

ผลกระทบของความเร็วหมุนเข้ามต่อโครงสร้างทางโลหะวิทยาและสมบัติทางกลของ
การเข้ามเลี้ยดทานแบบกวนอะลูมิเนียมหล่อ กึ่งของแข็งต่างชนิด 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*} รอมฎอน บูรพา^{1,2} ประภา เมืองจันทร์บุรี³
Worapong Boonchouytan^{1,2*} Romadorn Burapa^{1,2} Prapas Muangjunburee³

¹ สาขาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย

² หน่วยวิจัยเทคโนโลยีการแปรรูปวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย

³ ภาควิชาชีวกรรมเหมืองแร่และวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

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

บทคัดย่อ

กระบวนการเข้ามเลี้ยดทานแบบกวนเป็นกรรมวิธีการเข้ามรูปแบบใหม่นำมาประยุกต์ใช้ในรอยเข้ามต่อชนวัสดุอะลูมิเนียมหล่อ กึ่งของแข็งต่างชนิดระหว่าง 356 กับ 7075 ซึ่งมีขนาด $50 \times 100 \times 4$ มิลลิเมตร โดยศึกษาอิทธิพลของความเร็วหมุนเข้ามที่มีผลต่อโครงสร้างทางโลหะวิทยาและสมบัติทางกลของแนวเข้าม การเข้ามต่อชนวัสดุต่างชนิดให้หัวพินมีลักษณะเป็นทรงกระบอกหมุนด้วยความเร็วหมุนเข้ามที่แตกต่างกัน คือ 710, 1,000 และ 1,400 รอบต่อนาที และความเร็วเดินเข้าม คือ 80, 112 และ 160 มิลลิเมตรต่อนาที บริเวณแนวเข้ามโครงสร้างจุลภาคมีความแตกต่างกัน 3 บริเวณ คือ บริเวณเนื้อโลหะเดิม บริเวณแนวเข้าม และบริเวณที่มีผลผลกระทบอันเนื่องมาจากความร้อน ซึ่งได้รับอิทธิพลโดยตรงมาจากความเร็วหมุนเข้ามของหัวพิน รอยเข้ามต่อชนในครั้งนี้ความเร็วหมุนเข้ามที่ 1,000 รอบต่อนาทีให้ค่าความแข็งแรงเฉลี่ยสูงสุดที่ 198.67 MPa ความเร็วหมุนเข้ามของหัวพินทำหน้าที่ผลักดันให้วัสดุไหลวนจากด้านหน้าไปสู่ด้านหลังของหัวพินเพื่อสร้างความร้อนจากแรงเสียดทาน ส่งผลกระทบต่อการเปลี่ยนแปลงของเกรน

คำสำคัญ: ความเร็วหมุนเข้าม, การเข้ามเลี้ยดทานแบบกวน, รอยเข้ามอะลูมิเนียมหล่อ กึ่งของแข็งต่างชนิด

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 $50 \text{ mm} \times 100 \text{ mm} \times 4 \text{ mm}$. 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) เป็นกระบวนการหล่อขึ้นรูปจีนงานที่ใช้โลหะผสมกึ่งของแข็งใน การฉีดเข้าแม่พิมพ์หล่อ นิยมใช้กับการขึ้นรูปอะลูมิเนียม [1] ซึ่งทำให้ได้เกรนที่มีลักษณะเป็นก้อนกลมยึดติดกันเป็นแพ ต่อเนื่องกันตามความกว้างของเนื้อโลหะ ทำให้มีสมบัติทางกลที่ดีกว่าโครงสร้างแบบเดนไดร์ตที่เกิดจากกระบวนการหล่อแบบดั้งเดิม [2] เมื่อนำวัสดุดังกล่าวมาเข้ามโดยกรรมวิธีการเข้าม

แบบหลอมละลาย (Fusion Welding) การเข้ามตัวของโลหะอะลูมิเนียมจากการหลอมทำให้เกรนก้อนกลมหายไปเกิดเป็นโครงสร้างเดนไดร์ตขึ้นมาใหม่ ทำให้เกิดความแตกต่างระหว่างโครงสร้างของเนื้อโลหะเดิมกับเนื้อแนวเข้าม ส่งผลให้สมบัติทางกลต่ำลงกว่าสมบัติทางกลของเนื้อโลหะเดิมที่เป็นลักษณะก้อนกลม [2] นอกจากนี้การเข้ามแบบหลอมละลายยังมักก่อให้มีความเห็นอกหัก (Residual Stress) การบิดงอ (Distortion) ที่ค่อนข้างมากซึ่งงานเข้ามมีโอกาสแตกกร้าวสูง (Welding

Crack) และมีปัญหาการเกิดโพรงอากาศ (Porosity) ในชิ้นงาน เชื่อมด้วย ซึ่งส่งผลให้สมบัติทางกลของชิ้นงานเชื่อมไม่ดีขึ้น การแก้ไขอาจจะต้องหาอุปกรณ์เสริมมาเพื่อกำจัดปัญหาดังกล่าว

การเชื่อมเสียดทานแบบกวน (Friction Stir Welding; FSW) เป็นการเชื่อมโลหะในสภาพของแข็ง (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 เมื่อไม่นานมานี้ได้มีผู้ทำการทดลองเชื่อมต่อชิ้นวัสดุอัลูมิเนียมหล่อ กึ่งของแข็ง เช่น SSM 356 [7-8] พบว่า ความเร็วหมุนเชื่อม และความเร็วเดินเชื่อม เป็นปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อเนื้อโลหะ และสมบัติทางกลของรอยเชื่อม หรือ SSM 356 และ SSM 6061 [9] โครงสร้างทางโลหะวิทยาบริเวณแนวเชื่อมมีความละเอียด กว่าเนื้อโลหะเดิม ด้านแอดวานซ์ซิง และด้านรีทรีทติ้ง เกิดการบิดเบี้ยวของเกรนไม่เป็นรูปร่าง เนื่องจากการหมุนของหัวพิน ดังนั้นกระบวนการเชื่อมเสียดทานแบบกวน ทำให้โครงสร้างของแนวเชื่อมมีเกรนขนาดเล็กและละเอียดลง ทำให้สามารถรับแรงได้สูง ซึ่งการเชื่อมแบบหลอมละลายไม่สามารถทำได้ [10] ซึ่งจะมีความเหมาะสมมากสำหรับการเชื่อมโลหะที่ไม่ต้องการให้เกิดการหลอมละลายบนแนวเชื่อมที่ส่งผลกระทบให้เกิดเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างทางจุลภาคจากการเย็นตัวได้ จะเห็นได้ว่าการเชื่อมเสียดทานแบบกวนของอัลูมิเนียมหล่อ กึ่งของแข็งยัง เป็นที่นิยมใช้เฉพาะในวงการวิจัยเท่านั้น ยังไม่ได้นำอัลูมิเนียม หล่อ กึ่งของแข็งมาใช้ในอุตสาหกรรมมากนัก ดังนั้นงานวิจัยนี้ได้นำเอาร่องรอยเชื่อมของสมบัติทางกลวัสดุสองชนิด คือ SSM 356 สามารถใช้กับงานประ "{"} ท้องต่อการความแข็งแรงสูง เช่น ชิ้นส่วนรถบรรทุก และในอุตสาหกรรมยานอวกาศ ส่วน SSM 7075 ทนทานต่อการผุกร่อนได้ดี มากเชื่อมต่อเข้าด้วยกัน ทั้งนี้ งานวิจัยนี้มีบางส่วนได้นำเสนอแล้วในเรื่องเกี่ยวกับโครงสร้าง กับค่าความแข็งแรง [11] ซึ่งการนำเสนอในครั้งนี้ได้เพิ่มมุมมอง ใหม่ที่แตกต่าง การเพิ่มการวิเคราะห์วิจารณ์ โครงสร้าง SEM (Scanning Electron Microscope) ค่าความแข็งแรง และค่าความแข็ง เป็นต้น

