชนบทที่ยั่งยืน 2556 ครั้งที่ 3 ระหว่างวันที่ 9-10 พฤษภาคม 2556.

ศุภชัย ชัยณรงค์ กุลยุทธ บุญเซ่ง **ชัยยุทธ มีงาม** และประภาศ เมืองจันทร์บุรี (2556) "การเชื่อมเสียดทานของอะคริลิคโดยใช้เครื่องจักรกลแบบอัตโนมัติ" การประชุมวิชาการข่ายงานวิศวกรรมอุตสาหการ ประจำปี พ.ศ. 2556, 16-18 ตุลาคม 2556 พัทยา จังหวัดชลบุรี

ยงยุทธ ดุลยกุล ซูไฮดี สนิ เดช เหมือนขาว และ**ชัยยุทธ มีงาม** (2556) "ศึกษาพฤติกรรมทางกลของรอยต่ออลูมิเนียมจากกระบวนการเชื่อมเสียดทานแบบกวนด้วยกระบวนการขึ้นรูปแบบสปินนิง" การประชุมวิชาการทางโลหะวิทยาแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 7 ระหว่างวันที่ 24-25 ตุลาคม 2556.มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

ซูไฮดี สนิ ยงยุทธ ดุลยกุล **ชัยยุทธ มีงาม** (2557) "การศึกษารัศมีของดรอว์บีดที่มีผลต่อการลากขึ้นรูปกล่องสี่เหลี่ยมของวัสดุอลูมิเนียม เกรด Al-1100" การประชุมวิชาการข่ายงานวิศวกรรมอุตสาหการ ประจำปี พ.ศ. 2557, 30-31 ตุลาคม 2557 สุวรรณภูมิ จังหวัดสมุทรปราการ

เดช เหมือนขาว ยงยุทธ ดุลยกุล **ชัยยุทธ มีงาม** "การอัดรีดพลาสติกรีไซเคิลระหว่างโพลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงและโพลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต" การประชุมวิชาการข่ายงานวิศวกรรมอุตสาหการ ประจำปี พ.ศ. 2557, 30-31 ตุลาคม 2557 สุวรรณภูมิ จังหวัดสมุทรปราการ

CHAIYOOT MEENGAM, SUPPACHAI CHAINARONG and KULYUTH BOONSENG "Joining of Semi Solid Metal 7075 Aluminum Alloys with Friction Welding" International Symposium on Hybrid Materials and Processing, (HyMaP 2014) 10-13 November, Busan, Korea, 2014.

<u>ทุนวิจัยที่ดำเนินการแล้ว</u>

ทุนวิจัยคณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม เรื่อง การหาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการอบชุบของอะลูมิเนียม เกรด 356 ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2557

ทุนวิจัยมหาวิทยาลัยราชภัฏสงขลา เรื่อง ศึกษาความเป็นไปได้การเชื่อมเสียดทานอะลูมิเนียมหล่อกึ่งของแข็งด้วยเครื่องกลึงแบบอัตโนมัติ ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2556

ทุนวิจัยมหาวิทยาลัยราชภัฏสงขลา เรื่อง การเชื่อมเสียดทานของอะคริลิคโดยใช้เครื่องจักรกลแบบอัตโนมัติ ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2557

ทุนวิจัยมหาวิทยาลัยราชภัฏสงขลา เรื่อง การเชื่อมแบบเฟสของเหลวของอะลูมิเนียมผสมหล่อกึ่งของแข็ง เกรด SSM7075 ด้วยกรรมวิธีการเชื่อมโดยการแพร่ ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2557

ทุนวิจัยมหาวิทยาลัยราชภัฏสงขลา เรื่อง การเชื่อมต่างวัสดุของอะลูมิเนียม SSM356 กับ SSM6061 โดยกรรมวิธีการเชื่อมเสียดทาน ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2557

ทุนวิจัยมหาวิทยาลัยราชภัฏสงขลา เรื่อง การเชื่อมเสียดทานแบบจุดอะลูมิเนียมหล่อกึ่งของแข็ง SSM 356 ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2558

ทุนวิจัยมหาวิทยาลัยราชภัฏสงขลา เรื่อง อิทธิพลของตัวแปรที่ส่งผลต่ออะลูมิเนียม Al-Zn ด้วยการเชื่อมเสียดทานแบบจุด ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2558

