



# อิทธิพลของพารามิเตอร์การเชื่อมเสียดทานแบบกวนต่อโครงสร้าง และสมบัติทางกลของอลูมิเนียมหล่อกิ่งของแข็ง 2024

## รอยเชื่อมแบบต่อชน

### Influence of Friction Stir Welding Parameters on Structure and Mechanical Properties of Aluminum Semi Solid Metal 2024 Butt Welded Joints

วรพงศ์ บุญช่วยแทน<sup>1,2,\*</sup> ชาตรี หอมเขียว<sup>1,2</sup> จักรนรินทร์ ฉัตรทอง<sup>1,2</sup> สุรสิทธิ์ ระวังวงศ์<sup>1,2</sup>

และ ประภาศ เมืองจันทร์บุรี<sup>3</sup>

Worapong Boonchouytan<sup>1,2,\*</sup> Chatree Homkeiw<sup>1,2</sup> Jaknarin Chatthong<sup>1,2</sup> Surasit  
Rawangwong<sup>1,2</sup> and Prapas Muangjunburee<sup>3</sup>

<sup>1</sup>สาขาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย จ.สงขลา 90000

<sup>2</sup>หน่วยวิจัยเทคโนโลยีการแปรรูปวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย จ.สงขลา 90000

<sup>3</sup>ภาควิชาวิศวกรรมเหมืองแร่และวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ จ.สงขลา 90110

<sup>1</sup> Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of  
Technology Srivijaya, Songkhla, 90000

<sup>2</sup> Materials Processing Technology Research Unit, Faculty of Engineering, Rajamangala University of  
Technology Srivijaya, Songkhla, 90000

<sup>3</sup> Department of Mining and Materials Engineering, Faculty of Engineering, Prince of Songkla  
University, Songkhla, 90110

\*E-mail: worapong.b@rmutsv.ac.th, Telephone: 081-5697303

#### บทคัดย่อ

บทความนี้ได้ศึกษาอิทธิพลของพารามิเตอร์การเชื่อมเสียดทานแบบกวนของอลูมิเนียมหล่อกิ่งของแข็ง 2024 ที่ส่งผลต่อโครงสร้างและสมบัติทางกล วัสดุที่ใช้ทดลองมีความหนา 4 มิลลิเมตร ความเร็วหมุนเชื่อม 710, 1000 และ 1400 รอบต่อนาที และความเร็วเดินเชื่อม 80, 112 และ 160 มิลลิเมตรต่อนาที ผลจากการทดลองพบว่าพารามิเตอร์การเชื่อมส่งผลกระทบให้เกิดความร้อนจากการเสียดทานและการไหลวนของวัสดุในแนวเชื่อมที่แตกต่างกัน ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของเกรนในแต่ละบริเวณของแนวเชื่อมและสมบัติทางกลของแนวเชื่อม โดยการหมุนของเครื่องมือเชื่อมที่สูงขึ้นทำให้เกิดความร้อนที่มากขึ้นที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของเกรน และการแตกหักของอนุภาค Al<sub>2</sub>Cu ค่าความแข็งของรอยเชื่อมมากที่สุดในช่วงบริเวณ TMAZ - SZ ที่ 145.10 Hv ที่ความเร็วหมุนเชื่อม 1400 รอบต่อนาที ความเร็วเดินเชื่อม 160 มิลลิเมตรต่อนาที และค่าความแข็งแรงดึงสูงสุดของการทดลองอยู่ที่ความเร็วหมุนเชื่อม 710 รอบต่อนาที ความเร็วเดินเชื่อม 160 มิลลิเมตรต่อนาที ที่ 208.08 MPa โดยค่าความแข็งแรงดึงของรอยเชื่อมทุกสภาวะการทดลองมีค่าต่ำกว่าค่าความแข็งแรงดึงของเนื้อวัสดุเดิม โดยมีค่าประสิทธิภาพแนวเชื่อมทุกสภาวะการเชื่อมไม่เกิน 80%

## ABSTRACT

This article studied the influence of friction welding parameters stirred semi-solid casting of aluminum 2024 on structural and mechanical properties. The sample material panel has a thickness of 4 mm. The variable parameters include with rotation speeds 710, 1000 and 1400 rpm and welding speeds 80, 112 and 160 mm/min. The results revealed that the welding parameters affect the heat from the friction and the flow of materials in welding. It changes the shape of grain in each area of welding as well as mechanical properties of the weld. The higher rotation speed of the weld affects the deformation of the grain and fracture of particle  $Al_2Cu$ . Hardness of the welding is in the area TMAZ-SZ at 145.10 Hv, rotation speed 1400 rpm, welding speed 160 mm/min. The maximum tensile strength receiving in this experiments was 208.08 MPa with conditions of rotation speed 710 rpm and welding speed 160 mm/min. However, the tensile strength of welds in all experimental conditions is lower than the based material. The efficiency of all welding conditions is not over 80%.

### 1. บทนำ

อลูมิเนียมเกรด 2xxx สามารถเพิ่มสมบัติทางกลด้วยกระบวนการทางความร้อน ทั้งในด้านความแข็งแรงและความแข็งแรง นอกจากนี้ยังสามารถทนต่อการกัดกร่อนได้ดีมีการใช้กันอย่างแพร่หลายสำหรับงานโครงสร้างต่าง ๆ แต่ก็มีอุปสรรคในการใช้งานและมีข้อจำกัดมากพอสมควร เช่น เทคนิคการเชื่อมประกอบ การสูญเสียความแข็งแรงเมื่อใช้งานในอุณหภูมิที่สูง โดยเฉพาะเทคนิคการเชื่อมประกอบด้วยกรรมวิธีการเชื่อมในสภาวะหลอมละลายมีข้อจำกัดอยู่มาก ไม่ว่าจะเป็นกรรมวิธีการเชื่อม TIG หรือ MIG เนื่องจากความร้อนจากการเชื่อมในสภาวะหลอมละลายทำให้เกิดรูพรุน รอยแตก และการบิดตัวของแนวเชื่อม เป็นต้น ส่งผลให้เกิดช่องว่างของค่าสมบัติทางกลด้านความแข็งแรงระหว่างเนื้อโลหะเดิมกับรอยเชื่อมมากกว่า 40 เปอร์เซ็นต์ ดังนั้นเพื่อเป็นการแก้ปัญหาดังกล่าวข้างต้นกรรมวิธีการเชื่อมสภาวะของแข็ง คือ การเชื่อมเสียดทานแบบกวน (Friction Stir Welding; FSW) ซึ่งในปัจจุบันถูกกล่าวถึงและนำไปใช้มากขึ้นในอุตสาหกรรมการบินและอวกาศ อุตสาหกรรมยานยนต์ อุตสาหกรรมทางทะเล รวมถึงทางการแพทย์ เป็นต้น [1-5]

การเชื่อมเสียดทานแบบกวนมีข้อดีและข้อได้เปรียบกว่ากระบวนการเชื่อมในสภาวะหลอมละลาย เช่น มีความร้อนที่ต่ำกว่าจุดหลอมละลายของวัสดุทำให้ไม่เกิดรูพรุนหรือรอยแตกในแนวเชื่อม ไม่เกิดการบิดตัวของแนวเชื่อม รวมถึงการใช้อุปกรณ์ในการเชื่อมที่น้อยกว่า เป็นต้น

ดังนั้น การเชื่อมเสียดทานแบบกวนจึงกลายเป็นกระบวนการที่เหมาะสมมากสำหรับการเชื่อมวัสดุ โดยเฉพาะอลูมิเนียมที่มีความแข็งแรงสูง เช่น 2024, 6061, 7075 เป็นต้น [6] เมื่อเทียบกับการเชื่อมแบบหลอมละลายแล้วบริเวณที่แตกต่างกันจะเกิดขึ้นในช่วงของแนวเชื่อม เนื่องจากความร้อนจากแรงเสียดทานก่อให้เกิดการเปลี่ยนรูปร่างของเกรนแบบพลาสติก ความร้อนจากแรงเสียดทานของเครื่องมือเชื่อมกับวัสดุเชื่อมทำให้เกิดการชะลอตัวของเนื้อโลหะจึงทำให้การหมุนย้ายโครงสร้างทางโลหะวิทยาเป็นไปตามแนวการหมุนของเครื่องมือ ภายใต้พารามิเตอร์การเชื่อมของเครื่องมือเชื่อม (บ่าและหัวพิน) โครงสร้างของการเชื่อมเสียดทานแบบกวนเนื่องจากความเครียดทางกลที่รุนแรงแนวเชื่อมจะแสดงให้เห็นถึงสามบริเวณที่แตกต่างกัน คือบริเวณแนวกวน (Stir Zone; SZ) บริเวณที่มีผลกระทบอันเนื่องมาจากความร้อน (Thermo Mechanical Affected Zone : TMAZ) และบริเวณได้รับผลกระทบทางความร้อน (Heat Affected Zone : HAZ) บริเวณ SZ เป็นพื้นที่ที่หัวพินของเครื่องมือเชื่อมผ่าน มีทั้งการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของเกรนสูงและการรักษาความร้อนบริเวณแนวเชื่อม โดยทั่วไปจะประกอบด้วยเกรนชนิดอีควิแอกซ์ (Equiaxed Grains) ที่ดีมากขึ้นเนื่องจากการตกผลึกใหม่ของเกรนที่เต็มรูปแบบที่มีผลมาจากความร้อนจากแรงเสียดทานทำให้มีจำนวนมากและเป็นเกรนละเอียด บริเวณที่อยู่ติดกับ SZ เป็น TMAZ บริเวณที่เกิดการเปลี่ยนแปลงของเกรนจากความร้อนทางกลอย่างรุนแรง

