

## ผลกระทบของกรรมวิธีการเชื่อมเสียดทานวัสดุต่างชนิดต่อโครงสร้างทางโลหะวิทยาและสมบัติทางกลระหว่างอะลูมิเนียมหล่อกึ่งของแข็ง SSM 356 กับ SSM 7075 โดยมีชั้นทองแดงเป็นวัสดุเสริมในแนวเชื่อม

วรพงศ์ บุญช่วยแทน\* รอมฎอน บุระพา และ วรธนพร ชีววุฒิมงคล  
สาขาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย  
หน่วยเทคโนโลยีการแปรรูปวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย

\* ผู้นิพนธ์ประสานงาน โทรศัพท์ 0 7431 7100 ต่อ 3110 อีเมล: worapong.b@rmutsv.ac.th DOI: 10.14416/j.kmutnb.2020.06.004  
รับเมื่อ 28 ตุลาคม 2562 แก้ไขเมื่อ 12 ธันวาคม 2562 ตอรับเมื่อ 20 ธันวาคม 2562 เผยแพร่ออนไลน์ 8 มิถุนายน 2563  
© 2020 King Mongkut's University of Technology North Bangkok. All Rights Reserved.

### บทคัดย่อ

งานวิจัยครั้งนี้ศึกษาการเชื่อมเสียดทานอะลูมิเนียมหล่อกึ่งของแข็งต่างชนิดระหว่าง SSM 356 กับ SSM 7075 ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตร และมีความยาว 100 มิลลิเมตร ภายใต้ความเร็วหมุนเชื่อม 1,300 รอบต่อนาที แรงดันเสียดทาน 50 บาร์ แรงดันอัด 3 ระดับ คือ 10, 20 และ 30 บาร์ เวลาเสียดทาน 30 วินาที และเวลาดันอัด 3 ระดับ คือ 5, 7 และ 10 วินาที เพื่อศึกษาปัจจัยของการเชื่อมที่ส่งผลกระทบต่อโครงสร้างมหภาค โครงสร้างจุลภาค และสมบัติทางกล ผลการทดลองพบว่าความเร็วหมุนเชื่อม แรงดันอัด และเวลาดันอัด ส่งผลโดยตรงต่อการเกิดครีบของแนวเชื่อมเมื่อเพิ่มแรงดันอัดและเวลาดันอัดมากขึ้นส่งผลให้ครีบเพิ่มมากขึ้น การเกิดขึ้นของครีบสัมพันธ์กับค่าความแข็งแรงดึงพบว่า ค่าความแข็งแรงดึงสูงสุด 203.81 เมกะปาสคาล ที่ความเร็วหมุนเชื่อม 1,300 รอบต่อนาที แรงดันอัด 20 บาร์ และเวลาดันอัด 7 วินาที ซึ่งมีครีบเกิดขึ้นมากที่สุด ค่าความแข็งแรงดึงสูงสุดที่ความเร็วหมุนเชื่อม 1,300 รอบต่อนาที แรงดันอัด 10 บาร์ เวลาดันอัด 7 วินาที เท่ากับ 97.8 HV ปัจจัยที่เลือกในการเชื่อมเสียดทานโดยเสริมวัสดุทองแดงในแนวเชื่อม คือ ความเร็วหมุนเชื่อมที่ 1,300 รอบต่อนาที แรงดันอัดที่ 20 บาร์ เวลาดันอัดที่ 7 วินาที ค่าความแข็งแรงดึงของรอยเชื่อมโดยเสริมวัสดุทองแดงในแนวเชื่อม 170.70 เมกะปาสคาล และค่าความแข็งแรงของรอยเชื่อมโดยเสริมวัสดุทองแดงในแนวเชื่อม 127.63 HV

**คำสำคัญ:** การเชื่อมเสียดทาน วัสดุต่างชนิด อะลูมิเนียมหล่อกึ่งของแข็ง วัสดุเสริมในแนวเชื่อม

การอ้างอิงบทความ: วรพงศ์ บุญช่วยแทน รอมฎอน บุระพา และ วรธนพร ชีววุฒิมงคล, “ผลกระทบของกรรมวิธีการเชื่อมเสียดทานวัสดุต่างชนิดต่อโครงสร้างทางโลหะวิทยาและสมบัติทางกลระหว่างอะลูมิเนียมหล่อกึ่งของแข็ง SSM 356 กับ SSM 7075 โดยมีชั้นทองแดงเป็นวัสดุเสริมในแนวเชื่อม,” วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, ปีที่ 30, ฉบับที่ 3, หน้า 465-480, ก.ค.-ก.ย. 2563.



## Effects of Friction Welding Dissimilar Joint to Metallurgy and Mechanical Properties between Aluminum Casting Semi-Solid Metal 356 and 7075 with Copper Interlayer on Welded

Worapong Boonchouytan\*, Romadon Burapa and Watthanaphon Cheewawuttipong

Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Rajamankala University of Technology Srivijaya, Songkhla, Thailand  
Materials Processing Technology Research Unit, Faculty of Engineering, Rajamankala University of Technology Srivijaya, Songkhla, Thailand

\* Corresponding Author, Tel. 0 7431 7100 Ext. 3110, E-mail: worapong.b@rmutsv.ac.th DOI: 10.14416/j.kmutnb.2020.06.004

Received 28 October 2019; Revised 12 December 2019; Accepted 20 December 2019; Published online: 8 June 2020

© 2020 King Mongkut's University of Technology North Bangkok. All Rights Reserved.

### Abstract

This research studied friction stir welding of dissimilar joints of aluminum semi-solid metal between SSM 356 and SSM 7075 with 10 mm diameters and 100 mm length under the rotation speed of 1,300 rpm, 50 bar friction pressure, 3-level compression pressure including 10, 20 and 30 bar, a friction time of 30 seconds, and the compression time of 5, 7 and 10 seconds. This study examined welding factors affecting macrostructure, microstructure, and mechanical properties. The findings revealed that the rotational speed, compression pressure and compression time directly affected the occurrence of weld flashes in relation to tensile strength. It was found that the maximum tensile strength was 203.81 MPa at the 1,300 rpm rotation speed, 20 bar compression pressure and a 7-second compression time; the maximum hardness at 1,300 rpm rotation speed, 10 bar pressure at and a 7-second compression time equals 97.8 HV. Factors selected for friction welding added with the copper material interlayer on welded joints comprise 1,300 rpm rotation speed, 20 bar compression pressure, a 7-second compression time, with the welded joint tensile strength of 170.70 MPa and 127.63 HV hardness.

**Keywords:** Friction Welding, Dissimilar Joint, Aluminum Casting Semi Solid Metal, Interlayer on Welded

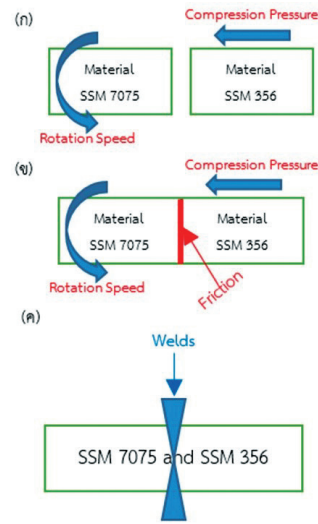
Please cite this article as: W. Boonchouytan, R. Burapa, and W. Cheewawuttipong, "Effects of friction welding dissimilar joint to metallurgy and mechanical properties between aluminum casting semi-solid metal 356 and 7075 with copper interlayer on welded," *The Journal of KMUTNB*, vol. 30, no. 3, pp. 465–480, Jul.-Sep. 2020 (in Thai).

## 1. บทนำ

การเชื่อมเสียดทานเป็นเทคนิคที่ใช้ในการเชื่อมต่อวัสดุที่มีรูปทรงสมมาตรกัน [1] ตัวอย่างของการเชื่อม แสดงดังรูปที่ 1 โดยกระบวนการเชื่อมเสียดทาน (Friction Welding; FW) มีขั้นตอนการเชื่อม คือ วัสดุทรงกระบอกตัวที่หนึ่งหมุนด้วยความเร็วคงที่ แสดงดังรูปที่ 1 (ก) จากนั้นวัสดุทรงกระบอกตัวที่สองที่ถูกยึดแน่นอยู่กับที่ และไม่มีการหมุนเคลื่อนเข้าหาวัสดุทรงกระบอกตัวที่หนึ่งด้วยแรงดันเสียดทาน และเวลาเสียดทาน แสดงดังรูปที่ 1 (ข) ความร้อนที่เกิดจากการเสียดทานทำให้วัสดุบริเวณรอยต่อเกิดการอ่อนตัว ขณะเดียวกันแรงดันในแนวแกนของแท่งทรงกระบอกจะอัดชิ้นงานเข้าด้วยกันทำให้เกิดการเชื่อมยึดเข้าด้วยกัน แสดงดังรูปที่ 1 (ค) ในกรรมวิธีการเชื่อมนี้ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการเชื่อมต่อกัน คือ ความเร็วหมุนเชื่อม แรงดันอัด แรงดันเสียดทาน เวลาต้นอัด และเวลาเสียดทาน เป็นต้น

การเชื่อมเสียดทานเป็นกระบวนการเชื่อมในสภาวะของแข็งที่มีการใช้งานกันอย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมต่างๆ เช่น การบินและอวกาศ รถยนต์ การเดินเรือ เป็นต้น ในกระบวนการนี้ชิ้นส่วนที่จะเชื่อมต่อกันจะถูกหมุนซึ่งกันและกัน ในขณะที่ใช้แรงดันตามแนวแกน (แรงดันอัดและแรงดันเสียดทาน) เมื่อมีการหมุนชิ้นออกไซด์ของผิวจะแตกและความร้อนเกิดขึ้นที่รอยต่อของชิ้นงานทั้งสองเนื่องจากแรงเสียดทานซึ่งทำให้วัสดุอ่อนตัวลง ในขณะที่ชิ้นส่วนยังคงหมุนอยู่ความร้อนที่เกิดขึ้นและวัสดุที่จุดเชื่อมจะเริ่มเปลี่ยนรูปเชิงพลาสติก ชิ้นออกไซด์ที่แตกจะถูกแยกไปจากรอยเชื่อมโดยการไหลของโลหะเชิงพลาสติกออกไปด้านนอก (ซึ่งปรากฏเป็นครีป) จากนั้นชิ้นส่วนจะถูกให้หยุดหมุนอย่างกะทันหันและมีแรงตามแนวแกนที่สูงกว่า (แรงดันอัด) เพื่อให้การเชื่อมเสร็จสมบูรณ์ข้อได้เปรียบเฉพาะของการเชื่อมเสียดทานเมื่อเปรียบเทียบกับกระบวนการเชื่อมในสภาวะของแข็งอื่นๆ คือ 1) ใช้เวลาของกระบวนการเชื่อมที่สั้นมาก 2) ไม่ต้องใช้เครื่องมือพิเศษ การจับยึด การควบคุมบรรยากาศปกคลุมหรือการเตรียมพื้นผิวที่ต้องการ 3) สามารถเชื่อมต่อรูปทรงท่อหรือวัสดุที่แตกต่างกันได้ [2], [3]

