

การเชื่อมอะลูมิเนียมผสมหล่อกิ่งของแข็ง SSM 356 กับ SSM 6061 โดยกรรมวิธีการเชื่อมเสียดทานแบบกวน

วรพงศ์ บุญช่วยแทน^{1*} จักรนรินทร์ ฉัตรทอง¹ สุรสิทธิ์ ระวังวงศ์² และ รอมฎอน บุรพา²

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาตัวแปรที่มีผลต่อโครงสร้างทางจุลภาคและสมบัติทางกล (ความแข็งและความแข็งแรง) ของแนวเชื่อมต่อชนที่ได้จากการเชื่อมเสียดทานแบบกวนระหว่างอะลูมิเนียมผสมหล่อกิ่งของแข็ง 356 กับ 6061 โดยใช้ตัวกวนทรงกระบอก ตัวแปรที่ใช้ในการทดลองมี 2 ตัวแปร คือ ความเร็วหมุนเชื่อมของตัวกวนที่ 710, 1000 และ 1400 rpm/min และความเร็วเดินเชื่อมที่ 80, 112 และ 160 mm/min ซึ่งความเร็วหมุนเชื่อมของหัวกวนและความเร็วเดินเชื่อมมีผลโดยตรงต่อโครงสร้าง และสมบัติทางกลของแนวเชื่อม จากการทดลองพบว่าโครงสร้างทางโลหะวิทยาบริเวณแนวเชื่อมมีความละเอียดกว่าเนื้อโลหะเดิม ด้านแอดวานซ์ซิงไซด์ และด้านรีทริคติ้งไซด์ เกิดการบิดเบี้ยวของเกรนไม่เป็นรูปร่าง เนื่องจากการหมุนของหัวกวน จากผลการทดสอบสมบัติทางกลค่าความแข็งเฉลี่ยสูงสุดที่ 61.9 HV ที่ความเร็วหมุนเชื่อม 1000 rpm ความเร็วเดินเชื่อมที่ 112 mm/min ความแข็งบริเวณตรงกลางแนวกวนจะสูงกว่าบริเวณอื่นและจะลดลงไปเรื่อยๆ จนถึงบริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อนทางกล หลังจากนั้นความแข็งจะถึงค่าความแข็งเดิมของเนื้อโลหะทั้งสองชนิด และที่ความเร็วหมุนเชื่อม 1400 rpm ความเร็วเดินเชื่อมที่ 112 mm/min จะทำให้ค่าความแข็งแรงดึงเฉลี่ยสูงสุดที่ 175.40 MPa

คำสำคัญ : การเชื่อมเสียดทานแบบกวน, เชื่อมต่อชนต่างชนิด, อะลูมิเนียมหล่อ 356, อะลูมิเนียมหล่อ 6061

¹ หลักสูตรสาขาวิชาวิศวกรรมการผลิต, สาขาวิศวกรรมอุตสาหกรรม, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย

² หลักสูตรสาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม, สาขาวิศวกรรมอุตสาหกรรม, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย

* ผู้ติดต่อ, อีเมล: b_ieeng@hotmail.com รับเมื่อ 14 มีนาคม 2556 ตอบรับเมื่อ 27 พฤษภาคม 2556

Friction Stir Welding of Dissimilar Joint of Aluminum Semi-Solid Metal Between SSM 356 and SSM 6061

Worapong Boonchouytan^{1*} Jaknarin Chatthong¹ Surasit Rangwangwong² and Romadorn Burapa²

Abstract

The objective of this research is to investigate the effect of parameters on the microstructure and mechanical properties of friction stir welded butt joints of dissimilar aluminum alloy sheets between Semi-Solid Metal (SSM) 356 and 6061. The base metal of SSM 356 and 6061 was located on the advancing side and on the retreating side, respectively. The cylindrical pin was used as the welding tool geometry. Friction stir welded using different tool rotation speed (710, 1000 and 1400 rpm) and welding speed (80, 112 and 160 mm/min). The rotation speed and welding speed have a direct weld with the structure and mechanical properties of the weld. The results showed that metallurgy structure of stir zone resolution than base metal. Achieve distorted shape of the grain due to rotation speed for advancing side and retreating side. The maximum average hardness of 61.9 HV at tool rotation speed 1000 rpm, welding speed 112 mm/min. Hardness in the stir zone is higher than other areas, and will be reduced until the area thermo mechanical affected zone after that hardness is up to hardness of base metal and rotation speed 1400 rpm, welding speed 112 mm/min contributing to provide the maximum average tensile strength of 175.40 MPa

Keywords : Friction Stir Welding, Dissimilar Joint, Semi-Solid Metal (SSM) 356 and SSM 6061

¹ Courses in Production Engineering, Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, University of Technology Srivijaya, Songkhla.

² Courses in Industrial Engineering, Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, University of Technology Srivijaya, Songkhla.

* Corresponding author, E-mail: b_ieeng@hotmail.com Received 14 March 2013, Accepted 27 May 2013

1. บทนำ

ในปัจจุบันนี้ ความต้องการชิ้นส่วนอะลูมิเนียมผสมที่หล่อด้วยกระบวนการไดคาสติง (Die Casting) ในอุตสาหกรรมรถยนต์และผลิตชิ้นส่วนรถยนต์มีสูงมาก รวมถึงอุตสาหกรรมอื่นๆ เช่น อุตสาหกรรมสร้างเครื่องจักรและอิเล็กทรอนิกส์ ทั้งนี้เพื่อช่วยลดน้ำหนักและการใช้พลังงาน ดังนั้นจึงมีการแข่งขันกันทางด้านเทคโนโลยีในการหล่ออะลูมิเนียมไดคาสติง กันอย่างกว้างขวาง เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพและคุณภาพในการผลิต

เทคโนโลยีใหม่ล่าสุดที่มีศักยภาพในการหล่ออะลูมิเนียมไดคาสติงคือกรรมวิธีการหล่อรีโอดีคาสติง (Rheocasting) ซึ่งเป็นการหล่อโลหะกึ่งของแข็ง (Semi-Solid Metal; SSM) ปัจจุบันนี้มีการวิจัยเทคโนโลยีการหล่อ SSM กันเฉพาะในประเทศอุตสาหกรรมชั้นนำประเทศไทยก็ได้เริ่มมีการวิจัยและพัฒนาเทคโนโลยี SSM เพื่อประยุกต์ใช้กับอุตสาหกรรมในประเทศประมาณ 1-2 ปีที่ผ่านมา เทคโนโลยีการหล่อโดยการพ่นฟองแก๊สเหนือน้ำโลหะ (Gas Induced Semi-Solid; GISS) [1] ผ่านแท่งกราฟไฟต์พุนเพื่อให้เกิดการไหลเคลื่อนของน้ำโลหะในขณะที่โลหะแข็งตัว เพื่อให้ได้เกรนแบบก้อนกลม หลังจากนั้นก็ขึ้นรูปโดยวิธีการหล่อในขณะที่โลหะมีการแข็งตัวบางส่วน การนำไปใช้งานของชิ้นส่วนอะลูมิเนียมผสมที่ได้จากกรรมวิธีการหล่อโลหะกึ่งของแข็ง ได้อย่างเต็มที่ก็จะเกี่ยวข้องกับกรรมวิธีต่อเนื่อง โดยเฉพาะที่เกี่ยวข้องกับการขึ้นรูป (Materials Forming) และการซ่อม (Repairing) อะลูมิเนียมผสมหล่อ ซึ่งก็จะมีวิธีการเชื่อม (Joining) เข้ามาเกี่ยวข้องอย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้ ทั้งการเชื่อมระหว่างอะลูมิเนียมผสมหล่อ (Similar Joint) และการเชื่อม

