



การศึกษาโครงสร้างทางโลหะวิทยาและความต้านทานการกัดกร่อนของรอยเชื่อมท่อเหล็กกล้าไร้สนิมต่างชนิดเกรด ASTM A790 SAF 2205 และ ASTM A312 TP 316L โดยกระบวนการเชื่อมอาร์กทั้งสแตนแก๊สปกคลุม

ภิสัก เลิศวิจิตรพันธุ์* ณรงค์เดช พัฒนไพบูลย์ สิทธิพงษ์ แสงอินทร์ และ พิเศษฐ์ธาวิณ เจริญญประดับ

ภาควิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมการเชื่อม, วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม,
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

* ผู้ประสานงานเผยแพร่ (Corresponding Author), E-mail: pisak.l@cit.kmutnb.ac.th

วันที่รับบทความ: 15 พฤษภาคม 2564; วันที่ทบทวนบทความ: 25 กรกฎาคม 2564; วันที่ตอบรับบทความ: 28 กรกฎาคม 2564
วันที่เผยแพร่ออนไลน์: 30 สิงหาคม 2564

บทคัดย่อ: งานวิจัยนี้ศึกษาการเชื่อมท่อเหล็กกล้าไร้สนิมต่างชนิดระหว่างเกรด ASTM A790 SAF 2205 และ ASTM A312 TP 316L ด้วยกระบวนการเชื่อมอาร์กทั้งสแตนแก๊สปกคลุมที่ส่งผลต่อโครงสร้างทางโลหะวิทยาและความต้านทานการกัดกร่อนของแนวเชื่อม ในการทดลองนี้ใช้ลวดเชื่อม AWS A5.9 ER2209 เชื่อมรอยต่อระหว่างท่อเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด ASTM A790 SAF 2205 เข้าด้วยกัน ส่วนอีกเงื่อนไขหนึ่งใช้ลวดเชื่อม AWS A5.14 ERNiCrMo-3 เชื่อมรอยต่อระหว่างท่อเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด ASTM A790 SAF 2205 และ ASTM A312 TP 316L จากนั้นตรวจสอบโครงสร้างทางโลหะวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง และทดสอบความต้านทานการกัดกร่อนด้วยเทคนิคโพเทนชิโอดีนามิกส์ โพลาริเซชันรวมถึงเทคนิคแบบจุ่ม (Immersion Test) ผลการวิจัยพบว่าโครงสร้างพื้นฐานของเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด ASTM A790 SAF 2205 มีองค์ประกอบเป็นเฟอร์ไรต์และออสเทนไนต์ ส่วนเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด ASTM A312 TP 316L มีโครงสร้างพื้นฐานเป็นออสเทนไนต์ ส่วนบริเวณแนวเชื่อมด้วยโลหะเติม AWS A5.9 ER2209 และ AWS A5.14 ERNiCrMo-3 พบโครงสร้างเฟอร์ไรต์-ออสเทนไนต์และออสเทนไนต์ ตามลำดับ นอกจากนี้การใช้ทั้งสองเทคนิคทดสอบความต้านทานการกัดกร่อนพบว่า อัตราการกัดกร่อนสูงสุดเกิดขึ้นกับแนวเชื่อมด้วยลวดเชื่อม AWS A5.14 ERNiCrMo-3 บนรอยต่อระหว่างวัสดุท่อเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด ASTM A790 SAF 2205 และ ASTM A312 TP 316L

คำสำคัญ: ความต้านทานการกัดกร่อน; เหล็กกล้าไร้สนิม; ASTM A790 SAF 2205; ASTM A312 TP 316L

The Study on Metallurgical Structure and Corrosion Resistance of Dissimilar Welds between ASTM A790 SAF 2205 and ASTM A312 TP 316L Stainless Steel Pipe by Gas Tungsten Arc Welding Process

Pisak Lertvijitpun*, Narongdet Pattanaphiboon, Sittipong Sang-in and Phisittawin Reanpradub

Department of Welding Engineering Technology, College of Industrial Technology,
King Mongkut's University of Technology North Bangkok

* Corresponding author, E-mail: pisak.l@cit.kmutnb.ac.th

Received: 15 May 2021; Revised 25 July 2021; Accepted: 28 July 2021

Online Published: 30 August 2021

Abstract: This research studies dissimilar welding between ASTM A790 SAF 2205 and ASTM A312 TP 316L stainless steel pipe by using gas tungsten arc welding (GTAW) process which affects the metallurgical structure and corrosion resistance of weldment. The filler metal used in this experiment is AWS A5.9 ER2209 for joining the ASTM A790 SAF 2205 together and AWS A5.14 ERNiCrMo-3 for joining the dissimilar material between ASTM A790 SAF 2205 and ASTM A312 TP 316L. The metallurgical structure was examined by using an optical microscope (OM) and the corrosion resistance of welded joint was carried out with potentiodynamic polarization and immersion test method. From the result, it was found that the general microstructure of ASTM A790 SAF 2205 comprises ferrite and austenite, ASTM A312 TP 316L is austenite. AWS A5.9 ER2209 and AWS A5.14 ERNiCrMo-3 welded metal found ferrite-austenite and austenite respectively. Moreover, both corrosion resistance test methods reflect the highest corrosion rate that occurs on the dissimilar welded joint between ASTM A790 SAF 2205 and ASTM A312 TP 316L which was welded by AWS A5.14 ERNiCrMo-3 filler metal.

Keywords: Corrosion Resistance; Stainless Steel; ASTM A790 SAF 2205; ASTM A312 TP 316L



1. บทนำ

เหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ (Duplex Stainless Steel: DDS) และเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก (Austenitic Stainless Steel) ถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมปิโตรเลียมโดยเฉพาะอย่างยิ่งในการลำเลียงน้ำมันดิบ และก๊าซธรรมชาติ ที่ต้องการสมบัติด้านความแข็งแรงทนต่อแรงดันในสภาวะที่มีอุณหภูมิสูง รวมถึงความต้านทานการกัดกร่อนในบรรยากาศที่ปนเปื้อนด้วยสารเคมี เช่น คลอไรด์ สารปรอท คาร์บอนไดออกไซด์ และไฮโดรเจนซัลไฟด์ [1] ความแตกต่างระหว่างการเลือกใช้เหล็กกล้าไร้สนิมทั้ง 2 เกรด ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ และความเค้นที่เกิดขึ้นในการใช้งานซึ่งในบริเวณที่ต้องรับความเค้นที่อุณหภูมิสูง จะเลือกใช้งานเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ เช่นเกรด ASTM A790 SAF 2205 ส่วนในบริเวณที่ต้องการสมบัติความต้านทานการกัดกร่อนเป็นหลักจะเลือกใช้เหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก เช่นเกรด ASTM A312 TP 316L เพื่อให้สอดคล้องกับสมบัติของวัสดุ [2] อย่างไรก็ตามการลำเลียงก๊าซธรรมชาติดังกล่าวจะต้องลำเลียงผ่านสภาพแวดล้อมที่เปลี่ยนแปลงไปตามธรรมชาติจึงสามารถปรับเปลี่ยนวัสดุให้ตรงกับสมบัติที่ต้องการและจำเป็นดังนั้นจุดที่มีการเปลี่ยนแปลงชนิดของวัสดุ สำหรับท่อลำเลียงที่ทำจากเหล็กกล้าไร้สนิมโดยทั่วไปแล้วจะใช้กระบวนการเชื่อมแบบหลอมละลาย จากวรรณกรรมวิจัยพบว่าการเชื่อมแบบหลอมละลายระหว่างเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์และเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกสามารถกระทำได้และผ่านเกณฑ์การยอมรับเช่นการทดสอบรอยเชื่อมแบบทำลายสภาพและไม่ทำลายสภาพตามมาตรฐานสากล ในกรณีที่ใช้ปริมาณ

