

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



นายกานต์ ภาณุตานนท์

สถาบันวิทยบริการ

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

ผลของโครเมียมและนิกเกิลต่อพฤติกรรมการกัดกร่อนของเหล็กกล้า  
ผสมสูงในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ ความเข้มข้น 3.5 เปอร์เซ็นต์  
โดยน้ำหนัก ที่ค่าพีเอช 2, 7, 10 และ อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส

โดย

นายกานต์ ภวภูตานนท์

สาขาวิชา

วิศวกรรมโลหการ


อาจารย์ที่ปรึกษา

รองศาสตราจารย์ ดร. กอบบุญ หล่อทองคำ

อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

ดร. เอกรัตน์ ไวยนิตย์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยรับนี้เป็นส่วน  
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโทบริหารธุรกิจ

  
..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์  
(ศาสตราจารย์ ดร.ดิเรก ลาวัณย์ศิริ)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

  
..... ประธานกรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ชاکกร จารุพิสิฐธร)

  
..... อาจารย์ที่ปรึกษา  
(รองศาสตราจารย์ ดร.กอบบุญ หล่อทองคำ)

  
..... อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม  
(ดร. เอกรัตน์ ไวยนิตย์)

  
..... กรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ไสว ตำนชัยวิจิตร)

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 และ อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส สารละลายอิ่มตัวด้วยอากาศและไม่อิ่มอากาศ เหล็กกล้าที่ใช้ศึกษามี 2 ชุด ชุดแรกมีส่วนผสมโครเมียมเป็น 13, 15, 18 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และชุดที่สองมีส่วนผสมของนิกเกิลเป็น 15, 23, 31, 40 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก การศึกษาอาศัยเทคนิคการวัดเส้นโพลาริเซชันเพื่อหาค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อน ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อน ค่าอัตราการกัดกร่อน ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าขณะวัสดุเกิดฟิล์มที่มีว ค่าศักย์ไฟฟ้าเริ่มเกิดพาสซีฟ ค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนแบบรูเข็ม และตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของบริเวณที่ถูกกัดกร่อนในช่วงค่าศักย์ไฟฟ้าทรานพาสซีฟ

ผลการศึกษาพบว่า การเพิ่มส่วนผสมโครเมียมของเหล็กกล้าโครเมียมไม่ส่งผลต่อค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนอย่างชัดเจน ส่วนผสมโครเมียมสูงขึ้นส่งผลลดค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อน ค่าอัตราการกัดกร่อน และค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าขณะวัสดุเกิดฟิล์มที่มีว แต่เพิ่มค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนแบบรูเข็ม การเพิ่มปริมาณนิกเกิลของเหล็กกล้า นิกเกิลส่งผลให้ค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนเพิ่มขึ้น ส่วนค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อนและค่าอัตราการกัดกร่อนลดลง พฤติกรรมการเกิดฟิล์มพาสซีฟตรวจพบที่พีเอช 10 สำหรับเหล็กที่ผสมนิกเกิล 23, 31 และ 40 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อน แบบรูเข็มเพิ่มขึ้นแต่ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าขณะวัสดุเกิดฟิล์มลดลง กรณีของการกัดกร่อนแบบทั่วผิวหน้า พฤติกรรมการกัดกร่อนของเหล็กกล้าโครเมียมและเหล็กกล้า นิกเกิลในสารละลายที่อิ่มตัวด้วยอากาศมีความรุนแรงมากกว่าสารละลายที่ไม่อิ่มอากาศ กรณีการกัดกร่อนแบบรูเข็มฟิล์มพาสซีฟมีเสถียรภาพในสารละลายอิ่มตัวด้วยอากาศมากกว่าสารละลายที่ไม่อิ่มอากาศ

ผลการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของบริเวณที่ถูกกัดกร่อนในช่วงค่าศักย์ไฟฟ้าทรานพาสซีฟ พบว่า จุดเริ่มต้นการกัดกร่อนแบบรูเข็มกระจายตัวทั่วไปในโครงสร้างจุลภาคของเหล็กกล้าโครเมียมและเหล็กกล้า นิกเกิลที่พีเอช 2, 7, 10

ภาควิชา...วิศวกรรมโลหการ.....ลายมือชื่อ..... กานต์ ภวภูตานนท์  
สาขาวิชา...วิศวกรรมโลหการ.....ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา..... โอบน หล่อทองคำ  
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 deaerated solution. 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

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีด้วยความช่วยเหลือจากหลายฝ่าย ผู้วิจัยขอกราบ  
ขอบพระคุณอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ รศ.ดร. กอบบุญ หล่อทองคำ ซึ่งได้กรุณาให้ความ  
ช่วยเหลือและแนะนำแนวทางที่เป็นประโยชน์ต่องานวิจัยด้วยดีตลอดมา ตลอดจนขอขอบพระคุณ  
ดร. เอกรัตน์ ไวยนิตย์ และคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ทุกท่านที่ให้คำแนะนำและข้อคิดเห็นที่  
เป็นประโยชน์ ขอขอบคุณ ศ.ดร. T. Maki ภาควิชาวัสดุศาสตร์และวัสดุวิศวกรรม มหาวิทยาลัย  
เกียวโต ที่ให้ความอนุเคราะห์เหล็กกล้าโครเมียมและเหล็กกล้านิกเกิลสำหรับการวิจัยในครั้งนี้  
ขอขอบพระคุณท่านอาจารย์และเจ้าหน้าที่ประจำภาควิชาวิศวกรรมโลหการทุกท่านที่ได้ให้ความ  
ช่วยเหลือจนงานวิจัยสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ท้ายนี้ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา และครอบครัว ที่สนับสนุนในด้านต่างๆ  
ด้วยดีตลอดมาจนสำเร็จการศึกษา และขอบคุณเพื่อนๆ ที่ให้ความช่วยเหลือและเป็นกำลังใจให้แก่  
ผู้วิจัยด้วยดีเสมอมา

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

# สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฅ
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. ปรีทรรศน์วรรณกรรม.....	3
2.1 ไฟฟ้าเคมีของการกักถ่วง.....	3
2.2 ศักย์ไฟฟ้าการกักถ่วง และความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกักถ่วง.....	4
2.3 เส้นโพลาริเซชัน.....	6
2.4 ผลของตัวออกซิไดเซอร์ต่อการเปลี่ยนแปลงของเส้นโพลาริเซชัน.....	7
2.5 ผลของค่าพีเอชของน้ำต่อการกักถ่วง.....	9
2.6 โครเมียมและนิกเกิลในฟิล์มพาสซีฟ.....	10
2.7 ผลของนิกเกิลต่อพฤติกรรมการกักถ่วงแบบมีแรงเค้นในสารละลาย 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



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 การทดสอบส่วนประกอบของฟิล์มพาสซีฟหลังการแช่ในสารละลายต่างๆ ด้วยเครื่อง ESCA [11].....	11
2.2 ค่า $E_{corr}$ , $I_{corr}$ , $E_p$ , $I_p$ ของฟิล์มจากอนุภาคระดับนาโนเมตรของนิกเกิล (pure Ni) และ นิกเกิล-โครเมียม (Ni-4.5Cr และ Ni-10.9Cr) ที่เคลือบด้วยไฟฟ้าบนโลหะพื้นนิกเกิล ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 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 ค่าที่วัดได้จากเส้นโพลาริเซชันของเหล็กกล้าโครเมียมและเหล็กกล้านิกเกิล ในสารละลาย A.....	32
4.4 ค่าที่วัดได้จากเส้นโพลาริเซชันของเหล็กกล้าโครเมียมและเหล็กกล้านิกเกิล ในสารละลาย B.....	33
ก.1 ผลของเวลาในการจุ่มชิ้นงานต่อศักย์ไฟฟ้าวงจรเปิดของชิ้นงานในสารละลาย โซเดียมคลอไรด์เข้มข้น 3.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส.....	69
ค.1 ค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนของเหล็กกล้าโครเมียมในสารละลาย A พีเอช 2.....	93
ค.2 ค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนของเหล็กกล้าโครเมียมในสารละลาย B พีเอช 2.....	93
ค.3 ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อนและอัตราการกัดกร่อนของ เหล็กกล้าโครเมียมในสารละลาย A พีเอช 2.....	94
ค.4 ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อนและอัตราการกัดกร่อนของ เหล็กกล้าโครเมียมในสารละลาย B พีเอช 2.....	94
ค.5 ค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนเริ่มเกิดพาสซีฟของเหล็กกล้าโครเมียม ในสารละลาย A พีเอช 2.....	95
ค.6 ค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนเริ่มเกิดพาสซีฟของเหล็กกล้าโครเมียม ในสารละลาย B พีเอช 2.....	95
ค.7 ค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนแบบรูเข็มหรือหลุมของเหล็กกล้าโครเมียม ในสารละลาย A พีเอช 2.....	96

## ตารางที่

ค.8	ค่าศักย์ไฟฟ้าการกักต่อนแบบรูเข็มหรือหลุมของเหล็กกล้าโครเมียม ในสารละลาย B พีเอช 2.....	96
ค.9	ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าขณะวัสดุเกิดฟิล์มที่ผิวของเหล็กกล้า โครเมียมในสารละลาย A พีเอช 2.....	97
ค.10	ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าขณะวัสดุเกิดฟิล์มที่ผิวของเหล็กกล้า โครเมียมในสารละลาย B พีเอช 2.....	97
ค.11	ค่าศักย์ไฟฟ้าการกักต่อนของเหล็กกล้าโครเมียมในสารละลาย A พีเอช 7.....	98
ค.12	ค่าศักย์ไฟฟ้าการกักต่อนของเหล็กกล้าโครเมียมในสารละลาย B พีเอช 7.....	98
ค.13	ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกักต่อนและอัตราการกักต่อนของ เหล็กกล้าโครเมียมในสารละลาย A พีเอช 7.....	99
ค.14	ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกักต่อนและอัตราการกักต่อนของ เหล็กกล้าโครเมียมในสารละลาย B พีเอช 7.....	99
ค.15	ค่าศักย์ไฟฟ้าการกักต่อนเริ่มเกิดพาสซีฟของเหล็กกล้าโครเมียม ในสารละลาย A พีเอช 7.....	100
ค.16	ค่าศักย์ไฟฟ้าการกักต่อนเริ่มเกิดพาสซีฟของเหล็กกล้าโครเมียม ในสารละลาย B พีเอช 7.....	100
ค.17	ค่าศักย์ไฟฟ้าการกักต่อนแบบรูเข็มหรือหลุมของเหล็กกล้าโครเมียม ในสารละลาย A พีเอช 7.....	101
ค.18	ค่าศักย์ไฟฟ้าการกักต่อนแบบรูเข็มหรือหลุมของเหล็กกล้าโครเมียม ในสารละลาย B พีเอช 7.....	101
ค.19	ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าขณะวัสดุเกิดฟิล์มที่ผิวของเหล็กกล้า โครเมียมในสารละลาย A พีเอช 7.....	102
ค.20	ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าขณะวัสดุเกิดฟิล์มที่ผิวของเหล็กกล้า โครเมียมในสารละลาย B พีเอช 7.....	102
ค.21	ค่าศักย์ไฟฟ้าการกักต่อนของเหล็กกล้าโครเมียมในสารละลาย A พีเอช 10.....	103
ค.22	ค่าศักย์ไฟฟ้าการกักต่อนของเหล็กกล้าโครเมียมในสารละลาย B พีเอช 10.....	103
ค.23	ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกักต่อนและอัตราการกักต่อนของ เหล็กกล้าโครเมียมในสารละลาย A พีเอช 10.....	104

ตารางที่

ค.24	ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกักต้อนและอัตราการกักต้อนของ เหล็กกล้าโครเมียมในสารละลาย B พีเอช 10.....	104
ค.25	ค่าศักย์ไฟฟ้าการกักต้อนเริ่มเกิดพาสซีฟของเหล็กกล้าโครเมียม ในสารละลาย A พีเอช 10.....	105
ค.26	ค่าศักย์ไฟฟ้าการกักต้อนเริ่มเกิดพาสซีฟของเหล็กกล้าโครเมียม ในสารละลาย B พีเอช 10.....	105
ค.27	ค่าศักย์ไฟฟ้าการกักต้อนแบบรูเข็มหรือหลุมของเหล็กกล้าโครเมียม ในสารละลาย A พีเอช 10.....	106
ค.28	ค่าศักย์ไฟฟ้าการกักต้อนแบบรูเข็มหรือหลุมของเหล็กกล้าโครเมียม ในสารละลาย B พีเอช 10.....	106
ค.29	ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าขณะวัสดุเกิดฟิล์มที่ผิวของเหล็กกล้า โครเมียมในสารละลาย A พีเอช 10.....	107
ค.30	ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าขณะวัสดุเกิดฟิล์มที่ผิวของเหล็กกล้า โครเมียมในสารละลาย B พีเอช 10.....	107
ค.31	ค่าศักย์ไฟฟ้าการกักต้อนของเหล็กกล้า निकเกิลในสารละลาย A พีเอช 2.....	108
ค.32	ค่าศักย์ไฟฟ้าการกักต้อนของเหล็กกล้า निकเกิลในสารละลาย B พีเอช 2.....	108
ค.33	ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกักต้อนและอัตราการกักต้อนของ เหล็กกล้า निकเกิลในสารละลาย A พีเอช 2.....	109
ค.34	ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกักต้อนและอัตราการกักต้อนของ เหล็กกล้า निकเกิลในสารละลาย B พีเอช 2.....	109
ค.35	ค่าศักย์ไฟฟ้าการกักต้อนของเหล็กกล้า निकเกิลในสารละลาย A พีเอช 7.....	110
ค.36	ค่าศักย์ไฟฟ้าการกักต้อนของเหล็กกล้า निकเกิลในสารละลาย B พีเอช 7.....	110
ค.37	ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกักต้อนและอัตราการกักต้อนของ เหล็กกล้า निकเกิลในสารละลาย A พีเอช 7.....	111
ค.38	ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกักต้อนและอัตราการกักต้อนของ เหล็กกล้า निकเกิลในสารละลาย B พีเอช 7.....	111
ค.39	ค่าศักย์ไฟฟ้าการกักต้อนของเหล็กกล้า निकเกิลในสารละลาย A พีเอช 10.....	112
ค.40	ค่าศักย์ไฟฟ้าการกักต้อนของเหล็กกล้า निकเกิลในสารละลาย B พีเอช 10.....	112

## ตารางที่

ค.41	ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อนและอัตราการกัดกร่อนของ เหล็กกล้า นิกเกิลในสารละลาย A พีเอช 10.....	113
ค.42	ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อนและอัตราการกัดกร่อนของ เหล็กกล้า นิกเกิลในสารละลาย B พีเอช 10.....	113
ค.43	ค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนเริ่มเกิดพาสซีฟของเหล็กกล้า นิกเกิล ในสารละลาย A พีเอช 10.....	114
ค.44	ค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนเริ่มเกิดพาสซีฟของเหล็กกล้า นิกเกิล ในสารละลาย B พีเอช 10.....	114
ค.45	ค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนแบบรูเข็มหรือหลุมของเหล็กกล้า นิกเกิล ในสารละลาย A พีเอช 10.....	115
ค.46	ค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนแบบรูเข็มหรือหลุมของเหล็กกล้า นิกเกิล 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 XRD ของเหล็กกล้าโครเมียม.....	118
ง.2	การคำนวณเพื่อระบุดัชนี (hkl) พีคตัวอย่าง XRD ของเหล็กกล้า นิกเกิล.....	121
ง.3	ข้อมูลตัวอย่างที่ใช้อ้างอิงผลการทดสอบ XRD ของชิ้นงานเหล็กกล้าโครเมียม และเหล็กกล้า นิกเกิล จาก JCPDS.....	122

## สารบัญภาพ

รูปที่	หน้า
2.1	ค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนและความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อน จากปฏิกิริยารวมระหว่างโลหะและสารละลายกรด.....4
2.2	ภาพจำลองเครื่องโพเทนชิโอสแตท.....5
2.3	ศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนและความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อน.....5
2.4	เส้นโพลาริเซชันและส่วนประกอบที่สำคัญ.....6
2.5	ผลของปริมาณออกซิไดเซชันในสารละลายกรดต่อการเปลี่ยนแปลงของเส้น โพลาริเซชัน.....8
2.6	การเปลี่ยนแปลงตำแหน่งของเส้นโพลาริเซชันจากความเข้มข้นของออกซิไดเซชัน 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 และ 25 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ในสารละลายเฟอริก- คลอไรด์เข้มข้น 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส.....15

รูปที่	หน้า
2.14 ตัวอย่างเส้นโพลาริเซชันของฟิล์มจากอนุภาคระดับนาโนเมตรของนิกเกิล (pure Ni) และนิกเกิล-โครเมียม ที่เคลือบด้วยไฟฟ้าบนโลหะพื้นนิกเกิลในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 3.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก.....	16
2.15 กระแสโฟโต (Photocurrent) ของฟิล์มพาสซีฟของโลหะผสม 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 การทดลองหาเส้นโพลาริเซชันด้วยเทคนิคโพเทนทิโอดนามิก.....	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 ตัวอย่างเส้นโพลาริเซชันของเหล็กกล้าโครเมียม.....	30
4.5 ตัวอย่างเส้นโพลาริเซชันของเหล็กกล้านิกเกิล.....	31
4.6 ผลของโครเมียมต่อศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนของเหล็กกล้าโครเมียม.....	34
4.7 ผลของค่าพีเอชต่อศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนด้วยทฤษฎีศักย์ไฟฟ้ารวม.....	35
4.8 ผลของโครเมียมต่อความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อนของเหล็กกล้าโครเมียม.....	36
4.9 ผลของออกซิเจนต่อค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อนโดยทฤษฎีศักย์ไฟฟ้ารวม.....	38
4.10 ผลของโครเมียมต่ออัตราการกัดกร่อนของเหล็กกล้าโครเมียม.....	39
4.11 ผลของโครเมียมต่อศักย์ไฟฟ้าเริ่มเกิดพาสซีฟของเหล็กกล้าโครเมียม.....	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 ผลของนิกเกิลต่อศักย์ไฟฟ้าเริ่มเกิดพาสซีฟของเหล็กกล้านิกเกิล.....	49
4.18 ผลของนิกเกิลต่อศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนแบบบรูซิมของเหล็กกล้านิกเกิล.....	50
4.19 แผนภาพโพแทสเซียมของโลหะนิกเกิลในน้ำที่อุณหภูมิ 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 เส้นโพลาริเซชันของเหล็กกล้าโครเมียม Fe-13Cr ในสารละลาย A พีเอช 2.....	70
ก.2 เส้นโพลาริเซชันของเหล็กกล้าโครเมียม Fe-13Cr ในสารละลาย B พีเอช 2.....	70
ก.3 เส้นโพลาริเซชันของเหล็กกล้าโครเมียม Fe-15Cr ในสารละลาย A พีเอช 2.....	71
ก.4 เส้นโพลาริเซชันของเหล็กกล้าโครเมียม Fe-15Cr ในสารละลาย B พีเอช 2.....	71
ก.5 เส้นโพลาริเซชันของเหล็กกล้าโครเมียม Fe-18Cr ในสารละลาย A พีเอช 2.....	72





รูปที่	หน้า
ก.34	เส้นโพลาริเซชันของเหล็กกล้าชนิด Fe-40Ni ในสารละลาย B พีเอช 7.....86
ก.35	เส้นโพลาริเซชันของเหล็กกล้าชนิด Fe-15Ni ในสารละลาย A พีเอช 10.....87
ก.36	เส้นโพลาริเซชันของเหล็กกล้าชนิด Fe-15Ni ในสารละลาย B พีเอช 10.....87
ก.37	เส้นโพลาริเซชันของเหล็กกล้าชนิด Fe-23Ni ในสารละลาย A พีเอช 10.....88
ก.38	เส้นโพลาริเซชันของเหล็กกล้าชนิด Fe-23Ni ในสารละลาย B พีเอช 10.....88
ก.39	เส้นโพลาริเซชันของเหล็กกล้าชนิด Fe-31Ni ในสารละลาย A พีเอช 10.....89
ก.40	เส้นโพลาริเซชันของเหล็กกล้าชนิด Fe-31Ni ในสารละลาย B พีเอช 10.....89
ก.41	เส้นโพลาริเซชันของเหล็กกล้าชนิด Fe-40Ni ในสารละลาย A พีเอช 10.....90
ก.42	เส้นโพลาริเซชันของเหล็กกล้าชนิด Fe-40Ni ในสารละลาย B พีเอช 10.....90
ข.1	วิธีหาค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนและกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อนจากเส้นโพลาริเซชัน.....91
ข.2	วิธีหาค่าศักย์ไฟฟ้าเริ่มเกิดพาสซีฟ 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 ของเหล็กกล้าชนิด Fe-15Ni.....119
ง.5	ผลการทดสอบ XRD ของเหล็กกล้าชนิด Fe-23Ni.....120
ง.6	ผลการทดสอบ XRD ของเหล็กกล้าชนิด Fe-31Ni.....120
ง.7	ผลการทดสอบ XRD ของเหล็กกล้าชนิด 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
$E_{\text{corr}}$	ศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อน (corrosion potential)
$E_{\text{pp}}$	ศักย์ไฟฟ้าเริ่มเกิดพาสซีฟ (primary passive potential)
$E_{\text{p}}$	ศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนแบบรูเข็มหรือหลุม (pitting potential)
$I_{\text{corr}}$	ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อน (corrosion current density)
$I_{\text{p}}$	ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าช่วงที่เกิดพาสซีฟฟิล์ม (passive current density)
$R_{\text{umpy}}$	ค่าอัตราการกัดกร่อน (corrosion rate, ไมโครเมตรต่อปี)
สารละลาย A	สารละลายโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้น 3.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ในสถานะอิมิตัวด้วยอากาศ (aerated) ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส
สารละลาย B	สารละลายโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้น 3.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ในสถานะไม่มีอากาศ (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 จุดประสงค์ของการผสมโครเมียมเพื่อเพิ่มคุณสมบัติความต้านทานการกัดกร่อนด้วยการสร้างชั้นฟิล์มพาสซีฟ (passive film) ชั้นที่ผิวเหล็กกล้าไร้สนิมและยังเป็นธาตุช่วยเพิ่มเสถียรภาพของเฟสเฟอร์ไรต์ (ferrite stabilizer) การศึกษาผลของโครเมียมในเหล็กกล้าไร้สนิมต่อความต้านทานการกัดกร่อนเริ่มตั้งแต่ช่วงปี 1940 [1] ผลการวิจัยที่ผ่านมายังพบว่ามีการศึกษากันในแต่ละสิ่งแวดล้อม เช่น การศึกษาในสารละลาย อุณหภูมิ และความเป็นกรดต่างที่แตกต่างกัน 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 การศึกษาอาศัยเทคนิคการวัดเส้นโพลาริเซชัน (polarization curve) และนำมาหาค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อน ( $E_{corr}$ ) ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อน (corrosion current density,  $I_{corr}$ ) ค่าอัตราการกัดกร่อน (corrosion rate,  $R_{mp}$ ) ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าขณะวัสดุเกิดฟิล์มที่ผิว (passive current density,  $I_p$ ) ค่าศักย์ไฟฟ้าเริ่มเกิดพาสซีฟ (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 วัดเส้นโพลาริเซชัน (polarization curve) ของเหล็กกล้าผสมโครเมียม 13, 15 และ 18 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และเหล็กกล้าผสมนิกเกิล 15, 23, 31 และ 40 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,  $I_p$ ) ค่าศักย์ไฟฟ้าเริ่มเกิดพาสซีฟ (primary passive potential,  $E_{pp}$ ) และค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนแบบรูเข็ม (pitting potential,  $E_p$ ) จากเส้นโพลาริเซชัน

1.3.3 ตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคที่ถูกกัดกร่อนด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง

1.3.4 วิเคราะห์และสรุปผลของโครเมียมและนิกเกิลต่อพฤติกรรมการกัดกร่อนของเหล็กกล้าโครเมียมและเหล็กกล้านิกเกิล

### 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 ทราบผลของโครเมียมและนิกเกิลต่อพฤติกรรมการกัดกร่อนของเหล็กกล้าโครเมียมและเหล็กกล้านิกเกิล

1.4.2 เป็นข้อมูลพื้นฐานสำหรับใช้พัฒนาเหล็กกล้าผสมโครเมียมและนิกเกิลในเชิงคุณสมบัติต้านทานการกัดกร่อนต่อไป

## บทที่ 2

### ปรีทรรศน์วรรณกรรม

#### 2.1 ไฟฟ้าเคมีของการกัดกร่อน [4]

การกัดกร่อนด้วยไฟฟ้าเคมีเป็นปฏิกิริยาที่โลหะสูญเสียแรงยึดระหว่างอะตอมของโลหะ กลายเป็นไอออนหลุดออกไปสู่สิ่งแวดล้อมทำให้เกิดการกัดกร่อนตามสมการที่ 2.1



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

ก. รีดักชันของน้ำที่ไม่มีออกซิเจน (ค่าพีเอชต่ำกว่า 4)



ข. รีดักชันของน้ำที่มีออกซิเจน (ค่าพีเอชต่ำกว่า 4)



ค. รีดักชันของน้ำที่ไม่มีออกซิเจน (ค่าพีเอชสูงกว่า 4)



ง. รีดักชันของน้ำที่มีออกซิเจน (ภายในน้ำที่มีค่าพีเอชสูงกว่า 4)

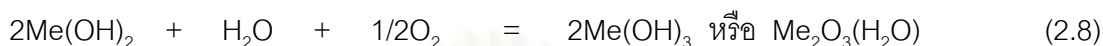
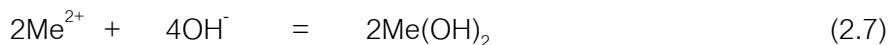


จ. รีดักชันของไอออนของโลหะ



ปฏิกิริยาแอโนดิกและแคโทดิกอาจเกิดขึ้นบนตำแหน่งใกล้เคียงกันหรือบนตำแหน่งที่ต่างกัน อย่างชัดเจนบนผิวโลหะ เนื่องจากความไม่สม่ำเสมอของผิวโลหะและสารละลายที่สัมผัสอยู่บนผิวโลหะ ความไม่สม่ำเสมอของผิวโลหะมีสาเหตุจาก ส่วนผสมทางเคมี แรงเค้นที่หลงเหลือ การเกิดฟิล์มพาสซีฟ และลักษณะของผิวโลหะที่แตกต่างกัน ความไม่สม่ำเสมอของสารละลายที่สัมผัสอยู่กับผิวโลหะมีหลายสาเหตุ เช่น ความเข้มข้นของไอออน ความเข้มข้นของก๊าซ อุณหภูมิ และ

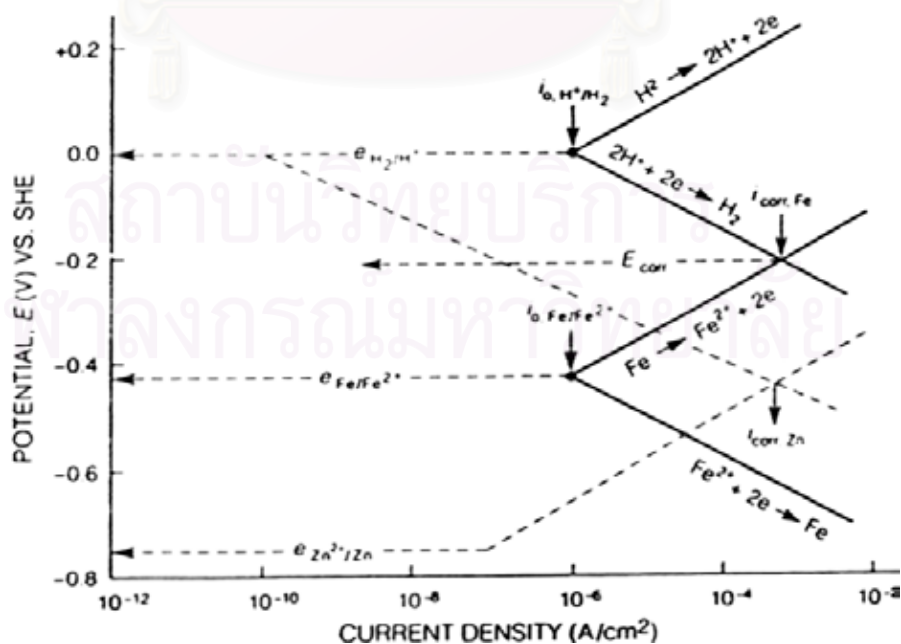
อัตราเร็วการไหลของสารละลายนั้น หลังการเกิดปฏิกิริยาการกัดกร่อนจะเกิดการรวมตัวของไฮดรอกไซด์ในสารละลายทำให้เกิดผลิตภัณฑ์จากการกัดกร่อน เช่น การสูญเสียเนื้อโลหะในสารละลายที่ค่าพีเอช 4 - 10 เกิดเป็นสารประกอบไฮดรอกไซด์ของโลหะที่ผิวของโลหะนั้นตามสมการที่ (2.7) และ (2.8)



