

กระบวนการทางความร้อน T6 หลังการเชื่อมเสียดทานแบบกวนของอะลูมิเนียมหล่อกึ่งของแข็ง 6061 Influences of post-weld Heat Treatment T6 of Friction Stir Welding Aluminum Semi-Solid Metal 6061

วรพงศ์ บุญช่วยแทน^{1*}, จักรนรินทร์ ฉัตรทอง² และ ชาตรี หอมเขียว³

สาขาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย สงขลา 90000

E-mail: worapong.b@rmutsv.ac.th^{1}, jaknarin.c@hotmail.com², chatree.h@rmutsv.ac.th³

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อโครงสร้างทางมหภาค จุลภาค และสมบัติทางกลของแนวเชื่อมต่อชนที่ผ่านกระบวนการทางความร้อนหลังการเชื่อมเสียดทานแบบกวนของอะลูมิเนียมหล่อกึ่งของแข็ง 6061 โดยใช้หัวกวนทรงกระบอก ปัจจัยที่ใช้ในการทดลองมี 2 ปัจจัย คือ ความเร็วหมุนเชื่อมของหัวกวนที่ระดับ 710, 1000 และ 1400 rpm ความเร็วเดินเชื่อมที่ 80, 112 และ 160 mm/min กระบวนการทางความร้อน T6 คือ การอบละลายของแข็งที่อุณหภูมิ 530 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง แล้วชุบน้ำและตามด้วยการบ่มเทียมที่ 185 °C เป็นเวลา 6 ชั่วโมง ซึ่งความเร็วหมุนเชื่อมของหัวกวน ความเร็วเดินเชื่อม และอิทธิพลทางความร้อนหลังการเชื่อมมีผลโดยตรงต่อโครงสร้าง และสมบัติทางกลของแนวเชื่อม จากการทดลองพบว่า โครงสร้างทางโลหะวิทยาบริเวณแนวเชื่อมมีความละเอียดกว่าเนื้อโลหะเดิม ทั้งด้านแอดวานซ์ซิงไซด์ และด้านรีทรีทติ้งไซด์ ซึ่งเกิดการบิดเบี้ยวของเกรนไม่เป็นรูปร่างเนื่องจากการหมุนของหัวกวน และเกิดรอยแตกบริเวณแนวเชื่อมเนื่องจากกระบวนการทางความร้อนหลังการเชื่อม นอกจากนี้ค่าความแข็งแรงเฉลี่ยสูงสุดที่ 177.53 MPa ที่ความเร็วหมุนเชื่อม 1400 rpm และความเร็วเดินเชื่อมที่ 80 mm/min และค่าความแข็ง

สูงสุดเฉลี่ย 117.63 Hv ที่ความเร็วหมุนเชื่อม 710 rpm และความเร็วเดินเชื่อมที่ 80 mm/min

คำสำคัญ: การเชื่อมเสียดทานแบบกวน, อะลูมิเนียมหล่อกึ่งของแข็ง 6061, อิทธิพลทางความร้อนหลังการเชื่อม T6

Abstract

The objective of this research is to investigate the effect of parameters on the macrostructure, the microstructure and the mechanical properties of post heat treatment friction stir welded butt joints of aluminum alloy sheets Semi-Solid Metal (SSM) 6061. The cylindrical pin was used as the welding tool. Friction stir welded within conditions of different tool rotation speed (710, 1000 and 1400 rpm) and welding speed (80, 112 and 160 mm/min). Heat treatment T6 is solution treatment temperature at 530 °C for 1 hours quenching in water and followed by artificial aging at 185 °C for 6 hours. The rotation speed, welding speed and post heat treatment have a direct weld with the structure and mechanical properties of the

weld. The results revealed that metallurgy structure of stir zone is smaller grain than base metal both advancing side and retreating side which occurred the cracks in welding zone. Furthermore, maximum average tensile strength of 177.53 MPa found at tool rotation speed 1400 rpm, welding speed 80 mm/min, whereas the maximum average hardness of 117.63 Hv found at tool rotation speed 710 rpm, and welding speed 80 mm/min.

Keywords: Friction Stir Welding, Aluminum Cast Semi Solid Metal 6061 (SSM 6061), Post Weld Heat Treatment T6

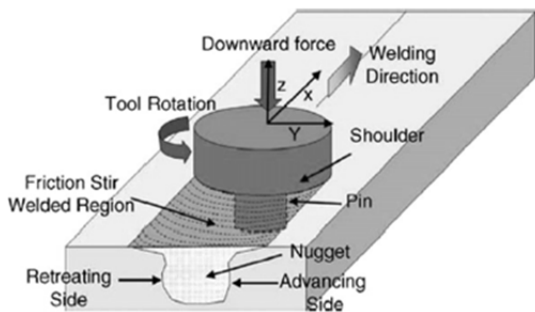
1. บทนำ

อะลูมิเนียมผสมซึ่งหล่อทิ้งของแข็ง เมื่อเชื่อมโดยการรวมวิธีการเชื่อมอาร์คหรือการเชื่อมโดยการหลอมละลาย (Fusion) โลหะแข็งตัวจะเกิดโครงสร้างขึ้นมาใหม่ ซึ่งโครงสร้างใหม่นี้อาจจะไม่เหมือนกับโครงสร้างเดิมของโลหะนั้น อาจจะมี ความเค้นตกค้าง (Residual Stress) การบิดงอ (Distortion) การแตกร้าวของรอยเชื่อม (Welding Crack) ในระหว่างการแข็งตัวจากการหลอมละลาย และมีปัญหาการเกิดโพรงอากาศ (Porosity) นอกจากนี้ยังมีปัญหาที่สำคัญอีกประการหนึ่งในการเชื่อมอะลูมิเนียม คือ การรักษาสมบัติทางกลของบริเวณรอยเชื่อมให้ใกล้เคียงกับเนื้อเดิมมากที่สุด การเชื่อมโดยการหลอมละลายก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางโลหะวิทยา (Metallurgical Changes) [1] ส่งผลทำให้แนวเชื่อม

(Welding Region) มีการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางกลของอะลูมิเนียมลดลงตามไปด้วย

การเชื่อมเสียดทานแบบกวน (Friction Stir Welding; FSW) เป็นการเชื่อมโลหะในสภาวะของแข็ง (Solid State Welding) ที่คิดค้นโดยสถาบันการเชื่อมอังกฤษ (The Welding Institute; TWI) เพื่อเชื่อมวัสดุที่ยากต่อการเชื่อมด้วยกระบวนการเชื่อมแบบหลอมละลาย แสดงดังรูปที่ 1 เช่น อะลูมิเนียมผสมเกรดต่างๆ มากมาย [2-4] กระบวนการเชื่อมเสียดทานแบบกวน ทำให้เกิดโครงสร้างของแนวเชื่อมที่มีเกรนเล็กละเอียด สามารถรับแรงได้สูง ซึ่งการเชื่อมแบบหลอมละลายไม่สามารถทำได้ [5] และจะมีความเหมาะสมมากสำหรับการเชื่อมโลหะที่ไม่ต้องการให้เกิดการหลอมเหลวขึ้น ซึ่งอาจจะส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างทางจุลภาคจากการเย็นตัวจากสภาวะของเหลวไปสู่สภาวะของแข็งได้ ตรงกับหลักการของการผลิตอะลูมิเนียมผสมหล่อแบบกึ่งของแข็ง นอกจากนี้การเชื่อมอะลูมิเนียมผสมหล่อแบบกึ่งของแข็งยังเป็นเทคโนโลยีที่ใหม่มาก และยังอยู่ในขั้นตอนการวิจัย เมื่อไม่นานมานี้ได้มีผู้ทำการทดลองเชื่อมต่อชนวัสดุอะลูมิเนียมหล่อทิ้งของแข็ง ซึ่งการเชื่อมดังกล่าวยังเป็นที่นิยมใช้เฉพาะในวงการวิจัยเท่านั้น ยังไม่ได้นำอะลูมิเนียมหล่อทิ้งของแข็งมาใช้งานอุตสาหกรรมมากนัก อะลูมิเนียมที่นิยมนำมาเชื่อม เช่น SSM 356 [6] ได้แสดงให้เห็นว่า ความเร็วรอบ ความเร็วในการเดินแนวเชื่อม และอิทธิพลทางความร้อน เป็นปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อเนื้อโลหะ และสมบัติทางกลของรอยเชื่อม สอดคล้องกันกับ SSM 7075 [7] ให้ความเห็นไว้ว่า บริเวณรอยเชื่อมมีลักษณะโครงสร้างที่แตกหักมากซึ่งประกอบไปด้วย

