

บทความวิจัย

อิทธิพลของปัจจัยกระบวนการที่มีผลต่อสมบัติทางกลของอะลูมิเนียมเกรด 5356 ที่ขึ้นรูปด้วยเทคโนโลยีการเชื่อมเติมเนื้อวัสดุ

มานิช นำฟู ธวัชชัย ไชยลังการ* อุกฤษฏ์ ธนทรัพย์ทวี และ ไกรสร วงษ์ปู้

สาขาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา

กิตติ วิโรจรัตนภาพิศาล

หน่วยวิจัยวัสดุขั้นสูงและการผลิตสมัยใหม่เพื่ออุตสาหกรรมการผลิต การแพทย์ และการเกษตร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา

* ผู้นิพนธ์ประสานงาน โทรศัพท์ 08 1724 4439 อีเมล: tawatchai_c@rmutl.ac.th DOI: 10.14416/j.kmutnb.2026.09.001

รับเมื่อ 13 กันยายน 2568 แก้ไขเมื่อ 6 กุมภาพันธ์ 2569 ตอบรับเมื่อ 1 เมษายน 2569 เผยแพร่ออนไลน์ 3 กันยายน 2569

© 2026 King Mongkut's University of Technology North Bangkok. All Rights Reserved.

บทคัดย่อ

การศึกษาอิทธิพลของปัจจัยกระบวนการที่มีผลต่อสมบัติทางกลของอะลูมิเนียมเกรด 5356 ที่ขึ้นรูปด้วยเทคโนโลยีการเชื่อมเติมเนื้อวัสดุ ดำเนินงานโดยใช้หุ่นยนต์เชื่อมในการขึ้นรูปชิ้นงานทดสอบผนังบาง โดยศึกษาอิทธิพลของปัจจัยกระบวนการ 3 ปัจจัย คือ ความเร็วในการป้อนลวดเชื่อม ความเร็วในการเดินเชื่อม และอัตราการไหลของก๊าซปกคลุมที่มีผลต่อค่าแรงดึงและความแข็งของชิ้นงานทดสอบ ผลการศึกษาพบว่าความเร็วในการเดินเชื่อมเป็นปัจจัยที่มีอิทธิพลสูงที่สุดต่อแรงดึง การปรับค่าพารามิเตอร์การเชื่อมโดยใช้ความเร็วในการป้อนลวดเชื่อม 6 เมตรต่อนาที ความเร็วในการเดินเชื่อม 0.4 เมตรต่อนาที และอัตราการไหลของก๊าซปกคลุม 10 ลิตรต่อนาที ส่งผลให้ได้ค่าแรงดึงสูงสุดที่ 4,918.69 นิวตัน ขณะที่การใช้ความเร็วในการป้อนลวดเชื่อม 7 เมตรต่อนาที ความเร็วในการเดินเชื่อม 0.4 เมตรต่อนาที และอัตราการไหลของก๊าซปกคลุม 14 ลิตรต่อนาที ส่งผลให้ค่าแรงดึงลดลงเหลือ 4,703.35 นิวตัน ในส่วนค่าความแข็งของชิ้นงานพบว่าอัตราการไหลของก๊าซปกคลุมมีอิทธิพลสูงที่สุดต่อค่าความแข็ง โดยค่าปัจจัยความเร็วในการป้อนลวดเชื่อม 6 เมตรต่อนาที ความเร็วในการเดินเชื่อม 0.4 เมตรต่อนาที และอัตราการไหลของก๊าซปกคลุม 10 ลิตรต่อนาที ได้ค่าความแข็งสูงสุดที่ 38.95 HRB ในขณะเดียวกันการใช้ความเร็วในการป้อนลวดเชื่อม 8 เมตรต่อนาที ความเร็วในการเดินเชื่อม 0.4 เมตรต่อนาที และอัตราการไหลของก๊าซปกคลุม 14 ลิตรต่อนาที ได้ค่าความแข็งต่ำสุดที่ 37.15 HRB ซึ่งการปรับเปลี่ยนปัจจัยกระบวนการทั้ง 3 ปัจจัย มีผลกระทบต่อสมบัติทางกลของชิ้นงานทดสอบ ดังนั้นการทดลองนำเทคโนโลยีการเชื่อมเติมเนื้อวัสดุมาใช้ในการขึ้นรูปชิ้นงานผนังบางสำหรับอะลูมิเนียมเกรด 5356 ในครั้งนี้เห็นควรพิจารณาปัจจัยความเร็วในการเดินเชื่อมเป็นหลัก เมื่อต้องการได้ค่าแรงดึงของชิ้นงานที่สูง และหากต้องการให้ชิ้นงานมีความแข็งให้พิจารณาจากการเลือกค่าอัตราการไหลของก๊าซปกคลุมให้มีความเหมาะสม

คำสำคัญ: การเชื่อมอาร์กโลหะแก๊สคลุม เทคโนโลยีการผลิตแบบเติมแต่งด้วยลวดอาร์ก ปัจจัยกระบวนการ สมบัติทางกล

การอ้างอิงบทความ: มานิช นำฟู, ธวัชชัย ไชยลังการ, อุกฤษฏ์ ธนทรัพย์ทวี, ไกรสร วงษ์ปู้ และ กิตติ วิโรจรัตนภาพิศาล, “อิทธิพลของปัจจัยกระบวนการที่มีผลต่อสมบัติทางกลของอะลูมิเนียมเกรด 5356 ที่ขึ้นรูปด้วยเทคโนโลยีการเชื่อมเติมเนื้อวัสดุ,” วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, ปีที่ 36, ฉบับที่ 4, หน้า 1-19, ต.ค.-ธ.ค. 2569 เลขที่บทความ 264-068291, doi: 10.14416/j.kmutnb.2026.09.001.



Research Article

Influence of Process Parameters on Mechanical Properties of 5356 Aluminum Alloy Fabricated by Wire Arc Additive Manufacturing Technology

Manoch Numfu Tawatchai Chailungkarn*, Ukrit Thanasuptawee and Krisorn Wongpoo

Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Lanna, Tak, Thailand
Kitti Wirottrattanaphaphisan

Advanced Materials and Modern Manufacturing Research Unit for Manufacturing, Medical and Agricultural Industries,
Rajamangala University of Technology Lanna, Tak, Thailand

* Corresponding Author, Tel. 08 1724 4439, E-mail: tawatchai_c@rmutl.ac.th DOI: 10.14416/j.kmutnb.2026.09.001

Received 13 September 2025; Revised 6 February 2026; Accepted 1 April 2026; Published online: 3 September 2026

© 2026 King Mongkut's University of Technology North Bangkok. All Rights Reserved.

Abstract

This research investigates the influence of process parameters on the mechanical properties of aluminum alloy 5356 fabricated using Wire Arc Additive Manufacturing (WAAM) technology. Thin-wall test specimens were produced by robotic welding, considering three key process parameters: Wire Feed Speed (WS), Travel Speed (TS), and shielding Gas Flow Rate (GF). The effects of these factors on tensile force and hardness were analyzed. The results indicate that travel speed is the most influential parameter on tensile force. The optimal combination of parameters, with WS of 6 m/min, TS of 0.4 m/min, and GF of 10 L/min, yielded the maximum tensile force of 4,918.69 N. Conversely, a combination of WS of 7 m/min, TS of 0.4 m/min, and GF of 14 L/min resulted in a reduced tensile force of 4,703.35 N. In terms of hardness, the shielding gas flow rate exhibited the most significant effect. The highest hardness value of 38.95 HRB was obtained with WS of 6 m/min, TS of 0.4 m/min, and GF of 10 L/min, while the lowest hardness value of 37.15 HRB occurred with WS of 8 m/min, TS of 0.4 m/min, and GF of 14 L/min. These findings confirm that variations in the three process parameters significantly affect the mechanical properties of WAAM-fabricated specimens. Therefore, in applying Wire Arc Additive Manufacturing (WAAM) to fabricate Al5356 thin-walled components, travel speed should be prioritized as the primary factor to achieve high tensile force. Furthermore, an appropriate shielding gas flow rate should be carefully selected to ensure the desired hardness.

Keywords: Gas Metal Arc Welding, Wire Arc Additive Manufacturing Technology, Process parameters, Mechanical Properties

Please cite this article as: M. Numfu, T. Chailungkarn, U. Thanasuptawee, K. Wongpoo, and K. Wirottrattanaphaphisan, "Influence of process parameters on mechanical properties of 5356 aluminum alloy fabricated by wire arc additive manufacturing technology," *The Journal of KMUTNB*, vol. 36, no. 4, pp. 1–19, Oct.–Dec. 2026 (in Thai), Art. no. 264-068291, doi: 10.14416/j.kmutnb.2026.09.001.

1. บทนำ

เทคโนโลยีการผลิตแบบเติมเนื้อวัสดุ (Additive Manufacturing; AM) ได้เข้ามามีบทบาทสำคัญในภาคอุตสาหกรรมสมัยใหม่ โดยเฉพาะในกลุ่มวัสดุโลหะ ซึ่งสามารถขึ้นรูปชิ้นงานที่มีความซับซ้อนสูง ลดข้อเสียในการผลิต และใช้ทรัพยากรอย่างมีประสิทธิภาพ [1]–[2] หนึ่งในเทคโนโลยีที่มีศักยภาพสูงในการขึ้นรูปโลหะขนาดใหญ่คือ เทคโนโลยีการเชื่อมเติมเนื้อวัสดุ (Wire Arc Additive Manufacturing; WAAM) ซึ่งใช้กระบวนการเชื่อมด้วยแหล่งพลังงานไฟฟ้าอาร์กเชื่อมกับลวดเชื่อมโลหะในการเติมเนื้อวัสดุแบบต่อเนื่อง [3] WAAM เหมาะสมกับการขึ้นรูปชิ้นงานขนาดใหญ่ เช่น อุตสาหกรรมอากาศยาน อุตสาหกรรมพลังงาน อุตสาหกรรมเรือเดินทะเล และอุตสาหกรรมแม่พิมพ์ เนื่องจากสามารถลดต้นทุนวัตถุดิบ และเวลาการผลิตเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการกัดจากบล็อกใหญ่ [4] อย่างไรก็ตาม คุณภาพของชิ้นงานที่ได้จาก WAAM ยังมีความแปรผันสูง โดยเฉพาะด้านสมบัติเชิงกล ซึ่งได้รับอิทธิพลจากปัจจัยกระบวนการ (Process Parameters) อย่างมาก เช่น อัตราการป้อนลวด กระแสไฟฟ้า ความเร็วในการเดินแนวเชื่อม รูปแบบการวางแนว และอุณหภูมิระหว่างชั้น [5]–[6] แม้จะมีการศึกษาเทคโนโลยีการผลิตแบบเติมเนื้อวัสดุในอะลูมิเนียมอย่างกว้างขวาง แต่การศึกษาความสัมพันธ์เชิงระบบ (Systematic Study) ของปัจจัยกระบวนการที่มีต่อเกรด ER5356 โดยเฉพาะในลักษณะผนังบาง (Thin Wall) ด้วยหุ่นยนต์เชื่อมยังไม่มีการระบุชุดพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุด (Optimized Parameters) อีกทั้งยังมิข้อมูลไม่เพียงพอในการวิเคราะห์เชิงลึกถึงปฏิสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยกระบวนการในการขึ้นรูปแบบผนังบาง