ระหว่างอะลูมิเนียมผสมหล่อกับโลหะชนิดอื่น (Dissimilar Joint) ในโครงสร้างหรือชิ้นส่วนประกอบต่างๆ

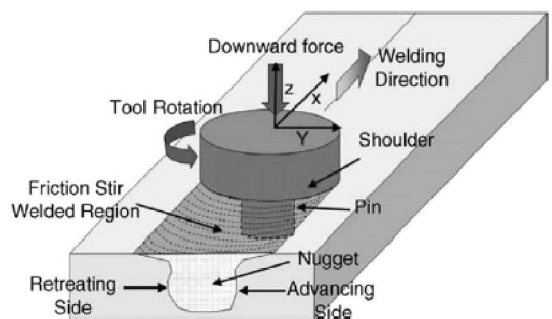
ในกรณีทั่วไปในการเชื่อมอะลูมิเนียมผสมซึ่งหล่อด้วยกระบวนการไดคาสติงธรรมดา (Conventional Aluminum Die Casting) ที่ไม่ใช่อะลูมิเนียมผสมซึ่งหล่อกึ่งของแข็ง จะเชื่อมโดยกรรมวิธีการเชื่อมอาร์คหรือการเชื่อมโดยการหลอมละลาย (Fusion) เมื่อโลหะแข็งตัวจะเกิดโครงสร้างขึ้นมาใหม่ ซึ่งโครงสร้างใหม่นี้อาจจะไม่เหมือนกับโครงสร้างเดิมของโลหะนั้น อาจจะมีความเค้นตกค้าง (Residual Stress) การบิดงอ (Distortion) การแตกร้าวของรอยเชื่อม (Welding Crack) ในระหว่างการแข็งตัวจากการหลอมละลายและมีปัญหาการเกิดโพรงอากาศ (Porosity) นอกจากนี้ยังมีปัญหาที่สำคัญอีกประการหนึ่งในการเชื่อมอะลูมิเนียม คือ การรักษาสมบัติทางกลของบริเวณรอยเชื่อมให้ใกล้เคียงกับเนื้อเดิมมากที่สุด การเชื่อมโดยการหลอมละลายก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางโลหะวิทยา (Metallurgical Changes) [2] ส่งผลทำให้แนวเชื่อม (Welding Region) มีการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางกลของอะลูมิเนียมลดลงตามไปด้วย

สำหรับอะลูมิเนียมผสมที่ได้จากกรรมวิธีการหล่อโลหะกึ่งของแข็ง ปัญหาใหญ่ปัญหาหนึ่งในการเชื่อมอะลูมิเนียมหล่อกึ่งของแข็ง โดยการเชื่อมหลอมละลายก็คือ การรักษาสมบัติทางกลของบริเวณแนวเชื่อม (Mechanical Properties of Joint) ให้ใกล้เคียงกับเนื้อเดิมมากที่สุด เพราะว่าการเชื่อมโดยการหลอมละลาย นอกจากการเกิดรูพุนแล้ว ยังจะก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างทางโลหะวิทยา ซึ่งจะส่งผลทำให้แนวเชื่อม รวมถึงบริเวณข้างแนวเชื่อม (Heat

Affected Zone; HAZ) มีการเปลี่ยนแปลงและทำให้อุณหภูมิอาจทำให้ชิ้นส่วนนั้นๆเสียหายหรือใช้งานได้ประสิทธิภาพต่ำ

การเชื่อมเสียดทานแบบกวน (Friction Stir Welding; FSW) เป็นการเชื่อมโลหะในสภาวะของแข็ง (Solid State Welding) ที่คิดค้นโดยสถาบันการเชื่อมอังกฤษ (The Welding Institute; TWI) เพื่อเชื่อมวัสดุที่ยากต่อการเชื่อมแบบด้วยกระบวนการเชื่อมแบบหลอมละลาย แสดงดังรูปที่ 1 เช่น อะลูมิเนียมผสมเกรดต่างๆ มากมาย [3-5] กระบวนการเชื่อมเสียดทานแบบกวน ทำให้เกิดโครงสร้างของแนวเชื่อมที่มีเกรนเล็กละเอียด สามารถรับแรงได้สูง ซึ่งการเชื่อมแบบหลอมละลายไม่สามารถทำได้ [6] และจะมีความเหมาะสมมากสำหรับการเชื่อมโลหะที่ไม่ต้องการให้เกิดการหลอมเหลวขึ้น ซึ่งอาจส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างทางจุลภาคจากการเย็นตัวจากสภาวะของเหลวไปสู่สภาวะของแข็งได้ ตรงกับหลักการของการผลิตอะลูมิเนียมผสมหล่อแบบกึ่งของแข็ง นอกจากนี้การเชื่อมอะลูมิเนียมผสมหล่อแบบกึ่งของแข็งยังเป็นเทคโนโลยีที่ใหม่มาก และยังอยู่ในขั้นตอนการวิจัย เมื่อไม่นานมานี้ได้มีผู้ทำการทดลองเชื่อมต่อชนวัสดุอะลูมิเนียมต่างชนิด ซึ่งการเชื่อมดังกล่าวนิยมใช้งานกันอย่างแพร่หลายในชิ้นส่วนอากาศยาน โครงสร้างเครื่องบิน (Airframe) และส่วนประกอบจรวด อลูมิเนียมที่นิยมนำมาเชื่อม เช่น A356 กับ AA6061 [7] ได้แสดงให้เห็นว่าสมบัติทางกลของแนวเชื่อม ส่วนมากจะขึ้นอยู่กับวัสดุที่อยู่ด้านรีทริทติงไซด์ เนื่องจากโครงสร้างของบริเวณแนวเชื่อมส่วนใหญ่จะประกอบขึ้นจากเนื้อวัสดุที่อยู่ด้านรีทริทติงไซด์ นอกจากนี้ได้มีการทดลองเชื่อม A356-T6 กับ AA6061-T651 [8] ที่แสดงผลของแนวเชื่อมที่มีค่า

ความต้านทานแรงดึงต่ำ อันเป็นสาเหตุมาจากการเกิดโครงสร้างใหม่ที่บริเวณแนวเชื่อม โดยมีการกระจายตัวของอนุภาคซิลิคอนตลอดความยาวของแนวเชื่อม ส่งผลให้บริเวณขอบเกรนเป็นจุดเริ่มต้นของการแตกหักจากการดึงจากการศึกษาผลของความเร็วหมุนเชื่อมและความเร็วเดินเชื่อมของแนวเชื่อม A356 กับ AA6061-T6 [9] ได้ผลที่ชี้ให้เห็นว่าการเปลี่ยนค่าความเร็วหมุนเชื่อมและความเร็วเดินเชื่อม ส่งผลโดยตรงต่อโครงสร้างจุลภาคของบริเวณแนวเชื่อมอย่างมีนัยสำคัญ SSM 356 กับ AA6061-T651 [10] พบว่าการปรับเปลี่ยนค่าความเร็วหมุนเชื่อมและความเร็วเดินเชื่อม ส่งผลโดยตรงต่อโครงสร้างจุลภาค สมบัติทางกลของบริเวณแนวเชื่อมอย่างมีนัยสำคัญ แต่อย่างไรก็ตามการเชื่อมเสียดทานแบบของอะลูมิเนียมผสมต่างชนิด ที่ได้จากการกระบวนการหล่อแบบกึ่งของแข็ง SSM 356 กับ SSM 6061 ซึ่งเป็นวัสดุใหม่ที่มีโครงสร้างเกรนแบบก้อนกลม นั้น ยังเป็นเทคโนโลยีที่ใหม่มาก และยังไม่ปรากฏหลักฐานในการทำวิจัยอีกด้วย



