

ปัจจัยที่ส่งผลต่อสมบัติความแข็งแรงเฉือน-ดึงของรอยต่อเกยระหว่างเหล็กกล้าคาร์บอน SS400 และเหล็กกล้าไร้สนิม SUS304 โดยใช้กระบวนการเชื่อมอาร์กโลหะแก๊สคลุม

Factors affecting tensile-shear strength properties of lap joints between SS400 carbon steel and SUS304 stainless steel using gas metal arc welding process

อมรศักดิ์ มาใหญ่¹, ณรงค์ศักดิ์ ธรรมโชติ¹, พีรเดช สุวิทยารักษ์¹ และ วีระพล ทับทิมดี^{2*}

Amornsak Mayai¹, Narongsak Thammachot¹, Peeradaech Suwittayaruk¹ and Weerapol Taptimdee^{2*}

Received: 15 May 2024 ; Revised: 8 July 2024 ; Accepted: 13 August 2024

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อสมบัติด้านความแข็งแรงเฉือน-ดึงของรอยต่อเกยระหว่างเหล็กกล้าคาร์บอน SS400 กับเหล็กกล้าไร้สนิม SUS304 โดยใช้กระบวนการเชื่อมโลหะแก๊สคลุม ทำตั้ง เชื่อมลง ควบคุมการเชื่อมด้วยแขนหุ่นยนต์เชื่อม โดยพิจารณาถึงปัจจัยการเชื่อม 2 ปัจจัย ปัจจัยละ 3 ระดับ ได้แก่ กระแสไฟเชื่อม (120, 140 และ 160 แอมแปร์) และความเร็วในการเชื่อม (200, 250 และ 300 มิลลิเมตรต่อนาที) โดยใช้การออกแบบแฟกทอเรียลเต็มรูปแบบ เพื่อวิเคราะห์ความแปรปรวนของข้อมูลอิทธิพลของปัจจัยหลักและอิทธิพลของปัจจัยร่วมที่มีผลต่อความแข็งแรงเฉือน-ดึง ผลการวิจัยพบว่า กระแสไฟเชื่อมและความเร็วในการเชื่อมที่เปลี่ยนแปลงไปส่งผลต่อความแข็งแรงเฉือน-ดึง เมื่อเชื่อมด้วยความเร็วในการเชื่อมคงที่ กระแสไฟเชื่อมสูงขึ้น ส่งผลให้ความแข็งแรงเฉือน-ดึงเพิ่มขึ้นและรอยเชื่อมกว้างขึ้น เมื่อความเร็วในการเชื่อมเพิ่มขึ้นส่งผลให้ความแข็งแรงเฉือน-ดึงลดลงและรอยเชื่อมแคบลง ผลของค่ามุมตัดเฉื่อยมีการเปลี่ยนแปลงไปในทิศทางเดียวกันกับความแข็งแรงเฉือน-ดึง กล่าวคือเมื่อเชื่อมด้วยกระแสไฟสูงขึ้น ความเร็วในการเชื่อมคงที่ ส่งผลให้มุมตัดเฉื่อยเพิ่มขึ้นและเมื่อความเร็วในการเชื่อมเพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่ามุมตัดเฉื่อยลดลง เมื่อเชื่อมด้วยกระแสไฟ 160 แอมแปร์ ความเร็ว 200 มิลลิเมตรต่อนาที ทำให้ได้ค่าความแข็งแรงเฉือน-ดึงสูงสุด

คำสำคัญ: รอยต่อเกย, สมบัติด้านความแข็งแรงเฉือน-ดึง, กระบวนการเชื่อมโลหะแก๊สคลุม, เหล็กกล้าคาร์บอน SS400, เหล็กกล้าไร้สนิม SUS304

Abstract

This research aims to study the factors affecting the tensile-shear strength of lap joints between SS400 carbon steel and SUS304 stainless steel welded using the gas metal arc welding process (GMAW) in the vertical down position with a welding robot arm. The experimental variables include three welding parameters, each with three levels: welding current (120, 140, and 160 amperes) and welding speed (200, 250, and 300 millimeters per minute). A full factorial design was employed to analyze the data variance, main effect, and interaction effects on shear-tensile strength. The results demonstrate that welding current and welding speed had a significant influence on the shear-tensile strength of the lap joints. When welding at a constant speed, increasing the welding current resulted in higher tensile-shear strength and a wider weld bead size. However, increasing the welding speed led to a decrease in tensile-shear strength and narrower weld beads. The trend of the average bent angle was consistent with that of the tensile-shear strength. When welding at a constant welding speed, a higher welding current resulted in a higher bend angle average, while increasing the welding speed lowered the bend angle average. A welding current of 160 A and 200 mm/min speed yielded the highest tensile-shear strength.

Keywords: Lab joints, tensile-shear strength, gas metal arc welding process, SS400 carbon steel, SUS304 stainless steel.

¹ สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา 30000

² สาขาวิชาวิศวกรรมการผลิตอัตโนมัติ คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏราชนครินทร์ อำเภอเมือง จังหวัดฉะเชิงเทรา 24000

¹ Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering and Technology, Rajamangala University of Technology Isan, Muang, Nakorn Ratchasima 30000

² Department of Automated Manufacturing Engineering, Faculty of Industrial Technology, Rajabhat Rajanagarindra University, Muang, Chachoengsao 24000

* Corresponding author: Weerapol Taptimdee E-mail: weerapol@techno.rru.ac.th

บทนำ

การเชื่อมถือเป็นเทคนิคการต่อโลหะที่มีบทบาทสำคัญในอุตสาหกรรมต่างๆ ตั้งแต่อุตสาหกรรมการก่อสร้างไปจนถึงอุตสาหกรรมการผลิต โดยการเชื่อมทำหน้าที่หลักในการต่อวัสดุเข้าด้วยกันเพื่อให้เกิดโครงสร้างที่มีความแข็งแรง ในปัจจุบันการเชื่อมด้วยแขนหุ่นยนต์เชื่อม (Welding robot arm) ได้รับความนิยมอย่างแพร่หลายในภาคอุตสาหกรรมการผลิตต่างๆ เช่น การใช้แขนหุ่นยนต์เชื่อมในอุตสาหกรรมการต่อเรือ (Lee, 2014), การใช้แขนหุ่นยนต์เชื่อมในการเชื่อมถังแรงดันสูงในอุตสาหกรรมปิโตรเคมี (Vosniakos *et al.*, 2022), การใช้แขนหุ่นยนต์เชื่อมในอุตสาหกรรมยานยนต์ในการเชื่อมตัวถังและชิ้นส่วน (Thakare, 2018) เป็นต้น แขนหุ่นยนต์เชื่อมมีประสิทธิภาพที่ดีทั้งในด้านการรักษาความสม่ำเสมอของคุณภาพการเชื่อม การรักษาความต่อเนื่องและการทำงานซ้ำๆ ทำให้มั่นใจได้ถึงผลของรอยเชื่อมที่แม่นยำ (Wang *et al.*, 2021)

การเชื่อมโลหะต่างชนิดกันเป็นงานที่ซับซ้อนเนื่องจากมีความแตกต่างกันด้านองค์ประกอบทางเคมีและสมบัติของวัสดุแต่ละประเภท เช่น สมบัติทางกล สมบัติทางกายภาพ และคุณลักษณะทางโลหะวิทยา สมบัติเหล่านี้มีบทบาทสำคัญต่อโครงสร้างโดยรวมและความน่าเชื่อถือของการเชื่อม จากรายงานการวิจัยที่ผ่านมาการศึกษาถึงการนำโลหะต่างชนิดกันมาต่อกันโดยการเชื่อมและศึกษาถึงปัจจัยต่างๆ ที่มีผลกระทบต่อแนวเชื่อม ซึ่งแสดงให้เห็นว่า มีความเป็นไปได้ในการนำโลหะต่างชนิดมาเชื่อมเข้าด้วยกันด้วยกระบวนการเชื่อมในรูปแบบต่างๆ เช่น การเชื่อมด้วยแรงเสียดทาน (FSW) ต่อชนทำราบ ระหว่างเหล็กกล้าไร้สนิม 304L และทองแดง (Tanmay & Panda, 2023) การเชื่อมโลหะแก๊สคลุม (GMAW) ต่อชนทำราบ ระหว่างเหล็กกล้าไร้สนิม 304L และเหล็กกล้าไร้สนิม 403 (Khan *et al.*, 2021) การเชื่อมอาร์คทังสเทนแก๊สปกคลุม (GTAW) ต่อชนทำราบ ระหว่างเหล็กกล้าคาร์บอน SS400 และเหล็กกล้าไร้สนิม 316L (Jahanzeb *et al.*, 2017) การเชื่อมด้วย

