รายงานการวิจัย

การเชื่อมแบบเฟสของเหลวของอะลูมิเนียมผสมหล่อกึ่งของแข็ง เกรด SSM7075
ด้วยกรรมวิธีการเชื่อมโดยการแพร่
Transient liquid phase (TLP) of SSM7075 by diffusion bonding

นายศุภชัย ชัยณรงค์
นายชัยยุทธ มีงาม
นายกุลยุทธ บุญเซ่ง

รายงานวิจัยฉบับนี้ได้รับเงินอุดหนุนการวิจัยจากกองทุนวิจัย
มหาวิทยาลัยราชภัฏสงขลา
พ.ศ. ๒๕๕๗

ชื่องานวิจัย การเชื่อมแบบเฟสของเหลวของอะลูมิเนียมผสมหล่อกึ่งของแข็ง เกรด SSM7075 ด้วยกรรมวิธีการเชื่อมโดยการแพร่

ผู้วิจัย นายศุภชัย ชัยณรงค์
นายชัยยุทธ มีงาม
นายกุลยุทธ บุญเซ่ง

คณะ เทคโนโลยีอุตสาหกรรม

ปี 2557

บทคัดย่อ

การเชื่อมโดยการแพร่โดยใช้เทคนิคการเกิดของเหลวแบบชั่วขณะสำหรับอะลูมิเนียมหล่อกึ่งของแข็ง เกรด SSM7075 ถูกนำมาใช้ในอุตสาหกรรมอากาศยาน ในการทดลองเชื่อมครั้งนี้ใช้ตัวแปรที่อุณหภูมิ 480 และ 540 องศาเซลเซียส เวลาที่ใช้ในการเชื่อม 30 60 90 และ 120 นาที และใช้สังกะสี-อะลูมิเนียม ZA27 ขนาดความหนา 50 ไมโครเมตร เป็นตัวเติมประสาน บริเวณรอยต่อเกิดการยึดติดที่แข็งแรง โดยเฟสของเหลวของสังกะสี-อะลูมิเนียม ZA27 จะเกิดการแพร่ไปยังอะลูมิเนียมหล่อกึ่งของแข็ง เกรด SSM7075 ส่งผลให้เฟสต่างๆ ในอะลูมิเนียมหล่อกึ่งของแข็ง เกรด SSM7075 เกิดการก่อตัวของสารประกอบรูปแบบใหม่ๆ ที่บริเวณรอยต่อระหว่างวัสดุทั้งสองชนิด บริเวณรอยต่อเกิดการหลอมละลายเข้ากันได้ดีมีความต้านทานแรงดึงสูงอยู่ที่ตัวแปรอุณหภูมิ 480 องศาเซลเซียส เวลาในการเชื่อม 120 นาที และแรงกดที่ 3 MPa โดยมีค่าความต้านทานแรงดึงอยู่ที่ 17.44 MPa และตัวแปรอุณหภูมิ 540 องศาเซลเซียส และเวลาเชื่อม 120 นาที พบว่ามีค่าความแข็งสูงที่สุด ซึ่งมีค่าความแข็งอยู่ที่ 101.00 HV

Research Title	Transient liquid phase (TLP) of SSM7075 by diffusion bonding
Researcher	Mr. Suppachai Chainarong
	Mr. Chaiyoot Meengam
	Mr. Kulyuth Boonseng
Faculty	Industrial
Year	2557

Abstract

TLP diffusion bonding of SSM7075 aluminium alloys used for aircraft industry was carried out tamperatures at 480 and 540 °C, bonding times at 30, 60, 90 and 120 min and using 50 μm thick ZA27 interlayer for various bonding times. Joint formation was attributed to the liquid-state diffusion of ZA27 into the SSM7075 alloy. The SSM7075 alloy followed by eutectic formation and isothermal solidification along the ZA27/SSM7075 interface. The joint region homogenized with increasing bonding time and gave the highest bond strength of 17.44 MPa after a bonding time of 120 min and tamperatures at 480 °C. The results of the investigation have shown that a have average hardness in the range 101.00 HV for tamperatures at 540 °C and bonding time of 120 min.

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยฉบับนี้สำเร็จได้ด้วยดี เนื่องด้วยการประสิทธิประสาทวิชาความรู้และความอนุเคราะห์จากบุคคลหลายฝ่าย ตลอดจนนักศึกษาและคณาจารย์ทุกท่านในโปรแกรมวิชาวิศวกรรมศาสตร์ คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏสงขลา ในการจัดทำงานวิจัยนี้ให้มีความสำเร็จและสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบคุณสถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยราชภัฏสงขลา ที่ได้ให้การสนับสนุนเงินทุนวิจัยในการวิจัยครั้งนี้

ขอขอบคุณสาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย ที่ให้การสนับสนุนเครื่องมือและอุปกรณ์ในการทำวิจัย และขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมเหมืองแร่และวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ตลอดจนศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ที่ให้การสนับสนุนเครื่องมือและการตรวจสอบโครงสร้างโลหะ จนสามารถดำเนินงานไปได้และมีความสมบูรณ์ครบถ้วนทุกประการ

คณะผู้ทำงานวิจัยขอขอบคุณทุกท่าน ทุกฝ่าย ที่สนับสนุนในการทำวิจัยด้วยใจจริง ขอขอบคุณ

ศุภชัย ชัยณรงค์
คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม

สารบัญ

เรื่อง	หน้า
บทคัดย่อ	ก
Abstract	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	ฉ
สารบัญรูป	ช
บทที่ 1 บทนำ	1
ความสำคัญและที่มาของปัญหา	1
วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย	2
ขอบเขตของโครงการวิจัย	2
ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	4
ทฤษฎี สมมุติฐาน และ/หรือกรอบแนวความคิดของการวิจัย	4
การทบทวนวรรณกรรม/งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	14
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงาน	18
การดำเนินงานวิจัย	18
วัสดุที่ใช้ในงานวิจัย	19
เครื่องมือและอุปกรณ์	20
ขั้นตอนการทดลอง	23
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิจารณ์ผล	27
ลักษณะทางกายภาพของชิ้นงานเชื่อม	27
ลักษณะโครงสร้างมหภาค	31
ลักษณะโครงสร้างจุลภาค	32
ความแข็งแรงดึง	35
ความแข็ง	36
บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง	38
บรรณานุกรม	39
ภาคผนวก ก ผลการทดสอบแรงดึง	41
ภาคผนวก ข ผลการทดสอบความแข็ง	43
ประวัติผู้เขียน	45

สารบัญตาราง

ตารางที่ **หน้า**

2.1 ตารางแสดงสัญลักษณ์กลุ่มอะลูมิเนียมหล่อผสม 5
2.2 ตารางแสดงสัญลักษณ์การทำเทมเปอร์ 6
3.1 ส่วนผสมทางเคมีของอะลูมิเนียมหล่อผสมแบบกึ่งของแข็ง SSM7075 (W.T.%) 19
3.2 ส่วนผสมทางเคมีของสังกะสี-อะลูมิเนียม เกรด ZA27 (W.T.%) 20
ตารางผนวก ก ผลการทดสอบแรงดึงของชิ้นงานเชื่อม 42
ตารางผนวก ข ผลการทดสอบความแข็ง 44

สารบัญรูป

รูปที่ **หน้า**

2.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการผลิตโลหะกึ่งของแข็งด้วยกรรมวิธีการปล่อยฟองแก๊ส 7
2.2 ลักษณะโครงสร้างก้อนกลมของอะลูมิเนียม เกรด SSM7075 8
2.3 กลไกการเกิดการเชื่อมโดยการแพร่ 9
2.4 ขั้นตอนการบ่มของโลหะผสมอะลูมิเนียม-ซิลิกอนหล่อเกรด A356 10
2.5 ความสามารถในการละลายของธาตุซิลิกอนและแมกนีเซียมภายในเนื้อเมตริกซ์กับอุณหภูมิ 11
2.6 ชิ้นงานทดสอบแรงดึงตามมาตรฐาน ASTM A370 12
2.7 แรงกดที่กระทำต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ผิวด้วยเครื่องไมโครวิกเกอร์ส 13
3.1 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัยโดยสรุป 18
3.2 อะลูมิเนียมหล่อกึ่งของแข็ง SSM7075 19
3.3 สังกะสี-อะลูมิเนียม เกรด ZA27 20
3.4 เครื่องกลึงชิ้นงานยี่ห้อ JET รุ่น GHB-1340A 20
3.5 เครื่องเลื่อยสายพานแนวนอน 21
3.6 เครื่องขัดกระดาษทรายและขัดสักหลาด 21
3.7 กล้องถ่ายภาพ ยี่ห้อ Zeiss 22
3.8 กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง 22
3.9 อะลูมิเนียมหล่อกึ่งของแข็ง เกรด SSM7075 ที่ผ่านการเลื่อย 23
3.10 กระบวนการกลึงเตรียมชิ้นงานทดลอง 23
3.11 ชิ้นทดสอบอะลูมิเนียมหล่อกึ่งของแข็งที่ผ่านการกลึง 24
3.12 การเตรียมผิวชิ้นงานก่อนการเชื่อม 24
3.13 ล้างผิวชิ้นงานด้วนน้ำยาอะซิโตน 24
3.14 กระบวนเชื่อมโดยการแพร่แบบเฟสของเหลวชั่วขณะ 25
3.15 วิธีการหล่อเรซิ่นครอบชิ้นงาน 25
3.16 ทดสอบความแข็งด้วยเครื่องทดสอบแบบวิกเกอร์ส 26
3.17 การทดสอบแรงดึงของชิ้นงานเชื่อม 26
4.1 ชิ้นงานเชื่อมที่อุณหภูมิ 480 องศาเซลเซียส เวลาในการเชื่อม 30 นาที 27
4.2 ชิ้นงานเชื่อมที่อุณหภูมิ 480 องศาเซลเซียส เวลาในการเชื่อม 60 นาที 28
4.3 ชิ้นงานเชื่อมที่อุณหภูมิ 480 องศาเซลเซียส เวลาในการเชื่อม 90 นาที 28
4.4 ชิ้นงานเชื่อมที่อุณหภูมิ 480 องศาเซลเซียส เวลาในการเชื่อม 120 นาที 29
4.5 ชิ้นงานเชื่อมที่อุณหภูมิ 540 องศาเซลเซียส เวลาในการเชื่อม 30 นาที 29
4.6 ชิ้นงานเชื่อมที่อุณหภูมิ 540 องศาเซลเซียส เวลาในการเชื่อม 60 นาที 30
4.7 ชิ้นงานเชื่อมที่อุณหภูมิ 540 องศาเซลเซียส เวลาในการเชื่อม 90 นาที 30
4.8 ชิ้นงานเชื่อมที่อุณหภูมิ 540 องศาเซลเซียส เวลาในการเชื่อม 120 นาที 30
4.9 ลักษณะโครงสร้างมหภาคของชิ้นงานหลังการเชื่อม 31
4.10 ลักษณะโครงสร้างของแนวเชื่อมที่อุณหภูมิ 480 องศาเซลเซียส 32
4.11 ลักษณะโครงสร้างของแนวเชื่อมที่อุณหภูมิ 540 องศาเซลเซียส 34

4.12 ค่าความแข็งแรงดึงของชิ้นงานเชื่อม 35
4.13 ความแข็งของชิ้นงานที่อุณหภูมิ 480 องศาเซลเซียส 36
4.14 ความแข็งของชิ้นงานที่อุณหภูมิ 540 องศาเซลเซียส 37

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา

กระบวนการหล่อโลหะแบบกึ่งของแข็งถูกคิดค้นในปี [1] ค.ศ. 1970 โดยนักวิจัยชื่อ Spencer และ Flemings ซึ่งอยู่ที่สถาบันเทคโนโลยีแห่งรัฐแมสซาชูเซตส์ (Massachusetts Institute of Technology, IMT) และในช่วง 30 ปี ที่ผ่านมากระบวนการขึ้นรูปโลหะกึ่งของแข็งได้พัฒนาอย่างต่อเนื่อง [2] โดยการหล่อโลหะกึ่งของแข็งเป็นการขึ้นรูปโลหะด้วยการหล่อในสภาวะที่น้ำโลหะมีการแข็งตัวบางส่วน เกิดการเปลี่ยนแปลงทางด้านโครงสร้างโดยจะใช้เทคนิคต่างๆ เข้ามาช่วยก่อนการหล่อ เช่น Rheocasting, Ultrasonic เป็นต้น เพื่อทำให้เกิดการแตกหักของเดรนไดรต์จนทำให้มีโครงสร้างเกรนแบบก้อนกลม (Spheroidal หรือ Globular grain) หลังจากการหล่อ และในช่วง 5 ปีที่ผ่านมา เทคโนโลยีการหล่อกึ่งของแข็ง (Semi-solid) ได้พัฒนาโดยอาศัยการพ่นฟองแก๊สในน้ำโลหะ (GISS, Gas Induced Semi-Solid) ซึ่งเป็นเทคนิคใหม่ที่มีกระบวนการสร้างโลหะกึ่งของแข็งที่คล้ายกับกรรมวิธีการหล่อแบบ Rheocasting โดยการปล่อยแก๊สเฉื่อย (แก๊สอาร์กอน หรือไนโตรเจน) ผ่านแท่งกราไฟต์ ทำให้เกิดการไหลเคลื่อนที่ของน้ำโลหะในขณะที่แข็งตัวและได้โครงสร้างเกรนเป็นแบบก้อนกลม (Spheroidal grain) [3] ซึ่งการหล่อกึ่งของแข็งนอกจากทำให้คุณสมบัติของอะลูมิเนียมดีขึ้นแล้ว ก็ยังช่วยลดต้นทุนในการผลิตของอุตสาหกรรมได้อีกด้วยเพราะใช้อุณหภูมิในการหล่อที่ต่ำกว่าจุดหลอมเหลวของวัสดุ ทำให้แม่พิมพ์ (Mold) มีอายุการใช้งานที่ยาวนานขึ้น โลหะที่ได้นิยมในการหล่อเป็นชิ้นงาน ได้แก่ อะลูมิเนียม ตะกั่ว เป็นต้น โดยเฉพาะอะลูมิเนียม เนื่องจากนิยมขึ้นรูปโดยการหล่อเป็นชิ้นงาน สำหรับอะลูมิเนียมที่ขึ้นรูปโลหะกึ่งของแข็ง ได้แก่ เกรด SSM 356, SSM 6061 และ SSM 7075 เป็นต้น โดยเฉพาะอะลูมิเนียม SSM 7075 ที่ใช้ในการผลิตชิ้นส่วนเครื่องบิน ชิ้นส่วนอุตสาหกรรมยานยนต์ [4] และชิ้นส่วนอื่นๆ ทางด้านงานวิศวกรรม โดยการยึดต่อของชิ้นงานอาศัยการเชื่อม ปัจจุบันการเชื่อม (Welding) วัสดุที่ขึ้นรูปมาจากกระบวนการหล่อกึ่งของแข็งนั้นเป็นการเชื่อมที่ทำได้ยาก มีความเสี่ยงต่อการเกิดปัญหาในการเชื่อมได้ง่าย โดยการเชื่อมอะลูมิเนียมทำได้ 2 กรรมวิธี คือ การเชื่อมในสถานะของเหลว (Liquid State Welding) และการเชื่อมในสถานะของแข็ง (Solid State Welding) สำหรับการเชื่อมในสภาวะของเหลวสำหรับอะลูมิเนียมหล่อกึ่งของแข็งพบว่า ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางโลหะวิทยา (Metallurgical changes) มีความเค้นตกค้าง (Residual stress) การบิดงอ (Distortion) การแตกร้าวของรอยเชื่อม (Welding crack) และในระหว่างการแข็งตัวจากการหลอมละลายมีปัญหาการเกิดโพรงอากาศ (Porosity) [5] ส่งผลให้คุณสมบัติทางกลของอะลูมิเนียมลดลง กรรมวิธีการเชื่อมในสภาวะของแข็งเป็นอีกวิธีการที่เป็นการเชื่อมที่ไม่เกิดการหลอมละลายของเนื้อเชื่อม เช่น การเชื่อมเสียดทานแบบกวน (Friction Stir Welding: FSW) [6] การเชื่อมโดยการแพร่ (Diffusion Bonding) การเชื่อมเสียดทาน (Friction Welding: FW) [7] เป็นต้น ซึ่งในการเชื่อมในสภาวะของแข็งพบว่ายังมีปัญหาเกี่ยวกับอะลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) ที่เกิดขึ้นในการเชื่อม

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 โดยกลไกของการเชื่อมต่อจะอาศัยการแพร่ของ

อะตอมระหว่างวัสดุที่เชื่อมต่อกัน การเชื่อมโดยการแพร่สามารถเชื่อมต่อวัสดุต่างชนิด (Dissimilar) วัสดุชนิดเดียวกัน (Similar) หรือเชื่อมหลายๆ ชิ้นพร้อมกันได้ (Sandwich) ซึ่งในการเชื่อมด้วยวิธีการนี้จะใช้ในอุตสาหกรรมหลายชนิดด้วยกัน เช่น ชิ้นส่วนเครื่องปฏิกรณ์ในอุตสาหกรรมพลังงานปรมาณู อุตสาหกรรมการบินและอวกาศ เป็นต้น ในการเชื่อมโดยการแพร่การเตรียมผิวงานเชื่อมมีความสำคัญมาก โดยผิวหน้าที่เชื่อมต้องมีความราบเรียบของผิวที่เชื่อมต่อกัน นอกจากนั้นในการเชื่อมต้องมีการควบคุมบรรยากาศในขณะเชื่อมเพื่อป้องกันการเกิดออกไซด์ ซึ่งอาจทำภายใต้ระบบสุญญากาศหรือบรรยากาศที่มีก๊าซปกคลุม แต่การเชื่อมยังใช้เวลาในการเชื่อมที่ยาวนานเพื่อให้การเชื่อมสมบูรณ์

จากข้อมูลข้างต้นและเหตุผลดังที่ได้กล่าวไว้แล้วนั้นจึงเป็นที่มาของโครงการวิจัยนี้ โดยจะศึกษาตัวแปร (Joining Parameters) ของการเชื่อมโดยการแพร่ของอะลูมิเนียมหล่อกึ่งของแข็ง SSM 7075 โดยใช้อะลูมิเนียม-สังกะสี เป็นตัวเติม (Filler) ระหว่างชิ้นงานทั้งสองชิ้นเพื่อให้ชิ้นงานเชื่อมติดได้ง่ายและรวดเร็วขึ้น หลังจากนั้นทดสอบสมบัติทางโลหะวิทยา (โครงสร้างมหภาคและจุลภาค) สมบัติทางกลของแนวเชื่อม (Weld Metal) เพื่อนำผลที่ได้จากการทดลองไปใช้ในงานเชิงวิศวกรรมและประยุกต์ใช้จริงในภาคอุตสาหกรรมต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

