

บทที่ 3 วิธีการทดลอง

ขั้นตอนการดำเนินการทดสอบการกัดกร่อนแบบหลุมของรอยเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมชนิด ER308 และ ER308LSi โดยกระบวนการเชื่อม GMAW-Pulse มีการแบ่งเป็น 12 ขั้นตอนดังนี้

- 3.1 การเลือกวัสดุสำหรับการเชื่อมทดสอบ
- 3.2 อุปกรณ์การเชื่อมทดสอบ
- 3.3 การกำหนดตัวแปรในการเชื่อมทดสอบ
- 3.4 ขั้นตอนการเชื่อมทดสอบ
- 3.5 การเตรียมชิ้นงานสำหรับการทดสอบแบบต่างๆ
- 3.6 การวัดขนาดและรูปร่างรอยเชื่อม
- 3.7 การตรวจสอบส่วนผสมทางเคมีของรอยเชื่อม
- 3.8 การทดสอบการกัดกร่อนแบบหลุมตามมาตรฐาน ASTM G48-03 Method A
- 3.9 การทดสอบการกัดกร่อนด้วยเคมีไฟฟ้า
- 3.10 การวัดปริมาณเฟอร์ไรต์ในรอยเชื่อม
- 3.11 การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาครอยเชื่อม
- 3.12 การตรวจสอบความแข็งแรงรอยเชื่อม

3.1 การเลือกวัสดุสำหรับการเชื่อมทดสอบ

วัสดุที่ใช้ในการทดสอบสามารถแบ่งออกเป็น 3 ส่วนที่สำคัญ ประกอบด้วย ชิ้นงานเชื่อม ลวดเชื่อม เปลือย และแก๊สปกคลุมรอยเชื่อม รายละเอียดของแต่ละองค์ประกอบมีดังนี้

3.1.1 ชิ้นงานเชื่อม

ชิ้นงานที่นำมาใช้ในการทดสอบเป็นเหล็กกล้าไร้สนิมมาตรฐาน AISI 304 ผ่านการเตรียมผิวชนิด 2B มีขนาดความหนา 2 มิลลิเมตร กว้าง 50 มิลลิเมตร ยาว 230 มิลลิเมตร มีส่วนผสมทางเคมีตามที่แสดงในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 ส่วนผสมทางเคมีของชิ้นงานเชื่อม AISI 304 (% โดยน้ำหนัก)

ชนิด	วิธีวิเคราะห์	C	Si	Mn	P	S	Cu
AISI 304	OES	0.04	0.40	1.18	0.036	0.002	0.05
	ICP	0.04	0.37	1.25	0.039	0.004	0.04
ข้อกำหนด		≤ 0.08	≤ 1.00	≤ 2.00	≤ 0.045	≤ 0.03	–

ชนิด	วิธีวิเคราะห์	Ni	Cr	Mo	Al	N	O
AISI 304	OES	7.92	18.12	0.05	0.001	0.0363	0.039
	ICP	7.98	18.28	0.04	0.002	0.0369	0.058
ข้อกำหนด		8.0 – 10.5	18.0 – 20.0	–	–	≤ 0.1	–

3.1.2 ลวดเชื่อมเปลือย

ลวดเชื่อมเปลือยที่ใช้ในการทดสอบเป็นชนิดม้วน น้ำหนักม้วนละ 20 กิโลกรัม มี 2 ชนิดจำแนกตามมาตรฐาน AWS A5.9 ประกอบด้วย ลวดเชื่อมเปลือยชนิด AWS A5.9 ER308 และ AWS A5.9 ER308LSi ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของลวดเท่ากับ 1.2 มิลลิเมตร ส่วนผสมทางเคมีของลวดเชื่อมทั้ง 2 ชนิดถูกวิเคราะห์ด้วย ICP แสดงในตารางที่ 3.2 และ 3.3

ตารางที่ 3.2 ส่วนผสมทางเคมีของลวดเชื่อมเปลือยชนิด ER308 (% โดยน้ำหนัก)

ชนิด	C	Si	Mn	P	S	Cu
ER308	0.04	0.48	1.57	0.024	0.001	0.11
ข้อกำหนด A5.9	≤ 0.08	0.30 – 0.65	1.0 – 2.5	≤ 0.03	≤ 0.03	≤ 0.75

ชนิด	Ni	Cr	Mo	Al	N	O
ER308	9.72	19.82	0.06	0.004	0.0240	0.003
ข้อกำหนด A5.9	9.0 – 11.0	19.5 – 22.0	≤ 0.75	–	–	–

ตารางที่ 3.3 ส่วนผสมทางเคมีของลวดเชื่อมเปลือยชนิด ER308LSi (%โดยน้ำหนัก)

ชนิด	C	Si	Mn	P	S	Cu
ER308LSi	0.02	0.78	1.88	0.020	0.001	0.09
ข้อกำหนด A5.9	≤ 0.03	0.65 – 1.00	1.0 – 2.5	≤ 0.03	≤ 0.03	≤ 0.75

ชนิด	Ni	Cr	Mo	Al	N	O
ER308LSi	10.1	19.97	0.07	0.004	0.0190	0.004
ข้อกำหนด A5.9	9.0 – 11.0	19.5 – 22.0	≤ 0.75	–	–	–

3.1.3 แก๊สปกคลุมรอยเชื่อม

แก๊สที่ใช้ในการทดสอบถูกบรรจุในถังทรงกระบอก จำนวน 4 ถัง ประกอบด้วย

1. แก๊สอาร์กอน ความบริสุทธิ์ 99.995% โดยปริมาตร
2. แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์
3. แก๊สอาร์กอน 98% ผสมแก๊สออกซิเจน 2% โดยปริมาตร
4. แก๊สอาร์กอน 95% ผสมแก๊สออกซิเจน 5% โดยปริมาตร

สมบัติของแก๊สที่นำมาใช้ในการทดสอบตามมาตรฐาน AWS C5.10-94 แสดงในตารางที่ 3.4

ตารางที่ 3.4 สมบัติของแก๊สปกคลุมรอยเชื่อม [5]

สมบัติ	หน่วย	ชนิดของแก๊สปกคลุม		
		Ar	CO ₂	O ₂
ความหนาแน่น ⁽¹⁾	Kg / m ³	1.656	1.833	1.326
ความหนาแน่นในสภาพของเหลว ⁽²⁾	Kg / m ³	1394	1014 ⁽³⁾	820.5
จุดเดือด ⁽⁴⁾	°C	-185.9	-78.5	-183.0
ความร้อนของการกลายเป็นไอ ⁽⁵⁾	kJ/kg	162.0	276.8 ⁽⁶⁾	213.0
การนำความร้อน ⁽⁷⁾	Watt/m K	0.0153	0.0162	0.0258
ศักย์การแตกตัวของไอออน	eV	15.7	14.4	13.2
น้ำหนักโมเลกุล		39.94	44.01	31.99

