

**อิทธิพลของการเชื่อมความต้านทานแบบจุดที่มีต่อความต้านทานแรงดึงเฉือนและการเกิด
สารประกอบเชิงโลหะระหว่างรอยต่อต่างชนิดของเหล็กกล้าคาร์บอนผสมต่ำ SPFH780 และ
อะลูมิเนียมผสม 5052**

**Influence of Resistance Spot Welding on Tensile Shear Strength and
Intermetallic Compound Formation in Dissimilar SPFH780 Low-Alloy
Carbon Steel and 5052 Aluminum Alloy Joints**

ประจักษ์ จัตกุล^{1*} ยิงยศ ทิพย์ศรีราช¹ ศราวุธ จันทร์กลาง¹ วัชนะชัย จูมผา¹ ฐิติ หมอรักษา¹ พิเชฐ หาญกล้า¹
พัชรกร อุดร¹ นิวัฒน์ มุแกม² จิตติวัฒน์ นิธิกาญจนธาร์³ วรรณนิศา นุชคุ้ม³ ธีรวุฒิ เชื้อนแก้ว⁴
วรชัย มั่นศิลป์⁵ พิชิต แก้วโกสุม⁶ และ วิชัย บุญโง่ง⁷

¹สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์บูรณาการและเทคโนโลยี
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก วิทยาเขตจันทบุรี

²สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการและการผลิต คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์
วิทยาเขตวังไกลกังวล

³สาขาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน

⁴สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตขอนแก่น
⁵แผนกวิชาช่างเชื่อมโลหะ วิทยาลัยเทคนิคจันทบุรี สถาบันการอาชีวศึกษาภาคตะวันออกเฉียงเหนือ

⁶สาขาวิชาวิศวกรรมยานยนต์ไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์บูรณาการและเทคโนโลยี
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก วิทยาเขตจันทบุรี

⁷แผนกวิชาช่างเทคนิคการผลิต วิทยาลัยเทคนิคสุรินทร์ สถาบันการอาชีวศึกษาภาคตะวันออกเฉียงเหนือ 5

Prajak Jattakul^{1*} Yingyos Thipsrirach¹ Sarawut Junklang¹ Watchanachai Joompha¹ Thiti Mhoraksa¹
Phichet Hankla¹ Patcharaporn Udon¹ Niwat Mookam² Jittiwat Nithikarnjanatharn³ Wannisa Nutkhum³
Teerawut Khuenkaew⁴ Worachai Mansilp⁵ Pichit Kaewkosum⁶ and Vichai Boonkong⁷

¹Department of Industrial Engineering, Faculty of Integrated Engineering and Technology,
Rajamangala University of Technology Tawan-Ok, Chanthaburi Campus

²Department of Industrial and Production Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of
Technology Rattanakosin, Wang Klai Kangwon Campus

³Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering and Technology Rajamangala University of
Technology Isan

⁴Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering Rajamangala University of Technology Isan,
Khon Kaen Campus

⁵Department of Welding, Chanthaburi Technical College, Institute of Vocational Education: Eastern Region

⁶Department of Electric Vehicle Engineering, Faculty of Integrated Engineering and Technology,
Rajamangala University of Technology Tawan-Ok, Chanthaburi Campus

⁷Department of Production Technology, Surin Technical College, Institute of Vocational Education: Eastern

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาอิทธิพลของระดับกระแสไฟฟ้าและชนิดของพัลส์ในการจ่ายกระแสไฟฟ้าในการเชื่อมความต้านทานแบบจุดที่มีต่อสมบัติทางกลและพฤติกรรมการก่อตัวของชั้นสารประกอบเชิงโลหะบริเวณรอยต่อระหว่างเหล็กกล้าคาร์บอนผสมต่ำ SPFH780 ความหนา 1.60 mm และอะลูมิเนียมผสม 5052 ความหนา 1.50 mm โดยทำการศึกษาเปรียบเทียบระหว่างการจ่ายกระแสไฟฟ้าชนิดพัลส์เดี่ยวและพัลส์คู่ที่กระแสไฟฟ้า 11000, 11500, 12000 และ 12500 แอมแปร์ (Ampere: A) ผลการศึกษาพบว่าการเชื่อมความต้านทานแบบจุดด้วยชนิดพัลส์คู่ให้ค่าความต้านทานแรงดึงเหนือเฉลี่ยสูงกว่าการเชื่อมด้วยชนิดพัลส์เดี่ยวในทุกๆระดับกระแสไฟฟ้า โดยเฉพาะที่ระดับกระแสไฟฟ้า 12500 A ให้ค่าความต้านทานแรงดึงเหนือเฉลี่ยสูงสุดเท่ากับ 4534.654 N เนื่องจากการจ่ายกระแสไฟฟ้าแบบพัลส์คู่สามารถควบคุมวัฏจักรความร้อนและลดการสะสมความร้อนส่วนเกินได้อย่างมีประสิทธิภาพ ส่งผลให้สามารถจำกัดการเจริญเติบโตของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ Fe_2Al_5 และ $FeAl_3$ ที่มีความเปราะสูงให้มีความหนาที่เหมาะสมได้ดีกว่า จากการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดและการกระจายตัวของธาตุ พบว่าการเพิ่มกระแสไฟฟ้าส่งผลโดยตรงต่อการเพิ่มพลังงานความร้อน ทำให้ขนาดของนิกเกิดเชื่อมขยายตัวขึ้นและเพิ่มขีดความสามารถในการรับภาระทางกลของรอยเชื่อม สรุปได้ว่ากระบวนการเชื่อมแบบพัลส์คู่เป็นเทคนิคที่มีประสิทธิภาพสูงในการปรับปรุงสมบัติทางกลและควบคุมการก่อตัวของสารประกอบบริเวณรอยต่อของโลหะต่างชนิดได้

คำสำคัญ: การเชื่อมความต้านทานแบบจุด เหล็กกล้าคาร์บอนผสมต่ำ SPFH780 อะลูมิเนียมผสม 5052 การก่อตัวของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ ความต้านทานแรงดึงเหนือ

Abstract

This research investigates the influence of welding current levels and pulse configurations on the mechanical properties and intermetallic compound (IMC) formation behavior at the interface of resistance spot-welded (RSW) joints between SPFH780 low-alloy carbon steel 1.60 mm thick and 5052 aluminum alloy 1.50 mm thick. A comparative study was conducted using single-pulse and double-pulse current modes at intensities of 11000, 11500, 12000, and 12500 Amperes (A). The results demonstrate that double-pulse RSW yields significantly higher average tensile-shear strengths than single-pulse welding across all tested current levels. Notably, a peak average tensile shear strength of 4534.654 N was achieved at a current of 12500 A using the double-pulse mode. This improvement is attributed to the superior thermal cycle control and the reduction of excessive heat accumulation inherent in the double-pulse delivery, which effectively limits the growth of brittle Fe_2Al_5 and $FeAl_3$ IMC layers to an optimal thickness. Microstructural analysis via scanning electron microscopy (SEM) and energy-dispersive X-ray spectroscopy (EDS) further revealed that increasing the welding current directly enhances heat input, thereby expanding the weld nugget size and improving the mechanical load-bearing capacity of the joints. In conclusion, the double-pulse welding process serves as a highly effective technique for enhancing mechanical performance and regulating interfacial IMC formation in dissimilar metal joining.

Keywords: Resistance Spot Welding, SPFH780 Low-Alloy Carbon Steel, 5052 Aluminum Alloy, Intermetallic Compound, Tensile Shear Strength

1. บทนำ

ในปัจจุบันอุตสาหกรรมยานยนต์ทั่วโลกมุ่งเน้นการพัฒนาเทคโนโลยีเพื่อลดการใช้พลังงานและลดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) สู่สิ่งแวดล้อม ซึ่งแนวทางที่มีประสิทธิภาพสูงสุดคือการลดน้ำหนักของโครงสร้างยานยนต์ (Lightweighting) [1–7] การนำวัสดุน้ำหนักเบาอย่างอะลูมิเนียมผสม (Aluminum Alloys) มาใช้งานร่วมกับเหล็กกล้าความแข็งแรงสูง (Advanced High Strength Steel: AHSS) จึงกลายเป็นกลยุทธ์สำคัญในการผลิตตัวถังรถยนต์แบบหลายวัสดุ (Multi-material design) เพื่อให้ได้ทั้งความแข็งแรงและความประหยัดน้ำหนัก [1–6, 8] อย่างไรก็ตาม การเชื่อมต่อวัสดุต่างชนิดกัน (Dissimilar Joining) ระหว่างอะลูมิเนียมและเหล็กกล้าถือเป็นความท้าทายทางวิศวกรรมอย่างยิ่ง เนื่องจากวัสดุทั้งสองชนิดมีความแตกต่างกันอย่างมากทั้งในด้านสมบัติทางกายภาพและทางเคมี เช่น จุดหลอมเหลวที่ต่างกันเกือบเท่าตัว และการมีความสามารถในการละลายเข้าด้วยกันที่จำกัดมาก [7, 9]

การเชื่อมต้านทานแบบจุด (Resistance Spot Welding: RSW) เป็นกระบวนการยึดต่อหลักที่นิยมใช้ในสายการผลิตชิ้นส่วนยานยนต์เนื่องจากมีประสิทธิภาพการผลิตสูง รวดเร็ว และสามารถควบคุมด้วยระบบอัตโนมัติได้ดี [10, 11] แต่เมื่อนำมาใช้เชื่อมต่อวัสดุต่างชนิดกันระหว่างอะลูมิเนียมผสมและเหล็กกล้า ความร้อนที่เกิดขึ้นในระดับสูงมักกระตุ้นให้เกิดปฏิกิริยาการแพร่ที่รอยต่อและก่อให้เกิดชั้นสารประกอบเชิงโลหะ (Intermetallic Compound: IMC) เช่น เฟส Fe₂Al₅ และ FeAl₃ [9, 10] ซึ่งเป็นชั้นที่มีความเปราะและมีความแข็งแรงสูงมาก หากชั้น IMC มีความหนาเกินไป จะส่งผลให้ความแข็งแรงทางกลของรอยเชื่อมลดลงอย่างมีนัยสำคัญ และมักเป็นจุดเริ่มต้นของการเกิดรอยแตกร้าวที่นำไปสู่การแตกหักในลักษณะเปราะที่รอยต่อ (Interfacial Fracture) [8, 10]

การควบคุมความหนาและลักษณะโครงสร้างทางจุลภาคของชั้น IMC จึงเป็นปัจจัยวิกฤตในการปรับปรุงคุณภาพของรอยเชื่อม งานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าพารามิเตอร์การเชื่อม โดยเฉพาะกระแสไฟฟ้า (Welding Current) และเวลาในการเชื่อม (Welding Time) มีผลโดยตรงต่อการเติบโตของชั้น IMC [11, 12] การนำเทคนิคการจ่ายกระแสไฟฟ้าแบบพัลส์ (Pulse Current) มาใช้ เช่น การเปรียบเทียบระหว่างพัลส์เดี่ยว (Single Pulse) และพัลส์คู่ (Double-Pulse) อาจเป็นทางเลือกในการจัดการการกระจายความร้อนและลดการสะสมความร้อนส่วนเกินที่รอยต่อได้ดีกว่า ซึ่งจะส่งผลโดยตรงต่อการควบคุมความหนาของ IMC และการเพิ่มความต้านทานแรงดึงเฉือนของรอยเชื่อมให้เหมาะสมกับการใช้งาน [12, 13]