- เพื่อหาเทคนิคการเชื่อมที่เหมาะสมในการเชื่อมอะลูมิเนียมผสม ซึ่งหล่อโดยเทคโนโลยีการหล่อกึ่งของแข็ง เกรด SSM 7075
- เพื่อศึกษาตัวแปรในการเชื่อมที่ใช้เชื่อมอะลูมิเนียมผสมซึ่งหล่อโดยเทคโนโลยีการหล่อกึ่งของแข็ง เกรด SSM 7075 โดยกรรมวิธีการเชื่อมโดยการแพร่ และใช้อะลูมิเนียม-สังกะสี เป็นตัวเติม

1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย

ขอบเขตของโครงการวิจัยนี้จะศึกษาการเชื่อมอะลูมิเนียมผสมที่หล่อโดยเทคโนโลยีกึ่งของแข็ง เกรด SSM 7075 ด้วยกรรมวิธีการเชื่อมโดยการแพร่และมีอะลูมิเนียม-สังกะสี เป็นตัวเติม ในการทดลองทำการเชื่อมภายใต้บรรยากาศอาร์กอนปกคลุม สำหรับการทดลองมีตัวแปรในการทดลองเบื้องต้นได้แก่ อุณหภูมิในการให้ความร้อน เวลาในการกดแช่ และแรงกด เป็นตัวแปรตั้งต้นและมีการทดลองหาตัวแปรที่เหมาะสมต่อไป โดยศึกษาการเปลี่ยนแปลงทางโลหะวิทยา โครงสร้างมหภาค (Macrostructure) โครงสร้างจุลภาค (Microstructure) โดยใช้กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (Optical Microscope, OM) รวมถึงใช้กล้องจุลทรรศน์อิเลคตรอนแบบส่องกราดซึ่งมีระบบเอ็กซ์เรย์ด้วย (Scanning Electron Microscope, SEM) โดยจะศึกษาบริเวณแนวเชื่อมและบริเวณที่มีผลกระทบอันเนื่องมาจากความร้อนจากการเชื่อม นอกจากนั้นยังศึกษาค่าความแข็งของชิ้นงานหลังจากการเชื่อม

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- ทราบถึงผลของตัวแปรในกรรมวิธีการเชื่อมโดยการแพร่ (Diffusion Bonding) ที่มีผลต่อสมบัติทางโลหะวิทยาและสมบัติทางกลของการเชื่อมอะลูมิเนียมผสม (SSM) ที่หล่อโดยเทคโนโลยีการหล่อกึ่งของแข็ง

- ทราบถึงความเป็นไปได้และค่าตัวแปรการเชื่อมที่เหมาะสม สำหรับการเชื่อมอะลูมิเนียมผสม (SSM) ซึ่งหล่อแบบกึ่งของแข็งด้วยกรรมวิธีการเชื่อมโดยการแพร่ (Diffusion Bonding) เพื่อประโยชน์ทางด้านงานวิจัยและอุตสาหกรรมสำหรับโลหะประเภทนี้ต่อไป

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ทฤษฎี สมมุติฐาน และ/หรือกรอบแนวความคิดของการวิจัย

2.1.1 โลหะอะลูมิเนียม

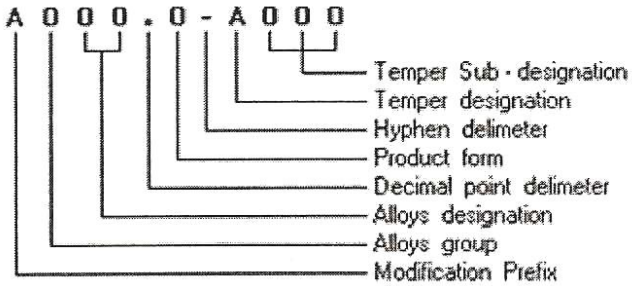
อะลูมิเนียมเป็นโลหะสำคัญที่ได้รับการใช้งานมากที่สุดในกลุ่มโลหะที่มีน้ำหนักเบา (Light Metals) ทั้งนี้เพราะอะลูมิเนียมมีสมบัติเด่นหลายประการ [2] เช่น มีความหนาแน่นน้อยและมีกำลังวัสดุต่อหน่วยน้ำหนักสูงจึงนิยมใช้ทำเครื่องใช้และชิ้นส่วนบางอย่างในเครื่องบิน จรวด และขีปนาวุธ สามารถขึ้นรูปด้วยกรรมวิธีต่างๆ ได้ง่าย จุดหลอมเหลวต่ำ หล่อหลอมง่าย และมีอัตราการไหลตัวสูง ค่าการนำไฟฟ้าไม่สูงมากนักแต่เนื่องจากน้ำหนักเบาจึงนิยมใช้เป็นตัวนำไฟฟ้า ไม่เป็นพิษต่อร่างกายมนุษย์ มีดัชนีในการสะท้อนกลับของแสงสูงมาก ทนทานต่อการเกิดสนิมและการกัดกร่อนในบรรยากาศใช้งานทั่วไปได้ดีมาก แต่ไม่ทันการกัดกร่อนต่อกรดและด่าง หาซื้อได้ง่ายและราคาไม่แพงมากนัก อะลูมิเนียมหล่อผสมตามมาตรฐานของ ASTM (American Society of Testing and Materials)

<u>ตัวเลขตัวที่หนึ่ง</u> เป็นสัญลักษณ์แสดงกลุ่มธาตุที่ผสมธาตุหนึ่งเป็นหลัก ตามตารางที่ 1 เช่น 2XX.X เป็นกลุ่มธาตุผสมของอะลูมิเนียม ที่มีทองแดงเป็นธาตุผสมหลัก เป็นต้น

<u>ตัวเลขตัวที่สองและสาม</u> เป็นสัญลักษณ์แสดงอะลูมิเนียมผสม ที่มีธาตุผสมชนิดอื่นผสมเข้าไปหรือแสดงอะลูมิเนียมบริสุทธิ์

<u>ตัวเลขตัวที่สี่</u> เป็นสัญลักษณ์ซึ่งเป็นการแบ่งตามการผลิตอย่างอื่น โดยจะใช้จุดทศนิยมแสดงการผลิต เป็นต้น เช่น การหล่อ หรือ จากแท่งอินกอท การปรับปรุงจากธาตุผสมเดิม หรือจำนวนสิ่งที่ปนเข้าไปแสดงโดยตัวอักษรก่อนตัวเลข ตัวอักษร “X” ใหญ่ ใช้สำหรับธาตุผสมที่ทดลองอยู่ อะลูมิเนียมหล่อผสมทั่วไปจะใช้ตัวเลข 3 หลัก

American Aluminum Association ได้กำหนดมาตรฐาน และแยกประเภทอะลูมิเนียมหล่อผสมตาม (American National Standard Institute) ANSI Standard ได้ ดังนี้



ตารางที่ 2.1 ตารางแสดงสัญลักษณ์กลุ่มอะลูมิเนียมหล่อผสม

1XX.X	อะลูมิเนียม ที่มีความบริสุทธิ์ ไม่น้อยกว่า 99.00%
2XX.X	ทองแดง (Copper , Cu)

3XX.X	ซิลิกอน (Silicon , Si) – ทองแดง (Copper , Cu) – แมกนีเซียม (Mg) ซิลิกอน (Silicon , Si) – แมกนีเซียม (Magnesium , Mg) ซิลิกอน (Silicon , Si) – ทองแดง (Copper , Cu)
4XX.X	ซิลิกอน (Silicon , Si)
5XX.X	แมกนีเซียม (Magnesium , Mg)
7XX.X	สังกะสี (Zinc , Zn)
8XX.X	ดีบุก (Tin , Sn)
9XX.X	ธาตุอื่นๆ (Other Element)
6XX.X	ยังไม่มีใช้ (Unused Series)

A: อักษรตัวแรก หมายถึง สมาชิกของ Alloys ที่เหมือนกันอยู่ในกลุ่มเดียวกัน (หมายถึง Aluminum Alloy) แม้ว่าส่วนผสมจะแตกต่างกัน

O: Alloy group จะเป็นตัวเลขตัวเดียวจาก 1 ถึง 9 ใช้เป็นตัวกำหนด ธาตุหลักของ Alloys หรือ Major Alloying

OO: Alloys designation เป็นตัวเลข 2 หลัก กำหนดความแตกต่างของสมาชิกในกลุ่ม Alloys เดียวกัน ความหมายของตัวเลขที่กำหนดเหมือนกับ Major Alloy ในบางครั้งตัวเลข 2 หลัก คือ ปริมาณ % ไม่น้อยกว่าของ Al ที่มีผสมอยู่ เช่น 190.X เท่ากับ Al ผสมอยู่ 99.90%

.O: ตัวเลขหลังจุดทศนิยม หมายถึง รูปแบบการผลิต หรือ Product form เป็นตัวเลขหลักเดียว

คือ .O: เป็น Casting Specification

.1: เป็น Ingot Specification

.2: เป็น Ingot Specification ที่ควบคุมส่วนผสมน้อยกว่า .1 Ingot Specification

A: Temper designation เป็นตัวกำหนดแทนกรรมวิธี Temper ของกระบวนการ Heat Treatment ที่ใช้กับ Heat Treatable Alloys ดังนี้

F: As Cast Condition หมายถึง งานจากสภาพหล่อ โดยไม่ต้องใช้ กรรมวิธีใดๆ ควบคุมภายหลังการหล่อขึ้นรูป

H: Strain Hardened หมายถึง สภาพของงานแข็งตัวเอง เนื่องจาก ความเครียด จากการทำ Cold working เช่น งานรีดขึ้นรูปต่างๆ

O: Anneal หมายถึง การอบอ่อน ใช้กับงานหล่อ ที่ต้องนำไปอบ เพื่อปรับปรุงขนาดรูปร่างให้คงที่ (Stability) ขณะใช้งาน หรือเพื่อทำให้เพิ่มความเหนียว (Ductility)

W: Solution Heat Treat เป็นการอบเพื่อเปลี่ยนโครงสร้างให้เป็น สารละลายของแข็งเฟสเดียวใช้กับ Alloys ที่สามารถชุบด้วยตนเองได้ในบรรยากาศปกติ

T: เป็นการอบด้วยความร้อน โดยกำหนดกรรมวิธี Temper ที่แน่นอนดีกว่า F หรือ O การกำหนดกรรมวิธี “F”, “O” และ “T” ทุกกระบวนการ สามารถหล่อด้วย แบบทราย และแบบเหล็ก

OO: Temper Sub – designation เป็นตัวเลขระบุกรรมวิธีทำ Temper ที่ชัดเจนโดยระบุอุณหภูมิและ

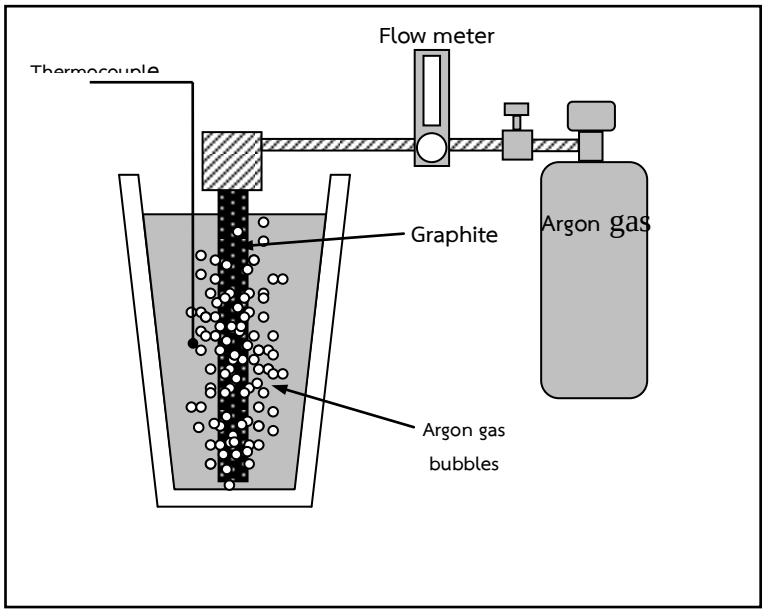
O: ช่วงเวลาปฏิบัติ การที่แยกละเอียดไปได้อีก 10 วิธีการจาก T1 ถึง T10 และส่วนปลีกย่อยอีกดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2.2 ตารางแสดงสัญลักษณ์การทำเทมเปอร์ (Tempering)

T1	ปล่อยให้งานเย็นตัวลงตามปกติในบรรยากาศปกติ และบ่มธรรมชาติ (Naturally Aged) โดยธรรมชาติและสภาพงานไม่เปลี่ยนแปลง
T2	ปล่อยให้งานเย็นตัวลงในบรรยากาศปกติ ความแข็งจะเกิดขึ้นจากการใช้งานที่อุณหภูมิต่ำ (Cold Worked) โดยธรรมชาติ ความแข็งเพิ่มขึ้นขณะใช้งาน
T3	นำงานไปทำการอบละลาย (Solution Heat Treated) แล้วปล่อยให้งานเย็นตัวลง แล้วทำ Naturally Aged โดยทิ้งชิ้นงานไว้ในบรรยากาศจะเกิดความแข็งเอง strain hardening
T4	ทำ Solution Heat Treated และ Naturally Aged เพื่อให้ความแข็งคงตัว
T5	ปล่อยให้งานค่อยๆ เย็นตัวลงในสภาพเดิม แล้วนำไปทำการบ่มเทียม (Artificially Aged)
T6	เป็นการทำ Solution Heat Treated , Quenching แล้วทำ Artificially Aged
T7	เป็นการทำ Solution Heat Treatment และ Stabilized
T8	เป็นการทำ Solution Heat Treated ต่อด้วย Cold Worked แล้วนำมาทำ Artificially Aged
T9	เป็นการทำ Solution Heat Treated ต่อด้วย Artificially Aged แล้วนำมาทำ Cold Worked
T10	เป็นการให้งานเย็นตัวตามปกติ แล้วนำไปขึ้นรูป Cold Worked แล้วนำมาทำ Artificially Aged

2.1.2 เทคโนโลยีการหล่อกึ่งของแข็ง

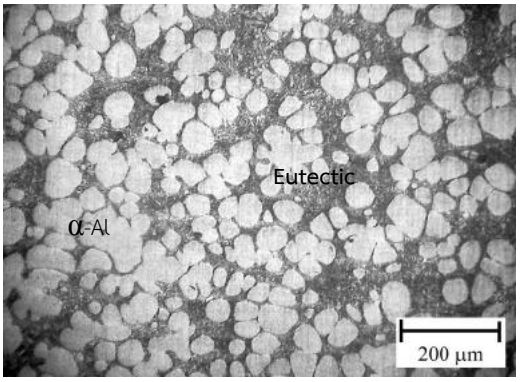
กระบวนการหล่อโลหะกึ่งของแข็งด้วยเทคนิค GISS (Gas induced semi-solid) เจษฎา วรรณสินธุ์ (2006) เป็นกระบวนการสร้างโลหะกึ่งของแข็งด้วยกรรมวิธีการพ่นฟองแก๊สเฉื่อยผ่านแท่งกราไฟต์พรุน (แก๊สอาร์กอน หรือ ไนโตรเจน) ซึ่งเป็นกรรมวิธีแบบใหม่สำหรับการผลิตโลหะกึ่งของแข็งที่มีหลักการคล้ายกับวิธีการหล่อแบบ Rheocasting ที่ให้โครงสร้างเกรนแบบก้อนกลม (Spheroidal grain) คุณสมบัติของโลหะกึ่งของแข็งมีหลายประการเช่น มีอุณหภูมิที่ต่ำกว่าโลหะเหลว โลหะเริ่มแข็งตัวบางส่วนแล้วขณะเทใส่แม่พิมพ์มีความเหนือที่สูงกว่าน้ำโลหะ มีความเค้นขณะไหลต่ำกว่าโลหะที่แข็งตัวแล้ว เป็นต้น ซึ่งคุณสมบัติดังกล่าวมีข้อดีหลายประการที่สามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้อย่างหลากหลายในกระบวนการผลิต เช่น ลดการเกิดของเสียจากปฏิกิริยาระหว่างออกซิเจนในขั้นตอนการหล่อโลหะลงในเบ้าและลดการเกิดโพรงหดตัว (Shrinkage) อีกทั้งยังช่วยยืดอายุการใช้งานของแม่พิมพ์ ดังแสดงในรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการผลิตโลหะกึ่งของแข็งด้วยกรรมวิธีการปล่อยฟองแก๊ส

2.1.3 อะลูมิเนียมผสม เกรด SSM 7075

อะลูมิเนียมเจือสังกะสี - แมกนีเซียม (7XXX) อะลูมิเนียมชนิดมีการเจือธาตุสังกะสีเป็นธาตุหลักและและแมงกานีสเป็นธาตุรองนอกจากนั้นยังมีทองแดงและโครเมียมอีกเล็กน้อยอะลูมิเนียมเจือกลุ่มนี้มีความแข็งแรงและคุณสมบัติทางกลที่ดีมากและมีน้ำหนักเบา ความต้านทานการกัดกร่อนและความสามารถในการเชื่อมอยู่ในเกณฑ์ที่ค่อนข้างต่ำเพราะจะเกิดการอ่อนตัวบริเวณแนวเชื่อม อะลูมิเนียมชนิดนี้จัดว่าเป็นกลุ่มที่สามารถปรับปรุงคุณสมบัติทางกลด้วยกรรมวิธีทางความร้อนได้ แต่ในปัจจุบันได้มีการผลิตและพัฒนาอะลูมิเนียมชนิดนี้โดยการผสมแมกนีเซียมลงไปและกำจัดทองแดงออกไปทำให้ความสามารถในการเชื่อมของอลูมิเนียมชนิดสูงขึ้น โดยจะไม่เกิดการอ่อนตัวบริเวณแนวเชื่อมเพราะบริเวณดังกล่าวได้เกิดการแข็งตัวจากตกตะกอนตามธรรมชาติ ดังแสดงในรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 ลักษณะโครงสร้างก้อนกลมของอะลูมิเนียม เกรด SSM7075 [15]

2.1.4 การเชื่อมโดยการแพร่ (Diffusion Bonding)

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 ดังแสดงในรูปที่ 2.3 โดยมีอัตราการแพร่ดังสมการที่ 1 การเชื่อมโดยการแพร่สามารถเชื่อมต่อวัสดุต่างชนิด (Dissimilar) วัสดุชนิดเดียวกัน (Similar) หรือเชื่อมหลายๆ ชิ้นพร้อมกันได้ (Sandwich) ซึ่งในการเชื่อมด้วยวิธีการนี้จะใช้ในอุตสาหกรรมหลายชนิดด้วยกัน เช่น ชิ้นส่วนเครื่องปฏิกรณ์ในอุตสาหกรรมพลังงานปรมาณู อุตสาหกรรมการบินและอวกาศ เป็นต้น ในการเชื่อมโดยการแพร่การเตรียมผิวงานเชื่อมมีความสำคัญมาก โดยผิวหน้าที่เชื่อมต้องมีความราบเรียบของผิวที่เชื่อมต่อกัน นอกจากนั้นในการเชื่อมต้องมีการควบคุมบรรยากาศในขณะเชื่อมเพื่อป้องกันการเกิดออกไซด์ ซึ่งอาจทำภายใต้ระบบสุญญากาศหรือบรรยากาศที่มีก๊าซปกคลุม

