

ความแข็งแรงดึงและโครงสร้างจุลภาคของรอยต่ออลูมิเนียม 6063-T1 ที่เชื่อมด้วยตัวกวนการเชื่อมด้วยการเสียดทานแบบกวนหลายรูปแบบ

Tensile Strength and Microstructure of 6063-T1 Aluminum Alloy Joint produced by Various Friction Stir Welding Pin Geometries

กิตติพงษ์ กิมะพงษ์¹ นราธิป แสงซ้าย² สงกรานต์ บางศรีณย์ทิพย์³

¹ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี อ.ธัญบุรี จ.ปทุมธานี 12100

²ภาควิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมเครื่องกล วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
เขตบางซื่อ กรุงเทพมหานคร 10802

³ภาควิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมอุตสาหการ วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
เขตบางซื่อ กรุงเทพมหานคร 10802

E-mail: kittipong.k@en.rmutt.ac.th

บทคัดย่อ

บทความนี้ รายงานผลการศึกษาค้นคว้าเกี่ยวกับรูปร่างตัวกวนการเชื่อมด้วยการเสียดทานแบบกวน เช่น ทรงกระบอก ทรงกรวย ทรงเกลียววนซ้าย และเกลียววนขวา ต่อความแข็งแรงดึงของรอยต่ออลูมิเนียม 6063-T1 การเปลี่ยนแปลงรูปร่างตัวกวนส่งผลต่อคุณภาพของรอยเชื่อมต่ออลูมิเนียมผสมเกรด 6063-T1 ตัวกวนทรงกระบอกและตัวกวนทรงกรวยทำให้เกิดจุดบกพร่องในแนวเชื่อมบริเวณด้านล่าง และเป็นจุดกำเนิดการพังทลายบริเวณกึ่งกลางของแนวเชื่อมขณะทำการทดสอบแรงดึง ตัวกวนทรงเกลียววนซ้ายและวนขวาทำให้ได้แนวเชื่อมที่มีความสมบูรณ์ ไม่มีจุดบกพร่องภายในแนวเชื่อม ส่งผลทำให้แนวเชื่อมมีความแข็งแรงกว่าโลหะหลักอลูมิเนียม

Abstract

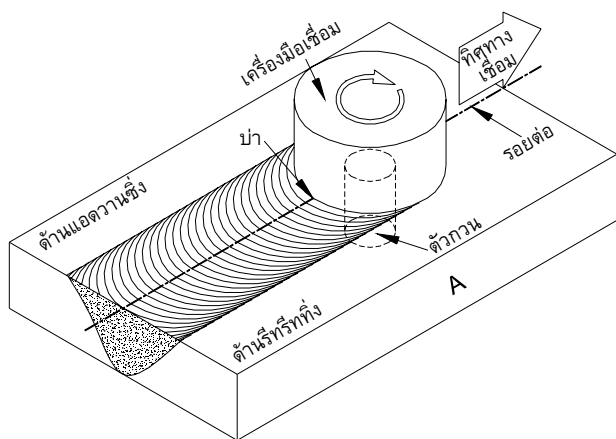
This paper reports a study result of FSW stirrer geometries effect such as cylindrical, cone, left screw and right screw stirrer shape on tensile strength of AA6063-T1 aluminum alloy butt joint. A variation of FSW Stirrer shape affected directly the AA6063-T1 aluminum alloy butt joint quality. A cylindrical stirrer shape and a

cone stirrer shape produced the void defect at the bottom part of the weld metal and initiated the failure of the joint when the joint was subjected the load during the tensile test. Left and right screw stirrer shapes gave the sound joint with no voice defect on the weld metal and affected to increase the joint strength that was higher than that of the aluminum base metal.

1. บทนำ

การเชื่อมด้วยการเสียดทานแบบกวน (Friction Stir Welding: FSW) เป็นกระบวนการเชื่อมในสถานะของแข็ง (Solid state welding) ที่มีการใช้งานอย่างแพร่หลายในงานอุตสาหกรรม เพื่อเชื่อมวัสดุที่มีความยากต่อการเชื่อมด้วยกระบวนการเชื่อมหลอมละลาย (Conventional fusion welding) เช่น อลูมิเนียมผสม [1] เมื่อเปรียบเทียบกับการเชื่อมแบบหลอมละลาย FSW สามารถทำให้สมบัติทางกลของแนวเชื่อมมีค่าสูงในบริเวณแนวเชื่อม (Welded Zone) กรรมวิธี FSW นี้ได้มีการประยุกต์ ใช้อย่างมีประสิทธิภาพในอุตสาหกรรมการผลิตเครื่องบิน รถยนต์ และเรือเดินสมุทร [1] และปัจจุบันเป็นกระบวนการที่ได้รับความสนใจในการทำวิจัย เพื่อพัฒนาสมบัติต่างๆ อย่างต่อเนื่อง ลักษณะกระบวนการ