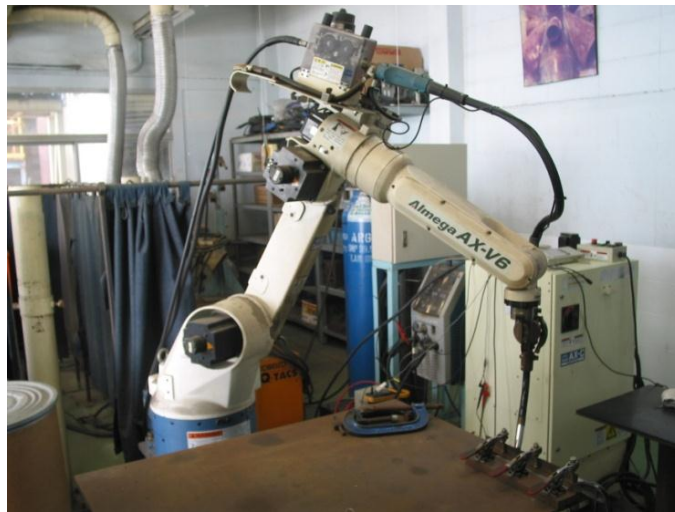
- หมายเหตุ
- (1) ที่ 21°C และ 1 ATM
 - (2) ณ จุดเดือด
 - (3) ของเหลวอิ่มตัวที่ -16.8°C
 - (4) ที่ 1 ATM ยกเว้น CO₂
 - (5) ที่จุดเดือดยกเว้น CO₂
 - (6) CO₂ เหลวที่ 2.07 MPa และ -16.8°C
 - (7) ที่ 0°C ยกเว้น CO₂ ที่ 25°C

3.2 อุปกรณ์การเชื่อมทดสอบ

อุปกรณ์ที่ใช้ในการเชื่อมทดสอบสามารถแบ่งออกเป็น 3 องค์ประกอบที่สำคัญ ประกอบด้วย หุ่นยนต์ และเครื่องเชื่อม อุปกรณ์วัดสัญญาณไฟฟ้า และชุดจับยึดชิ้นงานเชื่อม

3.2.1 หุ่นยนต์และเครื่องเชื่อม

หุ่นยนต์และเครื่องเชื่อมที่ใช้ในการทดสอบถูกนำเข้าโดยบริษัท ไคเซน เอเชีย (ประเทศไทย) จำกัด รุ่น OTC Almega AX-V6 สำหรับงานเชื่อมในกลุ่มยานยนต์ ส่วนเครื่องเชื่อมเป็นชนิดอินเวอร์เตอร์ กระแสไฟตรงรุ่น OTC DP-400 ตามที่แสดงในรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 หุ่นยนต์เชื่อม OTC Almega AX-V6 และเครื่องเชื่อมอินเวอร์เตอร์กระแสไฟตรง OTC DP-400

3.2.2 อุปกรณ์วัดสัญญาณไฟฟ้า

อุปกรณ์วัดสัญญาณไฟฟ้าที่ใช้ในการทดสอบ เป็นอุปกรณ์ที่ผลิตขึ้นโดยบริษัท KEYENCE ประเทศญี่ปุ่น รุ่น NR-2010 ทำหน้าที่ในการตรวจจับสัญญาณไฟฟ้าประกอบด้วย กระแสไฟฟ้า แรงดันไฟฟ้า รวมถึงสภาวะการลัดวงจรในหนึ่งหน่วยวินาทีเพื่อระบุจำนวนครั้งของการเกิดสะเก็ดไฟเชื่อม เครื่องวัดสัญญาณไฟฟ้าที่ใช้ถูกแสดงในรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 อุปกรณ์วัดสัญญาณไฟฟ้า KEYENCE รุ่น NR-2010

3.2.3 ชุดจับยึดชิ้นงานเชื่อม

ชุดจับยึดชิ้นงานเชื่อมในการทดสอบ ทำหน้าที่ในการจับยึดแผ่นชิ้นงานด้านบนและล่าง เพื่อลดช่องว่างของแผ่นชิ้นงานทั้งสองในระหว่างการเชื่อมด้วยรอยเชื่อมต่อแบบเกย และป้องกันการเชื่อมทะลุสู่ฐานวางชิ้นงานในระหว่างการปรับสภาพการเชื่อมที่เหมาะสม ชุดจับยึดชิ้นงานเชื่อมแสดงในรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 ชุดจับยึดชิ้นงานเชื่อม

3.3 การกำหนดตัวแปรในการเชื่อมทดสอบ

ในการกำหนดตัวแปรสำหรับการเชื่อมทดสอบ เป็นการอาศัยข้อมูลสถานะการเชื่อมโดยการอ้างอิงจากการใช้งานจริงในกลุ่มอุตสาหกรรมผู้ผลิตชิ้นส่วนท่อไอเสียรถยนต์ ซึ่งมีการปรับประเภทตัวแปรในการเชื่อมออกเป็น ตัวแปรประเภทคงที่ และตัวแปรประเภทแปรผัน

3.3.1 ตัวแปรประเภทคงที่

ตัวแปรประเภทคงที่ เป็นตัวแปรที่มีลักษณะหรือเงื่อนไขเหมือนกันในทุกการเชื่อมทดสอบ ตัวแปรดังกล่าวแสดงในตารางที่ 3.5

ตารางที่ 3.5 ตัวแปรคงที่สำหรับการกำหนดในการเชื่อมทดสอบ

ชนิดของตัวแปรคงที่	ค่าที่กำหนด	หน่วยการวัด
สภาวะการเชื่อม	150 – 22 – 100	แอมป์แปร์-โวลต์-เซนติเมตร/นาทิต
สภาวะพัลส์	$I_p = 420A, I_b = 38A, T_p = 1.2ms$	แอมป์แปร์ – มิลลิวินาที
อัตราการไหลของแก๊ส	15 ± 2	ลิตร/นาทิต
มุมเชื่อม	30	องศา
มุมงาน	15	องศา
ทิศทางการเชื่อม	เดินหน้า (โฟร์แฮนด์)	–
ระยะยื่นของปลายลวด	15 ± 1	มิลลิเมตร

3.3.2 ตัวแปรประเภทแปรผัน

ตัวแปรประเภทแปรผัน เป็นตัวแปรที่มีเงื่อนไขหรือการปรับเปลี่ยนในแต่ละชุดการทดสอบการเชื่อม ตัวแปรนี้เป็นสิ่งที่ผู้วิจัยสนใจศึกษา สังเกต และควบคุม สำหรับตัวแปรประเภทแปรผันที่ใช้ในการเชื่อมทดสอบแสดงในตารางที่ 3.6