อนุภาค Al_7Cu_2Fe , Mg_2Si , Al_2CuMg และ $Al_2Cu_3Zn_3$ ในอะลูมิเนียมเมตริกซ์กระจายอย่างสม่ำเสมอทั่วบริเวณที่ถูกกวน อิทธิพลทางความร้อนมีผลต่อเนื้อโลหะ และสมบัติทางกลของรอยเชื่อม แต่อย่างไรก็ตามอิทธิพลทางความร้อนหลังเชื่อมเสียดทานแบบกวนของอะลูมิเนียมผสมกึ่งของแข็ง SSM 6061 (Post Heat Treatment Friction Stir Welding: P_oHTFSW) ซึ่งเป็นวัสดุใหม่ที่มีโครงสร้างเกรนแบบก่อนกลมนั้นยังเป็นเทคโนโลยีที่ใหม่มาก และยังไม่ปรากฏหลักฐานในการทำวิจัยอีกด้วย



รูปที่ 1 การเชื่อมเสียดทานแบบกวน [8]

จากข้อมูลและเหตุผลดังกล่าวข้างต้นจึงเป็นที่มาของโครงการวิจัย กระบวนการทางความร้อน T6 หลังการเชื่อมเสียดทานแบบกวนของอะลูมิเนียมหล่อกึ่งของแข็ง 6061 ปัจจัยที่ศึกษา คือ ความเร็วหมุนเชื่อม ความเร็วเดินเชื่อม และกระบวนการทางความร้อน T6 หลังการเชื่อม เพื่อศึกษาปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางโลหะวิทยา (โครงสร้างทางมหภาค และจุลภาค) และสมบัติทางกล (ความตารางที่ 1 ส่วนผสมทางเคมี และความแข็งแรงของวัสดุทดลอง (ร้อยละโดยน้ำหนัก)

แข็งแรง และความแข็ง) โดยเฉพาะของเนื้อเชื่อม (Weld Metal) บริเวณแนวเชื่อม (Stir Zone; SZ) และบริเวณที่มีผลกระทบอันเนื่องมาจากความร้อน (Thermo Mechanical Affected Zone; TMAZ) เพื่อความเหมาะสมทางด้านโครงสร้างทางมหภาค จุลภาค และสมบัติทางกล อีกทั้งนำผลมาปรับปรุงเพื่อเลือกใช้กรรมวิธีการเชื่อมที่เหมาะสมทั้งในแง่งานวิจัย และอุตสาหกรรมต่อไป

2. วิธีการดำเนินงานวิจัย

การทดลองอิทธิพลทางความร้อน T6 หลังการเชื่อมด้วยกระบวนการเชื่อมเสียดทานแบบกวนของอะลูมิเนียมหล่อกึ่งของแข็ง 6061 มีเครื่องมือ อุปกรณ์ วัสดุ และตัวแปรที่ใช้ในการทดลอง ดังนี้

2.1 วัสดุและปัจจัยในการทดลอง

วัสดุที่ใช้ในการทดลอง คือ อะลูมิเนียมผสมที่หล่อด้วยกระบวนการหล่อแบบกึ่งของแข็ง โดยการพ่นฟองแก๊สเฉื่อยในน้ำโลหะ (GISS) [9] SSM 6061 มีส่วนผสมทางเคมี แสดงดังตารางที่ 1 ชิ้นงานทดลองมีขนาดความหนา 4 mm ความยาว 100 mm และความกว้าง 50 mm แผ่นวัสดุทั้งสองถูกยึดประกอบเป็นรอยต่อชน และยึดแน่นบนอุปกรณ์ (Fixture) ที่ถูกติดตั้งบนแท่นเครื่องกัดแนวตั้ง (Vertical Milling Machine)

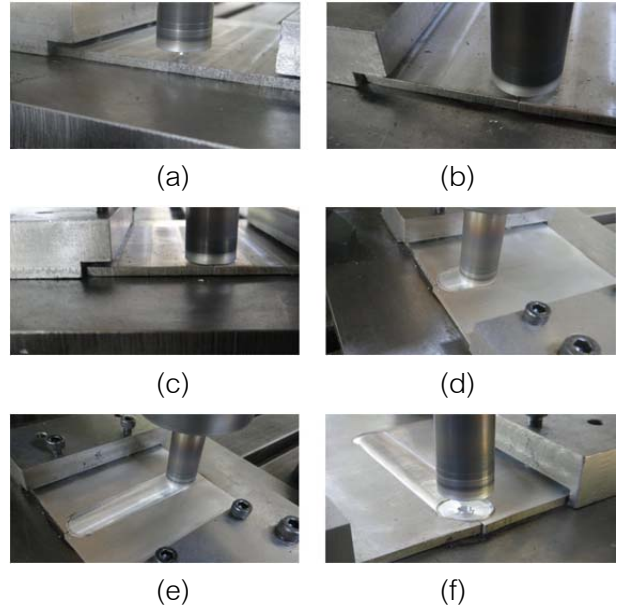
Elements	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Ti	Cr	Al	Tensile Strength (MPa)
SSM 6061	0.80	0.70	0.40	0.15	1.20	0.25	0.15	0.35	Bal.	164

ในการทดลองจะใช้ตัวควนรูปทรงกระบอกที่ทำจากเหล็กกล้าเครื่องมือเกรด SKD 11 โดยมีขนาดความยาวหัวพิน 3.2 mm ความโต 5 mm และความโตหัว Shoulder 20 mm มีรูปร่างแสดงดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 ตัวควนรูปทรงกระบอกที่ใช้ในการทดลอง

โดยการทดลองครั้งนี้การเชื่อมจะถูกเชื่อมด้วยเครื่องกัดแนวตั้ง เอียงตัวควน 3 องศา การทดลองในการเชื่อมเสียดทานแบบกวน แสดงดังรูปที่ 3 หัวพินที่หมุนเหนือชิ้นงาน 3(a) จากนั้นหัวพินสอดลงไปใญ่ข้อวัสดุจนกระทั่งปลายของตัวควนถูกสอดไปในระยะความลึกจนสัมผัสกับปากกวนเป็นระยะเวลา 30 วินาที 3(b) จากนั้นความร้อนที่เกิดจากการเสียดทานระหว่างหัวพิน ปากกวน และผิวชิ้นงานจะทำให้เกิดความร้อนที่ทำให้วัสดุเกิดการอ่อนตัว และเกิดการเคลื่อนที่ไหลวนรอบ ๆ หัวพิน 3(c) เดินเชื่อมตามความเร็วในการเดินแนวเชื่อมที่กำหนด ในขั้นตอนนี้จะเกิดการรวมตัวของวัสดุทั้งสองชิ้น 3(d) ทำให้เกิดรอยต่อชนของวัสดุสองชิ้นขึ้น 3(e) เมื่อสิ้นสุดการเชื่อมก่อนยกหัวพินขึ้นจากรอยเชื่อม ควรให้หัวพินหมุนเสียดทานคงที่ระหว่างชิ้นงานกับหัวพิน และปากกวน ณ ตำแหน่งสุดท้ายของการเชื่อมประมาณ 20 วินาที 3(f) เพื่อให้เกิดการประสานที่ดีขึ้นหลังจากนั้นก็ยกหัวพินขึ้นจากชิ้นงาน เป็นอันเสร็จกระบวนการทดลองการเชื่อมเสียดทานแบบกวน



