

การศึกษาอิทธิพลของตัวแปรในการเชื่อมความต้านทานแบบจุดที่มีต่อความต้านทาน
แรงดึงเฉือนระหว่างอะลูมิเนียมผสมกับเหล็กกล้าคาร์บอนผสมต่ำ

Investigation of the Influence of Resistance Spot Welding Parameters on
the Tensile Shear Strength of Dissimilar Joints between Aluminum Alloy
and Low-Carbon Steel

ศราวุธ จันทรกลาง¹, วรชัย มั่นศิลป์², คทาวุธ อรรคชวร³, วิชัย บุญโคง⁴, เกียรติศักดิ์ สมนึก⁵, ธีรวุฒิ เชื้อนแก้ว⁶,
ศักดิ์ดา วงศ์อัญญรินทร์⁷ และ ประจักษ์ จัตกุล^{8*}

^{1,8}สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์บูรณาการและเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก
วิทยาเขตจันทบุรี อำเภอเขาฉกรรจ์ จันทบุรี 22210

²แผนกวิชาช่างเชื่อมโลหะ วิทยาลัยเทคนิคจันทบุรี สถาบันการอาชีวศึกษาภาคตะวันออก อำเภอเมืองจันทบุรี
จังหวัดจันทบุรี 22000

³แผนกวิชาช่างเชื่อมและเทคโนโลยีโลหะ วิทยาลัยเทคนิคขอนแก่น สถาบันการอาชีวศึกษาภาคตะวันออกเฉียงเหนือ 3
อำเภอเมือง จังหวัดขอนแก่น 40000

^{4,5}แผนกวิชาช่างเทคนิคการผลิต วิทยาลัยเทคนิคสุรินทร์ สถาบันการอาชีวศึกษาภาคตะวันออกเฉียงเหนือ 5 อำเภอเมือง
จังหวัดสุรินทร์ 32000

⁶สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตขอนแก่น
อำเภอเมือง จังหวัดขอนแก่น 40000

⁷ภาควิชาเทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์ วิทยาลัยเทคนิคหาดใหญ่ สถาบันการอาชีวศึกษาภาคใต้ 3 อำเภอหาดใหญ่
จังหวัดสงขลา 90110

Sarawut Junklang¹, Worachai Mansilp², Katawoot Akkasorn³, Vichai Boonkong⁴, Kiatisak Somnuek⁵,
Teerawut Khuenkaew⁶, Sakda Wongadyarin⁷ and Prajak Jattakul^{8*}

^{1,8}Department of Industrial Engineering, Faculty of Integrated Engineering and Technology, Rajamangala
University of Technology Tawan-Ok, Chanthaburi Campus, Khao Khitchakut, Chanthaburi 22210

²Department of Welding, Chanthaburi Technical College, Institute of Vocational Education: Eastern Region,
Mueang Chanthaburi, Chanthaburi 22000

³Department of Welding & Metal Technology Division, Khonkaen Technical College, Institute of Vocational
Education: Northeastern Region 3, Mueang, Khon Kaen 40000

^{4,5}Department of Production Technology, Surin Technical College, Institute of Vocational Education:
Eastern Northeastern Region 5, Mueang, Surin 32000

⁶Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Isan,
Khon Kaen Campus, Mueang, Khon Kaen 40000

⁷Department of Electronics Technology, Hatyai Technical College, Institute of Vocational Education:
Southern Region 3, Hat Yai, Songkhla, 90110

*Corresponding author Email: Prajak_ja@rmutto.ac.th

(Received: June 7, 2025 / Revised: June 19, 2025 / Accepted: June 20, 2025)

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาอิทธิพลของตัวแปรในการเชื่อมความต้านทานแบบจุดที่มีต่อความต้านทานแรงดึงเฉือน พฤติกรรมการแตกหักและการก่อตัวของผลิตภัณฑ์ระหว่างอะลูมิเนียมผสม 5052 กับเหล็กกล้าคาร์บอนผสมต่ำ SPFH 780 โดยใช้เงื่อนไขที่เป็น เวลาในการปล่อยกระแสขาขึ้นและเวลาในการปล่อยกระแสขาลง 0 และ 15 Cycle โดยควบคุมแรงกดของอิเล็กโทรดเป็น 0.075 MPa และ 0.150 MPa จากผลการศึกษา พบว่าเงื่อนไขที่ส่งผลให้ชิ้นงานมีค่าความต้านทานแรงดึงเฉือนบริเวณรอยต่อของชิ้นงานสูงสุดคือ เวลาในการปล่อยกระแสขาขึ้นที่ 15 Cycle เวลาในการปล่อยกระแสขาลงที่ 0 Cycle และแรงกดของอิเล็กโทรด 0.075 MPa สำหรับการวิเคราะห์พฤติกรรมการแตกหักพบว่าชิ้นงานที่ให้ค่าความต้านทานแรงดึงเฉือนสูงสุดปรากฏพฤติกรรมการแตกหักแบบเหนียว (Ductile) และมีการก่อตัวของชั้นสารประกอบเชิงโลหะของเฟส $Al_{0.95}Mg_{0.05}$, $(Al_{0.5}Cr_{0.5})Fe$, $Cr_{0.03}Fe_{0.97}$ และ $Fe_{2.99}(Al_{0.441}Si_{0.559})$

คำสำคัญ: เวลาในการปล่อยกระแสขาขึ้น, เวลาในการปล่อยกระแสขาลง, แรงกดของอิเล็กโทรด, ความต้านทานแรงดึงเฉือน, การเชื่อมความต้านทานแบบจุด, พฤติกรรมการแตกหัก, ชั้นสารประกอบเชิงโลหะ

Abstract

This study aims to investigate the influence of resistance spot welding parameters on the tensile shear strength, fracture behavior, and crystal formation between 5052 aluminum alloy and SPFH 780 low-carbon alloy steel. The welding parameters included an upslope and downslope current time of 0 and 15 cycles, respectively, with electrode forces controlled at 0.075 MPa and 0.150 MPa. The results revealed that the condition yielding the highest tensile shear strength at the joint was an upslope current time of 15 cycles, a downslope current time of 0 cycles, and an electrode force of 0.075 MPa. Fracture behavior analysis indicated that the joint exhibiting the highest tensile shear strength demonstrated ductile fracture characteristics. Additionally, phase formation analysis revealed the presence of intermetallic compounds, including $Al_{0.95}Mg_{0.05}$, $(Al_{0.5}Cr_{0.5})Fe$, $Cr_{0.03}Fe_{0.97}$ และ $Fe_{2.99}(Al_{0.441}Si_{0.559})$

Keywords: Up slope, Down slope, Electrode force, Tensile shear force, Resistance spot weld, Fracture Behavior, Intermetallic Compound

1. บทนำ

ในปัจจุบันอุตสาหกรรมยานยนต์เป็นหนึ่งในอุตสาหกรรมที่มีความสำคัญเป็นอย่างมาก และเพื่อให้เป็นไปตามข้อกำหนดของการปล่อยก๊าซเรือนกระจก ซึ่งรวมถึงเทคโนโลยีที่ลดการใช้พลังงานของรถยนต์และการปล่อย CO_2 และนำไปสู่เทคโนโลยีที่เกี่ยวข้องกับการผลิตส่วนประกอบของโครงสร้างตัวถังรถยนต์ที่ผลิตจากวัสดุผสมที่มีความแข็งแรงสูงและน้ำหนักเบา เพื่อตอบสนองความต้องการของลูกค้าและเพื่อลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจก ดังนั้นผู้ผลิตในภาคอุตสาหกรรมยานยนต์จึงพยายามลดน้ำหนักของรถยนต์ด้วยการออกแบบตัวถังของรถยนต์ให้น้ำหนักที่เบา โดยการใช้ตัวถังรถแบบผสมที่ยังคงความแข็งแรงและการประหยัดต้นทุนของเหล็กเข้ากับวัสดุที่มีน้ำหนักเบา เช่น อะลูมิเนียมผสม ดังนั้นการเลือกใช้วัสดุในการใช้งานที่เหมาะสม ผู้ผลิตสามารถที่จะหาค่าที่เหมาะสมทั้งในเรื่องของน้ำหนักของโครงสร้างตัวถังและต้นทุนในการผลิต โดยจะต้องให้เกิดสมดุลกันระหว่างราคาและประสิทธิภาพในด้านความปลอดภัยที่เพิ่มสูงขึ้นกว่าเดิม จึงจะได้รับการยอมรับว่าเป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพในการลดน้ำหนักของรถยนต์ได้ [1-3]