ตารางที่ 3.6 ตัวแปรประเภทแปรผันในการเชื่อมทดสอบ

ตัวแปรประเภทแปรผัน	หน่วยการวัด
ชนิดแก๊สปกคลุมรอยเชื่อม	%
ชนิดลวดเชื่อมเปลี่ยน	–

3.4 ขั้นตอนการเชื่อมทดสอบ

ขั้นตอนการเชื่อมประกอบด้วยการทำความสะอาดผิวชิ้นงานด้วยเอทานอล การปรับระยะปลายลวดเชื่อมกับผิวชิ้นงานให้ได้ระยะที่กำหนด การประกอบชิ้นงานบนที่จับยึด การป้อนค่าในคำสั่งของหุ่นยนต์เชื่อม และการเชื่อมทดสอบ โดยกำหนดให้รอยเชื่อมมีความยาวประมาณ 180 มิลลิเมตร ซึ่งขั้นตอนต่างๆแสดงในรูปที่ 3.4 ถึง 3.8



รูปที่ 3.4 การทำความสะอาดผิวชิ้นงานก่อนการเชื่อม



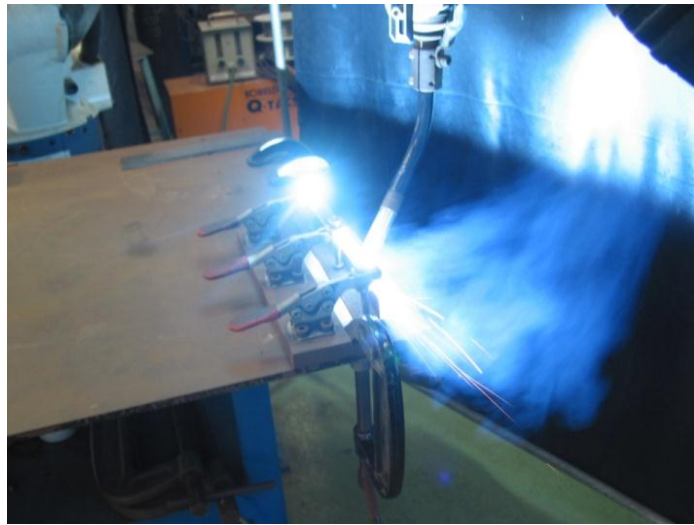
รูปที่ 3.5 การประกอบชิ้นงานบนที่จับยึด



รูปที่ 3.6 การปรับระยะปลายลวดเชื่อม



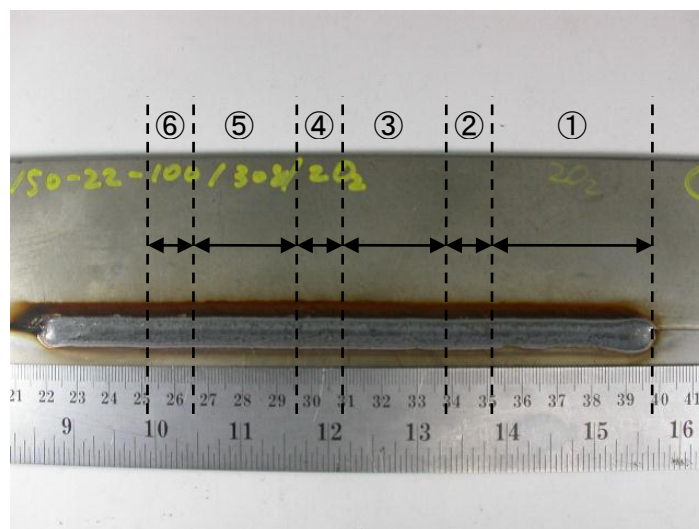
รูปที่ 3.7 การปรับระยะมุมทอรัชเชื่อมให้ได้ขนาดและการทำ Pre-welding



รูปที่ 3.8 การเชื่อมทดสอบ

3.5 การเตรียมชิ้นงานสำหรับการทดสอบแบบต่างๆ

การเตรียมชิ้นงานสำหรับการทดสอบการกัดกร่อนแบบหลุมถูกตัดออกจากชิ้นงานเชื่อมบริเวณ ③ ตามที่แสดงในรูปที่ 3.9



รูปที่ 3.9 การแบ่งชิ้นงานเพื่อการทดสอบ

สำหรับบริเวณ ① ใช้ในการเชื่อมทดสอบส่วนผสมทางเคมีในรอยเชื่อม บริเวณ ②, ④ และ ⑥ ใช้ทดสอบโครงสร้างจุลภาค รูปร่างและโครงสร้างมหภาค และความแข็งแรงรอยเชื่อมตามลำดับ อุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมชิ้นงานประกอบด้วย

1. เลื่อยไฟฟ้าที่มีระบบน้ำหล่อเย็น สำหรับการตัดแยกย่อยชิ้นงานใหญ่เป็นชิ้นงานขนาดเล็ก
2. เลื่อยมือ สำหรับตัดชิ้นงานขนาดเล็กที่เลื่อยไฟฟ้าไม่สามารถตัดได้
3. กระจายทรายสายพานเบอร์ 80 สำหรับการขัดผิวหยาบ ก่อนขัดด้วยกระจายทรายน้ำ
4. เครื่องขัดผิวชิ้นงาน สำหรับการขัดผิวละเอียด
5. กระจายทรายน้ำเบอร์ 100, 240, 320, 400, และ 600
6. เอทานอลสำหรับการล้างทำความสะอาดผิวชิ้นงาน

3.6 การวัดขนาดและรูปร่างรอยเชื่อม

การเตรียมชิ้นงานสำหรับการวัดขนาดและรูปร่างรอยเชื่อม มีขั้นตอนในการเตรียมชิ้นงานดังนี้

3.6.1 การขัดผิวชิ้นงาน

ขั้นตอนการขัดผิวชิ้นงานประกอบด้วย

1. นำชิ้นงานบริเวณ ④ ที่เตรียมในรูปที่ 3.9 มาขัดด้วยกระจายทรายสายพานเบอร์ 80 ทั้งสองด้าน จากนั้นนำมาขัดด้วยกระจายทรายตั้งแต่เบอร์ 100, 240, 320, 400, 600, 800, 1000, 1500 และ 2000 ตามลำดับ
2. การขัดผิวหน้าชิ้นงานต้องทำการสลับทิศทางการขัดให้เป็นแนวตารางกับแนวเดิม ตามเบอร์ของกระจายทรายที่ใช้ นอกจากนี้ในระหว่างการขัดต้องทำการเปิดน้ำเพื่อเป็นการขัดเศษผงเหล็กหรือเศษกระจายทรายที่หลุดออกมาในระหว่างการขัดด้วย

