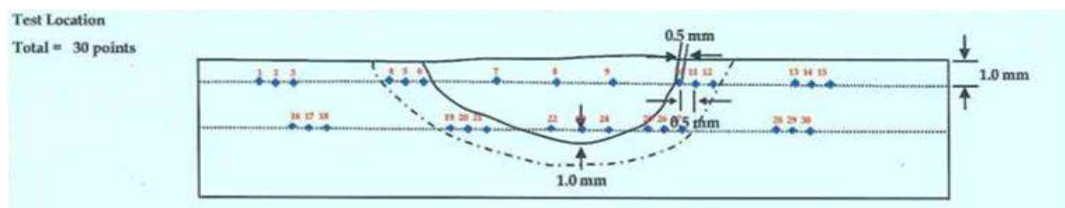


บทที่ 4 ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง

เพื่อศึกษาถึงอิทธิพลของกรรมวิธีทางความร้อน (Stabilization heat treatment) ที่ส่งผลต่อโครงสร้างจุลภาค ความแข็ง และความต้านทานต่อการกัดกร่อนตามขอบเกรน ของสแตนเลส AISI 321 หลังจากวัสดุผ่านกระบวนการเชื่อมทิกแบบไม่เติมลวด (Autogenous) ด้วยกระแสเชื่อมที่ 175 แอมแปร์ และความร้อนจากการปรับปรุงโครงสร้างด้วยกระบวนการ (Stabilized Heat Treatment) ที่อุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียส เป็นเวลานาน 1 ชั่วโมง จากนั้นจึงนำชิ้นงานไปจำลองสภาวะการใช้งานต่อด้วยกรรมวิธีการบ่ม (Aging) โดยการให้ความร้อนกับชิ้นงานที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส เป็นเวลานาน 24 ชั่วโมง ผลการทดลองคุณสมบัติทางกลของชิ้นทดสอบแสดงผลในรูปแบบค่าเฉลี่ยของการวัดค่าความแข็ง (Vickers Hardness) ตามมาตรฐาน ASTM E92-82 ผลการทดลองในด้านความสามารถต่อการต้านทานการกัดกร่อนตามขอบเกรนจะแสดงผลออกมาในลักษณะของการวัดปริมาณ (Sensitization of austenitic stainless steel) ด้วยเทคนิคทางไฟฟ้า DLEPR ตามมาตรฐาน JIS G 0580 และผลการทดลองการกัดกร่อนตามขอบเกรน (Intergranular Corrosion) ที่ส่งผลต่อโครงสร้างจุลภาค ตามมาตรฐาน ASTM A 262 Practice-A ในบริเวณเนื้อวัสดุพื้นฐาน (Base Metal) บริเวณกระพวร้อน (Heat Affected Zone) และบริเวณเนื้อเชื่อม (Weldment) แสดงผลและวิเคราะห์ผลได้ดังนี้

4.1 ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลองถึงคุณสมบัติทางกลโดยการวัดค่าความแข็ง Vickers Hardness

กำหนดจุดเพื่อวัดค่าความแข็งในส่วนต่างๆของชิ้นงาน ตามรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 กำหนดจุดเพื่อวัดค่าความแข็งในส่วนต่างๆของชิ้นงาน

4.1.1 ผลการทดลองวัดค่าความแข็งในบริเวณเนื้อเชื่อม (Weldment)

ให้ค่าความแข็งสูงสุดที่ 161.0 HV ให้ค่าต่ำสุดที่ 150.3 HV และค่าเฉลี่ยที่ 155.68 HV ตามตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 วัดค่าความแข็งในบริเวณเนื้อเชื่อม (Weldment)

ลำดับที่	ตำแหน่งจุดกด	ค่าความแข็งในบริเวณเนื้อเชื่อม (HV)
1	Weld Point 1	151.2
2	Weld Point 2	150.3
3	Weld Point 3	155.2
4	Weld Point 4	156.7
5	Weld Point 5	159.7
6	Weld Point 6	161
Average		155.68

4.1.2 ผลการทดลองวัดค่าความแข็งในบริเวณวัสดุพื้นฐาน (Base Metal)

ให้ค่าความแข็งสูงสุดที่ 168.4 HV ให้ค่าต่ำสุดที่ 136.8 HV และค่าเฉลี่ยที่ 154.96 HV ตามตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 วัดค่าความแข็งในบริเวณวัสดุพื้นฐาน (Base Metal)

ลำดับที่	ตำแหน่งจุดกด	ค่าความแข็งในบริเวณเนื้อวัสดุพื้นฐาน (HV)
1	Base Metal Point 1	150.3
2	Base Metal Point 2	149.8
3	Base Metal Point 3	150
4	Base Metal Point 13	168.4
5	Base Metal Point 14	167.8
6	Base Metal Point 15	167.1
7	Base Metal Point 16	136.8
8	Base Metal Point 17	137.8
9	Base Metal Point 18	139.9
10	Base Metal Point 28	161.2
11	Base Metal Point 29	165.9
12	Base Metal Point 30	164.5
Average		154.96

