ผลของโครเมียมและนิกเกิลต่อพฤติกรรมการกัดกร่อนของเหล็กกล้าผสมสูงในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ ความเข้มข้น 3.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ที่ค่าพีเอช 2, 7,10 และ อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส

นายกานต์ ภวภูตานนท์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโลหการ ภาควิชาวิศวกรรมโลหการ

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2549

ISBN 974-14-3423-5

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

EFFECTS OF CHROMIUM AND NICKEL ON CORROSION BEHAVIOR OF HIGH ALLOYED STEELS IN 3.5 WT% SODIUM CHLORIDE SOLUTION AT pH 2, 7,10 AND 25 ° C

Mr. Gan Pavapootanont

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering program in Metallurgical Engineering
Department of Metallurgical Engineering
Faculty of Engineering
Chulalongkorn University
Academic Year 2006
ISBN 974-14-3423-5
Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	ผลของโครเมียมและนิกเกิลต่อพฤติกรรมการกัดกร่อนของเหล็กกล้าผสมสูงในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ ความเข้มข้น 3.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ที่ค่าพีเอช 2, 7,10 และ อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส
โดย	นายกานต์ ภวภูตานนท์
สาขาวิชา	วิศวกรรมโลหการ
อาจารย์ที่ปรึกษา	รองศาสตราจารย์ ดร. กอบบุญ หล่อทองคำ
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	ดร. เอกรัตน์ ไวยนิตย์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

.... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

(ศาสตราจารย์ ดร.ดิเรก ลาวัณย์ศิริ)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.... ประธานกรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ชาคร จารุพิสิฐธร)

.... อาจารย์ที่ปรึกษา

(รองศาสตราจารย์ ดร.กอบบุญ หล่อทองคำ)

.... อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

(ดร. เอกรัตน์ ไวยนิตย์)

.... กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ไสว ด่านชัยวิจิตร)

กานต์ ภวภูตานนท์ : ผลของโครเมียมและนิกเกิลต่อพฤติกรรมการกัดกร่อนของเหล็กกล้าผสมสูงในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้น 3.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ที่ค่าพีเอช 2, 7,10 และ อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส (EFFECTS OF CHROMIUM AND NICKEL ON CORROSION BEHAVIOR OF HIGH ALLOYED STEELS IN 3.5 WT% SODIUM CHLORIDE SOLUTION AT pH 2, 7,10 AND 25 ˚C) อ. ที่ปรึกษา : รองศาสตราจารย์ ดร.กอบบุญ หล่อทองคำ, อ.ที่ปรึกษาร่วม: ดร. เอกรัตน์ ไวยนิตย์ 137 หน้า. ISBN 974-14-3423-5

วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้ คือ ศึกษาผลของโครเมียมและนิกเกิลต่อพฤติกรรมการกัดกร่อนของเหล็กกล้าผสมสูงในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้น 3.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ที่ค่าพีเอช 2, 7,10 และอุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส สารละลายอิ่มตัวด้วยอากาศและไม่มีอากาศ เหล็กกล้าที่ใช้ศึกษามี 2 ชุด ชุดแรกมีส่วนผสมโครเมียมเป็น 13, 15, 18 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และชุดที่สองมีส่วนผสมของนิกเกิลเป็น 15, 23, 31, 40 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก การศึกษาอาศัยเทคนิคการวัดเส้นโพลาไรเซชันเพื่อหาค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อน ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อน ค่าอัตราการกัดกร่อน ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าขณะวัสดุเกิดฟิล์มที่ผิว ค่าศักย์ไฟฟ้าเริ่มเกิดพาสสีพ ค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนแบบรูเข็ม และตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของบริเวณที่ถูกกัดกร่อนในช่วงค่าศักย์ไฟฟ้าทรานพาสสีพ

ผลการศึกษาพบว่าการเพิ่มส่วนผสมโครเมียมของเหล็กกล้าโครเมียมไม่ส่งผลต่อค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนอย่างชัดเจน ส่วนผสมโครเมียมสูงขึ้นส่งผลลดค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อน ค่าอัตราการกัดกร่อน และค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าขณะวัสดุเกิดฟิล์มที่ผิว แต่เพิ่มค่าศักย์ ไฟฟ้าการกัดกร่อนแบบรูเข็ม การเพิ่มปริมาณนิกเกิลของเหล็กกล้านิกเกิลส่งผลให้ค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนเพิ่มขึ้น ส่วนค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อนและค่าอัตราการกัดกร่อนลดลง พฤติกรรมการเกิดฟิล์มพาสสีพตรวจพบที่พีเอช 10 สำหรับเหล็กที่ผสมนิกเกิล 23, 31 และ 40เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อน แบบรูเข็มเพิ่มขึ้นแต่ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าขณะวัสดุเกิดฟิล์มลดลง กรณีของการกัดกร่อนแบบทั่วผิวหน้าพฤติกรรมการกัดกร่อนของเหล็กกล้าโครเมียมและเหล็กกล้านิกเกิลในสารละลายที่อิ่มตัวด้วยอากาศมีความรุนแรงมากกว่าสารละลายที่ไม่มีอากาศ กรณีการกัดกร่อนแบบรูเข็มฟิล์มพาสสีพมีเสถียรภาพในสารละลายอิ่มตัวด้วยอากาศมากกว่าสารละลายที่ไม่มีอากาศ

ผลการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของบริเวณที่ถูกกัดกร่อนในช่วงค่าศักย์ไฟฟ้าทรานพาสสีพ พบว่าจุดเริ่มต้นการกัดกร่อนแบบรูเข็มกระจายตัวทั่วไปในโครงสร้างจุลภาคของเหล็กกล้าโครเมียมและเหล็กกล้านิกเกิลที่พีเอช 2, 7,10

ภาควิชา....วิศวกรรมโลหการ..ลายมือชื่อ......กานต์ ภวภูตานนท์..............

สาขาวิชา...วิศวกรรมโลหการ..ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.............................

ปีการศึกษา......2549...ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม............................

4670666121: MAJOR METALLURGICAL ENGINEERING

KEY WORD: corrosion behavior, high alloy steel (chromium steel and nickel steel), NaCl solution

GAN PAVAPOOTANONT: EFFECTS OF CHROMIUM AND NICKEL ON CORROSION BEHAVIOR OF HIGH ALLOYED STEELS IN 3.5 WT% SODIUM CHLORIDE SOLUTION AT pH 2, 7, 10 AND 25 °C. THESIS ADVISOR: ASSOC. PROF. Dr-Ing. GOBBOON LOTHONGKUM, THESIS CO-ADVISOR: Dr-Ing. EKKARUT VIYANIT, 137 pp. ISBN 974-14-3423-5

The objective of this work was to study the effects of chromium and nickel on corrosion behavior of high alloyed steels in aerated and deaerated 3.5 wt% sodium chloride solution at pH 2, 7, 10 and 25 °C. The samples were chromium steels with chromium contents of 13, 15 and 18 wt.%, and nickel steels with nickel contents of 15, 23, 31 and 40 wt.%. The polarization curves of samples were measured to determine corrosion potential, corrosion current density, corrosion rate, primary passive potential, passive current density and pitting potential. The corroded microstructures after transpassive potential were also observed.

For chromium steel, the increase of chromium content had no obvious effect on corrosion potential. This resulted in decreasing of corrosion current density, corrosion rate, and passive current density, but increasing of pitting potential. For nickel steels, the increase of nickel increased corrosion potential, but decreased corrosion current density and corrosion rate. Only 23, 31 and 40 wt.% of nickel in nickel steel expressed passivity at pH 10. At this pH, the pitting potential of 40% Ni steel was higher. However, its passive current density was lower than those of 23% and 31% Ni steels. The general corrosion behavior of chromium steels and nickel steels in aerated solution were less than in deaerated solution. For pitting corrosion, passive film was more stable in aerated solution than in dearated soluton. At pH 2, 7, 10, pits initiated randomly in microstructures of both chromium steels and nickel steels.

Department...Metallurgical Engineering............ Student's signature.....Gan Pavapootanont

Field of studies...Metallurgical Engineering........ Advisor's signature.......Gobboon Lothongkum

Academic year ...2006.................................... Co-advisor's signature..

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดีด้วยความช่วยเหลือจากหลายฝ่าย ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ รศ.ดร. กอบบุญ หล่อทองคำ ซึ่งได้กรุณาให้ความช่วยเหลือและแนะนำแนวทางที่เป็นประโยชน์ต่องานวิจัยด้วยดีตลอดมา ตลอดจนขอขอบพระคุณ ดร. เอกรัตน์ ไวยนิตย์ และคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ทุกท่านที่ให้คำแนะนำและข้อคิดเห็นที่เป็นประโยชน์ ขอขอบคุณ ศ.ดร. T. Maki ภาควิชาวัสดุศาสตร์และวัสดุวิศวกรรม มหาวิทยาลัยเกียวโต ที่ให้ความอนุเคราะห์เหล็กกล้าโครเมียมและเหล็กกล้านิกเกิลสำหรับการวิจัยในครั้งนี้ ขอขอบพระคุณท่านอาจารย์และเจ้าหน้าที่ประจำภาควิชาวิศวกรรมโลหการทุกท่านที่ได้ให้ความช่วยเหลือจนงานวิจัยสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

ท้ายนี้ผู้วิจัยของกราบขอบพระคุณบิดา มารดา และครอบครัว ที่สนับสนุนในด้านต่างๆ ด้วยดีตลอดมาจนสำเร็จการศึกษา และขอบคุณเพื่อนๆ ที่ให้ความช่วยเหลือและเป็นกำลังใจให้แก่ผู้วิจัยด้วยดีเสมอมา

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย...ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ...จ
กิตติกรรมประกาศ..ฉ
สารบัญ..ช
สารบัญตาราง...ฌ
สารบัญภาพ...ฐ
คำอธิบายคำย่อ...ถ
บทที่
1. บทนำ...1
1.1 ความสำคัญของงานวิจัย..1
1.2 วัตถุประสงค์..1
1.3 ขอบเขตการศึกษา..2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ...2
2. ปริทรรศน์วรรณกรรม..3
2.1 ไฟฟ้าเคมีของการกัดกร่อน...3
2.2 ศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อน และความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อน...........4
2.3 เส้นโพลาไรเซชัน...6
2.4 ผลของตัวออกซิไดเซอร์ต่อการเปลี่ยนแปลงของเส้นโพลาไรเซชัน.................7
2.5 ผลของค่าพีเอชของน้ำต่อการกัดกร่อน..9
2.6 โครเมียมและนิกเกิลในฟิล์มพาสสีพ..10
2.7 ผลของนิกเกิลต่อพฤติกรรมการกัดกร่อนแบบมีแรงเค้นในสารละลาย
กลุ่มคลอไรด์...11
2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง...13
3. ขั้นตอนและวิธีดำเนินการทดลอง..19
3.1 วัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง...19
3.2 ขั้นตอนการทดลอง...25
4. ผลการทดลองและอภิปราย...27
5. สรุปผลการทดลอง...63

หน้า

รายการอ้างอิง……………………………………………………..……………………65
ภาคผนวก…………………………………………………………………….......... 68
ภาคผนวก ก……………………………………………………..…………………69
ภาคผนวก ข……………………………………………………………..……………91
ภาคผนวก ค……………………………………………………………..……………93
ภาคผนวก ง...117
ภาคผนวก จ...123
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์...137

สารบัญตาราง

ตารางที่ **หน้า**

2.1 การทดสอบส่วนประกอบของฟิล์มพาสสีพหลังการแช่ในสารละลายต่างๆ ด้วยเครื่อง ESCA [11]....................11

2.2 ค่า E_{corr}, I_{corr}, E_p, I_p ของฟิล์มจากอนุภาคระดับนาโนเมตรของนิกเกิล (pure Ni) และนิกเกิล-โครเมียม (Ni-4.5Cr และ Ni-10.9Cr) ที่เคลือบด้วยไฟฟ้าบนโลหะพื้นนิกเกิลในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 3.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก....................17

3.1 ส่วนผสมทางเคมี (เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก) ของเหล็กกล้าผสมโครเมียม....................19

3.2 ส่วนผสมทางเคมี (เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก) ของเหล็กกล้าผสมนิกเกิล....................21

4.1 การระบุดัชนี (hkl) พีคตัวอย่าง XRD ของเหล็กกล้าโครเมียม Fe-18Cr....................27

4.2 การระบุดัชนี (hkl) พีคตัวอย่าง XRD ของเหล็กกล้านิกเกิล Fe-15Ni และ Fe40Ni....................29

4.3 ค่าที่วัดได้จากเส้นโพลาไรเซชันของเหล็กกล้าโครเมียมและเหล็กกล้านิกเกิลในสารละลาย A....................32

4.4 ค่าที่วัดได้จากเส้นโพลาไรเซชันของเหล็กกล้าโครเมียมและเหล็กกล้านิกเกิลในสารละลาย B....................33

ก.1 ผลของเวลาในการจุ่มชิ้นงานต่อศักย์ไฟฟ้าวงจรเปิดของชิ้นงานในสารละลายโซเดียมคลอไรด์เข้มข้น 3.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส....................69

ค.1 ค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนของเหล็กกล้าโครเมียมในสารละลาย A พีเอช 2....................93

ค.2 ค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนของเหล็กกล้าโครเมียมในสารละลาย B พีเอช 2....................93

ค.3 ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อนและอัตราการกัดกร่อนของเหล็กกล้าโครเมียมในสารละลาย A พีเอช 2....................94

ค.4 ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อนและอัตราการกัดกร่อนของเหล็กกล้าโครเมียมในสารละลาย B พีเอช 2....................94

ค.5 ค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนเริ่มเกิดพาสสีพของเหล็กกล้าโครเมียมในสารละลาย A พีเอช 2....................95

ค.6 ค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนเริ่มเกิดพาสสีพของเหล็กกล้าโครเมียมในสารละลาย B พีเอช 2....................95

ค.7 ค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนแบบรูเข็มหรือหลุมของเหล็กกล้าโครเมียมในสารละลาย A พีเอช 2....................96

ตารางที่ **หน้า**

ค.8 ค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนแบบรูเข็มหรือหลุมของเหล็กกล้าโครเมียม ในสารละลาย B พีเอช 2……….96
ค.9 ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าขณะวัสดุเกิดฟิล์มที่ผิวของเหล็กกล้าโครเมียมในสารละลาย A พีเอช 2……….97
ค.10 ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าขณะวัสดุเกิดฟิล์มที่ผิวของเหล็กกล้าโครเมียมในสารละลาย B พีเอช 2……….97
ค.11 ค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนของเหล็กกล้าโครเมียมในสารละลาย A พีเอช 7……….98
ค.12 ค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนของเหล็กกล้าโครเมียมในสารละลาย B พีเอช 7……….98
ค.13 ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อนและอัตราการกัดกร่อนของเหล็กกล้าโครเมียมในสารละลาย A พีเอช 7……….99
ค.14 ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อนและอัตราการกัดกร่อนของเหล็กกล้าโครเมียมในสารละลาย B พีเอช 7……….99
ค.15 ค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนเริ่มเกิดพาสสีพของเหล็กกล้าโครเมียม ในสารละลาย A พีเอช 7……….100
ค.16 ค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนเริ่มเกิดพาสสีพของเหล็กกล้าโครเมียม ในสารละลาย B พีเอช 7……….100
ค.17 ค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนแบบรูเข็มหรือหลุมของเหล็กกล้าโครเมียม ในสารละลาย A พีเอช 7……….101
ค.18 ค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนแบบรูเข็มหรือหลุมของเหล็กกล้าโครเมียม ในสารละลาย B พีเอช 7……….101
ค.19 ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าขณะวัสดุเกิดฟิล์มที่ผิวของเหล็กกล้าโครเมียมในสารละลาย A พีเอช 7……….102
ค.20 ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าขณะวัสดุเกิดฟิล์มที่ผิวของเหล็กกล้าโครเมียมในสารละลาย B พีเอช 7……….102
ค.21 ค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนของเหล็กกล้าโครเมียมในสารละลาย A พีเอช 10……….103
ค.22 ค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนของเหล็กกล้าโครเมียมในสารละลาย B พีเอช 10……….103
ค.23 ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อนและอัตราการกัดกร่อนของเหล็กกล้าโครเมียมในสารละลาย A พีเอช 10……….104

ตารางที่ **หน้า**

ค.24 ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อนและอัตราการกัดกร่อนของ
เหล็กกล้าโครเมียมในสารละลาย B พีเอช 10……..…..……………………………...104
ค.25 ค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนเริ่มเกิดพาสสีพของเหล็กกล้าโครเมียม
ในสารละลาย A พีเอช 10…………………………………………..…..……………...105
ค.26 ค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนเริ่มเกิดพาสสีพของเหล็กกล้าโครเมียม
ในสารละลาย B พีเอช 10…………………………………………..…..………………105
ค.27 ค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนแบบรูเข็มหรือหลุมของเหล็กกล้าโครเมียม
ในสารละลาย A พีเอช 10………..…………………………………………………..106
ค.28 ค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนแบบรูเข็มหรือหลุมของเหล็กกล้าโครเมียม
ในสารละลาย B พีเอช 10………..……………………………………………………106
ค.29 ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าขณะวัสดุเกิดฟิล์มที่ผิวของเหล็กกล้า
โครเมียมในสารละลาย A พีเอช 10………………………………………………..…..107
ค.30 ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าขณะวัสดุเกิดฟิล์มที่ผิวของเหล็กกล้า
โครเมียมในสารละลาย B พีเอช 10…………………………………..…………..107
ค.31 ค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนของเหล็กกล้านิกเกิลในสารละลาย A พีเอช 2………………108
ค.32 ค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนของเหล็กกล้านิกเกิลในสารละลาย B พีเอช 2………………108
ค.33 ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อนและอัตราการกัดกร่อนของ
เหล็กกล้านิกเกิลในสารละลาย A พีเอช 2……..…..…..………………………..……..109
ค.34 ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อนและอัตราการกัดกร่อนของ
เหล็กกล้านิกเกิลในสารละลาย B พีเอช 2……..…..…..……………………..……..109
ค.35 ค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนของเหล็กกล้านิกเกิลในสารละลาย A พีเอช 7………………110
ค.36 ค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนของเหล็กกล้านิกเกิลในสารละลาย B พีเอช 7………………110
ค.37 ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อนและอัตราการกัดกร่อนของ
เหล็กกล้านิกเกิลในสารละลาย A พีเอช 7……..…..…..………………………..……..111
ค.38 ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อนและอัตราการกัดกร่อนของ
เหล็กกล้านิกเกิลในสารละลาย B พีเอช 7……..…..…..……………………..……..111
ค.39 ค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนของเหล็กกล้านิกเกิลในสารละลาย A พีเอช 10……..……112
ค.40 ค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนของเหล็กกล้านิกเกิลในสารละลาย B พีเอช 10……..……112

ตารางที่ **หน้า**

ค.41 ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อนและอัตราการกัดกร่อนของ
เหล็กกล้านิกเกิลในสารละลาย A พีเอช 10……..…....…..………….…………..…..113
ค.42 ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อนและอัตราการกัดกร่อนของ
เหล็กกล้านิกเกิลในสารละลาย B พีเอช 10……..…....…..………….…………..…..113
ค.43 ค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนเริ่มเกิดพาสสีพของเหล็กกล้านิกเกิล
ในสารละลาย A พีเอช 10…………………………..………………..…..……………114
ค.44 ค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนเริ่มเกิดพาสสีพของเหล็กกล้านิกเกิล
ในสารละลาย B พีเอช 10…………………………..………………..…..…………..114
ค.45 ค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนแบบรูเข็มหรือหลุมของเหล็กกล้านิกเกิล
ในสารละลาย A พีเอช 10……………..…………………………………..……………..115
ค.46 ค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนแบบรูเข็มหรือหลุมของเหล็กกล้านิกเกิล
ในสารละลาย B พีเอช 10……………..…………………..……………………………..115
ค.47 ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าขณะวัสดุเกิดฟิล์มที่ผิวของเหล็กกล้า
นิกเกิลในสารละลาย A พีเอช 10..………………..…………………………..……..…..116
ค.48 ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าขณะวัสดุเกิดฟิล์มที่ผิวของเหล็กกล้า
นิกเกิลในสารละลาย B พีเอช 10..………………..…………………………..……..…..116
ง.1 การคำนวณเพื่อระบุดัชนี (hkl) พีคตัวอย่าง XRDของเหล็กกล้าโครเมียม……………....118
ง.2 การคำนวณเพื่อระบุดัชนี (hkl) พีคตัวอย่าง XRD ของเหล็กกล้านิกเกิล………………....121
ง.3 ข้อมูลตัวอย่างที่ใช้อ้างอิงผลการทดสอบ XRDของชิ้นงานเหล็กกล้าโครเมียม
และเหล็กกล้านิกเกิล จาก JCPDS...122

สารบัญภาพ

รูปที่ **หน้า**

2.1 ค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนและความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อน
จากปฏิกิริยารวมระหว่างโลหะและสารละลายกรด……………………………………......4
2.2 ภาพจำลองเครื่องโพเทนชิโอสแตท..5
2.3 ศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนและความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อน..............................5
2.4 เส้นโพลาไรเซชันและส่วนประกอบที่สำคัญ...6
2.5 ผลของปริมาณออกซิไดเซอร์ในสารละลายกรดต่อการเปลี่ยนแปลงของเส้น
โพลาไรเซชัน………………………………………………………………………..8
2.6 การเปลี่ยนแปลงตำแหน่งของเส้นโพลาไรเซชันจากความเข้มข้นของออกซิไดเซอร์
จากน้อย (1) ไปมาก (8)……………………………………………………………....8
2.7 ผลของปริมาณออกซิเจนที่ละลายในน้ำต่อศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนในเหล็กกล้า
ไร้สนิม SUS304 ที่มีการกัดกร่อนเฉพาะที่แบบในซอก (crevice corrosion)……………..9
2.8 ผลของนิกเกิลต่ออัตราการเคลื่อนที่ของรอยแตกของเหล็กผสมโครเมียมและนิกเกิลใน
สารละลายโซเดียมคลอไรด์ร้อนในสภาวะอิ่มตัวด้วยอากาศ……………………………...12
2.9 ผลของนิกเกิลต่ออุณหภูมิวิกฤตของการเกิดรอยแตกของกลุ่มโลหะผสมนิกเกิลและ
เหล็กในสารละลายแมกนีเซียมคลอไรด์ 20.4 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักที่ไม่มีอากาศ……….12
2.10 ผลของโครเมียมต่อศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนแบบรูเข็มที่ผสมในเหล็กโครเมียมใน
สารละลายโซเดียมคลอไรด์ 0.75 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักในสภาวะไม่มีอากาศ…………..13
2.11 ผลของนิกเกิลต่อศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนแบบรูเข็มที่ผสมในเหล็กโครเมียม
15 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 0.75 เปอร์เซ็นต์
โดยน้ำหนักในสภาวะไม่มีอากาศ……………………………………………………….14
2.12 ผลของโครเมียมต่อความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อนที่ผสมในเหล็กกล้า
ไร้สนิมดูเพล็กซ์ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์เข้มข้น 3 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก
ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส...15
2.13 ผลของนิกเกิลต่ออัตราการกัดกร่อนแบบรูเข็มของเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ที่มี
ส่วนผสมโครเมียม 22 และ25 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ในสารละลายเฟอร์ริก-
คลอไรด์เข้มข้น 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส.......................15

รูปที่ **หน้า**

2.14 ตัวอย่างเส้นโพลาไรเซชันของฟิล์มจากอนุภาคระดับนาโนเมตรของนิกเกิล (pure Ni) และนิกเกิล-โครเมียม ที่เคลือบด้วยไฟฟ้าบนโลหะพื้นนิกเกิลในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 3.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก..16
2.15 กระแสโฟโต (Photocurrent) ของฟิล์มพาสสีพของโลหะผสม Fe-20Cr-15Ni ในสารละลายบอเรตบัฟเฟอร์ที่ค่าพีเอช 8.5.. 18
3.1 โครงสร้างจุลภาคของเหล็กกล้าโครเมียมที่ผ่านการอบชุบความร้อน.............................20
3.2 โครงสร้างจุลภาคของเหล็กกล้านิกเกิลที่ผ่านการอบชุบความร้อน................................22
3.3 เครื่องโพเทนชิโอสแตทรุ่น PGSTAT 20(GPES)..23
3.4 อิเล็กโทรดอ้างอิง (Reference electrode)..23
3.5 อิเล็กโทรดวัดกระแส (Counter electrode)..24
3.6 การทดลองหาเส้นโพลาไรเซชันด้วยเทคนิคโพเทนทิโอไดนามิก...............................25
4.1 ผลทดสอบ XRD ของเหล็กกล้าโครเมียม Fe-18Cr...27
4.2 ผลทดสอบ XRD ของเหล็กกล้านิกเกิล Fe-15Ni..28
4.3 ผลทดสอบ XRD ของเหล็กกล้านิกเกิล Fe-40Ni..29
4.4 ตัวอย่างเส้นโพลาไรเซชันของเหล็กกล้าโครเมียม..30
4.5 ตัวอย่างเส้นโพลาไรเซชันของเหล็กกล้านิกเกิล...31
4.6 ผลของโครเมียมต่อศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนของเหล็กกล้าโครเมียม..........................34
4.7 ผลของค่าพีเอชต่อศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนด้วยทฤษฎีศักย์ไฟฟ้ารวม............................35
4.8 ผลของโครเมียมต่อความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อนของเหล็กกล้าโครเมียม......36
4.9 ผลของออกซิเจนต่อค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อนโดยทฤษฎีศักย์ไฟฟ้ารวม..38
4.10 ผลของโครเมียมต่ออัตราการกัดกร่อนของเหล็กกล้าโครเมียม.....................................39
4.11 ผลของโครเมียมต่อศักย์ไฟฟ้าเริ่มเกิดพาสสีพของเหล็กกล้าโครเมียม............................40
4.12 ผลของโครเมียมต่อศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนแบบรูเข็มของเหล็กกล้าโครเมียม................42
4.13 ผลของโครเมียมต่อความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าขณะวัสดุเกิดฟิล์มของเหล็กกล้าโครเมียม..44
4.14 ผลของนิกเกิลต่อศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนของเหล็กกล้านิกเกิล.....................................46

รูปที่ **หน้า**

4.15 ผลของนิกเกิลต่อความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อนของเหล็กกล้านิกเกิล...........47
4.16 ผลของนิกเกิลต่ออัตราการกัดกร่อนของเหล็กกล้านิกเกิล......................................48
4.17 ผลของนิกเกิลต่อศักย์ไฟฟ้าเริ่มเกิดพาสสีพของเหล็กกล้านิกเกิล.................................49
4.18 ผลของนิกเกิลต่อศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนแบบรูเข็มของเหล็กกล้านิกเกิล.....................50
4.19 แผนภาพโพเบของโลหะนิกเกิลในน้ำที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส...........................52
4.20 ผลของนิกเกิลต่อความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าขณะวัสดุเกิดฟิล์มของเหล็กกล้านิกเกิล......53
4.21 บริเวณที่ถูกกัดกร่อนของเหล็กกล้าโครเมียม Fe-13Cr ในสารละลาย A
ที่ค่า ก.pH 2 ข. pH 7 ค. pH 10...54
4.22 บริเวณที่ถูกกัดกร่อนของเหล็กกล้าโครเมียม Fe-13Cr ในสารละลาย B
ที่ค่า ก.pH 2 ข. pH 7 ค. pH 10...55
4.23 บริเวณที่ถูกกัดกร่อนของเหล็กกล้าโครเมียม Fe-18Cr ในสารละลาย A
ที่ค่า ก.pH 2 ข. pH 7 ค. pH 10...56
4.24 บริเวณที่ถูกกัดกร่อนของเหล็กกล้าโครเมียม Fe-18Cr ในสารละลาย B
ที่ค่า ก.pH 2 ข. pH 7 ค. pH 10...57
4.25 บริเวณที่ถูกกัดกร่อนของเหล็กกล้านิกเกิล Fe-15Ni ในสารละลาย A
ที่ค่า ก.pH 2 ข. pH 7 ค. pH 10...58
4.26 บริเวณที่ถูกกัดกร่อนของเหล็กกล้านิกเกิล Fe-15Ni ในสารละลาย B
ที่ค่า ก.pH 2 ข. pH 7 ค. pH 10...59
4.27 บริเวณที่ถูกกัดกร่อนของเหล็กกล้านิกเกิล Fe-40Ni ในสารละลาย A
ที่ค่า ก.pH 2 ข. pH 7 ค. pH 10...60
4.28 บริเวณที่ถูกกัดกร่อนของเหล็กกล้านิกเกิล Fe-40Ni ในสารละลาย B
ที่ค่า ก.pH 2 ข. pH 7 ค. pH 10...61
ก.1 เส้นโพลาไรเซชันของเหล็กกล้าโครเมียม Fe-13Cr ในสารละลาย A พีเอช 2................70
ก.2 เส้นโพลาไรเซชันของเหล็กกล้าโครเมียม Fe-13Cr ในสารละลาย B พีเอช 2................70
ก.3 เส้นโพลาไรเซชันของเหล็กกล้าโครเมียม Fe-15Cr ในสารละลาย A พีเอช 2................71
ก.4 เส้นโพลาไรเซชันของเหล็กกล้าโครเมียม Fe-15Cr ในสารละลาย B พีเอช 2................71
ก.5 เส้นโพลาไรเซชันของเหล็กกล้าโครเมียม Fe-18Cr ในสารละลาย A พีเอช 2................72

รูปที่ **หน้า**

ก.6 เส้นโพลาไรเซชันของเหล็กกล้าโครเมียม Fe-18Cr ในสารละลาย B พีเอช 2................72
ก.7 เส้นโพลาไรเซชันของเหล็กกล้าโครเมียม Fe-13Cr ในสารละลาย A พีเอช 7................73
ก.8 เส้นโพลาไรเซชันของเหล็กกล้าโครเมียม Fe-13Cr ในสารละลาย B พีเอช 7................73
ก.9 เส้นโพลาไรเซชันของเหล็กกล้าโครเมียม Fe-15Cr ในสารละลาย A พีเอช 7................74
ก.10 เส้นโพลาไรเซชันของเหล็กกล้าโครเมียม Fe-15Cr ในสารละลาย B พีเอช 7................74
ก.11 เส้นโพลาไรเซชันของเหล็กกล้าโครเมียม Fe-18Cr ในสารละลาย A พีเอช 7................75
ก.12 เส้นโพลาไรเซชันของเหล็กกล้าโครเมียม Fe-18Cr ในสารละลาย B พีเอช 7................75
ก.13 เส้นโพลาไรเซชันของเหล็กกล้าโครเมียม Fe-13Cr ในสารละลาย A พีเอช 10...............76
ก.14 เส้นโพลาไรเซชันของเหล็กกล้าโครเมียม Fe-13Cr ในสารละลาย B พีเอช 10...............76
ก.15 เส้นโพลาไรเซชันของเหล็กกล้าโครเมียม Fe-15Cr ในสารละลาย A พีเอช 10...............77
ก.16 เส้นโพลาไรเซชันของเหล็กกล้าโครเมียม Fe-15Cr ในสารละลาย B พีเอช 10...............77
ก.17 เส้นโพลาไรเซชันของเหล็กกล้าโครเมียม Fe-18Cr ในสารละลาย A พีเอช 10...............78
ก.18 เส้นโพลาไรเซชันของเหล็กกล้าโครเมียม Fe-18Cr ในสารละลาย B พีเอช 10...............78
ก.19 เส้นโพลาไรเซชันของเหล็กกล้านิกเกิล Fe-15Ni ในสารละลาย A พีเอช 2...................79
ก.20 เส้นโพลาไรเซชันของเหล็กกล้านิกเกิล Fe-15Ni ในสารละลาย B พีเอช 2...................79
ก.21 เส้นโพลาไรเซชันของเหล็กกล้านิกเกิล Fe-23Ni ในสารละลาย A พีเอช 2...................80
ก.22 เส้นโพลาไรเซชันของเหล็กกล้านิกเกิล Fe-23Ni ในสารละลาย B พีเอช 2...................80
ก.23 เส้นโพลาไรเซชันของเหล็กกล้านิกเกิล Fe-31Ni ในสารละลาย A พีเอช 2...................81
ก.24 เส้นโพลาไรเซชันของเหล็กกล้านิกเกิล Fe-31Ni ในสารละลาย B พีเอช 2...................81
ก.25 เส้นโพลาไรเซชันของเหล็กกล้านิกเกิล Fe-40Ni ในสารละลาย A พีเอช 2...................82
ก.26 เส้นโพลาไรเซชันของเหล็กกล้านิกเกิล Fe-40Ni ในสารละลาย B พีเอช 2...................82
ก.27 เส้นโพลาไรเซชันของเหล็กกล้านิกเกิล Fe-15Ni ในสารละลาย A พีเอช 7...................83
ก.28 เส้นโพลาไรเซชันของเหล็กกล้านิกเกิล Fe-15Ni ในสารละลาย B พีเอช 7...................83
ก.29 เส้นโพลาไรเซชันของเหล็กกล้านิกเกิล Fe-23Ni ในสารละลาย A พีเอช 7...................84
ก.30 เส้นโพลาไรเซชันของเหล็กกล้านิกเกิล Fe-23Ni ในสารละลาย B พีเอช 7...................84
ก.31 เส้นโพลาไรเซชันของเหล็กกล้านิกเกิล Fe-31Ni ในสารละลาย A พีเอช 7...................85
ก.32 เส้นโพลาไรเซชันของเหล็กกล้านิกเกิล Fe-31Ni ในสารละลาย B พีเอช 7...................85
ก.33 เส้นโพลาไรเซชันของเหล็กกล้านิกเกิล Fe-40Ni ในสารละลาย A พีเอช 7...................86

รูปที่ **หน้า**

ก.34 เส้นโพลาไรเซชันของเหล็กกล้านิกเกิล Fe-40Ni ในสารละลาย B พีเอช 7……………….86
ก.35 เส้นโพลาไรเซชันของเหล็กกล้านิกเกิล Fe-15Ni ในสารละลาย A พีเอช 10……………...87
ก.36 เส้นโพลาไรเซชันของเหล็กกล้านิกเกิล Fe-15Ni ในสารละลาย B พีเอช 10……………...87
ก.37 เส้นโพลาไรเซชันของเหล็กกล้านิกเกิล Fe-23Ni ในสารละลาย A พีเอช 10..…………….88
ก.38 เส้นโพลาไรเซชันของเหล็กกล้านิกเกิล Fe-23Ni ในสารละลาย B พีเอช 10..…………….88
ก.39 เส้นโพลาไรเซชันของเหล็กกล้านิกเกิล Fe-31Ni ในสารละลาย A พีเอช 10…..………….89
ก.40 เส้นโพลาไรเซชันของเหล็กกล้านิกเกิล Fe-31Ni ในสารละลาย B พีเอช 10…..………….89
ก.41 เส้นโพลาไรเซชันของเหล็กกล้านิกเกิล Fe-40Ni ในสารละลาย A พีเอช 10……….…….90
ก.42 เส้นโพลาไรเซชันของเหล็กกล้านิกเกิล Fe-40Ni ในสารละลาย B พีเอช 10……….…….90
ข.1 วิธีหาค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนและกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อนจากเส้นโพลาไรเซชัน.........91
ข.2 วิธีหาค่าศักย์ไฟฟ้าเริ่มเกิดพาสสีพ ค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนแบบรูเข็มหรือหลุม
และความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าขณะเกิดฟิล์ม..92
ง.1 ผลการทดสอบ XRD ของเหล็กกล้าโครเมียม Fe-13Cr...117
ง.2 ผลการทดสอบ XRD ของเหล็กกล้าโครเมียม Fe-15Cr...117
ง.3 ผลการทดสอบ XRD ของเหล็กกล้าโครเมียม Fe-18Cr...118
ง.4 ผลการทดสอบ XRD ของเหล็กกล้านิกเกิล Fe-15Ni...119
ง.5 ผลการทดสอบ XRD ของเหล็กกล้านิกเกิล Fe-23Ni...120
ง.6 ผลการทดสอบ XRD ของเหล็กกล้านิกเกิล Fe-31Ni...120
ง.7 ผลการทดสอบ XRD ของเหล็กกล้านิกเกิล Fe-40Ni...121
จ.1 บริเวณที่ถูกกัดกร่อนของเหล็กกล้าโครเมียม Fe-13Cr ในสารละลาย A
ที่ค่า ก.พีเอช 2 ข. พีเอช 7 ค. พีเอช 10..123
จ.2 บริเวณที่ถูกกัดกร่อนของเหล็กกล้าโครเมียม Fe-13Cr ในสารละลาย B
ที่ค่า ก.พีเอช 2 ข. พีเอช 7 ค. พีเอช 10..124
จ.3 บริเวณที่ถูกกัดกร่อนของเหล็กกล้าโครเมียม Fe-15Cr ในสารละลาย A
ที่ค่า ก.พีเอช 2 ข. พีเอช 7 ค. พีเอช 10..125
จ.4 บริเวณที่ถูกกัดกร่อนของเหล็กกล้าโครเมียม Fe-15Cr ในสารละลาย B
ที่ค่า ก.พีเอช 2 ข. พีเอช 7 ค. พีเอช 10..126

รูปที่ **หน้า**

จ.5 บริเวณที่ถูกกัดกร่อนของเหล็กกล้าโครเมียม Fe-18Cr ในสารละลาย A
ที่ค่า ก.พีเอช 2 ข. พีเอช 7 ค. พีเอช 10..127
จ.6 บริเวณที่ถูกกัดกร่อนของเหล็กกล้าโครเมียม Fe-18Cr ในสารละลาย B
ที่ค่า ก.พีเอช 2 ข. พีเอช 7 ค. พีเอช 10..128
จ.7 บริเวณที่ถูกกัดกร่อนของเหล็กกล้านิกเกิล Fe-15Ni ในสารละลาย A
ที่ค่า ก.พีเอช 2 ข. พีเอช 7 ค. พีเอช 10……………………………………………...129
จ.8 บริเวณที่ถูกกัดกร่อนของเหล็กกล้านิกเกิล Fe-15Ni ในสารละลาย B
ที่ค่า ก.พีเอช 2 ข. พีเอช 7 ค. พีเอช 10...130
จ.9 บริเวณที่ถูกกัดกร่อนของเหล็กกล้านิกเกิล Fe-23Ni ในสารละลาย A
ที่ค่า ก.พีเอช 2 ข. พีเอช 7 ค. พีเอช 10...131
จ.10 บริเวณที่ถูกกัดกร่อนของเหล็กกล้านิกเกิล Fe-23Ni ในสารละลาย B
ที่ค่า ก.พีเอช 2 ข. พีเอช 7 ค. พีเอช 10...132
จ.11 บริเวณที่ถูกกัดกร่อนของเหล็กกล้านิกเกิล Fe-31Ni ในสารละลาย A
ที่ค่า ก.พีเอช 2 ข. พีเอช 7 ค. พีเอช 10...133
จ.12 บริเวณที่ถูกกัดกร่อนของเหล็กกล้านิกเกิล Fe-31Ni ในสารละลาย B
ที่ค่า ก.พีเอช 2 ข. พีเอช 7 ค. พีเอช 10...134
จ.13 บริเวณที่ถูกกัดกร่อนของเหล็กกล้านิกเกิล Fe-40Ni ในสารละลาย A
ที่ค่า ก.พีเอช 2 ข. พีเอช 7 ค. พีเอช 10...135
จ.14 บริเวณที่ถูกกัดกร่อนของเหล็กกล้านิกเกิล Fe-40Ni ในสารละลาย B
ที่ค่า ก.พีเอช 2 ข. พีเอช 7 ค. พีเอช 10...136

คำอธิบายคำย่อ

คำย่อ	ความหมาย
E_{corr}	ศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อน (corrosion potential)
E_{pp}	ศักย์ไฟฟ้าเริ่มเกิดพาสสีพ (primary passive potential)
E_{p}	ศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนแบบรูเข็มหรือหลุม (pitting potential)
I_{corr}	ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อน (corrosion current density)
I_{p}	ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าช่วงที่เกิดพาสสีฟฟิล์ม (passive current density)
R_{umpy}	ค่าอัตราการกัดกร่อน (corrosion rate, ไมโครเมตรต่อปี)
สารละลาย A	สารละลายโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้น 3.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ในสภาวะอิ่มตัวด้วยอากาศ (aerated) ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส
สารละลาย B	สารละลายโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้น 3.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ในสภาวะไม่มีอากาศ (deaerated) ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส
JCPDS	Joint Committee for Powder Diffraction Studies (International Center for Diffraction Data statistical process control method development)

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญของงานวิจัย

ธาตุผสมหลักที่สำคัญในเหล็กกล้าไร้สนิมโดยทั่วไปคือโครเมียมและนิกเกิล จุดประสงค์ของการผสมโครเมียมเพื่อเพิ่มคุณสมบัติความต้านทานการกัดกร่อนด้วยการสร้างชั้นฟิล์มพาสสีพ (passive film) ขึ้นที่ผิวเหล็กกล้าไร้สนิมและยังเป็นธาตุช่วยเพิ่มเสถียรภาพของเฟสเฟอร์ไรต์ (ferrite stabilizer) การศึกษาผลของโครเมียมในเหล็กกล้าไร้สนิมต่อความต้านทานการกัดกร่อนเริ่มตั้งแต่ช่วงปี 1940 [1] ผลการวิจัยที่ผ่านมายังพบว่ามีการศึกษากันในแต่ละสิ่งแวดล้อม เช่น การศึกษาในสารละลาย อุณหภูมิ และความเป็นกรดด่างที่แตกต่างกัน เป็นต้น [2,4]

นิกเกิลเป็นธาตุช่วยเพิ่มเสถียรภาพของเฟสออสเทนไนต์ (austenite stabilizer) ที่มีคุณสมบัติแปรรูปได้ง่ายและมีความแกร่ง (toughness) ทั้งที่อุณหภูมิห้องและต่ำกว่าศูนย์องศาเซลเซียส [3] แต่คุณสมบัติต้านทานการกัดกร่อนของเหล็กกล้าไร้สนิมยังไม่มีข้อสรุปที่แน่ชัด [2-4]

งานวิจัยนี้ศึกษาผลของโครเมียมและนิกเกิลต่อพฤติกรรมการกัดกร่อนของเหล็กกล้าผสมสูงในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้น 3.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ที่พีเอช 2, 7, 10 อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส สารละลายอิ่มตัวด้วยอากาศ (aerated) และสภาวะไม่มีอากาศ (deaerated) เหล็กกล้าที่ใช้ศึกษามี 2 ชุด ชุดแรกมีส่วนผสมของโครเมียมเป็น 13, 15, 18 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และชุดที่สองมีส่วนผสมของนิกเกิลเป็น 15, 23, 31, 40 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก การศึกษาอาศัยเทคนิคการวัดเส้นโพลาไรเซชัน (polarization curve) และนำมาหาค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อน (corrosion potential, E_{corr}) ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อน (corrosion current density, I_{corr}) ค่าอัตราการกัดกร่อน (corrosion rate, R_{mpy}) ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าขณะวัสดุเกิดฟิล์มที่ผิว (passive current density, I_p) ค่าศักย์ไฟฟ้าเริ่มเกิดพาสสีพ (primary passive potential, E_{pp}) และค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนแบบรูเข็ม (pitting potential, E_p) ข้อสรุปจากผลการทดลองอาจใช้เป็นข้อมูลพื้นฐานสำหรับพัฒนาเหล็กกล้าโครเมียมและนิกเกิลต่อคุณสมบัติความต้านทานการกัดกร่อนต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์

ศึกษาผลของปริมาณโครเมียมและนิกเกิลต่อพฤติกรรมการกัดกร่อนของเหล็กกล้าผสมโครเมียม 13, 15 และ 18 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และเหล็กกล้าผสมนิกเกิล 15, 23, 31 และ 40 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ในสารละลาย A และ B ที่พีเอช 2, 7 และ 10

1.3 ขอบเขตของการศึกษา

1.3.1 วัดเส้นโพลาไรเซชัน (polarization curve) ของเหล็กกล้าผสมโครเมียม 13, 15 และ18 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และเหล็กกล้าผสมนิกเกิล 15, 23, 31 และ40 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ในสารละลาย A และ B ที่พีเอช 2, 7 และ 10

1.3.2 หาค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อน (corrosion potential, E_{corr}) ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อน (corrosion current density, I_{corr}) ค่าอัตราการกัดกร่อน (corrosion rate, R_{mpy}) ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าขณะวัสดุเกิดฟิล์มที่ผิว (passive current density, I_p) ค่าศักย์ไฟฟ้าเริ่มเกิดพาสสีพ (primary passive potential, E_{pp}) และค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนแบบรูเข็ม (pitting potential, E_p) จากเส้นโพลาไรเซชัน

1.3.3 ตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคที่ถูกกัดกร่อนด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง

1.3.4 วิเคราะห์และสรุปผลของโครเมียมและนิกเกิลต่อพฤติกรรมการกัดกร่อนของเหล็กกล้าโครเมียมและเหล็กกล้านิกเกิล

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 ทราบผลของโครเมียมและนิกเกิลต่อพฤติกรรมการกัดกร่อนของเหล็กกล้าโครเมียมและเหล็กกล้านิกเกิล

1.4.2 เป็นข้อมูลพื้นฐานสำหรับใช้พัฒนาเหล็กกล้าผสมโครเมียมและนิกเกิลในเชิงคุณสมบัติต้านทานการกัดกร่อนต่อไป

บทที่ 2

ปริทรรศน์วรรณกรรม

2.1 ไฟฟ้าเคมีของการกัดกร่อน [4]

การกัดกร่อนด้วยไฟฟ้าเคมีเป็นปฏิกิริยาที่โลหะสูญเสียแรงยึดระหว่างอะตอมของโลหะกลายเป็นไอออนหลุดออกไปสู่สิ่งแวดล้อมทำให้เกิดการกัดกร่อนตามสมการที่ 2.1

$$M = M^{n+} + ne^{-} \tag{2.1}$$

ปฏิกิริยานี้เป็นปฏิกิริยาออกซิเดชัน (oxidation) หรือปฏิกิริยาแอโนดิก (anodic reaction) เกิดขึ้นที่ขั้วแอโนด (anode) เพื่อให้เกิดสมดุลในระบบจะเกิดปฏิกิริยารีดักชัน (reduction) หรือปฏิกิริยาแคโทดิก (cathodic reaction) ที่ขั้วแคโทด (cathode) ปฏิกิริยาแคโทดิกแบ่งออกได้หลายแบบ เช่น

ก. รีดักชันของน้ำที่ไม่มีออกซิเจน (ค่าพีเอชต่ำกว่า 4)

$$2H^{+} + 2e^{-} = H_2 \tag{2.2}$$

ข. รีดักชันของน้ำที่มีออกซิเจน (ค่าพีเอชต่ำกว่า 4)

$$O_2 + 4H^{+} + 4e^{-} = H_2O \tag{2.3}$$

ค. รีดักชันของน้ำที่ไม่มีออกซิเจน(ค่าพีเอชสูงกว่า 4)

$$2H_2O + 2e^{-} = H_2 + 2OH^{-} \tag{2.4}$$

ง. รีดักชันของน้ำที่มีออกซิเจน (ภายในน้ำที่มีค่าพีเอชสูงกว่า 4)

$$O_2 + 2H_2O + 4e^{-} = 4OH^{-} \tag{2.5}$$

จ. รีดักชันของไอออนของโลหะ

$$M^{3+} + e^{-} = M^{2+} \tag{2.6}$$

ปฏิกิริยาแอโนดิกและแคโทดิกอาจเกิดขึ้นบนตำแหน่งใกล้กันหรือบนตำแหน่งที่ต่างกันอย่างชัดเจนบนผิวโลหะ เนื่องจากความไม่สม่ำเสมอของผิวโลหะและสารละลายที่สัมผัสอยู่บนผิวโลหะ ความไม่สม่ำเสมอของผิวโลหะมีสาเหตุจาก ส่วนผสมทางเคมี แรงเค้นที่หลงเหลือ การเกิดฟิล์มพาสสีพ และลักษณะของผิวโลหะที่แตกต่างกัน ความไม่สม่ำเสมอของสารละลายที่สัมผัสอยู่กับผิวโลหะมีหลายสาเหตุ เช่น ความเข้มข้นของไอออน ความเข้มข้นของก๊าซ อุณหภูมิ และ

อัตราเร็วการไหลของสารละลายนั้น หลังการเกิดปฏิกิริยาการกัดกร่อนจะเกิดการรวมตัวของไอออนในสารละลายทำให้เกิดผลิตภัณฑ์จากการกัดกร่อน เช่น การสูญเสียเนื้อโลหะในสารละลายที่ค่าพีเอช 4 - 10 เกิดเป็นสารประกอบไฮดรอกไซด์ของโลหะที่ผิวของโลหะนั้นตามสมการที่ (2.7) และ (2.8)

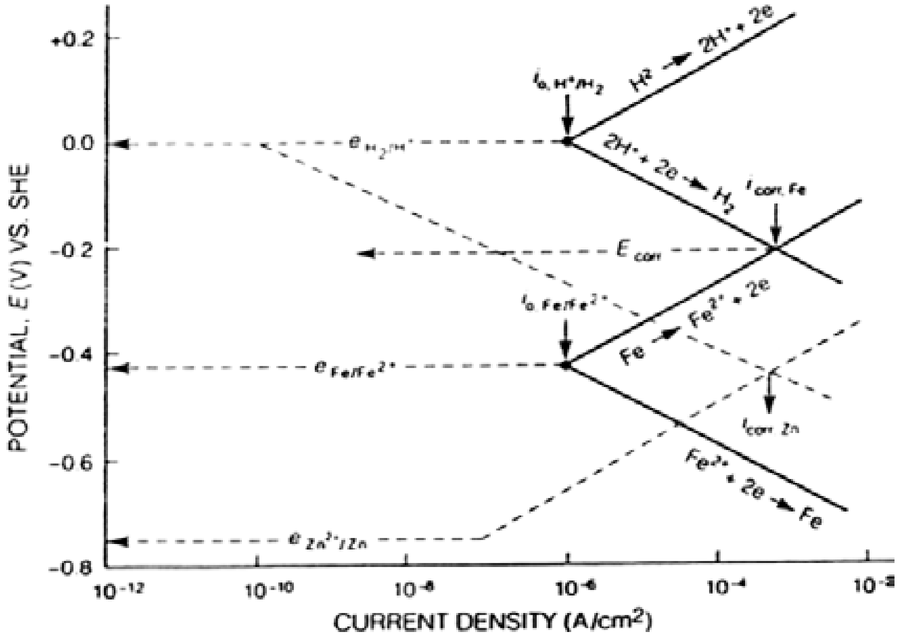
$$2Me^{2+} + 4OH^{-} = 2Me(OH)_2 \qquad (2.7)$$

$$2Me(OH)_2 + H_2O + 1/2O_2 = 2Me(OH)_3 \text{ หรือ } Me_2O_3(H_2O) \qquad (2.8)$$

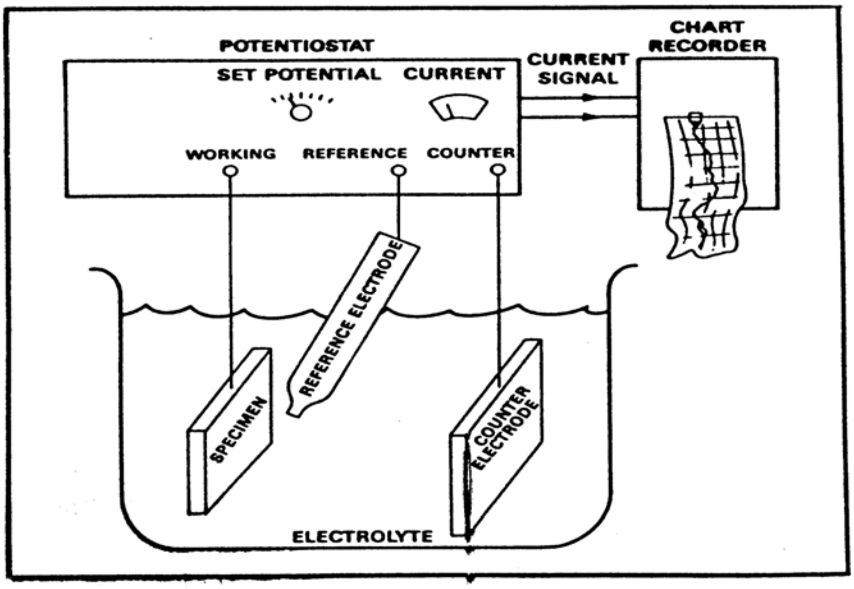
เมื่อสารประกอบ $Me_2O_3(H_2O)$ สูญเสียน้ำ (dehydration) กลายเป็นสารประกอบ MeOOH หรือ Me_2O_3 ที่มีคุณสมบัติลดอัตราการกัดกร่อน เช่น Cr_2O_3 ในเหล็กกล้าไร้สนิม

2.2 ศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อน และความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อน [4]

จากทฤษฎีศักย์ไฟฟ้ารวม (mixed potential theory) [4] ค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อน (corrosion potential, E_{corr}) คือ ค่าศักย์ไฟฟ้าตรงจุดที่ศักย์ไฟฟ้ารวมของปฏิกิริยาแอโนดิกในโลหะเท่ากับศักย์ไฟฟ้ารวมของปฏิกิริยาแคโทดิกในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ ความหนาแน่นกระแสที่ศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนเรียกว่า ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อน (corrosion current density, I_{corr}) ดังแสดงในรูปที่ 2.1 การวัดศักย์ไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าขณะเกิดการกัดกร่อน [3] สามารถทำได้โดยใช้เครื่องโพเทนชิโอสแตท (potentiostat) ดังแสดงในรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.1 ค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนและความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อนจากปฏิกิริยารวมระหว่างโลหะและสารละลายกรด [4]

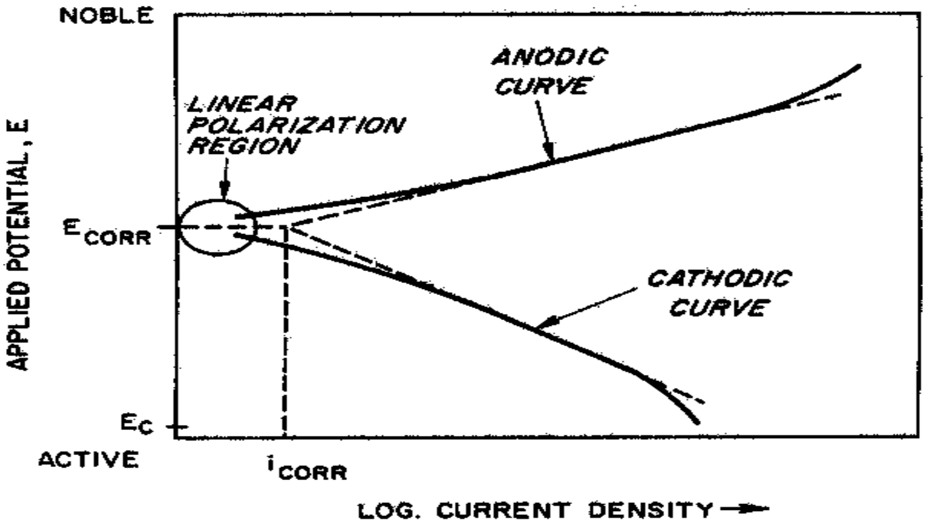


รูปที่ 2.2 ภาพจำลองเครื่องโพเทนชิโอสแตท (potentiostat) [5]

อิเล็กโทรดที่ใช้มี 3 ชนิดคือ

- อิเล็กโทรดอ้างอิง (reference electrode) คือ Ag/AgCl (3M KCl)
- อิเล็กโทรดกระแส (counter electrode) คือ แพลทินัม หรือ คาร์บอน
- อิเล็กโทรดตัวอย่าง (specimen) คือ ชิ้นงานตัวอย่างที่ต้องการทดสอบ

ค่าศักย์ไฟฟ้าได้จากการวัดเทียบระหว่างค่าศักย์ไฟฟ้าอิเล็กโทรดอ้างอิงกับอิเล็กโทรดตัวอย่าง ค่ากระแสไฟฟ้าได้จากการวัดเทียบระหว่างอิเล็กโทรดกระแสกับอิเล็กโทรดตัวอย่าง จากค่าศักย์ไฟฟ้าและค่ากระแสไฟฟ้าที่วัดได้นำมาสร้างกราฟแสดงความสัมพันธ์จะได้กราฟที่เรียกว่าเส้นโพลาไรเซชัน (polarization curve)



รูปที่ 2.3 ศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนและความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อน [1]

รูปที่ 2.3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างศักย์ไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าของปฏิกิริยาแอโนดิกและปฏิกิริยาแคโทดิกบนผิวของโลหะที่เกิดการกัดกร่อน การเกิดกระแสไฟฟ้าไหลผ่านผิวของขั้วไฟฟ้าทำให้ความต่างศักย์ของขั้วทั้งสองเกิดการเปลี่ยนแปลงในเส้นกราฟแอโนดิก (anodic curve) และเส้นกราฟแคโทดิก (cathodic curve) ที่แสดงถึงการเกิดโพลาไรเซชันของขั้วทั้งสอง [3-4] ค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนและกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อนหาได้จากจุดตัดของเส้นที่สัมผัสกับเส้นกราฟแอโนดิกและเส้นกราฟแคโทดิก ดังแสดงในรูปที่ 2.3 จากกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อนสามารถหาอัตราการกัดกร่อน [1] ได้จากสมการ (2.9)

$$R_{umpy} = [3.27 \times I_{corr} \times e] / \rho \qquad (2.9)$$

เมื่อ R_{umpy} คือ อัตราการเกิดการกัดกร่อน (ไมโครเมตรต่อปี)

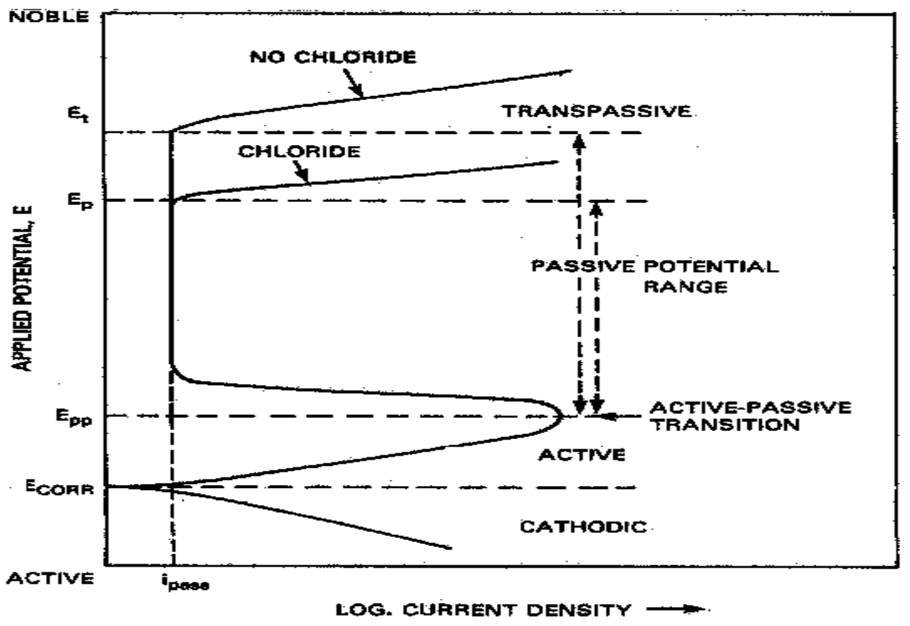
i_{corr} = ความหนาแน่นกระแสการกัดกร่อน (ไมโครแอมป์ต่อตารางเซนติเมตร)

e = น้ำหนักกรัมสมมูลย์ของโลหะ

ρ = ความหนาแน่นของโลหะ (กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร)

2.3 **เส้นโพลาไรเซชัน** (polarization curve) [2-4]

การศึกษาพฤติกรรมพาสซิวิตี (passivity) ของวัสดุจากเส้นกราฟโพลาไรเซชันทำได้โดยเพิ่มศักย์ไฟฟ้าจาก E_{corr} ในรูปที่ 2.3 ไปในทิศทางบวก (noble) และบันทึกค่ากระแสได้ความสัมพันธ์เป็นดังรูปที่ 2.4



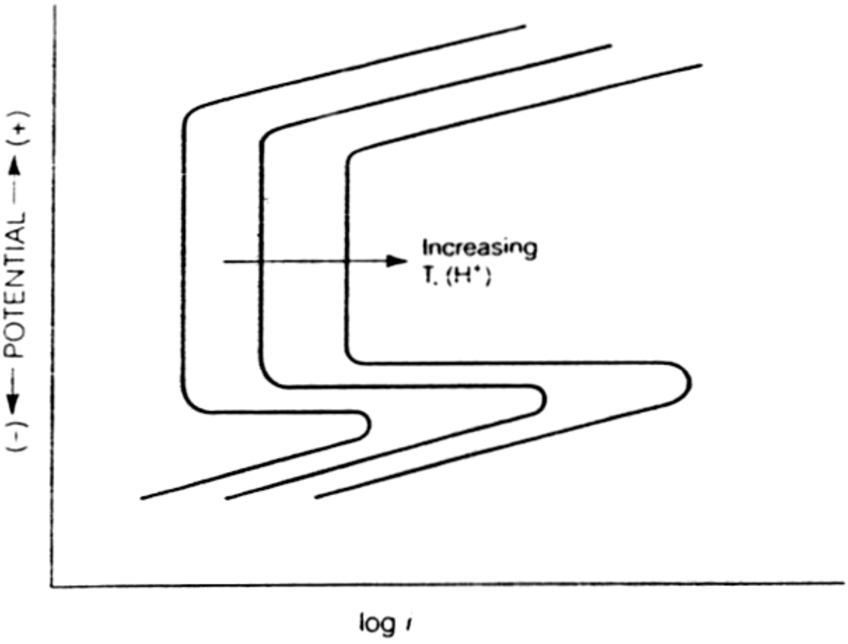
รูปที่ 2.4 เส้นโพลาไรเซชันและส่วนประกอบที่สำคัญ [1]

