

ผลของรูปทรงเครื่องมือเชื่อมต่อการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาคและสมบัติทางกลของการเชื่อมเสียดทานแบบกวนใต้น้ำของอลูมิเนียมผสม AA 5083

Effect of stir welding tool geometry on microstructure transformation and mechanical properties of submerged friction of AA 5083 aluminum alloy

วิทยา สิริคุณ^{1*}, ยงยุทธ ดุลยกุล², เดช เหมือนขาว³
Witthaya Sririkun^{1*}, Yongyuth Dunyakul², Dech Maunkhaw³

Received: 8 February 2021 ; Revised: 29 May 2021 ; Accepted: 9 June 2021

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษารูปแบบเครื่องมือเชื่อม 3 แบบ ได้แก่ เครื่องมือเชื่อมรูปทรงกระบอก เครื่องมือเชื่อมรูปทรงสามเหลี่ยมและเครื่องมือเชื่อมรูปทรงสี่เหลี่ยมจากการเชื่อมเสียดทานแบบกวนใต้น้ำ เกรด AA 5083 ของอลูมิเนียมผสมต่อสมบัติทางกลและโครงสร้างทางโลหะวิทยา โดยมีตัวแปรในการวิจัยนี้ คือ ความเร็วหมุนเชื่อม 1000 1400 และ 2000 รอบต่อนาที และความเร็วเดินเชื่อม 80 112 และ 160 มิลลิเมตรต่อนาที ตามลำดับ ผลการทดลองพบว่าเครื่องมือเชื่อมรูปทรงกระบอกที่ความเร็วหมุนเชื่อม 2000 รอบต่อนาที และความเร็วเดินเชื่อม 112 มิลลิเมตรต่อนาที ให้ค่าความต้านทานแรงดึงเฉลี่ยสูงสุด คือ 101.23 MPa ประสิทธิภาพรอยต่อ 37.08 เปอร์เซ็นต์ ในขณะที่เครื่องมือเชื่อมรูปทรงสี่เหลี่ยมที่ความเร็วหมุนเชื่อม 1400 รอบต่อนาที และความเร็วเดินเชื่อม 160 มิลลิเมตร มีค่าเฉลี่ยค่าความต้านทานแรงดึงต่ำสุด คือ 76.54 MPa บริเวณรอยกวนมีค่าความแข็งเฉลี่ย 44 HV_{0.1} จากเครื่องมือเชื่อมรูปทรงกระบอก โครงสร้างจุลภาคที่ก่อตัวในรูปของสารประกอบ Mg₂Si และ Al₆(Mn, Fe) ถูกแรงทางกลและความร้อนกระทำส่งผลให้อนุภาคเล็กลงและเปลี่ยนรูปร่างเฟสเป็นสารประกอบ Al₃Fe และเฟส Al(Fe)Si นอกจากนี้พบการเกิดจุดบกพร่องบริเวณรอยเชื่อมของเครื่องมือเชื่อมรูปทรงกระบอก เกิดรอยแตกขนาดเล็กด้านล่างรอยเชื่อมในทำนองเดียวกันเครื่องมือเชื่อมรูปทรงสามเหลี่ยมและสี่เหลี่ยมเกิดรอยแตกด้านล่างรอยเชื่อม แต่มีขนาดที่โตขึ้น และเครื่องมือเชื่อมรูปทรงสามเหลี่ยมพบช่องว่างบริเวณที่ได้รับอิทธิพลทางความร้อนด้าน retreating ในขณะที่เครื่องมือเชื่อมรูปทรงสี่เหลี่ยมพบแนวรอยลากกวนที่ไม่ยึดติดกันกลางรอยเชื่อม

คำสำคัญ: การเชื่อมเสียดทานแบบกวนใต้น้ำ อลูมิเนียมผสม เกรด AA 5083 รูปทรงเครื่องมือเชื่อม โครงสร้างจุลภาค สมบัติทางกล

Abstract

The objectives of this research were to study the effect of tool geometries ; a cylindrical tool pin, a triangular tool pin, and a square tool pin on mechanical properties and metallurgical structures of AA 5083 aluminum alloy using submerged friction stir welding. The parameters of this research were the rotation speed of 1000, 1400 and 2000 rpm and the welding speed of 80, 112 and 160 mm/min, respectively. The results showed that the cylindrical tool pin at the rotation speed of 2000 rpm and welding speed of 112 mm/min provided the highest tensile strength at 101.23 MPa, and joint efficiency at 37.08 percent. While the rotation speed of 1400 rpm and the welding speed of 160 mm/min from the square tool pin had the average minimum tensile strength at 76.54 MPa. At the stirring zone, the average hardness was 44 HV_{0.1} from the cylindrical tool pin. The microstructures, formed as Mg₂Si and Al₆(Mn, Fe) compounds, were subjected to mechanical and thermal forces, resulting in smaller particles and phase shaping to

¹ อาจารย์, คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัยสงขลา จังหวัดสงขลา 90000

² ผู้ช่วยศาสตราจารย์, คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัยสงขลา จังหวัดสงขลา 90000

³ รองศาสตราจารย์, คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัยสงขลา จังหวัดสงขลา 90000

¹ Lecture, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Srivijaya, Songkhla, 90000

² Assist. Prof., Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Srivijaya, Songkhla, 90000

³ Assoc. Prof., Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Srivijaya, Songkhla, 90000

* Corresponding author ; Witthaya.s@rmutsv.ac.th

Al₃Fe compounds and Al(Fe)Si phases. In addition, for welding area of a cylindrical tool pin, small cracks in the bottom of the weld were found. Likewise, in triangular and square tool pins, large cracks were found below the weld. It was also shown that gaps were in the triangular tool pin in the retreating heat-affected zone while non-stick lines were found in the square tool pin in the middle of the weld.

Keywords: Submerged friction stir welding, AA 5083 aluminum alloy, Tool geometry, Microstructure, Mechanical properties.

บทนำ

ช่วงเวลา 10 ปีที่ผ่านมา การเชื่อมเสียดทานแบบกวน (Friction Stir Welding: FSW) เป็นนวัตกรรมการเชื่อมใหม่ที่ถูกนำมาใช้งานอย่างแพร่หลาย ซึ่งวิธีการเชื่อมเสียดทานแบบกวนถูกค้นพบที่สถาบันการเชื่อมประเทศอังกฤษ (The Welding Institute ; UK) ในปี ค.ศ.1991(Ma *et al.*, 2018) การเชื่อมเสียดทานแบบกวนเป็นวิธีการเชื่อมในสถานะของแข็ง (Solid State Welding) ที่มีกลไกการยึดติดของชิ้นงานด้วยการกวนให้เนื้อวัสดุเชื่อมประสานเข้าด้วยกันและสร้างความร้อนในขณะที่เชื่อมด้วยการเสียดทานระหว่างผิววัสดุเชื่อม กับผิวของปากเครื่องมือเชื่อม ความร้อนในขณะที่เชื่อมเป็นปัจจัยที่สำคัญ เนื่องจากส่งผลต่อการอ่อนตัวของเนื้อวัสดุ จนนำไปสู่การยึดติดกันของชิ้นงานหลังการเชื่อมที่มีความสมบูรณ์ที่แตกต่างกัน (Luo *et al.*, 2016) โดยทั่วไปการเชื่อมเสียดทานแบบกวนเกิดความร้อนในช่วงอุณหภูมิ 0.5-0.8 เท่าของจุดหลอมเหลว (Kumar *et al.*, 2019) อย่างไรก็ตามการเชื่อมเสียดทานแบบกวนมีความจำเป็นต้องมีการเชื่อมในสภาวะชิ้นงานกำลังอยู่ในสภาวะใช้งานหรือชิ้นงานเชื่อมอยู่ในสภาวะได้นำ ซึ่งเป็นความยากและถือได้ว่าเป็นความท้าทาย เนื่องจากกลไกการสร้างความร้อนทำได้ยาก เกิดการสูญเสียความร้อน จากการพาความร้อนของน้ำ นำไปสู่การเกิดข้อบกพร่องบริเวณรอยเชื่อม ของชิ้นงานจากการเชื่อมเสียดทานแบบกวน (Podržaj & Klobcar *et al.*, 2015) ปัจจุบันจึงมีหลายงานวิจัยได้ศึกษาปัจจัยสำหรับการเชื่อมเสียดทานแบบกวนได้นำ (Eyvazian *et al.*, 2020 ; Derazkola *et al.*, 2020) ที่ส่งผลต่อสมบัติทางกล สมบัติทางความร้อนและโครงสร้างจุลภาคอย่างต่อเนื่อง ซึ่งตัวแปรที่เหมาะสมสำหรับการเชื่อมเสียดทานแบบกวนได้นำจะนำไปสู่การลดข้อผิดพลาดหลังการเชื่อม ปัจจัยที่สำคัญในการเชื่อมเสียดทานแบบกวนได้นำ เช่น ความเร็วหมุนเชื่อม (Rotation Speed) ความเร็วเดินเชื่อม (Travel Speed) ทิศทางการหมุนเชื่อม (Direction of Welding) แรงกด (Compressive Force) หรือระยะกดลึก (Depth of Plug) มุมเอียงเชื่อม (Tilt Angle) และน้ำ (Tan *et al.*, 2017) เพราะตัวแปรเหล่านี้ส่งผลต่อการเกิดความร้อนในขณะที่เชื่อม อย่างไรก็ตามรูปทรงเครื่องมือเชื่อมก็มีความสำคัญสำหรับการเชื่อมเสียดทานแบบกวนได้นำซึ่งเป็นอีกปัจจัยที่ส่งผลต่อการเกิดความร้อน