ถึงแม้ว่าจะไม่ได้รับผลโดยตรงในการกดหรือการหมุนของเครื่องมือเชื่อมที่หัวพิน แต่เครื่องมือเชื่อมที่บ่าเชื่อมก็ส่งผลกระทบต่อได้โดยตรงเนื่องจากความเครียดเหนือนภายในแนวเชื่อม ทำให้บริเวณ TMAZ เกรนจะเสียรูปร่างแบบพลาสติกเช่นเดียวกับบริเวณ SZ แต่ไม่เพียงพอที่จะทำให้เกิดการตกผลึกใหม่ของเกรน นอกเหนือจากบริเวณ TMAZ ที่เป็นบริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อนแล้ว ยังมีบริเวณอีกบริเวณหนึ่งที่ซึ่งบริเวณนี้จะโดนการกระทำของเครื่องมือเชื่อมที่บ่าเชื่อมส่งผลกระทบต่อจากความร้อนเช่นกัน เรียกว่า บริเวณ HAZ ซึ่งเกิดจากการไหลเวียนของความร้อนบริเวณส่วนปลายของเครื่องมือเชื่อม [7-12] นอกจากนี้รูปร่างของรอยเชื่อมที่เป็นลักษณะวงแหวนครึ่งวงกลมด้านบนของพื้นผิวรอยเชื่อม จะมีระยะห่างระหว่างวงแหวนครึ่งวงกลมอย่างสม่ำเสมอหรือจะเพิ่มขึ้นและลดลงก็ได้ซึ่งขึ้นอยู่กับพารามิเตอร์ของการเชื่อม คือ ความเร็วเดินเชื่อมและความเร็วหมุนเชื่อม ส่งผลให้โครงสร้างเป็นเนื้อเดียวกันภายใต้แนวเชื่อม [13] พารามิเตอร์ต่าง ๆ ของการเชื่อมเสียดทานแบบกวน เช่น ความเร็วหมุนเชื่อม (R), ความเร็วเดินเชื่อม (V), แรงกดตามแนวแกนเครื่องมือ รูปทรงเรขาคณิตของหัวพิน การเอียงองศาของเครื่องมือเชื่อม รวมถึงความลึกในกคเครื่องมือเชื่อมลงในเนื้อวัสดุ เป็นต้น ต่างก็ส่งผลกระทบต่อกระบวนการ FSW ท่ามกลางพารามิเตอร์ต่าง ๆ เหล่านี้ความเร็วหมุนเชื่อมและความเร็วเดินเชื่อม เป็นสองพารามิเตอร์การเชื่อมที่สำคัญที่สุดที่มีอิทธิพลต่อความร้อนจากแรงเสียดทาน ส่งผลต่อคุณภาพของโครงสร้างทางโลหะวิทยาและสมบัติทางกลของแนวเชื่อม [14-15]

จุดมุ่งหมายของงานวิจัยในครั้งนี้คือการสร้างอิทธิพลของอัตราส่วน (R/V) ระหว่างความเร็วหมุนเชื่อม (Rotation; R) กับความเร็วเดินเชื่อม (Velocity; V) ที่ส่งผลเกี่ยวกับคุณภาพของแนวเชื่อม ทั้งคุณภาพของ

โครงสร้างทางโลหะวิทยาและสมบัติทางกลของแนวเชื่อมของโลหะผสมหล่อทิ้งของแข็งอลูมิเนียม 2024

## 2. รูปแบบการทดลอง

อลูมิเนียมหล่อทิ้งของแข็ง 2024 (Semi-Solid Metal; SSM) ที่ผ่านกรรมวิธีการหล่อแบบปล่อยฟองแก๊สเหนี่ยวน้ำโลหะ (Gas Induce Semi Solid; GISS) [16] มีความหนา 15 มิลลิเมตร (mm) ความกว้าง 100 mm และความยาว 100 mm ถูกนำมาใช้เป็นวัสดุในการทดลองครั้งนี้ จากนั้นจะนำมาแปรรูปด้วยเครื่องกัดแนวตั้งให้มีขนาด ความหนา 4 mm ความกว้าง 100 mm และความยาว 100 mm องค์กรประกอบทางเคมีของวัสดุทดลองและสมบัติทางกลของวัสดุแสดงดังตารางที่ 1 และ 2 เครื่องมือเชื่อมทำจากเหล็กเครื่องมือ SKD11 บ่ากวน (Shoulder) มีขนาดความยาวเส้นผ่านศูนย์กลาง 20 mm หัวพินมีรูปร่างเป็นทรงกระบอกขนาดความยาวเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 mm ยาว 3.2 mm รายละเอียดของเครื่องมือเชื่อมแสดงดังตารางที่ 3 และรูปที่ 1 มุมเอียงของเครื่องมือเชื่อมในขณะเชื่อมที่ 3 องศา และความลึกของบ่าเชื่อมที่กดลงไปเนื้อวัสดุทดลองเท่ากับ 1.0 mm



รูปที่ 1 หัวพินทรงกระบอกที่ใช้ในการเชื่อม

ตารางที่ 1 องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุทดลอง (ส่วนของน้ำหนัก %)

Elements	Al	Cr	Cu	Fe	Mg	Mn	Si	Ti	Zn	Other
SSM 2024	90.7	0.1	3.8	0.5	1.2	0.3	0.5	0.15	0.25	2.5

ตารางที่ 2 สมบัติทางกลของวัสดุทดลอง

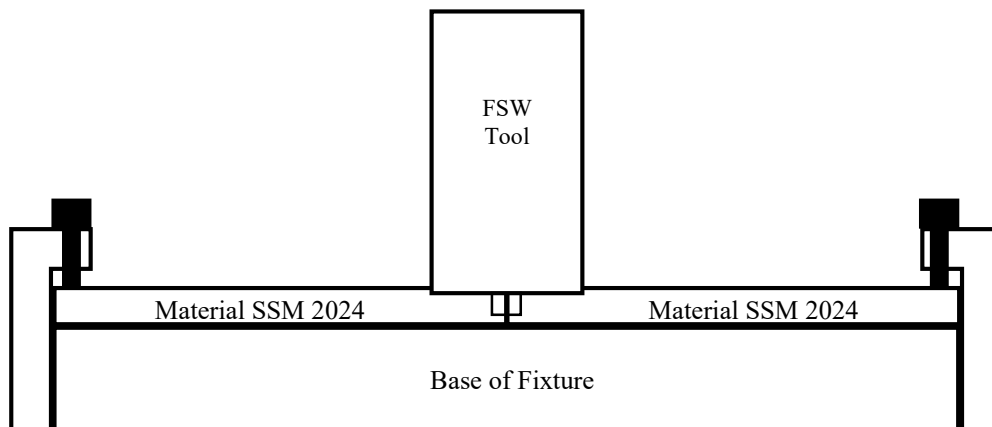
Tensile Strength (MPa)	Yield Strength (MPa)	Elongation (%)	Hardness (HV)
261	209	9.5	92

ตารางที่ 3 รูปทรงเรขาคณิตของเครื่องมือ FSW

Pin description	Pin diameter (mm)	Pin Length (mm)	Pin Angle (°)	Shoulder diameter (mm)
Cylinder	5	3.2	3	20

ตารางที่ 4 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการเชื่อม

Sample	Rotation Speed, R, (rpm)	Welding Speed, V, (mm/min)	R/V	R <sup>2</sup> /V
1	710	80	8.88	6301
2	710	112	6.34	4501
3	710	160	4.44	3151
4	1000	80	12.50	12500
5	1000	112	8.93	8929
6	1000	160	6.25	6250
7	1400	80	17.50	24500
8	1400	112	12.50	17500
9	1400	160	8.75	12250

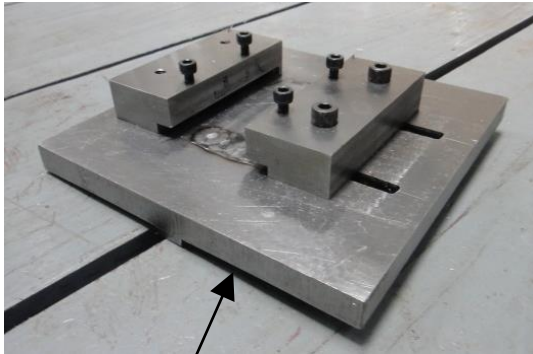


รูปที่ 2 รูปแบบการเชื่อมเสียดทานแบบกวน

รูปแบบการเชื่อมเสียดทานแบบกวนจะมีฟิกเจอร์ (Fixture) แสดงดังรูปที่ 2 สำหรับการเชื่อมเสียดทานแบบกวนซึ่งออกแบบมาเพื่อการทดลองงานเชื่อมเสียดทานแบบกวน โดยในตัวฟิกเจอร์จะมีแผ่นเหล็กรองด้านล่างกันระหว่างวัสดุทดลองกับโต๊ะงานของเครื่องกัดแนวตั้ง แสดงดังรูปที่ 3 การเชื่อมจะใช้เครื่องกัดแนวตั้งประกอบเข้ากับเครื่องมือเชื่อมหมุนวนตามเข็มนาฬิกา โดยที่เครื่องมือเชื่อมจะหมุนอยู่กับที่ในขณะที่โต๊ะงานเคลื่อนที่

ไปตามแนวแกน มีพารามิเตอร์ที่ใช้ในการเชื่อม 2 ปัจจัยหลัก คือ ความเร็วหมุนเชื่อม (Rotation Speed) มีหน่วยเป็น รอบต่อนาที (rpm) และความเร็วเดินเชื่อม (Welding Speed) มีหน่วยเป็น มิลลิเมตรต่อนาที (mm/min) โดยการทดลองการเชื่อมนั้นจะเชื่อมทั้งหมดจำนวน 3 ซ้ำ เพื่อลดค่าความแปรปรวนของการทดลอง โดยที่รอยเชื่อมทั้งหมดของการทดลองอยู่ในสภาพ "ร้อน" ตามอัตราส่วนระหว่างความเร็วหมุนเชื่อมต่อความเร็วเดิน