รูปที่ 2.4 เมื่อเพิ่มศักย์ไฟฟ้าจากค่าศักย์ไฟฟ้ากัดกร่อน (E_{corr}) ถึงจุดหนึ่งความหนาแน่นกระแสไฟฟ้ากลับลดลงจากเกิดชั้นฟิล์มพาสสีพบนผิวโลหะ ค่าศักย์ไฟฟ้าที่จุดเปลี่ยนแปลงจากพฤติกรรมการกัดกร่อนแบบแอคทีฟเป็นพาสสีพ (active-passive transition) เรียกว่า ศักย์ไฟฟ้าเริ่มเกิดฟิล์มพาสสีพ (E_{pp}) เมื่อเพิ่มศักย์ไฟฟ้าต่อไปความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าจะลดลงจนคงที่ที่ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าค่าหนึ่ง กราฟช่วงนี้เรียกว่าช่วงพาสสีพ (passive zone) ซึ่งแสดงถึงความเสถียรของฟิล์มพาสสีพบนผิวโลหะนั้นๆ ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้ากลับเพิ่มอย่างรวดเร็วเมื่อเพิ่มศักย์ไฟฟ้ามากถึงค่าศักย์ไฟฟ้าทรานพาสสีพ (E_t) หรือค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนแบบรูเข็มหรือหลุม (E_p)เพราะที่ค่าศักย์ไฟฟ้านี้ฟิล์มพาสสีพถูกทำลายและถูกกัดกร่อนเฉพาะที่แบบรูเข็มหรือหลุม การกัดกร่อนแบบรูเข็มหรือหลุมจะมีความรุนแรงมากขึ้นเมื่อศักย์ไฟฟ้าเพิ่มขึ้นเกินค่า E_t

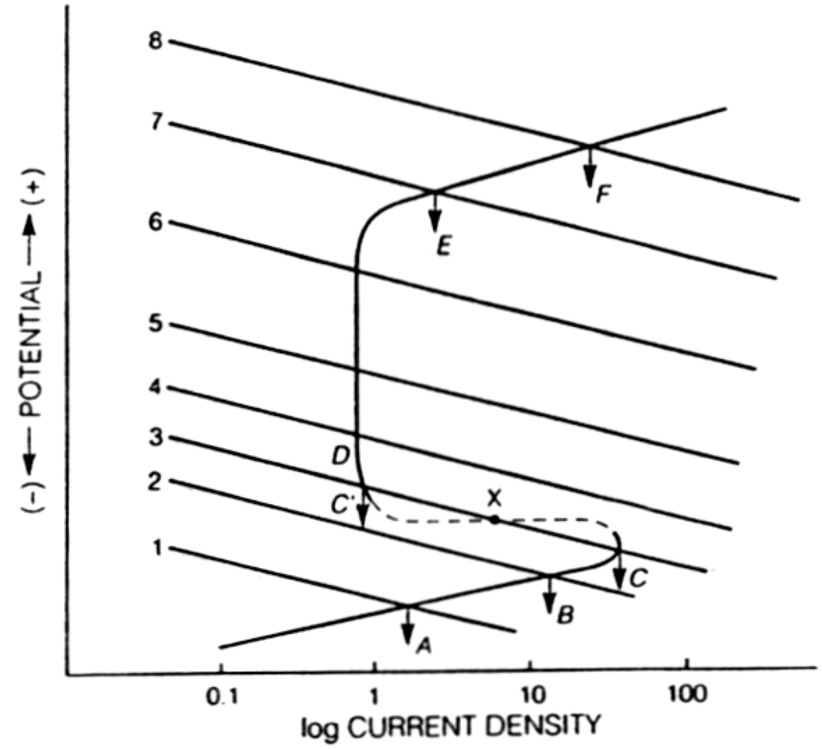
เส้นโพลาไรเซชันที่ได้จากการทดลองของโลหะตัวอย่างในสารละลายที่ไม่มีคลอไรด์จะมีค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนแบบรูเข็มและความกว้างช่วงพาสสีฟมากกว่าในสารละลายที่มีคลอไรด์ นอกจากนี้ตัวแปรอื่นที่มีผลต่อเส้นโพลาไรเซชัน ได้แก่ ปริมาณออกซิเจนในสารละลาย อัตราการเพิ่มค่าศักย์ไฟฟ้าหรืออัตราสแกน อุณหภูมิที่ใช้ในการทดลอง ความเข้มข้นของสารละลาย แรงเค้นในวัสดุ เป็นต้น [2,4]

2.4 ผลของตัวออกซิไดเซอร์ต่อการเปลี่ยนแปลงของเส้นโพลาไรเซชัน [4]

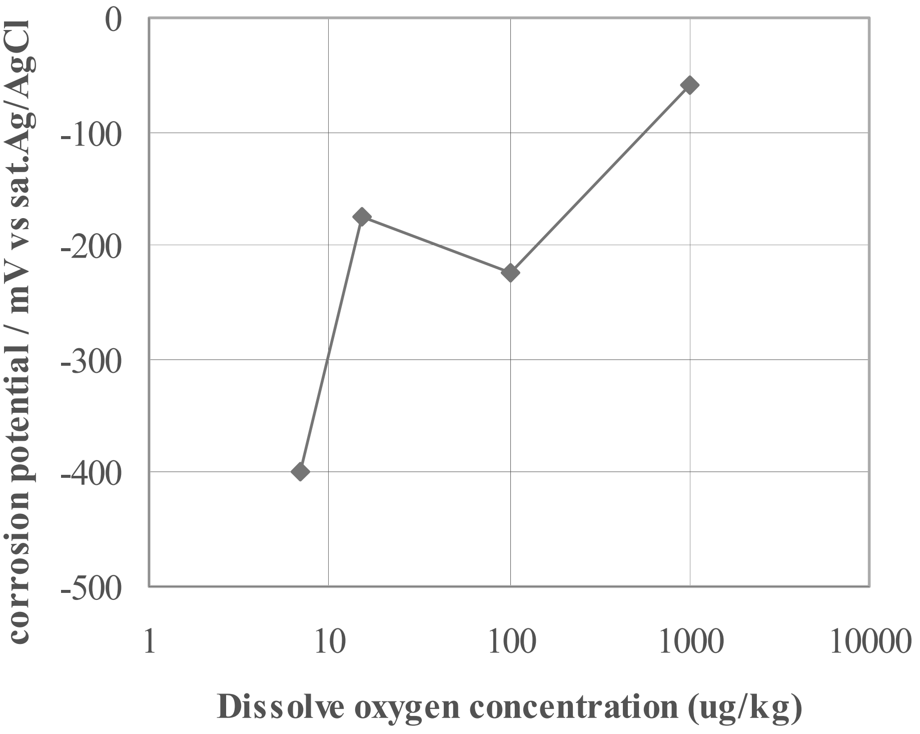
ตัวออกซิไดเซอร์ เช่น H^+, Fe^{3+} และ O_2 ที่มีแนวโน้มรวมตัวกับ e^- จากปฏิกิริยาออกซิเดชันได้ดี ถ้าปรากฏในสารละลายอิเล็กโทรไลต์จะเกิดการกัดกร่อนมากขึ้นจากการเพิ่มของศักย์ ไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าในครึ่งเซลล์ของปฏิกิริยารีดักชัน ปริมาณออกซิไดเซอร์ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งของเส้นโพลาไรเซชันจากสภาพป้องกันการกัดกร่อน (passive) เป็นสภาพไวต่อการกัดกร่อน (active) ดังแสดงรูปในที่ 2.5 และ 2.6 ในรูปที่ 2.5 ปริมาณออกซิไดเซอร์ในสารละลายกรด เช่น H^+ และ O_2 ส่งผลให้ศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนแบบรูเข็มมีค่าลดลง ขณะที่ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าขณะวัสดุเกิดฟิล์มมีค่าเพิ่มขึ้น ในรูปที่ 2.6 ความเข้มข้นของออกซิไดเซอร์เพิ่มจาก 1 ไป 2 ทำให้ตำแหน่งสมดุลหรือตำแหน่งที่ผลรวมปฏิกิริยาแอโนดิกเท่ากับปฏิกริยาแคโทดิกเลื่อนจากจุด A ไป B ทำให้ศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนและความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อนเพิ่มขึ้น ส่งผลให้มีอัตราการกัดกร่อนมากขึ้น เมื่อความเข้มข้นของออกซิไดเซอร์เพิ่มจาก 6 ไป 7 ตำแหน่งสมดุลเลื่อนจากจุด E ไป F ทำให้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าทรานพาสสีพสูงขึ้นหรือเกิดการกัดกร่อนเฉพาะที่รุนแรงขึ้น



รูปที่ 2.5 ผลของปริมาณออกซิไดเซอร์ในสารละลายกรดต่อการเปลี่ยนแปลงของเส้นโพลาไรเซชัน [4]



รูปที่ 2.6 การเปลี่ยนแปลงตำแหน่งของเส้นโพลาไรเซชันจากความเข้มข้นของออกซิไดเซอร์จากน้อย (1) ไปมาก (8) [4]



รูปที่ 2.7 ผลของปริมาณออกซิเจนที่ละลายในน้ำต่อศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนในเหล็กกล้าไร้สนิม SUS304 ที่มีการกัดกร่อนเฉพาะที่แบบในซอก (crevice corrosion) [6]

Masayoshi, Satoshi และคณะ [6] ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างผลของออกซิเจนที่ละลายในน้ำกับค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนในเหล็กกล้าไร้สนิม SUS304 ที่มีการกัดกร่อนเฉพาะที่แบบในซอก พบว่าปริมาณออกซิเจนที่ละลายในน้ำเพิ่มขึ้นมีผลให้ค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นดังแสดงรูปในที่ 2.7

2.5 ผลของค่าพีเอชของน้ำต่อการกัดกร่อน [7]

การเปลี่ยนแปลงค่าพีเอชมีผลต่อปฏิกิริยารีดักชันของ H^+ ตามสมการที่ 2.2 น้ำที่ค่าพีเอชน้อยกว่า 4 สารประกอบเหล็กออกไซด์ถูกทำลายจากปฏิกิริยารีดักชันของ H^+ ที่มีปริมาณมาก เมื่อไม่มีสารประกอบเหล็กออกไซด์การกัดกร่อนจากออกซิเจนตามสมการที่ 2.3 จึงเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว น้ำที่ค่าพีเอชช่วง 4-10 สารประกอบเหล็กออกไซด์แทบไม่ถูกทำลายจาก H^+ ที่มีปริมาณน้อย การกัดกร่อนจะเกิดจากปฏิกิริยารีดักชันของออกซิเจนที่สามารถผ่านสารประกอบออกไซด์ของเหล็กได้เท่านั้น ดังแสดงในสมการที่ 2.4 ที่ค่าพีเอชมากกว่า 10 สารประกอบเหล็กออกไซด์มีความเสถียรจากการเพิ่มขึ้นของไฮดรอกซิลด์ไอออน (OH^-) ทำให้การกัดกร่อนลดลง

2.6 โครเมียมและนิกเกิลในพาสสีฟฟิล์ม (Chromium and Nickel in layers of passive film)

ปกติการเกิดฟิล์มพาสสีพในโลหะจะประกอบด้วยชั้น (layer) ตามลำดับ [2] ดังนี้

1) ชั้นโลหะพื้น (metal หรือ bulk alloy) อยู่ด้านในสุด
2) ชั้นโลหะ-ออกไซด์ (metallic interface layer) อยู่ระหว่างโลหะพื้นและชั้นออกไซด์
3) ชั้นออกไซด์ (inner oxide layer) เป็นชั้นที่เกิดปฏิกิริยาพาสสีพ
4) ชั้นไฮดรอกไซด์ (outer hydroxide layer หรือ salt layer) เป็นชั้นที่เริ่มเกิดปฏิกิริยาพาสสีพ

I. Olefjord, B. Brox และ U. Jelvestam [9] ศึกษาปริมาณ นิกเกิล โครเมียม และโมลิบดินัมของชั้น (layer) ของเหล็กนิกเกิล เหล็กนิกเกิลโมลิบดินัม และ เหล็กนิกเกิลโครเมียม ด้วยเทคนิค XPS พบว่าเหล็กนิกเกิลจะเกิดการเลือกละลาย (selective dissolution) ของเหล็กในชั้นโลหะพื้นและในสารละลาย ขณะที่นิกเกิลเลือกละลายระหว่างชั้นโลหะกับชั้นออกไซด์มากที่สุด เช่น เดียวกับโมลิบดินัมในเหล็กนิกเกิลโมลิบดินัม โดยลักษณะดังกล่าวจะช่วยลดการละลายตัวแบบแอโนดิกจากการที่นิกเกิลเป็นธาตุทรานซิชันที่มีอิเล็กตรอนในชั้น d ไม่มีคู่ว่างอยู่จึงเกิดการแลกเปลี่ยนอิเล็กตรอนกับธาตุในกลุ่มทรานซิชันด้วยกัน เช่น เหล็ก โครเมียม โมลิบดินัม รวมตัวกันด้วยพันธะโลหะ (intermetallic bonding) ที่มีเสถียรภาพสูง [2,7] ในเหล็กนิกเกิลโครเมียมพบการเลือกละลายของโครเมียมบริเวณชั้นออกไซด์มากที่สุดขณะที่มีนิกเกิลในชั้นออกไซด์ต่ำมาก แสดงให้เห็นว่าโครเมียมเป็นธาตุหลักในการสร้างฟิล์มออกไซด์ของเหล็กกล้าไร้สนิม

S. Jin และ A. Atrens [10] ศึกษาการฟอร์มตัวของฟิล์มพาสสีพของเหล็กล้าไร้สนิม18-12 (มีส่วนผสม 18%Cr และ 12%Ni) หลังผ่านการแช่ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้น 0.1 โมลาร์ ด้วยเครื่อง ESCA พบว่าที่ค่าศักย์ไฟฟ้าต่ำกว่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนแบบรูเข็มของเหล็กกล้าไร้สนิม18-12 ฟิล์มพาสสีพของเหล็กกล้าไร้สนิม 18-12 ประกอบด้วย ชั้นนอกสุดเป็นชั้นสารประกอบไฮดรอกไซด์ ชั้นถัดเข้ามาเป็นชั้นสารประกอบของเหล็ก $\cong$ 16% โครเมียม $\cong$ 11% และออกซิเจน $\cong$ 70% และชั้นในสุดเป็นชั้นโลหะที่มีส่วนผสมทางเคมีต่างจากเนื้อวัสดุ ในชั้นนี้ประกอบด้วยนิกเกิลเป็นส่วนใหญ่และมีปริมาณโครเมียมลดลงจากส่วนนอกไปถึงส่วนในที่ติดกับเนื้อวัสดุ เมื่อค่าศักย์ไฟฟ้าในการทดลองสูงกว่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนแบบรูเข็มของเหล็กล้าไร้สนิม 18-12 พบว่าปริมาณโครเมียมในชั้นสารประกอบออกไซด์ไม่เปลี่ยนแปลงตามศักย์ไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้น แต่ปริมาณเหล็กลดลงเหลือ $\cong$ 3% และ $\cong$ 2% เมื่อศักย์ไฟฟ้าเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ S. Jin และ A. Atrens [11] ได้ศึกษาและรวบรวมข้อมูลการสร้างฟิล์มพาสสีพของเหล็กล้าไร้สนิมหลังการแช่ในสารละลายต่างๆ ด้วยเครื่อง ESCA ตัวอย่างฟิล์มพาสสีพดังตารางที่ 2.1

ตารางที่2.1 การทดสอบส่วนประกอบของฟิล์มพาสสีพหลังการแช่ในสารละลาย ต่างๆ ด้วยเครื่อง ESCA [11]

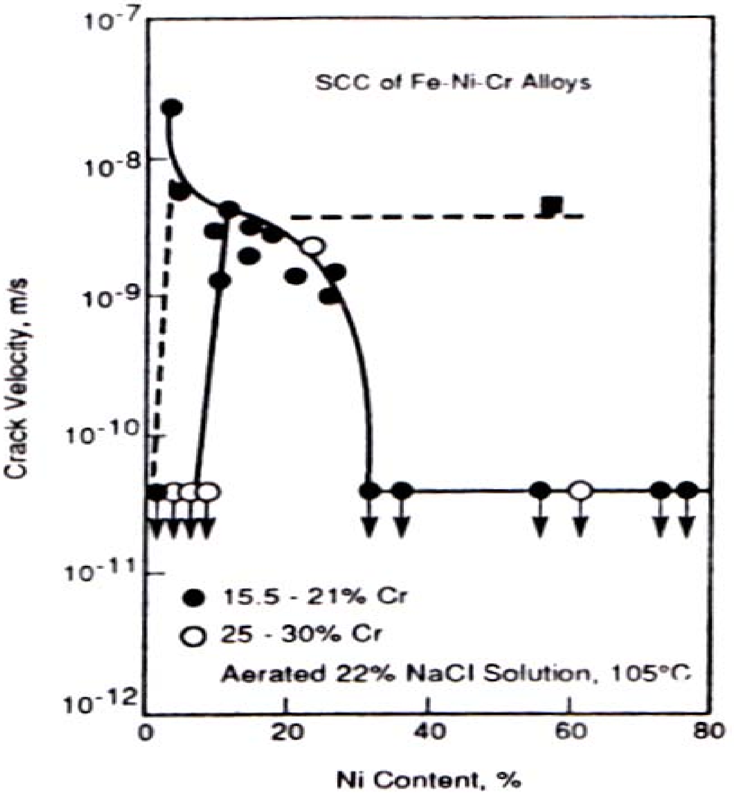
สารละลาย	องค์ประกอบของฟิล์มพาสสีพ	ชนิดของเหล็กกล้าไร้สนิม
3%NaCl	ชั้นออกไซด์อิ่มตัวด้วยเหล็กและโครเมียม	Fe-(5.9-30)Cr
3.5%NaCl	ชั้นออกไซด์อิ่มตัวด้วยเหล็กและโครเมียม ชั้นโลหะ-ออกไซด์มีปริมาณโครเมียมต่ำ	Fe-26Cr
H_2SO_4	ชั้นออกไซด์มีองค์ประกอบเป็น$(Fe,Cr)_2O_3$	Fe-26Cr

2.7 **ผลของนิกเกิลต่อพฤติกรรมการกัดกร่อนแบบมีแรงเค้น** (stress corrosion cracking) **ในสารละลายกลุ่มคลอไรด์** [12]

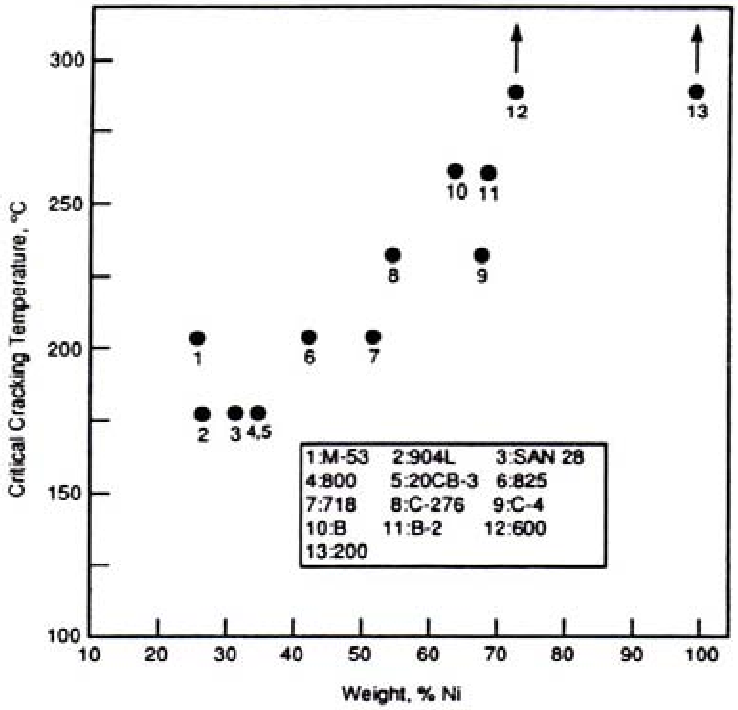
นิกเกิลในเหล็กกล้าไร้สนิมเป็นตัวสร้างเสถียรภาพให้กับเฟสออสเตนไนท์ (austenite stabilizer) ซึ่งมีความแกร่ง (toughness) ที่อุณหภูมิสูงและอุณหภูมิต่ำกว่าศูนย์องศาเซลเซียส ส่งผลให้การกัดกร่อนแบบมีแรงเค้นมีความรุนแรงลดลง

ผลของนิกเกิลต่อพฤติกรรมการกัดกร่อนแบบมีแรงเค้นได้ศึกษาในด้านของความเร็วรอยแตก (crack velocity) [13] โดยทดลองเหล็กโครเมียมนิกเกิลในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้น 22 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักในสภาวะอิ่มตัวด้วยอากาศ ที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส พบว่าเมื่อปริมาณนิกเกิลเพิ่มจาก 2 ถึง 76 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ความเร็วในการเคลื่อนที่ของรอยแตกลดลงแล้วคงที่เมื่อปริมาณนิกเกิลมากกว่า 35 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ดังแสดงในรูปที่ 2.8

การศึกษาผลของนิกเกิลต่ออุณหภูมิวิกฤตของการเกิดรอยแตก (critical cracking temperature) [14] โดยทดลองกลุ่มโลหะผสมนิกเกิลและเหล็กในสารละลายแมกนีเซียมคลอไรด์ความเข้มข้น 20.4 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักในสภาวะไม่มีอากาศ อุณหภูมิวิกฤติการเกิดรอยแตกสูงขึ้นตามปริมาณนิกเกิลที่เพิ่มจาก 25 ถึง 100 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ดังแสดงในรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.8 ผลของนิกเกิลต่ออัตราการเคลื่อนที่ของรอยแตกของเหล็กผสมโครเมียมและนิกเกิลในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ร้อนในสภาวะอิ่มตัวด้วยอากาศ [13]

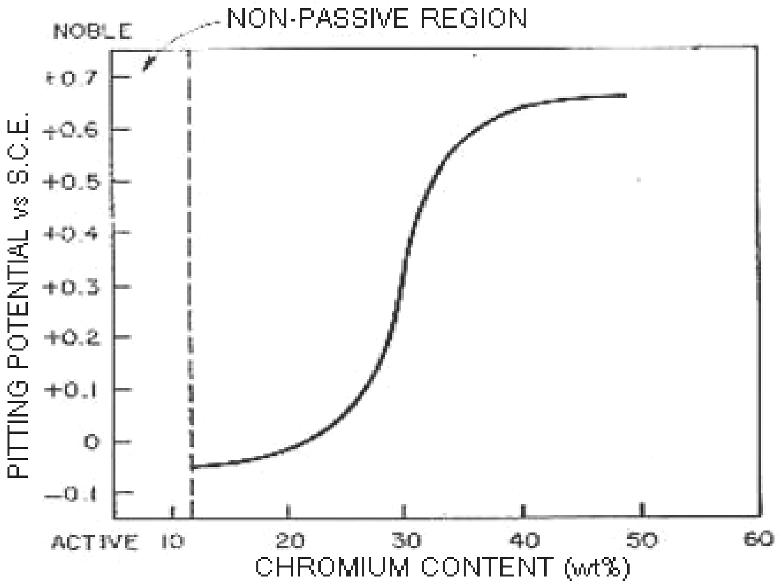


รูปที่ 2.9 ผลของนิกเกิลต่ออุณหภูมิวิกฤตของการเกิดรอยแตกของกลุ่มโลหะผสมนิกเกิลและเหล็กในสารละลายแมกนีเซียมคลอไรด์ 20.4 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักที่ไม่มีอากาศ [14]

2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

คุณสมบัติต้านทานการกัดกร่อนของเหล็กกล้าไร้สนิมปกติเกิดจากการสร้างสารประกอบออกไซด์ที่ผิวหรือพาสสีพฟิล์ม (passive film) ธาตุผสมมีผลต่อองค์ประกอบและคุณสมบัติของสารประกอบออกไซด์หรือฟิล์มพาสสีพ คุณสมบัติต้านทานการกัดกร่อนของเหล็กกล้าไร้สนิมจะเปลี่ยนแปลงตามสภาพแวดล้อม เช่น ความเป็นกรดด่าง สารละลาย อุณหภูมิ [2-4] ด้วยเหตุผลดังกล่าวจึงมีการศึกษาผลของธาตุผสมหลักที่สำคัญเช่น ผลของโครเมียมและนิกเกิลในเหล็กกล้าไร้สนิมต่อพฤติกรรมการกัดกร่อนในสิ่งแวดล้อมจำเพาะที่แตกต่างกัน ผลการศึกษาที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยนี้มีดังนี้

J. Horvath และ H. H. Uhlig [15] เสนอผลของโครเมียมต่อศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนแบบรูเข็มของในเหล็กโครเมียมในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 0.75 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก พบ ว่าเมื่อปริมาณโครเมียมสูงขึ้นจะส่งผลให้ศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนแบบรูเข็ม (pitting potential) มีค่าเพิ่มขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 2.10



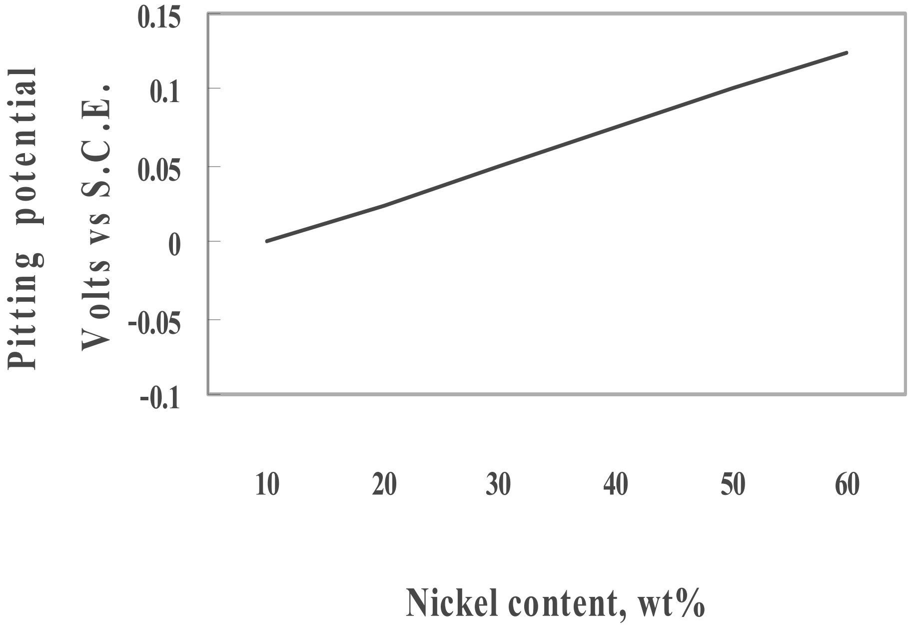
รูปที่ 2.10 ผลของโครเมียมต่อศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนแบบรูเข็มที่ผสมในเหล็กโครเมียมในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 0.75 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักในสภาวะไม่มีอากาศ [15]

นอกจากโครเมียมที่เพิ่มความต้านทานการกัดกร่อนแบบรูเข็ม โมลิบดินัมและไนโตรเจนก็มีส่วนเพิ่มความต้านทานการกัดกร่อนแบบรูเข็ม ดัชนีที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณโครเมียม โมลิบดินัม และไนโตรเจน กับคุณสมบัติต้านทานการกัดกร่อนแบบรูเข็มคือ Pitting Resistance Equivalent Number (PREN) [3] ดังแสดงในสมการที่ 2.10

$$PREN = \%Cr + 3.3\%Mo + 16\%N \tag{2.10}$$

อย่างไรก็ตาม PREN เป็นแค่ดัชนีชี้วัดเบื้องต้นในการแสดงแนวโน้มของความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณโครเมียม โมลิบดินัม และไนโตรเจน กับความต้านทานการกัดกร่อนแบบรูเข็ม เพราะ PREN ไม่ได้คำนึงถึงปัจจัยอื่นในการเกิดการกัดกร่อนแบบรูเข็ม เช่น อุณหภูมิวิกฤตในการเกิดการกัดกร่อนแบบรูเข็ม ความเป็นกรดด่างของสารละลาย และความเค้นสะสม [4, 6]

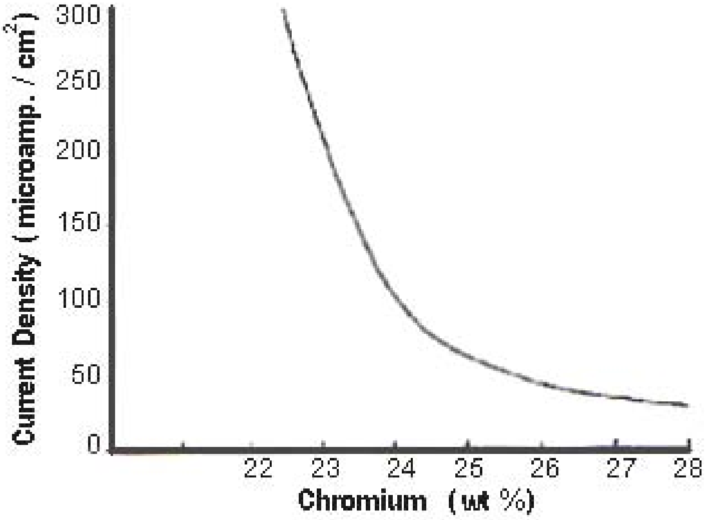
J. Horvath และ H. H.Uhlig [15] เสนอผลของนิกเกิลต่อศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนแบบรูเข็มของเหล็กผสมโครเมียม 15 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 0.75 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก พบว่าปริมาณนิกเกิลที่สูงขึ้นส่งผลให้ศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนแบบรูเข็มมีค่าเพิ่มขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 2.11



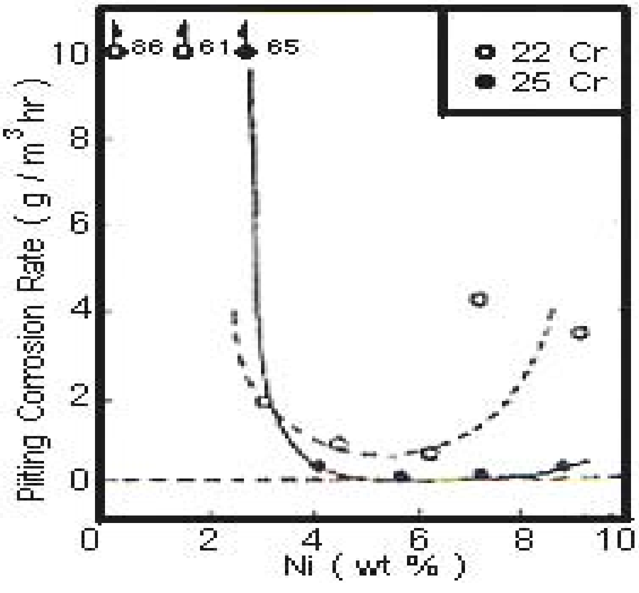
รูปที่ 2 .11 ผลของนิกเกิลต่อศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนแบบรูเข็มที่ผสมในเหล็กโครเมียม 15 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 0.75 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักในสภาวะไม่มีอากาศ [15]

C. V. Roscoc และ K. J. Gradwell [16] ศึกษาผลของโครเมียมและนิกเกิลต่อคุณสมบัติความต้านทานการกัดกร่อนแบบรูเข็มของเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ พบว่าเมื่อปริมาณโครเมียมเพิ่มขึ้นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อนของเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ลดลง ดังแสดงในรูปที่ 2.12 ส่วนการผสมนิกเกิลจะช่วยลดอัตราการกัดกร่อนแบบรูเข็มเมื่อมีปริมาณนิกเกิลที่เหมาะสม ดังแสดงในรูปที่ 2.13 เห็นได้ว่าเหล็กกล้าไร้สนิมผสมโครเมียม 25 เปอร์เซ็นต์

โดยน้ำหนักที่มีปริมาณนิกเกิล 4 - 8 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และเหล็กกล้าไร้สนิมผสมโครเมียม 22 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักที่มีปริมาณนิกเกิล 4 - 8 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก มีอัตราการกัดกร่อนแบบรูเข็มต่ำที่สุด แต่อัตราการกัดกร่อนกลับมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอีกเมื่อปริมาณนิกเกิลมากกว่า 8 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ทั้งกรณีเหล็กกล้าไร้สนิมที่มีส่วนผสมโครเมียม 22 และ 25 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

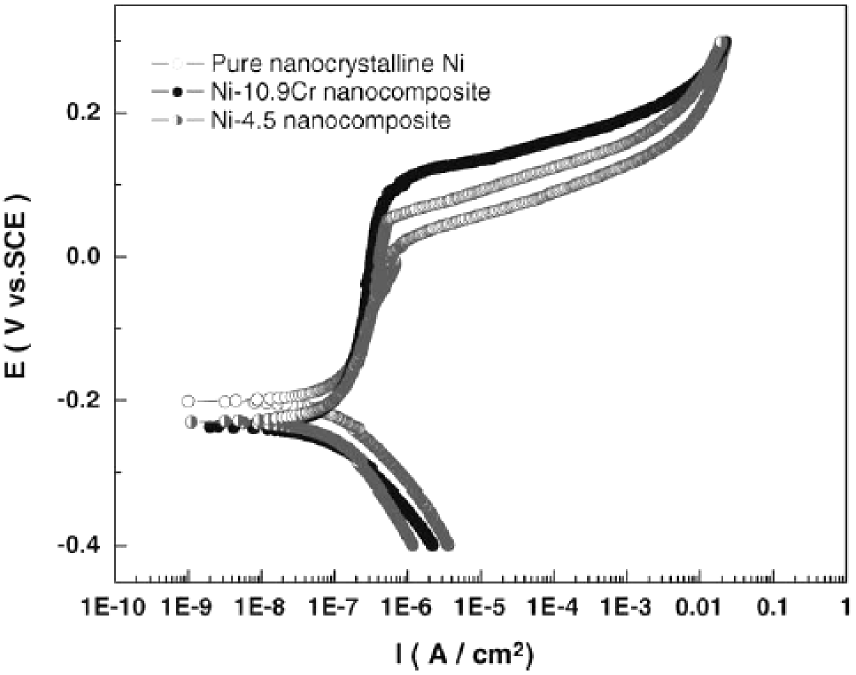


รูปที่ 2.12 ผลของโครเมียมต่อความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อนของเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้น 3 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส [16]



รูปที่ 2.13 ผลของนิกเกิลต่ออัตราการกัดกร่อนแบบรูเข็มของเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ที่มีส่วนผสมโครเมียม 22 และ 25 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ในสารละลายเฟอร์ริกคลอไรด์เข้มข้น 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส [16]

X. Peng, Y. Zang, J. Zhao และ F. Wang [17] ศึกษาเส้นโพลาไรเซชันของฟิล์มที่เกิดจากอนุภาคระดับนาโนเมตรของนิกเกิล (pure Ni) และนิกเกิล-โครเมียมที่เคลือบด้วยไฟฟ้าบนโลหะพื้นนิกเกิล 99.9 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 3.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ดังแสดงในรูปที่ 2.14 (ฟิล์มจากอนุภาคระดับนาโนเมตรของนิกเกิล-โครเมียมแบ่งเป็น Ni-4.5Cr และ Ni-10.9Cr ที่มีโครเมียม 4.5 และ 10.9 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ตามลำดับ) พบว่าปริมาณโครเมียมที่เพิ่มขึ้นในฟิล์มส่งผลให้ค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนและศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนแบบรูเข็มสูงขึ้น ขณะที่ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อนและความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าขณะวัสดุเกิดฟิล์มที่ผิวมีค่าลดลง ดังแสดงในตารางที่ 2.3

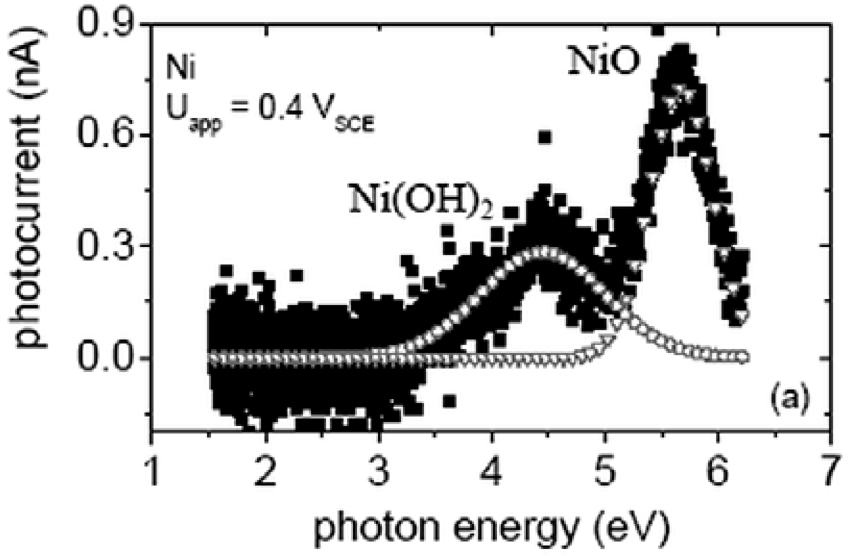


รูปที่ 2.14 ตัวอย่างเส้นโพลาไรเซชันของฟิล์มจากอนุภาคระดับนาโนเมตรของนิกเกิล (pure Ni) และนิกเกิล-โครเมียม ที่เคลือบด้วยไฟฟ้าบนโลหะพื้นนิกเกิล ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 3.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก [17]

H.J. Jang, H.Y. Ha และ H.S. Kwon [18] ศึกษาการสร้างฟิล์มพาสสีพของโลหะนิกเกิลในสารละลายบอเรตบัฟเฟอร์ที่ค่าพีเอช 8.5 ด้วยเทคนิคโฟโตไฟฟ้าเคมี (Photoelectrochemical) พบการเกิดฟิล์มพาสสีพที่ประกอบด้วย NiO ที่อยู่ชั้นในและ $Ni(OH)_2$ ที่ชั้นนอกของฟิล์ม ดังแสดงในรูปที่ 2.15

ตารางที่ 2.3 ค่า E_{corr}, I_{corr}, E_p, I_p ของฟิล์มจากอนุภาคระดับนาโนเมตรของนิกเกิล (pure Ni) และนิกเกิล-โครเมียม (Ni-4.5Cr และ Ni-10.9Cr) ที่เคลือบด้วยไฟฟ้าบนโลหะพื้นนิกเกิลในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 3.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส [17]

ตัวอย่าง	E_{corr} (mV)	I_{corr} (uA/cm^2)	E_p (mV)	I_p (uA/cm^2)
Pure Ni	-196.0	0.216	-85.0	0.3
Ni-4.5Cr	-201.0	0.095	-143.0	0.12
Ni-10.9Cr	-235.0	0.074	-198.0	0.10



รูปที่ 2.15 กระแสโฟโต (Photocurrent) ของฟิล์มพาสสีพของโลหะผสม Fe-20Cr-15Ni ในสารละลายบอเรตบัฟเฟอร์ [18]

จากการศึกษาผลของโครเมียมต่อพฤติกรรมการกัดกร่อนที่ผ่านมาเป็นข้อมูลที่แสดงผลของพฤติกรรมการกัดกร่อนในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ที่มีค่าพีเอชเป็นกลาง ไม่มีผลการเปลี่ยนแปลงค่าความเป็นกรดด่างเข้ามาเกี่ยวข้อง ส่วนผลของนิกเกิลต่อพฤติกรรมการกัดกร่อนเคมีที่ผ่านมาเป็นข้อมูลแสดงพฤติกรรมการกัดกร่อนของนิกเกิลร่วมกับโครเมียมปริมาณคงที่ 15 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก อีกทั้งไม่พบความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณนิกเกิลกับพฤติกรรมการกัดกร่อนที่ชัดเจนโดยเฉพาะในส่วนของพฤติกรรมการกัดกร่อนแบบรูเข็ม

กรณีศึกษาผลของโครเมียมต่อพฤติกรรมการกัดกร่อน ในการวิจัยนี้ศึกษาผลการเปลี่ยนแปลงค่าความเป็นกรดด่าง ได้แก่ สภาวะกรด (พีเอช 2) สภาวะเป็นกลาง (พีเอช 7) และ

สภาวะด่าง (พีเอช 10) เพื่อแสดงแนวโน้มพฤติกรรมการกัดกร่อนของเหล็กกล้าผสมโครเมียม 13, 15 และ 18 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าความเป็นกรดด่าง ส่วนกรณีศึกษาผลของนิกเกิลต่อพฤติกรรมการกัดกร่อนได้ศึกษาทำนองเดียวกันโดยใช้เหล็กกล้าผสมนิกเกิล 15, 23, 31 และ 40 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เพื่อศึกษาแนวโน้มของพฤติกรรมการกัดกร่อนจากผลของนิกเกิลเพียงธาตุเดียวให้ชัดเจนยิ่งขึ้น

บทที่ 3

ขั้นตอนและวิธีดำเนินการทดลอง

เหล็กที่ใช้ศึกษามี 2 ชุด ชุดแรกมีส่วนผสมของโครเมียมเป็น 13, 15, 18 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก (Fe-13Cr, Fe-15Cr และ Fe-18Cr) และชุดที่สองมีส่วนผสมของนิกเกิลเป็น 15, 23, 31, 40 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก (Fe-15Ni, Fe-23Ni, Fe-31Ni และ Fe-40Ni)

3.1 วัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

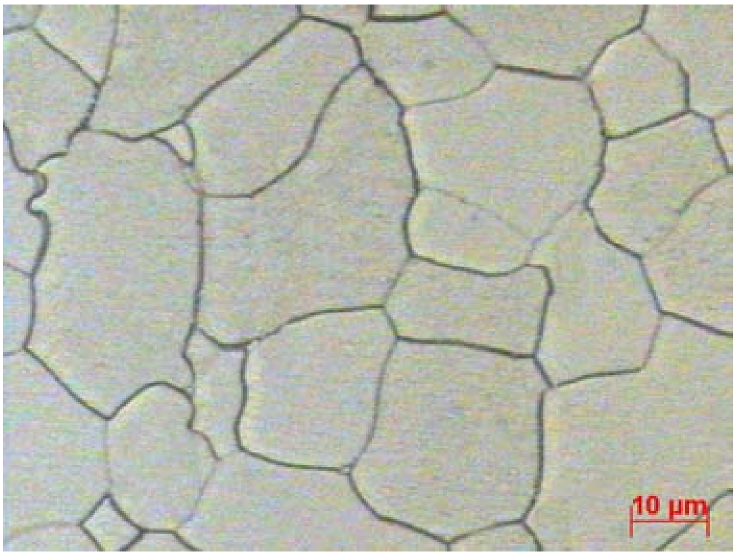
3.1.1 ชิ้นงานที่ใช้ในการทดลอง

3.1.1.1 เหล็กกล้าโครเมียม (Fe-13Cr, Fe-15Cr และ Fe-18Cr) ได้รับความอนุเคราะห์จากห้องปฏิบัติการวิจัยของ ศ.ดร. T. Maki ภาควิชาวัสดุศาสตร์และวัสดุวิศวกรรม มหาวิทยาลัยเกียวโต โดยมีส่วนผสมทางเคมีดังตารางที่ 3.1

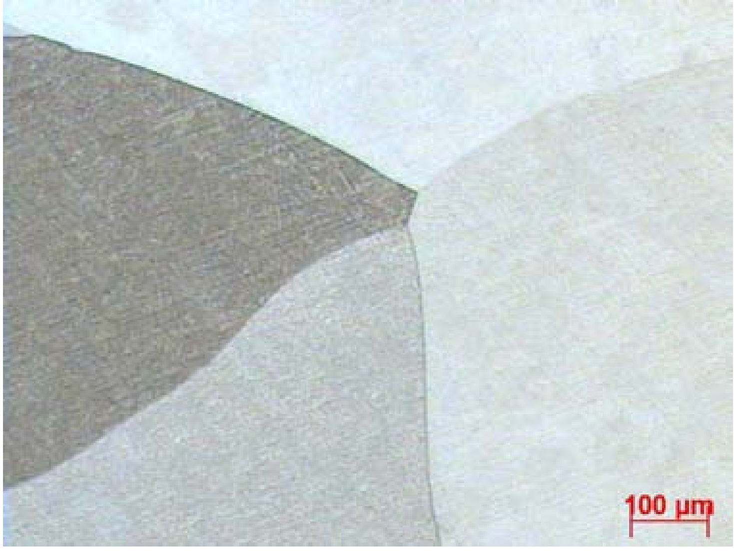
ตารางที่ 3.1 ส่วนผสมทางเคมี (เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก) ของเหล็กกล้าโครเมียม

ชิ้นงาน	ส่วนผสมทางเคมี (เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก)								
	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Al	Mo
Fe-13Cr	0.033	0.547	0.512	0.026	0.009	0.076	12.50	0.013	0.085
Fe-15Cr	0.027	0.078	0.019	0.003	0.001	0.015	15.00	0.012	0.033
Fe-18Cr	0.019	0.232	0.196	0.012	0.002	0.052	17.57	0.012	0.041

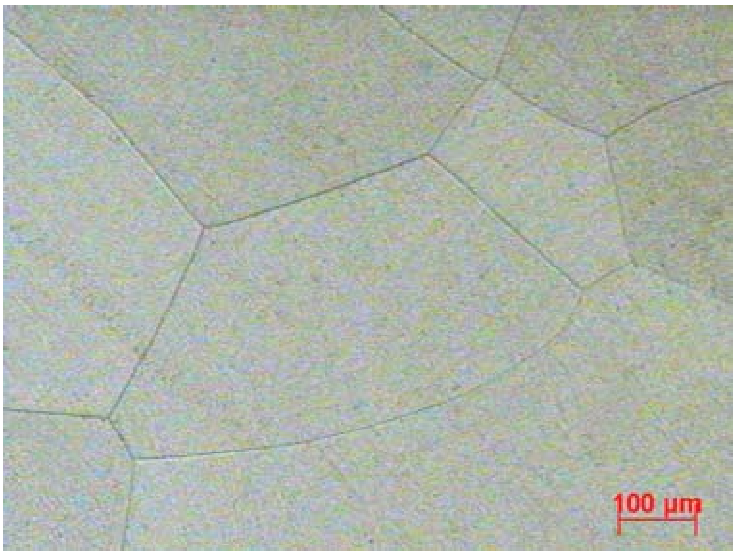
ชิ้นงานเหล็กกล้าโครเมียมผ่านการอบที่อุณหภูมิ 1325 องศาเซลเซียส 1 ชั่วโมง15 นาที แล้วชุบน้ำจนเย็นตัวถึงอุณหภูมิห้อง โดยมีโครงสร้างจุลภาคดังแสดงในรูปที่ 3.1



ก. Fe-13Cr



ข. Fe-15Cr



ค. Fe-18Cr

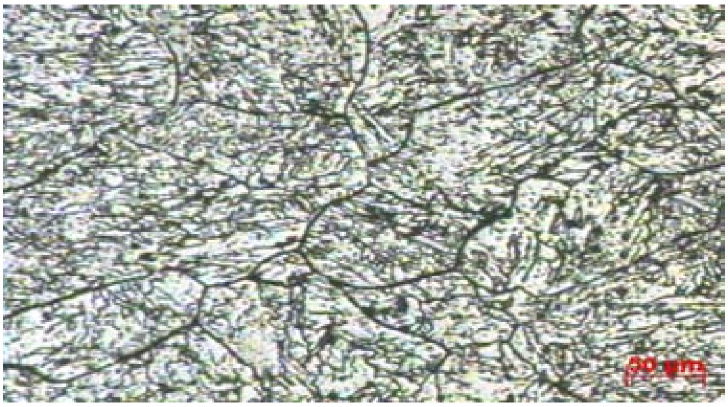
รูปที่ 3.1 โครงสร้างจุลภาคของเหล็กกล้าโครเมียมที่ผ่านการอบชุบความร้อน

3.1.1.2 เหล็กกล้านิกเกิล (Fe-15Ni, Fe-23Ni, Fe-31Ni และ Fe-40Ni) ได้รับความอนุเคราะห์จากห้องปฏิบัติการวิจัยของ ศ.ดร. T. Maki ภาควิชาวัสดุศาสตร์และวัสดุวิศวกรรม มหาวิทยาลัยเกียวโต โดยมีส่วนผสมทางเคมีดังตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 ส่วนผสมทางเคมี (เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก) ของเหล็กกล้านิกเกิล

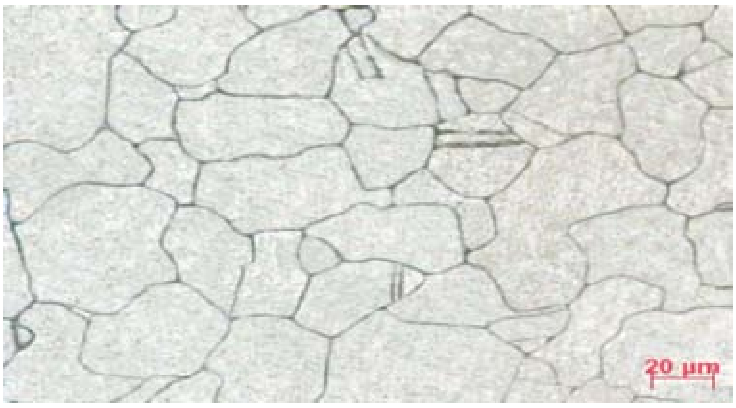
ชิ้นงาน	ส่วนผสมทางเคมี (เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก)							
	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Al
Fe-15Ni	0.0017	0.006	0.003	<0.003	0.0019	14.99	-	0.015
Fe-23Ni	<0.01	<0.005	<0.01	0.002	0.003	23.00	-	0.015
Fe-31Ni	0.005	0.005	0.01	0.002	0.008	30.80	-	0.015
Fe-40Ni	0.01	0.008	<0.01	0.004	0.015	39.99	-	0.023

ชิ้นงานเหล็กกล้านิกเกิลผ่านการอบที่อุณหภูมิ 1225 องศาเซลเซียส 1 ชั่วโมง 20 นาที แล้วปล่อยให้เย็นตัวในเตาจนถึงอุณหภูมิห้อง โดยมีโครงสร้างจุลภาคดังแสดงในรูปที่ 3.2

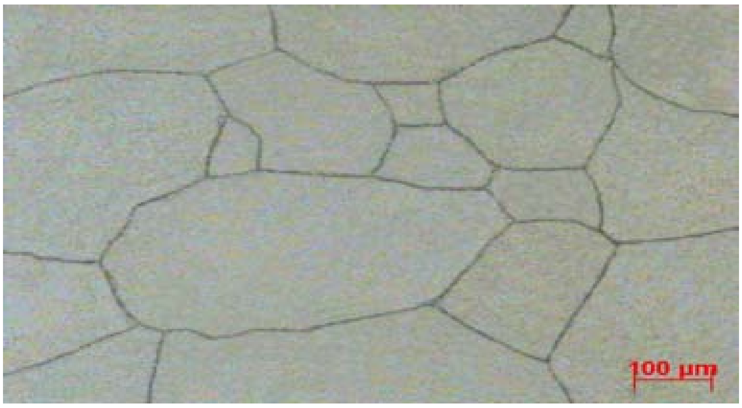


ก. Fe-15Ni

ข. Fe-23Ni



ค. Fe-31Ni

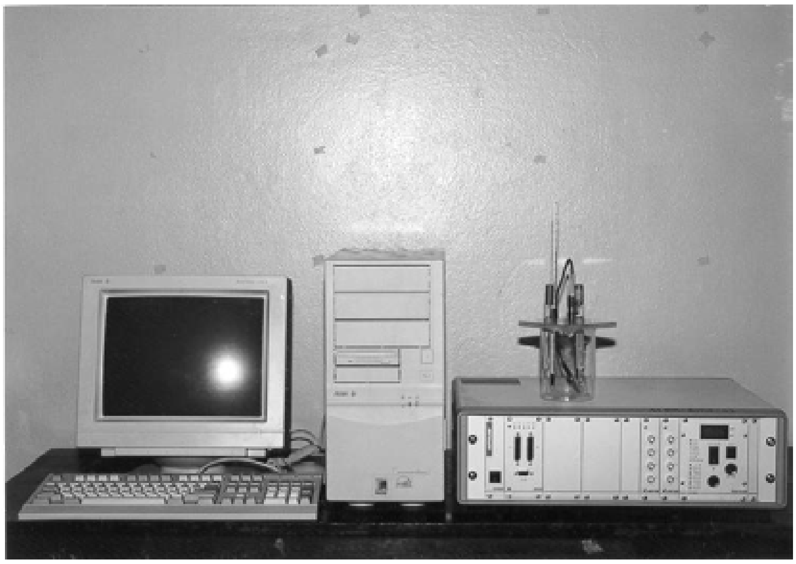


ง. Fe-40Ni

รูปที่ 3.2 โครงสร้างจุลภาคของเหล็กกล้านิกเกิลที่ผ่านการอบชุบความร้อน

3.1.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

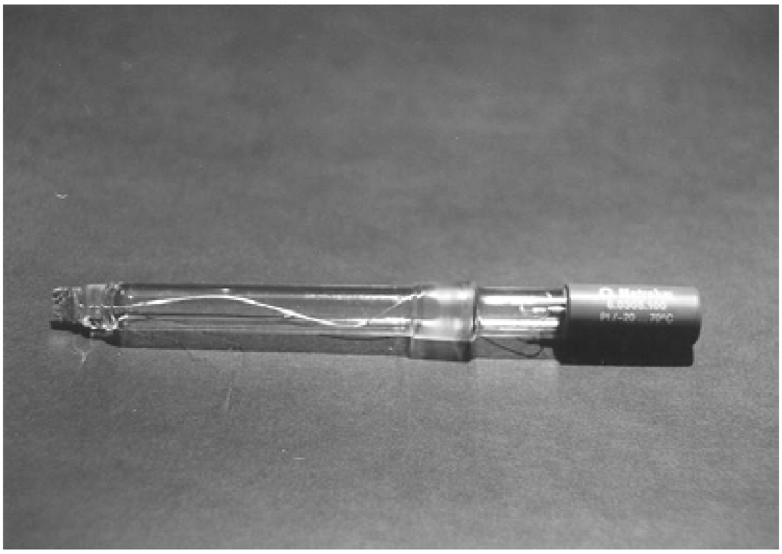
3.1.2.1 เครื่องมือวัดเส้นโพลาไรเซชัน (โพเทนซิโอสแตท รุ่น PGSTAT 20 (GPES)) ดังแสดงในรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 เครื่องโพเทนซิโอสแตทรุ่น PGSTAT 20(GPES)

อิเล็กโทรดประกอบด้วยอิเล็กโทรดอ้างอิง (reference electrode) ได้แก่ Ag / AgCl (3 M KCl) (silver chloride electrode) และอิเล็กโทรดวัดกระแส (counter electrode) ได้แก่ แพลทินัม (Pt) ดังแสดงในรูปที่ 3.4 และ 3.5 ตามลำดับ ในส่วนของอิเล็กโทรดตัวอย่าง (working electrode) คือ ชิ้นงานทดสอบเหล็กกล้าโครเมียม (Fe-13Cr, Fe-15Cr และ Fe-18Cr) และเหล็กกล้านิกเกิล (Fe-15Ni, Fe-23Ni, Fe-31Ni และ Fe-40Ni)

รูปที่ 3.4 อิเล็กโทรดอ้างอิง (Reference electrode)



รูปที่ 3.5 อิเล็กโทรดวัดกระแส (Counter electrode)

3.1.2.2 เครื่องมือสำหรับเตรียมผิวชิ้นงาน

1) กระดาษทราย (เบอร์ 80-1200) ผ้าสักหลาดและผงขัดเพชร (ขนาด 1 และ 3 ไมครอน)

2) เครื่องขัดผิวชิ้นงาน

3) เครื่องทำความสะอาดด้วยคลื่นอัลตร้าโซนิค (ultrasonic cleaning)

3.1.2.3 เครื่องมือวิเคราะห์

1) กล้องจุลทรรศน์แสง (optical microscope)

2) เครื่องมือวิเคราะห์ส่วนผสมเคมี (emission spectroscopy)

3) กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด (SEM)

4) เครื่อง X-ray diffraction (XRD)

3.1.2.4 สารเคมี

1) สารละลายโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้น 3.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักอิ่มตัวด้วยอากาศ (สารละลาย A) และไม่มีอากาศ (สารละลาย B)

2) กรดซัลฟิวริก (H_2SO_4) และสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH)

3) สารละลาย Villela: 100 ml.ethanal, 10 ml.HCl & 5 g.picric acid สำหรับกัดดูโครงสร้างจุลภาคของเหล็กกล้าโครเมียม

4) สารละลาย Kalling 2: 100 ml.ethanal, 33 ml.distilled water, 33 ml.HCl & 5 g.Cu_2Cl หรือ สารละลาย Marble: 100 ml.ethanal, 100 ml.HCl & 20 g.Cu_2SO_4 สำหรับกัดดูโครงสร้างจุลภาคของเหล็กกล้านิกเกิล

3.2 ขั้นตอนการทดลอง

3.2.1 การตรวจสอบความต้านทานการกัดกร่อนโดยวิธีการวัดเส้นโพลาไรเซชัน

3.3.1.1 นำชิ้นงานเหล็กกล้าโครเมียม (Fe-13Cr, Fe-15Cr และ Fe-18Cr) และเหล็กกล้านิกเกิล (Fe-15Ni, Fe-23Ni, Fe-31Ni และ Fe-40Ni) ขนาด 30x10x5 มิลลิเมตร มาขัดผิวหน้าทุกด้านด้วยกระดาษทรายเบอร์ 80 - 1200

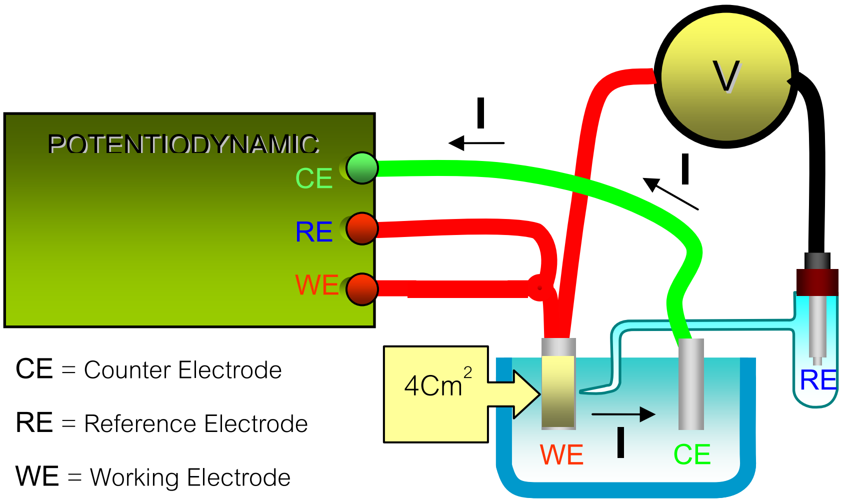
3.3.1.2 เตรียมสารละลาย A และ B ปริมาตร 300 ลูกบาศก์เซนติเมตร ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ปรับค่าพีเอชสารละลายเป็น 2 (ด้วย 2-5 mol.H_2SO_4), 7 และ 10 (ด้วย 0.3-1 wt%.NaOH) ในสารละลาย A พ่นอากาศประมาณ 30 นาที และสารละลาย B ไล่อากาศด้วยไนโตรเจนประมาณ 120 นาที ก่อนทำการทดลองหาเส้นโพลาไรเซชัน

3.3.1.3 ทดสอบชิ้นงานด้วยเทคนิคโพเทนทิโอไดนามิกในสารละลายข้อ 3.3.1.2 โดยให้ชิ้นงานสัมผัสกับสารละลายเป็นพื้นที่ประมาณ 4 ตารางเซนติเมตร ดังรูปที่ 3.6

3.3.1.4 หาเส้นโพลาไรเซชันของเหล็กกล้าโครเมียม (Fe-13Cr, Fe-15Cr และ Fe-18Cr) และเหล็กกล้านิกเกิล (Fe-15Ni, Fe-23Ni, Fe-31Ni และ Fe-40Ni) ในสารละลายข้อ 3.3.1.2 ด้วยอัตราการสแกน 0.1 มิลลิโวลต์ต่อวินาที ทดลองซ้ำตามสภาวะเดิม 3 ครั้ง

3.3.1.5 วัดค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อน (corrosion potential, E_{corr}) ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อน (corrosion current density, I_{corr}) ค่าอัตราการกัดกร่อน (corrosion rate R_{mpy}) ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าขณะวัสดุเกิดฟิล์มที่ผิว (passive current density, I_p) ค่าศักย์ไฟฟ้าเริ่มเกิดพาสสีพ (primary passive potential, E_{pp}) และค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนแบบรูเข็ม (pitting potential, E_p) จากเส้นโพลาไรเซชัน

3.3.1.6 วิเคราะห์ความสัมพันธ์ของตัวแปรในข้อ 3.3.1.5 กับส่วนผสมโครเมียมและนิกเกิล



รูปที่ 3.6 การทดลองหาเส้นโพลาไรเซชันด้วยเทคนิคโพเทนทิโอไดนามิก

3.2.2 การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคบริเวณที่ถูกกัดกร่อน