เชื่อมแสดงให้เห็นในรูปที่ 1 ที่ผ่านมามีการประยุกต์ใช้ FSW ในการเชื่อมอลูมิเนียมเกรดต่างๆมากมาย เช่น การเชื่อมรอยต่ออลูมิเนียมผสม A356 [3] อลูมิเนียมผสมเกรด AA2017 [4] อลูมิเนียมผสมเกรด AA5083 [5] อลูมิเนียมผสมเกรด AA6082 [6] อลูมิเนียมผสม Al-Li-Cu [7] หรืออลูมิเนียมผสม AA6063 [8-9] เป็นต้น และการศึกษาเหล่านี้ได้รายงานความแข็งแรงของรอยต่อชนเหล่านี้ มีค่าสูงมากกว่าอลูมิเนียมที่ใช้เป็นวัสดุในงานเชื่อม

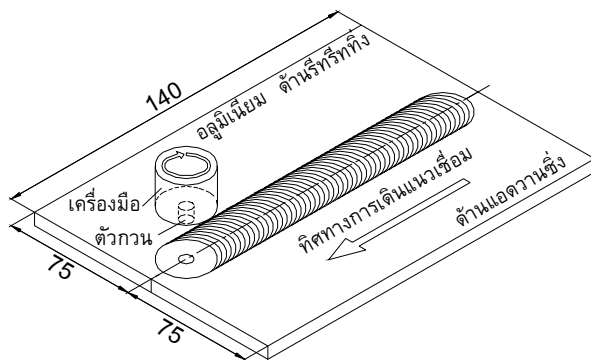


รูปที่ 1 การเชื่อมด้วยการเสียดทานแบบกวน

นอกจากนั้นจากหลักการเบื้องต้น ตัวกวนที่สอดเข้าไปในรอยต่อ เป็นหนึ่งในตัวแปรสำคัญที่บ่งชี้การรวมตัวของวัสดุ การเปลี่ยนแปลงรูปร่างและขนาดของตัวกวนที่ใช้ในการเชื่อมรอยต่อ คาดว่าจะทำให้ได้คุณลักษณะและความแข็งแรงของรอยเชื่อมที่แตกต่างกัน ที่ผ่านมามีการออกแบบรูปร่างตัวกวนหลายแบบเพื่อทำการเชื่อมรอยต่อชนอลูมิเนียมผสม เช่น การออกแบบตัวกวนให้มีรูปร่างแบบเกลียววนขวา (Right Screw) ที่ทำให้อลูมิเนียม 2024 สามารถรวมตัวเข้ากับอลูมิเนียม 6061 ได้ดีและเพิ่มความแข็งแรงของรอยต่อ [10] หรือการใช้ตัวกวนเกลียววนขวา ในการเชื่อมอลูมิเนียมและเซรามิก ที่รายงานอัตราการสึกกร่อนของตัวกวนที่เกิดมีค่าสูง [11] หรือการใช้ตัวกวนที่มีรูปร่างหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัสเกลียววนขวา และเกลียววนซ้ายในการเชื่อมอลูมิเนียม 1018 ที่แสดงการรวมตัวของเนื้อวัสดุที่ดีกว่า เมื่อใช้ตัวกวนเกลียววนขวาและการทดสอบความแข็งแรงด้วยการดัดโค้ง ขึ้นทดสอบ

ไม่แสดงการแตกหักบริเวณรอยเชื่อม [12] หรือการออกแบบตัวกวนเกลียววนขวาทรงกระบอกและทรงกรวยในการเชื่อมอลูมิเนียมผสมเกรด 2014 ที่แสดงค่าความแข็งแรงสูงสุดประมาณร้อยละ 75 ของความแข็งแรงของอลูมิเนียมสามารถทำได้โดยตัวกวนเกลียววนขวาทรงกรวย เนื่องจากขนาดของเกรนเล็กและละเอียดขึ้น [13] จากข้อมูลที่ได้กล่าวมา ผู้วิจัยจึงมีวัตถุประสงค์ในการเชื่อมอลูมิเนียมผสมเกรด AA6063-T1 ด้วยการเชื่อมด้วยการเสียดทานแบบกวนที่ใช้ตัวกวนรูปร่างต่างๆ เช่น ตัวกวนทรงกระบอก ตัวกวนทรงกรวย ตัวกวนเกลียวซ้าย และตัวกวนวนขวา จากนั้นทำการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคและสมบัติทางกลของแนวเชื่อม เพื่อเตรียมข้อมูลในการประยุกต์ใช้ในงานอุตสาหกรรมต่อไป

