

โครงสร้างจุลภาคและสมบัติทางกลของอะลูมิเนียมหล่อกึ่งแข็งเกรด 2024 กับ 6061 ที่เชื่อมด้วยความเสียดทานแบบกวน

Microstructure and Mechanical Properties of Friction Stir Welding of 2024 and 6061 Aluminium Semi-Solid Casting

วรพงศ์ บุญช่วยแทน^{1,2*} วรธนพร ชีววุฒิพงศ์^{1,2} และ รอมฎอน บุระพา^{1,2}

Worapong Boonchouytan,^{1,2*} Watthanaphon Cheewawuttipong,^{1,2} and Romadon Burapa^{1,2}

¹สาขาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย

²หน่วยวิจัยเทคโนโลยีการแปรรูปวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย

¹Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Srivijaya, Songkhla

²Materials Processing Technology Research Unit, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Srivijaya, Songkhla

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

(Received: March 27, 2020, Revised: July 16, 2020, Accepted: November 10, 2020)

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการเชื่อมเสียดทานแบบกวนวัสดุต่างชนิดระหว่างอะลูมิเนียมผสมหล่อกึ่งแข็งของ 2024 กับ 6061 ซึ่งตัวอย่างมีขนาดความหนาของอะลูมิเนียม 4 มิลลิเมตร ความกว้าง 50 มิลลิเมตร และความยาว 100 มิลลิเมตร โดยการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคและสมบัติทางกล ภายใต้ความเร็วหมุนเชื่อม 710 1000 และ 1400 รอบต่อนาที และความเร็วเดินเชื่อม 40 80 และ 112 มิลลิเมตรต่อนาที ผลการทดลองพบว่า สภาวะการเชื่อมเสียดทานแบบกวนที่ดีที่สุด ที่ความเร็วหมุนเชื่อมที่ 1000 รอบต่อนาที ความเร็วเดินเชื่อมที่ 112 มิลลิเมตรต่อนาที ซึ่งมีค่าความต้านทานแรงดึงและความแข็งสูงสุดในบริเวณแนวแกน เท่ากับ 190.4 MPa และ 137.0 HV ตามลำดับ นอกจากนี้โครงสร้างทางโลหะวิทยาของรอยเชื่อมมีลักษณะรอยเชื่อมที่กว้างเมื่อใช้ความเร็วหมุนเชื่อมสูง

คำสำคัญ: การเชื่อมเสียดทานแบบกวน อะลูมิเนียมหล่อกึ่งแข็ง โครงสร้างจุลภาค

Abstract

The purpose of this research was to study friction stir welding of dissimilar materials, that is the semi-solid 2024 and 6061 aluminum alloy. The dimensions of aluminium alloy were 4 mm in thickness, 50 mm in width and 100 mm in length. The analysis of the microstructure and mechanical properties was carried out with the rotation speed of 710, 1000 and 1400 rpm and the welding speed of 40, 80 and 112 mm/min. The research results indicated that the rotation speed of 1000 rpm and welding speed of 112 mm/min were condition most suitable to friction stir welding. The tensile strength and ultimate hardness in the stirred zone were found to be 190.4 MPa and 137 HV, respectively. In addition, an investigation of metallurgical structure of the weld revealed that the welded joint became wider when using a high rotation speed.

Keywords: Friction Stir Welding, Aluminium Semi-Solid Casting, Microstructure

1. บทนำ

การเชื่อมเสียดทานแบบกวน (Friction Stir Welding : FSW) มีข้อดีและข้อได้เปรียบกว่ากระบวนการเชื่อมในสภาวะหลอมละลาย เช่น มีความร้อนที่ต่ำกว่าจุดหลอมละลายของวัสดุทำให้ไม่เกิดรูพรุนหรือรอยแตกในแนวเชื่อม ไม่เกิดการบิดตัวของแนวเชื่อม รวมถึงการใช้อุปกรณ์ในการเชื่อมที่น้อยกว่า เป็นต้น ดังนั้นการเชื่อมเสียดทานแบบกวนจึงกลายเป็นกระบวนการที่เหมาะสมมากสำหรับการเชื่อมวัสดุโดยเฉพาะอะลูมิเนียมที่มีค่าความต้านทานแรงดึงสูง เช่น 2024 6061 7075 เป็นต้น (Ericsson & Sandström, 2003) เมื่อเทียบกับการเชื่อมแบบหลอมละลายแล้วบริเวณที่แตกต่างกันจะเกิดขึ้นในช่วงของแนวเชื่อม เนื่องจากความร้อนจากแรงเสียดทานก่อให้เกิดการแปรรูปถาวรของเกรน ความร้อนจากแรงเสียดทานของเครื่องมือเชื่อมกับวัสดุเชื่อมทำให้เกิดการหมุนย้ายของโครงสร้างทางโลหะวิทยาเป็นไปตามแนวการหมุนของเครื่องมือภายใต้พารามิเตอร์การเชื่อมของเครื่องมือเชื่อม (บ่าและหัวพิน) (Lockwood et al., 2002) โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานที่ผ่านการเชื่อมเสียดทานแบบกวนจะแสดงให้เห็นถึงสามบริเวณที่แตกต่างกัน เนื่องจาก ความเครียดทางกลที่รุนแรงแนวเชื่อม คือ บริเวณแนวกวน (Stir Zone; SZ) บริเวณที่มีผลกระทบอันเนื่องมาจากความร้อนทางกล (Thermo Mechanical Affected Zone : TMAZ) และบริเวณกระทบร้อน (Heat Affected Zone : HAZ) บริเวณ SZ เป็นพื้นที่ที่หัวพินของเครื่องมือเชื่อมผ่าน มีทั้งการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของเกรนสูงและการรักษาความร้อนบริเวณแนวเชื่อม โดยทั่วไปจะประกอบด้วยเกรนชนิดอีคิวแอกซ์ (Equiaxed Grains) ที่ตีมาจากเนื่องจากการตกผลึกใหม่ของเกรนที่เติมรูปแบบที่มีผลมาจากความร้อนจากแรงเสียดทานทำให้มีจำนวนมากและเป็นเกรนละเอียด บริเวณที่อยู่ติดกับ SZ เป็น TMAZ บริเวณที่เกิดการเปลี่ยนแปลงของเกรนจากความร้อนทางกลอย่างรุนแรงถึงแม้ว่าจะไม่ได้รับผลโดยตรงในการกดหรือการหมุนของเครื่องมือเชื่อมที่หัวพิน แต่เครื่องมือเชื่อมที่บ่าเชื่อมก็ส่งผลกระทบต่อโดยตรงเนื่องจากความเครียดเฉือนภายในแนวเชื่อมทำให้บริเวณ TMAZ เกรนจะเกิดการแปรรูปถาวร เช่นเดียวกับบริเวณ SZ แต่ไม่เพียงพอที่จะทำให้เกิดการตกผลึกใหม่ของเกรน นอกเหนือจากบริเวณ TMAZ ที่เป็นบริเวณที่โดนผลกระทบจากความร้อนแล้วยังมีบริเวณอีกบริเวณหนึ่งที่ซึ่งบริเวณนี้จะโดนการกระทำของเครื่องมือเชื่อมที่บ่าเชื่อมส่งผลกระทบจากความร้อนเช่นกัน เรียกว่า บริเวณ HAZ ซึ่งเกิดจากการไหลเวียนของความร้อนบริเวณส่วนปลายของเครื่องมือเชื่อม (Lockwood et al., 2002; Ali et al., 2006;

Booth et al., 2007; Golestaneh et al., 2009; Shusheng et al., 2006) นอกจากนี้รูปร่างของรอยเชื่อมที่เป็นลักษณะวงแหวนครึ่งวงกลมด้านบนของพื้นผิวรอยเชื่อม จะมีระยะห่างระหว่างวงแหวนครึ่งวงกลมอย่างสม่ำเสมอหรือจะเพิ่มขึ้นและลดลงก็ได้ซึ่งขึ้นอยู่กับพารามิเตอร์ของการเชื่อม คือ ความเร็วเดินเชื่อมและความเร็วหมุนเชื่อม ส่งผลให้โครงสร้างเป็นเนื้อเดียวกันภายใต้แนวเชื่อม (Krishnan, 2002) ปัจจัยต่าง ๆ ของการเชื่อมเสียดทานแบบกวน เช่น ความเร็วหมุนเชื่อม (R) ความเร็วเดินเชื่อม (V) แรงกดตามแนวแกนเครื่องมือ รูปทรงเรขาคณิตของหัวพิน การเอียงองศาของเครื่องมือเชื่อม รวมถึงความลึกในกตเครื่องมือเชื่อมลงในเนื้อวัสดุ เป็นต้น ต่างก็ส่งผลกระทบต่อกระบวนการ FSW ท่ามกลางปัจจัยต่าง ๆ เหล่านี้ ความเร็วหมุนเชื่อมและความเร็วเดินเชื่อม เป็นสองปัจจัยการเชื่อมที่สำคัญที่สุดที่มีอิทธิพลต่อความร้อนจากแรงเสียดทานส่งผลต่อคุณภาพของโครงสร้างทางโลหะวิทยาและสมบัติทางกลของแนวเชื่อม (Kanwer et al., 2010; Zhang et al., 2012)

