



ผลกระทบของพารามิเตอร์การเชื่อมเสียดทานแบบกวนต่อความแข็งแรงดึงของรอยต่อชนอะลูมิเนียมผสมหล่อกิ่งของแข็งเกรด 2024

อังคาร คำเรือน และ สมศักดิ์ ศิวดำรงพงศ์*

สาขาวิชาวิศวกรรมการผลิต สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

อุกฤษฏ์ ชนทรัพย์ทวี

สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา

ประภาศ เมืองจันทร์บุรี

ภาควิชาวิศวกรรมเหมืองแร่และวัสดุ คณะวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

* ผู้นิพนธ์ประสานงาน โทรศัพท์ 0 4422 4236 อีเมล: somsaksi@sut.ac.th DOI: 10.14416/j.kmutnb.2020.12.003

รับเมื่อ 27 มีนาคม 2563 แก้ไขเมื่อ 30 เมษายน 2563 ตอบรับเมื่อ 5 พฤษภาคม 2563 เผยแพร่ออนไลน์ 14 ธันวาคม 2563

© 2021 King Mongkut's University of Technology North Bangkok. All Rights Reserved.

บทคัดย่อ

การเชื่อมเสียดทานแบบกวนเป็นการเชื่อมแบบไม่หลอมละลายซึ่งให้คุณภาพรอยเชื่อมที่ดี โดยเฉพาะสำหรับวัสดุที่เชื่อมได้ยากด้วยวิธีหลอมละลาย อย่างไรก็ตาม ในการเชื่อมเสียดทานแบบกวนนั้นจำเป็นต้องตั้งพารามิเตอร์การเชื่อมให้เหมาะสมเพื่อให้ได้รอยเชื่อมที่ดี ประกอบกับการศึกษาเรื่องการเชื่อมวัสดุอะลูมิเนียมผสมหล่อกิ่งของแข็งยังมีจำนวนน้อย งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลกระทบของพารามิเตอร์การเชื่อมเสียดทานแบบกวนต่อโครงสร้างจุลภาค และความแข็งแรงดึงของแนวเชื่อมต่อชนวัสดุอะลูมิเนียมผสมหล่อกิ่งของแข็ง 2024 ด้วยเทคนิคออกแบบการทดลองแบบแฟกทอเรียลเต็มจำนวน โดยกำหนดปัจจัยในการทดลอง 3 ปัจจัย ได้แก่ ความเร็วรอบในการหมุนกวนที่ 530 และ 790 รอบต่อนาที ความเร็วเดินเชื่อมที่ 22 และ 36 มิลลิเมตรต่อนาที และรูปทรงของหัวกวน แบบทรงกรวย ทรงกระบอกเรียบ และทรงกระบอกเกลียว ผลการทดลองพบว่า ผลกระทบหลักที่ส่งผลต่อค่าความแข็งแรงดึงมากที่สุด คือ ความเร็วรอบในการหมุนกวน และรูปทรงของหัวกวนตามลำดับ ที่ระดับนัยสำคัญ 95% ในขณะที่ความเร็วเดินเชื่อมในช่วงระดับปัจจัยที่ศึกษาไม่ส่งผลต่อความแข็งแรงดึงอย่างมีนัยสำคัญ โดยรูปทรงของหัวกวนแบบทรงกระบอกเรียบ ความเร็วรอบในการหมุนกวน 530 รอบต่อนาที และความเร็วเดินเชื่อม 36 มิลลิเมตรต่อนาที ให้ค่าเฉลี่ยความแข็งแรงดึงสูงสุด 212 เมกะปาสคาล คิดเป็นความแข็งแรงดึงของงานเชื่อมต่อเนื้อวัสดุเดิมเท่ากับ 99%

คำสำคัญ: การเชื่อมเสียดทานแบบกวน ความแข็งแรงดึง อะลูมิเนียมผสมหล่อกิ่งของแข็ง 2024

การอ้างอิงบทความ: อังคาร คำเรือน, สมศักดิ์ ศิวดำรงพงศ์, อุกฤษฏ์ ชนทรัพย์ทวี และ ประภาศ เมืองจันทร์บุรี, “ผลกระทบของพารามิเตอร์การเชื่อมเสียดทานแบบกวนต่อความแข็งแรงดึงของรอยต่อชนอะลูมิเนียมผสมหล่อกิ่งของแข็งเกรด 2024,” วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, ปีที่ 31, ฉบับที่ 2, หน้า 266-277, เม.ย.-มิ.ย. 2564.



Influence of Friction Stir Welding Parameters on Tensile Strength of Semi-solid Cast 2024 Aluminum Alloy Butt Joints

Angkarn Kamruan and Somsak Siwadamrongpong*

School of Manufacturing Engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima, Thailand
Ukrit Thanasubtawee

Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Lanna, Chiang Mai, Thailand
Prapas Muangjunburee

Department of Mining and Materials Engineering, Faculty of Engineering, Prince of Songkla University, Songkhla, Thailand

* Corresponding Author, Tel. 0 4422 4236, E-mail: somsaksi@sut.ac.th DOI: 10.14416/j.kmutnb.2020.12.003

Received 27 March 2020; Revised 30 April 2020; Accepted 5 May 2020; Published online: 14 December 2020

© 2021 King Mongkut's University of Technology North Bangkok. All Rights Reserved.

Abstract

Friction stir welding is one of solid state welding techniques which provide good weld joint compared with fusion welding techniques, especially for difficult-to-fusion welded materials. However, appropriate welding parameters were necessary to achieve good weld joints with friction stir welding. Moreover, there are a few reports on welding of semi-solid aluminum. The aims of this study are to investigate the influence of friction stir welding parameters on the microstructure and tensile strength of friction stir welding of butt joints between Semi-solid cast aluminum alloy 2024. A full factorial design technique was employed with 3 parameters, consisting of the rotation speed, welding speed and shape of stir head (cone, cylindrical and thread). Based on statistical results, it was found that the rotational speed and the shape of stir head parameters had an influence on microstructure and tensile strength of a welded joint, while welding speed was not a significant parameter at the 95% significance level. It was indicated that a cylindrical stir head at a rotational speed of 790 rpm and 36 mm/min welding speed yielded the highest tensile strength of 212 MPa, accounting for 99% of based material tensile strength.

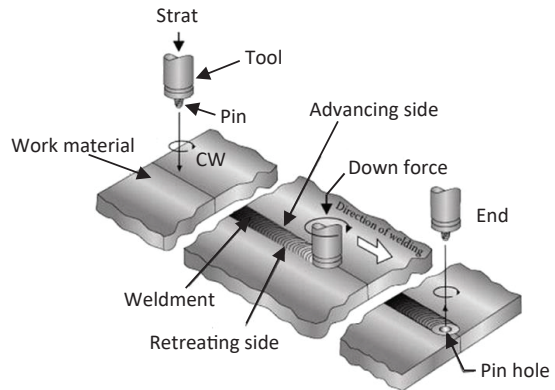
Keywords: Friction Stir Welding, Tensile Strength, Aluminum Alloy Semi-solid Metal 2024

Please cite this article as: A. Kamruan, S. Siwadamrongpong, U. Thanasubtawee, and P. Muangjunburee, "Influence of friction stir welding parameters on tensile strength of semi-solid cast 2024 aluminum alloy butt joints," *The Journal of KMUTNB*, vol. 31, no. 2, pp. 266–277, Apr.–Jun. 2021 (in Thai).