ความร้อนเข้าสู่ชิ้นงานต่ำจะส่งผลให้มีสัดส่วนของเฟอไรต์ต่อออสเทนไนต์สูงกว่ากรณีที่ใช้ปริมาณความร้อนเข้าสู่ชิ้นงานสูง รวมถึงกรณีที่ใช้ปริมาณความร้อนเข้าสู่ชิ้นงานสูงจะส่งผลให้เกิดออสเทนไนต์ทุติยภูมิมากยิ่งขึ้นทำให้ความต้านทานการกัดกร่อนแบบรูเข็มของวัสดุต่ำลง ในบรรยากาศแมกนีเซียมคลอไรด์ [1, 3] อย่างไรก็ตามยังไม่มีรายงานเกี่ยวกับผลกระทบของการเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมต่างชนิดระหว่างเกรด ASTM A790 SAF 2205 และเกรด ASTM A312 TP 316L ต่อความต้านทานการกัดกร่อน ซึ่งโดยทั่วไปจะมีความสัมพันธ์กับโครงสร้างที่เปลี่ยนแปลงของวัสดุในการบวนการเชื่อม งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาความต้านทานการกัดกร่อนและโครงสร้างจุลภาคของเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์เกรด ASTM A790 SAF 2205 และเกรด ASTM A312 TP 316L ด้วยโลหะเติม AWS A5.14 ERNiCrMo-3 ในกระบวนการเชื่อมอาร์กทั้งสแตนแก๊สปกคลุม (GTAW)

2. วัสดุและขั้นตอนในการวิจัย

2.1 วัสดุที่ใช้ในการวิจัย

โลหะงานที่ใช้ในงานวิจัยนี้คือท่อเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ เกรด ASTM A790 SAF 2205 และเกรด ASTM A312 TP 316L ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 88.90 มิลลิเมตร หนา 5.49 มิลลิเมตร ความยาว 150 มิลลิเมตร ส่วนโลหะเติมที่ใช้คือ AWS A5.9 ER2209 และ AWS A5.14 ERNiCrMo-3 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.4 มิลลิเมตรส่วนผสมทางเคมีของโลหะงานแสดงดังตารางที่ 1 และของโลหะเติมแสดงดังตารางที่ 2 ตามลำดับ



ตารางที่ 1 ส่วนผสมทางเคมีของโลหะงาน (จากใบรับรองส่วนผสมทางเคมีของผู้ผลิต)

Materials	ส่วนผสมทางเคมี (Wt.%)											
	Cr	Ni	Nb	Ti	Al	Cu	C	N	Mo	Si	Mn	Fe
A312 TP 316L	17.0	11.0	-	-	-	-	0.02	0.10	2.02	-	1.54	Bal.
A790 SAF 2205	22.0	5.24	-	-	-	0.15	0.02	0.16	3.12	0.65	0.77	Bal.

ตารางที่ 2 ส่วนผสมทางเคมีของโลหะเติม (จากใบรับรองส่วนผสมทางเคมีของผู้ผลิต)

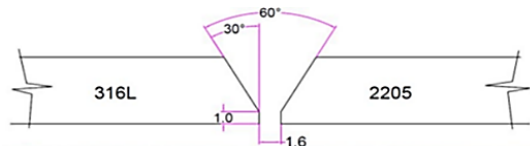
Materials	ส่วนผสมทางเคมี (Wt.%)											
	Cr	Ni	Nb	Ti	Al	Cu	C	N	Mo	Si	Mn	Fe
ERNiCrMo-3	22.10	64.50	3.40	0.21	0.11	0.01	0.01	-	9.40	0.03	0.01	-
ER2209	23.20	8.60	-	-	-	0.04	0.01	0.17	3.29	0.42	1.45	Bal.

2.2 การเตรียมชิ้นงานเชื่อม

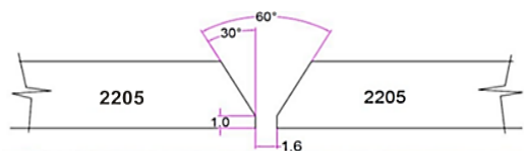
งานวิจัยนี้สร้างรอยเชื่อมต่อโดยตัดเตรียมท่อเหล็กกล้าไร้สนิมตามรายละเอียดในหัวข้อ 2.1 และบากมุมเติมโลหะให้มีมุมรวมที่ 60 องศา โดยแบ่งเป็น 2 เจอนไขดังนี้คือ (1) การเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ ASTM A790 SAF 2205 กับเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก ASTM A312 TP 316L ด้วยโลหะเติมชนิด AWS A5.14 ERNiCrMo-3 แสดงในรูปที่ 1 และชุดที่ (2) เกิดจากการเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ ASTM A790 SAF 2205 จำนวน 2 ชั้น ด้วยโลหะเติมชนิด AWS A5.9 ER2209 แสดงในรูปที่ 2

2.3 การดำเนินการเชื่อม

ดำเนินการเชื่อมด้วยกระบวนการเชื่อมอาร์กทั้งสแตนแก๊สปกคลุม (GTAW) ในตำแหน่งท่าเชื่อม 6G โดยกำหนดพารามิเตอร์ในการเชื่อมดังตารางที่ 3



รูปที่ 1 รอยต่อเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ ASTM A790 SAF 2205 กับเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก A312 TP 316L ด้วยโลหะเติมชนิด AWS A5.14 ERNiCrMo-3



รูปที่ 2 รอยต่อเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ ASTM A790 SAF 2205 ด้วยโลหะเติมชนิด AWS A5.9 ER2209

ตารางที่ 3 พารามิเตอร์ในการเชื่อม

พารามิเตอร์	โลหะเติม	
	ERNiCrMo-3	ER2209
แรงดันอาร์ก	10-11 V	11 V
กระแสไฟเชื่อม	94-133 A	93.5-137.5 A
ความเร็วในการเชื่อม	34.14-73.79 mm/min	58.18-118.34 mm/min
อุณหภูมิระหว่างแนวเชื่อม	<150	<250
อัตราการไหลแก๊สปกคลุม	10 L/min	10 L/min
อัตราการไหลแก๊สรองหลัง	20 L/min	20 L/min

