



รายงานการวิจัย

เรื่อง

การเชื่อมโดยการแพร่แบบเฟสของเหลวอะลูมิเนียมผสมหล่อกิ่งของแข็ง เกรด

SSM 6063 โดยใช้ผงโลหะสังกะสีเป็นตัวประสาน

The transient liquid phase diffusion bonding of SSM 6063
aluminium alloy using zinc powder interlayer

รองศาสตราจารย์ ดร.ชัยยุทธ มिंगาม

คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏสงขลา

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศุภชัย ชัยณรงค์

คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏสงขลา

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ยงยุทธ ดุลยกุล

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย สงขลา

มหาวิทยาลัยราชภัฏสงขลา

พ.ศ.2567



ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยราชภัฏสงขลา
(งานวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนจากงบประมาณกองทุนวิจัยมหาวิทยาลัยราชภัฏสงขลา
ปีงบประมาณ พ.ศ.2567)



หัวข้อวิจัย	การเชื่อมโดยการแพร่แบบเฟสของเหลวอะลูมิเนียมผสมหล่อกิ่งของแข็ง เกรด SSM 6063 โดยใช้ผงโลหะสังกะสีเป็นตัวประสาน
ผู้ดำเนินการวิจัย	รองศาสตราจารย์ ดร.ชัยยุทธ มिंगาม ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศุภชัย ชัยณรงค์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ยงยุทธ ดุลยกุล
ที่ปรึกษา	
หน่วยงาน	คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏสงขลา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย สงขลา
ปี พ.ศ.	2567

การวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาอิทธิพลของวัสดุประสานต่อสมบัติทางกลและโครงสร้างทางโลหะวิทยาของรอยต่ออะลูมิเนียมหล่อกิ่งแข็ง เกรด 6063 โดยใช้กระบวนการเชื่อมโดยการแพร่แบบเฟสของเหลว อะลูมิเนียมหล่อกิ่งแข็ง เกรด 6063 ถูกเตรียมรูปทรงกระบอก ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตร ความยาว 30 มิลลิเมตร และใช้ผงสังกะสีเกรด ZA27 เป็นวัสดุประสาน ซึ่งถูกอัดด้วยแรงกด 12 KN ในการทดลองนี้ได้กำหนดตัวแปรสำคัญ ได้แก่ ขนาดของวัสดุประสาน 100, 300 และ 500 ไมโครเมตร เวลาในการเชื่อม 90 และ 120 นาที อุณหภูมิในการเชื่อม 450 และ 500 องศาเซลเซียส แรงกด 4 MPa บรรยากาศปกคลุมด้วยอาร์กอน 4 ลิตรต่อนาที ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า ขนาดของวัสดุประสาน เวลา และอุณหภูมิในการเชื่อม มีผลต่อสมบัติทางกลและโครงสร้างทางโลหะวิทยาของรอยต่ออะลูมิเนียมหล่อกิ่งแข็ง เกรด 6063 ผลการเชื่อมโดยการแพร่แบบเฟสของเหลว พบว่ารอยต่อที่ใช้ขนาดอนุภาค 100 ไมโครเมตร ที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เวลา 120 นาที ให้ค่าความแข็งแรงดึงสูงสุดที่ 22.31 MPa ผลการทดสอบความแข็งแบบวิกเกอร์ มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 37.04 HV (HV_{200gF}) โครงสร้างทางโลหะวิทยามีลักษณะแบ่งฝั่กกันอย่างชัดเจนระหว่างวัสดุประสานและอะลูมิเนียมหล่อกิ่งแข็ง เกรด 6063 จากการวิเคราะห์ผลการทดลอง สามารถสรุปได้ว่า ขนาดของวัสดุประสาน เวลา และอุณหภูมิในการเชื่อม มีผลอย่างมีนัยสำคัญต่อสมบัติทางกลและโครงสร้างทางโลหะวิทยาของรอยต่ออะลูมิเนียมหล่อกิ่งแข็ง เกรด 6063 ซึ่งข้อมูลที่ได้จากการวิจัยนี้สามารถนำไปใช้เป็นแนวทางในการพัฒนากระบวนการเชื่อมแพร่ที่มีประสิทธิภาพยิ่งขึ้น

คำสำคัญ การเชื่อมโดยการแพร่แบบเฟสของเหลว อะลูมิเนียมผสมหล่อกิ่งของแข็ง เกรด 6063
ผงโลหะสังกะสี

Research Title	The transient liquid phase diffusion bonding of SSM 6063 aluminium alloy using zinc powder interlayer
Researcher	Assoc. Prof. Dr. Chaiyoot Meengam Asst. Prof. Dr. Suppachai Chainarong Asst. Prof. Yongyuth Dunyakul
Research Consultants	
Organization	Faculty of Industrial Technology, Songkhla Rajabhat University Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Srivijaya
Year	2025

The objective of this research is to investigate the influence of filler material on the mechanical properties and metallurgical structure of semi-solid cast aluminum alloy 6063 joints using the Transient Liquid Phase (TLP) bonding process. The semi-solid cast aluminum alloy 6063 was prepared in a cylindrical shape with a diameter of 10 mm and a length of 30 mm. Zinc powder of grade ZA27 was used as the filler material, which was compacted under a pressure of 12 kN. In this study, the key variables were: Filler particle sizes of 100, 300, and 500 micrometers, bonding times of 90 and 120 minutes, bonding temperatures of 450 and 500 degrees Celsius, Applied pressure of 4 MPa and argon shielding gas at a flow rate of 4 liters per minute. The experimental results revealed that the particle size of the filler, bonding time, and bonding temperature significantly affected the mechanical properties and metallurgical structure of the semi-solid cast aluminum alloy 6063 joints. The TLP bonding process showed that joints with a filler particle size of 100 micrometers, at a temperature of 500 degrees Celsius, and a bonding time of 120 minutes, achieved the highest tensile strength of 22.31 MPa. The Vickers hardness test yielded an average hardness value of 37.04 HV (HV200gF). The metallurgical structure exhibited a distinct separation between the filler material and the semi-solid cast aluminum alloy 6063. From the analysis of the experimental results, it can be concluded that the filler particle size, bonding time, and bonding temperature significantly influence

the mechanical properties and metallurgical structure of semi-solid cast aluminum alloy 6063 joints. The findings of this research provide valuable insights for optimizing the TLP bonding process for enhanced bonding efficiency.

Keywords Transient liquid phase diffusion bonding, SSM 6063 aluminium alloy, Zinc powder



กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วย การสนับสนุนจากทุนอุดหนุนการวิจัยจากงบประมาณกองทุนวิจัย มหาวิทยาลัยราชภัฏสงขลา ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2565 ในหัวข้อเรื่อง "การเชื่อมโดยการแพร่แบบเฟสของเหลวอะลูมิเนียมผสมหล่อทิ้งของแข็ง เกรด SSM 6063 โดยใช้ผงโลหะสังกะสีเป็นตัวประสาน" ภายใต้ทุนวิจัยมหาวิทยาลัยราชภัฏสงขลา เลขที่ 008/2565

ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณ มหาวิทยาลัยราชภัฏสงขลา ที่ได้มอบทุนสนับสนุนการวิจัยในครั้งนี้ ซึ่งเป็นแรงขับเคลื่อนสำคัญในการดำเนินการวิจัยและพัฒนาความรู้ด้านวิศวกรรมวัสดุและเทคโนโลยีการเชื่อม นอกจากนี้ ขอขอบคุณ คณาจารย์และบุคลากรในคณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏสงขลา ที่ได้ให้คำแนะนำและสนับสนุนทางวิชาการตลอดระยะเวลาการดำเนินการ

ทั้งนี้ ข้าพเจ้าขอขอบคุณ เพื่อนนักวิจัยและผู้มีส่วนร่วมทุกท่าน ที่ได้ร่วมแลกเปลี่ยนความคิดเห็นและสนับสนุนในการทดลองและวิเคราะห์ผลวิจัย ซึ่งมีส่วนสำคัญที่ทำให้งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงตามเป้าหมายที่ตั้งไว้ ขอขอบพระคุณทุกท่านอีกครั้งที่ได้ให้การสนับสนุนและมีส่วนร่วมในการทำวิจัยในครั้งนี้

คณะผู้วิจัย

2567

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ข
กิตติกรรมประกาศ	ง
สารบัญ	จ
สารบัญตาราง	ช
สารบัญภาพ	ซ
บทที่ 1 บทนำ	1
ความเป็นมาและความสำคัญ	1
วัตถุประสงค์ของการวิจัย	3
ขอบเขตการวิจัย	3
คำจำกัดความที่ใช้ในงานวิจัย	3
ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	5
บทที่ 2 แนวคิด ทฤษฎี เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	6
ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	6
กรอบแนวคิดในการวิจัยของโครงการวิจัย	18
งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	19
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย	24
เครื่องมือและอุปกรณ์	24
ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย	29
บทที่ 4 ผลการวิจัย	38
ลักษณะทางกายภาพของชิ้นงานเชื่อมแพร่ผ่านเฟสของเหลว	38
วิเคราะห์การประสานติดกันของผิวหน้ารอยเชื่อม	42
การทดสอบความแข็งแรงดึง	46

การวิเคราะห์สถิติ	48
การทดสอบความแข็ง	50
การตรวจสอบโครงสร้างทางโลหะวิทยา	53
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ	63
สรุปผลการวิจัย	63
อภิปรายผล	64
ข้อเสนอแนะในการนำผลการวิจัยไปใช้	65
ข้อเสนอแนะในการทำวิจัยครั้งต่อไป	65
บรรณานุกรม	66
ภาคผนวก	70
ภาคผนวก ก การศึกษาความเป็นไปได้การเชื่อมแพร่ผ่านเฟสของเหลว ด้วยเทคนิคการใช้ผงโลหะสังกะสีเป็นตัวประสานสำหรับ เชื่อมอะลูมิเนียม	70
ประวัติผู้วิจัย	78

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
2.1	สัญลักษณ์กลุ่มอะลูมิเนียม	10
2.2	คุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของสังกะสี	12
2.3	การวิเคราะห์ความแปรปรวนสำหรับการทดลอง	17
3.1	การกำหนดค่าตัวแปรการเชื่อมแพร่ผ่านเฟสของเหลวอะลูมิเนียมผสมหล่อทิ้งของแข็ง เกรด SSM 6063 โดยใช้ผงโลหะสังกะสีเป็นตัวประสาน	34
4.1	การทดลองและผลการทดสอบความแข็งแรงดึงรอยเชื่อม	49
4.2	การออกแบบการทดลอง (ANOVA)	50



สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
2.1	กลไกการเกิดการเชื่อมแพร่	7
2.2	ลักษณะการแพร่ของอะตอมแบบแทรกตัว	8
3.1	วิธีการดำเนินการวิจัยและขั้นตอนการวิจัย	23
3.2	เครื่องเลื่อยสายพาน ยี่ห้อ Taiwan รุ่น BAND SAW 7	24
3.3	เครื่องกลึง ยี่ห้อ Harrison รุ่น M300	25
3.4	เครื่องเชื่อมโดยการแพร่แบบเฟสของเหลว	26
3.5	เครื่องชั่งน้ำหนักความละเอียดสูง รุ่น VERTEX CK-12B	26
3.6	เครื่องทดสอบความแข็งแรงแบบวิกเกอร์ ยี่ห้อ Matsuzawa รุ่น MMT-X	27
3.7	เครื่องทดสอบแรงดึง ยี่ห้อ Universal Testing Machine รุ่น NRI-TS501-300	28
3.8	กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง	28
3.9	กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	29
3.10	ชิ้นงานทดลองที่ผ่านการกลึงของอะลูมิเนียมหล่อกึ่งแข็ง เกรด SSM 6063	30
3.11	วัสดุประสานที่มีขนาด 100, 300 และ 500 ไมโครเมตร	31
3.12	ขัดชิ้นงานด้วยกระดาษทรายเพื่อกำจัดฟิล์มออกไซด์	31
3.13	การเตรียมผิวหน้าชิ้นงานก่อนการเชื่อมด้วยลวดเชื่อมด้วยน้ำยาอะซิโตน	32
3.14	เครื่องมืออุปกรณ์ในกระบวนการเชื่อมโดยการแพร่	32
3.15	แบบจำลองการเชื่อมโดยการแพร่แบบเฟสของเหลว	33
3.16	การขัดผิวให้เรียบด้วยกระดาษทราย	34
3.17	กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง	35
3.18	กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด	36
3.19	การทดสอบแรงดึงชิ้นงานจากการเชื่อมแพร่ผ่านเฟสของเหลว	37
3.20	เครื่องทดสอบความแข็งแรงแบบไมโครวิกเกอร์	37
4.1	ลักษณะทางกายภาพของชิ้นงานหลังจากการเชื่อมแพร่ผ่านเฟสของเหลว อะลูมิเนียมหล่อผสมกึ่งของแข็ง เกรด SSM 6063 โดยใช้ผงโลหะสังกะสี เกรด ZA27 ขนาดอนุภาค 100 ไมโครเมตร เป็นตัวประสาน	39
4.2	ลักษณะทางกายภาพของชิ้นงานหลังจากการเชื่อมแพร่ผ่านเฟสของเหลว อะลูมิเนียมหล่อผสมกึ่งของแข็ง เกรด SSM 6063 โดยใช้ผงโลหะสังกะสี เกรด ZA27 ขนาดอนุภาค 300 ไมโครเมตร เป็นตัวประสาน	40

สารบัญภาพ (ต่อ)

	หน้า
4.3 ลักษณะทางกายภาพของชิ้นงานหลังจากการเชื่อมแพร่ผ่านเฟสของเหลวอะลูมิเนียมหล่อผสมกึ่งของแข็ง เกรด SSM 6063 โดยใช้ผงโลหะสังกะสี เกรด ZA27 ขนาดอนุภาค 500 ไมโครเมตร เป็นตัวประสาน	42
4.4 ลักษณะผิวหน้ารอยเชื่อมของชิ้นงานหลังจากการเชื่อมแพร่ผ่านเฟสของเหลวด้วยวัสดุประสานขนาดอนุภาค 100 ไมโครเมตร	43
4.5 ลักษณะผิวหน้ารอยเชื่อมของชิ้นงานหลังจากการเชื่อมแพร่ผ่านเฟสของเหลวด้วยวัสดุประสานขนาดอนุภาค 300 ไมโครเมตร	44
4.6 ลักษณะผิวหน้ารอยเชื่อมของชิ้นงานหลังจากการเชื่อมแพร่ผ่านเฟสของเหลวด้วยวัสดุประสานขนาดอนุภาค 300 ไมโครเมตร	45
4.7 ความแข็งแรงดึงของชิ้นงานการเชื่อมแพร่ผ่านเฟสของเหลวอะลูมิเนียมหล่อผสมกึ่งของแข็ง เกรด SSM 6063 โดยใช้ผงโลหะสังกะสี เกรด ZA27 ขนาดอนุภาค 100, 300 และ 500 ไมโครเมตร เป็นตัวประสาน	47
4.8 ความแข็งชิ้นงานการเชื่อมแพร่ผ่านเฟสของเหลวอะลูมิเนียมหล่อผสมกึ่งของแข็ง เกรด SSM 6063 ที่ขนาดอนุภาค 500 ไมโครเมตร ที่อุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 90 นาที	51
4.9 ความแข็งชิ้นงานการเชื่อมแพร่ผ่านเฟสของเหลวอะลูมิเนียมหล่อผสมกึ่งของแข็ง เกรด SSM 6063 ที่ขนาดอนุภาค 500 ไมโครเมตร ที่อุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 120 นาที	52
4.10 โครงสร้างจุลภาคฐานของอะลูมิเนียมหล่อกึ่งแข็ง เกรด 6063	53
4.11 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานเชื่อมที่อุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส เวลาการกดแช่ 90 และ 120 นาที ขนาดวัสดุประสาน 100 ไมโครเมตร	54
4.12 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานเชื่อมที่อุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส เวลาการกดแช่ 90 และ 120 นาที ขนาดวัสดุประสาน 300 ไมโครเมตร	55
4.13 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานเชื่อมที่อุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส เวลาการกดแช่ 90 และ 120 นาที ขนาดวัสดุประสาน 500 ไมโครเมตร	56
4.14 ขนาดอนุภาคของวัสดุประสานขนาด 100 ไมโครเมตร	57
4.15 ขนาดอนุภาคของวัสดุประสานขนาด 300 ไมโครเมตร	58
4.16 ขนาดอนุภาคของวัสดุประสานขนาด 500 ไมโครเมตร	59

สารบัญภาพ (ต่อ)

		หน้า
4.17	บริเวณรอยเชื่อมจากการถ่ายด้วยกล้องอิเล็กทรอนิกส์แบบส่องกราดกำลังขยาย 1000 เท่า	61
4.18	บริเวณรอยเชื่อมจากการถ่ายด้วยกล้องอิเล็กทรอนิกส์แบบส่องกราดกำลังขยาย 2500 เท่า	62



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ

ปัจจุบันกระบวนการเชื่อมมีอยู่หลายวิธี ในการเลือกใช้กระบวนการเชื่อมนั้นจะขึ้นอยู่กับความเหมาะสมของการผลิตในงานอุตสาหกรรมนั้น ๆ สำหรับการเชื่อมที่ใช้ความร้อนจากการอาร์ค เรียกว่า การเชื่อมแบบหลอมละลาย (Liquid State Welding) ความร้อนที่ได้จากการอาร์คจะทำให้เกิดการหลอมละลายเข้าด้วยกันของเนื้อโลหะบริเวณบ่อหลอมของรอยเชื่อม เมื่อโลหะแข็งตัวจะเกิดโครงสร้างใหม่ ซึ่งอาจจะส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงของสมบัติทางกลและส่งผลให้เกิดการแตกของรอยเชื่อมในระหว่างการแข็งตัวจากการหลอมละลาย (Hot Crack) ปัญหาการเกิดโพรงอากาศ (Porosity) ส่งผลโดยตรงให้สมบัติทางกลของอะลูมิเนียมหลังการเชื่อมลดลง [1] ดังนั้นนักวิจัยจึงได้มีการหาวิธีการเชื่อมและเทคนิคใหม่ ๆ ที่เหมาะสมสำหรับการเชื่อมวัสดุกลุ่มอะลูมิเนียมผสม เพื่อให้โครงสร้างทางโลหะวิทยาและสมบัติทางกลให้ใกล้เคียงกับโลหะเดิม การเชื่อมในสถานะของแข็ง (Solid State Welding) จึงเป็นกระบวนการเชื่อมที่น่าสนใจ เพราะหลักการยึดติดของโลหะเข้าด้วยกันเกิดขึ้นที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิหลอมเหลวของโลหะนั้น โดยที่โลหะยังอยู่ในสถานะของแข็ง โลหะจะเชื่อมติดกันด้วยความร้อนในขณะที่เชื่อมต่ำกว่าจุดหลอมเหลว (Melting Point) [2] อย่างไรก็ตาม กระบวนการเชื่อมในสถานะของแข็งที่มีความเหมาะสมในการเชื่อมอะลูมิเนียมและเป็นที่นิยมมีหลากหลายวิธี ได้แก่ การเชื่อมเสียดทานแบบกวน (Friction Stir Welding) [3] การเชื่อมด้วยแรงต้านทาน (Resistance Welding) [4] และการเชื่อมโดยการแพร่ (Diffusion Welding) [5] ผลจากการศึกษาวิจัยกระบวนการเชื่อมเสียดทานแบบกวนยังส่งผลให้มีการเปลี่ยนแปลงทางโครงสร้างทางโลหะวิทยาในบริเวณที่ได้รับการกวนจากแรงทางกล ส่งผลให้เกรนมีความละเอียด (Fine Grain) [6] วิธีการเชื่อมนี้จึงยังไม่สามารถรักษาโครงสร้างจุลภาคเดิมหลังการเชื่อมได้ ในทำนองเดียวกัน การเชื่อมด้วยแรงต้านทานก็ยังมีการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างจุลภาคเช่นกัน [7] แต่สำหรับกระบวนการเชื่อมโดยการแพร่พบว่าการเปลี่ยนแปลงทางโครงสร้างทางโลหะวิทยาหลังการเชื่อมน้อยมาก เพราะใช้หลักการแพร่ของอะตอมเมื่อได้รับความร้อน ภายใต้แรงกดที่ต่ำในขณะที่เชื่อม เมื่อเวลาผ่านไป อะตอมของวัสดุจะเกิดพลังงานกระตุ้นจากความร้อนในขณะที่เชื่อม และเกิดการเคลื่อนที่ของอะตอมที่แลกเปลี่ยน ส่งผลให้วัสดุเกิดการเชื่อมติดกัน กระบวนการเชื่อมโดยการแพร่มีตัวแปรที่เกี่ยวข้องในการเชื่อม คือ แรงกดขณะเชื่อม (Contact Pressure) เวลาในการกดแช่ (Holding Time) อุณหภูมิในการเชื่อม (Temperature) และบรรยากาศ (Atmosphere) และตัวแปรอื่น ๆ [8] อย่างไรก็ตาม อะลูมิเนียมผสม เกรด 6063 ก็ถูกนำมาใช้แพร่หลายในอุตสาหกรรมยานยนต์ เนื่องจากการพัฒนาของเทคโนโลยีในการหล่ออะลูมิเนียมไดคาสติ้ง (Die Casting) ทำให้อะลูมิเนียมผสม เกรด 6063 มี

การนำไปใช้งานกันอย่างกว้างขวาง ทั้งในภาคอุตสาหกรรมอากาศยาน อุตสาหกรรมต่อเรือ อุตสาหกรรมรถไฟฟ้า เป็นต้น [9] สำหรับเทคโนโลยีล่าสุดที่มีศักยภาพในการหล่อ คือ กรรมวิธีการหล่อโลหะกึ่งของแข็ง (Semi-Solid Metal: SSM) [10] ปัจจุบันการใช้เทคโนโลยีการหล่อโลหะกึ่งของแข็งทั่วโลกมีหลายเทคนิคด้วยกัน ประเทศไทยมีการวิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีการหล่อโลหะกึ่งของแข็ง เพื่อประยุกต์ใช้กับอุตสาหกรรมในประเทศและอุตสาหกรรมในต่างประเทศ ซึ่งเทคนิคที่เป็นที่น่าสนใจในขณะนี้ คือ กระบวนการหล่อโลหะกึ่งของแข็งด้วยเทคนิค (Gas Induced Semi-Solid: GISS) เป็นกระบวนการสร้างโลหะกึ่งของแข็งด้วยกรรมวิธีการพ่นฟองแก๊สเฉื่อยผ่านแท่งกราไฟต์พรมแก๊สอาร์กอน หรือไนโตรเจน ซึ่งเป็นกรรมวิธีแบบใหม่สำหรับการผลิตโลหะกึ่งของแข็งที่มีหลักการคล้ายกับวิธีลิโธคาสติ้ง (Rheocasting Method) ที่ให้โครงสร้างเกรนแบบก้อนกลม (Globular Grain) [11] ในขณะเดียวกันอะลูมิเนียมผสม เกรด SSM 6063 ก็ถูกนำมาหล่อด้วยเทคนิคกรรมวิธีการพ่นฟองแก๊สเฉื่อย เพื่อใช้กับงานอุตสาหกรรมยานยนต์ โดยเฉพาะการขึ้นรูปเป็นชิ้นส่วนประตูรถยนต์ (Car Door) ชิ้นส่วนระบายความร้อนในรถยนต์ (Heat Sinks) และชิ้นส่วนระบายแก๊สรถยนต์ (Flow channels for gas) [12] เนื่องจากอะลูมิเนียมผสมหล่อกึ่งแข็ง เกรด SSM 6063 มีส่วนผสมซิลิกอนเป็นธาตุผสมหลักและแมกนีเซียมเป็นธาตุผสมรอง ธาตุผสมเหล่านี้ช่วยให้ อะลูมิเนียมเกรดนี้มีความแข็งแรงสูง ทนต่อการกัดกร่อน อย่างไรก็ตามการเชื่อมโดยการแพร่ของ อะลูมิเนียมผสมหล่อกึ่งแข็ง เกรด SSM 6063 ยังมีความยาก เนื่องจากการเกิดออกไซด์ (Oxide) ในการเชื่อม ส่งผลให้ใช้เวลาในการเชื่อมนาน ดังนั้นการศึกษาด้านเทคนิคการเชื่อมโดยการแพร่ เพื่อลดเวลาในการเชื่อมจึงมีความน่าสนใจ การใช้วัสดุที่มีจุดหลอมเหลวต่ำว่าวัสดุเชื่อม เรียกว่า การเชื่อมแบบเฟสของเหลว ซึ่งเทคนิคนี้จะช่วยลดเวลาในการเชื่อมโดยการแพร่ ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงสนใจการเชื่อมโดยการแพร่แบบเฟสของเหลวอะลูมิเนียมผสมหล่อกึ่งแข็ง เกรด SSM 6063 โดยใช้ผงโลหะสังกะสีเป็นตัวประสาน ซึ่งจะส่งผลให้สามารถลดเวลาในการเชื่อมโดยการแพร่ได้ และยังส่งผลต่อการเกิดสารประกอบ Mg_2Si และ $MgZn_2$ ซึ่งสารประกอบทั้งสองชนิดจะส่งผลที่ดีต่อสมบัติทางกลหลังการเชื่อม

จากข้อมูลและเหตุผลดังที่กล่าวมา คณะผู้วิจัยจึงได้มีความสนใจศึกษาการเชื่อมโดยการแพร่ของอะลูมิเนียมผสมหล่อกึ่งของแข็ง เกรด SSM 6063 โดยใช้ผงโลหะสังกะสีเป็นตัวประสาน ผลการศึกษาจะประเมินสมบัติทางกลและโครงสร้างทางโลหะวิทยาหลังการเชื่อม ผลการทดลองเชื่อมโดยการแพร่จะทดสอบแรงดึง ความแข็ง และตรวจสอบลักษณะโครงสร้างจุลภาคที่เปลี่ยนแปลงหลังจากการเชื่อมด้วยกล้องอิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) กล้องอิเล็กตรอนแบบใช้แสง (OM) จากนั้นวิเคราะห์และประเมินผลเพื่อนำไปเขียนบทความวิชาการในการตีพิมพ์ระดับนานาชาติต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษาตัวแปรที่ส่งผลต่อการเชื่อมโดยการแพร่แบบเฟสของเหลวอะลูมิเนียมผสมหล่อกิ่งของแข็ง เกรด SSM 6063 โดยใช้ผงโลหะสังกะสีเป็นตัวประสาน

1.2.2 เพื่อศึกษาผลการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาคบริเวณรอยต่อ สมบัติทางกลของชิ้นงานหลังการเชื่อมโดยการแพร่แบบเฟสของเหลวอะลูมิเนียมผสมหล่อกิ่งของแข็ง เกรด SSM 6063 โดยใช้ผงโลหะสังกะสีเป็นตัวประสาน

1.3 ขอบเขตการวิจัย

ขอบเขตของงานวิจัยนี้จะใช้วัสดุที่ใช้ทดลองเป็นอะลูมิเนียมผสมหล่อกิ่งของแข็ง เกรด SSM 6063 โดยชิ้นงานทดลองเป็นชิ้นงานรูปทรงกระบอก ขนาดความโต เส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตร ความยาว 40 มิลลิเมตร สำหรับผงโลหะสังกะสีใช้ขนาดช่วง 100-200 ไมโครเมตร การกำหนดปัจจัยในการทดลอง ได้แก่ เวลาในการกดแช่ 30-150 นาที อุณหภูมิในการเชื่อมโดยการแพร่ที่ 270-470 องศาเซลเซียส ซึ่งตัวแปรเหล่านี้จะมีการทดลองเบื้องต้น เพื่อกำหนดตัวแปรที่เหมาะสมต่อไป สำหรับตัวแปรในการเชื่อมอื่น ๆ ได้แก่ ก๊าซอาร์กอนที่อัตราการไหลที่ 4 ลิตรต่อนาที แรงกดเชื่อมที่ 4 MPa (แรงกดคงที่) จากนั้นผลที่ได้จากการทดลองจะนำไปทดสอบสมบัติทางกล ได้แก่ การทดสอบความแข็ง (Hardness Testing) ตามมาตรฐาน ASTM E304-00 แบบวิธีการทดสอบแบบวิกเกอร์ส (Hardness Vickers: HV) และการทดสอบแรงดึง (Tensile Testing) ตามมาตรฐาน ASTM E8mm นอกจากนั้นชิ้นงานหลังการเชื่อมบางส่วนตรวจสอบโครงสร้างมหภาค (Macrostructure) และโครงสร้างจุลภาค (Microstructure) ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราดและกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง ผลที่ได้จากการทดลองจะประเมินปัจจัยที่ส่งผลในการเชื่อมอะลูมิเนียมผสมหล่อกิ่งของแข็ง เกรด SSM 6063 โดยใช้ผงโลหะสังกะสีเป็นตัวประสาน แล้วประเมินวิเคราะห์จากปัจจัยที่เหมาะสม โดยพิจารณาจากผลการทดสอบสมบัติทางกล การตรวจสอบโครงสร้างทางโลหะวิทยา จากนั้นนำองค์ความรู้ที่ได้จากการวิจัยนี้เผยแพร่สู่การตีพิมพ์บทความวิจัยในระดับนานาชาติ จำนวน 1 บทความ และนำเสนอบทความวิจัยในระดับชาติ จำนวน 1 บทความ ตามลำดับ

1.4 คำจำกัดความที่ใช้ในงานวิจัย

1.4.1 การเชื่อมโดยการแพร่แบบเฟสของเหลว (Transient Liquid Phase Bonding - TLP Bonding) หมายถึง กระบวนการเชื่อมวัสดุที่ใช้ตัวประสานซึ่งสามารถหลอมเหลวได้ที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิของวัสดุหลัก โดยในกระบวนการนี้ ตัวประสานจะหลอมเหลวเมื่อได้รับความร้อนและจะแทรกซึมเข้าไปในผิวหน้าของวัสดุหลัก จากนั้นเกิดการแพร่กระจาย (Diffusion) ของธาตุตัวประสานและธาตุของวัสดุหลัก ทำให้เกิดโครงสร้างเนื้อเดียวกัน (Homogeneous Structure) ที่รอยต่อ

หลังจากนั้น ตัวประสานจะเกิดการแข็งตัวเมื่ออุณหภูมิลดลง ทำให้ได้รอยต่อที่มีความแข็งแรงสูงและทนทานต่ออุณหภูมิสูง

1.4.2 อะลูมิเนียมผสมหล่อกึ่งของแข็ง เกรด SSM 6063 (Semi-Solid Metal Casting Aluminum Alloy Grade SSM 6063) หมายถึง โลหะผสมอะลูมิเนียมเกรด 6063 ซึ่งผ่านกระบวนการหล่อแบบกึ่งของแข็ง (Semi-Solid Metal Casting - SSM) โดยในกระบวนการนี้ โลหะจะอยู่ในสภาวะกึ่งของแข็ง-กึ่งของเหลว (Slurry) ซึ่งช่วยเพิ่มความสามารถในการไหล (Flowability) และลดการหดตัว (Shrinkage) ทำให้ได้ชิ้นงานที่มีความแม่นยำสูงและปราศจากโพรงอากาศ (Porosity) นอกจากนี้ โลหะผสมเกรด 6063 มีส่วนประกอบหลักคืออะลูมิเนียม แมกนีเซียม และซิลิกอน ซึ่งให้สมบัติเชิงกลที่ดี เช่น ความแข็งแรง ความต้านทานการกัดกร่อน และความสามารถในการขึ้นรูปที่ดี

1.4.3 ผงโลหะสังกะสีเกรด ZA27 (Zinc Alloy Powder Grade ZA27) หมายถึง ผงโลหะผสมสังกะสีที่มีส่วนประกอบหลักคือสังกะสี อะลูมิเนียม และทองแดง โดยเกรด ZA27 มีปริมาณอะลูมิเนียมสูงกว่าผงโลหะสังกะสีเกรดอื่น ๆ ทำให้มีสมบัติเชิงกลที่ดี เช่น ความแข็งแรงสูง ความเหนียวแน่น (Toughness) และความต้านทานการสึกหรอ (Wear Resistance) นอกจากนี้ ผงโลหะสังกะสี ZA27 ยังมีจุดหลอมเหลวต่ำและมีความสามารถในการเปียก (Wettability) ที่ดีเมื่อใช้เป็นตัวประสานในกระบวนการเชื่อมโดยการแพร่แบบเฟสของเหลว

1.4.4 การแพร่ (Diffusion) หมายถึง กระบวนการเคลื่อนที่ของอะตอมหรือโมเลกุลจากบริเวณที่มีความเข้มข้นสูงไปยังบริเวณที่มีความเข้มข้นต่ำ ซึ่งเกิดขึ้นจากการเคลื่อนที่แบบสุ่ม (Random Motion) ของอะตอมภายใต้อุณหภูมิที่สูงขึ้น โดยในกระบวนการเชื่อมโดยการแพร่แบบเฟสของเหลว (Transient Liquid Phase Bonding - TLP Bonding) การแพร่จะเกิดขึ้นระหว่างตัวประสานที่หลอมเหลวและพื้นผิวของวัสดุหลัก ทำให้เกิดการผสมของธาตุและเกิดโครงสร้างจุลภาคใหม่ที่มีความแข็งแรงและความทนทานสูงขึ้น

1.4.5 โครงสร้างจุลภาค (Microstructure) หมายถึง โครงสร้างภายในของวัสดุที่สามารถมองเห็นได้ด้วยกล้องจุลทรรศน์ (Microscope) ซึ่งประกอบไปด้วยเม็ดผลึก (Grains) รอยต่อระหว่างเม็ดผลึก (Grain Boundaries) และเฟสต่าง ๆ (Phases) ที่เกิดขึ้นในเนื้อวัสดุ โดยโครงสร้างจุลภาคมีผลโดยตรงต่อสมบัติเชิงกลของวัสดุ เช่น ความแข็งแรง ความเหนียว และความทนทานต่อการสึกหรอ ในการวิจัยนี้ การเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างจุลภาคที่เกิดขึ้นระหว่างกระบวนการเชื่อมโดยการแพร่แบบเฟสของเหลวจะถูกวิเคราะห์เพื่อประเมินผลกระทบต่อสมบัติเชิงกลของอะลูมิเนียมผสมหล่อกึ่งของแข็ง เกรด SSM 6063

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.5.1 การวิจัยนี้จะช่วยเพิ่มพูนความรู้เกี่ยวกับกลไกการแพร่ (Diffusion Mechanism) และพฤติกรรมของโครงสร้างจุลภาค (Microstructure) ที่เกิดขึ้นในกระบวนการเชื่อมโดยการแพร่แบบเฟสของเหลว (Transient Liquid Phase Bonding - TLP Bonding) ของอะลูมิเนียมผสมหล่อกิ่งของแข็งเกรด SSM 6063 โดยใช้ผงโลหะสังกะสีเป็นตัวประสาน ซึ่งจะเป็นประโยชน์ต่อการพัฒนาความรู้ทางด้านวิศวกรรมวัสดุและเทคโนโลยีการเชื่อม

1.5.2 การวิจัยจะช่วยพัฒนาขีดความสามารถของบุคลากรทางวิชาการและนักวิจัยในสาขาวิศวกรรมวัสดุ โดยเฉพาะในมหาวิทยาลัยและสถาบันวิจัยภายในประเทศ ซึ่งจะส่งเสริมให้เกิดการพัฒนาทักษะและนวัตกรรมใหม่ ๆ

1.5.3 การวิจัยสามารถนำไปใช้พัฒนากระบวนการผลิตในอุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้อง เช่น อุตสาหกรรมยานยนต์ อากาศยาน และอิเล็กทรอนิกส์ ที่ต้องการความแข็งแรงสูงและน้ำหนักเบา โดยใช้วัสดุอะลูมิเนียมผสมหล่อกิ่งของแข็งเกรด SSM 6063

1.5.4 การใช้ผงโลหะสังกะสีเป็นตัวประสานที่มีจุดหลอมเหลวต่ำ จะช่วยลดอุณหภูมิในการเชื่อม ลดการใช้พลังงาน และลดต้นทุนการผลิตในภาคอุตสาหกรรม

1.5.5 ข้อมูลที่ได้สามารถนำไปใช้ในงานออกแบบและผลิตชิ้นส่วนที่ต้องการความแข็งแรงสูง และทนทานต่อสภาวะการใช้งานที่รุนแรง เช่น ชิ้นส่วนในเครื่องจักรกล ชิ้นส่วนยานยนต์ และชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ ซึ่งจะช่วยเพิ่มคุณภาพและอายุการใช้งานของผลิตภัณฑ์

1.5.6 การวิจัยสามารถนำไปใช้เป็นแนวทางในการปรับปรุงและพัฒนากระบวนการเชื่อมโดยการแพร่แบบเฟสของเหลว ให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้นและได้รอยต่อที่มีคุณภาพสูงขึ้น

บทที่ 2

แนวคิด ทฤษฎี เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1.1 การเชื่อมโดยการแพร่ (Diffusion Bonding)

