

อิทธิพลของกระแสไฟเชื่อมและความเร็วในการเชื่อม  
ที่ส่งผลต่อความแข็งและโครงสร้างของรอยต่อเกย  
ระหว่างเหล็กกล้า SS กับเหล็กกล้าไร้สนิม 400SUS 304  
ในกระบวนการเชื่อมอาร์คโลหะแก๊สคลุมด้วยแขนหุ่นยนต์เชื่อม

The Effect of Welding Current and Welding Speed  
on Hardness and Structure of Lap Joint Between SS400  
Steel and SUS304 Stainless Steel in Robotic Gas Metal  
Arc Welding Process

วีระพล ทับทิมดี<sup>1</sup> ณรงค์ศักดิ์ ธรรมโชติ<sup>2</sup> พีรเดช สุวิทย์รักษ์<sup>2</sup>  
อรรถกร จันทร์ชนะ<sup>3</sup> และ อมรศักดิ์ มาใหญ่<sup>2\*</sup>  
Weerapol Taptimdee<sup>1</sup>, Narongsak Thammachot<sup>2</sup>,  
Peeradaech Suwittayaruk<sup>2</sup>, Atthakorn Chanchana<sup>3</sup>,  
and Amornsak Mayai<sup>2\*</sup>

Received: 19 August 2024

Revised: 10 September 2025

Accepted: 18 December 2025

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาอิทธิพลของกระแสไฟเชื่อมและความเร็วในการเชื่อมที่ส่งผลต่อความแข็ง โครงสร้างมหภาคและโครงสร้างจุลภาคของรอยต่อเกยระหว่างเหล็กกล้าไร้สนิม SUS304 กับเหล็ก

<sup>1</sup> สาขาวิชาวิศวกรรมการผลิตอัตโนมัติ คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏราชนครินทร์ ฉะเชิงเทรา ประเทศไทย 24000

<sup>1</sup> Department of Automated Manufacturing Engineering, Faculty of Industrial Technology, Rajabhat Rajanagarindra University, Chachoengsao, Thailand 10330

<sup>2</sup> สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน นครราชสีมา ประเทศไทย 30000

<sup>2</sup> Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering and Technology, Rajamangala University of Technology Isan, Nakorn Ratchasima, Thailand 30000

<sup>3</sup> หลักสูตรวิศวกรรมการผลิต คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีปทุมวัน กรุงเทพฯ ประเทศไทย 10330

<sup>3</sup> Department of Manufacturing Engineering, Faculty of Engineering, Pathumwan Institute of Technology, Bangkok, Thailand, 10330

\* ผู้รับผิดชอบประสานงาน (Corresponding author) e-mail: amornsak.ma@rmuti.ac.th

กล้าคาร์บอน SS400 ด้วยกระบวนการเชื่อมโลหะแก๊สคลุม ทำตั้งเชื่อมลง ด้วยลวดเชื่อม ER309L ใช้แก๊สอาร์กอน 99.99% ปกคลุมแนวเชื่อม เชื่อมด้วยแขนหุ่นยนต์เชื่อมโดยกำหนดปัจจัยด้านกระแสไฟเชื่อมไว้ 3 ระดับ ได้แก่ 120, 140 และ 160 แอมแปร์ และความเร็วในการเชื่อม 3 ระดับ ได้แก่ 200, 250 และ 300 มิลลิเมตรต่อนาที ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าเมื่อเพิ่มกระแสไฟเชื่อมให้สูงขึ้น ทำให้ขนาดความกว้าง ความสูงของแนวเชื่อมเพิ่ม มากขึ้น อีกทั้งยังทำให้การซึมลึกของแนวเชื่อมเพิ่มสูงขึ้นอีกด้วย อย่างไรก็ตามขนาดความกว้าง ความสูง และการซึมลึกของแนวเชื่อมกลับลดลงเมื่อเพิ่มความเร็วในการเชื่อม เมื่อปรับกระแสไฟเชื่อมและความเร็วในการเชื่อม เพิ่มขึ้น ผลการทดสอบความแข็งของแนวเชื่อมพบว่าที่กระแสไฟเชื่อม 140 แอมแปร์ ความเร็ว 250 มิลลิเมตรต่อนาที ให้ค่าความแข็งสูงสุด การตรวจสอบโครงสร้างมหภาคและโครงสร้างจุลภาคไม่พบความไม่ต่อเนื่องบนผิวแนวเชื่อม เมื่อเพิ่มกระแสไฟเชื่อมและความเร็วในการเชื่อมส่งผลให้โครงสร้างจุลภาคเกิดการเปลี่ยนแปลง ซึ่งสอดคล้องกับความแข็งที่ได้ ผลการศึกษานี้สามารถนำไปใช้เป็นแนวทางในการกำหนดตัวแปรสำหรับการเชื่อมโลหะต่างชนิดกันได้

**คำสำคัญ:** การเชื่อมโลหะแก๊สคลุม แขนหุ่นยนต์เชื่อม โครงสร้างมหภาค โครงสร้างจุลภาค รอยต่อเกย

## ABSTRACT

The objective of this research was to investigate the influence of welding current and welding speed on the hardness, macrostructure, and microstructure of lap joints between SUS304 stainless steel and SS400 carbon steel. Using a robotic Gas Metal Arc Welding process in a vertical-down position, the research utilized an ER309L filler wire with 100% argon shielding gas. Welding parameters included three current levels (120, 140, and 160 A) and three welding speeds (200, 250, and 300 mm/min). The results indicated that increasing the welding current increased the weld bead's width, height, and penetration. Conversely, these properties decreased with an increase in welding speed. A maximum weld bead hardness was achieved at a current of 140 A and a speed of 250 mm/min. Macro and microstructural analysis showed no surface discontinuities. The changes in welding current and speed influenced the microstructure, which correlated with the hardness results.

**Keywords:** Gas metal arc welding; Welding robot arm; Macrostructure; Microstructure; Lap joint

## บทนำ

ในปัจจุบันแขนหุ่นยนต์อุตสาหกรรม (Industrial robot arm) นำมาประยุกต์ใช้ในงานอุตสาหกรรมสมัยใหม่อย่างกว้างขวาง เนื่องจากช่วยตอบสนองงานด้านการผลิตให้ง่าย แม่นยำ รวดเร็วและประหยัดขึ้น โดยประยุกต์ใช้ในกระบวนการผลิตในด้านต่างๆ เช่น การหยิบ การบรรจุ การจัดเรียงบนพาเลท การเคลื่อนย้ายวัสดุ ตรวจสอบเช็คคุณภาพสินค้า งานประกอบชิ้นส่วนและงานเชื่อม เป็นต้น โดยแขนหุ่นยนต์เชื่อมมักนำมาใช้ร่วมกับกระบวนการเชื่อมโลหะแก๊สคลุม เนื่องจากควบคุมการเชื่อมได้ง่าย สามารถเชื่อมโลหะได้หลากหลายชนิดและเป็นกระบวนการเชื่อมที่เหมาะสมกับการเชื่อมแบบกึ่งอัตโนมัติหรือการเชื่อมแบบอัตโนมัติ

อีกด้วย [1] แขนหุ่นยนต์เชื่อมมีประสิทธิภาพในด้านการรักษาความสม่ำเสมอของคุณภาพการเชื่อม [2] การรักษาความต่อเนื่องและการทำงานซ้ำๆ ทำให้มั่นใจได้ถึงผลของแนวเชื่อมที่แม่นยำ [3]

