

อิทธิพลของตัวแปรในการเชื่อมความต้านทานแบบจุดที่มีผลต่อความแข็งแรง ของรอยต่อแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม 316L

Influence of Resistance Spot Welding Parameters on Welding Joints of 316L Stainless Steel Plates

ภูเมศวร์ แสงระยับ * และ นิวัฒน์ มูเก็ม

Phoometh Sangrayub * and Niwat Mookem

Received: 24 February 2021, Revised: 23 May 2021, Accepted: 22 June 2021

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาอิทธิพลของตัวแปรในการเชื่อมด้วยความต้านทานแบบจุดที่มีผลต่อความแข็งแรงของรอยต่อแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม 316L หนา 0.5 mm ซึ่งมีตัวแปรที่ศึกษา คือ กระแสไฟฟ้า เวลาในการปล่อยกระแสไฟฟ้า และความดันจากอิเล็กโทรดกดชิ้นงาน ออกแบบการทดลองแบบบ็อกซ์-เบห์นเคน (Box-Behnken) และใช้ฟังก์ชันความพึงพอใจ (Desirability function) ในการหาเงื่อนไขที่เหมาะสม ศึกษาสมบัติทางกล ได้แก่ แรงเฉือน ความแข็งแรงจุดภาค และศึกษาโครงสร้างจุลภาค ขนาบรอยเชื่อม ตลอดจนการแตกหักของรอยเชื่อม ผลการศึกษา พบว่า ปัจจัยหลัก กระแสไฟฟ้า เวลาในการปล่อยกระแสไฟฟ้า และความดันจากอิเล็กโทรดกดชิ้นงาน รวมถึงอันตรกิริยาร่วมระหว่างกระแสไฟฟ้าและความดันจากอิเล็กโทรดกดชิ้นงานมีอิทธิพลต่อการรับแรงเฉือนของรอยต่อที่ระดับนัยสำคัญ $\alpha = 0.05$ ผลการหาค่าที่เหมาะสม พบว่า เงื่อนไขที่รับแรงเฉือนสูงสุด คือ กระแสไฟฟ้า 4,500 A เวลาในการปล่อยกระแสไฟฟ้า 2 s และความดันจากอิเล็กโทรดกดชิ้นงาน 0.3 MPa รับแรงเฉือนสูงสุด เท่ากับ 2,679.59 N ผลการศึกษาโครงสร้างจุลภาค ความแข็งแรงจุดภาค และลักษณะการแตกหัก พบว่า การเพิ่มขึ้นของกระแสไฟฟ้าและเวลาปล่อยกระแสไฟฟ้าจะทำให้ขนาดของรอยเชื่อมและความแข็งแรงเพิ่มขึ้น ในขณะที่การเพิ่มขึ้นของความดันจากอิเล็กโทรดกดชิ้นงานจะส่งผลให้ขนาดรอยเชื่อมและความแข็งแรงลดลง

คำสำคัญ: การเชื่อมด้วยความต้านทานแบบจุด, เหล็กกล้าไร้สนิม 316L, การทดลองแบบบ็อกซ์-เบห์นเคน

สาขาวิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะอุตสาหกรรมและเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์ วิทยาเขตวังไกลกังวล
อำเภอหัวหิน จังหวัดประจวบคีรีขันธ์ 77110

Department of Industrial Engineering Technology, Faculty of Industry and Technology, Rajamangala University of Technology Rattanakosin,
Wang Klai Kangwon Campus, Hua Hin, Prachuap Khiri Khan 77110, Thailand.

* ผู้ประสานงาน ไปรษณีย์อิเล็กทรอนิกส์ (Corresponding author, e-mail): phoometh.san@rmutr.ac.th

ABSTRACT

This research aims to study the influence of resistance spot welding parameters on joints of 316L stainless steel plates (thickness 0.5 mm). The factors included welding current, welding time, and electrode pressure. The study also considered mechanical properties including shear force, micro hardness, microstructure, nugget size, and failure mode. The Box-Behnken design was employed as the experimental strategy, and the desirability function was used as the optimization tool. The results revealed that welding current, welding time, electrode pressure, and 2-way interactions between welding current and electrode pressure were the main effects that influence the shear force of joints at $\alpha = 0.05$. The optimal welding condition was 0.3 MPa of electrode pressure, 4,500 A of weld current, and 2 s of weld time, and the corresponding shear force load was 2,679.59 N. The experimental results of microstructure, microhardness, and failure modes showed that nugget size and tensile shear strength increased with the increasing of welding current and welding time. In contrast, the increasing of electrode pressure affected the decreasing of nugget size and tensile shear strength.

Key words: resistance spot welding, stainless Steel 316L, box-behnken design

บทนำ

ปัจจุบันเหล็กกล้าไร้สนิม 316L เป็นที่นิยมนำมาใช้ประดิษฐ์เป็นชิ้นส่วนประกอบต่างๆ กันอย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมการผลิต เช่น ยานพาหนะ เรือ หรือตึกอาคาร (Zhang *et al.*, 2020) เนื่องจากมีสมบัติทางกลที่เหมาะสม ง่ายต่อการขึ้นรูป มีราคาถูก และมีความสามารถต้านทานการกัดกร่อนที่ดีเยี่ยม (NAS, 1990) มีกระบวนการต่อวัสดุหลากหลายที่สามารถนำมาใช้การเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิม เช่น กระบวนการเชื่อมทิก (Tungsten Inert Gas: TIG) กระบวนการเชื่อมมิก (Metal Inert Gas: MIG) กระบวนการเชื่อมใต้ฟลักซ์ (Submerged arc welding: SAW) และกระบวนการเชื่อมด้วยความต้านทานแบบจุด (Resistance spot welding: RSW) (Kianersi *et al.*, 2014) ในกลุ่มกระบวนการเชื่อมเหล่านี้ กระบวนการเชื่อมด้วยความต้านทานแบบจุดเป็นที่นิยมนำมาใช้งานในการต่อโลหะแผ่น (Cao *et al.*, 2021) เนื่องจากเป็นกระบวนการต่อที่มีประสิทธิภาพสูง รวดเร็ว และ

ใช้ต้นทุนต่ำในการผลิตเมื่อเปรียบเทียบกับกระบวนการเชื่อมโลหะด้วยวิธีอื่น (Kim *et al.*, 2019) การต่อวัสดุด้วยวิธีนี้ใช้หลักการเกิดความร้อนจากค่าความต้านทานไฟฟ้าของวัสดุเมื่อปล่อยกระแสไฟฟ้าไหลผ่านรอยต่อภายใต้แรงกดจากอิเล็กโทรด (Miller, 2012) ซึ่งอิเล็กโทรดจะทำจากวัสดุที่มีสมบัตินำไฟฟ้าได้ดี เช่น ทองแดง หรือทองแดงผสมเป็นต้น สาเหตุที่ควรใช้ชนิดของอิเล็กโทรดที่มีสมบัติการนำไฟฟ้าได้ดี เนื่องจากกระบวนการเชื่อมนี้ต้องการให้เกิดความร้อน ณ บริเวณรอยต่อของชิ้นงานเพื่อให้เกิดการหลอมเหลว ซึ่งถ้าใช้วัสดุที่มีค่าความต้านทานไฟฟ้าสูงในการเชื่อมส่งผลให้แท่งอิเล็กโทรดมีอุณหภูมิสูงจนเกิดการหลอมเหลวติดกับตัวชิ้นงาน ทำให้อิเล็กโทรดเสียหายจนไม่สามารถใช้งานได้อีก ตลอดจนเป็นผลกระทบต่อรอยเชื่อม ดังนั้นชนิดของวัสดุที่นำมาใช้เป็นอิเล็กโทรดจึงเป็นปัจจัยหนึ่งที่มีความสำคัญต่อกระบวนการเชื่อมนี้ (Salem, 2011) นอกจากนี้ในกระบวนการยังมีปัจจัยสำคัญที่มี

อิทธิพลต่อความแข็งแรงของรอยเชื่อม คือ กระแสไฟฟ้าในการเชื่อม เวลาในการปล่อยกระแสไฟฟ้า และความดันกดชิ้นงานจากอิเล็กโทรด ซึ่ง 3 ตัวแปรนี้เป็นปัจจัยหลักๆ ที่มีหลายงานวิจัยได้ทำการศึกษาไว้ (Verm *et al.*, 2014; Marashi, 2008) และเป็นตัวแปรที่มีผลต่อคุณภาพของรอยเชื่อมทั้งในเชิงสมบัติทางกล โครงสร้างจุลภาค การใช้เงื่อนไขของตัวแปรในการเชื่อมด้วยความดันแบบจุดที่ไม่เหมาะสมกับวัสดุ จะมีผลให้รอยเชื่อมไม่แข็งแรงและอื่นๆ เช่น ขนาดรอยเชื่อมเล็กหรือความลึกของรอยเชื่อมมีมากเกินไป ด้วยเหตุนี้เงื่อนไขของตัวแปรในการเชื่อมด้วยความดันแบบจุดจึงเป็นองค์ประกอบที่สำคัญต่อกระบวนการ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาอิทธิพลของตัวแปรในการเชื่อมด้วยความดันแบบจุดที่มีผลต่อความแข็งแรงของรอยต่อแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม 316L หนา 0.5 mm มีตัวแปรที่ศึกษา คือ กระแสไฟฟ้า (Welding current) เวลาในการปล่อยกระแสไฟฟ้า (Welding time) และความดันจากอิเล็กโทรดกดชิ้นงาน (Electrode pressure) ออกแบบการทดลองด้วยเทคนิคบ็อกซ์-เบห์นเคน และใช้ฟังก์ชันความพึงพอใจในการหาเงื่อนไขที่เหมาะสม

