

โครงสร้างจุลภาคและสมบัติทางกลของกรรมวิธี การเชื่อมเสียดทานอะลูมิเนียมหล่อกึ่งของแข็ง 7075 Microstructure and Mechanical Properties of Friction Welding Aluminum Semi-Solid Casting 7075

วรพงศ์ บุญช่วยแทน^{1,2*} วรธนพร ชีววุฒิปอง^{1,2} และ ชาตรี หอมเขียว^{1,2}

Worapong Boonchouytan^{1,2*} Watthanaphon Cheewawuttipong^{1,2} Chatree Homkhiew^{1,2}

¹สาขาวิศวกรรมอุตสาหการ, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย

²หน่วยวิจัยเทคโนโลยีการแปรรูปวัสดุ, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย

e-mail : worapong.b@rmutsv.ac.th*, c.watthanaphon@gmail.com และ chatree.h@rmutsv.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อการเชื่อมเสียดทานอะลูมิเนียมหล่อกึ่งของแข็ง 7075 การทดลองเชื่อมกระทำภายใต้ความเร็วหมุนเชื่อม 3 ระดับ คือ 450 675 และ 1000 รอบต่อนาที (rpm) และแรงดันเชื่อม 3 ระดับ คือ 40 50 และ 60 บาร์ (bar) โดยมุ่งเน้นผลกระทบต่อโครงสร้างมหภาคและจุลภาค ความแข็ง และความแข็งแรงดึงของรอยเชื่อม ซึ่งผลการทดลองพบว่า โครงสร้างบริเวณการเสียรูปอย่างสมบูรณ์แบบ (Fully Deformed Zone; FPDZ) เป็นเกรนที่ละเอียดเกิดการผสมผสานของเนื้อโลหะทั้งสองชิ้น ลักษณะการเรียงตัวของเกรนเป็นแถวเรียงตัวไปในทิศทางเดียวกันซึ่งได้รับอิทธิพลจากการหมุนของเครื่องกลึง ค่าความแข็งแรงเพิ่มมากขึ้นเมื่อเพิ่มความเร็วหมุนเชื่อม ค่าความแข็งแรงดึงสูงสุด 244.6 เมกะปาสคาล (MPa) ที่ความเร็วหมุนเชื่อม 1000 rpm แรงดันเชื่อมที่ 60 bar และมีประสิทธิภาพของความแข็งแรงดึงรอยเชื่อมอยู่ที่ประมาณ 107.3% เมื่อเทียบกับเนื้อโลหะเดิม

คำสำคัญ :

การเชื่อมเสียดทาน อะลูมิเนียมหล่อกึ่งของแข็ง โครงสร้างจุลภาค สมบัติทางกล

Abstract

The purpose of this research was to investigate the factors affecting semi-solid aluminum casting 7075. The welding experiments were carried out under three welding speeds as 450, 675 and 1000 rpm, and three welding pressure as 40, 50 and 60 bar, with emphasis effects on macro and microstructure, hardness and tensile strength of welds. The results showed that the fully deformed zone structure was fine grain at the combination of two metal pieces, which had the same direction of grain arrangement because of the influence from the rotation of the lathe. The strength was increased by the faster welding speed. The maximum tensile strength was 244.6 MPa at a welding speed of 1000 rpm welding pressure of 60 bar. The efficiency of received strength of the joints was approximately 107.3% comparing with base metal.

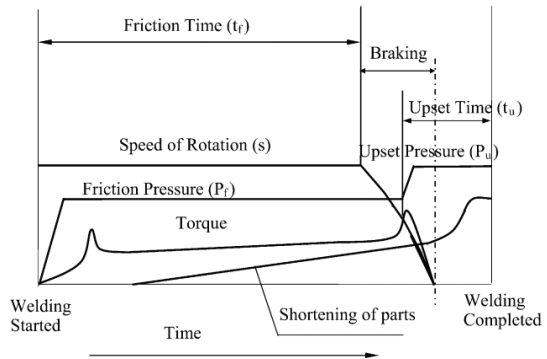
Keywords :

Friction Welding, Aluminum Semi-Solid Casting, Microstructure, Mechanical Properties

1. บทนำ

การเชื่อมเสียดทานเป็นเทคโนโลยีการเชื่อมในสภาวะของแข็ง โดยใช้ความร้อนจากแรงเสียดทานที่สร้างขึ้นที่พื้นผิวของวัสดุทั้งสองอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นทำให้เกิดการอินเตอร์เฟซกันพอที่จะทำให้พื้นผิวทั้งสองหลอมเข้าด้วยกันภายใต้ความดันสูง ความร้อนที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงพลังงานทางกลเป็นพลังงานความร้อนที่จากองค์ประกอบระหว่างการหมุนภายใต้ความกดดัน โดยไม่ต้องใช้พลังงานใดๆ เพิ่มอีก [1]

การเชื่อมเสียดทานได้ใช้อย่างกว้างขวางในอุตสาหกรรมการบินและอวกาศ อุตสาหกรรมรถยนต์ เพราะมีข้อดี เช่น ประหยัดวัสดุ ใช้เวลาในการผลิตต่ำ และมีความร้อนน้อย รวมถึงความกว้างในบริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อน (Unaffected zone; UZ) น้อย พารามิเตอร์ที่น่าสนใจมากที่สุดของการเชื่อมเสียดทานคือ เวลาเสียดทาน ความดันเสียดทาน เวลาดัน และความเร็วหมุน [2] กรรมวิธีการเชื่อมเสียดทานสามารถอธิบายได้ในภาพที่ 1 โดยชิ้นงานจะหมุนด้วยความเร็วคงที่ (Speed of Rotation; S) ในขณะที่ยื่นชิ้นงานสองชิ้นจะเกิดการเสียดสีจนเกิดแรงเสียดทาน และเกิดความร้อนขึ้นบริเวณรอยเชื่อม จากนั้นชิ้นงานส่วนที่เคลื่อนที่ได้จะถูกผลักไปยังส่วนที่หมุน ภายใต้ความกดดันแรงเสียดทานตามแนวแกน (Friction Pressure; P_f) และภายใต้เวลาเสียดทาน (Friction Time; t_f) จากนั้นการหมุนเชื่อมจะหยุดการทำงานลงอย่างรวดเร็ว ในขณะนั้นก็จะดันชิ้นงานเข้าไปด้วยความดันแกน (Upset Pressure; P_u) ภายใต้เวลาที่กำหนดไว้ (Upset Time; t_u) เป็นอันเสร็จกรรมวิธีการเชื่อมเสียดทาน