1. บทนำ

ในปัจจุบันอะลูมิเนียมผสมเข้ามามีบทบาทที่สำคัญและมีปริมาณการใช้งานเพิ่มมากขึ้นในอุตสาหกรรมต่างๆ อย่างกว้างขวาง เช่น อุตสาหกรรมยานยนต์ อุตสาหกรรมชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ ชิ้นส่วนเครื่องบิน อุตสาหกรรมแม่พิมพ์ และชิ้นส่วนประกอบเครื่องจักรกล เนื่องจากว่าเป็นวัสดุที่หล่อขึ้นรูปได้ง่าย ง่ายต่อการแปรรูป มีความแข็งและความแข็งแรงสูง มีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนต่ำ ไม่เป็นสนิม สามารถเพิ่มความแข็งด้วยวิธีการอบชุบ กัดแต่งได้ง่ายและขึ้นรูปได้ดี โดยเฉพาะอย่างยิ่งอะลูมิเนียมมีน้ำหนักเพียง 1 ใน 3 ของเหล็กกล้า ซึ่งเมื่อคิดเป็นอัตราส่วนความแข็งแรงต่อน้ำหนักแล้วอะลูมิเนียมมีความแข็งแรงสูงกว่าเหล็กมาก [1] และในบางกระบวนการผลิตจำเป็นต้องมีการขึ้นรูปด้วยวิธีการเชื่อม แต่อะลูมิเนียมผสมบางชนิดเป็นวัสดุที่เชื่อมได้ค่อนข้างยากด้วยการเชื่อมแบบหลอมละลาย เนื่องจากยากในการควบคุมโลหะหลอมเหลวระหว่างการเชื่อม ด้วยเหตุนี้การเชื่อมเสียดทานแบบกวน (Friction Stir Welding; FSW) ซึ่งเป็นการเชื่อมโลหะในสภาวะของแข็ง (Solid State Welding) สามารถให้คุณภาพรอยเชื่อมที่ดี และมีประสิทธิภาพในด้านความแข็งแรงสูงสูงกว่าการเชื่อมแบบหลอมละลายจึงถูกนำมาประยุกต์ใช้เพื่อทำให้เกิดโครงสร้างของแนวเชื่อมที่มีเกรนขนาดเล็กละเอียด สามารถรับแรงได้สูง [2] และมีความเหมาะสมมากสำหรับการเชื่อมโลหะที่ไม่ต้องการให้เกิดการหลอมละลายขึ้น ซึ่งอาจส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างทางจุลภาคจากการเย็นตัวจากสภาวะของเหลวไปสู่สภาวะของแข็งได้ เช่น โลหะอะลูมิเนียมผสมเกรด 2024 7075 ที่เป็นอะลูมิเนียมที่มีความแข็งแรงสูง รวมถึงอะลูมิเนียมผสมที่ผ่านการหล่อขึ้นรูปแบบกึ่งของแข็งที่ยังมีการวิจัยการเชื่อมอย่างจำกัด

อะลูมิเนียมผสมหล่อแบบกึ่งของแข็ง SSM 2024 เป็นวัสดุที่มีโครงสร้างเกรนแบบก้อนกลม ได้จากกรรมวิธีการหล่อโลหะกึ่งของแข็ง (GISS) [3] การเชื่อมอะลูมิเนียมผสมหล่อแบบกึ่งของแข็งยังเป็นเรื่องที่มีการค้นคว้าวิจัยอยู่ในวงจำกัด ถึงแม้จะมีการเริ่มนำไปใช้ในงานอุตสาหกรรมผลิตชิ้นส่วนยานยนต์ทั้งในประเทศและต่างประเทศแล้วก็ตาม ใน

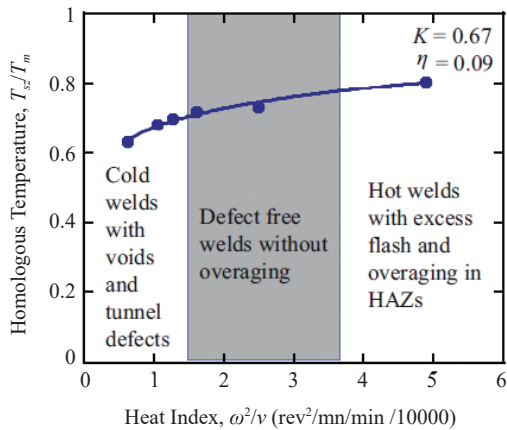


รูปที่ 1 การเชื่อมเสียดทานแบบกวน [5]

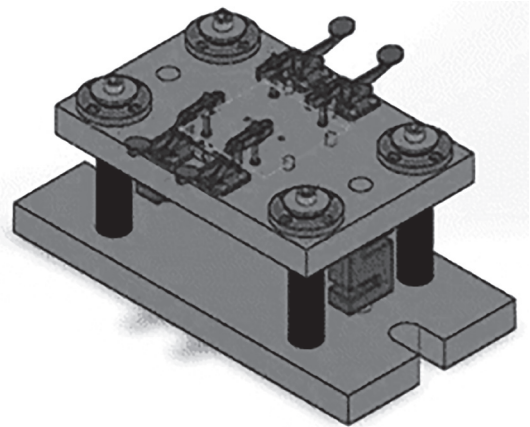
กระบวนการเชื่อมเสียดทานแบบกวนมีปัจจัยสำคัญที่ใช้ในการทดลอง ได้แก่ ความเร็วรอบในการหมุนกวน ความเร็วในการเดินแนวเชื่อม ความสมดุลของแรงกด และรูปแบบของหัวกวน เป็นต้น ดังรูปที่ 1 โดยปัจจัยเหล่านี้ส่งผลต่อการประสานของเนื้อโลหะ ความแข็งแรงของรอยเชื่อม ซึ่งความร้อนจากแรงเสียดทาน เนื่องจากการกวนมีผลต่อเนื้อโลหะ และสมบัติทางกลของรอยเชื่อม จุดมุ่งหมายในการเชื่อมเสียดทานแบบกวนของอะลูมิเนียมผสม คือรักษาสมบัติทางกลของบริเวณแนวเชื่อม (Mechanical Properties of Joint) ให้ใกล้เคียงกับเนื้อวัสดุเดิมมากที่สุด และลดผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างทางโลหะวิทยา ซึ่งส่งผลทำให้แนวเชื่อม (Welded Region) รวมถึงบริเวณรอบๆ แนวเชื่อมมีการเปลี่ยนแปลงทางโครงสร้างทำให้สมบัติทางกลมีความแข็งแรงลดลงจากผลกระทบทางด้านความร้อน (Heat Affected Zone; HAZ) [4] ดังนั้นพารามิเตอร์การเชื่อมที่เหมาะสมส่งผลให้ได้คุณภาพรอยเชื่อมที่ดี มีประสิทธิภาพการใช้งานสูงขึ้น

รายงานของ Lui และคณะ [6] ได้ศึกษาสมบัติความแข็งแรงดึงต่อกระบวนการเชื่อมเสียดทานแบบกวนของอะลูมิเนียม AA2017-T351 โดยกำหนดค่าของค่าเรโวลูชันพิทช์ (Revolution Pitch) ที่ 0.02 ถึง 0.4 มิลลิเมตรต่อรอบ ดังสมการที่ (1)

$$\text{Revolution pitch} = \frac{T}{R} \quad (1)$$



รูปที่ 2 แผนภาพของช่วงค่าดัชนีความร้อน [7]



รูปที่ 3 อุปกรณ์จับยึดในการเชื่อมเสียดทานแบบกวน

โดยที่ T คือ ความเร็วในการเดินเชื่อม (mm/min) และ R คือ ความเร็วรอบในการหมุนกวน (rpm) พบว่า ค่าเรโวลูชันพิทช์ (Revolution Pitch; mm/rev) เท่ากับ 0.07 มิลลิเมตรต่อรอบ ให้ค่าความแข็งแรงถึงสูงสุดที่ 82% ของเนื้อวัสดุเดิม

รายงานของ Iman และคณะ [7] ที่ได้ศึกษาผลกระทบจากกระบวนการเชื่อมเสียดทานแบบกวนของอะลูมิเนียมเกรด AA6063-T4 พบว่า รอยเชื่อมมีความสมบูรณ์โดยไม่เกิดข้อบกพร่อง (Defect Free Weld) สอดคล้องตามค่าดัชนีความร้อน (Heat Index; HI) ที่ช่วง 1.5–3.5 ไม่เกิดข้อบกพร่องในรอยเชื่อม ดังรูปที่ 2