วิธีดำเนินการวิจัย

1. การออกแบบการทดลอง

การออกแบบการทดลองเพื่อศึกษาตัวแปรที่มีผลกระทบต่อความแข็งแรงของรอยต่อ และหาพารามิเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับการเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิม 316L หนา 0.5 mm ด้วยความดันแบบจุดในงานวิจัยนี้ศึกษา 3 ปัจจัย คือ กระแสไฟฟ้า 3,000-5,000 A, เวลาในการปล่อยกระแสไฟฟ้า 1-2 s และความดันจากอิเล็กโทรดกดชิ้นงาน 0.3-0.5 MPa ซึ่งค่าของปัจจัยเหล่านี้ได้ข้อมูลมาจากคู่มือการเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมด้วยการเชื่อมความดันแบบจุด (NiDi, 1979) ปัจจัยและระดับในการทดลองแสดงดังตารางที่ 1 ออกแบบการทดลองโดยใช้โปรแกรมทางสถิติ MINITAB เวอร์ชัน 16 ด้วยเทคนิคบ็อกซ์-เบห์นเคน (Box-Behnken) ทำซ้ำ 3 ครั้ง ทั้งหมด 45 การทดลอง การทดลองแบบ Box-Behnken เป็นการทดลองที่มีประสิทธิภาพและนิยมใช้มากในกรณีศึกษาปัจจัยที่ 3 ระดับโดยเฉพาะกรณีที่ต้องการสร้างสมการความสัมพันธ์เมื่อปัจจัยเป็นปัจจัยเชิงปริมาณ (Quantitative factors) (Chailungka *et al.*, 2013) ผลการทดลองที่ตำแหน่งกึ่งกลางจะถูกนำไปวิเคราะห์ทางสถิติเพื่อหาความเหมาะสมของรูปแบบจำลองทางคณิตศาสตร์กับผลการทดลอง โดยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้แสดงดังสมการ (1)

$$Y = \beta_0 + \sum_{i=1}^n \beta_i X_i + \beta_{ii} X_i^2 + \sum_{i \neq j=1}^n \beta_{ij} X_i X_j \quad (1)$$

เมื่อ $\beta_0, \beta_i, \beta_{ii}, \beta_{ij}$ คือ ค่าสัมประสิทธิ์ X_i คือ ตัวแปรอิสระ

ตารางที่ 1 แสดงปัจจัยและระดับในการทดลอง

Factors	Code	Levels		
		-1	0	1
Welding current (A)	X_1	3,000	4000	5,000
Welding time (Sec)	X_2	1	1.5	2
Electrode pressure (MPa)	X_3	0.3	0.4	0.5

การหาพารามิเตอร์ที่เหมาะสมในงานวิจัยนี้ จะใช้ฟังก์ชันความพึงพอใจ (Desirability function) เพื่อหาเงื่อนไขในการเชื่อมที่ให้ค่าแรงเชื่อมสูงสุด ถ้าให้ $Y_i(x)$ เป็นค่าผลตอบ (Response value) ของเงื่อนไขการเชื่อม x และ $d_i(Y_i)$ คือ ฟังก์ชันความพึงพอใจของ Y_i ในช่วง 0-1 ของฟังก์ชันความพึงพอใจ

ค่า $d_i(Y_i) = 0$ คือ ค่าความพึงพอใจที่น้อยที่สุด และ $d_i(Y_i) = 1$ คือ ค่าความพึงพอใจที่มากที่สุด และในทางปฏิบัติจะใช้ค่าทำนาย แทน Y_i และค่าความพึงพอใจรวม D สามารถหาได้จากค่ามัธยฐานเรขาคณิต (Geometric mean) ของความพึงพอใจของแต่ละผลตอบ ดังแสดงในสมการที่ (2)

$$D = \left(\prod_{i=1}^k d_i(\hat{Y}_i) \right)^{1/k} \quad (2)$$

เมื่อ k คือ จำนวนของผลตอบ โดยที่ค่าผลตอบ สามารถแปลงเป็นค่าความพึงพอใจได้โดยใช้วิธีของ Derringer and Suich (1980) ในกรณีที่ต้องการ

ผลตอบที่น้อยที่สุด ฟังก์ชันความพึงพอใจสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (3)

$$d_i(\hat{Y}_i) = \begin{cases} 1 & \text{if } \hat{Y}_i(x) < T_i \\ \left(\frac{\hat{Y}_i(x) - U_i}{T_i - U_i} \right)^r & \text{if } T_i \leq \hat{Y}_i(x) \leq U_i \\ 0 & \text{if } \hat{Y}_i(x) > U_i \end{cases} \quad (3)$$

เมื่อ U_i คือ ขีดจำกัดบน (Upper limit) ของผลตอบ r คือ ค่าน้ำหนักของฟังก์ชัน และ T_i คือ ค่าเป้าหมาย (Target) ของผลตอบ ในกรณีที่ต้องการผล

ตอบที่มากที่สุด ฟังก์ชันความพึงพอใจสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (4)

$$d_i(\hat{Y}_i) = \begin{cases} 0 & \text{if } \hat{Y}_i(x) < L_i \\ \left(\frac{\hat{Y}_i(x) - L_i}{T_i - L_i} \right)^r & \text{if } L_i \leq \hat{Y}_i(x) \leq T_i \\ 1 & \text{if } \hat{Y}_i(x) > T_i \end{cases} \quad (4)$$

เมื่อ L_i คือ ขีดจำกัดล่าง (Lower limit) ของผลตอบ และในกรณีที่ต้องการผลตอบที่ใกล้เคียงกับ

ค่าเป้าหมายมากที่สุด ฟังก์ชันความพึงพอใจสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (5)

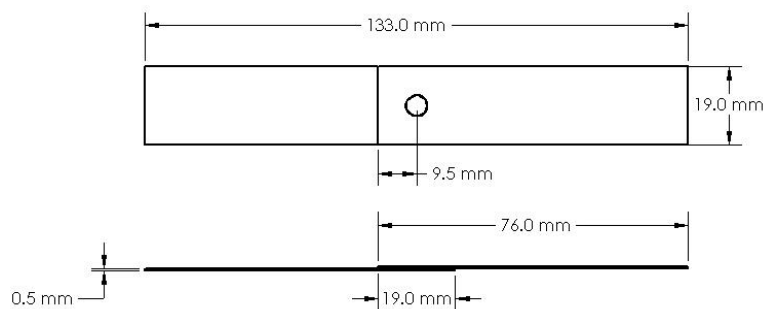
$$d_i(\hat{Y}_i) = \begin{cases} 0 & \text{if } \hat{Y}_i(x) < L_i \\ \left(\frac{\hat{Y}_i(x) - L_i}{T_i - L_i} \right)^s & \text{if } L_i \leq \hat{Y}_i(x) \leq T_i \\ \left(\frac{\hat{Y}_i(x) - U_i}{T_i - U_i} \right)^t & \text{if } T_i \leq \hat{Y}_i(x) \leq U_i \\ 0 & \text{if } \hat{Y}_i(x) > U_i \end{cases} \quad (5)$$

เมื่อ s และ t คือ ค่าน้ำหนักของฟังก์ชัน

2. การเตรียมวัสดุและอุปกรณ์ในการทดลอง

โลหะพื้นใช้แผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม 316L หนา 0.5 mm มาต่อแบบต่อเกลย ตามมาตรฐานของการกำหนดขนาดชิ้นงานทดสอบสำหรับการเชื่อมด้วยความต้านทาน (Resistance welding) AWS C3 (Julupai, 1996) แสดงดังภาพที่ 1 และนำไปเชื่อมด้วยความต้านทานแบบจุดภายใต้บรรยากาศปกติกด้วยเครื่อง Spot welding ยี่ห้อ Fan รุ่น ISO 25510522

โดยใช้อิเล็กโทรดรูปร่างตามมาตรฐานแบบ E ชนิดทองแดงมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 mm (Salem, 2011) หลังการเชื่อมนำตัวอย่างมาทดสอบแรงเฉือนของรอยต่อ โดยใช้เครื่องทดสอบเอนกประสงค์ยี่ห้อ Zwick รุ่น ZO20 ซึ่งทดสอบตามมาตรฐาน JIS Z 3192 ใช้ความเร็วในการดึงที่ 10 mm/min (American Welding Society, 2008)