รูปที่ 3 กรรมวิธีการเชื่อมเสียดทานแบบกวน

ปัจจัยในการทดลอง กำหนดให้มี 2 ปัจจัยหลัก คือ ความเร็วหมุนเชื่อม (Rotation Speed) มี 3 ระดับ คือ 710, 1000 และ 1400 rpm และความเร็วเดินเชื่อม (Welding Speed) มี 3 ระดับ คือ 80, 112 และ 160 mm/min นอกจากนี้ปัจจัยที่ควบคุม คือ การเอียงองศาของตัวควน 3 องศา (Tool Tilt Angle) ขนาดของตัวควน (Pin Dimensions) และแรงกดของตัวควน (Down Force) 450 N

2.2 กระบวนการทางความร้อน T6

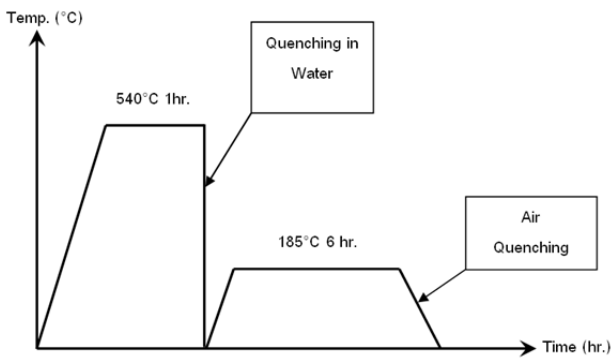
เมื่อเชื่อมชิ้นงานเสร็จนำชิ้นงานไปผ่านกรรมวิธีทางความร้อนแบบ T6 หลังการเชื่อม ขั้นตอนทดลองการบ่มชิ้นงานมีดังต่อไปนี้

1) อบละลายของแข็ง (Solution Heat Treatment) อุณหภูมิที่ 540 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 1 ชั่วโมง [10]

2) เมื่อทำการอบขึ้นทดสอบตามระยะเวลาต่างๆตามขั้นตอนการทดลอง และจุ่มขึ้นทดสอบลงในน้ำ

3) เมื่อผ่านขั้นตอนใน ขั้นที่ 1 และ 2 แล้วนำชิ้นทดสอบไปบ่มเทียม (Artificial Aging) ที่อุณหภูมิ 185 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 8 ชั่วโมง [10]

4) เมื่อทำการบ่มชิ้นทดสอบตามระยะเวลาต่างๆตามขั้นตอนการทดลอง จากนั้นให้ชิ้นงานเย็นตัวในอากาศ ซึ่งขั้นตอนดังกล่าวแสดงดังรูปที่ 4



รูปที่ 4 ขั้นตอนในการทำกระบวนการทางความร้อน T6

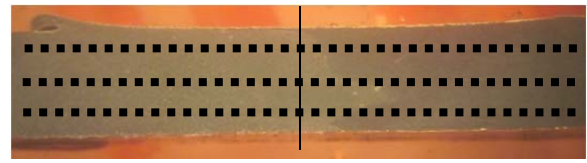
2.3 โครงสร้างทางโลหะวิทยา

หลังจากทำกระบวนการทางความร้อนหลังเชื่อมเรียบร้อยแล้ว ชิ้นทดสอบจะถูกตัดตั้งฉากกับแนวเชื่อม จากนั้นนำไปขัดด้วยกระดาษทราย และผ้าสักหลาด นำไปกัดกรด (Etching) ด้วยสารละลายเจ็จจาก Keller's Reagent และนำไปทดสอบโครงสร้างด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบลำแสง เพื่อคุณลักษณะโครงสร้างทางมหภาค และจุลภาค รวมถึงรูปร่างและขนาดของเกรนที่บริเวณแนวเชื่อมหลังผ่านกระบวนการเชื่อมเสียดทานแบบกวน

2.4 การทดสอบความแข็ง

ชิ้นงานทดสอบความแข็งจะถูกตัดตามขวางของแนวเชื่อม การทดสอบจะใช้เครื่องทดสอบแบบไมโครวิกเกอร์กดบริเวณพื้นที่หน้าตัดของแนวเชื่อม โดย

แบ่งออกเป็นสามแถว ซึ่งประกอบด้วยแถวบน กลาง และล่างตามลำดับ แสดงดังรูปที่ 5 กัดตั้งแต่ตรงกลางไปจนถึงระยะห่างจากจุดศูนย์กลางแนวเชื่อม 10 mm ระยะห่างของรอยกดแต่ละจุด 0.5 mm แรงกดที่ใช้ 100g และเวลาในการกด 10 วินาที โดยอ้างอิงตามมาตรฐาน ASTM-E18



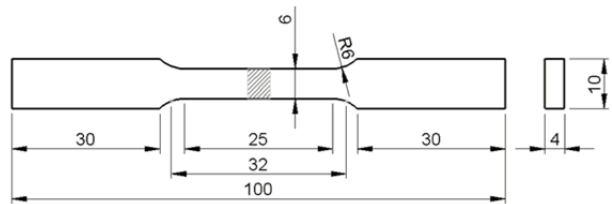
(AS) SSM 6061

SSM 6061 (RS)

รูปที่ 5 บริเวณพื้นที่หน้าตัดที่ทดสอบความแข็ง

2.5 การทดสอบความแข็งแรง

ชิ้นงานที่ได้จะถูกนำไปทดสอบความแข็งแรงเพื่อหาสมบัติทางกลของแนวเชื่อม โดยชิ้นงานทดสอบจะถูกตัดตั้งฉากกับแนวเชื่อม และให้รอยเชื่อมอยู่ตรงกลางของชิ้นทดสอบอัตราเร็วในการดึงที่ 1.67×10^{-2} mm/min ซึ่งขนาด และรูปร่างของชิ้นทดสอบถูกแสดงดังรูปที่ 6 โดยอ้างอิงตามมาตรฐาน ASTM-E8M



รูปที่ 6 ชิ้นงานทดสอบแรงดึงตามมาตรฐาน ASTM-E8M

3. ผลการวิจัยและวิเคราะห์ผล










จากการทดลองเชื่อมด้วยกระบวนการเชื่อมเสียดทานแบบกวนของอะลูมิเนียมหล่อกิ่งของแข็ง 6061 โดยการนำเครื่องกัดแนวตั้งมาประยุกต์ใช้เป็นเครื่องเชื่อมเสียดทานแบบกวน ซึ่งคุณลักษณะแนวเชื่อมที่ได้จะเปลี่ยนแปลงไปตามปัจจัยที่ใช้ในแต่ละ

เงื่อนไขของการเชื่อม ค่าต่าง ๆ ที่ได้จากการทดลองสามารถแสดงเป็นข้อ ๆ ดังนี้

3.1 ผลของโครงสร้างทางโลหะวิทยา



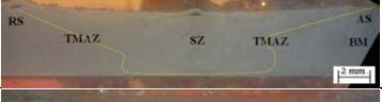
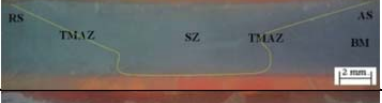