4.1.3 ผลการทดลองวัดค่าความแข็งในบริเวณกระทบบร้อน (Heat Affected Zone)

ให้ค่าความแข็งสูงสุดที่ 164.9 HV ให้ค่าต่ำสุดที่ 144.8 HV และค่าเฉลี่ยที่ 154.79 HV ตามตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 วัดค่าความแข็งในบริเวณกระทบบร้อน (Heat Affected Zone)

ลำดับที่	ตำแหน่งจุดกด	ค่าความแข็งในบริเวณกระทบบร้อน (HV)
1	HAZ Point 4	153.3
2	HAZ Point 5	147.5
3	HAZ Point 6	144.8
4	HAZ Point 10	164.9
5	HAZ Point 11	164.8
6	HAZ Point 12	163.7
7	HAZ Point 19	148.4
8	HAZ Point 20	149.6
9	HAZ Point 21	154.7
10	HAZ Point 25	152.2
11	HAZ Point 26	156.1
12	HAZ Point 27	157.5
Average		154.79

วิเคราะห์ผลการทดลองในด้านค่าความแข็ง ค่าเฉลี่ยบริเวณวัสดุพื้นฐาน (Base Metal) วัดได้ที่ 154.96 HV ค่าเฉลี่ยบริเวณกระทบบร้อน (Heat Affected Zone) วัดได้ที่ 154.79 HV และค่าเฉลี่ยบริเวณเนื้อเชื่อม (Weldment) วัดได้ที่ 155.68 HV จะเห็นได้ว่าวัสดุเกรด AISI A321 ที่ผ่านกระบวนการปรับปรุงโครงสร้างด้วยกรรมวิธีทางความร้อน (Stabilized Heat Treatment) ค่าความแข็งที่วัดค่าได้มากที่สุดเกิดขึ้นที่บริเวณเนื้อเชื่อม (Base Metal) อันเป็นผลมาจากการเย็นตัวลงอย่างรวดเร็วในกระบวนการเชื่อมทำให้ โครงสร้างจุลภาคของวัสดุมีเกรนที่ละเอียดจึงทำให้มีความแข็งมากกว่าในจุดอื่น ส่วนที่มีค่าความแข็งน้อยที่สุดเกิดขึ้นที่บริเวณกระทบบร้อน (Heat Affected Zone) อันเป็นผลมาจากความร้อนจากบ่อหลอมละลายถ่ายโอนมาสะสมที่บริเวณกระทบบร้อนจำนวนมากและทำให้อัตราการเย็นตัวต่ำ โครงสร้างจุลภาคที่ได้จึงมีเกรนหยาบส่งผลให้มีค่าความแข็งที่ต่ำกว่าบริเวณเนื้อเชื่อม (Weldment) และวัสดุพื้นฐาน (Base Metal)

4.2 ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการหาปริมาณ Sensitization of austenitic stainless steel ด้วยเทคนิคทางไฟฟ้า DLEPR ตามมาตรฐาน JIS G 0580

ตามมาตรฐาน ASTM A262 ได้กำหนดความสัมพันธ์ระดับการเกิดกัดกร่อนจากการวัดค่าเฉลี่ยของสัดส่วนระหว่างกระแสฟุ้งย้อนกลับ Reverse (Ir) ต่อฟุ้ง Anode (Ia) ไว้ดังรูปแบบต่อไปนี้

1. รูปแบบ (Step) คือ Ir/Ia น้อยกว่า 0.001 โดยตามมาตรฐานกำหนดว่า ไม่เกิดการกัดกร่อน
2. รูปแบบ (Dual) คือ Ir/Ia มากกว่า 0.001 แต่ไม่เกิน 0.05 โดยตามมาตรฐานกำหนดว่า เกิดการกัดกร่อนเพียงบางส่วน
3. รูปแบบ (Ditch) คือ Ir/Ia มากกว่า 0.05 โดยตามมาตรฐานกำหนดว่า เกิดการกัดกร่อนอย่างสมบูรณ์แบบ (Completely Sensitized)