ประกอบกับยังไม่มีรายงานข้อมูลการศึกษาการเชื่อมวัสดุอะลูมิเนียมผสมหล่อแบบกึ่งของแข็งเกรด 2024 งานวิจัยนี้จึงต้องการศึกษาพารามิเตอร์การเชื่อมเสียดทานแบบกวนของอะลูมิเนียมผสมหล่อกึ่งของแข็งเกรด 2024 โดยมีปัจจัยที่ศึกษาคือ ความเร็วรอบในการหมุนกวน ความเร็วในการเดินเชื่อม และรูปทรงของหัวกวนที่ใช้ในการหมุนกวน ต่อการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางจุลภาค และความแข็งแรงดึง โดยการกำหนดระดับปัจจัยจะอ้างอิงกับค่าเรโวลูชันพิทช์ และค่าดัชนีความร้อน

2. วัสดุ อุปกรณ์และวิธีการวิจัย

2.1 วัสดุทดลอง

วัสดุที่ใช้ในการทดลอง คือ อะลูมิเนียมผสมหล่อกึ่ง

ของแข็งเกรด 2024 ที่หล่อด้วยกระบวนการหล่อแบบกึ่งของแข็ง โดยมีส่วนผสมทางเคมี ดังตารางที่ 1 ซึ่งมีส่วนผสมสอดคล้องกับอะลูมิเนียมผสมเกรด 2024 ตามมาตรฐาน JIS A2024

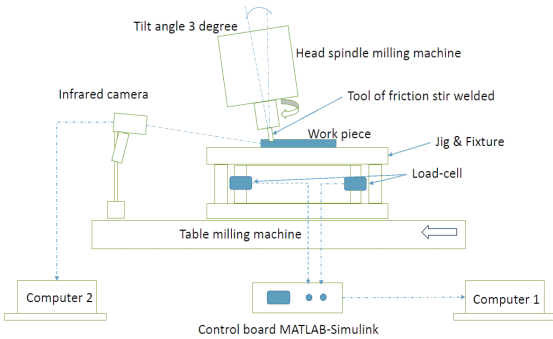
ตารางที่ 1 ส่วนผสมของโลหะอะลูมิเนียมผสมหล่อกึ่งของแข็งเกรด 2024 (wt%)

Cu	Mg	Mn	Si	Fe	Ti	Zn	Al
5.09	1.67	0.63	0.4	0.33	0.03	0.04	Bal.

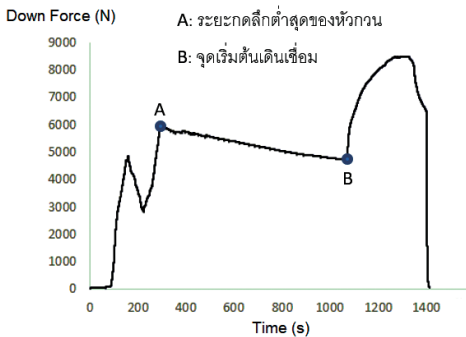
2.2 การเตรียมชิ้นงานเชื่อม

ชิ้นงานทดลองนำมาขึ้นรูปให้มีขนาดความกว้าง 50 มิลลิเมตร ความยาว 100 มิลลิเมตร และความหนา 4 มิลลิเมตร นำชิ้นงาน 2 ชิ้น มาเชื่อมด้วยวิธีต่อชนโดยติดตั้งบนอุปกรณ์จับยึด (Jig & Fixture) ที่สามารถวัดแรงกดในขณะที่เชื่อมได้ ดังรูปที่ 3 โดยนำอุปกรณ์จับยึดมาติดตั้งบนชุดโต๊ะของแท่นเครื่องมิลลิ่ง (Milling Machine)

ขณะเริ่มกระบวนการเชื่อมชิ้นงาน ดังรูปที่ 1 เมื่อหัวกวนเริ่มสัมผัสชิ้นงานที่อยู่บนอุปกรณ์จับยึดที่ติดตั้งโหลดเซลล์ (Load Cell) เพื่อวัดแรงกด (Down Force) ในแนวตั้งมาที่โหลดเซลล์ และบันทึกค่าตลอดการเชื่อม ดังรูปที่ 4 และแรงกดตลอดการเชื่อมดังรูปที่ 5 การบันทึกแรงกดพบว่า แรงกดเพิ่มสูงขึ้นในขณะที่หัวกวนลงในชิ้นงาน และลดลงเมื่อแห้วหัวกวน



รูปที่ 4 แผนภาพการติดตั้งอุปกรณ์ในการทดลอง



รูปที่ 5 แรงกดในขณะที่เชื่อมเสียดทานแบบกวนของหัวกวนแบบทรงกระบอกเรียบ ความเร็วรอบในการหมุนกวน 790 รอบต่อนาที ความเร็วในการเดินเชื่อม 22 มิลลิเมตรต่อนาที

ทิ้งไว้หลังจากกดจนได้ระยะกดลึกที่สุด และแรงกดเพิ่มขึ้นอีกเมื่อเริ่มเดินเชื่อม จากรูปที่ 5 ทำให้ทราบพฤติกรรมของแรงกดที่เกิดขึ้น โดยสัมพันธ์กับระยะกดลึกเสียดทาน (Plunge Depth) ทำให้เกิดความร้อนภายในเนื้อวัสดุส่งผลให้เกิดการอ่อนตัวหรืออยู่ในสภาวะพลาสติก การเกิดการเสียดทานระหว่างพื้นผิวของปากเครื่องมือกวนกับชิ้นงาน ทำให้เกิดความร้อนขึ้นอย่างรวดเร็ว ระยะกดลึกเสียดทานเพิ่มมากขึ้นมีผลต่อปริมาณความร้อนที่เกิดขึ้นเช่นกัน ซึ่งจะเกิดครีบด้านข้างแนวเชื่อมมาก และมีผลกระทบให้ชิ้นงานบางลง ส่วนระยะกดลึกเสียดทานน้อยทำให้ปริมาณความร้อนเกิดขึ้นน้อยในการเชื่อม ความร้อนที่ไม่เพียงพออาจส่งผลให้เกิดรูตำหนิขึ้นภายในโครงสร้าง [5] ในงานวิจัยนี้ควบคุมระยะเวลาการแช่หัวกวน

ทิ้งไว้ จากจุด A ถึงจุด B เป็นระยะเวลา 800 วินาที เพื่อเป็นการกระจายความร้อน และลดแรงกดก่อนเดินเชื่อม และป้องกันความเสียหายที่อาจเกิดขึ้นต่อชุดแกนสปินเดิลของเครื่องจักร โดยแรงกดสูงสุดตลอดการเชื่อมอยู่ในช่วง 8,200–8,400 นิวตัน

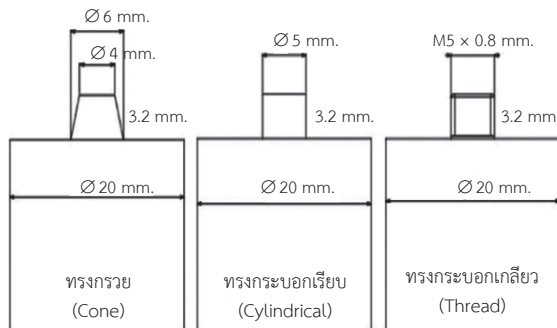
2.3 การออกแบบการทดลอง

การทดลองถูกออกแบบภายใต้การออกแบบการทดลองแบบแฟกทอเรียลเต็มจำนวน (Full Factorial Design) ที่มีความเหมาะสมกับการออกแบบการทดลองในกรณีที่เลือกจำนวนระดับของปัจจัยต่างกัน โดยกำหนดพารามิเตอร์ในการศึกษา 3 พารามิเตอร์ ประกอบด้วยความเร็วรอบในการหมุนกวน ความเร็วในการเดินเชื่อม และรูปทรงของหัวกวน แสดงดังตารางที่ 2 โดยเก็บข้อมูลการทดสอบความแข็งแรงตั้งจากจำนวนสิ่งตัวอย่างจำนวน 2 ตัวอย่าง แสดงดังตารางที่ 2 โดยที่ค่าระดับของแต่ละพารามิเตอร์สามารถคิดเป็นค่าเรโซลูชันพิตซ์ 0.03-0.07 มิลลิเมตรต่อรอบ และค่าดัชนีความร้อน 1.3-2.9 อ้างอิงตามรายงานของ Liu และคณะ [6] Imam และคณะ [7]