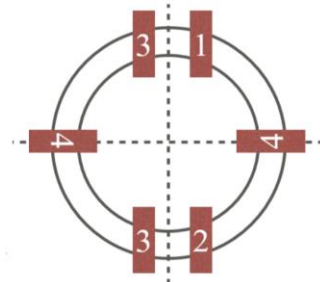
สังเกตเห็นได้ว่าการเชื่อมด้วยโลหะเติมทั้ง 2 ชนิด พารามิเตอร์บางตัวจะมีความแตกต่างกันได้บ้าง ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับพฤติกรรมและสมบัติของวัสดุโลหะเติมและโลหะงานซึ่งเป็นไปตามข้อกำหนดตามมาตรฐานสมาคมการเชื่อมสหรัฐอเมริกา (AWS)

หลังขั้นตอนผ่านกระบวนการเชื่อมแล้วจะถูกนำมาตรวจสอบโดยไม่ทำลายสภาพด้วยวิธีการตรวจสอบด้วยสายตา เพื่อให้มั่นใจว่าขั้นตอนเชื่อมผ่านเกณฑ์การยอมรับเบื้องต้น ทั้งนี้เนื่องจากงานวิจัยนี้เป็นงานวิจัยต่อยอดโดยงานวิจัยก่อนหน้ามีการกำหนดองค์ประกอบในการเชื่อมลักษณะเดียวกันแต่มุ่งเน้นการทดสอบสมบัติเชิงกล [1] จึงทำให้งานวิจัยนี้มุ่งเน้นศึกษาสมบัติความต้านทานการกัดกร่อนบริเวณแนวเชื่อม

2.4 การเตรียมชิ้นทดสอบและกำหนดำเนินการวิจัย

หลังจากผ่านการตรวจสอบแนวเชื่อมด้วยสายตาแล้ว นำชิ้นงานเชื่อมมาทำการตัดเป็นชิ้นงานทดสอบในตำแหน่งต่างๆ ดังนี้ ตำแหน่งที่ 1 ชิ้นงานตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค 2 ชิ้นงานตรวจสอบโครงสร้างมหภาค 3 ชิ้นงานทดสอบความต้านทาน

การกัดกร่อนด้วยเทคนิคโพเทนซิโอดินามิกส์ โพลาริเซชัน และ 4 ชิ้นงานทดสอบความต้านทานการกัดกร่อนด้วยเทคนิคแบบจุ่ม ดังรูปที่ 3



รูปที่ 3 ตำแหน่งการตัดเตรียมชิ้นงานทดสอบ

2.4.1 การทดสอบด้วยเทคนิคโพเทนซิโอดินามิกส์ โพลาริเซชัน (Potentiodynamic Polarization)

สำหรับการทดสอบการกัดกร่อน ดำเนินการโดยใช้เทคนิคโพเทนซิโอดินามิกส์ โพลาริเซชัน ทำโดยเตรียมชิ้นงานทดสอบโดยการตัดขวางแนวเชื่อมในตำแหน่งที่ 3 (6 และ 12 นาฬิกา) ขนาดชิ้นทดสอบกว้าง 15 มิลลิเมตร ยาว 40 มิลลิเมตร และนำไปผ่านกระบวนการตัดปาดผิวให้เรียบเพื่อขจัดความโค้งงอ



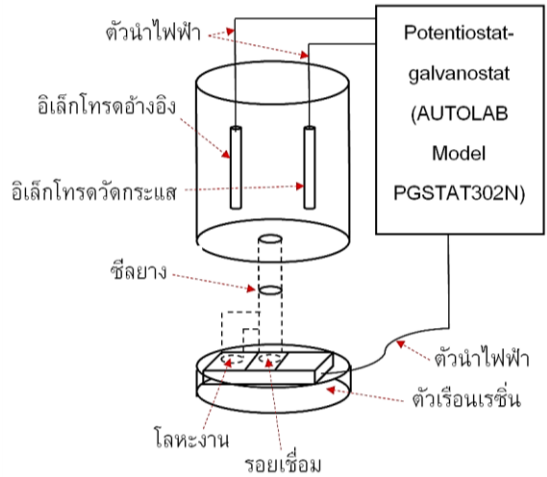
ผิวท่อด้านในและด้านนอก หลังจากนั้นชิ้นงานจะถูกนำมาบัดกรีเชื่อมต่อสายไฟและขึ้นตัวเรือนด้วยเรซินเพื่อให้ขัดมันผิวหน้าทดสอบได้สะดวก ซึ่งการขัดผิวหน้าจะขัดด้วยกระดาษทรายเบอร์ 180, 400, 800, 1200 และ 2000 ตามลำดับ จากนั้นขัดมันบนผ้าสักหลาดด้วยผงอะลูมินา ทำความสะอาดชิ้นงานพร้อมกับตรวจสอบขอบเขตบริเวณที่จะทำการทดสอบด้วยการกัดกรวดโดยใช้เทคนิคเดียวกันกับการตรวจสอบโครงสร้างมหภาคและทำสัญลักษณ์บนชิ้นงาน จากนั้นขัดมันด้วยผงอะลูมินาอีกครั้งและติดตั้งเข้ากับเครื่องทดสอบความต้านทานการกัดกร่อนด้วยเทคนิคโพเทนชิโอไดนามิกส์ โพลาริเซชัน (Potentiostat-galvanostat: AUTOLAB Model PGSTAT302N) โดยลักษณะการติดตั้งชิ้นทดสอบดังรูปที่ 4 และมีตัวแปรในการทดสอบดังตารางที่ 4

เมื่อได้ค่าความหนาแน่นกระแสการกัดกร่อนจากการทดสอบแล้วจะนำมาคำนวณหามวลและความหนาที่สูญเสียไปในระหว่างการทดสอบหรืออัตราการกัดกร่อนที่เกิดขึ้นดังสมการที่ 1 และ 2 ตามลำดับ

$$\frac{dm}{Adt} = i \frac{AW}{nF} \quad (1)$$

$$\frac{dl}{dt} = i \frac{AW}{nF\rho} \quad (2)$$

โดยที่ $\frac{dm}{Adt}$ คือมวลที่สูญเสียไป ($g/s \cdot cm^2$) $\frac{dl}{dt}$ คือความหนาที่สูญเสียไป (cm/s) i คือความหนาแน่นกระแสการกัดกร่อน (A/cm^2) AW คือน้ำหนักอะตอมของวัสดุ n คือจำนวนอิเล็กตรอนแลกเปลี่ยน F คือค่าคงที่ฟาราเดย์ ($96,485 C/mol$) และ ρ คือความหนาแน่นของวัสดุ (g/cm^3) [4]