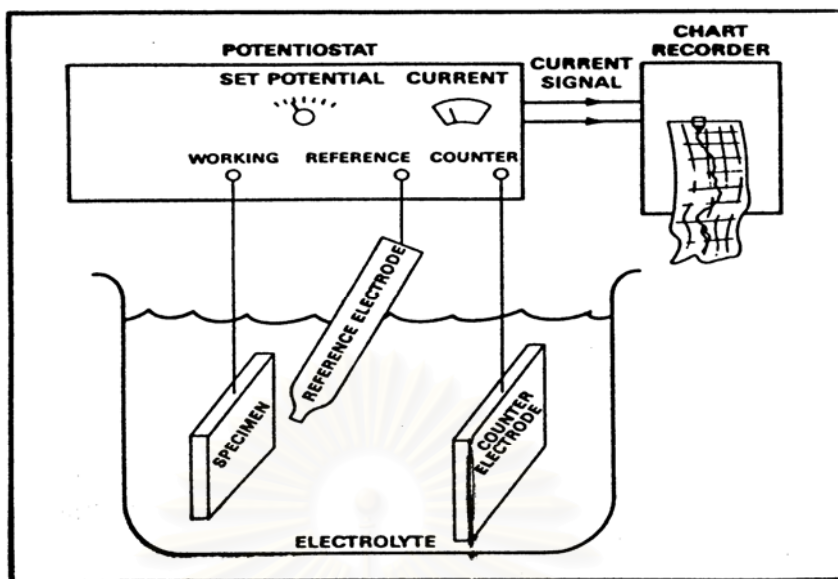
เมื่อสารประกอบ  $\text{Me}_2\text{O}_3(\text{H}_2\text{O})$  สูญเสียน้ำ (dehydration) กลายเป็นสารประกอบ  $\text{MeOOH}$  หรือ  $\text{Me}_2\text{O}_3$  ที่มีคุณสมบัติลดอัตราการกัดกร่อน เช่น  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  ในเหล็กกล้าไร้สนิม

## 2.2 ศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อน และความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อน [4]

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



รูปที่ 2.1 ค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนและความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อนจากปฏิกิริยารวมระหว่างโลหะและสารละลายกรด [4]

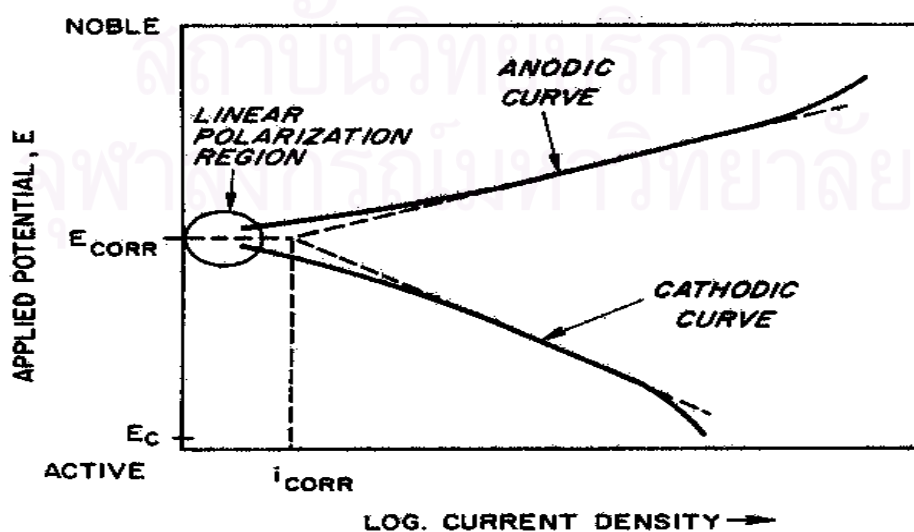


รูปที่ 2.2 ภาพจำลองเครื่องโพเทนชิโอสแตท (potentiostat) [5]

อิเล็กโทรดที่ใช้มี 3 ชนิดคือ

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

ค่าศักย์ไฟฟ้าได้จากการวัดเทียบระหว่างค่าศักย์ไฟฟ้าอิเล็กโทรดอ้างอิงกับอิเล็กโทรดตัวอย่าง ค่ากระแสไฟฟ้าได้จากการวัดเทียบระหว่างอิเล็กโทรดกระแสบกับอิเล็กโทรดตัวอย่าง จากค่าศักย์ไฟฟ้าและค่ากระแสไฟฟ้าที่วัดได้นี้มาสร้างกราฟแสดงความสัมพันธ์จะได้กราฟที่เรียกว่าเส้นโพลาริเซชัน (polarization curve)



รูปที่ 2.3 ศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนและความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อน [1]



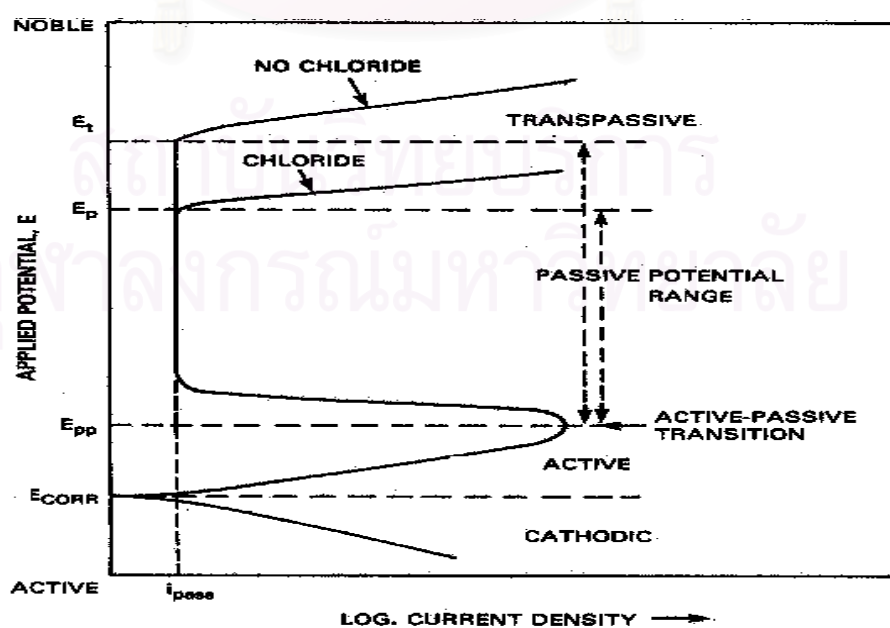
รูปที่ 2.3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างศักย์ไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าของปฏิกิริยาแอโนดิก และปฏิกิริยาแคโทดิกบนผิวของโลหะที่เกิดการกัดกร่อน การเกิดกระแสไฟฟ้าไหลผ่านผิวของ ขั้วไฟฟ้าทำให้ความต่างศักย์ของขั้วทั้งสองเกิดการเปลี่ยนแปลงในเส้นกราฟแอโนดิก (anodic curve) และเส้นกราฟแคโทดิก (cathodic curve) ที่แสดงถึงการเกิดโพลาริเซชันของขั้วทั้งสอง [3-4] ค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนและกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อนหาได้จากจุดตัดของเส้นที่สัมพันธ์กับ เส้นกราฟแอโนดิกและเส้นกราฟแคโทดิก ดังแสดงในรูปที่ 2.3 จากกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อน สามารถหาอัตราการกัดกร่อน [1] ได้จากสมการ (2.9)

$$R_{\text{umpy}} = [3.27 \times i_{\text{corr}} \times e] / \rho \quad (2.9)$$

เมื่อ	$R_{\text{umpy}}$	คือ	อัตราการเกิดการกัดกร่อน (ไมโครเมตรต่อปี)
	$i_{\text{corr}}$	=	ความหนาแน่นกระแสการกัดกร่อน (ไมโครแอมป์ต่อตารางเซนติเมตร)
	$e$	=	น้ำหนักกรัมสมมูลของโลหะ
	$\rho$	=	ความหนาแน่นของโลหะ (กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร)

### 2.3 เส้นโพลาริเซชัน (polarization curve) [2-4]

การศึกษาพฤติกรรมพาสซีวิตี (passivity) ของวัสดุจากเส้นกราฟโพลาริเซชันทำได้โดย เพิ่มศักย์ไฟฟ้าจาก  $E_{\text{corr}}$  ในรูปที่ 2.3 ไปในทิศทางบวก (noble) และบันทึกค่ากระแสได้ความสัมพันธ์เป็นดังรูปที่ 2.4



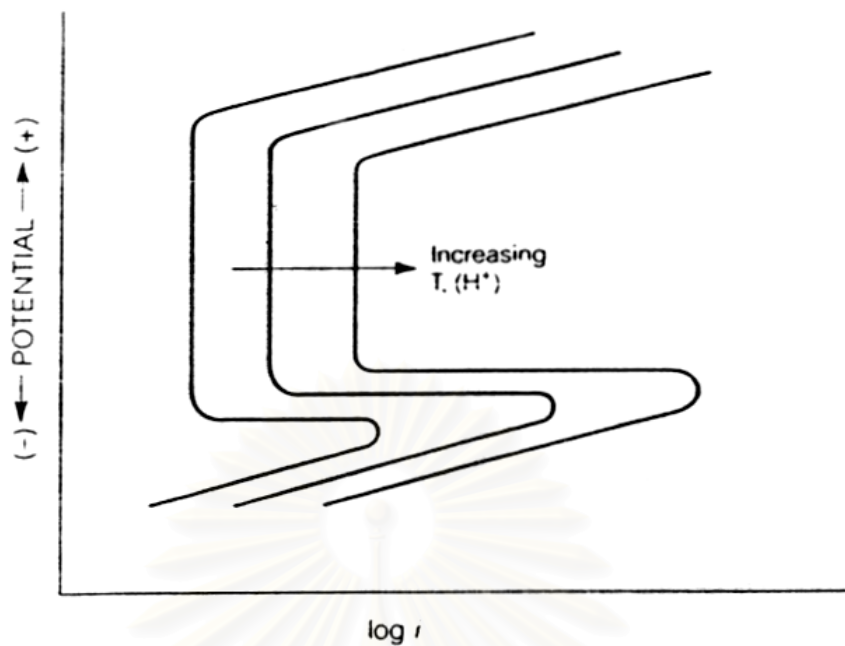
รูปที่ 2.4 เส้นโพลาริเซชันและส่วนประกอบที่สำคัญ [1]

รูปที่ 2.4 เมื่อเพิ่มศักย์ไฟฟ้าจากค่าศักย์ไฟฟ้ากัดกร่อน ( $E_{corr}$ ) ถึงจุดหนึ่งความหนาแน่นกระแสไฟฟ้ากลับลดลงจากเกิดขึ้นฟิล์มพาสซีฟบนผิวโลหะ ค่าศักย์ไฟฟ้าที่จุดเปลี่ยนแปลงจากพฤติกรรมการกัดกร่อนแบบแอคทีฟเป็นพาสซีฟ (active-passive transition) เรียกว่า ศักย์ไฟฟ้าเริ่มเกิดฟิล์มพาสซีฟ ( $E_{pp}$ ) เมื่อเพิ่มศักย์ไฟฟ้าต่อไปความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าจะลดลงจนคงที่ที่ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าค่าหนึ่ง กราฟช่วงนี้เรียกว่าช่วงพาสซีฟ (passive zone) ซึ่งแสดงถึงความเสถียรของฟิล์มพาสซีฟบนผิวโลหะนั้นๆ ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้ากลับเพิ่มอย่างรวดเร็วเมื่อเพิ่มศักย์ไฟฟ้ามากถึงค่าศักย์ไฟฟ้าทรานพาสซีฟ ( $E_t$ ) หรือค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนแบบรูเข็มหรือหลุม ( $E_p$ ) เพราะที่ค่าศักย์ไฟฟ้านี้ฟิล์มพาสซีฟถูกทำลายและถูกกัดกร่อนเฉพาะที่แบบรูเข็มหรือหลุม การกัดกร่อนแบบรูเข็มหรือหลุมจะมีความรุนแรงมากขึ้นเมื่อศักย์ไฟฟ้าเพิ่มขึ้นเกินค่า  $E_t$

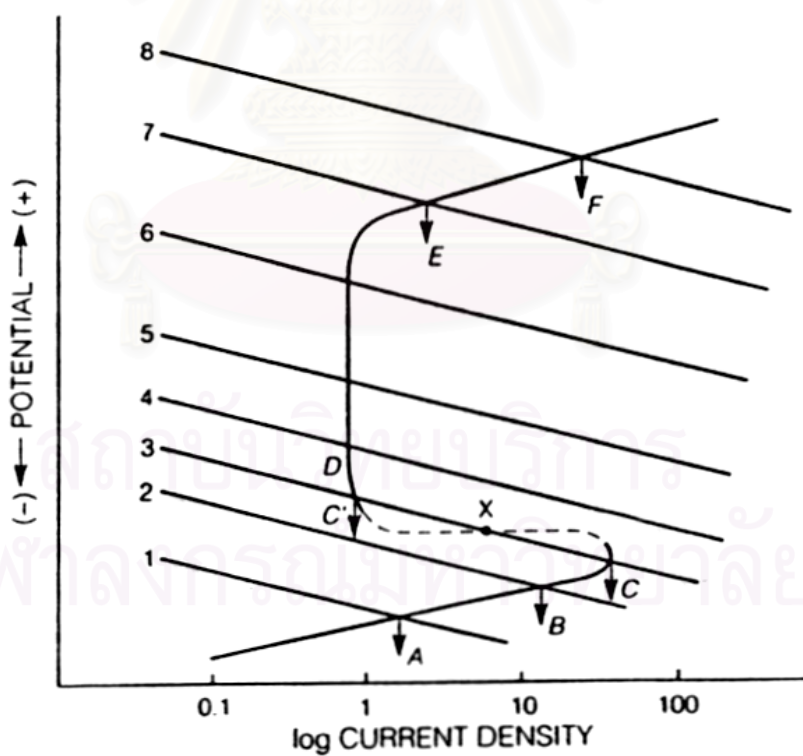
เส้นโนลาไรเซชันที่ได้จากการทดลองของโลหะตัวอย่างในสารละลายที่ไม่มีคลอไรด์จะมีค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนแบบรูเข็มและความกว้างช่วงพาสซีฟมากกว่าในสารละลายที่มีคลอไรด์ นอกจากนี้ตัวแปรอื่นที่มีผลต่อเส้นโนลาไรเซชัน ได้แก่ ปริมาณออกซิเจนในสารละลาย อัตราการเพิ่มค่าศักย์ไฟฟ้าหรืออัตราสแกน อุณหภูมิที่ใช้ในการทดลอง ความเข้มข้นของสารละลาย แรงเค้นในวัสดุ เป็นต้น [2,4]

## 2.4 ผลของตัวออกซิไดเซอร์ต่อการเปลี่ยนแปลงของเส้นโนลาไรเซชัน [4]

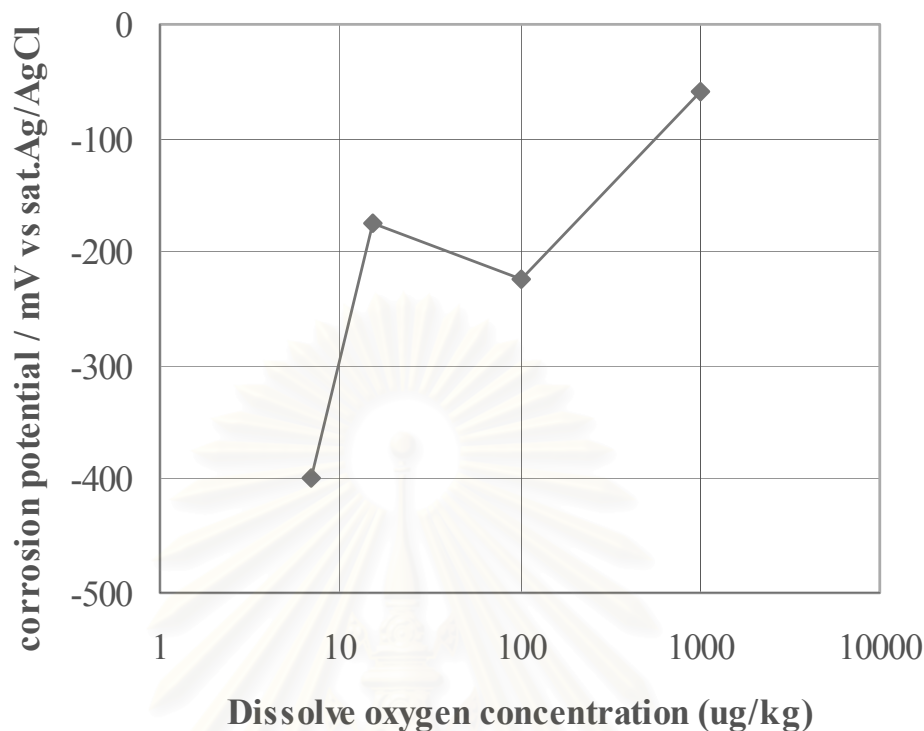
ตัวออกซิไดเซอร์ เช่น  $H^+$ ,  $Fe^{3+}$  และ  $O_2$  ที่มีแนวโน้มรวมตัวกับ  $e^-$  จากปฏิกิริยาออกซิเดชันได้ดี ถ้าปรากฏในสารละลายอิเล็กโทรไลต์จะเกิดการกัดกร่อนมากขึ้นจากการเพิ่มของศักย์ไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าในครึ่งเซลล์ของปฏิกิริยารีดักชัน ปริมาณออกซิไดเซอร์ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งของเส้นโนลาไรเซชันจากสภาพป้องกันการกัดกร่อน (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 ทำให้ตำแหน่งสมมูลหรือตำแหน่งที่ผลรวมปฏิกิริยาแอโนดิกเท่ากับปฏิกิริยาแคโทดิกเลื่อนจากจุด A ไป B ทำให้ศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนและความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อนเพิ่มขึ้น ส่งผลให้มีอัตราการกัดกร่อนมากขึ้น เมื่อความเข้มข้นของออกซิไดเซอร์เพิ่มจาก 6 ไป 7 ตำแหน่งสมมูลเลื่อนจากจุด E ไป F ทำให้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าทรานพาสซีฟสูงขึ้นหรือเกิดการกัดกร่อนเฉพาะที่รุนแรงขึ้น



รูปที่ 2.5 ผลของปริมาณออกซิไดเซชันในสารละลายกรดต่อการเปลี่ยนแปลงของเส้นโพลาริเซชัน [4]



รูปที่ 2.6 การเปลี่ยนแปลงตำแหน่งของเส้นโพลาริเซชันจากความเข้มข้นของออกซิไดเซชันจากน้อย (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 สารประกอบเหล็กออกไซด์มีความเสถียรจากการเพิ่มขึ้นของไฮดรอกไซด์ไอออน ( $OH^-$ ) ทำให้การกัดกร่อนลดลง

## 2.6 โครเมียมและนิกเกิลในพาสซีฟฟิล์ม (Chromium and Nickel in layers of passive film)

ปกติการเกิดฟิล์มพาสซีฟในโลหะจะประกอบด้วยชั้น (layer) ตามลำดับ [2] ดังนี้

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

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

S. Jin และ A. Atrens [10] ศึกษาการฟอร์มตัวของฟิล์มพาสซีฟของเหล็กกล้าไร้สนิม 18-12 (มีส่วนผสม 18%Cr และ 12%Ni) หลังผ่านการแช่ในสารละลายไฮเดียมคลอไรด์ความเข้มข้น 0.1 โมลาร์ ด้วยเครื่อง ESCA พบว่าที่ค่าศักย์ไฟฟ้าต่ำกว่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนแบบรูเข็มของเหล็กกล้าไร้สนิม 18-12 ฟิล์มพาสซีฟของเหล็กกล้าไร้สนิม 18-12 ประกอบด้วย ชั้นนอกสุดเป็นชั้นสารประกอบไฮดรอกไซด์ ชั้นถัดเข้ามาเป็นชั้นสารประกอบของเหล็ก  $\cong 16\%$  โครเมียม  $\cong 11\%$  และออกซิเจน  $\cong 70\%$  และชั้นในสุดเป็นชั้นโลหะที่มีส่วนผสมทางเคมีต่างจากเนื้อวัสดุ ในชั้นนี้ประกอบด้วยนิกเกิลเป็นส่วนใหญ่และมีปริมาณโครเมียมลดลงจากส่วนนอกไปถึงส่วนในที่ติดกับเนื้อวัสดุ เมื่อค่าศักย์ไฟฟ้าในการทดลองสูงกว่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนแบบรูเข็มของเหล็กกล้าไร้สนิม 18-12 พบว่าปริมาณโครเมียมในชั้นสารประกอบออกไซด์ไม่เปลี่ยนแปลงตามศักย์ไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้น แต่ปริมาณเหล็กลดลงเหลือ  $\cong 3\%$  และ  $\cong 2\%$  เมื่อศักย์ไฟฟ้าเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ S. Jin และ A. Atrens [11] ได้ศึกษาและรวบรวมข้อมูลการสร้างฟิล์มพาสซีฟของเหล็กกล้าไร้สนิมหลังการแช่ในสารละลายต่างๆ ด้วยเครื่อง ESCA ตัวอย่างฟิล์มพาสซีฟดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 การทดสอบส่วนประกอบของฟิล์มพาสซีฟหลังการแช่ในสารละลาย ต่างๆ ด้วย  
เครื่อง ESCA [11]

สารละลาย	องค์ประกอบของฟิล์มพาสซีฟ	ชนิดของเหล็กกล้าไร้สนิม
3%NaCl	ชั้นออกไซด์ที่ก่อตัวด้วยเหล็กและโครเมียม	Fe-(5.9-30)Cr
3.5%NaCl	ชั้นออกไซด์ที่ก่อตัวด้วยเหล็กและโครเมียม ชั้นโลหะ-ออกไซด์มีปริมาณโครเมียมต่ำ	Fe-26Cr
H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	ชั้นออกไซด์ที่มีองค์ประกอบเป็น(Fe,Cr) <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe-26Cr

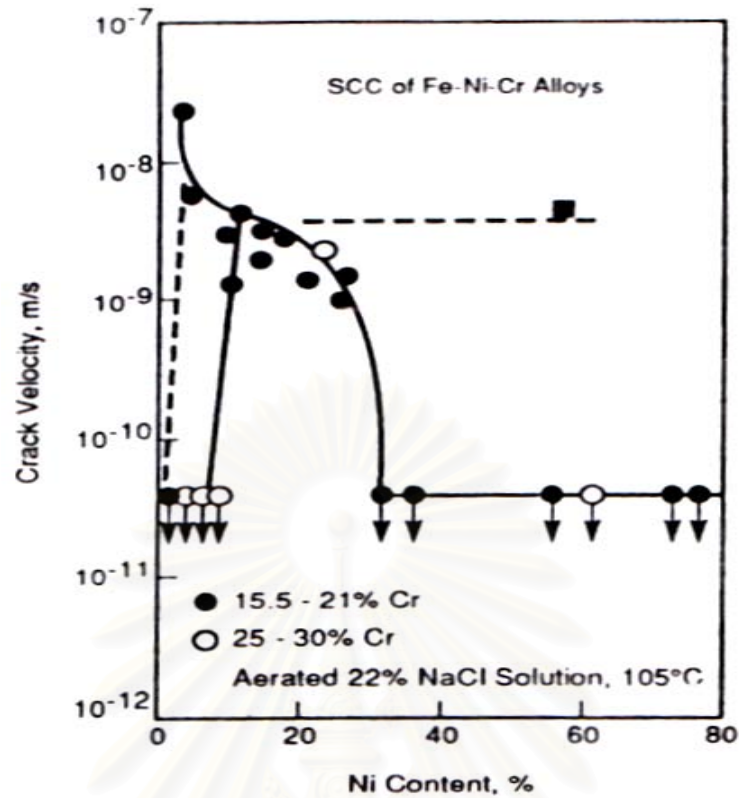
## 2.7 ผลของนิกเกิดต่อพฤติกรรมการกัดกร่อนแบบมีแรงเค้น (stress corrosion cracking) ในสารละลายกลุ่มคลอไรด์ [12]

นิกเกิดในเหล็กกล้าไร้สนิมเป็นตัวสร้างเสถียรภาพให้กับเฟสออสเทนไนท์ (austenite stabilizer) ซึ่งมีความแกร่ง (toughness) ที่อุณหภูมิสูงและอุณหภูมิต่ำกว่าศูนย์องศาเซลเซียส ส่งผลให้การกัดกร่อนแบบมีแรงเค้นมีความรุนแรงลดลง

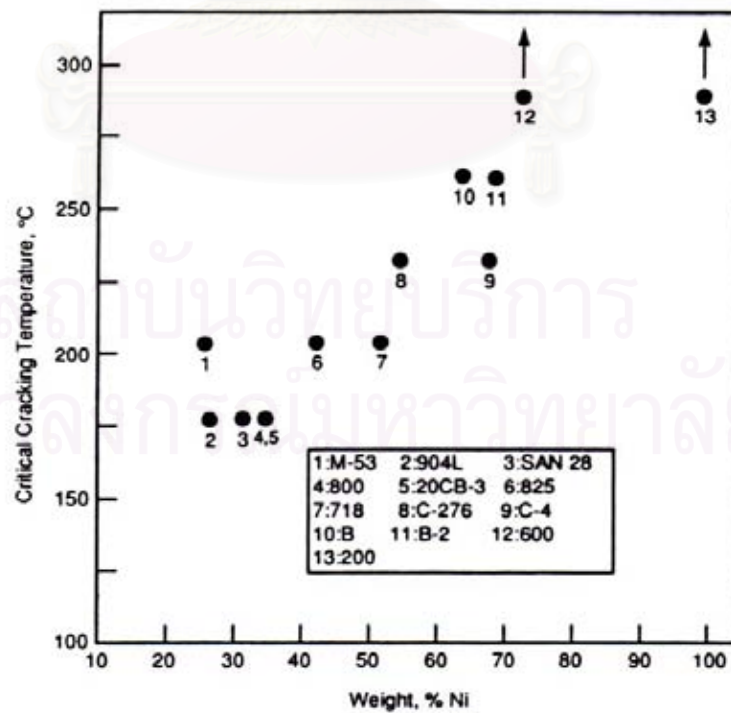
ผลของนิกเกิดต่อพฤติกรรมการกัดกร่อนแบบมีแรงเค้นได้ศึกษาในด้านของความเร็วรอยแตก (crack velocity) [13] โดยทดลองเหล็กโครเมียมนิกเกิดในสารละลายไฮเดียมคลอไรด์ ความเข้มข้น 22 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักในสภาวะอิ่มตัวด้วยอากาศ ที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส พบว่าเมื่อปริมาณนิกเกิดเพิ่มจาก 2 ถึง 76 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ความเร็วในการเคลื่อนที่ของรอยแตกลดลงแล้วคงที่เมื่อปริมาณนิกเกิดมากกว่า 35 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ดังแสดงในรูปที่ 2.8

การศึกษาผลของนิกเกิดต่ออุณหภูมิวิกฤตของการเกิดรอยแตก (critical cracking temperature) [14] โดยทดลองกลุ่มโลหะผสมนิกเกิดและเหล็กในสารละลายแมกนีเซียมคลอไรด์ ความเข้มข้น 20.4 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักในสภาวะไม่มีอากาศ อุณหภูมิวิกฤตการเกิดรอยแตกสูงขึ้นตามปริมาณนิกเกิดที่เพิ่มจาก 25 ถึง 100 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ดังแสดงในรูปที่ 2.9

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 2.8 ผลของนิกเกิลต่ออัตราการเคลื่อนที่ของรอยแตกของเหล็กผสมโครเมียมและนิกเกิลในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ร้อนในสภาวะอิ่มตัวด้วยอากาศ [13]