อะลูมิเนียม เป็นหนึ่งในวัสดุที่นิยมนำมาใช้ใน

WAAM เนื่องจากมีน้ำหนักเบา ทนต่อการกัดกร่อน และมีสมบัติเชิงกลเหมาะสมต่อการใช้งานด้านโครงสร้าง โดยเฉพาะในอุตสาหกรรมยานยนต์ และทางทะเล [7]–[8] อย่างไรก็ตาม อะลูมิเนียมมีจุดหลอมเหลวต่ำ และการนำความร้อนสูง ซึ่งส่งผลให้มีความเสี่ยงต่อการเกิดรูพรุน (Porosity) การหดตัว (Shrinkage) และความไม่ต่อเนื่องของแนวเชื่อมระหว่างชั้น หากไม่ควบคุมพารามิเตอร์อย่างเหมาะสม

งานวิจัยจำนวนมากพบว่าการปรับค่าพารามิเตอร์มีผลโดยตรงต่อโครงสร้างจุลภาค (Microstructure) ความแข็งแรงแรงดึง (Tensile Strength) ความแข็ง (Hardness) และความเหนียวของชิ้นงาน [9]–[12] เช่น การเพิ่มกระแสไฟฟ้าเกินค่าที่เหมาะสมจะทำให้เกิดการสะสมความร้อนมากเกินไป ซึ่งส่งผลให้ค่าความต้านทานแรงดึงของชิ้นงานลดลง [13]–[14] ขณะที่ความเร็วในการเดินแนวเชื่อมที่สูงเกินไปอาจทำให้เกิดการหลอมไม่ทั่วถึง และความไม่สม่ำเสมอของชั้นแนวเชื่อม [15]–[16] ด้วยเหตุนี้การศึกษาอิทธิพลของปัจจัยกระบวนการที่มีผลต่อสมบัติทางกลของอะลูมิเนียมเกรด 5356 ที่ขึ้นรูปด้วยเทคโนโลยีการเติมเนื้อวัสดุจึงมีความสำคัญทั้งในด้านการควบคุมคุณภาพ และเพิ่มประสิทธิภาพในการขึ้นรูปชิ้นงานให้เหมาะสมกับการใช้งานจริง

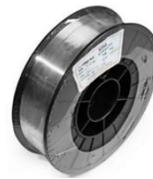
ในการกำหนดปัจจัยกระบวนการของเทคโนโลยีการผลิตแบบเติมเนื้อวัสดุด้วยหุ่นยนต์ที่ทำงานร่วมกับเครื่องเชื่อมที่ทำงานร่วมกันแบบอัตโนมัติสามารถควบคุมปัจจัยได้โดยตรงผ่านชุดคำสั่งหุ่นยนต์ และเครื่องเชื่อมด้วยโหมด Synergic Mode ซึ่งส่งผลโดยตรงต่อการสะสมความร้อน (Heat Input) โดยที่กระแสและแรงดันไฟฟ้านั้นถูกปรับค่าตามอัตราการป้อนลวด (Wire Feed Speed; WS) ในระบบ Synergic ที่เครื่อง

เชื่อม ส่วนความเร็วในการเดินแนวเชื่อม (Travel Speed; TS) และอัตราการไหลของแก๊สปกคลุมแนวเชื่อม (Gas Flow Rate; GF) เป็นปัจจัยที่ปรับตั้งค่าได้จากหุ่นยนต์เชื่อม และวาล์วควบคุมอัตราการไหลของแก๊ส ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นในการศึกษาปัจจัยกระบวนการ 3 ปัจจัย คือ อัตราการป้อนลวด ความเร็วในการเดินแนวเชื่อม และอัตราการไหลของแก๊สปกคลุมแนวเชื่อม ที่ส่งผลต่อสมบัติทางกลทางด้านความต้านทานแรงดึงและค่าความแข็ง ของชิ้นงานผนังบางที่ขึ้นรูปด้วยเทคโนโลยีการเติมเนื้อวัสดุแบบเติมแต่งด้วยลวดอาร์กหรือที่เรียกว่า WAAM ซึ่งผลการศึกษาคงจะช่วยกำหนดปัจจัยกระบวนการการผลิตชิ้นงานที่เหมาะสมในกระบวนการผลิตแบบเพิ่มเนื้อวัสดุที่ใช้หลักการเชื่อมโลหะร่วมกับแขนหุ่นยนต์อุตสาหกรรม และเป็นแนวทางในการวิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีการผลิตแบบเติมเนื้อวัสดุในอนาคต

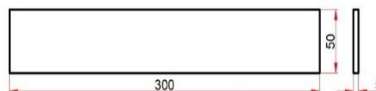
2. วิธีการทดลอง

2.1 วัสดุที่ใช้ในการศึกษาวิจัย

วัสดุที่ใช้ในการเชื่อมขึ้นรูปชิ้นงานผนังบาง ลวดเชื่อมอะลูมิเนียมฐานแมกนีเซียม เกรด ER5356 ขนาดความโตเส้นลวด 1.2 มิลลิเมตร ดังแสดงในรูปที่ 1 โดยมีส่วนผสมทางเคมี ดังแสดงในตารางที่ 1 และใช้อะลูมิเนียมแผ่นขนาด กว้าง 50 มิลลิเมตร ยาว 300 มิลลิเมตร และหนา 5 มิลลิเมตร เกรด 6063 เป็นฐานรองขึ้นงานผนังบางแสดงในรูปที่ 2 และมีส่วนผสมทางเคมี แสดงในตารางที่ 2 โดยส่วนผสมทางเคมีของลวดเชื่อม และฐานรองเชื่อมทำการวิเคราะห์ส่วนผสมด้วยเครื่องวิเคราะห์โลหะแบบตั้งโต๊ะ (Arc-Spark Spectrometer : SPECTROLAB LAVM11) ในห้องปฏิบัติการทดสอบวัสดุของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา



รูปที่ 1 ลวดเชื่อมอะลูมิเนียม เกรด ER5356



รูปที่ 2 ขนาดของอะลูมิเนียมแผ่นใช้เป็นฐานรอง (หน่วยเป็นมิลลิเมตร)

ตารางที่ 1 องค์ประกอบทางเคมีของลวดเชื่อมอะลูมิเนียมฐานแมกนีเซียม เกรด ER5356 (หน่วย wt.%)

Si	Fe	Cu	Mn	Pb
0.054	0.277	0.037	0.376	0.003
Mg	Cr	Ni	Zn	Ga
>1.44	0.126	0.004	0.060	0.014
Cd	Ce	Na	V	Al
0.013	0.002	0.002	0.022	97.5

ตารางที่ 2 องค์ประกอบทางเคมีของฐานรองขึ้นงานอะลูมิเนียมเกรด 6063 (หน่วย wt.%)

Si	Fe	Cu	Mn	Mg
0.435	0.515	0.162	0.062	0.422
Cr	Ni	Zn	Ti	Cd
0.007	0.006	0.125	0.019	0.012
Ga	V	Pb	Al	
0.012	0.012	0.002	98.2	

2.2 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการศึกษาวิจัย

เครื่องเชื่อมมิกส์-แม็ก ยี่ห้อ Fronius TPS 320i ถูกนำมาในการเชื่อมขึ้นรูปชิ้นงานทดสอบผนังบาง โดยใช้

เครื่องเชื่อม MIG ยี่ห้อ Fronius เป็นระบบกระแสไฟ (Alternating Current Electricity; AC) เป็นแหล่งจ่ายไฟ ในการเชื่อมเติมเนื้อวัสดุ และกำหนดโหมดเชื่อมเป็นแบบ MIG/MAG Standard Synergic ทำงานร่วมกับโรบอท 6 แกน ยี่ห้อ KUKA Robotics KR8 R1440 สำหรับสร้างการ เดินของแนวเชื่อม และใช้แก๊สอาร์กอนปกคลุมแนวเชื่อม ในขณะที่สร้างชิ้นแนวเชื่อมแต่ละชั้น ดังแสดงในรูปที่ 3



รูปที่ 3 หุ่นยนต์เชื่อมที่ใช้ในการขึ้นรูปชิ้นงานผนังบาง

2.3 กระบวนการวิจัย

ในการดำเนินงานเพื่อศึกษาอิทธิพลของปัจจัย กระบวนการที่มีผลต่อสมบัติทางกลของอะลูมิเนียมเกรด 5356 ที่ขึ้นรูปด้วยเทคโนโลยีการเติมเนื้อวัสดุ ได้ ทำการศึกษาปัจจัยกระบวนการ 3 ปัจจัย คือ อัตราการ ป้อนลวด ความเร็วในการเดินแนวเชื่อม และอัตราการ ไหลของแก๊สปกคลุมแนวเชื่อมที่ส่งผลต่อสมบัติทางกล ทางด้านความต้านทานแรงดึง และค่าความแข็งของ ชิ้นงานผนังบาง โดยระดับของปัจจัยที่ใช้ในการทดลอง ครั้งนี้ได้แก่ ความเร็วในการป้อนลวดเชื่อม ความเร็วใน การเดินเชื่อม และอัตราการไหลของแก๊สปกคลุม ถูก กำหนดขึ้นโดยอ้างอิงจากผลการทดสอบเบื้องต้น (Preliminary Test) เพื่อหาช่วงพารามิเตอร์ที่ให้การก่อ รูปแนวเชื่อมที่เสถียรที่สุด และสอดคล้องกับงานวิจัย