(Zhang, H & Liu, H., 2013) โดยรูปทรงเครื่องมือเชื่อมที่เหมาะสมสามารถสร้างความสัมพันธ์ของความร้อนที่ดีระหว่างผิวงานเชื่อมกับผิวของเครื่องมือเชื่อมได้ นำไปสู่การยึดติดของชิ้นงานหลังการเชื่อมที่ดี ในทางตรงกันข้ามรูปทรงเครื่องมือเชื่อมที่ไม่เหมาะสมสำหรับการเชื่อมเสียดทานแบบกวนได้นำจะส่งผลให้เกิดการเสียหายของเครื่องมือเชื่อมด้วย ดังนั้นรูปทรงเครื่องมือเชื่อมจึงมีความน่าสนใจและถูกศึกษาวิจัยในงานวิจัยนี้ ปัจจุบันอลูมิเนียมผสมแมกเนต AA 5083 ถูกใช้งานในอุตสาหกรรมผลิตเรือ (Jebaraj *et al.*, 2020) เนื่องจากน้ำหนักเบา มีความสามารถทนการกัดกร่อนสูง (Ramesh & Kumar, 2020) ซึ่งประกอบกับอุตสาหกรรมผลิตเรือมักจะใช้วิธีการเชื่อมเสียดทานแบบกวนในการเชื่อมประกอบชิ้นรูปชิ้นส่วนเรือหรือวิธีการเชื่อมเสียดทานแบบกวนได้นำสำหรับการเชื่อมซ่อมเรืออยู่แล้ว การเชื่อมเสียดทานแบบกวนได้นำเป็นวิธีการเชื่อมที่ยาก เนื่องจากเกิดความร้อนแบบไม่สมดุล Chander and Kumar (2019) ได้อธิบายว่าเครื่องมือกวนส่งผลต่อความต้านทานแรงดึงและโครงสร้างจุลภาค ดังนั้นการศึกษารูปทรงเครื่องมือเชื่อมจึงมีความสำคัญ ในขณะที่ Tan *et al.* (2017b) อธิบายว่าสารละลายของแข็งที่อยู่ในเฟสยูเทคติกจะตะกอนได้ยาก เพราะอุณหภูมิของน้ำและการเกิดออกไซด์ที่ผิวของอะลูมิเนียมจะนำไปสู่ความซับซ้อนในการเชื่อม จากการศึกษาแสดงให้เห็นว่ามีความน่าสนใจในการศึกษาวิจัยนี้

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงสนใจศึกษารูปทรงเครื่องมือเชื่อมและตัวแปรอื่นๆ ของการเชื่อมอลูมิเนียมผสมแมกเนต AA 5083 ด้วยวิธีการเชื่อมเสียดทานแบบกวนได้นำที่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาคของสารละลายของแข็งเฟส Mg₂Si กับ Al₆(Mn, Fe) ซึ่งเฟส Mg₂Si กับ Al₆(Mn, Fe) เป็นเฟสยูเทคติกเกิดการเปลี่ยนแปลงแบบไม่ปกติในสภาวะการเชื่อมได้นำ สารละลายของแข็งเฟส Mg₂Si และ Al₆(Mn, Fe) จะส่งผลต่อสมบัติทางกลของชิ้นงานหลังการเชื่อมเสียดทานแบบกวนได้นำ ผลการทดลองที่ได้จะประเมินความสัมพันธ์ของสมบัติทางกล โครงสร้างจุลภาคกับรูปทรงเครื่องมือเชื่อมที่แตกต่างกัน ด้วยการศึกษาวิเคราะห์ความต้านทานแรงดึง แรงดัดโค้ง ความแข็งแรงการตรวจสอบโครงสร้างมหภาค โครงสร้างจุลภาคและการกระจายตัวของสารละลายของแข็ง

ด้วยกล้องจุลทรรศน์ กล้องอิเล็กตรอนแบบส่องกราด ซึ่งผลการประเมินที่ได้จะนำเสนอต่อไป

วัตถุประสงค์การวิจัย

เพื่อศึกษารูปร่างเครื่องมือเชื่อม ความเร็วหมุนเชื่อม ความเร็วเดินเชื่อมที่แตกต่างกันของการเชื่อมอลูมิเนียมผสม เกรด AA 5083 ด้วยกรรมวิธีการเชื่อมเสียดทานแบบกวนได้นำที่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาคบริเวณรอยเชื่อมและสมบัติทางกลหลังการเชื่อม

ระเบียบวิธีวิจัย

อลูมิเนียมผสม AA 5083

อลูมิเนียมผสม เกรด AA 5083 เป็นวัสดุที่ใช้ในการทดลอง ชิ้นงานถูกเตรียมให้เป็นรูปทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาด 75x150x6 มิลลิเมตร ตามลำดับ (กว้างxยาวxสูง) โดยมีแมกนีเซียมเป็นธาตุผสมหลักและมีธาตุอื่นๆ เป็นธาตุผสมรอง ได้แก่ แมงกานีส เหล็ก ซิลิกอน สังกะสีและโครเมียมตามลำดับ โครงสร้างจุลภาคประกอบด้วยเฟสยูเทคติก (β -Eutectic Phase) รวมตัวเป็นสารละลายของแข็ง Mg_2Si กับ Al (Mn, Fe) แทรกตัวระหว่างขอบเกรนของเฟสเนื้อพื้นแอลฟา (α) อลูมิเนียมผสม เกรด AA 5083 มีจุดหลอมเหลวที่อุณหภูมิ 591-631 องศาเซลเซียส (Engler, O & Miller-Jupp, S., 2016) ส่วนผสมทางเคมีและสมบัติทางกล ดังแสดงใน Table 1

Table 1 Chemical compositions and mechanical properties of AA 5083 aluminum alloy

Materials	Element (Wt %)			
	Mg	Si	Mn	Fe
AA 5083	4.15	0.13	0.73	0.31
	Cu	Al		
	0.025	Bal.		
Tensile Strength (MPa)	Elongation (%)		Hardness (HV)	
270-350	12		70	

เหล็กเครื่องมือ H13

เหล็กเครื่องมือเกรด H13 ตามมาตรฐาน DIN ISO 4957 เป็นเหล็กกล้าคาร์บอนสูง ใช้สำหรับการผลิตเป็นเครื่องมือเชื่อม ซึ่งมีส่วนผสมทางเคมีของโครเมียม โมลิบดีนัมและวานาเดียม จึงทนต่อการ สึกหรือที่อุณหภูมิสูง นำไปสู่การใช้งานที่อุณหภูมิสูงได้ดี ซึ่งสอดคล้องกับการใช้งานของเครื่องมือ

กวนเชื่อมที่มีการเชื่อมในขณะอุณหภูมิเชื่อมสูง นอกจากนั้นยังมีสมบัติด้านการต้านทานการกัดกร่อนที่ดี ดังแสดงใน Table 2

Table 2 Chemical compositions and mechanical properties of H13 tool steel (Jungsub et al., 2019)

Materials	Element (Wt %)		
	C	Mn	Si
H13	0.51	0.42	1.26
	Cr	Mo	V
	5.50	1.52	1.00
Tensile Strength (MPa)	Elongation (%)	Hardness (HRC)	
1200-1590	9	240	

วิธีการทดลอง

การเตรียมเครื่องมือเชื่อม

เครื่องมือเชื่อมสำหรับการเชื่อมเสียดทานแบบกวนได้นำถูกออกแบบให้หัวกวนมีลักษณะที่แตกต่างกัน 3 แบบ คือ รูปทรงกระบอก (Cylinder Pin) รูปทรงสามเหลี่ยม (Triangle Pin) และรูปทรงสี่เหลี่ยม (Square Pin) ตามลำดับ บ่าของเครื่องมือเชื่อม (Shoulder) มีขนาด 20 มิลลิเมตร ความลึกของหัวกวน 4.8 มิลลิเมตร และความยาวเครื่องมือเชื่อมรวม 120 มิลลิเมตร ซึ่งจะมีขนาดเท่ากันทุกเครื่องมือเชื่อม อย่างไรก็ตาม ขนาดความโตของหัวกวนจะไม่แตกต่างกัน โดยหัวกวนแต่ละแบบมีขนาด 5 มิลลิเมตร สอดคล้องกับงานวิจัย Khan et al. (2015) ที่นำเสนอความสัมพันธ์ของการเกิดความร้อนที่เหมาะสม ประเมินจากอัตราส่วนความโตของบ่าต้องมากกว่าขนาดหัวกวนไม่น้อยกว่า 3 เท่า ดังแสดงใน Figure 1

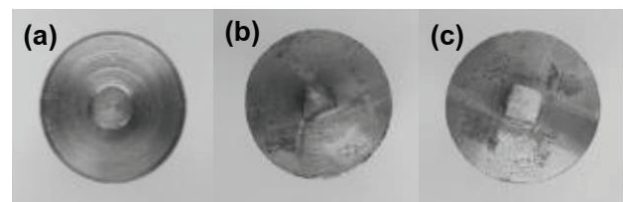


Figure 1 Characteristics of different welding tool pin.