วัสดุที่นำมาใช้ในอุตสาหกรรมต่างๆ ที่นิยมใช้มาก



รูปที่ 1 กระบวนการเชื่อมเสียดทาน

คือ อะลูมิเนียม (Aluminum) อะลูมิเนียมจะมีสมบัติทางกลที่ไม่สูงนัก แต่สามารถเพิ่มธาตุที่สำคัญบางชนิดเข้าไปได้ เช่น แมกนีเซียม ซิลิกอน ทองแดง เป็นต้น เพื่อเพิ่มสมบัติทางกลให้กับอะลูมิเนียมได้ และได้อะลูมิเนียมผสม (Alloy) ที่มีคุณสมบัติที่เหมาะสมกับการใช้งานในอุตสาหกรรมต่างๆ ได้ [4] อะลูมิเนียม 7075 เป็นอะลูมิเนียมผสมสังกะสี ที่มีความแข็งแรงสูงที่สุดในกลุ่ม ตัดได้ง่าย นิยมใช้ทำแม่พิมพ์เป่าขวดพลาสติก แม่พิมพ์ฉีดพลาสติก อุปกรณ์ชิ้นส่วนเครื่องจักรกล โต๊ะเครื่องมือ แผ่นรอง สแตมป์ ส่วนอะลูมิเนียมเกรด 356 เป็นอะลูมิเนียมกลุ่มผสมซิลิกอน ซึ่งมีข้อดีหลายประการ เช่น สามารถนำไปผ่านกระบวนการทางความร้อนเพื่อเพิ่มความแข็งแรงได้ (Precipitation Hardening Age Hardening) สามารถนำไปผลิตโดยใช้ทั้งแบบหล่อทรายและแบบหล่อถาวร มีผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวัสดุทั้งสอง เช่น โครงสร้างจุลภาคและความแข็งแรงดึงของการเชื่อมเสียดทานโลหะอะลูมิเนียมผสม AA7075-T6 พบว่า แรงเสียดทาน ความเร็วหมุนเชื่อม และความยาวการเผาไหม้ (Burn-off Length) เป็นสามปัจจัยที่สำคัญที่สุดที่มีผลต่อค่าความแข็งแรงดึงของรอยเชื่อม โดยมีประสิทธิภาพของรอยเชื่อมเมื่อเทียบกับเนื้อโลหะเดิมเท่ากับ 89% [3] โครงสร้างจุลภาคและสมบัติทางกลของการเชื่อมเสียดทานวัสดุ SSM 356 พบว่า โครงสร้าง

ในบริเวณรอยเชื่อมเกิดการแตกหักของเฟสยูเทคติกเนื่องจากความเร็วหมุนเชื่อมและแรงดันอัด การเชื่อมด้วยวิธีนี้จะช่วยรักษาโครงสร้างทางจุลภาคให้คล้ายกับโครงสร้างเดิมของวัสดุทดลอง [5] นอกจากนี้ยังพบงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับเชื่อมเสียดทานวัสดุทั้งสองชนิดเข้าด้วยกัน เช่น อิทธิพลของความเร็วหมุนเชื่อมที่ส่งผลต่อสมบัติทางกลของการเชื่อมอะลูมิเนียมต่างชนิด ระหว่าง SSM 7075 กับ SSM 356 ด้วยการเชื่อมเสียดทานพบว่า ความเร็วหมุนเชื่อมที่แตกต่างกันทำให้มีสมบัติทางกลที่แตกต่างกัน และโครงสร้างจุลภาคบริเวณรอยเชื่อมถูกแรงเสียดทานจากการหมุนกระทำจนอนุภาคของเฟสเกิดการแตกหักและเล็กลง [4] การเชื่อมต่างวัสดุของอะลูมิเนียม SSM 356 กับ SSM 6061 โดยกรรมวิธีการเชื่อมเสียดทานพบว่า มีการเชื่อมติดเข้าด้วยกันได้ดีในทุกตัวแปรของการทดลอง ลักษณะโครงสร้างจุลภาคของทั้งสองวัสดุผสมเข้ากันได้ โดยมีการแตกหักของอนุภาคของวัสดุทั้งสองชนิด [6] จากผลงานวิจัยที่เคยทำมาในอดีต พบว่าการเชื่อมต่อวัสดุทั้งสองด้วยกรรมวิธีนี้ยังไม่มีภาวการณ์นำวัสดุเสริมในแนวเชื่อม ดังนั้นในงานวิจัยครั้งนี้ได้เสนอวัสดุทองแดงซึ่งมีสมบัติเด่น คือ ความแข็งแรง โดยมีข้อสันนิษฐานเพื่อการค้นพบโดยการเพิ่มทองแดงสามารถช่วยเพิ่มสมบัติทางกลให้กับรอยเชื่อมได้

จากเหตุผลดังกล่าวงานวิจัยครั้งนี้จึงศึกษาผลกระทบของกรรมวิธีการเชื่อมเสียดทานวัสดุต่างชนิดต่อโครงสร้างทางโลหะวิทยาและสมบัติทางกลระหว่างอะลูมิเนียมหล่อกึ่งของแข็ง SSM 356 กับ SSM 7075 โดยมีชั้นทองแดงเป็นวัสดุเสริมในแนวเชื่อม โดยการยืนยันผลด้วยการตรวจสอบโครงสร้างมหภาค โครงสร้างจุลภาค สมบัติทางกล (ความแข็งแรงและความแข็งแรงดึง) ซึ่งสามารถนำผลการทดลอง การวิเคราะห์ผลการทดลองไปประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้อง และเป็นฐานข้อมูลให้กับงานวิจัยของประเทศไทยต่อไป

## 2. วัสดุและขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

วัสดุที่ใช้ในการวิจัย คือ อะลูมิเนียมหล่อกึ่งของแข็ง (Semi Solid Metal; SSM) SSM 7075 และ SSM 356 โดยมีส่วนผสมทางเคมีของวัสดุทดลอง (เปอร์เซ็นต์ต่อน้ำหนัก)

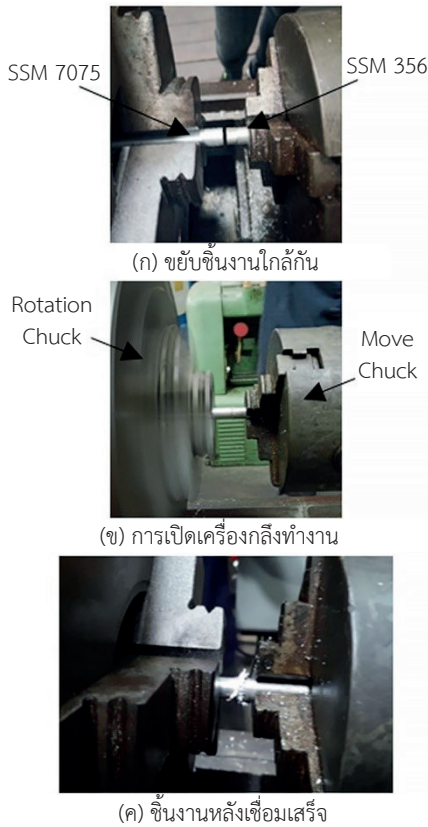
และสมบัติทางกล แสดงดังตารางที่ 1 จากนั้นนำวัสดุทดลองมาแปรรูปด้วยเครื่องกลึงขั้นศูนย์ ยี่ห้อ HELLER รุ่น 2S ให้มีรูปทรงเป็นทรงกระบอก มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตร และมีความยาว 100 มิลลิเมตร

ปัจจัยกระบวนการเชื่อมเสียดทาน ประกอบด้วยความเร็วหมุนเชื่อม (R) 1 ระดับ คือ 1,300 รอบต่อนาที แรงดันเสียดทาน (P1) 1 ระดับ คือ 50 บาร์ แรงดันอัด (P2) 3 ระดับ คือ 10, 20 และ 30 บาร์ เวลาเสียดทาน (T1) 1 ระดับ คือ 30 วินาที และเวลาดันอัด (T2) 3 ระดับ คือ 5, 7 และ 10 วินาที

ตารางที่ 1 ส่วนผสมทางเคมี (เปอร์เซ็นต์ต่อน้ำหนัก) และสมบัติทางกลของวัสดุทดลอง

| Elements               | SSM 356 | SSM 7075 |
|------------------------|---------|----------|
| Si                     | 7.74    | 0.40     |
| Fe                     | 0.57    | 0.50     |
| Cu                     | 0.05    | 1.40     |
| Mn                     | 0.06    | 0.30     |
| Mg                     | 1.20    | 2.30     |
| Zn                     | 0.01    | 5.30     |
| Ti                     | 0.05    | 0.20     |
| Cr                     | 0.02    | 0.21     |
| Ni                     | 0.01    | -        |
| Mg                     | 0.32    | -        |
| Al                     | Bal.    | Bal.     |
| Tensile Strength (MPa) | 169     | 228      |
| Hardness Vickers (HV)  | 83      | 124      |