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

เมื่อ

D = สัมประสิทธิ์การแพร่ (cm^2)

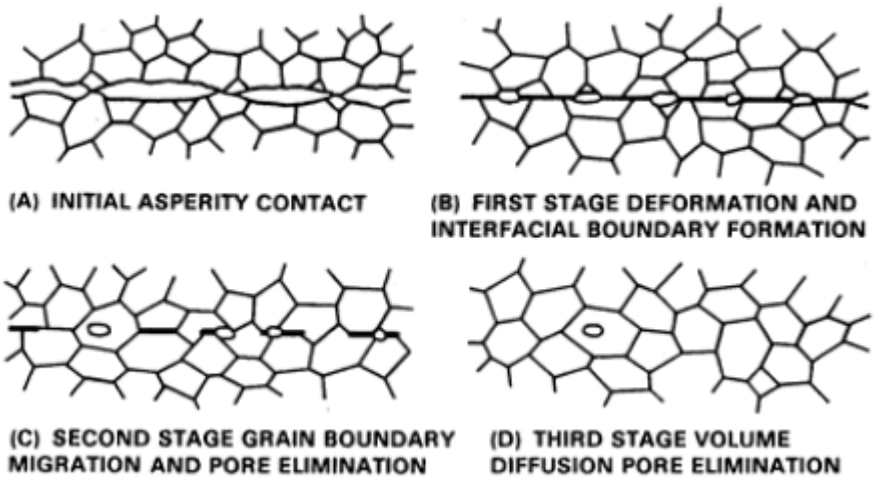
T = อุณหภูมิ (Kelvin)

R = ค่าคงที่ของก๊าซ

A = ค่าคงที่

Q = พลังงานกระตุ้น

ในการแพร่ สัมประสิทธิ์การแพร่ (D) จะเร็วหรือช้าขึ้นอยู่กับ อุณหภูมิ กล่าวคือ ที่อุณหภูมิที่สูงยิ่งทำให้สัมประสิทธิ์ของการแพร่ที่รวดเร็ว ในทางตรงกันข้ามอุณหภูมิต่ำทำให้สัมประสิทธิ์การแพร่ช้าตามไปด้วย ซึ่งอุณหภูมิที่ช่วยในการแพร่จะบ่งบอกให้เห็นปริมาณพลังงานกระตุ้นว่ามีปริมาณต่ำหรือสูง หากเกิดพลังงานกระตุ้นที่สูงเป็นผลมาจากอุณหภูมิสูง ที่อุณหภูมิต่ำพลังงานกระตุ้นก็น้อยทำให้เกิดการแพร่ได้ช้า ในการเชื่อมโดยการแพร่มีกลไกการแพร่อยู่ด้วยกัน 4 ช่วง คือ ช่วงเริ่มต้นของผิวสัมผัส (Initial asperity contact) เป็นช่วงที่ขึ้นกับแรงกด เพราะแรงกดที่สูงเกินไปส่งผลให้โครงสร้างบิดเบี้ยวและหากแรงกดที่ต่ำเกินไป ส่งผลให้เกิดช่องว่างระหว่างผิวสัมผัสที่สูง



รูปที่ 2.3 กลไกการเกิดการเชื่อมโดยการแพร่ [19]

ในช่วงแรกของการแพร่ (First stage deformation and interfacial boundary formation) จะเป็นการเปลี่ยนรูปอย่างช้าๆ บริเวณขอบเกรนของชิ้นงาน โดยที่ขอบเกรนจะเชื่อมต่อกัน ปริมาณช่องว่าง (Void) จะเริ่มลดลง ช่วงที่สองของการแพร่ (Second stage grain boundary migration and pore elimination) เป็นช่วงที่เกิดการเคลื่อนย้ายของขอบเกรนเพื่อมาเชื่อมต่อกัน ซึ่งส่งผลให้กำจัด ช่องว่างที่ผิวสัมผัส ส่วนในช่วงสุดท้ายหรือช่วงที่สามของการเชื่อม (Third stage volume diffusion pore elimination) ช่วงนี้จะเกิดการแพร่ที่สมบูรณ์ ปริมาณช่องว่างจะหายไป

2.1.5 กระบวนการทางความร้อน T6

โลหะผสมอะลูมิเนียม – ซิลิกอน ไม่สามารถเพิ่มความแข็งแรงให้สูงขึ้นได้ด้วยวิธีการอบชุบความร้อน แต่เมื่อเติมแมกนีเซียม หรือทองแดง จะเกิดการรวมตัวให้เฟสกึ่งโลหะ เช่น Mg_2Al_3 หรือ $CuAl_2$ ซึ่งทำให้สามารถปรับปรุงสมบัติทางกลได้โดยนำมาผ่านกระบวนการทางความร้อนแบบ T5 ที่ประกอบด้วยกระบวนการบ่มเทียม หรือ T6 ที่ประกอบด้วย 3 กระบวนการ ดังนี้

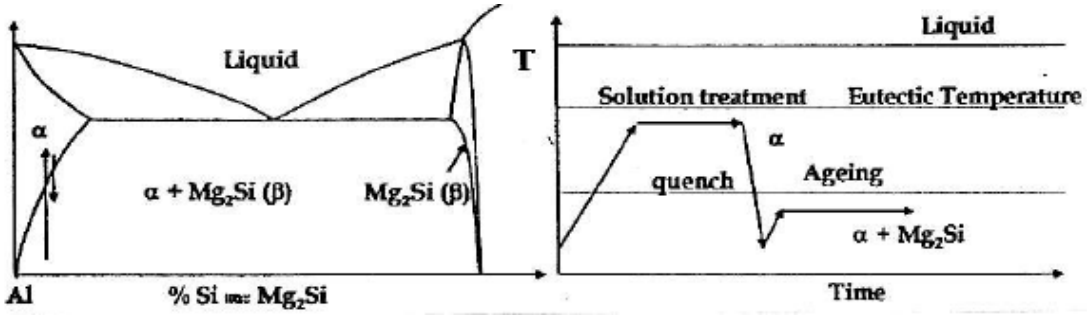
1. การอบละลาย (Solution treatment) เป็นการอบเพื่อละลายเฟสที่สอง เช่น Mg_2Si หรือ $CuAl_2$ ให้อยู่ในรูปสารละลายของแข็งและมีการแพร่อย่างทั่วถึงทั้งชิ้นงาน โดยอุณหภูมิและเวลาของการอบละลายขึ้นอยู่กับหมายเลขและขนาดของโลหะผสมเป็นหลัก

2. การชุบ (Quenching) เพื่อให้ธาตุ Mg และ Cu ที่ละลายเป็นสารละลายของแข็งในกระบวนการแรก ยังคงอยู่ในสภาวะสารละลายของแข็งที่อุณหภูมิต่ำ โดยนำโลหะผสมจากกระบวนการที่ 1 มาทำให้เกิดการเย็นตัวลงมาอย่างรวดเร็ว ธาตุเหล่านี้จะอยู่ในรูปสารละลายของแข็งที่มีสภาวะอิ่มตัวยิ่งยวด และพร้อมที่จะตกตะกอนออกมาเมื่อนำมาผ่านกระบวนการขั้นที่ 3

3. การบ่ม (Aging) กระบวนการนี้ทำให้เกิดการตกตะกอนของเฟสกึ่งโลหะที่มีความละเอียดมาก และช่วยเพิ่มความแข็งได้ การบ่มอาจทำได้โดยการวางชิ้นงานไว้ ณ อุณหภูมิห้อง เรียกว่า การบ่ธรรมชาติ (Natural aging) หรือนำชิ้นงานไปอบที่อุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับการตกตะกอน เรียกว่า การบ่มเทียม (Artificial aging) โดยอุณหภูมิของการบ่มที่ขึ้นอยู่กับหมายเลขของโลหะผสม และเวลาของการบ่มที่ให้ความแข็งสูงสุดขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของการบ่ม

ขั้นตอนการบ่ม (Age Hardening)

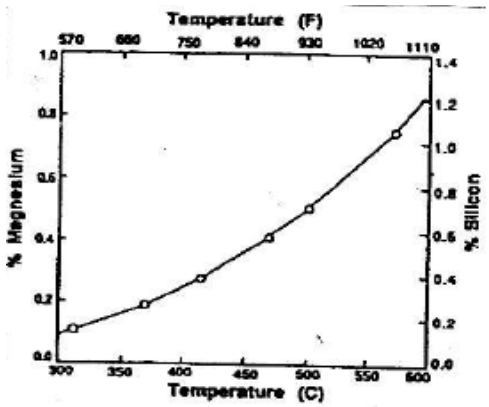
โลหะผสมอะลูมิเนียม-ซิลิกอนชนิดเกรด A356 ถูกนำมาเพิ่มความแข็งจากสภาวะหล่อด้วยกระบวนการบ่มแข็ง (Age Hardening) โดยทำให้เกิดอนุภาคขนาดเล็กของเฟสที่สอง (Secondary Phase) นั่นคือ อนุภาค Mg_2Si กระจายตัวอยู่ในเนื้อเมตริกซ์ (เฟส $\alpha - Al$) โดยอนุภาค Mg_2Si ที่เกิดขึ้นเหล่านี้ทำหน้าที่ต้านทานการเคลื่อนที่ของดีสโลเคชัน (Dislocation) ด้วยกลไก Cutting และ Bowing ส่งผลให้ชิ้นงานที่ผ่านการบ่มมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น ซึ่งขั้นตอนการบ่มประกอบด้วยกระบวนการอบชุบ 3 ขั้นตอนดังแสดงในรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 ขั้นตอนการบ่มของโลหะผสมอะลูมิเนียม-ซิลิกอน

ขั้นตอน Solution Treatment

โลหะอะลูมิเนียมหล่อผสมเกรด A356 จะมีส่วนผสมทางเคมีที่สำคัญคือ อะลูมิเนียม, ซิลิกอน และ แมกนีเซียม ซึ่งผลจากอัตราการเย็นตัวชิ้นทดสอบในสภาวะหล่อจะเกิดการ Segregation ของแมกนีเซียมและซิลิกอนอยู่ในรูปของเฟส Mg_2Si ที่มีขนาดใหญ่และซิลิกอนที่เหลือจะอยู่ในรูปเฟส Eutectic Silicon เมื่อชิ้นทดสอบผ่านการทำ Solution Heat Treatment ด้วยการอบชิ้นทดสอบที่อุณหภูมิสูงพบว่ามีการละลายของเฟส Mg_2Si ทำให้ซิลิกอนและแมกนีเซียมละลายเข้าสู่ในโครงสร้างอะลูมิเนียมเนื่องจากความสามารถในการละลายของซิลิกอนและอะลูมิเนียมสูงขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 ความสามารถในการละลายของธาตุซิลิกอนและแมกนีเซียมภายในเนื้อเมตริกซ์กับอุณหภูมิ

เมื่อพิจารณาโครงสร้างจุลภาคของโลหะผสมอะลูมิเนียม-ซิลิกอนหล่อเกรด A356 จากเฟสไดอะแกรมของอะลูมิเนียม-ซิลิกอน-แมกนีเซียมซิลิไซด์พบว่าอุณหภูมิในการแข็งตัวของเฟสแต่ละชนิดมีค่า

แตกต่างกัน ส่งผลให้เกิดการแยกตัวของธาตุต่าง ๆ ภายในโครงสร้างของชิ้นงาน ซึ่งเรียกว่าการเกิด Segregation จากเฟสไดอะแกรมพบว่าเมื่อน้ำอะลูมิเนียมหลอมเหลวผ่านอุณหภูมิ 615 °C จะเริ่มเกิดเฟสของแข็ง ซึ่งเรียกว่าเฟส $\alpha - Al$ ซึ่งจะเริ่มแข็งตัวก่อนและมีลักษณะรูปร่างคล้ายกิ่งไม้ ที่เรียกว่า Dendrite โดยเฟส $\alpha - Al$ ที่เกิดขึ้นมีปริมาณซิลิกอนและแมกนีเซียมที่สามารถละลายได้น้อยมาก เมื่อเฟส $\alpha - Al$ เติบโตขึ้นเรื่อย ๆ ทำให้น้ำอะลูมิเนียมหลอมเหลวมีปริมาณของธาตุซิลิกอนและแมกนีเซียมเพิ่มขึ้น ซึ่งอยู่ตามระหว่างแขน Dendrite ทำให้ชิ้นทดสอบจะอยู่ในสภาวะกึ่งของแข็งกึ่งของเหลว จนกระทั่งเมื่อชิ้นทดสอบเย็นตัวผ่านอุณหภูมิ 577 °C จะมีเฟส Eutectic Silicon เกิดขึ้นและเป็นบริเวณที่เย็นตัวสุดท้าย ส่งผลทำให้เกิดความแตกต่างของส่วนผสมทางเคมีภายในโครงสร้างของชิ้นงาน

โดยขั้นตอน Solution Treatment คือขั้นตอนการอบชิ้นทดสอบที่อุณหภูมิสูง ทำให้อะตอมของธาตุต่างๆ ภายในโครงสร้างผลึกเกิดการแพร่ของอะตอมจากบริเวณที่ความเข้มข้นสูงไปยังบริเวณที่มีความเข้มข้นต่ำได้รวดเร็วขึ้น โดยการให้ความร้อนกับโลหะผสมอะลูมิเนียม-ซิลิกอนหล่อ เกรด A356 จนกระทั่งอุณหภูมิของชิ้นงานเท่ากับ 520-550°C เป็นระยะเวลา 4-12 ชั่วโมง ทำให้อะตอมของตัวถูกละลายเกิดการละลายอาทิ เช่น ซิลิกอน แมกนีเซียมละลายเข้าสู่ตัวทำละลายคือเฟส $\alpha - Al$ เพื่อทำให้เนื้อเมตริกซ์มีความเป็นเนื้อเดียวกับตัวทำละลาย โดยอาศัยการแพร่ของอะตอมในโครงสร้างซึ่งเป็นการแพร่แบบแทนที่ จากเฟสไดอะแกรมพบว่าเมื่อเพิ่มอุณหภูมิของชิ้นงานให้สูงขึ้น ส่งผลทำให้อะตอมต่าง ๆ ภายในโครงสร้างมีพลังงานเพิ่มขึ้น ซึ่งทำให้เกิดโอกาสในการเกิดช่องว่างภายในโครงสร้างของผลึกซึ่งเรียกว่า วาเคนซี (Vacancy) ได้มากขึ้น โดยวาเคนซีที่เกิดขึ้นเหล่านี้ทำให้อะตอมของซิลิกอนและแมกนีเซียมสามารถแพร่แบบแทนที่เข้าสู่เนื้อเมตริกซ์ได้รวดเร็วขึ้น

ขั้นตอน Quenching

โดยการชุบชิ้นทดสอบที่ผ่านขั้นตอน Solution Treatment ที่มีอุณหภูมิในช่วง 25-60 °C ทำให้อะตอมของซิลิกอนและแมกนีเซียมที่ละลายเข้าสู่เฟส $\alpha - Al$ ในระหว่างขั้นตอน Solution Treatment ไม่มีระยะเวลาเพียงพอที่จะแพร่ออกจากเฟส $\alpha - Al$ จึงตกค้างภายในเนื้อเมตริกซ์ $\alpha - Al$ ในสภาวะสารละลายของแข็งอิ่มตัวยิ่งยวด (Super saturated solid-solution)

ขั้นตอน Aging

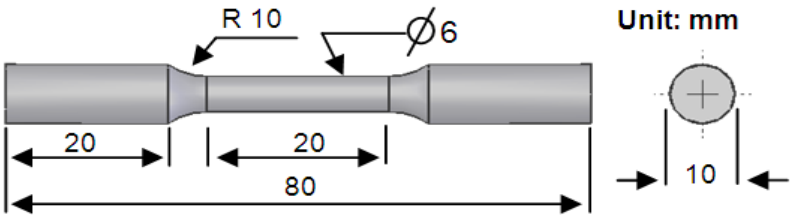
โดยการให้ความร้อนแก่ชิ้นทดสอบที่อุณหภูมิประมาณ 120-200 °C เป็นระยะเวลา 3-24 ชั่วโมง หลังจากผ่านขั้นตอน Quenching ในขั้นตอน Aging จะเกิดการแพร่ของอะตอมซิลิกอนและแมกนีเซียมออกจากเฟส $\alpha - Al$ ไปรวมตัวกันและเกิดเป็นกลุ่มอนุภาคของเฟสใหม่ที่เรียกว่าอนุภาค Mg_2Si และอนุภาคที่เกิดขึ้นเหล่านี้มีขนาดเล็กในระดับนาโนเมตรและกระจายตัวในเนื้อเมตริกซ์ โดยอุณหภูมิและระยะเวลาในขั้นตอน Aging มีผลต่ออัตราการแพร่ของอะตอมของซิลิกอนและแมกนีเซียมที่จะฟอร์มตัวกันเป็นอนุภาค Mg_2Si โดยกลไกการเกิดเฟสใหม่เป็นไปตามปฏิกิริยา Precipitation Hardening ดังนี้

$$\text{GP Zone} \longrightarrow \beta'' \text{ Phase} \longrightarrow \beta' \text{ Phase} \longrightarrow \beta \text{ (Stable phase)}$$

2.1.6 การทดสอบความแข็งแรงดึง

การทดสอบสมบัติเชิงกล เพื่อหาค่าความแข็งแรงดึงของกรรมวิธีโดยการแพร่ จะทดสอบแรงดึงของรอยยึดติดจากการต่อ ใช้ชิ้นทดสอบแบบลดขนาดตามมาตรฐานงานกลม นำมาขึ้นรูปเป็นชิ้นทดสอบแรงดึง ตามยาวกับแนวเชื่อม นำไปทดสอบแรงดึงที่อุณหภูมิห้องความเร็วในการดึง 1.67×10^{-2}

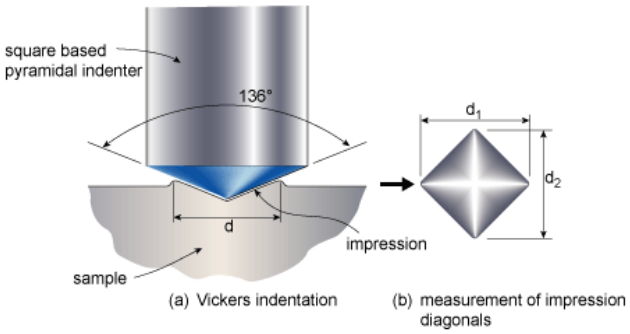
มิลลิเมตร/วินาที โดยใช้มาตรฐาน ASTM (A370) เพื่อดูค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุด และค่าเปอร์เซ็นต์การยืดหลังจากการเสียรูป โดยการเตรียมชิ้นงานจะแสดงดังรูปที่ 2.6 และมาตรฐาน ASTM (A370)