(a) Cylinder, (b) Triangle and (c) Square

การเชื่อมเสียดทานแบบกวนได้นำ

การเชื่อมเสียดทานแบบกวนได้นำของอลูมิเนียมผสม เกรด AA 5083 จะออกแบบชุดจำลองชิ้นงานให้อยู่ได้นำ โดยผลิตจากเหล็กกล้าไร้สนิม เกรด SUS 304 และผนังกั้นนำขึ้นรูปด้วยอะคริลิก ชุดจำลองชิ้นงานได้นำเป็นรูปทรง

ลูกบาศก์สี่เหลี่ยมผืนผ้า ขนาดความกว้าง 220 มิลลิเมตร ขนาดความยาว 350 มิลลิเมตร และขนาดความสูง 150 มิลลิเมตร ดังแสดงใน Figure 2

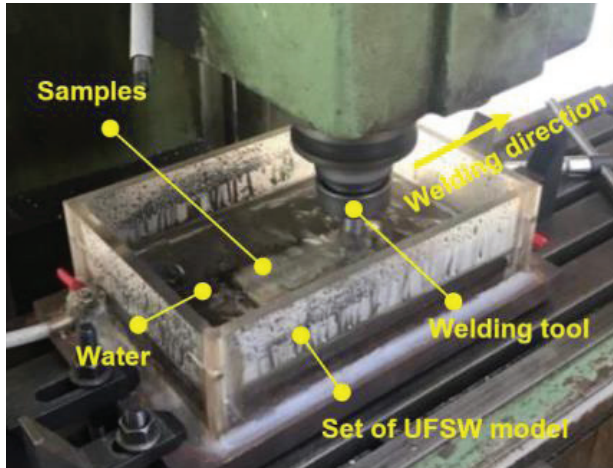


Figure 2 Submerged friction stir welding process

สำหรับขั้นตอนการเชื่อมเสียดทานแบบกวนใต้น้ำ เริ่มจากการจับยึดชิ้นงานเชื่อมให้แน่น แล้วเติมน้ำที่อุณหภูมิ 25-30 องศาเซลเซียส ลงไปในชุดจำลองชิ้นงานใต้น้ำ กำหนดปริมาณน้ำที่ 1000 มิลลิลิตร ชิ้นงานถูกจับยึดใต้ผิวหน้าที่ความลึก 25 มิลลิเมตร จากผิวหน้า จากนั้นควบคุมเครื่องมือกวนหมุนตามเข็มนาฬิกา แล้วออกแรงกดให้เครื่องมือกวนสอดลงไปใต้อั้ววัสดุในบริเวณจุดเริ่มต้นของการเชื่อม จนกระทั่งปลายของเครื่องมือกวนถูกสอดจมลงในเนื้อวัสดุ ที่ความลึก 0.8 มิลลิเมตร จากปากเครื่องมือเชื่อม กดแช่เป็นระยะเวลา 30 วินาที ในช่วงนี้ความร้อนที่เกิดจากการเสียดทานระหว่างผิวชิ้นงานและปากของเครื่องมือจะทำให้วัสดุเกิดการอ่อน นำไปสู่การไหลวนของเนื้อวัสดุรอบๆ หัวกวน เมื่อระยะเวลากดแช่เป็นไปตามตัวแปรที่กำหนดแล้วควบคุมความเร็วเดินเชื่อมซึ่งในขณะที่เชื่อมจะตรวจวัดอุณหภูมิของน้ำด้วยสายวัดอุณหภูมิ (Thermocouple) เพื่อสังเกตการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิน้ำ จากนั้นเมื่อสิ้นสุดการเชื่อมก่อนดึงหัวกวนออกจากรอยเชื่อมจะกดแช่บริเวณจุดสุดท้ายของรอยเชื่อม เป็นระยะเวลา 30 วินาที เพื่อรักษาความร้อนบริเวณจุดสุดท้ายของรอยเชื่อม นำไปสู่ความสมบูรณ์ของรอยเชื่อมบริเวณจุดสุดท้ายของชิ้นงานเชื่อม จากนั้นดึงเครื่องมือกวนออกจากรอยเชื่อม สำหรับการเชื่อมเสียดทานแบบกวนใต้น้ำของอลูมิเนียมผสม เกรด AA 5083 โดยแต่ละการทดลองจะเชื่อมตามปัจจัยในการเชื่อมที่กำหนด ดังแสดงใน Table 3 ซึ่งตัวแปรที่ใช้ในการทดลองนี้ ได้ศึกษาเบื้องต้น แล้วนำมากำหนดตัวแปรในการทดลองตัวแปรละ 3 ระดับ

Table 3 Parameters in Submerged Friction Stir Welding with AA 5083 aluminum alloy

Parameter	Level		
	1	2	3
Rotation Speed	1000	1400	2000
Welding Speed	80	112	160
Tool geometry	Cylinder	Triangle	Square

การทดสอบแรงดึง

ทำการทดสอบหาค่าความต้านทานแรงดึงของชิ้นงานผ่านการเชื่อม ได้เตรียมชิ้นงานทดสอบตามมาตรฐาน ASTM E8M (ASTM International, 2019b) ชิ้นงานถูกทดสอบด้วยเครื่องทดสอบแรงดึงยี่ห้อ Lloyd รุ่น EZ50 และทดสอบชิ้นงานที่อุณหภูมิห้อง ดังแสดงใน Figure 3

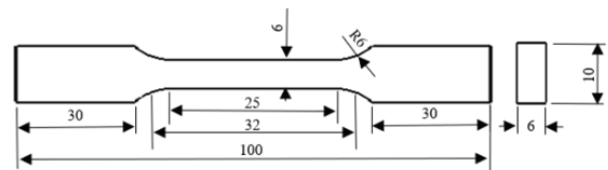


Figure 3 The specimen for tensile test following ASTM E8M standard ASTM (International. November, 2019b)

การทดสอบการดัดโค้ง

การทดสอบสมบัติการดัดโค้งจะทำการทดลองแบบดัดสามจุด (Three point bending test) ตามมาตรฐาน ASTM E290-14 (ASTM International, 2019a) ชิ้นงานดัดโค้งเป็นรูปทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้า ขนาด 20x150x6 มิลลิเมตร จะดัดโค้งชิ้นงานที่ผ่านการเชื่อมแต่ละรูปแบบของเครื่องมือกวน โดยมีการดัดโค้งขึ้นทดสอบด้านหน้ารอยเชื่อม (Face bending) และด้านหลังรอยเชื่อม (Root bending) ซึ่งจะทดสอบการดัดโค้งแบบรูปตัวยู (U-bending) ชิ้นงานหลังการทดสอบการดัดโค้งจะประเมินการแตกหักของรอยเชื่อมและวิเคราะห์ลักษณะการแตกหักของชิ้นงาน การทดสอบแสดงใน Figure 4

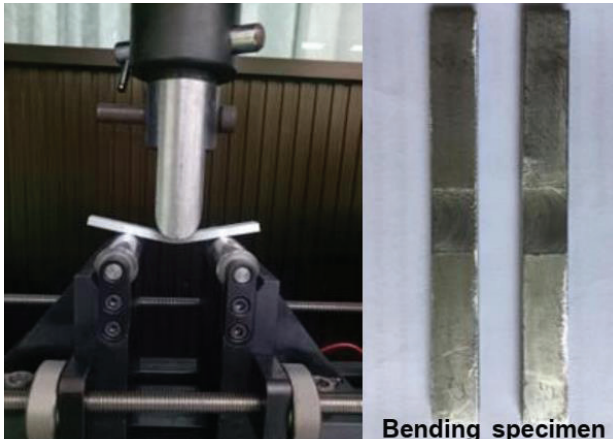


Figure 4 Three point bending test on specimen following ASTM E290-14 standard (ASTM International, November, 2019a)

การทดสอบความแข็ง

ชิ้นงานถูกนำมาทดสอบความแข็งด้วยวิธี วิคเกอร์ (Vickers Hardness: HV) เป็นวิธีการตรวจสอบความแข็งที่ห้วงกดทำจากวัสดุเพชร ออกแรงกดบริเวณพื้นที่หน้าตัดของรอยเชื่อม ระยะห่างระหว่างรอยกด 1.5 มิลลิเมตร แรงกดที่ใช้ 100 กรัมแรง เวลา 10 วินาที ดังแสดงใน Figure 5

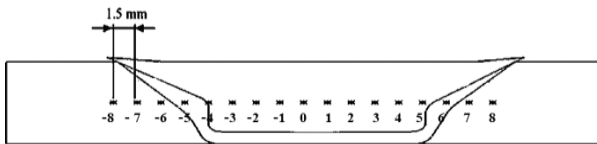


Figure 5 Vickers hardness test position profiles

การตรวจสอบโครงสร้างโลหะวิทยา

ชิ้นงานบริเวณกลางรอยเชื่อมถูกเตรียมสำหรับการตรวจสอบโครงสร้างโลหะวิทยาเพื่อวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาคที่ส่งผลมาจากปัจจัยในการเชื่อม การเตรียมชิ้นงานเริ่มจากการขัดผิวชิ้นงานด้วยกระดาษทรายหยาบเบอร์ 220 400 600 800 1000 และ 1200 ตามลำดับ หลังจากนั้นนำชิ้นงานไปขัดผิวละเอียดด้วยผงขัดอะลูมินา (Alumina Oxide) ขนาดอนุภาคตั้งแต่ 5 1 และ 0.3 ไมโครเมตร ด้วยผ้าสักหลาด สุดท้ายนำชิ้นงานทดสอบกัด (Etching) ผิวหน้าด้วยน้ำยาแคลเลอร์ (Keller's reagent) เวลาในการกัดกรด 5 วินาที ชิ้นงานถูกนำไปตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์จุลทรรศน์แบบแสง (Optical microscopy) และตรวจสอบการกระจายตัวของอนุภาคและการวิเคราะห์ธาตุเชิงปริมาณด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope: FESEM)

ผลการวิจัย

ผลของเครื่องมือกวนต่อลักษณะผิวหน้ารอยเชื่อม

ลักษณะผิวหน้ารอยเชื่อมของเครื่องมือกวน แสดงใน Figure 6 ผลการทดลองแสดงให้เห็นถึงการเกิดความสมบูรณ์ของรอยเชื่อมที่แตกต่างกัน พบว่าเครื่องมือกวนรูปทรงกระบอก ผิวหน้ารอยเชื่อมเรียบ แต่สังเกตเห็นว่าเกิดครีบก้นจำนวนมาก (Flash) ซึ่งเกิดจากความร้อนที่เกิดขึ้นสูงในขณะเชื่อม (Zhao *et al.*, 2015)