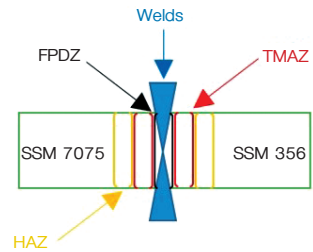
ขั้นตอนการเชื่อมเสียดทาน เริ่มจากการจับยึดอะลูมิเนียม SSM 7075 ด้านหัวจับเครื่องกลึงขั้นศูนย์ และจับยึดอะลูมิเนียม SSM 356 ด้านหัวจับอยู่กับที่ของเครื่องดันอัดด้วยระบบไฮดรอลิกส์ แสดงดังรูปที่ 2 (ก) เปิดเครื่องดันอัดด้วยระบบไฮดรอลิกส์ เพื่อขยับวัสดุด้านอะลูมิเนียม SSM 356 เลื่อนเข้าหาด้านอะลูมิเนียม 7075 แสดงดังรูปที่ 2 (ข) เลื่อนขยับจนวัสดุทั้งสองสัมผัสกันเล็กน้อยเพื่อคว่ำวัสดุทั้งสองมีผิวหน้าตรงกันพอดี และเพื่อไม่ให้เกิดความผิดพลาดขณะทำการเชื่อมทำงาน เปิดเครื่องกลึงขั้นศูนย์เพื่อเริ่มเข้าสู่กระบวนการเชื่อมเสียดทานเพื่อให้ด้านอะลูมิเนียม 7075 ที่หมุนตามความเร็วหมุนเชื่อม (R) ของปัจจัยการเชื่อมในการทดลอง จากนั้นค่อยๆ



รูปที่ 2 กระบวนการเชื่อมเสียดทาน

เลื่อนขยับวัสดุด้านอะลูมิเนียม SSM 356 ให้ผิวหน้าของวัสดุสัมผัสและเกิดแรงเสียดทานโดยใช้เวลาในการเสียดทาน (T1) เป็นเวลา 30 วินาที ในขณะที่เสียดทานกันอยู่นั้นมีการใช้แรงดันเสียดทาน (P1) 50 บาร์ พร้อมกันด้วย เมื่อเสียดทานจนถึงเวลาที่กำหนดแล้วจึงใช้แรงดันอัด (P2) ของปัจจัยการเชื่อมในการทดลองแบบอัตโนมัติของเครื่อง และใช้เวลาดันอัด (T2) ของปัจจัยการเชื่อมในการทดลอง เมื่อครบกำหนดเวลาดันอัดแล้วพร้อมกับกดหยุดเครื่องกลึงยื่นศูนย์พร้อมกับเหยียบเบรกเพื่อให้เครื่องหยุดการหมุน จากนั้นคลายชุดหัวจับทั้งสองด้านที่จับยึดชิ้นงานอยู่ออกและนำชิ้นงานออกมา เป็นอันเสร็จกระบวนการเชื่อมเสียดทานต่อหนึ่งปัจจัยการเชื่อมในการทดลอง โดยชิ้นงานเชื่อมที่เชื่อมเสร็จแสดงดังรูปที่ 2 (ค)

เมื่อได้ชิ้นงานเชื่อมมาแล้วจะนำไปดำเนินการตรวจ

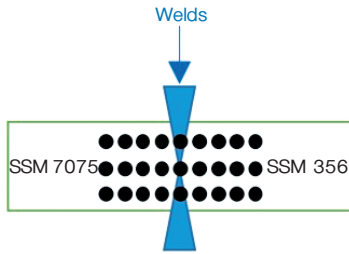


รูปที่ 3 บริเวณชิ้นงานเพื่อตรวจสอบโครงสร้างทางโลหะวิทยา

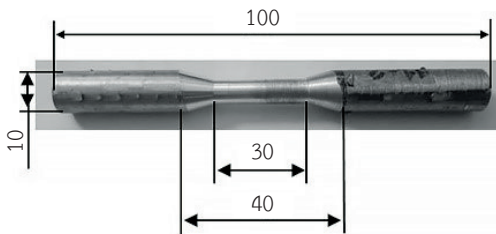
สอบโครงสร้างทางโลหะวิทยา การทดสอบสมบัติทางกลด้านความแข็งแรงดึง และด้านความแข็ง โดยชิ้นงานที่นำไปตรวจสอบโครงสร้างทางโลหะวิทยาจะนำไปผ่าครึ่งด้วยเลื่อยมือ จากนั้นได้นำไปหล่อเรซิน แล้วนำไปขัดด้วยกระดาษทรายเบอร์หยาบจนถึงเบอร์ละเอียด แล้วขัดด้วยผ้าสักหลาดอีกครั้ง จากนั้นนำไปกัดด้วยกรดซิลิโคนเป็นเวลา 10 วินาที แล้วนำไปตรวจสอบโครงสร้างทางโลหะวิทยาในระดับมหภาคและจุลภาค ด้วยกล้องจุลทรรศน์โดยมีตำแหน่งการส่องกล้องจุลทรรศน์ คือ บริเวณการเสียรูปอย่างสมบูรณ์แบบ (Fully Deformed Zone; FPDZ) บริเวณผลกระทบความร้อนจากทางกล (Thermomechanical Affected Zone; TMAZ), บริเวณผลกระทบความร้อน (Heat Affected Zone; HAZ) และบริเวณเนื้อโลหะเดิม (Base Metal; BM) แสดงดังรูปที่ 3

การทดสอบความแข็ง นำชิ้นงานเชื่อมไปผ่าครึ่งด้วยเลื่อยมือ จากนั้นได้นำไปหล่อเรซิน แล้วนำไปขัดด้วยกระดาษทรายเบอร์หยาบจนถึงเบอร์ละเอียด แล้วขัดด้วยผ้าสักหลาดพอเรียบร้อยแล้ว นำมาทดสอบความแข็งแรงด้วยเครื่องทดสอบความแข็งแบบวิกเกอร์ (Hardness Vickers; HV) กดบริเวณพื้นที่หน้าตัดของรอยเชื่อม ระยะห่างรอยกด 1 มิลลิเมตร แรงที่ใช้กด 100 กรัม เป็นเวลา 10 วินาทีต่อหนึ่งรอยกด แสดงดังรูปที่ 4 โดยในหนึ่งชิ้นงานทดสอบจะกดทั้งหมด 3 แนว แล้วนำทั้ง 3 แนว มาคำนวณค่าเฉลี่ยเพื่อเป็นตัวแทนของชิ้นงานทดสอบแต่ละสภาวะการทดลอง

การทดสอบความแข็งแรงดึง เพื่อหาค่าความแข็งแรงของวัสดุภายใต้การรับภาระแรงดึง การเตรียมชิ้นทดสอบ ในขั้นตอนนี้ชิ้นงานทดสอบที่ได้จากกรรมวิธีการเชื่อมเสียดทานจะนำมาขึ้นรูปด้วยการกลึงโดยให้รอยเชื่อมอยู่บริเวณตรงกลาง



รูปที่ 4 ตำแหน่งการกวดทดสอบความแข็ง

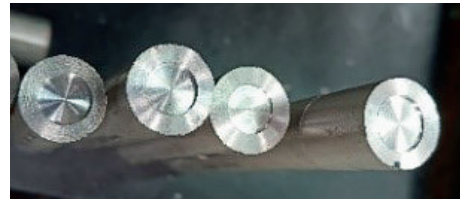


รูปที่ 5 แบบทดสอบความแข็งแรงตามมาตรฐาน ASTM E8

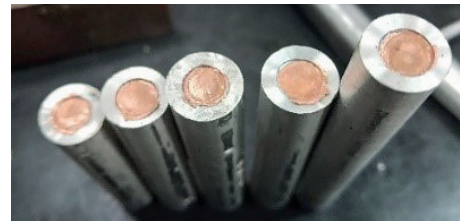
ชิ้นงานทดสอบ การขึ้นรูปชิ้นงานทดสอบตามมาตรฐาน ASTM E8 แสดงดังรูปที่ 5 เมื่อแปรรูปชิ้นงานทดสอบเสร็จก็นำไปทดสอบความแข็งแรงดึงด้วยเครื่องทดสอบแบบอเนกประสงค์ที่อุณหภูมิห้อง ด้วยความเร็วในการดึง 1 มิลลิเมตรต่อนาที

หลังจากขั้นตอนนี้จะทำการวิเคราะห์หาปัจจัยการเชื่อมเสียดทานที่ส่งผลทำให้ได้ค่าความแข็งแรงดึงมากที่สุดมาทำการทดลองโดยใช้วัสดุทองแดงเสริมในแนวเชื่อม โดยมีขั้นตอนการเตรียมวัสดุเชื่อมเสียดทานโดยเสริมวัสดุทองแดงในการเชื่อม เหมือนกับการเชื่อมแบบไม่มีวัสดุเสริมในแนวเชื่อม แต่เลือกอะลูมิเนียม SSM 356 ที่จับอยู่กับที่ในขั้นตอนการเชื่อมเสียดทานมาเจาะรูด้วยดอกกัด (End Mill) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 มิลลิเมตร บนผิวหน้า แสดงดังรูปที่ 6 และเจาะลึกลงไปเนื้อวัสดุที่ 0.2 มิลลิเมตร เพื่อใส่แผ่นทองแดงบริสุทธิ์ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 มิลลิเมตร และความหนา 0.2 มิลลิเมตร เป็นวัสดุเสริมในการเชื่อมเสียดทาน แสดงดังรูปที่ 7

จากนั้นเมื่อทำการเชื่อมเสียดทานแล้ว จะนำมาวิเคราะห์โครงสร้างทางโลหะวิทยา และสมบัติทางกลต่อไป



รูปที่ 6 อะลูมิเนียม SSM 356 หลังเจาะ



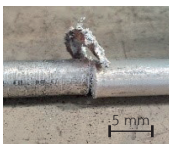
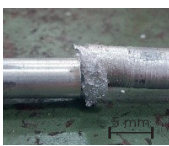
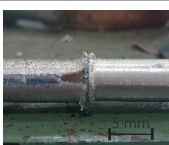
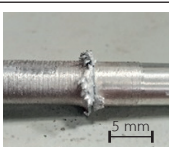
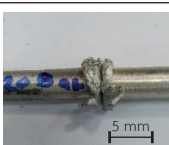

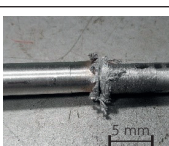
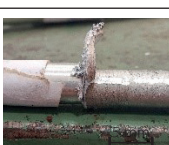
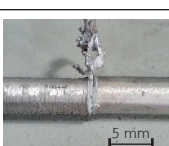
รูปที่ 7 อะลูมิเนียม SSM 356 ที่เสริมวัสดุทองแดง