รูปที่ 4 การติดตั้งชิ้นทดสอบการกัดกร่อน

ตารางที่ 4 ตัวแปรการทดสอบความต้านทานการกัดกร่อนด้วยเทคนิคโพเทนชิโอไดนามิกส์ โพลาริเซชัน

ตัวแปร	ค่าที่ใช้ทดสอบ
ศักย์ไฟฟ้าเริ่มต้น	-1.5 โวลต์
ศักย์ไฟฟ้าสิ้นสุด	1.5 โวลต์
อัตราการสแกน	0.00166 โวลต์ต่อวินาที
อิเล็กโทรดวัดกระแส	Pt
อิเล็กโทรดอ้างอิง	Ag/AgCl

2.4.2 การทดสอบด้วยเทคนิคแบบจุ่ม (Immersion)

การทดสอบนี้ดำเนินการตามกรอบมาตรฐาน ASTM G31 โดยตัดเตรียมชิ้นทดสอบให้มีขนาด กว้าง 20 มิลลิเมตร ยาว 40 มิลลิเมตร มีความหนาตามวัสดุท่อเดิม พื้นผิวชิ้นงานจะทำความสะอาดด้วยแปรงลวดเหล็กกล้าไร้สนิม ล้างด้วยอะซิโตนในเครื่องล้างอัลตราโซนิค การเตรียมสารละลายใช้น้ำกลั่นปริมาตร 600 มิลลิลิตร ผสมกับ เพอร์ริกคลอไรด์



68.72 กรัม และกรดไฮโดรคลอริก 16 มิลลิลิตร ทำการชั่งน้ำหนักขึ้นทดสอบด้วยเครื่องชั่งน้ำหนักความละเอียด 0.0001 กรัม จากนั้นนำขึ้นทดสอบที่ได้เตรียมไว้จุ่มลงในสารละลายดังกล่าวเป็นเวลา 72 ชั่วโมง อุณหภูมิที่ใช้ในการทดสอบคือ 22 ± 2 องศาเซลเซียส ทั้งนี้จะดำเนินการตรวจสอบน้ำหนักของวัสดุทุกๆ 24 ชั่วโมง

2.4.3 การตรวจสอบโครงสร้างทางโลหะวิทยา

ชิ้นงานถูกตัดให้มีขนาดกว้าง 10 มิลลิเมตร ยาว 40 มิลลิเมตร จำนวน 2 ชิ้น สำหรับการตรวจสอบโครงสร้างมหภาคและโครงสร้างจุลภาค โดยการขัดด้วยกระดาษทรายเบอร์ 180, 400, 800, 1200 และ 2000 ตามลำดับ จากนั้นขัดมันบนผ้าสักหลาดด้วยผงอะลูมินา ทำความสะอาดและเป่าแห้งด้วยลมที่อุณหภูมิห้อง การกัดผิวหน้าชิ้นงาน สำหรับชิ้นงานที่เชื่อมด้วยโลหะเติมชนิด AWS A5.9 ER2209 ใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) 20 กรัม ผสมกับน้ำกลั่น 100 มิลลิลิตร ในการกัดผิวหน้าชิ้นงาน สำหรับชิ้นงานที่เชื่อมด้วยโลหะเติมชนิด AWS A5.14 ERNiCrMo-3 จะใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) 20 กรัม กับน้ำกลั่น 100 มิลลิลิตร ในการกัดกรดชิ้นงานทางด้านที่เป็นเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ ใช้คอปเปอร์ซัลเฟต (CuSO_4) 10 กรัม สารละลายกรดไฮโดรคลอริก (HCl) 50 มิลลิลิตร และน้ำกลั่น 50 มิลลิลิตร สำหรับกัดกรดชิ้นงานด้านที่เป็นเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก ASTM A790 TP 316L สำหรับบริเวณแนวเชื่อมจะใช้กรดออกซาลิก 10 กรัม กับน้ำกลั่น 100 มิลลิลิตร ทุกสารละลายที่ใช้ในการกัดผิวหน้าจะใช้เทคนิคเคมีไฟฟ้าด้วยแรงดันไฟฟ้า 6 โวลต์ กระแส 0.3 มิลลิแอมแปร์ จากนั้นตรวจสอบโครงสร้างมหภาค

ด้วยกล้องสเตอริโอ เพื่อดูความสมบูรณ์ของแนวเชื่อมและตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสงเพื่อวิเคราะห์ผลร่วมกับผลการทดสอบความต้านทานการกัดกร่อน

3. ผลการวิจัยและการอภิปรายผล

3.1 ผลการตรวจสอบด้วยสายตา (Visual Test)

จากการตรวจสอบด้วยสายตาโดยใช้เกณฑ์ตามมาตรฐาน ASME B31.1 พบว่าชิ้นงานเชื่อมทั้งรอยต่อบริเวณผิวหน้าของรอยเชื่อมมีความสูงสม่ำเสมอเท่ากัน และมีการหลอมละลายระหว่างโลหะเติมทั้ง 2 ชนิดและวัสดุฐานอย่างสมบูรณ์ตลอดแนวเส้นรอบวงท่อ ไม่พบรอยกัดแหงซ่างแนวเชื่อม การวัดความสูงของแนวเชื่อมอยู่ในเกณฑ์ที่กำหนดคือไม่เกิน 4 มิลลิเมตร

3.2 ผลการทดสอบด้วยเทคนิคโพเทนชิโอไดนามิกส์ โพลาริเซชัน (Potentiodynamic Polarization)

จากหัวข้อที่ 2.4.1 จะเห็นว่าทำการทดสอบความต้านทานการกัดกร่อนด้วยเทคนิคโพเทนชิโอไดนามิกส์ โพลาริเซชันใน ตำแหน่ง 12 นาฬิกา และตำแหน่ง 6 นาฬิกา รวมเป็น 2 ชั้นทดสอบ ผลจากการทดสอบแสดงค่า E_{corr} (ศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อน) I_{corr} (กระแสไฟฟ้าการกัดกร่อน) และ E_{pit} (ศักย์ไฟฟ้าที่ก่อให้เกิดการกัดกร่อนแบบรูเข็ม) ดังตารางที่ 5 โดยพบว่าค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนเฉลี่ยของวัสดุโลหะงานเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ ASTM A790 SAF 2205 มีค่าสูงสุดที่ -0.227 โวลต์ ตามด้วยวัสดุโลหะงานเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก ASTM A312 TP 316L ที่ -0.285 โวลต์ แนวเชื่อมด้วยวัสดุ AWS A5.9