ที่เกี่ยวข้องกับการขึ้นรูปอะลูมิเนียมด้วยเทคโนโลยี WAAM ของ Wieczorowski [12] และ Teixeira [13] ที่ได้ศึกษาปัจจัยกระบวนการในการขึ้นรูปชิ้นงานจาก เทคโนโลยีการเติมเนื้อวัสดุแบบเติมแต่งด้วยลวดอาร์ก ที่สามารถช่วยควบคุมปริมาณความร้อนสะสม และลด จุดบกพร่องในเนื้อวัสดุได้

2.3.1 การออกแบบการทดลอง

การดำเนินการทดลองใช้การออกแบบการทดลอง เชิงแฟกทอเรียล 3^k ทำการทดลองซ้ำ 2 รอบ ซึ่งได้ จำนวนการทดลองทั้งหมด 54 การทดลอง โดย ทำการศึกษาถึงสมบัติทางกลด้านความต้านทานแรงดึง และความแข็ง โดยกำหนดปัจจัยกระบวนการ 3 ปัจจัย และระดับปัจจัยละ 3 ระดับ ดังแสดงในตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ปัจจัยกระบวนการและระดับของปัจจัย

ปัจจัย	ต่ำ	กลาง	สูง	หน่วย
ความเร็วในการ ป้อนลวดเชื่อม	6	7	8	m/min
ความเร็วในการ เดินเชื่อม	0.4	0.5	0.6	m/min
อัตราการไหลของ แก๊สปกคลุม	10	12	14	l/min

2.3.2 การขึ้นรูปชิ้นงานทดสอบ

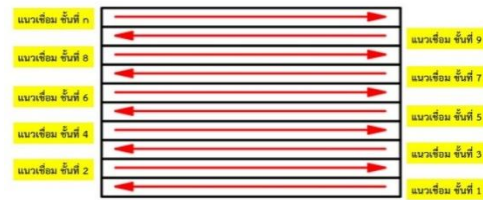
ชิ้นงานทดสอบจะถูกขึ้นรูปในรูปแบบชิ้นงานผนัง บาง โดยสร้างขึ้นจากกระบวนการเชื่อมแบบเติมเนื้อ วัสดุด้วยเทคโนโลยีการเชื่อมมิกส์-แม็ก โดยใช้ฐานรอง จากวัสดุอะลูมิเนียมแผ่นเกรด 6063 มีขนาดกว้าง ยาว และหนา 50x300x5 มิลลิเมตร ในการเชื่อมเติมวัสดุ ในแต่ละชั้นจะกำหนดทิศทางการเดินเชื่อมไปและกลับ ดังแสดงในรูปที่ 4 ในแต่ละชั้นจะใช้เวลาในการรอคอย 70 วินาที จากการทดสอบเบื้องต้นด้วยการวัดอุณหภูมิ

จากเครื่องวัดอุณหภูมิอินฟราเรดโดยอุณหภูมิที่ได้อยู่ในช่วงประมาณ 100–150 องศาเซลเซียส ซึ่งช่วงเวลาดังกล่าวเพียงพอที่จะลดอุณหภูมิสะสมไม่ให้สูงเกินจุดวิกฤต เพื่อป้องกันการเติบโตของเกรนที่ผิดปกติ (Grain Growth) และรักษาความสมบูรณ์เชิงมิติของชิ้นงานผนังบาง สอดคล้องกับงานวิจัยของ Wu [11] และ Teixeira [13] หลังจากนั้นทำการเชื่อมซ้ำในแนวเชื่อมต่อไป โดยทำการเชื่อมขึ้นรูปชิ้นงานทดสอบผนังบางทั้งหมด 20 ชั้น ดังแสดงในรูปที่ 5 การสร้างแนวเชื่อมผนังบางกำหนดปัจจัยกระบวนการจากการตารางการทดลองโดยใช้การออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียล 3^k โดยกำหนดปัจจัยกระบวนการในการทดลอง 3 ปัจจัย คือ ความเร็วในการป้อนลวดเชื่อม ความเร็วในการเดินแนวเชื่อม และอัตราการไหลของแก๊สปกคลุมแนวเชื่อม และกำหนดปัจจัยอื่น ๆ ในกระบวนการเชื่อมเติมเนื้อวัสดุดังแสดงในตารางที่ 4

ตารางที่ 4 การกำหนดปัจจัยในการดำเนินงาน

ปัจจัย	ค่าของปัจจัย
Wire Feed Speed	6 / 7 / 8 m/min
Travel Speed	0.4 / 0.5 / 0.6 m/min
Gas Flow Rate	10 / 12 / 14 L/min
Wait time	70 second
Arc length	14 mm
Vertical offset	2 mm

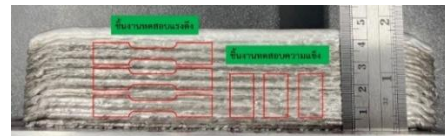
ชิ้นงานทดสอบผนังบางที่ถูกสร้างขึ้นมาจากปัจจัยกระบวนการจากการออกแบบการทดลองจะถูกนำมาขึ้นรูปเป็นชิ้นงานทดสอบสมบัติทางกล แสดงในรูปที่ 6 โดยมีขนาดและมิติของชิ้นงานทดสอบแรงดึงตามมาตรฐาน ASTM E8M แสดงในรูปที่ 7 (ก) และตัวอย่างชิ้นงานทดสอบแรงดึงแสดงดังรูปที่ 7 (ข) ในส่วนขนาดและมิติ



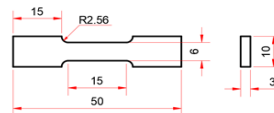
รูปที่ 4 ทิศทางการเดินเชื่อม



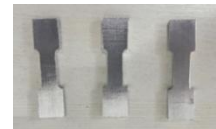
รูปที่ 5 ชิ้นงานทดสอบผนังบางที่ถูกสร้างขึ้นจากเทคโนโลยีการเติมเนื้อวัสดุแบบเติมแต่งด้วยลวดอาร์ก



รูปที่ 6 ลักษณะการตัดขึ้นรูปของชิ้นงานทดสอบ

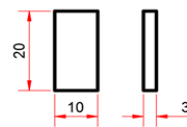


(ก)



(ข)

รูปที่ 7 ขนาดและมิติของชิ้นงานทดสอบแรงดึง (หน่วยเป็นมิลลิเมตร) (ก) ขนาดชิ้นงานทดสอบแรงดึง (ข) ตัวอย่างชิ้นงานทดสอบแรงดึง



(ก)



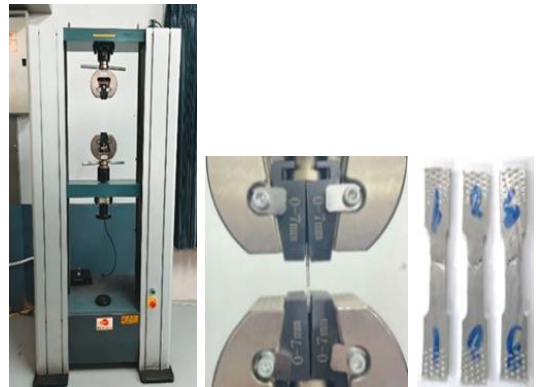
(ข)

รูปที่ 8 ขนาดและมิติของชิ้นงานทดสอบความแข็ง (หน่วยเป็นมิลลิเมตร) (ก) ขนาดชิ้นงานทดสอบความแข็ง (ข) ตัวอย่างชิ้นงานทดสอบความแข็ง

ชิ้นงานทดสอบความแข็งแสดงในรูปที่ 8 (ก) และตัวอย่างชิ้นงานทดสอบความแข็งแสดงดังรูปที่ 8 (ข)

2.3.3 การทดสอบสมบัติทางกล (Mechanical Properties Testing)

การทดสอบสมบัติทางกลทางด้านความต้านทานแรงดึง (Tensile Force) กระทำโดยกำหนดตามมาตรฐาน ASTM E8 ด้วยเครื่องทดสอบแรงดึง (Universal Testing Machine; UTM) ดังรูปที่ 9 (ก) โดยทำการติดตั้งชิ้นงานทดสอบให้ระยะห่างระหว่างหัวจับ 24 มิลลิเมตร แสดงดังรูปที่ 9 (ข) และใช้หัวจับชิ้นงานทดสอบแรงดึงแบบ Wedge grip และกำหนดความเร็วขณะดึง (Crosshead Speed) 1.05 มิลลิเมตรต่อนาที ทำการดึงจนชิ้นงานทดสอบขาดดังรูปที่ 9 (ค) และการทดสอบความแข็งของชิ้นงานทดสอบกระทำด้วยเครื่องทดสอบความแข็งแบบ Rockwell ยี่ห้อ DIGICON รุ่น HT- R150A ตามมาตรฐาน ASTM E18 ทดสอบความแข็งแบบ Rockwell (Rockwell Hardness Test) โดยใช้ลูกเหล็กชุบแข็งขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.588 มิลลิเมตร ดังแสดงในรูปที่ 10 (ก) และทำการกดทดสอบความแข็ง 5 จุด ดังแสดงในรูปที่ 10 (ข)



รูปที่ 9 การทดสอบความต้านทานแรงดึง



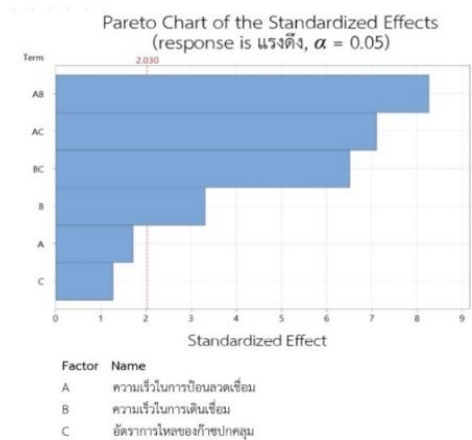
รูปที่ 10 การทดสอบความแข็ง

3. ผลการทดลองและอภิปรายผลการทดลอง

3.1 สมบัติทางกลทางด้านความต้านทานแรงดึง

ผลการทดสอบความสามารถรับแรงดึงดำเนินการทดลองโดยใช้การออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียล 3^k ทำการทดลองซ้ำ 2 รอบ ซึ่งได้จำนวนการทดลองทั้งหมด 54 การทดลอง ซึ่งผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 5 และจากผลการทดลองในตารางที่ 5 นำมาทำการสร้างกราฟพาเรโตด้วยโปรแกรม Minitab เพื่อวิเคราะห์หาปัจจัยหลักที่มีผลต่อค่าแรงดึงสูงสุดของชิ้นงานทดสอบ ที่ระดับ Alpha = 0.05 ดังแสดงในรูปที่ 11