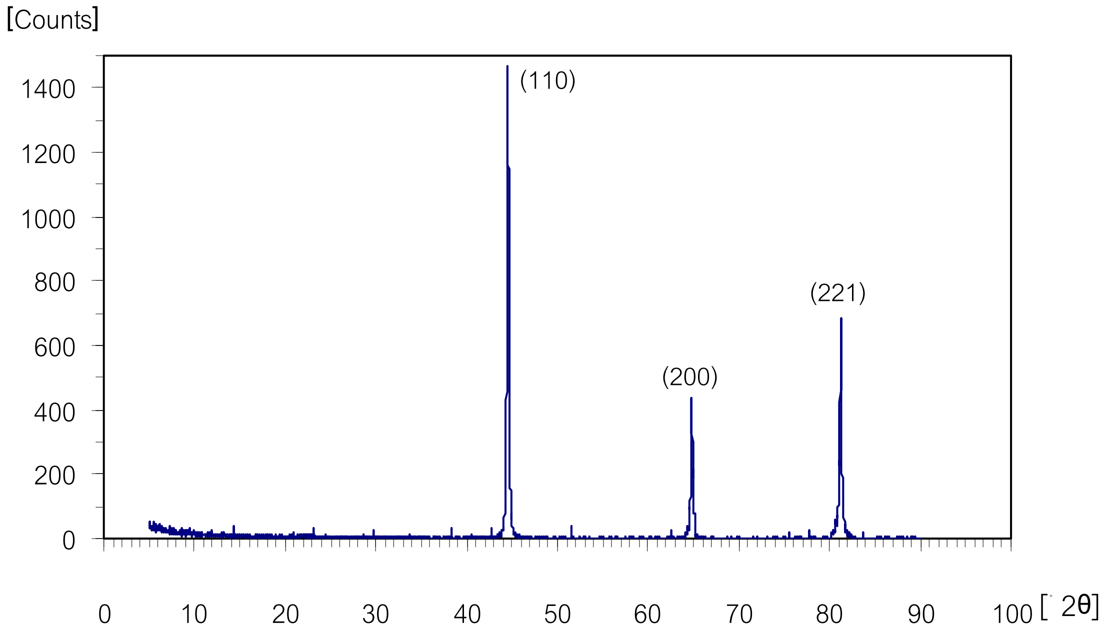
3.3.2.1 นำชิ้นงานที่ถูกกัดกร่อนในช่วงค่าศักย์ไฟฟ้าทรานพาสสีพมาขัดละเอียดด้วยผงเพชรขนาด 3 และ 1 ไมครอน ตามลำดับ แล้วกัดผิวหน้าชิ้นงานด้วยสารละลาย Villela ที่อุณหภูมิห้องสำหรับเหล็กกล้าโครเมียม และสารละลาย Kalling 2 หรือ Marble ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียสสำหรับเหล็กกล้านิกเกิล

3.3.2.2 ตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคที่ถูกกัดกร่อนในช่วงค่าศักย์ไฟฟ้าทรานพาสสีพโดยกล้องจุลทรรศน์ชนิดแสง

บทที่ 4

ผลการทดลองและการอภิปราย

จากการทดสอบ XRD เพื่อทราบถึงโครงสร้างผลึกของเหล็กกล้าโครเมียมที่ใช้ศึกษาพฤติกรรมการกัดกร่อน ผลทดสอบ XRD ของเหล็กกล้าโครเมียม Fe-13Cr, Fe-15Cr และ Fe-18Cr มีลักษณะคล้ายคลึงกัน แตกต่างกันที่ค่า intensity ของพีคลำดับที่ 1, 2 และ 3 ดังนั้นได้นำผลทดสอบ XRD ของเหล็กกล้าโครเมียม Fe-18Cr มาเป็นตัวอย่างในการนำเสนอ ดังแสดงในรูปที่ 4.1 และการระบุดัชนีของพีคตัวอย่างแสดงในตารางที่ 4.1 (ผลทดสอบ XRD และการคำนวณเพื่อระบุดัชนีพีคตัวอย่างของเหล็กกล้าโครเมียมทั้งหมดแสดงในภาคผนวก ง)



รูปที่ 4.1 ผลทดสอบ XRD ของเหล็กกล้าโครเมียม Fe-18Cr

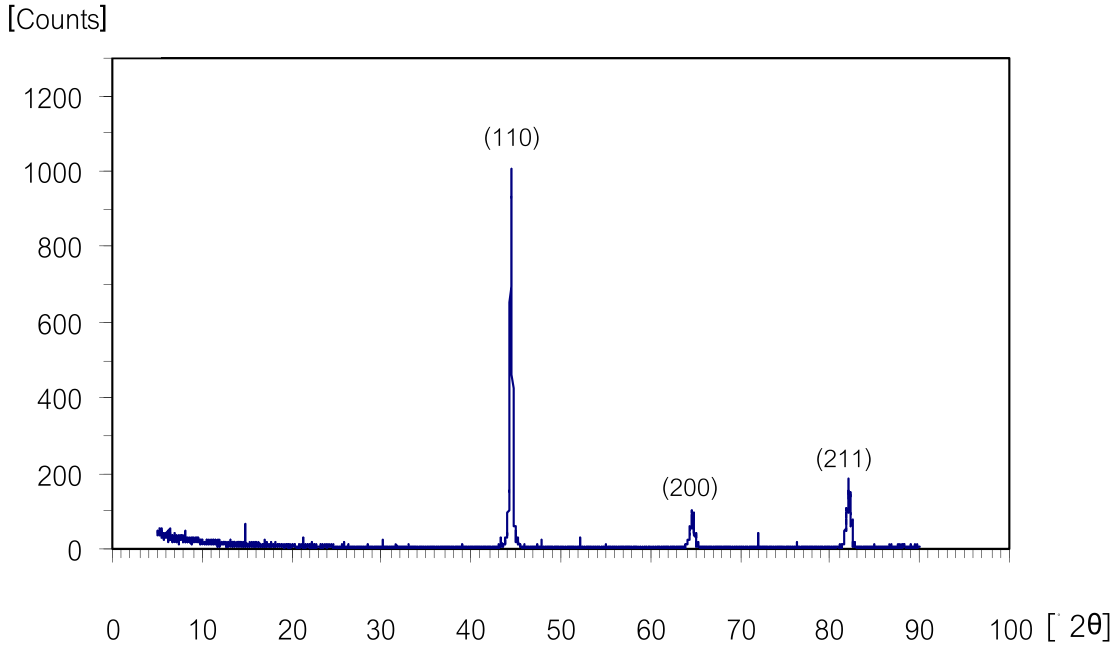
ตารางที่ 4.1 การระบุดัชนี (hkl) พีคตัวอย่างของเหล็กกล้าโครเมียม Fe-18Cr

ชิ้นงาน	พีคลำดับที่	2θ	sin(θ)	d_{hkl}	$sin^2(θ)$	$\{sin^2(θ) \times 2\}$ / Min. of $sin^2(θ)$	$h^2+k^2+l^2$	hkl
Fe-18Cr	1	44.55	0.379	2.034	0.144	2.00	2	110
	2	64.83	0.536	1.438	0.287	5.99	4	200
	3	81.69	0.654	1.174	0.428	5.94	6	221

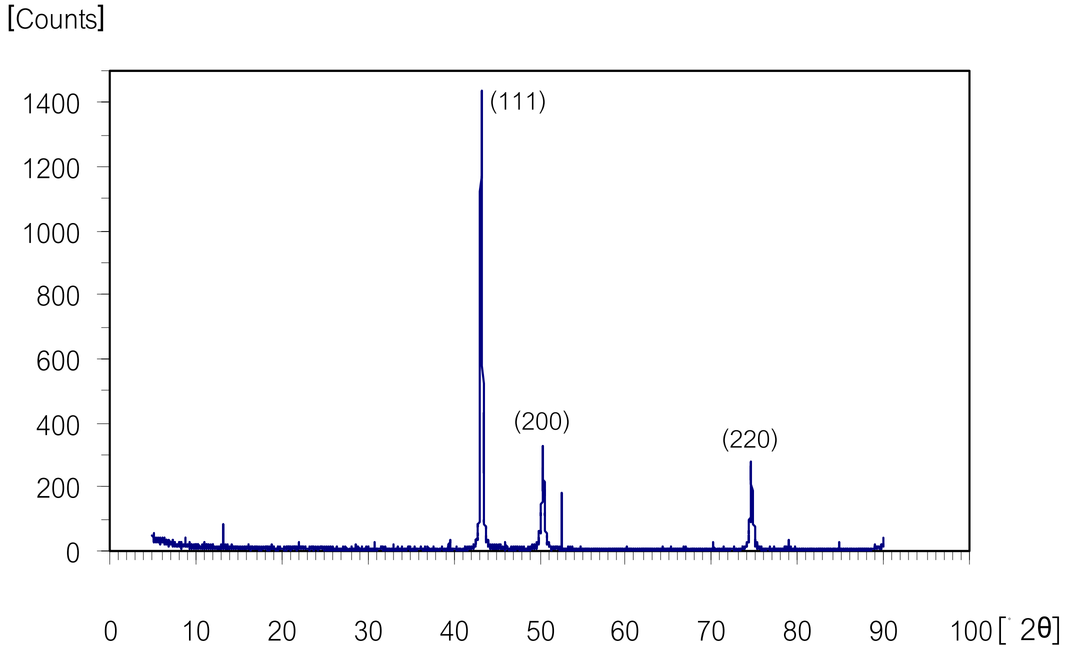
จากการเปรียบเทียบค่ามุม 2θ ระยะห่างระหว่างระนาบผลึก (d_{hkl}) และ ระนาบผลึก hkl ที่คำนวณจากผลทดสอบ XRD ของเหล็กกล้าโครเมียม Fe-13Cr, Fe-15Cr และ Fe-18Cr กับข้อมูล XRD จาก JCPDS พบว่าใกล้เคียงกับข้อมูลของเหล็กโครเมียมและเหล็กกล้าไร้สนิม 434L ที่มีโครงสร้างผลึกแบบ body-center-cubic (bcc)

การทดสอบ XRD เพื่อทราบถึงโครงสร้างผลึกของเหล็กกล้านิกเกิลที่ใช้ศึกษาพฤติกรรมการกัดกร่อน ผลทดสอบ XRD ของเหล็กกล้านิกเกิล Fe-15Ni มีลักษณะคล้ายกับ Fe-23Ni ขณะที่เหล็กกล้านิกเกิล Fe-31Ni มีลักษณะคล้ายกับ Fe-40Ni แตกต่างกันที่ค่า intensity ของพีคลำดับที่ 1, 2 และ 3 ดังนั้นได้นำผลทดสอบ XRD ของเหล็กกล้านิกเกิล Fe-15Ni และ Fe-40Ni มาเป็นตัวอย่างในการนำเสนอ ดังแสดงในรูปที่ 4.2-4.3 และการระบุดัชนีของพีคตัวอย่างแสดงในตารางที่ 4.2 (ผลทดสอบ XRD และการคำนวณเพื่อระบุดัชนีพีคตัวอย่างของเหล็กกล้านิกเกิลทั้งหมดแสดงในภาคผนวก ง)

จากการเปรียบเทียบค่ามุม 2θ ระยะห่างระหว่างระนาบผลึก (d_{hkl}) และ ระนาบผลึก hkl ที่คำนวณจากผลทดสอบ XRD ของเหล็กกล้านิกเกิล Fe-15Ni และ Fe-23Ni กับข้อมูล XRD จาก JCPDS พบว่าใกล้เคียงกับข้อมูลของเหล็กนิกเกิลที่มีโครงสร้างผลึกแบบ body-center-tetragonal (bct) ขณะที่ผลทดสอบ XRD ของเหล็กกล้านิกเกิล Fe-31Ni และ Fe-40Ni ใกล้เคียงกับข้อมูลของเหล็กกล้าไร้สนิม 304L และเหล็กกล้านิกเกิลที่มีโครงสร้างผลึกแบบ face-center-cubic (fcc)



รูปที่ 4.2 ผลทดสอบ XRD ของเหล็กกล้านิกเกิล Fe-15Ni



รูปที่ 4.3 ผลทดสอบ XRD ของเหล็กกล้านิกเกิล Fe-40Ni

ตารางที่ 4.2 การระบุดัชนี (hkl) พีคตัวอย่างของเหล็กกล้านิกเกิล Fe-15Ni และ Fe-40Ni

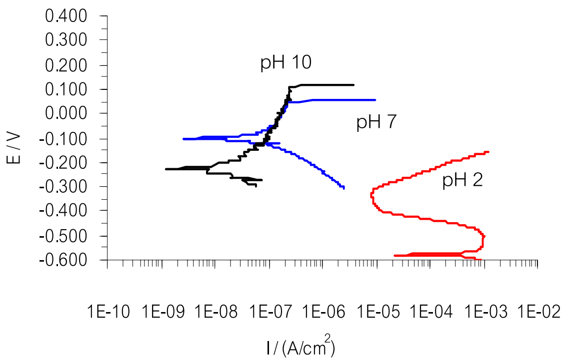
ชิ้นงาน	พีคลำดับที่	2θ	sin(θ)	d_{hkl}	$\sin^2(\theta)$	$\{\sin^2(\theta) \times 3\}$ / Min. of $\sin^2(\theta)$	$h^2+k^2+l^2$	hkl
Fe-15Ni	1	44.51	0.379	2.032	0.144	2.00	2	110
	2	64.80	0.539	1.429	0.291	4.04	4	200
	3	82.23	0.658	1.171	0.433	6.01	6	211
Fe-40Ni	1	43.87	0.373	2.065	0.139	3.00	3	111
	2	51.13	0.431	1.788	0.186	4.01	4	200
	3	75.19	0.610	1.263	0.372	8.03	8	220

4.1 ผลการวัดเส้นโพลาไรเซชันของเหล็กกล้าโครเมียมและเหล็กกล้านิกเกิล

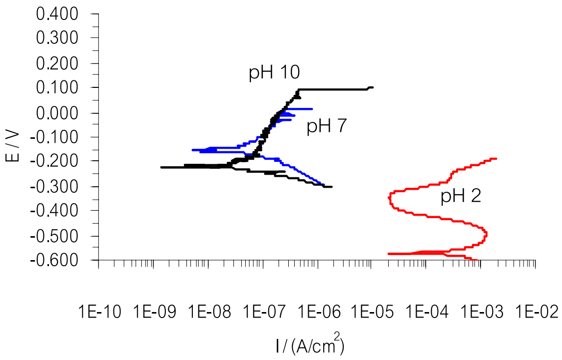
ผลการทดสอบเส้นโพลาไรเซชันในเหล็กกล้าผสมโครเมียม 13, 15, 18 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ในสารละลาย A และ B แสดงด้วยตัวอย่างเส้นโพลาไรเซชันดังรูปที่ 4.4 ผลการทดสอบเส้นโพลาไรเซชันในเหล็กกล้าผสมนิกเกิล15, 23, 31, 40 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักในสารละลาย A และ B แสดงด้วยตัวอย่างเส้นโพลาไรเซชัน ดังรูปที่ 4.5

จากเส้นโพลาไรเซชันของเหล็กกล้าโครเมียมและเหล็กกล้านิกเกิล (เส้นโพลาไรเซชันที่วัดได้จากการทดลอง แสดงในภาคผนวก ก) นำมาหาค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อน (corrosion

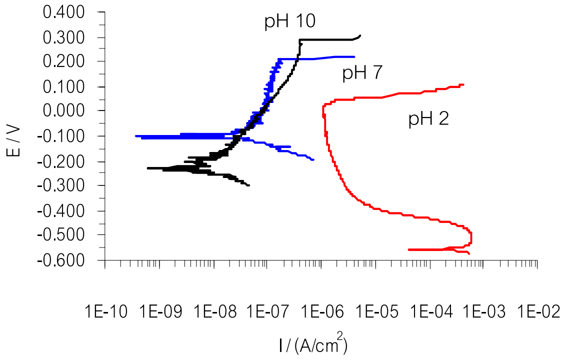
potential, E_{corr}) ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อน (corrosion current density, I_{corr}) ค่าอัตราการกัดกร่อน (corrosion rate, R_{mpy}) ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าขณะวัสดุเกิดฟิล์มที่ผิว (passive current density, I_p) ค่าศักย์ไฟฟ้าเริ่มเกิดพาสสีพ (primary passive potential, E_{pp}) และค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนแบบรูเข็มหรือหลุม (pitting potential, E_p) ได้ผลดังแสดงในตารางที่ 4.3 และ 4.4 ตามลำดับ (ตัวอย่างการหาค่าดังกล่าวแสดงในภาคผนวก ข)



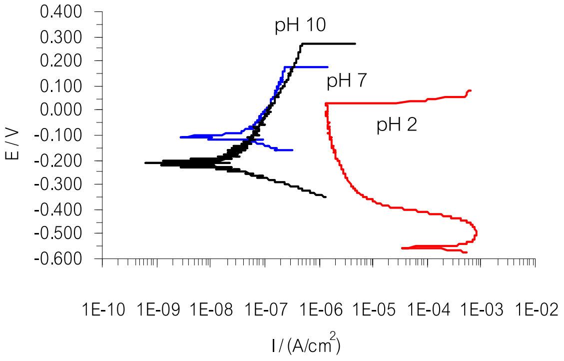
ก. Fe-13Cr (สารละลาย A)



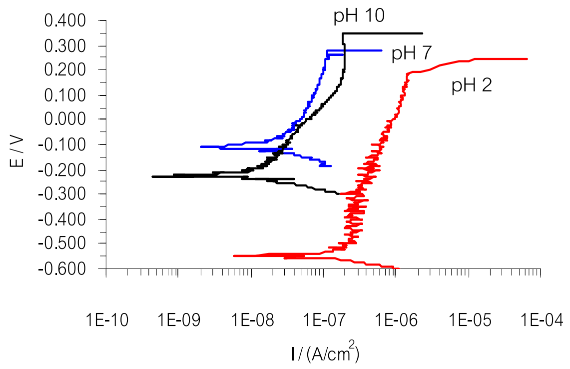
ข. Fe-13Cr (สารละลาย B)



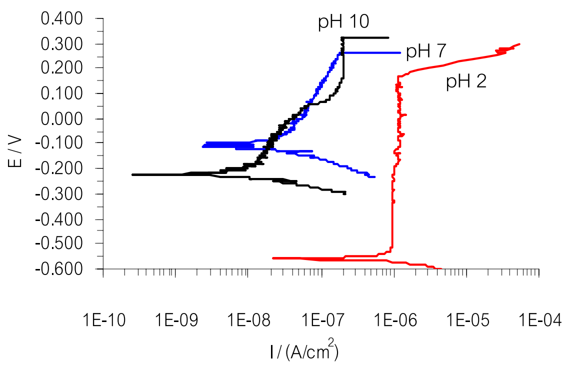
ค. Fe-15Cr (สารละลาย A)



ง. Fe-15Cr (สารละลาย B)

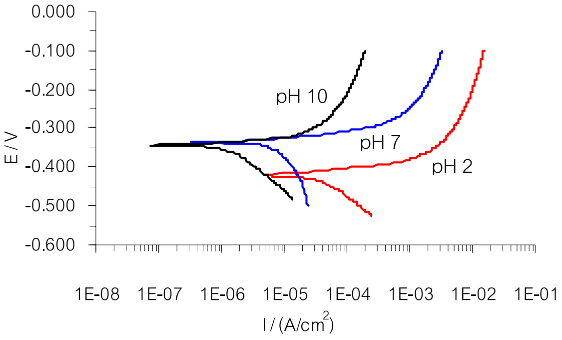


จ. Fe-18Cr (สารละลาย A)

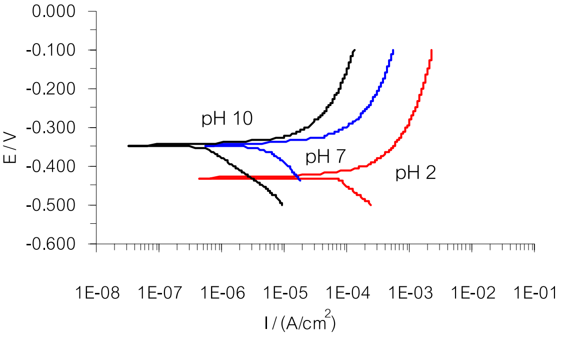


ฉ. Fe-18Cr (สารละลาย B)

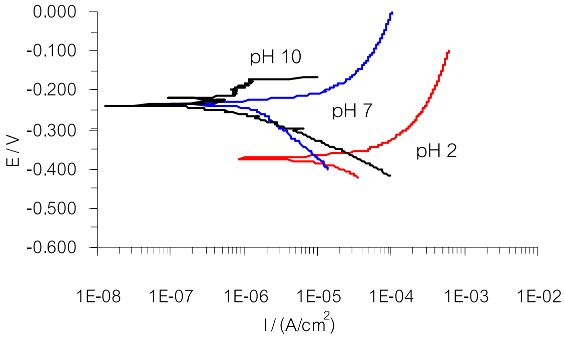
รูปที่ 4.4 ตัวอย่างเส้นโพลาไรเซชันของเหล็กกล้าโครเมียม



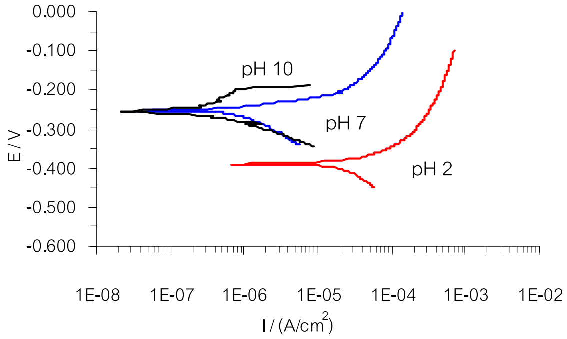
ก. Fe-15Ni (สารละลาย A)



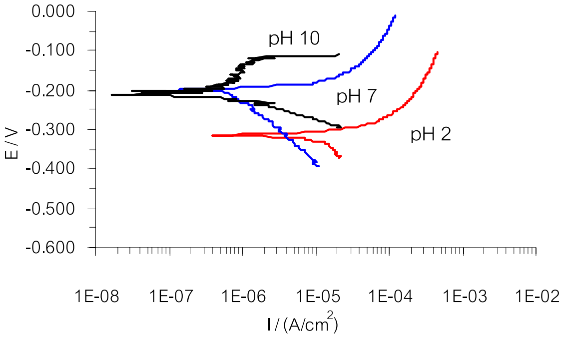
ข. Fe-15Ni (สารละลาย B)



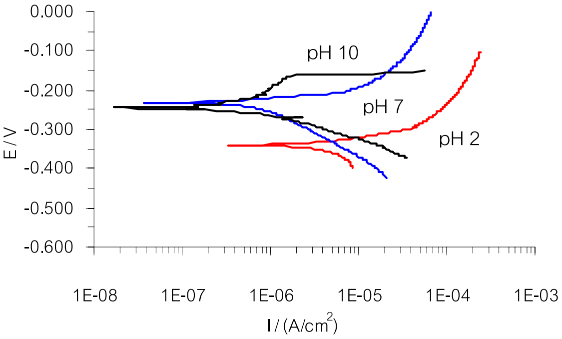
ค. Fe-23Ni (สารละลาย A)



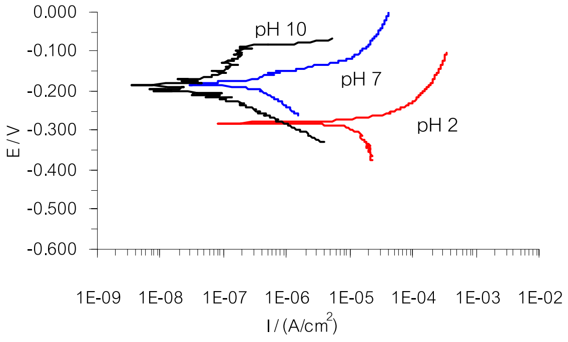
ง. Fe-23Ni (สารละลาย B)



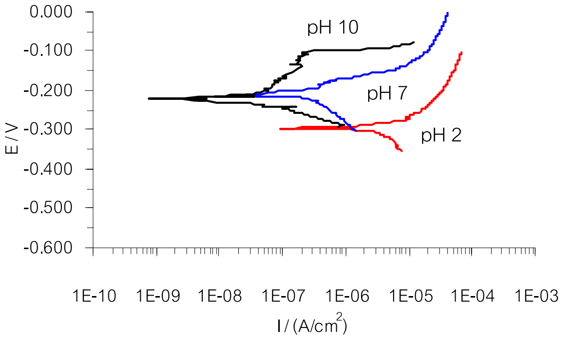
จ. Fe-31Ni (สารละลาย A)



ฉ. Fe-31Ni (สารละลาย B)



ช. Fe-40Ni (สารละลาย A)



ซ. Fe-40Ni (สารละลาย B)

รูปที่ 4.5 ตัวอย่างเส้นโพลาไรเซชันของเหล็กกล้านิกเกิล

ตารางที่ 4.3 ค่าที่วัดได้จากเส้นโพลาไรเซชันของเหล็กกล้าโครเมียมและเหล็กกล้านิกเกิลในสารละลาย A

Sample	พีเอช 2						พีเอช 7						พีเอช 10					
	E_{corr}	I_{corr}	R_{umpy}	I_p	E_{pp}	E_p	E_{corr}	I_{corr}	R_{umpy}	I_p	E_{pp}	E_p	E_{corr}	I_{corr}	R_{umpy}	I_p	E_{pp}	E_p
Fe-13Cr	-549.8	557.87	6448.2	10.15	-485.7	-297.1	-92.7	0.0099	0.133	1.306	-70.3	45.7	-223.4	0.0012	0.0139	0.099	-174.4	118.0
Fe-15Cr	-547.2	465.18	5376.6	1.523	-488.9	35.5	-90.7	0.0054	0.062	0.993	-74.2	214.0	-220.4	0.0009	0.0106	0.088	-181.1	302.4
Fe-18Cr	-546.7	0.562	6.497	0.727	-492.4	182.1	-90.3	0.0023	0.027	0.063	-81.7	275.9	-219.2	0.0007	0.0061	0.075	-192.0	344.2
Fe-15Ni	-429.5	17.76	204.84	-	-	-	-344.8	6.208	60.59	-	-	-	-345.3	1.370	15.810	-	-	-
Fe-23Ni	-385.9	9.284	107.09	-	-	-	-240.7	0.948	10.49	-	-	-	-247.0	0.517	5.966	0.865	-226.4	-155.4
Fe-31Ni	-322.9	7.266	83.32	-	-	-	-223.5	0.679	7.84	-	-	-	-235.7	0.465	5.366	0.693	-200.6	-122.5
Fe-40Ni	-278.0	5.281	5.37	-	-	-	-177.9	0.277	2.62	-	-	-	-180.8	0.084	0.969	0.014	-181.2	-85.8

หมายเหตุ : E_{corr} ค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อน (โวลต์, Ag/AgCl)

I_{corr} ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อน (ไมโครแอมป์ต่อตารางเซนติเมตร)

I_p ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าขณะวัสดุเกิดฟิล์มที่ผิว (ไมโครแอมป์ต่อตารางเซนติเมตร)

E_{pp} ค่าศักย์ไฟฟ้าเริ่มเกิดพาสสีพ (มิลลิโวลต์)

E_p ค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนแบบรูเข็ม (มิลลิโวลต์)

R_{umpy} ค่าอัตราการกัดกร่อน (ไมโครเมตรต่อปี)

ตารางที่ 4.4 ค่าที่วัดได้จากเส้นโพลาไรเซชันของเหล็กกล้าโครเมียมและเหล็กกล้านิกเกิลในสารละลาย B

Sample	พีเอช 2						พีเอช 7						พีเอช 10					
	E_{corr}	I_{corr}	R_{umpy}	I_p	E_{pp}	E_p	E_{corr}	I_{corr}	R_{umpy}	I_p	E_{pp}	E_p	E_{corr}	I_{corr}	R_{umpy}	I_p	E_{pp}	E_p
Fe-13Cr	-558.3	305.43	3530.4	14.29	-491.1	-323.0	-111.3	0.0072	0.0832	1.383	-75.2	22.3	-230.6	0.0012	0.0124	1.307	-179.2	106.0
Fe-15Cr	-557.0	237.16	2742.3	1.837	-496.8	19.52	-110.0	0.0047	0.0536	1.083	-78.5	182.6	-230.2	0.0007	0.0101	0.098	-182.1	285.9
Fe-18Cr	-556.8	1.355	1655.6	0.897	-501.6	163.2	-109.6	0.0017	0.0183	0.080	-86.3	267.5	-228.4	0.0005	0.0049	0.090	-194.8	322.7
Fe-15Ni	-446.9	15.94	15.67	-	-	-	-358.6	3.878	44.659	-	-	-	-361.8	0.846	9.323	-	-	-
Fe-23Ni	-398.4	8.68	108.01	-	-	-	-275.0	0.568	6.554	-	-	-	-281.8	0.114	1.316	0.445	-238.6	-191.7
Fe-31Ni	-340.9	2.68	30.93	-	-	-	-249.2	0.329	3.797	-	-	-	-252.5	0.042	0.482	0.164	-231.1	-155.0
Fe-40Ni	-307.3	2.35	27.00	-	-	-	-196.9	0.197	2.273	-	-	-	-201.7	0.017	0.192	0.061	-203.8	-102.6

หมายเหตุ : E_{corr} ค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อน (โวลต์, Ag/AgCl)

I_{corr} ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อน (ไมโครแอมป์ต่อตารางเซนติเมตร)

I_p ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าขณะวัสดุเกิดฟิล์มที่ผิว (ไมโครแอมป์ต่อตารางเซนติเมตร)

E_{pp} ค่าศักย์ไฟฟ้าเริ่มเกิดพาสสีพ (มิลลิโวลต์)

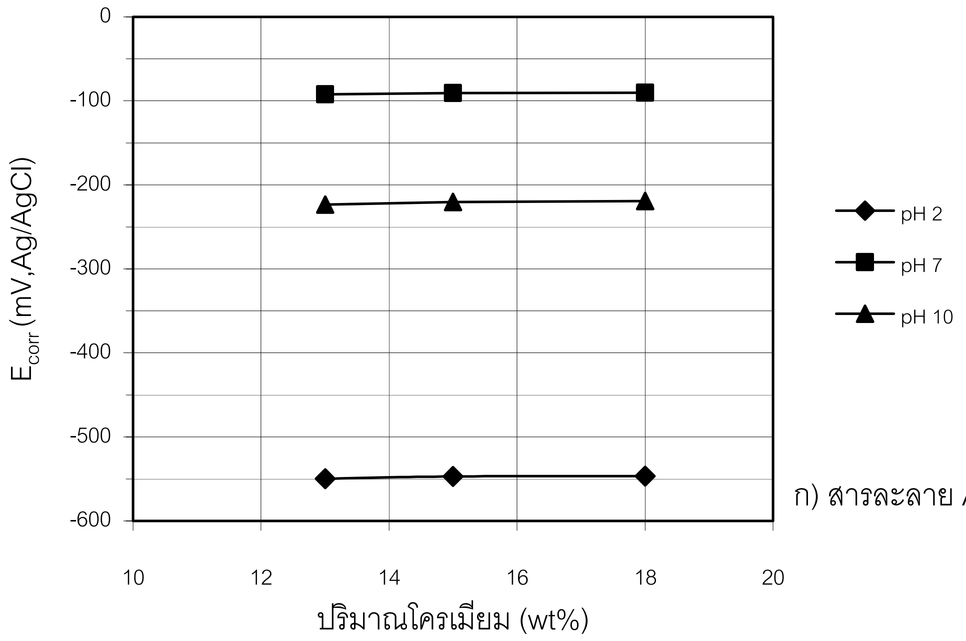
E_p ค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนแบบรูเข็มหรือหลุม (มิลลิโวลต์)

R_{umpy} ค่าอัตราการกัดกร่อน (ไมโครเมตรต่อปี)

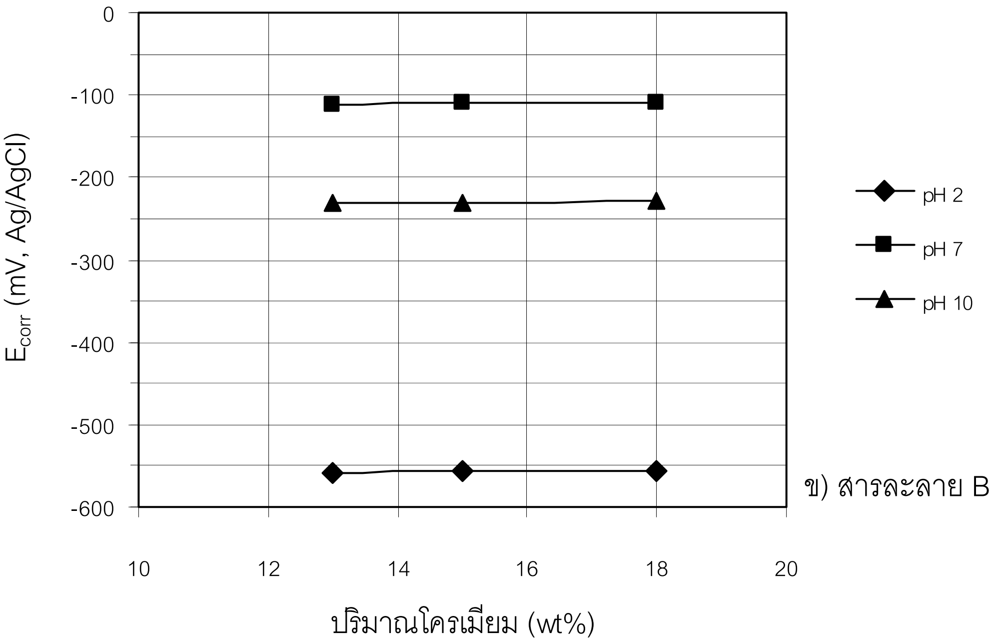
จากค่าที่แสดงพฤติกรรมการกัดกร่อนในตารางที่ 4.3 และ 4.4 สามารถนำมาสร้างกราฟแสดงความสัมพันธ์กับปริมาณโครเมียมในเหล็กกล้าโครเมียมและปริมาณนิกเกิลในเหล็กกล้านิกเกิลในสารละลาย A และ B ดังแสดงในหัวข้อต่อไปนี้

4.2 ผลของโครเมียมในเหล็กกล้าโครเมียมต่อพฤติกรรมการกัดกร่อน

4.2.1 ศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อน (E_{corr})



ก) สารละลาย A



ข) สารละลาย B

รูปที่ 4.6 ผลของโครเมียมต่อศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนของเหล็กกล้าโครเมียม

รูปที่ 4.6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนและปริมาณโครเมียมในเหล็กกล้าโครเมียม พบว่าที่ค่าพีเอช 2, 7 และ 10 ปริมาณโครเมียมที่เพิ่มขึ้นไม่มีผลที่ชัดเจนต่อศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อน โดยศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนที่ทดสอบในสารละลาย B มีค่าน้อยกว่าในสารละลาย A เป็นผลมาจากการลดความรุนแรงของปริมาณออกซิไดเซอร์อย่างออกซิเจนลงทำให้ศักย์ไฟฟ้าจากสมการที่ (4.1) มีผลต่อศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนโดยรวมลดลง [4]

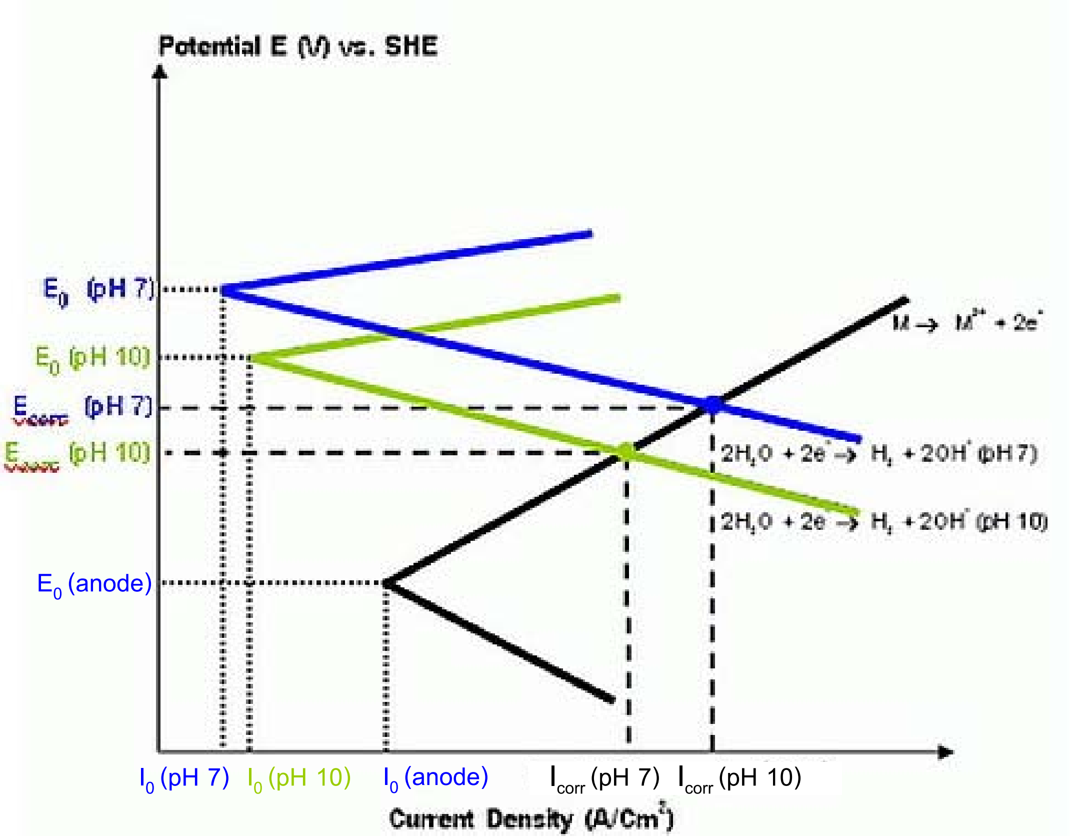
$$O_2 \quad + \quad 4H^+ \quad + \quad 4e^- \quad = \quad H_2O \qquad (4.1)$$

กรณีที่ค่าพีเอช 10 มีค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนน้อยกว่าที่ค่าพีเอช 7 อธิบายได้จากศักย์ไฟฟ้ารีดักชัน (E_0) ของน้ำซึ่งเป็นปฏิกิริยาแคโทดิกหลักที่ค่าพีเอช 10 มีแนวโน้มต่ำกว่าศักย์ไฟฟ้ารีดักชันของน้ำที่ค่าพีเอช 7 [7] ดังแสดงในสมการที่ (4.2) [7] และรูปที่ 4.7

$$E_0 \quad = \quad E^0_{H+/H2} \quad - \quad 0.059pH \qquad \{E^0_{H+/H2} = 0.000\ V\} \qquad (4.2)$$

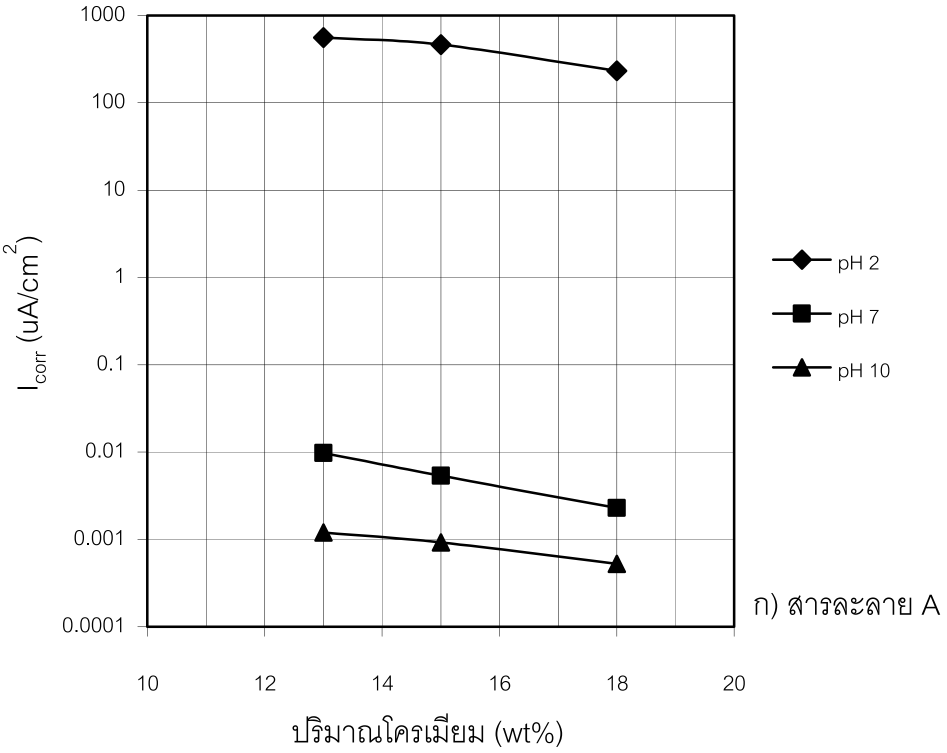
$$2H_2O \quad + \quad 2e^- \quad = \quad H_2 \quad + \quad 2OH^- \qquad \{pH\ 7\ ;\ E_0 = -0.413\ V\ vs.\ SHE\}$$

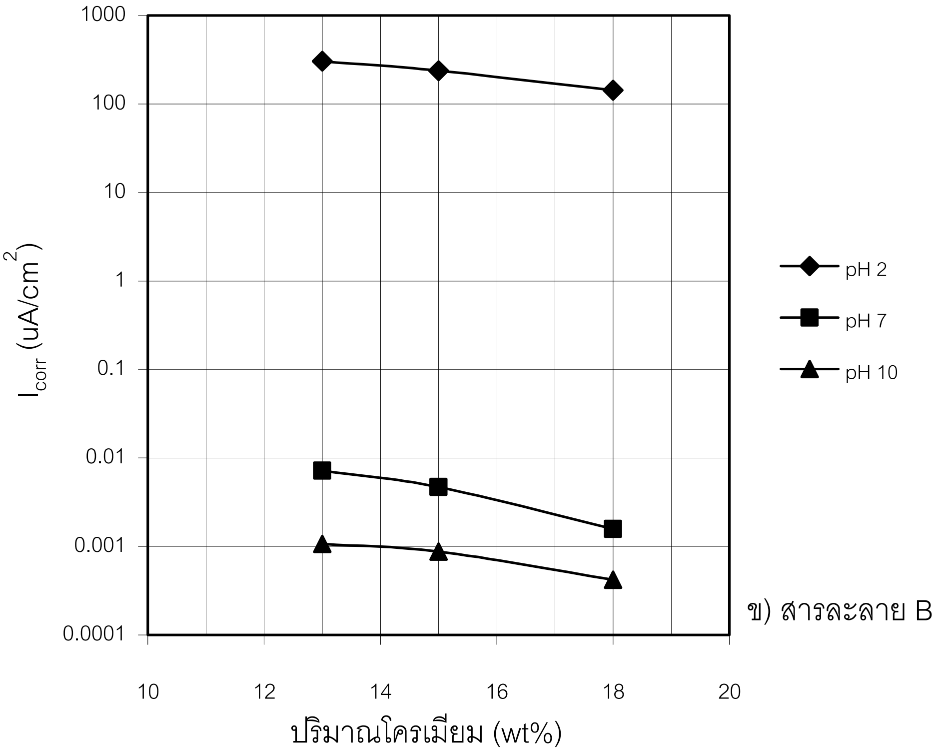
$$\{pH\ 10\ ;\ E_0 = -0.591V\ vs.\ SHE\}$$



รูปที่ 4.7 ผลของค่าพีเอชต่อศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนโดยทฤษฎีศักย์ไฟฟ้ารวม

4.2.2 ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อน (I_{corr}) และอัตราการกัดกร่อน (R_{umpy})





รูปที่ 4.8 ผลของโครเมียมต่อความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อนของเหล็กกล้าโครเมียม

ค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนที่พีเอช 2 มีค่าต่ำกว่าที่พีเอช 7 และ 10 อธิบายจากในรูปที่ 4.7 ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่จุดสมดุลของปฏิกิริยาที่ขั้วแอโนด (I_0 (anode)) ที่พีเอช 2 อาจมีค่ามากกว่าที่พีเอช 7 และ 10 จากสภาพกรดที่รุนแรงกว่า เนื่องจากเสถียรภาพของไอออนโลหะในสารละลายกรดต่างจากในสารละลายด่าง

รูปที่ 4.8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อนและปริมาณโครเมียมในเหล็กกล้าโครเมียม พบว่าปริมาณโครเมียมเพิ่มขึ้นทำให้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อนลดลง ผลการทดลองเป็นเช่นเดียวกับผลของ C. V. Roscoc และ K. J. Gradwell [16] เมื่อโครเมียมของเหล็กกล้าโครเมียมถูกออกซิไดซ์เป็นไอออนโครเมียมในสารละลาย ไอออนโครเมียมบางส่วนกลายเป็นอะตอมปกคลุมที่ผิวของเหล็กกล้าโครเมียมขัดขวางการต่อละลายแบบแอโนดิกของเหล็กเป็นไอออนเหล็ก [2] ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อนลดลงอย่างชัดเจนที่ค่าพีเอช 2 ขณะที่ความหนาแน่นกระแส ไฟฟ้าการกัดกร่อนที่ค่าพีเอช 7 และ 10 มีค่าลดลงเล็กน้อยในแนวโน้มใกล้เคียงกันเมื่อปริมาณโครเมียมเพิ่มสูงขึ้น มีสาเหตุจากที่ค่าพีเอช 2 ปริมาณ H^+ ที่เป็นตัวออกซิไดเซอร์ (จากการแตกตัวของกรด H_2SO_4) มากกว่าที่ค่าตามความสัมพันธ์ในสมการที่ (4.4) พีเอช 7 และ10 กรณีค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อนในสารละลาย B มีค่าน้อยกว่าในสารละลาย A เป็นผลจากการสูญเสียไอออนบวกและอิเล็กตรอนของโลหะตามสมการที่ (4.5) มีแนวโน้มลดลงเมื่อออกซิเจนในสารละลายลดลงตามสมการที่ (4.1) หรือดูจากผลของออกซิเจนต่อค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อนโดยทฤษฎีศักย์ไฟฟ้ารวมดังแสดงในรูปที่ 4.9 [19]

$$pH = -\log [H^+] \qquad (4.4)$$

$$M = M^{n+} + ne^- \qquad (4.5)$$

จากค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อนสามารถนำไปคำนวณหาค่าอัตราการกัดกร่อนได้ตามสมการ (4.6) [7]

$$R_{umpy} = [3.27 \times I_{corr} \times e] / \rho \qquad (4.6)$$

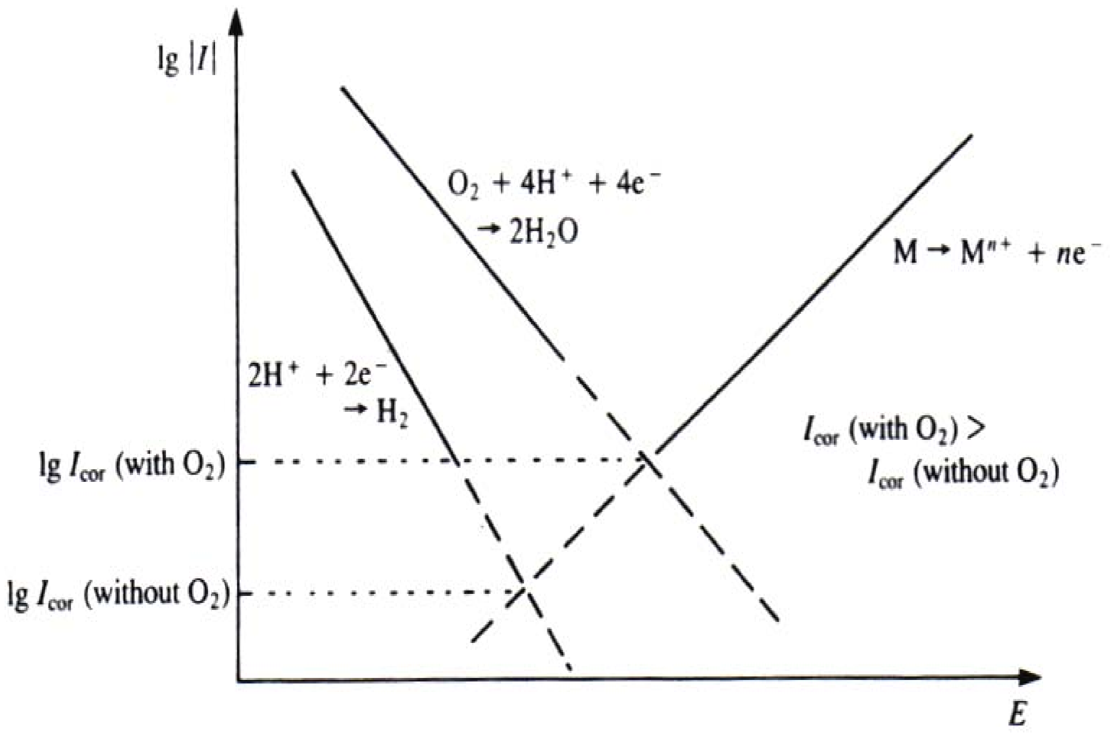
เมื่อ R_{umpy} คือ อัตราการเกิดการกัดกร่อน (ไมโครเมตรต่อปี)

I_{corr} คือ ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อน (ไมโครแอมป์ต่อตารางเซนติเมตร)

e คือ น้ำหนักกรัมสมมูลของโลหะ

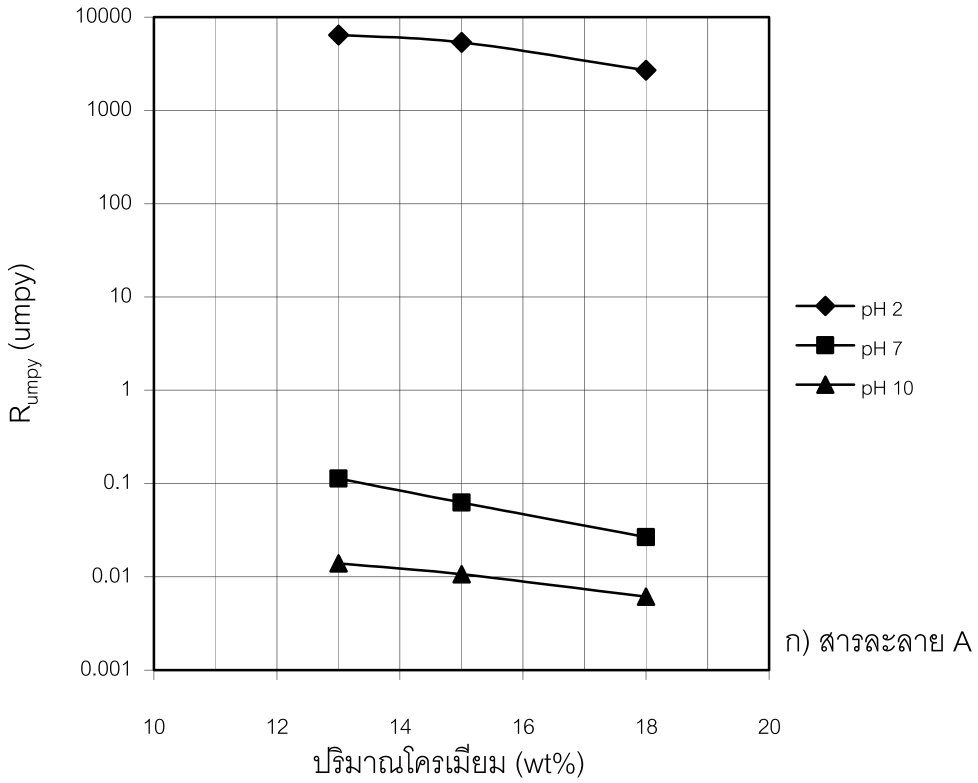
ρ คือ ความหนาแน่นของโลหะ

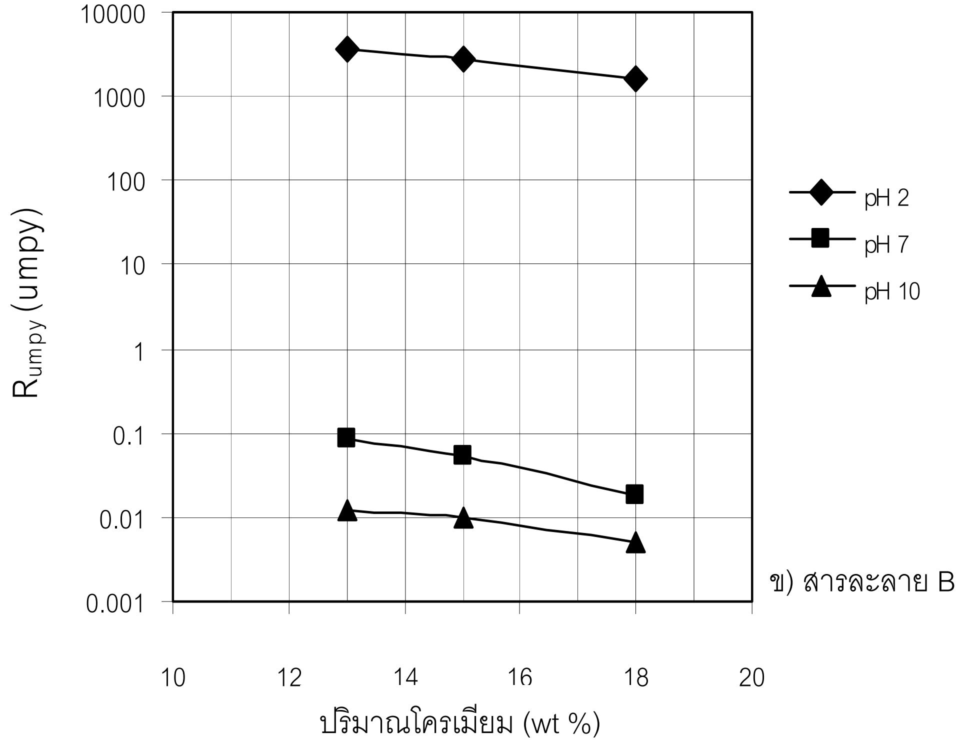
ได้ผลดังรูปที่ 4.10



รูปที่ 4.9 ผลของออกซิเจนต่อค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อนโดยทฤษฎีศักย์ไฟฟ้ารวม [19]

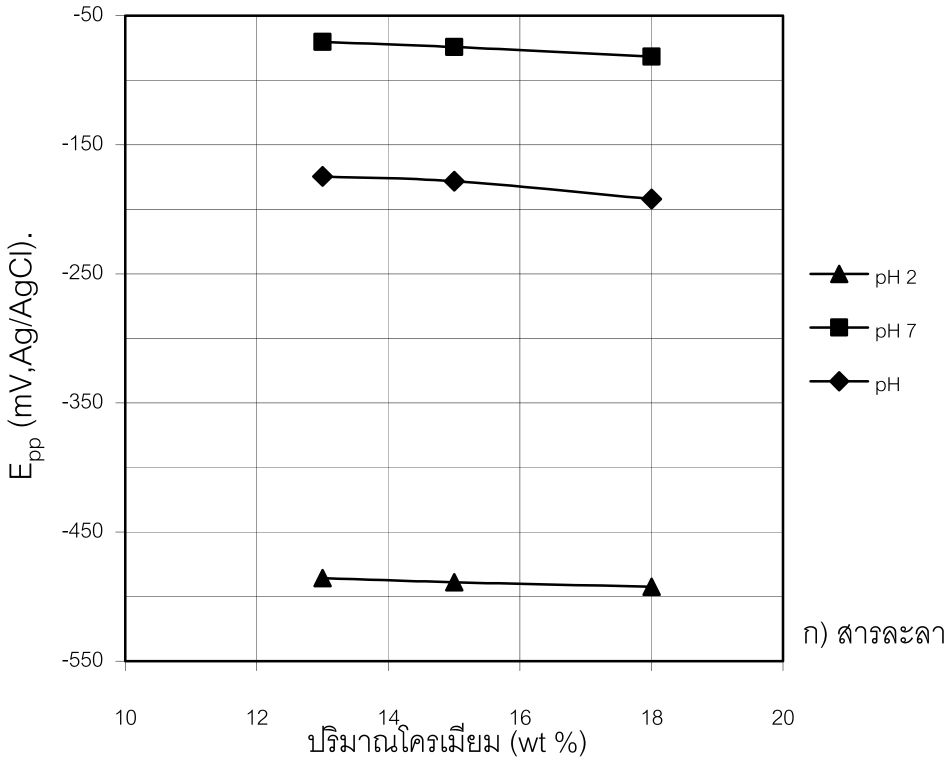
รูปที่ 4.10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการกัดกร่อนและปริมาณโครเมียมของเหล็กกล้าโครเมียม พบว่าปริมาณโครเมียมเพิ่มขึ้นทำให้ค่าอัตราการกัดกร่อนลดลงดังแนวโน้มเดียวกับค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อนทั้งในสารละลาย A และ B รูปที่ 4.10 แสดงผลที่สอดคล้องกับ รูปที่ 4.8 เนื่องจากเป็นการเปลี่ยนหน่วยอัตราการกัดกร่อนจากหน่วยกระแสไฟฟ้าเป็นหน่วยการทะลุทะลวงเท่านั้น



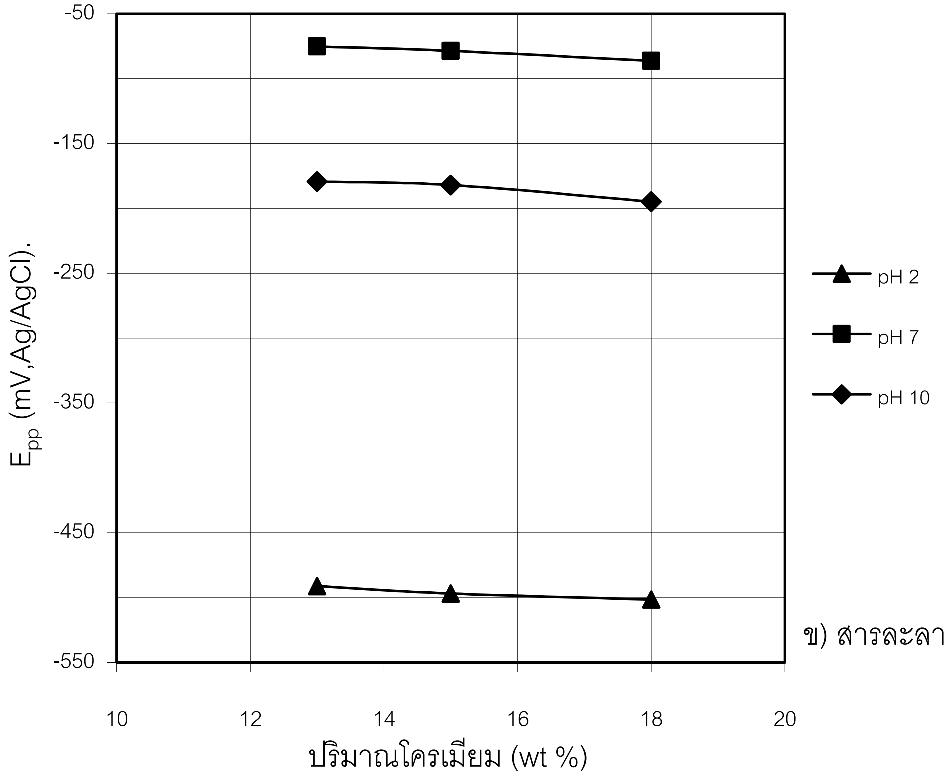


รูปที่ 4.10 ผลของโครเมียมต่ออัตราการกัดกร่อนของเหล็กกล้าโครเมียม

4.2.3 ศักย์ไฟฟ้าเริ่มเกิดพาสสีพ (E_{pp}) และศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนแบบรูเข็ม (E_p)



ก) สารละลาย A



ข) สารละลาย B

รูปที่ 4.11 ผลของโครเมียมต่อศักย์ไฟฟ้าเริ่มเกิดพาสสีพของเหล็กกล้าโครเมียม

รูปที่ 4.11 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างศักย์ไฟฟ้าเริ่มเกิดพาสสีพและปริมาณโครเมียมในเหล็กกล้าโครเมียม พบว่าปริมาณโครเมียมเพิ่มขึ้นทำให้ศักย์ไฟฟ้าเริ่มเกิดพาสสีพลดลง แสดงว่าการสร้างฟิล์มทำได้ง่ายขึ้น ผลการทดลองเป็นเช่นเดียวกับผลของ K. Ozakawa และ H. J. Engell [20] อธิบายได้ดังนี้ ปริมาณโครเมียมสูงขึ้นเร่งการเกิดฟิล์มพาสสีพให้เร็วขึ้น เพราะโครเมียมเป็นส่วนประกอบสำคัญในฟิล์มพาสสีพ [11] ความสัมพันธ์ระหว่างศักย์ไฟฟ้าเริ่มเกิดฟิล์มพาสสีพและค่าพีเอช ปกติที่ค่าพีเอช 2 ควรมีค่าศักย์ไฟฟ้าเริ่มเกิดพาสสีพสูงกว่าที่พีเอช 7 และ 10 หรือว่าการสร้างฟิล์มพาสสีพที่พีเอช 2 เกิดยากกว่าที่พีเอช 7 และ 10 เพราะฟิล์มพาสสีพของโครเมียมสามารถละลายได้จากปริมาณของ H^+ ที่สูงในสารละลายที่พีเอช 2 [7] แต่การทดลองนี้พบว่าศักย์ไฟฟ้าเริ่มเกิดพาสสีพที่ค่าพีเอช 2 กลับมีค่าต่ำกว่าที่พีเอช 7 และ 10 จึงไม่สามารถหาเหตุผลมาอธิบายผลการทดลองในส่วนนี้

ศักย์ไฟฟ้าเริ่มเกิดพาสสีพในสารละลาย A มีค่ามากกว่าในสารละลาย B เล็กน้อย เพราะปริมาณออกซิเจนในสารละลาย B ลดลง ทำให้ปฏิกิริยาแอโนดิกเกิดได้เร็วขึ้น (ศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนต่ำลง) ส่งผลให้ไอออนของเหล็กและโครเมียมที่ละลายออกสู่สารละลายตามสมการที่ 4.7 เกิดได้เร็วขึ้นและทำให้การสร้างฟิล์มจากไอออนของโครเมียมเกิดได้ง่ายขึ้นด้วย