กรรมวิธีการเชื่อมโดยการแพร่เป็นการเชื่อมในสถานะของแข็ง สามารถเชื่อมต่อวัสดุได้หลายชนิด เช่น เซรามิก (Ceramic) วัสดุผสม (Composites) และโลหะ เป็นต้น กรรมวิธีการเชื่อมโดยการแพร่ต้องอาศัยตัวแปรที่เกี่ยวข้อง คือ แรงกดขณะเชื่อม (Pressure) เวลาในการกดแช่ (Time) และอุณหภูมิในการเชื่อม (Temperature) นอกจากนั้นยังมีตัวแปรอื่น ๆ เช่น ความราบเรียบของผิวรอยต่อ (Surface Roughness) ความสะอาดของผิวรอยต่อ (Cleaning Surface) เป็นต้น โดยกลไกของการเชื่อมต่อก็คือการแพร่ของอะตอมระหว่างวัสดุที่เชื่อมต่อกัน ดังแสดงในภาพที่ 2.1 โดยมีอัตราการแพร่ดังสมการที่ 1 การเชื่อมโดยการแพร่สามารถเชื่อมต่อวัสดุต่างชนิด (Dissimilar) วัสดุชนิดเดียวกัน (Similar) หรือเชื่อมหลายๆ ชั้นพร้อมกันได้ (Sandwich) ซึ่งในการเชื่อมด้วยวิธีการนี้จะใช้ในอุตสาหกรรมหลายชนิดด้วยกัน เช่น ชิ้นส่วนเครื่องปฏิกรณ์ในอุตสาหกรรมพลังงานปรมาณู อุตสาหกรรมการบินและอวกาศ เป็นต้น ในการเชื่อมโดยการแพร่การเตรียมผิวงานเชื่อมมีความสำคัญมาก โดยผิวหน้าที่เชื่อมต้องมีความราบเรียบของผิวที่เชื่อมต่อกัน นอกจากนั้นในการเชื่อมต้องมีการควบคุมบรรยากาศในขณะเชื่อมเพื่อป้องกันการเกิดออกไซด์ ซึ่งอาจทำภายใต้ระบบสุญญากาศหรือบรรยากาศที่มีก๊าซปกคลุม

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

เมื่อ

D = สัมประสิทธิ์การแพร่ (cm^2)

T = อุณหภูมิ (Kelvin)

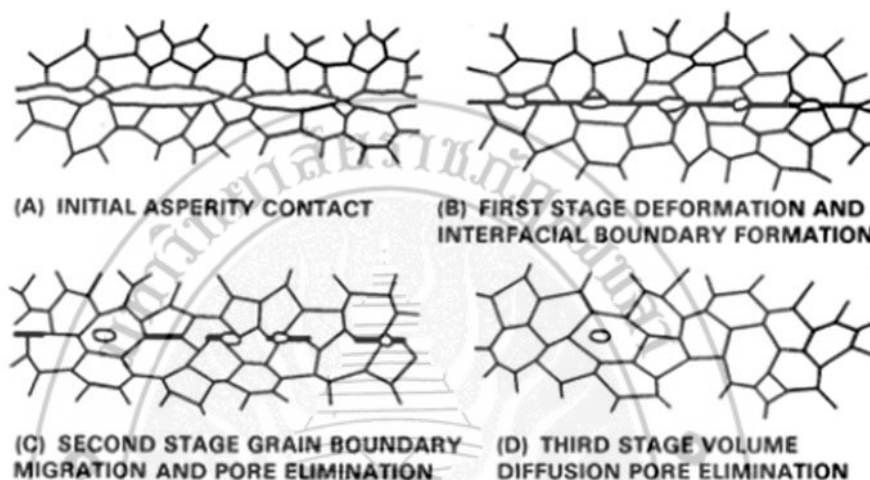
R = ค่าคงที่ของก๊าซ

A = ค่าคงที่

Q = พลังงานกระตุ้น

ในการแพร่ สัมประสิทธิ์การแพร่ (D) จะเร็วหรือช้าขึ้นอยู่กับ อุณหภูมิ กล่าวคือ ที่อุณหภูมิที่สูงยิ่งทำให้สัมประสิทธิ์ของการแพร่ที่รวดเร็ว ในทางตรงกันข้ามอุณหภูมิต่ำทำให้สัมประสิทธิ์การแพร่ช้าตามไปด้วย ซึ่งอุณหภูมิที่ช่วยในการแพร่จะบ่งบอกให้เห็นปริมาณพลังงานกระตุ้นว่ามีปริมาณต่ำ

หรือสูง หากเกิดพลังงานกระตุ้นที่สูงเป็นผลมาจากอุณหภูมิสูง ที่อุณหภูมิต่ำพลังงานกระตุ้นก็น้อยทำให้เกิดการแพร่ได้ช้า ในการเชื่อมโดยการแพร่มีกลไกการแพร่อยู่ด้วยกัน 4 ช่วง คือ ช่วงเริ่มต้นของผิวสัมผัส (Initial asperity contact) เป็นช่วงที่ขึ้นกับแรงกด เพราะแรงกดที่สูงเกินไปส่งผลให้โครงสร้างบิดเบี้ยวและหากแรงกดที่ต่ำเกินไป ส่งผลให้เกิดช่องว่างระหว่างผิวสัมผัสที่สูง [13]



ภาพที่ 2.1 กลไกการเกิดการเชื่อมแพร่

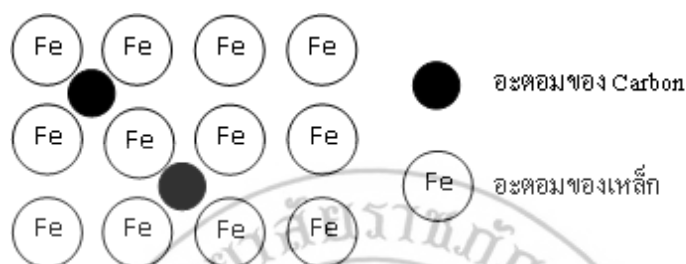
ในช่วงแรกของการแพร่ (First stage deformation and interfacial boundary formation) จะเป็นการเปลี่ยนรูปร่างอย่างช้า ๆ บริเวณขอบเกรนของชิ้นงาน โดยที่ขอบเกรนจะเชื่อมต่อกัน ปริมาณช่องว่าง (Void) จะเริ่มลดลง ช่วงที่สองของการแพร่ (Second stage grain boundary migration and pore elimination) เป็นช่วงที่เกิดการเคลื่อนย้ายของขอบเกรนเพื่อมาเชื่อมต่อกัน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

การแพร่ของอะตอม หมายถึง การเคลื่อนที่ของอะตอมจากบริเวณหนึ่งไปยังอีกบริเวณหนึ่ง ภายใต้พลังงานกระตุ้นซึ่งระบบ การแพร่ของอะตอมสามารถแบ่งออกเป็น 2 ลักษณะ คือ การแพร่แบบแทรกตัว (Interstitial Diffusion) และการแพร่แบบแทนที่ (Substitution Diffusion)

(1) การแพร่แบบแทรกตัว (Interstitial Diffusion)

การแพร่ของอะตอมต่างชนิดกันที่เกิดขึ้นในกรณีที่ขนาดของอะตอมตัวถูกละลาย มีขนาดเล็กกว่าอะตอมของตัวทำละลายมาก ๆ เช่น อะตอมของคาร์บอนซึ่งมีขนาดเล็กกว่าอะตอม

เหล็กมากทำให้อะตอมของคาร์บอนสามารถแทรกตัวในโครงสร้างผลึกได้ ดังนั้นการแพร่ของอะตอมแบบแทรกตัวจึงเกิดขึ้นได้ง่ายและรวดเร็ว ดังแสดงในภาพที่ 2.2



ภาพที่ 2.2 ลักษณะการแพร่ของอะตอมแบบแทรกตัว

(2) การแพร่แบบแทนที่ (Substitution Diffusion)

กรณีของอะตอมของตัวทำละลายและตัวถูกละลายมีขนาดใกล้เคียงกันการแพร่ที่เกิดขึ้นจะเป็นการแพร่แบบแทนที่ กล่าวคือ การแพร่จะเกิดได้ก็ต่อเมื่อจะต้องมีวาแคนซี คือ ตำแหน่งช่องว่างในโครงสร้างผลึก (Vacancy) ในตำแหน่งข้างเคียงอะตอมจึงสามารถแพร่ได้ ดังนั้นความเร็วในการแพร่ชนิดนี้ขึ้นอยู่กับปริมาณช่องว่างภายในโครงสร้างผลึก จากความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับจำนวนวาแคนซีที่เกิดขึ้นพบว่าเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นอะตอมต่าง ๆ ภายในโครงสร้างมีพลังงานเพิ่มขึ้นสามารถเอาชนะพลังงานยึดเหนี่ยวและหลุดเป็นอะตอมอิสระ ทำให้เกิดวาแคนซีเป็นจำนวนมากดังนั้นการแพร่แบบแทนที่ ณ อุณหภูมิสูงจะเกิดขึ้นได้รวดเร็วกว่าการแพร่แบบแทนที่ ณ อุณหภูมิต่ำตัวแปรที่มีผลต่อการแพร่ ได้แก่

1) อุณหภูมิเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นทำให้อะตอมต่าง ๆ มีพลังงานภายในสูงขึ้นทำให้เกิดการสั่นมากขึ้นเมื่ออะตอมใด ๆ ที่มีพลังงานมากกว่าพลังงานยึดเหนี่ยวจะหลุดออกจากโครงสร้างผลึกทำให้เกิดเป็นวาแคนซี และอะตอมต่าง ๆ เกิดการแพร่ได้ง่าย

2) ขนาดของอะตอมของตัวทำละลายและตัวถูกละลายในกรณีที่มีขนาดแตกต่างกันมาก เช่น อะตอมของเหล็กและคาร์บอนจะมีลักษณะการแพร่แบบแทรก แต่ในกรณีที่อะตอมทั้งสองมีขนาดใกล้เคียงกันจะมีลักษณะการแพร่แบบแทนที่

3) ค่าสัมประสิทธิ์ของการแพร่ (Diffusivity; D) โดยวัสดุแต่ละชนิดมีโครงสร้างผลึกและพลังงานยึดเหนี่ยวอะตอมที่แตกต่างกันซึ่งส่งผลต่อการแพร่ของอะตอม โดยพบว่าธาตุที่มีจุดหลอมเหลวต่ำมีค่าสัมประสิทธิ์ของการแพร่ของอะตอมสูงกว่าธาตุที่มีจุดหลอมเหลวสูง ซึ่งหมายถึง

อะตอมของธาตุที่มีจุดหลอมเหลวต่ำกว่าสามารถแพร่ได้เร็วกว่าธาตุที่มีจุดหลอมเหลวสูง สัมประสิทธิ์การแพร่

4) จุดบกพร่องในโครงสร้างผลึกซึ่งจุดบกพร่องที่เกิดขึ้นจะมีหลายลักษณะอาทิ เช่น วาเคนซี ดิสโลเคชัน และบริเวณขอบเกรนซึ่งบริเวณเหล่านี้อะตอมต่าง ๆ สามารถแพร่ได้

2.1.2 อะลูมิเนียม (Aluminium Alloy)

อะลูมิเนียมเป็นโลหะสำคัญที่ได้รับการใช้งานมากที่สุดในกลุ่มโลหะที่มีน้ำหนักเบา (Light Metals) ทั้งนี้เพราะอะลูมิเนียมมีสมบัติเด่นหลายประการ เช่น มีความหนาแน่นน้อยและมีกำลังวัสดุต่อหน่วยน้ำหนักสูงจึงนิยมใช้ทำเครื่องใช้และชิ้นส่วนบางอย่างในเครื่องบิน จรวด และซีปนาอูธ สามารถขึ้นรูปด้วยกรรมวิธีต่าง ๆ ได้ง่าย จุดหลอมเหลวต่ำ หลอมเหลวง่าย และมีอัตราการไหลตัวสูง ค่าการนำไฟฟ้าไม่สูงมากนักแต่เนื่องจากน้ำหนักเบาจึงนิยมใช้เป็นตัวนำไฟฟ้า ไม่เป็นพิษต่อร่างกายมนุษย์ มีดัชนีในการสะท้อนกลับของแสงสูงมาก ทนทานต่อการเกิดสนิมและการกัดกร่อนในบรรยากาศใช้งานทั่วไปได้ดีมาก แต่ไม่ทนการกัดกร่อนต่อกรดและด่าง หาซื้อได้ง่ายและราคาไม่แพงมากนัก สมาคมอะลูมิเนียมแห่งอเมริกา (The Aluminium Association of America) ได้กำหนดสัญลักษณ์สำหรับอะลูมิเนียมผสมขึ้น โดยสามารถแยกเป็นประเภทใหญ่ ๆ ได้ 2 ประเภทคือ (1) การกำหนดสัญลักษณ์สำหรับอะลูมิเนียมผสมขึ้นรูป (Designation for Wrought Aluminium Alloys) การกำหนดสัญลักษณ์ อะลูมิเนียมผสมขึ้นรูป หรืออะลูมิเนียมผสมรีด โดยใช้ระบบตัวเลข 4 หลัก (2) การกำหนดสัญลักษณ์สำหรับอะลูมิเนียมผสมหล่อ (Designation for Cast Aluminium Alloys) ได้กำหนดสัญลักษณ์อะลูมิเนียมผสมหล่อ โดยใช้ระบบตัวเลข 2 หลักหรือ 3 หลัก

ตัวเลขตัวที่หนึ่ง เป็นสัญลักษณ์แสดงกลุ่มธาตุที่ผสมธาตุหนึ่งเป็นหลัก เช่น 2XXX เป็นกลุ่มธาตุผสมของอะลูมิเนียมที่มีทองแดงเป็นธาตุผสมหลัก ซึ่งมีอยู่ 8 กลุ่ม ตัวเลขตัวที่สอง เป็นสัญลักษณ์ใช้สำหรับกำกับ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงส่วนผสมของโลหะ ให้แตกต่างไปจากโลหะผสมเดิม เช่น ตัวเลข 0 แสดงว่า เป็นโลหะผสมดั้งเดิม ส่วนตัวเลข 1-9 แสดงว่า เป็นโลหะที่ผสมเข้าไปเปลี่ยนแปลงจากเดิม ยกตัวอย่างเช่น หมายเลข 2024 ตัวเลขหลักที่สองคือ 0 (4.5%Cu, 1.5%Mg, 0.5%Si และ 0.1%Cr) เมื่อเทียบกับหมายเลข 2218 ตัวเลขหลักที่สองคือ 2 (4.0%Cu, 2.0%Ni, 1.5%Mg และ 0.2%Si) ซึ่งสังเกตได้ว่า หมายเลข 2218 มีนิกเกิล (Ni) ผสมเข้าไป ตัวเลขตัวที่สามและสี่ เป็นสัญลักษณ์ที่ใช้แสดงชนิดย่อย ๆ ของโลหะที่ผสมในกลุ่มเดียวกัน ความแตกต่างที่เกิดขึ้นนี้ มักจะเป็นส่วนผสมที่แตกต่างกัน ตัวอย่างเช่น หมายเลข 2014 ตัวเลขหลักที่สามและสี่คือ 14(4.4%Cu, 0.8%Si, 0.8%Mn และ 0.4%Mg) และหมายเลข 2017 ตัวเลขหลักที่สามและสี่คือ 17(4.0%Cu, 0.8%Si, 0.5%Mn, 0.5%Mg และ 0.1%Cr) ดังแสดงในตารางที่ 2.1 เฉพาะอะลูมิเนียมในกลุ่ม 1XXX ตัวเลขหลักที่สาม และหลักที่สี่จะแสดงปริมาณของอะลูมิเนียมที่เป็นจุดทศนิยม 2 ตำแหน่ง ที่

ปรากฏภายหลัง 99% เช่น หมายเลข 1060 และหมายเลข 1080 หมายถึง อะลูมิเนียมขึ้นรูปที่มีอะลูมิเนียม 99.60% และ 99.80% ตามลำดับ

ตารางที่ 2.1 สัญลักษณ์กลุ่มอะลูมิเนียม [14]

สัญลักษณ์	ธาตุที่เป็นส่วนผสมหลักในอะลูมิเนียม
1XXX	อะลูมิเนียมที่มีความบริสุทธิ์ไม่น้อยกว่า 99.0%
2XXX	ทองแดง
3XXX	แมงกานีส
4XXX	ซิลิกอน
5XXX	แมกนีเซียม
6XXX	แมกนีเซียม กับ ซิลิกอน
7XXX	สังกะสี
8XXX	ธาตุอื่น ๆ
9XXX	ยังไม่มีที่ใช้

อะลูมิเนียมผสมแมกนีเซียมและซิลิกอน (Aluminium - Silicon - Magnesium Alloys) โลหะผสมชนิดนี้เป็นโลหะผสมขึ้นรูปจะจัดอยู่ในกลุ่ม 6XXX และการรวมตัวของโลหะผสมชนิดนี้จะเกิดขึ้น โดยแมกนีเซียมและซิลิกอนรวมกันเป็นสารประกอบ เรียกว่า แมกนีเซียมซิลิไซด์ (Mg_2Si) แล้วมารวมตัวกับอะลูมิเนียมเป็นแบบยูเทคติกที่อุณหภูมิต่ำกว่า 600 องศาเซลเซียส โลหะผสมชนิดนี้จะสามารถทำการแยกตัวแข็งโดยการวิธีทางความร้อน (Artificial Aging) ได้ โดยแมกนีเซียมซิลิไซด์จะแยกตัวออกมา ซึ่งมีผลทำให้โลหะนี้มีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น นอกจากนี้แล้วยังมีความต้านทานกัดกร่อนดีอีกด้วย เหมาะแก่การนำไปใช้ทำเฟอร์นิเจอร์ เรือแคนู และใช้ในงานสถาปัตยกรรม เป็นต้น สำหรับโลหะผสมอะลูมิเนียม-แมกนีเซียม-ซิลิกอนชนิดรีดจะมีอยู่ด้วยกันหลายชนิด คือ โลหะผสม 6053, 6061 และ 6063 การผสมซิลิกอนด้วยจำนวนพอเหมาะนี้จะสามารถลดปริมาณแมกนีเซียมลงได้ เช่น โลหะผสม 6061 (0.6 Si, 1 Mg) โลหะผสมอะลูมิเนียม-แมกนีเซียม-ซิลิกอนชนิดหล่อก็จะมีอยู่ด้วยกันหลายชนิด เช่น โลหะผสม 355, 356 และ 360 ซึ่งเป็นโลหะผสมที่มีคุณสมบัติการหล่อดี มีความแข็งแรงสูงและมีความต้านทานการสึกหรอดี ในกรณีที่นำโลหะผสมนี้ไปทำการอบชุบ หรือผ่านกรรมวิธีทางความร้อน จะช่วยปรับปรุงคุณสมบัติทางกลให้ได้ใกล้เคียง กับโลหะผสมอะลูมิเนียม-ทองแดง เหมาะแก่การนำไปใช้ทำชิ้นส่วนเครื่องจักรกลและเครื่องบิน

สำหรับโลหะอะลูมิเนียมผสมทองแดง ถ้าผสมทองแดงในปริมาณที่พอเหมาะจะทำให้เกิดการแยกตัวแข็งดี แต่ถ้าผสมในปริมาณมากก็จะทำให้ความต้านทานการกัดกร่อนลดลงไป เช่น โลหะผสม 2014, 2025 และ 7075 การป้องกันการกัดกร่อนของโลหะเหล่านี้ ทำได้โดยใช้อะลูมิเนียมบริสุทธิ์ประกบเคลือบบนผิว แล้วรีดโดยกระบวนการทางความร้อนให้ติดกับเนื้อโลหะ กรรมวิธีดังกล่าวนี้เรียกว่า เคลดดิ้ง และโลหะพวกนี้มีชื่อเรียกพิเศษ เรียกว่า แอลเคลด (Alclad) ซึ่งเป็นโลหะที่มีความต้านทานการกัดกร่อนที่ผิวดี ส่วนแกนกลางจะเป็นโลหะที่มีความแข็งแรงสูง

บริษัทอะลูมิเนียมแห่งอเมริกาเป็นผู้ผลิตโลหะแอลเคลดนี้ขึ้นมาใช้หลายชนิดด้วยกัน เช่น แอลเคลด 2024 เป็นโลหะแผ่นที่ใช้อะลูมิเนียมบริสุทธิ์ประกบเคลือบผิวและสำหรับแอลเคลด 2014 กับแอลเคลด 7075 ซึ่งเป็นโลหะแผ่นเหมือนกัน แต่ประกบเคลือบผิวด้วยโลหะผสม 6053 (0.1 Cu, 0.6 Si, 0.35 Fe, 1.2 Mg, 0.1 Zn และ 0.25 Cr) ตามลำดับ

2.1.3 สังกะสี (Zinc)

เป็นธาตุโลหะที่มีหมายเลขอะตอม 30 และสัญลักษณ์ทางเคมีคือ Zn มีลักษณะเป็นโลหะสีเงิน มันวาว และมีความไวต่อปฏิกิริยาเคมีพอสมควร สังกะสีมีบทบาทสำคัญในหลายอุตสาหกรรม โดยเฉพาะอย่างยิ่งในการเชื่อมโดยการแพร่แบบเฟสของเหลว (Transient Liquid Phase Bonding - TLP Bonding) คุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของสังกะสี จุดหลอมเหลวและจุดเดือด สังกะสีมีจุดหลอมเหลวที่ประมาณ 419.5 องศาเซลเซียส และจุดเดือดที่ประมาณ 907 องศาเซลเซียส ความหนาแน่นที่อุณหภูมิห้อง สังกะสีมีความหนาแน่นประมาณ 7.14 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร โครงสร้างผลึก สังกะสีมีโครงสร้างผลึกแบบเฮกซะโกนอล (Hexagonal Close-Packed - HCP) ปฏิกิริยากับอากาศ สังกะสีทำปฏิกิริยากับออกซิเจนในอากาศ เกิดเป็นชั้นบาง ๆ ของสังกะสีออกไซด์ (ZnO) ที่ช่วยป้องกันการกัดกร่อน ปฏิกิริยากับกรดและด่าง สังกะสีทำปฏิกิริยากับกรด เช่น กรดไฮโดรคลอริก (HCl) ปล่อยก๊าซไฮโดรเจน (H_2) และเกิดเป็นสังกะสีคลอไรด์ ($ZnCl_2$) นอกจากนี้ยังทำปฏิกิริยากับด่าง เช่น โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) บทบาทของสังกะสีในกระบวนการเชื่อมโดยการแพร่แบบเฟสของเหลว (TLP Bonding) ในกระบวนการเชื่อมโดยการแพร่แบบเฟสของเหลว สังกะสีถูกใช้เป็นวัสดุประสาน (Brazing Filler) เนื่องจากมีจุดหลอมเหลวต่ำ เมื่อสังกะสีหลอมเหลวที่อุณหภูมิประมาณ 419.5 องศาเซลเซียส จะสามารถแทรกซึมเข้าไปในช่องว่างระหว่างวัสดุที่ต้องการเชื่อม และทำปฏิกิริยากับพื้นผิวของวัสดุ ส่งผลให้เกิดการแพร่ของอะตอมระหว่างวัสดุและสังกะสี สร้างรอยต่อที่มีความแข็งแรงและทนทาน การใช้สังกะสีเป็นวัสดุประสานในกระบวนการ TLP Bonding มีข้อดีหลายประการ ลดอุณหภูมิในการเชื่อม เนื่องจากสังกะสีมีจุดหลอมเหลวต่ำ การใช้สังกะสีเป็นวัสดุประสานช่วยลดอุณหภูมิที่จำเป็นในการเชื่อม ซึ่งช่วยลดความเสี่ยงของการเสียรูปหรือความเสียหายต่อวัสดุพื้นฐาน ปรับปรุงคุณสมบัติของรอยต่อ สังกะสีสามารถทำปฏิกิริยากับโลหะอื่น ๆ เช่น อะลูมิเนียม สร้างสารประกอบระหว่างโลหะ (Intermetallic Compounds)

ที่ช่วยเพิ่มความแข็งแรงและความทนทานของรอยต่อ ป้องกันการกัดกร่อน สังกะสีมีความต้านทานต่อการกัดกร่อนสูง การใช้สังกะสีเป็นวัสดุประสานสามารถช่วยป้องกันการกัดกร่อนในรอยต่อ เพิ่มอายุการใช้งานของชิ้นส่วนที่เชื่อม อย่างไรก็ตาม การใช้สังกะสีในกระบวนการ TLP Bonding จำเป็นต้องควบคุมพารามิเตอร์ต่าง ๆ อย่างแม่นยำ เช่น อุณหภูมิ เวลา และความดัน เพื่อให้ได้รอยต่อที่มีคุณภาพสูง นอกจากนี้ ควรพิจารณาการเกิดสารประกอบระหว่างโลหะที่อาจมีผลต่อความเปราะหรือความแข็งแรงของรอยต่อ คุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของสังกะสีดังแสดงในตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 คุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของสังกะสี [15]

คุณสมบัติ	ค่า
หมายเลขอะตอม	30
มวลอะตอม	65.409 กรัม/โมล
โครงสร้างผลึก	หกเหลี่ยม (Hexagonal)
จุดหลอมเหลว	419.5 °C
จุดเดือด	907 °C
ความหนาแน่น	7.14 กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร
การจัดเรียงอิเล็กตรอน	[Ar] 3d ¹⁰ 4s ²

สังกะสีมีความไวต่อปฏิกิริยาเคมีพอสมควร สามารถทำปฏิกิริยากับออกซิเจนในอากาศ เกิดเป็นชั้นบาง ๆ ของสังกะสีออกไซด์ (ZnO) ที่ช่วยป้องกันการกัดกร่อน นอกจากนี้ยังทำปฏิกิริยากับกรด เช่น กรดไฮโดรคลอริก (HCl) ปล่อยก๊าซไฮโดรเจน (H₂) และเกิดเป็นสังกะสีคลอไรด์ (ZnCl₂) รวมถึงทำปฏิกิริยากับด่าง เช่น โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) การใช้ประโยชน์ของสังกะสี ได้แก่ การชุบสังกะสี (Galvanization): สังกะสีถูกใช้ในการเคลือบเหล็กหรือเหล็กกล้าเพื่อป้องกันการกัดกร่อน กระบวนการนี้เรียกว่าการชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อน (Hot-Dip Galvanizing) ซึ่งช่วยยืดอายุการใช้งานของโครงสร้างเหล็ก ใช้ในโลหะผสม สังกะสีถูกใช้เป็นส่วนประกอบในโลหะผสมหลายชนิด เช่น ทองเหลือง (Brass) ซึ่งเป็นโลหะผสมระหว่างทองแดงและสังกะสี และอุตสาหกรรมเคมี สังกะสีถูกใช้ในการผลิตสารเคมีต่าง ๆ เช่น สังกะสีออกไซด์ (ZnO) ที่ใช้ในอุตสาหกรรมยางและเครื่องสำอาง เป็นต้น

2.1.4 วิเคราะห์ข้อมูลเชิงสถิติ (Static Analysis)

เป็นการนำวิธีการทางสถิติมาใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูล Montgomery D.C. (2000) [15] กล่าวว่า เพื่อให้ผลลัพธ์และข้อสรุปที่เกิดขึ้นเป็นไปตามวัตถุประสงค์ของการทดลอง เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการตัดสินใจที่มีประสิทธิภาพ ข้อสรุปที่ได้มีเหตุผลและความน่าเชื่อถือ การวิเคราะห์ผลการทดสอบแรงดึงของชิ้นทดสอบ บันทึกผลการทดลอง สถิติที่ใช้ในการวิจัย ซึ่งต้องใช้ในการวิเคราะห์ ค่าทดสอบของชิ้นงานที่ใช้ในงานวิจัย คือสถิติเชิงพรรณนา (Descriptive Statistics) เพื่อหาค่าเฉลี่ย ค่าสูงสุด ค่าต่ำสุด สถิติเชิงอนุมาน (Inferential Statistic) เพื่อหาค่าความแปรปรวน และอิทธิพลของตัวแปรที่เกี่ยวข้อง

การกำหนดขนาดตัวอย่างว่าจะมีจำนวนเท่าไรที่สามารถเป็นตัวแทนประชากรได้เพียงพอและเหมาะสมที่จะทำให้การวิจัยมีประสิทธิภาพไม่สิ้นเปลืองงบประมาณ เวลา และกำลังคน โดยการกำหนดขนาดตัวอย่าง โดยการกำหนดค่าดังนี้

- (1) Type I Error (α) = 0.05
- (2) Power ($1 - \beta$) = 0.95
- (3) Number of Center Point = 0
- (4) Estimate σ
- (5) Minimum Effect (D)

การประมาณค่า σ จากผลการทดลองที่เกี่ยวข้อง ค่าที่มีการแนะนำให้ใช้ หรือการศึกษาเบื้องต้นของการทดลองนี้ ในกรณีนี้ไม่มีข้อมูลของการทดลองอื่น หรือข้อมูลอื่น ๆ มาใช้ในการประมาณค่า ที่ต้องการจึงต้องมีการศึกษาเบื้องต้นเพื่อประมาณค่า σ โดยการออกแบบการทดลอง Factorial Design หาค่า σ จากสมการที่ 2

$$\sigma = \sqrt{MS_{Error}} \quad (2)$$

การออกแบบเชิงแฟกทอเรียล 2 ปัจจัย คือ A และ B ปัจจัย A จะประกอบด้วย a ระดับ และปัจจัย B จะประกอบด้วย b ระดับ ซึ่งทั้งหมดอยู่ในรูปของการออกแบบเชิงแฟกทอเรียล คือ ในแต่ละซ้ำของการทดลองประกอบด้วย การทดลองร่วมปัจจัยทั้งหมด $a*b$ การทดลอง โดยปกติจะมีจำนวนซ้ำทั้งหมด n ครั้ง กำหนดให้ y_{ijk} คือผลตอบที่สังเกตได้เมื่อปัจจัย A อยู่ในระดับ i ($i = 1, 2, \dots, a$) และปัจจัย B อยู่ในระดับ j ($j = 1, 2, \dots, b$) สำหรับซ้ำที่ k ($k = 1, 2, \dots, n$) รูปแบบทั่วไปของการออกแบบเชิงแฟกทอเรียล 2 ปัจจัย เนื่องจากลำดับของการสังเกตทั้ง $a*b*n$ ครั้ง เลือกมาอย่าง

สุ่มเป็นการออกแบบสุ่มบริบูรณ์ (Completely randomized design) แบบจำลองสถิติเชิงเส้น (Linear statistical model) ดังแสดงในสมการที่ 3

$$y_{ijk} = \mu + \tau_i + \beta_j + (\tau\beta)_{ij} + \varepsilon_{ijk} \begin{cases} i = 1, 2, \dots, a \\ j = 1, 2, \dots, b \\ k = 1, 2, \dots, n \end{cases} \quad (3)$$

โดยที่ μ หมายถึง ผลเฉลี่ยทั้งหมด τ_i หมายถึง ผลที่เกิดจากระดับที่ i ของแถวของปัจจัย A; β_j หมายถึง ผลที่เกิดจากระดับที่ j ของคอลัมน์ ของปัจจัย B; $(\tau\beta)_{ij}$ หมายถึง ผลที่เกิดจากอันตรกิริยาระหว่าง τ_i และ β_j และ ε_{ij} หมายถึง องค์ประกอบของความผิดพลาดแบบสุ่มสมมติว่าปัจจัยทั้งคู่มีค่าตายตัว (Fixed) และผลจากการทดลอง (Treatment effect) หมายถึง ส่วนที่เบี่ยงเบนจากค่าเฉลี่ยทั้งหมดดังนั้น $\sum_{i=1}^a \tau_i = 0$ และ $\sum_{j=1}^b \beta_j = 0$ ในทำนองเดียวกันสมมติว่าผลที่เกิดจากอันตรกิริยามีค่าตายตัวและกำหนดว่า $\sum_{i=1}^a (\tau\beta)_{ij} = \sum_{j=1}^b (\tau\beta)_{ij} = 0$ เนื่องจากในการทดลองครั้งนี้มีจำนวนทำซ้ำ n ครั้ง ดังนั้น จำนวนข้อมูลที่ได้จากการสังเกตทั้งหมดเท่ากับ $a * b * n$ ในการทดลองเชิงแฟกทอเรียล 2 ปัจจัย ทั้งปัจจัยที่เกิดจากอุณหภูมิ (A) และเวลาในการเชื่อม (B) มีความสำคัญเท่ากัน

ความเท่ากันของผลที่เกิดจากอุณหภูมิ

$$H_0 : \tau_1 = \tau_2 = \dots = \tau_a = 0$$

$$H_1 : \tau_i \neq 0 \text{ At Least One}$$

ความเท่ากันของผลที่เกิดจากเวลาในการเชื่อม

$$H_0 : \beta_1 = \beta_2 = \dots = \beta_b = 0$$

$$H_1 : \beta_j \neq 0 \text{ At Least One}$$

ผลของอันตรกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่างอุณหภูมิและเวลาในการเชื่อมมีนัยสำคัญหรือไม่

$$H_0 : (\tau\beta)_{ij} = 0 \quad \text{For All } i, j$$

$$H_1 : (\tau\beta)_{ij} \neq 0 \quad \text{At Least One}$$

การทดสอบสมมติฐานเหล่านี้โดยใช้การวิเคราะห์ความแปรปรวน 2 ปัจจัยเป็นการทดสอบตัวแปรที่ถูกกำหนดในการทดลองว่ามีอิทธิพลต่อการทดลองหรือไม่โดยตั้งสมมติฐานหลักและความสัมพันธ์ของตัวแปร ตรวจสอบผลด้วยค่าทางสถิติดังนี้

(1) พิจารณา Main effect

ทดสอบสมมติฐาน อิทธิพลของอุณหภูมิ

$H_0 : \tau_1 = \tau_2$ สำหรับทุกระดับ อิทธิพลของอุณหภูมิไม่แตกต่างกัน

$H_1 : \tau_1 \neq \tau_2$ สำหรับบางระดับ อิทธิพลของอุณหภูมิแตกต่างกัน

ทดสอบสมมติฐาน อิทธิพลของเวลาในการเชื่อม

$H_0 : \beta_1 = \beta_2 = \beta_3$ สำหรับทุกระดับอิทธิพลของเวลาในการเชื่อมไม่

แตกต่างกัน

$H_1 : \beta_1 \neq \beta_2 \neq \beta_3$ สำหรับบางระดับ อิทธิพลของเวลาในการเชื่อม

แตกต่างกัน

(2) พิจารณา 2 Factor interaction effect

ทดสอบอันตรกิริยา (Interaction) ระหว่างอุณหภูมิกับเวลาในการเชื่อม

$H_0 : (\tau\beta)_{ij} = 0$ for all i, j ทุกระดับ i, j ไม่มีอิทธิพลของ Interaction

($i = 1, 2; j = 1, 2, 3$)

$H_1 : at least one (\tau\beta)_{ij} \neq 0$ มีบาง i, j มีอิทธิพลของ Interaction

($i = 1, 2; j = 1, 2, 3$)

การสร้างแบบจำลองการถดถอยกับตัวแปรที่มีความสัมพันธ์กันตั้งแต่สองตัวขึ้นไป ซึ่งจะสร้างแบบจำลองและหาความสัมพันธ์ของตัวแปร คือ อุณหภูมิกับเวลาในการเชื่อม จึงได้สร้างแบบจำลองที่แสดงความสัมพันธ์ของงานเชื่อมด้วยอุณหภูมิกับเวลาในการเชื่อม และใช้แบบจำลองในการพยากรณ์ค่าที่เหมาะสมที่สุดในการดำเนินงานของการเชื่อมโดยการแพร่ แบบจำลองการถดถอยถูกนำมาใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูล จากการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลาในการเชื่อม แบบจำลองที่ใช้แสดงความสัมพันธ์ ดังสมการที่ 4 และ 5 ตามลำดับ

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \varepsilon \quad (4)$$

สมการทั่วไปของ Regression Factorial Design

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_{12} x_1 x_2 \quad (5)$$

เป็นการทดสอบสมมติฐานเกี่ยวกับตัวแปรที่ใช้ในแบบจำลองในการตรวจสอบการใช้งานของแบบจำลอง โดยสมมติว่าค่าความผิดพลาดในแบบจำลอง ε_1 มีการกระจายแบบปกติและเป็นอิสระมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0 และมีความแปรปรวนเท่ากับ σ^2 ซึ่งเขียนย่อได้เป็น $\varepsilon\text{-NID } (0, \sigma^2)$ ผลก็คือข้อมูลที่เก็บมาได้ y จะมีการกระจายแบบปกติและเป็นอิสระมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ $\beta_0 + \sum_{j=1}^k \beta_j x_{ij}$ ความแปรปรวนเท่ากับ σ^2 การทดสอบนัยสำคัญของการถดถอยคือการทดสอบเพื่อตรวจสอบความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรผลตอบ y และเซตย่อยของตัวแปรถดถอย $x_1, x_2, \dots, x_k$ หรือไม่ สมมติฐานที่เหมาะสมคือ

$$H_0 = \beta_1 = \beta_2 = \dots = \beta_k = 0$$

$$H_1 = \beta_1 \neq 0 \text{ for at Least One } j$$

การปฏิเสธ H_0 จากสมมติฐาน บอกให้ทราบว่า อย่างน้อยที่สุดตัวแปรถดถอย $x_1, x_2, \dots, x_k$ หนึ่งตัวจะมีผลอย่างมีนัยสำคัญต่อแบบจำลอง การทดสอบทำได้จากการแบ่งผลรวมทั้งหมดของกำลังสอง (SS_T) ในการวิเคราะห์ความแปรปรวนผลรวมกำลังสองที่เกิดจากแบบจำลองและผลรวมของกำลังสองที่เกิดจากส่วนตกค้างหรือความผิดพลาด คำนวณได้จากสมการที่ 6

$$SS_T = SS_R + SS_E \quad (6)$$

ถ้าสมมติฐานศูนย์ $H_0 = \beta_1 = \beta_2 \dots = \beta_k = 0$ เป็นจริงแล้ว SS_R / σ^2 จะมีการกระจายแบบ X^2_k โดยที่ระดับขั้นความเสรีของ X^2 เท่ากับจำนวนของตัวแปรการถดถอยในแบบจำลองในทำนองเดียวกันเราสามารถแสดงได้ว่า SS_R / σ^2 มีการกระจายแบบ X^2_{n-k-1} และ SS_E และ SS_R จะเป็นอิสระ วิธีการทดสอบ $H_0 = \beta_1 = \beta_2 \dots = \beta_k = 0$ จากสมการที่ 7

$$F_0 = \frac{SS_R / K}{SS_E / (n - k - 1)} = \frac{MS_R}{MS_E} \quad (7)$$

ปฏิเสธ H_0 ก็ต่อเมื่อ F_0 มีค่ามากกว่า $F_{\alpha, k, n-k-1}$ ในทางกลับกันอาจจะใช้วิธีการ P-value เพื่อทดสอบสมมติฐานและจะปฏิเสธ H_0 ต่อเมื่อ P-value สำหรับค่าสถิติ F_0 น้อยกว่า α ตารางทั่วไปในการวิเคราะห์ความแปรปรวนถูกสรุปอยู่ในตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 การวิเคราะห์ความแปรปรวนสำหรับการทดลอง [16]

