

อิทธิพลของตัวแปรในการเชื่อมเสียดทานอะลูมิเนียมหล่อกึ่งของแข็งต่างชนิด ระหว่าง SSM 356 กับ 7075

Effect of Parameter in Friction Stir Welding Dissimilar Joints of Aluminum Semi-Solid Metal Between SSM 356 and 7075

สุรสิทธิ์ ระวังวงศ์^{a,1,*}, วรพงศ์ บุญช่วยแทน^{a,2} ชาตรี หอมเขียว^{a,3} วรธนพร ชีววุฒิมงคล^{a,4}

^aสาขาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย

^aหน่วยวิจัยเทคโนโลยีการแปรรูปวัสดุ (Materials Processing Technology Research Unit)

1 ถนนราชดำเนินนอก ตำบลบ่อยาง อำเภอเมือง จังหวัดสงขลา 90000

E-mail: ^{1*}surasit.r@rmutsv.ac.th, ²worapong.b@rmutsv.ac.th, ³chatree.h@rmutsv.ac.th, ⁴c.watthanaphon@gmail.com

บทคัดย่อ - งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาอิทธิพลของตัวแปรที่มีผลกระทบต่อโครงสร้างทางจุลภาค และสมบัติทางกล (ความแข็งแรงดึง) ของแนวเชื่อมต่อชนที่ได้จากการเชื่อมเสียดทานแบบกวนระหว่างอะลูมิเนียมผสมหล่อกึ่งของแข็งเกรด 356 กับ 7075 การวางตำแหน่งการเชื่อมให้ เกรด 356 อยู่ด้านรีเทรตติ้งไซด์ และ เกรด 7075 อยู่ด้านแอดวานซ์ไซด์ โดยใช้ตัวกวนทรงกระบอก ตัวแปรที่ใช้ในการทดลองมี 2 ตัวแปร คือ ความเร็วหมุนเชื่อมของตัวกวนที่ 710 1,000 และ 1,400 รอบต่อนาที และความเร็วเดินเชื่อมที่ 80 112 และ 160 มม./นาที ความเร็วหมุนเชื่อมของตัวกวนและความเร็วเดินเชื่อมมีผลกระทบต่อโครงสร้างจุลภาคและสมบัติทางกลของแนวเชื่อม จากการทดลองพบว่าปัจจัยหลักที่ส่งผลต่อค่าความแข็งแรงดึง คือความเร็วหมุนเชื่อม ความเร็วเดินเชื่อม และปัจจัยร่วมระหว่างความเร็วหมุนเชื่อมกับความเร็วเดินเชื่อม โดยมีแนวโน้มว่าเมื่อใช้ความเร็วหมุนเชื่อมสูงมีผลทำให้ค่าความแข็งแรงเพิ่มขึ้น ผลการทดลองที่ความเร็วหมุนเชื่อม 1,400 รอบต่อนาที ความเร็วเดินเชื่อมที่ 112 มม./นาที ให้ค่าความแข็งแรงดึงเฉลี่ยสูงสุด 213 MPa โครงสร้างทางโลหะวิทยาบริเวณแนวเชื่อมประกอบด้วยเนื้อวัสดุของอะลูมิเนียมผสมทั้งสองชนิดที่ละเอียดกว่าเนื้อโลหะเดิม

คำสำคัญ - การเชื่อมเสียดทานแบบกวนวัสดุต่างชนิดอะลูมิเนียมหล่อกึ่งของแข็ง เกรด 356 อะลูมิเนียมหล่อกึ่งของแข็งเกรด 7075 การออกแบบการทดลอง

Abstract - The objective of this research was to investigate the effect of parameters on the microstructure and mechanical properties with butt joints by using friction stir welded between Semi-Solid Metal (SSM) grade 356 and 7075. The base

metal of grade 356 was located on the retreating side and grade 7075 on the advancing side which used the cylindrical pin. The two-variable used in this experiment consists of tool rotation speed; 710 1,000 and 1,400 rpm and welding speed; 80, 112 and 160 mm/min. From the experiment the rotation speed of friction stir and the welding speed had a direct effect on the microstructure and mechanical of welding. The result revealed that the main factor had an effect upon tensile strength which was the rotation speed, the welded speed and cofactor between the rotation speed and the welded speed. The trend showed that the tensile strength increased with high rotation speed. The results of rotation speed 1,400 rpm and welded speed 112 mm/min were the highest tensile strength average 213 MPa. Metallurgical of the welding joint showed that the combined two types of aluminum observed finer grain than the older materials.

Keywords - Friction Stir Welding Dissimilar Joints, Aluminum Semi-Solid Metal (SSM) 356, Aluminum Semi-Solid Metal (SSM) 7075, Design of Experiment

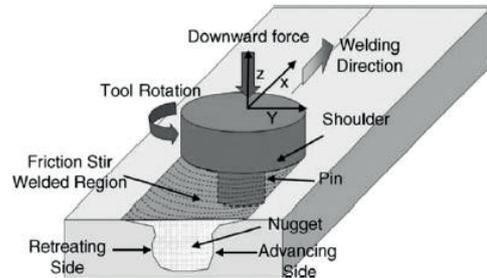
1. บทนำ

อะลูมิเนียมผสมที่ได้จากกรรมวิธีการหล่อโลหะกึ่งของแข็ง (Semi Solid Metal; SSM) โดยใช้เทคโนโลยีการหล่อโดยการพันฟองแก๊สเฉื่อยในน้ำโลหะ (Rheocasting) [1] นั้น ปัญหาหนึ่งในการเชื่อมโลหะกึ่งของแข็งโดยใช้วิธีการเชื่อมแบบหลอมละลาย ก็

คือการรักษาสมบัติทางกลของบริเวณแนวเชื่อม (Mechanical Properties of Joint) ให้ใกล้เคียงกับเนื้อเดิมมากที่สุดเพราะว่าการเชื่อมโดยการหลอมละลาย นอกจากการเกิดรูพรุนแล้ว ยังจะก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างทางโลหะวิทยา ซึ่งจะส่งผลทำให้แนวเชื่อม (Welded Region) รวมถึงบริเวณแนวเชื่อม (Heat Affected Zone; HAZ) มีการเปลี่ยนแปลงและอาจจะทำให้ชิ้นส่วนนั้น ๆ เสียหายได้หรือมีความแข็งแรงต่ำเมื่อนำไปใช้งานจริง

