

การเลือกใช้โลหะเติมสำหรับการเชื่อมทิกท่อไร้ตะเข็บระหว่างเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด AISI304 และเกรด AISI316L

Selection of Filler Metal for TIG Welding a Seamless Tube between AISI304 and AISI316L Stainless Steel

ศักดิ์ชัย จันทศรี* ระพี กาญจนะ ชนรินทร์ รักษ์ตย์ และ กิตติพงษ์ กิมะพงศ์

ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

อำเภอคลองหลวง จังหวัดปทุมธานี 12120

E-mail: sakchai.c@en.rmutt.ac.th

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

Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering,

Rajamangala University of Technology Thanyaburi,

Khlong Luang, Pathum Thani 12120, Thailand

E-mail: sakchai.c@en.rmutt.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีจุดประสงค์หลักในการเลือกใช้โลหะเติมการเชื่อมทิก (Tungsten inert gas welding: TIG welding) เพื่อทำให้เกิดรอยต่อระหว่างเหล็กกล้าไร้สนิมต่าง AISI304 และ AISI316L ที่ทำให้เกิดความแข็งแรงสูง และศึกษาตัวแปรการเชื่อมที่มีผลต่อสมบัติของรอยต่อ ผลการทดลองโดยสรุปมีดังนี้ กระแสเชื่อมที่เพิ่มสูงขึ้น ส่งผลทำให้ความแข็งแรงดึงของรอยต่อที่เชื่อมด้วยโลหะเติมทั้ง 3 รูปแบบมีค่าเพิ่มขึ้น โลหะเติมที่มีความเหมาะสมในการเชื่อมรอยต่อระหว่างเหล็กกล้าไร้สนิม AISI304 และ AISI316L คือ โลหะเติม ER309LSi ซึ่งแสดงความแข็งแรงดึงสูงสุด 607 MPa รอยต่อที่เชื่อมด้วยโลหะเติม ER309LSi นี้แสดงค่าความแข็งแรงดึงสูงกว่า ER316LSi และ ER316L ที่ 5% และ 3% ตามลำดับ ตำแหน่งการพังทลายของชิ้นทดสอบความแข็งแรงดึงสามารถพบได้ที่กึ่งกลางของโลหะเชื่อมเมื่อกระแสเชื่อมมีค่า 80-100 A อย่างไรก็ตามตำแหน่งการพังทลายถูกเลื่อนไปที่ด้านเหล็กกล้าไร้สนิม AISI316L เมื่อกระแสเชื่อมมีค่าสูงและแสดงการเกิดการเปลี่ยนรูปในปริมาณสูงในพื้นที่การพังทลาย ความแข็งแรงเฉลี่ยของโลหะเชื่อมที่เชื่อมด้วยโลหะเติม ER309LSi มีค่าสูงสุดในโลหะเติมทั้ง 3 แบบ และมีความสัมพันธ์โดยตรงทำให้เกิดความแข็งแรงดึงสูงสุดของรอยต่อ

คำสำคัญ: รอยต่อโลหะต่างชนิด; เหล็กกล้าไร้สนิม; การเชื่อมทิก; ความแข็งแรงดึง

Abstract

This research aimed to investigate the filler metal selection for TIG welding which could produce a high strength of a joint between AISI304 and AISI316 stainless steel and to study an effect of welding parameter on joint properties. The results can be summarized that an increase of welding current results in an increase of both the tensile strength and the elongation of a tube butt joint produced by 3 types of filler metals. The optimized filler metal for welding the tube butt joint between AISI304 and AISI316L to obtain a tensile strength of 607 MPa was ER309LSi filler metal. This ER309LSi filler metal also produced the joint that showed 5% and 3% higher tensile strength than that of ER316LSi and ER316L, respectively. The fracture location of the tensile test specimen was found at the center line of the weld metal when the welding current was 80-100 A. However, the fracture location was shifted to the AISI316L side when the welding current was increased and was also showed the larger deformed trace around the fracture area. The average hardness of the weld metal produced by ER319LSi filler metal showed the highest hardness among 3 filler metals and was directly related to gain the highest strength of the joint.

