

อิทธิพลของความเร็วรอบและระยะกอดอัดที่ส่งผลต่อการเชื่อมเสียดทาน ของอะลูมิเนียมหล่อกิ่งของแข็ง SSM 6061

The Influence of Rotation Speed and Burn-off Length Affecting Friction Welding of SSM 6061 Aluminum Alloy

ชัยยุทธ มิงาม^{1*} และศุภชัย ชัยณรงค์²

^{1*, 2}โปรแกรมวิชาวิศวกรรมศาสตร์ คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏสงขลา อ.เมือง จ.สงขลา 90000

โทรศัพท์ 074-260200 โทรสาร 074-324221 Email : Chaiyoot.me@skru.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีจุดประสงค์เพื่อศึกษาอิทธิพลของตัวแปรที่ส่งผลต่อสมบัติทางกลและโครงสร้างจุลภาคของอะลูมิเนียมหล่อกิ่งของแข็ง เกรด SSM 6061 ด้วยกระบวนการเชื่อมเสียดทาน จากการทดลองพบว่าอะลูมิเนียมหล่อกิ่งของแข็งสามารถยึดติดได้ดีในทุกการทดลอง ค่าความแข็งแรงดึงสูงสุดอยู่ที่ 126.88 MPa ซึ่งมาจากตัวแปรที่ความเร็วรอบ 1310 รอบต่อนาที และระยะกอดอัดที่ 3 มิลลิเมตร เวลาในการกอดแช่ 15 วินาที และบริเวณรอยเชื่อมมีค่าความแข็งสูงสุดเฉลี่ย อยู่ที่ 55.05 HV ความแข็งของชิ้นงานหลังการเชื่อมในทุกการทดลองไม่แตกต่างกันมาก บริเวณเนื้อเชื่อม และบริเวณที่ได้รับผลกระทบของความร้อนมีโครงสร้างจุลภาคที่เปลี่ยนไปจากโครงสร้างเดิมของวัสดุ เนื่องจากเกิดจากความร้อนและแรงกอดอัดในขณะเชื่อมเสียดทาน ทำให้โครงสร้างเปลี่ยนแปลง โครงสร้างบริเวณเนื้อเชื่อมเกิดการแตกหักแบบเปราะของธาตุผสม ส่งผลให้มีขนาดที่เล็กและกระจายตัวทั่วบริเวณเนื้อเชื่อม

คำสำคัญ : การเชื่อมเสียดทาน, อะลูมิเนียมหล่อกิ่งของแข็ง SSM 6061, ความเร็วรอบ

Abstract

The objective of this research was to study the effects of rotation speeds and burn-off length of the mechanical and microstructural properties of SSM 6061 aluminum alloy by friction welding. In all the experiments, it was found that the samples can adhere well together. The maximum average tensile strength was 126.88 MPa which was obtained with a rotational speed of 1310 rpm, burn-off length of 3 mm and a 15 minute holding time. In the welded areas, the maximum hardness was 55.05 HV with similar values found in all the experiments. Moreover, in welded and thermal mechanical affected zones, changes of the microstructure due to heat input and friction force during the friction welding process were observed, welding of the material was brittle throughout the welded area.

Keywords : Friction welding, SSM 6061 Aluminum Alloy, Rotation Speed

1. บทนำ

ปัจจุบันกรรมวิธีการเชื่อม (Welding) ถูกพัฒนาเทคนิคในการเชื่อมอย่างต่อเนื่อง เพื่อสามารถเชื่อมชิ้นงานให้ได้ชิ้นงานเชื่อมที่มีคุณภาพ (Welding Quality) โดยการเชื่อมในสถานะของแข็ง (Solid State Welding) เป็นอีกเทคนิคที่ถูกนำมาใช้เชื่อมวัสดุในปัจจุบัน สำหรับการเชื่อมในสถานะของแข็งเป็นการเชื่อมที่ชิ้นงานหลอมละลายติดกันที่อุณหภูมิในขณะเชื่อมต่ำกว่าจุดหลอมเหลว (Melting point) ของวัสดุทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางโลหะวิทยา (Metallurgical Changes) ที่น้อยมาก ซึ่งปัจจุบันจึงมีการเชื่อมในสถานะของแข็งมาใช้งานอย่างกว้างขวาง เช่น การเชื่อมเสียดทานแบบบวน (Friction Stir Welding: FSW) (Trimble D.O, 2015) การเชื่อมเสียดทานแบบจุด (Friction Stir Spot Welding: FSSW) (Yang X.W, 2015) การเชื่อมเสียดทาน (Friction Welding) (Shailesh Singh K, 2014) การเชื่อมโดยการแพร่ (Diffusion Bonding) (Lee C.S, 1999) และกรรมวิธีการเชื่อมอื่น ๆ การเชื่อมเหล่านี้ถูกนำไปใช้ในอุตสาหกรรมยานยนต์ อุตสาหกรรมการผลิตรถไฟ อุตสาหกรรมผลิตเครื่องบิน เพราะการเชื่อมในสถานะของแข็งมีข้อเด่นในการเชื่อม ได้แก่ ลดความเค้นตกค้างจากการเชื่อม (Residual Stress) ลดการบิดงอของชิ้นงานเชื่อม (Distortion) ลดการแตกร้าวของรอยเชื่อม (Welding Crack) ลดปัญหาการเกิดโพรงอากาศ (Porosity) ในเนื้อเชื่อม ลดการเกิดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ในระหว่างการเชื่อม (CO_2 Reduce) (Uday M. B, 2011) ส่งผลให้ชิ้นงานหลังการเชื่อมในสถานะของแข็งมีสมบัติทางกลที่ดี สำหรับการเชื่อมเสียดทานก็เป็นอีกกรรมวิธีที่เชื่อมในสถานะของแข็ง โดยอาศัยการเสียดทานระหว่างผิวหน้าสัมผัสของชิ้นงานร่วมกับการออกแรงกดจนทำให้ผิวหน้าของชิ้นงานเกิดความร้อนทั้งสองชิ้น เนื้อวัสดุบริเวณรอยต่อจะเกิดการอ่อนตัว และออกแรงกดอีกครั้งเพื่อให้ชิ้นงานทั้งสองชิ้นยึดติดกัน การเชื่อมเสียดทานมีตัวแปรหลักในการเชื่อม คือ ความเร็วหมุน (Spindle Speed) เวลาในการกดแช่ (Holding Time) และแรงกด (Pressure) หรือระยะยกตัด (Burn-off Length) และมีตัวแปรอื่น ๆ ได้แก่ ความขรุขระผิวสัมผัส การทำความสะอาดชิ้นงาน เป็นต้น (Moarrefzadeh. A, 2012) ซึ่งตัวแปรเหล่านี้ล้วนส่งผลต่อโครงสร้างจุลภาค และสมบัติทางกลของชิ้นงานหลังการเชื่อมเสียดทาน