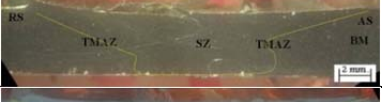


ลักษณะผิวด้านบนของแนวเชื่อม แสดงดังรูปที่ 7 พบว่า มีลักษณะผิวหน้ารอยเชื่อมที่ขรุขระเล็กน้อยเป็นรอยที่เกิดจากบ่าของ Tool อีกทั้งเกิดครีบเล็กน้อยของด้านรีทริทติ้งไซด์ อันเนื่องมาจากความร้อนที่สะสมในรอยเชื่อมมีมากพอที่จะทำให้เนื้ออะลูมิเนียมอยู่ในสภาวะพลาสติกเกิดการเคลื่อนตัวของเนื้ออะลูมิเนียมได้สะดวกหลุดออกจากบ่าของ Tool เกิดเป็นครีบด้านรีทริทติ้งไซด์ เพราะว่าด้านรีทริทติ้งไซด์ เป็นด้านที่ทิศทางการหมุนของ Tool สวนทางกับทิศทางการเดินแนวเชื่อม [11] บริเวณผิวหน้ารอยเชื่อมของแนวเชื่อมเกิดการประสานกันที่ดีของรอยเชื่อมต่อชน และบริเวณด้านล่างของรอยเชื่อมมีการซึมลึกที่ดี ไม่พบรอยแยกที่ไม่ประสานกันของรอยเชื่อม แต่จะเกิดรูบริเวณจุดสิ้นสุดของรอยเชื่อมอันเนื่องมาจากปลายของหัวพิน บริเวณแนวเชื่อมที่ผ่านกระบวนการทางความร้อนหลังการเชื่อมเกิดการพุพอง (Blistering) บริเวณผิวแนวเชื่อมอันเนื่องมาจากการอบชิ้นงานที่อุณหภูมิสูงและเป็นเวลานาน ทำให้รูพุนที่มีอากาศอยู่ใต้ผิวงานเกิดการดันตัวและพุพองออกมานอกผิวงานในที่สุดแต่สามารถหลีกเลี่ยงการพุพองของผิวงานได้ด้วยวิธีการกระบวนการทางความร้อนที่ใช้เวลาสั้นอุณหภูมิต่ำ [12] อีกทั้งปริมาณการพุพองของแนวเชื่อมที่ความเร็วหมุนของหัวพินต่ำ (710 rpm) มีมากกว่าแนวเชื่อมที่ความเร็วหมุนของหัวพินสูง (1400 rpm)

โครงสร้างทางมหภาคของแนวเชื่อม อะลูมิเนียมผสม แสดงดังรูปที่ 8 พบว่ารอยเชื่อมของความเร็วหมุนของหัวพินสูงมีลักษณะรอยเชื่อมที่กว้างกว่ารอยเชื่อมของความเร็วหมุนของหัวพินต่ำ อันเนื่องมาจากความร้อนที่มากกว่าทำให้เนื้อ

Rotation Speed (rpm)	Welding Speed (mm/min)	Surface Welding
710	80	
	112	
	160	
1000	80	
	112	
	160	
1400	80	
	112	
	160	

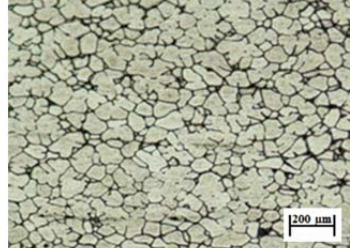
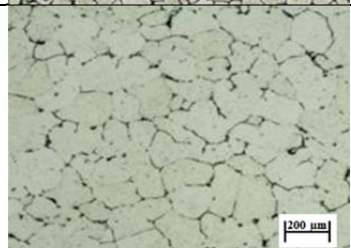
รูปที่ 7 ลักษณะผิวด้านบนของแนวเชื่อมที่ตัวแปรต่างๆ

อะลูมิเนียมอยู่ในสภาวะพลาสติกเป็นบริเวณกว้างกว่าการเชื่อมด้วยความเร็วหมุนของหัวพินต่ำ [13] รอยเชื่อมที่ผ่านกระบวนการทางความร้อนหลังการเชื่อม จะปรากฏรอยแตก (Crack) บริเวณรอยเชื่อมอันเนื่องมาจากอิทธิพลของกระบวนการทางความร้อน [6, 14-15] ซึ่งการแตกของแนวเชื่อมเกิดขึ้นในระหว่างการชุบในน้ำหลังจากขั้นตอนกระบวนการอบละลาย (Solution Treatment) จากการสังเกตบริเวณรอยเชื่อมที่ความเร็วหมุนของหัวพินสูง (1000 และ 1400 rpm) จะมีลักษณะรอยแตกกว้างมากกว่ารอยเชื่อมที่ความเร็วหมุนของหัวพินต่ำ (710 rpm)

Rotation Speed (rpm)	Welding Speed (mm/min)	Macro Structure
710	80	
	112	
	160	
1000	80	
	112	
	160	
1400	80	
	112	
	160	

รูปที่ 8 โครงสร้างทางมหภาคของแนวเชื่อม

โครงสร้างทางจุลภาคบริเวณเนื้อโลหะเดิมแสดงดังรูปที่ 9 โครงสร้างทางจุลภาคของบริเวณเนื้อโลหะเดิมของอะลูมิเนียมหล่อกิ่งของแข็ง 6061 (9a) เฟส α -Al เป็นลักษณะก้อนกลมต่อเนื่องกันมีเฟส (α -Al + Mg_2Si) จับกลุ่มรอบเฟส α -Al [16] โครงสร้างทางจุลภาคสภาวะที่ผ่านกระบวนการทางความร้อน T6 ของอะลูมิเนียมหล่อกิ่งของแข็ง 6061 (9b) เกรนของเฟส α -Al เป็นลักษณะก้อนกลมต่อเนื่องกันมีเฟส Mg_2Si กระจุกกระจายไม่เป็นระเบียบรอบเฟส α -Al มีการแพร่ของ อนุภาค Mg, Si ออกจากเฟสยูเทคติก และละลายเข้าสู่อะลูมิเนียมเมตริกซ์ [16]

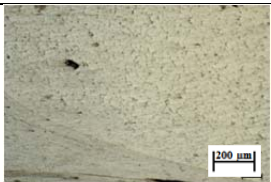
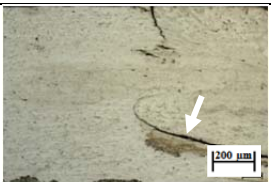
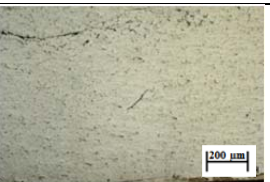