4.2.1 ความต่างสัดส่วนของกระแสไฟฟ้าที่ป้อนเข้าไปในวัสดุบริเวณเนื้อเชื่อม

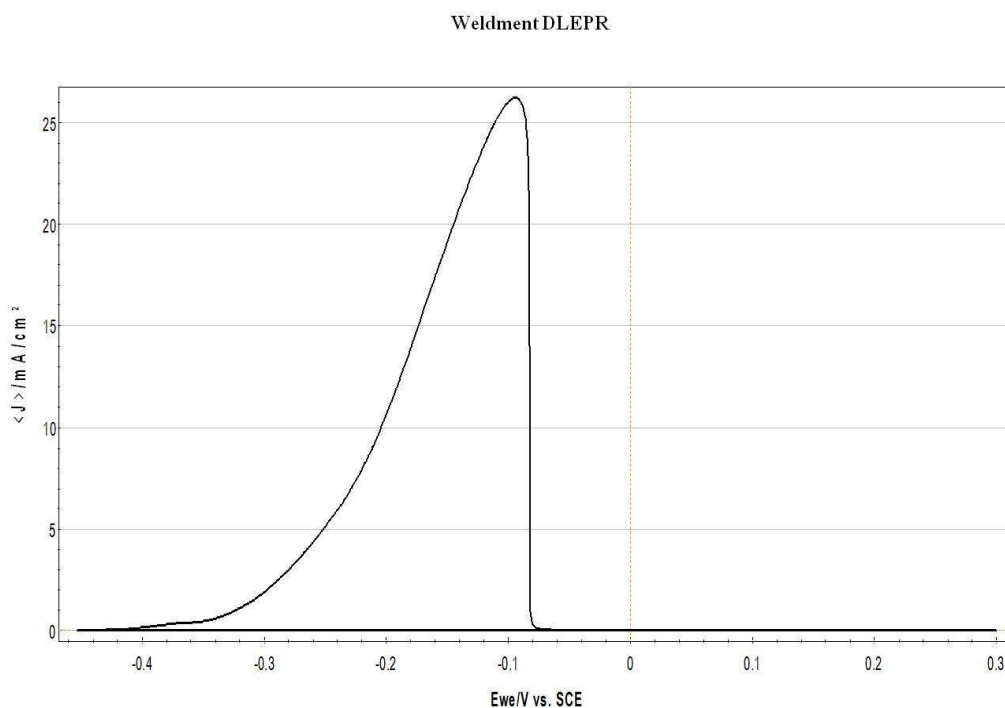
(Weldment)

ในแต่ละครั้งที่ทำการทดสอบคิดเป็นสัดส่วนของกระแสฟุ้งย้อนกลับ Reverse (Ir) ต่อฟุ้ง Anode (Ia) จากนั้นนำมาคิดเป็นเฉลี่ยอีกครั้งตามตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 ปริมาณ Sensitization of austenitic stainless steel บริเวณเนื้อเชื่อม (Weldment)

Weldment	Reverse Scan (Ir)	Anode Scan (Ia)	Ir/Ia
1	0.00892	18	0.000496
2	0.0108	21.5	0.000502
3	0.0193	26.2	0.000737
Average	0.013007	21.9	0.000594

ผลจากการทดสอบของเครื่อง Potentiostat (VMP) โดยใช้โปรแกรม EC-Lab ด้วยเทคนิค Cyclic Potentiodynamic Polarization จากการทดลองทั้ง 3 ครั้ง ในบริเวณบริเวณเนื้อเชื่อม (Weldment) นำค่าที่ได้มาแสดงถึงความสัมพันธ์ค่าเฉลี่ยของสัดส่วนระหว่างกระแสฟุ้งย้อนกลับ Reverse (Ir) ต่อฟุ้ง Anode (Ia) ตามรูปที่ 4.2 ผลการวิเคราะห์ค่าเฉลี่ยที่ได้คือ 0.000594 จัดอยู่ในรูปแบบ (Step Structure) แสดงให้เห็นว่าไม่เกิดการกัดกร่อนตามขอบเกรนที่สอดคล้องกับการจำแนกโครงสร้างจุลภาค สอดคล้องกับมาตรฐาน ASTM A262