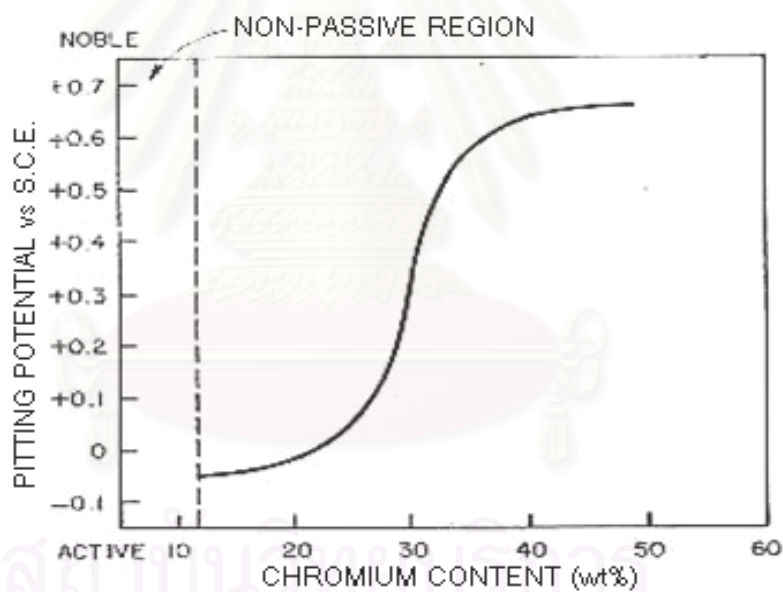


รูปที่ 2.9 ผลของนิกเกิลต่ออุณหภูมิวิกฤตของการเกิดรอยแตกของกลุ่มโลหะผสมนิกเกิลและเหล็กในสารละลายแมกนีเซียมคลอไรด์ 20.4 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักที่ไม่มีอากาศ [14]

## 2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

คุณสมบัติต้านทานการกัดกร่อนของเหล็กกล้าไร้สนิมปกติเกิดจากการสร้างสารประกอบออกไซด์ที่ผิวหรือพาสซีฟฟิล์ม (passive film) วัสดุผสมมีผลต่อองค์ประกอบและคุณสมบัติของสารประกอบออกไซด์หรือฟิล์มพาสซีฟ คุณสมบัติต้านทานการกัดกร่อนของเหล็กกล้าไร้สนิมจะเปลี่ยนแปลงตามสภาพแวดล้อม เช่น ความเป็นกรดต่าง สารละลาย อุณหภูมิ [2-4] ด้วยเหตุผลดังกล่าวจึงมีการศึกษาผลของวัสดุผสมหลักที่สำคัญ เช่น ผลของโครเมียมและนิกเกิลในเหล็กกล้าไร้สนิมต่อพฤติกรรมกัดกร่อนในสิ่งแวดล้อมจำเพาะที่แตกต่างกัน ผลการศึกษาที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยนี้มีดังนี้

J. Horvath และ H. H. Uhlig [15] เสนอผลของโครเมียมต่อศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนแบบรูเข็มของเหล็กโครเมียมในสารละลายไฮเดียมคลอไรด์ 0.75 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก พบว่าเมื่อปริมาณโครเมียมสูงขึ้นจะส่งผลให้ศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนแบบรูเข็ม (pitting potential) มีค่าเพิ่มขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 ผลของโครเมียมต่อศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนแบบรูเข็มที่ผสมในเหล็กโครเมียมในสารละลายไฮเดียมคลอไรด์ 0.75 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักในสภาวะไม่มีอากาศ [15]

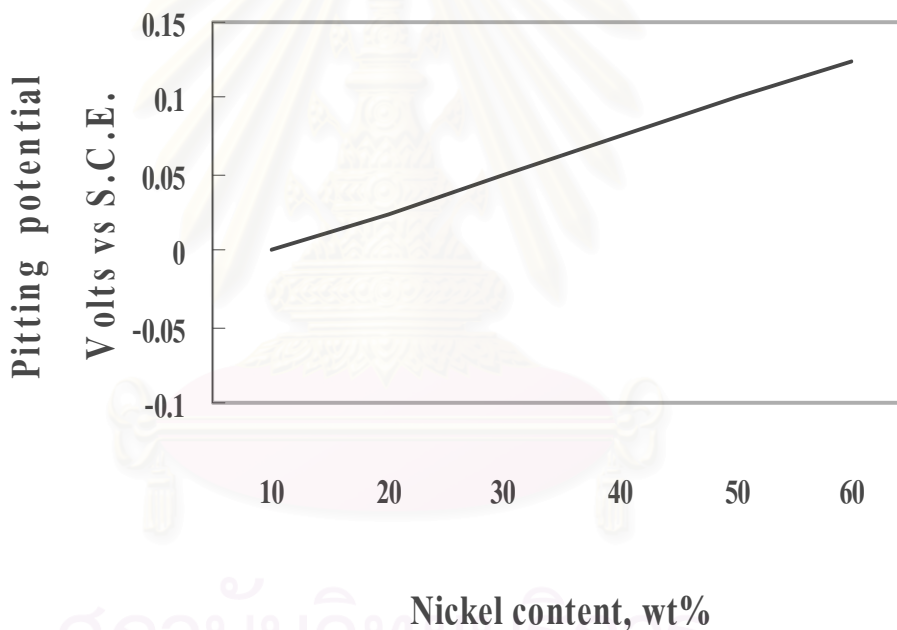
นอกจากโครเมียมที่เพิ่มความต้านทานการกัดกร่อนแบบรูเข็ม โมลิบดีนัมและไนโตรเจนก็มีส่วนเพิ่มความต้านทานการกัดกร่อนแบบรูเข็ม ดัชนีที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณโครเมียม โมลิบดีนัม และไนโตรเจน กับคุณสมบัติต้านทานการกัดกร่อนแบบรูเข็มคือ Pitting Resistance Equivalent Number (PREN) [3] ดังแสดงในสมการที่ 2.10



$$\text{PREN} = \%Cr + 3.3\%Mo + 16\%N \quad (2.10)$$

อย่างไรก็ตาม PREN เป็นแค่ดัชนีชี้วัดเบื้องต้นในการแสดงแนวโน้มของความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณโครเมียม โมลิบดีนัม และไนโตรเจน กับความต้านทานการกัดกร่อนแบบรูเข็ม เพราะ PREN ไม่ได้คำนึงถึงปัจจัยอื่นในการเกิดการกัดกร่อนแบบรูเข็ม เช่น อุณหภูมิวิกฤตในการเกิดการกัดกร่อนแบบรูเข็ม ความเป็นกรดต่างของสารละลาย และความเค็มสะสม [4, 6]

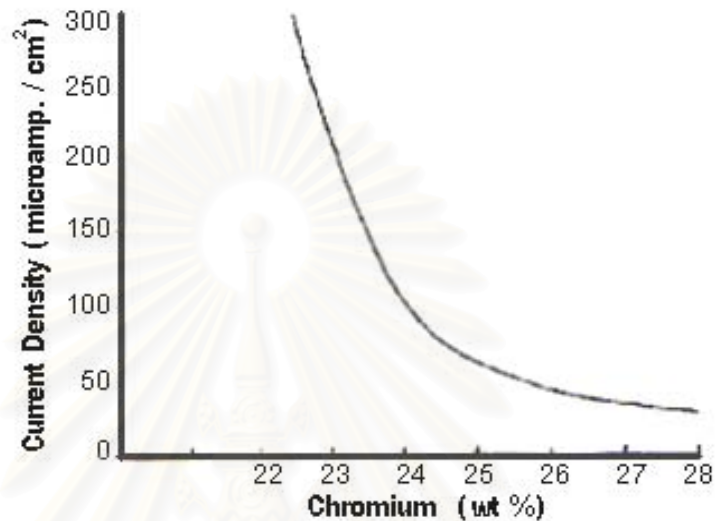
J. Horvath และ H. H.Uhlig [15] เสนอผลของนิกเกิลต่อศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนแบบรูเข็มของเหล็กผสมโครเมียม 15 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 0.75 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก พบว่าปริมาณนิกเกิลที่สูงขึ้นส่งผลให้ศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนแบบรูเข็มมีค่าเพิ่มขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 2.11



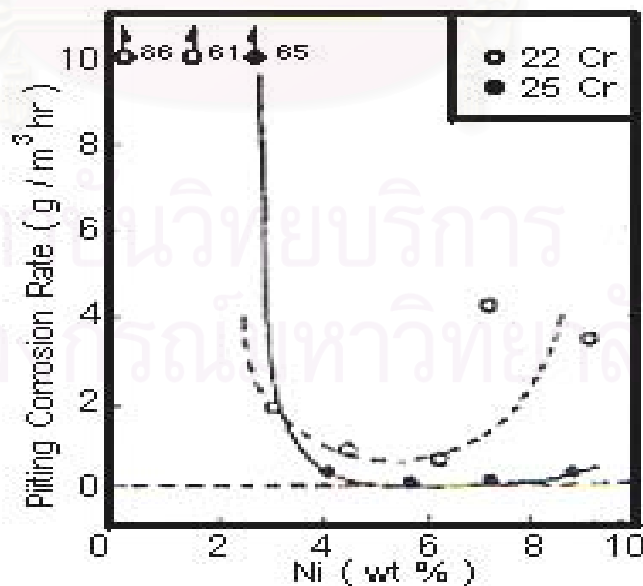
รูปที่ 2.11 ผลของนิกเกิลต่อศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนแบบรูเข็มที่ผสมในเหล็กโครเมียม 15 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 0.75 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักในสภาวะไม่มีอากาศ [15]

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

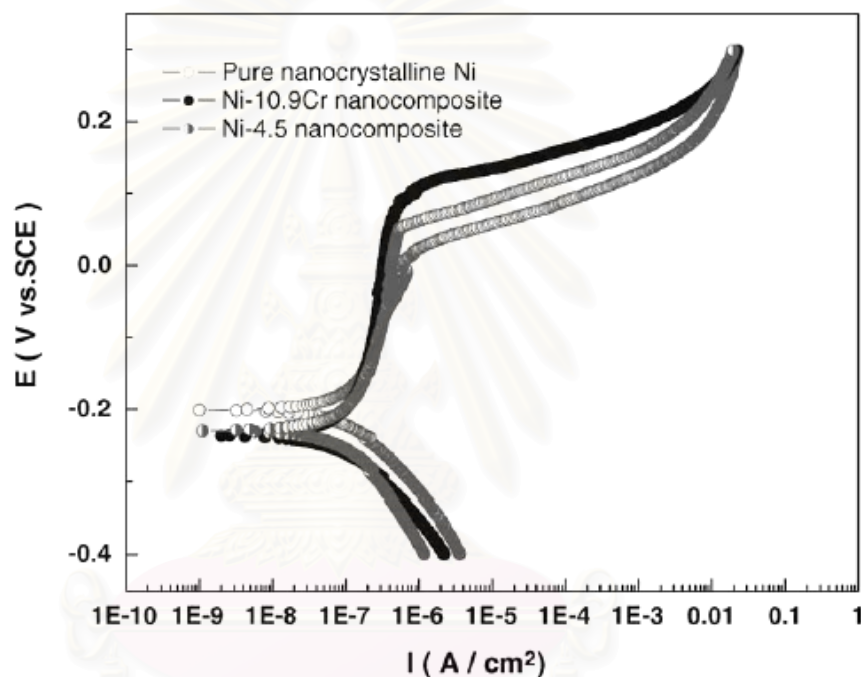


รูปที่ 2.12 ผลของโครเมียมต่อความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อนของเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้น 3 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส [16]



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

X. Peng, Y. Zang, J. Zhao และ F. Wang [17] ศึกษาเส้นโพลาริเซชันของฟิล์มที่เกิดจากอนุภาคระดับนาโนเมตรของนิกเกิล (pure Ni) และนิกเกิล-โครเมียมที่เคลือบด้วยไฟฟ้าบนโลหะพื้นนิกเกิล 99.9 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักในสารละลายไฮเดียมคลอไรด์ 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

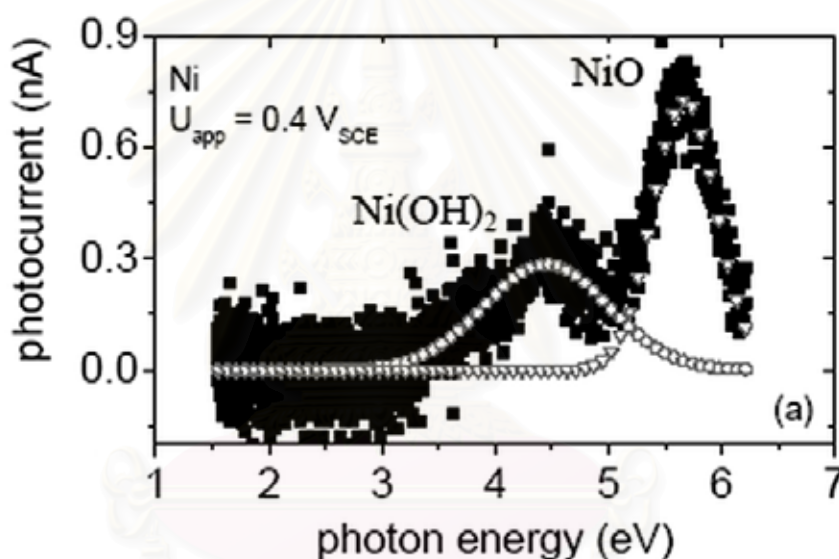


รูปที่ 2.14 ตัวอย่างเส้นโพลาริเซชันของฟิล์มจากอนุภาคระดับนาโนเมตรของนิกเกิล (pure Ni) และนิกเกิล-โครเมียม ที่เคลือบด้วยไฟฟ้าบนโลหะพื้นนิกเกิล ในสารละลายไฮเดียมคลอไรด์ 3.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก [17]

H.J. Jang, H.Y. Ha และ H.S. Kwon [18] ศึกษาการสร้างฟิล์มพาสซีฟของโลหะนิกเกิลในสารละลายบอเรตบัฟเฟอร์ที่ค่าพีเอช 8.5 ด้วยเทคนิคโฟโตไฟฟ้าเคมี (Photoelectrochemical) พบการเกิดฟิล์มพาสซีฟที่ประกอบด้วย NiO ที่อยู่ชั้นในและ Ni(OH)<sub>2</sub> ที่ชั้นนอกของฟิล์ม ดังแสดงในรูปที่ 2.15

ตารางที่ 2.3 ค่า  $E_{\text{corr}}$ ,  $I_{\text{corr}}$ ,  $E_p$ ,  $I_p$  ของฟิล์มจากอนุภาคระดับนาโนเมตรของนิกเกิล (pure Ni) และ นิกเกิล-โครเมียม (Ni-4.5Cr และ Ni-10.9Cr) ที่เคลือบด้วยไฟฟ้าบนโลหะพื้นนิกเกิล ในสารละลายไฮเดียมคลอไรด์ 3.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส [17]

ตัวอย่าง	$E_{\text{corr}}$ (mV)	$I_{\text{corr}}$ ( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ )	$E_p$ (mV)	$I_p$ ( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ )
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) ของฟิล์มพาสซีฟของโลหะผสม Fe-20Cr-15Ni ในสารละลาย บอเรตบัฟเฟอร์ [18]

จากการศึกษาผลของโครเมียมต่อพฤติกรรมการกัดกร่อนที่ผ่านมาเป็นข้อมูลที่แสดงผลของพฤติกรรมการกัดกร่อนในสารละลายไฮเดียมคลอไรด์ที่มีค่าพีเอชเป็นกลาง ไม่มีผลการเปลี่ยนแปลงค่าความเป็นกรดต่างเข้ามาเกี่ยวข้อง ส่วนผลของนิกเกิลต่อพฤติกรรมการกัดกร่อนเคมีที่ผ่านมาเป็นข้อมูลแสดงพฤติกรรมการกัดกร่อนของนิกเกิลร่วมกับโครเมียมปริมาณคงที่ 15 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก อีกทั้งไม่พบความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณนิกเกิลกับพฤติกรรมการกัดกร่อนที่ชัดเจน โดยเฉพาะในส่วนของพฤติกรรมการกัดกร่อนแบบรูเข็ม

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

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



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## 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

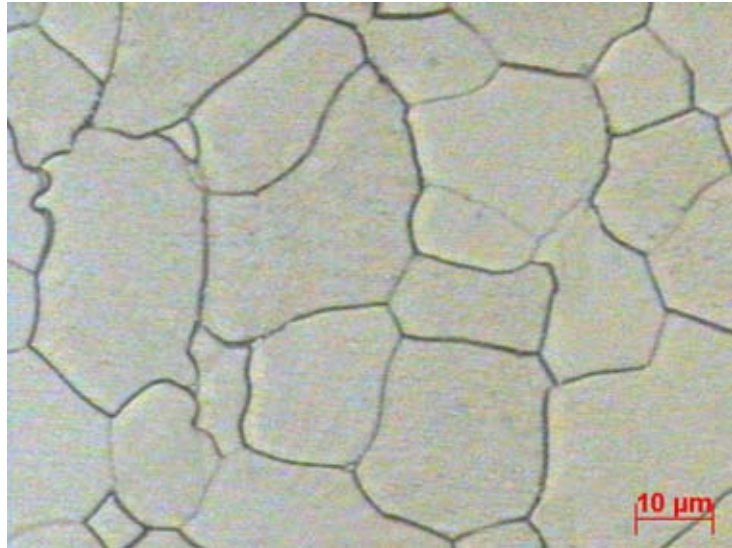
##### 3.1.1 ชิ้นงานที่ใช้ในการทดลอง

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

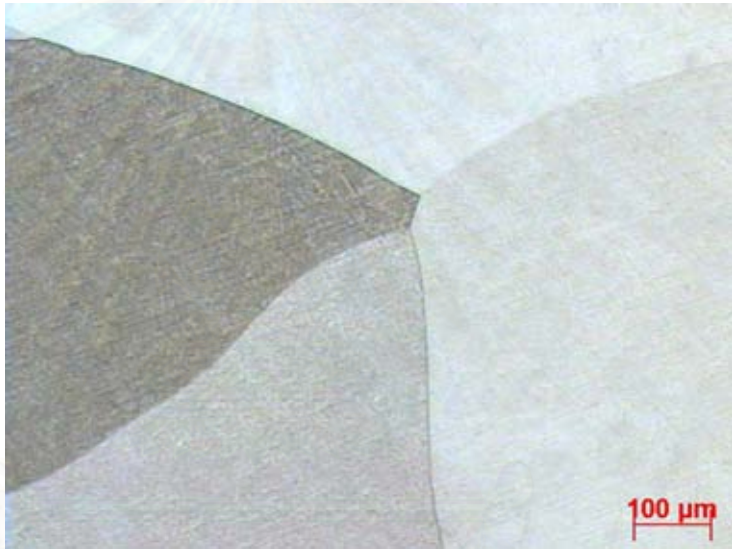
ตารางที่ 3.1 ส่วนผสมทางเคมี (เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก) ของเหล็กกล้าโครเมียม

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

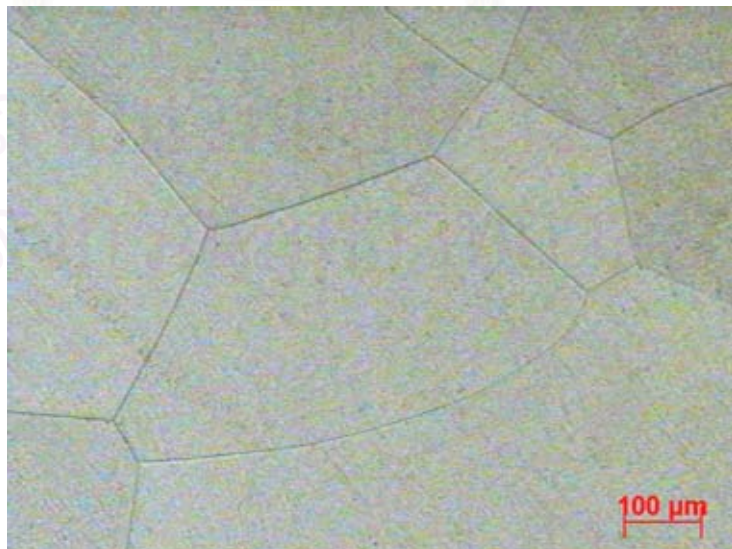
ชิ้นงานเหล็กกล้าโครเมียมผ่านการอบที่อุณหภูมิ 1325 องศาเซลเซียส 1 ชั่วโมง 15 นาที แล้วชุบน้ำจมนเย็นตัวถึงอุณหภูมิห้อง โดยมีโครงสร้างจุลภาคดังแสดงในรูปที่ 3.1



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

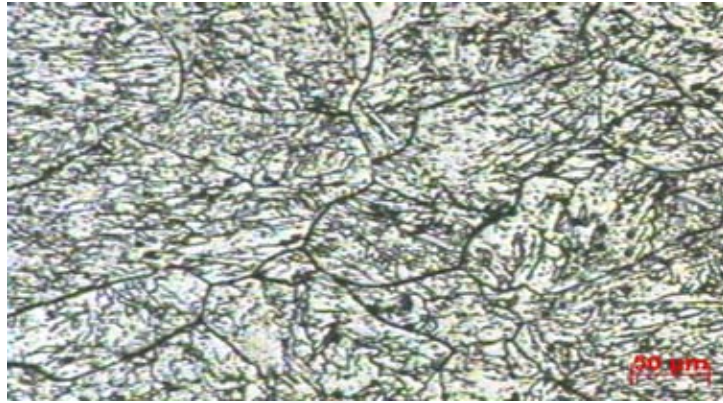
ตารางที่ 3.2 ส่วนผสมทางเคมี (เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก) ของเหล็กกล้านิกเกิล

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

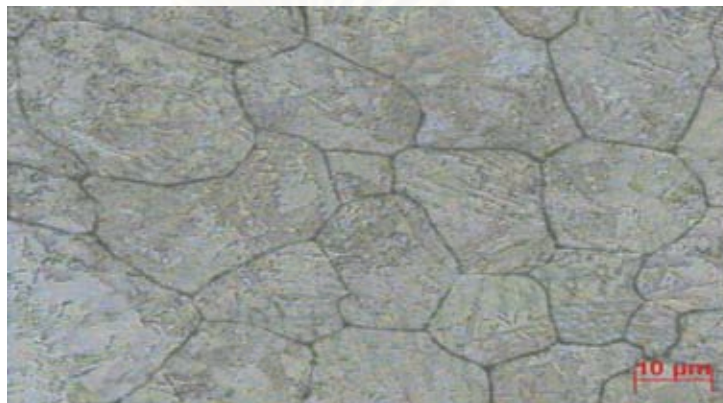
ชิ้นงานเหล็กกล้านิกเกิลผ่านการอบที่อุณหภูมิ 1225 องศาเซลเซียส 1 ชั่วโมง 20 นาที แล้วปล่อยให้เย็นตัวในเตาจนถึงอุณหภูมิห้อง โดยมีโครงสร้างจุลภาคดังแสดงในรูปที่ 3.2

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

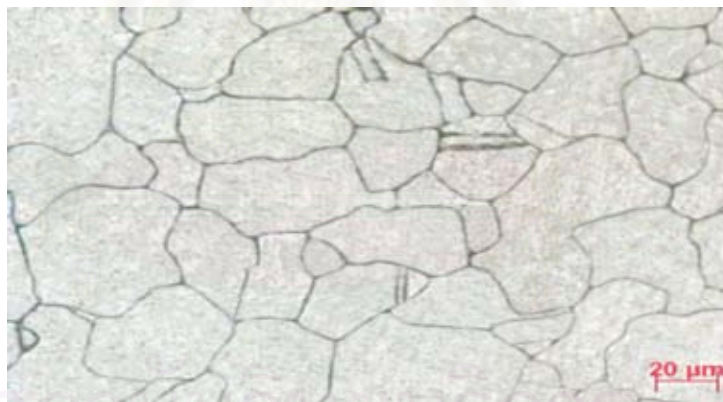




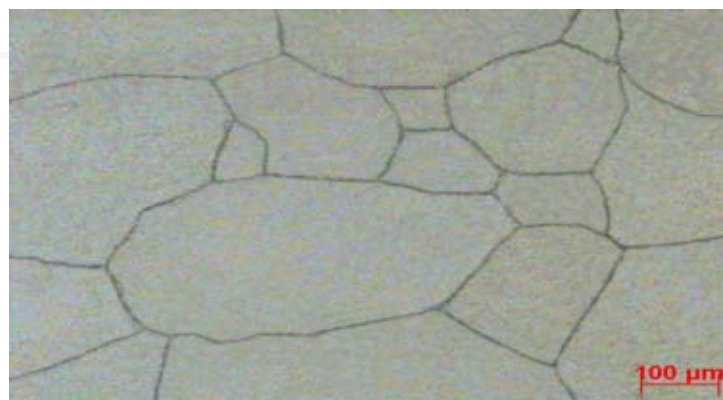
ก. Fe-15Ni



ข. Fe-23Ni



ค. Fe-31Ni



ง. Fe-40Ni

รูปที่ 3.2 โครงสร้างจุลภาคของเหล็กกล้า นิกเกิลที่เกิดจากการอบชุบความร้อน

### 3.1.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

3.1.2.1 เครื่องมือวัดเส้นโพลาริเซชัน (โพเทนชิโอสแตท รุ่น PGSTAT 20 (GPES)) ดังแสดงในรูปที่ 3.3

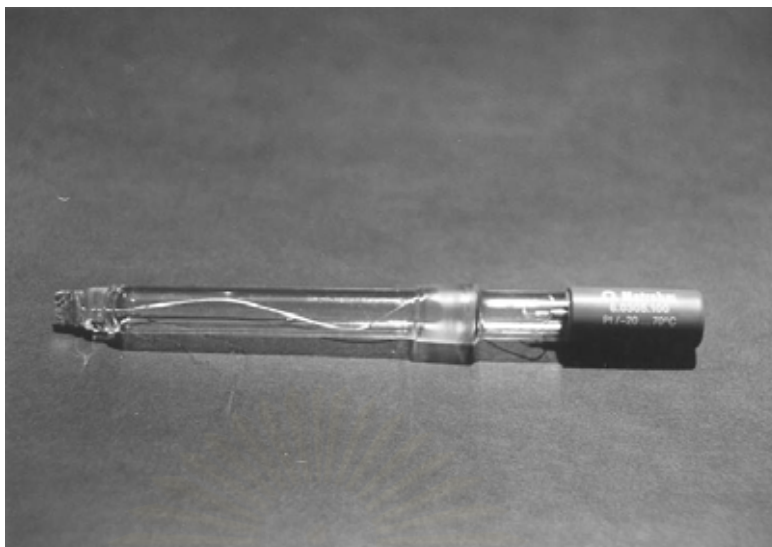


รูปที่ 3.3 เครื่องโพเทนชิโอสแตทรุ่น PGSTAT 20(GPES)

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) และเหล็กกล้า นิกเกิล (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) กระจกทราย (เบอร์ 80-1200) ผ้าสักหลาดและผงขัดเพชร (ขนาด 1 และ 3 ไมครอน)
- 2) เครื่องขัดผิวชิ้นงาน
- 3) เครื่องทำความสะอาดด้วยคลื่นอัลตราโซนิก (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. $Cu_2SO_4$  สำหรับกัดดูโครงสร้างจุลภาคของเหล็กกล้า นิกเกิล

## 3.2 ขั้นตอนการทดลอง

### 3.2.1 การตรวจสอบความต้านทานการกัดกร่อนโดยวิธีการวัดเส้นโพลาริเซชัน

3.3.1.1 นำชิ้นงานเหล็กกล้าโครเมียม (Fe-13Cr, Fe-15Cr และ Fe-18Cr) และเหล็กกล้า นิกเกิล (Fe-15Ni, Fe-23Ni, Fe-31Ni และ Fe-40Ni) ขนาด 30x10x5 มิลลิเมตร มาขัดผิวหน้าทุก ด้านด้วยกระดาษทรายเบอร์ 80 - 1200