ภาพที่ 1 รูปร่างและขนาดของชิ้นงานทดสอบ

สำหรับชิ้นงานอีกชุดหนึ่งนำมาตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง (Optical Microscope) ยี่ห้อ Olympus รุ่น BX53M และเทคนิคจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy, SEM) ยี่ห้อ JEOL รุ่น JSM-6510LV วิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของชิ้นสารประกอบเชิงโลหะด้วยเทคนิคจุลวิเคราะห์ (Energy Dispersive X-ray Spectroscopy, EDS) ยี่ห้อ

JEOL รุ่น JSM-6510LV ทดสอบความแข็งจุลภาคด้วยเครื่องวัดค่าความแข็งจุลภาค Hardness Tester ยี่ห้อ Wilson Hardness รุ่น Tukon 1102/1202 ตามมาตรฐานการทดสอบแรงกด AWS D8.9 M-2012 (American Welding Society, 2012) การกดความแข็งแบบวิกเกอร์ใช้หัวกดแบบเพชรรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัส มุม 136 deg. แรงกด 300 g ใช้เวลาในการทดสอบ 10 s

ผลการวิจัยและวิจารณ์ผล

1. ผลวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

จากการวิเคราะห์ข้อมูลเพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์และหาความแปรปรวนของแบบจำลองในเทอมต่างๆ พบว่า การตรวจสอบสมมติฐานของแบบจำลองจากส่วนตกค้างของข้อมูลไม่พบสิ่งผิดปกติใดๆ ปัจจัยหลักที่มีอิทธิพลต่อค่าความแข็งแรงเหนือนของรอยต่อ คือ กระแสไฟฟ้า (X_1) เวลา

ในการปล่อยกระแสไฟฟ้า (X_2) และความดันจากอิเล็กโทรดกดชิ้นงาน (X_3) รวมทั้งอันตรกิริยาของกระแสไฟฟ้าและความดันจากอิเล็กโทรดกดชิ้นงาน ($X_1 * X_3$) มีผลต่อค่าความแข็งแรงของรอยเชื่อมที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ($p\text{-value} < 0.05$) แสดงค่าสัมประสิทธิ์หลังการปรับปรุงของแบบจำลองดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 การวิเคราะห์สัมประสิทธิ์การถดถอยในรูปแบบการเข้ารหัส

Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	2239.69	16.19	138.37	<0.001
X_1	218.75	22.16	9.87	<0.001
X_2	114.84	22.16	5.18	<0.001
X_3	-141.96	22.16	-6.41	<0.001
$X_1 * X_3$	-81.51	31.34	-2.60	0.013
R-Sq = 81.86% R-Sq (adj) = 79.54%				

เมื่อนำค่าสัมประสิทธิ์ของเทอมต่างๆ ที่มีผลต่อค่าความแข็งแรงในการรับแรงเหนือนสูงสุดของจุดเชื่อมไปเขียนสมการทำนายค่าความแข็งแรงในการรับแรงเหนือนสูงสุดสามารถเขียนได้ดังสมการ

ทำนายที่ (6) เมื่อ Y คือ ค่าความแข็งแรงในการรับแรงเหนือนสูงสุด และค่าปัจจัยทั้งสามในสมการแทนด้วยตัวแปรถูกเข้ารหัส คือ

$$Y = 2239.69 + 218.75 (X_1) + 114.84 (X_2) - 141.96 (X_3) - 81.51(X_1 * X_3) \quad (6)$$

การหาค่าที่เหมาะสมของปัจจัยที่มีผลต่อค่าความแข็งแรงในการรับแรงเหนือนสูงสุดของจุดเชื่อมโดยใช้ฟังก์ชัน Response Optimizer ในโปรแกรม MINITAB เวอร์ชัน 16 ผู้วิจัยเลือกกำหนดค่าเป้าหมาย

ของผลตอบสนอง (Goal) เป็นค่ามากที่สุดของผลตอบสนอง (Maximum) เนื่องจากต้องการให้ได้ค่าความแข็งแรงในการรับแรงเหนือนของจุดเชื่อมสูงสุด ค่าที่เหมาะสมของปัจจัยแสดงตามตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ผลตอบสนองเงื่อนไขที่เหมาะสม

Response Optimization						
Factors	Goal	Lower	Target	Upper	Weight	Import
Shear force	Maximum	1638	2600	2600	1	1
Global Solution						
Welding current = 0.88		Welding time = 1		Electrode pressure = -1		
Predicted Responses						
Shear force = 2681.55,		desirability = 1.00		Composite Desirability = 1.00		

ค่าปัจจัยที่เหมาะสมจากการคำนวณของโปรแกรมสำหรับชุดการทดลองนี้ คือ กระแสไฟฟ้าที่ระดับ 0.88 (4,400 A) เวลาในการปล่อยกระแสไฟฟ้าที่ระดับ 1 (2 s) และความดันจากอิล็กโทรดกดชิ้นงานที่ระดับ -1 (0.3 MPa) โดยได้ค่าผลตอบสนองจากการทำนายแรงเฉือนสูงสุดของจุดเชื่อม (Predicted Response) เท่ากับ 2681.55 N และได้ค่าความพึงพอใจโดยรวมเท่ากับ 1.00 การทดลองเพื่อ

ยืนยันผลจากค่าที่เหมาะสมของปัจจัยที่มีผลต่อค่าความแข็งแรงในการรับแรงเฉือนสูงสุด ผู้วิจัยได้ทำการปรับค่าปัจจัยต่างๆ บนเครื่องเชื่อมให้ได้ค่าที่ใกล้เคียงกับค่าที่เหมาะสมจากการทำนายมากที่สุด โดยปรับค่ากระแสไฟฟ้า 4,500 A เวลาในการปล่อยกระแสไฟฟ้า 2 s และความดันจากอิล็กโทรดกดชิ้นงาน 0.3 MPa ทำการทดลองซ้ำ 5 ครั้ง เพื่อเพิ่มความเชื่อมั่นแสดงผลดังตารางที่ 4

ตารางที่ 4 การทดลองเพื่อยืนยันผล

No.	Factors			Shear force (N)
	Welding current (A)	Welding time (s)	Electrode pressure (MPa)	
1	4,500	2	0.3	2680.10
2	4,500	2	0.3	2677.33
3	4,500	2	0.3	2679.27
4	4,500	2	0.3	2678.71
5	4,500	2	0.3	2682.54
Average				2679.59
SD				1.93
95% CI				2677.19 - 2681.99

ผลการวิเคราะห์ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของผลการทดลอง จากตารางที่ 4 จะเห็นได้ว่า ค่าแรงเฉือนในการทดลองยืนยันผลทั้งหมดอยู่ในช่วงความเชื่อมั่น และมีค่าการ

เบี่ยงเบนมาตรฐานของการทดลองยืนยันผลที่มีค่าต่ำ โดยมีค่าเฉลี่ยของแรงเฉือนเท่ากับ 2679.59 N