### 3. ผลการวิจัยและอภิปรายผล

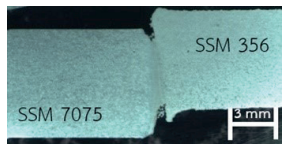
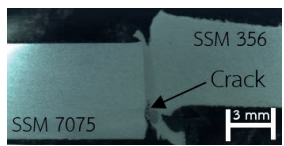
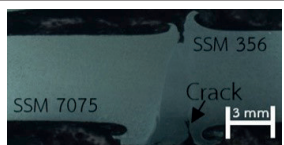
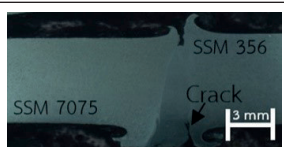
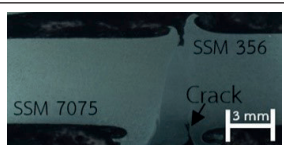
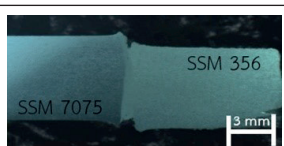
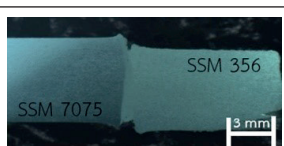
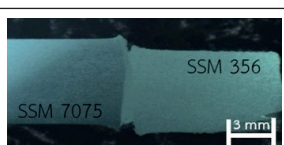
1) ผิวหน้าด้านบนการเชื่อมเสียดทานที่ความเร็วหมุนเชื่อมที่ 1,300 รอบต่อนาที แสดงดังตารางที่ 2 พบว่า สามารถเชื่อมวัสดุทั้งสองให้ประสานกันได้ โดยปัจจัยความเร็วหมุนเชื่อม แรงดันอัด และเวลาดันอัดส่งผลโดยตรงต่อรูปร่างของแนวเชื่อม ครีบของแนวเชื่อมเพิ่มมากขึ้นเมื่อเพิ่มแรงดันอัดและเวลาอัด [7], [8]

2) โครงสร้างมหภาคการเชื่อมเสียดทานที่ความเร็วหมุนเชื่อม 1,300 รอบต่อนาที แสดงดังตารางที่ 3 พบว่า ลักษณะผิวของบริเวณรอยเชื่อมมีการประสานกันเป็นอย่างดี มีการเกิดครีบ (Weld Flashes) บริเวณรอยเชื่อม ข้อสังเกตพบว่า ครีบบมีปริมาณเพิ่มมากขึ้นเมื่อเพิ่มแรงดันอัดและเวลาดันอัดเหตุการณ์ที่เกิดขึ้นนี้มิสาเหตุมาจากความร้อนที่สะสมอยู่ในรอยเชื่อมมีปริมาณมากพอที่ทำให้วัสดุเกิดการเปลี่ยนรูปเชิงพลาสติก [3] เมื่อรอยเชื่อมโดนกระทำโดยแรงดันอัดและเวลาดันอัด และที่แรงดันอัด 10 และ 30 บาร์ ชิ้นงานในการเชื่อมมีจุดบกพร่อง (Defect) เช่น รอยแตกเล็กๆ (Crack) และช่องว่างรอยเชื่อม (Voids) ขึ้นภายในเนื้อของวัสดุหลังการเชื่อม เนื่องมาจากเมื่อต้นเนื้อวัสดุเข้าด้วยกันด้วยแรงดันอัดที่ไม่เหมาะสมสามารถทำให้เนื้อเกรนของวัสดุทั้งสองชนิดไม่เกิดการผสานตัวเข้าด้วยกันและแยกชั้นของเม็ดเกรน

**ตารางที่ 2** ผลการเชื่อมเสียดทานความเร็ว 1,300 รอบต่อนาที

| แรงดันอัด (บาร์) | เวลาดันอัด (วินาที) | ผลการเชื่อม | ภาพประกอบ   |
|------------------|---------------------|-------------|---|
| 10               | 5                   | เชื่อมต่อ   |    |
|                  | 7                   | เชื่อมต่อ   |    |
|                  | 10                  | เชื่อมต่อ   |    |
| 20               | 5                   | เชื่อมต่อ   |   |
|                  | 7                   | เชื่อมต่อ   |  |
|                  | 10                  | เชื่อมต่อ   |  |
| 30               | 5                   | เชื่อมต่อ   |  |
|                  | 7                   | เชื่อมต่อ   |  |
|                  | 10                  | เชื่อมต่อ   |  |

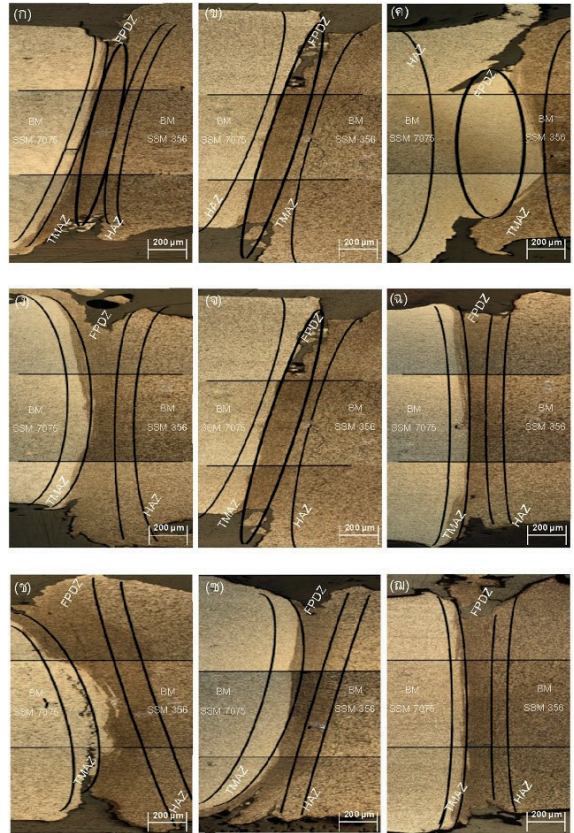
**ตารางที่ 3** ผลการเชื่อมเสียดทานความเร็ว 1,300 รอบต่อนาที

| แรงดันอัด (บาร์) | เวลาดันอัด (วินาที) | ภาพประกอบ   |
|------------------|---------------------|---|
| 10               | 5                   |    |
|                  | 7                   |    |
|                  | 10                  |    |
| 20               | 5                   |   |
|                  | 7                   |  |
|                  | 10                  |  |
| 30               | 5                   |  |
|                  | 7                   |  |
|                  | 10                  |  |

วราพงศ์ บุญช่วยแทน และคณะ, “ผลกระทบของกรรมวิธีการเชื่อมเสียดทานวัสดุต่างชนิดต่อโครงสร้างทางโลหะวิทยาและสมบัติทางกลระหว่าง อะลูมิเนียมหล่อกึ่งของแข็ง SSM 356 กับ SSM 7075 โดยมีชั้นทองแดงเป็นวัสดุเสริมในแนวเชื่อม.”

3) โครงสร้างจุลภาคของรอยเชื่อม ของการเชื่อมเสียดทานวัสดุต่างชนิด แสดงดังรูปที่ 8 แสดงให้เห็นถึงโครงสร้างจุลภาคบริเวณที่แตกต่างกันของรอยเชื่อมอย่างชัดเจน ประกอบด้วย บริเวณการเสียดทานอย่างสมบูรณ์แบบ (FPDZ) บริเวณผลกระทบความร้อนจากทางกล (TMAZ) บริเวณผลกระทบความร้อน (HAZ) และบริเวณเนื้อโลหะเดิม (BM) [9] โครงสร้างจุลภาคของแนวเชื่อมที่บริเวณกึ่งกลางและแนวรัศมีจากการหมุนเชื่อมพบว่า บริเวณ FPDZ แสดงให้เห็นเกรนที่ละเอียดมากอย่างที่สามารเปรียบเทียบได้กับบริเวณอื่นๆ อย่างชัดเจน โดยทั่วไปความกว้างของบริเวณ FPDZ เป็นผลมาจากการก่อตัวของครีบ ซึ่งพบว่าปัจจัยในการทดลองเชื่อมได้มีการเกิดขึ้นของครีบมากก็จะมีบริเวณ FPDZ ที่กว้าง เช่นกันถ้ามีการเกิดครีบน้อยก็จะมีบริเวณ FPDZ ที่กว้างน้อยกว่า สอดคล้องกับงานวิจัยของ Kimura และคณะ [10] นอกจากนี้พบว่า บริเวณ FPDZ จะมีการเกิดขึ้นเบี่ยงเข้าไปในบริเวณวัสดุที่มีความแข็งแรงน้อยกว่าอย่างเห็นได้ชัดจากการทดลองในครั้งนี้ซึ่งพบว่า อะลูมิเนียม SSM 356 มีความแข็งแรงน้อยกว่าอะลูมิเนียม SSM 7075 จึงทำให้บริเวณ FPDZ เบี่ยงเข้าไปในด้านอะลูมิเนียม SSM 356 อย่างเห็นได้ชัดเจน

บริเวณ TMAZ สามารถสังเกตเห็นที่บริเวณที่ติดกับบริเวณ FPDZ ซึ่งไม่ได้อยู่บริเวณตรงกลางแนวเชื่อมซึ่งพบว่าการเปลี่ยนรูปเชิงพลาสติกนั้นอยู่ที่แนวรัศมีมากกว่าที่จุดกึ่งกลางของชิ้นงานเชื่อม ความแตกต่างบางประการในโครงสร้างจุลภาคบริเวณ TMAZ สังเกตเห็นได้ระหว่างด้านที่อยู่กับที่และแนวหมุนของรอยเชื่อมดังที่เห็นได้ในรูปที่ 8 สำหรับวัสดุด้านที่เคลื่อนที่ในแนวระนาบ เกรนที่อยู่ติดกับบริเวณ FPDZ นั้น ดูเหมือนจะมีทิศทางขนานไปกับแนวเชื่อม (Weld Interface) ไปเกือบจะตลอดแนวเชื่อมซึ่งแสดงให้เห็นถึงการไหลของโลหะในสภาวะพลาสติก ในทางตรงกันข้ามสำหรับด้านที่ต้องเคลื่อนที่ด้วยการหมุน จะเกิดปริมาณของครีบที่น้อยกว่าด้านที่เคลื่อนที่ในแนวระนาบเสมอ ข้อสังเกตเหล่านี้ขอแนะนำอย่างยิ่งว่าสภาวะความร้อนและการเปลี่ยนรูปเชิงพลาสติกนั้นแตกต่างกันมากทั้งสองด้านของรอยเชื่อม ความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างด้านที่เคลื่อนที่ในแนว