Keywords: Dissimilar metal joint; Stainless steel; TIG welding; Tensile strength

1. บทนำ

ความต้องการใช้งานในรอยต่อท่อโลหะต่างชนิดในอุตสาหกรรมโรงไฟฟ้าต้นกำลัง อุตสาหกรรมเคมี อุตสาหกรรมปิโตรเคมี [1] หรืออุตสาหกรรมนิวเคลียร์ [2] เป็นต้น ส่งผลทำให้เกิดการศึกษาและพัฒนากระบวนการในการต่อ (Joining) ท่อโลหะต่างชนิดเข้าด้วยกันเพื่อให้ได้รอยต่อที่มีความเหมาะสมในการนำไปใช้งาน หนึ่งในกระบวนการต่อเชื่อมที่ถูกนำมาใช้ในการต่อท่อเหล็กกล้าไร้สนิมต่างชนิดที่มีประสิทธิภาพสูง และทำให้เกิดรอยต่อที่มีคุณภาพสูง คือ กระบวนการเชื่อม และมีผลการทดลองที่แสดงถึงรอยต่อที่มีความแข็งแรงและโครงสร้างโลหะวิทยาที่มีประสิทธิภาพสูงกว่าเนื้อชิ้นงานที่ใช้ในการทดลอง ที่ผ่านมากระบวนการเชื่อมที่ถูกนำมาใช้ในการเชื่อมประกอบด้วยการเชื่อมอาร์กสวดหุ้มฟลักซ์ [3-4] การเชื่อมเสียดทาน (Friction welding) [5-8] หรือการเชื่อมทิก (Tungsten inert gas welding) [9-10] เป็นต้น เมื่อพิจารณาการเชื่อมทิก หรือการเชื่อมอาร์กทังสเตนแก๊สคลุม (Gas tungsten arc welding: GTAW) ซึ่งเป็นกระบวนการเชื่อมที่ทำให้เกิดการกระจายความร้อน (Heat distribution) ที่ผิวหน้าแนวเชื่อมในวงแคบและให้ค่าการหลอมลึกของความร้อน (Heat penetration) สูง วิธีการนี้อาจสามารถเชื่อมท่อผนังบางและเหล็กแผ่นบางได้อย่างมีประสิทธิภาพและทำให้ได้โลหะเชื่อมที่มีคุณภาพสูงได้ [11]

ในการศึกษาและพัฒนากระบวนการเชื่อมทิกรอยต่อชนเหล็กกล้าไร้สนิมต่างชนิดเพื่อให้ได้โลหะเชื่อมสมบูรณ์และมีความแข็งแรงสูง ตัวแปรการเชื่อมต่างๆ เพื่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงค่าความร้อนขาเข้า (Heat input)

ถูกประยุกต์ใช้ในการเชื่อมรอยต่อ [1, 4] ค่าความร้อนที่มีค่าสูงมักทำให้เกิดความเค้นตกค้างสูงในรอยต่อและส่งผลทำให้ความแข็งแรงและความแข็งแรงของรอยต่อเพิ่มขึ้นได้ [3, 5, 6] อย่างไรก็ตามหากมีการปรับปรุงส่วนผสมทางเคมีของโลหะเชื่อม โดยการเพิ่มธาตุสำคัญที่มีหน้าที่ในการก่อกำเนิดของเฟสเสริมแรง เช่น เฟสโลหะคาร์ไบด์ต่างๆ สามารถปรับปรุงความแข็งแรงและความแข็งแรงของโลหะเชื่อมให้ดีขึ้นได้ การเพิ่มความแข็งแรงและความแข็งแรงของโลหะเชื่อมสามารถดำเนินการได้โดยการเพิ่มปริมาณธาตุโครเมียม วานาเดียม แมงกานีส โมลิบดีนัม นีโอเมียม ทั้งสะเตน และคาร์บอน ในโลหะเติม ธาตุเหล่านี้เมื่อเติมลงไปโลหะเชื่อมจะก่อตัวทำให้เกิดโลหะคาร์ไบด์ประกอบด้วยโครเมียมคาร์ไบด์ วานาเดียมคาร์ไบด์ แมงกานีสคาร์ไบด์ โมลิบดีนัมคาร์ไบด์ นีโอเมียมคาร์ไบด์ และทั้งสะเตนคาร์ไบด์ ที่กระจายในพื้นที่หลักโลหะเชื่อม และด้วยสมบัติที่เฟสเหล่านี้มีความแข็งแรงและความแข็งแรงสูงจึงส่งผลทำให้โลหะเชื่อมมีความแข็งแรงและความแข็งแรงสูงตามไปด้วย [12-14] ด้วยเหตุนี้จึงเป็นสิ่งสำคัญที่ต้องมีการเลือกส่วนผสมทางเคมีของโลหะเติมที่มีค่าเหมาะสมกับรอยต่อโลหะตามกำหนดเพื่อให้ได้รอยต่อสมบูรณ์ที่ให้โครงสร้างจุลภาคที่ประกอบด้วยเฟสเสริมแรงที่ส่งผลทำให้ค่าความแข็งแรงและความแข็งแรงของรอยต่อที่มีค่าสูงกว่าเนื้อชิ้นงานได้ [2, 15]

ข้อมูลการวิจัยข้างต้นพบว่าการเชื่อมท่อรอยต่อชนระหว่างท่อผนังบางไร้ตะเข็บระหว่างเหล็กกล้าไร้สนิม AISI304 และ AISI316L ที่ใช้โลหะเติมที่เหมาะสมทำให้เกิดรอยต่อคุณภาพตามต้องการนั้นมีรายงานไว้ค่อนข้างจำกัด ด้วยเหตุนี้งานวิจัยนี้จึงมีแนวคิดในการพัฒนาสมบัติของรอยต่อเหล็กกล้าไร้สนิม AISI304 และ AISI316L ให้มีค่าสมบัติทางกลสูง โดยการศึกษาอิทธิพลโลหะเติมที่มีผลต่อความแข็งแรงดึง ความแข็งแรง และโครงสร้างโลหะวิทยาของรอยต่อการเชื่อมท่อเหล็กกล้าไร้สนิม AISI304 และ AISI316L ข้อมูลที่ได้จากการศึกษาคาดว่าสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในงานอุตสาหกรรมเพื่อการเพิ่มผลิตภาพต่อไป