จากข้อมูลและเหตุผลดังที่ได้กล่าวไว้ข้างต้นจึงเป็นที่มาของงานวิจัยนี้ โดยจะศึกษาการเชื่อมเสียดทานอะลูมิเนียมหล่อกิ่งของแข็ง SSM 6061 ที่ผ่านการขึ้นรูปด้วยเทคโนโลยีการหล่อกิ่งของแข็งแบบ GISS (Gas Induce Semi-Solid) (J. Wannasin, 2008) การเชื่อมเสียดทานจะกำหนดตัวแปรของการเชื่อมเสียดทาน ได้แก่ ความเร็วหมุน เวลาในการกดแช่ และระยะยกตัด ตามลำดับ โดยจะประยุกต์ใช้เครื่องกลึงแบบอัตโนมัติ (Computer Numerical Control : CNC) สำหรับเป็นเครื่องเชื่อมซึ่งจะทำให้มีความแม่นยำในการเชื่อมเสียดทาน หลังจากการเชื่อมเสียดทานชิ้นงานถูกนำไปทดสอบโครงสร้างมหภาคและจุลภาคในบริเวณเนื้อเชื่อม (Weld Zone : WZ) บริเวณที่ได้รับอิทธิพลทางความร้อน (Thermal Mechanical Affect Zone : TMAZ) และบริเวณเนื้อโลหะเดิม (Base Metal: BM) ด้วยกล้องจุลทรรศน์ (Optical Microscopy : OM) และกล้องอิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy: SEM) และทดสอบค่าความแข็งแรงดึง (Tensile Strength Test) ทดสอบค่าความแข็ง (Hardness Test) และวิเคราะห์ผลการทดลอง สรุปผลการทดลองในลำดับต่อไป

2. วัตถุประสงค์ของการวิจัย

2.1 เพื่อศึกษาตัวแปรในการเชื่อมเสียดทาน ได้แก่ ความเร็วหมุน และระยะกดอัด ที่ส่งผลต่อการยึดติดของชิ้นงานเชื่อมเสียดทานของอะลูมิเนียมหล่อกิ่งของแข็ง SSM 6061

2.2 เพื่อศึกษาผลของค่าความแข็งแรงดึง ค่าความแข็ง หลังจากการเชื่อมเสียดทานของชิ้นงานและโครงสร้างมหภาค โครงสร้างจุลภาคในเนื้อเชื่อม บริเวณที่ได้รับอิทธิพลทางความร้อนเปรียบเทียบกับบริเวณเนื้อโลหะเดิมของรอยเชื่อม

3. วิธีดำเนินการวิจัย

3.1 วัสดุที่ใช้ในการทดลอง

การวิจัยนี้ใช้อะลูมิเนียมหล่อผสม SSM 6061 มีส่วนผสมทางเคมีหลัก คือ แมกนีเซียม และซิลิกอน ดังแสดงในตารางที่ 1 ธาตุที่ผสมในอะลูมิเนียมเกรดนี้ทำให้มีความแข็งแรงสูง เหนียวทนต่อการกัดกร่อนและมีสมบัติทางกลที่ดี สำหรับอะลูมิเนียมเกรดนี้ผ่านการขึ้นรูปในสถานะกิ่งของแข็ง ด้วยกรรมวิธีแบบ GISS ซึ่งเป็นการปรับปรุงโครงสร้างของวัสดุให้เป็นก้อนกลม (Globular Structures) นำไปสู่สมบัติทางกลที่ดีของชิ้นงาน

ตารางที่ 1 ส่วนผสมทางเคมีของอะลูมิเนียมหล่อผสม SSM 6061 (ร้อยละโดยน้ำหนัก)

สังกะสี	แมกนีเซียม	ทองแดง	เหล็ก	ซิลิกอน	แมงกานีส	โครเมียม	ไททาเนียม	อะลูมิเนียม
6.08	2.50	1.93	0.46	0.40	0.03	0.19	0.02	88.39

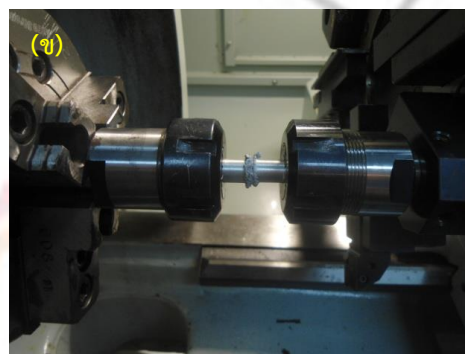
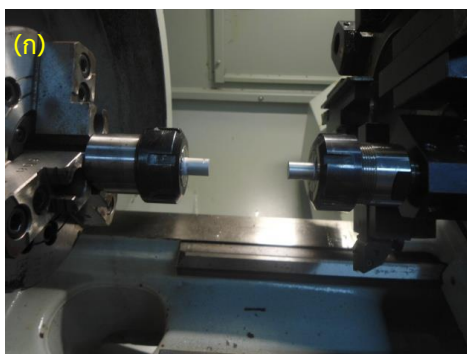
3.2 การเตรียมชิ้นงานเชื่อม

สำหรับขั้นตอนในการเตรียมชิ้นงานเพื่อเชื่อมจะตัดชิ้นงานเป็นทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาด $20 \times 100 \times 25$ มิลลิเมตร (ความกว้าง x ความยาว x ความหนา) ด้วยเครื่องเลื่อยสายพาน การเลื่อยใช้น้ำหล่อเย็นช่วยระบายความร้อนของชิ้นงาน หลังจากนั้นนำชิ้นงานที่ตัดเรียบร้อยแล้วไปกลึงปอกผิวด้วยความเร็วรอบที่ 800 รอบต่อนาที อัตราการป้อนลึก 2 มิลลิเมตรต่อนาทีและความเร็วในการเดิน 10 เมตรต่อนาที เพื่อให้ได้ชิ้นงานที่มีผิวเรียบทรงกระบอก เส้นผ่านศูนย์กลาง 12 มิลลิเมตร และความยาว 50 มิลลิเมตร ตามลำดับ ชิ้นงานที่ได้จากการกลึงนำไปเตรียมผิวหน้ารอยเชื่อม โดยขัดด้วยกระดาษทรายหยาบ เบอร์ 180 กรिट เพื่อกำจัดฟิล์มอะลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3 film) ที่ผิวของชิ้นงานก่อนการเชื่อมเสียดทาน

3.3 การเชื่อมเสียดทานชิ้นงาน

ชิ้นงานอะลูมิเนียมหล่อกิ่งของแข็ง SSM 6061 ที่เชื่อมเสียดทานจะถูกจับยึดบนเครื่องกลึงแบบอัตโนมัติ ซึ่งประยุกต์ใช้เป็นเครื่องเชื่อมเสียดทาน โดยการควบคุมความเร็วหมุน ความเร็วเดิน และระยะกดลึก ซึ่งตัวแปรในการเชื่อมเสียดทานอะลูมิเนียมหล่อกิ่งของแข็ง SSM 6061 ดังแสดงในตารางที่ 2 สำหรับการควบคุมจากเครื่องกลึงแบบอัตโนมัติจะนำไปสู่การเชื่อมที่แม่นยำและถูกต้องยิ่งขึ้น ลำดับขั้นตอนการเชื่อมเสียดทาน เริ่มจากการนำชิ้นงานทั้งสองชิ้นจับเข้ากับหัวจับของเครื่องกลึง (Arber) และชุดจับยึดอีกด้านของชิ้นงาน ดังแสดงในภาพที่ 1 (ก) ชิ้นงานถูกเชื่อม