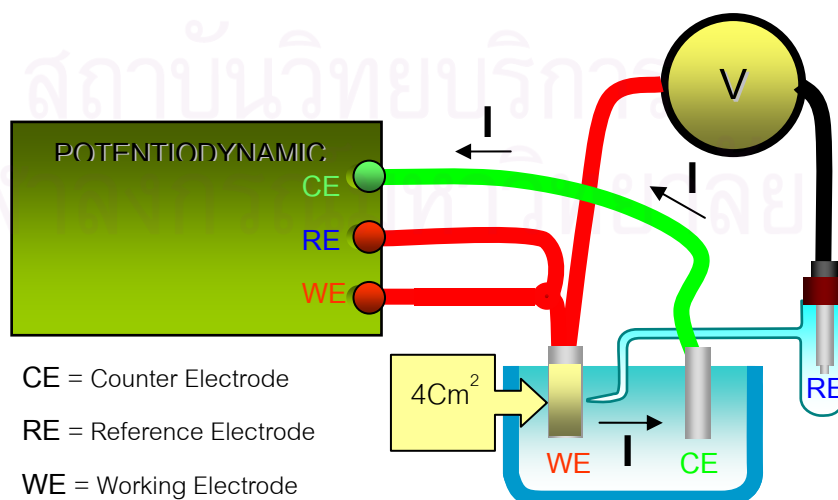
3.3.1.2 เตรียมสารละลาย A และ B ปริมาตร 300 ลูกบาศก์เซนติเมตร ที่อุณหภูมิ 25 องศา เซลเซียส ปรับค่าพีเอชสารละลายเป็น 2 (ด้วย 2-5 mol.H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>), 7 และ 10 (ด้วย 0.3-1 wt%.NaOH) ในสารละลาย A ฟ้นอากาศประมาณ 30 นาที และสารละลาย B ไล่อากาศด้วย ไนโตรเจนประมาณ 120 นาที ก่อนทำการทดลองหาเส้นโพลาริเซชัน

3.3.1.3 ทดสอบชิ้นงานด้วยเทคนิคโพเทนทิโอดินามิกในสารละลายข้อ 3.3.1.2 โดยให้ ชิ้นงานสัมผัสกับสารละลายเป็นพื้นที่ประมาณ 4 ตารางเซนติเมตร ดังรูปที่ 3.6

3.3.1.4 หาเส้นโพลาริเซชันของเหล็กกล้าโครเมียม (Fe-13Cr, Fe-15Cr และ Fe-18Cr) และเหล็กกล้า นิกเกิล (Fe-15Ni, Fe-23Ni, Fe-31Ni และ Fe-40Ni) ในสารละลายข้อ 3.3.1.2 ด้วย อัตราการสแกน 0.1 มิลลิโวลต์ต่อวินาที ทดลองซ้ำตามสภาวะเดิม 3 ครั้ง

3.3.1.5 วัดค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อน (corrosion potential,  $E_{corr}$ ) ค่าความหนาแน่น กระแสไฟฟ้าการกัดกร่อน (corrosion current density,  $I_{corr}$ ) ค่าอัตราการกัดกร่อน (corrosion rate  $R_{mpy}$ ) ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าขณะวัสดุเกิดฟิล์มที่ผิว (passive current density,  $I_p$ ) ค่าศักย์ไฟฟ้าเริ่มเกิดพาสซีฟ (primary passive potential,  $E_{pp}$ ) และค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อน แบบรูเข็ม (pitting potential,  $E_p$ ) จากเส้นโพลาริเซชัน

3.3.1.6 วิเคราะห์ความสัมพันธ์ของตัวแปรในข้อ 3.3.1.5 กับส่วนผสมโครเมียมและนิกเกิล



รูปที่ 3.6 การทดลองหาเส้นโพลาริเซชันด้วยเทคนิคโพเทนทิโอดินามิก

### 3.2.2 การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคบริเวณที่ถูกกัดกร่อน

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

3.3.2.2 ตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคที่ถูกกัดกร่อนในช่วงค่าศักย์ไฟฟ้าทรานพาสซีฟโดยกล้องจุลทรรศน์ชนิดแสง

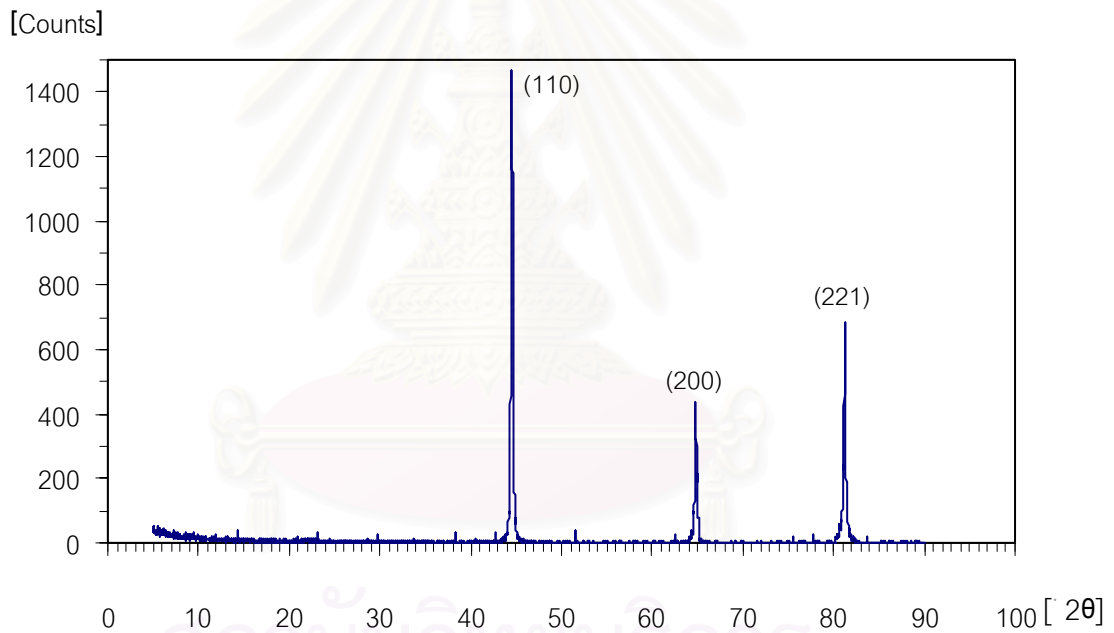


สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## บทที่ 4

### ผลการทดลองและการอภิปราย

จากการทดสอบ XRD เพื่อทราบถึงโครงสร้างผลึกของเหล็กกล้าโครเมียมที่ใช้ศึกษา พฤติกรรมการกัดกร่อน 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

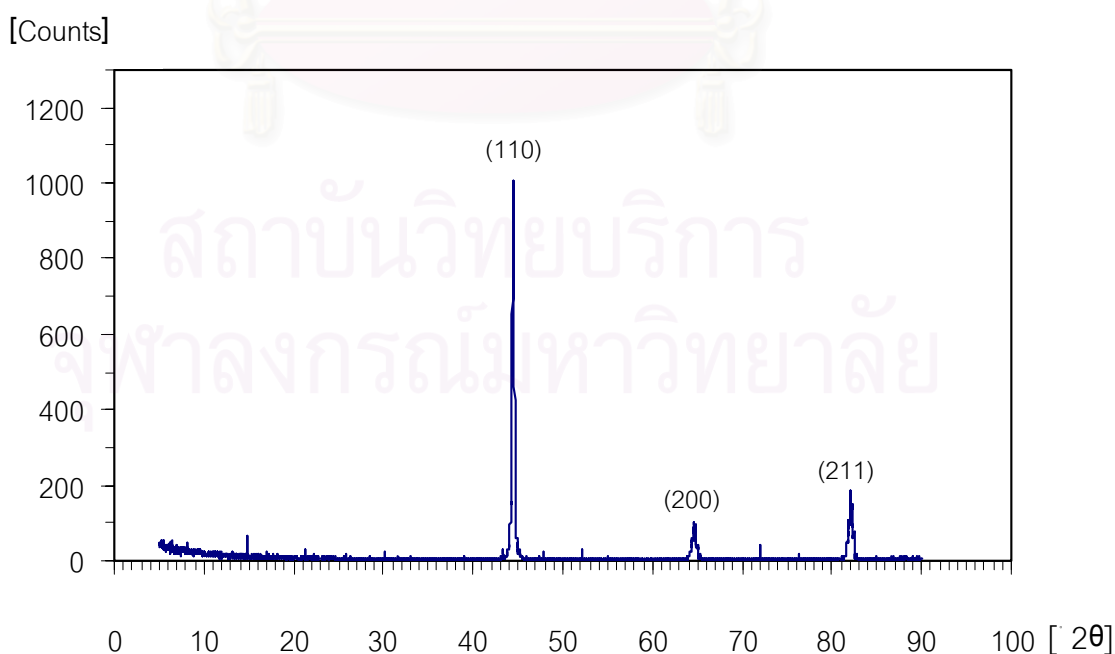
ตารางที่ 4.1 การระบุดัชนี (hkl) พีคตัวอย่างของเหล็กกล้าโครเมียม Fe-18Cr

ชั้นงาน	พีคลำดับที่	2θ	sin(θ)	$d_{hkl}$	$\sin^2(\theta)$	$\{\sin^2(\theta) \times 2\} / \text{Min. of } \sin^2(\theta)$	$h^2+k^2+l^2$	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

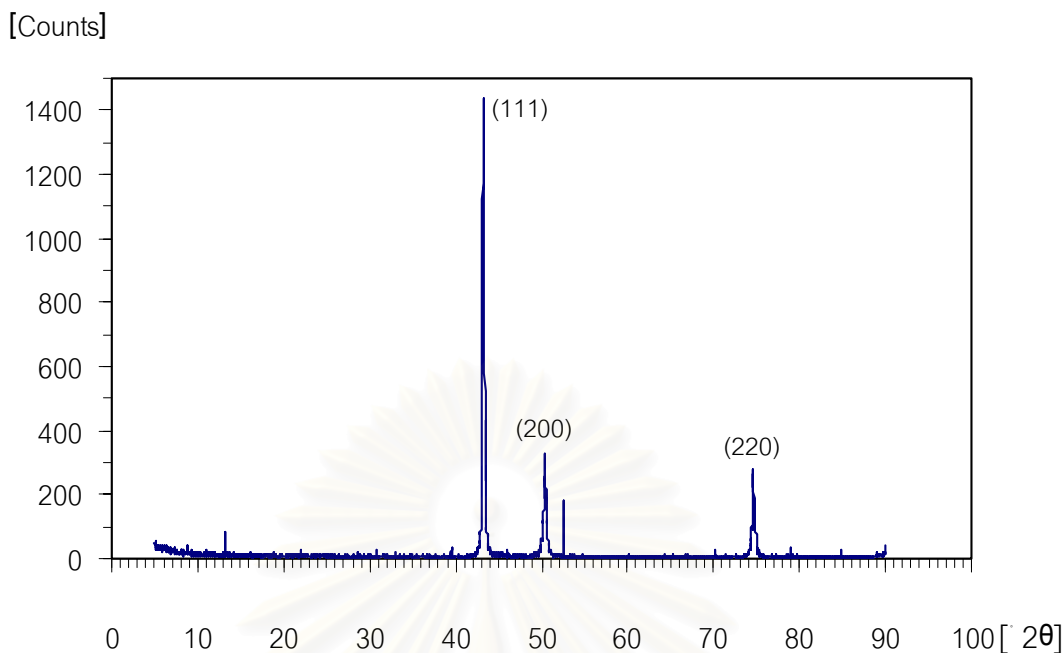
จากการเปรียบเทียบค่ามุม  $2\theta$  ระยะห่างระหว่างระนาบผลึก ( $d_{hkl}$ ) และ ระนาบผลึก hkl ที่คำนวณจากผลทดสอบ XRD ของเหล็กกล้าโครเมียม Fe-13Cr, Fe-15Cr และ Fe-18Cr กับข้อมูล XRD จาก JCPDS พบว่าใกล้เคียงกับข้อมูลของเหล็กโครเมียมและเหล็กกล้าไร้สนิม 434L ที่มีโครงสร้างผลึกแบบ body-center-cubic (bcc)

การทดสอบ XRD เพื่อทราบถึงโครงสร้างผลึกของเหล็กกล้าที่ศึกษาพฤติกรรม การกัดกร่อน ผลทดสอบ XRD ของเหล็กกล้า Fe-15Ni มีลักษณะคล้ายกับ Fe-23Ni ขณะที่เหล็กกล้า Fe-31Ni มีลักษณะคล้ายกับ Fe-40Ni แตกต่างกันที่ค่า intensity ของพีคลำดับที่ 1, 2 และ 3 ดังนั้นได้นำผลทดสอบ XRD ของเหล็กกล้า Fe-15Ni และ Fe-40Ni มาเป็น ตัวอย่างในการนำเสนอ ดังแสดงในรูปที่ 4.2-4.3 และการระบุดัชนีของพีคตัวอย่างแสดงในตาราง ที่ 4.2 (ผลทดสอบ XRD และการคำนวณเพื่อระบุดัชนีของพีคตัวอย่างของเหล็กกล้า Fe-15Ni และ Fe-40Ni ทั้งหมดแสดงในภาคผนวก ง)

จากการเปรียบเทียบค่ามุม  $2\theta$  ระยะห่างระหว่างระนาบผลึก ( $d_{hkl}$ ) และ ระนาบผลึก hkl ที่คำนวณจากผลทดสอบ XRD ของเหล็กกล้า Fe-15Ni และ Fe-23Ni กับข้อมูล XRD จาก JCPDS พบว่าใกล้เคียงกับข้อมูลของเหล็กกล้าที่มีโครงสร้างผลึกแบบ body-center-tetragonal (bct) ขณะที่ผลทดสอบ XRD ของเหล็กกล้า Fe-31Ni และ Fe-40Ni ใกล้เคียงกับข้อมูลของเหล็กกล้าไร้สนิม 304L และเหล็กกล้าที่มีโครงสร้างผลึกแบบ face-center-cubic (fcc)



รูปที่ 4.2 ผลทดสอบ XRD ของเหล็กกล้า Fe-15Ni



รูปที่ 4.3 ผลทดสอบ XRD ของเหล็กกล้าชนิด Fe-40Ni

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

ชิ้นงาน	พีคลำดับที่	2θ	sin(θ)	$d_{hkl}$	$\sin^2(\theta)$	$\{\sin^2(\theta) \times 3\} / \text{Min. of } \sin^2(\theta)$	$h^2+k^2+l^2$	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

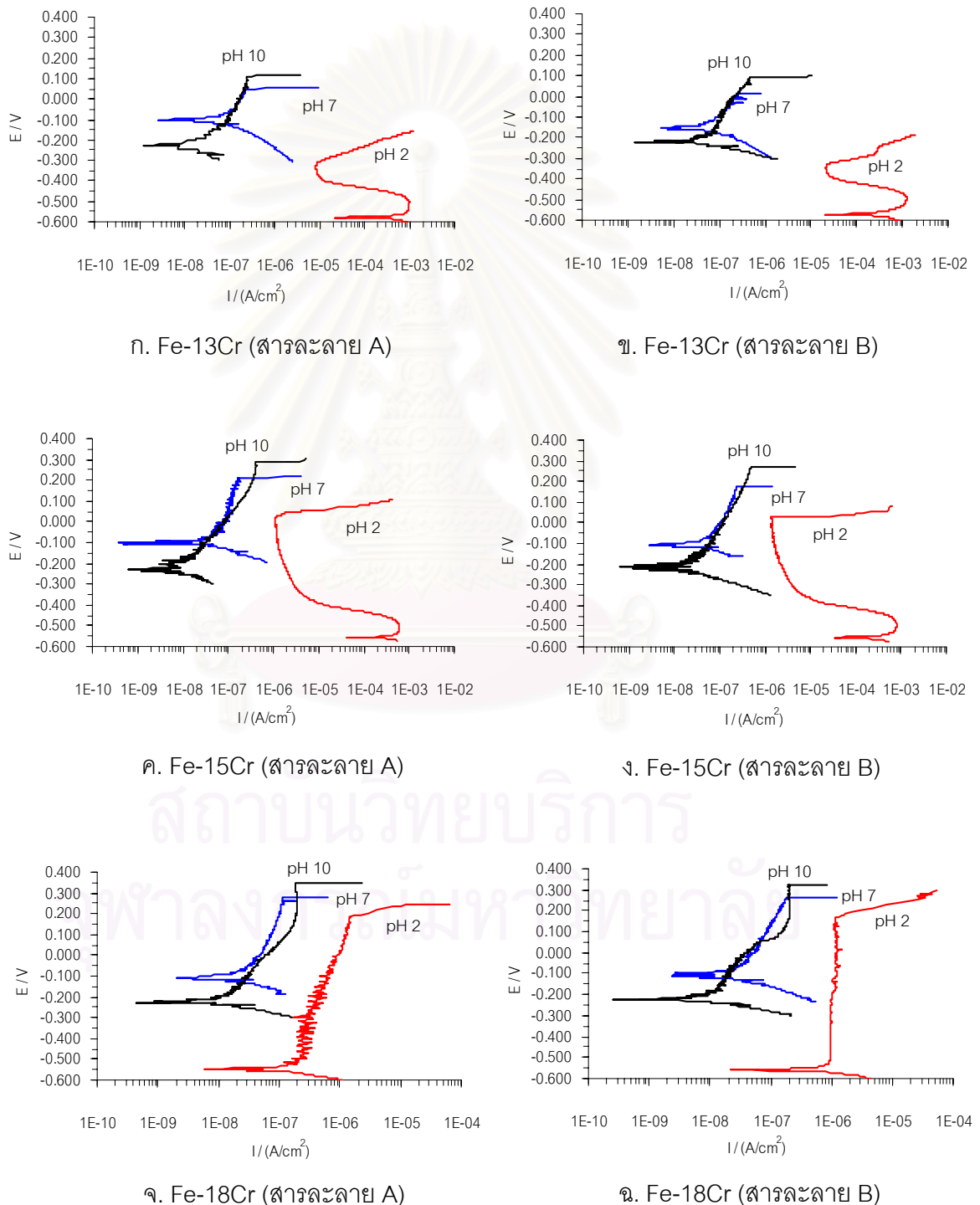
#### 4.1 ผลการวัดเส้นโพลาริเซชันของเหล็กกล้าโครเมียมและเหล็กกล้าชนิด

ผลการทดสอบเส้นโพลาริเซชันในเหล็กกล้าผสมโครเมียม 13, 15, 18 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ในสารละลาย A และ B แสดงด้วยตัวอย่างเส้นโพลาริเซชันดังรูปที่ 4.4 ผลการทดสอบเส้นโพลาริเซชันในเหล็กกล้าผสมนิกเกิล 15, 23, 31, 40 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักในสารละลาย A และ B แสดงด้วยตัวอย่างเส้นโพลาริเซชัน ดังรูปที่ 4.5

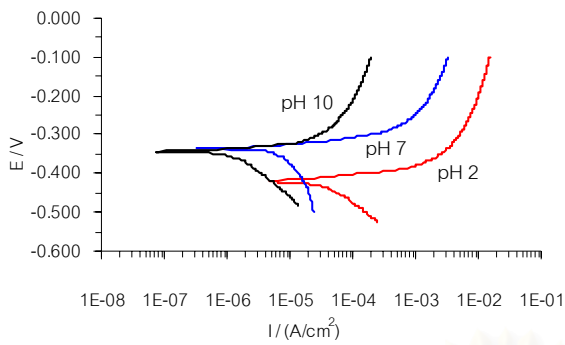
จากเส้นโพลาริเซชันของเหล็กกล้าโครเมียมและเหล็กกล้าชนิด (เส้นโพลาริเซชันที่วัดได้จากการทดลอง แสดงในภาคผนวก ก) นำมาหาค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อน (corrosion



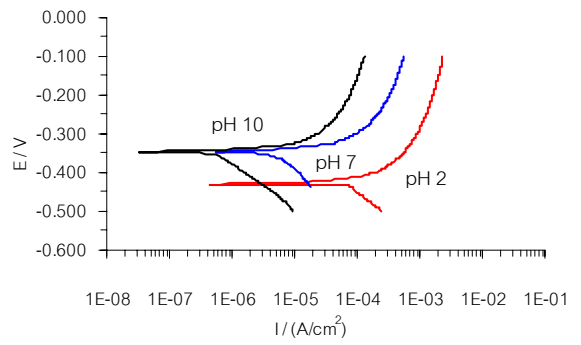
potential,  $E_{\text{corr}}$ ) ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อน (corrosion current density,  $I_{\text{corr}}$ ) ค่าอัตราการกัดกร่อน (corrosion rate,  $R_{\text{mp}}$ ) ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าขณะวัสดุเกิดฟิล์มที่ผิว (passive current density,  $I_p$ ) ค่าศักย์ไฟฟ้าเริ่มเกิดพาสซีฟ (primary passive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



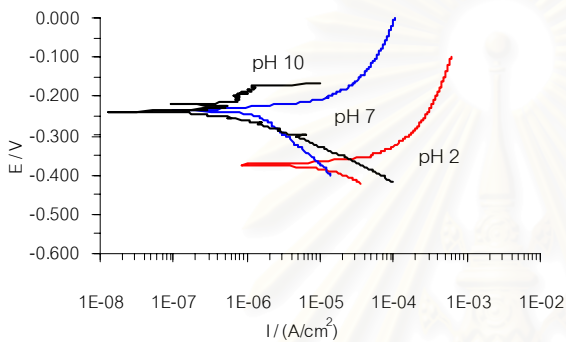
รูปที่ 4.4 ตัวอย่างเส้นโพลาริเซชันของเหล็กกล้าโครเมียม



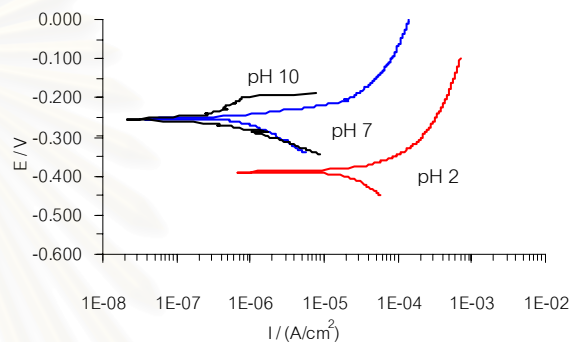
ก. Fe-15Ni (สารละลาย A)



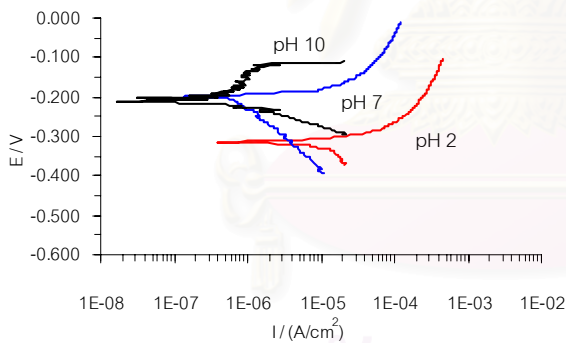
ข. Fe-15Ni (สารละลาย B)



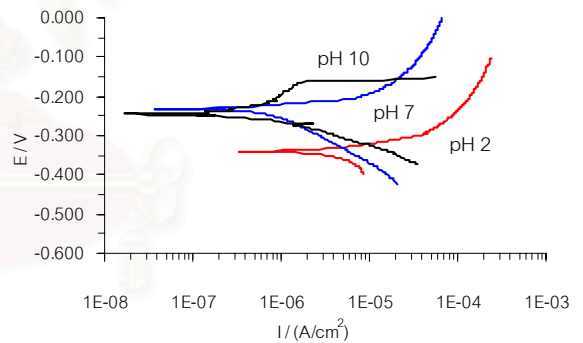
ค. Fe-23Ni (สารละลาย A)



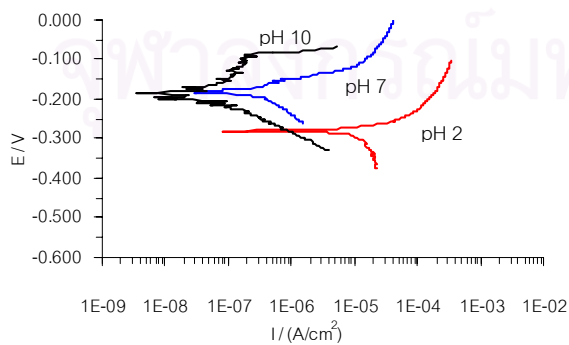
ง. Fe-23Ni (สารละลาย B)



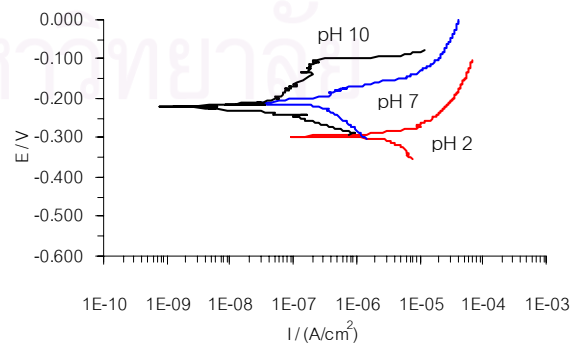
จ. Fe-31Ni (สารละลาย A)



ฉ. Fe-31Ni (สารละลาย B)



ช. Fe-40Ni (สารละลาย A)



ซ. Fe-40Ni (สารละลาย B)

รูปที่ 4.5 ตัวอย่างเส้นโพลาริเซชันของเหล็กกล้าชนิดเกิด

ตารางที่ 4.3 ค่าที่วัดได้จากเส้นโพลาริเซชันของเหล็กกล้าโครเมียมและเหล็กกล้านิกเกิลในสารละลาย 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)

$E_{pp}$  ค่าศักย์ไฟฟ้าเริ่มเกิดพาสซีฟ (มิลลิโวลต์)

$E_p$  ค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนแบบรูเข็ม (มิลลิโวลต์)

$R_{umpy}$  ค่าอัตราการกัดกร่อน (ไมโครเมตรต่อปี)

ตารางที่ 4.4 ค่าที่วัดได้จากเส้นโพลาริเซชันของเหล็กกล้าโครเมียมและเหล็กกล้านิกเกิลในสารละลาย 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)

$E_{pp}$  ค่าศักย์ไฟฟ้าเริ่มเกิดพาสซีฟ (มิลลิโวลต์)

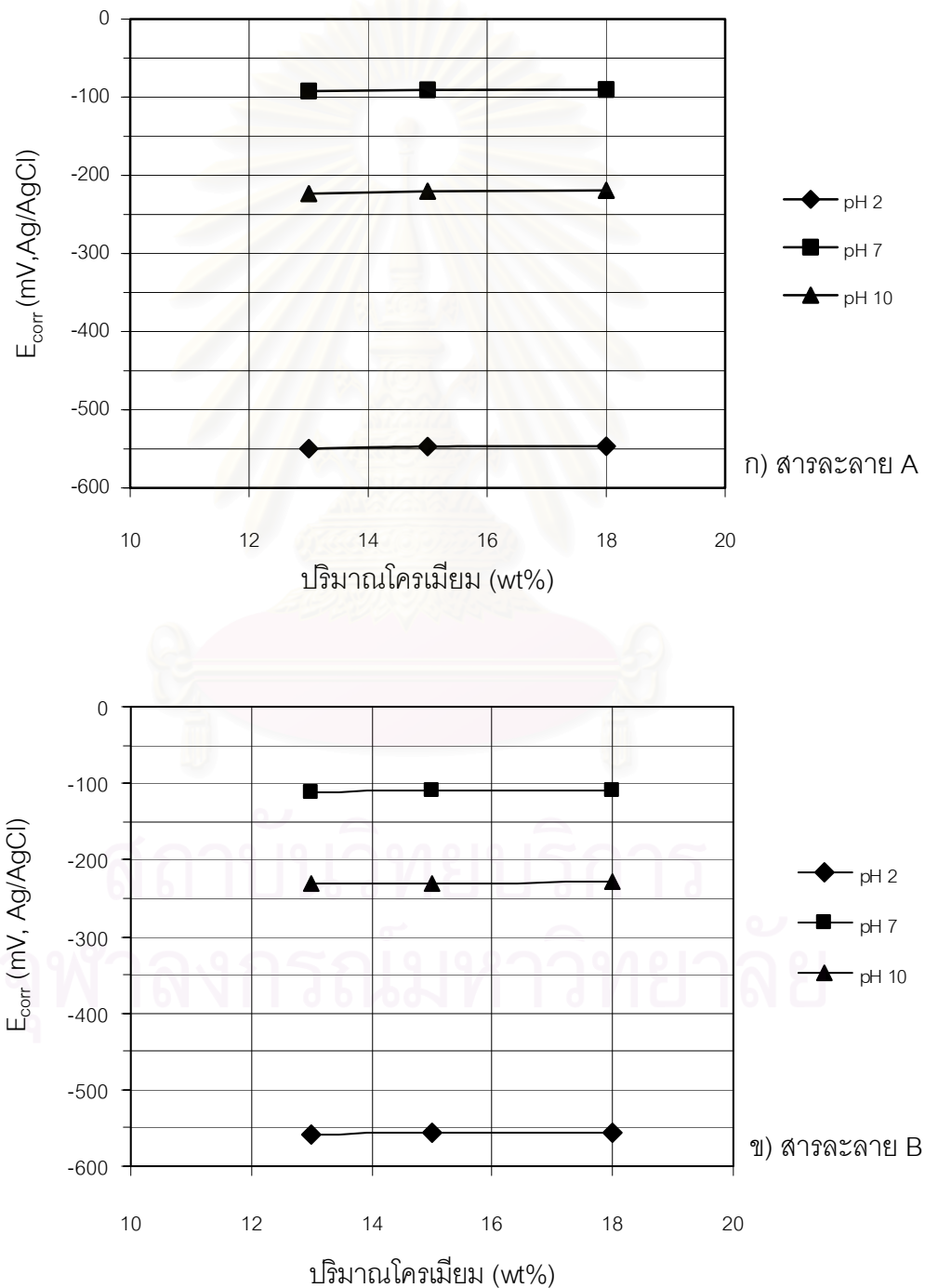
$E_p$  ค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนแบบรูเข็มหรือหลุม (มิลลิโวลต์)