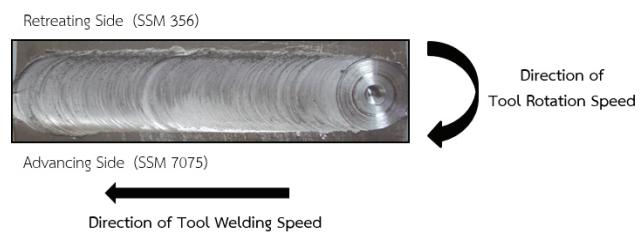
จากข้อมูลและเหตุผลดังกล่าวเป็นที่มาของงานวิจัย โดยปัจจัยที่ศึกษา คือ ความเร็วหมุนเชื่อม (รอบต่อนาที; rpm) และความเร็วเดินเชื่อม (มิลลิเมตรต่อนาที; mm/min) เพื่อศึกษา ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการเปลี่ยนแปลงลักษณะทางโลหะวิทยา (โครงสร้างทางมหภาค และจุลภาค) และสมบัติทางกล (ความแข็งแรง และความแข็ง) โดยเฉพาะของเนื้อเชื่อม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

Affected Zone; TMAZ) เพื่อความเหมาะสมทางด้านโครงสร้างทางมหภาค จุลภาค และสมบัติทางกล

2. วิธีการดำเนินงานวิจัย

2.1 วัสดุและอุปกรณ์

อะลูมิเนียมสมหล่อ กึ่งของแข็ง SSM 356 กับ SSM 7075 ที่ผ่านการหล่อแบบอัด (Squeeze Casting) ด้วยกระบวนการหล่อแบบ GISS [1] มีส่วนสมทางเคมีและสมบัติทางกล แสดงดังตารางที่ 1 และ 2 ตามลำดับนำไปตัดด้วยเครื่องเลื่อยสายพานแนวโน้ม รุ่น CS - 230 จากนั้นทำการปรับขนาดชิ้นงานทั้งสองด้านด้วยเครื่องกัดแนวตั้ง (Vertical Milling Machine) ยี่ห้อ HELLER รุ่น 2S ให้มีขนาดความกว้าง \times ความยาว คือ 50×100 mm แล้วนำแผ่นวัสดุทั้งสองชิ้นประกอบเป็นรอยต่อชัน และยึดแน่นบนอุปกรณ์จับยึดแนวเชื่อม (Fixture) ที่ถูกติดตั้งบนแท่นเครื่องกัดแนวตั้ง โดยที่ชิ้นงานจะเคลื่อนที่ไปตลอดความยาวของแนวเชื่อม ลักษณะการวางได้กำหนดให้ SSM 356 อยู่ด้านรีทรีทติ้ง (Retreating Side; RS) และ SSM 7075 อยู่ด้านแอดวานซ์ซิง (Advancing Side; AS) เนื่องจากจากคุณผู้วิจัยได้ทำการศึกษา ก่อนหน้าแล้วพบว่าถ้านำ SSM 7075 วางตำแหน่งการเชื่อมอยู่ด้าน Retreating Side จะทำให้ค่าความแข็งแรงต่ำกว่าอยู่ด้าน Advancing Side ซึ่งการเชื่อมเสียดทานแบบกวนจะกำหนดให้หัวพินอยู่กึ่งกลางรอยเชื่อม และเชื่อมตามแนวยาวของชิ้นงาน โดยมีลักษณะอุปกรณ์ แสดงดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 การวางตำแหน่งชิ้นงานเชื่อมต่อชิ้นวัสดุต่างชนิด

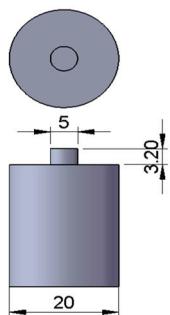
ลักษณะของหัวพินที่นำมาใช้ในการทดลอง คือ แบบทรงกระบอก (Cylindrical Pin) ขนาดของบ่ามีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 20 mm หัวพินมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 5 mm และความยาว 3.2 mm ทำจากเหล็กเครื่องมือมาตรฐาน JIS วัสดุ SKD 11 แสดงดังรูปที่ 2 การปรับมุมเอียงของเครื่องกัดแนวตั้ง และปรับระดับอุปกรณ์จับยึดชิ้นทดลองให้ได้ระดับคงที่ ตลอดความยาวของชิ้นทดลองงานเชื่อม 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 ค่าความแข็งแรงตึงของวัสดุทดลอง

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 การเตรียมเครื่องขึ้นรูปที่ใช้เชื่อมชิ้นงาน

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 จะทำการจับยึดชิ้นงานเชื่อมทั้งสองชิ้นในทาราบซึ่งยึดติดกับแท่นรองชิ้นงาน หรือพิกเจอร์ แสดงดังรูปที่ 4 เครื่องมือเชื่อม (Tool) จะจับยึดติดกับเพลาหมุนของเครื่องกัดแนวตั้ง โดยกำหนดให้เครื่องมือเชื่อมหมุนอยู่กับที่ ในขณะที่ชิ้นงานเชื่อมเคลื่อนที่ตามแนวระนาบ การเชื่อมเสียดทานแบบกวน ประกอบด้วย (1) การปรับค่าพารามิเตอร์ตามการทดลอง คือ ความเร็วหมุนเชื่อม และความเร็วเดินเชื่อม (2) หมุนกดหัวพินลงไปในเนื้อวัสดุ