ตารางที่ 2 ตัวแปรและระดับในการทดลอง

ปัจจัยในการทดลอง	หน่วย	ระดับของปัจจัย		
ความเร็วรอบในการหมุนกวน	RPM	530	790	-
ความเร็วในการเดินเชื่อม	mm/min	22	36	-
รูปทรงของหัวกวน	None	Cone	Cylinder	Thread

หัวกวนที่ใช้ในงานวิจัยนี้มี 3 รูปแบบ เนื่องจากมีรายงานเกี่ยวกับอิทธิพลของหัวกวน ต่อการไหลตัวของเนื้อวัสดุในแนวอนจากด้านหน้าไปด้านหลังและในแนวตั้งจากด้านบนลงด้านล่าง จึงทำให้เกิดการผสมผสานเข้าเป็นเนื้อเดียวกันได้ดีภายในโครงสร้างรอยเชื่อม โดยทั่วไปแล้วลักษณะพื้นฐานหัวกวนที่นิยมใช้เป็นแบบ หัวกวนทรงกระบอกเรียบ และหัวกวนทรงกรวย นอกจากนี้แล้วผู้วิจัยยังได้ออกแบบให้มีการสร้างเกลียวหรือร่องเกลียวในพื้นที่ผิวหัวกวนเพิ่มเติมเพื่อให้การไหลตัวของเนื้อวัสดุมีประสิทธิภาพมากขึ้น รวมถึงการ



รูปที่ 6 เครื่องมือรูปทรงของหัวขวานที่ใช้ในการทดลอง

ลดแรงกระทำที่เกิดขึ้นในกระบวนการอีกด้วย [8] หัวขวานที่ผลิตจากเหล็กกล้าเครื่องมือที่มีความแข็งทนต่อการสึกหรอสูงเกรด DC53 (SKD61 Modified) โดยหัวขวานทั้ง 3 แบบ มีความยาวของหัวขวาน 3.2 มิลลิเมตร ขนาดความโตของหัวขวาน 5 มิลลิเมตร และมีขนาดบ่า (Shoulder) 20 มิลลิเมตร โดยคิดเป็นอัตราส่วนขนาดบ่ากวนต่อหัวขวาน D/d เท่ากับ 4 เท่า ดังรูปที่ 6

โดยการทดลองครั้งนี้การเชื่อมเสียดทานแบบกวนถูกเชื่อมด้วยเครื่องมือลึง ยี่ห้อ Haven รุ่น XLW6332HIV มุมเอียงการกวน (Tilt angle) 3 องศา จุดเริ่มต้นของการเชื่อมเริ่มจากบริเวณตรงกลางจุดต่อของชิ้นงานทั้งสองชิ้น และห่างจากขอบชิ้นงาน 15 มิลลิเมตร จากนั้นเมื่อหัวขวานเริ่มหมุนด้วยความเร็วรอบคงที่ตามที่กำหนดไว้ เริ่มป้อนหัวขวานลงไปยังชิ้นงานจนกระทั่งได้ความลึกและบ่าของตัวขวานสัมผัสกับผิวชิ้นงานตามความลึกที่กำหนด จากนั้นตัวขวานหมุนอยู่กับที่เพื่อเป็นการกระจายความร้อนให้ทั่วถึงและแรงกดค่อยๆ ลดลง จากนั้นจึงเริ่มเดินเชื่อมบนชิ้นทดสอบตามความเร็วในการเดินเชื่อมที่กำหนดโดยระบบอัตโนมัติ เมื่อถึงปลายแนวเชื่อมตัวขวานหมุนอยู่กับที่ 15 วินาที ก่อนยกตัวขวานออกจากแนวเชื่อม

ปัจจัยในการทดลอง ดังตารางที่ 2 กำหนดให้มี 3 ปัจจัยหลัก คือ ความเร็วรอบในการหมุนกวน (Rotation Speed) มี 2 ระดับ คือ 530 และ 790 รอบต่อนาที ความเร็วในการเดินเชื่อม (Welding Speed) มี 2 ระดับ คือ 22 และ 36 มิลลิเมตรต่อนาที และชนิดรูปทรงของหัวขวาน 3 รูปแบบ

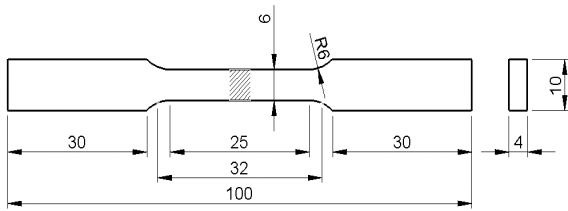
ได้แก่ แบบทรงกรวย แบบทรงกระบอกเรียบ และแบบทรงกระบอกเกลียว ปัจจัยที่ควบคุมคงที่ คือ การเอียงองศาของตัวขวาน 3 องศา (Tool Tilt Angle) ขนาดของตัวขวาน (Pin Dimensions) และระยะกดลึกที่ 100% ของขนาดบ่าของตัวขวาน (Shoulder) ที่ความลึกเท่ากับ 3.8 มิลลิเมตร ระยะกดลึกมีผลกับการเพิ่มขึ้นของความแข็งแรงจากกลไกความเครียดช่วยให้แนวเชื่อมมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น ดังนั้นระยะกดลึกจึงมีผลต่อการลดความหนาแน่นของดิสโลเคชัน (Dislocation) ดังนั้นจึงช่วยปรับปรุงสมบัติทางกลในการเชื่อม โดยค่าระยะเผื่อแผ่นรองหลัง (Penetration) คือ ระยะที่ปลายหัวขวานห่างจากพื้นด้านล่างเท่ากับ 0.2 มิลลิเมตร [9]

2.4 โครงสร้างทางโลหะวิทยา

หลังจากเชื่อมชิ้นงานทดสอบเรียบร้อยแล้วชิ้นทดสอบถูกตัดตั้งฉากกับแนวเชื่อม จากนั้นนำไปขัดด้วยกระดาษทรายเบอร์ 400, 600, 800, 1000, 1200 และ 2400 จากนั้นขัดด้วยผ้าสักหลาดและผงขัดอะลูมินาขนาด 5 ไมครอน และนำไปถ่ายภาพโครงสร้างด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบลำแสง (O.M.) ยี่ห้อ Olympus รุ่น LEXT 3D OSL4000 กล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (SEM & EDS & EBSD) ยี่ห้อ JEOL รุ่น JSM7100F เพื่อดูลักษณะโครงสร้างทางจุลภาคบริเวณเนื้อวัสดุเดิมเปรียบเทียบกับบริเวณรอยเชื่อม

2.5 การทดสอบความแข็งแรงดึง

ชิ้นงานที่ได้ถูกนำไปทดสอบความแข็งแรงดึงของแนวเชื่อม โดยชิ้นงานทดสอบถูกตัดตั้งฉากกับแนวเชื่อม และให้รอยเชื่อมอยู่กึ่งกลางของชิ้นทดสอบ ใช้อัตราเร็วในการดึงที่ 1.002 มิลลิเมตรต่อนาที ซึ่งขนาดและรูปทรงของชิ้นทดสอบอ้างอิงตามมาตรฐาน ASTM-E8M [9] ดังรูปที่ 7 โดยชิ้นงานทดสอบ (Specimen) ถูกเตรียมด้วยเครื่องตัดชิ้นงานได้น้ำด้วยกระแสไฟฟ้าแบบลวดระบบอัตโนมัติ (CNC Wire Cut EDM) ยี่ห้อ Mitsubishi electric รุ่น MV-R และทดสอบแรงดึงด้วยเครื่องทดสอบสมบัติทางกล ยี่ห้อ SHIMADZU รุ่น AG-50 KNX