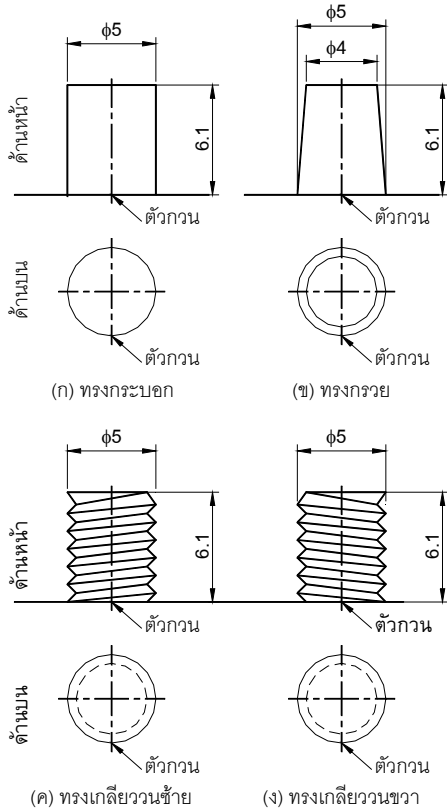
2. วิธีการทดลอง



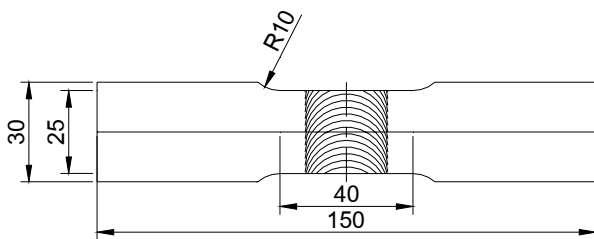
รูปที่ 2 มิติของรอยต่อชน (หน่วย: mm.)

วัสดุในการทดลอง คือ อลูมิเนียมผสมเกรด 6063-T1 (94.7%Al-4.0%Mg-0.05%Mn-0.01%Cr-0.02%Cu โดยน้ำหนัก) หนา 6.3 mm. ที่มีความแข็งแรงดึงสูงสุดประมาณ 210 MPa เมื่อทำการทดสอบดึงตามแนวรีด แผ่นอลูมิเนียมถูกเตรียมให้มีขนาดยาว 140 mm. และกว้าง 75 mm. แผ่นอลูมิเนียมถูกนำมาประกอบเป็นรอยต่อชนดังแสดงในรูปที่ 2 และยึดแน่นบนอุปกรณ์จับยึด (Jig) ก่อนยึดแน่นอีกครั้งบนแท่นเครื่องกัด ตัวกวนเครื่องมือเชื่อมทำจากเหล็กกล้าเครื่องมือเกรด SKD11 มีรูปร่างเป็นทรงกระบอก ทรงเกลียวซ้าย เกลียวขวา และทรงกรวย โดยมีขนาดและรูปร่างดังแสดงในรูปที่ 3 ความเร็วรอบของตัวกวนมีค่า 2000 rpm ความเร็ว

ของการเดินแนวเชื่อมไปตามแนวต่อชนมีการเปลี่ยนแปลงค่าจาก 50 ถึง 200 mm/min ความเอียงของตัวกวน 2° เมื่อทำการเชื่อมเสร็จสมบูรณ์ ชิ้นงานเชื่อมถูกนำมาทำการเตรียมขึ้นทดสอบความแข็งแรงดึงดังแสดงในรูปที่ 4 แนวเชื่อมบริเวณกึ่งกลางตามทิศทางการเดินแนวเชื่อมถูกตัดและตรวจสอบโครงสร้างมหภาคและจุลภาคในทิศที่ตั้งฉากกับทิศทางการเชื่อม เพื่อตรวจสอบความสมบูรณ์ของแนวเชื่อมและเปรียบเทียบกับความต้านทานแรงดึงต่อไป



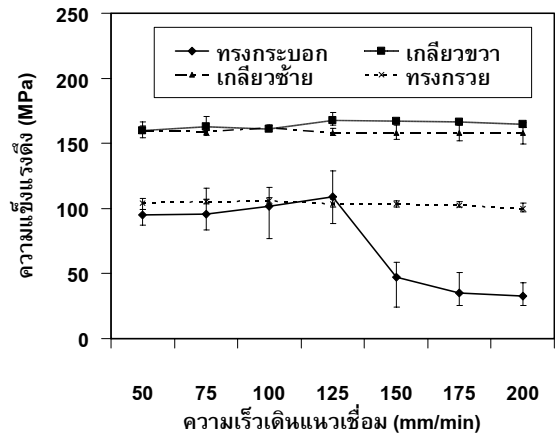
รูปที่ 3 มิติของตัวกวนเครื่องมือเชื่อม (หน่วย: mm.)



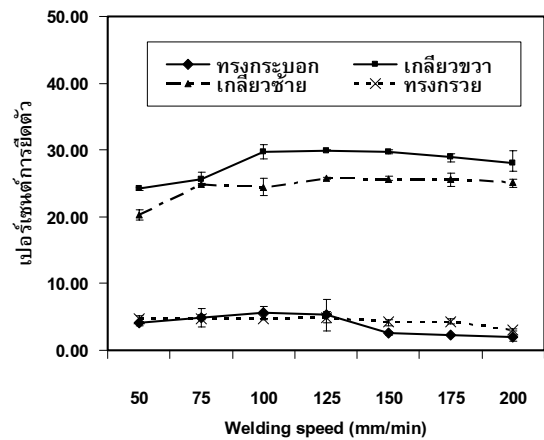
รูปที่ 4 ชิ้นทดสอบความแข็งแรงดึง (หน่วย: mm.)