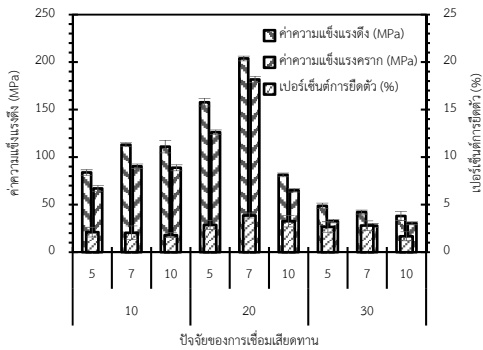


รูปที่ 8 โครงสร้างทางจุลภาคของรอยเชื่อมเสียดทาน (ก) แรงดันอัด 10 บาร์ เวลาต้นอัด 5 วินาที (ข) แรงดันอัด 10 บาร์ เวลาต้นอัด 7 วินาที (ค) แรงดันอัด 10 บาร์ เวลาต้นอัด 10 วินาที (ง) แรงดันอัด 20 บาร์ เวลาต้นอัด 5 วินาที (จ) แรงดันอัด 20 บาร์ เวลาต้นอัด 7 วินาที (ฉ) แรงดันอัด 20 บาร์ เวลาต้นอัด 10 วินาที (ช) แรงดันอัด 30 บาร์ เวลาต้นอัด 5 วินาที (ฉ) แรงดันอัด 30 บาร์ เวลาต้นอัด 7 วินาที (ณ) แรงดันอัด 30 บาร์ เวลาต้นอัด 10 วินาที

ระนาบและด้านที่ต้องเคลื่อนที่ด้วยการหมุนสามารถเกิดขึ้นได้เนื่องจาก ด้านที่ต้องเคลื่อนที่ด้วยการหมุน หมุนด้วยความเร็วสูงสามารถนำไปสู่การกระจายความร้อนได้เร็วขึ้น มีการพาความร้อนได้มากกว่าด้านที่เคลื่อนที่ในแนวระนาบ ดังนั้นด้านที่เคลื่อนที่ในแนวระนาบจึงมีอุณหภูมิที่สูงขึ้น

4) ค่าความแข็งแรงดึง แสดงดังตารางที่ 4 เป็นค่าเฉลี่ย



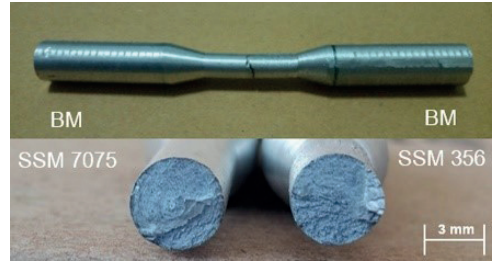


รูปที่ 9 ค่าความแข็งแรงดึงของรอยเชื่อม

จากการทดสอบจำนวน 3 ครั้ง พบว่า การผสมกันของแนวเชื่อมด้วยปัจจัยของกระบวนการเชื่อมเสียดทานมีค่าความแข็งแรงดึงสูงสุด (Ultimate Tensile Strength; UTS) 203.8 เมกะปาสคาล (Megapascals; MPa) ที่ปัจจัยการเชื่อมเสียดทานความเร็วหมุนเชื่อม 1,300 รอบต่อนาที แรงดันอัด 20 บาร์ และเวลาดันอัด 7 วินาที ส่วนค่าความแข็งแรงดึงต่ำสุด 38.0 เมกะปาสคาล ที่ปัจจัยการเชื่อมเสียดทานความเร็วหมุนเชื่อม 1,300 รอบต่อนาที แรงดันอัด 30 บาร์ และเวลาดันอัด 10 วินาที และในทุกปัจจัยการเชื่อม พบว่ามีค่าความแข็งแรงดึงน้อยกว่าวัสดุทดลองอะลูมิเนียม SSM 7075 ทั้งหมด แสดงดังรูปที่ 9 และชิ้นงานตัวอย่างทั้งหมดพบว่าจุดขาดของวัสดุอยู่ในบริเวณรอยเชื่อม แสดงดังรูปที่ 10

ตารางที่ 4 ผลการทดสอบความแข็งแรงดึง

| แรงดันอัด (บาร์) | เวลาดันอัด (วินาที) | ค่าความแข็งแรงดึง (เมกะปาสคาล) | ค่าความแข็งแรงคราก (เมกะปาสคาล) | เปอร์เซ็นต์การยืดตัว (%) |
|------------------|---------------------|--------------------------------|---------------------------------|--------------------------|
| 10               | 5                   | 83.8                           | 67.1                            | 2.1                      |
|                  | 7                   | 113.1                          | 90.4                            | 2.0                      |
|                  | 10                  | 111.1                          | 88.9                            | 1.8                      |
| 20               | 5                   | 157.8                          | 126.2                           | 2.9                      |
|                  | 7                   | 203.8                          | 181.7                           | 3.9                      |
|                  | 10                  | 81.3                           | 65.1                            | 3.3                      |
| 30               | 5                   | 48.8                           | 32.6                            | 2.7                      |
|                  | 7                   | 42.2                           | 28.0                            | 2.8                      |
|                  | 10                  | 38.0                           | 30.4                            | 1.7                      |



รูปที่ 10 รอยขาดของรอยเชื่อมเสียดทาน

ค่าความแข็งแรงดึงที่น้อยกว่ามีความสัมพันธ์กับการเกิดขึ้นของครีบ ซึ่งกรณีที่มีครีบน้อยเป็นข้อแสดงให้เห็นถึงการเปลี่ยนรูปเชิงพลาสติกที่ไม่เพียงพอและเกิดความร้อนไม่เพียงพอในแนวเชื่อม ในทางกลับกันตัวอย่างปัจจัยการเชื่อมเสียดทานความเร็วหมุนเชื่อม 1,300 รอบต่อนาที แรงดันอัด 20 บาร์ และเวลาดันอัด 7 วินาที มีปริมาณครีบที่ตีซึ่งบ่งบอกถึงการสร้างความร้อนและเกิดการเปลี่ยนรูปเชิงพลาสติกที่เพียงพอ

การเชื่อมเสียดทานนั้นเป็นกระบวนการเปลี่ยนรูปเชิงพลาสติกแบบร้อน ซึ่งการเปลี่ยนรูปเชิงพลาสติกมีบทบาทสำคัญอย่างมากสำหรับกระบวนการนี้ กระบวนการเชื่อมเสียดทานสามารถแบ่งออกเป็น 3 ระยะ ระยะที่ 1 ในช่วงแรกของการเชื่อมเกิดการเสียดสี การสึกหรอ และการยืดเกิดขึ้นเนื่องจากแรงเสียดทาน สิ่งนี้ทำให้อุณหภูมิของวัสดุทดลองเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว และทำให้ความแข็งแรงของวัสดุลดลง [11] สำหรับรอยเชื่อมที่ดีควรมีอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นสูงพอสมควร (สูงกว่า 400 องศาเซลเซียส) เพื่อให้เกิดความดันไหลต่ำมากพอที่จะทำให้เกิดการเปลี่ยนรูปเชิงพลาสติกได้อย่างเพียงพอ แรงดันอัด เวลาดันอัด และความเร็วหมุนเชื่อมมีบทบาทสำคัญในการกำหนดอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นในบริเวณรอยเชื่อม ในช่วงท้ายของระยะที่ 1 ครีบจำนวนมากเกิดจากการไหลของโลหะในสถานะพลาสติก ระยะที่ 2 นั้น ขึ้นอยู่กับช่วงระยะความยาวของการเสียดทาน ยิ่งความยาวการเสียดทานมากขึ้นเท่าใดก็ยิ่งส่งความร้อนเข้าสู่บริเวณรอยเชื่อมมากขึ้นเท่านั้น และระยะที่ 3 ชิ้นส่วนจะถูกหยุดอย่างกะทันหันและเกิดแรงดันอัดที่สูงกว่าแรงเสียดทานที่เกิดขึ้น ทำให้เกิดครีบจำนวนมากซึ่งเป็นการเปลี่ยนรูปเชิงพลาสติก แต่การลด

แรงดันอัดสามารถกระทำเพื่อให้ได้รอยเชื่อมที่ดี อย่างไรก็ตาม ขอบเขตของการลดแรงดันอัดขึ้นอยู่กับขนาดของชิ้นงาน เชื่อมและช่วงระยะความยาวของการเสียดทาน

ผลการวิจัยพบว่า การผสมกันรอยเชื่อม เกิดจากความ สัมพันธ์ของแรงดันอัดที่สูงกว่าความเร็วหมุนเชื่อมและช่วง ระยะความยาวของการเสียดทานจะเกิดรอยเชื่อมที่แข็งแรง แรงดันอัดที่เพิ่มขึ้น และความเร็วหมุนเชื่อมที่สูงขึ้นจะช่วยให้ มีอุณหภูมิที่สูงพอ เพื่อให้การเปลี่ยนรูปร่างพลาสติกที่เพียงพอ ที่เกิดขึ้นในระหว่างระยะที่ 1 และ 2 ช่วงระยะความยาวของ การเสียดทานที่สูงขึ้นจะช่วยให้ได้การเปลี่ยนรูปร่างพลาสติก ที่ต้องการในระยะที่ 3 [12] จากผลการทดลองที่เกิดขึ้นพบว่า การเปลี่ยนรูปร่างพลาสติกที่เพียงพอในสภาวะของการทดลอง แรงดันอัด ที่ 10 และ 20 บาร์ และเมื่อเพิ่มแรงดันอัดเป็น 30 บาร์ ทำให้ไม่เกิดการเปลี่ยนรูปร่างพลาสติกที่เพียงพอจึงทำให้ ค่าความแข็งแรงดึงของรอยเชื่อมลดลง ข้อสังเกตเหล่านี้ชี้ให้เห็นว่าแรงดันอัดที่ไม่มีบทบาทสำคัญในการเชื่อมเสียดทาน