2. ผลการศึกษาโครงสร้างจุลภาค

2.1 การศึกษาอิทธิพลของกระแสไฟฟ้า

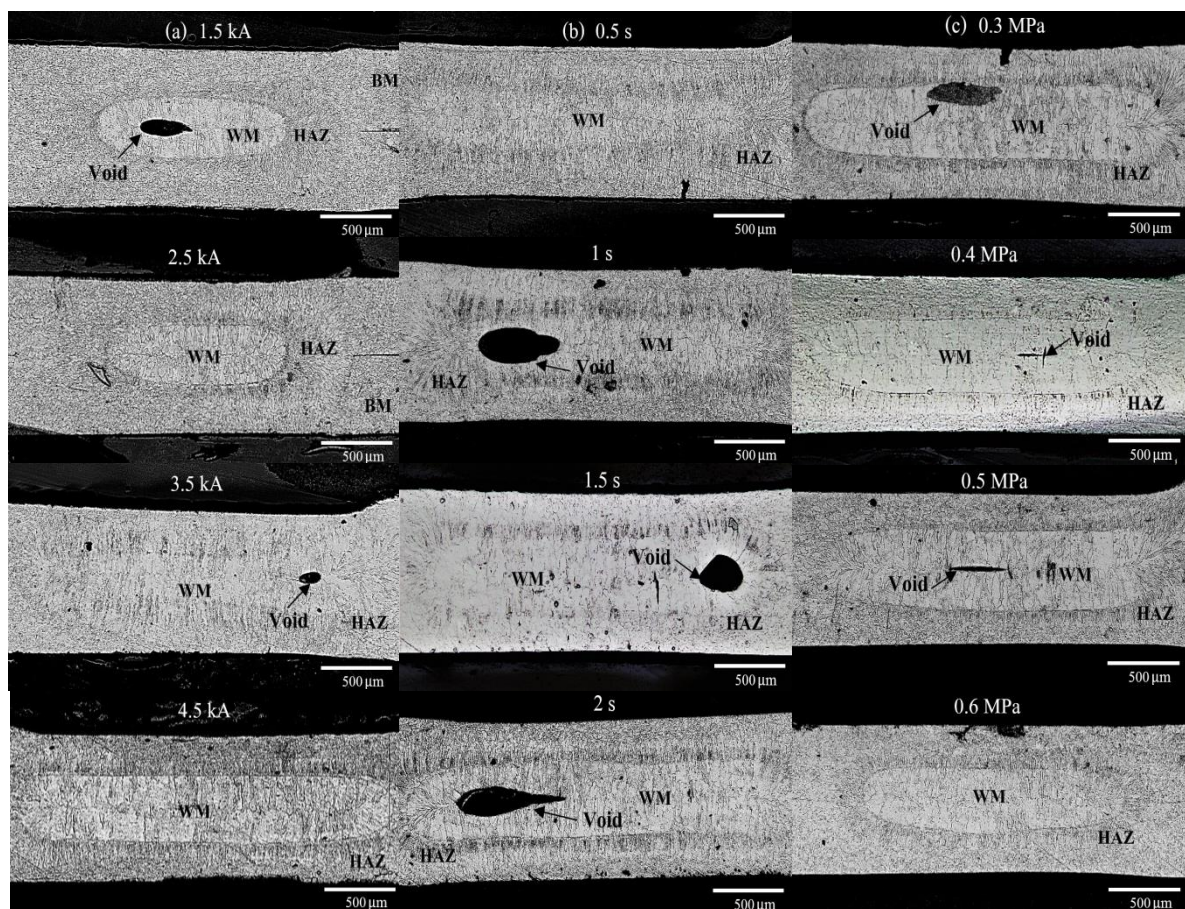
อิทธิพลของกระแสไฟฟ้าในการเชื่อมแผ่น เหล็กกล้าไร้สนิม 316L หนา 0.5 mm ด้วยกระบวนการ เชื่อมความดันแบบจุดที่กระแสไฟฟ้า 1,500, 2,500, 3,500 และ 4,500 A โดยกำหนดตัวแปรอื่นในการ เชื่อมคงที่ คือ เวลาในการปล่อยกระแสไฟฟ้า 2 s และความดันจากอิเล็กโทรดกดชิ้นงาน 0.3 MPa ผลการ ทดลองจากภาพที่ 2 คอลัมน์ (a) พบว่า การเพิ่ม

กระแสไฟฟ้าในการเชื่อมส่งผลให้ขนาดรอยเชื่อมมี ขนาดโตขึ้น โดยกระแสไฟฟ้าในการเชื่อม 1,500 A มี ขนาดรอยเชื่อมเล็กที่สุด ซึ่งขนาดรอยเชื่อมจะโตขึ้น เมื่อเพิ่มกระแสไฟฟ้าในการเชื่อม สาเหตุนี้เกิด เนื่องมาจากกระแสไฟฟ้ามีผลต่อความร้อนที่เกิดขึ้น การเพิ่มขึ้นของกระแสไฟฟ้าทำให้ความร้อน ในการ เชื่อมสูงขึ้น (Beni *et al.*, 2019) สอดคล้องกับสมการ ที่ (7) ตามทฤษฎี คือ

$$H = I^2 R t \quad (7)$$

เมื่อ H คือ ความร้อน I คือ กระแสไฟฟ้า R คือ ค่าความต้านทานไฟฟ้าของวัสดุ t คือ ระยะเวลา ในการปล่อยกระแสไฟฟ้า ซึ่งความร้อนที่เพิ่มขึ้นทำ

ให้โลหะเกิดการหลอมละลายและผสานกันเป็นรอย เชื่อม ขนาดของรอยเชื่อมเพิ่มขึ้นตามความร้อนที่เกิด ในการเชื่อม



ภาพที่ 2 ภาพถ่าย OM ที่กำลังขยาย 50x คอลัมน์ (a) คือ ของอิทธิพลของกระแสไฟฟ้า, (b) คือ เวลาในการปล่อย กระแสไฟฟ้า และ (c) คือ ความดันจากอิเล็กโทรดกดชิ้นงาน

2.2 อิทธิพลของเวลาในการปล่อยกระแสไฟฟ้า

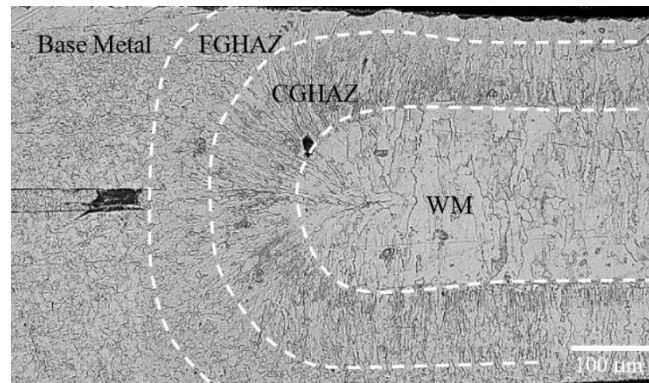
อิทธิพลของเวลาในการปล่อยกระแสไฟฟ้าที่ 0.5, 1, 1.5 และ 2 s โดยกำหนดตัวแปรอื่นคงที่ คือ กระแสไฟฟ้า 4,500 A และความดันจากอิเล็กโทรดชิ้นงาน 0.3 MPa ผลการทดลอง พบว่า การเพิ่มเวลาในการปล่อยกระแสไฟฟ้าส่งผลให้ขนาดรอยเชื่อมมีขนาดโตขึ้นแสดงดังภาพที่ 2 คอลัมน์ (b) สาเหตุมาจากอิทธิพลทางความร้อนตามทฤษฎีและสมการที่ (7) เมื่อเพิ่มเวลาในการปล่อยกระแสไฟฟ้าทำให้ความร้อนในการเชื่อมเพิ่มสูงขึ้น จึงเป็นผลทำให้ขนาดรอยเชื่อมมีขนาดโตขึ้นซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Akkas (2017) และ Kim *et al.* (2019) อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาเปรียบเทียบผลการศึกษาโครงสร้างจุลภาคของอิทธิพลทั้งสามปัจจัยจากภาพที่ 2 พบว่า เวลาในการปล่อยกระแสไฟฟ้ามีอิทธิพลต่อการเปลี่ยนแปลงของขนาดรอยเชื่อมน้อยที่สุด สาเหตุเนื่องจากขนาดความหนาขึ้นทดสอบที่มีความหนาเพียง 0.5 mm ซึ่งมีพื้นที่ในการเชื่อมค่อนข้างน้อยจึงทำให้รอยเชื่อมเกิดความร้อนและเย็นตัวอย่างรวดเร็ว นอกจากนี้ช่วงเวลาในการเชื่อมที่ใช้ทำการทดลองเพียง 0.5 - 2 s ทำให้เวลาในการเชื่อมจึงมีอิทธิพลน้อยที่จะทำให้นขนาดรอยเชื่อมเกิดการเปลี่ยนแปลงซึ่งสอดคล้องกับผลวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์ของปัจจัยที่มีผลต่อความแข็งแรงของรอยต่อในตารางที่ 2

2.3 อิทธิพลของความดันจากอิเล็กโทรดกดชิ้นงาน

อิทธิพลของความดันจากอิเล็กโทรดกดชิ้นงานที่ 0.3, 0.4, 0.5 และ 0.6 MPa โดยกำหนดตัวแปรอื่นคงที่ คือ กระแสไฟฟ้า 4,500 A และเวลาในการปล่อยกระแสไฟฟ้า 2 s ผลการศึกษาดังภาพที่ 2 คอลัมน์ (c) พบว่า การเพิ่มความดันจากอิเล็กโทรดกดชิ้นงานทำให้นขนาดของรอยเชื่อมและความ

แข็งแรงของรอยต่อลดลง รอยต่อที่ใช้ความดันจากอิเล็กโทรดกดชิ้นงาน 0.3 MPa สามารถรับแรงเฉือนได้มากกว่าที่รอยต่อที่ใช้ความดันจากอิเล็กโทรดกดชิ้นงาน 0.6 MPa เนื่องจากการใช้ความดันกดชิ้นงานที่ 0.6 MPa ทำให้ผิวของชิ้นงานเกิดการเสียดสีมากกว่าหรือมีผิวสัมผัสมากขึ้น ส่งผลให้ค่าความต้านทานไฟฟ้าที่เกิดบริเวณหน้าสัมผัสของรอยต่อลดลง ดังนั้นความร้อนที่เกิดขึ้นจากความต้านทานไฟฟ้าจึงต่ำกว่าที่ใช้ความดันกดชิ้นงานที่ 0.3 MPa ด้วยเหตุนี้ รอยต่อที่ใช้ความดันจากอิเล็กโทรดกดชิ้นงาน 0.3 MPa จึงมีขนาดรอยเชื่อมและความแข็งแรงของรอยต่อมากกว่า ซึ่งผลการศึกษาสอดคล้องกับงานวิจัยของ Pouranvari and Ranjbarnoode (2013) และ Wohner *et al.* (2021)

