

ปัจจัยที่มีผลต่อการเชื่อมเสียดทานแบบกวนต่างความหนาของอะลูมิเนียม  
ผสมหล่อกิ่งของแข็งต่างชนิดระหว่าง 2024 กับ 7075

EFFECT OF FACTORS TO FRICTION STIR WELDING TAILOR WELD  
BLANKS FOR ALUMINUM CASTING SEMI-SOLID METAL DISSIMILAR  
JOINT BETWEEN 2024 AND 7075

วรพงศ์ บุญช่วยแทน<sup>1,4</sup>, โรมฎอน บุระพา<sup>2,4</sup> และ วรธนพร ชีววุฒิพงษ์<sup>3,4</sup>

<sup>1,2,3</sup>อาจารย์, สาขาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย, 1 ถ.ราชดำเนินนอก ต.บ่อหย่าง อ.เมือง จ.สงขลา 90000,

<sup>1</sup>worapong.b@rmutsv.ac.th, <sup>2</sup>romadorn.b@hotmail.com, <sup>3</sup>c.watthanaphon@gmail.com

<sup>4</sup>นักวิจัย, หน่วยเทคโนโลยีการแปรรูปวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยี

ราชมงคลศรีวิชัย, 1 ถ.ราชดำเนินนอก ต.บ่อหย่าง อ.เมือง จ.สงขลา 90000

Worapong Boonchouytan<sup>1,4</sup>, Romadon Burapa<sup>2,4</sup> and Watthanaphon Cheewawuttipong<sup>3,4</sup>

<sup>1,2,3</sup>Lecturer, Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering,

Rajamankala University of Technology Srivijaya, 1 Ratchadamnoennok Rd.

Boyang Sub-district, Muang District, Songkhla 90000, Thailand,

<sup>1</sup>worapong.b@rmutsv.ac.th, <sup>2</sup>romadorn.b@hotmail.com, <sup>3</sup>c.watthanaphon@gmail.com

<sup>4</sup>Researcher, Materials Processing Technology Research Unit, Faculty of Engineering,

Rajamankala University of Technology Srivijaya, 1 Ratchadamnoennok Rd.

Boyang Sub-district, Muang District, Songkhla 90000, Thailand

### บทคัดย่อ

การเชื่อมเสียดทานแบบกวนต่างความหนาของอะลูมิเนียมผสมหล่อกิ่งของแข็งต่างชนิดเหมาะ  
สำหรับการใช้งานอุตสาหกรรมการบินและอวกาศ เนื่องจากการลดน้ำหนักและลดต้นทุนการผลิต  
งานวิจัยครั้งนี้ใช้วัสดุเป็นอะลูมิเนียมหล่อกิ่งของแข็ง 2024 ความหนา 4 มิลลิเมตร และอะลูมิเนียม  
หล่อกิ่งของแข็ง 7075 ความหนา 6 มิลลิเมตร ภายใต้ความเร็วหมุนเชื่อม 1320-2200 รอบต่อนาที  
และความเร็วเดินเชื่อม 80-160 มิลลิเมตรต่อนาที เพื่อศึกษาปัจจัยการเชื่อมที่มีผลต่อโครงสร้าง  
มหภาค โครงสร้างจุลภาค ความแข็งแรงดึง และความแข็ง ผลการทดลองพบว่า การเพิ่มความเร็ว  
หมุนเชื่อมมากขึ้นจะทำให้ความแข็งแรงดึงมีค่าลดลง และการเพิ่มความเร็วเดินเชื่อมให้เร็วขึ้น

จะทำให้ความแข็งแรงดิ่งมีค่าลดน้อยลง บริเวณแนวแกนเกรนถูกทำให้ละเอียดด้วยการเพิ่มขึ้นของความร้อนและการเปลี่ยนรูปเชิงพลาสติก ความแข็งแรงดิ่งมากที่สุด คือ 215.52 MPa ที่ความเร็วหมุนเชื่อม 1750 รอบต่อนาที ความเร็วเดินเชื่อมที่ 160 มิลลิเมตรต่อนาที และความแข็งแรงสูงสุด บริเวณแนวแกน ที่ได้จากการทดลอง คือ 135.0 HV<sub>0.1</sub> ที่ความเร็วหมุนเชื่อม 1320 รอบต่อนาที และความเร็วเดินเชื่อม 120 มิลลิเมตรต่อนาที

**คำสำคัญ:** การเชื่อมเสียดทานแบบกวน, การเชื่อมต่างความหนา, อะลูมิเนียมผสมหล่อกิ่งของแข็ง, วัสดุต่างชนิด

### ABSTRACT

Friction stir welding in tailor weld blanks of dissimilar joint, semi-solid castings, suitable for applications in the aerospace industry. Due to weight loss and lower production costs. This research uses materials made of aluminum semi-solid cast 2024, thickness 4 mm and aluminum semi-solid cast 7075, thickness 6 mm under rotation speed 1320-2200 rpm and welding speed 80-160 mm/min in to study the welding factors affecting macrostructures, microstructure, tensile strength and hardness. The results showed that increasing the rotation speed increases the tensile strength to be reduced and increasing the welding speed faster will result in lower tensile strength values. The stir zone grain area is fined with the increase in heat and plastic deformation. The maximum tensile strength is 215.52 MPa at the rotation speed of 1750 rpm, welding speed at 160 mm/min and the maximum hardness of the SZ area obtained from the experiment is 135.0 HV<sub>0.1</sub> at the rotation speed of 1320 rpm and welding speed of 120 mm/min.

**KEYWORDS:** Friction Stir Welding, Tailor Weld Blanks, Aluminum Casting Semi-Solid Metal, Dissimilar Joint

### 1. บทนำ

อะลูมิเนียม AA2024 และ AA7075 เป็นโลหะผสมอะลูมิเนียม 2 ชนิดหลักที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมการบินและอวกาศ เนื่องจากมีความแข็งแรงสูง ความหนาแน่นต่ำ ความทนทานต่อการแตกหักสูง และสามารถปรับปรุงสมบัติได้ดีเมื่อผ่านกระบวนการทางความร้อน [1] ความจำเป็นในการเชื่อมต่อวัสดุที่ไม่เหมือนกันมีการเติบโตมากในอุตสาหกรรมต่างๆ เนื่องจากมีความต้องการส่วนประกอบที่จะทนต่อสภาพการทดสอบสมบัติทางกลที่ซับซ้อน [2] การเชื่อมต่อโลหะผสมมีข้อบกพร่องหลายอย่าง เช่น ความพรุน รอยแตกร้อน การลดความแข็งแรง และความ

ยึดหยุ่นในพื้นที่รอยเชื่อม 1 การเชื่อมเสียดทานแบบกวน (Friction Stir Welding: FSW) เป็นการเชื่อมโลหะในสภาวะของแข็งเป็นเทคนิคที่ได้รับการพัฒนาขึ้นโดยสถาบันเชื่อมของเคมบริดจ์ ประเทศอังกฤษ [3] กรรมวิธีนี้ลดอุณหภูมิที่ถูกรสร้างขึ้นจากการหมุนของเครื่องมือเชื่อมไม่เกินไปจุดหลอมเหลวของวัสดุช่วยแก้ไขปัญหาที่เกิดจากการเชื่อมในสภาวะของเหลว วิธี FSW เหมาะอย่างยิ่งสำหรับการเชื่อมโลหะอะลูมิเนียมผสมที่มีความสามารถในการเชื่อมไม่ตี เช่น 2xxx และ 7xxx [4]

โครงสร้างจุลภาคของอะลูมิเนียมอัลลอยด์ใน FSW โดยปกติจะเกี่ยวข้องกับบริเวณแนวกวน (Stir Zone: SZ) บริเวณผลกระทบทางความร้อนจากทางกล (Thermal Mechanical Affect Zone: TMAZ) บริเวณผลกระทบความร้อน (Heat Affect Zone: HAZ) และเนื้อโลหะเดิม (Base Metal: BM) การเชื่อม FSW ส่งผลให้อุณหภูมิในแนวเชื่อมเพิ่มขึ้นถึง 400-550 องศาเซลเซียส ( $^{\circ}\text{C}$ ) ภายในบริเวณ SZ ที่อุณหภูมิสูงเช่นนี้ การตกตะกอนสามารถละลายลงในอะลูมิเนียมเมทริกซ์ซึ่งขึ้นอยู่กับชนิดของโลหะผสมและอุณหภูมิสูงสุด [5] ดังนั้นจึงจำเป็นต้องใช้การรักษาความร้อนหลังจากการเชื่อมโลหะผสมอะลูมิเนียม 2xxx และ 7xxx จึงเป็นสิ่งจำเป็นเพื่อให้ได้สมบัติทางกลที่ต้องการ