3.6.2 การขัดผิวละเอียดด้วยผงขัดอลูมินา

เมื่อเสร็จสิ้นการขัดด้วยกระจายทราย ขั้นตอนถัดไปเป็นการขัดโดยใช้ผ้าสักกะหลาด และมีผงอลูมินาผสมน้ำเป็นตัวช่วยในการลบรอยที่เกิดจากการขัดด้วยกระจายทราย ผงขัดอลูมินาที่ใช้มีขนาดความละเอียดตั้งแต่ 0.05 – 0.3 ไมโครเมตร สภาพผิวที่ต้องการในขั้นตอนการขัดด้วยผงอลูมินาคือ สภาพผิวที่มันวาวเหมือนกระจก โดยไม่ให้เหลือรอยขัดกระจายทรายอยู่ที่ผิวหน้าชิ้นงาน

3.6.3 การกัดกรด

ชิ้นงานที่ผ่านการขัดผิวด้วยผงอลูมินามาแล้ว ถูกลำบากกัดกรดเพื่อทำการตรวจสอบลักษณะรอยเชื่อม โดยใช้สารละลายกรดสำหรับการตรวจสอบโครงสร้างมหภาค ตามมาตรฐาน ASTM E340-00 (2006) ซึ่งรายละเอียดของส่วนผสมกรดที่ใช้ถูกแสดงในตารางที่ 3.7

ตารางที่ 3.7 ส่วนผสมกรดสำหรับตรวจสอบโครงสร้างมหภาค [17]

โครงสร้างที่ตรวจสอบ	ส่วนผสมกรด	มาตรฐานอ้างอิง
มหภาค	50 mL HCL (เข้มข้น) + 50 mL H ₂ O	ASTM E340-00 (2006)

3.6.4 การวัดขนาดรอยเชื่อม

ชิ้นงานสำหรับวัดขนาดรอยเชื่อมใช้กำลังขยายที่ 30 เท่า ด้วยกล้องสเตอริโอไมโครสโคป ตรา MEIJI โปรแกรมที่ใช้ในการวัดขนาดคือ Dino lite 2.0 โดยทำการวัดขนาดขาแนวเชื่อม ความนูน และการซึมลึกตามวิธีการที่ระบุใน ASM ฉบับที่ 6 [18]

3.7 การตรวจสอบส่วนผสมทางเคมีของรอยเชื่อม

ขั้นตอนการตรวจสอบส่วนผสมทางเคมีในรอยเชื่อม มีรายละเอียดของการเตรียมชิ้นงานเพื่อตรวจสอบดังนี้

1. นำชิ้นงานบริเวณ ① ที่แสดงในรูปที่ 3.9 มาทำการเชื่อม โดยใช้สภาวะการเชื่อมเดียวกับการเชื่อมเพื่อทดลองการกัดกร่อนแบบหลุม
2. ทำการเชื่อมให้มีขนาดความยาวรอยเชื่อมเท่ากับ 50 มิลลิเมตร จำนวน 5 แนวเชื่อม โดยทำการเชื่อมเพียง 1 ชั้นเชื่อมเท่านั้น
3. นำชิ้นงานที่ผ่านการเชื่อมแล้ว ไปปาดผิวหน้าลึกลงใต้ผิวรอยเชื่อมประมาณ 1 มิลลิเมตร
4. เก็บเศษผิวรอยเชื่อมที่ได้จากการปาดผิวหน้า ไปทำการวิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมี โดยใช้ ICP สำหรับธาตุคาร์บอนและกำมะถันวิเคราะห์ด้วยเครื่อง C/S Analyzer ส่วนไนโตรเจนและออกซิเจนวิเคราะห์ด้วยเครื่อง O/N Analyzer

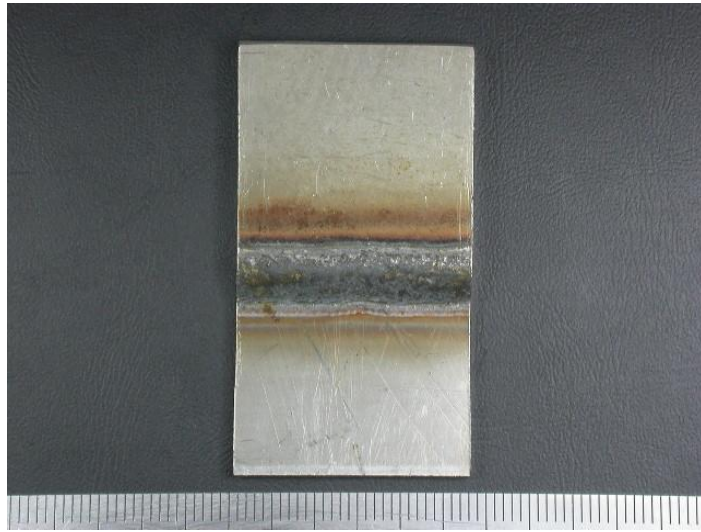
3.8 การทดสอบการกัดกร่อนแบบหลุมตามมาตรฐาน ASTM G48-03 Method A

การทดสอบการกัดกร่อนแบบหลุมมีขั้นตอนการเตรียมการและการทดสอบดังนี้

3.8.1 การเตรียมชิ้นงาน

ขั้นตอนในการเตรียมชิ้นงานสำหรับการทดสอบการกัดกร่อนแบบหลุม มีรายละเอียดดังนี้

1. การนำชิ้นงานตามที่แสดงในรูป 3.9 มาตัดที่บริเวณ ③ ให้มีขนาดความหนา 2 มิลลิเมตร กว้าง 28 ± 2 มิลลิเมตร ยาว 50 ± 2 มิลลิเมตรตามที่แสดงในรูป 3.10



รูปที่ 3.10 ชิ้นงานหลังการตัด

2. ชิ้นงานที่ผ่านการตัดด้วยเลื่อยมือถูกลมและขัดด้วยกระดาษทรายสายพานเบอร์ 80 ทั้ง 4 ด้านที่ผ่านการตัด เพื่อทำการลบรอยหยาบที่เกิดจากการตัดด้วยเลื่อยมือ

3. ชิ้นงานที่ผ่านการขัดด้วยกระดาษทรายสายพานถูกขัดด้วยกระทรายน้ำอีกครั้ง โดยเริ่มตั้งแต่เบอร์ 100, 240, 320, 400, และ 600 ตามลำดับ ความเร็วรอบที่ใช้ในการขัดชิ้นงานอยู่ที่ 100 รอบต่อนาที การขัดชิ้นงานด้วยกระดาษทรายน้ำถูกแสดงในรูปที่ 3.11 ชิ้นงานที่ผ่านขัดด้วยกระดาษทรายน้ำเรียบร้อยแล้วจะถูกทำความสะอาดผิวด้วยเอทานอล



รูปที่ 3.11 การขัดผิวชิ้นงานด้วยกระดาษทราย

3.8.2 อุปกรณ์และสารละลายสำหรับการทดสอบการกักกรองแบบหลุม

อุปกรณ์และสารละลายที่ใช้ในการทดสอบการกักกรองแบบหลุมแบ่งออกเป็น 5 กลุ่ม ประกอบด้วย อุปกรณ์ในกลุ่มเครื่องแก้ว อุปกรณ์ในกลุ่มควบคุมอุณหภูมิ อุปกรณ์ในกลุ่มส่องขยาย สารละลายและตัวทำละลาย และอุปกรณ์อื่นๆ ที่เกี่ยวข้อง อุปกรณ์บางส่วนและสารละลายที่ใช้ในการทดสอบการกักกรองแบบหลุมถูกแสดงในรูปที่ 3.12 สำหรับรายละเอียดของอุปกรณ์ทั้งหมดมีดังนี้



