

ผลของความเร็วในการเชื่อม CMT ที่มีต่อสมบัติทางกลและความสามารถในการขึ้นรูปของ อะลูมิเนียมผสม AA5052

Effect of CMT Welding Speed on Mechanical Property and Formability of Aluminium Alloy AA5052MT

ณัฐศักดิ์ พรพุดศิริ^{1*} นิวัฒน์ มูแกม¹ และ พิสิต เมืองน้อย¹

¹สาขาวิศวกรรมอุตสาหการและการผลิต คณะอุตสาหกรรมและเทคโนโลยี

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี วิทยาเขตวังไกลกังวล อำเภอหัวหิน จังหวัดประจวบคีรีขันธ์ 77110

Natthasak Pornputsiri^{1*} Niwat Mookam¹ and Phisith Muangnoy¹

¹Department of Industrial and Production Engineering, Faculty of Industry and Technology,

Rajamangala University of Technology Rattanakosin Wang Klai Kang Won Campus,

Hua-Hin, Prachubkhirikhan, 77110

Corresponding author Email: natthasak.por@rmutr.ac.th*

(Received: August 24, 2023; Revise: December 4, 2023; Accepted: December 12, 2023)

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อตรวจสอบและประเมินผลกระทบของความเร็วในการเชื่อม CMT) Cold Metal Transfer Welding) ที่ส่งผลกระทบต่อความต้านทานแรงดึงและความสามารถในการขึ้นรูปของอะลูมิเนียมผสมเกรด AA5052 ซึ่งเป็นวัสดุที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมการผลิตชิ้นส่วนยานยนต์ เนื่องจากมีความแข็งแรงและมีน้ำหนักเบา การเชื่อมที่เหมาะสมดำเนินการประเมินและวิเคราะห์ผลจากผลการทดสอบความต้านทานแรงดึงและความสามารถในการขึ้นรูปด้วยวิธีอริคสัน ผลการทดลองพบว่า ความเสียหายที่เกิดกับตัวอย่างที่ผ่านการเชื่อมด้วยที่ความเร็วแตกต่างกันไม่ขึ้นอยู่กับสมบัติทางกลของแผ่นโลหะ อย่างไรก็ตามชิ้นงานที่ผ่านการเชื่อมโดยใช้ความเร็วต่ำจะมีความต้านทานแรงดึงที่ดีกว่าความเร็วสูง นอกจากนี้ผลการขึ้นรูปด้วยวิธีอริคสันพบว่าชิ้นงานที่ผ่านการเชื่อมต่อโดยใช้ความเร็วต่ำมีค่าความสามารถในการขึ้นรูปสูงกว่าอย่างเห็นได้ชัด เนื่องจากสามารถขึ้นรูปด้วยความลึกที่สูงกว่าก่อนเกิดการแตกหัก เงื่อนไขการเชื่อมโดยใช้ความเร็วต่ำการแตกหักเสียหายเริ่มเกิดขึ้นกับแผ่นพื้นด้านข้างของแนวเชื่อมและแตกแบบขวางแนวเชื่อมร่วมกัน ในทางตรงกันข้ามเมื่อเชื่อมด้วยความเร็วสูงการแตกหักเสียหายของชิ้นงานเกิดขึ้นกับตำแหน่งกึ่งกลางแนวเชื่อมและรอยแตกมีทิศทางขนานไปกับแนวเชื่อม

คำสำคัญ: โลหะแผ่น ความสามารถในการขึ้นรูป อะลูมิเนียมผสม การเชื่อม CMT การทดสอบการขึ้นรูปด้วยวิธีอริคสัน

Abstract

This research aimed to investigate and evaluate the effect of CMT welding speed on the tensile strength and formability of AA5052 aluminum alloy. Aluminum is a widely used material in the automotive industry due to its strength and lightweight. Optimum welds were evaluated and analyzed based on the tensile strength and formability results. The formability was examined by the Erichsen Cupping test method. The experimental

results showed that the damage to samples welded at different speeds is independent of the mechanical properties of the substrate. However, welded samples with low welding speeds have better tensile strength than high welding speeds. In addition, the results of the Eriksson method showed that the low-speed welded samples had significantly higher formability. Because of the deeper forming of the cup before failure. In low-speed conditions, fractures begin to occur in the substrate near the weld seam together with fractures across the weld seam. Inversely, the higher welding speeds the fracture occurs at the center of the weld seam, and the fracture direction is parallel to the weld seam.

Keywords: Sheet Metal, Formability, Aluminium Alloy, CMT Welding, Erichsen Cupping Test

1. บทนำ

การศึกษาความสามารถในการขึ้นรูป (Formability) ของโลหะแผ่นเพื่อการผลิตชิ้นส่วนมีความสำคัญกับอุตสาหกรรม การขึ้นรูปโลหะ เพื่อให้ได้มาซึ่งผลิตภัณฑ์และชิ้นส่วนที่มีคุณภาพ ที่ผ่านมานักวิจัยจำนวนมากได้มีการศึกษาไว้หลากหลาย ประเด็น ซึ่งการทดสอบค่าความสามารถในการขึ้นรูปของวัสดุเป็นประเด็นที่น่าสนใจและเป็นวิธีการทดสอบขั้นพื้นฐาน ซึ่งการขึ้นรูปชิ้นส่วนจากโลหะแผ่นเป็นลักษณะของการให้แรงกระทำจนกระทั่งวัสดุเกิดการเปลี่ยนรูปแบบถาวร (Plastic deformation) เพื่อให้ได้รูปร่างตามต้องการ [1-3] ทั้งนี้ความสามารถในการขึ้นรูปจะเป็นตัวบ่งชี้ถึงความสำเร็จในการสร้างผลิตภัณฑ์และ ประสิทธิภาพในการผลิตชิ้นส่วน เพื่อให้ได้ชิ้นงานถูกต้องเที่ยงตรงตามข้อกำหนดโดยไม่เกิดความเสียหายกับชิ้นงานสำเร็จ [4] ใน ส่วนของการขึ้นรูปวัสดุที่ผ่านการเชื่อมต่อจำเป็นต้องพิจารณาถึงปัจจัยสำคัญที่เกี่ยวข้อง เช่นสมบัติทางกลของโลหะแผ่น ข้อกำหนดและกระบวนการขึ้นรูป ซึ่งปัญหาสำคัญในการขึ้นรูปโลหะแผ่นที่ผ่านการเชื่อมต่อคือ การเกิดออกไซด์ฟิล์มและชั้นของสิ่ง ปลอมปนบริเวณรอยเชื่อมต่อ ซึ่งจะทำให้ง่ายต่อการแตกหักหรือเกิดความเสียหายได้ง่ายเมื่อถูกขึ้นรูปโดยใช้แรงกดอัดสูง ดังนั้น การเชื่อมที่ดีและให้สมบัติทางกลที่เหมาะสม จะส่งผลดีต่อกระบวนการขึ้นรูปของโลหะแผ่นทั้งชนิดที่เป็นโลหะและอลูมิเนียม อย่างไรก็ตามการเชื่อมแบบหลอมละลาย (Fusion welding) โดยทั่วไปการควบคุมผลกระทบของความร้อนในกระบวนการเชื่อมจะทำได้ ยาก โดยเฉพาะการเชื่อมต่ออะลูมิเนียมแผ่นบาง ดังนั้นการเชื่อมแบบ CMT (Cold Metal Transfer Welding) ซึ่งเป็นวิธีที่ สามารถควบคุมความร้อนในกระบวนการเชื่อมได้ดี จึงได้รับความนิยมและนำมาใช้เพื่อการเชื่อมต่อชิ้นส่วนโดยเฉพาะโลหะแผ่น บาง เนื่องการเชื่อมต่อทางกลของโลหะแผ่นจะเป็นลักษณะของพับขอบและซ้อนทับกันซึ่งเป็นข้อจำกัดต่อกระบวนการขึ้นรูปและ ความแข็งแรงของชิ้นส่วนหลังการขึ้นรูป ดังนั้นการเชื่อมต่อโลหะแผ่นด้วยกระบวนการเชื่อมแบบ CMT จึงเป็นทางเลือกที่สำคัญใน การเตรียมโลหะแผ่นเพื่อนำไปขึ้นรูปในขั้นตอนต่อไป