จากการศึกษาวิจัยที่เกี่ยวข้องเกี่ยวกับการเชื่อมความต้านทานแบบจุดระหว่างวัสดุต่างชนิดประเภทอะลูมิเนียมและเหล็กกล้าได้เน้นไปที่การควบคุมพารามิเตอร์เพื่อจำกัดการขยายตัวของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ ซึ่งเป็นปัจจัยหลักที่ส่งผลต่อความแข็งแรงทางกล โดย Cserépi และ Meilinger [11] ได้ทำการศึกษาและพบว่าพารามิเตอร์ในกระบวนการเชื่อมมีความสัมพันธ์โดยตรงต่อความหนาและชนิดของเฟสในชั้น IMC ซึ่งเป็นตัวกำหนดพฤติกรรมการแตกหักและค่าแรงดึงเฉือนของรอยต่อ ดังนั้นการพัฒนาเทคนิคการจ่ายกระแสไฟฟ้าแบบหลายพัลส์เริ่มได้รับความสนใจอย่างมาก เช่น งานวิจัยของ Li และคณะ [14] ที่ได้ทำการศึกษาการใช้กระแสไฟฟ้าแบบพัลส์ขับไล่ (Expulsion Pulse) ร่วมกับพัลส์ล็อก (Locking Pulse) ซึ่งเป็นแนวทางในการควบคุมปริมาณอะลูมิเนียมหลอมเหลวบริเวณรอยต่อ โดยพัลส์ขับไล่ทำหน้าที่ขจัดอะลูมิเนียมส่วนเกินออกจากบริเวณเชื่อมโดยการจ่ายกระแสไฟฟ้าที่แรงและสั้น ขณะที่พัลส์ล็อกช่วยสร้างแนวเชื่อมที่มั่นคงระหว่างวัสดุโดยหลังจากขจัดอะลูมิเนียมส่วนเกินออกแล้ว จะจ่ายกระแสไฟฟ้าอีกครั้ง เพื่อทำให้วัสดุหลัก เช่น เหล็กหลอมและเชื่อมติดกัน ส่งผลให้สามารถลดการสะสมของอะลูมิเนียมและยับยั้งการเกิด IMC ที่มีความเปราะได้อย่างมีประสิทธิภาพ ในขณะที่ Chen และ Liu [15] ได้ศึกษาและแสดงให้เห็นว่าการใช้กระแสไฟฟ้าแบบพัลส์คู่ (Double-Pulse) ร่วมกับการอุ่นร้อน (Preheating) สามารถเพิ่มความต้านทานแรงดึงเฉือนเฉลี่ยได้สูงถึง 2858.700 นิวตัน และช่วยเพิ่มความเสถียรของรอยเชื่อมได้ดีกว่าการใช้พัลส์เดี่ยว

นอกจากนี้ งานวิจัยของ Lara และคณะ [16] ได้นำเสนอการใช้แผ่นสแตนเลสเป็นชั้นแทรกกลาง (Interlayer) ในการเชื่อมวัสดุต่างชนิดระหว่างเหล็กและอะลูมิเนียม เพื่อปรับเปลี่ยนปฏิกิริยาทางเคมีบริเวณรอยต่อ โดยชั้นแทรกดังกล่าวช่วยลดการสัมผัสโดยตรงระหว่าง Fe และ Al และควบคุมพฤติกรรมการแพร่ของธาตุ ส่งผลให้การก่อตัวของสารประกอบเชิงโลหะ โดยเฉพาะเฟส FeAl_3 ที่มีความเปราะสูงลดลง ซึ่งนำไปสู่การปรับปรุงคุณสมบัติเชิงกลของรอยเชื่อมอย่างมีนัยสำคัญ อย่างไรก็ตาม แม้ว่าจะมีงานวิจัยจำนวนมากได้ทำการศึกษาผลของรูปคลื่นกระแสไฟฟ้าต่อพฤติกรรมของรอยเชื่อม แต่ในพฤติกรรมการแตกหักยังคงมีความซับซ้อน เนื่องจากได้รับอิทธิพลจากหลายปัจจัยร่วมกัน เช่น การเกิดสารประกอบเชิงโลหะ ขนาดแนวเชื่อม และการกระจายความร้อน ส่งผลให้ความสัมพันธ์ดังกล่าวยังไม่สามารถอธิบายได้อย่างชัดเจนและครอบคลุม แต่จากการทบทวนวรรณกรรมพบว่ายังมีช่องว่างของงานวิจัย (Research Gap) ที่สำคัญ คือการขาดข้อมูลการศึกษาเชิงเปรียบเทียบโดยตรงระหว่างอิทธิพลของกระแสไฟฟ้าแบบพัลส์เดี่ยวและพัลส์คู่ที่มีต่อการเชื่อมต่อวัสดุ เช่น เหล็กกล้า SPFH780 และอะลูมิเนียม 5052 โดยเฉพาะการวิเคราะห์เชิงปริมาณของความหนาและเฟสของสารประกอบเชิงโลหะ (Fe_2Al_5 และ FeAl_3) ที่สอดคล้องกับค่าความต้านทานแรงดึงเฉือนในเงื่อนไขของพัลส์ที่แตกต่างกัน ซึ่งเป็นประเด็นสำคัญที่งานวิจัยชิ้นนี้มุ่งหวังจะเพิ่มเติมเพื่อให้เกิดความเข้าใจที่ชัดเจนสำหรับการนำไปประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมยานยนต์ต่อไป

ดังนั้น จากช่องว่างขององค์ความรู้ดังกล่าว การศึกษานี้จึงมุ่งเน้นการวิเคราะห์อิทธิพลของการเชื่อมความต้านทานแบบจุดที่มีต่อค่าความต้านทานแรงดึงเฉือนและพฤติกรรมการเติบโตของชั้นสารประกอบเชิงโลหะบริเวณรอยต่อระหว่างเหล็กกล้า SPFH780 และอะลูมิเนียมผสม 5052 โดยทำการเปรียบเทียบผลของการใช้กระแสไฟฟ้าแบบพัลส์เดี่ยวและพัลส์คู่ เพื่อวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างโครงสร้างจุลภาค การก่อตัวของชั้น IMC และสมบัติทางกล อันนำไปสู่การกำหนดเงื่อนไขการเชื่อมที่เหมาะสมสำหรับการประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมยานยนต์และอุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้องต่อไป

2. วิธีการดำเนินงานวิจัย

2.1 การเตรียมโลหะพื้น

การเตรียมโลหะพื้นสำหรับศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิในการเชื่อมความต้านทานแบบจุดระหว่างอะลูมิเนียมผสม 5052 กับเหล็กกล้าคาร์บอนผสมต่ำ SPFH780 จะทำการเตรียมชิ้นงานตามมาตรฐานในการเชื่อมความต้านทานแบบจุด AWS C1.1M/C1.1:2019 [17] โดยอะลูมิเนียมผสม 5052 ที่ใช้ในการศึกษานี้มีความหนา 1.50 mm และเหล็กกล้าคาร์บอนผสมต่ำ SPFH780 มีความหนา 1.60 mm และชิ้นงานถูกเตรียมโดยการตัดให้ได้ขนาดความกว้าง 25 mm และความยาว 102 mm โดยองค์ประกอบทางเคมีของโลหะพื้นแสดงไว้ในตารางที่ 1 และตารางที่ 2

2.2 วิธีการทดลอง

ในการศึกษานี้ได้ทำการศึกษาดัวแปรที่เป็นกระแสไฟฟ้าในการเชื่อม โดยทำการศึกษาการปล่อยกระแสไฟฟ้าแบบพัลส์เดี่ยวและแบบพัลส์คู่ที่เงื่อนไขในการปล่อยกระแสไฟฟ้าที่แตกต่างกัน 4 ค่า คือ 11000, 11500, 12000 และ 12500 แอมแปร์ (Ampere: A) ดังนั้นจึงมีจำนวนการทดลองทั้งหมดเท่ากับ 8 การทดลอง ซึ่งตัวแปรและระดับในการเชื่อมความต้านทานที่ใช้ในการทดลองนี้ได้แสดงในตารางที่ 3

ในการศึกษานี้ ใช้ตัวแปรกระแสไฟฟ้าเป็นตัวแปรหลักในกระบวนการเชื่อมความต้านทานแบบจุด เนื่องจากเป็นปัจจัยที่มีอิทธิพลโดยตรงต่อการเกิดความร้อนตามหลักจุล ซึ่งควบคุมการหลอมเหลวและการเจริญเติบโตของนิกเก็บริเวรหลอมเหลว (Weld Nugget) ที่มีขนาด รูปร่าง และความต่อเนื่องเพียงพอส่งผลอย่างชัดเจนต่อคุณภาพของรอยเชื่อม ทั้งนี้ในการศึกษานี้ได้กำหนดรูปแบบการปล่อยกระแสไฟฟ้าเป็นแบบพัลส์เดี่ยวและพัลส์คู่ เพื่อเปรียบเทียบลักษณะการสะสมและการกระจายความร้อน โดยเลือกช่วงค่ากระแสไฟฟ้าที่ 11000 A, 11500 A, 12000 A และ 12500 A ซึ่งครอบคลุมระดับพลังงานที่เหมาะสมต่อการเกิดรอยเชื่อมที่มีคุณภาพ และเอื้อต่อการวิเคราะห์อิทธิพลต่อความแข็งแรงเชิงกลและการก่อตัวของสารประกอบเชิงโลหะบริเวณรอยต่ออย่างเป็นระบบ ดังนั้นการออกแบบการทดลองจำนวน 8 เงื่อนไขจึงมีความเหมาะสม

สำหรับการศึกษาอิทธิพลของตัวแปรดังกล่าวได้อย่างครอบคลุมและมีประสิทธิภาพ

ตารางที่ 1 องค์ประกอบทางเคมีของอะลูมิเนียมผสม 5052

ประเภทของวัสดุ	องค์ประกอบทางเคมี (wt%)								
	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Ti	Cr	Al
อะลูมิเนียมผสม 5052	0.6	0.5	0.1	0.5	2.6	0.2	0.1	0.25	Bal.

ตารางที่ 2 องค์ประกอบทางเคมีของเหล็กกล้าคาร์บอนผสมต่ำ SPFH780

ประเภทของวัสดุ	องค์ประกอบทางเคมี (wt%)					
	C	Si	Mn	P	S	Fe
เหล็กกล้าคาร์บอนผสมต่ำ SPFH780	0.2	0.6	2	0.02	0.01	Bal.