การเชื่อมโลหะต่างชนิดกัน (Dissimilar Metal Welding) เป็นกระบวนการที่มีความสำคัญอย่างยิ่งในอุตสาหกรรมที่หลากหลาย ได้แก่ อุตสาหกรรมการบินและอวกาศ เช่น การเชื่อมโลหะน้ำหนักเบา (อลูมิเนียม) กับโลหะที่มีความทนทานสูง (ไทเทเนียม) เพื่อให้ได้โครงสร้างที่แข็งแรงและน้ำหนักเบา [4] อุตสาหกรรมพลังงาน เช่น การผลิตกังหันในโรงไฟฟ้าที่ต้องการวัสดุทนความร้อนโดยการเชื่อมระหว่างเหล็กกล้าไร้สนิม (Stainless Steel) กับโลหะนิกเกิล (Nickel Alloys) [5] อุตสาหกรรมการแพทย์ในการผลิตอุปกรณ์ทางการแพทย์ เช่น การเชื่อมไทเทเนียม (ทนการกัดกร่อนและน้ำหนักเบา) กับสแตนเลสสตีลในเครื่องมือผ่าตัด [6] เป็นต้น การเชื่อมโลหะต่างชนิดกันเป็นกระบวนการที่สามารถรวมสมบัติที่โดดเด่นของวัสดุต่างชนิดกันเข้าไว้ในชิ้นงานเดียวกัน เช่น การรวมความสามารถในการต้านทานการกัดกร่อนของเหล็กกล้าไร้สนิมเข้ากับความแข็งแรงของเหล็กกล้าคาร์บอน ซึ่งหนึ่งในโลหะที่ถูกนำมาใช้งานกันอย่างแพร่หลายคือการเชื่อมระหว่าง SUS304 ซึ่งเป็นเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกที่มีโครเมียมและนิกเกิลเป็นองค์ประกอบหลัก กับ SS400 ซึ่งเป็นเหล็กกล้าโครงสร้างทั่วไปที่มีคาร์บอนต่ำ มีความแข็งแรงและสามารถขึ้นรูปได้ดี นอกจากนี้การเชื่อมโลหะต่างชนิดกันยังสามารถนำวัสดุที่มีสมบัติแตกต่างกันมาผสานกันเพื่อให้ได้ประโยชน์สูงสุดทั้งในด้านของการลดต้นทุนการผลิต การตอบสนองความต้องการเฉพาะทาง การปรับปรุงสมบัติของวัสดุโดยเฉพาะในแง่ของสมบัติทางกลและความต้านทานต่อสภาพแวดล้อม อย่างไรก็ตามในทางปฏิบัติการเชื่อมโลหะต่างชนิดกันนั้นทำได้ยาก เนื่องจากโลหะแต่ละชนิดมีสมบัติทางกล สมบัติทางกายภาพและสมบัติทางเคมีที่แตกต่างกัน ซึ่งอาจทำให้สมบัติของแนวเชื่อมลดลงเมื่อเทียบกับการเชื่อมบนโลหะชนิดเดียวกัน [7] อย่างไรก็ตามงานทางด้านวิศวกรรมอีกเป็นจำนวนมากยังคงต้องการเชื่อมโลหะต่างชนิดกันเข้าด้วยกัน [8] ดังนั้นจึงมีงานวิจัยหลายชิ้นที่มุ่งเน้นไปที่การเชื่อมโลหะต่างชนิดกันโดยใช้เหล็กกล้าคาร์บอนและเหล็กกล้าไร้สนิมเป็นฐานด้วยกรรมวิธีการเชื่อมแบบต่างๆ เช่น James และ Sudhish [9] ได้ศึกษาผลระหว่างชั้นในการเชื่อมด้วยแรงเสียดทานของเหล็กกล้าไร้สนิม SS304 และเหล็กกล้าคาร์บอนปานกลาง AISI 1040 พบว่าความแข็งแรงสูงสุดที่รอยต่อลดลงเมื่อเชื่อมโดยไม่ใช้ชั้นประสาน ซึ่งเป็นผลมาจากการลดลงของการตกตะกอนของโครเมียมคาร์ไบด์ที่รอยต่ออันเนื่องมาจากนิกเกิล Biswas และคณะ [10] ได้ศึกษาผลกระทบของพารามิเตอร์ต่อสมบัติทางกลของเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 และเหล็กกล้าคาร์บอนปานกลาง 45C8 โดยใช้กระบวนการเชื่อมโลหะแก๊สคลุม พบว่าพารามิเตอร์ของกระบวนการที่มีผลต่อการตอบสนองอย่างมีนัยสำคัญคือกระแสเชื่อม ในบริเวณรอยเชื่อมความแข็งแรงจะลดลงเมื่อกระแสเชื่อมเพิ่มขึ้นและความหนาของรอยเชื่อมจะเพิ่มขึ้นเช่นกัน Purnama และ Oktadinata [11] ได้ศึกษาถึงผลของแก๊สปกป้องและลดเติมบนโครงสร้างจุลภาคของการเชื่อม SS304 และ SS400 พบว่ารอยเชื่อมที่ใช้ก๊าซ 100% CO<sub>2</sub> มีปริมาณสารเจือปนในโลหะเชื่อมสูงกว่าการใช้ก๊าซผสม (90% Ar + 10% CO<sub>2</sub>) Jahanzeb และคณะ [12] ได้ศึกษาถึงผลของโครงสร้างจุลภาคต่อความหลากหลายของความแข็งแรงของการเชื่อม SS304 และ SS400 พบว่าโครงสร้างจุลภาคบริเวณแนวเชื่อมมีความแตกต่างกันอย่างชัดเจนเมื่อเทียบกับบริเวณเส้นหลอมละลายและความผันแปรของความแข็งแรงของ SS400 ในระดับจุลภาคมีน้อยมาก เป็นต้น อย่างไรก็ตามการเชื่อมโลหะทั้งสองชนิดนี้เข้าด้วยกันยังคงเป็นความท้าทายทางเทคนิค เนื่องจากมีความแตกต่างกันอย่างมากในแง่ขององค์ประกอบทางเคมี จุดหลอมเหลว การนำความร้อน และอัตราการขยายตัวเชิงความร้อน ความแตกต่างเหล่านี้ อาจทำให้เกิดความเค้นตกค้างสูง การแตกร้าวหลังการเชื่อมและการก่อตัวของโครงสร้างเฟสที่ประ

เช่น เฟสเฟอไรต์-มาร์เทนไซต์ หรือโซนที่มีความเข้มข้นของคาร์บอนสูง ซึ่งมักจะพบในบริเวณอินเตอร์เฟซระหว่างแนวเชื่อมกับโลหะฐาน

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงได้ศึกษาถึงอิทธิพลของปัจจัยด้านกระแสไฟเชื่อมและความเร็วในการเชื่อมที่ส่งผลต่อสมบัติด้านความแข็ง โครงสร้างมหภาค และโครงสร้างจุลภาคของรอยต่อเกยระหว่างเหล็กกล้าคาร์บอน SS400 กับเหล็กกล้าไร้สนิม SUS304 ในกระบวนการเชื่อมโลหะแก๊สคลุมโดยใช้แขนหุ่นยนต์เชื่อมในท่าตั้งเชื่อมลง เพื่อสร้างความเข้าใจในพฤติกรรมที่เกิดขึ้นจากการเชื่อมโลหะต่างชนิดกันภายใต้ปัจจัยที่ส่งผลต่อคุณภาพงานเชื่อม และสามารถนำไปประยุกต์ใช้เป็นแนวทางในการกำหนดตัวแปรสำหรับใช้ในงานเชื่อมโลหะต่างชนิดกันได้

### วิธีดำเนินการวิจัย

#### วัสดุ

งานวิจัยนี้ใช้เหล็กกล้าคาร์บอน SS400 (JIS G3101) และเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิค SUS304 เป็นวัสดุฐานในการเชื่อมและเชื่อมด้วยลวดเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิม เกรด ER309L ตามมาตรฐาน AWS A5.9 โดยองค์ประกอบทางเคมีของ SS400 และ SUS304 ดำเนินการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคสเปกโทรสโกปี ด้วยเครื่อง Emission spectrometer (ยี่ห้อ Amarex รุ่น Spectromaxx) และองค์ประกอบทางเคมีของลวดเชื่อมเป็นค่ามาตรฐานจากโรงงานผู้ผลิต ดังแสดงใน Table 1 และสมบัติทางกลของวัสดุทั้ง 3 ชนิด ดังแสดงใน Table 2 ตามลำดับ

**Table 1** Chemical compositions of materials and electrodes used on this study.

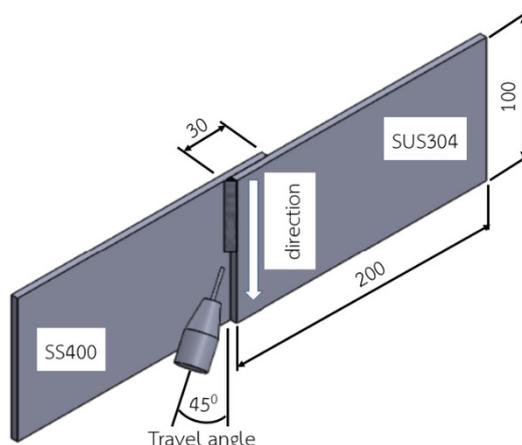
Chemical compositions (wt.%)	Materials and electrodes		
	SS400	SUS304	ER309L
Cr	-	18.0	24.5
Ni	-	8.8	13.0
C	0.15	0.08	0.025
Mn	0.203	2.0	1.88
P	0.007	-	0.02
S	0.008	-	0.01
Si	-	-	0.40
Mo	-	-	0.35
N	-	-	0.10
Cu	-	-	0.35

