

พฤติกรรมโครงสร้างจุลภาคและสมบัติทางกลของการเชื่อมเสียดทานกวนแบบจุดของแผ่นอลูมิเนียมหล่อกิ่งของแข็งต่างชนิด SSM2024 และ SSM6061

Microstructural Behavior and Mechanical Properties of Friction Stir Spot Welding of Dissimilar Aluminum Semi Solid Casting Sheets SSM2024 and SSM6061

วรพงศ์ บุญช่วยแทน^{1*} วรธนพร ชีววุฒิพงศ์² และรอมฎอน บุระพา³

¹ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สาขาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย

²อาจารย์ สาขาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย

³อาจารย์ สาขาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย

Worapong Boonchouytan^{1*} Watthanaphon Cheewawuttipong² and Romadorn Burapa³

¹Assistant Professor, Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Rajamankala University of Technology Srivijaya, Ratchadamnoen Nok, Bo Yang, Muang, Songkhla, 90000

²Instructor, Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Rajamankala University of Technology Srivijaya, Ratchadamnoen Nok, Bo Yang, Muang, Songkhla, 90000

³Instructor, Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Rajamankala University of Technology Srivijaya, Ratchadamnoen Nok, Bo Yang, Muang, Songkhla, 90000

*Corresponding author: Email: worapong.b@rmutsv.ac.th

บทคัดย่อ

เทคนิคการเชื่อมเสียดทานแบบจุดในครั้งนี้ได้ออกแบบมาเพื่อประสานแผ่นอลูมิเนียมหล่อกิ่งของแข็งต่างชนิดกันระหว่าง 2024 และ 6061 โดยมีปัจจัยการเชื่อม คือ ความเร็วหมุนเชื่อม 3 ระดับ 500 1,000 และ 1,400 รอบต่อนาที ความเร็วกด 3 ระดับ 56 112 และ 224 มิลลิเมตรต่อนาที ความลึกของปากกวนที่กดลงในเนื้อวัสดุทดลองคือ 0.5 มิลลิเมตร และระยะเวลาหมุนแช่ในเนื้อวัสดุ 10 วินาที เครื่องมือเชื่อมทรงกระบอกหมุนตามเข็มนาฬิกา ผลการทดลองพบว่าโครงสร้างจุลภาคบริเวณพินกวน (Stir Pin Zone; SpZ) ด้านล่างของหัวพินเกิดการประสานกันของวัสดุสองชนิดเป็นรูปแบบลามลาร์ (lamellar) ที่เกิดจากการแผ่ความร้อนโดยการเสียดทานของเครื่องมือเชื่อม ค่าแรงเฉือนเฉลี่ยสูงสุดของชิ้นงานทดสอบมีค่าเท่ากับ 3.77 กิโลนิวตัน ที่ความเร็วหมุนเชื่อม 500 รอบต่อนาที ความเร็วกด 56 มิลลิเมตรต่อนาที และค่าแรงเฉือนเฉลี่ยต่ำสุดของชิ้นงานทดสอบมีค่าเท่ากับ 1.51 กิโลนิวตัน ที่ความเร็วหมุนเชื่อม 1,400 รอบต่อนาที ความเร็วกด 224 มิลลิเมตรต่อนาที

คำสำคัญ: การเชื่อมเสียดทานกวนแบบจุด อลูมิเนียมหล่อกิ่งของแข็ง โครงสร้างทางจุลภาค สมบัติทางกล

ABSTRACT

Friction welding by using stir spot technique which was to design weld semi-solid aluminum castings with differenced types of SSM2024 and SSM6061. The welding factors were studied compose of rotation speeds (500, 1,000, and 1,400 rpm), the plunging rate (56, 112, and 224 mm/min), the tool shoulder plunge depths was employed 0.5 mm, and the constant dwell time for 10 sec. The rotated clockwise cylindrical welding was used. The results showed that the lamellar structure at the stir pin zone (SpZ) on the bottom revealed the combining of two materials cause of heat dissipation from the friction of welding tool. The highest result of weld shear force was 3.77 kN, at rotation speed of 500 rpm, and the plunging rate 56 mm/min. Whereas the lowest weld shear force was 1.51 kN, at rotation speed of 1,400 rpm, and the plunging rate 224 mm/min.

Keyword: Friction Stir Spot Welding, Aluminum Semi Solid Casting, Microstructural, Mechanical Properties

1. บทนำ

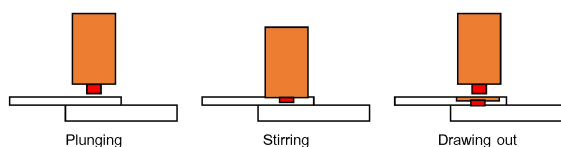
จุดมุ่งหมายสำหรับอุตสาหกรรมยานยนต์ในอนาคตคือการขยายฐานเทคโนโลยีและการใช้เทคโนโลยีใหม่ ๆ รวมไปถึงการประยุกต์ใช้การเชื่อมเสียดทานแบบจุด (Friction Stir Spot Weld; FSSW) ในวัสดุชนิดเดียวกันและต่างชนิดกัน FSSW เป็นรูปแบบของการเชื่อมที่คล้ายคลึงกับการเชื่อมเสียดทานแบบกวน (Friction Stir Weld; FSW) โดยที่กระบวนการ FSSW เครื่องมือเชื่อมหมุนอยู่กับที่และเคลื่อนที่ขึ้นลงในแนวดิ่ง แต่สำหรับกระบวนการ FSW เครื่องมือเชื่อมหมุนอยู่กับที่และเคลื่อนที่ในแนวระนาบ ในระหว่างกระบวนการ FSSW การกดลงของเครื่องมือเชื่อม และระยะเวลาในการหมุนจะเป็นตัวกำหนดความร้อนที่ส่งผลต่อการเปลี่ยนรูปเชิงพลาสติกของวัสดุ เครื่องมือเชื่อม รูปทรงเรขาคณิตของเครื่องมือเชื่อมก็ส่งผลต่อสมบัติทางกลของรอยเชื่อมด้วยเช่นกัน [1-2] กระบวนการ FSSW แสดงดังรูปที่ 1 โดยการเชื่อมเริ่มจากการจับยึดชิ้นงานทดลองเชื่อม จากนั้นเปิดเครื่องกัดให้เครื่องมือเชื่อมหมุนตามปัจจัยในการทดลอง เคลื่อนที่ที่ตำแหน่งของเครื่องกัดในแนวแกน Z แบบอัตโนมัติตามความเร็วกัดที่กำหนดตามปัจจัยในการทดลองให้เครื่องมือเชื่อมกดลงไปใ้เนื้อวัสดุทดลอง และสัมผัสกับปากกวน เมื่อครบเวลาที่กำหนดก็เคลื่อนที่ของโต๊ะ

งานลงเพื่อให้หัวพินลอยขึ้นออกจากรอยเชื่อม จากนั้นตอนดังกล่าว คือ กระบวนการทดลองการเชื่อมเสียดทานแบบจุด

กระบวนการ FSSW ใช้เครื่องมือเชื่อมคล้ายคลึงกับเครื่องมือเชื่อมของกระบวนการ FSW [3] โดยที่มีปากเชื่อมเพื่อสร้างแรงเสียดทานให้เกิดเป็นความร้อน และมีหัวพินมาช่วยในการไหลของวัสดุระหว่างชิ้นงาน [1] นอกเหนือจากนี้ปัจจัยการเชื่อมอื่นๆ ที่มีบทบาทสำคัญในคุณสมบัติของรอยเชื่อม เช่น ความเร็วรอบของเครื่องมือเชื่อม ระดับความลึกของเครื่องมือเชื่อม และระยะเวลาหมุนในเนื้อวัสดุ ปัจจัยการเชื่อมเหล่านี้มีอิทธิพลโดยตรงต่อสมบัติทางกลและโครงสร้างทางโลหะวิทยาของรอยเชื่อม [1,4-6]

อลูมิเนียมเกรด 2024 เป็นอลูมิเนียมกลุ่มผสมทองแดง มีความแข็งแรงสูง และทนต่อการกัดกร่อนได้ดี นิยมใช้ทำแม่พิมพ์เป่าพลาสติกหรือแม่พิมพ์ขึ้นรูปพลาสติกในสุญญากาศ แม่พิมพ์ร่องเท้า ชิ้นส่วนเครื่องจักรกล โครงสร้างเครื่องบินอุปกรณ์จับยึดต่างๆ อลูมิเนียม 6061 เป็นอลูมิเนียมกลุ่มผสมแมกนีเซียมและซิลิกอน ที่สามารถบ่มแข็งได้ มีความแข็งแรงสูง และทนต่อการกัดกร่อนได้ดีเยี่ยม สามารถขัดเงาได้ดี และชุบอะโนไดซ์สีได้ผิวสวยงาม นิยมใช้ทำแม่พิมพ์เป่าพลาสติก แม่พิมพ์ฉีดโฟมและยาง