ตารางที่ 3 ระดับและปัจจัยที่ใช้ในการทดลอง

ปัจจัย	ระดับ			
	1	2	3	4
กระแสไฟฟ้าแบบพัลส์เดี่ยว (A)	11000	11500	12000	12500
กระแสไฟฟ้าแบบพัลส์คู่ (A)	11000	11500	12000	12500

2.3 การเชื่อมความต้านทาน

ก่อนที่จะทำการเชื่อมความต้านทาน นำโลหะพื้นหรือชิ้นงานล้างทำความสะอาดพื้นผิวของชิ้นงานด้วยอะซิโตนเพื่อขจัดคราบน้ำมันที่ผิวและรอให้แห้ง จากนั้นทำการวางและเตรียมชิ้นงานทดสอบประกอบกับตัวจับยึดชิ้นงานแล้วทำการเชื่อมด้วยเครื่องเชื่อมความต้านทาน PANASONIC รุ่น YR500-CM2 ขนาดกำลัง 50 KVA 50 Hz โดยใช้ขั้วอิเล็กโทรดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 16 mm ที่มีลักษณะโค้งมนและตัดตรงบริเวณปลายอิเล็กโทรด โดยใช้อิเล็กโทรดทำจากวัสดุทองแดงผสม CuCrZr

2.4 การทดสอบความต้านทานแรงดึงเหนือบริเวณรอยต่อ

สำหรับขั้นตอนการทดสอบความต้านทานแรงดึงเหนือบริเวณรอยต่อ จะนำชิ้นงานที่ผ่านการเชื่อมความต้านทานแบบจุด มาทำการทดสอบความต้านทานแรงดึงเหนือบริเวณรอยต่อ โดยใช้เครื่องทดสอบเอนกประสงค์ยี่ห้อ SHIMADZU รุ่น AG-X 50 kN ที่ความเร็ว 2.0 mm/min

2.5 การวิเคราะห์ชิ้นสารประกอบบริเวณรอยต่อ

สำหรับขั้นตอนการวิเคราะห์ชิ้นสารประกอบบริเวณรอยต่อนั้น จะนำชิ้นงานที่ผ่านการทดสอบความต้านทานแรงดึงเหนือบริเวณรอยต่อ มาทำการวิเคราะห์ชิ้นสารประกอบบริเวณรอยต่อ โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy: SEM) ยี่ห้อ ThermoFisher รุ่น Axia ChemiSEM และวิเคราะห์การกระจายตัวของธาตุบริเวณรอยต่อของชิ้นงานด้วย Energy-Dispersive X-ray Spectroscopy (EDS) รุ่น Axia ChemiSEM

3. ผลการทดลองและอภิปรายผล

3.1 ผลการทดลองเชื่อมความต้านทานแบบจุด

หลังจากการทดลองเชื่อมความต้านทานแบบจุดของชิ้นงาน ได้นำชิ้นงานมาทำการทดสอบความแข็งแรงบริเวณรอยต่อ โดยการทดสอบความต้านทานแรงดึงเหนือบริเวณรอยต่อและนำข้อมูลที่ได้จากการทดสอบมาทำการวิเคราะห์โดยนำชิ้นงานมาทำ

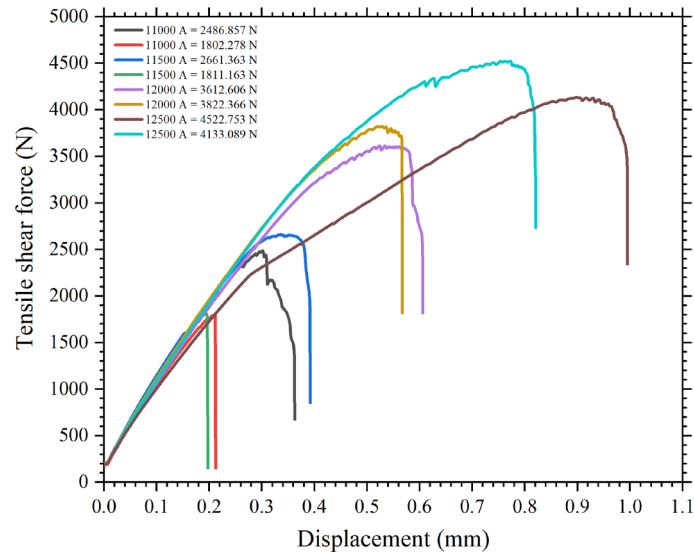
การวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคและชั้นสารประกอบเชิงโลหะบริเวณรอยต่อของชิ้นงาน โดยผลการทดสอบค่าความต้านทานแรงดึงเดือนแสดงดังตารางที่ 4

จากการทดสอบค่าความต้านทานแรงดึงเดือน พบว่าค่าความต้านทานแรงดึงเดือนเฉลี่ยสูงสุดของพัลส์เดี่ยวอยู่ที่ 4327.921 N ที่กระแสไฟฟ้า 12500 A และสำหรับพัลส์คู่ ค่าความต้านทานแรงดึงเดือนเฉลี่ยสูงสุดอยู่ที่ 4534.654 N ที่กระแสไฟฟ้า 12500 A โดยรวมแล้วการเชื่อมความต้านทานแบบพัลส์คู่ให้ค่าความต้านทานแรงดึงเดือนที่สูงกว่าการเชื่อมแบบพัลส์เดี่ยวที่กระแสไฟฟ้าที่เท่ากัน ดังแสดงในตารางที่ 4 และรูปที่ 1–3 ดังนั้นการใช้วิธีการเชื่อมความต้านทานแบบพัลส์คู่ (Double-Pulse) มีแนวโน้มที่จะให้ค่าความต้านทานแรงดึงเดือนเฉลี่ยที่สูงกว่าแบบพัลส์เดี่ยว (Single Pulse) อย่างเห็นได้ชัด โดยเฉพาะที่กระแสไฟฟ้า 12500 A

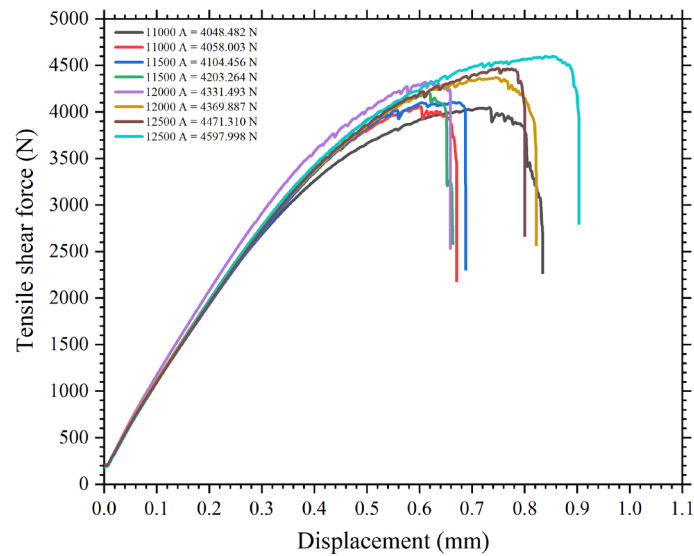
จากการวิเคราะห์อิทธิพลของกระบวนการเชื่อมความต้านทานแบบจุดระหว่างเหล็กกล้าความแข็งแรงสูง SPFH780 และอะลูมิเนียมผสม 5052 พบว่าการจ่ายกระแสไฟฟ้าแบบพัลส์คู่ (Double-Pulse) ส่งผลให้ค่าแรงดึงเดือนสูงกว่าแบบพัลส์เดี่ยว เนื่องจากกลไกการจ่ายกระแสไฟฟ้าแบบพัลส์คู่ช่วยควบคุมวัฏจักรความร้อนและลดการสะสมความร้อนส่วนเกินบริเวณรอยต่อได้อย่างมีประสิทธิภาพ ส่งผลให้สามารถจำกัดการเจริญเติบโตของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ เช่น เฟส Fe_2Al_5 และ $FeAl_3$ [14, 18] ที่มีความเปราะสูงให้มีความหนาที่เหมาะสม ในขณะที่การเพิ่มระดับกระแสไฟฟ้าในการเชื่อมส่งผลโดยตรงต่อการเพิ่มพลังงานความร้อนตามกฎของจูลซึ่งกระตุ้นให้เกิดการหลอมละลายและการเพิ่มขนาดของนิกเกิลเชื่อมทำให้พื้นที่ที่ได้รับความร้อนเพิ่มขึ้น ส่งผลให้รอยเชื่อมสามารถรองรับภาระเชิงกลได้ดีขึ้น และส่งผลให้รอยเชื่อมมีความสามารถในการต้านทานแรงดึงเดือนเพิ่มขึ้นตามระดับกระแสไฟฟ้า โดยมีค่าสูงสุดที่ระดับกระแสไฟฟ้า 12500 A

ตารางที่ 4 ผลการทดสอบค่าความต้านทานแรงดึงเดือน

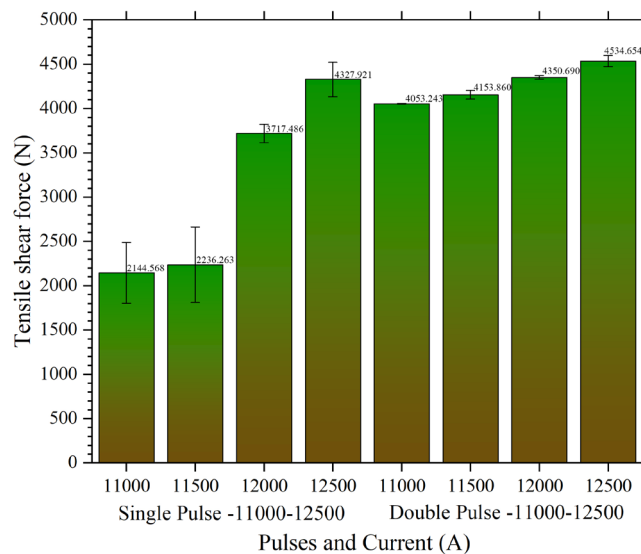
ตัวแปร	กระแส ไฟฟ้า (A)	ทำซ้ำครั้งที่ 1 (N)	ทำซ้ำครั้งที่ 2 (N)	ค่าเฉลี่ย (N)
กระแส ไฟฟ้าแบบพัลส์เดี่ยว (A)	11000	2486.857	1802.278	2144.568
	11500	2661.363	1811.163	2236.263
	12000	3612.606	3822.366	3717.486
	12500	4522.753	4133.089	4327.921
กระแส ไฟฟ้าแบบพัลส์คู่ (A)	11000	4048.482	4058.003	4053.243
	11500	4104.456	4203.264	4153.860
	12000	4331.493	4369.887	4350.690
	12500	4471.310	4597.998	4534.654



