

ผลกระทบของความเร็วมุมเชื่อมต่อโครงสร้างทางโลหะวิทยาและสมบัติทางกลของ การเชื่อมเสียดทานแบบกวนอะลูมิเนียมหล่อกิ่งของแข็งต่างชนิด 356 กับ 7075 Effect of tool rotational speed on metallurgical and mechanical properties of dissimilar joint friction stir welded aluminum semi solid metal 356 and 7075

วรพงศ์ บุญช่วยแทน^{1,2*} รอมฏอน บุระพา^{1,2} ประภาศ เมืองจันทร์บุรี³
Worapong Boonchouytan^{1,2*} Romadorn Burapa^{1,2} Prapas Muangjunburee³

¹ สาขาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย

² หน่วยวิจัยเทคโนโลยีการแปรรูปวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย

³ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องจักรและวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

* Corresponding authors e-mail: worapong.b@rmuts.ac.th

บทคัดย่อ

กระบวนการเชื่อมเสียดทานแบบกวนเป็นกรรมวิธีการเชื่อมรูปแบบใหม่นำมาประยุกต์ใช้ในรอยเชื่อมต่อชนวัสดุอะลูมิเนียมหล่อกิ่งของแข็งต่างชนิดระหว่าง 356 กับ 7075 ซึ่งมีขนาด 50 x 100 x 4 มิลลิเมตร โดยศึกษาอิทธิพลของความเร็วมุมเชื่อมที่มีผลต่อโครงสร้างทางโลหะวิทยาและสมบัติทางกลของแนวเชื่อม การเชื่อมต่อชนวัสดุต่างชนิดใช้หัวพินมีลักษณะเป็นทรงกระบอกหมุนด้วยความเร็วมุมเชื่อมที่แตกต่างกัน คือ 710 1,000 และ 1,400 รอบต่อนาที และความเร็วด้านเชื่อม คือ 80 112 และ 160 มิลลิเมตรต่อนาที บริเวณแนวเชื่อมโครงสร้างจุลภาคมีความแตกต่างกัน 3 บริเวณ คือ บริเวณเนื้อโลหะเดิม บริเวณแนวเชื่อม และบริเวณที่มีผลกระทบอันเนื่องมาจากความร้อน ซึ่งได้รับอิทธิพลโดยตรงมาจากความเร็วมุมเชื่อมของหัวพิน รอยเชื่อมต่อชนในครั้งนี้ความเร็วมุมเชื่อมที่ 1,000 รอบต่อนาทีให้ค่าความแข็งแรงเฉลี่ยสูงสุดที่ 198.67 MPa ความเร็วมุมเชื่อมของหัวพินทำหน้าที่ผลักดันให้วัสดุไหลวนจากด้านหน้าไปสู่ด้านหลังของหัวพินเพื่อสร้างความร้อนจากแรงเสียดทาน ส่งผลกระทบต่อการเปลี่ยนแปลงของเกรน

คำสำคัญ: ความเร็วมุมเชื่อม, การเชื่อมเสียดทานแบบกวน, รอยเชื่อมอะลูมิเนียมหล่อกิ่งของแข็งต่างชนิด

Abstract

Friction Stir Welding (FSW) is the new welding process applied in this research to join dissimilar grades of aluminum alloy sheets Semi-Solid Metal (SSM) 356 and 7075 with dimensions of 50 mm x 100 mm x 4 mm. The effect of tool rotational speed on metallurgy and mechanical properties of welding was investigated. Dissimilar butt joints were produced using cylindrical pin with conditions of different tool rotation speed (710, 1,000 and 1,400 rpm) and welding speed (80, 112 and 160 mm/min). The welding microstructures showed 3 different areas including base metal, stir zone and thermo mechanically affected zone, which are directly affected by the rotation speed of tool pin. The butt joint rotation speeds 1,000 rpm provided the average maximum tensile strength 198.67 MPa. Rotation speed of tool pin served pushing the material flow from front to back of tool pin for generating the thermal from friction to change the grain.

Keywords: Rotational Speed, Friction Stir Weld, Semi Solid Metal Dissimilar Joint

1. บทนำ

กระบวนการหล่อแบบ GISS (Gas Induce Semi Solid) เป็นกระบวนการหล่อขึ้นรูปชิ้นงานที่ใช้โลหะผสมกิ่งของแข็งในการฉีดเข้าแม่พิมพ์หล่อ นิยมใช้กับการขึ้นรูปอะลูมิเนียม [1] ซึ่งทำให้ได้เกรนที่มีลักษณะเป็นก้อนกลมยัดติดกันเป็นแพต่อเนื่องกันตามความกว้างของเนื้อโลหะ ทำให้มีสมบัติทางกลที่ดีกว่าโครงสร้างแบบเดนไดรต์ที่เกิดจากกระบวนการหล่อแบบดั้งเดิม [2] เมื่อนำวัสดุดังกล่าวมาเชื่อมโดยกรรมวิธีการเชื่อม

แบบหลอมละลาย (Fusion Welding) การแข็งตัวของโลหะอะลูมิเนียมจากการหลอมทำให้เกิดเกรนก้อนกลมหายไปเกิดเป็นโครงสร้างเดนไดรต์ขึ้นมาใหม่ ทำให้เกิดความแตกต่างระหว่างโครงสร้างของเนื้อโลหะเดิมกับเนื้อแนวเชื่อม ส่งผลให้สมบัติทางกลต่ำกว่าสมบัติทางกลของเนื้อโลหะเดิมที่เป็นลักษณะก้อนกลม [2] นอกจากนี้การเชื่อมแบบหลอมละลายยังมักก่อให้เกิดความเค้นตกค้าง (Residual Stress) การบิดงอ (Distortion) ที่ค่อนข้างมากชิ้นงานเชื่อมมีโอกาสแตกร้าวสูง (Welding

Crack) และมีปัญหาการเกิดโพรงอากาศ (Porosity) ในชิ้นงานเชื่อมด้วย ซึ่งส่งผลให้สมบัติทางกลของชิ้นงานเชื่อมไม่ดีขึ้น การแก้ไขอาจจะต้องหาอุปกรณ์เสริมมาเพื่อกำจัดปัญหาดังกล่าว

การเชื่อมเสียดทานแบบกวน (Friction Stir Welding; FSW) เป็นการเชื่อมโลหะในสภาวะของแข็ง (Solid State Welding) ที่พัฒนาโดยสถาบันการเชื่อมอังกฤษ (The Welding Institute; TWI) เพื่อเชื่อมวัสดุที่ยากต่อการเชื่อมด้วยกระบวนการเชื่อมแบบหลอมละลาย [3-6] เป็นกระบวนการเชื่อมติดเข้าด้วยกันของวัสดุสองชนิดที่ชิ้นงานเชื่อมขณะเชื่อมมีอุณหภูมิต่ำกว่าจุดหลอมเหลว โดยอาศัยการควบคุมตัวแปรการเชื่อมต่าง ๆ เช่น ขนาดและรูปร่างของหัวพิน (Tool Pin Profile) ความเร็วหมุนเชื่อม (Rotation Speed) ความเร็วเดินเชื่อม (Welding Speed) มุมเอียงของหัวพิน (Tilt Angle) ฯลฯ และสามารถเชื่อมได้ทั้งวัสดุชนิดเดียวกันและต่างชนิด เมื่อไม่นานมานี้ได้มีผู้ทำการทดลองเชื่อมต่อชนวัสดุอะลูมิเนียมหล่อกิ่งของแข็ง เช่น SSM 356 [7-8] พบว่า ความเร็วหมุนเชื่อม และความเร็วเดินเชื่อม เป็นปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อเนื้อโลหะ และสมบัติทางกลของรอยเชื่อม หรือ SSM 356 และ SSM 6061 [9] โครงสร้างทางโลหะวิทยาบริเวณแนวเชื่อมมีความละเอียดกว่าเนื้อโลหะเดิม ด้านแอดวานซ์ซิง และด้านรีทรีตติง เกิดการบิดเบี้ยวของเกรนไม่เป็นรูปร่าง เนื่องจากการหมุนของหัวพิน ดังนั้นกระบวนการเชื่อมเสียดทานแบบกวน ทำให้โครงสร้างของแนวเชื่อมมีเกรนขนาดเล็กและละเอียดลง ทำให้สามารถรับแรงได้สูง ซึ่งการเชื่อมแบบหลอมละลายไม่สามารถทำได้ [10] ซึ่งจะมีความเหมาะสมมากสำหรับการเชื่อมโลหะที่ไม่ต้องการให้เกิดการหลอมละลายบนแนวเชื่อมที่ส่งผลกระทบให้เกิดเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างทางจุลภาคจากการเย็นตัวได้ จะเห็นได้ว่าการเชื่อมเสียดทานแบบกวนอะลูมิเนียมหล่อกิ่งของแข็งยังเป็นที่ยอมรับเฉพาะในวงการวิจัยเท่านั้น ยังไม่ได้นำมาอะลูมิเนียมหล่อกิ่งของแข็งมาใช้ในงานอุตสาหกรรมมากนัก ดังนั้นงานวิจัยนี้ได้นำเอาข้อดีของสมบัติทางกลวัสดุสองชนิด คือ SSM 356 สามารถใช้กับงานประเภทต้องการความแข็งแรงสูง เช่น ชิ้นส่วนรถบรรทุก และ ในอุตสาหกรรมยานอวกาศ ส่วน SSM 7075 ทนทานต่อการผุกร่อนได้ดี มาเชื่อมต่อเข้าด้วยกัน ทั้งนี้นงานวิจัยนี้มีบางส่วนได้นำเสนอแล้วในเรื่องเกี่ยวกับโครงสร้างกับค่าความแข็งแรง [11] ซึ่งการนำเสนอในครั้งนี้ได้เพิ่มมุมมองใหม่ที่แตกต่างกัน การเพิ่มการวิเคราะห์ห้วงวิจรณ์ โครงสร้าง SEM (Scanning Electron Microscope) ค่าความแข็งแรง และค่าความแข็ง เป็นต้น