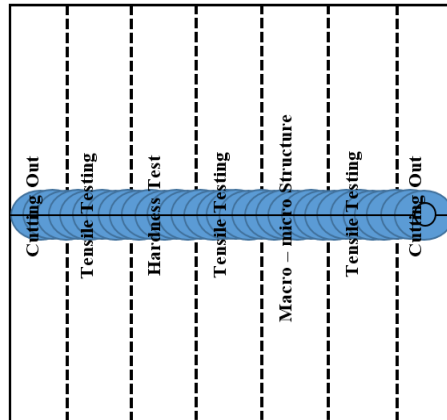
เชื่อม (R/V) และอัตราส่วน  $R^2/V$  หมายถึง คำนีความ ร้อน เหนืออัตราส่วนนี้ถูกคิดค้นโดย [17] พารามิเตอร์ที่ ใช้ในการเชื่อมครั้งนี้แสดงดังตารางที่ 4



ฐานด้านล่างของฟีกเจอร์

รูปที่ 3 ลักษณะของฟีกเจอร์

เมื่อเชื่อมชิ้นงานเสร็จต่อหนึ่งสภาวะจะทำการ ตรวจสอบรอยเชื่อมด้วยตาเปล่าก่อนเป็นอันดับแรก เพื่อ ตรวจสอบสิ่งผิดปกติในรอยเชื่อมว่ามีกระพริบหรือมี รอยไหม้ จากนั้นจะนำไปร่างแบบตัดตั้งฉากกับแนวเชื่อม เพื่อนำส่วนต่างๆ ไปทดสอบสมบัติทางกลและตรวจสอบ โครงสร้างทางโลหะวิทยา โดยส่วนหัวและส่วนท้ายของ แนวเชื่อมจะถูกตัดออก (Cutting Out) ข้างละ 15 mm จากนั้นส่วนที่ติดกับส่วนหัวและส่วนท้ายคือส่วนที่จะ นำไปแปรรูปเป็นชิ้นงานทดสอบสมบัติทางกลด้านความ แข็งแรงดึง (Tensile Testing) จำนวน 3 ชิ้น ความ กว้างชิ้นละ 15 mm ส่วนต่อมานำไปดูโครงสร้างทาง โลหะวิทยาในระดับมหภาคและจุลภาค (Macro – Micro Structure) ความกว้าง 10 mm และส่วนสุดท้ายจะ นำไปทดสอบสมบัติทางกลด้านความแข็งแรง ความกว้าง 15 mm รายละเอียดแสดงดังรูปที่ 4



รูปที่ 4 แบบร่างของการตัดขวางกับแนวเชื่อมที่ผ่าน การเชื่อมเสียดทานแบบกวน

การตรวจสอบ โครงสร้างทางโลหะวิทยา ระดับ มหภาคและจุลภาค จะเตรียมชิ้นงานโดยนำชิ้นงานเชื่อม ไปหล่อเรซินในบล็อกที่กำหนด จากนั้นนำไปขัดด้วย กระดาษทรายเรียงลำดับความหยาบมากไปจนถึงความ หยาบน้อย ตั้งแต่เบอร์ 320 – 1200 เมื่อขัดเสร็จก็นำไป ขัดต่อบนผ้าสักหลาดด้วยผงขัดอะลูมินา จำนวน 3 ขนาด คือ 3, 1 และ 0.5 ไมโครเมตร ( $\mu\text{m}$ ) ตามลำดับ จากนั้น นำไปกัดด้วยกรดซิลิโคนเป็นเวลา 10 วินาที (s) ถึงจุดนี้ ชิ้นงานพร้อมตรวจสอบ โครงสร้างทางโลหะวิทยาทั้ง ระดับมหภาคด้วยกล้องกำลังขยายต่ำ และระดับจุลภาค ด้วยกล้องจุลทรรศน์

การทดสอบสมบัติทางกลด้านความแข็งแรง จะเตรียม ชิ้นงานเหมือนกับการเตรียมชิ้นงานเพื่อการตรวจสอบ โครงสร้างทางโลหะวิทยาในระดับมหภาคและจุลภาคทุก ประการ และใช้เครื่องทดสอบความแข็งแรงแบบวิกเกอร์ กด ลงบริเวณพื้นที่หน้าตัดของรอยเชื่อม แรงกดที่ใช้ 100 กรัม (g) เป็นเวลา 10 s ต่อหนึ่งรอยกด ระยะห่างระหว่าง รอยกด 1 mm โดยใน 1 ชิ้นงานทดสอบจะกดทั้งหมด 3 แนวกด แล้วนำทั้ง 3 แนวกดมาคำนวณค่าเฉลี่ยเพื่อเป็น ตัวแทนของชิ้นงานทดสอบแต่ละสภาวะการทดลอง

การทดสอบสมบัติทางกลด้านความแข็งแรงดึง จะนำ ชิ้นงานที่ได้จากการตัดแบ่งมาแปรรูปด้วยเครื่องกัดแนวตั้ง โดยใช้คอมพิวเตอร์ในการควบคุมในการผลิตให้มีขนาด

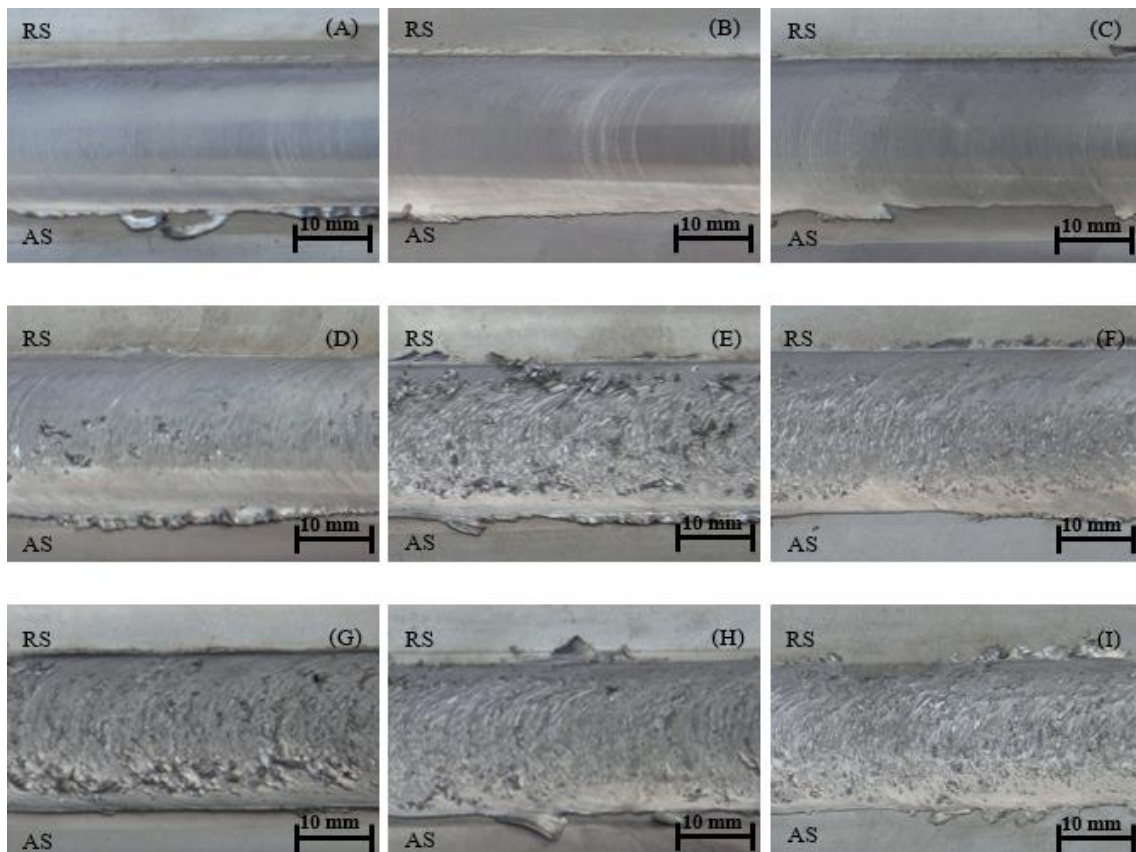
ตามมาตรฐานการทดสอบ ASTM E8M จากนั้นนำไปทดสอบความแข็งแรงดึงด้วยเครื่องทดสอบแบบเอนกประสงค์ที่อุณหภูมิห้องโดยมีความเร็วในการดึง 1 mm/min โดยในหนึ่งสภาวะของการทดลองจะดึง 3 ชิ้น ในแต่ละสภาวะจะทดสอบจำนวน 3 ซ้ำ จะทำให้ได้ค่าทดสอบสมบัติทางกลด้านความแข็งแรงดึง 9 ค่าต่อหนึ่งสภาวะ

### 3. ผลการทดลองและวิเคราะห์ผล

#### 3.1 คุณภาพรอยเชื่อม

รูปที่ 5 แสดงให้เห็นถึงลักษณะพื้นผิวด้านบนของรอยเชื่อมที่อยู่ภายใต้พารามิเตอร์ต่างๆ ของการเชื่อม โดยที่ความเร็วหมุนเชื่อม 710 rpm แสดงดังรูปที่ 3 (A-C) ความเร็วหมุนเชื่อม 1000 rpm แสดงดังรูปที่ 3 (D-F)

