

# เทคนิคการถ่ายโอนโลหะหลอมเหลวแบบพัลส์สำหรับการเชื่อมแบบจุดอะลูมิเนียม 5052 CMT-Plus Techniques for Spot Welding of Aluminum Alloy 5052

นิวัฒน์ มูเก็ม<sup>1\*</sup>

Niwat Mookam<sup>1\*</sup>

โชคชัย สิงหธรรม<sup>2</sup>

Chokchai Singhatham<sup>2</sup>

ทวีศักดิ์ รุ่งศักดิ์ทวีกุล<sup>3</sup>

Thaweesak Rungsakthaweekul<sup>3</sup>

รัฐศักดิ์ พรหมมาศ<sup>4</sup>

Ratthasak Prommas<sup>4</sup>

<sup>1</sup>สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการและการผลิต คณะอุตสาหกรรมและเทคโนโลยี

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์ วิทยาเขตวังไกลกังวล หัวหิน ประจวบคีรีขันธ์ 77110 ประเทศไทย

<sup>1</sup>Department of Industrial and Production Engineering, Faculty of Industry and Technology,  
Rajamangala University of Technology Rattanakosin Wang Klai Kangwon Campus,  
Hua Hin, Prachuapkhirikhan 77110, Thailand

<sup>2</sup>บริษัทศูนย์ฝึกอบรมมาตรฐานงานเชื่อมอุตสาหกรรม จำกัด ประชาอุทิศ 79 แขวงทุ่งครุ เขตทุ่งครุ  
กรุงเทพมหานคร 10140 ประเทศไทย

<sup>2</sup>TRAINING CENTER INDUSTRY WELDING STANDARD CO.,LTD. Soi Pracha Uthit 79, Thung Khru,  
Thung Khru, Bangkok 10140, Thailand

<sup>3</sup>สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์  
วิทยาเขตวังไกลกังวล หัวหิน ประจวบคีรีขันธ์ 77110 ประเทศไทย

<sup>3</sup>Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of  
Technology Rattanakosin, Wang Klai Kangwon Campus, Hua Hin, Prachuapkhirikhan 77110,  
Thailand

<sup>4</sup>สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์ ศาลายา  
พุทธมณฑล นครปฐม 73170 ประเทศไทย

<sup>4</sup>Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of  
Technology Rattanakosin Salaya, Phutthamonthon, Nakhonpathom 73170, Thailand

\*Corresponding Author. E-mail : niwat.moo@rmutr.ac.th

(Received: April 7, 2022, Revised: June 4, 2022, Accepted: June 15, 2022)

**บทคัดย่อ :** ในงานวิจัยนี้ประยุกต์ใช้ CMT-Plus ในการเชื่อมแบบจุดอะลูมิเนียม 5052 ใช้โลหะเติม AL-5Si มีความเร็วการ  
ป้อนโลหะเติมแตกต่างกันที่ 2, 4, 6, 8 และ 10 m/min เพื่อศึกษาความสูงของรอยเชื่อม โครงสร้างจุลภาค และความ  
แข็งแรงของรอยเชื่อม ผลการทดลองพบว่า อัตราป้อนโลหะเติมที่แตกต่างกันมีผลต่อรอยเชื่อม มีความสูงของรอยเชื่อม

โครงสร้างจุลภาคและความแข็งแรงที่ดีเมื่อใช้ความเร็วป้อนโลหะเติมที่ 4 m/min โลหะเติมกระจายตัวได้ดี เกิดการหลอมอย่างสมบูรณ์และรอยเชื่อมมีความสูงน้อย โครงสร้างจุลภาคแสดงให้เห็นตำหนิรอยแตกขนาดเล็กและโพรงอากาศเกิดขึ้นน้อย บริเวณหลอมละลายเกิดเฉพาะเฟส  $Al_9Si$  ในเมทริกซ์พื้นของอะลูมิเนียม ซึ่งมีโครงสร้างผลึกแบบ Face-centered cubic (FCC) เฟสสารประกอบเชิงโลหะในรอยเชื่อมมีขนาดเล็กและการกระจายตัวของเฟสมีความสม่ำเสมอมาก ความต้านทานการลอกดีเมื่อใช้อัตราป้อนที่เหมาะสม มีพื้นที่ฉีกขาดขนาดใหญ่และความต้านทานการลอกออกสูงสุด 0.39 kN

**คำสำคัญ:** การถ่ายโอนโลหะเย็นแบบพัลส์ การเชื่อมแบบจุด ความสูงของรอยเชื่อม โครงสร้างจุลภาค ความต้านทานการลอกออก

**Abstract :** In this research, CMT-Plus was applied to spot weld aluminum 5052 using Al-5Si filler metal with the different feed speeds of 2, 4, 6, 8, and 10 m/min. To study the weld base height, microstructure, and strength of the welded joint. The investigation results showed that the different wire feed rates of filler metal affected all results of the welded joint. The weld base height, microstructure, and peeling resistance were excellent when using a feed speed of 4 m/min. The filler metal was very well spread, complete fusion and the spot weld exhibited a little weld base height. The microstructure exhibited a low defect of microcrack and porosity. The Fusion zone occurred only  $Al_9Si$  intermetallic phase in the Al matrix with a face-centered cubic structure. The intermetallic phase in spot weld was small and uniform distribution. The peeling resistance was excellent when using the optimal feed speed. The larger areas of fracture failure and the maximum peel strength were 0.39 kN.