การประยุกต์ใช้เทคนิคการเชื่อมต่อก่อนเพื่อการขึ้นรูปถูกนำไปใช้ในอุตสาหกรรมต่างๆ อย่างหลากหลาย ได้แก่ การผลิต ชิ้นส่วนยานยนต์ อากาศยาน อุปกรณ์ทางการแพทย์ หลังคาอาคาร อุปกรณ์เด็กเล่น และชิ้นส่วนเครื่องจักรกล เป็นต้น จาก งานวิจัยที่ผ่านมาได้แสดงให้เห็นว่า วิธีการทดสอบการขึ้นรูปถ้วยของอิริคสัน (Erichsen cupping test) เป็นวิธีการที่สามารถ นำไปใช้เพื่อประเมินความสามารถในการขึ้นรูปชิ้นส่วนโลหะแผ่นได้อย่างมีประสิทธิภาพและเชื่อถือได้ ซึ่งอิริคสันได้เป็นผู้คิดค้นไว้ เมื่อหลายปีก่อน [5-6] การทดสอบจะดำเนินการโดยติดตั้งแผ่นโลหะในตำแหน่งระหว่างพันธ์และตาย ซึ่งสามารถกำหนดขนาดแรง กดแผ่นชิ้นงานให้คงที่ตลอดกระบวนการจนกระทั่งแผ่นชิ้นงานเกิดการฉีกขาด [7-8] โดยจะประเมินความสามารถในการขึ้นรูปของ โลหะแผ่นจากค่าความลึก (Penetration) ในการขึ้นรูป และแรงสูงสุดที่ใช้ในการขึ้นรูป (Drawing force)

ในการเลือกใช้วัสดุเพื่อการขึ้นรูปด้วยแม่พิมพ์ จำเป็นต้องทราบถึงสมบัติทางกลและความสามารถในการขึ้นรูปของวัสดุหรือโลหะแผ่น เพื่อเป็นข้อมูลในการออกแบบแม่พิมพ์และข้อกำหนดในการผลิตผลิตภัณฑ์ให้ได้คุณภาพและไม่เกิดความเสียหายในระหว่าง การขึ้นรูป [9] งานวิจัยที่ผ่านมาได้มีการศึกษาวิจัยเกี่ยวกับสมบัติทางกลของรอยเชื่อมโลหะแผ่นเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ ซึ่งพบว่า ความแข็งแรงของการเชื่อมต่อด้วยเลเซอร์จะขึ้นอยู่กับชนิดของก๊าซปกคลุม [10] ในการตรวจสอบความสามารถในการขึ้นรูปของ รอยเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมได้แสดงให้เห็นว่าความสูงของรอยเชื่อมที่เพิ่มมากขึ้นจะส่งผลทำให้ค่าความสามารถในการขึ้นรูปลดลง [11-12] กรณีการศึกษาความสามารถในการขึ้นรูปของโลหะแผ่นที่ได้จากกระบวนการเชื่อมต่อโลหะแผ่นต่างชนิดกัน ระหว่าง เหล็กกล้าไร้สนิมชนิดเฟอร์ริติกและเหล็กกล้าความแข็งแรงสูงชนิด TWIP หรือ Twinning induced plasticity steels ด้วยวิธีการ ทดสอบความสามารถในการขึ้นรูปของอิริคสัน พบว่ารอยแตกร้าวที่เกิดขึ้นภายในรอยเชื่อมจะส่งผลอย่างมากต่อสมบัติทางกลและ ความสามารถในการขึ้นรูปของโลหะแผ่น [13-14] ทั้งนี้โดยทั่วไปรอยเชื่อมต่อของโลหะแผ่นที่มีความแข็งแรงสูงมีทั้งข้อดีและ ข้อเสีย งานวิจัยซึ่งทำการศึกษเกี่ยวกับการเชื่อมต่ออะลูมิเนียมแผ่นบางได้แสดงให้เห็นว่า แผนภาพขีดจำกัดในการขึ้นรูป (Forming Limit Diagram ; FLD) เป็นเครื่องมือที่มีประโยชน์ในการทำนายและวิเคราะห์ความสามารถในการขึ้นรูปของรอยเชื่อม [15] ปัจจุบันวิธีการทดสอบการขึ้นรูปด้วยของอิริคสันถูกประยุกต์ใช้เพื่อการประมวลผลร่วมกับภาพดิจิทัลในการทดสอบการขึ้น รูปชิ้นส่วนในอุตสาหกรรมมากขึ้น [16] ในอนาคตวิธีการดังกล่าวมีแนวโน้มถูกนำไปใช้อย่างกว้างขวางเพื่อการทำนายพฤติกรรม การขึ้นรูปของโลหะแผ่นและการกำหนดเงื่อนไขการขึ้นรูปที่เหมาะสม

อย่างไรก็ตาม จากการสืบค้นงานวิจัยที่ผ่านมายังไม่พบงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการทดสอบความสามารถในการขึ้นรูปของ รอยเชื่อมที่ได้จากกระบวนการเชื่อมแบบ CMT โดยใช้เทคนิคหรือวิธีการทดสอบของอิริคสันแต่อย่างใด ดังนั้นงานวิจัยนี้จึง มุ่งเน้นศึกษาเกี่ยวกับความสามารถในการขึ้นรูปของโลหะแผ่นอะลูมิเนียมที่ผ่านการเชื่อมต่อด้วยวิธี CMT โดยการกำหนดค่า ความเร็วในการเดินเชื่อมที่แตกต่างกัน เพื่อการประเมินผลกระทบที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพของรอยเชื่อมและความสามารถในการ ขึ้นรูปของโลหะแผ่นที่ผ่านการเชื่อม โดยใช้วิธีการทดสอบของอิริคสัน ทั้งนี้เพื่อใช้เป็นแนวทางในการปรับตั้งการเชื่อม CMT ให้ เหมาะสมก่อนนำมาขึ้นรูป เพื่อการผลิตชิ้นงานให้ได้คุณภาพตามที่กำหนด หลีกเลี่ยงความเสียหายหรือข้อบกพร่องที่อาจเกิดขึ้น ระหว่างกระบวนการขึ้นรูปและเพื่อนำไปใช้ประโยชน์สำหรับอุตสาหกรรมการขึ้นรูปโลหะแผ่นต่อไป