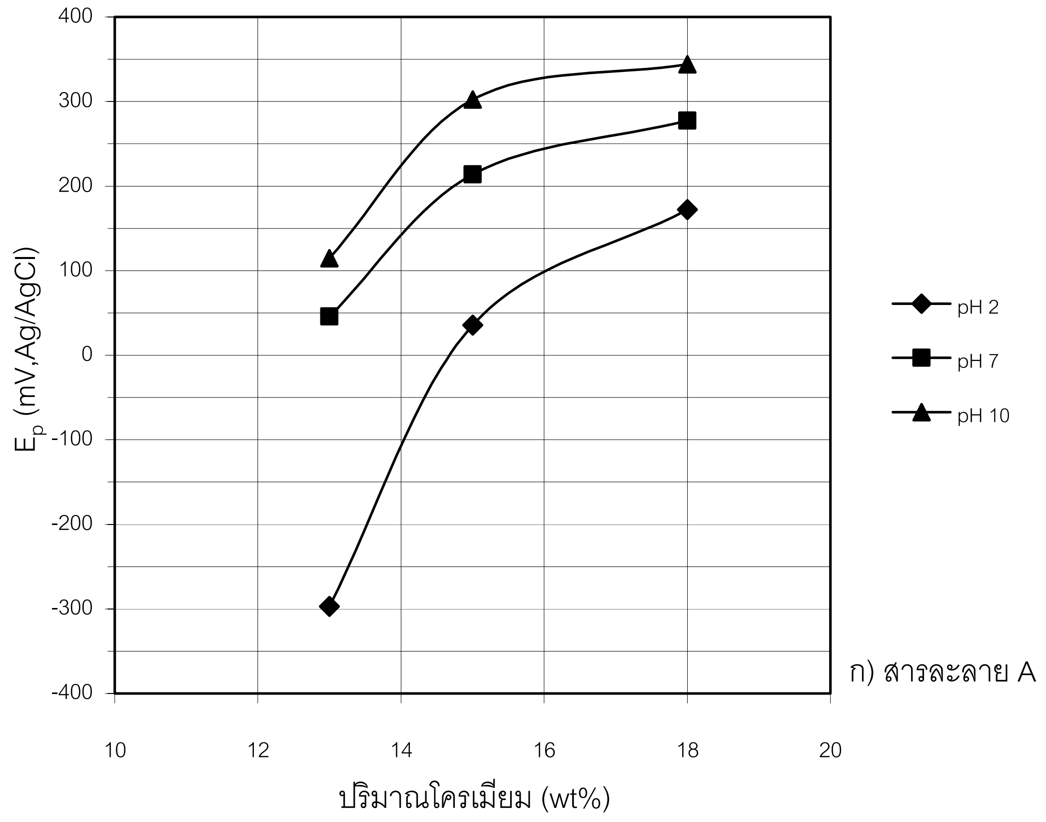
รูปที่ 4.12 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนแบบรูเข็มและปริมาณโครเมียมของเหล็กกล้าโครเมียม พบว่าปริมาณโครเมียมสูงขึ้นช่วยเพิ่มศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนแบบรูเข็มให้สูงขึ้น อธิบายได้จากเหล็กกล้าโครเมียมสามารถสร้างฟิล์มพาสสีพที่ช่วยป้องกันการกัดกร่อนจากสารละลาย ฟิล์มพาสสีพของเหล็กกล้าโครเมียมมีส่วนประกอบชั้นนอกสุดเป็นไฮดรอกไซด์ ชั้นถัดเข้ามาเป็นออกไซด์ของเหล็กและโครเมียม $(Fe, Cr)_2O_3$) และชั้นในสุดคือชั้นรอยต่อระหว่างชั้นออกไซด์กับเนื้อวัสดุ (metallic layer) ที่มีส่วนผสมทางเคมีต่างจากเนื้อวัสดุ [10-11] โดยฟิล์มพาสสีพมีเสถียรภาพสูงขึ้นตามการเพิ่มของปริมาณโครเมียมที่มีผลต่อการสร้างและซ่อมแซมฟิล์มพาสสีพ [2] ดังแสดงในสมการ (4.7) – (4.10) [2,4] (โดย M แทน Cr, Fe)

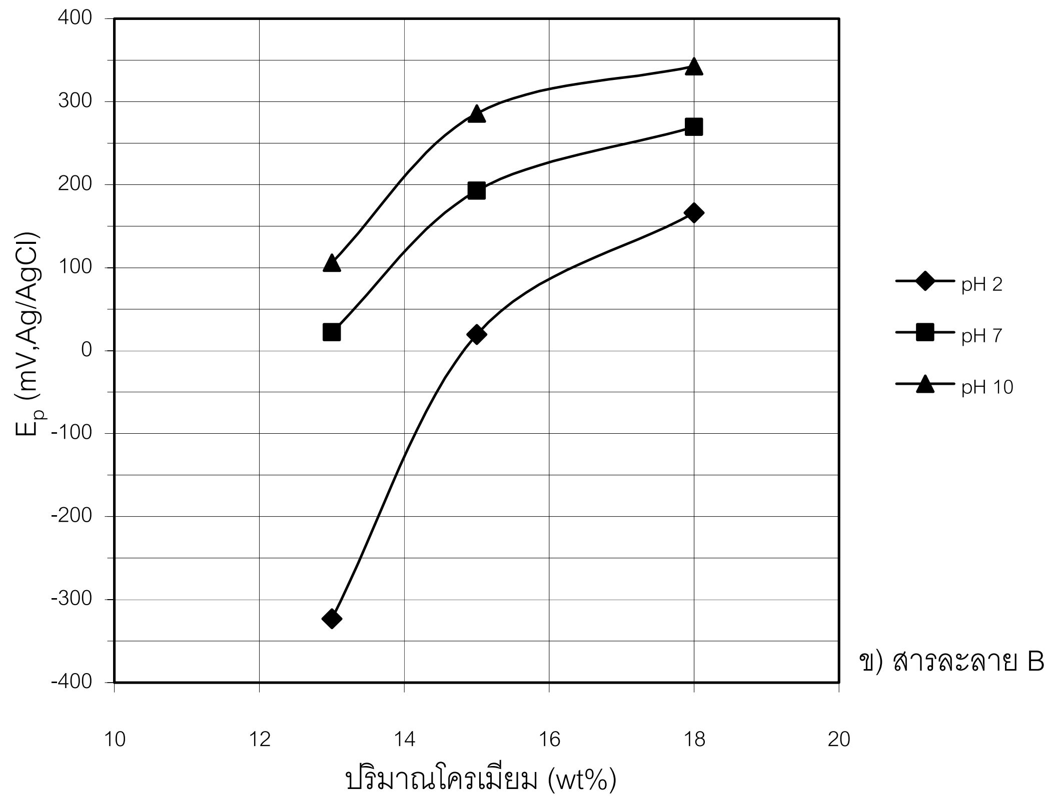
$$M^+_{aq} + H_2O = MOH_{ads} + H^+ + e^- \quad \text{(passivating step)} \quad (4.7)$$

$$MOH_{ads} = MO_{ads} + H^+ + e^- \quad \text{(passivating step)} \quad (4.8)$$

$$MO_{ads} + 2H_2O = M_2O_3 + 2H^+ + 2e^- \quad \text{(passivating step)} \quad (4.9)$$

$$MOH_{ads} + H_2O = M(OH)_2 + H^+ + e^- \quad \text{(repassivating step)} \quad (4.10)$$





รูปที่ 4.12 ผลของโครเมียมต่อศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนแบบรูเข็มของเหล็กกล้าโครเมียม

กรณีที่ค่าพีเอช 2 มีการเปลี่ยนแปลงของศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนแบบรูเข็มมากกว่าที่ค่าพีเอช 7 และ 10 อาจเป็นผลมาจากที่ค่าพีเอช 2 มีปริมาณ H^+ มากกว่าค่าที่ค่าพีเอช 7 และ10 อีกทั้งฟิล์มของโครเมียมสามารถละลายได้ในกรด [7] ส่งผลให้การละลายของฟิล์มจากปริมาณ H^+ ในสมการ (4.11) – (4.13) ที่ค่าพีเอช 2 มีความรุนแรงมากกว่าที่ค่าพีเอช 7 และ10 [7] นอกจากเหตุผลดังกล่าวที่ค่าพีเอช 10 และ 7 มีปริมาณ OH^- จากการแตกตัวของ NaOH และ H_2O สูงกว่าที่ค่าพีเอช 2 [4] โดย OH^- เป็นส่วนประกอบสำคัญในการสร้างและซ่อมแซมฟิล์มพาสสีพดังสมการ (4.14) ทำให้ที่ค่าพีเอช 2 มีความแตกต่างของค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนแบบรูเข็มที่ปริมาณโครเมียมต่ำกับปริมาณโครเมียมสูงมากกว่าที่ค่าพีเอช 7 และ 10 [4]

$$M_2O_3 + 2H^+ + 2e^- = MO_{ads} + 2H_2O \quad \text{(dissolution step)} \quad (4.11)$$

$$MO_{ads} + H^+ + e^- = MOH_{ads} \quad \text{(dissolution step)} \quad (4.12)$$

$$MOH_{ads} + H^+ + e^- = M^+_{aq} + H_2O \quad \text{(dissolution step)} \quad (4.13)$$

$$M^{2+}_{aq} + 2OH^- = M(OH)_{2(ads)} \quad (4.14)$$

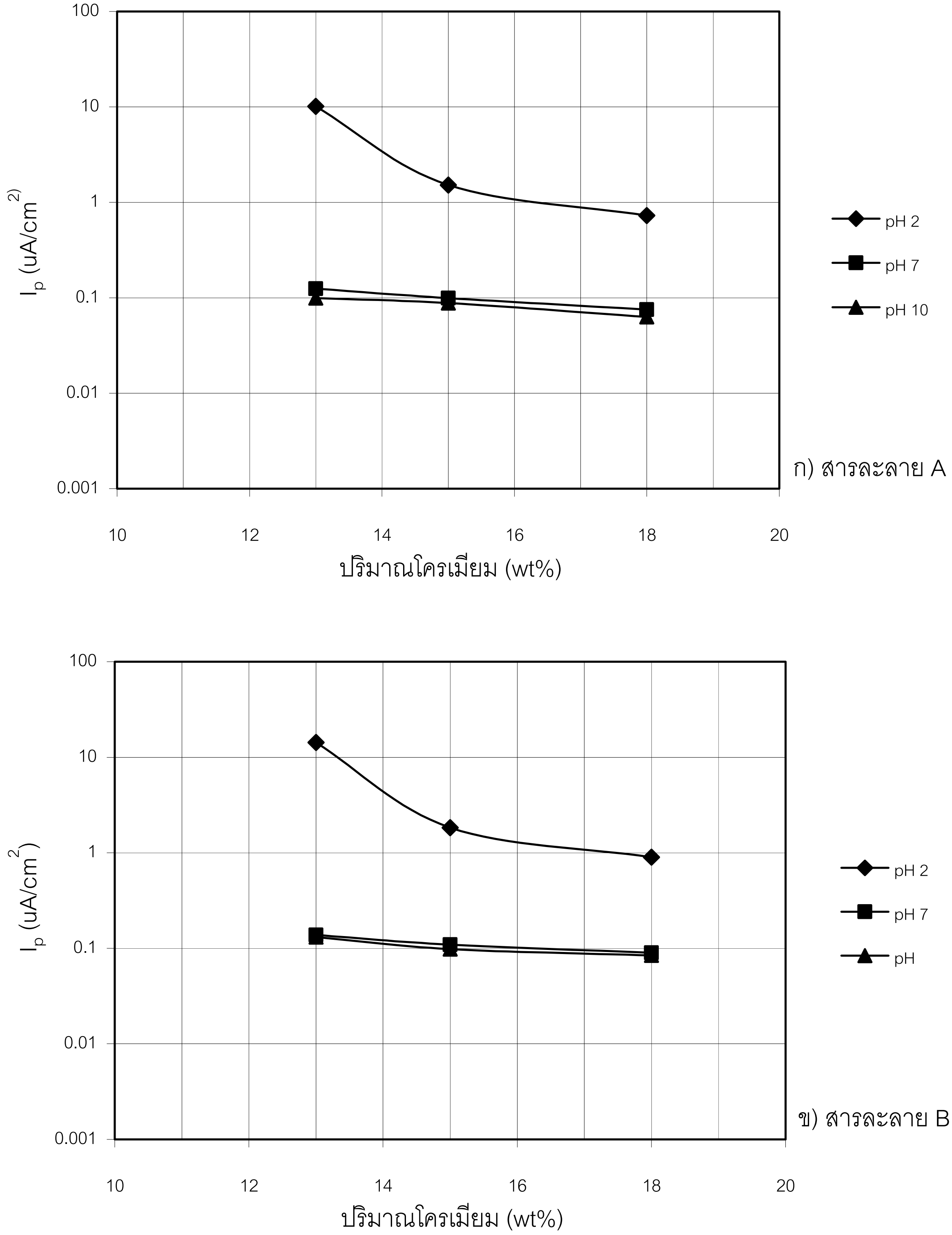
$$O_2 + 2H_2O + 4e^- = 4OH^- \quad \text{(oxygen reduction)} \quad (4.15)$$

ผลของศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนแบบรูเข็มในสารละลาย Bมีค่าต่ำกว่าสารละลาย A ผลการทดลองเป็นเช่นเดียวกับผลของ H. H. Hassan [21] อธิบายจากปริมาณ O_2 ช่วยในการเกิด OH^- ลดลง [4] ในสมการที่ (4.15) ทำให้ความสามารถในการซ่อมแซมฟิล์มพาสสีพเกิดได้ที่ศักย์ไฟฟ้าต่ำลงด้วย

4.2.4 **ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าขณะวัสดุเกิดฟิล์ม (I_p)**

รูปที่ 4.13 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าขณะวัสดุเกิดฟิล์มและปริมาณโครเมียมในเหล็กกล้าโครเมียม ปริมาณโครเมียมเพิ่มขึ้นมีผลให้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าขณะเกิดฟิล์มในเหล็กกล้าโครเมียมมีค่าลดลงจากการเพิ่มความแน่นของชั้นฟิล์มพาสสีพ ทำให้ไอออนบวกและลบผ่านเข้าออกชั้นฟิล์มได้ยากขึ้นหรือเกิดการละลายตัวแบบแอโนดิกลดลง [4] ที่พีเอช 2 ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าขณะเกิดฟิล์มเปลี่ยนแปลงชัดเจนกว่าที่ค่าพีเอช 7 และ 10 อาจเป็นเพราะที่พีเอช 2 การละลายแบบแอโนดิกสูงในสภาพกรดตามปริมาณของ H^+ ดังสมการ (4.11) – (4.13) ขณะที่พีเอช 7 และ 10 มีการละลายแบบแอโนดิกที่ต่ำกว่า [7] ดังนั้นความแตกต่างของความสามารถในการซ่อมแซมฟิล์มพาสสีพระหว่างปริมาณโครเมียมต่ำกับปริมาณโครเมียมสูงจึงเกิดชัดเจนกว่าที่ค่าพีเอช 7 และ 10 ผลของค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าขณะวัสดุเกิดฟิล์มในสารละลาย A มีค่าต่ำกว่าสารละลาย B เล็กน้อยเกิดจากปฏิกิริยารีดักชันของ O_2 เกิด

เป็น OH^- ตามสมการที่ (4.15) โดย OH^- มีผลต่อการซ่อมแซมฟิล์มพาสสีพตามสมการที่ (4.14) ส่งผลให้ฟิล์มแน่นขึ้น [22] และลดการสูญเสียไอออนและอิเล็กตรอนโลหะในช่วงการเกิดพาสสีพ



รูปที่ 4.13 ผลของโครเมียมต่อความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าขณะวัสดุเกิดฟิล์มของเหล็กกล้าโครเมียม

4.3 ผลของนิกเกิลในเหล็กกล้านิกเกิลต่อพฤติกรรมการกัดกร่อน

4.3.1 ศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อน (E_{corr})

รูปที่ 4.14 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนและปริมาณนิกเกิลของเหล็กกล้านิกเกิล พบว่าที่ค่าพีเอช 2, 7 และ10 ปริมาณนิกเกิลเพิ่มขึ้นส่งผลให้ศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนสูงขึ้น [23] เนื่องจากนิกเกิลมีศักย์ไฟฟ้าอิเล็กโทรดมาตรฐาน (E^0) สูงกว่าเหล็กดังสมการที่ 4.16 และ 4.17 [2,17]

$$Ni^{2+} + 2e^- = Ni \qquad \{E^0 = -0.250\} \qquad (4.16)$$

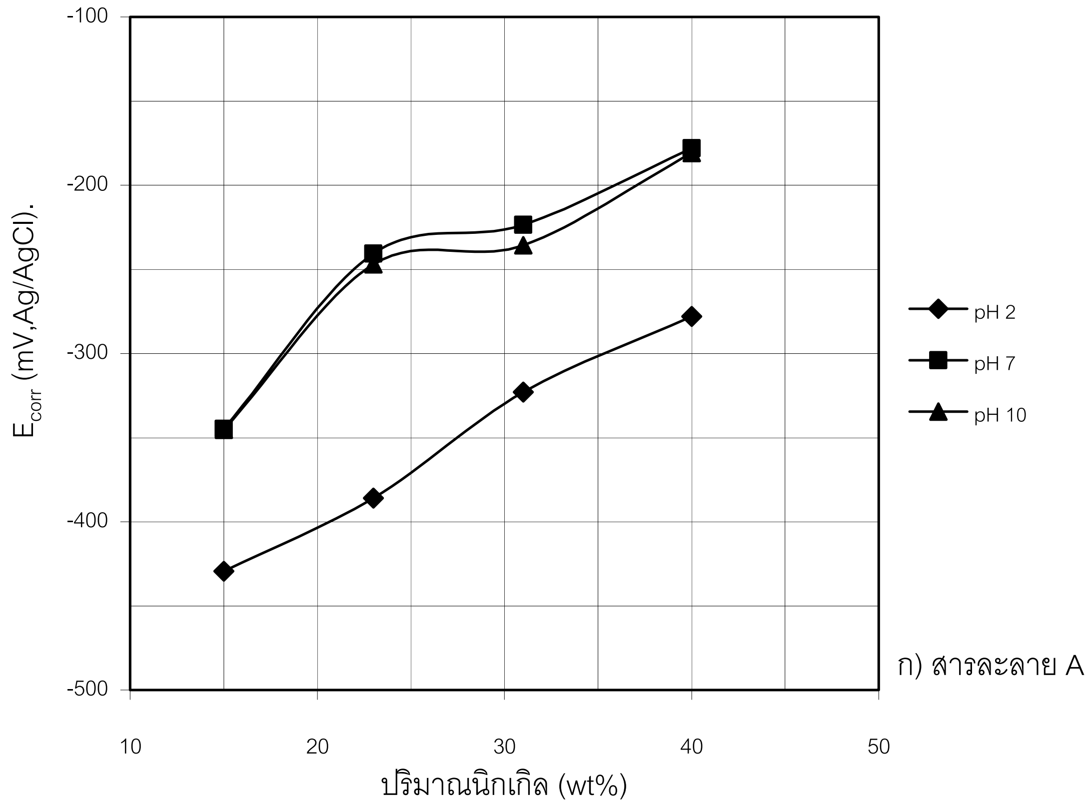
$$Fe^{2+} + 2e^- = Fe \qquad \{E^0 = -0.447\} \qquad (4.17)$$

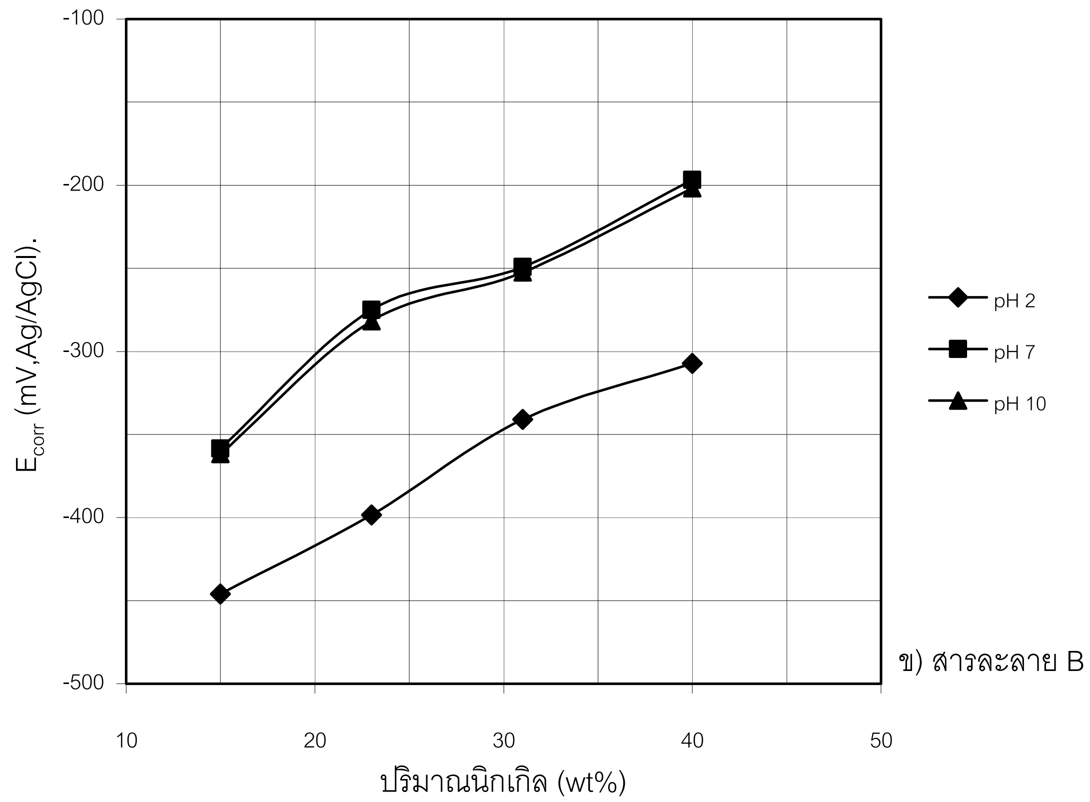
กรณีผลของการเปลี่ยนแปลงพีเอชและปริมาณอากาศที่ต่างกันในสารละลาย A และ B ต่อศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนมีแนวโน้มใกล้เคียงกับผลของโครเมียม ดังนั้นอธิบายได้ด้วยเหตุผลลักษณะเดียวกับผลของโครเมียมต่อศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนในหัวข้อที่ 4.2.1

4.3.2 ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อน (I_{corr}) และอัตราการกัดกร่อน (R_{umpy})

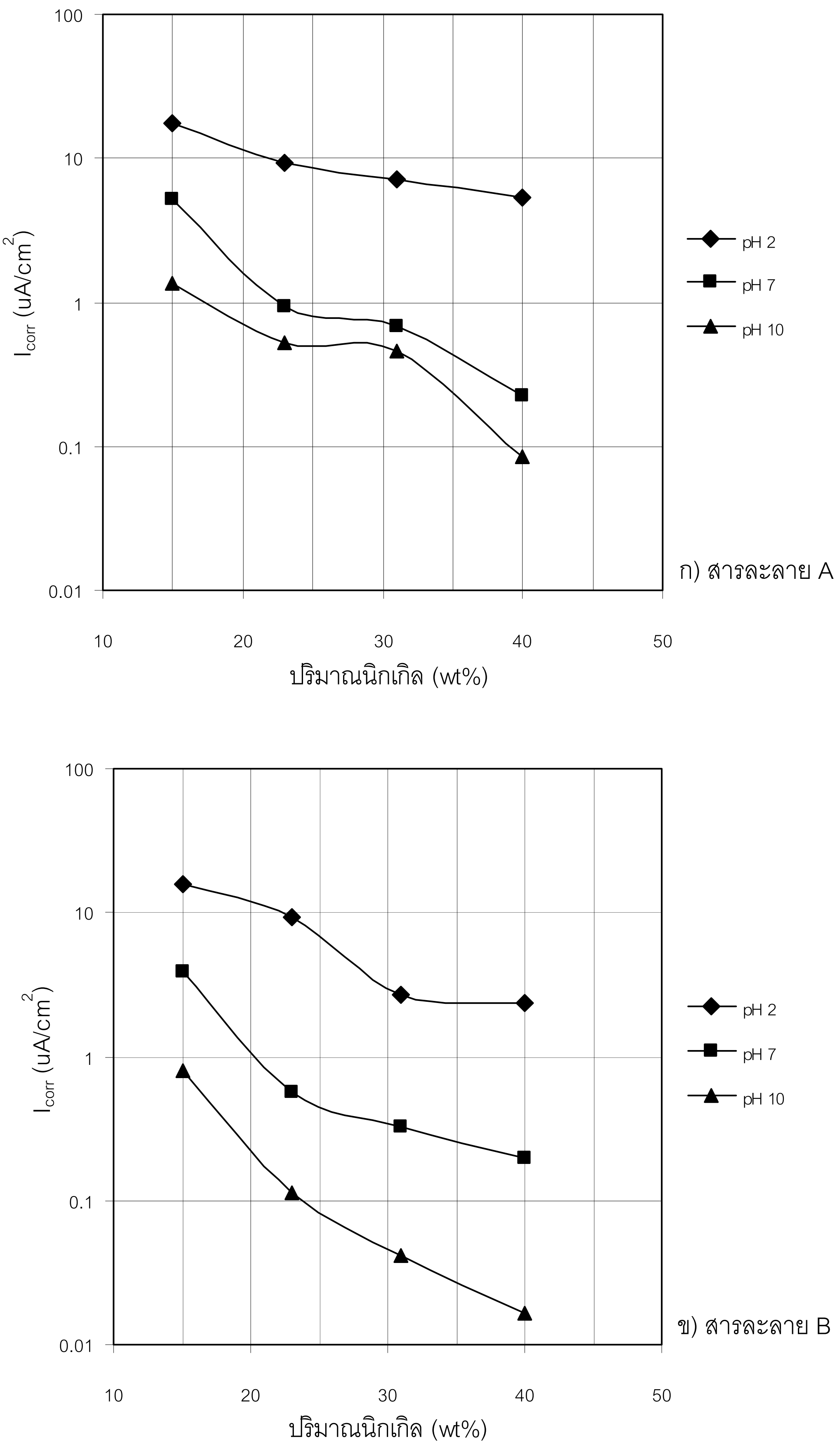
รูปที่ 4.15 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อนและปริมาณนิกเกิลของเหล็กกล้านิกเกิล พบว่าปริมาณนิกเกิลเพิ่มขึ้นทำให้ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อนลดลง ผลการทดลองเป็นเช่นเดียวกับผลของ S.Azuma และ T. Kudo [24] เนื่องจากนิกเกิลเป็นธาตุทรานซิชันที่มีอิเล็กตรอนในชั้น d ที่ไม่มีคู่ว่างอยู่ จึงพยามแลกเปลี่ยนอิเล็กตรอนกับธาตุในกลุ่มทรานซิชันด้วยกัน เช่น เหล็ก โครเมียม โมลิบดินัม สร้างสารประกอบด้วยพันธะโลหะ (intermetallic bonding) ที่มีเสถียรภาพสูง [2, 7] มีผลช่วยลดการละลายแบบแอโนดิก โดยค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อนลดลงอย่างชัดเจนที่ค่าพีเอช 2 ขณะที่ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อนที่ค่าพีเอช 7 และ 10 มีค่าลดลงเล็กน้อยในแนวโน้มใกล้เคียงกัน ที่ค่าพีเอช 2 ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อนที่ทดสอบในสารละลาย B มีค่าน้อยกว่าในสารละลาย A โดยผลของการเปลี่ยนแปลงพีเอชและปริมาณอากาศที่ต่างกันในสารละลาย A และ B ต่อความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อนอธิบายได้ด้วยเหตุผลลักษณะเดียวกับผลของโครเมียมในหัวข้อที่ 4.2.2

จากค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อนสามารถนำไปคำนวณหาค่าอัตราการกัดกร่อนได้จากสมการ (4.5) พบว่าปริมาณนิกเกิลเพิ่มขึ้นช่วยลดอัตราการกัดกร่อนในเหล็กกล้านิกเกิลด้วยแนวโน้มเดียวกับค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อน ดังแสดงในรูปที่ 4.16

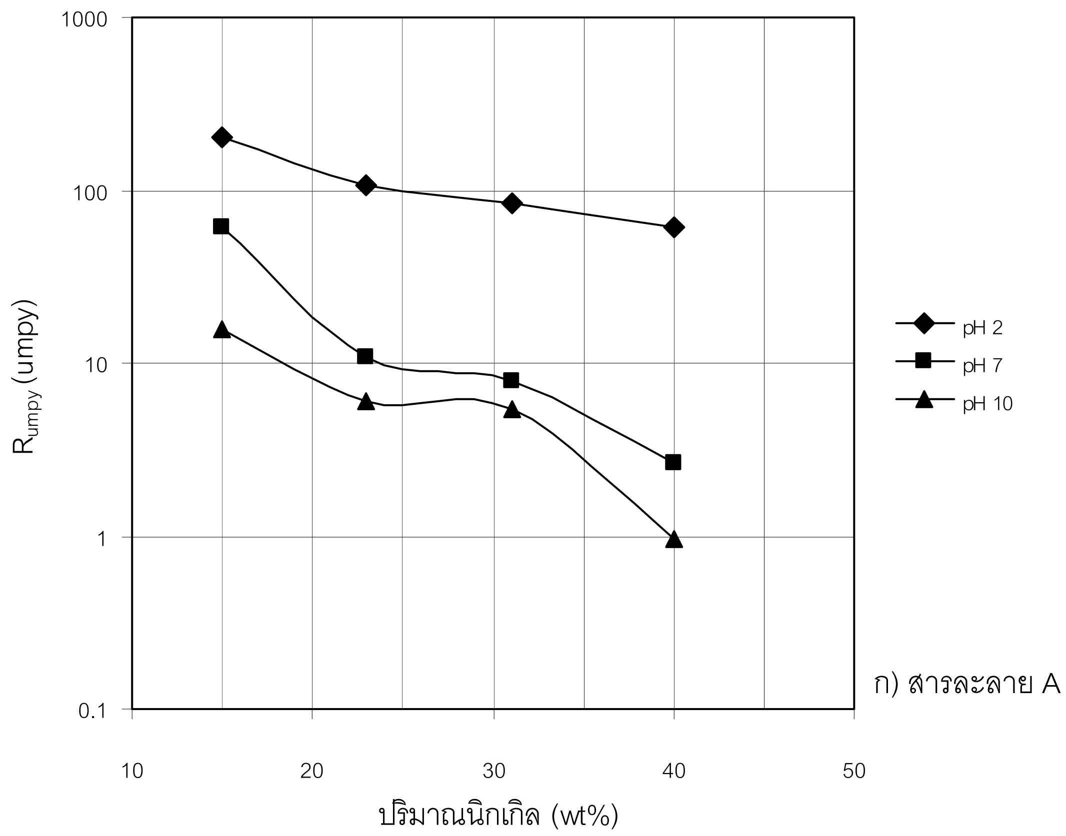


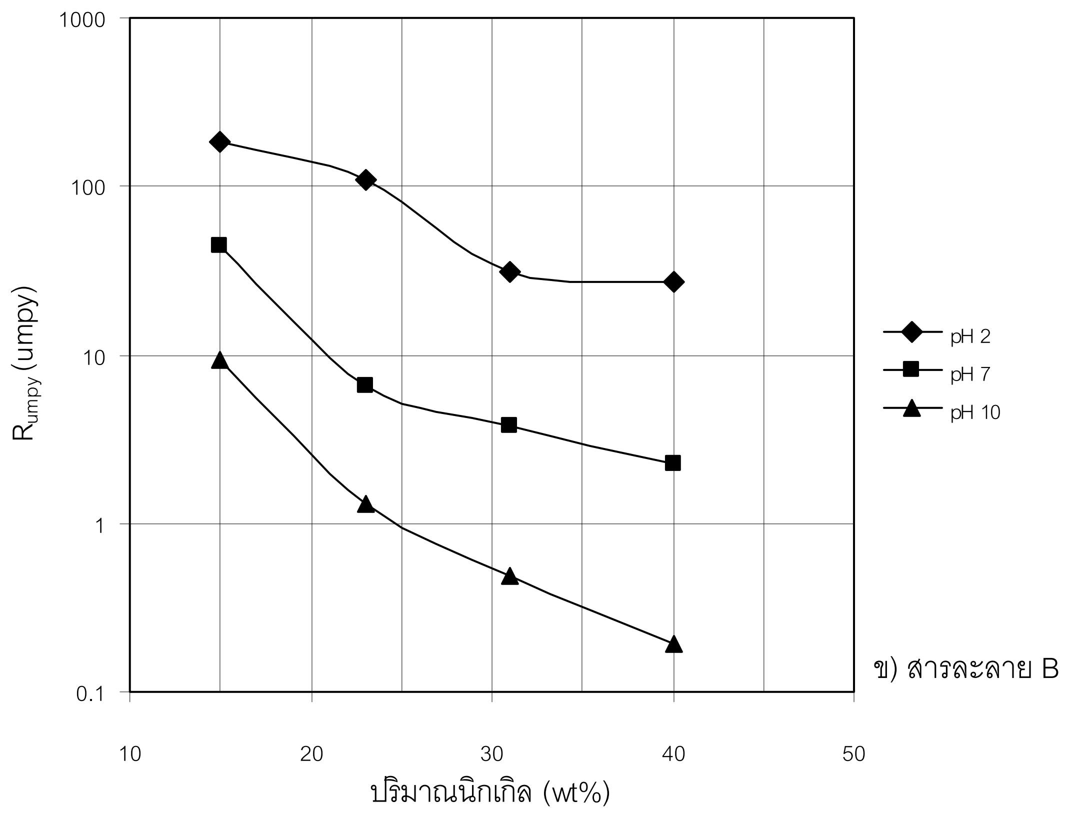


รูปที่ 4.14 ผลของนิกเกิลต่อศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนของเหล็กกล้านิกเกิล



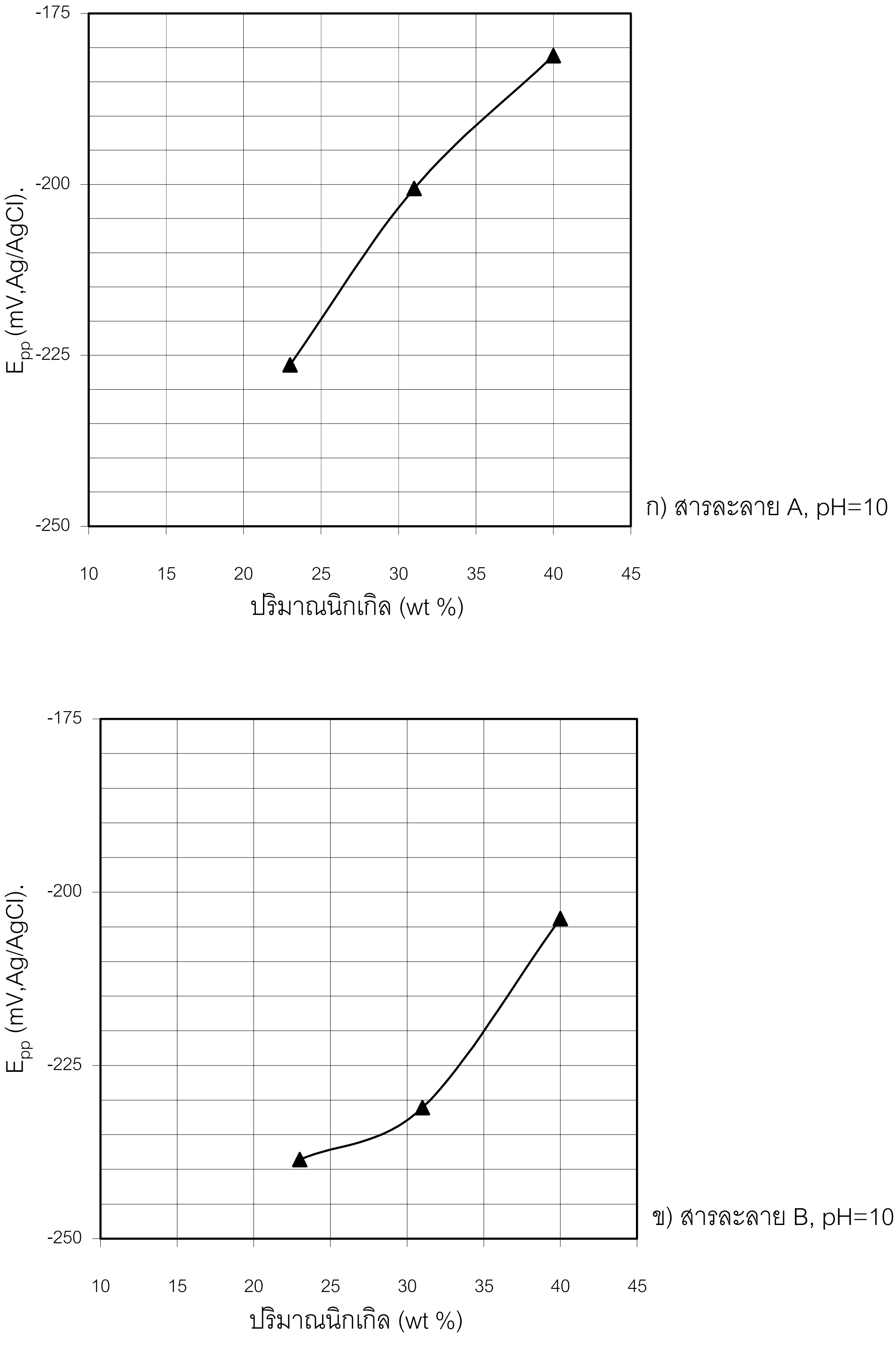
รูปที่ 4.15 ผลของนิกเกิลต่อความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อนของเหล็กกล้านิกเกิล



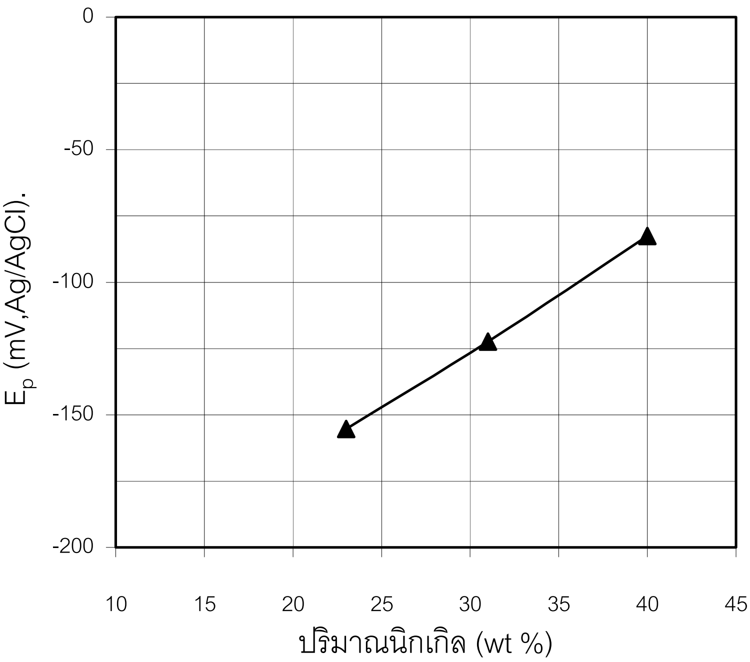


รูปที่ 4.16 ผลของนิกเกิลต่ออัตราการกัดกร่อนของเหล็กกล้านิกเกิล

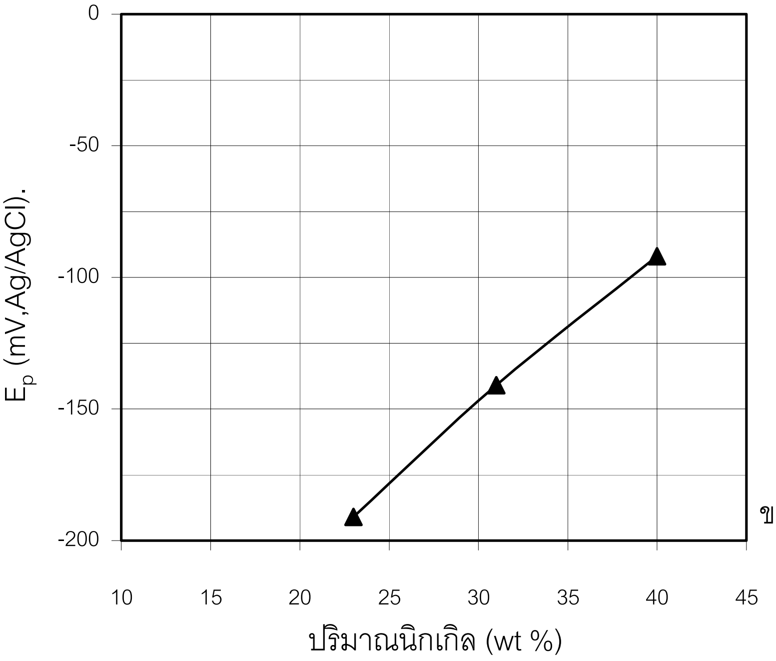
4.3.3 ศักย์ไฟฟ้าเริ่มเกิดพาสสีพ (E_{pp}) และศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนแบบรูเข็ม (E_p)



รูปที่ 4.17 ผลของนิกเกิลต่อศักย์ไฟฟ้าเริ่มเกิดพาสสีพของเหล็กกล้านิกเกิล



ก) สารละลาย A, pH=10



ข) สารละลาย B, pH=10

รูปที่ 4.18 ผลของนิกเกิลต่อศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนแบบรูเข็มของเหล็กกล้านิกเกิล

รูปที่ 4.17 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างศักย์ไฟฟ้าเริ่มเกิดพาสสีพและปริมาณนิกเกิลในเหล็กกล้านิกเกิล พบว่ามีช่วงการเกิดฟิล์มในเหล็กกล้านิกเกิลที่ 23, 31 และ 40 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักในสารละลาย A และ B ที่ค่าพีเอช 10 เท่านั้น โดยปริมาณนิกเกิลเพิ่มขึ้นทำให้ศักย์ไฟฟ้าเริ่มเกิดพาสสีพสูงขึ้น ผลการทดลองเป็นเช่นเดียวกับผลของ X. Peng, Y. Zang, J. Zhao,

F. Wang [18] และ Y. S. Zang, X. M. Zhu [25] อธิบายจากปริมาณนิกเกิลเพิ่มขึ้นส่งผลให้ปฏิกิริยาแอโนดิกเกิดได้ช้าลง (ศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนสูงขึ้น) ดังนั้นไอออนของนิกเกิลในสารละลายที่เกิดจากปฏิกิริยาแอโนดิกจึงเกิดได้ช้าลง ส่งผลให้การเกิดฟิล์มพาสสีพ $Ni(OH)_2$ จากไอออนของนิกเกิลในสมการที่ 4.18 ยากขึ้นแม้จะมีปริมาณนิกเกิลมากขึ้นก็ตาม ตรงข้ามกับผลของโครเมียมที่ช่วยให้เกิดฟิล์มพาสสีพได้เร็วขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับผลของปริมาณนิกเกิลที่ต่ำมากเมื่อเทียบกับปริมาณโครเมียมในฟิล์มพาสสีพของเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก [22] กรณีผลของการเปลี่ยนแปลงพีเอชและปริมาณอากาศที่ต่างกันในสารละลาย A และ B ต่อศักย์ไฟฟ้าเริ่มเกิดพาสสีพอธิบายด้วยเหตุผลลักษณะเดียวกับผลของโครเมียมต่อศักย์ไฟฟ้าเริ่มเกิดพาสสีพในหัวข้อที่ 4.2.3

รูปที่ 4.18 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนแบบรูเข็มและปริมาณนิกเกิลในเหล็กกล้านิกเกิล พบว่ามีช่วงการเกิดฟิล์มในเหล็กกล้านิกเกิลที่ 23, 31 และ 40 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ในสารละลาย A และ B ที่ค่าพีเอช 10 เท่านั้น อธิบายจากแผนภาพโพเบในรูปที่ 4.19 ได้ว่าที่ช่วงพีเอชตั้งแต่ 8 ถึง 14 และค่าศักย์ไฟฟ้าตั้งแต่ -750 ถึง 400 มิลลิโวลต์ นิกเกิลสามารถสร้างสารประกอบ $Ni(OH)_2$ [19-20] ที่อาจมีคุณสมบัติเป็นฟิล์มพาสสีพ ความสามารถในการสร้าง $Ni(OH)_2$ สูงตามปริมาณนิกเกิลที่เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนแบบรูเข็มมีแนวโน้มสูงขึ้นเมื่อปริมาณนิกเกิลเพิ่มจาก 23 ถึง 40 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก กรณีเหล็กกล้านิกเกิลที่มีปริมาณนิกเกิล 15 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักไม่แสดงการสร้างฟิล์มอาจเป็นผลจากมีปริมาณนิกเกิลต่ำจนไม่สามารถสร้างฟิล์มพาสสีพที่เสถียรได้

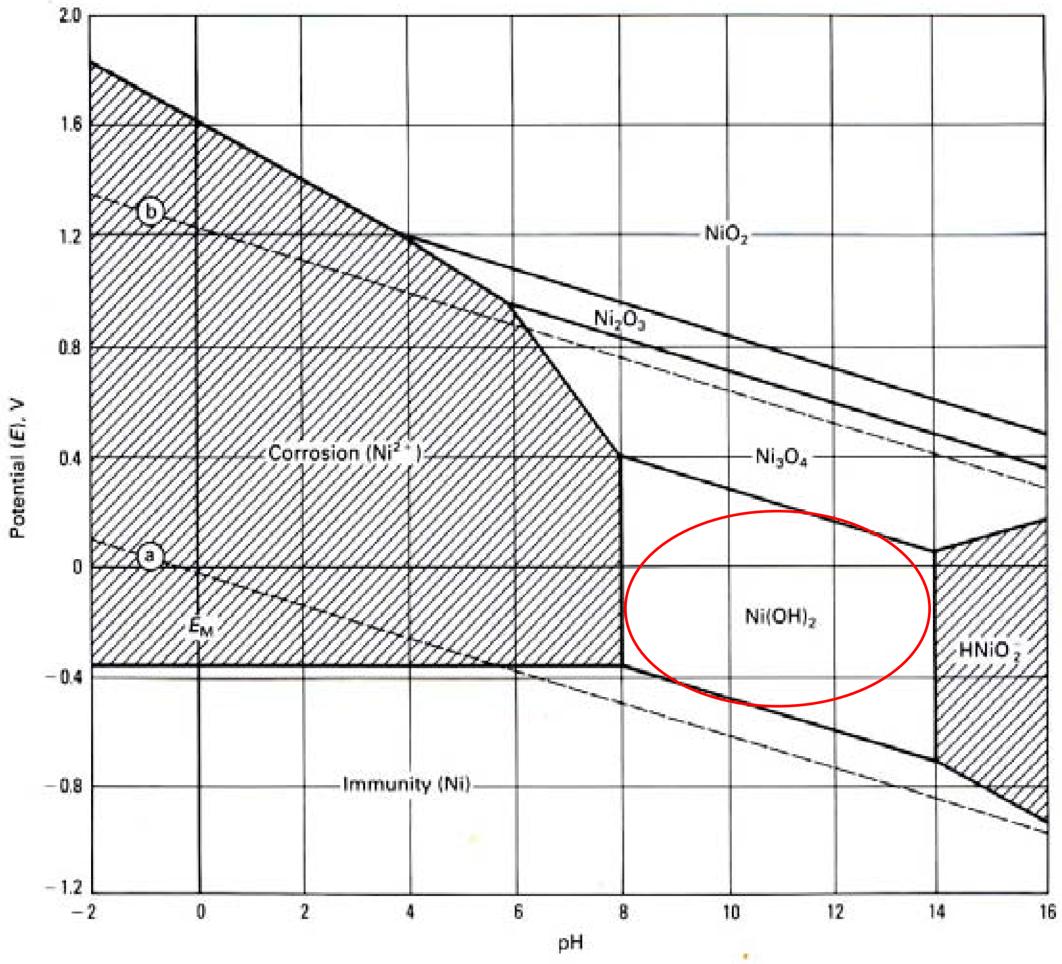
ผลของศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนแบบรูเข็มในสารละลาย B มีค่าต่ำกว่าสารละลาย A เพราะปริมาณ O_2 ช่วยในการเกิด OH^- ลดลง [4] ในสมการที่ (4.15) ทำให้ความสามารถในการสร้างและซ่อมแซมฟิล์มพาสสีพ $Ni(OH)_2$ ตามสมการที่ (4.18) เกิดได้ที่ศักย์ไฟฟ้าต่ำลงหรือมีเสถียรภาพต่ำลงด้วย

$$Ni^{2+} + 2OH^- = Ni(OH)_2 \qquad (4.18)$$

4.3.4 ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าขณะวัสดุเกิดฟิล์ม (I_p)

รูปที่ 4.20 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าขณะวัสดุเกิดฟิล์มและปริมาณนิกเกิลของเหล็กกล้านิกเกิลที่ค่าพีเอช 10 พบว่าค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าขณะวัสดุเกิดฟิล์มลดลงเมื่อปริมาณนิกเกิลของเหล็กกล้าผสมนิกเกิลเพิ่มขึ้นจาก 23 ถึง 40 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก สามารถอธิบายได้จากความสามารถในการสร้างและซ่อมแซมฟิล์มพาสสีพของนิกเกิลตามปริมาณนิกเกิลสูงขึ้นตามสมการที่ (4.18) ส่งผลให้ความรุนแรงของการกัดกร่อนในช่วงการเกิดพาสสีพลดลง ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าขณะวัสดุเกิดฟิล์มที่ค่าพีเอช 10 ในสารละลาย

A มีค่าต่ำกว่าสารละลาย B จากปฏิกิริยารีดักชันของ O_2 เกิดเป็น OH^- ตามสมการที่ (4.15) โดย OH^- มีผลต่อการซ่อมแซมฟิล์มพาสสีพ $Ni(OH)_2$ ตามสมการที่ (4.18)



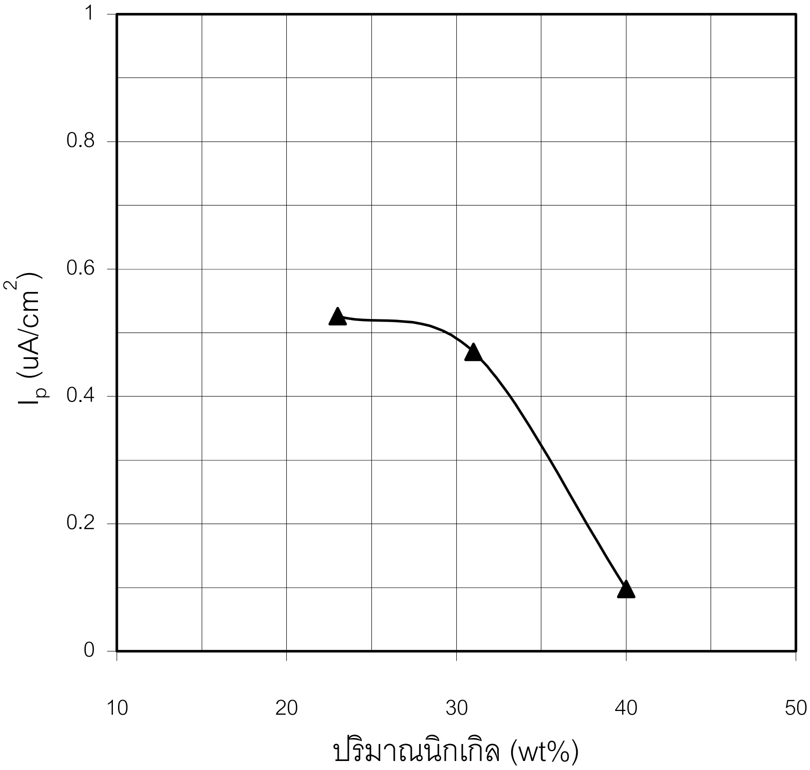
รูปที่ 4.19 แผนภาพโพเบของโลหะนิกเกิลในน้ำที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส [4]

4.4 โครงสร้างจุลภาคบริเวณที่ถูกกัดกร่อนในช่วงค่าศักย์ไฟฟ้าทรานพาสสีพ

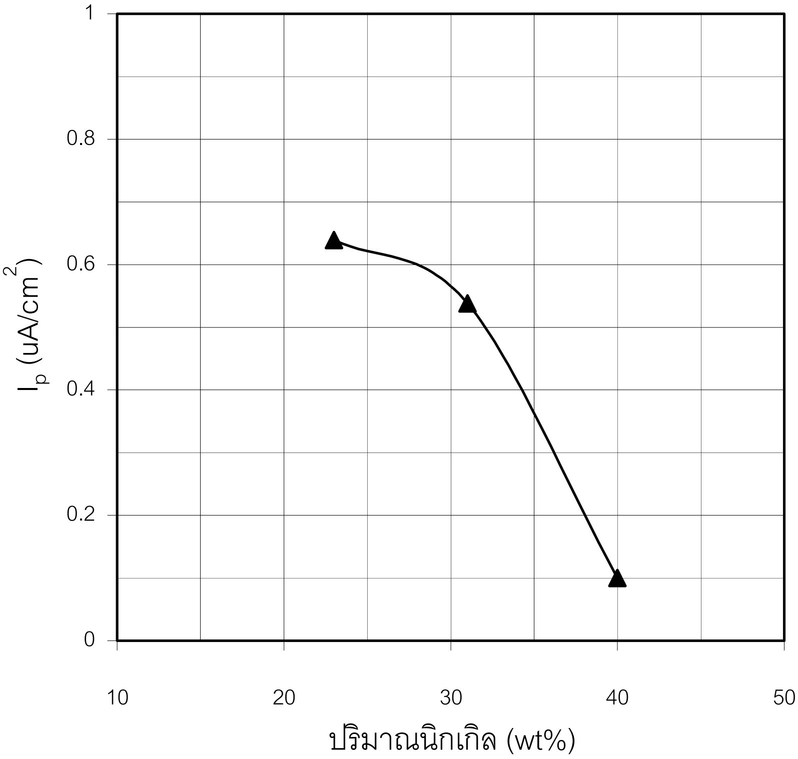
การศึกษาในที่นี้ให้ตัวอย่างชิ้นงานเหล็กกล้าโครเมียมและเหล็กกล้านิกเกิลมีค่าศักย์ไฟฟ้าคงที่ในช่วงค่าศักย์ไฟฟ้าทรานพาสสีพเป็นเวลา 5 – 50 นาทีแล้วตรวจโครงสร้างจุลภาคที่ถูกกัดกร่อน ได้ผลดังหัวข้อที่ 4.4.1

รูปที่ 4.21-4.24 แสดงบริเวณที่ถูกกัดกร่อนของเหล็กกล้าผสมโครเมียม Fe-13Cr และ Fe-18Cr พบว่าการเริ่มต้นการกัดกร่อนแบบรูเข็มหรือหลุม ((initial pit) โดยสังเกตจากขนาดที่ใหญ่กว่ารูเข็มหรือหลุมที่เกิดขึ้นใหม่) เกิดได้ทั่วไปภายในเกรนหลังจากที่ฟิล์มพาสสีพถูกทำลาย ที่ค่าพีเอช 2, 7 และ 10 ทั้งในสารละลาย A และ B ไม่พบการกัดกร่อนที่ขอบเกรน (intergranular corrosion) จากการตกผลึกของโครเมียมคาร์ไบด์หรือสารประกอบที่มีโครเมียมเป็นส่วนประกอบ

อธิบายได้ว่าโครงสร้างจุลภาคของเหล็กกล้าผสมโครเมียม Fe-13Cr และ Fe-18Cr มีส่วนผสมทางเคมีไม่แตกต่างกันจนส่งผลต่อการกัดกร่อนเฉพาะที่



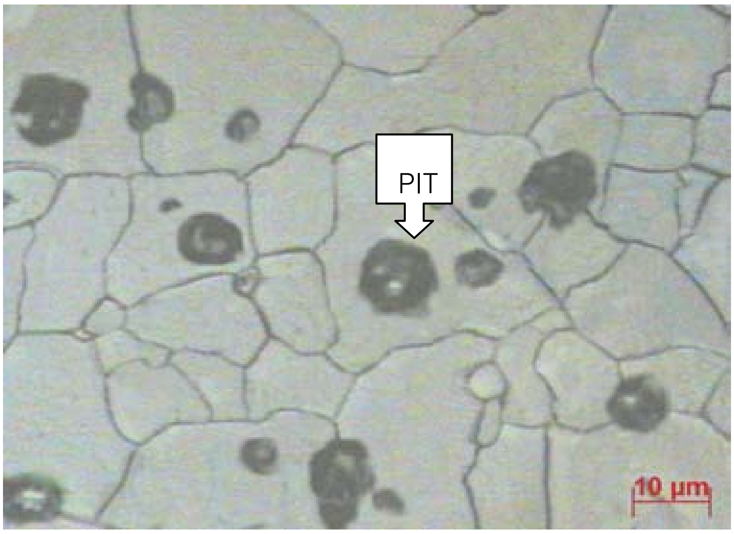
ก) สารละลาย A, pH=10



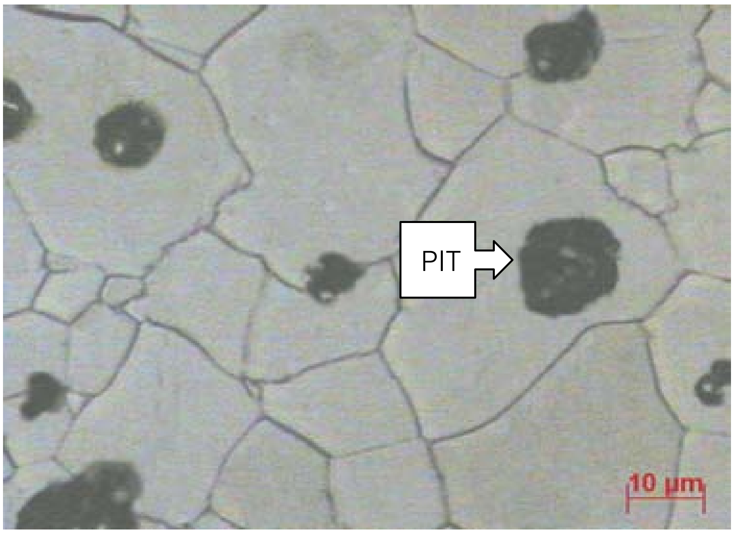
ข) สารละลาย B, pH=10

รูปที่ 4.20 ผลของนิกเกิลต่อความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าขณะวัสดุเกิดฟิล์มของเหล็กกล้านิกเกิล

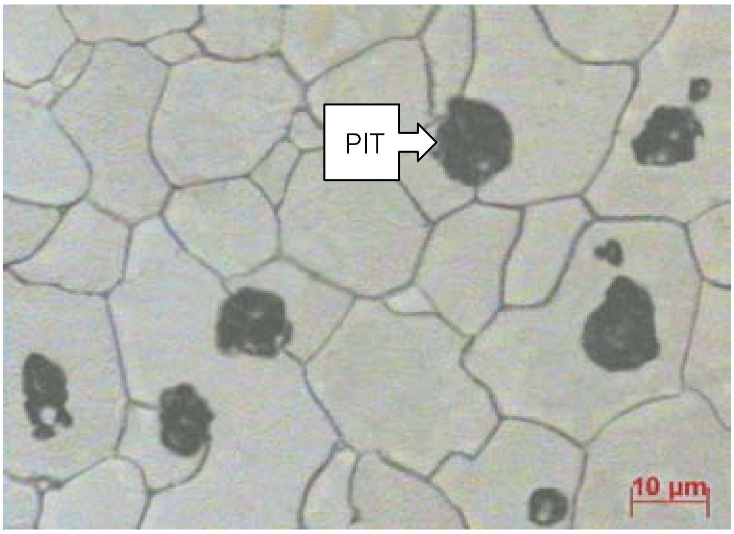
4.4.1โครงสร้างจุลภาคบริเวณที่ถูกกัดกร่อนของเหล็กกล้าโครเมียม



ก. พีเอช 2

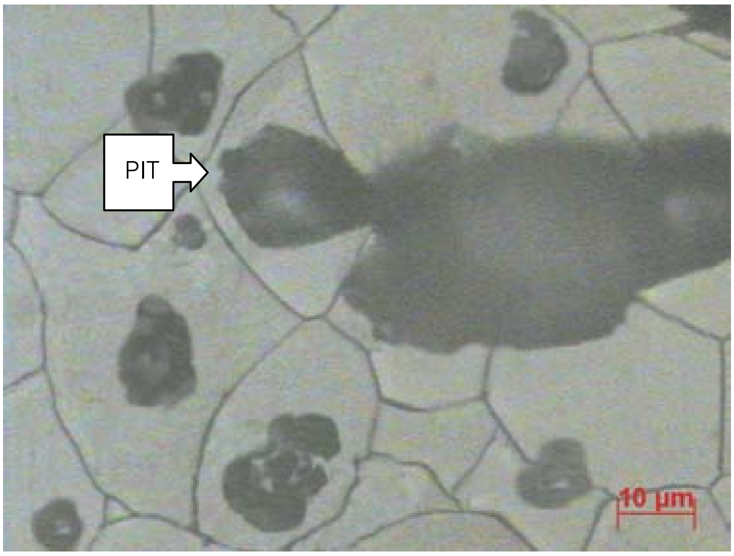


ข. พีเอช 7

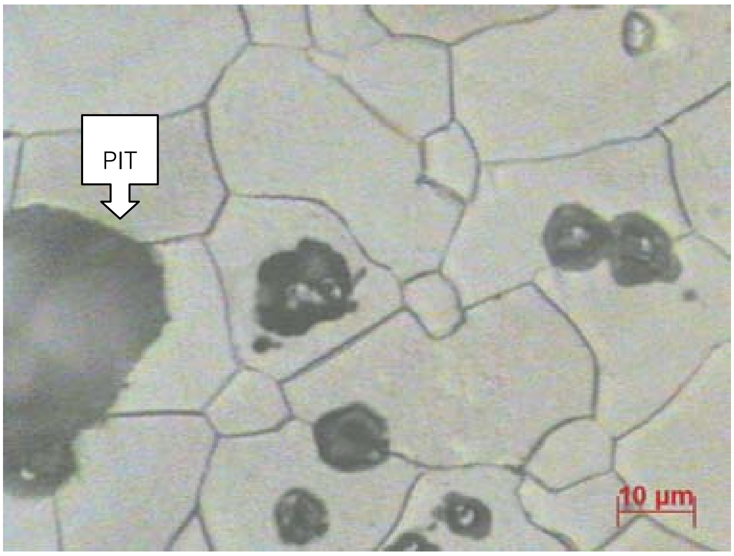


ค. พีเอช 10

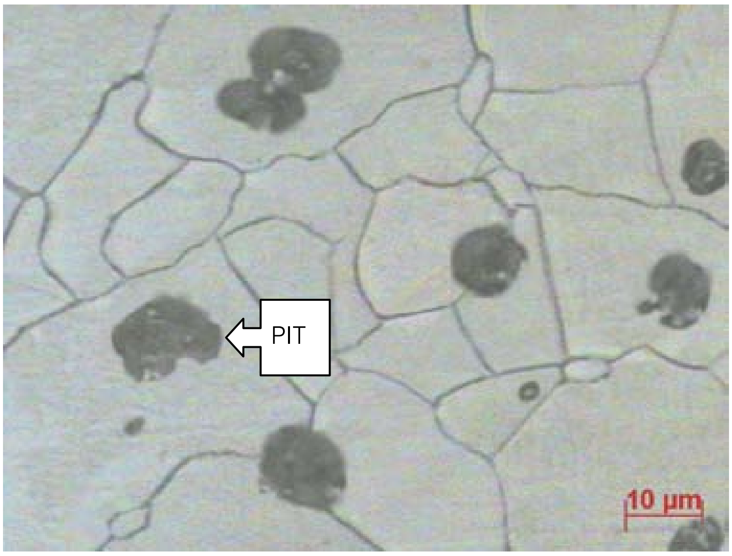
รูปที่ 4.21 บริเวณที่ถูกกัดกร่อนของเหล็กกล้าโครเมียม Fe-13Cr ในสารละลาย A
ที่ค่า ก.พีเอช 2 ข. พีเอช 7 ค. พีเอช 10