$R_{umpy}$  ค่าอัตราการกัดกร่อน (ไมโครเมตรต่อปี)

จากค่าที่แสดงพฤติกรรมการกัดกร่อนในตารางที่ 4.3 และ 4.4 สามารถนำมาสร้างกราฟแสดงความสัมพันธ์กับปริมาณโครเมียมในเหล็กกล้าโครเมียมและปริมาณนิกเกิลในเหล็กกล้าในสารละลาย A และ B ดังแสดงในหัวข้อต่อไป

## 4.2 ผลของโครเมียมในเหล็กกล้าโครเมียมต่อพฤติกรรมการกัดกร่อน

### 4.2.1 ศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อน ( $E_{corr}$ )



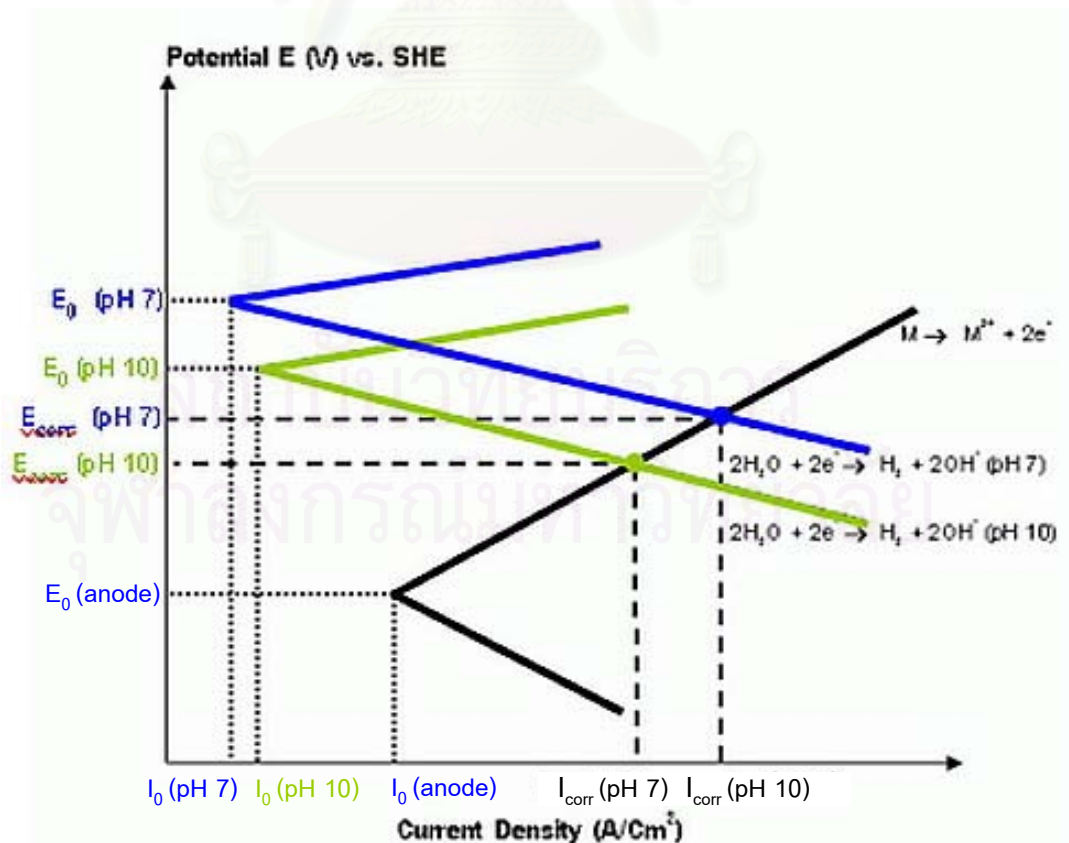
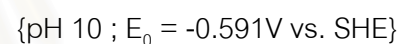
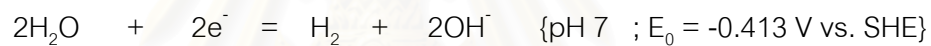
รูปที่ 4.6 ผลของโครเมียมต่อศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนของเหล็กกล้าโครเมียม

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



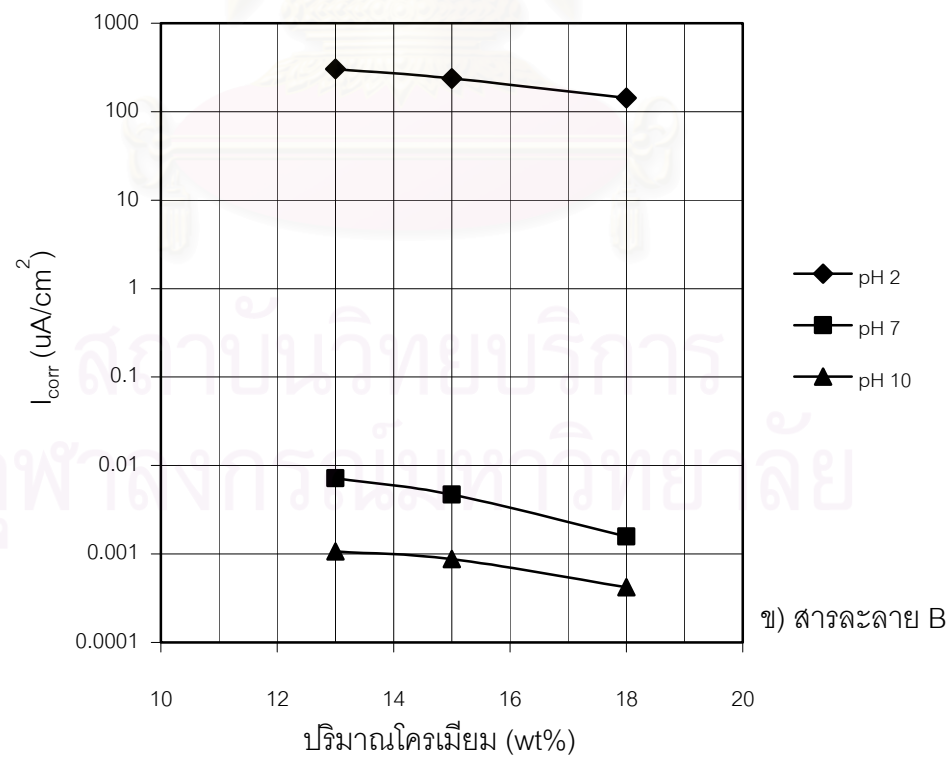
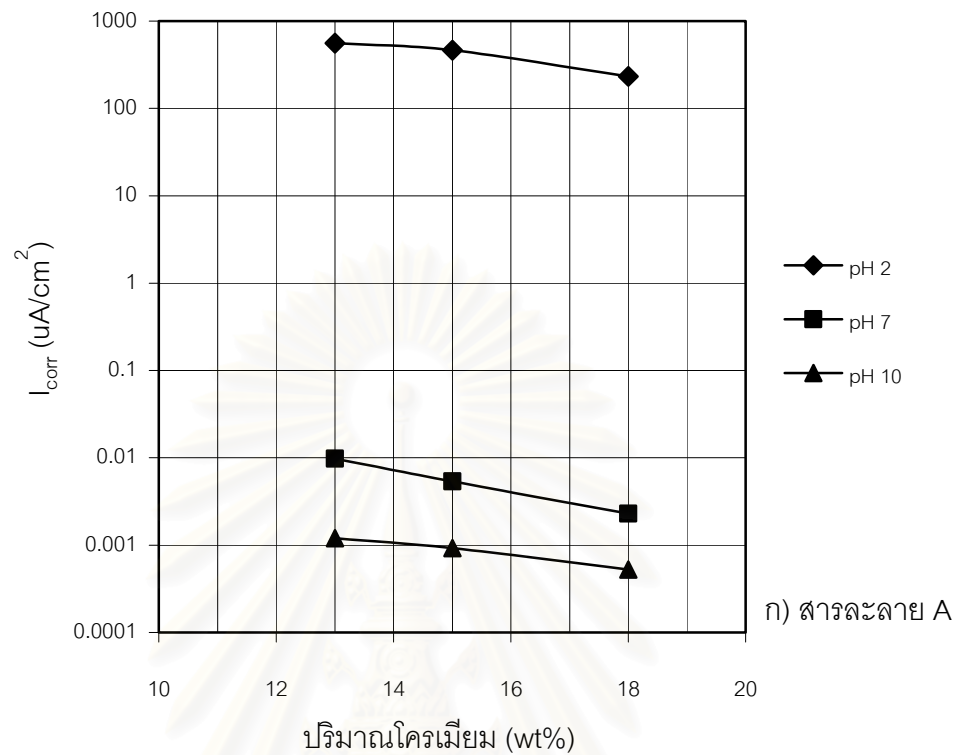
กรณีค่าพีเอช 10 มีค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนน้อยกว่าที่ค่าพีเอช 7 อธิบายได้จากศักย์ไฟฟ้ารีดักชัน ( $E_0$ ) ของน้ำซึ่งเป็นปฏิกิริยาแคโทดิกหลักที่ค่าพีเอช 10 มีแนวโน้มต่ำกว่าศักย์ไฟฟ้ารีดักชันของน้ำที่ค่าพีเอช 7 [7] ดังแสดงในสมการที่ (4.2) [7] และรูปที่ 4.7

$$E_0 = E_{\text{H}^+/\text{H}_2}^0 - 0.059\text{pH} \quad \{E_{\text{H}^+/\text{H}_2}^0 = 0.000 \text{ V}\} \quad (4.2)$$



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 เนื่องจากเสถียรภาพของไอออนโลหะในสารละลายกรดต่างจากในสารละลายต่าง

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

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



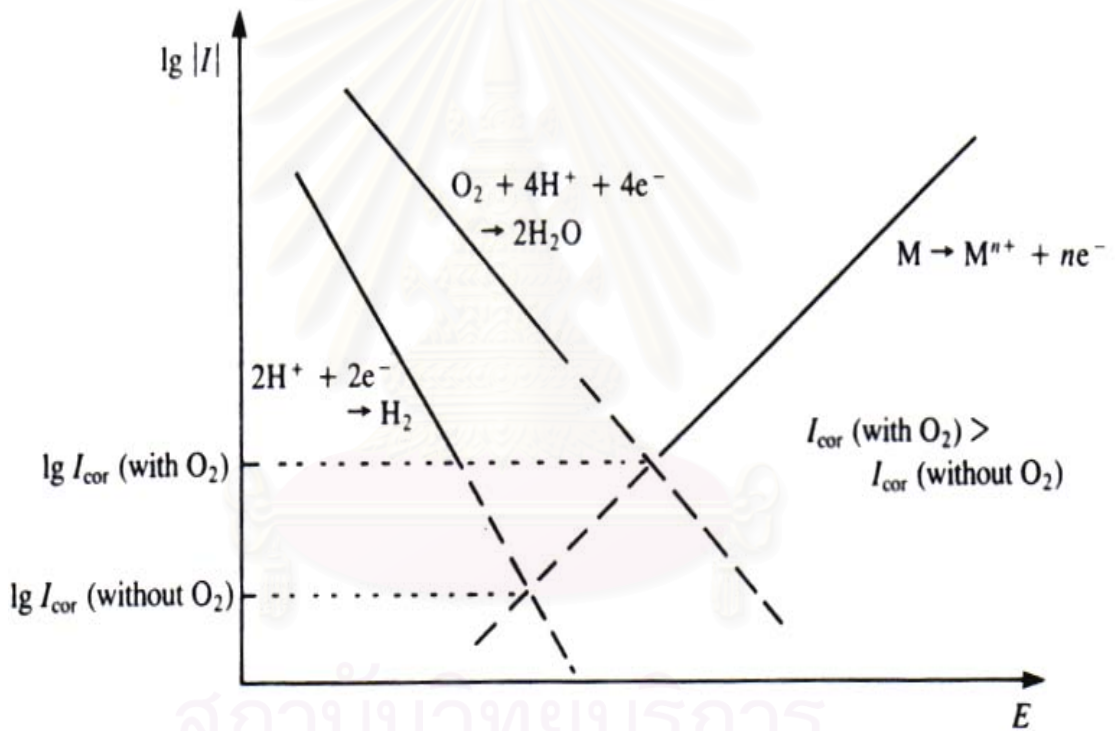
จากค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อนสามารถนำไปคำนวณหาค่าอัตราการกัดกร่อนได้ตามสมการ (4.6) [7]

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



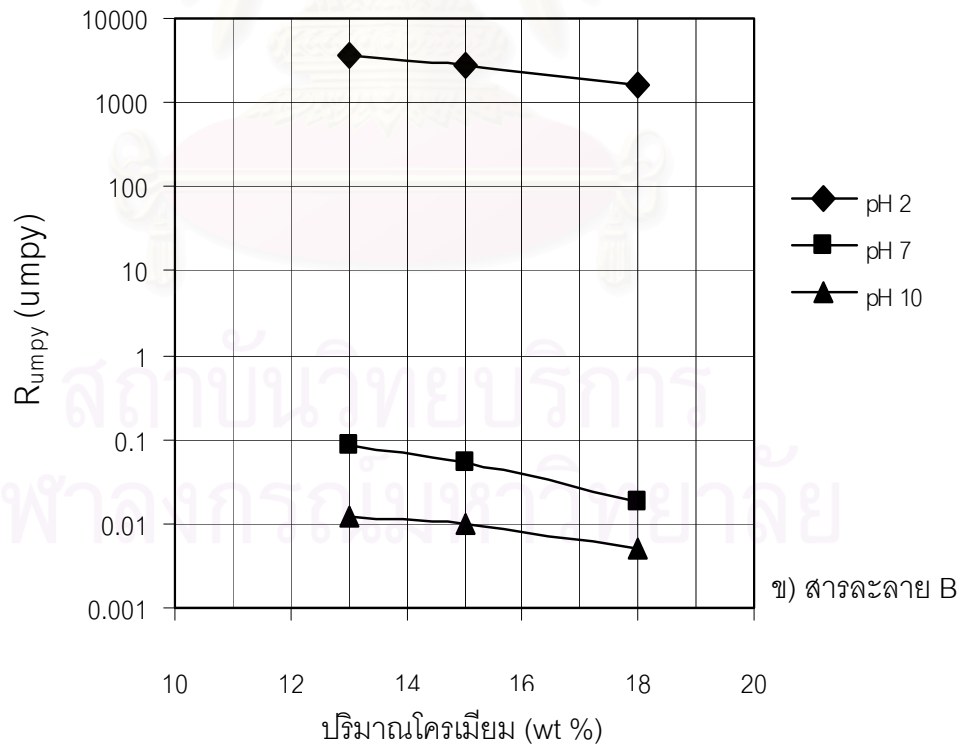
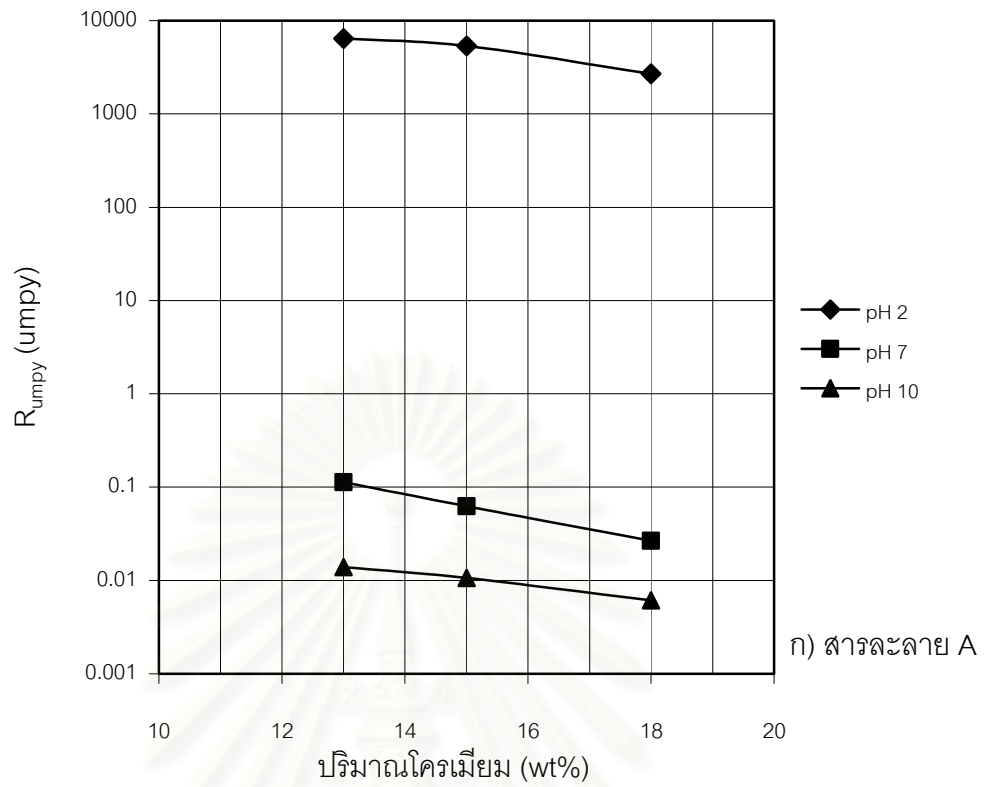
เมื่อ	$R_{\text{umpy}}$	คือ	อัตราการเกิดการกัดกร่อน (ไมโครเมตรต่อปี)
		$I_{\text{corr}}$	คือ ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อน (ไมโครแอมป์ต่อตารางเซนติเมตร)
		$e$	คือ น้ำหนักกรัมสมมูลของโลหะ
		$\rho$	คือ ความหนาแน่นของโลหะ

ได้ผลดังรูปที่ 4.10



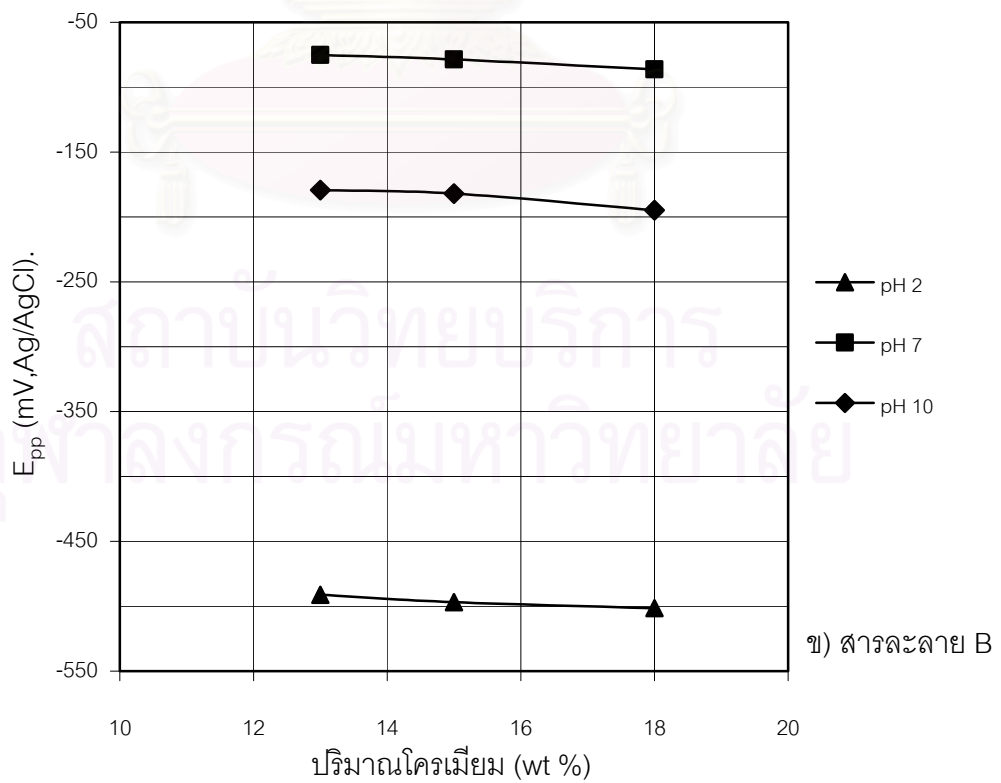
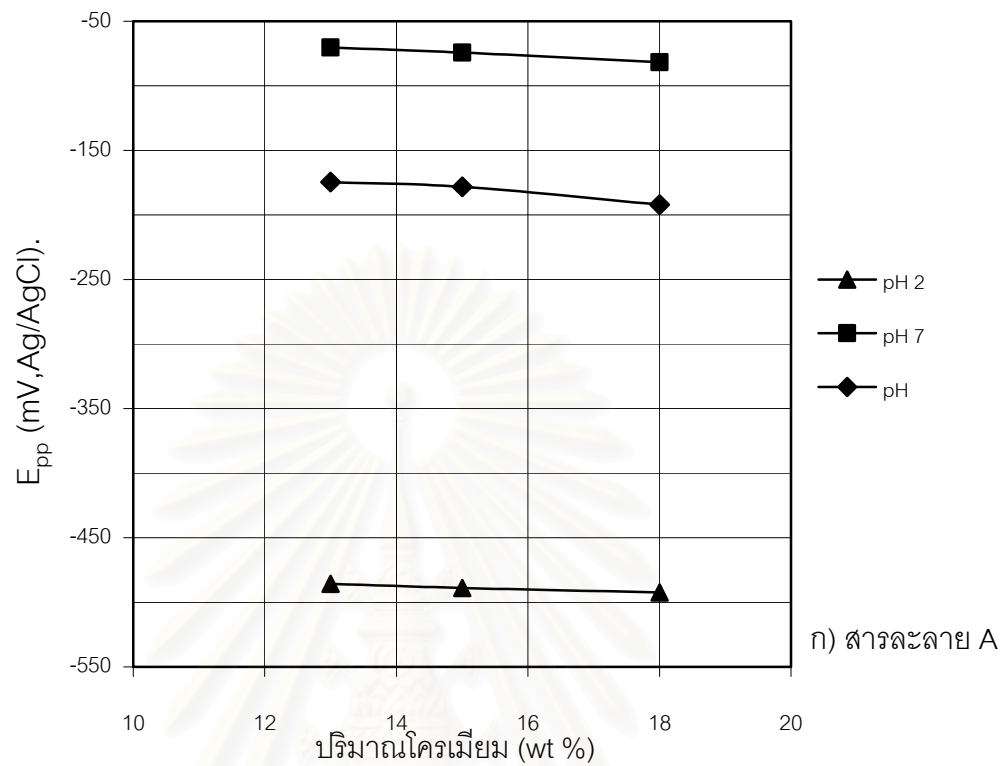
รูปที่ 4.9 ผลของออกซิเจนต่อค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อนโดยทฤษฎีศักย์ไฟฟ้ารวม [19]

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



รูปที่ 4.10 ผลของโครเมียมต่ออัตราการกัดกร่อนของเหล็กกล้าโครเมียม

#### 4.2.3 ศักย์ไฟฟ้าเริ่มเกิดพาสซีฟ ( $E_{pp}$ ) และศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนแบบรูเข็ม ( $E_p$ )

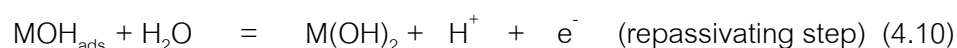
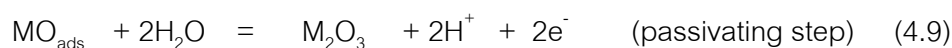
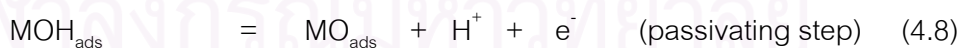
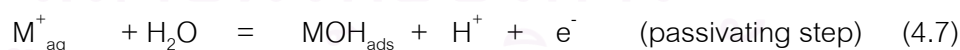


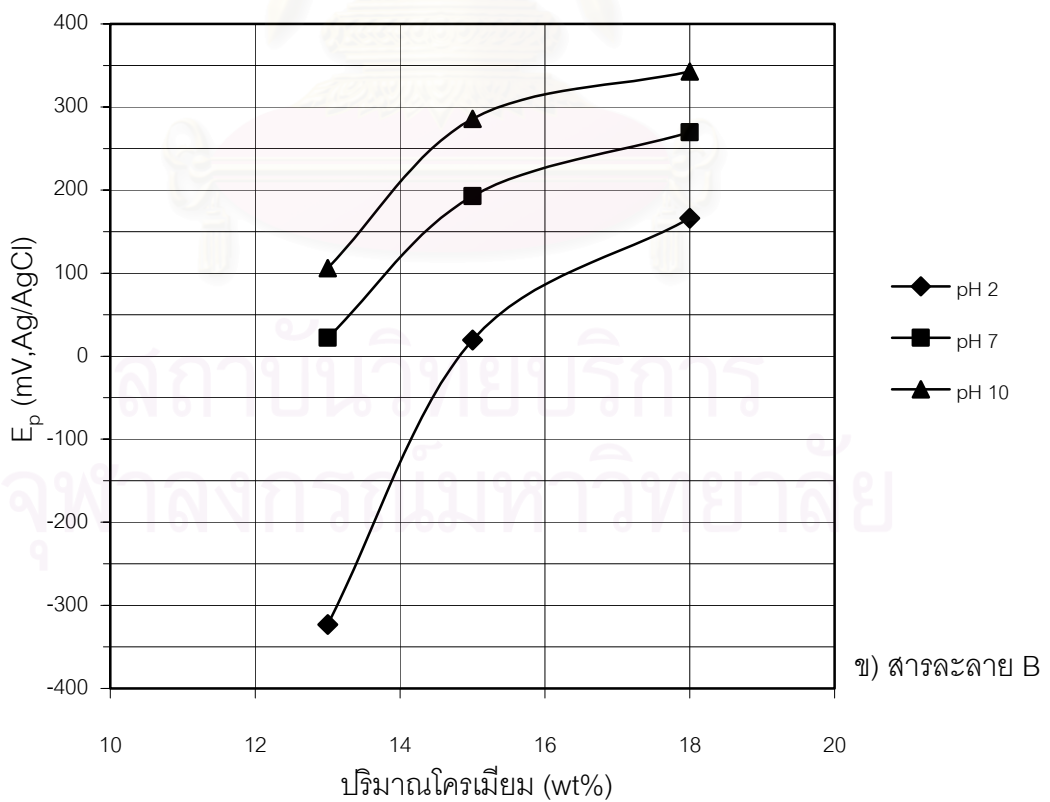
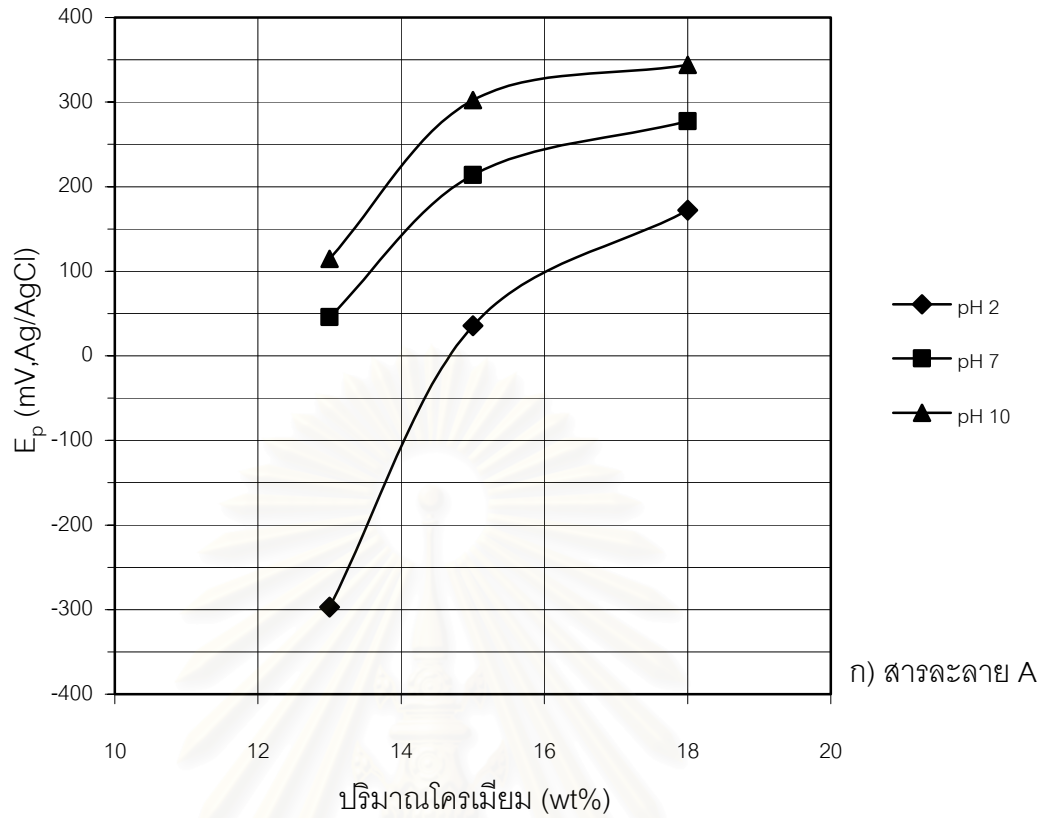
รูปที่ 4.11 ผลของโครเมียมต่อศักย์ไฟฟ้าเริ่มเกิดพาสซีฟของเหล็กกล้าโครเมียม