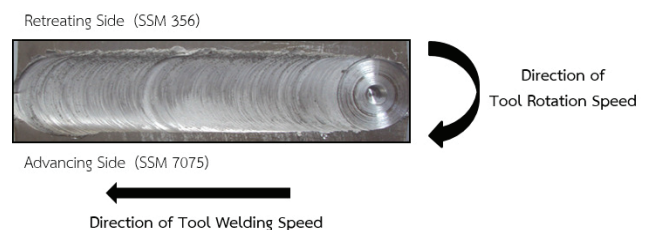
จากข้อมูลและเหตุผลดังกล่าวเป็นที่มาของงานวิจัย โดยปัจจัยที่ศึกษา คือ ความเร็วหมุนเชื่อม (รอบต่อนาที; rpm) และความเร็วเดินเชื่อม (มิลลิเมตรต่อนาที; mm/min) เพื่อศึกษาปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการเปลี่ยนแปลงลักษณะทางโลหะวิทยา (โครงสร้างทางมหภาค และจุลภาค) และสมบัติทางกล (ความแข็งแรง และความแข็ง) โดยเฉพาะของเนื้อเชื่อม (Weld Metal) บริเวณแนวเชื่อม (Stir Zone; SZ) และบริเวณที่มีผลกระทบอันเนื่องมาจากความร้อน (Thermo Mechanical

Affected Zone; TMAZ) เพื่อความเหมาะสมทางด้านโครงสร้างทางมหภาค จุลภาค และสมบัติทางกล

2. วิธีการดำเนินงานวิจัย

2.1 วัสดุและอุปกรณ์

อะลูมิเนียมผสมหล่อกิ่งของแข็ง SSM 356 กับ SSM 7075 ที่ผ่านการหล่อแบบอัด (Squeeze Casting) ด้วยกระบวนการหล่อแบบ GISS [1] มีส่วนผสมทางเคมีและสมบัติทางกล แสดงดังตารางที่ 1 และ 2 ตามลำดับนำไปตัดด้วยเครื่องเลื่อยสายพานแนวนอน รุ่น CS - 230 จากนั้นทำการปรับขนาดชิ้นงานทั้งสองด้านด้วยเครื่องกัดแนวตั้ง (Vertical Milling Machine) ยี่ห้อ HELLER รุ่น 2S ให้มีขนาดความหนา 4 มิลลิเมตร (mm) โดยให้มีขนาดความกว้าง × ความยาว คือ 50 × 100 mm แล้วนำแผ่นวัสดุทั้งสองยึดประกอบเป็นรอยต่อชนและยึดแน่นบนอุปกรณ์จับยึดแนวเชื่อม (Fixture) ที่ถูกติดตั้งบนแท่นเครื่องกัดแนวตั้ง โดยที่ชิ้นงานจะเคลื่อนที่ไปตลอดความยาวของแนวเชื่อม ลักษณะการวางได้กำหนดให้ SSM 356 อยู่ด้านรีทรีตติง (Retreating Side; RS) และ SSM 7075 อยู่ด้านแอดวานซ์ซิง (Advancing Side; AS) เนื่องมาจากคณะผู้วิจัยได้ทำการศึกษาก่อนหน้านี้แล้วพบว่าถ้านำ SSM 7075 วางตำแหน่งการเชื่อมอยู่ด้าน Retreating Side จะทำให้ค่าความแข็งแรงต่ำกว่าอยู่ด้าน Advancing Side ซึ่งการเชื่อมเสียดทานแบบกวนจะกำหนดให้หัวพินอยู่กึ่งกลางรอยเชื่อมและเชื่อมตามแนวยาวของชิ้นงาน โดยมีละเอียด แสดงดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 การวางตำแหน่งชิ้นงานเชื่อมต่อชนวัสดุต่างชนิด

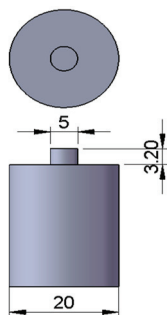
ลักษณะของหัวพินที่นำมาใช้ในการทดลอง คือ แบบทรงกระบอก (Cylindrical Pin) ขนาดของปามีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 20 mm หัวพินมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 mm และความยาว 3.2 mm ทำจากเหล็กเครื่องมือมาตรฐาน JIS วัสดุ SKD 11 แสดงดังรูปที่ 2 การปรับมุมเอียงของเครื่อง ซึ่งจะต้องปรับให้หัวพินเอียงทำมุม 3 องศา กับแกนของเครื่องกัดแนวตั้ง และปรับระดับอุปกรณ์จับยึดขึ้นทดลองให้ได้ระดับคงที่ตลอดความยาวของชิ้นทดลองงานเชื่อม แสดงดังรูปที่ 3

ตารางที่ 1 ส่วนผสมทางเคมีของวัสดุทดลอง (ร้อยละโดยน้ำหนัก)

Elements	SSM 356	SSM 7075
Si	7.5	0.4
Fe	0.2	0.5
Cu	0.2	2
Mn	0.1	0.3
Mg	0.45	2.9
Zn	0.1	6.1
Ti	0.2	0.2
Cr	0.02	0.28
Ni	0.01	-
Al	Balance	Balance

ตารางที่ 2 ค่าความแข็งแรงดึงของวัสดุทดลอง

Base Material	SSM 356	SSM 7075
Tensile Strength (MPa)	182	228
Yield Strength (MPa)	145	181
Percentage Elongation (%)	11	14
Hardness (Hv)	67	107



รูปที่ 2 หัวพินที่ใช้ในการเชื่อมเสียดทานแบบกวน

2.2 การเตรียมเครื่องจักรเพื่อเชื่อมชิ้นงาน

การปรับความเร็วในการหมุนหัวพิน เป็นการปรับที่สภาพตามการทดลอง 3 ระดับ คือ 710 1000 และ 1400 rpm การปรับความเร็วในการเดินแนวเชื่อม เป็นการปรับความเร็วในการเดินแนวเชื่อมของหัวพิน โดยปรับตามสภาพการทดลอง 3 ระดับ คือ 80 112 และ 160 mm/min