2. วิธีการทดลอง

2.1 วัสดุทดลอง

วัสดุในการทดลอง คือเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิค AISI304 และเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิค AISI316L ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 60.3 mm ยาว 60 mm หนา 2.8 mm ซึ่งมีรูปร่างดังรูปที่ 1 และส่วนผสมทางเคมีดังตารางที่ 1 ท่อเหล็กกล้าถูกทำการเชื่อม GTAW แบบจุดที่ตำแหน่ง 3 6 9 และ 12 นาฬิกา (ตำแหน่ง 90° 180° 270° และ 360° เมื่อเปรียบเทียบกับจุดศูนย์กลางของท่อ) ของชิ้นงานที่แนวรอยต่อของท่อเหล็กกล้าไร้สนิม ความยาวรวมของรอยต่อชนมีค่าเท่ากับ 120 mm ก่อนทำการยึดท่อเข้าอุปกรณ์ช่วยในการเชื่อมที่สามารถหมุนรอบตัวเองด้วยความเร็วที่กำหนด

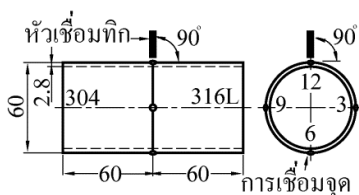
2.2 กระบวนการเชื่อม

กระบวนการเชื่อมรอยต่อชน คือ การเชื่อมอาร์กทั้งสะเตนแก๊สคลุม โดยมีตัวแปรการเชื่อมประกอบด้วยโลหะเติม 3 รูปแบบ ประกอบด้วย โลหะเติม AWS-ER309LSi, AWS-ER316L และ AWS-ER316LSi ซึ่งมี

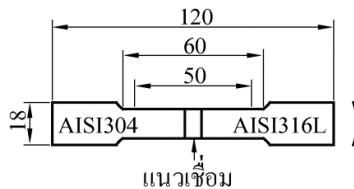
ส่วนผสมทางเคมีดังตารางที่ 1 อัตราการไหลของแก๊สอาร์กอน 99.99% เท่ากับ 10 l/min อัตราการป้อนลวดเชื่อมเป็น 120 mm/min ความเร็วเดินแนวเชื่อม 150 mm/min กระแสเชื่อม 80-160 A รอยต่อชนที่ถูกทำการเชื่อมด้วยตัวแปรการเชื่อมที่กำหนดถูกนำมาทำการเตรียมเพื่อการตรวจสอบสมบัติของรอยต่อประกอบด้วยการทดสอบความแข็งแรงดึง ความแข็ง และการตรวจสอบโครงสร้างโลหะวิทยา ในการตรวจสอบความแข็งแรงดึงของรอยต่อ ชิ้นทดสอบความแข็งแรงดึงมีรูปร่างและขนาดของชิ้นทดสอบความแข็งแรงดึงดังรูปที่ 2 การทดสอบความแข็งแรงดึงถูกทำการทดสอบด้วยความเร็วในการดึงทดสอบหรืออัตราการเกิดความเครียด (Strain rate) เท่ากับ 1 mm/min ค่าความแข็งแรงดึงสูงสุด อัตราการยืดตัวของรอยต่อ และตำแหน่งการพังทลายของชิ้นทดสอบความแข็งแรงดึงถูกทำการศึกษาและเปรียบเทียบ

ตารางที่ 1 ส่วนผสมทางเคมีของวัสดุทดลอง (wt%)

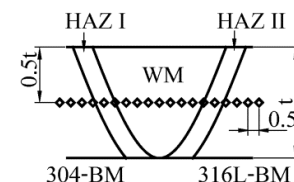
วัสดุ	C	Cr	Ni	Mo	Mn	Si	P	S
AISI304	0.03	18.00	8.10	0.00	1.90	0.60	0.04	0.03
AISI316L	0.02	17.50	10.00	2.20	1.80	0.70	0.01	0.03
ER309LSi	0.03	23.00	12.00	0.60	1.00	0.65	0.01	0.01
ER316LSi	0.02	18.50	11.50	2.50	1.70	0.90	0.01	0.01
ER316L	0.01	18.72	12.25	2.50	1.80	0.34	0.01	0.01



รูปที่ 1 รูปร่างและขนาดของรอยต่อเหล็กกล้าไร้สนิมต่างชนิด AISI304 และ AISI316L (หน่วย: mm)



รูปที่ 2 รูปร่างและขนาดชิ้นทดสอบความแข็งแรงดึง (หน่วย: mm)



รูปที่ 3 ตำแหน่งการทดสอบความแข็งวิกเกอร์ส (หน่วย: mm)