อะลูมิเนียม AA2024 และ AA6061 ใช้กันอย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมการบิน อุตสาหกรรมยานยนต์ และอุตสาหกรรมทางทะเล ในส่วนของเฟรมท่อนและส่วนกล่องเก็บข้อมูล การเชื่อมต่อวัสดุสองชนิดนี้เข้าด้วยกันถือเป็นความท้าทายอย่างหนึ่ง เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงขององค์ประกอบทางเคมีและสมบัติทางกลของวัสดุเดิม (Heidarzadeh et al., 2012; Amancio-Filho et al., 2008; Babu et al., 2011) ในอดีตการเชื่อมแบบหลอมละลายของอะลูมิเนียมที่ไม่เหมือนกันเป็นเรื่องที่ลำบาก และทำได้ยากมาก ดังนั้นกระบวนการ FSW จึงได้รับความนิยมกันอย่างแพร่หลายสำหรับการเชื่อมวัสดุต่างชนิด โดยใช้หลักการสะสมของความร้อนที่ต่ำกว่าอุณหภูมิหลอมละลายของวัสดุเชื่อม โดยมีงานวิจัยก่อนหน้านี้ที่เกี่ยวกับกระบวนการเชื่อม FSW เช่น พฤติกรรมโครงสร้างจุลภาคและสมบัติทางกลของการเชื่อมเสียดทานแบบกวนของแผ่นอะลูมิเนียมหล่อขึ้นของแข็งต่างชนิด SSM2024 และ SSM6061 พบว่า โครงสร้างจุลภาคบริเวณพินกวน (Stir Pin Zone; SpZ) ด้านล่างของหัวพินเกิดการประสานกันของวัสดุสองชนิดเป็นรูปแบบลามลาร์ (lamellar) ที่เกิดจากการแผ่ความร้อนโดยการเสียดทานของเครื่องมือเชื่อม (Boonchouytan et al., 2017) การไหลและโครงสร้างจุลภาคที่เกี่ยวข้องกับการเชื่อมเสียดทานแบบกวนของอะลูมิเนียม 2024 กับอะลูมิเนียม 6061 พบว่า การเปลี่ยนแปลงของเกรนเกิดจากการตกผลึกแบบไดนามิก ซึ่งเป็นกลไกของการเชื่อมเสียดทานแบบกวน ทิศทางการหมุนของเกรนสามารถเห็นได้ชัดจากทิศทางการหมุนของเครื่องมือเชื่อม ซึ่งมีลักษณะที่คล้าย

กับกระแสน้ำวน (Ying et al., 1999) การศึกษาเบื้องต้นเกี่ยวกับโครงสร้างจุลภาคและสมบัติทางกลของการเชื่อมเสียดทานแบบกวนที่วัสดุต่างชนิดในโลหะผสมอะลูมิเนียม 2024-T351 และ 6056-T4 พบว่า การไหลของวัสดุมีรูปแบบบลาลาร์ เนื่องจากสมบัติทางกลที่ต่างกันของสองวัสดุเกิดการผสมผสานกันภายในบริเวณ SZ ส่งผลให้ความเครียดของวัสดุมีค่าสูง การแตกหักของการทดสอบค่าความต้านทานแรงดึงเกิดขึ้นที่บริเวณ TMAZ (Amancio-Filho et al., 2009) การศึกษาเกี่ยวกับการเชื่อมเสียดทานแบบกวนของการเชื่อมโลหะ AA 2024 และ AA 6061 พบว่า บริเวณ HAZ เกรนไม่มีการแปรรูปถาวร เนื่องจากเป็นบริเวณที่ได้รับผลกระทบน้อย ในขณะที่บริเวณ TMAZ เกิดการแปรรูปถาวรของเกรนอย่างมากในขอบเขตของเกรนระหว่าง บริเวณ TMAZ กับบริเวณ SZ ซึ่งเกิดจากการความร้อนในระหว่างกระบวนการเชื่อม (Sadeesh et al., 2014) แรงบิด อุณหภูมิ และการกระจายความเค้นในการเชื่อมเสียดทานแบบกวนวัสดุต่างชนิดระหว่าง 6061-T6 และ 2014-T6 พบว่า แรงบิดที่เกิดจากเครื่องมือเชื่อมส่งผลต่อการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิและการไหลวนของโลหะ กล่าวคือ เมื่อยิ่งเพิ่มความเร็วหมุนเชื่อมมากขึ้นส่งผลให้มีแรงบิดเพิ่มมากขึ้น เกิดการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิในขณะทำการเชื่อม และเกิดการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างบริเวณ SZ กว้างมากขึ้น (Caroline et al., 2013) จากงานวิจัยดังกล่าวยังไม่มีการกล่าวถึงผลงานเกี่ยวกับการเชื่อมเสียดทานแบบกวนอะลูมิเนียมหล่อทั้งของแข็งระหว่าง 2024 และ 6061

ดังนั้นงานวิจัยครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการเปลี่ยนแปลงลักษณะทางโลหะวิทยา (โครงสร้างมหภาค และจุลภาค) และสมบัติทางกล (ค่าความต้านทานแรงดึง และความเค้น) ของรอยเชื่อมด้วยกรรมวิธีการเชื่อมเสียดทานแบบกวนวัสดุต่างชนิดให้เหมาะสมกับภาคอุตสาหกรรมต่อไป

2. วัสดุ อุปกรณ์ และกระบวนการวิจัย

โลหะอะลูมิเนียมผสมหล่อทั้งของแข็ง (Aluminum Casting Semi Solid Metal; SSM) 2024 กับ 6061 ที่ผ่านการหล่ออัด (Squeeze Casting) โดยมีส่วนผสมทางเคมีของวัสดุทดลอง (ร้อยละโดยน้ำหนัก) แสดงดังตารางที่ 1 และมีค่าความต้านทานแรงดึงของวัสดุทดลอง แสดงดังตารางที่ 2 นำวัสดุไปตัดด้วยเครื่องเลื่อยสายพานแนวนอน ยี่ห้อ Chenlong รุ่น CS - 230 และทำการปรับขนาดชิ้นงานด้วยเครื่องกัดแนวตั้งยี่ห้อ HELLER รุ่น 2S ให้มีขนาดความยาว × ความกว้าง × ความหนา คือ 100 × 50 × 4 มิลลิเมตร โดยมีลักษณะการวางชิ้นงานเพื่อเชื่อมต่อน แสดงดังรูปที่ 1

ตารางที่ 1 ส่วนผสมทางเคมีของวัสดุทดลอง (ร้อยละโดยน้ำหนัก)

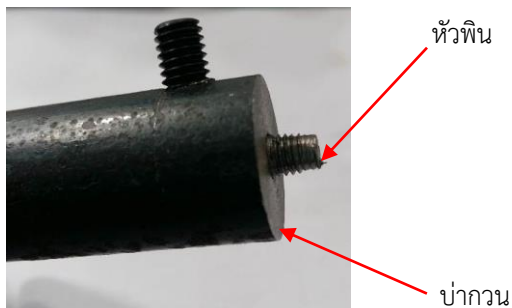
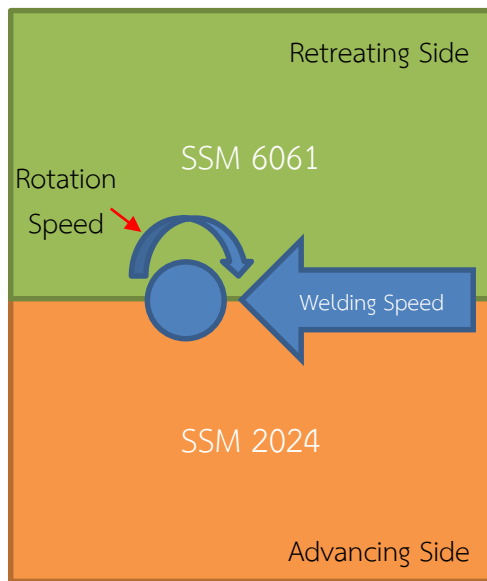
Element	SSM 2024	SSM 6061
Cr	0.1	0.2
Cu	4.4	0.3
Fe	0.5	0.7
Mg	1.5	1.0
Mn	0.6	0.2
Si	0.5	0.6
Ti	0.2	0.2
Zn	0.3	0.3
Al	91.9	96.5

ตารางที่ 2 ค่าความต้านทานแรงดึงของวัสดุทดลอง

Aluminium	SSM 2024	SSM 6061
Tensile Strength (MPa)	260.9	164.0
Yield Strength (MPa)	208.7	131.2
Elongation (%)	9.5	3.9

เครื่องมือเชื่อมผลิตจากวัสดุเหล็กกล้าเครื่องมือ เกรด SKD 11 มีลักษณะหัวพินเป็นเกลียวสามเหลี่ยมหมุนขวา มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของหัวพิน (Pin) 5 มิลลิเมตร ความยาว 3.2 มิลลิเมตร และมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของบ่ากวน (Shoulder) 20 มิลลิเมตร แสดงดังรูปที่ 2

การประยุกต์นำเครื่องกัดแนวตั้งมาเป็นเครื่องเชื่อมเสียดทานแบบกวน ซึ่งจะต้องปรับให้เครื่องมือเชื่อมเอียงทำมุม 3 องศา กับผิวหน้าชิ้นทดลอง การปรับเปลี่ยนปัจจัยที่ใช้ในการทดลอง คือ ความเร็วหมุนเชื่อม (Rotation Speed) มี 3 ระดับ คือ 710 1000 และ 1400 รอบต่อนาที (rpm) และความเร็วเดินเชื่อม (Welding Speed) มี 3 ระดับ คือ 40 80 และ 112 มิลลิเมตรต่อนาที (mm/min) การจับยึดชิ้นงาน และการจับยึดเครื่องมือของการเชื่อมเสียดทานแบบกวน (Friction Stir Welding : FSW) จะทำการจับยึดชิ้นงาน 2 ชิ้นติดกันกับแท่นรองชิ้นงานหรือฟิกเจอร์ โดยจับยึดฟิกเจอร์ติดกับโต๊ะงานของเครื่องกัดแนวตั้งด้วยแคลมป์ขั้นบันได (Step Clamp) การทดลองกำหนดให้เครื่องมือเชื่อมหมุนอยู่กับที่และชิ้นทดลองเคลื่อนที่ และกำหนดให้ อะลูมิเนียมผสมหล่อทั้งของแข็ง 6061 อยู่ด้านตรงข้ามกับทิศทางการหมุนของเครื่องมือเชื่อม (Retreating Side : RS) และอะลูมิเนียมผสมหล่อทั้งของแข็ง 2024 อยู่ด้านเดียวกันกับทิศทางการหมุนของเครื่องมือเชื่อม (Advancing Side : AS)