3. ผลการทดลองและการวิจารณ์ผล

รูปที่ 5 และ 6 แสดงผลการทดสอบความแข็งแรงดึงและเปอร์เซ็นต์ของการยึดตัวของชิ้นงานเชื่อมที่เชื่อมด้วยตัวกวนรูปร่างต่างๆ และค่าความเร็วเดินแนวเชื่อม 50 – 200 mm/min พบว่าชิ้นทดสอบที่ทำการเชื่อมด้วยตัวกวนรูปทรงกระบอก แสดงค่าความแข็งแรงและค่าเปอร์เซ็นต์ของการยึดตัวของชิ้นทดสอบมีค่าสูงสุดที่ค่าประมาณ 110MPa และ 5.36% ตามลำดับ เมื่อเชื่อมที่ความเร็วเดินแนวเชื่อม 125 mm/min ค่าความแข็งแรงของแนวเชื่อมมีค่าแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นเมื่อความเร็วเดินแนวเชื่อมเพิ่มขึ้นจาก 50 ถึง 125 mm/min และลดลงอีกครั้ง เมื่อความเร็วเดินแนวเชื่อมเพิ่มขึ้นจาก 150 ถึง 200 mm/min



รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งแรงดึงและความเร็วเดินแนวของแนวเชื่อมที่เชื่อมด้วยตัวกวนรูปร่างต่างๆ

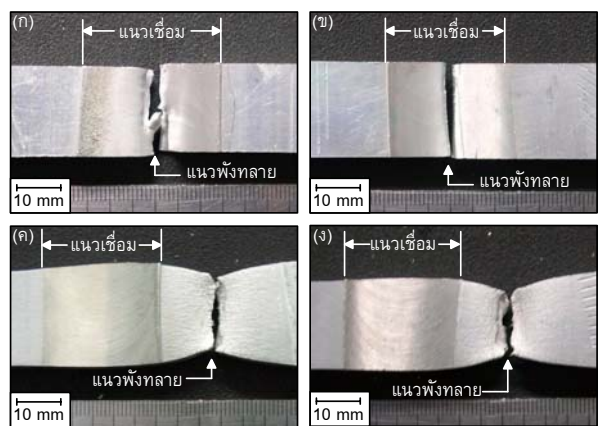


รูปที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการยึดตัวและความเร็วเดินแนวของแนวเชื่อมที่เชื่อมด้วยตัวกวนรูปร่างต่างๆ

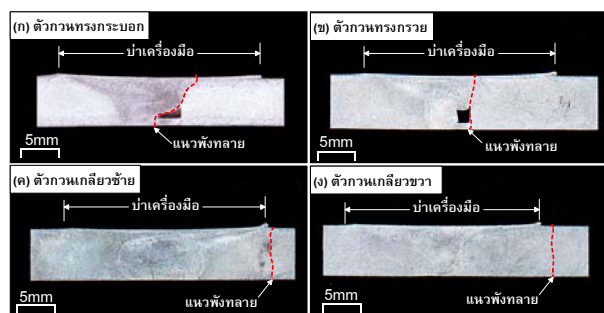
การเปลี่ยนแปลงค่าความแข็งแรงดึงของชิ้นทดสอบที่เชื่อมด้วยตัวกวนทรงกระบอกนี้เกิดขึ้นเนื่องจากการเกิดจุดบกพร่องที่บริเวณมุมด้านล่างของแนวเชื่อมดังแสดงในรูปที่ 8 (ก) ทำการวัดเปรียบเทียบความโตตามแนวแกน X และ Y ของจุดบกพร่องนี้ พบว่าสำหรับที่ความเร็วเดินแนวเชื่อม 50 mm/min มีค่าเฉลี่ย ประมาณ 1.554 mm และ 2.818 mm ค่าเฉลี่ยสำหรับ 125 mm/min ประมาณ 1.530 mm และ 2.754 mm และค่าเฉลี่ยสำหรับ 200 mm/min ประมาณ 4.372 mm และ 3.369 mm ซึ่งแสดงขนาดมิติที่ใหญ่ขึ้นเมื่อความเร็วเดินแนวเชื่อมนั้นมีค่าน้อยกว่าหรือสูงกว่าค่าความเร็วรอบที่เหมาะสมซึ่งในตัวแปรแรก คือ ตัวกวนทรงกระบอกนั้นมีค่าความเร็วเดินที่เหมาะสมที่ 125 mm/min แนวการพังทลายของชิ้นงานเมื่อทำการทดสอบแรงดึงนั้นเกิดขึ้นผ่านจุดดังกล่าวและขยายไปยังผิวด้านบนของแนวเชื่อมดังแสดงในรูปที่ 7 และแนวเส้นประในรูปที่ 8 (ข) จึงสามารถสรุปได้ว่า จุดบกพร่องที่เกิดขึ้นส่งผลโดยตรงต่อการเปลี่ยนแปลงค่าความแข็งแรงดึงของรอยต่อ นอกจากนี้พบว่าจุดบกพร่องนี้ที่ได้นี้มีลักษณะคล้ายกับจุดบกพร่องที่เกิดในการเชื่อมด้วยการเสียดทานแบบกวนรอยต่ออลูมิเนียมเกรด 2025 [10] และอลูมิเนียมเกรด 6063-T6 [14] แต่ในรายงานผลการทดลองการเชื่อมอลูมิเนียมทั้งสองเกรดนั้นไม่ได้อธิบายความสัมพันธ์ระหว่างการเกิดจุดบกพร่องและความแข็งแรงดึงไว้ อย่างไรก็ตาม Mishra and Ma [15] ได้กล่าวไว้ว่า หากมีการเอียงตัวกวนเพิ่มมากขึ้นหรือรูปร่างของตัวกวนถูกออกแบบให้มีลักษณะที่คาดว่าจะทำให้เกิดการกวนที่รุนแรงขึ้นและจุดบกพร่องที่เกิดขึ้นนั้นจะสามารถกำจัดออกได้ [13] ซึ่งจากคำกล่าวนี้ผู้วิจัยจึงใช้เป็นข้อมูลในการออกแบบตัวกวนในการทดลองต่อไป

