

การศึกษาอิทธิพลกระแสเชื่อมอาร์กทั้งสะเตนแก๊สคลุมต่อสมบัติของรอยต่อ
ระหว่างท่อเหล็กกล้าไร้สนิม AISI304 และ AISI316L

A Study on Effect of GTAW Current on the Properties of the AISI304 and AISI316L
Stainless Steel Tube Joint Properties

ชนรินทร์ รุกสตัย* ระพี กาญจนะ กิตติพงษ์ กิมะพงศ์ และ ศักดิ์ชัย จันทศรี

ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

อำเภอคลองหลวง จังหวัดปทุมธานี 12120

E-mail: chanerin.r@en.rmutt.ac.th

Chanerin Ruksut*, Rapee Kanchana, Kittipong Kimapong and Sakchai Chantasri

Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering,

Rajamangala University of Technology Thanyaburi,

Khlong Luang, Pathum Thani 12120, Thailand

E-mail: chanerin.r@en.rmutt.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีจุดประสงค์เพื่อศึกษาอิทธิพลกระแสเชื่อมอาร์กทั้งสะเตนแก๊สคลุมที่มีผลต่อสมบัติของรอยต่อของท่อเหล็กกล้าไร้สนิม AISI304 และ AISI316L และโลหะเติม ER309LSi โดยทำการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างกระแสเชื่อมและสมบัติของรอยต่อ ตัวแปรการเชื่อมในการศึกษานี้ถูกทำการศึกษาเพื่อหาค่าความแข็งแรงดึง โครงสร้างมหภาค และความแข็ง ผลการทดลองโดยสรุปมีดังนี้ รอยต่อระหว่างท่อเหล็กกล้าไร้สนิม AISI304 และ AISI316L ถูกทำการเชื่อมและได้รอยต่อสมบูรณ์เมื่อใช้กระแสเชื่อม 100-160 A การเพิ่มกระแสเชื่อมส่งผลทำให้ความแข็งแรงดึงและการยืดตัวของรอยต่อเพิ่มขึ้น และมีความสัมพันธ์โดยตรงกับค่าความแข็งแรงของโลหะเชื่อม ความแข็งแรงดึงและการยืดตัวสูงสุดมีค่าเท่ากับ 609 MPa และ 58% เมื่อใช้กระแสเชื่อม 140 A ในการเชื่อมรอยต่อ การนิกษาคของขึ้นทดสอบความแข็งแรงดึงที่แสดงโลหะเชื่อมสมบูรณ์เกิดขึ้นในพื้นที่โลหะเชื่อมเนื่องจากความแข็งสูงและการลดขนาดพื้นที่หน้าตัดของโลหะเชื่อม ขณะที่รอยต่อที่ไม่สมบูรณ์การนิกษาคเกิดขึ้นที่กึ่งกลางของโลหะเชื่อมตำแหน่งแนวรอยต่อ

คำสำคัญ: วัสดุต่างชนิด; เหล็กกล้าไร้สนิม; การเชื่อมอาร์กทั้งสะเตนแก๊สคลุม; ความแข็งแรงดึง; กระแสเชื่อม

Abstract

This research aimed to study an effect of GTAW current on a tube butt joint Properties of AISI304 and AISI316L stainless steel using ER309LSi filler metal. A relation of the welding current and the joint properties was systematically investigated. The welding parameters in this study were studied for tensile strength, macrostructure, and hardness was investigated and analyzed. The summarized results were as follows. The tube joint of AISI304 and AISI316L was successfully welded by GTAW and was reached a sound joint when the welding current of 100-160 A was applied. Increasing the welding current resulted in an increase in tensile strength and elongation of the weld joint and hardness of the weld metal. The maximum tensile strength and the elongation of 609 MPa and 58% were found when the welding current of 140 A was applied to weld the butt joint. The fracture location of the tensile strength specimen that showed a sound weld metal was at the weld metal area because of the higher hardness and the reduction of the cross section of the weld metal. While the fracture location of the joint that showed incomplete weld metal was found at the center of the weld metal.

Keywords: Dissimilar materials joint; Stainless steel; Gas tungsten arc welding; Tensile strength; Welding current