รูปที่ 1 การเชื่อมเสียดทานแบบกวน [11]

จากข้อมูลและเหตุผลดังกล่าวข้างต้นจึงเป็นที่มาของโครงการวิจัย การเชื่อมอะลูมิเนียมผสมหล่อกึ่งของแข็ง

ต่างชนิด SSM 356 กับ SSM 6061 ด้วยกระบวนการเชื่อมเสียดทานแบบกวน โดยศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการเชื่อม คือ ปัจจัยความเร็วหมุนเชื่อม และปัจจัยความเร็วเดินเชื่อม ที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางโลหะวิทยา (โครงสร้างทางมหภาคและจุลภาค) และสมบัติทางกลโดยเฉพาะของเนื้อเชื่อม (Weld Metal) และบริเวณที่มีผลกระทบอันเนื่องมาจากความร้อน (Thermo Mechanical Affected Zone; TMAZ) เพื่อความเหมาะสมทางด้านโครงสร้างทางมหภาค จุลภาคและสมบัติทางกล อีกทั้งนำผลมาปรับปรุงเพื่อเลือกใช้กรรมวิธีการเชื่อมที่เหมาะสมทั้งในแง่งานวิจัยและอุตสาหกรรมต่อไป

2. วิธีดำเนินงานวิจัย

การทดลองเชื่อมด้วยกระบวนการเชื่อมเสียดทานแบบกวนของวัสดุต่างชนิด มีเครื่องมือ อุปกรณ์ วัสดุ และตัวแปรที่ใช้ในการทดลอง ดังนี้

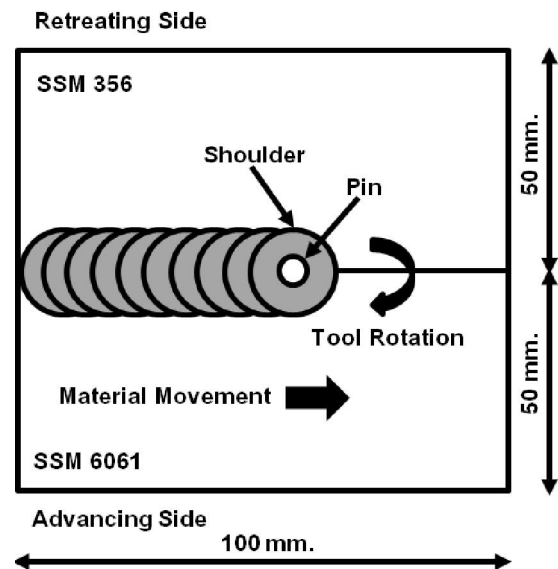
2.1 วัสดุและตัวแปรในการทดลอง

วัสดุที่ใช้ในการทดลอง คือ อะลูมิเนียมผสมที่หล่อด้วยกระบวนการหล่อแบบกึ่งของแข็ง SSM 356 และ SSM 6061 โดยมีส่วนผสมทางเคมี แสดงดังตารางที่ 1 ชั้นทดสอบมีขนาดความหนา 4 mm ความยาว 100 mm และความกว้าง 50 mm แผ่นวัสดุทั้งสองถูกยึดประกอบเป็นรอยต่อชนโดยมีละเอียดยังแสดงดังรูปที่ 2 และยึดแน่นบนอุปกรณ์จับยึดแนวเชื่อม (Fixture) ที่ถูกติดตั้งบนแท่นเครื่องกัดแนวตั้ง (Vertical Milling Machine) โดยที่ชิ้นงานจะเคลื่อนที่ไปตลอดความยาวของแนวเชื่อม ลักษณะการวางได้กำหนดให้ SSM 356 อยู่ด้านริท

ริตติงไซด์ (Retreating Side; RS) และ SSM 6061 อยู่ด้านแอดวานซิงไซด์ (Advancing Side; AS)

ตารางที่ 1 ส่วนผสมทางเคมีและความแข็งแรงดึงของวัสดุทดลอง (ร้อยละโดยน้ำหนัก)

Elements	SSM 356	SSM 6061
Si	7.74	0.60
Fe	0.57	0.70
Cu	0.05	0.28
Mn	0.06	0.15
Mg	0.32	1.00
Zn	0.01	0.25
Ti	0.05	0.15
Cr	0.02	0.20
Ni	0.01	-
Al	Bal.	Bal.
Tensile Strength (MPa)	172	164



รูปที่ 2 รายละเอียดของการเชื่อมต่อชน FSW

ในการทดลองจะใช้ตัวกวนรูปทรงกระบอกที่ทำจากเหล็กกล้าเครื่องมือเกรด SKD 11 โดยมีขนาดความโตหัวพื้น 3.2 mm ความยาว 5 mm และความโตหัว Shoulder 20 mm มีรูปร่างแสดงดังรูปที่ 3 โดยการทดลองครั้งนี้การเชื่อมจะถูกเชื่อมด้วยเครื่องกัดแนวตั้งเอียงตัวกวน 3 องศา และจะถูกสอดเข้าตรงกลางของรอยเชื่อม โดยห่างจากขอบชิ้นงาน 10 mm จนกระทั่งได้ความลึกและบ่าของตัวกวนสัมพันธ์กับผิวชิ้นงาน ตัวกวนจะหมุนอยู่กับที่ ณ จุดเริ่มต้นเป็นเวลา 45 วินาที เพื่อเป็นการกระจายความร้อนให้ทั่วถึงกับชิ้นงานทดสอบ และเริ่มเดินเชื่อมบนชิ้นทดสอบตามตัวแปรที่กำหนดโดยอัตโนมัติ เมื่อถึงปลายแนวเชื่อมตัวกวนก็จะหมุนอยู่กับที่ 10 วินาที ก่อนจะยกตัวกวนออกจากแนวเชื่อม โดยตัวแปรในการทดลองแสดงดังตารางที่ 2



รูปที่ 3 ตัวกวนรูปทรงกระบอกที่ใช้ในการทดลอง

ตารางที่ 2 ตัวแปรและระดับในการทดลอง

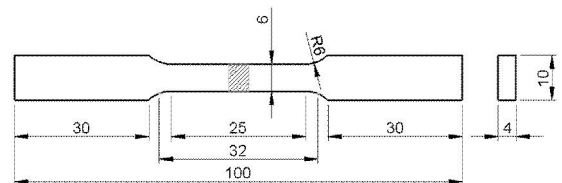
Welding Parameter	Unit	Level		
		1	2	3
Rotation Speed	rpm	710	1,000	1,400
Welding Speed	mm/min	80	112	160
Tool Tilt Angle	degree	3	-	-
Down Force	kN	4.5	-	-

2.2 โครงสร้างทางโลหะวิทยา

หลังจากทำการเชื่อมชิ้นงานทดสอบเรียบร้อยแล้ว ชิ้นทดสอบจะถูกตัดตั้งฉากกับแนวเชื่อม จากนั้นนำไปขัดด้วยกระดาษทรายและผ้าสักหลาด นำไปกัดกรด (Etching) ด้วยสารละลายเจือจาง Keller’s Reagent และนำไปทดสอบโครงสร้างด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบลำแสงเพื่อดูลักษณะโครงสร้างทางมหภาคและจุลภาค รวมถึงรูปร่างและขนาดของเกรนที่บริเวณแนวเชื่อมหลังผ่านกระบวนการเชื่อมเสียดทานแบบกวน

2.3 การทดสอบแรงดึง

ชิ้นงานที่ได้จะถูกนำไปทดสอบแรงดึงเพื่อหาสมบัติทางกลของแนวเชื่อม โดยชิ้นงานทดสอบจะถูกตัดตั้งฉากกับแนวเชื่อมและให้รอยเชื่อมอยู่ตรงกลางของชิ้นทดสอบอัตราเร็วในการดึงที่ 1.67×10^{-2} mm/s ซึ่งขนาดและรูปร่างของชิ้นทดสอบจะถูกแสดงดังรูปที่ 4 โดยอ้างอิงตามมาตรฐาน ASTM-E8M