แบบต่อชน (Butt Joint) ในการเชื่อมชิ้นงานด้านหนึ่งไม่เกิดการหมุนและชิ้นงานอีกด้านเกิดการหมุน ทิศทางการหมุนตามเข็มนาฬิกา (Clockwise) จากนั้นให้ผิวหน้าของชิ้นงานทั้งสองขึ้นเกิดการสัมผัสกันจนเกิดการเสียดทานระหว่างผิวชิ้นงานทั้งสองขึ้น นำไปสู่การเกิดความร้อนในขณะเชื่อมเสียดทาน ความร้อนระหว่างผิวสัมผัสของชิ้นงานทั้งสองขึ้นจะส่งผลให้บริเวณที่ได้รับความร้อนเกิดการอ่อนตัวจากการเสียดทาน เนื่องจากการหมุนเพียงด้านเดียวของชิ้นงานส่งผลให้เกิดความร้อน (Heat Input) ระหว่างการเชื่อมเสียดทาน เมื่อเกิดการอ่อนตัวของวัสดุก็ให้แรงกดดันชิ้นงานทั้งสองขึ้นให้ยึดติดกัน ในขณะที่ชิ้นงานกำลังหมุน ส่งผลให้ชิ้นงานหลังจากการเชื่อมยึดติดกัน ดังแสดงในภาพที่ 1 (ข) จากนั้นหยุดการควบคุมของเครื่องกลึงแบบอัตโนมัติ รอให้ชิ้นงานเชื่อมเย็นตัวก็จะเสร็จขั้นตอนของการเชื่อมเสียดทาน



ภาพที่ 1 ขั้นตอนการเชื่อมเสียดทานของอะลูมิเนียมหล่อกิ่งของแข็ง SSM 6061

3.4 การเตรียมชิ้นงานทดสอบสมบัติทางกลและโลหะวิทยา

ชิ้นงานที่ได้จากการเชื่อมเสียดทานบางส่วนไปหล่อเรือนกรอบ ด้วยวิธีการหล่อเรซิน และใช้น้ำยาแรงประสานทำให้เรซินแข็งตัวครอบชิ้นงาน โดยจะใช้ท่อพีวีซีเป็นเข้าแบบในการหล่อชิ้นงาน เพื่อนำไปทดสอบความแข็งและตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค การทดสอบความแข็งจะทดสอบแบบวิกเกอร์ส ใช้แรงกดที่ 10 กิโลกรัมแรง เวลาในการกดแช่ 10 วินาที การวัดความแข็งแต่ละจุดจะวัด 9 ครั้ง แล้วหาค่าเฉลี่ยของความแข็งที่ได้จากการวัดชิ้นงาน เครื่องวัดความแข็งในการทดลองใช้ยี่ห้อ Zwick/Roell รุ่น ZHU สำหรับการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค ชิ้นงานที่ผ่านการหล่อเรือนกรอบจะถูกนำไปกลึงให้ออกครึ่งหนึ่งของชิ้นงาน และนำไปกัดด้วยกรด Keller (Keller's Solution) โดยจะศึกษาบริเวณเนื้อเชื่อม บริเวณที่ได้รับอิทธิพลทางความร้อน และบริเวณเนื้อโลหะเดิมของวัสดุ เพื่อดูการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างจุลภาค การตรวจสอบในระดับจุลภาคจะใช้กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง ยี่ห้อ Reich และการตรวจสอบระดับอนุภาคใช้กล้องอิเล็กตรอนแบบส่องกราด ยี่ห้อ FEI-Quanta 400 และชิ้นงานที่ได้จากการเชื่อมเสียดทานบางส่วนถูกนำไปทดสอบแรงดึง เพื่อหาค่าความแข็งแรงดึง การทดสอบแรงดึงจะใช้เครื่อง ยี่ห้อ Testomatic รุ่น 50N ดึงชิ้นงานในสภาวะอุณหภูมิห้อง จะเตรียมชิ้นงานทดสอบตามมาตรฐานทดสอบแรงดึง ASTM A370 ตามลำดับ

ตารางที่ 2 ตัวแปรในการทดลองเชื่อมเสียดทานของอะลูมิเนียมหล่อกิ่งของแข็ง SSM 6061

ตัวแปรในการทดลอง		
ความเร็วในการหมุน (รอบต่อนาที)	ระยะกดลึก (มิลลิเมตร)	เวลาการกดแช่ (วินาที)
950	2.5	15
	3.0	
	3.5	
1070	2.5	
	3.0	
	3.5	
1190	2.5	
	3.0	
	3.5	
1310	2.5	
	3.0	
	3.5	

สำหรับการเชื่อมเสียดทานของอะลูมิเนียมหล่อกิ่งของแข็ง SSM 6061 จะสนใจความเร็วหมุนในการเชื่อม ระยะกดลึก และเวลาในการกดแช่ ซึ่งเป็นตัวแปรที่ทำให้สมบัติทางกลมีค่าสูงขึ้น เพราะมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาค จนนำไปสู่การยึดติดของชิ้นงานหลังการเชื่อม และส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงของค่าความแข็งแรงดึงและค่าความแข็ง

4. ผลการดำเนินงานวิจัย

การเชื่อมเสียดทานของอะลูมิเนียมหล่อกิ่งของแข็ง SSM 6061 ได้ศึกษาการตัวแปรเบื้องต้นเพื่อหาตัวแปรที่เหมาะสมพบว่าช่วงความเร็วต่ำกว่า 950 รอบต่อนาที ชิ้นงานไม่ยึดติด และเมื่อเพิ่มความเร็วรอบหมุนสูงเกิน 1310 รอบต่อนาที พบว่าชิ้นงานไม่ยึดติดเช่นกัน คณะผู้วิจัยจึงได้กำหนดความเร็วในการเชื่อมที่ 950 1070 1190 และ 1310 รอบต่อนาที และระยะกดอัด 2.5 3.0 และ 3.5 มิลลิเมตร เพื่อใช้สำหรับการทดลอง ซึ่งผลการทดลองแสดงดังต่อไปนี้

4.1 ลักษณะทางกายภาพของชิ้นงานหลังเชื่อมเสียดทาน

ลักษณะทางกายภาพของชิ้นงานหลังการเชื่อมเสียดทานของอะลูมิเนียมหล่อกิ่งของแข็ง SSM 6061 พบว่าทุกการทดลองชิ้นงานสามารถเชื่อมยึดติดกันได้ดี ซึ่งมีผลไปในทิศทางเดียวกัน ดังแสดงในภาพที่ 2 ชิ้นงานไม่เกิดจุดบกพร่อง (Defect) หรือชิ้นงานไม่เกิดการโก่งงอ (Buckling) ซึ่งเป็นสาเหตุมาจากความเร็วรอบในการหมุนและระยะการกดที่เหมาะสม ทำให้เกิดความร้อนในการเชื่อม ส่งผลให้เนื้อวัสดุอ่อนตัว (Softening) ได้ดี (Khalid Rafi. H, 2010) จนนำไปสู่การยึดติดของชิ้นงานหลังการเชื่อม อย่างไรก็ตามจะเห็นได้ว่าบริเวณรอยต่อเกิดครีป (Flash) ของชิ้นงานเนื่องจากเนื้อวัสดุบางส่วนที่เกิดการอ่อนตัวบริเวณเนื้อเชื่อมถูกผลักออกด้วยแรงกด (Friction Force) เมื่อเปรียบเทียบกับที่ระยะกดอัด 2.5 มิลลิเมตร กับระยะกดอัด 3.5 มิลลิเมตร แสดงให้เห็นชัดเจนว่าที่ระยะกดอัดที่สูงกว่ามีแนวโน้มที่ชิ้นงานหลังการเชื่อมเสียดทานเกิดครีปที่มากกว่า เพราะระยะก