พลาสมา (PAW) ต่อเกย ทำราบ ระหว่างเหล็กกล้าคาร์บอน SS400 และเหล็กกล้าไร้สนิม 304 (Purnama & Oktadinata, 2019) เป็นต้น เห็นได้ว่า มีการนำเหล็กกล้าไร้สนิมหรือเหล็กกล้าคาร์บอนมาเชื่อมต่อกับโลหะต่างชนิดกันด้วยกระบวนการเชื่อมทำเชื่อม และการต่อที่แตกต่างกัน อย่างไรก็ตามการศึกษาถึงกระบวนการเชื่อมต่อเกย ทำตั้งของเหล็กกล้าคาร์บอนและเหล็กกล้าไร้สนิมด้วยกระบวนการเชื่อม GMAW ที่เชื่อมด้วยแขนหุ่นยนต์เชื่อมยังมีไม่มากนัก เนื่องจากการเชื่อมทำตั้งต้องคำนึงถึงแรงโน้มถ่วงของโลกที่กระทำกับน้ำโลหะเหลวไหลลงสู่ด้านล่าง ซึ่งอาจส่งผลกระทบต่อคุณภาพงานเชื่อมได้ ดังนั้นจึงควรพิจารณาถึงปัจจัยที่เหมาะสมที่ส่งผลต่องานเชื่อม เช่น กระแสไฟเชื่อม ความเร็วในการเดินแนวเชื่อม ความเร็วลวดเชื่อม เป็นต้น เพื่อให้ได้แนวเชื่อมที่มีคุณภาพทั้งทางกายภาพ ทางกลและโครงสร้างจุลภาค

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงได้ศึกษาถึงปัจจัยที่มีผลต่อสมบัติด้านความแข็งแรงเฉือน-ดึงของรอยต่อเกยระหว่างเหล็กกล้าคาร์บอน SS400 กับเหล็กกล้าไร้สนิม SUS304 ในกระบวนการเชื่อมโลหะแก๊สคลุม ทำตั้ง เชื่อมลง ควบคุมการเชื่อมด้วยแขนหุ่นยนต์เชื่อม โดยการวิเคราะห์พารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้อง ได้แก่ กระแสไฟเชื่อมและความเร็วในการเชื่อมที่ส่งผลต่อสมบัติด้านความแข็งแรงเฉือน-ดึงของรอยเชื่อมสำหรับวัสดุต่างชนิดกัน

วิธีดำเนินงานวิจัย

วัสดุและคุณสมบัติ

วัสดุที่นำมาใช้ในงานวิจัยนี้ คือ เหล็กกล้าคาร์บอน SS400 เหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก SUS304 และลวดเชื่อมที่ใช้เชื่อม คือ ลวดเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิม ER309L ตามมาตรฐาน AWS A5.9 ทำการวิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมีของวัสดุทั้ง 3 ชนิดด้วยเครื่อง Emission spectrometer (ยี่ห้อ Amarex รุ่น Spectromaxx) ผลการตรวจสอบส่วนผสมทางเคมี แสดงดัง Table 1

Table 1 Chemical compositions of materials and electrodes used in the study.

materials and electrodes	Chemical compositions (%)									
	Cr	Ni	C	Mn	P	S	Si	Mo	Ni	Cu
SS400	0.051	0.047	0.116	0.542	0.012	0.014	-	0.009	0.047	0.179
SUS304	18.513	7.983	0.078	1.763	0.021	0.008	-	0.235	7.983	0.306
ER309L	24.5	13.0	0.025	1.88	0.02	0.01	0.40	0.35	0.10	0.35

การเตรียมชิ้นงานและปัจจัยการทดลอง

เหล็กกล้าคาร์บอน SS400 และเหล็กกล้าไร้สนิม SUS304 ความหนา 3 มิลลิเมตร นำมาตัดให้มีขนาด 100 × 200 มิลลิเมตร วัสดุทั้งสองชนิดนำมาต่อกันโดย SUS304 วางทับบน SS400 โดยกำหนดให้มีระยะเกยของโลหะเชื่อมเท่ากับ 30 มิลลิเมตร (ASTM D 1002-99) ทำการเชื่อมด้านเดียว ด้วยกระบวนการเชื่อมโลหะแก๊สคลุม (GMAW) ในท่าตั้ง เชื่อมลง มุมในการเดินแนวเชื่อมเท่ากับ 45 องศา ควบคุมการเชื่อมด้วยแขนหุ่นยนต์เชื่อม (ยี่ห้อ Panasonic รุ่น VR-006) เชื่อมด้วยลวดเชื่อม ER309L ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางลวดเชื่อมเท่ากับ 1.2 มิลลิเมตร ใช้แก๊สอาร์กอน (99.99% Ar) ในการปกคลุมแนวเชื่อม อัตราการไหลของแก๊ส 12 ลิตร/นาที ลักษณะการต่อเกยและทิศทางการเดินแนวเชื่อม แสดงดัง Figure 1

ในงานวิจัยนี้ ได้กำหนดปัจจัยที่ใช้ในการทดลอง 2 ปัจจัย ปัจจัยละ 3 ระดับ ได้แก่ ค่ากระแสไฟเชื่อม (120, 140 และ 160 แอมแปร์) และความเร็วในการเชื่อม (200, 250 และ 300 มิลลิเมตรต่อนาที) จำนวนตัวอย่างที่ใช้ในการทดลองระดับปัจจัยละ 5 ตัวอย่าง รวมทั้งสิ้น 45 ตัวอย่าง

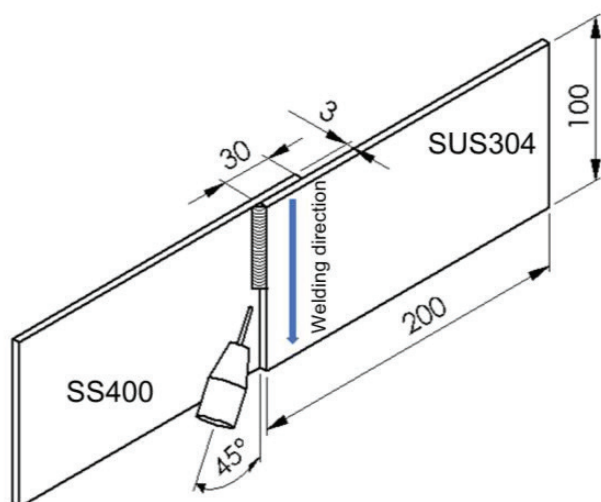


Figure 1 The characteristics of the lap joint and the welding direction.

การทดสอบลักษณะผิวหน้ารอยเชื่อม ความแข็งแรงเฉือน-ดึงและมุมตัด

หลังการเชื่อม ชิ้นงานตัวอย่างถูกนำมาตรวจสอบลักษณะผิวหน้ารอยเชื่อมด้วยสายตา (Visual test) ได้แก่ เกล็ดของแนวเชื่อม และขนาดแนวเชื่อม เป็นต้น จากนั้นจึงเตรียมชิ้นงานตัวอย่างเพื่อใช้เป็นชิ้นทดสอบความแข็งแรงเฉือน-ดึง โดยตัดบริเวณจุดเริ่มต้นและจุดสิ้นสุดแนวเชื่อมทั้งและชิ้นงานตัวอย่างสำหรับทดสอบแรงเฉือน-ดึงถูกตัดบริเวณพื้นที่ถัดมา