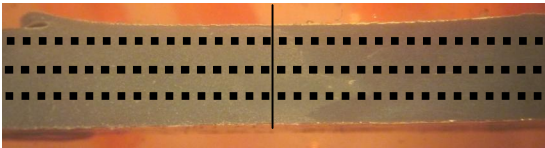


รูปที่ 4 ชิ้นงานทดสอบแรงดึงตามมาตรฐาน ASTM-E8M

2.4 การทดสอบความแข็ง

ชิ้นงานทดสอบความแข็งจะถูกตัดตามขวางของแนวเชื่อม การทดสอบจะใช้เครื่องทดสอบแบบไมโครวิกเกอร์กดบริเวณพื้นที่หน้าตัดของแนวเชื่อม โดย

แบ่งออกเป็นสามแถว ซึ่งประกอบด้วยแถวบน กลาง และล่างตามลำดับ แสดงดังรูปที่ 5 กัดตั้งแต่ตรงกลางไปจนถึงระยะห่างจากจุดศูนย์กลางแนวเชื่อม 10 mm ระยะห่างของรอยกัดแต่ละจุด 0.5 mm แรงกัดที่ใช้ 100g และเวลาในการกัด 10 วินาที



(AS) SSM 356

SSM AA 6061 (RS)

รูปที่ 5 บริเวณพื้นที่หน้าตัดที่กัดความแข็ง

3. ผลการวิจัยและวิเคราะห์ผล

จากการทดลองเชื่อมด้วยกระบวนการเชื่อมเสียดทานแบบกวนของวัสดุต่างชนิด โดยการนำเครื่องกัดแนวตั้งมาประยุกต์ใช้เป็นเครื่องเชื่อมเสียดทานแบบกวน รอยเชื่อมที่ได้มีความสมบูรณ์ ซึ่งคุณลักษณะแนวเชื่อมที่ได้จะเปลี่ยนแปลงไปตามตัวแปรที่ใช้ในแต่ละเงื่อนไขของการเชื่อม ค่าต่างๆ ที่ได้จากการทดลองสามารถแสดงเป็นข้อๆ ดังนี้

3.1 โครงสร้างทางโลหะวิทยาของแนวเชื่อม

จากผลการทดลองเชื่อมแสดงดังตารางที่ 3 ลักษณะผิวด้านบนของแนวเชื่อมที่ตัวแปรต่างๆ โดยพบว่า ที่ทุกค่าความเร็วหมุนเชื่อมและความเร็วเดินเชื่อม ลักษณะผิวด้านบนของแนวเชื่อมจะมีความเรียบและสม่ำเสมอ ครีบบริเวณแนวเชื่อมจะเกิดขึ้นเล็กน้อยที่บริเวณด้านริทรีทิงไซด์ แต่ลักษณะผิวด้านบนของแนวเชื่อมที่ความเร็วหมุนเชื่อม 1400 rpm ความเร็วเดินเชื่อมที่ 160

mm/min จะมีครีบเกิดขึ้นที่บริเวณด้านแอดวานซิงไซด์ และมีรอยแยกเกิดขึ้นที่บริเวณปลายของแนวเชื่อม ลักษณะครีบที่เกิดขึ้นเป็นลักษณะความผิดปกติที่เกิดขึ้นเมื่อค่าแรงกดเดียวกัน แต่ความเร็วหมุนเชื่อมสูงและความเร็วเดินเชื่อมที่ต่ำ ส่งผลทำให้ความร้อนนำเข้าสู่แนวเชื่อมมีปริมาณมากเกินไป [12] ทำให้เนื้อโลหะมีการอ่อนตัวในขณะที่เครื่องมือเคลื่อนที่ เนื้อโลหะจะมีการไหลวนและถูกขับออกมาเป็นครีบขึ้นที่บริเวณปลายบ่าของเครื่องมือกวนและเกิดรอยแยกขึ้นเล็กน้อยที่ปลายแนวเชื่อม เนื่องจากความแตกต่างของอุณหภูมิบริเวณด้านบนและด้านล่างของแนวเชื่อม ส่งผลให้การประสานของเนื้อวัสดุที่บริเวณด้านบนแนวเชื่อมไม่สมบูรณ์









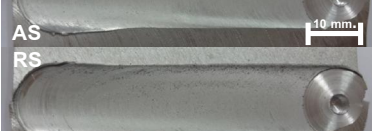















การตรวจสอบโครงสร้างทางมหภาคของแนวเชื่อมอะลูมิเนียมผสมต่างชนิด โดยการตัดชิ้นทดสอบในทิศทางตั้งฉากกับแนวเชื่อมและให้แนวเชื่อมอยู่ตรงกลางชิ้นทดสอบ บริเวณเขตที่ได้รับผลกระทบจากความร้อนทางกล และบริเวณเนื้อโลหะเดิม ที่แต่ละตัวแปรเชื่อม แสดงดังตารางที่ 3 ซึ่งจะเป็นลักษณะ โครงสร้างทางมหภาคที่ความเร็วหมุนเชื่อม 710, 1000, 1400 rpm ตามลำดับ และความเร็วเดินเชื่อม 80, 112, 160 mm/min ตามลำดับ จากผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าโครงสร้างของแนวเชื่อมส่วนใหญ่จะผันแปรไปตามตัวแปรเชื่อมในการทดลอง โดยจะพบว่า การปรับเปลี่ยนความเร็วหมุนเชื่อมและความเร็วเดินเชื่อมจะส่งผลให้การจัดเรียงตัวของเนื้อวัสดุที่บริเวณแนวเชื่อมเปลี่ยนไป เมื่อพิจารณาความเร็วหมุนเชื่อมที่เพิ่มขึ้นจะพบว่าลักษณะโครงสร้างทางมหภาคของแนวเชื่อมจะขยายตัวกว้างขึ้น โดยสามารถเปรียบเทียบได้จากความเร็วหมุนเชื่อม 710

กับ 1400 rpm เพราะความเร็วหมุนเชื่อมที่สูงขึ้นนั้นจะส่งผลให้ความร้อนจากการเสียดทานในเนื้อวัสดุมีค่าเพิ่มขึ้นด้วย ในขณะที่เดียวกันเมื่อความเร็วเดินเชื่อมเพิ่มขึ้นการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างที่บริเวณแนวแกนจะกว้างขึ้นด้วยเมื่อเทียบกับโครงสร้างที่ความเร็วหมุนเชื่อมที่ต่ำ ความเร็วเดินเชื่อมของตัวแกนก็มีผลโดยตรงต่อการเปลี่ยนโครงสร้างของแนวเชื่อมเช่นกันจากการทดลองพบว่าที่ความเร็วหมุนเชื่อมเดียวกันแต่ค่าความเร็วเดินเชื่อมเพิ่มขึ้น การเปลี่ยนโครงสร้างของแนวเชื่อมจะมีขนาดที่แคบและเล็กลง เพราะที่ความเร็วเดินเชื่อมยิ่งมาก ความร้อนจากการเสียดทานของตัวแกนกับเนื้อวัสดุจะยิ่งลดลง การกระจายตัวของความร้อนในวัสดุมีค่าน้อยจึงส่งผลให้การเปลี่ยนโครงสร้างของเนื้อวัสดุมีค่าน้อยลงด้วย จากตารางที่ 3 จะสังเกตเห็นว่าแนวเชื่อมมีการผสมกันของอะลูมิเนียมผสมทั้งสองชนิด มีการเกิดครีปที่ขึ้นที่บริเวณขอบของแนวเชื่อม ซึ่งครีปที่เกิดขึ้นนั้นจะมีปริมาณน้อยลงเมื่อความเร็วเดินเชื่อมเพิ่มขึ้น อีกทั้งพบว่าบริเวณที่รอยเชื่อมถูกกวน ไม่มีข้อบกพร่องใดๆ เกิดขึ้นกับรอยเชื่อม รอยเชื่อมมีลักษณะที่ประสานเข้าด้วยกันเป็นอย่างดีของทั้งสองชิ้น ความร้อนจะเกิดการสะสมในรอยเชื่อมอยู่ในสภาวะพลาสติกเกิดการไหลวนรอบ ๆ ตัวแกน เมื่ออะลูมิเนียมเกิดการแข็งตัวโครงสร้างบริเวณรอยเชื่อมจะมีลักษณะภาพร่างคล้ายกับหัวหอมรีที่มีภาพแบบปรากฏชัดเจน อันเนื่องมาจากแรงกดและความร้อน ทำให้การไหลวนของเนื้ออะลูมิเนียมเป็นแบบเรียบและมีทิศทางการไหลวนในลักษณะที่แน่นอนรอบตัวแกน อีกทั้งพบว่ารอยเชื่อมของความเร็วหมุนของหัวพินสูงมีลักษณะรอยเชื่อมที่กว้างกว่ารอยเชื่อมของความเร็วหมุนของ