การเชื่อมเสียดทานแบบกวน (Friction Stir Welding; FSW) แสดงดังรูปที่ 1 เป็นการเชื่อมโลหะในสภาวะของแข็ง (Solid State Welding) ที่คิดค้นโดยสถาบันการเชื่อมอังกฤษ (The Welding Institute; TWI) ซึ่งเหมาะสำหรับการเชื่อมวัสดุที่ยากต่อการเชื่อมด้วยกระบวนการเชื่อมแบบหลอมละลาย เช่น อะลูมิเนียมผสมเกรดต่าง ๆ [2-4] กระบวนการเชื่อมเสียดทานแบบกวนทำให้เกิดโครงสร้างของแนวเชื่อมที่มีเกรนเล็กละเอียดสามารถรับแรงได้สูง ซึ่งการเชื่อมแบบหลอมละลายไม่สามารถทำได้ [5] และจะมีความเหมาะสมสำหรับการเชื่อมโลหะที่ไม่ต้องการให้เกิดการหลอมเหลวขึ้น ซึ่งอาจจะส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างทางจุลภาคจากการเย็นตัวจากสภาวะของเหลวไปสู่สภาวะของแข็งได้ตรงกับหลักการของการผลิตอะลูมิเนียมผสมหล่อแบบกึ่งของแข็ง นอกจากนี้การเชื่อมอะลูมิเนียมผสมหล่อแบบกึ่งของแข็งยังเป็นเทคโนโลยีที่ใหม่มาก และยังมีอยู่ในขั้นตอนการวิจัย เมื่อไม่นานมานี้ได้มีผู้ทำการทดลองเชื่อมต่อชนวัสดุต่างชนิดระหว่างอะลูมิเนียมรีดกับอะลูมิเนียมหล่อซึ่งการเชื่อมดังกล่าวนิยมใช้งานกันอย่างแพร่หลายในชิ้นส่วนอากาศยาน โครงสร้างเครื่องบิน และส่วนประกอบซีปนาอวรุ อะลูมิเนียมที่นิยมนำมาเชื่อม เช่น A 356 กับ AA 6061 [6] ได้แสดงให้เห็นว่าสมบัติทางกลของแนวเชื่อมส่วนมากจะขึ้นอยู่กับวัสดุที่อยู่ด้านรีเทรตติงไซด์เนื่องจากโครงสร้างของบริเวณแนวเชื่อมส่วนใหญ่จะประกอบขึ้นจากเนื้อวัสดุที่อยู่ด้านรีเทรตติงไซด์ (Retreating Side; RS) นอกจากนี้ได้มีการทดลองเชื่อม A 356-T6 กับ AA 6061-T651 [7] ที่แสดงผลของแนวเชื่อมที่มีค่าความต้านทานแรงดึงต่ำอันเป็นสาเหตุมาจากการเกิดโครงสร้างใหม่ที่บริเวณแนวเชื่อมโดยมีการกระจายตัวของอนุภาคซิลิคอนตลอดความยาวของแนวเชื่อม ส่งผลให้บริเวณขอบเกรนเป็นจุดเริ่มต้นของการแตกหักจากการดึงจากการศึกษาผลของความเร็วหมุนเชื่อม และความเร็วเดินเชื่อมของแนวเชื่อม A 356 กับ AA 6061-T6 [8] ได้ผลที่ชี้ให้เห็นว่าการเปลี่ยนค่าความเร็วหมุนเชื่อมและความเร็วเดินเชื่อมส่งผลโดยตรงต่อโครงสร้างจุลภาคของบริเวณ แนวเชื่อมอย่างมีนัยสำคัญเช่นเดียวกับการเชื่อม SSM 356 กับ AA 6061-T651 [9] พบว่าการปรับเปลี่ยนค่าความเร็วหมุนเชื่อมและความเร็วเดินเชื่อมส่งผลโดยตรงต่อโครงสร้างจุลภาค สมบัติทางกลของบริเวณแนวเชื่อมอย่างมีนัยสำคัญ แต่อย่างไรก็ตามการ

เชื่อมเสียดทานแบบกวนของอะลูมิเนียมผสมต่างชนิดที่ได้จากกระบวนการหล่อแบบกึ่งของแข็ง SSM 356 กับ SSM 7075 ซึ่งเป็นวัสดุใหม่ที่มีโครงสร้างเกรนแบบก้อนกลมนั้นยังเป็นเทคโนโลยีที่ใหม่มากและยังไม่ปรากฏหลักฐานในการทำวิจัยอีกด้วย



รูปที่ 1 การเชื่อมเสียดทานแบบกวน [10]

จากเหตุผลดังกล่าวข้างต้นจึงเป็นที่มาของการเชื่อมอะลูมิเนียมผสมหล่อกึ่งของแข็งต่างชนิด เกรด 356 กับ 7075 ด้วยกระบวนการเชื่อมเสียดทานแบบกวนโดยศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการเชื่อมคือ ปัจจัยความเร็วหมุนเชื่อม และปัจจัยความเร็วเดินเชื่อมที่มีผลกระทบต่อเปลี่ยนแปลงสมบัติทางโลหะวิทยา (โครงสร้าง ทางมหภาค และจุลภาค) และสมบัติทางกลโดยเฉพาะของเนื้อเชื่อม และบริเวณที่มีผลกระทบต่ออันเนื่องมาจากความร้อน (Thermo Mechanical Affected Zone; TMAZ) เพื่อความเหมาะสมด้านโครงสร้างทางมหภาค จุลภาค และสมบัติทางกล

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อ 1) ศึกษาผลการเชื่อมเสียดทานแบบกวนที่มีผลต่อโครงสร้างมหภาค จุลภาค และสมบัติทางกลของแนวเชื่อมอะลูมิเนียมผสมหล่อกึ่งของแข็ง เกรด 356 กับ 7075 และ 2) ศึกษาตัวแปรการเชื่อมเสียดทานแบบกวนที่มีผลต่อสมบัติทางกลของแนวเชื่อมอะลูมิเนียมผสมหล่อกึ่งของแข็ง เกรด 356 กับ 7075

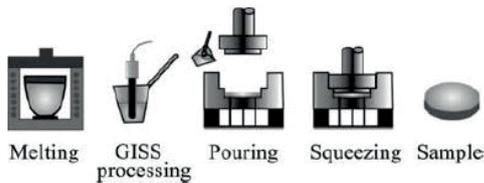
2. วิธีดำเนินการวิจัย

การทดลองนี้ใช้กระบวนการเชื่อมเสียดทานแบบกวนของวัสดุต่างชนิดกัน โดยมีเครื่องมือ วัสดุ และตัวแปรที่ใช้ในการทดลองดังนี้

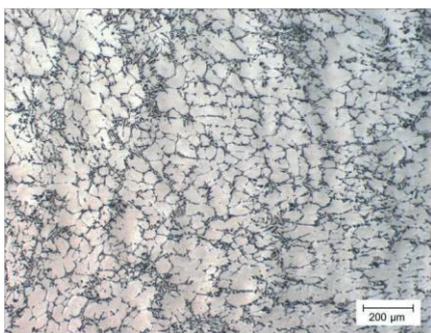
2.1 กรรมวิธีการหล่อขึ้นรูปอะลูมิเนียมกึ่งของแข็ง เกรด 356 และ 7075

ในการวิจัยครั้งนี้โลหะที่นำมาใช้ในการศึกษา คือ อะลูมิเนียมกึ่งของแข็ง เกรด 356 และ 7075 ซึ่งมีส่วนผสมทางเคมี แสดงดังตารางที่ 1 กรรมวิธีการหล่อขึ้นรูปอะลูมิเนียมกึ่งของแข็ง เกรด 356 และ 7075 เริ่มต้นจากการนำอะลูมิเนียมแต่ละเกรดไปบรรจุลงในเบ้าหลอม กราไฟต์ที่อยู่ภายในเตาหลอมไฟฟ้าชนิดขดลวดความต้านทาน เพื่อทำการหลอมละลายอะลูมิเนียมแต่ละเกรดให้กลายเป็นอะลูมิเนียมหลอมเหลวที่อุณหภูมิ 720 องศา

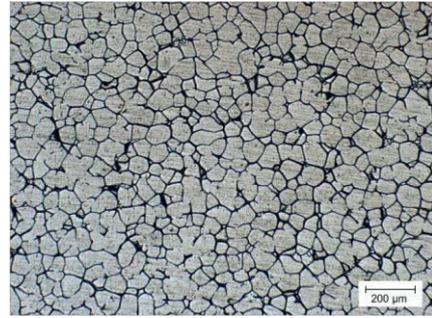
เซลเซียส สำหรับอะลูมิเนียมกึ่งของแข็ง เกรด 356 และที่อุณหภูมิ 730 องศาเซลเซียส สำหรับอะลูมิเนียมกึ่งของแข็ง เกรด 7075 เมื่ออะลูมิเนียมหลอมละลายดีแล้ว จึงทำความสะอาดอะลูมิเนียมหลอมเหลวด้วยฟลักซ์ (Flux) จากนั้นจึงทำการตักอะลูมิเนียมหลอมเหลวจากเตาหลอมประมาณ 500 กรัม เพื่อนำมาเข้าสู่กระบวนการเตรียมโลหะกึ่งของแข็งด้วยวิธีการปล่อยฟองแก๊ส (Gas Induced Semi Solid, GISS Process) เข้าไปในอะลูมิเนียมหลอมเหลวเป็นเวลา 10 วินาที ที่อุณหภูมิ 620 องศาเซลเซียส สำหรับอะลูมิเนียม กึ่งของแข็ง เกรด 356 และที่อุณหภูมิ 640 องศาเซลเซียส สำหรับอะลูมิเนียมกึ่งของแข็ง เกรด 7075 ก่อนนำไปทำการหล่อแบบอัด (Squeeze Casting) เพื่อขึ้นรูปอะลูมิเนียมกึ่งของแข็ง เกรด 356 และ 7075 ให้เป็นชิ้นงานตามต้องการ ภายใต้แรงกดอัดอยู่ที่ 66 เมกะปาสคาล ด้วยเครื่องอัดไฮดรอลิก ขนาด 100 ตัน และอุณหภูมิของแม่พิมพ์ที่ใช้ในการขึ้นรูปอะลูมิเนียมกึ่งของแข็งอยู่ที่ 300 องศาเซลเซียส ดังแสดงในรูปที่ 2 และ รูปที่ 3 แสดงโครงสร้างทางจุลภาคของอะลูมิเนียมกึ่งของแข็ง เกรด 356 และ 7075 ที่ผ่านการขึ้นรูปด้วยกรรมวิธีการหล่อแบบอัดร่วมกับกระบวนการ GISS ก่อนการนำอะลูมิเนียมกึ่งของแข็งทั้งสองเกรดไปทำการเชื่อมเสียดทานแบบกวนต่อไป



รูปที่ 2 แบบจำลองกรรมวิธีการหล่อแบบอัด (Squeeze Casting) ร่วมกับกระบวนการ GISS [1], [11]



(ก)



(ข)

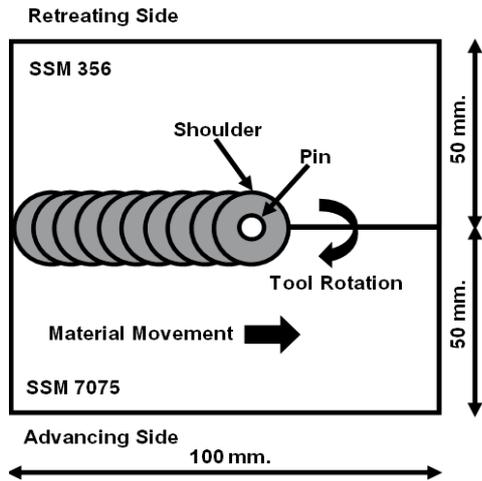
รูปที่ 3 โครงสร้างทางจุลภาคของอะลูมิเนียมที่ผ่านการขึ้นรูปด้วยกรรมวิธีการหล่อแบบอัดร่วมกับกระบวนการ GISS (ก) อะลูมิเนียมกึ่งของแข็ง เกรด 356 และ (ข) อะลูมิเนียมกึ่งของแข็ง เกรด 7075

2.2 ตัวแปรในการทดลอง

วัสดุที่ใช้ในการทดลองคืออะลูมิเนียมผสมที่หล่อด้วยกระบวนการหล่อแบบกึ่งของแข็ง เกรด 356 และ 7075 โดยมีส่วนผสมทางเคมี แสดงดังตารางที่ 1 ชั้นทดสอบมีความหนา 4 มม. ความยาว 100 มม. และความกว้าง 50 มม. แผ่นวัสดุทั้งสองถูกยึดประกอบเป็นรอยต่อชน โดยมีรายละเอียด แสดงดังรูปที่ 4 และยึดแน่นบนอุปกรณ์จับยึดที่ถูกติดตั้งบนแท่นเครื่องกัดแนวตั้ง โดยชิ้นงานจะเคลื่อนที่ไปตลอดความยาวของแนวเชื่อม ลักษณะการวางชิ้นงานได้กำหนดให้ SSM 356 อยู่ด้านรีทreating ไซด์ (Retreating Side; RS) และ SSM 7075 อยู่ด้านแอดวานซิง ไซด์ (Advancing Side; AS)

ตารางที่ 1 ส่วนผสมทางเคมีและความแข็งแรงดึงของวัสดุทดลอง (ร้อยละโดยน้ำหนัก)

Elements	SSM 356	SSM 7075
Si	7.5	0.4
Fe	0.2	0.5
Cu	0.2	2
Mn	0.1	0.3
Mg	0.45	2.9
Zn	0.1	6.1
Ti	0.2	0.2
Cr	0.02	0.28
Ni	0.01	-
Al	Bal.	Bal.
Tensile Strength (MPa)	182	228



รูปที่ 4 การเชื่อมต่อนในการเชื่อมเสียดทานแบบกวน [13]

ในการทดลองจะใช้ตัวกวนรูปทรงกระบอกที่ทำจากเหล็กกล้าเครื่องมือเกรด SKD 11 โดยมีขนาดความโตหัวพิน 3.2 มม. ความยาว 5 มม. และความโตของหัว Shoulder 20 มม. มีลักษณะรูปร่างแสดงดัง รูปที่ 5 การทดลองนี้จะเชื่อมด้วยเครื่องกัดแนวตั้ง โดยเอียงตัวกวน 3 องศา และจะถูกสอดเข้าตรงกลางของรอยเชื่อมโดยห่างจากขอบชิ้นงาน 10 มม. จนกระทั่งได้ความลึกและป่าของตัวกวนสัมผัสกับผิวชิ้นงานตัวกวนจะหมุนอยู่กับที่ ณ จุดเริ่มต้นเป็นเวลา 45 วินาที เพื่อเป็นการกระจายความร้อนให้ทั่วชิ้นงานทดสอบ และเริ่มเดินเชื่อมบนชิ้นงานทดสอบตามตัวแปรที่กำหนดโดยอัตโนมัติ เมื่อถึงปลายแนวเชื่อมตัวกวนก็จะหมุนอยู่กับที่ประมาณ 10 วินาที ก่อนจะยกตัวกวนออกจากแนวเชื่อมโดยตัวแปรในการทดลอง แสดงดังตารางที่ 2



รูปที่ 5 ตัวกวนรูปทรงกระบอกที่ใช้ในการทดลอง

ตารางที่ 2 ตัวแปรและระดับในการทดลอง

ตัวแปรในการเชื่อม	หน่วย	ระดับ		
		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	-	-

จากตารางที่ 2 เป็นการกำหนดตัวแปรและระดับในการทดลอง โดยปัจจัยในการทดลองประกอบด้วย 2 ปัจจัยหลัก คือ ความเร็วหมุนเชื่อม (Rotation Speed) มี 3 ระดับ คือ 710, 1,000 และ 1,400 รอบต่อนาที และความเร็วเดินเชื่อม

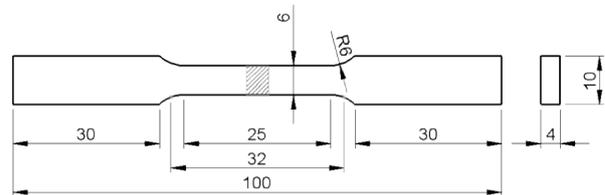
(Welding Speed) มี 3 ระดับ คือ 80 112 160 มม./นาที ซึ่งระดับของปัจจัยการทดลองนี้ได้อ้างอิงจากการทดลองของ Kim. et al. [12] และ Worapong. et al. [13] ซึ่งสอดคล้องกับความสามารถของเครื่องจักรที่ใช้ในการทดลอง และเป็นเครื่องกัดแนวตั้ง ปัจจัยที่ควบคุมคือ การเอียงองศาของตัวกวน 3 องศา (Tool Tilt Angle) ขนาดของตัวกวน (Pin Dimensions) และแรงกดของตัวกวน (Down Force)

2.3 โครงสร้างทางโลหะวิทยา

หลังจากเชื่อมชิ้นงานทดสอบเรียบร้อยแล้วชิ้นทดสอบจะถูกตัดตั้งฉากกับแนวเชื่อม จากนั้นนำไปขัดด้วยกระดาษทราย ผ้าสักหลาดและนำไปกัดกรด (Etching) ด้วยสารละลายเจือจาง Keller's Reagent และนำไปส่องโครงสร้างด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบลำแสง (Optical Microscopes) เพื่อดูลักษณะโครงสร้างทางมหภาคและจุลภาค รวมถึงรูปร่างและขนาดของเกรนที่บริเวณแนวเชื่อมหลังผ่านกระบวนการเชื่อมเสียดทานแบบกวน

2.4 การทดสอบความแข็งแรง

ชิ้นงานที่นำไปทดสอบความแข็งแรง เพื่อหาสมบัติทางกลของแนวเชื่อม โดยชิ้นงานทดสอบจะถูกตัดตั้งฉากกับแนวเชื่อม และให้รอยเชื่อมอยู่ตรงกลางของชิ้นทดสอบ ในการทดสอบความแข็งแรงจะใช้อัตราเร็วในการดึงที่ 1.67×10^2 มม./วินาที ซึ่งขนาดและรูปร่างของชิ้นทดสอบ แสดงดังรูปที่ 6 โดยอ้างอิงตามมาตรฐาน ASTM-E8M



รูปที่ 6 ชิ้นงานทดสอบแรงดึงตามมาตรฐาน ASTM-E8M

2.5 การวิเคราะห์ผลทางสถิติ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาอิทธิพลของตัวแปรในการเชื่อมเสียดทานอะลูมิเนียมหล่อกิ่งของแข็งต่างชนิดระหว่าง เกรด 356 กับ 7075 โดยประยุกต์ใช้สถิติเพื่อทำการเก็บรวบรวมข้อมูล ออกแบบการทดลอง และวิเคราะห์ผลอย่างเป็นระบบ ใช้โปรแกรมมินิแทป รุ่น 16 (Minitab version 16) เป็นเครื่องมือในการวิเคราะห์ผลทางสถิติ โดยมีแนวทางในการออกแบบการทดลอง ดังนี้

1) การหาขนาดสิ่งตัวอย่าง (Sample Size) หรือการหาขนาดของการทำซ้ำ (Replicate) ในการทดลอง ออกแบบการทดลองโดยใช้โปรแกรมมินิแทป รุ่น 16 โดยสถิติที่ใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูลคือ ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ที่ระดับนัยสำคัญ 5%

2) ภายใต้สมมุติฐานหลัก (H_0) ที่ว่าปัจจัยหลัก (Main Effects) ซึ่งประกอบด้วย ความเร็วหมุนเชื่อม และความเร็วเดิน

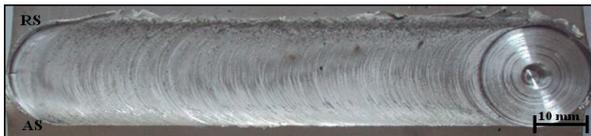
เชื่อม รวมถึงปฏิสัมพันธ์ (Interaction Effects) ไม่มีผลกระทบต่อผลตอบสนอง ซึ่งก็คือค่าความแข็งแรง ผู้วิจัยได้ประยุกต์ใช้การออกแบบการทดลองแบบแฟกทอเรียลแบบ 2 ปัจจัย 3 ระดับ (2^2 Factorial Design) ดังนั้นจำนวนการทดลองที่เป็นไปได้ทั้งสิ้นเท่ากับ 36 การทดลอง และการวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance : ANOVA) จะเป็นวิธีการหลักที่ใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูลในงานวิจัยนี้ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ด้วยค่าระดับนัยสำคัญ 5%

3. ผลการวิจัยและการวิเคราะห์ผล

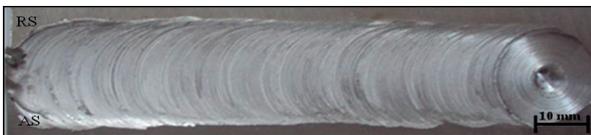
จากการทดลองเชื่อมด้วยกระบวนการเชื่อมเสียดทานแบบกวนของวัสดุต่างชนิดกัน โดยการนำเครื่องกัดแนวตั้งมาประยุกต์ใช้เป็นเครื่องเชื่อมเสียดทานแบบกวน รอยเชื่อมที่ได้มีความสมบูรณ์ ซึ่งคุณลักษณะแนวเชื่อมที่ได้จะเปลี่ยนแปลงไปตามตัวแปรที่ใช้ในแต่ละเงื่อนไขของการเชื่อม และผลที่ได้จากการทดลองสามารถแสดงเป็นประเด็นดังนี้

3.1 ผลของโครงสร้างทางโลหะวิทยา

ลักษณะผิวด้านบนของแนวเชื่อม แสดงดังรูปที่ 7 โดยพบว่าเมื่อเพิ่มความเร็วหมุนเชื่อมขึ้นเรื่อย ๆ จาก 710-1,400 รอบต่อนาที ลักษณะผิวด้านบนของแนวเชื่อมจะมีความหยาบมากขึ้นตามลำดับ และเกิดครีบบริเวณแนวเชื่อมที่ด้านริทเทรตติ้งไซด์มากขึ้นตามลำดับ ลักษณะที่เกิดขึ้นจะเกิดเมื่อค่าแรงกดเดียวกัน แต่ความเร็วหมุนเชื่อมสูง ส่งผลทำให้ความร้อนนำเข้าไปในแนวเชื่อมมีปริมาณมากเกินไป [12] ทำให้เนื้อโลหะมีการอ่อนตัวในขณะที่เครื่องมือเคลื่อนที่เนื้อโลหะจะมีการไหลวน และถูกขับออกมาเป็นครีบบริเวณปลายบ่าของเครื่องมือกวน



(ก) ความเร็วหมุนเชื่อม 710 รอบต่อนาที



(ข) ความเร็วหมุนเชื่อม 1,000 รอบต่อนาที



(ค) ความเร็วหมุนเชื่อม 1,400 รอบต่อนาที

รูปที่ 7 ลักษณะผิวด้านบนของแนวเชื่อมที่ตัวแปรต่าง ๆ

โครงสร้างทางมหภาคของแนวเชื่อมอะลูมิเนียมผสมต่างชนิด โดยการตัดชิ้นทดสอบในทิศทางตั้งฉากกับแนวเชื่อม และให้แนวเชื่อมอยู่ตรงกลางชิ้นทดสอบเช่นเดียวกันบริเวณเขตที่ได้รับผลกระทบจากความร้อนทางกลและบริเวณเนื้อโลหะเดิม ที่แต่ละตัวแปรเชื่อม แสดงดังรูปที่ 8 จากผลการทดลองพบว่าเมื่อความเร็วหมุนเชื่อมเพิ่มขึ้น แนวเชื่อมจะขยายตัวกว้างขึ้น โดยสามารถเปรียบเทียบได้จากความเร็วหมุนเชื่อม 710 กับ 1,400 รอบต่อนาที เพราะความเร็วหมุนเชื่อมที่สูงขึ้นนั้นจะส่งผลให้ความร้อนจากการเสียดทานในเนื้อวัสดุมีค่าเพิ่มขึ้นด้วย แนวเชื่อมมีการผสมกันของอะลูมิเนียมผสมทั้งสองชนิด มีการเกิดครีบขึ้นที่บริเวณขอบของแนวเชื่อม อีกทั้งพบว่าบริเวณที่รอยเชื่อมถูกกวนไม่มีข้อบกพร่องใด ๆ เกิดขึ้นกับรอยเชื่อม รอยเชื่อมมีลักษณะที่ประสานเข้าด้วยกันเป็นอย่างดีของทั้งสองชิ้น ความร้อนจะเกิดการสะสมในรอยเชื่อมอยู่ในสภาวะพลาสติกเกิดการไหลวนรอบ ๆ ตัวกวนเมื่ออะลูมิเนียมเกิดการแข็งตัวโครงสร้างบริเวณรอยเชื่อมจะมีลักษณะที่บดบังคล้ายกับหัวหอมที่มีภาพปรากฏชัดเจน อันเนื่องมาจากแรงกดและความร้อนทำให้การไหลวนของเนื้ออะลูมิเนียมเป็นแบบเรียบและมีทิศทางการไหลวนในลักษณะที่แน่นรอบตัวกวน อีกทั้งพบว่ารอยเชื่อมของความเร็วหมุนของหัวพินสูงจะมีลักษณะรอยเชื่อมที่กว้างกว่ารอยเชื่อมของความเร็วหมุนของหัวพินต่ำ อันเนื่องมาจากความร้อนที่มากกว่าทำให้เนื้ออะลูมิเนียมอยู่ในสภาวะพลาสติกเป็นบริเวณกว้างกว่าการเชื่อมด้วยความเร็วหมุนของหัวพินต่ำ [14]

โครงสร้างทางจุลภาคของแนวเชื่อมอะลูมิเนียมผสมต่างชนิด แสดงดังตารางที่ 3 พบว่าโครงสร้างจุลภาคที่บริเวณเนื้อเชื่อมที่ถูกกวนจะมีการรวมตัวกันของวัสดุทั้งสองชนิดอย่างชัดเจน โดยจะมีการเรียงตัวสลับกันของวัสดุทั้งสอง และที่ตรงกลางเนื้อเชื่อมมีเนื้อวัสดุด้านริทเทรตติ้งไซด์อยู่ด้านล่างและด้านบนจะมีเนื้อของวัสดุด้านแอดวานซิงไซด์ [15] เนื่องจากเนื้อวัสดุถูกขับมาในขณะที่กวนบริเวณด้านแอดวานซิงไซด์ (AS) ของแนวเชื่อมพบว่ามีเนื้อวัสดุของอะลูมิเนียมผสมหล่อกิ่งของแข็ง เกรด 7075 ผสมอยู่โดยเนื้อวัสดุมีความละเอียดมากขึ้นเนื่องจากถูกบดและไหลกระแทกกับเครื่องมือในขณะที่กวน เกรนของอะลูมิเนียมผสมหล่อกิ่งของแข็ง เกรด 356 จะมีลักษณะยาวเรียวยาวเนื่องจากมีการเสียรูปเชิงพลาสติกเนื่องจากตัวกวนบริเวณแนวกวน (SZ) เป็นโครงสร้างของเนื้อวัสดุระหว่างสองชนิดโดยเกรนจะมีความละเอียดและมีขนาดเล็กกว่าเนื้อโลหะเดิม เกรนจะมีความละเอียดมาก โดยเฉพาะอะลูมิเนียมผสมหล่อกิ่งของแข็ง เกรด 7075 ซึ่งด้านบนของบริเวณแนวกวนจะมีเนื้อโลหะชนิดนี้ผสมอยู่เป็นจำนวนมาก เนื่องจากการพัดพาในขณะที่กวน และบริเวณด้านริทเทรตติ้งไซด์ (RS) ของแนวกวนโดยเนื้อวัสดุส่วนใหญ่จะเป็นเนื้อวัสดุของโลหะที่ถูกกำหนดให้อยู่ด้านริทเทรตติ้งไซด์ และเนื้อวัสดุบางส่วนจะมี

การเรียงตัวสลับกันไประหว่างอะลูมิเนียมผสมหล่อกิ่งของแข็งเกรด 356 กับ 7075 [16-17]



(ก) ความเร็วหมุนเชื่อม 710 รอบต่อนาที



(ข) ความเร็วหมุนเชื่อม 1,000 รอบต่อนาที



(ค) ความเร็วหมุนเชื่อม 1,400 รอบต่อนาที

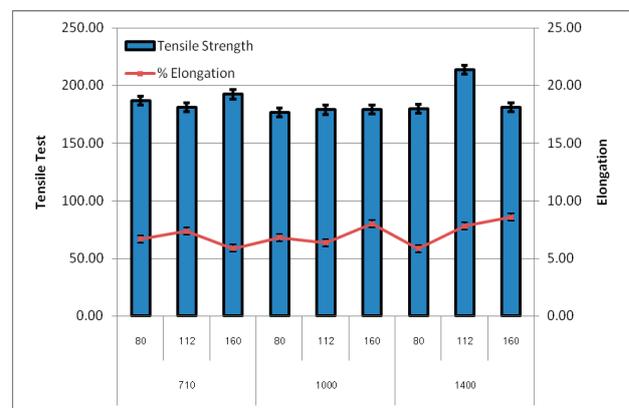
รูปที่ 8 โครงสร้างทางมหภาคของแนวเชื่อม

3.2 ผลของค่าความแข็งแรงดึง

ผลการทดสอบความแข็งแรงแสดงดังรูปที่ 9 พบว่าที่บริเวณแนวเชื่อมของวัสดุต่างชนิดจะมีความแข็งแรงดึงที่ต่ำกว่าเมื่อเทียบกับเนื้อโลหะเดิมของอะลูมิเนียมผสมหล่อกิ่งของแข็ง เกรด 7075 แต่จะสูงกว่าเล็กน้อยเมื่อเทียบกับโลหะเดิม เกรด 356 ที่ค่าความเร็วหมุนเชื่อม 710 รอบต่อนาที เมื่อเพิ่มความเร็วเดินเชื่อมทำให้ค่าความแข็งแรงดึงเพิ่มขึ้น อันเนื่องจากความร้อนที่เกิดจากการเสียดทานสะสมอยู่มากพอ เมื่อเพิ่มความเร็วเดินเชื่อมก็จะไม่ส่งผลทำให้ความร้อนที่สะสมในแนวทวนนั้นต่ำลง แต่กลับช่วยส่งผลให้มีค่าเพิ่มมากขึ้น จึงทำให้ค่าความแข็งแรงดึงเพิ่มขึ้นไป

ด้วย [18] ซึ่งลักษณะดังกล่าวเหมือนกับความเร็วหมุนเชื่อมที่ 1,000 และ 1,400 รอบต่อนาที โดยที่ค่าความแข็งแรงดึงสูงสุด 213.55 MPa ที่ความเร็วหมุนเชื่อมที่ 1,400 รอบต่อนาที ความเร็วเดินเชื่อม 112 มม./นาที อย่างไรก็ตามที่ค่าเปอร์เซ็นต์การยืด (% Elongation) มีค่าที่ กล่าวคือจะมีค่าเปอร์เซ็นต์การยืดของการทดลองทั้งหมดอยู่ในช่วง 5-10 %

ลักษณะการขาดของชิ้นทดสอบจะเกิดขึ้น 2 บริเวณ คือ บริเวณเนื้อโลหะเดิมของอะลูมิเนียมหล่อกิ่งของแข็ง เกรด 356 (Base Metal of SSM 356) และบริเวณเขตที่ได้รับผลกระทบจากความร้อนทางกลของอะลูมิเนียมหล่อกิ่งของแข็ง เกรด 356 (TMAZ of SSM 356) เนื่องจากบริเวณทั้ง 2 เป็นบริเวณที่ค่าความแข็งแรงดึงจะต่ำกว่าบริเวณอื่น



รูปที่ 9 ความแข็งแรงดึงของแนวเชื่อม

ตารางที่ 3 ลักษณะโครงสร้างทางจุลภาค

Rotation Speed (rpm)	TMAZ (RS)	SZ	TMAZ (AS)
710			
1,000			
1,400			

3.3 ผลของการวิเคราะห์ทางสถิติ

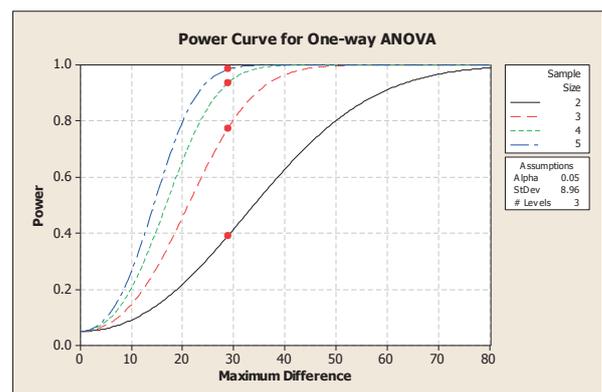
ผลการทดลองทางสถิติเริ่มจากการหาขนาดสิ่งตัวอย่าง โดยค่าสถิติที่ใช้สำหรับวิเคราะห์ข้อมูลคือ ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% โดยการเก็บข้อมูลจากการทดลอง 1 ชั่วโมง ในทุกสภาวะการเชื่อม จากนั้นนำมาหาจำนวนครั้งในการทดลองแต่ละระดับโดยใช้โปรแกรมมินิแทป รุ่น 16 ได้เท่ากับ 4 ตัวอย่าง แสดงดังรูปที่ 10 ซึ่งผลการทดลองจะแบ่งออกเป็น 2 ส่วนคือ การตรวจสอบสมมติฐานของข้อมูล และการวิเคราะห์ความแปรปรวนและผลกระทบของปัจจัยหลักที่มีผลต่อการเชื่อมเสียดทานแบบกวน

3.3.1 การตรวจสอบสมมติฐานของข้อมูล

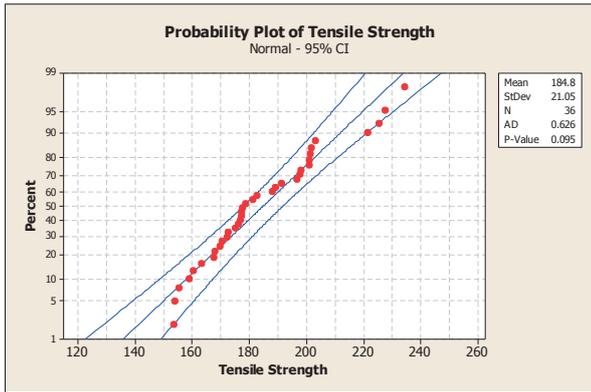
ในการตรวจสอบสมมติฐานของข้อมูลโดยการอาศัยกราฟในการวิเคราะห์ข้อมูลโดยนิยมทำการตรวจสอบ 3 ส่วน กล่าวคือ การตรวจสอบการกระจายตัวแบบแจกแจงปกติ การตรวจสอบเสถียรภาพของความแปรปรวน และการตรวจสอบความเป็นอิสระของข้อมูลดังนี้

การตรวจสอบการกระจายตัวแบบแจกแจงปกติ พบว่าข้อมูลมีลักษณะไม่เป็นเส้นตรง มีบางจุดกระจายตัวออกนอกเส้น จึงทดสอบกราฟการแจกแจงความน่าจะเป็นแบบปกติ (Normal Probability) ที่ α เท่ากับ 0.05 จากกราฟได้ค่า P-Value เท่ากับ

0.095 ดังแสดงในรูปที่ 11 จึงมีข้อมูลสนับสนุนได้ว่า ข้อมูลมีการกระจายตัวเป็นแบบปกติอย่างมีนัยสำคัญ

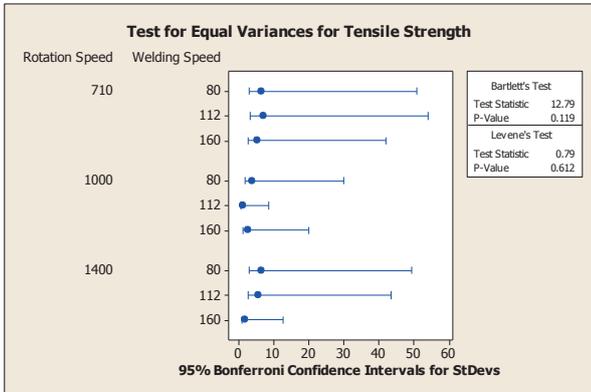


รูปที่ 10 จำนวนครั้งในการทดลองที่เหมาะสม



รูปที่ 11 การกระจายตัวแบบปกติของข้อมูล

การทดสอบความเท่ากันของความแปรปรวนของรอยเชื่อมจากปัจจัยต่าง ๆ เหล่านี้ แสดงว่าความเบี่ยงเบนมาตรฐานในการทดลองทั้งหมด 4 ข้อ ไม่มีความแตกต่างกัน ซึ่งสามารถทดสอบได้จาก Bartlett's Test ผลการคำนวณที่ได้แสดงดังรูปที่ 12 ค่า P-Value เท่ากับ 0.119 มีค่ามากกว่า α เท่ากับ 0.05 แสดงว่าสัดส่วนของความแปรปรวนมีค่าน้อย ความแปรปรวนของการทดลองทั้ง 12 ครั้ง จึงมีค่าเท่ากันหรือมีค่าแตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญ



รูปที่ 12 การทดสอบความเท่ากันของความแปรปรวน

3.3.2 การวิเคราะห์ความแปรปรวนและผลกระทบของปัจจัยหลักที่มีผลต่อการเชื่อมเสียดทานแบบกวน

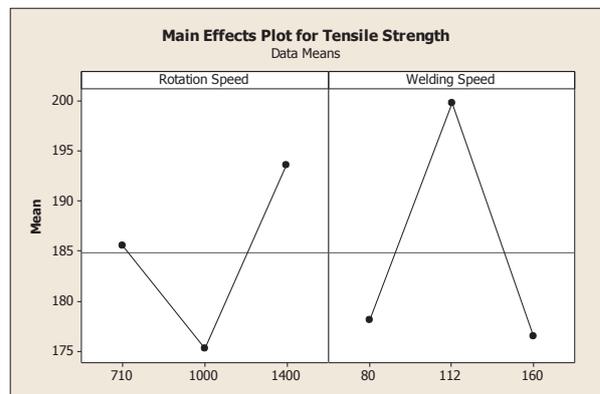
การวิเคราะห์ค่าความแปรปรวนจากการทดลองวัดค่าความแข็งแรงดึงตามที่ได้ออกแบบไว้ได้พบว่า R^2 มีค่าเท่ากับ 95.92 เปอร์เซ็นต์ และค่า Adjust R^2 มีค่าเท่ากับ 94.71 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งมีความหมายว่าถ้าหากความแปรปรวนในข้อมูลมี 100 เปอร์เซ็นต์แล้ว ความแปรปรวน 95.92 เปอร์เซ็นต์ สามารถอธิบายได้ด้วยตัวแบบถดถอยส่วนปริมาณที่เหลือ 4.08 เปอร์เซ็นต์ ไม่สามารถอธิบายได้ เนื่องจากสาเหตุที่ไม่สามารถควบคุมได้ แสดงดังตารางที่ 4

ตารางที่ 4 ผลการวิเคราะห์ค่าความแปรปรวนของค่าความแข็งแรงดึง

Analysis of Variance for Tensile Test, using Adjusted SS for Tests						
Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Rotation Speed	2	2018.2	2018.2	1009.1	43.09	0.000
Welding Speed	2	4040.7	4040.7	2020.3	86.27	0.000
Rotation Speed × Welding Speed	4	8812.9	8812.9	2203.2	94.08	0.000
Error	27	632.3	632.3	23.4		
Total	35	15504.1				

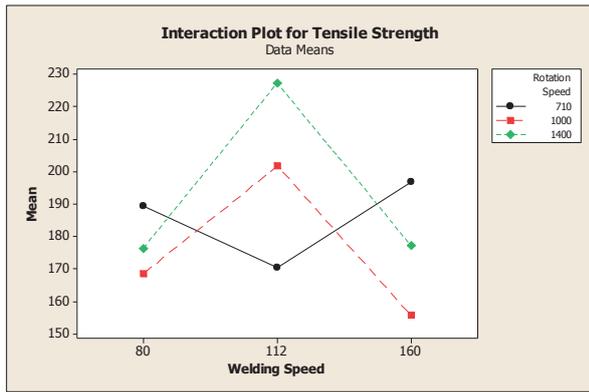
S = 4.83930 R-Sq = 95.92% R-Sq(adj) = 94.71%

การทดลองจากรูปที่ 13 พบว่าปัจจัยหลักที่ส่งผลต่อค่าความแข็งแรงดึงของการเชื่อมเสียดทานแบบกวน คือ ความเร็วหมุนเชื่อม และความเร็วเดินเชื่อม โดยความเร็วหมุนเชื่อมมีแนวโน้มว่าเมื่อเพิ่มความเร็วจาก 710 เป็น 1,000 รอบต่อนาที ค่าความแข็งแรงดึงจะลดลง แต่เมื่อเพิ่มความเร็วหมุนเชื่อมเป็น 1,400 รอบต่อนาที ค่าความแข็งแรงดึงจะเพิ่มขึ้น โดยที่ความเร็วเดินเชื่อมมีแนวโน้มว่าเมื่อเพิ่มความเร็วเดินเชื่อมจาก 80 เป็น 112 มม./นาที ค่าความแข็งแรงดึงจะเพิ่มขึ้น แต่เมื่ออัตราความเร็วเดินขึ้นถึง 160 มม./นาที จะทำให้ค่าความแข็งแรงดึงลดลง



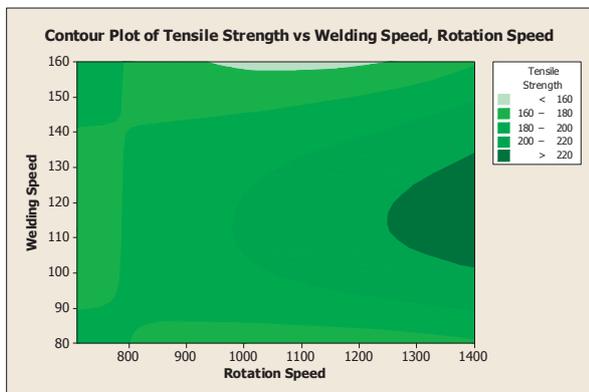
รูปที่ 13 การเปลี่ยนแปลงของค่าความแข็งแรงจากการเปลี่ยนแปลงระดับของปัจจัยหลัก

การทดลองจากรูปที่ 14 พบว่าปัจจัยร่วมที่ส่งผลต่อค่าความแข็งแรงดึงการเชื่อมเสียดทานแบบกวนคือ ความเร็วหมุนเชื่อมและความเร็วเดินเชื่อม โดยความเร็วหมุนเชื่อมที่ 1,000 รอบต่อนาที ร่วมกับความเร็วเดินเชื่อมที่ 160 มม./นาที ค่าความแข็งแรงดึงจะลดลงมากที่สุด ส่วนปัจจัยร่วมอื่น ๆ ก็ส่งผลต่อค่าความแข็งแรงดึงแต่มีระดับที่สูงกว่า



รูปที่ 14 การปฏิสัมพันธ์ของค่าความแข็งแรงดึง

จากผลการคำนวณข้อมูลการทดลองด้วยโปรแกรมประมวลผลทางสถิติ เมื่อกำหนดปัจจัยความเร็วหมุนเชื่อมและความเร็วเดินเชื่อมที่มีอิทธิพลต่อค่าความแข็งแรงดึงของแนวเชื่อมกราฟิครูปร่าง (Contour Plot) แสดงดังรูปที่ 15 ความเร็วหมุนเชื่อมสูงขึ้น ค่าความแข็งแรงดึงของแนวเชื่อมจะเพิ่มมากขึ้น และในขณะที่ความเร็วเดินเชื่อมเพิ่มขึ้นค่าความแข็งแรงดึงของแนวเชื่อมจะเพิ่มขึ้นถึงค่า ๆ หนึ่งแล้ว เมื่อยังเพิ่มความเร็วเดินเชื่อมค่าความแข็งแรงดึงของแนวเชื่อมจะลดลง พื้นที่ตอบสนองของค่าความแข็งแรงดึงของแนวเชื่อมที่ได้รับอิทธิพลจากความเร็วหมุนเชื่อมกับความเร็วเดินเชื่อม



รูปที่ 15 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วหมุนเชื่อมกับความเร็วเดินเชื่อมที่มีอิทธิพลต่อค่าความแข็งแรงดึงในระดับต่าง ๆ

4. สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

กระบวนการเชื่อมเสียดทานแบบกวนสามารถเชื่อมต่อชนวัสดุต่างชนิดระหว่างอะลูมิเนียมหล่อกิ่งของแข็ง เกรด 356 กับ 7075 ได้อย่างมีประสิทธิภาพ และจากการศึกษาอิทธิพลของตัวแปรในการเชื่อมเสียดทานแบบกวนที่มีผลต่อสมบัติทางกลของแนวเชื่อมสามารถสรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะได้ดังนี้

4.1 สรุปผลการวิจัย

- 1) ลักษณะโครงสร้างจุลภาคบริเวณแนวกวนจะเป็นโครงสร้างที่ประกอบด้วยเนื้อวัสดุของทั้งสองชนิด โดยที่เกรนจะมีขนาดเล็กลงและมีความละเอียดเพิ่มขึ้น
- 2) ความเร็วหมุนเชื่อมและความเร็วเดินเชื่อมเป็นปัจจัยสำคัญที่ถูกควบคุม การเปลี่ยนค่าทั้งสองจะทำให้ความร้อนจากการเสียดทานและการกวนมีผลต่อเนื้อโลหะ และสมบัติทางกลของแนวเชื่อมที่ความเร็วหมุนเชื่อมสูงขึ้นค่าความแข็งแรงดึงจะมีค่าเพิ่มขึ้นที่ความเร็วหมุนเชื่อม 1,400 รอบต่อนาที ความเร็วเดินเชื่อมที่ 112 มม./นาที ให้ค่าความแข็งแรงดึงสูงสุด 213 MPa
- 3) การเชื่อมเสียดทานแบบกวนจะเหมาะสำหรับวัสดุที่ยากต่อการเชื่อมแบบหลอมละลาย เช่น อะลูมิเนียม ทองเหลือง เป็นต้น

4.2 ข้อเสนอแนะ

- 1) ก่อนการเชื่อมชิ้นงานทดลองควรเชื่อมชิ้นงานทดลองเพื่อให้เกิดความร้อนสะสมในแผ่นรองชิ้นงานก่อนและเพื่อไล่ความชื้นออก
- 2) ควรศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับสภาวะทางความร้อนที่เหมาะสมต่อการผ่านกระบวนการทางความร้อนหลังการเชื่อม
- 3) งานวิจัยนี้จะเป็นข้อมูลทางวิชาการด้านกระบวนการเชื่อมเสียดทานแบบกวนสำหรับการนำไปประยุกต์ใช้หรือการต่อยอดในเชิงอุตสาหกรรมการเชื่อมต่อไป

5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนจากสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (วช.) และมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัยงบประมาณประจำปี 2556 และขอขอบคุณห้องปฏิบัติการวิศวกรรมเชื่อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] J. Wannasin, "Diecasting aluminum casting technology for semi-solids," presented at Conf. Casting TFC-3, Songkhla, Thailand, 2006.
- [2] W. M. Thomas, E. D. Nicholas, J. C. Needham, M. G. Murch, S. P. Temple, and C. J. Dawes, "Friction stir butt welding," Patent application PCT/ GB92/02203 and GB patent application, No.9125978.8, 1991.
- [3] W. M. Thomas and E. D. Nicholas, "Friction stir welding for the transportation industries," *Materials and Design*, vol. 18, pp. 269-273. 1997.
- [4] O. T. Midling and E. J. Morley, "Friction stir welding," Patent application PCT/NO95/00005, 1998.
- [5] R. S. Mishra and Z. Y. Ma, "Friction stir welding and processing," *Materials Science and Engineering*, vol. 50, pp. 1-78, 2005.

- [6] 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*, vol. 49, pp. 423-428, 2003.
- [7] 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*, vol. 35A: pp. 2837-2843, 2004.
- [8] M. Ghosh, K. Kumar, S. V. Kailas, and A. K. Ray. "Optimization of friction stir welding parameter for dissimilar aluminum alloys," *Materials and Design*, vol. 31, pp. 3033-3037, 2010.
- [9] 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," *Songklanakar J. Sci. Technol*, vol. 33, pp. 441-448, 2011.
- [10] S. M. Rajiv and W. M. Murray, "Friction stir welding and processing," *ASM International*, pp. 1-5, 2007.
- [11] R. Burapa, S. Janudom, T. Chucheep, R. Canyon, and J. Wannasin, "Effects of primary phase morphology on mechanical properties of Al-Si-Mg-Fe alloy in semi-solid slurry casting process," *Trans. Nonferrous Met. Soc*, vol. 20, pp. 857-861, 2010.
- [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*, vol. 415, pp. 250-254, 2006.
- [13] W. Boonchouytan, J. Chatthong, S. Rawangwong, and R. Burapa, "Friction stir welding of dissimilar joint of aluminum semi-solid metal between SSM 356 and SSM 6061," *The Journal of Industrial Technology*, vol. 9, pp. 47-62, 2013.
- [14] Z. Y. Ma, S. R. Sharma, and R. S. Mishra, "Effect of friction stir processing on the microstructure of cast A356 aluminum," *Materials Science and Engineering*, vol. 433, pp. 269-278, 2006.
- [15] O. Hatamleh and A. Wald, "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*, vol. 209, pp. 4822-4829, 2009.
- [16] P. Cavaliere, E. Cerri, and A. Squillace, "Mechanical response of 2024-7075 aluminium alloys joined by friction stir welding," *Journal of Materials Science*, vol. 40, pp. 3669-3676, 2005.
- [17] P. Cavaliere, A. D. 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*, vol. 30, pp. 609-616, 2009.
- [18] N. S. Sundaram and N. Murugan, "Tensile behavior of dissimilar friction stir welded joints of aluminium alloys," *Materials and Design*, vol. 31, pp. 4184-4193, 2010.