ก. พีเอช 2

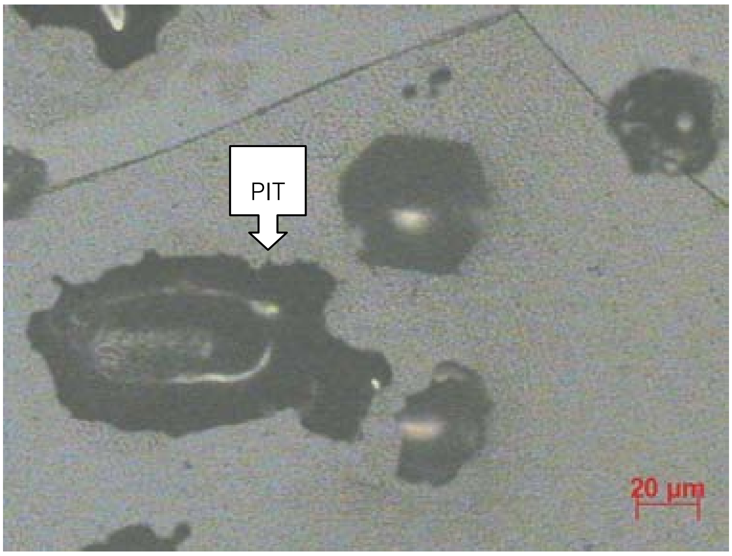


ข. พีเอช 7

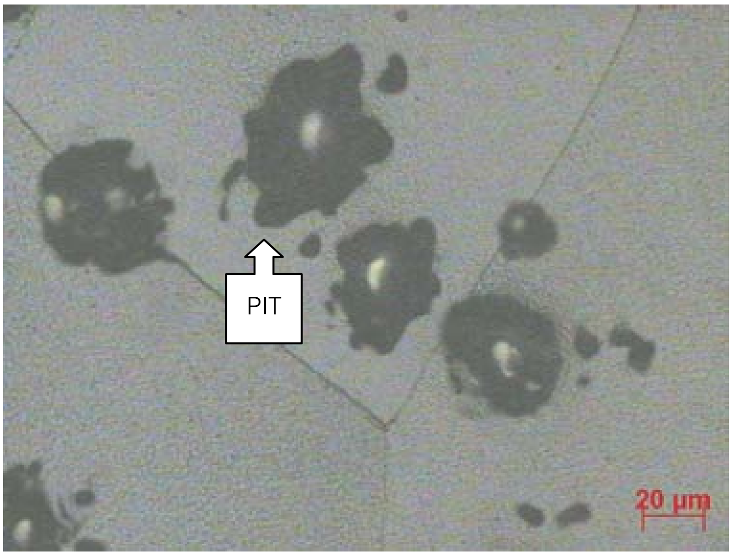


ค. พีเอช 10

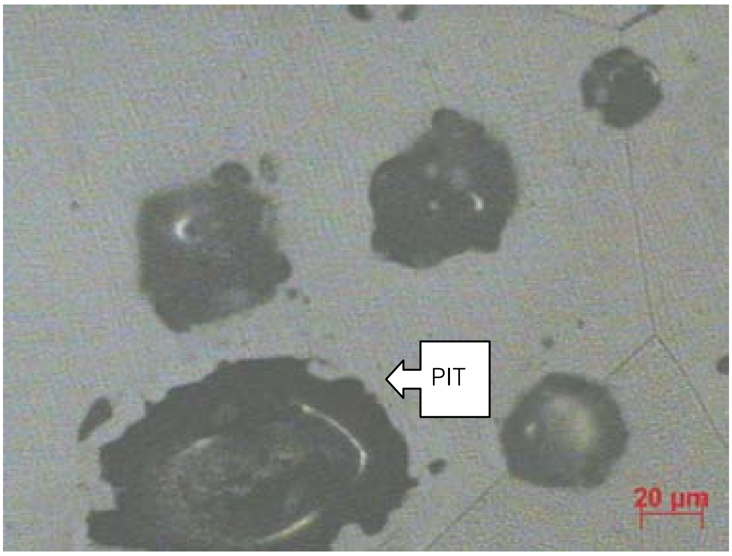
รูปที่ 4.22 บริเวณที่ถูกกัดกร่อนของเหล็กกล้าโครเมียม Fe-13Cr ในสารละลาย B ที่ค่า ก.พีเอช 2 ข. พีเอช 7 ค. พีเอช 10



ก. พีเอช 2

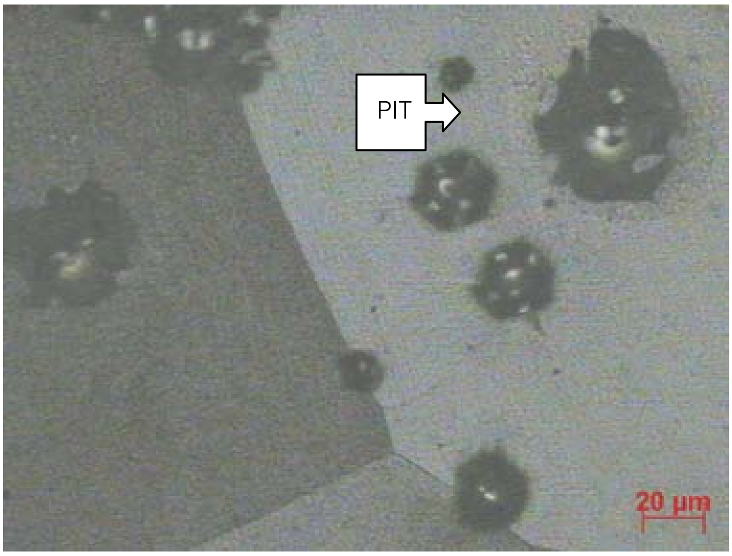


ข. พีเอช 7

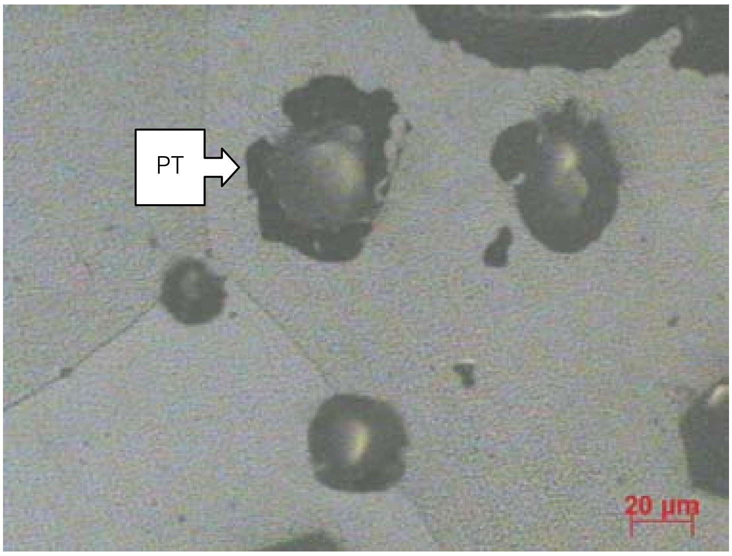


ค. พีเอช 10

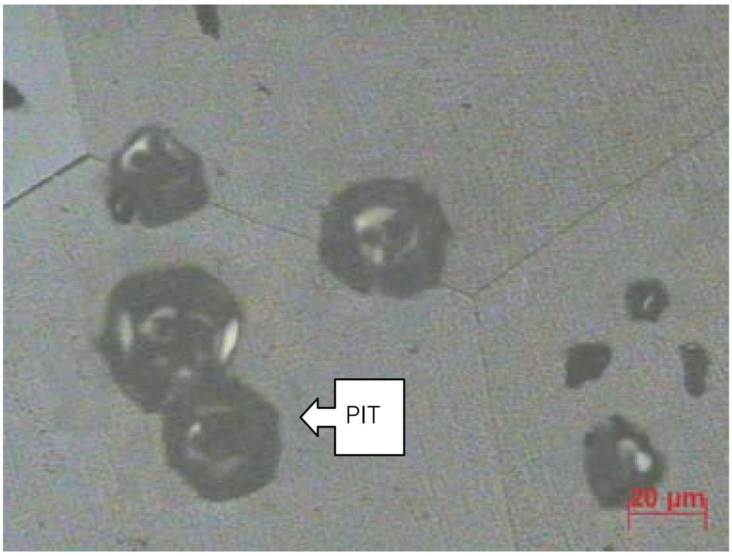
รูปที่ 4.23 บริเวณที่ถูกกัดกร่อนของเหล็กกล้าโครเมียม Fe-18Cr ในสารละลาย A ที่ค่า ก.พีเอช 2 ข. พีเอช 7 ค. พีเอช 10



ก. พีเอช 2



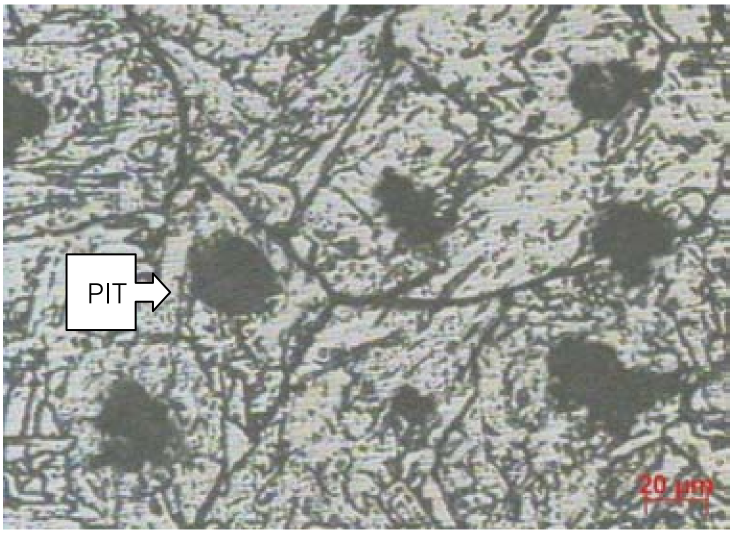
ข. พีเอช 7



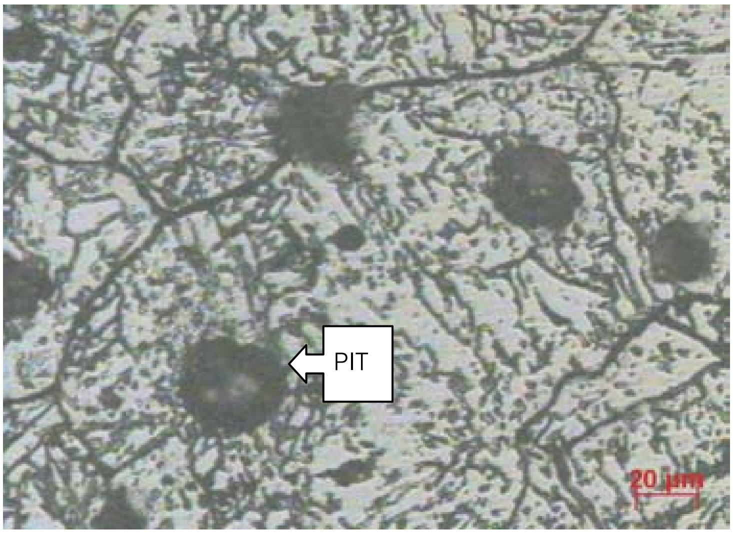
ค. พีเอช 10

รูปที่ 4.24 บริเวณที่ถูกกัดกร่อนของเหล็กกล้าโครเมียม Fe-18Cr ในสารละลาย B ที่ค่า ก.พีเอช 2 ข. พีเอช 7 ค. พีเอช 10

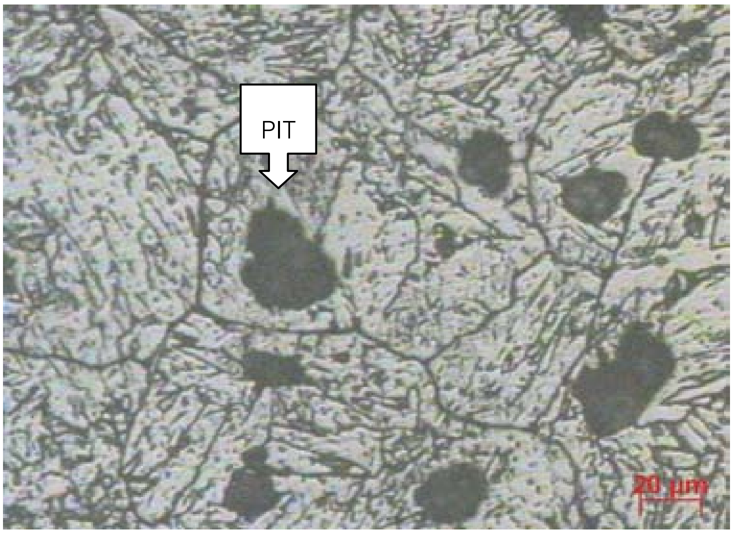
4.4.1โครงสร้างจุลภาคบริเวณที่ถูกกัดกร่อนของเหล็กกล้านิกเกิล



ก. พีเอช 2

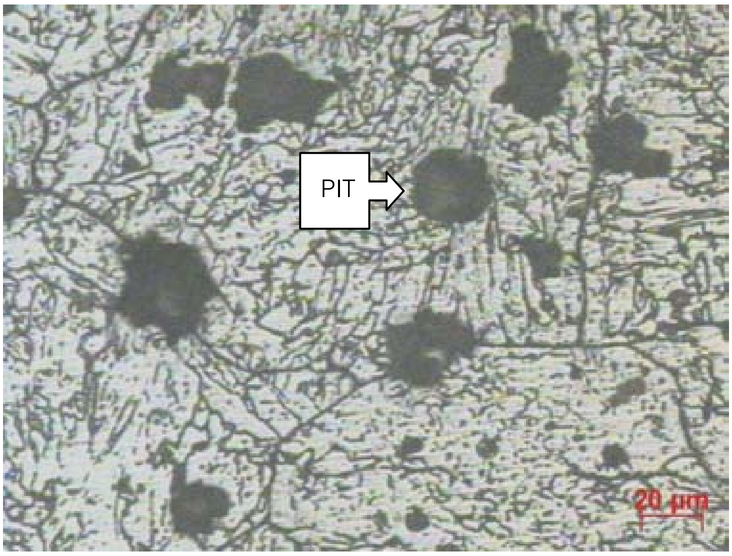


ข. พีเอช 7

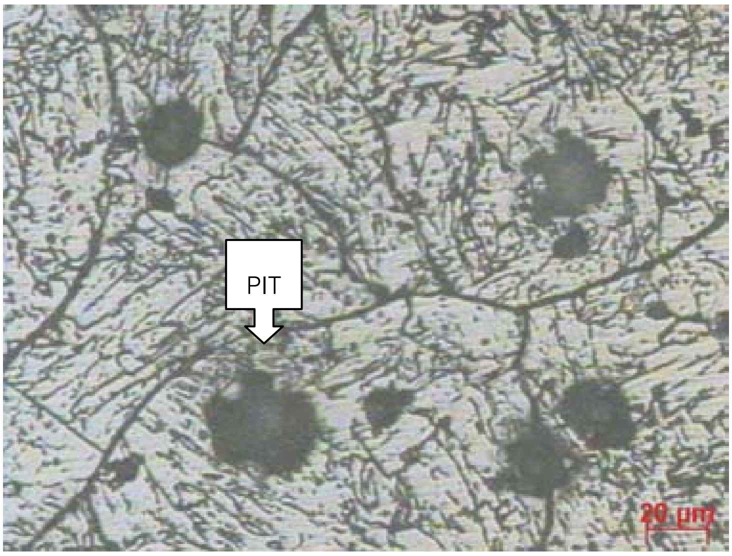


ค. พีเอช 10

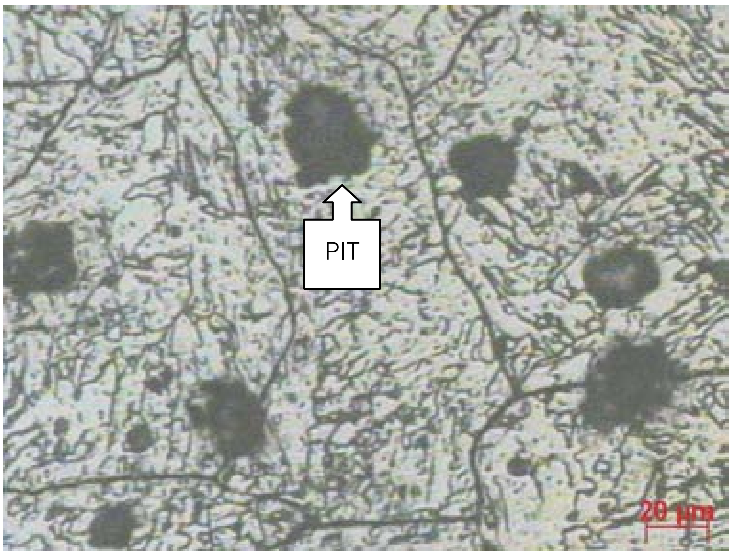
รูปที่ 4.25 บริเวณที่ถูกกัดกร่อนของเหล็กกล้านิกเกิล Fe-15Ni ในสารละลาย A
ที่ค่า ก.พีเอช 2 ข. พีเอช 7 ค. พีเอช 10



ก. พีเอช 2

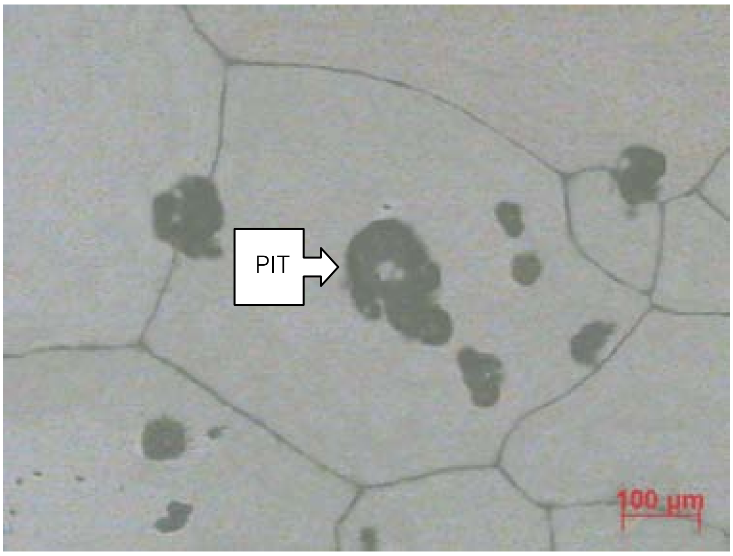


ข. พีเอช 7

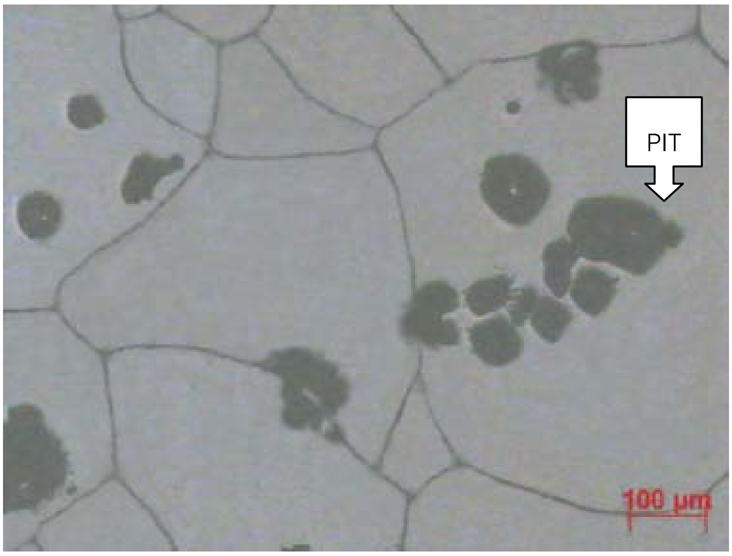


ค. พีเอช 10

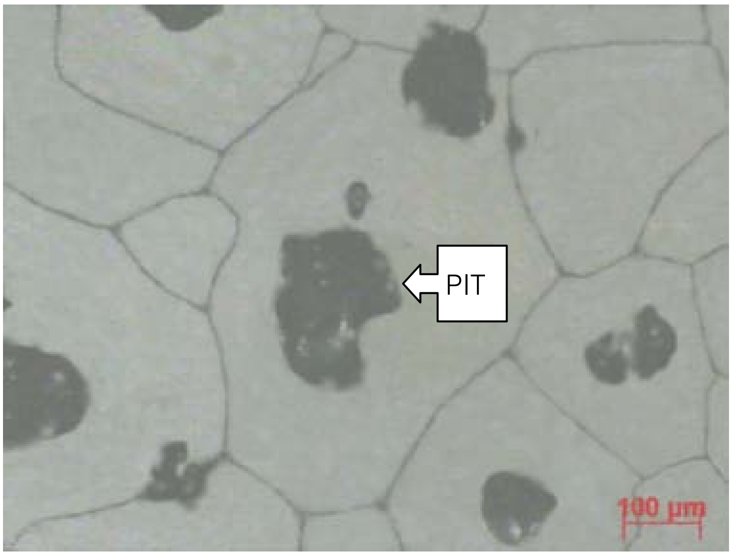
รูปที่ 4.26 บริเวณที่ถูกกัดกร่อนของเหล็กกล้านิกเกิล Fe-15Ni ในสารละลาย B
ที่ค่า ก.พีเอช 2 ข. พีเอช 7 ค. พีเอช 10



ก. พีเอช 2

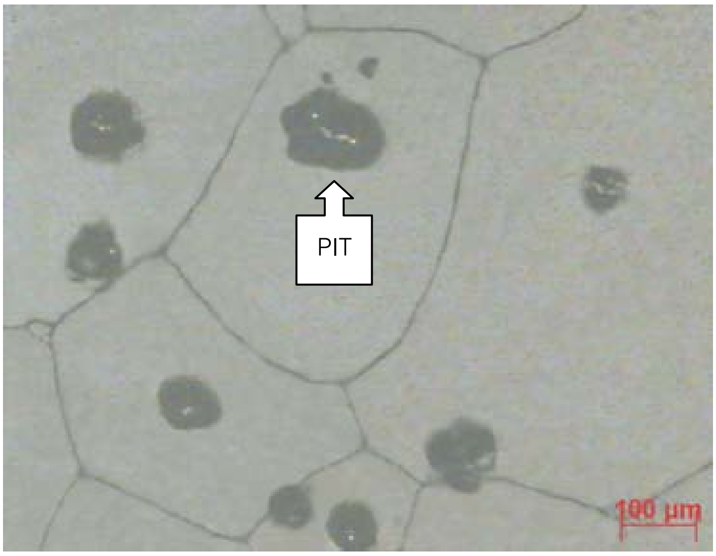


ข. พีเอช 7

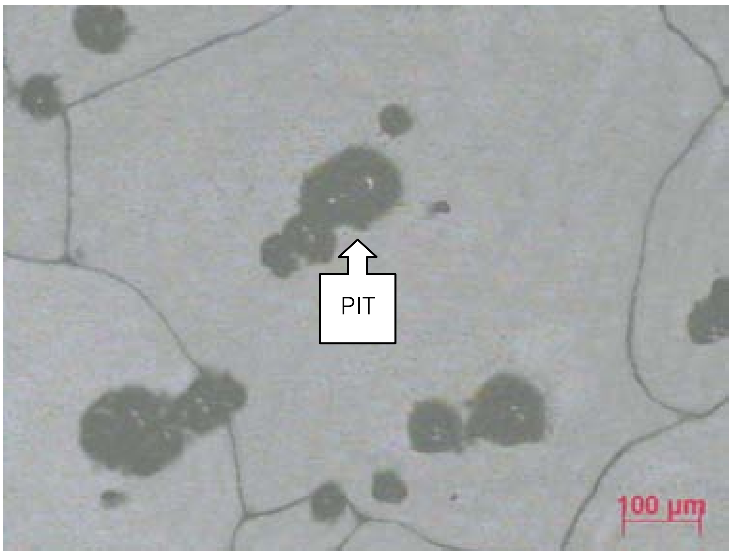


ค. พีเอช 10

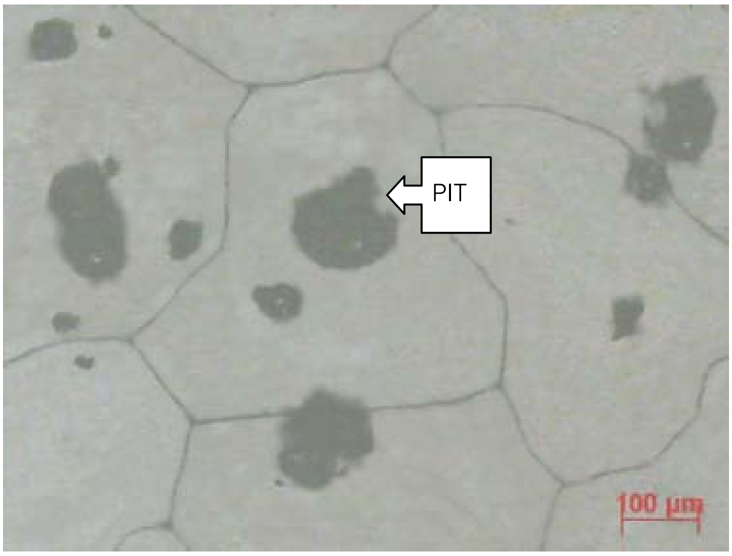
รูปที่ 4.27 บริเวณที่ถูกกัดกร่อนของเหล็กกล้านิกเกิล Fe-40Ni ในสารละลาย A ที่ค่า ก.พีเอช 2 ข. พีเอช 7 ค. พีเอช 10



ก. พีเอช 2



ข. พีเอช 7



ค. พีเอช 10

รูปที่ 4.28 บริเวณที่ถูกกัดกร่อนของเหล็กกล้านิกเกิล Fe-40Ni ในสารละลาย B ที่ค่า ก.พีเอช 2 ข. พีเอช 7 ค. พีเอช 10

รูปที่ 4.25-4.28 แสดงบริเวณที่ถูกกัดกร่อนของเหล็กกล้าผสมนิกเกิล Fe-15Ni และ Fe-40Ni พบว่าการเริ่มต้นการกัดกร่อนแบบรูเข็มหรือหลุม (initial pit) เกิดได้ทั่วไปภายในเกรน และที่ขอบเกรน ที่ค่าพีเอช 2, 7 และ 10 ทั้งในสารละลาย A และ B เช่นเดียวกับกรณีของเหล็กกล้าโครเมียม

บทที่ 5

สรุปผลการทดลอง

การศึกษาผลของโครเมียมในเหล็กกล้าโครเมียมและนิกเกิลในเหล็กกล้านิกเกิลต่อพฤติกรรมการกัดกร่อนในสารละลาย A และ B เหล็กกล้าที่ใช้ทดลองมี 2 ชุด ชุดแรกมีส่วนผสมของโครเมียมเป็น 13, 15, 18 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก (Fe-13Cr, Fe-15Cr, Fe-18Cr) และชุดที่สองมีส่วนผสมของนิกเกิลเป็น 15, 23, 31, 40 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก (Fe-15Ni, Fe-23Ni, Fe-31Ni, Fe-40Ni) สามารถสรุปผลการทดลองได้ดังนี้

1. ผลของโครเมียมต่อพฤติกรรมการกัดกร่อนของเหล็กกล้าโครเมียม

1.1) ปริมาณโครเมียมที่เพิ่มขึ้นจาก 13-18 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ไม่ส่งผลที่ชัดเจนต่อศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อน (corrosion potential, E_{corr})

1.2) ปริมาณโครเมียมที่เพิ่มขึ้นลดค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า การกัดกร่อน (corrosion current density, I_{corr}) และค่าอัตราการกัดกร่อน (corrosion rate, R_{mpy})

1.3) ปริมาณโครเมียมที่เพิ่มขึ้นลดค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า ขณะวัสดุเกิดฟิล์มที่ผิว (passive current density, I_p) ค่าศักย์ไฟฟ้าเริ่มเกิดพาสสีพ (primary passive potential E_{pp}) และเพิ่มค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนแบบรูเข็มหรือหลุม (pitting potential, E_p)

2. ผลของนิกเกิลต่อพฤติกรรมการกัดกร่อนของเหล็กกล้านิกเกิล

2.1) ปริมาณนิกเกิลที่เพิ่มขึ้นเพิ่มศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อน

2.2) ปริมาณนิกเกิลที่เพิ่มขึ้นลดค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อนและค่าอัตราการกัดกร่อน

2.3) ที่ค่าพีเอช 2, 7 ไม่พบพฤติกรรมการสร้างฟิล์มของเหล็กกล้านิกเกิล

2.4) ที่ค่าพีเอช 10 เหล็กกล้าผสมนิกเกิลที่ส่วนผสม 23- 40 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก มีพฤติกรรมการสร้างฟิล์มพาสสีพ โดยปริมาณนิกเกิลที่เพิ่มขึ้นจาก 23 - 40 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักช่วยลดค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าขณะวัสดุเกิดฟิล์มที่ผิวและเพิ่มค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนแบบรูเข็ม

3. พฤติกรรมการกัดกร่อนของเหล็กกล้าโครเมียมและเหล็กกล้านิกเกิลที่ค่าพีเอช 2 มีความรุนแรงกว่าที่ค่าพีเอช 7 และ10

4. ในสารละลาย B เหล็กกล้าโครเมียมและเหล็กกล้านิกเกิล มีค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อน ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อน ค่าอัตราการกัดกร่อน ค่าศักย์ไฟฟ้าเริ่มเกิดพาสสีพ และ

ค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนแบบรูเข็มหรือหลุมน้อยกว่าในสารละลาย A ขณะที่ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าขณะวัสดุเกิดฟิล์มที่ผิวในสารละลาย B มากกว่าในสารละลาย A เล็กน้อย

5. การกัดกร่อนแบบรูเข็มหรือหลุมในช่วงศักย์ไฟฟ้าทรานพาสสีพของเหล็กกล้าโครเมียมและเหล็กกล้านิกเกิลกระจายตัวทั่วไปภายในเกรนและที่ขอบเกรน

รายการอ้างอิง

1. A. J. Sedriks, Corrosion of Stainless Steels, 2nd ed., John-Wiley & Sons, NewYork, 1996. p. 6-114.
2. P. Marcus and J.Oudar, Corrosion Mechanism in Theory and Practice 1sted., Marcel Dekker,Inc., Newyork,1995. p. 56-197.
3. P. Lacombe, B.Baroux and G. Berranger, Stainless Steels, 1st ed., Les Editions de Physique Les Ulis, France, 1993 . p.117-124.
4. D. A. Jones, Principle and Prevention of Corrosion, 2nd ed., Maxwell Macmillan International Publishing Group, Singapore, 1991. p. 42-120.
5. พรวสา วงษ์ปัญญา ผลของไนโตรเจนต่อความต้านทานการกัดกร่อนของเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ที่มีส่วนผสมโครเมียม 28% นิกเกิล 7% ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้น 3.5 % โดยน้ำหนัก วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมโลหการ บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย 2546
6. M. Hirano, S. Itaba, T. Minami, L. B. Nui and H. Takaku, Corrosion Potential Measurement on Crevice Corrosion Behavior of Boiler Materials for Thermal Power Plants, the Electrochemical Society, abs. 444, 204th Meeting, 2003.
7. ศิริลักษณ์ นิวิฐจรรยงค์ การกัดกร่อนและการเลือกใช้วัสดุ (พิมพ์ครั้งที่1) สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ 2545 หน้า 4-72
8. M. Hirano, S. Itaba, T. Minami, L. B. Nui and H. Takaku, Corrosion Potential Measurement on Crevice Corrosion Behavior of Boiler Materials for Thermal Power Plants, the Electrochemical Society, 204th Meeting, 2003, abs. 444.
9. I. Olefjord, B.Brox and U. Jelvestam, J. Electrochem.Soc.132:2854 (1985)
10. S.Jin and A.Atrens, ESCA-Studies of the Surface Film Formed on Stainless Steels by Exposure to 0.1 M NaCl solution at Controlled Potentials, Appl.Phys A46, p.51-65,1988
11. S.Jin and A.Atrens, Passive Films on Stainless Steel in AqueousMedia, Appl. Phys A50, p.287-300,1990
12. Russell H. Jones, Stress Corrosion Cracking Material Performance and Evaluation3rd,ASM International,1996

13. M. O. Speidel, Stress Corrosion Cracking of Stainless Steels in NaCl Solution, Metall.Trans.A,Vol12, p779,1981. p. 137-138.
14. J.Kolts, Temperature Limits for Stress Corrosion Cracking of Selected Stainless Steels and Ni Base alloys in Chloride Containing Environments, Paper No.241,present at Corrosion/82,National Association of Corrosion Engineers, 1982
15. J. Horwath and H. H. Uhlig, Critical potential for pitting corrosion of Ni, Ni-Cr, Cr-Fe and related stainless steel, Journal of the Electrochemical Society, Vol.115, p.791,1968.
16. C. V. Roscoc and K. J. Gradwell, International conference on duplex stainless steels, the Hague, N. L., Preprints (1986): paper no. 34, p. 127-135.
17. X Peng, Y. Zang, J. Zhao and F. Wang, Electrochemical Performance in 3.5 % NaCl of the Electrodeposited Nanocrystalline Ni Films with and without Dispersion of Nanoparticles, Electrochemica Acta 51, 2006, p. 4922-4927.
18. H. J. Jang, H.Y. Ha and H. S. Kwon, Photoelectrochemical Analysis on the Passive Film Formed on Ni in pH 8.5 Buffer Solution, The Electrochemical Society, 204th Meeting, 2003, abs. 447.
19. C. M. A. Brett and M. O. Brett, Electrochemistry: principles, methods and application, 1st ed., Oxford University Press Inc.,Newyork,1994, p. 359.
20. K. Osozawa and H. J. Engell, Corrosion Science, 6, 1996, p. 389.
21. H. H. Hassan, "Perchlorate and oxygen reduction during Zn corrosion in a neutral medium", Electrochemica Acta, 2006, p.1-7
22. G. Lothongkum, S. Chaikittisilp and A. W. Lothongkum, "XPS investigation of surface films on high Cr-Ni ferritic and austenitic stainless steels", Applied Surface Science, 218, 2003, p.202-209.
23. S. Jouen, M. Jean and B. Honnoyer: "Atmospheric Corrosion of Nickel in Various Outdoor Environments", Corrosion Science, 46, 2004, p. 499-514.

24. S.Azuma, T.Kudo, H.Miyuki, M.Yamashita and H.Ushida, Effect of Nickel alloying on crevice corrosion resistance of stainless steel, Corrosion Science 46 : (2004) , p. 2265-2280 .

25. Y. S. Zang and X. M. Zhu, “Electrochemicalpolarization and passive film analysis of austenitic Fe-Mn-Al steels in aqueous solutions”, Corrosion Science, 41, 1999, p. 1877-1833.

26. บัญชา ธนบุญสมบัติ การศึกษาวัสดุโดยเทคนิคดิฟแฟรกชัน (พิมพ์ครั้งที่1) สำนักพิมพ์ ส.ส.ท. 2544 หน้า 113-115.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

เส้นโพลาไรเซชันที่ได้จากการทดลอง

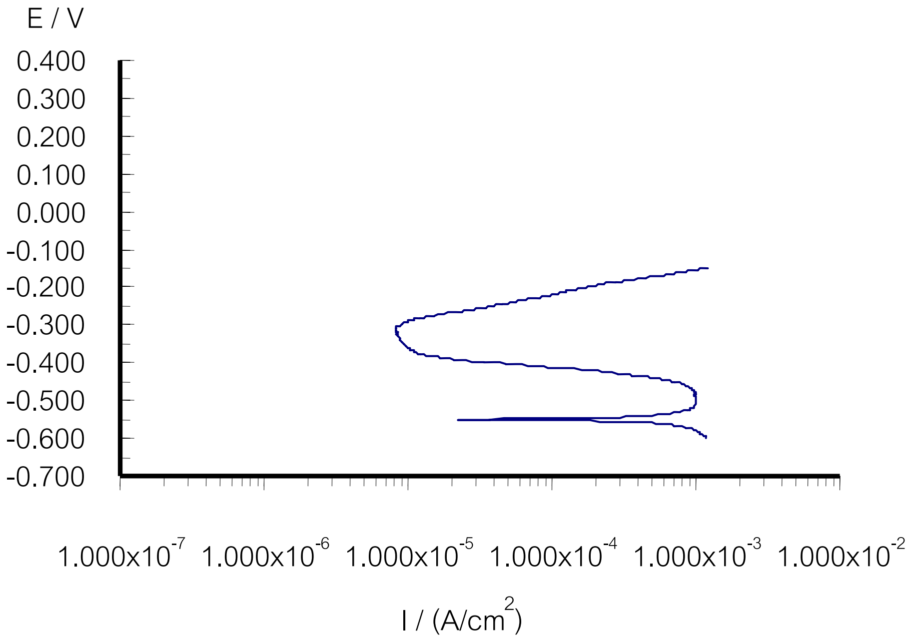
สภาวะที่ใช้ในการทดลอง

- ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 3.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก
- สภาวะความเป็นกรด-ด่างของสารละลายเท่ากับ 2, 7 และ 10
- อุณหภูมิที่ใช้ในการทดลองเท่ากับ 25 องศาเซลเซียส
- เวลาที่ใช้พ่นอากาศในสารละลายเท่ากับ 10 นาที (สภาวะอิ่มตัวด้วยอากาศ)
- เวลาที่ใช้พ่นไนโตรเจนในสารละลายเท่ากับ 90 นาที (สภาวะไม่มีอากาศ)
- อัตราการสแกนเท่ากับ 0.1 มิลลิโวลต์ต่อวินาที
- เวลาที่ใช้ในการจุ่มแช่ชิ้นงานก่อนการสแกน (equilibrium time) เท่ากับ 2700 วินาทีเป็นเวลาที่ศักย์ไฟฟ้าในระบบคงที่ไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลา โดยทดสอบจากความสัมพันธ์ระหว่างศักย์ไฟฟ้าวงจรเปิดกับเวลาในการแช่ชิ้นงาน ดังตารางที่ ก.1

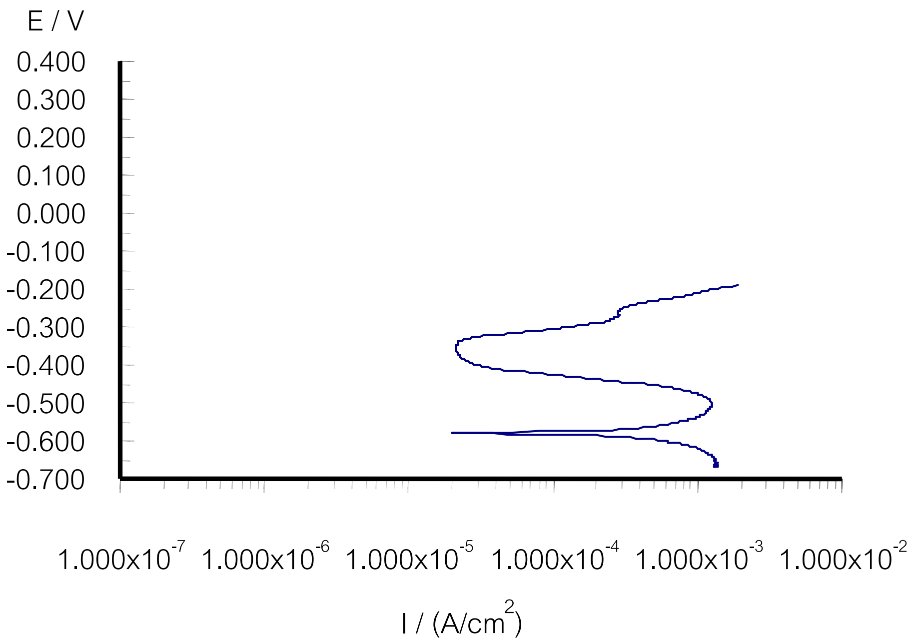
ตารางที่ ก.1 ผลของ equilibrium time ต่อศักย์ไฟฟ้าวงจรเปิดของชิ้นงานในสารละลายโซเดียมคลอไรด์เข้มข้น 3.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส

เวลาที่ใช้ (นาที)	ค่าศักย์ไฟฟ้า (โวลต์)
5	-0.092
10	-0.082
15	-0.086
20	-0.083
30	-0.072
40	-0.075
45	-0.075
50	-0.075
60	-0.075

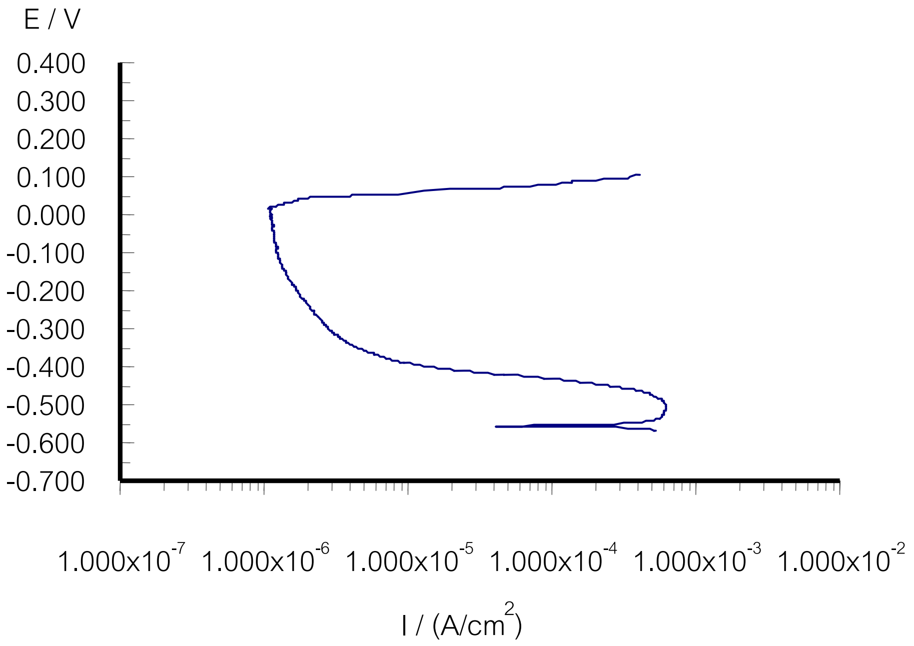
ก.1 เส้นโพลาไรเซชันของเหล็กกล้าโครเมียมในสารละลาย A และ B อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส



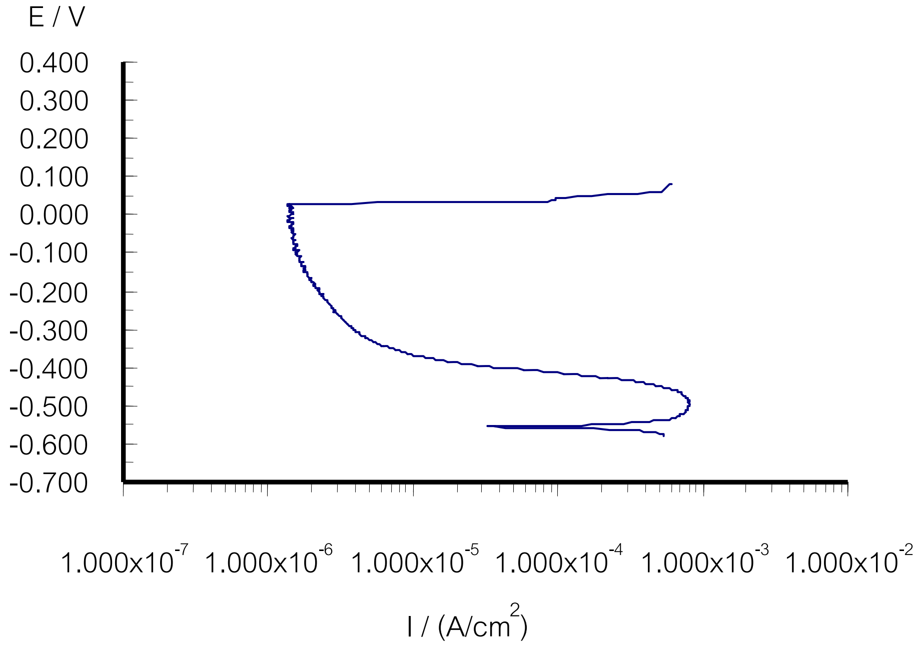
รูปที่ ก.1 เส้นโพลาไรเซชันของเหล็กกล้าโครเมียม Fe-13Cr ในสารละลาย A พีเอช 2 (พีเอช 2.00 - 1.98)



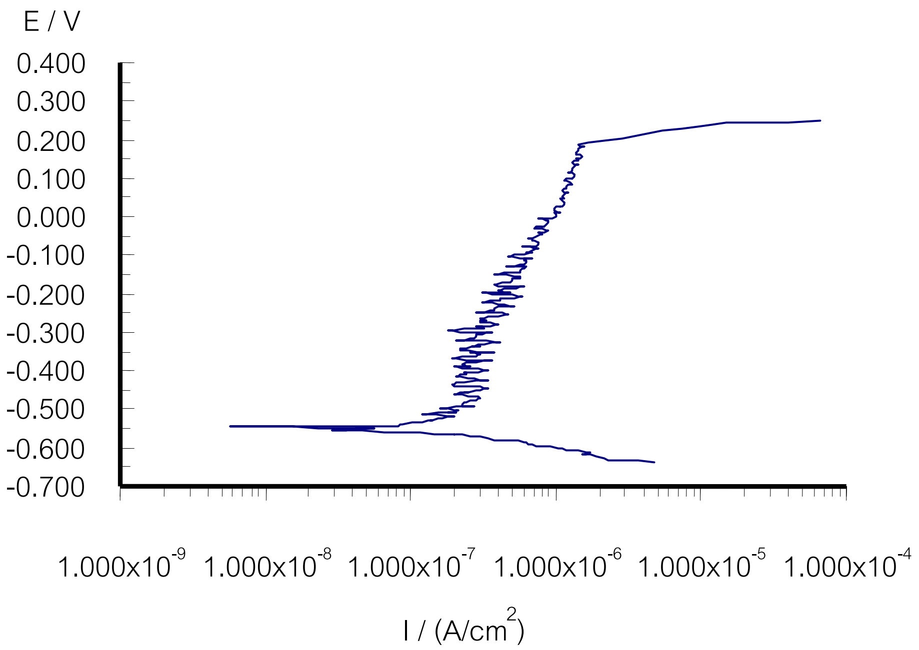
รูปที่ ก.2 เส้นโพลาไรเซชันของเหล็กกล้าโครเมียม Fe-13Cr ในสารละลาย B พีเอช 2 (พีเอช 2.00 - 1.98)



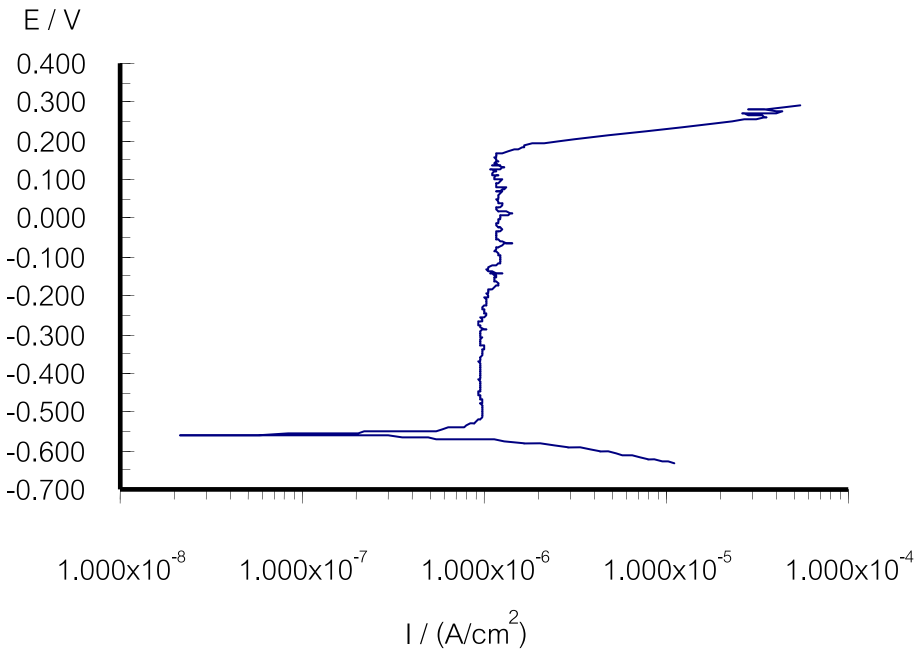
รูปที่ ก.3 เส้นโพลาไรเซชันของเหล็กกล้าโครเมียม Fe-15Cr ในสารละลาย A พีเอช 2 (พีเอช 2.00 - 1.99)



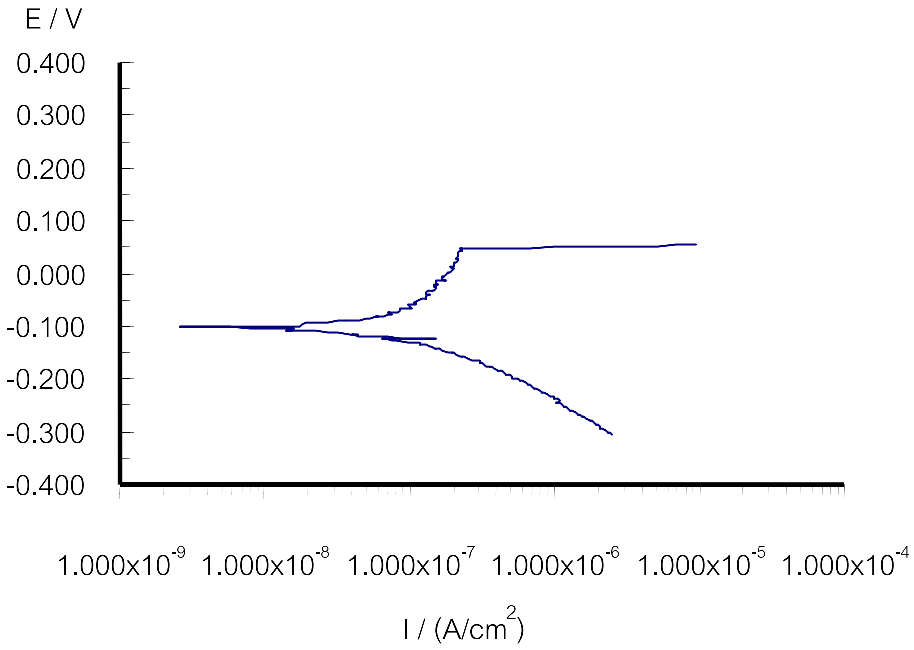
รูปที่ ก.4 เส้นโพลาไรเซชันของเหล็กกล้าโครเมียม Fe-15Cr ในสารละลาย B พีเอช 2 (พีเอช 2.00 - 1.98)



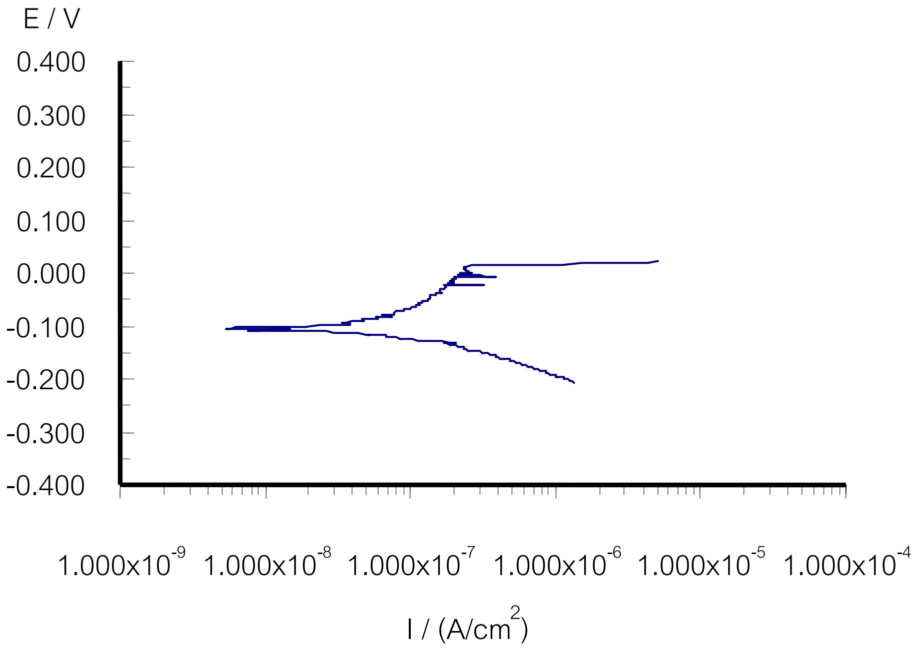
รูปที่ ก.5 เส้นโพลาไรเซชันของเหล็กกล้าโครเมียม Fe-18Cr ในสารละลาย A พีเอช 2 (พีเอช 2.00 - 1.98)



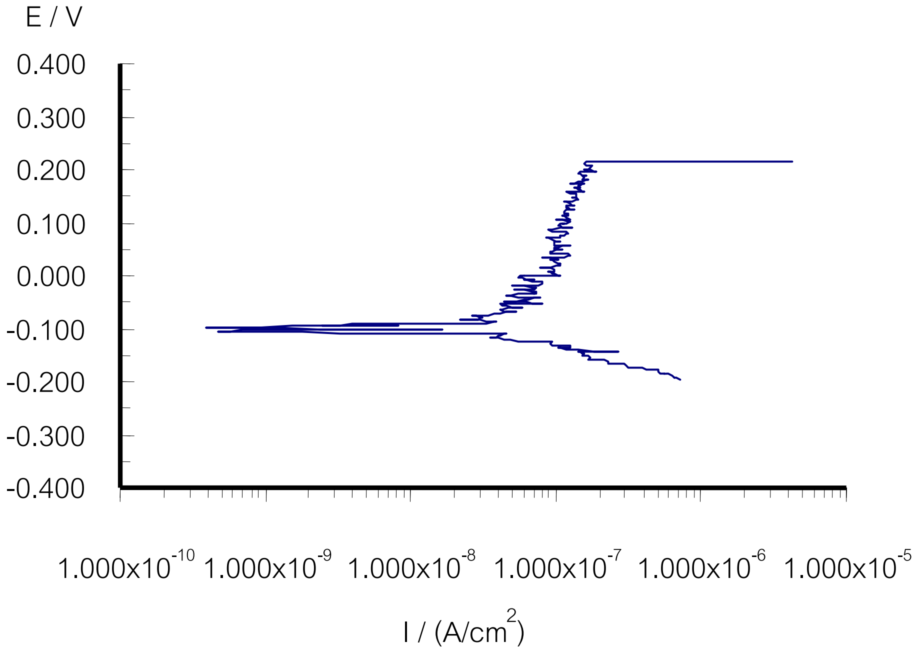
รูปที่ ก.6 เส้นโพลาไรเซชันของเหล็กกล้าโครเมียม Fe-18Cr ในสารละลาย B พีเอช 2 (พีเอช 2.00 - 1.99)



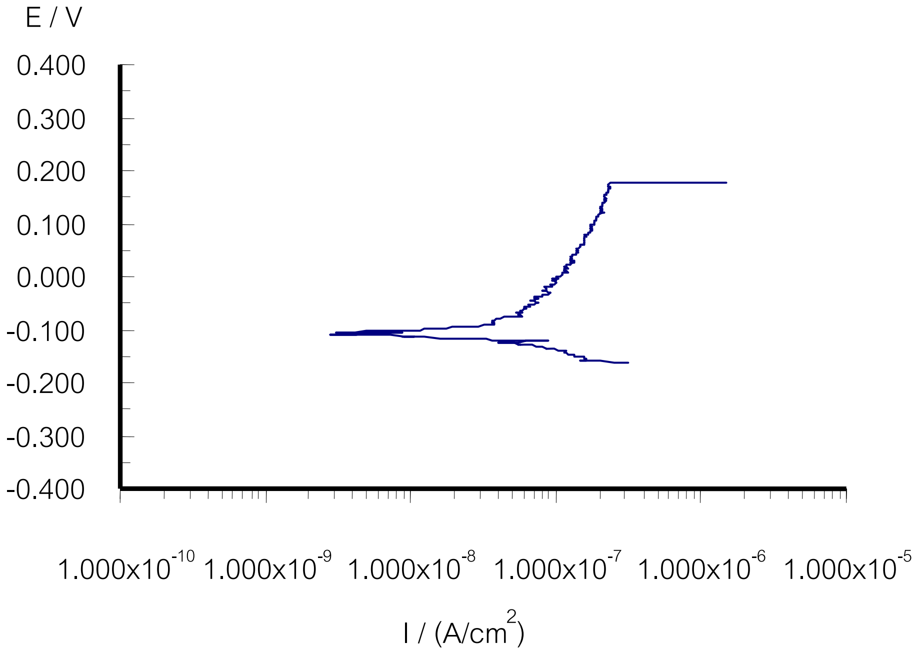
รูปที่ ก.7 เส้นโพลาไรเซชันของเหล็กกล้าโครเมียม Fe-13Cr ในสารละลาย A พีเอช 7 (พีเอช 7.00 - 6.97)



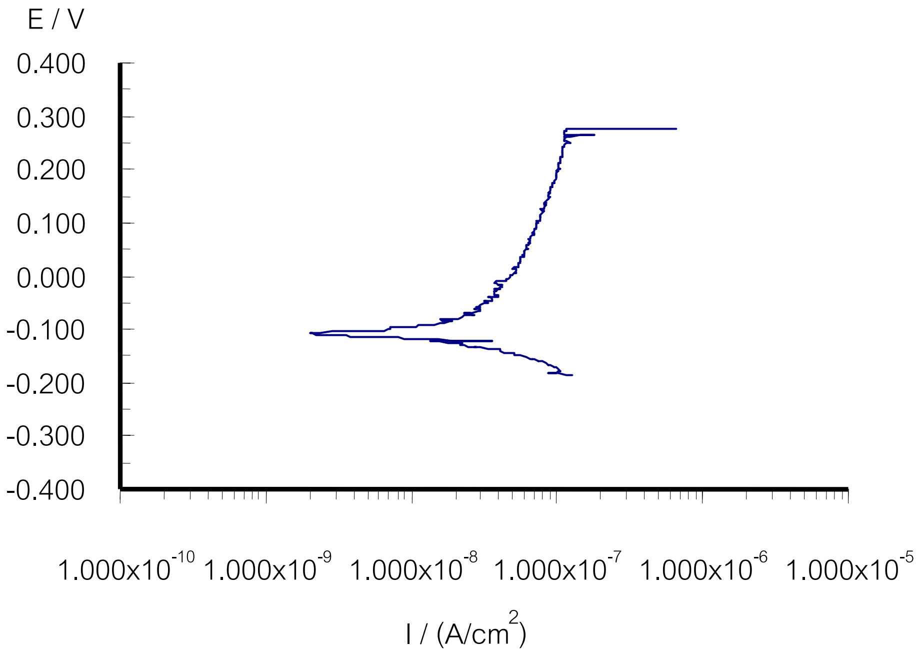
รูปที่ ก.8 เส้นโพลาไรเซชันของเหล็กกล้าโครเมียม Fe-13Cr ในสารละลาย B พีเอช 7 (พีเอช 7.00 - 6.97)



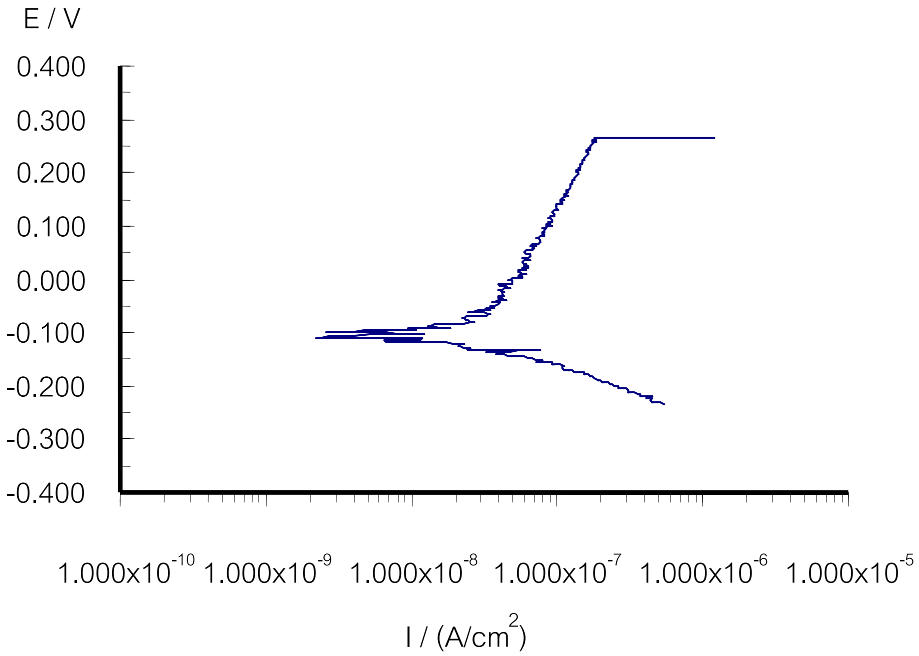
รูปที่ ก.9 เส้นโพลาไรเซชันของเหล็กกล้าโครเมียม Fe-15Cr ในสารละลาย A พีเอช 7 (พีเอช 7.00 -6.99)



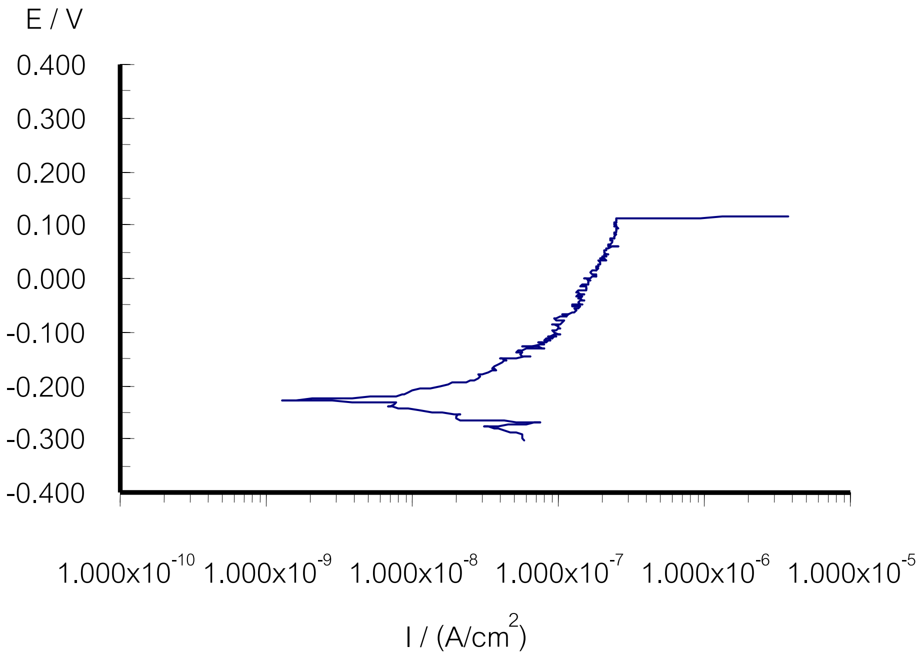
รูปที่ ก.10 เส้นโพลาไรเซชันของเหล็กกล้าโครเมียม Fe-15Cr ในสารละลาย B พีเอช 7 (พีเอช 7.00 -6.99)



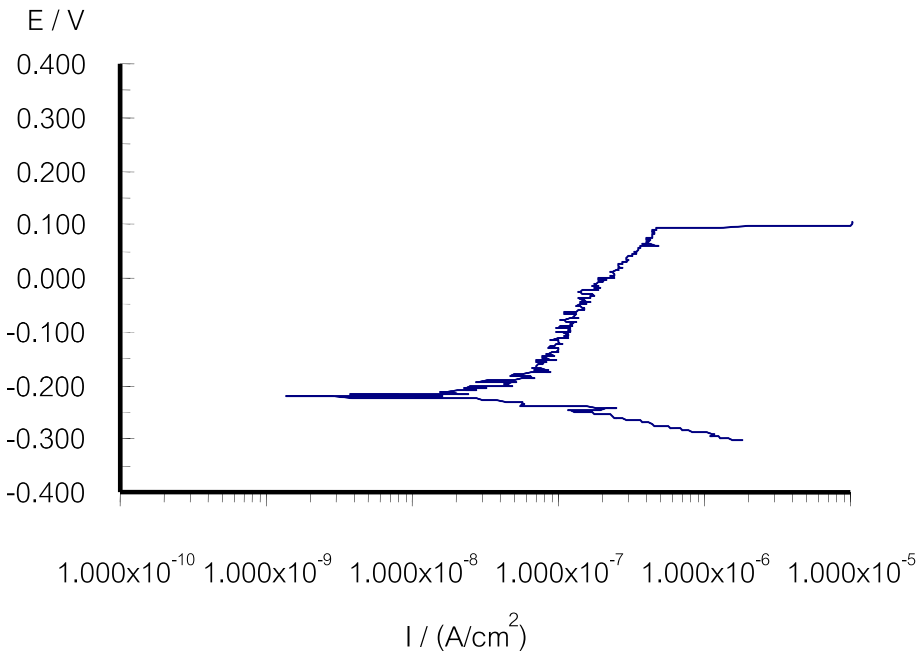
รูปที่ ก.11 เส้นโพลาไรเซชันของเหล็กกล้าโครเมียม Fe-18Cr ในสารละลาย A พีเอช 7 (พีเอช 7.00 -6.99)



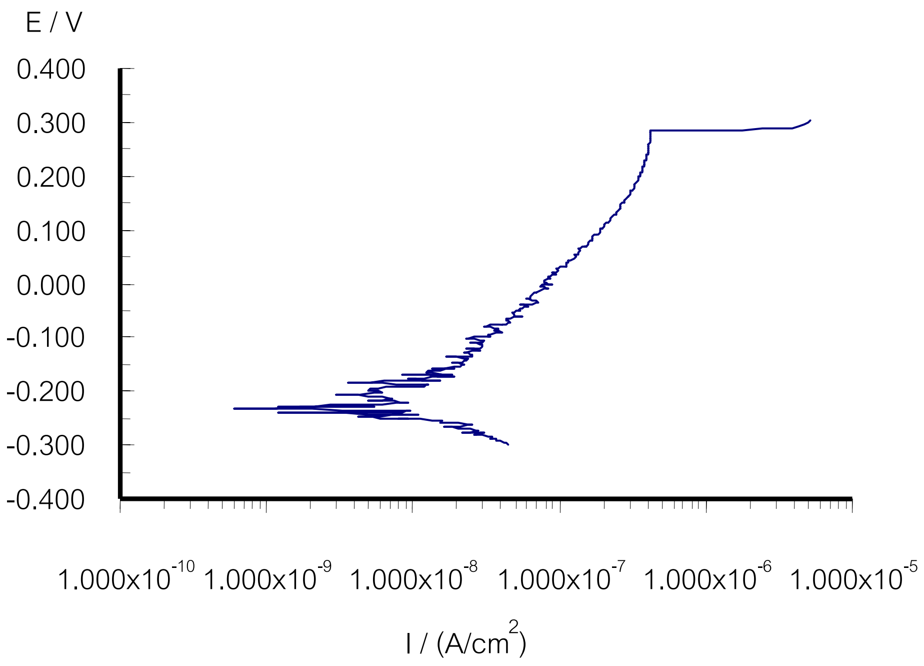
รูปที่ ก.12 เส้นโพลาไรเซชันของเหล็กกล้าโครเมียม Fe-18Cr ในสารละลาย B พีเอช 7 (พีเอช 7.00 -6.99)



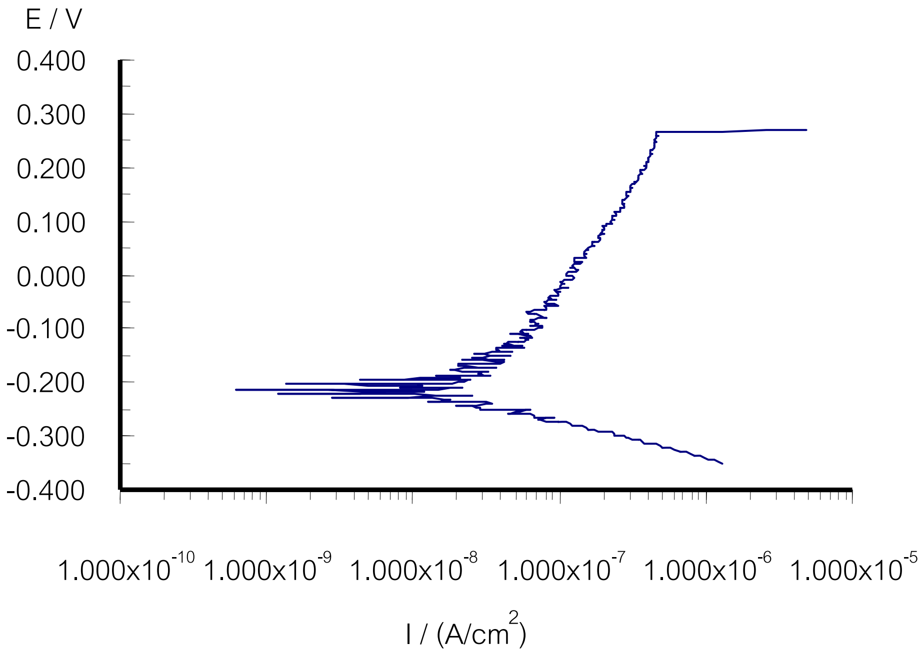
รูปที่ ก.13 เส้นโพลาไรเซชันของเหล็กกล้าโครเมียม Fe-13Cr ในสารละลาย A พีเอช 10 (พีเอช 10.00-9.99)



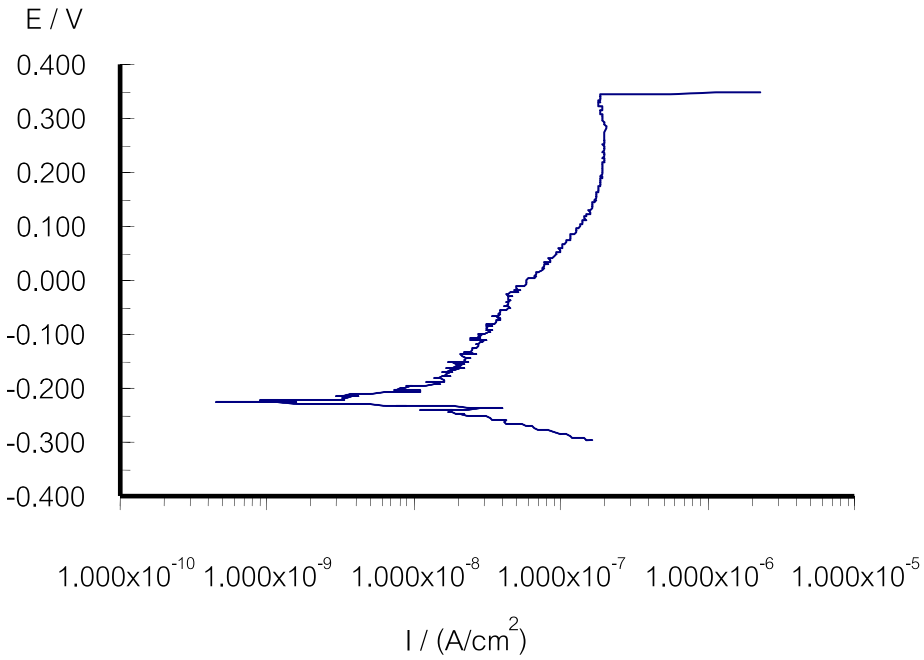
รูปที่ ก.14 เส้นโพลาไรเซชันของเหล็กกล้าโครเมียม Fe-13Cr ในสารละลาย B พีเอช 10 (พีเอช 10.00-9.99)



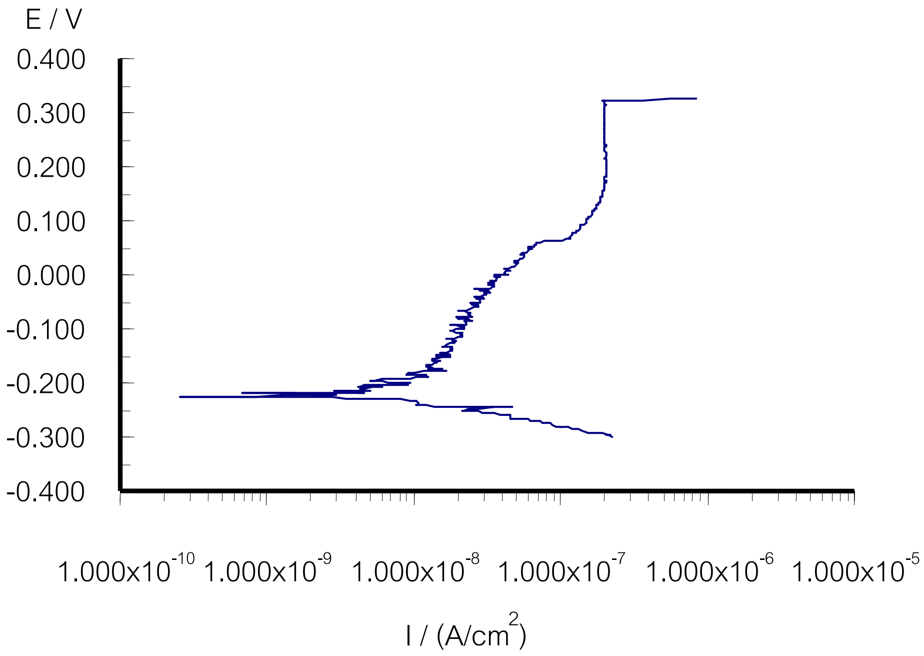
รูปที่ ก.15 เส้นโพลาไรเซชันของเหล็กกล้าโครเมียม Fe-15Cr ในสารละลาย A พีเอช 10 (พีเอช 10.01-9.99)



รูปที่ ก.16 เส้นโพลาไรเซชันของเหล็กกล้าโครเมียม Fe-15Cr ในสารละลาย B พีเอช 10 (พีเอช 10.01-9.99)

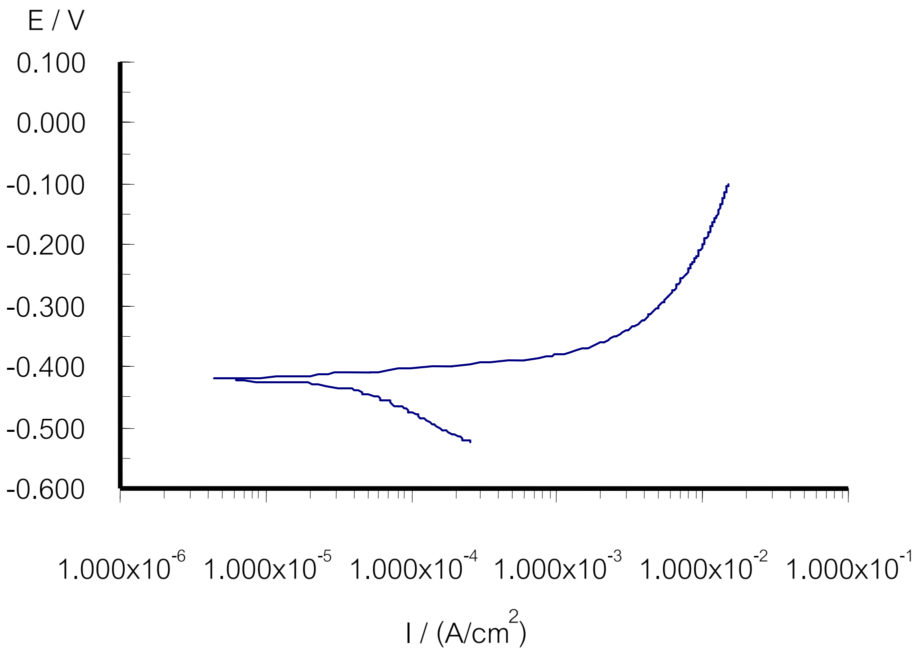


รูปที่ ก.17 เส้นโพลาไรเซชันของเหล็กกล้าโครเมียม Fe-18Cr ในสารละลาย A พีเอช 10 (พีเอช 10.00-9.99)

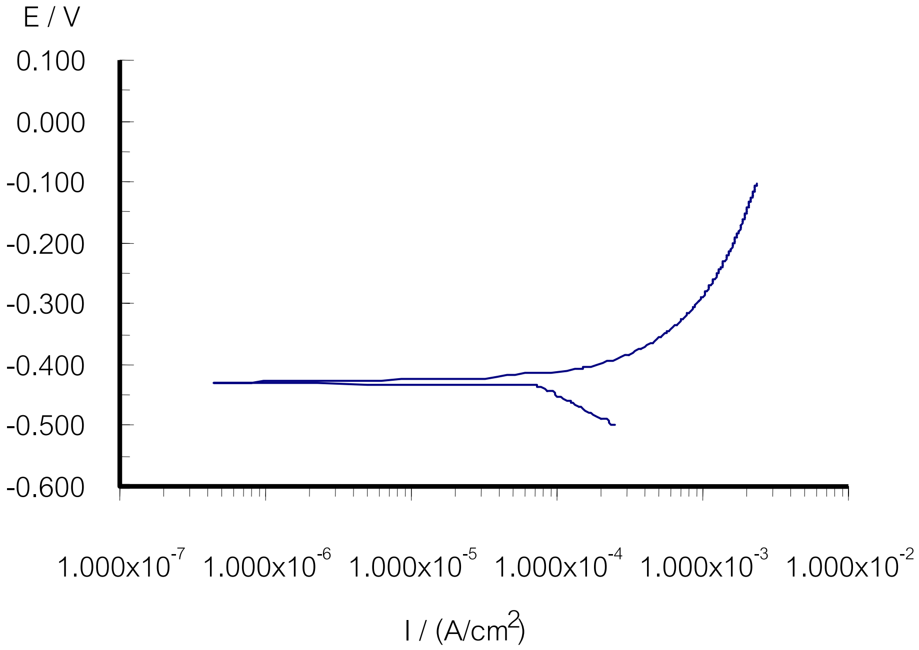


รูปที่ ก.18 เส้นโพลาไรเซชันของเหล็กกล้าโครเมียม Fe-18Cr ในสารละลาย B พีเอช 10 (พีเอช 10.00-9.99)

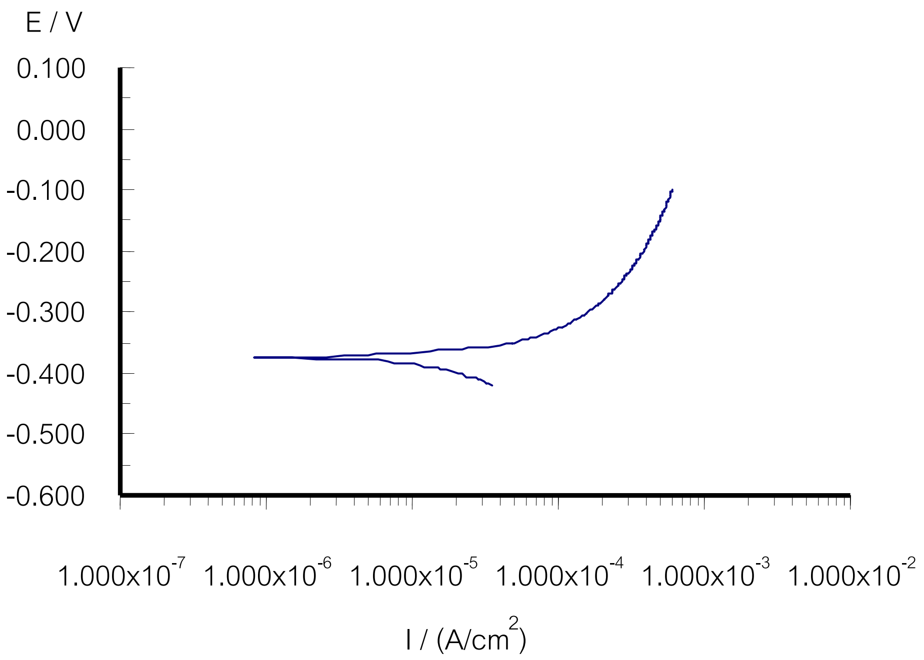
ก.2 เส้นโพลาไรเซชันของเหล็กกล้านิกเกิลในสารละลาย A และ B อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส



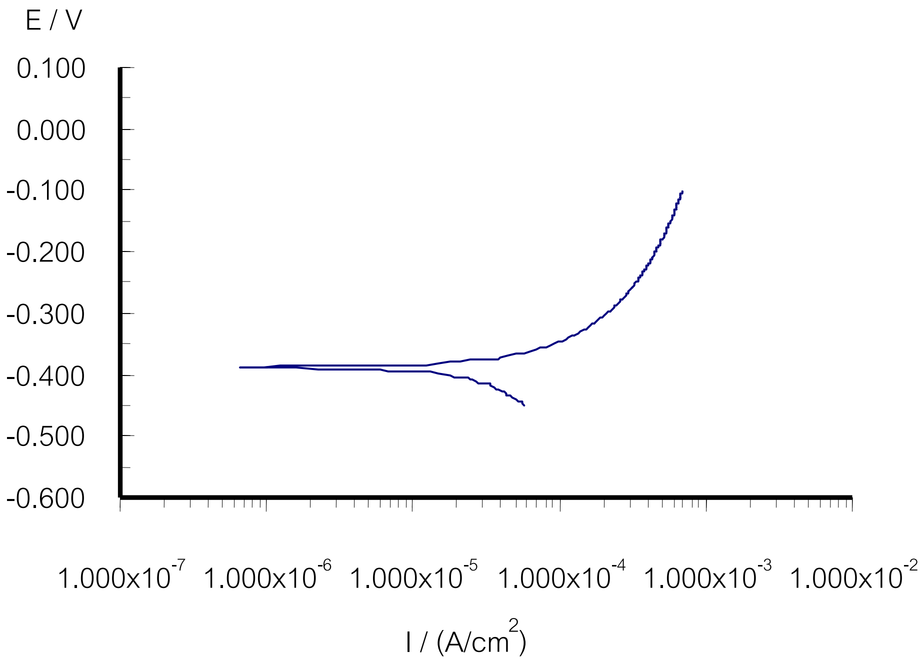
รูปที่ ก.19 เส้นโพลาไรเซชันของเหล็กกล้านิกเกิล Fe-15Ni ในสารละลาย A พีเอช 2 (พีเอช 2.00-1.98)



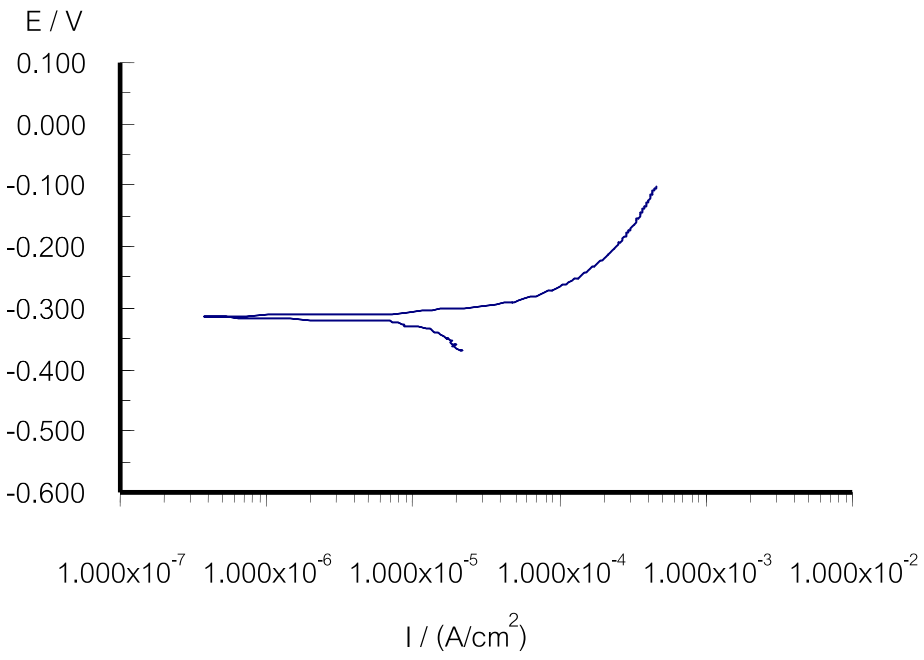
รูปที่ ก.20 เส้นโพลาไรเซชันของเหล็กกล้านิกเกิล Fe-15Ni ในสารละลาย B พีเอช 2 (พีเอช 2.01-1.99)



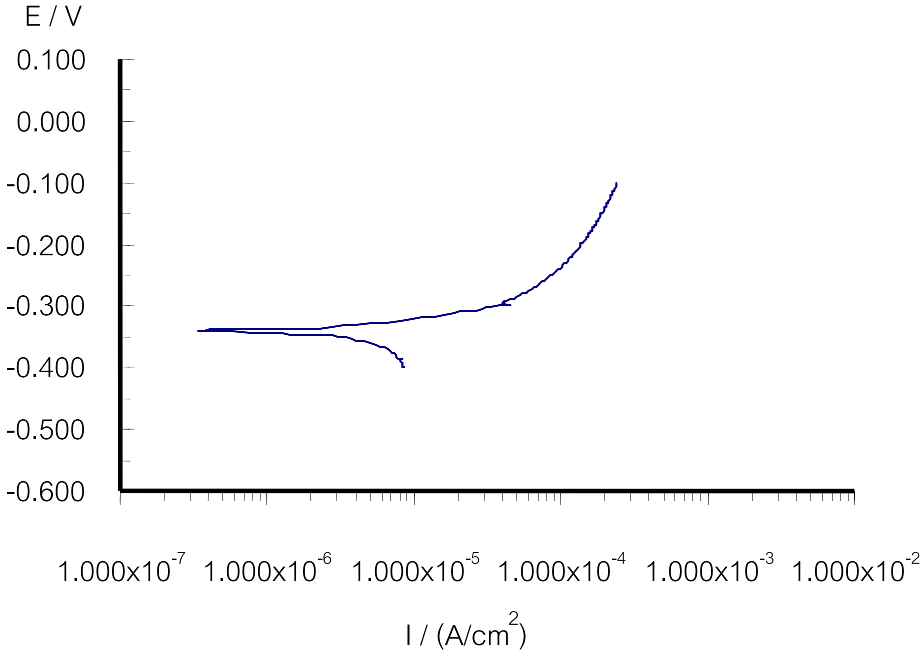
รูปที่ ก.21 เส้นโพลาไรเซชันของเหล็กกล้านิกเกิล Fe-23Ni ในสารละลาย A พีเอช 2 (พีเอช 2.01-1.99)



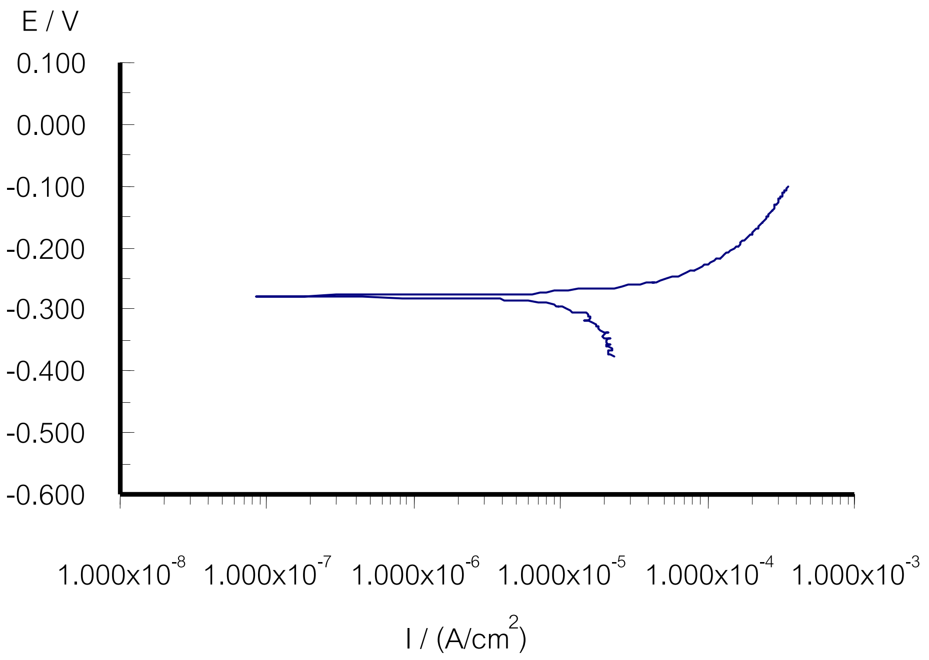
รูปที่ ก.22 เส้นโพลาไรเซชันของเหล็กกล้านิกเกิล Fe-23Ni ในสารละลาย B พีเอช 2 (พีเอช 2.01-2.00)



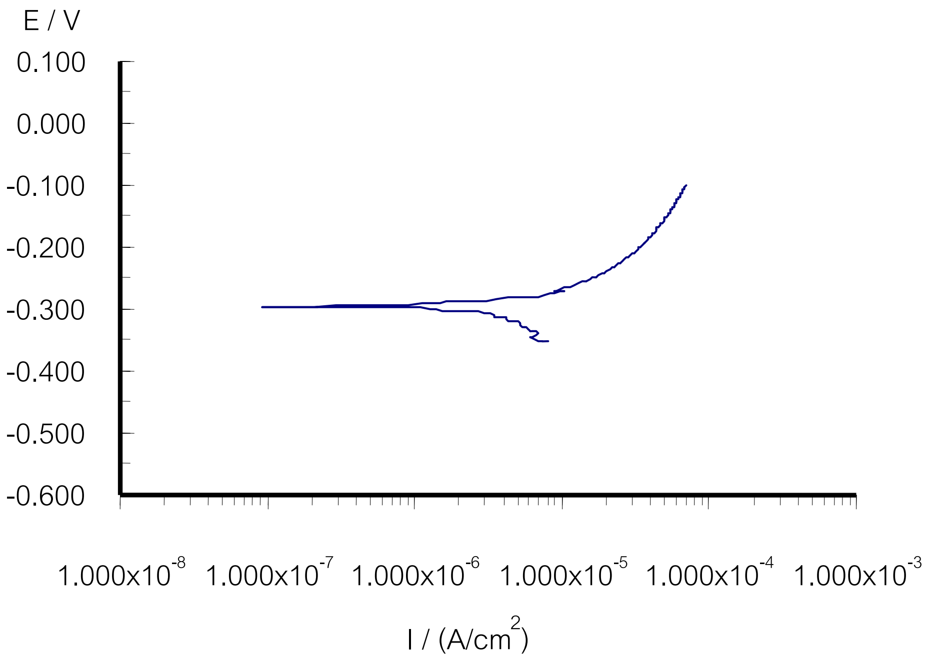
รูปที่ ก.23 เส้นโพลาไรเซชันของเหล็กกล้านิกเกิล Fe-31Ni ในสารละลาย A พีเอช 2 (พีเอช 2.00-1.99)



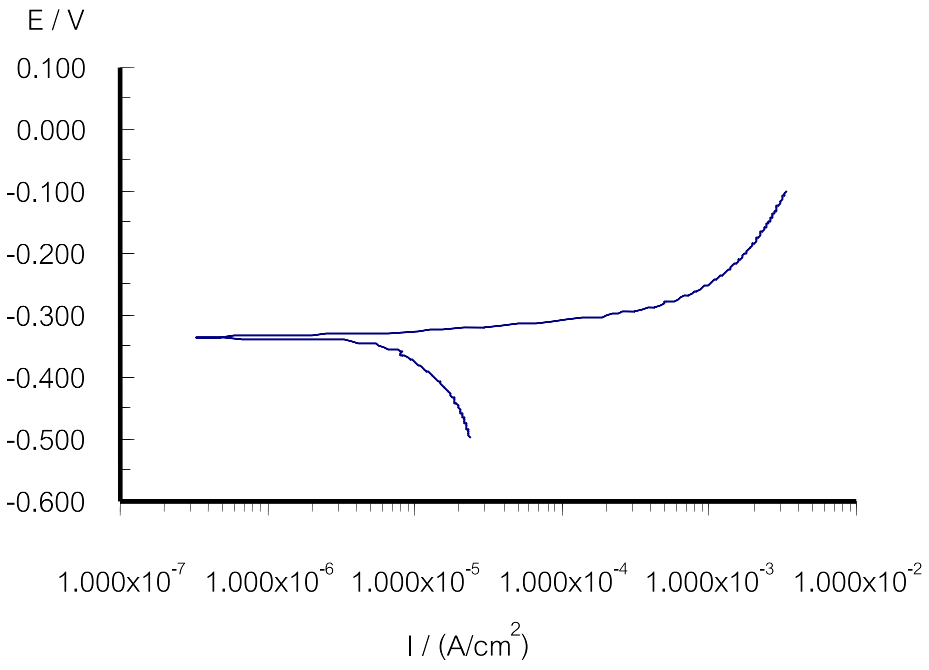
รูปที่ ก.24 เส้นโพลาไรเซชันของเหล็กกล้านิกเกิล Fe-31Ni ในสารละลาย B พีเอช 2 (พีเอช 2.00-1.98)



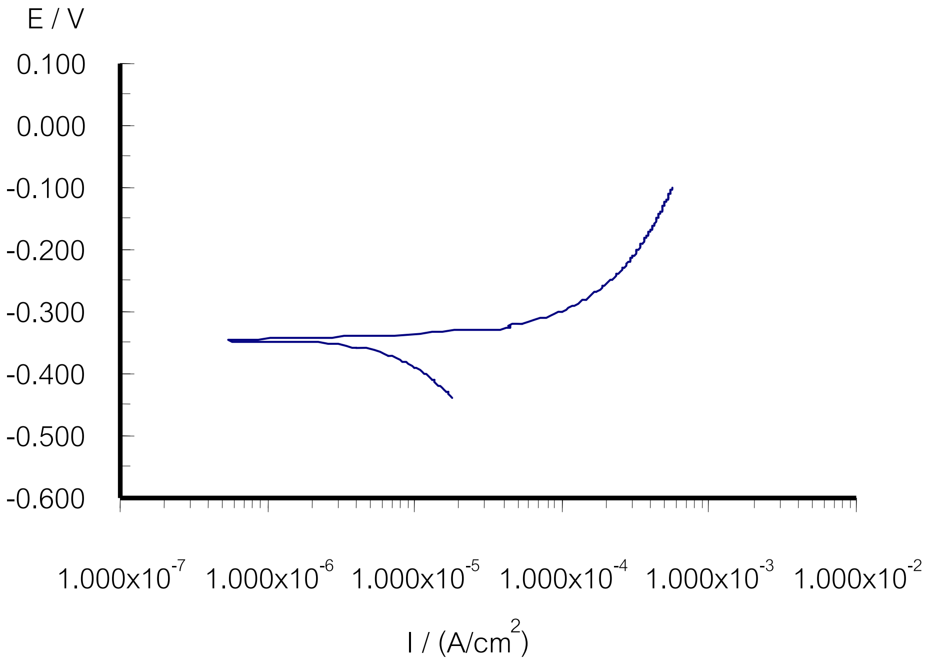
รูปที่ ก.25 เส้นโพลาไรเซชันของเหล็กกล้านิกเกิล Fe-40Ni ในสารละลาย A พีเอช 2 (พีเอช 2.01-1.99)



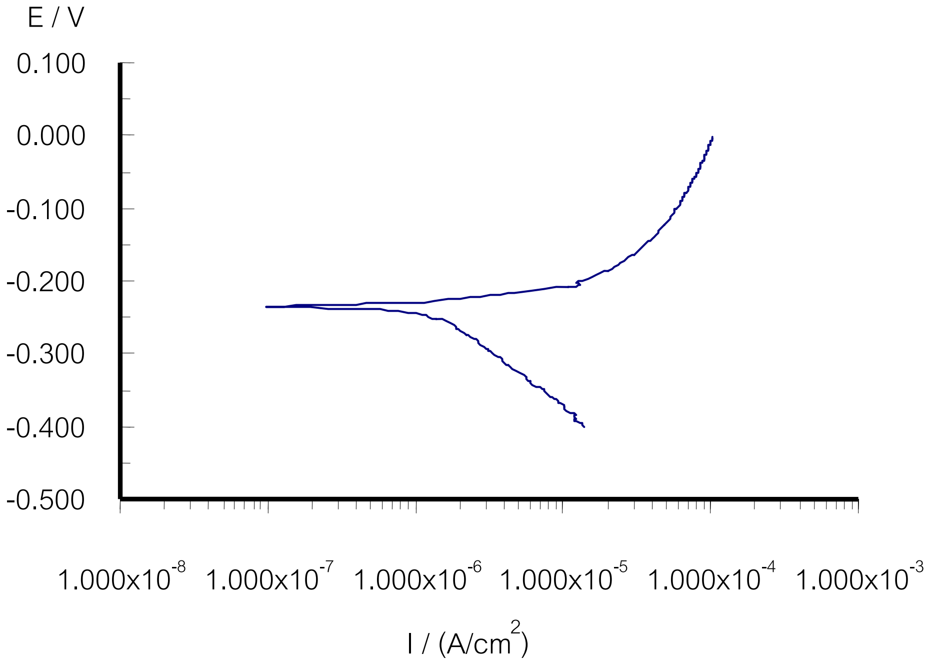
รูปที่ ก.26 เส้นโพลาไรเซชันของเหล็กกล้านิกเกิล Fe-40Ni ในสารละลาย B พีเอช 2 (พีเอช 2.00-1.98)



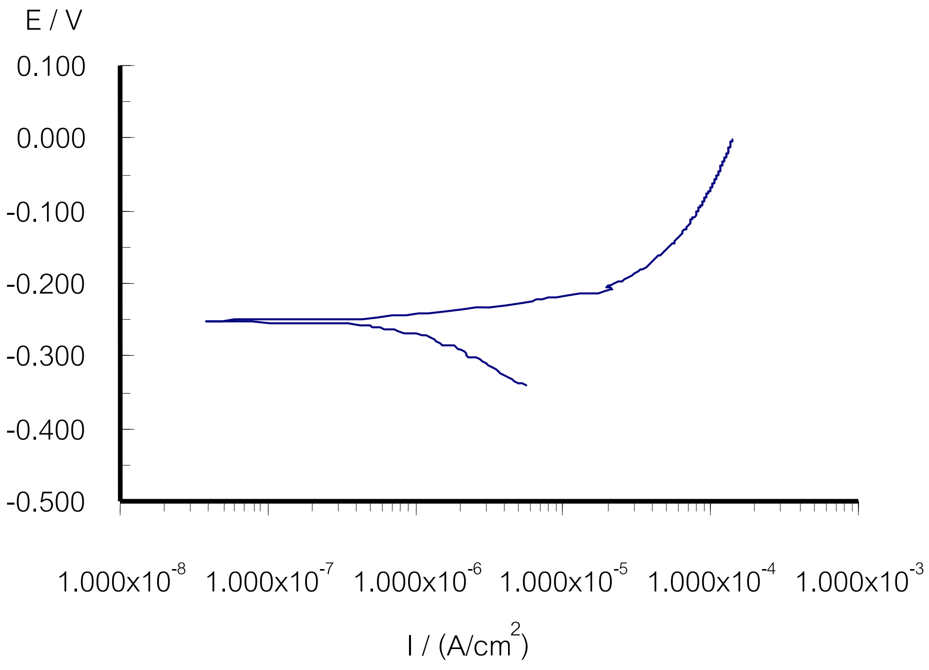
รูปที่ ก.27 เส้นโพลาไรเซชันของเหล็กกล้านิกเกิล Fe-15Ni ในสารละลาย A พีเอช 7 (พีเอช 7.00-6.97)



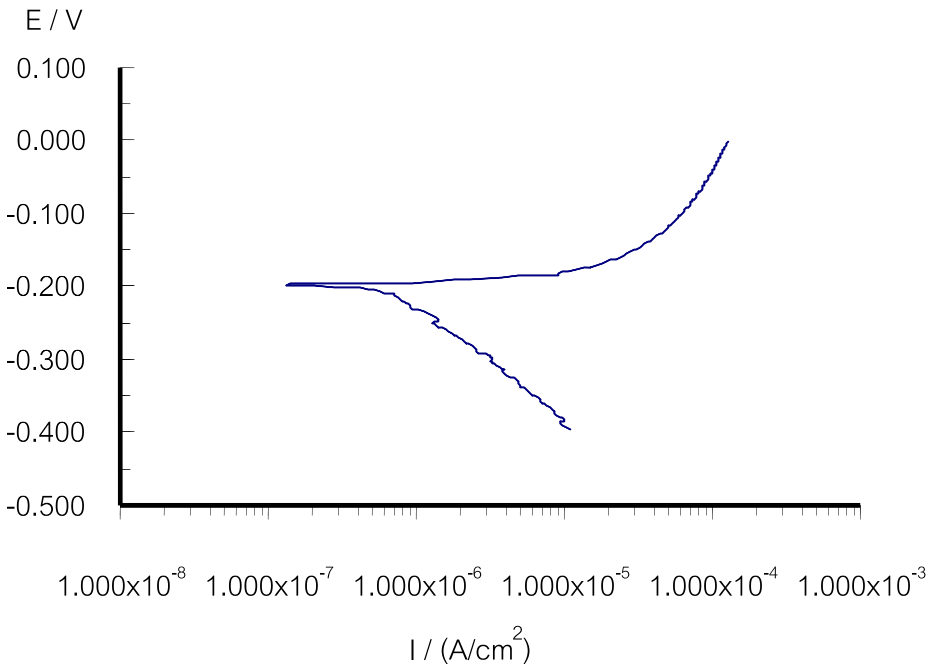
รูปที่ ก.28 เส้นโพลาไรเซชันของเหล็กกล้านิกเกิล Fe-15Ni ในสารละลาย B พีเอช 7 (พีเอช 7.00-6.97)



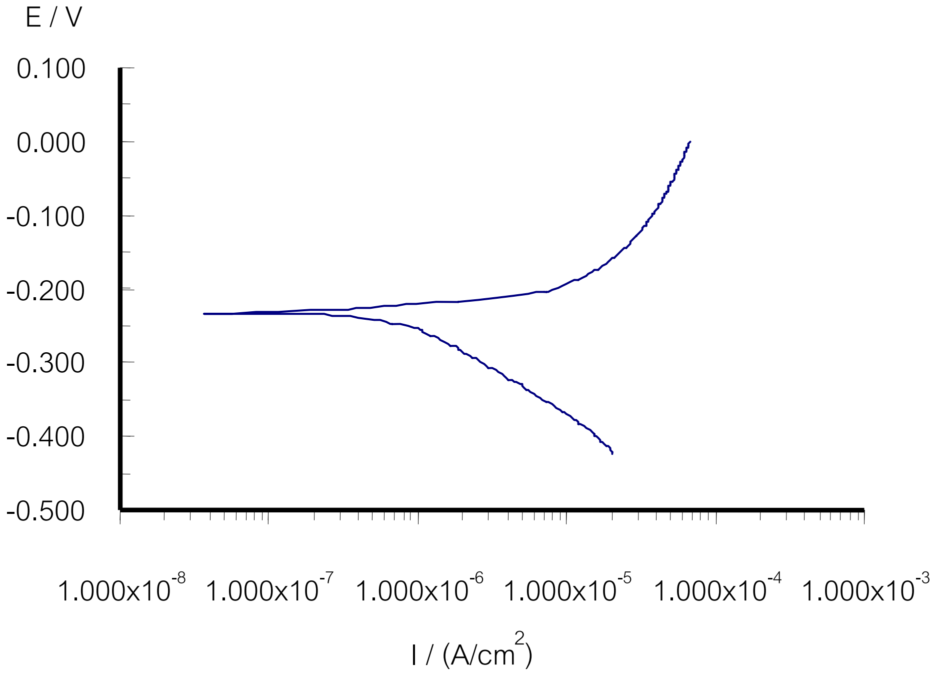
รูปที่ ก.29 เส้นโพลาไรเซชันของเหล็กกล้านิกเกิล Fe-23Ni ในสารละลาย A พีเอช 7 (พีเอช 7.01-6.97)



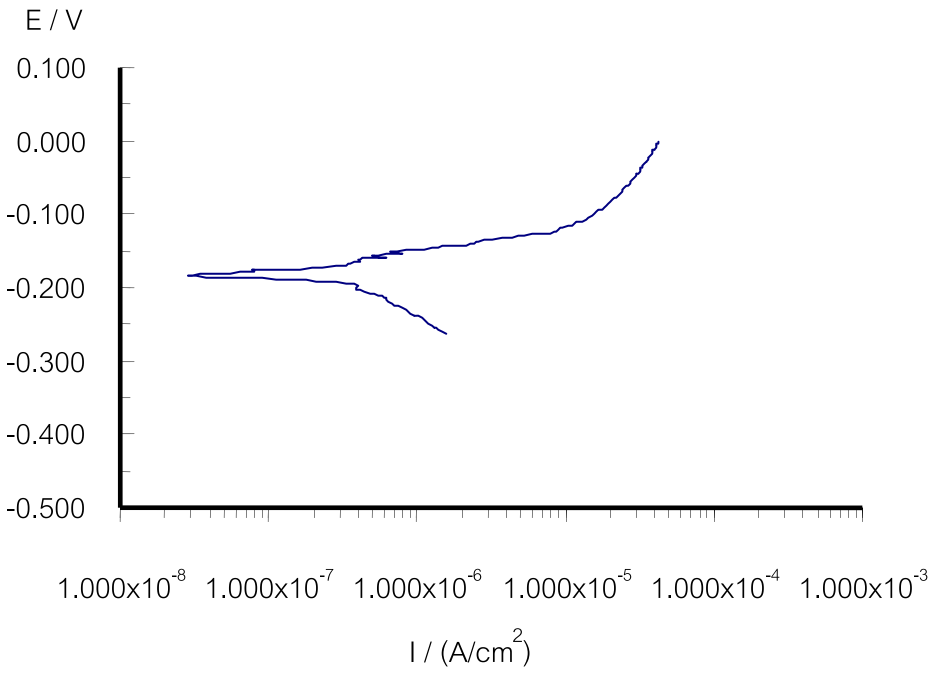
รูปที่ ก.30 เส้นโพลาไรเซชันของเหล็กกล้านิกเกิล Fe-23Ni ในสารละลาย B พีเอช 7 (พีเอช 7.00-6.98)



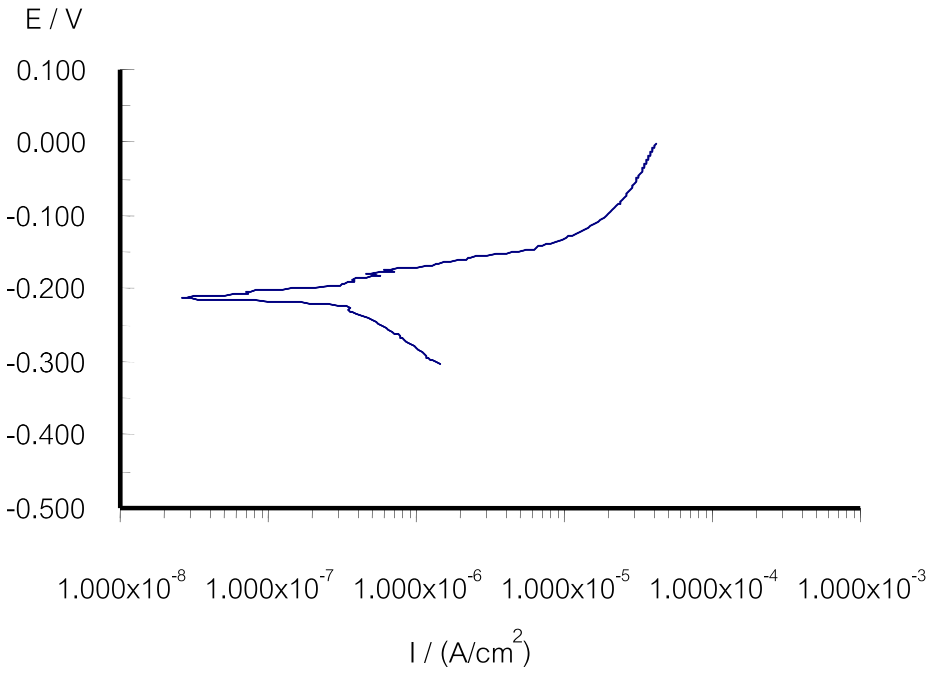
รูปที่ ก.31 เส้นโพลาไรเซชันของเหล็กกล้านิกเกิล Fe-31Ni ในสารละลาย A พีเอช 7 (พีเอช 7.01-6.98)



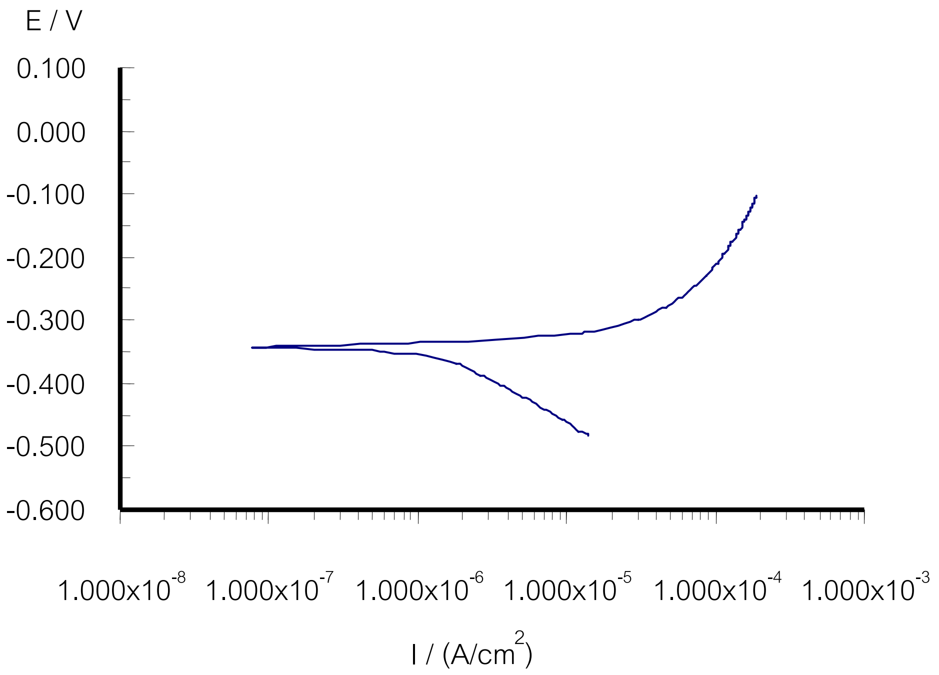
รูปที่ ก.32 เส้นโพลาไรเซชันของเหล็กกล้านิกเกิล Fe-31Ni ในสารละลาย B พีเอช 7 (พีเอช 7.00-6.99)



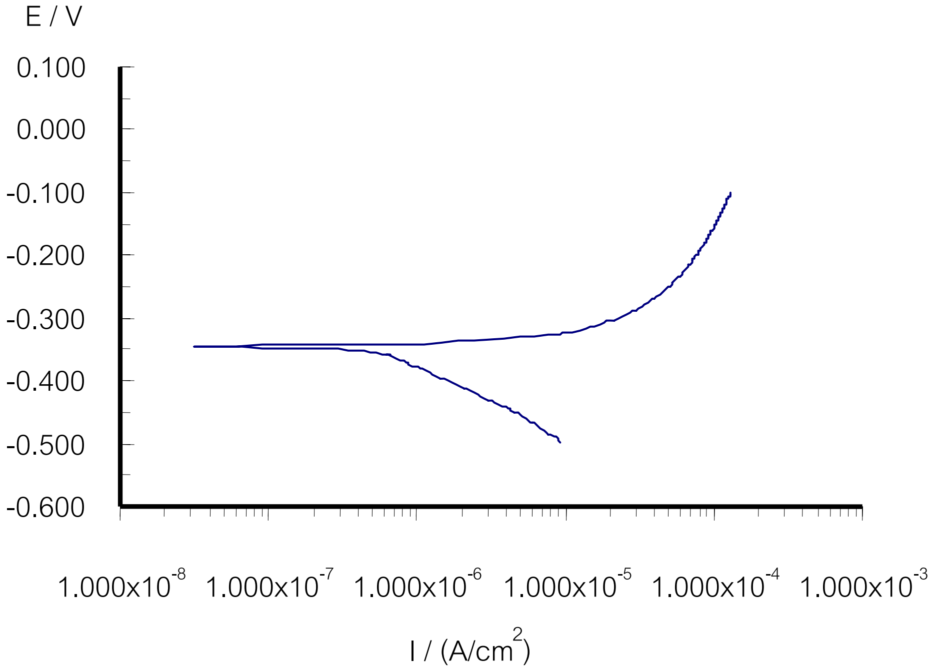
รูปที่ ก.33 เส้นโพลาไรเซชันของเหล็กกล้านิกเกิล Fe-40Ni ในสารละลาย A พีเอช 7 (พีเอช 7.00-6.98)



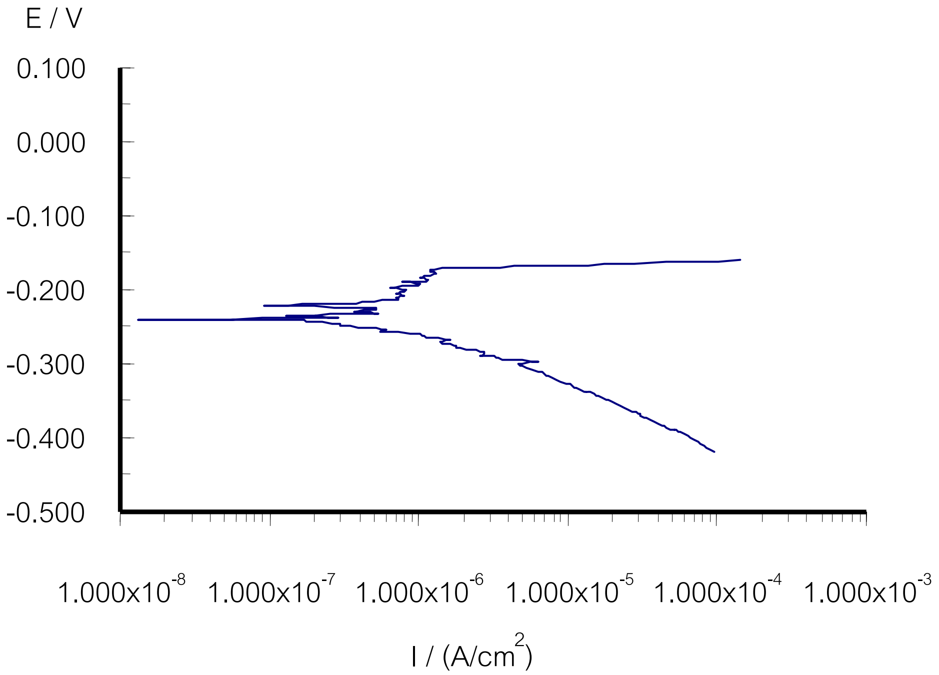
รูปที่ ก.34 เส้นโพลาไรเซชันของเหล็กกล้านิกเกิล Fe-40Ni ในสารละลาย B พีเอช 7 (พีเอช 7.00-6.98)



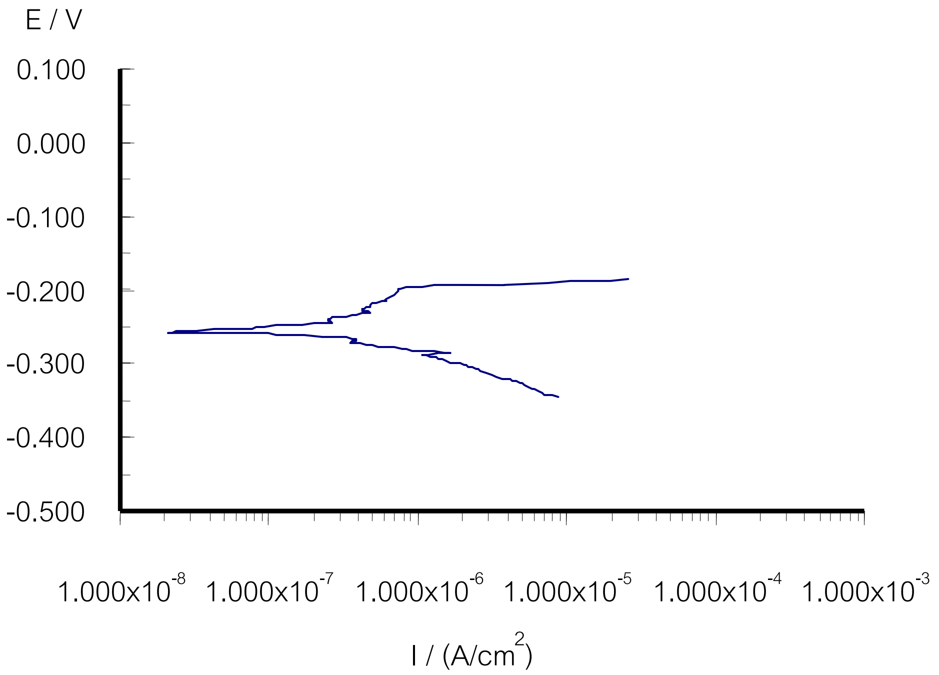
รูปที่ ก.35 เส้นโพลาไรเซชันของเหล็กกล้านิกเกิล Fe-15Ni ในสารละลาย A พีเอช 10 (พีเอช 10.00-9.98)



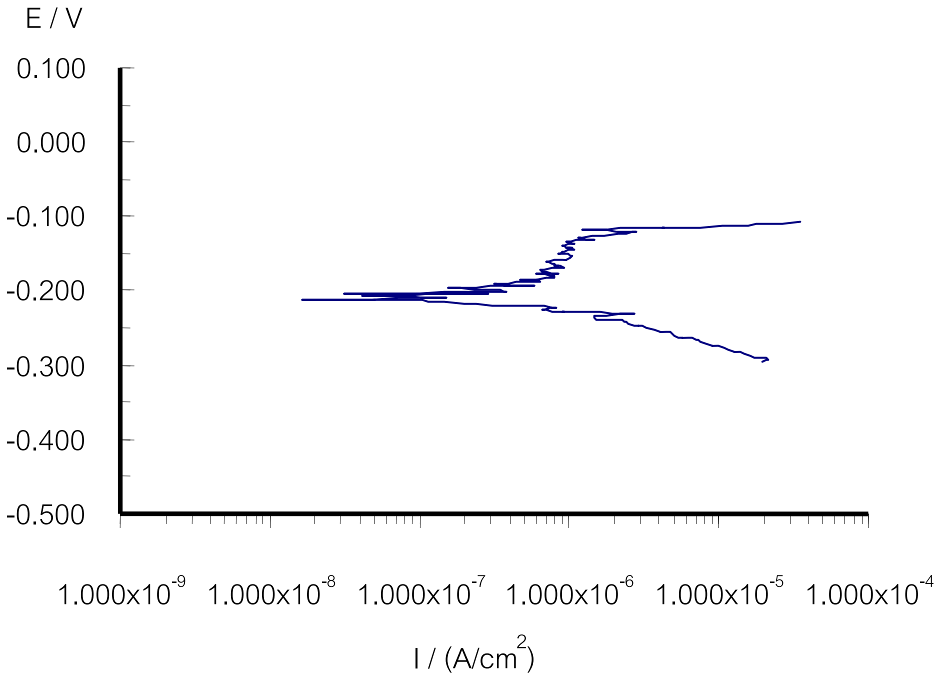
รูปที่ ก.36 เส้นโพลาไรเซชันของเหล็กกล้านิกเกิล Fe-15Ni ในสารละลาย B พีเอช 10 (พีเอช 10.00-9.99)



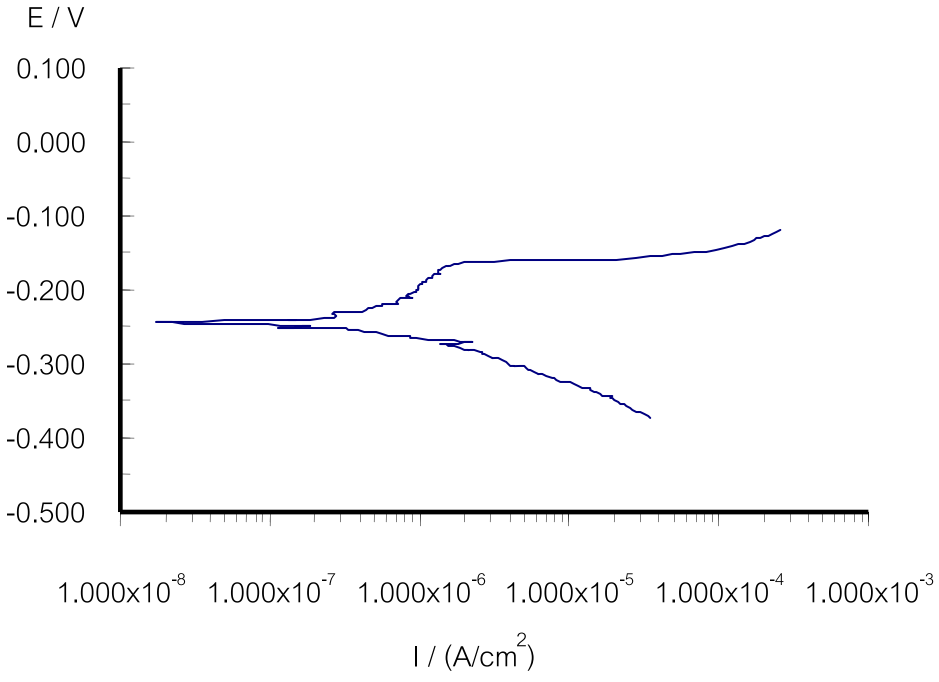
รูปที่ ก.37 เส้นโพลาไรเซชันของเหล็กกล้านิกเกิล Fe-23Ni ในสารละลาย A พีเอช 10 (พีเอช 10.00-9.99)



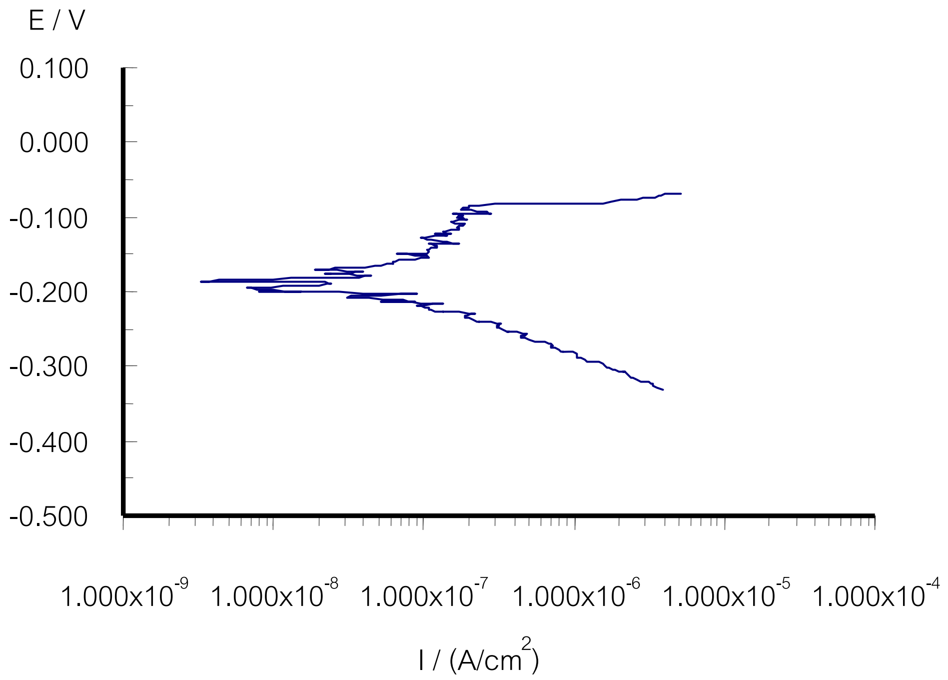
รูปที่ ก.38 เส้นโพลาไรเซชันของเหล็กกล้านิกเกิล Fe-23Ni ในสารละลาย B พีเอช 10 (พีเอช 10.01-9.98)



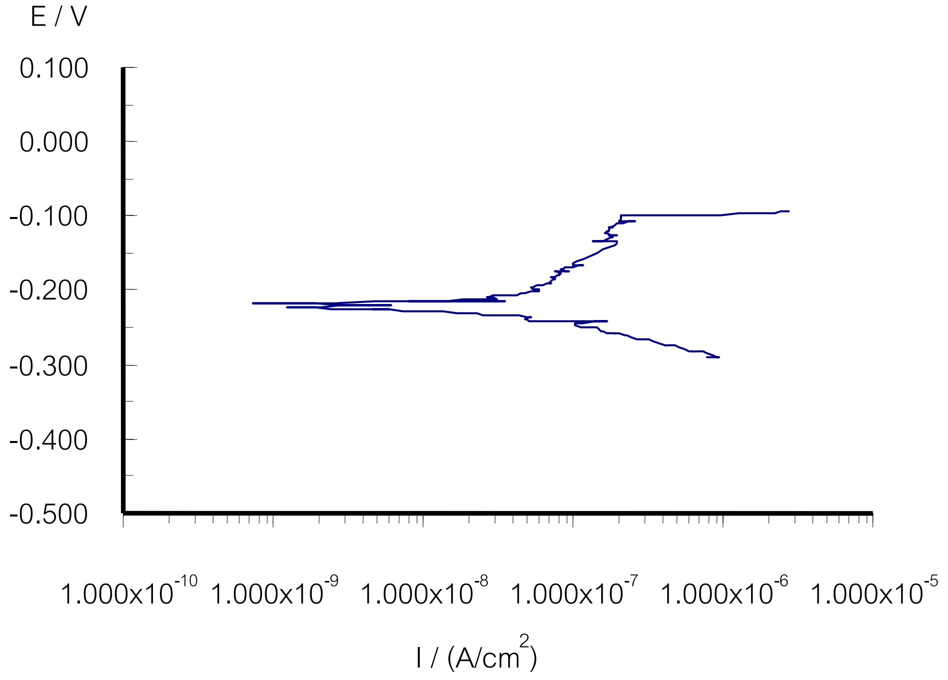
รูปที่ ก.39 เส้นโพลาไรเซชันของเหล็กกล้านิกเกิล Fe-31Ni ในสารละลาย A พีเอช 10 (พีเอช 10.00-10.00)



รูปที่ ก.40 เส้นโพลาไรเซชันของเหล็กกล้านิกเกิล Fe-31Ni ในสารละลาย B พีเอช 10 (พีเอช 10.00-10.00)



รูปที่ ก.41 เส้นโพลาไรเซชันของเหล็กกล้านิกเกิล Fe-40Ni ในสารละลาย A พีเอช 10 (พีเอช 10.01-10.00)



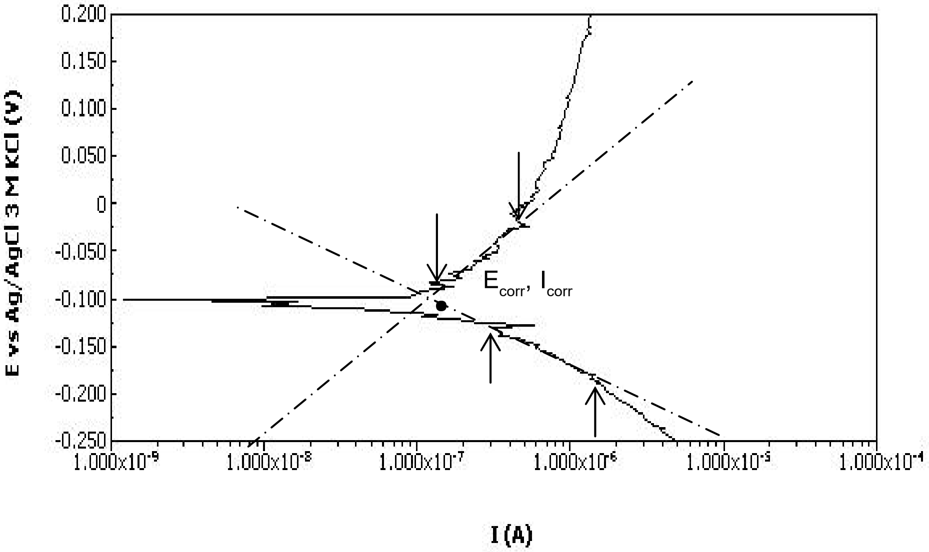
รูปที่ ก.42 เส้นโพลาไรเซชันของเหล็กกล้านิกเกิล Fe-40Ni ในสารละลาย B พีเอช 10 (พีเอช 10.01-10.01)

ภาคผนวก ข

การหาค่าตัวแปรการกัดกร่อนจากเส้นโพลาไรเซชัน

การหาค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนและกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อน(E_{corr} และ I_{corr})

ศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนและกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อนหาได้โดยวิธีหาจุดตัดของเส้น Tafel ในที่นี้ใช้โปรแกรมลีเนียร์รีเกรสชัน มีวิธีการหาโดยกำหนดตำแหน่ง 2 จุดบนบนเส้นโค้งโพลาไรเซชันแล้วใช้คำสั่งทำลีเนียร์รีเกรสชัน โปรแกรมจะคำนวณเส้นตรงระหว่างจุด 2 จุด ที่กำหนดไว้ ดังรูปที่ ข.1 ซึ่งแสดงจุดตัดระหว่างเส้นความชันของเส้นกราฟช่วงที่เกิดปฏิกิริยาแอโนด และเส้นความชันของเส้นกราฟช่วงที่เกิดปฏิกิริยาแคโทด จุดตัดคือศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนและกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อนได้



รูปที่ ข.1 วิธีการหาค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนและกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อน จากเส้นโพลาไรเซชัน

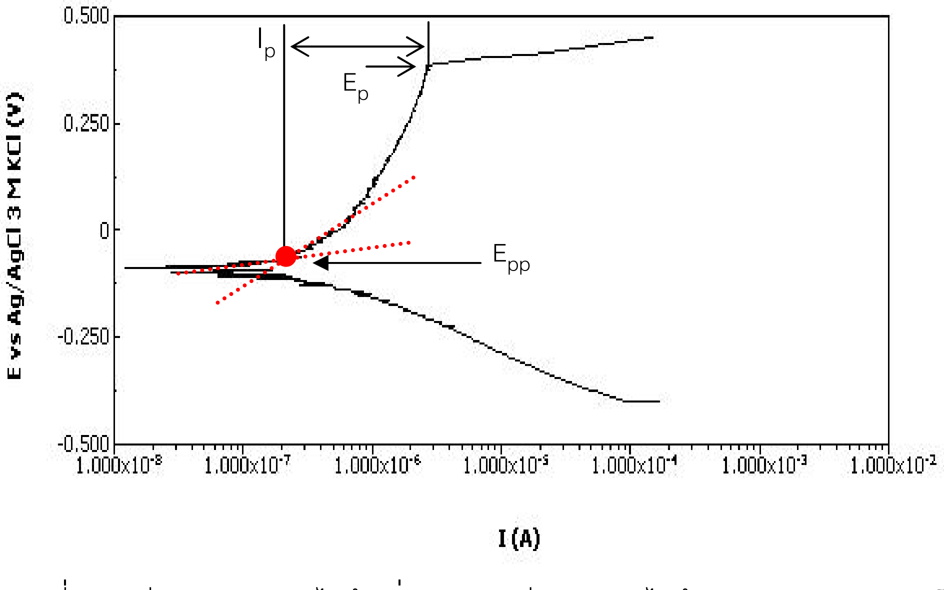
การคำนวณอัตราการกัดกร่อน (R_{umpy}) สามารถคำนวณหาค่าอัตราการกัดกร่อนได้จาก

$$R_{umpy} = [3.27 \times I_{corr} \times e] / \rho \qquad (ข.1)$$

เมื่อ	R_{umpy}	คือ	อัตราการเกิดการกัดกร่อน (ไมโครเมตรต่อปี)
	I_{corr}	คือ	ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อน (ไมโครแอมป์ต่อตารางเซนติเมตร)
	e	คือ	น้ำหนักกรัมสมมูลของโลหะ
	ρ	คือ	ความหนาแน่นของโลหะ

การหาค่าศักย์ไฟฟ้าเริ่มเกิดพาสสีพ ค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนแบบรูเข็มหรือหลุมและความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าขณะเกิดฟิล์ม (E_p และ I_p)

เมื่อศักย์ไฟฟ้าเพิ่มขึ้นจากค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนถึงจุดที่กระแสไฟฟ้าเริ่มมีอัตราการเพิ่มลดลง (จุดเริ่มเปลี่ยนแปลงความชัน) ศักย์ไฟฟ้าที่จุดนี้เรียกว่าศักย์ไฟฟ้าเริ่มเกิดพาสสีพ โดยศักย์ไฟฟ้าเริ่มเกิดพาสสีพหาจากจุดตัดจากเส้นสัมผัสของเส้นกราฟแอโนดิกที่เริ่มมีความชันต่างกัน กรณีที่กระแสช่วงพาสสีพเพิ่มอย่างกะทันหันกลายเป็นกระแสช่วงทรานพาสสีพ จะกำหนดให้จุดดังกล่าวเป็นค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนแบบรูเข็มหรือหลุม ดังแสดงในรูปที่ ข.2 กรณีค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าขณะเกิดฟิล์มที่ผิวนั้น สามารถหาได้จากการนำข้อมูลช่วงพาสสีพมาทำการคำนวณเพื่อหาค่าเฉลี่ย



รูปที่ ข.2 วิธีการหาค่าศักย์ไฟฟ้าเริ่มเกิดพาสสีพ ค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนแบบรูเข็มหรือหลุมและความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าขณะเกิดฟิล์ม

ภาคผนวก ค

ค่าตัวแปรต่าง ๆที่ได้จากเส้นโพลาไรเซชัน

ค.1 เหล็กกล้าโครเมียมในสารละลาย A และ B พีเอช 2

ตารางที่ ค.1 ค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนของเหล็กกล้าโครเมียมในสารละลาย Aพีเอช 2

ชิ้นงาน / ครั้งที่	Fe-13Cr (mV) vs.Ag/AgCl	Fe-15Cr (mV) vs.Ag/AgCl	Fe-18Cr (mV) vs.Ag/AgCl
1	-552.691	-560.303	-550.582
2	-546.283	-543.715	-548.204
3	-550.504	-551.387	-541.329
ค่าเฉลี่ย	-549.826	-547.173	-546.705
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	3.257	8.302	4.805

ตารางที่ ค.2 ค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนของเหล็กกล้าโครเมียมในสารละลาย B พีเอช 2

ชิ้นงาน / ครั้งที่	Fe-13Cr (mV) vs.Ag/AgCl	Fe-15Cr (mV) vs.Ag/AgCl	Fe-18Cr (mV) vs.Ag/AgCl
1	-563.149	-554.667	-551.694
2	-551.387	-561.153	-559.132
3	-560.445	-555.285	-559.705
ค่าเฉลี่ย	-558.327	-557.035	-556.845
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	6.160	3.580	4.469

ตารางที่ ค.3 ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อนและอัตราการกัดกร่อนของเหล็กกล้าโครเมียมในสารละลาย A พีเอช 2

ชิ้นงาน / ครั้งที่	Fe-13Cr ($\mu A/cm^2$)	Fe-15Cr ($\mu A/cm^2$)	Fe-18Cr ($\mu A/cm^2$)
1	625.654	531.107	0.386
2	488.632	356.189	0.931
3	599.309	499.253	0.369
ค่าเฉลี่ย	557.865	465.182	0.562
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	72.708	93.165	0.3297
อัตราการกัดกร่อน	(μmpy)	(μmpy)	(μmpy)
	6448.2	5376.6	6.479

ตารางที่ ค.4 ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อนและอัตราการกัดกร่อนของเหล็กกล้าโครเมียมในสารละลาย B พีเอช 2

ชิ้นงาน / ครั้งที่	Fe-13Cr ($\mu A/cm^2$)	Fe-15Cr ($\mu A/cm^2$)	Fe-18Cr ($\mu A/cm^2$)
1	401.384	224.361	0.978
2	298.198	199.212	2.062
3	216.72	287.898	1.025
ค่าเฉลี่ย	305.434	237.157	1.355
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	92.544	45.707	0.1627
อัตราการกัดกร่อน	(μmpy)	(μmpy)	(μmpy)
	3530.4	2742.3	1655.6

ตารางที่ ค.5 ค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนเริ่มเกิดพาสสีพของเหล็กกล้าโครเมียมในสารละลาย A พีเอช 2

ชิ้นงาน / ครั้งที่	Fe-13Cr (mV) vs.Ag/AgCl	Fe-15Cr (mV) vs.Ag/AgCl	Fe-18Cr (mV) vs.Ag/AgCl
1	-490.381	-492.362	-491.623
2	-489.157	-487.148	-495.377
3	-477.376	-487.214	-490.143
ค่าเฉลี่ย	-485.638	-488.908	-492.381
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	7.181227	2.991434	2.698076

ตารางที่ ค.6 ค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนเริ่มเกิดพาสสีพของเหล็กกล้าโครเมียมในสารละลาย B พีเอช 2

ชิ้นงาน / ครั้งที่	Fe-13Cr (mV) vs.Ag/AgCl	Fe-15Cr (mV) vs.Ag/AgCl	Fe-18Cr (mV) vs.Ag/AgCl
1	-493.552	-495.952	-500.326
2	-483.317	-495.186	-500.598
3	-496.359	-499.385	-503.981
ค่าเฉลี่ย	-491.076	-496.841	-501.635
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	6.864501	2.236211	2.036242

ตารางที่ ค.7 ค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนแบบรูเข็มหรือหลุมของเหล็กกล้าโครเมียมในสารละลาย A พีเอช 2

ชิ้นงาน / ครั้งที่	Fe-13Cr (mV) vs.Ag/AgCl	Fe-15Cr (mV) vs.Ag/AgCl	Fe-18Cr (mV) vs.Ag/AgCl
1	-281.634	33.717	188.477
2	-306.172	33.012	175.285
3	303.542	39.654	182.427
ค่าเฉลี่ย	-297.116	35.461	182.063
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	13.472	3.648	6.604

ตารางที่ ค.8 ค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนแบบรูเข็มหรือหลุมของเหล็กกล้าโครเมียมในสารละลาย B พีเอช 2

ชิ้นงาน / ครั้งที่	Fe-13Cr (mV) vs.Ag/AgCl	Fe-15Cr (mV) vs.Ag/AgCl	Fe-18Cr (mV) vs.Ag/AgCl
1	-321.970	19.392	159.412
2	-321.658	22.259	165.775
3	-325.450	16. 659	164.337
ค่าเฉลี่ย	-323.026	19.522	163.175
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	2.105	2.027	3.337

ตารางที่ ค.9 ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าขณะวัสดุเกิดฟิล์มที่ผิวของเหล็กกล้าโครเมียมใน สารละลาย A พีเอช 2

ชิ้นงาน / ครั้งที่	Fe-13Cr ($\mu A/cm^2$)	Fe-15Cr ($\mu A/cm^2$)	Fe-18Cr ($\mu A/cm^2$)
1	10.2825	1.6195	0.7954
2	10.3181	1.5189	0.7165
3	9.8464	1.4360	0.6691
ค่าเฉลี่ย	10.1490	1.5248	0.7270
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	0.2627	0.0919	0.0638

ตารางที่ ค.10 ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าขณะวัสดุเกิดฟิล์มที่ผิวของเหล็กกล้าโครเมียมใน สารละลาย B พีเอช 2

ชิ้นงาน / ครั้งที่	Fe-13Cr ($\mu A/cm^2$)	Fe-15Cr ($\mu A/cm^2$)	Fe-18Cr ($\mu A/cm^2$)
1	14.3107	1.8189	0.7038
2	14.3760	2.2412	0.9272
3	14.1682	1.4535	1.0606
ค่าเฉลี่ย	14.285	1.8379	0.8972
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	0.10626	0.39419	0.18028

เหล็กกล้าโครเมียมในสารละลาย A และ B พีเอช 7

ตารางที่ ค.11 ค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนของเหล็กกล้าโครเมียมในสารละลาย A พีเอช 7

ชิ้นงาน / ครั้งที่	Fe-13Cr (mV) vs.Ag/AgCl	Fe-15Cr (mV) vs.Ag/AgCl	Fe-18Cr (mV) vs.Ag/AgCl
1	-91.635	-90.244	-90.156
2	-91.364	-91.023	-89.983
3	-93.178	-90.782	-90.725
ค่าเฉลี่ย	-92.726	-90.683	-90.288
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	0.9785	0.3988	0.3882

ตารางที่ ค.12 ค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนของของเหล็กกล้าโครเมียมในสารละลาย B พีเอช 7

ชิ้นงาน / ครั้งที่	Fe-13Cr (mV) vs.Ag/AgCl	Fe-15Cr (mV) vs.Ag/AgCl	Fe-18Cr (mV) vs.Ag/AgCl
1	-109.975	-109.985	-109.914
2	-110.357	-110.715	-108.361
3	-113.562	-109.231	-110.429
ค่าเฉลี่ย	-111.298	-109.977	-109.568
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	1.9704	0.7422	1.0765

ตารางที่ ค.13 ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อนและอัตราการกัดกร่อนของเหล็กกล้าโครเมียมในสารละลาย A พีเอช 7

ชิ้นงาน / ครั้งที่	Fe-13Cr ($\mu A/cm^2$)	Fe-15Cr ($\mu A/cm^2$)	Fe-18Cr ($\mu A/cm^2$)
1	0.009862	0.006523	0.002144
2	0.008531	0.004813	0.002056
3	0.011193	0.004885	0.002784
ค่าเฉลี่ย	0.009862	0.005407	0.002328
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	0.00131	0.00967	0.000397
อัตราการกัดกร่อน	(μmpy)	(μmpy)	(μmpy)
	0.133	0.0624	0.0266

ตารางที่ ค.14 ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อนและอัตราการกัดกร่อนของเหล็กกล้าโครเมียมในสารละลาย B พีเอช 7

ชิ้นงาน / ครั้งที่	Fe-13Cr ($\mu A/cm^2$)	Fe-15Cr ($\mu A/cm^2$)	Fe-18Cr ($\mu A/cm^2$)
1	0.007088	0.003854	0.001714
2	0.007581	0.005136	0.001627
3	0.006985	0.005179	0.001654
ค่าเฉลี่ย	0.007218	0.004723	0.001665
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	0.000319	0.000753	0.000045
อัตราการกัดกร่อน	(μmpy)	(μmpy)	(μmpy)
	0.0832	0.0536	0.0183

ตารางที่ ค.15 ค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนเริ่มเกิดพาสสีพของเหล็กกล้าโครเมียมในสารละลาย A พีเอช 7

ชิ้นงาน / ครั้งที่	Fe-13Cr (mV) vs.Ag/AgCl	Fe-15Cr (mV) vs.Ag/AgCl	Fe-18Cr (mV) vs.Ag/AgCl
1	-71.320	-71.424	-83.276
2	-67.156	-77.364	-79.654
3	-72.328	-73.659	-82.266
ค่าเฉลี่ย	-70.268	-74.149	-81.732
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	2.741792	3.000162	1.869114

ตารางที่ ค.16 ค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนเริ่มเกิดพาสสีพของเหล็กกล้าโครเมียมในสารละลาย B พีเอช 7

ชิ้นงาน / ครั้งที่	Fe-13Cr (mV) vs.Ag/AgCl	Fe-15Cr (mV) vs.Ag/AgCl	Fe-18Cr (mV) vs.Ag/AgCl
1	-77.028	-81.689	-84.105
2	-75.631	-75.591	-84.713
3	-73.121	-78.346	-90.328
ค่าเฉลี่ย	-75.260	-78.542	-86.382
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	1.979746	3.053721	3.430831

ตารางที่ ค.17 ค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนแบบรูเข็มหรือหลุมของเหล็กกล้าโครเมียมในสารละลาย A พีเอช 7

ชิ้นงาน / ครั้งที่	Fe-13Cr (mV) vs.Ag/AgCl	Fe-15Cr (mV) vs.Ag/AgCl	Fe-18Cr (mV) vs.Ag/AgCl
1	49.326	211.556	272.651
2	42.498	216.402	275.686
3	45.399	213.928	279.324
ค่าเฉลี่ย	45.741	213.962	275.887
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	3.426	2.423	3.341

ตารางที่ ค.18 ค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนแบบรูเข็มหรือหลุมของเหล็กกล้าโครเมียมในสารละลาย B พีเอช 7

ชิ้นงาน / ครั้งที่	Fe-13Cr (mV) vs.Ag/AgCl	Fe-15Cr (mV) vs.Ag/AgCl	Fe-18Cr (mV) vs.Ag/AgCl
1	24.126	175.986	263.995
2	24.148	188.648	270.243
3	18.695	183.262	268.340
ค่าเฉลี่ย	22.323	182.632	267.526
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	3.142	6.354	3.203

ตารางที่ ค.19 ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าขณะวัสดุเกิดฟิล์มที่ผิวของเหล็กกล้าโครเมียมในสารละลาย A พีเอช 7

ชิ้นงาน / ครั้งที่	Fe-13Cr ($\mu A/cm^2$)	Fe-15Cr ($\mu A/cm^2$)	Fe-18Cr ($\mu A/cm^2$)
1	0.1184	0.1008	0.0764
2	0.1308	0.0918	0.0585
3	0.1237	0.0867	0.0568
ค่าเฉลี่ย	0.1242	0.0931	0.0639
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	0.00622	0.00714	0.01086

ตารางที่ ค.20 ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าขณะวัสดุเกิดฟิล์มที่ผิวของเหล็กกล้าโครเมียมในสารละลาย B พีเอช 7

ชิ้นงาน / ครั้งที่	Fe-13Cr ($\mu A/cm^2$)	Fe-15Cr ($\mu A/cm^2$)	Fe-18Cr ($\mu A/cm^2$)
1	0.1328	0.1165	0.1012
2	0.1377	0.0972	0.0878
3	0.1441	0.1097	0.0816
ค่าเฉลี่ย	0.1382	0.1078	0.0902
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	0.00567	0.00979	0.01002

ค.3 เหล็กกล้าโครเมียมในสารละลาย A และ B พีเอช 10

ตารางที่ ค.21 ค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนของเหล็กกล้าโครเมียมในสารละลาย A พีเอช 10

ชิ้นงาน / ครั้งที่	Fe-13Cr (mV) vs.Ag/AgCl	Fe-15Cr (mV) vs.Ag/AgCl	Fe-18Cr (mV) vs.Ag/AgCl
1	-221.364	-221.766	-219.060
2	-224.951	-219.343	-220.351
3	-223.921	-220.343	-218.135
ค่าเฉลี่ย	-223.412	-220.4	-219.182
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	1.846877	1.217638	1.113026

ตารางที่ ค.22 ค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนของเหล็กกล้าโครเมียมในสารละลาย B พีเอช 10

ชิ้นงาน / ครั้งที่	Fe-13Cr (mV) vs.Ag/AgCl	Fe-15Cr (mV) vs.Ag/AgCl	Fe-18Cr (mV) vs.Ag/AgCl
1	-230.651	-230.241	-229.025
2	-231.294	-229.277	-228.263
3	-229.816	-230.968	-227.945
ค่าเฉลี่ย	-230.587	-230.162	-228.411
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	0.741076	0.848264	0.555003

ตารางที่ ค.23 ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อนและอัตราการกัดกร่อนของเหล็กกล้าโครเมียมในสารละลาย A พีเอช 10

ชิ้นงาน / ครั้งที่	Fe-13Cr ($\mu A/cm^2$)	Fe-15Cr ($\mu A/cm^2$)	Fe-18Cr ($\mu A/cm^2$)
1	0.001375	0.000852	0.000694
2	0.001259	0.001047	0.000646
3	0.001074	0.000822	0.000706
ค่าเฉลี่ย	0.001236	0.000907	0.000682
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	0.000152	0.000122	3.17E-05
อัตราการกัดกร่อน	(μmpy)	(μmpy)	(μmpy)
	0.0139	0.0106	0.0061

ตารางที่ ค.24 ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อนและอัตราการกัดกร่อนของเหล็กกล้าโครเมียมในสารละลาย B พีเอช 10

ชิ้นงาน / ครั้งที่	Fe-13Cr ($\mu A/cm^2$)	Fe-15Cr ($\mu A/cm^2$)	Fe-18Cr ($\mu A/cm^2$)
1	0.001185	0.000713	0.000520
2	0.001115	0.000699	0.000449
3	0.001201	0.000763	0.000498
ค่าเฉลี่ย	0.001167	0.000725	0.000489
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	0.000046	0.000034	0.000037
อัตราการกัดกร่อน	(μmpy)	(μmpy)	(μmpy)
	0.0124	0.0101	0.0049

ตารางที่ ค.25 ค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนเริ่มเกิดพาสสีพของเหล็กกล้าโครเมียมในสารละลาย A พีเอช 7

ชิ้นงาน / ครั้งที่	Fe-13Cr (mV) vs.Ag/AgCl	Fe-15Cr (mV) vs.Ag/AgCl	Fe-18Cr (mV) vs.Ag/AgCl
1	-171.556	-178.308	-195.580
2	-175.852	-180.164	-190.309
3	-175.921	-175.672	-190.189
ค่าเฉลี่ย	-174.443	-178.048	-192.026
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	2.50045	2.25726	3.07844

ตารางที่ ค.26 ค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนเริ่มเกิดพาสสีพของเหล็กกล้าโครเมียมในสารละลาย B พีเอช 7

ชิ้นงาน / ครั้งที่	Fe-13Cr (mV) vs.Ag/AgCl	Fe-15Cr (mV) vs.Ag/AgCl	Fe-18Cr (mV) vs.Ag/AgCl
1	-181.651	-180.953	-196.341
2	-176.692	-186.620	-189.584
3	-179.377	-178.797	-198.493
ค่าเฉลี่ย	-179.240	-182.125	-194.806
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	2.48234	4.04068	4.64863

ตารางที่ ค.27 ค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนแบบรูเข็มหรือหลุมของเหล็กกล้าโครเมียมในสารละลาย A พีเอช 10

ชิ้นงาน / ครั้งที่	Fe-13Cr (mV) vs.Ag/AgCl	Fe-15Cr (mV) vs.Ag/AgCl	Fe-18Cr (mV) vs.Ag/AgCl
1	117.003	305.354	340.102
2	121.607	306.798	344.238
3	115.394	295.150	348.161
ค่าเฉลี่ย	118.001	302.434	344.167
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	3.224569	6.349313	4.029969

ตารางที่ ค.28 ค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนแบบรูเข็มหรือหลุมของเหล็กกล้าโครเมียมในสารละลาย B พีเอช 10

ชิ้นงาน / ครั้งที่	Fe-13Cr (mV) vs.Ag/AgCl	Fe-15Cr (mV) vs.Ag/AgCl	Fe-18Cr (mV) vs.Ag/AgCl
1	111.765	290.771	327.063
2	107.693	277.639	323.145
3	98.428	289.149	317.868
ค่าเฉลี่ย	105.962	285.853	322.692
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	6.834922	7.159614	4.614208

ตารางที่ ค.29 ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าขณะวัสดุเกิดฟิล์มที่ผิวของเหล็กกล้าโครเมียมใน สารละลาย A พีเอช 10

ชิ้นงาน / ครั้งที่	Fe-13Cr ($\mu A/cm^2$)	Fe-15Cr ($\mu A/cm^2$)	Fe-18Cr ($\mu A/cm^2$)
1	0.098745	0.084963	0.067554
2	0.099625	0.091628	0.079161
3	0.099452	0.088396	0.079427
ค่าเฉลี่ย	0.099274	0.088329	0.075381
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	0.00047	0.00333	0.00678

ตารางที่ ค.30 ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าขณะวัสดุเกิดฟิล์มที่ผิวของเหล็กกล้าโครเมียมใน สารละลาย B พีเอช 10

ชิ้นงาน / ครั้งที่	Fe-13Cr ($\mu A/cm^2$)	Fe-15Cr ($\mu A/cm^2$)	Fe-18Cr ($\mu A/cm^2$)
1	0.12978	0.094798	0.082267
2	0.125423	0.097257	0.079332
3	0.139081	0.102599	0.092618
ค่าเฉลี่ย	0.131428	0.098218	0.084739
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	0.00698	0.00399	0.00698

ค.4 เหล็กกล้านิกเกิลในสารละลาย A และ B พีเอช 2

ตารางที่ ค.31 ค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนของเหล็กกล้านิกเกิลในสารละลาย A พีเอช 2

ชิ้นงาน / ครั้งที่	Fe-15Ni (mV) vs.Ag/AgCl	Fe-23Ni (mV) vs.Ag/AgCl	Fe-31Ni (mV) vs.Ag/AgCl	Fe-40Ni (mV) vs.Ag/AgCl
1	-427.633	-391.131	-318.465	-282.689
2	-435.198	-386.959	-327.121	-275.433
3	-425.714	-379.481	-323.195	-275.737
ค่าเฉลี่ย	-429.515	-385.857	-322.927	-277.953
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	5.01428	5.902663	4.334219	4.104312

ตารางที่ ค.32 ค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนของเหล็กกล้านิกเกิลในสารละลาย B พีเอช 2

ชิ้นงาน / ครั้งที่	Fe-15Ni (mV) vs.Ag/AgCl	Fe-23Ni (mV) vs.Ag/AgCl	Fe-31Ni (mV) vs.Ag/AgCl	Fe-40Ni (mV) vs.Ag/AgCl
1	-452.154	-399.564	-342.691	-301.498
2	-437.222	-392.591	-339.148	-311.782
3	-451.309	-403.105	-340.930	-308.701
ค่าเฉลี่ย	-446.895	-398.420	-340.923	-307.327
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	8.387711	5.349542	1.77151	5.277885

ตารางที่ ค.33 ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อนและอัตราการกัดกร่อนของเหล็กกล้านิกเกิลในสารละลาย A พีเอช 2

ชิ้นงาน / ครั้งที่	Fe-15Ni ($\mu A/cm^2$)	Fe-23Ni ($\mu A/cm^2$)	Fe-31Ni ($\mu A/cm^2$)	Fe-40Ni ($\mu A/cm^2$)
1	17.653	9.812	7.653	5.283
2	18.142	9.077	7.120	6.059
3	17.479	8.963	7.025	4.501
ค่าเฉลี่ย	17.758	9.284	7.266	5.281
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	0.343746	0.4608	0.338501	0.779002
อัตราการกัดกร่อน	(μmpy)	(μmpy)	(μmpy)	(μmpy)
	204.84	107.09	83.32	5.37

ตารางที่ ค.34 ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อนและอัตราการกัดกร่อนของเหล็กกล้านิกเกิลในสารละลาย A พีเอช 2

ชิ้นงาน / ครั้งที่	Fe-15Ni ($\mu A/cm^2$)	Fe-23Ni ($\mu A/cm^2$)	Fe-31Ni ($\mu A/cm^2$)	Fe-40Ni ($\mu A/cm^2$)
1	15.372	8.841	2.561	2.288
2	16.288	8.634	2.698	2.402
3	16.151	8.555	2.790	2.348
ค่าเฉลี่ย	15.937	8.676	2.683	2.346
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	0.494076	0.147697	0.115235	0.057026
อัตราการกัดกร่อน	(μmpy)	(μmpy)	(μmpy)	(μmpy)
	183.49	108.01	30.93	27.03

ค.5 เหล็กกล้านิกเกิลในสารละลาย A และ B พีเอช 7

ตารางที่ ค.35 ค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนของเหล็กกล้านิกเกิลในสารละลาย A พีเอช 7

ชิ้นงาน / ครั้งที่	Fe-15Ni (mV) vs.Ag/AgCl	Fe-23Ni (mV) vs.Ag/AgCl	Fe-31Ni (mV) vs.Ag/AgCl	Fe-40Ni (mV) vs.Ag/AgCl
1	-342.632	-242.695	-230.498	-171.651
2	-344.153	-240.931	-235.327	-180.364
3	-347.660	-238.576	-234.708	-181.693
ค่าเฉลี่ย	-344.815	-240.734	-233.511	-177.902
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	2.578542	2.066554	2.627626	5.454728

ตารางที่ ค.36 ค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนของเหล็กกล้านิกเกิลในสารละลาย B พีเอช 7

ชิ้นงาน / ครั้งที่	Fe-15Ni (mV) vs.Ag/AgCl	Fe-23Ni (mV) vs.Ag/AgCl	Fe-31Ni (mV) vs.Ag/AgCl	Fe-40Ni (mV) vs.Ag/AgCl
1	-355.122	-281.673	-254.618	-191.225
2	-360.841	-272.439	-244.702	-203.728
3	-359.906	-271.014	-248.364	-195.645
ค่าเฉลี่ย	-358.623	-275.042	-249.228	-196.866
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	3.067785	5.786646	5.014144	6.340298

ตารางที่ ค.37 ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อนและอัตราการกัดกร่อนของเหล็กกล้านิกเกิลในสารละลาย A พีเอช 7

ชิ้นงาน / ครั้งที่	Fe-15Ni ($\mu A/cm^2$)	Fe-23Ni ($\mu A/cm^2$)	Fe-31Ni ($\mu A/cm^2$)	Fe-40Ni ($\mu A/cm^2$)
1	6.318	0.926	0.632	0.253
2	5.947	0.973	0.722	0.277
3	6.358	0.945	0.683	0.301
ค่าเฉลี่ย	6.208	0.948	0.679	0.277
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	0.226628	0.023643	0.045133	0.024038
อัตราการกัดกร่อน	(μmpy)	(μmpy)	(μmpy)	(μmpy)
	60.59	10.49	7.84	2.62

ตารางที่ ค.38 ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อนและอัตราการกัดกร่อนของเหล็กกล้านิกเกิลในสารละลาย B พีเอช 7

ชิ้นงาน / ครั้งที่	Fe-15Ni ($\mu A/cm^2$)	Fe-23Ni ($\mu A/cm^2$)	Fe-31Ni ($\mu A/cm^2$)	Fe-40Ni ($\mu A/cm^2$)
1	3.856	0.618	0.336	0.185
2	3.891	0.524	0.310	0.200
3	3.887	0.562	0.341	0.206
ค่าเฉลี่ย	3.878	0.568	0.329	0.197
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	0.019157	0.047286	0.016643	0.010817
อัตราการกัดกร่อน	(μmpy)	(μmpy)	(μmpy)	(μmpy)
	44.659	6.554	3.797	2.273

ค.6 เหล็กกล้านิกเกิลในสารละลาย A และ B พีเอช 10

ตารางที่ ค.39 ค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนของเหล็กกล้านิกเกิลในสารละลาย A พีเอช 10

ครั้งที่ \ ชิ้นงาน	Fe-15Ni (mV) vs.Ag/AgCl	Fe-23Ni (mV) vs.Ag/AgCl	Fe-31Ni (mV) vs.Ag/AgCl	Fe-40Ni (mV) vs.Ag/AgCl
1	-346.285	-243.398	-235.112	-183.513
2	-344.917	-248.982	-233.694	-179.672
3	-344.704	-248.497	-238.429	-179.071
ค่าเฉลี่ย	-345.302	-246.959	-235.745	-180.752
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	0.857939	3.093436	2.430138	2.409905

ตารางที่ ค.40 ค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนของเหล็กกล้านิกเกิลในสารละลาย B พีเอช 10

ครั้งที่ \ ชิ้นงาน	Fe-15Ni (mV) vs.Ag/AgCl	Fe-23Ni (mV) vs.Ag/AgCl	Fe-31Ni (mV) vs.Ag/AgCl	Fe-40Ni (mV) vs.Ag/AgCl
1	-363.482	-279.637	-255.417	-204.837
2	-362.032	-282.725	-250.689	-198.361
3	-359.847	-283.143	-251.040	-201.824
ค่าเฉลี่ย	-361.787	-281.835	-252.381	-201.674
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	1.829843	1.914963	2.63424	3.240605

ตารางที่ ค.41 ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อนและอัตราการกัดกร่อนของเหล็กกล้าเหล็กกล้านิกเกิลในสารละลาย A พีเอช 10

ชิ้นงาน / ครั้งที่	Fe-15Ni ($\mu A/cm^2$)	Fe-23Ni ($\mu A/cm^2$)	Fe-31Ni ($\mu A/cm^2$)	Fe-40Ni ($\mu A/cm^2$)
1	1.369	0.532	0.472	0.079
2	1.352	0.509	0.455	0.087
3	1.389	0.510	0.468	0.086
ค่าเฉลี่ย	1.370	0.517	0.465	0.084
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	0.01852	0.013	0.008888	0.004359
อัตราการกัดกร่อน	(μmpy)	(μmpy)	(μmpy)	(μmpy)
	15.810	5.966	5.366	0.969

ตารางที่ ค.42 ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อนและอัตราการกัดกร่อนของเหล็กกล้านิกเกิลในสารละลาย B พีเอช 10

ชิ้นงาน / ครั้งที่	Fe-15Ni ($\mu A/cm^2$)	Fe-23Ni ($\mu A/cm^2$)	Fe-31Ni ($\mu A/cm^2$)	Fe-40Ni ($\mu A/cm^2$)
1	0.889	0.111	0.059	0.018
2	0.807	0.128	0.033	0.018
3	0.843	0.103	0.034	0.015
ค่าเฉลี่ย	0.846	0.114	0.042	0.017
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	0.041102	0.012767	0.014731	0.001732
อัตราการกัดกร่อน	(μmpy)	(μmpy)	(μmpy)	(μmpy)
	9.323	1.316	0.482	0.192

ตารางที่ ค.43 ค่าศักย์ไฟฟ้าเริ่มเกิดพาสสีพของเหล็กกล้านิกเกิลในสารละลาย A พีเอช 10

ชิ้นงาน / ครั้งที่	Fe-15Ni (mV) vs.Ag/AgCl	Fe-23Ni (mV) vs.Ag/AgCl	Fe-31Ni (mV) vs.Ag/AgCl	Fe-40Ni (mV) vs.Ag/AgCl
1	-	-234.681	-211.635	-179.328
2	-	-220.170	-198.963	-192.647
3	-	-224.457	-191.418	-171.793
ค่าเฉลี่ย	-	-226.436	-200.672	-181.256
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	-	7.45517	10.2163	10.55984

ตารางที่ ค.44 ค่าศักย์ไฟฟ้าเริ่มเกิดพาสสีพของเหล็กกล้านิกเกิลในสารละลาย B พีเอช 10

ชิ้นงาน / ครั้งที่	Fe-15Ni (mV) vs.Ag/AgCl	Fe-23Ni (mV) vs.Ag/AgCl	Fe-31Ni (mV) vs.Ag/AgCl	Fe-40Ni (mV) vs.Ag/AgCl
1	-	-230.431	-228.675	-198.438
2	-	-239.148	-232.145	-210.952
3	-	-246.446	-232.627	-202.118
ค่าเฉลี่ย	-	-238.675	-231.149	-203.836
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	-	8.01797	2.15606	6.43146

ตารางที่ ค.45 ค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนแบบรูเข็มหรือหลุมของเหล็กกล้านิกเกิลในสารละลาย A พีเอช 10

ชิ้นงาน / ครั้งที่	Fe-15Ni (mV) vs.Ag/AgCl	Fe-23Ni (mV) vs.Ag/AgCl	Fe-31Ni (mV) vs.Ag/AgCl	Fe-40Ni (mV) vs.Ag/AgCl
1	-	-149.396	-122.368	-89.376
2	-	-157.428	-126.147	-85.317
3	-	-159.415	-118.880	-82.836
ค่าเฉลี่ย	-	-155.413	-122.465	-85.843
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	-	5.304739	3.634471	3.301576

ตารางที่ ค.46 ค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนแบบรูเข็มหรือหลุมของเหล็กกล้านิกเกิลในสารละลาย B พีเอช 10

ชิ้นงาน / ครั้งที่	Fe-15Ni (mV) vs.Ag/AgCl	Fe-23Ni (mV) vs.Ag/AgCl	Fe-31Ni (mV) vs.Ag/AgCl	Fe-40Ni (mV) vs.Ag/AgCl
1	-	-188.782	-149.615	-98.781
2	-	-196.882	-150.904	-100.317
3	-	-189.478	-164.548	-108.702
ค่าเฉลี่ย	-	-191.714	-155.022	-102.6
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	-	4.489128	8.274607	5.340003

ตารางที่ ค.47 ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าขณะวัสดุเกิดฟิล์มที่ผิวของเหล็กกล้านิกเกิลในสารละลาย A พีเอช 10

ชิ้นงาน / ครั้งที่	Fe-15Ni (μA/cm^2)	Fe-23Ni (μA/cm^2)	Fe-31Ni (μA/cm^2)	Fe-40Ni (μA/cm^2)
1	-	0.517232	0.504874	0.098839
2	-	0.564861	0.493601	0.100176
3	-	0.497014	0.412668	0.096011
ค่าเฉลี่ย	-	0.526369	0.470381	0.098342
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	-	0.049923	0.022113	0.004703

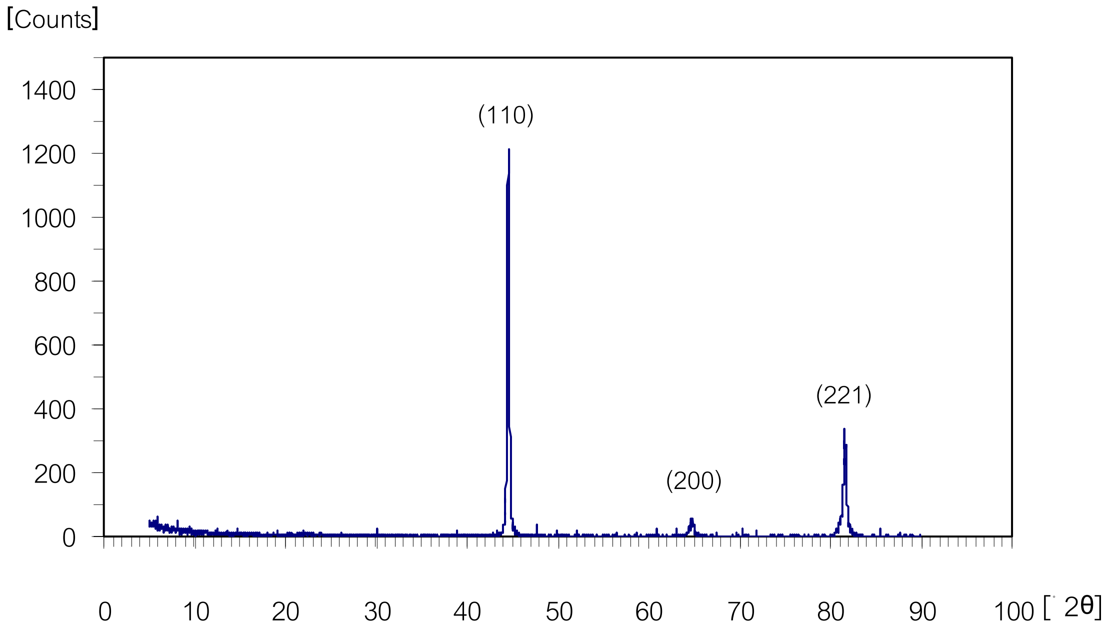
ตารางที่ ค.48 ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าขณะวัสดุเกิดฟิล์มที่ผิวของเหล็กกล้านิกเกิลในสารละลาย B พีเอช 10

ชิ้นงาน / ครั้งที่	Fe-15Ni (μA/cm^2)	Fe-23Ni (μA/cm^2)	Fe-31Ni (μA/cm^2)	Fe-40Ni (μA/cm^2)
1	-	0.638947	0.513478	0.096941
2	-	0.594681	0.568384	0.095483
3	-	0.684236	0.532567	0.106322
ค่าเฉลี่ย	-	0639288	0.538143	0.099582
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	-	0.04478	0.02787	0.00588

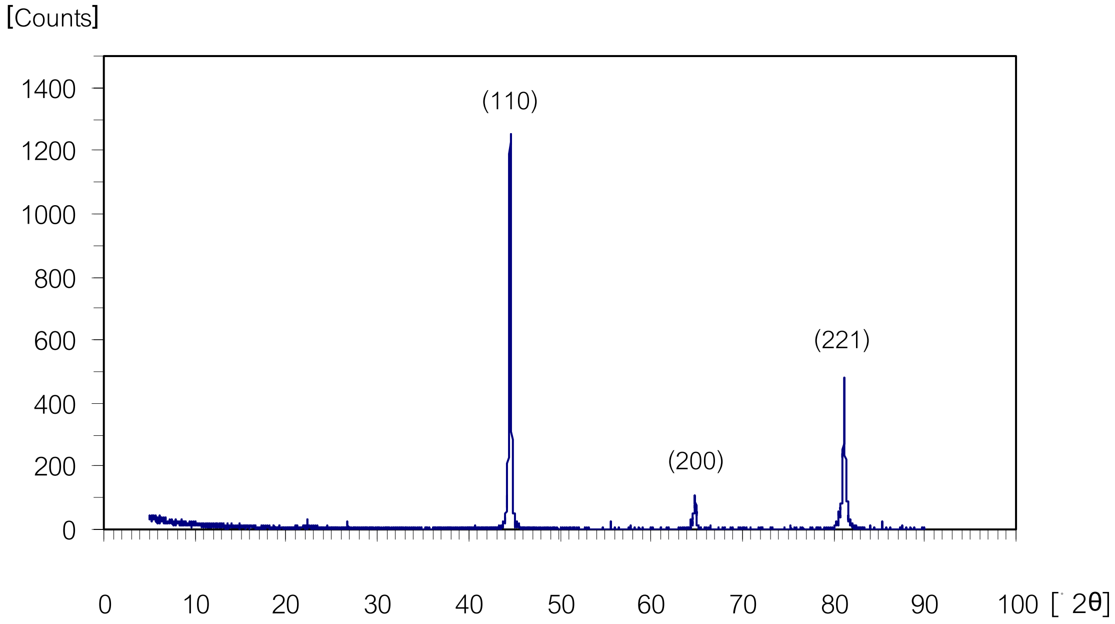
ภาคผนวก ง

ผลทดสอบX-ray diffraction (XRD) ของเหล็กกล้าโครเมียมและเหล็กกล้านิกเกิล

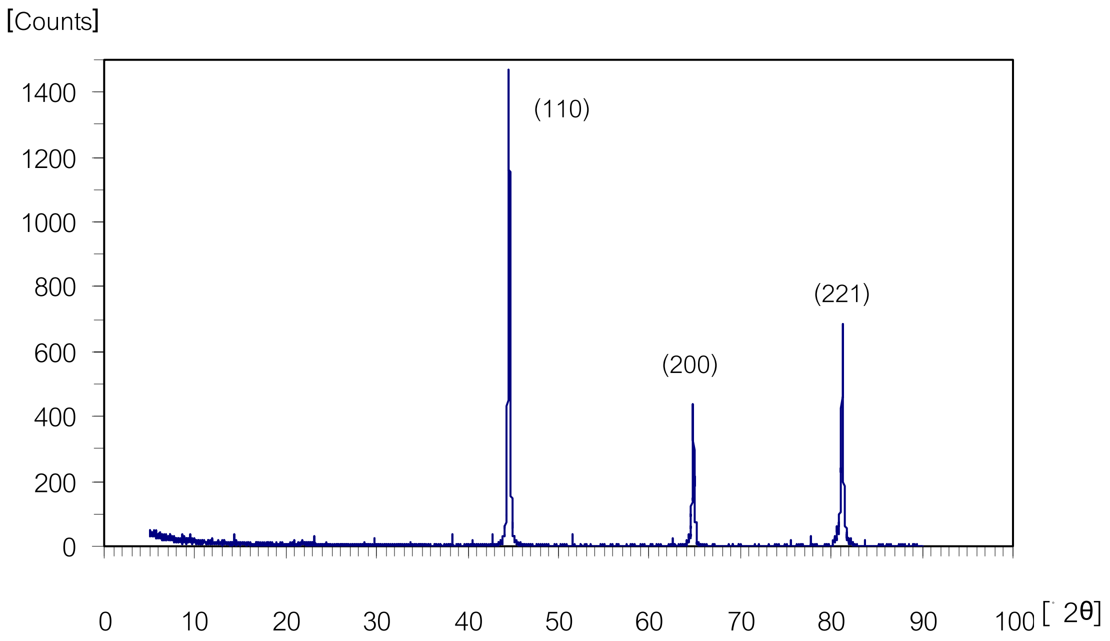
ผลการทดสอบX-ray diffraction (XRD) ของเหล็กกล้าโครเมียม Fe-13Cr, Fe-15Cr และ Fe-18Cr ดังแสดงในรูปที่ ง.1-ง.3 โดยการระบุดัชนีของพีคตัวอย่าง [26] แสดงในตารางที่ ง.1



รูปที่ ง.1 ผลการทดสอบ XRD ของเหล็กกล้าโครเมียม Fe-13Cr



รูปที่ ง.2 ผลการทดสอบ XRD ของเหล็กกล้าโครเมียม Fe-15r



รูปที่ ง.3 ผลการทดสอบ XRD ของเหล็กกล้าโครเมียม Fe-18Cr

ตารางที่ ง.1 การคำนวณเพื่อระบุดัชนี (hkl) พีคตัวอย่าง XRDของเหล็กกล้าโครเมียม

ชิ้นงาน	พีคลำดับที่	2θ	sin(θ)	d_{hkl}	$sin^2(θ)$	$\{sin^2(θ) \times 2\}$ / min of $sin^2(θ)$	$h^2+k^2+l^2$	hkl
Fe-13Cr	1	44.87	0.381	2.022	0.145	2.00	2	110
	2	65.01	0.537	1.434	0.288	3.97	4	200
	3	81.99	0.656	1.175	0.430	5.93	6	221
Fe-15Cr	1	44.77	0.380	2.027	0.144	2.00	2	110
	2	64.87	0.536	1.438	0.287	3.99	4	200
	3	81.89	0.655	1.176	0.429	5.96	6	221
Fe-18Cr	1	44.55	0.379	2.034	0.144	2.00	2	110
	2	64.83	0.536	1.438	0.287	5.99	4	200
	3	81.69	0.654	1.174	0.428	5.94	6	221

ค่า d_{hkl} (ระยะห่างระหว่างระนาบผลึก) คำนวณจากกฎของแบรกก์ ดังแสดงในสมการที่ (1) และระยะห่างระหว่างระนาบผลึกสำหรับระบบลูกบาศก์คำนวณจากสมการ (2)

$$d_{hkl} = \lambda / 2 \sin(\theta) \qquad (1)$$

โดย λ (ความยาวคลื่น X-ray จาก anode tube $Cu_{\alpha 1}$) = 0.1541 nm

$$d_{hkl} = a / \sqrt{h^2+K^2+l^2} \qquad (2)$$

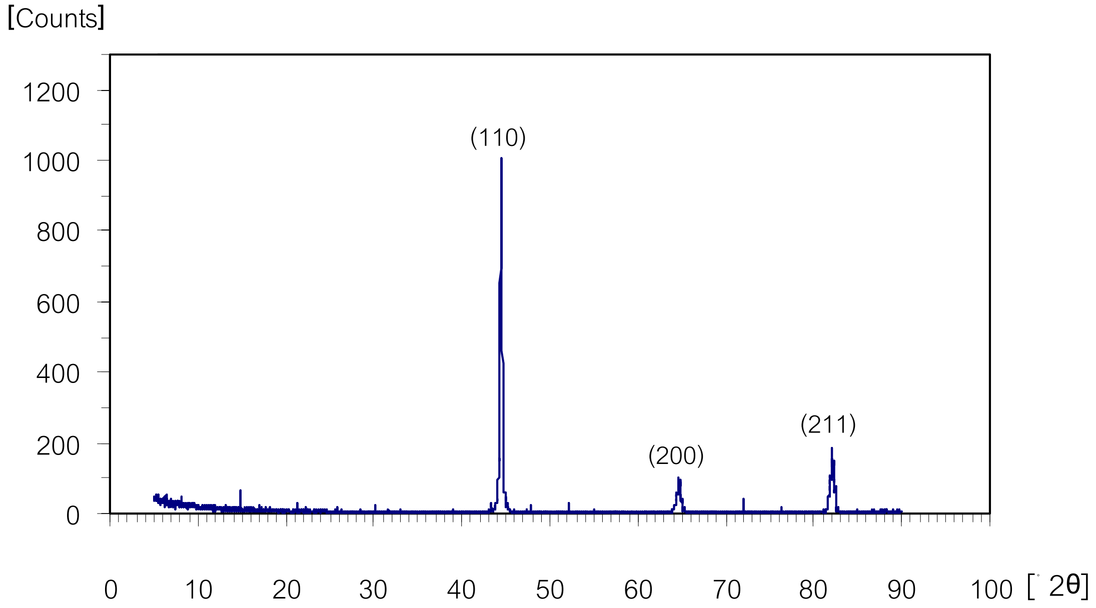
โดย a คือแลตทิซพารามิเตอร์

แทนค่า d_{hkl} จากสมการ (1) ลงใน (2) และจัดรูปใหม่จนได้สมการ (3)

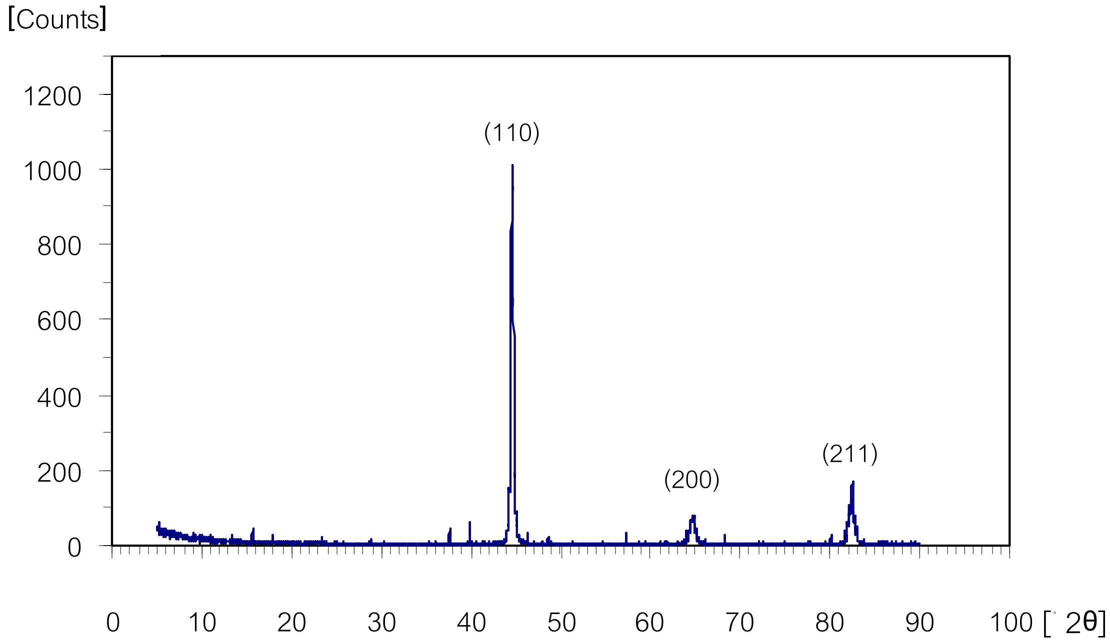
$$h^2+K^2+l^2 = (2a/\lambda)^2 \sin^2(\theta) \qquad (3)$$

ค่า $h^2+K^2+l^2$ คำนวณจากสมการ (3) โดยทำให้คอลัมน์ที่ 7 ของตารางที่ ง.1 เป็นจำนวนเต็มแบบเดียวกับค่า $h^2+K^2+l^2$ ในสมการ (3)

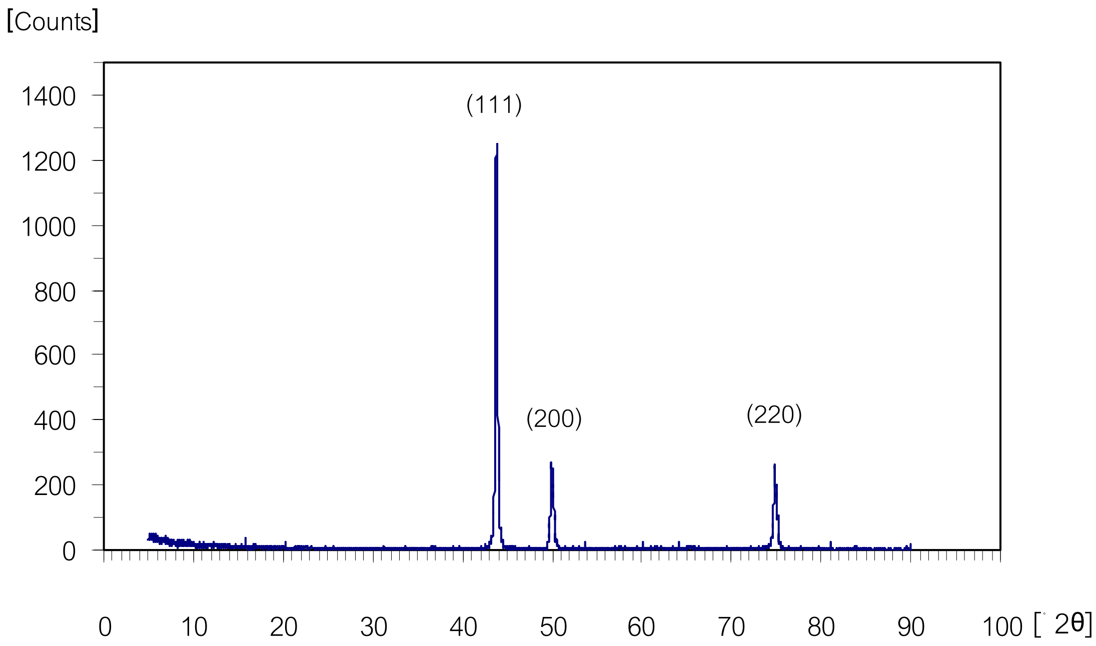
ผลการทดสอบX-ray diffraction (XRD) ของเหล็กกล้านิกเกิล Fe-15Ni, Fe-23Ni, Fe-31Ni และ Fe-40Ni ดังแสดงในรูปที่ ง.4-ง.7 โดยการระบุดัชนีของพีคตัวอย่างแสดงในตารางที่ ง.2 (มีหลักการคำนวณแบบเดียวตารางที่ ง. 1)



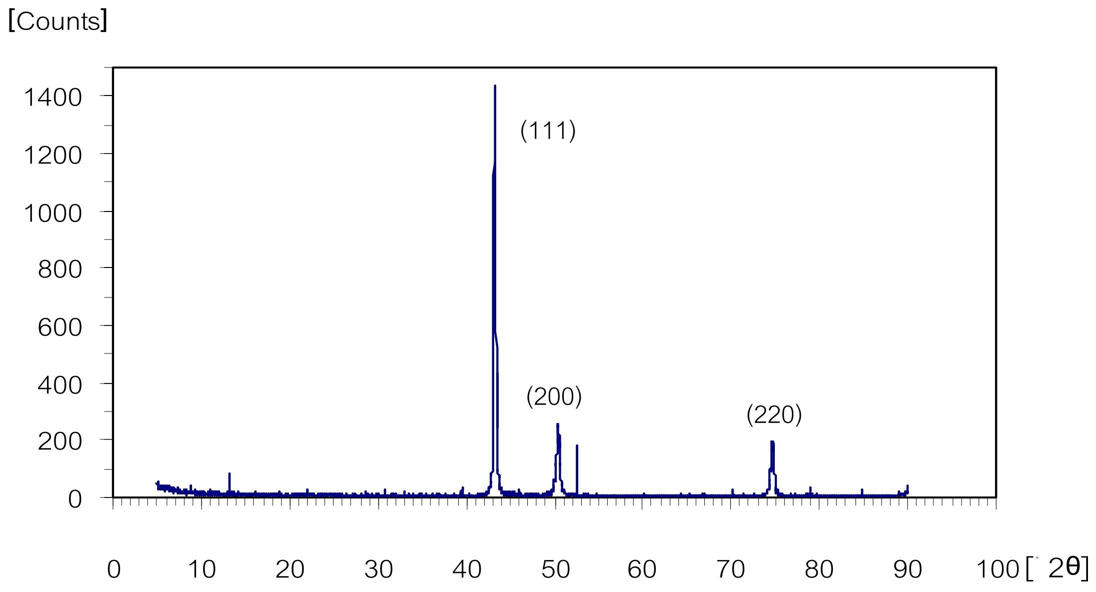
รูปที่ ง.4 ผลการทดสอบ XRD ของเหล็กกล้านิกเกิล Fe-15Ni



รูปที่ ง.5 ผลการทดสอบ XRD ของเหล็กกล้านิกเกิล Fe-23Ni



รูปที่ ง.6 ผลการทดสอบ XRD ของเหล็กกล้านิกเกิล Fe-31Ni



รูปที่ ง.7 ผลการทดสอบ XRD ของเหล็กกล้านิกเกิล Fe-40Ni

ตารางที่ ง.2 การคำนวณเพื่อระบุดัชนี (hkl) พีคตัวอย่าง XRD ของเหล็กกล้านิกเกิล

ชิ้นงาน	พีคลำดับที่	2θ	$\sin(\theta)$	d_{hkl}	$\sin^2(\theta)$	$\{\sin^2(\theta) \times 3\}$ / min of $\sin^2(\theta)$	$h^2+k^2+l^2$	hkl
Fe-15Ni	1	44.51	0.379	2.032	0.144	2.00	2	110
	2	64.80	0.536	1.438	0.287	3.99	4	200
	3	82.23	0.658	1.171	0.433	6.01	6	211
Fe-23Ni	1	44.61	0.380	2.027	0.144	3.00	2	111
	2	64.93	0.537	1.435	0.288	4.00	4	200
	3	82.49	0.659	1.169	0.434	6.03	6	211
Fe-31Ni	1	43.75	0.373	2.066	0.144	3.00	3	111
	2	50.15	0.424	1.817	0.179	3.73	4	200
	3	75.03	0.609	1.265	0.371	7.73	8	220
Fe-40Ni	1	43.87	0.373	2.065	0.139	3.00	3	111
	2	51.13	0.431	1.788	0.186	4.01	4	200
	3	75.19	0.610	1.263	0.372	8.03	8	220

ตารางที่ ง.3 ข้อมูลตัวอย่างที่ใช้อ้างอิงผลการทดสอบ XRDของเหล็กกล้าโครเมียมและเหล็กกล้านิกเกิล จาก JCPDS

วัสดุ	พีค ลำดับที่	2θ	d_{hkl}	hkl
iron chromium AISI 434L	1	44.485	2.0350	110
	2	64.779	1.4380	200
	3	81.986	1.1743	221
Iron nickel (bct)	1	44.683	2.0280	110
	2	65.038	1.4340	200
	3	82.361	1.1708	211
Iron nickel (fcc)	1	43.473	2.0800	111
	2	50.674	1.8000	200
	3	74.679	1.2700	220
stainless steel AISI 304	1	43.621	2.0738	111
	2	50.837	1.7951	200
	3	74.772	1.2690	220

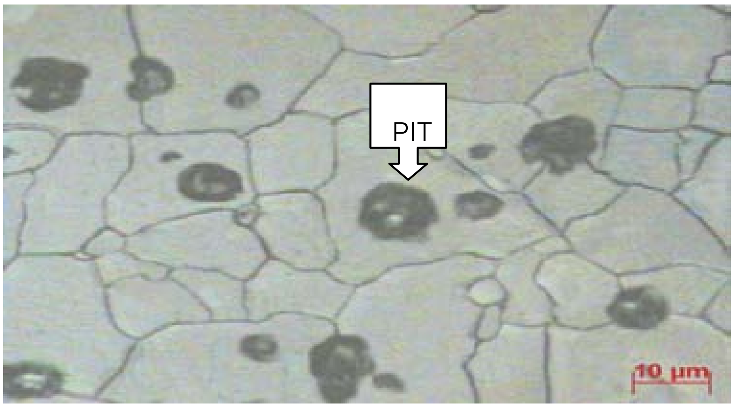
จากการเปรียบเทียบค่ามุม2θ , ระยะห่างระหว่างระนาบผลึก (d_{hkl}) และ ระนาบผลึก hkl ที่คำนวณจากผลทดสอบ XRD ของเหล็กกล้าโครเมียม Fe-13Cr, Fe-15Cr และ Fe-18Cr กับข้อมูล XRDจาก JCPDS ในตารางที่ ง.3 พบว่าใกล้เคียงกับข้อมูลของเหล็กโครเมียมและเหล็กกล้าไร้สนิม 434L ที่มีโครงสร้างผลึกแบบ body-center- cubic (bcc) กรณีผลทดสอบ XRD ของเหล็กกล้านิกเกิล Fe-15Ni และ Fe-23Ni พบว่าใกล้เคียงกับข้อมูลของเหล็กผสมนิกเกิลที่มีโครงสร้างผลึกแบบ body-center- tetragonal (bct) ขณะที่ผลทดสอบ XRD ของเหล็กกล้านิกเกิล Fe-31Ni และ Fe-40Ni ใกล้เคียงกับข้อมูลของเหล็กกล้าไร้สนิม 304L และเหล็กกล้านิกเกิลที่มีโครงสร้างผลึกแบบ face-center-cubic (fcc)

ภาคผนวก จ

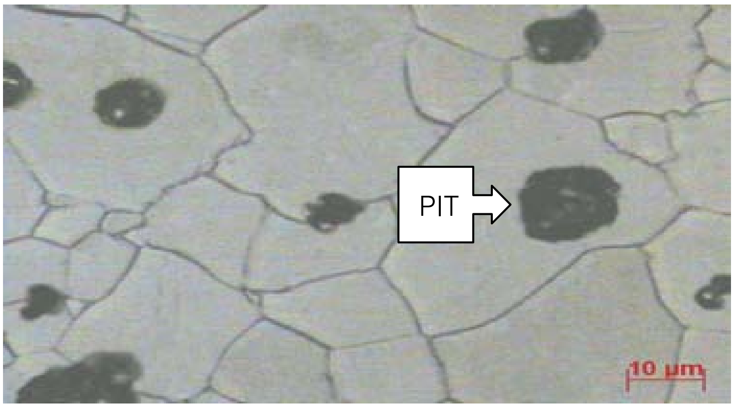
โครงสร้างจุลภาคบริเวณที่ถูกกัดกร่อนในช่วงค่าศักย์ไฟฟ้าทรานพาสสีพ

ภาพตัวอย่างโครงสร้างจุลภาคที่ถูกกัดกร่อนของเหล็กกล้าโครเมียมและเหล็กกล้านิกเกิล ที่ค่าศักย์ไฟฟ้าคงที่ในช่วงศักย์ไฟฟ้าทรานพาสสีพเป็นเวลา 5 – 50 นาที

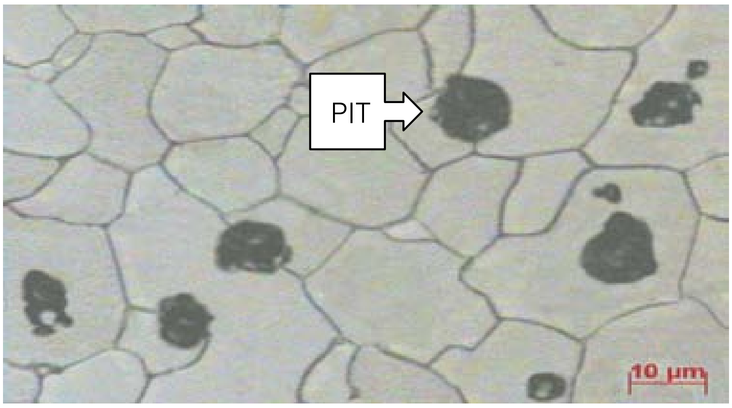
จ.1 โครงสร้างจุลภาคบริเวณที่ถูกกัดกร่อนของเหล็กกล้าโครเมียม



ก. พีเอช 2



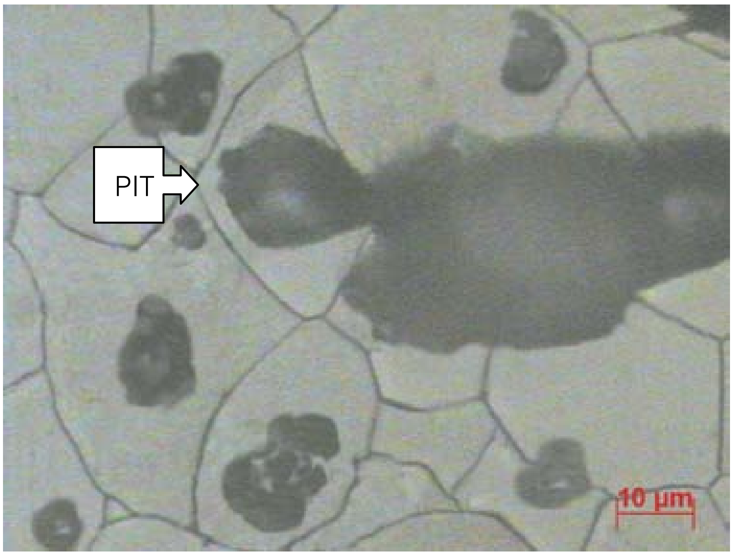
ข. พีเอช 7



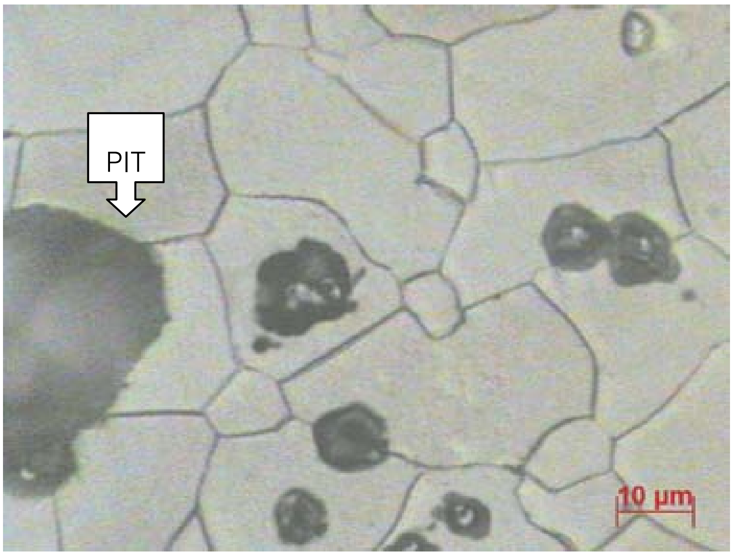
ค. พีเอช 10

รูปที่ จ.1 บริเวณที่ถูกกัดกร่อนของเหล็กกล้าโครเมียม Fe-13Cr ในสารละลาย A

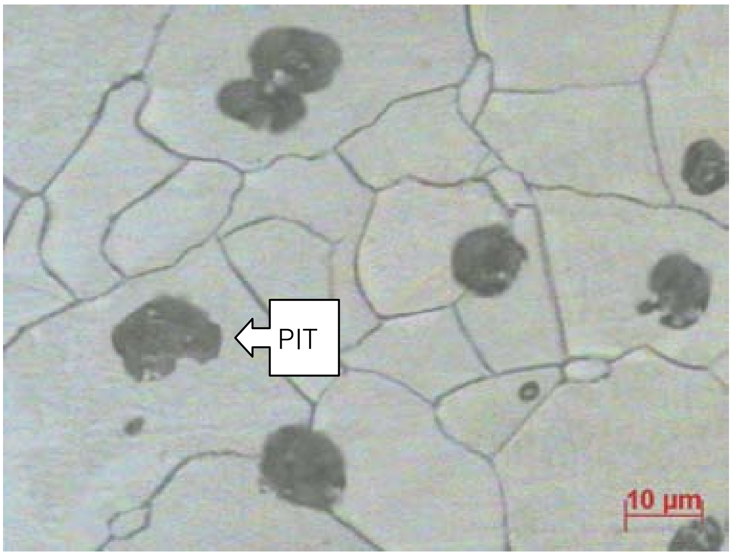
ที่ค่า ก.พีเอช 2 ข. พีเอช 7 ค. พีเอช 10



ก. พีเอช 2

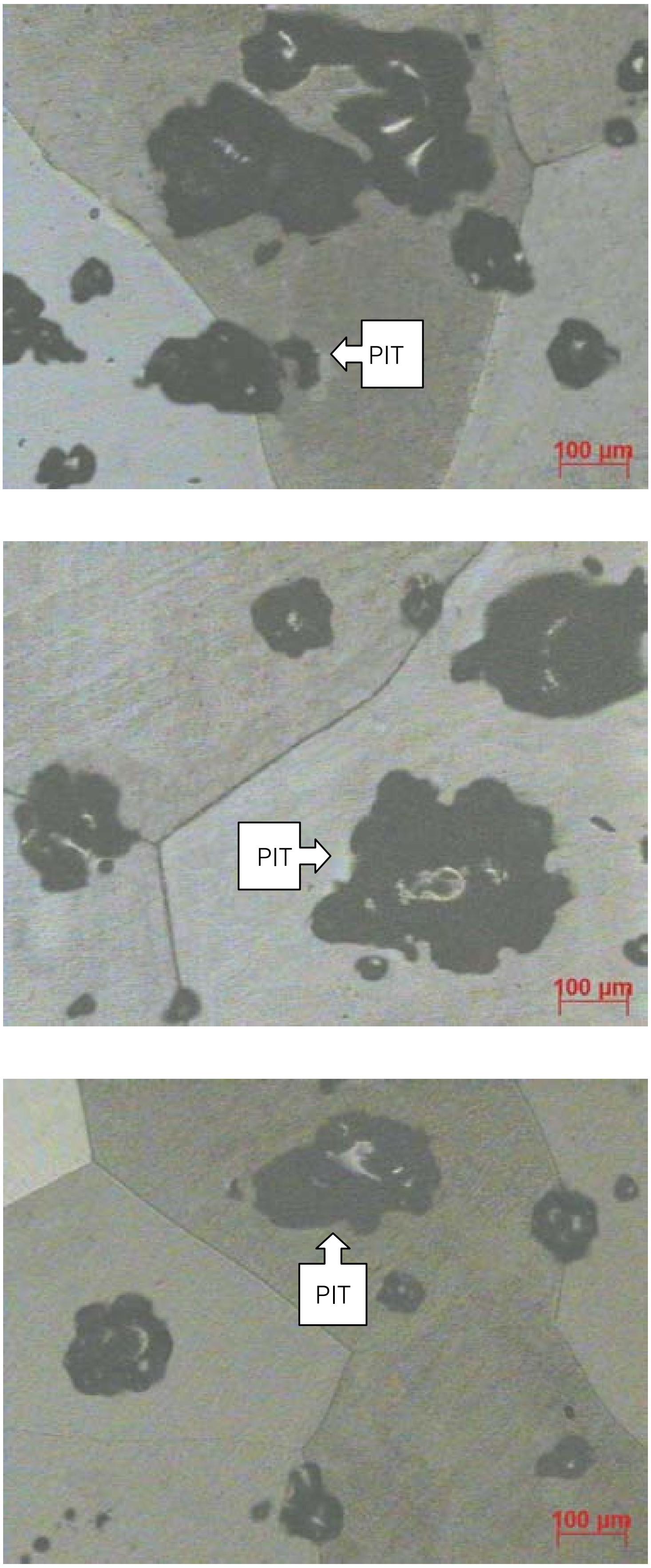


ข. พีเอช 7



ค. พีเอช 10

รูปที่ จ.2 บริเวณที่ถูกกัดกร่อนของเหล็กกล้าโครเมียม Fe-13Cr ในสารละลาย B
ที่ค่า ก.พีเอช 2 ข. พีเอช 7 ค. พีเอช 10

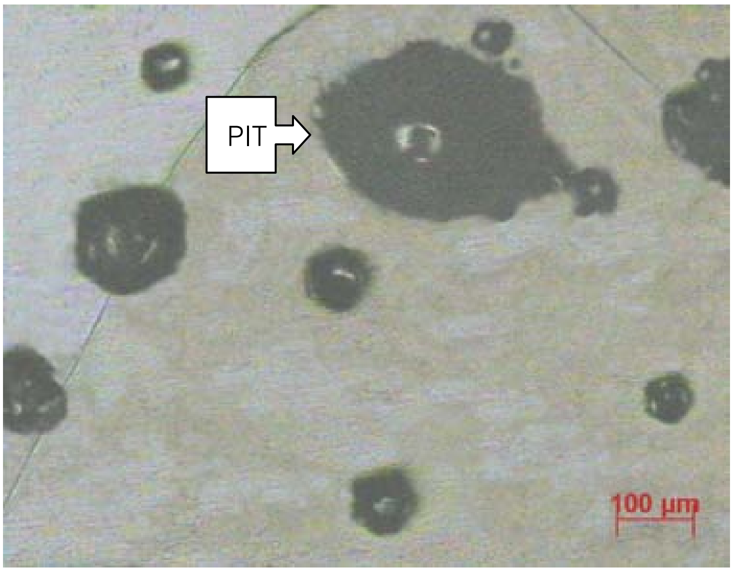


ก. พีเอช 2

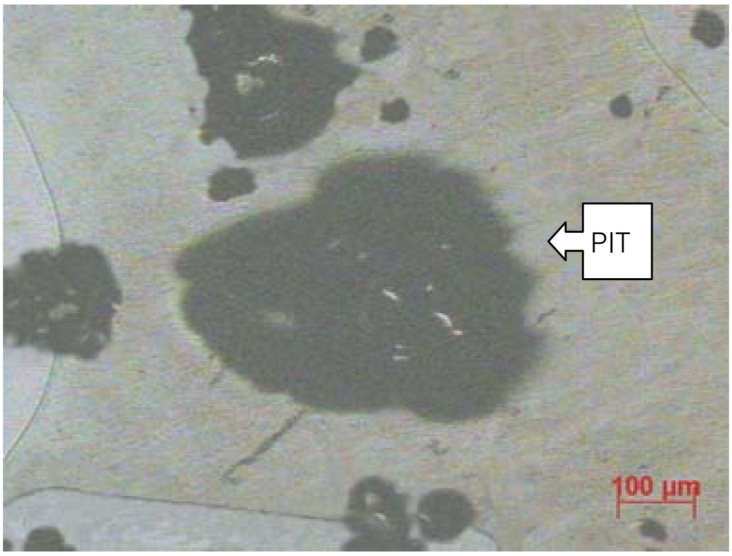
ข. พีเอช 7

ค. พีเอช 10

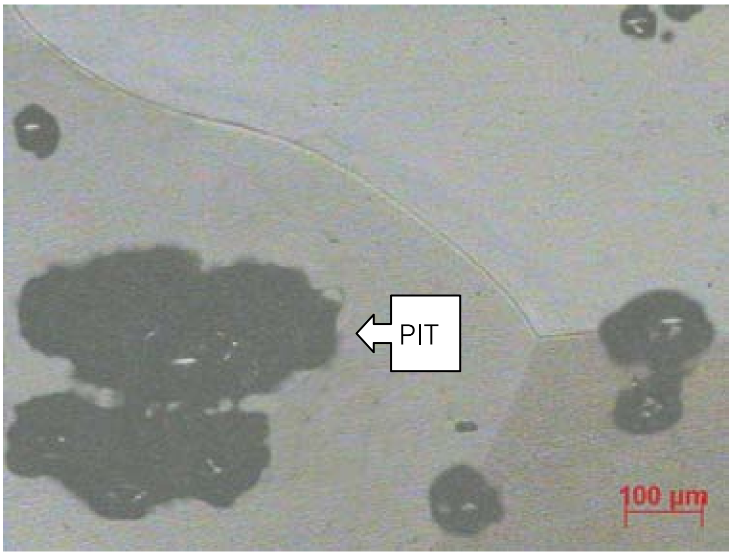
รูปที่ จ.3 บริเวณที่ถูกกัดกร่อนของเหล็กกล้าโครเมียม Fe-15Cr ในสารละลาย A
ที่ค่า ก.พีเอช 2 ข. พีเอช 7 ค. พีเอช 10



ก. พีเอช 2

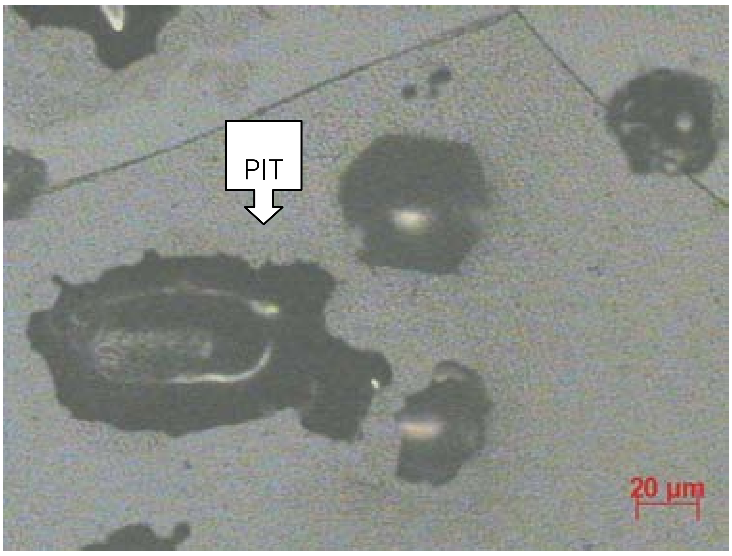


ข. พีเอช 7

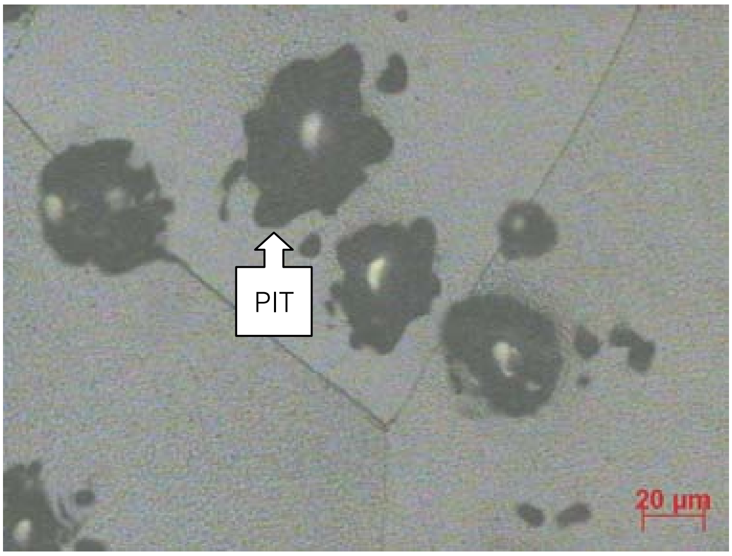


ค. พีเอช 10

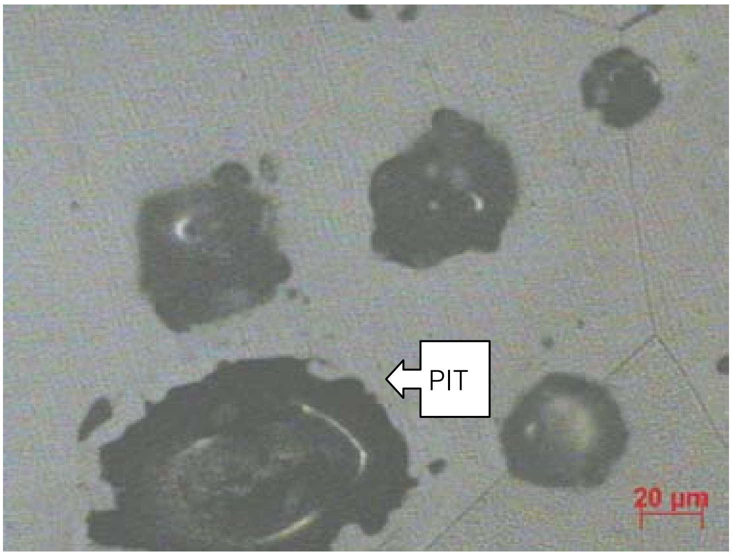
รูปที่ จ.4 บริเวณที่ถูกกัดกร่อนของเหล็กกล้าโครเมียม Fe-15Cr ในสารละลาย B
ที่ค่า ก.พีเอช 2 ข. พีเอช 7 ค. พีเอช 10



ก. พีเอช 2

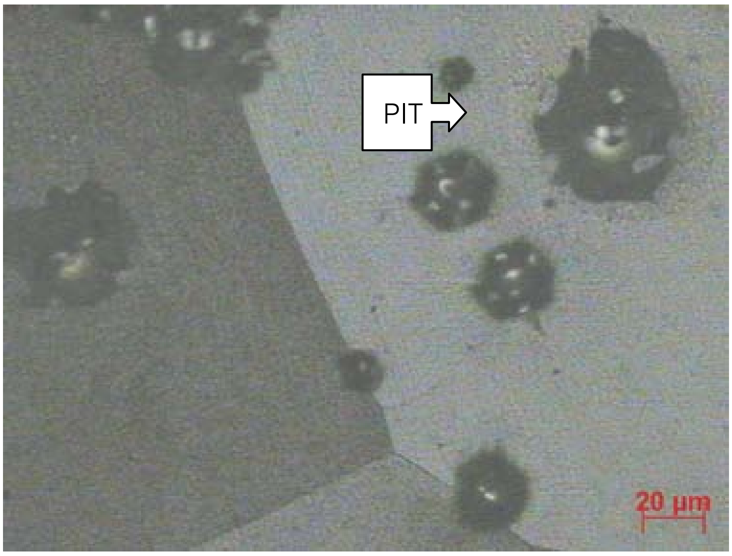


ข. พีเอช 7

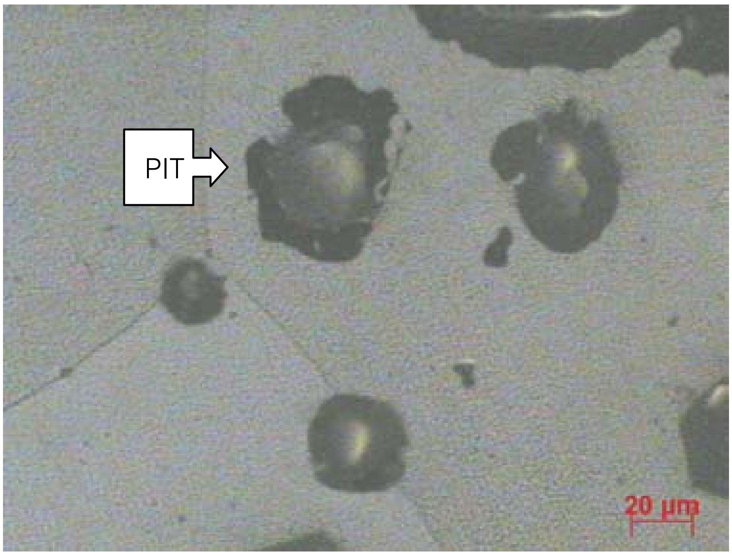


ค. พีเอช 10

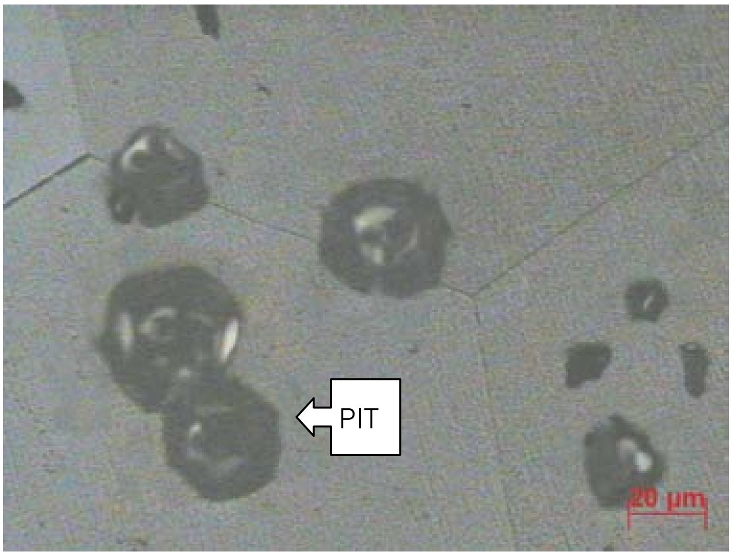
รูปที่ จ.5 บริเวณที่ถูกกัดกร่อนของเหล็กกล้าโครเมียม Fe-18Cr ในสารละลาย A
ที่ค่า ก.พีเอช 2 ข. พีเอช 7 ค. พีเอช 10



ก. พีเอช 2



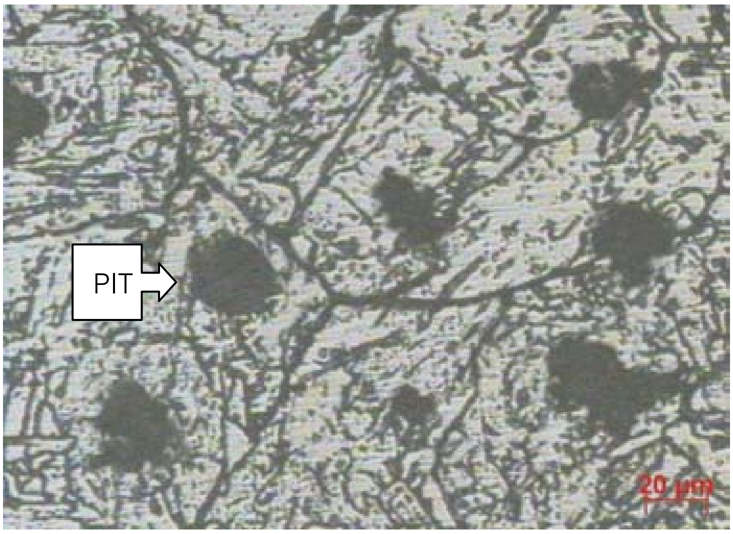
ข. พีเอช 7



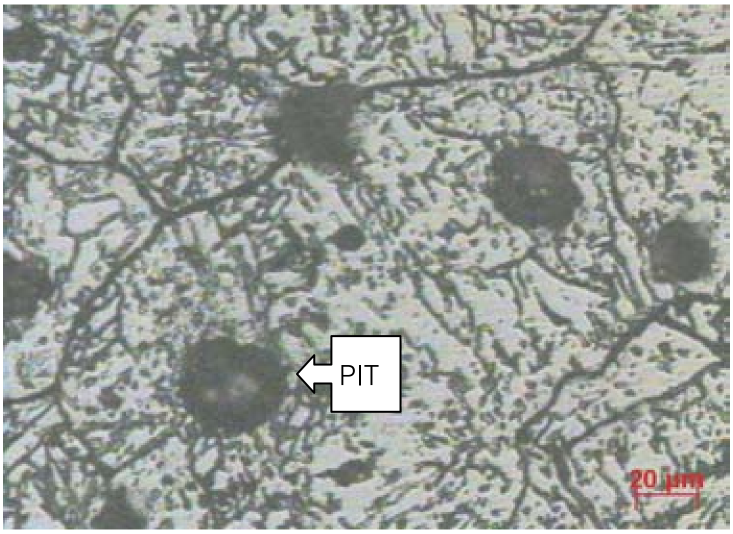
ค. พีเอช 10

รูปที่ จ.6 บริเวณที่ถูกกัดกร่อนของเหล็กกล้าโครเมียม Fe-18Cr ในสารละลาย B
ที่ค่า ก.พีเอช 2 ข. พีเอช 7 ค. พีเอช 10

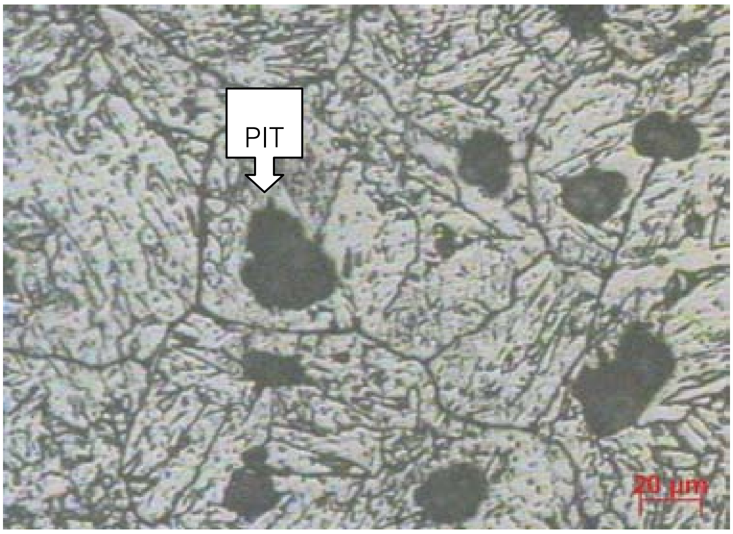
จ.2 โครงสร้างจุลภาคบริเวณที่ถูกกัดกร่อนของเหล็กกล้านิกเกิล



ก. พีเอช 2

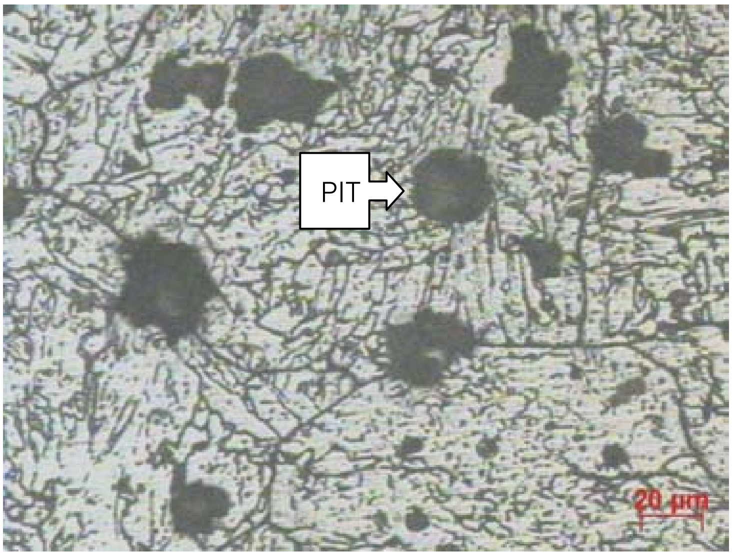


ข. พีเอช 7

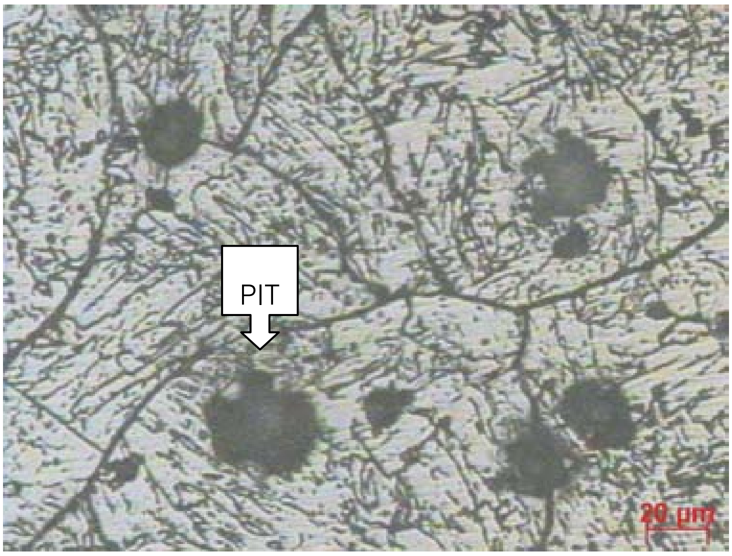


ค. พีเอช 10

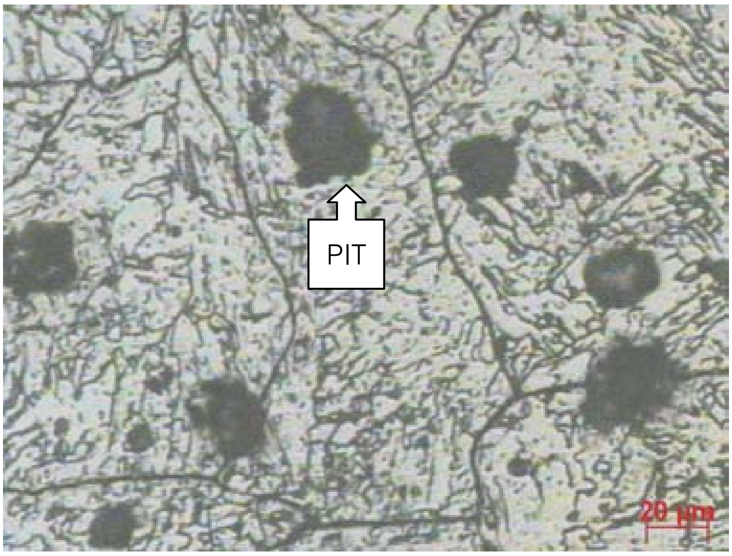
รูปที่ จ.7 บริเวณที่ถูกกัดกร่อนของเหล็กกล้านิกเกิล Fe-15Ni ในสารละลาย A
ที่ค่า ก.พีเอช 2 ข. พีเอช 7 ค. พีเอช 10



ก. พีเอช 2

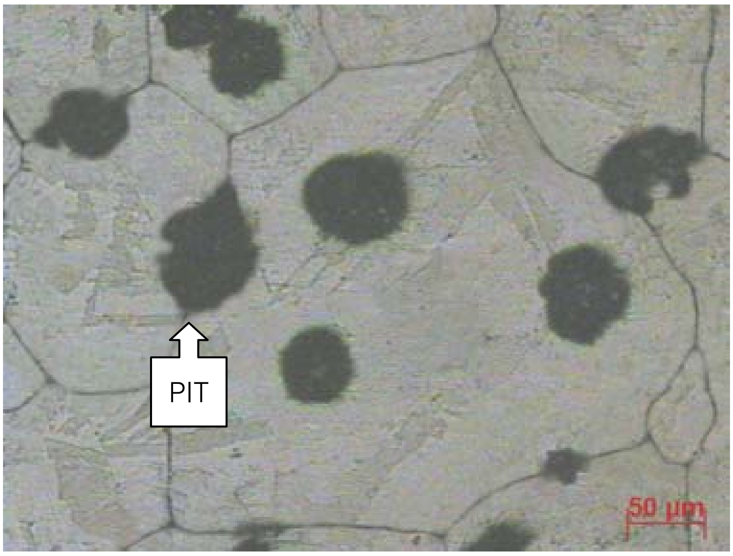


ข. พีเอช 7

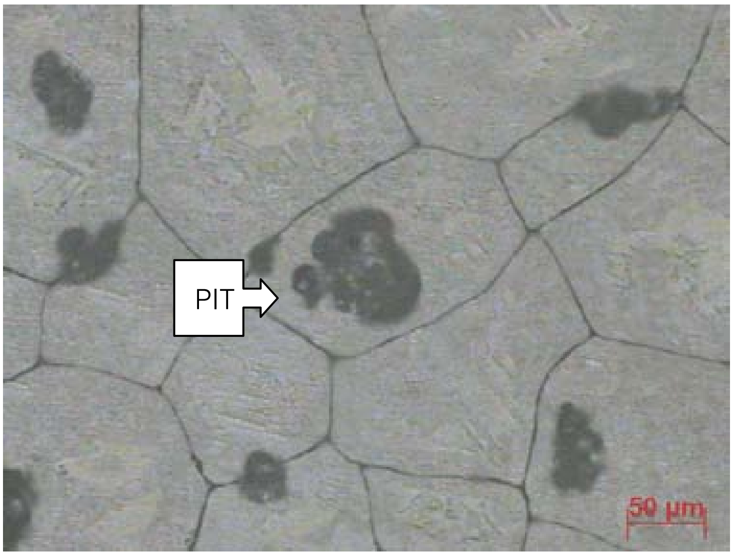


ค. พีเอช 10

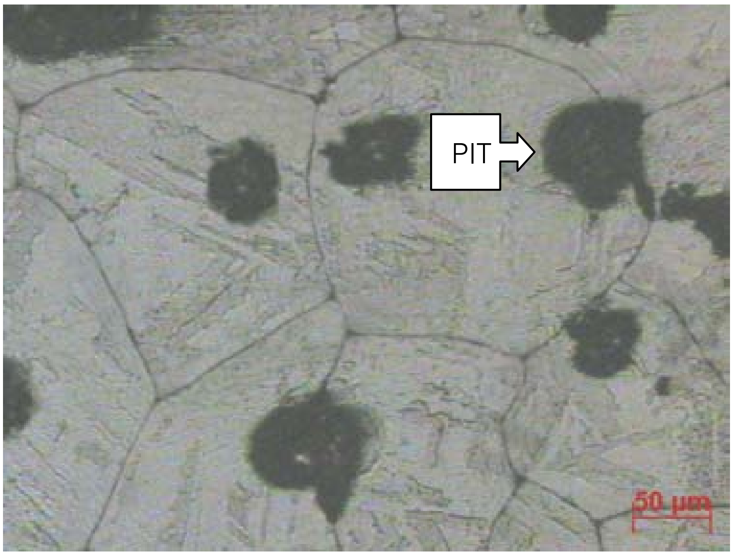
รูปที่ จ.8 บริเวณที่ถูกกัดกร่อนของเหล็กกล้านิกเกิล Fe-15Ni ในสารละลาย B
ที่ค่า ก.พีเอช 2 ข. พีเอช 7 ค. พีเอช 10



ก. พีเอช 2

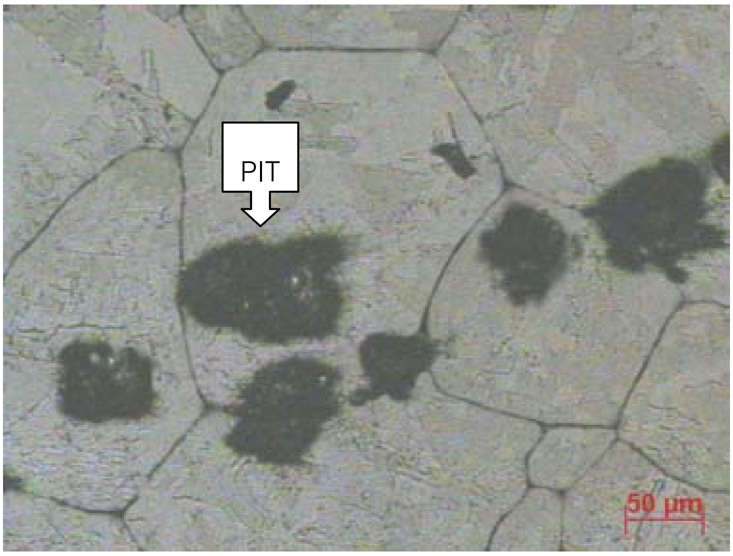


ข. พีเอช 7

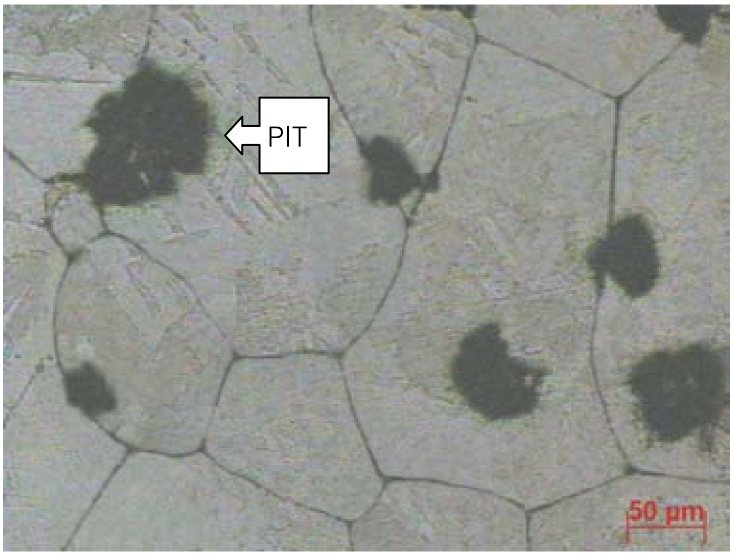


ค. พีเอช 10

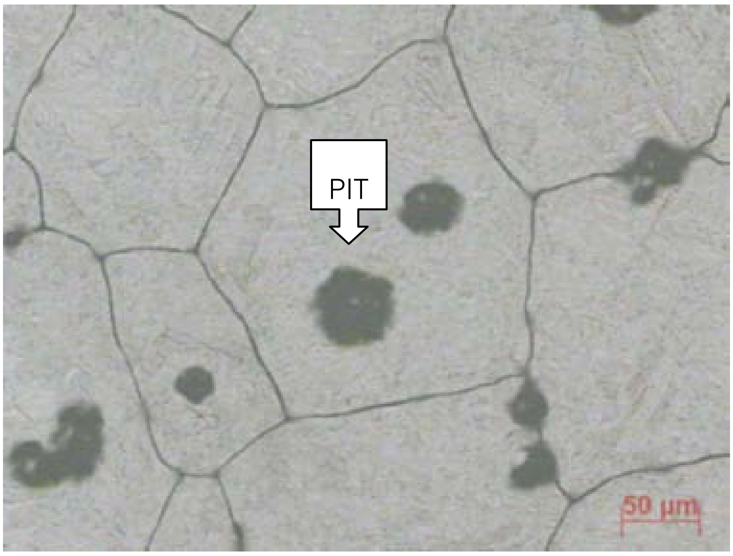
รูปที่ จ.9 บริเวณที่ถูกกัดกร่อนของเหล็กกล้านิกเกิล Fe-23Ni ในสารละลาย A
ที่ค่า ก.พีเอช 2 ข. พีเอช 7 ค. พีเอช 10



ก. พีเอช 2

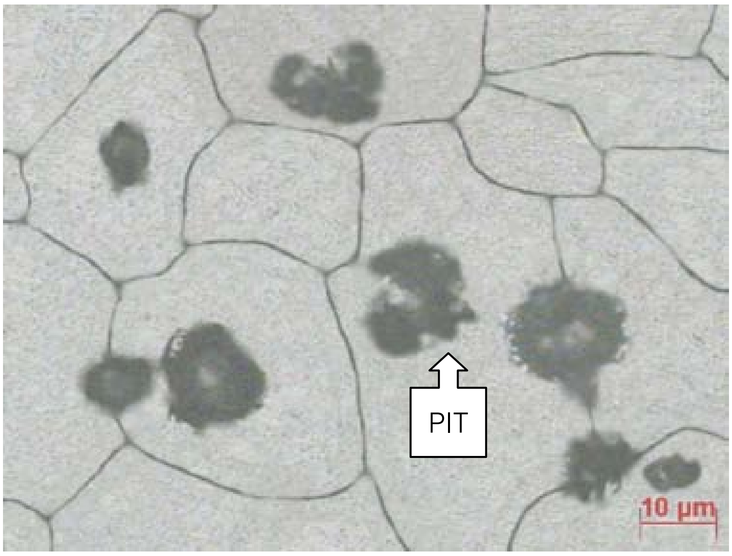


ข. พีเอช 7

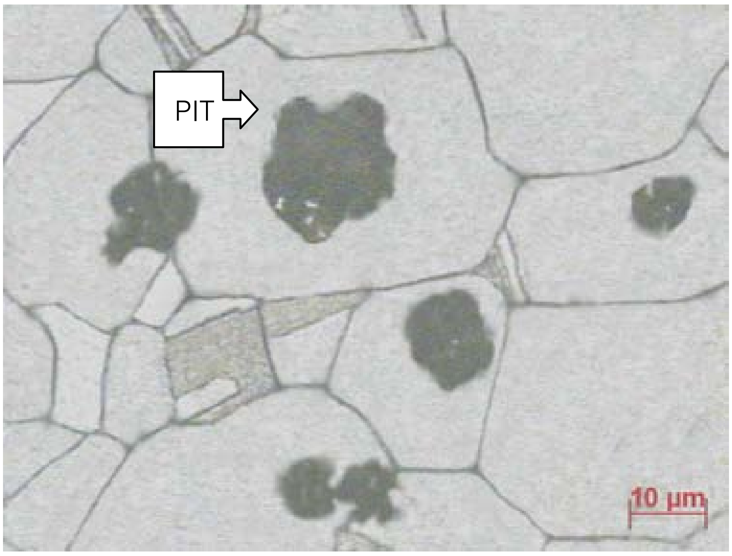


ค. พีเอช 10

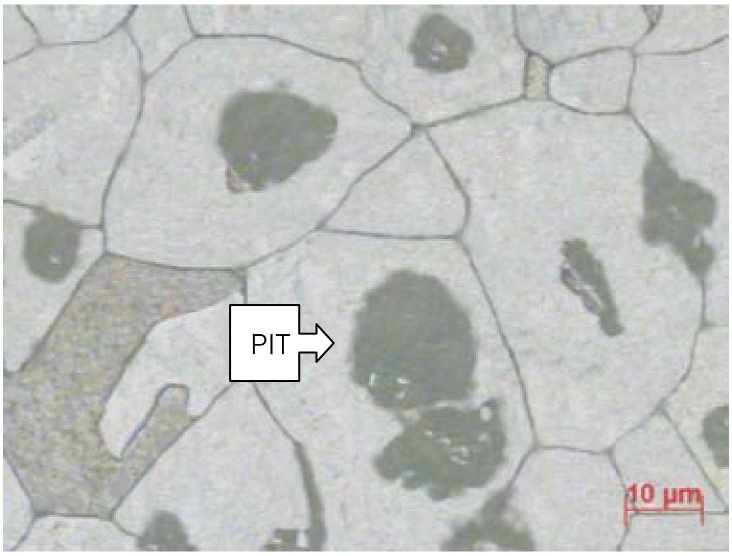
รูปที่ จ.10 บริเวณที่ถูกกัดกร่อนของเหล็กกล้านิกเกิล Fe-23Ni ในสารละลาย B ที่ค่า ก.พีเอช 2 ข. พีเอช 7 ค. พีเอช 10



ก. พีเอช 2

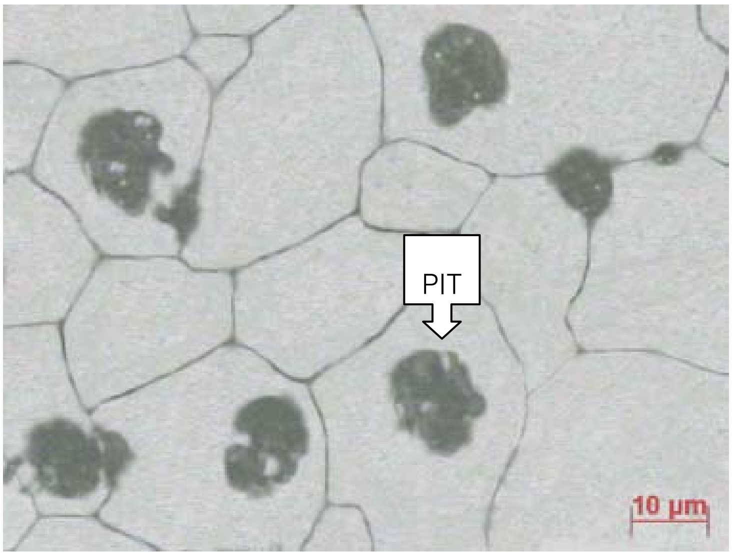


ข. พีเอช 7

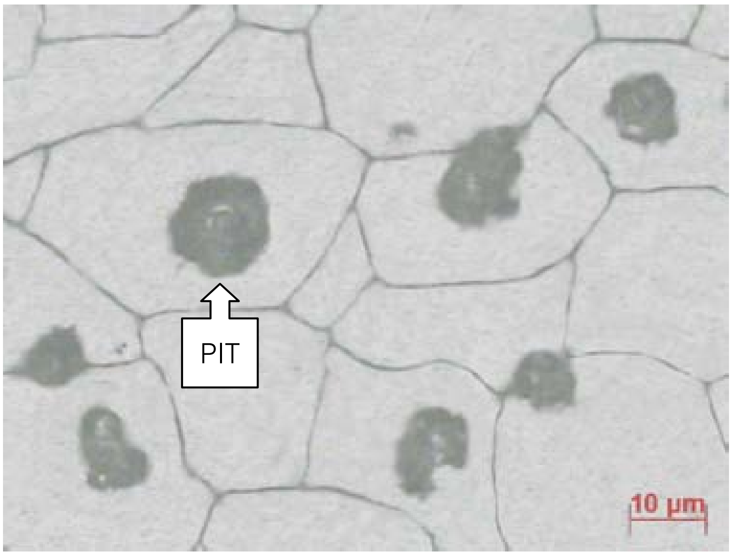


ค. พีเอช 10

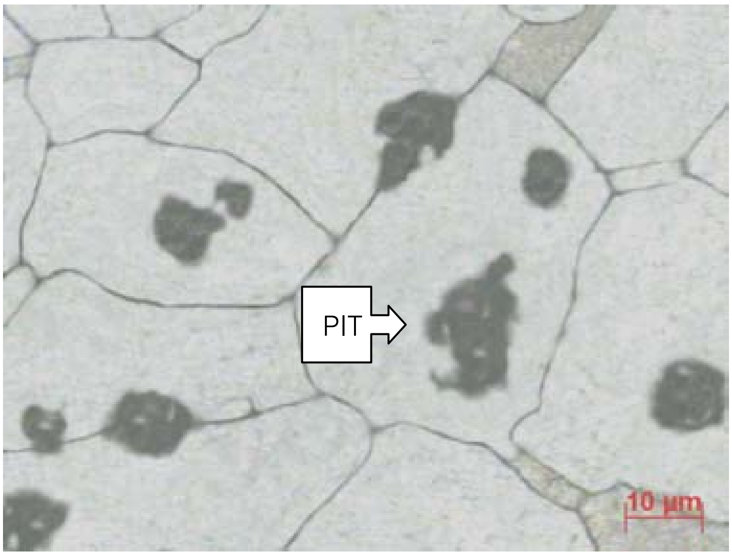
รูปที่ จ.11 บริเวณที่ถูกกัดกร่อนของเหล็กกล้านิกเกิล Fe-31Ni ในสารละลาย A
ที่ค่า ก.พีเอช 2 ข. พีเอช 7 ค. พีเอช 10



ก. พีเอช 2

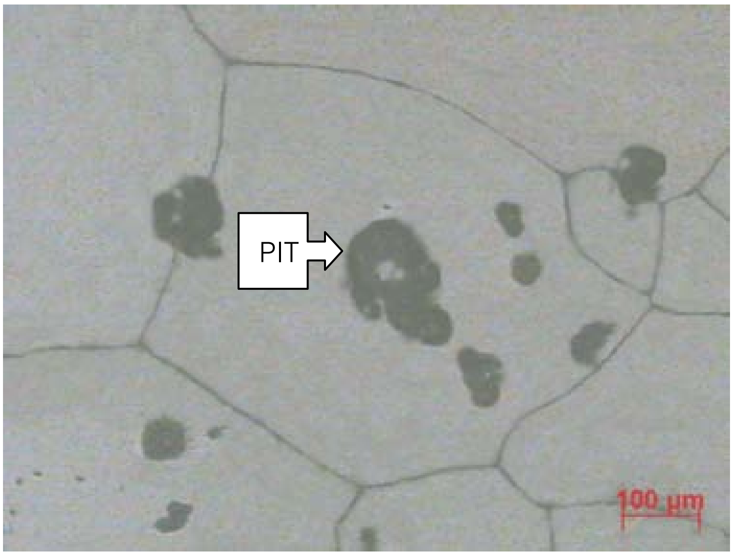


ข. พีเอช 7

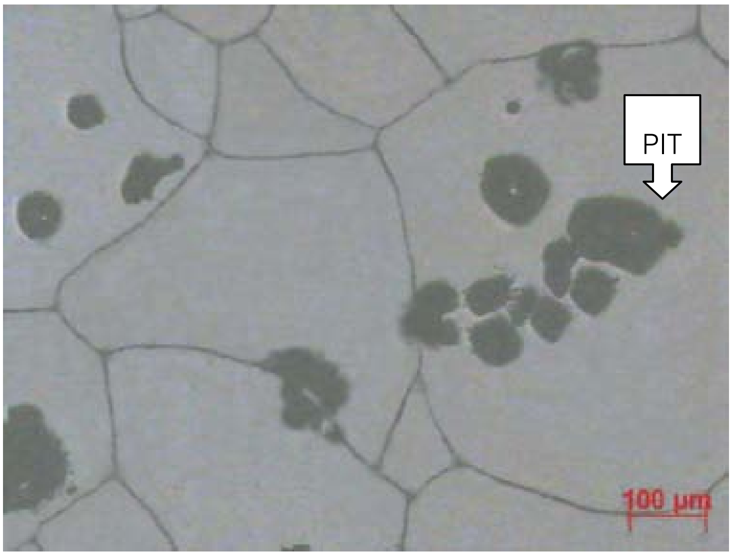


ค. พีเอช 10

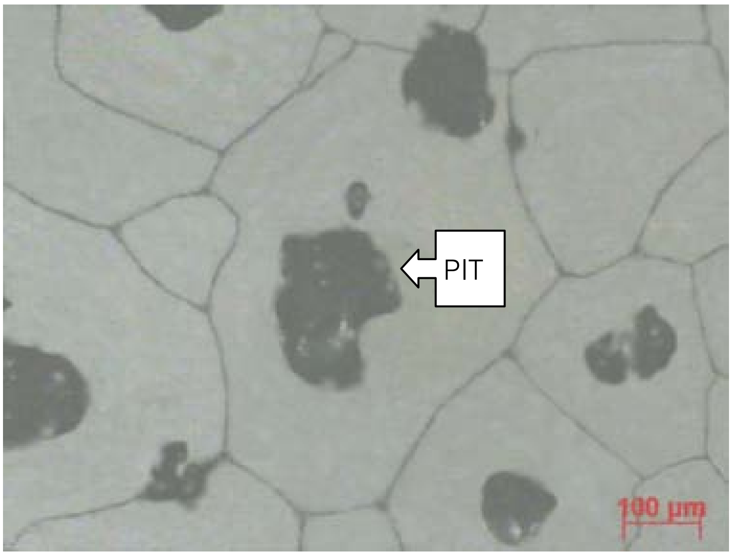
รูปที่ จ.12 บริเวณที่ถูกกัดกร่อนของเหล็กกล้านิกเกิล Fe-31Ni ในสารละลาย B ที่ค่า ก.พีเอช 2 ข. พีเอช 7 ค. พีเอช 10



ก. พีเอช 2

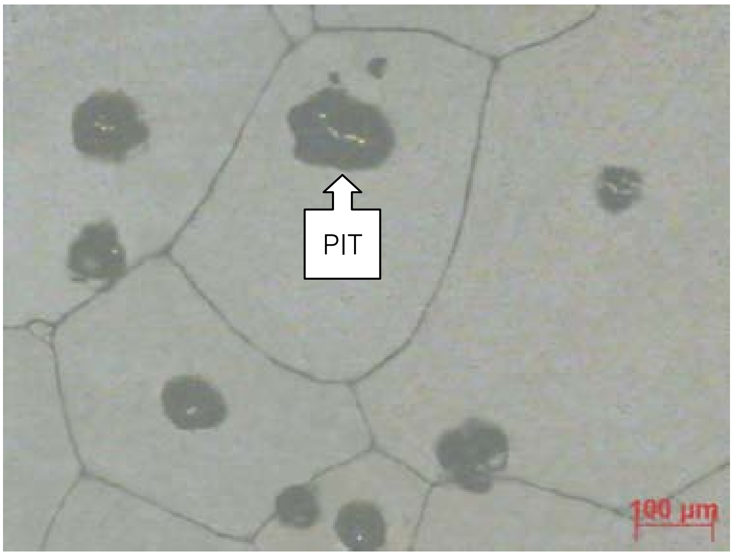


ข. พีเอช 7

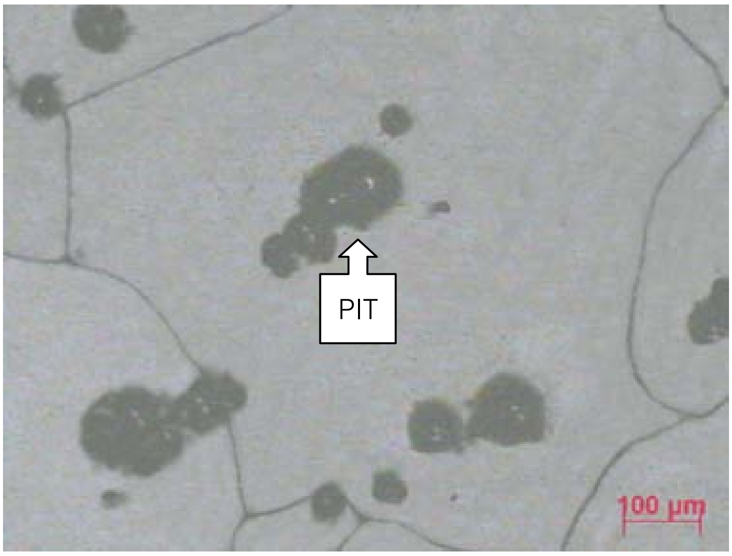


ค. พีเอช 10

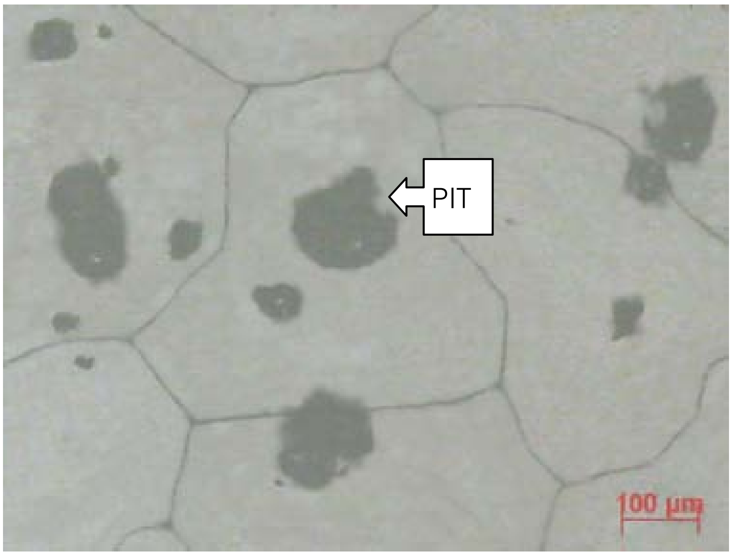
รูปที่ จ.13 บริเวณที่ถูกกัดกร่อนของเหล็กกล้านิกเกิล Fe-40Ni ในสารละลาย A
ที่ค่า ก.พีเอช 2 ข. พีเอช 7 ค. พีเอช 10



ก. พีเอช 2



ข. พีเอช 7



ค. พีเอช 10

รูปที่ จ.14 บริเวณที่ถูกกัดกร่อนของเหล็กกล้านิกเกิล Fe-40Ni ในสารละลาย B
ที่ค่า ก.พีเอช 2 ข. พีเอช 7 ค. พีเอช 10

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

ชื่อ-นามสกุล	นายกานต์ ภวภูตานนท์
วัน-เดือน-ปีเกิด	13 เมษายน พ.ศ. 2524
ที่อยู่	30/151 ถนนงามวงศ์วาน แขวงทุ่งสองห้อง เขตหลักสี่ กรุงเทพมหานคร 10210
วุฒิการศึกษา	- วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโลหการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ปีการศึกษา 2545 - เข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโลหการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ภาคการศึกษาที่ 2/2546