รูปที่ 1 ความต้านทานแรงดึงเชื่อมแบบพัลส์เดี่ยว



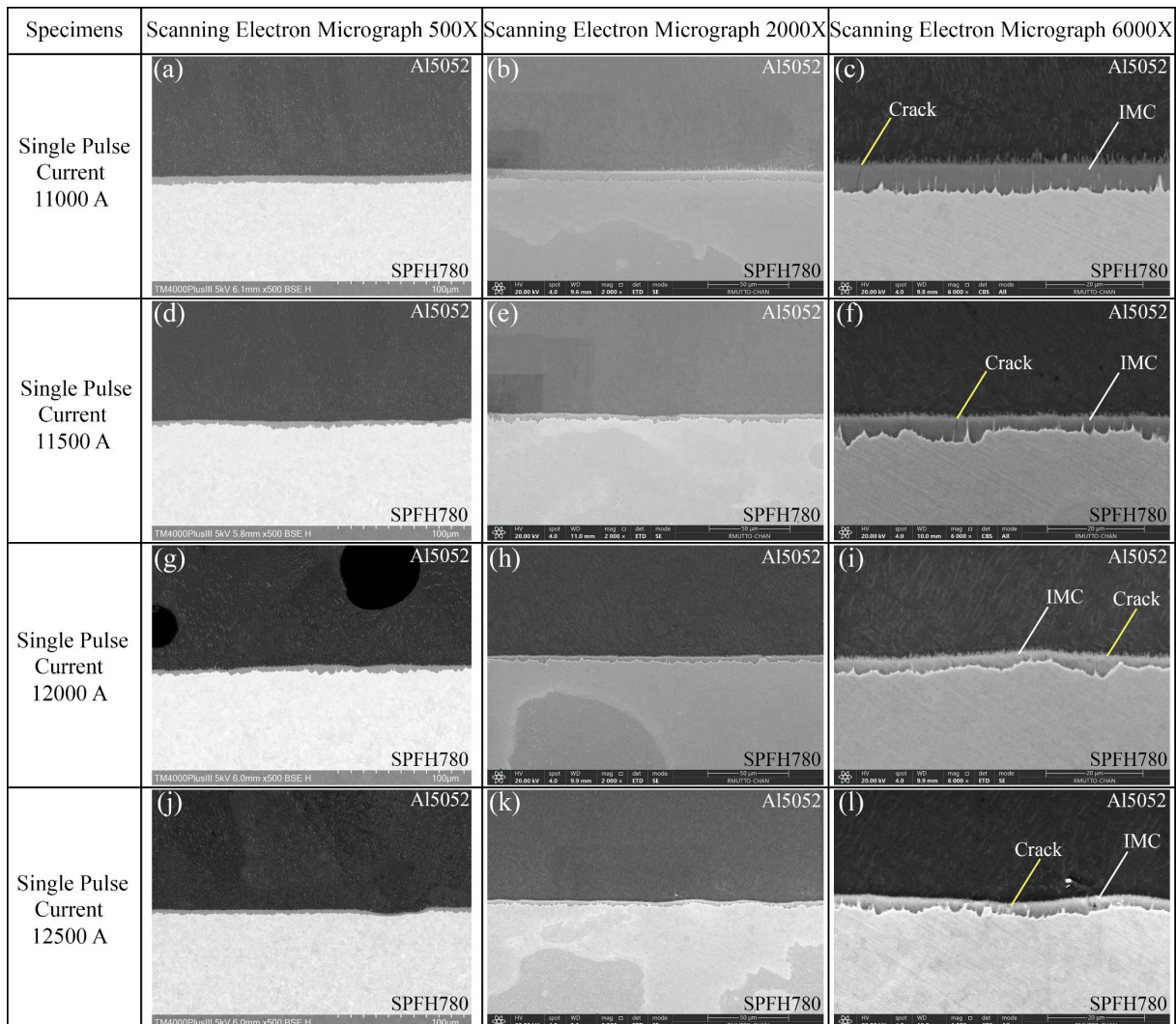
รูปที่ 2 ความต้านทานแรงดึงเชื่อมแบบพัลส์คู่



รูปที่ 3 ความต้านทานแรงดึงเชื่อมแบบพัลส์คู่และพัลส์เดี่ยว

3.2 โครงสร้างจุลภาคของชั้นสารประกอบบริเวณรอยต่อ

จากการวิเคราะห์ โครงสร้างจุลภาคของชั้นสารประกอบบริเวณรอยต่อด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) บริเวณรอยต่อระหว่างเหล็กกล้า SPFH780 และอะลูมิเนียม 5052 ดังแสดงในรูปที่ 4 (a)–(l) พบว่าการใช้กระแสไฟฟ้าที่ 12500 A ส่งผลให้เกิดรอยแตกกว้างในชั้นสารประกอบเชิงโลหะ (IMC) น้อยที่สุดเมื่อเทียบกับระดับกระแสไฟฟ้าอื่น ๆ ซึ่งสามารถอธิบายได้ว่า การเพิ่มกระแสไฟฟ้าจะช่วยเพิ่มพลังงานความร้อนในการเชื่อมความต้านทานแบบจุดตามหลักของจูล (Joule Heating) ซึ่งจะช่วยให้เกิดการเปียกที่ดี (Wetting) และช่วยในการแพร่ของอะตอมระหว่างวัสดุต่างชนิดให้มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น ซึ่งในสภาวะที่กระแสไฟฟ้าที่ต่ำ ทำให้พลังงานความร้อนที่ไม่เพียงพออาจทำให้ชั้นของ IMC เกิดการก่อตัวแบบไม่ต่อเนื่องหรือมีลักษณะที่มีความเปราะสูงจนไม่สามารถต้านทานความเค้นหดตัว (Thermal Contraction Stress) ในช่วงของการเย็นตัวได้ ทำให้เกิดรอยแตก (Micro-Cracks) หรือช่องว่างบริเวณรอยต่อ ในขณะที่กระแสไฟฟ้า 12500 A นั้น ช่วยให้ชั้น IMC มีความต่อเนื่องและมีการยึดเกาะทางกลที่ดีกว่ากระแสไฟฟ้าที่ต่ำ จึงช่วยลดการเกิดรอยแตกและส่งผลให้ได้ค่าความต้านทานแรงดึงเฉือนที่สูงกว่าเงื่อนไขอื่นตามผลการทดลองสำหรับในการศึกษานี้

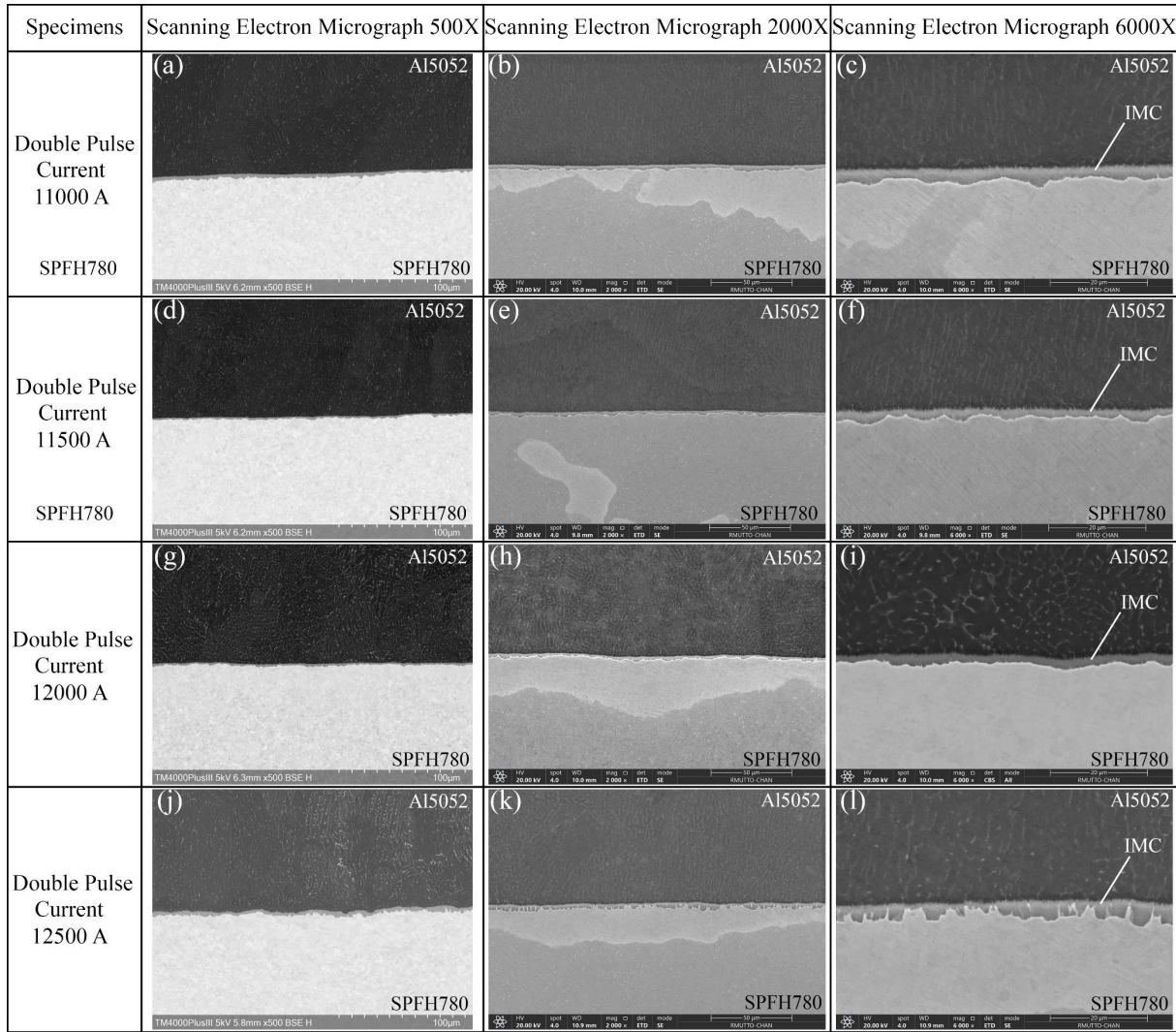


รูปที่ 4 โครงสร้างจุลภาคบริเวณรอยต่อในการเชื่อมความต้านทานแบบจุดชนิดพัลส์เดี่ยวที่กระแสไฟฟ้าในการเชื่อมที่แตกต่างกัน (a–c): กระแสไฟฟ้า 11000 A (d–f): กระแสไฟฟ้า 11500 A (g–i): กระแสไฟฟ้า 12000 A และ (j–l): กระแสไฟฟ้า 12500 A

