



การเชื่อมอะลูมิเนียมหล่อทิ้งแข็งระหว่าง SSM356 กับ SSM6061

โดยกรรมวิธีการเชื่อมทิกและการเชื่อมเสียดทานแบบกวน

มุหามัด เต๊ะยอ^{1*}, อามีนา เมฆารัฐ² และประภาศ เมืองจันทร์บุรี³

Welding of Aluminum Alloys between SSM356 and SSM6061 by TIG and Friction Stir Welding Processes

Muhamad Tehyo^{1*}, Amina Mekharat² and Prapas Muangjunburee³

¹สาขาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏวราชนครินทร์ จ.นครราชสีมา 96000

²ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ จ.สงขลา 90112

³ภาควิชาวิศวกรรมเหมืองแร่และวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ จ.สงขลา 90112

¹Program in Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Princess of Naradhiwas University, Narathiwat 96000

²Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Prince of Songkla University, Songkhla 90112

³Department of Mining and Material Engineering, Faculty of Engineering, Prince of Songkla University, Songkhla 90112

* Corresponding author. E-mail address: tehyo_m@hotmail.com

บทคัดย่อ

บทความนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาและเปรียบเทียบสมบัติทางกล รวมไปถึงโครงสร้างมหภาคของรอยเชื่อมต่อชนระหว่างอะลูมิเนียมผสมหล่อทิ้งแข็งต่างชนิดกัน คือ SSM356 และ SSM6061 ในสภาพที่ไม่ได้ผ่านกระบวนการทางความร้อน T6 และผ่านกระบวนการทางความร้อน T6 (as cast และ T6) ด้วยกระบวนการเชื่อมที่แตกต่างกันระหว่างการเชื่อมเสียดทานแบบกวน การเชื่อมทิก แบบเติมสวดและการเชื่อมทิกแบบไม่เติมสวด เป็นการเชื่อมต่อชนชิ้นงานที่มีความหนา 4 มิลลิเมตร ในการวิจัยชิ้นงานที่ไม่ได้ผ่านกระบวนการทางความร้อน T6 นั้น เป็นการวิจัยชิ้นต้นพบว่ากระบวนการเชื่อมทิกแบบเติมสวด การเชื่อมทิกแบบไม่เติมสวด และการเชื่อมเสียดทานแบบกวนสามารถเชื่อมอะลูมิเนียมผสมหล่อทิ้งแข็งต่างชนิดกันได้ดี และจากผลการวิจัยชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการทางความร้อน T6 พบว่าทุกกระบวนการเชื่อมสามารถเชื่อมชิ้นงานได้ กระบวนการเชื่อมที่แตกต่างกันมีผลต่อค่าความแข็งแรงดึง ซึ่งกระบวนการเชื่อมเสียดทานแบบกวนมีค่าความแข็งแรงดึงเฉลี่ยสูงสุด คือ 168.32 MPa ค่าความแข็งแรงของทุกกระบวนการเชื่อมที่บริเวณตรงกลางแนวเชื่อมจะมีค่าความแข็งแรงสูงสุดและค่าความแข็งแรงจะค่อยๆ ลดลงต่ำสุดจนถึงบริเวณที่ได้รับผลกระทบทางความร้อน จากนั้นค่าความแข็งแรงจะเพิ่มขึ้นจนถึงบริเวณของเนื้อโลหะเดิม โดยกระบวนการเชื่อมเสียดทานแบบกวนมีค่าความแข็งแรงเฉลี่ยบริเวณตรงกลางแนวเชื่อมสูงสุด คือ 74.1 HV จากการวิเคราะห์ผลด้วยวิธีการทางสถิติ พบว่ากระบวนการเชื่อมและลักษณะของชิ้นงานมีผลต่อค่าความแข็งแรงดึงของแนวเชื่อมอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

คำสำคัญ: การเชื่อมเสียดทานแบบกวน การเชื่อมทิก ความแข็งแรงดึง

Abstract

The objective of this research was to investigate the mechanical properties and macrostructural analysis of dissimilar aluminum alloys, SSM356 and SSM6061 (as cast and T6) by using different processes: TIG (with filler), TIG (without filler) and Friction stir welding. Aluminum alloys of 4 mm. thickness was used as the base material as for preparing a butt joint welded. The preliminary results of aluminum alloys as cast condition showed that TIG (with filler), TIG (without filler) and Friction stir welding were making a good welded joint of dissimilar aluminum alloys. The result of aluminum alloys by heat treatment (T6) condition showed that different welding process could make dissimilar aluminum alloy joints. The ultimate tensile strength of dissimilar joint by FSW were 168.32 MPa superior to TIG (with filler) and TIG (without filler) welding. The hardness in the weld zone was higher than other areas and would be reduced until it reached the heat affected zone area. After that it would increase up to the base metal area. The average hardness of FSW at the weld zone was at the maximum of 74.1 HV. The study revealed that the two welding parameters that significantly effect on the tensile strength.

Keywords: Friction stir welding, TIG, Tensile Strength

บทนำ

ปัจจุบันอะลูมิเนียมหล่อผสมเป็นวัสดุประเภทหนึ่งที่ยิยมในการนำไปใช้อย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมต่างๆ เช่น อุตสาหกรรมยานยนต์ อุตสาหกรรมอากาศยาน อุตสาหกรรมผลิตชิ้นส่วนเครื่องจักรและอื่น ๆ (Kasman, 2013; Rajakumar, Muralidharan, & Balasubramanian, 2010) เนื่องจากอะลูมิเนียมผสมมีข้อดีหลายประการ เช่น ความหนาแน่นต่ำ มีความแข็งแรงสูง ง่ายต่อการขึ้นรูป มีความต้านทานการกัดกร่อนดี มีน้ำหนักเบา และมีอัตราส่วนของความแข็งแรงต่อน้ำหนักดีกว่าเหล็กกล้าชนิดความแข็งแรงสูง (High strength steels) อีกทั้งยังสามารถนำไปประยุกต์ในกระบวนการผลิตได้หลากหลาย

เทคโนโลยีการหล่อโลหะกึ่งของแข็ง (Semi-solid metal; SSM) เป็นเทคโนโลยีที่มีศักยภาพในการหล่ออะลูมิเนียมแบบไดคาสต์ (Die casting) ซึ่งปัจจุบันมีการใช้เทคโนโลยีการหล่อโลหะกึ่งของแข็งกันทั่วโลก สำหรับประเทศไทยได้มีการวิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีการหล่อโลหะกึ่งของแข็งเช่นกัน ทั้งนี้เพื่อที่จะนำมาประยุกต์ใช้กับอุตสาหกรรมภายในประเทศ โดยเทคโนโลยีที่ได้รับความสนใจและกำลังพัฒนาในขณะนี้ คือ กระบวนการหล่อโลหะกึ่งของแข็งด้วยเทคนิค GISS (Gas induced semi-solid) (Wannasin, Martinezb & Flemings, 2006) เป็นกระบวนการหล่อที่สร้างโลหะกึ่งของแข็งด้วยกรรมวิธีการพ่นฟองแก๊สเฉื่อยผ่านแท่งกราฟไฟต์พูน (แก๊สอาร์กอนหรือไนโตรเจน) เป็นกรรมวิธีการหล่อที่มีเทคนิคและวิธีการคล้ายกับกรรมวิธีการหล่อแบบ Rheocasting ที่มีโครงสร้างของเกรนเป็นแบบก้อนกลม (Spheroidal grain) มีข้อดีคือ โครงสร้างของเกรนมีการกระจายตัวสม่ำเสมอและมีค่ากำลังคราก (Yield strength) เพิ่มขึ้น สมบัติโดยทั่วไปของการหล่อโลหะกึ่งของแข็งมีหลายประการ เช่น มีอุณหภูมิที่ต่ำกว่าจุดหลอมเหลวของโลหะนั้น โลหะเริ่มแข็งตัวบางส่วนแล้วขณะเทใส่แม่พิมพ์มีความหนืดที่สูงกว่าน้ำโลหะ มีความเค้นขณะไหลต่ำกว่าโลหะที่แข็งตัวแล้ว เป็นต้น ซึ่งสมบัติดังกล่าวมีข้อดีหลายประการที่สามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้อย่างหลากหลายในกระบวนการผลิต เช่น ลดการเกิดของเสียจากปฏิกิริยาระหว่างออกซิเจนในขั้นตอนการหล่อโลหะลงในเบ้าและลดการเกิดโพรงหดตัว (Shrinkage) อีกทั้งยังช่วยยืดอายุการใช้งานของแม่พิมพ์เพื่อที่จะนำมาประยุกต์ใช้กับงานอุตสาหกรรมภายในประเทศ โดยเฉพาะที่เกี่ยวข้องกับการขึ้นรูป (Materials forming) และการประกอบชิ้นส่วน เช่น การเชื่อมต่อตัวถังรถยนต์ การเชื่อมซ่อมล้อแม็ก การเชื่อมต่อของชิ้นส่วนเครื่องบินหรือถังเชื้อเพลิงของจรวด และการเชื่อมตัวถังของรถไฟความเร็วสูง ซึ่งชิ้นส่วนดังกล่าวจำเป็นต้องมีการเชื่อมประกอบชิ้นส่วนและการซ่อมแซม (Repairing) เข้ามาเกี่ยวข้องอย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้ อีกทั้งการเชื่อมก็มีบทบาทสำคัญต่อกระบวนการผลิตในด้านการประกอบชิ้นส่วนของผลิตภัณฑ์ ดังนั้นจึงต้องมีการพัฒนาเทคโนโลยีการเชื่อมเข้ามาใช้ในงานอุตสาหกรรมให้เหมาะสมกับสภาพของงาน อีกทั้งกระบวนการเชื่อมก็มีข้อจำกัดที่จะส่งผลกระทบในด้านต่างๆ ทั้งในขณะเชื่อมและภายหลังการเชื่อม โดยเฉพาะชิ้นส่วนที่ทำจากอะลูมิเนียมซึ่งมีหลายประเภทในการนำไปใช้งาน อีกทั้งกระบวนการเชื่อมก็มีอยู่หลายวิธี ดังนั้นในการเลือกกระบวนการเชื่อมมาใช้จะขึ้นอยู่กับความเหมาะสมของประเภทวัสดุและกระบวนการผลิตในงานอุตสาหกรรมนั้นๆ

การเชื่อมอะลูมิเนียมผสมต่างชนิดกัน (Dissimilar joint) ได้มีการประยุกต์ใช้ในงานอุตสาหกรรมต่างๆ กันอย่างแพร่หลาย โดยสามารถนำข้อดีของอะลูมิเนียมแต่ละชนิดมาใช้งานได้อย่างกว้างขวางและมีประสิทธิภาพมากขึ้น แต่อย่างไรก็ตามการเชื่อมอะลูมิเนียมผสมต่างชนิดกันยังมีความยุ่งยากอยู่ เนื่องจากอะลูมิเนียมผสมแต่ละชนิดมีสมบัติทางเคมี ทางกายภาพและสมบัติทางกลที่แตกต่างกัน ซึ่งปัจจุบันการเชื่อมต่อชิ้นส่วนอะลูมิเนียมหล่อต่างชนิดกัน กำลังมีบทบาทในอุตสาหกรรม เช่น อุตสาหกรรมอากาศยาน อุตสาหกรรมยานยนต์ และอุตสาหกรรมซีปนาวุธ เป็นต้น