**Keywords:** CMT-Plus, Spot welding, Weld base high, Microstructure, Peel strength

## 1. บทนำ

อะลูมิเนียมอัลลอยด์มีสมบัติที่โดดเด่นด้านอัตราส่วนความแข็งแรงต่อน้ำหนัก นำมาใช้ทดแทนเหล็กกล้าในหลาย ๆ อุตสาหกรรม เช่น อะลูมิเนียม 5052 นำมาใช้งานได้ดีกับสภาวะแวดล้อมที่มีการกัดกร่อน เช่น จากการสัมผัสกับน้ำทะเล [1], [2] สำหรับกระบวนการประกอบและต่ออะลูมิเนียมเข้าด้วยกันโดยทั่วไปใช้กระบวนการเชื่อม เนื่องจากทำได้ง่าย ต้นทุนต่ำ ให้สมบัติทางโลหะวิทยาและสมบัติทางกลที่ดีหลังการเชื่อมเข้าด้วยกัน

แต่อย่างไรก็ตามการเชื่อมอะลูมิเนียมเข้าด้วยกันมีจุดอ่อนและยังไวต่อการเกิดปฏิกิริยาหลายประการนำไปสู่การลดความสามารถในการเชื่อมและสมบัติทางกลได้เช่นกัน เช่น การเกิดรูพรุนและพองอากาศที่มาจากกระบวนการเชื่อม [2], [3] สำหรับการเชื่อมอะลูมิเนียมแผ่นบางสามารถทำให้เกิดรอยเชื่อมที่รับน้ำหนักได้ดีเมื่อมีความร้อนในกระบวนการเชื่อมเกิดขึ้นน้อย เช่น การเชื่อมในสภาวะของแข็ง (Solid-state welding) ได้แก่ การเชื่อมกวนแบบจุด (Friction stir spot welding) [4] ซึ่งเกิดผลกระทบจากความร้อนน้อย แต่วิธีดังกล่าวตำแหน่งยกเครื่องมือที่ใช้ในการเชื่อมกวนเกิดช่องว่างจึงเป็นข้อจำกัดสำหรับการเชื่อมแบบจุด อย่างไรก็ตามเทคโนโลยีการถ่ายโอนโลหะหลอมเหลว (Cold metal transfer; CMT) เป็นอีกเทคนิคหนึ่งของการเชื่อมที่มีการพัฒนามาจากกระบวนการเชื่อมมิก (Metal inert gas; MIG) ที่มีความร้อนในกระบวนการต่ำ (Low heat input) ซึ่งการนำมาเชื่อมอะลูมิเนียมมีข้อดีหลายประการ เช่น ประสิทธิภาพการเชื่อม มีความยืดหยุ่น สามารถเชื่อมได้เร็ว มีความแข็งแรง และไม่จำเป็นต้องใช้ช่างที่มีฝีมือเฉพาะทาง นอกจากนั้นการใช้ CMT ที่มีความร้อนในกระบวนการต่ำเชื่อมอะลูมิเนียม ยังสามารถควบคุมการป้อนโลหะเติมได้อย่างมีประสิทธิภาพโดยการถ่ายโอนหยดโลหะหลอมเหลวไปยังพื้นผิว ซึ่งนำไปสู่การกำจัดข้อบกพร่องในการเชื่อมและป้องกันการก่อตัวของเฟสใหม่

จากความร้อนได้ดี [5] แต่กระบวนการดังกล่าวจำเป็นต้องใช้โลหะเติมในการเชื่อมซึ่งแตกต่างจากการเชื่อมแบบจุดดั้งเดิม ดังนั้นปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับโลหะเติมจึงสำคัญจากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่า ผลกระทบขององค์ประกอบทางเคมีของโลหะเติมมีผลต่อกระบวนการหลอมละลาย การแข็งตัว โครงสร้างจุลภาคและสมบัติทางกล ตัวอย่างเช่น โลหะเติม ER4047 มีความตึงผิวของบ่อหลอมละลายที่ต่ำกว่า ER5183 ส่งผลให้ส่วนบนตรงกลางของรอยเชื่อมบริเวณหลอมละลายมีพื้นที่ที่กว้างหรือทำให้รอยเชื่อมมีขนาดใหญ่ [6] อีกทั้งยังพบว่าการเพิ่มความเร็วยการป้อนโลหะเติมขณะเชื่อมส่งผลให้เกิดชั้นสารประกอบเชิงโลหะ (IMC) ขนาดใหญ่ที่มีความเปราะทำให้ความแข็งแรงของรอยต่อลดลง [7]