จากรูปที่ 5 (a)–(l) เป็นโครงสร้างจุลภาคบริเวณรอยต่อในการเชื่อมความต้านทานแบบจุดชนิดพัลส์คู่ที่กระแสไฟฟ้าในการเชื่อมที่แตกต่างกัน โดยกระแสไฟฟ้าพัลส์แรกที่ใช้ในการเชื่อมคือ 4000 A และกระแสไฟฟ้าพัลส์ที่สองมีค่ากระแสไฟฟ้าที่แตกต่างกันคือ 11000 A, 11500 A, 12000 A และ 12500 A สำหรับในกระบวนการเชื่อมความต้านทานแบบจุดแบบพัลส์คู่ ดังนั้นกระแสไฟฟ้าพัลส์แรกทำหน้าที่เป็น "พัลส์กระตุ้นผิวหน้า" (Activation Pulse) โดยมีกลไกหลักคือการทำลายชั้นฟิล์มอะลูมิเนียมออกไซด์ Al_2O_3 บนผิวหน้าอะลูมิเนียมผสม 5052 ซึ่งชั้นฟิล์มอะลูมิเนียมออกไซด์ Al_2O_3 มีความหนาแน่นและมีจุดหลอมเหลวสูงมาก (ประมาณ 2050 °C) ซึ่งทำหน้าที่เป็นฉนวนไฟฟ้า ดังนั้นกระแสไฟฟ้าพัลส์แรกที่ใช้ 4000 A ซึ่งเป็นระดับกระแสไฟฟ้าที่ไม่สูงจนทำให้เกิดการหลอมละลายได้อย่างรุนแรง จะสร้างความร้อนเฉพาะจุดที่บริเวณรอยต่อ ซึ่งความร้อนนี้จะทำให้เกิดความเค้นเนื่องจากการขยายตัวทางความร้อนที่แตกต่างกันระหว่างออกไซด์และเนื้อโลหะ ส่งผลให้ชั้นออกไซด์เกิดการแตกร้าวและหลุดลอกออกมา ทำให้เกิดผิวหน้าโลหะที่สะอาดและสัมผัสกันได้โดยตรง หรือพัลส์แรกช่วยลดความต้านทานสัมผัส (Contact Resistance) ให้คงที่และสม่ำเสมอ พร้อมทั้งเพิ่มพื้นที่สัมผัสที่สะอาดระหว่างโลหะต่างชนิดกันได้

ในช่วงเริ่มต้นของการเชื่อม ความต้านทานสัมผัส (Contact Resistance) จะมีความผันผวนสูงมาก หากใช้กระแสไฟฟ้าสูงในทันทีแบบพัลส์เดียวจะทำให้เกิดการอาร์ค การระเบิด หรือการกระเด็นของโลหะที่หลอมได้ ดังนั้นการใช้พัลส์แรกที่ใช้ 4000 A จะช่วยให้ค่อยๆ ลดความต้านทานสัมผัสให้ต่ำลงและสม่ำเสมอทั่วบริเวณรอยต่อ ซึ่งเป็นการเตรียมความพร้อมให้กับการไหลของกระแสไฟฟ้าในพัลส์ที่สองที่มีค่าสูงกว่า ทำให้การกำเนิดความร้อนในพัลส์หลักหรือพัลส์สองนั้นมีความเสถียรขึ้น และอีกประการหนึ่งการเปิดผิวหน้าขึ้นงานในพัลส์แรกจะช่วยให้โลหะหลอมจากฝั่งอะลูมิเนียมสามารถเปียกที่ผิว (Wetting) บนฝั่งเหล็กได้ดีขึ้น และช่วยกระตุ้นการแพร่ (Diffusion) ของอะตอมระหว่าง Fe และ Al ได้อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้นเมื่อได้รับพลังงานจากพัลส์ที่สอง ส่งผลให้พันธะทางโลหะวิทยาแข็งแรงขึ้น จนได้ค่าความต้านทานแรงดึงเฉือนที่สูงที่สุดในเงื่อนไข 12500 A

นอกจากพัลส์แรกจะช่วยเพิ่มอุณหภูมิของชิ้นงานให้สูงขึ้นระดับหนึ่งแล้ว จะส่งผลให้ความเหนียว (Ductility) ของวัสดุเพิ่มขึ้นด้วย และช่วยให้ผิวสัมผัสแนบสนิทกันได้ดีขึ้นภายใต้แรงกดของอิเล็กโทรด (Electrode Force) การที่ผิวสัมผัสแนบสนิทก่อนเริ่มพัลส์ที่สอง จะช่วยควบคุมการเติบโตของ ขั้วสารประกอบเชิงโลหะให้มีความสม่ำเสมอและลดโอกาสการเกิดรอยแตกร้าว (Cracks) ในชั้นของ IMC ได้ ดังแสดงในรูปที่ 5 (a)–(l)

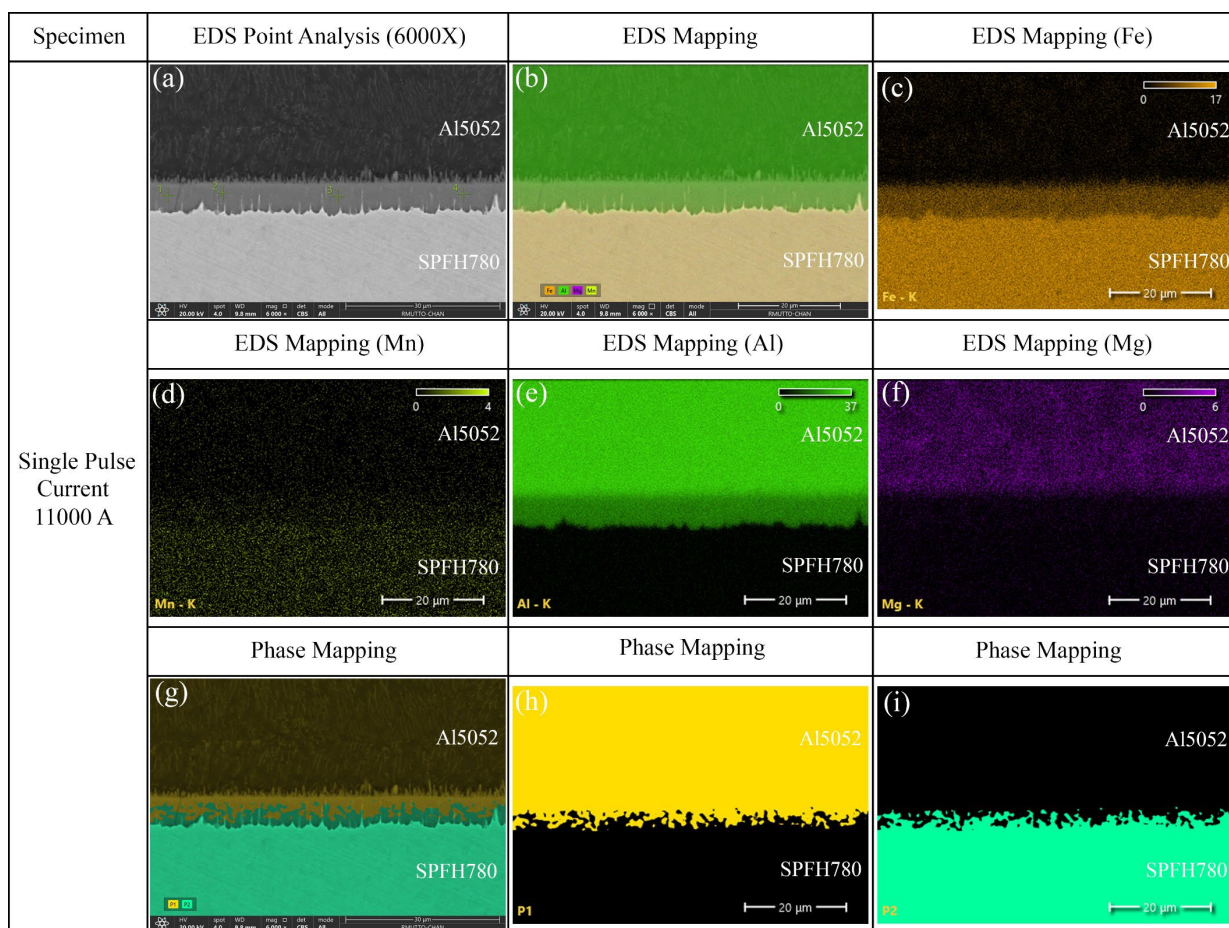


รูปที่ 5 โครงสร้างจุลภาคบริเวณรอยต่อในการเชื่อมความต้านทานแบบจุดชนิดพัลส์คู่ที่กระแสไฟฟ้าในการเชื่อมที่แตกต่างกัน (a-c): กระแสไฟฟ้า 11000 A (d-f): กระแสไฟฟ้า 11500 A (g-i): กระแสไฟฟ้า 12000 A และ (j-l): กระแสไฟฟ้า 12500