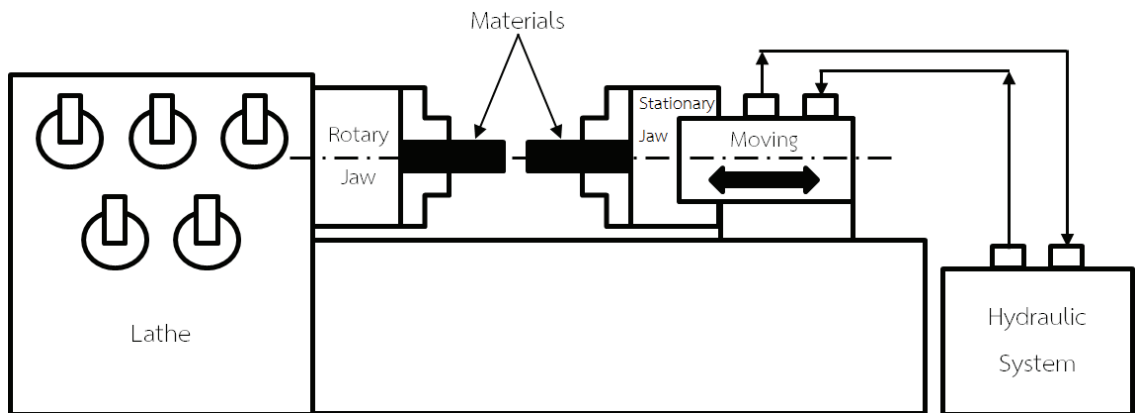
ภาพที่ 1 พารามิเตอร์ในการเชื่อมเสียดทาน
อย่างต่อเนื่อง [2]

ทั้งนี้การศึกษาในทางทฤษฎีและการทดลองเกี่ยวกับพารามิเตอร์เหล่านี้สามารถเห็นได้ในบทความต่างๆ เช่น R.Y. Tylecote [3] ได้ตรวจสอบพารามิเตอร์ที่อิทธิพลต่อคุณภาพการเชื่อมของความแข็งแรงในแนวเชื่อม และบริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อน (Unaffected zone; UZ) Dobrovidov et al [4] การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการเชื่อมแรงเสียดทานระหว่างเหล็กกล้าความเร็วรอบสูง R6M5 กับเหล็กคาร์บอน 45 M.N. Ahmad Fauzi et al [5] โครงสร้างจุลภาคและสมบัติทางกลของโลหะผสมอะลูมิเนียม 6061 กับอะลูมินาโดยการเชื่อมเสียดทาน Mumin Sahin et al [6] ได้ศึกษาสมบัติทางกลของชิ้นส่วน AISI 1045 ที่เชื่อมด้วยกรรมวิธีการเชื่อมเสียดทาน จากข้อมูลและเหตุผลดังกล่าวการเชื่อมเสียดทานสามารถนำมาใช้ในงานเชื่อมวัสดุที่ยากต่อการเชื่อมแบบหลอมละลาย ทั้งในแง่วัสดุเดียวกันหรือต่างชนิดกัน ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงขอเสนองานวิจัยการเชื่อมเสียดทานของอะลูมิเนียมหล่อกิ่งของแข็ง 7075 โดยจะมุ่งเน้นผลโครงสร้างทางโลหะวิทยาและสมบัติทางกล

2. กระบวนการวิจัย

กรรมวิธีการเชื่อมเสียดทานที่ใช้ในการทดลองแสดงดังภาพที่ 2 ได้รับการออกแบบและสร้างเป็นแบบต่อเนื่อง การทำงานของเครื่องเชื่อมเสียดทานจะมีฐานเครื่องที่ยึดติดอยู่กับสะพานแทนเครื่องของเครื่องกลึง การกำหนดความเร็วรอบการหมุนเชื่อม

ใช้รอบการหมุนของเครื่องกลึงที่มีอยู่เป็นปัจจัยในการเชื่อม ในส่วนของเครื่องเชื่อมเสียดทานใช้ระบบไฮดรอลิกส์เป็นต้นกำลัง สามารถควบคุมความดันเสียดทาน ความดันอัด เวลาเสียดทาน และเวลาอัดด้วยระบบไฟฟ้า ซึ่งสามารถเชื่อมได้ทั้งวัสดุชนิดเดียวกัน และวัสดุต่างชนิดกัน [7] โดยระบบการเชื่อมเสียดทานแสดงดังภาพที่ 2

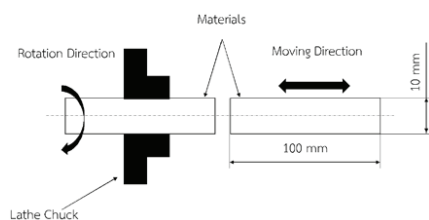


ภาพที่ 2 ระบบของการเชื่อมเสียดทาน [7]

วัสดุที่ใช้ในการทดลองเป็นอะลูมิเนียมหล่อกิ่งของแข็ง 7075 (Semi Solid Metal 7075 : SSM 7075) ที่หล่อด้วยกรรมวิธีหล่ออัด โดยปล่อยฟองแก๊สเหนียว (Gas Induce Semi Solid : GISS) [8] โดยมีองค์ประกอบทางเคมีแสดงดังตารางที่ 1 และสมบัติทางกล แสดงดังตารางที่ 2 รูปทรงเรขาคณิตของชิ้นงานทดลองมีขนาดความโตขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตร (mm) และมีความยาว 100 mm โดยมีรูปแบบของกระบวนการเชื่อมเสียดทาน และขนาดตัวอย่างที่ใช้ในการทดลองแสดงดังภาพที่ 3

ตารางที่ 1 องค์ประกอบทางเคมี (ร้อยละโดยน้ำหนัก) และสมบัติทางกล

Elements	SSM 7075
Si	0.4
Fe	0.5
Cu	2.0
Mn	0.3
Mg	2.9
Zn	6.1
Ti	0.2
Cr	0.3
Ni	-
Al	Balance



ภาพที่ 3 รูปแบบของกระบวนการเชื่อมเสียดทาน และขนาดตัวอย่างที่ใช้ในการทดลอง

ปัจจัยในการเชื่อมเสียดทาน ประกอบด้วย ความเร็วหมุนชิ้นงาน (S) มีหน่วยเป็นรอบต่อนาที (rpm) แรงดันเสียดทาน (P_f) มีหน่วยเป็น บาร์ (bar) เวลาเสียดทาน (T_f) มีหน่วยเป็น วินาที (s) แรงดันอัด (P_u) มีหน่วยเป็น บาร์ (bar) และเวลาอัด (T_u) มีหน่วยเป็นวินาที (s) แสดงดังตารางที่ 3 และรูปแบบการทดลองของการเชื่อมเสียดทาน SSM 7075 แสดงดังตารางที่ 4

ตารางที่ 2 สมบัติทางกลของวัสดุทดลอง

Mechanical Properties	Value
Tensile Strength (MPa)	228
Yield Strength (MPa)	181
Percentage Elongation (%)	14
Hardness (Hv)	107