รูปที่ 2.6 แสดงชิ้นงานทดสอบแรงดึงตามมาตรฐาน ASTM A370

2.1.7 การทดสอบความแข็ง

เป็นการทดสอบความสามารถของโลหะในการต้านทานต่อการแปรรูปถาวร เมื่อถูกแรงกดจากหัวกดกระทำลงบนชิ้นทดสอบ การทดสอบความแข็งที่นิยมใช้มี 3 วิธี คือ บริเนลล์ ร็อกเวลล์ และวิกเกอร์ส สำหรับในงานวิจัย ผู้วิจัยได้เลือกวิธีการทดสอบแบบวิกเกอร์ส เนื่องจากการทดสอบความแข็งแบบวิกเกอร์ส จะเหมาะสำหรับการวัดบริเวณพื้นที่หน้าตัดของแนวกวนโดยในการวัดความแข็งจะใช้หัวกดเพชรมีลักษณะเป็นปิรามิดฐานสี่เหลี่ยมที่ปลายหัวกดทำมุม 136 องศา ดังรูปที่ 2.7 โดยเวลาที่ใช้ในการกด 10 วินาที ค่าความแข็งจะคำนวณจากแรงกดที่กระทำต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ผิว สามารถวัดค่าความแข็งได้ตั้งแต่โลหะที่นิ่มมากค่าความแข็งประมาณ 5 kgf/mm^2 จนถึงโลหะที่แข็งมากๆ ประมาณค่าความแข็งประมาณ 1,500 kgf/mm^2 โดยไม่ต้องเปลี่ยนหัวกด จะเปลี่ยนเฉพาะแรงกดเท่านั้น โดยมีค่าระหว่าง 1-120 kgf ขึ้นอยู่กับความแข็งของโลหะ



รูปที่ 2.7 การทดสอบแรงกดแบบไมโครวิกเกอร์ส

การวัดค่าความแข็งด้วยเครื่องวัดความแข็งแบบไมโครวิกเกอร์ส บริเวณภาคตัดตามยาวรอยกวนเพื่อหาว่าในแต่ละบริเวณของชิ้นทดสอบกวนมีค่าความแข็งภายในเนื้อวัสดุที่แตกต่างกันมากน้อยเพียงใด จากการคำนวณโดยใช้สมการ

$$Hv = \frac{1.854P}{d^2} \qquad (2)$$

เมื่อ

Hv	คือ	ค่าความแข็งแบบ Vickers (kgf /mm^2)
P	คือ	แรงกด (kgf)
d	คือ	ขนาดเส้นทแยงมุม d1 และ d_2 เฉลี่ย (mm)

2.2 การทบทวนวรรณกรรม/งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

T.J Linert [8] ได้ศึกษาการเชื่อมเสียดทานแบบกวนของการเชื่อมอะลูมิเนียมผสมด้วยการเชื่อมเสียดทานแบบกวนซึ่งมีข้อดีหลายอย่างเมื่อเปรียบเทียบกับการเชื่อมแบบหลอมละลาย (Fusion welding) เช่น สามารถหลีกเลี่ยงการแตกในระหว่างการแข็งตัวและลดปัญหาเกี่ยวกับการเกิดโพรงอากาศ (Porosity) โดยเฉพาะกับการเชื่อมอะลูมิเนียมผสมที่หล่อโดยวิธีไดคาสติ้งเพราะว่าการเชื่อมเสียดทานแบบกวนเป็นการเชื่อมในสภาวะของแข็ง ความร้อนที่เกิดขึ้นไม่เกินจุดหลอมเหลวของวัสดุจึงไม่เกิดการหลอมละลาย ทำให้โครงสร้างเกิดการเปลี่ยนเฟสจากเฟสหนึ่งไปเป็นอีกเฟสหนึ่ง ชิ้นงานที่ผ่านการเชื่อมเสียดทานแบบกวนจะมีความเค้นตกค้าง (Residual stress) การบิดงอ (Distortion) น้อยกว่าการเชื่อมแบบหลอมละลาย ความเค้นตกค้างที่น้อยกว่าเป็นผลมาจากความร้อนที่ต่ำขณะเชื่อม (Heat input)

C.S. Lee [9] และคณะได้ศึกษาการเชื่อมอะลูมิเนียมคอมโพสิต เกรด 6061 โดยใช้อุณหภูมิ 400-450 องศาเซลเซียส เวลากดแช่ 16 นาที ภายใต้แรงกด 10.69 MPa. โดยแรงกดจะออกแรง 3 ระดับ ระดับแรกให้แรงกดที่ต่ำ (Preload) เพื่อให้เกิดแรงอัดที่ผิวสัมผัสน้อยทำให้ช่วงรีคอฟเวอร์รี่ของการแพร่สั้น จากนั้นให้แรงกดเข้าสู่ช่วงกดเชื่อม (Compressive load) ช่วงนี้จะทำให้ผิวสัมผัสที่มีแรงเพิ่มขึ้นส่งผลให้ชิ้นงานที่ได้รับแรงในช่วงพรีโหลดยึดติดดีขึ้นและลดแรงกดลงมาในระดับที่ต่ำอีกครั้ง (Applied load) เพื่อลดการโก่งงอที่อุณหภูมิสูง การให้แรง 3 ระดับ เพื่อลดการเกิดอะลูมิเนียมออกไซด์ที่ผิวงานเชื่อม จากการทดลองพบว่าค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุดอยู่ที่ 163.9 MPa. ประสิทธิภาพรอยต่อ (Joint efficiency) เฉลี่ย 90.5 เปอร์เซ็นต์ และพื้นที่การยึดติด (Bonded area) อยู่ที่ 77.7 เปอร์เซ็นต์ ในการเชื่อมโดยการแพร่ของอะลูมิเนียมพบว่าปัญหาส่วนใหญ่จากการเชื่อม คือ การเกิดออกไซด์ฟิล์มบริเวณผิวงานเชื่อม ฟิล์มออกไซด์ที่เกิดขึ้นจะแปรผันตรงกับอุณหภูมิในการเชื่อม ยิ่งอุณหภูมิเชื่อมที่สูงก็ยิ่งส่งผลให้เกิดฟิล์มออกไซด์ที่ง่ายขึ้น โดยฟิล์มออกไซด์จะเป็นตัวขัดขวางการยึดติดเข้าด้วยกันของชิ้นงานเชื่อม ส่งผลให้ชิ้นงานมีค่าความต้านทานแรงดึงที่ลดลง

A. URENA และ J.M. GOMEZ DE SALAZAR [10] ได้ทำการทดลองเชื่อมโดยการแพร่ของวัสดุต่างชนิดเข้าด้วยกัน ระหว่างอะลูมิเนียมเกรด AA2124 กับ อะลูมิเนียม เกรด 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 หลังจากนั้นบ่มเทียมชิ้นงานที่อุณหภูมิ 191 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 16 ชั่วโมง หลังจากการทดลองครั้งนี้ผลปรากฏว่าอนุภาคของทองแดงที่มีรูปร่างลักษณะเป็นแบบแท่ง (Rod) ในเกรด AA2124 แพร่เข้าไปสู่อะลูมิเนียม เกรด AA8090 โดยบริเวณรอยต่อเชื่อม (Bond line) พบว่ามีความเข้มข้นของทองแดงที่สูง ซึ่งอนุภาคทองแดงจะฟอร์มตัวในรูปสารประกอบ $CuAl_2$

X-P. Zhang และคณะ [11] ได้ศึกษาการเชื่อมโดยการแพร่ของอะลูมิเนียมคอมโพสิตที่เสริมแรงด้วยซิลิกอนคาร์ไบด์ เกรด 2024 และ 6061 โดยใช้ตัวแปรด้านเวลาในการกดแช่ 15 นาที ที่แรงกด 0.08-0.09 MPa. และอุณหภูมิ 540 องศาเซลเซียส การทดลองทำภายใต้ระบบสุญญากาศ อะลูมิเนียมคอมโพสิตเกรด 2024 มีปริมาณสัดส่วนคอม โพสิตผสมต่างกัน คือที่ 0, 5, 10, 15, และ 25 เปอร์เซ็นต์ และอะลูมิเนียมคอมโพสิตเกรด 6061 มีปริมาณสัดส่วนคอมโพสิต 10 และ 25 เปอร์เซ็นต์ ชิ้นงานผ่านการกระบวนการทางความร้อน T6 ที่อุณหภูมิอบละลาย 520 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมงและบ่มเทียมที่อุณหภูมิ 160 เป็นเวลา 8-12 ชั่วโมง ในการเชื่อมจะทำการเชื่อมชิ้นงานที่มีส่วนผสมเดียวกันเข้าด้วยกัน จากการทดลองพบว่าค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุดอยู่ที่การเชื่อมอะลูมิเนียม เกรด 2024 ที่ไม่มีส่วนผสมของคอมโพสิต (SiC_p/2024Al+SiC_p/2024Al) มีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 128 MPa ซึ่งอะลูมิเนียมคอมโพสิต เกรด 2024 มีปริมาณสัดส่วนคอมโพสิตผสมอยู่ที่ 5 เปอร์เซ็นต์ ให้ค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุดรองลงมา มีค่าเฉลี่ยที่ 98 MPa แต่หากเป็นการเชื่อมอะลูมิเนียมคอมโพสิตที่มีสัดส่วนคอมโพสิตต่างกันเข้าด้วยกัน พบว่าที่อะลูมิเนียมคอมโพสิต เกรด 2024 มีปริมาณสัดส่วนคอมโพสิตผสมอยู่ที่ 5 เปอร์เซ็นต์ สามารถเชื่อมได้ดีกับอะลูมิเนียมคอมโพสิต เกรด 6061 มีปริมาณสัดส่วนคอมโพสิต 10 เปอร์เซ็นต์ (5%SiC_p/2024Al+10% SiC_p/6061Al) ค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุดมีค่าเฉลี่ยที่ 74 MPa โดยลักษณะโครงสร้างทางจุลภาคพบว่าที่เส้นรอยต่อพบปริมาณอะลูมิเนียม 86 เปอร์เซ็นต์ ซิลิกอน 12.8 เปอร์เซ็นต์ และแมกนีเซียม 1.2 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

A.S. Zuruzi [12] ได้นำเทคนิคความขรุขระของผิวงานก่อนเชื่อมเข้ามาลดฟิล์มออกไซด์ โดยได้ทดลองเชื่อมอะลูมิเนียม เกรด 6061 ที่ผ่านการขัดด้วยกระดาษทรายที่มีความละเอียดต่างกัน คือ เบอร์ 180 และ 1,000 กริด มาเชื่อมที่อุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส ที่แรงกด 8.08 MPa เวลาในการกดแช่ต่างกัน 30, 45, 60, 75 และ 90 นาที เชื่อมในสภาวะบรรยากาศทั่วไป และได้พบว่าที่ความขรุขระของผิวเชื่อมที่ผ่านการขัดด้วยกระดาษทราย 180 กริด ที่เวลา 75 นาที ให้การยึดติดหลังการเชื่อมที่ดีที่สุด ให้ค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุดอยู่ที่ 124 MPa กระดาษทรายที่มีความขรุขระจะส่งผลให้การทำลายฟิล์มออกไซด์ในขณะเชื่อมทำได้ดีกว่า

Anne Sunwoo และ Reynold Lum [13] จึงได้ศึกษาการเชื่อมโดยการแพร่ของอะลูมิเนียมโดยเชื่อมภายใต้ตัวแปรดังนี้ ชิ้นงานเป็นแผ่นแบนที่ความหนา 1.5 มิลลิเมตร มีขนาดของเกรนเฉลี่ยน้อยกว่า 10 μm ก่อนการเชื่อมขัดด้วยกระดาษทรายละเอียดเบอร์ 400 กริด และทำความสะอาดผิวด้วยกรดไนตริกเป็นเวลา 2 นาที จากนั้นให้แรงกดที่ 0.41, 0.55, 0.70, 0.85 และ 0.97 MPa อุณหภูมิช่วง 500-515 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที การทดลองทำภายใต้บรรยากาศอาร์กอนปกคลุม หลังจากการทดลองนำมาทดสอบค่าความต้านทานแรงดึงและวิเคราะห์ลักษณะการแตกหักของชิ้นงาน ซึ่งพบว่าที่แรงกด 0.70 และ 0.85 MPa ให้ค่าความต้านทานแรงดึงสูงที่สุด โดยมีค่า 21 N/mm^2 แล้วนำชิ้นส่วนรอยขาดไปวิเคราะห์การแตกหักจากการขาดด้วยเครื่องอิเล็กตรอนแบบส่องกราด จากการวิเคราะห์ผลพบว่า พื้นที่รอยขาดส่วนใหญ่จะยึดติดแบบเหนียว แต่ผิวยึดติดจะแตกต่างกันตามตัวแปรในการทดลอง โดยการยึดติดแบบนี้เรียกว่า การยึดติดแบบรังผึ้ง (Honeycomb) และในผิวหน้ารอยต่อยังพบอีกว่าประกอบไปด้วย 3 ลักษณะ คือ การแตกหักแบบเหนียว จะให้รอยบุ๋มจากการขาดที่ลึก การแตกหักแบบกึ่งเหนียว ลักษณะการขาดจะตื้นว่าการขาดแบบเหนียว และพื้นที่บางส่วนไม่เกิดการยึดติด

Anne Sunwoo และ Reynold Lum [14] ได้เชื่อมโดยการแพร่ของอะลูมิเนียมเกรด 7475 ซึ่งขนาดชิ้นงานยังคงขนาดเดิม อุณหภูมิที่ใช้ 510 องศาเซลเซียส ในการทดลองครั้งนี้จะแตกต่างจากงานวิจัยครั้งก่อน คือ แรงที่ใช้ในการกดจะเพิ่มตามความเค้นที่ชิ้นงานรับได้ที่อุณหภูมิสูงโดยแรงกดเริ่มต้นที่ 0.3

MPa ชิ้นงานจะมีความเค้น 40 เปอร์เซ็นต์ แรงกด 0.85 MPa ชิ้นงานจะมีความเค้น 100 เปอร์เซ็นต์ ความเร็วที่ใช้ในการกดอยู่ที่ 0.3 มิลลิเมตรต่อนาที จากการทดลองทำให้ทราบได้ว่า ค่าแรงกดที่ใช้ไม่ควรน้อยกว่า 0.6 MPa เพราะทำให้แรงกดต่ำเกินส่งผลให้ชิ้นงานไม่ติด ค่าที่เหมาะสมควรอยู่ที่ 0.9 MPa ค่าความแข็งแรงดึงเฉลี่ยอยู่ที่ 50 MN/m^2. ลักษณะชิ้นงานที่ขาดจะเป็นแบบเกิดรอยบุ๋มลึก เพราะเป็นการขาดแบบเหนียว

Xu Huibin และคณะ [15] ได้ศึกษาการเชื่อมอะลูมิเนียมคอมโพสิต เกรด A356 ในการทดลองใช้ตัวแปรดังต่อไปนี้ อะลูมิเนียมคอมโพสิต ที่มีปริมาณซิลิกอนคอมโพสิตผสมอยู่ในสัดส่วน 20 เปอร์เซ็นต์ โดยชิ้นงานเชื่อมเป็นทรงกระบอกขนาด 10x40 มิลลิเมตร จากนั้นใช้ตัวเติมสังกะสีอะลูมิเนียม (Zn-Al) ขนาด 10x5 มิลลิเมตร เป็นตัวประสานระหว่างชิ้นงาน ในการทดลองใช้อุณหภูมิที่ 530 องศาเซลเซียส แรงกด 4 MPa เวลาที่ใช้ 2 นาที โดยให้ชิ้นงานเกิดการสั่นที่ความถี่ 50 Hz ด้วยเวลา 5, 10, 20, 30 และ 45 วินาที การทดลองครั้งนี้ทำในบรรยากาศทั่วไป จากการทดลองพบว่าสังกะสีอะลูมิเนียมที่เป็นตัวประสานระหว่างชิ้นงานมีจุดหลอมเหลวที่ต่ำกว่าจึงหลอมละลายเป็นตัวประสานให้ชิ้นงานยึดติดกันและเมื่อนำไปทดสอบแรงดึงพบว่าที่เวลาในการสั่น 30 วินาที ให้ค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุด มีค่าอยู่ที่ 175 MPa จากนั้นได้ศึกษาลักษณะรอยต่อด้วยระบบ EPMA พบว่าบริเวณรอยต่อมีออกไซด์แทรกตัวอยู่ระหว่างช่องว่างหลังจากเชื่อม นอกจากนั้นยังพบสัดส่วนของสังกะสี อะลูมิเนียมและทองแดงที่สูงบริเวณรอยต่อ ซึ่งเป็นผลมาจากตัวเติม ปริมาณออกไซด์ที่มากทำให้ชิ้นงานยึดติดได้ไม่ดี

M.Muratoglu และ O.Yilmaz, M.Aksoy [16] นักวิจัยชาวตุรกีได้ร่วมกันศึกษาการเชื่อมโดยการแพร่ของอะลูมิเนียมสองชนิดเข้าด้วยกัน ซึ่งอะลูมิเนียมที่ใช้เป็นอะลูมิเนียมคอมโพสิต เกรด 2124 เชื่อมเข้ากับอะลูมิเนียมบริสุทธิ์ โดยอะลูมิเนียมคอมโพสิตมีปริมาณซิลิกอนคอมโพสิตผสมอยู่ในสัดส่วน 25 เปอร์เซ็นต์ ผ่านกระบวนการทางความร้อน T6 ที่อุณหภูมิอบละลาย 495 องศาเซลเซียส เวลา 1 ชั่วโมง หลังจากนั้นบ่มเทียมที่อุณหภูมิ 175 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง เชื่อมภายใต้ตัวแปรที่อุณหภูมิ 475 องศาเซลเซียส เวลาที่ใช้ 30 นาที แรงกด 2.5 MPa และเชื่อมภายใต้บรรยากาศอาร์กอนที่ 3 bar จากการทดลองพบว่าชิ้นงานมีค่าความแข็งต่างกันตามเนื้อเดิมของวัสดุ โดยความแข็งชิ้นงานด้านอะลูมิเนียมคอมโพสิต 2124 มีค่าความแข็งเฉลี่ย 255 HV ส่วนค่าความแข็งเฉลี่ยด้านอะลูมิเนียมบริสุทธิ์เฉลี่ย 184 HV และเมื่อศึกษาความเค้นที่ตกค้างหลังจากเชื่อมชิ้นงานพบว่า ชิ้นงานมีความเค้นตกค้างที่ลดลง เนื่องมาจากชิ้นงานผ่านกระบวนการทางความร้อนมาแล้ว เมื่อได้รับความร้อนอีกจึงเป็นการปลดปล่อยพลังงานที่ตกค้าง และยังพบอีกว่าปริมาณทองแดงจากอะลูมิเนียมคอมโพสิต เกรด 2124 แพร่ไปยังด้านอะลูมิเนียมบริสุทธิ์ แต่ซิลิกอนบริเวณรอยต่อลดน้อยลง