แสดงดัง Figure 2 ชิ้นทดสอบถูกกัดขึ้นรูปด้วยเครื่อง CNC ให้มีขนาดกว้าง 25.4 มิลลิเมตรและยาว 170 มิลลิเมตร จากนั้นเพื่อจำกัดความเสียหายให้เกิดขึ้นเฉพาะบริเวณแนวเชื่อมเท่านั้น จึงนำชิ้นทดสอบมาทำการกัดบริเวณด้านข้างแนวเชื่อมเพื่อกำหนดรอยฉีกขาดของชิ้นทดสอบ ที่ต้องเตรียมชิ้นทดสอบเช่นนี้เนื่องจากเมื่อชิ้นทดสอบรับแรงเฉือน-ดึง ตำแหน่งของความเสียหายจะเกิดขึ้นบนโลหะฐานซึ่งอยู่ห่างจากบริเวณแนวเชื่อม ซึ่งกลไกการฉีกขาดของโลหะฐานเกิดขึ้นก่อนที่จะเกิดความเสียหายที่เนื้อเชื่อม สิ่งนี้เกิดขึ้นเนื่องจากบริเวณเนื้อเชื่อมและพื้นที่ที่ได้รับผลกระทบจากความร้อน มีความแข็งแรงสูงกว่าโลหะฐาน (Amodeo *et al.*, 2014) ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงเตรียมชิ้นทดสอบโดยกัดบริเวณด้านข้างรอยเชื่อม ดัง Figure 3 การทดสอบความแข็งแรงเฉือน-ดึงดำเนินการตามมาตรฐาน ASTM D1002-99 (American Society for Testing and Materials, 1999) โดยใช้เครื่องทดสอบแรงดึงอเนกประสงค์ (Universal testing machine ยี่ห้อ LLOYD รุ่น LB100 plus) การจับชิ้นงานทดสอบบนเครื่องทดสอบแรงดึงอเนกประสงค์ แสดงดัง Figure 4 (a) จากนั้นจึงทำการวัดมุมตัดของชิ้นทดสอบด้วยใบวัดมุม (Kimapong & Triwanapong, 2018) แสดงดัง Figure 4 (b)

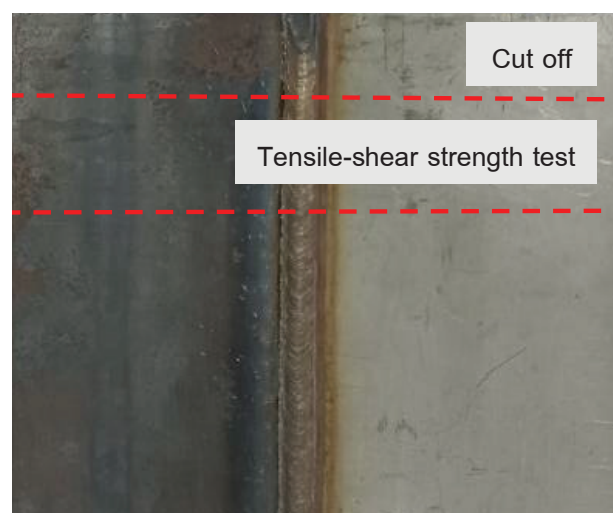


Figure 2 Specimen cutting positions.

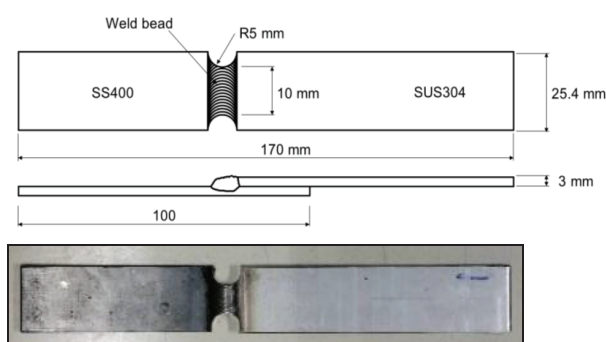


Figure 3 Preparation specimen of a tensile-shear strength test according to the ASTM D1002 – 99 standards.

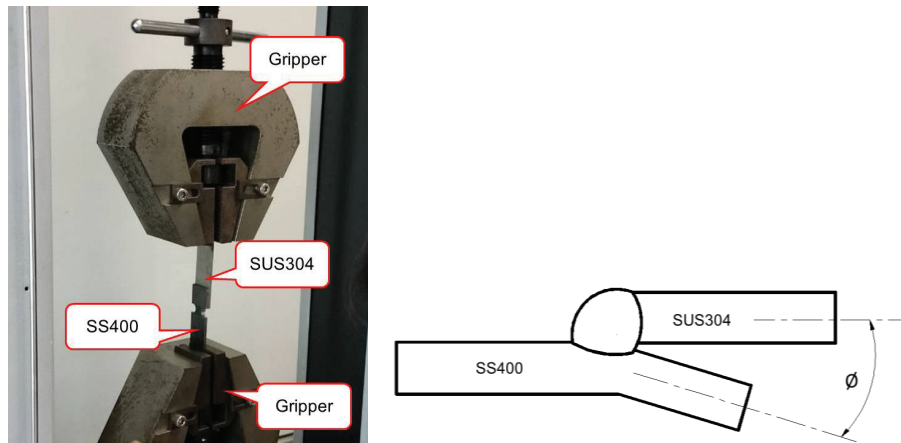


Figure 4 (a) tensile-shear strength test on universal testing machine (b) Bent angle measurement.

สถิติที่ใช้ในการวิจัย

ในงานวิจัยนี้ ดำเนินการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติด้วยโปรแกรม Minitab ในการวิเคราะห์ความแปรปรวนของข้อมูลและอิทธิพลของปัจจัยร่วมที่มีผลต่อความแข็งแรงเฉือนดึง ด้วยวิธีการออกแบบแฟกทอเรียลเต็มรูปแบบเพื่อยืนยันสมมติฐานในการทดลองว่าผลกระทบของกระแสไฟเชื่อมและความเร็วในการเชื่อมที่เปลี่ยนแปลงไปมีผลต่อสมบัติทางกลด้านความแข็งแรงเฉือนดึงของแนวเชื่อมหรือไม่ กำหนดระดับนัยสำคัญที่ระดับ 0.05

ผลการวิจัย

ลักษณะผิวหน้ารอยเชื่อม

ชิ้นงานตัวอย่างที่นำมาวิเคราะห์ลักษณะผิวหน้ารอยเชื่อมหลังการเชื่อมนี้ ผู้วิจัยได้เลือกใช้กระแสไฟเชื่อมคงที่ 140 แอมแปร์ และกำหนดความเร็วในการเชื่อมที่แตกต่างกันดัง Figure 5 และเลือกความเร็วในการเชื่อม 250 มิลลิเมตรต่อ นาที และปรับกระแสไฟเชื่อมที่แตกต่างกัน ดัง Figure 6 ซึ่งถูกใช้เป็นตัวแทนของตัวแปรทั้งสองชนิดเนื่องจากเป็นค่ากลางของตัวแปรที่ใช้ในการทดลองในงานวิจัยนี้