ตารางที่ 3 ปัจจัยในการเชื่อมเสียดทานที่ใช้ในการทดลอง

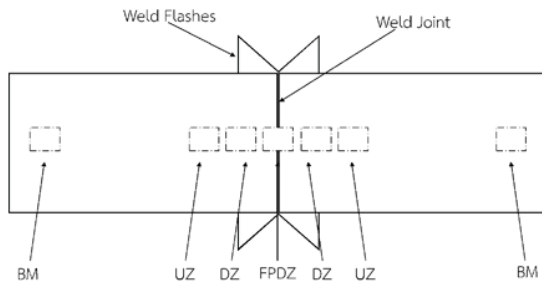
Welding Factor	Level of Experiment		
	1	2	3
ความเร็วหมุนชิ้นงาน (rpm)	450	675	1000
แรงดันเสียดทาน (bar)	40	40	40
เวลาเสียดทาน (s)	6	6	6
แรงดันอัด (bar)	40	50	60
เวลาอัด (s)	3	3	3

ตารางที่ 4 รูปแบบการทดลองของการเชื่อมเสียดทาน SSM7075

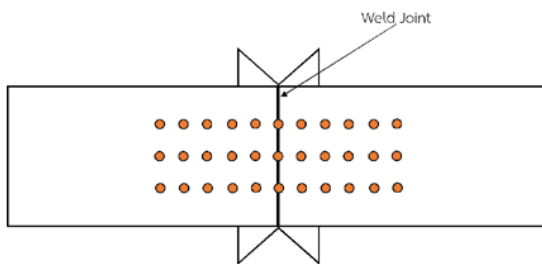
Samples	Rotation Speed (rpm)	Pressure (bar)	Number of Repeat
FW1	450	40	3
FW2	450	50	3
FW3	450	60	3
FW4	675	40	3
FW5	675	50	3
FW6	675	60	3
FW7	1000	40	3
FW8	1000	50	3
FW9	1000	60	3

การตรวจสอบโครงสร้างทางโลหะวิทยา การทดสอบสมบัติทางกล ด้านความแข็งแรง และด้านความแข็งแรงดึง โดยชิ้นงานที่นำไปตรวจสอบโครงสร้างทางโลหะวิทยาจะนำไปผ่าครึ่งด้วยเครื่องเลื่อยสายพานแนวนอน รุ่น CS - 230 จากนั้นจะนำชิ้นงานที่ได้ไปหล่อเรซิน แล้วนำไปขัดด้วยกระดาษทรายเบอร์หยาบจนถึงละเอียด แล้วขัดด้วยผ้าสักหลาดอีกครั้ง จากนั้นนำไปกัดด้วยกรดซิลิโคนเป็นเวลา 10s แล้วนำไปตรวจสอบโครงสร้างทางโลหะวิทยาระดับจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์ โดยมีตำแหน่งการส่องกล้องจุลทรรศน์ คือ บริเวณเนื้อโลหะเดิม (Base Metal; BM) บริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อน (Unaffected zone; UZ) บริเวณการเสียรูป (Deformation Zone; DZ) และบริเวณการเสียรูปอย่างสมบูรณ์แบบ Fully Deformed Zone; FPDZ) แสดงดังภาพที่ 4

การทดสอบความแข็งแรงนำมาจากชิ้นงานที่ผ่าครึ่ง อีกด้านหนึ่งมาหล่อเรซินแล้วขัดด้วยกระดาษทราย เบอร์หยาบจนถึงละเอียด และขัดด้วยผ้าสักหลาด จนเรียบ เสร็จแล้วนำมาทดสอบความแข็งแรงด้วยเครื่องทดสอบความแข็งแรงแบบวิกเกอร์ โดยกดบริเวณพื้นที่หน้าตัดของรอยเชื่อม ระยะห่างระหว่างรอยกด 1 mm แรงกดที่ใช้ 100 กรัม (g) เป็นเวลา 10s ต่อหนึ่งรอยกด แสดงดังภาพที่ 5 โดยใน 1 ชิ้นงานทดสอบจะกดทั้งหมด 3 แนว แล้วนำทั้ง 3 แนวมาคำนวณค่าเฉลี่ยเพื่อเป็น ตัวแทนของชิ้นงานทดสอบแต่ละสภาวะการทดลอง



ภาพที่ 4 ตำแหน่งการส่องกล้องจุลทรรศน์



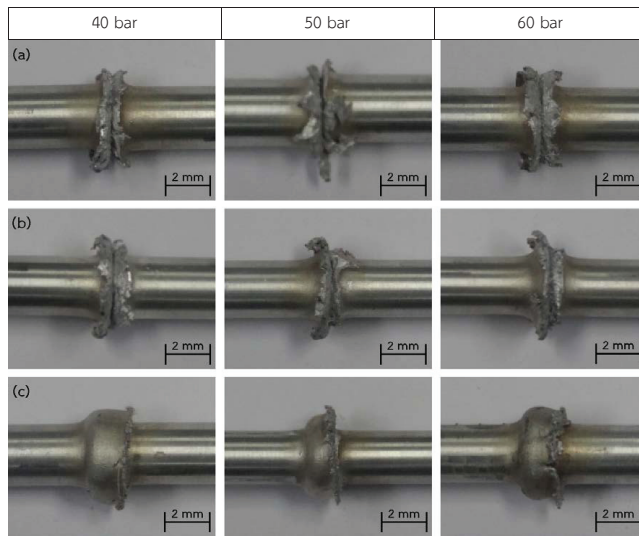
ภาพที่ 5 ตำแหน่งทดสอบความแข็งแรง

การทดสอบความแข็งแรงแรงดึงจะนำชิ้นงานเชื่อมที่ได้ไปแปรรูปให้มีขนาดตามมาตรฐานการทดสอบ American Society for Testing and Materials Standard Test Methods for Tension Testing (ASTM E8M) ด้วยเครื่องกลึงขั้นศูนย์ เมื่อแปรรูปชิ้นงานทดสอบเสร็จก็นำไปทดสอบความแข็งแรงแรงดึงด้วยเครื่องทดสอบแบบเอนกประสงค์ที่อุณหภูมิห้องที่มีความเร็วในการดึง 1 mm/min