หัวพินต่ำ อันเนื่องมาจากความร้อนที่มากกว่าทำให้เนื้ออะลูมิเนียมอยู่ในสภาวะพลาสติกเป็นบริเวณกว้างกว่า การเชื่อมด้วยความเร็วหมุนของหัวพินต่ำ [13]

การตรวจสอบโครงสร้างทางจุลภาคของแนวเชื่อมอะลูมิเนียมผสมต่างชนิด แสดงดังตารางที่ 4 ซึ่งจะเป็นลักษณะโครงสร้างทางมหภาคที่ความเร็วหมุนเชื่อม 710, 1000, 1400 rpm ตามลำดับ พบว่า โครงสร้างจุลภาคที่บริเวณเนื้อเชื่อมที่ถูกกวนจะมีการเกิดผลึกใหม่ที่มาจากการรวมตัวกันของวัสดุทั้งสองชนิดอย่างชัดเจน โดยจะมีการเรียงตัวสลับกันของวัสดุทั้งสอง (ซิกแซก) ที่ตรงกลางเนื้อเชื่อมมีเนื้อวัสดุด้านรีทริทติงไซด์อยู่ด้านล่างและด้านบนจะมีเนื้อของวัสดุด้านแอดวานซิงไซด์ เนื่องจากเนื้อวัสดุถูกขยับมาในขณะที่กวน บริเวณด้านแอดวานซิงไซด์ (AS) ของแนวเชื่อมจะพบว่าเนื้อวัสดุของ SSM 6061 ผสมอยู่โดยเนื้อวัสดุมีความละเอียดมากขึ้นเนื่องจากถูกบดและไหลกระแทกกับเครื่องมือในขณะที่กวน เกรนของ SSM 356 จะมีลักษณะยาวรีเนื่องจากมีการเสีรูปร่างพลาสติกเนื่องจากตัวแกนบริเวณแนวแกน (SZ) เป็น โครงสร้างของผลึกใหม่ระหว่างเนื้อวัสดุของสองชนิดโดยเกรนจะมีความละเอียดและมีขนาดเล็กกว่าเนื้อโลหะเดิม เกรนจะมีความละเอียดมากโดยเฉพาะ SSM 6061 ซึ่งด้านบนของบริเวณแนวแกนจะมีเนื้อโลหะชนิดนี้ผสมอยู่เป็นจำนวนมากเนื่องจากพัฒนาในขณะที่กวน และบริเวณด้านรีทริทติงไซด์ (RS) ของแนวแกนโดยเนื้อวัสดุส่วนใหญ่จะเป็นเนื้อวัสดุของโลหะที่ถูกกำหนดให้อยู่ด้านรีทริทติงไซด์ และเนื้อวัสดุบางส่วนจะมีการเรียงตัวสลับกันไป ระหว่าง SSM 356 กับ SSM 6061

ตารางที่ 3 ผลการทดสอบผิวด้านบนรอยเชื่อม และ โครงสร้างมหภาคของแนวเชื่อม

ความเร็วหมุนเชื่อม (rpm)	ความเร็วเดินเชื่อม (mm/min)	ผิวด้านบนแนวเชื่อม	โครงสร้างมหภาค
710	80	RS 	AS 
		AS 	RS 
710	112	RS 	AS 
		AS 	RS 
710	160	RS 	AS 
		AS 	RS 
1000	80	RS 	AS 
		AS 	RS 
1000	112	RS 	AS 
		AS 	RS 
1000	160	RS 	AS 
		AS 	RS 
1400	80	RS 	AS
		AS 	RS
1400	112	RS 	AS
		AS 	RS
1400	160	RS 	AS
		AS 	RS

ตารางที่ 4 ผลการทดสอบโครงสร้างจุลภาคของแนวเชื่อม

ความเร็วหมุนเชื่อม (rpm)	ความเร็วเดินเชื่อม (mm./min)	TMAZ (AS)	SZ	TMAZ (RS)
710	80			
710	112			
710	160			
1000	80			
1000	112			
1000	160			
1400	80			
1400	112			
1400	160			

บริเวณแนวเชื่อมของวัสดุต่างชนิดจะมีบริเวณที่แตกต่างกันสามบริเวณ คือ บริเวณแนวทวน บริเวณที่ได้รับผลกระทบอันเนื่องมาจากความร้อนทางกล และบริเวณเนื้อโลหะเดิม จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าบริเวณตรงกลางแนวเชื่อมจะมีเนื้อวัสดุที่เกิดโครงสร้าง

ที่เกิดขึ้นใหม่ โดยมีการผสมของเนื้อวัสดุทั้งสองชนิด ลักษณะเกรนบริเวณดังกล่าวจะมีความละเอียดมากกว่าเมื่อเทียบกับเกรนที่บริเวณเนื้อโลหะเดิมเนื่องจากบริเวณตรงกลางแนวทวนจะมีอุณหภูมิที่สูงกว่าและการเสีรูปของเนื้อโลหะที่ได้จากการเสียดทานในขณะที่

กวนมีปริมาณมากขึ้น ส่งผลให้เกรนมีขนาดเล็กลง โครงสร้างเกรนในบริเวณที่ได้รับผลกระทบอันเนื่องมาจากความร้อนทางกล จะมีลักษณะรีวเนื่องจากผลจากการเสีรूपจากปฏิกิริยาทางกลที่ได้รับจากตัวกวน ส่วนที่บริเวณเนื้อโลหะเดิมซึ่งเป็นบริเวณที่ไม่ได้รับผลกระทบทางกลที่มาจากตัวกวนและโครงสร้างเกรนในบริเวณดังกล่าวจะคล้ายกับโครงสร้างของเนื้อโลหะเดิม [14] เมื่อค่าความเร็วหมุนเชื่อมยิ่งเพิ่มขึ้น ความร้อนจากการเสียดทานและการไหลวนของเนื้อโลหะก็จะมีปริมาณที่มากขึ้น ส่งผลให้ลักษณะเกรนในบริเวณแนวกวนมีความละเอียดขึ้น [15-16]