ในช่วงหลายปีที่ผ่านมา อะลูมิเนียมผสม 5052 นั้นได้รับความสนใจเป็นอย่างมากในอุตสาหกรรมยานยนต์และการบินโดยใช้เป็นส่วนหนึ่งของโครงสร้างตัวถังรถยนต์ ส่วนปิดคลุม และแอสซีของตัวรถยนต์ เป็นต้น เนื่องจากการที่อะลูมิเนียมผสม

5052 นั้นน้ำหนักเบา โดยอะลูมิเนียมผสม 5052 จะเบากว่าเหล็กแบบเดิมถึง 3 เท่า ซึ่งน้ำหนักเบาช่วยให้ยานยนต์มีอัตรา การประหยัดเชื้อเพลิงที่ดีกว่าเดิม สามารถขึ้นรูปได้ดีเยี่ยม ดูดซับแรงปะทะได้มากกว่าเหล็กหรือทนต่อการชนได้ดี [4-6]

ในกระบวนการผลิตตัวถังรถยนต์จะมีกระบวนการเชื่อมต่อวัสดุที่เป็นโลหะแผ่นที่มีรอยต่อแบบเกยเข้าด้วยกันอยู่ หลายวิธีคือ การเชื่อมอาร์กไฟฟ้า การเชื่อมต้านทานและการเชื่อมด้วยแรงเสียดทาน ในบรรดาวิธีการเชื่อมต่อโลหะเหล่านี้ การเชื่อมต้านทานแบบจุดเป็นกระบวนการเชื่อมที่มีความสำคัญมากวิธีหนึ่ง และถูกใช้อย่างแพร่หลาย เนื่องจากว่าเป็น กระบวนการเชื่อมที่ให้อายุการใช้งานที่ยาวนานและใช้พลังงานต่ำ และใช้แรงงานง่าย จึงเป็นกระบวนการเชื่อมที่เหมาะสมสำหรับการผลิต จำนวนมาก อย่างไรก็ตามการเชื่อมระหว่างอะลูมิเนียมผสม 5052 และเหล็กกล้าก็ยังมีความยากกว่าการเชื่อมระหว่าง ชิ้นงานโลหะชนิดเดียวกันอันเนื่องมาจากความแตกต่างของสมบัติวัสดุ การขยายตัวเนื่องจากความร้อนของวัสดุส่งผลให้เกิดรู พุนขนาดเล็กบริเวณรอยต่อ (Pores) และการก่อตัวของชั้นสารประกอบเชิงโลหะซึ่งจะส่งผลต่อความแข็งแรงหรือคุณภาพ ของรอยต่อได้ [7-10]

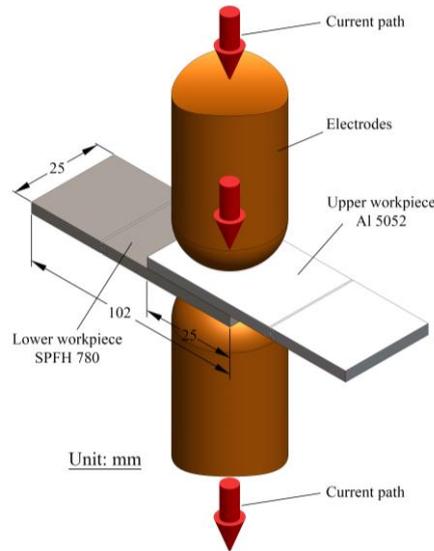
จากการศึกษาที่ผ่านมาได้มีการนำเสนอแนวทางในการปรับปรุงรอยเชื่อมในหลายรูปแบบเช่น การใช้ค่ากระแสไฟฟ้าใน การเชื่อมที่สูงและใช้ระยะเวลาในการเชื่อมที่ต่ำเพื่อลดการเกิดสารประกอบเชิงโลหะ แต่ก็อาจส่งผลต่ออายุการใช้งานของ อิเล็กโทรดให้สั้นลงรวมทั้งเกิดตำหนิที่รอยเชื่อมได้ง่าย เนื่องจากกระแสไฟฟ้าการเชื่อมที่สูงนั้นส่งผลให้เกิดความร้อนที่สูงทำให้เกิด การสึกหรอของอิเล็กโทรดได้ง่าย [10-13] และนอกจากนี้ยังมีการใช้แผ่นเหล็กกล้าไปทำการชุบเคลือบผิวด้วยสังกะสี ซึ่ง จะช่วยลดการกัดตัวของชั้นสารประกอบเชิงโลหะได้ แต่จะส่งผลให้เกิดรูพุนบริเวณรอยต่อ เนื่องจากเกิดการระเหยของ สังกะสีที่เคลือบบนพื้นผิวของแผ่นเหล็กกล้าในระหว่างการได้รับความร้อน [14] และอีกวิธีหนึ่งก็คือการลดการเกิด สารประกอบเชิงโลหะโดยการใช้โลหะเติมในกระบวนการเชื่อม แต่อย่างไรก็ตามอาจจะเป็นการเพิ่มขึ้นต้นทุนใน กระบวนการผลิตซึ่งส่งผลต่อรอบเวลาการผลิตได้ [15]

ซึ่งจากการศึกษาวิจัยที่เกี่ยวข้องพบว่า มีเฉพาะการศึกษาเพื่อหาเงื่อนไขที่เหมาะสมในการเชื่อมความต้านทาน กับวัสดุชนิดเดียวกันและต่างชนิดกันโดยใช้ตัวแปรกระแสไฟฟ้าแบบพัลส์เดี่ยวและพัลส์คู่ เวลาในการปล่อยกระแสไฟฟ้า แรง กดของอิเล็กโทรด ชนิดและขนาดของอิเล็กโทรด ที่มีอิทธิพลต่อค่าความต้านทานแรงดึงเฉือนโดยใช้วิธีการออกแบบการ ทดลองด้วยวิธีต่างๆ แต่ยังคงขาดการศึกษาและวิจัยที่เกี่ยวข้องกับเวลาในการปล่อยกระแสขาขึ้น (Up Slope) เวลาในการปล่อย กระแสขาลง (Down Slope) และแรงกดของอิเล็กโทรด (Electrode Force) ในกระบวนการเชื่อมความต้านทานทั้งกับวัสดุ ชนิดเดียวกันและต่างชนิดกันที่มีอิทธิพลต่อค่าความต้านทานแรงดึงเฉือน พฤติกรรมการแตกหัก และการก่อตัวของโครงสร้าง ผลึกบริเวณรอยต่อ ดังนั้นในการศึกษานี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาเวลาในการปล่อยกระแสขาขึ้นและขาลงของการเชื่อม ความต้านทานที่มีผลต่อพฤติกรรมการแตกหักและการก่อตัวของโครงสร้างผลึกบริเวณรอยต่อระหว่างอะลูมิเนียมผสม 5052 กับเหล็กกล้าคาร์บอนผสมต่ำ SPFH780 เพื่อเป็นแนวทางในการประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมการผลิตชิ้นส่วนยานยนต์และ อุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้องได้

2. วิธีการดำเนินงานวิจัย

2.1 การเตรียมโลหะพื้น

การเตรียมโลหะพื้นสำหรับศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิในการเชื่อมความต้านทานระหว่างอะลูมิเนียมผสม 5052 กับ เหล็กกล้าคาร์บอนผสมต่ำ SPFH 780 จะทำการเตรียมชิ้นงานตามมาตรฐานในการเชื่อมความต้านทาน AWS C1.1M/C1.1:2019 [16] โดยอะลูมิเนียมผสม 5052 ที่ใช้ในการศึกษานี้มีความหนา 1.50 mm และเหล็กกล้าคาร์บอนผสมต่ำ SPFH 780 หนา 1.60 mm ชิ้นงานถูกเตรียมโดยการตัดให้ได้ขนาดความกว้าง 25 mm และความยาว 102 mm โดยการจัด วางการเชื่อมความต้านทาน ขนาดของชิ้นงานทดสอบแสดงดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 การเชื่อมความต้านทานโดยการกดของอิเล็กโทรดบนชิ้นงานตามมาตรฐาน AWS [17]