2. วิธีดำเนินการวิจัย

2.1 วัสดุการทดลอง งานวิจัยนี้ทำการทดลองกับโลหะแผ่นอะลูมิเนียมผสมเกรด AA 5052 ขนาดความหนา 1 มิลลิเมตร เบื้องต้นจะนำโลหะแผ่นไปทำการตรวจสอบความต้านทานแรงดึงในทิศทางารัดต่างๆ คือ ตามแนวการรีด (0°) เฉียงแนวการรีด (45°) และขวางแนวการรีด (90°) โดยผลการทดสอบแรงดึงแสดงดังตารางที่ 1

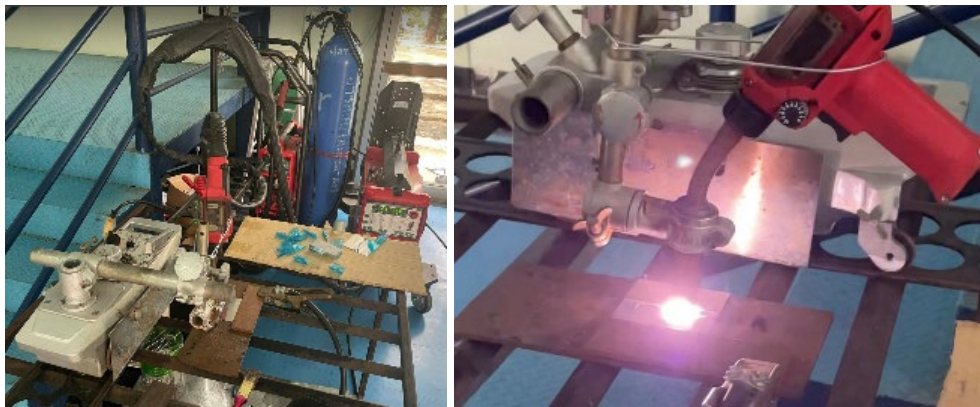
ตารางที่ 1 สมบัติทางกลของแผ่นอะลูมิเนียมผสมเกรด AA5052

Rolling direction	Yield Stength) MPa(	Ultimate Tensile Strength (MPa(	Total Elongation(%)
0°	193.53	228.23	12.60
45°	187.67	219.29	14.21
90°	198.73	238.18	12.86

2.2 การเชื่อม CMT ขั้นตอนการเชื่อม CMT ใช้เครื่องเชื่อมยี่ห้อ Fronius รุ่น TransPuls Synregic 2700 ควบคุม ความเร็วในการเดินเชื่อมด้วยอุปกรณ์อัตโนมัติแสดงดังรูปที่ 1 และใช้รูปแบบ Pulse synergic ในการเชื่อม ซึ่งเป็นโหมดการเชื่อม

มาตรฐานของผู้ผลิตเครื่องเชื่อม โดยมีลักษณะการทำงานที่เกิดจากการควบคุมการเปิด-ปิดวงจร (Switching) ระหว่างกระแสต่ำสุดและกระแสสูงสุดเพื่อควบคุมอัตราการไหลตัวของเส้นลวดซึ่งจะก่อให้เกิดกระแสพัลส์ที่เหมาะสม ในงานวิจัยนี้จะกำหนดรอยต่อแบบต่อชน กระแสไฟฟ้าคงที่ 25 A และกำหนดความเร็วในการเดินเชื่อม (Welding speed; WS) 4 ระดับ คือ 200, 300, 400 และ 500 มิลลิเมตร/นาที ซึ่งเป็นระดับความเร็วที่เครื่องเชื่อมสามารถรักษาการถ่ายโอนการพัลส์ของกระแสเชื่อมระดับสูงสุดที่ 60 Cycle/Sec ทั้งนี้จังหวะการพัลส์แต่ละครั้งจะทำให้ปลายลวดเชื่อมเป็นหยดโลหะได้ 1 หยดและถ่ายโอนการอาร์คสู่บ่อหลอมเหลวด้วยความถี่ที่สม่ำเสมอและต่อเนื่องกัน

2.3 ลวดเชื่อมที่ใช้ในการทดลอง เป็นลวดเชื่อมประเภทเปลือยตัน (Solid wire) สำหรับเชื่อมวัสดุประเภทอลูมิเนียม ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.8 มิลลิเมตร และใช้ชุดป้อนเชื่อมแบบเดินราง ยี่ห้อ Gazcut รุ่น Straightline cutting machine Kc-12 Max 3



รูปที่ 1 อุปกรณ์และการเชื่อม CMT

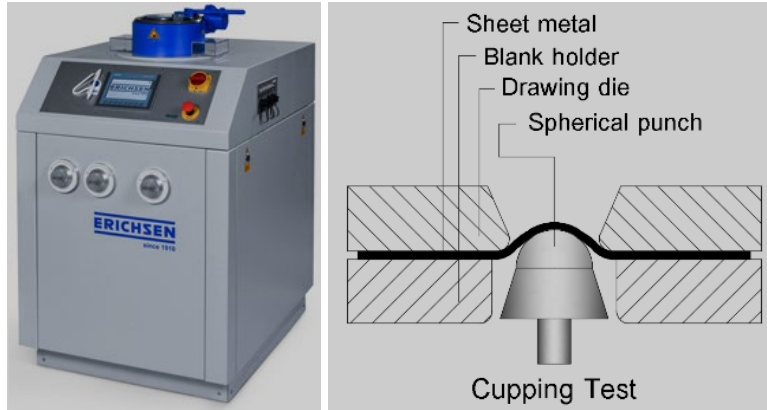
2.4 การตรวจสอบหลังการเชื่อม หลังการเชื่อมเก็บข้อมูลเพื่อนำไปวิเคราะห์ดังนี้

2.4.1 ทำการทดสอบความต้านทานแรงดึงของชิ้นทดสอบเพื่อหาค่าค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุดของรอยเชื่อม โดยการตัดเตรียมชิ้นทดสอบแรงดึงตามมาตรฐาน ASTM E8M และทำการทดสอบแรงดึงบนเครื่องทดสอบเนกประสงค์ขนาด 50 kN รุ่น AGS-X ยี่ห้อ SHIMADZU

2.4.2 ทำการวัดขนาดความสูงและความกว้างของรอยเชื่อม โดยการถ่ายภาพและวัดขนาดโดยใช้กล้องจุลทรรศน์สเตอริโอ (Stereozoom microscope) ยี่ห้อ Nikon รุ่น SMZ745T

2.4.3 วัดขนาดการซึมลึกและโครงสร้างจุลภาคของรอยเชื่อม ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง (Optical microscope) ยี่ห้อ Olympus รุ่น BX53M

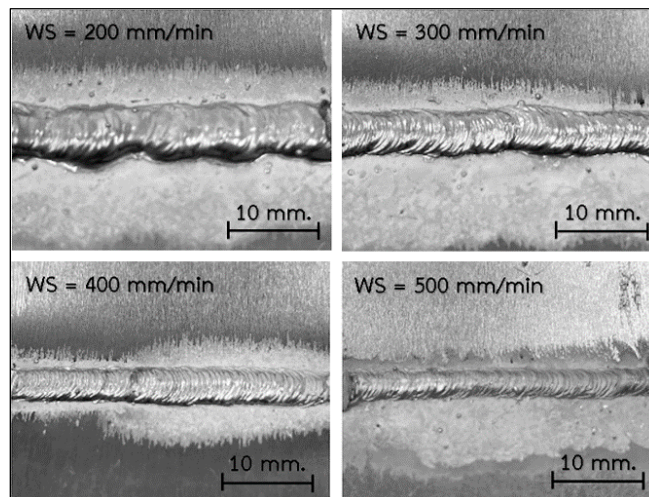
2.4.4 ทดสอบความสามารถในการขึ้นรูปด้วยวิธีการทดสอบการขึ้นรูปถ้วยของอิริกสัน โดยใช้เครื่องทดสอบยี่ห้อ SIEMENS รุ่น SAMATIC HMI Modell 134 ซึ่งแสดงดังรูปที่ 2 โดยกำหนดค่าความเร็วในการขึ้นรูปที่ 25 มิลลิเมตร/นาที และใช้แรงในการกดแผ่นชิ้นงานที่ 2 kN.