และความเร็วหมุนเชื่อม 1400 rpm แสดงดังรูปที่ 3 (G-I) ซึ่งแต่ละสภาวะจะเรียงลำดับของความเร็วเดินเชื่อมจาก 80, 112 และ 160 mm/min ตามลำดับ ผลการทดลองพบว่าพื้นผิวด้านบนของรอยเชื่อมที่ความเร็วหมุนเชื่อมต่ำจะเรียบและมีครีบน้อย แสดงดังรูปที่ 3 (A-C) ในขณะที่เพิ่มความเร็วหมุนเชื่อมขึ้น จาก 710 เป็น 1000 และ 1400 rpm ตามลำดับ พบว่าลักษณะพื้นผิวด้านบนของรอยเชื่อมมีความขรุขระ มีสะเก็ด มีครีบ เพิ่มมากขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของความเร็วหมุนเชื่อมด้วย นอกจากนี้ยังพบร่องรอยของบ่าเครื่องมือเชื่อมที่มีการแบ่งเป็นชั้นๆ ตามรอยหมุนของเครื่องมือเชื่อม แสดงดังรูปที่ 3 (D-F) และ 3 (G-I) แต่ไม่พบความผิดปกติของรอยเชื่อมแต่อย่างใด



รูปที่ 5 ลักษณะพื้นผิวของรอยเชื่อมตามพารามิเตอร์ความเร็วหมุนเชื่อมและความเร็วเดินเชื่อม ดังนี้

(A) 710 rpm 80 mm/min, (B) 710 rpm 112 mm/min, (C) 710 rpm 160 mm/min,  
(D) 1000 rpm 80 mm/min, (E) 1000 rpm 112 mm/min, (F) 1000 rpm 160 mm/min,  
(G) 1400 rpm 80 mm/min, (H) 1400 rpm 112 mm/min and (I) 1400 rpm 160 mm/min.

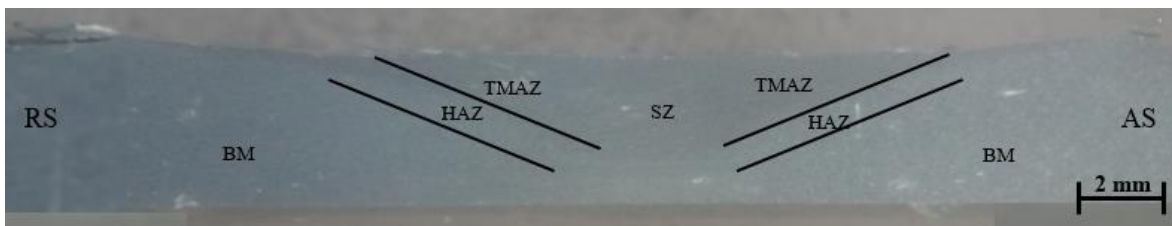


ผลที่ได้ชี้ให้เห็นว่าลักษณะพื้นผิวด้านบนของรอยเชื่อมได้รับผลกระทบมากขึ้น โดยความเร็วหมุนเชื่อมมากกว่าความเร็วเดินเชื่อมเนื่องจากความแตกต่างของค่าระดับความร้อนที่เกิดขึ้น การเพิ่มขึ้นของอัตราส่วน  $R/V$  นำไปสู่ความร้อนที่สูงขึ้นแสดงโดยดัชนี  $R^2/V$  และการเพิ่มขึ้นของความเร็วหมุนเชื่อมส่งผลต่อรอยเชื่อม รวมถึงการไหลวนของเนื้อวัสดุที่มีมากขึ้นตามการหมุนวนของความเร็วหมุนเชื่อมอีกด้วย [18-22] การเพิ่มขึ้นของอัตราส่วน  $R/V$  นำไปสู่ขนาดที่กว้างและลึกมากขึ้นของบริเวณรอยเชื่อม เพราะการนำเข้ามาความร้อนที่สูงขึ้นที่เกิดจากการหมุนวนของเครื่องมือเชื่อมที่เพิ่มขึ้น พบว่าความร้อนที่สูงขึ้นช่วยเพิ่มการไหลของวัสดุโดยมีเครื่องมือเชื่อมเป็นอุปกรณ์สำคัญ ดังนั้นความร้อนที่เกิดจากแรงเสียดทานทำให้วัสดุอยู่ในสภาวะพลาสติกจึงไหลตัวได้อย่างง่ายดาย [19,22-23] ระยะห่างของร่องรอยของบ่าเครื่องมือเชื่อมที่มีการแบ่งเป็นชั้นๆ ตามรอยหมุนของเครื่องมือเชื่อมเกี่ยวข้องกับการเคลื่อนตัวไปข้างหน้าของ

เครื่องมือเชื่อมตามความเร็วเดินเชื่อมที่กำหนด [13,24-25] นอกจากนี้ยังสามารถสันนิษฐานได้ว่าพารามิเตอร์ของการเชื่อมและการไหลวนของวัสดุได้ส่งผลกระทบต่อลักษณะรอยเชื่อม ข้อบกพร่องรอยเชื่อมส่วนใหญ่เกิดขึ้นในกรณีที่มีการไหลของวัสดุรอบๆ เครื่องมือเชื่อมยังไม่เพียงพอ และการปรับเปลี่ยนค่าความเร็วหมุนเชื่อมและความเร็วเดินเชื่อม อาจจะเป็นเหตุผลสำหรับการเกิดข้อบกพร่องในแนวเชื่อมได้ [15,26-29]

### 3.2 โครงสร้างมหภาค

โครงสร้างมหภาคของรอยเชื่อมแสดงดังรูปที่ 5 จากการสังเกตในแนวเชื่อมทุกสภาวะ รอยเชื่อมเสียดทานแบบกวนจะถูกแบ่งออกเป็น 4 บริเวณ คือ SZ, TMAZ, HAZ และเนื้อ โลหะ เดิม (Base Metal; BM) นอกจากนี้ไม่พบข้อบกพร่องในรอยเชื่อมในทุกสภาวะการเชื่อมอีกด้วย



รูปที่ 6 โครงสร้างมหภาคของรอยเชื่อม

### 3.3 โครงสร้างจุลภาค

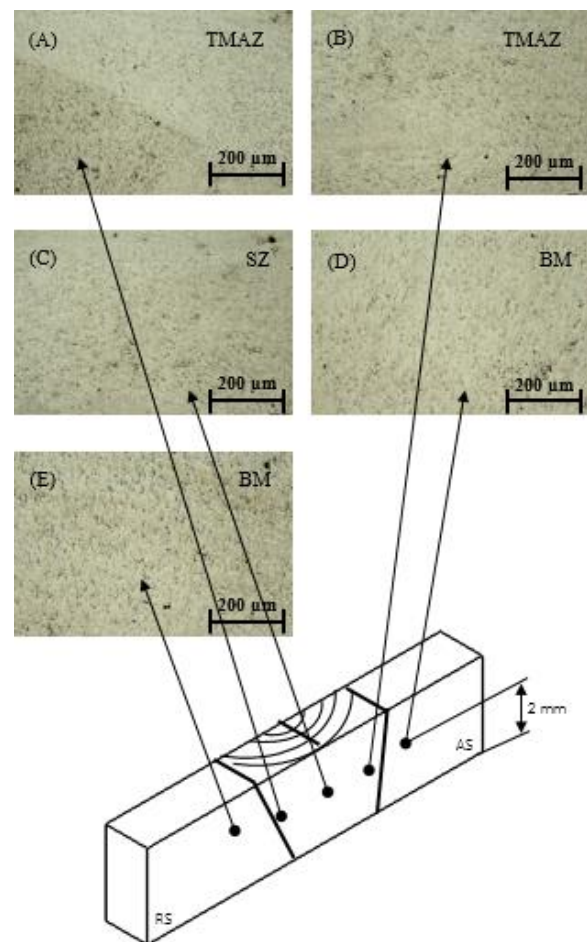
จากการตรวจสอบ โครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (Optical Microscope : OM) พบว่าบริเวณเนื้อโลหะเดิม (BM) ประกอบไปด้วยเฟสแอลฟา ( $\alpha$ ) แบบก้อนกลมผสมกับเฟส Eutectic ประกอบไปด้วย  $\alpha + Al_2Cu / Al_2CuMg$  [30] ซึ่งโครงสร้างเนื้อโลหะเดิมจะมีลักษณะเหมือนกันทุกสภาวะการเชื่อม แสดงดังรูปที่ 7(D,E) การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของรอยเชื่อมแสดงดังรูปที่ 7(A-E) แสดงให้เห็นตำแหน่งต่าง ๆ ที่ใช้ส่องกล้องในรอยเชื่อม ที่ความเร็วหมุนเชื่อม 710 rpm ความเร็วเดินเชื่อม 80 mm/min

พบว่าที่บริเวณ SZ และ บริเวณ TMAZ มีการตกผลึกใหม่ของเกรนที่มีผลมาจากความร้อนจากแรงเสียดทานขนาดเกรนในบริเวณ SZ และ TMAZ จะเล็กมากเมื่อเทียบกับบริเวณ BM ซึ่งเป็นผลมาจากการหมุนวนของเครื่องมือเชื่อมทำให้เกิดการไหลวนของเนื้อวัสดุ ในทางตรงกันข้ามโครงสร้างบริเวณ HAZ คล้ายกับโครงสร้างบริเวณ BM เนื่องจากการไหลของวัสดุอยู่บริเวณขอบปลายบ่าของเครื่องมือเชื่อมจึงไม่โดนผลกระทบมากนัก นอกจากนี้เฟส Eutectic เกิดการแตกหัก และกระจายทั่วบริเวณ SZ ในระหว่างการเชื่อม และมีการแพร่ขยายบริเวณ SZ มากขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของความเร็ว