รูปที่ 7 ชิ้นงานทดสอบแรงดึงตามมาตรฐาน ASTM-E8M [9]

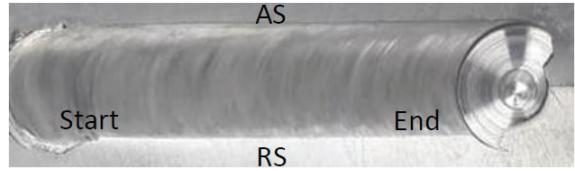
3. ผลการทดลอง

การทดลองเชื่อมด้วยกระบวนการเชื่อมเสียดทานแบบกวนของอะลูมิเนียมผสมหล่อกิ่งของแข็ง เกรด 2024 โดยการนำเครื่องมือลิง มาประยุกต์ใช้เป็นเครื่องเชื่อมเสียดทานแบบกวน รอยเชื่อมที่ได้จากการสังเกตและตรวจสอบทางกายภาพเบื้องต้น มีการประสานของวัสดุทั้งสองได้ดี ซึ่งลักษณะแนวเชื่อมที่ได้เปลี่ยนแปลงไปตามปัจจัยที่ใช้ในแต่ละเงื่อนไขของการเชื่อมค่าต่างๆ ที่ได้จากการทดลองสามารถแสดงได้ดังนี้

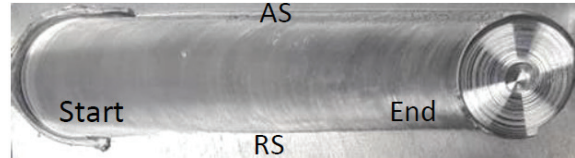
3.1 โครงสร้างทางโลหะวิทยา

ลักษณะผิวด้านบนของแนวเชื่อมพบว่า ที่ความเร็วการหมุนหัวกวน 530 และ 790 รอบต่อนาที และความเร็วในการเดินแนวเชื่อม 22 และ 36 มิลลิเมตรต่อนาที ผิวหน้าของรอยเชื่อมจากวิธีแบบต่อชนประสานกันได้ดี ไม่เกิดข้อบกพร่องหรือรอยแยกของชิ้นงานทั้งสองชิ้น ดังรูปที่ 8 ลักษณะผิวหน้ารอยเชื่อมที่ความเร็วรอบ 530 รอบต่อนาที มีความเรียบมันวาวกว่ารอยเชื่อมที่ความเร็วรอบในการหมุนกวน 790 รอบต่อนาที บริเวณด้านแอดวานซิงไซด์ (Advancing Side; AS) เกิดครีบมากกว่าด้านรีเทรตติ้งไซด์ (Retreating Side; RS) เนื่องจากลักษณะทิศทางการไหลของเนื้อวัสดุไหลวนหมุนไปตามหัวกวน การเดินเชื่อมทำให้เนื้อวัสดุไหลอัดไปทางด้านแอดวานซิงไซด์ [10] โดยที่ความเร็วรอบของหัวกวนที่สูงขึ้นเกิดครีบมากกว่าความเร็วรอบการหมุนที่ต่ำกว่า เนื่องจากความเร็วรอบที่สูงขึ้นทำให้เกิดการสร้างความร้อนได้มากขึ้นทำให้วัสดุเกิดสภาวะพลาสติกและเกิดการไหลตัวได้ง่ายขึ้นตามทิศทางการไหลของหัวกวน

เมื่อนำชิ้นงานที่ผ่านการเชื่อมมาตรวจสอบโครงสร้าง



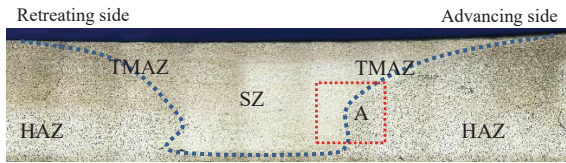
(ก) ความเร็วรอบในการหมุน 530 รอบต่อนาที



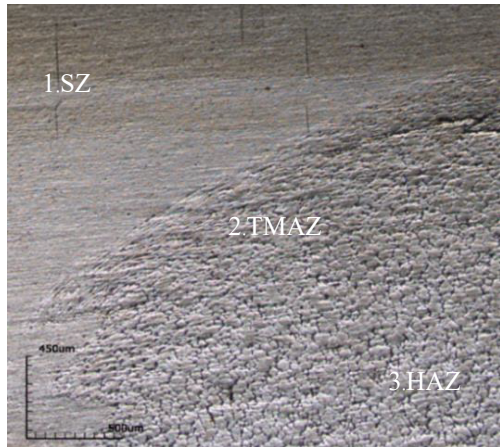
(ข) ความเร็วรอบในการหมุนกวน 790 รอบต่อนาที

รูปที่ 8 ลักษณะผิวด้านบนของแนวเชื่อมเสียดทานแบบกวนของหัวกวนแบบทรงกระบอกเรียกที่ความเร็วรอบในการหมุนกวนระหว่าง 530 และ 790 รอบต่อนาที ความเร็วในการเดินเชื่อม 22 มิลลิเมตรต่อนาที

จุลภาคของลักษณะภาพตัดขวาง ดังรูปที่ 9 โครงสร้างรอยเชื่อมแบ่งออกเป็น 3 ส่วน ได้แก่ พื้นที่ที่ถูกกวน (SZ) พื้นที่ที่ได้รับผลกระทบความร้อนทางกล (TMAZ) และพื้นที่ได้รับผลกระทบความร้อนเพียงอย่างเดียว (HAZ) [2] พบว่า รอยเชื่อมของรูปแบบหัวกวนทั้ง 3 แบบ ที่ความเร็วรอบของหัวกวนที่ 790 รอบต่อนาที ทั้งความเร็วในการเดินเชื่อม 22 และ 36 มิลลิเมตรต่อนาที พบว่า รอยเชื่อมมีความสมบูรณ์โดยไม่เกิดข้อบกพร่อง (Defect Free Weld) สอดคล้องตามรายงานของ Iman และคณะ [7] ที่ได้ศึกษาผลกระทบจากกระบวนการเชื่อมเสียดทานแบบกวนของอะลูมิเนียมเกรด AA6063-T4 พบว่า Heat Index ที่ช่วง 1.5–3.5 ไม่เกิดข้อบกพร่องในรอยเชื่อม แต่ที่ความเร็วในการหมุนกวน 530 รอบต่อนาที ทั้งความเร็วในการเดินเชื่อม 22 และ 36 มิลลิเมตรต่อนาที และทุกรูปแบบของหัวกวน พบจุดบกพร่องของรอยเชื่อมเกิดรูโพรงขนาดเล็กๆ บริเวณที่ขอบด้านข้างตรงกลางของรอยเชื่อมในพื้นที่กวน (Nugget) ด้านแอดวานซิงไซด์ (Advancing Side) ดังรูปที่ 10 โดยมีลักษณะเป็นการไหลของเนื้อวัสดุที่ไหลไม่เต็มในบริเวณพื้นที่กวนหรือไม่สมบูรณ์เนื่องจากความร้อนที่มากหรือน้อยเกินไป และแรงกดที่ไม่เพียงพอและเหมาะสม [11]