อย่างไรก็ตามการเชื่อมด้วย CMT มีหลายโหมดให้เลือกใช้ อีกทั้งต้องปรับตั้งหลายตัวแปรที่เกี่ยวข้อง และการนำมาเชื่อมแบบจุดมีข้อมูลแนะนำไว้ค่อนข้างน้อยจึงเป็นปัญหาสำคัญสำหรับผู้ปฏิบัติงาน ดังนั้นในงานวิจัยนี้ นำเทคนิคการถ่ายโอนโลหะหลอมเหลวแบบพลัส (CMT-Plus) มาเชื่อมอะลูมิเนียม 5052 แบบจุด โดยใช้ความเร็วการป้อนโลหะเติมแตกต่างกัน ได้แก่ 2, 4, 6, 8 และ 10 mm/min เพื่อตรวจสอบความสูงรอยเชื่อม โครงสร้างจุลภาค การเกิดขึ้นของเฟส และความแข็งแรงในแง่ของความต้านทานการลอกออก (Peel strength)

## 2. วัตถุประสงค์

งานวิจัยฉบับนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาเทคนิคการถ่ายโอนโลหะหลอมเหลวแบบพลัสสำหรับการเชื่อมจุดอะลูมิเนียม 5052 จากการปรับตั้งความเร็วในการป้อนโลหะเติมที่แตกต่างกัน ที่มีต่อความสูงรอยเชื่อม โครงสร้างจุลภาคและความต้านทานการลอกออกของรอยต่อ

## 3. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

เนื่องจากการนำเทคนิคการถ่ายโอนโลหะหลอมเหลวแบบพลัสมาใช้ในการเชื่อมแบบจุดโดยอาศัยโลหะ

เติมเพิ่มความสามารถในการเชื่อมและความแข็งแรงของรอยต่อ ดังนั้นในการเชื่อมระหว่างการเติมโลหะเติมเกิดการหลอมละลายเข้ากับชิ้นงานและสามารถเกิดการสูญเสียความร้อนของโลหะเติมต่อหน่วยมิลลิเมตรและพลังงานสามารถคำนวณได้จาก [8], [9]

$$R = P/WFS \quad (1)$$

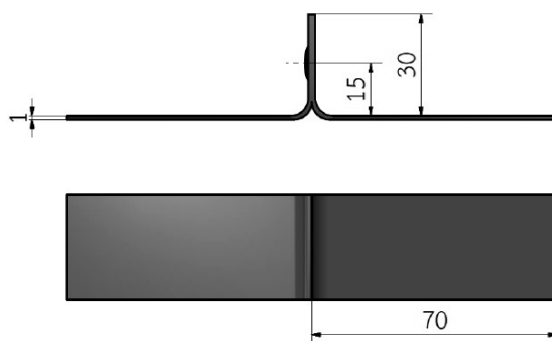
เมื่อ R คือ ความร้อนที่ลวดเชื่อมใช้ต่อมิลลิเมตร (J/mm), P คือ พลังงาน (Power) ในหน่วย W และ WFS คือ ความเร็วในการป้อนโลหะเติม (m/min)

$$P = U_m \times I_m \quad (2)$$

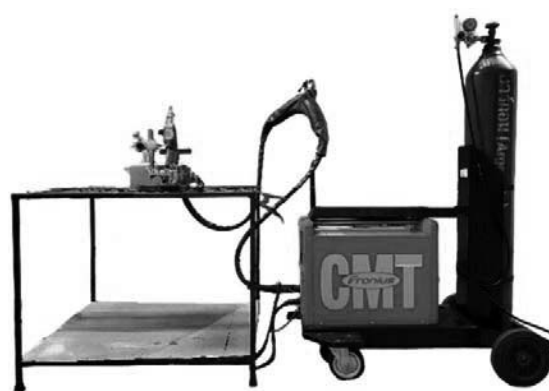
เมื่อ  $U_m$  และ  $I_m$  คือ ค่าเฉลี่ยของความต่างศักย์ไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าในการเชื่อม