การเชื่อมต่างความหนา (Tailored Welded Blanks: TWBs) ได้นำมาประยุกต์ใช้ครั้งแรกในอุตสาหกรรมการประกอบยานยนต์ แนวคิดนี้หัวใจหลักคือการเชื่อมวัสดุที่มีความหนาแตกต่างกันเพื่อปรับปรุงกระบวนการผลิต ส่งเสริมการใช้วัสดุอย่างมีประสิทธิภาพ การกระจายน้ำหนักเชิงโครงสร้างที่ดีขึ้น [6] การเพิ่มประสิทธิภาพน้ำหนักของโครงสร้างและการลดต้นทุน กระบวนการดังกล่าวยังเป็นที่สนใจมากขึ้นสำหรับภาคการขนส่งอื่นๆ เช่น อุตสาหกรรมการบินและอวกาศ อุตสาหกรรมการต่อเรือ เป็นต้น แม้จะมีข้อได้เปรียบที่น่าสนใจอยู่มากแต่การเชื่อมประสานแบบหลอมละลายนั้นจะส่งผลต่อประสิทธิภาพทางกลของแนวเชื่อม ดังนั้นเทคโนโลยีการเชื่อมสถานะของแข็ง เพื่อให้อุณหภูมิของกระบวนการเชื่อมต่ำลง (ต่ำกว่าอุณหภูมิหลอมละลาย) คือ การเชื่อมเสียดทานแบบกวน (Friction Stir Welding: FSW) ที่ได้รับการพัฒนามากขึ้น เช่น ศึกษาสมบัติทางกลของการเชื่อมเสียดทานแบบกวนของโลหะผสม 2024-T3 และ 7075-T6 แสดงให้เห็นว่าความแข็งแรงเพิ่มขึ้นที่ด้าน Advancing Side (AS) และลดลงสู่ด้าน Retreating Side (RS) ของการเชื่อมเสียดทานแบบกวน [7] ศึกษาผลของกระบวนการทางความร้อนหลังการเชื่อมต่อสมบัติรอยเชื่อมของการเชื่อมเสียดทานแบบกวนโลหะผสมอะลูมิเนียม 2024-T4 และ 7075-T6 ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าขั้นตอนกระบวนการทางความร้อนหลังการเชื่อมโลหะทั้งสอง 2024-T6 และ 7075-T6 จะช่วยเพิ่มความแข็งแรงทางกลของรอยเชื่อมให้สูงขึ้น [8] ศึกษาการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงรูปของการเชื่อมต่อชนต่างความหนาโดยใช้หัวพินที่แตกต่างกัน พบว่าช่องว่างที่เชื่อมด้วยเครื่องมือเชื่อมหัวพินรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสมีสมบัติการขึ้นรูปที่ดีกว่าเมื่อเทียบกับรูปแบบของเครื่องมือเชื่อมหัวพินแบบอื่นๆ [9] จะเห็นได้ว่าการเชื่อมเสียดทานแบบกวนอะลูมิเนียมหล่อกิ่ง

ของแข็ง (Semi Solid Metal: SSM) ยังเป็นที่นิยมใช้เฉพาะในวงการวิจัยเท่านั้น ยังไม่ได้นำอะลูมิเนียมหล่อกิ่งของแข็งมาใช้ในงานอุตสาหกรรมมากนัก ดังนั้นงานวิจัยนี้ได้นำเอาข้อดีของสมบัติทางกลวัสดุสองชนิด คือ SSM 2024 สามารถใช้กับงานประเภทต้องการความแข็งแรงสูง เช่น ชิ้นส่วนรถบรรทุก และ ในอุตสาหกรรมยานอวกาศ ส่วน SSM 7075 ทนทานต่อการผุกร่อนได้ดีมาเชื่อมต่อกัน

ดังนั้นวัตถุประสงค์ของงานวิจัยครั้งนี้เพื่อศึกษาปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการเปลี่ยนแปลงลักษณะทางโลหะวิทยา (โครงสร้างทางมหภาค และจุลภาค) และสมบัติทางกล (ความแข็งแรง และความแข็ง) เพื่อศึกษาโครงสร้างมหภาค โครงสร้างจุลภาค และสมบัติทางกล ของรอยเชื่อมด้วยกรรมวิธีการเชื่อมเสียดทานแบบกวนวัสดุต่างชนิดต่างความหนาให้เหมาะสมกับภาคอุตสาหกรรมต่อไป

## 2. วัสดุ อุปกรณ์ และกระบวนการวิจัย

### 2.1 วัสดุ อุปกรณ์

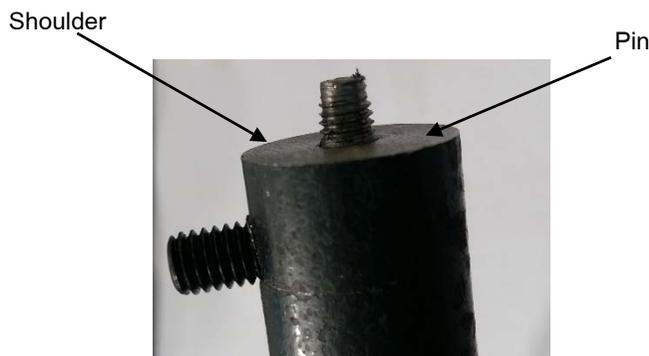
วัสดุที่ใช้ในการทดลอง คือ อะลูมิเนียมหล่อกิ่งของแข็ง 2024 ขนาดความกว้าง 50 มิลลิเมตร (mm) ความยาว 100 มิลลิเมตร ความหนา 4 มิลลิเมตร และอะลูมิเนียมหล่อกิ่งของแข็ง 7075 ขนาดความกว้าง 50 มิลลิเมตร ความยาว 100 มิลลิเมตร ความหนา 6 มิลลิเมตร โดยมีส่วนผสมทางเคมี (เปอร์เซ็นต์ต่อน้ำหนัก) แสดงดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ส่วนผสมทางเคมี (เปอร์เซ็นต์ต่อน้ำหนัก) ของวัสดุทดลอง

Elements	SSM 2024	SSM 7075
Si	0.50	0.40
Fe	0.50	0.50
Cu	3.80	1.50
Mn	0.30	0.30
Mg	1.20	2.50
Zn	0.25	5.50
Ti	0.15	0.20
Cr	0.10	0.23
Al	Bal.	Bal.
Tensile Strength (MPa)	255	222

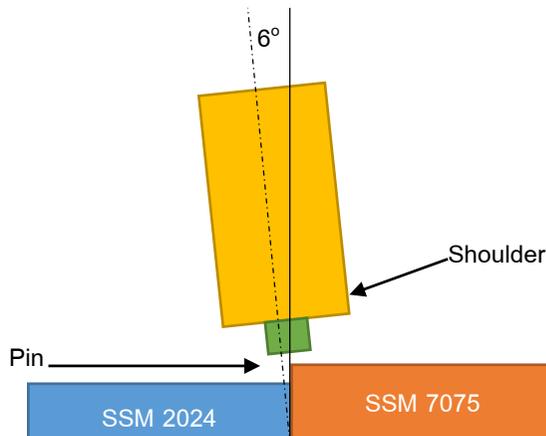
การเชื่อมใช้กรรมวิธีการเชื่อมเสียดทานแบบกวน (Friction Stir Welding) ด้วยเครื่องกัดแนวตั้ง (Vertical Milling Machine) ที่สามารถปรับความเร็วหมุนเชื่อม 3 ระดับ คือ 1320 1750 2200 รอบต่อนาที (rpm) และความเร็วเดินเชื่อม 3 ระดับ คือ 80 120 160 มิลลิเมตรต่อนาที (mm/min)

เครื่องมือเชื่อมผลิตจากวัสดุ JIS-SKD11 มีลักษณะหัวพิน (Pin) เป็นเกลียวสามเหลี่ยมหมุนขวา มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 มิลลิเมตร ความยาว 4 มิลลิเมตร และมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของบ่ากวน (Shoulder) 20 มิลลิเมตร แสดงดังรูปที่ 1



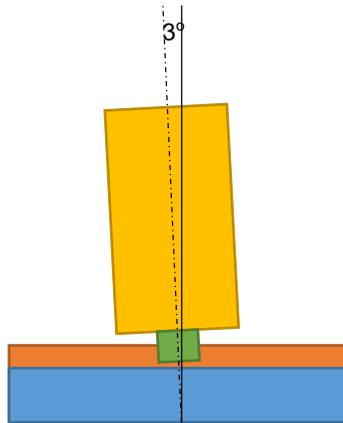
รูปที่ 1 เครื่องมือเชื่อมสำหรับการทดลอง

มุมเอียงของเครื่องมือเชื่อมในขณะทำการเชื่อม ประกอบด้วย 2 มุม คือ มุมเอียงทำมุมกับแนวตั้ง ( $\theta$ ) 6 องศา แสดงดังรูปที่ 2(ก) และมุมเอียงขนานกับแนวระนาบ ( $\alpha$ ) 3 องศา แสดงดังรูปที่ 2(ข)



ก) มุมเอียงทำมุมกับแนวตั้ง ( $\theta$ )

รูปที่ 2 มุมเอียงของเครื่องมือเชื่อม

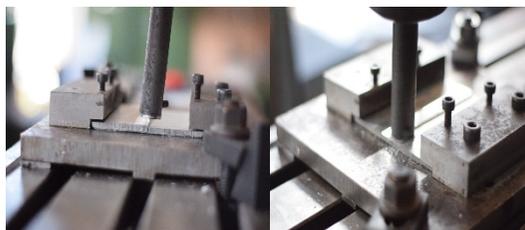


(ข) มุมเอียงขนานกับแนวระนาบ ( $\alpha$ )

รูปที่ 2 มุมเอียงของเครื่องมือเชื่อม (ต่อ)

## 2.2 กระบวนการวิจัย

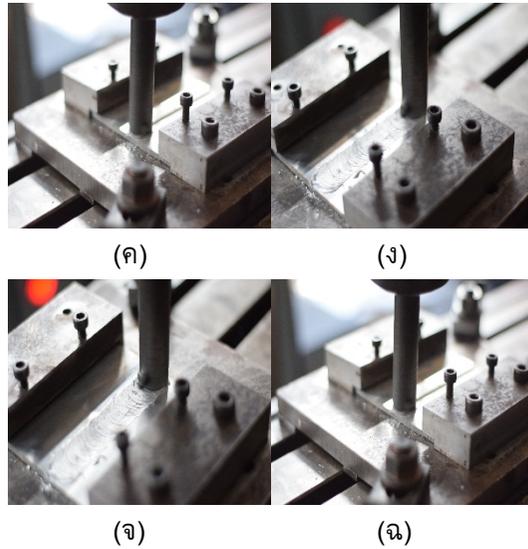
การเชื่อมในทุกๆ ปัจจัยการทดลองของการเชื่อมเสียดทานแบบกวน (Friction Stir Welding Tailor Weld Blanks: FSWTWBs) แสดงดังรูปที่ 3 ประกอบด้วยขั้นตอน รูปที่ 3(ก) หัวพินที่หมุนตามเข็มนาฬิกา รูปที่ 3(ข) จากนั้นหัวพินสอดลงไปใ้เนื้อวัสดุจนกระทั่งปลายของหัวพินถูกสอดไปในระยะความลึกที่กำหนดเป็นระยะเวลา 20-30 วินาที [6] เนื่องจากระยะเวลาที่กำหนดนั้นสามารถทำให้อะลูมิเนียมเกิดการหลอมละลายที่ดีและสามารถไหลวนรอบๆ หัวพินได้สะดวกก่อนทำการเดินแนวเชื่อมด้วยความเร็วในการเดินแนวเชื่อมที่กำหนด รูปที่ 3(ค) จากนั้นความร้อนที่เกิดจากการเสียดทานระหว่างผิวหัวพิน และป่าของเครื่องมือจะทำให้เกิดความร้อนที่ทำให้วัสดุเกิดการอ่อนตัว และเกิดการเคลื่อนที่ไหลวนรอบๆ หัวพิน รูปที่ 3(ง) เดินเชื่อมตามความเร็วในการเดินแนวเชื่อมที่กำหนด ในขั้นตอนนี้จะเกิดการรวมตัวของวัสดุทั้งสองชั้น รูปที่ 3(จ) ทำให้เกิดรอยต่อชั้น รูปที่ 3(ฉ) เมื่อสิ้นสุดการเชื่อมก่อนยกหัวพินออกจากรอยเชื่อม ก่อนทำการยกหัวพินควรให้การเสียดทานที่เกิดจากหัวพินคงที่ ณ ตำแหน่งสุดท้ายของการเชื่อมประมาณ 20-30 วินาที