โครงสร้างยานพาหนะและอาคาร หมุดยั้วราวสะพาน การเชื่อมต่อวัสดุสองชนิดนี้เข้าด้วยกันถือเป็นความท้าทายอย่างหนึ่ง เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงขององค์ประกอบทางเคมีและสมบัติทางกลของวัสดุเดิม [7-9] ในอดีตการเชื่อมแบบหลอมละลายของอลูมิเนียมที่ไม่เหมือนกันเป็นเรื่องที่ลำบาก และทำได้ยากมาก ดังนั้นกระบวนการ FSSW ใช้กันอย่างแพร่หลายในการเชื่อมวัสดุต่างชนิดกัน โดยใช้หลักการสะสมความร้อนของวัสดุทั้งสองสัมพันธ์กับอุณหภูมิที่ต่ำกว่าอุณหภูมิหลอมละลายของวัสดุเชื่อม โดยมีงานวิจัยก่อนหน้านี้ที่เกี่ยวกับกระบวนการเชื่อม FSW และ FSSW เช่น การเปลี่ยนแปลงสมบัติทางกลของการเชื่อมเสียดทานแบบจุดระหว่างอลูมิเนียมเกรด AA1060 กับทองแดงบริสุทธิ์เกรด C11000 [10] กลไกการกระจายตัวของอนุภาค Zn ในข้อบกพร่องของรอยเชื่อมเสียดทานแบบของแมกนีเซียม-สังกะสี [11] การไหลและโครงสร้างทางจุลภาคที่เกี่ยวข้องกับการเชื่อมเสียดทานแบบกวนของอลูมิเนียมเกรด 2024 กับอลูมิเนียมเกรด 6061 [12] การศึกษาเบื้องต้นเกี่ยวกับโครงสร้างจุลภาคและสมบัติทางกลของการเชื่อมเสียดทานแบบกวนที่วัสดุต่างชนิดในโลหะผสมอลูมิเนียมเกรด 2024-T351 และอลูมิเนียมเกรด 6056-T4 [13] การศึกษาเกี่ยวกับการเชื่อมเสียดทานแบบกวนของการเชื่อมโลหะ อลูมิเนียมเกรด AA 2024 และอลูมิเนียมเกรด AA 6061 [14] แรงบิดอุณหภูมิ และการกระจายความเค้นในการเชื่อมเสียดทานแบบกวนวัสดุต่างชนิดระหว่างอลูมิเนียมเกรด 6061-T6 และอลูมิเนียมเกรด 2014-T6 [15]



รูปที่ 1 ขั้นตอนการเชื่อมเสียดทานกวนแบบจุด

จากงานวิจัยดังกล่าวยังไม่มีผลการกล่าวถึงผลงานเกี่ยวกับการเชื่อมเสียดทานแบบจุดระหว่างอลูมิเนียมเกรด AA2024 และอลูมิเนียมเกรด AA6061 ดังนั้นใน

การศึกษาครั้งนี้จึงได้มีการใช้กระบวนการ FSSW เชื่อมอลูมิเนียมหล่อกึ่งแข็งที่มีสมบัติทางกลดีกว่าอลูมิเนียมหล่อทั่วไป โดยชิ้นงานไม่มีโพรงอากาศ มีสมบัติทางกลดีกว่า และสามารถแปรรูปได้ดี [16] ระหว่าง SSM2024 และ SSM6061 เพื่อศึกษาโครงสร้างทางโลหะวิทยา และสมบัติทางกลที่เปลี่ยนแปลงไป โดยใช้พารามิเตอร์และเครื่องมือเชื่อมที่แตกต่างกัน

2. ขั้นตอนการออกแบบการทดลอง

อลูมิเนียมหล่อกึ่งแข็ง (Semi Solid Metal; SSM) ถูกนำมาแปรรูปด้วยเครื่องเลื่อยสายพานแนวนอน ยี่ห้อ Chenlong รุ่น CS-230 และเครื่องกัดแนวตั้ง ยี่ห้อ Brigeport เพื่อให้ได้ขนาดพร้อมใช้ในการทดลอง ขนาดของชิ้นงานทดลองมีขนาดความกว้าง x ความยาว x ความหนา โดยที่ SSM2024 มีขนาด 100 x 15 x 2 มิลลิเมตร ส่วน SSM6061 มีขนาด 100 x 15 x 4 มิลลิเมตร รอยเชื่อมเสียดทานแบบจุดมีรูปแบบการซ้อนทับกันที่ 20 mm การวางตำแหน่งการเชื่อมเสียดทานกวนแบบจุดแสดงดังรูปที่ 2 องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุทดลอง 2 ชนิด SSM2024 และ SSM6061 แสดงดังตารางที่ 1 และมีสมบัติทางกลของวัสดุทดลองแสดงดังตารางที่ 2

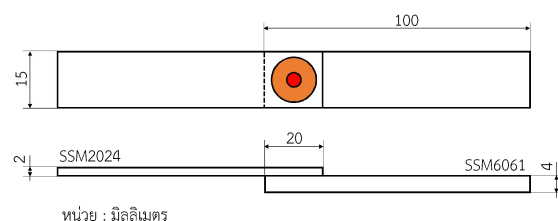
ตารางที่ 1 องค์ประกอบทางเคมี (WT%) ของ SSM2024 และ SSM6061 ที่ใช้ในการวิจัย

วัสดุ	SSM2024	SSM6061
Cr	0.1	0.2
Cu	4.4	0.3
Fe	0.5	0.7
Mg	1.5	1.0
Mn	0.6	0.2
Si	0.5	0.6
Ti	0.2	0.2
Zn	0.3	0.3
Al	91.9	96.5

การเชื่อมด้วย FSSW มีปัจจัยการเชื่อมแสดงดังตารางที่ 3 โดยที่ ความเร็วหมุนเชื่อม (Rotation Speed) มีหน่วยเป็น รอบต่อนาที (rpm) ความเร็วกด (Plunging Rate) มีหน่วยเป็น มิลลิเมตรต่อนาที (mm/min) โดยมีความลึกของบ่ากวนที่กดลงในเนื้อวัสดุทดลองคือ 0.5 มิลลิเมตร โดยมีระยะเวลาหมุนแซในเนื้อวัสดุ 10 วินาที (s) เครื่องมือเชื่อมถูกผลิตด้วยวัสดุเหล็กเครื่องมือ SKD11 มีความยาวของบ่ากวน 1.4 มิลลิเมตร และขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางหัวหิน 5 มิลลิเมตร หัวหินมีลักษณะเป็นทรงกระบอก มีรายละเอียดแสดงดังรูปที่ 3

ตารางที่ 2 สมบัติทางกลของ ของ SSM2024 และ SSM6061

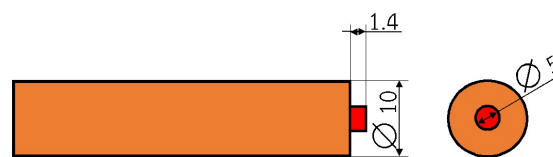
สมบัติทางกล	SSM2024	SSM6061
ความแข็งแรงดึง (MPa)	260.93	164
ความเค้นคราก (MPa)	208.75	131.2
อัตราการยืดตัว (%)	9.51	3.9
ความแข็ง (Hv)	92	68



หน่วย : มิลลิเมตร
รูปที่ 2 การวางตำแหน่งการเชื่อมเสียดทานกวนแบบจุด

ตารางที่ 3 ปัจจัยที่ใช้ในการทดลองการเชื่อม FSSW

ตัวอย่าง	ความเร็วหมุนเชื่อม (รอบต่อนาที)	ความเร็วกด (มิลลิเมตรต่อนาที)	จำนวน ชิ้น
FSSW1	500	56	3
FSSW2	500	112	3
FSSW3	500	224	3
FSSW4	1,000	56	3
FSSW5	1,000	112	3
FSSW6	1,000	224	3
FSSW7	1,400	56	3
FSSW8	1,400	112	3
FSSW9	1,400	224	3