รูปที่ 4.2 ผลการทดสอบ DLEPR ในบริเวณเนื้อเชื่อม (Weldment) ค่าเฉลี่ยของกระแส

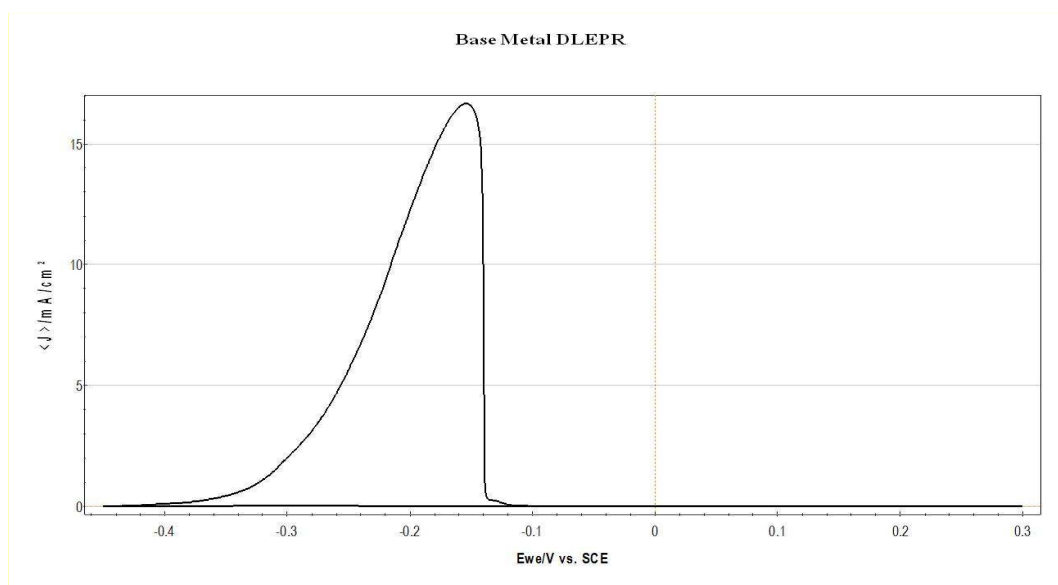
4.2.2 ความต่างสัดส่วนของกระแสไฟฟ้าที่ป้อนเข้าไปในวัสดุบริเวณวัสดุพื้นฐาน (Base Metal)

ในแต่ละครั้งที่ทำการทดสอบคิดเป็นสัดส่วนของกระแสฝั่งย้อนกลับ Reverse (Ir) ต่อฝั่ง Anode (Ia) จากนั้นนำมาคิดเป็นเฉลี่ยอีกครั้งตามตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.5 ปริมาณ Sensitization of austenitic stainless steel บริเวณวัสดุพื้นฐาน (Base metal)

Base Metal	Reverse Scan (Ir)	Anode Scan (Ia)	Ir/Ia
1	0.022	15.3	0.001438
2	0.0288	16.7	0.001725
3	0.055	23.8	0.002311
Average	0.035267	18.6	0.001896

ผลจากการทดสอบของเครื่อง Potentiostat (VMP) โดยใช้โปรแกรม EC-Lab ด้วยเทคนิค Cyclic Potentiodynamic Polarization จากการทดลองทั้ง 3 ครั้ง ในบริเวณวัสดุพื้นฐาน (Base Metal) นำค่าที่ได้มาแสดงถึงความสัมพันธ์ค่าเฉลี่ยของสัดส่วนระหว่างกระแสผิวย้อนกลับ Reverse (Ir) ต่อฝั่ง Anode (Ia) ตามรูปที่ 4.3 ผลการวิเคราะห์ค่าเฉลี่ยที่ได้คือ 0.001896 จัดอยู่ในรูปแบบ (Step Structure) หากจะค่อนข้างเปลี่ยนแปลงไปเป็นรูปแบบ (Dual Structure) เล็กน้อย แสดงให้เห็นว่าไม่เกิดการกัดกร่อนตามขอบเกรนสอดคล้องกับการจำแนกโครงสร้างจุลภาคตามมาตรฐาน ASTM A262



รูปที่ 4.3 ผลการทดสอบ DLEPR ในบริเวณ (Base Metal) ค่าเฉลี่ยของของกระแส

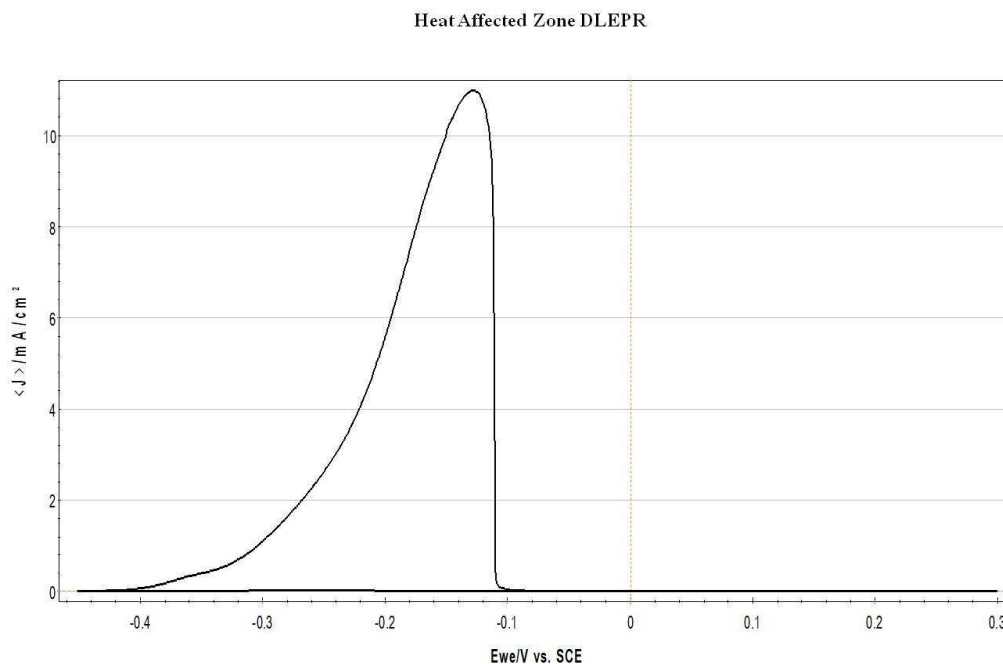
4.2.3 ความต่างสัดส่วนของกระแสไฟฟ้าที่ป้อนเข้าไปในวัสดุในบริเวณกระทบร้อน (Heat Affected Zone)