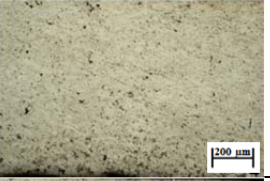




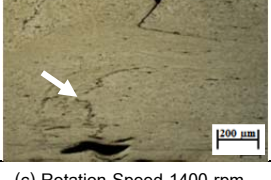

Point Scan	Micro Structure
(a) Base SSM 6061	
(b) Base SSM 6061 T6	

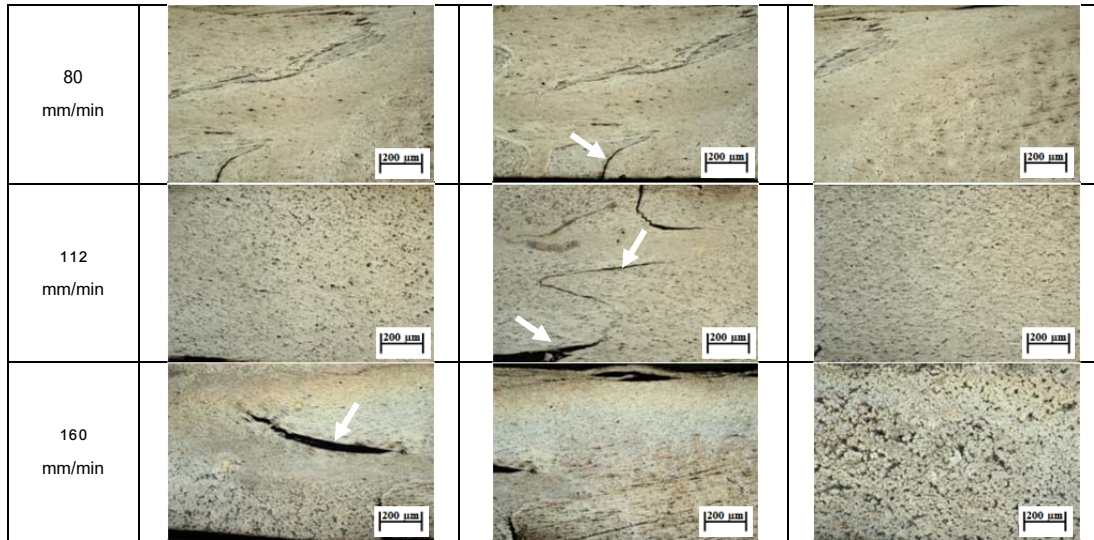
รูปที่ 9 โครงสร้างทางจุลภาคของบริเวณเนื้อโลหะเดิม

โครงสร้างทางจุลภาคของแนวเชื่อมอะลูมิเนียมผสม SSM 6061 แสดงดังรูปที่ 10 พบว่าบริเวณรอยเชื่อมมีการแพร่ของอนุภาค Mg, Si ผสมในอะลูมิเนียมเมตริกซ์กระจายตัวอย่างสม่ำเสมอทั่วทั้งบริเวณที่ถูกกวน [15] อันเนื่องมาจากการเสียดทานระหว่างหัวพินกับเนื้ออะลูมิเนียมทำให้เกิดการแตก

ละเอียดของโครงสร้างเกรนแบบก้อนกลมและเฟส Eutectic บริเวณแนวเชื่อมที่ผ่านกระบวนการทางความร้อนหลังการเชื่อม จะปรากฏรอยแตกร้าว (Crack) เป็นผลเนื่องมาจากอิทธิพลของกระบวนการทางความร้อน [6, 14-15] ซึ่งการแตกของแนวเชื่อมเกิดขึ้นในระหว่างการชุบในน้ำหลังจากขั้นตอนกระบวนการอบละลาย (Solution Treatment) ที่

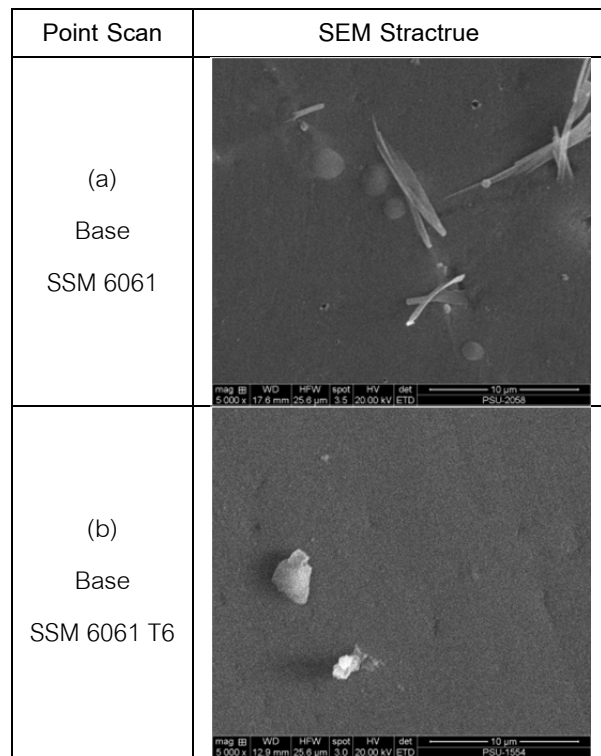
อุณหภูมิ 540°C จากการสังเกตบริเวณรอยเชื่อมที่ความเร็วหมุนของหัวพินสูง (1000 และ 1400 rpm) จะมีลักษณะรอยแตกร้าวมากกว่ารอยเชื่อมที่ความเร็วหมุนของหัวพินต่ำ (710 rpm) และรอยแตกที่ความเร็วหมุนของหัวพินสูง จะมีการกระจัดกระจายมากกว่า รอยเชื่อมที่ความเร็วหมุนของหัวพินต่ำ ซึ่งรอยแตกจะชี้ให้เห็นโดยลูกศรสีขาว

Welding Speed	TMAZ (RS)	SZ	TMAZ (AS)
	(a) Rotation Speed 710 rpm		
80 mm/min			
112 mm/min			
160 mm/min			
(b) Rotation Speed 1000 rpm			
80 mm/min			
112 mm/min			
160 mm/min			
(c) Rotation Speed 1400 rpm			



รูปที่ 10 ลักษณะโครงสร้างทางจุลภาค

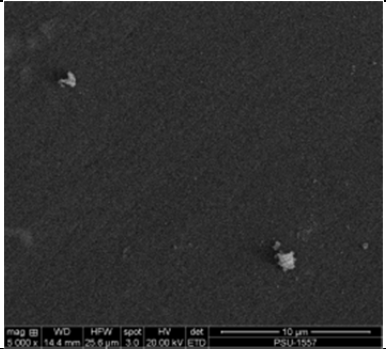
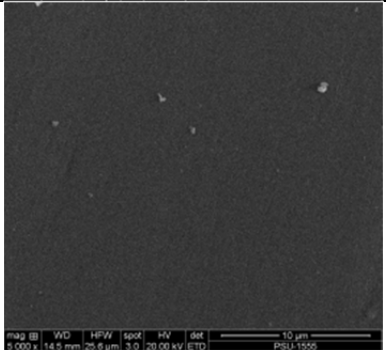
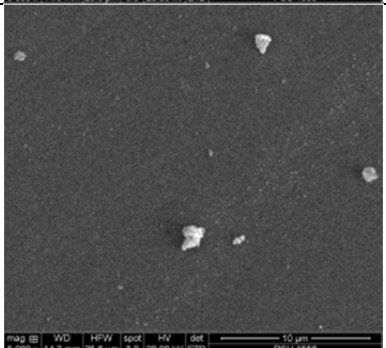
โครงสร้างจุลภาค SEM ของเนื้อโลหะเดิม แสดงดังรูปที่ 11(a) เฟส Mg, Si มีการเกาะตัวกันเป็น กิ่งก้านภายในเนื้ออะลูมิเนียมเมตริกซ์ [16] กระจาย ตัวทั่วไปในอลูมิเนียมเมตริกซ์ โดยเฉพาะอนุภาค Mg, Si ซึ่งเป็นธาตุผสมหลัก มีลักษณะเป็นแบบ Rods มี ขนาดความโตประมาณ 1.5 μm และแบบ Plates มี ขนาดความโตประมาณ 2.5 μm มีขนาดความยาว ประมาณ 15-20 μm ผสมอยู่ในอลูมิเนียมเมตริกซ์ โดยเนื้อโลหะเดิมที่ไม่ผ่านกระบวนการทางความร้อน (As cast) อนุภาค Mg, Si (สีขาว) มีลักษณะขนาด ใหญ่กว่าเมื่อเปรียบเทียบกับเนื้อโลหะเดิมที่ผ่าน กระบวนการทางความร้อน T6 แสดงดังรูปที่ 11(b) อนุภาค Mg, Si มีลักษณะเป็นแท่งยาวเรียว และกลม มน เพื่อแพร่เข้าสู่อะลูมิเนียมเมตริกซ์ รวมตัวเป็น อนุภาค Mg_2Si [16] ส่วนสภาวะที่ผ่านกระบวนการ ทางความร้อน Solution อนุภาค Mg, Si มีลักษณะ เป็นแท่งยาว ปลายแหลม มีขนาดอนุภาคใหญ่กว่าใน สภาวะที่ผ่านกระบวนการทางความร้อน T6