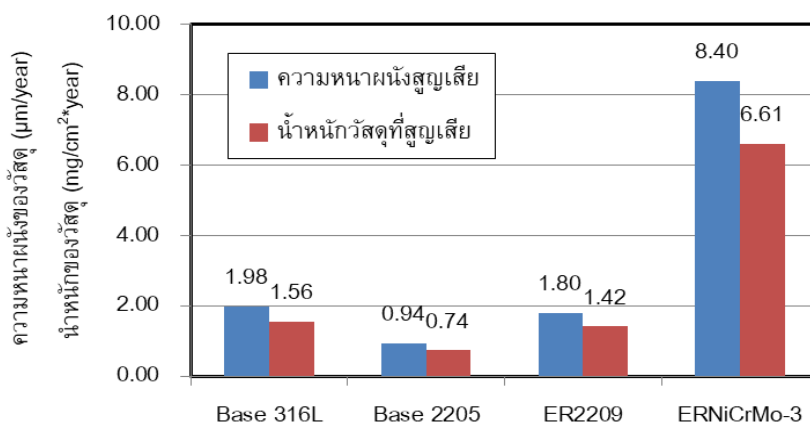
ตารางที่ 5 ศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อน กระแสไฟฟ้าการกัดกร่อน และศักย์ไฟฟ้าที่ก่อให้เกิดการกัดกร่อนแบบรูเข็ม

ชิ้นงาน / ตำแหน่ง	E_{corr} (V)			I_{corr} (A)			E_{pit} (V)		
	12 นาฬิกา	6 นาฬิกา	เฉลี่ย	12 นาฬิกา	6 นาฬิกา	เฉลี่ย	12 นาฬิกา	6 นาฬิกา	เฉลี่ย
Base 316L	-0.286	-0.283	-0.285	1.825×10^{-7}	1.589×10^{-7}	1.707×10^{-7}	0.433	0.417	0.425
Base 2205	-0.286	-0.167	-0.227	0.797×10^{-7}	0.828×10^{-7}	0.812×10^{-7}	1.143	1.211	1.177
แนวเชื่อม (ER2209)	-0.313	-0.275	-0.294	1.672×10^{-7}	1.429×10^{-7}	1.551×10^{-7}	1.118	1.125	1.122
แนวเชื่อม (ERNiCrMo-3)	-0.391	-0.214	-0.303	7.583×10^{-7}	6.906×10^{-7}	7.245×10^{-7}	1.132	1.000	1.066

ER2209 ที่ -0.294 โวลต์ และค่าต่ำสุดคือแนวเชื่อมด้วยวัสดุ AWS A5.14 ERNiCrMo-3 ที่ -0.303 โวลต์ ส่วนกระแสการกัดกร่อนเฉลี่ยพบว่าแนวเชื่อมด้วยวัสดุ AWS A5.14 ERNiCrMo-3 มีค่าสูงสุดที่ 7.245×10^{-7} แอมแปร์ แสดงถึงการกัดกร่อนเกิดขึ้นมากที่สุด และค่าต่ำสุดคือโลหะงาน ASTM A790 SAF 2205 ที่ 8.283×10^{-8} แอมแปร์ เกิดการกัดกร่อนต่ำที่สุด ทั้งนี้จะพบว่าค่า E_{corr} ในตำแหน่ง 6 นาฬิกามีค่าต่ำกว่าที่ตำแหน่ง 12 นาฬิกา เนื่องจากการเชื่อมใช้ตำแหน่งท่าเชื่อม 6G โดยเริ่มเชื่อมจากตำแหน่ง 6 นาฬิกา ขึ้นไปที่ตำแหน่ง 12 นาฬิกา หากพิจารณาถึงปริมาณความร้อนที่สะสมในแต่ละตำแหน่งจะพบว่าตำแหน่ง 12 นาฬิกา มีความร้อน

สะสมสูงกว่าตำแหน่ง 6 นาฬิกา สามารถส่งผลกระทบต่อโครงสร้างทางโลหะวิทยาและความต้านทานการกัดกร่อนที่ลดลงได้ [3] ส่วนการคำนวณหาอัตราการกัดกร่อนในรูปแบบของความหนาของผนังท่อที่หายไปและน้ำหนักของวัสดุที่สูญเสียไปจะสามารถนำเสนอได้ดังแผนภูมิแห่งดังรูปที่ 5

จากรูปที่ 5 แสดงอัตราการกัดกร่อนในลักษณะของความหนาผนังท่อที่บางลง และน้ำหนักของวัสดุที่สูญเสียไปในการทดสอบความต้านทานการกัดกร่อนซึ่งพบว่าวัสดุโลหะงานเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์เกรด 2205 มีความต้านทานการกัดกร่อนสูงสุด ส่วนแนวเชื่อมด้วยวัสดุ AWS A5.14 ERNiCrMo-3 มีความต้านทานการกัดกร่อนต่ำที่สุด



รูปที่ 5 แผนภูมิแสดงอัตราการกัดกร่อน

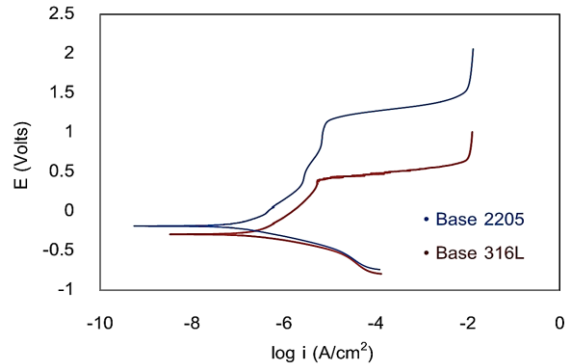


อย่างไรก็ตามเมื่อทำการเปรียบเทียบความต้านทานการกัดกร่อนแบบรูเข็มของวัสดุโลหะงานจะพบว่าวัสดุโลหะงานเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก ASTM A790 SAF 2205 มีค่าเฉลี่ยสูงสุดที่ 1.177 โวลต์ ส่วนเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก ASTM A312 TP 316L มีค่าเฉลี่ยต่ำสุดที่ 0.425 โวลต์ ซึ่งสอดคล้องกับปริมาณธาตุเจือโครเมียม โมลิบดีนัม และไนโตรเจนของเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกที่มีสูงกว่าเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกซึ่งเป็นปัจจัยหลักในการต้านทานการกัดกร่อนแบบรูเข็ม [5] ส่วนแนวเชื่อมด้วยวัสดุ AWS A5.9 ER2209 มีค่า 1.122 โวลต์ และแนวเชื่อมด้วยวัสดุ AWS A5.14 ERNiCrMo-3 มีค่า 1.066 โวลต์ ผลการทดสอบด้วยเทคนิคโพเทนชิโอสแตติกโพลาริเซชันโดยการเปรียบเทียบความต้านทานการกัดกร่อนแบบรูเข็มระหว่างวัสดุโลหะงาน และแนวเชื่อมแสดงดังรูปที่ 6 และ 7 ตามลำดับ