#### 4. วิธีดำเนินการศึกษา

การทดลองใช้อะลูมิเนียมเกรด 5052 ขนาด 1 mm ขนาด 30x100 mm นำมาพับที่ระยะเกย 30 mm และนำไปเชื่อมดังภาพที่ 1 การเชื่อมใช้เครื่องเชื่อม CMT ยี่ห้อ Fronius รุ่น TransPuls Synregic 2700 ดังภาพที่ 2 ใช้โหมต CMT-Plus เชื่อมแบบจุด (Spot welding) และใช้ก๊าซอาร์กอนปกคลุมรอยเชื่อม สำหรับโลหะเติมที่ใช้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.2 mm ตามมาตรฐาน AWS A5.10: ER 4043 (Al-5Si) ตัวแปรคงที่กำหนดระยะห่างระหว่างชิ้นงานกับหัวทอร์ช 7 mm กระแสไฟฟ้า 100 A ความต่างศักย์ไฟฟ้า 17.4 V และป้อนโลหะเติมด้วยความเร็วที่แตกต่างกัน ได้แก่ 2, 4, 6, 8, และ 10 m/min โดยมีการทดลองซ้ำ 3 ชิ้นงานต่อสภาวะการทดลองและระหว่างการเชื่อมใช้อุปกรณ์จับยึดและปล่อยให้เย็นตัวที่อุณหภูมิห้อง



ภาพที่ 1 ชิ้นงาน (หน่วย mm)



ภาพที่ 2 เครื่องเชื่อม CMT

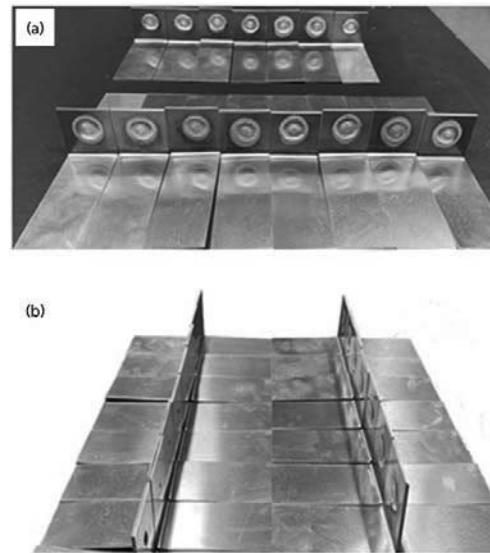
หลังการเชื่อมความสูงด้านบนของรอยเชื่อมวัดด้วยไมโครมิเตอร์ (Micrometer) ยี่ห้อ Mitutoyo รุ่น 193-101 มีความละเอียด 0.01 mm ในการทดสอบสมบัติทางกลในแง่ความต้านทานการลอกออกของรอยเชื่อมใช้เครื่องทดสอบเนกประสงค์ (Universal Testing Machine) ยี่ห้อ Zwick รุ่น Z020 ทดสอบด้วยความเร็ว 10 mm/min โครงสร้างจุลภาค (Microstructure) ตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสงยี่ห้อ Olympus รุ่น BX60M และใช้การตรวจสอบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray diffractometer; XRD) ยี่ห้อ Panalytical รุ่น Aesis 600W ยืนยันเฟสที่เกิดขึ้น

## 5. ผลการศึกษา

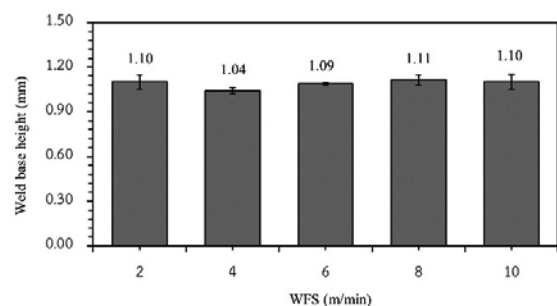
### 5.1 ความสูงของรอยเชื่อม

ชิ้นงานทดสอบและรอยเชื่อมหลังการเชื่อมแบบจุดด้วย CMT แสดงดังภาพที่ 3 ไม่พบการโก่งตัวหรือบิดงอจากผลของความร้อนของชิ้นงานหลังการเชื่อม เกิดรอยเชื่อมสูงกว่าพื้นผิวแผ่นรองเฉพาะด้านที่มีการเติมโลหะเติมเท่านั้น (ภาพที่ 3 (a)) โดยด้านหลังของแผ่นรองยังคงมีพื้นผิวเดิมที่เรียบไม่เกิดรอยนูน (ภาพที่ 3 (b)) แตกต่างกับงานวิจัยที่ผ่านมา จากการเชื่อมอะลูมิเนียม 6061-T6 ป้อนโลหะเติมด้วยความเร็ว 6.6 m/min โดยใช้โหมดการเชื่อมแบบทั่วไป (CMT-Standard) และแบบพลัส (CMT-Plus) ให้รอยเชื่อมที่มีรอยนูนยื่นออกมาจากพื้นผิวนอกจากด้านบนแล้วด้านล่างรอยเชื่อมยังมีผิวนูนขนาดความสูงมากกว่า 1 mm เนื่องจากผลของการสะสมความร้อนและการซึมลึก [10] อย่างไรก็ตามพื้นผิวที่ไม่เรียบจะไม่เป็นผลดีกับการนำไปใช้งานหรือการประกอบของชิ้นส่วน

สำหรับความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วในการป้อนโลหะเติมและค่าความสูงเฉลี่ยของรอยเชื่อมแสดงดังภาพที่ 4 พบว่า การป้อนโลหะเติมไม่มีผลอย่างมีนัยสำคัญต่อความสูง เนื่องจากโลหะเติมที่ถูกเติมลงไป ในรอยเชื่อมมีปริมาณที่เท่ากันตลอดจนพลังงานเชื่อมจากแหล่งจ่ายที่กำหนดไว้เท่ากันประมาณ 1,740 W จึงให้ผลความสูงของรอยเชื่อมแตกต่างกันเล็กน้อย รอยเชื่อมจุดมีความสูงเฉลี่ยอยู่ในช่วง 1.04-1.11 mm อย่างไรก็ตามการป้อนโลหะเติมที่ 4 m/min รอยเชื่อมมีความสูงจากโลหะพื้นต่ำสุดเพียง 1.04 mm ซึ่งเป็นค่าที่ดีในแง่ความสูงที่ไม่ต้องการให้เกิดขึ้นสูงจากผิวของแผ่นรองหรือโลหะพื้นด้านบนมาก



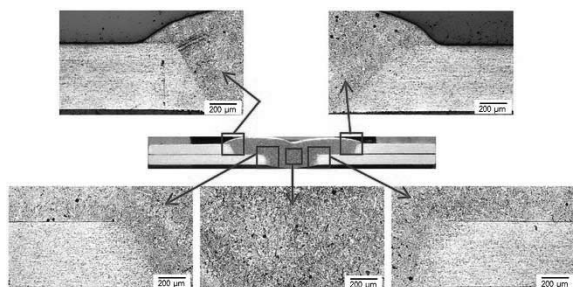
ภาพที่ 3 ชิ้นงานหลังการเชื่อมและรอยต่อ



ภาพที่ 4 อัตราป้อนและความสูงของรอยเชื่อม

### 5.2 โครงสร้างจุลภาคและเฟสที่เกิดขึ้น

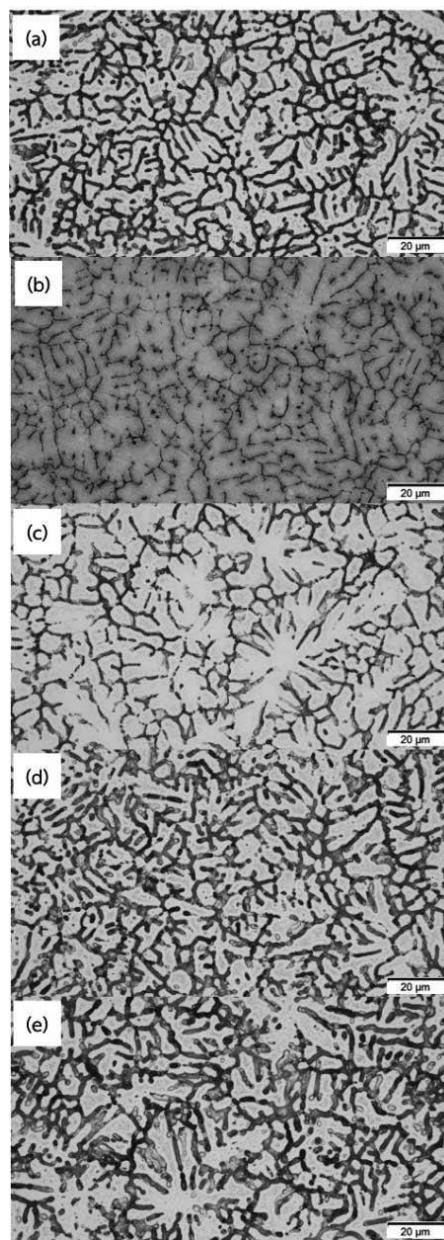
ภาคตัดขวางของรอยเชื่อมแสดงตัวอย่างดังภาพที่ 5 แสดงบริเวณต่าง ๆ ที่ได้รับผลกระทบจากความร้อนและจากการเชื่อมเกิดการซึมลึกถึงแผ่นรองด้านล่างได้ดี พบโพรงอากาศและรอยแตกขนาดเล็กเกิดขึ้นเพียงเล็กน้อย



ภาพที่ 5 ลักษณะของรอยเชื่อมและการซึมลึก

เมื่อตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคบริเวณหลอมละลายแสดงดังภาพที่ 6 ทุกการทดลองเกิดเดนไดรต์ (Dendrite) ของ Al-Si ในเมตริกซ์พื้นหลัก