K.Kitazono [17] ทีมวิจัยจากญี่ปุ่นได้ศึกษาการเชื่อมอะลูมิเนียมโฟม โดยอะลูมิเนียมโฟมที่ใช้เป็นเกรด ALPORAS ที่ใช้ในอุตสาหกรรมการบิน สาเหตุที่ต้องเชื่อมอะลูมิเนียมโฟมด้วยการเชื่อมโดยการแพร่ เพราะเพื่อหลีกเลี่ยงการเชื่อมแบบเดิมซึ่งเชื่อมวัสดุชนิดนี้ได้ยาก ในการทดลองครั้งนี้ใช้อะลูมิเนียม เกรด 5083 เป็นตัวประสานระหว่างชิ้นงานทั้งสองชิ้นให้ยึดติดกัน อุณหภูมิที่ใช้ 773 และ 823 เคลวิน แรงกด 0.2 MPa และเวลาที่ใช้ 30 นาที ชิ้นงานที่เชื่อมเป็นทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้า ขนาด 29x10x10 มิลลิเมตร ก่อนการเชื่อมมีการทำความสะอาดผิวหน้าด้วยกรดเคลเลอร์ (Keller acid) หลังการทดลองพบว่าบริเวณรอยต่อเกิดการแพร่ของแมกนีเซียมจากอะลูมิเนียม 5083 ไปยังด้านอะลูมิเนียมโฟมสัดส่วนความเข้มข้นอยู่ที่ 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักและจะลดลงเรื่อย ๆ ตามระยะทางของการแพร่และค่าความต้านทานแรงดึงของอุณหภูมิเชื่อมที่ 773 เคลวิน มากกว่าที่อุณหภูมิเชื่อม 823 เคลวิน แต่ค่าความต้านทานแรงดึงจะได้แค่ 60 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเปรียบเทียบกับเนื้อวัสดุเดิม

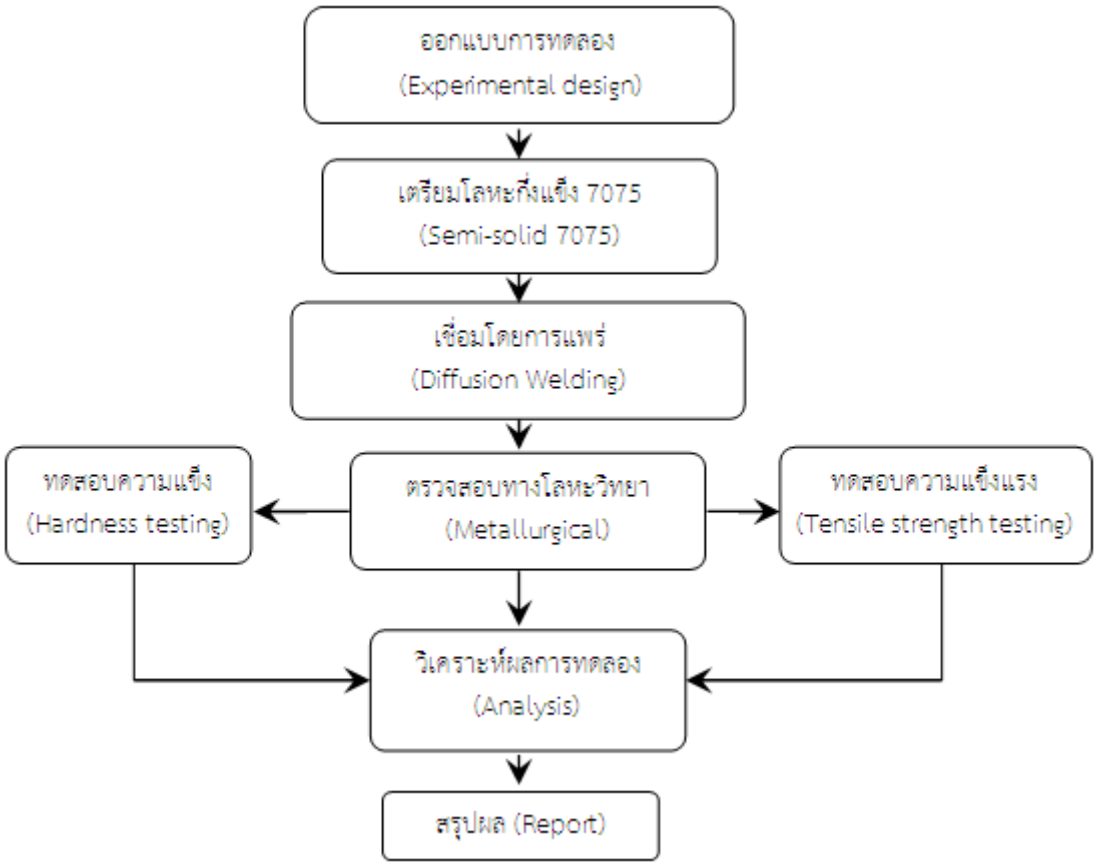
บทที่ 3

วิธีการดำเนินงาน

บทนี้จะกล่าวถึงเครื่องมือ และอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองวิจัย ซึ่งนำมาใช้เป็นเครื่องมือพื้นฐานสำหรับการทดลองและเครื่องมือหลักในการทดลอง โดยมีขั้นตอนในการทดลองต่างๆ ดังต่อไปนี้

3.1 การดำเนินงานวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการเชื่อมต่อชนของอะลูมิเนียม SSM7075 ด้วยกรรมวิธีการเชื่อมโดยการแพร่แบบเฟสของเหลวชั่วขณะ (Transient liquid of diffusion bonding) โดยใช้สังกะสี-อะลูมิเนียม เกรด ZA27 ในการเป็นตัวประสานเพื่อให้เกิดเฟสของเหลวในขณะเชื่อม การเชื่อมจะทำภายใต้เตาควบคุมอุณหภูมิ ซึ่งมีก๊าซอาร์กอนปกคลุมภายในเตา เพื่อป้องกันออกไซด์ที่เกิดขึ้นในระหว่างการเชื่อม ตัวแปรที่ใช้ในการทดลอง ได้แก่ อุณหภูมิ เวลา แรงกด เป็นต้น โดยขั้นตอนการดำเนินงานวิจัยครั้งนี้ได้ดำเนินงานตามขั้นตอน ดังนี้



รูปที่ 3.1 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัยโดยสรุป

3.2 วัสดุที่ใช้ในงานวิจัย

3.2.1 อะลูมิเนียมหล่อกึ่งของแข็ง SSM7075

อะลูมิเนียมหล่อกึ่งของแข็ง SSM7075 ซึ่งมีส่วนผสมทางเคมีดังตารางที่ 3.1 โดยวัสดุอะลูมิเนียมหล่อกึ่งของแข็ง SSM7075 ผ่านการหล่อขึ้นรูปแบบกึ่งของแข็งด้วยเทคนิค GISS (Gas induced semi-solid) ซึ่งเทคนิค GISS จะทำการหล่อที่อุณหภูมิประมาณ 640 C จะใช้แก๊สไนโตรเจนพ่นผ่านแท่งกราไฟต์พรุน ด้วยความเร็วที่ 5 ลิตร ต่อนาที เพื่อให้เกิดการไหลวนของน้ำโลหะเกิดการแตกตัวของโครงสร้างเดนไดรต์เป็นเวลา 10 วินาที จากนั้นนำน้ำโลหะอะลูมิเนียมไปเทลงใน Mold แล้วอัด (Squeeze) ที่ความดันไม่น้อยกว่า 2,000 Psi ค้างไว้จนโลหะแข็งตัว ได้เป็นชิ้นงานแบบแผ่นสี่เหลี่ยมที่มีความหนาประมาณ 25 มิลลิเมตร ขนาด 10x10 เซนติเมตร ดังแสดงในรูปที่ 3.2

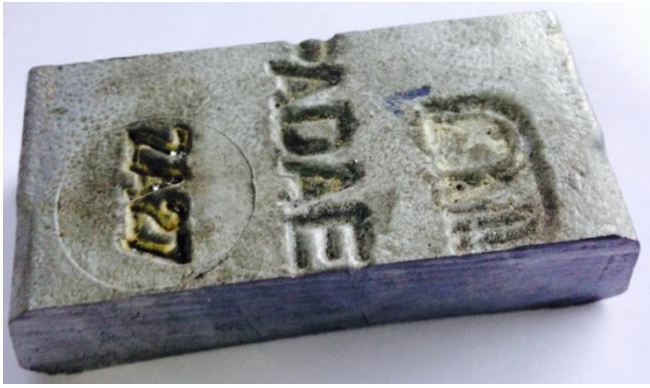
รูปที่ 3.2 อะลูมิเนียมหล่อกึ่งของแข็ง SSM7075

ตารางที่ 3.1 ส่วนผสมทางเคมีของอะลูมิเนียมหล่อผสมแบบกึ่งของแข็ง SSM7075 (W.T.%)

วัสดุ	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Ti	Al
SSM7075	-	0.46	1.93	-	2.50	6.08	-	Bal.

3.2.2 สังกะสี-อะลูมิเนียม เกรด ZA27

สังกะสี-อะลูมิเนียม เกรด ZA27 ซึ่งมีส่วนผสมทางเคมีดังตารางที่ 3.2 เป็นสังกะสีที่มีส่วนผสมของอะลูมิเนียมที่เยอะ โดยส่วนใหญ่มักนำไปขึ้นรูปด้วยกระบวนการหล่อ สมบัติทางกลของสังกะสี-อะลูมิเนียม เกรด ZA27 จะมีค่าความต้านทานแรงดึงที่ 450 MPa และมีเปอร์เซ็นต์การยืดตัวที่ 1-3 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งนำไปสู่ข้อเด่น คือ มีความแข็งแรงและความแข็งสูง นำไฟฟ้าได้ดี มีการนำความร้อนที่สูง และทนต่อการกัดกร่อนที่ดี ซึ่งจากสมบัติเหล่านี้ สังกะสี-อะลูมิเนียม เกรด ZA27 จึงมักถูกนำมาใช้งานในหลายๆ อุตสาหกรรมดังแสดงในรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 สังกะสี-อะลูมิเนียม เกรด ZA27

ตารางที่ 3.2 ส่วนผสมทางเคมีของสังกะสี-อะลูมิเนียม เกรด ZA27 (W.T.%)

วัสดุ	Al	Cu	Mg	Fe	L	Cd	Ni
ZA27	25.0-28.0	2.0-2.5	0.01-0.02	0.075	0.006	0.003	Remainder

3.3 เครื่องมือและอุปกรณ์

3.3.1 เครื่องกลึง ใช้สำหรับการกลึงอะลูมิเนียม SSM7075 เพื่อเตรียมเป็นชิ้นงานสำหรับเชื่อม โดยเครื่องกลึงที่ใช้เป็นเครื่องกลึง ยี่ห้อ JET รุ่น GHB-1340A นอกจากนั้นยังนำไปเตรียมชิ้นงานตามมาตรฐานเพื่อทดสอบแรงดึง ดังแสดงในรูปที่ 3.4

รูปที่ 3.4 เครื่องกลึงชิ้นงานยี่ห้อ JET รุ่น GHB-1340A

3.3.2 เครื่องเลื่อยสายพานแนวนอน ใช้ในการตัดแบ่งชิ้นงานหลังจากการหล่อจนสำเร็จเป็นชิ้นงาน เพื่อเตรียมไปกลึงขึ้นรูปเป็นชิ้นงานทดลอง โดยเครื่องเลื่อยสายพานมีระบบน้ำหล่อเย็นในการระบายความร้อนแนวตัดในขณะเชื่อม เพื่อป้องกันการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาคเมื่อได้รับความร้อนจากการเลื่อย ดังแสดงในรูปที่ 3.5

รูปที่ 3.5 เครื่องเลื่อยสายพานแนวนอน

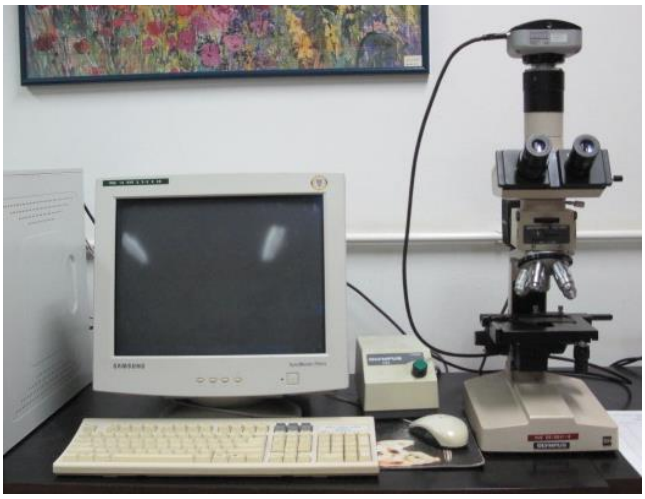
3.3.3 เครื่องขัดกระดาษทรายและขัดผ้าสักหลาด ใช้สำหรับการขัดเตรียมผิวหน้าชิ้นงานก่อนการนำชิ้นงานไปดูภาพในระดับโครงสร้างมหภาคและโครงสร้างจุลภาค ตัวเครื่องจะมีระบบน้ำทำความสะอาดชิ้นงานในระหว่างที่กำลังขัดชิ้นงาน ซึ่งเครื่องสามารถปรับรอบได้ด้วยระบบอัตโนมัติ ดังแสดงในรูปที่ 3.6

รูปที่ 3.6 เครื่องขัดกระดาษทรายและขัดสักหลาด

3.3.4 กล้องถ่ายภาพกำลังขยายต่ำ ยี่ห้อ Zeiss ที่มีกำลังขยายอยู่ในช่วง 2-15 เท่า ใช้ในการถ่ายภาพโครงสร้างระดับมหภาคและหาจุดบกพร่องที่มีขนาดใหญ่หลังจากการเชื่อม โดยตัวกล้องมีไฟล่างเพื่อป้องกันการสะท้อนกลับของแสงจากผิวชิ้นงาน ดังแสดงในรูปที่ 3.7

รูปที่ 3.7 กล้องถ่ายภาพ ยี่ห้อ Zeiss

3.3.5 กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (Optical Microscope, OM) ซึ่งมีกำลังขยายที่สูง โดยมีกำลังขยายอยู่ที่ช่วงระหว่าง 50-500 เท่า ใช้ในการดูภาพโครงสร้างระดับจุลภาคเพื่อดูลักษณะการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างและใช้สำหรับตรวจหาจุดบกพร่องบริเวณเนื้อเชื่อม โดยตัวกล้องจะต่อกับระบบคอมพิวเตอร์เพื่อส่งถ่ายข้อมูลจากการถ่าย ทำให้สามารถเก็บภาพได้อย่างชัดเจนยิ่งขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.8 กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง

3.4 ขั้นตอนการทดลอง

3.4.1 ตัดอะลูมิเนียมผสมหล่อกึ่งของแข็งเกรด SSM7075 ที่ผ่านการหล่อแบบอัด (squeeze casting) นำไปทำการตัดเป็นชิ้นงานทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาด ความกว้าง x ความยาว x ความหนา (20x100x25) มิลลิเมตร ด้วยเครื่องเลื่อยสายพานแนวนอน ในการเลื่อยใช้น้ำหล่อเย็นในการระบายความร้อนของชิ้นงาน และยังเป็นการรักษาคุณสมบัติทางโละวิทยาของชิ้นงาน หลังจากการตัดชิ้นงานเสร็จสิ้นจะได้ชิ้นงาน 5 ชิ้น ต่ออะลูมิเนียม 1 แผ่น ดังแสดงในรูปที่ 3.9

รูปที่ 3.9 อะลูมิเนียมหล่อกึ่งของแข็ง เกรด SSM7075 ที่ผ่านการเลื่อย

3.4.2 หลังจากนั้นนำชิ้นงานที่ตัดเรียบร้อยไปกลึงปอกผิวด้วยความเร็วรอบที่ 1200 รอบต่อนาที อัตราการป้อนลึก ครั้งละ 3 มิลลิเมตร ต่อนาที ใช้ความเร็วในการเดิน 10 มิลลิเมตร ต่อนาที ดังแสดงในรูปที่ 3.10 เพื่อให้ได้ชิ้นงานที่มีผิวเรียบและเป็นทรงกระบอก โดยชิ้นงานที่ได้มีลักษณะเป็นทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12 มิลลิเมตร ยาว 45 มิลลิเมตร ดังแสดงในรูปที่ 3.11

รูปที่ 3.10 กระบวนการกลึงเตรียมชิ้นงานทดลอง

รูปที่ 3.11 ชิ้นทดสอบอะลูมิเนียมหล่อกึ่งของแข็งที่ผ่านการกลึง

3.4.3 นำชิ้นงานที่ได้จากการกลึงมาเตรียมผิวหน้ารอยเชื่อม โดยขัดด้วยกระดาษทรายละเอียดเบอร์ 320 กริด เพื่อกำจัดฟิล์มอะลูมิเนียมออกไซด์ที่ผิวของชิ้นงานเชื่อมก่อนการเชื่อม ดังแสดงในรูปที่ 3.12 อย่างไรก็ตามในขั้นตอนนี้ควรมีการระมัดระวังความลาดเอียงของผิวหน้าหลังจากการขัดด้วย

รูปที่ 3.12 การเตรียมผิวชิ้นงานก่อนการเชื่อม

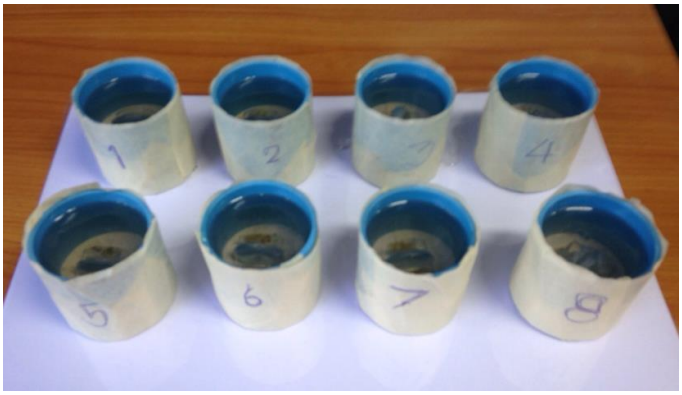
3.4.4 นำชิ้นงานที่ผ่านการเตรียมผิวและขัดด้วยกระดาษทรายเบอร์ 320 กริด เรียบร้อยแล้ว ล้างผิวหน้าด้านที่จะเชื่อมด้วยน้ำยาอะซิโตน (Acetones) โดยในการล้างจะแช่ไว้ 45 วินาที เพื่อทำความสะอาดผิวงานเชื่อมจากคราบสกปรกและคราบไขมันที่ติดผิวงาน ดังแสดงในรูปที่ 3.13 แล้วใช้ลมเป่าจนผิวชิ้นงานแห้ง ขั้นตอนนี้ถือได้ว่าเป็นขั้นตอนที่สำคัญ มือผู้ปฏิบัติงานไม่ควรสัมผัสชิ้นงานโดยตรง และควรสวมหน้ากากปิดจมูกเพื่อป้องกันการสูดดมน้ำยาอะซิโตนนำไปสู่ความปลอดภัยของผู้ปฏิบัติงานเอง