**Table 2** Mechanical properties of materials and electrodes used on this study [13].

Mechanical properties	Materials and electrodes		
	SS400	SUS304	ER309L
Yield Strength (MPa)	205-245	205 Min	205 Min
Tensile Strength (MPa)	400 – 510	520 Min	510 Min
Elongation (%)		40 Min	25 Min
Reduction of area (%)		60 Min	60 Min

ปัจจัยการทดลอง

เหล็กกล้าคาร์บอน SS400 และเหล็กกล้าไร้สนิม SUS304 ความหนา 3 มิลลิเมตร นำมาตัดให้มีขนาดกว้าง 100 มิลลิเมตร ยาว 200 มิลลิเมตร จากนั้นนำวัสดุทั้งสองชนิดมาต่อเกยกัน โดยวาง SUS304 บน SS400 ให้มีระยะเกยของโลหะเชื่อมเท่ากับ 30 มิลลิเมตรตามมาตรฐาน ASTM D 1002-99 [14] ดังแสดงใน Figure 1 ชิ้นงานเชื่อมด้วยกระบวนการเชื่อมโลหะแก๊สคลุม (GMAW) ทำตั้งเชื่อมลงแบบเชื่อมด้านเดียว (Single side) มุมในการเดินเชื่อม (Work Travel) เท่ากับ 45 องศา ควบคุมการเชื่อมด้วยแขนหุ่นยนต์เชื่อม (Panasonic รุ่น VR-006) ทำการเชื่อมด้วยลวดเชื่อมสำหรับงานเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด ER309L ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางลวดเชื่อมเท่ากับ 1.2 มิลลิเมตร ใช้แก๊สอาร์กอน (99.99% Ar) ในการปกคลุมแนวเชื่อมที่อัตราการไหล 12 ลิตร/นาที ระยะยื่นของลวดเชื่อมคงที่คือ 10 มิลลิเมตร



**Figure1** Characteristics of lab joints and welding directions.

Table 3 แสดงตัวแปรที่ใช้ในการทดลอง ได้แก่ ค่ากระแสไฟเชื่อม 3 ระดับ คือ 120, 140 และ 160 แอมแปร์ และใช้ความเร็วในการเชื่อม 3 ระดับ คือ 200, 250 และ 300 มิลลิเมตรต่อนาที ใช้ตัวอย่างในการทดลอง 9 กลุ่ม ทำการทดลองซ้ำกลุ่มละ 5 ตัวอย่าง รวมใช้ตัวอย่างในการทดลองทั้งสิ้น 45 ตัวอย่าง

**Table 3** Factors of experimental.

Factor	Low	Medium	High
Current (A)	120	140	160
Welding speed(mm/min)	200	250	300

การเตรียมชิ้นงานและการทดสอบ

นำชิ้นงานที่ผ่านการเชื่อมแล้วมาตัดเพื่อใช้เป็นชิ้นงานตัวอย่างในการทดสอบค่าความแข็ง วิเคราะห์โครงสร้างมหภาคและโครงสร้างจุลภาค โดยตัดส่วนหัวและส่วนท้ายของชิ้นงานตัวอย่างทิ้ง ตำแหน่งการตัดชิ้นงานดังแสดงใน Figure 2 ชิ้นงานจะถูกตัดตามขวางแนวเชื่อมให้มีขนาด 30x10 มิลลิเมตร เพื่อนำไปขึ้นเรือนด้วยเรซิน จากนั้นนำไปขัดด้วยกระดาษทรายเบอร์ 320 จนถึงเบอร์ 1200 และขัดด้วยผ้าสักหลาดโดยใช้ผงอลูมิน่าขนาด 0.3 และ 0.05 ไมโครเมตร ตามลำดับ จนผิวชิ้นงานเรียบใส ตัวอย่างแบ่งออกเป็นสองกลุ่ม ตัวอย่างกลุ่มแรกใช้ในการวิเคราะห์โครงสร้างมหภาคและจุลภาค โดยนำชิ้นงานมาล้างทำความสะอาดเป่าผิวหน้าชิ้นงานให้แห้ง ดำเนินการกัดกรดด้าน SUS304 ก่อน โดยนำชิ้นงานมาติดเทปใสบนผิว SS400 จากนั้นกัดด้วยกรด Glycerol 10 cc. + HNO<sub>3</sub> 5 cc. + HCl 15 cc. จุ่มแช่ไว้ 5-10 วินาที ทำความสะอาดผิวหน้าชิ้นงานด้วยแอลกอฮอล์และแกะเทปใสออกแล้วเป่าให้แห้ง จากนั้นดำเนินการกัดกรดด้าน SUS400 โดยติดเทปใสบนผิวหน้า SUS304 แล้วทำการกัดผิวด้วยกรด Methyl alcohol 100 cc. + HNO<sub>3</sub> 3 cc. จุ่มไว้ 7-10 วินาทีทำความสะอาดผิวหน้าชิ้นงานด้วยแอลกอฮอล์และแกะเทปใสออกแล้วเป่าให้แห้ง การตรวจสอบโครงสร้างมหภาคของแนวเชื่อมพิจารณาจากลักษณะรูปร่างทางกายภาพของแนวเชื่อม ได้แก่ ความกว้าง (width) ความสูง (actual throat) และการซึมลึกของแนวเชื่อม (penetration depth) เป็นต้น การวัดขนาดความกว้างของแนวเชื่อม (a) วัดจากขอบของผิวหน้างานเชื่อม (face of weld) ด้านหนึ่งไปจนถึงอีกด้านหนึ่ง การวัดความสูงของแนวเชื่อม (b) วัดตั้งแต่ราก (weld root) ไปจนถึงผิวหน้างานเชื่อม และการวัดการซึมลึก (c) วัดขนาดการซึมลึกของเนื้อแนวเชื่อมลงไปในตัววัสดุพื้น ดัง Figure 3 การวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคพิจารณาจากลักษณะโครงสร้างบริเวณแนวเชื่อม บริเวณกระแทบร้อนและเนื้อโลหะฐาน ชิ้นงานจะนำไปส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (optical microscope) เครื่องหมายการค้า LEIGA รุ่น DMC4500 ตำแหน่งในการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคมี 3 ตำแหน่งคือ a = บริเวณกระแทบร้อนของ SUS304 และแนวเชื่อม b = แนวเชื่อม และ c = บริเวณกระแทบร้อนของแนวเชื่อมและ SS304 ดังแสดงใน Figure 4

ตัวอย่างกลุ่มที่สอง นำไปวัดค่าความแข็งแบบไมโครวิกเกอร์ (MHV) ซึ่งวัดทั้งหมด 9 จุด/ชิ้นทดสอบ ดังแสดงใน Figure 5 เริ่มทำการวัดความแข็งตั้งแต่บริเวณเหล็กกล้าไร้สนิม SUS304 บริเวณกระแทบร้อน SUS304 บริเวณแนวเชื่อม บริเวณกระแทบร้อน SS400 และบริเวณเหล็กกล้า SS400 ด้วยเครื่องทดสอบความแข็ง (Matsuzawa รุ่น MMT-X3A) ใช้แรงกด 0.3 kgf. เวลาในการกดแช่ 15 วินาที

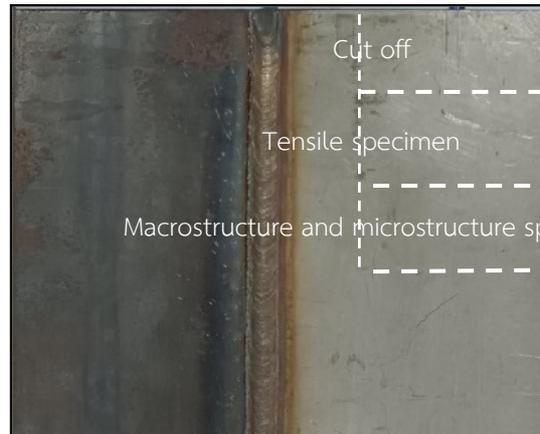


Figure2 Specimen cutting position.