1. บทนำ

รอยต่อท่อโลหะต่างชนิดถูกใช้งานอย่างแพร่หลายในโรงงานอุตสาหกรรม เช่น โครงสร้างทางวิศวกรรมของอุตสาหกรรมผลิตไฟฟ้า ปิโตรเคมีและการกลั่น [1] การต่อยึดท่อโลหะต่างชนิดเพื่อการใช้งานได้อย่างมีประสิทธิภาพในอุตสาหกรรมเหล่านี้มักใช้การเชื่อมในการประกอบชิ้นส่วน ยกตัวอย่าง เช่น การเชื่อมทิก (Tungsten inert gas welding: TIG welding) หลายแนวรอยต่อท่อเหล็กกล้าไร้สนิมมาแทนชดิก 13% Cr และเหล็กกล้าไร้สนิมคิวเพล็กซ์ 2205 [2] การเชื่อมทิกท่อเหล็กกล้าโครเมียม X20 และ P91 [3] การเชื่อมเสียดทาน (Friction welding: FW) ท่อเหล็กกล้าไร้สนิมมาแทนชดิก [4-5] การเชื่อมเสียดทานเหล็กกล้าไร้สนิม SUS304HCu [6] การเชื่อมเสียดทานเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนดิก AISI310S [7] การเชื่อมอาร์ก (Arc welding) ท่อเหล็กกล้าเฟอร์ริติก 2.25Cr-1Mo กับเหล็กกล้าไร้สนิม SS316 [8] การเชื่อมอาร์กรอยต่อชนเหล็กกล้าคาร์บอน SFVQ1A และเหล็กกล้าไร้สนิม SUS316 [9] หรือการเชื่อมทิกเหล็กกล้าไร้สนิมคิวเพล็กซ์และเหล็กกล้ามาแทนชดิกพิเศษ [2] เป็นต้น ในการศึกษาและพัฒนากระบวนการเชื่อมเพื่อให้ได้สมบัติของแนวเชื่อมที่ต้องการ ตัวแปรการเชื่อมสำคัญที่มีการศึกษาการเปลี่ยนแปลงประกอบด้วยกระแสเชื่อมและความเร็วเดินแนวแสดงให้ทราบถึงความร้อนที่ให้แก่นวนเชื่อม (Heat input) [1, 9] หรือการให้เวลาและแรงดันเสียดสีที่ทำให้ความร้อนที่ให้แก่นวนเชื่อมต่อการเกิดการเปลี่ยนแปลง [4-7] หรือการเปรียบเทียบกระบวนการเชื่อม [1] หรือการเชื่อมรองพื้นผิวรอยต่อ [8] หรือการให้ความร้อนก่อนและหลังการเชื่อม [3, 8, 10] เป็นต้น ผลของการศึกษาที่ผ่านมาได้รายงานไว้ว่า การเปลี่ยนแปลงพลังงานความร้อนในแนวเชื่อม (Heat energy) เช่น กระแสเชื่อม แรงดันเชื่อม หรือความเร็วเดินแนวเชื่อม เป็นต้น

เป็นสาเหตุหลักที่ทำให้สมบัติทางกลของรอยต่อ เกิดการเปลี่ยนแปลง [4-5, 8] ค่าพลังงานความร้อนที่ให้แก่นวเชื่อมที่แตกต่างกันทำให้ความต้านทานการกัดกร่อนของรอยต่อลดลงได้เนื่องจากการลดเฟสโครเมียมออกไซด์บนพื้นผิวเหล็กกล้าไร้สนิม อย่างไรก็ตามหากมีการปรับปรุงส่วนผสมทางเคมีของโลหะเชื่อมที่มีความเหมาะสมนั้นสามารถทำให้ความต้านทานการกัดกร่อนของรอยต่อเหล็กกล้าไร้สนิมไม่เปลี่ยนแปลงได้ [11]

ข้อมูลการวิจัยด้านบนพบว่าการเชื่อมรอยต่อระหว่างท่อเหล็กกล้าไร้สนิม AISI304 และ AISI316L มีการรายงานค่อนข้างจำกัด การเลือกค่าพลังงานความร้อนที่เหมาะสมสำหรับรอยต่อเหล็กกล้าไร้สนิมยังคงมีการศึกษาและพัฒนาอย่างต่อเนื่อง ด้วยเหตุนี้ในงานวิจัยจึงมีกรอบแนวคิดในการเลือกพลังงานความร้อนที่เหมาะสมสำหรับรอยต่อโดยการศึกษาอิทธิพลของกระแสเชื่อมที่มีผลต่อความแข็งแรงของรอยต่อ เนื่องจากขนาดและรูปแบบของวัสดุในการทดลองตลอดจนกระบวนการเชื่อมที่เลือกใช้ เป็นสิ่งที่มีการศึกษาและพัฒนาในงานอุตสาหกรรมในปัจจุบัน ด้วยเหตุนี้ผลการทดลองที่ได้คาดว่าจะสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในงานอุตสาหกรรมการขนถ่ายของเหลวเฉพาะที่ส่งผลทำให้อายุการใช้งานและสมบัติของรอยต่อเพิ่มขึ้น

2. วิธีการทดลอง

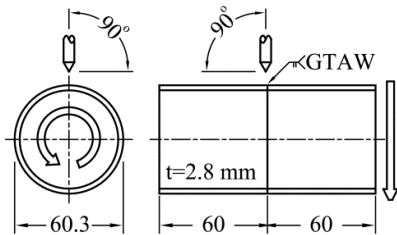
ท่อเหล็กกล้าไร้สนิมผนังบางไร้ตะเข็บเกรด AISI304 และ AISI316L ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 60.3 mm และความหนาของผนัง 2.8 mm ถูกนำมาใช้เป็นวัสดุในการทดลอง ท่อเหล็กกล้าไร้สนิมมีส่วนผสมทางเคมีและสมบัติทางกลดังตารางที่ 1 ท่อเหล็กกล้าไร้สนิมต่างชนิดถูกประกอบเป็นรอยต่อชนดั่งรูปที่ 1 รอยต่อชนในการทดลองเป็นรอยต่อชนแบบไม่มีร่องบากและมีช่องว่างแนวราก (Root gap) เท่ากับ 0.0 mm ก่อนการเชื่อมรอยต่อถูกทำการเชื่อมจุดจำนวน 4 จุดรอบๆ เส้นรอบวงของรอยต่อ