รูปที่ 3.12 อุปกรณ์สำหรับการทดสอบการกักกรองแบบหลุม

3.8.2.1 อุปกรณ์เครื่องแก้ว

1. ปีกเกอร์ขนาดความจุ 1000 มิลลิลิตร จำนวน 7 ปีกเกอร์
2. กระจกนาฬิกาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 125 มิลลิเมตรจำนวน 7 แผ่น
3. กระบอกตวง ขนาดความจุ 50 มิลลิลิตร จำนวน 1 กระบอก
4. กรวยแก้ว ขนาดความกว้าง 75 มิลลิเมตร จำนวน 1 กระบอก
5. แท่งแก้ววางชิ้นงาน
6. แท่งแก้วกวนสารละลาย

3.8.2.2 อุปกรณ์สำหรับการควบคุมอุณหภูมิ

1. ตู้เย็นสำหรับควบคุมอุณหภูมิ
2. เทอร์โมมิเตอร์ชนิดปรอท ระดับการวัดอุณหภูมิ 0 – 100°C

3.8.2.3 อุปกรณ์สำหรับส่องขยาย

1. กล้องกำลังขยายชนิดสเตอริโอไมโครสโคป ตรา MEIJI
2. กล้องถ่ายรูปดิจิทัล ตรา NIKON รุ่น Coolpix 4500

3.8.2.4 สารละลายและตัวทำละลาย

1. น้ำกลั่น สำหรับการทดลองทางวิทยาศาสตร์
2. อะซีโตน ตรา JT Baker
3. สารละลาย Iron (III) Chloride Hexahydrate ตรา POCH ผลิตจากประเทศโปแลนด์ มีส่วนผสมทางเคมีตามใบรับรองแสดงในตารางที่ 3.8

ตารางที่ 3.8 ส่วนผสมทางเคมีของสารละลาย Iron (III) Chloride Hexahydrate

องค์ประกอบ	ปริมาณที่แสดงในใบรับรอง	ปริมาณที่กำหนด
Assay	99.9	97 – 102
Substances insoluble in HCL	<0.2	Max. 0.2
Phosphates (PO ₄)	<0.05	Max. 0.05
Sulphate (SO ₄)	<0.1	Max. 0.1
Arsenic (As)	<0.005	Max. 0.005
Zinc (Zn)	<0.05	Max. 0.05
Magnesium (Mg)	<0.05	Max. 0.05
Manganese (Mn)	<0.1	Max. 0.1
Copper (Cu)	<0.01	Max. 0.01
Lead (Pb)	<0.01	Max. 0.01
Potassium (K)	<0.05	Max. 0.05
Sodium (Na)	<0.1	Max. 0.1
Calcium (Ca)	<0.05	Max. 0.05
Iron (III)	<0.05	Max. 0.05

3.8.2.5 อุปกรณ์อื่นๆที่เกี่ยวข้อง

1. กระดาษกรอง No. 1 ตรา Whatman ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 110 มิลลิเมตร
2. แปร่งไนลอน

3. ไดรเป้าผม

4. เครื่อง Ultrasonic cleaner

3.8.3 การกำหนดตัวแปรในการทดสอบการกัดกร่อนแบบหลุม

ในการกำหนดตัวแปรสำหรับการทดสอบการกัดกร่อนแบบหลุม แบ่งประเภทตัวแปรออกเป็น ตัวแปรประเภทคงที่ และตัวแปรประเภทแปรผัน

3.8.3.1 ตัวแปรประเภทคงที่

ตัวแปรประเภทคงที่ เป็นตัวแปรที่มีลักษณะหรือเงื่อนไขเหมือนกันในทุกการทดลอง ตัวแปรดังกล่าวแสดงในตารางที่ 3.9

ตารางที่ 3.9 ตัวแปรคงที่สำหรับการทดสอบการกัดกร่อนแบบหลุม

ชนิดของตัวแปรคงที่	ค่าที่กำหนด	หน่วยการวัด
อุณหภูมิการทดสอบ	22 ± 2	องศาเซลเซียส
ขนาดความกว้างชิ้นงาน	25 – 50	มิลลิเมตร
ความละเอียดของเครื่องชั่ง	0.0001	กรัม
ปริมาณสารละลาย	600	มิลลิลิตร
ระยะเวลาการทดสอบ	72	ชั่วโมง

3.8.3.2 ตัวแปรประเภทแปรผัน

ตัวแปรประเภทแปรผัน เป็นตัวแปรที่มีเงื่อนไขหรือการปรับเปลี่ยนในแต่ละชุดการทดสอบ สำหรับตัวแปรประเภทผันแปรที่ใช้ในการทดสอบแสดงในตารางที่ 3.10

ตารางที่ 3.10 ตัวแปรประเภทผันแปรในการทดสอบการกัดกร่อนแบบหลุม

ตัวแปรประเภทแปรผัน	หน่วยการวัด
ชนิดแก๊สปกคลุมที่ใช้เชื่อมชิ้นงาน	%
ชนิดลวดเชื่อมเปลือย	—

3.8.3.3 สภาพการทดสอบ

สภาพที่ใช้ในการทดสอบต้องทำการควบคุมให้อยู่ในสภาพใกล้เคียงกันมากที่สุด สำหรับสภาพการทดสอบของรอยเชื่อมทั้ง 2 ชนิดแสดงในตารางที่ 3.11

ตารางที่ 3.11 สภาพการทดสอบการกัดกร่อนแบบหลุม

การทดสอบ ครั้งที่	อุณหภูมิที่บันทึกระหว่างการทดสอบ ER308 และ ER308LSi	ระยะเวลาทดสอบ (ชั่วโมง)	จำนวนชิ้นงาน ทดสอบ (ชิ้น)
1	$22 \pm 2^{\circ}\text{C}$	72	7
2	$22 \pm 2^{\circ}\text{C}$	72	7
3	$22 \pm 2^{\circ}\text{C}$	72	7
4	$22 \pm 2^{\circ}\text{C}$	72	7
5	$22 \pm 2^{\circ}\text{C}$	72	7

3.8.4 การดำเนินการทดสอบ

การทดสอบการกัดกร่อนแบบหลุม ดำเนินการตามมาตรฐาน ASTM G48-03 Standard Test Methods for Pitting and Crevice Corrosion Resistance of Stainless Steels and Related Alloys by Use of Ferric Chloride Solution –Method A: Ferric chloride pitting test [19] โดยมีขั้นตอนการทดสอบดังนี้