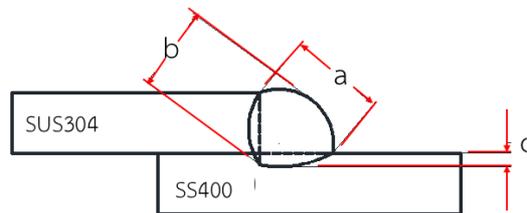


Figure 3 Weld size measurement, where a = width, b = actual throat, and c = penetration depth.

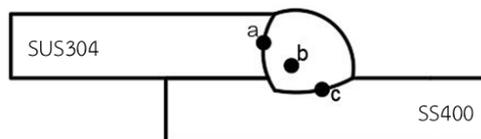


Figure 4 Positions for microstructure examination.

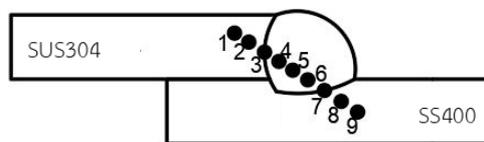


Figure5 Positions of hardness measurement.

**ผลการวิจัยและอภิปรายผล**

ผลการวิเคราะห์โครงสร้างมหภาค

การตรวจสอบโครงสร้างมหภาคของแนวเชื่อมเป็นการพิจารณาถึงลักษณะทางกายภาพ ได้แก่ ขนาด ความกว้าง ความสูงและการซึมลึกของแนวเชื่อม เพื่อพิจารณาถึงอิทธิพลของปัจจัยด้านกระแสไฟเชื่อมและความเร็วในการเชื่อมที่มีผลต่อลักษณะทางกายภาพของแนวเชื่อม โดยกำหนดกระแสไฟเชื่อมและความเร็วในการเชื่อมที่แตกต่างกัน ประกอบด้วยกระแสไฟเชื่อม ได้แก่ 120, 140 และ 160 แอมแปร์ และความเร็วในการเชื่อม ได้แก่ 200, 250 และ 300 มิลลิเมตรต่อนาที โดยลำดับแรกเป็นการพิจารณาข้อบกพร่องหรือความไม่ต่อเนื่องที่เกิดขึ้นในชิ้นงานเชื่อมซึ่งพิจารณาบนพื้นที่หน้าตัดของชิ้นงานเชื่อม ดังแสดงใน Figure 6 จากนั้นจึงทำการวัดขนาดความกว้าง ความสูงและการซึมลึกของแนวเชื่อม และผลของกระแสไฟเชื่อมและความเร็วในการเชื่อมต่อความกว้างและความสูงของแนวเชื่อม ดังแสดงใน Figure 7 และการซึมลึกของแนวเชื่อมดังแสดงใน Figure 8



Figure 6 Cross-section of weld.

Figure 6 แสดงพื้นที่หน้าตัดของแนวเชื่อม โดยผู้วิจัยเลือกนำเสนอตัวอย่างชิ้นงานเชื่อมที่ใช้กระแสไฟเชื่อมและความเร็วในการเชื่อมน้อยสุดดังแสดงใน Figure 6(a) และกระแสไฟเชื่อมและความเร็วในการเชื่อมมากที่สุดดังแสดงใน Figure 6(b) มาพิจารณา จากภาพแสดงให้เห็นว่าแนวเชื่อมมีความสมบูรณ์ ไม่พบความไม่ต่อเนื่องบนแนวเชื่อม อันได้แก่ รอยแตก ร้าว รูพรุน เป็นต้น

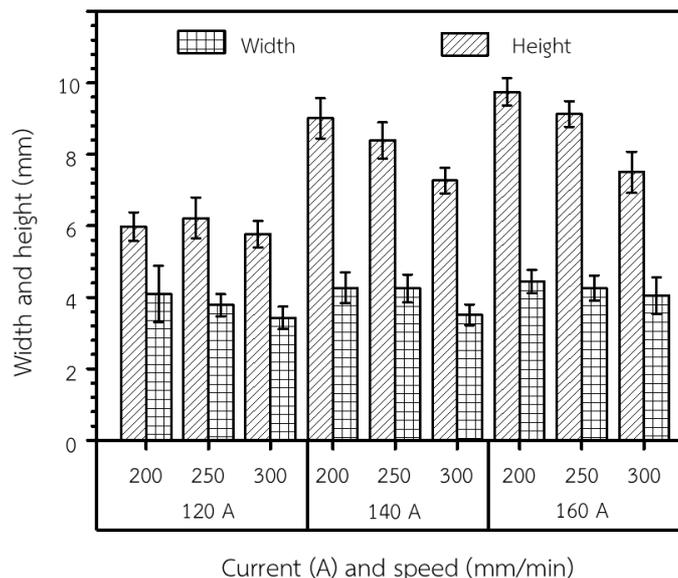


Figure 7 Effects of welding current and speed on width and height of weld.

เมื่อพิจารณากระแสไฟเชื่อมและความเร็วในการเชื่อมที่ส่งผลต่อขนาดรูปร่างด้านความกว้างและความสูงของแนวเชื่อม ดังแสดงใน Figure 7 พบว่าเมื่อเชื่อมด้วยกระแสไฟเชื่อมคงที่ ความเร็วในการเชื่อมเพิ่มขึ้นทำให้ขนาดความสูงของแนวเชื่อมลดลง รวมถึงขนาดความกว้างของแนวเชื่อมลดลงเช่นกัน ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากเมื่อกระแสไฟเชื่อมคงที่ ความร้อนที่ทำให้ลวดเชื่อมหลอมละลายเต็มลงไปแนวเชื่อมที่เพิ่มขึ้นทำให้ปริมาณเนื้อเชื่อมที่เต็มลงไปแนวเชื่อมลดลง [15] เมื่อเชื่อมโดยปรับกระแสไฟเชื่อมให้สูงขึ้น ความเร็วในการเชื่อมคงที่ ทำให้ความสูงของแนวเชื่อมเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจนแต่ความกว้างของแนวเชื่อมเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย ทั้งนี้เนื่องจากระบบการเชื่อมเป็นแบบแรงดันคงที่ (Constant voltage) เมื่อกระแสไฟเชื่อมสูงขึ้นส่งผลให้ลวดเชื่อมหลอมละลายได้มากขึ้น อัตราการเติมลวดลงไปแนวเชื่อมจึงเพิ่มขึ้นส่งผลให้ความสูงและความกว้างของแนวเชื่อมเพิ่มขึ้น [16]

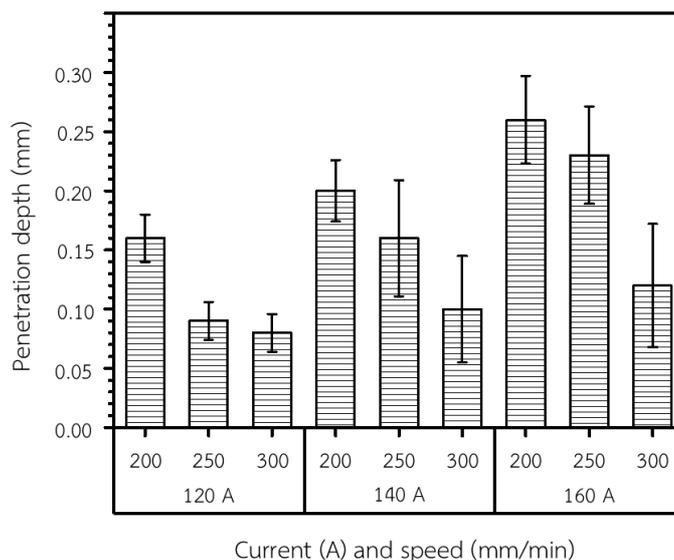


Figure 8 Effects of welding current and speed on penetration depth of weld.