ตารางที่ 1 ส่วนผสมทางเคมีของวัสดุทดลอง (wt%)

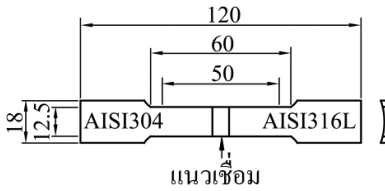
วัสดุ	C	Cr	Ni	Mo	Mn	Si	P	S	ความแข็งแรงดึง	ความแข็ง
AISI304	0.03	18.00	8.10	0.00	1.90	0.60	0.04	0.03	576 MPa	165 HV
AISI316L	0.02	17.50	10.00	2.20	1.80	0.70	0.01	0.03	607 MPa	177 HV
ER309LSi	0.03	23.00	12.00	0.60	1.00	0.65	0.01	0.01	-	-

กระบวนการเชื่อมที่ใช้ในการเชื่อมยี่ดรอยต่อเข้าด้วยกัน คือ การเชื่อมอาร์กทั้งสะเตนแก๊สคลุม (Gas tungsten arc welding: GTAW) ที่สามารถป้อนโลหะเติม (Filler metal) แบบอัตโนมัติที่ความเร็วการป้อนที่สามารถปรับเปลี่ยนความเร็วในการเติมโลหะเติมได้อิสระ โลหะเติมที่ใช้ในการทดลอง คือ โลหะเติม ER309LSi ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.2 mm ซึ่งมีส่วนผสมทางเคมีดังตารางที่ 1 อัตราการป้อนโลหะเติมเข้าสู่บ่อหลอมละลายมีค่าเท่ากับ 120 mm/min ตัวแปรการเชื่อมอื่นๆ ประกอบด้วย กระแสเชื่อม 80-160 A ความเร็วในการเดินแนวเชื่อมที่วัดจากหัวด้านนอกของรอยต่อท่อเหล็กกล้าไร้สนิมต่างชนิดเท่ากับ 150 mm/min แก๊สคลุม คือ แก๊ส

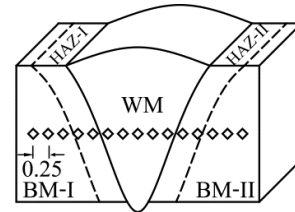
อาร์กอน 99.99% ที่มีอัตราการไหล 10 l/min ในการเชื่อมรอยต่อ แท่งทั้งสะเตนของมือเชื่อมถูกจับยึดแน่นในแนวตั้งที่ทำมุมกับแกนหมุนของรอยต่อดังรูปที่ 1 ที่มีค่ามุม 90° การเชื่อมอาร์กขึ้นงานถูกกระทำบนผิวบนของรอยต่อในท่าราบเท่านั้น (ผิวด้านบนของรอยต่อตำแหน่ง 12 นาฬิกา)



รูปที่ 1 รอยต่อชนวัสดุทดลอง
(หน่วย: mm)



รูปที่ 2 ชิ้นทดสอบความแข็งแรงดึง
(หน่วย: mm)



รูปที่ 3 การทดสอบความแข็งแรงตาม
แนวกำหนด

รอยต่อที่ได้ถูกนำมาทำการตัดด้วยเครื่องตัดชิ้นทดสอบโครงสร้างจุลภาคด้วยใบตัดเลื่อยสัณฐานอะลูมิเนียมออกไซด์ที่มีความเร็วรอบในการหมุน 2000 rpm และมีการหล่อเย็นด้วยสารหล่อเย็นเพื่อป้องกันการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างโลหะวิทยาของชิ้นทดสอบ รอยต่อที่ได้ถูกนำมาทำการทดสอบสมบัติประกอบด้วยการทดสอบความแข็งแรงดึง การทดสอบความแข็ง และการตรวจสอบโครงสร้างโลหะวิทยา

ในการทดสอบความแข็งแรงดึง ความหนาของผิวหน้าแนวเชื่อมและความหนาของแนวรากถูกเจียรไนออกด้วยเครื่องเจียรไน ก่อนการตัดและเตรียมเพื่อให้ได้ชิ้นทดสอบความแข็งแรงดึงดังรูปที่ 2 ชิ้นทดสอบนี้ถูกนำไปทำการทดสอบความแข็งแรงดึงโดยใช้อัตราการเกิดความเครียด (Strain rate) เท่ากับ 1 mm/min ผลการทดสอบที่ถูกนำมาทำการวิเคราะห์สมบัติของรอยต่อประกอบด้วยค่าความแข็งแรงดึงสูงสุด การยืดตัว ตำแหน่งการนิกษาคของชิ้นทดสอบความแข็งแรงดึง และพื้นผิวการนิกษาคของชิ้นทดสอบความแข็งแรงดึง