หมุนเชื่อมอีกด้วย ซึ่งเป็นผลมาจากความร้อนจากแรงเสียดทานระหว่างวัสดุคูลองกับเครื่องมือเชื่อม การหมุนของเครื่องมือเชื่อมที่สูงขึ้นทำให้เกิดความร้อนที่มากขึ้นส่งผลให้วัสดุอยู่ในสภาวะพลาสติกที่กว้างขึ้นด้วย แสดงดังรูปที่ 8(A) ความเร็วหมุนเชื่อม 1000 rpm ความเร็วเดินเชื่อม 112 mm/min และแสดงดังรูปที่ 8(B) ความเร็วหมุนเชื่อม 1400 rpm ความเร็วเดินเชื่อม 160 mm/min จากลักษณะดังกล่าวดูเหมือนว่าค่าความเร็วเดินเชื่อมซึ่งเป็นพารามิเตอร์ในการเชื่อมมีผลต่อรูปแบบของเกรนที่ไม่ได้แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญมากนัก และในโครงสร้างจุลภาคสำหรับแต่ละบริเวณก็มีลักษณะที่คล้ายคลึงกัน นอกจากบริเวณ SZ กับบริเวณ BM ที่แตกต่างกันอย่างเห็นได้ชัด อิทธิพลต่างๆ ที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของเกรน และการแตกหักของอนุภาค  $Al_2Cu$  ได้ส่งผลกระทบต่อไปสู่ค่าสมบัติทางกลอีกด้วย [13] ผลที่ได้ชี้ให้เห็นว่าลักษณะรอยเชื่อมได้รับผลกระทบมากขึ้นจากความเร็วหมุนเชื่อม และการเพิ่มขึ้นของอัตราส่วน R/V นำไปสู่ความแตกต่างของระดับความร้อนที่เกิดขึ้นส่งผลกระทบต่อแนวเชื่อม [18-22] แสดงดังรูปที่ 8 นอกจากนี้ขนาดของเกรนในบริเวณ SZ และบริเวณ TMAZ เกิดการเปลี่ยนรูปร่างแบบเร่งรัดมากที่อุณหภูมิสูง ซึ่งเกิดจากการเสียดรูปร่างและการตกผลึกใหม่แบบไดนามิก ซึ่งได้ผลเช่นเดียวกับ [31-33]

การเปลี่ยนแปลงรูปร่างของเกรนในบริเวณ TMAZ มีการเปลี่ยนรูปร่างแบบพลาสติกที่น้อยกว่าบริเวณ SZ เพราะได้รับความร้อนต่ำกว่าบริเวณ SZ ในทางตรงกันข้ามกับการเปลี่ยนรูปร่างแบบพลาสติกบริเวณ HAZ แทบจะไม่เกิดขึ้นเลยเพียงเพราะมีความร้อนที่เกิดขึ้นในบริเวณนั้นน้อยมาก ดังนั้นโครงสร้างทางจุลภาคที่ดูเหมือนว่าจะไม่ใช่เป็นเนื้อเดียวกันนำไปสู่การเพิ่มขึ้นของขนาดเกรนในบริเวณ TMAZ และบริเวณ HAZ เพราะไม่ได้เกิดปรากฏการณ์การตกผลึกของเกรน แต่เกิดการตกตะกอนขนาดเล็กลงในระหว่างขั้นตอนของการเชื่อมและทำให้เกรนที่เกิดขึ้นมีความหยาบกว่าเกรนในบริเวณ SZ นอกจากนี้ขนาดของเกรนจะไม่เหมือนกันในทุกส่วนของบริเวณ SZ

เกรนที่มีขนาดเล็กจะอยู่ด้านล่างของรอยเชื่อม ส่วนเกรนที่มีขนาดใหญ่กว่าจะอยู่ด้านบนของรอยเชื่อม สันนิษฐานว่าเป็นเพราะความแตกต่างในระดับความร้อนที่เกิดขึ้นบริเวณ SZ ด้านบนจะได้รับอิทธิพลจากบ่าของเครื่องมือเชื่อมทำให้เกิดความร้อนที่มากกว่า บริเวณ SZ ด้านล่างที่ได้รับความร้อนจากการเสียดทานของเครื่องมือเชื่อมที่น้อยกว่าทำให้เกรนดูมีขนาดเล็กกว่า [9,14,20-21,25,32-37]



รูปที่ 7 โครงสร้างจุลภาคของรอยเชื่อม ที่ความเร็วหมุนเชื่อม 710 rpm ความเร็วเดินเชื่อม 80 mm/min

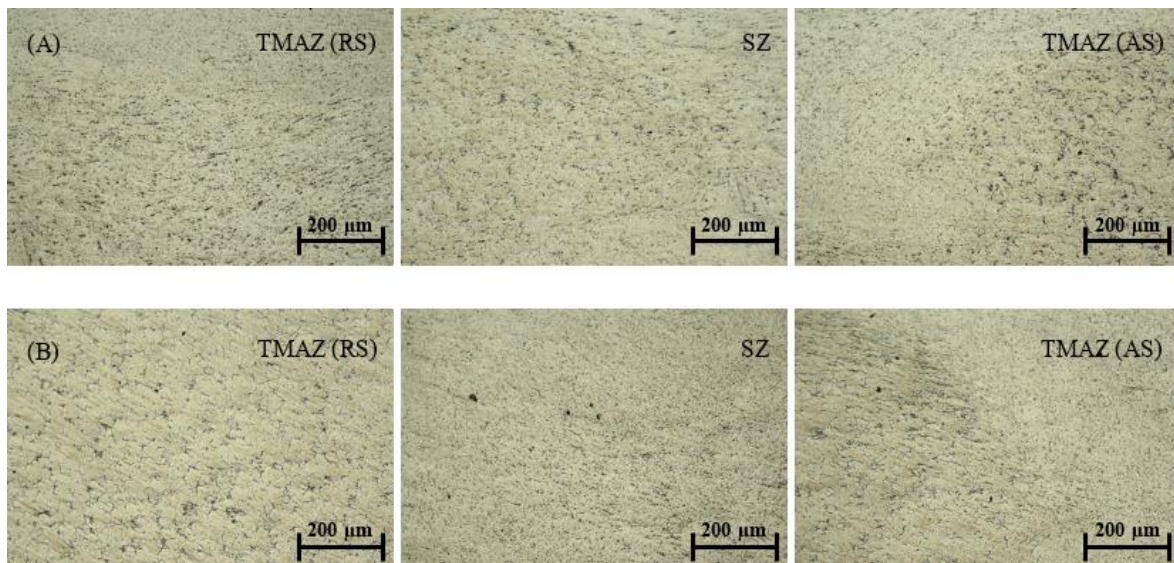
### 3.4 การทดสอบสมบัติทางกลด้านความแข็ง

รูปแบบค่าความแข็งของรอยเชื่อมภายใต้พารามิเตอร์การเชื่อม พบว่า รอยเชื่อมแสดงลักษณะคล้ายตัวยูกว่า (∩) ค่าบริเวณ BM มีค่าเกาะกลุ่มกันต่อเนื่องจนถึงบริเวณ TMAZ จากนั้นค่าความแข็งค่อยๆ เพิ่มขึ้นเมื่อเข้า



สู่บริเวณ SZ และลดต่ำลงเรื่อยๆ เมื่อเริ่มเข้าสู่บริเวณ TMAZ ของอีกด้านหนึ่งปรากฏการณ์นี้แสดงดังรูปที่ 9-11 ที่เป็นเช่นนี้เนื่องมาจากการตกผลึกใหม่ของเกรนที่เกิดจากความร้อนจากการเชื่อมเสียดทานแบบกวนมีมากในบริเวณ SZ ทำให้มีค่ามากกว่าทั้งในบริเวณ TMAZ และบริเวณ BM ซึ่งแสดงให้เห็นถึงค่าความแข็งที่แตกต่างกัน ส่วนบริเวณ TMAZ และบริเวณ HAZ ที่มีค่าลดลง

เนื่องมาจากการระบายความร้อนออกจากแนวเชื่อมมีค่ามากทำให้เกิดการตกผลึกใหม่ของอนุภาค  $Al_2Cu$  มีน้อย ส่งผลให้ค่าความแข็งน้อยตามไปด้วย [8,15,19,38-39] นอกจากนี้ข้อสังเกตในค่าความแข็งของความเร็วเดินเชื่อมที่แตกต่างกันมีค่าไม่แตกต่างกันมากนัก ผลจากการปรับเปลี่ยนของความเร็วเดินเชื่อมไม่ได้ส่งผลต่อค่าความแข็งมากนัก



รูปที่ 8 โครงสร้างจุลภาคของรอยเชื่อม โดยที่ (A) ความเร็วหมุนเชื่อม 1000 rpm ความเร็วเดินเชื่อม 112 mm/min และ (B) ความเร็วหมุนเชื่อม 1400 rpm ความเร็วเดินเชื่อม 160 mm/min