เมื่อพิจารณาถึงค่ากระแสไฟเชื่อมและความเร็วในการเชื่อมที่ส่งผลต่อการซึมลึกของแนวเชื่อม ดังแสดงใน Figure 8 พบว่าเมื่อเชื่อมด้วยกระแสไฟเชื่อมคงที่ ความเร็วในการเชื่อมเพิ่มขึ้น ส่งผลให้การซึมลึกของแนวเชื่อมลดลง ซึ่งเป็นผลมาจากเมื่อความเร็วในการเชื่อมเพิ่มขึ้นส่งผลให้ความร้อนที่หลอมละลายลวดเชื่อมและโลหะฐานลดลงทำให้การหลอมละลายเข้ากันระหว่างแนวเชื่อมและโลหะฐานลดลง [17] เมื่อเชื่อมด้วยกระแสไฟเชื่อมเพิ่มขึ้น ความเร็วในการเชื่อมคงที่ ส่งผลต่อการซึมลึกอย่างชัดเจน เมื่อเชื่อมด้วยกระแสไฟเชื่อม 120 แอมแปร์ ความเร็วในการเชื่อม 200 มิลลิเมตรต่อนาที การซึมลึกอยู่ที่ 0.16 มิลลิเมตร เมื่อเพิ่มกระแสไฟเชื่อมเป็น 140 และ 160 แอมแปร์ ตามลำดับ การซึมลึกเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน เมื่อเชื่อมด้วยกระแสไฟเชื่อม 160 แอมแปร์ การซึมลึกอยู่ที่ 0.26 มิลลิเมตรซึ่งเป็นค่าสูงสุด การซึมลึกที่เพิ่มขึ้นนี้เป็นผลมาจากความร้อนที่ป้อนเข้าสู่แนวเชื่อมและโลหะฐานมีมากขึ้น ส่งผลให้การหลอมละลายของโลหะทั้งสองสามารถละลายเข้ากันได้มากยิ่งขึ้น [18]

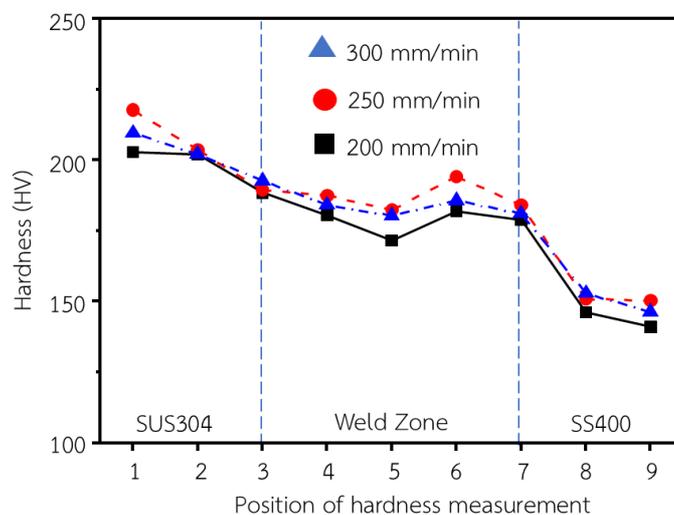


Figure 9 Effect of hardness testing of 140 A current with various welding speeds.

Figure 9 แสดงตำแหน่งการวัดความแข็งบนชิ้นงานทดสอบใน 3 พื้นที่คือ บริเวณโลหะฐาน SUS304 แนวเชื่อม และ SS400 โดยกำหนดค่ากระแสไฟเชื่อมคงที่ 140 แอมแปร์ ความเร็วในการเชื่อมเท่ากับ 200, 250 และ 300 มิลลิเมตรต่อนาที ผลแสดงให้เห็นว่าเมื่อเชื่อมด้วยความเร็วในการเชื่อมเท่ากับ 200 มิลลิเมตรต่อนาที ค่าความแข็งสูงสุดเกิดขึ้นที่บริเวณโลหะฐาน SUS304 ซึ่งมีค่าความแข็งอยู่ในช่วง 200-210 HV ค่าความแข็งค่อยๆ ลดลงจากโลหะฐาน SUS304 ไปจนถึงบริเวณแนวเชื่อม ค่าความแข็งบริเวณแนวเชื่อมมีค่าใกล้เคียงกัน ซึ่งมีค่าอยู่ในช่วง 170-180 HV และค่าความแข็งลดลงต่อไปจนถึงบริเวณโลหะฐาน SS400 ซึ่งมีค่าความแข็งอยู่ในช่วง 140-150 HV

เมื่อพิจารณาผลของความเร็วในการเชื่อมที่เพิ่มขึ้น (จาก 200 มิลลิเมตรต่อนาที เป็น 250 และ 300 มิลลิเมตรต่อนาที) ภายใต้กระแสไฟเชื่อมคงที่ 140 แอมแปร์ พบว่าค่าความแข็งบริเวณโลหะฐาน SUS304 แนวเชื่อม และ SS400 มีการเปลี่ยนแปลงตามความเร็วในการเชื่อมที่เปลี่ยนแปลงไป ค่าความแข็งลดลงเมื่อความเร็วในการเชื่อมเพิ่มขึ้น เนื่องจากความเร็วในการเชื่อมที่แตกต่างกันส่งผลต่ออัตราการเย็นตัวแตกต่างกัน เมื่อความเร็วในการเชื่อมต่ำ (200 มิลลิเมตรต่อนาที) ส่งผลให้ความร้อนสะสมในบริเวณแนวเชื่อมมากขึ้นทำให้อัตราการเย็นตัวเร็ว ส่งผลให้ความแข็งสูง เมื่อความเร็วในการเชื่อมเพิ่มขึ้นระยะเวลาที่ความร้อนสะสมอยู่ในแนวเชื่อมลดลง ทำให้อัตราการเย็นตัวช้าซึ่งส่งผลให้ค่าความแข็งลดลง

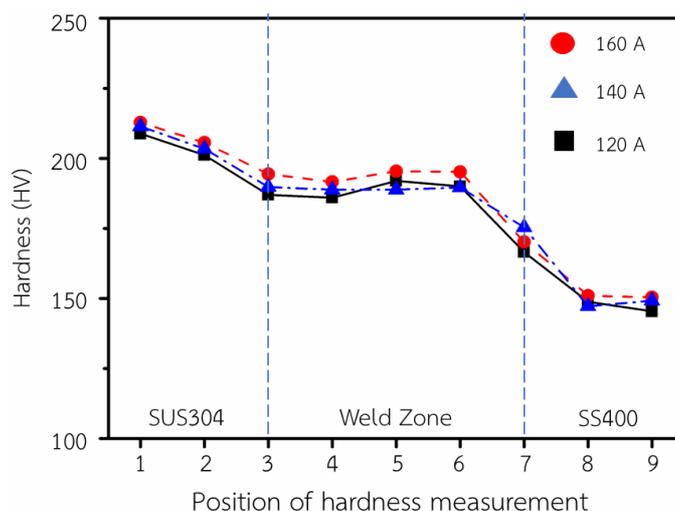


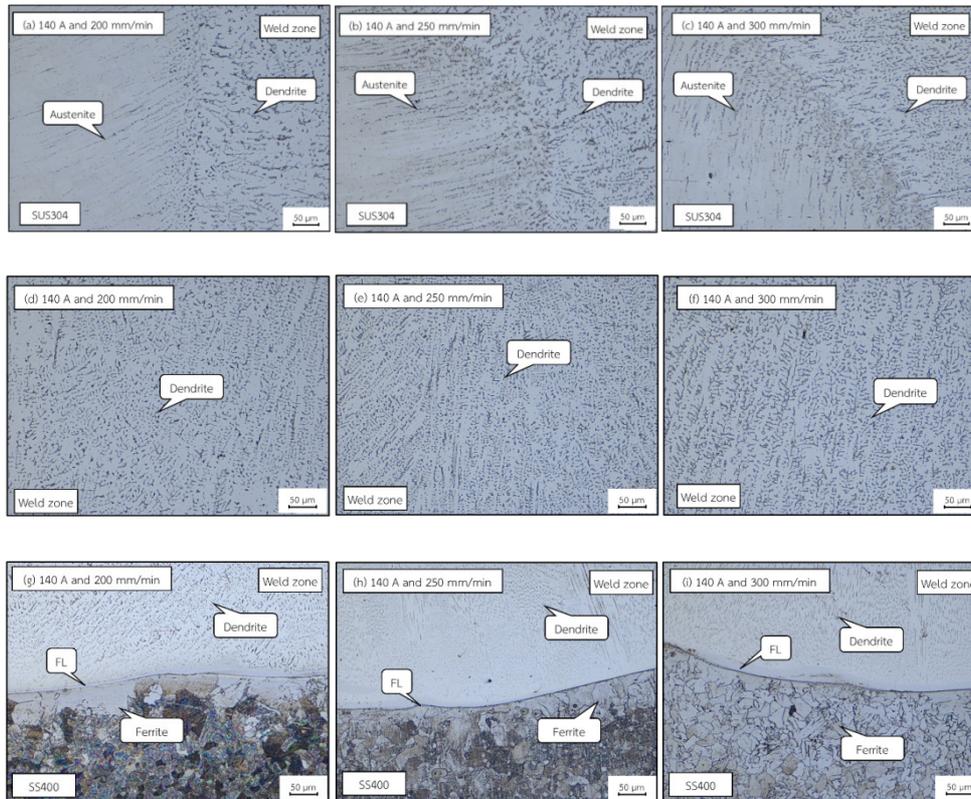
Figure 10 Effect of hardness testing with a welding speed of 250 mm/min at varied currents of 120, 140, and 160 A.