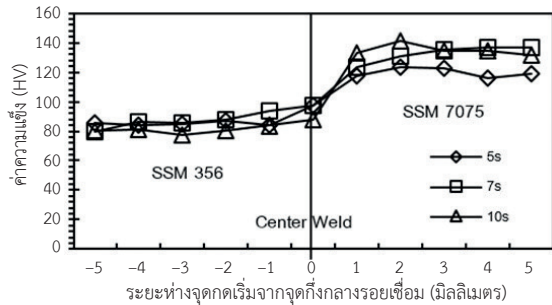
5) ค่าความแข็ง แสดงดังรูปที่ 11-13 เรียงตามลำดับ แรงดันอัด 10, 20 และ 30 บาร์ โดยที่มีค่าความแข็งสูงสุดที่ แรงดันอัด 10 บาร์ เวลาต้นอัด 7 วินาที เท่ากับ 97.8 HV

ความแข็งรอยเชื่อม แรงดันอัด 10 บาร์ แสดงดังรูปที่ 11 มีค่าความแข็งสูงสุดที่บริเวณ FPDZ ของชิ้นทดสอบ เท่ากับ 97.8 HV ที่เวลาต้นอัด 7 วินาที รองลงมาคือ 97.73 HV ที่เวลาต้นอัด 5 วินาที และค่าความแข็งน้อยสุดเท่ากับ 87.56 HV ที่เวลาต้นอัด 10 วินาที

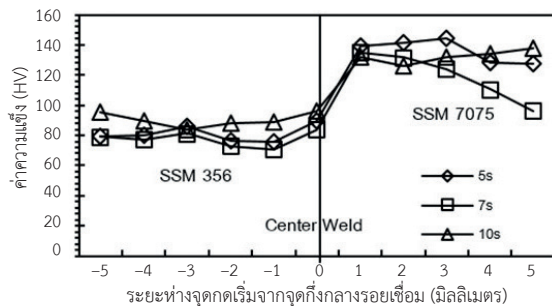
ความแข็งรอยเชื่อม แรงดันอัด 20 บาร์ แสดงดังรูปที่ 12 มีค่าความแข็งสูงสุดที่บริเวณ FPDZ ของชิ้นทดสอบ เท่ากับ 96.16 HV ที่เวลาต้นอัด 10 วินาที รองลงมาคือ 89.33 HV ที่เวลาต้นอัด 5 วินาที และค่าความแข็งน้อยสุดเท่ากับ 83.96 HV ที่เวลาต้นอัด 7 วินาที

ความแข็งรอยเชื่อม แรงดันอัด 30 บาร์ แสดงดังรูปที่ 13 มีค่าความแข็งสูงสุดที่บริเวณ FPDZ ของชิ้นทดสอบ เท่ากับ 93.43 HV ที่เวลาต้นอัด 7 วินาที รองลงมาคือ 91.56 HV ที่เวลาต้นอัด 10 วินาที และค่าความแข็งน้อยสุดเท่ากับ 88.06 HV ที่เวลาต้นอัด 5 วินาที

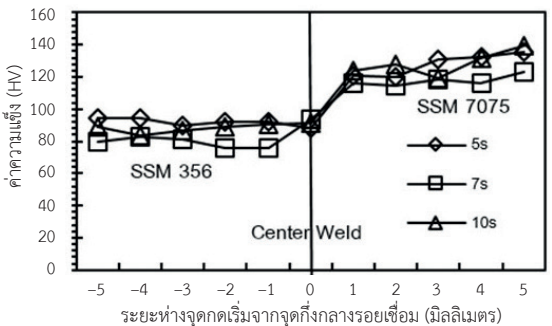
รูปที่ 11-13 แสดงค่าความแข็งบริเวณรอยเชื่อม



รูปที่ 11 ค่าความแข็งรอยเชื่อมที่แรงดันอัด 10 บาร์



รูปที่ 12 ค่าความแข็งรอยเชื่อมที่แรงดันอัด 20 บาร์



รูปที่ 13 ค่าความแข็งรอยเชื่อมที่แรงดัน 30 บาร์

โดยมีระยะวัดค่าความแข็งห่างจากจุดกึ่งกลางรอยเชื่อม 5 มิลลิเมตร ซึ่งจะแสดงรูปแบบของค่าความแข็งสามารถเห็น ได้ชัดว่าค่าความแข็งบริเวณเนื้อโลหะเดิมของวัสดุทั้งสอง ชนิดมีความแตกต่างกัน ข้อสังเกตวัสดุด้านที่อยู่กับที่ (SSM 356) มีค่าความแข็งเพิ่มมากขึ้นเมื่อเข้าไปใกล้บริเวณ TMAZ และ HAZ ส่วนวัสดุด้านที่หมุน (SSM 7075) มีค่าความแข็ง ลดลงเมื่อเข้าไปใกล้บริเวณ TMAZ และ HAZ เช่นกัน อย่างไรก็ตาม ค่าความแข็งในบริเวณ FPDZ ไม่ได้มีค่าความแข็ง

เพิ่มขึ้นมากนักเมื่อเทียบกับเนื้อโลหะเดิม

การลดลงของค่าความแข็งในบริเวณ TMAZ และ HAZ นั้น สามารถอธิบายได้จากการเร่งรัดการแข็งตัวของเนื้อโลหะเดิมจากการเปลี่ยนรูปเชิงพลาสติกในระหว่างการเชื่อมเสียดทาน [3] ความร้อนที่เกิดจากการเสียดทานไม่มากพอที่จะทำให้เกิดการตกตะกอนของอนุภาค Si, Mg และ Zn ในบริเวณแนวเชื่อม นอกจากนี้การระบายความร้อนที่เร็วเกินไปทำให้เกิดการเร่งรัดในการแข็งตัวของวัสดุส่งผลให้ค่าความแข็งแรงลดลง

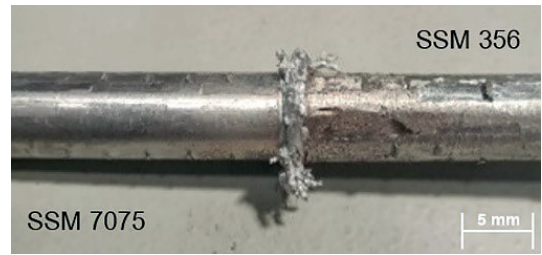
สำหรับค่าความแข็งบริเวณ FPDZ ไม่ได้ต่ำกว่าเนื้อโลหะเดิม แต่ก็ไม่ได้สูงกว่าเนื้อโลหะเดิมมากนัก เนื่องจากมีโครงสร้างทางจุลภาคที่ละเอียดมากกว่า และดั่งที่ได้กล่าวไปแล้วนั้น ค่าความแข็งของวัสดุต้นที่หมุนนั้นสูงกว่าด้านที่อยู่กับที่นี้อาจเป็นผลมาจากการมีอยู่ของเกรนที่ค่อนข้างละเอียดกว่า และความร้อนที่เกิดจากการเสียดทานมีมากพอที่จะทำให้เกิดการตกตะกอนของอนุภาคการเปลี่ยนรูปเชิงพลาสติกของวัสดุนั่นเอง

6) ผลการทดลองเชื่อมเสียดทานระหว่างอะลูมิเนียม SSM 356 กับ อะลูมิเนียม SSM 7075 โดยเสริมวัสดุทองแดง ปัจจัยที่เลือกในการเชื่อมเสียดทานระหว่างอะลูมิเนียมหล่อผสม SSM 356 กับ SSM 7075 โดยเสริมวัสดุทองแดงในแนวเชื่อม คือ ความเร็วหมุนเชื่อมที่ 1,300 รอบต่อนาที แรงดันอัดที่ 20 บาร์ เวลาต้นอัดที่ 7 วินาที โดยเลือกจากผลการทดลองที่ผ่านมาโดยปัจจัยดังกล่าวที่ค่าความแข็งแรงถึงสูงสุดที่ 203.81 เมกะปาสคาล

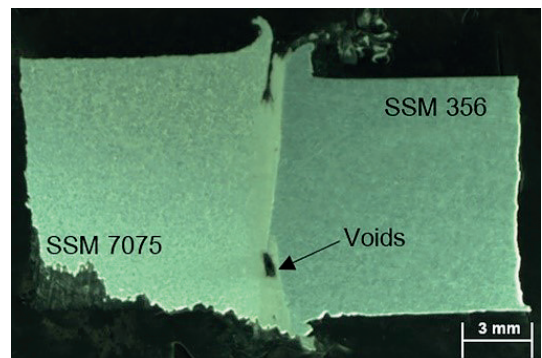
ผิวหน้าด้านบนของรอยเชื่อม แสดงดังรูปที่ 14 พบว่า รอยเชื่อมมีการประสานเข้าด้วยกันได้ดี เกิดครีบบนรอยเชื่อมเล็กน้อยโดยมีปริมาณมากในด้านของเนื้อวัสดุที่มีค่าความแข็งน้อยกว่าอะลูมิเนียม SSM 356 [13]

โครงสร้างมหภาค แสดงดังรูปที่ 15 พบว่า บริเวณรอยเชื่อมมีจุดบกพร่องเป็นช่องว่างเล็กๆ เป็นผลอันเนื่องมาจากความร้อนจากการเสียดทานที่ไม่เพียงพอ ทำให้เนื้อวัสดุทั้งอะลูมิเนียมและทองแดงมีการเปลี่ยนรูปเชิงพลาสติกไม่มากพอ [14] และมีครีบบนบริเวณของอะลูมิเนียม SSM 356

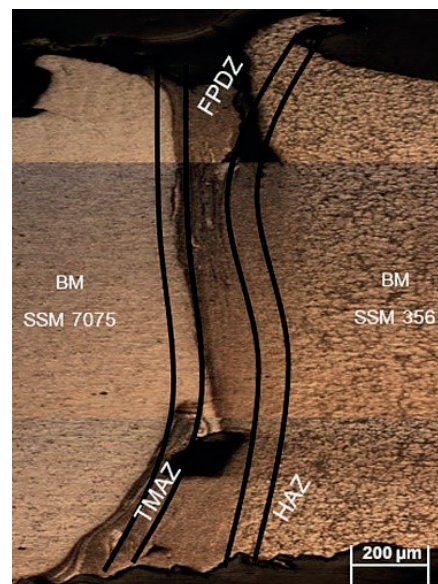
โครงสร้างจุลภาค แสดงดังรูปที่ 16 พบว่า ทองแดงเข้า