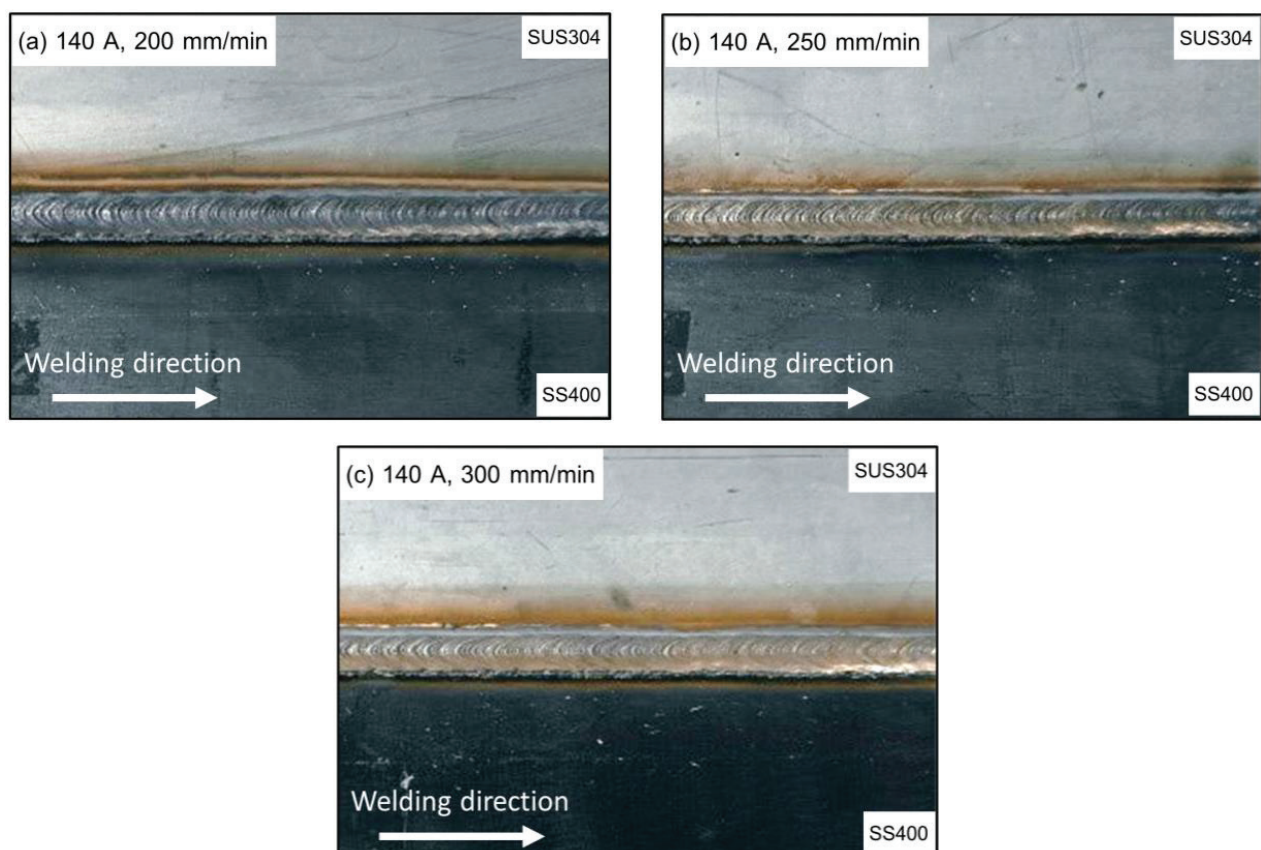


Figure 5 Surface characteristics of the weld seam at a welding current of 140 A and the welding speeds of (a) 200 mm/min, (b) 250 mm/min, and (c) 300 mm/min.

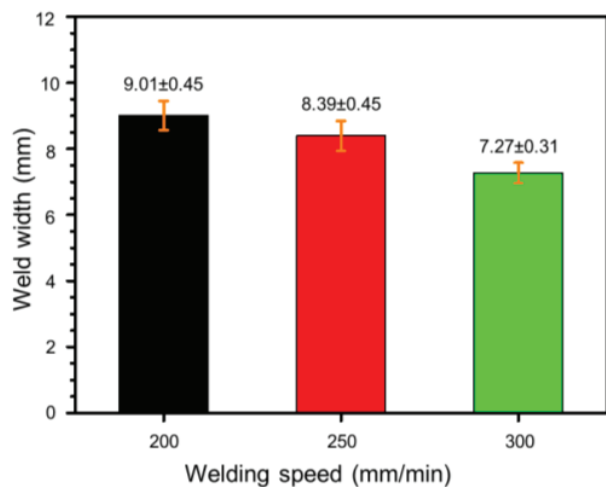


Figure 6 Weld width when using a welding current of 140 A and the welding speeds of 200, 250 and 300 mm/min.

Figure 5 แสดงลักษณะผิวหน้าของรอยเชื่อม เมื่อเชื่อมด้วยความเร็ว 200, 250 และ 300 มิลลิเมตรต่อนาที พบว่าแนวเชื่อมทั้งหมดมีความสมบูรณ์ ไม่พบความไม่ต่อเนื่องบนแนวเชื่อม เมื่อเชื่อมด้วยความเร็ว 200 มิลลิเมตรต่อนาที (Figure 5 (a)) เกล็ดของแนวเชื่อมละเอียดและมีความกว้างของแนวเชื่อมเฉลี่ยที่ 9.01 มิลลิเมตร (Figure 6) แต่เมื่อเพิ่มความเร็วในการเชื่อมให้สูงขึ้นจาก 200 มิลลิเมตรต่อนาที เป็น 250 และ 300 มิลลิเมตรต่อนาที (Figure 5 (b, c)) พบว่า เมื่อความเร็วเพิ่มขึ้น เกล็ดของแนวเชื่อมหยาบขึ้นและขนาดแนวเชื่อมแคบลง โดยมีขนาดความกว้างของแนวเชื่อมเฉลี่ยลดลง เป็น 8.39 และ 7.27 มิลลิเมตร ตามลำดับ (Figure 6) ผลนี้เกิดขึ้นเนื่องจากเมื่อความเร็วในการเคลื่อนที่เพิ่มขึ้นทำให้หยดของน้ำโลหะหลอมเหลวสะสมจากจุดเชื่อมเดิมลงในแนวเชื่อมได้น้อยลง ซึ่งส่งผลให้ความกว้างของแนวเชื่อมลดลง (Kumar *et al.*, 2021; Panda *et al.*, 2019)

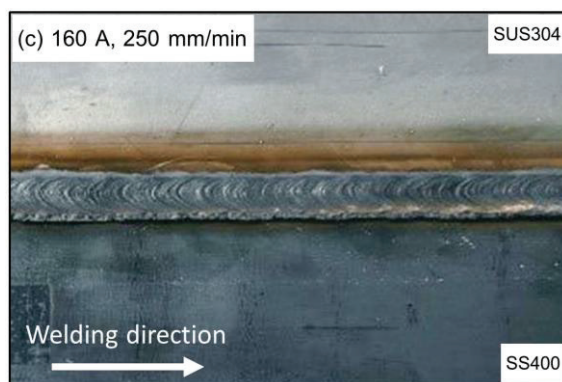
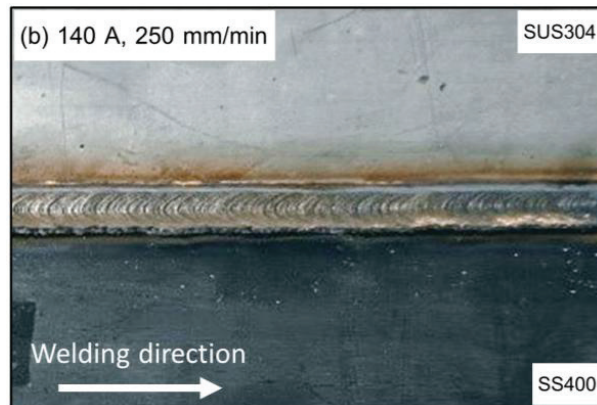
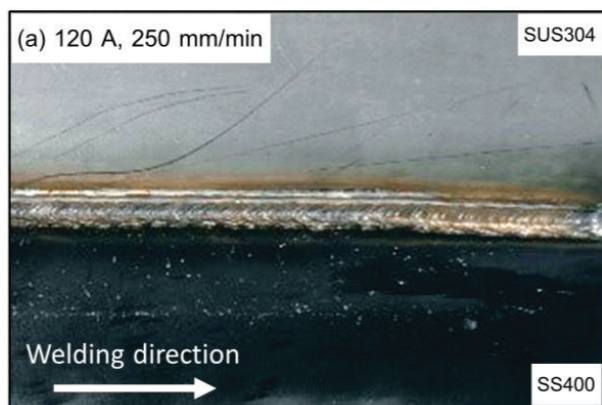


Figure 7 Surface characteristics of the weld seam on a welding speed of 250 mm/min and the welding current of (a) 120 A, (b) 140 A, and (c) 160 A.

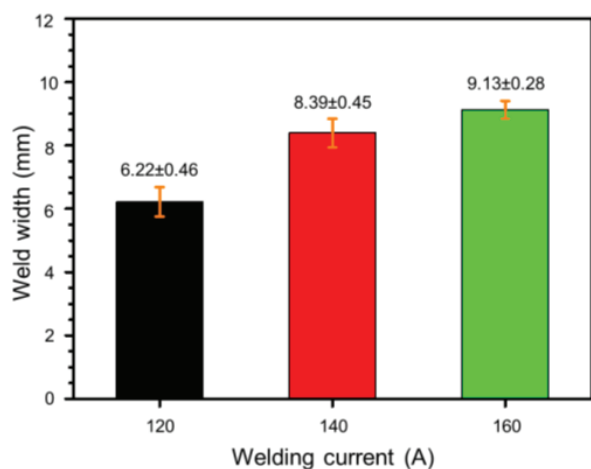


Figure 8 Width of weld seam when using a welding speed of 250 mm/min on the welding currents of 120, 140 and 160 A.