ทุนวิจัยจากงบประมาณแผ่นดิน (วช.) เรื่อง ผลของความขรุขระจากการกลึงปอกผิวเหล็ก AISI 1045 ด้วยเครื่องกลึงอัตโนมัติ ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2557

ทุนวิจัยจากงบประมาณแผ่นดิน (วช.) เรื่อง อิทธิพลของตัวแปรที่ส่งผลต่อความขรุขระของการกลึงปาดผิวเหล็ก AISI 1045 ด้วยเครื่องกลึงอัตโนมัติ ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2557

ทุนวิจัยจากงบประมาณแผ่นดิน (วช.) เรื่อง การเชื่อมเสียดทานอะลูมิเนียมหล่อกึ่งของแข็ง ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2558

ผู้ร่วมโครงการวิจัย

ชื่อ นายศุภชัย ชัยณรงค์

เลขที่บัตรประจำตัวประชาชน (13 หลัก) 19098 00063 170

วัน/เดือน/ปีเกิด 27 ธันวาคม 2527

วุฒิการศึกษา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (ป.โท) สาขาวิชา วิศวกรรมอุตสาหการและระบบ

คณะ เทคโนโลยีอุตสาหกรรม สังกัด โปรแกรมวิชาวิศวกรรมศาสตร์

ตำแหน่ง พนักงานมหาวิทยาลัย

ที่อยู่ที่สามารถติดต่อได้ 733 ถ. เพชรเกษม ต. หาดใหญ่ อ. หาดใหญ่ จ. สงขลา 90110

โทรศัพท์ 089-6595906 E-mail c_suppachai@hotmail.com

ประสบการณ์ในงานวิจัย

ศุภชัย ชัยณรงค์ เสกสรร สุธรรมานนท์ และประภาศ เมืองจันทร์บุรี "การปรับปรุงสมบัติเชิงกลของอะลูมิเนียมหล่อกึ่งของแข็งโดยกรรมวิธีเสียดทานแบบกวน" การประชุมข่ายงานวิศวกรรมอุตสาหการ 13-15 ตุลาคม 2553. คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี (IE Network 2010)

กุลยุทธ บุญเซ่ง ผจงจิต พิจิตบรรจง และ**ศุภชัย ชัยณรงค์** "แนวทางการปรับปรุงประสิทธิภาพการทำงานสำหรับกลุ่มรับซื้อน้ำยาง กรณีศึกษา กลุ่มรับซื้อน้ำยาง ต.สะท้อน อ.นาทวี จ.สงขลา"นเรศวรวิจัย ครั้งที่ 8 นวัตกรรมความรู้สู่ประชาคมอาเซียน. 28-29 กรกฎาคม 2555.มหาวิทยาลัยนเรศวร

กุลยุทธ บุญเซ่ง ผจงจิต พิจิตบรรจง และ**ศุภชัย ชัยณรงค์** "การพัฒนาผลิตภัณฑ์ด้านเทคนิคการกระจายหน้าที่เชิงคุณภาพ กรณีศึกษา เครื่องดื่มรังนกแท้ กลุ่มแม่บ้านเพ็งอาด อ.ปากพะยูน จ.พัทลุง" การสัมมนาวิชาการประจำปี 2555: Eco Innovation and Solution 2012. 17-18 ตุลาคม 2555. สภาอุตสาหกรรมแห่งประเทศร่วมกับมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

Chaiyoot Meengam, Prapas Muangjunburee, Suppachai Chainarong "Investigation on Mechanical Properties and Microstructure of SSM 356-T6 Aluminium Alloy by Diffusion Bonding" Advanced Materials Research Vols. 881-883, pp 1301-1306.

Kulyuth Boonseng, Chaiyoot Meengam, Suppachai Chainarong, and Prapas Muangjunburee "Microstructure and Hardness of Friction Welded SSM 356 Aluminium Alloy" Advanced Materials Research (2014).

Suppachai Chainarong, Prapas Muangjunburee and Chaiyoot Meengam "Friction Welding of SSM356 with SSM7075 Aluminium Alloys" Australian Journal of Basic and Applied Sciences Vols.8 (15), pp 277-284.

