

ผลของความเร็วหมุนเชื่อมและความเร็วเดินเชื่อมต่อโครงสร้างจุลภาคและสมบัติเชิงกลของอลูมิเนียมหล่อกึ่งของแข็ง 356 ที่ผ่านการเชื่อมเสียดทานแบบกวนใต้น้ำ

วรพงศ์ บุญช่วยแทน^{1*} ชาตรี หอมเขียว¹

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย อ.เมือง จ.สงขลา 90000

และ ศุภชัย ชัยณรงค์²

มหาวิทยาลัยราชภัฏสงขลา อ.เมือง จ.สงขลา 90000

* Corresponding Author: worapong.b@rmutsv.ac.th

¹ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม และ หน่วยงานวิจัยเทคโนโลยีการแปรรูปวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์

² อาจารย์ประจำ โปรแกรมวิชาวิศวกรรมศาสตร์ คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม

ข้อมูลบทความ

บทคัดย่อ

ประวัติบทความ :

รับเพื่อพิจารณา : 26 ตุลาคม 2561

แก้ไข : 1 กุมภาพันธ์ 2562

ตอบรับ : 19 มิถุนายน 2562

คำสำคัญ :

การเชื่อมเสียดทานแบบกวนใต้น้ำ /

โครงสร้างจุลภาค /

สมบัติเชิงกล /

อลูมิเนียมหล่อกึ่งของแข็ง

เป็นที่ทราบกันดีว่าการเชื่อมเสียดทานแบบกวนใต้น้ำนั้นสามารถปรับปรุงสมบัติเชิงกลของรอยเชื่อมได้ เพื่อหาผลกระทบของพารามิเตอร์การเชื่อมที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพของรอยเชื่อม งานวิจัยนี้จึงมุ่งศึกษาการเชื่อมแบบดังกล่าวกับอลูมิเนียมหล่อกึ่งของแข็ง 356 ที่ผ่านการหล่อด้วยกรรมวิธีการหล่อแบบ Gas Induced Semi Solid (GISS) โดยใช้ความเร็วหมุนเชื่อม 1100, 1320 และ 1750 รอบต่อนาที ความเร็วเดินเชื่อม 80, 112 และ 160 มิลลิเมตร/นาที และใช้น้ำที่อุณหภูมิห้องปริมาตร 5 ลิตร จากผลการศึกษา พบว่า ขนาดของเกรนมีความละเอียดมากขึ้นเมื่อความเร็วหมุนเชื่อมเพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นผลกระทบโดยตรงของการเสียรูปเชิงพลาสติกของวัสดุและความร้อนของการเสียดทานในช่วงของการเชื่อม เกรนในบริเวณ TMAZ และ HAZ มีการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างในลักษณะที่บิดเบี้ยวและไม่เป็นรูปร่างที่แน่นอน ในกรณีปกติระดับค่าความแข็งของรอยเชื่อมค่อนข้างสูงกว่าเนื้อโลหะเดิม อย่างไรก็ตาม เมื่อความเร็วหมุนเชื่อมเพิ่มขึ้น ค่าความแข็งของบริเวณแนวเชื่อมจะมีค่าเพิ่มขึ้น ความแข็งแรงดึงมีค่าเพิ่มมากขึ้นเมื่อเพิ่มความเร็วหมุนเชื่อมจนถึง 1320 รอบต่อนาที จากนั้นจึงมีค่าลดลง ค่าความแข็งแรงดึงสูงสุดอยู่ที่ 360.2 MPa ในขณะที่ประสิทธิภาพการเชื่อมมีค่าสูงกว่า 100 เปอร์เซนต์ในทุกกรณี

Influences of Rotational Speed and Travel Speed on Microstructure and Mechanical Properties of Semi-solid Casted Aluminum 356 Undergone Underwater Friction Stir Welding

Worapong Boonchouytan^{1*}, Chatree Homkhiew¹

Rajamangala University of Technology Srivijaya, Mueang, Songkhla, 90000

and Suppachai Chainarong²

Songkhla Rajabhat University, Mueang, Songkhla, 90000

* Corresponding Author: worapong.b@rmutsv.ac.th

¹ Assistant Professor, Department of Industrial Engineering and Materials Processing Technology Research Unit, Faculty of Engineering.

² Lecturer, Department of Engineering, Faculty of Industrial Technology.

Article Info

Abstract

Article History:

Received: October 26, 2018

Revised: February 1, 2019

Accepted: June 19, 2019

Keywords:

Underwater Friction Stir Welding /
Microstructure /
Mechanical Properties /
Aluminum Casting Semi-Solid

Underwater friction stir welding is known to be capable of improving mechanical properties of welded joints produced by friction stir welding (FSW). To determine the effects of key parameters affecting the efficiency of welded joints, this study investigated FSW of semi-solid casting aluminum 356, which was molded through the gas induced semi solid (GISS) method. Welding was done at rotational speeds of 1100, 1320, and 1750 rounds per minute (rpm) and welding speeds of 80, 112, and 160 millimeters per minute. Five liters of water at room temperature was used for FSW. The study revealed that grain sizes became finer as the rotational speed increased; such a result is the direct effect of plastic deformation of the material as well as of the friction-induced heat due to FSW. The grains in the thermal mechanically affected zone and heat affected zone suffered structural changes and became distorted with undefined shape. Under normal circumstance, hardness level of butt weld was higher than that of base metal; however, when the rotational speed increased, the hardness level of weld nugget zone increased. Tensile strength increased with increasing rotational speed up to 1320 rpm; the strength decreased beyond such a value. The highest tensile strength was noted to be 360.2 MPa, while the weld efficiency was higher than 100 percent in all cases.

1. บทนำ

การเชื่อมเสียดทานแบบกวน (Friction Stir Welding; FSW) ได้รับความนิยมนิยมและมีการนำไปใช้งานอย่างแพร่หลาย สำหรับการเชื่อมอลูมิเนียมที่ต้องการรักษาความร้อนในบริเวณแนวเชื่อมกับเนื้อโลหะเดิมให้ใกล้เคียงกันมากที่สุดหรือให้มีความแตกต่างกันน้อยที่สุด อย่างไรก็ตามบริเวณ ซึ่งแนวเชื่อมประกอบด้วยบริเวณแนวเชื่อม (Weld Nugget Zone; WNZ) บริเวณที่ได้รับความร้อนจากผลกระทบทางกล (Thermal Mechanically Affected Zone; TMAZ) และบริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อน (Heat Affected Zone; HAZ) มีรูปแบบที่แตกต่างกันออกไปของแต่ละสภาวะการเชื่อม ทั้งนี้ ความร้อนของการเชื่อมเสียดทานแบบกวนจะมีผลต่อการตกตะกอนของอนุภาคในบริเวณรอยเชื่อม [1-4] และส่งผลให้ค่าความแข็งแรงดึงของแนวเชื่อมมีค่าที่แตกต่างกันออกไปอีกด้วย ดังนั้นเพื่อที่จะปรับปรุงรอยเชื่อมโดยการควบคุมระดับอุณหภูมิระหว่างภายในกับภายนอกให้มีความใกล้เคียงกันระหว่างการ FSW โดยมีงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง เช่น Benavides และคณะ [5] ได้พัฒนาทดลอง FSW ของอลูมิเนียม 2024 โดยใช้โนโตรเจนเหลวเพื่อระบายความร้อน และลดอุณหภูมิของการเชื่อม ค่าความแข็งแรงในบริเวณ TMAZ และ HAZ สูงขึ้นเมื่อเทียบกับการเชื่อมแบบปกติ แต่เกิดช่องว่างในรอยเชื่อมซึ่งเป็นข้อบกพร่องที่เกิดขึ้นในบริเวณ WNZ และอิทธิพลของการเย็นตัวส่งผลต่อสมบัติเชิงกลของรอยเชื่อม ต่อมา Fratini และคณะ [6] ปรับปรุงในขั้นตอนของกระบวนการทางความร้อนกับการให้น้ำหมุนวนบนพื้นผิวด้านบนของอลูมิเนียมในกระบวนการ FSW พบว่า ความแข็งแรงดึงของรอยเชื่อมสูงขึ้นเนื่องจากการระบายความร้อน นอกจากนี้การนำน้ำมาใช้ในการกระบวนการเชื่อมเสียดทานแบบกวน เพื่อระบายความร้อนออกจากแนวเชื่อมนั้น Liu และคณะ [7]