- นำชิ้นงานที่เตรียมในขั้นตอนที่ 3.5 มาชั่งน้ำหนัก โดยใช้เครื่องชั่งที่มีหน่วยทศนิยม 4 ตำแหน่ง บันทึกน้ำหนักชิ้นงานที่ได้ก่อนการทดสอบ
- ทำการละลาย $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ จำนวน 100 กรัม ในน้ำกลั่นปริมาณ 900 มิลลิลิตร โดยใช้แท่งแก้วกวนให้ $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ละลายในน้ำกลั่นจนหมด จากนั้นใช้กระดาษกรอง กรองสารละลาย $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ เพื่อดักกากตะกอนที่เกิดขึ้น
- เทสารละลาย $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ที่ได้จากการกรองจำนวน 600 มิลลิลิตรลงในบีกเกอร์ที่มีขนาดความจุ 1000 มิลลิลิตร จากนั้นนำบีกเกอร์ที่บรรจุสารละลาย $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ใส่ในตู้เย็นที่มีการควบคุมอุณหภูมิระหว่าง $22 \pm 2^{\circ}\text{C}$ แล้วปล่อยให้สารละลายมีอุณหภูมิเท่ากับอุณหภูมิในตู้เย็น โดยการวัดด้วยเทอร์โมมิเตอร์
- นำชิ้นงานที่ผ่านการชั่งน้ำหนักวางลงบนแท่งแก้ววางชิ้นงาน แล้วจุ่มลงในบีกเกอร์ที่บรรจุสารละลาย $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ที่อยู่ในตู้เย็น

5. ปิดปากบีกเกอร์ด้วยกระจกนาฬิกา ปล่อยให้ชิ้นงานแช่ในสารละลาย $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ เป็นเวลา 72 ชั่วโมง โดยในระหว่างการทดสอบต้องรักษาระดับอุณหภูมิให้อยู่ในเกณฑ์ที่กำหนด
6. นำชิ้นงานขึ้นจากสารละลายเมื่อครบตามระยะเวลาที่กำหนด เปิดน้ำให้ไหลผ่านชิ้นงานแล้วใช้แปรงในลอนขัดผิวหน้าชิ้นงานเพื่อขจัดเศษตะกอนจากกระบวนการกัดกร่อนและนำชิ้นงานไปทำความสะอาดด้วยเครื่อง Ultrasonic cleaner โดยแช่ชิ้นงานไว้เป็นเวลา 10 นาที
7. จุ่มชิ้นงานที่ผ่านการล้างด้วยน้ำลงในบีกเกอร์ที่บรรจุอะซิโตนเป็นเวลา 1 นาที จากนั้นทำการเป่าแห้งชิ้นงานด้วยไดร์เป่าผม
8. นำชิ้นงานที่ผ่านการเป่าแห้งไปชั่งน้ำหนักด้วยเครื่องชั่งที่มีหน่วยทศนิยม 4 ตำแหน่ง บันทึกน้ำหนักชิ้นงานที่ได้หลังการทดสอบ
9. ตรวจสอบและถ่ายภาพผิวรอยเชื่อมด้วยกล้องจุลทรรศน์ชนิดสเตอริโอที่กำลังขยาย 30 เท่า

3.8.5 การวัดอัตราการกัดกร่อนตามมาตรฐาน ASTM G1-03

การหามวลของชิ้นงานที่หายไปในช่วงการทดสอบการกัดกร่อน สามารถทำได้ด้วยการอาศัยสมการดังต่อไปนี้

$$\text{อัตราการกัดกร่อน} = (K \times W) / (A \times T \times D) \quad (3.1)$$

เมื่อ

K	คือ ค่าคงที่
T	คือ เวลาที่ปล่อยให้ชิ้นงานสัมผัสสาร
A	คือ พื้นที่ (ตารางเซนติเมตร)
W	คือ มวลที่สูญเสีย (กรัม)
D	คือ ความหนาแน่น (กรัม / ตารางเซนติเมตร), AISI 304 = 7.94 g/cm^2

อัตราการกัดกร่อนสามารถหาได้ในหลากหลายหน่วย ทั้งนี้ขึ้นกับค่า K ที่นำมาใช้ โดยมีค่าแสดงตามตารางที่ 3.12

ตารางที่ 3.12 ค่าคงที่ K สำหรับคำนวณอัตราการกัดกร่อน [19]

หน่วยอัตราการกัดกร่อนที่ต้องการ	ค่าคงที่ K ในสมการ
Mils per year (mpy)	3.45×10^6
Inches per year (ipy)	3.45×10^3
Inches per month (ipm)	2.87×10^2
Millimetres per year (mm/y)	8.76×10^4
Micrometres per year (um/y)	8.76×10^7
Picometres per year (pm/y)	2.78×10^6
Grams per square meter per hour ($\text{g/m}^2 \cdot \text{h}$)	$1.00 \times 10^4 \times D$
Milligrams per square decimeter per day (mdd)	$2.40 \times 10^6 \times D$
Micrograms per square meter per second ($\mu\text{m/m}^2 \cdot \text{s}$)	$2.78 \times 10^6 \times D$

3.9 การทดสอบการกัดกร่อนด้วยเคมีไฟฟ้า

ขั้นตอนการทดสอบการกัดกร่อนด้วยวิธีทางเคมีไฟฟ้ามีวิธีการดังนี้

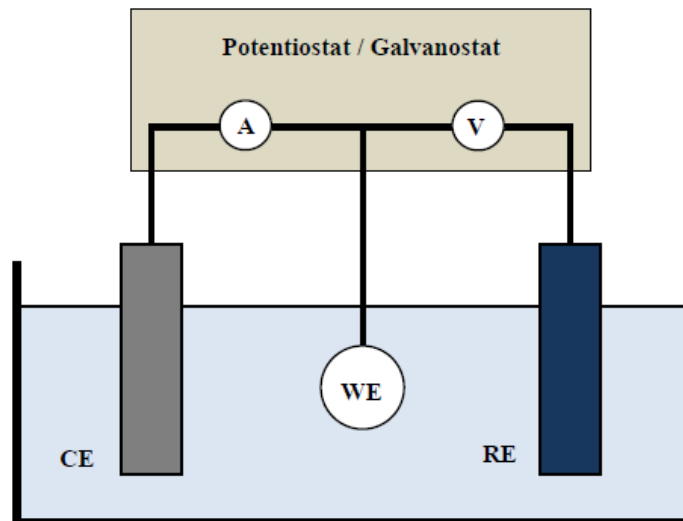
3.9.1 การเตรียมตัวอย่างทดสอบ

เตรียมตัวอย่างรอยเชื่อมทั้งสองชนิดในแต่ละสภาวะแก่สเปกคลุมให้มีขนาด 10 x10 มิลลิเมตร จากนั้น ขจัดคราบออกไซด์ที่บริเวณผิวรอยเชื่อมออกจนหมด และขัดผิวหน้าด้านข้างด้วยกระดาษเบอร์ 80, 230, 320, 400 และ 600 ตามลำดับ นำชิ้นงานทิ้งไว้ในบรรยากาศปกติเป็นระยะเวลาไม่น้อยกว่า 24 ชั่วโมง