รูปที่ 14 ผิวหน้าด้านบนรอยเชื่อม โดยเสริมวัสดุทองแดงในแนวเชื่อม



รูปที่ 15 โครงสร้างมหัศจรรย์เชื่อม โดยเสริมวัสดุทองแดงในแนวเชื่อม



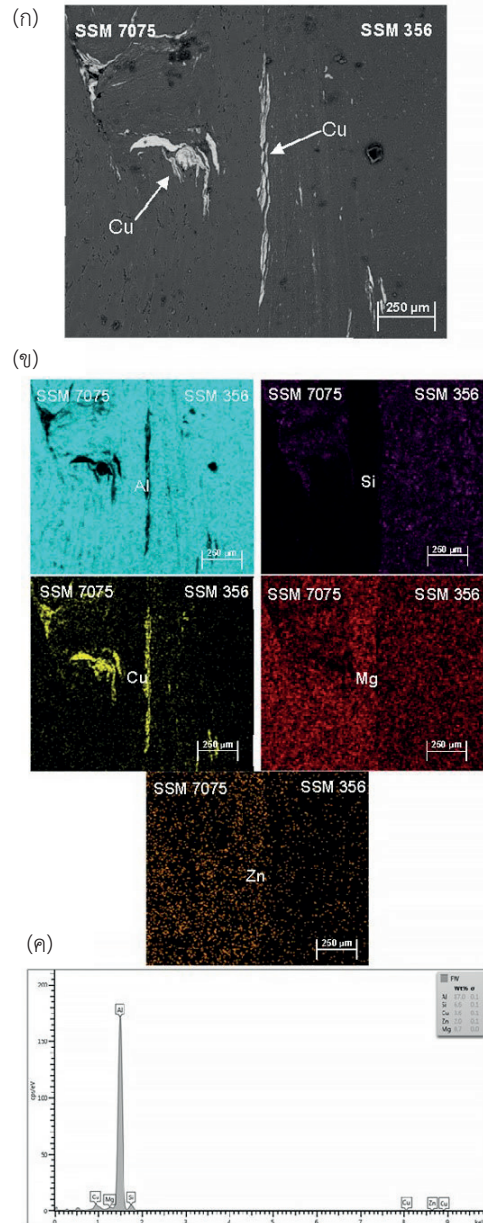
รูปที่ 16 โครงสร้างจุลภาครอยเชื่อม โดยเสริมวัสดุทองแดงในแนวเชื่อม

ผสมกับเนื้อของวัสดุอะลูมิเนียมในบริเวณ FPDZ ซึ่งบริเวณที่เกิดการเปลี่ยนรูปเชิงพลาสติกนั้นจะมีจุดบกพร่องของรอยเชื่อม เนื่องมาจากผลของแรงเฉือนที่มากขึ้นและการเสียดทานบนพื้นผิววัสดุทดลองนั้นเกิดขึ้นจากการเปลี่ยนรูปเชิงพลาสติก ส่งผลให้เกิดความร้อนที่รุนแรงมากขึ้นที่ผิวหน้าสัมผัส เกรนและการเปลี่ยนรูปเชิงพลาสติกจึงไม่สมบูรณ์ [15]

ภาพถ่าย Scanning Electron Microscope (SEM) ของรอยเชื่อม แสดงรูปที่ 17 (ก) พบว่า ในบริเวณ FPDZ มีการประสานกันของวัสดุอะลูมิเนียมทั้งสองชนิด ส่วนวัสดุทองแดงมีบางส่วนที่ตกตะกอนไปกับบรอยเชื่อม แต่ก็มีบางส่วนที่ไม่สามารถตกตะกอนได้เนื่องจากความร้อนจากการเชื่อมมีปริมาณไม่มากพอ นอกจากนี้จะสังเกตเห็นว่าทองแดงเกิดการแตกหัก และกระจายตัวทั่วบริเวณ FPDZ อันเนื่องมาจากอิทธิพลของปัจจัยการเชื่อมเสียดทาน [16], [17]

ส่วนรูปที่ 17 (ข) แสดงให้เห็นถึงการกระจายตัวของวัสดุทองแดงในบริเวณ FPDZ ที่ชัดเจนด้วยการตรวจสอบการวิเคราะห์ธาตุ (Energy Dispersive X-ray Spectrometer Analysis) เชิงคุณภาพ (Qualitative Analysis) โดยจะเห็นว่าบริเวณที่มีสีขาวของรูปที่ 17 (ก) จะเป็นวัสดุทองแดงซึ่งแสดงให้เห็นได้ชัดในรูปที่ 17 (ข) นอกจากนี้ยังเห็นว่าบริเวณด้านวัสดุอะลูมิเนียม SSM 7075 จะมีปริมาณของธาตุสังกะสี (Zn) มากกว่าด้านวัสดุอะลูมิเนียม SSM 356 ในขณะที่บริเวณด้านวัสดุอะลูมิเนียม SSM 356 จะมีปริมาณธาตุซิลิกอน (Si) มากกว่าด้านวัสดุอะลูมิเนียม SSM 7075 ซึ่งแสดงดังรูปที่ 17 (ข)

รูปที่ 17 (ค) แสดงการตรวจสอบการวิเคราะห์ธาตุเชิงปริมาณ (Quantitative Analysis) พบว่า มีปริมาณธาตุอะลูมิเนียม (Al) 87.0% ปริมาณธาตุ Si 6.6% ปริมาณธาตุ Cu 3.6% ปริมาณธาตุ Zn 2.0% และปริมาณธาตุแมกนีเซียม (Mg) 0.7% นอกจากนี้เป็นการบ่งชี้ให้เห็นว่าปริมาณธาตุในบริเวณที่ตรวจสอบมีส่วนประกอบของธาตุ Al เป็นหลัก เนื่องจากวัสดุทดลองเป็นอะลูมิเนียม โดยมีธาตุ Si, Zn และ Mg เป็นธาตุประกอบ นอกจากนั้นจะเห็นได้ว่ามีธาตุ Cu เติมนิดมากซึ่งเกิดจากการเติมเนื้อวัสดุทองแดงเป็นวัสดุเสริมในรอยเชื่อม จะเห็นว่าวัสดุทองแดงมีการกระจายตัว



รูปที่ 17 โครงสร้าง SEM และ EDX ของรอยเชื่อม โดยเสริมวัสดุทองแดงในแนวเชื่อม

บริเวณรอยเชื่อม ซึ่งมีผลอันเนื่องมาจากความเร็วหมุนเชื่อมโดยตรง [17]

ค่าความแข็งแรงดึงของรอยเชื่อมโดยเสริมวัสดุทองแดงในแนวเชื่อม แสดงดังตารางที่ 5 พบว่า เมื่อเปรียบเทียบค่า

ความแข็งแรงระหว่างชิ้นงานที่ไม่มีชั้นทองแดงเป็นวัสดุเสริม โดยค่าความแข็งแรงดิ่งลดลง จาก 203.81 เมกะปาสคาล เหลือ 170.705 เมกะปาสคาล เหตุผลที่ทำให้ค่าความแข็งแรงดิ่งลดลงเนื่องมาจาก ความร้อนจากการเสียดทานซึ่งมีอิทธิพลมาจากความหมุนเชื่อมและแรงดันอัดที่ทำให้พบชั้นผิวสีเทาที่บริเวณ FPDZ ส่งผลทำให้ค่าความแข็งแรงดิ่งลดลง [18]

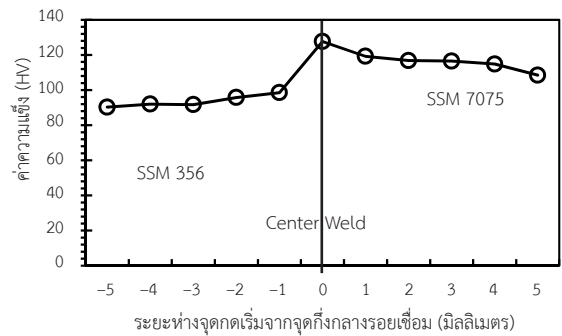
ตารางที่ 5 ค่าความแข็งแรงดิ่งของรอยเชื่อม โดยเสริมวัสดุทองแดงในแนวเชื่อม

| ค่าความแข็งแรงดิ่ง (เมกะปาสคาล) | ค่าความแข็งแรงคราก (เมกะปาสคาล) | เปอร์เซ็นต์การยึดตัว (%) |
|---------------------------------|---------------------------------|--------------------------|
| 170.7                           | 137.1                           | 2.9                      |

ค่าความแข็งแรงของรอยเชื่อมโดยเสริมวัสดุทองแดงในแนวเชื่อม แสดงดังรูปที่ 18 พบว่า ค่าความแข็งแรงบริเวณ Center Weld มีค่าความแข็งแรงที่ 127.63 HV ซึ่งมีค่าความแข็งแรงสูงกว่าชิ้นงานที่ไม่มีทองแดงเป็นชั้นวัสดุเสริมที่มีค่าความแข็งแรงเท่ากับ 83.96 HV อย่างไรก็ตาม วัสดุทองแดงมีแนวโน้มที่จะอ่อนตัวลงเมื่อมีอุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้น แต่ในขณะเดียวกัน เนื่องจากการก่อตัวของ IMC ( $Al_2Cu$ ,  $AlCu$  และ  $Al_4Cu_9$ ) ความแข็งแรงของอินเทอร์เฟซรอยเชื่อม  $Al/Cu$  เพิ่มขึ้นเมื่อมีอุณหภูมิเพิ่มขึ้น เนื่องมาจากการก่อตัวของ IMC ความแข็งแรงของรอยเชื่อมสูงกว่าเนื้อโลหะเดิมของอะลูมิเนียมและทองแดง [19] นอกจากนี้เมื่อสังเกตค่าความแข็งแรงบริเวณ HAZ มีค่าความแข็งแรงที่ลดลงจากรอยเชื่อมที่ไม่เสริมทองแดง เนื่องมาจากการได้รับผลกระทบทางความร้อนจากบริเวณ FPDZ โดยตรงจนไปถึงบริเวณเนื้อโลหะเดิมของอะลูมิเนียม SSM 7075 ที่ได้รับผลกระทบไม่มากจึงมีค่าความแข็งแรงลดลงไม่มากจากเนื้อโลหะเดิม