ได้คิดค้นและพบว่าค่าความเค้นแรงดึงมีผลอย่างมีนัยสำคัญ โดยการเชื่อมได้น้ำมีค่าสูงกว่าการเชื่อมแบบปกติ ซึ่งอาจจะเป็นไปได้ว่าแม้อาจปรับปรุงสมบัติเชิงกลของ FSW ได้ด้วยกรรมวิธีการเชื่อมได้น้ำ และแม้ว่าการระบายความร้อนด้วยการไหลเวียนของน้ำภายนอกจะได้รับการพิสูจน์ว่าสามารถใช้ได้สำหรับการปรับปรุงความแข็งแรงในการศึกษาก่อนหน้านี้ แต่ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรของการเชื่อมที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพของการระบายความร้อนยังไม่ได้รับการศึกษามากนัก

ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงมุ่งศึกษาการเชื่อมเสียดทานแบบกวนอลูมิเนียมหล่อกึ่งของแข็ง 356 ในสภาวะได้น้ำ โดยศึกษาผลกระทบจากความเร็วหมุนเชื่อมและความเร็วเดินเชื่อมต่อคุณภาพของรอยเชื่อมในแง่ของโครงสร้างมหภาค โครงสร้างจุลภาค ค่าความแข็งแรง และค่าความแข็งแรงดึง

2. ขั้นตอนการดำเนินการทดลอง

วัสดุที่ใช้ในการทดลอง (Base Metal; BM) เป็นอลูมิเนียมหล่อกึ่งของแข็ง 356 (Semi Solid Metal 356; SSM 356) ที่ผ่านกรรมวิธีการหล่อแบบปล่อยฟองแก๊สเฉื่อยในน้ำโลหะ (Gas Induce Semi Solid; GISS) โดยมีความหนา 4 มิลลิเมตร (mm) ความกว้าง 50 mm และความยาว 50 mm องค์ประกอบทางเคมี แสดงดังตารางที่ 1 และสมบัติเชิงกลของ BM แสดงดังตารางที่ 2 เครื่องมือเชื่อมผลิตจากเหล็กเครื่องมือ SKD11 หัวพินมีรูปร่างเป็นทรงกระบอก แสดงดังรูปที่ 1 ขนาดของเครื่องมือเชื่อม แสดงดังตารางที่ 3 ขณะเชื่อม กำหนดให้มุมเอียงของเครื่องมือเชื่อม (Tool Tilt) 3 องศา และความลึกของบ่าเชื่อมที่กดลงไปใ้เนื้อวัสดุทดลองเท่ากับ 1.0 mm

ตารางที่ 1 องค์ประกอบทางเคมีของอลูมิเนียมหล่อกึ่งของแข็ง 356 (ส่วนของน้ำหนัก %)

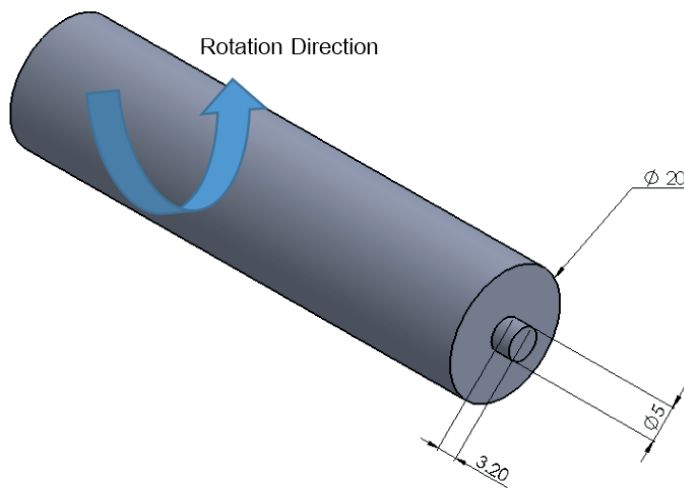
Al	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Ti	Cr	Ni
Bal.	7.74	0.57	0.05	0.06	0.32	0.01	0.05	0.02	0.01

ตารางที่ 2 สมบัติเชิงกลของอลูมิเนียมหล่อกิ่งของแข็ง 356 (ส่วนของน้ำหนัก %)

Tensile Strength (MPa)	Elongation (%)	Hardness Vickers (Hv)
169.0	5.3	45.4

ตารางที่ 3 ขนาดของเครื่องมือเชื่อมเสียดทาน

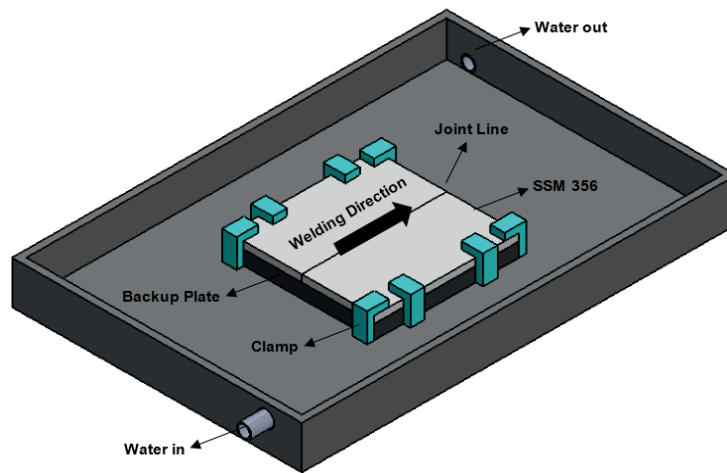
Shoulder Diameter(mm)	Pin Diameter (mm)	Pin Length (mm)
20	5	3.2



รูปที่ 1 เครื่องมือเชื่อมเสียดทาน

การเชื่อม FSW ในสภาวะได้นำใช้อุปกรณ์การเชื่อมแสดงดังรูปที่ 2 โดยเริ่มจากการจับยึดชิ้นงานบนอุปกรณ์การเชื่อมแล้วเปิดวาล์วน้ำเข้าโดยใช้น้ำปริมาตร 5 ลิตร ที่อุณหภูมิห้องเมื่อได้ปริมาตรที่ต้องการก็ปิดวาล์วน้ำเข้า จากนั้นปรับระดับพารามิเตอร์ของการเชื่อม คือ ความเร็วหมุนเชื่อม (Rotation Speed) 1100, 1320, 1750 รอบต่อนาที (rpm) เริ่มทำการเปิดเครื่องกวดแนวตั้งที่ใช้เป็นเครื่องเชื่อมเสียดทาน กดเครื่องมือเชื่อมลงบนเนื้อวัสดุที่จุดเริ่มต้นโดยให้ความลึกของบ่าเชื่อมที่กดลงไปเนื้อวัสดุทดลองเท่ากับ 1.0 mm และค้างไว้ประมาณ 30 วินาที (s) เพื่อให้ความร้อนเกิดการสะสมในเนื้อวัสดุและเกิดสภาวะพลาสติก เมื่อถึงเวลาที่กำหนดเริ่มเดินแนวเชื่อม