3. ผลการทดลองและวิเคราะห์ผล

3.1 การตรวจสอบโครงสร้าง

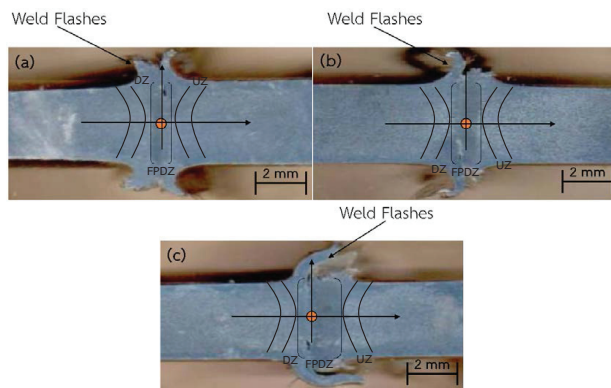
จากการทดลองการเชื่อมเสียดทานตามปัจจัยที่ได้กำหนด พบว่า ความเร็วหมุนเชื่อมและแรงดันอัดส่งผลโดยตรงต่อรูปร่างของแนวเชื่อม แสดงดังภาพที่ 6 ครีบของแนวเชื่อม (Weld Flashes) เพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มแรงดันอัดจาก 40 เป็น 60 bar ส่วนการเพิ่มขึ้นของความเร็วหมุนเชื่อมก็ทำให้เกิดการอ่อนตัวของวัสดุมากขึ้น ส่งผลให้แนวเชื่อมเกิดการท่อน้ำของเนื้อวัสดุภายในตัวของมันเอง เมื่อเปรียบเทียบกันระหว่างความเร็วหมุนเชื่อมที่ 450 rpm กับ 1000 rpm จะเห็นได้ชัดว่ารูปร่างของการเกิด Weld Flashes นั้นชัดเจนมากขึ้น เมื่อเริ่มเพิ่มความเร็วหมุนเชื่อมส่งผลให้เกิด Weld Flashes ที่เพิ่มขึ้นเรื่อยๆ นั้นเป็นผลมาจากอุณหภูมิที่สะสมในเนื้อวัสดุมีมากขึ้น เมื่อเพิ่มความเร็วหมุนเชื่อมส่งผลให้เกิด Weld Flashes ที่แตกต่างกัน [9]



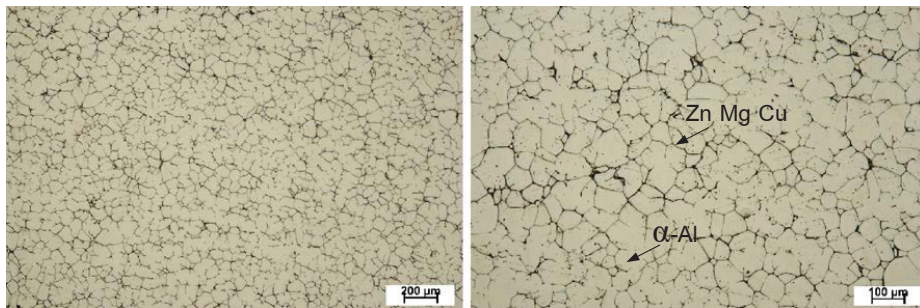
ภาพที่ 6 รอยเชื่อมของชิ้นงาน (a) ความเร็วหมุนเชื่อม 450 rpm (b) ความเร็วหมุนเชื่อม 675 rpm (c) ความเร็วหมุนเชื่อม 1000 rpm

จากนั้นเมื่อนำแนวเชื่อมเสียดทานของแต่ละปัจจัยเชื่อมมาตรวจสอบโครงสร้างมหภาค แสดงดังภาพที่ 7 ทำให้เห็นบริเวณเนื้อโลหะเดิม (Base Metal; BM) บริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อน (Unaffected zone; UZ) บริเวณการเสียรูป (Deformation Zone; DZ) และบริเวณการเสียรูปอย่างสมบูรณ์แบบ (Fully Deformed Zone; FPDZ) ที่ชัดเจน โดยพบว่าบริเวณ FPDZ มีความกว้างของแนวเชื่อมเพิ่มมากขึ้นเมื่อเพิ่มความเร็วหมุนเชื่อมและแรงดันเชื่อม รอยเชื่อมมีการ

ประสานกันกว้างมากขึ้นเมื่อเพิ่มความเร็วหมุนเชื่อม [5] และพบว่า จุดกึ่งกลางรอยเชื่อม (Center Weld) จะอยู่ตรงกลางรอยเชื่อมของทั้งสองชิ้นงาน รอยเชื่อมเกิด Weld Flashes เพิ่มมากขึ้นเมื่อเพิ่มความเร็วหมุนเชื่อม โดยชิ้นงานเชื่อมด้านเคลื่อนที่แบบหมุนมีลักษณะโดนดันเนื้อเชื่อมทำให้เกิดการยืดออกของเนื้อวัสดุ ในขณะที่ชิ้นงานเชื่อมด้านที่เคลื่อนที่เข้าออกมีลักษณะโดนกดเนื้อเชื่อมทำให้เกิดการดันตัวของเนื้อวัสดุออกมา



ภาพที่ 7 โครงสร้างมหภาคของรอยต่อเชื่อมที่แรงดันอัด 50 bar (a) ความเร็วหมุนเชื่อม 450 rpm (b) ความเร็วหมุนเชื่อม 675 rpm (c) ความเร็วหมุนเชื่อม 1000 rpm



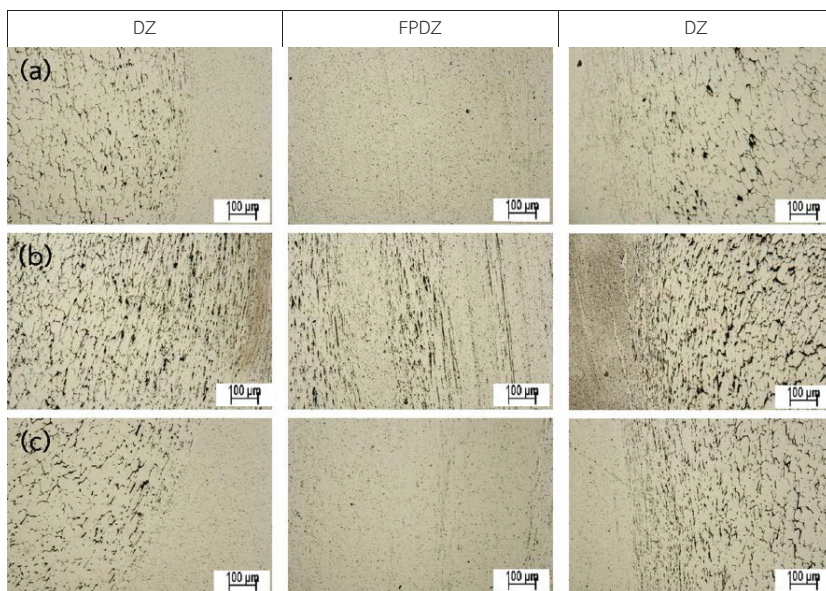
ภาพที่ 8 โครงสร้างจุลภาคบริเวณเนื้อโลหะเดิม

ภาพที่ 8 แสดงโครงสร้างจุลภาคบริเวณ BM โดยมีเกรนของเฟส α -Al ลักษณะของเกรนเป็นแบบก้อนกลมต่อเนื่องกันมีเฟส Zn Mg และ Cu จักกลุ่มรอบเฟส α -Al (ขอบเกรนสีดำ) [10]