Figure 10 แสดงตำแหน่งการวัดความแข็งบนชิ้นงานทดสอบบริเวณพื้นที่โลหะฐาน SUS304 แนวเชื่อม และ SS400 โดยกำหนดความเร็วในการเชื่อมคงที่ 250 มิลลิเมตรต่อนาที ค่ากระแสไฟเชื่อมเท่ากับ 120 140 และ 160 แอมแปร์ ผลแสดงให้เห็นว่าเมื่อเชื่อมด้วยกระแสไฟเชื่อมเท่ากับ 120 แอมแปร์ ค่าความแข็งสูงสุดเกิดขึ้นที่บริเวณโลหะฐาน SUS304 ซึ่งมีค่าความแข็งอยู่ในช่วง 210-220 HV ค่าความแข็งค่อยๆ ลดลงจากโลหะฐาน SUS304 ไปจนถึงบริเวณแนวเชื่อม ค่าความแข็งบริเวณแนวเชื่อมมีค่าใกล้เคียงกัน ซึ่งมีค่าอยู่ในช่วง 180-190 HV ค่าความแข็งลดลงต่อไปจนถึงบริเวณโลหะฐาน SS400 ซึ่งมีความแข็งอยู่ในช่วง 140-150 HV

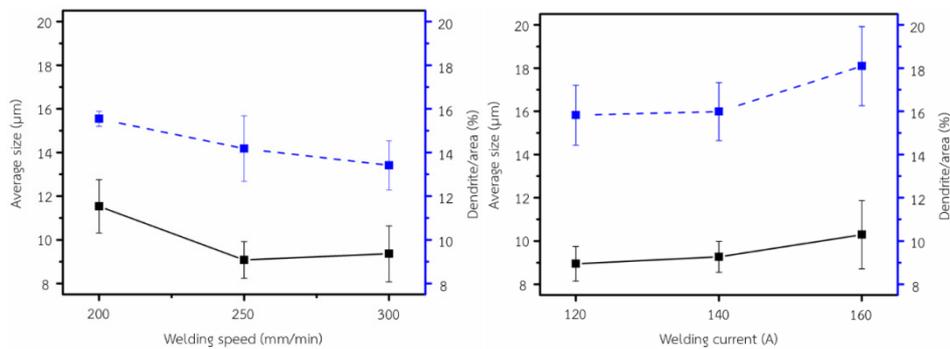
เมื่อพิจารณาผลของการเชื่อมด้วยกระแสไฟเชื่อมเพิ่มขึ้นจาก 120 แอมแปร์ เป็น 140 และ 160 แอมแปร์ความเร็วในการเชื่อมคงที่ 250 มิลลิเมตร/นาที พบว่าค่าความแข็งในทุกๆตำแหน่งการวัดมีการเปลี่ยนแปลงตามกระแสไฟเชื่อมที่ใช้เมื่อใช้กระแสไฟเชื่อมต่ำ (120 แอมแปร์) ความร้อนที่เกิดขึ้นในระหว่างการเชื่อมน้อยกว่าการใช้กระแสไฟเชื่อมสูง ซึ่งทำให้พื้นที่บริเวณแนวเชื่อมมีการอัตราการเย็นตัวช้าทำให้ความแข็งในแนวเชื่อมค่อนข้างต่ำ [19] เมื่อเพิ่มกระแสไฟเชื่อมสูงขึ้น (140 และ 160 แอมแปร์) ความร้อนที่เกิดขึ้นในบริเวณเชื่อมเพิ่มขึ้น ทำให้อัตราการหลอมละลายสูงขึ้นและพื้นที่เชื่อมมีความร้อนสูงขึ้นทำให้แนวเชื่อมมีอัตราการเย็นตัวเร็วขึ้น ความแข็งในแนวเชื่อมจึงเพิ่มขึ้นเล็กน้อย

#### ผลการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาค

Figure 11 (a-i) แสดงภาพถ่ายการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคในบริเวณตำแหน่ง a-c ดังแสดงใน Figure 4 เมื่อกำหนดค่ากระแสไฟเชื่อมคงที่เป็น 140 แอมแปร์ และปรับเปลี่ยนความเร็วในการเชื่อม 3 ระดับคือ 200 250 และ 300 มิลลิเมตรต่อนาที เพื่อศึกษาอิทธิพลของความเร็วในการเชื่อมที่ส่งผลต่อโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานเชื่อม เมื่อความเร็วในการเชื่อมเปลี่ยนแปลงไป



**Figure 11** Microstructure of HAZ of SUS304/weld zone at 140 A current.



(a) 140 A current, 200-300 mm/min speed      (b) 120-160 A current, 250 mm/min speed

**Figure 12** Average size and percentage of dendrite/area

Figure 11 (a-c) แสดงภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคบริเวณวัสดุฐาน SUS304/แนวเชื่อม ซึ่งเป็นบริเวณตำแหน่ง a ของ Figure 4 จากภาพถ่ายแสดงให้เห็นว่าเมื่อเชื่อมโลหะด้วยความเร็วในการเชื่อมที่แตกต่างกัน โครงสร้างจุลภาคภายในเนื้อโลหะมีการเปลี่ยนแปลงไป บนพื้นผิวของวัสดุฐาน SUS304 พบโครงสร้างออสเทนไนต์ เกิดขึ้นซึ่งเป็นลักษณะโครงสร้างของเหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มออสเทนติก เมื่อเชื่อมโดยใช้ความเร็วในการเชื่อม 200 มิลลิเมตรต่อนาที (Figure 11 (a)) พบว่าที่บริเวณของแนวเชื่อมมีเส้นสีดำที่มีลักษณะเป็นเส้นยาว มีกิ่งก้านกระจายตัวอยู่ทั่วไปภายในพื้นผิว ซึ่งเป็นลักษณะของโครงสร้างเดนไดรต์ เมื่อเข้าสู่พื้นที่หลอมละลาย (Fusion zone) ระหว่าง SUS304/แนวเชื่อม โครงสร้างเดนไดรต์ที่มีปริมาณมากขึ้น มีขนาดเกรนที่เล็กลง เรียงตัวกันอย่างชัดเจน มีการหลอมละลายเข้าเป็นเนื้อเดียวกัน (Homogenous) เนื่องจาก SUS304 และลวดเชื่อม ER309L มีส่วนผสมของโครเมียมและนิกเกิลสูง (Table 1) เมื่อเพิ่มความเร็วในการเชื่อมให้สูงขึ้นเป็น 250 มิลลิเมตรต่อนาที (Figure 11 (b)) และ 300 มิลลิเมตรต่อนาที (Figure 11 (c)) พบว่าบริเวณพื้นที่หลอมละลายปรากฏโครงสร้างเดนไดรต์ที่ยังคงมีความหนาแน่นและมีขนาดของเกรนละเอียด ผลเช่นนี้เกิดจากเมื่อเชื่อมด้วยความเร็วต่ำ จึงเกิดความร้อนสะสมขึ้นในพื้นที่หลอมละลาย ทำให้มีอุณหภูมิสูงทำให้เกิดผลึกใหม่ขนาดเล็กบริเวณพื้นที่หลอมละลาย ซึ่งผลึกของเดนไดรต์ใหม่นี้เกิดการก่อตัวขึ้นที่อุณหภูมิสูงและยังคงอยู่บนอุณหภูมิลดลงถึงอุณหภูมิห้อง [20]