2.3 การเชื่อมเสียดทานแบบกวน

การเตรียมอุปกรณ์ในการเชื่อมเสียดทานแบบกวน จะทำการจับยึดชิ้นงานเชื่อมทั้งสองชิ้นในแท่นราบซึ่งยึดติดกับแท่นรองชิ้นงานหรือฟิกเจอร์ แสดงดังรูปที่ 4 เครื่องมือเชื่อม (Tool) จะจับยึดติดกับเพลาลูกหมุนของเครื่องกัดแนวตั้ง โดยกำหนดให้เครื่องมือเชื่อมหมุนอยู่กับที่ ในขณะที่ชิ้นงานเชื่อมเคลื่อนที่ตามแนวระนาบ การเชื่อมเสียดทานแบบกวน ประกอบด้วย (1) การปรับค่าพารามิเตอร์ตามการทดลอง คือ ความเร็วหมุนเชื่อมและความเร็วเดินเชื่อม (2) หมุนกดหัวพินลงไปในเนื้อวัสดุ

จนกระทั่งปลายของหัวพินถูกสอดไปในเนื้อวัสดุ และบ่าของเครื่องมือเชื่อมกดลงไปในเนื้อวัสดุ 1 mm กดแช่ไว้เป็นระยะเวลา 30 วินาที (s) ในขั้นตอนนี้เนื้ออะลูมิเนียมเกิดสภาพพลาสติกที่ดีและสามารถไหลวนรอบ ๆ หัวพิน ซึ่งเกิดจากบ่าของเครื่องมือทำให้เกิดความร้อนจากแรงเสียดทาน จากนั้นทำการเดินแนวเชื่อมด้วยความเร็วในการเดินแนวเชื่อมที่กำหนด (3) หัวพินก็จะเดินเชื่อมตามความเร็วในการเดินแนวเชื่อม และเส้นทางที่กำหนด เกิดการรวมตัวของวัสดุทั้งสองชิ้น (4) ตำแหน่งปลายแนวเชื่อม ก่อนยกหัวพินออกแนวเชื่อมให้หัวพินหมุนกดแช่ ณ ตำแหน่งสุดท้ายของการเชื่อมประมาณ 20 s เพื่อให้เกิดความร้อนสะสมบริเวณปลายแนวเชื่อม ป้องกันการเกิดข้อบกพร่องในแนวเชื่อม เป็นอันสิ้นสุดกระบวนการเชื่อม เสียดทานแบบกวนของทุกสภาวะการทดลอง โดยการทดลองในแต่ละสภาวะจะทำจำนวน 3 ซ้ำ รวมเป็น 27 ชิ้นการทดลอง

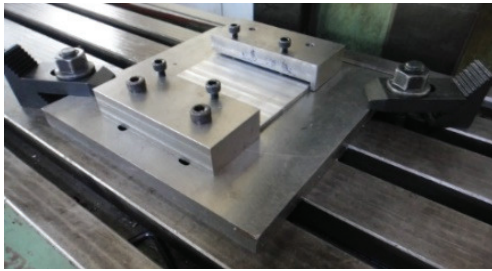


รูปที่ 3 การเอียงหัวพินในขั้นตอนการเชื่อม

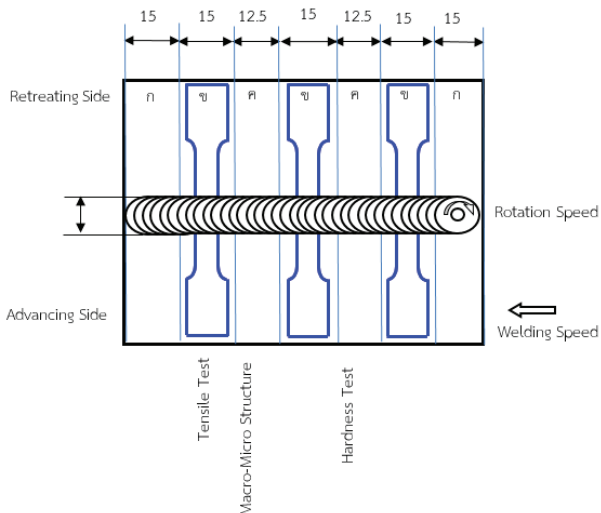
หลังจากเชื่อมตามตัวแปรที่กำหนดแล้วก็นำชิ้นงานมาสังเกตแบบ แสดงดังรูปที่ 5 โดยใช้เครื่องมือเลื่อยสายพานแนวนอนตัดเพื่อที่จะนำมาตัดแบ่งชิ้นงานทดลองไปตรวจสอบลักษณะทางโลหะวิทยา และสมบัติทางกล ชิ้นทดลองจะตัดตามขวางกับแนวเชื่อม โดยบริเวณ (ก) เป็นส่วนหัว และท้ายจะเป็นส่วนที่ตัดทิ้งไป บริเวณ (ข) ส่วนนี้จะทำการตัดเพื่อนำไปทำการทดสอบความแข็งแรง บริเวณ (ค) นำไปตรวจสอบลักษณะทางโลหะวิทยา และการทดสอบความแข็งแรง

2.4 การเตรียมทดสอบทางโลหะวิทยาและสมบัติทางกล

โครงสร้างทางโลหะวิทยา เมื่อนำชิ้นงานทดลองไปตัดตามการสังเกตจากรูปที่ 5 ส่วน (ค) จากนั้นนำชิ้นงานทดลองไปหล่อเย็นในบล็อกที่จัดเตรียมไว้ แล้วนำไปขัดด้วยกระดาษทรายเบอร์ 300 – 1200 ตามลำดับ ต่อจากนั้นตามด้วยการขัดผ้าสักหลาดใช้ผงขัดอะลูมิเนียมขนาด 5 1 และ 0.3 ไมโครเมตร (μm) ตามลำดับ เมื่อขัดเสร็จนำไปกัดกรดด้วยสารละลาย Keller's Reagent แล้วนำไปส่องดูโครงสร้างทางจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบลำแสง เพื่อดูขนาดและรูปร่างของเกรนที่บริเวณแนวเชื่อมจากกระบวนการเชื่อมเสียดทานแบบกวน



รูปที่ 4 ลักษณะการจับยึดฟิกเจอร์ขณะทำการทดลอง



รูปที่ 5 การสเกตแบบขึ้นทดลองเพื่อตัดชิ้นงานเชื่อมสำหรับการตรวจสอบ

การทดสอบความแข็งแรง ชิ้นงานซึ่งได้จากการตัดแบ่งในส่วน (ข) จากรูปที่ 5 ถูกนำมาแปรรูปขึ้นงานตามมาตรฐานการอ้างอิง ASTM-E8M ด้วยเครื่องกัดแนวตั้ง เพื่อนำไปทดสอบความแข็งแรงของแนวเชื่อม โดยให้รอยเชื่อมอยู่ตรงกลางของชิ้นงาน และทดสอบด้วยเครื่องทดสอบเอนกประสงค์ (Universal Testing Machine) ด้วยอัตราเร็วในการเคลื่อนที่ของหัวจับที่ 1.00 mm/min

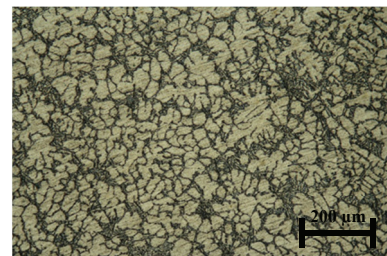
การทดสอบความแข็งแรง ชิ้นงานส่วน (ค) จากรูปที่ 5 นำมาทดสอบความแข็งแรงของแนวเชื่อม ใช้เครื่องทดสอบแบบไมโครวิกเกอร์กดบริเวณพื้นที่หน้าตัดของแนวเชื่อม วัดขนาดจากด้านบนรอยเชื่อมลงมา 2 mm เพื่อให้แนวการทดสอบอยู่บริเวณตรงกลางรอยเชื่อมพอดี และเป็นตัวแทนค่าความแข็งแรงของแนวเชื่อม โดยการกดจะเริ่มกดตั้งแต่ตรงกลางแนวเชื่อมออกไปจนสุดระยะของแนวเชื่อม ระยะห่างของรอยกดแต่ละจุด 1.0 mm และห่างจากจุดศูนย์กลางแนวเชื่อมออกไปข้างละ 14 mm โดยแรงกดที่ใช้ 100 กรัม (g) และเวลาในการกด 10 s

3. ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลงานวิจัย

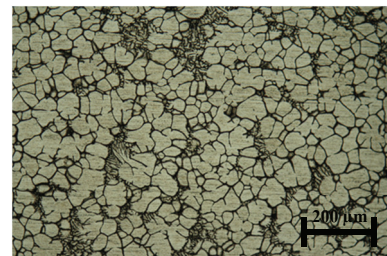
งานวิจัยนี้ศึกษาลักษณะทางโลหะวิทยาและสมบัติทางกลของการเชื่อมเสียดทานแบบกวนของอะลูมิเนียมผสมหล่อทิ้งของแข็งต่างชนิด ซึ่งได้ผลจากการทดลองของงานวิจัยดังต่อไปนี้

3.1 ลักษณะโครงสร้างโลหะวิทยาของเนื้อโลหะเดิม

โครงสร้างทางจุลภาคของบริเวณเนื้อโลหะเดิมของ SSM 356 แสดงดังรูปที่ 6(ก) เกรนของเฟส α -Al เป็นลักษณะก้อนกลมต่อเนื่องกันมีเฟส Si, Fe และ Mg จับกลุ่มรอบเฟส α -Al [12] โครงสร้างทางจุลภาคของบริเวณเนื้อโลหะเดิมของ SSM 7075 แสดงดังรูปที่ 6(ข) เกรนของเฟส α -Al เป็นลักษณะก้อนกลมต่อเนื่องกันมีเฟส Zn, Mg และ Cu จับกลุ่มรอบเฟส α -Al [13]



(ก) SSM 356



(ข) SSM 7075

รูปที่ 6 โครงสร้างจุลภาคของบริเวณเนื้อโลหะเดิม

3.2 ลักษณะโครงสร้างโลหะวิทยาของแนวเชื่อม

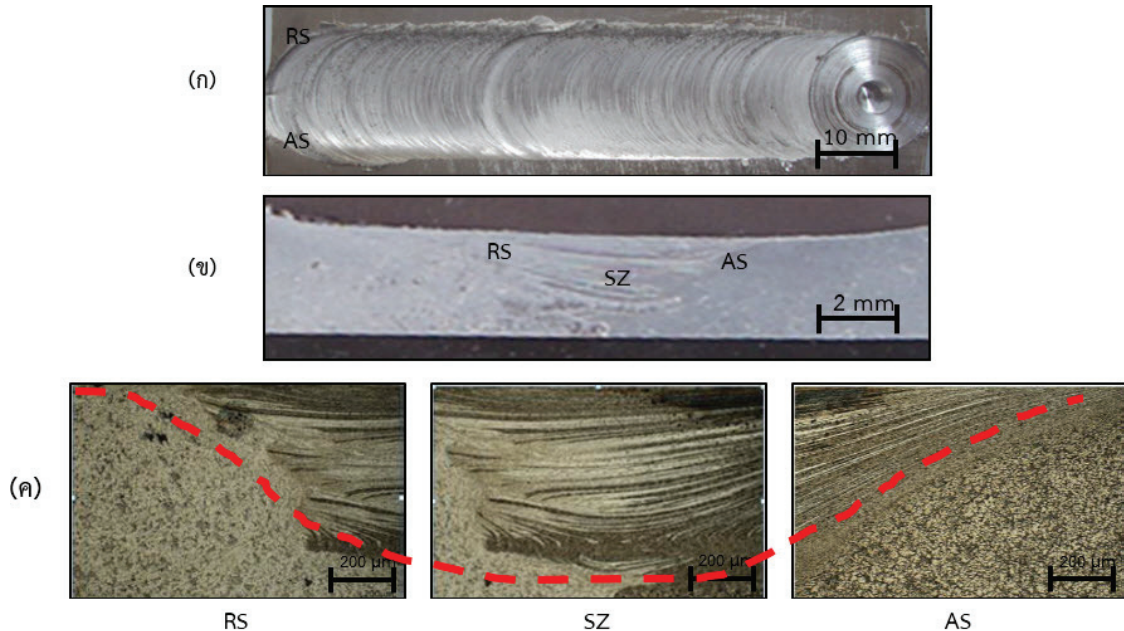
โครงสร้างทางโลหะวิทยาสามารถวิเคราะห์ผลการทดลองออกเป็น 3 ลักษณะ คือ ผิวด้านบนรอยเชื่อม โครงสร้างทางมหภาค และโครงสร้างทางจุลภาค แสดงดังรูปที่ 7-9 โดยผลจะแยกออกเป็นระดับความเร็วหมุนเชื่อม ส่วนความเร็วเดินเชื่อมนั้นมีผลที่เหมือนกัน

ผิวหน้าด้านบนของรอยเชื่อม แสดงดังรูปที่ 7-9 (ก) เป็นรอยขรุขระไม่เรียบ มีลักษณะคล้ายเกล็ดปลา ซึ่งเกิดขึ้นจากรอยการหมุนของบ่าของเครื่องมือเชื่อม เมื่อเปรียบเทียบทั้งสามความเร็วหมุนเชื่อม พบว่า ความเร็วหมุนเชื่อมต่ำ (710 rpm) มีความเรียบมากที่สุด เนื่องมาจากความร้อนจากแรงเสียดทานที่สะสมอยู่ในเนื้ออะลูมิเนียมมีความเหมาะสม เกิดการไหลวนของเนื้ออะลูมิเนียมที่อยู่ในสภาวะพลาสติกได้ดี และเมื่อเพิ่มความเร็วหมุนเชื่อมสูงขึ้น การเกิดรอยขรุขระในแนวเชื่อมก็มากขึ้นเนื่องมาจากความร้อนที่เกิดจากการเสียดทานเข้าไปสะสมในแนวเชื่อมที่ไม่มากพอที่จะทำให้เนื้ออะลูมิเนียมอยู่ในสภาวะพลาสติก ดังนั้นเมื่อเริ่มเดินแนวเชื่อมจึงทำให้ไม่เกิดการไหลวนของเนื้ออะลูมิเนียมบนแนวเชื่อม [14]

โครงสร้างมหภาคของรอยเชื่อม แสดงดังรูปที่ 7-9 (ข) รอยเชื่อมมีลักษณะที่ประสานกันเป็นอย่างดีของทั้งสองชิ้น บริเวณที่รอยเชื่อมถูกกวน ไม่มีข้อบกพร่องใดเกิดขึ้นบนแนวเชื่อม ความร้อนจากแรงเสียดทานเกิดการสะสมในรอยเชื่อมทำให้เนื้อ

วัสดุอยู่ในสภาวะพลาสติกเกิดการไหลวนรอบๆ หัวพิน [14] เมื่อแนวเชื่อมเย็นตัวจะมีลักษณะภาพร่างเป็นชั้นๆ สลับกันระหว่างเนื้ออะลูมิเนียมทั้งสองชนิด ซึ่งจะเห็นได้ว่า เนื้ออะลูมิเนียม SSM 356 จะล้าเข้าไปด้านของ SSM 7075 มากกว่า เห็นได้ชัดเจน ตามทิศทางการถวนของหัวพิน [14-16] เนื่องมาจากการวางตำแหน่งการเชื่อม วัสดุ SSM 356 อยู่ใน

ด้าน Retreating Side ทำให้หัวพินหมุนวนเนื้ออะลูมิเนียมที่อยู่ ในสภาวะพลาสติกด้วยแรงเหวี่ยงจากความเร็วหมุนเชื่อมมาฝั่ง ทางด้าน Advancing Side ซึ่งเป็นที่วางตำแหน่งของวัสดุ SSM 7075 ทำหน้าที่รองรับเนื้อวัสดุมากระแทกและเกิดการดันเนื้อ วัสดุของ SSM 356 มาฝั่งด้าน SSM 7075 [14-18]