Figure 7 แสดงลักษณะผิวหน้าของแนวเชื่อม เมื่อเชื่อมด้วยกระแสไฟ 120, 140 และ 160 แอมแปร์ ผลแสดงให้เห็นว่า แนวเชื่อมทั้งหมดมีความสมบูรณ์ ไม่พบความไม่ต่อเนื่องบนแนวเชื่อม เมื่อเชื่อมด้วยกระแสไฟเชื่อม 120 แอมแปร์ ดัง Figure 7 (a) พบว่า เกิดลักษณะของแนวเชื่อมหยาบและมีขนาดของแนวเชื่อมที่ค่อนข้างแคบ โดยมีขนาดแนวเชื่อมเท่ากับ 6.22 มิลลิเมตร (Figure 8) เมื่อเพิ่มกระแสไฟเชื่อมให้สูงขึ้นเป็น 140 และ 160 แอมแปร์ พบว่า ขนาดของแนวเชื่อมมีขนาดที่กว้างขึ้น โดยมีขนาดแนวเชื่อมเท่ากับ 8.39 และ 9.13 มิลลิเมตร ตามลำดับ (Figure 8) การเพิ่มขึ้นของกระแสไฟเชื่อมแสดงให้เห็นถึงผลกระทบที่มีต่อความกว้างของรอยเชื่อม เมื่อเพิ่มกระแสไฟเชื่อมให้สูงขึ้น หยดน้ำโลหะหลอมเหลวขนาดใหญ่ก็สะสมตัว จากนั้นจึงตกลงมาสะสมในแนวเชื่อมในขณะที่มีความเร็วในการเคลื่อนที่คงที่ จึงทำให้ความกว้างของรอยเชื่อมเพิ่มขึ้น (Pan *et al.*, 2018; Pathak *et al.*, 2021)

ผลการทดสอบแรงเฉือน-ดึงและมูมดัด

ผลการทดสอบแรงเฉือน-ดึงของชิ้นงานทดสอบ และกราฟเปรียบเทียบความสัมพันธ์ของแรงเฉือน-ดึงเมื่อกระแสไฟและความเร็วในการเชื่อมที่แตกต่างกัน แสดงดัง Table 2 และ Figure 9 ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่า การเชื่อมด้วยกระแสไฟที่เพิ่มขึ้นทำให้ความแข็งแรงแรงเฉือน-ดึงเพิ่มขึ้น เมื่อเปรียบเทียบความเร็วในการเชื่อมที่เท่ากัน ดัง Figure 9 (a) เมื่อเชื่อมด้วยความเร็ว 200 มิลลิเมตรต่อนาที กระแสไฟ 120 แอมแปร์ ค่าแรงเฉือน-ดึงมีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 297.5 นิวตันต่อตารางมิลลิเมตร และเมื่อกระแสไฟเพิ่มขึ้นเป็น 140 และ 160 แอมแปร์ ค่าแรงเฉือน-ดึงเพิ่มขึ้นเป็น 481.6 นิวตันต่อตารางมิลลิเมตร และ 516.3 นิวตันต่อตารางมิลลิเมตร ตามลำดับ ซึ่งแรงเฉือน-ดึงเพิ่มขึ้นเกือบ 2 เท่า เมื่อเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยระหว่างกระแส

ไฟที่ 120 แอมแปร์กับ 160 แอมแปร์ ที่เป็นเช่นนี้เนื่องมาจากกระแสไฟที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ความร้อนในการหลอมละลายของเนื้อโลหะทั้งสองชนิดและเนื้อโลหะจากลวดเชื่อมสามารถละลายเข้าเป็นเนื้อเดียวกันได้มากขึ้น (Vora *et al.*, 2022) จึงทำให้ความแข็งแรงเฉือนเพิ่มขึ้น

เมื่อพิจารณาผลของความเร็วในการเชื่อมที่มีต่อความแข็งแรงเฉือน-ดึง ดัง Figure 9 (b) แสดงให้เห็นว่า ความเร็วในการเชื่อมที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ความแข็งแรงเฉือน-ดึงลดลง เมื่อเชื่อมกระแสไฟ 120 แอมแปร์ ความเร็ว 200 มิลลิเมตรต่อนาที ค่าความแข็งแรงเฉือน-ดึงมีค่าเฉลี่ย 297.5 นิวตันต่อตารางมิลลิเมตร ในขณะที่เมื่อความเร็วเพิ่มขึ้นเป็น 250 และ 300 มิลลิเมตรต่อนาที ค่าความแข็งแรงเฉือน-ดึงเฉลี่ยมีค่า 288.8 และ 279.0 นิวตันต่อตารางมิลลิเมตร ตามลำดับ ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากความเร็วในการเชื่อมที่เพิ่มขึ้นทำให้อัตราการป้อนลวดเชื่อมลดลงหรือเนื้อโลหะที่ละลายจากลวดเชื่อมลดลงทำให้เนื้อโลหะบริเวณแนวเชื่อมลดลง ดังนั้นพื้นที่ในการรับแรงเฉือน-ดึงจึงลดลง ส่งผลให้ความแข็งแรงเฉือน-ดึงลดลงไปด้วย (Rakesh *et al.*, 2022)

เมื่อพิจารณาค่าความแข็งแรงเฉือน-ดึงที่มีค่าเฉลี่ยต่ำสุดและสูงสุด พบว่า ที่กระแสไฟ 160 แอมแปร์ ความเร็ว 200 มิลลิเมตรต่อนาที ให้ค่าความแข็งแรงเฉือน-ดึงเฉลี่ยสูงสุดอยู่ที่ 502.1 นิวตันต่อตารางมิลลิเมตร ในขณะที่กระแสไฟ 120 แอมแปร์ ความเร็ว 300 มิลลิเมตรต่อนาที ให้ค่าความแข็งแรงเฉือน-ดึงเฉลี่ยต่ำสุดอยู่ที่ 279.0 นิวตันต่อตารางมิลลิเมตร

ผลของมูมดัดเมื่อกระแสเชื่อมและความเร็วเปลี่ยนแปลงไป ดัง Figure 10 พบว่า ค่ามูมดัดเฉลี่ยมีการเปลี่ยนแปลงไปในทิศทางเดียวกันกับความแข็งแรงเฉือน-ดึง กล่าวคือ เมื่อความเร็วในการเชื่อมเพิ่มขึ้นส่งผลให้มูมดัดเฉลี่ยลดลง (Figure 10 (a)) เช่น เมื่อเชื่อมด้วยกระแส 120 แอมแปร์ ความเร็วในการเชื่อม 200 มิลลิเมตรต่อนาที ค่ามูมดัดเฉลี่ยอยู่ที่ 13.3 องศา เมื่อความเร็วในการเชื่อมเพิ่มขึ้นเป็น 250 และ 300 มิลลิเมตรต่อนาที ค่ามูมดัดเฉลี่ยลดลงเป็น 11.4 และ 8.2 องศา ตามลำดับ เมื่อกระแสไฟเชื่อมเพิ่มขึ้นส่งผลให้มูมดัดเฉลี่ยเพิ่มขึ้น (Figure 10 (b)) เช่น เมื่อเชื่อมด้วยกระแสไฟ 120 แอมแปร์ ความเร็ว 200 มิลลิเมตรต่อนาที มีค่ามูมดัดเฉลี่ยอยู่ที่ 13.3 องศา ในขณะที่กระแสไฟ 140 และ 160 แอมแปร์ ค่ามูมดัดเฉลี่ยเพิ่มขึ้นเป็น 29.4 องศาและ 38.2 องศา ตามลำดับ ที่เป็นเช่นนี้เพราะกระแสไฟที่เพิ่มขึ้นทำให้ความร้อนในการหลอมละลายสูงขึ้น เนื้อโลหะที่แนวเชื่อมหลอมละลายเข้ากันได้มากขึ้นจึงส่งผลให้ค่ามูมดัดเฉลี่ยมีค่าสูงขึ้นตามลำดับ ในขณะที่ผลของความเร็วในการเชื่อมที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่ามูมดัดเฉลี่ยลดลง ซึ่งเป็นสาเหตุเดียวกับการลดลงของความแข็งแรงเฉือน-ดึงที่กล่าวมาข้างต้น