2.2 วิธีการทดลอง

ในการศึกษานี้ใช้ปัจจัยในการทดลอง 3 ปัจจัย และแต่ละปัจจัยมี 2 ระดับ ดังนั้นจึงมีจำนวนการทดลองเท่ากับ 8 การทดลอง ซึ่งในการเชื่อมความต้านทานนี้มีเงื่อนไขหรือตัวแปรในการเชื่อมความต้านทาน ในการทดลองครั้งนี้ มีปัจจัยที่สามารถกำหนดและปรับค่าได้จำนวน 3 ตัวแปรด้วยกัน ได้แก่ (1) Up Slope: คือ เวลาในการปล่อยกระแสขาขึ้น (2) Down Slope: คือ เวลาในการปล่อยกระแสขาลง และ (3) Electrode Force: คือ แรงกดของอิเล็กโทรด ซึ่งตัวแปรและระดับในการเชื่อมความต้านทานที่ใช้ในการทดลองนี้ได้แสดงในตารางที่ 1

สำหรับในการศึกษานี้ เหตุผลที่ได้ทำการเลือกใช้ตัวแปรในการทดลองจำนวน 3 ตัว ซึ่งได้แก่ เวลาในการปล่อยกระแสขาขึ้น (Upslope) เวลาในการปล่อยกระแสขาลง (Downslope) และแรงกดของอิเล็กโทรด (Electrode Force) เนื่องจากเป็นปัจจัยที่สามารถควบคุมการเพิ่มและลดของกระแสไฟฟ้าในช่วงต้นและปลายของกระบวนการเชื่อมได้อย่างละเอียด ซึ่งส่งผลต่อการเกิดความร้อน การหลอมเหลว และการก่อตัวของสารประกอบเชิงโลหะบริเวณรอยต่อได้โดยตรง แม้ว่าปัจจัยหลักอื่น เช่น กระแสไฟฟ้า เวลาเชื่อม หรือขนาดอิเล็กโทรด จะมีการศึกษากันอย่างแพร่หลายในงานวิจัยก่อนหน้านี้แล้ว แต่ปัจจัยด้านการควบคุมรูปแบบของกระแสในลักษณะขึ้น-ลงยังมีการศึกษาน้อย ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นไปที่การศึกษามลกระทบของปัจจัยทั้งสามต่อความแข็งแรง พฤติกรรมการแตกหัก และการก่อตัวของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ เพื่อให้ได้ข้อมูลเชิงลึกที่สามารถประยุกต์ใช้ในกระบวนการผลิตจริงได้อย่างมีประสิทธิภาพ

ตารางที่ 1 ระดับและปัจจัยที่ใช้ในการทดลอง

ปัจจัย	ระดับ	
	Low	High
เวลาในการปล่อยกระแสขาขึ้น: Up Slope (Cycle)	0	15
เวลาในการปล่อยกระแสขาลง: Down Slope (Cycle)	0	15
แรงกดของอิเล็กโทรด: Electrode Force (MPa)	0.075	0.15

2.3 การเชื่อมความต้านทาน

ก่อนที่จะทำการเชื่อมความต้านทาน นำโลหะพื้นหรือชิ้นงานล้างทำความสะอาดพื้นผิวของชิ้นงานด้วยอะซิโตนเพื่อขจัดคราบน้ำมันที่ผิวและรอให้แห้ง จากนั้นทำการวางและเตรียมชิ้นงานทดสอบประกอบกับตัวจับยึดชิ้นงานดังแสดงในรูปที่ 1

แล้วทำการเชื่อมด้วยเครื่องเชื่อมความต้านทาน PANASONIC รุ่น YR500-CM2 ขนาดกำลัง 50 KVA 50 Hz โดยใช้อิเล็กโทรดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 16 mm ที่มีลักษณะโค้งมนและตัดตรงบริเวณปลายอิเล็กโทรด โดยอิเล็กโทรดทำจากวัสดุ CuCrZr ใช้กระแสไฟฟ้าในการเชื่อมที่ 11,000 A และเวลาในการปล่อยกระแสไฟฟ้าปกติ 7 Cycle

2.4 การทดสอบความต้านทานแรงดึงเหนือบริเวณรอยต่อ

สำหรับขั้นตอนการทดสอบความต้านทานแรงดึงเหนือบริเวณรอยต่อ จะนำชิ้นงานที่ผ่านการเชื่อมความต้านทาน มาทำการทดสอบความต้านทานแรงดึงเหนือบริเวณรอยต่อ โดยใช้เครื่องทดสอบเอนกประสงค์ยี่ห้อ SHIMADZU รุ่น AG-X 100 kN ที่ความเร็ว 2.0 mm/min

2.5 การวิเคราะห์พฤติกรรมการแตกหักและชั้นสารประกอบบริเวณรอยต่อ

สำหรับขั้นตอนการวิเคราะห์พฤติกรรมการแตกหักบริเวณรอยต่อนั้น จะนำชิ้นงานที่ผ่านการทดสอบความต้านทานแรงดึงเหนือบริเวณรอยต่อที่ได้ค่าความต้านทานแรงดึงเหนือบริเวณรอยต่อ สูงสุด กลางและต่ำสุดมาทำการวิเคราะห์พฤติกรรมการแตกหักบริเวณรอยต่อ โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy: SEM) ยี่ห้อ JEOL รุ่น JSM-6510LV และวิเคราะห์การกระจายตัวของธาตุบริเวณรอยแตกหักด้วย Energy Dispersive X-Ray Spectrometry (EDS) ยี่ห้อ Oxford รุ่น X-MAX และทำการตรวจสอบชั้นสารประกอบเชิงโลหะหรือเฟสที่เกิดบริเวณรอยแตกหักของชิ้นงานที่ได้ค่าความต้านทานแรงดึงเหนือบริเวณรอยต่อ และชิ้นงานที่ได้ค่าความต้านทานแรงดึงเหนือบริเวณรอยต่อต่ำสุด โดยจะใช้การวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-Ray Diffractometer) ในการศึกษาชั้นสารประกอบเชิงโลหะหรือโครงสร้างผลึกบริเวณพื้นผิวที่เกิดการแตกหัก ด้วยเครื่องตรวจสอบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ ยี่ห้อ BRUKER รุ่น D8-Discover ในการตรวจสอบใช้ความต่างศักย์ 40 kV กระแสไฟฟ้า 40 mA ความเร็วในการสแกน 0.2 min/0.02° กับมุมการเลี้ยวเบน 2θ ในช่วงความยาวคลื่น 25-75°

3. ผลการวิจัย

3.1 ผลจากการทดลองเชื่อมความต้านทาน

จากการทดลองเชื่อมความต้านทานชิ้นงาน หลังจากนั้นได้นำชิ้นงานมาทำการทดสอบความแข็งแรงบริเวณรอยต่อ โดยการทดสอบความต้านทานแรงดึงเหนือบริเวณรอยต่อและนำข้อมูลที่ได้จากการทดสอบมาทำการวิเคราะห์โดยทำการเลือกเงื่อนไขที่ให้ค่าความต้านทานแรงดึงเหนือบริเวณรอยต่อ สูงสุด กลางและต่ำสุดมาทำการวิเคราะห์พฤติกรรมการแตกหักบริเวณรอยต่อและทำการตรวจสอบชั้นสารประกอบเชิงโลหะหรือเฟสที่เกิดบริเวณรอยแตกหักของชิ้นงาน โดยผลการทดสอบค่าความต้านทานแรงดึงเหนือบริเวณรอยต่อแสดงดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ปัจจัยที่ได้จากการทดสอบค่าความต้านทานแรงดึงเหนือบริเวณรอยต่อ