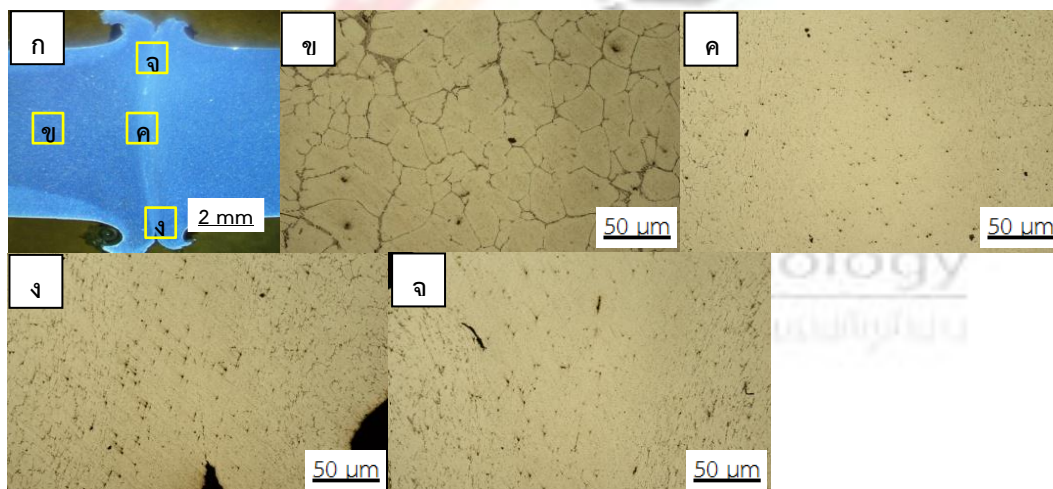
อัตราที่สูงทำให้ถูกผลึกออกมาเร็วกว่าระยะกอดัตที่น้อย อย่างไรก็ตามความเร็วรอบในการหมุนที่สูงก็สร้างความร้อนที่สูงด้วย ทำให้เนื้อวัสดุอ่อนตัวได้ง่าย ส่งผลให้เกิดครีบกาวที่มากเช่นกัน ตัวอย่างเช่น ความเร็วรอบ 950 รอบต่อนาที มีครีบน้อยกว่าความเร็วรอบที่ 1310 รอบต่อนาที อย่างชัดเจน แต่การเกิดครีบกาวที่มากเกินไปหลังการเชื่อมเสียดทานก็ไม่ส่งผลดีต่อชิ้นงาน เนื่องจากทำให้สูญเสียเนื้อวัสดุบริเวณเนื้อเชื่อม (Su. J, 2003) จากการทดลองเชื่อมเสียดทานของอะลูมิเนียมหล่อกิ่งของแข็ง SSM 6061 เป็นที่น่าสังเกตว่า ความเร็วรอบที่สูงขึ้นไม่ส่งผลต่อการเสียรูป (Deformation) ของชิ้นงานหลังการเชื่อม เนื่องจากความร้อนที่ได้จากการหมุนในระหว่างการเชื่อมจะเกิดบริเวณเนื้อเชื่อม ซึ่งเป็นการเกิดความร้อนเฉพาะบริเวณ จึงไม่ทำให้บริเวณอื่น ๆ เกิดการเสียรูปตามไปด้วย

ความเร็วรอบ (รอบต่อนาที)	ระยะกอดัต (มิลลิเมตร)		
	2.5	3	3.5
950			
1070			
1190			
1310			

ภาพที่ 2 ลักษณะทางกายภาพของชิ้นงานอะลูมิเนียมหล่อกิ่งของแข็ง SSM 6061 ที่ต่อแบบชนหลังเชื่อมเสียดทาน

4.2 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานหลังเชื่อมเสียดทาน

การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคบริเวณเนื้อเชื่อมด้วยกล้องจุลทรรศน์ แสดงในภาพที่ 3 ผลของโครงสร้างจุลภาคในทุกการทดลองมีผลการทดลองที่คล้าย ๆ กัน คณะผู้วิจัยจึงนำเสนอผลของโครงสร้างจุลภาคที่ความเร็วรอบ 1310 รอบต่อนาที และระยะกดอัด 3 มิลลิเมตร เพียงการทดลองเดียว เนื่องจากตัวแปรดังกล่าวมีสมบัติทางกลดีที่สุด ภาพที่ 3 (ก) แสดงตำแหน่งการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค ซึ่งผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าบริเวณเนื้อเชื่อมมีการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างมากที่สุด โดยเฟสอะลูมิเนียมเมตริกซ์ (α Phase) ที่มีโครงสร้างเดิมแบบเกรนก่อนกลม ดังแสดงในภาพที่ 3 (ข) ไม่ได้รับพฤติกรรมของแรงและความร้อน จึงไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างจุลภาค ทำให้โครงสร้างมีเกรนก่อนกลมเหมือนเดิม แต่บริเวณเนื้อเชื่อมถูกแรงหมุนทำลายเฟสยูเทคติกจนละเอียดส่งผลให้เฟสยูเทคติก (Mg_2Si Phase) ที่แตกหักจนมีขนาดที่เล็กลง ดังแสดงในภาพที่ 3 (ค) เฟสยูเทคติกที่มีขนาดเล็กทำให้ความแข็ง และค่าความแข็งแรงดึงของชิ้นงานดี นอกจากนั้นพบว่าบริเวณที่ได้รับอิทธิพลทางความร้อนเกิดการไหลตัวของเกรนก่อนกลม ทิศทางการไหลของเกรนตามแนวยาวขนาดกับทิศทางของการหมุน ดังแสดงในภาพที่ 3 (ง และ จ) และบริเวณที่ความร้อนในการเชื่อมและแรงจากการกดอัดจากการเชื่อมส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างอย่างชัดเจน (Su. J, 2003) แต่การเชื่อมที่มาจากตัวแปรที่ไม่เหมาะสมอาจนำไปสู่ความไม่สมบูรณ์ของชิ้นงานได้