ในกรณีที่เครื่องมือกวนรูปทรงสามเหลี่ยม ดังแสดงใน Figure 7 ผลการทดลองพบว่ารอยเชื่อมมีความขรุขระและเกิดครีบก้นที่น้อย ส่งผลมาจากความร้อนในขณะเชื่อมน้อย ซึ่งน้ำที่เป็นสารตัวกลางในการพาความร้อนให้เกิดพฤติกรรมกรรมการสูญเสียความร้อน อาจนำไปสู่ความไม่สมบูรณ์ของรอยเชื่อมและเกิดจุดบกพร่องหลังการเชื่อมได้ (Zhang *et al.*, 2011)

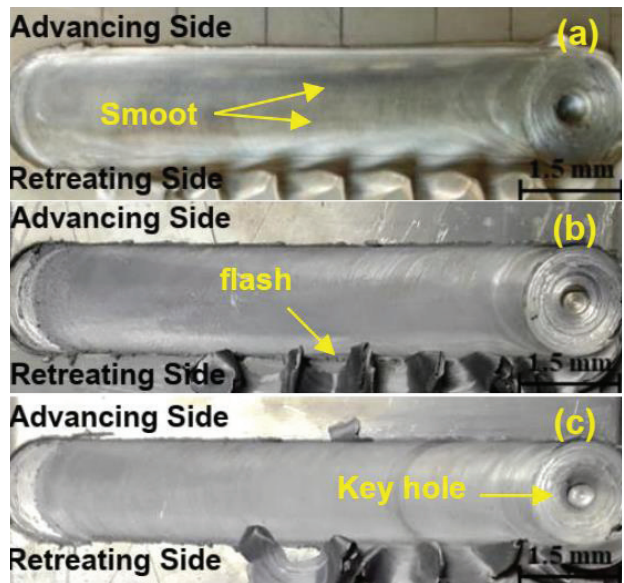


Figure 6 Characteristics of welding from top view surface using a cylindrical tool pin at rotation speed 2000 rpm and welding speed: (a) 80, (b) 112 and (c) 160 mm/min

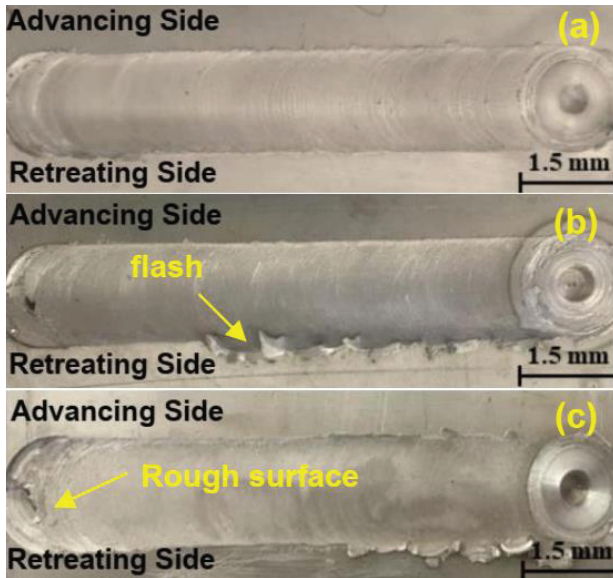


Figure 7 Characteristics of welding from top view surface using a triangular tool pin at rotation speed 2000 rpm and welding speed: (a) 80, (b) 112 and (c) 160 mm/min

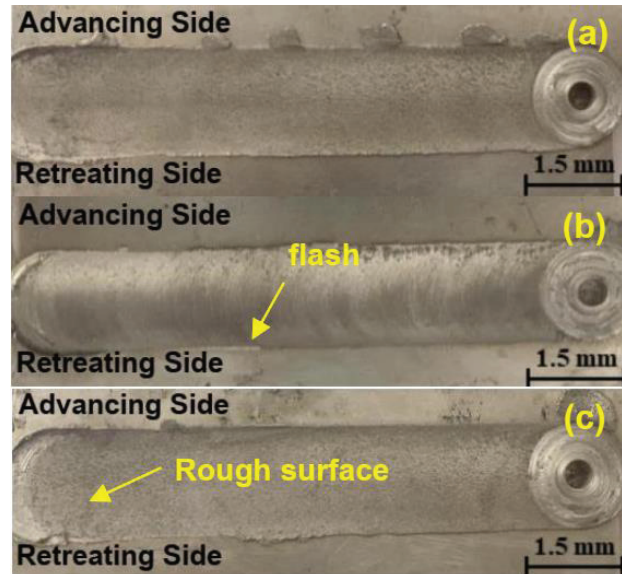


Figure 8 Characteristics of welding from top view surface using a square pin at rotation speed 2000 rpm and welding speed: (a) 80, (b) 112 and (c) 160 mm/min

ในทำนองเดียวกันเครื่องมือกวนรูปทรงสามเหลี่ยม ดังแสดงใน Figure 8 พบว่าผิวรอยเชื่อมมีความราบเรียบที่ดีกว่า เมื่อเปรียบเทียบกับเครื่องมือกวนรูปทรงสี่เหลี่ยม สังเกตได้ว่ารูปทรงเครื่องมือกวนสี่เหลี่ยมเกิดครีบจากความร้อนเช่นกัน ซึ่งคาดว่าได้จากพฤติกรรมของการเกิดความร้อนที่ดี แต่เครื่องมือกวนรูปสี่เหลี่ยมเกิดครีบน้อยและผิวรอยต่อขรุขระน้อยเช่นกัน เนื่องจากความร้อนในขณะที่เชื่อมน้อย อย่างไรก็ตามการเชื่อมเสียตทานแบบกวนได้น้ำสำหรับอลูมิเนียมความร้อนเข้าขณะเชื่อมเป็นสิ่งสำคัญ เนื่องจากอลูมิเนียมมีสัมประสิทธิ์การนำความร้อนสูงและน้ำก็ทำให้เกิดการสูญเสียความร้อนในขณะที่เชื่อมได้มาก (Wahid *et al.*, 2018)

ความต้านทานแรงดึงของรอยเชื่อม

ความต้านทานแรงดึงเฉลี่ยของชิ้นงานหลังการเชื่อม ดังแสดงใน Table 4 ประสิทธิภาพรอยต่อสามารถ คำนวณได้จากสมการ (Meengam *et al.*, 2017)

ประสิทธิภาพรอยต่อ =

$$\frac{\text{ความต้านทานแรงดึงชิ้นงานเชื่อม}}{\text{ความต้านทานแรงดึงเนื้อโลหะเดิม}} \times 100 \text{ เปอร์เซ็นต์}$$

ผลการทดลองพบว่าความต้านทานแรงดึงเฉลี่ยทุกการทดลองมีประสิทธิภาพรอยต่อน้อยกว่า 50 เปอร์เซ็นต์ พิจารณาจากตัวแปรเครื่องมือเชื่อมแบบทรงกระบอก ความเร็วเดินเชื่อม 112 มิลลิเมตรต่อนาที ความเร็วหมุนเชื่อม 2000 รอบต่อนาที พบว่าค่าเฉลี่ยค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุด 101.23 MPa เมื่อคำนวณจากสมการประสิทธิภาพรอยต่อ แสดงให้เห็นว่ามีประสิทธิภาพรอยต่อ 37.08 เปอร์เซ็นต์ ในทางตรงกันข้ามหัวกวนรูปทรงสี่เหลี่ยมที่ความเร็วหมุนเชื่อม 1400 รอบต่อนาที และความเร็วเดินเชื่อม 160 มิลลิเมตร พบว่าค่าเฉลี่ยค่าความต้านทานแรงดึงต่ำสุด 76.54 MPa เนื่องจากพฤติกรรมทางกลในการลากกวนเนื้อวัสดุของเครื่องมือกวนต่างกัน ซึ่งความเร็วรอบที่สูงและความเร็วเดินเชื่อมต่ำ ทำให้การลากกวนเนื้อโลหะเข้ากันได้ดี นำไปสู่ค่าความต้านทานแรงดึงที่ดีเช่นกัน

Table 4 Average tensile strength of specimen under various weld conditions

Tool geometry	Welding Speed (mm/min)	Rotation Speed (rpm)		
		1000	1400	2000
Cylinder	80	86.78	93.00	97.71
	112	83.07	93.71	101.23
	160	87.02	92.60	95.99
Triangle	80	80.27	88.33	92.69
	112	81.00	87.41	91.06
	160	84.51	92.35	91.28
Square	80	89.58	82.98	84.64
	112	81.61	83.60	79.87
	160	79.33	76.54	80.10

* **Note:** Base tensile strength of AA 5083 aluminum alloy is 273 MPa

อย่างไรก็ตามความต้านทานแรงดึงหลังการเชื่อมเสียดทานแบบกวนได้น้ำที่แตกต่างกัน ส่งผลมาจากความเค้นตกค้างในชิ้นงานเชื่อมที่สูงกว่าการเชื่อมในสภาวะปกติ (Anand & Sridhar, 2020) และจุดบกพร่องที่เกิดหลังการเชื่อม โดยเฉพาะการเกิดจุดพบกพร่องแบบการไม่หลอมละลายลึก (Lack of Penetration) ส่งผลให้ความต้านทานแรงดึงลดลงอย่างมีนัยสำคัญ (Meengam & Sillapasa, 2020)

การตัดโค้งรอยเชื่อม

ผลการทดสอบการตัดโค้งของรอยเชื่อมโดยเครื่องมือกวนรูปทรงทั้งสามแบบแสดงดัง Table 5 พบว่าชิ้นงานหลังการทดสอบการตัดโค้งด้านหน้าชิ้นงานในบางตัวแปรสามารถรับแรงตัดได้ ลักษณะผิวรอยตัดเกิดการโค้งงอ ไม่มีรอยแตก แต่ชิ้นงานที่ตัดโค้งด้านหลังพบว่าชิ้นงานจะเกิดรอยแตกหักในบริเวณรอยต่อและบริเวณอิทธิพลทางความร้อน เนื่องจากการเกิดจุดพบกพร่องบริเวณรอยเชื่อม เมื่อได้รับแรงตั้งฉากกับ