ดังนั้นอิทธิพลของความเร็วหมุนเชื่อมและความเร็วเดินเชื่อมที่มีต่อลักษณะโครงสร้างทางมหภาคและจุลภาคของแนวเชื่อม จากการทดลองจะพบว่าค่าความเร็วหมุนเชื่อมที่สูงขึ้นการเปลี่ยนโครงสร้างที่บริเวณแนวกวนจะเปลี่ยนไปด้วย ที่ความเร็วเดินเชื่อมเดียวกันแต่ความความเร็วหมุนเชื่อมสูงขึ้นทำให้โครงสร้างบริเวณที่ถูกมีลักษณะเกรนที่ละเอียดขึ้น เนื่องจากความร้อนจากการเสียดทานแบบกวนมีมาก การเสีรूपของเนื้อวัสดุที่เกิดขึ้นมีมากตามไปด้วย ในทางกลับกันเมื่อความเร็วหมุนเชื่อมที่ต่ำลงการเปลี่ยนโครงสร้างบริเวณแนวเชื่อมจะมีพื้นที่แคบกว่าเนื่องจากความร้อนและการกระจายตัวที่ชิ้นงานลดลง

3.2 ความแข็งแรงของแนวเชื่อม

ตารางที่ 5 แสดงค่าความแข็งแรงของรอยเชื่อมอะลูมิเนียมหล่อกิ่งแข็ง 356 กับ 6061 ประกอบไปด้วย ค่า Yield Strength ค่า Tensile Strength ค่า Elongation และเปอร์เซ็นต์ประสิทธิภาพของแนวเชื่อมเมื่อเทียบกับเนื้อโลหะเดิมของอะลูมิเนียมหล่อกิ่งแข็ง 356 และ 6061 สภาพแนวเชื่อมที่ดีที่สุดของการทดลองนี้คือ ความเร็ว

หมุนเชื่อม 1400 rpm และความเร็วเดินเชื่อม 112 mm/min เมื่อเปรียบเทียบกับเนื้อโลหะเดิม 356 มีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้น 1.98% และเปรียบเทียบกับเนื้อโลหะเดิม 6061 มีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้น 6.95% ส่วนสภาพแนวเชื่อมที่ต่ำที่สุดของการทดลองนี้คือ ความเร็วหมุนเชื่อม 710 rpm และความเร็วเดินเชื่อม 112 mm/min เมื่อเปรียบเทียบกับเนื้อโลหะเดิม 356 แล้ว มีประสิทธิภาพลดลงเหลือ 77.79% และเปรียบเทียบกับเนื้อโลหะเดิม 6061 มีประสิทธิภาพลดลงเหลือ 81.59% โดยที่ประสิทธิภาพแนวเชื่อมคำนวณได้จากการนำผลค่าความแข็งแรงดึงของแนวเชื่อมเป็นตัวตั้งหารด้วยผลค่าความแข็งแรงดึงของเนื้อโลหะเดิม [17]

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

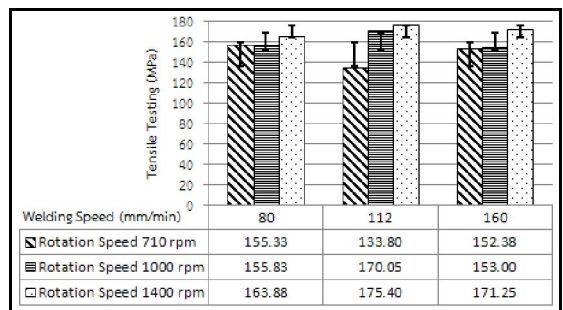
จากกราฟแสดงดังรูปที่ 6 เป็นผลการทดสอบความแข็งแรงของแนวเชื่อม จะพบว่าที่บริเวณแนวเชื่อมของวัสดุต่างชนิดจะมีความแข็งแรงดึงที่ต่ำกว่าเมื่อเทียบกับเนื้อโลหะเดิมของ SSM 6061 แต่จะสูงกว่าเล็กน้อยเมื่อเทียบกับโลหะเดิม SSM 356 ที่ค่าความเร็วหมุนเชื่อมเดียวกัน เมื่อค่าความเร็วเดินเชื่อมเพิ่มขึ้น ค่าความแข็งแรงดึงจะมีค่าลดลง เนื่องจากที่ความเร็วเดินเชื่อมสูง ความร้อนจากการเสียดทานที่จะทำให้เนื้อโลหะบริเวณแนวกวนมีการอ่อนตัวลง นั้นมีค่าน้อยลง ส่งผลให้การไหลวนของเนื้อวัสดุในขณะกวนไม่สมบูรณ์ ส่งผลให้ค่าความแข็งแรงดึงลดลงได้เช่นเดียวกัน [17] ที่ความเร็วหมุนเชื่อมสูงขึ้นทำให้ค่าความแข็งแรงดึงมีค่ามากขึ้น เมื่อเทียบกับที่ความเร็วเดินเชื่อมเดียวกันจะพบว่า ยิ่งค่าความเร็วหมุนเชื่อมเพิ่มขึ้น ความร้อนจากการเสียดทาน

ระหว่างตัวกวนกับเนื้อวัสดุจะมีมากขึ้น ทำให้การ
 กระจายตัวและการประสานกันของเนื้อวัสดุมีความ
 สมบูรณ์ส่งผลให้ค่าความแข็งแรงดึงมีค่าสูงขึ้น

ตารางที่ 5 ค่าความแข็งแรง (MPa) ของแนวเชื่อมต่อชน โดยการเชื่อมเสียดทานแบบกวน SSM 356 กับ SSM 6061

Joint	Yield Strength (MPa)	Tensile Strength (MPa)	Elongation (%)	Joint Efficiency (BM SSM 356) (%)	Joint Efficiency (BM SSM 6061) (%)
BM SSM 356	137.60	172.00	4.50	-	-
BM SSM 6061	131.20	164.00	1.30	-	-
80	124.26	155.33	9.12	90.31	94.71
710	112	133.80	5.76	77.79	81.59
160	121.90	152.38	5.33	88.59	92.91
80	124.66	155.83	4.96	90.60	95.02
1000	112	170.05	6.87	98.87	103.69
160	122.40	153.00	5.88	88.95	93.29
80	131.10	163.88	7.80	95.28	99.92
1400	112	175.40	8.55	101.98	106.95
160	137.00	171.25	9.40	99.56	104.42

ลักษณะการขาดของชิ้นทดสอบจะเกิดขึ้น 2 บริเวณ คือ บริเวณเนื้อโลหะเดิมของอะลูมิเนียมหล่อทิ้งของแข็ง SSM 6061 (Base Metal of SSM 6061) และบริเวณเขตที่ได้รับผลกระทบจากความร้อนทางกลของอะลูมิเนียมหล่อทิ้งของแข็ง SSM 6061 (TMAZ of SSM 6061) เนื่องจากบริเวณทั้ง 2 เป็นบริเวณที่ค่าความแข็งแรงต่ำกว่าบริเวณอื่น