จนกระทั่งปลายของหัวพินถูกกดไปในเนื้อวัสดุ และบ่าของเครื่องมือเชื่อมกดลงไปในเนื้อวัสดุ 1 mm กดแซวไว้เป็นระยะเวลา 30 วินาที (s) ในขั้นตอนนี้จะมีอุณหภูมิเนื้ยมเกิดสภาพวัสดุติกที่ดีและสามารถให้ลุวนรอบ ๆ หัวพิน ซึ่งเกิดจากบ่าของเครื่องมือทำให้เกิดความร้อนจากแรงเสียดทาน จากนั้นทำการเดินแนวเชื่อมด้วยความเร็วในการเดินแนวเชื่อมที่กำหนด (3) หัวพินก็จะเดินเชื่อมตามความเร็วในการเดินแนวเชื่อม และเส้นทางที่กำหนด เกิดการรวมตัวของวัสดุทั้งสองชิ้น (4) ตำแหน่งปลายแนวเชื่อม ก่อนยกหัวพินออกแนวเชื่อมให้หัวพินหมุนกดแซว ตำแหน่งสุดท้ายของการเชื่อมประมาณ 20 s เพื่อให้เกิดความร้อนสะสมบริเวณปลายแนวเชื่อม ป้องกันการเกิดข้อบกพร่องในแนวเชื่อม เป็นอันสิ้นสุดกระบวนการเชื่อมเสียดทานแบบกวนของทุกสภาพการทดลอง โดยการทดลองในแต่ละสภาพจะทำจำนวน 3 ช้า รวมเป็น 27 ชั้นการทดลอง



รูปที่ 3 การเตรียมหัวพินในขั้นตอนการเชื่อม

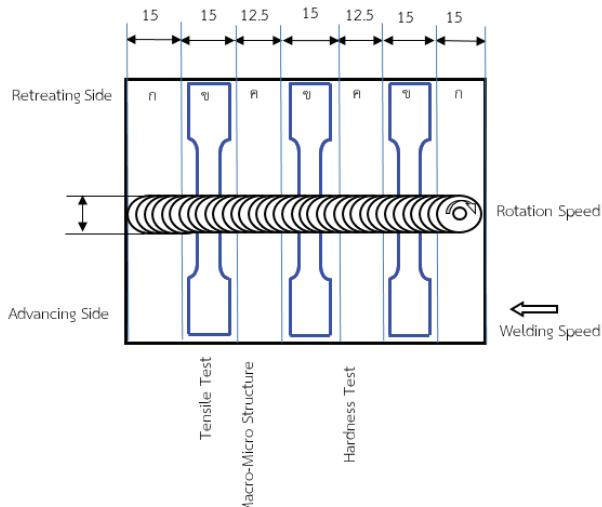
หลังจากเชื่อมตามตัวแปรที่กำหนดแล้วก็นำชิ้นงานมาสเกตแบบ แสดงดังรูปที่ 5 โดยใช้เครื่องเลื่อยสายพานแนวอนตัด เพื่อที่จะนำมาตัดแบ่งชิ้นงานทดลองไปตรวจสอบลักษณะทางโลหะวิทยา และสมบัติทางกล ชิ้นทดลองจะตัดตามขวางกับแนวเชื่อม โดยบริเวณ (ก) เป็นส่วนหัว และท้ายจะเป็นส่วนที่ตัดทึ้งไป บริเวณ (ข) ส่วนนี้จะทำการตัดเพื่อนำไปทำการทดสอบความแข็งแรง บริเวณ (ค) นำไปตรวจสอบลักษณะทางโลหะวิทยา และการทดสอบความแข็ง

2.4 การเตรียมทดสอบทางโลหะวิทยาและสมบัติทางกล

โครงสร้างทางโลหะวิทยา เมื่อนำชิ้นงานทดลองไปตัดตามการสเกตจากรูปที่ 5 ส่วน (ค) จากนั้นนำชิ้นงานทดลองไปหล่อเรซินในบล็อกที่จัดเตรียมไว้ แล้วนำไปขัดด้วยกระดาษทรายเบอร์ 300 – 1200 ตามลำดับ ต่อจากนั้นตามด้วยการขัดผ้าสักหลาดใช้ผงขัดอะกูมิน่าขนาด 5 1 และ 0.3 ไมโครเมตร (μm) ตามลำดับ เมื่อขัดเสร็จนำไปกัดกรดด้วยสารละลาย Keller's Reagent แล้วนำไปส่องดูโครงสร้างทางจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบลำแสง เพื่อคุณภาพและรูปร่างของเกร็นที่บริเวณแนวเชื่อมจากกระบวนการเชื่อมเสียดทานแบบกวน



รูปที่ 4 ลักษณะการจับยึดพิกเจอร์ขณะทำการทดสอบ



รูปที่ 5 การสเกตแบบชั้นทดลองเพื่อตัดชิ้นงานเขื่อมสำหรับการตรวจสอบ

การทดสอบความแข็งแรง ชิ้นงานซึ่งได้จากการตัดแบบในส่วน (ข) จากรูปที่ 5 ถูกนำมาแปรรูปชิ้นงานตามมาตรฐานการอ้างอิง ASTM-E8M ด้วยเครื่องกัดแนวตั้ง เพื่อนำไปทดสอบความแข็งแรงของแนวเขื่อม โดยให้รอยเขื่อมอยู่ตระหง่านของชิ้นงาน และทดสอบด้วยเครื่องทดสอบทนสอบเอนกประสงค์ (Universal Testing Machine) ด้วยอัตราเร็วในการเคลื่อนที่ของหัวจับที่ 1.00 mm/min

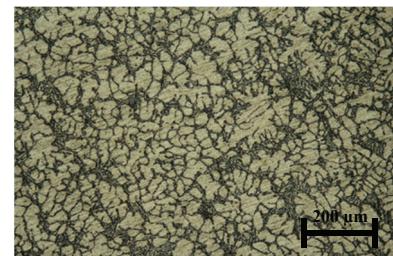
การทดสอบความแข็ง ชิ้นงานส่วน (ค) จากรูปที่ 5 นำมาทดสอบความแข็งของแนวเขื่อม ใช้เครื่องทดสอบแบบไมโครวิกเกอร์กับบริเวณพื้นที่หน้าตัดของแนวเขื่อม วัดขนาดจากด้านบนรอยเขื่อมลงมา 2 mm เพื่อให้แนวการทดสอบอยู่บริเวณตรงกลางรอยเขื่อมพอดี และเป็นตัวแทนค่าความแข็งของแนวเขื่อม โดยการกดจะเริ่มกดตั้งแต่ตระหง่านของแนวเขื่อม ออกไปจนสุดระยะของแนวเขื่อม ระยะห่างของรอยกดแต่ละจุด 1.0 mm และห่างจากจุดศูนย์กลางแนวเขื่อมออกไปข้างละ 14 mm โดยแรงกดที่ใช้ 100 กรัม (ก) และเวลาในการกด 10 s

3. ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลงานวิจัย

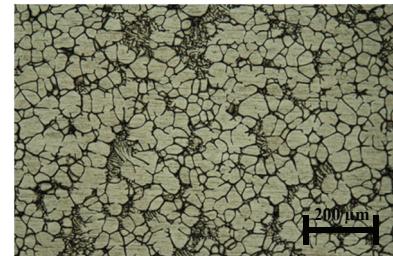
งานวิจัยนี้ศึกษาลักษณะทางโลหะวิทยาและสมบัติทางกลของการเขื่อมเสียดทานแบบกวนของอะลูมิเนียมผสมหล่อ กึ่งแข็งต่างชนิด ซึ่งได้ผลจากการทดลองของงานวิจัยดังต่อไปนี้

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 ลักษณะโครงสร้างโลหะวิทยาของแนวเขื่อม

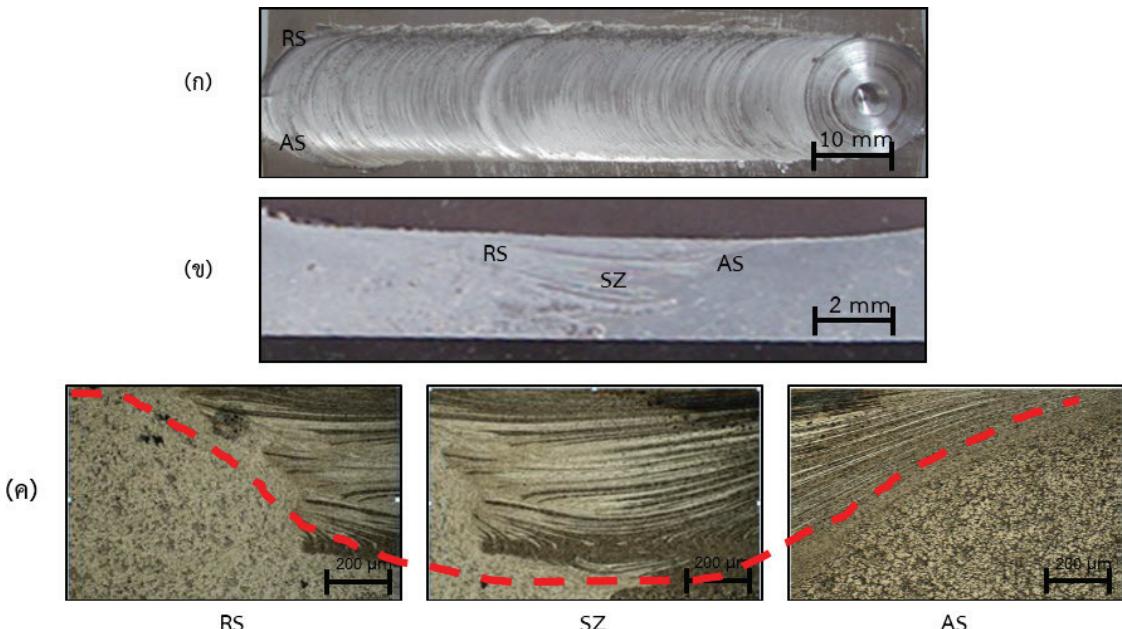
โครงสร้างทางโลหะวิทยาสามารถวิเคราะห์ผลการทดลองออกเป็น 3 ลักษณะ คือ ผิวด้านบนรอยเขื่อม โครงสร้างทางมหภาค และโครงสร้างทางจุลภาค แสดงดังรูปที่ 7-9 โดยผลจะแยกออกเป็นระดับความเร็วที่เขื่อม ส่วนความเร็วเดินเขื่อมนั้นมีผลที่เหมือนกัน

ผิวน้ำด้านบนของรอยเขื่อม แสดงดังรูปที่ 7-9 (ก) เป็นรอยชุกรูมิไม่เรียบ มีลักษณะคล้ายเกล็ดปลา ซึ่งเกิดขึ้นจากรอยการหมุนของบ่าของเครื่องมือเขื่อม เมื่อเปรียบเทียบห้องสามความเร็วที่เขื่อม พบว่า ความเร็วที่เขื่อมต่ำ (710 rpm) มีความเรียบมากที่สุด เนื่องมาจากความร้อนจากแรงเสียดทานที่สะสมอยู่ในเนื้ออะลูมิเนียมมีความเหมาะสม ก็สามารถเกิดการไหลวนของเนื้ออะลูมิเนียมที่อยู่ในสภาวะพลาสติกได้ดี และเมื่อเพิ่มความเร็วที่เขื่อมสูงขึ้น การเกิดรอยชุกรูมิในแนวเขื่อมก็มีมากขึ้นเนื่องมาจากความร้อนที่เกิดจากการเสียดทานเข้าไปสะสมในแนวเขื่อมที่ไม่มากพอที่จะทำให้เนื้ออะลูมิเนียมอยู่ในสภาวะพลาสติก ดังนั้นเมื่อเริ่มเดินแนวเขื่อมจึงทำให้ไม่เกิดการไหลวนของเนื้ออะลูมิเนียมบนแนวเขื่อม [14]

โครงสร้างมหภาคของรอยเขื่อม แสดงดังรูปที่ 7-9 (ข) รอยเขื่อมมีลักษณะที่ประสานกันเป็นอย่างดีของหงส์สองชิ้น บริเวณที่รอยเขื่อมถูกกวน ไม่มีข้อบกพร่องได้เกิดขึ้นบนแนวเขื่อม ความร้อนจากแรงเสียดทานก็สามารถสะสมในรอยเขื่อมทำให้เนื้อ

วัสดุอยู่ในสภาพพลาสติกเกิดการไหลวนรอบๆ หัวพิน [14] เมื่อแนวเชื่อมเย็นตัวจะมีลักษณะภาพร่างเป็นชั้นๆ สลับกันระหว่างเนื้ออะลูมิเนียมทั้งสองชนิด ซึ่งจะเห็นได้ว่า เนื้ออะลูมิเนียม SSM 356 จะล้ำเข้าไปด้านของ SSM 7075 มากกว่า เห็นได้ชัดเจน ตามทิศทางการกวนของหัวพิน [14-16] เนื่องมาจากการวางแผนการเชื่อม วัสดุ SSM 356 อยู่ใน