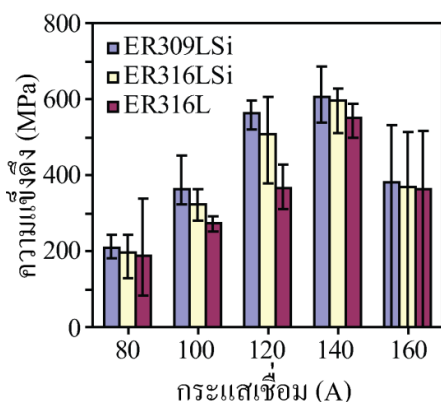
2.3 การตรวจสอบสมบัติรอยต่องานเชื่อม

ในการตรวจสอบความแข็งแรงของรอยต่อ ชิ้นทดสอบถูกเตรียมจากการตัดแนวเชื่อมตั้งฉากกับทิศทางการเดินแนวเชื่อม พื้นผิวที่ผ่านการตัดถูกนำมาทำการขัดหยาบด้วยกระดาษทรายเบอร์ 150-2000 ขัดมันด้วยผงเพชรขนาด 1 μm และกัดรอย (Etching) พื้นผิวขัดมันด้วยสารละลายที่ประกอบด้วยแอมโมเนียมไบฟลูออไรด์ 20 g + โปตัสเซียมเมตาไบซัลไฟท์ 0.5 g และน้ำกลั่น 100 ml เพื่อทำการแสดงพื้นที่ของรอยต่อ การตรวจสอบความแข็งแรงถูกดำเนินการด้วยวิธีการทดสอบความแข็งแรงไมโครวิกเกอร์ส ตำแหน่งของการทดสอบถูกกำหนดไว้ดังรูปที่ 3 โดย

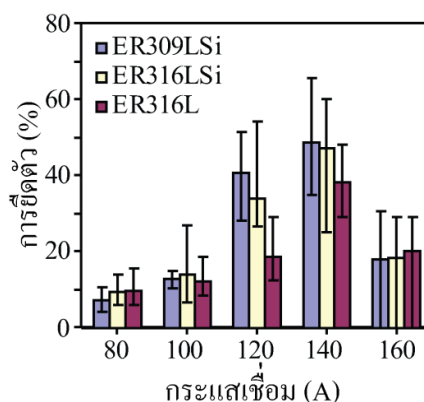
ทำการทดสอบเป็นแนวความแข็ง (Hardness profile) เริ่มต้นที่ด้านเนื้อชิ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิม AISI304 ลากผ่านพื้นที่กระทบร้อน (Heat affected zone: HAZ) ด้านเนื้อชิ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิม AISI304 โลหะเชื่อม (Weld metal: WM) พื้นที่กระทบร้อน (Heat affected zone: HAZ) ด้านเนื้อชิ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิม AISI316L และด้านเนื้อชิ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิม AISI316L แนวความแข็งถูกกำหนดไว้ที่กึ่งกลางความหนาของผนังท่อหรือประมาณ 1.4 mm จากพื้นผิวด้านนอกของท่อ การทดสอบความแข็งกำหนดให้ใช้แรงกดทดสอบ 100 gf และเวลากดแช่ 10 s ระยะห่างระหว่างจุดทดสอบ 2 จุด มีค่าเท่ากับ 0.5 mm ส่วนผสมทางเคมีของโลหะเชื่อมและรอยต่อถูกวิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมีด้วยเทคนิคการวิเคราะห์กระจายพลังงาน (Energy dispersive spectrometry: EDS) ที่ต่อพ่วงในกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope: SEM)

3. ผลการทดลองและการวิจารณ์

รูปที่ 4 และ 5 แสดงผลการทดสอบความแข็งแรงดึงของชิ้นทดสอบรอยต่อเชื่อมทิกเหล็กกล้าไร้สนิมต่างชนิดที่เชื่อมด้วยกระแสเชื่อม 80-160 A และโลหะเติม 3 รูปแบบ ประกอบด้วยโลหะเติม ER309LSi ER316LSi และ ER316L ผลการทดลองพบว่าค่าความแข็งแรงดึงของชิ้นทดสอบที่เชื่อมด้วยกระแสต่ำ คือ 80-100 A ค่าความแข็งแรงดึงของรอยต่อมีค่าค่อนข้างต่ำเมื่อทำการเชื่อมด้วยโลหะเติมทั้งสามรูปแบบ การเกิดลักษณะนี้เนื่องจากที่กระแสเชื่อมต่ำ 80-100 A นั้นค่าความร้อนขาเข้า (Heat input) มีค่าต่ำทำให้การหลอมลึกของโลหะเชื่อม (Weld penetration) ไม่สมบูรณ์ และไม่เกิดหลอมละลายตลอดพื้นที่หน้าตัดของความหนาผนังท่อ ส่งผลทำให้พื้นที่การรับแรงของชิ้นทดสอบมีค่าน้อยลง นอกจากนั้นส่วนที่เกิดการหลอมลึกไม่สมบูรณ์ส่งผลทำให้เกิดเป็นจุดเริ่มต้นของการแตกร้าวของชิ้นทดสอบและส่งผลทำให้เกิดการพังทลายตามแนวการพังทลาย (Fracture path: FP) ของชิ้นทดสอบที่บริเวณกึ่งกลางของชิ้นทดสอบแรงดึงดังรูปที่ 6 ก.-ค. ซึ่งแสดงการพังทลายของชิ้นทดสอบความแข็งแรงดึงที่กระแสเชื่อม 80 A ด้วยโลหะเติมทั้งสาม