หน่วย : มิลลิเมตร
รูปที่ 3 หัวหินที่ใช้ในงานวิจัย

ขั้นตอนการทดลองการเชื่อมเสียดทานแบบจุดจะเชื่อมด้วยเครื่องกัดแนวตั้ง ยี่ห้อ Heller รุ่น 2S การเชื่อมเริ่มจากการจับยึดชิ้นงานทดลองเชื่อมบนปากกาจับงาน โดยมีแท่งขนานเป็นตัวรองเชื่อมเพื่อป้องกันการทรุดตัวขณะกดเชื่อม แสดงดังรูปที่ 4 จากนั้นเปิดเครื่องกัดให้เครื่องมือเชื่อมหมุนตามปัจจัยในการทดลองลอยอยู่เหนือชิ้นงาน จากนั้นเคลื่อนที่โต๊ะงานของเครื่องกัดในแนวแกน Z แบบอัตโนมัติตามความเร็วกดที่กำหนดตามปัจจัยในการทดลองให้เครื่องมือเชื่อมกดลงไปในเนื้อวัสดุทดลอง 0.5 มิลลิเมตร และสัมผัสกับบ่ากวนเป็นระยะเวลา 10 วินาที เมื่อครบเวลาที่กำหนดก็เคลื่อนที่ของโต๊ะงานลงเพื่อให้หัวหินลอยขึ้นออกจากรอยเชื่อม จากนั้นขั้นตอนดังกล่าว คือ กระบวนการทดลองการเชื่อมเสียดทานแบบจุด

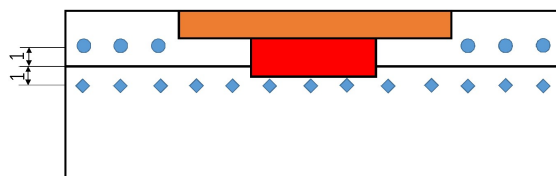


รูปที่ 4 ลักษณะการจับยึดชิ้นงานทดลองเชื่อม

การวิเคราะห์ลักษณะโครงสร้างทางวิทยาประกอบด้วย 3 วิธี คือ กล้องถ่ายภาพกำลังขยาย 2 - 10 เท่า ใช้ในการดูภาพโครงสร้างมหภาคของชิ้นทดสอบ กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (Optical Microscopy : OM) ใช้ในการดูภาพโครงสร้างจุลภาคของชิ้นทดสอบ กล้อง

จุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด (Scanning Electron Microscope; SEM) ใช้ในการดูภาพโครงสร้างจุลภาคในบริเวณจุดกวน (SZ)

การทดสอบความแข็งแรงแบบวิกเกอร์ แสดงดังรูปที่ 5 การทดสอบจะใช้เครื่องทดสอบแบบไมโครวิกเกอร์ กดบริเวณพื้นที่หน้าตัดของแนวเชื่อม โดยแบ่งออกเป็นสองแถว ซึ่งประกอบด้วยแถวบน และแถวล่าง กดตั้งแต่ตรงกลางไปจนถึงระยะห่างจากจุดศูนย์กลางแนวเชื่อม 10 มิลลิเมตร ระยะห่างของรอยกดแต่ละจุด 1 มิลลิเมตร แรงกดที่ใช้ 100 กรัม และเวลาในการกด 10 วินาที



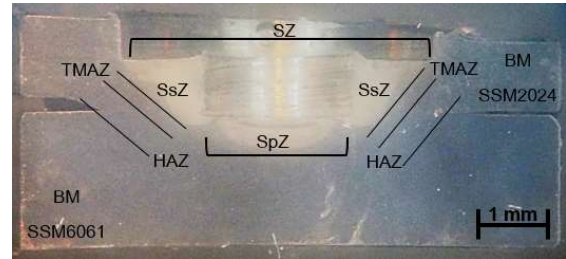
หน่วย : มิลลิเมตร

รูปที่ 5 รูปแบบการทดสอบความแข็งแรงของการเชื่อม
เสียดทานกวนแบบจุด

การทดสอบความแข็งแรงแรงเฉือน การทดสอบจะใช้เครื่องทดสอบแบบบอนกประสงค์ ทดสอบแรงเฉือนแบบ Lap Shear ดำเนินการโดยใช้ไฮดรอลิคเซลล์ขนาด 100 กิโลนิวตัน (kN) ที่มีความเร็วของหัวจับ (Crosshead) เท่ากับ 1 มิลลิเมตรต่อนาที

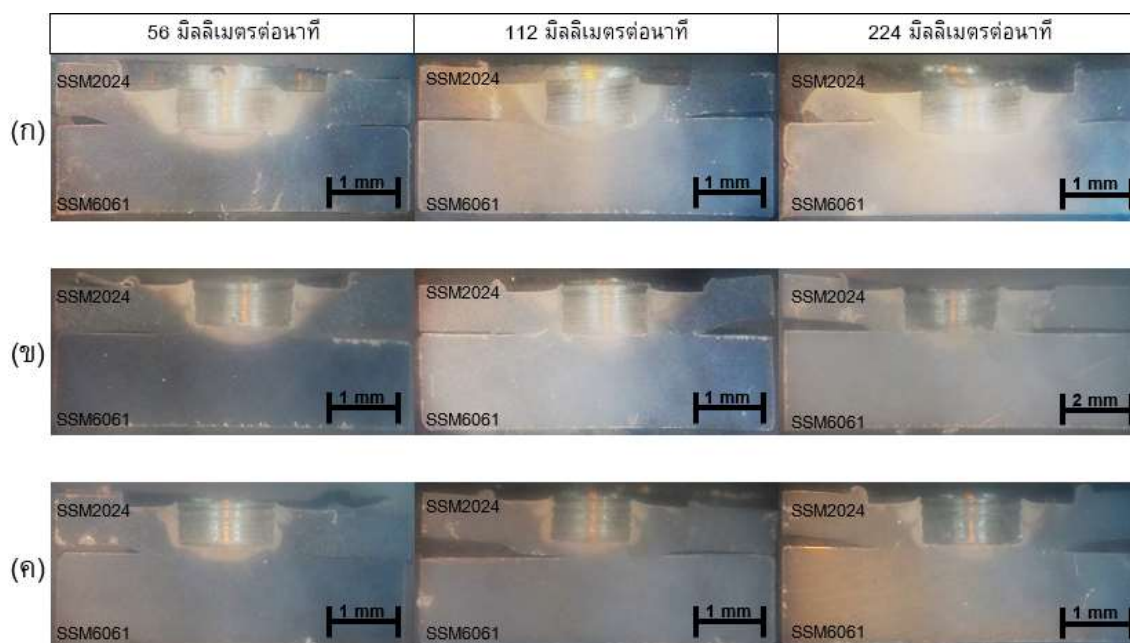
3. ผลการวิจัยและวิเคราะห์ผล

รูปที่ 6 แสดงให้เห็นลักษณะโครงสร้างมหภาคของรอยเชื่อมเสียดทานแบบจุด แสดงดังรูปที่ 6 จากรูปรอยเชื่อมปรากฏเป็นรูปร่างคล้ายอ่างล้างหน้าซึ่งสามารถแบ่งออกเป็น 3 บริเวณ ได้แก่ บริเวณกวน (Stir Zone; SZ) บริเวณที่ได้รับความร้อนทางกล (Thermo Mechanical Affected Zone; TMAZ) และบริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อน (Heat Affected Zone; HAZ) นอกจากนี้ บริเวณ SZ ประกอบด้วยบริเวณปากกวน (Stir Shoulder Zone; SsZ) และบริเวณพินกวน (Stir Pin Zone; SpZ) [17]

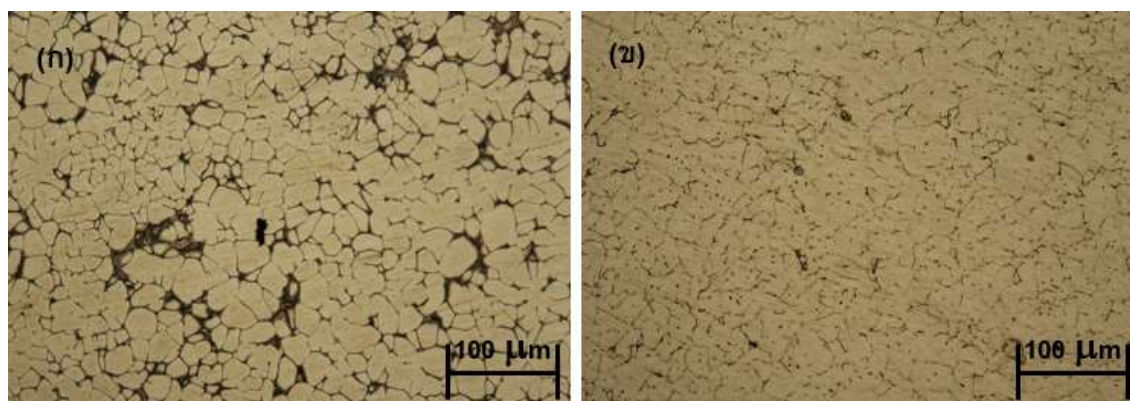


รูปที่ 6 โครงสร้างมหภาคของรอยเชื่อมเสียดทานแบบจุด
ที่ ความเร็วหมุนเชื่อม 500 รอบต่อนาที ความเร็วกด 56
มิลลิเมตรต่อนาที