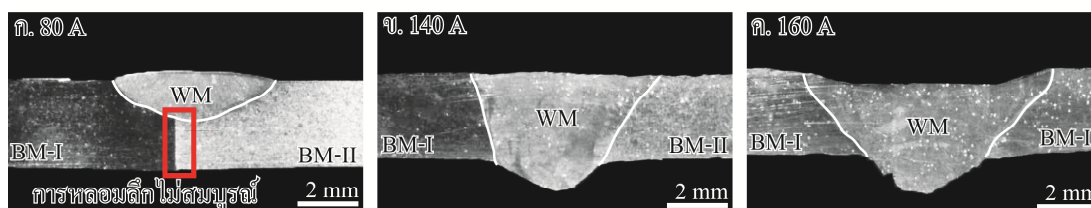
การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องกำลังขยายต่ำ พื้นผิวที่ถูกนำมาตรวจสอบถูกตัดเตรียมในแนวตั้งฉากกับทิศทางการเดินแนวเชื่อม พื้นระนาบที่ได้จากการตัดถูกขัดหยาบด้วยกระดาษทราย ขัดมันด้วยผงเพชรจนพื้นผิวชิ้นทดสอบมีความมันวาวคล้ายกระจกเงา (Mirror-like) และกัดผิวหน้า (Etching) ด้วยสารละลายที่กำหนดเพื่อแสดงพื้นที่ต่างๆ ประกอบด้วยโลหะฐาน (Base metal: BM) เหล็กกล้าไร้สนิม AISI304 (BM-I) และเหล็กกล้าไร้สนิม AISI316L (BM-II) พื้นที่กระทบร้อน (Heat affected zone: HAZ) ด้านเหล็กกล้าไร้สนิม AISI304 (HAZ-I) และเหล็กกล้าไร้สนิม AISI316L (HAZ-II) และโลหะเชื่อม (Weld metal)

ชิ้นงานที่ผ่านการตรวจสอบโครงสร้างโลหะวิทยาถูกนำมาทำการทดสอบความแข็ง ด้วยการทดสอบความแข็งไมโครวิกเกอร์สด้วยแรงกดทดสอบ 100 gf เวลากดแช่ 10 s การทดสอบเป็นการทดสอบความแข็งเป็นแนวทดสอบ (Hardness profile) เส้นแนวทดสอบความแข็งกำหนดให้อยู่ที่ตำแหน่งกึ่งกลางความหนาของรอยต่อ หรือ

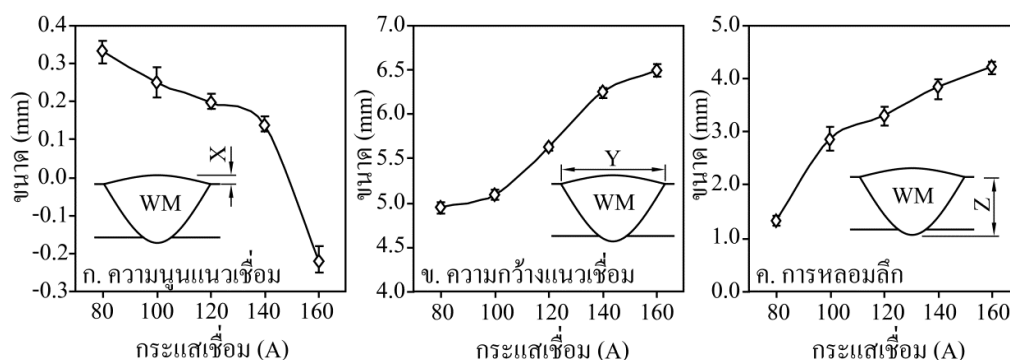
1.4 mm จากผิวด้านบนและด้านล่างของรอยต่อ การทดสอบทำการทดสอบเริ่มที่ BM-I HAZ-I WM HAZ-II และ BM-II ดังรูปที่ 3 กำหนดให้ความห่างระหว่างจุดทดสอบมีค่าเท่ากับ 0.25 mm

3. ผลการทดลองและการวิจารณ์

รูปที่ 4 แสดงโครงสร้างมหภาคของรอยต่อที่เชื่อมด้วยกระแสเชื่อมต่างๆ ที่แสดงพื้นที่โลหะเชื่อมออกเป็น 3 ส่วนหลัก คือ พื้นที่โลหะฐานเหล็กกล้าไร้สนิม AISI304 (BM-I) พื้นที่โลหะเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิม AISI316L (BM-II) และโลหะเชื่อม (WM) ในส่วนของพื้นที่ที่กระทบร้อน HAZ-I และ HAZ-II ไม่สามารถตรวจสอบพบได้ด้วยกล้องกำลังขยายต่ำ เมื่อกระแสเชื่อมเกิดการเปลี่ยนแปลงพบว่ารูปร่างของโลหะเชื่อมเกิดการเปลี่ยนแปลง กล่าวคือที่กระแสเชื่อมต่ำ 80 A แนวเชื่อมที่ได้มีความนูนของรอยเชื่อมต่ำ (X) แนวเชื่อมมีความกว้างต่ำ (Y) และโลหะเชื่อมไม่เกิดการหลอมลึก (Z) ลงสู่ด้านล่างตลอดแนวความหนาของรอยต่อ (ความหนาของผนังท่อเท่ากับ 2.8 mm) ดังรูปที่ 4 และแสดงค่าขนาดของรูปร่างโลหะเชื่อมดังรูปที่ 5 เมื่อกระแสเชื่อมเพิ่มขึ้นจาก 100-160 A ส่งผลทำให้ค่าความนูนของแนวเชื่อมมีค่าลดลง ความกว้างของโลหะเชื่อมเพิ่มขึ้น และการหลอมลึกของโลหะเชื่อมเพิ่มขึ้น ดังรูปที่ 4 ข. และ ค. กระแสเชื่อมที่เพิ่มขึ้นส่งผลทำให้เกิดความร้อนเข้า (Heat input) ในรอยต่อมีค่าเพิ่มขึ้น [12-13] และส่งผลทำให้เกิดการขยายพื้นที่การเชื่อม และการหลอมละลายของโลหะบริเวณรอยต่อเพิ่มขึ้นดังรูปที่ 5 การเพิ่มกระแสเชื่อมในการเชื่อมรอยต่อด้วยการเชื่อมทิกทำให้เกิดการหลอมลึกความร้อน (Heat penetration) สูง [14] ทำให้ความนูนของผิวน้ำแนวเชื่อมลดลงเนื่องจากโลหะเดิมถูกกดลงสู่