ตำแหน่งการฉีกขาดของชิ้นงานตัวอย่างหลังจากทดสอบความแข็งแรงเฉือน-ดึง แสดงดัง Figure 11 แสดงให้เห็นว่า ตำแหน่งการฉีกขาดของตัวอย่างเริ่มต้นในบริเวณใกล้เคียงกับจุดตัดพร้อมกันของ SS400, เนื้อเชื่อมและ SUS304 เนื่องจากบริเวณดังกล่าวเป็นจุดศูนย์รวมของความเค้น จึงทำให้ความต้านทานการแตกหักของรอยต่อลดลง (Hasanniah & Movahedi, 2019; Ye *et al.*, 2017) และการฉีกขาดขยายตัวต่อเนื่องไปในบริเวณเนื้อเชื่อมจนถึงผิวด้านนอกของ SUS304

เมื่อพิจารณาลักษณะการฉีกขาดของชิ้นงานตัวอย่างที่ทำให้ค่าความแข็งแรงเฉือน-ดึงสูงสุดและต่ำสุด แสดงให้เห็นว่า ลักษณะการฉีกขาดของตัวอย่างทั้งสองแตกต่างกัน โดยชิ้นงานตัวอย่างที่เชื่อมด้วยกระแสไฟฟ้าเชื่อม 160 แอมแปร์ ความเร็วในการเชื่อม 200 มิลลิเมตรต่อนาที พบว่า การหลอมละลายของแนวเชื่อมสมบูรณ์และรอยฉีกขาดจะมีลักษณะเกือบเป็นเส้นตรง ซึ่งแตกต่างจากรอยฉีกขาดของตัวอย่างที่เชื่อมด้วย

กระแสไฟฟ้าเชื่อม 120 แอมแปร์ ความเร็วในการเชื่อม 300 มิลลิเมตรต่อนาที พบว่า การหลอมละลายของแนวเชื่อมไม่สมบูรณ์และรอยฉีกขาดจะมีลักษณะไม่เป็นเส้นตรง ที่เป็นเช่นนี้เป็นผลมาจากกระแสไฟฟ้าเชื่อมที่ต่ำและความเร็วในการเชื่อมสูงส่งผลให้ความร้อนเกิดขึ้นที่บ่อหลอมละลายไม่เพียงพอจึงเกิดการหลอมละลายไม่สมบูรณ์ขึ้น ส่งผลให้ความสามารถในการรับแรงเฉือน-ดึงลดลง ซึ่งเป็นไปตามกฎของจูล นั่นคือ ความร้อนที่เกิดขึ้นจะแปรผันตรงตามกระแสและเวลา (Thakur & Chapgaon, 2016) และลักษณะของรอยฉีกขาดนั้น Kimapong and Triwanapong (2018) ได้กล่าวว่า ทิศทางการฉีกขาดของรอยเชื่อมที่ให้ค่าความแข็งแรงสูงจะต้องตั้งฉากกับทิศทางของแนวแรง และผลจากมุมตัดที่มากขึ้นอาจช่วยถ่ายเทพลังงานให้ชิ้นงานมีความแข็งแรงขึ้น ส่งผลให้มีความสามารถในการรับแรงเฉือน-ดึงสูงขึ้น

Table 2 Tensile-shear strength results on different welding currents and speeds.

Current (A)	Speed (mm/min)	Tensile shear strength (N/mm ²)					Average TSS (N/mm ²)	Average bent angle (Degree)
		Sample						
		1	2	3	4	5		
120	200	283.6	219.1	303.9	343.9	337.0	297.5±50.3	13.2±1.3
	250	299.4	416.5	244.9	255.0	228.5	288.8±76.0	11.4±1.5
	300	345.2	274.2	310.9	211.5	253.2	279.0±51.6	8.2±1.5
140	200	466.4	503.8	510.1	425.7	502.2	481.6±35.7	29.4±1.7
	250	508.2	436.3	461.3	492.2	476.2	474.8±27.8	27.8±2.5
	300	460.4	480.9	381.7	384.4	475.1	436.5±49.4	24.8±1.5
160	200	533.0	472.9	521.7	466.4	516.3	502.1±30.3	38.2±2.9
	250	498.5	441.1	491.2	495.7	524.5	490.2±30.4	36.0±2.6
	300	477.4	461.3	438.6	399.2	440.4	443.4±29.4	31.6±2.1

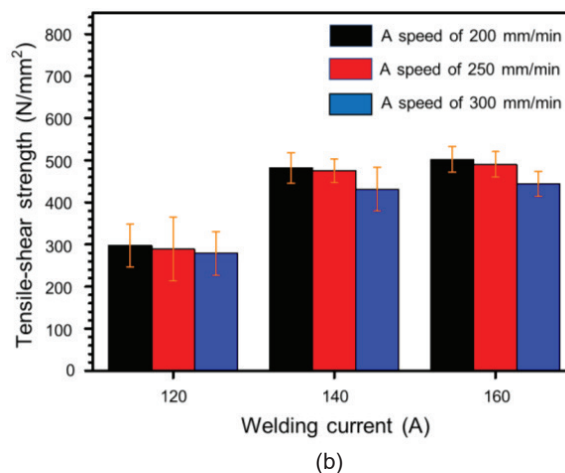
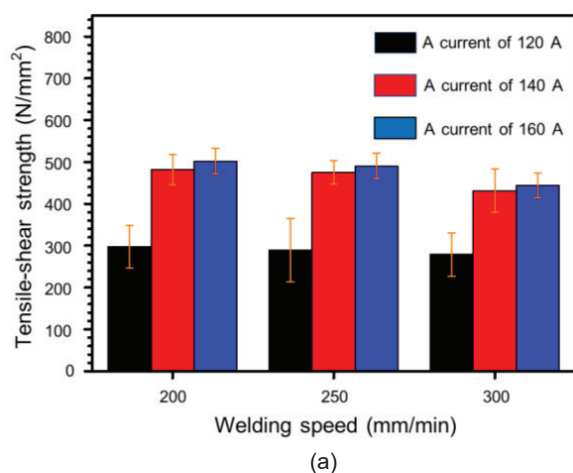


Figure 9 The result of tensile-shear strength on (a) welding speed and (b) welding current.

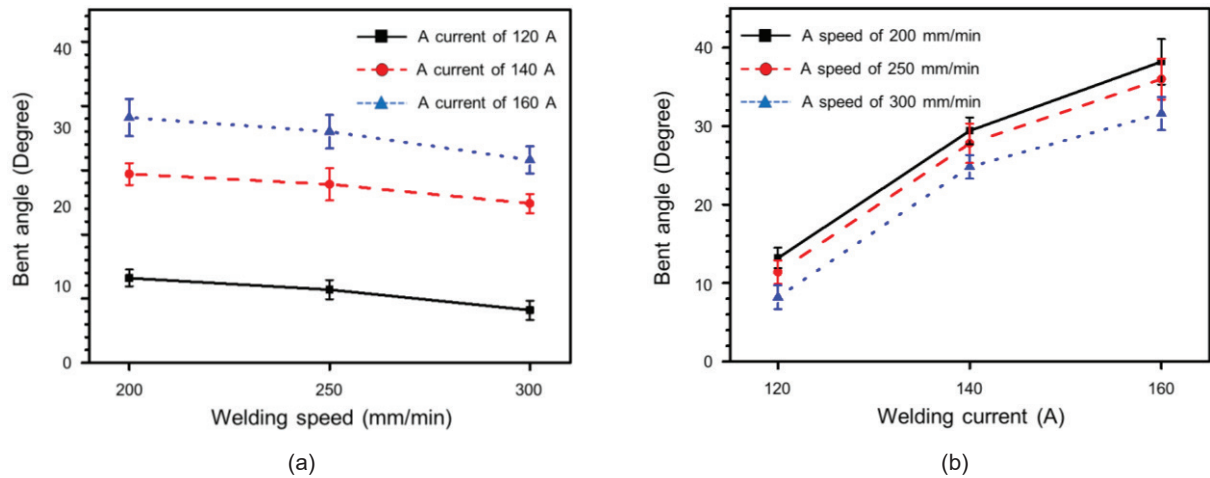


Figure 10 The result of bent angle on (a) welding speed and (b) welding current.