(ก) โครงสร้างจุลภาครอยเชื่อมลักษณะตัดขวาง

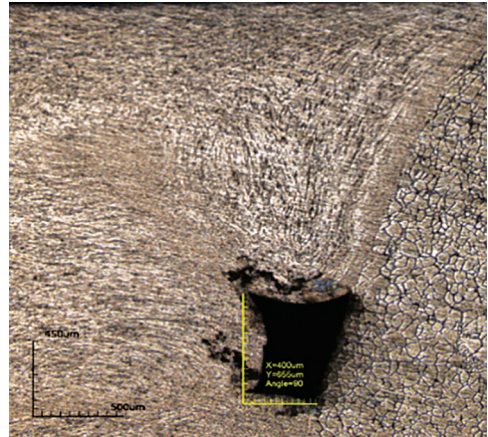


(ข) บริเวณพื้นที่ A

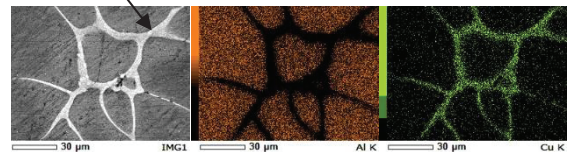
รูปที่ 9 โครงสร้างทางจุลภาคของแนวเชื่อมเสียดทานแบบกวนของหัวกวนแบบทรงกระบอกเรียบที่ความเร็วรอบในการหมุนกวน 790 รอบต่อนาที ความเร็วในการเดินเชื่อม 22 มิลลิเมตรต่อนาที

ในส่วนพื้นที่ของการเชื่อมที่ได้รับผลกระทบทั้ง 3 ส่วน ดังรูปที่ 9 ได้แก่ บริเวณแรก คือ บริเวณที่ถูกสัมผัสกับหัวกวนโดยตรง (SZ) ซึ่งมีเกรนขนาดเล็กละเอียด บริเวณที่สอง คือ บริเวณพื้นที่ได้รับผลกระทบความร้อนทางกล (TMAZ) ลักษณะเกรนมีทิศทางการยืดออกไปตามหัวกวน และบริเวณสุดท้ายคือบริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อนเพียงอย่างเดียว (HAZ) สังเกตรูปร่างของเกรนได้ง่าย มีขอบเกรนชัดเจน [14]

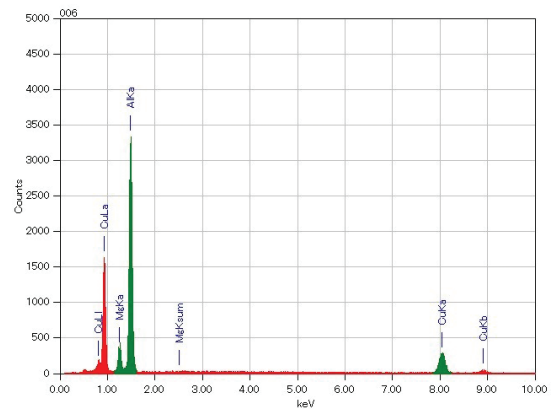
ผลการทดสอบโครงสร้างจุลภาคจากกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราดพบว่า ในพื้นที่บริเวณผลกระทบจากความร้อนสามารถสังเกตรูปร่างของเกรนและบริเวณของเกรนได้อย่างชัดเจน และพบการกระจายตัวของธาตุทองแดง (Cu) ในบริเวณพื้นที่ขอบเกรนเป็นจำนวนมาก และมีการกระจายตัวสม่ำเสมอ ดังรูปที่ 11 ซึ่งในบริเวณพื้นที่ขอบเกรนเมื่อนำ



รูปที่ 10 ลักษณะจุดบกพร่อง (Void) ที่เกิดในรอยเชื่อม

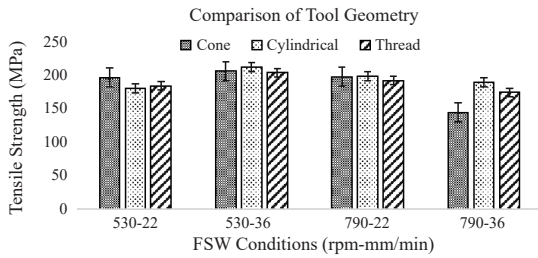
Mg-Al₂Cu/Cu-Al₂

รูปที่ 11 การกระจายตัวของธาตุในบริเวณพื้นที่ได้รับผลกระทบจากความร้อน



รูปที่ 12 ชนิดและปริมาณธาตุที่เป็นองค์ประกอบบริเวณขอบเกรน

ไปตรวจสอบชนิดและปริมาณธาตุที่เป็นองค์ประกอบพบเฟสยูเทคติก Mg-Al₂Cu/Cu-Al₂ ดังรูปที่ 12 สอดคล้องกับรายงานของ Jacob และคณะ [13]



รูปที่ 13 ผลการทดสอบความแข็งแรงดึงในสภาวะต่างของรูปทรงหัวกวานทั้ง 3 รูปแบบ

ส่วนบริเวณพื้นที่ได้รับผลกระทบความร้อนทางกล พบว่าเกรนมีลักษณะเสียรูปในลักษณะยืดยาวออก (Elongated Grain) ไปตามทิศทางการหมุนของหัวกวาน [12] และบริเวณพื้นที่ที่ถูกกวานด้วยหัวกวานพบว่า มีเกรนลักษณะเล็กและละเอียด เกิดโครงสร้างเป็นผลึกใหม่ (Recrystallized) จากความร้อนจากการหมุนกวาน และมีความแข็งแรงจากการตกตะกอน (Precipitates) โดยมีเฟสยูเทคติก Mg-Al₂Cu และ Cu-Al₂ กระจายตัวในเฟสหลักที่เป็นเนื้ออะลูมิเนียมอย่างสม่ำเสมอ [13]

3.2 ความแข็งแรงดึงจากการทดสอบ

จากการทดสอบความแข็งแรงดึงของชิ้นงานทดสอบการดึงตามมาตรฐาน ASTM-E8M ซึ่งเป็นค่าความแข็งแรงดึงเฉลี่ยจากจำนวนตัวอย่าง 2 ตัวอย่าง ดังรูปที่ 13 พบว่า หัวกวานแบบทรงกระบอกเรียบให้ค่าความแข็งแรงดึงเฉลี่ยสูงสุด 212 MPa ที่ความเร็วรอบในการหมุนกวาน 530 รอบต่อนาที ความเร็วในการเดินเชื่อม 36 มิลลิเมตรต่อนาที เนื่องจากค่าความร้อนในการเชื่อม (Heat input) ที่เหมาะสม ความเร็วในการหมุนกวานต่ำ และความเร็วในการเดินเชื่อมสูงทำให้อุณหภูมิในขณะเชื่อมไม่สูงมาก ส่งผลให้พื้นที่ได้รับผลกระทบทางความร้อน (HAZ) ได้รับความร้อนน้อยลงด้วย ทำให้เกรนมีขนาดเล็กกว่าการเชื่อมที่ความเร็วรอบในการหมุนกวานที่ 790 รอบต่อนาที เกิดอุณหภูมิจากการเดินเชื่อมสูงกว่า ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดสอบความแข็งแรงดึง ที่การขาดของชิ้นงานเกิดขึ้นบริเวณขอบรอยเชื่อมซึ่งเป็นบริเวณพื้นที่ได้รับผลกระทบทางความร้อน (HAZ) ทางด้านริทเทอริงไซด์