รูปที่ 3.13 ล้างผิวชิ้นงานด้วนน้ำยาอะซิโตน

3.4.5 ในการนำชิ้นงานเข้าเตาเพื่อเชื่อมโดยการแพร่แบบเฟสของเหลวชั่วขณะจะใช้ สังกะสี-อะลูมิเนียม เกรด ZA27 ที่มีขนาดความหนา 3 มิลลิเมตร เป็นตัวประสานตรงกลางระหว่างอะลูมิเนียมหล่อกึ่งของแข็ง เกรด 7075 ทั้งสองชิ้น แล้วทำการเชื่อมตามตัวแปรต่างๆ ที่ได้กำหนดไว้ สำหรับการเชื่อมจะใช้ก๊าซอาร์กอนในการปกคลุม ดังแสดงในรูปที่ 3.14

รูปที่ 3.14 กระบวนเชื่อมโดยการแพร่แบบเฟสของเหลวชั่วขณะ

3.4.6 หลังจากนั้นนำชิ้นงานที่ได้จากการเชื่อมโดยการแพร่แบบเฟสของเหลวชั่วขณะไปหล่อเรือนครอบ ด้วยวิธีการหล่อเรซิ่นและใช้น้ำยาเร่งประสานทำให้เรซิ่นแข็งตัวครอบชิ้นงาน เพื่อนำไปทดสอบความแข็งและตรวจดูโครงสร้างต่อไป ดังแสดงในรูปที่ 3.15

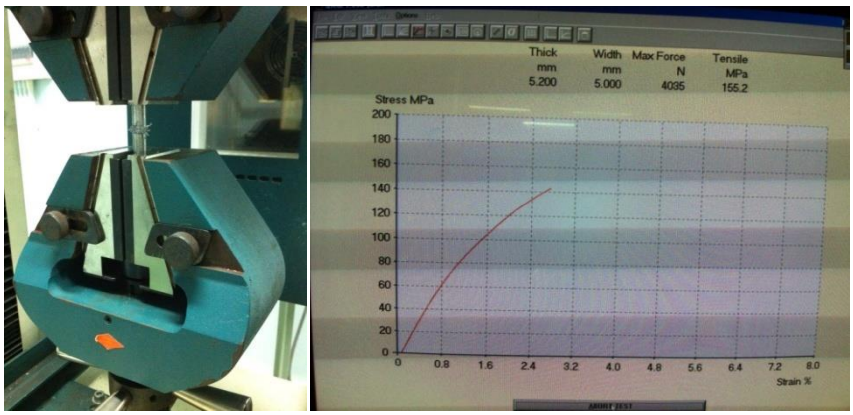


รูปที่ 3.15 วิธีการหล่อเรซิ่นครอบชิ้นงาน

3.4.7 ชิ้นงานที่ได้จากหล่อเรซินเมื่อแข็งตัวถูกนำไปทดสอบความแข็งด้วยเครื่องทดสอบความแข็ง ดังแสดงในรูปที่ 3.16 โดยใช้แรงกดที่ 10 กิโลกรัมแรง เวลาในการกดแช่ 10 วินาที การทดสอบจะใช้แบบวิกเกอร์ส

รูปที่ 3.16 ทดสอบความแข็งด้วยเครื่องทดสอบแบบวิกเกอร์ส

3.4.8 ชิ้นงานที่ได้จากการเชื่อมโดยการแพร่แบบเฟสของเหลวชั่วขณะบางส่วนถูกนำไปทดสอบแรงดึง เพื่อหาค่าความต้านทานแรงดึงของชิ้นงาน ดังแสดงในรูปที่ 3.17 โดยการทดสอบแรงดึงจะทำตามมาตรฐานทดสอบแรงดึง ASTM A370



รูปที่ 3.17 การทดสอบแรงดึงของชิ้นงานเชื่อม

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิจารณ์ผล

การศึกษาและทดลองเชื่อมอะลูมิเนียมหล่อกึ่งของแข็ง เกรด SSM 7075 โดยใช้เทคนิคเป็นการเติมตัวประสานของสังกะสี-อะลูมิเนียม เกรด ZA27 ระหว่างชิ้นงานทั้งสองชิ้น ซึ่งเป็นตัวถูกละลายเพื่อให้ชิ้นงานทั้งสองชิ้นยึดติดกัน เป็นการเพิ่มประสิทธิภาพของการแพร่ ลดระยะเวลาในการเชื่อมได้ หลังจากการทดลองได้มีการทดสอบ สมบัติทางกล ลักษณะโครงสร้างมหภาค และลักษณะโครงสร้างจุลภาค โดยผลการทดลองจะแสดงดังต่อไปนี้

4.1 ลักษณะทางกายภาพของชิ้นงานเชื่อม (Characterizes of sample)

ลักษณะทางกายภาพของชิ้นงานหลังจากการเชื่อมโดยการแพร่แบบเฟสของเหลวชั่วขณะจะมีความแตกต่างกันอย่างชัดเจน ซึ่งขึ้นอยู่กับแต่ละตัวแปรของการทดลอง อุณหภูมิและเวลาที่ใช้สำหรับการเชื่อมมีผลต่อการทดลอง รูปที่ 4.1 แสดงให้เห็นลักษณะของชิ้นงานหลังจากการเชื่อมที่ตัวแปรอุณหภูมิ 480 องศาเซลเซียส เวลาในการเชื่อม 30 นาที ชิ้นงานเชื่อมทั้งสองชิ้นยึดติดกันได้ดี ไม่เกิดการโก่งงอของชิ้นงานหลังจากการเชื่อม ความร้อนและระยะเวลาสั้นๆ ในการเชื่อมส่งผลให้สังกะสี-อะลูมิเนียม เกรด ZA27 ที่เป็นตัวประสานระหว่างชิ้นงานทั้งสองชิ้นยังไม่หลอมละลายทั้งหมด

รูปที่ 4.1 ชิ้นงานเชื่อมที่อุณหภูมิ 480 องศาเซลเซียส เวลาในการเชื่อม 30 นาที

เมื่อเพิ่มเวลาในการเชื่อมที่เพิ่มขึ้น จากเวลาในการเชื่อม 30 นาที ไปสู่เวลาในการเชื่อม 60 นาที ในขณะที่อุณหภูมิยังเท่าเดิมกลับพบว่าสังกะสี-อะลูมิเนียม เกรด ZA27 ที่เป็นตัวประสานระหว่างชิ้นงานทั้งสองชิ้นยังหลอมละลายมากขึ้นจากการสะสมของความร้อนภายในชิ้นงาน ส่งผลให้สังกะสี-อะลูมิเนียม เกรด ZA27 ถูกขับออกมาข้างๆ ชิ้นงานทั้งสองชิ้น เนื่องจากการหลอมละลายที่มีความเป็นของเหลวสูงแล้ว ยังมาจากแรงที่ใช้ในการกดชิ้นงานด้วย ดังแสดงในรูปที่ 4.2

รูปที่ 4.2 ชิ้นงานเชื่อมที่อุณหภูมิ 480 องศาเซลเซียส เวลาในการเชื่อม 60 นาที

คล้ายๆ กัน เมื่อเพิ่มเวลาในการเชื่อม 60 นาที ไปสู่เวลาในการเชื่อม 90 นาที ทำให้สังกะสี-อะลูมิเนียม เกรด ZA27 เกิดการหลอมละลายเป็นเฟสของเหลวโดยสมบูรณ์ ทำให้เกิดการขับออกจากตัวประสานของสังกะสี-อะลูมิเนียม เกรด ZA27 ในปริมาณที่มากขึ้น อย่างไรก็ตามชิ้นงานตามลักษณะทางกายภาพก็ไม่เกิดการโก่งงอ หรือการความจากความร้อนและแรงกด ดังแสดงในรูปที่ 4.3

รูปที่ 4.3 ชิ้นงานเชื่อมที่อุณหภูมิ 480 องศาเซลเซียส เวลาในการเชื่อม 90 นาที

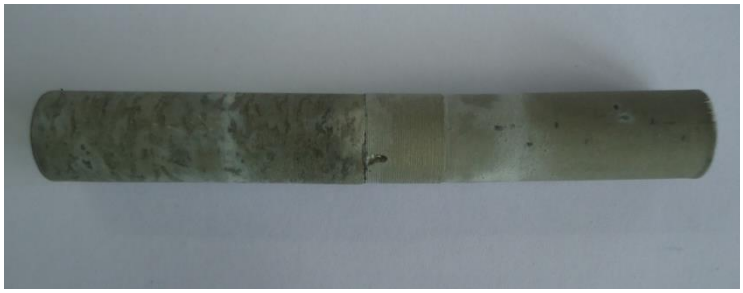
ในขณะเดียวกันเวลาในการเชื่อม 120 นาที ส่งผลให้สังกะสี-อะลูมิเนียม เกรด ZA27 เกิดการขับออกมารอบรอยต่อของชิ้นงาน ยึดประสานกันได้ดี นำไปสู่การยึดติดที่ดีของชิ้นงาน ชิ้นงานไม่เกิดการเสียรูปจากตัวแปรที่เชื่อม ดังแสดงในรูปที่ 4.4 แต่เมื่อเพิ่มเวลาในการเชื่อมที่ยาวนานกว่านี้กลับพบว่าชิ้นงานเริ่มเกิดการเสียรูปจากความร้อน เวลา ที่ถูกกระทำภายใต้แรงกดเนื่องจากเกิดการคืบของโครงสร้างภายในของชิ้นงาน เพราะความร้อนเป็นพลังงานกระตุ้นให้อะตอมในโลหะเหล่านี้เกิดการเคลื่อนที่ และวัสดุกลุ่มอะลูมิเนียมก็มีค่าสัมประสิทธิ์ทางด้านความร้อนที่ดีอีกด้วย

รูปที่ 4.4 ชิ้นงานเชื่อมที่อุณหภูมิ 480 องศาเซลเซียส เวลาในการเชื่อม 120 นาที

การเพิ่มอุณหภูมิสำหรับการเชื่อมโดยการแพร่โดยใช้เทคนิคการเชื่อมแบบให้วัสดุประสานบริเวณชิ้นงานทั้งสองชิ้นเป็นเฟสของเหลวชั่วขณะยิ่งนำไปสู่ระยะเวลาที่สั้นลงในการทำให้ชิ้นงานเกิดการหลอมละลาย เมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการเชื่อมจาก 480 องศาเซลเซียส ไปยังอุณหภูมิ 540 องศาเซลเซียส ชิ้นงานเริ่มมีการเสียรูปจากความร้อนในขณะเชื่อม และเมื่อเพิ่มเวลาที่นานขึ้น นำไปสู่การเสียรูปแบบพลาสติก (Plastic deformation) ของชิ้นงานหลังการเชื่อม ตัวอย่างเช่นที่ อุณหภูมิ 540 องศาเซลเซียส เวลาในการเชื่อม 30 นาที ดังแสดงในรูปที่ 4.5 ลักษณะของชิ้นงานเริ่มเกิดการโก่งงอ บริเวณรอยต่อของชิ้นงานประสานยึดติดกันไม่ดี เพราะเวลาในการเชื่อม 30 นาที ยังไม่สามารถทำให้สังกะสี-อะลูมิเนียม เกรด ZA27 หลอมละลายเป็นของเหลวทั้งหมด จึงนำไปสู่การกัดขอบของชิ้นงานเชื่อมบริเวณรอยต่อของชิ้นงาน ลักษณะการเสียหายเหล่านี้ส่งผลมาจากตัวแปรที่ใช้สำหรับการเชื่อม และส่งผลไปสู่สมบัติทางกลของชิ้นงานเชื่อมอีกด้วย

รูปที่ 4.5 ชิ้นงานเชื่อมที่อุณหภูมิ 540 องศาเซลเซียส เวลาในการเชื่อม 30 นาที

เป็นที่แน่ชัดเมื่อเวลาในการเชื่อม 30 นาที ไปสู่เวลาในการเชื่อม 60 นาที ชิ้นงานเกิดการเปลี่ยนแปลงของลักษณะทางกายภาพอย่างชัดเจน ดังแสดงในรูปที่ 4.6 ความร้อนที่สูงทำให้อะลูมิเนียมเฟส (α-Al) บางส่วนของอะลูมิเนียมหล่อกึ่งของแข็ง เกรด SSM7075 เกิดการหลอมละลายเป็นของเหลว ซึ่งเมื่อเฟสของเหลวสังกะสี-อะลูมิเนียม เกรด ZA27 หลอมละลายอยู่ตรงกลางระหว่างสองชิ้นแล้ว จึงนำไปสู่การเสียรูปจากความร้อน (กัดขอบ) จากบริเวณแนวเชื่อมไปสู่ชิ้นงานอะลูมิเนียมหล่อกึ่งของแข็ง เกรด SSM7075



รูปที่ 4.6 ชิ้นงานเชื่อมที่อุณหภูมิ 540 องศาเซลเซียส เวลาในการเชื่อม 60 นาที

นอกจากนี้ยังพบว่าเมื่อเพิ่มในการเชื่อม 60 นาที ไปสู่เวลาในการเชื่อม 90 นาที ขนาดของชิ้นงานที่เกิดการกัดของยิ่งมีความโตขึ้นอีก ดังแสดงในรูปที่ 4.7 เนื่องจากพลังงานความร้อนจากรเชื่อมเกิดการสะสมในชิ้นงานเชื่อม โดยลักษณะการกัดขอบจะเริ่มเกิดจากกึ่งกลางของชิ้นงานเชื่อม (บริเวณรอยเชื่อม) ที่มีการหลอมละลายไปยังอะลูมิเนียมหล่อกึ่งของแข็ง เกรด SSM7075 โดยมีทิศทางการกัดขอบตั้งฉากกับแนวเชื่อม เวลาที่เพิ่มขึ้นสำหรับการเชื่อมที่อุณหภูมิ 540 องศาเซลเซียส มีแนวโน้มที่ทำให้ชิ้นงานเสียรูปได้ง่ายขึ้น

รูปที่ 4.7 ชิ้นงานเชื่อมที่อุณหภูมิ 540 องศาเซลเซียส เวลาในการเชื่อม 90 นาที

อย่างไรก็ตาม เมื่อเวลาเพิ่มถึง 120 นาที พบว่าลักษณะการกัดขอบของชิ้นงานบริเวณรอยเชื่อมยิ่งเพิ่มขึ้น (รูปที่ 4.8) และมีขนาดโตขึ้นตามทิศทางของรอยเชื่อม เนื่องจากการหลอมของสังกะสี-อะลูมิเนียมเกรด ZA27 ที่มีจุดหลอมเหลวเพียง 399 องศาเซลเซียส ทำให้ความร้อนแพร่ไปสู่ชิ้นงานทั้งสองชิ้นได้เร็วขึ้น

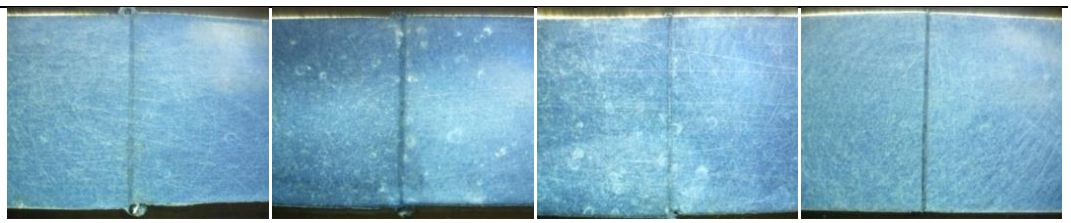
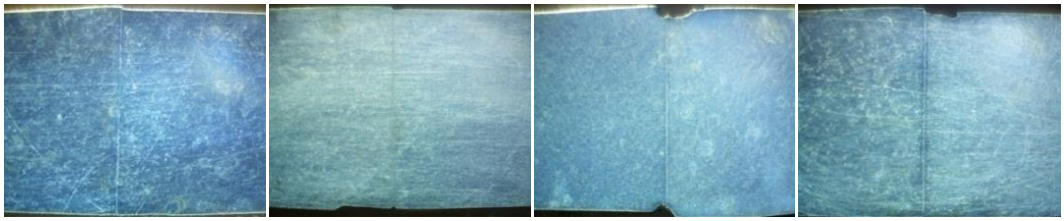
รูปที่ 4.8 ชิ้นงานเชื่อมที่อุณหภูมิ 540 องศาเซลเซียส เวลาในการเชื่อม 120 นาที

จะเห็นได้ว่าลักษณะทางกายภาพของชิ้นงานหลังจากการเชื่อมโดยการแพร่โดยใช้เทคนิคการเชื่อมแบบให้วัสดุประสานบริเวณรอยต่อของชิ้นงานทั้งสองชิ้นเป็นเฟสของเหลวชั่วขณะชิ้นงานยึดติดเข้ากันได้ดี แต่พบว่าอุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในการเชื่อมมีผลต่อลักษณะการเสียรูปของชิ้นงานหลังจากการเชื่อม โดยเวลาที่สั้น

หรืออุณหภูมิที่น้อยเกินไปส่งผลให้ชิ้นงานเกิดการยึดติดได้ยาก เนื่องจากมีความเป็นของเหลวได้น้อย ซึ่งในสถานะของเหลวอะตอมมีพลังงานกระตุ้นมากกว่าสถานะของแข็ง ส่งผลให้อะตอมแพร่ได้ง่ายกว่า ในทางตรงกันข้ามเวลาที่นานหรืออุณหภูมิที่สูงจนเกินไปส่งผลให้ชิ้นงานเกิดการเสียรูปจากความร้อน จนนำไปสู่การโก่งงอและกัดขอบบริเวณรอยเชื่อมของชิ้นงาน

4.2 ลักษณะโครงสร้างมหภาค (Macro Structure)