รูปที่ 2 ลักษณะเครื่องมือเชื่อมของงานวิจัยครั้งนี้

การเชื่อมในทุก ๆ การทดลองในการเชื่อมเสียดทานแบบกวน แสดงดังรูปที่ 3 ประกอบด้วยขั้นตอน (ก) เปิดเครื่องกัดให้หัวพินที่หมุนตามเข็มนาฬิกาตามความเร็วรอบที่กำหนดไว้ในปัจจัยเชื่อม (ข) จากนั้นสอดหัวพินลงไปใ้เนื้อวัสดุ จนกระทั่งปลายของหัวพินถูกสอดลงไปและปากกวนสัมผัสกับชิ้นงานเชื่อม ในระยะความลึก 1 มิลลิเมตร จากนั้นกำหนดให้เครื่องมือเชื่อมหมุนวน ณ ตำแหน่งนี้เป็นระยะเวลา 30 วินาที เพื่อให้เกิดการสะสมความร้อนในแนวเชื่อมทำให้วัสดุเกิดการอ่อนตัวและเกิดการเคลื่อนที่ไหลวนรอบ ๆ หัวพิน (ค) เดินเชื่อมด้วยความเร็วเดินเชื่อมที่กำหนดไว้ในปัจจัยเชื่อม ในขั้นตอนนี้จะเกิดการรวมตัวของวัสดุทั้ง 3 ชนิด (ง) เมื่อสิ้นสุดขอบของชิ้นงานเชื่อมให้หยุดการเดินเชื่อมที่กำหนดไว้ จากนั้นก่อนการยกเครื่องมือเชื่อมออกจากรอยเชื่อม ให้หมุนเครื่องมือเชื่อมวน ณ ตำแหน่งนี้เป็นระยะเวลา 30 วินาที เพื่อให้การเสียดทานที่เกิดจากเครื่องมือเชื่อมกับวัสดุทดลองคงที่ เมื่อครบเวลาที่กำหนดจึงยกเครื่องมือเชื่อมออกจากแนวเชื่อม เป็นอันเสร็จขั้นตอนการเชื่อมเสียดทานแบบกวนต่อหนึ่งปัจจัยเชื่อม



(ก) หัวพินที่หมุน

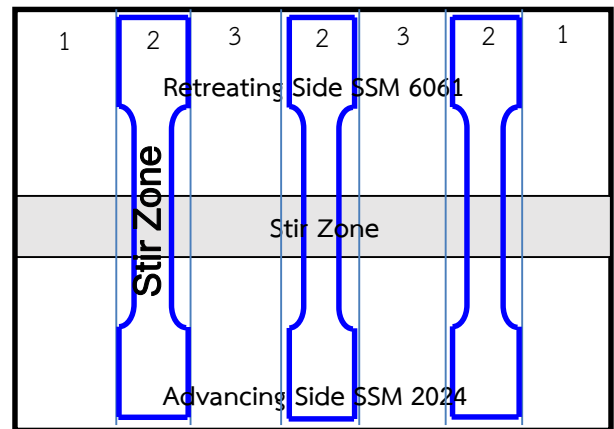
(ข) หัวพินสอดลง



(ค) เดินเชื่อมตาม

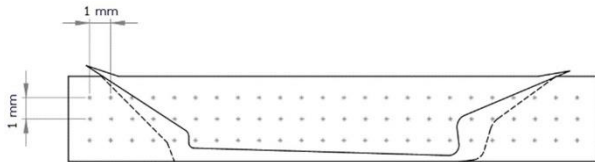
(ง) สิ้นสุดการเชื่อม

รูปที่ 3 ขั้นตอนการเชื่อมเสียดทานแบบกวน



การเตรียมชิ้นงานสำหรับตรวจสอบโครงสร้าง จากชิ้นงานเชื่อมเสร็จแล้วนำมาตัดตามแนวขวางกับรอยเชื่อม แสดงดังรูปที่ 4 โดยชิ้นงานส่วนที่ (1) เป็นส่วนเริ่มต้นและสิ้นสุดแนวเชื่อมจะเป็นส่วนที่ตัดทิ้งไป ชิ้นงานส่วนที่ (2) ส่วนนี้จะทำการตัดเพื่อนำไปทำการทดสอบค่าความต้านทานแรงดึง และชิ้นงานส่วนที่ (3) นำไปตรวจสอบสมบัติทางโลหะวิทยาเพื่อดูโครงสร้างมหภาค โครงสร้างจุลภาค และทดสอบความแข็ง การเตรียมชิ้นทดสอบเพื่อตรวจสอบโครงสร้างมหภาค โครงสร้างจุลภาค และทดสอบความแข็ง นำชิ้นทดสอบที่ตัดเสร็จแล้วมาดำเนินการหล่อด้วยน้ำยา Epoxy Resin ชัดด้วยกระดาษทรายน้ำเบอร์ 80 320 400 600 800 1000 และ 1500 ตามลำดับทรายพร้อมเปิดน้ำไหลผ่าน เมื่อขัดด้วยกระดาษทรายจนผิวหน้าของชิ้นทดสอบเรียบแล้ว ก็ขัดด้วยสีกหลาดโดยใช้ผงอลูมินาขนาด 0.5 3.0 และ 0.1 ไมโครเมตร ตามลำดับ เสร็จแล้วนำไปกัด้วยกรดคิลเลอร์เป็นเวลา 10 วินาที แล้วนำไปตรวจสอบโครงสร้างทางโลหะวิทยาระดับมหภาคและจุลภาค ด้วยกล้องจุลทรรศน์แสง

การทดสอบความแข็ง ด้วยเครื่องทดสอบความแข็งแบบวิกเกอร์ รุ่น Zwick / Roell ZHU กดบริเวณพื้นที่หน้าตัดของรอยเชื่อม ระยะห่างของรอยกดแต่ละจุด 1 มิลลิเมตร แรงกดที่ใช้ 100 กรัม และเวลาในการกด 10 วินาที ตำแหน่งของการทดสอบแสดงดังรูปที่ 5



รูปที่ 5 ตำแหน่งการกดทดสอบความแข็ง

การเตรียมชิ้นทดสอบค่าความต้านทานแรงดึง โดยดำเนินการขึ้นรูปด้วยเครื่องกดแนวตั้ง ให้ได้ขนาดตามมาตรฐาน ASTM E8M นำชิ้นงานทดสอบที่ขึ้นรูปแล้วเสร็จไปทดสอบค่าความต้านทานแรงดึง ด้วยเครื่องทดสอบแบบประสมคัตที่อุณหภูมิห้อง โดยใช้ความเร็วในการดึง 1 มิลลิเมตรต่อนาที

3. ผลการทดลองและวิเคราะห์ผล

3.1 โครงสร้างมหภาคของรอยเชื่อม

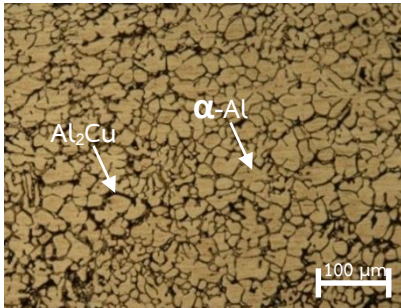
ลักษณะผิวด้านบนของรอยเชื่อมเสียดทานแบบกวนวัสดุต่างชนิดระหว่างอะลูมิเนียมผสมหล่อกิ่งของแข็ง 2024 กับ 6061 แสดงดังรูปที่ 6 วิเคราะห์ผลการตรวจสอบลักษณะผิวด้านบนของรอยเชื่อม พบว่า บริเวณผิวหน้ารอยเชื่อมเกิดการผสมกันที่ดีของรอยเชื่อมต่อชนและบริเวณด้านล่างของรอยเชื่อมมีการซึมลึกที่ดี ไม่พบรอยแยกที่ไม่ประสานกันของรอยเชื่อม แต่จะเกิดรูบริเวณจุดสิ้นสุดของรอยเชื่อมอันเนื่องมาจากปลายหัวพิน แต่อย่างไรก็ตามลักษณะผิวหน้าด้านบนของรอยเชื่อมที่ความเร็วหมุนเชื่อม 1400 รอบต่อนาที จะเกิดผิวขรุขระที่หยาบมากกว่าความเร็วหมุนเชื่อม 710 รอบต่อนาที แต่ลักษณะของผิวหน้าของรอยเชื่อมที่ขรุขระไม่เรียบคล้ายกับเกล็ดปลานั้นจะเกิดขึ้นที่ความเร็วเดินเชื่อม 160 มิลลิเมตรต่อนาที เท่านั้น เนื่องจากมาจากความเร็วหมุนเชื่อมสูงในขณะที่ความเร็วเดินเชื่อมสูง ทำให้อุณหภูมิที่สะสมในแนวเชื่อมมีไม่เพียงพอจึงทำให้เกิดชั้นสะสมของโลหะ ส่งผลทำให้ผิวหน้ารอยเชื่อมมีความขรุขระ

Rotation Speed (rpm)	Welding Speed (mm/min)	Surfaces of Welded
710	40	RS : SSM 6061
	80	AS : SSM 6061 AS : SSM 2024
	112	RS : SSM 6061 AS : SSM 2024
1000	40	RS : SSM 6061 AS : SSM 2024
	80	RS : SSM 6061 AS : SSM 2024
	112	RS : SSM 6061 AS : SSM 2024
1400	40	RS : SSM 6061 AS : SSM 2024
	80	RS : SSM 6061 AS : SSM 2024
	112	RS : SSM 6061 AS : SSM 2024

รูปที่ 6 ลักษณะผิวหน้าด้านบนของรอยเชื่อม

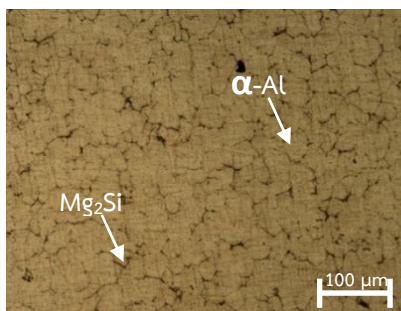
3.2 โครงสร้างจุลภาคบริเวณเนื้อโลหะเดิม

โครงสร้างจุลภาคบริเวณเนื้อโลหะเดิม อะลูมิเนียมผสมหล่อ กิ่งของแข็ง 2024 บริเวณเนื้อโลหะเดิมเกรนของเฟส α -Al เป็นลักษณะก้อนกลมต่อเนื่องกันมีเฟส Al_2Cu จับกลุ่มรอบเฟส α -Al แสดงดังรูปที่ 7