โดยใช้ความเร็วเดินเชื่อม (Travel Speed) 80, 112, 160 มิลลิเมตร/นาที (mm/min) จนสุดปลายของแนวเชื่อมแล้วจึงหยุดการเดินเชื่อม จากนั้นก็ให้เครื่องมือเชื่อมหมุนค้างไว้ประมาณ 20 s เพื่อให้ความร้อนที่สะสมมาในขณะเดินแนวเชื่อมมีมากพอเมื่อถึงเวลาที่กำหนดจึงยกเครื่องมือเชื่อมออกจากแนวเชื่อมและเปิดวาล์วปล่อยน้ำออกจากขั้นตอนการเชื่อมที่กล่าวมานั้นจะใช้สำหรับทุกกระบวนการ FSW สำหรับการทดลองลำดับที่ FSW 1 – FSW 9 และในแต่ละการทดลองจะทำซ้ำจำนวน 3 ครั้ง ซึ่งรายละเอียดของพารามิเตอร์การ FSW ในการทดลองครั้งนี้แสดงดังตารางที่ 4



รูปที่ 2 รูปแบบอุปกรณ์การเชื่อมเสียดทานแบบกวนใต้ น้ำ

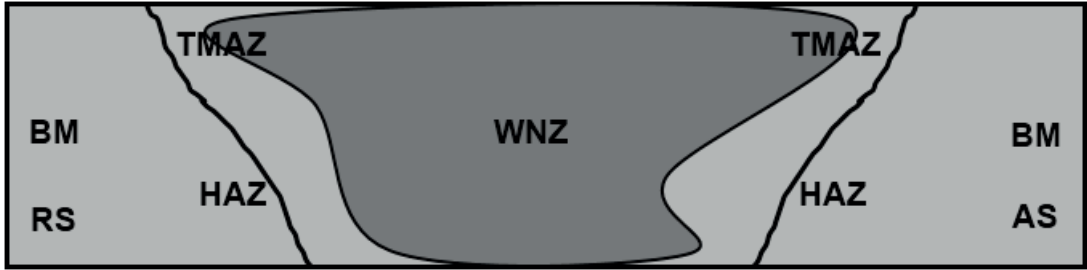
ตารางที่ 4 แผนการทดลองที่ใช้ในการเชื่อม

Samples	Rotation Speed (rpm)	Travel Speed (mm/min)	Tool Tilt ($^{\circ}$)	Number of Repeat
FSW 1	1100	80	3	3
FSW 2	1100	112	3	3
FSW 3	1100	160	3	3
FSW 4	1320	80	3	3
FSW 5	1320	112	3	3
FSW 6	1320	160	3	3
FSW 7	1750	80	3	3
FSW 8	1750	112	3	3
FSW 9	1750	160	3	3

เมื่อเชื่อมชิ้นงานเสร็จแล้วนำแนวเชื่อมมาตัดแบ่งเพื่อนำชิ้นงานตัวอย่างไปทดสอบสมบัติต่างๆ เช่น ตรวจสอบโครงสร้างทางโลหะวิทยา การทดสอบสมบัติเชิงกล ด้านความแข็ง และความแข็งแรงดึง โดยตัดให้ตั้งฉากกับแนวเชื่อม ชิ้นงานที่นำไปตรวจสอบโครงสร้างทางโลหะวิทยาต้องขัดด้วยกระดาษทรายเบอร์ 320-1200 จากนั้นขัดต่อด้วยผ้าสักหลาดที่ใช้ผงอลูมินา

ขนาด 3-0.5 ไมโครเมตร จากนั้นนำไปกัดด้วยกรด คิลเลอร์ (Keller's etch) เป็นเวลา 10 s แล้วนำไปตรวจสอบโครงสร้างทางโลหะวิทยาระดับจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์ โดยมีตำแหน่งการส่องกล้องจุลทรรศน์ คือ บริเวณเนื้อโลหะเดิม (Base Metal; BM) บริเวณที่มีผลกระทบอันเนื่องมาจากความร้อน (Thermo Mechanical Affected Zone; TMAZ) บริเวณที่ได้รับผล

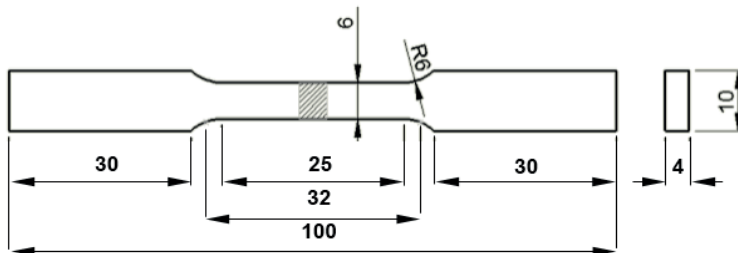
กระทบจากความร้อน (Heat affected zone; HAZ) ทั้งด้าน บริเวณแนวเชื่อม (Weld Nugget Zone; WNZ) แสดงดังรูป (Advancing Side; AS) และ (Retreating Side; RS) และ ที่ 3



รูปที่ 3 ตำแหน่งของการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาค

การทดสอบความแข็งของรอยเชื่อม โดยการนำชิ้นงานที่ ตรวจสอบโครงสร้างทางโลหะวิทยาเสร็จเรียบร้อยแล้ว นำมา ทดสอบความแข็งด้วยเครื่องทดสอบความแข็งแบบวิกเกอร์ กดบริเวณพื้นที่หน้าตัดของรอยเชื่อม ระยะห่างระหว่างรอยกด 1 mm แรงกดที่ใช้ 100 กรัม (g) เป็นเวลา 10 S ต่อหนึ่งรอยกด โดยใน 1 ชิ้นงานทดสอบจะกดทั้งหมด 3 แนว แล้วนำทั้ง 3 แนวมาคำนวณค่าเฉลี่ยเพื่อเป็นตัวแทนของชิ้นงานทดสอบ แต่ละสภาวะการทดลอง

การทดสอบความแข็งแรงดึง จะนำชิ้นงานตัวอย่างมาแปรรูป ตามแนวขวางกับรอยเชื่อมด้วยเครื่องกัดแนวตั้งโดยใช้คอม- พิวเตอร์ในการควบคุม ให้มีขนาดตามมาตรฐานการทดสอบ American Society for Testing and Materials Standard Test Methods for Tension Testing (ASTM E8M) โดยมี ขนาดแสดงดังรูปที่ 4 เมื่อแปรรูปชิ้นงานทดสอบเสร็จ นำไป ทดสอบความแข็งแรงดึงด้วยเครื่องทดสอบแบบเอนกประสงค์ ที่อุณหภูมิห้อง ด้วยความเร็วในการดึง 1 mm/min



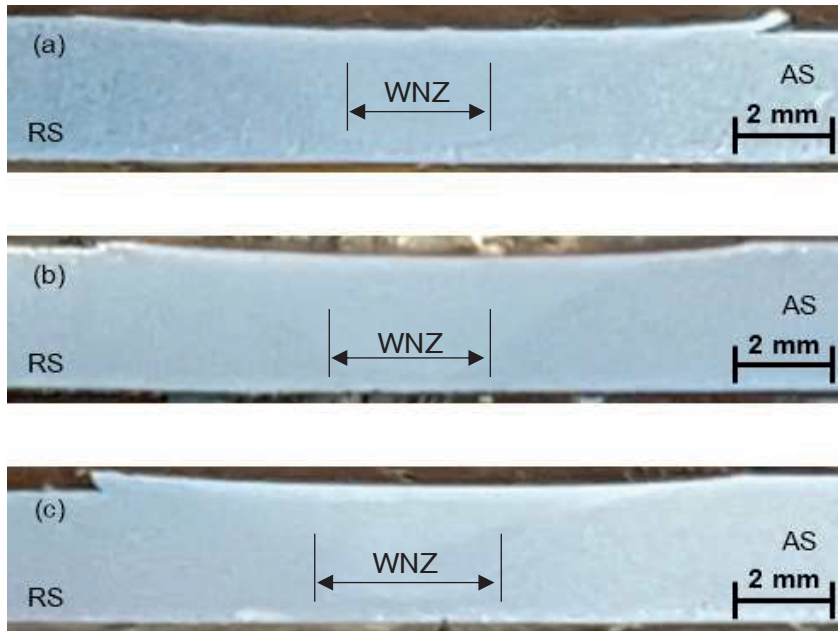
รูปที่ 4 ตำแหน่งของการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาค

3. ผลการทดลองและวิเคราะห์ผล

3.1 โครงสร้างมหภาคและจุลภาคของรอยเชื่อม

โครงสร้างมหภาคของรอยเชื่อมที่ความเร็วเดินเชื่อม 112 mm/min แสดงดังรูปที่ 5 ที่มีความเร็วหมุนเชื่อมแตกต่างกัน พบว่าไม่มีข้อบกพร่องในรอยเชื่อม ซึ่งเมื่อปรับความเร็ว

หมุนเชื่อมเพิ่มมากขึ้นยังพบว่ามีความกว้างของบริเวณ WNZ เพิ่มมากขึ้นตามความเร็วหมุนเชื่อมซึ่งมีสาเหตุมาจากการไหลวน ของเนื้อวัสดุรอบๆ เครื่องมือเชื่อมที่ได้รับอิทธิพลโดยตรงมาจาก พารามิเตอร์การเชื่อม ส่วนสภาวะอื่นๆ ที่ไม่ได้กล่าวถึงก็มี ลักษณะที่เหมือนกัน



รูปที่ 5 โครงสร้างมหภาคของแนวเชื่อมที่แตกต่างกันตามความเร็วหมุนเชื่อม
645 (a) 1100 rpm (b) 1320 rpm และ (c) 1750 rpm

รูปที่ 6 แสดงโครงสร้างจุลภาคของรอยเชื่อมที่ความเร็วหมุนเชื่อม 1100 rpm ความเร็วเดินเชื่อม 80 mm/min แสดงให้เห็นตำแหน่งต่าง ๆ ของรอยเชื่อม พบว่าขนาดเกรนในบริเวณ WNZ และ TMAZ จะเล็กมากเมื่อเทียบกับบริเวณ BM ซึ่งเป็นผลมาจากการหมุนวนของเครื่องมือเชื่อมทำให้เกิดการไหลวนของเนื้อวัสดุ ในทางตรงกันข้ามโครงสร้างบริเวณ

HAZ คล้ายกับโครงสร้างบริเวณ BM เนื่องจากการไหลของวัสดุอยู่บริเวณขอบปลายบ่าของเครื่องมือเชื่อมจึงไม่โดนผลกระทบมากนัก นอกจากนี้เฟส Eutectic เกิดการแตกหัก และกระจายทั่วบริเวณ WNZ ในระหว่างการเชื่อม ส่วนโครงสร้างบริเวณเนื้อโลหะเดิมมีลักษณะของเฟสยูเทคติกเกาะกลุ่มรวมกันเป็นก้อนกลม มีอนุภาค Mg_2Si อยู่ในเฟสยูเทคติก [8]



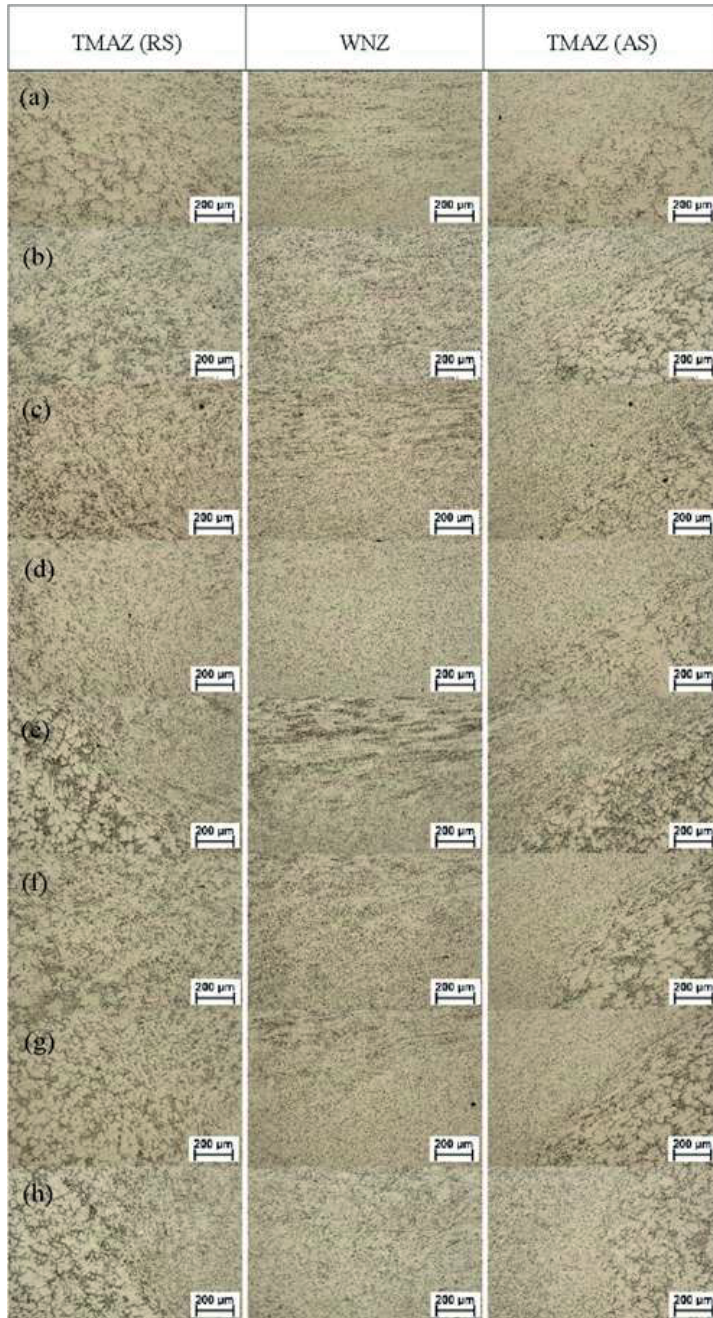
รูปที่ 6 โครงสร้างจุลภาคของแนวเชื่อมที่ความเร็วหมุนเชื่อม 1100 rpm และความเร็วเดินเชื่อม 80 mm/min (a) BM on the RS (b) TMAZ on the RS (c) WNZ (d) TMAZ on the AS และ (e) BM on the AS

บริเวณ WNZ เกรนมีลักษณะการตกผลึก เนื่องจากการหมุนวนของเครื่องมือเชื่อมแบบไดนามิกในระหว่างการ FSW แสดงดังรูปที่ 7 ขนาดของเกรนจะแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ โดยที่มีความเร็วหมุนเชื่อมกับความเร็วเดินเชื่อมเป็นปัจจัยหลัก

ลองสังเกตว่าในขณะที่การเพิ่มขึ้นของความเร็วหมุนเชื่อม 1100-1750 รอบ/นาที มีขนาดของเกรนที่ละเอียดมากขึ้น มีผลมาจากความเร็วหมุนเชื่อมที่เป็นผลกระทบโดยตรงของการเสียดสีเชิงพลาสติกของวัสดุ และความร้อนของการเสียดทาน

ในช่วงของการเชื่อม FSW [9-12] อีกทั้งผลของการเพิ่มขึ้นของความเร็วเดินเชื่อมเป็นส่วนช่วยเสริมการเปลี่ยนรูปร่างของวัสดุและความร้อนในช่วงของการเชื่อม FSW นอกจากนี้ยังช่วยให้