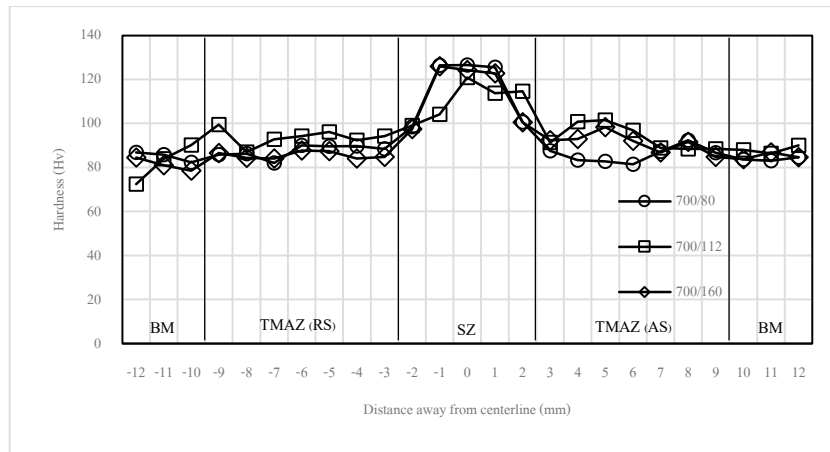
นอกจากนี้พฤติกรรมของค่าความแข็งพบว่าเมื่อเพิ่มความเร็วหมุนเชื่อมมากขึ้นค่าความแข็งบริเวณ SZ ก็มีค่าเพิ่มมากขึ้น กล่าวคือ ที่ความเร็วหมุนเชื่อม 710 rpm มีค่าความแข็งสูงสุด 126.60 Hv ต่อมาที่ความเร็วหมุนเชื่อม 1000 rpm มีค่าความแข็งสูงสุด 133.20 Hv และที่ความเร็วหมุนเชื่อม 1400 rpm มีค่าความแข็งสูงสุด 145.10 Hv นั่นคือการเพิ่มขึ้นของความเร็วหมุนเชื่อมส่งผลต่อการเพิ่มขึ้นของค่าความแข็งด้วย แสดงดังรูปที่ 9-11 เป็นเช่นนี้ด้วยเหตุว่าเพราะความร้อนที่เกิดขึ้นในระหว่างการเชื่อมทำให้เกิดการตกผลึกใหม่ของเกรน ดังนั้นผลกระทบนี้จะเกิดขึ้นอย่างรุนแรงมากในบริเวณ SZ ในขณะที่บริเวณ TMAZ จะได้รับผลกระทบน้อยกว่า นอกจากนี้ตำแหน่งที่โดนหัวพินของเครื่องมือเชื่อม

โดยตรงอยู่บริเวณ SZ ทำให้เกิดการแตกหักของอนุภาค  $Al_2Cu$  และหมุนวนกระจายทั่วบริเวณที่ถูกเชื่อม [8,15,19,38-39] โดยผลของการทดลองพบว่าค่าความแข็งของรอยเชื่อมมากที่สุดในช่วงบริเวณ TMAZ - SZ ที่ 145.10 Hv ที่ความเร็วหมุนเชื่อม 1400 rpm ความเร็วเดินเชื่อม 160 mm/min และค่าความแข็งของรอยเชื่อมน้อยที่สุดในช่วงบริเวณ TMAZ - SZ ที่ 82.80 Hv ที่ความเร็วหมุนเชื่อม 710 rpm ความเร็วเดินเชื่อม 80 mm/min

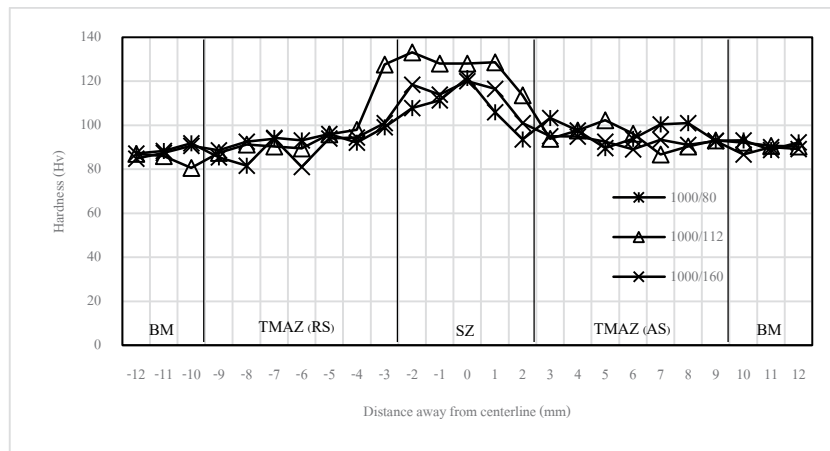
ข้อสังเกตอีกประการพบว่า เมื่อเพิ่มความเร็วหมุนเชื่อมมากขึ้นความกว้างของบริเวณ SZ มีมากขึ้นตามไปด้วย แสดงดังรูปที่ 9-11 การทดลองพบว่าเมื่อเพิ่มความเร็วหมุนเชื่อมมากขึ้นจะทำให้เกิดความร้อนจากการ

เสียดทานระหว่างเครื่องมือเชื่อมกับวัสดุทดลอง โดยที่ความเร็วหมุนเชื่อม 710 rpm มีอุณหภูมิที่รอยเชื่อม 480 องศาเซลเซียส (°C) ความเร็วหมุนเชื่อม 710 rpm มีอุณหภูมิที่รอยเชื่อม 510 °C และความเร็วหมุนเชื่อม 1400 rpm มีอุณหภูมิที่รอยเชื่อม 520 °C ตามลำดับ ซึ่ง

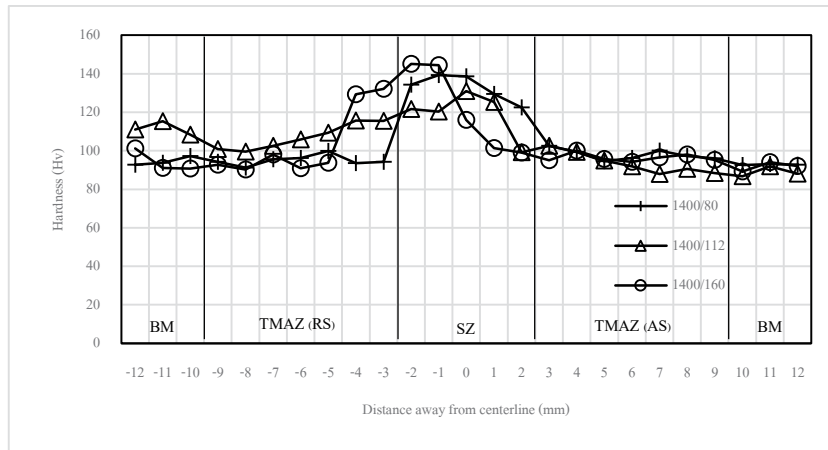
วิเคราะห์ได้ว่าเมื่ออุณหภูมิเพิ่มมากขึ้นย่อมส่งผลต่อการตกผลึกใหม่ของเกรนเป็นบริเวณกว้างมากขึ้น ส่งผลให้ค่าความแข็งของบริเวณ SZ มีค่ากว้างมากขึ้นเมื่อเพิ่มความเร็วหมุนเชื่อมมากขึ้นนั่นเอง [28]



รูปที่ 9 สมบัติทางกลด้านความแข็ง ที่ความเร็วหมุนเชื่อม 710 rpm



รูปที่ 10 สมบัติทางกลด้านความแข็ง ที่ความเร็วหมุนเชื่อม 1000 rpm



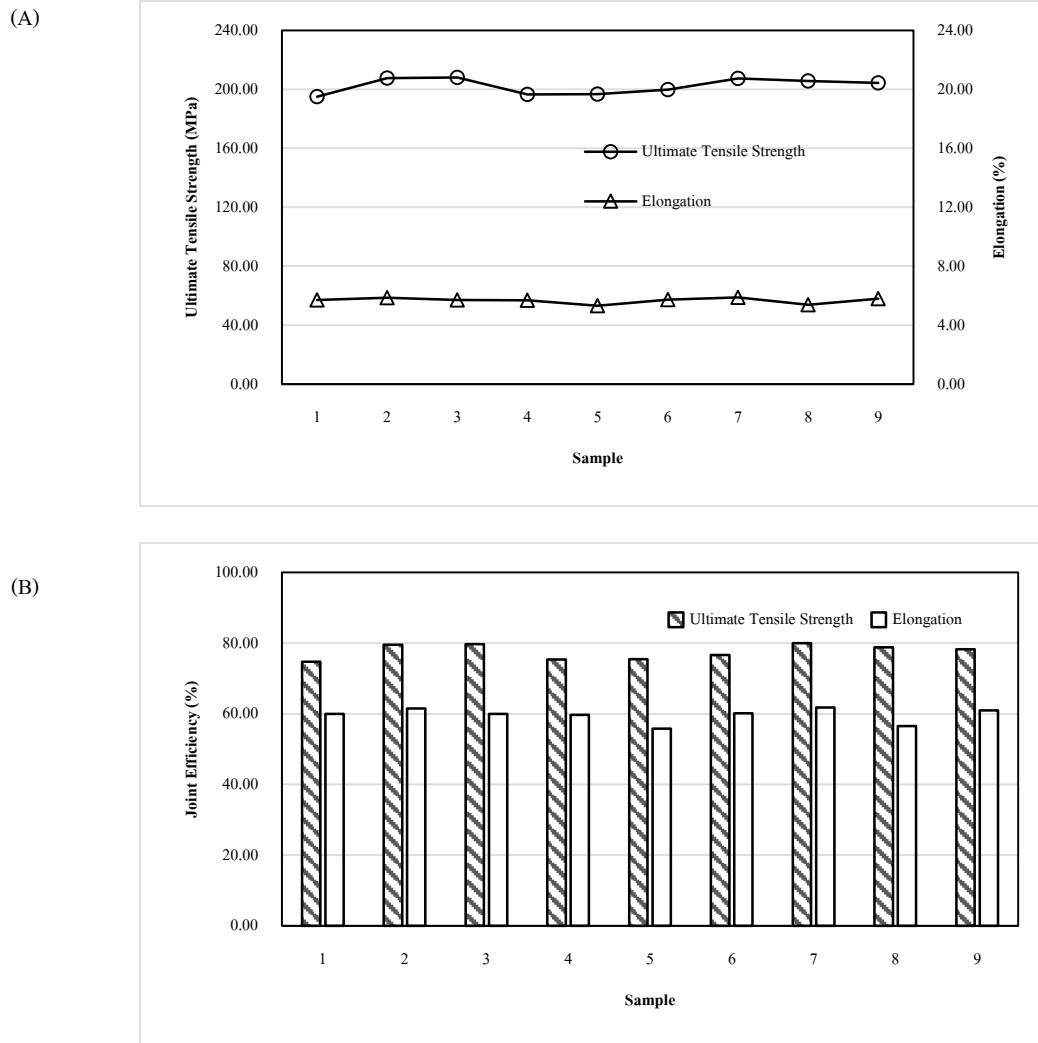
รูปที่ 11 สมบัติทางกลด้านความแข็ง ที่ความเร็วหมุนเชื่อม 1400 rpm