รอยเชื่อม จุดบกพร่องเหล่านั้นไม่สามารถรับแรงได้ จึงนำไปสู่การเสียหายของชิ้นงานเชื่อม ส่งผลให้เกิดการแตกหักและเสียรูปแบบถาวร (Babu *et al.*, 2019) จาก Table 5 จะเห็นว่าเครื่องมือกวนรูปทรงกระบอกสามารถรับแรงตัดได้ดีในทางตรงกันข้ามเครื่องมือกวนรูปทรงสี่เหลี่ยมมีแนวโน้มที่แสดงให้เห็นว่าชิ้นงานเกิดการเสียหายจากการแตกหักบริเวณรอยเชื่อม (Stir Zone: SZ) ซึ่งผลการทดลองสอดคล้องกับความต้านทานแรงดึง ในขณะที่เครื่องมือกวนรูปทรงสามเหลี่ยมพบว่ามีการแตกหลังการทดสอบการตัดโค้งชิ้นงานบริเวณรอยเชื่อมและบริเวณที่ได้รับอิทธิพลทางความร้อน (Thermal Mechanical Affect Zone: TMAZ) เนื่องจากบริเวณรอยเชื่อมและบริเวณที่ได้รับอิทธิพลทางความร้อนจะเกิดการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างจุลภาคหลังการเชื่อม จึงส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงของสมบัติทางกลเช่นกัน

Table 5 Bending results of submerged friction stir welded of AA 5083 aluminum alloy

Tool geometry	Welding Speed (mm/min)	Face bending	Root bending	Location of broken
Cylinder	80	Accept	Accept	No broken
	112	Accept	Accept	No broken
	160	Accept	Accept	No broken
Triangle	80	Accept	Reject	Crack in SZ, TMAZ
	112	Accept	Reject	Crack in SZ
	160	Accept	Reject	Crack in SZ
Square	80	Accept	Reject	Crack in SZ
	112	Reject	Reject	Crack in SZ
	160	Reject	Reject	Crack in SZ

ผลการทดสอบความแข็ง

ความแข็งชิ้นงานหลังการเชื่อมแสดงดัง Figure 9 แนวโน้มของค่าความแข็งใกล้เคียงกันทั้งสามเครื่องมือ กวน อย่างไรก็ตามบริเวณที่ได้รับอิทธิพลทางความร้อนพบว่าค่าความแข็งมีค่าต่ำกว่าบริเวณอื่นๆ เนื่องจากโครงสร้างจุลภาคเปลี่ยนไปจากโครงสร้างเดิมของวัสดุ เป็นที่น่าสังเกตได้ว่าบริเวณที่ได้รับอิทธิพลทางความร้อนด้าน retreating มีความแข็งมากกว่าบริเวณที่ได้รับอิทธิพลทางความร้อนด้าน advancing เนื่องจากด้าน retreating มีความร้อนในขณะที่เชื่อมมากกว่าด้าน advancing (Maharia *et al.*, 2018) สังเกตได้จากลักษณะการเกิดครีปที่เกิดขึ้นอธิบายไว้ก่อนหน้านี้ นอกจากนี้การเกิดความเค้นตกค้างจากการเย็นตัวอย่างรวดเร็วด้วยน้ำ การเกิดพฤติกรรมทางความร้อน (Thermal behavior) และการแปลงเฟสส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของความแข็งหลังการเชื่อม (Pedapati *et al.*, 2020)

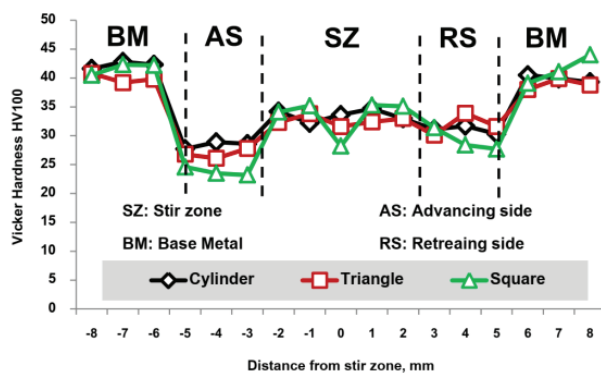


Figure 9 Hardness of welded specimen at different tool geometries of submerged friction stir welded joint of AA 5083 aluminum alloy

การวิเคราะห์ผลโครงสร้างจุลภาค

การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงที่กำลังขยาย 50 เท่า ดังแสดงใน Figure 10 พบว่าเนื้อโลหะเดิมประกอบไปด้วยเฟสแอลฟาผสมกับเฟสยูเทคติก (Mg_2Si , $Al_6(Mn, Fe)$ -Eutectic) โดยเฟสยูเทคติกทั้งสองแบบคือ Mg_2Si และ $Al_6(Mn, Fe)$ (Attallah *et al.*, 2007) รวมตัวในรูปแบบสารประกอบ (Intermetallic phases) มีลักษณะเป็นเข็มปลายแหลมสลับกัน กระจายอย่างสม่ำเสมอในเนื้อพื้น

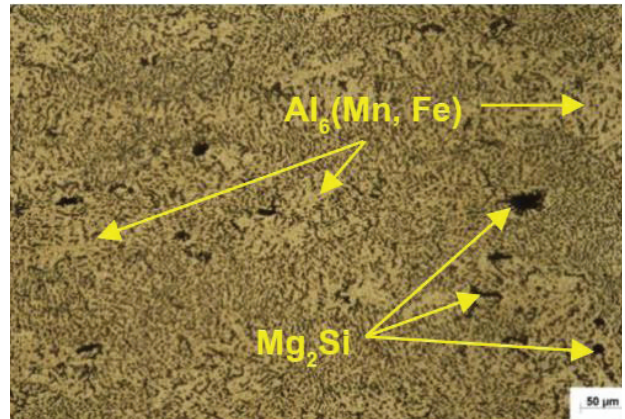


Figure 10 The base microstructure of AA 5083 aluminum Alloy

อย่างไรก็ตามตัวแปรในการเชื่อมส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างจุลภาคบริเวณรอยเชื่อมหรือบริเวณที่ได้รับผลกระทบทางความร้อน พบว่าโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานที่เชื่อมด้วยเครื่องมือกวนรูปทรงกระบอกความเร็วหมุนเชื่อม 2000 รอบต่อนาที ความเร็วเดินเชื่อม 112 มิลลิเมตรต่อนาที เนื้อโลหะถูกกวนรวมตัวกันอย่างชัดเจน โดยจะมีการเรียงตัวสลับกันของเนื้อวัสดุและเนื้อวัสดุมีการไหลวน ทำให้เนื้อวัสดุมีเกรนที่เล็กและละเอียด โดยสารประกอบเฟส Mg_2Si และเฟส $Al_6(Mn, Fe)$ มีลักษณะของโครงสร้างละเอียดมาก กระจายตัวอย่างสม่ำเสมอทั่วบริเวณรอยกวนเชื่อม เพราะแรงทางกลจากการไหลวนรอบเครื่องมือกวนส่งผลให้เกิดการแตกหักของสารประกอบเฟส Mg_2Si และเฟส $Al_6(Mn, Fe)$ และเกิดการไหลวนตามทิศทางของการหมุน ทำให้บริเวณรอยเชื่อมประสานเข้ากันได้ดี อย่างไรก็ตาม สังเกตได้ว่าโครงสร้างจุลภาคบริเวณด้านล่างของรอยเชื่อมของเครื่องมือกวนรูปทรงกระบอกสามารถตรวจพบจุดบกพร่องขนาดเล็ก ซึ่งเป็นรอยแตกที่ส่งผลมาจากความร้อนเข้าไม่ถึงในบริเวณดังกล่าว ส่งผลให้เกิดรอยแตกเล็กๆ หลังการเชื่อมได้ (Das *et al.*, 2019) โดยเฉพาะในสถานะของการเชื่อมใต้น้ำที่ชนิดและปริมาณของน้ำในการเชื่อมมีอิทธิพลต่อการเกิดขึ้นของความร้อนในขณะที่เชื่อม ดังแสดงใน Figure 11

รูปแบบของเครื่องมือกวนที่แตกต่างกันส่งผลอย่างมีนัยสำคัญต่อการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาคและการเกิดจุดบกพร่อง จากการทดลองพบว่าเครื่องมือกวนรูปทรงสามเหลี่ยมที่ตัวแปรเดียวกัน คือ ความเร็วหมุนเชื่อม 2000 รอบต่อนาที ความเร็วเดินเชื่อม 112 มิลลิเมตรต่อนาที พบว่าบริเวณรอยกวนมีการรวมตัวกันของเนื้อวัสดุ โดยจะมีการเรียงตัวสลับกันของเนื้อวัสดุ เนื้อวัสดุมีการไหลวนไปตามทิศทางของการหมุนเชื่อมและไหลวนรอบเครื่องมือกวนเช่นกัน บริเวณรอยกวนจะมีโครงสร้างจุลภาคที่มีความละเอียดมีขนาดเฟสที่เล็กกว่าเนื้อโลหะเดิม