รูปที่ 7 โครงสร้างจุลภาคอะลูมิเนียมหล่อกิ่งของแข็ง 2024

โครงสร้างจุลภาคบริเวณเนื้อโลหะเดิม อะลูมิเนียมผสมหล่อกิ่งของแข็ง 6061 บริเวณเนื้อโลหะเดิมเกรนของเฟส α -Al เป็นลักษณะโครงสร้างก้อนกลมที่ล้อมรอบด้วยเฟสยูเทคติก แมกนีเซียมซิลิไซด์ (Mg_2Si) แสดงดังรูปที่ 8



รูปที่ 8 โครงสร้างจุลภาคอะลูมิเนียมหล่อกิ่งของแข็ง 6061

3.3 โครงสร้างมหภาคและจุลภาคของรอยเชื่อม

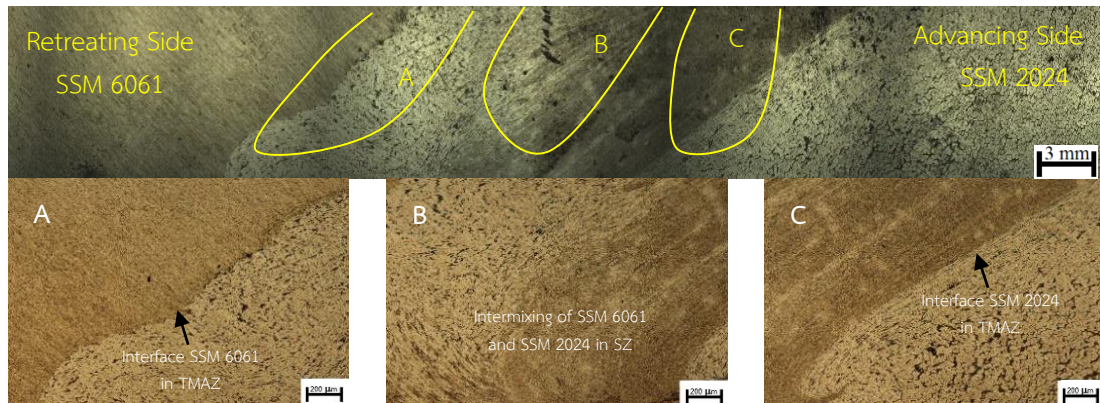
โครงสร้างมหภาคและจุลภาคของการเชื่อมเสียดทานแบบ กวนวัสดุต่างชนิดระหว่างอะลูมิเนียมผสมหล่อกิ่งของแข็ง 2024 กับ 6061 ที่ความเร็วหมุนเชื่อม 710 1000 และ 1400 รอบต่อนาที แสดงดังรูปที่ 9-11 โครงสร้างมหภาค พบว่า บริเวณรอยเชื่อมที่ประกอบไปด้วย บริเวณ SZ บริเวณ TMAZ บริเวณ HAZ และบริเวณ BM ไม่มีข้อบกพร่องใด ๆ เกิดขึ้นกับรอยเชื่อม และรอยเชื่อมมีลักษณะที่ประสานกันเป็นอย่างดีของวัสดุทั้งสองชั้น การประสานกันของวัสดุทั้งสองชั้นเกิดจากความร้อนที่สะสมในรอยเชื่อมซึ่งเป็นอิทธิพลมาจากกลไกการเชื่อม ประกอบด้วย ความเร็วหมุนเชื่อม ความเร็วเดินเชื่อม วัสดุ

ทดลอง เครื่องมือเชื่อม การเอียงองศาการเชื่อม ซึ่งทั้งหมดนี้ล้วนแต่เป็นปัจจัยการเชื่อมที่ช่วยเสริมซึ่งกันและกันทำให้เกิดการประสานกันด้วยดี ข้อสังเกตจากการทดลอง พบว่า เกิดการผสมผสานกันระหว่างวัสดุทั้งสองด้วยการไหลวนรอบ ๆ หัวพิน ทำให้มีลักษณะภาพร่างคล้ายกับชั้นของหัวหอมที่มีภาพแบบชัดเจนเป็นชั้น ๆ ตามทิศทางการกวนของหัวพิน อีกทั้งพบว่า รอยเชื่อมที่ความเร็วหมุนเชื่อมและความเร็วเดินเชื่อมจะมีลักษณะรอยเชื่อมที่กว้าง อันเนื่องมาจากความร้อนที่มากในรอยเชื่อมทำให้อะลูมิเนียมเกิดการอ่อนตัวจนเกิดการไหลวนของเนื้ออะลูมิเนียมรอบหัวพินได้อย่างดีทำให้เกิดรอยเชื่อมที่กว้าง (Zhang et al., 2012) ที่ความเร็วในการหมุนหัวพิน 1000 รอบต่อนาที จะเห็นการรวมตัวกันของเนื้ออะลูมิเนียมทั้งสองชั้นได้ดีที่สุด (Kanwer et al., 2010)

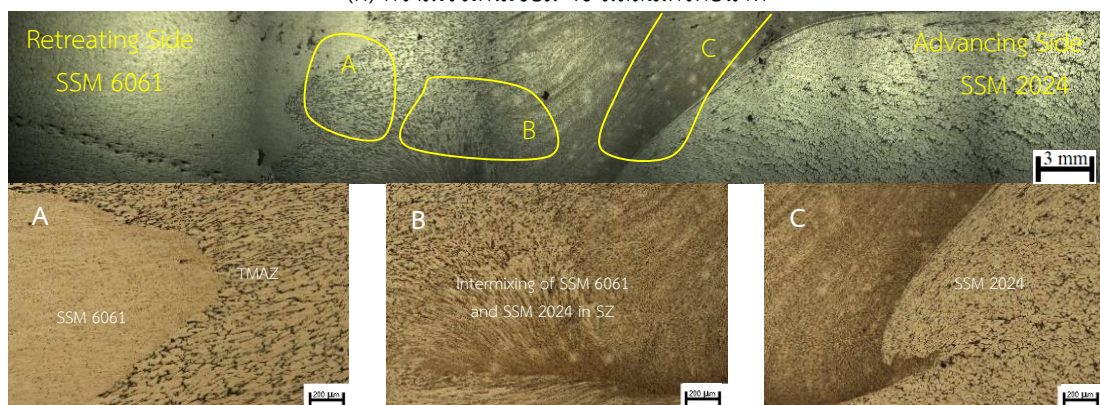
โครงสร้างจุลภาค พบว่า มีความแตกต่างกันอย่างชัดเจนมากกว่าโครงสร้างมหภาค โดยเฉพาะบริเวณ TMAZ กับบริเวณ BM อันเนื่องมาจากอิทธิพลของเครื่องมือเชื่อมที่บริเวณ บ่ากวนที่ตกลงไปในเนื้อวัสดุ ความร้อนที่เกิดจากการเสียดทานระหว่างวัสดุทดลองกับเครื่องมือเชื่อมที่บริเวณที่บ่ากวนแผ่อิทธิพลของผลกระทบอันเนื่องมาจากความร้อนทางกลอย่างเห็นได้ชัด ส่งผลทำให้เกิดการแปรรูปถาวรของเกรนจากเกรนที่ลักษณะก้อนกลมเดิม ทำให้เกรนในบริเวณ TMAZ มีลักษณะที่ละเอียดเพิ่มมากขึ้นซึ่งย่อมส่งผลต่อสมบัติทางกลค่าความแข็งแรงเพิ่มขึ้นมากกว่าเนื้อโลหะเดิมตามขึ้นไปด้วย (Hasan et al., 2019) ข้อสังเกตจากโครงสร้างจุลภาค พบว่า การแปรรูปถาวรของเกรนบริเวณ SZ กับบริเวณ TMAZ มีความแตกต่างกันมาก กล่าวคือ เกรนบริเวณ SZ เกิดจากการเสียดทานแบบกวนของเครื่องมือเชื่อมที่หัวพินโดยตรง ทำให้เกิดความร้อนสะสมมุ่งเข้าสู่จุดกึ่งกลางรอยเชื่อม โดยมีบริเวณบ่ากวนของเครื่องมือเชื่อมเป็นตัวสะสมความร้อนในรอยเชื่อม จากปรากฏการณ์ดังกล่าวทำให้เกรนในบริเวณนี้มีขนาดละเอียดเพิ่มมากขึ้นกว่าบริเวณ TMAZ ส่งผลให้ค่าความแข็งแรงมีค่ามากที่สุดเมื่อเทียบกับในแต่ละบริเวณของการเชื่อม นอกจากนี้จากรูปที่ 9-11 ก็ยังพบว่า เกรนบริเวณ SZ มีการผสมผสานกันของวัสดุทั้งสองซึ่งปรากฏเป็นชั้นของวัสดุอย่างชัดเจน โดยมีผลมาจากการวางแผนเชื่อมของชิ้นงานในลักษณะต่อชน พร้อมกันนั้นการหมุนกดลงของเครื่องมือเชื่อมที่ตำแหน่งวัสดุทั้งสอง ย่อมส่งผลให้เกิดการผสมผสานของเนื้อวัสดุทั้งสองเข้าด้วยกันเป็นอย่างดี ข้อสังเกตอีกประการ เมื่อเพิ่มความเร็วหมุนเชื่อมมากขึ้นทำให้เกิดการประสานของเกรนทั้งสองรุนแรงมากขึ้น กล่าวคือ เห็นการแปรรูปถาวรของเกรนทั้งสองที่ผสมผสานกันอย่างชัดเจนมากขึ้น ลักษณะการซ้อนทับกันของเกรนทั้งสองมีมากขึ้น และ

นอกจากนั้นยังเห็นได้ชัดว่าความกว้างของเกรนบริเวณ SZ มีความกว้างมากขึ้น ที่เป็นลักษณะนั้นอันเนื่องมาจากอิทธิพลของความร้อนสะสมที่สูงขึ้นด้วยการอาศัยพลังงานของเครื่องมือเชื่อมจากการเพิ่มขึ้นของความเร็วหมุนเชื่อม ส่งผล