รอยเชื่อมปรากฏรอยของเครื่องมือเชื่อมในส่วนรอยตัดขวางของรอยเชื่อมที่เกิดขึ้น โดยใช้พารามิเตอร์ที่แตกต่างกัน ในส่วนของรอยเชื่อมจะเห็นบริเวณที่ประสานกันของวัสดุทั้งสอง ซึ่งมีในช่วงของความกว้างเครื่องมือเชื่อม เนื่องมาจากกระบวนการเชื่อมเสียดทานแบบจุดใช้ความร้อนจากการเสียดทานกันระหว่างชิ้นงานกับเครื่องมือเชื่อม บริเวณที่ได้รับความร้อนมาก คือ บริเวณที่เครื่องมือเชื่อมเสียดทานกัน ส่วนบริเวณที่ได้รับความร้อนน้อยคือบริเวณที่ไม่มีเครื่องมือเชื่อมเสียดทานกัน จึงทำให้เกิดรอยที่ไม่ประสานกันตรงบริเวณด้านข้างของรอยเชื่อม แสดงดังรูปที่ 7 ข้อสังเกตอีกประการ คือ ที่ความเร็วหมุนเชื่อมสูง (1,400 รอบต่อนาที) จะส่งผลให้รอยเชื่อมแคบกว่าความเร็วหมุนเชื่อมต่ำ (500 รอบต่อนาที) เนื่องมาจากความร้อนจากแรงเสียดทานสะสมในเนื้อวัสดุน้อย ทำให้มีการแผ่ความร้อนในเนื้อวัสดุเนื้อ นอกจากนี้ที่ความเร็วกดต่ำ (56 มิลลิเมตรต่อนาที) จะมีความกว้างของรอยเชื่อมในส่วนที่ติดกันกว้างกว่าความเร็วกดสูง (224 มิลลิเมตรต่อนาที) เนื่องมาจากความเร็วกดที่ต่ำมีแรงในการกดของเครื่องมือเชื่อมกับเนื้อวัสดุที่ไม่รวดเร็วจนเกินไป เกิดการสะสมความร้อนของแนวเชื่อมอย่างสม่ำเสมอ ในทางกลับกันความเร็วกดสูงมีแรงกดของเครื่องมือเชื่อมกับเนื้อวัสดุที่รวดเร็วมาก ทำให้เวลาในการเชื่อมสั้นลง ส่งผลต่อความร้อนที่สะสมในแนวเชื่อมมีไม่มากพอที่จะทำให้เกิดการประสานกันของแนวเชื่อมที่สมบูรณ์



รูปที่ 7 โครงสร้างมหภาคของรอยเชื่อม FSSW ระหว่าง SSM2024 กับ SSM6061 (ก) ความเร็วหมุนเชื่อม 500 รอบต่อนาที (ข) ความเร็วหมุนเชื่อม 1,000 รอบต่อนาที และ (ค) ความเร็วหมุนเชื่อม 1,400 รอบต่อนาที



รูปที่ 8 โครงสร้างจุลภาคบริเวณเนื้อวัสดุเดิม (ก) SSM2024 และ (ข) SSM6061

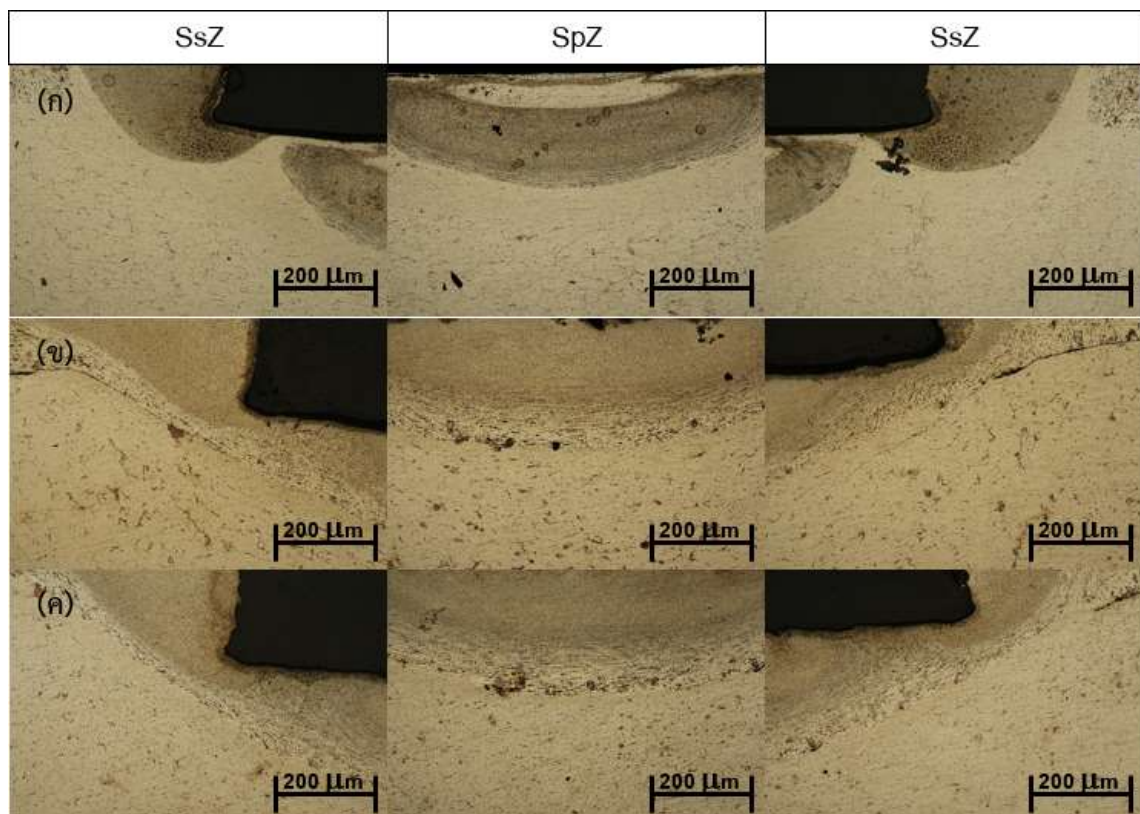
รูปที่ 8 โครงสร้างจุลภาคบริเวณเนื้อวัสดุเดิม (Base Metal; BM) (ก) SSM2024 ประกอบไปด้วยเฟสแอลฟา (α) แบบก่อนกลมผสมกับเฟส Eutectic ประกอบไปด้วย $\alpha + \text{Al}_2\text{Cu}$ / Al_2CuMg [18] (ข) SSM6061 ประกอบไปด้วยเฟส α -Al มีลักษณะก่อนกลมต่อเนื่องกันมีเฟส Mg, Si และ Cu จับกลุ่มรอบเฟส α -Al [19] ซึ่งโครงสร้างเนื้อโลหะเดิมจะมีลักษณะเหมือนกันทุกสภาวะการเชื่อม

โครงสร้างจุลภาคของรอยเชื่อมเสียดทานแบบจุดในสภาวะต่างๆ แสดงดังรูปที่ 9-11 โครงสร้างจุลภาคของ