ในแต่ละครั้งที่ทำการทดสอบคิดเป็นสัดส่วนของกระแสผิวย้อนกลับ Reverse (Ir) ต่อฝั่ง Anode (Ia) จากนั้นนำมาคิดเป็นเฉลี่ยอีกครั้งตามตารางที่ 4.6

ตารางที่ 4.6 ปริมาณ Sensitization of austenitic stainless steel บริเวณกระทบร้อน (Heat Affected Zone)

Heat Affected Zone	Reverse Scan (Ir)	Anode Scan (Ia)	Ir/Ia
1	0.00838	5.19	0.001615
2	0.0122	7.72	0.00158
3	0.0203	11	0.001845
Average	0.013627	7.97	0.00171

ผลจากการทดสอบของเครื่อง Potentiostat (VMP) โดยใช้โปรแกรม EC-Lab ด้วยเทคนิค Cyclic Potentiodynamic Polarization จากการทดลองทั้ง 3 ครั้ง ในบริเวณกระทบร้อน (Heat Affected Zone) นำค่าที่ได้มาแสดงถึงความสัมพันธ์ค่าเฉลี่ยของสัดส่วนระหว่างกระแสฟุ้งย้อนกลับ Reverse (Ir) ต่อ ฟุ้ง Anode (Ia) ตามรูปที่ 4.4 ผลการวิเคราะห์ค่าเฉลี่ยที่ได้คือ 0.00171 จัดอยู่ในรูปแบบ (Step Structure) หากจะค่อนข้างเปลี่ยนแปลงไปเป็นรูปแบบ (Dual Structure) เล็กน้อย แสดงให้เห็นว่าไม่เกิดการกัดกร่อนตามขอบเกรนสอดคล้องกับการจำแนกโครงสร้างจุลภาคตามมาตรฐาน ASTM A262 เช่นเดียวกับบริเวณเนื้อวัสดุพื้นฐาน (Base Metal)

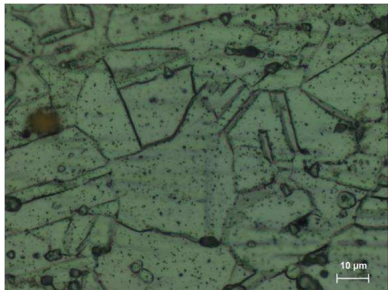
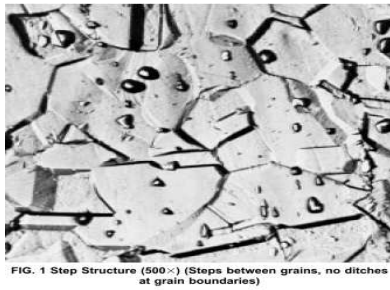
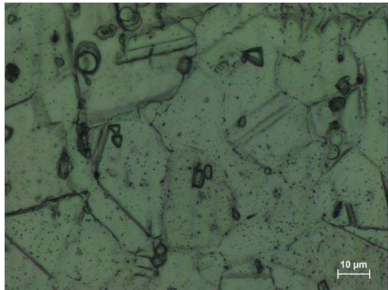
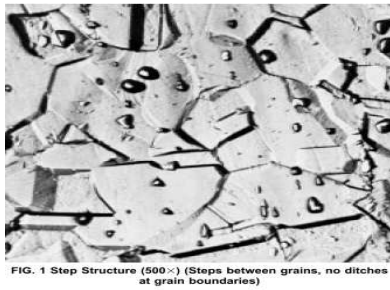
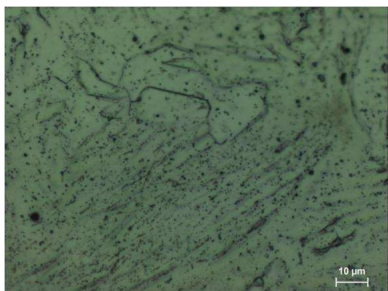
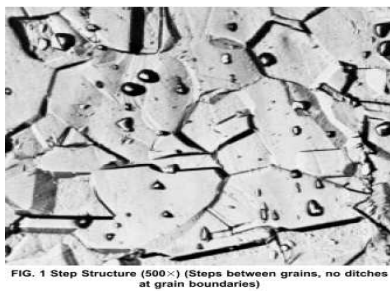