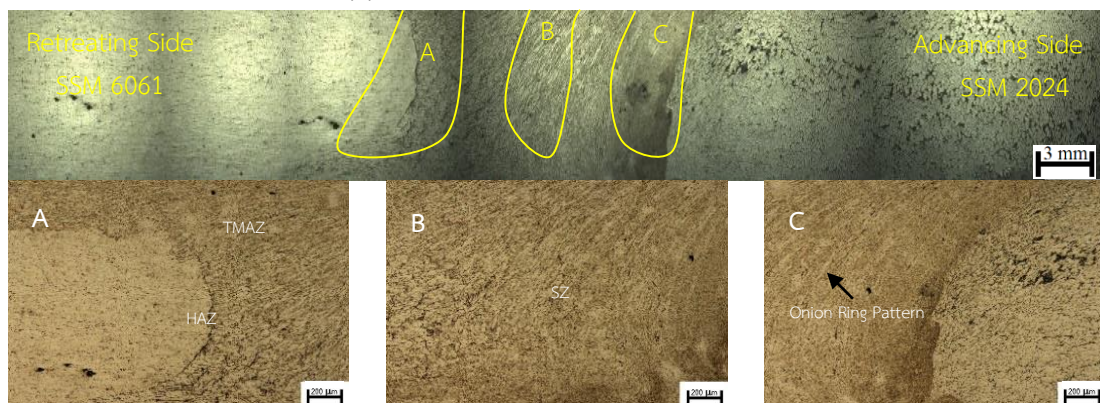
ก่อให้เกิดความร้อนที่เพิ่มมากขึ้นในรอยเชื่อมแผ่ความร้อนไปยังเกรนทำให้เกิดการแปรรูปถาวรอย่างต่อเนื่อง ส่งผลทำให้บริเวณ SZ มีความกว้างเพิ่มมากขึ้นตามไปด้วย



(ก) ความเร็วเดินเชื่อม 40 มิลลิเมตรต่อนาที



(ข) ความเร็วเดินเชื่อม 80 มิลลิเมตรต่อนาที



(ค) ความเร็วเดินเชื่อม 112 มิลลิเมตรต่อนาที

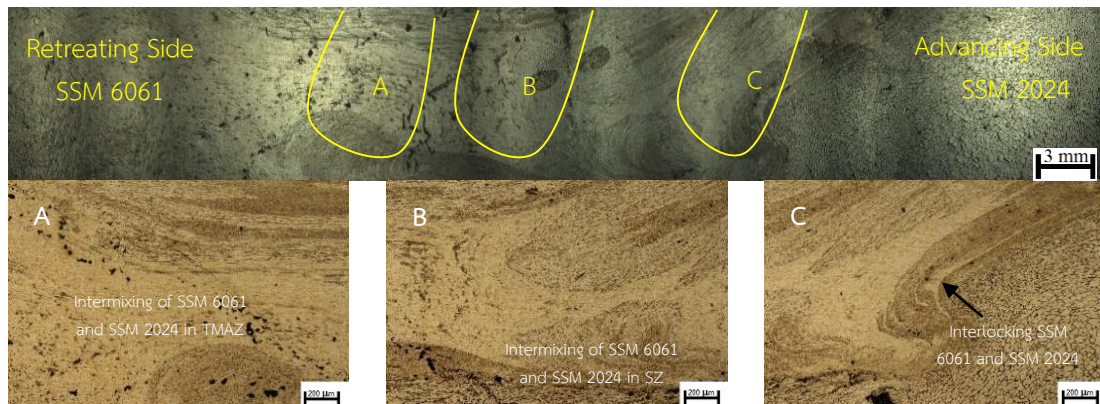
รูปที่ 9 ลักษณะโครงสร้างมหภาคและโครงสร้างจุลภาคของรอยเชื่อมที่ความเร็วหมุนเชื่อม 710 รอบต่อนาที

เมื่อพิจารณาปัจจัยเชื่อมด้านความเร็วเดินเชื่อม 40 80 และ 112 มิลลิเมตรต่อนาที ได้นำเสนอโครงสร้างพื้นที่บริเวณ A B

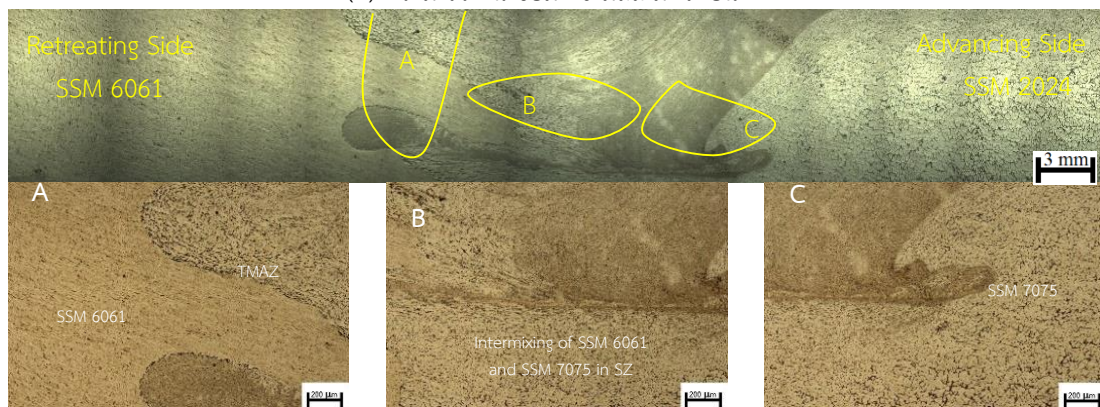
และ C จากรูปที่ 9 บริเวณพื้นที่ A และ B จะเป็นลักษณะของผิวรอยต่อของสองบริเวณ (Interface) คือ บริเวณ TMAZ กับ

บริเวณ BM และในรูปที่ 9(ค) ที่ความเร็วเดินเชื่อม 112 มิลลิเมตรต่อนาที สามารถเห็นการสลับเป็นชั้น ๆ ของเนื้อเกรน

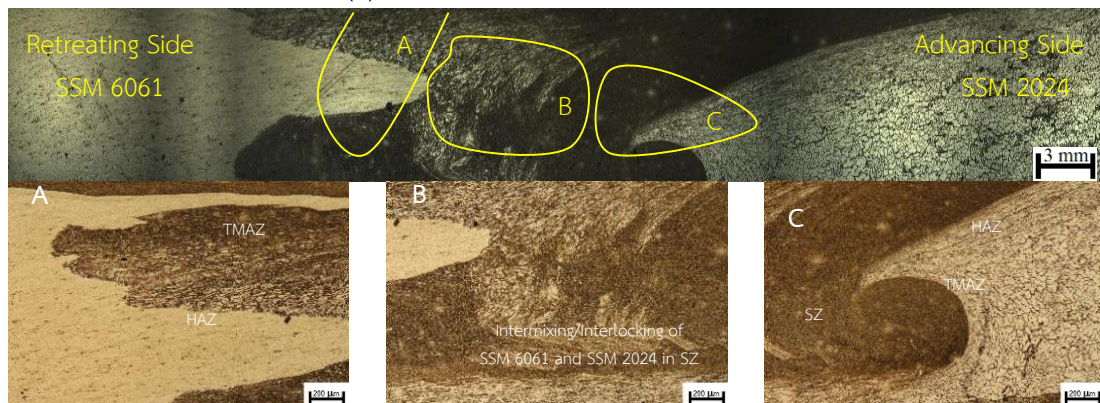
วัสดุทั้งสองได้อย่างชัดเจนซึ่งมีลักษณะคล้ายกับชั้นของหัวหอม (Onion Ring Pattern) (Chen & Cui, 2008)



(ก) ความเร็วเดินเชื่อม 40 มิลลิเมตรต่อนาที



(ข) ความเร็วเดินเชื่อม 80 มิลลิเมตรต่อนาที



(ค) ความเร็วเดินเชื่อม 112 มิลลิเมตรต่อนาที

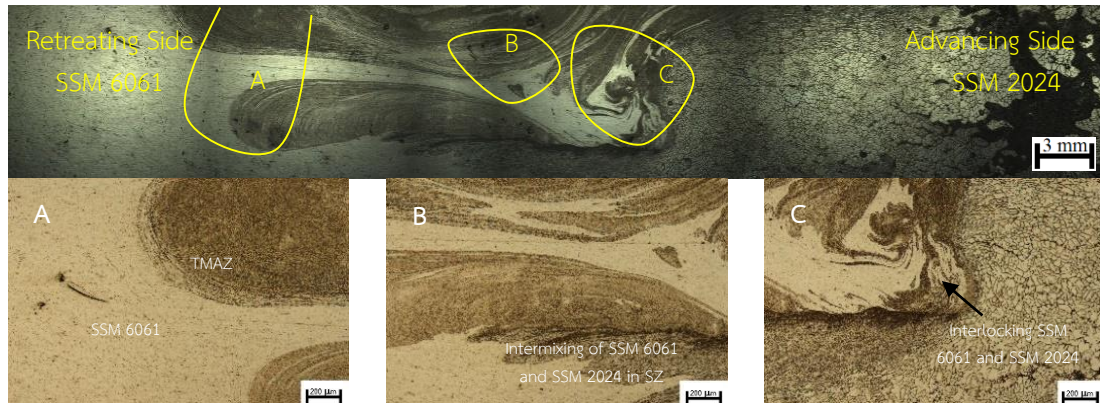
รูปที่ 10 ลักษณะโครงสร้างมหภาคและโครงสร้างจุลภาคของรอยเชื่อมที่ความเร็วหมุนเชื่อม 1000 รอบต่อนาที

ข้อสังเกตของรูปที่ 10 โครงสร้างพื้นที่บริเวณ A B และ C จากรูปที่ 10 อย่างที่เคยกล่าวถึงความกว้างของบริเวณ SZ มากขึ้นเมื่อเพิ่มความเร็วหมุนเชื่อมมากขึ้นบริเวณพื้นที่ A และ B จะเห็นได้ชัดขึ้น กล่าวคือ การขยายของบริเวณ SZ มีความกว้างมากขึ้นแผ่อิทธิพลไปยังบริเวณ TMAZ มากกว่าเดิม นอกจากนี้ที่