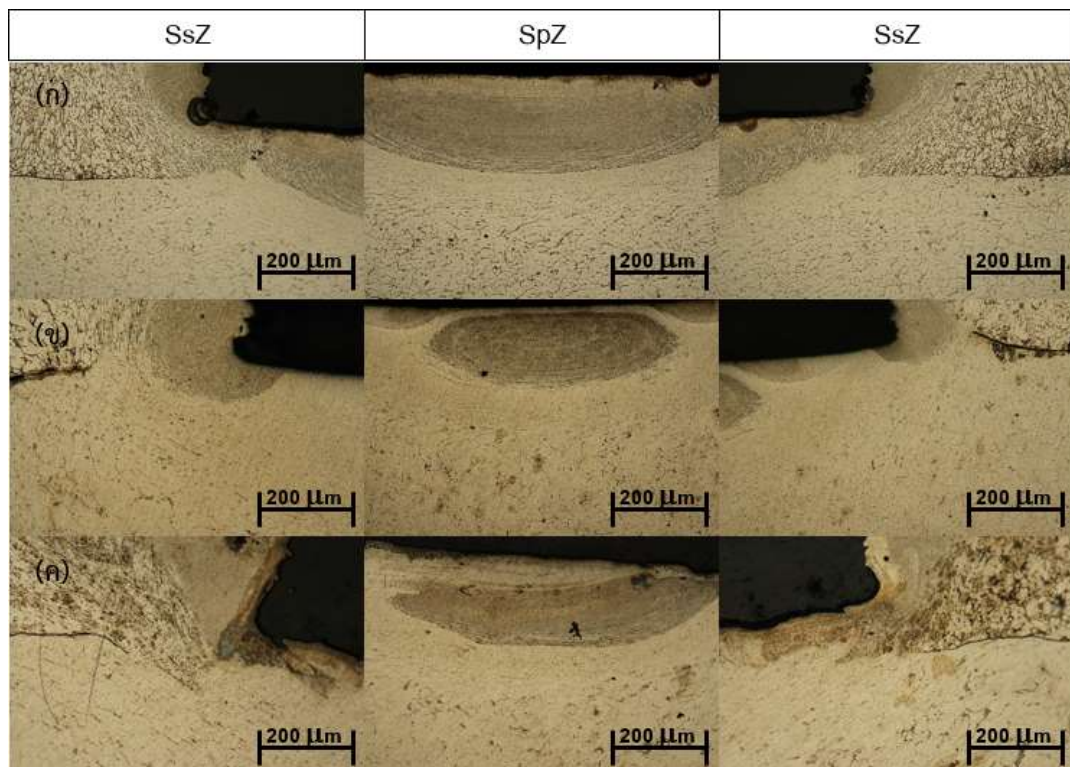
บริเวณ HAZ มีลักษณะคล้ายคลึงกับบริเวณ BM เนื่องจากมีอุณหภูมิไม่สูงมากนักในระหว่างกระบวนการเชื่อม [17] ส่วนบริเวณ TMAZ โครงสร้างเกิดการบิดเบี้ยวของเกรนด้วยรูปแบบที่เป็นอิสระต่อกันซึ่งเป็นผลมาจากการแพร่กระจายความร้อนที่เกิดจากแรงขับของเครื่องมือรวมกับแรงเฉือนในการกวนเนื้อวัสดุ [20] ในรูปที่ 9-11 แสดงโครงสร้างจุลภาคบริเวณ SsZ และบริเวณ SpZ ปรากฏโครงสร้างจุลภาคที่เป็นเนื้อเดียวกันในสองวัสดุที่เกิดการรวมกันของความเค้นเฉือนและการแพร่กระจายความร้อนและอุณหภูมิที่สูงขึ้นจึงนำไปสู่โครงสร้างจุลภาคที่เป็นเนื้อ

เดียวกัน [17] นอกจากนี้สังเกตได้ว่าบริเวณ SpZ ด้านล่างของหัวพินเกิดการประสานกันของวัสดุสองชนิด แสดงให้เห็นว่าบริเวณพินกวนที่เกิดขึ้นมีรูปแบบ lamellar ที่เกิดจากการแผ่ความร้อนโดยการเสียดทานของเครื่องมือเชื่อม [13,21] ส่วนของบริเวณแนวกวนทั้งหมด SZ เกิดการเชื่อมประสานดีไม่มีข้อบกพร่องภายใน จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าบริเวณ SZ จะมีความละเอียดมากกว่าเมื่อเทียบกับเกรนที่บริเวณ BM เนื่องจากบริเวณ SZ จะมีความละเอียดสูงและการเสียดทานของเนื้อโลหะที่ได้จากการเสียดทานในขณะที่กวนมีปริมาณมากขึ้นส่งผลให้เกรนมีขนาดเล็กลงโครงสร้างเกรนในบริเวณ TMAZ จะมีลักษณะเรียบเนื่องจากผลจากการเสียดทานจากปฏิกิริยาทางกลที่ได้รับจากตัวกวนส่วนที่บริเวณ BM ซึ่งเป็นบริเวณที่

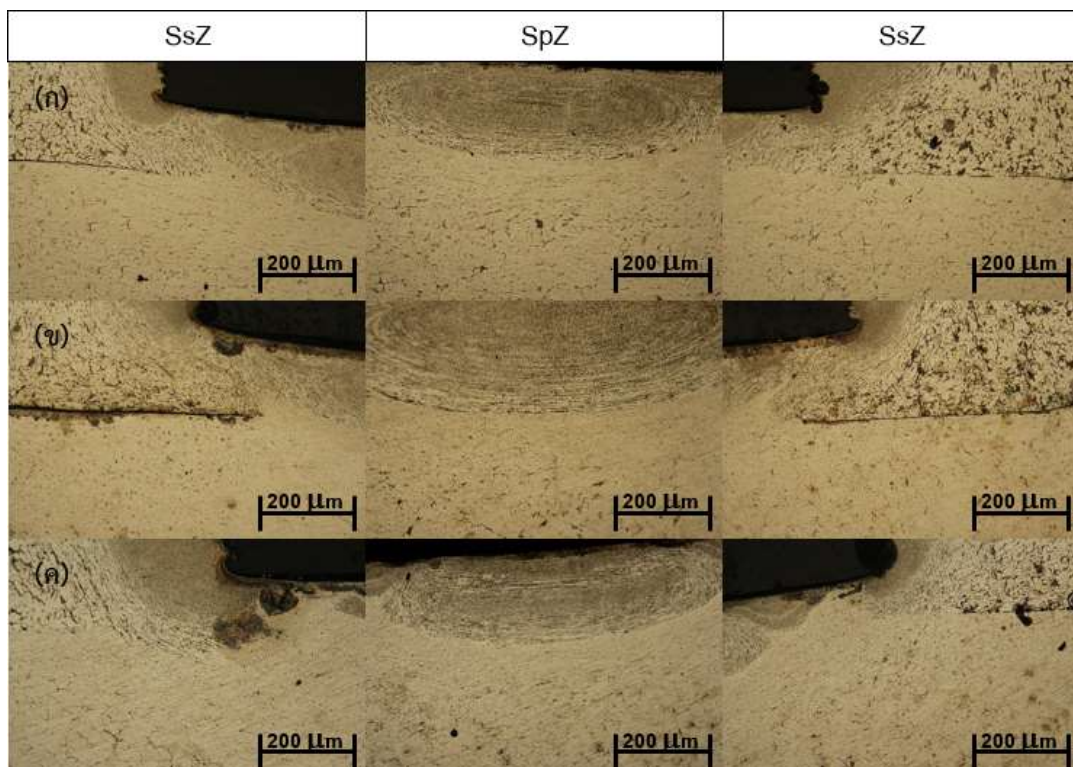
ไม่ได้รับผลกระทบทางกลที่มาจากตัวกวนและโครงสร้างเกรนในบริเวณดังกล่าวจะคล้ายกับโครงสร้างของเนื้อโลหะเดิม [22] เมื่อค่าความเร็วหมุนเชื่อมโยงเพิ่มขึ้นความร้อนจากการเสียดทานและการไหลวนของเนื้อโลหะก็จะมีปริมาณที่มากขึ้นส่งผลให้ลักษณะเกรนในบริเวณ SZ มีความละเอียดขึ้น [23-24] ดังนั้นอิทธิพลของความเร็วหมุนเชื่อมและความเร็วกดที่มีต่อลักษณะโครงสร้างทางมหภาค และจุลภาคของแนวเชื่อม จากการทดลองจะพบว่า ที่ความเร็วกดเดียวกันแต่ความเร็วหมุนเชื่อมสูงขึ้นทำให้โครงสร้างบริเวณที่ถูกมีลักษณะเกรนที่ละเอียดขึ้น เนื่องจากความร้อนจากการเสียดทานแบบกวนมีมาก การเสียดทานของเนื้อวัสดุที่เกิดขึ้นมีมากตามไปด้วย



รูปที่ 9 โครงสร้างจุลภาคบริเวณแนวเชื่อมที่ความเร็วหมุนเชื่อม 500 รอบต่อนาที (ก) ความเร็วกด 56 มิลลิเมตรต่อนาที (ข) ความเร็วกด 112 มิลลิเมตรต่อนาที และ (ค) ความเร็วกด 224 มิลลิเมตรต่อนาที