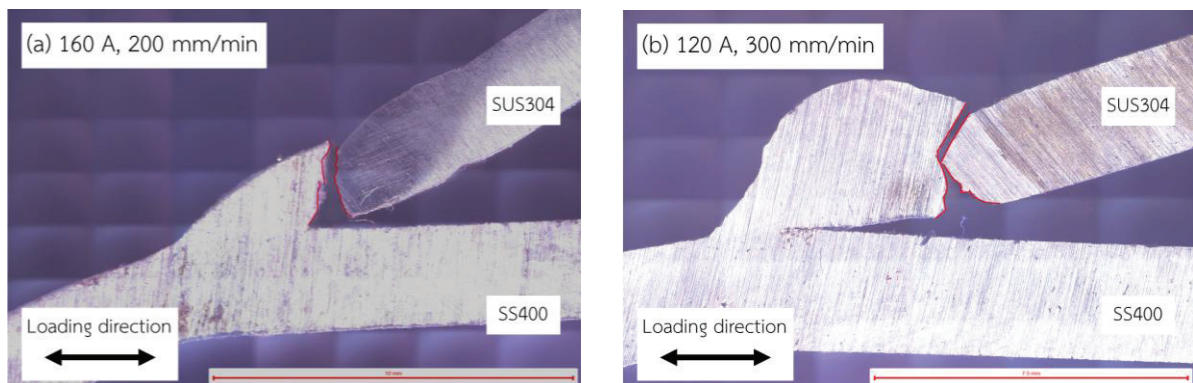


Figure 11 Fracture positions of specimens at different welding currents and speeds: (a) 120 A, 300 mm/min, and (b) 160 A, 200 mm/min.

ผลการวิเคราะห์ทางสถิติ

เพื่อยืนยันสมมติฐานงานวิจัย จากการวิเคราะห์ผลทางสถิติที่ได้รับจากการออกแบบแฟกทอเรียลเต็มรูปแบบผ่านการวิเคราะห์ความแปรปรวน ในการพิจารณาข้อกำหนดในการวิเคราะห์เบื้องต้น ค่า Residual ต้องผ่านการทดสอบ 3 ข้อดังนี้

1. ค่า Residual มีการแจกแจงปกติ
2. ค่าความแปรปรวนของ Residual ของแต่ละปัจจัย ได้แก่ กระแสไฟเชื่อมและความเร็วในการเชื่อม มีค่าเท่ากัน

3. ค่า Residual มีความอิสระต่อกัน

ผลที่ได้จากการนำค่า Residual ในการทดสอบข้อกำหนดทั้ง 3 ข้อ พบว่ามี 1 ข้อที่ไม่ผ่านข้อกำหนด ได้แก่ ค่าความแปรปรวนของ Residual ของกระแสไฟเชื่อมมีค่าไม่เท่ากัน ส่งผลให้ไม่สามารถนำค่าทางสถิติที่ได้รับมาวิเคราะห์ต่อได้ อย่างไรก็ตามในการวิเคราะห์ผลการทดลองสามารถวิเคราะห์ผลผ่านกราฟแสดงอิทธิพลหลักและกราฟแสดงอิทธิพลร่วม ดังแสดงใน Figure 12(a) และ Figure 12(b) ตามลำดับ

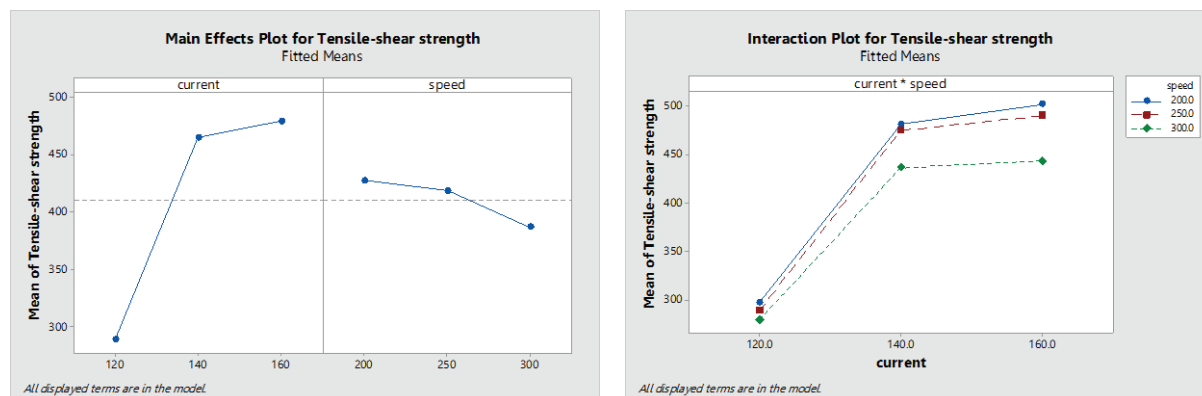


Figure 12 (a) Main effect and (b) Interaction plot of tensile-shear strength.

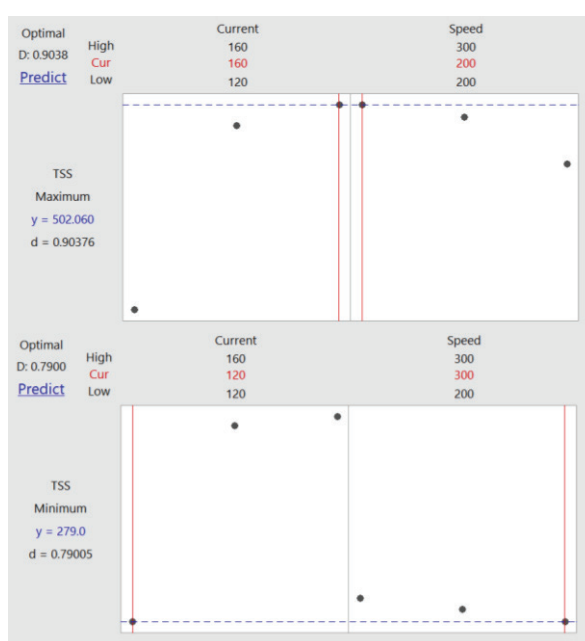


Figure 13 (a) Optimization plots for maximum and (b) minimum of tensile-shear strength.

จาก Figure 12 (a) แสดงอิทธิพลหลัก (Main effect) ของค่าเฉลี่ยความแข็งแรงเฉือน-ดึง เมื่อพิจารณาผลกระทบของปัจจัยหลักที่ส่งผลต่อค่าความแข็งแรงเฉือน-ดึง ทั้ง 2 ปัจจัย คือ กระแสไฟและความเร็วในการเชื่อม จะเห็นได้ว่า ค่ากระแสไฟและความเร็วที่ส่งผลให้ค่าเฉลี่ยความแข็งแรงเฉือน-ดึงสูงสุดคือ เมื่อเชื่อมด้วยกระแสไฟ 160 แอมแปร์ ความเร็วในการเชื่อม 200 มิลลิเมตรต่อนาที

จาก Figure 12 (b) แสดงอิทธิพลร่วม (Interaction plot) ระหว่างค่ากระแสไฟและความเร็วในการเชื่อม ผลการวิเคราะห์แสดงให้เห็นว่า เมื่อเชื่อมด้วยกระแสไฟ 120 แอมแปร์ ค่าเฉลี่ยความแข็งแรงเฉือน-ดึงจะมีค่าต่ำในทุกๆ ความเร็วในการเชื่อม แต่เมื่อเพิ่มกระแสไฟเชื่อมให้สูงขึ้น ค่าเฉลี่ยความแข็งแรงเฉือน-ดึงจะมีค่าสูงขึ้นในทุกๆ ความเร็วในการเชื่อม เมื่อเชื่อมด้วยกระแสไฟ 160 แอมแปร์ ความเร็วในการเชื่อม

200 มิลลิเมตรต่อนาที ทำให้ค่าความแข็งแรงเฉือน-ดึงสูงสุดที่ 502.1 นิวตันต่อตารางมิลลิเมตร และค่าความแข็งแรงเฉือน-ดึงต่ำสุดที่ 279.0 นิวตันต่อตารางมิลลิเมตร เมื่อเชื่อมด้วยกระแสไฟ 120 แอมแปร์ ความเร็ว 300 มิลลิเมตรต่อนาที