รูปที่ 4.4 ผลการทดสอบ DLEPR ในบริเวณกระทบร้อน (HAZ) ค่าเฉลี่ยของของกระแส

ผลการทดลองที่ได้จากการเปรียบเทียบกับค่าสัดส่วนของกระแส Ir/Ia ในบริเวณเนื้อเชื่อม (Weldment) โดยเฉลี่ยเท่ากับ 0.000594 ในรูปแบบ (Step Structure) และบริเวณกระทบร้อน (Heat affected Zone) โดยเฉลี่ยเท่ากับ 0.00171 ในรูปแบบ (Step Structure) ก่อนไปทาง (Dual Structure) บ้างเล็กน้อย และ เนื้อวัสดุพื้นฐาน (Base Metal) โดยเฉลี่ยเท่ากับ 0.001896 ในรูปแบบ (Step Structure) ก่อนไปทาง (Dual Structure) บ้างเล็กน้อยเช่นเดียวกัน เมื่อพิจารณาจากผลการทดสอบด้วย กระบวนการ DLEPR เปรียบเทียบทั้งสามบริเวณของวัสดุ AISI A321 พบว่าบริเวณที่มีค่าสัดส่วนของ กระแส Ir/Ia มีปริมาณมากที่สุดภายในบริเวณวัสดุพื้นฐาน Base Metal ซึ่งสอดคล้องกับการจำแนก โครงสร้างจุลภาคการกัดกร่อนในรูปแบบ (step Structure) ที่ก่อนไปทาง (Dual Structure) น้อย ทั้งนี้ก็ เนื่องมาจากความร้อน (Heat Input) ที่ได้รับขณะเชื่อมมีส่วนในการกระตุ้นให้เกิดการแยกตัวของ ไทเทเนียมจากคาร์บอนและความร้อนที่เกิดจากการปรับปรุงโครงสร้างด้วยกรรมวิธีทางความร้อน (Stabilization Heat Treatment) ตรงบริเวณดังกล่าวได้รับอุณหภูมิที่ 950 องศาเซลเซียส ถือได้ว่าเป็น อุณหภูมิที่ใกล้เคียงกับอุณหภูมิที่เกิดการแยกตัว (Dissolve) บางส่วนของตัวไทเทเนียมคาร์โบไน ไตรน์ Ti (C,N) เป็นส่วนเสริมที่ทำให้บริเวณดังกล่าวมีค่าสัดส่วนทางไฟฟ้า Ir/Ia มากกว่าเมื่อ เปรียบเทียบกับบริเวณอื่นๆ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยก่อนหน้านี้ที่พบว่า การแยกตัวของไทเทเนียมจะ พบได้ที่อุณหภูมิเริ่มต้นตั้งแต่ 900 องศาเซลเซียส ไปจนกระทั่ง 1100 องศาเซลเซียส

4.3 ผลการจำแนกโครงสร้างหลังกัดกรดตาม ASTM A262 Practice-A

ผลการเปรียบเทียบของภาพถ่ายโครงสร้างทางจุลภาคที่กำลังขยาย 500 เท่า หลังจากการทดลองกัดกรดตาม ASTM A 262 Practice A ที่ได้รับได้จำแนกประเภทของโครงสร้างที่การกัดกร่อนตามขอบเกรน (Intergranular Corrosion) เป็นภาพถ่ายเพื่อใช้ในการเปรียบเทียบกับชิ้นงานทดลองจริงตามรูปที่ 4.5

บริเวณที่ทดสอบ	ชิ้นงานทดสอบ	ชนิดเปรียบเทียบตามมาตรฐาน ASTM A260 Practice - A
วัสดุพื้นฐาน Base Metal		 FIG. 1 Step Structure (500×) (Steps between grains, no ditches at grain boundaries)
กระแทกร้อน HAZ		 FIG. 1 Step Structure (500×) (Steps between grains, no ditches at grain boundaries)
เนื้อเชื่อม Weldment		 FIG. 1 Step Structure (500×) (Steps between grains, no ditches at grain boundaries)