Suppachai Chainarong, Chaiyoot Meengam and Kulyuth Boonseng "Effect of Friction Welding on tensile strength of Polymethyl Methacrylate (PMMA) by Computerized Numerical Control Machine" วารสารวิจัย มข. ปีที่ 20 ฉบับที่ 1 มกราคม – มีนาคม 2558.

Y.DUNYAKUL, C.MEENGAM, D.MAUNKHAW and S.CHAINARONG "Evolution of Diffusion Bonding Parameters on Microstructure and Mechanical Properties of Dissimilar SSM7075 with SSM356 Aluminum Alloy Joints" Engineering Journal, Vol 20 (3) pp.135-144.

ชัยยุทธ มีงาม **ศุภชัย ชัยณรงค์** และประภาศ เมืองจันทร์บุรี "อิทธิพลของความเร็วรอบที่ส่งผลต่อสมบัติทางกลของการเชื่อมอะลูมิเนียมต่างชนิด ระหว่าง SSM7075 กับ SSM356 ด้วยการเชื่อมเสียดทาน" วารสารวิชาการและวิจัย มทร.พระนคร ปีที่ 10 ฉบับที่ 1 ปี 2559 หน้า 94-105

Suppachai Chainarong, Siva Sitthipong, Chaiyoot Meengam "Influence of stress to mechanical failure of long tail shaft in the power transmission system on

local fishing boat" S NRU Journal of Science and Technology 8 (1) January – April (2016) pp.127-132.

CHAIYOOT MEENGAM, SUPPACHAI CHAINARONG and KULYUTH BOONSENG "Joining of Semi Solid Metal 7075 Aluminum Alloys with Friction Welding" International Symposium on Hybrid Materials and Processing, (HyMaP 2014) 10-13 November, Busan, Korea, 2014.

<u>ทุนวิจัยที่ดำเนินการแล้ว</u>

ทุนวิจัยคณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม เรื่อง การเชื่อมอะลูมิเนียมต่างชนิดโดยกรรมวิธีเชื่อมแบบแพร่ ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2557

ทุนวิจัยมหาวิทยาลัยราชภัฏสงขลา เรื่อง ศึกษาความเป็นไปได้การเชื่อมเสียดทานอะลูมิเนียมหล่อกึ่งของแข็งด้วยเครื่องกลึงแบบอัตโนมัติ ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2556

ทุนวิจัยมหาวิทยาลัยราชภัฏสงขลา เรื่อง การเชื่อมเสียดทานของอะคริลิคโดยใช้เครื่องจักรกลแบบอัตโนมัติ ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2557

ทุนวิจัยมหาวิทยาลัยราชภัฏสงขลา เรื่อง การเชื่อมแบบเฟสของเหลวของอะลูมิเนียมผสมหล่อกึ่งของแข็ง เกรด SSM7075 ด้วยกรรมวิธีการเชื่อมโดยการแพร่ ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2557

ทุนวิจัยมหาวิทยาลัยราชภัฏสงขลา เรื่อง การเชื่อมต่างวัสดุของอะลูมิเนียม SSM356 กับ SSM6061 โดยกรรมวิธีการเชื่อมเสียดทาน ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2557

ทุนวิจัยมหาวิทยาลัยราชภัฏสงขลา เรื่อง การเชื่อมเสียดทานแบบจุดอะลูมิเนียมหล่อกึ่งของแข็ง SSM 356 ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2558

ทุนวิจัยมหาวิทยาลัยราชภัฏสงขลา เรื่อง อิทธิพลของตัวแปรที่ส่งผลต่ออะลูมิเนียม Al-Zn ด้วยการเชื่อมเสียดทานแบบจุด ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2558

ทุนวิจัยจากงบประมาณแผ่นดิน (วช.) เรื่อง ผลของความขรุขระจากการกลึงปอกผิวเหล็ก AISI 1045 ด้วยเครื่องกลึงอัตโนมัติ ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2557

ทุนวิจัยจากงบประมาณแผ่นดิน (วช.) เรื่อง อิทธิพลของตัวแปรที่ส่งผลต่อความขรุขระของการกลึงปาดผิวเหล็ก AISI 1045 ด้วยเครื่องกลึงอัตโนมัติ ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2557

ทุนวิจัยจากงบประมาณแผ่นดิน (วช.) เรื่อง การเชื่อมเสียดทานอะลูมิเนียมหล่อกึ่งของแข็ง ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2558