รูปที่ 4.11 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างศักย์ไฟฟ้าเริ่มเกิดพาสซีฟและปริมาณโครเมียมในเหล็กกล้าโครเมียม พบว่าปริมาณโครเมียมเพิ่มขึ้นทำให้ศักย์ไฟฟ้าเริ่มเกิดพาสซีฟลดลง แสดงว่าการสร้างฟิล์มทำได้ง่ายขึ้น ผลการทดลองเป็นเช่นเดียวกับผลของ K. Ozakawa และ H. J. Engell [20] อธิบายได้ดังนี้ ปริมาณโครเมียมสูงขึ้นเร่งการเกิดฟิล์มพาสซีฟให้เร็วขึ้น เพราะโครเมียมเป็นส่วนประกอบสำคัญในฟิล์มพาสซีฟ [11] ความสัมพันธ์ระหว่างศักย์ไฟฟ้าเริ่มเกิดฟิล์มพาสซีฟและค่าพีเอช ปกติที่ค่าพีเอช 2 ควรมีค่าศักย์ไฟฟ้าเริ่มเกิดพาสซีฟสูงกว่าที่พีเอช 7 และ 10 หรือว่าการสร้างฟิล์มพาสซีฟที่พีเอช 2 เกิดยากกว่าที่พีเอช 7 และ 10 เพราะฟิล์มพาสซีฟของโครเมียมสามารถละลายได้จากปริมาณของ  $H^+$  ที่สูงในสารละลายที่พีเอช 2 [7] แต่การทดลองนี้พบว่าศักย์ไฟฟ้าเริ่มเกิดพาสซีฟที่ค่าพีเอช 2 กลับมีค่าต่ำกว่าที่พีเอช 7 และ 10 จึงไม่สามารถหาเหตุผลมาอธิบายผลการทดลองในส่วนนี้

ศักย์ไฟฟ้าเริ่มเกิดพาสซีฟในสารละลาย A มีค่ามากกว่าในสารละลาย B เล็กน้อย เพราะปริมาณออกซิเจนในสารละลาย B ลดลง ทำให้ปฏิกิริยาเอนอดิกเกิดได้เร็วขึ้น (ศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนต่ำลง) ส่งผลให้อิออนของเหล็กและโครเมียมที่ละลายออกสู่สารละลายตามสมการที่ 4.7 เกิดได้เร็วขึ้นและทำให้การสร้างฟิล์มจากอิออนของโครเมียมเกิดได้ง่ายขึ้นด้วย

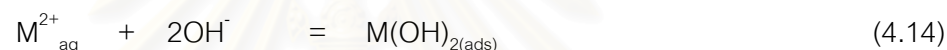
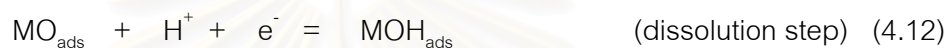
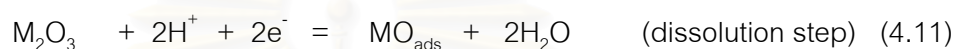
รูปที่ 4.12 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนแบบรูเข็มและปริมาณโครเมียมของเหล็กกล้าโครเมียม พบว่าปริมาณโครเมียมสูงขึ้นช่วยเพิ่มศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนแบบรูเข็มให้สูงขึ้น อธิบายได้จากเหล็กกล้าโครเมียมสามารถสร้างฟิล์มพาสซีฟที่ช่วยป้องกันการกัดกร่อนจากสารละลาย ฟิล์มพาสซีฟของเหล็กกล้าโครเมียมมีส่วนประกอบชั้นนอกสุดเป็นไฮดรอกไซด์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





รูปที่ 4.12 ผลของโครเมียมต่อศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนแบบรูเข็มของเหล็กกล้าโครเมียม

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

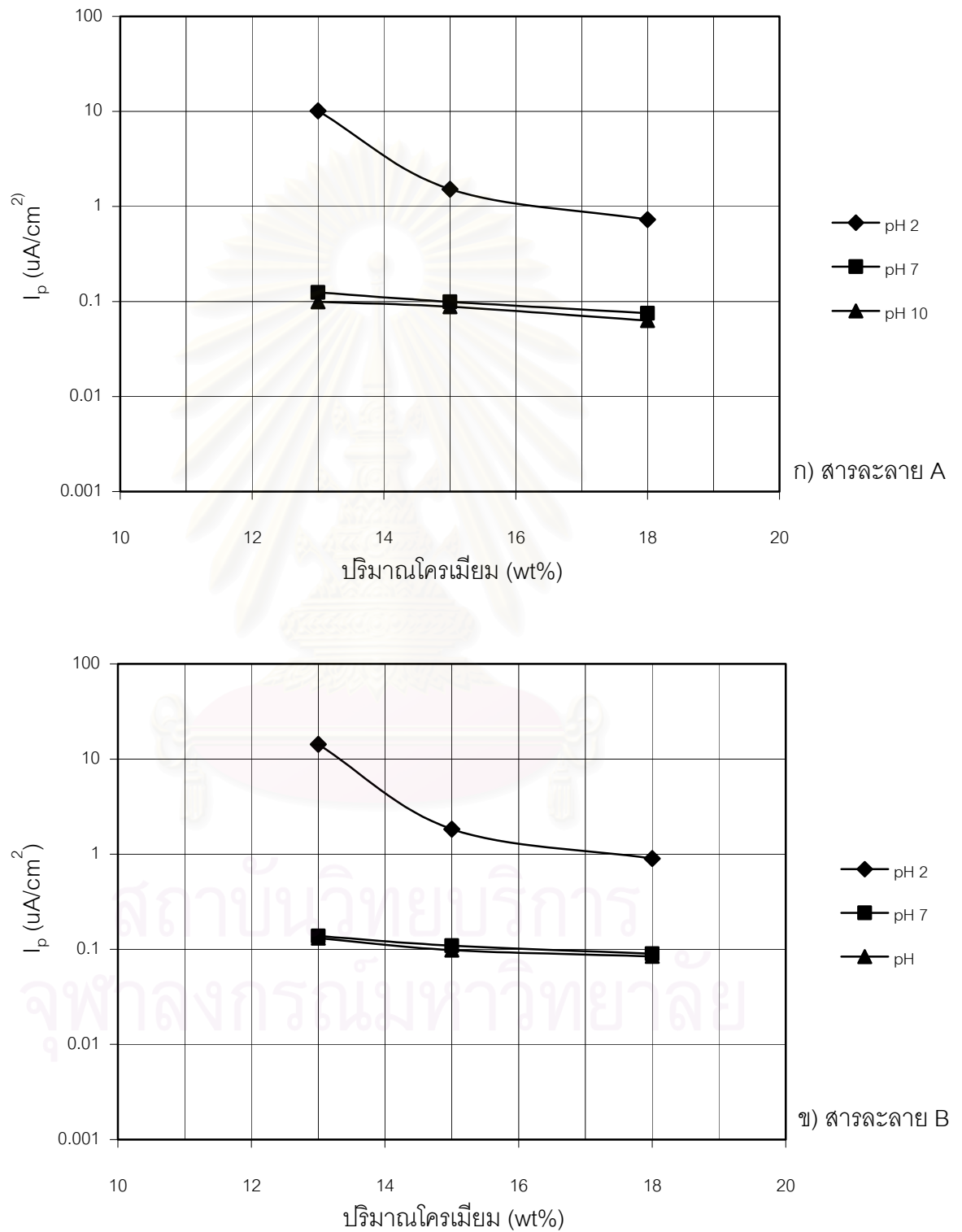


ผลของศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนแบบรูเข็มในสารละลาย B มีค่าต่ำกว่าสารละลาย A ผลการทดลองเป็นเช่นเดียวกับผลของ H. H. Hassan [21] อธิบายจากปริมาณ  $O_2$  ช่วยในการเกิด  $OH^-$  ลดลง [4] ในสมการที่ (4.15) ทำให้ความสามารถในการซ่อมแซมฟิล์มพาสซีฟเกิดได้ที่ศักย์ไฟฟ้าต่ำลงด้วย

#### 4.2.4 ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าขณะวัสดุเกิดฟิล์ม ( $I_p$ )

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

เป็น  $\text{OH}^-$  ตามสมการที่ (4.15) โดย  $\text{OH}^-$  มีผลต่อการซ่อมแซมฟิล์มพาสซีฟตามสมการที่ (4.14) ส่งผลให้ฟิล์มแน่นขึ้น [22] และลดการสูญเสียไอออนและอิเล็กตรอนโลหะในช่วงการเกิดพาสซีฟ



รูปที่ 4.13 ผลของโครเมียมต่อความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าขณะวัสดุเกิดฟิล์มของเหล็กกล้าโครเมียม

### 4.3 ผลของนิกเกิลในเหล็กกล้า นิกเกิลต่อพฤติกรรมการกัดกร่อน

#### 4.3.1 ศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อน ( $E_{\text{corr}}$ )

รูปที่ 4.14 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนและปริมาณนิกเกิลของเหล็กกล้า นิกเกิล พบว่าที่ค่าพีเอช 2, 7 และ 10 ปริมาณนิกเกิลเพิ่มขึ้นส่งผลให้ศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนสูงขึ้น [23] เนื่องจากนิกเกิลมีศักย์ไฟฟ้าอิเล็กโทรดมาตรฐาน ( $E^0$ ) สูงกว่าเหล็กดังสมการที่ 4.16 และ 4.17 [2,17]



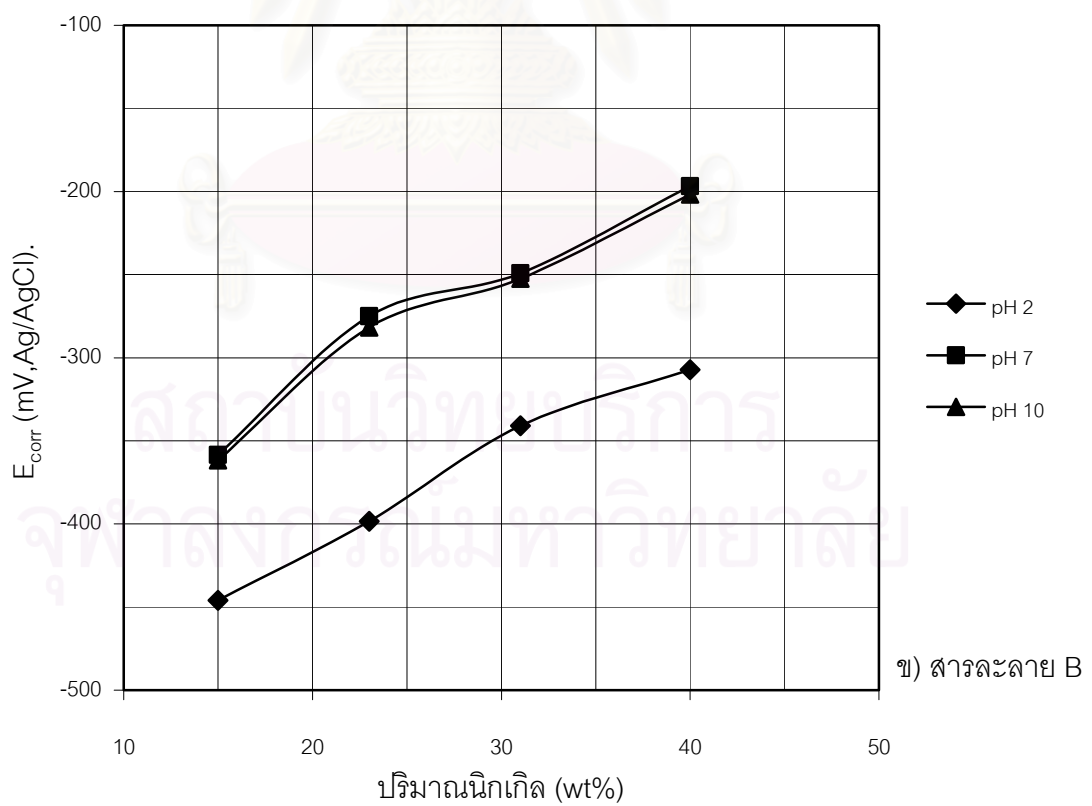
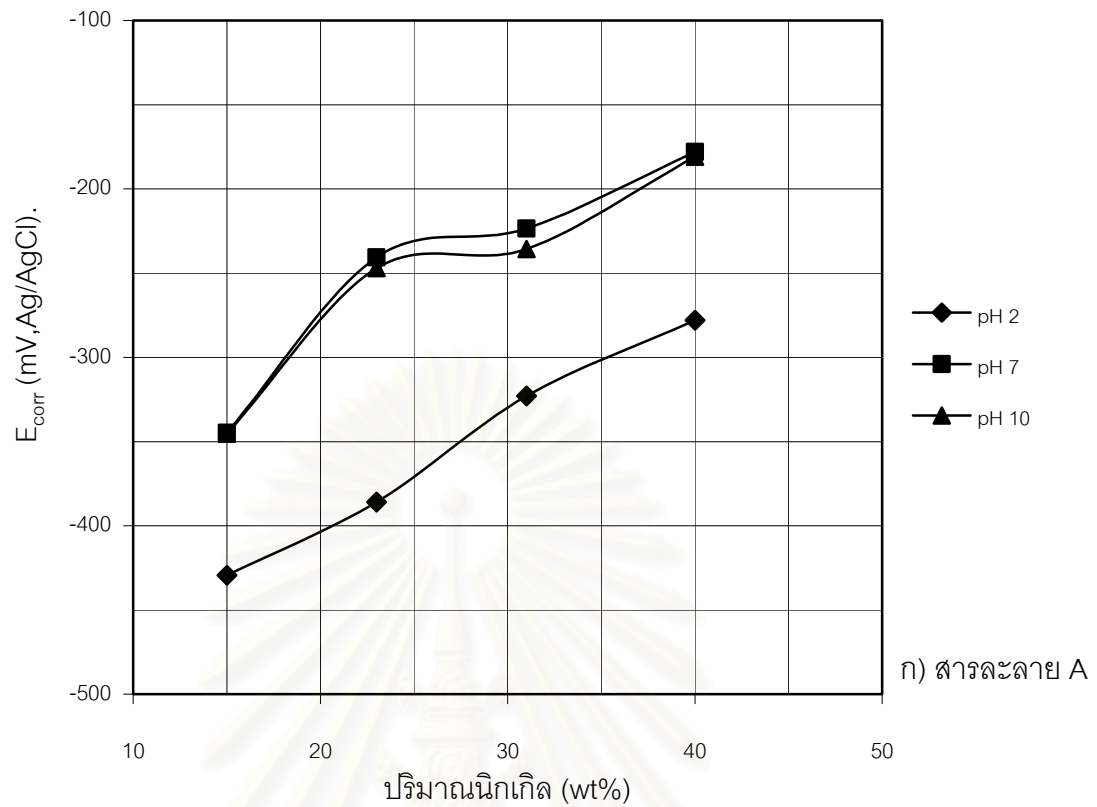
กรณีผลของการเปลี่ยนแปลงพีเอชและปริมาณอากาศที่ต่างกันในสารละลาย A และ B ต่อศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนมีแนวโน้มใกล้เคียงกับผลของโครเมียม ดังนั้นอธิบายได้ด้วยเหตุผลลักษณะเดียวกับผลของโครเมียมต่อศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนในหัวข้อที่ 4.2.1

#### 4.3.2 ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อน ( $I_{\text{corr}}$ ) และอัตราการกัดกร่อน ( $R_{\text{umppy}}$ )

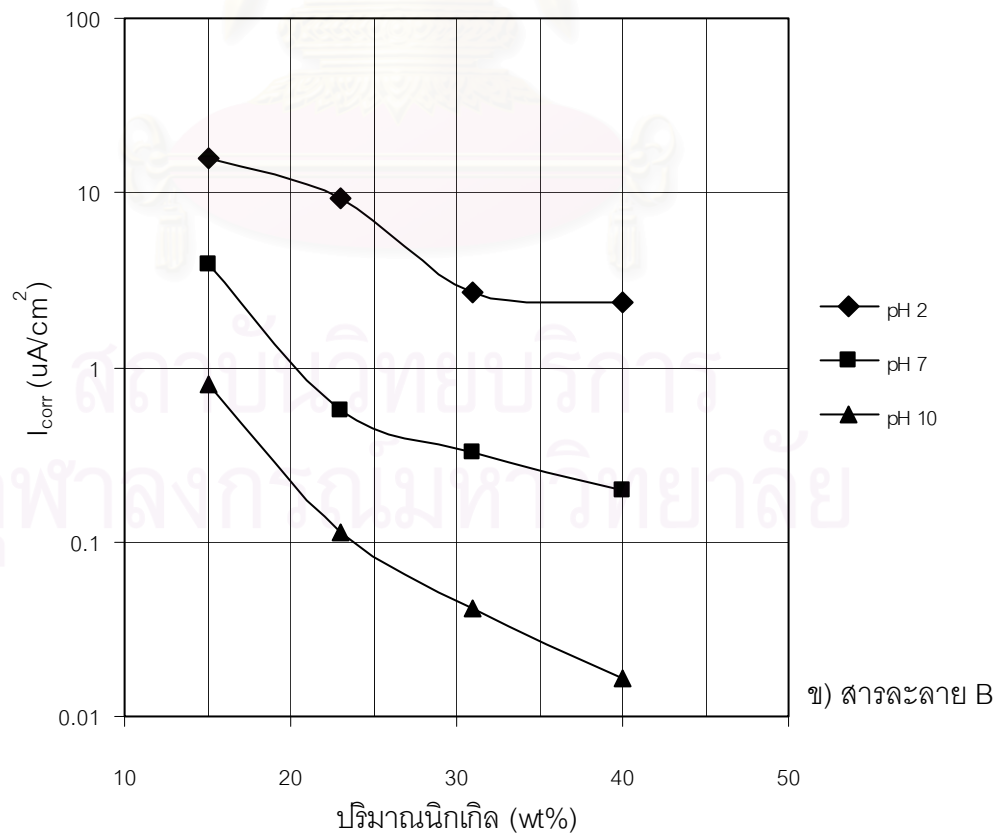
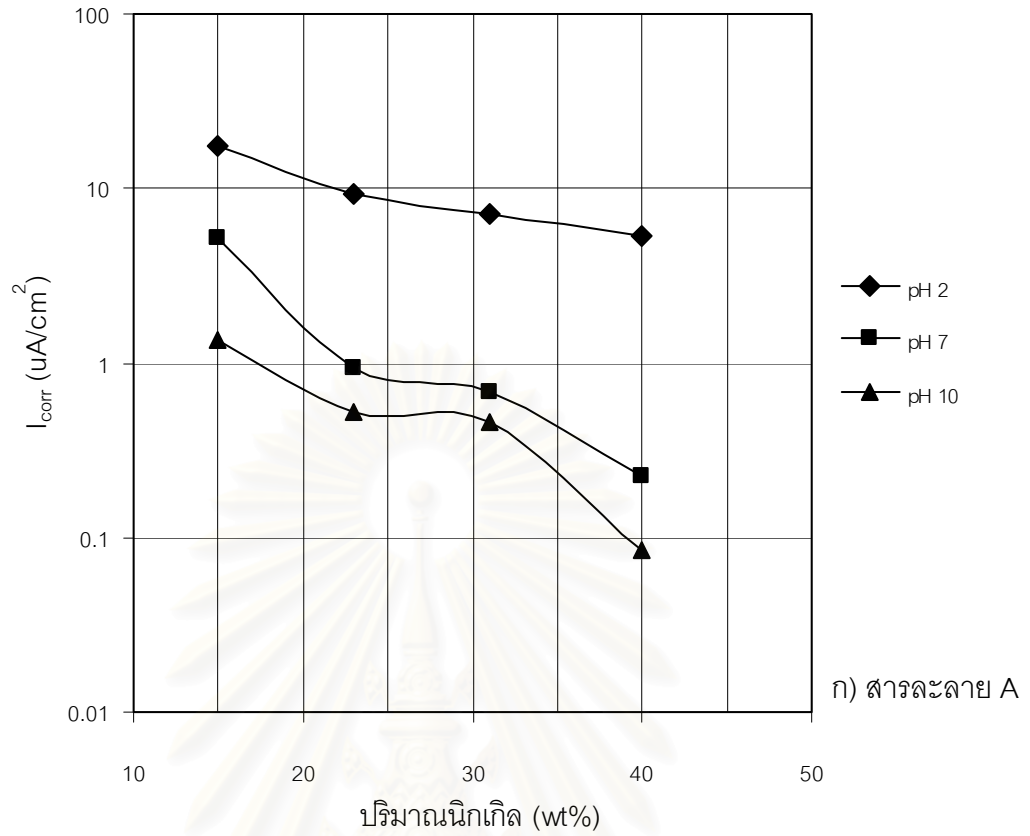
รูปที่ 4.15 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อนและปริมาณนิกเกิลของเหล็กกล้า นิกเกิล พบว่าปริมาณนิกเกิลเพิ่มขึ้นทำให้ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อนลดลง ผลการทดลองเป็นเช่นเดียวกับผลของ S.Azuma และ T. Kudo [24] เนื่องจากนิกเกิลเป็นธาตุทรานซิชันที่มีอิเล็กตรอนในชั้น d ที่ไม่มีคู่วางอยู่ จึงพยายามแลกเปลี่ยนอิเล็กตรอนกับธาตุในกลุ่มทรานซิชันด้วยกัน เช่น เหล็ก โครเมียม โมลิบดีนัม สร้างสารประกอบด้วยพันธะโลหะ (intermetallic bonding) ที่มีเสถียรภาพสูง [2, 7] มีผลช่วยลดการละลายแบบแอโนดิก โดยค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อนลดลงอย่างชัดเจนที่ค่าพีเอช 2 ขณะที่ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อนที่ค่าพีเอช 7 และ 10 มีค่าลดลงเล็กน้อยในแนวโน้มใกล้เคียงกัน ที่ค่าพีเอช 2 ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อนที่ทดสอบในสารละลาย B มีค่าน้อยกว่าในสารละลาย A โดยผลของการเปลี่ยนแปลงพีเอชและปริมาณอากาศที่ต่างกัน ในสารละลาย A และ B ต่อความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อนอธิบายได้ด้วยเหตุผลลักษณะเดียวกับผลของโครเมียมในหัวข้อที่ 4.2.2

จากค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อนสามารถนำไปคำนวณหาอัตราการกัดกร่อนได้จากสมการ (4.5) พบว่าปริมาณนิกเกิลเพิ่มขึ้นช่วยลดอัตราการกัดกร่อนในเหล็กกล้า นิกเกิลด้วยแนวโน้มเดียวกับค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อน ดังแสดงในรูปที่ 4.16

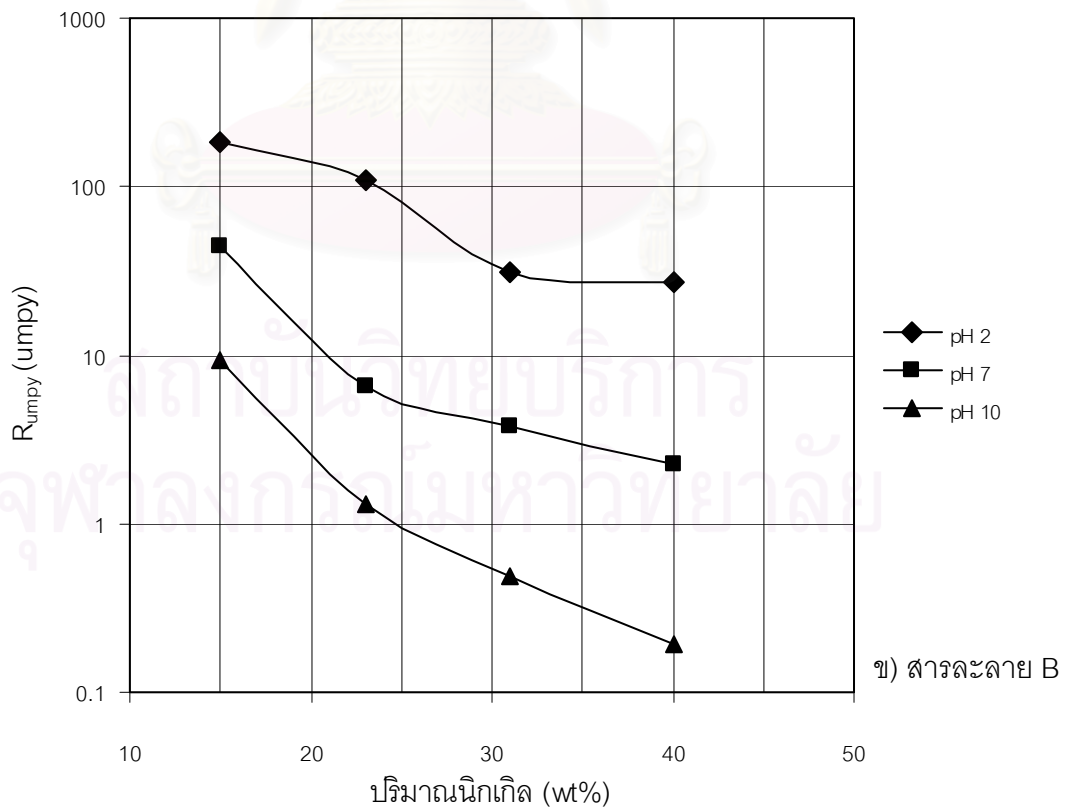
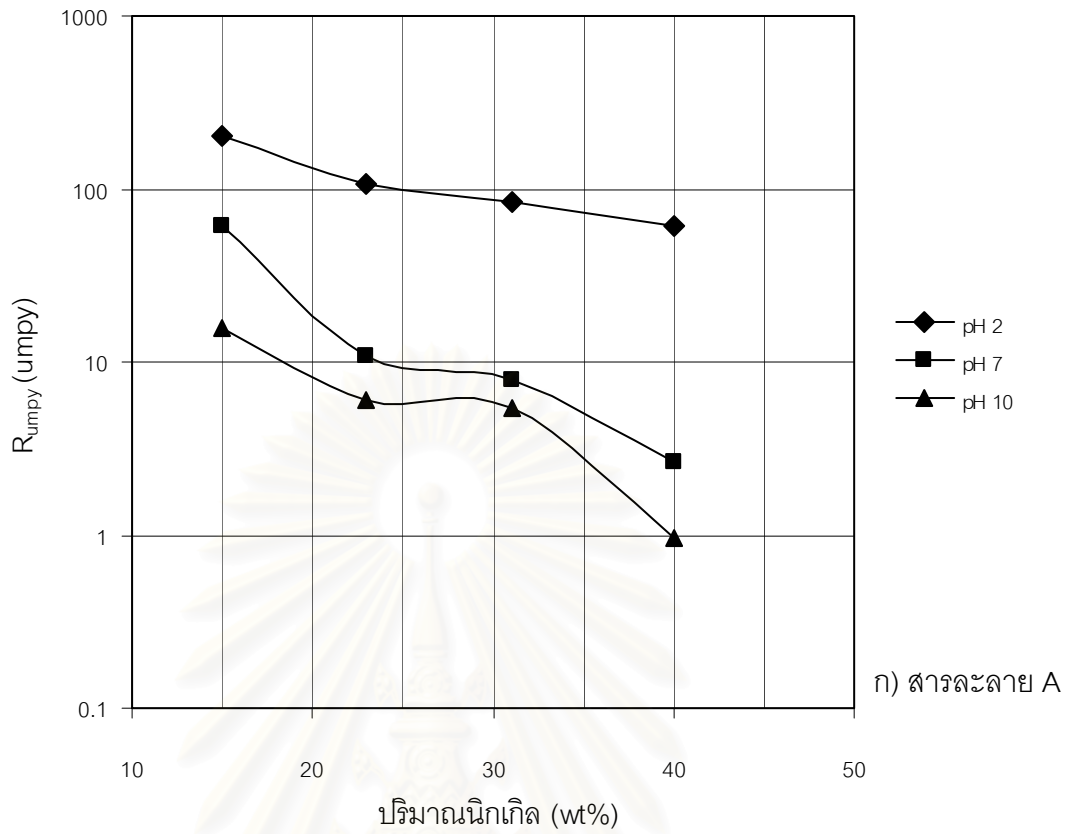