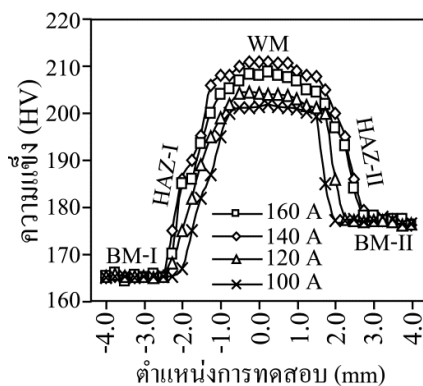
รูปที่ 4 โครงสร้างมหภาครอยต่อเหล็กกล้าไร้สนิมต่างชนิดที่เชื่อมด้วยกระแสเชื่อมแตกต่าง



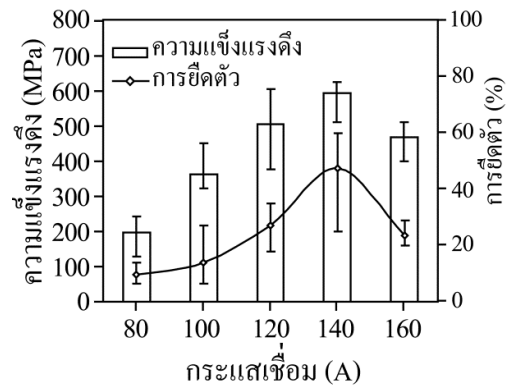
รูปที่ 5 ขนาดรูปร่างโลหะเชื่อมที่กระแสเชื่อมแตกต่าง

พื้นผิวด้านล่างของรอยต่อและก่อให้เกิดความนูนของแนวรากสูงขึ้น ซึ่งเป็นผลการทดลองลักษณะนี้คล้ายกับการเชื่อมอาร์กโลหะแก๊สคลุม (Gas metal arc welding: GMAW) รอยต่อตัวที่ระหว่างเหล็กกล้า SS400 และ SUS304 ที่ความนูนของแนวเชื่อมสามารถลดลงได้เมื่อกระแสเชื่อมเพิ่มขึ้น [15]

พื้นผิวระนาบที่ทำการตรวจสอบโครงสร้างมหภาคที่เชื่อมด้วยกระแสเชื่อม 100-160 A ในรูปที่ 5 ถูกนำมาทำการทดสอบค่าความแข็งไมโครวิกเกอร์และแสดงผลการทดสอบดังรูปที่ 6 รอยต่อที่เชื่อมด้วยกระแสเชื่อม 80 A ไม่ถูกนำมาทำการทดสอบเนื่องจากการหลอมลึกลึกมีค่าน้อยกว่า 0.5 เท่าของความหนาของรอยต่อ ผลการทดสอบความแข็งดังรูปที่ 6 พบว่าค่าความแข็งของผิวระนาบโครงสร้างมหภาคที่เชื่อมด้วยกระแสเชื่อม 100-160 A มีแนวโน้มคล้ายกัน กล่าวคือความแข็งของโลหะฐาน BM-I และ BM-II มีค่าเฉลี่ยประมาณ 165 และ 177 HV ตามลำดับ ค่าความแข็งของโลหะเชื่อมมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อตำแหน่งการทดสอบเข้าสู่พื้นที่ที่กระทบร้อน HAZ-I และ HAZ-II และแสดงค่าความแข็งสูงสุดที่บริเวณกึ่งกลางของโลหะเชื่อม การเพิ่มค่าความแข็งของพื้นที่ที่กระทบร้อนนี้เกิดขึ้นเนื่องการปรับปรุงขนาดเกรนให้มีขนาดเล็กและละเอียดลงซึ่งเป็นไปตามความสัมพันธ์ของฮอลล์เพทช์ (Hall-Petch relation) [16] ค่าความแข็งที่มีค่าเพิ่มขึ้นของโลหะเชื่อมในพื้นที่โลหะเชื่อมเมื่อเปรียบเทียบกับโลหะฐานและพื้นที่ที่กระทบร้อนเกิดขึ้นได้โดยสาเหตุหลักสองประการ ประกอบด้วย สาเหตุที่หนึ่ง คือโลหะเชื่อมนั้นประกอบด้วยโครงสร้างเดนไดรต์ที่เกิดจากการเย็นตัวไม่สม่ำเสมอในขณะที่เกิดการเปลี่ยนเฟสจากของเหลวสู่ของแข็ง และเป็นโครงสร้างที่มีสมบัติทางด้านความแข็งและความเปราะสูงกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับเกรนทั่วไป เช่น เกรนกลมมน (Equi-axed grain) หรือเกรนยาว (Columnar grain) [17] สาเหตุที่สอง คือโลหะเชื่อมมีส่วนผสมทางเคมีของธาตุเสริมแรง (Reinforcement element) คือ โครเมียมในปริมาณที่สูงกว่าพื้นที่ที่กระทบร้อน และโลหะฐาน โครเมียมที่มีปริมาณสูงสามารถก่อให้เกิดเฟสโครเมียมคาร์ไบด์ที่มีความแข็งสูงกระจายในพื้นที่โลหะเชื่อมและส่งผลทำให้ความแข็งของโลหะเชื่อมมีค่าสูงขึ้นได้ [18] อย่างไรก็ตามการวิเคราะห์หาปริมาณและการกระจายเฟสโครเมียมคาร์ไบด์ควรมีการศึกษาด้วยเครื่องมือวิเคราะห์คุณภาพสูงต่อไป เมื่อทำการเปรียบเทียบค่าความแข็งของรอยต่อที่ทำการเชื่อมด้วยกระแสเชื่อมต่างๆ พบว่ากระแสเชื่อมที่มีค่าสูงขึ้นส่งผลทำให้ความแข็งของโลหะเชื่อมมีค่าเพิ่มขึ้น และการกระจายความแข็งที่มีค่าสูงในระนาบการตรวจสอบมีค่าเพิ่มขึ้น