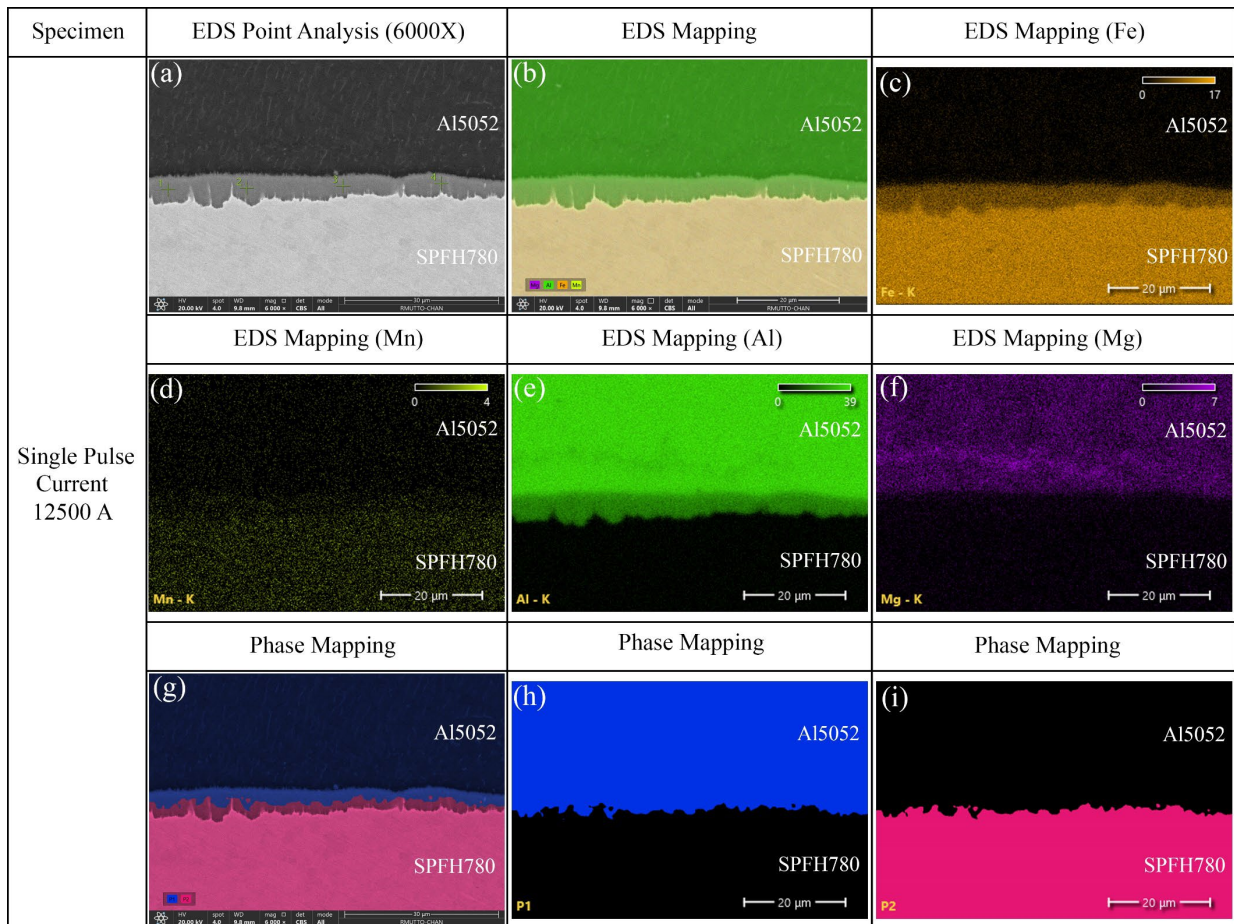
A

3.3 การวิเคราะห์การกระจายตัวของธาตุที่ชั้นสารประกอบบริเวณรอยต่อ

จากการวิเคราะห์และเปรียบเทียบขององค์ประกอบทางเคมีของชั้นสารประกอบเชิงโลหะที่รอยต่อดังแสดงในตารางที่ 5 และรูปที่ 6-7 (a-l) พบว่าการใช้กระแสไฟฟ้า 11000 A และ 12500 A แบบพัลส์เดี่ยวให้ผลลัพธ์ที่ต่างกันอย่างชัดเจน โดยที่กระแสไฟฟ้า 11000 A พบการก่อตัวของรอยแตกร้าวและความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะบริเวณรอยต่อที่ไม่สม่ำเสมอ ในขณะที่กระแสไฟฟ้า 12500 A ให้ผลการเชื่อมที่ดีกว่าและแข็งแรงกว่า โดยมีชั้นสารประกอบเชิงโลหะชนิด FeAl_2 ก่อตัวอย่างต่อเนื่องและสมบูรณ์ ซึ่งสอดคล้องกับตำแหน่งของเฟสที่ระบุในแผนภาพสมดุลเฟสของโลหะผสมสองชนิด (Binary Alloy Phase Diagram) ของ FeAl [19] และสอดคล้องกับการกระจายตัวของเฟส (Phase Mapping) ที่แสดงการกระจายตัวของธาตุ Fe และ Al อย่างเข้มข้นและสม่ำเสมอในบริเวณรอยเชื่อม ส่วนธาตุ Mn และ Mg ยังคงมีการกระจายตัวที่เบาบางและไม่ได้เป็นองค์ประกอบหลักของชั้นเฟสที่เกิดขึ้นในทั้งสองสภาวะ นอกจากนี้ จากรูปการวิเคราะห์การกระจายตัวของธาตุ (EDS Mapping) ยังยืนยันว่าการกระจายตัวของธาตุ Al และ Fe เป็นองค์ประกอบหลักของเฟสดังกล่าว ในขณะที่ปริมาณของ Mn และ Mg ที่ค่อนข้างบางเล็กน้อยนั้นไม่ได้มีบทบาทสำคัญในการสร้างโครงสร้างของชั้นสารประกอบเชิงโลหะที่บริเวณรอยต่อ



รูปที่ 6 การวิเคราะห์การกระจายตัวของธาตุ (EDS Mapping) และการกระจายตัวของเฟส (Phase Mapping) (a): ตำแหน่งการวิเคราะห์แบบจุด (b): รวมธาตุด้วยวิธี EDS Mapping (c): Fe (d): Mn (e): Al (f): Mg (g): การรวมการกระจายตัวของเฟส (Phase Mapping) (h): เฟส Al (i): เฟส Fe

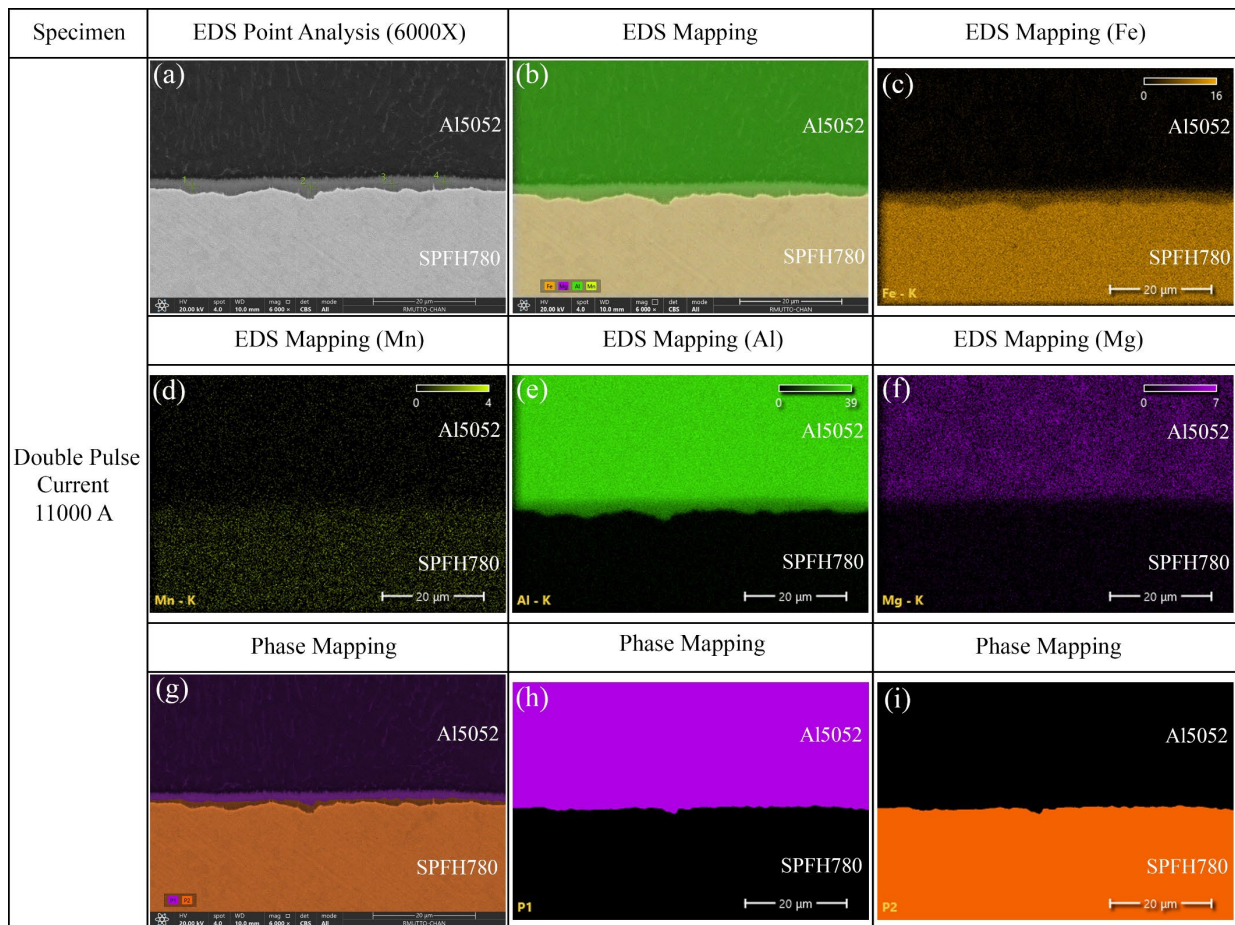


รูปที่ 7 การวิเคราะห์การกระจายตัวของธาตุ (EDS Mapping) และการกระจายตัวของเฟส (Phase Mapping) (a): ตำแหน่งการวิเคราะห์แบบจุด (b): รวมธาตุด้วยวิธี EDS Mapping (c): Fe (d): Mn (e): Al (f): Mg (g): การรวมการกระจายตัวของเฟส (Phase Mapping) (h): เฟส Al (i): เฟส Fe

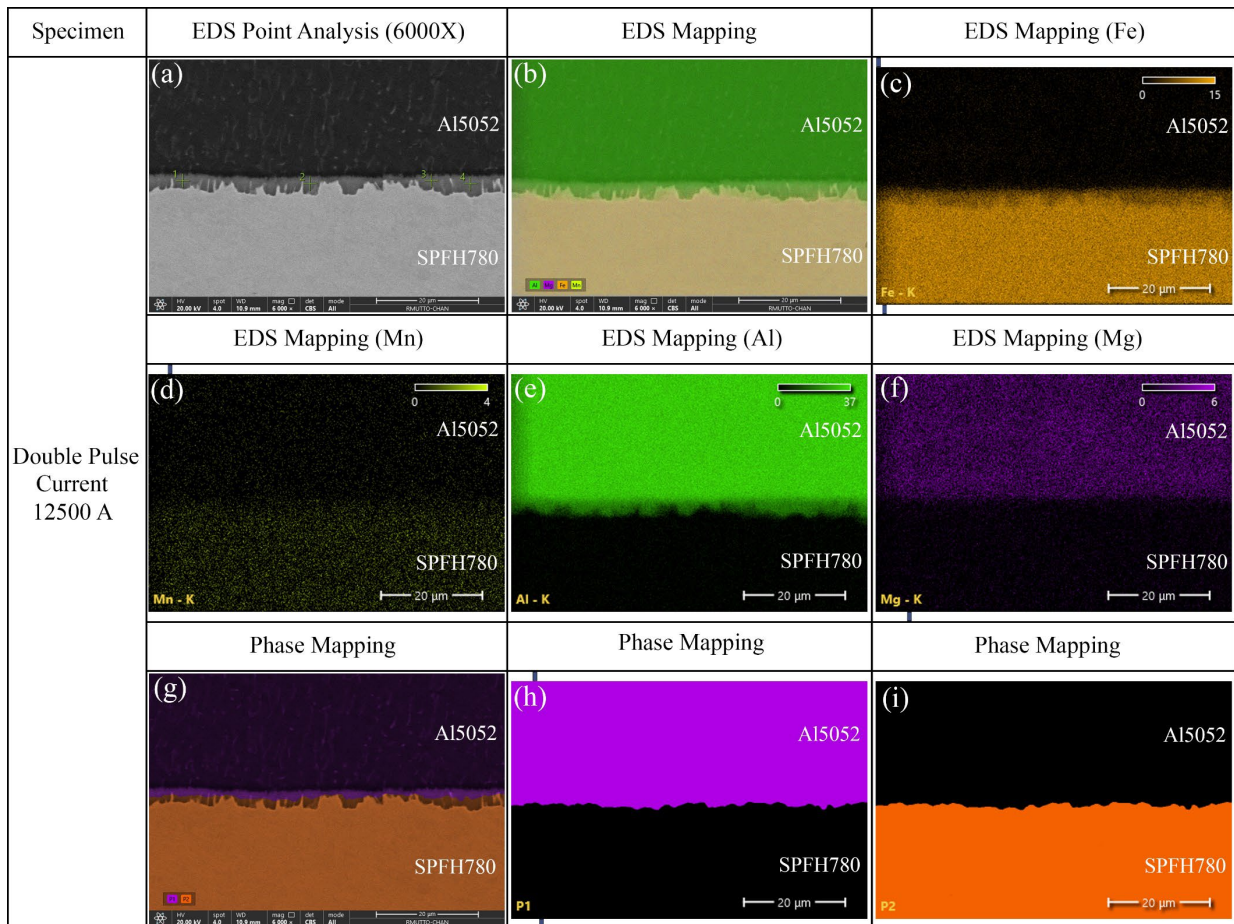
จากการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของชิ้นสารประกอบเชิงโลหะบริเวณรอยต่อที่ใช้กระแสไฟฟ้าแบบพัลส์คู่ (Double Pulse Current) โดยใช้กระแสไฟฟ้า 11000 และ 12500 A ดังแสดงในตารางที่ 5 และรูปที่ 8-9 (a-l) พบว่าชิ้นสารประกอบเชิงโลหะที่ก่อตัวขึ้นที่กระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการเชื่อมที่ 11000 A คือ FeAl_2 ในขณะที่กระแสไฟฟ้า 12500 A พบการก่อตัวของ Fe_2Al_5 ซึ่งสอดคล้องกับตำแหน่งของเฟสที่ระบุในแผนภาพสมดุลเฟสของโลหะผสมสองชนิด ของ Fe-Al โดยกระบวนการเชื่อมแบบพัลส์คู่ไม่ปรากฏรอยแตกร้าวในทั้งสองสภาวะของการปล่อยกระแสไฟฟ้า และส่งผลให้ได้รอยต่อที่มีค่าความต้านทานแรงดึงเดือนสูงกว่าการเชื่อมแบบพัลส์เดี่ยว สอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ธาตุ (EDS Mapping) และการระบุเฟส (Phase Mapping) ที่แสดงการกระจายตัวของธาตุ Fe และ Al อย่างเข้มข้นและสม่ำเสมอตลอดแนวรอยเชื่อม ในขณะที่ธาตุ Mn และ Mg ยังคงมีการกระจายตัวที่เบาบางและไม่ได้เป็นองค์ประกอบหลักของชิ้นเฟสที่เกิดขึ้นในทั้งสองสภาวะ

เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์เชิงกลระหว่างรูปแบบการจ่ายกระแสไฟฟ้าและพฤติกรรมการก่อตัวของชิ้นสารประกอบเชิงโลหะ จากข้อมูลในตารางที่ 5 พบว่ารูปแบบกระแสไฟฟ้าแบบพัลส์คู่มีประสิทธิภาพในการจัดการวัฏจักรความร้อน (Thermal cycle management) ที่ดีกว่ารูปแบบพัลส์เดี่ยว โดยกลไกของพัลส์คู่ช่วยควบคุมการสะสมความร้อนส่วนเกินบริเวณรอยต่อ ส่งผลให้การแพร่ของอะตอมระหว่างเหล็กและอะลูมิเนียมมีความสม่ำเสมอมากขึ้น การควบคุมความร้อนด้วยวิธีนี้ช่วยจำกัดการเติบโตของเฟสที่เปราะบาง เช่น Fe_2Al_5 และ FeAl_3 ให้อยู่ในระดับความหนาที่เหมาะสมและมีความต่อเนื่อง

ของชิ้นสารประกอบ ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญที่ช่วยลดโอกาสการเกิดรอยแตกร้าวภายในรอยเชื่อม และส่งผลโดยตรงต่อการเพิ่มความต้านทานแรงดึงเฉือนให้สูงขึ้นเมื่อเทียบกับรูปแบบพัลส์เดี่ยวที่ระดับกระแสไฟฟ้าเดียวกัน



รูปที่ 8 การวิเคราะห์การกระจายตัวของธาตุ (EDS Mapping) และการกระจายตัวของเฟส (Phase Mapping) (a): ตำแหน่งการวิเคราะห์แบบจุด (b): รวมธาตุด้วยวิธี EDS Mapping (c): Fe (d): Mn (e): Al (f): Mg (g): การรวมการกระจายตัวของเฟส (Phase Mapping) (h): เฟส Al (i): เฟส Fe



รูปที่ 9 การวิเคราะห์การกระจายตัวของธาตุ (EDS Mapping) และการกระจายตัวของเฟส (Phase Mapping) (a): ตำแหน่งการวิเคราะห์แบบจุด (b): รวมธาตุด้วยวิธี EDS Mapping (c): Fe (d): Mn (e): Al (f): Mg (g): การรวมการกระจายตัวของเฟส (Phase Mapping) (h): เฟส Al (i): เฟส Fe

ตารางที่ 5 องค์ประกอบทางเคมีของชั้นสารประกอบเชิงโลหะที่บริเวณรอยต่อ

องค์ประกอบทางเคมีของชั้นสารประกอบเชิงโลหะที่ตำแหน่งต่างๆ ของชิ้นงานที่ใช้กระแสไฟฟ้า 11000 A ชนิดพัลส์เดียว (รูปที่ 6(a))				
ชนิดของธาตุ	จุดที่ 1 at%	จุดที่ 2 at%	จุดที่ 3 at%	จุดที่ 4 at%
Al	65.05	65.35	65.05	64.6
Fe	34.95	34.25	34.95	35.00
Mn	–	0.40	–	0.40
Mg	–	–	–	–
Possible Phase	FeAl ₂	FeAl ₂	FeAl ₂	FeAl ₂

ตารางที่ 5 (ต่อ) องค์ประกอบทางเคมีของชิ้นสารประกอบเชิงโลหะที่บริเวณรอยต่อ

องค์ประกอบทางเคมีของชิ้นสารประกอบเชิงโลหะที่ตำแหน่งต่างๆ ของชิ้นงานที่ใช้กระแสไฟฟ้า 12500 A ชนิดพัลส์ เดี่ยว (รูปที่ 7(a))				
ชนิดของธาตุ	จุดที่ 1 at%	จุดที่ 2 at%	จุดที่ 3 at%	จุดที่ 4 at%
Al	68.65	65.40	64.60	65.20
Fe	29.35	34.60	35.00	34.80
Mn	0.40	–	0.40	–
Mg	1.60	–	–	–
Possible Phase	Fe ₂ Al ₅	FeAl ₂	FeAl ₂	FeAl ₂
องค์ประกอบทางเคมีของชิ้นสารประกอบเชิงโลหะที่ตำแหน่งต่างๆ ของชิ้นงานที่ใช้กระแสไฟฟ้า 11000 A ชนิดพัลส์คู่ (รูปที่ 8(a))				
Al	68.95	66.25	66.20	68.20
Fe	28.95	33.35	33.80	31.50
Mn	0.40	0.40	–	0.30
Mg	1.70	–	–	–
Possible Phase	Fe ₂ Al ₅	FeAl ₂	FeAl ₂	FeAl ₂
องค์ประกอบทางเคมีของชิ้นสารประกอบเชิงโลหะที่ตำแหน่งต่างๆ ของชิ้นงานที่ใช้กระแสไฟฟ้า 12500 A ชนิดพัลส์คู่ (รูปที่ 9(a))				
Al	68.80	67.30	66.85	70.95
Fe	29.10	32.30	32.75	28.45
Mn	0.40	0.40	0.40	0.30
Mg	1.70	–	–	0.30
Possible Phase	Fe ₂ Al ₅	FeAl ₂	FeAl ₂	FeAl ₃

ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของชิ้นสารประกอบเชิงโลหะ และค่าความต้านทานแรงดึงเฉือน ในการเชื่อมความต้านทานแบบจุดระหว่างเหล็กกล้า SPFH780 และอะลูมิเนียมผสมเกรด 5052 แสดงลักษณะความสัมพันธ์ในเชิงที่สวนทางกัน ซึ่งจำเป็นต้องอาศัยการหาค่าที่ตัวแปรหรือเงื่อนไขเหมาะสมที่สุด (Optimization) ในเชิงโลหะวิทยา ชั้น IMC ที่ก่อตัวขึ้นประกอบด้วยเฟส Fe₂Al₅ และ FeAl₃ ซึ่งมีคุณสมบัติความแข็งแรงสูงแต่มีความเปราะเด่นชัด

จากผลการวิเคราะห์พฤติกรรมความแข็งแรงด้วยค่าความต้านทานแรงดึงเฉือนพบว่า เมื่อปรับเพิ่มกระแสไฟฟ้าในการเชื่อมจาก 11000 A เป็น 12500 A พลังงานความร้อนสะสม ณ บริเวณรอยต่อจะเพิ่มสูงขึ้น ส่งผลต่อกลไกความแข็งแรงในสองลักษณะที่สวนทางกัน กล่าวคือ: (1) การขยายตัวของนูกเก็ต (Nugget Size Expansion): ช่วยเพิ่มพื้นที่หน้าตัดในการประสาน (Bonding Area) ซึ่งส่งผลบวกโดยตรงต่อความต้านทานแรงดึงเฉือนของรอยเชื่อม (2) การเพิ่มขึ้นของความหนาชั้น IMC: หากชิ้นสารประกอบมีความหนาเกินกว่าระดับวิกฤต (Critical Thickness) ซึ่งโดยทั่วไปกำหนดไว้ที่ไม่เกิน 10 ไมโครเมตร สำหรับรอยต่อเหล็กกับอะลูมิเนียม [18, 20, 21] จะส่งผลให้ชิ้นสารประกอบนี้กลายเป็นแหล่งกำเนิดรอยร้าว (Crack Initiation Site) และลดความเหนียว (Ductility) ของรอยเชื่อมลง

ประเด็นสำคัญที่พบจากการศึกษานี้พบว่า การประยุกต์ใช้เทคนิคการจ่ายกระแสไฟฟ้าแบบพัลส์คู่ที่ระดับ 12500 A ให้ค่าความต้านทานแรงดึงเฉือนสูงสุดเท่ากับ 4534.654 นิวตัน เนื่องจากช่วงพัก (Cooling Time) ระหว่างพัลส์ช่วยชะลอ

อัตราการแพร่ของอะตอม (Atomic Diffusion) ระหว่างธาตุเหล็ก (Fe) และอะลูมิเนียม (Al) ให้ไม่รวดเร็วเกินไปเมื่อเปรียบเทียบกับกร่ายกระแสไฟฟ้าแบบพัลส์เดี่ยวที่ระดับพลังงานเทียบเท่ากัน ส่งผลให้ชั้น IMC มีความหนาในระดับที่เหมาะสม (Optimal Thickness) ซึ่งเพียงพอต่อการสร้างพันธะทางเคมีที่แข็งแรงโดยไม่ก่อให้เกิดการแตกหักแบบเปราะที่รอยต่อ (Interfacial Brittle Failure)