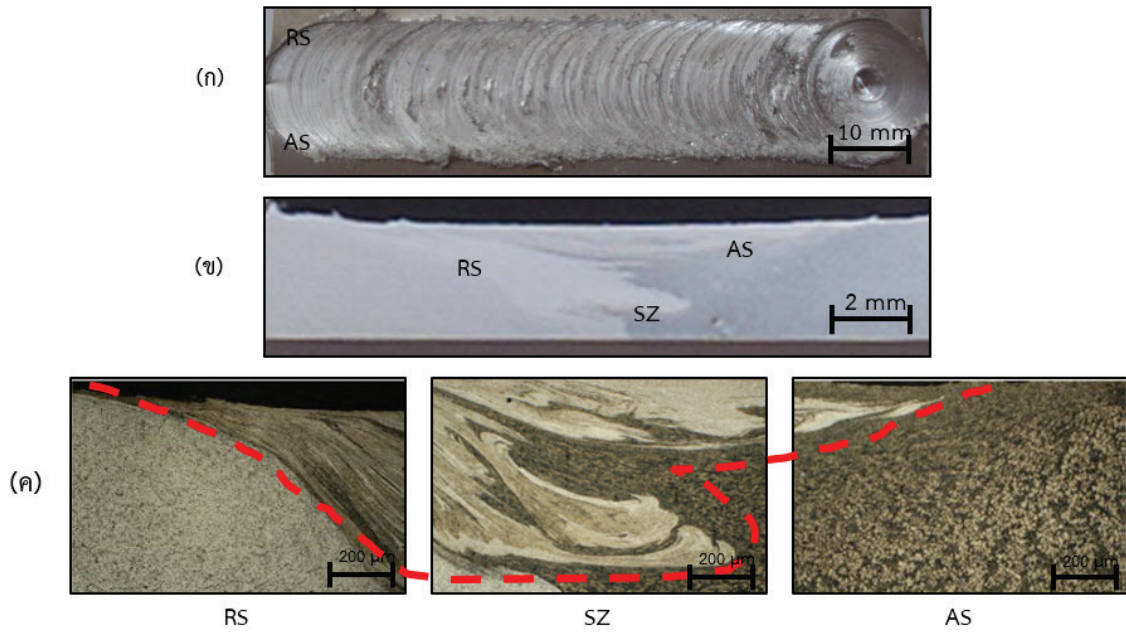
รูปที่ 7 โครงสร้างโลหะวิทยาของแนวเชื่อมที่ความเร็วหมุนเชื่อม 710 rpm ความเร็วพินเชื่อม 80 mm/min

ลักษณะโครงสร้างจุลภาค แสดงดังรูปที่ 7-9 (ค) ของบริเวณ แนวเชื่อมมีการรวมตัวกันของเนื้อวัสดุทั้งสองชนิดขึ้นอย่างเห็น ได้ชัด โดยจะมีการเรียงตัวสลับกันของวัสดุทั้งสองชนิด ที่ บริเวณตรงกลางแนวเชื่อม (SZ) โดยเนื้อวัสดุมีความละเอียด เนื่องจากถูกบดและไหลกระแทกกับตัวถวนในขณะถวน เกรน ของ SSM 356 จะมีลักษณะยาวเรียวยาว ที่ตรงกลางของแนวเชื่อม ระหว่างเนื้อวัสดุของสองชนิดเกรนจะมีความละเอียดและมี ขนาดเล็กกว่าเนื้อโลหะเดิม เกรนมีความละเอียดมาก โดยเฉพาะ SSM 7075 ซึ่งด้านบนของบริเวณแนวถวนจะมีเนื้อ โลหะชนิดนี้ผสมอยู่เป็นจำนวนมากเนื่องจากพัดพาของตัวถวน ในขณะถวน [17] การสัมผัสระหว่างผิวชิ้นงานด้านบนกับบ่า ของตัวถวนจะใกล้เคียงด้านล่าง ส่งผลให้เกรนมีความละเอียด เนื้อวัสดุบางส่วนจะมีการเรียงตัวกันเป็นชั้นๆ สลับกันไป [18] วัสดุทั้งสองชนิดเกิดสภาวะพลาสติกการอัดและการดันเนื้อวัสดุ ทั้งสองอย่างต่อเนื่อง โดยทั่วไปการเชื่อมเสียดทานแบบถวน ความเร็วหมุนเชื่อมของเครื่องมือ เป็นปัจจัยที่สำคัญส่งผลให้ เกิดความร้อนจากแรงเสียดทาน ถ้าความร้อนไม่เพียงพอเกิด การไหลของพลาสติกไม่ดี ส่งผลต่อข้อบกพร่องในแนวเชื่อม และเกิดการผสมผสานกันของเนื้อวัสดุที่ไม่ดีพอ [18]

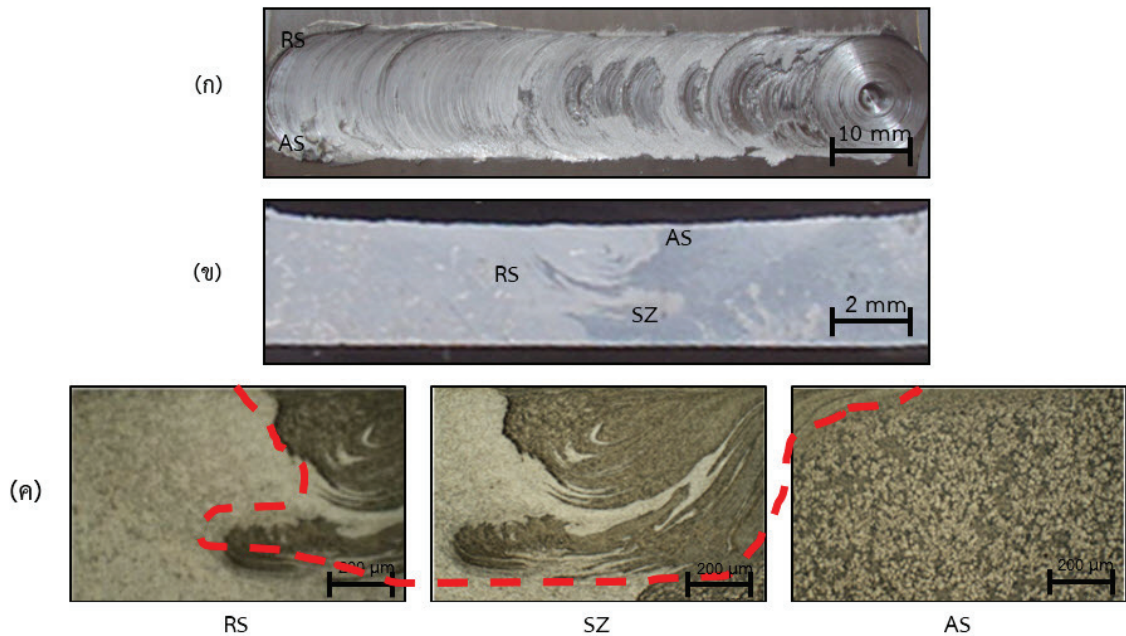
ความแตกต่างระหว่างโครงสร้างจุลภาคของความเร็วหมุน เชื่อมทั้ง 3 ระดับ พบว่า รูปร่างของเกรนเกิดการยืดยาวและบิด เบี้ยวซึ่งเกิดจากแรงหมุนเหวี่ยงของเครื่องมือเชื่อม และเมื่อ

ปรับเปลี่ยนความเร็วรอบจาก 710 rpm เป็น 1000 rpm การ ยืดยาวและบิดเบี้ยวนี้มีความรุนแรงเพิ่มมากขึ้น นอกจากนี้ยัง เกิดการผสมผสานของเนื้อวัสดุที่เห็นได้ชัด แสดงดังรูปที่ 7-9(ค) เนื้อวัสดุฝั่ง SSM 356 เข้ามาผสมผสานกับเนื้อวัสดุฝั่ง SSM 7075 และมีการผสมผสานกันมากขึ้นเมื่อเพิ่มความเร็วหมุน เชื่อมมากขึ้น