Source of Variation	Sum of Squares	Degrees of Freedom	Mean Square	F _o
Regression	SS _R	K	MS _R	MS _R /MS _E
Error or Residual	SS _E	n - k - 1	MS _E	
Total	SS _T	n - 1		

การคำนวณทำได้โดยใช้ซอฟต์แวร์ทางสถิติ แสดงให้เห็นส่วนหนึ่งของผลการวิเคราะห์จาก Stat graphics คือ การวิเคราะห์ความแปรปรวนของแบบจำลอง การทดสอบความมีนัยสำคัญของการถดถอยของการทดสอบสมมติฐานที่ว่า

$$H_0 = \beta_1 = \beta_2 = 0$$

$$H_1 \neq 0 \text{ for at Least One } j$$

ค่า P-value สำหรับค่าสถิติ F จะสรุปได้ว่าอย่างน้อยที่สุดหนึ่งในสองของตัวแปรความเร็วรอบของ Tool และอัตราความเร็วในการเชื่อมจะมีสัมประสิทธิ์การถดถอยไม่เป็นศูนย์ ค่า R^2 คำนวณได้จากสมการที่ 8

$$R^2 = \frac{SS_R}{SS_T} = 1 - \frac{SS_E}{SS_T} \quad (8)$$

R^2 เป็นตัววัดของจำนวนที่ลดลงในความแปรผันของ Y เมื่อใช้ตัวถดถอย $X_1, X_2, \dots, X_K$ ในแบบจำลอง อย่างไรก็ตาม ค่าที่ R^2 มีค่ามากไม่ได้แปลว่าแบบจำลองการถดถอยที่สร้างขึ้นมานี้ดี เนื่องจากการเติมตัวแปรเข้าไปในแบบจำลองจะทำให้ R^2 เพิ่มขึ้นไม่ว่าตัวแปรที่เติมเข้าไบนั้นจะมีนัยสำคัญทางสถิติหรือไม่ ดังนั้น อาจจะเป็นไปได้ว่าแบบจำลองที่มีค่า R^2 มาก อาจจะเป็นแบบจำลองที่ไม่ดีในการพยากรณ์ค่าผลตอบก็ได้

เนื่องจาก R^2 มีค่าเพิ่มขึ้นเสมอเมื่อเราเพิ่มพจน์ต่าง ๆ เข้าไปในแบบจำลอง ทำให้ค่าสถิติ R^2 แบบปรับแล้วมากกว่า เขียนเป็นสมการได้เป็นสมการที่ 9

$$R^2_{adj} = 1 - \frac{SS_E / (n - p)}{SS_E / (n - 1)} = 1 - \left(\frac{n - 1}{n - p} \right) (1 - R^2) \quad (9)$$

ตามปกติสถิติ R^2 แบบปรับแล้วจะไม่เพิ่มขึ้นเมื่อจำนวนของตัวแปรเพิ่มขึ้นในแบบจำลอง แต่ในความเป็นจริง ถ้าเพิ่มตัวแปรที่ไม่จำเป็นลงในแบบจำลอง ค่าของ R^2_{adj} จะมีค่าลดลงเสมอ เมื่อ R^2 และ R^2_{adj} แตกต่างกันมาก จะหมายความว่ามีโอกาสสูงที่จะพบว่าพจน์ที่ไม่มีนัยสำคัญได้ถูกเติมลงไปแบบจำลอง

2.2 กรอบแนวคิดในการวิจัยของโครงการวิจัย

การวิจัยนี้มุ่งเน้นศึกษากระบวนการเชื่อมแพร่แบบเฟสของเหลว (Transient Liquid Phase Bonding - TLPB) สำหรับอะลูมิเนียมผสมหล่อทิ้งของแข็ง เกรด 6063 โดยใช้ผงโลหะสังกะสี (เช่น AC43A) เป็นตัวประสาน เพื่อปรับปรุงความแข็งแรงและคุณสมบัติเชิงกลของรอยเชื่อม โดยเน้นการศึกษาตัวแปรต้นที่สำคัญ ได้แก่ ชนิดและปริมาณของผงโลหะสังกะสี ซึ่งมีผลต่อการหลอมและการแพร่ระหว่างชิ้นงานกับตัวประสาน การปรับเปลี่ยนปริมาณของผงโลหะสังกะสีส่งผลต่อความสมบูรณ์ของรอยเชื่อม ทั้งในด้านการเติมเต็มช่องว่างและการกระจายตัวของสารประสาน อีกทั้งยังพิจารณาผลกระทบของอุณหภูมิและระยะเวลาในการเชื่อม ซึ่งส่งผลโดยตรงต่อการเกิดเฟสของเหลว การแพร่ของอะตอม และการสร้างพันธะโลหะที่แข็งแรง การปรับเปลี่ยนอุณหภูมิและระยะเวลาส่งผลต่อการเกิดโครงสร้างจุลภาคและคุณสมบัติเชิงกลของรอยเชื่อม นอกจากนี้ ยังศึกษาแรงกดในการเชื่อมซึ่งช่วยเพิ่มพื้นที่สัมผัสระหว่างผงโลหะกับพื้นผิวของชิ้นงาน ส่งผลให้การแพร่และการหลอมละลายมีประสิทธิภาพมากขึ้น ทั้งนี้ ผลของตัวแปรต้นเหล่านี้จะถูกวิเคราะห์ผ่านตัวแปรตาม ได้แก่ ความแข็งแรงของรอยเชื่อม ซึ่งประเมินจากแรงดึง โครงสร้างจุลภาคที่แสดงถึงการจัดเรียงตัวของผลึกและเฟสต่าง ๆ ที่เกิดจากการแข็งตัวของผงโลหะ ซึ่งมีผลต่อความสมบูรณ์ของพันธะโลหะ เนื่องจากส่งผลต่อความแข็งแรงของรอยเชื่อม เพื่อให้ผลการวิจัยมีความแม่นยำและเชื่อถือได้ จึงควบคุมตัวแปรสำคัญ เช่น ชนิดและขนาดของผงโลหะสังกะสี เพื่อให้ได้คุณสมบัติเชิงกลและโครงสร้างจุลภาคที่สม่ำเสมอ อีกทั้งยังควบคุมสภาพแวดล้อมในการเชื่อม เช่น การใช้แก๊สเฉื่อย (Inert Gas) เพื่อป้องกันการเกิดออกไซด์ตกค้างที่อาจส่งผลต่อความแข็งแรงของรอยเชื่อม การวิจัยนี้คาดว่าจะได้ข้อมูลที่เป็นประโยชน์ในการปรับปรุงกระบวนการเชื่อมแพร่ผ่านเฟสของเหลว สำหรับอะลูมิเนียมผสมหล่อทิ้งของแข็ง เกรด 6063 ซึ่งสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานในอุตสาหกรรมที่ต้องการวัสดุน้ำหนักเบาและความแข็งแรงสูง เช่น อุตสาหกรรมการบินและอวกาศยานอย่างมีประสิทธิภาพสูงสุด

2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

เจนณรงค์ นาคเทวัญ [17] ได้ศึกษาการเชื่อมเสียดทานแบบกวนของอะลูมิเนียมกึ่งของแข็งเกรด 7075 โดยใช้กระบวนการเชื่อมที่ความเร็ว 70, 90 และ 110 มิลลิเมตรต่อนาที ภายใต้ความเร็วรอบ 1110 และ 1320 รอบต่อนาที ผลการวิจัยพบว่า การเชื่อมที่ความเร็วรอบ 1320 รอบต่อนาที ทำให้เกิดโพรงในบริเวณส่วนล่างของแนวเชื่อม ขณะที่ความเร็วรอบ 1110 รอบต่อนาที ให้แนวเชื่อมที่สมบูรณ์ นอกจากนี้ การทดสอบในสภาวะทางความร้อน 4 รูปแบบ ได้แก่ สภาวะหลังเชื่อม สภาวะบ่มเทียมน้ำหลังเชื่อม สภาวะอบละลายหลังเชื่อม และ T6 หลังเชื่อม พบว่าผิวแนวเชื่อมในสภาวะอบละลายหลังเชื่อมและ T6 หลังเชื่อมที่ความเร็ว 90 และ 110 มิลลิเมตรต่อนาที มีลักษณะพุพองใต้ผิวจากการขยายตัวของอากาศภายในแนวเชื่อม ขณะที่สภาวะอื่น ๆ มีความสมบูรณ์ดี การวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคชี้ให้เห็นว่า เกรนในบริเวณที่ถูกกวนมีการขยายตัวมากขึ้นในความเร็ว 90 และ 110 มิลลิเมตรต่อนาที ซึ่งส่งผลให้เกิดการแตกร้าวและค่าความแข็งสูงขึ้น โดยค่าความแข็งสูงสุด 197.3 HV และค่าความแข็งแรงดึงสูงสุด 459.23 MPa ที่ความเร็วรอบ 1110 รอบต่อนาที และความเร็วเชื่อม 110 มิลลิเมตรต่อนาที สำหรับสภาวะ T6 หลังเชื่อม ซึ่งมีประสิทธิภาพของแนวเชื่อมสูงถึง 101.53 เปอร์เซ็นต์

ชัยยุทธ มิ่งาม และคณะ [18] ได้ศึกษาการเชื่อมแพร่ของอะลูมิเนียมผสมเกรด SSM 356 ที่ไม่ผ่านกระบวนการทางความร้อน (As Cast) และผ่านกระบวนการทางความร้อน T6 โดยใช้แรงกด 0.4-2.7 MPa อุณหภูมิ 495 องศาเซลเซียส และเวลาการแช่ 3 ชั่วโมง ภายใต้บรรยากาศอาร์กอน ผลการวิจัยชี้ให้เห็นว่า ความแข็งแรงดึงสูงสุดของอะลูมิเนียมที่ไม่ผ่านกระบวนการ T6 อยู่ที่ 129.30 MPa ที่แรงกด 1.8 MPa และ 123.12 MPa ที่ 2.4 MPa โดยมีประสิทธิภาพการเชื่อม 76% และ 72% ตามลำดับ ขณะที่อะลูมิเนียมที่ผ่านกระบวนการ T6 มีค่าความแข็งแรงดึงสูงสุด 182.20 MPa ที่แรงกด 2.4 MPa ซึ่งมีประสิทธิภาพการเชื่อม 61% เมื่อเทียบกับเนื้อโลหะเดิม นอกจากนี้ ยังพบว่าค่าความแข็งหลังการเชื่อมของชิ้นงาน As Cast เพิ่มขึ้น โดยเฉพาะที่บริเวณรอยต่อ ขณะที่ชิ้นงาน T6 มีค่าความแข็งลดลง

เดช เหมือนขาว, ยงยุทธ ดุลยกุล และชัยยุทธ มิ่งาม [19] ได้ศึกษาการเชื่อมแพร่ของทองเหลืองและเหล็กกล้าคาร์บอน โดยพบว่าการเพิ่มอุณหภูมิและเวลาในการเชื่อมส่งผลให้ความแข็งแรงของรอยเชื่อมเพิ่มขึ้น และเกิดการแพร่ของอะตอมอย่างชัดเจนในบริเวณแนวเชื่อม นอกจากนี้ การวิจัยเกี่ยวกับการเชื่อมอะลูมิเนียมคอมโพสิตเกรด 2024 และ 6061 โดย Zhang และคณะ (256X) พบว่าความต้านทานแรงดึงสูงสุดเกิดขึ้นในชิ้นงานที่ไม่มีส่วนผสมของคอมโพสิต ขณะที่การเชื่อมชิ้นงานที่มีส่วนผสมคอมโพสิตต่างกันให้ค่าความต้านทานแรงดึงต่ำกว่า

Sunwoo และ Lum [20] แสดงให้เห็นว่าการใช้แรงกดหลายระดับในกระบวนการเชื่อมแพร่ ช่วยลดการเกิดออกไซด์ที่ผิวงานเชื่อม ส่งผลให้ค่าความต้านทานแรงดึงสูงขึ้น โดยการแพร่ของ อะลูมิเนียมโดยเชื่อมภายใต้ตัวแปรดังนี้ ชิ้นงานเป็นแผ่นแบนที่ความหนา 1.5 มิลลิเมตร มีขนาดของ เกรนเฉลี่ยน้อยกว่า $10\text{ }\mu\text{m}$ ก่อนการเชื่อมขัดด้วยกระดาษทรายละเอียดเบอร์ 400 กริต และทำความสะอาด ผิวด้วยกรดไนตริกเป็นเวลา 2 นาที จากนั้นให้แรงกดที่ 0.41, 0.55, 0.70, 0.85 และ 0.97 MPa อุณหภูมิช่วง 500-515 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที การทดลองทำภายใต้บรรยากาศ อาร์กอนปกคลุม หลังจากการทดลองนำมาทดสอบค่าความต้านทานแรงดึงและวิเคราะห์ลักษณะการ แตกหักของชิ้นงาน ซึ่งพบว่าที่แรงกด 0.70 และ 0.85 MPa ให้ค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุด โดยมี ค่า 21 N/mm^2 แล้วนำชิ้นส่วนรอยขาดไปวิเคราะห์การแตกหักจากการขาดด้วยเครื่องอิเล็กตรอน แบบส่องกราด จากการวิเคราะห์ผลพบว่า พื้นที่รอยขาดส่วนใหญ่จะยึดติดแบบเหนียว แต่ผิวยึดติดจะ แตกต่างกันตามตัวแปรในการทดลอง โดยการยึดติดแบบนี้เรียกว่า การยึดติดแบบรังผึ้ง (Honeycomb) และในผิวหน้ารอยต่อยังพบอีกว่าประกอบไปด้วย 3 ลักษณะ คือ การแตกหักแบบ เหนียว จะให้รอยบ่มจากการขาดที่ลึก การแตกหักแบบกึ่งเหนียว ลักษณะการขาดจะขึ้นว่าการขาด แบบเหนียว และพื้นที่บางส่วนไม่เกิดการยึดติด

M.Muratoglu และ O.Yilmaz, M.Aksoy [21] นักวิจัยชาวตุรกีได้ร่วมกันศึกษาการเชื่อมโดย การแพร่ของอะลูมิเนียมสองชนิดเข้าด้วยกัน ซึ่งอะลูมิเนียมที่ใช้เป็นอะลูมิเนียมคอมโพสิต เกรด 2124 เชื่อมเข้ากับอะลูมิเนียมบริสุทธิ์ โดยอะลูมิเนียมคอมโพสิตมีปริมาณซิลิกอนคอมโพสิตผสมอยู่ใน สัดส่วน 25 เปอร์เซ็นต์ ผ่านกระบวนการทางความร้อน T6 ที่อุณหภูมิอบละลาย 495 องศาเซลเซียส เวลา 1 ชั่วโมง หลังจากนั้นบ่มที่อุณหภูมิ 175 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง เชื่อมภายใต้ ตัวแปรที่อุณหภูมิ 475 องศาเซลเซียส เวลาที่ใช้ 30 นาที แรงกด 2.5 MPa และเชื่อมภายใต้ บรรยากาศอาร์กอนที่ 3 bar จากการทดลองพบว่าชิ้นงานมีค่าความแข็งแรงต่างกันตามเนื้อเดิมของวัสดุ โดยความแข็งแรงชิ้นงานด้านอะลูมิเนียมคอมโพสิต 2124 มีค่าความแข็งแรงเฉลี่ย 255 HV ส่วนค่าความแข็งแรง ด้านอะลูมิเนียมบริสุทธิ์เฉลี่ย 184 HV และเมื่อศึกษาความเค้นที่ตกค้างหลังจากเชื่อมชิ้นงาน พบว่า ชิ้นงานมีความเค้นตกค้างที่ลดลง เนื่องมาจากชิ้นงานผ่านกระบวนการทางความร้อนมาแล้ว เมื่อได้รับความร้อนอีกจึงเป็นการปลดปล่อยพลังงานที่ตกค้าง และยังพบอีกว่าปริมาณทองแดงจาก อะลูมิเนียมคอมโพสิต เกรด 2124 แพร่ไปยังด้านอะลูมิเนียมบริสุทธิ์ แต่ซิลิกอนบริเวณรอยต่อลด น้อยลง

K.Kitazono [22] ทีมวิจัยจากญี่ปุ่นได้ศึกษาการเชื่อมอะลูมิเนียมโพร โดยอะลูมิเนียมโพรที่ ใช้เป็น เกรด ALPORAS ที่ใช้ในอุตสาหกรรมการบิน สาเหตุที่ต้องเชื่อมอะลูมิเนียมโพรด้วยการเชื่อม แพร่ เพราะเพื่อหลีกเลี่ยงการเชื่อมแบบเดิมซึ่งเชื่อมวัสดุชนิดนี้ได้ยาก ในการทดลองครั้งนี้ใช้ อะลูมิเนียม เกรด 5083 เป็นตัวประสานระหว่างชิ้นงานทั้งสองขึ้นให้ยึดติดกัน อุณหภูมิที่ใช้ 773 และ

823 เคลวิน แรงกด 0.2 MPa และเวลาที่ใช้ 30 นาที ชิ้นงานที่เชื่อมเป็นทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้า ขนาด 29x10x10 มิลลิเมตร ก่อนการเชื่อมมีการทำความสะอาดผิวหน้าด้วยกรดเคิลเลอร์ (Keller acid) หลังการทดลองพบว่าบริเวณรอยต่อเกิดการแพร่ของแมกนีเซียมจากอะลูมิเนียม 5083 ไปยังด้าน อะลูมิเนียมโพมสัดส่วนความเข้มข้นอยู่ที่ 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักและจะลดลงเรื่อย ๆ ตามระยะทาง ของการแพร่และค่าความต้านทานแรงดึงของอุณหภูมิจาก 773 เคลวิน มากกว่าที่อุณหภูมิเชื่อม 823 เคลวิน แต่ค่าความต้านทานแรงดึงจะได้แค่ 60 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเปรียบเทียบกับเนื้อวัสดุเดิม

Xu Huibin และคณะ [23] ได้ศึกษาการเชื่อมอะลูมิเนียมคอมโพสิตเกรด A356 ในการ ทดลองใช้ตัวแปรดังต่อไปนี้ อะลูมิเนียมคอมโพสิตมีปริมาณซิลิกอนคอมโพสิตผสมอยู่ในสัดส่วน 20 เปอร์เซ็นต์ โดยชิ้นงานเชื่อมเป็นทรงกระบอกขนาด 10x40 มิลลิเมตร จากนั้นใช้ตัวเติมสังกะสี อะลูมิเนียม (Zn-Al) ขนาด 10x5 มิลลิเมตร เป็นตัวประสานระหว่างชิ้นงาน ในการทดลองใช้อุณหภูมิ ที่ 530 องศาเซลเซียส แรงกด 4 MPa เวลาที่ใช้ 2 นาที โดยให้ชิ้นงานเกิดการสั่นที่ความถี่ 50 Hz ด้วยเวลา 5, 10, 20, 30 และ 45 วินาที การทดลองครั้งนี้ทำในบรรยากาศทั่วไป จากการทดลอง พบว่าสังกะสีอะลูมิเนียมที่เป็นตัวประสานระหว่างชิ้นงานมีจุดหลอมเหลวที่ต่ำกว่าจึงหลอมละลายเป็น ตัวประสานให้ชิ้นงานยึดติดกันและเมื่อนำไปทดสอบแรงดึงพบว่าที่เวลาในการสั่น 30 วินาที ให้ค่า ความต้านทานแรงดึงสูงสุด มีค่าอยู่ที่ 175 MPa จากนั้นได้ศึกษาลักษณะรอยต่อด้วยระบบ EPMA พบว่าบริเวณรอยต่อมีออกไซด์แทรกตัวอยู่ระหว่างช่องว่างหลังจากเชื่อม นอกจากนั้นยังพบสัดส่วน ของสังกะสี อะลูมิเนียมและทองแดงที่สูงบริเวณรอยต่อ ซึ่งเป็นผลมาจากตัวเติม ปริมาณออกไซด์ที่ มากทำให้ชิ้นงานยึดติดได้ไม่ดี

Chaiyoot, M., Yongyuth, D., และ Dech, M. [24] งานวิจัยนี้ศึกษาพารามิเตอร์สำคัญ สำหรับการยึดติดแบบดิฟฟิวชันของโลหะผสมอะลูมิเนียม SSM-ADC 12 กับโลหะผสมอะลูมิเนียม SSM-6063 ที่ต่างชนิดกัน รวมถึงกลไกการแพร่กระจายของธาตุในระหว่างกระบวนการเชื่อม ผลการ ทดลองแสดงให้เห็นว่า อุณหภูมิในการยึดติดที่ 776 Kelvin (K) และระยะเวลาในการยึดติด 150 นาที เป็นเงื่อนไขที่เหมาะสมสำหรับการเชื่อมวัสดุชนิดนี้ เนื่องจากรอยเชื่อมมีความสมบูรณ์ ไม่มีรอย บูดทางกายภาพ และไม่มีรอยตำหนิจากการเชื่อม องค์ประกอบของธาตุ Si ในเมทริกซ์เกิดการ แพร่กระจายจากความเข้มข้น 11.80% น้ำหนัก (wt%) ของโลหะผสมอะลูมิเนียม SSM-ADC 12 ไป ยังโลหะผสมอะลูมิเนียม SSM-6063 ที่ความเข้มข้น 8% น้ำหนัก (wt%) โดยมีระยะทางการแพร่ 7.577 มิลลิเมตร ค่าความแข็งเพิ่มขึ้นอย่างมากเนื่องจาก ความร้อน แรงอัด และการตกตะกอนของ Mg_2Si intermetallic ในสารละลาย โดยค่าความแข็งเริ่มต้นที่ 110.72 HV จากโลหะผสมอะลูมิเนียม SSM-ADC 12 และ 76.10 HV จากโลหะผสมอะลูมิเนียม SSM-6063

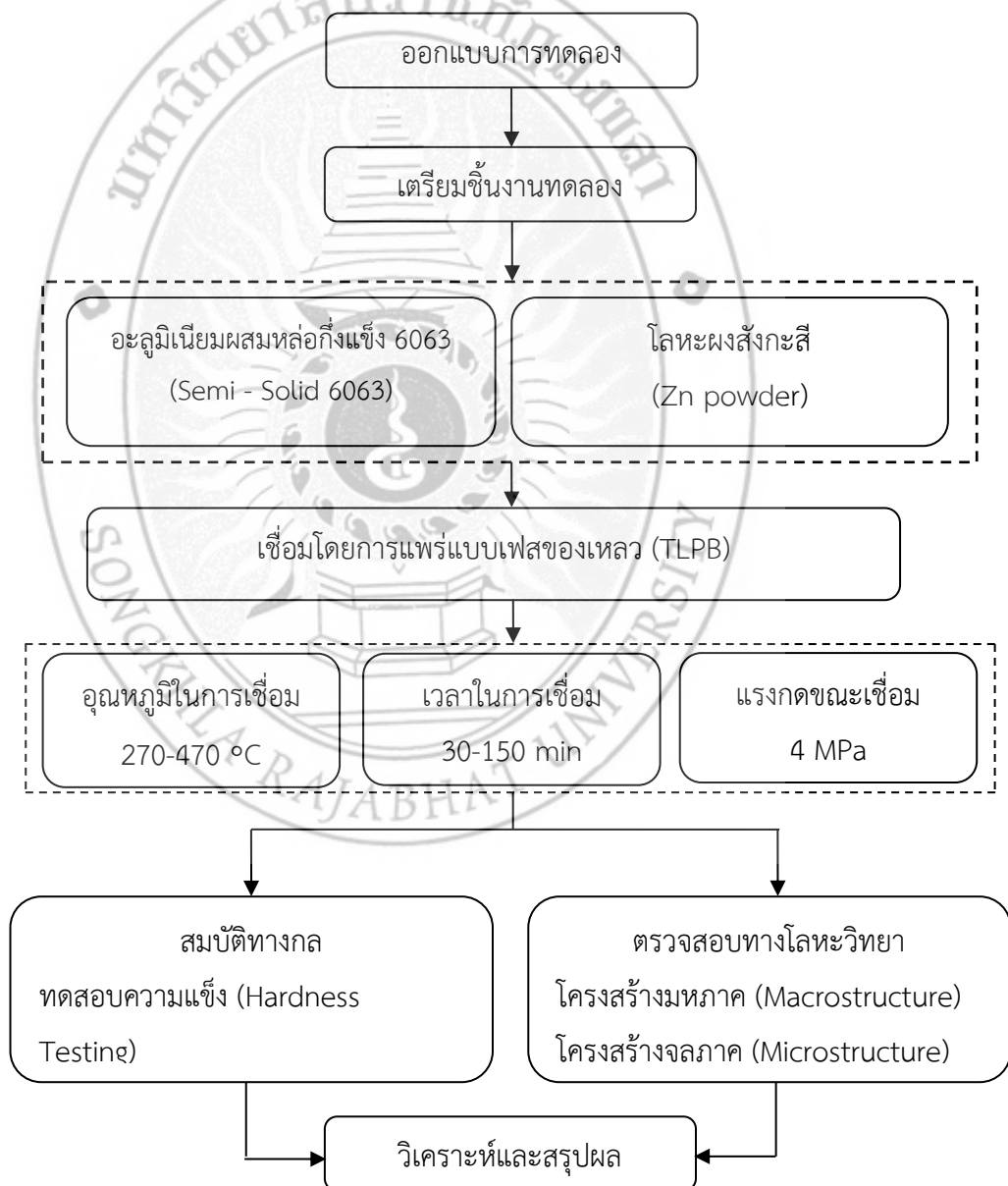
Pu, Z., Zhengwei, L., Xinzhu, D., Zhiwu, X., และ Jiuchun, Y. [25] ศึกษาการยึดติดด้วยความแข็งแรงสูงที่อุณหภูมิและความดันต่ำ โดยใช้เทคนิคการยึดติดด้วยการแพร่กระจาย (Diffusion Bonding) เป็นความท้าทายที่สำคัญในการผลิตฮีตซิงก์โลหะผสมอะลูมิเนียม ในงานวิจัยนี้ได้ทำการยึดติดโลหะผสม 6063 โดยใช้เทคนิคการยึดติดด้วยการแพร่กระจายทั้งในเฟสของเหลวและเฟสของแข็งแบบใหม่ โดยใช้วัสดุชั้นกลาง Hypereutectic Zn 30-Sn วิธีการนี้ประสบความสำเร็จที่อุณหภูมิ 360 องศาเซลเซียส และความดัน 1 MPa รอยต่อของโลหะผสม 6063 ที่ยึดติดประกอบด้วย เฟส Eutectoid Zn-Al เป็นส่วนใหญ่ ซึ่งมีความแข็งแรงมากกว่าโลหะฐาน โดยในระหว่างกระบวนการยึดติดด้วยการแพร่กระจาย รอยต่อถูกสร้างขึ้นจาก เฟส Eutectic Sn-Zn และเฟส η -Zn โดยในช่วงเริ่มต้นของการแพร่กระจาย สัดส่วนของเฟส Eutectic Sn-Zn ค่อย ๆ ลดลง ในขณะที่ เฟส Eutectoid Zn-Al เพิ่มขึ้น ในรอยต่อ ผ่านการแพร่กระจายระหว่างโลหะฐานและชั้นกลางเมื่อเวลาในการยึดติดนานขึ้น พบว่าเฟส η -Zn ก็เปลี่ยนเป็น เฟส Eutectoid Zn-Al พร้อมกับการลดลงของ เฟส Eutectic Sn-Zn ซึ่งเหลือ ธาตุ Sn เพียง 0.02% โดยน้ำหนักในรอยต่อ กลไกการแพร่กระจายใน เฟสของเหลวและเฟสของแข็ง ได้รับการเปิดเผย โดยพบว่า การแทรกซึมของ Sn ไปยังขอบเขตเมล็ดของโลหะผสม 6063 เกิดขึ้นภายใต้การช่วยเหลือของการแพร่กระจายของ Zn ซึ่งอะลูมิเนียมที่เกิดจากโลหะฐานจะแพร่กระจายไปกับเฟส η -Zn ทำให้เกิด เฟส Eutectoid Zn-Al ที่มีความแข็งแรงสูง

จากการศึกษาทั้งหมดนี้ ชี้ให้เห็นว่าการปรับตัวแปรในกระบวนการเชื่อม เช่น อุณหภูมิ แรงกด และชนิดของวัสดุผสม มีผลโดยตรงต่อโครงสร้างจุลภาคและคุณสมบัติเชิงกลของรอยเชื่อม โดยเฉพาะการแพร่ขององค์ประกอบต่าง ๆ ในโลหะที่ส่งผลต่อความแข็งแรงและความสมบูรณ์ของรอยเชื่อม ซึ่งสามารถนำข้อมูลเหล่านี้ไปประยุกต์ใช้ในการปรับปรุงกระบวนการเชื่อมและเพิ่มประสิทธิภาพของวัสดุในอุตสาหกรรมต่าง ๆ เช่น ยานยนต์และอากาศยาน เป็นต้น

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

งานวิจัยนี้เพื่อศึกษาการเชื่อมโดยการแพร่แบบเฟสของเหลวของต่ออะลูมิเนียมผสมหล่อกึ่งของแข็ง SSM 6063 โดยใช้ผงโลหะสังกะสีเป็นตัวประสาน ตัวแปรในการเชื่อม ได้แก่ อุณหภูมิ เวลาในการเชื่อม ก๊าซปกคลุม แรงกด ซึ่งปัจจัยเหล่านี้มีผลต่อโครงสร้างทางโลหะวิทยา และสมบัติทางกล วิธีดำเนินการวิจัยและขั้นตอนแสดงดังต่อไปนี้



ภาพที่ 3.1 วิธีดำเนินการวิจัยและขั้นตอนการวิจัย

3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์

3.1.1 การใช้เครื่องเลื่อยสายพาน ยี่ห้อ Taiwan รุ่น BAND SAW 7 ในการตัดอะลูมิเนียมหล่อกิ่งแข็งเกรด 6063 จำเป็นต้องเตรียมเครื่องและชิ้นงานอย่างเหมาะสม โดยเริ่มจากการตรวจสอบสภาพเครื่อง ความตึงของใบเลื่อย และการปรับแขนประคองใบเลื่อยให้ใกล้ชิ้นงานมากที่สุด เพื่อเพิ่มความมั่นคงและความแม่นยำในการตัด รวมถึงการจับยึดชิ้นงานให้แน่นหนาเพื่อป้องกันการเคลื่อนที่ระหว่างการตัด ควรเลือกใบเลื่อยที่มีฟันเลื่อยละเอียดและเคลือบสารป้องกันการติดขัด พร้อมปรับความเร็วและแรงกดให้เหมาะสม โดยใช้น้ำมันหล่อเย็นเพื่อช่วยลดความร้อนและยืดอายุการใช้งานของใบเลื่อย หลังการใช้งาน ควรลดความตึงของใบเลื่อยและทำความสะอาดเศษอะลูมิเนียมและน้ำมันหล่อเย็นที่ตกค้าง เพื่อรักษาสภาพเครื่องให้อยู่ในสภาพดี การปฏิบัติตามขั้นตอนเหล่านี้จะช่วยให้การตัดอะลูมิเนียมหล่อกิ่งแข็งเกรด 6063 ด้วยเครื่องเลื่อยสายพาน Taiwan รุ่น BAND SAW 7 เป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพและปลอดภัย ดังแสดงในภาพที่ 3.2



ภาพที่ 3.2 เครื่องเลื่อยสายพาน ยี่ห้อ Taiwan รุ่น BAND SAW 7

3.1.2 การใช้เครื่องกลึง ยี่ห้อ Harrison รุ่น M300 ในการกลึงปาดหน้าและกลึงปอกอะลูมิเนียมหล่อกิ่งแข็งเกรด 6063 จำเป็นต้องเตรียมเครื่องและชิ้นงานอย่างเหมาะสม โดยเริ่มจากการตรวจสอบสภาพเครื่องกลึง เช่น การหล่อลื่นชิ้นส่วนที่เคลื่อนไหวและความแน่นของสกรูยึดต่าง ๆ จากนั้นติดตั้งชิ้นงานบนหัวจับ (Chuck) อย่างมั่นคงและเลือกมีดกลึงที่เหมาะสมกับการกลึงอะลูมิเนียม ซึ่งต้องมีมุมคมตัดที่ถูกต้องเพื่อให้ได้ผิวงานที่เรียบ การปรับความเร็วรอบและความเร็วป้อนให้เหมาะสมเป็นสิ่งสำคัญ โดยการกลึงปาดหน้า (Facing) จะเลื่อนมีดกลึงเข้าหาชิ้นงานในแนวขวางเพื่อปรับผิวหน้าให้เรียบ ส่วนการกลึงปอก (Turning) จะเคลื่อนมีดกลึงตามแนวยาวของชิ้นงานเพื่อลดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง การใช้ น้ำมันหล่อเย็นจะช่วยป้องกันการสะสมของเศษและยืดอายุการใช้งานของมีดกลึง แสดงในภาพที่ 3.3



ภาพที่ 3.3 เครื่องกลึง ยี่ห้อ Harrison รุ่น M300

3.1.3 เครื่องเชื่อมโดยการแพร่แบบเฟสของเหลว (Transient Liquid Phase Bonding - TLP Bonding) เป็นเทคนิคการเชื่อมที่ใช้วัสดุประสานซึ่งมีจุดหลอมเหลวต่ำกว่าวัสดุหลัก โดยวัสดุประสานจะหลอมเหลวเมื่อได้รับความร้อนและแทรกซึมเข้าสู่ช่องว่างระหว่างชิ้นงาน จากนั้นจะเกิดการแพร่กระจายของอะตอมระหว่างวัสดุประสานและวัสดุหลัก ทำให้เกิดสารประกอบระหว่างโลหะที่มีความแข็งแรงสูงและเป็นโครงสร้างเนื้อเดียวกัน เมื่อลดอุณหภูมิ วัสดุประสานจะเกิดการแข็งตัวและเชื่อมชิ้นงานเข้าด้วยกันอย่างถาวร ขั้นตอนการเชื่อมประกอบด้วยการเตรียมชิ้นงานและวัสดุประสาน การประกอบชิ้นงาน การให้ความร้อนในเตาเผาบรรยากาศควบคุม การใช้แรงกดอัดเพื่อช่วยการแพร่กระจาย และการแข็งตัวของวัสดุประสาน ข้อดีของกระบวนการนี้คือได้รอยต่อที่มีความแข็งแรงสูง ทนทานต่อการสึกหรอและอุณหภูมิสูง และสามารถเชื่อมวัสดุต่างชนิดกันได้ โดยไม่เกิดการเสียรูปของวัสดุหลัก ทั้งนี้ต้องควบคุมอุณหภูมิและเวลาอย่างแม่นยำเพื่อป้องกันการเกิดสารประกอบที่เปราะและความแข็งแรงต่ำ การเชื่อมโดยการแพร่แบบเฟสของเหลวจึงเหมาะสำหรับการใช้งานในอุตสาหกรรมยานยนต์ อากาศยาน และอิเล็กทรอนิกส์ที่ต้องการรอยต่อที่มีคุณภาพสูง แสดงในภาพที่ 3.4



ภาพที่ 3.4 เครื่องเชื่อมโดยการแพร่แบบเฟสของเหลว

3.1.4 เครื่องชั่งน้ำหนักความละเอียดสูง รุ่น VERTEX CK-12B เป็นเครื่องชั่งที่สามารถวัดน้ำหนักได้ในหน่วยกรัมและแสดงผลได้ละเอียดถึง 4 ตำแหน่งทศนิยม การใช้งานเริ่มต้นด้วยการวางเครื่องชั่งบนพื้นผิวที่มั่นคงและปราศจากการสั่นสะเทือน หลีกเลี่ยงแหล่งความร้อน แสงแดด และลมแรง ก่อนใช้งานควรปรับเทียบเครื่องชั่งด้วยตุ้มน้ำหนักมาตรฐานเพื่อความแม่นยำ จากนั้นเปิดเครื่องและรอให้จอแสดงผลเป็นศูนย์ วางภาชนะบนแท่นชั่งและกดปุ่มหักน้ำหนักภาชนะ (Tare) ก่อนวางวัตถุที่ต้องการชั่ง การแสดงผลจะแม่นยำถึง 4 ตำแหน่งทศนิยม หลังการใช้งานควรทำความสะอาดด้วยผ้านุ่มและเก็บรักษาในที่แห้งปราศจากฝุ่น เพื่อยืดอายุการใช้งานและรักษาความแม่นยำในการชั่งน้ำหนัก แสดงในภาพที่ 3.5



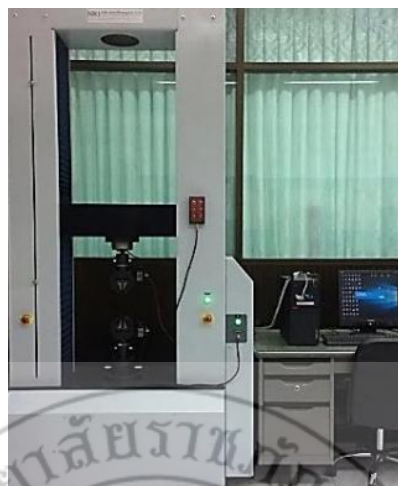
ภาพที่ 3.5 เครื่องชั่งน้ำหนักความละเอียดสูง รุ่น VERTEX CK-12B