ตัวกวนทรงกรวย เป็นตัวกวนของการเชื่อมด้วยการเสียดทานแบบกวนที่ออกแบบมาเพื่อทำการลดแรงเสียดทานที่มักเกิดขึ้นสูงในขั้นตอนของการกดตัวกวนลงระหว่างรอยต่อของแนวเชื่อม [15] อย่างไรก็ตามในการใช้ตัวกวนทรงกรวยในการเชื่อมรอยต่ออลูมิเนียม 6063-T1 ไม่สามารถกำจัดจุดบกพร่องที่เกิดในตำแหน่งด้านล่างของรอยเชื่อมดังแสดงใน

รูปที่ 8 (ข) ลงได้ จุดบกพร่องในตำแหน่งและลักษณะนี้เป็นลักษณะเดียวกับที่เกิดในรอยต่อที่เชื่อมด้วยตัวกวนทรงกระบอกเป็นสาเหตุให้รอยต่อมีความแข็งแรงน้อยลง และเป็นจุดกำเนิดการพังทลายที่ขยายตัวต่อไปสู่ด้านบนของแนวเชื่อมดังแสดงในรูปที่ 7 (ข) และแนวเส้นประในรูปที่ 8 (ข) จุดบกพร่องนี้ส่งผลทำให้ความแข็งแรงของรอยต่อมีค่าลดลง โดยค่าความแข็งแรงสูงสุดและการยืดตัวมีค่าสูงสุดประมาณ 106 MPa และมีค่าการยืดตัว 4.66% ตามลำดับ ที่ความเร็วเดินแนวเชื่อม 100 mm/min



รูปที่ 7 ตำแหน่งการพังทลายของชิ้นทดสอบความแข็งแรงดึงที่ความเร็วเดินแนวเชื่อม 125 mm/min.: (ก) ทรงกระบอก (ข) ทรงกรวย (ค) ทรงเกลียวซ้าย และ (ง) ทรงเกลียวขวา