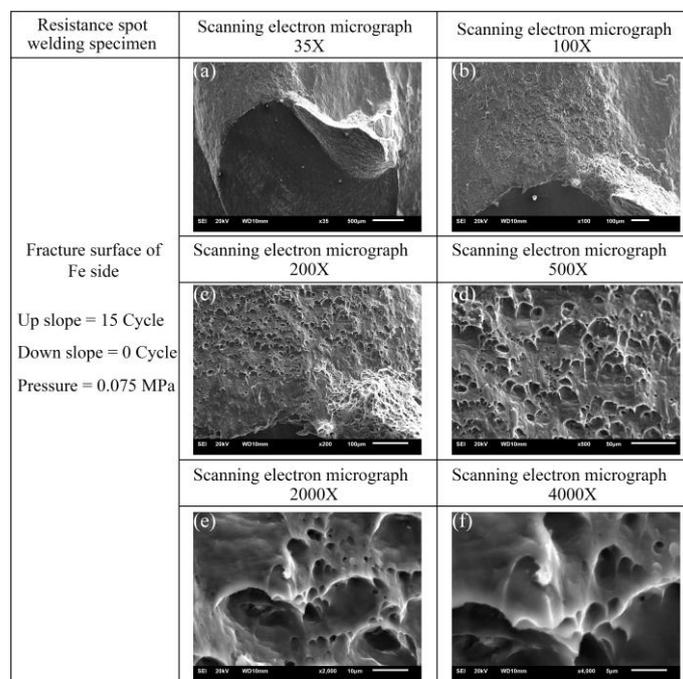
Samples No.	Up Slope (Cycle)	Down Slope (Cycle)	Electrode Force (MPa)	Average Tensile Shear Force (N)
1	0	0	0.075	2712.06
2	0	0	0.150	2367.40
3	0	15	0.075	2325.54
4	0	15	0.150	2833.18
5	7.5	7.5	0.115	2369.90
6	7.5	7.5	0.115	2424.84
7	7.5	7.5	0.115	2613.39
8	15	0	0.075	3939.98

9	15	0	0.150	3266.13
10	15	15	0.075	3263.89
11	15	15	0.150	1727.76

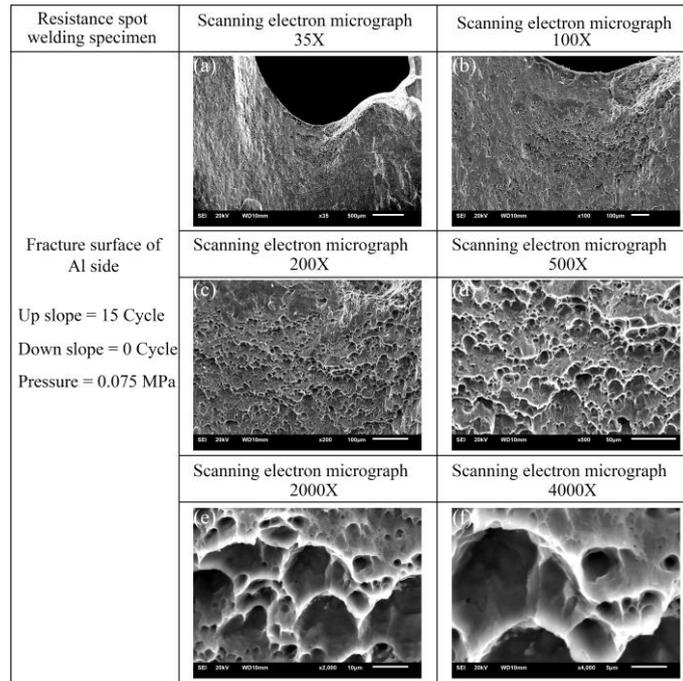
3.2 พฤติกรรมการแตกหักและการก่อตัวของชั้นสารประกอบเชิงโลหะบริเวณรอยต่อ

ในการวิเคราะห์พฤติกรรมการแตกหักของรอยต่อในการเชื่อมความต้านที่ใช้เงื่อนไขหรือสภาวะในการเชื่อมที่แตกต่างกัน โดยในการศึกษานี้ได้ทำการคัดเลือกสภาวะการเชื่อมที่ส่งผลให้ชิ้นงานมีความสามารถในการต้านแรงดึงเฉือนที่ระดับสูงที่สุด ที่ Up Slope = 15 Cycle Down Slope = 0 Cycle และ Electrode Force = 0.075 MPa สำหรับสภาวะการเชื่อมที่ส่งผลให้ชิ้นงานมีความสามารถในการต้านแรงดึงเฉือนที่ระดับค่ากลางที่ Up Slope = 0 Cycle Down Slope = 0 Cycle และ Electrode Force = 0.075 MPa สำหรับสภาวะการเชื่อมที่ส่งผลให้ชิ้นงานมีความสามารถในการต้านแรงดึงเฉือนที่ระดับต่ำสุดนั้นจะอยู่ที่ Up Slope = 15 Cycle Down Slope = 15 Cycle และ Electrode Force = 0.15 MPa ไปทำการวิเคราะห์พฤติกรรมการแตกหักและการกระจายตัวของธาตุ รวมทั้งวิเคราะห์การก่อตัวของชั้นสารประกอบบริเวณรอยต่อของชิ้นงานที่เกิดการแตกหัก (เฉพาะเงื่อนไขที่ให้ค่าความต้านทานแรงดึงเฉือนสูงสุดและต่ำสุด)

เมื่อนำชิ้นงานที่ใช้สภาวะการเชื่อมที่ส่งผลให้ชิ้นงานมีความสามารถในการต้านแรงดึงเฉือนเฉลี่ยสูงสุดที่ 3939.98 N ไปทำการวิเคราะห์พฤติกรรมการแตกหัก พบรอยแตกหักที่มี Dimple (ลักษณะบวมเล็ก ๆ ที่เกิดจากการยึดตัวของโลหะในระหว่างการแตกหักแบบเหนียว) บนพื้นผิวของการแตกหักและมีการยึดตัวทั้งสองด้าน แสดงถึงการแตกหักแบบเหนียว ดังแสดงในรูปที่ 2 (a-f) ตามลำดับ ซึ่งเป็นพฤติกรรมการแตกหักแบบเหนียวของชิ้นงานด้านเหล็กกล้าคาร์บอนผสมต่ำ SPFH780 และด้านอะลูมิเนียมผสม 5052 โดยการเกิดแตกหักแบบเหนียวนี้เป็นข้อดีของคุณสมบัติเชิงกลของรอยต่อ รอยต่อที่คืนขึ้นเมื่อเกิดการแตกหักจะเกิดการแตกหักแบบเหนียวซึ่งจะมีความต้านทานต่อความล้าได้ดี แต่ถ้าเกิดการแตกหักแบบเปราะรอยแตกที่เกิดขึ้นจะขยายตัวไปได้ง่าย [18-19] นำไปสู่การลดลงของความต้านทานต่อความล้าของรอยต่อ

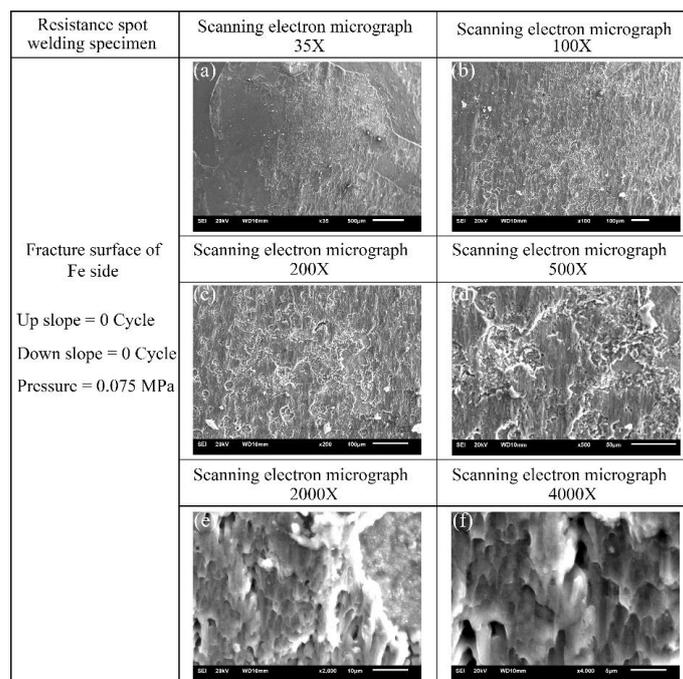


รูปที่ 2 พฤติกรรมการแตกหักด้านเหล็กกล้าคาร์บอนผสมต่ำภายใต้กำลังขยายต่างๆ ของชิ้นงานที่ให้ค่าความต้านทานแรงดึงเฉือนสูงสุด: (a): 35 เท่า (b): 100 เท่า (c): 200 เท่า (d): 500 เท่า (e): 2000 เท่า และ (f): 4000 เท่า