รูปที่ 11 โครงสร้างจุลภาค SEM ของเนื้อโลหะเดิม

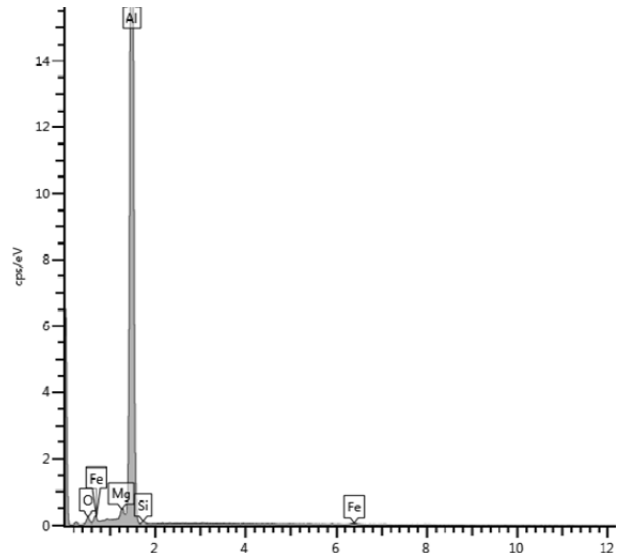
โครงสร้างจุลภาค SEM ของรอยเชื่อม ที่ ความเร็วหมุนเชื่อม 1400 rpm ความเร็วเดินเชื่อม 80 mm/min มีค่าความแข็งแรงเฉลี่ยสูงสุด 177.53 MPa แสดงดังรูปที่ 12 เกิดการแตกหักของเฟส Mg_2Si กระจัดกระจายทั่วบริเวณที่ถูกกวน จะเห็นว่าบริเวณ

แนวเชื่อม SZ (12b) เกรนมีความละเอียดมากกว่า บริเวณที่มีผลกระทบอันเนื่องมาจากความร้อน TMAZ (12a, c) เนื่องมาจากบริเวณแนวเชื่อมจะถูกหมุนวน ด้วยหัวทวนโดยตรงจึงทำให้เกรนบริเวณนี้มีความละเอียดมากกว่า และมีขนาดเล็กลงเมื่อเทียบกับเกรน บริเวณเนื้อโลหะเดิมอันเนื่องมาจากความเร็วหมุน เชื่อม และความเร็วเดินเชื่อมมีอิทธิพลโดยตรง [15, 17]

Point Scan	SEM Structure
(a) TMAZ (RS)	
(b) SZ	
(c) TMAZ (AS)	

รูปที่ 12 โครงสร้างทางจุลภาค SEM ของรอยเชื่อม

ผลการวิเคราะห์ธาตุเชิงปริมาณ (EDX) แสดง ดังรูปที่ 13 เพื่อระบุถึงเฟส Mg_2Si ที่แพร่กระจายใน หลายในรูปแบบของแนวเชื่อมที่ผ่านกระบวนการทาง ความร้อน T6



รูปที่ 13 ผลการวิเคราะห์ธาตุเชิงปริมาณ (EDX)

3.2 ผลของค่าความแข็งแรง

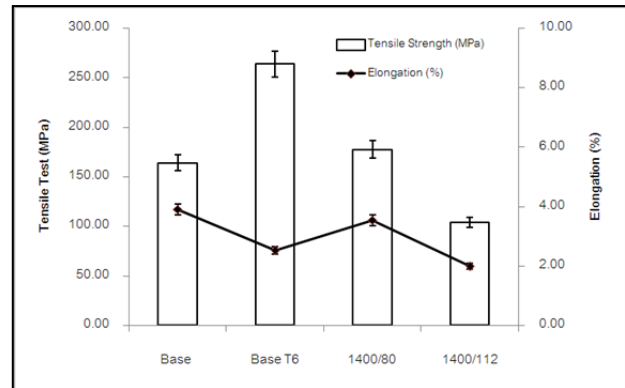
ความแข็งแรงของรอยเชื่อมอะลูมิเนียมหล่อ กิ่งแข็ง 6061 แสดงดังตารางที่ 2 สภาพแนวเชื่อมที่ดี ที่สุดของการทดลองนี้คือ ความเร็วหมุนเชื่อม 1400 rpm และความเร็วเดินเชื่อม 80 mm/min เมื่อ เปรียบเทียบกับเนื้อโลหะเดิม 6061 มีประสิทธิภาพ เพิ่มขึ้น 108.25% และเปรียบเทียบกับเนื้อโลหะเดิม 6061-T6 มีประสิทธิภาพ 67.28% โดยที่ ประสิทธิภาพแนวเชื่อมคำนวณได้จากการนำผลค่า ความแข็งแรงดึงของแนวเชื่อมเป็นตัวตั้งหารด้วยผล ค่าความแข็งแรงดึงของเนื้อโลหะเดิม [6]

$$\text{Joint Efficiency} = \frac{\text{Tensile Test of FSW}}{\text{Tensile Test of Base Metal}} \quad (1)$$

ผลการทดสอบความแข็งแรง แสดงดังรูปที่ 14 ขึ้นงานทดสอบความแข็งแรงตามมาตรฐาน E8M ซึ่งเป็นค่าความแข็งแรงจากค่าเฉลี่ย 3 ซัก พบว่าค่าความแข็งแรงเฉลี่ยสูงสุด 177.53 MPa ที่ความเร็วหมุนเชื่อม 1400 rpm และความเร็วเดินเชื่อม 80 mm/min ที่ความเร็วหมุนเชื่อมสูงขึ้นทำให้ค่าความแข็งแรงมีค่ามากขึ้น เมื่อเทียบกับที่ความเร็วเดินเชื่อมเดียวกันจะพบว่า ยิ่งค่าความเร็วหมุนเชื่อมเพิ่มขึ้น ความร้อนจากการเสียดทานระหว่างตัวแกนกับเนื้อวัสดุจะมีมากขึ้น ทำให้การกระจายตัวและการประสานกันของเนื้อวัสดุ มีความสมบูรณ์ส่งผลให้ค่าความแข็งแรงมีค่าสูงขึ้น [18-19] ส่วนค่าความแข็งแรงเฉลี่ยต่ำสุด 103.67 MPa ที่ความเร็วหมุนเชื่อม 1400 rpm และความเร็วเดินเชื่อม 112 mm/min เมื่อค่าความเร็วเดินเชื่อมเพิ่มขึ้น ค่าความแข็งแรงจะมีค่าเพิ่มขึ้น แต่เนื่องจากนำชิ้นงานไปกระบวนการทางความร้อนหลังการเชื่อม ทำให้ค่าความแข็งแรงเลยจุดสูงสุดจนทำให้เกิดรอยแตกบริเวณแนวเชื่อม ส่งผลให้ค่าความแข็งแรงลดลงได้เช่นเดียวกัน [6, 14-15]