นอกจากนี้โครงสร้างพื้นฐานของเกรนของวัสดุทั้ง 2 ชนิดมี ลักษณะเป็นก้อนกลม (α) จะสังเกตได้ว่าในบริเวณแนวเชื่อม (SZ) โครงสร้างก้อนกลมถูกบดทำลายจนไม่เหลือร่องรอยของ ก้อนกลมที่เป็นแบบนี้เนื่องมาจากการหมุนวนของ เครื่องมือเชื่อมทำหน้าที่ส่งผลกระทบโดยตรงต่อแนวเชื่อม โดย ที่หัวพินจะอยู่บริเวณตรงกลางแนวเชื่อมพอดี ทำให้เนื้อวัสดุ บริเวณนี้มีลักษณะละเอียดกว่าบริเวณอื่นๆ และมีส่วนประกอบ ของวัสดุของทั้งสองชนิดเข้าด้วยกันสลับกันเป็นชั้นๆ อย่างเห็น ได้ชัดเจน ส่วนบริเวณด้านข้างของบริเวณ SZ คือ บริเวณ TMAZ ทั้งด้าน RS และ AS ลักษณะเกรนก้อนกลมที่ เปลี่ยนแปลงไปเป็นลักษณะแบบบิดเบี้ยว และยืดยาวตามทิศ การหมุนของเครื่องมือเชื่อม ซึ่งสังเกตได้จากทั้งด้าน RS และ AS เป็นบริเวณด้านข้างของเครื่องมือเชื่อมที่บริเวณปากถวน ทำให้ได้รับผลกระทบจากการหมุนวนในลักษณะการหมุนเหวี่ยง เนื้อโลหะ



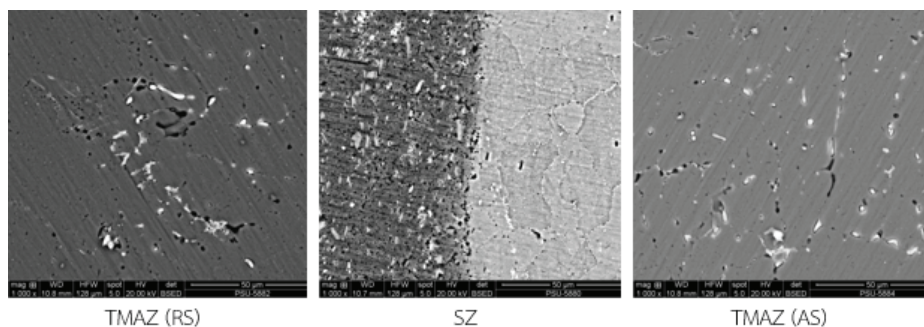
รูปที่ 8 โครงสร้างโลหะวิทยาของแนวเชื่อมที่ความเร็วหมุนเชื่อม 1000 rpm ความเร็วหมุนเชื่อม 112 mm/min



รูปที่ 9 โครงสร้างโลหะวิทยาของแนวเชื่อมที่ความเร็วหมุนเชื่อม 1400 rpm ความเร็วหมุนเชื่อม 160 mm/min

โครงสร้างทางจุลภาค SEM ของรอยเชื่อม ที่ความเร็วหมุนเชื่อมที่ 1000 rpm ความเร็วเดินเชื่อม 112 mm/min แสดงดังรูปที่ 10 เกิดการแตกหักของเฟส α กระจัดกระจายทั่วบริเวณที่ถูกกวน บริเวณแนวเชื่อม SZ เกรนมีความละเอียดมากกว่าบริเวณที่มีผลกระทบอื่นเนื่องมาจากความร้อน TMAZ

เนื่องมาจากบริเวณแนวเชื่อมจะถูกหมุนวนด้วยหัวพินโดยตรง จึงทำให้เกรนบริเวณนี้มีความละเอียดมากกว่า และมีขนาดเล็กลงเมื่อเทียบกับเกรนบริเวณเนื้อโลหะเดิม อันเนื่องมาจากความเร็วหมุนเชื่อม และความเร็วเดินเชื่อมมีอิทธิพลโดยตรง [19-20]



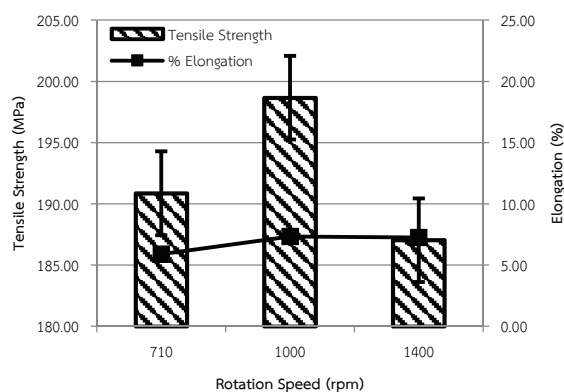
รูปที่ 10 โครงสร้าง SEM บริเวณแนวเชื่อม

3.3 สมบัติความแข็งแรงของแนวเชื่อม

ผลการทดลองความแข็งแรง แสดงดังรูปที่ 11 พบว่า ความเร็วหมุนเชื่อมจะผลักดันให้วัสดุไหลวนจากด้านหน้า ไปด้านหลังของเครื่องมือเพื่อสร้างความร้อนจากแรงเสียดทาน ได้ส่งผลกระทบต่อกระบวนการเปลี่ยนแปลงของเกรนและการผสมผสานของเนื้อวัสดุ ความร้อนจากแรงเสียดทานที่เหมาะสม จะนำไปสู่การผสมผสานของเนื้อวัสดุที่ดี เช่น ที่ความเร็วหมุน เชื่อม 1000 rpm ส่งผลให้ค่าความแข็งแรงเฉลี่ยสูงสุด คือ 198.67 MPa เป็นที่สังเกตความเร็วหมุนเชื่อมของเครื่องมือ สูงขึ้นเกิดการสร้างความร้อนจากแรงเสียดทานเพิ่มขึ้น แต่กลับ ว่ามีอัตราการระบายความร้อนช้าลงนำไปสู่อนุภาคของเกรนได้ ช้าและเกิดการสลายตัวของเกรน [21-22] จึงทำให้มีค่าความ แข็งแรงต่ำ ส่วนที่ความเร็วหมุนเชื่อมของเครื่องมือต่ำลงทำให้ เกิดการผสมผสานของเนื้อวัสดุที่ไม่เหมาะสมนำไปสู่การลดลง ของค่าความแข็งแรง เนื่องจากเกิดความร้อนจากแรงเสียดทาน ที่ต่ำ [18]

การผสมผสานของเนื้อวัสดุที่เห็นได้ชัดจากรูปที่ 7-9 นั้น แสดงให้เห็นถึงสมบัติทางกลด้านความแข็งแรงของแนวเชื่อมที่มี มากขึ้นเมื่อเทียบกับค่าความแข็งแรงของเนื้อโลหะเดิมของ SSM 356 การบิดเบี้ยวของเกรนที่เกิดจากแรงหมุนเหวี่ยงของ เครื่องกวดึงส่งผ่านมายังเครื่องมือเชื่อมก็เช่นกัน ส่งผลให้ ค่าความแข็งแรงเพิ่มมากขึ้นเมื่อปรับเปลี่ยนความเร็วรอบมาก ขึ้น ดังเช่นผลการทดลองที่ได้นำเสนอนี้ พบว่าเมื่อปรับเปลี่ยน ความเร็วรอบจาก 710 rpm เป็น 1000 rpm รูปร่างของเกรน เกิดการบิดเบี้ยวอย่างมาก ส่งผลให้ค่าความแข็งแรงเพิ่มขึ้นไป ด้วย