จากรูปที่ 11 แสดงถึงปัจจัยที่มีผลกระทบร่วม และ



รูปที่ 11 กราฟพาเรโตแสดงผลกระทบที่มีผลต่อค่าแรงดึง

ผลกระทบหลักที่ส่งผลต่อค่าแรงดึงอย่างมีนัยสำคัญ โดยพบว่าความเร็วในการเดินแนวเชื่อมเป็นผลกระทบหลัก



ตารางที่ 5 ผลค่าแรงดึงสูงสุดของชิ้นงานทดสอบ

ลำดับที่	อัตราการ ป้อนลวด	ความเร็ว ในการเดิน แนวเชื่อม	อัตราการไหล ของก๊าซ	แรงดึงสูงสุด (N)	ลำดับที่	อัตราการ ป้อนลวด	ความเร็ว ในการเดิน แนวเชื่อม	อัตราการไหล ของก๊าซ	แรงดึงสูงสุด (N)
1	6	0.4	10	4,900.69	28	6	0.4	10	4,918.69
2	6	0.4	12	4,829.69	29	6	0.4	12	4,835.35
3	6	0.4	14	4,814.68	30	6	0.4	14	4,842.35
4	6	0.5	10	4,720.68	31	6	0.5	10	4,745.02
5	6	0.5	12	4,735.01	32	6	0.5	12	4,757.68
6	6	0.5	14	4,752.02	33	6	0.5	14	4,782.35
7	6	0.6	10	4,771.35	34	6	0.6	10	4,772.69
8	6	0.6	12	4,764.68	35	6	0.6	12	4,785.69
9	6	0.6	14	4,735.68	36	6	0.6	14	4,769.35
10	7	0.4	10	4,843.35	37	7	0.4	10	4,861.69
11	7	0.4	12	4,782.68	38	7	0.4	12	4,815.35
12	7	0.4	14	4,703.35	39	7	0.4	14	4,725.02
13	7	0.5	10	4,814.68	40	7	0.5	10	4,857.69
14	7	0.5	12	4,760.72	41	7	0.5	12	4,765.35
15	7	0.5	14	4,770.69	42	7	0.5	14	4,791.69
16	7	0.6	10	4,775.68	43	7	0.6	10	4,789.02
17	7	0.6	12	4,781.69	44	7	0.6	12	4,755.02
18	7	0.6	14	4,739.35	45	7	0.6	14	4,768.35
19	8	0.4	10	4,758.69	46	8	0.4	10	4,780.68
20	8	0.4	12	4,739.35	47	8	0.4	12	4,735.02
21	8	0.4	14	4,764.35	48	8	0.4	14	4,720.35
22	8	0.5	10	4,756.02	49	8	0.5	10	4,710.02
23	8	0.5	12	4,755.68	50	8	0.5	12	4,770.35
24	8	0.5	14	4,829.02	51	8	0.5	14	4,856.35
25	8	0.6	10	4,719.35	52	8	0.6	10	4,723.69
26	8	0.6	12	4,805.02	53	8	0.6	12	4,825.35
27	8	0.6	14	4,847.69	54	8	0.6	14	4,856.69

ของปัจจัย ในขณะที่ผลกระทบระหว่าง 2 ปัจจัย พบว่าอัตราการป้อนลวด และความเร็วในการเดินแนวเชื่อม (WS-TS) ส่งผลต่อค่าแรงดึงมากที่สุด รวมไปถึง

ความเร็วในการป้อนลวดเชื่อม และอัตราการไหลของก๊าซ (WS-GF) ความเร็วในการเดินแนวเชื่อม และอัตราการไหลของก๊าซ (TS-GF) ส่งผลต่อค่าแรงดึง จากนั้น

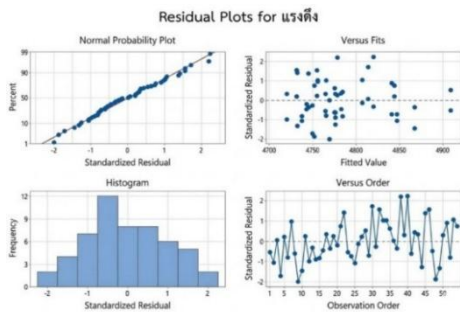
ทำการวิเคราะห์ผลความแปรปรวน (ANOVA) ซึ่งค่าแรงดึงแสดงให้เห็นถึงผลกระทบหลัก และผลกระทบร่วมของปัจจัยที่ส่งผลต่อค่าแรงดึงของชิ้นงานทดสอบในระดับค่าความเชื่อมั่นที่ 95 เปอร์เซนต์ พบว่าปัจจัยหลักและปัจจัยร่วมที่มีอิทธิพลต่อแรงดึง ได้แก่ อัตราการป้อนลวด ความเร็วในการเดินแนวเชื่อม และอัตราการไหลของก๊าซ โดยที่ปัจจัยดังกล่าวแสดงผลกระทบเกินกว่าเส้นระดับ Alpha = 0.05 นอกจากนี้พบว่าความเร็วในการป้อนลวดเชื่อม และอัตราการไหลของก๊าซเป็นปัจจัยที่ไม่ส่งผลกระทบเพราะแสดงผลกระทบน้อยกว่าเส้นระดับ Alpha = 0.05 จากนั้นทำการวิเคราะห์ปัจจัยหลักที่มีผลต่อค่าแรงดึงด้วยค่า p -value ที่ระดับ 0.05 พบว่าความเร็วในการเชื่อม มีค่า p -value น้อยกว่า 0.05 นั้นแสดงว่ามีผลต่อค่าแรงดึงของชิ้นงานทดสอบ ดังแสดงในตารางที่ 6

ตารางที่ 6 การวิเคราะห์ความแปรปรวนค่าแรงดึง

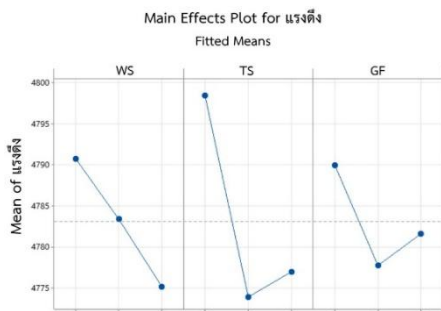
การวิเคราะห์ความแปรปรวน					
แหล่งกำเนิดความแปรปรวน	องศาอิสระ	ผลรวมกำลังสองปรับค่า	ค่าเฉลี่ยกำลังสองปรับค่า	ค่า F	ค่า P
Model	18	112,901	6,272.3	14.40	0.000
Linear	6	9,976	1,662.7	3.82	0.005
WS	2	2,180	1,089.9	2.50	0.096
TS	2	6,392	3,195.9	7.34	0.002
GF	2	1,405	702.4	1.61	0.214
2-Way Interactions	12	102,925	8,577.1	19.69	0.000
WS*TS	4	42,770	10,692.5	24.55	0.000
WS*GF	4	32,419	8,104.9	18.61	0.000
TS*GF	4	27,735	6,933.8	15.92	0.000
Error	35	15,242	435.5		
Lack-of-Fit	8	6,907	863.4	2.80	0.021
Pure Error	27	8,335	308.7		
Total	53	128,144			

การตรวจสอบผลการทดลองของค่าแรงดึง แสดงในรูปที่ 12 แสดงให้เห็นว่าการกระจายของกราฟมีการกระจายแบบแจกแจงปกติ โดยการใช้การพล็อตความน่าจะเป็นแบบปกติ (Normal Distribution Plot) และไม่แสดงสิ่งผิดปกติให้เห็นว่ามีส่วนตกค้าง (Residual) และผลการทดลองของค่าแรงดึงยังมีการกระจายตัวมีแนวโน้มตามแนวเส้นตรง อีกทั้งความเป็นอิสระ (Independent) ของค่าที่มีส่วนตกค้างพบว่ามีการกระจายตัวของค่าความผิดพลาดนั้นมีความเป็นอิสระต่อกัน และแผนภูมิการกระจาย (Scatter Plot) เมื่อพิจารณาการกระจายของข้อมูลบนแผนภูมิพบว่ามีการกระจายตัวของค่าส่วนตกค้างมีรูปแบบที่เป็นอิสระและไม่มีความเป็นอิสระที่แน่นอน แสดงให้เห็นว่าค่าส่วนตกค้างมีความเป็นอิสระต่อกันไม่ขึ้นอยู่กับลำดับการทดลอง ความเสถียรของความแปรปรวน (Variance Stability) พบว่ากากระจายตัวของส่วนตกค้างมีลักษณะที่ต่างกัน มีการกระจายตัวแบบอิสระทั้งทางบวกและทางลบไม่ขึ้นอยู่กับค่าที่ถูกทำนาย แสดงว่าข้อมูลมีความเสถียรของความแปรปรวนและความแปรผันของข้อมูล (Histogram) แสดงกราฟแท่งที่แสดงความผันแปรของข้อมูลด้วยการเรียงลำดับความถี่ตามปริมาณที่เกิดขึ้น และจัดกลุ่มข้อมูลเข้าด้วยกันเพื่อให้เห็นช่วงของข้อมูลที่ชัดเจน

การวิเคราะห์ปัจจัยที่เป็นอิทธิพลหลัก (Main Effects) ทั้ง 3 ปัจจัย คือ WS (ความเร็วในการป้อนลวดเชื่อม) TS (ความเร็วในการเดินเชื่อม) และ GF (อัตราการไหลของก๊าซปกคลุม) ที่ส่งผลกระทบต่อค่าแรงดึงดังแสดงในรูปที่ 13 พบว่าเมื่อใช้ความเร็วในการป้อนลวดเชื่อม 6 เมตรต่อนาที จะให้ค่าแรงดึงค่อนข้างสูง แต่เมื่อความเร็วในการป้อนลวดเชื่อมเพิ่มขึ้นทำให้ค่าแรงดึงลดลง แสดงว่าการเพิ่มความเร็วในการป้อนลวดเชื่อม