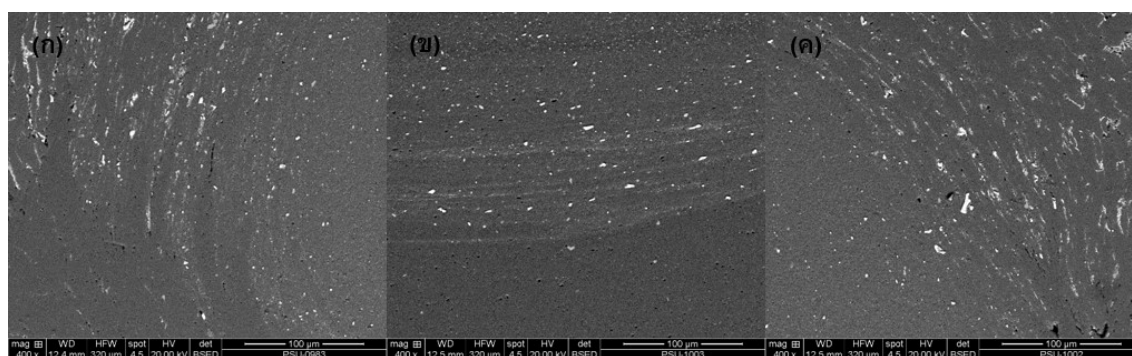
รูปที่ 10 โครงสร้างจุลภาคบริเวณแนวเชื่อมที่ความเร็วหมุนเชื่อม 1,000 รอบต่อนาที (ก) ความเร็วกด 56 มิลลิเมตรต่อนาที (ข) ความเร็วกด 112 มิลลิเมตรต่อนาที และ (ค) ความเร็วกด 224 มิลลิเมตรต่อนาที



รูปที่ 11 โครงสร้างจุลภาคบริเวณแนวเชื่อมที่ความเร็วหมุนเชื่อม 1,400 รอบต่อนาที (ก) ความเร็วกด 56 มิลลิเมตรต่อนาที (ข) ความเร็วกด 112 มิลลิเมตรต่อนาที และ (ค) ความเร็วกด 224 มิลลิเมตรต่อนาที

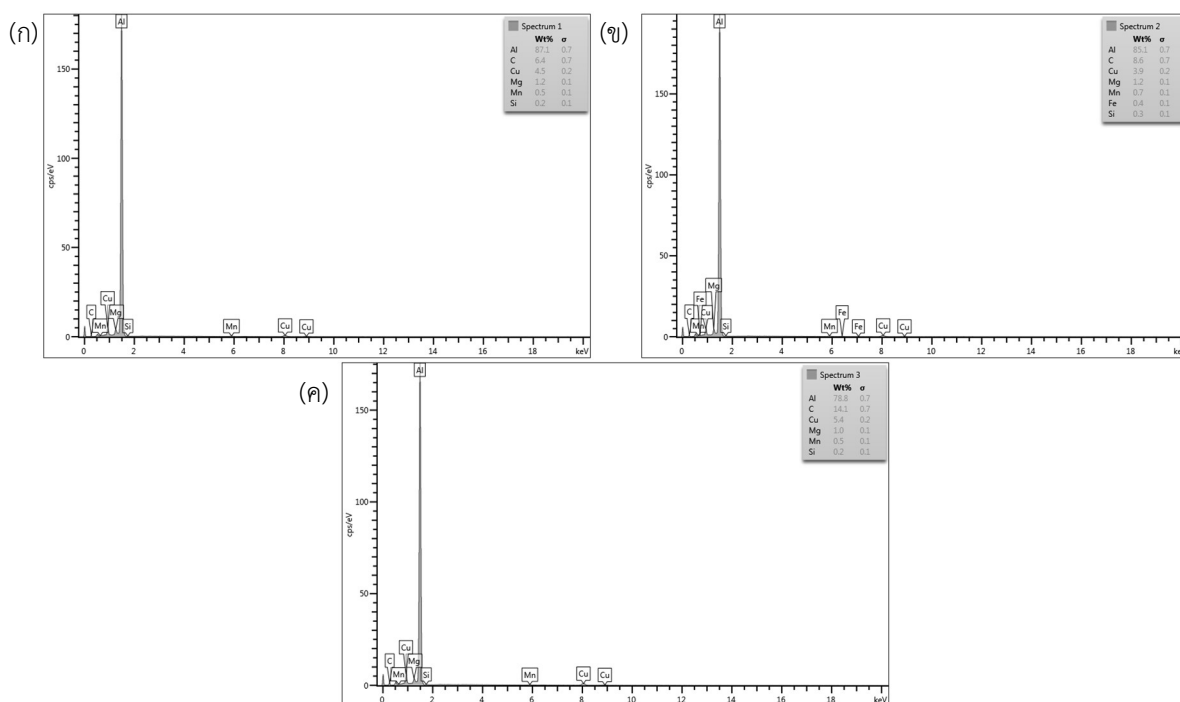
โครงสร้างจุลภาค SEM ของรอยเชื่อมที่ความเร็วหมุนเชื่อม 500 รอบต่อนาที ความเร็วแก๊ส 56 มิลลิเมตรต่อนาที ซึ่งมีค่าแรงเฉือนจากการเชื่อมเสียดทานแบบจุดมากที่สุดมาทำการวิเคราะห์ โดย (ก) บริเวณ SsZ (ข) บริเวณ SpZ และ (ค) บริเวณ SsZ แสดงดังรูปที่ 12 พบว่าเกิดการหมุนวนของเกรนตามทิศทางการหมุนซึ่งเป็นผลมาจากการหมุนวนของ

เครื่องมือเชื่อม นอกจากนี้ยังพบว่าบริเวณบริเวณ SsZ มีส่วนประกอบของ Al Cu Mn Mg และ Si ส่วนบริเวณ SsZ มีส่วนประกอบของ Al Cu Fe Mn Mg และ Si และบริเวณรอบหัวพินมีการตกตะกอนของเกรน Cu เป็นอนุภาคขนาดเล็กที่กระจายตัวอยู่รอบๆ รายละเอียดแสดงดังรูปที่ 13



รูปที่ 12 โครงสร้างจุลภาค SEM ของรอยเชื่อมที่ความเร็วหมุนเชื่อม 500 รอบต่อนาที ความเร็วแก๊ส 56 มิลลิเมตรต่อนาที

(ก) บริเวณ SsZ (ข) บริเวณ SpZ และ (ค) บริเวณ SsZ



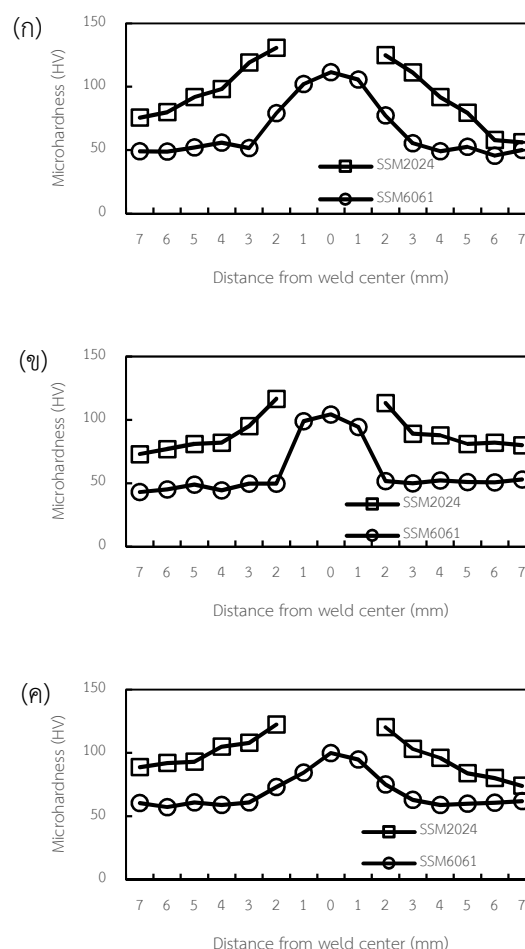
รูปที่ 13 EDX ของบริเวณรอยเชื่อมที่ความเร็วหมุนเชื่อม 500 รอบต่อนาที ความเร็วแก๊ส 56 มิลลิเมตรต่อนาที