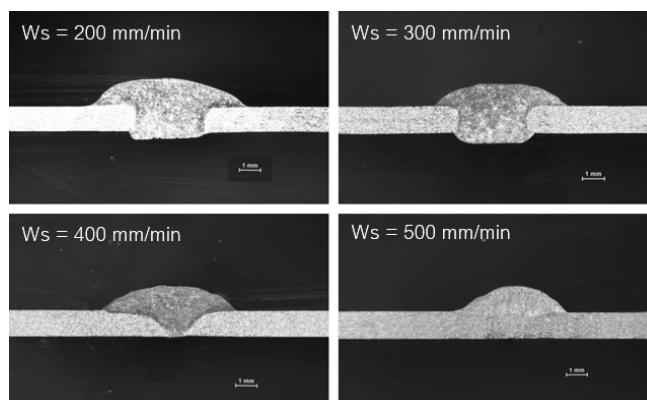
รูปที่ 2 เครื่องทดสอบการขึ้นรูปถ้วยของอิริคสัน

3. ผลการทดลองและการวิจารณ์ผล

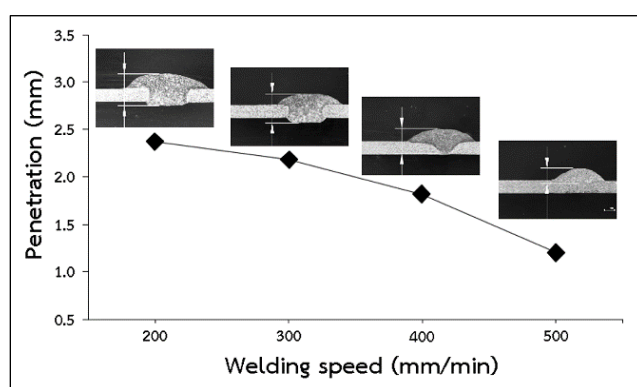
3.1 พื้นผิวและภาคตัดขวางของรอยเชื่อม พื้นผิวรอยเชื่อมจากการควบคุมความเร็วในการเดินเชื่อมแตกต่างกันดังรูปที่ 3 แสดงให้เห็นรอยเชื่อมมีลักษณะกว้างและเกิดความไม่สม่ำเสมอของรอยเชื่อมด้านข้างจากการใช้ความเร็วในการเดินเชื่อมที่ 200 และ 300 มิลลิเมตร/นาที อย่างไรก็ตามการเพิ่มความเร็วในการเดินเชื่อมส่งผลให้ความกว้างของรอยเชื่อมลดลง รอยเชื่อมมีขนาดเล็กและสม่ำเสมอมากขึ้น เม็ดโลหะขนาดเล็กที่เกิดจากการกระเด็นของโลหะเหลวที่เกาะอยู่บนพื้นผิวชิ้นงานเกิดขึ้นได้น้อย จากการใช้ความเร็วในการเดินเชื่อม 400 และ 500 มิลลิเมตร/นาที นอกจากนั้นชิ้นงานทดลองทั้งหมดไม่เกิดการบิดงอในระหว่างการเชื่อม สำหรับภาคตัดขวางของรอยเชื่อมและบริเวณหลอมละลาย (Fusion zone: FZ) ที่เกิดขึ้นแสดงดังรูปที่ 4 วัสดุแผ่นรองหลอมละลายเข้ากับโลหะเดิมได้ดีเป็นบริเวณกว้าง และเกิดการหลอมเฉพาะพื้นผิวสำหรับการใช้ความเร็วสูงและมีการซึมลึก (Penetration) เกิดขึ้นน้อย