(ก)

(ข)

รูปที่ 3 กรรมวิธีการเชื่อมเสียดทานแบบกวนวัสดุต่างชนิดและต่างขนาด



รูปที่ 3 กรรมวิธีการเชื่อมเสียดทานแบบกาววัสดุต่างชนิดและต่างความหนา (ต่อ)

การตรวจสอบโครงสร้างมหภาค หลังจากการตรวจสอบด้วยสายตาแล้วไม่พบข้อบกพร่องใดๆ ของรอยเชื่อม จากนั้นนำชิ้นทดสอบไปทำการเขียนแบบ และทำการตัดชิ้นงานทดสอบ จากนั้นนำชิ้นทดสอบไปหล่อด้วยน้ำยา Epoxy Resin จากนั้นทำการขัดด้วยกระดาษทรายน้ำตั้งแต่เบอร์ 80, 320, 400, 600, 800, 1000 และ 1500 ตามลำดับ เมื่อขัดด้วยกระดาษทรายน้ำจนผิวหน้าของชิ้นทดสอบเรียบตามความต้องการแล้ว ก็ตามด้วยการขัดสักหลาดด้วยผงอะลูมินาขนาด 3, 0.5 และ 0.1 ไมโครเมตร ตามลำดับ เพื่อคุณภาพของผิวหน้าชิ้นทดสอบที่สูงขึ้น

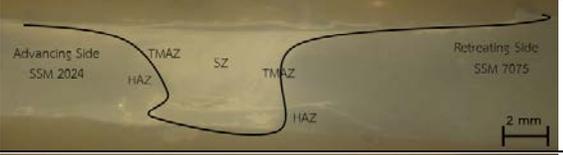
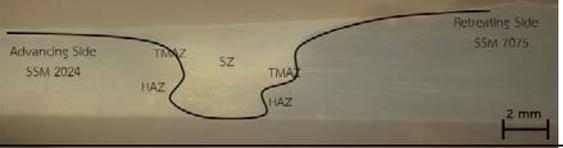
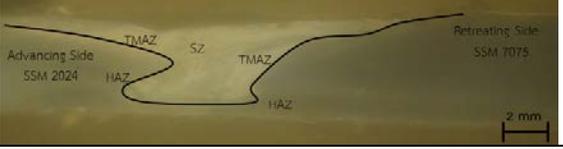
การทดสอบความแข็ง ชิ้นทดสอบความแข็งจะเป็นชิ้นทดสอบเดียวกันกับชิ้นทดสอบที่ตรวจสอบโครงสร้างมหภาค และโครงสร้างจุลภาค การทดสอบจะเป็นแบบวิกเกอร์กดบริเวณพื้นที่หน้าตัดของรอยเชื่อม ระยะห่างระหว่างรอยกด 1 มิลลิเมตร แรงกดที่ใช้ 100 กรัมแรง เป็นเวลา 10 วินาที

การทดสอบความแข็งแรง เป็นการทดสอบเพื่อหาความแข็งแรงของวัสดุภายใต้การรับภาระหรือแรงแบบดึงการเตรียมชิ้นทดสอบ ในขั้นตอนนี้ชิ้นทดสอบที่ได้จากกรรมวิธีการเชื่อมเสียดทานแบบกาวจะตัดตามขวางกับแนวเชื่อมเพื่อนำไปทดสอบความแข็งแรงโดยขึ้นรูปชิ้นทดสอบตามมาตรฐาน ASTM E8M นำชิ้นทดสอบที่เตรียมโดยการตัดตามขวางกับรอยเชื่อมไปทดสอบความแข็งแรงที่อุณหภูมิห้องความเร็วในการดึง 1 มิลลิเมตรต่อนาที

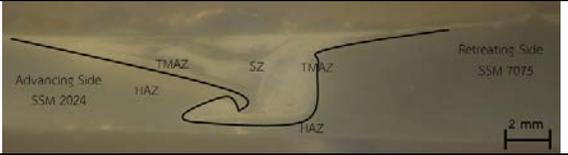
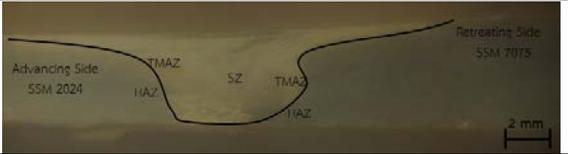
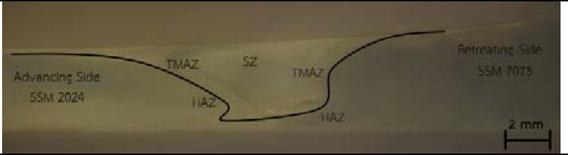
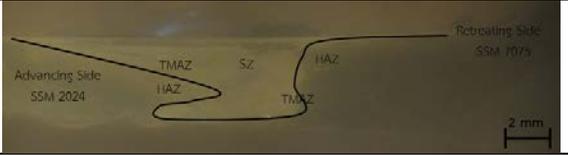
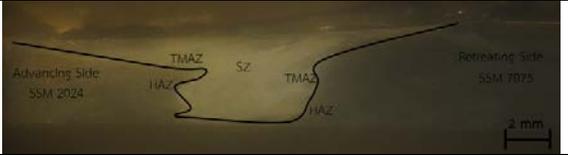
### 3. ผลการทดลองและวิเคราะห์ผล

#### 3.1 โครงสร้างมหภาคของรอยเชื่อม

โครงสร้างมหภาคของรอยเชื่อมที่ความเร็วหมุนเชื่อม และความเร็วเดินเชื่อมที่ต่างกัน แสดงดังรูปที่ 4 พบว่าบริเวณรอยเชื่อมที่ถูกกวนไม่มีข้อบกพร่องใดๆ เกิดขึ้นกับรอยเชื่อม และรอยเชื่อมมีการประสานกันเป็นอย่างดี จากโครงสร้างมหภาคเหล่านี้ได้แสดงให้เห็นพื้นที่ต่างๆ ของรอยเชื่อมซึ่งสามารถสังเกตเห็นได้ เช่น บริเวณแนวกวน (Stir Zone: SZ) บริเวณที่ได้รับผลกระทบทางความร้อนจากทางกล (Thermo-Mechanical Affected Zone: TMAZ) บริเวณที่ได้รับผลกระทบความร้อน (Heat Affected Zone: HAZ) และเนื้อโลหะเดิม (Base Metal: BM) บริเวณที่ได้รับผลกระทบทางความร้อนจากทางกลและบริเวณที่ได้รับผลกระทบความร้อนมีบริเวณค่อนข้างเล็ก นอกจากนี้การเกิดขึ้นของครีปในขั้นตอนการเชื่อมจะเป็นประโยชน์สำหรับรอยเชื่อมเพื่อไม่ให้เกิดรอยแตกกร้าวเนื่องมาจากความล้า และจะช่วยลดความเครียดเพื่อไม่ให้เกิดรอยแตกของแนวเชื่อมในบริเวณปลายแนวเชื่อม [10] และเป็นที่น่าสนใจในบริเวณแนวกวน พบว่ารอยเชื่อมมีการสลักรันระหว่างเนื้อโลหะเดิมของทั้งสองชนิดเป็นชั้นๆ เนื่องมาจากการตกผลึกแบบไดนามิกส์โดยการหมุนกวนของเครื่องมือเชื่อมในระหว่างการเชื่อม ในบริเวณ TMAZ เนื่องจากการเปลี่ยนรูปเชิงพลาสติกไม่เพียงพอทำให้การตกผลึกของเกรนมีน้อย ส่วนในบริเวณ HAZ จะไม่มีการเปลี่ยนรูปเชิงพลาสติกและเกรนมีลักษณะเหมือนกันกับบริเวณเนื้อโลหะเดิม [11]

Rotation Speed (rpm)	Welding Speed (mm/min)	Macrograph of Welded
1320	80	
	120	
	160	

รูปที่ 4 โครงสร้างมหภาคของรอยเชื่อม

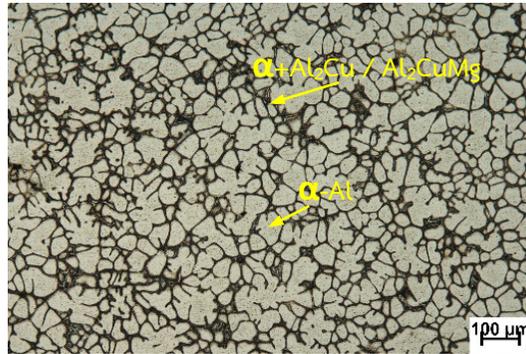
Rotation Speed (rpm)	Welding Speed (mm/min)	Macrograph of Welded
1750	80	
	120	
	160	
2200	80	
	120	
	160	