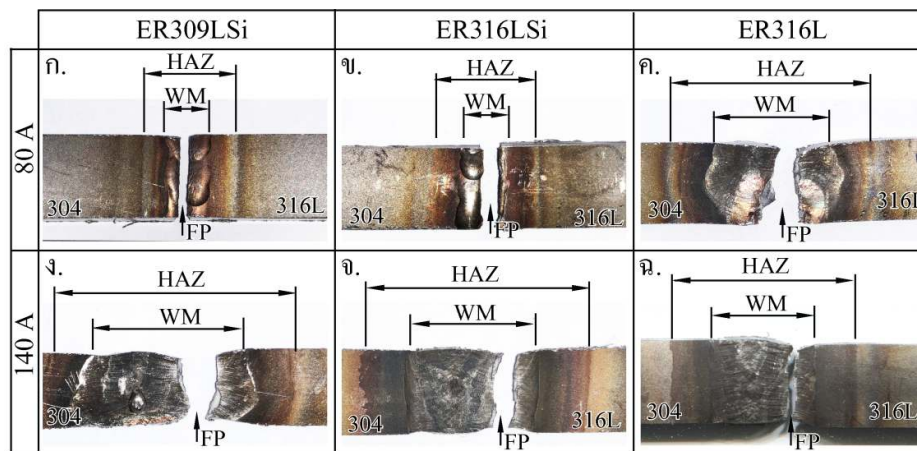


รูปที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งแรงดึง กระแสเชื่อม และโลหะเติม



รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างการยึดตัว กระแสเชื่อม และโลหะเติม

เมื่อกระแสเชื่อมเพิ่มขึ้นมากกว่า 100 A คือ 120-140 A ค่าความร้อนเข้ามีความเหมาะสมในการเชื่อมรอยต่อชนเหล็กกล้าไร้สนิมต่างชนิดมากขึ้น เนื่องจากการหลอมลึกของชิ้นทดสอบมีค่าเพิ่มขึ้นและสามารถหลอมละลายสมบูรณ์ตลอดความหนาของผนังท่อตามแนวรอยต่อ การหลอมลึกสมบูรณ์นี้ทำให้จุดเริ่มต้นการแตกร้าวของชิ้นทดสอบความแข็งแรงดึงแนวรากของรอยต่อชนถูกกำจัดออกไปและมีพื้นที่ในการรับแรงเพิ่มขึ้นตลอดความหนาของผนังท่อ การเกิดลักษณะนี้ทำให้ค่าความแข็งแรงของรอยต่อและการยึดตัวของชิ้นทดสอบความแข็งแรงดึงมีค่าเพิ่มขึ้นได้ ค่าความแข็งแรงดึงและการยึดตัวของรอยต่อมีค่าสูงสุดในแต่ละโลหะเดิมที่กระแสเชื่อม 140 A มีค่าประมาณ 607 550 และ 596 MPa สำหรับโลหะเดิม ER309LSi ER316LSi และ ER316L ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบตำแหน่งการพังทลายของชิ้นทดสอบความแข็งแรงดึงพบว่า เมื่อรอยต่อชนมีการเชื่อมด้วยกระแสเชื่อม 140 A ซึ่งเป็นกระแสเชื่อมที่แสดงค่าความแข็งแรงดึงสูงสุดดังรูปที่ 6 ค.-จ. พบว่าการเกิดการพังทลายเกิดขึ้นที่บริเวณใกล้เคียงกับผิวสัมผัส (Interface) ระหว่างโลหะเชื่อมและเนื้อชิ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิม AISI316L



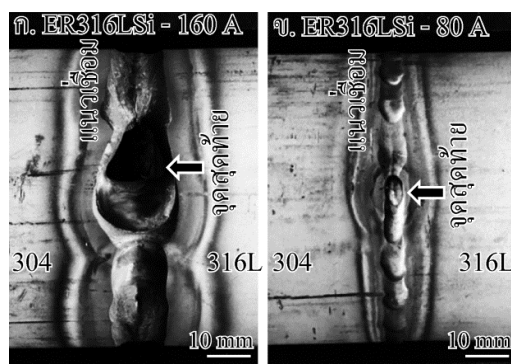
รูปที่ 6 การพังทลายของชิ้นทดสอบความแข็งแรงดึงที่เชื่อมด้วยกระแสและลวดเชื่อมแตกต่าง

เมื่อกระแสเชื่อมเพิ่มขึ้นมากกว่า 100 A คือ 120-140 A ค่าความร้อนเข้ามีความเหมาะสมในการเชื่อมรอยต่อชนเหล็กกล้าไร้สนิมต่างชนิดมากขึ้น เนื่องจากการหลอมลึกของชิ้นทดสอบมีค่าเพิ่มขึ้นและสามารถหลอมละลายสมบูรณ์ตลอดความหนาของผนังท่อตามแนวรอยต่อ การหลอมลึกสมบูรณ์นี้ทำให้จุดเริ่มต้นการแตกร้าวของชิ้นทดสอบความแข็งแรงดึงแนวรากของรอยต่อชนถูกกำจัดออกไปและมีพื้นที่ในการรับแรงเพิ่มขึ้นตลอดความหนาของผนังท่อ การเกิดลักษณะนี้ทำให้ค่าความแข็งแรงของรอยต่อและการยึดตัวของชิ้นทดสอบความแข็งแรงดึงมีค่าเพิ่มขึ้นได้ ค่าความแข็งแรงดึงและการยึดตัวของรอยต่อมีค่าสูงสุดในแต่ละโลหะเดิมที่กระแสเชื่อม 140 A มีค่าประมาณ 607 550 และ 596 MPa สำหรับโลหะเดิม ER309LSi ER316LSi และ ER316L ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบตำแหน่งการพังทลายของชิ้นทดสอบความแข็งแรงดึงพบว่า เมื่อรอยต่อชนมีการเชื่อมด้วยกระแสเชื่อม 140 A ซึ่งเป็นกระแสเชื่อมที่แสดงค่าความแข็งแรงดึงสูงสุดดังรูปที่ 6 ค.-จ. พบว่าการเกิดการพังทลาย