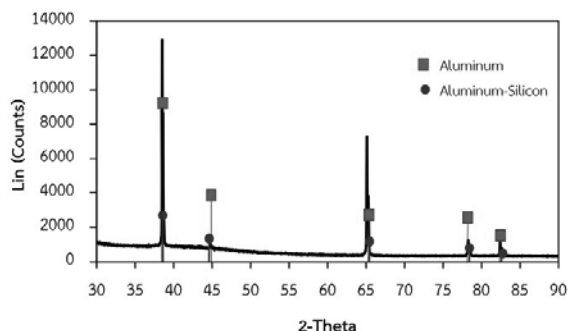
อย่างไรก็ตามเมื่อตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคกลางโลหะเติมบริเวณที่หลอมละลายแสดงให้เห็นภาพที่ 6 (c) การเกิดขึ้นของเฟส  $Al_3Si$  มีขนาดเล็กและปริมาณที่น้อยกว่าการใช้ความเร็วป้อนอื่น ๆ จากงานวิจัยที่ผ่านมาใช้โลหะเติม Al-5Si ที่ความเร็วป้อน 4.7, 5 และ 5.3 m/min พบว่าเกิดขึ้นสารประกอบเชิงโลหะในปริมาณมากเมื่อใช้ความเร็วต่ำ การเพิ่มความเร็วทำให้ IMC ลดลงได้ และสามารถเพิ่มขึ้นอีกครั้งได้เช่นกัน [11] ดังนั้นจึงแสดงให้เห็นการปรับตั้งค่าความเร็วป้อนที่มากหรือน้อยจนเกินไปก็อาจจะไม่ส่งผลดีกับรอยต่อ ซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษาในช่วง 2, 4 และ 6 m/min เช่นกัน เนื่องจากผลความร้อนจากการป้อนลวดเติมที่มีการเปลี่ยนแปลงในระหว่างการป้อนโลหะเติมถึงแม้มีการกำหนดพลังงานจากแหล่งจ่ายไว้เท่ากันในการทดลอง ด้วยการเพิ่มความเร็วในการป้อนลวด ความร้อนที่ลวดเชื่อมใช้เพิ่มขึ้นแล้วจึงลดลงซึ่งบ่งชี้ว่าพลังงานของการเชื่อมเพิ่มขึ้นและเปลี่ยนแปลงลดลงเล็กน้อยได้ตามอัตราการสะสมและการสูญเสียพลังงาน [8]



ภาพที่ 6 โครงสร้างจุลภาคของรอยต่อที่อัตราการป้อนแตกต่างกัน

อย่างไรก็ตามควรมีการตรวจวัดความร้อนที่เกิดขึ้นจริงของรอยต่อเพื่อใช้ประกอบการอธิบายการเกิดขึ้นและการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างจุลภาค โดยส่วนนี้ไม่ได้ดำเนินการไว้ใน การทดลอง จากการยืนยันการเกิดขึ้นของเฟสด้วย XRD แสดงดังภาพที่ 7 ในช่วง  $2\theta$  ตั้งแต่  $30-90^\circ$  พบ  $Al_3Si$  (บริเวณสีดำ) ในเมตริกซ์หลักของ  $\alpha-Al$  (บริเวณ

สี่เทา) และมีโครงสร้างผลึกแบบ Face-centered cubic (FCC) ที่เหมือนกัน โครงสร้างที่พบในงานนี้สอดคล้องกับงานวิจัยของ Selvamani [12] ซึ่งพบโครงสร้างแบบเดนไดรต์บริเวณหลอมละลายเช่นกัน และความร้อนในกระบวนการเชื่อมปรับปรุงให้เกิดเกรนละเอียด และมีขนาดที่เล็กกว่าแผ่นรอง สามารถทำให้อยู่ต่อมีความแข็งแรง อย่างไรก็ตามผลจากการศึกษาแตกต่างกับงานวิจัยของ Lei และคณะ [10] พบบริเวณหลอมละลายเกิดเกรนที่มีลักษณะยาวและหยาบ (Columnar grains) ส่งผลให้ความแข็งแรงของรอยต่อลดลง ดังนั้นโครงสร้างจุลภาคที่เกิดขึ้นส่งผลต่อความแข็งแรงที่ต่างกัน



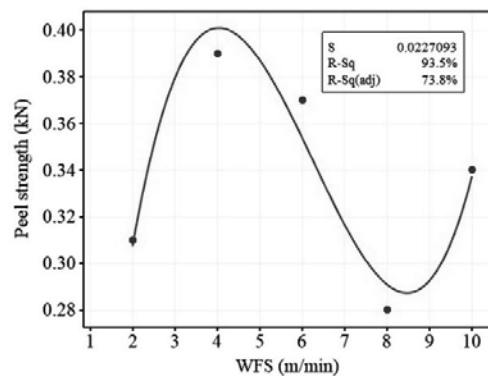
ภาพที่ 7 ผลการตรวจสอบ XRD

### 5.3 ความต้านทานการลอกออก

จากค่าเฉลี่ยความต้านทานการลอกออกที่ความเร็วในการป้อนลวดโลหะเติมต่าง ๆ แสดงดังภาพที่ 8 นำมาประมาณและเขียนสมการทำนายความต้านทานการลอกออกได้ดังสมการที่ (3)