รูปที่ 3 รอยเชื่อมที่ความเร็วในการเดินเชื่อมแตกต่างกัน

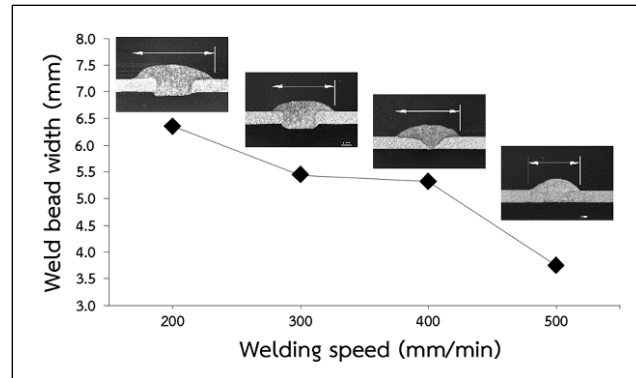


รูปที่ 4 ภาคตัดขวางของรอยเชื่อม



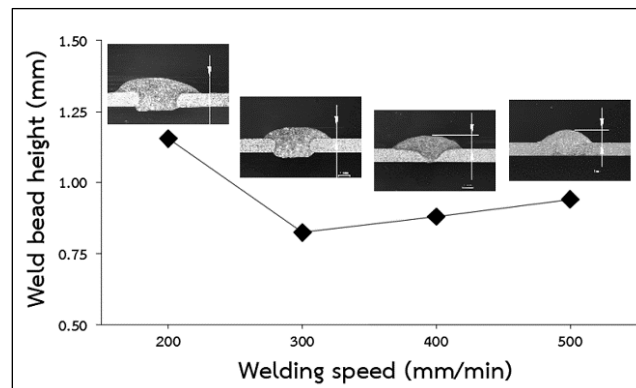
รูปที่ 5 การซึมลึกของแนวเชื่อม

3.2 ขนาดและรูปร่างของรอยเชื่อม จากรูปที่ 5 พบว่าการกำหนดความเร็วในการเดินเชื่อมที่ 200 และ 300 มิลลิเมตร/นาที่ มีการซึมลึกของรอยเชื่อมที่ดี และพบการทะลุผ่านรอยต่อแบบสมบูรณ์ (Complete joint penetration) แต่เกิดรอยนูนด้านล่างของแผ่นรอง ประเด็นนี้สำหรับงานที่เตรียมไปใช้ในการขึ้นรูปจึงไม่เหมาะสม เนื่องจากการเกิดรอยนูนที่ผิวด้านล่างแผ่นขึ้นงานซึ่งต้องสัมผัสกับผิวแม่พิมพ์จะทำให้พื้นผิวสัมผัสหรือแรงในการจับยึดไม่สม่ำเสมอหรืออาจก่อให้เกิดรอยครูดที่ผิวแม่พิมพ์ได้ และจากผลการทดลองจะพบว่าการซึมลึกของรอยเชื่อมมีแนวโน้มลดลงเมื่อความเร็วในการเดินเชื่อมเพิ่มมากขึ้น ซึ่งเป็นผลมาจากพลังงานความร้อนระหว่างการเชื่อม ค่าพลังงานความร้อนที่เพิ่มสูงขึ้นจะส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนรูปแบบการซึมลึกจากรูปแบบ V (V-shape) เป็นการซึมลึกที่ราบเรียบกว่าแบบ U (U-shape) เนื่องจากความเร็วในการเดินเชื่อมลดการสะสมความร้อน ซึ่งปกติสามารถควบคุมได้ด้วยค่ากระแสไฟฟ้าสูงสุดในการเชื่อม โดยพบค่ากระแสไฟฟ้าสูงเกิดรูปแบบการซึมลึกในแบบ V และแบบ U มากกว่ากรณีกำหนดค่ากระแสในการเชื่อมต่ำ [17]



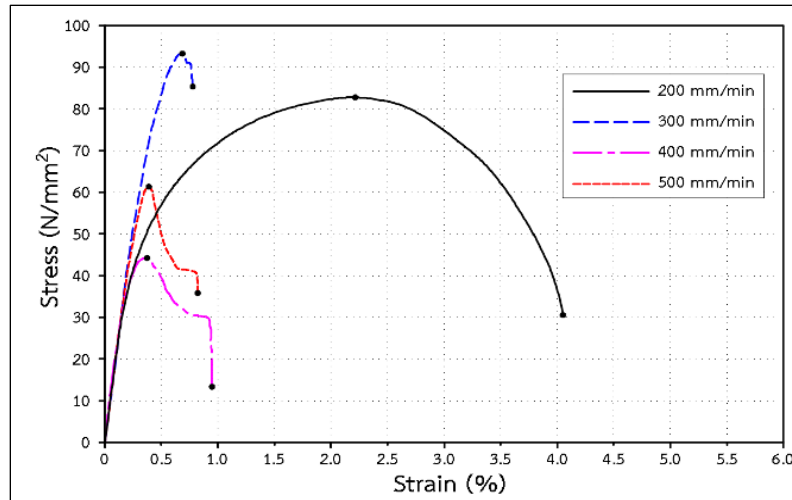
รูปที่ 6 ความกว้างของรอยเชื่อม

จากผลการทดลองรูปที่ 6 พบขนาดความกว้างของรอยเชื่อม (Weld bead width) มีแนวโน้มลดลงเมื่อเพิ่มความเร็วในการเดินเชื่อม เนื่องจากการเพิ่มความเร็วในการเดินเชื่อมทำให้รอยเชื่อมได้รับความร้อนลดลงและส่งผลให้รอยเชื่อมบนพื้นผิวแผ่นพื้นแคบ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมา [18] โดยรายละเอียดผลการทดลองพบว่า การเดินเชื่อมด้วยความเร็ว 200 มิลลิเมตร/นาทีกว้างของรอยเชื่อมโดยเฉลี่ย 6.355 มิลลิเมตร และเมื่อความเร็วในการเดินเชื่อมเพิ่มขึ้นที่ 500 มิลลิเมตร/นาทีกว้างของรอยเชื่อมโดยเฉลี่ย 3.735 มิลลิเมตร เมื่อพิจารณาเงื่อนไขการเชื่อมในแง่ของความสูงของรอยเชื่อม (Weld bead height) ในงานนี้ใช้เกณฑ์ยอมรับตาม AWS D1.2/D1.2M:2003 สำหรับการเชื่อมอาร์กโลหะก๊าซคลุม (Gas metal arc welding) ในการเชื่อมต่อชนควรมีความสูงของรอยเชื่อมไม่เกิน 2 มิลลิเมตร จากพื้นผิวด้านบนของวัสดุ [19] เมื่อตรวจสอบผลการทดลองรูปที่ 7 พบว่าเป็นไปตามเกณฑ์ยอมรับทุกเงื่อนไขการทดลองโดยการเดินเชื่อมด้วยความเร็ว 200 มิลลิเมตร/นาทีกว้างของรอยเชื่อมโดยเฉลี่ย 1.155 มิลลิเมตร และที่ความเร็วในการเดินเชื่อม 500 มิลลิเมตร/นาทีกว้างของรอยเชื่อมโดยเฉลี่ย 0.94 มิลลิเมตร



รูปที่ 7 ความสูงของรอยเชื่อม

3.3 สมบัติทางกล ผลการทดสอบค่าความต้านทานแรงดึงขึ้นทดสอบงานเชื่อมดังรูปที่ 8 แสดงความสัมพันธ์ความเค้น-ความเครียดของแนวเชื่อมที่ความเร็วที่แตกต่างกัน ซึ่งพบว่าความเร็วในการเดินเชื่อมส่งผลต่อสมบัติทางกลของชิ้นทดสอบอย่างเห็นได้ชัดผลแสดงข้อมูลดังตารางที่ 2