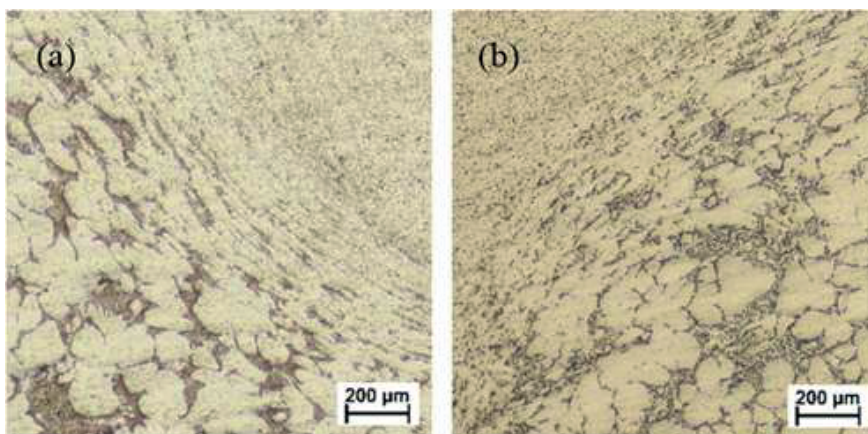
การระบายความร้อนออกจากแนวเชื่อมได้อย่างรวดเร็ว เกิดการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ ทำให้โครงสร้างเกิดการตกผลึกและละลายเข้าไปในออลูมิเนียมแมทริกซ์ได้มากขึ้น [7]



รูปที่ 7 ลักษณะของเกรนของแนวเชื่อมที่แตกต่างกัน (a) 1100 rpm 112 mm/min (b) 1100 rpm 160 mm/min (c) 1320 rpm 80 mm/min (d) 1320 rpm 112 mm/min (e) 1320 rpm 160 mm/min (f) 1750 rpm 80 mm/min (f) 1750 rpm 112 mm/min และ (f) 1750 rpm 160 mm/min

ในบริเวณ TMAZ และ HAZ เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางจุลภาค เกรนมีลักษณะที่บิดเบี้ยวและไม่เป็นรูปร่างที่แน่นอน แสดงดังรูปที่ 8 โดยเกรนในบริเวณ RS มีลักษณะที่ยืดยาว เนื่องจากการหมุนของเครื่องมือเชื่อมในลักษณะการหมุนแบบดึงออกจากจุดศูนย์กลางเป็นวงกลมส่งผลให้เกรนยืดยาวออกตามรอยการหมุนเชื่อม แสดงดังรูปที่ 8(a) ซึ่งปรากฏการณ์ดังกล่าวทำให้เกิดรอยอินเตอร์เฟซของเกรนระหว่างบริเวณ WNZ และ TMAZ นอกจากนี้ในทางตรงกันข้ามกับบริเวณ RS ของรอยเชื่อมก็คือบริเวณ AS เกรนบริเวณนี้มีลักษณะบีบอัด

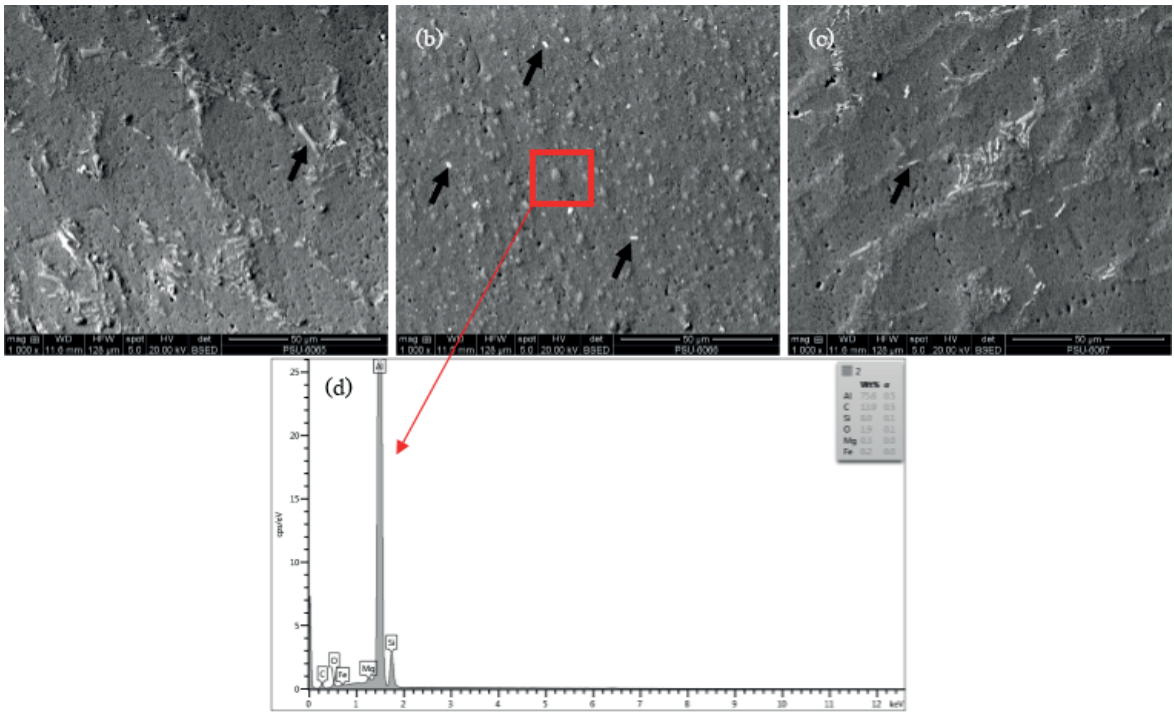
และมีขนาดเล็กกว่าบริเวณ RS เนื่องมาจากการหมุนเชื่อมของเครื่องมือเชื่อมที่หมุนเข้าหาจุดศูนย์กลางส่งผลให้เกรนบีบอัดเข้าหากันตามรอยการหมุนเชื่อม แสดงดังรูปที่ 8(b) และทำให้เกิดรอยอินเตอร์เฟซของเกรนระหว่างบริเวณ WNZ และ TMAZ ชัดเจน [13] ลักษณะของการเรียงตัวของเกรนตามทิศทางการหมุนของเครื่องมือเชื่อม เนื่องมาจากความร้อนที่สะสมในแนวเชื่อมทำให้เนื้อวัสดุอยู่ในสภาวะพลาสติก เกิดการเคลื่อนตัวของเนื้อโลหะไปตามทิศทางการหมุนเชื่อม ส่งผลโดยตรงต่อเกรนที่อยู่ภายในให้มีการเรียงตัวในทิศทางเดียวกัน [14-15]



รูปที่ 8 ลักษณะเกรนในบริเวณ TMAZ, HAZ และ BM ที่ความเร็วเดินเชื่อม 112 mm/min
(a) TMAZ RS และ (b) TMAZ AS

รูปที่ 9 แสดงโครงสร้างทางจุลภาคโดยใช้เทคนิคกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของรอยเชื่อมที่ความเร็วหมุนเชื่อม 1320 rpm ความเร็วเดินเชื่อม 80 mm/min ซึ่งผลจากการทดลองมีความแข็งแรงดึงเฉลี่ยสูงสุด 360.2 MPa พบว่า เกรนเกิดการแตกหักของเฟส Mg_2Si กระจุกกระจายทั่วบริเวณ WNZ ข้อสังเกตพบว่าเกรนบริเวณ WNZ (ดูรูปที่ 9(b)) เกรนมีความละเอียดมากกว่าบริเวณ TMAZ (ดูรูปที่ 9(a,c))

เนื่องมาจากเกรนบริเวณ WNZ ถูกกระทำด้วยหัวพินที่หมุนวนในแนวเชื่อมโดยตรง เป็นสาเหตุทำให้เกรนบริเวณนี้มีความละเอียดมากกว่า และมีขนาดเล็กลงเมื่อเทียบกับเกรนบริเวณ BM อันเนื่องมาจากความเร็วหมุนเชื่อม และความเร็วเดินเชื่อมมีอิทธิพลโดยตรง อีกทั้งอนุภาคของ Mg, Si มีลักษณะเป็นแท่งยาวเรียว และกลมมน เมื่อแพร่เข้าสู่ลูมิเนียมเมตริกซ์ รวมตัวเป็นอนุภาค Mg_2Si (ดูรูปที่ 9(d)) จึงทำให้มีขนาดเล็กลง