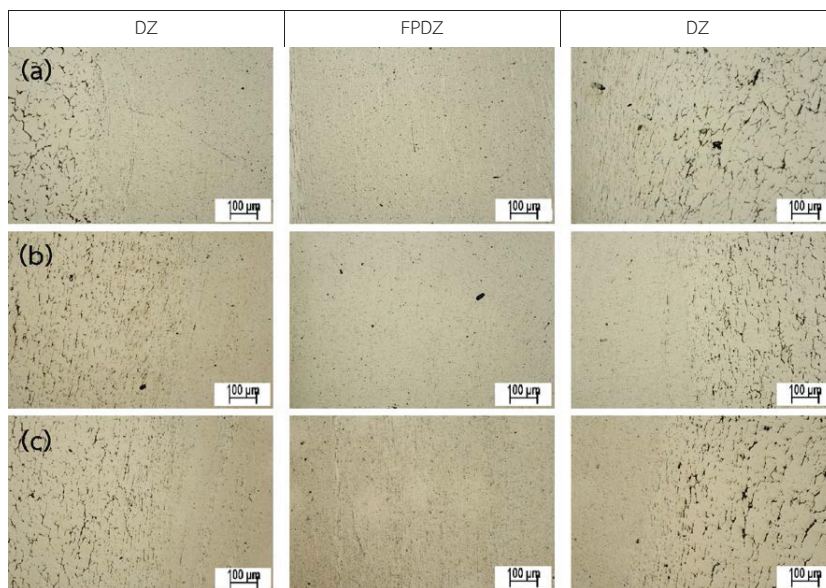
ผลการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค แสดงดังภาพที่ 9-11 โดยที่ความเร็วหมุนเชื่อม 450 675 และ 1000 rpm ตามลำดับ พบว่า โครงสร้างบริเวณ FPDZ เป็นเกรนที่ละเอียดเกิดการผสมผสานของเนื้อโลหะทั้งสองชั้น เมื่อพิจารณาไปถึงค่าระดับความเร็วหมุนเชื่อมและแรงดันอัดที่แตกต่างกันก็พบว่า โครงสร้างเกรนมีลักษณะคล้ายคลึงกัน มีเนื้อเชื่อมที่ละเอียดจากรูปโครงสร้างจุลภาคของเกรนในบริเวณ FPDZ จะเห็นถึงลักษณะการเรียงตัวของเกรนเล็กเป็นแถวเรียงตัวไปในทิศทางเดียวกันซึ่งได้รับอิทธิพลมาจากการหมุนของเครื่องกลึง ซึ่งการเปลี่ยนรูปร่างดังกล่าว เกิดจากการปรับโครงสร้างแบบไดนามิก (Dynamic Recrystallization) ซึ่งได้รับอิทธิพลมาจากความเร็วหมุนเชื่อมและแรงดันอัดจากการเชื่อม

ส่วนที่บริเวณ UZ มีลักษณะของเกรนที่ผสมผสานกันของเกรนที่มีความละเอียดกับเกรนที่เปลี่ยนแปลงรูปร่างไม่เป็นเกรนก้อนกลม เนื่องจากบริเวณนี้เริ่มได้รับผลกระทบทางกลน้อยกว่าบริเวณ FPDZ ที่ได้รับผลกระทบโดยตรงจากการหมุนและอัดของชิ้นงานทั้งสอง

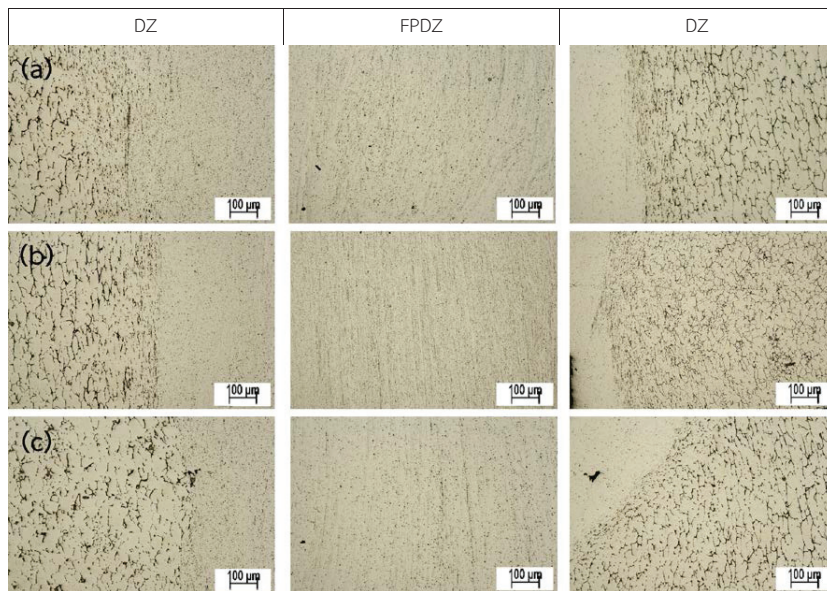
ส่วนบริเวณ DZ จะเห็นการบิดเบี้ยวของเกรนแบบไม่มีรูปร่างที่แน่นอนที่เกิดจากหมุนและอัดของชิ้นงานทั้งสองชั้น และบริเวณ DZ จะติดกับบริเวณ BM ทำให้เห็นรูปร่างของเกรนที่แตกต่างกันอย่างชัดเจน ในบริเวณรอยเชื่อมต่อการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างจากโครงสร้างเนื้อโลหะเดิมเพื่อปรับโครงสร้าง พบว่า ความร้อนจากแรงเสียดทานทำให้เกิดโครงสร้างรูปทรงกลมเกิดการเปลี่ยนรูปร่าง นอกจากนี้โครงสร้างที่ดีในบริเวณเชื่อม คือ พื้นที่ของการผสมสองเฟสระหว่างยูเทคติก (Eutectic) เฟส ($MgZn_2$) และเฟสอะลูมิเนียม (α -Al) [11]



ภาพที่ 9 โครงสร้างจุลภาคของรอยเชื่อมที่ความเร็วหมุนเชื่อม 450 rpm
 (a) แรงดันอัด 40 bar (b) แรงดันอัด 50 bar (c) แรงดันอัด 60 bar



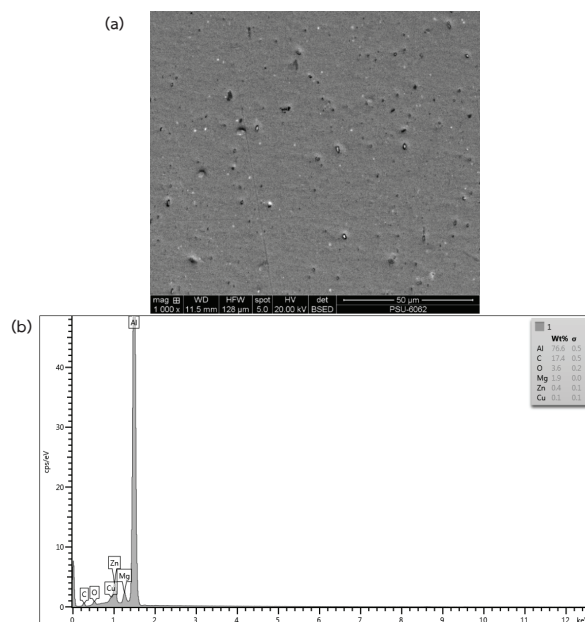
ภาพที่ 10 โครงสร้างจุลภาคของรอยเชื่อมที่ความเร็วหมุนเชื่อม 675 rpm
 (a) แรงดันอัด 40 bar (b) แรงดันอัด 50 bar (c) แรงดันอัด 60 bar