เกิดขึ้นที่บริเวณใกล้เคียงกับผิวสัมผัส (Interface) ระหว่างโลหะเชื่อมและเนื้อชิ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิม AISI316L

เมื่อใช้กระแสเชื่อมสูงสุด 160 A เชื่อมรอยต่อชนเหล็กกล้าไร้สนิมต่างชนิด ความร้อนขาเข้ามีค่าสูงสุด เมื่อทำการเชื่อมรอยต่อท่อเหล็กกล้าไร้สนิมต่างชนิดในระยทางที่ยาวขึ้นส่งผลทำให้เกิดความร้อนสะสมใน ชิ้นงานเชื่อมและส่งผลทำให้เกิดการเชื่อมทะลุที่จุดสุดท้ายการเชื่อมหรือตำแหน่ง 12 นาฬิกาของรอยต่อดังรูปที่ 7 ก. การเกิดการสะสมความร้อนของรอยต่อจนเกิดการเชื่อมทะลุนี้ส่งผลทำให้ค่าความแข็งแรงดึงและการยึดตัวของ รอยต่อมีค่าแตกต่างกันตามตำแหน่งของชิ้นทดสอบตลอดความยาวแนวเชื่อม การเชื่อมทะลุที่จุดสุดท้ายของแนว เชื่อมนี้สามารถกำจัดออกไปได้เมื่อใช้ค่าความร้อนขาเข้าต่ำสุดดังรูปที่ 7 ข.

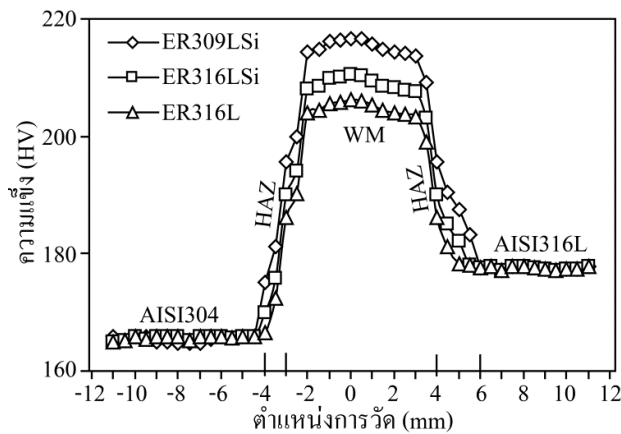
เมื่อเปรียบเทียบรอยต่อที่เชื่อมด้วยโลหะเติม ER309LSi รอยต่อที่เชื่อมด้วยโลหะเติม ER316L และโลหะ เติม ER316LSi ค่าความแข็งแรงดึงของรอยต่อและการยึดตัวของรอยต่อที่เชื่อมด้วยโลหะเติมทั้งสองมีแนวโน้ม เพิ่มขึ้นเมื่อกระแสเชื่อมเพิ่มขึ้นและแสดงค่าความแข็งแรงดึงและการยึดตัวสูงสุดที่กระแสเชื่อม 140 A ค่าความ แข็งแรงดึงสูงสุดของรอยต่อที่เชื่อมด้วยโลหะเติม ER316LSi และโลหะเติม ER316L มีค่าต่ำกว่ารอยต่อที่เชื่อม ด้วยโลหะเติม ER309L ประมาณ 3 และ 5% ตามลำดับ ขณะที่ค่าการยึดตัวของรอยต่อที่เชื่อมด้วยโลหะเติม ER316LSi และ ER316L มีค่าต่ำกว่าความแข็งแรงดึงสูงสุดของรอยต่อที่เชื่อมด้วยโลหะเติม ER309LSi ประมาณ 5 และ 15% ตามลำดับ