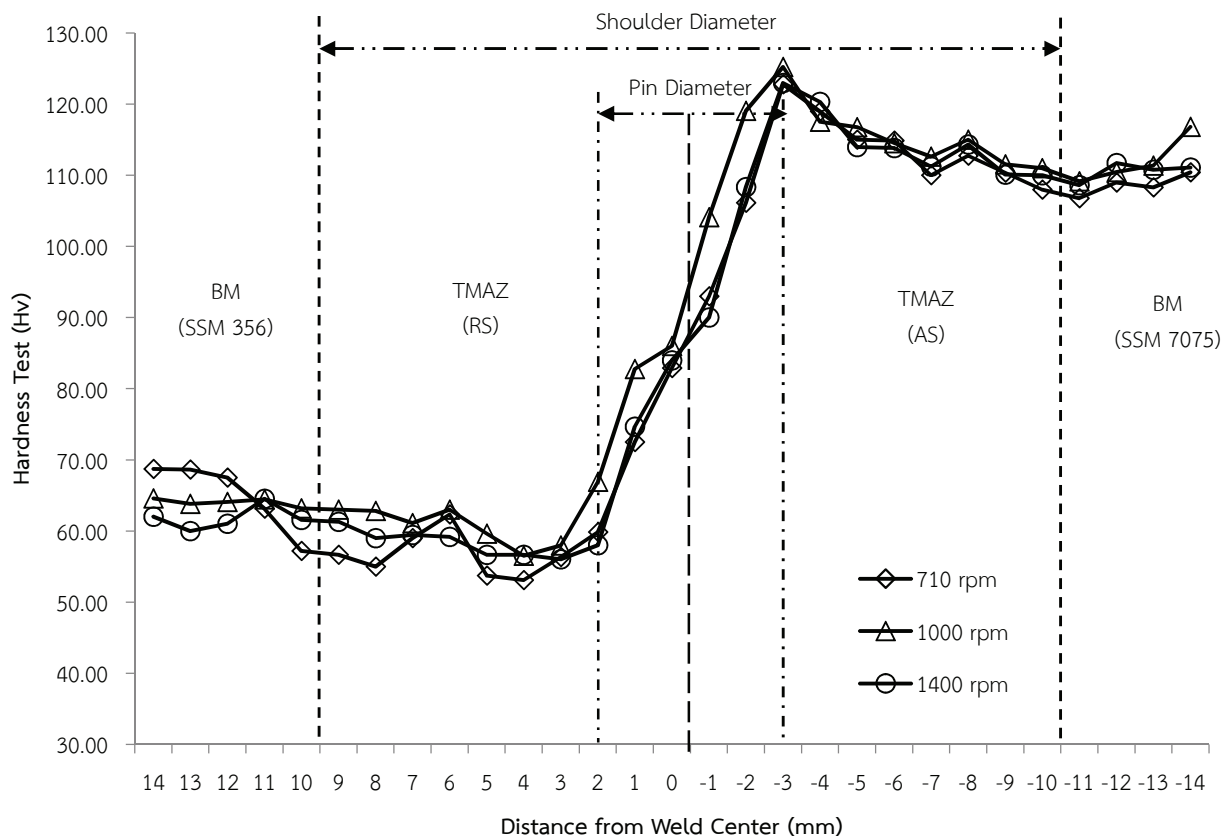
เมื่อเทียบค่าความแข็งแรงกับเนื้อโลหะเดิม SSM 7075 พบว่าต่ำกว่าประมาณ 12 เปอร์เซ็นต์ แต่จะสูงกว่าเมื่อเทียบกับ SSM 356 ประมาณ 9 เปอร์เซ็นต์ ที่ค่าความเร็วหมุนเชื่อม 1000 rpm ให้ค่าความแข็งแรงเฉลี่ยสูงสุด 198.67 MPa ส่วน ค่าความแข็งแรงเฉลี่ยต่ำสุดที่ 187.03 MPa ที่ความเร็วหมุน เชื่อมที่ 1400 rpm อย่างไรก็ตามค่าเปอร์เซ็นต์การยืด (% Elongation) มีค่าที่ใกล้เคียงกันมาก คือ จะมีค่าเปอร์เซ็นต์การ ยืดของการทดลองทั้งหมดอยู่ในช่วง 5-10 %



รูปที่ 11 ค่าความแข็งแรงของแนวเชื่อม

3.4 สมบัติความแข็งแรงของแนวเชื่อม

ผลการทดลองความแข็งแรง พบว่าค่าความแข็งแรงของแนวเชื่อม วัสดุฐาน SSM 356 มีความแข็งแรงต่ำกว่า SSM 7075 แสดงดังรูปที่ 12 ค่าความแข็งแรงที่ต่ำจะปรากฏอยู่ในบริเวณที่ได้รับผลกระทบ จากความร้อนทางกล (Thermo-Mechanically Affected Zone; TMAZ) ของทั้งสองด้านของแนวเชื่อม การอ่อนตัวของ ความแข็งแรงในบริเวณนี้เกิดจากการหมุนเหวี่ยงของเกรนที่หายไป บางส่วนไปผสมอยู่ในบริเวณแนวเชื่อม (Stir Zone; SZ) ที่พัด พาไปโดยหัวพินทำให้บริเวณแนวเชื่อมมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ สังเกตจากด้าน SSM 356 ความแข็งแรงเริ่มขยับขึ้นมากกว่าเนื้อ โลหะเดิม ซึ่งเกิดจากการหมุนวนของเนื้อโลหะด้าน SSM 7075 มาผสมกัน ในทางกลับกัน ด้าน SSM 7075 กลับมีค่าต่ำลงเรื่อย ๆ เมื่อเทียบกับเนื้อโลหะเดิมเพราะเกิดจากการนำวัสดุที่มีความ อ่อนกว่ามาผสมกันนั่นเอง [20] ข้อสังเกตค่าความแข็งแรงของ ความเร็วหมุนเชื่อมของเครื่องมือที่ 1000 รอบนาที ใน SZ และ TMAZ สูงกว่าทั้งสองความเร็วรอบ การเพิ่มขึ้นของปริมาณ เกรนที่ตะกอนในแนวเชื่อมมีมากกว่า พร้อมกับการแข็งตัว ในช่วงการเกิดสภาวะพลาสมิกมีค่าเร็วกว่าทำให้มีค่าความแข็งแรงที่ ดีกว่า [20, 23] โดยค่ามากที่สุดของการทดลองนี้อยู่ที่ 119.00 Hv ที่ความเร็วหมุนเชื่อม 1000 rpm ส่วนค่าต่ำสุดอยู่ที่ 55.00 Hv ที่ความเร็วหมุนเชื่อม 710 rpm



รูปที่ 12 ค่าความแข็งของแนวเชื่อม

4. สรุปผล

อิทธิพลของค่าพารามิเตอร์ที่ส่งผลต่อโครงสร้างและสมบัติทางกลของการเชื่อมเสียดทานแบบกวนวัสดุต่างชนิดระหว่าง SSM 356 กับ SSM 7075 สามารถสรุปผลได้ดังนี้

ความเร็วหมุนเชื่อมเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลให้เกิดการผสมผสานกันของเนื้อวัสดุทั้งสองชนิด ความร้อนจากแรงเสียดทานจะเกิดการสะสมในรอยเชื่อมให้อยู่ในสภาวะพลาสติกเกิดการไหลวนรอบ ๆ หัวพิน จะมีลักษณะภาพร่างเป็นชั้นๆ สลับกันระหว่างเนื้ออะลูมิเนียม SSM 356 กับ SSM 7075 ส่งผลต่อโครงสร้างจุลภาคโดยตรง

โครงสร้างจุลภาคบริเวณแนวเชื่อม มีการผสมผสานของวัสดุสองชนิด (Mixing) เกิดจากการหมุนกวนของเครื่องมือที่ทำให้เกิดการเสียรูปในสภาวะพลาสติกในลักษณะการอัดและการดันเนื้อวัสดุทั้งสองชนิดให้ผสมผสานเข้าด้วยกัน โดยเฉพาะในบริเวณแนวเชื่อม (SZ) วัสดุทั้งสองชนิดจะเกิดสภาวะพลาสติกการอัดและการดันเนื้อวัสดุทั้งสองอย่างต่อเนื่อง

ความเร็วหมุนเชื่อมของเครื่องมือจะผลักและดันให้วัสดุไหลวนจากด้านหน้าไปด้านหลังของเครื่องมือเพื่อสร้างความร้อนจากแรงเสียดทาน ได้ส่งผลกระทบต่อเปลี่ยนแปลงของเกรนและการผสมผสานของเนื้อวัสดุ ความร้อนจากแรงเสียดทานที่เหมาะสมจะนำไปสู่การผสมผสานของเนื้อวัสดุที่ดี เช่น ที่ความเร็วหมุนเชื่อม 1000 รอบ/นาที ส่งผลให้ค่าความแข็งแรงเฉลี่ยมากที่สุด คือ 198.67 MPa ส่วนค่าความแข็งแรงเฉลี่ยต่ำสุด

ที่ 187.03 MPa ที่ความเร็วหมุนเชื่อมที่ 1400 rpm ค่าเปอร์เซ็นต์การยืด (% Elongation) ของการทดลองอยู่ในช่วง 5-10 %

จากแนวเชื่อมทั้งหมดค่าความแข็งที่ต่ำจะปรากฏอยู่ในบริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อนทางกล (Thermo-Mechanically Affected Zone; TMAZ) ของทั้งสองด้านของแนวเชื่อม โดยค่ามากที่สุดของการทดลองนี้ อยู่ที่ 119.00 Hv ที่ความเร็วหมุนเชื่อม 1000 rpm ส่วนค่าต่ำสุดอยู่ที่ 55.00 Hv ที่ความเร็วหมุนเชื่อม 710 rpm

5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนการทำวิจัย จากงบประมาณแผ่นดิน ประจำปีงบประมาณ 2557 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย และผู้วิจัยขอขอบคุณคณาจารย์ชาววิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้เครื่องมือและอุปกรณ์ในการทดลอง งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] รอมฎอน บุระพา, รังสิณี แคนยุกต์ และเจษฎา วรณสินธุ์. (2552). การพัฒนากระบวนการผลิตโลหะกึ่งของแข็งโดยการพันพอง แก๊สขณะแข็งตัวสำหรับอะลูมิเนียมผสมเกรด A356. การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ครั้งที่ 7, 21-22 พฤษภาคม 2552, สงขลา, 549-554.