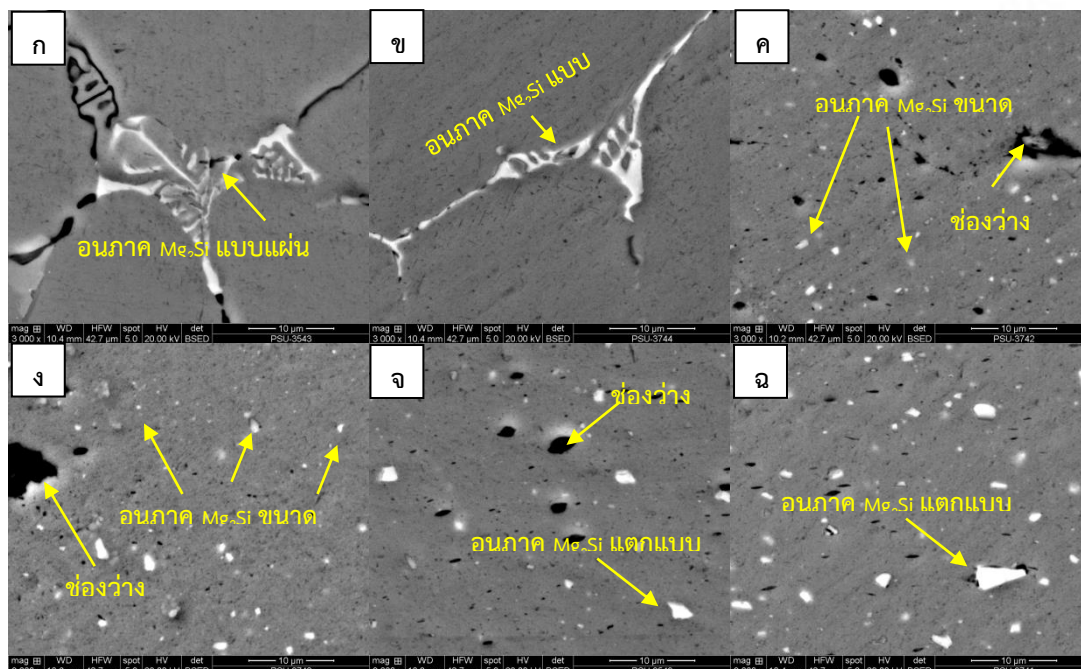


ภาพที่ 3 ภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์ที่ความเร็วรอบ 1310 รอบต่อนาที และระยะกดอัด 3 มิลลิเมตร เมื่อ (ก) โครงสร้างมหภาค (ข) เนื้อโลหะเดิมแบบเกรนก่อนกลมของอะลูมิเนียมหล่อ กิ่งของแข็ง SSM 6061 (ค) กึ่งกลางเนื้อเชื่อม (ง) ขอบล่างรอยต่อ (จ) ขอบบนรอยต่อ

4.3 ลักษณะของอนุภาคของชิ้นงานหลังเชื่อมเสียดทาน

ภาพที่ 4 แสดงบริเวณเนื้อเชื่อมที่ถ่ายด้วยกล้องอิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่กำลังขยาย 3000 เท่า เพื่อตรวจสอบขนาดอนุภาค Mg_2Si ที่เล็กลงจากแตกหักจากแรงของการหมุนเชื่อม (สีขาว) การวัดขนาดอนุภาคบริเวณเนื้อเชื่อมเป็นการวัดแบบสุ่ม แล้วหาค่าเฉลี่ยขนาดของอนุภาค โดยอนุภาคเดิมของอะลูมิเนียมหล่อกิ่งของแข็ง SSM 6061 มีรูปทรง 2 ลักษณะ คือ อนุภาคแบบแผ่น (Plate-like Shape) ขนาดความยาว 24.17 ไมโครเมตร และขนาดความกว้าง 23.28 ไมโครเมตร

ดังแสดงในภาพที่ 4 (ก) และอนุภาคแบบแท่ง (Rod Shape) ขนาดความยาว 43.54 ไมโครเมตร และขนาดความกว้าง 22.07 ไมโครเมตร ดังแสดงในภาพที่ 4 (ข) ตามลำดับ

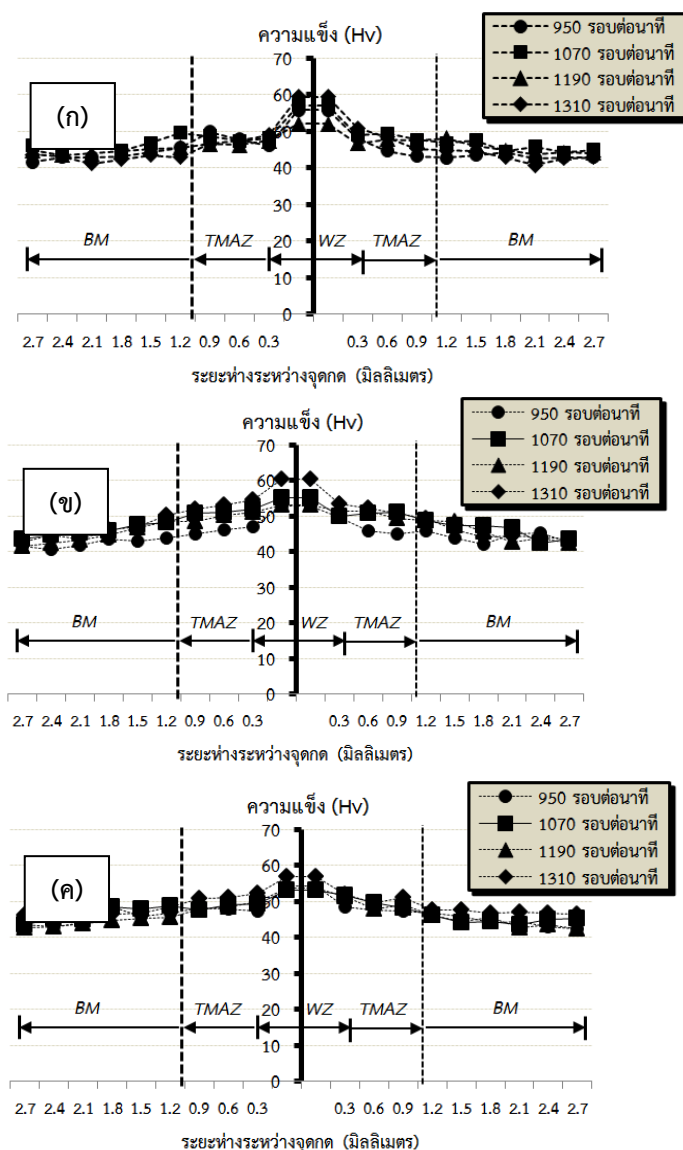


ภาพที่ 4 อนุภาคบริเวณเนื้อเชื่อมที่ถ่ายด้วยกล้องอิเล็กตรอนแบบส่องกราด ที่ระยะกอดัต 3 มิลลิเมตร เมื่อ (ก) อนุภาคแบบแผ่นยาว (ข) อนุภาคแบบแท่ง (ค) อนุภาคที่ความเร็วรอบ 1310 รอบต่อนาที (ง) อนุภาคที่ความเร็วรอบ 1190 รอบต่อนาที (จ) อนุภาคที่ความเร็วรอบ 1070 รอบต่อนาที และ (ฉ) อนุภาคที่ความเร็วรอบ 950 รอบต่อนาที

ตัวแปรของแรงกดและความเร็วในการหมุนเชื่อมส่งผลให้อนุภาคบริเวณเนื้อเชื่อมมีขนาดที่เล็กลง (Ahmad Fauzi, M. N, 2010) ในทุกการทดลอง โดยความเร็วรอบ 1310 รอบต่อนาที มีขนาดความยาว 1.01 ไมโครเมตร และขนาดความกว้าง 0.69 ไมโครเมตร ดังแสดงในภาพที่ 4 (ค) ความเร็วรอบ 1190 รอบต่อนาที มีขนาดความยาว 1.88 ไมโครเมตร และขนาดความกว้าง 1.10 ไมโครเมตร ดังแสดงในภาพที่ 4 (ง) ความเร็วรอบ 1070 รอบต่อนาที มีขนาดความยาว 2.07 ไมโครเมตร และขนาดความกว้าง 1.98 ไมโครเมตร ดังแสดงในภาพที่ 4 (จ) และความเร็วรอบ 950 รอบต่อนาที มีขนาดความยาว 4.12 ไมโครเมตร และขนาดความกว้าง 2.85 ไมโครเมตร ดังแสดงในภาพที่ 4 (ฉ) ตามลำดับ อนุภาคขนาดเล็กเหล่านี้จะแตกแบบเปราะ เพราะมีลักษณะการแตกแบบหลายเหลี่ยม มีปลายแหลมและกระจายทั่วอะลูมิเนียมเมตริกซ์ (สีเทา) ในบริเวณของเนื้อเชื่อม ซึ่งการกระจายตัวของอนุภาคมีผลการทดลองไปในทำนองเดียวกันทุกการทดลอง อนุภาคที่เล็กและกระจายตัวดีจะทำให้ชิ้นงานมีสมบัติทางด้านความแข็งแรงที่ดีด้วย อย่างไรก็ตามเมื่อตรวจสอบที่กำลังขยายที่สูงก็พบช่องว่างขนาดเล็กเช่นกัน