รูปที่ 4 โครงสร้างมหภาคของรอยเชื่อม (ต่อ)

### 3.2 โครงสร้างจุลภาคของรอยเชื่อม

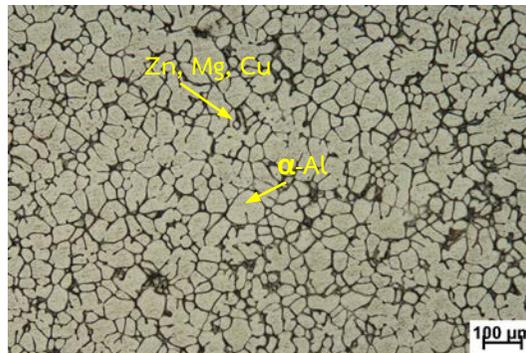
#### 3.2.1 โครงสร้างจุลภาคของเนื้อโลหะเดิม

อะลูมิเนียมหล่อกิ่งของแข็ง 2024 แสดงดังรูปที่ 5 เกรนของเฟส  $\alpha$ -Al (พื้นสีขาว) เป็นลักษณะก้อนกลมต่อเนื่องกันมีโครงสร้างยูเทคติก  $\alpha + Al_2Cu / Al_2CuMg$  (ขอบสีดำ) จับกลุ่มรอบเฟส  $\alpha$ -Al [12] โดยโครงสร้างเนื้อโลหะเดิมจะมีลักษณะเหมือนกันทุกสภาวะการเชื่อม



รูปที่ 5 โครงสร้างจุลภาคของบริเวณเนื้อโลหะเดิมอะลูมิเนียมหล่อทิ้งของแข็ง 2024

อะลูมิเนียมหล่อทิ้งของแข็ง 7075 แสดงดังรูปที่ 6 มีเกรนของเฟส  $\alpha$ -Al (พื้นสีขาว) ลักษณะของเกรนเป็นแบบก้อนกลมต่อเนื่องกันมีโครงสร้างยูเทคติก Zn Mg และ Cu (ขอบสีดำ) จับกลุ่มรอบเฟส  $\alpha$ -Al [13]

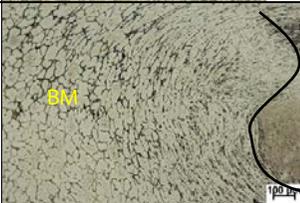
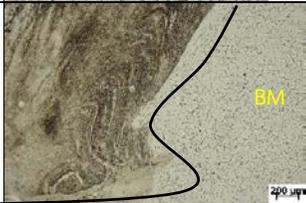


รูปที่ 6 โครงสร้างจุลภาคของบริเวณเนื้อโลหะเดิมอะลูมิเนียมหล่อทิ้งของแข็ง 7075

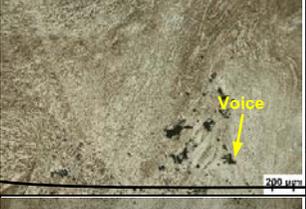
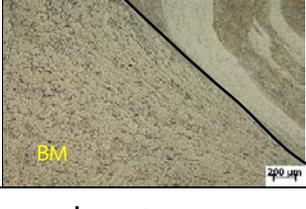
### 3.2.2 โครงสร้างจุลภาคของรอยเชื่อม

โครงสร้างจุลภาคของรอยเชื่อมที่ความเร็วหมุนเชื่อม 1320 1750 และ 2200 รอบต่อนาที แสดงดังรูปที่ 7-9 ตามลำดับ พบว่า ความร้อนที่เกิดขึ้นระหว่างกระบวนการ FSW นั้นมีปัจจัยสองประการ คือ แรงเสียดทานระหว่างเครื่องมือเชื่อมกับชิ้นงาน และการเปลี่ยนรูปเชิงพลาสติก [14] เป็นที่ทราบกันดีว่า FSW สร้างอุณหภูมิแบบอสมมาตรและยังมีอีกสองปัจจัยที่ทำให้เกิดปรากฏการณ์นี้ คือ ความทนต่อความร้อนของวัสดุทดลองที่แตกต่างกัน และความเร็วรอบของการหมุนวนในแนวเชื่อม [5, 14] เป็นผลให้มีความแปรผันอย่างมีนัยสำคัญในโครงสร้างจุลภาคของรอยเชื่อมเสียดทานแบบกวนในแนวเชื่อม TWB ที่แตกต่างกัน การวิเคราะห์ โครงสร้างจุลภาคของรอยเชื่อมดังกล่าวแสดงให้เห็นว่ามีการแทรกซึมแบบเต็มและไม่มีข้อบกพร่องใดๆ ในรอยเชื่อม ยิ่งไป

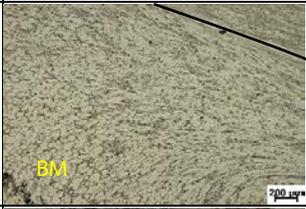
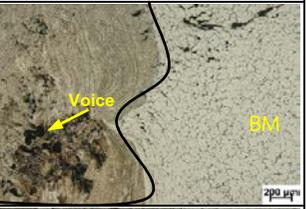
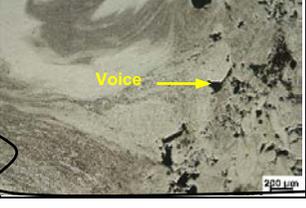
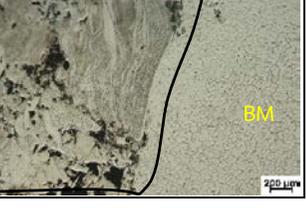
กว่านั้นยังสามารถสังเกตเห็นได้ว่ากระบวนการเชื่อมเปลี่ยนบริเวณ SZ อย่างมากซึ่งถูกแทนที่อย่างสมบูรณ์ด้วยเกรนที่ผสมผสานกันของเนื้อโลหะทั้งสองชนิด ติดกับบริเวณ SZ คือบริเวณ TMAZ ทั้งด้านหมุนดึงเนื้อโลหะ Retreating Side (RS) และด้านหมุนดันเนื้อโลหะ Advancing Side (AS) ซึ่งเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของเกรนอย่างรุนแรง มีการเปลี่ยนรูปเชิงพลาสติกสามารถสังเกตเห็นเกรนที่มีรูปร่างที่บิดเบี้ยวเนื่องจากการเปลี่ยนรูปแบบรุนแรงในระหว่างกระบวนการ FSW เนื่องจากการเชื่อมของบริเวณด้าน AS ได้รับผลกระทบมากขึ้นจากความเร็วของการหมุนวนของเครื่องมือเชื่อม การแปรผันของโครงสร้างจุลภาคจาก SZ ถึง TMAZ มีความรุนแรงมากขึ้นเมื่อเทียบกับบริเวณด้าน RS [15, 16] นอกจากนี้โครงสร้างทางจุลภาคของบริเวณ SZ ประกอบด้วยเกรนที่เป็นเนื้อเดียวกัน และละเอียดกว่ามากขึ้นเมื่อเทียบกับโครงสร้างจุลภาคของบริเวณอื่น ๆ เป็นเพราะความร้อนที่เพียงพอที่เกิดจากการทำงานของเครื่องมือในระหว่างกระบวนการเชื่อม FSW [9]

Welding Speed (mm/min)	TMAZ SSM 2024 Advancing Side (AS)	Stir Zone (SZ)	TMAZ SSM 7075 Retreating Side (RS)
80			
120			
160			

รูปที่ 7 โครงสร้างจุลภาคของรอยเชื่อมที่ 1320 รอบต่อหาที่

Welding Speed (mm/min)	TMAZ SSM 2024 Advancing Side (AS)	Stir Zone (SZ)	TMAZ SSM 7075 Retreating Side (RS)
80			
120			
160			

รูปที่ 8 โครงสร้างจุลภาคของรอยเชื่อมที่ 1750 รอบต่อนาที

Welding Speed (mm/min)	TMAZ SSM 2024 Advancing Side (AS)	Stir Zone (SZ)	TMAZ SSM 7075 Retreating Side (RS)
80			
120			

รูปที่ 9 โครงสร้างจุลภาคของรอยเชื่อมที่ 2200 รอบต่อนาที

Welding Speed (mm/min)	TMAZ SSM 2024 Advancing Side (AS)	Stir Zone (SZ)	TMAZ SSM 7075 Retreating Side (RS)
160			

รูปที่ 9 โครงสร้างจุลภาคของรอยเชื่อมที่ 2200 รอบต่อนาที (ต่อ)

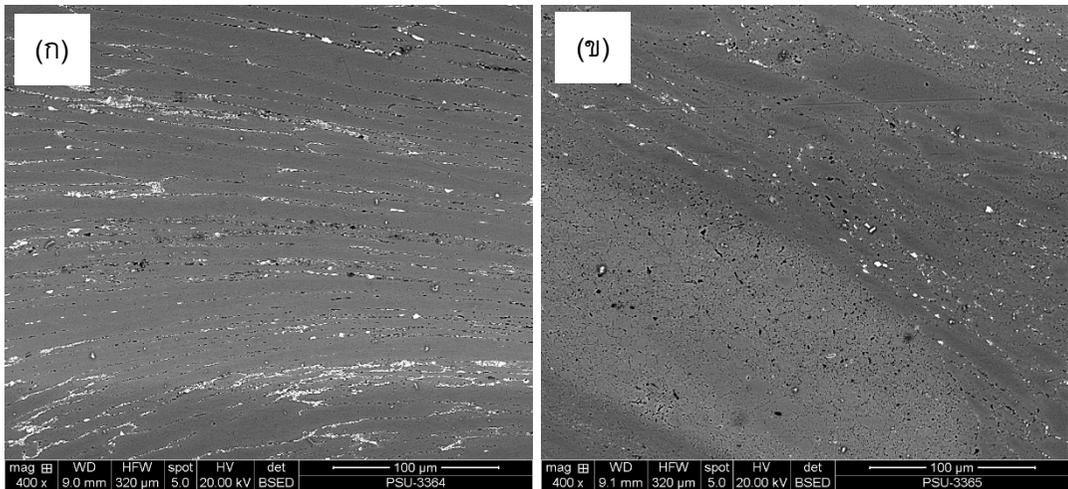
อย่างที่สามารรถเห็นได้ในรูปที่ 7-9 บริเวณ SZ ถูกทำให้ละเอียดด้วยการเพิ่มขึ้นของความร้อนและการเปลี่ยนรูปเชิงพลาสติก ในเวลาเดียวกันทำให้เกิดการปรับแต่งเกรนบริเวณ SZ นอกจากนี้ยังเป็นที่ยืนยันว่าขนาดเกรนบริเวณด้าน AS นั้นน้อยกว่าบริเวณด้าน RS เป็นเพราะสาเหตุของอุณหภูมิที่สูงขึ้นของบริเวณด้าน AS มากกว่าบริเวณด้าน RS ในระหว่างการเชื่อม [5] ยิ่งไปกว่านั้นโครงสร้างของบริเวณ TMAZ จะสามารถสังเกตได้เล็กน้อยในบางพื้นที่ในบริเวณ SZ เมื่อเพิ่มความร้อนมากขึ้นจะมีแรงผลักดันเนื้อวัสดุมากขึ้นสำหรับการแพร่กระจายขององค์ประกอบอัลลอยด์และโครงสร้างของบริเวณ TMAZ จะมองเห็นได้น้อยลง [6]