รูปที่ 7 จุดสุดท้ายการเชื่อมที่กระแสเชื่อมแตกต่าง

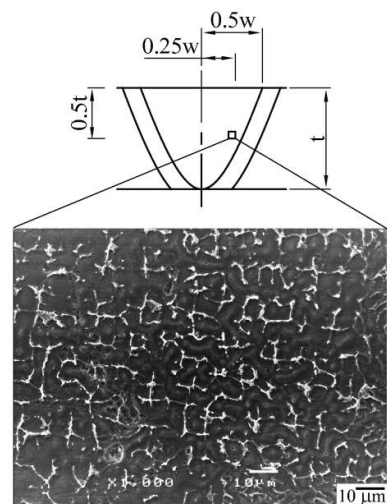
รูปที่ 8 แสดงผลการทดสอบความแข็งของชิ้นทดสอบที่ตำแหน่งการทดสอบดังรูปที่ 3 พบว่าค่าความแข็ง ของเนื้อชิ้นงาน AISI304 และ AISI316L มีค่าความแข็งเฉลี่ยที่ 165 และ 177 HV ตามลำดับ ค่าความแข็งมีค่า แนวโน้มที่เพิ่มขึ้นเมื่อตำแหน่งการตรวจสอบเข้าสู่พื้นที่ที่กระทบร้อน (HAZ) เนื่องจากพื้นที่ที่กระทบร้อนของด้าน เหล็กกล้าไร้สนิม AISI316L มีค่าความแข็งสูงกว่า ด้วยเหตุนี้จึงพบแถบการวัดความแข็งที่มีความชัดเจนมากกว่า ด้านเหล็กกล้าไร้สนิม AISI304 ค่าความแข็งในพื้นที่ที่กระทบร้อนมีค่าสูงขึ้นจนกระทั่งเข้าสู่พื้นที่โลหะเชื่อม (WM) และแสดงค่าสูงสุดที่กึ่งกลางแนวเชื่อม ถึงแม้ว่าค่าความแข็งของเหล็กกล้าไร้สนิม AISI316L มีค่าสูงกว่าเหล็กกล้า ไร้สนิม AISI304 ในสภาวะก่อนการเชื่อม อย่างไรก็ตามเมื่อทำการเชื่อมด้วยโลหะเติมทั้ง 3 รูปแบบแล้ว ค่าความ

แข็งที่ตรวจสอบพบว่าความแข็งของโลหะเชื่อมด้านเหล็กกล้าไร้สนิม AIS304 มีค่าสูงกว่าโลหะเชื่อมด้านเหล็กกล้าไร้สนิม AISI316L ผลการทดสอบที่ได้สอดคล้องกับผลการทดสอบความแข็งแรงดึงที่ชิ้นทดสอบส่วนใหญ่ขึ้นที่ตำแหน่งโลหะเชื่อมด้านเหล็กกล้าไร้สนิม AISI316L และเมื่อทำการเปรียบเทียบค่าความแข็งสูงสุดในพื้นที่โลหะเชื่อมพบว่าค่าความแข็งสูงสุดพบได้เมื่อทำการเชื่อมด้วยโลหะเติม ER309LSi ขณะที่โลหะเติม ER316LSi และ ER316L มีค่าความแข็งต่ำลงมาตามลำดับ ค่าความแข็งที่ได้นี้เสริมความเข้าใจในการวิเคราะห์ผลการทดสอบความแข็งแรงดึงดังรูปที่ 4 และ 5 โลหะที่มีความแข็งมักมีความแข็งแรงสูง

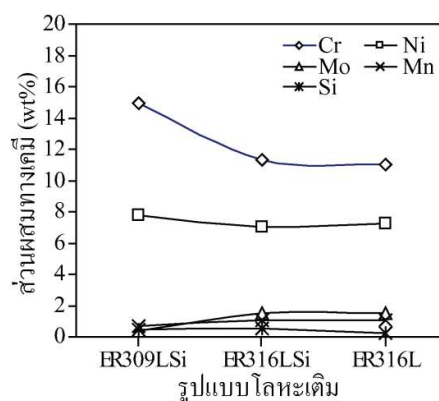


รูปที่ 8 ค่าความแข็งของรอยที่ทำการเชื่อมด้วยโลหะเติม 3 รูปแบบ

ค่าความแข็งและความแข็งแรงของโลหะเชื่อมที่เชื่อมด้วยโลหะเติม 3 รูปแบบ ที่กระแสเชื่อม 140 A ถูกนำไปทำการตรวจสอบส่วนผสมทางเคมีโดยการวัดการกระจายพลังงาน (Energy dispersive spectrometry: EDS) แบบการตรวจพื้นที่ (Area scan) ขนาดประมาณ $13000 \mu\text{m}^2$ บนพื้นที่โครงสร้างเดนไดรต์ในโลหะเชื่อมดังรูปที่ 9 ก. ของโลหะเติมทั้ง 3 รูปแบบ ผลการตรวจสอบส่วนผสมทางเคมีของโลหะเชื่อม ดังรูปที่ 9 ข. พบว่าธาตุเสริมความแข็งและความแข็งแรง (Reinforcement element) เช่น โครเมียม และนิกเกิล ในโลหะเชื่อมเชื่อมมีค่าสูงเมื่อใช้โลหะเติม ER309LSi ในการเชื่อมรอยต่อ ขณะที่ธาตุผสมอื่นๆ มีค่าใกล้เคียงกัน โครเมียมและนิกเกิลที่มีปริมาณสูงกว่าส่งผลทำให้เกิดโลหะคาร์ไบด์กระจายตัวในพื้นที่โลหะเชื่อมและทำให้ความแข็งและความแข็งแรงของโลหะเชื่อมมีค่าเพิ่มขึ้นได้มากกว่า [16] จึงเป็นเหตุผลสำคัญที่รอยต่อที่เชื่อมด้วยโลหะเติม ER309LSi แสดงค่าความแข็งและความแข็งแรงของโลหะเชื่อมสูงกว่าโลหะเติม ER316LSi และ โลหะเติม ER316L



ก. พื้นที่โลหะเชื่อมตำแหน่งการพังทลาย



ข. ส่วนผสมทางเคมีของโลหะเชื่อม

รูปที่ 9 การวิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมีของโครงสร้างจุลภาคตำแหน่งพังทลายภายในโลหะเชื่อมที่ใช้โลหะเติม 3 รูปแบบที่กระแสเชื่อม 140 A