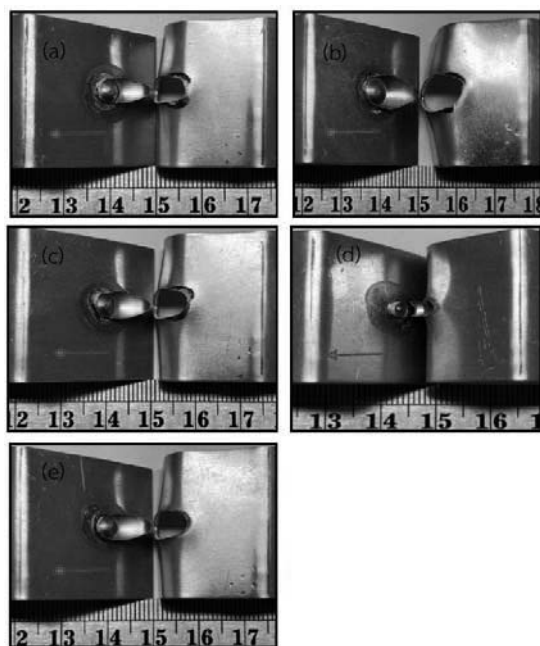
$$y = -0.052000 + 0.266900x - 0.048840x^2 + 0.002604x^3 \quad (3)$$

เมื่อ y คือ ความต้านทานการลอกออก (kN) และ x คือ ความเร็วการป้อนโลหะเติม (m/min)



ภาพที่ 8 ความต้านทานการลอกออกและความเร็ว

สำหรับลักษณะของรอยฉีกขาดของชิ้นงานจากการทดสอบแสดงดังภาพที่ 9 ทุกการทดสอบเกิดรอยฉีกขาดบริเวณเนื้อโลหะของแผ่นรองด้านล่าง ไม่เกิดความเสียหายบริเวณหลอมละลาย แสดงให้เห็นถึงการเกิดเดนไดรต์ที่มีขนาดเล็กทำให้บริเวณรอยต่อมีความแข็งแรง นอกจากนั้นผลบ่งบอกรอยฉีกขาดที่มีขนาดใหญ่สามารถต้านทานการลอกออกได้ดี เมื่อเปรียบเทียบความต้านทานการลอกออกที่ความเร็วการป้อนต่าง ๆ พบว่า การป้อนด้วยความเร็ว 4 m/min มีความแข็งแรงเฉลี่ยของรอยเชื่อมสูงสุดที่ 0.39 kN ซึ่งโดยธรรมชาติเฟสสารประกอบเชิงโลหะที่เกิดขึ้นมีความเปราะ ดังนั้นการเกิดเฟสดังกล่าวขึ้นในปริมาณที่มากจนเกินไปจึงไม่ส่งผลดีต่อความแข็งแรงของรอยต่อ ทำให้อยู่ต่อมีความแข็งแรงลดลง อย่างไรก็ตามในงานวิจัยฉบับนี้ได้ศึกษาผลเบื้องต้นและความเป็นไปได้สำหรับการใช้เทคนิคการ CMT-Plus เชื่อมแบบจุดอะลูมิเนียม 5052 ที่ประสงค์ให้มีความแข็งแรงเพียงพอเพื่อการใช้งาน และในงานนี้พบสารประกอบเชิงโลหะในโครงสร้างจุลภาคชนิดเดียว ซึ่งในอนาคตน่าสนใจอย่างยิ่งสำหรับพัฒนาไปสู่การเชื่อมวัสดุต่างชนิด (Dissimilar materials) ด้วยวิธีนี้ เนื่องจากมีปัจจัยการเกิดขึ้นและเจริญเติบโตของชิ้นสารประกอบเชิงโลหะบริเวณรอยต่อ โครงสร้างทางโลหะวิทยาที่สามารถเกิดขึ้นได้แตกต่างกันและส่งผลต่อความแข็งแรง ความเชื่อถือได้เพิ่มเข้ามาให้พิจารณา เช่น การเชื่อมอะลูมิเนียมกับเหล็กเข้าด้วยกันเพื่อให้มีการใช้งานที่หลากหลายยิ่งขึ้น



ภาพที่ 9 รอยฉีกขาด

## 6. สรุปและอภิปรายผล

จากการศึกษาเทคนิคการถ่ายโอนโลหะหลอมเหลวแบบพัลส์สำหรับการเชื่อมจุดอะลูมิเนียม 5052 จากการปรับตั้งความเร็วในการป้อนโลหะเติมที่แตกต่างกันจากการทดลองสรุปได้ดังนี้