3.9.2 การทดสอบอัตราการกัดกร่อนด้วยเคมีไฟฟ้า

ทำความสะอาดชิ้นงานที่ใช้ในการทดสอบด้วยเอทานอลและอะซิโตน ตามมาตรฐาน ASTM G5 แช่ชิ้นงานทดสอบในสารละลาย 3.5%NaCl ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส และเชื่อมต่อชิ้นงานเข้ากับชุดทดสอบตามที่แสดงในรูปที่ 3.13 จากนั้นป้อนศักย์ไฟฟ้าเข้าสู่ชิ้นงานทดสอบ และวัดค่าความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นด้วยชุดคอมพิวเตอร์ควบคุมกำลัง (PGSTAT 302N) และชุดอุปกรณ์ทดสอบการกัดกร่อน ซึ่งประกอบด้วยอิเล็กโทรด 3 ชนิดได้แก่ 1. อิเล็กโทรดอ้างอิง (Reference Electrode or RE): Ag/AgCl (3M KCl), 2. อิเล็กโทรดกระแส (Counter Electrode or CE): แพลตินัม และ 3. อิเล็กโทรดตัวอย่างทดสอบ (Working Electrode or WE): ชิ้นงานทดสอบ

ในระหว่างการทดสอบศักย์ไฟฟ้าของชิ้นงานทดสอบถูกวัดเปรียบเทียบกับอิเล็กโทรดอ้างอิง และการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าของชิ้นงานทดสอบถูกเปรียบเทียบกับอิเล็กโทรดกระแส ค่าศักย์ไฟฟ้าและค่ากระแสไฟฟ้าที่ได้จากการทดสอบ ถูกนำมาประมวลผลเพื่อสร้างความสัมพันธ์ระหว่างค่าศักย์ไฟฟ้าและค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า (Current Density) ในรูปแบบเส้นโค้งโพลาไรเซชัน (Polarization Curve) ซึ่งสามารถนำมาใช้คำนวณหาอัตราการกัดกร่อนของชิ้นงานทดสอบ



รูปที่ 3.13 แผนภาพแสดงการเชื่อมต่อของอิเล็กโทรดกับระบบวัดการกัดกร่อน

ลักษณะของเส้นโค้งโพลาไรเซชันที่ได้จากการทดสอบด้วยเทคนิค Tafel สามารถนำมาแปลผลสมบัติความต้านทานการกัดกร่อนได้ดังนี้

1. ศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อน (Corrosion Potential, E_{corr}) เป็นค่าศักย์ไฟฟ้าที่อัตราการเกิดปฏิกิริยาคาโทดิกและอโนดิกอยู่ในสถานะสมดุล โดยโลหะที่มีค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนต่ำจะไวต่อการกัดกร่อนมากกว่าชิ้นงานที่มีค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนสูง
2. ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อน (Corrosion Current Density, i_{corr}) เป็นค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า ณ จุดศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อน โดยค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อนแสดงถึงการกัดกร่อนแบบทั่วผิวหน้า (Uniform corrosion) และสามารถนำมาคำนวณหาอัตราการกัดกร่อนแบบทั่วผิวหน้าต่อปีของชิ้นงานได้จากสมการ (3.2)

$$\text{Corrosion rate} = \frac{I_{\text{corr}} \times M \times k}{A \times n \times \rho} \quad (3.2)$$

เมื่อ

I_{corr}	คือ ค่ากระแสไฟฟ้าการกัดกร่อน (corrosion current, μA)
M	คือ น้ำหนักอะตอม (g/mole)
A	คือ พื้นที่ทดสอบการกัดกร่อน (cm^2)
ρ	คือ ความหนาแน่นของชิ้นงานทดสอบ (g/cm^3)
n	คือ จำนวนอิเล็กตรอนที่สูญเสียเมื่อโลหะเกิดการกัดกร่อน
k	คือ ค่าคงที่ (Metric and Time Conversion Factor)
	= 0.129 สำหรับการคำนวณในหน่วย mpy
	= 0.00327 สำหรับการคำนวณในหน่วย mm/yr

3.10 การวัดปริมาณเฟอร์ไรต์ในรอยเชื่อม

ขั้นตอนการวัดปริมาณเฟอร์ไรต์ในรอยเชื่อม เพื่อทำการเปรียบเทียบผลที่ได้จากการทดสอบการกัดกร่อนแบบหลุมในรอยเชื่อม โดยใช้วิธีการวิเคราะห์จากส่วนผสมทางเคมีของรอยเชื่อม ด้วยการนำค่าส่วนผสมทางเคมีในรอยเชื่อมที่ได้ในขั้นตอนที่ 3.7 ไปวิเคราะห์หาปริมาณเคลด้าเฟอร์ไรต์ด้วยการแทนค่าในสมการโครเมียมเทียบเท่าและนิกเกิลเทียบเท่าเพื่อกำหนดจุดในไดอะแกรม WRC-1992 สำหรับสมการโครเมียมเทียบเท่าและนิกเกิลเทียบเท่าของ WRC-1992 เป็นดังนี้

$$\text{Cr equivalent} = \% \text{Cr} + \% \text{Mo} + (0.7 \times \% \text{Nb (Cb)}) \quad (3.3)$$

$$\text{Ni equivalent} = \% \text{Ni} + (35 \times \% \text{C}) + (20 \times \% \text{N}) + (0.25 \times \% \text{Cu}) \quad (3.4)$$

3.11 การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาครอยเชื่อม

การเตรียมชิ้นงานสำหรับการตรวจสอบโครงสร้างรอยเชื่อมจุลภาค เป็นการตรวจสอบผลของโครงสร้างที่เกิดขึ้นเกี่ยวกับการกัดกร่อนแบบหลุมและปริมาณเฟอร์ไรต์ในรอยเชื่อม ขั้นตอนในการเตรียมชิ้นงานสำหรับการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคในรอยเชื่อมมีรายละเอียดดังนี้

3.11.1 การขัดผิวชิ้นงาน

ขั้นตอนการขัดผิวชิ้นงานประกอบด้วย

1. นำชิ้นงานบริเวณ ② ที่เตรียมในรูปที่ 3.9 มาขัดด้วยกระดาษทรายสายพานเบอร์ 80 ทั้งสองด้าน จากนั้นนำมาขัดด้วยกระดาษทรายตั้งแต่เบอร์ 100, 240, 320, 400, 600, 800, 1000, 1500 และ 2000 ตามลำดับ
2. การขัดผิวหน้าชิ้นงานต้องทำการสลับทิศทางการขัดให้เป็นแนวตารางกับแนวเดิม ตามเบอร์ของกระดาษทรายที่ใช้ นอกจากนี้ในระหว่างการขัดต้องทำการเปิดน้ำเพื่อเป็นการขัดเศษผงเหล็กหรือเศษกระดาษทรายที่หลุดออกมาในระหว่างการขัดด้วย