ด้าน Retreating Side ทำให้หัวพินหมุนวนเนื้ออะลูมิเนียมที่อยู่ในสภาพพลาสติกด้วยแรงเหวี่ยงจากความเร็วหมุนเชื่อมมาฝั่งทางด้าน Advancing Side ซึ่งเป็นทิว่างทำแท่นของวัสดุ SSM 7075 ทำหน้าที่รับเนื้อวัสดุมากระแทกและเกิดการดันเนื้อวัสดุของ SSM 356 มาฝั่งด้าน SSM 7075 [14-18]



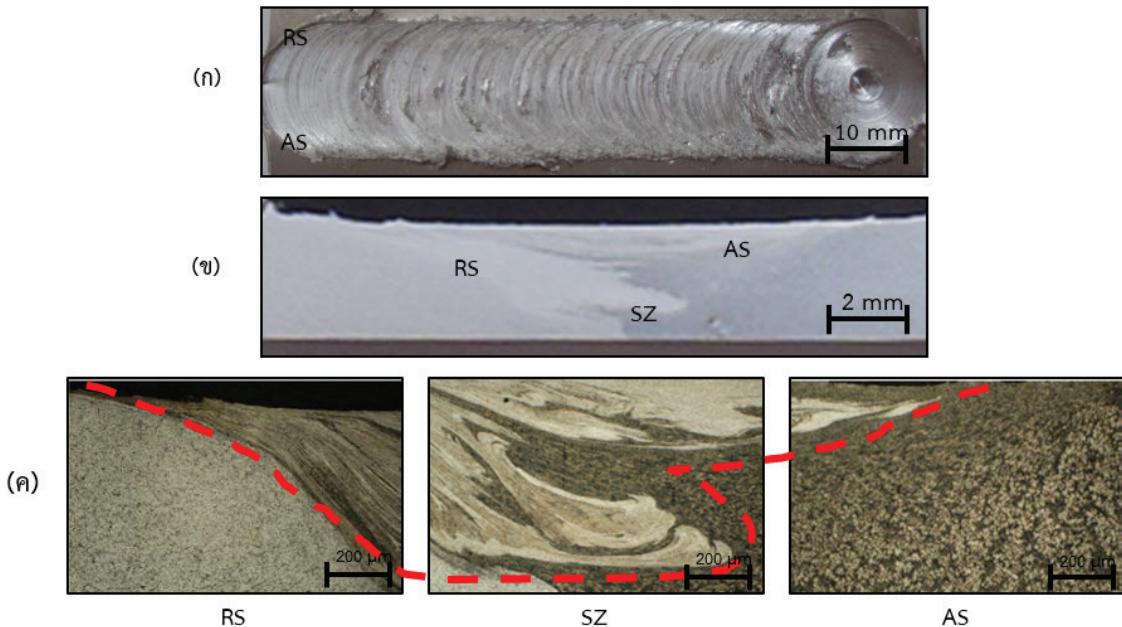
รูปที่ 7 โครงสร้างโลหะวิทยาของแนวเชื่อมที่ความเร็วหมุนเชื่อม 710 rpm ความเร็วหมุนเชื่อม 80 mm/min

ลักษณะโครงสร้างจุลภาค แสดงดังรูปที่ 7-9 (ค) ของบริเวณแนวเชื่อมมีการรวมตัวกันของเนื้อวัสดุทั้งสองชนิดขึ้นอย่างเห็นได้ชัด โดยจะมีการเรียงตัวสลับกันของวัสดุทั้งสองชนิด ที่บริเวณตรงกลางเนื้อเชื่อม (SZ) โดยเนื้อวัสดุมีความละเอียดเนื่องจากถูกกดและให้ผลกระทบกับตัวกวนในขณะกวน เกรนของ SSM 356 จะมีลักษณะยาวเรียวยาว ที่ตรงกลางของแนวเชื่อมระหว่างเนื้อวัสดุของสองชนิดเกรนจะมีความละเอียดและมีขนาดเล็กกว่าเนื้อโลหะเดิม เกรนมีความละเอียดมากโดยเฉพาะ SSM 7075 ซึ่งด้านบนของบริเวณแนวกวนจะมีเนื้อโลหะชนิดนี้สมอยู่เป็นจำนวนมากเนื่องจากพัดพาของตัวกวนในขณะกวน [17] การสัมผัสระหว่างผิวชั้นงานด้านบนกับป่าของตัวกวนจะไก้ก้าว่าด้านล่าง ส่งผลให้เกรนมีความละเอียดเนื้อวัสดุบางส่วนจะมีการเรียงตัวกันเป็นชั้นๆ สลับกันไป [18] วัสดุทั้งสองชนิดเกิดสภาพพลาสติกการอัดและการดันเนื้อวัสดุทั้งสองอย่างต่อเนื่อง โดยทั่วไปการเชื่อมเสียดทานแบบกวนความเร็วหมุนเชื่อมของเครื่องมือ เป็นปัจจัยที่สำคัญส่งผลให้เกิดความร้อนจากแรงเสียดทาน ถ้าความร้อนไม่เพียงพอเกิดการไหลของพลาสติกไม่ดี ส่งผลต่อข้อบกพร่องในแนวเชื่อม และเกิดการผสมผสานกันของเนื้อวัสดุที่ไม่ดีพอ [18]

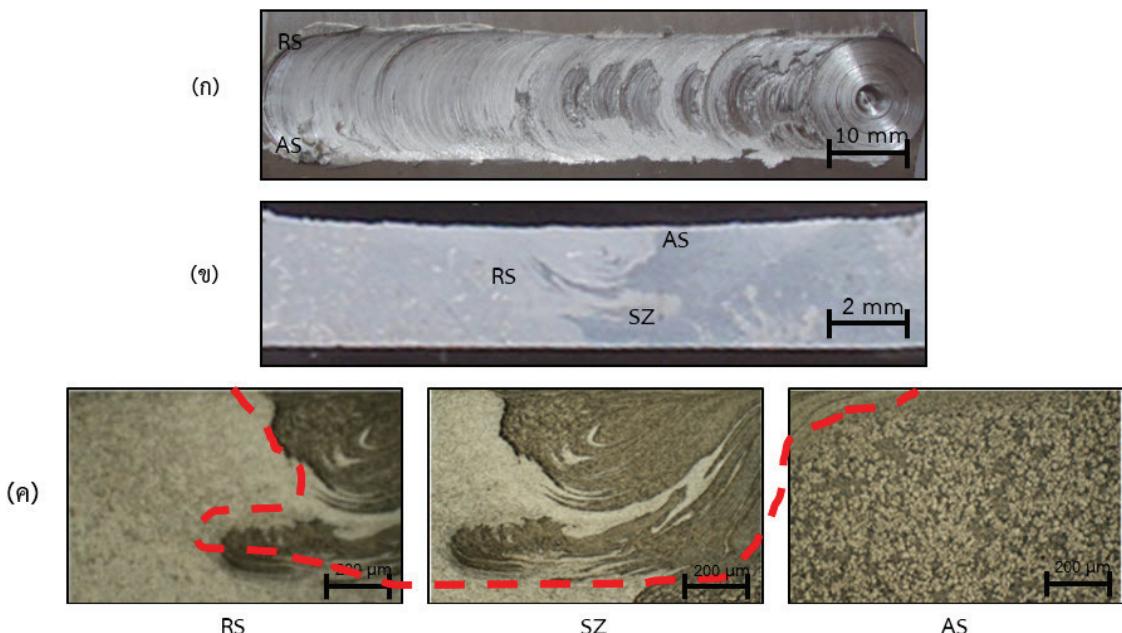
ความแตกต่างระหว่างโครงสร้างจุลภาคของความเร็วหมุนเชื่อมทั้ง 3 ระดับ พบว่า รูปร่างของเกรนเกิดการยึดยาวและบิดเบี้ยวซึ่งเกิดจากแรงหมุนเหวี่ยงของเครื่องมือเชื่อม และเมื่อ