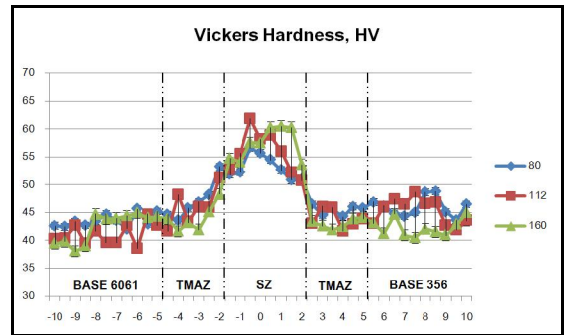


รูปที่ 6 ความแข็งแรงของแนวเชื่อม

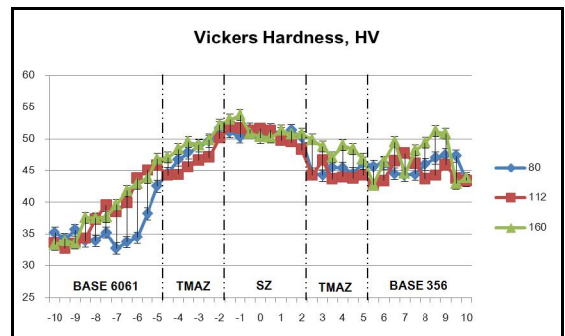
3.3 ความแข็งของแนวเชื่อม

จากรูปที่ 7 แสดงค่าความแข็งของแนวเชื่อมที่ได้จากการเชื่อมเสียดทานแบบกวนของวัสดุต่างชนิด พบว่าการกระจายตัวของค่าความแข็งของแนวเชื่อมที่บริเวณตรงกลางจะมีค่าสูงสุดและจะลดลงไปเรื่อยๆ จนถึงบริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อนทางกล (Thermo-Mechanically Affected Zone; TMAZ) ของทั้งสองด้านของแนวเชื่อม สาเหตุดังกล่าวจะมาจากผลของวัฏจักรทางความร้อนของวัสดุที่เกิดขึ้นระหว่างกระบวนการเชื่อมเสียดทานแบบกวนและการตกตะกอนของเกรนที่มีความหยาบ [18] หลังจากบริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อนทางกลในการกวนแล้ว ความแข็งของแนวเชื่อมจะมีค่าลดต่ำลงเรื่อยๆ ไปจนถึงค่าความแข็งเดิมของเนื้อโลหะทั้งสองชนิด เนื่องจากบริเวณดังกล่าวเป็นบริเวณที่ไม่ได้รับผลกระทบจากการกวน โดยค่าความแข็งดังกล่าวจะผันแปรไปตามแต่ละตัวแปรเชื่อม สิ่งที่น่าสังเกตอีกประการหนึ่งจากค่าความแข็งที่มากที่สุดบริเวณตรงกลางแนวเชื่อม คือ ขณะที่ตัวกวนมีการหมุนและเคลื่อนที่นั้น ที่ตรงกลางส่วนโค้งของบ่าด้านหลังจะเป็นตัวช่วยในการบีบอัดเนื้อโลหะมากที่สุด ทำให้เนื้อโลหะบริเวณนั้นถูกบีบอัดให้แน่นจากบ่าของตัวกวนมากที่สุดเช่นกัน ผลกระทบที่ได้จากกรรมวิธีดังกล่าวจะเป็นเหตุให้ค่าความแข็งบริเวณนั้นมากกว่าบริเวณอื่น เหตุผลที่ทำให้โลหะมีการอ่อนตัวเป็นผลพวงมาจาก [19] การเกิดโครงสร้างผลึกใหม่ในบริเวณแนวกวนและมีการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างเชิงซ้อนของรูปร่างของเกรน ลักษณะและการกระจายตัวของเฟสต่างๆ ในโครงสร้างจุลภาคของบริเวณที่ถูกกวน การกระจายตัวและความหนาแน่นของเนื้อวัสดุที่

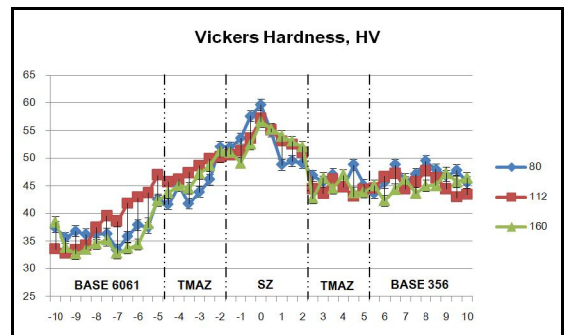
ลดลงทำให้มีการอ่อนตัวของเนื้อวัสดุส่งผลให้ค่าความแข็งลดน้อยลง จากเหตุผลที่กล่าวมาแล้วข้างต้นนั้นสามารถให้คำยืนยันถึงผลของความแข็งที่ลดลงได้



(ก)



(ข)



(ค)

รูปที่ 7 ค่าความแข็งของแนวเชื่อมความเร็วหมุนเชื่อม (ก) 710 (ข) 1000 และ (ค) 1400 rpm

ค่าความแข็งของบริเวณเนื้อโลหะเดิมของ อะลูมิเนียมเกรด SSM 356 ประมาณ 45.35 HV และ บริเวณเนื้อโลหะเดิมของอะลูมิเนียมเกรด SSM 6061 ประมาณ 38.45 HV และค่าความแข็งของบริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อนทางกล (TMAZ) ของ SSM 356 ประมาณ 45.08 HV และบริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อนทางกล (TMAZ) ของ SSM 6061 ประมาณ 45.62 HV ส่วนค่าความแข็งของความเร็วหมุนเชื่อม 710 rpm แสดงดังรูปที่ 6(ก) ความแข็งเฉลี่ยที่ตรงกลางแนวเชื่อม (SZ) ประมาณ 51.47 HV ค่าความแข็งของความเร็วหมุนเชื่อม 1000 rpm แสดงดังรูปที่ 6(ข) ความแข็งเฉลี่ยที่ตรงกลางแนวเชื่อม (SZ) ประมาณ 56.31 HV และค่าความแข็งของความเร็วหมุนเชื่อม 1400 rpm แสดงดังรูปที่ 6(ค) ความแข็งเฉลี่ยที่ตรงกลางแนวเชื่อม (SZ) ประมาณ 52.72 HV นอกจากนี้ค่าความแข็งสูงสุด ประมาณ 61.90 HV ที่ความเร็วหมุนเชื่อม 1000 rpm ความเร็วเดินเชื่อม 112 mm/min และค่าความแข็งต่ำสุดที่ความเร็วหมุนเชื่อม 1400 rpm ความเร็วเดินเชื่อม 160 mm/min ประมาณ 32.6 HV

อิทธิพลของความเร็วหมุนเชื่อมกับความเร็วเดินเชื่อมจะมีความสัมพันธ์โดยตรงกับการกระจายตัวของค่าความแข็งที่บริเวณแนวเชื่อม จากการทดลองจะสังเกตเห็นว่ายิ่งความเร็วหมุนเชื่อมสูงขึ้นการกระจายตัวของความแข็งจะมีมากขึ้น ความเร็วเดินเชื่อมที่สูงขึ้นจะทำให้ความแข็งมีการกระจายตัวที่ลดลง แต่เมื่อความเร็วเดินเชื่อมมีค่าสูงมากเกินไป จะส่งผลให้การผสมกันของเนื้อวัสดุมีความไม่สมบูรณ์และจะก่อให้เกิดรูโพรงขึ้นในบริเวณแนวเชื่อม ความแข็งบริเวณดังกล่าวจะมีค่าต่ำ ทั้งนี้ความสัมพันธ์ของค่าทั้งสองกับความแข็งจะมีผลอย่างมีนัยสำคัญ

4. สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

4.1 สรุปผลการวิจัย

กระบวนการเชื่อมเสียดทานแบบกวน สามารถเชื่อมต่อชนวัสดุต่างชนิด ระหว่างอะลูมิเนียมหล่อกิ่งของแข็ง SSM 356 กับ SSM 6061 ได้อย่างมีประสิทธิภาพ และจากการทดลองศึกษาตัวแปรในการเชื่อมที่มีผลต่อสมบัติทางกลของแนวเชื่อม ผลการทดลองสามารถสรุปได้ดังนี้

1) ลักษณะโครงสร้างบริเวณแนวกวน จะเป็นโครงสร้างที่เกิดขึ้นใหม่ ซึ่งจะประกอบด้วยเนื้อวัสดุของทั้งสองชนิด โดยที่เกรนจะมีขนาดเล็กกลงและมีความละเอียดเพิ่มขึ้น