รูปที่ 12 การตรวจสอบผลการทดลองของค่าแรงดึง

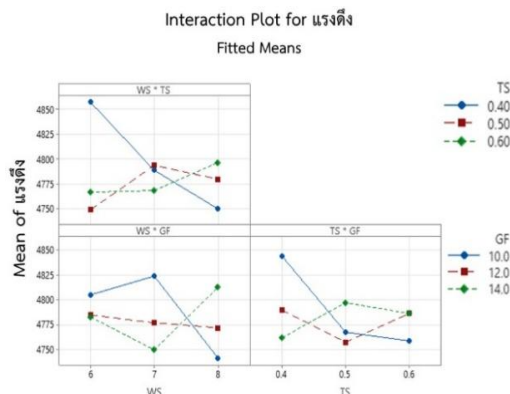


รูปที่ 13 แสดงกราฟของอิทธิพลหลัก 3 ปัจจัยที่มีผลต่อแรงดึง

มากเกินไปส่งผลโดยตรงต่อการเพิ่มปริมาณเนื้อวัสดุที่เติมลงในแนวเชื่อม และการสะสมความร้อนที่สูงขึ้น ซึ่งความร้อนสะสมที่มากเกินไปนี้ส่งผลให้โครงสร้างจุลภาคของอะลูมิเนียมมีลักษณะเกรนที่หยาบขึ้น และอาจเกิดการขยายตัวของโซนที่ได้รับผลกระทบจากความร้อน ส่งผลให้ความสามารถในการต้านทานการเสียรูปถาวรลดลง ในขณะที่กราฟของความเร็วในการเดินเชื่อมมีความชันมากที่สุดเมื่อเทียบกับความเร็วในการป้อนลวดเชื่อม และอัตราการไหลของก๊าซปกคลุม โดยเมื่อความเร็วในการเดินเชื่อม 0.4 เมตรต่อนาที ได้ค่าแรงดึงสูงสุด แต่เมื่อเพิ่มความเร็วในการเดินเชื่อมเป็น 0.5–0.6 เมตรต่อนาที ค่าแรงดึงลดลงชัดเจน แสดงให้เห็นว่าความเร็วในการเดินเชื่อมเป็นปัจจัยที่มีอิทธิพลสูง

ที่สุดต่อแรงดึง ซึ่งสอดคล้องกับ Sahul และคณะ [17] โดยความเร็วในการเดินเชื่อมเป็นปัจจัยหลักที่กำหนดคุณภาพของชิ้นงาน WAAM เนื่องจากความเร็วในการเดินเชื่อมที่เหมาะสมจะช่วยควบคุมการเย็นตัว (Cooling Rate) หากความเร็วในการเดินเชื่อมต่ำเกินไปจะเกิดความร้อนสะสมสูง ทำให้เกรนขยายตัว (Coarse Grain) และลดความแข็งแรงของวัสดุ โดยความเร็วเชื่อมที่เหมาะสมในการทดลองนี้ควรอยู่ที่ 0.4 เมตรต่อนาที เพื่อให้การสะสมพลังงาน และการหลอมรวมของน้ำโลหะเหมาะสม ในส่วนอัตราการไหลของก๊าซปกคลุมพบว่าค่าแรงดึงมีการแกว่งขึ้นลงเล็กน้อยไม่เปลี่ยนแปลงชัดเจนเหมือนความเร็วในการเดินเชื่อม โดยที่อัตราการไหลของก๊าซปกคลุม 10 ลิตรต่อนาที ได้ค่าแรงดึงค่อนข้างสูง และอัตราการไหลของก๊าซปกคลุมที่ได้ค่าแรงดึงกลับลดลงเล็กน้อย แสดงว่าอัตราการไหลของก๊าซปกคลุมมีอิทธิพลน้อยที่สุด ใน 3 ปัจจัย แต่การเลือกอัตราการไหลของก๊าซปกคลุมที่เหมาะสมยังมีความสำคัญในการป้องกันการเกิดรูพรุน และการปนเปื้อนจากอากาศ ซึ่งเป็นไปในแนวทางเดียวกันงานวิจัยของ Vinicius และคณะ [18] ระบุว่าอัตราการไหลของก๊าซปกคลุมที่สมบูรณ์มีผลต่อความสะอาดของผิวงาน และความเสถียรภาพเชิงมิติของผนังบาง ซึ่งส่งผลต่อโครงสร้างภายใน

การวิเคราะห์ปัจจัยที่เป็นอิทธิพลร่วม (Interaction Effect) ที่ส่งผลกระทบต่อค่าความต้านทานแรงดึง ทั้ง 3 ปัจจัย ดังแสดงในรูปที่ 14 พบว่าผลกระทบร่วมระหว่างความเร็วในการป้อนลวดเชื่อม และความเร็วในการเดินเชื่อมพบว่าเมื่อใช้ความเร็วในการป้อนลวดเชื่อมเพิ่มขึ้นจาก 6 ไปยัง 8 เมตรต่อนาที ค่าความเร็วในการเดินเชื่อมที่ต่ำ (0.4) ส่งผลให้ค่าแรงดึงลดลงอย่างมาก เนื่องจากมี



รูปที่ 14 แสดงกราฟของอิทธิพลร่วมที่มีผลต่อแรงดึง

พลังงานความร้อนสะสมต่อหน่วยความยาวสูง และเมื่อมีการเพิ่มความเร็วในการป้อนลวดเชื่อมเข้าไปจะยิ่งเป็นการเพิ่มปริมาณเนื้อโลหะ และความร้อนเข้าสู่ชิ้นงานมากขึ้นไป ส่งผลให้อัตราการเย็นตัวช้าลงทำให้โครงสร้างจุลภาคเกิดการสะสมตัวของความร้อนที่สูงเกินสมมูล ก่อให้เกิดเกรนขนาดใหญ่ และอาจเกิดการแยกตัวของธาตุผสม ซึ่งเป็นจุดอ่อนที่ทำให้ความสามารถในการรับแรงดึงลดลง ในขณะที่ความเร็วในการเดินเชื่อมที่ระดับสูงกว่า (0.5 และ 0.6) ค่าแรงดึงมีความผันผวนเล็กน้อย เนื่องจากความร้อนสะสมถูกระบายออกได้เร็วกว่า ทำให้การเปลี่ยนแปลงของความเร็วในการเดินเชื่อม ส่งผลกระทบท่อโครงสร้างจุลภาค และความแข็งแรงน้อยกว่า การตัดกันของเส้นกราฟบ่งบอกว่ามีผลกระทบร่วมชัดเจนระหว่างความเร็วในการป้อนลวดเชื่อมและความเร็วในการเดินเชื่อม ซึ่งผลของความเร็วในการป้อนลวดเชื่อมต่อค่าความต้านทานแรงดึงขึ้นอยู่กับค่าของความเร็วในการเดินเชื่อม หากเดินเชื่อมช้าจะต้องควบคุมความเร็วในการป้อนลวดเชื่อมให้น้อยเพื่อให้ค่าแรงดึงสูงสุด

ผลกระทบร่วมระหว่างความเร็วในการป้อนลวดเชื่อมและอัตราการไหลของก๊าซปกคลุมพบว่าที่อัตราการไหล

ของก๊าซต่ำ (GF = 10) และการเพิ่มความเร็วในการเดินเชื่อมส่งผลกระทบท่อแรงดึงอย่างมาก เนื่องจากเมื่อความเร็วในการเดินเชื่อมสูงขึ้น ขนาดของบ่อหลอมละลายจะขยายตัวตามปริมาณเนื้อวัสดุที่เติมลงไป หากก๊าซปกคลุมมีอัตราการไหลไม่เพียงพอจะทำให้การปกคลุมบ่อหลอมละลายไม่ทั่วถึง ก่อให้เกิดปฏิกิริยากับออกซิเจนในอากาศ และการกักตัวของฟองอากาศภายในเนื้อวัสดุ ส่งผลให้ชิ้นงานขาดออกจากกันได้ง่ายเมื่อรับแรงดึง แต่เมื่อเพิ่มอัตราการไหลของก๊าซประสิทธิภาพในการป้องกันบ่อหลอมละลายดีขึ้น ทำให้ผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงความเร็วในการเดินเชื่อมต่อความแข็งแรงลดน้อยลง การเลือกความเร็วในการป้อนลวดเชื่อมต้องพิจารณาพร้อมกับค่าอัตราการไหลของก๊าซปกคลุม โดยอัตราการไหลของก๊าซปกคลุมต่ำ (10 ลิตรต่อนาที) จะไวต่อการเปลี่ยนแปลงของความเร็วในการป้อนลวดเชื่อมที่มากกว่า

ผลกระทบร่วมระหว่างความเร็วในการเดินเชื่อมและอัตราการไหลของก๊าซปกคลุมพบว่าที่อัตราการไหลของก๊าซต่ำการเปลี่ยนแปลงความเร็วในการเดินเชื่อมมีผลกระทบอย่างมากต่อการลดลงของแรงดึง โดยที่อัตราการไหลของก๊าซต่ำนั้นมีความไวต่อเสถียรภาพของบ่อหลอมละลายสูง เมื่อความเร็วในการเดินเชื่อมเปลี่ยนแปลงไปจะส่งผลต่อรูปร่างของแนวเชื่อม และการไหลวนของน้ำโลหะ หากปัจจัยทั้ง 3 ไม่สอดคล้องกันจะนำไปสู่การเกิดโครงสร้างที่ไม่เป็นเนื้อเดียวกันและความไม่สมบูรณ์ของการหลอมละลายระหว่างชิ้น ส่งผลให้ประสิทธิภาพเชิงกลในค่าแรงดึงลดลง โดยที่ความเร็วในการเดินเชื่อม 0.40 เมตรต่อนาที และอัตราการไหลของก๊าซปกคลุม 10 ลิตรต่อนาที ได้ค่าแรงดึงสูงสุด แต่ถ้าเพิ่มความเร็วในการเดินเชื่อม เป็น 0.60 เมตรต่อนาที ทำให้ค่าแรงดึงลดลงมาก การตัดกันของ

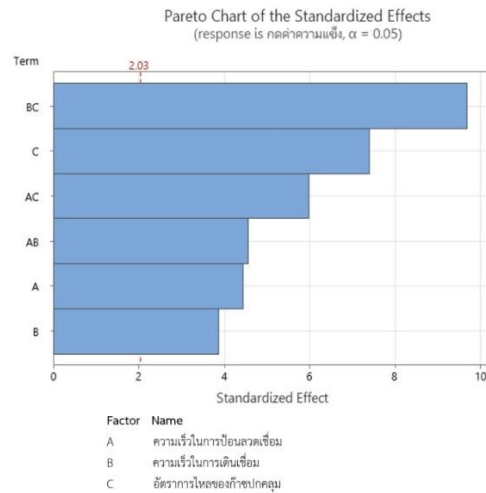
เส้นกราฟแสดงให้เห็นว่าผลกระทบร่วมระหว่างความเร็วในการเดินเชื่อม และอัตราการไหลของก๊าซปกคลุมมีผลค่าแรงดึง โดยเฉพาะเมื่อความเร็วในการเดินเชื่อมต่ำ (0.40 เมตรต่อนาที) ค่าของอัตราการไหลของก๊าซปกคลุมจะมีอิทธิพลต่อผลลัพธ์ชัดเจน