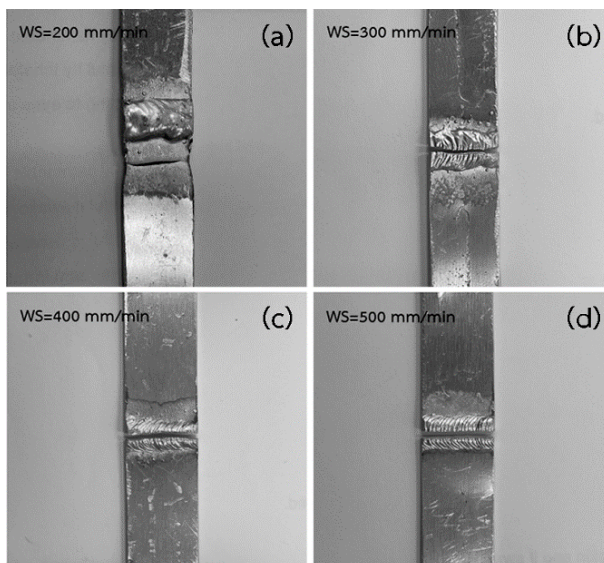


รูปที่ 8 ความแข็งแรงดึงแนวเชื่อมที่ความเร็วต่าง ๆ

ตารางที่ 2 สมบัติทางกลของชิ้นทดสอบที่ได้จากการเชื่อมด้วยความเร็วที่แตกต่างกัน

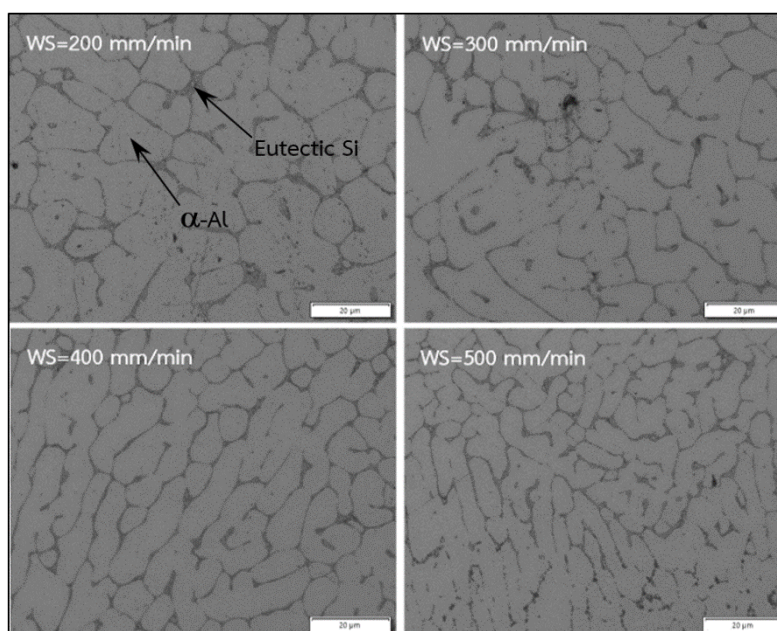
Welding speed (mm/min)	Yield Strength (MPa)	Ultimate Tensile Strength (MPa)	Total Elongation (%)
200	54.96	82.62	4.1
300	83.15	93.06	0.78
400	40.28	43.86	0.95
500	58.53	61.12	0.82

จากความเร็วในการเดินเชื่อมที่แตกต่างกัน พบว่าชิ้นงานทดสอบที่ใช้ความเร็วในการเดินแนวเชื่อม 200 มิลลิเมตร/นาที มีอัตราการยืดตัว (TE) สูงอย่างเห็นได้ชัดที่ 4.1% และมีความต้านทานแรงดึง (UTS) เฉลี่ยที่ 82.62 N/mm² โดยการฉีกขาดจะเกิดที่ตำแหน่งของแผ่นอะลูมิเนียมใกล้กับแนวเชื่อมดังรูปที่ 9(a) และเมื่อเพิ่มความเร็วการเดินแนวเชื่อม 300 มิลลิเมตร/นาที ส่งผลให้การยืดตัวของชิ้นงานทดสอบลดลง เนื่องจากเมื่อความเร็วในการเดินเชื่อมที่เพิ่มสูงขึ้นจะส่งผลให้มีเวลาในการซึมลึกของลวดเชื่อมไปยังโลหะพื้น “ซึ่งมีความเหนียวสูง” ลดลง ดังนั้นเมื่อนำไปทำการทดสอบแรงดึงการฉีกขาดเสียหายจึงเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วกับแนวเชื่อมซึ่งมีความแข็งแรงและเปราะ ดังผลการทดลองที่พบว่ารอยเชื่อมที่ความเร็วนี้จะมีค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุดที่ 93.06 N/mm² และมีอัตราการยืดตัวน้อยสุดที่ 0.78% โดยการฉีกขาดเกิดขึ้นที่ตำแหน่งกึ่งกลางของแนวเชื่อมและมีลักษณะเป็นเส้นโค้งงอเล็กน้อยดังรูปที่ 9(b) เมื่อความเร็วการเดินแนวเชื่อมเพิ่มสูงขึ้นที่ 400 มิลลิเมตร/นาที ส่งผลให้ชิ้นทดสอบมีค่าความแข็งแรงดึงลดลงอย่างเห็นได้ชัด โดยมีค่าความแข็งแรงดึงต่ำสุดที่ 43.86 N/mm² และมีอัตราการยืดตัวที่ 0.95% การฉีกขาดเกิดขึ้นที่ตำแหน่งกึ่งกลางของแนวเชื่อมและมีลักษณะค่อนข้างเป็นเส้นตรง ดังรูปที่ 9(c) ส่วนชิ้นทดสอบจากการเชื่อมด้วยความเร็วสูงสุดที่ 500 มิลลิเมตร/นาที จะมีค่าความแข็งแรงดึงที่ 61.12 N/mm² และมีอัตราการยืดตัวที่ 0.82% การฉีกขาดเกิดขึ้นที่ตำแหน่งกึ่งกลางของแนวเชื่อมและมีลักษณะเป็นเส้นตรง ดังรูปที่ 9(d) จากผลการทดลองสรุปได้ว่า กรณีใช้ความเร็วในการเดินเชื่อมต่ำรอยเชื่อมจะมีความแข็งแรงมากกว่าโลหะแผ่น ในทางกลับกันเมื่อความเร็วในการเดินเชื่อมเพิ่มสูงขึ้นจะส่งผลให้รอยเชื่อมมีความแข็งแรงต่ำกว่าโลหะแผ่น เนื่องจากความเร็วในการเชื่อมที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้การสะสมความร้อน และการซึมลึกของรอยเชื่อมลดลง [17]



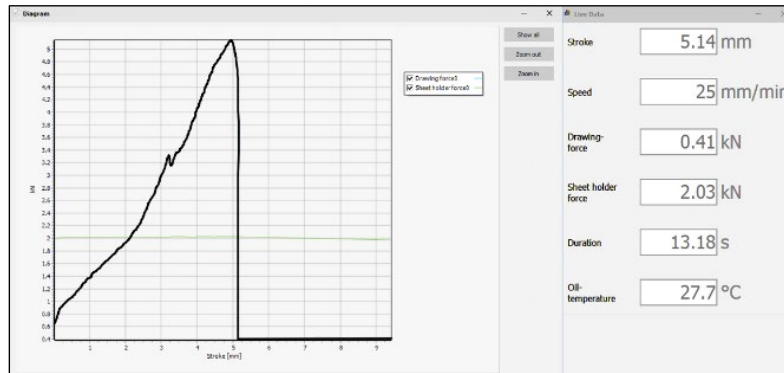
รูปที่ 9 ความเสียหายของชั้นทดสอบงานเชื่อมจากการทดสอบแรงดึง

3.4 โครงสร้างจุลภาครูปที่ 10 แสดงโครงสร้างจุลภาคบริเวณหลอมละลายของรอยเชื่อมซึ่งประกอบด้วยสารละลายของแข็งยูเทคติก (Eutectic) Al-Si ที่ขอบเกรนของเฟสที่มีความเข้มข้นของอะลูมิเนียม เนื่องจากโลหะเติมที่ใช้ในการทดลองมีส่วนผสมของซิลิคอนถึง 5 wt.% ผลที่ได้สอดคล้องกับงานวิจัยของ Singh และคณะ [20] จากการใช้โลหะเติมชนิดเดียวกัน นอกจากนั้นการเชื่อมด้วยความเร็วต่ำ เฟสที่มีความเข้มข้นของอะลูมิเนียมมีขนาดใหญ่และมีรูปร่างกลม แตกต่างจากการเชื่อมด้วยความเร็วสูงซึ่งจะส่งผลให้เกิดเฟสในรูปแบบเป็นลักษณะแท่งยาว เนื่องจากอิทธิพลของการสะสมความร้อนในกระบวนการเชื่อม