สำหรับการเชื่อมอะลูมิเนียมผสมหล่อกึ่งแข็ง ปัญหาที่มักพบบ่อยครั้งเมื่อเชื่อมด้วยวิธีการหลอมละลาย คือ การรักษาสมบัติทางกลของบริเวณแนวเชื่อม (Mechanical properties of joint) ให้ใกล้เคียงกับเนื้อโลหะเดิมให้มากที่สุด เนื่องจากการเชื่อมแบบหลอมละลายนั้นจะทำให้เกิดรูพูนบริเวณแนวเชื่อมและทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางโลหะวิทยาที่ส่งผลต่อบริเวณแนวเชื่อมและบริเวณอิทธิพลความร้อน (Heat affected zone; HAZ) การเชื่อมแบบ



หลอมละลายที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายวิธีหนึ่ง คือ การเชื่อมทิก (Tungsten Inert Gas; TIG) เป็นการเชื่อมแบบหลอมละลายที่ใช้แก๊สเฉื่อยปกคลุมบริเวณแนวเชื่อม ส่งผลให้รอยเชื่อมที่ได้มีคุณภาพสูง อีกทั้งสามารถเชื่อมได้ในทุกตำแหน่งของการเชื่อม สำหรับกระบวนการเชื่อมวัสดุต่างชนิดที่ยากต่อการเชื่อมแบบหลอมละลาย นิยมใช้กระบวนการเชื่อมเสียดทานแบบกวน เนื่องจากการเชื่อมในภาวะของแข็ง (Solid state welding) ดังนั้นแนวเชื่อมที่ได้จะมีลักษณะของเกรนที่เล็กละเอียด สามารถรับแรงได้สูง อีกทั้งยังสามารถควบคุมความร้อนในบริเวณแนวเชื่อมได้อีกด้วย (Mishra & Ma, 2005)

จากข้อมูลดังกล่าวมาเบื้องต้นจะเห็นได้ว่าการเชื่อมทิกและการเชื่อมเสียดทานแบบกวนเป็น 2 กรรมวิธีที่ใช้เชื่อมอะลูมิเนียมผสม อย่างไรก็ตามการเชื่อมระหว่างอะลูมิเนียมผสมที่ได้จากกระบวนการหล่อแบบกึ่งของแข็ง SSM356 กับ SSM6061 นั้น เป็นเทคโนโลยีที่ใหม่และยังไม่มีข้อมูลเกี่ยวกับการเปรียบเทียบสมบัติทางกลของบริเวณแนวเชื่อมในการเชื่อมด้วยวิธีที่แตกต่างกัน ด้วยเหตุผลดังกล่าวจึงเป็นที่มาของงานวิจัยนี้ โดยจะศึกษาและเปรียบเทียบสมบัติทางกล รวมไปถึงโครงสร้างมหภาคของรอยเชื่อมระหว่างอะลูมิเนียมผสมหล่อกึ่งแข็ง SSM356 กับ SSM6061 เป็นการเปรียบเทียบวิธีการเชื่อมที่แตกต่างกัน 2 วิธี คือ การเชื่อมทิกและการเชื่อมเสียดทานแบบกวน รวมถึงนำผลที่ได้มาปรับปรุงเพื่อเลือกใช้กรรมวิธีการเชื่อมที่เหมาะสมทั้งในแง่ของงานวิจัยและงานอุตสาหกรรมของประเทศต่อไป

วัตถุประสงค์ของการวิจัย

วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้เพื่อการศึกษาและเปรียบเทียบโครงสร้างมหภาคและสมบัติทางกลของบริเวณแนวเชื่อม บริเวณที่ได้รับผลกระทบทางความร้อน บริเวณเขตอิทธิพลของความร้อนทางกล และเนื้อโลหะเดิมจากการเชื่อมเสียดทานแบบกวนและการเชื่อม ทิกของอะลูมิเนียมหล่อผสมต่างชนิดกัน

วิธีดำเนินการวิจัย

ในงานวิจัยนี้ทำการเชื่อม 3 กระบวนการ คือ การเชื่อมเสียดทานแบบกวน การเชื่อมทิกแบบเติมลวด และการเชื่อมทิกแบบไม่เติมลวด โดยวัสดุที่ใช้ในการทดลองเป็นอะลูมิเนียมหล่อผสมสองชนิด คือ อะลูมิเนียมผสมหล่อกึ่งแข็ง SSM356 และอะลูมิเนียมผสมหล่อกึ่งแข็ง SSM6061 โดยแบ่งอะลูมิเนียมออกเป็นสองกลุ่ม คือ อะลูมิเนียมที่ไม่ได้ผ่านกระบวนการทางความร้อน T6 (as cast) และผ่านกระบวนการทางความร้อน T6 ทำการเชื่อมต่อชนทำราบทำการเชื่อมแต่ละกระบวนการตามเงื่อนไขที่กำหนด หลังจากนั้นนำผลไปวิเคราะห์และสรุปผลการทดลองจากลักษณะโครงสร้างทางมหภาคและการทดสอบสมบัติทางกล

1. ตัวแปรในการทดลอง จากตารางที่ 1 จะแสดงตัวแปรสำคัญในการทดลอง

ตารางที่ 1 ตัวแปรสำคัญในการทดลอง

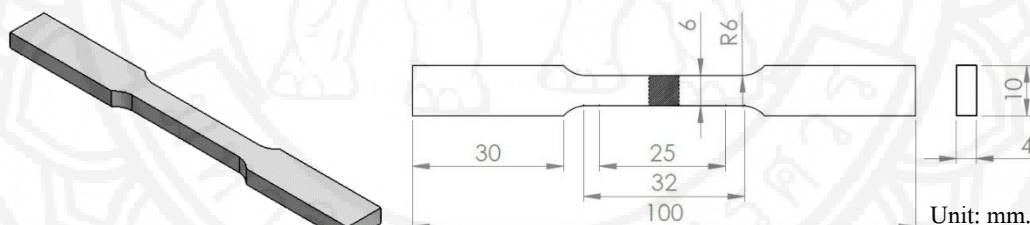
Welding conditions		No filler	Filler
TIG	Current	140 A	140 A
	Arc voltage	15.6 V	15.6 V
	Shield gas	Argon	Argon
	Welding speed	350 mm/min	250 mm/min
	Gas flow rate	15 l/min	15 l/min
	Filler rod type	–	AA4043
	Filler rod diameter	–	2.4 mm.
FSW	Rotation speed	1,400 rpm	–
	Welding speed	112 mm/min	–
	Shoulder diameter	Ø 20 mm.	–
	Pin diameter	Ø 5 mm.	–
	Tool tilt angle	3 degrees	–

2. การตรวจสอบค่าความแข็ง การตรวจสอบค่าความแข็งเป็นการตรวจสอบในระดับไมโครมีหน่วยเป็น Vickers ใช้ชิ้นงานทดสอบชิ้นเดียวกับชิ้นงานทดสอบที่ใช้ในการตรวจสอบโครงสร้างมหภาค เมื่อชิ้นงานทดสอบนำไปตรวจสอบโครงสร้างมหภาคเรียบร้อยแล้ว จึงนำชิ้นงานทดสอบดังกล่าวมาทดสอบความแข็งโดยวัดค่าความแข็งบริเวณภาคตัดขวางของแนวเชื่อมตั้งแต่บริเวณโลหะฐาน บริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อน (HAZ) บริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อนทางกล (TMAZ) บริเวณแนวแกน (SZ) และบริเวณแนวเชื่อม (Weld zone) ออกแรงกดในแนวตั้งฉากกับผิวหน้าชิ้นงานทดสอบด้วยน้ำหนักกด 100 กรัม เวลากด 10 วินาที ระยะห่างของแต่ละจุดที่กด 0.5 มิลลิเมตร



รูปที่ 1 ชิ้นงานขณะทดสอบค่าความแข็ง

3. การตรวจสอบค่าความแข็งแรงดึง การเตรียมชิ้นงานทดสอบหาค่าความแข็งแรงดึง โดยนำชิ้นงานที่ได้จากการตัดตามขวางกับแนวเชื่อม กำหนดให้แนวเชื่อมอยู่ตรงกลางชิ้นงานทดสอบทำการกัดผิวทุกด้านให้มีความเรียบสม่ำเสมอและกัดให้ได้ขนาดตามมาตรฐาน ASTM-E8M ด้วยเครื่องกัดแนวตั้งให้ได้ขนาดดังแสดงในรูปที่ 2 จากนั้นนำชิ้นงานไปทดสอบด้วยเครื่องทดสอบแรงดึงในขั้นตอนต่อไป



รูปที่ 2 ขนาดมาตรฐาน ASTM-E8M ของชิ้นทดสอบ

4. การวิเคราะห์ข้อมูลของค่าความแข็งแรงดึงด้วยวิธีการทางสถิติ งานวิจัยนี้มีปัจจัยหลักที่สำคัญ 2 ปัจจัย คือ กระบวนการเชื่อมและสภาวะชิ้นงาน โดยกระบวนการเชื่อมมี 3 ระดับ คือ กระบวนการเชื่อมเสียดทานแบบกวน กระบวนการเชื่อมทิกแบบเติมลวด และกระบวนการเชื่อมทิกแบบไม่เติมลวด สภาวะชิ้นงานมี 2 ระดับ คือ สภาวะชิ้นงานที่ไม่ได้ผ่านกระบวนการทางความร้อน T6 และสภาวะชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการทางความร้อน T6 ทำการเชื่อมชิ้นงานและกำหนดค่าพารามิเตอร์ในการเชื่อมเป็นแผนการทดลองแบบสุ่ม ตามตารางที่ 2 ทำการเชื่อม 3 ซ้ำ จำนวน 18 ชิ้น หลังจากนั้นนำชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการเชื่อมไปเตรียมเป็นชิ้นงานเพื่อตรวจสอบโครงสร้างมหภาค ทดสอบความแข็ง และทดสอบค่าความแข็งแรงดึงตามมาตรฐาน ASTM-E8M ต่อไป



ตารางที่ 2 การออกแบบแผนการทดลองเชื่อมชิ้นงานแบบสุ่ม

StdOrder	RunOrder	Welding	Material	StdOrder	RunOrder	Welding	Material
6	1	FSW	T6	11	10	FSW	as cast
2	2	TIG1	T6	10	11	TIG2	T6
1	3	TIG1	as cast	8	12	TIG1	T6
4	4	TIG2	T6	16	13	TIG2	T6
3	5	TIG2	as cast	17	14	FSW	as cast
5	6	FSW	as cast	18	15	FSW	T6
9	7	TIG2	as cast	15	16	TIG2	as cast
7	8	TIG1	as cast	14	17	TIG1	T6
12	9	FSW	T6	13	18	TIG1	as cast

หมายเหตุ: TIG1 คือ การเชื่อมทิกแบบเดิมลวด, TIG2 คือ การเชื่อมทิกแบบไม่เดิมลวด และ FSW คือ การเชื่อมเสียดทานแบบกวน

การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ โดยใช้ผลของค่าความแข็งแรงดึงมาทำการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ Minitab release 16 เพื่อช่วยในการคำนวณค่าทางสถิติและทำการวิเคราะห์ผลการทดลองแบบ General full factorial ที่ค่าระดับความเชื่อมั่น 95% โดยการแสดงผลการวิเคราะห์การทดสอบความถูกต้องของตัวแบบ เป็นการวิเคราะห์ด้วยวิธี ANOVA และการพิจารณาสัมประสิทธิ์แสดงการตัดสินใจ