รูปที่ 4.5 ผลการจำแนกโครงสร้างหลังกัดกรดตาม ASTM A262 Practice-A

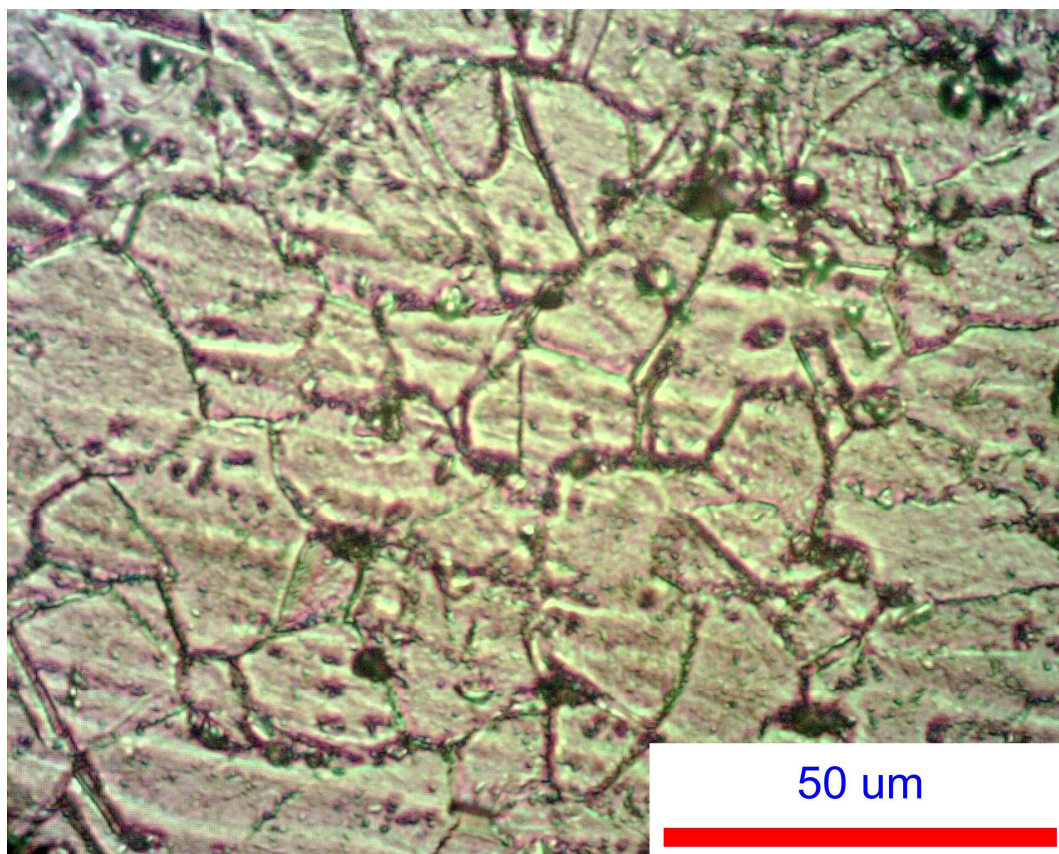
ผลการทดลองตามมาตรฐาน ASTM A262 Practice A มีลักษณะโครงสร้างหลังการทดสอบด้วยการกัดกรดออกซาริก ที่ใช้ในการจำแนกลักษณะโครงสร้างจุลภาคต่อการกัดกร่อนตามขอบเกรน พบว่าโครงสร้างจุลภาคที่ผ่านการทดลองทั้งสามบริเวณของงานเชื่อมมีลักษณะโครงสร้างการกัดกร่อนแบบ

(Step Structure) และเมื่อนำผลที่ได้มาพิจารณาก็พบทั้งสามบริเวณไม่ว่าจะเป็นเนื้อเชื่อม บริเวณผลกระทบร้อน และบริเวณเนื้อวัสดุพื้นฐานเมื่อนำมาปรับปรุงด้วยกระบวนการทางความร้อนที่อุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียส จะทำให้โครงสร้างทางจุลภาคมีขนาดเกรนที่ใหญ่ และตัวไทเทเนียมคาร์ไบด์ในไตรนัมมีผลึกที่โตขึ้น ไม่ทำให้ความสามารถในการต้านทานต่อการกัดกร่อนตามขอบเกรนลดน้อยลง ถึงแม้ว่าวัสดุจะถูกใช้งานในช่วงอุณหภูมิเซนซิไทเซชันก็ตาม