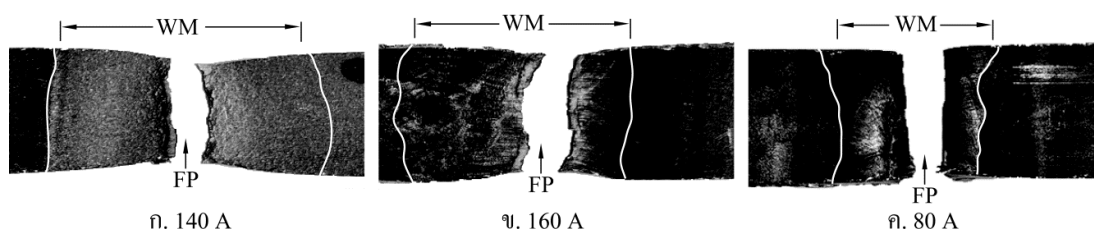


รูปที่ 6 แนวความแข็งตัดขวางรอยต่อ



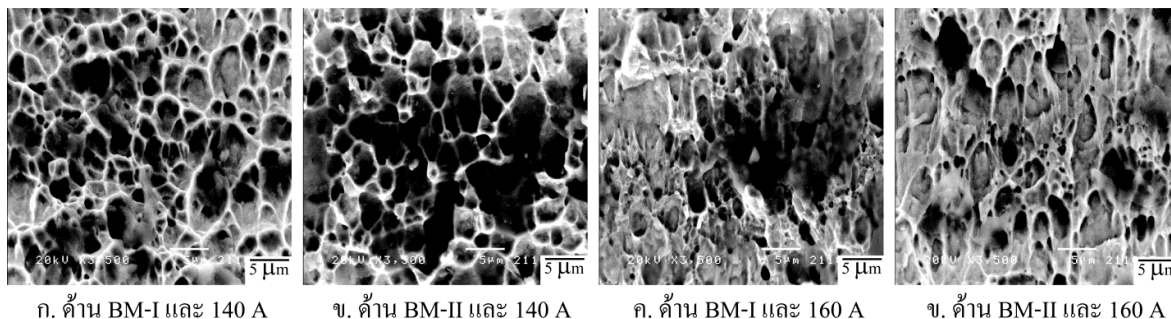
รูปที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งแรงดึง การยืดตัว และกระแสเชื่อม

ค่าความแข็งแรงของโลหะเชื่อมที่มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อกระแสเชื่อมเพิ่มขึ้นมีความสัมพันธ์กับผลการทดสอบความแข็งแรงดึงดังรูปที่ 7 โลหะเชื่อมที่แสดงค่าความแข็งแรงสูงสุด คือ โลหะเชื่อมที่เชื่อมด้วยกระแสเชื่อม 140 A แสดงค่าความแข็งแรงดึงและการยืดตัวสูงสุดในการทดสอบนี้ที่ค่าประมาณ 609 MPa และ 58% ตามลำดับ ค่าความแข็งแรงนี้มีค่าสูงกว่าความแข็งแรงดึงของโลหะฐานเหล็กกล้าไร้สนิม AISI316L (BM-II) เล็กน้อย อย่างไรก็ตามเนื่องจากความไม่สม่ำเสมอของโครงสร้างเดนไดรท์ในโลหะเชื่อมและการลดขนาดของพื้นที่หน้าตัดของโลหะเชื่อมของชิ้นทดสอบความแข็งแรงดึง จึงส่งผลทำให้รอยต่อเกิดการฉีกขาดในโลหะเชื่อมและเกิดการยืดตัวสูงในชิ้นทดสอบดังรูปที่ 8 ก. และ ข. ที่เชื่อมด้วยกระแสเชื่อม 140 และ 160 A เมื่อเปรียบเทียบกับการฉีกขาดของชิ้นทดสอบความแข็งแรงดึงของรอยต่อที่เชื่อมด้วยกระแสเชื่อม 80 A ที่ก่อให้เกิดรอยต่อที่มีการหลอมลึกไม่สมบูรณ์ดังรูปที่ 4 ก. การฉีกขาดของชิ้นทดสอบเกิดขึ้นที่กึ่งกลางโลหะเชื่อมตำแหน่งแนวเส้นรอยต่อ (Butt line) และเกิดการยืดตัวค่อนข้างต่ำก่อนการฉีกขาดดังรูปที่ 8 ค.