3.1.5 เครื่องทดสอบความแข็งแบบวิกเกอร์ ยี่ห้อ Matsuzawa รุ่น MMT-X เพื่อวัดความแข็งของอะลูมิเนียมหล่อกิ่งแข็งเกรด 6063 ตามมาตรฐาน ASTM E92-82 เริ่มจากการขัดผิวชิ้นงานให้เรียบและสะอาดเพื่อให้ได้รอยกดที่ชัดเจน จากนั้นเปิดเครื่องและปรับเทียบด้วยบล็อกมาตรฐานความแข็งเพื่อความแม่นยำในการวัด วางชิ้นงานบนแท่นทดสอบ ปรับตำแหน่งให้เหมาะสม และเลือกแรงกดที่เหมาะสมตามมาตรฐาน ASTM E92-82 หัวกดเพชรรูปพีระมิดจะกดลงบนผิวชิ้นงานด้วยแรงที่กำหนด และวัดความยาวเส้นทแยงมุมของรอยกดผ่านกล้องไมโครสโคปในตัวเครื่อง ค่าความแข็งวิกเกอร์ (HV) จะถูกคำนวณโดยอัตโนมัติและบันทึกผลที่ได้พร้อมกับเงื่อนไขการทดสอบ เช่น แรงกดและระยะเวลาที่ใช้ การปฏิบัติตามขั้นตอนเหล่านี้จะช่วยให้การทดสอบความแข็งของอะลูมิเนียมเกรด 6063 ด้วยเครื่อง Matsuzawa MMT-X เป็นไปอย่างถูกต้องและเชื่อถือได้ แสดงในภาพที่ 3.6



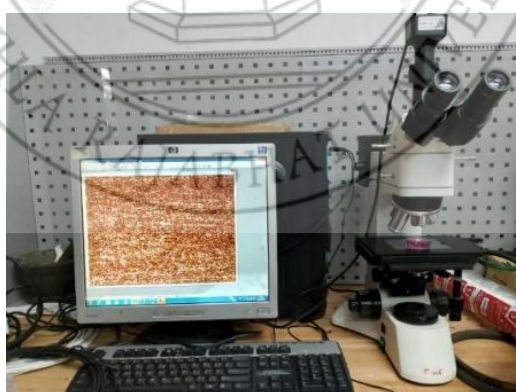
ภาพที่ 3.6 เครื่องทดสอบความแข็งแบบวิกเกอร์ ยี่ห้อ Matsuzawa รุ่น MMT-X

3.1.6 เครื่องทดสอบแรงดึง ยี่ห้อ Universal Testing Machine รุ่น NRI-TS501-300 ตามมาตรฐาน ASTM E8-13a เริ่มจากการตัดชิ้นงานในแนวขวางของรอยเชื่อมและตรวจสอบให้พื้นผิวเรียบและปราศจากข้อบกพร่อง จากนั้นเปิดเครื่องและตั้งค่าความเร็วในการดึงที่ 1.27 มิลลิเมตรต่อนาที (mm/min) ตามมาตรฐาน ติดตั้งชิ้นงานทดสอบเข้ากับปากจับของเครื่องให้แน่นหนาและตรงแนวแกน เริ่มการทดสอบโดยให้เครื่องดึงชิ้นงานด้วยความเร็วที่ตั้งค่าไว้ พร้อมทั้งบันทึกข้อมูลแรงที่ใช้และการยืดตัวของชิ้นงานอย่างต่อเนื่อง เมื่อชิ้นงานขาดหรือสิ้นสุดการทดสอบ เครื่องจะบันทึกค่าต่าง ๆ เช่น แรงดึงสูงสุด ความยืดตัว และสมบัติทางกลอื่น ๆ จากนั้นนำข้อมูลที่ได้อาวิเคราะห์เพื่อประเมินสมบัติทางกลของชิ้นงานที่ผ่านการเชื่อม การปฏิบัติตามขั้นตอนเหล่านี้จะช่วยให้การทดสอบแรงดึงเป็นไปอย่างถูกต้องและสอดคล้องกับมาตรฐาน ASTM E8-13a แสดงในภาพที่ 3.7



ภาพที่ 3.7 เครื่องทดสอบแรงดึง ยี่ห้อ Universal Testing Machine รุ่น NRI-TS501-300

3.1.7 กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงในการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคทางโลหะวิทยา เริ่มจากการเตรียมชิ้นงานโดยการตัดให้มีขนาดเหมาะสม ขัดผิวหน้าให้เรียบและเงา และอาจใช้สารเคมีในการกัดผิว (etching) เพื่อเผยโครงสร้างจุลภาคที่ชัดเจนขึ้น จากนั้นตั้งค่ากล้องจุลทรรศน์โดยปรับแหล่งกำเนิดแสง เลือกลেনส์วัตถุที่มีกำลังขยายเหมาะสม และปรับโฟกัสเพื่อให้ได้ภาพที่คมชัด เมื่อพร้อมแล้วจึงสังเกตโครงสร้างจุลภาคผ่านเลนส์ตาหรือหน้าจอแสดงผล และบันทึกภาพหรือวิดีโอของโครงสร้างที่สนใจเพื่อใช้ในการวิเคราะห์ การใช้กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงนี้ช่วยให้เข้าใจถึงโครงสร้างภายในของวัสดุ ซึ่งมีผลต่อสมบัติทางกลและการนำไปใช้งานได้อย่างแม่นยำ แสดงในภาพที่ 3.8



ภาพที่ 3.8 กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง

3.1.8 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope: SEM) เป็นเครื่องมือที่ใช้วิเคราะห์และตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของวัสดุ โดยใช้ลำแสงอิเล็กตรอนที่มีความละเอียดสูงกว่าลำแสงแสงทั่วไป การใช้งาน SEM เริ่มจากการเตรียมชิ้นงานให้สะอาดและเรียบเนียน หากชิ้นงานเป็นฉนวนไฟฟ้าจำเป็นต้องเคลือบด้วยโลหะบาง ๆ เพื่อป้องกันการสะสมของประจุไฟฟ้า จากนั้นติดตั้งชิ้นงานบนแท่นวางตัวอย่างและดูดอากาศในห้องสุญญากาศ ตั้งค่าแรงดันไฟฟ้าเร่ง (Accelerating Voltage) และเลือกประเภทของสัญญาณอิเล็กตรอน เช่น Secondary Electrons (SE) เพื่อวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิว หรือ Backscattered Electrons (BSE) เพื่อวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี ปรับโฟกัสและกำลังขยายให้เหมาะสม และบันทึกภาพดิจิทัลสำหรับการวิเคราะห์เพิ่มเติม SEM ยังสามารถวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีเชิงปริมาณและเชิงคุณภาพได้ด้วยเทคนิค EDX/EDS ซึ่งช่วยระบุชนิดและปริมาณของธาตุที่อยู่ในบริเวณที่สนใจ SEM เป็นเทคนิคที่มีประสิทธิภาพสูงในการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคและองค์ประกอบทางเคมีในงานวิจัยด้านวัสดุศาสตร์ วิศวกรรมโลหะ และนาโนเทคโนโลยี แสดงในภาพที่ 3.9



ภาพที่ 3.9 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

3.2 ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย

(1) จัดเตรียมเครื่องมือและอุปกรณ์สำหรับการวิจัยและการออกแบบการทดลอง (Equipment Preparation and Design of Experiment)

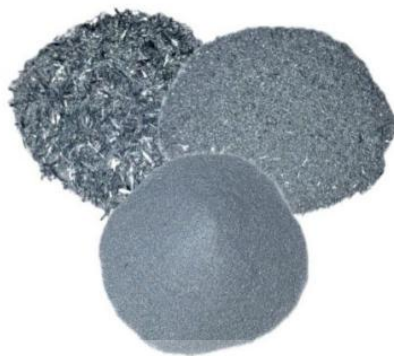
การเตรียมชิ้นงานเชื่อมจะเริ่มจากการหล่อชิ้นงานอะลูมิเนียมหล่อกึ่งแข็ง เกรด SSM 6063 และเตรียมโลหะผงสังกะสี เกรด ZA 27 ขนาดความโต 100, 300 และ 500 ไมโครเมตร เมื่อได้ชิ้นงานให้นำชิ้นงานไปตัดแบ่งขนาด จากนั้นนำชิ้นงานที่ตัดเสร็จเรียบร้อยแล้ว ไปกลึงปอกผิวด้วย

ความเร็วรอบที่ 800 รอบต่อนาที อัตราการป้อนลึก ครั้งละ 1.5 มิลลิเมตรต่อนาที ใช้ความเร็วในการเดิน 15 มิลลิเมตรต่อนาที เพื่อให้ได้ชิ้นงานที่มีผิวเรียบเป็นรูปทรงกระบอกและกลึงปาดผิวหน้าเพื่อให้ได้ระนาบในการเชื่อม โดยชิ้นงานที่ได้มีลักษณะเป็นรูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตร ความยาว 40 มิลลิเมตร ดังแสดงในภาพที่ 3.10



ภาพที่ 3.10 ชิ้นงานทดลองที่ผ่านการกลึงของอะลูมิเนียมหล่อกิ่งแข็ง เกรด SSM 6063

การเตรียมวัสดุประสานที่มีขนาด 100, 300 และ 500 ไมโครเมตร เริ่มจากการเลือกและตรวจสอบคุณสมบัติของผงโลหะ จากนั้นทำการร่อนและคัดขนาดโดยใช้ตะแกรงที่มีขนาดรู 100, 300 และ 500 ไมโครเมตร โดยใช้เครื่องร่อน (Sieve Shaker) เพื่อแยกผงโลหะออกตามขนาดที่ต้องการ ผงโลหะที่ได้จะถูกตรวจสอบขนาดอนุภาคเพิ่มเติมโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (SEM) หรือ Particle Size Analyzer เพื่อความแม่นยำ จากนั้นทำความสะอาดผงโลหะด้วยแอลกอฮอล์หรืออะซิโตน เพื่อกำจัดคราบน้ำมันและสิ่งสกปรก แล้วอบแห้งในเตาอบสุญญากาศเพื่อป้องกันความชื้นและการเกิดออกไซด์ สุดท้ายเก็บรักษาในภาชนะสุญญากาศหรือภาชนะที่มีแก๊สเฉื่อย เช่น อาร์กอน เพื่อป้องกันการเกิดออกไซด์และการจับตัวเป็นก้อน โดยติดฉลากระบุขนาดอนุภาคและวันผลิตเพื่อความสะดวกในการใช้งานและการตรวจสอบย้อนกลับ ทั้งนี้ควรปฏิบัติตามข้อควรระวังเพื่อความปลอดภัย เช่น การสวมหน้ากากกันฝุ่นและถุงมือ รวมถึงการทำงานในห้องที่มีการระบายอากาศที่ดี เพื่อให้ได้วัสดุประสานที่มีคุณภาพและขนาดอนุภาคที่สม่ำเสมอ ซึ่งจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพและความแข็งแรงในการเชื่อมโดยการแพร่แบบเฟสของเหลว ดังแสดงในภาพที่ 3.11



ภาพที่ 3.11 วัสดุประสานที่มีขนาด 100, 300 และ 500 ไมโครเมตร

(2) การเชื่อมโดยการแพร่แบบเฟสของเหลว (Transient Liquid Phase Bonding - TLP Bonding)

กระบวนการเชื่อมโดยการแพร่แบบเฟสของเหลวจะเริ่มจากการเตรียมผิวหน้าชิ้นงานทั้งสองชิ้น คือ อะลูมิเนียมผสมหล่อแข็งเกรด SSM 6063 นำชิ้นงานขัดด้วยกระดาษทรายเบอร์ 400 เพื่อกำจัดฟิล์มอะลูมิเนียมออกไซด์ที่ผิวของชิ้นงานเชื่อมก่อนการเชื่อม ในส่วนการขัดชิ้นงานผู้ปฏิบัติงานต้องสวมถุงมือ เพื่อป้องกันคราบไขมันและสิ่งสกปรก ดังแสดงในภาพที่ 3.12



ภาพที่ 3.12 ขัดชิ้นงานด้วยกระดาษทรายเพื่อกำจัดฟิล์มออกไซด์

หลังจากที่ผ่านการเตรียมผิวและขัดด้วยกระดาษทรายเบอร์ 320 กรिट แล้วนำชิ้นงานมาล้างผิวหน้าด้านที่จะเชื่อมด้วยน้ำยาอะซิโตน (Acetones) โดยในการล้างจะแช่ไว้ 30 วินาที เพื่อทำความสะอาดผิวชิ้นงานเชื่อมจากการขัดและคราบไขมันที่ติดผิวงาน ดังแสดงในภาพที่ 3.13 แล้วใช้ลมเป่าผิวหน้าชิ้นงานจนแห้ง ในขั้นตอนนี้ถือว่าเป็นขั้นตอนที่สำคัญ มือผู้ปฏิบัติงานไม่ควรสัมผัสผิวหน้า

ขึ้นงานโดยตรงและควรสวมหน้ากากปิดจมูก เพื่อป้องกันการสูดดมน้ำยาอะซิโตน นำไปสู่ความปลอดภัยของผู้ปฏิบัติงาน



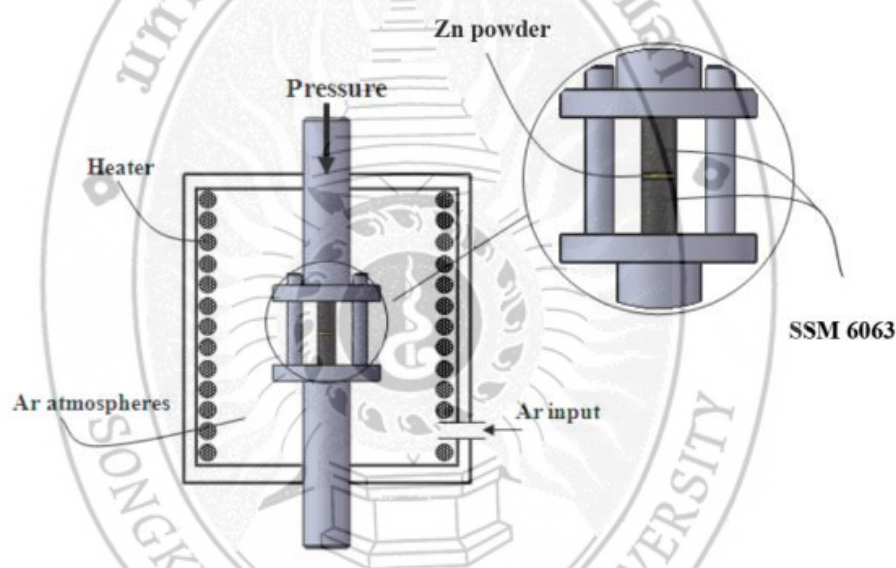
ภาพที่ 3.13 การเตรียมผิวหน้าขึ้นงานก่อนการเชื่อมการล้างผิวหน้าขึ้นงานด้วยน้ำยาอะซิโตน

จากนั้นเครื่องมืออุปกรณ์ในการเชื่อมโดยการแพร่แบบเฟสของเหลว โดยใช้เครื่องกดอัดขึ้นงาน (Compression Machine) และให้ความร้อนระบบปิด โดยให้อยู่ในตู้ควบคุมความร้อนขึ้นงานจะยึดติดกับหัวกดของเครื่อง จากนั้นจะใช้โปรแกรมในการควบคุมแรงกดของเครื่องและจะควบคุมอุณหภูมิในการให้ความร้อนเวลาในการกดแช่ นอกจากนี้ปล่อยแก๊สอาร์กอนเข้าไปในเตาที่อัตราการไหลตัว 4 ลิตรต่อนาที ดังแสดงในภาพที่ 3.14



ภาพที่ 3.14 เครื่องมืออุปกรณ์ในกระบวนการเชื่อมโดยการแพร่

กระบวนการเชื่อมโดยการแพร่แบบเฟสของเหลว จะนำชิ้นงานที่ผ่านการเตรียมผิวหน้า ชิ้นงานก่อนการเชื่อมมาประกอบเข้าด้วยกัน ในสภาวะของการปรับแรงกดคงที่ตามตัวแปรในการ ทดลองและเติมผงโลหะสังกะสีลงไประหว่างชิ้นงาน สำหรับการนำชิ้นงานเข้าเตาจะใส่ชิ้นงานไปยัง บริเวณหัวกดทั้งด้านบนและด้านล่าง จากนั้นตั้งชิ้นงานให้ตั้งฉากซึ่งจะทำให้ชิ้นงานตรงกัน เริ่มกด ชิ้นงานตามแรงที่ตั้งไว้ในโปรแกรมของเครื่องกด โดยแรงกดจะเป็นตัวแปรคงที่ คือ 4 MPa หลังจากนั้นทำการเปิดอุณหภูมิตามโปรแกรมที่ได้ตั้งไว้ โดยอุณหภูมิและเวลาในการที่ใช้ในการเชื่อมจะเป็นตัว แปรที่กำหนดกด หลังจากตั้งแรงกดและอุณหภูมิในการเชื่อมเสร็จ ก็เปิดแก๊สอาร์กอนให้ไหลเข้าเตา และสังเกตการทดลองจนครบเวลาตามโปรแกรมที่ตั้งไว้ก่อนหน้านี้ประมาณ 4-5 ชั่วโมงต่อชิ้นงาน หลังจากนั้นปิดแก๊สและปล่อยให้ชิ้นงานเย็นตัวภายในเตา ดังแบบจำลองการเชื่อมในภาพที่ 3.15



ภาพที่ 3.15 แบบจำลองการเชื่อมโดยการแพร่แบบเฟสของเหลว

สำหรับตัวแปรของการเชื่อมแพร่ผ่านเฟสของเหลวอะลูมิเนียมหล่อผสมกึ่งของแข็ง เกรด SSM 6063 โดยผงโลหะสังกะสี เกรด ZA27 เป็นวัสดุประสาน จะทำการทดลองความเป็นไปได้ เบื้องต้น จากนั้นจะกำหนดตัวแปรที่เป็นไปได้ในการเชื่อมและทำการทดลองซ้ำ เพื่อยืนยันผลการ ทดลอง ซึ่งจำนวนการทดลองทั้งหมด จะทดลองที่ 48 การทดลอง ดังแสดงในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 การกำหนดค่าตัวแปรการเชื่อมแพร่ผ่านเฟสของเหลวอะลูมิเนียมผสมหล่อกิ่งของแข็งเกรด SSM 6063 โดยใช้ผงโลหะสังกะสีเป็นตัวประสาน

ลำดับ	ตัวแปร	ตัวย่อ	หน่วย	ระดับ		
1	อุณหภูมิเชื่อม	T	องศาเซลเซียส	450	500	
2	เวลาในการเชื่อม	t	นาทีก	90	120	
3	ขนาดตัวประสาน	T_p	ไมโครเมตร	100	300	500

(3) ตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค (Microstructure Testing)

การเตรียมชิ้นงานสำหรับตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคที่ผ่านกระบวนการเชื่อมแพร่ผ่านเฟสของเหลวอะลูมิเนียมผสมหล่อกิ่งของแข็งเกรด SSM 6063 โดยใช้ผงโลหะสังกะสีเกรด ZA27 เป็นวัสดุประสาน โดยนำชิ้นงานเลื่อยออกข้างละ 20 มิลลิเมตร เพื่อที่จะนำชิ้นงานมาหล่อทำตัวเรือนแบบเย็น (Cold Mounting) การทำเรือนหุ้มชิ้นงาน (Mounting) เนื่องจากชิ้นงานมีขนาดเล็กไม่สามารถจับด้วยมือได้ จึงต้องใช้อุปกรณ์จับยึดเพื่อช่วยในการขัดให้มีผิวหน้าเรียบ โดยผสมน้ำยาเรซินเข้ากับตัวเร่งปฏิกิริยาที่อัตราส่วน 10 : 1 แล้วรอให้น้ำยาเรซินแข็งตัว จากนั้นนำชิ้นงานที่ผ่านการหล่อตัวเรือนแบบเย็นเสร็จเรียบร้อยแล้วมาล้างทำความสะอาดผิวชิ้นงาน โดยล้างเข้าไปครึ่งหนึ่งของชิ้นงานที่ผ่านการเชื่อม เพื่อที่จะนำชิ้นงานไปขัดและดูโครงสร้างทางโลหะวิทยา ต่อจากนั้นขัดผิวตัวอย่างชิ้นงานให้เรียบ โดยใช้กระดาษทรายตั้งแต่เบอร์หยาบไปจนถึงเบอร์ละเอียด หลังจากนั้นนำชิ้นงานไปล้างน้ำให้สะอาด ก่อนที่จะนำชิ้นงานไปขัดเงา (Polishing) ด้วยผงอะลูมินา ขัดจะกระทั่งชิ้นงานมีความราบเรียบ แล้วล้างด้วยน้ำให้สะอาด หลังจากนั้นล้างด้วย แอลกอฮอล์อีกครั้งและเป่าให้แห้ง การขัดหยาบเป็นการขัดผิวให้เรียบด้วยกระดาษทรายและน้ำ โดยเริ่มตั้งแต่เบอร์ 100, 320, 400, 600, 800, 1000 และ 1200 ตามลำดับ ดังแสดงในภาพที่ 3.16



ภาพที่ 3.16 การขัดผิวให้เรียบด้วยกระดาษทราย

ในการขัดชิ้นงานจะใช้น้ำระบายความร้อนและช่วยในการกำจัดเศษโลหะที่ขัดออกมาจาก กระดาษทราย การขัดละเอียดเป็นการขัดละเอียดขั้นสุดท้ายบนงานหมุนด้วยผ้าสักหลาดโดยมีน้ำ ผสมผงขัดอะลูมินา (Al_2O_3) ที่มีขนาดละเอียดขนาด 0.3 และ 0.05 ไมโครเมตร ขัดที่ความเร็วรอบ ประมาณ 150-500 รอบต่อนาที จากนั้น ใช้น้ำยากัดชิ้นรอย (Etching) เป็นสารเคมีที่มี กรดไฮโดร ฟลูออริก (Hydrofluoric Acid) ซึ่งเป็นสารละลายของ ไฮโดรเจนฟลูออไรด์ (HF) ในน้ำมีฤทธิ์กัด กร่อนรุนแรง และ เป็นอันตรายสูงต่อการสัมผัส โดยหากสัมผัสผิวหนังจะทำให้เกิด แผลไหม้ขั้นรุนแรง และเนื้อเยื่อตาย โดยไม่รู้สึกรีบปวดในทันที นอกจากนี้ยังสามารถ ระบายกระบวนการเมตาบอลิซึม ของแคลเซียม ซึ่งอาจทำให้เกิด ภาวะหัวใจวาย (Cardiac Arrest) และ เสียชีวิตได้ แม้จะมีความ อันตรายสูง แต่น้ำยากัดชิ้นรอยก็มีความสำคัญในกระบวนการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคของโลหะ และวัสดุต่าง ๆ ดังนั้น การใช้งานต้องปฏิบัติตามมาตรการความปลอดภัยอย่างเคร่งครัด เช่น การสวม ใส่อุปกรณ์ป้องกัน การใช้งานในห้องที่มีระบบระบายอากาศที่ดี และหากสัมผัสผิวหนังต้องล้างด้วยน้ำ ปริมาณมากและทาเจลแคลเซียมกลูโคเนตเพื่อป้องกันอันตรายที่อาจเกิดขึ้น

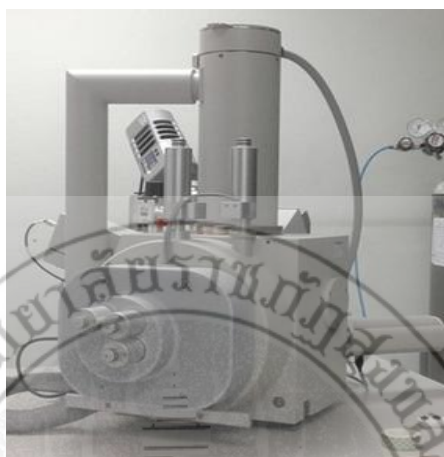
ชิ้นงานหลังการขัดนำไปตรวจสอบโครงสร้างด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (Optical Microscope : OM) ซึ่งมีกำลังขยายที่สูงประมาณ 50-500 เท่า ใช้ในการดูภาพโครงสร้างทางโลหะ วิทยา โดยตัวกล้องจะต่อกับระบบคอมพิวเตอร์ เพื่อส่งถ่ายข้อมูลจากการถ่าย ทำให้สามารถเก็บภาพ ได้อย่างชัดเจนยิ่งขึ้น ดังแสดงในภาพที่ 3.17



ภาพที่ 3.17 กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง

ชิ้นงานตรวจสอบโครงสร้างทางจุลภาคด้วยกล้องอิเล็กตรอนแบบส่องกราด เป็นการ ตรวจสอบโครงสร้างทางจุลภาคด้วยกล้องอิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่มีกำลังขยายช่วง 1,000– 50,000 เท่า ที่ 2 kV เพื่อตรวจสอบโครงสร้างบริเวณแนวเชื่อม (Bond line) เพื่อตรวจสอบการ เปลี่ยนแปลงของโครงสร้างเกรน ดูการกระจายตัวของอนุภาคราตุผสมอื่น ๆ หลังจากการเชื่อม

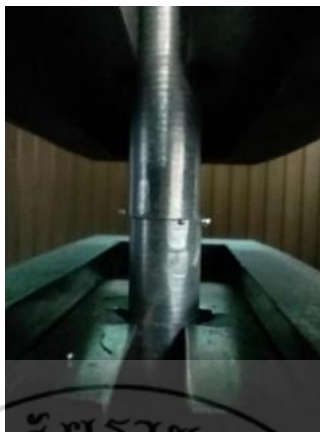
แพร์และการตรวจสอบด้วย EDX จะทำการตรวจสอบเพียงจุดเดียวในบริเวณที่เชื่อมแพร์และชิ้นงานเชื่อมทั้งสองด้าน ดังแสดงในภาพที่ 3.18



ภาพที่ 3.18 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด

(4) ตรวจสอบสมบัติทางกล (Mechanical Testing)

การทดสอบแรงดึงของชิ้นงานเชื่อมแพร์ (Diffusion Bonding) เป็นกระบวนการที่ใช้เพื่อวิเคราะห์สมบัติทางกลของรอยต่อเชื่อม เช่น ความต้านทานแรงดึงสูงสุด (Ultimate Tensile Strength - UTS) และความยืดตัว (Elongation) โดยใช้เครื่องทดสอบแรงดึง (Universal Testing Machine - UTM) ตามมาตรฐาน ASTM E8/E8M ขั้นตอนเริ่มจากการเตรียมชิ้นงานโดยตัดในแนวตั้งฉากกับรอยต่อเชื่อมและขัดผิวให้เรียบ จากนั้นติดตั้งชิ้นงานในเครื่องทดสอบและปรับตั้งค่าความเร็วในการดึงที่ 1.27 mm/min ทำการดึงชิ้นงานจนขาดเพื่อบันทึกค่าแรงดึงสูงสุดและการยืดตัว แล้ววิเคราะห์ลักษณะการขาดของชิ้นงานเพื่อประเมินคุณภาพของรอยต่อเชื่อม การทดสอบนี้ช่วยให้ได้ข้อมูลสมบัติทางกลที่แม่นยำ สามารถเปรียบเทียบกับวัสดุพื้นฐานเพื่อประเมินประสิทธิภาพของรอยต่อเชื่อม และใช้ในการปรับปรุงกระบวนการเชื่อมเพื่อให้ได้รอยต่อที่มีคุณภาพสูงขึ้น การปฏิบัติตามมาตรฐาน ASTM E8/E8M อย่างเคร่งครัดและควบคุมพารามิเตอร์อย่างแม่นยำจะช่วยให้ผลการทดสอบเชื่อถือได้และสามารถนำไปใช้ในงานวิจัยและอุตสาหกรรมต่าง ๆ ได้อย่างมีประสิทธิภาพ ดังแสดงในภาพที่ 3.19



ภาพที่ 3.19 การทดสอบแรงดึงชิ้นงานจากการเชื่อมแพร์ผ่านเฟสของเหลว

นำชิ้นงานที่ผ่านขั้นตอนการขัดไปทดสอบความแข็ง ซึ่งในการทดสอบความแข็งนั้น ผู้วิจัยได้เลือกใช้วิธีการทดสอบความแข็งในหน่วย (Vickers) ด้วยเครื่องทดสอบความแข็งแบบไมโครวิกเกอร์ โดยได้กำหนดน้ำหนักกดของหัวกดคงที่ (Load Fixed) ไว้ที่ 100 กรัมกดเป็นเวลา 10 วินาที และกวดหาความแข็งของชิ้นงานในแต่ละสถานะๆ แต่ละชิ้นจะทำการหาความแข็งของชิ้นงาน โดยการวัดหาความแข็งจำนวน 10 จุด ต่อ 1 ชิ้นงาน และกวดบริเวณพื้นที่หน้าตัดของรอยเชื่อมที่ตรงกลางชิ้นงานเชื่อม โดยระยะห่างระหว่างรอยกด 200 ไมโครเมตร หรือประมาณ 0.2 มิลลิเมตร ดังแสดงในภาพที่ 3.20



ภาพที่ 3.20 เครื่องทดสอบความแข็งแบบไมโครวิกเกอร์

บทที่ 4

ผลการวิจัย

ผลการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการเชื่อมอะลูมิเนียมหล่อกิ่งแข็ง เกรด 6063 โดยใช้ ผงสังกะสี เป็นวัสดุประสาน (Interlayer) ด้วยกระบวนการเชื่อมแพร่แบบเฟสของเหลว ได้ดำเนินการทดลอง และวิเคราะห์ผลอย่างเป็นระบบ โดยเริ่มจากการเตรียมชิ้นงานและวัสดุประสานให้เหมาะสม จากนั้น ดำเนินการเชื่อมด้วยเชื่อมแพร่แบบเฟสของเหลวและวิเคราะห์ปัจจัยที่มีผลต่อคุณภาพของรอยต่อ เช่น อุณหภูมิ เวลา และแรงกด เพื่อให้ได้รอยต่อที่มีความแข็งแรงและคุณภาพสูง ผลการวิจัย การวิเคราะห์ผล สามารถสรุปได้ดังนี้

4.1 ลักษณะทางกายภาพของชิ้นงานเชื่อมแพร่ผ่านเฟสของเหลว (Characterizes of TLP sample)

จากภาพที่ 4.1 แสดงลักษณะทางกายภาพของชิ้นงานหลังจากการเชื่อมแพร่ผ่านเฟสของเหลว อะลูมิเนียมหล่อผสมกิ่งของแข็ง เกรด SSM 6063 โดยใช้ผงโลหะสังกะสี เกรด ZA27 ขนาดอนุภาค 100 ไมโครเมตร เป็นวัสดุประสาน ผลการเชื่อมพบว่า ชิ้นงานหลังการเชื่อมสามารถยึดติดกันดีในทุก การทดลอง ทั้งการเชื่อมที่อุณหภูมิ 450 และ 500 องศาเซลเซียส หรือการเชื่อมที่เวลา 90 และ 120 นาที อย่างไรก็ตามลักษณะทางกายภาพของชิ้นงานเชื่อมแพร่ผ่านเฟสของเหลวโดยใช้ผงโลหะสังกะสี ขนาด 100 ไมโครเมตรมีความแตกต่างกันบ้าง เนื่องจากความร้อนและระยะเวลาในการเชื่อมแพร่ผ่านเฟสของเหลว ส่งผลให้ผงโลหะสังกะสี เกรด ZA27 ที่เป็นตัวประสานระหว่างชิ้นงานทั้งสองชิ้น หลอมละลายเป็นของเหลวที่ต่างกัน ซึ่งขึ้นอยู่กับตัวแปรของการทดลองและปัจจัยที่ส่งผลต่อกลไกการ ยึดติดของชิ้นงานเชื่อม ซึ่งลักษณะทางกายภาพของชิ้นงานหลังจากการเชื่อมแพร่ผ่านเฟสของเหลว อะลูมิเนียมหล่อผสมกิ่งของแข็ง เกรด SSM 6063 โดยใช้ผงโลหะสังกะสี เกรด ZA27 ขนาดอนุภาค 100 ไมโครเมตรเป็นตัวประสาน พบว่ารอยต่อเชื่อมมีความสม่ำเสมอและเชื่อมติดกันอย่างต่อเนื่อง โดยไม่พบรูพรุนหรือรอยแตก รอยเชื่อมมีความเรียบและสม่ำเสมอโดยไม่มีการสะสมของวัสดุประสาน ที่เกินความจำเป็น ไม่พบการเสียรูปหรือการบิดเบี้ยวของชิ้นงาน ซึ่งแสดงถึงการควบคุมพารามิเตอร์ การเชื่อมได้อย่างเหมาะสม สีของชิ้นงานเป็นสีเทาเงินสม่ำเสมอทั้งบริเวณรอยเชื่อมและชิ้นงานหลัก โดยไม่พบการเปลี่ยนสีที่แสดงถึงการเกิดออกไซด์หรือการไหม้ ซึ่งแสดงให้เห็นว่ากระบวนการเชื่อมได้ ดำเนินการในบรรยากาศปกคลุมด้วยแก๊สเฉื่อย เช่น อาร์กอน เพื่อป้องกันการเกิดออกไซด์ นอกจากนี้ ไม่พบการโก่งงอหรือการบิดเบี้ยว ซึ่งแสดงถึงความสมดุลของความร้อนและการกระจายของแรงกดที่ สม่ำเสมอระหว่างกระบวนการเชื่อม โดยกลไกการเชื่อมแพร่ทำให้เกิดการแพร่กระจายของอะตอม อย่างสม่ำเสมอระหว่างอะลูมิเนียมหล่อผสมกิ่งของแข็งและผงโลหะสังกะสี ZA27 ส่งผลให้เกิด

โครงสร้างเนื้อเดียวกันและป้องกันการโก่งงอ ขนาดอนุภาค 100 ไมโครเมตรส่งผลให้การหลอมเหลว และการแพร่กระจายของอะตอมเกิดขึ้นอย่างสม่ำเสมอเนื่องจากมีพื้นที่ผิวสัมผัสที่พอเหมาะ ขนาดอนุภาคที่เล็กและสม่ำเสมอช่วยให้เกิดการแพร่กระจายได้รวดเร็วและทั่วถึง ส่งผลให้รอยเชื่อมมีความแข็งแรงและโครงสร้างจุลภาคที่ละเอียดและเนื้อเดียวกัน การใช้ขนาดอนุภาค 100 ไมโครเมตรทำให้เกิดสารประกอบระหว่างโลหะที่มีความแข็งแรงสูง เช่น Zn-Al ที่ช่วยเพิ่มความแข็งแรงของรอยเชื่อม สรุปได้ว่าการใช้ผงโลหะสังกะสีเกรด ZA27 ขนาดอนุภาค 100 ไมโครเมตรเป็นตัวประสานในการเชื่อมแพร่ผ่านเฟสของเหลว ส่งผลให้ชิ้นงานมีรอยเชื่อมที่สมบูรณ์และสม่ำเสมอ โดยไม่มีรูพรุนหรือรอยแตก ไม่เกิดการเสียรูปหรือการโก่งงอ สีของชิ้นงานเป็นสีเทาเงินสม่ำเสมอและความแข็งแรงสูง ซึ่งเหมาะสมสำหรับการใช้งานที่ต้องการความแข็งแรงและทนทานสูง [26]

ขนาดตัว ประสาน (ไมโครเมตร)	เวลา (นาท)	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	ลักษณะชิ้นงานหลังการเชื่อม	ผลของการ เชื่อม
100	90	450		รอยเชื่อม สมบูรณ์
		500		รอยเชื่อม สมบูรณ์
	120	450		รอยเชื่อม สมบูรณ์
		500		รอยเชื่อม สมบูรณ์

ภาพที่ 4.1 ลักษณะทางกายภาพของชิ้นงานหลังจากการเชื่อมแพร่ผ่านเฟสของเหลวอะลูมิเนียมหล่อผสมกึ่งของแข็ง เกรด SSM 6063 โดยใช้ผงโลหะสังกะสี เกรด ZA27 ขนาดอนุภาค 100 ไมโครเมตร เป็นตัวประสาน

ในขณะทำการเชื่อมแพร่ผ่านเฟสของเหลวอะลูมิเนียมหล่อผสมกึ่งของแข็ง เกรด SSM 6063 โดยใช้ผงโลหะสังกะสี เกรด ZA27 ขนาดอนุภาค 300 ไมโครเมตร พบว่าลักษณะทางกายภาพของชิ้นงานหลังจากการเชื่อมแพร่ผ่านเฟสของเหลวมีความแตกต่างกันอย่างชัดเจน โดยที่เวลาในการเชื่อม 120 นาที ทั้งอุณหภูมิเชื่อมที่ 450 และ 500 องศาเซลเซียส แสดงให้เห็นว่าชิ้นงานเริ่มเกิดการเสียรูปจากความร้อน สังเกตได้จากแนวการแพร่ของความร้อนในบริเวณรอยต่อที่กว้าง ส่งผลให้

ชิ้นงานเชื่อมเกิดการเสียรูปร่างอย่างถาวร ในขณะที่เวลาในการเชื่อม 90 นาที ทั้งอุณหภูมิเชื่อมที่ 450 และ 500 องศาเซลเซียส พบว่าชิ้นงานเกิดการเสียรูปที่น้อยกว่า อย่างไรก็ตาม ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าขนาดอนุภาคของผงโลหะสังกะสี เกรด ZA27 มีอิทธิพลต่อการสะสมของความร้อน โดยขนาดอนุภาคที่โต นำไปสู่การสะสมของความร้อนที่สูงกว่าขนาดอนุภาคที่เล็กกว่า [14] ลักษณะทางกายภาพของชิ้นงานหลังจากการเชื่อมแพร่ผ่านเฟสของเหลวอะลูมิเนียมหล่อผสมกึ่งของแข็ง เกรด SSM 6063 โดยใช้ผงโลหะสังกะสี เกรด ZA27 ขนาดอนุภาค 300 ไมโครเมตรเป็นตัวประสาน พบว่ารอยต่อเชื่อมมีความสม่ำเสมอและเชื่อมติดกันได้ดี โดยไม่พบรูพรุนหรือรอยแตกจากการหลอมเหลวและการแข็งตัวของโลหะ แต่ในบางตัวอย่างพบรอยนูนและการสะสมของวัสดุประสานที่ไม่สม่ำเสมอ ซึ่งเกิดจากการหลอมเหลวและการไหลของโลหะที่มากเกินไป โดยเฉพาะในกรณีที่ใช้เวลา 120 นาที และอุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส ดังแสดงในภาพที่ 4.2