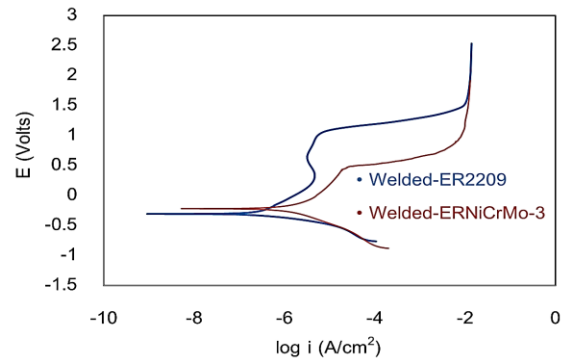
3.3 ผลการทดสอบด้วยเทคนิคแบบจุ่ม (Immersion Test)

จากการทดสอบด้วยเทคนิคแบบจุ่มชิ้นงานเชื่อมด้วยโลหะเติม AWS A5.9 ER2209 และ AWS A5.14 ERNiCrMo-3 ซึ่งมีน้ำหนักเริ่มต้นแตกต่างกันเล็กน้อย (สามารถเกิดความแปรผันได้) ระยะเวลาการจุ่ม 24, 48 และ 72 ชั่วโมง เกิดการกัดกร่อนที่ผิวชิ้นงานดังรูปที่ 8 และ 9 ตามลำดับ และพบว่าน้ำหนักที่สูญเสียไปของชิ้นงานทั้ง 2 ชนิดสามารถจับกันได้ดังตารางที่ 6

จากรูปที่ 8 และ 9 แสดงให้เห็นร่องรอยของการกัดกร่อนที่เพิ่มมากขึ้นตามเวลาที่จุ่มทดสอบซึ่งสอดคล้องกับค่าน้ำหนักชิ้นทดสอบและน้ำหนักที่สูญเสียไปตามตารางที่ 6 และพบว่าการกัดกร่อนของ

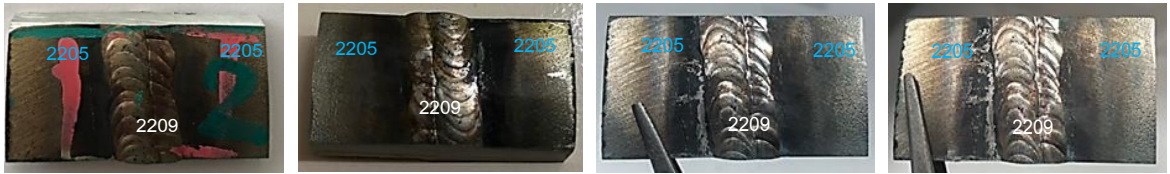


รูปที่ 6 แสดงความต้านทานการกัดกร่อนแบบรูเข็มของวัสดุโลหะงาน



รูปที่ 7 แสดงความต้านทานการกัดกร่อนแบบรูเข็มของแนวเชื่อม

ชิ้นทดสอบที่ผ่านการเชื่อมด้วยโลหะเติม AWS A5.9 ER2209สังเกตเห็นการกัดกร่อนบริเวณรอยเชื่อมมากกว่าบริเวณโลหะงานซึ่งสอดคล้องกับค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนของโลหะงานที่สูงกว่าบริเวณแนวเชื่อม นอกจากนี้พบว่าเกิดการกัดกร่อนน้อยกว่า เมื่อเปรียบเทียบกับชิ้นงานที่เชื่อมด้วยโลหะเติม AWS A5.14 ERNiCrMo-3 ทั้งนี้เป็นเพราะ ชิ้นงานเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมต่างเกรด ประกอบไปด้วยวัสดุเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก ASTM A312 TP 316L



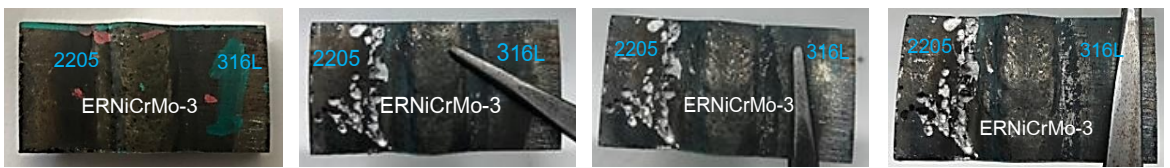
(ก)

(ข)

(ค)

(ง)

รูปที่ 8 ชิ้นงานเชื่อมด้วยโลหะเติม AWS A5.9 ER2209 (ก) ไม่ผ่านการจุ่ม และผ่านการจุ่มที่เวลา (ข) 24 ชั่วโมง (ค) 48 ชั่วโมง และ (ง) 72 ชั่วโมง



(ก)

(ข)

(ค)

(ง)

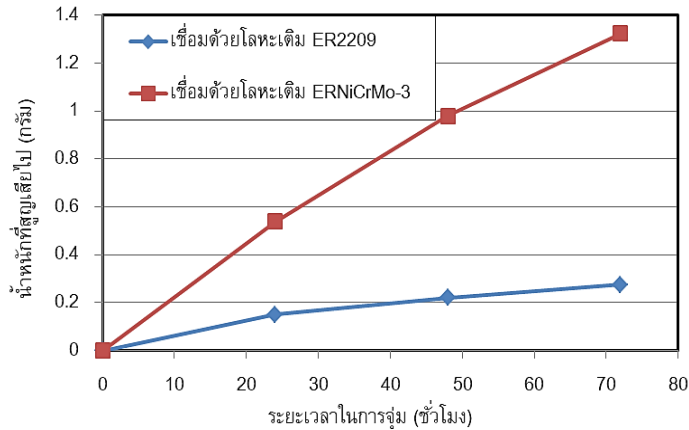
รูปที่ 9 ชิ้นงานเชื่อมด้วยโลหะเติม AWS A5.14 ERNiCrMo-3 (ก) ไม่ผ่านการจุ่ม และผ่านการจุ่มที่เวลา (ข) 24 ชั่วโมง (ค) 48 ชั่วโมง และ (ง) 72 ชั่วโมง

ตารางที่ 6 คำนวณน้ำหนักที่สูญเสียไปของชิ้นทดสอบการกัดกร่อนด้วยเทคนิคแบบจุ่ม

ระยะเวลา (ชั่วโมง)	น้ำหนักชิ้นทดสอบ (กรัม)		น้ำหนักที่สูญเสียไป (กรัม)	
	เชื่อมด้วยโลหะเติม	เชื่อมด้วยโลหะเติม	เชื่อมด้วยโลหะเติม	เชื่อมด้วยโลหะเติม
	ER2209	ERNiCrMo-3	ER2209	ERNiCrMo-3
0	37.1863	35.8080	0.0000	0.0000
24	37.0352	35.2687	0.1511	0.5393
48	36.9657	34.8286	0.2206	0.9794
72	36.9120	34.4839	0.2743	1.3241