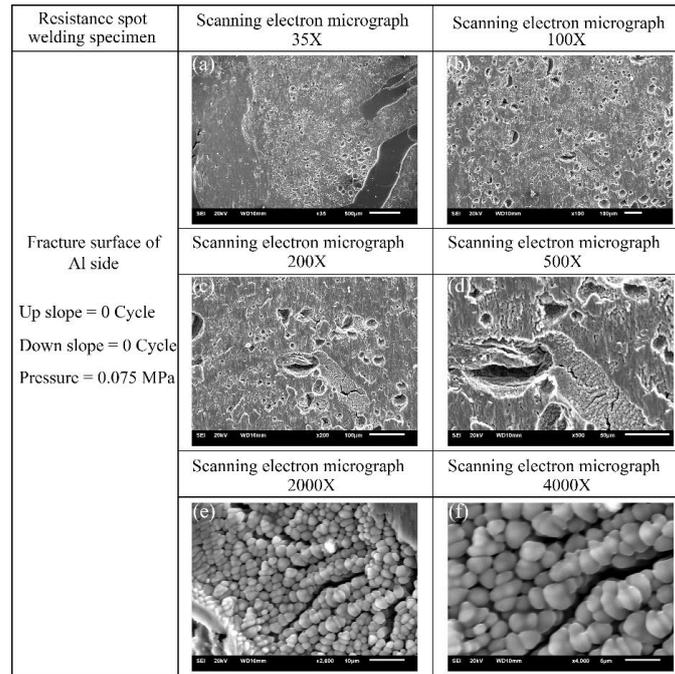


รูปที่ 3 พฤติกรรมการแตกหักด้านอะลูมิเนียมผสมภายใต้กำลังขยายต่าง ๆ ของชิ้นงานที่ให้ค่าความต้านทานแรงดึงเฉือนสูงสุด: (a): 35 เท่า (b): 100 เท่า (c): 200 เท่า (d): 500 เท่า (e): 2000 เท่า และ (f): 4000 เท่า

ในการเชื่อมชิ้นงานที่ให้ค่าความต้านทานแรงดึงเฉือนระดับค่ากลางสำหรับการศึกษาอยู่ที่ 2712.06 N เมื่อทำการวิเคราะห์พฤติกรรมการแตกหัก พบว่าเกิดการแตกหักบริเวณรอยต่อ (Interface) ดังแสดงในรูปที่ 4 (a-f) และรูปที่ 5 (a-f) ตามลำดับ และพบว่ามีกรเริ่มปรากฏรอยแตกหักที่มี ลักษณะปุ่ม เล็กน้อยบนพื้นผิวของการแตกหัก ดังแสดงในรูปที่ 4 (f) ซึ่งแสดงถึงรอยต่อนั้นเริ่มมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้นบริเวณรอยต่อเมื่อใช้เงื่อนไขในการเชื่อมที่เปลี่ยนแปลงไป

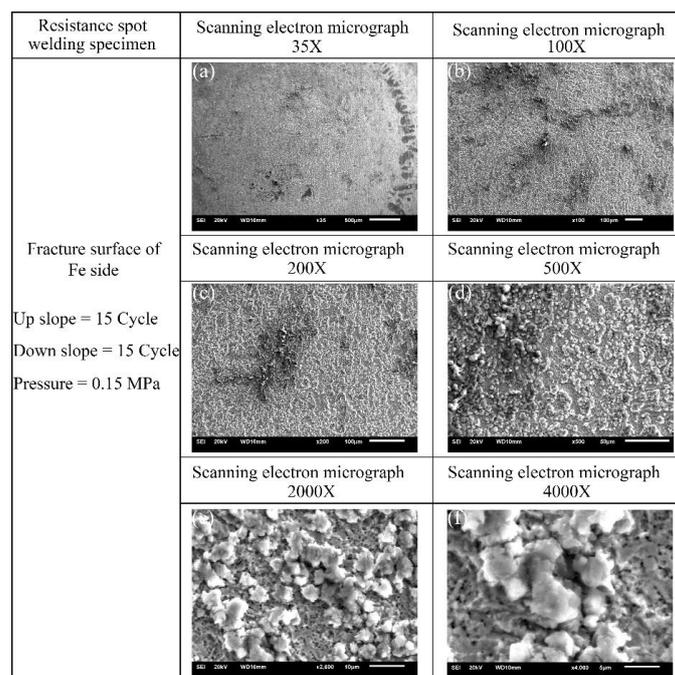


รูปที่ 4 พฤติกรรมการแตกหักด้านเหล็กกล้าคาร์บอนผสมต่ำที่แตกต่างกันของชิ้นงานที่ให้ค่าความต้านทานแรงดึงเฉือนระดับค่ากลาง: (a): 35 เท่า (b): 100 เท่า (c): 200 เท่า (d): 500 เท่า (e): 2000 เท่า และ (f): 4000 เท่า

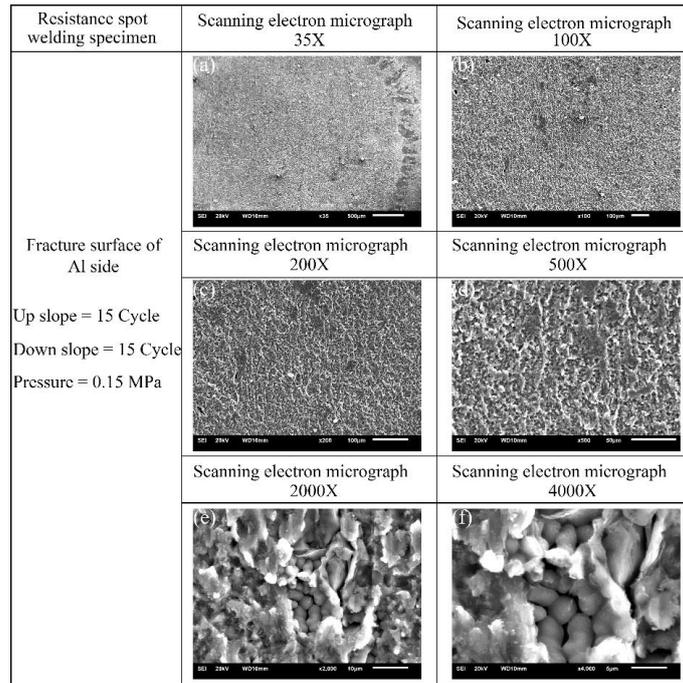


รูปที่ 5 พฤติกรรมการแตกหักด้านอะลูมิเนียมผสมที่แตกต่างกันของชิ้นงานที่ให้ค่าความต้านทานแรงดึงเฉือนระดับค่ากลาง: (a): 35 เท่า (b): 100 เท่า (c): 200 เท่า (d): 500 เท่า (e): 2000 เท่า และ (f): 4000 เท่า

ในทางตรงกันข้ามชิ้นงานที่ใช้เงื่อนไขในการเชื่อมที่ให้ค่าความต้านทานแรงดึงเฉือนเฉลี่ยต่ำสุดที่ 1727.76 N เมื่อทำการวิเคราะห์พฤติกรรมการแตกหัก พบว่าเกิดการแตกหักบริเวณรอยต่อ (Interface) และไม่ปรากฏรอยแตกหักที่มีลักษณะบวมเล็ก ๆ บนพื้นผิวของการแตกหักซึ่งแสดงถึงรอยต่อนั้นมีความแข็งแรงน้อย บ่งชี้ว่าเกิดการแตกหักแบบเปราะเกิดขึ้นบริเวณรอยต่อ ส่งผลให้รอยแตกที่เกิดขึ้นจะขยายตัวไปได้ง่าย นำไปสู่การลดลงของค่าความต้านทานแรงดึงเฉือนและความต้านทานต่อความล้าของรอยต่อ ดังแสดงในรูปที่ 6 และรูปที่ 7 ตามลำดับ