รูปที่ 8 ตำแหน่งการฉีกขาดของชิ้นทดสอบความแข็งแรงดึงที่กระแสเชื่อมแตกต่าง

พื้นผิวการฉีกขาดของชิ้นทดสอบความแข็งแรงดึงที่ตั้งฉากกับแนวฉีกขาด (FP) ที่เกิดการฉีกขาดในโลหะเชื่อมด้าน BM-II ในรูปที่ 8 ถูกนำมาทำการตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด (Scanning electron microscope: SEM) ที่กำลังขยาย 3500 เท่าทั้งสองด้านของชิ้นส่วนการทดสอบความแข็งแรงดึงและได้ภาพถ่ายดังรูปที่ 9 พื้นผิวการฉีกขาดของชิ้นทดสอบที่เชื่อมด้วยกระแสเชื่อม 140 A ที่แสดงค่าความแข็งแรงสูงสุดดังรูปที่ 9 ก. และ ข. แสดงพื้นผิวการฉีกขาดแบบหลุม (Dimple pattern) ซึ่งแสดงพฤติกรรมการฉีกขาดแบบเหนียว (Ductile behavior) ของชิ้นทดสอบ ผลการตรวจสอบด้วยภาพถ่ายกำลังขยายสูงนี้สนับสนุนผลการตรวจสอบแนวการฉีกขาดในรูปที่ 8 ก. ที่ชิ้นทดสอบแสดงการยืดตัวเสียรูปสูง และมีค่าการยืดตัวสูงสุดในการทดสอบนี้ ขณะเดียวกันเมื่อเปรียบเทียบกับพื้นผิวการฉีกขาดของชิ้นทดสอบที่เชื่อมด้วยกระแสเชื่อม 160 A ที่แสดงค่าความแข็งแรงต่ำกว่า พื้นผิวการฉีกขาดแบบหลุมสามารถตรวจพบได้เช่นเดียวกัน อย่างไรก็ตามเมื่อทำการเปรียบเทียบขนาดของหลุมที่เกิดขึ้น ขนาดหลุมของผิวการฉีกขาดที่เชื่อมด้วยกระแสเชื่อม 160 A มีขนาดของหลุมมีขนาดใหญ่ และมีความลึกของหลุมที่ต่ำกว่าซึ่งแสดงให้เห็นว่าพฤติกรรมความเหนียวของชิ้นทดสอบมีค่าที่ต่ำกว่าชิ้นทดสอบที่เชื่อมด้วยกระแสเชื่อม 140 A



รูปที่ 9 ภาพถ่ายกำลังขยายสูงของพื้นผิวการกัดกร่อนของชิ้นทดสอบความแข็งแรงดึง

4. สรุปผลการทดลอง

รอยต่อท่อเหล็กกล้าไร้สนิม AISI304 และ AISI316L เป็นรอยต่อที่มีการใช้งานเพิ่มขึ้นอย่างแพร่หลายในโรงงานอุตสาหกรรม เช่น โครงสร้างทางวิศวกรรมของอุตสาหกรรมผลิตไฟฟ้า ปิโตรเคมีและการกลั่น การศึกษาตัวแปรการเชื่อมที่เหมาะสมและทำให้เกิดความแข็งแรงสูงสุด และมีความเหมาะสมในการนำไปใช้งาน จึงเป็นสิ่งสำคัญที่ต้องทำการศึกษาและพัฒนาอย่างต่อเนื่อง ด้วยเหตุนี้รอยต่อจึงถูกทำการเชื่อมด้วยกระบวนการเชื่อมอาร์กทั้งสะเตนแก๊สคลุมที่กระแสเชื่อม 80-160 A โดยใช้โลหะเติม ER309LSi และศึกษาและวิเคราะห์สมบัติของรอยต่อเพื่อหาค่ากระแสเชื่อมที่มีความเหมาะสม ผลการทดลองโดยสรุปมีดังนี้

4.1 รอยต่อท่อเหล็กกล้าไร้สนิม AISI304 และ AISI316L ถูกทำการเชื่อมและได้รอยต่อสมบูรณ์เมื่อใช้กระแสเชื่อม 100-160 A

4.2 ความแข็งแรงของโลหะเชื่อมมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อกระแสเชื่อมเพิ่มขึ้น และแสดงค่าความแข็งแรงสูงในตำแหน่งโลหะเชื่อมที่แสดงปริมาณโครเมียมผสมสูง

4.3 การเพิ่มกระแสเชื่อมส่งผลทำให้ความแข็งแรงดึงและการยึดตัวของรอยต่อเพิ่มขึ้น และมีความสัมพันธ์โดยตรงกับค่าความแข็งแรงของโลหะเชื่อม ความแข็งแรงและการยึดตัวสูงสุดมีค่าเท่ากับ 609 MPa และ 58% เมื่อใช้กระแสเชื่อม 140 A ในการเชื่อมรอยต่อ อย่างไรก็ตามความแข็งแรงขึ้นอยู่กับพื้นฐานของค่าพื้นที่หน้าตัดที่แตกต่างกันเนื่องจากการหลอมลึกที่แตกต่างกัน การนำตัวแปรการเชื่อมนี้ไปใช้งานจึงต้องพิจารณาเป็นสำคัญ