- [2] ประกาศ เมืองจันทร์บุรี. (2550). การเชื่อมและโลหะวิทยาการเชื่อม อะลูมิเนียม. รายงานวิจัย, ภาควิชาวิศวกรรมเหมืองแร่และวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
- [3] W. M. Thomas, E. D. Nicholas, J. C. Needham, M. G. Murch, P. Temple smith & C. J. Dawes. (1991). Friction Stir Butt Welding. International patent application No.PCT/GB92/02203 and GB patent application No.9125978.8, Dec. 6.
- [4] W.M. Thomas & E.D. Nicholas. (1997). Friction Stir Welding for the Transportation Industries. *Materials and Design*, 18, 269-273.
- [5] Midling O T, Morley E J & Sandvik A. Friction stir welding. European Patent Application 959 078 88.
- [6] R. S. Mishra & Z. Y. Ma. (2005). Friction Stir Welding and Processing. *Materials Science and Engineering*, 50, 1-78.
- [7] อับดุล บินระหีม, นภิสพร มีมงคล และ ประกาศ เมืองจันทร์บุรี. (2551). ศึกษาสมบัติทางโลหะวิทยา และทางกลของการเชื่อม อะลูมิเนียม A356 ซึ่งหล่อโดยเทคโนโลยี การหล่อทิ้งของแข็ง ด้วยกรรมวิธีการเชื่อมเสียดทานแบบกวน. *การประชุมวิชาการ ข่ายงานวิศวกรรมอุตสาหการ ประจำปี พ.ศ. 2551, 20-22 ตุลาคม 2551, สงขลา*, 1111-1116.
- [8] ธงชัย เครือผือ และ ประกาศ เมืองจันทร์บุรี. (2551). อิทธิพลของ ความเร็วในการเชื่อมและรูปแบบของหัวพินที่มีผลต่อสมบัติ ทางโลหะวิทยาและสมบัติทางกลในการเชื่อมอะลูมิเนียมผสม A 356 ที่หล่อโดยเทคโนโลยีหล่อทิ้งของแข็งด้วยกรรมวิธีการ เชื่อมเสียดทานแบบกวน. *การประชุมวิชาการข่ายงาน วิศวกรรมอุตสาหการ ประจำปี พ.ศ. 2551, 20-22 ตุลาคม 2551, สงขลา*, 933-939.
- [9] วรพงศ์ บุญช่วยแทน, จักรนรินทร์ ฉัตรทอง, สุรสิทธิ์ ระวังวงศ์ และ รอมฎอน นูระพา. (2556). การเชื่อมอะลูมิเนียมผสมหล่อทิ้ง ของแข็ง SSM 356 กับ SSM 6061 โดยกรรมวิธีการเชื่อม เสียดทานแบบกวน. *วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม*, 9(3), 47-61.
- [10] Kim Y.G., Fujii H., Tsumura T., Komazaki T. & Nakata K. (2006). Effect of Welding parameter on Microstructure in stir zone of FSW joints of Aluminum die casting alloy. *Materials Letters*, 60, 3830-3837.
- [11] W. Boonchouytan, J. Chatthong, S. Rawangwong, R. Burapa & P. Muangjunburee. (2014). Investigation of Dissimilar Joint between 356 and 7075 of Semi-Solid (SSM) Aluminum Alloy by Friction Stir Welding. *Advanced Materials Research*, 931-932, 344-348.
- [12] Akhter R., Ivanchev L., & Burger H.P. (2007). Effect of pre/post T6 heat treatment on the mechanical properties of laser welded SSM cast A356 aluminium alloy. *Materials Science and Engineering A*, 447, 192–196.
- [13] N. Mahathaninwonga, T. Plookphol, J. Wannasina & S. Wisutmethangoon. (2012). T6 heat treatment of rheocasting 7075 Al alloy. *Materials Science and Engineering A*, 532, 91-99.
- [14] P. Sadeesh, M. Venkatesh Kannan, V. Rajkumar, P. Avinash, N. Arivazhagan, K. Devendranath Ramkumar & S. Narayanan. (2013). Studies on friction stir welding of AA 2024 and AA 6061 dissimilar metals. *International Conference on Materials for Advanced Technologies (ICMAT2013), Symposium W - Advanced Structural and Functional Materials for Protection Conf.* 145-149.
- [15] Hamed Jamshidi Aval. (2015). Influences of pin prfile on the mechanical and microstructural behaviors in dissimilar friction stir welded AA6082-AA7075 butt Joint. *Materials and Design*, 67, 413-421.
- [16] J.F. Guo, H.C. Chen, C.N. Sun, G. Bi, Z. Sun & J. Wei. (2014). Friction stir welding of dissimilar materials between AA6061 and AA7075 Al alloys effects of process parameters. *Materials and Design*, 56, 185-192.
- [17] A.A.M. da Silva, E. Arruti, G. Janeiro, E. Aldanondo, P. Alvarez & A. Echeverria. (2011). Material flow and mechanical behaviour of dissimilar AA2024-T3 and AA7075-T6 aluminium alloys friction stir welds. *Materials and Design*, 32, 2021-2027.
- [18] R. Palanivel, P. Koshy Mathews, I. Dinaharan & N. Murugan. (2014). Mechanical and metallurgical properties of dissimilar friction stir welded AA5083-H111 and AA6351-T6 aluminum alloys. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 24, 58-65.
- [19] M. Ghosh, K. Kumar, S.V. Kailas & A.K. Ray. (2010). Optimization of friction stir welding parameters for dissimilar aluminum alloys. *Materials and Design*, 31, 3033-3037.
- [20] Saad Ahmed Khodir & Toshiya Shibayanagi. Friction stir welding of dissimilar AA2024 and AA7075 aluminum alloys. *First International Conference on the Science and Technology for Advanced Ceramics (STAC) in conjunction with the Second International Conference on Joining Technology for new Metallic Glasses and Inorganic Materials (JTMCM) Conf.* 82-87.
- [21] K. Elangovan & V. Balasubramanian. (2008). Influences of tool pin profile and welding speed on the formation of friction stir processing zone in AA2219 aluminium alloy. *Journal of Material Processing Technology*, 200, 163-175.
- [22] R. Palanivel & P. Koshymathews. (2012). Prediction and optimization of process parameter of friction stir welded AA5083- H111 aluminum alloy using response surface methodology. *Journal of Central South University of Technology*, 19, 1-8.
- [23] M. Koilraj, V. Sundareswaran, S. Vijayan & S.R. Koteswara Rao. (2012). Friction stir welding of dissimilar aluminum alloys AA2219 to AA5083 Optimization of process parameters using Taguchi technique. *Materials and Design*, 42, 1-7.

7. ชีวประวัติ



อาจารย์วรพงศ์ บุญช่วยแทน
สาขาวิศวกรรมอุตสาหการ
คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล
ศรีวิชัยสงขลา



อาจารย์รอมฎอน บุระพา
สาขาวิศวกรรมอุตสาหการ
คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล



ผศ.ดร. ประภาศ เมืองจันทร์บุรี
ภาควิชาวิศวกรรมเหมืองแร่และวัสดุ
คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์สงขลา