ขนาดตัว ประสาน (ไมโครเมตร)	เวลา (นาที)	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	ลักษณะชิ้นงานหลังการเชื่อม	ผลของการ เชื่อม
300	90	450		รอยเชื่อม สมบูรณ์
		500		รอยเชื่อม สมบูรณ์
	120	450		รอยเชื่อม สมบูรณ์
		500		รอยเชื่อม สมบูรณ์

ภาพที่ 4.2 ลักษณะทางกายภาพของชิ้นงานหลังจากการเชื่อมแพร่ผ่านเฟสของเหลวอะลูมิเนียมหล่อผสมกึ่งของแข็ง เกรด SSM 6063 โดยใช้ผงโลหะสังกะสี เกรด ZA27 ขนาดอนุภาค 300 ไมโครเมตร เป็นตัวประสาน

การเสียรูปเล็กน้อยและการบิดเบี้ยวเกิดขึ้นเนื่องจากการสะสมความร้อนและการหดตัวของโลหะขณะเย็นตัว การสะสมของโลหะที่ไม่สม่ำเสมอส่งผลให้เกิดความเค้นตกค้างภายในรอยเชื่อม ส่วนสีของชิ้นงานเป็นสีเทาเงินสม่ำเสมอโดยไม่มีการเกิดออกไซด์หรือการไหม้จากความร้อนสูงเกินไป

ซึ่งแสดงให้เห็นว่ากระบวนการเชื่อมดำเนินการในบรรยากาศที่มีการป้องกันออกไซด์ ขนาดอนุภาค 300 ไมโครเมตร ส่งผลให้การหลอมเหลวและการไหลของโลหะประสานเกิดขึ้นได้ดี แต่การแพร่กระจายของอะตอมช้ากว่าและทำให้โครงสร้างจุลภาคหยาบกว่า ส่งผลให้ความแข็งแรงของรอยเชื่อมลดลงเล็กน้อยเมื่อเทียบกับขนาดอนุภาค 100 ไมโครเมตร นอกจากนี้ ขนาดอนุภาคที่ใหญ่ขึ้นยังทำให้เกิดการสะสมของโลหะที่ไม่สม่ำเสมอและการบิดเบี้ยวมากขึ้น ดังนั้น การเลือกขนาดอนุภาคที่เหมาะสมจึงเป็นสิ่งสำคัญในการปรับปรุงคุณภาพและความแข็งแรงของรอยเชื่อม

ในทำนองเดียวกัน ขนาดอนุภาคของผงโลหะสังกะสีเกรด ZA27 ที่เป็นวัสดุประสานที่ขนาดความโต 500 ไมโครเมตร พบว่าลักษณะทางกายภาพของชิ้นงานหลังจากการเชื่อมแพร่ผ่านเฟสของเหลวเกิดการเสียรูปจากความร้อนแบบโก่งงอ สังเกตได้จากอุณหภูมิ 450 และ 500 องศาเซลเซียส เวลาในการเชื่อม 90 และ 120 นาที แสดงให้เห็นลักษณะของชิ้นงานงอตามแนวทิศทางการกดเชื่อม ซึ่งส่งผลต่อสมบัติทางกลหลังการเชื่อม อย่างไรก็ตามในทุกการทดลองแสดงให้เห็นว่า ชิ้นงานหลังการเชื่อมยึดติดดี ลักษณะทางกายภาพของชิ้นงานหลังจากการเชื่อมแพร่ผ่านเฟสของเหลวอะลูมิเนียมหล่อผสมกึ่งของแข็ง เกรด SSM 6063 โดยใช้ผงโลหะสังกะสีเกรด ZA27 ขนาดอนุภาค 500 ไมโครเมตรเป็นตัวประสาน พบว่ารอยต่อเชื่อมมีความสม่ำเสมอและเชื่อมติดกันได้ดี โดยไม่มีรูพรุนหรือรอยแตกจากการหลอมเหลวและการแข็งตัวของโลหะ แต่ในบางตัวอย่างพบรอยนูนและการสะสมของวัสดุประสานที่ไม่สม่ำเสมอ ซึ่งเกิดจากการหลอมเหลวและการไหลของโลหะที่มากเกินไป โดยเฉพาะในกรณีที่ใช้เวลา 120 นาทีและอุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส การเสียรูปเล็กน้อยและการบิดเบี้ยวเกิดจากการสะสมความร้อนและการหดตัวของโลหะขณะเย็นตัว ซึ่งเกิดมากกว่าในกรณีที่ใช้ขนาดอนุภาค 500 ไมโครเมตรเนื่องจากขนาดอนุภาคที่ใหญ่ขึ้นทำให้การแพร่กระจายของอะตอมช้าลง การสะสมความร้อนมากขึ้นและทำให้เกิดการบิดเบี้ยวหรือการเสียรูปมากขึ้น สีของชิ้นงานเป็นสีเทาเงินสม่ำเสมอทั้งบริเวณรอยเชื่อมและชิ้นงานหลัก โดยไม่พบการเปลี่ยนสีที่แสดงถึงการเกิดออกไซด์หรือการไหม้ แสดงให้เห็นว่ากระบวนการเชื่อมได้ดำเนินการในบรรยากาศปกคลุมด้วยแก๊สเฉื่อย เช่น อาร์กอน เพื่อป้องกันการเกิดออกไซด์ การโก่งงอเล็กน้อยเกิดจากความแตกต่างของอัตราการหดตัวระหว่างรอยเชื่อมและชิ้นงานหลัก การสะสมของโลหะประสานที่ไม่สม่ำเสมอทำให้เกิดความเค้นตกค้างภายในรอยเชื่อม ขนาดอนุภาค 500 ไมโครเมตรทำให้การหลอมเหลวและการไหลของโลหะประสานเกิดขึ้นได้ดี แต่การแพร่กระจายของอะตอมช้ากว่าขนาดอนุภาค 100 ไมโครเมตรเนื่องจากพื้นที่ผิวสัมผัสที่น้อยกว่า ทำให้เกิดสารประกอบระหว่างโลหะที่มีขนาดใหญ่กว่าและการจัดเรียงตัวของผลึกที่หยาบกว่า ส่งผลให้ความแข็งแรงของรอยเชื่อมลดลงเล็กน้อยเมื่อเทียบกับขนาดอนุภาค 100 ไมโครเมตร การไหลของโลหะประสานที่มากขึ้นทำให้เกิดการสะสมของโลหะที่ไม่สม่ำเสมอและการบิดเบี้ยวที่มากกว่า ดังนั้น การใช้ผงโลหะสังกะสีเกรด ZA27 ขนาดอนุภาค 500 ไมโครเมตรเป็นตัวประสานในการเชื่อมแพร่ผ่านเฟสของเหลวส่งผลให้รอยเชื่อมมีความสม่ำเสมอและ

เชื่อมติดกันได้ดี แต่พบการบิดเบี้ยวและการสะสมของโลหะที่ไม่สม่ำเสมอมากกว่าเมื่อเทียบกับขนาดอนุภาค 100 และ 300 ไมโครเมตร ซึ่งเกิดจากการแพร่กระจายของอะตอมที่ช้าลงและการไหลของโลหะที่มากขึ้น [27] ขนาดอนุภาคที่ใหญ่ขึ้นยังทำให้โครงสร้างจุลภาคหยาบกว่าและความแข็งแรงของรอยเชื่อมลดลงเล็กน้อย ดังแสดงในภาพที่ 4.3

ขนาดตัว ประสาน (ไมโครเมตร)	เวลา (นาท)	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	ลักษณะชิ้นงานหลังการเชื่อม	ผลของการ เชื่อม
500	90	450		รอยเชื่อม สมบูรณ์
		500		รอยเชื่อม สมบูรณ์
	120	450		รอยเชื่อม สมบูรณ์
		500		รอยเชื่อม สมบูรณ์

ภาพที่ 4.3 ลักษณะทางกายภาพของชิ้นงานหลังจากการเชื่อมแพร่ผ่านเฟสของเหลวอะลูมิเนียมหล่อผสมกึ่งของแข็ง เกรด SSM 6063 โดยใช้ผงโลหะสังกะสี เกรด ZA27 ขนาดอนุภาค 500 ไมโครเมตร เป็นตัวประสาน

4.2 วิเคราะห์การประสานติดกันของผิวหน้ารอยเชื่อม (Surface Analysis)

การประสานติดกันของผิวหน้ารอยเชื่อมมีความสำคัญในการประเมินคุณภาพของรอยเชื่อม ซึ่งจะส่งผลต่อความแข็งแรงและความทนทานของชิ้นงานที่เชื่อม โดยการเชื่อมที่ดีจะต้องมีการเชื่อมติดกันอย่างสมบูรณ์ ระหว่างวัสดุหลักและวัสดุประสาน เพื่อให้รอยต่อเชื่อมสามารถรับแรงได้ดีและไม่เกิดการแตกหักหรือความเสียหายภายหลัง การประสานติดกันที่สมบูรณ์จะช่วยเพิ่มความแข็งแรงให้กับรอยเชื่อมและป้องกันการเกิดรอยต่อที่อ่อนแอ เช่น การเกิดรูพรุนหรือรอยแตกในรอยเชื่อม ซึ่งสามารถส่งผลกระทบต่อสมบัติทางกลของวัสดุได้ การควบคุมพารามิเตอร์ต่าง ๆ เช่น อุณหภูมิ เวลา และแรงกดในกระบวนการเชื่อมจะช่วยให้การประสานติดกันของผิวหน้ารอยเชื่อมเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพ

Green Compact (μm)	Time (minute)	Temperature ($^{\circ}\text{C}$)	Appearance on the surface
100	90	450	
		500	
	120	450	
		500	

ภาพที่ 4.4 ลักษณะผิวหน้ารอยเชื่อมของชิ้นงานหลังจากการเชื่อมแพร่ผ่านเฟสของเหลวด้วยวัสดุประสานขนาดอนุภาค 100 ไมโครเมตร

จากภาพที่ 4.4 แสดงลักษณะทางกายภาพของชิ้นงานหลังจากการเชื่อมแพร่ผ่านเฟสของเหลวอะลูมิเนียมหล่อผสมกึ่งของแข็ง เกรด SSM 6063 โดยใช้ผงโลหะสังกะสี เกรด ZA27 ขนาดอนุภาค 100 ไมโครเมตรเป็นวัสดุประสาน พบว่าเมื่อเชื่อมที่อุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียสในเวลา 90 และ 120 นาที ผิวรอยเชื่อมมีลักษณะขรุขระและไม่เรียบสนิท เนื่องจากการแพร่กระจายของอะตอมระหว่างวัสดุประสานและวัสดุหลักยังไม่สมบูรณ์ ทำให้เกิดรอยนูนและการสะสมวัสดุประสานที่ไม่สม่ำเสมอ แต่เมื่อเชื่อมที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียสในเวลา 90 และ 120 นาที พบว่าผิวรอยเชื่อมมีความเรียบและเชื่อมติดกันได้ดีขึ้น โดยไม่มีรอยนูนและการไหลของโลหะที่มากเกินไป การแพร่กระจายของอะตอมระหว่างวัสดุประสานและวัสดุหลักเกิดขึ้นอย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น ทำให้เกิดการเชื่อมที่มีคุณภาพสูงที่พื้นผิวรอยเชื่อม ดังนั้น การใช้ผงโลหะสังกะสีขนาดอนุภาค 100 ไมโครเมตรและการควบคุมอุณหภูมิในการเชื่อมมีผลต่อการสร้างรอยเชื่อมที่สม่ำเสมอและมีคุณภาพสูง โดยไม่เกิดการสะสมวัสดุประสานที่เกินความจำเป็นและไม่มีรอยนูนที่ไม่จำเป็น [28]

Green Compact (μm)	Time (minute)	Temperature ($^{\circ}\text{C}$)	Appearance on the surface
300	90	450	
		500	
	120	450	
		500	

ภาพที่ 4.5 ลักษณะผิวหน้ารอยเชื่อมของชิ้นงานหลังจากการเชื่อมแพร่ผ่านเฟสของเหลวด้วยวัสดุประสานขนาดอนุภาค 300 ไมโครเมตร

จากภาพที่ 4.5 แสดงลักษณะทางกายภาพของชิ้นงานหลังจากการเชื่อมแพร่ผ่านเฟสของเหลวอะลูมิเนียมหล่อผสมกึ่งของแข็ง เกรด SSM 6063 โดยใช้ผงโลหะสังกะสี เกรด ZA27 ขนาดอนุภาค 300 ไมโครเมตรเป็นวัสดุประสาน พบว่าเมื่อเชื่อมที่อุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียสในเวลา 90 นาทีและ 120 นาที ผิวรอยเชื่อมมีลักษณะขรุขระและหยาบ เนื่องจากการแพร่กระจายของอะตอมระหว่างวัสดุประสานและวัสดุหลักยังไม่สมบูรณ์ ทำให้เกิดรอยนูนและการสะสมของวัสดุประสานที่ไม่สม่ำเสมอ ซึ่งแสดงถึงการหลอมเหลวที่ไม่เต็มที่ แต่เมื่อเชื่อมที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียสในเวลา 90 นาทีและ 120 นาที ผิวรอยเชื่อมแสดงลักษณะเรียบเนียนและเชื่อมติดกันได้ดี โดยไม่มีการสะสมวัสดุประสานที่มากเกินไป การแพร่กระจายของอะตอมระหว่างวัสดุประสานและวัสดุหลักเกิดขึ้นอย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น ทำให้เกิดการเชื่อมที่มีคุณภาพสูงและผิวรอยเชื่อมที่เรียบ เมื่อเปรียบเทียบกับขนาดอนุภาค 100 ไมโครเมตรพบว่า ขนาดอนุภาค 300 ไมโครเมตรทำให้การแพร่กระจายของอะตอมช้ากว่าและมีพื้นที่ผิวสัมผัสน้อยกว่า ส่งผลให้การไหลของโลหะประสานในระหว่างการเชื่อมไม่

ดีเท่ากับขนาดอนุภาค 100 ไมโครเมตร ซึ่งทำให้รอยเชื่อมมีลักษณะหยาบกว่าและอาจมีการสะสมวัสดุประสานที่ไม่สม่ำเสมอ ขนาดอนุภาค 100 ไมโครเมตรทำให้การแพร่กระจายของอะตอมเกิดขึ้นได้เร็วและทั่วถึง ส่งผลให้รอยเชื่อมมีความเรียบและมีคุณภาพสูงกว่า สรุปได้ว่าการใช้ผงโลหะสังกะสีเกรด ZA27 ขนาดอนุภาค 300 ไมโครเมตรเป็นวัสดุประสานในการเชื่อมแพร่ผ่านเฟสของเหลวช่วยให้ผิวรอยเชื่อมมีลักษณะเรียบขึ้นและเชื่อมติดกันได้ดี แต่ยังคงมีรอยนูนและการสะสมวัสดุประสานที่ไม่สม่ำเสมอมากกว่าขนาดอนุภาค 100 ไมโครเมตร ซึ่งให้ผิวรอยเชื่อมที่เรียบเนียนและมีความแข็งแรงสูงกว่า [29]

Green Compact (μm)	Time (minute)	Temperature ($^{\circ}\text{C}$)	Appearance on the surface
500	90	450	
		500	
	120	450	
		500	

ภาพที่ 4.6 ลักษณะผิวหน้ารอยเชื่อมของชิ้นงานหลังจากการเชื่อมแพร่ผ่านเฟสของเหลวด้วยวัสดุประสานขนาดอนุภาค 300 ไมโครเมตร

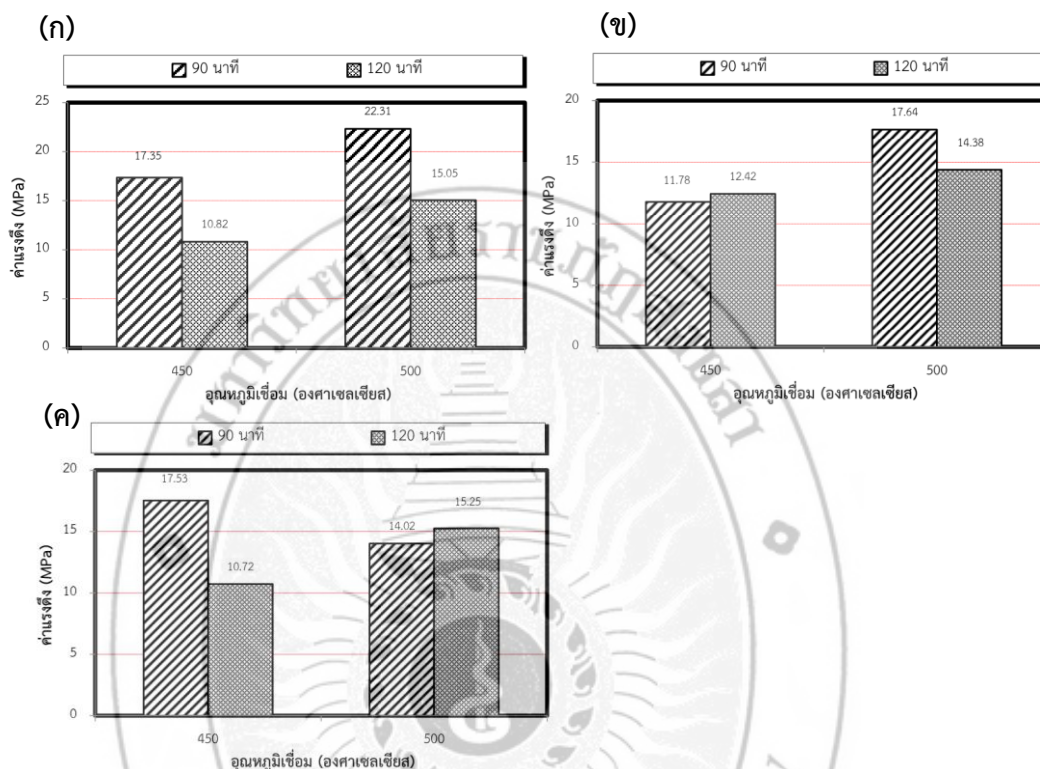
จากภาพที่ 4.6 แสดงลักษณะทางกายภาพของชิ้นงานหลังจากการเชื่อมแพร่ผ่านเฟสของเหลวอะลูมิเนียมหล่อผสมกึ่งของแข็ง เกรด SSM 6063 โดยใช้ผงโลหะสังกะสี เกรด ZA27 ขนาดอนุภาค 500 ไมโครเมตรเป็นวัสดุประสาน พบว่าเมื่อเชื่อมที่อุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียสในเวลา 90

นาที่และ 120 นาที่ ผิวยรอยเชื่อมมีลักษณะขรุขระและหยาบ เนื่องจากการแพร่กระจายของอะตอมระหว่างวัสดุประสานและวัสดุหลักยังไม่สมบูรณ์ ทำให้เกิดรอยนูนและการสะสมวัสดุประสานที่ไม่สม่ำเสมอ ซึ่งแสดงถึงการหลอมเหลวที่ไม่เต็มที่ แต่เมื่อเชื่อมที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียสในเวลา 90 นาที่และ 120 นาที่ ผิวยรอยเชื่อมมีลักษณะเรียบเนียนและเชื่อมติดกันได้ดีขึ้น โดยไม่มีการสะสมวัสดุประสานที่มากเกินไป การแพร่กระจายของอะตอมระหว่างวัสดุประสานและวัสดุหลักเกิดขึ้นอย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น ทำให้เกิดการเชื่อมที่มีคุณภาพสูงและผิวยรอยเชื่อมที่เรียบ เมื่อเปรียบเทียบกับขนาดอนุภาค 100 ไมโครเมตรพบว่า ขนาดอนุภาค 500 ไมโครเมตรทำให้การแพร่กระจายของอะตอมช้ากว่าและมีพื้นที่ผิวสัมผัสน้อยกว่า ส่งผลให้การไหลของโลหะประสานในระหว่างการเชื่อมไม่ดีเท่ากับขนาดอนุภาค 100 หรือ 300 ไมโครเมตร ซึ่งทำให้ผิวยรอยเชื่อมมีลักษณะหยาบกว่าและอาจเกิดการสะสมวัสดุประสานที่ไม่สม่ำเสมอ ขนาดอนุภาค 100 ไมโครเมตรทำให้การแพร่กระจายของอะตอมเกิดขึ้นได้เร็วและทั่วถึง ทำให้ผิวยรอยเชื่อมมีความเรียบและมีคุณภาพสูงกว่า ขนาดอนุภาค 300 ไมโครเมตรมีการแพร่กระจายของอะตอมที่ช้ากว่าขนาด 100 ไมโครเมตร แต่มากกว่าขนาด 500 ไมโครเมตร ทำให้ผิวยรอยเชื่อมมีลักษณะค่อนข้างเรียบ และการสะสมวัสดุประสานไม่มากเกินไป สรุปได้ว่า การใช้ผงโลหะสังกะสีขนาดอนุภาค 500 ไมโครเมตรในการเชื่อมแพร่ผ่านเฟสของเหลวทำให้ผิวยรอยเชื่อมมีลักษณะหยาบกว่าและการสะสมวัสดุประสานที่ไม่สม่ำเสมอมากกว่าการใช้ขนาดอนุภาค 100 ไมโครเมตร ซึ่งให้ผิวยรอยเชื่อมที่เรียบและมีคุณภาพสูงกว่า และขนาดอนุภาค 300 ไมโครเมตรมีคุณสมบัติที่ดีขึ้นจากขนาด 500 ไมโครเมตรแต่ยังไม่ดีเท่ากับขนาด 100 ไมโครเมตร

4.3 การทดสอบความแข็งแรงดึง (Tensile Test)

สำหรับค่าความแข็งแรงดึงของรอยเชื่อมที่ได้จากการเชื่อมแพร่ผ่านเฟสของเหลวอะลูมิเนียมหล่อผสมกึ่งของแข็ง เกรด SSM 6063 โดยใช้ผงโลหะสังกะสี เกรด ZA27 ขนาดอนุภาค 100, 300 และ 500 ไมโครเมตร เป็นวัสดุประสาน พบว่าที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เวลาในการเชื่อม 120 นาที่ ขนาดอนุภาค 100 ไมโครเมตร ให้ค่าความแข็งแรงดึงสูงกว่าการทดลองอื่น ๆ มีค่าเท่ากับ 22.31 MPa ดังแสดงในภาพที่ 10(ก) ในทางตรงกัน ที่อุณหภูมิเชื่อม 450 องศาเซลเซียส เวลาในการเชื่อม 90 นาที่ ขนาดอนุภาค 500 ไมโครเมตร พบว่ามีค่าความแข็งแรงดึงต่ำสุด เท่ากับ 10.72 MPa ดังแสดงในภาพที่ 10(ค) ในขณะที่ขนาดอนุภาค 300 ไมโครเมตร พบว่าค่าความแข็งแรงดึงของรอยเชื่อมมีค่าที่ใกล้เคียงกันในทุกการทดลอง ตัวอย่างเช่น อุณหภูมิเชื่อม 450 องศาเซลเซียส เวลาในการเชื่อม 90 นาที่ มีค่าความแข็งแรงดึงมีค่า 11.78 MPa ในขณะที่อุณหภูมิเชื่อม 500 เวลาในการเชื่อมเดียวกัน พบว่ามีค่าความแข็งแรงดึงมีค่า 12.48 MPa ดังแสดงในภาพที่ 10(ข) สาเหตุสำคัญที่ส่งผลต่อค่าความแข็งแรงของรอยเชื่อม เพราะสัดส่วนความเป็นของเหลวและขนาดอนุภาค เนื่องจากขนาดอนุภาคที่เล็ก ส่งผลให้มีความสามารถละลายตัวที่ดีกว่าและส่งผลต่อการลดช่องว่างบริเวณผิว

รอยต่อได้สูงกว่าขนาดอนุภาคที่ใหญ่ นำไปสู่การยึดติดที่แข็งแรงกว่าชิ้นงานที่เชื่อมด้วยขนาดอนุภาคผงโลหะสังกะสีเกรด ZA27 เป็นตัวประสาน [30] สำหรับค่าความแข็งแรงดึงของรอยเชื่อมในการทดลองอื่น ๆ สามารถพิจารณาได้จากภาพที่ 4.7



ภาพที่ 4.7 ความแข็งแรงดึงของชิ้นงานการเชื่อมแพร่ผ่านเฟสของเหลวอะลูมิเนียมหล่อผสมกึ่งของแข็ง เกรด SSM 6063 โดยใช้ผงโลหะสังกะสี เกรด ZA27 ขนาดอนุภาค 100, 300 และ 500 ไมโครเมตร เป็นตัวประสาน

จะเห็นได้ว่าความแข็งแรงดึงของชิ้นงานเชื่อมแพร่ผ่านเฟสของเหลวอะลูมิเนียมหล่อผสมกึ่งของแข็ง เกรด SSM 6063 โดยใช้ผงโลหะสังกะสี เกรด ZA27 ขนาดอนุภาค 100, 300 และ 500 ไมโครเมตร เป็นวัสดุประสาน สามารถอธิบายกลไกการทนทานแรงดึงและสาเหตุที่ทำให้ชิ้นงานขาดได้ดังนี้ ชิ้นงานที่เชื่อมผ่านกระบวนการเชื่อมแพร่แบบเฟสของเหลว โดยใช้ผงโลหะสังกะสีเป็นวัสดุประสานมีกลไกการทนทานแรงดึงที่ดีเมื่อมีการแพร่กระจายของอะตอมระหว่างวัสดุประสานและวัสดุหลักอย่างสม่ำเสมอ และการใช้ขนาดอนุภาคเล็กลง เช่น ขนาด 100 ไมโครเมตรทำให้การแพร่กระจายของอะตอมเกิดขึ้นได้อย่างรวดเร็วและทั่วถึง ส่งผลให้รอยเชื่อมมีความแข็งแรงสูงและทนทานต่อแรงดึงได้ดี ขนาดอนุภาคที่เล็กยังช่วยทำให้เกิดการเชื่อมติดกันที่แน่นหนา โดยไม่มีการสะสมวัสดุประสานที่มากเกินไปซึ่งจะทำให้เกิดจุดอ่อนในรอยเชื่อม ในขณะที่ชิ้นงานที่เชื่อมด้วยวัสดุ

ประสานขนาดอนุภาค 500 ไมโครเมตร และ 300 ไมโครเมตรพบว่า ความแข็งแรงดิ่งลดลงโดยมีค่าแรงดิ่งที่ต่ำกว่าชิ้นงานที่ใช้วัสดุประสานขนาด 100 ไมโครเมตร ซึ่งอาจเกิดจากการแพร่กระจายของอะตอมที่ช้ากว่า ทำให้เกิดการสะสมวัสดุประสานที่ไม่สม่ำเสมอ และการหลอมเหลวไม่สมบูรณ์ ส่งผลให้รอยเชื่อมมีความหยابและมีรอยต่อที่อ่อนแอในบางจุด ซึ่งอาจทำให้เกิดการแตกหัก (Fracture) ได้ง่ายกว่า การขาดของชิ้นงานอาจเกิดจากการเกิดจุดอ่อนในรอยเชื่อม ซึ่งเกิดจากการที่วัสดุประสานสะสมไม่สม่ำเสมอ หรือการแพร่กระจายของอะตอมไม่ทั่วถึง ซึ่งทำให้เกิดความเค้นตกค้าง (Residual Stress) ภายในรอยเชื่อม ขนาดอนุภาคที่ใหญ่ขึ้นทำให้การแพร่กระจายของอะตอมช้าลงและทำให้รอยเชื่อมมีโครงสร้างที่หยابและไม่สมบูรณ์ ส่งผลให้แรงดิ่งสูงสุดของชิ้นงานลดลงและทำให้เกิดการขาดจากการแตกหักที่รอยเชื่อมได้ง่ายขึ้น สรุปได้ว่า ความแข็งแรงดิ่งของชิ้นงานที่ใช้วัสดุประสานขนาดอนุภาคเล็ก (100 ไมโครเมตร) มีการแพร่กระจายอะตอมที่ดีและสมบูรณ์ ส่งผลให้มีความแข็งแรงสูง ส่วนการใช้วัสดุประสานขนาดอนุภาคใหญ่ (300 และ 500 ไมโครเมตร) อาจทำให้เกิดการสะสมวัสดุประสานที่ไม่สม่ำเสมอและเกิดรอยต่อที่อ่อนแอ ซึ่งส่งผลให้ชิ้นงานมีความทนทานแรงดิ่งต่ำและเกิดการขาดจากการแตกหักได้ง่าย [31]

4.4 การวิเคราะห์สถิตินิ (Static Analysis)

ข้อมูลการทดลองที่ศึกษาผลกระทบของตัวแปรสามตัว ได้แก่ เวลาในการเชื่อม (90 นาทีและ 120 นาที), อุณหภูมิการเชื่อม (450 และ 500 องศาเซลเซียส) และขนาดอนุภาค (100, 300 และ 500 ไมโครเมตร) ต่อความแข็งแรงของการเชื่อม (Tensile Strength) ซึ่งวัดเป็นหน่วย MPa โดยมีการทดลองทั้งหมด 12 ครั้ง ที่ผสมผสานค่าของตัวแปรเหล่านี้ ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าเมื่อเวลาในการเชื่อมและอุณหภูมิสูงขึ้น ความแข็งแรงของการเชื่อมมักลดลง แต่อาจมีการเปลี่ยนแปลงที่ไม่แน่นอนตามขนาดอนุภาค ตัวแปรขนาดอนุภาคมีผลกระทบต่อความแข็งแรงเช่นกัน การวิเคราะห์นี้สามารถนำไปใช้ในการพัฒนากระบวนการเชื่อมเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการผลิตวัสดุที่แข็งแรงขึ้นได้ ดังแสดงในตารางที่ 4.1

จากการทดลองพบว่าเมื่อเวลาในการเชื่อมเพิ่มขึ้นจาก 90 นาที เป็น 120 นาที ความแข็งแรงของการเชื่อมมักจะลดลงเล็กน้อย (เช่น จาก 17.35 MPa เป็น 10.82 MPa) แต่อาจมีผลที่ไม่แน่นอนขึ้นอยู่กับอุณหภูมิและขนาดอนุภาค เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นจาก 450 องศาเซลเซียส เป็น 500 องศาเซลเซียส ความแข็งแรงของการเชื่อมก็มีการเปลี่ยนแปลงบางครั้ง (เช่น 17.35 MPa ที่ 450 องศาเซลเซียสลดลงเหลือ 11.78 MPa ที่ 500 องศาเซลเซียส) ซึ่งอาจเกิดจากการที่อุณหภูมิสูงขึ้นทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงในโครงสร้างของวัสดุ และขนาดอนุภาคที่แตกต่างกันทำให้ความแข็งแรงของการเชื่อมเปลี่ยนแปลง ตัวอย่างเช่น ขนาดอนุภาค 100 ไมโครเมตร มีความแข็งแรงที่สูงกว่า 500 ไมโครเมตรในบางกรณี

ตารางที่ 4.1 การทดลองและผลการทดสอบความแข็งแรงดึงรอยเชื่อม

การทดลอง	เวลา (นาท)	อุณหภูมิ (°C)	ขนาดอนุภาค (ไมโครเมตร)	ความแข็งแรง (MPa)
1	90	450	100	17.35
2	90	450	300	22.31
3	90	450	500	15.05
4	90	500	100	11.78
5	90	500	300	12.42
6	90	500	500	14.38
7	120	450	100	10.82
8	120	450	300	11.72
9	120	450	500	10.72
10	120	500	100	15.05
11	120	500	300	12.65
12	120	500	500	15.07

การวิเคราะห์ ANOVA จากข้อมูลที่ให้มาศึกษาผลกระทบของตัวแปรสามตัว ได้แก่ เวลาในการเชื่อม (90 นาท และ 120 นาท) อุณหภูมิ (450 และ 500 องศาเซลเซียส) และขนาดอนุภาค (100, 300 และ 500 ไมโครเมตร) ต่อความแข็งแรงของการเชื่อม (Tensile Strength) พบว่าไม่มีปัจจัยใดที่มีผลกระทบอย่างมีนัยสำคัญต่อความแข็งแรงของการเชื่อม เนื่องจาก p-value สำหรับทุกปัจจัย (เวลา อุณหภูมิ และขนาดอนุภาค) มีค่ามากกว่า 0.05 ซึ่งหมายความว่าไม่สามารถปฏิเสธสมมติฐานที่ว่าไม่มีผลกระทบจากปัจจัยเหล่านี้ต่อความแข็งแรงได้ สำหรับค่า F-statistic ที่คำนวณได้แสดงถึงอัตราส่วนระหว่าง Mean Square ของปัจจัยแต่ละตัวกับ Residual Mean Square โดยค่า F-statistic สำหรับทุกปัจจัยต่ำและไม่สามารถแสดงให้เห็นถึงความแตกต่างที่มีนัยสำคัญในตัวแปรเหล่านี้ นอกจากนี้ Mean Square ของแต่ละตัวแปรคำนวณจากการหาร Sum of Squares ด้วย Degrees of Freedom ของแต่ละตัวแปร ซึ่งช่วยให้เราเห็นความแปรผันที่เกิดจากแต่ละปัจจัย การวิเคราะห์นี้แสดงให้เห็นว่าในกรณีนี้ ปัจจัยเหล่านี้ไม่ส่งผลกระทบอย่างมีนัยสำคัญต่อความแข็งแรงของการเชื่อม [32] ดังแสดงในตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 การออกแบบการทดลอง (ANOVA)

Source of Variation	Sum of Squares (SS)	Degrees of Freedom (df)	Mean Square (MS)	F-statistic	p-value
เวลาเชื่อม	24.825633	1.0	24.825633	1.979104	0.202297
อุณหภูมิเชื่อม	3.652033	1.0	3.652033	0.291141	0.606220
ขนาดอนุภาค	2.659400	2.0	1.329700	0.106004	0.900838
ความเค้น	87.807133	7.0	12.543876		
รวม	118.944200	11.0			

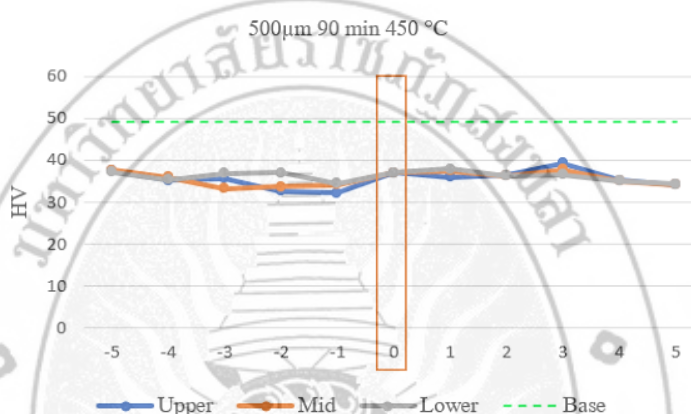
ค่าของ R^2 ที่คำนวณได้จากการทดลองนี้คือ 0.7382 หรือประมาณ 73.82 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งหมายความว่าโมเดลการทดลองสามารถอธิบายความแปรผันของข้อมูลได้ประมาณ ส่วนที่เหลืออีกประมาณ 26.18 เปอร์เซ็นต์ ของความแปรผันไม่ได้รับการอธิบายจากตัวแปรที่ศึกษาในโมเดลนี้ ซึ่งอาจเกิดจากปัจจัยอื่นๆ ที่ไม่ได้ถูกพิจารณาหรือข้อมูลที่มีความแปรผันสูงในกลุ่มตัวอย่าง

4.5 การทดสอบความแข็ง (Vicker Hardness Test)

การทดสอบความแข็งรอยแนวเชื่อมของอะลูมิเนียมหล่อกิ่งแข็ง เกรด 6063 โดยการทดสอบในรอยต่อทั้งหมด 6 จุด โดยใช้การกดบริเวณพื้นผิวชิ้นงาน ด้วยแรงกด 200 gF เป็นระยะเวลา 10 วินาที กดบริเวณแนวรอยต่อจนถึงเนื้ออะลูมิเนียมเดิมทั้งหมด 10 จุด โดยมีระยะห่างระหว่างจุดกด 1500 ไมโครเมตร หรือ 1.5 มิลลิเมตร และได้ค่าความแข็งของรอยเชื่อม ดังนี้

ผลการทดสอบความแข็ง (hardness test) ของชิ้นงานการเชื่อมแพร่ผ่านเฟสของเหลว อะลูมิเนียมหล่อผสมกิ่งของแข็ง เกรด SSM 6063 โดยใช้ผงโลหะสังกะสี เกรด ZA27 ขนาดอนุภาค 500 ไมโครเมตร ที่อุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 90 นาที พบว่า ความแข็ง (HV) ของชิ้นงานมีความสม่ำเสมอในแนวรอยเชื่อมทั้งหมด (Upper, Mid, Lower) และใกล้เคียงกับค่า ความแข็งของฐาน (Base) โดยไม่มีการเปลี่ยนแปลงที่มีนัยสำคัญ [33] ซึ่งแสดงให้เห็นว่าโครงสร้างจุลภาคของรอยเชื่อมมีความสมบูรณ์และเสถียรในระหว่างกระบวนการเชื่อม การทดสอบความแข็งแสดงให้เห็นว่า การตกตะกอนของโครงสร้างจุลภาคในรอยเชื่อมที่ใช้วัสดุประสานขนาด 500 ไมโครเมตร นั้นมีความสำคัญต่อการควบคุมความแข็ง โดยในระหว่างการเชื่อมมีการแพร่กระจายของอะตอมระหว่างอะลูมิเนียมและผงสังกะสี ซึ่งนำไปสู่การสร้างสารประกอบระหว่างโลหะ (Intermetallic Compounds) ที่ช่วยเพิ่มความแข็งในรอยเชื่อม ขนาดอนุภาคที่ใหญ่ขึ้นอย่าง 500 ไมโครเมตร ทำให้การแพร่กระจายของอะตอมเกิดขึ้นช้ากว่าขนาดอนุภาคที่เล็กกว่า ส่งผลให้การตกตะกอนของโครงสร้างจุลภาคเกิดขึ้นอย่างช้าๆ แต่สามารถรักษาความสมดุลในการสร้างสารประกอบที่เสถียรและ

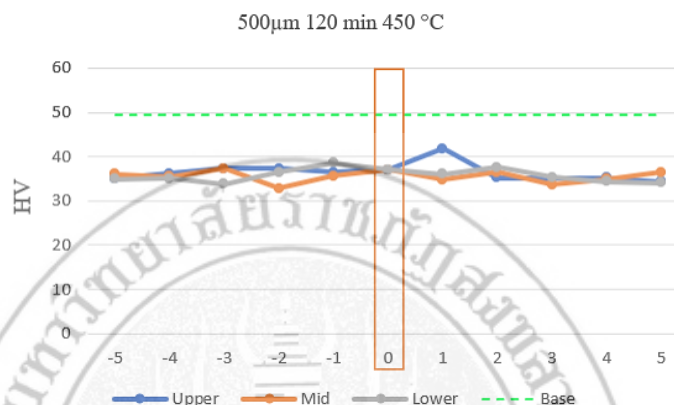
ทำให้รอยเชื่อมมีความแข็งที่ไม่แตกต่างจากความแข็งของวัสดุฐาน (Base) อย่างมาก การตกตะกอนของโครงสร้างจุลภาคที่มีการจัดเรียงตัวอย่างดีทำให้เกิดสารประกอบระหว่างโลหะที่มีความแข็งสูง ซึ่งส่งผลให้ความแข็งของรอยเชื่อมไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงที่สำคัญระหว่างตำแหน่งต่างๆ ของรอยเชื่อมและฐาน โดยค่าสูงสุดที่ 500 ไมโครเมตร แสดงถึงความแข็งที่คงที่ในระหว่างกระบวนการเชื่อมและไม่มีความแตกต่างมากระหว่างตำแหน่งต่างๆ ทั้ง Upper, Mid, Lower ซึ่งบ่งชี้ว่าความแข็งที่สูงนั้นได้รับการกระจายอย่างเหมาะสมและมีความสมดุลในการเชื่อม ดังแสดงในภาพที่ 4.8



ภาพที่ 4.8 ความแข็งชิ้นงานการเชื่อมแพร์ผ่านเฟสของเหลวอะลูมิเนียมหล่อผสมกึ่งของแข็ง เกรด SSM 6063 ที่ขนาดอนุภาค 500 ไมโครเมตร ที่อุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 90 นาที

จากภาพที่ 4.9 แสดงผลการทดสอบความแข็ง (hardness test) ของชิ้นงานการเชื่อมแพร์ผ่านเฟสของเหลวอะลูมิเนียมหล่อผสมกึ่งของแข็ง เกรด SSM 6063 โดยใช้ผงโลหะสังกะสี เกรด ZA27 ขนาดอนุภาค 500 ไมโครเมตร ที่อุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 120 นาที พบว่าความแข็ง (HV) ของชิ้นงานมีความสม่ำเสมอในทุกตำแหน่งของรอยเชื่อม (Upper, Mid, Lower) โดยมีค่าใกล้เคียงกับความแข็งของวัสดุฐาน (Base) ซึ่งบ่งชี้ว่าโครงสร้างจุลภาคของรอยเชื่อมมีความเสถียรและสมบูรณ์ในระหว่างกระบวนการเชื่อม การทดสอบความแข็งแสดงให้เห็นว่า ความแข็งในรอยเชื่อมที่ใช้วัสดุประสานขนาด 500 ไมโครเมตร ถูกกำหนดโดยการตกตะกอนของโครงสร้างจุลภาคที่มีการจัดเรียงตัวอย่างดี ซึ่งช่วยเพิ่มความแข็งในรอยเชื่อม เมื่อวัสดุประสานถูกหลอมและแพร่กระจายระหว่างอะลูมิเนียมและผงสังกะสี จะเกิดการสร้างสารประกอบระหว่างโลหะ (Intermetallic Compounds) ที่มีความแข็งสูง ซึ่งช่วยเพิ่มความแข็งในรอยเชื่อม [34] ขนาดอนุภาคที่ใหญ่ขึ้นทำให้การแพร่กระจายของอะตอมเกิดขึ้นช้ากว่า แต่สามารถรักษาความสมดุลในการสร้างสารประกอบที่เสถียร และทำให้รอยเชื่อมมีความแข็งที่ไม่แตกต่างจากความแข็งของวัสดุฐาน (Base) อย่างมาก การตกตะกอนของโครงสร้างจุลภาคที่มีการจัดเรียงตัวอย่างดีทำให้เกิดสารประกอบ

ระหว่างโลหะที่มีความแข็งสูง ซึ่งส่งผลให้ความแข็งของรอยเชื่อมไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงที่สำคัญระหว่างตำแหน่งต่างๆ ของรอยเชื่อมและฐาน ความแข็งคงที่ในทุกตำแหน่งทั้ง Upper, Mid และ Lower ซึ่งบ่งชี้ว่า ความแข็งที่สูงนั้นได้รับการกระจายอย่างเหมาะสมและมีความสมดุลในการเชื่อม



ภาพที่ 4.9 ความแข็งขึ้นงานการเชื่อมแพร่ผ่านเฟสของเหลวอะลูมิเนียมหล่อผสมกึ่งของแข็ง เกรด SSM 6063 ที่ขนาดอนุภาค 500 ไมโครเมตร ที่อุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 120 นาที

เมื่อเปรียบเทียบระหว่างกราฟทั้งสองจากการเชื่อมแพร่ผ่านเฟสของเหลวอะลูมิเนียมหล่อผสมกึ่งของแข็ง เกรด SSM 6063 โดยใช้ผงโลหะสังกะสี เกรด ZA27 ที่ขนาดอนุภาค 500 ไมโครเมตร ที่อุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส ในระยะเวลา 90 นาที และ 120 นาที พบว่าเวลาในการเชื่อมที่ 90 นาที ความแข็งของรอยเชื่อมในทุกตำแหน่งค่อนข้างคงที่และใกล้เคียงกับความแข็งของวัสดุฐาน (Base Metal) โดยมีค่าอยู่ที่ประมาณ 35-40 HV ในขณะที่ในเวลาที่เชื่อม 120 นาที ความแข็งยังคงมีความคงที่ในตำแหน่งต่าง ๆ ของรอยเชื่อม แต่มีการเพิ่มขึ้นเล็กน้อย โดยเฉพาะในตำแหน่ง Lower ซึ่งมีค่าความแข็งสูงถึงประมาณ 50 HV ส่วนตำแหน่ง Upper และ Mid ยังคงมีความแข็งที่ประมาณ 40 HV ความแตกต่างของความแข็งที่เวลา 90 นาที มีค่อนข้างน้อยและมีความคงที่มาก ในขณะที่เวลาที่ 120 นาที มีการกระจายตัวของความแข็งที่กว้างขึ้น โดยตำแหน่ง Lower มีความแข็งที่สูงกว่าอย่างเห็นได้ชัด ซึ่งอาจเกิดจากกระบวนการตกตะกอนของสารประกอบระหว่างโลหะ (Intermetallic Compounds) ที่ส่งผลให้มีการเพิ่มความแข็งในรอยเชื่อม ในกราฟที่ 90 นาที ไม่มีการเปลี่ยนแปลงที่มีนัยสำคัญในค่าความแข็งระหว่างตำแหน่งต่าง ๆ ทำให้ความแข็งในบางตำแหน่งเพิ่มขึ้น โดยเฉพาะในตำแหน่ง Lower ซึ่งแสดงถึงการเกิดสารประกอบระหว่างโลหะที่มีความแข็งสูงขึ้น เมื่อเทียบกับการเชื่อมที่ใช้เวลา 90 นาที

4.6 การตรวจสอบโครงสร้างทางโลหะวิทยา (Vicker Hardness Test)

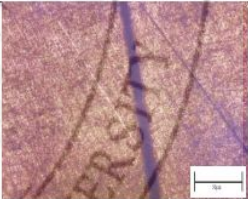
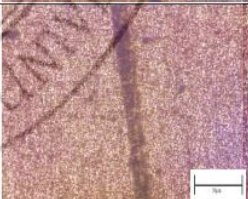
การตรวจสอบโครงสร้างทางโลหะวิทยาเป็นกระบวนการที่ใช้ในการศึกษาและวิเคราะห์ลักษณะของโครงสร้างภายในของวัสดุโลหะ โดยใช้เทคนิคต่าง ๆ เช่น การส่องกล้องจุลทรรศน์เพื่อดูลักษณะของผลึก (Grain Structure) และการกระจายตัวขององค์ประกอบต่าง ๆ ภายในวัสดุ การตรวจสอบนี้ช่วยให้สามารถระบุลักษณะเฉพาะ เช่น ขนาดผลึก การจัดเรียงตัวของผลึก และการมีสารประกอบระหว่างโลหะ (Intermetallic Compounds) ซึ่งสามารถบ่งชี้ถึงคุณสมบัติของวัสดุ เช่น ความแข็งแรง ความต้านทานการกัดกร่อน และสมบัติทางกลต่าง ๆ ที่สำคัญ

เนื้อโลหะเดิมของอะลูมิเนียมหล่อกึ่งแข็ง เกรด 6063 สามารถอธิบายรายละเอียดของโครงสร้างได้ว่า โครงสร้างของโลหะนี้มีขนาดผลึกที่ละเอียด ซึ่งหมายความว่าอะลูมิเนียมมีการจัดเรียงตัวของผลึกอย่างสม่ำเสมอ การมีผลึกที่ละเอียดช่วยเพิ่มความแข็งแรงและทนทานต่อการเสียรูป (Deformation) ได้ดีขึ้นในระหว่างการใช้งาน นอกจากนี้ การกระจายตัวของอนุภาคโลหะในเนื้อวัสดุก็มีความสม่ำเสมอ ซึ่งบ่งชี้ถึงกระบวนการหล่อที่มีความเสถียรในการควบคุมองค์ประกอบและอุณหภูมิระหว่างการหลอม โครงสร้างที่แสดงในภาพนี้เป็นลักษณะของโลหะที่มีความสม่ำเสมอและไม่มีความผิดปกติ เช่น รอยแตกหรือรูพรุน ซึ่งบ่งชี้ถึงความสมบูรณ์และความแข็งแรงที่ดีของโลหะเดิม อีกทั้งการจัดเรียงตัวของผลึกในโลหะหล่อนี้มีลักษณะที่เป็นระเบียบและเสถียร ซึ่งช่วยเสริมความแข็งแรงให้กับวัสดุ โดยรวมแล้ว [35] ภาพนี้แสดงให้เห็นถึงคุณสมบัติทางโลหะวิทยาของอะลูมิเนียมหล่อกึ่งแข็งเกรด 6063 ที่มีโครงสร้างที่ดีและสามารถนำไปใช้งานในผลิตภัณฑ์ที่ต้องการความแข็งแรงและความทนทานสูง ดังแสดงในภาพที่ 4.10



ภาพที่ 4.10 โครงสร้างจุลภาคฐานของอะลูมิเนียมหล่อกึ่งแข็ง เกรด 6063

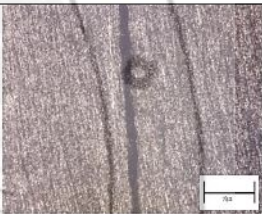
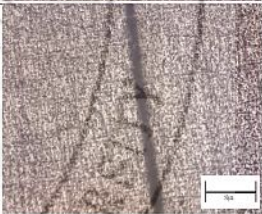
โครงสร้างจุลภาคของรอยเชื่อมอะลูมิเนียมหล่อกึ่งแข็ง เกรด 6063 โดยใช้ผงสังกะสีเป็นวัสดุประสานที่อุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส เวลาการกดแช่ 90 และ 120 นาที ขนาดวัสดุประสาน 100 ไมโครเมตร สามารถอธิบายลักษณะโครงสร้างและการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างหลังการเชื่อมได้ว่า ในช่วง 90 นาที โครงสร้างจุลภาคแสดงให้เห็นว่า การจัดเรียงตัวของผลึกในรอยเชื่อมยังไม่สมบูรณ์ โดยการแพร่กระจายของอะตอมระหว่างวัสดุประสานและวัสดุหลักยังไม่ทั่วถึง ทำให้เกิดการหลอมเหลวที่ไม่สมบูรณ์และการกระจายตัวของวัสดุประสานที่ไม่สม่ำเสมอ ซึ่งอาจทำให้รอยเชื่อมมีความอ่อนแอ ส่วนในช่วง 120 นาที การแพร่กระจายของอะตอมระหว่างวัสดุประสานและวัสดุหลักดีขึ้น การตกตะกอนของสารประกอบระหว่างโลหะดีขึ้น ทำให้การเชื่อมมีความสมบูรณ์และแข็งแรงขึ้น การสะสมวัสดุประสานมีความสม่ำเสมอมากขึ้นและความแข็งแรงของรอยเชื่อมสูงขึ้น การเปลี่ยนแปลงนี้แสดงให้เห็นว่า การเพิ่มเวลาการเชื่อมทำให้โครงสร้างจุลภาคของรอยเชื่อมมีความเสถียรและละเอียดขึ้น ซึ่งช่วยเพิ่มความแข็งแรงของรอยเชื่อมอย่างมีนัยสำคัญ โดยเฉพาะในช่วงเวลา 120 นาทีที่การตกตะกอนของสารประกอบระหว่างโลหะทำให้โครงสร้างจุลภาคมีความสมบูรณ์และเสถียร ดังแสดงในภาพที่ 4.11

Green Compact (μm)	Temperature ($^{\circ}\text{C}$)	Time (minute)	Magnification Specifications 5X
100	450	90	
		120	

ภาพที่ 4.11 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานเชื่อมที่อุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส เวลาการกดแช่ 90 และ 120 นาที ขนาดวัสดุประสาน 100 ไมโครเมตร

โครงสร้างจุลภาคของรอยเชื่อมอะลูมิเนียมหล่อกึ่งแข็งเกรด 6063 โดยใช้ผงสังกะสีเป็นวัสดุประสานที่อุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส เวลาการกดแช่ 90 และ 120 นาที ขนาดวัสดุประสาน 300 ไมโครเมตร เราสามารถอธิบายลักษณะโครงสร้างและการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างหลังการเชื่อมได้ว่า ในช่วง 90 นาที โครงสร้างจุลภาคในรอยเชื่อมยังไม่สมบูรณ์ ผลึกในรอยเชื่อมมีขนาดไม่สม่ำเสมอ

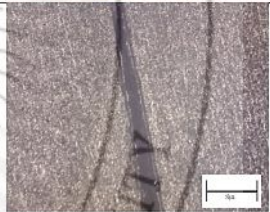
และการกระจายตัวของวัสดุประสานไม่ทั่วถึง ซึ่งแสดงให้เห็นถึงการแพร่กระจายของอะตอมที่ยังไม่สมบูรณ์ ทำให้รอยเชื่อมมีลักษณะที่ไม่สมบูรณ์และอ่อนแอ หลังการเชื่อม 120 นาที โครงสร้างจุลภาคได้รับการปรับปรุง โดยการแพร่กระจายของอะตอมระหว่างวัสดุประสานและวัสดุหลักดีขึ้น ทำให้การสะสมวัสดุประสานที่สม่ำเสมอและโครงสร้างของรอยเชื่อมมีความสมบูรณ์และแข็งแรงขึ้น การสะสมวัสดุประสานที่มีความสม่ำเสมอช่วยให้การเกิดสารประกอบระหว่างโลหะ (Intermetallic Compounds) เสถียรขึ้น และทำให้รอยเชื่อมมีความแข็งแรงสูงขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับกรณีการเชื่อมในเวลา 90 นาทีที่ยังมีความไม่สมบูรณ์ในรอยเชื่อม ดังนั้น การเพิ่มเวลาการเชื่อมทำให้โครงสร้างของรอยเชื่อมมีความสมบูรณ์มากขึ้นและแข็งแรงขึ้นจากการที่การแพร่กระจายของอะตอมดีขึ้นและสารประกอบระหว่างโลหะเกิดขึ้นได้ดีมากขึ้น ดังแสดงในภาพที่ 4.12

Green Compact (μm)	Temperature ($^{\circ}\text{C}$)	Time (minute)	Magnification Specifications 5X
300	450	90	
		120	

ภาพที่ 4.12 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานเชื่อมที่อุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส เวลาการกดแช่ 90 และ 120 นาที ขนาดวัสดุประสาน 300 ไมโครเมตร

โครงสร้างจุลภาคของรอยเชื่อมอะลูมิเนียมหล่อกิ่งแข็งเกรด 6063 โดยใช้ผงสังกะสีเป็นวัสดุประสานที่อุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส เวลาการกดแช่ 90 และ 120 นาที ขนาดวัสดุประสาน 500 ไมโครเมตร เราสามารถอธิบายลักษณะโครงสร้างและการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างหลังการเชื่อมได้ว่า ในช่วง 90 นาที โครงสร้างจุลภาคในรอยเชื่อมยังไม่สมบูรณ์ โดยการจัดเรียงตัวของผลึกไม่สม่ำเสมอ และการกระจายตัวของวัสดุประสานยังไม่ทั่วถึง ซึ่งแสดงให้เห็นถึงการแพร่กระจายของอะตอมที่ไม่เต็มที่ ทำให้รอยเชื่อมมีจุดอ่อนและความแข็งแรงต่ำ การสะสมวัสดุประสานที่ไม่สม่ำเสมอส่งผลให้รอยเชื่อมมีลักษณะหยาบและอาจมีความอ่อนแอ หลังจากการเชื่อม 120 นาที พบว่าโครงสร้างจุลภาคในรอยเชื่อมมีการพัฒนาอย่างชัดเจน โดยการแพร่กระจายของอะตอมดีขึ้น ผลึกใน

รอยเชื่อมมีการจัดเรียงตัวอย่างสม่ำเสมอ และการสะสมวัสดุประสานมีความสมดุลและเสถียยิ่งขึ้น ส่งผลให้รอยเชื่อมมีความแข็งแรงสูงขึ้น การตกตะกอนของสารประกอบระหว่างโลหะทำให้รอยเชื่อมมีความสมบูรณ์และแข็งแรง การเปลี่ยนแปลงนี้แสดงให้เห็นว่าเวลาการเชื่อมที่ยาวนานขึ้นทำให้โครงสร้างของรอยเชื่อมมีความสมบูรณ์มากขึ้น การกระจายตัวของอะตอมและการสะสมวัสดุประสานที่สม่ำเสมอช่วยเพิ่มความแข็งแรงและเสถียรภาพของโครงสร้างจุลภาค สรุปได้ว่าการเชื่อมที่ใช้เวลานานขึ้น (120 นาที) ทำให้รอยเชื่อมมีความสมบูรณ์และแข็งแรงมากขึ้น จากการที่การแพร่กระจายของอะตอมและการสะสมวัสดุประสานมีประสิทธิภาพดีขึ้น การเกิดสารประกอบระหว่างโลหะที่เสถียรก็ช่วยเพิ่มความแข็งแรงของรอยเชื่อม [36] ดังแสดงในภาพที่ 4.13

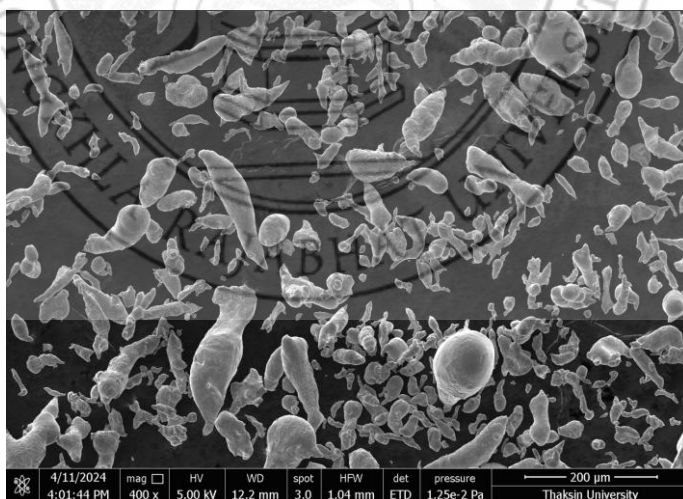
Green Compact (μm)	Temperature ($^{\circ}\text{C}$)	Time (minute)	Magnification Specifications 5X
500	450	90	
		120	

ภาพที่ 4.13 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานเชื่อมที่อุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส เวลาการกดแช่ 90 และ 120 นาที ขนาดวัสดุประสาน 500 ไมโครเมตร

โครงสร้างจุลภาคของรอยเชื่อมอะลูมิเนียมหล่อกึ่งแข็งเกรด 6063 โดยใช้ผงสังกะสีเป็นวัสดุประสานที่อุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส เวลาการกดแช่ 90 และ 120 นาที ขนาดวัสดุประสาน 100, 300 ไมโครเมตร สามารถเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงโครงสร้าง เมื่อเปรียบเทียบระหว่างขนาดวัสดุประสาน 100 ไมโครเมตรและ 300 ไมโครเมตร พบว่าโครงสร้างจุลภาคของวัสดุประสานขนาด 100 ไมโครเมตร เมื่อเวลาเชื่อม 90 นาที จะมีความสมบูรณ์ในการจัดเรียงตัวของผลึกที่ดีขึ้น และการกระจายตัวของวัสดุประสานก็ทั่วถึงมากขึ้นเมื่อเทียบกับขนาดวัสดุประสาน 300 ไมโครเมตร ซึ่งในกรณีของวัสดุประสานขนาด 300 ไมโครเมตรมีการกระจายตัวของวัสดุประสานที่ไม่ทั่วถึงและบางจุดยังคงมีลักษณะของการสะสมวัสดุประสานที่ไม่สมบูรณ์ ซึ่งอาจทำให้เกิดการสะสมวัสดุที่ไม่สม่ำเสมอ และทำให้รอยเชื่อมมีความอ่อนแอ หลังจากการเชื่อมที่เวลา 120 นาที โครงสร้างจุลภาคของทั้งขนาด

วัสดุประสาน 100 ไมโครเมตรและ 300 ไมโครเมตรมีการพัฒนาขึ้น โดยที่การแพร่กระจายของอะตอมระหว่างวัสดุประสานและวัสดุหลักมีประสิทธิภาพมากขึ้น การสะสมวัสดุประสานดีขึ้น ทำให้รอยเชื่อมมีความสมบูรณ์และแข็งแรงขึ้น แต่สำหรับวัสดุประสานขนาด 300 ไมโครเมตร การกระจายตัวของวัสดุประสานยังคงมีความไม่สมบูรณ์เล็กน้อยเมื่อเทียบกับวัสดุประสานขนาด 100 ไมโครเมตร การใช้วัสดุประสานขนาด 100 ไมโครเมตร ทำให้โครงสร้างจุลภาคของรอยเชื่อมมีความสมบูรณ์และเสถียรมากกว่า ขนาดวัสดุประสาน 300 ไมโครเมตร ซึ่งมีการสะสมวัสดุประสานที่ไม่สม่ำเสมอ โดยการเพิ่มเวลาการเชื่อมทำให้โครงสร้างมีความสมบูรณ์และแข็งแรงมากขึ้น [37]

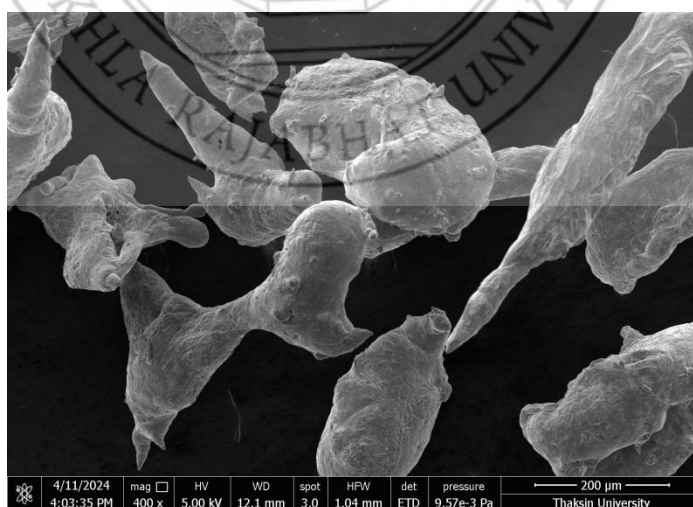
ขนาดอนุภาคของวัสดุประสานขนาด 100 ไมโครเมตร โดยใช้เครื่องมือจุลทรรศน์อิเล็กตรอนส่องกราด (SEM) สามารถอธิบายลักษณะทางกายภาพ อนุภาควัสดุประสานในภาพมีรูปร่างไม่สมบูรณ์บางส่วน โดยมีลักษณะเป็นส่วนโค้งหรือลูกกลมที่ไม่สมบูรณ์ ซึ่งแสดงให้เห็นถึงการหลอมเหลวของวัสดุในกระบวนการเชื่อมที่ไม่สม่ำเสมอ อนุภาคหลากหลายรูปร่างทั้งกลมและแบน ซึ่งจะส่งผลต่อกระบวนการเชื่อมโดยการแพร่กระจายของอะตอมระหว่างวัสดุประสานและวัสดุหลักที่ไม่สมบูรณ์ ความกลมของอนุภาคสามารถคำนวณได้จากสูตร Circularity ซึ่งเป็นอัตราส่วนระหว่างพื้นที่ (Area) ของอนุภาคและเส้นรอบวง (Perimeter) โดยค่านี้จะอยู่ในช่วง 0 ถึง 1 ซึ่งค่าความกลมที่ใกล้ 1 หมายความว่าอนุภาคมีรูปร่างกลมสมบูรณ์ การเรียงตัวของอนุภาคในภาพดูเหมือนจะไม่สม่ำเสมอ บางส่วนอาจมีการกองตัวและบางอนุภาคอาจมีการสัมผัสกัน ทำให้เกิดผลกระทบต่อการแพร่กระจายของอะตอมระหว่างวัสดุประสานและวัสดุหลักที่ไม่สม่ำเสมอ



ภาพที่ 4.14 ขนาดอนุภาคของวัสดุประสานขนาด 100 ไมโครเมตร

การจัดเรียงตัวแบบไม่สม่ำเสมอในอนุภาคอาจส่งผลให้รอยเชื่อมมีความแข็งแรงลดลงในบางจุด ขณะที่อนุภาคที่มีรูปทรงไม่สมบูรณ์อาจมีผลต่อการสร้างสารประกอบระหว่างโลหะ (Intermetallic Compounds) ที่มีความแข็งแรงต่ำกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุที่มีอนุภาคทรงกลมสมบูรณ์ โดยวัสดุประสานขนาด 100 ไมโครเมตร มีค่าความกลมที่ 0.733 ดังแสดงในภาพที่ 4.14

ขนาดอนุภาคของวัสดุประสานขนาด 300 ไมโครเมตร ซึ่งถ่ายภาพจากเครื่องอิเล็กตรอนแบบส่องกราดมีลักษณะทางกายภาพของอนุภาควัสดุประสานสามารถอธิบายได้ว่า อนุภาควัสดุประสานมีรูปร่างที่ไม่สมบูรณ์หลายรูปแบบ โดยส่วนใหญ่มีลักษณะเป็นอนุภาคที่มีความยาวและแหลม ซึ่งแสดงถึงการแตกหักของวัสดุในกระบวนการผลิตที่ไม่สมบูรณ์ ลักษณะเหล่านี้อาจบ่งชี้ถึงการหลอมเหลวที่ไม่สมบูรณ์และการจัดเรียงตัวที่ไม่เป็นระเบียบ ส่งผลให้ลักษณะการแพร่กระจายของอะตอมในกระบวนการเชื่อมอาจไม่สม่ำเสมอ สำหรับการวัดสัดส่วนความกลม (Circularity) ของอนุภาควัสดุประสาน สามารถคำนวณได้จากสูตร $Circularity = (4 \pi \times Area) / Perimeter^2$ ซึ่งในกรณีนี้เนื่องจากภาพไม่ได้ให้ค่าของพื้นที่ (Area) และเส้นรอบวง (Perimeter) การวิเคราะห์ลักษณะการเรียงตัวจากภาพพบว่าอนุภาคมีการกระจายตัวที่ไม่สม่ำเสมอ [38] โดยบางอนุภาคมีการเรียงตัวที่ใกล้ชิดกัน ขณะที่บางอนุภาคอยู่ห่างกัน ซึ่งอาจส่งผลต่อการแพร่กระจายของอะตอมระหว่างวัสดุประสานและวัสดุหลักในกระบวนการเชื่อม นอกจากนี้ การเรียงตัวที่ไม่สม่ำเสมออาจทำให้เกิดจุดอ่อนในรอยเชื่อม ซึ่งส่งผลต่อความแข็งแรงของรอยเชื่อมที่ลดลง สรุปได้ว่า อนุภาควัสดุประสานขนาด 300 ไมโครเมตรในภาพนี้มีลักษณะการจัดเรียงตัวที่ไม่สมบูรณ์ โดยส่วนใหญ่มีรูปร่างที่ยาวและแหลม ความไม่สม่ำเสมอในการกระจายตัวของอนุภาคอาจส่งผลต่อกระบวนการเชื่อม วัสดุประสานขนาด 300 ไมโครเมตร มีค่าความกลมที่ 0.619 ดังแสดงในภาพที่ 4.15



ภาพที่ 4.15 ขนาดอนุภาคของวัสดุประสานขนาด 300 ไมโครเมตร

ขนาดอนุภาควัสดุประสานขนาด 500 ไมโครเมตร สามารถอธิบายลักษณะทางกายภาพได้ว่า อนุภาควัสดุประสานมีรูปร่างที่ไม่สมบูรณ์และค่อนข้างแหลม โดยบางอนุภาคมีลักษณะเป็นเส้นยาวหรือปลายแหลม ซึ่งแสดงถึงการแตกหักที่ไม่สมบูรณ์และกระบวนการผลิตที่อาจเกิดจากการหลอมเหลวที่ไม่เสถียรหรือการจัดเรียงตัวที่ไม่เป็นระเบียบ การปรากฏของอนุภาคเหล่านี้บ่งชี้ถึงความไม่สมบูรณ์ในการผลิต ซึ่งอาจส่งผลให้การกระจายตัวของวัสดุประสานในระหว่างกระบวนการเชื่อมไม่ การวิเคราะห์ลักษณะการเรียงตัวพบว่าอนุภาคมีการเรียงตัวที่ไม่สม่ำเสมอ โดยบางอนุภาคมีการสัมผัสกันอย่างใกล้ชิด ขณะที่บางอนุภาคอยู่ห่างกัน การเรียงตัวที่ไม่สม่ำเสมอนี้อาจส่งผลต่อการแพร่กระจายของอะตอมระหว่างวัสดุประสานและวัสดุหลัก ซึ่งอาจทำให้กระบวนการเชื่อมมีความไม่เสถียรและไม่สามารถสร้างการเชื่อมที่สมบูรณ์ได้ นอกจากนี้ การละลายตัวของวัสดุประสานอาจไม่สมบูรณ์เมื่อเทียบกับอนุภาคที่มีรูปร่างกลมสมบูรณ์ ซึ่งอาจทำให้การแพร่กระจายของอะตอมในกระบวนการเชื่อมไม่เกิดประสิทธิภาพสูงสุด สรุปคืออนุภาควัสดุประสานขนาด 500 ไมโครเมตรนี้มีลักษณะการจัดเรียงตัวที่ไม่สมบูรณ์ ซึ่งอาจทำให้กระบวนการเชื่อมมีข้อบกพร่องและความแข็งแรงของรอยเชื่อมลดลง วัสดุประสานขนาด 300 ไมโครเมตร มีค่าความกลมที่ 0.509 ดังแสดงในภาพที่ 4.16

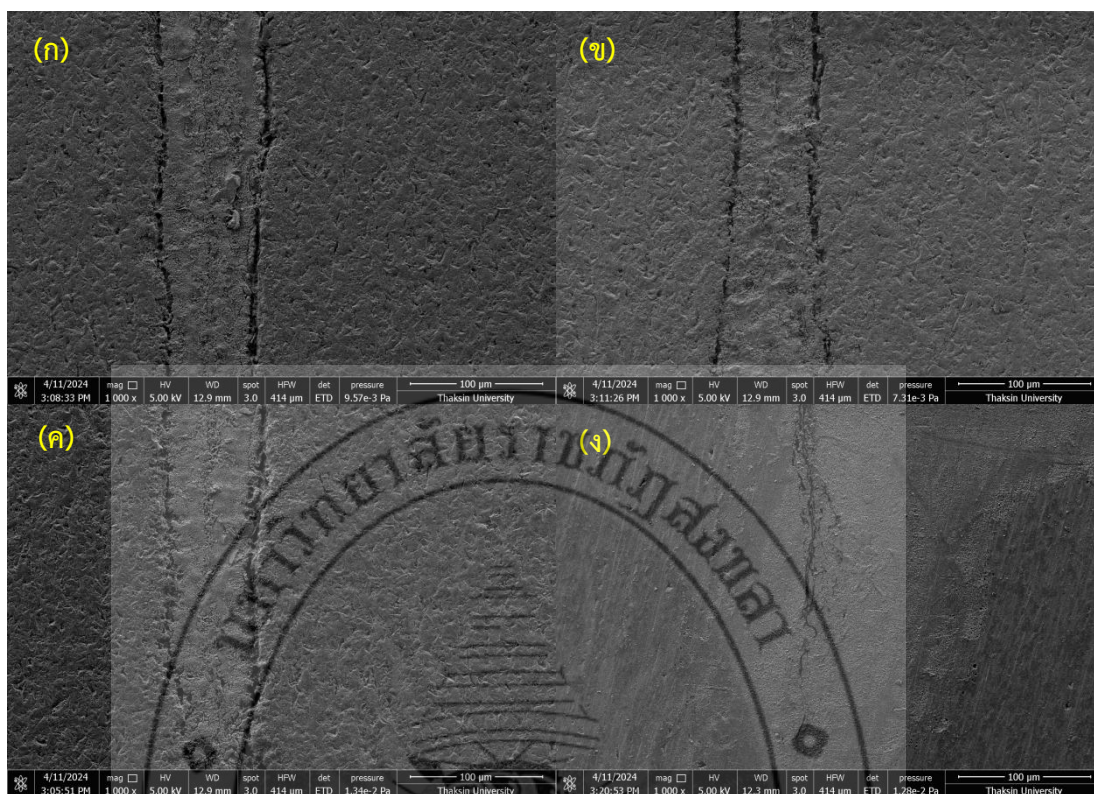


ภาพที่ 4.16 ขนาดอนุภาคของวัสดุประสานขนาด 500 ไมโครเมตร

สำหรับการตรวจสอบรอยแนวเชื่อม พบว่ามีการกระจายตัวของวัสดุประสานออกไปด้านข้างรอยเชื่อม สังเกตได้จากจุดที่เกิดขึ้นจากรอยเชื่อม การประสานตัวของอะลูมิเนียมหล่อกึ่งแข็ง เกรด 6063 กับวัสดุประสานจะเห็นได้ว่าประสานกันดี ระหว่างอะลูมิเนียมหล่อกึ่งแข็ง เกรด 6063 กับวัสดุประสาน โดยไม่มีช่องว่าง ทำให้ส่งผลต่อความแข็งแรงในการทดสอบคุณสมบัติทางกลที่ดี อย่างไรก็ตาม

ตามเมื่อประเมินบริเวณรอยเชื่อมด้วยกล้องอิเล็กทรอนิกส์แบบส่องกราดแล้วพบว่าลักษณะโครงสร้างบางส่วนยังมีความสมบูรณ์ของรอยเชื่อมที่ต่างกันไปตามตัวแปรในการทดลอง

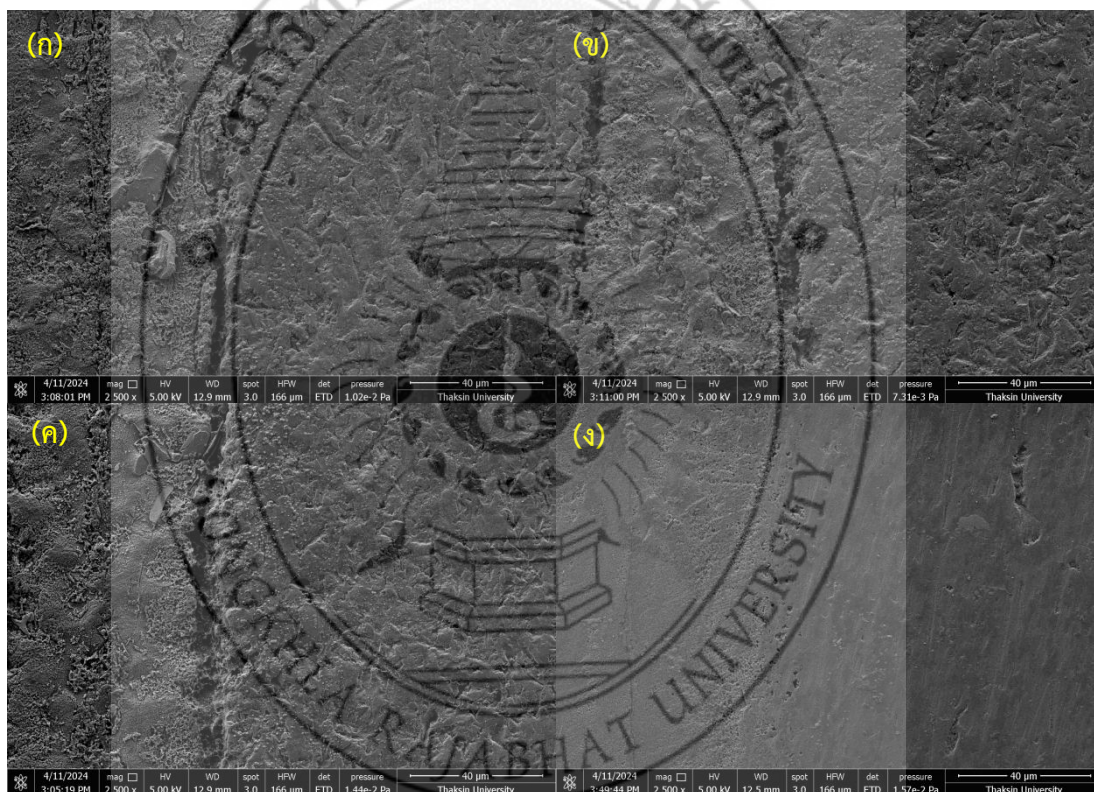
จากภาพที่ 4.17 แสดงลักษณะรอยต่อของชิ้นงานหลังการเชื่อมของขนาดอนุภาค 100 ไมโครเมตร จากการเปรียบเทียบลักษณะรอยต่อและวิเคราะห์ข้อบกพร่อง (defect) พบว่าภาพที่ 4.17 (ก และ ข) ที่อุณหภูมิเชื่อม 450 องศาเซลเซียส เวลาในการเชื่อม 90 และ 120 นาที พบว่าในเวลาเชื่อม 120 นาที (ภาพภาพที่ 4.17 ข) การเชื่อมมีความสมบูรณ์มากขึ้น โดยไม่มีการเกิดช่องว่างหรือรอยแตกที่เห็นได้ชัดเจน ขณะที่ในภาพภาพที่ 4.17 (ก) ที่ใช้เวลาในการเชื่อม 90 นาที พบว่ารอยต่อยังไม่สมบูรณ์และมีช่องว่างระหว่างวัสดุประสานและวัสดุหลักที่เกิดจากการแพร่กระจายของอะตอมที่ไม่ทั่วถึง ซึ่งทำให้รอยเชื่อมมีจุดอ่อน ส่งผลให้การเชื่อมไม่แข็งแรง ส่วนในภาพที่ 4.17 (ค และ ง) ที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เวลาในการเชื่อม 90 และ 120 นาที พบว่าการเชื่อมสมบูรณ์มากขึ้น โดยไม่มีช่องว่างหรือรอยแตกที่เห็นได้ชัดเจน การแพร่กระจายของอะตอมในอุณหภูมิที่สูงขึ้นทำให้รอยเชื่อมมีความแข็งแรงและสมบูรณ์มากขึ้น โดยเฉพาะในการเชื่อมที่ใช้เวลา 120 นาที ภาพที่ 4.17 (ง) ซึ่งแสดงถึงความเสถียรและความสมบูรณ์ของรอยเชื่อมที่ดีกว่าเมื่อเทียบกับการเชื่อมในเวลา 90 นาที ภาพที่ 4.17 (ค) การวิเคราะห์ข้อบกพร่องพบว่าในภาพที่ใช้เวลาเชื่อม 90 นาทีทั้งที่อุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส และ 500 องศาเซลเซียส ยังพบช่องว่างและความไม่สมบูรณ์ที่เกิดจากการแพร่กระจายของอะตอมที่ไม่ทั่วถึง ซึ่งอาจส่งผลให้ความแข็งแรงของรอยเชื่อมลดลง ส่วนการเชื่อมที่ใช้เวลา 120 นาที และอุณหภูมิสูงขึ้นจะเห็นการกระจายตัวของวัสดุประสานที่ดีขึ้น ทำให้รอยเชื่อมมีความสมบูรณ์และแข็งแรงขึ้น โดยไม่มีข้อบกพร่องที่สำคัญ สรุปได้ว่าการใช้เวลาในการเชื่อมที่ยาวนานและอุณหภูมิที่สูงขึ้นช่วยให้กระบวนการเชื่อมมีประสิทธิภาพมากขึ้น การกระจายตัวของวัสดุประสานดีขึ้น และการเกิดข้อบกพร่องในรอยเชื่อมน้อยลง ส่งผลให้รอยเชื่อมมีความแข็งแรงและความสมบูรณ์สูงขึ้น อย่างไรก็ตามการวิเคราะห์ลักษณะรอยต่อของชิ้นงานหลังการเชื่อม จะวิเคราะห์จากตัวแปรบางส่วน โดยวิเคราะห์จากขนาดอนุภาค 100 ไมโครเมตร เนื่องจากขนาดอนุภาคที่เล็กส่งผลต่อสมบัติทางกลที่ดีกว่าขนาดอนุภาคขนาด 300 และ 500 ไมโครเมตร ผลของขนาดอนุภาคในการเชื่อมโดยการแพร่แบบเฟสของเหลวส่งผลชัดเจนต่อการยึดติดของชิ้นงานหลังการเชื่อม โดยส่งผลต่อสมบัติทางกลอย่างมีนัยสำคัญ [39]



ภาพที่ 4.17 บริเวณรอยเชื่อมจากการถ่ายด้วยกล้องอิเล็กตรอนแบบส่องกราดกำลังขยาย 1000 เท่า

จากภาพที่ 4.18 แสดงลักษณะรอยต่อของชิ้นงานหลังการเชื่อมของขนาดอนุภาค 100 ไมโครเมตร โดยถ่ายด้วยกล้องอิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) กำลังขยาย 2500 เท่า สามารถเปรียบเทียบและวิเคราะห์ลักษณะรอยเชื่อมและจุดบกพร่อง (defect) จากภาพที่ 4.18 (ก และ ข) ของตัวแปรอุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส เวลาในการเชื่อม 90 และ 120 นาที ตามลำดับ โดยในภาพภาพที่ 4.18 (ก) พบว่ารอยเชื่อมยังไม่สมบูรณ์ โดยมีช่องว่างเล็กน้อยระหว่างวัสดุประสานและวัสดุหลัก (voids) ซึ่งเกิดจากการแพร่กระจายของอะตอมที่ไม่ทั่วถึง ทำให้เกิดการหลอมเหลวไม่สมบูรณ์ นอกจากนี้ยังเห็นรอยแตกที่บางจุดซึ่งอาจส่งผลให้รอยเชื่อมมีความแข็งแรงต่ำลง ในภาพที่ 4.18 (ข) จะเห็นได้ว่ารอยเชื่อมมีลักษณะที่ดีขึ้น โดยไม่มีช่องว่างและการแตกหัก แต่ยังมีการกระจายตัวที่ไม่สมบูรณ์บ้าง ซึ่งส่งผลให้เกิดข้อบกพร่องเล็กน้อย สำหรับภาพที่ 4.18 (ค และ ง) จากตัวแปรเชื่อมที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เวลาในการเชื่อมที่ 90 และ 120 นาที พบว่าที่เวลาในการเชื่อม 90 นาที รอยเชื่อมมีลักษณะที่ดีขึ้นและมีความสมบูรณ์มากขึ้นเมื่อเทียบกับที่อุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส แต่ยังพบจุดบกพร่องเป็นรูพรุนเล็กน้อยบริเวณขอบรอยเชื่อม ซึ่งอาจเกิดจากการสะสมของวัสดุประสานที่ไม่สม่ำเสมอ และในภาพที่ 4.18 (ง) พบว่ารอยเชื่อมสมบูรณ์ที่สุด ไม่มีช่องว่างหรือรอยแตกและความกระจายตัวของวัสดุประสานดีมาก การเกิดสารประกอบระหว่างโลหะที่เสถียรช่วยเพิ่ม

ความแข็งแรงและลดข้อบกพร่อง จุดบกพร่องที่พบในการทดลอง คือ ช่องว่าง (Void) ซึ่งมักเกิดจากการแพร่กระจายของอะตอมที่ไม่สมบูรณ์ในกระบวนการเชื่อมที่อุณหภูมิและเวลาสั้นเกินไป หรือการสะสมของวัสดุประสานที่ไม่สม่ำเสมอ นอกจากนี้ยังพบรอยแตก (Cracks) ซึ่งเกิดจากการหดตัวของวัสดุขณะเย็นตัว หรือการเค้นที่เกิดขึ้นในระหว่างกระบวนการเชื่อม ซึ่งจากการเปรียบเทียบระหว่างเวลาการเชื่อมที่แตกต่างกันและอุณหภูมิที่สูงขึ้น การเชื่อมที่มีเวลา 120 นาที และอุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส ภาพที่ 4.18 (ง) ให้ผลลัพธ์ที่ดีที่สุด โดยรอยเชื่อมมีความสมบูรณ์ ไม่มีข้อบกพร่องที่สำคัญและแสดงถึงการแพร่กระจายของอะตอมที่ดี ทำให้อรอยเชื่อมมีความแข็งแรงและเสถียรมากที่สุด เมื่อเปรียบเทียบกับตัวแปรอื่น ๆ [40]



ภาพที่ 4.18 บริเวณรอยเชื่อมจากการถ่ายด้วยกล้องอิเล็กตรอนแบบส่องกราดกำลังขยาย 2500 เท่า

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัย อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ

จากการศึกษาการเชื่อมแพร่ผ่านเฟสของเหลวอะลูมิเนียมหล่อผสมกึ่งของแข็งเกรด SSM 6063 โดยใช้ผงโลหะสังกะสีเกรด ZA27 ขนาดอนุภาค 100, 300 และ 500 ไมโครเมตรเป็นวัสดุประสาน สามารถสรุปผลการทดลองได้ดังนี้

5.1 สรุปผลการวิจัย

5.1 ลักษณะทางกายภาพของชิ้นงานเชื่อมแพร่ผ่านเฟสของเหลว แสดงให้เห็นว่าการเชื่อมที่ใช้ผงโลหะสังกะสีเกรด ZA27 ขนาดอนุภาค 100 ไมโครเมตร รอยเชื่อมมีความสม่ำเสมอ เชื่อมติดกันดี ไม่มีรูพรุนหรือรอยแตก โดยการควบคุมอุณหภูมิและเวลาทำให้การแพร่กระจายของอะตอมเกิดขึ้นอย่างมีประสิทธิภาพ ส่งผลให้รอยเชื่อมมีความแข็งแรงสูง ขนาดอนุภาค 300 ไมโครเมตร ทำให้การแพร่กระจายของอะตอมช้าลง ทำให้อายุเชื่อมมีความหยาบและแข็งแรงลดลงเล็กน้อย ในขณะที่ขนาดอนุภาค 500 ไมโครเมตร ทำให้เกิดการสะสมวัสดุประสานที่ไม่สม่ำเสมอและมีการบิดเบี้ยว ส่งผลให้ความแข็งแรงลดลงเมื่อเทียบกับขนาดอนุภาคที่เล็กกว่า

5.2 วิเคราะห์การประสานติดกันของผิวหน้ารอยเชื่อม พบว่าการใช้ผงโลหะสังกะสีขนาดอนุภาค 100 ไมโครเมตรที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส ผิวรอยเชื่อมมีความเรียบเนียนและเชื่อมติดกันได้ดี การแพร่กระจายของอะตอมระหว่างวัสดุประสานและวัสดุหลักเกิดขึ้นอย่างมีประสิทธิภาพ ในขนาดอนุภาค 300 ไมโครเมตร พบว่าผิวรอยเชื่อมมีลักษณะขรุขระ เนื่องจากการแพร่กระจายของอะตอมไม่สมบูรณ์ ขนาดอนุภาค 500 ไมโครเมตร ทำให้อายุเชื่อมมีลักษณะหยาบและการสะสมวัสดุประสานไม่สม่ำเสมอ ส่งผลให้เกิดการโก่งงอและการสะสมโลหะที่ไม่สมดุล

5.3 ผลการทดสอบความแข็งแรงดึงแสดงให้เห็นว่า ขนาดอนุภาค 100 ไมโครเมตร ที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เวลา 120 นาที ให้ค่าความแข็งแรงดึงสูงสุดที่ 22.31 MPa ขนาดอนุภาคที่ใหญ่กว่า (300 และ 500 ไมโครเมตร) มีค่าความแข็งแรงดึงต่ำกว่า เนื่องจากการแพร่กระจายของอะตอมช้ากว่า และสะสมวัสดุประสานที่ไม่สม่ำเสมอ ส่งผลให้ความแข็งแรงของรอยเชื่อมลดลง การแพร่กระจายของอะตอมที่มีประสิทธิภาพสูงในขนาดอนุภาคที่เล็กส่งผลให้รอยเชื่อมมีความแข็งแรงสูงและทนทานต่อแรงดึงได้ดี

5.4 ผลการทดสอบความแข็งแรงดึงแสดงให้เห็นว่า ขนาดอนุภาค 500 ไมโครเมตร มีค่าความแข็งแรงที่สม่ำเสมอในตำแหน่งต่าง ๆ ของรอยเชื่อม และใกล้เคียงกับความแข็งแรงของวัสดุฐาน ขนาดอนุภาค 100 ไมโครเมตร แสดงให้เห็นความแข็งแรงที่สูงขึ้นและการกระจายความแข็งแรงที่ดีขึ้นในทุกตำแหน่งของรอย

เชื่อม ซึ่งแสดงให้เห็นว่าขนาดอนุภาคที่เล็กช่วยเพิ่มความแข็งแรงและความสมดุลของโครงสร้างในรอยเชื่อม

5.5 การตรวจสอบโครงสร้างทางโลหะวิทยาพบว่า ขนาดอนุภาค 100 ไมโครเมตรทำให้การแพร่กระจายของอะตอมเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วและทั่วถึง ส่งผลให้โครงสร้างจุลภาคของรอยเชื่อมมีความสมบูรณ์และแข็งแรง ขนาดอนุภาคที่ใหญ่กว่า (300 และ 500 ไมโครเมตร) ทำให้การแพร่กระจายของอะตอมช้าลง ส่งผลให้โครงสร้างจุลภาคหยาบและไม่สมบูรณ์ ซึ่งทำให้อายุเชื่อมมีความแข็งแรงลดลง

5.2 อภิปรายผล

จากผลการทดลองพบว่าชิ้นงานที่เชื่อมด้วยผงโลหะสังกะสีขนาดอนุภาค 100 ไมโครเมตรมีลักษณะรอยเชื่อมที่สมบูรณ์และสม่ำเสมอทั้งที่อุณหภูมิ 450 และ 500 องศาเซลเซียส รวมถึงเวลาเชื่อมที่ 90 และ 120 นาที รอยเชื่อมไม่มีรูพรุนหรือรอยแตก และการกระจายตัวของวัสดุประสานเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพ ส่งผลให้อายุเชื่อมมีความแข็งแรงสูง ซึ่งแสดงถึงการควบคุมพารามิเตอร์การเชื่อมได้อย่างเหมาะสมและการแพร่กระจายของอะตอมระหว่างวัสดุประสานและวัสดุหลักอย่างสมบูรณ์ การใช้ขนาดอนุภาค 100 ไมโครเมตร ช่วยให้การละลายตัวและการแพร่กระจายของอะตอมเป็นไปได้ดี ส่งผลให้อายุเชื่อมมีความแข็งแรงและโครงสร้างละเอียด นอกจากนี้การทดสอบความแข็งแรงดึงยังพบว่า การใช้วัสดุประสานขนาดอนุภาค 100 ไมโครเมตร ที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียสและเวลา 120 นาที ให้ค่าความแข็งแรงดึงสูงสุดที่ 22.31 MPa ซึ่งสูงกว่าขนาดอนุภาคที่ใหญ่กว่า ขณะที่การทดสอบความแข็งแรงพบว่า ความแข็งแรงของชิ้นงานที่เชื่อมด้วยวัสดุประสานขนาดอนุภาค 500 ไมโครเมตร มีความแข็งแรงที่และใกล้เคียงกับวัสดุฐาน การตรวจสอบโครงสร้างทางโลหะวิทยายังแสดงให้เห็นว่า การใช้ผงโลหะสังกะสีขนาดอนุภาค 100 ไมโครเมตรช่วยให้โครงสร้างจุลภาคของรอยเชื่อมมีความสมบูรณ์ และการแพร่กระจายของวัสดุประสานระหว่างวัสดุหลักและวัสดุประสานเป็นไปอย่างสม่ำเสมอ ทำให้อายุเชื่อมมีความแข็งแรงและทนทานสูง ดังนั้น การใช้วัสดุประสานขนาดอนุภาคเล็ก (100 ไมโครเมตร) ในกระบวนการเชื่อมแพร่ผ่านเฟสของเหลวจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการเชื่อม และให้ผลลัพธ์ที่ดีกว่าในการสร้างรอยเชื่อมที่แข็งแรงและสมบูรณ์

5.3 ข้อเสนอแนะในการนำผลการวิจัยไปใช้

จากผลการวิจัยนี้ สามารถนำไปใช้งานในภาคอุตสาหกรรม โดยการเลือกขนาดอนุภาควัสดุประสานที่เหมาะสมมีผลอย่างมากต่อคุณสมบัติของรอยเชื่อม การใช้ผงโลหะสังกะสีขนาดอนุภาค 100 ไมโครเมตร ช่วยให้การแพร่กระจายของอะตอมทำได้มีประสิทธิภาพ ส่งผลให้รอยเชื่อมมีความแข็งแรงและความสมบูรณ์มากขึ้น ซึ่งเหมาะสมสำหรับอุตสาหกรรมที่ต้องการความทนทานสูง เช่น อุตสาหกรรมยานยนต์และอิเล็กทรอนิกส์ นอกจากนี้ การควบคุมพารามิเตอร์การเชื่อม เช่น อุณหภูมิและเวลาเชื่อมเป็นสิ่งสำคัญ เพื่อให้การแพร่กระจายของอะตอมระหว่างวัสดุประสานและวัสดุหลักเป็นไปอย่างสม่ำเสมอและไม่มีข้อบกพร่อง การศึกษาและพัฒนาเทคนิคการเชื่อมที่ดียิ่งขึ้น รวมถึงการเลือกขนาดอนุภาควัสดุประสานที่เหมาะสม จะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตและลดต้นทุนในอุตสาหกรรม นอกจากนี้ การนำผลการวิจัยนี้ไปประยุกต์ใช้ในการพัฒนาวัสดุใหม่ ๆ ที่ต้องการคุณสมบัติการเชื่อมที่มีประสิทธิภาพสูง และทนทานต่อสภาวะการใช้งานที่มีความเค้นสูงจะเป็นประโยชน์ต่อการพัฒนาผลิตภัณฑ์ในอนาคต

5.4 ข้อเสนอแนะในการทำวิจัยครั้งต่อไป

สำหรับการวิจัยครั้งต่อไปที่น่าสนใจในงานนี้ ควรเน้นการทดลองกับขนาดอนุภาควัสดุประสานที่หลากหลาย ทั้งในแง่ของปริมาณและประเภทวัสดุประสานที่แตกต่างกัน รวมถึงการทดสอบในหลายอุณหภูมิและเวลาที่แตกต่างกัน เพื่อให้ครอบคลุมการประยุกต์ใช้ในสภาวะต่างๆ ของภาคอุตสาหกรรม นอกจากนี้ ควรศึกษาและพัฒนากระบวนการเชื่อมโดยการศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับกลไกการแพร่กระจายของอะตอมในระหว่างกระบวนการเชื่อม เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการควบคุมการหลอมเหลวและหลีกเลี่ยงปัญหาที่เกิดจากการแพร่กระจายที่ไม่ทั่วถึง ซึ่งอาจส่งผลกระทบต่อความแข็งแรงของรอยเชื่อม รวมถึงการทดสอบคุณสมบัติทางกลของรอยเชื่อมในสภาวะการใช้งานจริง โดยเฉพาะในสภาวะที่มีความเค้นสูงหรืออุณหภูมิที่แปรปรวน เพื่อประเมินความทนทานของรอยเชื่อมในระยะยาว การพัฒนาวัสดุประสานที่สามารถใช้งานในอุณหภูมิสูงและทนต่อสภาวะแวดล้อมที่หลากหลายก็เป็นอีกหนึ่งหัวข้อที่สำคัญในการวิจัยครั้งต่อไป เพื่อปรับปรุงสมบัติการเชื่อมและเพิ่มประสิทธิภาพของวัสดุ และสุดท้าย ควรศึกษาเทคนิคการเชื่อมแบบอื่นๆ เช่น การใช้การเชื่อมด้วยเลเซอร์หรือการเชื่อมด้วยอาร์ค เพื่อให้ได้ข้อสรุปที่มีความครอบคลุมและประสิทธิภาพดีกว่าในภาคอุตสาหกรรม

บรรณานุกรม

- [1] Nami, H.; Halvae, A.; Adgi, H. Transient liquid phase diffusion bonding of Al/Mg₂Si metal matrix composite. *Mater. Des.* 2011, 32, 3957–3965.
- [2] 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.
- [3] Linert, T.J. (2005) “Friction Stir Welding Studies on Mild Steel”, *Welding Journal*, Vol.83, pp. 1S-9S.
- [4] Zygmunt Mikno. (2020) “Resistance Welding of Aluminium Alloys with an Electromechanical Electrode Force System”, *Aluminium Alloys*. pp. 1-25.
- [5] Chaiyoot Meengam, Prapas Muangjunburee and Suppachai Chainarong. (2014) “Investigation on Mechanical Properties and Microstructure of SSM 356-T6 Aluminium Alloy by Diffusion Bonding” *Advanced Materials Research*, Vol.881-883 pp. 1301-1306.
- [6] Donatus, U. and et al. (2019) “Macro and microgalvanic interactions in friction stir weldment of AA2198-T851 alloy”, *Journal of Materials Research and Technology*. 8(6), pp. 6209–6222.
- [7] A.A Al-Filfily, A.S Al-Adili and M.H Sar. (2020) “Strength of resistance spot welding of aluminum alloy AA6061 to carbon steel using different filler materials”, *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*. 881: pp. 1–9.
- [8] Yongkang Liu, Guofeng Wang, Yuqing Chen, Qingxin Kang, Shuyi Luo, Zhenlun Li, Xunhu Xu, Qing Liu and Xiaochong Sui. (2022) “Air atmosphere diffusion bonding of Al–Mg–Li alloy using Cu nano-coating interlayer: Microstructural characterization and formation mechanisms” *Materials & Design*, 215, pp. 1–14.
- [9] Kenevisi, M.S.; Mousavi Khoie, S.M.; Alaei, M. Microstructural evaluation and mechanical properties of the diffusion bonded Al/Ti alloys joint. *Mech. Mater.* 2013, 64, 69–75.
- [10] เจษฎา วรรณสินธุ์ และคณะ (2549) เทคโนโลยีการหล่ออะลูมิเนียมไดคาสติงแบบกึ่งของแข็ง การประชุมวิชาการงานหล่อไทย ครั้งที่ 3 สงขลา, ประเทศไทย, หน้า 1-12

- [11] Wannasin, J. and et al. (2010) “Research and development of gas induced semi-solid process for industrial applications”, Transactions of Nonferrous Metals Society of China. 20(3), pp. s1010-s1015.
- [12] Thanabumrungskul, S. and et al. (2010) “Industrial development of gas induced semi-solid process”, Transactions of Nonferrous Metals Society of China. 20(3), pp. s1016-s1021.
- [13] Stefan Habisch and et al. (2018) “The Effect of Interlayer Materials on the Joint Properties of Diffusion-Bonded Aluminium and Magnesium”, Metals. 8(138), pp. 2-12.
- [14] Gullino, A., Matteis, P. and D’Aiuto, F. (2019) “Review of Aluminum-to-Steel Welding Technologies for Car-Body Applications”, Metals. 9(315), pp. 1-28.
- [15] Zhu, Y.h. General rule of phase decomposition in Zn-Al based alloys (II) on effects of external stresses on phase transformation. Mater. Trans. 2004, 45, 3083–3097.
- [16] Montgomery, D. C. Designing and analysis of experiments. 5th ed. New York: John Wiley & Sons Inc., 2000.
- [17] เจนณรงค์ นาคเทวัญ (2555) “การเชื่อมเสียดทานแบบกวนอะลูมิเนียมกึ่งของแข็ง เกรด 7075” วิทยานิพนธ์ สาขาวิชาวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
- [18] ชัยยุทธ มิ่งาม (2555) การเชื่อมอะลูมิเนียมผสมหล่อกึ่งของแข็งโดยการแพร่ วิทยานิพนธ์ สาขาวิชาวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
- [19] เดช เหมือนขาว ยงยุทธ ดุลยกุล และชัยยุทธ มิ่งาม (2556) “ศึกษาโครงสร้างจุลภาคและสมบัติทางกลของทองเหลืองโดยกระบวนการเชื่อมแพร่” สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย สงขลา
- [20] Sunwoo, A. & Lum, R. (1995) “Superplastic Deformation Enhanced Diffusion Bonding of Aluminum alloy 7475” Scripta Metallurgica et Materialia, Vol.33(4), pp. 639-644.
- [21] Muratoglu M Yilmaz, O. and Aksoy M. (2006) “Investigation on Diffusion Bonding Characteristics of Aluminum Metal Matrix Composites (Al/SiCp) With Pure Aluminum for Different Heat Treatment, Journal of Materials Processing Technology, Vol.178 (1–3), pp. 211-217

- [22] Kitazono, K. Kitajima, A. Sato, E. Matsushita, J. Kuribayashi, K. (2002) "Solid-State Diffusion Bonding of Closed-Cell Aluminum Foams Materials Science and Engineering" Materials Science and Engineering A, Vol.327(2), pp. 128-132
- [23] 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.
- [24] Chaiyoot, M. Yongyuth, D. & Dech, M. (2023). Joint dissimilar diffusion bonding of SSMADC12 Al alloy to SSM 6063 Al alloy. Rajamangala University of Technology Srivijaya.
- [25] X-P. Zhang, L. Ye and Y.-W. Mai. (1999) "Investigation on diffusion bonding characteristics of SiC particulate reinforced aluminium metal matrix composites (Al/SiCp-MMC)" Composites: Part A 30, pp. 1415–1421.
- [26] Yadlapalli, R.T.; Kotapati, A.; Kandipati, R.; Balusu, S.R.; Koritala, C.S. Advancements in energy efficient GaN power devices and power modules for electric vehicle applications: A review. Int. J. Energy Res. 2021, 45, 12638–12664.
- [27] Deng, Z. Development of The Third Generation of Semiconductors with SiC and GaN as The Mainstay. Highlights Sci. Eng. Technol. 2022, 27, 436–442.
- [28] Shen, Y.A.; Lin, Y.X.; Ouyang, F.Y.; Nishikawa, H.; Tsai, M.-H. Thermomigration suppression in Sn3.5Ag solder joints by hot-end FeCoNiMn alloy. Intermetallics 2023, 154, 107821.
- [29] Qiao, Y.; Ma, H.; Yu, F.; Zhao, N. Quasi-in-situ observation on diffusion anisotropy dominated asymmetrical growth of Cu-Sn IMCs under temperature gradient. Acta Mater. 2021, 217, 117168.
- [30] Chen, C.; Suganuma, K. Microstructure and mechanical properties of sintered Ag particles with flake and spherical shape from nano to micro size. Mater. Des. 2019, 162, 311–321.
- [31] Mokhtari, O.; Nishikawa, H. Transient liquid phase bonding of Sn–Bi solder with added Cu particles. J. Mater. Sci. Mater. Electron. 2016, 27, 4232–4244.

- [32] Lis, A.; Leinenbach, C. Effect of process and service conditions on TLP-bonded components with (Ag,Ni)-Sn interlayer combinations. *J. Electron. Mater.* 2015, 44, 4576–4588.
- [33] Li, J.F.; Agyakwa, P.A.; Johnson, C.M. Interfacial reaction in Cu/Sn/Cu system during the transient liquid phase soldering process. *Acta Mater.* 2011, 59, 1198–1211.
- [34] Kang, Q.; Wang, C.; Zhou, S.; Li, G.; Lu, T.; Tian, Y.; He, P. Low-temperature Co-hydroxylated Cu/SiO₂ hybrid bonding strategy for a memory-centric chip architecture. *ACS Appl. Mater. Interfaces* 2021, 13, 38866–38876.
- [35] He, S.; Shen, Y.A.; Xiong, B.; Huo, F.; Li, J.; Ge, J.; Pan, Z.; Li, W.; Hu, C.; Nishikawa, H. Behavior of Sn-3.0 Ag-0.5 Cu solder/Cu fluxless soldering via Sn steaming under formic acid atmosphere. *J. Mater. Res. Technol.* 2022, 21, 2352–2361.
- [36] Bashir, M.N.; Haseeb, A.; Naher, S.; Ali, M.M.; Bashir, M.B.A.; Zaidi, A.A.; Jamshaid, M.; Javed, I. Effects of cobalt nanoparticle on microstructure of Sn58Bi solder joint. *J. Mater. Sci. Mater. Electron.* 2023, 34, 248.
- [37] Zhang, C.; Liu, S.; Qian, G.; Zhou, J.; Xue, F. Effect of Sb content on properties of Sn—Bi solders. *Trans. Nonferrous Met. Soc. China* 2014, 24, 184–191.
- [38] Pan, J.; Toleno, B.J.; Chou, T.-C.; Dee, W.J. The effect of reflow profile on SnPb and SnAgCu solder joint shear strength. *Solder. Surf. Mt. Technol.* 2006, 18, 48–56.
- [39] Hou, M.M.; Eagar, T.W. Low temperature transient liquid phase (LTTLP) bonding for Au/Cu and Cu/Cu interconnections. *J. Electron. Packag.* 1992, 114, 443–447.
- [40] Liu, Y.; Ren, B.; Xue, Y.; Zhou, M.; Cao, R.; Zeng, X. Improvement on the mechanical properties of eutectic Sn58Bi alloy with porous Cu addition during isothermal aging. *Mater. Res. Express* 2021, 8, 76302.

The seal of Songkhla Rajabhat University is a circular emblem. It features a central tiered stupa with a flame-like sunburst radiating from its base. Below the stupa is a circular medallion containing a Thai character, and at the bottom is a five-tiered pedestal. The entire emblem is encircled by a border containing the university's name in Thai script at the top and 'SONGKHLA RAJABHAT UNIVERSITY' in English at the bottom.

ภาคผนวก ก

การศึกษาความเป็นไปได้การเชื่อมแพร่ผ่านเฟสของเหลวด้วยเทคนิคการใช้ผงโลหะสังกะสีเป็นตัว
ประสานสำหรับเชื่อมอะลูมิเนียม



NETWORK 2024

Ubon Ratchanthani University

"Next-Gen Manufacturing:
Green and Smart Solutions for the Future"

2024

บทความฉบับสมบูรณ์ (PROCEEDING)

15 - 17 May 2024

Centara Hotel Ubon, Ubon Ratchathani

จัดทำโดย

ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี

การศึกษาความเป็นไปได้การเชื่อมแพร่ผ่านเฟสของเหลว
ด้วยเทคนิคการใช้ผงโลหะสังกะสีเป็นตัวประสานสำหรับเชื่อมอะลูมิเนียม

The Studying the Feasibility of Transient Liquid Phase Diffusion Bonding with the Technique of
using Zinc Powder Interlayer for Aluminum Alloy Welding

ยงยุทธ ดุลยกุล¹, เดช เหมือนขาว², วิทยา ศิริคุณ³, ศิวะ สิทธิพงษ์⁴, กิตติมา ศิลปษา⁵, ชัยยุทธ มิงาม⁶

^{1,2}สาขาวิชาวิศวกรรมการผลิต คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย

³สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย

⁴ห้องปฏิบัติการทดสอบทางฟิสิกส์ ศูนย์ทดสอบและมาตรวิทยา สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย

⁵สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี

⁶สาขาเทคโนโลยีการผลิต คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏสงขลา

E-mail: Chaiyoot.me@skru.ac.th*

Yongyuth Dulyakul¹, Dech Maunkhaw², Witthaya Sririkun³, Siva Sitthipong⁴, Kittima Sillapasa⁵, Chaiyoot Meengam⁶

^{1,2}Department of Production Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Srivijaya Songkhla

³Department of Production Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Srivijaya Songkhla

⁴Physical Testing Laboratory, Industrial Metrology and Testing Service Centre,

Thailand Institute of Scientific and Technological Research

⁵Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Ubon Ratchathani University

⁶Department of Production Technology, Faculty of Industrial Technology, Songkhla Rajabhat University

E-mail: Chaiyoot.me@skru.ac.th*

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาความเป็นไปได้การเชื่อมแพร่ผ่านเฟสของเหลวของเหลวอะลูมิเนียมหล่อกึ่งของแข็ง เกรด 6063 โดยใช้ผงโลหะสังกะสี เกรด ZA 27 เป็นวัสดุประสาน ตัวแปรในการเชื่อม ได้แก่ อุณหภูมิในการเชื่อม 450 และ 500 องศาเซลเซียส เวลาในการเชื่อม 90 และ 120 นาที ผงโลหะสังกะสี เกรด ZA 27 มีขนาดความโตเฉลี่ย 100 ไมโครเมตร แก๊สอาร์กอนปกคลุมงานเชื่อมที่ 4 ลิตรต่อนาที และแรงกดเชื่อม 4 MPa ผลจากการทดลองพบว่ามีความเป็นไปได้ในการศึกษานี้ ชิ้นงานหลังการเชื่อมยึดติดดี ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิเชื่อม 500 องศาเซลเซียส เวลาในการเชื่อม 90 นาที ค่าแรงดึงเฉลี่ยสูงสุด 22.31 MPa ในทางตรงกันข้ามที่อุณหภูมิเชื่อมที่ 450 เวลาการแช่ 120 นาที แรงดึงเฉลี่ยเฉลี่ยต่ำสุดที่ 10.82 MPa ตามลำดับ ลักษณะทางกายภาพชิ้นงานเชื่อมหลังจากการเชื่อมแพร่ผ่านเฟสของเหลวมีการยึดติดในทุกการทดลอง แต่มีการเสียรูปจากความร้อนในขณะเชื่อม

คำสำคัญ: การเชื่อมแพร่ผ่านเฟสของเหลว, ผงโลหะสังกะสี, อะลูมิเนียม, แรงดึง

Abstract

This research investigates the feasibility of transient liquid phase diffusion bonding of 6063 semi-solid aluminum alloy using ZA 27 zinc alloy powder as interlayer material. The welding parameters studied include temperatures of 450 and 500 degrees Celsius and welding times of 90 and 120 minutes, the average particle size of ZA 27 zinc alloy powder is 100 micrometers. The welding environment is shielded with a 4 liter per minute argon gas flow, and the welding pressure is 4 MPa. Experimental results indicate the feasibility of this study, with well-adhered welded pieces observed. The experiments show that at a welding temperature of 500 degrees Celsius and a welding time of 90 minutes, the maximum average tensile strength is 22.31 MPa. Conversely, at a welding temperature of 450 degrees Celsius and a holding time of 120 minutes, the minimum average tensile strength is 10.82 MPa. Physically, the welded pieces exhibit good adhesion in all experiments but suffer deformation from heat during welding.

Keywords: Transient Liquid Phase Diffusion Bonding, Zinc Powder, Aluminum Alloy, Tensile Strength.

1. บทนำ

ในช่วงหลายปีที่ผ่านมากรรมวิธีการเชื่อมแพร่ (Diffusion Welding) มักนำไปใช้สำหรับการนำมาเชื่อมชิ้นงานที่ซับซ้อน เชื่อมได้ยากและการเชื่อมวัสดุต่างชนิดกัน เพราะกลไกการยึดติดของโลหะเข้าด้วยกันเกิดขึ้นที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิหลอมเหลวของโลหะ (Melting Point) โดยที่โลหะยังอยู่ในสถานะของแข็ง (Solid State Welding) แต่จะตอมภายในวัสดุเกิดการแพร่ต่อกัน เมื่ออะตอมได้รับความร้อนจะเกิดพลังงานกระตุ้นจากความร้อนในขณะเชื่อมและเกิดการเคลื่อนที่ของอะตอมที่แลกเปลี่ยนระหว่างวัสดุเชื่อม ส่งผลให้วัสดุเกิดการเชื่อมติดกัน โดยกระบวนการเชื่อมแพร่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงทางโครงสร้างทางโลหะวิทยาหลังการเชื่อมและส่งผลที่ดีต่อสมบัติทางกล ซึ่งมีค่าแรงดึงหลังการเชื่อมที่ 20-70 เปอร์เซ็นต์ ของแรงดึงวัสดุเชื่อม [1] อย่างไรก็ตาม ปัจจุบันกรรมวิธีการเชื่อมแพร่ได้ศึกษาเทคนิคใหม่ ๆ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการเชื่อมและลดเวลาในการเชื่อมที่นาน การเชื่อมแพร่ผ่านเฟสของเหลว (Transient Liquid Phase Diffusion Bonding) เป็นอีกเทคนิคที่นำมาใช้ในแทนการเชื่อมแพร่แบบเดิม เนื่องจากสามารถลดเวลาในการเชื่อม เพิ่มความแข็งแรงของชิ้นงานเชื่อมได้ การเชื่อมแพร่ผ่านเฟสของเหลวใช้หลักการหลอมละลายของตัวประสาน (Binder) เป็นตัวถูกทำลายแล้วให้อะตอมของวัสดุประสานแพร่ไปยังวัสดุฐานในสถานะของเหลว (Liquid State) แต่วัสดุฐานยังอยู่ในสถานะของแข็ง การเชื่อมแพร่ผ่านเฟสของเหลวจะเกิดของเหลวในขณะเชื่อมชั่วคราว เมื่อเชื่อมชิ้นงานเสร็จ บริเวณรอยต่อ (Interlayer) จะเกิดเป็นของแข็งที่มีการผสมกันระหว่างโครงสร้างของวัสดุประสานและวัสดุฐาน [2] ตัวแปรที่สำคัญสำหรับการเชื่อมแพร่ผ่านเฟสของเหลว ได้แก่ แรงกดขณะเชื่อม (Contact Pressure) เวลาในการกดแช่ (Holding Time) อุณหภูมิในการเชื่อม (Temperature) และบรรยากาศ (Atmosphere) และชนิดของวัสดุประสาน (Binder type) ซึ่งตัวแปรเหล่านี้ส่งผลต่อสมบัติทางกลอย่างมีนัยสำคัญ [3] ในขณะที่ปัจจุบันอะลูมิเนียมถูกนำมาใช้งานในอุตสาหกรรมสูงชันอย่างต่อเนื่อง ทั้งในภาคอุตสาหกรรมอากาศยาน อุตสาหกรรมต่อเรือ อุตสาหกรรมรถไฟและอุตสาหกรรมอากาศยาน เพราะอะลูมิเนียมมีน้ำหนักเบาและมีความแข็งแรง มีความสามารถที่ดีด้านทนทานต่อการกัดกร่อน จึงถูกนำมาใช้งานอย่างแพร่หลายในภาคอุตสาหกรรม [4] อย่างไรก็ตามการเชื่อมแพร่ผ่านเฟสของเหลววัสดุกลุ่มอะลูมิเนียมมีความน่าสนใจ เนื่องจากสามารถลดปัญหาของการเกิดออกไซด์ (Oxide) ในการเชื่อม ลดเวลาในการเชื่อมนานและเป็นเทคนิคใหม่ที่น่าสนใจ [5] อย่างไรก็ตาม ชนิดของวัสดุประสานต้องมีความเหมาะสม เนื่องจากต้องสนับสนุนคุณภาพรอยเชื่อมที่ดีหลังจากการเชื่อม โดยงานวิจัยนี้ใช้ผงโลหะสังกะสีสำหรับเป็นวัสดุประสาน ซึ่งส่วนผสมสำคัญในผงโลหะสังกะสี คือ ธาตุอะลูมิเนียม (Al) ซึ่งเป็นธาตุที่ตรงกับวัสดุฐานเชื่อม ดังนั้นจึงมีความน่าจะเป็นเหมาะสมสำหรับการเชื่อมแพร่ผ่านเฟสของเหลวอะลูมิเนียม โดยใช้ผงโลหะสังกะสีเป็นตัวประสาน

จากข้อมูลและเหตุผลดังที่กล่าวมา คณะผู้วิจัยจึงได้มีความสนใจศึกษาความเป็นไปได้ของการเชื่อมแพร่ผ่านเฟสของเหลวอะลูมิเนียมโดยใช้ผงโลหะสังกะสีเป็นตัวประสาน ซึ่งผลการทดลองหลังจากการวิเคราะห์ผล จะนำเสนอต่อไป

2. วัตถุประสงค์ของการวิจัย

เพื่อศึกษาตัวแปรที่มีความเป็นไปได้ของการเชื่อมแพร่ผ่านเฟสของเหลวอะลูมิเนียมหล่อทิ้งของแข็ง เกรด 6063 ที่ส่งผลต่อสมบัติทางด้านแรงดึง

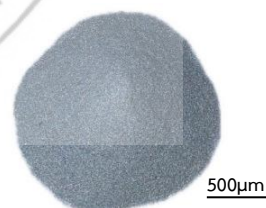
3. วิธีการดำเนินการวิจัย

3.1 วัสดุในการวิจัย

วัสดุที่นำมาใช้ในการทดลองเชื่อมเป็นอะลูมิเนียมหล่อทิ้งของแข็ง เกรด 6063 ได้จากกระบวนการหล่อขึ้นรูปด้วยเทคนิคการหล่อแบบกึ่งของแข็งด้วยวิธีการใช้แก๊สเฉื่อยผ่านแท่งกราไฟต์พูนในน้ำโลหะที่มีสถานะกึ่งแข็งกึ่งเหลว (GISS) สำหรับวัสดุวิจัยได้รับการสนับสนุนจากบริษัท กิสดิจ จำกัด โดยใช้อะลูมิเนียมหล่อทิ้งของแข็ง เกรด 6063 มีธาตุซิลิกอนเป็นธาตุผสมหลัก สำหรับส่วนผสมทางเคมีอะลูมิเนียมหล่อทิ้งของแข็ง เกรด 6063 ดังแสดงในตารางที่ 1 ในขณะที่ผงโลหะสังกะสี เกรด ZA 27 มีขนาดความโตเฉลี่ย 100 ไมโครเมตร มีธาตุอะลูมิเนียมเป็นธาตุผสมหลัก การใช้ตัวประสานผงโลหะสังกะสี เกรด ZA 27 จะนำไปชั่งน้ำหนักทดลองที่ 0.1 กรัม ดังแสดงในรูปที่ 1 และส่วนผสมทางเคมี ดังแสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 1 ส่วนผสมทางเคมีของอะลูมิเนียมหล่อทิ้งของแข็ง เกรด 6063

วัสดุ	ส่วนผสมทางเคมี (weight %)								
	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Ti	Cr	Al
6063	0.62	0.36	0.26	0.39	0.66	0.38	0.18	0.77	Bal.



รูปที่ 1 ผงโลหะสังกะสี เกรด ZA 27 ที่ขนาด 100 ไมโครเมตร

ตารางที่ 2 ส่วนผสมทางเคมีของผงโลหะสังกะสี เกรด ZA 27

วัสดุ	ส่วนผสมทางเคมี (weight %)							
	Al	Cu	Mn	Mg	Si	Ni	Fe	Zn
ZA 27	4.20	3.22	0.82	0.91	0.81	0.05	0.01	Bal.

3.2 ขั้นตอนการเชื่อมผ่านเฟสของเหลว

ชิ้นงานทดลองเตรียมเป็นรูปทรงกระบอก ขนาด $\varnothing 10$ มิลลิเมตร ความยาวชิ้นงาน 45 มิลลิเมตร จากนั้นนำชิ้นงานที่ได้ปรับพื้นผิวรอยเชื่อมด้วยการขัดด้วยกระดาษทรายเบอร์ 400 แล้วล้างทำความสะอาดบริเวณผิวหน้ารอยเชื่อมด้วยน้ำอะซิโตน (Acetones) เพื่อกำจัดคราบไขมันและสิ่งสกปรกบริเวณผิวเชื่อม เป็นเวลา 5-10 นาที ต่อจากนั้นอะลูมิเนียมหล่อกิ่งของแข็ง เกรด 6063 มาต่อกัน โดยใช้ผงโลหะสังกะสี เกรด ZA 27 ที่ผ่านการชั่งน้ำหนักทดลองที่ 0.1 กรัม มาเติมบริเวณรอยต่อ ชิ้นงานทั้งสองเชื่อมต่อกัน (Butt joint) โดยมีผงโลหะสังกะสี เกรด ZA 27 ประสานระหว่างกลางชิ้นงานเชื่อมทั้งสองและออกแรงกดคงที่ 4 MPa ปลดก๊าซอาร์กอนให้ไหลเข้าเตาอบด้วยอัตราการไหล 4 ลิตรต่อนาที ควบคุมอุณหภูมิและเวลาด้วยชุดคำสั่งของโปรแกรมแบบอัตโนมัติ ซึ่งอุณหภูมิเชื่อมที่ใช้ คือ 450 และ 500 องศาเซลเซียส เวลาที่ใช้ในการเชื่อม 90 และ 120 นาที ซึ่งเป็นตัวแปรที่ได้จากการศึกษาเบื้องต้นก่อนหน้านี้ สำหรับการทดลองทั้งหมด 3 ขั้ว โดยทดลองทั้งหมด 12 การทดลอง จากนั้นนำผลการทดลองที่ได้มาทดสอบแรงดึง การเชื่อมผ่านเฟสของเหลวอะลูมิเนียมหล่อกิ่งของแข็ง เกรด 6063 โดยใช้ผงโลหะสังกะสี เกรด ZA 27 เป็นวัสดุประสาน ดังแสดงในรูปที่ 2



รูปที่ 2 การเชื่อมผ่านเฟสของเหลวอะลูมิเนียมหล่อกิ่งของแข็ง เกรด 6063 โดยใช้ผงโลหะสังกะสี เกรด ZA 27 เป็นวัสดุประสาน

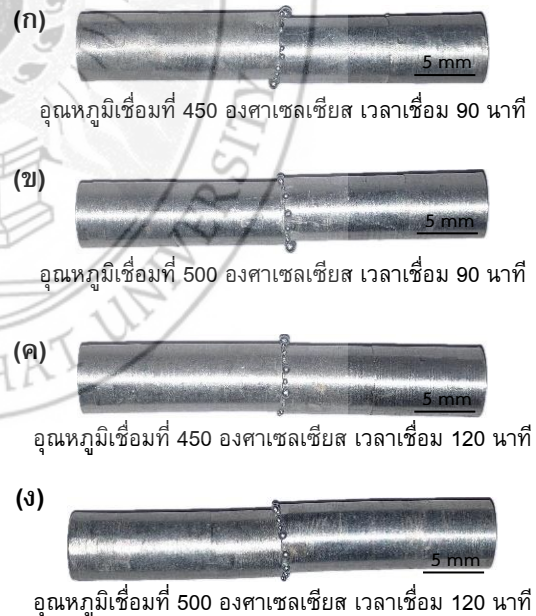
2.3 การทดสอบสมบัติด้านแรงดึง

ชิ้นงานหลังการเชื่อมผ่านเฟสของเหลวอะลูมิเนียมหล่อกิ่งของแข็ง เกรด 6063 โดยใช้ผงโลหะสังกะสี เกรด ZA 27 เป็นวัสดุประสาน จะถูกเตรียมชิ้นงานทดสอบแรงดึงตามมาตรฐาน ASTM E8M (American Society of Testing and Materials) [6] ด้วยการทดสอบที่อุณหภูมิห้อง ความเร็วในการทดสอบแรงดึงที่ 1.67×10^{-2} มิลลิเมตรต่อวินาที เครื่องทดสอบแรงดึงที่ใช้เป็นเครื่องทดสอบแรงดึง ยี่ห้อ Testometric รุ่น M500-50 kN หลังการทดสอบแรงดึง ผลที่ได้จากการทดสอบถูกประเมินความสามารถในการยึดติดและวิเคราะห์ผลต่อไป

4. ผลการวิจัย

4.1 ลักษณะทางกายภาพชิ้นงานเชื่อม

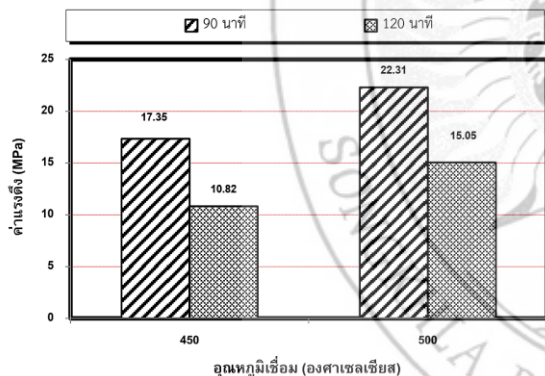
ลักษณะทางกายภาพชิ้นงานเชื่อมหลังจากกรรมวิธีการเชื่อมผ่านเฟสของเหลว พบว่ามีความเป็นได้ เนื่องจากมีการยึดติดที่ดีของชิ้นงานในทุกการทดลอง โดยทั่วไปสังเกตได้ว่า ชิ้นงานมีลักษณะเสียรูปที่แตกต่างกัน (Deformation) เนื่องจากการอุณหภูมิและเวลาที่แตกต่างกัน [7] ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิเชื่อมที่ 500 องศาเซลเซียส ชิ้นงานเริ่มเกิดการโก่งงอ (Deflection) เพราะความร้อนที่สูงส่งผลให้ผงโลหะสังกะสี เกรด ZA 27 เกิดการหลอมละลายตัว โดยจุดหลอมเหลวของผงโลหะสังกะสี เกรด ZA 27 อยู่ที่ 399 องศาเซลเซียส ทำให้ของเหลวที่เกิดจากอุณหภูมิเชื่อม แพร่ความร้อนไปยังวัสดุฐานได้สูง นำไปสู่การโก่งตัวของชิ้นงานเชื่อม [8] ดังแสดงในรูปที่ 3 (ข และ ง) สำหรับอุณหภูมิเชื่อมที่ 500 องศาเซลเซียส พบว่าลักษณะชิ้นงานเสียรูปแบบการบวมบริเวณรอยต่อ รูปที่ 3 (ก และ ค) เพราะเกิดความร้อนสูงเฉพาะบริเวณรอยต่อ อีกทั้งวัสดุฐานก็ได้รับความร้อนที่ต่ำ [9] ส่งผลให้เกิดการโก่งงอที่น้อยกว่าอุณหภูมิเชื่อมที่ 500 องศาเซลเซียส อย่างไรก็ตาม เป็นที่น่าสังเกตว่าแสดงให้เห็นว่า กลไกการเสียรูปของชิ้นงานบางส่วน เกิดจากผงโลหะสังกะสี เกรด ZA 27 หลอมละลาย ซึ่งพิจารณาได้จากการไหลตัวของของเหลวรอบ ๆ บริเวณรอยต่อเชื่อม สำหรับลักษณะทางกายภาพชิ้นงานเชื่อมทุกตัวแปร ดังแสดงในรูปที่ 3



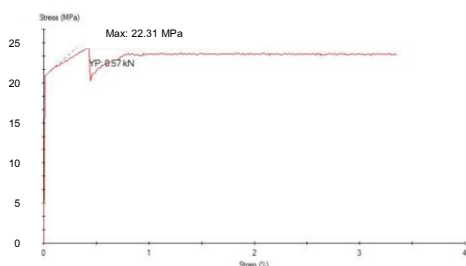
รูปที่ 3 ลักษณะทางกายภาพชิ้นงานเชื่อมผ่านเฟสของเหลว อะลูมิเนียมหล่อกิ่งของแข็ง เกรด 6063 โดยใช้ผงโลหะสังกะสี เกรด ZA 27 เป็นวัสดุประสาน

4.2 ผลการทดสอบแรงดึง

ผลการทดสอบทดสอบแรงดึงของกรรมวิธีเชื่อมแพร่ผ่านเฟสของเหลวอะลูมิเนียมหล่อกิ่งของแข็ง เกรด 6063 โดยใช้ผงโลหะสังกะสี เกรด ZA 27 เป็นวัสดุประสาน แสดงให้เห็นว่าที่เวลาทดสอบ 120 นาที ทั้งอุณหภูมิเชื่อมที่ 450 และ 500 องศาเซลเซียส ส่งผลต่อแรงดึงที่ต่ำ โดยมีค่าแรงดึงเฉลี่ยที่ 10.82 และ 15.05 MPa ตามลำดับ เนื่องจากเวลาที่นานไปส่งผลให้ชั้นงานเกิดการโก่งงอ [10] และนำไปสู่ค่าแรงดึงที่ต่ำ [11] สำหรับการเชื่อมที่เวลาทดสอบ 90 นาที มีแนวโน้มที่ดี ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าแรงดึงมีค่าที่สูงกว่าการทดลองอื่น ๆ โดยการเชื่อมที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เวลาทดสอบ 90 นาที พบว่าแรงดึงเฉลี่ยสูงสุดที่ 22.31 MPa เวลาที่เหมาะสมในการเชื่อมส่งผลให้ชั้นงานโก่งตัวน้อยและนำไปสู่ช่วงการแพร่สุดท้ายของอะตอม (Third Stage Volume Diffusion Pore Elimination) [12] ซึ่งช่วงนี้จะเกิดการแพร่ที่สมบูรณ์ ปริมาณช่องว่างจะหายไป สำหรับอุณหภูมิที่ 450 องศาเซลเซียส เวลาทดสอบ 90 นาที มีค่าแรงดึงเฉลี่ยที่ 17.35 MPa อย่างไรก็ตาม เมื่อเปรียบเทียบกับแรงดึงกับเนื้อโลหะเดิม (Base Metal) ของอะลูมิเนียมหล่อกิ่งแข็ง เกรด 6063 ซึ่งมีค่าแรงดึงเท่ากับ 149 MPa และสังกะสี เกรด ZA 27 ซึ่งมีค่าแรงดึงเท่ากับ 417 MPa แสดงให้เห็นได้ว่าค่าแรงดึงยังน้อยกว่าทุกการทดลอง (รูปที่ 4) และลักษณะของกราฟความเค้น-ความเครียด ดังแสดงในรูปที่ 5



รูปที่ 4 ผลการทดสอบแรงดึงของชิ้นงานที่ผ่านการเชื่อมแพร่ผ่านเฟสของเหลวอะลูมิเนียม



รูปที่ 5 กราฟ Stress-strain curve ของชิ้นทดสอบ

5. สรุป

5.1 ผลการทดสอบทดสอบแรงดึงเฉลี่ยสูงสุดที่เชื่อมที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เวลาทดสอบ 90 นาที พบว่าแรงดึงเฉลี่ยสูงสุดที่ 22.31 MPa ในทางตรงกันข้ามที่อุณหภูมิเชื่อมที่ 450 องศาเซลเซียส เวลาทดสอบ 120 นาที แรงดึงเฉลี่ยเฉลี่ยต่ำสุดที่ 10.82 MPa ตามลำดับ

5.2 การเชื่อมแพร่ผ่านเฟสของเหลวอะลูมิเนียมหล่อกิ่งของแข็ง เกรด 6063 โดยใช้ผงโลหะสังกะสี เกรด ZA 27 เป็นวัสดุประสาน พบว่ามีความเป็นไปได้ เนื่องจากมีการยึดติดที่ดีของชิ้นงานในทุกการทดลอง ซึ่งมีค่าแรงดึง คือ เวลาทดสอบ 90 นาที อุณหภูมิเชื่อมที่ 450 และ 500 องศาเซลเซียส ส่งผลต่อแรงดึงที่ต่ำ โดยมีค่าแรงดึงเฉลี่ยที่ 17.35 และ 22.31 MPa ในขณะที่เวลาทดสอบ 120 นาที อุณหภูมิเชื่อมที่ 450 และ 500 องศาเซลเซียส มีค่าแรงดึงเฉลี่ยที่ 10.82 และ 15.05 MPa ตามลำดับ

6. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนทุนวิจัยจากงบประมาณอุดหนุน การวิจัยจากงบประมาณกองทุนวิจัย มหาวิทยาลัยราชภัฏ สงขลา ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2566 ภายใต้สัญญาทุนเลขที่ 008/2565 ซึ่งทางคณะผู้วิจัยรู้สึกซาบซึ้งเป็นอย่างยิ่ง จึงใคร่ขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ โอกาสนี้ด้วย

เอกสารอ้างอิง

- [1] S. Venugopal, M. Seeman, R. Seetharaman, and V. Jayaseelan, 2022. "The effect of bonding process parameters on the microstructure and mechanical properties of AA5083 diffusion-bonded joints" Int. J. Lightweight Mater. Manuf, Vol. 5: 555–563.
- [2] C. Meengam, Y. Dunyakul and D. Maunkhaw. 2023. "The Liquid Fraction of ZA27 Zinc Alloy from TLP Diffusion Bonding Affecting Mechanical Properties and Microstructural Characterizations of SSC-ADC12 Aluminum Alloy". KEM, Vol. 963: 11-17.
- [3] Yongyuth Dunyakul, Chaiyoot Meengam, Dech Maunkhaw and Suppachai Chainarong. 2018. "Transient Liquid Phase Bonding of Semi-Solid Metal 7075 Aluminum Alloy Using ZA 27 Zinc Alloy Interlayer. Metals, Vol. 8: 0637.
- [4] Xiaohan You, Zhiqian Xing, Shaowei Jiang, Yao Zhu, Yuhuan Lin, Huasheng Qiu, Renjie Nie, Jiahao Yang, David Hui, Wei Chen and Yu Chen. 2024. "A review of research on aluminum alloy materials in structural engineering" DIBE. Vol. 17: 100319.

- [5] Wei Guo, Jingru Xin, Ding Hao, Yana Ma, Jiangtao Xiong, Jinglong Li, and Qinghua Feng. 2024. "Diffusion bonding of nickel-based powder metallurgy superalloy FGH98 with pure nickel interlayer" J. Mater. Res. Technol, Vol. 30: 267-282.
- [6] ASTM E8M, Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials. ASTM International. November 17, 2022.
- [7] Shunya Saijo, Shinji Koyama and Ikuo Shohji. 2017. "Liquid Phase Diffusion Bonding of AC2C/ADC12 Aluminum Casting Alloy by Using Metal Salt Coated Zn Sheet". Procedia Eng, Vol. 184: 284-289.
- [8] Qiyang Tan and Mingxing Zhang. 2024. "Recent advances in inoculation treatment for powder-based additive manufacturing of aluminium alloys". Mater. Sci. Eng., R, Vol. 158: 100773.
- [9] Yongyuth Donyakul, Chaiyoot Meengam, Dech Maunkhaw and Suppachai Chainarong. 2018. "Transient Liquid Phase Bonding of Semi-Solid Metal 7075 Aluminum Alloy Using ZA 27 Zinc Alloy Interlayer. Metals, Vol. 8: 0637.
- [10] M. Joseph Fernandus, T. Senthikumar, V. Balasubramanian, and S. Rajakumar. 2012. "Optimising diffusion bonding parameters to maximize the strength of AA6061 aluminium and AZ31B magnesium alloy joints" Mater. Des, Vol. 33: 31-41.
- [11] Brandon Fields, Mahsa Amiri, Benjamin E. MacDonald, Julia T. Pürstl, Chen Dai, Xiaochun Li, Diran Apelian and Lorenzo Valdevit. 2024. "Investigation of an additively manufactured modified aluminum 7068 alloy: Processing, microstructure, and mechanical properties" Mater. Sci. Eng. A., Vol. 891: 145091.
- [12] Guo-zheng Ma, Peng-fei He, Hai-dou Wang, Hong-gang Tian, Li Zhou, Qing-song Yong, Ming Liu, Hai-chao Zhao and Dong-yu He. 2023. "Promoting bonding strength between internal Al-Si based gradient coating and aluminum alloy cylinder bore by forming homo-epitaxial growth interface" Mater. Des, Vol. 227: 111764.



ประวัติผู้วิจัย

หัวหน้าโครงการวิจัย

ชื่อ ดร.ชัยยุทธ มีงาม

เลขที่บัตรประจำตัวประชาชน (13 หลัก) 19099 00044 231

วัน/เดือน/ปีเกิด 12 มกราคม 2528

วุฒิการศึกษา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (ปริญญาเอก) สาขาวิชา วิศวกรรมอุตสาหการ
คณะ เทคโนโลยีอุตสาหกรรม หลักสูตรอุตสาหกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาเทคโนโลยีการผลิต
ตำแหน่ง รองศาสตราจารย์

ที่อยู่ที่สามารถติดต่อได้ หลักสูตรเทคโนโลยีการผลิต คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม

มหาวิทยาลัยราชภัฏสงขลา อ. เมือง จ. สงขลา 90000 E-mails:

Chaiyoot.me@skru.ac.th โทรศัพท์/โทรสาร: 083-1715652

ประสบการณ์ในงานวิจัย

ตีพิมพ์ในวารสารวิชาการ

ชัยยุทธ มีงาม และศุภชัยชัยณรงค์ “อิทธิพลของความเร็วรอบและระยะกวดอัดที่ส่งผลต่อการเชื่อมเสียดทานของอะลูมิเนียมหล่อกิ่งของแข็ง SSM 6061 ด้วยการออกแบบการทดลองแบบหลายปัจจัย” วารสารวิชาการคณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏลำปาง ปีที่ 10 ฉบับที่ 1 มกราคม-มิถุนายน 2560, 26-39.

ศิวะ สิทธิพงศ์ ประภาศ เมืองจันทร์บุรี เจริญยุทธ เดชวายุกุล ณรงค์ฤทธิ์ โทธรัตน์ และชัยยุทธ มีงาม “การวิเคราะห์ค่าความเค้นของเพลากีร์ขับเคลื่อนของรถชุดไฟฟ้าด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์” วารสารมหาวิทยาลัยทักษิณ ปีที่ 20 ฉบับที่ 1 มกราคม-มิถุนายน 2560, 57-66.

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

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.
- 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” *KKU Res.* Vols.20 (1) pp. 42-53.
- Siva Sitthipong, Prawit Towatana, Amnuay Sitticharoenchai, Chaiyoot Meengam “Life Extension of Propeller Shafts by Hardfacing Welding” *Materials Science Forum*. Vol.872 pp. 62-66.
- Yongyuth Dunyakul, Chaiyoot Meengam, Dech Maunkhaw and Suppachai 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. 134-144.
- Suppachai Chainarong, Chaiyoot Meengam and Muhamad Tehyo “Rotary Friction Welding of Dissimilar Joints between SSM356 and SSM6061 Aluminium Alloys Produced by GISS” *Engineering Journal*, Vol. 21 (1) pp. 181-191.
- Suppachai Chainarong, Siva Sitthipong, Chaiyoot Meengam, Prapas Muangjunburee and Muhamad Tehyo “A Comparative Study: Lift Extension of Weld Surfacing of AISI 4340 High Tensile Strength Low Alloy Steel” *Journal of Engineering and Applied Sciences*, Vol. 11 (7) pp. 1644-1649.
- Siva Sitthipong, Prawit Towatana, Amnuay Sitticharoenchai, and Chaiyoot Meengam “Fatigue Life Evaluation of Weld Surfacing LB 52 Grade” *Key Engineering Materials*, Vol. 744 pp. 259-263.
- C. Meengam, S. Chainarong, and P. Muangjunburee “Friction Welding of Semi-Solid Metal 7075 Aluminum Alloy” *Materials Today: Proceedings*, Vol. 4 pp. 1303-1311.

- S. Sitthipong, P. Towatana, A. Sitticharoenchai, and C. Meengam “Abrasive Wear Behavior of Surface Hardfacing on Propeller Shafts AISI 4140 Alloy Steel” *Materials Today: Proceedings*, Vol. 4 pp. 1492-1499.
- Yongyuth Dunyakul, Chaiyoot Meengam, Dech Maunkhaw, and Suhaidee Sani “Dissimilar Welding by Friction Stir Welding of C3064 Brass with AA1100 Aluminum Alloy” *International Journal of Engineering and Technology (IJET)*, Vol. 9(4) pp. 3349-3354.
- Siva Sitthipong, Prawit Towatana, Sittipong Lohwirakorn, Chaiyoot Meengam, and Suppachai Chainarong “The Design of Experimental Production of Briquette Solid Fuel from Oil Palm Fiber and Kernel Meal Residual” *ENGINEERING JOURNAL*, Vol. 24, (2020) pp. 32-42.
- Yongyuth Dunyakul, Chaiyoot Meengam, and Dech Maunkhaw “Investigation Toiler Weld Blank of SSM 2024 Aluminum Alloys by Friction Stir Welding Joint” *Materials Science Forum*, Vols. 1020, (2020) pp. 41-48.
- ศิวะ สิทธิพงษ์, ประศัลน์ บุญเพชร, สิทธิพงษ์ โลวีรกรณ, ศุภชัย ชัยณรงค์ และชัยยุทธ มิ่งาม “การประเมินความผ่อนคลายของลวดเหล็กกล้าตีเกลียวสำหรับคอนกรีตอัดแรง, วารสารวิจัย ปีที่ 13 ฉบับที่ 1, (2563) pp. 72-81.
- ศิวะ สิทธิพงษ์, ประศัลน์ บุญเพชร, สิทธิพงษ์ โลวีรกรณ, ศุภชัย ชัยณรงค์ และชัยยุทธ มิ่งาม “การวิเคราะห์ความผ่อนคลายของลวดเหล็กกล้าสำหรับคอนกรีตอัดแรง, วารสารวิศวกรรมสถาน ฉบับวิจัยและพัฒนา ปีที่ 32 ฉบับที่ 1, (2563) pp. 37-46.
- Chaiyoot Meengam, Suppachai Chainarong and Siva Sitthipong “Investigation of Shear Strength and Metallurgy on Semi-Solid Metal 356 Aluminium Alloy with Lap Joint by Friction Stir Spot Welding” *Engineering and Applied Science Research*.
- นิพนธ์ มณีโชติ และชัยยุทธ มิ่งาม “การศึกษาพฤติกรรมล้าจากการอบอ่อนของเหล็กกล้าคาร์บอน เกรด AISI 1050 ที่ผ่านการเชื่อมด้วยวิธีแก๊สปกคลุม, วารสารมหาสารคาม

ผู้ร่วมโครงการวิจัย

ชื่อ ดร.ศุภชัย ชัยณรงค์

เลขที่บัตรประจำตัวประชาชน (13 หลัก) 1-9098-00063-17-0

วัน/เดือน/ปีเกิด 29 ธันวาคม 2527

วุฒิการศึกษา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (ปริญญาเอก) สาขาวิชา วิศวกรรมอุตสาหการ

คณะ เทคโนโลยีอุตสาหการ หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาโลจิสติกส์

ตำแหน่ง ผู้ช่วยศาสตราจารย์

ที่อยู่ที่สามารถติดต่อได้ หลักสูตรวิศวกรรมโลจิสติกส์ คณะเทคโนโลยีอุตสาหการ

มหาวิทยาลัยราชภัฏสงขลา อ. เมือง จ. สงขลา 90000 E-mails:

c_supachai@hotmail.com โทรศัพท์/โทรสาร: 093-8746995

ประสบการณ์ในงานวิจัย

ตีพิมพ์ในวารสารวิชาการ

ชัยยุทธ มิ่งาม และศุภชัยชัยณรงค์ “อิทธิพลของความเร็วยรอบและระยะกอดัดที่ส่งผลต่อการเชื่อมเสียดทานของอะลูมิเนียมหล่อกิ่งของแข็ง SSM 6061 ด้วยการออกแบบการทดลองแบบหลายปัจจัย” วารสารวิชาการคณะเทคโนโลยีอุตสาหการ มหาวิทยาลัยราชภัฏลำปาง ปีที่ 10 ฉบับที่ 1 มกราคม-มิถุนายน 2560, 26-39.

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

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.

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” KRU Res. Vols.20 (1) pp. 42-53.

- Yongyuth Duniyakul, Chaiyoot Meengam, Dech Maunkhaw and Suppachai 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. 134-144.
- Suppachai Chainarong, Chaiyoot Meengam and Muhamad Tehyo “Rotary Friction Welding of Dissimilar Joints between SSM356 and SSM6061 Aluminium Alloys Produced by GISS” Engineering Journal, Vol. 21 (1) pp. 181-191.
- Suppachai Chainarong, Siva Sitthipong, Chaiyoot Meengam, Prapas Muangjunburee and Muhamad Tehyo “A Comparative Study: Lift Extension of Weld Surfacing of AISI 4340 High Tensile Strength Low Alloy Steel” Journal of Engineering and Applied Sciences, Vol. 11 (7) pp. 1644-1649.
- C. Meengam, S. Chainarong, and P. Muangjunburee “Friction Welding of Semi-Solid Metal 7075 Aluminum Alloy” Materials Today: Proceedings, Vol. 4 pp. 1303-1311.
- Siva Sitthipong, Prawit Towatana, Sittipong Lohwirakorn, Chaiyoot Meengam, and Suppachai Chainarong “The Design of Experimental Production of Briquette Solid Fuel from Oil Palm Fiber and Kernel Meal Residual” ENGINEERING JOURNAL, Vol. 24, (2020) pp. 32-42.
- ศิวะ สิทธิพงษ์, ประศัลน์ บุญเพชร, สิทธิพงษ์ โลวีรกรณ, ศุภชัย ชัยณรงค์ และชัยยุทธ มีงาม “การวิเคราะห์ความผ่นคลายของลวดเหล็กกล้าสำหรับคอนกรีตอัดแรง, วารสารวิศวกรรมสถาน ฉบับวิจัยและพัฒนา ปีที่ 32 ฉบับที่ 1, (2563) pp. 37-46.
- Chaiyoot Meengam, Suppachai Chainarong and Siva Sitthipong “Investigation of Shear Strength and Metallurgy on Semi-Solid Metal 356 Aluminium Alloy with Lap Joint by Friction Stir Spot Welding” Engineering and Applied Science Research.

ผู้ร่วมโครงการวิจัย

ชื่อ นายยงยุทธ ดุลยกุล

เลขที่บัตรประจำตัวประชาชน (13 หลัก) 5-8001- 00013 -09-4

วัน/เดือน/ปีเกิด 8 กันยายน 2514

วุฒิการศึกษา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (ปริญญาโท) สาขาวิชา วิศวกรรมอุตสาหการ

คณะ เทคโนโลยีอุตสาหการ หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาโลจิสติกส์

ตำแหน่ง ผู้ช่วยศาสตราจารย์

ที่อยู่ที่สามารถติดต่อได้ หลักสูตรวิศวกรรมการผลิต คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัย

เทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย สงขลา

อ. เมือง จ. สงขลา 90000 E-mails: Dyongyuth@gmail.com โทรศัพท์/โทรสาร:

089-1976371

ประสบการณ์ในงานวิจัย

ตีพิมพ์ในวารสารวิชาการ

Yongyuth Duniyakul, Chaiyoot Meengam, Dech Maunkhaw and Suppachai Chainarong. 2016. Evaluation of Microstructure and Mechanical Properties in Dissimilar Joint of SSM7075 with SSM356 Aluminum Alloy using Diffusion Bonding. Engineering Journal Volume 20 Issue 0125-8281 No 3, pp. 135-144.

Yongyuth Duniyakul, Chaiyoot Meengam, Dech Maunkhaw and Suhaidee Sani. 2017. Dissimilar Welding by Friction Stir Welding of C3064 Brass with AA1100 Aluminum Alloy. International Journal of Engineering and Technology Volume 9 Issue 4 No 4, pp. 3349-3354.

ยงยุทธ ดุลยกุล, เดช เหมือนขาว, ชัยยุทธ มิงาม และ ศุภชัย ชัยณรงค์. 2561. การเชื่อมวัสดุต่างชนิดระหว่างทองเหลือง เกรด C2800 กับ อลูมิเนียมหล่อกึ่งแข็ง เกรด 356 โดยกระบวนการเชื่อมแบบแพร่.(Proceedings) การประชุมทางวิชาการราชมงคลด้านเทคโนโลยีการผลิตและการจัดการ ณ โรงแรมดีวาน่า พลาซ่า อำเภอเมือง จังหวัดกระบี่ วันที่ 30 - 31 พฤษภาคม 2561. หน้า 434-439.

ยงยุทธ ดุลยกุล ชัยยุทธ มิงาม และเดช เหมือนขาว. 2562. สมบัติทางกลและโครงสร้างจุลภาคอะลูมิเนียมหล่อกึ่งแข็ง 356 กับ 7075 ด้วยเทคนิคการเชื่อมแพร่แบบผ่านเฟสของเหลว. บทความวิจัย วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีมหาวิทยาลัยมหาสารคาม.ปีที่ 38 ฉบับที่ 1 มกราคม-กุมภาพันธ์ 2562. หน้า 101-112.

ยงยุทธ ดุลยกุล, ชัยยุทธ มีงาม, ศุภชัย ชัยณรงค์, เดช เหมือนขาว และ มุhammad เต๊ะยอ 2562. ผลกระทบของตัวแปรเชื่อมแบบกวนใต้น้ำต่อสมบัติทางกลและโครงสร้างจุลภาคของ อะลูมิเนียมผสม AA1100. (Proceedings) การประชุมทางวิชาการราชภัฏนครราชสีมาด้านเทคโนโลยีการผลิตและการจัดการ ณ โรงแรมดิเอ็มเพรส อำเภอเมือง จังหวัดเชียงใหม่ วันที่ 30-31 พฤษภาคม 2562. หน้า 125-132.

ยงยุทธ ดุลยกุล, เดช เหมือนขาว และชัยยุทธ มีงามการปรับปรุงคุณภาพของกระบวนการผลิตยางแผ่นรมควัน กรณีศึกษาโรงงานเพชรรุ่งเรือง ส.อุตสาหกรรมยาง งานประชุมวิชาการระดับชาติ ระหว่างวันที่ 3-4 กันยายน 2563 โรงแรมเคพีแกรนด์ อำเภอเมือง จังหวัดจันทบุรี

เดช เหมือนขาว, ยงยุทธ ดุลยกุล ผังคาร์บอนจากขยะพลาสติกในชุมชนเทศบาลเมืองเขารูปช้างจังหวัดสงขลา งานประชุมวิชาการระดับชาติ ETCI-CARD ครั้งที่ 13 “นวัตกรรม เพื่อพัฒนาสังคมอย่างยั่งยืน” ระหว่างวันที่ 28-30 เมษายน 2564 ณ โรงแรมฟอร์จูนริเวอร์วิว จังหวัดนครพนม

เดช เหมือนขาว และ ยงยุทธ ดุลยกุล วัสดุเชิงประกอบโลหะพื้นอะลูมิเนียมเสริมแรงด้วยอนุภาคนาโนของไททาเนียมไดออกไซด์ (TiO₂) โดยกระบวนการหล่อกวน งานประชุมวิชาการระดับชาติ ระหว่างวันที่ 15-16 ธันวาคม 2563 ณ มหาวิทยาลัยราชภัฏพระนครศรีอยุธยา

เดช เหมือนขาว และ ยงยุทธ ดุลยกุล การผลิตแผ่นประกอบจากเศษกระจุตเหลือใช้จากงานหัตถกรรมในชุมชนทะเลน้อย จังหวัดพัทลุง งานประชุมวิชาการระดับชาติ ระหว่างวันที่ 3-4 กันยายน 2563 โรงแรมเคพีแกรนด์ อำเภอเมือง จังหวัดจันทบุรี

Yongyuth Duniyakul, Chaiyoot Meengam and Dech Maunkhaw. 2021. Investigation Toiler Weld Blank of SSM 2024 Aluminum Alloys by Friction Stir Welding Joint. Materials Science Forum. Volume 1020 Issue 1662-9752, pp. 41-49.