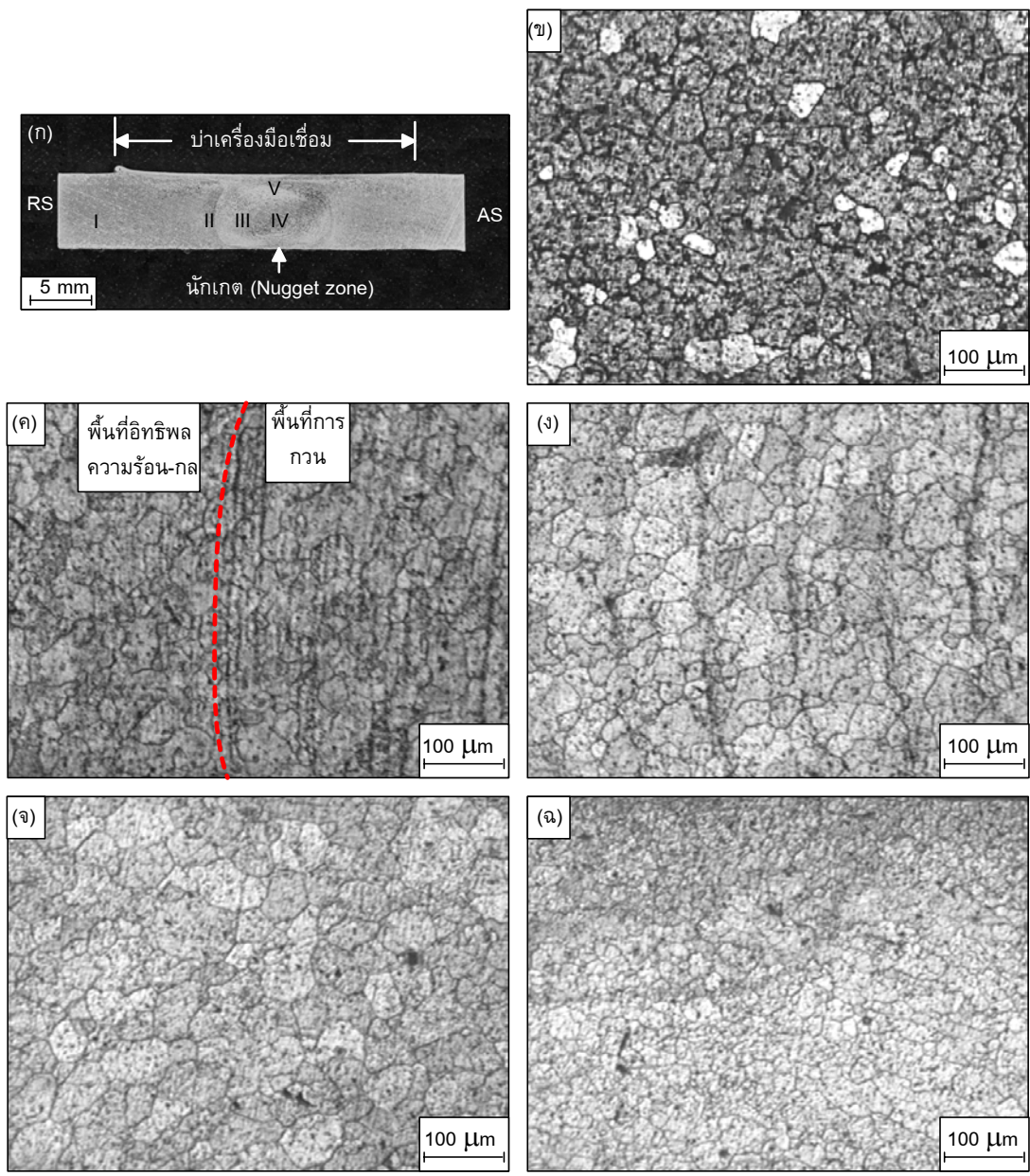


รูปที่ 8 โครงสร้างมหภาคของแนวเชื่อมที่เชื่อมด้วยตัวกวนรูปร่างต่างๆ ที่ความเร็วรอบ 2000 rpm และที่ความเร็วเดินแนวเชื่อม 125 mm/min.

รอยต่อที่เชื่อมด้วยตัวกวนรูปทรงเกลียวขวาและขวา สามารถกำจัดจุดบกพร่องที่พบในรอยต่อที่เชื่อมด้วยตัว

กวนทรงกระบอกและทรงเกลียวในตำแหน่งมุมด้านล่างของแนวเชื่อมลงได้ดังแสดงในรูปที่ 8 (ค) และ (ง) โครงสร้างมหภาคที่ได้แสดงความสมบูรณ์ของแนวเชื่อมที่ไม่มีจุดบกพร่องเกิดขึ้น ทำให้จุดกำเนิดการพังทลายที่เกิดขึ้นในรอยต่อที่เชื่อมด้วยตัวกวนรูปทรงที่ผ่านมานั้นหมดไป เมื่อนำรอยต่อไปทำการทดสอบแรงดึงพบว่าชิ้นงานเกิดการพังทลายที่บริเวณโลหะหลักรูมิเนียม ไม่เกิดที่บริเวณแนวเชื่อมอีกต่อไปดังแสดงในรูปที่ 7 (ค)-(ง) และเส้นประในรูปที่ 8 (ค)-(ง)

ค่าความแข็งแรงดึงและการยืดตัวของรอยต่อมีค่าที่ใกล้เคียงกัน เนื่องจากรอยต่อมีค่าความแข็งแรงสูงกว่าโลหะอะลูมิเนียมที่ใช้เชื่อม และค่าความแข็งแรงที่ได้เป็นค่าความแข็งแรงของโลหะอะลูมิเนียมเท่านั้น อย่างไรก็ตามในการเชื่อมด้วยตัวกวนทรงเกลียววนซ้ายและขวา ค่าความแข็งแรงสูงสุดที่ได้มีค่าประมาณ 168MPa ที่รอยต่อที่เชื่อมด้วยตัวกวนวนซ้าย ความเร็วเดินแนวเชื่อม 125 mm/min