จากการวิเคราะห์ผลการทดลองมีความสอดคล้องกับค่าที่ได้รับจากการหาค่าผลลัพธ์ที่ดีที่สุดสำหรับค่าความแข็งแรงเฉือนสูงสุดและต่ำสุด ดังแสดงในรูป Figure 13 (a) และ Figure 13 (b) ตามลำดับ

สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาถึงปัจจัยที่ส่งผลต่อสมบัติด้านความแข็งแรงเฉือน-ดึงของรอยต่อเกยระหว่างเหล็กกล้าคาร์บอน SS400 กับเหล็กกล้าไร้สนิม SUS304 ในกระบวนการเชื่อมโลหะแก๊สคลุม ทำตั้ง เชื่อมลง ควบคุมการเชื่อมด้วยแขน

หุ่นยนต์เชื่อม โดยพิจารณาถึงปัจจัยด้านกระแสไฟเชื่อมและความเร็วในการเชื่อมที่แตกต่างกัน ผลการทดลองสรุปดังนี้

1. เมื่อเชื่อมด้วยกระแสไฟเชื่อมเพิ่มขึ้น ความเร็วในการเชื่อมคงที่ พบว่า ความกว้างของรอยเชื่อมเพิ่มขึ้นและความแข็งแรงเฉือน-ดึงเพิ่มขึ้น

2. เมื่อเชื่อมด้วยกระแสไฟเชื่อมคงที่ ความเร็วในการเชื่อมเพิ่มขึ้น พบว่า ความกว้างของรอยเชื่อมลดลง และความแข็งแรงเฉือน-ดึงของรอยเชื่อมลดลง

3. ค่ามุมตัดเฉื่อยมีการเปลี่ยนแปลงไปในทิศทางเดียวกันกับความแข็งแรงเฉือน-ดึง กล่าวคือเมื่อเชื่อมด้วยกระแสไฟเพิ่มขึ้น ความเร็วในการเชื่อมคงที่ ส่งผลให้มุมตัดเฉื่อยเพิ่มขึ้นและเมื่อความเร็วในการเชื่อมเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ค่ามุมตัดเฉื่อยลดลง

4. ปัจจัยด้านกระแสไฟเชื่อมและความเร็วในการเชื่อมที่ส่งผลให้ค่าความแข็งแรงเฉือน-ดึงเฉลี่ยสูงสุด คือ การเชื่อมด้วยกระแสไฟ 160 แอมแปร์ ความเร็วในการเชื่อม 200 มิลลิเมตรต่อนาที ค่าความแข็งแรงเฉือน-ดึงเฉลี่ยสูงสุดอยู่ที่ 502.1 นิวตันต่อตารางมิลลิเมตร และค่าความแข็งแรงเฉือน-ดึงเฉลี่ยต่ำสุดที่ 279.0 นิวตันต่อตารางมิลลิเมตร เมื่อเชื่อมด้วยกระแสไฟ 120 แอมแปร์ ความเร็ว 300 มิลลิเมตรต่อนาที

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณคณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน ที่ให้การสนับสนุนทุนวิจัยในครั้งนี้และขอขอบคุณสาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการที่ให้ความอนุเคราะห์เครื่องมือ อุปกรณ์และสถานที่ในการทำงานวิจัยในครั้งนี้

เอกสารอ้างอิง

Amodeo, C. M., Lai, W. J., Lee, J., & Pan, J. (2014). Failure modes of gas metal arc welds in lap-shear specimens of high strength low alloy (HSLA) steel. *Engineering Fracture Mechanics*, 131, 74–99. <https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2014.07.009>

American Society for Testing and Materials. (1999). *Standard test method for apparent shear strength of single-lap-joint adhesively bonded metal specimens by tension loading (metal-to-metal)* (ASTM D1002-99). ASTM International.

Hasanniah, A., & Movahedi, M. (2019). Gas tungsten arc lap welding of aluminum/steel hybrid structures. *Marine Structures*, 64, 295–304. <https://doi.org/10.1016/j.marstruc.2018.11.013>

Jahanzeb, N., Shin, J. H., Singh, J., Heo, Y. U., & Choi, S. H. (2017). Effect of microstructure on the hardness heterogeneity of dissimilar metal joints between 316L stainless steel and SS400 steel. *Materials Science and Engineering: A*, 700, 338–350. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2017.06.002>

Khan, M., Dewan, M. W., & Sarkar, M. Z. (2021). Effects of welding technique, filler metal and post-weld heat treatment on stainless steel and mild steel dissimilar welding joint. *Journal of Manufacturing Processes*, 64, 1307–1321. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2021.02.058>

Kimapong, K., & Triwanapong, S. (2018). Influence of gas metal arc welding parameter on lap joint properties of SS400 carbon steel and SUS304 stainless steel. *Key Engineering Materials*, 789, 110–114. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.789.110>

Kumar, V., Mandal, A., Das, A. K., & Kumar, S. (2021). Parametric study and characterization of wire arc additive manufactured steel structures. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 115(5–6), 1723–1733. <https://doi.org/10.1007/s00170-021-07261-6>

Lee, D. (2014). Robots in the shipbuilding industry. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 30(5), 442–450. <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2014.02.002>

Pan, Z., Ding, D., Wu, B., Cui, D., Li, H., & Norrish, J. (2018). Arc welding processes for additive manufacturing: A review. *Transactions on Intelligent Welding Manufacturing*, 2, 3–24. https://doi.org/10.1007/978-981-10-5355-9_1

Panda, B., Shankhwar, K., Garg, A., & Savalani, M. M. (2019). Evaluation of genetic programming-based models for simulating bead dimensions in wire and arc additive manufacturing. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 30(2), 809–820. <https://doi.org/10.1007/s10845-016-1282-2>

Pathak, D., Pratap Singh, R., Gaur, S., & Balu, V. (2021). To study the influence of process parameters on weld bead geometry in shielded metal arc welding. *Materials Today: Proceedings*, 44, 39–44. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.06.164>

- Purnama, D., & Oktadinata, H. (2019). Effect of shielding gas and filler metal to microstructure of dissimilar welded joint between austenitic stainless steel and low carbon steel. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 547(1), Article 012003. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/547/1/012003>
- Rakesh, C., Heet, P., Jay, V., & Vivek, P. (2022). Parametric study and investigations of bead geometries of GMAW-based wire-arc additive manufacturing of 316L stainless steels. *Metals*, 12(8), Article 1232. <https://doi.org/10.3390/met12081232>
- Tanmay, & Panda, S. S. (2023). Microstructure and mechanical characterization of stainless steel and copper joint by metallurgical modification in GTAW process. *Metallurgical and Materials Transactions A: Physical Metallurgy and Materials Science*, 54(3), 1010–1023. <https://doi.org/10.1007/s11661-023-06964-7>
- Thakare, Y. A., & Upadhyay, P. (2018). Study on robotic manufacturing for automobile. *International Journal of Innovations in Engineering Research and Technology (IJIERT)*, 2018: i-MESCON 18, 227–229.
- Thakur, P. P., & Chapgaon, A. N. (2016). A review on effects of GTAW process parameters on weld. *International Journal for Research in Applied Science & Engineering Technology (IJRASET)*, 4(1), 136–140. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.11535.38569>
- Vora, J., Parikh, N., Chaudhari, R., Patel, V. K., Paramar, H., Pimenov, D. Y., & Giasin, K. (2022). Optimization of bead morphology for GMAW-based wire-arc additive manufacturing of 2.25 Cr-1.0 Mo steel using metal-cored wires. *Applied Sciences*, 12(10), Article 5060. <https://doi.org/10.3390/app12105060>
- Vosniakos, G. C., Katsaros, P., Papagiannoulis, I., & Meristoudi, E. (2022). Development of robotic welding stations for pressure vessels: Interactive digital manufacturing approaches. *International Journal on Interactive Design and Manufacturing*, 16(1), 151–166. <https://doi.org/10.1007/s12008-021-00813-w>
- Wang, X., Zhou, X., Xia, Z., & Gu, X. (2021). A survey of welding robot intelligent path optimization. *Journal of Manufacturing Processes*, 63, 14–23. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2020.04.085>
- Ye, Z., Huang, J., Cheng, Z., Gao, W., Zhang, Y., Chen, S., & Yang, J. (2017). Combined effects of MIG and TIG arcs on weld appearance and interface properties in Al/steel double-sided butt welding-brazing. *Journal of Materials Processing Technology*, 250, 25–34. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2017.07.003>