รูปที่ 4.14 ผลของนิกเกิลต่อศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนของเหล็กกล้า นิกเกิล

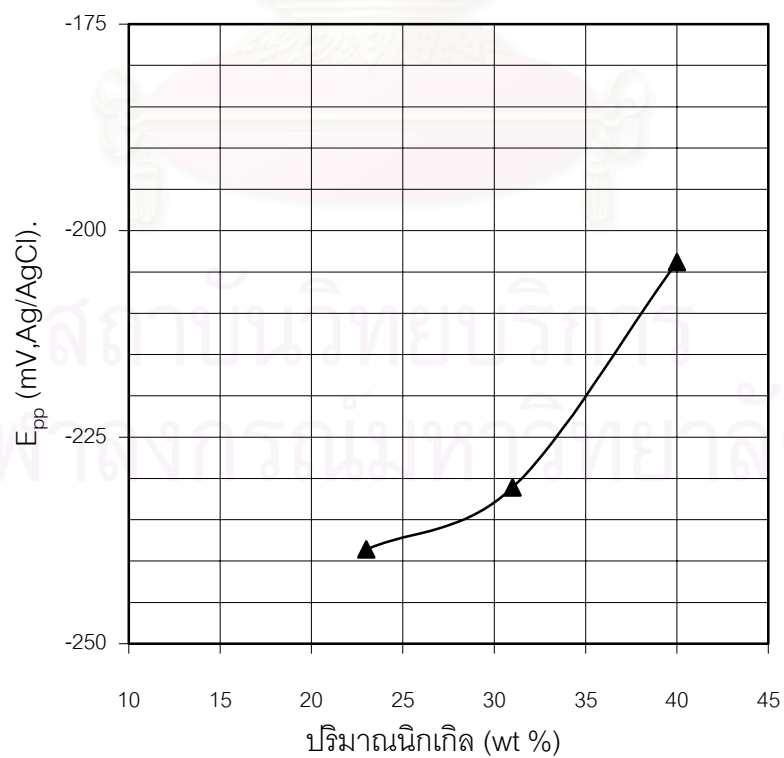
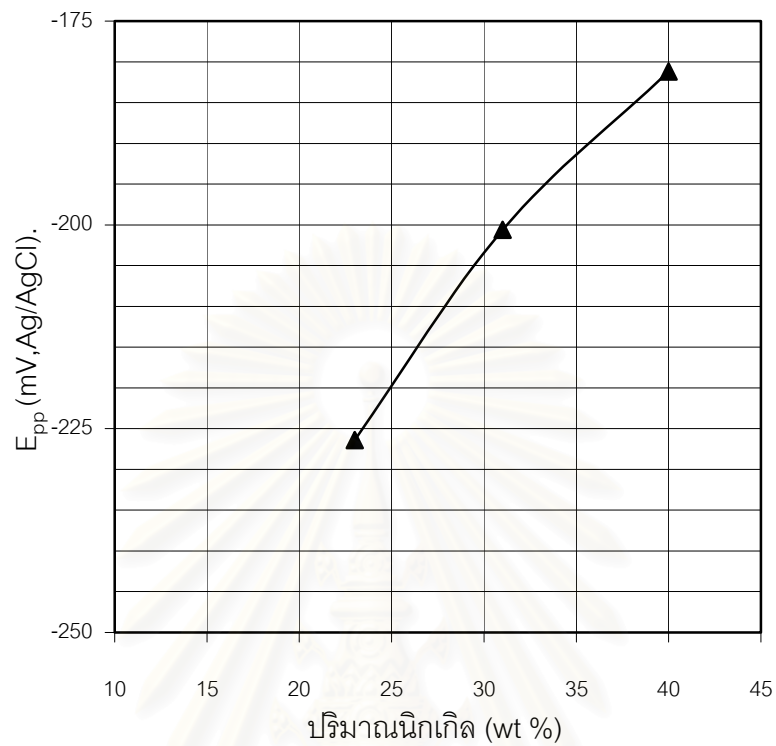


รูปที่ 4.15 ผลของนิกเกิลต่อความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อนของเหล็กกล้า นิกเกิล

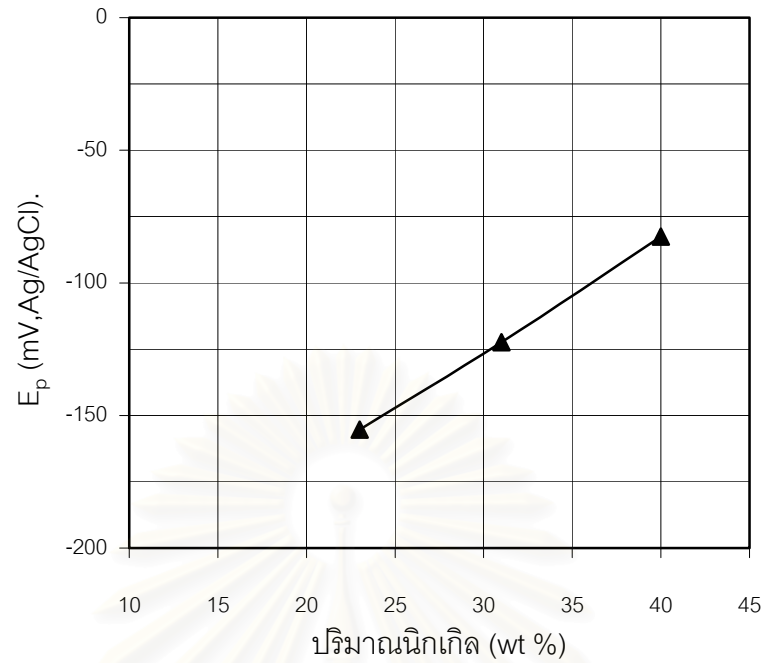


รูปที่ 4.16 ผลของนิกเกิลต่ออัตราการกัดกร่อนของเหล็กกล้านิกเกิล

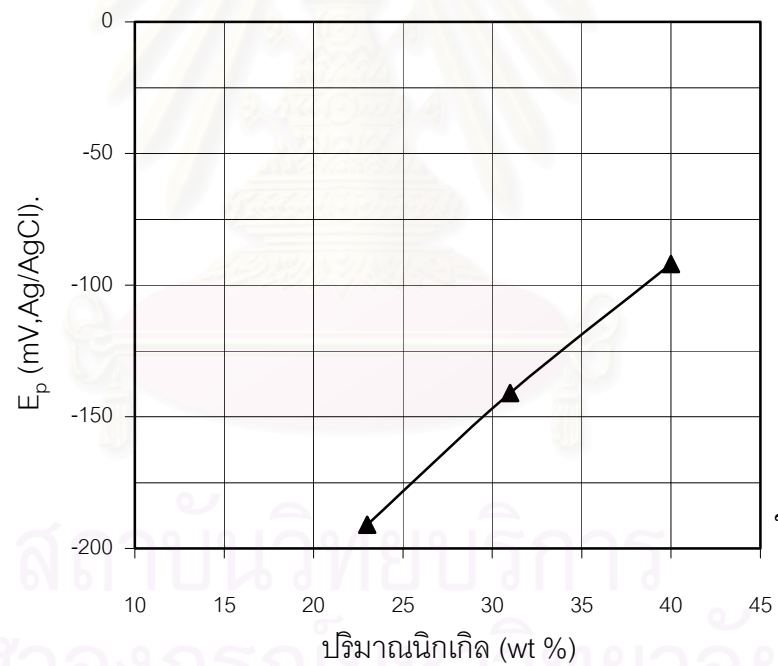
### 4.3.3 ศักย์ไฟฟ้าเริ่มเกิดพาสซีฟ ( $E_{pp}$ ) และศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนแบบรูเข็ม ( $E_p$ )



รูปที่ 4.17 ผลของนิกเกิลต่อศักย์ไฟฟ้าเริ่มเกิดพาสซีฟของเหล็กกล้า นิกเกิล



ก) สารละลาย A, pH=10



ข) สารละลาย B, pH=10

รูปที่ 4.18 ผลของนิกเกิลต่อศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนแบบรูเข็มของเหล็กกล้า นิกเกิล

รูปที่ 4.17 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างศักย์ไฟฟ้าเริ่มเกิดพาสซีฟและปริมาณนิกเกิลในเหล็กกล้า นิกเกิล พบว่ามีช่วงการเกิดฟิล์มในเหล็กกล้า นิกเกิลที่ 23, 31 และ 40 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักในสารละลาย A และ B ที่ค่าพีเอช 10 เท่านั้น โดยปริมาณนิกเกิลเพิ่มขึ้นทำให้ศักย์ไฟฟ้าเริ่มเกิดพาสซีฟสูงขึ้น ผลการทดลองเป็นเช่นเดียวกับผลของ X. Peng, Y. Zang, J. Zhao,

F. Wang [18] และ Y. S. Zang, X. M. Zhu [25] อธิบายจากปริมาณนิกเกิลเพิ่มขึ้นส่งผลให้ปฏิกิริยาแอโนดิกเกิดได้ช้าลง (ศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนสูงขึ้น) ดังนั้นไอออนของนิกเกิลในสารละลายที่เกิดจากปฏิกิริยาแอโนดิกจึงเกิดได้ช้าลง ส่งผลให้การเกิดฟิล์มพาสซีฟ  $\text{Ni}(\text{OH})_2$  จากไอออนของนิกเกิลในสมการที่ 4.18 ยากขึ้นแม้จะมีปริมาณนิกเกิลมากขึ้นก็ตาม ตรงข้ามกับผลของโครเมียมที่ช่วยให้เกิดฟิล์มพาสซีฟได้เร็วขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับผลของปริมาณนิกเกิลที่ต่ำมากเมื่อเทียบกับปริมาณโครเมียมในฟิล์มพาสซีฟของเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก [22] กรณีผลของการเปลี่ยนแปลงพีเอชและปริมาณอากาศที่ต่างกันในสารละลาย A และ B ต่อศักย์ไฟฟ้าเริ่มเกิดพาสซีฟอธิบายด้วยเหตุผลลักษณะเดียวกับผลของโครเมียมต่อศักย์ไฟฟ้าเริ่มเกิดพาสซีฟในหัวข้อที่ 4.2.3

รูปที่ 4.18 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนแบบรูเข็มและปริมาณนิกเกิลในเหล็กกล้า นิกเกิล พบว่ามีช่วงการเกิดฟิล์มในเหล็กกล้า นิกเกิลที่ 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  $\text{Ni}(\text{OH})_2$  [19-20] ที่อาจมีคุณสมบัติเป็นฟิล์มพาสซีฟ ความสามารถในการสร้าง  $\text{Ni}(\text{OH})_2$  สูงตามปริมาณนิกเกิลที่เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนแบบรูเข็มมีแนวโน้มสูงขึ้นเมื่อปริมาณนิกเกิลเพิ่มจาก 23 ถึง 40 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก กรณีเหล็กกล้า นิกเกิลที่มีปริมาณนิกเกิล 15 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักไม่แสดงการสร้างฟิล์มอาจเป็นผลจากมีปริมาณนิกเกิลต่ำจนไม่สามารถสร้างฟิล์มพาสซีฟที่เสถียรได้

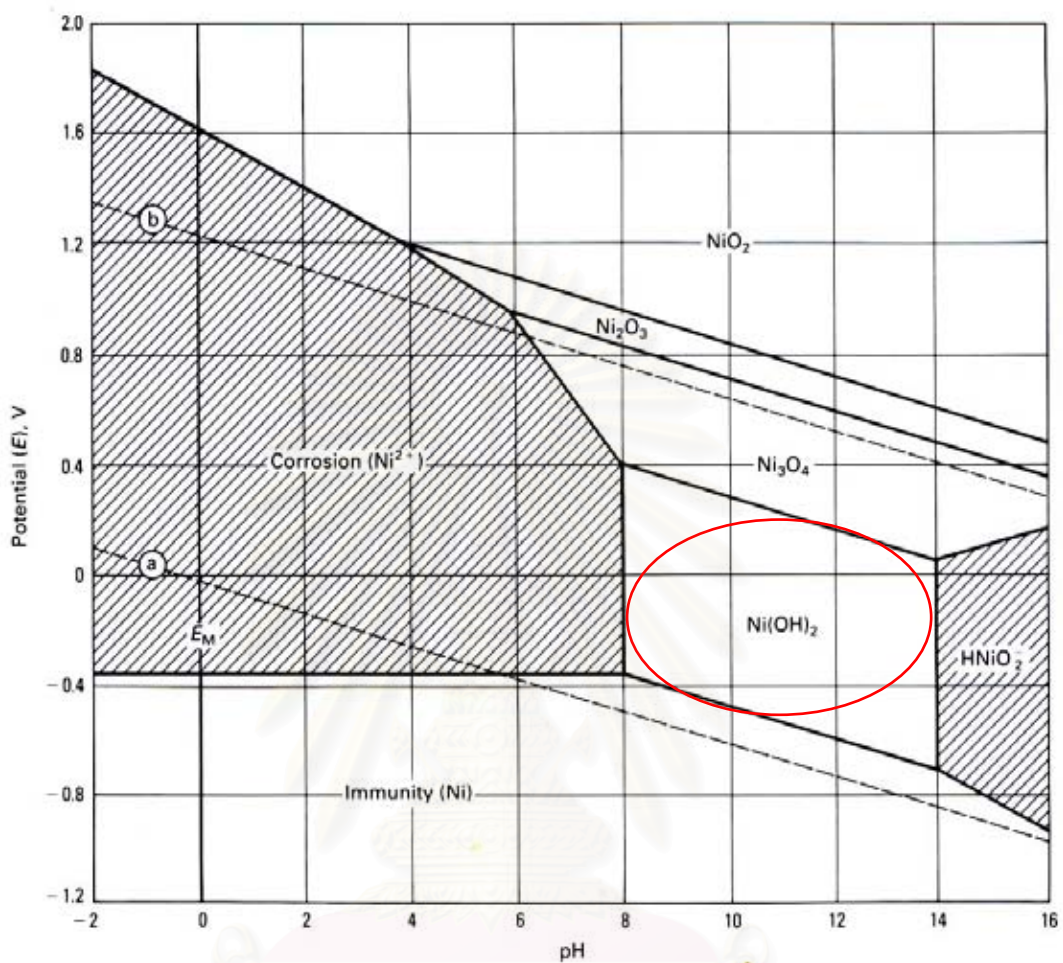
ผลของศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนแบบรูเข็มในสารละลาย B มีค่าต่ำกว่าสารละลาย A เพราะปริมาณ  $\text{O}_2$  ช่วยในการเกิด  $\text{OH}^-$  ลดลง [4] ในสมการที่ (4.15) ทำให้ความสามารถในการสร้างและซ่อมแซมฟิล์มพาสซีฟ  $\text{Ni}(\text{OH})_2$  ตามสมการที่ (4.18) เกิดได้ที่ศักย์ไฟฟ้าต่ำลงหรือมีเสถียรภาพต่ำลงด้วย



#### 4.3.4 ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าขณะวัสดุเกิดฟิล์ม ( $I_p$ )

รูปที่ 4.20 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าขณะวัสดุเกิดฟิล์มและปริมาณนิกเกิลของเหล็กกล้า นิกเกิลที่ค่าพีเอช 10 พบว่าค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าขณะวัสดุเกิดฟิล์มลดลงเมื่อปริมาณนิกเกิลของเหล็กกล้าผสมนิกเกิลเพิ่มขึ้นจาก 23 ถึง 40 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก สามารถอธิบายได้จากความสามารถในการสร้างและซ่อมแซมฟิล์มพาสซีฟของนิกเกิลตามปริมาณนิกเกิลสูงขึ้นตามสมการที่ (4.18) ส่งผลให้ความรุนแรงของการกัดกร่อนในช่วงการเกิดพาสซีฟลดลง ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าขณะวัสดุเกิดฟิล์มที่ค่าพีเอช 10 ในสารละลาย

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



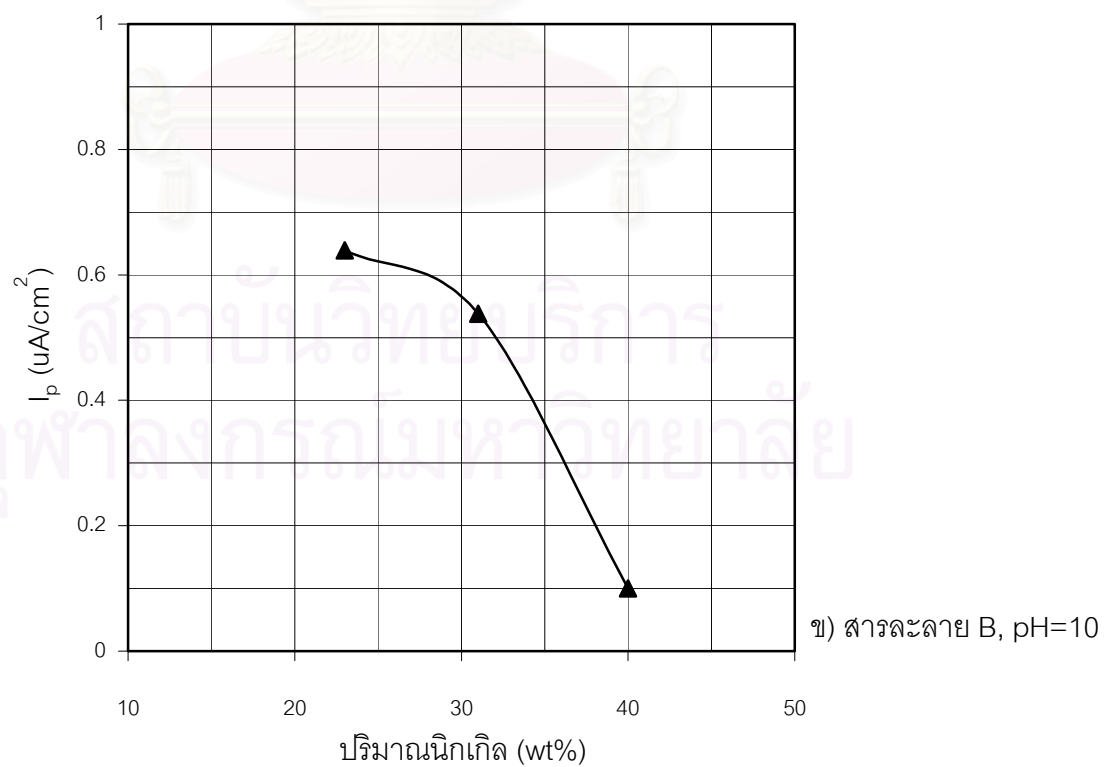
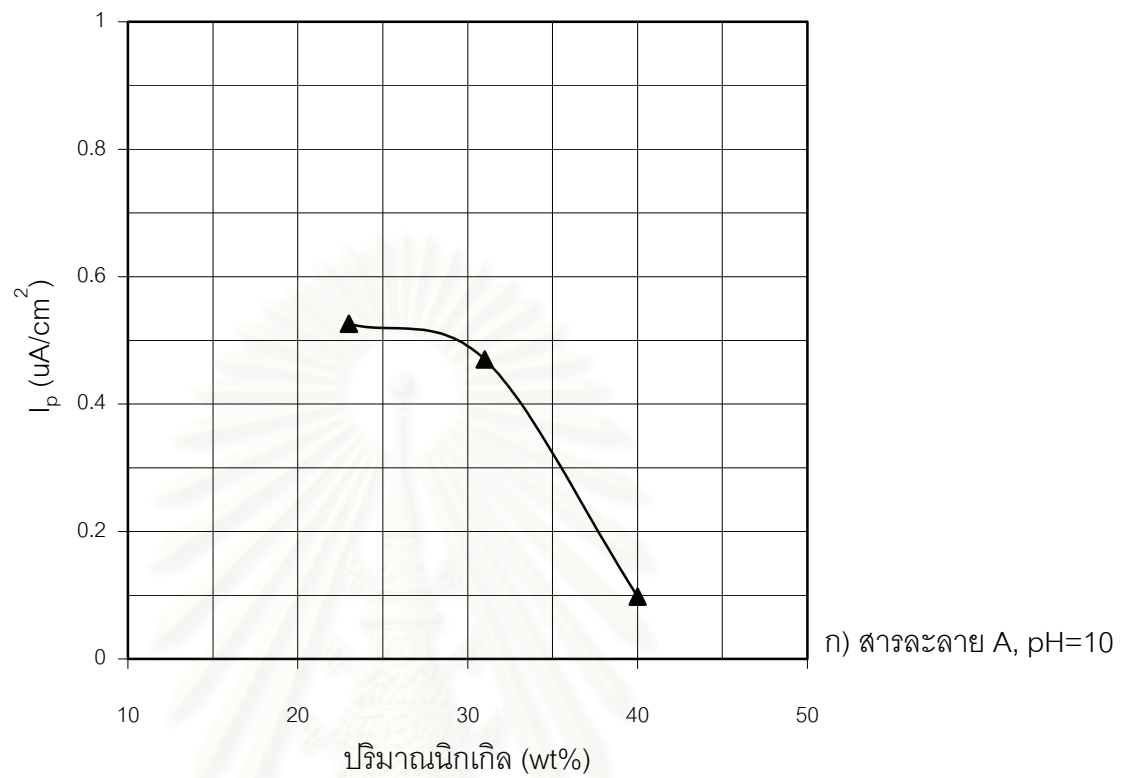
รูปที่ 4.19 แผนภาพโพเทนเชียลของโลหะนิกเกิลในน้ำที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส [4]

#### 4.4 โครงสร้างจุลภาคบริเวณที่ถูกกัดกร่อนในช่วงค่าศักย์ไฟฟ้าทรานพาสซีฟ

การศึกษาในที่นี้ให้ตัวอย่างชิ้นงานเหล็กกล้าโครเมียมและเหล็กกล้านิกเกิลมีค่าศักย์ไฟฟ้าคงที่ในช่วงค่าศักย์ไฟฟ้าทรานพาสซีฟเป็นเวลา 5 – 50 นาทีแล้วตรวจโครงสร้างจุลภาคที่ถูกกัดกร่อน ได้ผลดังหัวข้อที่ 4.4.1

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

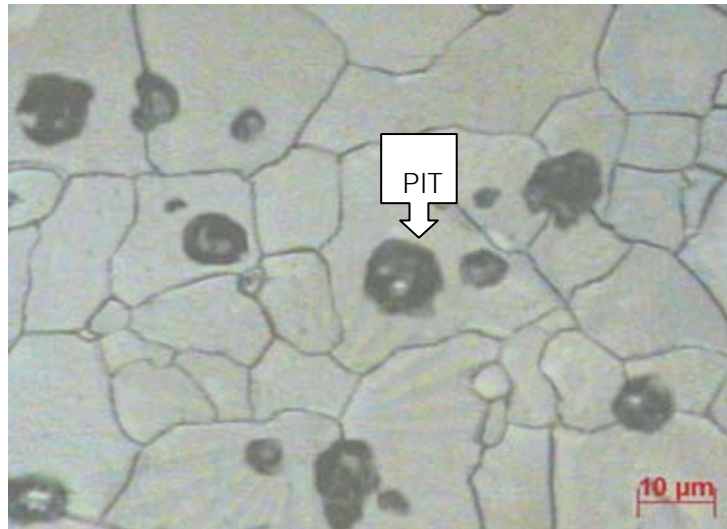
อธิบายได้ว่าโครงสร้างจุลภาคของเหล็กกล้าผสมโครเมียม Fe-13Cr และ Fe-18Cr มีส่วนผสมทางเคมีไม่แตกต่างกันจนส่งผลต่อการกัดกร่อนเฉพาะที่



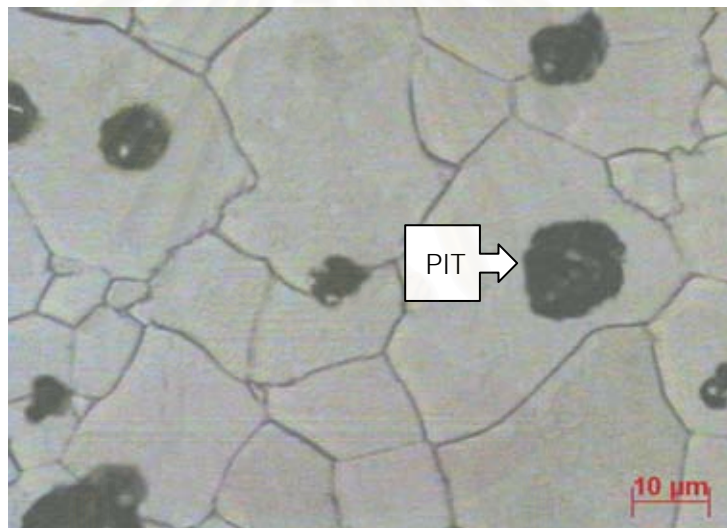
รูปที่ 4.20 ผลของนิกเกิลต่อความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าขณะวัสดุเกิดฟิล์มของเหล็กกล้า นิกเกิล



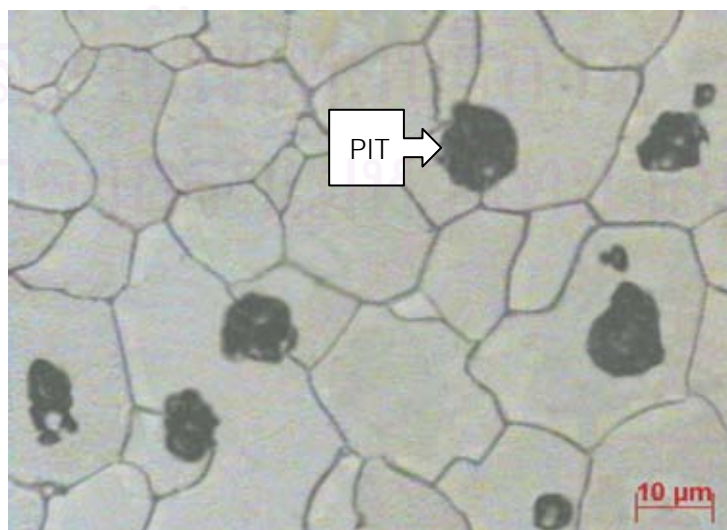
#### 4.4.1 โครงสร้างจุลภาคบริเวณที่ถูกกัดกร่อนของเหล็กกล้าโครเมียม