สำหรับในด้านของการควบคุมคุณภาพสำหรับอุตสาหกรรมการผลิตยานยนต์ องค์ความรู้นี้ชี้ให้เห็นว่าการจัดการวัฏจักรความร้อนสำหรับงานเชื่อมความต้านทานแบบจุด (Thermal Cycle Management) ผ่านเทคนิคการจ่ายกระแสไฟฟ้าแบบพัลส์คู่ เป็นปัจจัยวิกฤตที่ต้องควบคุมควบคู่ไปกับการตรวจสอบขนาดของนิกเกิ้ล ดังนั้นข้อมูลเชิงลึกนี้จะเป็นประโยชน์อย่างยิ่งในการกำหนดพารามิเตอร์เพื่อควบคุมมาตรฐานการเชื่อมความต้านทานแบบจุดสำหรับโลหะต่างชนิดให้มีประสิทธิภาพและมีความเชื่อมั่นสูงสุดในเชิงวิศวกรรมต่อไป

4. สรุป

จากการศึกษาอิทธิพลของกระบวนการเชื่อมความต้านทานแบบจุดที่มีต่อสมบัติทางกลและพฤติกรรมการก่อตัวของชั้นสารประกอบเชิงโลหะบริเวณรอยต่อระหว่างเหล็กกล้าคาร์บอนผสมต่ำ SPFH780 และอะลูมิเนียมผสมเกรด 5052 โดยทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพระหว่างการจ่ายกระแสไฟฟ้าแบบพัลส์เดี่ยวและพัลส์คู่ที่ระดับกระแสไฟฟ้า 11000 A, 11500 A, 12000 A และ 12500 A โดยวิธีการทดลองประกอบด้วยการเตรียมชิ้นงานตามมาตรฐาน AWS C1.1M/C1.1:2019 และการทดสอบความต้านทานแรงดึงเฉือนด้วยเครื่องทดสอบความต้านทานแรงดึง (Universal Testing Machine: UTM) สำหรับการวิเคราะห์ลักษณะโครงสร้างจุลภาคของรอยเชื่อมจะทำการวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ร่วมกับการวิเคราะห์การกระจายตัวของธาตุ (EDS) บริเวณรอยต่อ ผลการวิเคราะห์แสดงให้เห็นว่าการจ่ายกระแสไฟฟ้าแบบพัลส์คู่ส่งผลให้รอยเชื่อมมีความต้านทานแรงดึงเฉือนสูงกว่าการใช้พัลส์เดี่ยวในทุกระดับกระแสไฟฟ้าในการเชื่อม โดยเฉพาะที่ระดับกระแสไฟฟ้าในการเชื่อม 12500 A ซึ่งให้ค่าความต้านทานแรงดึงเฉือนเฉลี่ยสูงสุดที่ 4534.654 N เนื่องจากการควบคุมวัฏจักรความร้อนด้วยพัลส์คู่ช่วยจำกัดความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะชนิด Fe_2Al_5 และ $FeAl_3$ ให้อยู่ในเกณฑ์ที่เหมาะสมและลดความเปราะบริเวณรอยต่อ นอกจากนี้การเพิ่มระดับกระแสไฟฟ้ายังส่งผลโดยตรงต่อการเพิ่มขนาดนิกเกิ้ลเชื่อม ซึ่งช่วยเพิ่มขีดความสามารถในการรองรับภาระทางกลได้อย่างมีประสิทธิภาพ สรุปได้ว่าเทคนิคการจ่ายกระแสไฟฟ้าแบบพัลส์คู่เป็นแนวทางที่เหมาะสมในการปรับปรุงคุณภาพการยึดติดระหว่างโลหะต่างชนิดเพื่อประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมยานยนต์ที่ต้องการความแข็งแรงสูงและมีน้ำหนักเบา

5. กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบพระคุณคณะวิศวกรรมศาสตรบัณฑิตบูรณาการและเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก วิทยาเขตจันทบุรี ที่ให้การสนับสนุนการวิจัยนี้

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] L. Walker, N. Avedissian, C. Vanderbilt, D. Paolini, and W. Zhang, "Effect of Fe–Al Intermetallics on Fatigue Properties of Aluminum to Steel Dissimilar Spot Welds," *International Journal of Fatigue*, vol. 187, p. 108434, Oct. 2024, doi: 10.1016/j.ijfatigue.2024.108434.
- [2] F. Teng, P. Huan, X. Wang, Z. Jiang, Q. Zhang, R. Liu, D. Lv, and H. Di, "Improving the Mechanical Properties of an Al–Si–Coated 22MnB5 Steel Resistance Spot Welding Joint by Adding Ni Foil to Suppress Fe–Al IMCs and δ -Ferrite," *Journal of Materials Research and Technology*, vol. 37, pp.

3615–3624, Aug. 2025, doi: 10.1016/j.jmrt.2025.07.058.

- [3] A. Kapil, A. Vivek, and G. Daehn, “Role of Zinc Coating on Joint Properties in Impact Spot Welded Al 6111 Aluminum Alloy to Galvanized High–Strength Low–Alloy Steel,” *Journal of Advanced Joining Processes*, vol. 11, p. 100276, Jan. 2025, doi: 10.1016/j.jajp.2024.100276.
- [4] W. Peng, D. Du, A. Dong, G. Wu, Z. Shen, B. Sun, N. Chen, H. Teng, S. Wang, and Y. Xie, “Mechanism of Flash Nickel Interlayer in Mitigating LME in Resistance Spot Welding of High–Strength Steel with Zn–Al–Mg Coating,” *Journal of Materials Research and Technology*, vol. 40, pp. 1248–1264, Jan. 2026, doi: 10.1016/j.jmrt.2025.12.246.
- [5] Z. Li, Y. Wang, Y. Chen, F. Cheng, D. Yang, G. Xie, and H. Yi, “Critical Influence of FeAl and α -Fe Phases in Coating Layers on Resistance Spot Weldability of Al–Si Coated Press–Hardening Steels,” *Journal of Materials Research and Technology*, vol. 41, pp. 4015–4030, Mar. 2026, doi: 10.1016/j.jmrt.2026.02.054.
- [6] S. Wang, Z. Yuan, Y. Meng, and B. Ge, “Failure Mechanisms of Intermetallic Compounds in Aluminum–Steel Resistance Spot Welds Utilizing Advanced Electron Microscopy Techniques,” *Journal of Materials Research and Technology*, vol. 35, pp. 5216–5221, Mar. 2025, doi: 10.1016/j.jmrt.2025.02.178.
- [7] L. Shi, J. Kang, X. Chen, A. S. Haselhuhn, D. R. Sigler, and B. E. Carlson, “Determination of Fracture Modes in Novel Aluminum–Steel Dissimilar Resistance Spot Welds,” *Procedia Structural Integrity*, vol. 17, pp. 355–362, 2019, doi: 10.1016/j.prostr.2019.08.047.
- [8] Y. G. Kim, B. J. Jo, J. S. Kim, and I. J. Kim, “A Study on Dissimilar Welding of Aluminum Alloy and Advanced High Strength Steel by Spot Welding Process,” *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, vol. 18, no. 1, pp. 121–126, Jan. 2017, doi: 10.1007/s12541-017-0015-6.
- [9] C. Qian, H. Ghassemi–Armaki, L. Shi, J. Kang, A. S. Haselhuhn, and B. E. Carlson, “Competing Fracture Modes in Al–Steel Resistance Spot Welded Structures: Experimental Evaluation and Numerical Prediction,” *International Journal of Impact Engineering*, vol. 185, p. 104838, Mar. 2024, doi: 10.1016/j.ijimpeng.2023.104838.
- [10] Y. Che, L. Wang, D. Sun, H. Li, and W. Geng, “Microstructures and Mechanical Properties of Resistance Spot–Welded Steel/Aluminum Alloy Joints with Process Tapes,” *Journal of Materials Engineering and Performance*, vol. 27, no. 11, pp. 5532–5544, Nov. 2018, doi: 10.1007/s11665-018-3595-0.
- [11] M. Fodorné Cserépi and Á. Meilinger, “The Effect of RSW Technological Parameters to the Properties of Aluminium/Steel Hybrid Joints,” *Multidiszciplináris Tudományok*, vol. 14, no. 3, pp. 202–210, 2024, doi: 10.35925/j.multi.2024.3.18.
- [12] W. Cai, Q. Chen, Y. Wang, S. Dong, and P. Luo, “Microstructural and Mechanical Characterization of Steel–DP780/Al–5052 Joints Formed Using Resistance Element Welding with Concealed Rivet Cover,” *Composites and Advanced Materials*, vol. 31, 2022, doi: 10.1177/26349833221101076.

- [13] S. M. Hong, S. Tashiro, H. S. Bang, and M. Tanaka, “A Study on the Effect of Current Waveform on Intermetallics Formation and the Weldability of Dissimilar Materials Welded Joints (AA5052 Alloy—GI Steel) in AC Pulse GMAW,” *Metals*, vol. 11, no. 4, p. 561, Apr. 2021, doi: 10.3390/met11040561.
- [14] M. Li, Y. Wang, W. Tao, and S. Yang, “A Novel Strategy for Realizing Reliable Welding of Aluminum–Steel,” *Welding Journal*, vol. 102, no. 11, pp. 293s–312s, Nov. 2023, doi: 10.29391/2023.102.022.
- [15] L. Chen and J. Liu, “Optimisation and Study of a Welding Process for Aluminium and Galvanised Steel Based on Resistance Welding,” in *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, vol. 238, no. 13, 2024, doi: 10.1177/09544062241226792.
- [16] B. Lara, R. Giorjao, H. Ghassemi–Armaki, and A. Ramirez, “Fe–Al Intermetallic Suppression of Dissimilar RSW Joints Using Stainless–Steel Interlayers,” *Science and Technology of Welding and Joining*, vol. 28, no. 6, pp. 461–467, 2023, doi: 10.1080/13621718.2023.2176046.
- [17] C1.1M/C1.1:2019, “Recommended Practices for Resistance Welding,” (2019).
- [18] M. Fodorné Cserépi and Á. Meilinger, “Effect of Intermetallic Compound Layer Size on Al/Steel Spot Weld Properties,” *Pollack Periodica*, vol. 21, no. 1, 2026, doi: 10.1556/606.2026.01507.
- [19] H. Okamoto, P. R. Subramanian, L. Kacpzak, and T. B. Massalski, *Binary Alloy Phase Diagram Fe–Al*, Materials Park, OH, USA: ASM International, 2001.
- [20] R. Hatano, T. Ogura, T. Matsuda, T. Sano, and A. Hirose, “Relationship Between Intermetallic Compound Layer Thickness with Deviation and Interfacial Strength for Dissimilar Joints of Aluminum Alloy and Stainless Steel,” *Materials Science and Engineering: A*, vol. 735, pp. 361–366, Sep. 2018, doi: 10.1016/j.msea.2018.08.065.
- [21] N. Chen, M. Wang, H. P. Wang, Z. Wan, and B. E. Carlson, “Microstructural and Mechanical Evolution of Al/Steel Interface with Fe_2Al_5 Growth in Resistance Spot Welding of Aluminum to Steel,” *Journal of Manufacturing Processes*, vol. 34, pp. 424–434, Aug. 2018, doi: 10.1016/j.jmapro.2018.06.024.