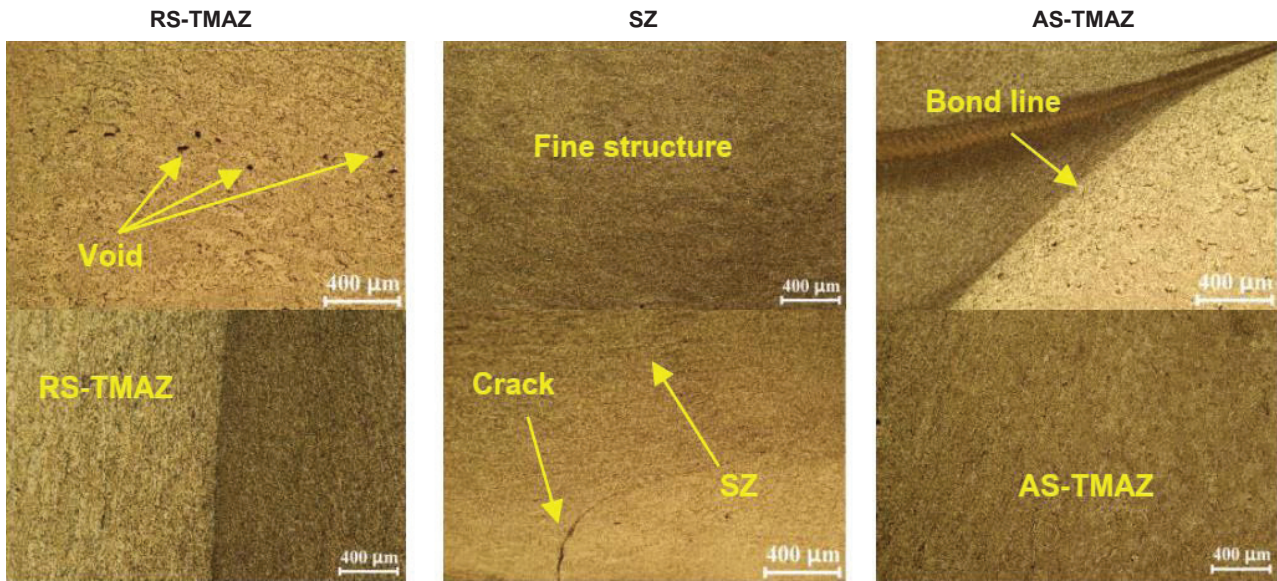


Figure 11 Microstructures of welding using the cylinder tool pin with the rotation speed at 2000 rpm and welding speed at 112 mm/min

อย่างไรก็ตามเครื่องมือทรงแท่งสามเหลี่ยมส่งผลต่อการเกิดจุดบกพร่องหลังการเชื่อมที่มากกว่าเครื่องมือทรงแท่งแบบรูปทรงกระบอก พบว่ามีลักษณะการเกิดจุดบกพร่องคล้ายๆ กับเครื่องมือทรงแท่งกระบอก โดยแสดงรอยแตกบริเวณด้านล่างรอยต่อ และยังพบช่องว่างจากการลากกวน

เนื้อโลหะไม่สมบูรณ์ในบริเวณที่ได้รับอิทธิพลทางความร้อนด้าน retreating ซึ่งช่องว่างเหล่านี้ นำไปสู่สมบัติทางด้านแรงดึงที่ต่ำลงและส่งผลให้ประสิทธิภาพพรอยต่อจากการคำนวณแสดงให้เห็นผลลัพธ์ที่น้อยลงเช่นกัน ดังแสดงใน Figure 12

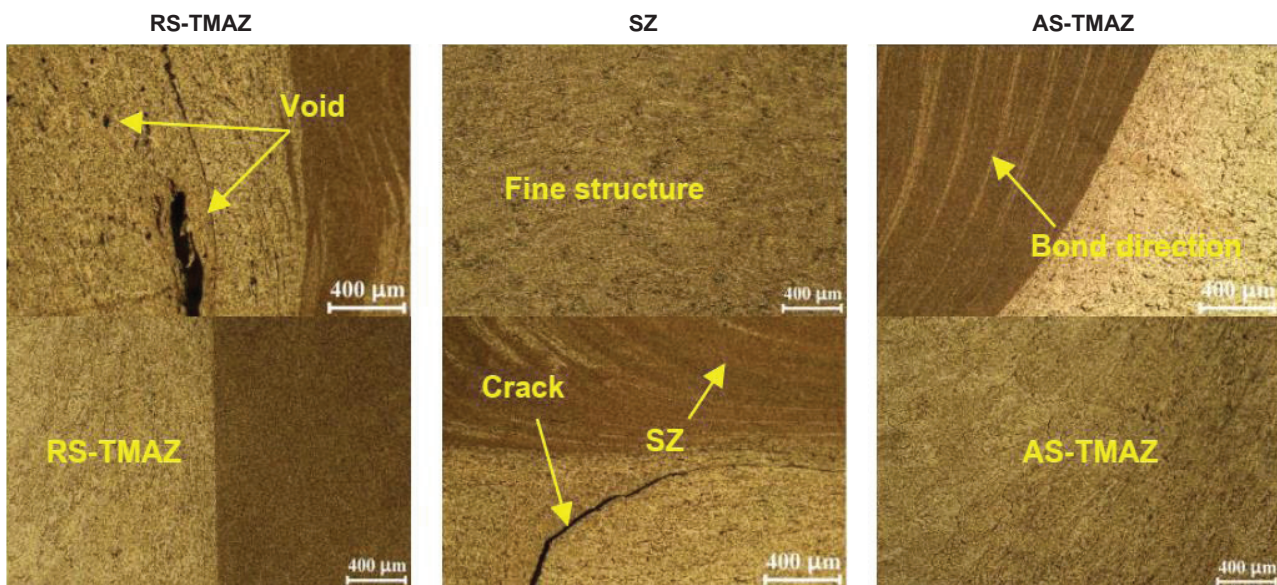


Figure 12 Microstructure welding using the triangle tool pin with the rotation speed at 2000 rpm and welding speed at 112 mm/min

ในทำนองเดียวกันจุดบกพร่องจากการเชื่อมเสียหายบนผืนกวนได้นำของเครื่องมือทรงแท่งสี่เหลี่ยมที่ความเร็วเดินเชื่อม 112 มิลลิเมตรต่อนาที และความเร็วหมุนเชื่อม 2000 รอบต่อนาที เกิดจากการไหลวนของเนื้อวัสดุที่ไม่สมบูรณ์ โดยพบรอยแตกบริเวณด้านล่างรอยต่อเช่นกัน แต่สังเกตได้ว่ารอยแตกมีขนาดใหญ่ เมื่อเปรียบเทียบกับเครื่องมือทรงแท่งทั้งสองแบบที่ได้ศึกษาวิจัย นอกจากนั้นยังพบ

แนวรอยลากกวนที่ไม่ยึดติดกัน (Kissing bond) ในบริเวณรอยเชื่อมและบริเวณที่ได้รับอิทธิพลทางความร้อนด้าน retreating ยังตรวจพบช่องว่างขนาดเล็ก จะเห็นได้ว่ารูปทรงของเครื่องมือทรงแท่งที่แตกต่างกัน ส่งผลต่อความสัมพันธ์ของคุณภาพรอยเชื่อมและนำไปสู่การเกิดข้อบกพร่องที่แตกต่างกันอย่างนัยสำคัญในการทดลอง

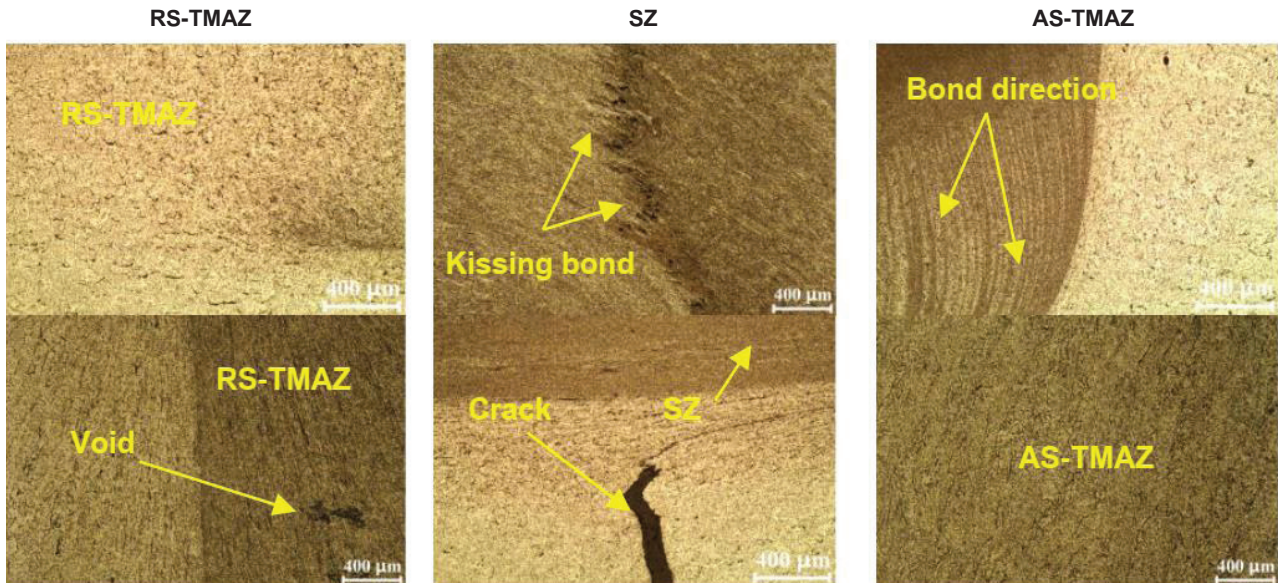


Figure 13 Microstructure welding using square tool pin with the rotation speed at 2000 rpm and welding speed at 112 mm/min