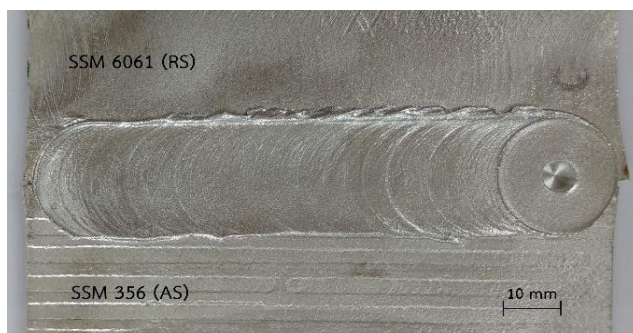
เมื่อทำการทดสอบด้วยวิธี ANOVA หาตัวแปรที่มีผลต่อการทดลองแล้ว สามารถนำข้อมูลมาเปรียบเทียบพหุคูณด้วยวิธี Turkey's HSD test เพื่อหาความแตกต่างในแต่ละระดับของตัวแปรต้นโดยการเปรียบเทียบทีละคู่ เพื่อตรวจสอบหาความแตกต่างระหว่างคู่ตัวแปรที่แตกต่างกันที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

ผลการวิจัยและอภิปราย

1. การตรวจสอบลักษณะทางกายภาพของแนวเชื่อม (Welding surface of welded)

จากกระบวนการเชื่อมเสียดทานแบบกวน การเชื่อมทิกแบบเดิมลวด และการเชื่อมทิกแบบไม่เดิมลวดของ อะลูมิเนียมผสมหล่อแข็งต่างชนิดกันระหว่าง SSM356 และ SSM6061 ที่ไม่ได้ผ่านกระบวนการทางความร้อน T6 และอะลูมิเนียมผสมหล่อแข็งต่างชนิดกันที่ผ่านกระบวนการทางความร้อน T6 ระหว่าง SSM356T6 และ SSM6061T6 โดยมีลักษณะทางกายภาพของแนวเชื่อมในแต่ละกระบวนการเชื่อมดังนี้

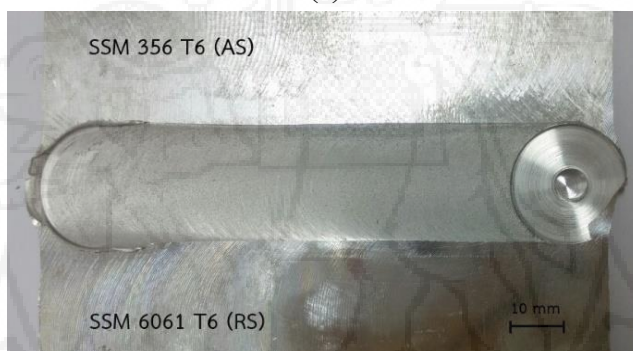
1.1 ลักษณะทางกายภาพของแนวเชื่อมเสียดทานแบบกวน การเชื่อมเสียดทานแบบกวนระหว่างอะลูมิเนียมผสมหล่อแข็งต่างชนิดกันระหว่าง SSM356 และ SSM6061 ที่ไม่ได้ผ่านกระบวนการทางความร้อน T6 แนวเชื่อมจะได้รับอิทธิพลจากความเร็วหมุนหัวทูล 1,400 รอบ/นาที และความเร็วเดินเชื่อม 112 มม./นาที และการเชื่อมเสียดทานแบบกวนอะลูมิเนียมผสมหล่อแข็งต่างชนิดกันที่ผ่านกระบวนการทางความร้อน T6 ระหว่าง SSM356T6 และ SSM6061T6 แนวเชื่อมจะได้รับอิทธิพลจากความเร็วหมุนหัวทูล 1,400 และ 1,750 รอบ/นาที และความเร็วเดินเชื่อม 112 มม./นาที มีลักษณะทางกายภาพที่แตกต่างกันดังรูปที่ 3 (ก) (ข) และ (ค) ผลจากการทดลองพบว่า ลักษณะทางกายภาพของแนวเชื่อมของชิ้นงานที่ไม่ได้ผ่านกระบวนการทางความร้อน T6 ค่อนข้างราบเรียบ จากความร้อนในแนวเชื่อมที่มีมากพอทำให้เกิดการอ่อนตัวและเกิดการเสียรูปในภาวะพลาสติกมาก ส่งผลให้เกิดเป็นครีبد้านอะลูมิเนียมผสมหล่อแข็ง SSM6061 (Retreating side) และเกิดเป็นเกล็ดตามรอยบ่าของหัวทูลบริเวณด้านบนแนวเชื่อมอย่างสม่ำเสมอ ดังรูปที่ 3 (ก) สำหรับชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการทางความร้อน T6 ลักษณะทางกายภาพของแนวเชื่อมมีความราบเรียบสม่ำเสมอและไม่มีครีบก่เกิดขึ้นบริเวณด้านข้างแนวเชื่อม เนื่องจากมีความแข็งแรงมากกว่าชิ้นงานที่ไม่ได้ผ่านกระบวนการทางความร้อน T6 ทำให้ความร้อนสะสมในแนวเชื่อมค่อนข้างน้อยส่งผลให้อะลูมิเนียมเกิดภาวะพลาสติกน้อยลงด้วยดังรูปที่ 3 (ข) และ (ค)



(ก)



(ข)

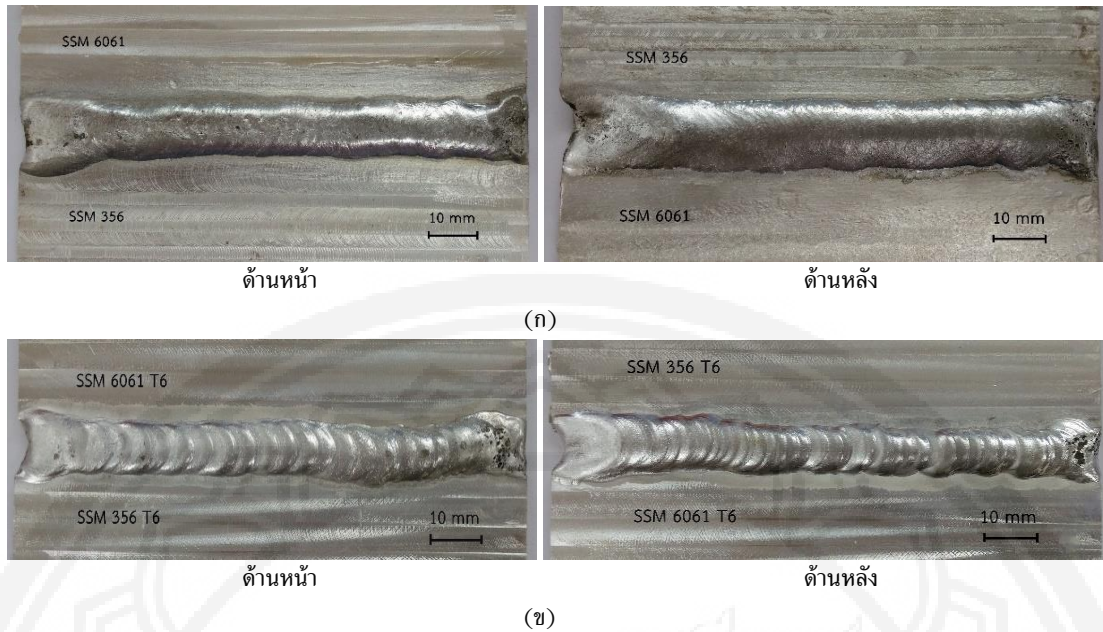


(ค)

รูปที่ 3 ลักษณะทางกายภาพของแนวเชื่อมเสียดทานแบบกวน

- (ก) ชิ้นงานที่ไม่ได้ผ่านกระบวนการทางความร้อน T6 ความเร็วหมุนหัวทูล 1,400 รอบ/นาที
- (ข) ชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการทางความร้อน T6 ความเร็วหมุนหัวทูล 1,400 รอบ/นาที และ
- (ค) ชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการทางความร้อน T6 ความเร็วหมุนหัวทูล 1,750 รอบ/นาที

1.2 ลักษณะทางกายภาพของแนวเชื่อมทิกแบบเติมลวด ผลจากการเชื่อมทิกแบบเติมลวดระหว่าง อะลูมิเนียมผสมหล่อแข็ง SSM356 และ SSM6061 ที่ไม่ได้ผ่านกระบวนการทางความร้อน T6 ดังแสดงในรูปที่ 4 (ก) พบว่าอะลูมิเนียมผสมหล่อแข็ง SSM356 และ SSM6061 สามารถเชื่อมติดกันได้ แนวเชื่อมมีความสมบูรณ์ เกิดของแนวเชื่อมละเอียดและมีความเรียบสม่ำเสมอ และผลการเชื่อมอะลูมิเนียมผสมหล่อแข็งต่างชนิดกัน ระหว่าง SSM356 กับ SSM6061 ที่ผ่านกระบวนการทางความร้อน T6 ดังแสดงในรูปที่ 4 (ข) พบว่าสามารถเชื่อม อะลูมิเนียมผสมต่างชนิดกันได้ แนวเชื่อมมีขนาดแคบกว่าแนวเชื่อมของอะลูมิเนียมผสมหล่อแข็งที่ไม่ได้ผ่าน กระบวนการทางความร้อน T6 การเรียงตัวของเกล็ดแนวเชื่อมสม่ำเสมอ มีการเรียงตัวของเกล็ดแนวเชื่อมที่หยาบกว่า อะลูมิเนียมผสมหล่อแข็งที่ไม่ได้ผ่านกระบวนการทางความร้อน T6 เนื่องจากอะลูมิเนียมที่ผ่านกระบวนการทาง ความร้อน T6 มีสมบัติทางกลที่ดีกว่าอะลูมิเนียมที่ไม่ได้ผ่านกระบวนการทางความร้อน T6 ในขณะที่ความร้อนในการ เชื่อมเท่ากัน (ปัจจัยการเชื่อมเดียวกัน) แต่อัตราการเย็นตัวของชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการทางความร้อน T6 จะเร็วกว่า ส่งผลให้เกล็ดของแนวเชื่อมมีลักษณะเกล็ดที่หยาบกว่าชิ้นงานที่ไม่ได้ผ่านกระบวนการทางความร้อน T6