3.2 สมบัติทางกลทางด้านความแข็ง

ผลการทดสอบความแข็งแรงของชิ้นงานทดสอบ
กระทำด้วยเครื่องทดสอบความแข็งแรงแบบ Rockwell
ยี่ห้อ DIGICON รุ่น HT- R150A ตามมาตรฐาน ASTM
E18M ผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 7 และจากผล
การทดลองทำการสร้างกราฟพาเรโต้ด้วยโปรแกรม Minitab
เพื่อวิเคราะห์หาปัจจัยหลักที่มีผลต่อค่าความต้านทาน
แรงดึงของชิ้นงานทดสอบ ที่ระดับ Alpha = 0.05 ดัง
แสดงในรูปที่ 15

จากรูปที่ 15 แสดงถึงปัจจัยที่มีผลกระทบร่วม และผลกระทบหลักต่อค่าความแข็งแกร่งที่มีนัยสำคัญ ซึ่งพบว่าอัตราไหลของก๊าซเป็นผลกระทบหลักของปัจจัย ในขณะที่ผลกระทบร่วมระหว่าง 2 ปัจจัยพบว่าความเร็วในการเดินเชื่อม-อัตราไหลของก๊าซ ส่งผลต่อค่าความแข็งแกร่งที่สุด รวมไปถึงความเร็วในการป้อนลวดเชื่อม-อัตราไหลของก๊าซ ความเร็วในการป้อนลวดเชื่อม-ความเร็วในการเดินเชื่อมและความเร็วในการป้อนลวดเชื่อม-ความเร็วในการเดินเชื่อมส่งผลต่อค่าความแข็งแกร่ง

จากผลการทดลองค่าความแข็งแกร่งทำการวิเคราะห์ความแปรปรวนของผลการทดลองค่าความแข็งแกร่งพบว่าปัจจัยหลัก และปัจจัยร่วมมีอิทธิพลต่อค่าความแข็งแกร่ง ได้แก่ อัตราการป้อนลมด ความเร็วในการเดินแนวเชื่อม และอัตราการไหลของก๊าซ โดยที่ปัจจัยดังกล่าวแสดงผลกระทบเกินกว่าเส้นระดับ $\text{Alpha} = 0.05$ การวิเคราะห์



รูปที่ 15 กราฟพารेटโตแสดงผลกระทบที่มีผลต่อค่าความแข็ง

ปัจจัยหลักที่มีผลต่อค่าความแข็งแกร่งด้วยค่า p -value ที่ระดับ 0.05 พบว่าความเร็วในการป้อนสวดเชื่อมความเร็วในการเดินเชื่อม และอัตราการไหลของก๊าซในการปกคลุม มีค่า p -value ของผลกระทบหลัก และผลกระทบร่วมของทั้งสาม ปัจจัยน้อยกว่า 0.05 มีผลต่อค่าความแข็งแกร่งของชิ้นงานทดสอบ ซึ่งบ่งชี้ถึงความสัมพันธ์ที่มีนัยสำคัญแสดงในตารางที่ 8

การตรวจสอบผลการทดลองของค่าความแข็ง
 ดังแสดงในรูปที่ 16 แสดงให้เห็นว่าการกระจายตัวของ
 กราฟมีการกระจายแบบแจกแจงปกติ โดยใช้การพล็อต
 ความน่าจะเป็นแบบปกติ และไม่แสดงสิ่งผิดปกติให้เห็น
 ว่ามีส่วนตกค้าง จากผลการทดลองของค่าความแข็งมี
 การกระจายตัวมีแนวโน้มตามแนวเส้นตรง และตรวจสอบ
 ความเป็นอิสระของค่าที่มีส่วนตกค้างพบว่าการกระจายตัว
 ของค่าความผิดพลาดนั้นมีความเป็นอิสระต่อกันโดยดู
 จากแผนภูมิการกระจาย เมื่อพิจารณาการกระจายของ
 ข้อมูลบนแผนภูมิพบว่า การกระจายตัวของค่าส่วน
 ตกค้างมีรูปแบบที่เป็นอิสระ และไม่มีรูปแบบที่แน่นอน

ตารางที่ 7 ผลค่าความแข็ง

ลำดับที่	อัตราการ ป้อนลวด	ความเร็ว ในการเดิน แนวเชื่อม	อัตราการไหล ของก๊าซ	ค่าความแข็ง (HRB)	ลำดับที่	อัตราการ ป้อนลวด	ความเร็ว ในการเดิน แนวเชื่อม	อัตราการไหล ของก๊าซ	ค่าความแข็ง (HRB)
1	6	0.4	10	38.85	28	6	0.4	10	38.95
2	6	0.4	12		29	6	0.4	12	
3	6	0.4	14	38.77	30	6	0.4	14	38.83
4	6	0.5	10		31	6	0.5	10	
5	6	0.5	12	37.83	32	6	0.5	12	37.85
6	6	0.5	14		33	6	0.5	14	
7	6	0.6	10	37.86	34	6	0.6	10	37.77
8	6	0.6	12		35	6	0.6	12	
9	6	0.6	14	38.67	36	6	0.6	14	38.45
10	7	0.4	10		37	7	0.4	10	
11	7	0.4	12	37.54	38	7	0.4	12	37.67
12	7	0.4	14		39	7	0.4	14	
13	7	0.5	10	38.52	40	7	0.5	10	38.65
14	7	0.5	12		41	7	0.5	12	
15	7	0.5	14	37.85	42	7	0.5	14	37.74
16	7	0.6	10		43	7	0.6	10	
17	7	0.6	12	38.67	44	7	0.6	12	38.45
18	7	0.6	14		45	7	0.6	14	
19	8	0.4	10	37.32	46	8	0.4	10	37.56
20	8	0.4	12		47	8	0.4	12	
21	8	0.4	14	38.52	48	8	0.4	14	38.37
22	8	0.5	10		49	8	0.5	10	
23	8	0.5	12	37.63	50	8	0.5	12	37.45
24	8	0.5	14		51	8	0.5	14	
25	8	0.6	10	37.54	52	8	0.6	10	37.65
26	8	0.6	12		53	8	0.6	12	
27	8	0.6	14	38.53	54	8	0.6	14	38.65

แสดงให้เห็นว่าค่าส่วนตกค้างมีความเป็นอิสระต่อกัน
ไม่ขึ้นอยู่กับลำดับการทดลอง อีกทั้งความเสถียรของ
ความแปรปรวน จากกราฟพบว่า การกระจายตัวของส่วน

ตกค้างมีลักษณะที่ต่างกันมีการกระจายตัวแบบอิสระทั้ง
ทางบวก และทางลบไม่ขึ้นอยู่กับค่าที่ถูกทำนาย แสดงว่า
ข้อมูลมีความเสถียรของความแปรปรวน และความแปรผัน

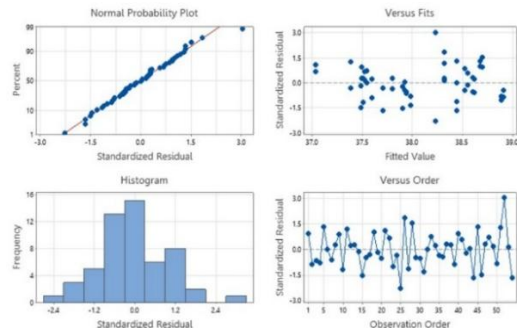
ตารางที่ 8 การวิเคราะห์ความแปรปรวนค่าความแข็ง

การวิเคราะห์ความแปรปรวน					
แหล่งกำเนิดความแปรปรวน	องศาอิสระ	ผลรวมกำลังสองปรับค่า	ค่าเฉลี่ยกำลังสองปรับค่า	ค่า F	ค่า P
Model	18	14.3846	0.79915	18.68	0.000
Linear	6	4.6376	0.77293	18.06	0.000
WS	2	1.0590	0.52952	12.38	0.000
TS	2	0.8276	0.41378	9.67	0.000
GF	2	2.7510	1.37548	32.15	0.000
2-Way Interactions	12	9.7471	0.81226	18.98	0.000
WS*TS	4	1.4750	0.36874	8.62	0.000
WS*GF	4	2.3356	0.58390	13.65	0.001
TS*GF	4	5.9365	1.48412	34.69	0.000
Error	35	1.4976	0.04279		
Lack-of-Fit	8	0.7858	0.09822	3.73	0.005
Pure Error	27	0.7118	0.02636		
Total	53	15.8822			

ของข้อมูล แสดงกราฟแท่งที่แสดงความผันแปรของข้อมูลด้วยการเรียงลำดับความถี่ตามปริมาณที่เกิดขึ้น และจัดกลุ่มข้อมูลเข้าด้วยกัน เพื่อให้เห็นช่วงของข้อมูลที่ชัดเจนโดยตัวเลขเป็นความถี่แสดงกราฟระหว่างความผันแปรของข้อมูลการทดลองสำหรับค่าความแข็ง

การวิเคราะห์ปัจจัยที่เป็นอิทธิพลหลัก ทั้ง 3 ปัจจัย คือ ความเร็วในการป้อนลวดเชื่อม ความเร็วในการเดินเชื่อม และอัตราการไหลของก๊าซปกคลุมที่ส่งผลกระทบต่อค่าความแข็ง ดังแสดงในรูปที่ 17 พบว่าเมื่อใช้ความเร็วในการป้อนลวดเชื่อม 6 เมตรต่อนาที จะให้ค่าความแข็งสูงสุด เนื่องจากปริมาณเนื้อวัสดุที่เติมลงไปต่อหน่วยเวลาน้อย ทำให้พลังงานความร้อนสะสมต่ำ และอัตรา