ตารางที่ 2 ค่าความแข็งแรงของแนวเชื่อม

Rotation Speed (rpm)	Welding Speed (mm/min)	Tensile Strength (MPa)	Elongation (%)	Joint Efficiency (Base) (%)	Joint Efficiency (Base T6) (%)
710	80	133.85	2.49	81.62	50.73
	112	133.43	3.89	81.36	50.57
	160	141.70	3.36	86.40	53.70
1000	80	133.50	2.89	81.40	50.59
	112	137.07	5.71	83.58	51.94
	160	138.73	2.56	84.59	52.58
1400	80	177.53	3.53	108.25	67.28
	112	153.67	1.98	93.29	58.23
	160	147.07	3.99	89.67	55.73
Base		164.00	3.90	-	-
Base T6		263.87	2.51	-	-



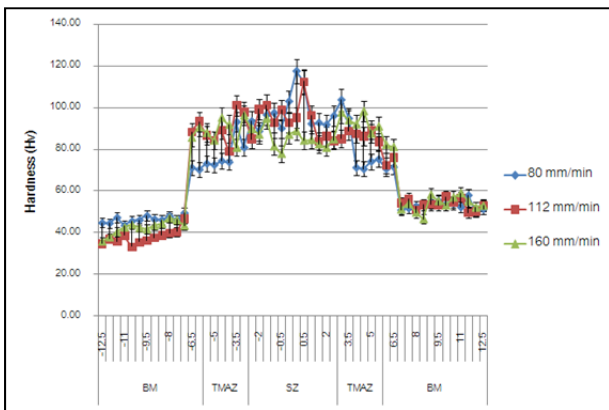
รูปที่ 14 กราฟค่าความแข็งแรงแนวเชื่อม

3.3 ผลของค่าความแข็ง

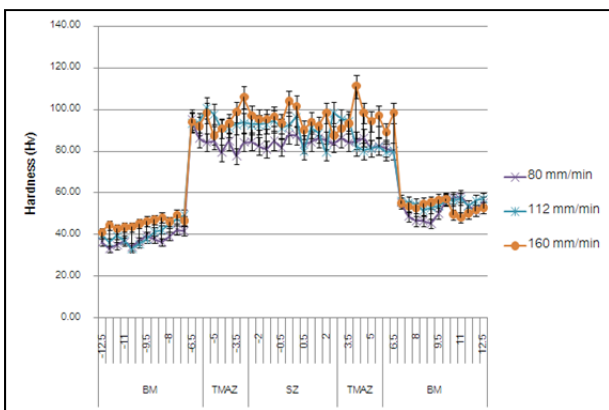
ความแข็งของรอยเชื่อมอะลูมิเนียมเนื้อหล่อทิ้งแข็ง 6061 แสดงดังรูปที่ 15 ลักษณะกราฟโดยรวม ค่าความแข็งมีค่าเพิ่มสูงขึ้นในบริเวณ TMAZ และมีค่าเพิ่มสูงขึ้นไปอีกกว่าเดิมเมื่อเข้าสู่บริเวณ SZ ส่วนบริเวณ BM มีค่าเท่า ๆ กันทั้งสองข้างค่าความแข็งสูงสุดประมาณ 117.60 Hv ที่ความเร็วหมุนเชื่อม 710 rpm ความเร็วเดินเชื่อม 80 mm/min และค่าความแข็งต่ำสุดที่ความเร็วหมุนเชื่อม 1000 rpm ความเร็วเดินเชื่อม 80 mm/min ประมาณ 33.20 Hv

ค่าความแข็งของเนื้อโลหะเดิมมีค่าเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ เมื่อมีสภาวะทางความร้อนเข้ามามีส่วนเกี่ยวข้องในกระบวนการเชื่อม อีกทั้งค่าความแข็งของบริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อนทางกลก็มีค่าเพิ่มขึ้นเช่นกัน เป็นลักษณะแบบนี้ก็เนื่องมาจากกระบวนการทางความร้อนมีอิทธิพลต่อสมบัติทางกลในด้านความแข็ง ทำให้การละลายตัวของเฟส Mg_2Si แทรกซึมเข้าสู่เนื้ออะลูมิเนียมได้ดีทำให้สามารถเพิ่มค่าความแข็งได้ [10] ส่วนในบริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อนทางกลการหมุนวนของหัวแกนเกิดการ

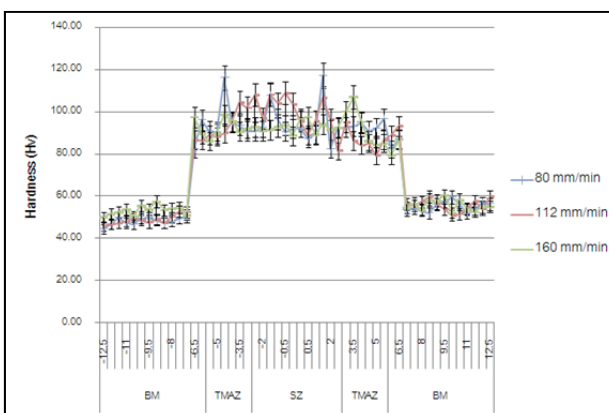
แตกหักของเฟส Mg_2Si กระจายตัวบริเวณที่ถูกกวน จะเห็นว่าเกรนมีความละเอียด และมีขนาดเล็กลงเมื่อเทียบกับเกรนบริเวณเนื้อโลหะเดิมอันเนื่องมาจากความเร็วหมุนเชื่อม และความเร็วเดินเชื่อมมีอิทธิพลโดยตรงผนวกกับสภาวะทางความร้อนที่ส่งผลทำให้ค่าความแข็งเพิ่มขึ้นตามไปด้วย [20]



(a) 710 rpm



(b) 1000 rpm



(c) 1400 rpm

รูปที่ 15 กราฟค่าความแข็งแนวเชื่อม

4. สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

กระบวนการทางความร้อน T6 หลังเชื่อมเสียดทานแบบกวนของอะลูมิเนียมหล่อกิ่งของแข็ง SSM 6061 (Post Heat Treatment Friction Stir Welding: P₀HTFSW) สามารถสรุปผลการทดลองจากปัจจัยในการเชื่อมที่มีผลต่อโครงสร้างมหภาค จุลภาค และสมบัติทางกลของแนวเชื่อมได้ดังนี้

1) ลักษณะผิวด้านบนของแนวเชื่อมจะมีความขรุขระตามรอยหมุนกวน มีความเข้ากันได้ดีของเนื้อโลหะ เกิดครีบลึกลงนอยบริเวณแนวเชื่อมด้านรีทริคตัสไซด์ และเกิดการพอง (Blistering) บริเวณผิวแนวเชื่อมหลังจากผ่านกระบวนการทางความร้อน T6

2) โครงสร้างทางมหภาคของแนวเชื่อมเกิดรอยแตกแยกบริเวณแนวเชื่อมอย่างชัดเจน อันเนื่องมาจากอิทธิพลทางความร้อน ที่ความเร็วหมุนเชื่อมสูงมีรอยแตกกระจายมากกว่าที่ความเร็วหมุนเชื่อมต่ำ

3) โครงสร้างทางจุลภาคของแนวเชื่อม พบว่าบริเวณตรงกลางแนวเชื่อม (SZ) เกิดรอยแตกแยกบริเวณแนวเชื่อมอย่างชัดเจน อันเนื่องมาจากอิทธิพลทางความร้อน ในบริเวณที่ได้รับผลกระทบอันเนื่องมาจากความร้อนทางกล (TMAZ) จะมีลักษณะเรียบ บิดเบี้ยว ไม่เป็นรูปร่าง เนื่องจากปฏิกิริยาความร้อนทางกลที่ได้รับจากตัวกวน