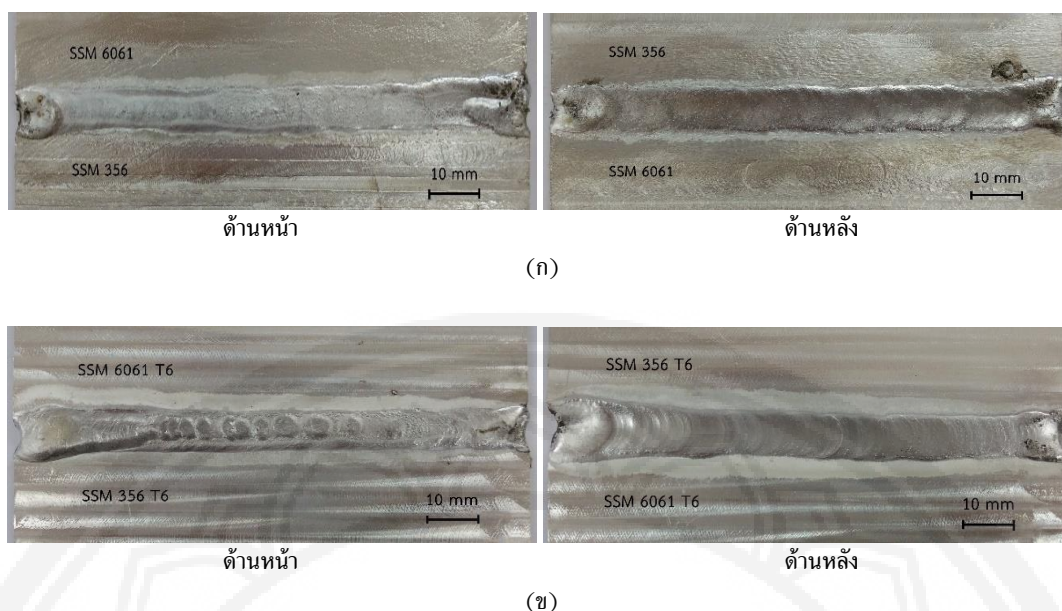


รูปที่ 4 ลักษณะทางกายภาพของแนวเชื่อมทิกแบบเต็มลวด

(ก) ชิ้นงานที่ไม่ได้ผ่านกระบวนการทางความร้อน T6 และ

(ข) ชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการทางความร้อน T6

1.3 ลักษณะทางกายภาพของแนวเชื่อมทิกแบบไม่เต็มลวด จากการเชื่อมทิกแบบไม่เต็มลวดระหว่าง อะลูมิเนียมผสมหล่อแข็ง SSM356 กับ SSM6061 สามารถเปรียบเทียบลักษณะทางกายภาพของชิ้นงานที่ไม่ได้ผ่านกระบวนการทางความร้อนและชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการทางความร้อน T6 ดังแสดงในรูปที่ 5 (ก) และ (ข) พบว่าสามารถเชื่อมระหว่างอะลูมิเนียมผสมหล่อแข็ง SSM356 และ SSM6061 ได้ แนวเชื่อมของชิ้นงานที่ไม่ได้ผ่านกระบวนการทางความร้อน T6 ดังแสดงในรูปที่ 5 (ก) มีความสมบูรณ์ เกิดแนวเชื่อมเรียบสม่ำเสมอ ทางด้านหน้าของแนวเชื่อมที่บริเวณต้นแนวเชื่อมมีการบวมเกิดขึ้นเล็กน้อย เนื่องจากความร้อนที่เกิดจากการเชื่อมด้านหลัง และแนวเชื่อมของชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการทางความร้อน T6 ดังแสดงในรูปที่ 5 (ข) มีลักษณะของเกล็ดแนวเชื่อมค่อนข้างชัดเจนกว่าแนวเชื่อมของชิ้นงานที่ไม่ได้ผ่านกระบวนการทางความร้อน T6 ทางด้านหน้าของแนวเชื่อมเกิดการบวมเกือบตลอดแนวเชื่อมเนื่องจากความร้อนจากการเชื่อมด้านหลัง



รูปที่ 5 ลักษณะทางกายภาพของแนวเชื่อมทิกแบบไม่เต็มลวด

(ก) ชิ้นงานที่ไม่ได้ผ่านกระบวนการทางความร้อน T6 และ

(ข) ชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการทางความร้อน T6

2. ลักษณะโครงสร้างทางมหภาคของแนวเชื่อม (Macrostructure of welded)

การตรวจสอบโครงสร้างทางมหภาคของแนวเชื่อมระหว่างอะลูมิเนียมผสมหล่อกิ่งแข็ง SSM356 และ SSM6061 โดยการตัดชิ้นงานทดสอบในทิศตั้งฉากกับแนวเชื่อมและให้แนวเชื่อมอยู่ตรงกลางชิ้นงานทดสอบ ทำการเตรียมชิ้นงานทดสอบตามขั้นตอนเพื่อทำการตรวจสอบโครงสร้างมหภาคของทุกกระบวนการเชื่อม

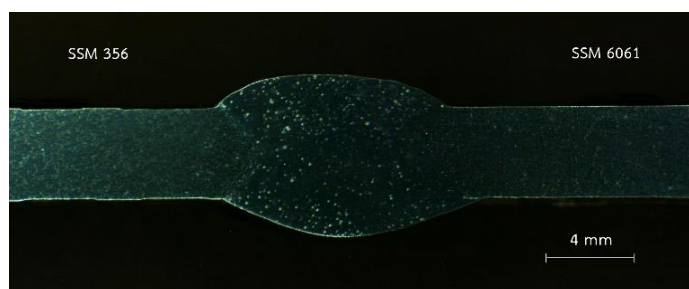
2.1 ลักษณะโครงสร้างทางมหภาคของแนวเชื่อมเสียดทานแบบกวน จากการตรวจสอบโครงสร้างมหภาคของแนวเชื่อมเสียดทานแบบกวนระหว่างอะลูมิเนียมผสมหล่อกิ่งแข็ง SSM356 กับ SSM6061 ที่ไม่ได้ผ่านกระบวนการทางความร้อน T6 และที่ผ่านกระบวนการทางความร้อน T6 สามารถเชื่อมประสานกันได้ดี มีความแตกต่างของสีเนื้ออะลูมิเนียมผสมทั้งสองชนิดอย่างชัดเจนตรงบริเวณแนวเชื่อม โดยอะลูมิเนียมผสมหล่อกิ่งแข็ง SSM6061 มีสีทึบกว่าอะลูมิเนียมผสมหล่อกิ่งแข็ง SSM356 และพบว่าอะลูมิเนียมผสมหล่อกิ่งแข็งที่ไม่ได้ผ่านกระบวนการทางความร้อน T6 และที่ผ่านกระบวนการทางความร้อน T6 ความเร็วหมุนหัวทูล 1,400 รอบ/นาที ดังแสดงในรูปที่ 6 (ก) และ (ข) มีการประสานกันของอะลูมิเนียมผสมทั้งสองชนิดได้ดี บริเวณเนื้อเชื่อมเกิดการเรียงตัวสลับกันของอะลูมิเนียมทั้งสองชนิดเป็นรูปฟันปลาอย่างชัดเจน มีครีบก่เกิดขึ้นทั้งสองด้านและมีมากทางด้านอะลูมิเนียมผสมหล่อกิ่งแข็ง SSM6061 (RS) และไม่พบรูพรุนในเนื้อเชื่อมที่มักจะเกิดขึ้นเมื่อเชื่อมอะลูมิเนียมด้วยวิธีการเชื่อมแบบหลอมละลาย และจากรูปที่ 6 (ค) พบว่าเมื่อความเร็วหมุนหัวทูลเพิ่มขึ้นลักษณะโครงสร้างมหภาคบริเวณที่ถูกกวน (Stir zone; SZ) มีขนาดกว้างขึ้น เนื่องจากความเร็วหมุนที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ความร้อนจากการเสียดทานในเนื้อเชื่อมมีค่าเพิ่มขึ้นด้วย บริเวณเนื้อเชื่อมเกิดการเรียงตัวของอะลูมิเนียมเป็นชั้น ๆ คล้ายกับหัวหอมและไม่พบรูพรุนในเนื้อเชื่อม



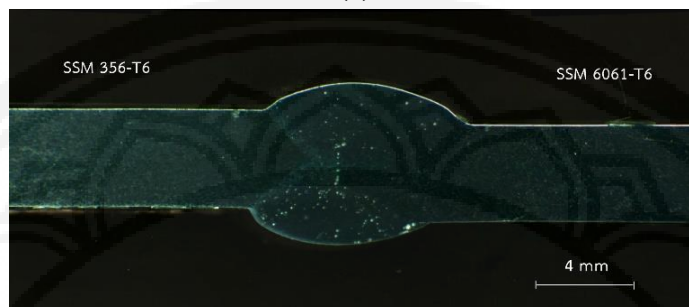
รูปที่ 6 โครงสร้างมหภาคของแนวเชื่อมเสียดทานแบบกวน

- (ก) ชิ้นงานที่ไม่ได้ผ่านกระบวนการทางความร้อน T6 ความเร็วหมุนหัวทูล 1,400 รอบ/นาที
 (ข) ชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการทางความร้อน T6 ความเร็วหมุนหัวทูล 1,400 รอบ/นาที และ
 (ค) ชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการทางความร้อน T6 ความเร็วหมุนหัวทูล 1,750 รอบ/นาที

2.2 ลักษณะโครงสร้างทางมหภาคของแนวเชื่อมทิกแบบเติมลวด จากการตรวจสอบโครงสร้างมหภาคของแนวเชื่อมทิกแบบเติมลวดระหว่างอะลูมิเนียมผสมหล่อกึ่งแข็ง SSM356 กับ SSM6061 ที่ไม่ได้ผ่านกระบวนการทางความร้อน T6 และที่ผ่านกระบวนการทางความร้อน T6 จากรูปที่ 7 (ก) และ (ข) พบว่าอะลูมิเนียมทั้งสองชนิดสามารถประสานกันได้ดี บริเวณแนวเชื่อมมีลักษณะนูนสูงกว่าบริเวณโลหะฐาน เนื่องจากโลหะที่เติมเข้าไปขณะทำการเชื่อม และมีรูพรุนกระจายตัวในเนื้อเชื่อม เนื่องจากขณะเชื่อมเมื่ออะลูมิเนียมหลอมละลายจะมีไฮโดรเจนเข้าไปอยู่ในเนื้อเชื่อมและติดอยู่เมื่อเนื้อเชื่อมแข็งตัวทำให้เกิดเป็นรูพรุน โดยชิ้นงานอะลูมิเนียมผสมหล่อกึ่งแข็งที่ไม่ได้ผ่านกระบวนการทางความร้อน T6 ดังแสดงในรูปที่ 7 (ก) มีรูพรุนกระจายตัวอยู่มาก และแนวเชื่อมมีขนาดกว้างกว่าแนวเชื่อมของชิ้นงานอะลูมิเนียมผสมหล่อกึ่งแข็งที่ผ่านกระบวนการทางความร้อน T6 ดังแสดงในรูปที่ 7 (ข) ประมาณ 1-2 มิลลิเมตร



(ก)



(ข)

รูปที่ 7 โครงสร้างมหภาคของแนวเชื่อมทิกแบบเติมลวด

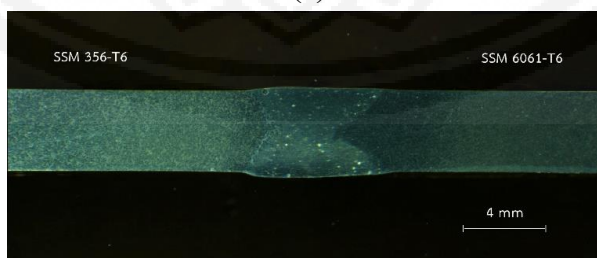
(ก) ชิ้นงานที่ไม่ได้ผ่านกระบวนการทางความร้อน T6 และ

(ข) ชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการทางความร้อน T6

2.3 ลักษณะโครงสร้างทางมหภาคของแนวเชื่อมทิกแบบไม่เติมลวด จากการตรวจสอบโครงสร้างมหภาคของแนวเชื่อมทิกแบบไม่เติมลวดระหว่างอะลูมิเนียมผสมหล่อกิ่งแข็ง SSM356 กับ SSM6061 ที่ไม่ได้ผ่านกระบวนการทางความร้อน T6 และที่ผ่านกระบวนการทางความร้อน T6 พบว่าบริเวณเนื้อเชื่อมมีความหนาเท่ากับความหนาของโลหะฐาน อะลูมิเนียมทั้งสองชนิดสามารถประสานกันได้ดีและมีรูพรุนกระจายตัวในเนื้อเชื่อมเล็กน้อย โดยชิ้นงานอะลูมิเนียมผสมหล่อกิ่งแข็งที่ไม่ได้ผ่านกระบวนการทางความร้อน T6 ดังแสดงในรูปที่ 8 (ก) มีรูพรุนกระจายตัวอยู่มากและแนวเชื่อมมีความกว้างเท่ากับแนวเชื่อมของชิ้นงานอะลูมิเนียมผสมหล่อกิ่งแข็งที่ผ่านกระบวนการทางความร้อน T6 ดังแสดงในรูปที่ 8 (ข)



(ก)



(ข)