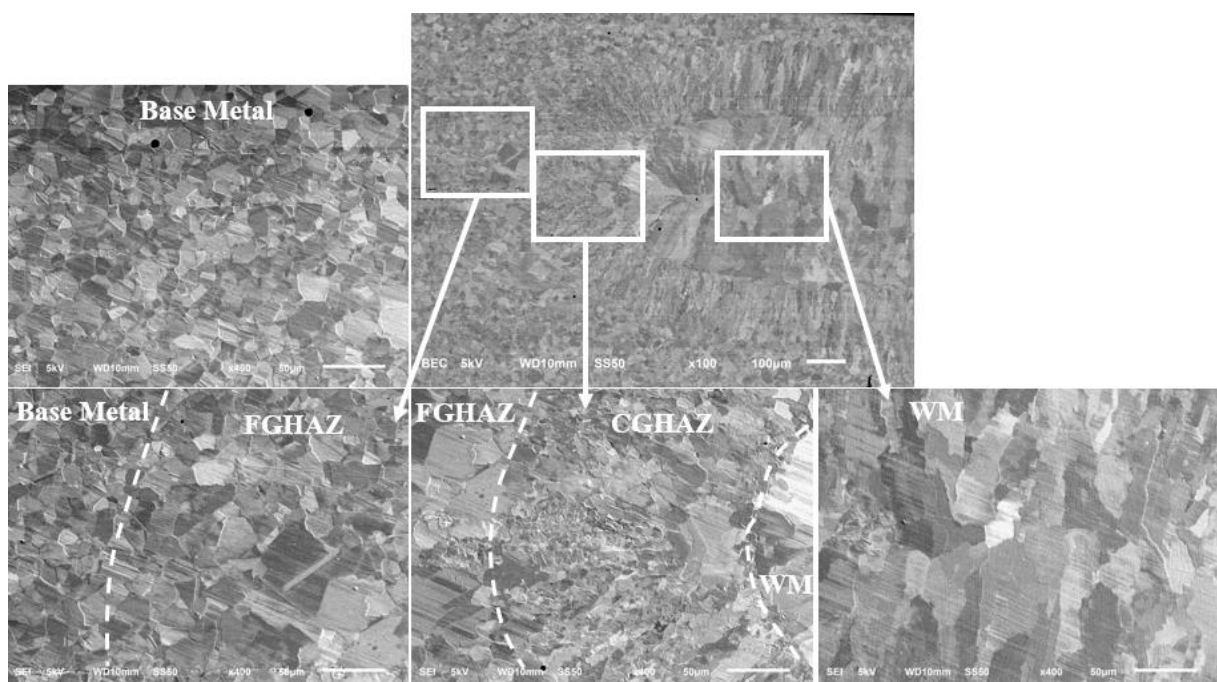
จากผลการศึกษาโครงสร้างจุลภาคพบว่า โครงสร้างจุลภาคของจุดเชื่อมเกิดลักษณะของโครงสร้างและขนาดเกรนที่ต่างกัน บริเวณรอยเชื่อม (Weld metal: WM) เป็นจุดที่เกิดการหลอมละลายมีลักษณะเกรนโตและเรียวยาว บริเวณกระทบร้อนซึ่งแบ่งได้เป็น 2 โซน คือ กระทบร้อนเกรนคอลัมน์าร์ (Columnar grain heat affected zone: CGHAZ) และ กระทบร้อนเกรนละเอียด (Fine grain heat affected zone: FGHAZ) ในงานวิจัยของ Lee and Chang (2020); Banerjee *et al.* (2016) ได้กล่าวว่า อิทธิพลของความร้อนที่เกิดขึ้นในการเชื่อมความต้านทานแบบจุดมีผลให้โครงสร้างจุลภาคเกิดต่างกัน โดยบริเวณรอยเชื่อม (WM) เกิดความร้อนสูงสุดรองลงมาคือ บริเวณกระทบร้อนเกรนคอลัมน์าร์ (CGHAZ) และบริเวณกระทบร้อนเกรนละเอียด (FGHAZ) ตามลำดับ ด้วยเหตุนี้จึงทำให้รูปร่างและขนาดเกรนของรอยเชื่อมดังภาพที่ 3 มีโครงสร้างจุลภาคและสมบัติทางกลที่ต่างกัน



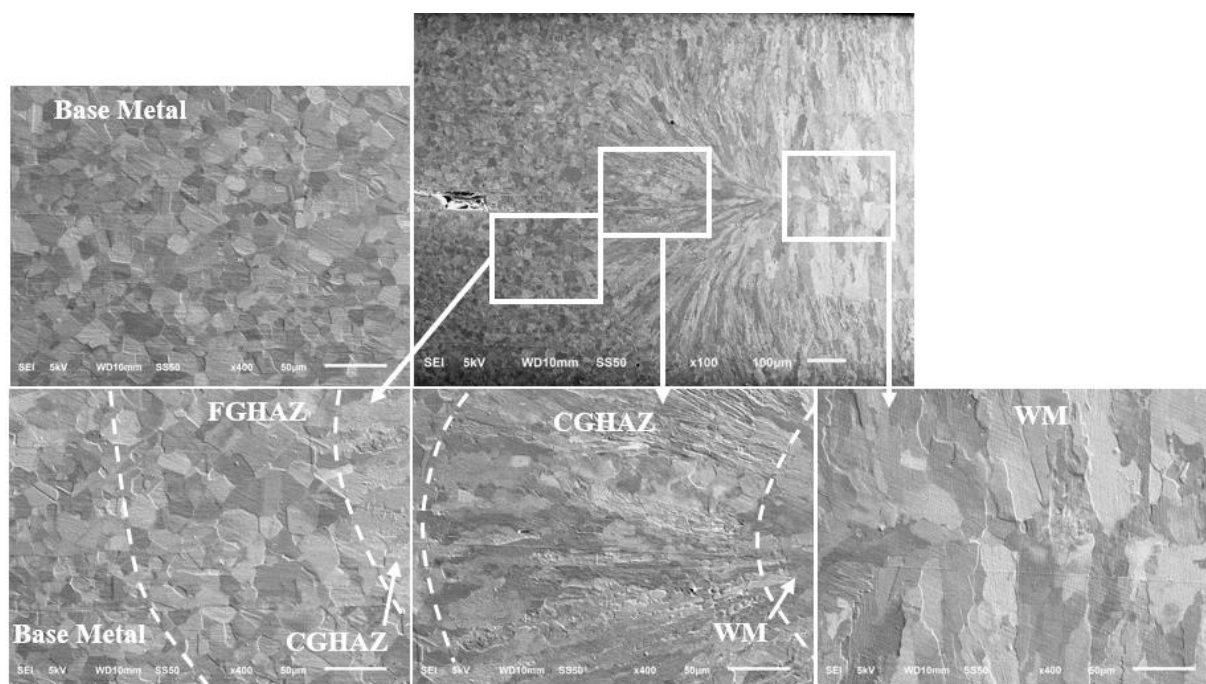
ภาพที่ 3 ภาพถ่าย OM ขนาดเกรนและพื้นที่ WM, CGHAZ, FGHAZ และ Base Metal ที่กำลังขยาย 100x

ภาพที่ 4 และ 5 คือ ภาพถ่ายลักษณะโครงสร้างจุลภาคของจุดเชื่อมจากการถ่ายด้วย SEM ที่กำลังขยาย 100x และ 400x ของชิ้นงานทดสอบที่มีความแข็งแรงต่ำสุด และชิ้นงานทดสอบที่มีความแข็งแรงสูงสุด ตามลำดับ ผลการศึกษา พบว่า ทั้งสองชิ้นงานเกิด

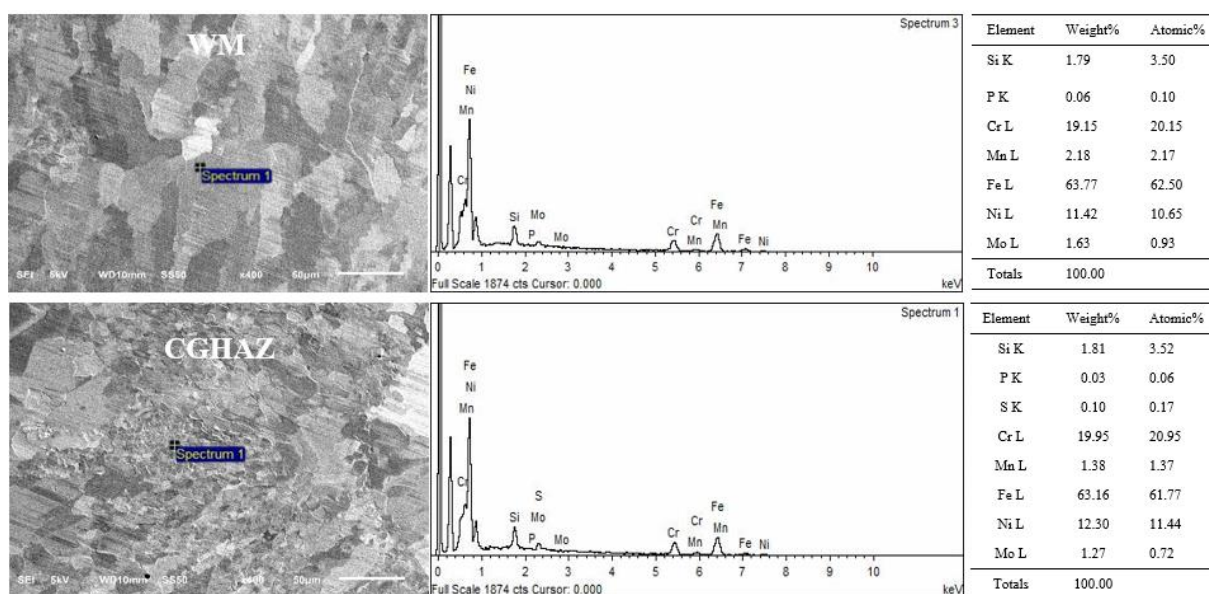
โครงสร้างจุลภาคที่มีลักษณะเหมือนกัน ทั้งด้านลักษณะเฟส ขนาดเกรน และองค์ประกอบทางเคมีของเฟสที่เกิดขึ้นดังแสดงผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีด้วย EDS ดังภาพที่ 6 และ 7 ตามลำดับ