การกระจายตัวของเฟสยูเทคติก

การประเมินการกระจายตัวของเฟส Mg_2Si และ $Al_6(Mn, Fe)$ จากการตรวจสอบกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ดังแสดงใน Figure 14 บริเวณรอยเชื่อมจะประเมินที่ตัวแปรความเร็วหมุนเชื่อม 2000 รอบต่อนาที และความเร็วเดินเชื่อม 112 มิลลิเมตรต่อนาที เพื่อวิเคราะห์ลักษณะการแตกหักหรือเปลี่ยนแปลงของขนาดเฟส Mg_2Si และ $Al_6(Mn, Fe)$ หลังการเชื่อม โดยพบว่าสารประกอบที่รวมตัวในรูปแบบของเฟส Mg_2Si และ $Al_6(Mn, Fe)$ เกิดการเปลี่ยนแปลงขนาดอนุภาคจากขนาดเดิม โดยมีขนาดที่เล็กลง ดังแสดงใน Figure 14 (b) เนื่องจากแรงทางกลจากการหมุนวนกระแทกกับเฟส Mg_2Si และ $Al_6(Mn, Fe)$ ส่งผลให้เฟสดังกล่าวเกิดการแตกหักและมีขนาดที่เล็กลง (Zhang & Liu, 2012) อย่างไรก็ตาม

อิทธิพลของความร้อนส่งผลให้เฟส $Al_6(Mn, Fe)$ เกิดการแตกแบบเปราะ โดยด้าน advancing มีความร้อนสะสมต่ำ พลังงานสะสมจึงกระตุ้นให้เฟส $Al_6(Mn, Fe)$ เกิดการขยายตัวและผลจากการเย็นตัวอย่างรวดเร็วของเฟส $Al_6(Mn, Fe)$ จึงเกิดการแตกแบบเปราะ นอกจากนี้ความร้อนสะสมยังส่งผลให้เฟส Mg_2Si เกิดการตกตะกอนใหม่ในสถานะของแข็ง (Dunyakul et al., 2021) (Precipitation) ส่งผลให้ขนาดอนุภาคเล็กลงและกระจายตัวได้ดีขึ้นในบริเวณที่ได้รับผลทางความร้อนหลังจากเชื่อมเสียดทานแบบกวนได้น้ำ ดังแสดงใน Figure 14 (a) สำหรับด้าน retreating ซึ่งเป็นด้านที่มีความร้อนสะสมสูงขนาดอนุภาคก็เล็กลง ความร้อนจะทำให้เฟส Mg_2Si และ $Al_6(Mn, Fe)$ อ่อนตัวและแตกหักได้ง่ายเมื่อเกิดการกระแทกจากแรงทางกล ดังแสดงใน Figure 14 (c)

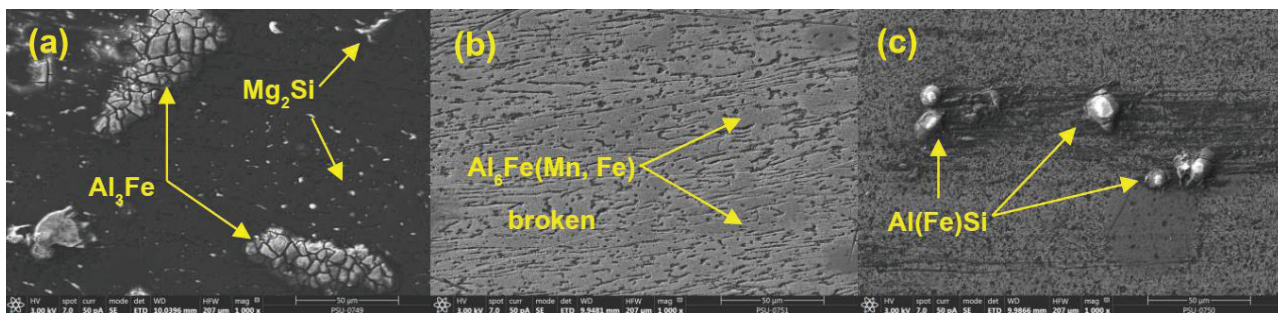


Figure 14 The intermetallic phases by scanning electron microscope on the surface of AA 5083 aluminum alloy with submerged friction stir welding

Figure 15 แสดงการวิเคราะห์ปริมาณธาตุบริเวณรอยเชื่อมด้วยวิธีการวิเคราะห์ธาตุเชิงปริมาณและการทำแบบจำลองการกระจายตัวของธาตุ (Mapping) พบว่าอลูมิเนียมซึ่งเป็นธาตุหลัก มีปริมาณธาตุถึง 69.2 เปอร์เซ็นต์ และมีปริมาณของเหล็กและซิลิกอน 0.28 และ 0.19 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ดังแสดงใน Figure 15 (h) ซึ่งจะรวมตัวกันในรูปแบบสารประกอบแบบเฟส Al₃Fe และเฟส Al(Fe)Si (Lingaraju & Salavaravu, 2016) โดยการรวมตัวของสารประกอบนี้จะมี ความแข็งแรงสูง เนื่องจากมีส่วนประกอบของธาตุเหล็ก

(Figure 15 (f)) แต่จะมีความเปราะที่ง่าย (Heidarzadeh, 2016) อย่างไรก็ตามสังเกตได้ว่าตรวจพบออกซิเจน (O) (Figure 15 (d)) เนื่องจากน้ำมีส่วนประกอบของออกซิเจนในรูปแบบของสารประกอบ H₂O ดังนั้นออกซิเจนในน้ำจึงแทรกตัวเข้าไปในรอยเชื่อม ในทำนองเดียวกันก็มีการตรวจพบคาร์บอนที่เป็นส่วนผสมของเหล็ก เกรด H 13 ที่ถูกผลิตเป็นเครื่องมือกลาน ส่งผลให้คาร์บอนแพร่ลงไปนรอยเชื่อม ดังแสดงใน Figure 15 (e)

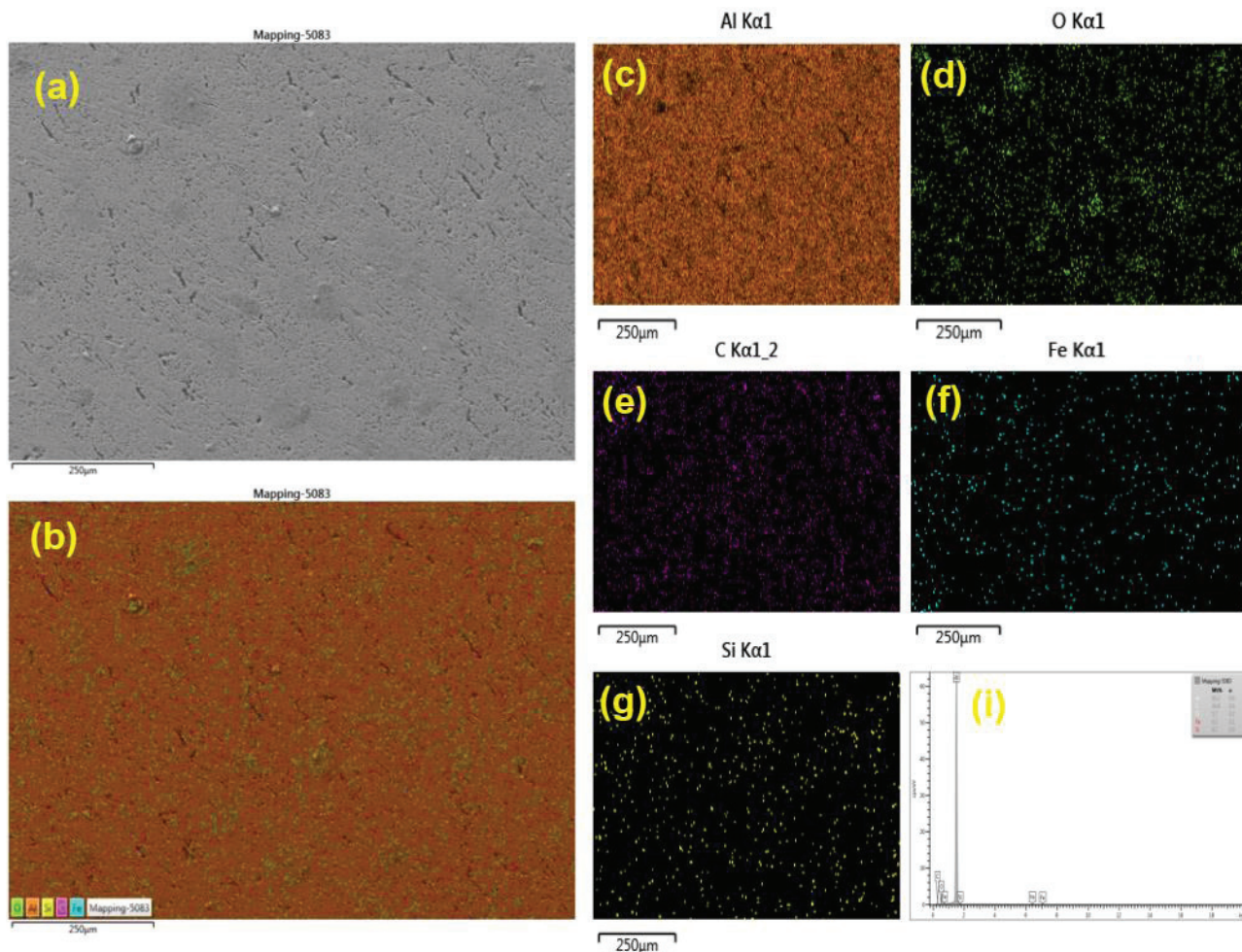


Figure 15 The energy-dispersive x-ray spectroscopy analysis of AA 5083 aluminum alloy with submerged friction stir welding

สรุปผล

จากการศึกษาวิจัยรูปแบบเครื่องมือกลานที่แตกต่างกันของการเชื่อมเสียดทานแบบกวนใต้น้ำอลูมิเนียมผสมเกรด AA 5083 ต่อสมบัติทางกลและโครงสร้างทางโลหะวิทยาสามารถสรุปได้ว่า