รูปที่ 8 โครงสร้างมหภาคของแนวเชื่อมทิกแบบไม่เติมลวด

(ก) ชิ้นงานที่ไม่ได้ผ่านกระบวนการทางความร้อน T6 และ

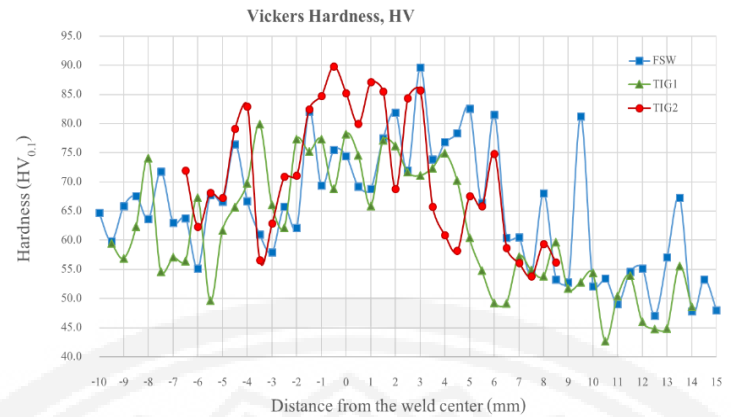
(ข) ชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการทางความร้อน T6



3. การทดสอบความแข็งของแนวเชื่อม (Hardness of welded)

จากการทดสอบความแข็งของแนวเชื่อมระหว่างอะลูมิเนียมผสมหล่อกิ่งแข็ง SSM356 และ SSM6061 ที่ไม่ได้ผ่านกระบวนการทางความร้อน T6 และที่ผ่านกระบวนการทางความร้อน T6 ด้วยเครื่องทดสอบแบบไมโครวิกเกอร์ พบว่าค่าความแข็งของทุกกระบวนการเชื่อมบริเวณตรงกลางแนวเชื่อมมีค่าสูงที่สุดและบริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อน (HAZ) มีค่าความแข็งต่ำที่สุด เนื่องจากการเชื่อมอะลูมิเนียมผสมที่บริเวณเนื้อเชื่อมเกิดการตกผลึกใหม่และในการเชื่อมทิกจะมีบริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อน จากเปลวอาร์คทำให้บริเวณดังกล่าวกลายเป็นสภาพอ่อน ส่งผลให้อะลูมิเนียมผสมเกิดการอ่อนตัวและบริเวณแนวเชื่อมมีค่าความแข็งมากกว่า (Muangjumburee, 2012)

ค่าความแข็งแนวเชื่อมอะลูมิเนียมผสมหล่อกิ่งแข็งต่างชนิดกันระหว่าง SSM356 กับ SSM6061 ที่ไม่ได้ผ่านกระบวนการทางความร้อน T6 ดังแสดงในรูปที่ 9 (ก) ค่าความแข็งเฉลี่ยบริเวณเนื้อโลหะเดิมของอะลูมิเนียมผสมหล่อกิ่งแข็ง SSM356 ประมาณ 68.5 HV และบริเวณเนื้อโลหะเดิมของอะลูมิเนียมผสมหล่อกิ่งแข็ง SSM6061 ประมาณ 56 HV บริเวณตรงกลางแนวเชื่อมในกระบวนการเชื่อมทิกแบบไม่เต็มลวดมีค่าความแข็งเฉลี่ยสูงสุดประมาณ 83.4 HV และบริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อนที่ติดกับเนื้อโลหะเดิมของอะลูมิเนียมผสมหล่อกิ่งแข็ง SSM6061 ในกระบวนการเชื่อมทิกแบบเต็มลวดมีค่าความแข็งเฉลี่ยต่ำสุดประมาณ 51.1 HV เมื่อเปรียบเทียบค่าความแข็งเฉลี่ยบริเวณตรงกลางแนวเชื่อมระหว่างชิ้นงานที่ไม่ได้ผ่านกระบวนการทางความร้อน T6 ดังแสดงในรูปที่ 9 (ก) กับชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการทางความร้อน T6 ดังแสดงในรูปที่ 9 (ข) ค่าความแข็งเฉลี่ยบริเวณตรงกลางแนวเชื่อมของอะลูมิเนียมที่ไม่ได้ผ่านกระบวนการทางความร้อน T6 จะมีค่าความแข็งที่สูงกว่าอะลูมิเนียมที่ผ่านกระบวนการทางความร้อน T6 เนื่องจากการเชื่อมแบบหลอมละลายกับอะลูมิเนียมผสมทำให้เกิดลักษณะการบ่มเทียม (Artificial age) อีกครั้ง ส่งผลให้ค่าความแข็งบริเวณแนวเชื่อมมีค่าลดลง ซึ่งค่าความแข็งเฉลี่ยบริเวณตรงกลางแนวเชื่อมในชิ้นงานเชื่อมที่ผ่านกระบวนการทางความร้อน T6 ดังแสดงในรูปที่ 9 (ข) กระบวนการเชื่อมเสียดทานแบบกวนที่ความเร็วหมุนเชื่อม 1,400 รอบ/นาที มีค่าความแข็งสูงสุดประมาณ 74.9 HV และบริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อนที่ติดกับเนื้อโลหะเดิมของอะลูมิเนียมผสมหล่อกิ่งแข็ง SSM356T6 ในกระบวนการเชื่อมเสียดทานแบบกวนที่ความเร็วหมุนเชื่อม 1,750 รอบ/นาที มีค่าความแข็งเฉลี่ยต่ำสุดประมาณ 44.6 HV



SSM356

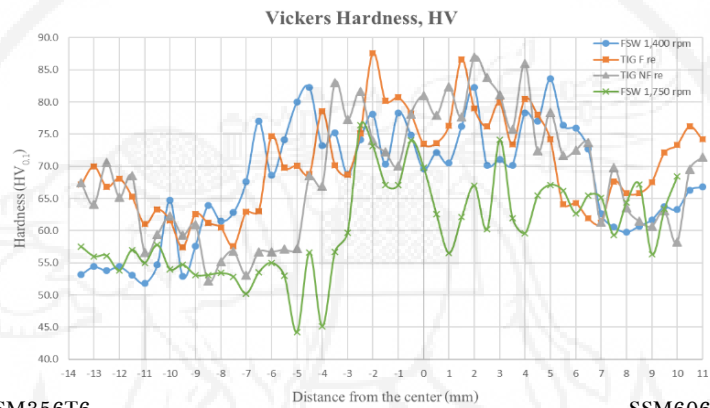
(ก)

SSM6061

หมายเหตุ: TIG1 คือ การเชื่อมทิกแบบเต็มลวด

TIG2 คือ การเชื่อมทิกแบบไม่เต็มลวด และ

FSW คือ การเชื่อมเสียดทานแบบกวนความเร็วหมุนเชื่อม 1,400 รอบ/นาที



SSM356T6

(ข)

SSM6061T6

หมายเหตุ: TIG1 คือ การเชื่อมทิกแบบเต็มลวด

TIG2 คือ การเชื่อมทิกแบบไม่เต็มลวด

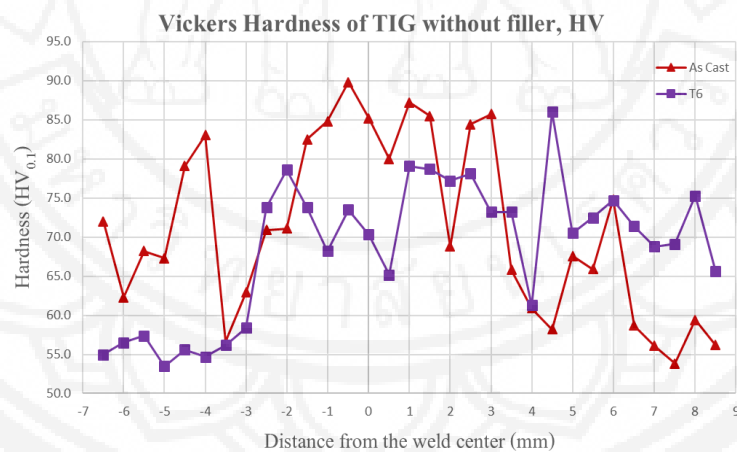
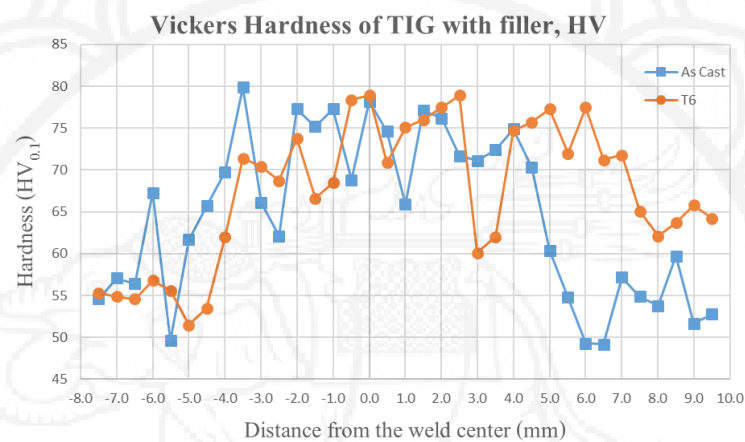
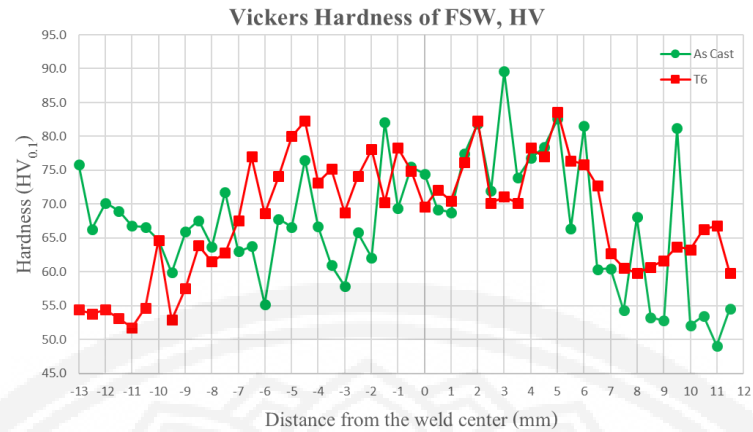
FSW 1,400 rpm คือ การเชื่อมเสียดทานแบบกวนความเร็วหมุนเชื่อม 1,400 รอบ/นาที

FSW 1,750 rpm คือ การเชื่อมเสียดทานแบบกวนความเร็วหมุนเชื่อม 1,750 รอบ/นาที

รูปที่ 9 ค่าความแข็งแรงแนวเชื่อมระหว่างอะลูมิเนียมผสมหล่อแข็ง SSM356 และ SSM6061

(ก) ชิ้นงานที่ไม่ได้ผ่านกระบวนการทางความร้อน T6 และ

(ข) ชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการทางความร้อน T6



รูปที่ 10 ค่าความแข็งของแนวเชื่อม

(ก) การเชื่อมเสียดทานแบบกวน

(ข) การเชื่อมทิกแบบเติมลวด และ

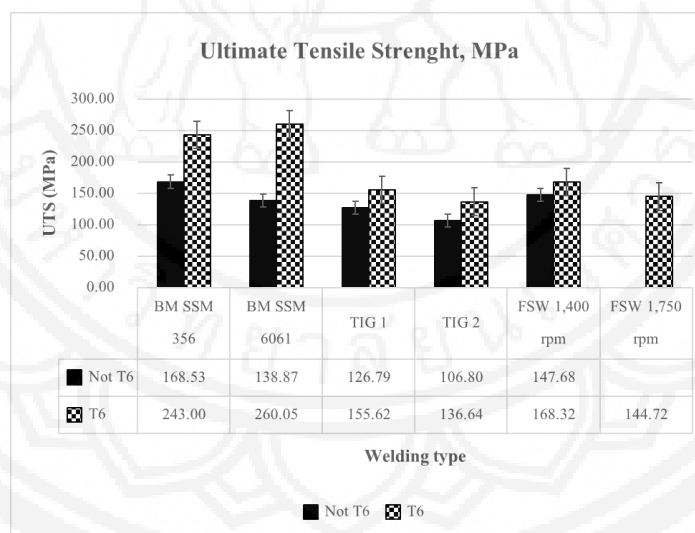
(ค) การเชื่อมทิกแบบไม่เติมลวด

เมื่อพิจารณาค่าความแข็งบริเวณเนื้อเชื่อมโดยแยกตามกระบวนการเชื่อม พบว่าการเชื่อมเสียดทานแบบกวนในชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการทางความร้อน T6 และชิ้นงานที่ไม่ได้ผ่านกระบวนการทางความร้อน T6 ให้ค่าความแข็งของแนวเชื่อมที่ใกล้เคียงกันดังแสดงในรูปที่ 10 (ก) เช่นเดียวกับการเชื่อมทิกแบบเติมลวดดังแสดงในรูปที่ 10 (ข)

สำหรับการเชื่อมทิกแบบไม่เติมลวดในชิ้นงานที่ไม่ได้ผ่านกระบวนการทางความร้อน T6 มีค่าความแข็งแรงที่เนื้อเชื่อมสูงกว่าชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการทางความร้อน T6 ดังแสดงในรูปที่ 10 (ค)

4. การทดสอบค่าความแข็งแรงดึงของแนวเชื่อม (Tensile strength of welded)

จากรูปที่ 11 แสดงผลการทดสอบความแข็งแรงดึงพบว่าค่าความแข็งแรงดึงของอะลูมิเนียมผสมหล่อกิ่งแข็งที่ผ่านกระบวนการทางความร้อน T6 ในทุกกระบวนการเชื่อมมีค่าความแข็งแรงดึงสูงกว่าแนวเชื่อมของอะลูมิเนียมผสมหล่อกิ่งแข็งที่ไม่ได้ผ่านกระบวนการทางความร้อน T6 เนื่องจากอะลูมิเนียมที่ผ่านกระบวนการทางความร้อน T6 มีสมบัติความแข็งแรงดึงที่เพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน โดยสังเกตได้จากค่าความแข็งแรงดึงของโลหะเดิมของอะลูมิเนียมผสมหล่อกิ่งแข็ง SSM356T6 ที่มีค่าความแข็งแรงดึงเพิ่มขึ้นคิดเป็นร้อยละ 44.2 และค่าความแข็งแรงดึงของโลหะเดิมของอะลูมิเนียมผสมหล่อกิ่งแข็ง SSM6061T6 มีค่าความแข็งแรงดึงเพิ่มขึ้นคิดเป็นร้อยละ 87.3 เมื่อเปรียบเทียบกับโลหะพื้นฐานที่ไม่ได้ผ่านกระบวนการทางความร้อน T6 จากการทดสอบกระบวนการเชื่อมเสียดทานแบบกวนที่ความเร็วหมุนเชื่อม 1,400 รอบ/นาที ในอะลูมิเนียมผสมหล่อกิ่งแข็งที่ผ่านกระบวนการทางความร้อน T6 มีค่าความแข็งแรงดึงเฉลี่ยสูงสุด คือ 168.32 MPa เมื่อเปรียบเทียบกับค่าความแข็งแรงดึงในแต่ละกระบวนการเชื่อมของอะลูมิเนียมผสมหล่อกิ่งแข็งที่ไม่ได้ผ่านกระบวนการทางความร้อน T6 พบว่ากระบวนการเชื่อมเสียดทานแบบกวนที่ความเร็วหมุนเชื่อม 1,400 รอบ/นาที มีค่าสูงสุดเช่นกัน คือ 147.68 MPa และการเชื่อมทิกแบบไม่เติมลวดมีค่าความแข็งแรงดึงต่ำสุด คือ 106.80 MPa ในขณะเดียวกันเมื่อเปรียบเทียบกับค่าความแข็งแรงดึงในแต่ละกระบวนการเชื่อมของอะลูมิเนียมผสมหล่อกิ่งแข็งที่ผ่านกระบวนการทางความร้อน T6 พบว่าการเชื่อมทิกแบบไม่เติมลวดมีค่าความแข็งแรงดึงต่ำสุดเช่นกัน คือ 136.64 MPa เนื่องจากการเชื่อมแบบหลอมละลายกับอะลูมิเนียมผสมทำให้เกิดลักษณะการบ่มเทียม (Artificial age) อีกครั้ง ส่งผลให้สมบัติทางกลของแนวเชื่อมลดลง แต่การเชื่อมทิกแบบเติมลวดมีสมบัติทางกลดีกว่าการเชื่อม ทิกแบบไม่เติมลวดเนื่องจากการเติมลวดชนิด AA4043 ที่มีธาตุซิลิกอนผสมอยู่ซึ่งมีสมบัติในการต้านการแตกร้าว ส่งผลให้ค่าความแข็งแรงดึงของอะลูมิเนียมผสมหล่อกิ่งแข็งด้วยกระบวนการเชื่อมทิกแบบเติมลวดมีค่าสูงกว่าการเชื่อมทิกแบบไม่เติมลวด



หมายเหตุ: TIG1 คือ การเชื่อมทิกแบบเติมลวด

TIG2 คือ การเชื่อมทิกแบบไม่เติมลวด

FSW 1,400 rpm คือ การเชื่อมเสียดทานแบบกวนความเร็วหมุนเชื่อม 1,400 รอบ/นาที และ

FSW 1,750 rpm คือ การเชื่อมเสียดทานแบบกวนความเร็วหมุนเชื่อม 1,750 รอบ/นาที

รูปที่ 11 ค่าความแข็งแรงดึงของโลหะพื้นฐานและแนวเชื่อมในทุกกระบวนการเชื่อม



5. การวิเคราะห์ค่าความแข็งแรงดึงด้วยวิธีการทางสถิติ (Statistical analysis of ultimate tensile strength of welded)

จากการวิเคราะห์ค่าความแข็งแรงดึงของกระบวนการเชื่อมเสียดทานแบบกวนในชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการทางความร้อน T6 พบว่าที่ความเร็วหมุนหัวทูล 1,400 รอบ/นาที ให้ผลการทดสอบสมบัติทางกล (ค่าความแข็งแรงดึง) ที่ดีกว่าความเร็วหมุนหัวทูล 1,750 รอบ/นาที ดังนั้น ในขั้นตอนการวิเคราะห์ค่าความแข็งแรงดึงด้วยวิธีทางสถิติ สำหรับกระบวนการเชื่อมเสียดทานแบบกวนในชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการทางความร้อน T6 จะกำหนดเพียงปัจจัยเดียว คือ ที่ความเร็วหมุนหัวทูล 1,400 รอบ/นาที เท่านั้น

การวิเคราะห์ค่าความแข็งแรงดึงของแนวเชื่อมด้วยวิธีการทางสถิติประกอบด้วยสองปัจจัย คือ กระบวนการเชื่อมและประเภทของอะลูมิเนียมผสมหล่อแข็ง ซึ่งกระบวนการเชื่อมมี 3 กระบวนการ คือ การเชื่อมเสียดทานแบบกวน (FSW) การเชื่อมทิกแบบเติมลวด (TIG1) และการเชื่อมทิกแบบไม่เติมลวด (TIG2) สำหรับประเภทของอะลูมิเนียมผสมหล่อแข็งมี 2 ประเภท คือ อะลูมิเนียมผสมหล่อแข็งที่ไม่ได้ผ่านกระบวนการทางความร้อน T6 และที่ผ่านกระบวนการทางความร้อน T6 ทำการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ Minitab release 16 ในการคำนวณค่าทางสถิติประกอบด้วยส่วนต่างๆ ดังนี้

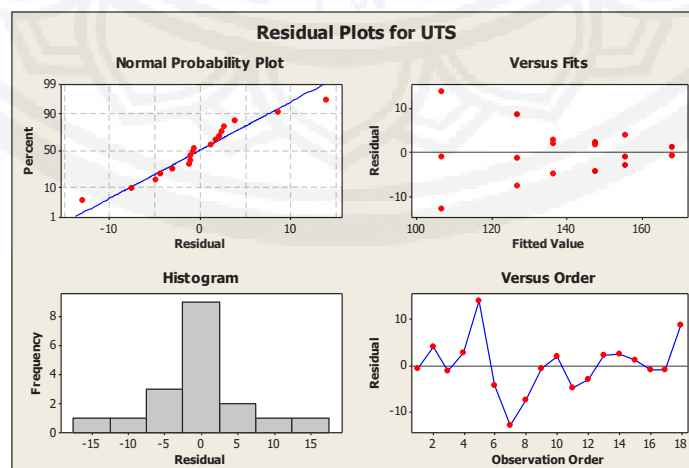
5.1 การวิเคราะห์ความถูกต้องของตัวแบบ การวิเคราะห์ความถูกต้องของตัวแบบ (Montgomery, 2005a, 2005b) ทางสถิติที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ประกอบด้วยความเป็นอิสระของข้อมูล ความเป็นปกติของข้อมูล และความมีเสถียรภาพของค่าความแปรปรวนของข้อมูล โดยทำการทดสอบความถูกต้องของตัวแบบทางสถิติของค่าความแข็งแรงดึงได้จากกราฟแสดงการวิเคราะห์ความถูกต้องของตัวแบบดังแสดงในรูปที่ 12

1) ความเป็นอิสระของข้อมูล

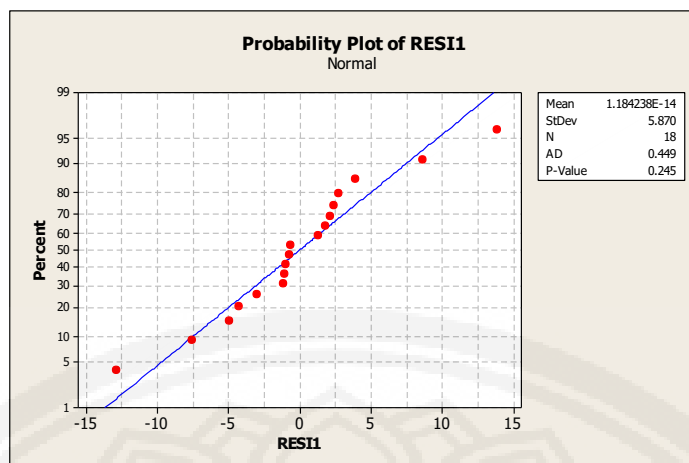
ความเป็นอิสระของข้อมูลสามารถพิจารณาได้จากกราฟดังแสดงในรูปที่ 12 (กราฟด้านล่างขวา) พบว่าลักษณะของกราฟไม่สามารถคาดเดาหรือทำนายทิศทางของการเคลื่อนที่ของข้อมูลได้อย่างชัดเจน ไม่มีการเกาะตัวไปในทิศทางเดียวกัน หมายความว่าข้อมูลที่ได้จากการทดลองมีความเป็นอิสระต่อกัน

2) ความเป็นปกติของข้อมูล

ความเป็นปกติของข้อมูลเป็นการพิจารณาว่าในการทดลองมีการเก็บข้อมูลมาแบบปกติหรือไม่ โดยพิจารณาจากกราฟแท่งว่ามีลักษณะเป็นระฆังคว่ำหรือไม่ (กรณีข้อมูลมากกว่า 30 ข้อมูล) แต่หากมีข้อมูลน้อยกว่า 30 ข้อมูล ให้พิจารณาลักษณะของกราฟการกระจายตัวของข้อมูลว่าเป็นเส้นตรงหรือไม่ จากรูปที่ 13 พบว่ากราฟมีลักษณะการกระจายตัวเป็นแบบเส้นตรง และค่า P-value ที่ได้มีค่าเท่ากับ 0.245 ที่ระดับความเชื่อมั่น 0.05 หมายความว่าข้อมูลที่พิจารณามีการแจกแจงแบบปกติ



รูปที่ 12 กราฟการวิเคราะห์ความถูกต้องของตัวแบบการทดลอง



รูปที่ 13 กราฟ probability plot

3) ความมีเสถียรภาพของค่าความแปรปรวนของข้อมูล

ความมีเสถียรภาพของค่าความแปรปรวนเป็นการสังเกตค่าความแปรปรวนของข้อมูลว่ามีการกระจายตัวรอบค่าศูนย์คลาดเคลื่อนสม่ำเสมอมากน้อยหรือไม่ สามารถพิจารณาได้จากรูปที่ 12 (กราฟด้านบนขวา) พบว่าข้อมูลมีการกระจายตัวแปรผันสม่ำเสมอรอบค่าศูนย์ ดังนั้นข้อมูลจึงมีความเสถียรภาพของค่าความแปรปรวน

5.2 การวิเคราะห์ ANOVA และการทดสอบสมมติฐานของการทดลอง การวิเคราะห์ ANOVA เพื่อหาอิทธิพลของกระบวนการเชื่อม ลักษณะชิ้นงาน และอันตรกิริยาร่วมระหว่างกระบวนการเชื่อมกับลักษณะชิ้นงาน มีผลต่อค่าความแข็งแรงดึงของแนวเชื่อมอย่างมีนัยสำคัญหรือไม่ สามารถพิจารณาจากการวิเคราะห์ผลด้วยโปรแกรมประมวลผลทางสถิติ ดังแสดงในตารางที่ 3

ตารางที่ 3 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่าความแข็งแรงดึงของแนวเชื่อม

General Linear Model: Tensile versus Welding, Material						
Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Welding	2	3954.9	3954.9	1977.4	40.51	0.000
Material	1	3144.5	3144.5	3144.5	64.41	0.000
Welding*Material	2	76.3	76.3	38.2	0.78	0.480
Error	12	585.8	585.8	48.8		
Total	17	7761.5				

S = 6.98702 R-Sq = 92.45% R-Sq(adj) = 89.31%

จากตารางที่ 3 ทำการตรวจสอบค่าสัมประสิทธิ์ในการตัดสินใจ (R-Sq) มีค่าเท่ากับ 92.45% แสดงให้เห็นว่าความแปรปรวนที่เกิดขึ้นเกิดจากการเปลี่ยนแปลงปัจจัยที่ต้องการทดสอบ คือ กระบวนการเชื่อมและลักษณะของชิ้นงานโดยคิดเป็นร้อยละ 92.45 นอกจากนี้เกิดจากปัจจัยที่ไม่สามารถควบคุมได้ (Uncontrollable) เช่น สภาพอากาศขณะทำการทดสอบ เป็นต้น โดยคิดเป็นร้อยละ 7.55

เมื่อพิจารณาค่า P-value กล่าวคือ ถ้า $P\text{-value} < \alpha$ ให้ปฏิเสธ H_0 แต่ถ้า $P\text{-value} > \alpha$ ให้ยอมรับ H_0 ที่ระดับนัยสำคัญ 95% ($\alpha = 0.05$) พบว่าค่า P-value ของอิทธิพลร่วมระหว่างกระบวนการเชื่อมและลักษณะชิ้นงาน (Welding*Material) มีค่าเท่ากับ 0.480 ซึ่งค่า P-value > 0.05 หมายความว่าอิทธิพลร่วมระหว่างกระบวนการเชื่อมและลักษณะชิ้นงานมีผลต่อค่าความแข็งแรงดึงอย่างไม่มีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95% และเมื่อวิเคราะห์ค่า P-value ของกระบวนการเชื่อม (Welding) และลักษณะชิ้นงาน (Material) มีค่าเท่ากับ 0.000 และ 0.000 ตามลำดับ ซึ่งค่า P-value < 0.05 หมายความว่ากระบวนการเชื่อมและลักษณะชิ้นงานมีผลต่อค่าความแข็งแรงดึงอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95%



5.3 การเปรียบเทียบพหุคูณด้วยวิธี Turkey การเปรียบเทียบพหุคูณเพื่อหาความแตกต่างในแต่ละระดับของตัวแปรต้นโดยการเปรียบเทียบทีละคู่ สามารถพิจารณาจากค่า P-value ที่วิเคราะห์ด้วยวิธี Turkey's HSD test เป็นการจับคู่ตัวแปรภายในปัจจัยเดียวกัน เพื่อตรวจสอบหาความแตกต่างระหว่างคู่ตัวแปรที่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

ตารางที่ 4 วิเคราะห์ความแตกต่างภายในปัจจัยของลักษณะชิ้นงานด้วยวิธี Turkey's HSD test

Individual 95% CIs For Mean Based on				
Level	N	Mean	StDev	Pooled StDev
Not T6	9	127.09	19.46	(-----*-----)
T6	9	153.52	14.09	(-----*-----)
				120 135 150 165
Grouping Information Using Turkey Method				
Material	N	Mean	Grouping	
T6	9	153.52	A	
Not T6	9	127.09	B	
Material		Difference of Means	SE of Difference	Adjusted P-Value
T6		26.43	8.008	0.0045

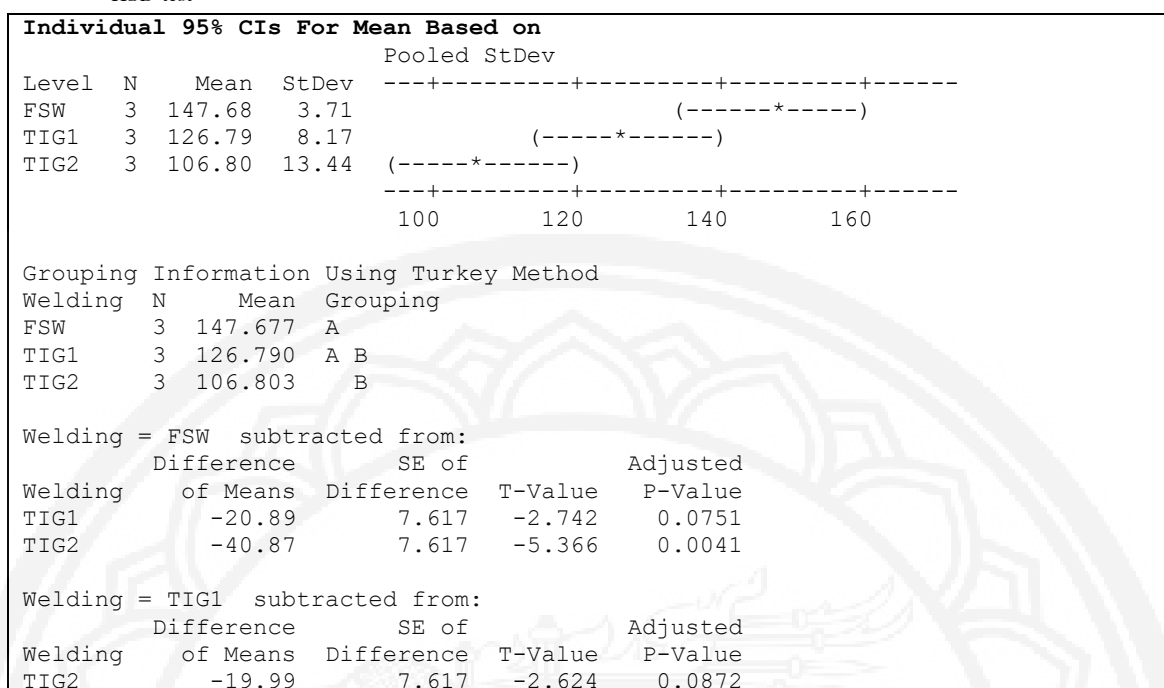
การวิเคราะห์ผลจากตารางที่ 3 พบว่าค่า P-value ของกระบวนการเชื่อม (Welding) และลักษณะชิ้นงาน (Material) < 0.05 หมายความว่ากระบวนการเชื่อมและลักษณะของชิ้นงานมีผลต่อค่าความแข็งแรงดึง เมื่อวิเคราะห์จับคู่ตัวแปรเพื่อหาความแตกต่างของตัวแปรภายในปัจจัยของลักษณะชิ้นงานด้วยวิธี Turkey's HSD test ดังแสดงในตารางที่ 4 พบว่าค่า P-value ระหว่างชิ้นงานทดสอบที่ผ่านกระบวนการทางความร้อน T6 และชิ้นงานทดสอบที่ไม่ได้ผ่านกระบวนการทางความร้อน T6 มีค่าเท่ากับ 0.0045 ซึ่ง < 0.05 หมายความว่าชิ้นงานทดสอบที่ผ่านกระบวนการทางความร้อน T6 จะให้ค่าความแข็งแรงดึงที่แตกต่างจากชิ้นงานทดสอบที่ไม่ได้ผ่านกระบวนการทางความร้อน T6 อย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

เมื่อทราบผลการวิเคราะห์จากตารางที่ 4 จึงทำการวิเคราะห์หาความแตกต่างของกระบวนการเชื่อม โดยการจับคู่ตัวแปรเพื่อหาความแตกต่างภายในปัจจัยหลักด้วยวิธี Turkey's HSD test เช่นเดียวกันกับวิธีข้างต้น ในการวิเคราะห์จะพิจารณาแยกเป็น 2 กรณีคือ วิเคราะห์หาความแตกต่างระหว่างกระบวนการเชื่อมในชิ้นงานทดสอบที่ไม่ได้ผ่านกระบวนการทางความร้อน T6 และวิเคราะห์หาความแตกต่างระหว่างกระบวนการเชื่อมในชิ้นงานทดสอบที่ผ่านกระบวนการทางความร้อน T6 สามารถวิเคราะห์ผลได้ดังตารางที่ 5 และ 6 ดังนี้

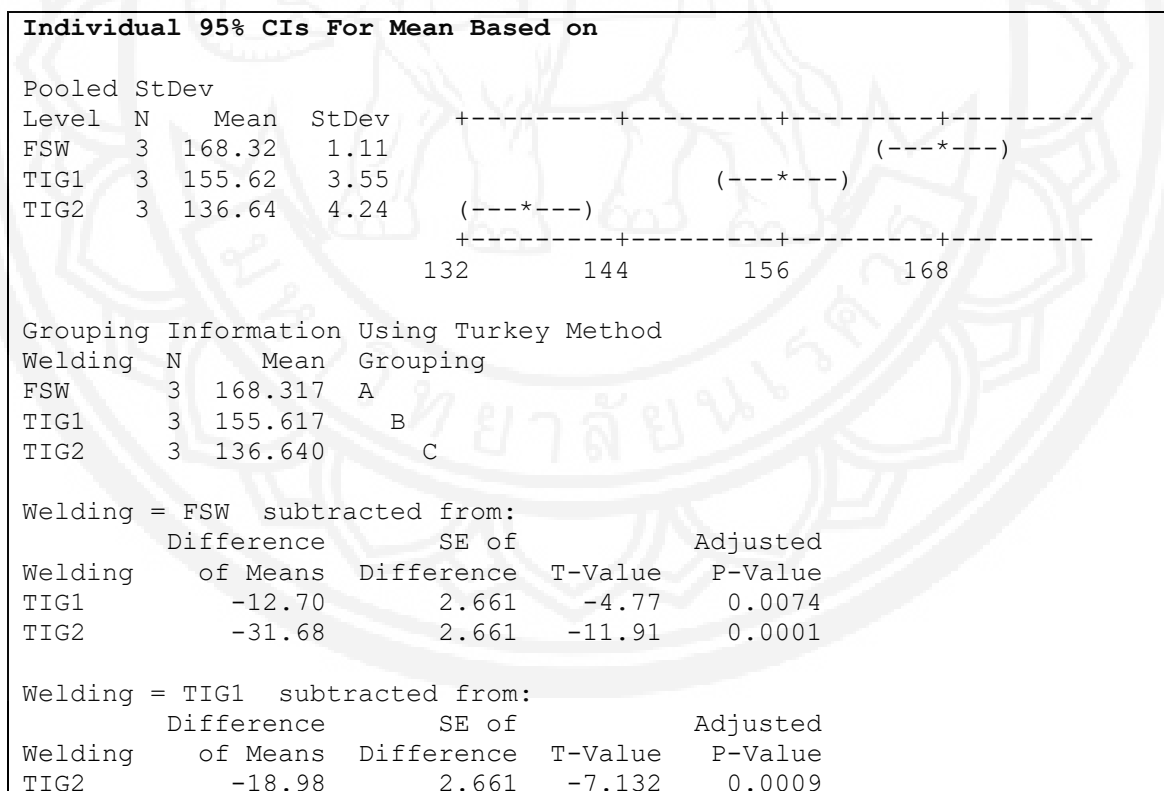
จากตารางที่ 5 เป็นการวิเคราะห์จับคู่ตัวแปรเพื่อหาความแตกต่างของตัวแปรภายในปัจจัยของกระบวนการเชื่อม ชิ้นงานทดสอบที่ไม่ได้ผ่านกระบวนการทางความร้อน T6 ด้วยวิธี Turkey's HSD test เมื่อพิจารณาจากค่า P-value ในแต่ละคู่ตัวแปร พบว่าสามารถแบ่งเป็น 2 กลุ่ม ประกอบด้วย กลุ่ม A หมายถึง การเชื่อมเสียดทานแบบกวน (FSW) ให้ค่าความแข็งแรงดึงแตกต่างกับกระบวนการเชื่อมทิกแบบเติมลวด (TIG1) อย่างไม่มีนัยสำคัญ แต่ให้ค่าความแข็งแรงดึงแตกต่างกับกระบวนการเชื่อมทิกแบบไม่เติมลวด (TIG2) อย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95% และกลุ่ม B หมายถึง การเชื่อมทิกแบบไม่เติมลวด (TIG2) ให้ค่าความแข็งแรงดึงแตกต่างกับกระบวนการเชื่อมทิกแบบเติมลวด (TIG1) อย่างไม่มีนัยสำคัญ แต่ให้ค่าความแข็งแรงดึงแตกต่างกับการเชื่อมเสียดทานแบบกวน (FSW) อย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95% หรือสามารถสรุปได้ว่าการเชื่อมเสียดทานแบบกวน (FSW) ให้ค่าความแข็งแรงดึงที่ไม่แตกต่างกับการเชื่อมทิกแบบเติมลวด (TIG1) แต่ให้ค่าความแข็งแรงดึงที่แตกต่างกับการเชื่อมทิกแบบไม่เติมลวด (TIG2) และการเชื่อมทิกแบบเติมลวด (TIG1) ให้ค่าความแข็งแรงดึงที่ไม่แตกต่างกับการเชื่อมทิกแบบไม่เติมลวด (TIG2)



ตารางที่ 5 วิเคราะห์ความแตกต่างภายในปัจจัยของกระบวนการเชื่อมชิ้นงานที่ไม่ได้ผ่านกระบวนการทางความร้อน T6 ด้วยวิธี Turkey's HSD test



ตารางที่ 6 วิเคราะห์ความแตกต่างภายในปัจจัยของกระบวนการเชื่อมชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการทางความร้อน T6 ด้วยวิธี Turkey's HSD test



จากตารางที่ 6 เป็นการวิเคราะห์จับคู่ตัวแปรเพื่อหาความแตกต่างของตัวแปรภายในปัจจัยของกระบวนการเชื่อมชิ้นงานทดสอบที่ผ่านกระบวนการทางความร้อน T6 ด้วยวิธี Turkey's HSD test เมื่อพิจารณาจากค่า P-value ในแต่ละคู่ตัวแปร พบว่าสามารถแบ่งได้เป็น 3 กลุ่ม ประกอบด้วย กลุ่ม A B และ C หมายถึง กระบวนการเชื่อมเสียดทาน



แบบกวน (FSW) ให้ค่าความแข็งแรงดึงแตกต่างกับกระบวนการเชื่อมทิกแบบเติมลวด (TIG1) อย่างมีนัยสำคัญและให้ค่าความแข็งแรงดึงแตกต่างกับกระบวนการเชื่อมทิกแบบไม่เติมลวด (TIG2) อย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95% รวมทั้งการเชื่อมทิกแบบเติมลวด (TIG1) ให้ค่าความแข็งแรงดึงแตกต่างกับกระบวนการเชื่อมทิกแบบไม่เติมลวด (TIG2) อย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95% หรือสามารถสรุปได้ว่าทุกกระบวนการเชื่อมให้ค่าความแข็งแรงดึงที่แตกต่างกัน โดยที่กระบวนการเชื่อมเสียดทานแบบกวนมีค่าความแข็งแรงดึงเฉลี่ยสูงสุด คือ 168.32 MPa รองลงมาคือกระบวนการเชื่อมทิกแบบเติมลวดมีค่าความแข็งแรงดึงเฉลี่ย 155.62 MPa และกระบวนการเชื่อมทิกแบบไม่เติมลวดมีค่าความแข็งแรงดึงเฉลี่ยต่ำสุด คือ 136.64 MPa

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

จากการศึกษาสามารถสรุปผลและให้ข้อเสนอแนะงานวิจัยได้ดังนี้

1. สรุปผลการวิจัย

- 1) ลักษณะทางกายภาพของแนวเชื่อมในทุกกระบวนการเชื่อมมีความสมบูรณ์ สามารถเชื่อมระหว่างอะลูมิเนียมผสมต่างชนิดกัน SSM356 และ SSM6061 ได้
- 2) ลักษณะโครงสร้างมหภาคของการเชื่อมเสียดทานแบบกวนมีการประสานกันของอะลูมิเนียมผสมทั้งสองชนิดอย่างชัดเจน แนวเชื่อมมีขนาดกว้างมากกว่าการเชื่อมทิก สำหรับการเชื่อมทิกแบบเติมลวดและไม่เติมลวดมีรูพรุนเกิดขึ้นบริเวณเนื้อเชื่อม
- 3) ค่าความแข็งแรงดึงของแนวเชื่อมโดยกระบวนการเชื่อมเสียดทานแบบกวนมีค่า 168.32 MPa การเชื่อมทิกแบบเติมลวด มีค่า 155.62 MPa และการเชื่อมทิกแบบไม่เติมลวด มีค่า 136.64 MPa ตามลำดับ
- 4) ค่าความแข็งบริเวณตรงกลางแนวเชื่อมมีค่าสูงสุดและค่อย ๆ ลดลงจนถึงบริเวณที่ได้รับผลกระทบทางความร้อน ซึ่งบริเวณนี้จะมีค่าความแข็งต่ำสุดจากนั้นค่าความแข็งเพิ่มขึ้นจนถึงบริเวณโลหะพื้นฐาน โดยค่าความแข็งบริเวณตรงกลางแนวเชื่อมในกระบวนการเชื่อมเสียดทานแบบกวนที่ความเร็วหมุนตัวกวน 1,400 รอบ/นาที มีค่าความแข็งเฉลี่ยสูงสุด คือ 74.9 HV รองลงมาคือกระบวนการเชื่อมทิกแบบไม่เติมลวดมีค่าความแข็งเฉลี่ย คือ 74.1 HV การเชื่อมทิกแบบเติมลวดมีค่าความแข็งเฉลี่ย คือ 73.5 HV และการเชื่อมเสียดทานแบบกวนที่ความเร็วหมุนตัวกวน 1,750 รอบ/นาที มีค่าความแข็งเฉลี่ยต่ำสุด คือ 67.5 HV
- 5) กระบวนการเชื่อมและลักษณะชิ้นงานมีผลต่อค่าความแข็งแรงดึงอย่างมีนัยสำคัญ ส่วนอิทธิพลร่วมระหว่างกระบวนการเชื่อมและลักษณะชิ้นงานมีผลต่อค่าความแข็งแรงดึงอย่างไม่มีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95%
- 6) ผลการวิเคราะห์ด้วยวิธี Turkey's HSD test กรณีชิ้นงานไม่ผ่าน T6 พบว่าการเชื่อมเสียดทานแบบกวน (FSW) ให้ค่าความแข็งแรงดึงที่ไม่แตกต่างกับการเชื่อมทิกแบบเติมลวด (TIG1) แต่ให้ค่าความแข็งแรงดึงที่แตกต่างกับการเชื่อมทิกแบบไม่เติมลวด (TIG2) และการเชื่อมทิกแบบเติมลวด (TIG1) ให้ค่าความแข็งแรงดึงที่ไม่แตกต่างกับการเชื่อมทิกแบบไม่เติมลวด (TIG2) ส่วนกรณีชิ้นงานผ่าน T6 พบว่าทุกกระบวนการเชื่อมให้ค่าความแข็งแรงดึงที่แตกต่างกัน โดยกระบวนการเชื่อมเสียดทานแบบกวนมีค่าความแข็งแรงดึงเฉลี่ยสูงสุด รองลงมาคือ กระบวนการเชื่อมทิกแบบเติมลวด และกระบวนการเชื่อมทิกแบบไม่เติมลวดจะให้ค่าเฉลี่ยต่ำสุด

2. ข้อเสนอแนะ

ควรจัดเตรียมวัสดุและวางแผนการทำกระบวนการทางความร้อน T6 ให้พร้อมมากที่สุด เนื่องจากต้องใช้เวลานานเกินไป



เอกสารอ้างอิง

- Kasman, S. (2013). Multi-response optimization using the Taguchi-based grey relational analysis: a case study for dissimilar friction stir butt welding of AA6082-T6/AA5754-H111. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 68(1), 795-804.
- Mishra, R. S., & Ma, Z. Y. (2005). Friction stir welding and processing. *Mater. Sci. Eng. R.*, 50, 1-78.
- Montgomery, D. C. (2005a). *“Introduction of Statistical Quality control”* (5th ed.). John Wiley & Sons Inc: USA.
- Montgomery, D. C. (2005b). *“Design and Analysis of Experiments”* (6th ed.). John Wiley & Sons Inc: USA.
- Muangjunburee, P. (2012). *WELDING ENGINEERING*. Songkhla: Educational Technology, Faculty of Engineering, Prince of Songkla University.
- Rajakumar, S., Muralidharan, C., & Balasubramanian, V. (2010). Optimization of the friction stir welding process and tool parameters to attain a maximum tensile strength of AA7075-T6 aluminium alloy. *Journal of Engineering Manufacture*, 224(8), 1175-1191.
- Wannasin, J., Martinezb, R., & Flemings, M. (2006). Grain refinement of an aluminum alloy by introducing gas bubbles during solidification. *Scripta Materialia*, 55(2), 115-118.