Figure 11 (d-f) แสดงภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคบริเวณแนวเชื่อมซึ่งเป็นบริเวณตำแหน่ง b ของ Figure 10 พบว่าเมื่อเชื่อมด้วยความเร็วในการเชื่อมที่แตกต่างกัน บริเวณแนวเชื่อมของความเร็วทั้งหมดเกิดเป็นโครงสร้างเดนไดรต์ ซึ่งพอร์มตัวในขณะที่มีการเย็นตัวอย่างรวดเร็วจากอุณหภูมิสูงไปจนถึงอุณหภูมิห้อง [21] ความเร็วในการเชื่อมที่เปลี่ยนแปลงไปส่งผลต่อการกระจายตัวของเดนไดรต์ในแนวเชื่อม เมื่อทำการวัดขนาดของเดนไดรต์จากภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคด้วยโปรแกรม ImageJ โดยให้เส้นที่บสีดำแสดงขนาดของเดนไดรต์ เกลี่ยและเส้นประสีน้ำเงินแสดงเปอร์เซ็นต์ของเดนไดรต์ต่อพื้นที่ดัง Figure 12 พบว่าขนาดของเดนไดรต์มีการเปลี่ยนแปลงเมื่อความเร็วในการเชื่อมเปลี่ยนไป เมื่อพิจารณาผลของความเร็วในการเชื่อมที่ส่งผลต่อความหนาแน่นของเดนไดรต์ที่เกิดขึ้นต่อพื้นที่ดัง Figure 12 (a) พบว่าเมื่อเชื่อมด้วยความเร็ว 200 มิลลิเมตรต่อนาที เดนไดรต์มีขนาดเฉลี่ยเท่ากับ 11.53 ไมโครเมตร และมีความหนาแน่นของเดนไดรต์เท่ากับ 15.55 เปอร์เซ็นต์ เมื่อความเร็วในการเชื่อมเพิ่มขึ้นเป็น 250 และ 300 มิลลิเมตรต่อนาที ขนาดของเดนไดรต์ลดลงและความหนาแน่นของเดนไดรต์ลดลงเช่นกัน โดยขนาดและความหนาแน่นของเดนไดรต์เฉลี่ยเมื่อเชื่อมด้วยความเร็ว 300 มิลลิเมตรต่อนาทีเท่ากับ 9.36 ไมโครเมตรและ 31.41 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ การลดลงของขนาดและความหนาแน่นเฉลี่ยของเดนไดรต์ส่งผลให้ความแข็งแรงของรอยเชื่อมลดลง ดังนั้นการเชื่อมด้วยความเร็วที่สูงเกินไปอาจส่งผลเสียต่อความแข็งแรงของแนวเชื่อมได้

จาก Figure 11 (g-i) แสดงภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคบริเวณแนวเชื่อม/SS400 ซึ่งเป็นบริเวณตำแหน่ง c ของ Figure 4 พบว่าเมื่อเชื่อมด้วยความเร็วในการเชื่อมที่แตกต่างกัน บริเวณโลหะฐาน SS400 เกิดเกรนขนาดใหญ่เป็นสีขาวและสีดำ ภายในเกรนสีขาวมีเม็ดสีดำเป็นจุดเล็กๆแทรกอยู่ภายใน ซึ่งเป็นลักษณะโครงสร้างเฟอร์ไรต์ของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ และพื้นที่รอยต่อประสานระหว่างแนวเชื่อม/SS400 สามารถมองเห็นการแบ่งชั้นระหว่างแนวเชื่อมกับ SS400 ได้อย่างชัดเจน ซึ่งแตกต่างกับพื้นที่รอยต่อประสานของ SUS304/แนวเชื่อม การที่แนวเชื่อมและวัสดุฐาน SS400 ไม่หลอมละลายเป็นเนื้อเดียวกัน ส่งผลให้ความแข็งแรงของชิ้นงานเชื่อมลดลง

Figure 1) 3a-i) แสดงภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคเมื่อกำหนดค่าความเร็วในการเชื่อมคงที่ 250 มิลลิเมตรต่อนาที และปรับเปลี่ยนค่ากระแสไฟเชื่อมเป็น 120, 140 และ 160 แอมแปร์ เพื่อศึกษาอิทธิพลของกระแสไฟเชื่อมที่ส่งผลต่อโครงสร้างจุลภาค

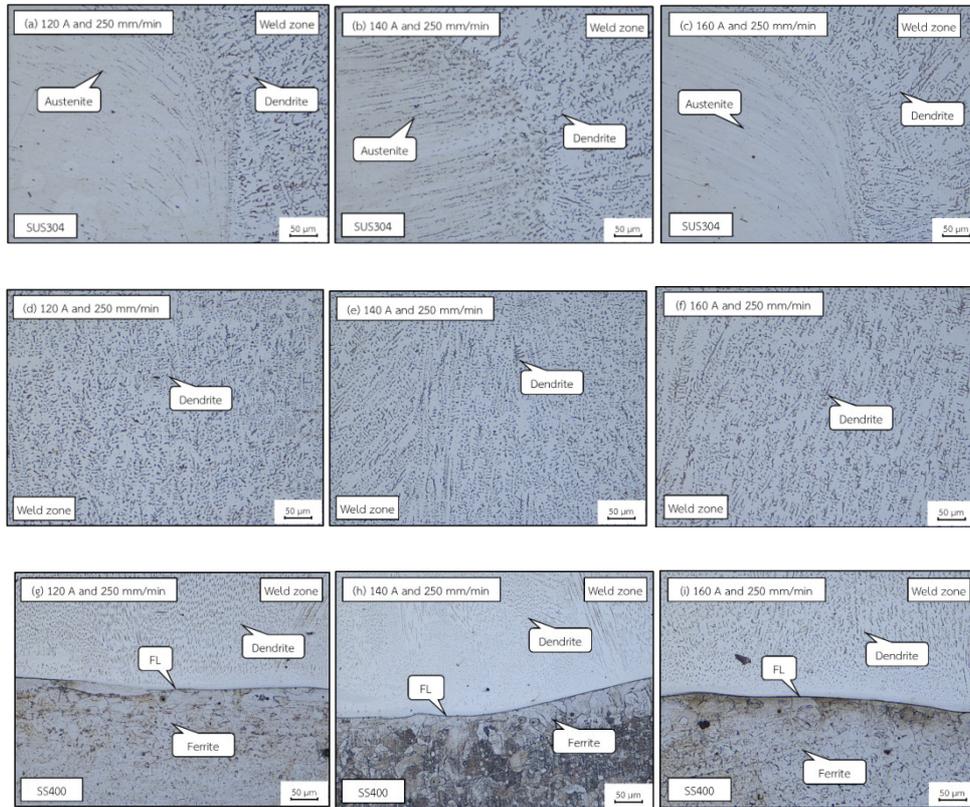


Figure 13 Microstructure of HAZ of SUS304/weld zone at 250 mm/min welding speed.

จาก Figure 13 (a-c) แสดงให้เห็นถึงภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคบริเวณ HAZ ของ SUS304 และแนวเชื่อม ซึ่งเป็นบริเวณตำแหน่ง a ของ Figure 4 พบว่าที่บริเวณแนวเชื่อมมีโครงสร้างผลึกแบบเดนไดรต์เกิดขึ้นในทุกๆกระแสไฟเชื่อมและมีการหลอมละลายเข้ากันได้อย่างชัดเจน เมื่อเพิ่มกระแสไฟเชื่อมให้สูงขึ้นโครงสร้างเดนไดรต์และออสเทนไนต์ไม่ได้เกิดการเปลี่ยนแปลงที่ชัดเจนนัก

จาก Figure 13 (d-f) แสดงโครงสร้างจุลภาคบริเวณแนวเชื่อม ซึ่งเป็นบริเวณตำแหน่ง b ของ Figure 9 พบว่าโครงสร้างจุลภาคของแนวเชื่อมของทุกๆกระแสไฟเชื่อมเกิดการก่อตัวของโครงสร้างเดนไดรต์ เมื่อเพิ่มกระแสไฟเชื่อมให้สูงขึ้นส่งผลต่อการกระจายตัวของโครงสร้างเดนไดรต์ นอกจากนี้ขนาดของแนวเชื่อมมีการเปลี่ยนแปลงเมื่อกระแสไฟเชื่อมเปลี่ยนไป ผลเช่นนี้ทำให้ความแข็งที่บริเวณแนวเชื่อมที่เชื่อมด้วยกระแสไฟที่แตกต่างกันมีค่าความแข็งที่ต่างกัน เมื่อพิจารณาขนาดและความหนาแน่นของเดนไดรต์ที่เกิดขึ้นต่อพื้นที่เมื่อกระแสไฟเชื่อมเปลี่ยนแปลงดังแสดงใน Figure 12 (b) พบว่าเมื่อเชื่อมด้วยกระแสไฟเชื่อม 120 แอมแปร์ ขนาดและความหนาแน่นของเดนไดรต์เฉลี่ยเท่ากับ 8.94 ไมโครเมตรและ 15.82 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ และเมื่อเพิ่ม