### 3.5 การทดสอบสมบัติทางกลด้านความแข็งแรงดึง

สมบัติทางกลด้านความแข็งแรงดึงและจุดขาดของรอยเชื่อมเสียดทานแบบกวนภายใต้พารามิเตอร์ต่างๆ แสดงในตารางที่ 5 และรูป 12 ผลการทดลองพบว่า ที่ความเร็วหมุนเชื่อม 710 rpm ค่าความแข็งแรงดึงโดยทั่วไปลดลงเมื่อความเร็วหมุนเชื่อมเพิ่มขึ้นเป็น 1000 rpm แต่เมื่อเพิ่มความเร็วหมุนเชื่อมเป็น 1400 rpm กลับทำให้ค่าความแข็งแรงดึงเพิ่มขึ้น แสดงดังรูปที่ 10(A) เหตุการณ์ดังกล่าวมีผลมาจาก ความเร็วหมุนเชื่อมส่งผลต่อค่าความร้อนจากการเสียดทาน ทำให้วัสดุอยู่ในสภาวะพลาสติกเกิดการหมุนวนของเนื้อโลหะที่เหมาะสม ดังนั้น ในช่วงความเร็วหมุนเชื่อม 1000 rpm เป็นช่วงที่การไหลวนของวัสดุในสภาวะพลาสติกไม่สมบูรณ์มากนัก ทำให้การผสมผสานของวัสดุทั้งสองข้างไม่ดีพอเลยทำให้ค่าความแข็งแรงดึงต่ำกว่าสภาวะความเร็วหมุนเชื่อมอื่นๆ [11,30-31,40-43] แต่การแตกต่างของค่าความแข็งแรงดึงภายใต้ความเร็วหมุนเชื่อมต่างๆ ก็ไม่สูงมากนัก โดยค่าความแข็งแรงดึงสูงสุดของการทดลองอยู่ที่ความเร็วหมุนเชื่อม 710 rpm ความเร็วเดินเชื่อม 160 mm/min ที่ 208.08 MPa และค่าความแข็งแรงดึงต่ำสุดของการทดลองอยู่ที่ความเร็วหมุนเชื่อม 1000 rpm ความเร็วเดินเชื่อม 80 mm/min ที่ 196.55 MPa จะเห็นได้ว่ามีค่าความแข็งแรงดึงอยู่ในช่วง 13 MPa เท่านั้น นอกจากนี้

ลักษณะการยึดตัวของรอยเชื่อมมีค่าเกาะกลุ่มไม่แตกต่างกันมากนักโดยที่ค่าความยึดตัวสูงสุดของการทดลองอยู่ที่ความเร็วหมุนเชื่อม 1400 rpm ความเร็วเดินเชื่อม 80 mm/min ที่ 5.88% และค่าความยึดตัวต่ำสุดของการทดลองอยู่ที่ความเร็วหมุนเชื่อม 1000 rpm ความเร็วเดินเชื่อม 80 mm/min ที่ 5.31% จะเห็นได้ว่ามีความต่างของค่าความยึดตัวอยู่ในช่วง 0.57% เท่านั้น และจากจุดขาดของการทดสอบสมบัติทางกลด้านความแข็งแรงดึงพบว่า การขาดไม่ได้ขาดที่บริเวณแนวแกน SZ แต่ส่วนใหญ่จะขาดในบริเวณ TMAZ ในทุกสภาวะการเชื่อม

นอกจากนี้ค่าประสิทธิภาพแนวเชื่อม (Joint Efficiency) เป็นการเทียบโดยการนำค่าความแข็งแรงดึงของเนื้อวัสดุเดิมเป็นตัวตั้งเทียบกับค่าความแข็งแรงดึงของรอยเชื่อมในแต่ละสภาวะการทดลองมีหน่วยเป็นเปอร์เซ็นต์ (%) เพื่อที่จะนำค่าเหล่านี้ไปเลือกใช้ในงานอุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้องได้ จากการทดลองพบว่าค่าความแข็งแรงดึงของรอยเชื่อมทุกสภาวะการทดลองมีค่าต่ำกว่าค่าความแข็งแรงดึงของเนื้อวัสดุเดิม โดยมีค่าประสิทธิภาพแนวเชื่อมไม่เกิน 80% แสดงดังรูปที่ 12(B)



รูปที่ 12 ค่าสมบัติทางกลด้านความแข็งแรงดึงและประสิทธิภาพของรอยเชื่อม

ตารางที่ 5 ค่าสมบัติทางกลด้านความแข็งแรงดึงและจุดขาดของรอยเชื่อมเลียดทานแบบกวน SSM 2024

Sample	Ultimate Tensile Strength (MPa)	Elongation (%)	Joint Efficiency (%)		Fracture location
			UTS <sub>F</sub> SW/UTS <sub>B</sub> M (%)	A <sub>F</sub> SW/A <sub>B</sub> M (%)	
1	195.00	5.71	74.73	59.98	TMAZ/HAZ on RS
2	207.62	5.85	79.57	61.54	TMAZ/HAZ on RS
3	208.08	5.71	79.75	59.98	TMAZ/HAZ on RS
4	196.55	5.68	75.33	59.68	NZ/TMAZ on AS
5	196.88	5.31	75.45	55.82	NZ/TMAZ on AS
6	199.85	5.72	76.59	60.15	TMAZ/HAZ on RS
7	207.38	5.88	79.48	61.79	NZ/TMAZ on AS
8	205.65	5.38	78.81	56.54	TMAZ/HAZ on RS
9	204.28	5.80	78.29	61.00	NZ/TMAZ on AS

#### 4. สรุปผลการทดลอง

โครงสร้างและสมบัติทางกลของรอยเชื่อมสามารถควบคุมได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยการเปลี่ยนแปลงความเร็วหมุนเชื่อมและความเร็วเดินเชื่อม

พื้นผิวด้านบนของรอยเชื่อมที่ความเร็วหมุนเชื่อมต่ำจะเรียบและมีครีบน้อย ถ้าเพิ่มความเร็วหมุนเชื่อมขึ้นลักษณะพื้นผิวด้านบนของรอยเชื่อมมีความขรุขระ มีสะเก็ดมีครีบ เพิ่มมากขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของความเร็วหมุนเชื่อมด้วย เนื่องด้วยการเพิ่มขึ้นของอัตราส่วน R/V นำไปสู่ขนาดที่กว้างและลึกมากขึ้นของบริเวณรอยเชื่อม

ขนาดของเกรนในบริเวณ SZ และบริเวณ TMAZ เกิดการเปลี่ยนรูปร่างแบบเร่งรัดมากที่อุณหภูมิสูง ซึ่งเกิดจากการเสีรูปร่างและการตกผลึกใหม่ของเกรนแบบไดนามิก

คุณภาพดีที่สุดของรอยเชื่อมที่ได้รับในอัตรา R/V 17.50 มีสาเหตุมาจากวัสดุที่หมุนวนรอบเครื่องมือเชื่อมด้วยความเร็วหมุนเชื่อมและความเร็วเดินเชื่อมที่ดีที่สุดนั้นคือปริมาณที่เพียงพอที่สุดของวัสดุที่สามารถใช้ได้ในการเชื่อมเพื่อป้องกันการเกิดข้อบกพร่องในรอยเชื่อม

ผลจากการแตกหักของอนุภาค  $Al_2Cu$  ที่ได้รับอิทธิพลจากการหมุนวนของเครื่องมือเชื่อมส่งผลต่อสมบัติทางกลด้านความแข็งแรงในบริเวณ SZ อย่างมาก

ค่าความแข็งแรงของรอยเชื่อมภายใต้พารามิเตอร์การเชื่อมมีลักษณะคล้ายตัวยูคว่ำ ( $\cap$ ) เนื่องมาจากการตกผลึกใหม่ของเกรนที่เกิดจากความร้อนจากการเชื่อมเสียดทานแบบกวนมีมากในบริเวณ SZ ทำให้มีค่ามากกว่าทั้งในบริเวณ TMAZ และบริเวณ BM

การเพิ่มความเร็วหมุนเชื่อมมากขึ้นค่าความแข็งแรงบริเวณ SZ ก็มีค่าเพิ่มมากขึ้น เพราะความร้อนที่เกิดขึ้นในระหว่างการเชื่อมทำให้เกิดการตกผลึกใหม่ของเกรน ดังนั้นผลกระทบนี้จะเกิดขึ้นอย่างรุนแรงมากในบริเวณ SZ ในขณะที่บริเวณ TMAZ จะได้รับผลกระทบน้อยกว่า

สมบัติทางกลด้านความแข็งแรงดึงของรอยเชื่อมมีค่าต่ำกว่าวัสดุทดลอง โดยมีประสิทธิภาพของรอยเชื่อมสูงสุดในแง่ของ UTS และการยึดตัวเป็น 79.75% และ 61.79% ตามลำดับ

#### 5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับงบประมาณสนับสนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย ประจำปีงบประมาณ 2557

#### เอกสารอ้างอิง

- [1] Lefebvre, F., Ganguly, S. and Sinclair, I. Micromechanical aspects of fatigue in a MIG welded aluminium airframe alloy: Part 1. Microstructural characterization. *Materials Science and Engineering A*, 2005; 397: 338-345.
- [2] Owen, R.A., Preston, R.V., Withers, P.J., Shercliff, H.R. and Webster, P.J. Neutron and synchrotron measurements of residual strain in TIG welded aluminium alloy 2024. *Materials Science and Engineering A*, 2003; 346: 159-167.
- [3] Thomas Wayne M., Nicholas Edward D., Needham James C., Murch Michael G., Temple-Smith Peter, Dawes Christopher J. *United States Patent*, No. 5460317, October 24, 1995.
- [4] Mishra, R.S. and Ma, Z.Y. Friction stir welding and processing. *Materials Science and Engineering: R: Reports*, 2005; 50: 1-78.
- [5] Grujicic, M., Arakere, G., Pandurangan, B., Hariharan, A. Yen, C.-F. and Cheeseman, B. A. Development of a Robust and Cost-Effective Friction Stir Welding Process for Use in Advanced Military Vehicles. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2011; 20(1): 11-23.