การเชื่อม FSW ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนรูปเชิงพลาสติกอย่างรุนแรงรอบๆ การหมุนเชื่อมและแรงเสียดทานระหว่างเครื่องมือเชื่อมกับชิ้นงาน ปัจจัยทั้งสองนี้นำไปสู่การเพิ่มอุณหภูมิภายในและรอบๆ บริเวณ SZ ข้อสังเกตพบว่ามีอุณหภูมิสูงขึ้นเล็กน้อยในบริเวณด้าน AS ของรอยเชื่อมที่ทิศทางเวกเตอร์ความเร็ววงสัมผัสเป็นเช่นเดียวกับเวกเตอร์ความเร็วไปข้างหน้า [5] นี่อาจเป็นสาเหตุให้วัสดุที่อยู่ในบริเวณด้าน AS มีการเปลี่ยนรูปเชิงพลาสติกมากขึ้นและมีอุณหภูมิสูงกว่าวัสดุบริเวณด้าน RS [17]

ส่วนโครงสร้างจุลภาคของบริเวณ TMAZ ทั้งบริเวณด้าน AS และบริเวณด้าน RS ของรอยเชื่อมตามลำดับ อย่างที่เห็นในบริเวณนี้เกรนมีลักษณะหยาบ และยึดออกอย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากอยู่ภายใต้การเปลี่ยนรูปเชิงพลาสติก แต่การปรับแต่งเกรนไม่ได้เกิดขึ้นในบริเวณนี้เนื่องจากมีการเปลี่ยนรูปแบบความเครียดไม่เพียงพอ [5] และโครงสร้างจุลภาคของบริเวณ HAZ ในบริเวณนี้มีการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิเพียงเล็กน้อย ทำให้การตกตะกอน และขนาดของเกรนให้มีการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยเช่นกัน อย่างไรก็ตามความร้อนในบริเวณใดๆ ที่สูงกว่า 250 องศาเซลเซียส จะทำให้เกิดผลกระทบที่สำคัญต่อการตกตะกอน และขนาดของเกรน นี้คือสาเหตุที่บริเวณ HAZ ไม่ได้รับการเปลี่ยนรูปเชิงพลาสติกใดๆ [5, 8]

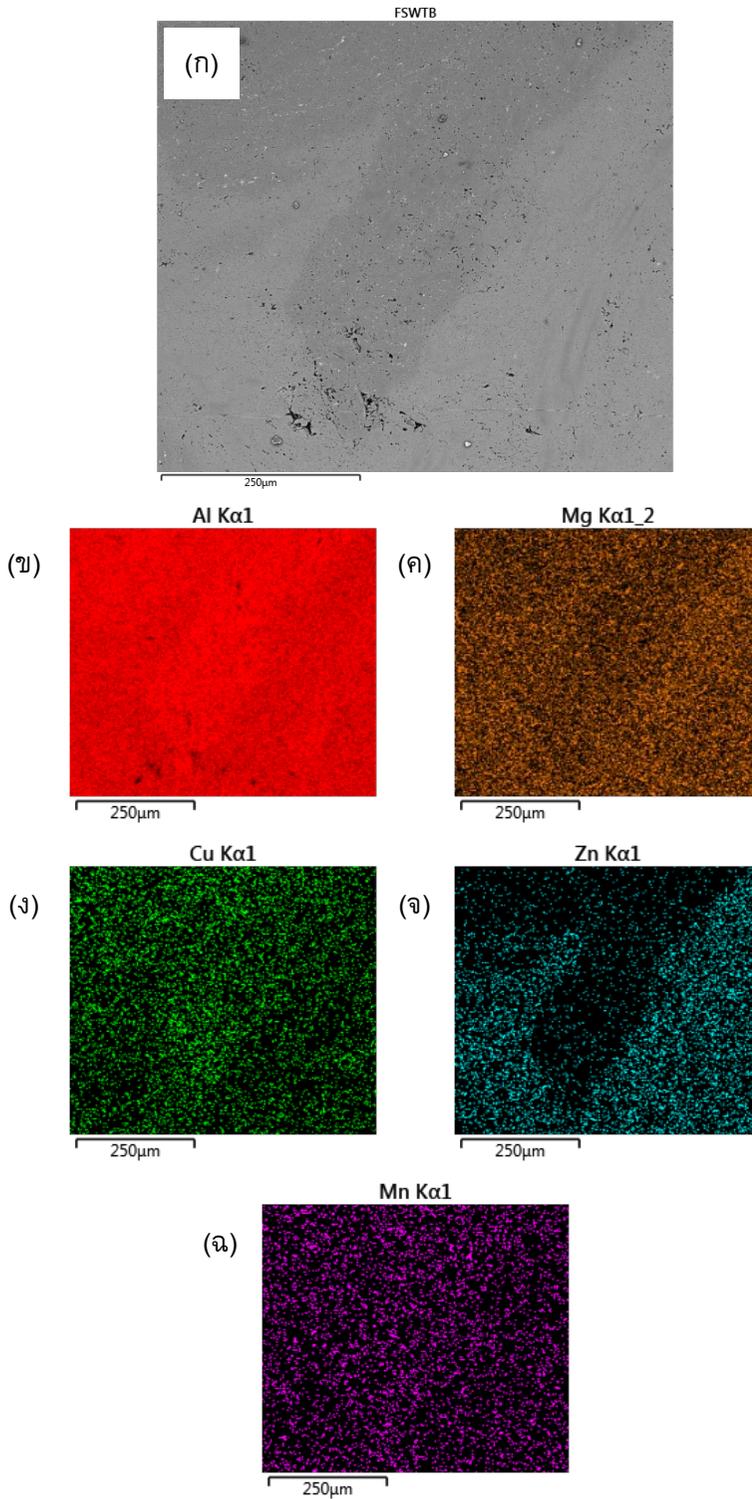
รูปที่ 10(ก) และ 10(ข) ตามลำดับ เป็นโครงสร้างจุลภาคโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน

ชนิดส่องกราด (Scanning Electron Microscope: SEM) แสดงให้เห็นเกรนทั้งสองในกรณีที่ถูกกระทำโดยความเร็วหมุนเชื่อมของเครื่องมือเชื่อม ทำให้เกรนเกิดลักษณะยึดออกหลังจากกระบวนการเชื่อม จะสังเกตเห็นได้จากรูปที่ 10(ก) ว่าจำนวนของอนุภาค intermetallic มีมากกว่ารูปที่ 10(ข) ในด้านหมุนดึงเนื้อโลหะ Retreating Side (RS) และด้านหมุนดันเนื้อโลหะ Advancing Side (AS) สิ่งนี้ทำให้มีความแตกต่างที่สำคัญของความแข็งแรงดึงของรอยเชื่อม [18-20] ซึ่งจะกล่าวถึงในส่วนต่อไป

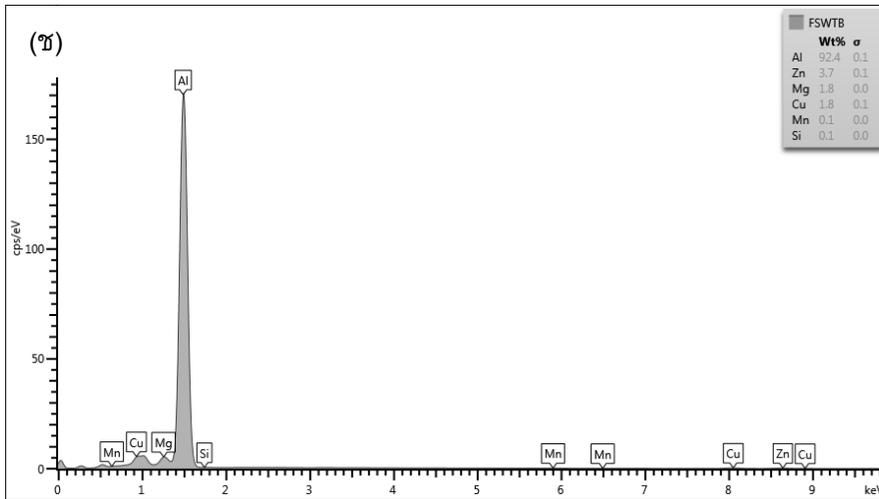


รูปที่ 10 โครงสร้าง SEM (ก) บริเวณด้านหมุนดึงเนื้อโลหะ Retreating Side (RS) และ (ข) บริเวณด้านหมุนดันเนื้อโลหะ Advancing Side (AS)