(ก) บริเวณ SsZ (ข) บริเวณ SpZ และ (ค) บริเวณ SsZ

ค่าความแข็งเฉลี่ยของรอยเชื่อมของทุกระดับความเร็ว กต โดย (ก) ความเร็วหมุนเชื่อม 500 รอบต่อนาที (ข) ความเร็วหมุนเชื่อม 1,000 รอบต่อนาที และ (ค) ความเร็วหมุนเชื่อม 1,400 รอบต่อนาที แสดงดังรูปที่ 14 โดยมีค่าความแข็งของเนื้อวัสดุเดิม SSM2024 อยู่ในช่วงระหว่าง 60-80 Hv ส่วนค่าความแข็งของ SSM6061 อยู่ในช่วงระหว่าง 40-60 Hv ในบริเวณ SpP ค่าความแข็งปรับตัวเพิ่มมากขึ้นของทั้งสองวัสดุ และในบริเวณ SpZ ค่าความแข็งสูงสุดในพื้นที่ใกล้กับหัวพิน ซึ่งมีรายงานว่าค่าความแข็งรอบหัวพินมีการตกตะกอนของเกรน Cu เป็นอนุภาคขนาดเล็กที่กระจายตัวอยู่รอบๆ หัวพิน [25] ซึ่งสอดคล้องกันกับผลการตรวจสอบ SEM และ EDX พบว่าบริเวณรอบหัวพินมีการตกตะกอนของเกรน Cu เป็นอนุภาคขนาดเล็กที่กระจายตัวอยู่รอบหัวพิน

ค่าความแข็งสูงสุดของรอยเชื่อมในวัสดุ SSM2024 อยู่บริเวณ SsZ มีค่า 130.7 Hv และวัสดุ SSM6061 อยู่บริเวณ SpZ มีค่า 111.5 Hv ส่วนค่าต่ำสุดของรอยเชื่อมในวัสดุ SSM2024 มีค่า 60.1 Hv และวัสดุ SSM6061 มีค่า 43.2 Hv

นอกจากนี้ยังพบว่าการกระจายตัวของค่าความแข็งมีรูปร่างคล้ายระฆังคว่ำ และมีแนวโน้มของค่าความแข็งลดลงเมื่อเพิ่มความเร็วหมุนเชื่อมมากขึ้น เนื่องมาจากการอัตราการกระจายตัวของความร้อนมีค่าเพิ่มมากขึ้นทำให้วัสดุอ่อนนุ่มลงเรื่อยๆ ส่งผลให้ค่าความแข็งลดลงตามไปด้วย [10] ซึ่งการกระจายตัวของค่าความแข็งก็สอดคล้องกับโครงสร้างทางจุลภาคพบว่าความหนาแน่นของเกรนในบริเวณใกล้หัวพินมีการกระจายตัวมากขึ้นเมื่อเพิ่มความเร็วหมุนเชื่อมมากขึ้นส่งผลให้ค่าความแข็งลดลงตามไปด้วย แต่ถึงอย่างไรก็ตามบริเวณที่ใกล้กับรูของหัวพินยังคงมีค่าความแข็งมากที่สุดของรอยเชื่อม ซึ่งเป็นผลมาจากการผสมเข้ากันได้ดีของวัสดุทั้งสองในบริเวณ SpZ มีความหนาแน่นของการตกตะกอนของเฟส การเคลื่อนที่มาจัดเรียงตัวของเกรนที่เป็นรูปแบบ ที่ผลมาจากการหมุนวนของเครื่องมือเชื่อม [17] ส่งผลให้ค่าความแข็งบริเวณนี้ดีที่สุด



รูปที่ 14 ค่าความแข็งเฉลี่ยของรอยเชื่อม

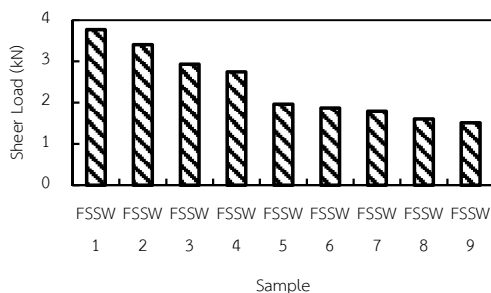
(ก) ความเร็วหมุนเชื่อม 500 รอบต่อนาที

(ข) ความเร็วหมุนเชื่อม 1,000 รอบต่อนาที และ

(ค) ความเร็วหมุนเชื่อม 1,400 รอบต่อนาที

ค่าแรงเฉือนการเชื่อมเสียดทานแบบจุด แสดงดังรูปที่ 15 พบว่าค่าแรงเฉือนลดน้อยลงเมื่อเพิ่มความเร็วหมุนเชื่อม ค่าแรงเฉือนโดยเฉลี่ยสูงสุดของชิ้นงานทดสอบที่ความเร็วหมุนเชื่อม 500 รอบต่อนาที ความเร็วกด 56 มิลลิเมตรต่อนาที ความแข็งแรงของรอยเชื่อมคือ 3.77 กิโลนิวตัน จากนั้นเมื่อเพิ่มความเร็วหมุนเชื่อมเพิ่มขึ้น ความแข็งแรงของรอยต่อลดลงเรื่อยๆ จนถึงจุดต่ำสุดของการทดลองครั้งนี้เป็น 1.51 กิโลนิวตัน ที่ความเร็วหมุนเชื่อม 1,400 รอบต่อนาที ความเร็วกด 224 มิลลิเมตรต่อนาที จากปรากฏการณ์ดังกล่าวพบหลักฐานของการที่จะเพิ่มค่าแรงเฉือนในขณะ

ใช้ความเร็วหมุนเชื่อมสูงจำเป็นต้องใช้เวลาในการทำงานให้สั้นลงเพื่อให้ได้ค่าแรงเฉือนสูงสุด [20] กล่าวคือถ้าใช้ความเร็วหมุนเชื่อมต่ำในการเชื่อมต้องใช้เวลาในการหมุนเชื่อมมาก แต่ในขณะเดียวกันถ้าใช้ความเร็วหมุนเชื่อมสูงในการเชื่อมต้องใช้เวลาในการหมุนเชื่อมน้อยลงนั่นเอง นอกจากนี้มีงานวิจัยพบว่าระยะกดลิกในรอยเชื่อมก็ส่งผลต่อค่าแรงเฉือน โดยที่ใช้ความเร็วหมุนเชื่อมต่ำในการเชื่อมต้องกดลิกในรอยเชื่อมน้อย แต่ในขณะเดียวกันถ้าใช้ความเร็วหมุนเชื่อมสูงในการเชื่อมต้องกดลิกในรอยเชื่อมสูง [26] ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยครั้งนี้ซึ่งใช้ระยะกดลิก 0.5 มิลลิเมตร ทำให้ที่ความเร็วหมุนเชื่อมต่ำมีค่าแรงเฉือนสูง



รูปที่ 15 ผลกระทบของปัจจัยในกระบวนการเชื่อมเสียดทานแบบจุดต่อค่าแรงเฉือนเฉลี่ยของรอยเชื่อม

ค่าแรงเฉือนสูงสุดในปัจจัยความเร็วหมุนเชื่อม 500 รอบต่อนาที ความเร็วกด 56 มิลลิเมตรต่อนาที ซึ่งพบว่าสอดคล้องกับการกระจายตัวของเกรนมีพื้นที่กว้างมากกว่าปัจจัยอื่นๆ เนื่องมาจากความร้อนที่เกิดจากแรงเสียดทานของปัจจัยการเชื่อมดังกล่าวมีมากกว่า ส่งผลให้เกิดการแพร่และมีการตกตะกอนของเกรน Cu เป็นอนุภาคขนาดเล็กที่กระจายตัวอยู่รอบๆ หัวพิน ซึ่งสอดคล้องกับผลการตรวจสอบ SEM และ EDX พบว่าบริเวณรอบหัวพินมีการตกตะกอนของเกรน Cu เป็นอนุภาคขนาดเล็กที่กระจายตัวอยู่รอบหัวพิน

4. สรุปผลการทดลอง

โครงสร้างจุลภาคของบริเวณ TMAZ โครงสร้างเกิดการบิดเบี้ยวของเกรนด้วยรูปแบบที่เป็นอิสระต่อกันซึ่งเป็นผลมาจากการแพร่กระจายความร้อนที่เกิดจากแรงขับเคลื่อนของเครื่องมือรวมกับแรงเฉือนในการกวนเนื้อ

โครงสร้างจุลภาคบริเวณ SpZ ด้านล่างของหัวพินเกิดการประสานกันของวัสดุสองชนิด แสดงให้เห็นว่าบริเวณพินกวนที่เกิดขึ้นมีรูปแบบ lamellar ที่เกิดจากการแผ่ความร้อนโดยการเสียดทานของเครื่องมือเชื่อม

แนวโน้มของค่าความแข็งแรงลดลงเมื่อเพิ่มความเร็วหมุนเชื่อมมากขึ้น เนื่องมาจากการอัตราการกระจายตัวของความร้อนมีค่าเพิ่มมากขึ้นทำให้วัสดุอ่อนนุ่มลงเรื่อยๆ ส่งผลให้ค่าความแข็งแรงลดลงตามไปด้วย