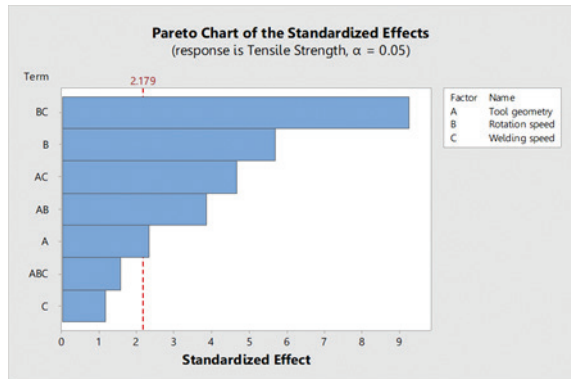
(Retreating Side) เนื่องจากเป็นบริเวณที่มีการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างของเกรนในบริเวณที่รับผลกระทบทางความร้อน (HAZ) เกรนมีขนาดใหญ่กว่าโครงสร้างเดิมทำให้ความแข็งแรงดึงลดลง ขณะที่หัวกวานแบบทรงกรวยให้ค่าความแข็งแรงดึงเฉลี่ยต่ำสุด 145 เมกะปาสกาล ที่ความเร็วหมุนเชื่อม 790 รอบต่อนาที และความเร็วในการเดินเชื่อม 36 มิลลิเมตรต่อนาที โดยค่าแรงดึงสูงสุดในการวิจัยนี้มีค่าเท่ากับ 212 เมกะปาสกาล มีประสิทธิภาพ 99% ของความแข็งแรงวัสดุพื้น

3.3 ผลวิเคราะห์ทางสถิติ

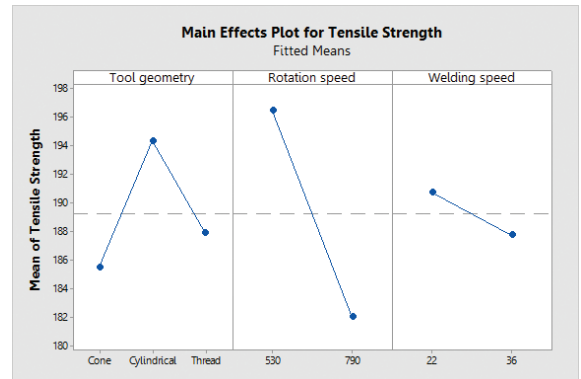
จากผลการทดลอง ได้นำมาวิเคราะห์ด้วยการวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่าความแข็งแรงดึงโดยใช้โปรแกรมมินิแทป รุ่น 18 (Minitab 18) ดังตารางที่ 3 เพื่อชี้ให้เห็นถึงผลกระทบหลัก และผลกระทบร่วมของพารามิเตอร์ที่ส่งผลต่อค่าความแข็งแรงดึงที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 พบว่า ผลกระทบหลักของพารามิเตอร์ที่ส่งผลกระทบต่อค่าความแข็งแรงดึงมากที่สุด ประกอบด้วย ความเร็วรอบในการหมุนกวานและรูปทรงของหัวกวานตามลำดับ ในขณะที่ความเร็วในการเดินเชื่อมในช่วงระดับปัจจัยที่ศึกษาไม่ส่งผลกระทบต่อค่าความแข็งแรงดึงอย่างมีนัยสำคัญ

เมื่อพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจได้จากการทดลอง R² มีค่าเท่ากับ 93.9 เปอร์เซ็นต์ และค่า Adjusted R² มีค่าเท่ากับ 88.3 เปอร์เซ็นต์ แสดงให้เห็นถึงจำนวนที่เพียงพอต่อการประมาณค่าพยากรณ์ของความแข็งแรงดึง โดยความผันแปรที่เกิดขึ้นในการทดลองมาจากผลกระทบหลัก และผลกระทบร่วมของแต่ละพารามิเตอร์ในการทดลอง 88.3 เปอร์เซ็นต์ และเกิดจากปัจจัยที่ไม่สามารถควบคุมได้ 11.7 เปอร์เซ็นต์

นอกจากนี้ยังพบว่า ผลกระทบร่วมระหว่างปัจจัยที่ส่งผลต่อค่าความแข็งแรงดึงประกอบด้วยความเร็วรอบในการหมุนกวานและความเร็วในการเดินเชื่อม รูปทรงของหัวกวานและความเร็วในการเดินเชื่อม และรูปทรงของหัวกวานและความเร็วรอบในการหมุนกวาน ตามลำดับ โดยผลกระทบร่วมระหว่างปัจจัยความเร็วรอบในการหมุนกวานและความเร็วในการเดินเชื่อม มีผลต่อความแข็งแรงดึงมากที่สุด ดังรูปที่ 14



รูปที่ 14 ปัจจัยของผลกระทบต่อค่าความแข็งแรงดึง



รูปที่ 15 ผลกระทบหลักที่ส่งผลต่อค่าความแข็งแรงดึง

ตารางที่ 3 ผลการวิเคราะห์ค่าความแปรปรวนของค่าความแข็งแรงดึง

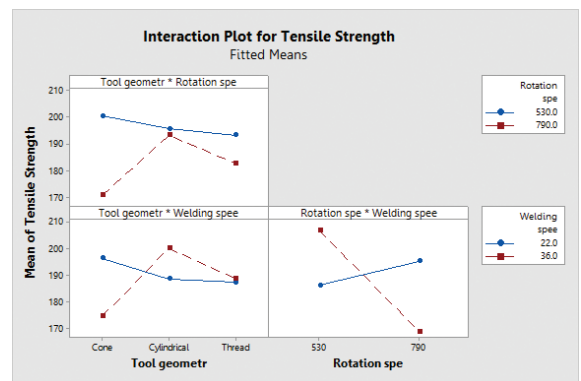
Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	11	7102.7	645.70	16.76	0.000
Linear	4	1636.1	409.01	10.62	0.001
Tool geometry	2	334.09	167.04	4.34	0.038
Rotation speed	1	1248.4	1248.4	32.40	0.000
Welding speed	1	53.61	53.61	1.39	0.261
2-Way Interactions	5	5289.3	1057.9	27.46	0.000
Tool geometry*Rotation speed	2	808.28	404.14	10.49	0.002
Tool geometry*Welding speed	2	1158.9	579.43	15.04	0.001
Rotation speed*Welding speed	1	3322.1	3322.1	86.23	0.000
3-Way Interactions	2	177.41	88.71	2.30	0.142
Tool geometry*Rotation speed*Welding speed	2	177.41	88.71	2.30	0.142
Error	12	462.30	38.52		
Total	23	7565.0			

Model Summary

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
6.20682	93.89%	88.29%	75.56%

รูปที่ 15 แสดงถึงผลกระทบหลักของพารามิเตอร์ที่ส่งผลต่อค่าความแข็งแรงดึง แสดงให้เห็นว่ารูปทรงของหัวเชื่อมแบบทรงกระบอกเรียบให้ค่าเฉลี่ยของค่าความแข็งแรงดึงสูงสุด ผลกระทบหลักของความเร็วรอบในการหมุนกวนมี



รูปที่ 16 ผลกระทบร่วมที่ส่งผลต่อค่าความแข็งแรงดึง

ความสัมพันธ์เชิงลบกับค่าความแข็งแรงดึงเมื่อความเร็วรอบในการหมุนกวนลดลงส่งผลให้ความแข็งแรงเพิ่มขึ้น ในขณะที่ความเร็วในการเดินเชื่อมก็มีความสัมพันธ์เชิงลบกับค่าความแข็งแรงดึงเช่นกัน เมื่อความเร็วในการเดินเชื่อมต่ำส่งผลให้ค่าความแข็งแรงดึงสูงกว่าค่าความเร็วในการเดินเชื่อมสูง

รูปที่ 16 แสดงความสัมพันธ์ร่วมของแต่ละพารามิเตอร์เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบในการหมุนกวน และความเร็วในการเดินเชื่อม พบว่า เมื่อใช้ค่าความเร็วรอบในการหมุนกวนที่ 530 รอบต่อนาที ความเร็วในการเดินเชื่อม 36 มิลลิเมตรต่อนาที ให้ค่าความแข็งแรงสูงกว่าความเร็วในการเดินเชื่อม 22 มิลลิเมตรต่อนาที ในทางตรงกันข้ามเมื่อใช้ความเร็วรอบของหัวกวนที่ 790 รอบต่อนาที ความเร็วในการเดินเชื่อม 22 มิลลิเมตรต่อนาที ให้ค่าความ