(1) ผลการทดสอบความต้านทานแรงดึงพบว่าเครื่องมือกลานรูปทรงกระบอกที่ความเร็วหมุนเชื่อม 2000 รอบต่อนาที ความเร็วเดินเชื่อม 112 มิลลิเมตรต่อนาที มีค่าเฉลี่ยความต้านทานแรงดึงสูงสุด คือ 101.23 MPa ประสิทธิภาพ

รอยต่อ 37.08 เปอร์เซ็นต์ ในทางตรงกันข้ามเครื่องมือกลานรูปทรงสี่เหลี่ยมความเร็วหมุนเชื่อม 1400 รอบต่อนาทีและความเร็วเดินเชื่อม 160 มิลลิเมตร พบว่าค่าเฉลี่ยค่าความต้านทานแรงดึงต่ำสุด คือ 76.54 MPa ตามลำดับ

(2) ผลการทดสอบการตัดโค้งแบบตัดสามจุด พบว่าเครื่องมือกลานรูปทรงกระบอกสามารถรับแรงตัดและยอมรับได้ทั้งการตัดโค้งผิวด้านหน้าและตัดโค้งผิวด้านหลังรอยต่อของชิ้นงานเชื่อม โดยเกิดการโค้งงอที่ไม่แตกหัก

(3) ผลการทดสอบความแข็งพบว่าบริเวณรอยกาวมีค่าความแข็งเฉลี่ย คือ 44 HV_{0.1} จากเครื่องมือกาวทรงกระบอกที่ความเร็วหมุนเชื่อม 2000 รอบต่อนาที ความเร็วเดินเชื่อม 112 มิลลิเมตรต่อนาที

(4) ผลการตรวจสอบจุดบกพร่องบริเวณรอยเชื่อมพบว่าเครื่องมือกาวรูปทรงกระบอกมีรอยแตกขนาดเล็ก ในขณะที่เครื่องมือกาวรูปทรงสามเหลี่ยมและรูปทรงสี่เหลี่ยมรอยแตกมีจำนวนมากและขนาดที่โต

(5) ผลการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคพบว่าสารประกอบเฟส Mg₂Si และ Al₆(Mn, Fe) เกิดการเปลี่ยนแปลงขนาดอนุภาคเล็กลง เนื่องจากแรงทางกลที่กระทำและความร้อนที่เกิดขึ้นขณะเชื่อม โดยมีการเปลี่ยนรูปร่างเฟสเป็นสารประกอบ Al₃Fe และเฟส Al(Fe)Si ตามลำดับ

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนเครื่องมือวิจัยจากสาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัยสงขลา ทางคณะผู้วิจัยจึงใคร่ขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

บรรณานุกรม

Anand. R & Sridhar. V.G. (2020). Studies on process parameters and tool geometry selecting aspects of friction stir welding. *Materials Today Processing*, 21(1),576-583.

ASTM International. (2019a). *ASTM E290-14, Standard test methods for bend testing of material for ductility*. ASTM International.

ASTM International. (2019b) *ASTM E8/E8M-09, Standard test methods for tension testing of metallic materials*. ASTM International.

Attallah, M.M., Davis, C.L. & Strangwood, M. (2007) Microstructure-microhardness relationships in friction stir welded AA5251. *Journal of Materials Science*, 42(17), 7299-7306.

Babu, K.T., Muthukumaran, S, & Kumar, C.H.B. (2019). A study on influence of underwater friction stir welding on microstructural, mechanical properties and formability in 5052-o aluminium alloys. *Materials Science Forum*, 969, 27-33.

Chander, M.S. & Kumar, P.S. (2019). Influence of tool pin geometry on friction stir welded dissimilar aluminium alloys-(AA5083 & AA6061). *International Journal of Mechanical and Production Engineering Research and Development*, 9(2), 581-588.

Das, J., Banik, S.R., Reddy, S.R.S.K., Sankar, M.R. & Robi, P.S. (2019). Review on process parameters effect on fatigue crack growth rate in friction stir welding. *Materials Today Processing*, 18(7), 3061-3070.

Derazkola, H.A., Eyvazian, A. & Simchi, A. (2020). Submerged friction stir welding of dissimilar joints between an Al-Mg alloy and low carbon steel: Thermo-mechanical modeling, microstructural features, and mechanical properties. *Journal of Manufacturing Processes*, 50, 68–79.

Dunyakul, Y., Meengam, C. & Maunkhaw, D. (2021). Investigation toiler weld blank of SSM 2024 aluminum alloys by friction stir welding joint. *Materials Science Forum*, 1020. 41-48.

Engler, O & Miller-Jupp, S. (2016). Control of second-phase particles in the Al-Mg-Mn alloy AA 5083. *Journal of Alloys and Compounds*, 689, 998-1010.

Eyvazian, A., Hamouda, A., Tarlochan, F., Derazkola, H.A., & Khodabakhshi, F.(2020). Simulation and experimental study of underwater dissimilar friction-stir welding between aluminium and steel. *Journal of Materials Research and Technology*, 9(3), 3767-3781.

Heidarzadeh, A. (2016). Effect of friction stir welding on microstructure and mechanical properties of dissimilar Al 5083-H321 and 316L stainless steel alloy joints. *Journal of Alloys and Compounds*, 680, 595-603.

Jebaraj, A.V., Aditya, K.V.V., Kumar, T.S., Ajaykumar, L. & Deepak, C.R. (2020). Mechanical and corrosion behaviour of aluminum alloy 5083 and its weldment for marine applications. *Materials Today Processing*, 22(4), 1470-1478.

Jungsub, L., Jungho, C., Junhyeok, P., Ji-Hun Y., Sangshik K., Im D. J. & Hyokyung S. (2019). Microstructural effects on the tensile and fracture behavior of selective laser melted H13 tool steel under varying conditions. *Materials Characterization*, 155, 109817.

Khan, N.Z., Khan, Z.A., Siddiquee, A.N. (2015). Effect of shoulder diameter to pin diameter (D/d) ratio on tensile strength of friction stir welded 6063 aluminum alloy. *Materials Today Processing*, 2, 1450-1457.

- Kumar L, Yazar K.U, Pramanik S. (2019). Effect of fusion and friction stir welding techniques on the microstructure, crystallographic texture and mechanical properties of mild steel. *Materials Science and Engineering: A*, 754, 400–410.
- Lingaraju, D. & Salavaravu, L. (2016). A Review on underwater friction stir welding Modified with normal friction stir welding setup. *International Journal of Advance Research in Science and Engineering*, 5(10), 1-9.
- Luo. C., Li. X., Song. D, Zhou N, Li. Y, Qi. W. (2016). Microstructure evolution and mechanical properties of friction stir welded dissimilar joints of Mg–Zn–Gd and Mg–Al–Zn alloys. *Materials Science and Engineering: A*, 664(10), 103-113.
- Ma. Z.Y, Feng A.H, Chen D.L, Shen J. (2018). Recent advance in friction stir welding/processing in aluminum alloys: Microstructure evaluation and mechanical properties. *Critical Reviews in Solid State and Materials Sciences*, 43(4), 269-233.
- Maharia, A.K, Sahu, S & Ansari, M.Z. (2018). Temperature and thermal stress distribution in underwater friction stir welding of aluminium plates. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 404,1-5.
- Meengam, C. & Sillapasa, K. (2020). Evaluation of optimization parameters of semi-solid metal 6063 aluminum alloy from friction stir welding process using factorial design analysis. *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, 4(123), 1-16.
- Meengam. C, Chainarong. S & Muangjunburee, P. (2017). Friction welding of semi-solid metal 7075 aluminum alloy. *Materials Today Processing*, 4, 1303–1311.
- Pedapati, S.R., Paramaguru, D., Awang, M., Mohebbi, H., & Korada, S.V. (2020). Effect of process parameters on mechanical properties of AA5052 joints using underwater friction stir welding. *Journal of Mechanical Engineering and Sciences*, 14(1), 6259-6271.
- Podržaj, P. & Klobcar, D. (2015). Welding defects at friction stir welding. *Metalurgija*, 54(2), 387-389.
- Ramesh, N.R. & Kumar, V.S.S. (2020). Experimental erosion-corrosion analysis of friction stir welding of AA 5083 and AA 6061 for sub-sea applications. *Applied Ocean Research*, 93, 102121.
- Tan, Y., Wang, X., Ma, M, Zhang, J., Liu, W., Fu, R, & Xiang, S. (2017). A study on microstructure and mechanical properties of AA 3003 aluminum alloy joints by underwater friction stir welding. *Materials Characterization*, 127, 41-52.
- Tan, Y.B., Wang, X.M., Ma, M., Zhang, J.X., Liu, J.X., Fu, R.D. & Xiang, S. (2017). A study on microstructure and mechanical properties of AA 3003 aluminum alloy joints by underwater friction stir welding. *Materials Characterization*, 127, 41–52.
- Wahid, M.A., Khan, Z.A. & Siddiquee, A.N. (2018). Review on underwater friction stir welding: A variant of friction stir welding with great potential of improving joint properties. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 28(2), 193-219.
- Zhang, H & Liu, H. (2013). Mathematical model and optimization for underwater friction stir welding of a heat-treatable aluminum alloy. *Materials & Design*, 45, 206-211.
- Zhang, H. & Liu, H. (2012). Characteristics and formation mechanisms of welding defects in underwater friction stir welded aluminum alloy. *Metallography Microstructure and Analysis*, 1(6), 269–281.
- Zhang, H.J., Liu, H.J. & Yu, L. (2011). Microstructure and mechanical properties as a function of rotation speed in underwater friction stir welded aluminum alloy joints. *Materials & Design*, 32, 4402-4407.
- Zhao, Y., Lu, Z., Yan, K., Linzhao, H. (2015). Microstructural characterizations and mechanical properties in underwater friction stir welding of aluminum and magnesium dissimilar alloys. *Materials & Design*, 65, 675-681.