กระแสไฟเชื่อมสูงขึ้น ขนาดและความหนาแน่นของเดนไดรต์เฉลี่ยเพิ่มขึ้น เมื่อเพิ่มกระแสไฟเชื่อมเป็น 160 แอมแปร์ มีขนาดเดนไดรต์เท่ากับ 10.29 ไมโครเมตร และความหนาแน่นเฉลี่ยเดนไดรต์เท่ากับ 18.09 เปอร์เซ็นต์ การเพิ่มขึ้นของขนาดและความหนาแน่นของเดนไดรต์เฉลี่ยเมื่อกระแสไฟเชื่อมสูงขึ้นสัมพันธ์กับความแข็งที่เพิ่มขึ้นดังแสดงใน Figure 10

จาก Figure 13 (g-i) แสดงโครงสร้างจุลภาคบริเวณแนวเชื่อมและ SS400 ซึ่งเป็นบริเวณตำแหน่ง c ของ Figure 10 พบว่าในส่วนแนวเชื่อมมีโครงสร้างเป็นเดนไดรต์และไม่พบการหลอมละลายเป็นเนื้อเดียวกัน ระหว่างเนื้อเชื่อมกับโลหะฐาน SS400 ไม่พบรอยแตกใดๆบนพื้นผิว ในฝั่งของ SS400 พบโครงสร้างเพอร์ไรต์ ซึ่งเป็นโครงสร้างที่พบทั่วไปในเหล็กกล้าคาร์บอน ลักษณะเช่นนี้ให้ผลคล้ายกับการเชื่อมเมื่อเปลี่ยนแปลงความเร็วในการเชื่อม

### สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาถึงอิทธิพลของกระแสไฟเชื่อมและความเร็วในการเชื่อมที่ส่งผลต่อความแข็ง โครงสร้างมหภาคและจุลภาคของรอยต่อเกยระหว่าง SUS304 กับ SS400 ในกระบวนการเชื่อมโลหะแก๊สคลุมด้วยแขนหุ่นยนต์เชื่อมสามารถสรุปผลได้ดังนี้

1. ปัจจัยด้านกระแสไฟเชื่อมและความเร็วในการเชื่อมมีผลต่อขนาดความกว้าง ความสูง ความแข็ง และโครงสร้างจุลภาคของแนวเชื่อม
2. เมื่อกำหนดกระแสไฟเชื่อมคงที่ แต่ความเร็วในการเชื่อมสูงขึ้น ส่งผลให้ขนาดของแนวเชื่อมทั้งความกว้าง ความสูงการซึมลึกลดลงและค่าความแข็งมีแนวโน้มลดลง
3. เมื่อกำหนดให้ความเร็วในการเชื่อมคงที่ แต่เพิ่มกระแสไฟเชื่อมให้สูงขึ้น ทำให้ขนาดความกว้าง ความสูงของแนวเชื่อมเพิ่มขึ้น อีกทั้งยังทำให้การซึมลึกของแนวเชื่อมเพิ่มสูงขึ้นอีกด้วยสอดคล้องกับค่าความแข็งมีแนวโน้มสูงขึ้น
4. ผลทางโครงสร้างมหภาคพบว่า ไม่พบความไม่ต่อเนื่องบนผิวแนวเชื่อม เมื่อเพิ่มกระแสไฟเชื่อมและความเร็วในการเชื่อม แต่ส่งผลให้โครงสร้างจุลภาคเกิดการเปลี่ยนแปลง ซึ่งสอดคล้องกับความแข็งที่ได้

### กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณคณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ที่ให้การสนับสนุนทุนวิจัยในครั้งนี้และขอขอบคุณสาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการที่ให้ความอนุเคราะห์เครื่องมืออุปกรณ์และสถานที่ในการทำงานวิจัยในครั้งนี้

### References

- [1] Nuraini, A. A., et al. (2014). The Effects of Welding Parameters on Butt Joints Using Robotic Gas Metal ARC Welding. *Journal of Mechanical Engineering and Sciences*, 6, 988–994.
- [2] Rout, A., et al. (2019). Advances in Weld Seam Tracking Techniques for Robotic Welding: A Review. *Robotics and Computer Integrated Manufacturing*, 56, 12–37.
- [3] Bandhu, D., et al. (2023). Influence of Regulated Metal Deposition and Gas Metal Arc Welding on ASTM A387-11-2 Steel Plates: As-Deposited Inspection, Microstructure,

- 
- and Mechanical Properties. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 32(3), 1025–1038.
- [4] Ahmed, M. M. Z., et al. (2023). Friction Stir Welding of Aluminum in the Aerospace Industry: The Current Progress and State-of-the-Art Review. *Materials*, 16(8), 2971.
- [5] Maurya, A. K., et al. (2021). Dissimilar Welding of Duplex Stainless Steel with Ni Alloys: A Review. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 192, 104439.
- [6] Wiegand, M., et al. (2023). Dissimilar Micro Beam Welding of Titanium to Nitinol and Stainless Steel Using Biocompatible Filler Materials for Medical Applications. *Welding in the World*, 67(1), 77–88.
- [7] Brezinová, J., & Hašul, J. (2023). Evaluation of Fillet Welds Properties Performed by Cold Metal Transfer Robotic Metal Active Gas Welding Technology. *Transport*, 38(1), 44–51.
- [8] Ogbonna, O. S., et al. (2023). Grey-Based Taguchi Method for Multi-Weld Quality Optimization of Gas Metal Arc Dissimilar Joining of Mild Steel and 316 Stainless Steel. *Results in Engineering*, 17, 100963.
- [9] James, J. A., & Sudhish, R. (2016). Study on Effect of Interlayer in Friction Welding for Dissimilar Steels: SS 304 and AISI 1040. *Procedia Technology*, 25, 1191–1198.
- [10] Ratan Biswas, A., et al. (2018). Study of Parametric Effects on Mechanical Properties of Stainless Steel (AISI 304) and Medium Carbon Steel (45C8) Welded Joint Using GMAW. *Materials Today: Proceedings*, 5(5), 12384–12393.
- [11] 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, 012003.
- [12] Jahanzeb, N., et al. (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.
- [13] Liu, J., et al. (2022). Microstructure and Mechanical Properties of Active Gas Arc Welding between 304 Austenitic Stainless Steel and Q235B Low Carbon Steel. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 31(10), 8199–8209.
- [14] ASTM International. (2001). *Standard Test Method for Apparent Shear Strength of Single-Lap-Joint Adhesively Bonded Metal Specimens by Tension Loading (Metal-to-Metal)* (ASTM D1002-01).
- [15] Kumar, V., et al. (2021). Parametric Study and Characterization of Wire Arc Additive Manufactured Steel Structures. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 115, 1723–1733.
- [16] Pathak, D., et al. (2021). To Study the Influence of Process Parameters on Weld Bead Geometry in Shielded Metal Arc Welding. *Materials Today: Proceedings*, 44(1), 39–44.

- [17] Chaudhari, R., et al. (2022). Parametric Study and Investigations of Bead Geometries of GMAW-Based Wire-Arc Additive Manufacturing of 316L Stainless Steels. *Metals*, 12(7), 1232.
- [18] Vora, J., et al. (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), 5060.
- [19] Nakhaei, R., et al. (2016). Effect of Active Gas on Weld Shape and Microstructure of Advanced A-TIG-Welded Stainless Steel. *Acta Metallurgica Sinica (English Letters)*, 29(3), 295–300.
- [20] Khalifeh, A. R., et al. (2013). Dissimilar Joining of AISI 304L/St37 Steels by TIG Welding Process. *Acta Metallurgica Sinica (English Letters)*, 26(6), 721–727.
- [21] Kimapong, K., & Triwanapong, S. (2018). Microstructure and Bending Strength of Dissimilar SS400/SUS304 Steels T-Fillet Joint by Gas Metal Arc Welding. *Key Engineering Materials*, 773, 189–195.