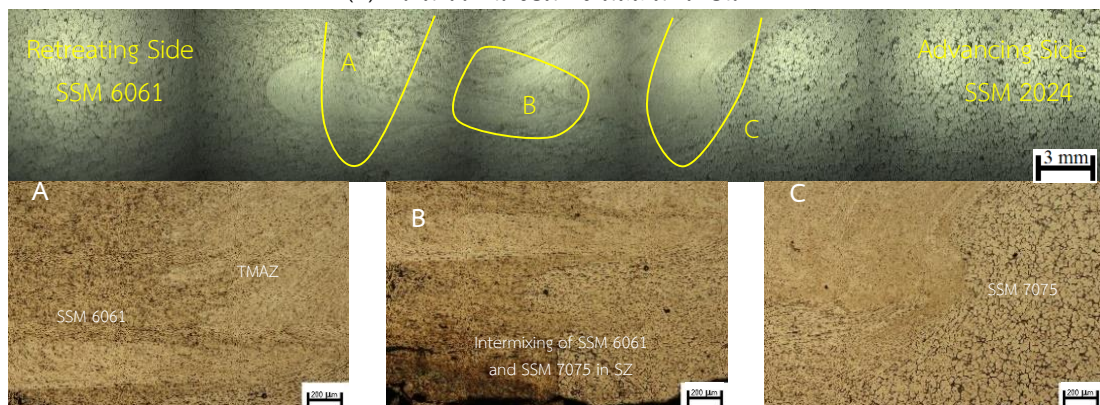
บริเวณพื้นที่ B ของทั้งรูปที่ 10(ก) – 10(ค) จะเห็นการผสมผสานของเนื้อโลหะอะลูมิเนียมทั้งสอง (Intermixing) เมื่อเทียบกับความเร็วหมุนเชื่อม 710 รอบต่อนาที มากขึ้นอีกด้วย และเป็นข้อสังเกตบริเวณพื้นที่ C เป็นลักษณะของผิวรอยต่อการเชื่อมต่อที่มีรูปทรงตะขอ (Interlocking) เป็นลักษณะที่เกรนเกิดการหมุนวน

ด้วยแรงบิดของเครื่องมือเชื่อมและเกิดการระบายความร้อนออกจากรอยเชื่อมอย่างรวดเร็ว ส่งผลทำให้เกิดการแปรรูปถาวร ซึ่งผลจากปรากฏการณ์ดังกล่าวทำให้สมบัติทางกลด้านค่าความต้านทานแรงดึงเพิ่มมากขึ้น สอดคล้องกันกับผลการวิจัย (Shen et al., 2005; Gonçalo et al., 2017) ที่พบว่าเกิด

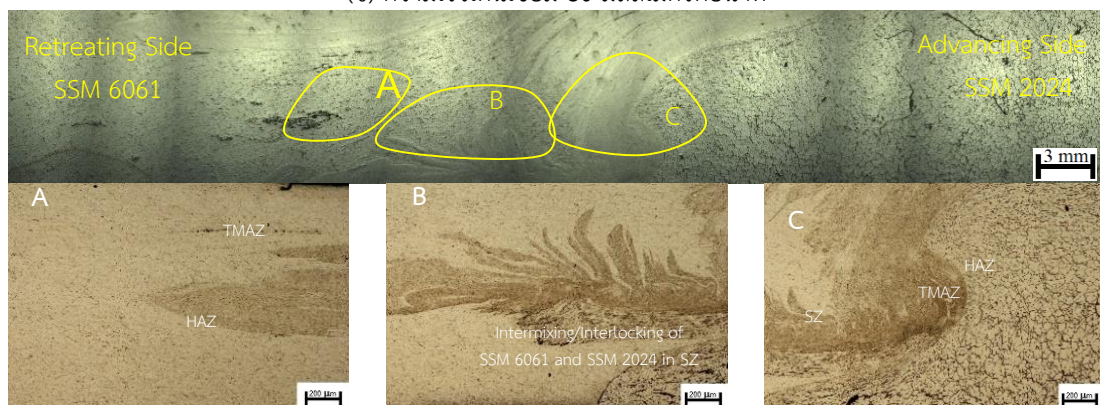
Interlocking สามารถเพิ่มค่าความต้านทานแรงดึงมากขึ้นไปด้วย เช่นเดียวกับกับงานวิจัยครั้งนี้ที่ความเร็วหมุนเชื่อม 1000 รอบต่อนาที ความเร็วเดินเชื่อม 112 มิลลิเมตรต่อนาที มีค่าความต้านทานแรงดึงมากที่สุดซึ่งมากที่สุดในการทดลองครั้งนี้ คือ 190.4 MPa



(ก) ความเร็วเดินเชื่อม 40 มิลลิเมตรต่อนาที



(ข) ความเร็วเดินเชื่อม 80 มิลลิเมตรต่อนาที



(ค) ความเร็วเดินเชื่อม 112 มิลลิเมตรต่อนาที

รูปที่ 11 ลักษณะโครงสร้างมหภาคและโครงสร้างจุลภาคของรอยเชื่อมที่ความเร็วหมุนเชื่อม 1400 รอบต่อนาที

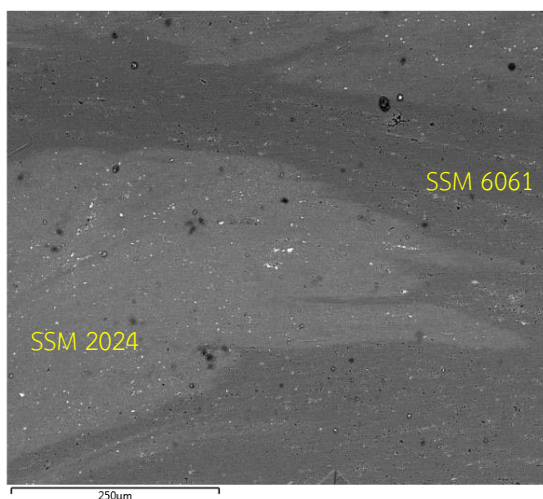
ส่วนข้อสังเกตของรูปที่ 11 โครงสร้างพื้นที่บริเวณ A B และ C จากรูปที่ 11 มีการขยายของบริเวณ SZ มีความกว้าง

มากที่สุด จะเห็นการผสมผสานของเนื้อโลหะอะลูมิเนียมทั้งสอง (Intermixing) ส่วนลักษณะของผิวรอยต่อการเชื่อมต่อนี้มี

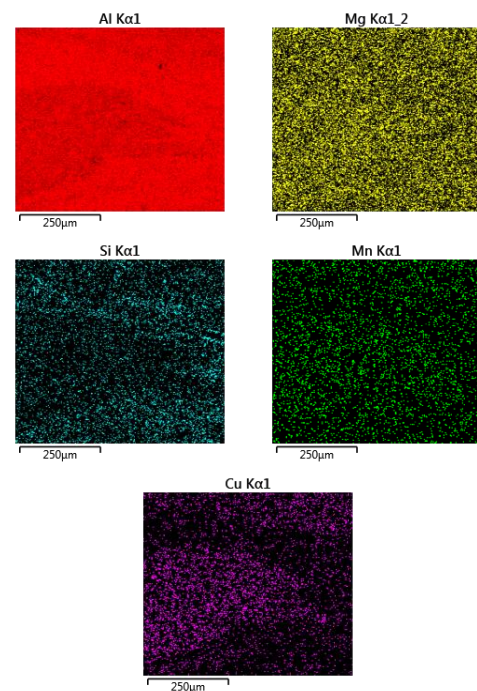
รูปทรงตะขอ (Interlocking) ในสภาวะความเร็วหมุนเชื่อมนี้จะไม่ค่อยเกิดขึ้นมากนัก อันเนื่องมาจากสาเหตุความเร็วหมุนเชื่อมที่เร็วเกินไป ทำให้ไม่เกิดความร้อนสะสมในรอยเชื่อมมากนัก ประกอบกับการระบายออกจากแนวเชื่อมที่ช้า ส่งผลให้เกรนเกิดการแปรรูปแบบไม่ถาวร ซึ่งผลจากปรากฏการณ์ดังกล่าวทำให้สมบัติทางกลด้านค่าความต้านทานแรงดึงที่ต่ำที่สุดซึ่งน้อยที่สุดในการทดลองครั้งนี้ คือ 127.2 MPa ที่ความเร็วหมุนเชื่อม 1000 รอบต่อนาที ความเร็วเดินเชื่อม 80 มิลลิเมตรต่อนาที

3.4 โครงสร้างจุลภาค Scanning Electron Microscope (SEM) ของรอยเชื่อม

โครงสร้างจุลภาคของรอยเชื่อมภาพถ่าย Scanning Electron Microscope (SEM) ของรอยเชื่อม ที่ความเร็วหมุนเชื่อมที่ 1,000 รอบต่อนาที และความเร็วเดินเชื่อม 112 มิลลิเมตรต่อนาที แสดงดังรูปที่ 12 พบว่าในบริเวณ SZ มีการประสานกันของวัสดุทั้งสองอย่างชัดเจนอันเนื่องมาจากอิทธิพลของปัจจัยการเชื่อมเสียดทาน และการวิเคราะห์โครงสร้างด้วยเครื่องวิเคราะห์ (Energy Dispersive X-ray Spectrometer : EDX) แบบ Mapping ของรอยเชื่อม แสดงดังรูปที่ 13 มีความสัมพันธ์กันของส่วนผสมทางเคมีของวัสดุทดลอง จะเห็นการกระจายตัวของธาตุซิลิกอน (Si) ในเนื้ออะลูมิเนียม SSM 6061 เห็นการกระจายตัวของธาตุทองแดง (Cu) ในเนื้ออะลูมิเนียม SSM 2024



รูปที่ 12 โครงสร้างจุลภาคของรอยเชื่อมภาพถ่าย Scanning Electron Microscope (SEM) ของรอยเชื่อม ที่ความเร็วหมุนเชื่อมที่ 1,000 รอบต่อนาที และความเร็วเดินเชื่อม 112 มิลลิเมตรต่อนาที