นอกจากนี้การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีด้วยเครื่อง Energy Dispersive X-ray Analyzer (EDX) พบว่า บริเวณ SZ แสดงในรูปที่ 11(ก) การวิเคราะห์อนุภาคในบริเวณนี้แสดงรูปที่ 11(ข-จ) แสดงให้เห็นว่ามีส่วนประกอบของ Al เป็นเฟสหลักของรอยเชื่อม และมีเฟส สังกะสี (Zn) แมกนีเซียม (Mg) ทองแดง (Cu) แมงกานีส (Mn) และ ซิลิกอน (Si) กระจุกกระจายอยู่ทั่วบริเวณรอยเชื่อมตามรูปร่างของรอยเชื่อม ส่วนรูปที่ 11(ข) แสดงการตรวจสอบการวิเคราะห์ธาตุเชิงปริมาณ (Quantitative Analysis) พบว่ามีปริมาณธาตุอะลูมิเนียม (Al) 92.4% ปริมาณธาตุ Zn 3.7% ปริมาณธาตุแมกนีเซียม (Mg) 1.8% ปริมาณธาตุ Cu 1.8% ปริมาณธาตุ Mn 0.1% และ ปริมาณธาตุ Si 0.1%



รูปที่ 11 โครงสร้าง SEM และ EDX บริเวณรอยเชื่อม



รูปที่ 11 โครงสร้าง SEM และ EDX บริเวณรอยเชื่อม (ต่อ)

### 3.3 ความแข็งแรงดึงของรอยเชื่อม

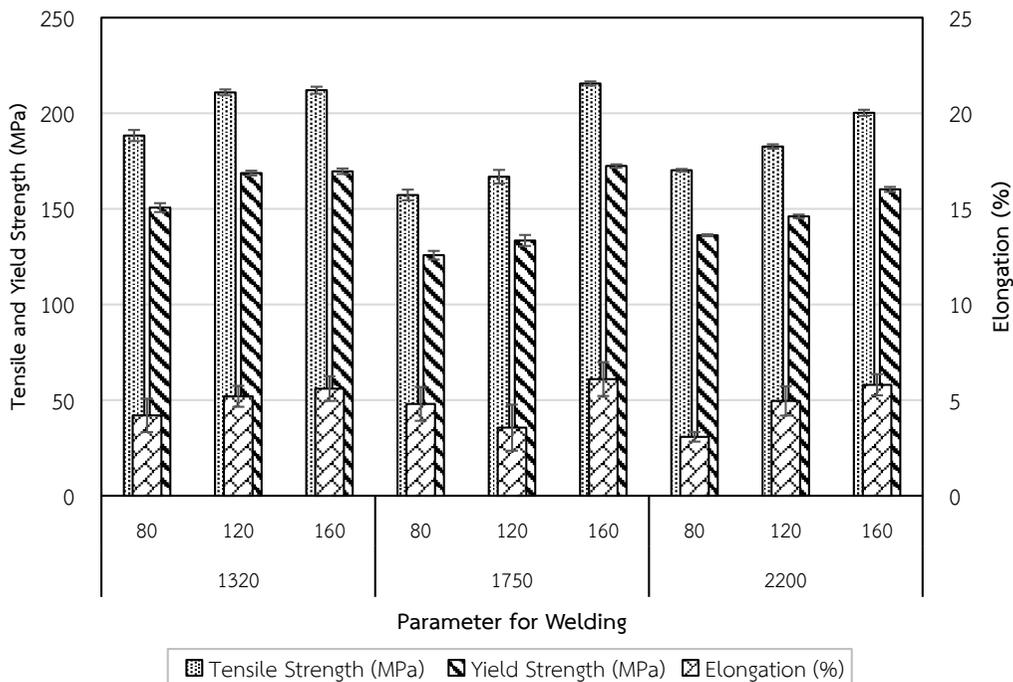
ปัจจัยที่มีผลต่อความแข็งแรงดึงของรอยเชื่อมการเชื่อมเสียดทานแบบกวนต่อชนต่าง ความหนาของอะลูมิเนียมผสมหล่อกิ่งของแข็งต่างชนิดระหว่าง 2024 กับ 7075 แสดงดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ความแข็งแรงดึงของรอยเชื่อม

Rotation Speed (rpm)	Welding Speed (mm/min)	Tensile Strength (MPa)	Yield Strength (MPa)	Elongation (%)
1320	80	188.31	150.65	4.20
	120	210.89	168.71	5.20
	160	212.03	169.62	5.60
1750	80	157.23	125.78	4.80
	120	166.81	133.45	3.56
	160	215.52	172.42	6.10
2200	80	170.20	136.16	3.08
	120	182.60	146.08	4.96
	160	200.23	160.18	5.80
Base SSM	2024	255.14	204.11	9.43
Base SSM	7075	222.27	177.81	14.17

วิเคราะห์ความแข็งแรงดึงของรอยเชื่อม เมื่อเปรียบเทียบการทดลองพบว่า ที่สภาวะการเชื่อม เสียทานแบบกวนที่ใช้ความเร็วหมุนเชื่อมที่ 1750 รอบต่อนาที ความเร็วเดินเชื่อมที่ 160 มิลลิเมตรต่อนาที มีความแข็งแรงดึงมากที่สุด คือ 215.52 MPa ส่วนความแข็งแรงดึงต่ำที่สุด คือ 157.23 MPa ที่ความเร็วหมุนเชื่อม 1750 รอบต่อนาที ความเร็วเดินเชื่อมที่ 80 มิลลิเมตรต่อนาที ผลการทดลองสภาวะอื่นๆ แสดงดังรูปที่ 12 เป็นสิ่งที่น่าสังเกต ในชุดของการเชื่อมแต่ละความเร็ว หมุนเชื่อม พบว่า เมื่อยิ่งเพิ่มความเร็วเดินเชื่อมมากขึ้นจะทำให้ความแข็งแรงดึงเพิ่มขึ้นตามไปด้วย สาเหตุเนื่องมาจากการใช้ความเร็วเดินเชื่อมที่สูง ทำให้เนื้อโลหะเกิดการไหลวนเข้ากันได้ดี

กระบวนการ FSW จะทำการสร้างความร้อนและเส้นทางการไหลของวัสดุโดยการเปลี่ยนรูป เชิงพลาสติก ส่วนใหญ่ขึ้นอยู่กับเครื่องมือเชื่อมกับวัสดุ [21, 22] อัตราส่วนของปริมาตรไดนามิกส ต่อความเร็วหมุนคงที่ของการหมุนเครื่องมือเชื่อมจะกำหนดเส้นทางการไหลของวัสดุโดยการ เปลี่ยนรูปเชิงพลาสติก ในระหว่างการเชื่อมและเครื่องมือเชื่อมที่มีอัตราการหมุนสูงสามารถกวาด วัสดุโดยการเปลี่ยนรูปเชิงพลาสติกจำนวนมากขึ้นนำไปสู่สมบัติทางกลที่ดีขึ้น [22-24] การสร้าง ความร้อนที่มากขึ้นสามารถนำไปสู่การปรับปรุงการไหลของวัสดุโดยการเปลี่ยนรูปเชิงพลาสติกใน ระหว่างการเชื่อม [23]

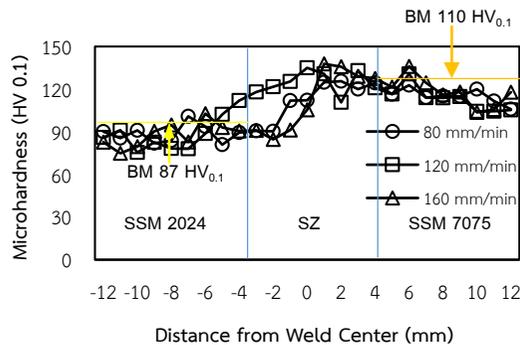


รูปที่ 12 กราฟความแข็งแรงดึงของรอยเชื่อมเสียทานแบบกวนทุกสภาวะ

### 3.4 ความแข็งของรอยเชื่อม

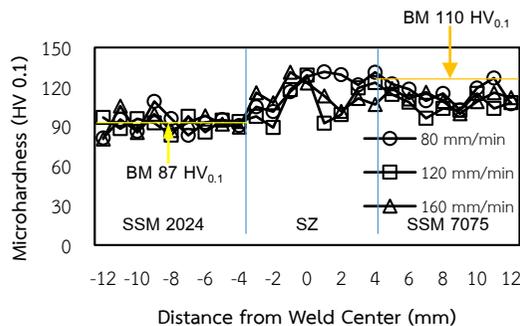
ผลการทดสอบความแข็งของแนวเชื่อม FSW สำหรับความแข็งของที่ความเร็วหมุนเชื่อม 1320 1750 และ 2200 รอบต่อนาที แสดงดังรูปที่ 13-15 ตามลำดับ

1) ความแข็งของรอยเชื่อมที่ 1320 รอบต่อนาที ความเร็วเดินเชื่อมที่ 80 120 และ 160 มิลลิเมตรต่อนาที แสดงดังรูปที่ 13 พบว่า ความแข็งของชิ้นทดสอบที่บริเวณ SZ มีความแข็งสูงสุดที่ความเร็วเดินเชื่อม 120 มิลลิเมตรต่อนาที มีความแข็งประมาณ 135.0 HV<sub>0.1</sub> ส่วนบริเวณ SZ ที่มีความแข็งต่ำสุด คือ ความเร็วเดินเชื่อม 160 มิลลิเมตรต่อนาที โดยมีความแข็งประมาณ 105.4 HV<sub>0.1</sub>



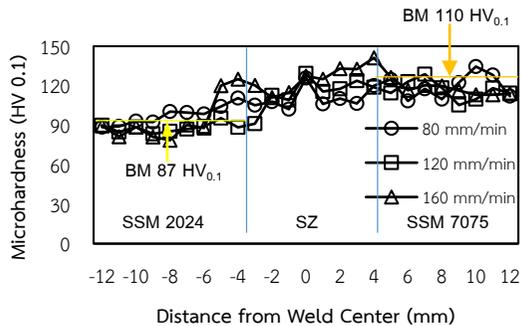
รูปที่ 13 กราฟความแข็งที่ความเร็วในการหมุนหัวพินที่ 1320 rpm