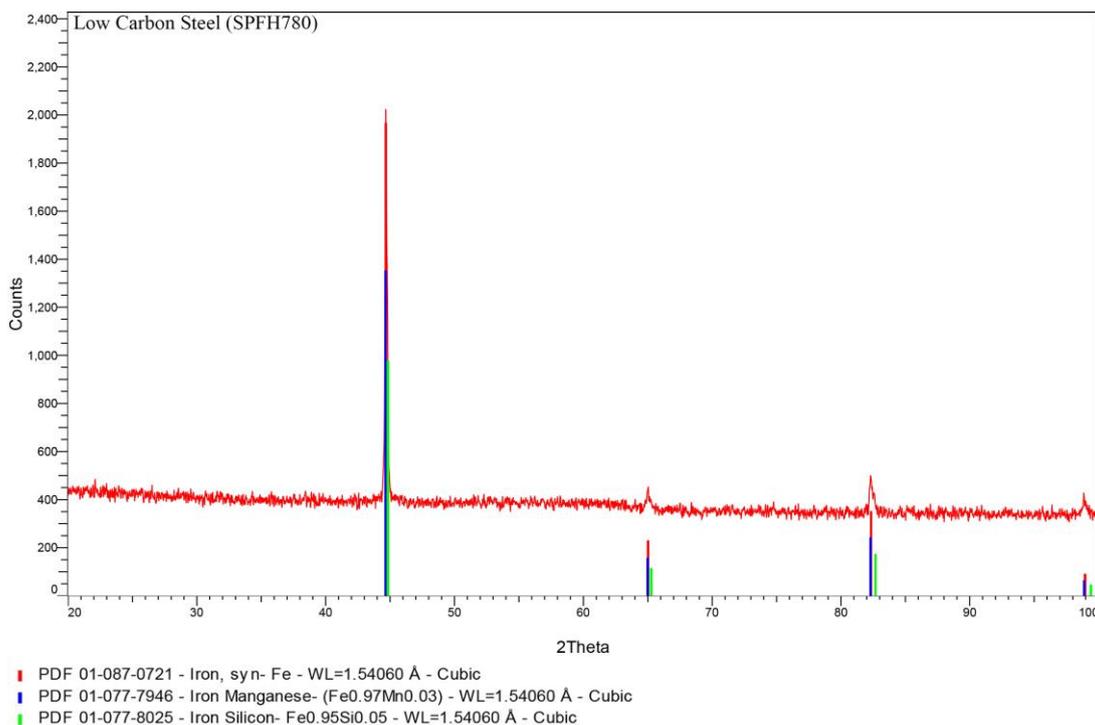


รูปที่ 6 พฤติกรรมการแตกหักของชิ้นงานด้านเหล็กกล้าคาร์บอนผสมต่ำที่แตกต่างกันของชิ้นงานที่ให้ค่าความต้านทานแรงดึงเฉือนต่ำสุด: (a): 35 เท่า (b): 100 เท่า (c): 200 เท่า (d): 500 เท่า (e): 2000 เท่า และ (f): 4000 เท่า

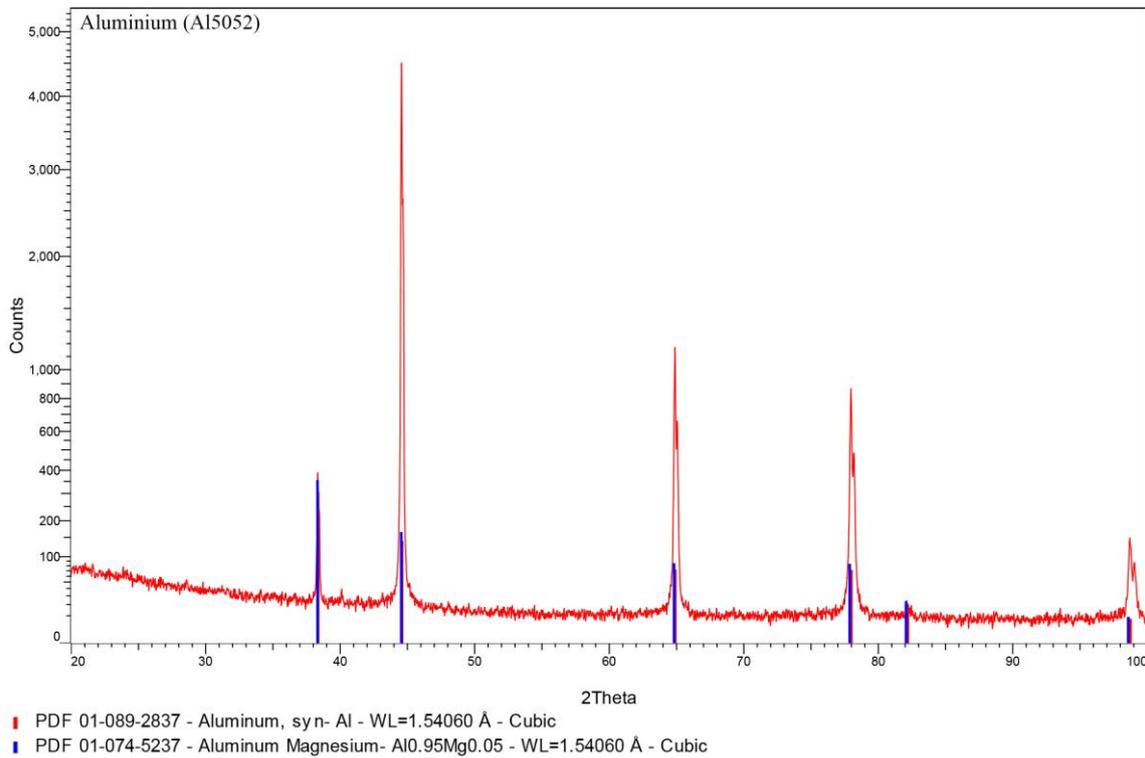


รูปที่ 7 พฤติกรรมการแตกหักของชิ้นงานด้านอะลูมิเนียมผสมภายใต้กำลังขยายต่าง ๆ ของชิ้นงานที่ให้ค่าความต้านทานแรงดึงเฉลี่ยต่ำสุด: (a): 35 เท่า (b): 100 เท่า (c): 200 เท่า (d): 500 เท่า (e): 2000 เท่า และ (f): 4000 เท่า

ก่อนทำการวิเคราะห์ชิ้นสารประกอบเชิงโลหะที่รอยต่อในการเชื่อมความต้านทานสำหรับในการศึกษานี้ ได้ทำการวิเคราะห์ชิ้นงานก่อนทำการเชื่อมสำหรับเหล็กกล้าคาร์บอนผสมต่ำและอะลูมิเนียมผสม 5052 แสดงดังรูปที่ 8 และรูปที่ 9 ตามลำดับ จากการวิเคราะห์พบว่ามีการก่อตัวของเฟส Fe, Fe_{0.97}Mn_{0.03} และ Fe_{0.95}Si_{0.05} สำหรับเหล็กกล้าคาร์บอนผสมต่ำ และ Al_{0.95}Mg_{0.05} สำหรับอะลูมิเนียมผสม 5052