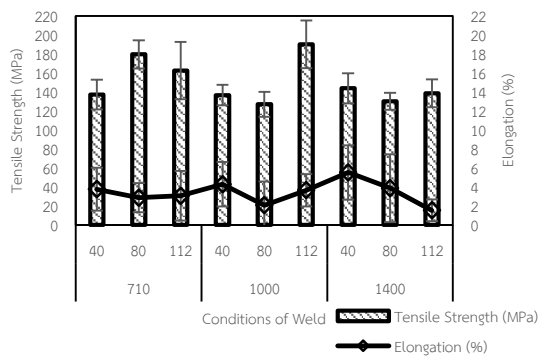
รูปที่ 13 การวิเคราะห์โครงสร้างด้วยเครื่องวิเคราะห์ EDX แบบ Mapping ของรอยเชื่อม

3.5 ค่าความต้านทานแรงดึงของรอยเชื่อม

ค่าความต้านทานแรงดึงของรอยเชื่อมอะลูมิเนียมผสมหล่อทิ้งของแข็ง 2024 กับ 6061 เป็นค่าเฉลี่ยของทั้งหมด 3 ชิ้น 12 ตัวอย่าง แสดงดังตารางที่ 3 และแสดงดังรูปที่ 14 แสดงค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุดของแต่ละปัจจัยการเชื่อม

ตารางที่ 3 ค่าความต้านทานแรงดึงรอยเชื่อม

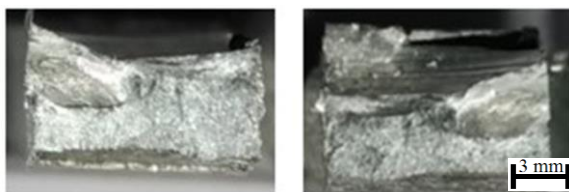
Rotation Speed (rpm)	Welding Speed (mm/min)	Tensile Strength (MPa)	Yield Strength (MPa)	Elongation (%)
710	40	137.4	114.3	3.8
	80	179.7	147.7	2.9
	112	162.6	129.7	3.1
1000	40	136.9	108.4	4.3
	80	127.2	107.7	2.1
	112	190.4	156.7	3.7
1400	40	144.1	119.7	5.5
	80	130.2	109.7	3.9
	112	138.7	94.1	1.5
Base SSM 2024		260.9	208.7	9.5
Base SSM 6061		164.0	131.2	3.9



รูปที่ 14 เปรียบเทียบค่าความต้านทานแรงดึงของรอยเชื่อม

วิเคราะห์ค่าความต้านทานแรงดึงของรอยเชื่อม กราฟค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุดของแต่ละสภาวะการเชื่อม เมื่อเปรียบเทียบการทดลอง แสดงดังรูปที่ 14 พบว่า ที่ความเร็วหมุนเชื่อม 1000 รอบต่อนาที ความเร็วเดินเชื่อม 112 มิลลิเมตรต่อนาที มีค่าความต้านทานแรงดึงมากที่สุดซึ่งมากที่สุดในการทดลองครั้งนี้ คือ 190.4 MPa เนื่องจากชิ้นงานนำมาเชื่อมด้วยตัวแปรที่เหมาะสม การหมุนวนของหัวพิน และการเดินกวนของแนวเชื่อมผสมเข้ากันได้ดี (Kanwer et al., 2010) ค่าความต้านทานแรงดึงต่ำที่สุดซึ่งน้อยที่สุดในการทดลองครั้งนี้ คือ 127.2 MPa ที่ความเร็วหมุนเชื่อม 1000 รอบต่อนาที ความเร็วเดินเชื่อม 80 มิลลิเมตรต่อนาที เนื่องจากจะทำให้เกิดความร้อนต่ำจากการหมุนของหัวพิน และการหมุนวนของเนื้ออะลูมิเนียมเคลื่อนตัวเข้ากันได้ไม่ดี ส่งผลให้ค่าความต้านทานแรงดึงต่ำที่สุด

นอกจากนี้ลักษณะรอยขาดของรอยเชื่อมในการทดสอบความต้านทานแรงดึง แสดงดังรูปที่ 15 ซึ่งได้ผลที่ได้จากการตรวจสอบในระดับโครงสร้างมหภาค พบว่า พื้นผิวแตกหักแสดงให้เห็นว่ามีรอยบวมและกระจายอย่างสม่ำเสมอทั่วทั้งพื้นผิวพร้อมกับบางส่วน และรอยขาดของรอยเชื่อมในการทดสอบความต้านทานแรงดึงส่วนใหญ่จะขาดที่บริเวณ SZ



รูปที่ 15 ลักษณะรอยขาดของแนวเชื่อมที่ความเร็วหมุนเชื่อม 1000 รอบต่อนาที ความเร็วเดินเชื่อม 112 มิลลิเมตรต่อนาที

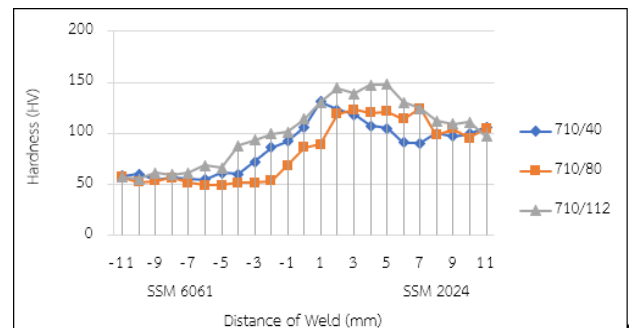
3.6 ค่าความแข็งของรอยเชื่อม

ค่าความแข็งรอยเชื่อมอะลูมิเนียมผสมหล่อกิ่งของแข็ง 2024 กับ 6061 เป็นค่าเฉลี่ยของทั้งหมดมีรายละเอียดดังนี้

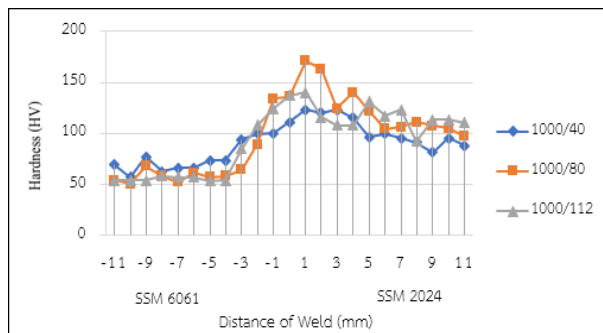
ค่าความแข็งของรอยเชื่อมที่ความเร็วหมุนเชื่อม 710 รอบต่อนาที ความเร็วเดินเชื่อม 40 80 และ 112 มิลลิเมตรต่อนาที แสดงดังรูปที่ 16 พบว่า ความแข็งของชิ้นทดสอบที่ความเร็วเดินเชื่อมที่ 112 มิลลิเมตรต่อนาที มีค่าความแข็งสูงสุดในบริเวณที่ถูกกวน (Stir Zone : SZ) ซึ่งมีความแข็งเท่ากับ 114 HV รองลงมาคือ ชิ้นทดสอบที่เชื่อมด้วยความเร็วเดินเชื่อมที่ 40 มิลลิเมตรต่อนาที มีความแข็งเท่ากับ 106 HV และชิ้นทดสอบที่เชื่อมด้วยความเร็วเดินแนวเชื่อมที่ 80 มิลลิเมตรต่อนาที มีความแข็งน้อยสุดเท่ากับ 86 HV

ค่าความแข็งของรอยเชื่อมที่ความเร็วหมุนเชื่อม 1,000 รอบต่อนาที ความเร็วเดินเชื่อม 40 80 และ 112 มิลลิเมตรต่อนาที แสดงดังรูปที่ 17 พบว่า ความแข็งของชิ้นทดสอบที่ความเร็วเดินเชื่อม 112 มิลลิเมตรต่อนาที มีค่าความแข็งสูงสุดในบริเวณที่ถูกกวน (Stir Zone : SZ) ซึ่งมีความแข็งเท่ากับ 137 HV รองลงมาคือ ชิ้นทดสอบที่เชื่อมด้วยความเร็วเดินเชื่อม 80 มิลลิเมตรต่อนาที มีความแข็งเท่ากับ 136 HV และชิ้นทดสอบที่เชื่อมด้วยความเร็วเดินเชื่อม 40 มิลลิเมตรต่อนาที มีความแข็งน้อยสุดเท่ากับ 111 HV

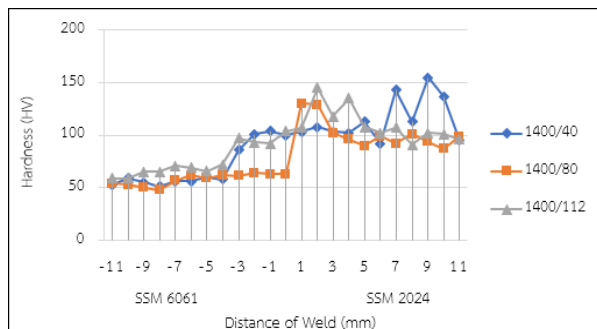
ค่าความแข็งของรอยเชื่อมที่ความเร็วหมุนเชื่อม 1,400 รอบต่อนาที ความเร็วเดินเชื่อม 40 80 และ 112 มิลลิเมตรต่อนาที แสดงดังรูปที่ 18 พบว่า ความแข็งของชิ้นทดสอบที่ความเร็วเดินเชื่อมที่ 112 มิลลิเมตรต่อนาที มีค่าความแข็งสูงสุดในบริเวณที่ถูกกวน (Stir Zone : SZ) ซึ่งมีความแข็งเท่ากับ 112 HV รองลงมาคือ ชิ้นทดสอบที่เชื่อมด้วยความเร็วเดินเชื่อม 40 มิลลิเมตรต่อนาที มีความแข็งเท่ากับ 100 HV และชิ้นทดสอบที่เชื่อมด้วยความเร็วเดินเชื่อม 80 มิลลิเมตรต่อนาที มีความแข็งน้อยสุดเท่ากับ 63 HV