แข็งแรงสูงกว่าความเร็วในการเดินเชื่อม 36 มิลลิเมตรต่ออนาที่ เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างรูปทรงหัวเชื่อม และความเร็วรอบในการหมุนทวนพบว่า รูปทรงหัวทวนแบบทรงกรวยให้ค่าความแข็งแรงดึงของรอยเชื่อมสูงที่สุด ตามด้วยหัวทวนแบบทรงกระบอกเรียบและหัวทวนแบบทรงกระบอกเกลียวตามลำดับ แต่ถ้าพิจารณาทั้งความเร็วรอบในการหมุนทวน 530 และ 790 รอบต่ออนาที่ พบว่า รูปทรงหัวทวนแบบทรงกระบอกเรียบให้ค่าความแข็งแรงดึงเฉลี่ยของรอยเชื่อมสูงที่สุด ตามด้วยหัวทวนแบบทรงกระบอกเกลียวและหัวทวนแบบทรงกรวย ตามลำดับ

เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างรูปทรงหัวเชื่อม และความเร็วในการเดินเชื่อม พบว่า ที่ระดับความเร็วในการเดินเชื่อม 22 มิลลิเมตรต่ออนาที่ รูปทรงแบบกรวยให้ค่าความแข็งแรงสูงสุด ในขณะที่ใช้ความเร็วในการเดินเชื่อมที่ 36 มิลลิเมตรต่ออนาที่ พบว่ารูปทรงหัวทวนแบบทรงกระบอกเรียบให้ค่าความแข็งแรงของรอยเชื่อมสูงที่สุด

4. สรุป

ผลการทดลองในกระบวนการเชื่อมเสียดทานแบบทวนของอะลูมิเนียมหล่อกิ่งของแข็ง เกรด 2024 พบว่า ทุกสภาวะของการเชื่อมให้ลักษณะผิวด้านบนของแนวเชื่อมเรียบและสม่ำเสมอ มีการผสมเข้ากันได้ดีของเนื้อโลหะ เกิดครีบเล็กน้อยบริเวณแนวเชื่อมด้านแอดวานซิงไซด์ (AS) และโครงสร้างทางจุลภาคของแนวเชื่อม บริเวณตรงกลางแนวเชื่อม (SZ) เกรนมีขนาดเล็กละเอียด เมื่อเทียบกับเกรนที่บริเวณเนื้อโลหะเดิม ในขณะที่บริเวณที่ได้รับผลกระทบอันเนื่องมาจากความร้อนทางกล (TMAZ) มีลักษณะเกรนเรียวยาวและยืดยาวเนื่องจากปฏิกิริยาทางกลที่ได้รับจากตัวทวน และบริเวณที่ได้รับความผลกระทบทางความร้อน (HAZ) มีลักษณะเกรนขนาดใหญ่กว่าเนื้อโลหะเดิม

ผลวิเคราะห์ทางสถิติพบว่า ผลกระทบหลักที่ส่งผลต่อค่าความแข็งแรงดึงของแนวเชื่อม ได้แก่ ความเร็วรอบในการหมุนทวนและรูปทรงของหัวทวนตามลำดับ โดยความเร็วในการเดินเชื่อมในช่วงระดับปัจจัยที่ศึกษาไม่ส่งผลต่อความแข็งแรงดึงอย่างมีนัยสำคัญ และพารามิเตอร์ที่ให้ความ

แข็งแรงเฉลี่ยสูงสุด 212 MPa คือ การเชื่อมด้วยหัวทวนแบบทรงกระบอกเรียบ ความเร็วรอบในการหมุนทวน 530 รอบต่ออนาที่ ความเร็วในการเดินเชื่อม 36 มิลลิเมตรต่ออนาที่

งานวิจัยนี้ยังมีตัวแปรอื่นที่น่าสนใจ ได้แก่ ขนาดสัดส่วนของบ่าทวนต่อหัวทวน (D/d ratio) และแรงกดที่เหมาะสมต่อขนาดของหัวทวน เพื่อนำไปประยุกต์ใช้หรือเป็นแนวทางวิจัยในการพัฒนาในกระบวนการเชื่อมต่อไป

5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนเครื่องมือการทำวิจัยจากมหาวิทยาลัยราชภัฏนครราชสีมา และมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

เอกสารอ้างอิง

- [1] N. Thammachot, *Metallurgy*. Bangkok: Chulalongkorn University Press., 2013 (in Thai).
- [2] R. S. Mishra and Z. Y. Ma, "Friction stir welding and processing," *Materials Science and Engineering*, vol. 50, no. 1–2, pp. 1–78, 2005.
- [3] J. Wanasin, "Semi-solid die casting technology," in *Proceedings of the Third Thai Foundry Conference, Bangkok, Thailand, November 23, 2006*, pp. 1–12 (in Thai).
- [4] C. Yu, D. Hua, J. Li, J. Zhao, M. Fu, and X. Li, "Effect of welding heat input and post-welded heat treatment on hardness of stir zone for friction stir-welded 2024-T3 aluminum alloy," *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, vol. 25, no. 8, pp. 2524–2532, 2015.
- [5] W. M. Thomas, E. D. Nicholas, J. C. Needham, M. G. Murch, S. P. Temple, and C. J. Dawes, "Friction Stir Butt Welding," International Patent Application, no. PCT/GB92/02203 and GB patent application, no. 9125978.8, 1991.
- [6] H. J. Liu, H. Fujii, M. Maeda, and K. Nogi, "Tensile

- properties and fracture locations of friction stir welded joints of 2017-T351 aluminum alloy,” *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 142, no. 3, pp. 692–696, 2003.
- [7] M. Imam, V. Racherla, and K. Biswas, “Effect of post weld natural aging on mechanical and microstructural properties of friction stir welded 6063-t4 aluminium alloy,” *Journal of Materials and Design*, vol. 64, pp. 657–686, 2014.
- [8] J. Guo, “Solid state welding processes in manufacturing,” in *Handbook of Manufacturing Engineering and Technology*, London: Springer-Verlag, 2015, pp. 576–583.
- [9] P. Muangjunburee, *The effect of Welding Parameters on Metallurgical and Mechanical Properties of Joining of Semi Solid (SSM) Aluminium Alloy A356 by Friction Stir Welding Process (FSW)*. Songkla: Prince of Songkla University, 2007 (in Thai).
- [10] Y. C. Lin, J. J. Liu, and J. N. Chen, “Material flow tracking for various tool geometries during the friction stir spot welding process,” *Journal of Materials Engineering and Performance*, vol. 22, no. 12, pp. 3674–3683, 2013.
- [11] J. Y. Sheikh-Ahmad, F. Ozturk, F. Jarrar, and Z. Evis, “Thermal history and microstructure during friction stir welding of Al–Mg alloy,” *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 86, pp. 1071–1081, 2016.
- [12] A. K. Lakshminarayanan, S. malarvizhi, and V. Balasubramanian. “Developing friction stir welding window for AA2219 aluminium alloy,” *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, vol. 21, no. 11, pp. 2339–2347, 2011.
- [13] J. Jacob, S. P. Shanmughanatan, and M. B. Kiran, “Effect of tool on microstructure and mechanical properties of friction stir processed AA2024-T351 aluminium alloy,” *Materials Today: Proceedings*, vol. 5, no. 1, pp. 2965–2979, 2018.
- [14] I. Radisavljevic, A. Zivkovic, N. Radovic, and V. Grabulov, “Influence of FSW parameters on formation quality and mechanical properties of Al 2024-T351 butt welded joints,” *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, vol. 23, no. 12, pp. 3525–3539, 2013.
- [15] H. K. Mohanty, M. M. Mahapatra, P. Kumar, P. Biswas, and N. R. Mandal, “Modeling the effects of tool shoulder and probe profile geometries on friction stirred aluminum welds using response surface methodology,” *Journal of Marine Science and Application*, vol. 11, pp. 493–503, 2012.