โลหะเติม AWS A5.14 ERNiCrMo-3 และเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ ASTM A790 SAF 2205 จึงมีความแตกต่างของศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนที่มากกว่าในกรณีรอยเชื่อมของเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ ASTM A790 SAF 2205 และโลหะเติม AWS A5.9 ER2209 ซึ่งเป็นผลมาจากอิทธิพลจากการกัดกร่อนแบบกัลวานิก (Galvanic Corrosion) ที่เกิดขึ้นเมื่อโลหะต่างชนิดสัมผัสกันในสารละลายที่มีฤทธิ์กัดกร่อน [3, 6]

ด้วยเหตุผลนี้ หากสังเกตจากรูปที่ 9 จะเห็นว่าบริเวณผลกระทบร้อน (HAZ) ของโลหะงานฝังวัสดุ ASTM A312 TP 316L ถูกกัดกร่อนได้อย่างชัดเจน ทั้งนี้เมื่อสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างเวลาและน้ำหนักของชิ้นทดสอบที่สูญเสียไปดังรูปที่ 10 สำหรับชิ้นทดสอบทั้ง 2 ชนิดพบว่าในช่วง 0-24 ชั่วโมงเส้นกราฟความสัมพันธ์มีความชันที่สูงกว่าช่วง 24-48 ชั่วโมง และ 48-72 ชั่วโมง ตามลำดับ



รูปที่ 10 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาการจุ่มต่อน้ำหนักที่สูญเสียไปในการถูกกัดกร่อน

อย่างไรก็ตามความเข้มข้นของสารละลายกัดกร่อนที่ใช้ในการทดลองเป็นข้อพึงระวังซึ่งเมื่อเวลาผ่านไปจะมีความเข้มข้นลดลงทำให้อัตราการกัดกร่อนลดลงตามไปด้วย

3.4 ผลการตรวจสอบโครงสร้างทางโลหะวิทยา

ผลการตรวจสอบโครงสร้างมหภาคพบว่าแนวเชื่อมไม่ปรากฏจุดบกพร่อง โดยผ่านเกณฑ์การยอมรับตามมาตรฐาน โครงสร้างมหภาคของชิ้นงานเชื่อมแสดงดังรูปที่ 11 สำหรับชิ้นงานเชื่อมด้วยโลหะเติม AWS A5.9 ER2209 และรูปที่ 12 สำหรับชิ้นงานเชื่อมด้วยโลหะเติม AWS A5.14 ERNiCrMo-3 ตามลำดับ

จากผลการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคพบว่าสำหรับวัสดุโลหะงาน ASTM A790 SAF 2205 มีโครงสร้างที่ประกอบไปด้วยเฟอไรต์ และออสเทนไนต์ โดยมีการจัดเรียงตัวตามที่สททางกริดชิ้นรูปในกระบวนการผลิตท่อไร้ตะเข็บ [7] ดังรูปที่ 13 ส่วนวัสดุ ASTM A312 TP 316L มีโครงสร้างพื้นฐานเป็นออสเทนไนต์ ดังรูปที่ 14 ตามลำดับ



รูปที่ 11 โครงสร้างมหภาคของชิ้นงานเชื่อมด้วยโลหะเติม AWS A5.9 ER2209



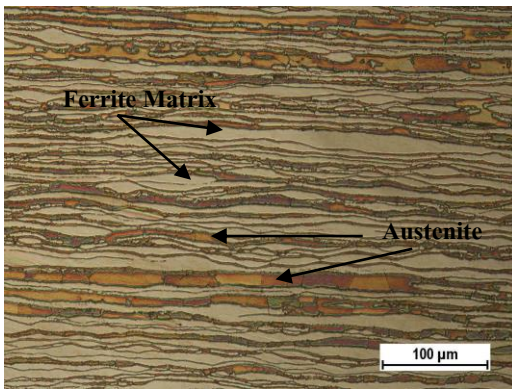
รูปที่ 12 โครงสร้างมหภาคของชิ้นงานเชื่อมด้วยโลหะเติม AWS A5.14 ERNiCrMo-3

นอกจากนี้ยังพบว่าโครงสร้างจุลภาคพื้นฐานของแนวเชื่อมด้วยโลหะเติมชนิด AWS A5.9 ER2209 บริเวณแนวเชื่อมทาบหน้า ปรากฏโครงสร้างที่ประกอบไปด้วยเฟสเฟอไรต์และเฟสออสเทนไนต์ โดยเฟสออสเทนไนต์ที่พบนั้นมีด้วยกัน 3 รูปแบบ คือ (1) เฟสออสเทนไนต์รูปแบบ “Widmānstten” (Widmānstten-Type Austenite: WA) (2) เฟสออสเทนไนต์ที่อยู่ใน

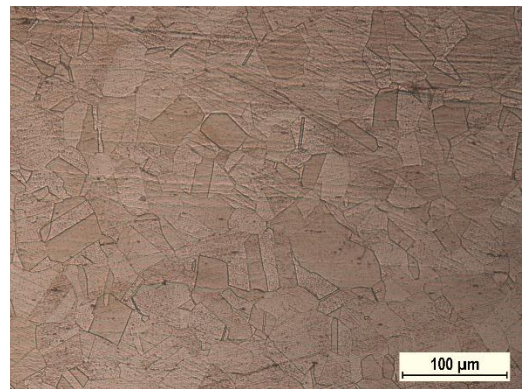


เกรน (Intragranular Austenite: IGA) และ (3) เฟส ออสเทนไนต์ที่อยู่ตามขอบเกรน (Grain Boundary Austenite: GBA) [7, 8] ดังรูปที่ 15 ส่วนแนวเชื่อมที่เชื่อมด้วยโลหะเติม AWS A5.14 ERNiCrMo-3 มีโครงสร้างพื้นฐานเป็นออสเทนไนต์ และมีรูปแบบการแข็งตัวแบบคอลัมน์าร์เดนไดรต์ (Columnar Dendritic) [9, 10] ดังรูปที่ 16

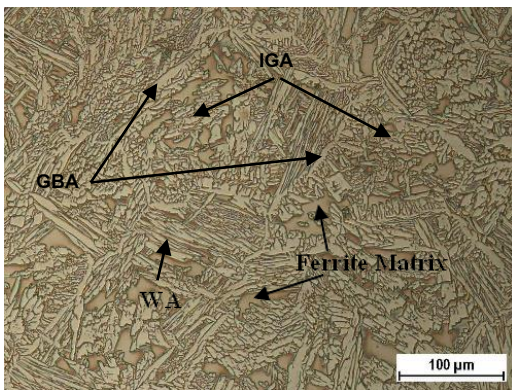
ทั้งนี้จากผลการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค สามารถวิเคราะห์ความสัมพันธ์กับความต้านทานการกัดกร่อนได้ว่า กรณีที่ของเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์นั้นมีสัดส่วนของโครงสร้างเฟอไรต์สูงกว่ากรณีของรอยเชื่อมโลหะต่างชนิดที่มีโลหะงานและโลหะเติมซึ่งมีโครงสร้างเป็นออสเทนไนต์ และจากวรรณกรรมวิจัยพบว่าโครงสร้างที่ทนต่อการกัดกร่อน