6.1 ความเร็วในการป้อนลวดโลหะเติมมีผลต่อความสูงรอยเชื่อม โครงสร้างจุลภาคและความต้านทานการลอกออกของรอยต่อ

6.2 โครงสร้างจุลภาคจากการตอพบเฉพาะสารประกอบเชิงโลหะ  $Al_9Si$  ในเมตริกซ์หลักของอะลูมิเนียม

6.3 ความเร็วในการป้อนโลหะเติมที่ 4 mm/min ให้ผลที่ดีมีความสูงรอยเชื่อมต่ำ เกิดเฟสสารประกอบเชิงโลหะที่มีขนาดเล็กกระจายตัวสม่ำเสมอ รอยต่อมีความแข็งแรงสูงและเกิดรอยฉีกขาดบริเวณกว้าง

## 7. กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอขอบคุณ บริษัท ศูนย์ฝึกอบรมมาตรฐานงานเชื่อมอุตสาหกรรม จำกัด สำหรับโจทย์ปัญหาในการศึกษาและสนับสนุนวัสดุในการทดลอง และขอขอบคุณสาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการและการผลิต มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์ วิทยาเขตวังไกลกังวล สำหรับสนับสนุนเครื่องมือในการวิจัย

## 8. บรรณานุกรม

- (1) A. Joe Alex, R. Vaira Vignesh, R. Padmanaban, and M. Govindaraju, "Effect of heat treatment on the mechanical and wear behavior of friction stir processed AA5052 alloy," *Materials Today: Proceedings*, vol. 22, pp. 3340–3346, 2019, doi: 10.1016/j.matpr.2020.03.297.
- (2) R. D. Ardika, T. Triyono, N. Muhayat, and Triyono, "A review porosity in aluminum welding," *Procedia Structural Integrity*, vol. 33, no. C, pp. 171–180, 2021, doi: 10.1016/j.prostr.2021.10.021.
- (3) D. Y. Susanti, W. B. Sediawan, M. Fahrurrozi, and M. Hidayat, *Studies on Kinetics and Optimum Agitation of Phenolic Compound Extraction from Intact Red Sorghum*, no. October. 2020.
- (4) N. Farmanbar, S. M. Mousavizade, and H. R. Ezatpour, "Achieving special mechanical properties with considering dwell time of AA5052 sheets welded by a simple novel friction stir spot welding," *Marine Structures*, vol. 65, no. September 2018, pp. 197–214, 2019, doi: 10.1016/j.marstruc.2019.01.010.
- (5) S. T. Selvamani, "Microstructure and stress corrosion behaviour of CMT welded AA6061 T-6 aluminium alloy joints," *Journal of Materials Research and Technology*, vol. 15, pp. 315–326, 2021, doi: 10.1016/j.jmrt.2021.08.005.
- (6) P. C. Huan et al., "Effect of wire composition on microstructure and properties of 6063 aluminium alloy hybrid synchronous pulse CMT welded joints," *Materials Science and Engineering A*, vol. 790, p. 139713, 2020, doi: 10.1016/j.msea.2020.139713.
- (7) S. Chen, S. Li, Y. Li, J. Huang, S. Chen, and J. Yang, "Butt welding-brazing of steel to aluminum by hybrid laser-CMT," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 272, no. April, pp. 163–169, 2019, doi: 10.1016/j.jmatprotec.2019.05.018.

- (8) W. Wu, J. Xue, Z. Zhang, X. Ren, and B. Xie, "Process optimization on multilayer morphology during 316l double-wire CMT+P deposition process," *Metals*, vol. 9, no. 12, pp. 1–13, 2019, doi: 10.3390/met9121334.
- (9) J. C. Dutra, R. H. Gonçalves e Silva, and C. Marques, "Melting and welding power characteristics of MIG–CMT versus conventional MIG for aluminium 5183," *Welding International*, vol. 29, no. 3, pp. 181–186, 2015, doi: 10.1080/09507116.2014.932974.
- (10) H. Y. Lei, Y. B. Li, and B. E. Carlsonb, "Cold metal transfer spot welding of 1 mm thick AA6061-T6," *Journal of Manufacturing Processes*, vol. 28, pp. 209–219, 2017, doi: 10.1016/j.jmapro.2017.06.004.
- (11) A. M. Milani, M. Paidar, A. Khodabandeh, and S. Nategh, "Influence of filler wire and wire feed speed on metallurgical and mechanical properties of MIG welding–brazing of automotive galvanized steel/5754 aluminum alloy in a lap joint configuration," *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 82, no. 9–12, pp. 1495–1506, 2016, doi: 10.1007/s00170-015-7505-4.
- (12) S.T. Selvamani, "Microstructure and stress corrosion behaviour of CMT welded AA6061 T-6 aluminium alloy joints," *Journal of Materials Research and Technology*, vol. 15, pp. 315–326, 2021, doi: 10.1016/j.jmrt.2021.08.005.