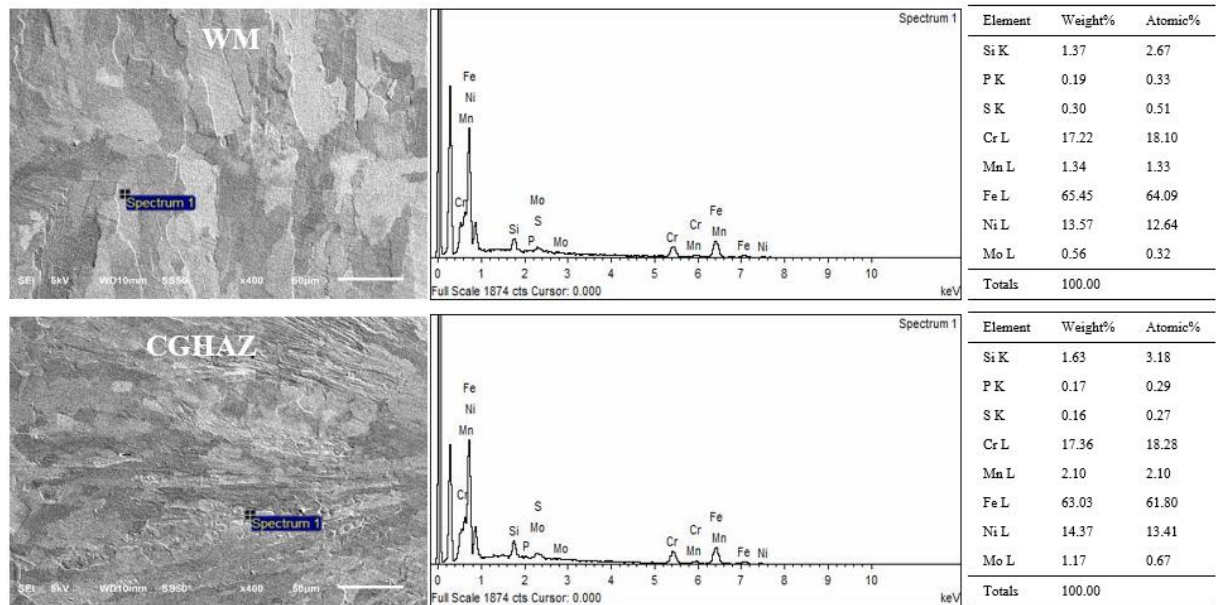
ภาพที่ 4 ภาพถ่าย SEM ที่กำลังขยาย 100x และ 400x ของชิ้นงานทดสอบที่มีความแข็งแรงต่ำสุด บริเวณ WM, CGHAZ, FGHAZ และ Base Metal



ภาพที่ 5 ภาพถ่าย SEM ที่กำลังขยาย 100x และ 400x ของชิ้นงานทดสอบที่มีความแข็งแรงสูงสุด บริเวณ WM, CGHAZ, FGHAZ และ Base Metal



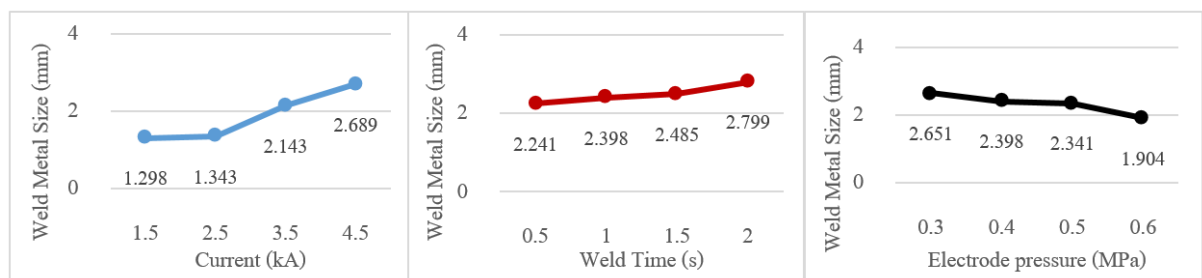
ภาพที่ 6 ผลวิเคราะห์ EDS ที่กำลังขยาย 400x ชิ้นงานทดสอบที่มีความแข็งแรงต่ำสุด บริเวณ WM และ CGHAZ



ภาพที่ 7 ผลวิเคราะห์ EDS ที่กำลังขยาย 400x ชิ้นงานทดสอบที่มีความแข็งแรงสูงสุด บริเวณ WM และ CGHAZ

ผลการศึกษาและวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคของจุดเชื่อมด้วย OM, SEM และ EDS สรุปได้ว่าบริเวณจุดเชื่อมเกิดโครงสร้างจุลภาค ขนาดเกรน และองค์ประกอบทางเคมีของเฟสที่เกิดขึ้นเหมือนกันทุกเงื่อนไขในการทดลอง โดยอิทธิพลของตัวแปรที่ทำการศึกษารั้งนี้ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงขนาด

ของจุดเชื่อมดังแสดงในภาพที่ 8 การเพิ่มขึ้นของกระแสไฟฟ้าและเวลาในการเชื่อมมีผลให้ขนาดจุดเชื่อมโตขึ้น ในขณะที่การที่การเพิ่มขึ้นของความดันจากอิเล็กโทรดกดขึ้นในการเชื่อมมีผลให้จุดเชื่อมมีขนาดเล็กลง

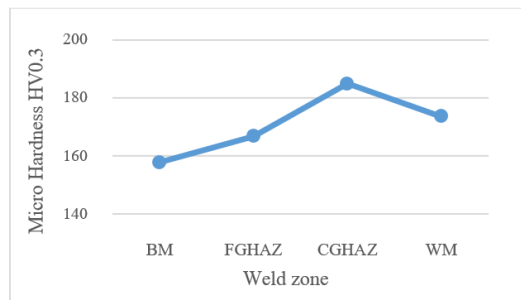


ภาพที่ 8 อิทธิพลของปัจจัยที่ส่งผลต่อขนาดของจุดเชื่อม

3. ผลการศึกษาความแข็งจุลภาค

จากการนำชิ้นทดสอบการศึกษอิทธิพลของตัวแปรที่มีผลต่อโครงสร้างจุลภาคมาทดสอบความแข็งจุลภาค แสดงผลดังภาพที่ 9 จะเห็นได้ว่า พื้นที่ CGHAZ หรือบริเวณกระแทกร้อนเกรนคอลลัมน์มี

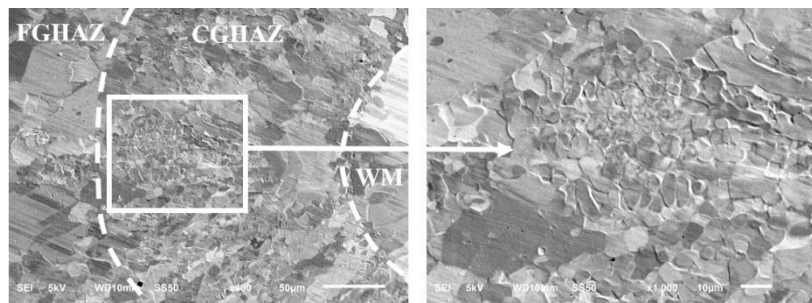
ความแข็งจุลภาคสูงสุดที่ 184.9 HV รองลงมา คือ พื้นที่ WM มีค่าความแข็งเท่ากับ 173.5 HV และ FGHAZ มีความแข็งจุลภาค 166.7 HV พื้นที่ BM (Base metal) จะมีความแข็งน้อยที่สุด 157.7 HV