4) โครงสร้างทางจุลภาค SEM บริเวณแนวเชื่อม SZ เกิดการแตกหักของเฟส Mg_2Si กระจายตัวบริเวณที่ถูกกวน เกรนมีความละเอียดมากกว่าบริเวณที่มีผลกระทบอันเนื่องมาจากความร้อน TMAZ เนื่องมาจากบริเวณแนวเชื่อมจะถูกหมุน

วนด้วยหัวควนโดยตรงจึงทำให้เกรนบริเวณนี้มีความละเอียดมากกว่า

5) ค่าความแข็งแรง พบว่า ค่าความแข็งแรงเฉลี่ยสูงสุด 177.53 MPa ความเร็วหมุนเชื่อม 1400 rpm ความเร็วเดินเชื่อมที่ 80 mm/min และค่าความแข็งแรงเฉลี่ยต่ำสุด 103.67 MPa ที่ความเร็วหมุนเชื่อม 1400 rpm และความเร็วเดินเชื่อม 112 mm/min

6) ค่าความแข็ง พบว่า ค่าความแข็งสูงสุดเฉลี่ย 117.60 Hv ที่ความเร็วหมุนเชื่อม 710 rpm ความเร็วเดินเชื่อม 80 mm/min และค่าความแข็งต่ำสุดที่ความเร็วหมุนเชื่อม 1000 rpm ความเร็วเดินเชื่อม 80 mm/min เฉลี่ย 33.20 Hv

ข้อเสนอแนะ

1) ก่อนการเชื่อมควรตรวจสอบผิวของแผ่นงานเชื่อมก่อนทำการเชื่อมเพื่อป้องกันคราบสกปรกต่างๆ ติดกับผิว เพราะคราบสกปรกต่างๆ อาจจะทำให้เกิดความบกพร่องในรอยเชื่อมได้

2) ควรศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับสภาวะทางความร้อนที่เหมาะสมต่อการผ่านกระบวนการทางความร้อนก่อนและหลังการเชื่อม เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของแนวเชื่อมให้มีความแข็งแรงยิ่งขึ้น

5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนการทำวิจัยจากเงินงบประมาณ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัยประจำปี 2556 จนทำให้งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

เอกสารอ้างอิง

- [1] ประกาศ เมืองจันทร์บุรี. 2551. การเชื่อมเสียดทานแบบกวนเทคโนโลยีล่าสุดสำหรับเชื่อมอะลูมิเนียม/อะลูมิเนียมผสม. การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมศาสตร์มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ครั้งที่ 6, 8-9 พฤษภาคม 2551, สงขลา, หน้า 599-602.
- [2] Thomas W.M., Nicholas E.D., Needham J.C., Murch M.G., Temple smith P. and Dawes C.J. 1991. Friction Stir Butt Welding. International Patent application No. PCT/GB92/02203 and GB patent application No. 9125978.8.
- [3] Thomas W.M. and Nicholas E.D. 1997. Friction Stir Welding for the Transportation Industries. Materials and Design., 18: 269-273.
- [4] Midling O.T. and Morley E.J. 1998. Friction Stir Welding. International patent application No. PCT/NO95/00005.
- [5] Mishra R.S. and Ma Z.Y. 2005. Friction Stir Welding and Processing. Materials Science and Engineering., 50: 1-78.
- [6] วรพงศ์ บุญช่วยแทน, ธเนศ รัตนวิไล, ประกาศ เมืองจันทร์บุรี และ กนิษฐิ์ ตะปะสา. 2554. การเชื่อมอะลูมิเนียมผสม 356 หล่อทิ้งของแข็งโดยกรรมวิธีการเชื่อมเสียดทานแบบกวน ในสภาพของกระบวนการทางความร้อน T6. วิศวกรรมสาร มข, ปีที่ 38 ฉบับที่ 3 เดือน กรกฎาคม-กันยายน 2554: 219-223.

- [7] เจนณรงค์ นาคเทวัญ. 2555. การเชื่อมเสียดทานแบบกวนอะลูมิเนียมกึ่งของแข็งเกรด 7075. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมวัสดุ ภาควิชาวิศวกรรมเหมืองแร่ และวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์, สงขลา.
- [8] Rajiv S.M. and Murray W.M. n.d. Friction Stir Welding and Processing.
- [9] รอมฎอน บุระพา รังสีณี แคนยุกต์ และ เจษฎา วรรณสินธุ์. 2552. การพัฒนากระบวนการผลิตโลหะกึ่งของแข็งโดยการพ่นพองแก๊สขณะแข็งตัวสำหรับอะลูมิเนียมผสมเกรด A356. การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ครั้งที่ 7, 21-22 พฤษภาคม 2552, สงขลา, หน้า 549-554.
- [10] C. Tan and S. Radzai. 2009. Effect of Hardness Test on Precipitation Hardening Aluminium Alloy 6061-T6. Chiang Mai Journal of Science., 36: 276-286.
- [11] Kim Y.G., Fujii H., Tsumura T., Komazaki T. and Nakata K. 2006. Effect of Welding parameter on Microstructure in stir zone of FSW joints of Aluminum die casting alloy. Materials Letters., 60: 3830-3837.
- [12] Lumley R.N., Odonnell R.G., Gunasegaram D.R. and Givord M. 2007. Heat Treatment of High-Pressure Die Castings. The Minerals Metals & Materials Society and ASM International 2007., 38A: 2564-2574.
- [13] Ma Z.Y., Sharma S.R. and Mishra R.S. 2006. Effect of friction stir processing on the microstructure of cast A356 aluminum. Material Science and Engineering A., 433: 269-278.
- [14] Chen Y.C., Liu H.J. and Feng J.C. 2005. Effect of post-weld heat treatment on the mechanical properties of 2219-0 friction stir welding joints. Material Science and Engineering., 40: 4657-4659.
- [15] Elangovan K. and Balasubramanian V. 2008. Influences of post-weld heat treatment on tensile properties of friction stir-welded AA6061 aluminum alloy joints. Materials Characterization., 59: 1168-1177.
- [16] Nitikarn Pajaroen, Thawatchai Plookphol, Jessada Wannasin and Sirikul Wisutmethangoon. 2013. Influence of Solution Heat Treatment Temperature and Time on the Microstructure and Mechanical Properties of Gas Induced Semi-Solid (GISS) 6061 Aluminum Alloy. Applied Mechanics and Materials., 313-314: 67-71.
- [17] L. E. MURR, G. LIU, J. C. McCLURE. 1998. A TEM study of precipitation and related microstructures in friction-stir-welded 6061 aluminium. Journal of Materials Science., 33: 1243-1251.
- [18] Kim Y.G., Fujii H., Tsumura T., Komazaki T. and Nakata K. 2006. Effect of Welding

- parameter on Microstructure in stir zone of FSW joints of Aluminum die casting alloy. Materials Letters., 60: 3830-3837.
- [19] Y.G. Kim, H. Fujii, T. Tsumura, T. Komazaki and K. Nakata. 2006. Three defect types in friction stir welding of aluminum die casting alloy, Materials Science and Engineering., A415: 250-254.
- [20] Yutaka S. Sato, Mitsunori Urata, and Hiroyuki Kokawa. 2002. Parameters Controlling Microstructure and Hardness during Friction-Stir Welding of Precipitation-Hardenable Aluminum Alloy 6063. Metallurgical and Materials Transactions A., 33A: 625-635.