4. สรุปผลการทดลอง

รอยต่อท่อเหล็กกล้าไร้สนิมต่างชนิด AISI304 และ AISI316L ถูกทำการเชื่อมอาร์กทั้งสะเตนแก๊สคลุมด้วยการใช้โลหะเติม 3 รูปแบบ ประกอบด้วยลวด ER309LSi ER316LSi และ ER316L และการเปลี่ยนแปลงกระแสเชื่อม 80-60 A เพื่อหาค่าตัวแปรที่เหมาะสมที่ทำให้เกิดความแข็งแรงดึงสูงสุด รอยต่อจากงานเชื่อมที่ได้ถูกทำการศึกษาสมบัติทางกลและการวิเคราะห์ทางโลหวิทยา ผลที่ได้จากการทดลองสามารถใช้เป็นข้อมูลเบื้องต้นในการพัฒนากระบวนการเชื่อมรอยต่อท่อเหล็กกล้าไร้สนิมต่างชนิดในงานอุตสาหกรรมได้ต่อไป ผลการทดลองโดยสรุป มีดังนี้

4.1 กระแสเชื่อมที่เพิ่มสูงขึ้นส่งผลทำให้ความแข็งแรงดึงของรอยต่อที่เชื่อมด้วยโลหะเติมทั้ง 3 รูปแบบมีค่าเพิ่มขึ้น

4.2 โลหะเติมที่มีความเหมาะสมในการเชื่อมรอยต่อ คือ โลหะเติม ER309LSi ซึ่งแสดงค่าความแข็งแรงดึงสูงสุด 607 MPa รอยต่อที่เชื่อมด้วยโลหะเติม ER309LSi แสดงค่าความแข็งแรงดึงสูงกว่า ER316LSi และ ER316L ที่ 3 และ 5% ตามลำดับ

4.3 ตำแหน่งการพังทลายของชิ้นทดสอบความแข็งแรงดึงสามารถพบได้ที่กึ่งกลางของโลหะเชื่อมเมื่อกระแสเชื่อมมีค่า 80-100 A อย่างไรก็ตามตำแหน่งการพังทลายถูกเลื่อนไปที่ด้านเหล็กกล้าไร้สนิม AISI316L เมื่อกระแสเชื่อมมีค่าสูงและแสดงการเกิดการเปลี่ยนรูปในปริมาณสูงในพื้นที่การพังทลาย

4.4 ความแข็งแรงเฉื่อยของโลหะเชื่อมที่เชื่อมด้วยโลหะเติม ER309LSi มีค่าสูงสุดในโลหะเติมทั้ง 3 รูปแบบ และมีความสัมพันธ์โดยตรงทำให้เกิดความแข็งแรงดึงสูงสุดของรอยต่อ

กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนบทความขอขอบพระคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี 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] C.R. Das, A.K. Bhaduri, G. Srinivasan, V. Shankar and S. Mathew, "Selection of filler wire for and effect of auto tempering on the mechanical properties of dissimilar metal joint between 403 and 304L(N) stainless steels," Journal of Materials Processing Technology, Vol. 209, 2009, pp. 1428-1435.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [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] 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.
- [7] 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.
- [8] M. Kimura, A. Ichihara, M. Kusaka and K. Kaizu, "Joint properties and their improvement of AISI 310S austenitic stainless steel thin walled circular pipe friction welded joint," Materials & Design, Vol. 38, 2012, pp. 38-46.
- [9] 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.

- [10] 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.
- [11] R. Kumar, S. Chattopadhyaya and S. Kumar, "Influence of Welding Current on Bead Shape, Mechanical and Structural Property of Tungsten Inert Gas Welded Stainless Steel Plate," *Materials Today: Proceedings*, Vol. 2, 2015, pp. 3342-3349.
- [12] Y. Wu, Y. Cai, H. Wang, S. Shi, X. Hua and Y. Wu, "Investigation on microstructure and properties of dissimilar joint between SA553 and SUS304 made by laser welding with filler wire," *Materials & Design*, Vol. 87, 2015, pp. 567-578.
- [13] M.F. Buchely, J.C. Gutierrez, L.M. León and A. Toro, "The effect of microstructure on abrasive wear of hardfacing alloys," *Wear*, Vol. 259, 2005, pp.52-61.
- [14] X.H. Wang, F. Han, S.Y. Qu and Z.D. Zou, "Microstructure of the Fe-based hardfacing layers reinforced by TiC-VC-Mo₂C particles," *Surface and Coatings Technology*, Vol. 202, 2008, pp. 1502-1509.
- [15] K. Devendranath Ramkumar, S. D. Patel, S. Sri Praveen, D. J. Choudhury, P. Prabakaran, N. Arivazhagan, et al., "Influence of filler metals and welding techniques on the structure–property relationships of Inconel 718 and AISI316L dissimilar weldments," *Materials & Design*, Vol. 62, 2014, pp. 175-188.
- [16] K. Kimapong, P. Poonnayom and V. Wattanjitsiri, "Microstructure and Wear Resistance of Hard-Facing Weld Metal on JIS-S50C Carbon Steel in Agricultural Machine Parts," *Materials Science Forum*, Vol. 872, 2016, pp. 55-61.