รูปที่ 9 โครงสร้างแนวเชื่อมตัวกวนเกลียวซ้าย: (ก) โครงสร้างมหภาค (ข) โครงสร้างอะลูมิเนียมหลัก (ค) บริเวณพื้นที่ที่อุณหภูมิความร้อน-กลและพื้นที่การกวน (ง) พื้นที่การกวน (จ) พื้นที่การกวน (ฉ) พื้นที่ใต้ปากเครื่องมือเชื่อม

รูปที่ 9 (ก) แสดงโครงสร้างมหภาคของรอยเชื่อมที่เชื่อมตัวทวนทรงเกลียววนซ้าย ความเร็วเดินแนวเชื่อม 125 mm/min ที่แสดงค่าความแข็งแรงสูงสุดในการทดลองครั้งนี้ ตัวอักษร AS หมายถึง ด้านแอดวานซ์ และตัวอักษร RS หมายถึง ด้านรีทริทิง รอยเชื่อมแสดงความสมบูรณ์ ไม่พบจุดบกพร่องเกิดขึ้นภายในแนวเชื่อม บริเวณกึ่งกลางแนวเชื่อมเรียกว่า “พื้นที่การกวน (Stir zone)” พบอลูมิเนียมเม็ดเป็นวง พื้นที่นี้เรียกว่า “พื้นที่นั๊กเกต (Nugget zone)” ซึ่งเป็นพื้นที่การกวนรุนแรง และอลูมิเนียมที่อ่อนตัวจากความร้อนเสียหาย ถูกตัดเฉือน และอัดอย่างรุนแรงเข้าด้วยกัน บริเวณพื้นที่นี้รูปแบบของเม็ดเกรนจะเกิดการก่อตัวขึ้นใหม่ และมีขนาดเล็กกลมมนขึ้น ทำการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคบริเวณที่มีความแตกต่างบนโครงสร้างมหภาคที่ตำแหน่ง I ถึง V มีรายละเอียดดังนี้ รูปที่ 9 (ข) แสดงพื้นที่ I โครงสร้างจุลภาคของโลหะหล่ออลูมิเนียมผสม 6063-T1 ที่รูปร่างของเม็ดเกรนที่ไม่เป็นระเบียบและไม่กลมมน ทำการวัดขนาดเกรนด้วยวิธีการลากเส้นตัดผ่านเกรน (Linear Interception) ตามมาตรฐาน ASTM E112 [16] พบว่ามีขนาดเกรนเฉลี่ยประมาณ 33.99 μm จุดที่ II คือ ขอบเขตระหว่างพื้นที่ที่ได้รับอิทธิพลจากความร้อนและแรงทางกล (Thermo-mechanical Affected Zone: TMAZ) [3,7,10] ซึ่งเป็นพื้นที่เกิดการปรับสภาพเนื่องจากความร้อนเสียดสีและแรงกวนอลูมิเนียม ทำให้เม็ดเกรนมีรูปร่างกลมมนดังแสดงที่พื้นที่ด้านซ้ายของเส้นประรูปที่ 9 (ค) และหากเปรียบเทียบกับรูปร่างของเม็ดเกรนโลหะหล่ออลูมิเนียม 6063-T1 พบว่ากลมมนและเป็นระเบียบกว่า ขณะที่ด้านขวาของเส้นประในรูปที่ 9 (ค) รูปที่ 9 (ง) และรูปที่ 9 (จ) นั้น หรือจุดที่ III ถึง V นั้น คือ พื้นที่การกวนที่อลูมิเนียมก่อตัวของเกรนใหม่ (Dynamic Re-crystallization) [7] ที่มีความละเอียดและกลมมน ทำการวัดขนาดเกรนพบว่า มีขนาดเกรนเฉลี่ย 18.49 μm ซึ่งมีขนาดเล็กกว่าอลูมิเนียมหลักเปรียบเทียบกับขนาดเม็ดเกรนของพื้นที่การกวนรอยเชื่อมด้วยตัวทวนทรงเกลียววากับตัวทวนทรงกระบอกกระบอกที่มีขนาดเม็ดเกรนประมาณ 25.42 μm พบว่ามีค่าที่น้อยกว่า อย่างไรก็ตามขนาดเกรนที่ได้ไม่ใช่ขนาดเกรนที่เล็กที่สุด ตำแหน่งที่มี

ขนาดเกรนเล็กที่สุด คือ ตำแหน่งด้านล่างของบ่าเครื่องมือเชื่อมดังแสดงในรูปที่ 9 (ฉ) เนื่องจากบริเวณนี้เป็นบริเวณที่ได้รับความร้อนสูงและเกิดการเฉือนสูงสุดในแนวเชื่อม [7] แต่มีบริเวณการเกิดลึกลงมาจากผิวหน้าแนวเชื่อมเพียง 150 μm เท่านั้น