- [6] Ericsson, M. and Sandström, R. Influence of welding speed on the fatigue of friction stir welds, and comparison with MIG and TIG. *International Journal of Fatigue*, 2003; 25(12): 1379-1387.
- [7] Lockwood, W.D., Tomaz, B. and Reynolds, A.P. Mechanical response of friction stir welded AA 2024: Experiment and modelling. *Materials Science and Engineering A*, 2002; 323(1-2): 348-353.
- [8] Ali, A., Brown, M.W., Rodopoulos, C. A. and Gardiner, S. Characterization of 2024-T351 friction stir welding joints. *Journal of Failure Analysis and Prevention*, 2006; 6(4): 83-96.
- [9] Booth D.P.P., Starink M.J. and Sinclair I. Analysis of local microstructure and hardness of 13 mm gauge 2024-T351 AA friction stir welds. *Materials Science and Technology*, 2007; 23: 276-284.
- [10] Golestaneh, A.F., Ali, A. and Zadeh, M. Modeling the fatigue crack growth in friction stir welded joint of 2024-T351 Al alloy. *Materials and Design*, 2009; 30(8): 2928-2937.
- [11] Di, S., Yanga, X., Luan, G. and Jian, B. Comparative study on fatigue properties between AA2024-T4 friction stir welds and base materials. *Materials Science and Engineering A*, 2006; 435-436: 389-395.
- [12] Ali, A., An, X., Rodopoulos, C.A., Brown, M.W., O'Harac, P., Leversd, A. and Gardiner, S. The effect of controlled shot peening on the fatigue behavior of 2024-T3 aluminum friction stir welds. *International Journal of Fatigue*, 2007; 29(8): 1531-1545.
- [13] Krishnan, K.N. On the formation of onion rings in friction stir welds. *Materials Science and Engineering A*, 2002; 327(2): 246-251.
- [14] Arora, K.S., Pandey, S., Schaper, M. and Kumar, R. Effect of process parameters on friction stir welding of aluminum alloy 2219-T87. *International Journal of Advanced Manufacture Technology*, 2010; 50(9): 941-952.
- [15] Zhang, Z., Xiao, B. L. and Ma, Z. Y. Effect of welding parameters on microstructure and mechanical properties of friction stir welded 2219Al-T6 joints. *Journal of Materials Science*, 2012; 47(9): 4075-4086.
- [16] Thanabumrungskul, S., Janudom, S., Burapa, R., Dulyapraphant, P. and Wannasin, J. Industrial development of gas induced semi-solid process. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2010; 20(3): s1016-s1021.
- [17] Vilaçaa, P., Quintinoa, L. and Santos, J.F. iSTIR-Analytical thermal model for friction stir welding. *Journal of Materials Processing Technology*, 2005; 169(3): 452-465.
- [18] Schmidt, H.N.B., Dickerson, T.L. and Hattel, J.H. Material flow in butt friction stir welds in AA2024-T3. *Acta Materialia*, 2006; 54(4): 1199-1209.
- [19] Hassan, Kh. A. A., Prangnell, P. B., Norman, A. F., Price, D. A. and Williams, S. W. Effect of welding parameters on nugget zone microstructure and properties in high strength aluminium alloy friction stir welds. *Science and Technology of Welding and Joining*, 2003; 8(4): 257-268.
- [20] Xu, W., Liu, J., Luan, G. and Dong, C. Temperature evolution, microstructure and mechanical properties of friction stir welded thick 2219-O aluminum alloy joints. *Materials and Design*, 2009; 30(6): 1886-1893.
- [21] Elangovana, K. and Balasubramanian, V. Influences of tool pin profile and welding speed on the formation of friction stir processing zone in AA2219 aluminium alloy. *Journal of Materials Processing Technology*, 2008; 200(1-3): 163-175.
- [22] Zhang, X. X., Xiao, B. L. and Ma, Z. Y. A transient thermal model for friction stir weld: Part II. Effects of weld conditions. *Metallurgical and Materials Transaction A*, 2011; 42: 3229-3239.
- [23] Lim, S., Kim, S., Lee, C.G. and Kim, S. Tensile behavior of friction- stir-welded Al 6061-T651. *Metallurgical and Materials Transaction A*, 2004; 35(9): 2829-2835.
- [24] Sutton, M.A., Yang, B., Reynolds, A.P. and Taylor, R. Microstructural studies of friction stir welds in 2024-T3 aluminum. *Materials Science and Engineering A*, 2002; 323(1-2): 160-166.



- [25] Zhang, Z. and Zhang, H. W. A fully coupled thermo-mechanical model of friction stir welding. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2008; 37(3): 279-293.
- [26] Zhang, Z., Xiao, B.L., Wang, D. and Ma, Z.Y. Effect of alclad layer on material flow and defect formation in friction stir welded 2024 aluminum alloy. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 2011; 42(6): 1717-1726.
- [27] Abbasi Gharacheh, M., Kokabi, A.H., Daneshi, G.H., Shalchi, B. and Sarrafi, R. The influence of the ratio of “rotational speed/traverse speed” ( $\omega/v$ ) on mechanical properties of AZ31 friction stir welds. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 2006; 46: 1983-1987.
- [28] Chen, Y., Liu, H. and Feng, J. Friction stir welding characteristics of different heat-treated-state 2219 aluminum alloy plates. *Materials Science and Engineering A*, 2006; 420(1-2): 21-25.
- [29] Zhang, Z. and Zhang, H.W. Numerical studies on the effect of transverse speed in friction stir welding. *Materials and Design*, 2009, 30(3): 900-907.
- [30] Pannaray, S., Wisutmethangoon, S., Plookphol, T. and Wannasin, J. Microstructure Evolution during Solution Heat Treatment of Semisolid Cast 2024 Aluminum Alloy. *Advanced Materials Research*, 2011; 339: 714-717.
- [31] Malarvizhi, S., Balasubramanian, V. Effect of welding processes on AA2219 aluminum alloy joint properties. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2011; 21(5): 962-973.
- [32] Srivatsana, T.S., Vasudevana, S. and Park, L. The tensile deformation and fracture behavior of friction stir welded aluminum alloy 2024. *Materials Science and Engineering A*, 2007; 466(1-2): 235-245.
- [33] Jata, K.V. and Lee Semiatin, S. Continuous Dynamic Recrystallization During Friction Stir Welding of High Strength Aluminum Alloys. *Scripta Materialia*, 2000; 43(8): 743-749.
- [34] Yang, B., Yan, J., Sutton, M.A. and Reynolds, A.P. Banded microstructure in AA2024-T351 and AA2524-T351 aluminum friction stir weld: Part I. Metallurgical studies. *Materials Science and Engineering A*, 2004; 364(1-2): 55-65.
- [35] Hassana, Kh.A.A., Norman, A.F., Price, D.A. and Prangnell, P.B. Stability of nugget zone grain structures in high strength Al alloy friction stir welds during solution treatment. *Acta Materialia*, 2003; 51(7): 1923-1936.
- [36] Liu, H., Zhang, H., Pan, Q. and Yu, L. Effect of friction stir welding parameters on microstructural characteristics and mechanical properties of 2219-T6 aluminum alloy joints. *International Journal Materials Forming*, 2011, 5(3): 235-241.
- [37] Jones, M.J., Heurtier, P., Desrayaud, C., Montheillet, F., Allehaux, D. and Driver, J.H. Correlation between microstructure and microhardness in a friction stir welded 2024 aluminum alloy. *Scripta Materialia*, 2005; 52(8): 693-697.
- [38] Squillace, A., De Fenzo, A., Giorleo, G. and Bellucci, F. A comparison between FSW and TIG welding techniques: Modifications of microstructure and pitting corrosion resistance in AA 2024-T3 butt joints. *Journal of Materials Processing and Technology*, 2004; 152(1): 97-105.
- [39] Heurtier, P., Jones, M.J., Desrayaud, C., Driver, J.H., Montheillet, F. and Allehaux, D. Mechanical and thermal modeling of friction stir welding. *Journal of Materials Processing Technology*, 2006; 171(3): 348-357.
- [40] Lakshminarayanan, A. K., Balasubramanian, V. and Elangovan, K. Effect of welding processes on tensile properties of AA6061 aluminum alloy joints. *International Journal of Advanced Manufacture Technology*, 2009; 40(3): 286-296.
- [41] He, Z-B, Peng, Y-Y., Yin, Z-M, Lei, X-F. Comparison of FSW and TIG welded joints in Al-Mg-Mn-Sc-Zr alloy plates. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2011, 21(8): 1685-1691.
- [42] Liu, H. J., Fujii, H. and Nogi, K. Friction stir welding characteristics of 2017-T351 aluminum alloy sheet. *Journal of Materials Science*, 2005; 40: 3297-3299.
- [43] Aydın, H., Bayram, A., Uğuz, A. and Akay, K.S. Tensile properties of friction stir welded joints of 2024 aluminum alloys in different heat-treated-state. *Materials and Design*, 2009; 30(6): 2211-2221.