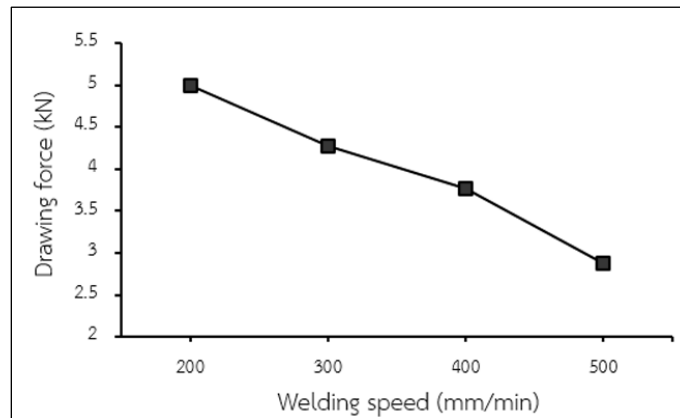
รูปที่ 10 โครงสร้างจุลภาคของรอยเชื่อมที่ได้จากการเดินแนวเชื่อมด้วยความเร็วแตกต่างกัน

3.5 ความสามารถในการขึ้นรูป (Formability) วิธีการทดสอบความสามารถในการขึ้นรูปถ้วยของอิริคสันเป็นลักษณะการลากขึ้นรูปโลหะแผ่นให้เกิดเป็นรูปทรงกลมจนทั้งฉีกขาด โดยในการทดลองนี้จะกำหนดค่าความเร็วในการขึ้นรูปที่ 25 มิลลิเมตร/นาที่ และใช้แรงในการกดแผ่นขึ้นงานที่ 2 kN โดยผลการทดลองจะแสดงในรูปของระยะความลึก ณ จุดแตกหัก (Stroke) และแรงในการขึ้นรูป (Drawing force) ดังรูปที่ 11



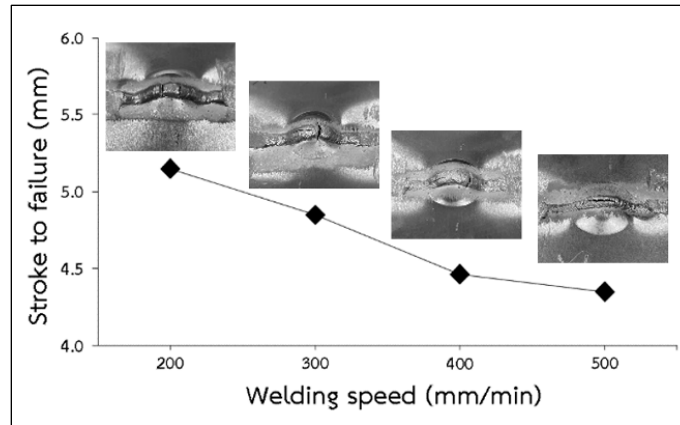
รูปที่ 11 ผลการทดสอบความสามารถในการขึ้นรูป

จากผลการทดสอบการขึ้นรูปถ้วยของอิริคสันแสดงให้เห็นว่าค่าความเร็วของการเดินแนวเชื่อมส่งผลต่อแรงในการขึ้นรูปและความสามารถในการขึ้นรูปของชิ้นทดสอบอย่างชัดเจน ดังรายละเอียดผลการทดลองรูปที่ 12 และรูปที่ 13 ตามลำดับ



รูปที่ 12 แรงในการขึ้นรูปด้วยวิธีการทดสอบของอิริคสัน

3.5.1 แรงในการขึ้นรูปถ้วยด้วยวิธีของอิริคสัน จากผลการทดลองรูปที่ 12 แสดงให้เห็นว่าแรงในการขึ้นรูปจะมีแนวโน้มลดลงเมื่อความเร็วในการเดินแนวเชื่อมเพิ่มสูงขึ้น โดยชิ้นทดสอบจากการเดินแนวเชื่อมด้วยความเร็ว 200 มิลลิเมตร/นาที่ จะใช้แรงในการขึ้นรูปสูงสุดที่ 5.08 kN. และชิ้นทดสอบจากการเดินแนวเชื่อมด้วยความเร็ว 500 มิลลิเมตร/นาที่ จะใช้แรงในการขึ้นรูปต่ำสุดที่ 2.88 kN. ซึ่งขนาดของแรงในการขึ้นรูปมีความสัมพันธ์กับค่าความแข็งแรงของชิ้นสอบที่ได้จากการทดสอบแรงดึง



รูปที่ 13 ความสามารถในการขึ้นรูปด้วยวิธีการทดสอบของอิริคสัน

3.5.2 ระยะเวลาของการแตกหัก ผลการทดลองรูปที่ 13 แสดงให้เห็นว่าเมื่อความเร็วในการเดินแนวเชื่อมเพิ่มสูงขึ้น จะส่งผลให้ค่าความสามารถในการขึ้นรูปหรือระยะความลึกของการแตกหักของวัสดุลดลง โดยขึ้นทดสอบจากการเดินแนวเชื่อม ด้วยความเร็ว 200 มิลลิเมตร/นาที มีระยะความลึกของการแตกหักสูงสุดที่ 5.38 มิลลิเมตร และขึ้นทดสอบจากการเดินแนวเชื่อม ด้วยความเร็ว 500 มิลลิเมตร/นาที จะมีระยะความลึกของการแตกหักต่ำสุดที่ 4.40 มิลลิเมตร ซึ่งให้เห็นว่าระยะความลึกของการแตกหักจากการขึ้นรูปมีความสัมพันธ์โดยตรงกับอัตราการยืดตัวของชิ้นสอบที่ได้จากการทดสอบแรงดึง อีกทั้งจากลักษณะรอยแตกบนชิ้นทดสอบของอิริคสันยังมีความสัมพันธ์กับการแตกหักในชิ้นทดสอบแรงดึง ซึ่งพบว่าการดึงขึ้นรูปขึ้นทดสอบจากการเดินแนวเชื่อมด้วยความเร็วต่ำ (200 มิลลิเมตร/นาที) รอยแตกจะเกิดขึ้นที่แผ่นอะลูมิเนียมด้านข้างของแนวเชื่อมและแตกแบบขวางแนวเชื่อมผสมกัน เมื่อความเร็วในการเดินแนวเชื่อมเพิ่มสูงขึ้นจะส่งผลให้เกิดการแตกในตำแหน่งกึ่งกลางแนวเชื่อมซึ่งมีทิศทางขนานไปกับแนวเชื่อมเพิ่มมากขึ้น ซึ่งสัมพันธ์กับผลการทดสอบแรงดึงและระยะการซึมลึกของแนวเชื่อม

4. สรุป

งานวิจัยนี้เป็นการวิจัยเพื่อศึกษาเปรียบเทียบความสามารถในการขึ้นรูปหลังการเชื่อมต่อกันด้วย CMT ที่ความเร็วในการเดินเชื่อมแตกต่างกันของโลหะอะลูมิเนียมผสมแผ่นบาง ด้วยวิธีการทดสอบแรงดึงและการทดสอบการขึ้นรูปด้วยของอิริคสัน โดยวิเคราะห์ผลจากลักษณะรอยเชื่อม สมบัติทางกล โครงสร้างจุลภาค และความสามารถในการขึ้นรูปของรอยเชื่อม จากผลการทดลองสามารถสรุปได้ดังนี้

4.1 ความกว้างและความสูงของรอยเชื่อมลดลงเมื่อความเร็วในการเชื่อมเพิ่มขึ้น เนื่องจากการใช้ความเร็วในการเดินเชื่อมที่สูงขึ้นจะส่งผลให้ความร้อนสะสมบนแนวเชื่อมลดลง การหลอมละลายของโลหะเดิมและโลหะพื้นจึงเกิดขึ้นน้อยกว่าทำให้การขยายในแนวความกว้างของแนวเชื่อมเกิดน้อยลง