4.4 ผลการทดสอบความแข็ง (Hardness Test)

กราฟผลของความแข็งอะลูมิเนียมหล่อกิ่งของแข็ง SSM 6061 จากการเชื่อมเสียดทาน ดังแสดงในภาพที่ 5 พบว่าค่าความแข็งบริเวณเนื้อโลหะเดิม เฉลี่ยอยู่ที่ 44.96 ± 7 HV ซึ่งมีค่าที่ใกล้เคียงกันทุก ๆ การทดลอง บริเวณเนื้อเชื่อม ในทุกตัวแปรมีค่าเพิ่มสูงขึ้น มีค่าเฉลี่ยที่ 55.05 ± 9 HV เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างจุลภาค และบริเวณที่ได้รับอิทธิพลผลกระทบของความร้อนมีค่าความแข็งเฉลี่ยที่ 50.14 ± 3 HV เพราะมีการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างจุลภาคเช่นกัน แต่จะมีความแข็งน้อยกว่าบริเวณรอยเชื่อม เพราะบริเวณดังกล่าวเป็นบริเวณที่เกิดการเปลี่ยนแปลงของความร้อน

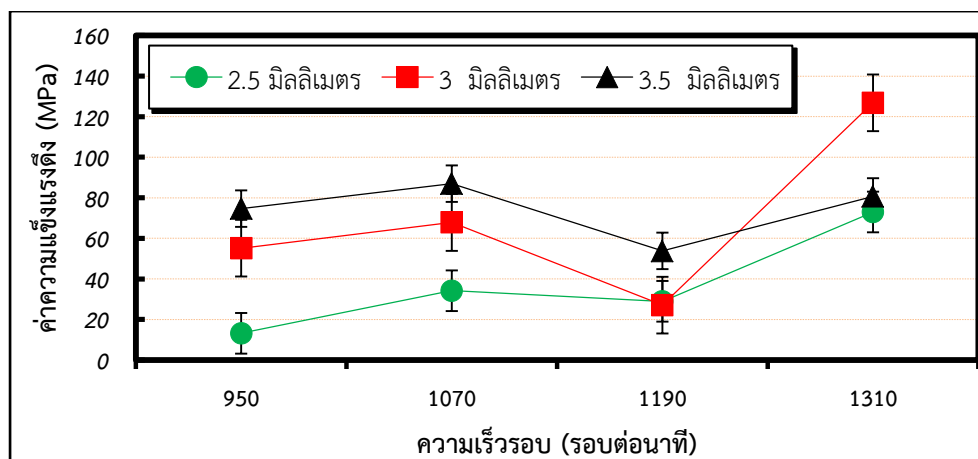


ภาพที่ 5 กราฟความแข็งของชิ้นงานหลังการเชื่อม เมื่อ (ก) ระยะกอดอัด 2.5 มิลลิเมตร (ข) ระยะกอดอัด 3.0 มิลลิเมตร และ (ค) ระยะกอดอัด 3.5 มิลลิเมตร

โครงสร้างจุลภาคเกิดการเปลี่ยนแปลงจากพฤติกรรมความร้อนและการกระทำของแรงกด (Ahmad Fauzi, M. N, 2010) ตัวแปรเหล่านี้ทำให้ธาตุผสมในอะลูมิเนียมหล่อกิ่งของแข็ง SSM 6061 เกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างอย่างถาวร นำไปสู่การเปลี่ยนแปลงของสมบัติด้านความแข็งแรงของชิ้นงาน เป็นที่น่าสังเกตว่าความเร็วรอบในการเชื่อมที่ 1310 รอบต่อนาที มีแนวโน้มที่จะส่งผลให้ค่าความแข็งแรงสูงกว่าความเร็วหมุนในการเชื่อมอื่น ๆ เนื่องจากความเร็วหมุนสามารถสร้างความร้อนที่ดีกว่าการหมุนที่ความเร็วรอบต่ำ (Moarrefzadeh, A, 2012) ความร้อนในการเชื่อมจะส่งผลให้เกิดการตกตะกอนของสารประกอบได้ง่ายและทำให้เนื้อวัสดุเกิดการไหลวนที่ดีในขณะที่เชื่อม เป็นสาเหตุให้ช่องว่างหลังการเชื่อมลดลง อย่างไรก็ตามระยะกอดัดก็เป็นอีกตัวแปรที่ส่งผลต่อการเกิดความร้อน โดยการเพิ่มระยะกอดัดจะเพิ่มความเค้นตกค้าง (Residual Stress) ส่งผลให้ชิ้นงานมีความแข็งแรงบริเวณเนื้อเชื่อมเพิ่มขึ้น หรือแม้กระทั่งตัวแปรอื่น ๆ เช่น ขนาดความโตผิวสัมผัสของชิ้นงานหรือความขรุขระของผิวสัมผัส ก็เป็นปัจจัยเพิ่มเติมที่มีผลต่อความแข็งแรงของชิ้นงานหลังการเชื่อม

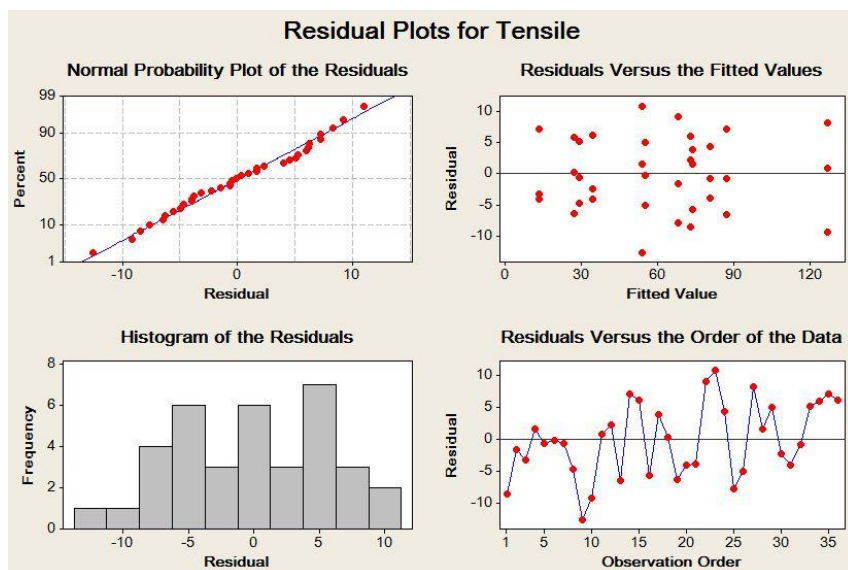
4.5 ผลการทดสอบความแข็งแรงดึง (Tensile Strength Test)