เปรียบเทียบผลการวิจัยการเชื่อมเสียดทานวัสดุต่างชนิดต่อโครงสร้างทางโลหะวิทยาและสมบัติทางกลระหว่างอะลูมิเนียมหล่อกึ่งของแข็ง SSM 356 กับ SSM 7075 ระหว่างไม่มีกับมีชั้นทองแดงเป็นวัสดุเสริมในแนวเชื่อม แสดงดังตารางที่ 6

จากผลการทดลองสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมต่างๆ เช่น อุตสาหกรรมรถยนต์ อุตสาหกรรม



รูปที่ 18 ค่าความแข็งแรงของรอยเชื่อมโดยเสริมวัสดุทองแดงในแนวเชื่อม

การบินและอวกาศ เป็นต้น ในส่วนของการลดน้ำหนักชิ้นส่วน การเชื่อมต่อวัสดุต่างชนิดเพื่อเสริมความแข็งแรงในบางชิ้นส่วน และการเพิ่มประสิทธิภาพความแข็งแรงในรอยเชื่อม นอกจากนี้การวิจัยในอนาคตควรเพิ่มการศึกษาการเสริมวัสดุในแนวเชื่อมชนิดต่างๆ เช่น โครเมียม ซิลิกอน เงิน สังกะสี เป็นต้น และควรเพิ่มรูปแบบการทดสอบสมบัติทางกล เช่น การทดสอบทางแรงกระแทก การทดสอบความล้า เป็นต้น

#### 4. สรุป

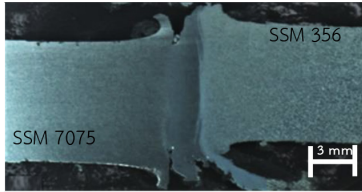
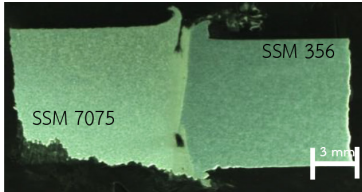
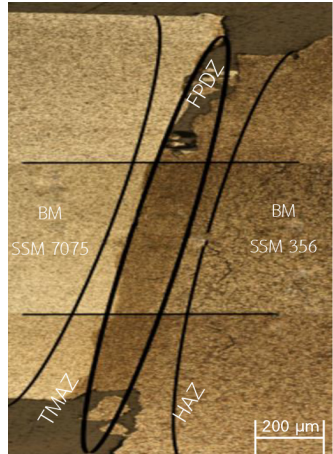

ครีบบีปริมาณเพิ่มมากขึ้นเมื่อเพิ่มแรงดันอัดและเวลาดันอัด สาเหตุมาจากความร้อนที่สะสมอยู่ในรอยเชื่อมมีปริมาณมากพอที่ทำให้วัสดุเกิดการเปลี่ยนแปลงเชิงพลาสติก

โครงสร้างจุลภาคบริเวณ FPDZ มีเกรนที่ละเอียดมาก และมีความกว้างของบริเวณ FPDZ เป็นผลมาจากการก่อตัวของครีบบ

ค่าความแข็งแรงดิ่งสูงสุด 203.8 เมกะปาสคาล ที่ความเร็วหมุนเชื่อม 1,300 รอบต่อนาที แรงดันอัด 20 บาร์ และเวลาดันอัด 7 วินาที ส่วนค่าความแข็งแรงดิ่งต่ำสุด 38.0 เมกะปาสคาล ที่ความเร็วหมุนเชื่อม 1,300 รอบต่อนาที แรงดันอัด 30 บาร์ และเวลาดันอัด 10 วินาที ค่าความแข็งแรงดิ่งมีความสัมพันธ์กับการเกิดชั้นของครีบบ

ค่าความแข็งแรงสูงสุดที่ความเร็วหมุนเชื่อม 1,300 รอบต่อนาที แรงดันอัด 10 บาร์ เวลาดันอัด 7 วินาที เท่ากับ 97.8 HV ค่าความแข็งแรงที่ลดลงเกิดจากการระบายความร้อนที่เร็วเกินไป

### ตารางที่ 6 เปรียบเทียบผลการวิจัยการเชื่อมเสียดทานวัสดุต่างชนิด

| รายการ            | รอยเชื่อมที่ไม่เสริมทองแดง   | รอยเชื่อมที่เสริมทองแดง   |
|-------------------|--|---|
| โครงสร้างมหภาค    |   |   |
| โครงสร้างจุลภาค   |  |  |
| ค่าความแข็งแรงดึง | 203.81 เมกะปาสคาล  | 170.70 เมกะปาสคาล   |
| ค่าความแข็ง       | 83.96 HV   | 127.63 HV   |

ทำให้เกิดการเร่งรัดในการแข็งตัวของวัสดุ

ปัจจัยที่เลือกในการเชื่อมเสียดทานโดยเสริมวัสดุทองแดงในแนวเชื่อม คือ ความเร็วหมุนเชื่อมที่ 1,300 รอบต่อนาที แรงดันอัดที่ 20 บาร์ เวลาตันอัดที่ 7 วินาที

ค่าความแข็งแรงดึงของรอยเชื่อมโดยเสริมวัสดุทองแดงในแนวเชื่อม 170.70 เมกะปาสคาล มีค่าน้อยกว่ารอยเชื่อมที่ไม่เสริมวัสดุทองแดงในแนวเชื่อม แต่ค่าความแข็งของรอยเชื่อมโดยเสริมวัสดุทองแดงในแนวเชื่อม 127.63 HV มีค่ามากกว่ารอยเชื่อมที่ไม่เสริมวัสดุทองแดงในแนวเชื่อม

#### 5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนงบประมาณเงินรายได้ประจำปี 2562 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย

#### เอกสารอ้างอิง

- [1] M. Yilmaz, M. Col, and M. Acet, "Interface properties of aluminum/steel friction-welded components," *Materials Characterization*, vol. 49, no. 5, pp. 421–429, 2003.
- [2] M. Maalekian, "Friction welding – critical assessment of literature," *Journal Science and Technology of Welding and Joining*, vol. 12, no. 8, pp. 738–759, 2007.
- [3] H. Khalid Rafi, G. D. Janaki Ram, G. Phanikumar, and K. Prasad Rao, "Microstructure and tensile properties of friction welded aluminum alloy AA7075-T6," *Materials and Design*, vol. 31, no. 5, pp. 2375–2380, 2010.
- [4] C. Meengam, S. Chainarong, and P. Muangjunburee,



- “Influences of rotation speed mechanical properties of dissimilar joint between SSM 7075 with SSM 356 by friction welding,” *RMUTP Research Journal*, vol. 10, no. 1, pp. 94–105, 2016 (in Thai).
- [5] K. Boonseng, S. Chainarong, and C. Meengam, “Microstructure and mechanical properties of friction welding in SSM 356 aluminium alloys,” *International Journal of Emerging Trends in Engineering Research*, vol. 2, no.4, pp. 20–24, 2014.
- [6] S. Chainarong and C. Meengam, *Dissimilar of SSM 356 with SSM 6061 aluminiums alloy by friction welding process*. Songkhla: Songkhla Rajabhat University, Faculty of Industrial, 2014 (in Thai).
- [7] L. Cui, X. Yang, G. Zhou, X. Xu, and Z. Shen, “Characteristics of defects and tensile behaviors on friction stir welded AA6061-T4 T-joints,” *Materials Science and Engineering: A*, vol. 543, pp. 58–68, 2012.
- [8] S. R. S. Bharathi, A. R. Rose, and V. Balasubramanian, “Tensile Properties and Microstructural Characteristics of Friction Welded Similar Joints of Aluminium Alloys,” *International Journal of Current Engineering and Technology*, vol. 5, no. 2, pp. 1211–1216, 2015.
- [9] W. B. Lee, Y. M. Yeon, D. U. Kim, and S. B. Jung, “Effect of friction welding parameters on mechanical and metallurgical properties of aluminum alloy 5052-A36 steel joint,” *Journal Materials Science and Technology*, vol. 19, no. 6, pp. 773–778, 2003.
- [10] M. Kimura, M. Choji, M. Kusaka, K. Seo, and A. Fuji, “Effect of friction welding conditions and aging treatment on mechanical properties of AA7075-T6 aluminum alloy friction joints,” *Journal Science and Technology of Welding and Joining*, vol. 10, no. 4, pp. 406–412, 2005.
- [11] M. Maalekian, E. Kozeschnik, H. P. Brantner, and H. Cerjak, “Comparative analysis of heat generation in friction welding of steel bars,” *Acta Materialia*, vol. 56, no. 12, pp. 2843–2855, 2008.
- [12] M. Kimura, M. Kusaka, K. Seo, and A. Fuji, “Joining phenomena during friction stage of AA7075-T6 aluminum alloy friction weld,” *Science and Technology of Welding and Joining*, vol. 10, no. 3, pp. 378–383, 2005.
- [13] P. Sammaiah, A. Suresh, and G. R. N. Tagore, “Mechanical properties of friction welded 6063 aluminum alloy and austenitic stainless steel,” *Journal of Materials Science*, vol. 45, no. 20, pp. 5512–5521, 2010.
- [14] K. Boonseng, C. Meengam, S. Chainarong, and P. Muangjunburee, “Microstructure and hardness of friction welded SSM 356 aluminium alloy,” *Advanced Materials Research*, vol. 887–888, pp. 1273–1279, 2014.
- [15] Z. L. Ni and F. X. Ye, “Effect of lap configuration on the microstructure and mechanical properties of dissimilar ultrasonic metal welded copper-aluminum joints,” *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 245, pp. 180–192, 2017.
- [16] M. Sahin, “Joining of aluminium and copper materials with friction welding,” *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 49, no. 5–8, pp. 527–534, 2010.
- [17] D. S. Chaudhari, “joining of aluminium to copper by friction stir welding,” *International*



- Journal of Innovative Research in Advanced Engineering*, vol. 1, no. 8, pp. 18–21, 2014.
- [18] D. L. Olson, T. A. Siewert, S. Liu, and G. R. Edwards, *Welding Brazing and Soldering*, 8th ed., Ohio: Metals Park, 1981, pp. 507–518.
- [19] S. Ao, C. Li, W. Zhang, M. Wu, Y. Dai, Y. Chen, and Z. Luo, “Microstructure evolution and mechanical properties of Al/Cu ultrasonic spot welded joints during thermal processing,” *Journal of Manufacturing Processes*, vol. 41, pp. 307–314, 2019.