ภาพที่ 9 กราฟแสดงผลการศึกษาต่อความแข็งจุลภาค

สำหรับสาเหตุที่พื้นที่ CGHAZ มีค่าความแข็งแรงมากกว่าพื้นที่ FGHAZ ผลจากการถ่ายภาพ SEM ที่กำลังขยาย 1000x ภาพที่ 10 พบว่า พื้นที่ CGHAZ ได้รับอิทธิพลทางความร้อนมากกว่าพื้นที่ FGHAZ ทำให้เกิดเกรนขนาดเล็กแทรกอยู่ในพื้นที่ CGHAZ

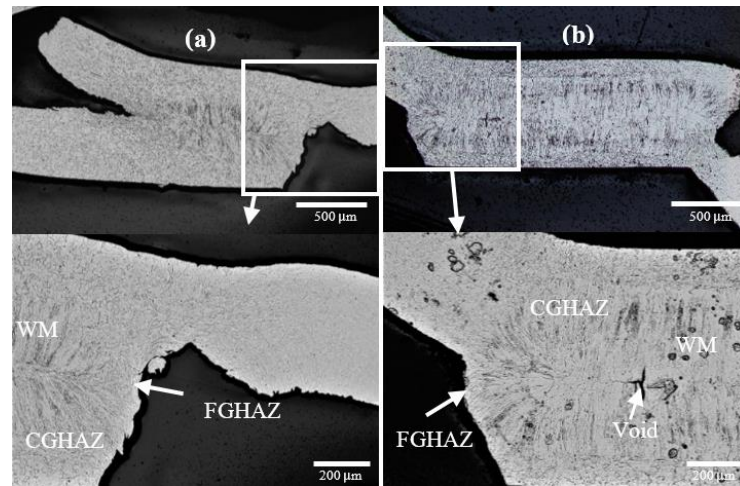
ซึ่งเมื่อเทียบกับขนาดเกรนของพื้นที่ FGHAZ เห็นได้ว่า มีขนาดเกรนที่เล็กกว่าอย่างเห็นได้ชัด ด้วยเหตุนี้จึงทำให้พื้นที่ CGHAZ มีค่าความแข็งแรงและความแข็งมากกว่าพื้นที่ FGHAZ



ภาพที่ 10 ภาพถ่าย SEM พื้นที่ CGHAZ ที่กำลังขยาย 1000x

เมื่อพิจารณาลักษณะการแตกหักของชิ้นงานทดสอบดังภาพที่ 11 พบว่า ชิ้นงานทดสอบทั้ง 2 ชิ้นเกิดการแตกหักบริเวณพื้นที่ FGHAZ หรือพื้นที่โลหะพื้นโซนกระทบร้อนเกรนละเอียดทั้งคู่ เนื่องจากพื้นที่ FGHAZ มีค่าความแข็งต่ำที่สุดในบริเวณจุดเชื่อมจึงต้านแรงเฉือนได้น้อย สำหรับชิ้นงานทดสอบที่ใช้กระแสไฟฟ้า 1,500 A เวลาในการปล่อยกระแสไฟฟ้า 0.5 s และความดันจากอิเล็กทรอนิกส์ชิ้นงาน 0.6 MPa

มีความแข็งแรงต่ำสุด เพราะเงื่อนไขดังกล่าวเกิดความร้อนในการเชื่อมต่ำสุด ทำให้ขนาดรอยเชื่อมหรือขนาดรัศมีของจุดเชื่อมที่เกิดขึ้นมีขนาดเล็กที่สุด ส่งผลให้สามารถรับแรงเฉือนได้น้อยเมื่อเทียบกับการใช้กระแสไฟฟ้าในการเชื่อม 5,000 A เวลาในการปล่อยกระแสไฟฟ้า 2 s และความดันจากอิเล็กทรอนิกส์ชิ้นงาน 0.3 MPa จุดเชื่อมมีขนาดพื้นที่ใหญ่กว่าสามารถรับแรงเฉือนได้สูงกว่า

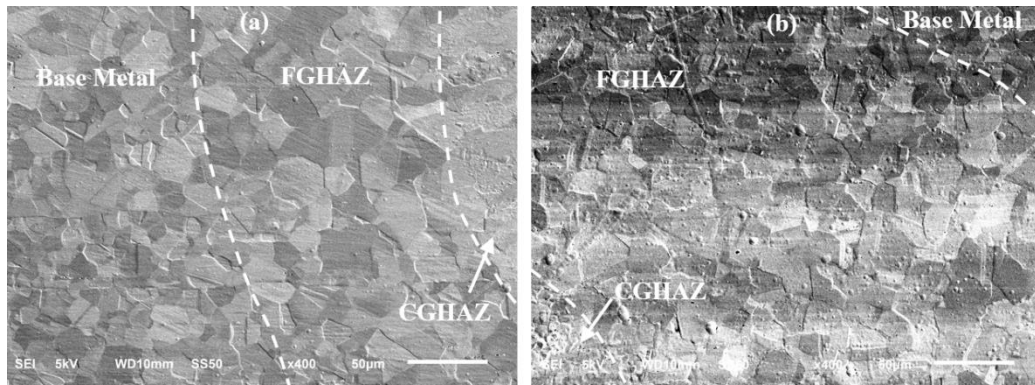


ภาพที่ 11 ลักษณะการแตกหักชิ้นงานทดสอบจากภาพถ่าย OM ที่กำลังขยาย 50x และ 100x ของชิ้นงานทดสอบที่มีความแข็งแรงต่ำสุด (a) และมีความแข็งแรงสูงสุด (b)

อย่างไรก็ตามการเพิ่มกระแสไฟฟ้าในการเชื่อมถึงแม้ว่ามีผลทำให้ขนาดของจุดเชื่อมโตขึ้น แต่ความร้อนในการเชื่อมที่สูงเกินไปส่งผลกระทบบต่อโครงสร้างจุลภาคและคุณสมบัติทางกล ดังแสดงในภาพที่ 12 ภาพถ่าย SEM ที่กำลังขยาย 400x ของพื้นที่ FGHAZ ที่เงื่อนไขกระแสไฟฟ้า 5,000 A เวลาในการปล่อยกระแสไฟฟ้า 2 s และความดันจากอิเล็กโทรดกดขึ้น 0.3 MPa พบว่า ความร้อนที่สูงเกินไปทำให้เกรนโตขึ้นและขยายขอบเขตของพื้นที่โซนกระทบร้อน ยิ่งไปกว่า ยังมีผลให้ค่าความแข็งของพื้นที่ FGHAZ ลดลง โดยมีค่าความแข็งเท่ากับ 153.5 HV ซึ่งมีความแข็งน้อยกว่าพื้นที่ FGHAZ ที่เงื่อนไขกระแสไฟฟ้า 4,500 A มีค่าความแข็งเท่ากับ 166.7 HV ด้วยเหตุนี้จึงทำให้ที่กระแสไฟฟ้าในการเชื่อม 4,500 A เวลาในการปล่อยกระแสไฟฟ้า 2 s และความดันจากอิเล็กโทรดกดขึ้นงาน 0.3 MPa เป็นเงื่อนไขที่สามารถรับแรงเฉือนได้สูงสุดของชิ้นทดสอบที่ได้จากการเชื่อมแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม 316L หนา 0.5 mm ด้วยกระบวนการเชื่อมความดันแบบจุด

สำหรับการเกิด Void หรือโพรงในพื้นที่ WM ในการศึกษาครั้งนี้ เป็นผลมาจากการเพิ่ม

กระแสไฟฟ้าและเวลาในการเชื่อมทำให้เกิดความร้อนสูงขึ้นตามสมการที่ (7) (Vijayan *et al.*, 2019) ความร้อนที่สูงจนโลหะเกิดการหลอมละลายทำให้เกิดการระเหิดของเหลว เกิดเป็น Void ในพื้นที่ของ WM ยิ่งความร้อนสูงโอกาสการเกิด Void ก็มีความเป็นไปได้สูงเช่นกัน ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงพบ Void เกิดในพื้นที่ WM ของการศึกษานี้ของกระแสไฟฟ้าและเวลาในการปล่อยกระแสไฟฟ้าในการเชื่อมสำหรับในแง่ของ Void ที่เกิดขึ้นในการศึกษานี้ของแรงกดนั้น การเพิ่มขึ้นของแรงกดทำให้เกิดความร้อนในการเชื่อมลดน้อยลงแต่แรงกดที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้อัตราการเกิด Void ลดลง เนื่องจากแรงกดที่สูงยับยั้งการระเหิดของเหลวได้ สอดคล้องกับงานวิจัยของ Wang *et al.*, (2014) และ Pouranvari and Marashi (2013) อย่างไรก็ตามโพรงที่เกิดขึ้นในการศึกษาครั้งนี้ไม่มีผลกระทบต่อความแข็งแรงของรอยต่อเนื่องจากพื้นที่ที่เกิดโพรง พบในบริเวณ WM ซึ่งเป็นพื้นที่ที่มีความแข็งแรงมากกว่าพื้นที่ FGHAZ และ Base Metal ดังนั้นในการศึกษานี้จึงไม่พบการแตกหักของชิ้นงานทดสอบเนื่องจากเกิด Void ในพื้นที่ WM