ผลการทดสอบแรงดึงพบว่าค่าความแข็งแรงดึงของรอยต่อมีผลที่แตกต่างกันตามตัวแปรของการเชื่อม โดยที่ความเร็วรอบ 1310 รอบต่อนาที และระยะกอดัดที่ 3.0 มิลลิเมตร มีค่าความแข็งแรงดึงสูงสุดเฉลี่ยอยู่ที่ 126.88 MPa ดังแสดงในภาพที่ 6 เนื่องจากมีช่องว่างหลังจากการเชื่อมที่มีขนาดเล็ก ดังแสดงในภาพที่ 4 (ค) ในทางตรงกันข้ามความเร็วรอบที่ 950 รอบต่อนาที ระยะกอดัดที่ 2.5 มิลลิเมตร มีค่าความแข็งแรงดึงต่ำสุดเฉลี่ยอยู่ที่ 13.20 MPa เนื่องจากความเร็วรอบในการหมุนเชื่อมที่แตกต่างกันสร้างความร้อนที่เกิดขึ้นในระหว่างการเชื่อมที่แตกต่างกัน จะเห็นได้ว่าที่ความเร็วรอบ 950 รอบต่อนาที ภายในโครงสร้างเกิดจุดบกพร่องที่มากกว่าที่ความเร็วรอบ 1310 รอบต่อนาที ดังแสดงในภาพที่ 4 (ฉ) อย่างไรก็ตามเมื่อเชื่อมที่ความเร็วรอบ 1190 รอบต่อนาที ค่าความแข็งแรงดึงของรอยต่อกลับมีค่าลดลง เพราะความเร็วรอบดังกล่าวนำไปสู่สร้างความร้อนที่ไม่ต่ำไป (Uday M. B, 2011) อย่างไรก็ตามเมื่อเปรียบเทียบระยะกอดัดแสดงให้เห็นว่า ที่ระยะกอดัดสูงให้ค่าความแข็งแรงดึงของชิ้นงานเชื่อมมากกว่าระยะกอดัดน้อย ตัวอย่างเช่น ความเร็วรอบ 1070 รอบต่อนาที ระยะกอดัดที่ 2.5 มิลลิเมตร มีค่าความแข็งแรงดึงเฉลี่ยที่ 34.19 MPa แต่ที่ความเร็วรอบเดียวกัน ระยะกอดัดที่ 3.5 มิลลิเมตร มีค่าความแข็งแรงดึงสูงขึ้นเฉลี่ยอยู่ที่ 87.01 MPa ซึ่งจะมีผลการทดลองไปในทำนองเดียวกันทุกความเร็วหมุนเชื่อม จะเห็นได้ว่าปริมาณช่องว่าง (Voids) ส่งผลโดยตรงต่อค่าความแข็งแรงดึงของชิ้นงาน สำหรับกระบวนการเชื่อมเสียดทานจะใช้งานในกลุ่มอุตสาหกรรมการผลิตได้แก่ อุตสาหกรรมน้ำมัน เช่น ตัวปรับแรงดันสูง (High-pressure Valve Body) กลุ่มอุตสาหกรรมเรือ เช่น เพลาลับ (Engine Drive Shaft) และอุตสาหกรรมอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้อง เป็นต้น



ภาพที่ 6 ค่าความแข็งแรงดึงของอะลูมิเนียมหล่อกิ่งของแข็ง SSM 6061 จากการเชื่อมเสียดทาน

การออกแบบการทดลองของงานวิจัยในครั้งนี้ คณะผู้วิจัยใช้การออกแบบการทดลองแบบ Factorial Design มาวิเคราะห์หาค่าตัวแปรต่าง ๆ ที่เหมาะสมต่อกระบวนการเชื่อมเสียดทาน โดยการนำโปรแกรม MINITAB V.16 มาใช้ในการออกแบบและวิเคราะห์ผลการทดลอง (D.C. Montgomery, 2000) โดยวิเคราะห์ผ่านทางค่าความแข็งแรงดึงของชิ้นงาน ซึ่งกำหนดตัวแปรในการทดลอง คือ ความเร็รรอบ ประกอบด้วย 950 1070 1190 และ 1310 รอบต่อนาที ส่วนอีกตัวแปร คือ ระยะกอดอัด ประกอบด้วย 2.5 3.0 และ 3.5 มิลลิเมตร หลังจากทดลองตามตัวแปรที่กำหนดนำผลการทดลองไปตรวจสอบว่าข้อมูลที่เก็บมานั้นเป็นข้อมูลที่มีคุณภาพหรือไม่ โดยมีความจำเป็นต้องพิสูจน์คุณสมบัติของข้อมูล 3 ประการด้วยกัน คือ การทดสอบความเป็นอิสระของข้อมูล (Independent Test) การทดสอบความเป็นปกติของข้อมูล (Normality Test) และการทดสอบความมีเสถียรภาพของข้อมูล (Variance Stability Test) ดังแสดงในภาพที่ 7 จากการวิเคราะห์ข้อมูล พบว่าค่าเฉลี่ยที่นำมาวิเคราะห์ความเป็นอิสระของข้อมูลมีการกระจายไร้รูปแบบไม่มีแนวโน้ม เมื่อวิเคราะห์ถึงความเป็นปกติของข้อมูล พบว่ามีแนวโน้มเข้าหาค่าคงที่ค่าหนึ่ง ซึ่งเป็นค่าที่ควรจะเป็นและไม่มีหลักฐานใดมาสนับสนุนว่าข้อมูลไม่มีเสถียรภาพ จึงสามารถสรุปได้ว่าข้อมูลมีคุณสมบัติทั้ง 3 ประการ คือ มีความเป็นอิสระต่อกันของข้อมูล มีความเป็นปกติของข้อมูล และมีความเสถียรภาพของข้อมูล และเมื่อทดสอบคุณสมบัติของข้อมูลแล้ว จึงนำข้อมูลมาวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance: ANOVA) สามารถแสดงผลตามตารางที่ 3



ภาพที่ 7 การตรวจสอบสมมติฐานของค่าความแข็งแรงดึง

จากตารางที่ 3 ผลการวิเคราะห์ค่าความแปรปรวนจากการทดลองค่าความแข็งแรงดึงที่ได้ออกแบบไว้ พบว่า ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ R-sq มีค่าเท่ากับร้อยละ 96.53 และค่า R-sq (adj) เท่ากับร้อยละ 94.94 ซึ่งมีความหมายว่า ถ้าหากความแปรปรวนในข้อมูลมี 100 (MPa)^2 แล้วความแปรปรวน 96.53 (MPa)^2 สามารถอธิบายได้ด้วยตัวแบบถดถอย ส่วนปริมาณที่เหลือไม่สามารถอธิบายได้ เนื่องจากสาเหตุที่ไม่สามารถควบคุมได้ เช่น สภาพภูมิอากาศ เป็นต้น และสามารถมองไปถึง ค่า R-sq (adj) เท่ากับร้อยละ 94.94 ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับค่า R-sq เป็นการยืนยันให้สมบูรณ์ว่าแบบจำลองหรือผลวิเคราะห์ความแปรปรวนมีความน่าเชื่อถือยิ่งขึ้น ดังนั้นจะได้ว่าความแปรปรวนของข้อมูลค่าความแข็งแรงดึง ส่วนใหญ่สามารถอธิบายได้ด้วยความเร็วรอบและระยะกดอัด รวมถึงอิทธิพลร่วมของทั้ง 2 ตัวแปร โดยดูจากค่า P-value ในตารางที่ 3 ซึ่งพบว่ามีค่าน้อยกว่า 0.05 ของทั้งตัวแปรหลักและตัวแปรร่วม