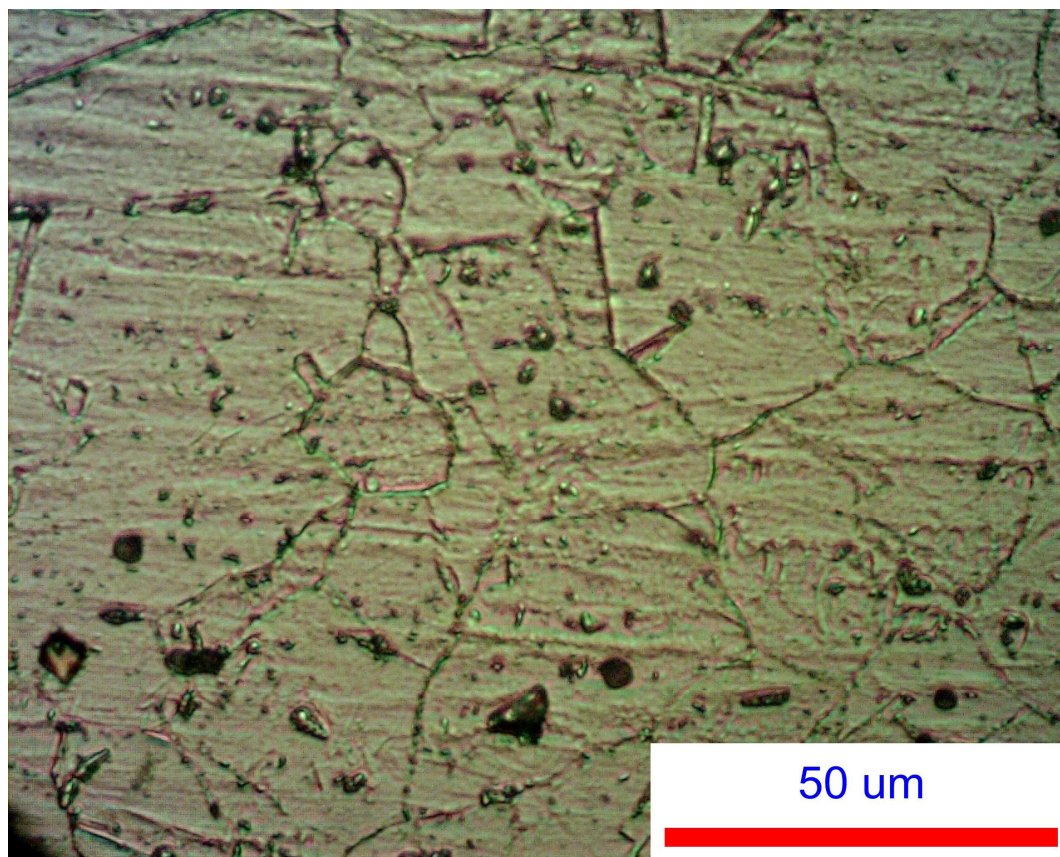
4.4 ผลการทดลองเพิ่มเติมเพื่อบ่งชี้ลักษณะสภาพโครงสร้างจุลภาคในบริเวณ กระทบร้อน ที่เกิดจากอิทธิพลของกระบวนการปรับปรุงทางความร้อนแบบ

Stabilized Heat Treatment โดยมาตรฐาน ASTM A262 Practice-A

ผลการทดลองเพิ่มจากการที่นำวัสดุที่ผ่านกระบวนการปรับปรุงโครงสร้างด้วยกรรมวิธีทางความร้อน Stabilization Heat Treatment ไปทำการกัดกรดด้วย Oxalic และทำการถ่ายภาพโครงสร้างจุลภาคที่กำลังขยาย 500 เท่า ด้วยกล้องจุลทรรศน์ในบริเวณกระทบร้อน Heat Affected Zone ซึ่งลักษณะโครงสร้างจุลภาคที่ได้เป็นแบบ (Dual Structure) แสดงให้เห็นว่าถึงแม้วัสดุได้รับการปรับปรุงโครงสร้างด้วยกรรมวิธีทางความร้อน Stabilized Heat Treatment มาแล้ว แต่เนื่องจากบริเวณดังกล่าวได้ผลกระทบจากความร้อนที่ทำให้เกิดการแยกตัวของไทเทเนียม (Dissolved) ออกจากคาร์บอนส่งผลให้คาร์บอนไปรวมตัวกับโครเมียมกลายเป็นโครเมียมคาร์ไบด์ที่บริเวณขอบเกรน และการเตรียมชิ้นงานทดลองที่จำกัดเฉพาะบริเวณกระทบร้อนเท่านั้นที่ทำให้ค่าการประเมินความต้านทานการกัดกร่อนตามขอบเกรนได้ผลที่ชัดเจนมากขึ้น ตามรูปที่ 4.6 และ 4.7



รูปที่ 4.6 ถ่ายภาพโครงสร้างจุลภาคในบริเวณกระทบร้อน ด้านข้างบ่อหลอม ที่กำลังขยาย 500 เท่าเป็น
การกัดกร่อนแบบ Dual Structure



รูปที่ 4.7 ถ่ายภาพโครงสร้างจุลภาคในบริเวณกระทบบร้อน ด้านล่างบ่อหลอม ที่กำลังขยาย 500 เท่าเป็น
การกัดกร่อนแบบ Dual Structure