4.2 การซึมลึกเปลี่ยนรูปแบบจากรูปร่าง V เป็นรูปร่าง U ที่มีการซึมลึกที่ราบเรียบ จากผลของความเร็วในการเดินเชื่อมที่ลดการสะสมความร้อนและส่งผลให้ความเค้นของรอยเชื่อมลดลงเช่นกัน

4.3 โครงสร้างจุลภาคบริเวณหลอมละลายของรอยเชื่อมเกิดเฟสยูเทคติกซิลิกอน (Eutectic silicon phase) ที่ขอบเกรน และการเพิ่มความเร็วในการเดินเชื่อมส่งผลให้เกิดเฟสในรูปแบบแท่งยาวและมีขนาดเล็ก

4.4 ความสามารถในการขึ้นรูปลดลงเมื่อเพิ่มความเร็วในการเดินเชื่อม เนื่องจากผลการซึมลึกและความกว้างของรอย

เชื่อมที่ลดลง ด้วยความเร็วเดินเชื่อมที่เพิ่มขึ้นจะส่งผลโดยตรงต่อความร้อนสะสมของแนวเชื่อมซึ่งจะทำให้โลหะเดิมและโลหะพื้นเกิดการหลอมละลายเป็นเนื้อเดียวกันน้อยลง

5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจาก มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์ ขอบคุณาจารย์ เจ้าหน้าที่ และนักศึกษา ของสาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการและการผลิต คณะอุตสาหกรรมและเทคโนโลยี ที่มีส่วนช่วยเหลือให้งานวิจัยฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] V. Modanloo, A. Gorji, and M. Bakhshi-Jooybari, “Effects of Forming Media on Hydrodynamic Deep Drawing”, *Journal of Mechanical Science and Technology*, Vol. 30, No. 5, pp.2237–2242, 2016.
- [2] A. Nishino, and T. Oya, “Multiscale Analysis of The Formability of CFRP Sheets Subjected to Warm Forming with A Temperature-Dependent Epoxy Model”, *International Journal of Material Forming*, Vol. 12, No. 5, pp.793–800, 2018.
- [3] Y. Uriya, and J. Yanagimoto, “Erichsen Cupping Test on Thermosetting CFRP Sheets”, *International Journal of Material Forming*, Vol. 10, No. 4, pp.527–534, 2017.
- [4] M.R. Bhatt, and S. Buch, “Prediction of Formability for Sheet Metal Component Using Artificial Intelligent Technique”, in *2nd International Conference on Signal Processing and Integrated Networks, SPIN-2015*, pp.388–393, 2015.
- [5] M. Singh, A.K. Choubey, and C. Sasikumar, “Formability Analysis of Aluminium Alloy by Erichsen Cupping Test Method”, *Materials Today: Proceedings*, Vol. 4, No. 2, pp.805–810, 2017.
- [6] M. Torkar, F. Tehovnik, and B. Podgornik, “Failure Analysis at Deep Drawing of Low Carbon Steels”, *Engineering Failure Analysis*, Vol. 40, pp.1–7, 2014. DOI: 10.1016/j.engfailanal. 2014.02.003
- [7] A.K. Choubey, G. Agnihotri, and C. Sasikumar, “Experimental and Mathematical Analysis of Simulation Results for Sheet Metal Parts in Deep Drawing”, *Journal of Mechanical Science and Technology*, Vol. 31, No. 9, pp.4215–4220, 2017.
- [8] A. Kocanda, and C. Jasinski, “Extended Evaluation of Erichsen Cupping Test Results by Means of Laser Speckle”, *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, Vol. 16, No. 2, pp.211–216, 2016.
- [9] V. Mugendiran, and A. Gnanavelbabu, “Analysis of Hole Flanging on AA5052 Alloy by Single Point Incremental Forming Process”, *Materials Today: Proceedings*, Vol. 5, No. 2, pp.8596–8603, 2018.
- [10] B. Chung, S. Rhee, and C. Lee, “The Effect of Shielding Gas Types on CO2 Laser Tailored Blank Weldability of Low Carbon Automotive Galvanized Steel”, *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 272, No. 2, pp.357–362, 1999.

- [11] E. Bayraktar, J. Moiron, and D. Kaplan, “Effect of Welding Conditions on The Formability Characteristics of Thin Sheet Steels: Mechanical and Metallurgical Effects”, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 175, Nos. 1–3, pp.20–26, 2006.
- [12] R.P. Madeira, and P.J. Modenesi, “Using Erichsen Testing to Evaluate the Performance of Welded Joints”, *Welding International*, Vol. 26, No. 1, pp.71–78, 2012.
- [13] A.S. Hamada, A. Kisko, A. Khosravifard, M.A. Hassan, L.P. Karjalainen and D. Porter, “Corrigendum to Ductility and Formability of Three High-Mn TWIP Steels in Quasi-Static and High-Speed Tensile and Erichsen Tests” (Mater. Sci. Eng. (2018) (A 712) (255–265)’, *Materials Science and Engineering A*, October, Vol. 717, pp.154, 2018. S092150931731571X, DOI: 10.1016/j.msea.2017.11.111
- [14] A.B. Naik, and A.C. Reddy, “Optimization of Tensile Strength in TIG Welding Using the Taguchi Method and Analysis of Variance (ANOVA)”, *Thermal Science and Engineering Progress*, August, Vol. 8, pp.327–339, 2018. DOI: 10.1016/j.tsep.2018.08.005
- [15] M. Parente, R. Safdarian, A.D. Santos, A. Loureiro, P. Vilaca, and R.M.N. Jorge, “A Study on The Formability of Aluminum Tailor Welded Blanks Produced by Friction Stir Welding”, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 83, Nos. 9–12, pp.2129–2141, 2016.
- [16] M. Aydin, X. Wu, K. Cetinkaya, M. Yasar, and I. Kadi, “Application of Digital Image Correlation Technique to Erichsen Cupping Test”, *Engineering Science and Technology, an International Journal*, Vol. 21, No. 4, pp.760–768, 2018.
- [17] M. Harooni, F Kong, B. Carlson, and R. Kovacevic, “Studying the Effect of Laser Welding Parameters on The Quality of ZEK100 Magnesium Alloy Sheets in Lap Joint Configuration”, in *Conference: 31st International Congress on Applications of Lasers & Electro-Optics, ICALEO At: Anaheim, California, The United States of America*, 2012. DOI: 10.2351/1.5062505
- [18] *Structural Welding Code–Aluminum: AWS D1.2/D1.2m:2003*, 4th Ed. Estados Unidos: American Welding Society, 2003.
- [19] B.C. Evik, and M. Ko. “The Effects of Welding Speed on The Microstructure Andmechanical Properties of Marine-Grade Aluminium (AA5754) Alloyjoined Using MIG Welding”, *Kovove Mater*, Vol. 57, pp. 307–316, 2019.
- [20] J. Singh, K.S., Arora, and D.K. Shukla, “Lap Weld-Brazing of Aluminium to Steel Using Novel Cold Metal Transfer Process”, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 283, p. 116728, 2020.