ภาพที่ 12 ภาพถ่าย SEM ที่กำลังขยาย 400x เปรียบเทียบขนาดเกรนและขอบเขตของพื้นที่ FGHAZ (a) ที่กระแสไฟฟ้า 4,500 A และ (b) 5,000 A

สรุป

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาอิทธิพลของตัวแปรในการเชื่อมด้วยความดันแบบจุดที่มีผลต่อความแข็งแรงของรอยต่อแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม 316L หนา 0.5 mm ซึ่งมีตัวแปรที่ศึกษา คือ กระแสไฟฟ้า เวลาในการปล่อยกระแสไฟฟ้า และความดันจากอิเล็กโทรดกดชิ้นงาน ผลจากการศึกษาสามารถสรุปได้ดังต่อไปนี้

1. ผลการศึกษาตัวแปรที่มีผลกระทบต่อความแข็งแรงของรอยต่อ พบว่า ปัจจัยหลัก กระแสไฟฟ้า เวลาปล่อยกระแสไฟฟ้าในการเชื่อม และความดันจากอิเล็กโทรดกดชิ้นงาน รวมทั้งอันตรกิริยาร่วมระหว่างกระแสไฟฟ้า และความดันจากอิเล็กโทรดกดชิ้นงานมีอิทธิพลต่อค่าความแข็งแรงของรอยต่อที่ระดับนัยสำคัญ $\alpha = 0.05$ ค่าปัจจัยที่เหมาะสมในทางสถิติสำหรับชุดการทดลองนี้ คือ กระแสไฟฟ้า 4,400 A เวลาปล่อยกระแสไฟฟ้าในการเชื่อม 2 s และความดันจากอิเล็กโทรดกดชิ้นงาน 0.3 MPa แต่เนื่องจากเครื่องเชื่อมความดันที่ใช้ในการทดลองครั้งนี้มีข้อจำกัดไม่สามารถทดลองที่กระแสไฟฟ้า 4,400 A ได้ ผู้วิจัยจึงทดลองเชื่อมที่ 4,500 A เวลาปล่อยกระแสไฟฟ้าในการเชื่อม 2 s และความดันจาก

อิเล็กโทรดกดชิ้นงาน 0.3 MPa โดยได้ค่าแรงเฉือนสูงสุดเท่ากับ 2,679.59 N

2. ผลการศึกษาโครงสร้างจุลภาค พบว่า การเพิ่มกระแสไฟฟ้าและเวลาในการปล่อยกระแสไฟฟ้าจะทำให้ขนาดของรอยเชื่อมและความแข็งแรงของรอยต่อเพิ่มขึ้น แต่การใช้กระแสไฟฟ้าและเวลาในการปล่อยกระแสไฟฟ้าที่ให้ความร้อนของจุดเชื่อมสูงเกินไปส่งผลกระทบบ่อโซนกระแทกร้อนเกิดการขยายขอบเขตและมีเกรนโตทำให้ความแข็งแรงของรอยต่อลดลง สำหรับการเพิ่มความดันจากอิเล็กโทรดกดชิ้นงานส่งผลให้ขนาดรอยเชื่อมและความแข็งแรงของรอยต่อลดลง

3. ผลการศึกษาความแข็งจุลภาคและลักษณะการแตกหัก พบว่า ชิ้นงานทดสอบทุกชิ้นงานเกิดการแตกหักบริเวณพื้นที่ FGHAZ เนื่องจากพื้นที่ FGHAZ มีค่าความแข็งต่ำที่สุดในบริเวณจุดเชื่อมจึงต้านแรงดึงเฉือนได้น้อย โดยพื้นที่ CGHAZ มีความแข็งจุลภาคสูงสุดที่ 184.9 HV รองลงมา คือ พื้นที่ WM มีค่าความแข็งเท่ากับ 173.5 HV และ FGHAZ มีความแข็งจุลภาคต่ำสุดที่ 166.7 HV

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์ และสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (วช.) ที่ให้การสนับสนุนงานวิจัยนี้ตามสัญญาเลขที่ A-52/2561 และขอบคุณสถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์ ที่ให้การสนับสนุนโครงการวิจัยนี้

เอกสารอ้างอิง

- Akkas, N. 2017. Welding Time Effect on Tensile–Shear Loading in Resistance Spot Welding of SPA-H Weathering Steel Sheets Used in Railway Vehicles. **Acta Physica Polonica A** 131(1): 52-54.
- American Welding Society. 2008. AWS. C1.4M/C1.4. 2009 Specification for resistance welding of carbon and low-alloy steels. **American National Standards Institute**. 2nd ed. AWS publishes, USA.
- American Welding Society. 2012. AWS. D8.9M-2012 Test Methods for Evaluating the Resistance Spot Welding Behavior of Automotive Sheet Steel Materials. **American National Standards Institute**. 3rd ed. AWS publishes, USA.
- Banerjee, P., Sarkar, R., Pal, T.K. and Shome, M. 2016. Effect of nugget size and notch geometry on the high cycle fatigue performance of resistance spot welded DP590 steel sheets. **Journal of Materials Processing Technology** 238: 226-243.
- Beni, S.S., Atapour, M., Salmani, M.R. and Ashiri, R. 2019. Resistance Spot Welding Metallurgy of Thin Sheets of Zinc-Coated Interstitial-Free Steel. **Metallurgical and Materials Transactions A** 50(5): 2218-2234.
- Cao, X., Li, Z., Zhou, X., Luo, Z. and Duan, J. 2021. Modeling and optimization of resistance spot welded aluminum to Al-Si coated boron steel using response surface methodology and genetic algorithm. **Measurement** 171: 0263-2241.
- Chailungka, N., Narkpasom, N. and Assawarachan, R. 2013. Optimization of sliced carrot drying using response surface methodology. **RMUTSB Academic Journal** 1(2): 92-102. (in Thai)
- Julupai, Y. 1996. Brazing. **Welding and Metal Technology** 14(25): 51-61. (in Thai)
- Kianersi, D., Mostafaei, A. and Amadeh, A.A. 2014. Resistance spot welding joints of AISI 316L austenitic stainless steel sheets: Phase transformations, Mechanical properties and microstructure characterization. **Materials and Design** 61: 251-263.
- Kim, G.C., Hwang, I., Kang, M., Kim, D., Park, H. and Kim, Y.M. 2019. Effect of Welding Time on Resistance Spot Weldability of Aluminum 5052 Alloy. **Metals and Materials International** 25(1): 207-218.
- Lee, H.T. and Chang, Y.C. 2020. Effect of Double Pulse Resistance Spot Welding Process on 15B22 Hot Stamped Boron Steel. **Metals** 10: 1279.
- Marashi, P. 2008. Microstructure and failure behavior of dissimilar resistance spot welds between low carbon galvanized and austenitic stainless steel. **Materials Science and Engineering** 480: 175-180.

- Miller. 2012. **Handbook for Resistance Spot Welding**. Millerweld, USA.
- NAS. 1990. **Long products stainless steel grade sheet**. North American stainless. Available source: <https://www.northamericanstainless.com/flat-products/steel-grades/>, January 12, 2021.
- NiDi. 1979. **Welding of stainless steels and other joining methods**. American iron and steel institute, Washington DC.
- Pouranvari, M. and Marashi, P. 2013. Critical review of automotive steels spot welding: Process, structure and properties. **Science and Technology of Welding and Joining** 18(5): 361-403.
- Pouranvari, M. and Ranjbarnoode, E. 2013. Effect of electrode force on fracture type of DQSK steel resistance spot welds. **Acta Metallurgical Slovaca** 19: 149-153.
- Salem, M. 2011. Control and Power Supply for Resistance Spot Welding (RSW). Doctor of Philosophy (Electrical and Computer Engineering), The University of Western Ontario.
- Verm, A.B., Ghunage, S.U. and Ahuja, B.B. 2014. Resistance welding of austenitic stainless steel (AISI 304 with AISI 315), pp. 302-1-302-6. *In All India Manufacturing Technology, Design and Research Conference 26th*. IIT Guwahati, Assam, India.
- Vijayan, V., Murugan, S.P., Son, SG. and Yeong, D.P. 2019. Shrinkage Void Formation in Resistance Spot Welds: its Effect on Advanced High-Strength-Steel Weld Strength and Failure Modes. **Journal of Materials Engineering and Performance** 28: 7514-7526.
- Wang, X., Wang, Y. and Fang, C. 2014. Welding Defects Occurrence and Their Effects on Weld Quality in Resistance Spot Welding of AHSS Steel. **Journal of the Iron and Steel Institute of Japan** 54(8): 1883-1889.
- Wohner, M., Mitzschke, N. and Jüttner, S. 2021. Resistance spot welding with variable electrode force development and benefit of a force profile to extend the weldability of 22MnB5+AS150. **Weld World** 65: 105-117.
- Zhang, Y., Guo, J., Li, Y., Luo, Z. and Zhang, X. 2020. A comparative study between the mechanical and microstructural properties of resistance spot welding joints among ferritic AISI 430 and austenitic AISI 304 stainless steel. **Journal of Materials Research and Technology** 9(1): 574-583.