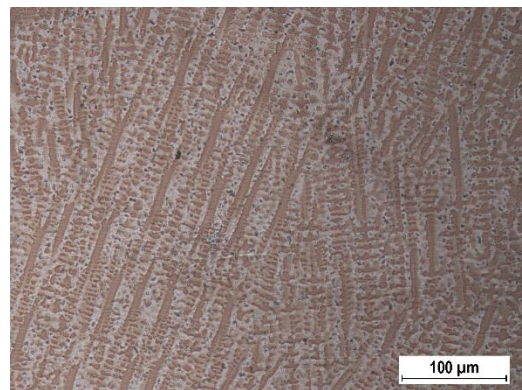
รูปที่ 13 แสดงโครงสร้างทางจุลภาควัสดุโลหะงาน ASTM A790 SAF 2205



รูปที่ 14 แสดงโครงสร้างทางจุลภาควัสดุโลหะงาน ASTM A312 TP 316L



รูปที่ 15 แสดงโครงสร้างจุลภาคแนวเชื่อมด้วยโลหะเติม AWS A5.9 ER2209



รูปที่ 16 แสดงโครงสร้างจุลภาคแนวเชื่อมด้วยโลหะเติม AWS A5.14 ERNiCrMo-3



แบบรูเข็มได้ดีกว่าคือโครงสร้างเฟอร์ไรต์ สอดคล้องกับงานวิจัยนี้ที่พบว่ารอยเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ ASTM A790 SAF 2205 ด้วยโลหะเติมชนิด AWS A5.9 ER2209 ด้านทานการกัดกร่อนแบบรูเข็มได้ดีกว่ารอยเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ ASTM A790 SAF 2205 กับเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก ASTM A312 TP 316L ด้วยโลหะเติมชนิด AWS A5.14 ERNiCrMo-3 ทั้งในการทดสอบด้วยเทคนิคโพเทนชิโอไดนามิกส์ โพลาริเซชันและด้วยเทคนิคแบบจุ่ม

4. สรุปผลการวิจัย

1. การเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ ASTM A790 SAF 2205 ด้วยโลหะเติมชนิด AWS A5.9 ER2209 และการเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ ASTM A790 SAF 2205 กับเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก ASTM A312 TP 316L ด้วยโลหะเติมชนิด AWS A5.14 ERNiCrMo-3 ในกระบวนการเชื่อม GTAW ไม่พบจุดบกพร่องของแนวเชื่อม โดยผ่านเกณฑ์การยอมรับตามมาตรฐานการเชื่อมสากล

2. การทดสอบด้วยเทคนิคโพเทนชิโอไดนามิกส์ โพลาริเซชันสรุปได้ว่าโลหะเติม AWS A5.14 ERNiCrMo-3 มีศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนต่ำที่สุด เกิดกระแสการกัดกร่อนสูงที่สุด ส่วนเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ ASTM A790 SAF 2205 ค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนสูงที่สุดและเกิดกระแสการกัดกร่อนต่ำที่สุด

3. เหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก ASTM A312 TP 316L มีค่าศักย์ไฟฟ้ารูเข็ม (E_{pit}) ต่ำสุด ส่วนเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ ASTM A790 SAF 2205 มีค่าศักย์ไฟฟ้ารูเข็ม (E_{pit}) สูงสุด

4. การทดสอบด้วยเทคนิคแบบจุ่มพบว่าแนวเชื่อมด้วยโลหะเติม AWS A5.14 ERNiCrMo-3 นั้นเป็นแนวเชื่อมที่ประกอบด้วยโลหะต่างชนิดถึง 3 ชนิด ซึ่งเร่งให้เกิดการกัดกร่อนที่สูงกว่าแนวเชื่อมด้วยโลหะเติม AWS A5.9 ER2209

5. จากการทดสอบทั้งการกัดกร่อนด้วยเทคนิคโพเทนชิโอไดนามิกส์ โพลาริเซชันและการทดสอบแบบจุ่มกล่าวได้ว่ารอยเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ ASTM A790 SAF 2205 ด้วยโลหะเติมชนิด AWS A5.9 ER2209 ด้านทานการกัดกร่อนได้ดีกว่ารอยเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ ASTM A790 SAF 2205 กับเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก ASTM A312 TP 316L ด้วยโลหะเติมชนิด AWS A5.14 ERNiCrMo-3 ทั้งนี้ให้พิจารณาถึงระยะเวลาและความคุ้มค่าในการใช้งาน อย่างไรก็ตามต้องคำนึงถึงความเข้มข้นของสารละลายในสภาวะแวดล้อมจริงด้วย

5. เอกสารอ้างอิง

- [1] R. Pornpanom, P. Wathanatham and K. Eidhed, The Study of dissimilar metal welding between duplex 2205 and austenitic 316L stainless steels by using GTAW process, Industrial Engineering Conference Network 2016 (IE Network 2016), Proceedings, 2016, 1349-1355. (in Thai)
- [2] J.C. Lippold and D.J. Kotecki, Welding metallurgy and weldability of stainless steels, 1st ED., John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, NJ, USA, 2005.



- [3] J. Verma and R.V. Taiwade, Dissimilar welding behavior of 22% Cr series stainless steel with 316L and its corrosion resistance in modified aggressive environment, *Journal of Manufacturing Process* 24(Part 1), 2016, 1-10.
- [4] S. Chandra-ambhorn, *Foundations of corrosion*, 5th Ed., Chulalongkorn University Publisher, Thailand, 2015.
- [5] Y. Prawoto, Synergy of erosion and galvanic effects of dissimilar steel welding: Field failure analysis case study and laboratory test results, *Journal of King Saud University – Engineering Sciences* 25 (1), 2013, 59–64.
- [6] S. Li, X. Ren, X. Ji and Y. Gui, Effects of microstructure changes on the superplasticity of 2205 duplex stainless steel, *Materials and Design* 55, 2014, 146-151.
- [7] S. Geng, J. Sun, L. Guo and H. Wang, Evolution of microstructure and corrosion behavior in 2205 duplex stainless steel GTA-welding joint, *Journal of Manufacturing Process*, 2015, 24, 32-37.
- [8] Y. Zhang, S. Cheng, S. Wu and F. Cheng, The evolution of microstructure and intergranular corrosion resistance of duplex stainless steel joint in multi-pass welding, *Journal of Materials Processing Technology*, 2020, 277, 116471.
- [9] N.P. Kumar and N.S. Shanmugam, Some studies on nickel based Inconel 625 hard overlays on AISI 316L plate by gas metal arc welding based hardfacing process, *Wear*, 2020, 456-457, 203394.
- [10] S. Sirohi, C. Pandey and A. Goyal, Role of the Ni-based filler (IN625) and heat-treatment on the mechanical performance of the GTA welded dissimilar joint of P91 and SS304H steel, *Journal of Manufacturing Processes*, 2021, 65, 174-189.