ภาพที่ 11 โครงสร้างจุลภาคของรอยเชื่อมที่ความเร็วหมุนเชื่อม 1000 rpm
(a) แรงดันอัด 40 bar (b) แรงดันอัด 50 bar (c) แรงดันอัด 60 bar

เมื่อนำชิ้นงานทดลองเชื่อมของรอยเชื่อมที่ความเร็วหมุนเชื่อม 1000 rpm แรงดันอัด 60 bar ไปตรวจสอบโครงสร้างด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope; SEM) แสดงดังภาพที่ 12 (a) พบว่าเกรนกระจายทั่วบริเวณของแนวเชื่อม เป็นผลมาจากปัจจัยการเชื่อม อย่างไรก็ตามการเชื่อมอะลูมิเนียมผสมหล่อทิ้งของแข็งกับการเชื่อมแบบ Solid-State ยังคงไม่สามารถรักษาโครงสร้างเดิมได้ แต่ยังโชคดีที่หลังจากการเชื่อมนี้โครงสร้างที่เกิดขึ้นใหม่ ไม่ได้กลายเป็น

โครงสร้างแบบ dendrite พบว่าโครงสร้างเป็นเฟสยูเทคติกซึ่งเป็นโครงสร้างที่ละเอียดประกอบด้วยสังกะสี (Zn) แมกนีเซียม (Mg) และทองแดง (Cu) และมีรวมเฟสเป็น $MgZn_2$ ซึ่งสอดคล้องกันกับ [11] ในเซตรอยจะแบ่งออกเป็นอนุภาคขนาดเล็กดังที่แสดงในภาพ 12 (b) และการวิเคราะห์ธาตุเชิงปริมาณ (Energy Dispersive X-ray Spectrometer; EDX) แสดงดังภาพที่ 12 (b) จากการวิเคราะห์พบว่า เกิดการก่อตัวของสารประกอบสะสมของ Al กับเฟส Zn Mg และ Cu



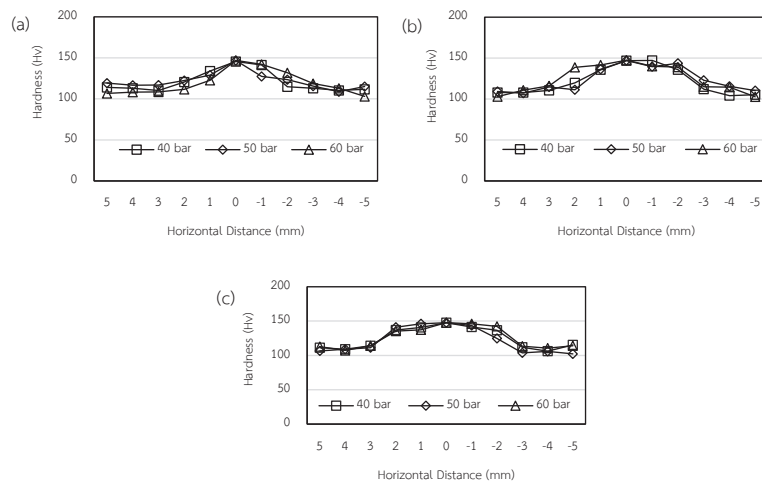
ภาพที่ 12 โครงสร้างจุลภาคของรอยเชื่อมที่ความเร็วหมุนเชื่อม 1000 rpm แรงดันอัด 60 bar (a) SEM และ (b) EDX

3.2 การทดสอบความแข็ง

ผลการทดสอบค่าความแข็งของแนวเชื่อมแสดงดังภาพที่ 13 (a) ความเร็วหมุนเชื่อม 450 rpm (b) ความเร็วหมุนเชื่อม 675 rpm และ (c) ความเร็วหมุนเชื่อม 1000 rpm ตามลำดับ เห็นได้ชัดว่าค่าความแข็งของแนวเชื่อมในบริเวณ DZ ถึงบริเวณ FPDZ สูงกว่าค่าความแข็งของเนื้ออะลูมิเนียมเดิม ค่าความแข็งในเนื้ออะลูมิเนียมเดิมมีความสม่ำเสมอตลอดช่วง แต่เมื่อเริ่มเข้าสู่บริเวณ UZ ค่าความสูงเริ่มปรับเพิ่มมากขึ้นเรื่อยๆ จนถึงจุดสูงสุดในตำแหน่ง Center Weld นอกจากนี้จะเห็นได้ชัดว่าค่าความแข็งของแนวเชื่อมในบริเวณ DZ – FPDZ กระจายตัวกว้างเพิ่มมากขึ้นเมื่อเพิ่มความเร็วหมุนเชื่อม นี้อาจเป็นผลมาจากการกระจายของความร้อนที่เกิดจากการเสียดทานที่มีผลต่อค่าความแข็ง [11] ในช่วงบริเวณ FPDZ ค่าความแข็งสูงกว่าพื้นที่อื่นๆ ความแข็งสูงกว่าพื้นที่อื่นอย่างชัดเจน เนื่องจากการกระจายตัวของอนุภาคเกรนในรอยเชื่อมซึ่งเป็นอนุภาคนาขนาดเล็กที่

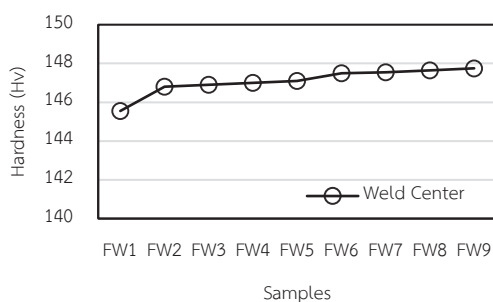
แตกโดยแรงทางกล ส่งผลให้ความแข็งแรงในบริเวณรอยเชื่อมเพิ่มขึ้น เนื่องจากการแตกหักของเฟส $MgZn_2$ ที่มากกว่าบริเวณอื่นๆ การเคลื่อนที่ของแรงกระทำเชิงกลจะกระจายตัวไปทั่วบริเวณเชื่อมซึ่งจะเกิดการตกตะกอนให้มียุคนาขนาดเล็ก Recrystallized [13] กว่าบริเวณอื่นๆ

ในทำนองเดียวกันพารามิเตอร์การเชื่อมต่อของงานวิจัยในครั้งนี้ทั้งหมดจะทำให้ค่าความแข็งคล้ายๆ กัน จากการทดลองพบว่าค่าความเร็วหมุนเชื่อมสูงส่งผลให้เกิดความร้อนในแนวเชื่อมสูง จะนำไปสู่ค่าความแข็งที่สูงขึ้น ตรงกันข้ามกับค่าความเร็วหมุนเชื่อมต่ำและส่งผลให้เกิดความร้อนในแนวเชื่อมต่ำทำให้ค่าความแข็งน้อยลง พารามิเตอร์การเชื่อมจะทำให้เกิดความร้อนสะสมในเนื้อวัสดุ เมื่อการเสียดทานจนทำให้เกิดความร้อนที่สูงขึ้นก็จะส่งผลต่อเนื้อวัสดุให้อ่อน ทำให้อนุภาคในอะลูมิเนียม SSM7075 เคลื่อนที่ได้ง่ายขึ้น สุดท้ายค่าความแข็งของงานวิจัยในพารามิเตอร์การเชื่อมรวมทั้งหมดหลังจากกระบวนการเชื่อมเสียดทานเกี่ยวข้องกับความร้อนในแนวเชื่อม



ภาพที่ 13 ความแข็งของแนวเชื่อม (a) ความเร็วหมุนเชื่อม 450 rpm
(b) ความเร็วหมุนเชื่อม 675 rpm (c) ความเร็วหมุนเชื่อม 1000 rpm

อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาเฉพาะค่าความแข็งของจุด Center Weld แสดงดังภาพที่ 14 พบว่าค่าความแข็งมีค่าเพิ่มมากขึ้นเรื่อยๆ เมื่อเพิ่มความเร็วหมุนเชื่อม เนื่องจากความร้อนและความเปลี่ยนแปลงรูปร่างในสภาวะพลาสติก [14] การเปลี่ยนรูปในสภาวะพลาสติกของวัสดุทำให้เกรนลดขนาดที่นำไปสู่การเพิ่มความความแข็งในแนวเชื่อม [15] โดยค่าความแข็งต่ำสุด 145.6 Hv ที่ความเร็วหมุนเชื่อม 450 rpm แรงดันเชื่อมที่ 40 bar และค่าความแข็งสูงสุด 147.8 Hv ที่ความเร็วหมุนเชื่อม 1000 rpm แรงดันเชื่อมที่ 60 bar รายละเอียดแสดงดังตารางที่ 5



ภาพที่ 14 ค่าความแข็งของแนวเชื่อม
บริเวณ Center Weld

ตารางที่ 5 ค่าความแข็งของจุด Center Weld ของ
รอยเชื่อมเสียดทาน SSM7075

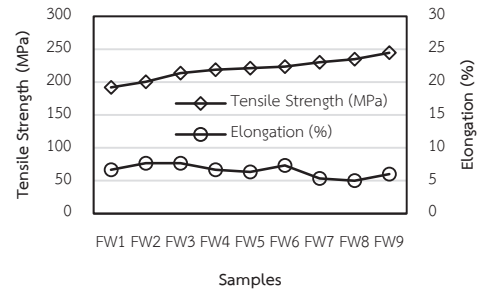
Samples	Weld Center (Hv)
FW1	145.6
FW2	146.8
FW3	146.9
FW4	147.0
FW5	147.1
FW6	147.5
FW7	147.6
FW8	147.7
FW9	147.8

3.3 การทดสอบความแข็งแรงดึง

ผลกระทบของความเร็วหมุนเชื่อมและแรงดันอัดที่ส่งผลต่อค่าความแข็งแรงดึงในการเชื่อมเสียดทาน แสดงดังภาพที่ 15 พบว่าการเปลี่ยนแปลงของความเร็วหมุนเชื่อมและแรงดันอัดทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงความแข็งแรงดึงในรอยเชื่อม ค่าความแข็งแรงเพิ่มมากขึ้นเมื่อเพิ่มความเร็ว

หมุนเชื่อมความร้อนและสภาวะการเปลี่ยนแปลงแบบพลาสติกส่งผลโดยตรงต่อรอยเชื่อม การเกิดความร้อนเกินจุดที่อยู่ในสภาวะพลาสติกจะทำให้เกิดการหลอม (Meltings) ของเนื้อวัสดุทำให้มีค่าความแข็งแรงลดลง [6] นอกจากนี้ความเร็วหมุนเชื่อมต่ำก็ส่งผลให้เกิดการป้อนความร้อนในเนื้อวัสดุที่ต่ำกว่าความเร็วหมุนเชื่อมสูง ทำให้วัสดุเกิดการไหลตัวภายในแนวเชื่อมที่ลำบากมากขึ้น และส่งผลต่อความสมบูรณ์ในแนวเชื่อม [16] ผลกระทบของความเร็วหมุนเชื่อมและแรงดันอัดของความแข็งแรงดึงรอยเชื่อม ค่าความแข็งแรงดึงต่ำสุด 192.0 MPa ที่ความเร็วหมุนเชื่อม 450 rpm

แรงดันเชื่อมที่ 40 bar และค่าความแข็งแรงดึงสูงสุด 244.6 MPa ที่ความเร็วหมุนเชื่อม 1000 rpm แรงดันเชื่อมที่ 60 bar รายละเอียดแสดงดังตารางที่ 6



ภาพที่ 15 ค่าความแข็งแรงดึงของแนวเชื่อม

ตารางที่ 6 ค่าความแข็งแรงดึงของรอยเชื่อมเสียดทาน SSM7075

Condition of Weld	Tensile Strength (Mpa)	YS_Stress (MPa)	Elongation (%)	Joint Efficiency
FW1	192.0	153.6	6.7	84.2
FW2	200.3	160.2	7.7	87.9
FW3	213.9	171.1	7.7	93.8
FW4	218.8	175.0	6.7	96.0
FW5	221.2	177.0	6.3	97.0
FW6	223.5	178.8	7.3	98.0
FW7	230.1	184.1	5.3	100.1
FW8	235.0	188.0	5.0	103.0
FW9	244.6	195.6	6.0	107.3

เนื่องจากความเร็วหมุนเชื่อมและแรงดันอัดของรอยเชื่อมเพิ่มมากขึ้น ความแข็งแรงดึงของรอยเชื่อมเพิ่มขึ้น แต่เปอร์เซ็นต์ (%) การยืดตัวของรอยเชื่อมไม่ได้มีแนวโน้มในลักษณะนั้น แต่จะแกว่งตัวอยู่ในช่วงแคบๆ ไม่เกิน 3% และสำหรับประสิทธิภาพของแนวเชื่อมเมื่อเทียบกับเนื้อโลหะเดิม พบว่าที่ความเร็วหมุนเชื่อม 1000 rpm มีค่าประสิทธิภาพแนวเชื่อมมากกว่า 100% ส่วนค่าความเร็วหมุนเชื่อมอื่นๆ น้อยกว่า 100%

นอกจากนี้ลักษณะรอยขาดของแนวเชื่อมในการทดสอบความแข็งแรงดึง ซึ่งผลที่ได้จากการตรวจสอบในระดับโครงสร้างมหภาค พบว่าลักษณะของผิวแตกที่เห็นเป็นแบบ Fibrous หรือ Silky และพื้นที่ผิวแตกมีสีเทา เนื่องจากการสะท้อนของแสง ส่วนผลที่ได้จากการตรวจสอบในระดับจุลภาคแสดงลักษณะของผิวแตกเป็นแบบ Dimple โดยถ้าชิ้นส่วนโลหะทางวิศวกรรมได้รับการกระกรรมแบบ Overload และแรงที่กระทำเป็นแบบแรงดึง [17] ลักษณะของ Dimple ที่เกิดขึ้นแสดงดังภาพที่ 16



ภาพที่ 16 ลักษณะรอยขาดของแนวเชื่อม

4. สรุปผลการทดลอง

1) บริเวณ FPDZ มีความกว้างของแนวเชื่อมเพิ่มมากขึ้นเมื่อเพิ่มความเร็วหมุนเชื่อมและแรงดันเชื่อม รอยเชื่อมมีการประสานกันกว้างมากขึ้นเมื่อเพิ่มความเร็วหมุนเชื่อม

2) บริเวณ DZ จะเห็นการบิดเบี้ยวของเกรนแบบไม่มีรูปร่างที่แน่นอนที่เกิดจากหมุนและอัดของชิ้นงานทั้งสองชิ้น และบริเวณ DZ จะติดกับบริเวณ BM ทำให้เห็นรูปร่างของเกรนที่แตกต่างกันอย่างชัดเจน

3) ค่าความแข็งแรงของแนวเชื่อมในบริเวณ DZ- FPDZ กระจ่ายตัวกว้างเพิ่มมากขึ้นเมื่อเพิ่มความเร็วหมุนเชื่อม นี่อาจเป็นผลมาจากการกระจายของความร้อนที่เกิดจากการเสียดทานที่มีผลต่อค่าความแข็งแรง

4) ผลกระทบของความเร็วหมุนเชื่อมและแรงดันอัดของความแข็งแรงดึงรอยเชื่อม ค่าความแข็งแรงดึงต่ำสุด 192.0 MPa ที่ความเร็วหมุนเชื่อม 450 rpm แรงดันเชื่อมที่ 40 bar และค่าความแข็งแรงดึงสูงสุด 244.6 MPa ที่ความเร็วหมุนเชื่อม 1000 rpm แรงดันเชื่อมที่ 60 bar และมีประสิทธิภาพของความแข็งแรงดึงรอยเชื่อมต่ออยู่ที่ประมาณ 107.3% เมื่อเทียบกับเนื้อโลหะเดิม

5. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณสาขาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้เครื่องมือและอุปกรณ์ในการทดลอง งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Sammaiah P., Tagore GRN. and Madhusudhan GR. (2009). Effect of parameters on mechanical properties of ferritic stainless steel (430) and 6063 Al-alloys by friction welding. *Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 3 : 21-34.
- [2] Mumin S. (2005). Joining with friction welding of high-speed steel and medium-carbon steel. *Journal of Materials Processing Technology*, 168 : 202-210.
- [3] Tylecote RF. (1986). *The Solid Phase Welding of Metals*. London : Edward Arnold Ltd.
- [4] Dobrovodov AN (1975). Selection of optimum conditions for the friction welding of high speed steel 45. *Welding Production*, 22 : 22-26
- [5] Ahmad FMN, Uday MB, Zuhailawati H and Ismail AB. (2010). Microstructure and mechanical properties of alumina-6061 aluminum alloy joined by friction welding. *Materials and Design*, 31 : 670-676

- [6] Mumin S., Erol AH. and Turgut G. (2007). Characterization of mechanical properties in AISI 1040 parts welded by friction welding. *Materials Characterization*, 58 : 1033-1038
- [7] วรพงศ์ บุญช่วยแทน จักรนรินทร์ ฉัตรทอง รอมฏอน บุระพา และชาตรี หอมเขียว (2559). การเชื่อมวัสดุทรงกระบอกด้วยกรรมวิธีการเชื่อมเสียดทาน. การประชุมวิชาการช่างงานวิศวกรรมอุตสาหกรรม ประจำปี พ.ศ. 2559, ขอนแก่น, ประเทศไทย, หน้า 1418-1423.
- [8] รอมฏอน บุระพา รังสินี แคนยุกต์ และเจษฎาวรรณสินธุ์ (2552). การพัฒนากระบวนการผลิตโลหะกึ่งของแข็งโดยการพันฟองแก๊สขณะแข็งตัวสำหรับอะลูมิเนียมผสมเกรด A356. การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ครั้งที่ 7, สงขลา, ประเทศไทย, หน้า 549-554.
- [9] Yanni W., Jinglong L., Jiangtao X. and Fusheng Z. (2016). Investigation of interdiffusion and intermetallic compounds in Al-Cu joint produced by continuous drive friction welding. *Engineering Science and Technology, an International Journal*, 19 : 90-95
- [10] Mahathaninwonga N., Plookphol T., Wannasina J. and Wisutmethangoon S. (2012). T6 heat treatment of rheocasting 7075 Al alloy. *Materials Science and Engineering A*, 532 : 91-99.
- [11] Suppachai C., Prapas M. and Chaiyoot M. (2014). Friction Welding of SSM356 with SSM7075 Aluminium Alloys. *Australian Journal of Basic and Applied Sciences*, 8 (15) : 277-284.
- [12] Yeoh CK., Shamsul BJ. and Zainal AA. (2004). The effect of varying process parameters on the microhardness and microstructure of Cu-Steel and Al-Al₂O₃ friction joints. *Jurnal Teknologi*, 41 : 85-95.
- [13] Rotundo F., Ceschini L., Morri A., Jun TS., Korsunsky AM. (2010). Mechanical and microstructural characterization of 2124Al/25 vol.%SiCp joints obtained by linear friction welding (LFW). *Composites Part A : Applied Science and Manufacturing*, 41 (9) : 1028-1037.
- [14] Uday MB., Ahmad Fauzi MN., Hasmaliza M. and Ahmad BI. (2008). Effect of Rotational Speeds on the Friction Welding of Alumina-Aluminum 6061 alloy joints. In: *Proceedings of Malaysian*
- [15] Ozdemir N. (2005). Investigation of the mechanical properties of friction-welded joints between AISI 304L and AISI 4340 steel as a function rotational speed. *Materials Letters*, 59: 2504-2509.
- [16] Uday MB., Ahmad FMN., Zuhailawati H., Ismail AB. (2011). Evaluation of interfacial bonding in dissimilar materials of YSZ-alumina composites to 6061 aluminium alloy using friction welding. *Materials Science and Engineering : A*, 528 (3) : 1348-1359.
- [17] กฤษ เหลืองโสภานันท์ และฉวีวรรณ พูนธนา นิวัฒน์กุล (2553). การวิเคราะห์ความเสียหายของชิ้นส่วนโลหะทางวิศวกรรมที่เกิดจากการรับภาระกรรมทางกลด้วยการตรวจสอบสภาพผิวแตก. *วิศวกรรมสาร มก. ปีที่ 23 ฉบับที่ 74* หน้า 109-119.