ปรับเปลี่ยนความเร็วรอบจาก 710 rpm เป็น 1000 rpm การยึดยาวและบิดเบี้ยวมีความรุนแรงเพิ่มมากขึ้น นอกจากนี้ยังเกิดการผสมผสานของเนื้อวัสดุที่เห็นได้ชัด แสดงดังรูปที่ 7-9(ค) เนื้อวัสดุฝั่ง SSM 356 เข้ามาผสมผสานกับเนื้อวัสดุฝั่ง SSM 7075 และมีการผสมผสานกันมากขึ้นเมื่อเพิ่มความเร็วหมุนเชื่อมมากขึ้น

นอกจากนี้โครงสร้างพื้นฐานของเกรนของวัสดุทั้ง 2 ชนิดมีลักษณะเป็นก้อนกลม (**A**) จะสังเกตได้ว่าในบริเวณแนวเชื่อม (SZ) โครงสร้างก้อนกลมถูกกดทำลายจนไม่เหลือร่องรอยของก้อนกลมที่เป็นแบบนี้เนื่องมาจากการหมุนวนของเครื่องมือเชื่อมทำหน้าที่ส่งผลกระทบโดยตรงต่อแนวเชื่อม โดยที่หัวพินจะอยู่บริเวณตรงกลางแนวเชื่อมพอดี ทำให้เนื้อวัสดุบริเวณนี้มีลักษณะละเอียดกว่าบริเวณอื่นๆ และมีส่วนประกอบของวัสดุของทั้งสองชนิดเข้าด้วยกันสลับกันเป็นชั้นๆ อย่างเห็นได้ชัดเจน ส่วนบริเวณด้านข้างของบริเวณ SZ คือ บริเวณ TMAZ ทั้งด้าน RS และ AS ลักษณะเกรนก้อนกลมที่เปลี่ยนแปลงไปเป็นลักษณะแบบบิดเบี้ยว และยึดยาวตามทิศทางการหมุนของเครื่องมือเชื่อม ซึ่งสังเกตได้จากทั้งด้าน RS และ AS เป็นบริเวณด้านข้างของเครื่องมือเชื่อมที่บริเวณบ่ากวนทำให้ได้รับผลกระทบจากการหมุนวนในลักษณะการหมุนเหวี่ยงเนื้อโลหะ



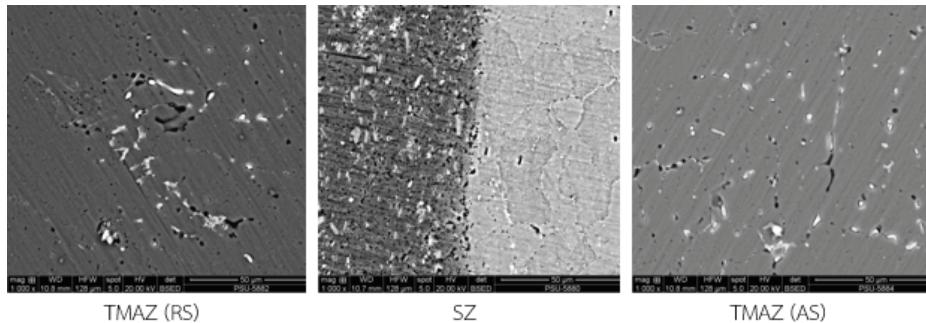
รูปที่ 8 โครงสร้างโลหะวิทยาของแนวเชื่อมที่ความเร็วหมุนเขื่อม 1000 rpm ความเร็วหมุนเขื่อม 112 mm/min



รูปที่ 9 โครงสร้างโลหะวิทยาของแนวเชื่อมที่ความเร็วหมุนเขื่อม 1400 rpm ความเร็วหมุนเขื่อม 160 mm/min

โครงสร้างทางจุลภาค SEM ของรอยเชื่อม ที่ความเร็วหมุนเขื่อมที่ 1000 rpm ความเร็วเดินเชื่อม 112 mm/min แสดงดังรูปที่ 10 เกิดการแตกหักของเฟส α กระჯัดกระจายทั่วบริเวณที่ถูกการ บริเวณแนวเชื่อม SZ เกรนมีความละเอียดมากกว่า บริเวณที่มีผลกระทบอันเนื่องมาจากการร้อน TMAZ

เนื่องมาจากบริเวณแนวเชื่อมจะถูกหมุนวนด้วยหัวพินโดยตรง จึงทำให้เกรนบริเวณนี้มีความละเอียดมากกว่า และมีขนาดเล็ก เมื่อเทียบกับเกรนบริเวณเนื้อโลหะเดิม อันเนื่องมาจากการเร็วหมุนเขื่อม และความเร็วเดินเชื่อมมีอิทธิพลโดยตรง [19-20]