จากการเชื่อมโดยการแพร่แบบเฟสของเหลวชั่วขณะ เมื่อนำชิ้นงานเชื่อมมาตรวจดูโครงสร้างมหภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์กำลังขยายต่ำพบว่าชิ้นงานเชื่อมทุกการทดลองเชื่อมติดเข้ากันได้ดี ซึ่งไม่พบจุดบกพร่องจากการเชื่อมในทุกๆ ตัวแปรของการดทดลอง การทดลองจะมีผลที่ไปในทำนองเดียวกันโดยสังกะสี-อะลูมิเนียม เกรด ZA27 จะเป็นตัวประสานระหว่างกลางทั้งสองชิ้น อย่างไรก็ตามที่ระยะเวลาในการเชื่อมที่สูงและอุณหภูมิในการเชื่อมที่สูงมีแนวโน้มที่จะทำให้ชิ้นงานยึดติดได้ดีขึ้น เนื่องจากส่งผลให้มีเวลาในการเชื่อมมากขึ้น การแพร่ของเฟสของเหลวของสังกะสี-อะลูมิเนียม เกรด ZA27 ทำได้ง่ายขึ้น นอกจากนั้นยังพบว่าความร้อนที่เกิดขึ้นในระหว่างการเชื่อมส่งผลให้ชิ้นงานเกิดการเสียรูป ซึ่งชิ้นงานมีลักษณะบวมข้างๆ บริเวณแนวเชื่อม ดังแสดงในรูปที่ 4.9 จะเห็นได้ชัดว่าตัวแปรที่ใช้ในการทดลองมีผลต่อลักษณะโครงสร้างมหภาคและนำไปสู่สมบัติทางกลของชิ้นงานหลังจากการเชื่อม

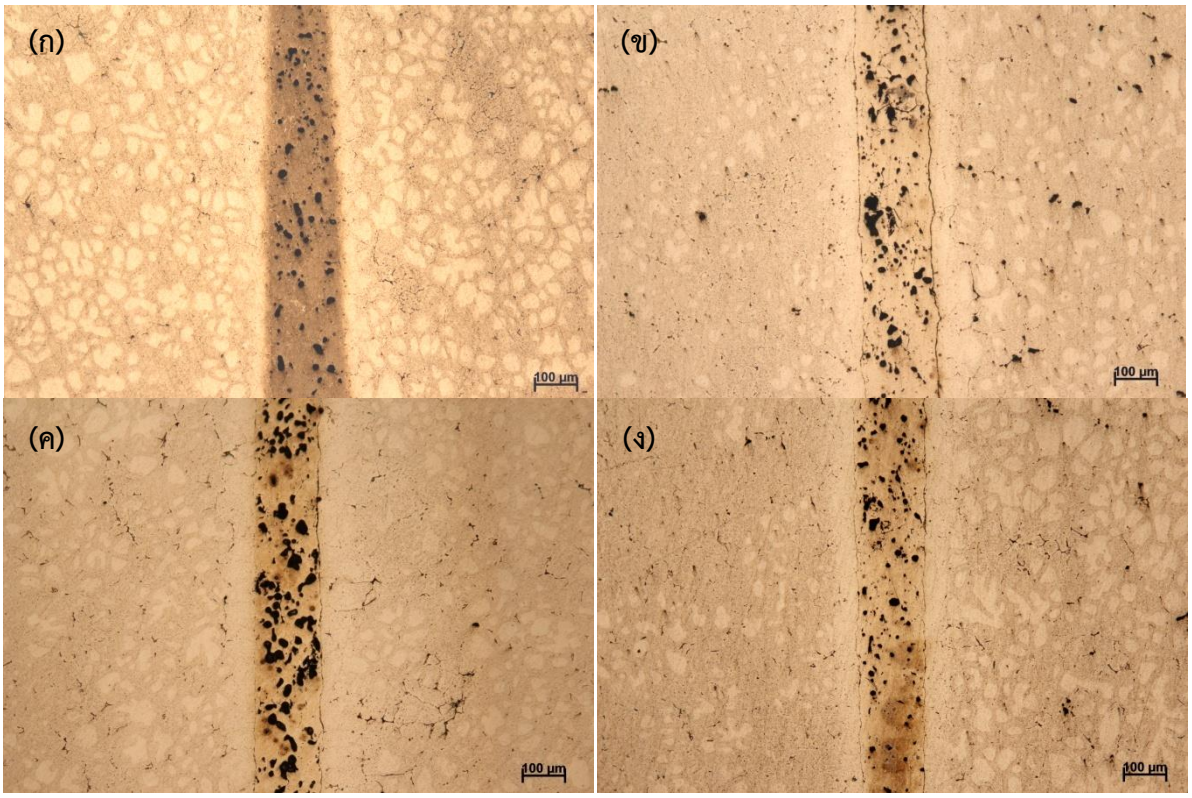
อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	เวลา (นาที)			
	30	60	90	120
480				
540				

รูปที่ 4.9 ลักษณะโครงสร้างมหภาคของชิ้นงานหลังการเชื่อม

สังกะสี-อะลูมิเนียม เกรด ZA27 เป็นตัวประสานระหว่างอะลูมิเนียมหล่อกึ่งของแข็ง เกรด SSM7075 ทั้งสองชิ้น ส่งผลให้เกิดการประสานกันที่ดีของชิ้นงาน โดยพื้นฐานที่มีส่วนประกอบทางเคมีที่คล้ายๆ กัน ของสังกะสีและอะลูมิเนียม จึงทำให้การประสานเชื่อมติดกันในทางที่ดี อย่างไรก็ตามอิทธิพลของความร้อนและตัวแปรของเวลาส่งผลโดยตรงต่อการเสียรูปของชิ้นงานหลังจากการเชื่อม การเลือกตัวแปรที่เหมาะสมจึงมีผลสำหรับการเชื่อม โดยตัวแปรเหล่านี้จะนำไปสู่สมบัติทางกลที่ดี

4.3 ลักษณะโครงสร้างจุลภาค (Micro Structure)

จากการทดลองพบว่าตัวแปรในการทดลองส่งผลโดยตรงต่อลักษณะโครงสร้างจุลภาค นำไปสู่ความสมบูรณ์ของเนื้อเชื่อมที่แตกต่างกัน และนำไปสู่สมบัติทางกลที่แตกต่างกันด้วย โดยรูปที่ 4.10 เป็นลักษณะเนื้อเชื่อมที่ตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์ที่กำลังขยาย 100 ไมโครเมตร ของตัวแปรที่อุณหภูมิ 480 องศาเซลเซียส เวลาในการเชื่อม 30, 60, 90 และ 120 นาที ตามลำดับ



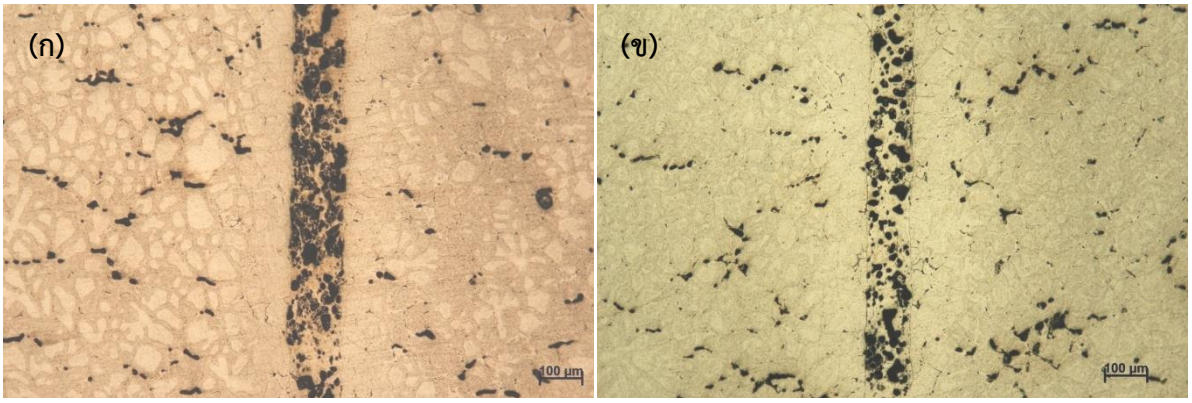
รูปที่ 4.10 ลักษณะโครงสร้างของแนวเชื่อมที่อุณหภูมิ 480 องศาเซลเซียส เมื่อ (ก) เวลาในการเชื่อม 30 นาที (ข) เวลาในการเชื่อม 60 นาที (ค) เวลาในการเชื่อม 90 นาที และ (ง) เวลาในการเชื่อม 120 นาที

จะเห็นได้ว่ายิ่งเวลาในการเชื่อมที่สูงขึ้น ส่งผลให้สังกะสี-อะลูมิเนียม เกรด ZA27 เกิดเป็นเฟสของเหลวที่สูงขึ้นตามไปด้วย ทำให้นำไปสู่การเกิดโพรงอากาศ (Porosity) ได้ง่าย สาเหตุมาจากของเหลวที่เกิดขึ้นในระหว่างการเชื่อมนำไปสู่การแทรกตัวของออกซิเจน (O_2) ในระหว่างเชื่อมได้ง่าย เมื่อออกซิเจนเข้าไปในระหว่างเชื่อมเกิดเป็นโพรงอากาศ หลังจากชิ้นงานเชื่อมออกซิเจนเหล่านี้ไม่สามารถออกมาได้หมดจึงตกค้างในแนวเชื่อม อย่างไรก็ตามโพรงอากาศที่เป็นผลมาจากออกซิเจนจะนำไปสู่สมบัติทางด้านการต้านทานแรงดึง โดยหลังจากการเชื่อมเมื่อชิ้นงานเกิดโพรงอากาศในปริมาณที่มาก ส่งผลให้ค่าความต้านทานแรงดึงจะมีค่าที่ต่ำลง ในทางตรงกันข้ามหลังจากการเชื่อมเมื่อชิ้นงานเกิดโพรงอากาศในปริมาณที่น้อย จะนำไปสู่ค่าความต้านทานแรงดึงที่สูงเช่นกัน จากรูปที่ 4.10 (ก) เป็นรูปที่แสดงบริเวณเนื้อเชื่อมของตัวแปรที่อุณหภูมิ 480 องศาเซลเซียส เวลาในการเชื่อม 30 นาที หลังจากการเชื่อมเมื่อตรวจสอบด้วยสายตา (Visual Test) พบว่าปริมาณของโพรงอากาศมีปริมาณที่น้อยกว่าเนื้อเชื่อมของตัวแปรอื่นๆ เมื่อเปรียบเทียบกัน เนื่องจากระยะเวลาที่น้อยนำไปสู่การเกิดเฟสของเหลวที่น้อยด้วยเช่นกัน ในทำนองเดียวกันการเชื่อมที่เวลานานๆ ที่เวลาในการ

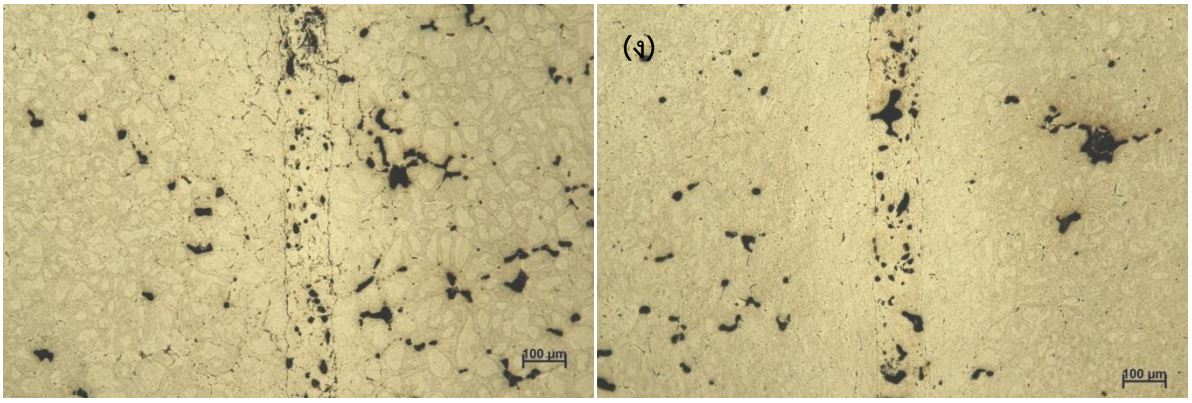
เชื่อม 120 นาที ดังแสดงในรูปที่ 4.10 (ง) พบว่ามีแนวโน้มที่จะส่งผลให้เกิดช่องว่างของโพรงอากาศเป็นแนวยาวขนานกับพื้นที่รอยต่อ (Interface) เนื่องจากเวลาที่นานส่งผลให้บริเวณรอยต่อเกิดการหดตัวจากของเหลวเป็นของแข็ง ทำให้เกิดเป็นโพรงอากาศที่มีลักษณะเป็นแนวยาว ซึ่งส่งผลมาจากการหดตัวของสังกะสี-อะลูมิเนียม เกรด ZA27 หลังจากการเชื่อม แต่เวลาที่ยาวนานพอเหมาะทำให้เกิดการแพร่ที่สมบูรณ์เช่นกัน ที่เวลาในการเชื่อม 60 นาที ดังแสดงในรูปที่ 4.10 (ข) พบว่าบริเวณรอยต่อระหว่างสังกะสี-อะลูมิเนียม เกรด ZA27 กับอะลูมิเนียมหล่อกึ่งของแข็ง เกรด 7075 เริ่มมีการเกิดของโพรงอากาศที่มีลักษณะเป็นแนวยาวขนานกับผิวรอยต่อ (Contact area) เนื่องจากเกิดการหดตัวของเฟสของเหลวหลังจากการเชื่อม ซึ่งเหมือนกันกับเวลาในการเชื่อม 90 นาที ดังแสดงในรูปที่ 4.10 (ค) แต่เวลาในการเชื่อม 90 นาที พบว่ามีปริมาณโพรงอากาศที่เยอะกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับเวลาในการเชื่อม 60 นาที

อย่างไรก็ตามเป็นที่น่าสังเกตว่าอะลูมิเนียมหล่อกึ่งของแข็ง เกรด 7075 ไม่มีการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างเดิมที่มีลักษณะเป็นโครงสร้างแบบก้อนกลม เนื่องจากความร้อนในระหว่างการเชื่อมกว่าจุดหลอมเหลว (Melting Temperature) ของอะลูมิเนียมเกรดนี้ โดยอะลูมิเนียมหล่อกึ่งของแข็ง เกรด 7075 มีจุดหลอมเหลวที่ 660 องศาเซลเซียส แต่สำหรับสังกะสี-อะลูมิเนียม เกรด ZA27 พบว่ามีการเปลี่ยนเฟสของโครงสร้างเดิมในระหว่างการเชื่อม เนื่องจากอุณหภูมิที่ใช้ในการเชื่อมสูงกว่าจุดหลอมเหลวของสังกะสี-อะลูมิเนียม เกรด ZA27 จึงส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างเดิม ซึ่งสังกะสี-อะลูมิเนียม เกรด ZA27 มีจุดหลอมเหลวที่ 399 องศาเซลเซียส เทคนิคในการเชื่อมโดยการแพร่แบบเฟสของเหลวสามารถช่วยลดเวลาในการเชื่อมให้สามารถเชื่อมได้เร็วขึ้น แต่จากการทดลองก็ยังพบว่าบริเวณเนื้อเชื่อมยังเกิดความไม่สมบูรณ์หลังจากการเชื่อม

รูปที่ 4.11 เป็นลักษณะเนื้อเชื่อมที่ตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์ที่กำลังขยาย 100 ไมโครเมตร ของตัวแปรที่อุณหภูมิ 540 องศาเซลเซียส เวลาในการเชื่อม 30, 60, 90 และ 120 นาที อุณหภูมิที่สูงขึ้นส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างบริเวณเนื้อเชื่อมอย่างชัดเจน



(ค)

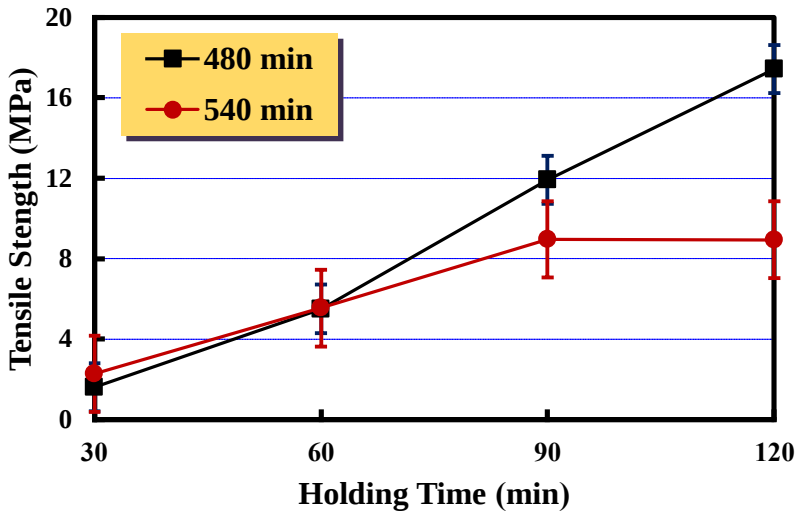


รูปที่ 4.11 ลักษณะโครงสร้างของแนวเชื่อมที่อุณหภูมิ 540 องศาเซลเซียส เมื่อ (ก) เวลาในการเชื่อม 30 นาที (ข) เวลาในการเชื่อม 60 นาที (ค) เวลาในการเชื่อม 90 นาที และ (ง) เวลาในการเชื่อม 120 นาที

จะเห็นได้ว่าเมื่อเพิ่มอุณหภูมิจาก 480 ไปสู่ 540 องศาเซลเซียส พบว่าเฟสอะลูมิเนียม (α-Al) และเฟสยูเทคติก ($MgZn_2$) ของอะลูมิเนียม เกรด 7075 เกิดการหลอมละลาย อย่างไรก็ตามบริเวณรอยต่อ (Interface) ยังพบโพรงอากาศจำนวนมาก ดังแสดงในรูปที่ 4.11 (ก) ซึ่งขนานกับแนวรอยต่อของชิ้นงาน เป็นที่น่าสังเกตว่าเมื่อเวลาในการเชื่อมที่สูงขึ้น ปริมาณของรอยต่อกลับลดลง เนื่องจากสังกะสี-อะลูมิเนียม เกรด ZA27 กลายเป็นของเหลวคล้ายๆ กับอะลูมิเนียม เกรด 7075 จึงทำให้วัสดุทั้งสองชนิดนี้ละลายเข้ากันได้ดี ดังแสดงในรูปที่ 4.11 (ง) เฟสของเหลวของสังกะสี-อะลูมิเนียม เกรด ZA27 จะเกิดการแพร่ไปสู่อะลูมิเนียม เกรด 7075 ได้อย่างรวดเร็วในสภาวะของเหลว ส่งผลให้วัสดุทั้งสองชนิดเกิดการเชื่อมติดกันในระยะเวลาที่สั้นลงเมื่อเปรียบเทียบกับการเชื่อมโดยการแพร่ในสภาวะของแข็ง แต่ถึงอย่างไรก็ตามการเชื่อมแบบเฟสของเหลวชั่วขณะมักนำไปสู่จุดบกพร่องของชิ้นงานหลังจากการเชื่อม โดยเฉพาะการเกิดโพรงอากาศที่เกิดจากการแทรกตัวของอากาศและความชื้นในระหว่างการเชื่อม