Residual Plots for ค่าความแข็ง



รูปที่ 16 การตรวจสอบผลการทดลองของค่าความแข็ง

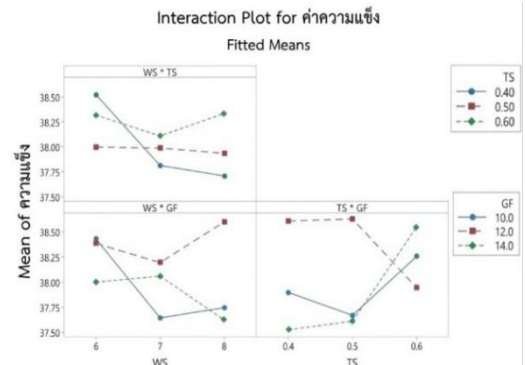


รูปที่ 17 แสดงกราฟของอิทธิพลหลัก 3 ปัจจัยที่มีผลต่อความแข็ง

การเย็นตัวรวดเร็ว ทำให้เกิดโครงสร้างจุลภาคแบบเกรนละเอียดซึ่งให้ค่าความแข็งสูง และเมื่อเพิ่มความเร็วในการป้อนลวดเชื่อม 7 และ 8 เมตรต่อนาที จะได้ค่าค่าความแข็งลดลงเล็กน้อย เนื่องจากเกิดการสะสมความร้อนที่มากขึ้นทำให้เกรนขยายตัว และพบว่าความเร็วในการเดินเชื่อม 0.6 เมตรต่อนาที ช่วยให้การสะสมความร้อน เคลื่อนที่ผ่านชิ้นงานอย่างรวดเร็วลดระยะเวลาที่ชิ้นงานจะได้รับความร้อนโดยตรง ช่วยลดขนาดของโซนที่ได้รับผลกระทบจากความร้อน และรักษาเสถียรภาพของเฟสสารละลายแข็งของแมกนีเซียมในอะลูมิเนียม ไม่ให้เกิดการตกตะกอนที่หยาบ ส่งผลให้โครงสร้างมีความ

แข็งตึง และสม่ำเสมอ ในส่วนอัตราการไหลของก๊าซปฏิกิริยา 12 ลิตรต่อนาที ได้ความแข็งแรงสูงสุด และอัตราการไหลของก๊าซปฏิกิริยา 10 ลิตรต่อนาที แสดงค่าความแข็งแรงที่ต่ำกว่า ในขณะที่อัตราการไหลของก๊าซปฏิกิริยา 14 ลิตรต่อนาที ความแข็งแรงกลับลดลงอีกครั้ง นั่นแสดงว่าอัตราการไหลของก๊าซปฏิกิริยา 12 ลิตรต่อนาที มีความแข็งแรงสูงสุดต่อค่าความแข็งแรง โดยอัตราการไหลของก๊าซปฏิกิริยาที่เหมาะสมคือ 12 ลิตรต่อนาที ซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวกลางในการพาความร้อนออกจากผิวหน้าบ่อหลอมได้อย่างมีประสิทธิภาพ ทำให้การจัดเรียงตัวของอะตอมในโครงสร้างผลึกมีความหนาแน่นสูงส่งผลให้ค่าความแข็งแรงที่วัดได้มีความคงที่ และสูงกว่าสภาวะที่ก๊าซปฏิกิริยาไม่เพียงพอหรือมากเกินไปจนเกิดความปั่นป่วน ซึ่งสภาวะการไหลของก๊าซปฏิกิริยาที่ไม่เหมาะสม ส่งผลให้เกิดการปนเปื้อนของอากาศ (Air Transport) เข้าสู่เนื้อวัสดุ โดยเฉพาะบริเวณผนังด้านข้างของชิ้นงาน นำไปสู่การเกิดจุดบกพร่อง และรูพรุน สอดคล้องกับผลการจำลองทางตัวเลขของ Wang และคณะ [19] ที่พบว่า การกระจายตัวของอากาศในลำอาร์กมีความสัมพันธ์โดยตรงกับเสถียรภาพของเกราะปฏิกิริยา และเป็นปัจจัยสำคัญที่ทำให้สมบัติทางกลลดลง

การวิเคราะห์ปัจจัยที่เป็นอิทธิพลร่วมที่ส่งผลกระทบต่อค่าความแข็งแรง ทั้ง 3 ปัจจัย ดังแสดงในรูปที่ 18 พบว่าผลกระทบร่วมระหว่างความเร็วในการป้อนลวดเชื่อมและความเร็วในการเดินเชื่อมที่ความเร็วในการป้อนลวดเชื่อม 6 เมตรต่อนาที และความเร็วในการเดินเชื่อม 0.40 เมตรต่อนาที ได้ค่าความแข็งแรงสูงมากที่สุด และเมื่อความเร็วในการเดินเชื่อมเพิ่มขึ้นจาก 0.40 เป็น 0.60 เมตรต่อนาที แนวโน้มที่ความเร็วในการป้อนลวดเชื่อม 6 เมตรต่อนาที ลดลงเล็กน้อย แต่ที่ความเร็วในการ



รูปที่ 18 แสดงกราฟของอิทธิพลร่วม 3 ปัจจัยที่มีผลต่อความแข็งแรง

ป้อนลวดเชื่อม 8 เมตรต่อนาที ค่าความแข็งแรงกลับเพิ่มขึ้น แสดงว่าเมื่อความเร็วในการเดินเชื่อมช้า และความเร็วในการป้อนลวดเชื่อมน้อย พลังงานต่อหน่วยพื้นที่มีความเหมาะสมทำให้เกิดการแข็งตัวที่ดี แต่ถ้าเพิ่มความเร็วในการเดินเชื่อมต้องชดเชยด้วยความเร็วในการป้อนลวดเชื่อมที่มากขึ้นเพื่อรักษาสมดุลความร้อนที่เกิดขึ้นในกระบวนการเชื่อม ซึ่งเป็นไปในทางเดียวกันกับ Sabanci และคณะ [20] ที่ระบุไว้ว่าความร้อนสะสมมีความสัมพันธ์โดยตรงกับค่าความแข็งแรง

ผลกระทบร่วมระหว่างความเร็วในการป้อนลวดเชื่อมและอัตราการไหลของก๊าซปฏิกิริยาที่อัตราการไหลของก๊าซปฏิกิริยา 6 และ 12 ลิตรต่อนาที พบว่ามีค่าความแข็งแรงสูงกว่าระดับอื่น แต่เมื่อเพิ่มความเร็วในการป้อนลวดเชื่อมไปที่ 8 เมตรต่อนาที ผลของอัตราการไหลของก๊าซปฏิกิริยาไม่คงที่ โดยที่อัตราการไหลของก๊าซปฏิกิริยา 12 ลิตรต่อนาที ให้ค่าความแข็งแรงสูงกว่าอัตราการไหลของก๊าซปฏิกิริยา 10 และ 14 ลิตรต่อนาที แสดงว่าอัตราการไหลของก๊าซปฏิกิริยาที่เหมาะสม (12 ลิตรต่อนาที) จะช่วยในเรื่องความเสถียรภาพของการเชื่อม โดยเฉพาะเมื่อความเร็วในการป้อนลวดเชื่อมอยู่ในระดับ



โดยเฉพาะเมื่อความเร็วในการป้อนลวดเชื่อมอยู่ในระดับต่ำ แต่เมื่อความเร็วในการป้อนลวดเชื่อมสูงเกินไป (8 เมตรต่อนาที) ความสมดุลระหว่างการไหล และการปกคลุมด้วยก๊าซจะถูกรบกวน ทำให้แนวโน้มนั่นไม่แน่นอน การใช้ความเร็วในการป้อนลวดเชื่อมมากเกินไปอาจก่อให้เกิดการสะสมความร้อน และออกซิเดชันในแนวเชื่อม หากก๊าซไม่เพียงพอหรือมากเกินไปจะทำให้ค่าความแข็งลดลง

ในขณะที่ผลกระทบระหว่างความเร็วในการเดินเชื่อมและอัตราการไหลของก๊าซปกคลุมที่ความเร็วในการเดินเชื่อม 0.40 เมตรต่อนาที ผลของอัตราการไหลของก๊าซปกคลุมค่อนข้างเสถียร (ค่าความแข็งไม่ต่างกันมาก) แต่เมื่อค่าความเร็วในการเดินเชื่อมที่ 0.50 เมตรต่อนาที ได้ค่าความแข็งสูงขึ้นอย่างชัดเจน เมื่ออัตราการไหลของก๊าซปกคลุม 12 ลิตรต่อนาที และที่ความเร็วในการเดินเชื่อม 0.60 เมตรต่อนาที ค่าความแข็งเพิ่มขึ้นหากใช้ค่าอัตราการไหลของก๊าซปกคลุม 10 ลิตรต่อนาที แต่ค่าความแข็งลดลงเมื่อใช้ค่าอัตราการไหลของก๊าซปกคลุม 12 ลิตรต่อนาที แล้วกลับเพิ่มเล็กน้อยเมื่อใช้ค่าอัตราการไหลของก๊าซปกคลุม 14 ลิตรต่อนาที การเลือกค่าความเร็วในการเดินเชื่อมระดับกลาง (0.50 เมตรต่อนาที) ควรใช้อัตราการไหลของก๊าซปกคลุม 12 ลิตรต่อนาที เพื่อให้ได้ค่าความแข็งสูงสุด แสดงว่าความเร็วในการเดินเชื่อมที่เหมาะสมกับอัตราการไหลของก๊าซปกคลุมพอเหมาะทำให้เกิดการปกป้องแนวเชื่อมที่ดีที่สุด และส่งผลต่อความแข็ง แต่ถ้าอัตราการไหลของก๊าซปกคลุมสูงหรือต่ำเกินไปจะเกิดการปั่นป่วนหรือการปกคลุมแนวเชื่อมของก๊าซไม่สมบูรณ์

4. สรุปผลการทดลอง

การศึกษาอิทธิพลของปัจจัยกระบวนการที่มีผลต่อสมบัติทางกลของอะลูมิเนียมเกรด 5356 ที่ขึ้นรูปด้วย