2) โครงสร้างทางจุลภาคของแนวเชื่อมมีความละเอียดมากกว่า เมื่อเทียบกับโครงสร้างเดิมของเนื้อโลหะเดิม ยิ่งความเร็วหมุนเชื่อมที่สูงขึ้นโครงสร้างของเกรนจะมีความละเอียดมากขึ้น ที่ความเร็วเดินเชื่อมลดลงโครงสร้างเกรนก็จะมีขนาดละเอียดเพิ่มขึ้นด้วยเช่นกัน และสังเกตเห็นว่าโครงสร้างเกรนที่ด้านบนซึ่งใกล้กับปากของตัวกวนจะมีความละเอียดมากกว่าเมื่อเทียบกับด้านล่างของแนวเชื่อม เนื่องจากความร้อนด้านบนที่สูงกว่าส่งผลให้เกรนมีความละเอียดมากกว่าด้วย

3) ผลการทดสอบสมบัติทางกล ค่าความแข็งแรงพบว่าความเร็วหมุนเชื่อมสูงขึ้น ค่าความแข็งแรงจึงจะมีค่าเพิ่มขึ้น ในทางกลับกันที่ความเร็วเดินเชื่อมที่สูง ค่าความแข็งแรงจึงจะมีค่าน้อยลง ที่ความเร็วหมุนเชื่อม 1,400 rpm ความเร็วเดินเชื่อมที่ 112 mm/min ให้ค่าความแข็งแรงสูงสุด 175.40 MPa

4) ผลการทดสอบสมบัติทางกล ค่าความแข็งของแนวเชื่อม โดยที่ค่าความแข็งสูงสุด ประมาณ 61.90 HV

ที่ความเร็วหมุนเชื่อม 1000 rpm ความเร็วเดินเชื่อม 112 mm/min และค่าความแข็งต่ำสุดที่ความเร็วหมุนเชื่อม 1400 rpm ความเร็วเดินเชื่อม 160 mm/min ประมาณ 32.6 HV

4.2 ข้อเสนอแนะ

1) ก่อนการเชื่อมควรตรวจสอบผิวของแผ่นงานเชื่อมก่อนทำการเชื่อมเพื่อป้องกันคราบสกปรกต่างๆ ติดกับผิว เพราะคราบสกปรกต่างๆ อาจจะทำให้เกิดความบกพร่องในรอยเชื่อมได้

2) ก่อนทำการเชื่อมควรเชื่อมชิ้นงานทดลอง เพื่อที่จะให้ความร้อนเกิดการสะสมในแผ่นรองชิ้นงานก่อน อีกทั้งเพื่อไล่ความชื้นในแผ่นรองชิ้นงานด้วย

3) การยึดจับชิ้นงานเชื่อมบนจิ๊ก ควรขันสกรูให้แน่น เพราะขณะทำการเชื่อมจะมีแรงกดและการสั่นสะเทือนขึ้น หากสกรูไม่แน่นพออาจจะทำให้ชิ้นงานมีการเคลื่อนได้

4) ควรมีการทำกระบวนการทางความร้อนของอะลูมิเนียมคือ T6 ดังนั้นควรศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับสถานะทางความร้อนที่เหมาะสมต่อการผ่านกระบวนการทางความร้อนหลังการเชื่อม

5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนการทำวิจัย จากงบประมาณรายได้ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย และผู้วิจัยขอขอบคุณสาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้เครื่องมือและอุปกรณ์ในการทดลอง จนงานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] J. Wannasin, “Diecasting Aluminum Casting Technology for Semi-Solids”, Proceedings of the Conference on Casting TFC-3, Songkhal, Thailand, 2006, pp. 1-12. (in Thai)
- [2] P. Muangjumburee, “The metallurgy of the aluminum” Research report, Department of Mining Engineering and Materials, Faculty of Engineering, Prince of Songkla University, Thailand. 2007.
- [3] W.M. Thomas, E.D. Nicholas, J.C. Needham, M.G. Murch, S.P. Temple and C.J. Dawes, “Friction stir butt welding”, International Patent application, PCT/GB92/02203 and GB patent application, 9125978.8.
- [4] W.M. Thomas and E.D. Nicholas, “Friction stir welding for the transportation industries”, Materials and Design 18, 1997, pp. 269-273.
- [5] O.T. Midling and E.J. Morley, “Friction stir welding”, International patent application, PCT/NO95/00005.
- [6] R.S. Mishra and Z.Y. Ma, “Friction stir welding and processing”, Materials Science and Engineering 50, 2005, pp. 1-78.
- [7] W.B. Lee, Y.M. Yeon and S.B. Jung, “The joint properties of dissimilar formed Al alloys by Friction stir welding according to the fixed location of materials”, Scripta Materialia 49, 2003, pp. 423-428.

- [8] S.G. Lim, S.S. Kim, C.G. Lee and S.J. Kim, “Tensile behavior of friction-stir-welding A356-T6/Al6061-T651 bi-alloy plate”, *Metallurgical and Materials Transaction A* 35A, 2004, pp. 2837-2843.
- [9] M. Ghosh, K. Kumar, S.V. Kailas and A.K. Ray, “Optimization of friction stir welding parameter for dissimilar aluminum alloys”, *Materials and Design* 31, 2010, pp. 3033-3037.
- [10] M. Tehyo, P. Muangjunburee and S. Chuchom., “Friction stir welding of dissimilar joint between semi-solid metal 356 and AA 6061-T651 by computerized numerical control machine”, *Songklanakarin Journal of Science and Technology* 33, 2011, pp. 441-448.
- [11] S.M. Rajiv and W.M. Murray, “*Friction Stir Welding and Processing* (4th ed.)” Wiley Book Company, 2009.
- [12] Y.G. Kim, H. Fujii, T. Tsumura, T. Komazaki and K. Nakata, “Three defect types in friction stir welding of aluminum die casting alloy”, *Materials Science and Engineering A* 415, 2006, pp. 250-254.
- [13] Z.Y. Ma, S.R. Sharma and R.S. Mishra, “Effect of friction stir processing on the microstructure of cast A356 aluminum”, *Material Science and Engineering A* 433, 2006, pp. 269-278.
- [14] O. Hatamleh and A. DeWald, “An investigation of the peening effects on the residual stresses in friction stir welded 2195 and 7075 aluminum alloy joints”, *Journal of Materials Processing Technology* 209, 2009, pp. 4822-4829.
- [15] P. Cavaliere, E. Cerri and A. Squillace., “Mechanical response of 2024-7075 aluminium alloys joined by Friction Stir Welding”, *Journal of Materials Science* 40, 2005, pp. 3669-3676.
- [16] P. Cavaliere, A. De Santis, F. Panella and A. Squillace., “Effect of welding parameter on mechanical and microstructural properties of dissimilar AA 6082 - AA 2024 joints produced by friction stir welding”, *Materials and Design* 30, 2009, pp. 609-616.
- [17] W. Boonchouytan, T. Ratanawilai, P. Muangjunburee and K. Tapasa., “Friction Stir Welded of SSM Cast 356 Aluminium Alloys with T6 Heat Treatment”, *KKU Engineering Journal* 38, No.3 July-September, 2011, pp. 219-232. (in Thai)
- [18] K.J. Colligan, P.J. Konkol, J.J. Fisher and J.J. Pickens, “Friction stir welding demonstrated for combat vehicle construction”, *Welding Journal*, 2003, pp. 1-6.
- [19] S.A. Khodir and T. Shidayanagi, “Friction stir welding of dissimilar AA2024 and AA7075 aluminum alloys”, *Materials Science and Engineering B* 148, 2008, pp. 82-87.