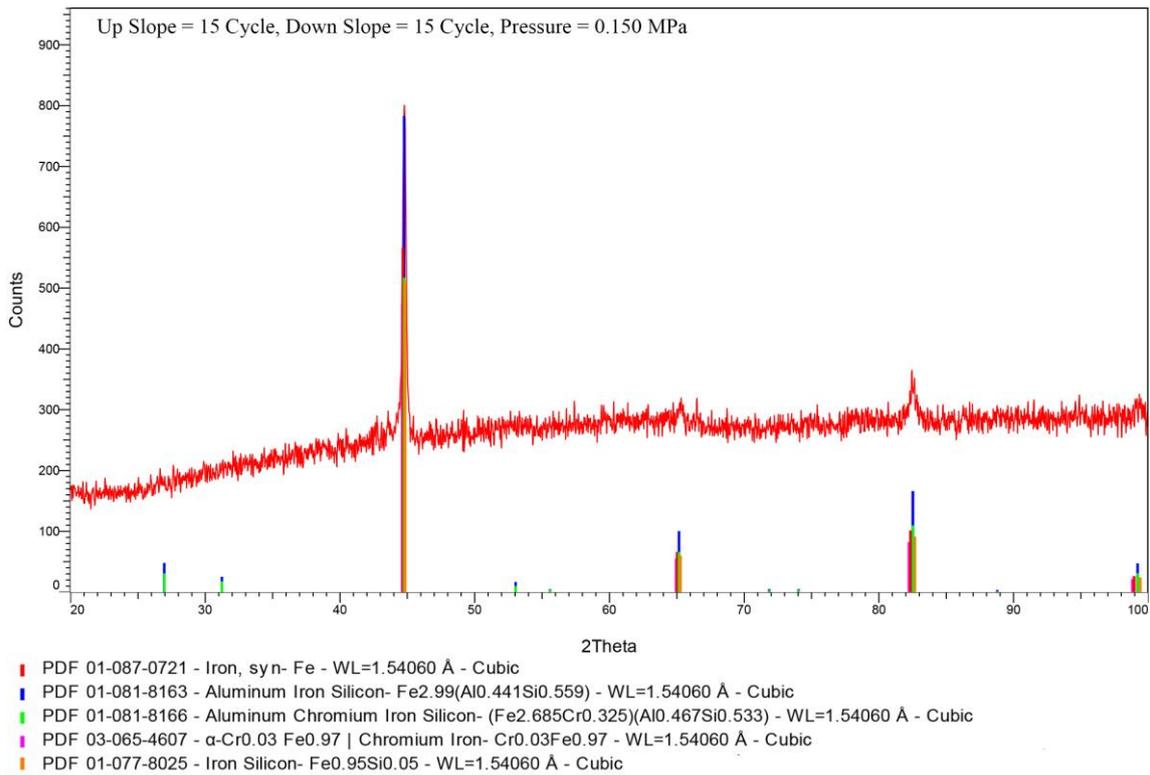


รูปที่ 8 การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของชิ้นสารประกอบที่รอยต่อของชิ้นงานเหล็กกล้าคาร์บอนผสมต่ำก่อนการเชื่อม

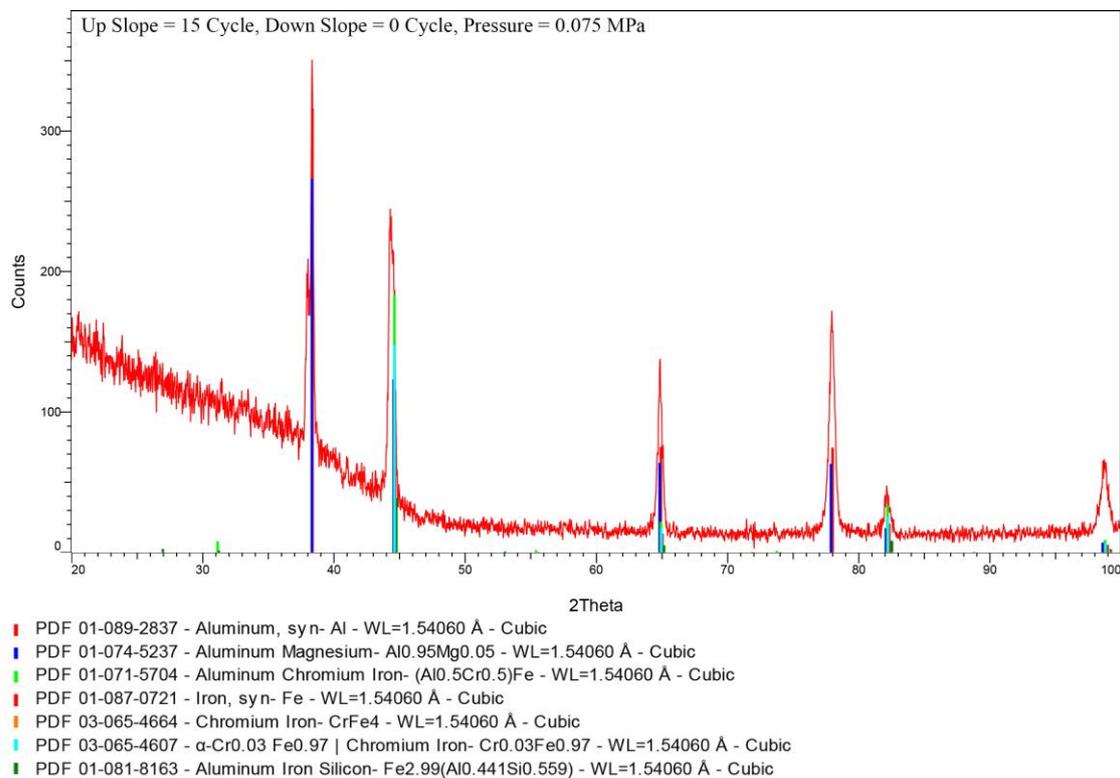


รูปที่ 9 การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของชั้นสารประกอบที่รอยต่อของชิ้นงานอะลูมิเนียมผสมก่อนการเชื่อม

จากการนำชิ้นงานไปทำการวิเคราะห์ชั้นสารประกอบเชิงโลหะที่รอยต่อในการเชื่อมความดันทาน สำหรับการศึกษา นี้จะทำการเลือกเฉพาะชิ้นงานที่ใช้เงื่อนไขที่ให้ค่าความดันทานแรงดึงเดือนสูงสุดและต่ำสุดคือ Up Slope = 15 Cycle Down Slope = 0 Cycle และ Electrode Force = 0.075 MPa และชิ้นงานที่ใช้เงื่อนไขที่ให้ค่าความดันทานแรงดึงเดือนต่ำสุดที่ Up slope = 15 Cycle Down Slope = 15 Cycle และ Electrode Force = 0.15 MPa ตามลำดับ จากไบนารี เฟสไดอะแกรม (Binary Phase Diagram) ของธาตุผสม Al-Fe พบว่ามีชั้นสารประกอบเชิงโลหะ Fe-Rich, Al-Rich, Fe₃Al, FeAl₂, Fe₂Al₅ และ FeAl₃ [19] ซึ่งจากผลการยืนยันเฟสที่เกิดขึ้นผ่านการวิเคราะห์ด้วย XRD นั้นพบว่ามีความสอดคล้องกัน โดยตำแหน่งที่ทำการวิเคราะห์ชั้นสารประกอบเชิงโลหะแสดงดังรูปที่ 10 และรูปที่ 11 ตามลำดับ พบว่าชั้นสารประกอบเชิงโลหะที่เกิดขึ้นมีโครงสร้างผลึกเป็นแบบ Cubic จากการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกด้วยวิธีการวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ ของการศึกษานี้พบว่าบริเวณที่เกิดจากการแตกหักของชิ้นงานที่ใช้เงื่อนไขในการเชื่อมที่ให้ค่าความดันทานแรงดึงเดือนสูงสุด นั้นปรากฏชั้นสารประกอบเชิงโลหะที่แตกต่างกันกับเงื่อนไขในการเชื่อมที่ให้ค่าความดันทานแรงดึงเดือนต่ำสุดก่ตัวขึ้นอยู่ สาม ชนิด ด้วยกัน คือ Aluminum Al, Aluminum Magnesium Al_{0.95}Mg_{0.05} และ Aluminum Chromium Iron, (Al_{0.5}Cr_{0.5})Fe โดยชั้นสารประกอบเชิงโลหะทั้งสามชนิดนี้มีโครงสร้างผลึกเป็นแบบ Cubic



รูปที่ 10 การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของชั้นสารประกอบที่รอยต่อของชั้นงานที่ผ่านการเชื่อมภายใต้สภาวะการเชื่อม ความดันทานแบบจุดที่ส่งผลให้เกิดค่าความแข็งแรงต่อแรงเฉือนในระดับต่ำสุด



รูปที่ 11 การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของชั้นสารประกอบที่รอยต่อของชั้นงานที่ผ่านการเชื่อมภายใต้สภาวะการเชื่อม ความดันทานแบบจุดที่ส่งผลให้เกิดค่าความแข็งแรงต่อแรงเฉือนในระดับสูงสุด