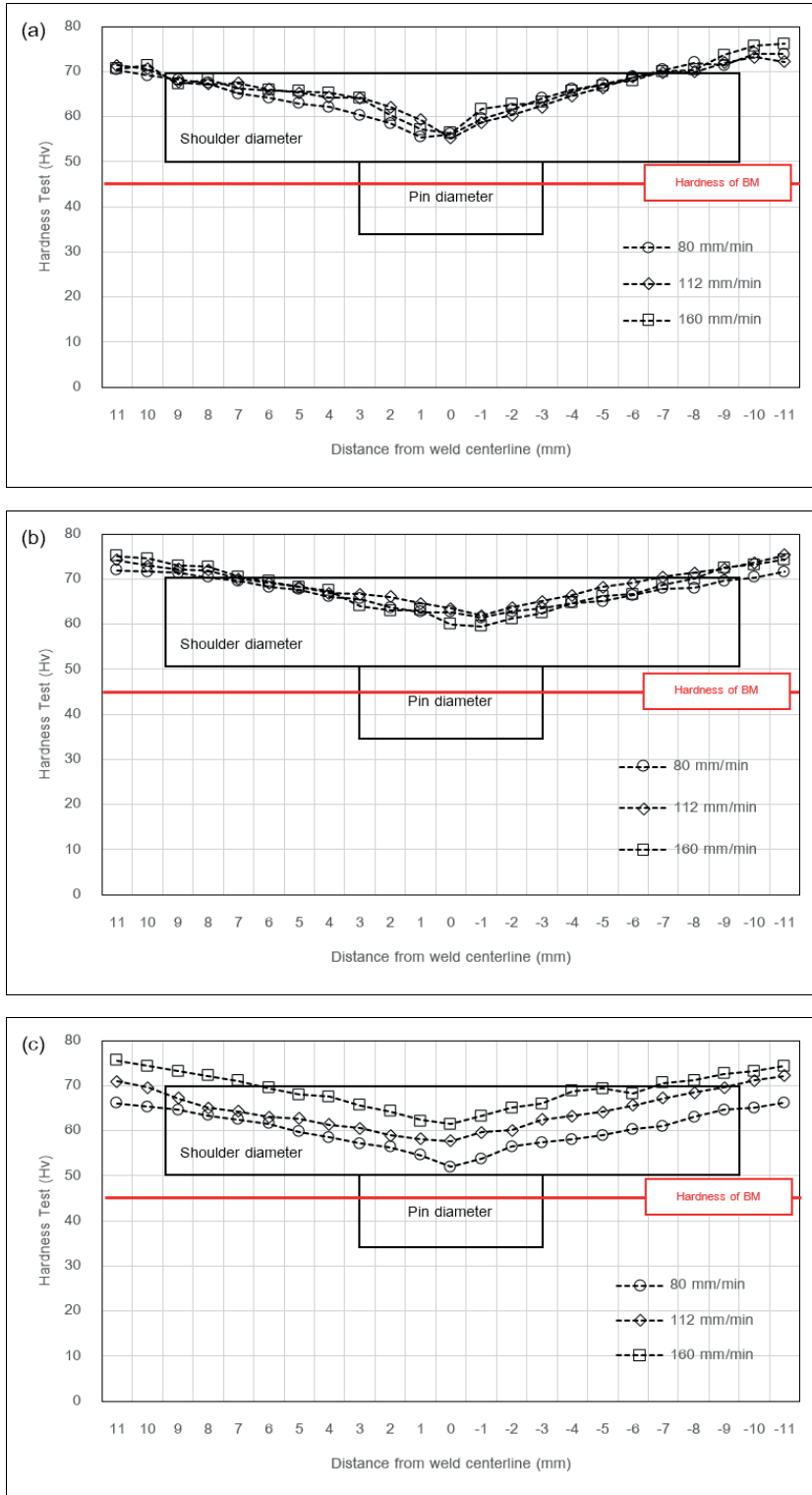


รูปที่ 9 โครงสร้าง SEM ของแนวเชื่อมที่ 1320 rpm 80 mm/min
(a) TMAZ RS (b) WNZ (c) TMAZ AS และ (d) EDX

3.2 การกระจายค่าความแข็งของรอยเชื่อม

การกระจายค่าความแข็งในรอยเชื่อมแสดงดังรูปที่ 10 พบว่าค่าความแข็งของบริเวณ BM อยู่ในช่วง 60-80 Hv ซึ่งมีความมากกว่าค่าความแข็งของบริเวณ BM ในสภาวะปกติ เป็นสาเหตุมาจากการตกตะกอนของเกรนที่เกิดจากสภาวะการเชื่อมได้น้ำ มีลักษณะเหมือนกับกระบวนการทางความร้อนที่ส่งผลทำให้ค่าความแข็งดีขึ้น โดยในทุกรอยเชื่อมมีค่าความแข็งบริเวณ BM ที่ใกล้เคียงกัน (ดูรูปที่ 10(a-c)) อีกหนึ่งปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นคือ ค่าความแข็งเกิดเป็นรูปร่างรูปตัว V (V-shape) โดยพบว่าค่าความแข็งบริเวณ BM มีค่าลดลงอย่างต่อเนื่องเมื่อเข้าสู่บริเวณ TMAZ และลดลงจนถึงจุดต่ำสุดเมื่อถึงบริเวณ WNZ (ดูรูปที่ 10(a-c)) ข้อสังเกตพบว่ามีค่าความแข็งเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มความเร็วมุมเชื่อมมากขึ้นค่าความแข็งเฉลี่ยบริเวณ WNZ มีค่าเพิ่มขึ้นมีสาเหตุ

มาจากการเพิ่มขึ้นของการตะกอนของอนุภาค Mg_2Si ที่ได้รับอิทธิพลโดยตรงจากการเสียดทาน โดยพบว่าที่ความเร็วมุมเชื่อม 1100 rpm ค่าความแข็งบริเวณ WNZ เฉลี่ย 59.4 Hv ที่ความเร็วมุมเชื่อม 1320 rpm ค่าความแข็งบริเวณ WNZ เฉลี่ย 60.4 Hv และความเร็วมุมเชื่อม 1750 rpm ค่าความแข็งบริเวณ WNZ เฉลี่ย 60.8 Hv นอกจากนี้พบว่าเมื่อเพิ่มความเร็วมุมเชื่อมมากขึ้นทำให้ความกว้างของบริเวณ WNZ และบริเวณ TMAZ เพิ่มมากขึ้น ซึ่งเป็นผลมาจากเมื่อความร้อนจากการเสียดทานมีอุณหภูมิเพิ่มมากขึ้นย่อมส่งผลต่อการตกผลึกใหม่ของเกรนเป็นบริเวณกว้างมากขึ้น ส่งผลให้ค่าความแข็งของบริเวณ WNZ และบริเวณ TMAZ มีค่ากว้างมากขึ้นเมื่อเพิ่มความเร็วมุมเชื่อมมากขึ้นนั่นเอง [16]



รูปที่ 10 การกระจายค่าความแข็งของรอยเชื่อมที่ความเร็วหมุนเชื่อม
 (a) 1110 rpm (b) 1320 rpm และ (c) 1750 rpm.

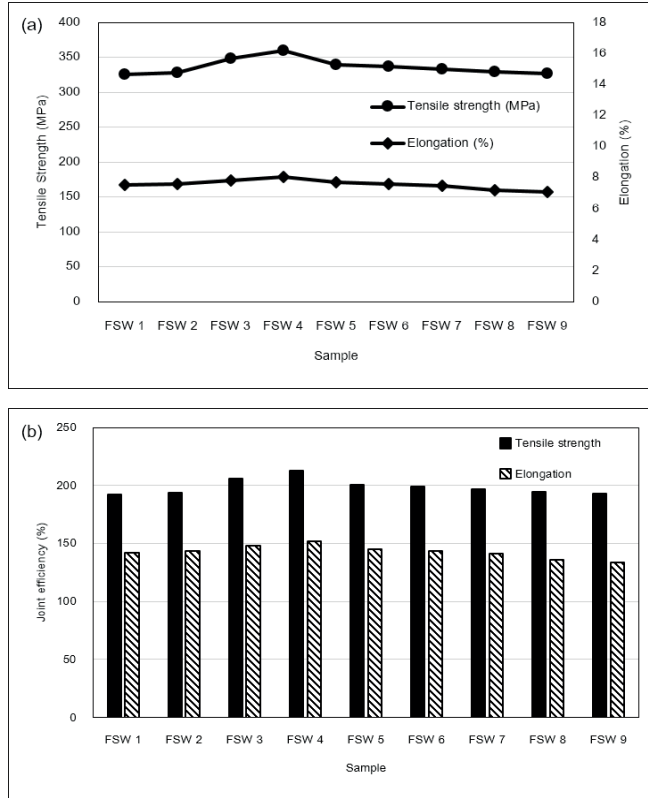
3.3 สมบัติความแข็งแรงดึงของรอยเชื่อม

ผลการทดสอบความแข็งแรงดึงของรอยเชื่อม FSW ในสภาวะได้นำ แสดงดังตารางที่ 5 ประกอบด้วย Tensile strength (MPa), Yield strength (MPa), Elongation (%), Joint Efficiency (%) และ Fracture location พบว่าค่าความแข็งแรงดึงมีค่าเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ เมื่อเริ่มปรับเปลี่ยนพารามิเตอร์การเชื่อม ข้อสังเกตพบว่าที่ความเร็วหมุนเชื่อม 1320 rpm ความเร็วเดินเชื่อม 80 mm/min มีค่าความแข็งแรงดึงสูงสุด 360.2 MPa และเมื่อปรับเปลี่ยนพารามิเตอร์การเชื่อม ค่าความแข็งแรงดึงเริ่มปรับค่าลดลง โดยที่ค่าความแข็งแรงดึงต่ำสุดมีค่า 325.3 MPa ความเร็วหมุนเชื่อม 1110 rpm ความเร็วเดินเชื่อม 80 mm/min แสดงดังรูปที่ 11(a) เหตุผลเนื่องมาจากที่ความเร็วหมุนเชื่อมของเครื่องมือสูงขึ้นเกิดการสร้างความร้อนจากแรงเสียดทานเพิ่มขึ้น และเมื่อเพิ่มความเร็วหมุนเชื่อม (1750 rpm) ทำให้เกิดความร้อนที่เพิ่มขึ้นมากเกินไป จนเนื้อวัสดุเกิดการอ่อนตัวจึงทำให้ค่าความแข็งแรงดึงลดต่ำลง [17-18] ส่วนที่ความเร็วหมุนเชื่อมของเครื่องมือต่ำลงทำให้เกิดการผสมผสานของเนื้อวัสดุที่ไม่เหมาะสมนำไปสู่การลดลงของค่าความแข็งแรงดึง เนื่องจากเกิดความร้อนจากแรงเสียดทาน

ที่ต่ำ [19] นอกจากนี้ค่า Elongation มีผลไปในทำนองเดียวกันกับค่าความแข็งแรงดึง เมื่อศึกษาค่าประสิทธิภาพแนวเชื่อม FSW ของการทดลองในครั้งนี้มีค่ามากกว่า 100% ทุกพารามิเตอร์การเชื่อมเมื่อเทียบกับค่าของ BM แสดงดังรูปที่ 11(b) จากผลการทดลองดังกล่าวซึ่งเป็นอิทธิพลมาจากพารามิเตอร์ของการเชื่อม ในระหว่างกระบวนการ FSW บริเวณ WNZ มีการเปลี่ยนแปลงสถานะแบบพลาสติกที่รุนแรง มีการถ่ายเทความร้อน และเกิดการตกผลึกใหม่ของเกรน [20-21] ดังนั้นเมื่อเพิ่มความเร็วหมุนเชื่อมมากขึ้นความร้อนที่เกิดจากการเสียดทานมีค่ามากขึ้นทำให้มีบริเวณที่อ่อนตัวมีพื้นที่กว้างขึ้น จึงทำให้ค่าความแข็งแรงดึงค่อยๆ ลดลงอย่างต่อเนื่อง ข้อสังเกตอีกประการคือบริเวณจุดขาดของการทดสอบค่าความแข็งแรงดึงพบว่า ทุกพารามิเตอร์การเชื่อมจะขาดในบริเวณ TMAZ/HAZ เป็นข้อสันนิษฐานได้ว่าบริเวณ WNZ มีความแข็งแรงมากกว่าบริเวณ TMAZ/HAZ อันเนื่องมาจากการตกตะกอนของเกรนและความละเอียดของเกรนมีมากกว่านั่นเอง ซึ่งสอดคล้องกันกับ [20] พบว่าจุดขาดของการทดสอบชิ้นงานเชื่อม ณ บริเวณนอกรอยเชื่อมฝั่งในทุกสภาวะการเชื่อม

ตารางที่ 5 ค่าความแข็งแรงดึงและจุดขาดของรอยเชื่อมเสียดทานแบบกวนได้นำ

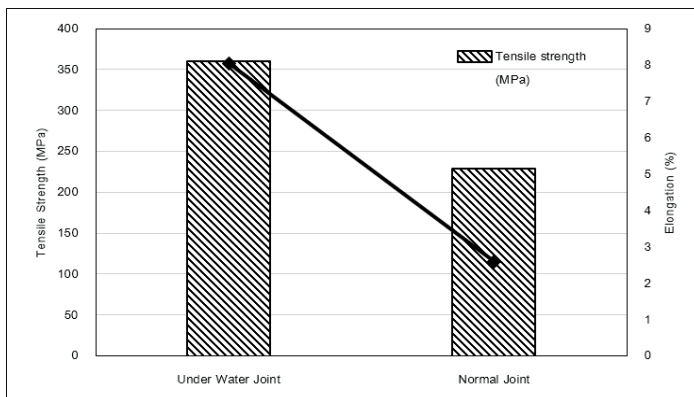
Samples	Tensile strength (MPa)	Yield strength (MPa)	Elongation (%)	Joint efficiency/ Tensile strength	Joint efficiency/ Elongation (%)	Fracture location
FSW 1	325.3	260.2	7.5	192.5	142.0	TMAZ/HAZ
FSW 2	327.7	262.1	7.6	193.9	143.4	TMAZ/HAZ
FSW 3	358.2	286.6	7.8	212.0	147.8	TMAZ/HAZ
FSW 4	360.2	288.2	8.1	213.1	151.9	TMAZ/HAZ
FSW 5	339.5	271.6	7.7	200.9	145.3	TMAZ/HAZ
FSW 6	336.7	269.4	7.6	199.2	143.4	TMAZ/HAZ
FSW 7	332.7	266.1	7.5	196.9	141.5	TMAZ/HAZ
FSW 8	329.1	263.3	7.2	194.7	136.0	TMAZ/HAZ
FSW 9	326.6	261.3	7.1	193.2	133.4	TMAZ/HAZ



รูปที่ 11 ค่าความแข็งแรงดึงและประสิทธิภาพของรอยเชื่อม

อย่างไรก็ตามเมื่อนำผลการทดสอบความแข็งแรงดึงของ รอยเชื่อม FSW ในสภาวะใต้น้ำมาเปรียบเทียบกับผลการ ทดสอบความแข็งแรงดึงของรอยเชื่อม FSW ในสภาวะปกติ [21] พบว่าค่าความแข็งแรงดึงของรอยเชื่อม FSW ในสภาวะ ใต้น้ำมีค่าความแข็งแรงดึงสูงสุด 360.2 MPa สูงกว่ารอยเชื่อม FSW ในสภาวะปกติที่มีค่าความแข็งแรงดึงสูงสุด 228.9 MPa

คิดเป็น 36.45% แสดงดังรูปที่ 12 ซึ่งสอดคล้องกันกับ Liu HJ [7] พบว่าความแข็งแรงดึงของการเชื่อมใต้น้ำมีค่าสูงกว่าของ การเชื่อมแบบปกติ การเชื่อม FSW ใต้น้ำเกิดการปรับปรุงสมบัติ เชิงกล โดยน้ำสามารถการระบายความร้อนทำให้เกิดความเร็ว ในการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิมาก และรวดเร็วจึงทำให้มี ความแข็งแรงดึงที่ดีกว่า



รูปที่ 12 ค่าความแข็งแรงดึงของแนวเชื่อมที่แตกต่างกัน

4. สรุปผลการทดลอง

1. ความเร็วหมุนเชื่อมเพิ่มมากขึ้นส่งผลให้มีความกว้างของบริเวณ WNZ มากขึ้น
2. เกรนมีความละเอียดมากขึ้น มีผลมาจากความเร็วหมุนเชื่อมที่เพิ่มมากขึ้นและกระทบโดยตรงของการเสีรูปร่างเชิงพลาสติกของวัสดุ และความร้อนของการเสียดทานในช่วงของการเชื่อม FSW
3. บริเวณ TMAZ และ HAZ มีการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างในลักษณะที่เกรนบิดเบี้ยวและไม่เป็นรูปร่างที่แน่นอน ซึ่งเป็นอิทธิพลที่เกิดจากการหมุนเชื่อมของเครื่องมือเชื่อม
4. การเชื่อมเสียดทานแบบกวนในสถานะไดน้ำ เกิดอัตราการเย็นตัวเร็วขึ้นในบริเวณ HAZ รวมถึงในบริเวณ WNZ ที่สามารถช่วยปรับปรุงทั้งความแข็งแรงดึงและความแข็งของรอยเชื่อม
5. ค่าความแข็งในรอยเชื่อมมีค่ามากกว่าค่าความแข็งของบริเวณ BM และค่าความแข็งบริเวณ WNZ มีค่าเพิ่มมากขึ้นเมื่อเพิ่มความเร็วหมุนเชื่อมมากขึ้น
6. ความแข็งแรงดึงของรอยเชื่อมมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มความเร็วหมุนเชื่อม ค่าความแข็งแรงดึงสูงสุดเป็น 360.2 MPa และมีประสิทธิภาพรอยเชื่อมมากกว่า 100% ในทุกพารามิเตอร์การเชื่อม
7. บริเวณ WNZ มีความแข็งแรงมากกว่าบริเวณ TMAZ/HAZ เนื่องจากจุดขาดของการทดสอบค่าความแข็งแรงดึงทุกพารามิเตอร์จะขาดในบริเวณ TMAZ/HAZ

5. เอกสารอ้างอิง

1. Fonda, R.W. and Bingert, J.F., 2004, "Microstructural Evolution in the Heat-affected Zone of a Friction Stir Weld," *Metallurgical and Materials Transactions A*, 35 (5), pp. 1487-1499.
2. Mishra, R.S. and Ma, Z.Y., 2005, "Friction Stir Welding and Processing," *Materials Science and Engineering R*, 50 (1-2), pp. 1-78.
3. Simar, A., Bréchet, Y., Meester, B.De., Denquin, A. and Pardoën, T., 2008, "Microstructure, Local and Global Mechanical Properties of Friction Stir Welds in Aluminium Alloy 6005A-T6," *Materials Science and Engineering A*, 486 (1-2), pp. 85-95.
4. Starink, M.J., Seschamps, A. and Wang, S.C., 2008, "The Strength of Friction Stir Welded and Friction Stir Processed Aluminum Alloys," *Scripta Materialia*, 58 (5), pp. 377-382.
5. Benavides, S., Li, Y., Murr, L.E., Brown, D. and McClure, J.C., 1999, "Low-Temperature Friction-Stir Welding of 2024 Aluminum," *Scripta Materialia*, 41 (8), pp. 809-815.
6. Fratini, L., Buffa, G. and Shivpuri, R., 2009, "In-Process Heat Treatments to Improve FS-Welded Butt Joints," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 43, pp. 664-670.
7. Liu, H.J., Zhang, H.J., Huang, Y.X. and Yu, L., 2010, "Mechanical Properties of Underwater Friction Stir Welded 2219 Aluminum Alloy," *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 20 (8), pp. 1387-1391.
8. Akhter, R., Ivanchev, L. and 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 (1-2), pp. 192-196.
9. Jata, K.V. and Semiatin, S.L., 2000, "Continuous Dynamic Recrystallization During Friction Stir Welding of High Strength Aluminum Alloys," *Scripta Materialia*, 43 (8), pp. 743-749.
10. Jazaeri, H. and Humphreys, F.J., 2004, "The Transition From Discontinuous to Continuous Recrystallization in Some Aluminum Alloys I—the Deformed State," *Acta Materialia*, 52 (11), pp. 3239-3250.
11. Prangnell, P.B. and Heason, C.P., 2005, "Grain Structure Formation During Friction Stir Welding Observed by the Stop Action Technique," *Acta Materialia*, 53 (11), pp. 3179-3192.

12. Sakai, T., Miura, H. and Yang, X., 2009, "Ultrafine Grain Formation in Face Centered Cubic Metals During Severe Plastic Deformation," *Materials Science and Engineering A*, 499 (1-2), pp. 2-6.
13. Liu, H.J., Zhang, H.J. and Yu, L., 2011, "Effect of Welding Speed on Microstructures and Mechanical Properties of Underwater Friction Stir Welded 2219 Aluminum Alloy," *Materials and Design*, 32 (3), pp. 1548-1553.
14. García-Bernal, M.A., Mishra, R.S., Verma, R. and Hernández-Silva, D., 2015, "Inhibition of Abnormal Grain Growth During Hot Deformation Behavior of Friction Stir Processed 5083 Al Alloys," *Materials Science and Engineering A*, 636 (11), pp. 326-330.
15. Yu, C., Hua, D., Jizhong, L., Zhihui, C., Jingwei, Z. and Wenjing, Y., 2016, "Influence of Multi-Pass Friction Stir Processing on the Microstructure and Mechanical Properties of Al-5083 Alloy," *Materials Science and Engineering A*, 650 (5), pp. 281-289.
16. Yingchun, C., Huijie, L. and Jicai, F., 2006, "Friction Stir Welding Characteristics of Different Heat-Treated-State 2219 Aluminum Alloy Plates," *Materials Science and Engineering A*, 420 (1-2), pp. 21-25.
17. Elangovan, K. and Balasubramanian, V., 2008, "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*, 200 (1-3), pp. 163-175.
18. Palanivel, R. and Koshymathews, P., 2012, "Prediction and Optimization of Process Parameter of Friction Stir Welded AA5083- H111 Aluminum Alloy Using Response Surface Methodology," *Journal of Central South University*, 19 (1), pp. 1-8.
19. Palanivel, R., Koshy Mathews, P., Dinaharan, I. and Murugan., N., 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 (1), pp. 58-65.
20. Intaing, T., Buahombura, P. and Borrissutthekul, R., 2018, "The Study of A6063-T831 Friction Stir Welding," *KMUTT Research and Development Journal*, 41 (3), pp. 281-297. (In Thai)
21. Boonchouytan, W., Ratanawilai, T. and Muang-junburee, P., 2012, "Effect of Pre/Post Heat Treatment on the Friction Stir Welded SSM 356 Aluminum Alloys," *Procedia Engineering*, 32, pp. 1139-1146.