ค่าความแข็งแรงสูงสุดในพื้นที่ใกล้กับหัวพิน ซึ่งมีรายงานว่าค่าความแข็งแรงรอบหัวพินมีการตกตะกอนของเกรน Cu เป็นอนุภาคขนาดเล็กที่กระจายตัวอยู่รอบๆ หัวพิน

ความเร็วหมุนเชื่อมสูงต้องใช้เวลาในการทำงานให้สั้นลงเพื่อให้ได้ค่าแรงเฉือนสูงสุด และต้องกดลิกในรอยเชื่อมสูงด้วย ค่าแรงเฉือนโดยเฉลี่ยสูงสุดของชิ้นงานทดสอบที่ความเร็วหมุนเชื่อม 500 รอบต่อนาที ความเร็วกด 56 มิลลิเมตรต่อนาที ความแข็งแรงของรอยเชื่อมคือ 3.77 กิโลนิวตัน และค่าแรงเฉือนต่ำสุดของการทดลองครั้งนี้เป็น 1.51 กิโลนิวตัน ที่ความเร็วหมุนเชื่อม 1,400 รอบต่อนาที ความเร็วกด 224 มิลลิเมตรต่อนาที

5. กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบพระคุณ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย ที่ให้ความอนุเคราะห์อุปกรณ์และเครื่องจักรที่ใช้ในงานวิจัยครั้งนี้

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] W. M. Thomas, E. D. Nicholas, J. C. Needham, M. G. Murch, P. Temple-Smith and C. J. Dawes, "Friction stir butt welding," Patent No., PCT/GB92/02203, 1991.

- [2] M. Merzoug, M. Mazari, Berrahall and A. Imad, "Parametric studies of the process of friction spot stir welding of aluminium 6060-T5 alloys," *Mater Design.*, vol. 31(6), pp. 3023-3028, 2010.
- [3] H. Badarinarayan, "Fundamentals of friction stir spot welding," *Doctoral Dissertations, Mechanical and Aerospace Engineering, Missouri University of Science and Technology*, 2009.
- [4] Y. Bozkurt, S. Salman and G. Çam, "Effect of welding parameters on lap shear tensile properties of dissimilar friction stir spot welded AA 5754-H22/2024-T3 joints," *Sci Technol Weld Joi.*, vol. 18(4), pp. 337-345, 2013.
- [5] G. Ipekoglu and G. Çam, "Effects of initial temper condition and postweld heat treatment on the properties of dissimilar friction-stir-welded joints between AA7075 and AA6061 aluminum alloys," *Metall and Mat Trans A.*, vol. 45(7), pp. 3074-3087, 2014.
- [6] G. Çam, G. Ipekoglu and H. Tarik Serindag, "Effects of use of higher strength interlayer and external cooling on properties of friction stir welded AA6061-T6 joints," *Sci Technol Weld Joi.*, vol. 19(8), pp. 715-720, 2014.
- [7] A. Heidarzadeh, H. Khodaverdizadeh, A. Mahmoudi and E. Nazari, "Tensile behavior of friction stir welded AA 6061-T4 aluminum alloy joints," *Mater Design.*, vol. 37, pp. 166-173, 2012.
- [8] S. T. Amancio-Filho, S. Sheikhi J. F. Dos Santos and C. Bolfarini, "Preliminary study on the microstructure and mechanical properties of dissimilar friction stir welds in aircraft aluminium alloys 2024-T351 and 6056-T4," *J Mater Process Tech.*, vol. 206(1-3), pp. 132-142, 2008.
- [9] S. Babu, G. D. Janaki Ram, P. V. Venkitakrishnan, G. Madhusudhan Reddy and K. Prasad Rao, "Microstructure and Mechanical Properties of Friction Stir Lap Welded Aluminum Alloy AA2014," *J Mater Sci Technol.*, vol. 28(5), pp. 414-426, 2011.
- [10] M. P. Mubiayi and E. T. Akinlabi, "Evolving properties of friction stir spot welds between AA1060 and commercially pure copper C11000," *T Nonferr Metal Soc.*, vol. 26(7), pp. 1852-1862, 2016.
- [11] R. Z. Xu, D. R. Ni, Q. Yang, C. Z. Liu and Z. Y. Ma, "Influencing mechanism of Zn interlayer addition on hook defects of friction stir spot welded Mg-Al-Zn alloy joints," *Mater Design.*, vol. 69, pp. 163-169, 2015.
- [12] Y. Li, L. E. Murr and J. C. McClure, "Flow visualization and residual microstructures associated with the friction-stir welding of 2024 aluminum to 6061 aluminum," *Mat Sci Eng A-Struct.*, vol. 271(1-2), pp. 213-223, 1999.
- [13] S. T. Amancio-Filho, S. Sheikhi, J. F. dos Santos and C. Bolfarini, "Preliminary study on the microstructure and mechanical properties of dissimilar friction stir welds in aircraft aluminium alloys 2024-T351 and 6056-T4," *J Mater Process Tech.*, vol. 206(1-3), pp. 132-142, 2008.
- [14] P. Sadeesh, M. Venkatesh Kannan, V. Rajkumar, P. Avinash, N. Arivazhagan, K.

- Devendranath Ramkumar and S. Narayanan, "Studies on friction stir welding of AA 2024 and AA 6061 dissimilar metals," *Procedia Eng.*, vol. 75, pp. 145-149, 2014.
- [15] C. Jonckheere, B. D. Meester, A. Denquin and A. Simar, "Torque, temperature and hardening precipitation evolution in dissimilar friction stir welds between 6061-T6 and 2014-T6 aluminum alloys," *J Mater Process Tech.*, vol. 213(6), pp. 826-837, 2013.
- [16] รอมฎอน บุระพา รังสิณี แคนยุกต์ และเจษฎา วรณสินธุ์. "การพัฒนากระบวนการผลิตโลหะกึ่งของแข็งโดยการพ่นพองแก๊สขณะแข็งตัวสำหรับอะลูมิเนียมผสมเกรด A356". การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ครั้งที่ 7 ประจำปี 2552. 21-22 พฤษภาคม 2552. สงขลา : 549-554, 2552.
- [17] C. Gao, R. Gao and Y. Ma, "Microstructure and mechanical properties of friction spot welding aluminium- lithium 2 A9 7 alloy," *Mater Design.*, vol. 83, pp. 719-727, 2015.
- [18] S. Thanabumrungskul, S. Janudom, R. Burapa, P. Dulyapraphant and J. Wannasin, "Industrial development of gas induced semi-solid process," *T Nonferr Metal Soc.*, vol. 20(3), pp. s1016-s1021, 2010.
- [19] N. Pajaroen, T. Plookphol, J. Wannasin and S. Wisutmethangoon, "Influence of Solution Heat Treatment Temperature and Time on the Microstructure and Mechanical Properties of Gas Induced Semi-Solid (GISS) 6061 Aluminum Alloy," *App Mech Mater.*, vol. 313-314, pp. 67-71, 2013.
- [20] E. Fereiduni, M. Movahedi and A. H. Kokabi, "Aluminum/ steel joints made by an alternative friction stir spot welding process," *J Mater Process Tech.*, vol. 224, pp. 1-10, 2015.
- [21] L. E. Murr, Y. Li, and J. C. McClure, "A Comparative Study of Friction Stir Welding of Aluminium Alloys," *Aluminium Trans.*, vol. 1, pp. 141-154, 1999.
- [22] O. Hatamleh and A. DeWald, "An investigation of the peening effects on the residual stresses in friction stir welded 2195 and 7075 aluminum alloy joints," *J Mater Process Tech.*, vol. 209, pp. 4822-4829, 2009.
- [23] P. Cavaliere, E. Cerri and A. Squillace, "Mechanical response of 2024 - 7075 aluminium alloys joined by Friction Stir Welding," *J Mater Sci.*, vol. 40, pp. 3669-3676, 2005.
- [24] P. Cavaliere, A. De Santis, F. Panella and A. Squillace, "Effect of welding parameter on mechanical and microstructural properties of dissimilar AA 6082 - AA 2024 joints produced by friction stir welding," *Mater Design.*, vol. 30, pp. 609-616, 2009.
- [25] M. Shiraly, M. Shamanian, M. R. Toroghinejad and M. Ahmadi Jazani, "Effect of Tool Rotation Rate on Microstructure and Mechanical Behavior of Friction Stir Spot-Welded Al/ Cu Composite," *J Mater Eng Perform.*, vol. 23(2), pp. 413-420, 2014.
- [26] R. Heideman, J. C. Johnson and S. Kou, "Metallurgical analysis of Al/Cu friction stir spot welding," *Sci Technol Weld Joi.*, vol. 15(7), pp. 597-604, 2010.