4.4 การกัดกร่อนของชิ้นทดสอบความแข็งแรงดึงที่แสดงโลหะเชื่อมสมบูรณ์เกิดขึ้นในพื้นที่โลหะเชื่อมเนื่องจากความแข็งแรงสูงและการลดขนาดพื้นที่หน้าตัดของโลหะเชื่อม ขณะที่รอยต่อที่ไม่สมบูรณ์เกิดขึ้นที่กึ่งกลางของโลหะเชื่อมตำแหน่งแนวรอยต่อ

กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนบทความขอขอบพระคุณสำนักงานการวิจัยแห่งชาติ (วช.) และมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี สำหรับทุนวิจัยประจำปีงบประมาณ 2561

เอกสารอ้างอิง

- [1] D. Akbari and I. Sattari-Far, "Effect of the welding heat input on residual stresses in butt-welds of dissimilar pipe joints," *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, Vol. 86, 2009, pp. 769-776.
- [2] K. Bettahar, M. Bouabdallah, R. Badji, M. Gaceb, C. Kahloun and B. Bacroix, "Microstructure and mechanical behavior in dissimilar 13Cr/2205 stainless steel welded pipes," *Materials & Design*, Vol. 85, 2015, pp. 221-229.
- [3] J. Brózda and M. Zeman, "Wrong heat treatment of martensitic steel welded tubes caused major cracking during assembly of resuperheaters in a fossil fuel power plant," *Engineering Failure Analysis*, Vol. 10, 2003, pp. 569-579.
- [4] C.A. Della Rovere, C.R. Ribeiro, R. Silva, N.G. Alcântara and S.E. Kuri, "Local mechanical properties of radial friction welded supermartensitic stainless steel pipes," *Materials & Design*, Vol. 56, 2014, pp. 423-427.
- [5] C.A. Della Rovere, J.M. Aquino, C.R. Ribeiro, R. Silva, N.G. Alcântara and S.E. Kuri, "Corrosion behavior of radial friction welded supermartensitic stainless steel pipes," *Materials & Design*, Vol. 65, 2015, pp. 318-327.
- [6] M. Vinoth Kumar and V. Balasubramanian, "Microstructure and tensile properties of friction welded SUS304HCu austenitic stainless steel tubes," *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, Vol. 113, 2014, pp. 25-31.
- [7] M. Kimura, A. Ichihara, M. Kusaka and K. Kaizu, "Joint properties and their improvement of AISI310S austenitic stainless steel thin walled circular pipe friction welded joint," *Materials & Design*, Vol. 38, 2012, pp. 38-46.
- [8] A. Joseph, S.K. Rai, T. Jayakumar and N. Murugan, "Evaluation of residual stresses in dissimilar weld joints," *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, Vol. 82, 2005, pp. 700-705.
- [9] D. Deng, S. Kiyoshima, K. Ogawa, N. Yanagida and K. Saito, "Predicting welding residual stresses in a dissimilar metal girth welded pipe using 3D finite element model with a simplified heat source," *Nuclear Engineering and Design*, Vol. 241, 2011, pp. 46-54.
- [10] S.D. Norris, "The degradation of dissimilar explosively welded joints due to thermal ageing," *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, Vol. 75, 1998, pp. 735-748.
- [11] K. Devendranath Ramkumar, N. Arivazhagan and S. Narayanan, "Effect of filler materials on the performance of gas tungsten arc welded AISI304 and Monel400," *Materials & Design*, Vol. 40, 2012, pp. 70-79.

- [12] W.A. Ayoola, W.J. Suder and S.W. Williams, “Parameters controlling weld bead profile in conduction laser welding,” Journal of Materials Processing Technology, Vol. 249, 2017, pp. 522-530.
- [13] L.G. Tong, J.C. Gu, L. Wang and S.W. Yin, “Influences of deposited metal material parameters on weld pool geometry during shield metal arc welding,” International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 90, 2015, pp. 968-978.
- [14] S. Kou, Welding Metallurgy, 2nd edition, John Wiley & Sons, Inc., New Jersey, 2003.
- [15] V. Wattanajitsiri, S. Triwanapong and K. Kimapong, “Microstructure and Cracking in Gas Metal Arc Weld Metal of Dissimilar SS400/SUS304 Steels T-Joint,” Engineering Journal of Research and Development, Vol. 29, 2018, pp. 27-36.
- [16] R. Abbaschian, L. Abbaschian and R.E. Reed-Hill, Physical Metallurgy Principles, 4th edition, Cengage Learning, Singapore, 2010.
- [17] K. Kimapong, S. Torsakul, A. Memon and N. Klanpracha, Engineering Materials, Cengage Learning, Bangkok, 2010.
- [18] K. Kimapong, P. Poonnayom and V. Wattanjitsiri, “Microstructure and Wear Resistance of Hardfacing Weld Metal on JIS-S50C Carbon Steel in Agricultural Machine Parts,” Materials Science Forum, Vol. 872, 2016, pp. 55-61.