4. สรุป

จากการศึกษาการเชื่อมความต้านทานที่เงื่อนไขในการเชื่อมที่แตกต่างกันคือ เวลาในการปล่อยกระแสขาขึ้น เวลาในการปล่อยกระแสขาลงและแรงกดของอิเล็กโทรด และวิเคราะห์ตัวแปรหรือเงื่อนไขในการเชื่อมความต้านทานที่ให้ค่าความต้านทานแรงดึงเดือนบริเวณรอยต่อที่มีอิทธิพลความต้านทานแรงดึงเดือน พฤติกรรมการแตกหักและการก่อตัวของชั้นสารประกอบเชิงโลหะระหว่างอะลูมิเนียมผสมกับเหล็กกล้าคาร์บอนผสมต่ำ จากการศึกษาพบว่า ชิ้นงานที่ใช้เงื่อนไขเวลาในการปล่อยกระแสขาขึ้นที่ 15 Cycle เวลาในการปล่อยกระแสขาลงที่ 0 Cycle และแรงกดของอิเล็กโทรด 0.075 MPa ให้ค่าความต้านทานแรงดึงเดือนบริเวณรอยต่อสูงสุด สำหรับการวิเคราะห์พฤติกรรมการแตกหักพบว่าชิ้นงานที่ให้ค่าความต้านทานแรงดึงเดือนสูงสุดปรากฏพฤติกรรมการแตกหักแบบเหนียว และมีการก่อตัวของชั้นสารประกอบเชิงโลหะของเฟส $Al_{0.95}Mg_{0.05}$, $(Al_{0.5}Cr_{0.5})Fe$, $Cr_{0.03}Fe_{0.97}$ และ $Fe_{2.99}(Al_{0.441}Si_{0.559})$ ในทางกลับกันชิ้นงานที่ให้ค่าแรงดึงเดือนต่ำสุดจะปรากฏพฤติกรรมการแตกหักเปราะ และมีการก่อตัวของชั้นสารประกอบเชิงโลหะของเฟส $Fe_{0.95}Si_{0.05}$, $Fe_{2.99}(Al_{0.441}Si_{0.559})$ และ $Cr_{0.03}Fe_{0.97}$

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณสาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์บูรณาการและเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก วิทยาเขตจันทบุรี ที่ให้การสนับสนุนการวิจัยนี้

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Y.G. Yang, Z. Su, W. Zuo, D. Ni, Y. Hu, Z. Wei and Z. Mi, "Effects of resistance spot welding parameters on microstructure and mechanical properties of the dissimilar welded joint of quenching and partitioning steels," *Materials Research Express* (2024). <https://doi.org/10.1088/2053-1591/ad791e>
- [2] M. Li, W. Tao, J. Zhang, Y. Wang and S. Yang, "Hybrid resistance-laser spot welding of aluminum to steel dissimilar materials: Microstructure and mechanical properties," *Materials & Desi*, vol.221, (2022). <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2022.111022>
- [3] T. Das, R. Das and J. Paul, "Resistance Spot Welding of Dissimilar AISI-1008 steel/Al-1100 Alloy Lap Joints with A Graphene Interlayer", *Journal of Manufacturing Processes*, vol.53, (2020), pp. 260–274. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2020.02.032>
- [4] J.P. Oliveira, K. Ponder, E. Brizes, T. Abke, P. Edwards and A.J. Ramirez, "Combining Resistance Spot Welding and Friction Element Welding for Dissimilar Joining of Aluminum to High Strength Steels," *Journal of Materials Processing Technology*, vol.273, (2019), Article no. 116192. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2019.04.018>
- [5] S. Tokita, C.Y. Liu and Y.S. Sato, "Effects of Material Combination for Ultrasonic Spot Welding on Microstructure and Strength of Al/Al, Al/Cu, and Al/Ni Dissimilar Joints. *Journal of Materials Research and Technology*," vol. 26, (2023), pp. 7619–7633. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2023.09.094>
- [6] Z. Sun, Z. Liang, L. Wang, Y. Liu, Y. Liang and D. Wang, "Microstructure and Mechanical Properties of Al-Zn-Mg-Cu Alloy Joints Welded by Ultrasonic Spot Welding with Soft Specification," *Journal of Manufacturing Processes*, vol.116, (2024), pp. 306–314. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2024.02.061>

- [7] H. Azhari-Saray, M. Sarkari-Khorrami, A. Nademi-Babahadi and S.F. Kashani-Bozorg, “Dissimilar Resistance Spot Welding of 6061-T6 Aluminum Alloy/St-12 Carbon Steel Using a High Entropy Alloy Interlayer,” *Intermetallics*, vol.124, (2020), Article no. 106876. <https://doi.org/10.1016/j.intermet.2020.106876>
- [8] S.M. Manladan, F. Yusof, S. Ramesh and M. Fadzil, “A Review on Resistance Spot Welding of Magnesium Alloys,” *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol.86, (2016), pp. 1805–1825. <https://doi.org/10.1007/s00170-015-8258-9>
- [9] S.N. Mortazavi, P. Marashi, M. Pouranvari and M. Masoumi, “Investigation on Joint Strength of Dissimilar Resistance Spot welds of Aluminum Alloy and Low Carbon Steel,” *Advanced Materials Research*, vol.264–265, (2011), pp. 384–389. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.264-265.384>
- [10] B. Pan, H. Sun, S.L. Shang, M. Banu, P.C. Wang, B.E. Carlson, Z.K. Liu and J. Li, “Understanding Formation Mechanisms of Intermetallic Compounds in Dissimilar Al/Steel Joint Processed by Resistance Spot Welding,” *Journal of Manufacturing Processes*, vol.83, (2022), pp. 212–222. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2022.08.062>
- [11] X. Wan, Y. Wang and C. Fang, “Welding Defects Occurrence and Their Effects on Weld Quality in Resistance Spot Welding of AHSS Steel,” *ISIJ International*, vol.54, (2014), pp.1883–1889. <https://doi.org/10.2355/isijinternational.54.1883>
- [12] Z. Xu and Y. Zhang, “Improvement on Microstructure and Mechanical Properties of Cu/Al Ultrasonic Spot Welded Joints Assisted by Periodic Additional Force,” *Journal of Materials Processing Technology*, vol.326, (2024). <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2024.118325>
- [13] P. Bamberg, R. Seewald, A. Schiebahn, U. Reisgen, N. Precoma and M. Epperlein, “Improvement of the Resistance Spot Welding of Al-Mg-Si Alloys by Using Cladding Technology: An Optical and Mechanical Characterization Study,” *Journal of Advanced Joining Processes*. vol.5, (2022). <https://doi.org/10.1016/j.jajp.2021.100090>
- [14] J. Queval, E. Geslain, C. Pouvreau, P. Broussaud-Laloue and S. Loyer, “Joining Thin Galvanized Low Carbon Steel Sheet to AA6056-T4 by Resistance Spot Welding and Adhesive Weld Bounding,” *Journal of Manufacturing Processes*, vol.110, (2024). pp. 70–81. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2023.12.049>
- [15] A. Gullino, P. Matteis and F.D. Aiuto, “Review of Aluminum-to-Steel Welding Technologies for Car-Body Applications,” *Metals*, vol.9, (2019), Article no. 315. <https://doi.org/10.3390/met9030315>
- [16] C1.1M/C1.1:2019, “Recommended Practices for Resistance Welding,” (2019).
- [17] AWS C3, “Committee on Brazing and Soldering,” (2007), “Brazing Handbook,” 5 ed. American welding society, Miami, Florida, United States of America.
- [18] L. Shi, W. Li, S. Li, Y. Shi, F. Jiang, Z. Zhou, X. Su, “Effect of loading configuration on tensile and fatigue behavior of dissimilar resistance spot welds of selective laser-melted maraging steels,” *International Journal of Fatigue* vol.198 (2025). <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2025.109031>.

- [19] L. Shi, J. Xue, J. Kang, B.S. Amirkhiz, A.S. Haselhuhn, B.E. Carlson, “Tensile and fatigue behavior of novel dissimilar resistance spot welds of AA5754 to steels: Interplay of intermetallic layer, weld nugget diameter and notch root angle,” *Journal of Materials Research and Technology* vol.22 (2023). pp.1737–1752. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2022.12.032>.
- [20] T.B. Massalski, H. Okamoto, P.R. Subramanian and L. Kacprzak, “Binary Alloy Phase Diagrams,” Materials Park, OH: ASM International (2000)