เทคโนโลยีการเติมเนื้อวัสดุ โดยศึกษา 3 ปัจจัย คือ ความเร็วในการป้อนลวดเชื่อม ความเร็วในการเดินเชื่อม และอัตราการไหลของก๊าซปกคลุม ผลการทดลองพบว่าความเร็วในการป้อนลวดเชื่อม 6 เมตรต่อนาที ความเร็วในการเดินเชื่อม 0.4 เมตรต่อนาที และอัตราการไหลของก๊าซ 10 ลิตรต่อนาที ให้ค่าแรงดึงสูงสุดที่ 4,918.69 นิวตัน ซึ่งเป็นค่าสูงที่สุด ในส่วนความเร็วในการป้อนลวดเชื่อม 7 เมตรต่อนาที ความเร็วในการเดินเชื่อม 0.4 เมตรต่อนาที และอัตราการไหลของก๊าซ 14 ลิตรต่อนาที ให้ค่าแรงดึงต่ำสุดที่ 4,703.35 นิวตัน โดยที่ความเร็วในการเดินเชื่อมมีอิทธิพลโดยตรงต่อค่าแรงดึงของชิ้นงานเชื่อม ซึ่งความเร็วในการเชื่อมที่ต่ำสามารถช่วยสร้างรอยเชื่อมที่สมบูรณ์ และเพิ่มค่าแรงดึง ดังนั้นการปรับความเร็วในการเชื่อมให้เหมาะสมจึงเป็นสิ่งสำคัญที่ส่งผลต่อสมบัติทางกลทางด้านแรงดึง ในขณะที่ผลกระทบต่อค่าความแข็ง การปรับเปลี่ยนค่าของปัจจัยใดปัจจัยหนึ่งสามารถส่งผลต่อความแข็งทำให้ค่าความแข็งที่ได้ อาจเพิ่มขึ้นหรือลดลง ทั้งนี้ จากผลการทดลองการกำหนดปัจจัยเบื้องต้นพบว่าค่าความแข็งของชิ้นงานที่ความเร็วในการป้อนลวดเชื่อม 6 เมตรต่อนาที ความเร็วในการเดินเชื่อม 0.4 เมตรต่อนาที และอัตราการไหลของก๊าซปกคลุม 10 ลิตรต่อนาที ให้ค่าความแข็งสูงสุดที่ 38.95 HRB ในขณะที่ปัจจัยความเร็วในการป้อนลวดเชื่อม 8 เมตรต่อนาที ความเร็วในการเดินเชื่อม 0.4 และอัตราการไหลของก๊าซปกคลุม 14 ลิตรต่อนาที ให้ค่าความแข็งต่ำสุดที่ 37.15 HRB ทั้งนี้ เกิดจากความร้อนสะสมที่เกิดขึ้นระหว่างการขึ้นรูปชิ้นงาน ปริมาณความร้อนที่สูงขึ้นระหว่างการขึ้นรูปจะช่วยปรับปรุงค่าความแข็งให้ดีขึ้น และจากผลการทดลองยังพบว่าอัตราการไหลของก๊าซมีอิทธิพลมากที่สุดต่อค่าความแข็ง โดยอัตราการไหลของก๊าซที่ต่ำหรือสูงเกินไปอาจเกิดการปั่นป่วนของลม (Turbulence) ที่ใช้ในการปกคลุมแนวเชื่อม

ทำให้แนวเชื่อมมีรูปทรงหรือความแข็งแรงลดลง

จากผลการศึกษาในครั้งนี้สามารถเป็นแนวทางในการปรับค่าปัจจัยกระบวนการสำหรับการชุบด้วยเทคโนโลยีการเติมเนื้อวัสดุของชิ้นงานอะลูมิเนียมเกรด 5356 ได้ว่าเมื่อต้องการชิ้นงานที่มีค่าแรงดึงสูงที่สามารถรับแรง Maximum tension force ได้มาก ควรให้ความสำคัญกับการควบคุมความเร็วในการเดินเชื่อมเป็นหลัก และหากต้องการควบคุมค่าความแข็งแรงของชิ้นงาน ควรพิจารณาปรับเลือกอัตราการไหลของก๊าซปกคลุมให้เหมาะสมร่วมกับความเร็วในการเดินเชื่อมและความเร็วในการป้อนลวดเชื่อม โดยพิจารณาจากความร้อนสะสมที่เกิดขึ้นในตัวชิ้นงาน โดยการปรับเปลี่ยนทั้ง 3 ปัจจัยล้วนส่งผลกระทบต่อสมบัติทางกลของชิ้นงานอะลูมิเนียมที่ขึ้นรูปด้วยเทคโนโลยี WAAM อย่างมีนัยสำคัญ

5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจาก ศูนย์ปฏิบัติการระบบการผลิตอัตโนมัติ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา ตาก

เอกสารอ้างอิง

- [1] V. T. Nguyen, P. S. Minh, T. M. T. Uyen, T. T. Do, H. V. T. Ngoc, M. T. Le, and V. T. T. Nguyen, "WAAM technique: Process parameters affecting the mechanical properties and microstructures of low-carbon steel," *Metals*, vol. 13, no. 5, 2023, Art. no. 873, doi: 10.3390/met13050873.
- [2] M. Silmbroth, N. Enzinger, C. Schneider-Bröskamp, A. Arnoldt, and T. Klein,

"Characterisation of structural modifications on cold-formed AA2024 substrates by wire arc additive manufacturing," *Science and Technology of Welding and Joining*, vol. 28, no. 4, pp. 314–322, 2023, doi: 10.1080/13621718.2022.2160902.

- [3] T. Hauser, A. Da Silva, R. T. Reisch, J. Volpp, T. Kamps, and A. F. Kaplan, "Fluctuation effects in wire arc additive manufacturing of aluminium analysed by high-speed imaging," *Journal of Manufacturing Processes*, vol. 56, pp. 1088–1098, 2020, doi: 10.1016/j.jmapro.2020.05.030.
- [4] P. Rodríguez-González, E. M. Ruiz-Navas, and E. Gordo, "Wire Arc Additive Manufacturing (WAAM) for aluminum-lithium alloys: A review," *Materials*, vol. 16, no. 4, 2023, Art. no. 1375, doi: 10.3390/ma16041375.
- [5] T. Hauser, R. T. Reisch, P. P. Breese, B. S. Lutz, M. Pantano, Y. Nalam, A. F. Kaplan, T. Kamps, J. Volpp, and A. F.H. Kaplan, "Porosity in wire arc additive manufacturing of aluminum alloys," *Additive Manufacturing*, vol. 41, 2021, Art. no. 101993, doi: 10.1016/j.addma.2021.101993.
- [6] A. Elsokaty, O. Oraby, S. Sadek, and H. G. Salem, "Influence of wire arc additive manufacturing beads' geometry and building strategy: Mechanical and structural behavior of ER70S-6 prismatic blocks," *Journal*



- of *Manufacturing and Materials Processing*, vol. 7, no. 1, pp. 3, 2022, doi: 10.3390/jmmp7010003.
- [7] K. Saravanakumar, J. Nampoothiri, and M. R. P. Kumar, "Wire arc additive manufacturing of aluminium 5356 alloy: Process parameter optimization and structure-property analysis," *Metallurgy and Materials*, vol. 70, no. 2, pp. 995–1002, 2025, doi: 10.24425/amm.20 25.153504.
- [8] A. Muthukumar, S. Jeyakumar, and K. Jayakumar, "Metallurgical and mechanical properties of marine grade AA5356 using wire arc additive manufacturing," *Materials Research Express*, vol. 11, no. 7, pp. 076503, 2024, doi: 10.1088/2053-1591/ad5817.
- [9] X. Zuo, Z. Lv, Y. Wang, X. Chen, and W. Qi, "Microstructural organization and mechanical properties of 5356 aluminum alloy wire arc additive manufacturing under low heat input conditions," *Metals*, vol. 15, no. 2, 2025, Art. no. 116, doi: 10.3390/met15020116.
- [10] A. I. Albannai, "A brief review on the common defects in wire arc additive manufacturing," *International Journal of Current Science Research and Review*, vol. 5, no. 12, pp. 4556–4576, 2022, doi: 10.47191/ijcsrr /V5-i12-19.
- [11] B. Wu, Z. Pan, D. Ding, D. Cuiuri, H. Li, J. Xu, and J. Norrish, "A review of the wire arc additive manufacturing of metals: Properties, defects and quality improvement," *Journal of Manufacturing Processes*, vol. 35, pp. 127–139, 2018, doi: 10.1016/j.jmapro.2018.08.001.
- [12] M. Wiczorowski, A. Pereira, D. Carou, B. Gapinski, and I. Ramirez, "Characterization of 5356 aluminum walls produced by Wire Arc Additive Manufacturing (WAAM)," *Materials*, vol. 16, no. 7, 2023, Art. no. 2570, doi: 10.3390/ma16072570.
- [13] F. R. Teixeira, F. M. Scotti, V. L. Jorge, and A. Scotti, "Combined effect of the interlayer temperature with travel speed on features of thin wall WAAM under two cooling approaches," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 126, no. 1, pp. 273–289, 2023, doi: 10.1007/s00170-023-11105-w.
- [14] N. A. Siddiqui, M. Muzamil, T. Jamil, and G. Hussain, "Heat sources in wire arc additive manufacturing and their impact on macro-microstructural characteristics and mechanical properties—an overview," *Smart Materials in Manufacturing*, vol. 3, 2025, Art. no. 100059, doi: 10.1016/j.smmf.2024.100059.
- [15] M. M. Tawfik, M. M. Nemat-Alla, and M. M. Dewidar, "Effect of travel speed on the properties of Al-Mg aluminum alloy fabricated by wire arc additive manufacturing," *Journal of Materials*

- Engineering and Performance*, vol. 30, no. 10, pp. 7762–7769, 2021, doi: 10.1007/s11665-021-05959-y.
- [16] M. Dekis, M. Tawfik, M. Egiza, and M. Dewidar, “Unveiling the characteristics of ER70S-6 low carbon steel alloy produced by wire arc additive manufacturing at different travel speeds,” *Metals and Materials International*, vol. 31, no. 2, pp. 325–338, 2025, doi: 10.1007/s12540-024-01766-x.
- [17] M. Sahul, M. Pavlik, M. Sahul, P. Kovačócy, and M. Martinkovic, “Effect of travel speed on the properties of 5087 aluminum alloy walls produced by wire and arc additive manufacturing,” *Journal of Materials Engineering and Performance*, vol. 33, pp. 8582–8600, 2024, doi: 10.1007/s11665-024-09166-3.
- [18] V. L. Jorge, F. R. Teixeira, A. Scotti, F. M. Scotti, and E. Siewert, “The significance of supplementary shielding in WAAM of aluminium thin walls,” *Journal of Manufacturing Processes*, vol. 106, pp. 520–536, 2023, doi: 10.1016/j.jmapro.2023.09.063.
- [19] X. Wang, S. Tashiro, M. Tanaka, and N. Q. Trinh, “Numerical investigation of the arc behavior and air transport during pulsed tungsten inert gas arc-based additive manufacturing,” *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 128, pp. 5385–5403, 2023, doi: 10.1007/s00170-023-12233-z.
- [20] O. Sabanci, C. Hacibekir, O. Kechagia, O. Tekelioglu, and C. Yuce, “Effect of process parameters on mechanical properties of 5554 aluminum alloy fabricated by wire arc additive manufacturing,” *Materials Testing*, vol. 67, no. 5, pp. 787–796, 2025, doi: 10.1515/mt-2024-0019.