2) ความแข็งของรอยเชื่อมที่ 1750 รอบต่อนาที ความเร็วเดินเชื่อมที่ 80 120 และ 160 มิลลิเมตรต่อนาที แสดงดังรูปที่ 14 พบว่า ความแข็งของชิ้นทดสอบที่บริเวณ SZ มีความแข็งสูงสุดที่ความเร็วเดินเชื่อม 120 มิลลิเมตรต่อนาที มีความแข็งประมาณ 129.0 HV<sub>0.1</sub> ส่วนบริเวณ SZ ที่มีความแข็งต่ำสุด คือ ความเร็วเดินเชื่อม 160 มิลลิเมตรต่อนาที โดยมีความแข็งประมาณ 123.1 HV<sub>0.1</sub>



รูปที่ 14 กราฟความแข็งที่ความเร็วในการหมุนหัวพินที่ 1750 rpm

3) ความแข็งของรอยเชื่อมที่ 2200 รอบต่อนาที ความเร็วเดินเชื่อมที่ 80 120 และ 160 มิลลิเมตรต่อนาที แสดงดังรูปที่ 15 พบว่า ความแข็งของชั้นทดสอบที่บริเวณ SZ มีความแข็งสูงสุด ที่ความเร็วเดินเชื่อม 120 มิลลิเมตรต่อนาที มีความแข็งประมาณ 129.4 HV<sub>0.1</sub> ส่วนบริเวณ SZ ที่มีความแข็งต่ำสุด คือ ความเร็วเดินเชื่อม 80 มิลลิเมตรต่อนาที โดยมีความแข็งประมาณ 125.9 HV<sub>0.1</sub>



รูปที่ 15 กราฟความแข็งที่ความเร็วในการหมุนหัวพินที่ 2200 rpm

เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาคที่เกิดจากกระบวนการ FSW สมบัติทางกลของรอยเชื่อมแสดงความแตกต่างกันอย่างมาก จากรูปที่ 13-15 แสดงให้เห็นถึงความแข็งแบบไม่สมมาตรกันซึ่งเกิดจากความแตกต่างทางโครงสร้างของวัสดุทดลองทั้งสอง (83.7 HV<sub>0.1</sub> และ 110.8 HV<sub>0.1</sub> สำหรับ SSM 2024 และ SSM 7075 ตามลำดับ) ในส่วนบริเวณ SZ และบริเวณ TMAZ มีความแข็งเพิ่มขึ้น สิ่งนี้สามารถอธิบายได้โดยการเปลี่ยนแปลงทางโครงสร้างจุลภาค เช่นการก่อตัวของเกรนที่ผ่านการตกผลึกแบบไดนามิกซึ่งมีพื้นผิวและขอบของเกรนที่ใหญ่กว่าต่อหน่วยปริมาตร รวมถึงความหนาแน่นที่เพิ่มขึ้นในบริเวณนี้ [5, 15, 16] ความแข็งสูงสุดบริเวณ SZ ที่ได้จากการทดลอง คือ 135.0 HV<sub>0.1</sub> ที่ความเร็วหมุนเชื่อม 1320 รอบต่อนาที และความเร็วเดินเชื่อม 120 มิลลิเมตรต่อนาที ส่วนความแข็งต่ำสุดบริเวณ SZ ที่ได้จากการทดลอง คือ 105.4 HV<sub>0.1</sub> ที่ความเร็วหมุนเชื่อม 1320 รอบต่อนาที และความเร็วเดินเชื่อม 160 มิลลิเมตรต่อนาที

### 3.5 การวิเคราะห์ข้อมูลความแข็งแรงดึงด้วยวิธีการทางสถิติ

การวิเคราะห์ผลข้อมูลด้วยวิธีการทางสถิติจะใช้ความแข็งแรงดึงด้วยโปรแกรมคำนวณทางสถิติ แสดงดังตารางที่ 3

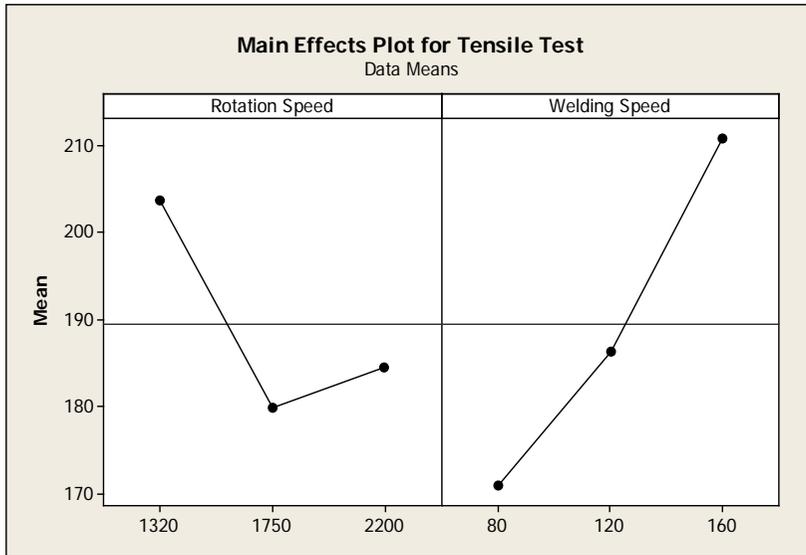
ตารางที่ 3 ตาราง ANOVA ของการเชื่อมเสียดทานแบบกวน

General Linear Model: Tensile Test versus Rotation Speed, Welding Speed						
Factor	Type	Levels	Values			
Rotation Speed	fixed	3	1320	1750	2200	
Welding Speed	fixed	3	80	120	160	
Analysis of Variance for Tensile Test, using Adjusted SS for Tests						
Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Rotation Speed	2	2835.7	2835.7	1417.9	315.71	0.000
Welding Speed	2	7211.9	7211.9	3605.9	802.92	0.000
Rotation Speed*Welding Speed	4	1758.4	1758.4	439.6	97.88	0.000
Error	18	80.8	80.8	4.5		
Total	26	11886.8				
S = 2.11921 R-Sq = 99.32% R-Sq(adj) = 99.02%						

จากการวิเคราะห์ข้อมูลของความแข็งแรงดึงตามปัจจัยต่างๆ แสดงดังตารางที่ 3 ได้ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ  $R^2$  เท่ากับ 99.32% หมายความว่า ความผันแปรต่างๆ ของการทดลองที่สามารถควบคุมได้ (Controllable) เช่น เครื่องมือ อุปกรณ์หรือปัจจัยต่างๆ ที่กำหนดให้คงที่ในการทดลอง มีค่าเท่ากับ 99.32% ส่วนที่เหลือประมาณ 0.68% เกิดจากปัจจัยต่างๆ ที่ไม่สามารถควบคุมได้ (Uncontrollable) ดังนั้นการออกแบบการทดลองครั้งนี้ ถือว่าอยู่ในระดับที่ยอมรับได้ เนื่องจากค่า  $R^2$  มากกว่า 70%

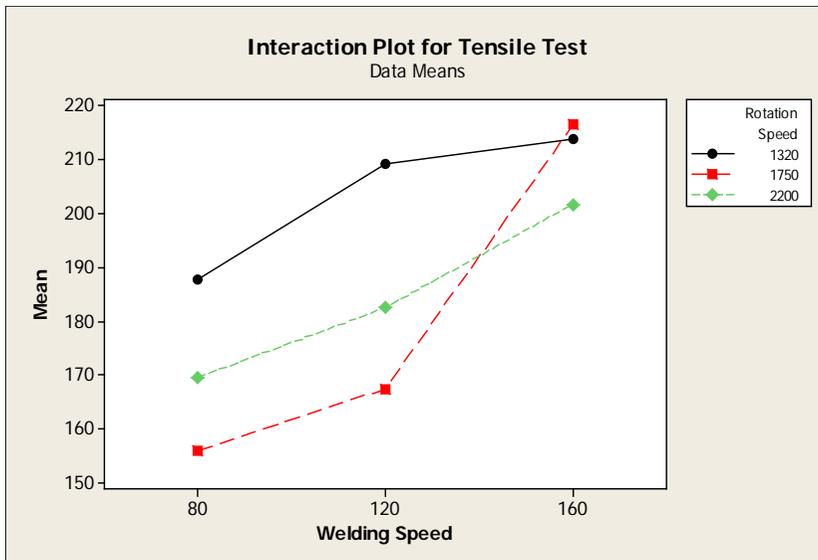
1) อิทธิพลของความเร็วหมุนเชื่อม และความเร็วเดินเชื่อม มีผลต่อความแข็งแรงดึงของรอยเชื่อม สามารถอธิบายเพิ่มเติมได้ แสดงดังรูปที่ 16

ความเร็วหมุนเชื่อม และความเร็วเดินเชื่อม เป็นปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อความแข็งแรงดึง จากรูปที่ 16 จะเห็นว่าเมื่อเพิ่มความเร็วหมุนเชื่อมมากขึ้นจะทำให้ความแข็งแรงดึงมีค่าน้อยลงด้วย ส่วนความเร็วเดินเชื่อมพบว่าถ้าเพิ่มความเร็วเดินเชื่อมให้เร็วขึ้นจะทำให้ความแข็งแรงดึงมีค่าน้อยลงตามไปด้วย



รูปที่ 16 ความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งแรงดึงกับความเร็วหมุนเชื่อมและความเร็วเดินเชื่อม

2) อิทธิพลร่วมระหว่างปัจจัยความเร็วหมุนเชื่อมกับความเร็วเดินเชื่อม มีผลต่อความแข็งแรงดึงของรอยเชื่อม สามารถอธิบายเพิ่มเติมได้ แสดงดังรูปที่ 17



รูปที่ 17 อันตรกิริยาความแข็งแรงดึงระหว่างความเร็วหมุนเชื่อมกับความเร็วเดินเชื่อม

จากรูปที่ 17 กราฟแสดงอันตรกิริยาความแข็งแรงดึงระหว่างความเร็วหมุนเชื่อมกับความเร็วเดินเชื่อมการเพิ่มความเร็วในการเดินแนวเชื่อม พบว่าความแข็งแรงดึงมีค่าเพิ่มขึ้นทุกสภาวะความเร็วหมุนเชื่อม เมื่อมีการเพิ่มความเร็วดำเนินเชื่อมมากขึ้น