ตารางที่ 3 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) ของค่าความแข็งแรงดึง

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Speed	3	16551.10	5517.00	111.38	0.000
Burn of length	2	9484.40	4742.20	95.73	0.000
Speed*Burn of length	6	7006.80	1167.80	23.58	0.000
Error	24	1188.80	49.50		
Total	35	34231.20			

R-sq 96.53% R-sq(adj) 94.94%

5. สรุปผลการทดลอง

หลังจากทดลองเชื่อมวัสดุกลุ่มอะลูมิเนียมหล่อกิ่งของแข็ง SSM 6061 ด้วยกระบวนการเชื่อมเสียดทาน เพื่อศึกษาตัวแปรที่ส่งผลต่อการยึดติดของชิ้นงานเชื่อม จากการทดสอบผลการทดลองสามารถสรุปผลการทดลองได้ดังนี้

5.1 โครงสร้างบริเวณรอยเชื่อมเกิดการแตกหักของเฟส Mg_2Si จนมีขนาดที่เล็กลงโดยความเร็วรอบ 1310 รอบต่อนาที มีขนาดที่วัดได้เล็กที่สุด ที่ขนาดความยาว 1.01 ไมโครเมตร และขนาดความกว้าง 0.69 ไมโครเมตร

5.2 ค่าความแข็งแรงดึงสูงสุดของชิ้นงานหลังการเชื่อมเสียดทานอยู่ที่ 126.88 MPa จากความเร็วรอบ 1310 รอบต่อนาที ระยะกอดอัดที่ 3 มิลลิเมตร และเวลาในการกดแช่ 15 วินาที

5.3 บริเวณรอยเชื่อมมีค่าความแข็งแรงสูงสุดเฉลี่ย อยู่ที่ 55.05 HV เกิดจากการแตกหักของเฟส Mg_2Si ที่กระจายตัวทั่วรอยเชื่อม

5.4 การวิเคราะห์ค่าความแปรปรวนจากการทดสอบค่าความแข็งแรงดึงที่ได้จากการทดลอง มีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ R-sq มีค่าเท่ากับร้อยละ 96.53

6. อภิปรายผลการวิจัย

การเชื่อมเสียดทานของอะลูมิเนียมหล่อกิ่งของแข็ง SSM 6061 มีผลการทดลองที่แตกต่างกัน ซึ่งเป็นผลมาจากตัวแปรในการทดลอง คือ ความเร็วหมุน เวลาในการกดแช่ และระยะกอดอัดที่ใช้ในการทดลอง โดยความเร็วหมุนในการเชื่อมที่สูงมีแนวโน้มทำให้ชิ้นงานหลังการเชื่อมยึดติดกันได้ดี เนื่องจากเกิดการสร้างความร้อนที่เหมาะสม และระยะกอดอัดที่สูงมีแนวโน้มเพิ่มสมบัติทางด้านความแข็งแรงของชิ้นงานหลังการเชื่อมได้

7. ข้อเสนอแนะ

สำหรับการวิจัยการเชื่อมเสียดทานของอะลูมิเนียมหล่อกิ่งของแข็ง SSM 6061 เป็นงานวิจัยที่สร้างองค์ความรู้ในการเชื่อมด้วยเทคนิคใหม่ ๆ ดังนั้นควรมีการศึกษาเพิ่มเติมในการเชื่อมเสียดทานของวัสดุกลุ่มอื่น ๆ หรือกลุ่มวัสดุที่เชื่อมได้ยากสำหรับการเชื่อมด้วยวิธีเชื่อมแบบทั่วไป นอกจากนั้นควรมีการศึกษาร่วมกันกับสถานประกอบการที่สนใจเทคนิคการเชื่อมนี้ โดยควรศึกษาการเชื่อมเสียดทานกับชิ้นส่วนที่มีการใช้งานในอุตสาหกรรมของประเทศ

8. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนงบประมาณในการวิจัยกองทุนวิจัย สถาบันวิจัยและพัฒนามหาวิทยาลัยราชภัฏสงขลา คณะผู้วิจัยต้องขอขอบคุณด้วยความจริงใจ

9. เอกสารอ้างอิง

Ahmad Fauzi M.N, Uday M.B, Zuhailawati H. and Ismail A.B. (2010). Microstructure and mechanical properties of alumina-6061 aluminium alloy joined by friction welding. **Materials and Design**, Vol. 31, February 2010, pp. 670-676.

- D.C. Montgomery. (2000). **Designing and analysis of experiments**, 5th ed., New York: John Wiley & Sons,.
- Khalid Rafi H. Janaki Ram G.D, Phanikumar G. and Prasad Rao K. (2010). Microstructure and tensile properties of friction welded aluminum alloy AA7075-T6. **Materials and Design**, Vol. 31, May 2010, pp. 2375-2380.
- Lee C.S, Li H, Chandel R.S, (1999). Vacuum-free diffusion bonding of aluminium metal matrix composite. **Journal of Materials Processing Technology**, Vol. 89-90, May 1999, pp. 326-330.
- Moarrefzadeh A. (2012). Study of Heat Affected Zone (HAZ) in Friction welding process. **Journal of Mechanical Engineering**, Vol. 1(1), January 2011, pp. 11-17.
- Shailesh Singh K, Chattopadhyay K, Phanikumar G. and Dutta P. (2014). Experimental and numerical studies on friction welding of thixocast A356 aluminum alloy. **Acta Materialia**, Vol. 73, July 2014, pp. 177-185.
- Su J.Q, Nelson T.W, Mishra R. and Mahoney M. (2003). Microstructural investigation friction stir welded 7050-T651 aluminum. **Acta Materialia**, Vol. 51, February 2003, pp. 713-729.
- Trimble D.O, Donnell G.E, Monaghan J. (2015). Characterization of tool shape and rotational speed for increased speed during friction stir welding of AA2024-T3. **Journal of Manufacturing Processes**, Vol. 17, January 2015, pp. 141-150.
- Uday M.B, Ahmad Fauzi M.N, Zuhailawati H. and Ismail A.B. (2011). Evaluation of interfacial bonding in dissimilar materials of YSZ-alumina composites to 6061 aluminium alloy using friction welding. **Materials Science and Engineering A**, Vol. 528(9), January 2011, pp. 1348-1359.
- Wannasin J, Janudom S, Rattanochaikul T. and Flemings M.C. (2008). Development of the Gas Induced Semi-Solid Metal Process for Aluminum Die Casting Application. **Solid State Phenomena**, Vol. 141-143, July 2008, pp. 97-102.
- Yang X.W, Fu T and Li W.Y. (2014). Friction Stir Spot Welding: A Review on Joint Macro and Microstructure, Property and Process Modeling. **Advances in Materials Science and Engineering**, June 2014, pp. 1-11.