3.11.2 การขัดผิวละเอียดด้วยผงขัดอลูมินา

เมื่อเสร็จสิ้นการขัดด้วยกระดาษทราย ขั้นตอนถัดไปเป็นการขัดโดยใช้ผ้าสักกะหลาด และมีผงอลูมินาผสมน้ำเป็นตัวช่วยในการลบรอยที่เกิดจากการขัดด้วยกระดาษทราย โดยขนาดผงขัดอลูมินาที่ใช้มีขนาดความละเอียดตั้งแต่ 0.05 – 0.3 ไมโครเมตร สภาพผิวที่ต้องการในขั้นตอนการขัดด้วยผงอลูมินาคือ สภาพผิวที่มันวาวเหมือนกระจก โดยไม่ให้เหลือรอยขัดกระดาษทรายอยู่ที่ผิวหน้าชิ้นงาน

3.11.3 การกัดกรด

ชิ้นงานที่ผ่านการขัดผิวด้วยผงอลูมินามาแล้ว ถูกนำมากัดกรดเพื่อทำการตรวจสอบโครงสร้าง เมื่อชิ้นงานที่ผ่านการกัดกรดเสร็จสิ้น ต้องนำไปล้างด้วยเอทานอล และเป่าแห้งด้วยลมร้อน สำหรับกรดที่ใช้ในการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค ถูกอ้างอิงตามมาตรฐานการทดสอบของ ASTM E407-07 ซึ่งรายละเอียดของส่วนผสมกรดที่ใช้ถูกแสดงในตารางที่ 3.13 สำหรับการย้อมสีโครงสร้างชิ้นงานให้นำชิ้นงานที่ผ่านการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคแล้ว มาขัดผิวหน้าใหม่ตามขั้นตอน 3.10.1 จากนั้นใช้สารละลาย Modified Morakami's reagent กัดที่ผิวชิ้นงาน

ตารางที่ 3.13 ส่วนผสมกรดสำหรับตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค [17]

โครงสร้างที่ตรวจสอบ	ส่วนผสมกรด	มาตรฐานอ้างอิง
จุลภาค	10 mL HNO ₃ + 30 mL HCL + 30 mL glycerol	ASTM E407-07

3.11.4 การถ่ายภาพโครงสร้าง

ชิ้นงานสำหรับตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคและโครงสร้างที่ผ่านการเชื่อมสัจะใช้กำลังขยายในการถ่ายภาพโครงสร้างจุลภาคอยู่ที่ประมาณ 200 และ 500 เท่า ถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์สำหรับงานทางโลหะวิทยา ตรา Carl Zeiss รุ่น Axioscope II โปรแกรมที่ใช้ในการบันทึกภาพคือ AxioVision Rel. 4.8.2 อุปกรณ์ในการถ่ายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์แสดงในรูปที่ 3.14 สำหรับภาพถ่ายที่กำลังขยายประมาณ 3500 เท่า ทำด้วยเครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM) พร้อมทั้งการวิเคราะห์ปริมาณธาตุผสมในโครงสร้างเฟอร์ไรต์และออสเทนไนต์ด้วยเทคนิค EDS



รูปที่ 3.14 อุปกรณ์สำหรับการถ่ายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์

3.12 การตรวจสอบความแข็งแรงเชื่อม

ขั้นตอนการเตรียมชิ้นงานสำหรับการตรวจสอบความแข็งแรงเชื่อม เป็นการนำชิ้นงานบริเวณ ⑥ ที่เตรียมในรูปที่ 3.9 มาวัดความแข็งแรงบริเวณชิ้นงาน บริเวณกระแทกร้อน และรอยเชื่อม โดยมีขั้นตอนดังนี้

1. นำชิ้นงานมาขัดด้วยกระดาษทรายสายพานเบอร์ 80 ทั้งสองด้าน จากนั้นนำมาขัดด้วยกระดาษทรายตั้งแต่เบอร์ 100, 240, 320, 400, 600, 800, 1000, 1500 และ 2000 ตามลำดับ
2. การจัดผิวหน้าชิ้นงานต้องทำการสลับทิศทางการขัดให้เป็นแนวตารางกับแนวเดิม ตามเบอร์ของกระดาษทรายที่ใช้ นอกจากนี้ในระหว่างการขัดต้องทำการเปิดน้ำเพื่อเป็นการขัดเศษผงเหล็กหรือเศษกระดาษทรายที่หลุดออกมาในระหว่างการขัด
3. ขั้นตอนถัดไปเป็นการขัดละเอียดโดยใช้ผ้าสักกะหลาด และมีผงอลูมินาผสมน้ำเป็นตัวช่วยในการลบรอยที่เกิดจากการขัดด้วยกระดาษทราย โดยขนาดผงขัดอลูมินาที่ใช้มีขนาดความ

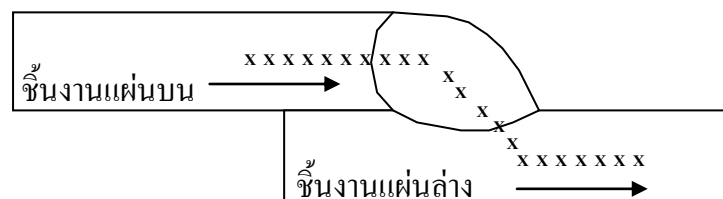
ละเอียดตั้งแต่ 0.05 – 0.3 ไมโครเมตร สภาพผิวที่ต้องการในขั้นตอนการขัดด้วยผงอลูมินา คือ สภาพผิวที่มันวาวเหมือนกระจก

4. ชิ้นงานที่ผ่านการขัดผิวด้วยผงอลูมินามาแล้ว ถูกลำบากัดกรดเพื่อทำการทดสอบโครงสร้างโดยใช้วิธีการกัดกรดแบบตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค

5. นำชิ้นงานมาวัดความแข็ง โดยใช้เครื่องวัดความแข็งไมโครวิกเกอร์ตรา Akashi รุ่น MVK-G2 โดยน้ำหนักที่ใช้กดเท่ากับ 1 กิโลกรัม รูปที่ 3.15 แสดงเครื่องวัดความแข็งแบบไมโครวิกเกอร์ กำหนดจุดที่วัดความแข็งแต่ละจุดห่างกัน 0.5 มิลลิเมตร ทิศทางการวัดความแข็งแสดงในรูปที่ 3.16



รูปที่ 3.15 เครื่องวัดความแข็งแบบไมโครวิกเกอร์



รูปที่ 3.16 ทิศทางการวัดความแข็ง