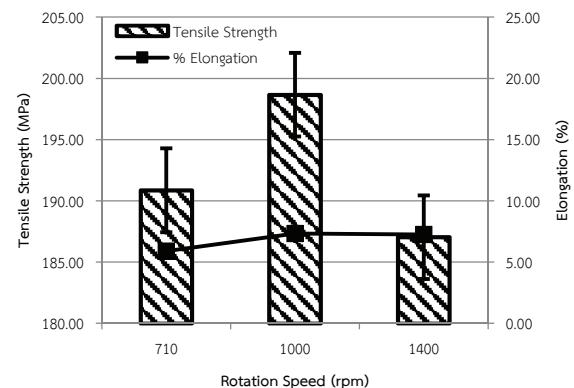
รูปที่ 10 โครงสร้าง SEM บริเวณแนวเชื่อม

3.3 สมบัติความแข็งแรงของแนวเชื่อม

ผลการทดลองความแข็งแรง แสดงดังรูปที่ 11 พบว่า ความเร็วหมุนเชื่อมจะผลักและดันให้วัสดุไหลวนจากด้านหน้าไปด้านหลังของเครื่องมือเพื่อสร้างความร้อนจากแรงเสียดทาน ได้ส่งผลกระทบต่อการเปลี่ยนแปลงของเกรนและการผสานผสานของเนื้อวัสดุ ความร้อนจากแรงเสียดทานที่เหมาะสมจะนำไปสู่การผสานผสานของเนื้อวัสดุที่ดี เช่น ที่ความเร็วหมุนเชื่อม 1000 rpm ส่งผลให้ค่าความแข็งแรงเฉลี่ยสูงสุด คือ 198.67 MPa เป็นที่สังเกตความเร็วหมุนเชื่อมของเครื่องมือสูงขึ้นเกิดการสร้างความร้อนจากแรงเสียดทานเพิ่มขึ้น แต่กลับว่ามีอัตราการระบายความร้อนช้าลงนำไปสู่อุณหภูมิของเกรนได้ช้าและเกิดการสลายตัวของเกรน [21-22] จึงทำให้มีค่าความแข็งแรงต่ำ ส่วนที่ความเร็วหมุนเชื่อมของเครื่องมือต่ำลงทำให้เกิดการผสานผสานของเนื้อวัสดุที่ไม่เหมาะสมนำไปสู่การลดลงของค่าความแข็งแรง เนื่องจากเกิดความร้อนจากแรงเสียดทานที่ต่ำ [18]

การผสานผสานของเนื้อวัสดุที่เห็นได้ชัดจากรูปที่ 7-9 นั้น แสดงให้เห็นถึงสมบัติทางกลด้านความแข็งแรงของแนวเชื่อมที่มีมากขึ้นเมื่อเทียบกับค่าความแข็งแรงของแนวเชื่อมของ SSM 356 การบิดเบี้ยวของเกรนที่เกิดจากแรงหมุนเหวี่ยงของเครื่องกัดแนวตั้งส่งผ่านมายังเครื่องมือเชื่อมกับกัน ส่งผลให้ค่าความแข็งแรงเพิ่มมากขึ้นเมื่อปรับเปลี่ยนความเร็วรอบมากขึ้น ดังเช่นผลการทดลองที่ได้นำเสนอ น พบว่าเมื่อปรับเปลี่ยนความเร็วรอบจาก 710 rpm เป็น 1000 rpm รูปร่างของเกรนเกิดการบิดเบี้ยวอย่างมาก ส่งผลให้ค่าความแข็งแรงเพิ่มขึ้นไปด้วย

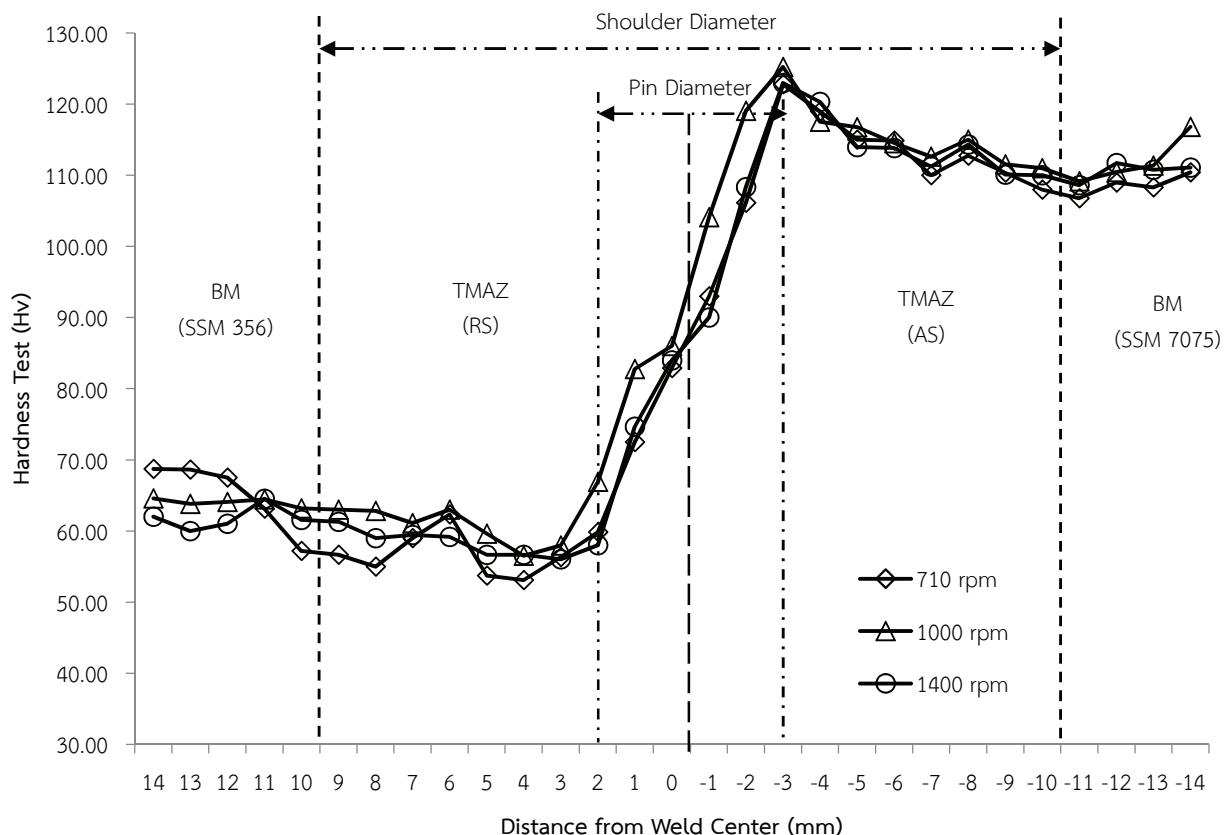
เมื่อเทียบค่าความแข็งแรงกับเนื้อโลหะเดิม SSM 7075 พบว่าต่ำกว่าประมาณ 12 เบอร์เซ็นต์ แต่จะสูงกว่าเมื่อเทียบกับ SSM 356 ประมาณ 9 เบอร์เซ็นต์ ที่ค่าความเร็วหมุนเชื่อม 1000 rpm ให้ค่าความแข็งแรงเฉลี่ยสูงสุด 198.67 MPa ส่วนค่าความแข็งแรงเฉลี่ยต่ำสุดที่ 187.03 MPa ที่ความเร็วหมุนเชื่อมที่ 1400 rpm อย่างไรก็ตามค่าเบอร์เซ็นต์การยืด (Elongation) มีค่าที่ใกล้เคียงกันมาก คือ จะมีค่าเบอร์เซ็นต์การยืดของการทดลองทั้งหมดอยู่ในช่วง 5-10 %



รูปที่ 11 ค่าความแข็งแรงของแนวเชื่อม

3.4 สมบัติความแข็งของแนวเชื่อม

ผลการทดลองความแข็ง พบว่าค่าความแข็งของแนวเชื่อมวัสดุฐาน SSM 356 มีความแข็งต่ำกว่า SSM 7075 แสดงดังรูปที่ 12 ค่าความแข็งที่ต่ำจะปรากฏอยู่ในบริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อนทางกล (Thermo-Mechanically Affected Zone; TMAZ) ของทั้งสองด้านของแนวเชื่อม การอ่อนตัวของความแข็งในบริเวณนี้เกิดจากการหมุนเหวี่ยงของเกรนที่หายไปบางส่วนไปสมอยู่ในบริเวณแนวเชื่อม (Stir Zone; SZ) ที่พัดพาไปโดยหัวพินทำให้บริเวณแนวเชื่อมมีความแข็งเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ สังเกตจากด้าน SSM 356 ความแข็งเริ่มขยายขึ้นมากกว่าเนื้อโลหะเดิม ซึ่งเกิดจากการหมุนของเนื้อโลหะด้าน SSM 7075 มาผสมกันในทางกลับกัน ด้าน SSM 7075 กลับมีค่าต่ำลงเรื่อยๆ เมื่อเทียบกับเนื้อโลหะเดิมเพราเดเกิดจากการนำวัสดุที่มีความอ่อนกว่ามาผสมกันนั้นเอง [20] ข้อสังเกตค่าความแข็งของความเร็วหมุนเชื่อมของเครื่องมือที่ 1000 รอบนาที ใน SZ และ TMAZ สูงกว่าทั้งสองความเร็วรอบ การเพิ่มขึ้นของปริมาณเกรนที่ตั้งกองในแนวเชื่อมมากกว่า พร้อมกับการแข็งตัวในช่วงการเกิดสภาพพลาสติกมีค่าเร็วกว่าทำให้มีค่าความแข็งที่ต่ำกว่า [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 ความร้อนจากแรงเสียดทานจะเกิดการสะสมในรอยเชื่อมให้อยู่ในสภาพพลาสติกเกิดการไหลวนรอบ ๆ หัวพิน จะมีลักษณะพาร่างเป็นชั้นๆ ลับกันระหว่างเนื้ออะลูมิเนียม SSM 356 กับ SSM 7075 ส่งผลต่อโครงสร้างจุลภาคโดยตรง

โครงสร้างจุลภาคบริเวณแนวเชื่อม มีการผสมผสานของวัสดุสองชนิด (Mixing) เกิดจากการหมุนกวนของเครื่องมือที่ทำให้เกิดการเสียรูปในสภาพพลาสติกในลักษณะการอัดและการดันเนื้อวัสดุทั้งสองชนิดให้ผสมผสานเข้าด้วยกัน โดยเฉพาะในบริเวณแนวเชื่อม (SZ) วัสดุทั้งสองชนิดจะเกิดสภาพพลาสติกการอัดและการดันเนื้อวัสดุทั้งสองอย่างต่อเนื่อง

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

ที่ 187.03 MPa ที่ความเร็วหมุนเชื่อมที่ 1400 rpm ค่าเบอร์เช็นต์การยืด (% 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 และผู้วิจัยขอขอบคุณสาขาวิชาศิวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้เครื่องมือและอุปกรณ์ในการทดลอง งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] รอมภูน บุรพา, รังสินี แคนยุกต์ และเจษฎา วรรณสินธุ์. (2552). การพัฒนาระบวนการผลิตโลหะกึ่งของแข็งโดยการพ่นฟองแก๊สขณะแข็งตัวสำหรับอะลูมิเนียมผสมเกรด A356. การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมศาสตร์

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

[2] ประภาศ เมืองจันทร์บุรี. (2550). การเชื่อมและโลหะวิทยาการเชื่อมอะลูมิเนียม. 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, นกิสพร มีมงคล และ ประภาศ เมืองจันทร์บุรี. (2551). ศึกษาสมบัติทางโลหะวิทยา และทางกลของการเชื่อมอะลูมิเนียม A356 ซึ่งหล่อโดยเทคโนโลยี การหล่อ กึ่งของแข็ง ด้วยกรรมวิธีการเชื่อมเสียดทานแบบกวน. การประชุมวิชาการ ช่างงานวิศวกรรมอุตสาหกรรม ประจำปี พ.ศ. 2551, 20-22 ตุลาคม 2551, สงขลา, 1111-1116.

[8] คงชัย เครือผือ และ ประภาศ เมืองจันทร์บุรี. (2551). อิทธิพลของความเร็วในการเชื่อมและรูปแบบของหัวพินที่มีผลต่อสมบัติทางโลหะวิทยาและสมบัติทางกลในการเชื่อมอะลูมิเนียมผสม A 356 ที่หล่อโดยเทคโนโลยีหล่อ กึ่งของแข็งด้วยกรรมวิธีการเชื่อมเสียดทานแบบกวน. การประชุมวิชาการช่างงานวิศวกรรมอุตสาหกรรม ประจำปี พ.ศ. 2551, 20-22 ตุลาคม 2551, สงขลา, 933-939.

[9] วรพงศ์ บุญช่วยแทน, จักรนันทร์ ฉัตรทอง, สุรศิทธิ์ ระหว่างวงศ์ และ รอมภูวน บุรพา. (2556). การเชื่อมอะลูมิเนียมผสมหล่อ กึ่งของแข็ง SSM 356 กับ SSM 6061 โดยกรรมวิธีการเชื่อมเสียดทานแบบกวน. 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. Muangjunkuree. (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 profile 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 (JTMC) 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. Koshy Mathews. (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 นุยช่วยแทน
สาขาวิศวกรรมอุตสาหการ
คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล
ศรีวิชัยสังขลา



อาจารย์รอมฎอน นุรุพาน
สาขาวิศวกรรมอุตสาหการ
คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล



ผศ.ดร.ประภาศ เมืองจันทร์บุรี
ภาควิชาศวกรรมเหมืองแร่และวัสดุ
คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์สังขลา