#### 4. สรุป

ปัจจัยที่มีผลต่อการเชื่อมเสียดทานแบบกวนต่างความหนาของอะลูมิเนียมผสมหล่อกิ่งของแข็งต่างชนิดระหว่าง 2024 กับ 7075 การเพิ่มความเร็วมุมเชื่อมมากขึ้นจะทำให้ความแข็งแรงดึงมีค่าน้อยลง ส่วนถ้าเพิ่มความเร็วดำเนินเชื่อมให้เร็วขึ้นจะทำให้ความแข็งแรงดึงมีค่าน้อยลงตามไปด้วย และความแข็งแรงดึงมีค่าเพิ่มขึ้นทุกสภาวะความเร็วหมุนเชื่อม เมื่อมีการเพิ่มความเร็วดำเนินเชื่อมมากขึ้น บริเวณรอยเชื่อมที่ถูกกวนไม่มีข้อบกพร่องใดๆ เกิดขึ้นกับรอยเชื่อม มีการสลับกันระหว่างเนื้อโลหะเดิมของทั้งสองชนิดเป็นชั้นๆ เนื่องมาจากการตกผลึกแบบไดนามิกส์โดยการหมุนกวนของเครื่องมือเชื่อมในระหว่างการเชื่อม บริเวณ SZ เกรนถูกทำให้ละเอียดด้วยการเพิ่มขึ้นของความร้อนและการเปลี่ยนรูปเชิงพลาสติก ขนาดเกรนบริเวณด้าน AS นั้นน้อยกว่าบริเวณด้าน RS เป็นเพราะสาเหตุของอุณหภูมิที่สูงขึ้นของ โดยบริเวณด้าน AS มากกว่าบริเวณด้าน RS ในระหว่างการเชื่อม และเกรนในบริเวณนี้มีลักษณะหมุน และยึดออก การเชื่อมเสียดทานแบบกวนที่ใช้ความเร็วหมุนเชื่อมที่ 1750 รอบต่อนาที ความเร็วดำเนินเชื่อมที่ 160 มิลลิเมตรต่อนาที มีความแข็งแรงดึงมากที่สุด คือ 215.52 MPa ส่วนความแข็งแรงดึงต่ำที่สุด คือ 157.23 MPa ที่ความเร็วหมุนเชื่อม 1750 รอบต่อนาที ความเร็วดำเนินเชื่อมที่ 80 มิลลิเมตรต่อนาที และความแข็งแรงสูงสุดบริเวณ SZ ที่ได้จากการทดลอง คือ 135.0 HV<sub>0.1</sub> ที่ความเร็วหมุนเชื่อม 1320 รอบต่อนาที และความเร็วเดินเชื่อม 120 มิลลิเมตรต่อนาที ส่วนความแข็งแรงต่ำสุดบริเวณ SZ ที่ได้จากการทดลอง คือ 105.4 HV<sub>0.1</sub> ที่ความเร็วหมุนเชื่อม 1320 รอบต่อนาที และความเร็วเดินเชื่อม 160 มิลลิเมตรต่อนาที

#### กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนงบประมาณเงินรายได้ ประจำปี 2561 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย

#### References

- [1] Mathers G. The welding of aluminum and its alloys. Cambridge, England: Woodhead Publishing; 2002.
- [2] Noor ZK, Arshad NS, Zahid AK, Suha KS. Investigations on tunneling and kissing bond defects in FSW joints for dissimilar aluminum alloys. J Alloys Compd 2015;648:360-7.

- [3] Amancio-Filho ST, Sheikhi S, Dos Santos JF, Bolfarini C. Preliminary study on the microstructure and mechanical properties of dissimilar friction stir welds in aircraft aluminum alloys 2024-T351 and 6056-T4. *J Mater Process Technol* 2008;206(1-3):132-42.
- [4] Youbao S, Xinqi Y, Lei C, Xiaopeng H, Zhikang S, Yan X. Defect features and mechanical properties of friction stir lap welded dissimilar AA2024-AA7075 aluminum alloy sheets. *Mater Des* 2014;55:9-18.
- [5] Mishra RS, Ma ZY. Friction stir welding and processing. *Mater Sci Eng R Rep* 2005;50(1-2):1-78.
- [6] Amir AZ, Jos S, Rinze B, Raph P. Mechanical properties and microstructure of friction stir welded tailor-made blanks. *Mater Sci Eng A* 2008;494(1-2):281-90.
- [7] Merklein M, Johannes M, Lechner M, Kuppert A. A review on tailored blanks-Production, applications and evaluation. *J Mater Process Technol* 2014;214(2):151-64
- [8] Safarbali B, Shamanian M, Eslami A. Effect of post-weld heat treatment on joint properties of dissimilar friction stir welded 2024-T4 and 7075-T6 aluminum alloys. *T Nonferr Metal Soc* 2018;28(7):1287-97.
- [9] Bhanodaya KBN, Davidson MJ, Neelakanteswara RA, Govindaraju M. Formability analysis of dissimilar tailor welded blanks welded with different tool pin profiles. *T Nonferr Metal Soc* 2015;25(6):1787-93.
- [10] Tavares SMO, Dos Santos JF, De Castro PMST. Friction stir welded joints of Al-Li Alloys for aeronautical applications: butt-joints and tailor welded blanks. *Theor Appl Fract Mec* 2013;65:8-13.
- [11] Palanivel R, Koshy MP. The tensile behaviour of friction-stir welded dissimilar aluminium alloy. *Mater Technol* 2011;45(6):623-6.
- [12] Thanabumrunikul S, Janudom S, Burapa R, Dulyapraphant P, Wannasin J. Industrial development of gas induced semi-solid process. *T Nonferr Metal Soc* 2010;20(3):s1016-21.
- [13] Mahathaninwonga N, Plookphol T, Wannasina J, Wisutmethangoon S. T6 heat treatment of rheocasting 7075 Al alloy. *Mater Sci Eng A* 2012;532:91-9.
- [14] Nandan R, Deb Roy T, Bhadeshia HKDH. Recent advances in friction-stir welding-process, weldment structure and properties. *Prog Mater Sci* 2008;53(6):980-1023.
- [15] Peel M, Steuwer A, Preuss M, Withers PJ. Microstructure, mechanical properties and

- residual stresses as a function of welding speed in aluminium AA5083 friction stir welds. *Acta Mater* 2003;51(16):4791-801.
- [16] Rao D, Huber K, Heerens J, Dos Santos JF, Huber N. Asymmetric mechanical properties and tensile behaviour prediction of aluminium alloy 5083 friction stir welding joints. *Mater Sci Eng A* 2013;565:44-50.
- [17] Jae-Hyung C, Donald EB, Paul RD. Modeling strain hardening and texture evolution in friction stir welding of stainless steel. *Mater Sci Eng A* 2005;398(1-2):146-63.
- [18] Birbilis N, Cavanaugh MK, Buchheit RG. Electrochemical behavior and localized corrosion associated with Al7CuFe particles in aluminum alloy7075-T651. *Corros Sci* 2006;48:4202-15.
- [19] Pang JJ, Liu FC, Liu J, Tan MJ, Blachwood DJ. Friction stir processing of aluminum alloy AA7075: microstructure, surface chemistry and corrosion resistance. *Corros Sci* 2016;106:2147-2228.
- [20] Niu PL, Li WY, Li N, Xu YX, Chen DL. Exfoliation corrosion of friction stir welded dissimilar 2024-to-7075 aluminum alloys. *Mater Charact* 2019;147:93-100.
- [21] Rai R, De A, Bhadeshia HKDH, Debroy T. Review: Friction stir welding tools. *Sci Technol Weld Joi* 2011;16(4):325-42.
- [22] Astarita A, Squillace A, Scala A, Prisco A. On the Critical Technological Issues of Friction Stir Welding T-Joints of Dissimilar Aluminum Alloys. *J Mater Eng Perform* 2012;21(8):1763-71.
- [23] Padmanaban G, Balasubramanian V. Selection of FSW tool pin profile, shoulder diameter and material for joining AZ31B magnesium alloy-An experimental approach. *Mater Des* 2009;30(7):2647-56.
- [24] Elangovan K, Balasubramanian V, Babu S. Predicting tensile strength of friction stir welded AA6061 aluminium alloy joints by a mathematical model. *Mater Des* 2009; 30(1):118-93.

## ประวัติผู้เขียนบทความ



วรพงศ์ บุญช่วยแทน ปัจจุบันตำแหน่งผู้ช่วยศาสตราจารย์ ผู้รับผิดชอบหลักสูตรสาขาวิชาวิศวกรรมการผลิต สาขาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย การศึกษาระดับปริญญาตรี วศ.บ.วิศวกรรมอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย ปริญญาโท วศ.ม.วิศวกรรมอุตสาหกรรมและระบบ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ E-mail: worapong.b@rmutsv.ac.th



รอมฎอน บุรพา ปัจจุบันตำแหน่งอาจารย์ ผู้รับผิดชอบหลักสูตรสาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม สาขาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย การศึกษาระดับปริญญาตรี วศ.บ.วิศวกรรมวัสดุ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ปริญญาโท วศ.ม.วิศวกรรมวัสดุ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ E-mail: romadorn.b@hotmail.com



วรรณพร ชีววุฒิพงศ์ ปัจจุบันตำแหน่งผู้ช่วยศาสตราจารย์ ผู้รับผิดชอบหลักสูตรสาขาวิชาวิศวกรรมการผลิต สาขาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย การศึกษาระดับปริญญาตรี วศ.บ.วิศวกรรมวัสดุ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ปริญญาโท วศ.ม.วิศวกรรมวัสดุ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ปริญญาเอก D.Eng. (Fiber Amenity Engineering) University of Fukui, Japan E-mail: c.watthanaphon@gmail.com

## Article History:

Received: August 5, 2019

Revised: November 21, 2019

Accepted: November 29, 2019