รูปที่ 16 ค่าความแข็งรอยเชื่อมที่ความเร็วหมุนเชื่อม 710 รอบต่อนาที



รูปที่ 17 ค่าความแข็งรอยเชื่อมที่ความเร็วหมุนเชื่อม 1,000 รอบต่อนาที



รูปที่ 18 ค่าความแข็งรอยเชื่อมที่ความเร็วหมุนเชื่อม 1,400 รอบต่อนาที

รูปแบบของค่าความแข็งสำหรับรอยเชื่อม คือ มีจุดเริ่มต้นจากค่าความแข็งของเนื้อโลหะเดิมในวัสดุอะลูมิเนียมหล่อทั้งของแข็ง 6061 จากนั้นเริ่มเพิ่มมากขึ้นเมื่อเข้าสู่บริเวณ TMAZ และมีค่าความแข็งสูงสุดในบริเวณ SZ และเริ่มลดลงเมื่อเข้าสู่บริเวณ TMAZ ของเนื้อโลหะเดิมในวัสดุอะลูมิเนียมหล่อทั้งของแข็ง 2024 และลดลงเมื่อเข้าสู่ค่าความแข็งของเนื้อโลหะเดิมวัสดุอะลูมิเนียมหล่อทั้งของแข็ง 2024 ในกรณีเดียวกันนี้มีผลคล้ายกันกับ (Caroline et al., 2013) เนื่องจากบริเวณ SZ มีอุณหภูมิสูงพอที่จะทำให้เกิดการตกตะกอนของเกรนละลายและผสมอยู่ในเนื้อวัสดุหลังจากเนื้อวัสดุเย็นตัวลงถึงอุณหภูมิห้อง ปรากฏการณ์เช่นนี้จะเพิ่มค่าความแข็งได้

นอกจากนี้ข้อสังเกตอีกประการซึ่งสอดคล้องกับผลด้านโครงสร้างจุลภาค พบว่า เกรนในบริเวณ TMAZ มีลักษณะที่ละเอียดเพิ่มมากขึ้นซึ่งย่อมส่งผลต่อสมบัติทางกลค่าความแข็งเพิ่มขึ้น และในบริเวณ SZ มีความละเอียดมากกว่าเนื้อโลหะเดิมตามขึ้นไป อันเนื่องมาจากความร้อนที่เกิดจากการเสียดทานระหว่างวัสดุทดลองกับเครื่องมือที่บริเวณที่ปากกวนแผ่อิทธิพลของผลกระทบอันเนื่องมาจากความร้อนทางกลอย่างเห็นได้ชัด (Hasan et al., 2019)

4. สรุป

ลักษณะผิวหน้าด้านบนของรอยเชื่อม ที่ความเร็วหมุนเชื่อมสูงจะเกิดครีบมากกว่าที่ความเร็วหมุนเชื่อมต่ำ

โครงสร้างมหภาคของรอยเชื่อมที่ใช้ความเร็วหมุนเชื่อมสูงมีลักษณะรอยเชื่อมที่กว้างกว่ารอยเชื่อมที่ใช้ความเร็วหมุนเชื่อมต่ำ

โครงสร้างจุลภาคของรอยเชื่อมที่ความเร็วหมุนเชื่อมต่ำมีความกว้างของบริเวณ SZ น้อยกว่าที่ความเร็วหมุนเชื่อมสูง

ค่าความต้านทานแรงดึงมากที่สุด คือ 190.4 MPa ที่ความเร็วหมุนเชื่อม 1000 รอบต่อนาที ความเร็วเดินเชื่อม 112 มิลลิเมตรต่อนาที และค่าความต้านทานแรงดึงน้อยที่สุด คือ 127.2 MPa ที่ความเร็วหมุนเชื่อม 1000 รอบต่อนาที ความเร็วเดินเชื่อม 80 มิลลิเมตรต่อนาที

ค่าความแข็งมากที่สุด คือ ความเร็วหมุนเชื่อมที่ 1000 รอบต่อนาที ความเร็วเดินเชื่อมที่ 112 มิลลิเมตรต่อนาที ที่บริเวณ SZ เท่ากับ 137 HV

5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนงบประมาณ ประจำปี 2562 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย

6. เอกสารอ้างอิง

- Ali, A., Brown, M. W., Rodopoulos, C. A., & Gardiner, S. (2006). Characterization of 2024-T351 friction stir welding joints. *Journal of Failure Analysis and Prevention*, 6, 83-96.
- Amancio-Filho, S. T., Sheikhi, S., Dos Santos, J. F., & Bolfarini, C. (2008). Preliminary study on the microstructure and mechanical properties of dissimilar friction stir welds in aircraft aluminium alloys 2024-T351 and 6056-T4. *Journal of Materials Processing Technology*, 206, 132-142.
- Amancio-Filho, S.T., Sheikhi, S., Dos Santos, J.F., & Bolfarini, C. (2008). Preliminary study on the microstructure and mechanical properties of dissimilar friction stir welds in aircraft aluminium alloys 2024-T351 and 6056-T4. *Journal of Materials Processing Technology*, 206, 132-142.
- Babu, S., Janaki Ram, G.D., Venkitakrishnan, P.V., Madhusudhan Reddy, G. & Prasad Rao, K. (2011). Microstructure and Mechanical Properties of Friction Stir Lap Welded Aluminum Alloy AA2014. *Journal of Materials Processing Technology*, 28, 414-426.

- Boonchouytan, W., Cheewawuttipong, W., & Burapa, R. (2017). Microstructural Behavior and Mechanical Properties of Friction Stir Spot Welding of Dissimilar Aluminum Semi Solid Casting Sheets SSM2024 and SSM6061. *Srinakharinwirot Engineering Journal*, 12(2), 130-142.
- Booth, D. P. P., Starink, M. J., & Sinclair, I. (2007). Analysis of local microstructure and hardness of 13 mm gauge 2024-T351 AA friction stir welds. *Materials Science and Technology*, 23, 276-284.
- Caroline, J., Bruno de, M., Anne, D. & Aude, S. (2013). Torque, temperature and hardening precipitation evolution in dissimilar friction stir welds between 6061-T6 and 2014-T6 aluminum alloys. *Journal of Materials Processing Technology*, 213, 826-837.
- Chen, Z. W., & Cui, S. (2008). On the forming mechanism of banded structures in aluminium alloy friction stir welds. *Scripta Materialia*, 58, 417- 420.
- Ericsson, M. & Sandström, R. (2003). Influence of welding speed on the fatigue of friction stir welds, and comparison with MIG and TIG. *International Journal of Fatigue*, 25, 1379-1387.
- Golestaneh, A.F., Aidy, A., & Zadeh, M. (2009). Modeling the fatigue crack growth in friction stir welded joint of 2024-T351 Al alloy. *Materials and Design*, 30, 2928-2937.
- Gonçalo, S., Hao, W., Pedro, V., & Telmo, G.S. (2017). FSW of aluminum AA5754 to steel DX54 with innovative overlap joint. *Weld World*, 61, 257-268.
- Hasan, J., Hadi, M., & Mohammad, H. (2019). Investigation of residual stress distribution of dissimilar Al-7075-T6 and Al-6061-T6 in the friction stir welding process strengthened with SiO₂ nanoparticles. *Journal of Manufacturing Processes*, 43, 145-153.
- Heidarzadeh, A., Khodaverdizadeh, H., Mahmoudi, A., & Nazari, E. (2012). Tensile behavior of friction stir welded AA 6061-T4 aluminum alloy joints. *Materials and Design*, 37, 166-173.
- Kanwer, S., Arora, S. P., Michael, S., & Rajneesh, K. (2010). Effect of process parameters on friction stir welding of aluminum alloy 2219- T87. *International Journal of Advanced Manufacture Technology*, 50, 941-952.
- Krishnan, K. N. (2002). On the formation of onion rings in friction stir welds. *Materials Science and Engineering A*, 327, 246-251.
- Lockwood, W.D., Tomaz, B. & Reynolds, A.P. (2002). Mechanical response of friction stir welded AA 2024: Experiment and modelling. *Materials Science and Engineering A*, 323, 348-353.
- Sadeesh, P., Venkatesh, K. M., Rajkumar, V., Avinash, P., Arivazhagan, N., Devendranath, Ramkumar K. & Narayanan, S. (2014). Studies on friction stir welding of AA 2024 and AA 6061 dissimilar metals. *Procedia Engineering*, 75, 145-149.
- Shen, Z., Chen, Y., Haghshenas, M., & Gerlich, A. P. (2015). Role of welding parameters on interfacial bonding in dissimilar steel/aluminum friction stir welds. *Engineering Science and Technology, an International Journal*, 18, 270-277.
- Shusheng, D., Xinqi, Y., Guohong, L., & Bo, J. (2006). Comparative study on fatigue properties between AA2024-T4 friction stir welds and base materials. *Materials Science and Engineering A*, 435-436, 389-395.
- Ying, L., Murr, L.E., & Mc Clure, J.C. (1999). Flow visualization and residual microstructures associated with the friction-stir welding of 2024 aluminum to 6061 aluminum. *Materials Science and Engineering: A*, 271, 213-223.
- Zhang, Z., Xiao, B. L., & Ma, Z. Y. (2012). Effect of welding parameters on microstructure and mechanical properties of friction stir welded 2219Al- T6 joints. *Journal of Materials Science*, 47, 4075-4086.

8. ชีวประวัติ



ผู้ช่วยศาสตราจารย์ วรพงศ์ บุญช่วยแทน
ผู้รับผิดชอบ
หลักสูตรสาขาวิชาวิศวกรรมการผลิต
สาขาวิศวกรรมอุตสาหกรรม
คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย



อาจารย์รอมฎอน บุระพา
อาจารย์ผู้สอน
หลักสูตรสาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม
สาขาวิศวกรรมอุตสาหกรรม
คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย



ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วรรณพร ชีววุฒิ
พงศ์
ผู้รับผิดชอบ
หลักสูตรสาขาวิชาวิศวกรรมการผลิต
สาขาวิศวกรรมอุตสาหกรรม
คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย