



การเชื่อมเสียดทานแบบกวนระหว่าง SSM356-T6 กับ AA6061-T651

Friction Stir Welding between SSM356-T6 and AA6061-T651

มุhammad เต๊ะยอ¹

Muhamad Tehyo¹

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ เพื่อศึกษาผลกระทบของตัวแปรในการเชื่อมเสียดทานแบบกวนของอะลูมิเนียมผสมต่างชนิดระหว่างอะลูมิเนียมหล่อของแข็ง SSM356-T6 กับอะลูมิเนียมรีดผสม AA6061-T651 ที่มีผลต่อโครงสร้างทางโลหะวิทยาและสมบัติทางกลของแนวเชื่อมต่อนั้น ตัวแปรในการทดลองมี 2 ตัวแปร คือ ความเร็วหมุนเชื่อมที่ 1,700, 2,100 และ 2,500 รอบต่อนาที และความเร็วเดินเชื่อมที่ 30, 60, 90 และ 120 มิลลิเมตรต่อนาที จากการทดลองพบว่าความเร็วหมุนเชื่อมและความเร็วเดินเชื่อมมีผลกระทบโดยตรงต่อโครงสร้างทางโลหะวิทยาและสมบัติทางกล โครงสร้างทางโลหะวิทยาบริเวณแนวเชื่อมจะประกอบด้วยเนื้อวัสดุของอะลูมิเนียมผสมทั้งสองชนิดที่มีความละเอียดกว่าเนื้อโลหะเดิม ค่าความแข็งแรงดึงเฉลี่ยสูงสุด 206.9 เมกะปาสคาล ที่ความเร็วหมุนเชื่อม 2,100 รอบต่อนาที ความเร็วเดินเชื่อมที่ 60 มิลลิเมตรต่อนาที จากการวิเคราะห์ผลทางสถิติ พบว่า ปัจจัยของความเร็วหมุนเชื่อมและความเร็วเดินเชื่อมมีผลกระทบต่อสมบัติทางกลของแนวเชื่อมอย่างมีนัยสำคัญ ส่วนปัจจัยร่วมระหว่างความเร็วหมุนเชื่อมกับความเร็วเดินเชื่อมไม่มีผลกระทบอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับ 0.05

คำสำคัญ: การเชื่อมเสียดทานแบบกวน อะลูมิเนียมผสมต่างชนิด

Abstract

The objective of this study is to investigate the effect of parameters on the metallurgical and mechanical properties of friction stir welded of dissimilar aluminum alloys between SSM356-T6 and AA6061-T651. The two welding parameters used in this experiment of rotation speed; 1,700, 2,100 and 2,500 rpm and welding speed; 30, 60, 90 and 120 mm/min. With regard to the experiment, the tool rotation speed and welding speed influence directly on the metallurgical and mechanical properties. The microstructure of the welding which can be characterized both the recrystallized of aluminum alloys. The maximum average values tensile strength of 206.9 MPa. The value was achieved for the joint produced at tool rotation speed 2,100 rpm and welding speed 60 mm/min. The study revealed that the two welding parameters that significantly effect on the tensile strength of the welding were significantly at the level of 0.05.

Keywords: Friction Stir Welding, Dissimilar Aluminum Alloys, Statistical Analysis

¹ สาขาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนราธิวาสราชนครินทร์

¹ Program in Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Princess of Naradhiwas University



บทนำ

ปัจจุบันถือว่าเทคโนโลยีงานเชื่อมโลหะเป็นหัวใจสำคัญของการพัฒนาอุตสาหกรรมด้านต่างๆ ของประเทศ เช่น อุตสาหกรรมการต่อเรือ อุตสาหกรรมยานยนต์ อุตสาหกรรมด้านอากาศยาน ซึ่งอุตสาหกรรมต่างๆ เหล่านี้จะให้สนใจของการศึกษารูปแบบของรอยต่อของวัสดุด้วยกระบวนการเชื่อม ซึ่งเทคนิคของกระบวนการเชื่อมโลหะมีอยู่มากมายหลายวิธีขึ้นอยู่กับแหล่งความร้อนและขั้นตอนในการเชื่อม วิธีการเชื่อมแต่ละชนิดจะมีข้อดีและข้อเสียที่แตกต่างกันออกไป (Brandon & Kaplan, 1997; ประภาศ เมืองจันทร์บุรี, 2550)

ในวงการอุตสาหกรรม การเชื่อมโลหะจะต้องคำนึงถึงผลผลิตด้านโครงสร้างและความแข็งแรงของรอยเชื่อมเป็นหลัก อีกทั้งความเร็วและต้นทุนในการเชื่อมด้วย จึงจำเป็นต้องให้ความสำคัญกับการเลือกใช้เทคนิคการเชื่อม (Welding Process) ให้เหมาะสมกับงานนั้นๆ โดยเฉพาะงานอุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้องกับการขึ้นรูป (Materials forming) และการซ่อม (Repairing) การเชื่อมโลหะด้วยวิธีการเชื่อมเสียดทานแบบกวน (Friction Stir Welding) เป็นวิธีการเชื่อมวิธีหนึ่งที่สามารถเชื่อมวัสดุชนิดเดียวกันหรือต่างกันได้ โดยเฉพาะวัสดุที่ยากต่อการเชื่อมแบบหลอมละลายทั่วไป เช่น อะลูมิเนียม โครงสร้างของแนวเชื่อมที่ได้จากการเชื่อมเสียดทานแบบกวนจะมีลักษณะเกรนที่เล็กละเอียด สามารถรับแรงได้สูง ซึ่งการเชื่อมแบบหลอมละลายทั่วไปไม่สามารถทำได้ (Harris & Norman, 2003; Lee, Yeon & Jung, 2003a, Lee, Yeon, & Jung, 2003b; Lim, Kim, Lee & Kim, 2004; Ghosh, Kumar, Kailas & Ray, 2010) วิธีการเชื่อมเสียดทานแบบกวนจะไม่ก่อให้เกิดสารเคมีที่เป็นอันตรายต่อมนุษย์และสิ่งแวดล้อม อีกทั้งช่วยลดเวลาและต้นทุนในการเชื่อมอีกด้วย (Mishra & Ma, 2005; Zhang, Robson & Prangnell, 2016) จากข้อดีข้างต้นจึงทำให้การเชื่อมเสียดทานแบบกวนเป็นที่ยอมรับกันในวงการอุตสาหกรรมของต่างประเทศ เช่น ในอดีตมีการเชื่อมต่อระหว่างอะลูมิเนียมผสมหล่อ A356 ซึ่งได้จากการหล่อแบบไดคาสต์ธรรมดา กับอะลูมิเนียมผสม AA6061 ซึ่งการเชื่อมต่อประเภทนี้ถูกประยุกต์ใช้กับงานชิ้นส่วนบางประเภทของอากาศยานและชิ้นส่วนเครื่องจักรอื่นๆ

อย่างไรก็ตามการเชื่อมระหว่างอะลูมิเนียมผสมที่ได้จากการหล่อแบบกึ่งของแข็ง SSM356-T6 กับอะลูมิเนียมรีดผสม AA6061-T651 นั้น ยังเป็นเทคโนโลยีที่ใหม่มาก ด้วยเหตุนี้เองจึงเป็นที่มาของการศึกษาวิจัยในการเชื่อมอะลูมิเนียมผสมเกรด SSM356-T6 ซึ่งหล่อโดยเทคโนโลยีการหล่อแบบกึ่งของแข็งกับอะลูมิเนียมรีดผสมเกรด AA6061-T651 ด้วยกระบวนการเชื่อมเสียดทานแบบกวน เพื่อศึกษาความเหมาะสมทางด้านโครงสร้างทางโลหะวิทยาและสมบัติทางกลของแนวเชื่อม และนำผลมาปรับปรุงเพื่อเลือกใช้ตัวแปรในการเชื่อมที่เหมาะสมต่อไป

วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อศึกษาและวิเคราะห์ความเป็นไปได้ในการเชื่อมเสียดทานแบบกวนของอะลูมิเนียมหล่อกึ่งของแข็ง SSM356-T6 กับอะลูมิเนียมรีดผสม AA6061-T651
2. เพื่อศึกษาและวิเคราะห์ถึงตัวแปรที่มีผลกระทบต่อโครงสร้างทางโลหะวิทยาและสมบัติทางกลของแนวเชื่อม รวมทั้งเนื้อโลหะบริเวณที่ใกล้เคียงกับแนวเชื่อม

ระเบียบวิธีวิจัย

1. การออกแบบการทดลอง

ตัวแปรในการทดลองแบ่งออกเป็น 2 ตัวแปร คือ ตัวแปรอิสระ และตัวแปรตาม ซึ่งสามารถแสดงรายละเอียดได้ดังนี้

ตัวแปรอิสระ จากการศึกษาวิเคราะห์ปัจจัยสำคัญในการเชื่อมเสียดทานแบบกวน ทำให้สามารถกำหนดปัจจัยและระดับปัจจัยที่ใช้ในการทดลองได้ดังตารางที่ 1 โดยปัจจัยที่ใช้ในการออกแบบการทดลองประกอบด้วย 2 ปัจจัย ได้แก่ ความเร็วหมุนเชื่อม (Rotation Speed) และความเร็วเดินเชื่อม (Welding Speed) ซึ่งตัวแปรหลักทั้งสองจะมีผลต่อแนวเชื่อมเป็นหลัก โดยแต่ละปัจจัยจะแบ่งออกเป็น 3 และ 4 ระดับ ตามลำดับ ดังต่อไปนี้

- 1) ความเร็วหมุนเชื่อม ประกอบด้วย 3 ระดับ คือ 1,700 2,100 และ 2,500 รอบต่อนาที
- 2) ความเร็วเดินเชื่อม ประกอบด้วย 4 ระดับ คือ 30, 60, 90 และ 120 มิลลิเมตรต่อนาที

ตารางที่ 1 ระดับปัจจัยที่ใช้ในการออกแบบการทดลอง

ปัจจัย (Factor)	ระดับ (Level)
ความเร็วหมุนเชื่อม (Rotation Speed)	1,700 รอบต่อนาที
	2,100 รอบต่อนาที
	2,500 รอบต่อนาที
ความเร็วเดินเชื่อม (Welding Speed)	30 มิลลิเมตรต่อนาที
	60 มิลลิเมตรต่อนาที
	90 มิลลิเมตรต่อนาที
	120 มิลลิเมตรต่อนาที

ตัวแปรตาม ตัวแปรตามที่กำหนดในงานวิจัยนี้ คือ ค่าความแข็งแรงดึงของแนวเชื่อมที่เกิดขึ้นในแต่ละสภาวะการทดลอง โดยใช้วิธีการออกแบบการทดลอง เพื่อศึกษาอิทธิพลของปัจจัยที่มีมากกว่าหนึ่งปัจจัยพร้อมๆ กันที่ส่งผลกระทบต่อค่าความแข็งแรงดึงของแนวเชื่อมที่เกิดขึ้น และทำการทดลอง 3 ซ้ำ ดังนั้นจึงมีการทดลองทั้งหมด 36 การทดลอง

2. การเตรียมชิ้นงาน

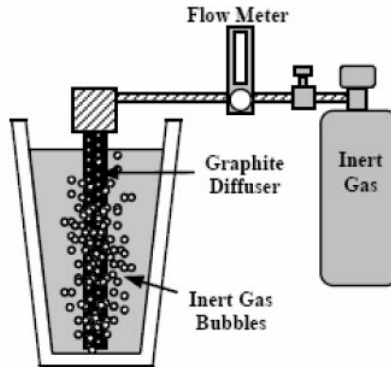
การเตรียมชิ้นงานจะแบ่งออกเป็น 2 ส่วน ส่วนแรกจะเป็นการเตรียมชิ้นงานสำหรับเชื่อม และส่วนที่สองจะเป็นการเตรียมชิ้นงานหลังเชื่อมเพื่อนำไปทดสอบโครงสร้างทางโลหะวิทยาและสมบัติทางกลของแนวเชื่อม (ค่าความแข็งแรงดึง) โดยมีรายละเอียดดังนี้

2.1. การเตรียมชิ้นงานสำหรับเชื่อม เป็นการเตรียมชิ้นงานจากการนำอะลูมิเนียมผสมที่ได้จากการหล่อแบบกึ่งของแข็ง SSM356-T6 กับอะลูมิเนียมรีดผสม AA6061-T651 มาตัดและกัดให้ได้ขนาดความกว้าง ยาว และหนา 50, 100 และ 4 มิลลิเมตร ตามลำดับ จากนั้นนำไปเชื่อมต่อชิ้นในท่าราบ

อะลูมิเนียมหล่อกึ่งของแข็ง SSM356-T6 กรรมวิธีการหล่อขึ้นรูปอะลูมิเนียมหล่อกึ่งของแข็ง SSM356-T6 (T6; Solution heat treatment 540°C 4 hours follow by quenching, Aging 165°C 12 hours) เริ่มต้นจากการนำอะลูมิเนียมไปบรรจุลงในเบ้าหลอมกราฟไฟต์ที่อยู่ภายในเตาหลอมไฟฟ้าชนิดขดลวดความต้านทาน เพื่อทำการหลอมละลายอะลูมิเนียมให้กลายเป็นอะลูมิเนียมหลอมเหลวที่อุณหภูมิ 720 องศาเซลเซียส เมื่ออะลูมิเนียมหลอมละลายดีแล้ว จึงทำความสะอาดอะลูมิเนียมหลอมเหลวด้วยฟลักซ์ (Flux) จากนั้นจึงทำการตัดอะลูมิเนียมหลอมเหลวจากเตาหลอมประมาณ 500 กรัม เพื่อนำมาเข้าสู่กระบวนการเตรียมโลหะกึ่งของแข็งด้วยวิธีการปล่อยฟองแก๊ส (Gas Induced Semi Solid, GISS Process) (Wannasin, Martinez & Flemings, 2006) (ดังแสดงในภาพที่ 1) เข้าไปในอะลูมิเนียมหลอมเหลวเป็นเวลา 10 วินาที ที่อุณหภูมิ 620 องศาเซลเซียส ก่อนนำไปทำการหล่อแบบอัด (Squeeze Casting) เพื่อขึ้นรูปอะลูมิเนียมหล่อกึ่งของแข็ง SSM356



ให้เป็นชิ้นงานตามต้องการ ภายใต้แรงกดอัดอยู่ที่ 66 เมกะปาสคาล ด้วยเครื่องอัดไฮดรอลิก ขนาด 100 ตัน และอุณหภูมิของแม่พิมพ์ที่ใช้ในการขึ้นรูปอะลูมิเนียมหล่อกิ่งของแข็งอยู่ที่ 300 องศาเซลเซียส (ส่วนผสมทางเคมีดังแสดงในตารางที่ 2)



ภาพที่ 1 กรรมวิธีผลิตโลหะกิ่งของแข็งแบบใหม่ด้วยกระบวนการ GISS (Wannasin, Martinez & Flemings, 2006)

อะลูมิเนียมรีดผสม AA6061-T651 เป็นโลหะผสมของอะลูมิเนียมที่มีแมกนีเซียมและซิลิกอนเป็นส่วนผสมสำคัญ สามารถเพิ่มความแข็งแรงได้ด้วยการผ่านกระบวนการบ่มแข็งและดึงเพื่อคลายความเค้นตามกระบวนการ T651 (Solution heat treatment 532°C follow by quenching, Annealing 414°C 2-3 hours, Aging 177°C 8 hours) เพื่อให้ได้ความแข็งแรงสูงสุด อะลูมิเนียมผสมชนิดนี้นิยมใช้งานที่ต้องการทั้งความแข็งแรงสูงร่วมกับความต้านทานต่อการกัดกร่อนที่ดีเยี่ยม เช่น งานโครงสร้างอาคาร (หมุดย้ำ) ราวสะพาน งานท่อขนส่ง สก๊ของเครื่องบินน้ำและเรือแคนู ท่อดูดของเครื่องดูดฝุ่น รางเลื่อนของรถขนของ อุปกรณ์จับยึดชิ้นงาน รวมทั้งงานในยานพาหนะต่างๆ เช่น เรือ รถบรรทุก และอากาศยาน เป็นต้น (ส่วนผสมทางเคมีดังแสดงในตารางที่ 2)

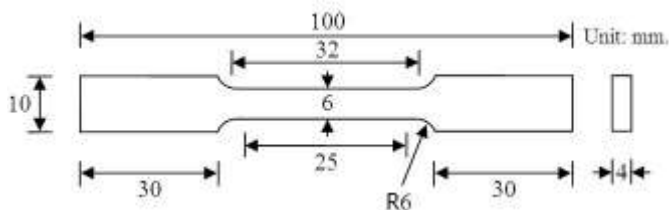
ตารางที่ 2 ส่วนผสมทางเคมี (W.T. %) และสมบัติทางกลของอะลูมิเนียมหล่อกิ่งของแข็ง SSM356-T6 และ AA6061-T651

Materials	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Ti	Cr	Ni	Al
SSM356-T6	7.74	0.57	0.05	0.06	0.32	0.01	0.05	0.02	0.01	Bal.
AA6061-T651	0.60	0.70	0.28	0.15	1.00	0.25	0.15	0.20	-	Bal.
Properties	Ultimate tensile strength (MPa)				Yield strength (MPa)				Elongation (%)	
SSM356-T6	268				184				10.6	
AA6061-T651	290				240				10.2	

2.2. การเตรียมชิ้นงานหลังเชื่อม เมื่อสิ้นสุดกระบวนการเชื่อมตามปัจจัยที่กำหนด ให้นำชิ้นงานไปตัดขวางกับแนวเชื่อมเพื่อทดสอบโครงสร้างทางโลหะวิทยาและทดสอบค่าความแข็งแรงดึงของแนวเชื่อม โดยมีรายละเอียดดังนี้

การเตรียมชิ้นงานสำหรับทดสอบโครงสร้างทางโลหะวิทยา หลังจากเชื่อมชิ้นงานทดสอบเรียบร้อยแล้ว ชิ้นทดสอบจะถูกตัดตั้งฉากกับแนวเชื่อม จากนั้นนำไปขัดด้วยกระดาษทราย ผ่าสักหลาดและนำไปกัดกรด (Etching) ด้วยสารละลายเจือจาง Keller's Reagent และนำไปส่องโครงสร้างด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบลำแสง (Optical Microscopes) เพื่อดูลักษณะโครงสร้างมหภาคและจุลภาคของบริเวณแนวเชื่อม

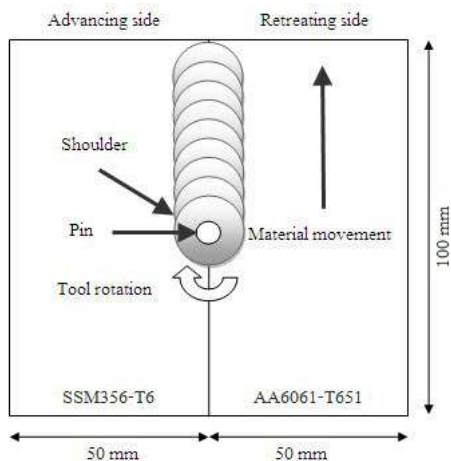
การเตรียมชิ้นงานทดสอบค่าความแข็งแรงดึง ชิ้นงานที่จะนำไปทดสอบค่าความแข็งแรงดึง เพื่อหาสมบัติทางกลของแนวเชื่อม โดยชิ้นงานทดสอบจะถูกตัดตั้งฉากกับแนวเชื่อม และให้รอยเชื่อมอยู่ตรงกลางของชิ้นทดสอบ ในการทดสอบค่าความแข็งแรงดึงจะทดสอบตามมาตรฐานการทดสอบชิ้นงาน ASTM-E8M เพื่อนำชิ้นงานที่ผ่านการจัดเตรียมไปทำการทดสอบหาความแข็งแรงดึงที่อัตราการดึง 1.67×10^{-2} มิลลิเมตรต่อวินาที ซึ่งขนาดและรูปร่างของชิ้นทดสอบจะแสดงรายละเอียดดังภาพที่ 2



ภาพที่ 2 แสดงชิ้นงานทดสอบความแข็งแรงดึงตามมาตรฐาน ASTM-E8M

3. การเชื่อมเสียดทานแบบกวน

สำหรับการเชื่อมเสียดทานแบบกวนนั้น จะเริ่มจากการนำตัวกวนรูปทรงกระบอกที่ผลิตจากเหล็กกล้าเครื่องมือรอบสูงตามมาตรฐาน JIS-SKH57 ขนาดหัวพิน 3.2 มิลลิเมตร ความยาว 5 มิลลิเมตร และขนาดของบ่า (Shoulder) 20 มิลลิเมตร มาติดตั้งเข้ากับตัวจับของเครื่องกัดแนวตั้ง โดยเอียงตัวกวน 3 องศา นำแผ่นวัสดุทั้งสองยึดประกอบเป็นรอยต่อชน โดยมีรายละเอียดดังแสดงในภาพที่ 3 และยึดแน่นบนอุปกรณ์จับยึดที่ถูกติดตั้งบนแท่นเครื่องกัดแนวตั้ง โดยชิ้นงานจะเคลื่อนที่ไปตลอดความยาวของแนวเชื่อม เมื่อทำการจับยึดตัวกวนและชิ้นงานเรียบร้อยแล้ว ให้กดปุ่มสตาร์ทของเครื่องเพื่อให้เครื่องทำงานตามตัวแปรเชื่อมที่กำหนด



ภาพที่ 3 แสดงการเชื่อมต่อการเชื่อมเสียดทานแบบกวน

4. การวิเคราะห์ผลทางสถิติ

งานวิจัยนี้ศึกษาอิทธิพลของตัวแปรในการเชื่อมเสียดทานแบบกวนของอะลูมิเนียมหล่อแข็ง SSM356-T6 กับอะลูมิเนียมรีดผสม AA6061-T651 โดยมีการประยุกต์ใช้สถิติเพื่อทำการเก็บรวบรวมข้อมูล ออกแบบการทดลอง และวิเคราะห์ผลอย่างเป็นระบบ โดยใช้โปรแกรมประมวลผลทางสถิติเป็นเครื่องมือในการวิเคราะห์ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05



ผลการวิจัย

จากการทดลองเชื่อมเสียดทานแบบกวนของอะลูมิเนียมผสมต่างชนิด โดยนำเครื่องกัดมาประยุกต์ใช้เป็นเครื่องเชื่อมเสียดทานแบบกวน รอยเชื่อมที่ได้มีความสมบูรณ์ คุณลักษณะของแนวเชื่อมที่ได้จะเปลี่ยนไปตามตัวแปรที่ใช้ในแต่ละเงื่อนไขของการเชื่อม ซึ่งผลที่ได้จากการทดลองสามารถแสดงเป็นรายละเอียดต่างๆ ได้ดังนี้

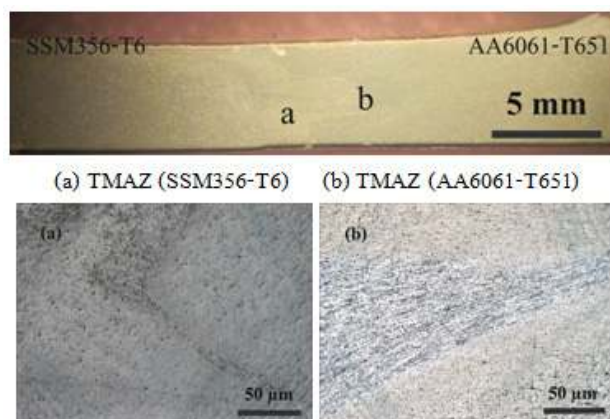
1. ผลของโครงสร้างทางโลหะวิทยา

สำหรับผลการทดสอบโครงสร้างทางโลหะวิทยาที่ประกอบด้วยลักษณะผิวด้านบนของแนวเชื่อม โครงสร้างมหภาคและจุลภาคนั้น จะยกกรณีแนวเชื่อมที่ให้ค่าความแข็งแรงดึงที่ดีที่สุดเท่านั้นมาใช้ในการอธิบาย ซึ่งในที่นี้จะเป็นตัวแปรเชื่อมที่ความเร็วหมุนเชื่อม 2,100 รอบต่อนาที ความเร็วเดินเชื่อม 60 มิลลิเมตรต่อนาที จะเป็นตัวแปรเชื่อมที่ให้ค่าความแข็งแรงดึงสูงสุดคือ 206.9 เมกกะปาสกาล จากผลการทดลองเชื่อมดังแสดงในภาพที่ 4 แสดงถึงลักษณะผิวด้านบนของแนวเชื่อม โดยลักษณะผิวด้านบนของแนวเชื่อมจะมีความเรียบและสม่ำเสมอ เกล็ดของแนวเชื่อมจะมีความละเอียด มีการเกิดครีปที่บริเวณขอบของตัวบนผิวแนวเชื่อม โดยผิวด้านบนของแนวเชื่อมที่ได้ไม่มีข้อบกพร่องใดๆ เกิดขึ้น เช่น การเสียรูป รอยแตกหรือรอยแยก แต่อย่างไรก็ตามลักษณะผิวด้านบนของแนวเชื่อมบ่งบอกถึงผลที่เกิดขึ้นในกระบวนการเชื่อมและสมบัติของแนวเชื่อมด้วย ซึ่งจะส่งผลโดยตรงต่อสมบัติทางกล



ภาพที่ 4 ลักษณะผิวด้านบนของแนวเชื่อม

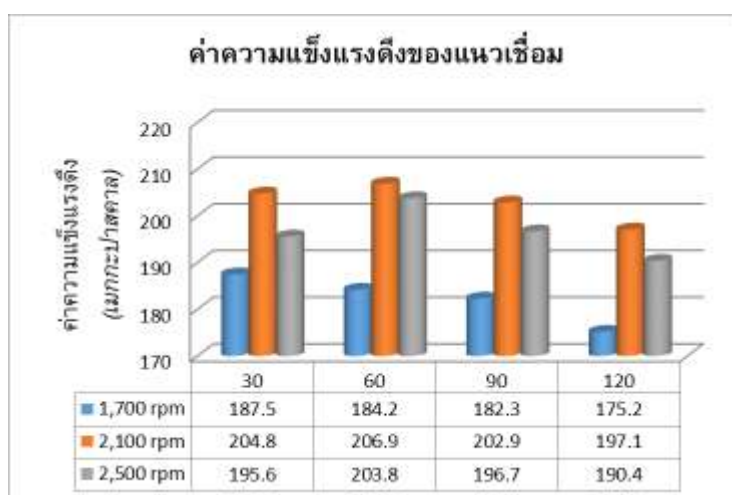
การตรวจสอบโครงสร้างมหภาคและจุลภาคของแนวเชื่อมดังแสดงในภาพที่ 5 พบว่าบริเวณตรงกลางของแนวเชื่อมจะมีโครงสร้างที่เกิดขึ้นใหม่จากการผสมกันของอะลูมิเนียมทั้งสองชนิดขึ้นมาอย่างชัดเจน (ภาพที่ 5 (บน)) โดยจะพบว่า การปรับเปลี่ยนความเร็วหมุนเชื่อมและความเร็วเดินเชื่อมจะส่งผลให้การจัดเรียงตัวของเนื้อวัสดุที่บริเวณแนวเชื่อมเปลี่ยนไป เมื่อพิจารณาความเร็วหมุนเชื่อมที่เพิ่มขึ้นจะพบว่าลักษณะโครงสร้างมหภาคของแนวเชื่อมจะขยายตัวกว้างขึ้น เพราะความเร็วหมุนเชื่อมที่สูงขึ้นนั้นจะส่งผลให้ความร้อนจากการเสียดทานในเนื้อวัสดุมีค่าเพิ่มขึ้นด้วย ในขณะที่เดียวกันเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความเร็วเดินเชื่อม โครงสร้างที่บริเวณแนวเชื่อมจะมีการเปลี่ยนโครงสร้างเช่นกัน จากการทดลองพบว่าความเร็วหมุนเชื่อมเดียวกันแต่ค่าความเร็วเดินเชื่อมเพิ่มขึ้น การเปลี่ยนโครงสร้างของแนวเชื่อมจะมีขนาดที่แคบและเล็กลง เพราะที่ความเร็วเดินเชื่อมยิ่งมาก ความร้อนจากการเสียดทานของตัวกวนกับเนื้อวัสดุจะยิ่งลดลง การกระจายตัวของความร้อนในเนื้อวัสดุมีค่าน้อยจึงส่งผลให้การเปลี่ยนโครงสร้างของเนื้อวัสดุน้อยลงไปด้วย ส่วนโครงสร้างจุลภาค (ภาพที่ 5 (ล่าง)) บริเวณที่ได้รับผลจากความร้อนทางกล (Thermo mechanical affected zone; TMAZ) ด้านแอตวามซิงของแนวเชื่อม (จุด a) พบว่ามีเนื้อวัสดุของ SSM356-T6 มีการแทรกตัวระหว่างเนื้อวัสดุ AA6061-T651 โดยเนื้อวัสดุมีความละเอียดเนื่องจากถูกบดและไหลกระแทกกับตัวกวนในขณะที่กวน เกรนจะมีลักษณะยาวรีเนื่องจากมีการเสียรูปเชิงพลาสติกในขณะที่มีการกวน ส่วนจุด b เป็นบริเวณที่ได้รับผลจากความร้อนทางกลด้านรีทรีตติงของแนวเชื่อม โดยเนื้อวัสดุส่วนใหญ่จะเป็นเนื้อวัสดุของโลหะที่ถูกกำหนดให้อยู่ด้านรีทรีตติง เนื้อวัสดุบางส่วนจะมีการเรียงตัวกันเป็นชั้นๆ สลับกันไป



ภาพที่ 5 ลักษณะโครงสร้างมหภาค (บน) และจุลภาคของแนวเชื่อม (ล่าง)

2. ค่าความแข็งแรงดึง

จากกราฟที่แสดงในภาพที่ 6 เป็นผลการทดสอบความแข็งแรงดึงเฉลี่ย (3 ซ้ำ) ของแนวเชื่อมที่ตัวแปรเชื่อมต่างๆ พบว่า ที่บริเวณแนวเชื่อมของวัสดุต่างชนิดจะมีความแข็งแรงดึงที่ต่ำกว่าเมื่อเทียบกับเนื้อโลหะเดิม ค่าความแข็งแรงดึงเฉลี่ยสูงสุดของแนวเชื่อมอยู่ที่ 206.9 เมกะปาสคาล ที่ความเร็วหมุนเชื่อม 2,100 รอบต่อนาที ความเร็วเดินเชื่อมที่ 60 มิลลิเมตรต่อนาที ซึ่งมีค่าต่ำกว่าค่าความแข็งแรงดึงเฉลี่ยของเนื้อโลหะเดิม แต่ค่าความแข็งแรงดึงเฉลี่ยจะสูงกว่าเมื่อเทียบกับผลงานวิจัยของ Lee, W.B., Yeon, Y.M. และ Jung, S.B. (2003b) ที่ได้เชื่อมอะลูมิเนียมผสม A356 ท่อแบบไดคาสต์ธรรมชาติกับ AA6061 โดยมีความแข็งแรงดึงเฉลี่ยอยู่ที่ 192 เมกะปาสคาล ซึ่งสามารถชี้ให้เห็นชัดว่าแนวเชื่อมของ SSM356-T6 กับ AA6061-T651 จะให้ค่าความแข็งแรงดึงที่สูงกว่าเนื่องจากผลของกระบวนการหล่อที่มีคุณภาพส่งผลให้สมบัติทางกลของวัสดุมีค่าเพิ่มสูงขึ้นไปด้วย รวมทั้งผลจากการเลือกใช้ตัวแปรเชื่อมที่มีความเหมาะสมซึ่งจะช่วยส่งผลให้แนวเชื่อมมีประสิทธิภาพมากขึ้นด้วยเช่นกัน



ภาพที่ 6 ความแข็งแรงดึงของแนวเชื่อมที่ตัวแปรเชื่อมต่างๆ



3. ผลการวิเคราะห์ทางสถิติ

การวิเคราะห์ผลทางสถิติของการทดลองในงานวิจัยนี้ แบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนแรกเป็นการตรวจสอบความถูกต้องของรูปแบบการทดลอง และส่วนที่สองเป็นการวิเคราะห์ความแปรปรวน โดยใช้โปรแกรมประมวลผลทางสถิติในการวิเคราะห์ผลการทดลอง รายละเอียดของการวิเคราะห์ดังกล่าวมีดังต่อไปนี้

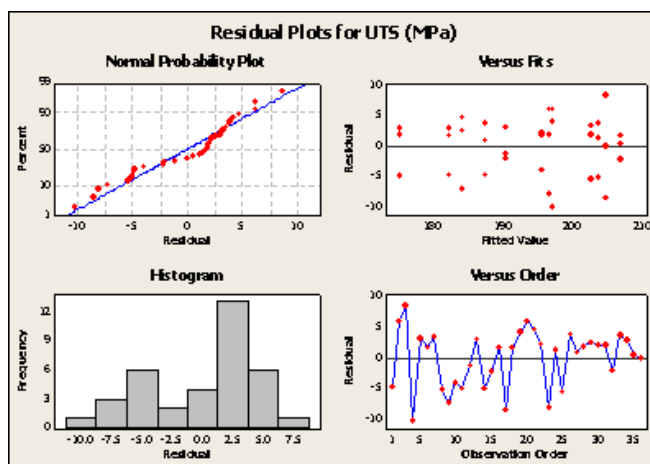
3.1 การตรวจสอบความถูกต้องของรูปแบบการทดลอง

ก่อนจะนำผลการทดลองที่ได้จากการทดลองตามรูปแบบการทดลองที่ได้ออกแบบไว้ไปทำการวิเคราะห์ความแปรปรวนนั้น ต้องมีการตรวจสอบความถูกต้องของรูปแบบการทดลองก่อน โดยในการตรวจสอบจะดูค่าส่วนตกค้าง (Residual) ของข้อมูลว่าผลการทดลองเป็นไปตามสมมติฐานหรือไม่ ได้แก่ ค่าส่วนตกค้างที่จะต้องมีการกระจายตัวแบบปกติ (Normal distribution) มีความเป็นอิสระของข้อมูล (Independently Distribution) และค่าความแปรปรวนมีเสถียรภาพ (Constant variance) เมื่อเป็นไปตามสมมติฐานทั้งหมดข้อมูลที่ได้จากการทดลองจึงสามารถนำไปวิเคราะห์ความแปรปรวนได้ (Montgomery, 2005a, Montgomery, 2005b)

การตรวจสอบการกระจายตัวแบบปกติของข้อมูล เป็นการพิจารณาว่าข้อมูลที่ได้จากการทดลองมีการกระจายเป็นแบบปกติหรือไม่ โดยพิจารณาจากกราฟการกระจายตัวของข้อมูล (Normal probability plot) ว่าเป็นเส้นตรงหรือไม่ (กรณีข้อมูลน้อยกว่า 30 ข้อมูล) ถ้าข้อมูลมีมากกว่า 30 ข้อมูล ให้พิจารณาจากกราฟ Histogram of the Residuals ว่ามีลักษณะกราฟเป็นแบบระฆังคว่ำหรือไม่ จากภาพที่ 7 พบว่าลักษณะกราฟเป็นแบบระฆังคว่ำ แสดงว่าข้อมูลมีการกระจายตัวเป็นแบบปกติ

การตรวจสอบความเป็นอิสระของข้อมูล เป็นการพิจารณาว่าข้อมูลที่ได้จากการทดลองมีความเป็นอิสระหรือไม่ โดยพิจารณาจากลักษณะกราฟ Residual Versus the Order of the Data ว่าข้อมูลมีการกระจายตัวที่ไม่สามารถทำนายหรือคาดเดาได้ว่ามีทิศทางหรือแนวโน้มเป็นอย่างไร จากภาพที่ 7 พบว่าข้อมูลแต่ละค่าที่ได้จากการทดลองมีความเป็นอิสระต่อกัน เนื่องจากลักษณะกราฟที่ได้ไม่สามารถทำนายหรือคาดเดาได้ว่ามีทิศทางที่แน่นอนหรือมีแนวโน้มเป็นอย่างไร

การตรวจสอบความเสถียรภาพของค่าความแปรปรวน เป็นการพิจารณาค่าส่วนตกค้างของข้อมูลเทียบกับค่าตัวแปรตอบสนองจากแบบจำลองการถดถอย โดยการสังเกตค่าความแปรปรวนของข้อมูลว่ามีการกระจายตัวรอบค่าศูนย์คลาดเคลื่อนสม่ำเสมอหรือไม่ โดยพิจารณาจาก Residuals Versus the Fitted Values จากภาพที่ 7 พบว่าข้อมูลมีการกระจายตัวรอบค่าศูนย์ในระดับที่น่าพอใจและสามารถยอมรับได้ เนื่องจากมีลักษณะการกระจายตัวที่ใกล้เคียงกัน จึงสามารถสรุปได้ว่าข้อมูลจากการทดลองมีเสถียรภาพของค่าความแปรปรวน



ภาพที่ 7 การตรวจสอบความถูกต้องของรูปแบบการทดลอง

3.2 การวิเคราะห์ความแปรปรวน

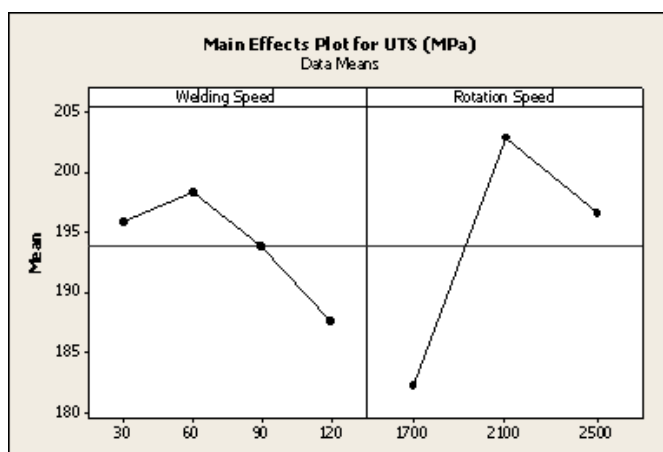
จากผลการตรวจสอบความถูกต้องของรูปแบบการทดลองที่ได้กล่าวมาแล้วในหัวข้อที่ 3.1 นั้น พบว่าข้อมูลที่ได้มีความถูกต้องและเหมาะสม ดังนั้นถือว่าข้อมูลที่ได้จากการทดลองมีความเหมาะสมสำหรับการนำไปวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance; ANOVA) ในลำดับต่อไป ซึ่งในการวิเคราะห์ความแปรปรวนของข้อมูลนั้น จะใช้โปรแกรมประมวลผลทางสถิติ โดยผลที่ได้จะแสดงดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ตาราง ANOVA

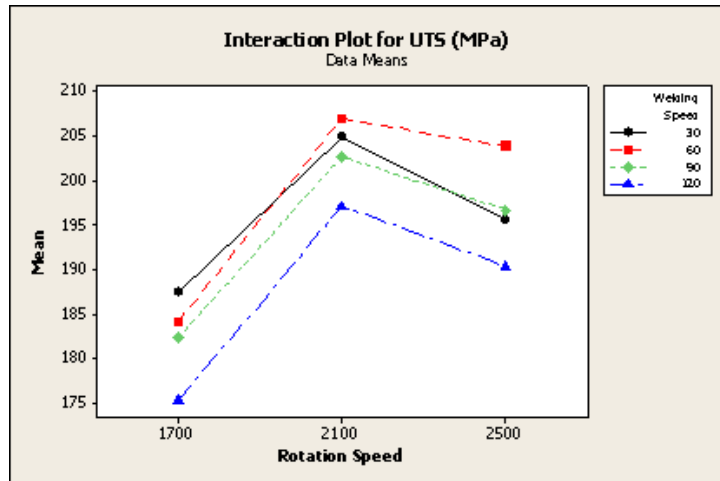
Analysis of Variance for UTS (MPa), using Adjusted SS for Tests						
Source	Degree of Freedom	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Rotation Speed (A)	2	2,671.11	2,671.11	1,335.56	43.01	0.000
Welding Speed (B)	3	574.12	574.12	191.37	6.16	0.003
AB	6	104.08	104.08	17.35	0.56	0.759
Error	24	745.29	745.29	31.05	-	-
Total	35	4,094.60	-	-	-	-

S = 5.57260, R-Sq = 81.80%, R-Sq(adj) = 73.46%

จากตารางที่ 3 พบว่าที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 อิทธิพลของปัจจัยหลัก ได้แก่ ความเร็วหมุนเชื่อม และความเร็วเดินเชื่อม มีอิทธิพลต่อค่าความแข็งแรงดึงของแนวเชื่อมอย่างมีนัยสำคัญ โดยพิจารณาจากค่า P-value ที่ได้นั้นมีค่าน้อยกว่าค่านัยสำคัญ ซึ่งอิทธิพลของปัจจัยหลักจากภาพที่ 8 พบว่าเมื่อค่าความเร็วหมุนเชื่อมเพิ่มขึ้นจาก 1,700 ถึง 2,100 รอบต่อนาที ส่งผลให้ค่าความแข็งแรงดึงของแนวเชื่อมเพิ่มขึ้น หลังจากนั้นจะมีค่าลดลง สำหรับปัจจัยของความเร็วเดินเชื่อม พบว่าเมื่อเพิ่มค่าความเร็วเดินเชื่อมขึ้นจาก 30 ถึง 60 มิลลิเมตรต่อนาที ค่าความแข็งแรงดึงโดยเฉลี่ยของแนวเชื่อมจะมีค่าเพิ่มขึ้น และเมื่อค่าความเร็วเดินเชื่อมเพิ่มจาก 60 มิลลิเมตรต่อนาทีขึ้นไป ค่าความแข็งแรงดึงโดยเฉลี่ยของแนวเชื่อมจะลดลง ที่ความเร็วเดินเชื่อม 60 มิลลิเมตรต่อนาที และความเร็วหมุนเชื่อมที่ 2,100 รอบต่อนาที จะให้ค่าความแข็งแรงดึงเฉลี่ยสูงสุด 206.9 เมกกะปาสกาล

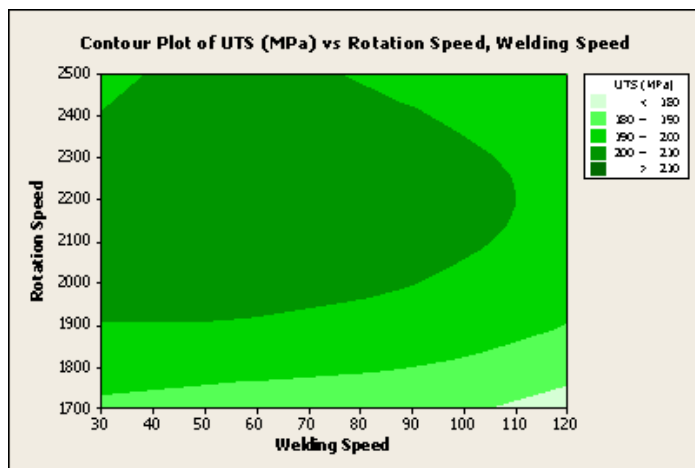


ภาพที่ 8 อิทธิพลของปัจจัยหลัก



ภาพที่ 9 อิทธิพลของปัจจัยร่วมระหว่างสองปัจจัย

ข้อค้นพบจากงานวิจัย พบว่าอิทธิพลของปัจจัยร่วมระหว่างสองปัจจัย ไม่มีอิทธิพลต่อค่าความแข็งแรงดึงของแนวเชื่อม เนื่องจากค่า P-value ที่ได้นั้นมีค่ามากกว่าค่าที่สำคัญ จากภาพที่ 9 พบว่าเมื่อค่าความเร็วหมุนเชื่อมเพิ่มขึ้น ค่าความแข็งแรงดึงเฉลี่ยของแนวเชื่อมจะเพิ่มขึ้นในทุกๆ ความเร็วเดินเชื่อม โดยที่ความเร็วหมุนเชื่อม 2,100 รอบต่อนาที และความเร็วเดินเชื่อม 60 มิลลิเมตรต่อนาที จะให้ค่าความแข็งแรงดึงสูงสุด ส่วนที่ความเร็วหมุนเชื่อม 1,700 รอบต่อนาที ความเร็วเดินเชื่อม 120 มิลลิเมตรต่อนาที จะให้ค่าความแข็งแรงดึงที่ต่ำที่สุด



ภาพที่ 10 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วหมุนเชื่อมกับความเร็วเดินเชื่อมที่มีอิทธิพลต่อค่าความแข็งแรงดึงในระดับต่างๆ

จากผลการคำนวณข้อมูลการทดลองด้วยโปรแกรมประมวลผลทางสถิติ เมื่อกำหนดปัจจัยความเร็วหมุนเชื่อม และความเร็วเดินเชื่อมที่มีอิทธิพลต่อค่าความแข็งแรงดึงของแนวเชื่อม Contour Plot ดังภาพที่ 10 ความเร็วหมุนเชื่อมที่มีค่าสูงขึ้น ค่าความแข็งแรงดึงของแนวเชื่อมจะเพิ่มมากขึ้น และในขณะที่ความเร็วเดินเชื่อมเพิ่มขึ้นค่าความแข็งแรงดึงของแนวเชื่อมจะเพิ่มขึ้นถึงค่าๆ หนึ่งแล้ว เมื่อยิ่งเพิ่มความเร็วเดินเชื่อมค่าความแข็งแรงดึงของแนวเชื่อมจะยิ่งลดลง



อภิปรายผล

จากลักษณะผิวด้านบนของแนวเชื่อม พบว่าที่ความเร็วเดินเชื่อมเดียวกัน ถ้าเพิ่มความเร็วหมุนเชื่อมขึ้นลักษณะผิวด้านบนของแนวเชื่อมจะมีความหยาบมากขึ้นและมีการเกิดครีบริบริเวณแนวเชื่อม ลักษณะครีบริที่เกิดขึ้นจะเกิดเมื่อค่าแรงกดเดียวกัน แต่ความเร็วหมุนเชื่อมที่สูง ส่งผลทำให้ความร้อนนำเข้า (heat input) ในแนวเชื่อมมีปริมาณมากขึ้นไป (สุรสิทธิ์ ระวังวงศ์, วรพงศ์ บุญช่วยแทน, ชาศรี หอมเขียว และวรรณพร ชีววุฒิพงศ์, 2558, Shayan, Tiago, Paulo, & Moreiraa, 2015) เมื่อโลหะมีการอ่อนตัวและมีการเสียรูปเชิงพลาสติกในขณะที่ตัวถ่วงเคลื่อนที่เมื่อโลหะจะมีการไหลวน และถูกขับออกมาเป็นครีบริบริเวณปลายบ่าของตัวถ่วง นอกจากนี้ยังพบว่าแนวเชื่อมที่มีความร้อนจากการเสียดทานที่มากพอ สามารถทำให้เกิดการเชื่อมลึกที่ดี ไม่พบรอยแยกที่เกิดจากการไม่ประสานกันของวัสดุที่แนวเชื่อม

โครงสร้างมหภาคและจุลภาคที่บริเวณแนวเชื่อมเป็นบริเวณที่ถูกถ่วงจะมีการเกิดผลึกใหม่ที่มาจากการรวมตัวกันของวัสดุทั้งสองชนิดอย่างชัดเจน โดยจะมีการเรียงตัวสลับกันของวัสดุทั้งสอง (ซิกแซก) ที่ตรงกลางแนวเชื่อมมีเนื้อวัสดุด้านรีทรีตดิ้งอยู่ด้านล่างและด้านบนจะมีเนื้อของวัสดุด้านแอตตามันข้างผานกันอยู่ เนื่องจากเนื้อวัสดุถูกขับมาในขณะที่เชื่อม โดยเนื้อวัสดุมีความละเอียดมากขึ้นเนื่องจากถูกบดและไหลกระแทกกับตัวถ่วงในขณะถ่วง ลักษณะเกรนของวัสดุทั้งสองชนิดจะยาวเรียวยาวเนื่องจากมีการเสียรูปเชิงพลาสติกเนื่องจากตัวถ่วง

อิทธิพลของความเร็วหมุนเชื่อมและความเร็วเดินเชื่อมมีผลต่อลักษณะโครงสร้างมหภาคและจุลภาคของแนวเชื่อมจากการทดลองจะพบว่าค่าความเร็วหมุนเชื่อมที่สูงขึ้นการเปลี่ยนโครงสร้างที่บริเวณแนวถ่วงจะเปลี่ยนไปด้วย ที่ความเร็วเดินเชื่อมเดียวกันแต่ค่าความเร็วหมุนเชื่อมสูงจะทำให้โครงสร้างบริเวณที่ถูกถ่วงมีลักษณะเกรนที่ละเอียดขึ้นกว่าปกติ เนื่องจากความร้อนจากการเสียดทานที่มาก การเสียรูปของเนื้อวัสดุที่เกิดขึ้นก็จะมากตามไปด้วย ในทางกลับกันเมื่อความเร็วหมุนเชื่อมที่ต่ำลงการเปลี่ยนโครงสร้างบริเวณแนวเชื่อมจะมีพื้นที่แคบกว่าเนื่องจากความร้อนและการกระจายตัวที่ขึ้นงานลดลง ส่วนผลของความเร็วเดินเชื่อมมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างที่บริเวณแนวถ่วง จากการทดลองพบว่าค่าความเร็วหมุนเชื่อมเดียวกันแต่ค่าความเร็วเดินเชื่อมเพิ่มขึ้นลักษณะการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของแนวเชื่อมจะเห็นได้ชัดเจน โดยจะมีการผานกันของเนื้อวัสดุทั้งสองชนิด กล่าวคือที่ความเร็วเดินเชื่อมต่ำจะพบว่าบริเวณแนวถ่วงจะมีการผานกันของวัสดุได้สมบูรณ์กว่าที่บริเวณแนวเชื่อมที่สูง อีกทั้งยังพบว่าลักษณะรอยเชื่อมก็จะมีความกว้างกว่าด้วย อันเนื่องมาจากความเร็วเดินเชื่อมที่ต่ำความร้อนจากการเสียดทานจะมากกว่าทำให้วัสดุที่อยู่ในสภาวะพลาสติกจะมากขึ้นด้วย ที่ความเร็วเดินเชื่อมที่สูงความร้อนจากการเสียดทานจะเกิดขึ้นน้อยทำให้การไหลวนและความเป็นพลาสติกของเนื้อวัสดุเกิดขึ้นไม่สมบูรณ์ (Ma, Sharma & Mishra, 2006; Hatamleh & Wald, 2009; Cavaliere, Cerri, & Squillace, 2005; Cavaliere, Santis, Panella & Squillace, 2009)

จากผลการทดสอบค่าความแข็งแรงดึงของแนวเชื่อมเสียดทานแบบถ่วง พบว่าการปรับเปลี่ยนความเร็วหมุนเชื่อมและความเร็วเดินเชื่อมมีผลโดยตรงต่อค่าความแข็งแรงดึงของแนวเชื่อม การเพิ่มความเร็วหมุนเชื่อมจะส่งผลให้ค่าความแข็งแรงดึงของแนวเชื่อมเพิ่มขึ้น เพราะความเร็วหมุนเชื่อมที่สูงขึ้น ส่งผลทำให้ความร้อนจากการเสียดทานระหว่างตัวถ่วงกับผิวชิ้นงานมีค่าเพิ่มขึ้น การเสียรูปของเนื้อวัสดุจะมีความสมบูรณ์และการผานเป็นเนื้อเดียวกันของวัสดุมีมากขึ้น ส่วนความเร็วเดินเชื่อมซึ่งมีอิทธิพลต่อค่าความแข็งแรงดึงของแนวเชื่อมเช่นกัน เมื่อเพิ่มความเร็วเดินเชื่อมค่าความแข็งแรงดึงของแนวเชื่อมจะมีค่าเพิ่มมากขึ้นถึงค่าๆ หนึ่ง หลังจากนั้นเมื่อเพิ่มความเร็วเดินเชื่อมต่อไปค่าความแข็งแรงดึงก็จะมีค่าน้อยลง เนื่องจากที่ความเร็วเดินเชื่อมที่ต่ำและสูงเกินไป ผลของความร้อนจากการเสียดทานที่มากเกินไปและความร้อนจากการเสียดทานที่ไม่เพียงพอ ความเร็วเดินเชื่อมที่ต่ำจะส่งผลให้โครงสร้างทางโลหะวิทยาของวัสดุมีการเปลี่ยนแปลงที่บริเวณแนวถ่วงและนำไปสู่ผลของค่าความแข็งแรงดึงที่ต่ำกว่าปกติ การเพิ่มความเร็วเดินเชื่อมส่งผลให้ความสามารถในการเกาะตัวของวัสดุลดลง การไหลวนเชิงพลาสติกของวัสดุมีค่าน้อยลงจึงทำให้ค่าความแข็งแรงดึงของแนวเชื่อมลดลง (Colligan, Konkol, Fisher & Pickens, 2003)



สรุป

จากผลการศึกษาปัจจัยของตัวแปรเชื่อมที่มีผลต่อลักษณะโครงสร้างทางโลหะวิทยาและสมบัติทางกลของแนวเชื่อมที่ได้จากการเชื่อมเสียดทานแบบกวนของอะลูมิเนียมผสมต่างชนิด พบว่าแนวเชื่อมสามารถเชื่อมต่อกันได้ และผลของการปรับเปลี่ยนตัวแปรเชื่อมส่งผลให้สมบัติของแนวเชื่อมเปลี่ยนแปลงไปด้วย โดยสามารถสรุปผลได้ดังนี้

1) การเชื่อมเสียดทานแบบกวนสามารถเชื่อมวัสดุที่เป็นอะลูมิเนียมหล่อกิ่งของแข็ง SSM356-T6 กับอะลูมิเนียมรีดผสม AA6061-T651 ได้ โดยลักษณะโครงสร้างทางโลหะวิทยาที่ได้รับบริเวณแนวเชื่อมจะเป็นโครงสร้างที่เกิดขึ้นมาใหม่จากการรวมกันของเนื้อวัสดุทั้งสองชนิด มีเกรนที่ละเอียดและเล็กกว่าเนื้อโลหะเดิม

2) ความเร็วหมุนเชื่อมและความเร็วเดินเชื่อมเป็นปัจจัยสำคัญที่ถูกควบคุมในการทดลอง ที่ความเร็วหมุนเชื่อม 2,100 รอบต่อนาที ความเร็วเดินเชื่อม 60 มิลลิเมตรต่อนาที ให้ค่าความแข็งแรงดึงเฉลี่ยสูงสุดที่ 206.9 เมกะปาสกาล

3) การวิเคราะห์ผลเชิงสถิติของค่าความแข็งแรงดึงของแนวเชื่อม พบว่าความเร็วหมุนเชื่อมและความเร็วเดินเชื่อมมีผลโดยตรงต่อค่าความแข็งแรงดึงของแนวเชื่อมอย่างมีนัยสำคัญ และอิทธิพลของปัจจัยร่วมระหว่างความเร็วหมุนเชื่อมกับความเร็วเดินเชื่อมไม่มีผลกระทบต่อค่าความแข็งแรงดึงของแนวเชื่อมอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับ 0.05

ข้อเสนอแนะ

- 1) ก่อนเชื่อมทุกครั้งควรจับยึดชิ้นงานให้แน่น เพื่อป้องกันการไหลเคลื่อนขณะทำการเชื่อม
- 2) ตัวแปรเชื่อมเสียดทานแบบกวนที่มีผลต่อคุณภาพของแนวเชื่อมมีอยู่มากมายหลายตัวแปร เช่น ความเร็วหมุนเชื่อม ความเร็วเดินเชื่อม แรงกด รูปแบบของตัวกวนและอื่นๆ หากมีผู้สนใจที่จะศึกษาต่อ ควรมีการศึกษาค่าแรงกดและรูปแบบของตัวกวนที่มีรูปทรงอื่นๆ เช่น หัวหกเหลี่ยม หัวสามเหลี่ยม รูปกรวย เป็นต้น เนื่องจากรูปแบบของตัวกวนที่แตกต่างกันจะส่งผลให้การไหลวนของเนื้อวัสดุแตกต่างกัน

รายการอ้างอิง

- ประกาศ เมืองจันทร์บุรี. (2550). การเชื่อมและโลหะวิทยาการเชื่อมอะลูมิเนียม. ใน **รายงานการทดลองการเชื่อมอะลูมิเนียม SSM356**. ภาควิชาวิศวกรรมเหมืองแร่และวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
- สุรสิทธิ์ ระวังวงศ์, วรพงศ์ บุญช่วยแทน, ชชาติ หอมเขียว และวรรณพร ชีวภูมิพงศ์. (2558). อิทธิพลของตัวแปรในการเชื่อมเสียดทานอะลูมิเนียมหล่อกิ่งของแข็งต่างชนิดระหว่าง SSM356 กับ 7075. **วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร**, 10(1), 21-30
- Brandon, D. & Kaplan, W.D. (1997). **Joining Processes, An introduction**. New York: John Wiley & Sons.
- Cavaliere, P., Cerri, E. & Squillace, A. (2005). Mechanical response of 2024-7075 aluminum alloys joined by friction stir welding. **Journal of Materials Science**, 40, 3669-3676.
- Cavaliere, P., Santis, A.D., Panella, F. & Squillace, A. (2009). Effect of welding parameter on mechanical and microstructural properties of dissimilar AA6082-AA2024 joints produced by friction stir welding. **Materials and Design**, 30, 609-616.
- Colligan, K.J., Konkol, P.J., Fisher, J.J. & Pickens, J.R. (2003). Friction stir welding demonstrated for combat vehicle construction. **Welding Journal**, 1-6.
- Ghosh, M., Kumar, K., Kailas, S.V. & Ray, A.K. (2010). Optimization of friction stir welding parameter for dissimilar aluminum alloys. **Materials and Design**, 31, 3033-3037.



- Harris, D. & Norman, A.F. (2003). Properties of Friction Stir Welded Joints: A Review of the Literature. EUROSTIR, **Progress report presented at the 6th PSG Meeting**, 17-18 June 2003.
- Hatamleh, O. & Wald, A. (2009). 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**, 4822-4829.
- Lee, W.B., Yeon, Y.M. & Jung, S.B. (2003a). The joint properties of dissimilar formed Al alloys by Friction stir welding according to the fixed location of materials. **Scripta Materialia**, **49**, 423-428.
- Lee, W.B., Yeon, Y.M. & Jung, S.B. (2003b). The mechanical properties related to the dominant microstructure in the weld zone of dissimilar formed Al alloy joints by friction stir welding. **Materials Science**, **38**, 4183-4191.
- Lim, S.G., Kim, S.S., Lee, C.G. & Kim, S.J. (2004). Tensile Behavior of Friction Stir Welding A356-T6/Al6061-T651 Bi-Alloy Plate. **Metallurgical and Materials Transaction A**, **35A**, 2837-2843.
- Ma, Z.Y., Sharma, S.R. & Mishra, R.S. (2006). Effect of friction stir processing on the microstructure of cast A356 aluminum. **Materials Science and Engineering**, **433**, 269-278.
- Midling, O.T. & Morley, E.J. (1998). **Friction Stir Welding**. International patent application, No. PCT/NO95/00005.
- Mishra, R.S. & Ma, Z.Y. (2005). Friction Stir Welding and Processing. **Materials Science and Engineering**, **50**, 1-78.
- Montgomery, D.C. (2005a). **Introduction of Statistical Quality control** (5th ed.). USA.: John Wiley & Sons Inc.
- Montgomery, D.C. (2005b). **Design and Analysis of Experiments** (6th ed). New York: John Wiley & Sons.
- Shayan, E., Tiago, R., Paulo, J.T. & Moreiraa, P.M.G.P. (2015). Effect of friction stir welding parameters with newly developed tool for lap joint of dissimilar polymers. **Procedia Engineering**, **114**, 199-207
- Thomas, W.M., Nicholas, E.D., Needham, J.C., Murch, M.G., Temple smith, P. & Dawes, C.J. (1991). **Friction Stir Butt Welding**. International Patent application, No. PCT/GB92/02203 and GB patent application, No.9125978.8.
- Thomas, W.M. & Nicholas, E.D. (1997). Friction Stir Welding for the Transportation Industries. **Materials and Design**, **18**, 269-273.
- Wannasin, J., Martinez, R.A. & Flemings, M.C. (2006). A Novel Technique to Produce Metal Slurries for Semi-Solid Metal Processing. **Solid State Phenomena**, **116-117**, 366-369.
- Zhang, C.D., Robson, J.D. & Prangnell, P.B. (2016). Dissimilar ultrasonic spot welding of aerospace aluminum alloy AA2139 to titanium alloy TiAl6V4. **Journal of Materials Processing Technology**, **231**, 382-388.