4.4 ความแข็งแรงดึง (Tensile Test)

จากรูปที่ 4.12 แสดงค่าความแข็งแรงดึงของแนวเชื่อมที่ได้จากการเชื่อมโดยการแพร่แบบเฟสของเหลวของวัสดุอะลูมิเนียมหล่อกึ่งของแข็ง เกรด SSM7075 ซึ่งใช้สังกะสี-อะลูมิเนียม เกรด ZA27 ในการประสานระหว่างทั้งสองชิ้นงาน ในการทดสอบแรงดึงพบว่าที่ตัวแปรอุณหภูมิ 480 องศาเซลเซียส จะให้ค่าความแข็งแรงดึงสูงตัวแปรอุณหภูมิที่ 540 องศาเซลเซียส เนื่องจากความร้อนในการเชื่อมที่สูงทำให้สังกะสี-อะลูมิเนียม เกรด ZA27เกิดเป็นของเหลวที่มากกว่า ส่งผลให้อากาศเข้าไปบริเวณรอยเชื่อมหลังจากการเย็นตัว ซึ่งโพรงอากาศขนาดใหญ่ขนานกับแนวรอยต่อที่พบเหล่านั้นนำไปสู่ค่าความแข็งที่ลดต่ำลง อย่างไรก็ตามก๊าซอาร์กอนที่ใช้ในการปกคลุมก็ป้องกันอากาศได้บางส่วน ในทางตรงกันข้ามที่ตัวแปรอุณหภูมิ 480 องศาเซลเซียส มีแนวโน้มที่จะเกิดการแทรกตัวของอากาศที่น้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับอุณหภูมิที่ 540 องศาเซลเซียส อย่างไรก็ตามที่ตัวแปรของเวลากลับตรงกันข้ามกับตัวแปรของอุณหภูมิ เป็นที่น่าสังเกตว่าเวลาในการเชื่อมที่เพิ่มขึ้น มีแนวโน้มที่จะทำให้ค่าความต้านทานแรงดึงสูงตามไปด้วย เนื่องจากเกิดการแพร่อยู่ในช่วงที่สมบูรณ์ แต่เวลาที่นานเกิดไปอาจนำไปสู่การเสียรูปอย่างถาวรของชิ้นงานหลังจากการเชื่อมได้



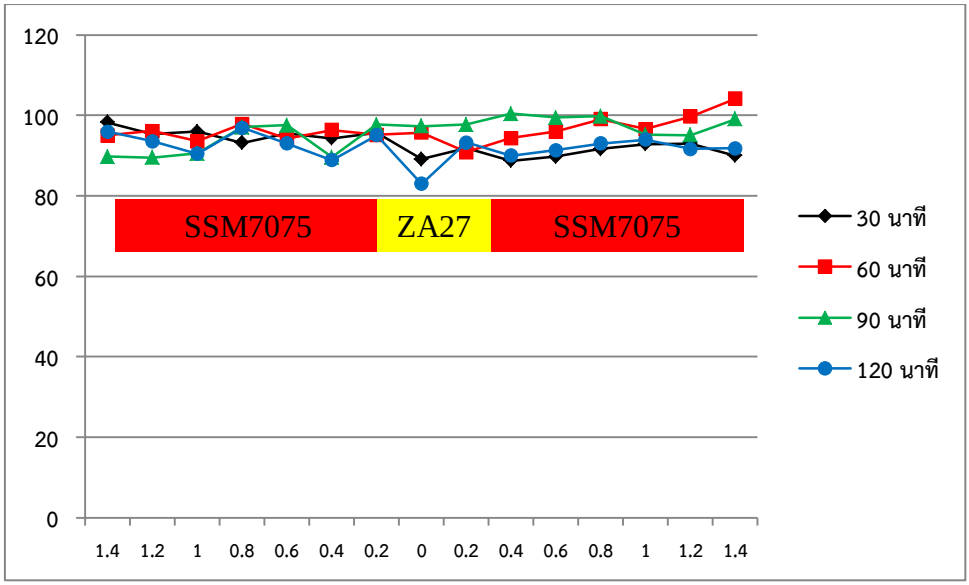
รูปที่ 4.12 ความแข็งแรงดึงของชิ้นงานเชื่อม

ความต้านทานแรงดึงสูงอยู่ที่ตัวแปรอุณหภูมิ 480 องศาเซลเซียส เวลาในการเชื่อม 120 นาที และแรงกดที่ 3 MPa โดยมีค่าความต้านทานแรงดึงอยู่ที่ 17.44 MPa และเมื่อเวลาที่ 90 นาที ถึง เวลาที่ 30 นาที จะเห็นได้ชัดเจนว่าค่าความต้านทานแรงดึงจะลดต่ำลงเรื่อยๆ โดยจะมีค่า 11.93, 5.60 และ 1.65 MPa ตามลำดับ ในขณะเดียวกันที่ตัวแปรอุณหภูมิ 540 องศาเซลเซียส ค่าความต้านทานแรงดึงหลังจากการทดสอบไม่มีค่าสูงมากนัก เนื่องจากเกิดจุดบกพร่องจากการเชื่อมที่สูงกว่า โดยมีค่าความต้านทานแรงดึงจะมีค่า 2.27, 5.54, 8.95 และ 8.94 เมื่อที่เวลาที่ 30 นาที ถึงเวลาที่ 90 นาที

อย่างไรก็ตามค่าความแข็งแรงดึงของชิ้นงานยังต้องมาจากคุณสมบัติของตัวประสานด้วย สังกะสี-อะลูมิเนียม เกรด ZA27 ที่ใช้เป็นตัวประสานไม่ได้มีค่าความแข็งแรงดึงที่สูงมากนัก โดยมีค่าความแข็งแรงดึงเพียง 310 MPa เท่านั้น

4.5 ความแข็ง (Hardness Test)

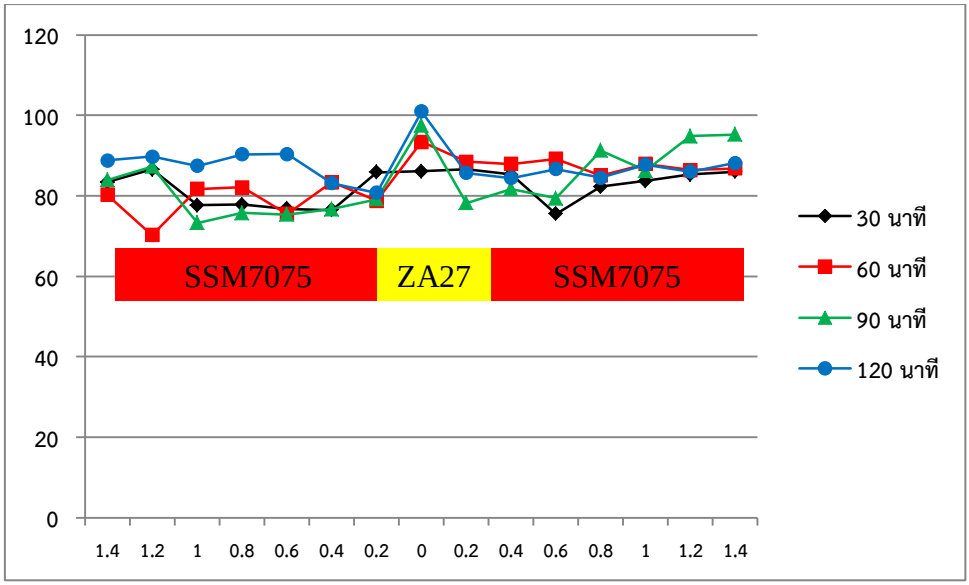
จากรูปที่ 4.13 และ 4.14 แสดงค่าความแข็งของแนวเชื่อมที่ได้จากการเชื่อมโดยการแพร่แบบเฟสของเหลวของวัสดุอะลูมิเนียมหล่อกึ่งของแข็ง เกรด SSM7075 การเชื่อมจะใช้สังกะสี-อะลูมิเนียม เกรด ZA27 ในการประสานระหว่างทั้งสองชิ้นงานเพื่อให้เกิดเป็นของเหลวและยึดติดกันได้เร็วขึ้น การวัดความแข็งทั้งหมดจะวัด 15 ตำแหน่ง แต่ละตำแหน่งห่างกัน 0.2 มิลลิเมตร หลังจากการวัดความแข็งพบว่า ที่อุณหภูมิ 480 องศาเซลเซียส บริเวณเนื้อเชื่อมมีค่าความแข็งต่ำกว่าเนื้อเดิมของวัสดุเล็กน้อย ซึ่งเนื้อเดิมของวัสดุ (Base metal) มีค่าความแข็งอยู่ที่ 101.42 HV แต่บริเวณเนื้อเชื่อมมีค่าความแข็งอยู่ที่ 91.28 HV เนื่องจากบริเวณดังกล่าวเกิดโพรงอากาศหลังจากการเชื่อม ซึ่งส่งผลมาจากการหดตัวของสังกะสี-อะลูมิเนียม เกรด ZA27 ที่มีสถานะเป็นของเหลวในขณะเชื่อม



รูปที่ 4.13 ความแข็งของชิ้นงานที่อุณหภูมิ 480 องศาเซลเซียส

แต่จะเห็นได้ว่าที่บริเวณของอะลูมิเนียมหล่อกึ่งของแข็ง เกรด SSM7075 ค่าความแข็งที่ได้มีค่าที่ใกล้เคียงกันทั้งสองชิ้น โดยบริเวณดังกล่าวมีค่าความแข็งอยู่ที่ 94.88 HV เป็นที่น่าสังเกตว่าที่บริเวณเนื้อเชื่อมของตัวแปรที่อุณหภูมิ 480 องศาเซลเซียส และเวลาเชื่อม 120 นาที พบว่ามีค่าความแข็งต่ำสุดเมื่อเปรียบเทียบกับตัวแปรอื่นๆ เนื่องจากพบโพรงอากาศขนาดใหญ่ขนานกับแนวรอยต่อ ซึ่งโพรงอากาศที่พบเหล่านั้นนำไปสู่ค่าความแข็งที่ลดต่ำลง

ในทางกลับกันเมื่อเพิ่มอุณหภูมิไปสู่ 540 องศาเซลเซียส พบว่าบริเวณเนื้อเชื่อมมีค่าความแข็งที่เพิ่มสูงขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับตัวแปรที่อุณหภูมิ 480 องศาเซลเซียส โดยมีค่าความแข็งอยู่ที่ 94.53 HV เพราะโพรงอากาศมีปริมาณที่ลดน้อยลง ซึ่งส่งผลมาจากเฟสของเหลวของสังกะสี-อะลูมิเนียม เกรด ZA27 มีการแพร่ที่สมบูรณ์มายิ่งขึ้น ทำให้ชิ้นงานยึดติดกันได้ดีขึ้น ตัวอย่างเช่น ที่ตัวแปรอุณหภูมิ 540 องศาเซลเซียส และเวลาเชื่อม 120 นาที พบว่ามีค่าความแข็งสูงที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับตัวแปรอื่นๆ ซึ่งมีค่าความแข็งอยู่ที่ 101.00 HV ดังแสดงในรูปที่ 4.14



รูปที่ 4.14 ความแข็งของชิ้นงานที่อุณหภูมิ 540 องศาเซลเซียส

อย่างไรก็ตามความแข็งบริเวณแนวเชื่อมอะลูมิเนียมหล่อกึ่งของแข็ง เกรด SSM7075 ซึ่งใช้สังกะสี-อะลูมิเนียม เกรด ZA27 ในการประสารระหว่างทั้งสองชิ้นงาน ด้วยการเชื่อมโดยการแพร่แบบเฟสของเหลวจะมีค่ามากหรือน้อยขึ้นอยู่กับปริมาณของโพรงอากาศที่เกิดขึ้นหลังการเชื่อมและลักษณะโครงสร้างจุลภาคที่เปลี่ยนแปลงไป

บทที่ 5

สรุปผลการทดลอง

การเชื่อมอะลูมิเนียมหล่อกึ่งของแข็ง เกรด SSM7075 โดยใช้เทคนิคเป็นการเติมตัวประสานของสังกะสี-อะลูมิเนียม เกรด ZA27 ระหว่างชิ้นงานทั้งสองชิ้นนั้น สามารถเชื่อมเข้ากันได้ถึงแม้ว่าวัสดุประสารอาจจะต่างชนิดกัน แต่พื้นฐานของวัสดุที่คล้ายๆ กัน ทำให้สามารเชื่อมเข้ากันได้ ส่งผลให้ชิ้นงานทั้งสองชิ้นยึดติดกัน ผลการทดลองจะสรุปและแสดงดังต่อไปนี้

5.1 สรุปผล

สำกรับการเชื่อมโดยการแพร่ของอะลูมิเนียมหล่อกึ่งของแข็ง เกรด SSM7075 ซึ่งใช้สังกะสี-อะลูมิเนียม เกรด ZA27 ในกระเป็นตัวประสานระหว่างชิ้นงานทั้งสอง สามรถสรุปได้ดังต่อไปนี้

(ก) ลักษณะโครงสร้างประสานกันดี แต่พบช่องว่างหลังจากการเชื่อม เนื่องจากการแทรกตัวของอากาศในขณะเชื่อมและหดตัวของเนื้อวัสดุหลังจากการเชื่อม

(ข) ความต้านทานแรงดึงสูงอยู่ที่ตัวแปรอุณหภูมิ 480 องศาเซลเซียส เวลาในการเชื่อม 120 นาที และแรงกดที่ 3 MPa โดยมีค่าความต้านทานแรงดึงอยู่ที่ 17.44 MPa และความต้านทานแรงดึงต่ำสุดอยู่ที่ตัวแปรอุณหภูมิที่ 480 องศาเซลเซียส เวลาในการเชื่อม 30 นาทีมีค่าความต้านทานแรงดึงอยู่ที่ 1.65 MPa ตามลำดับ

(ค) ตัวแปรอุณหภูมิ 540 องศาเซลเซียส และเวลาเชื่อม 120 นาที พบว่ามีค่าความแข็งสูงที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับตัวแปรอื่นๆ ซึ่งมีค่าความแข็งอยู่ที่ 101.00 HV

5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 ควรมีการใช้เทคนิคการเชื่อมแบบนี้สำหรับการเชื่อมต่างวัสดุ เช่น การเชื่อมวัสดุในกลุ่มไททาเนียมกับกลุ่มอะลูมิเนียม หรือวัสดุกลุ่มอื่นๆ ที่มีการใช้งานแพร่หลาย

5.2.2 ควรมีการศึกษาเพิ่มเติมสำหรับการเกิดจุดบกพร่องเมื่อมีการนำเทคนิคนี้มาใช้งาน หรือปริมาณการเกิดจุดบกพร่องหลังจากการเชื่อม

บรรณานุกรม

[1] Spencer, D.B. 1971. “Rheology of Liquid-Solid Mixtures of Lead Tin” Ph.D. Thesis, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA, U.S.A.

[2] Flemings M.C. “Solidification processing” McGraw-Hill, Inc., 146-154, 1974.

[3] เจษฎา วรรณสินธุ์ และคณะ. “เทคโนโลยีการหล่ออะลูมิเนียมไดคาสติงแบบกึ่งของแข็ง” การประชุมวิชาการงานหล่อไทย ครั้งที่ 3. สงขลา, ประเทศไทย, 1-12. 2549.

[4] Wannasin, J., Junudom, S., Rattanochaikul, T. and Flemings, M.C. “Development of the Gas Induced Semi-Solid Metal Process for Aluminum Die Casting Applications, Solid State Phenom” Vol. 141 (2008), pp.97-102, 2008.

[5] ประภาศ เมืองจันทร์บุรี. “การเชื่อมและโลหะวิทยาการเชื่อมอะลูมิเนียม” ภาควิชาวิศวกรรมเหมืองแร่และวัสดุ คณะวิศวกรรมสาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ รายงานการทดลองภายในการเชื่อมอะลูมิเนียม SSM A356, 2550.

[6] ธงชัย เครือผือ และ ประภาศ เมืองจันทร์บุรี. “อิทธิพลของความเร็วในการเชื่อมและรูปแบบของหัวพินที่มีผลต่อสมบัติทางโลหะวิทยาและสมบัติทางกลในการเชื่อมอะลูมิเนียมผสม A 356 ที่หล่อโดยเทคโนโลยีหล่อกึ่งของแข็งด้วยกรรมวิธีการเชื่อมเสียดทานแบบกวน” การประชุมวิชาการข่ายงานวิศวกรรมอุตสาหการ, สงขลา, ประเทศไทย 933-939, 2551.

[7] I. Bhamji, et al., “Linear friction welding of aluminum to copper” Institute of Materials, Minerals and Mining Published by Maney on behalf of the Institute.

[8] T.J Linert et al. “Friction Stir Welding Studies on Mild Steel, Welding Journal” Vol.83, 2003, pp. 1S-9S, 2005.

[9] C.S. Lee, H. Li, R.S. Chandel. “Vacuum-free diffusion bonding of aluminium metal matrix composite” 326-330, 1999.

[10] A. URENA and J.M. GOMEZ DE SALAZAR. “Bonding of aluminium matrix composites for application in the transport industry” Journal de Physique 111, Volume 3, pp. 1037-1042, November 1993.

[11] X-P. Zhang, L. Ye and Y.-W. Mai. “Investigation on diffusion bonding characteristics of SiC particulate reinforced aluminium metal matrix composites (Al/SiCp-MMC)” Composites: Part A 30 (1999) 1415–1421, 18 May 1999.

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

[13] Anne Sunwoo and Reynold Lum. “Superplastic Deformation Enhanced Diffusion Bonding of Aluminum alloy 7475” Volume 33, No 4, pp. 639-644, 1995.

[14] Anne Sunwoo, Reynold Lum and Richard vandervoort. “Concurrent Solid State Diffusion Bonding and Superplastic Forming of Aluminum alloy 7475” January 1995.

[15] Xu Huibin, Yan Jiuchun and Xu Zhiwu. “Interface structure changes during vibration liquid phase bonding of SiCp/A356 composites in air” Composites: Part A 37 1458–1463, 2006.

[16] M. Muratoglu, O. Yilmaz and M. Aksoy. “Investigation on diffusion bonding characteristics of aluminum metal matrix composites (Al/SiCp) with pure aluminum for different heat treatments” Journal of Materials Processing Technology pp. 211–217, 2006.

[17] K. Kitazono, A. Kitajima and E. Sato. “Solid-state diffusion bonding of closed-cell aluminum foams” Materials Science and Engineering A327, 128–132, 2002.

[18] เจษฎา วรรณสินธุ์, รอมฎอน บูรพาและ รังสินี แคนยุกต์. “Development of the Gas Induced Semi-Solid Metal Processing for A356 Aluminum Alloy” การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ครั้งที่ 7.

[19] Fundamentals of Diffusion Bonding, [Online]. Available: http://www.msm.cam.ac.uk/phasetrans/2005/Amir/bond.html.