4. สรุปผลการทดลอง

- 4.1 ตัวทวนทรงกระบอกและตัวทวนทรงกรวยทำให้เกิดจุดบกพร่องในแนวเชื่อมบริเวณด้านล่าง และเป็นจุดกำเนิดการพังทลายบริเวณกึ่งกลางของแนวเชื่อม
- 4.2 ตัวทวนทรงเกลียววนซ้ายและวนขวาทำให้ได้แนวเชื่อมที่มีความสมบูรณ์ ไม่มีจุดบกพร่องภายในแนวเชื่อม ส่งผลทำให้แนวเชื่อมมีความแข็งแรงกว่าโลหะหล่ออลูมิเนียม
- 4.3 ความแข็งแรงสูงสุดในการทดลองมีค่าเท่ากับ 168 MPa ที่ตัวทวนทรงเกลียววนซ้าย ความเร็วรอบ 2000 รอบต่อนาที ความเร็วเดินแนว 125 mm/min
- 4.4 โครงสร้างจุลภาคของแนวเชื่อมที่เชื่อมด้วยตัวทวนวนซ้าย ทำให้เกิดการก่อตัวของเกรนใหม่ที่มีขนาดเล็กและกลมมนกว่าโลหะหล่ออลูมิเนียม

เอกสารอ้างอิง

- [1] Thomas, W.M., Nicholas, E.D., Needham, J.C., Murch, M.G., Templesmith, P. and Dawes, C.J. 1991. Friction Stir Welding. G.B. Patent Application No. 9125978.8.
- [2] Thomas, W.M. and Nicholas, E.D. 1997. Friction Stir Welding for the Transportation Industries. Materials and Design, 18: 269-273.
- [3] Lee, W.B., Yeon, Y.M. and Jung, S.B. 2003. The Improvement of Mechanical Properties of Friction-stir-welded A356 Al Alloy. Mater. Sci. and Eng. A, 355: 154-159.
- [4] Lie, H.J., Fujii, H., Maeda, M. and Nogi, K. 2003. Tensile Properties and Fracture Locations of

- Friction Stir Welding Joints of 2017-T351 Aluminum Alloy. *J. of Mat. Proc. Tech.*, 142: 692-696.
- [5] Peel, M., Steuwer, A., Preuss, M. and Withers, O.J. 2003. Microstructure, Mechanical Properties and Residual Stresses as a Function of Welding Speed in Aluminum AA5083 Friction Stir Welds. *Acta Mater.*, 51: 4791-4801.
- [6] Ericsson, E. and Sandstrom, A. 2003. Influence of Welding Speed on the Fatigue of Friction Stir Welds and Comparison with MIG and TIG. *J. of Fatigue*, 25: 1379-1387.
- [7] Jata, K.V. and Semiatin, S.L. 2003. Continuous Dynamic Recrystallization during Friction Stir Welding of High Strength Aluminum Alloys. *Scripta Mater.*, 43: 743-749.
- [8] Sato, Y., Kokawa, H., Enomoto, M., and Jogan, S. 1999. Microstructural Evolution of 6063 Al during Friction Stir Welding. Preprints of the National Meeting of J.W.S. 160-161.
- [9] Sato, Y. and Kokawa, H. 2001. Distribution of Tensile Property and Microstructure in Friction Stir Welds of 6063 Aluminum. *Metallurgical And Materials Transactions A*. 32A: 3023-3031.
- [10] Li, Y., Murr, L.E. and McClure, J.C. 1999. Flow Visualization and Residual Microstructure associated with the Friction-stir Welding of 2024 Aluminum and 6061 Aluminum. *Mat. Sci. and Eng. A*, 271: 213-223.
- [11] Prado, R.A., Murr, L.E., Shindo, D.J. and Soto, K.F. 2001. Tool Wear in Friction-stir Welding of Aluminum Alloy 6061+20% Al₂O₃: A Preliminary Study. *Scripta Met.*, 45: 75-80.
- [12] Boz, M. and Kurt, A. 2004. The Influence of Stirrer Geometry on Bonding and Mechanical Properties in Friction Stir Welding Process. *Mat. and Des.*, 25: 343-347.
- [13] Zhao, Y. Lin, S., Wu, L. and Qu, F. 2005. The Influence of Pin Geometry on Bonding and Mechanical Properties in Friction Stir Weld 2014 Al Alloy. *Mat. Letters*, 59: 2948-2952.
- [14] บรรเจิด ดอนเนตรงาม และสมนึก วัฒนศรียกูล. 2550. การเปรียบเทียบกระบวนการเชื่อมเสียดทานหมุนกวนอลูมิเนียมเจือ AA6063-T6 ระหว่างสลักแกนหมุนทรงกระบอกหัวตัดตรงกับหัวโค้ง. การประชุมข่ายงานวิศวกรรมอุตสาหกรรมประจำปี 2550. ภูเก็ต, ประเทศไทย, 24-26 ตุลาคม 2550: แผ่นซีดีรวม
- [15] Mishra, R.S. and Ma, Z.Y. 2005. Friction Stir Welding and Processing. *Mat. Sci. and Eng. R*. 50: 1-78.
- [16] www.metallography.com/grain.htm, January 15, 2008.