ก. พีไอช 2

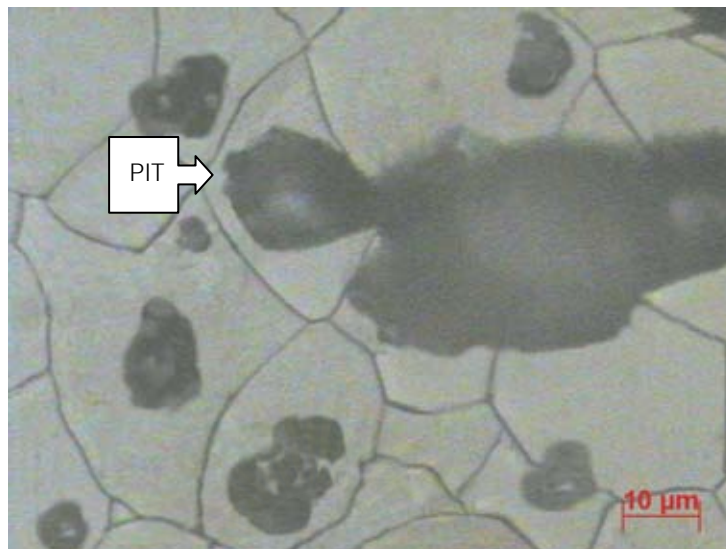


ข. พีไอช 7

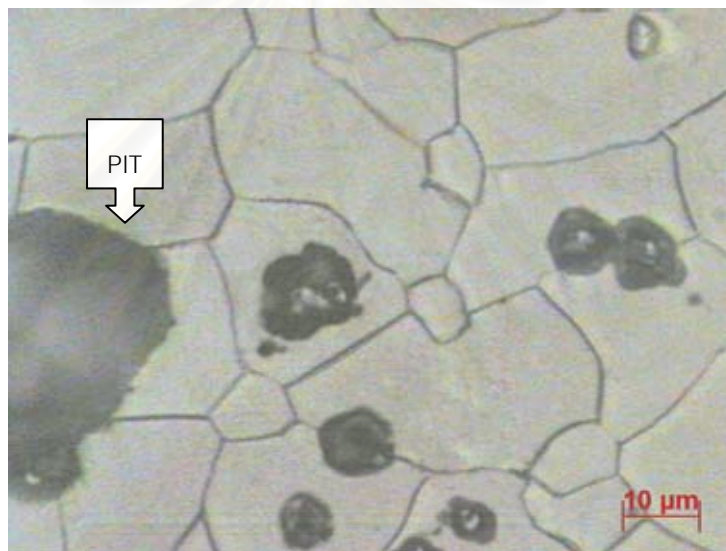


ค. พีไอช 10

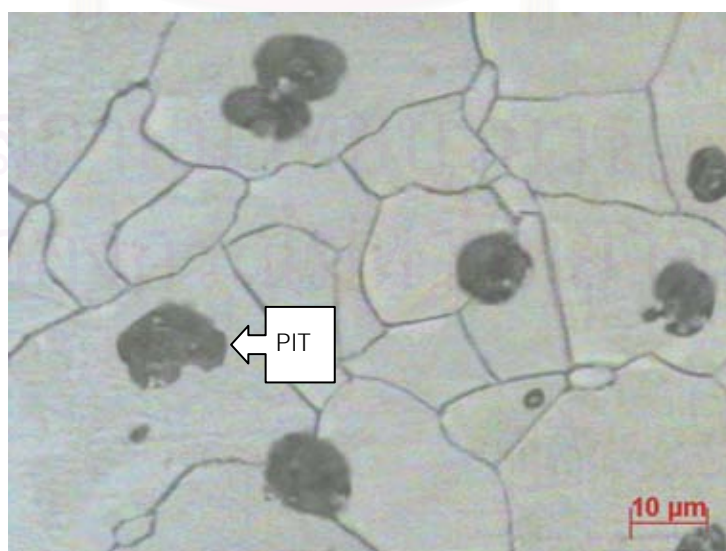
รูปที่ 4.21 บริเวณที่ถูกกัดกร่อนของเหล็กกล้าโครเมียม Fe-13Cr ในสารละลาย A  
ที่ค่า ก.พีไอช 2 ข. พีไอช 7 ค. พีไอช 10



ก. พีไอช 2

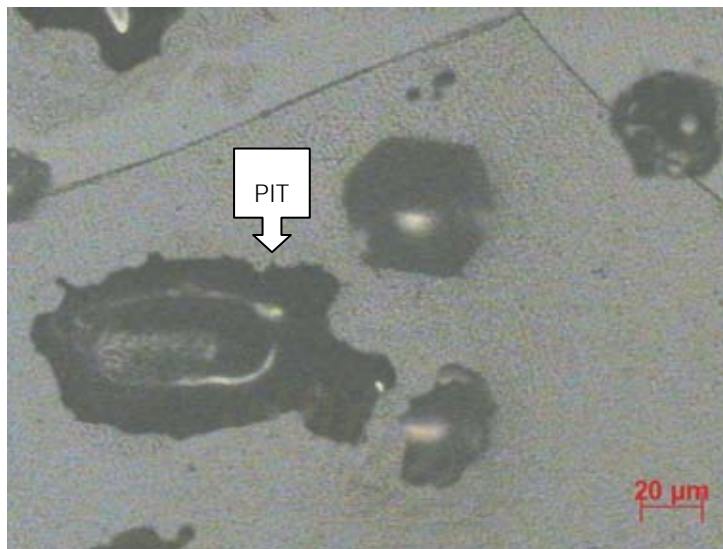


ข. พีไอช 7

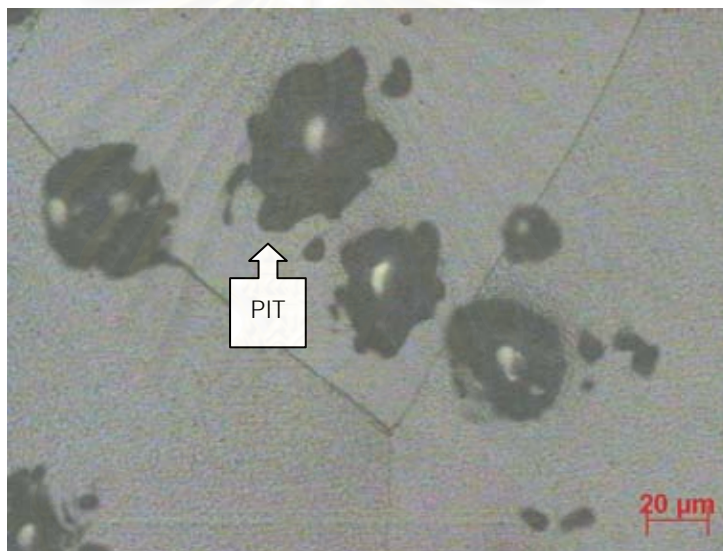


ค. พีไอช 10

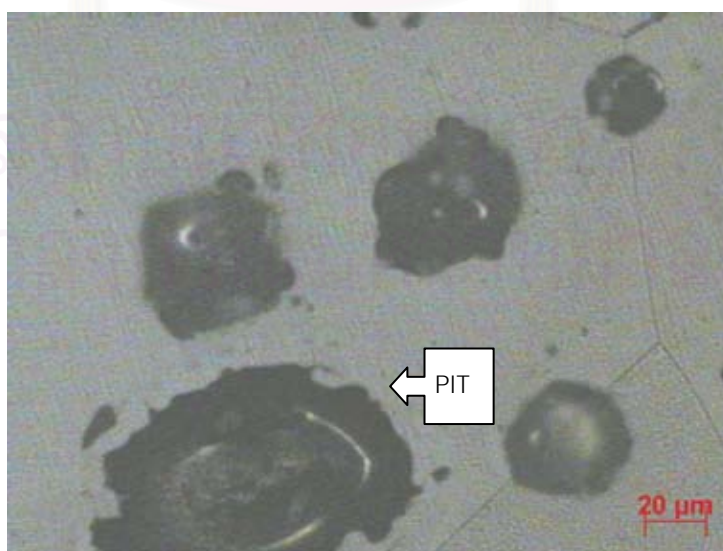
รูปที่ 4.22 บริเวณที่ถูกลัดกร่อนของเหล็กกล้าโครเมียม Fe-13Cr ในสารละลาย B  
ที่ค่า ก.พีไอช 2 ข. พีไอช 7 ค. พีไอช 10



ก. พีเอช 2

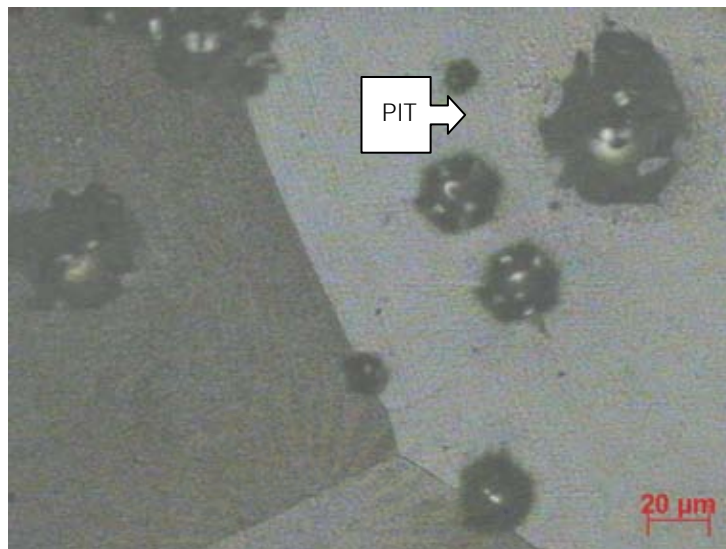


ข. พีเอช 7

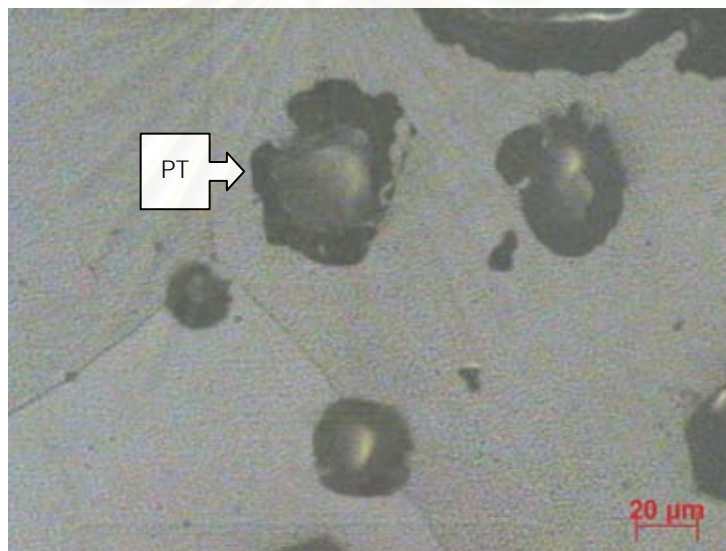


ค. พีเอช 10

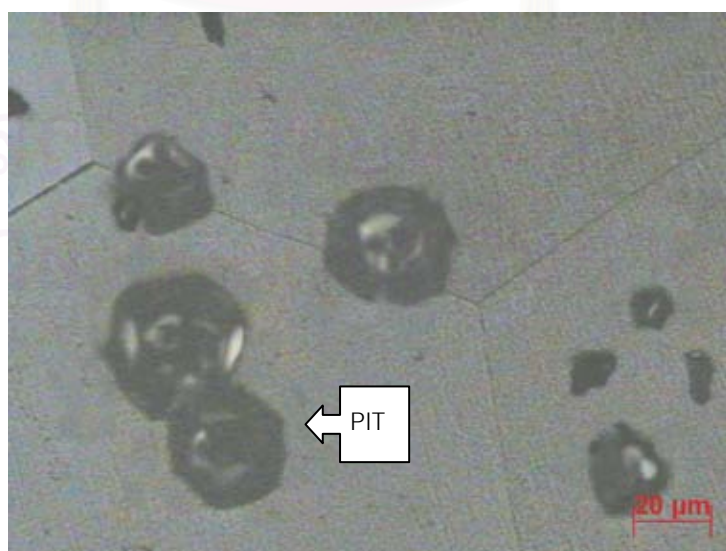
รูปที่ 4.23 บริเวณที่ถูกกัดกร่อนของเหล็กกล้าโครเมียม Fe-18Cr ในสารละลาย A  
ที่ค่า ก.พีเอช 2 ข. พีเอช 7 ค. พีเอช 10



ก. พีเอช 2



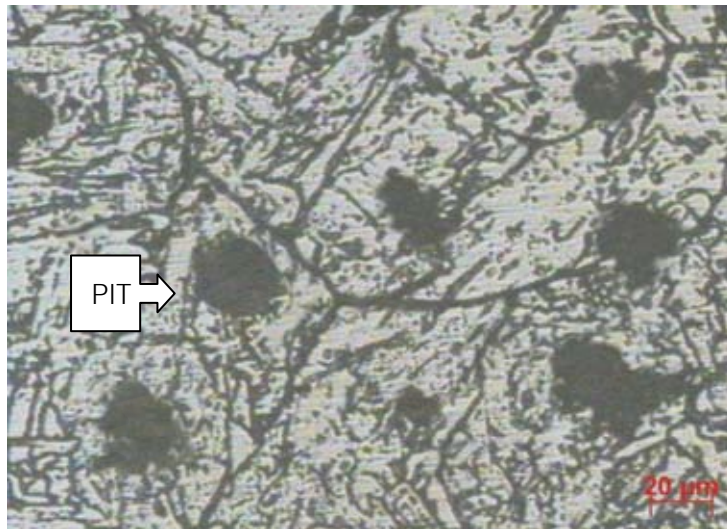
ข. พีเอช 7



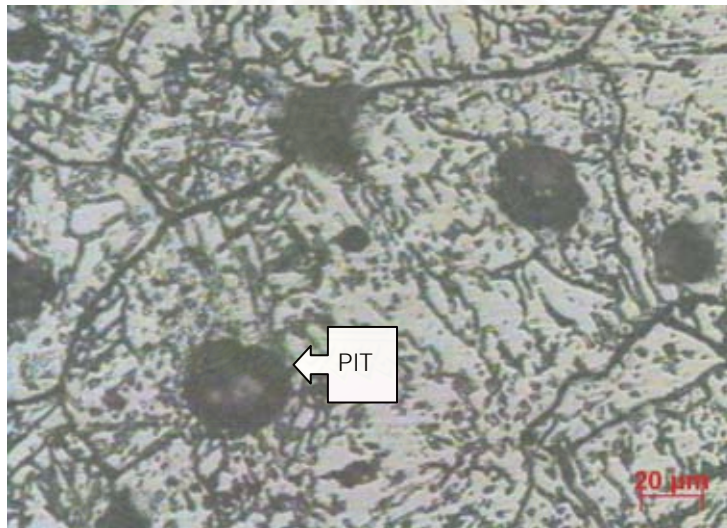
ค. พีเอช 10

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

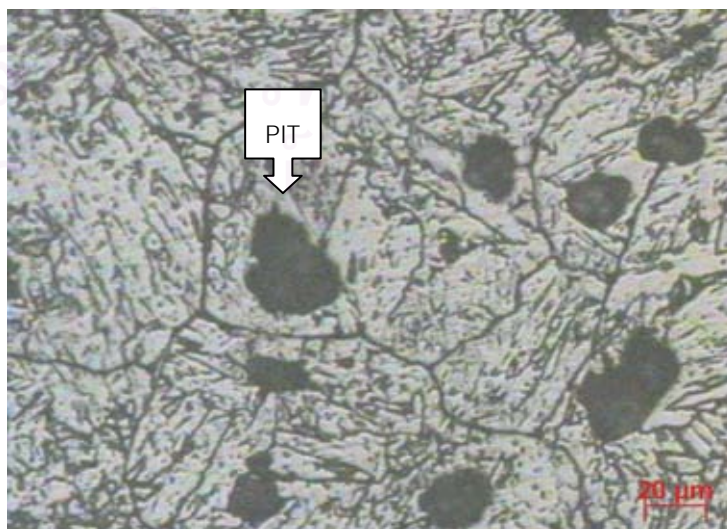
#### 4.4.1 โครงสร้างจุลภาคบริเวณที่ถูกกัดกร่อนของเหล็กกล้าชนิด Fe-15Ni



ก. พีไอช 2

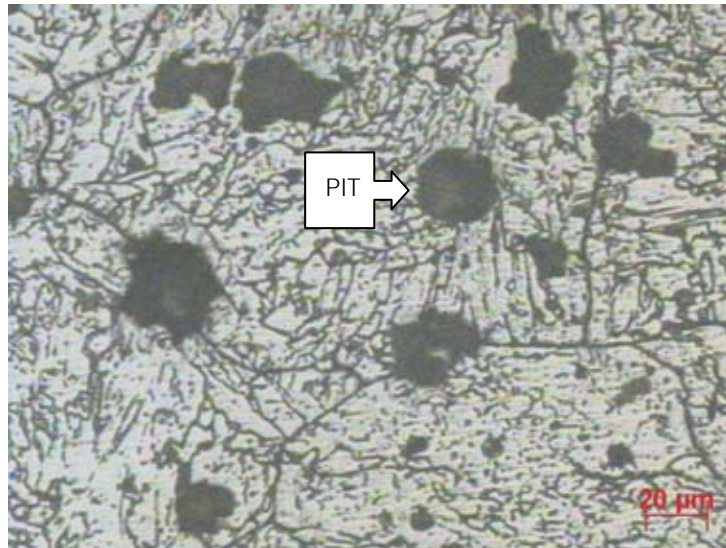


ข. พีไอช 7

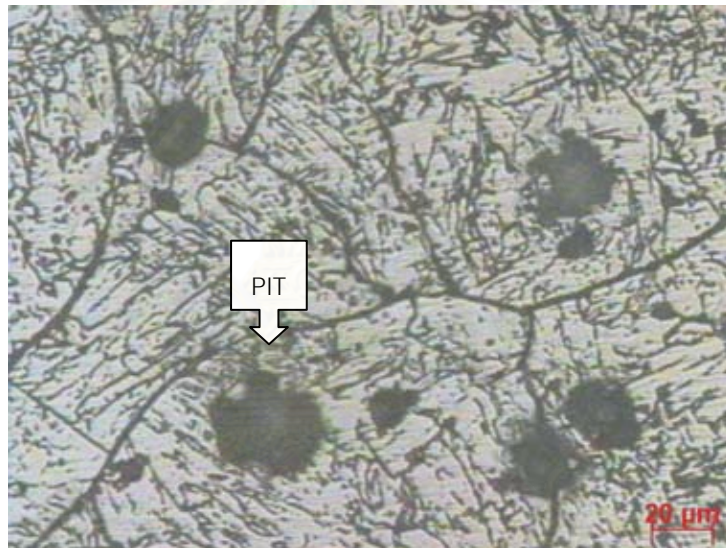


ค. พีไอช 10

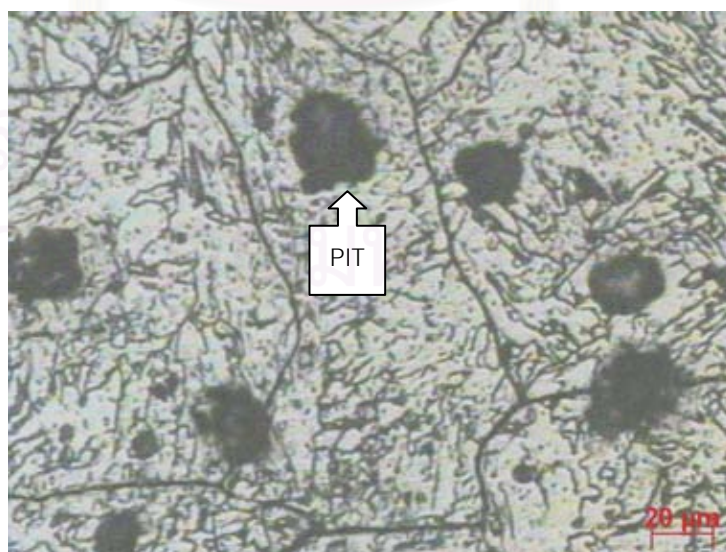
รูปที่ 4.25 บริเวณที่ถูกกัดกร่อนของเหล็กกล้าชนิด Fe-15Ni ในสารละลาย A  
ที่ค่า ก.พีไอช 2 ข. พีไอช 7 ค. พีไอช 10



ก. พีไอช 2

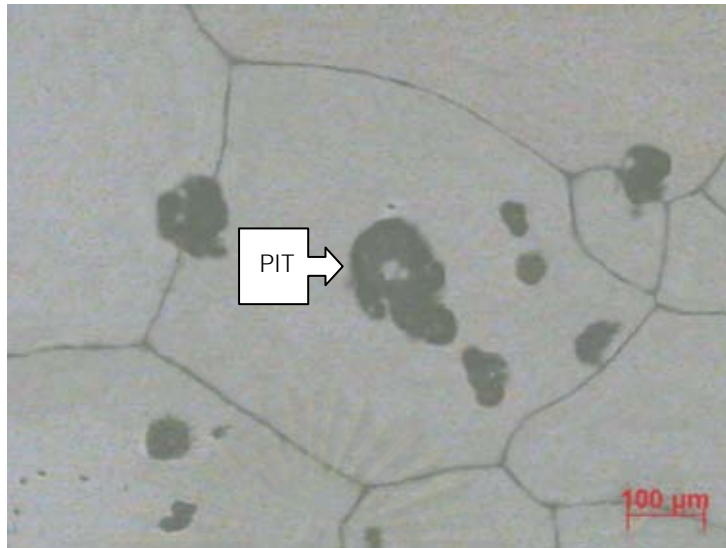


ข. พีไอช 7

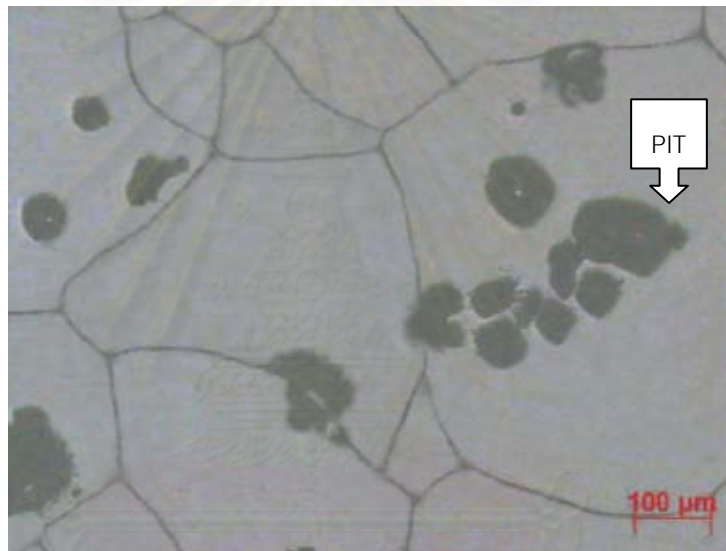


ค. พีไอช 10

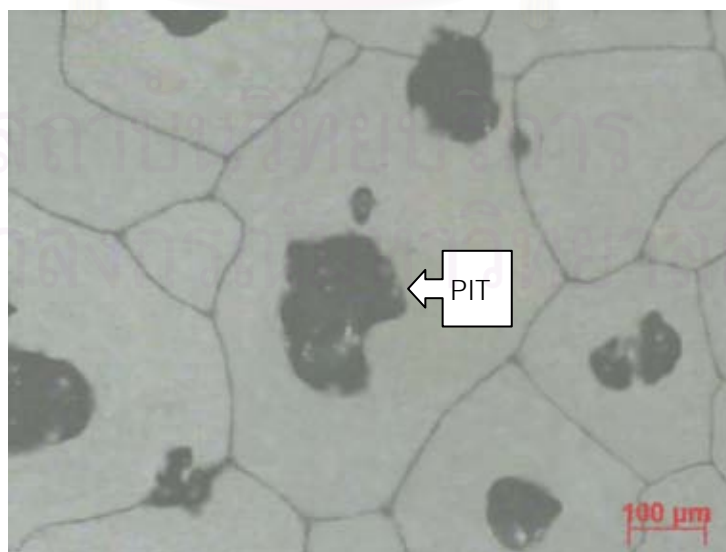
รูปที่ 4.26 บริเวณที่ถูกกัดกร่อนของเหล็กกล้าชนิด Fe-15Ni ในสารละลาย B  
ที่ค่า ก.พีไอช 2 ข. พีไอช 7 ค. พีไอช 10



ก. พีเอช 2

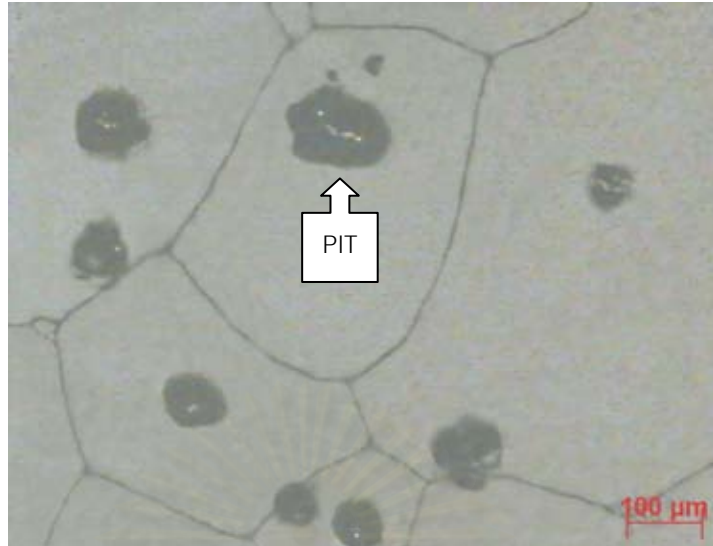


ข. พีเอช 7

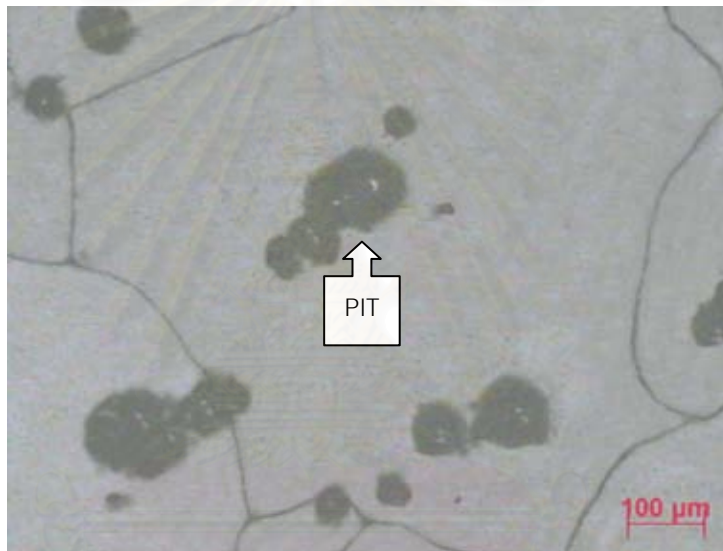


ค. พีเอช 10

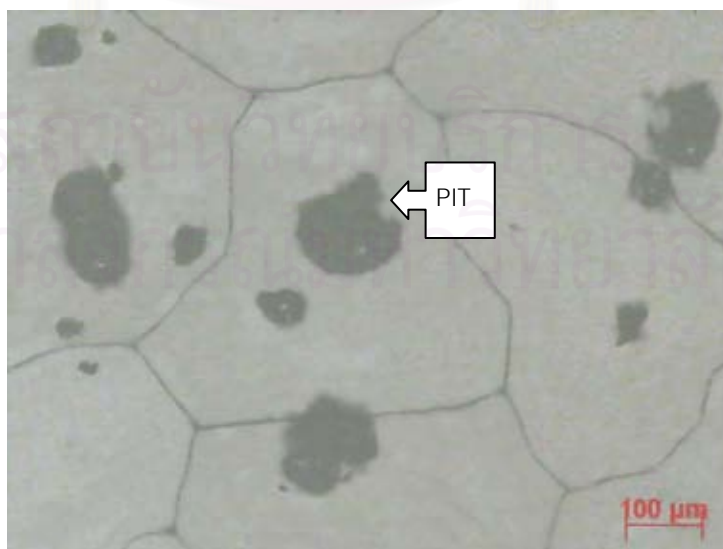
รูปที่ 4.27 บริเวณที่ถูกกัดกร่อนของเหล็กกล้าชนิด Fe-40Ni ในสารละลาย A  
ที่ค่า ก.พีเอช 2 ข. พีเอช 7 ค. พีเอช 10



ก. พีเอช 2



ข. พีเอช 7



ค. พีเอช 10

รูปที่ 4.28 บริเวณที่ถูกกัดกร่อนของเหล็กกล้าชนิด 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



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## 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,  $I_p$ ) ค่าศักย์ไฟฟ้าเริ่มเกิดพาสซีฟ (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 มีพฤติกรรมการสร้างฟิล์มพาสซีฟ โดยปริมาณนิกเกิลที่เพิ่มขึ้นจาก 23 - 40 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ช่วยลดค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าขณะวัสดุเกิดฟิล์มที่ผิวและเพิ่มค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนแบบรูเข็ม
3. พฤติกรรมการกัดกร่อนของเหล็กกล้าโครเมียมและเหล็กกล้านิกเกิลที่ค่าพีเอช 2 มีความรุนแรงกว่าที่ค่าพีเอช 7 และ 10
4. ในสารละลาย B เหล็กกล้าโครเมียมและเหล็กกล้านิกเกิล มีค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อน ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อน ค่าอัตราการกัดกร่อน ค่าศักย์ไฟฟ้าเริ่มเกิดพาสซีฟ และ

ค่าศักย์ไฟฟ้าการกักถ่วงแบบรูเข็มหรือหลุมน้อยกว่าในสารละลาย A ขณะที่ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าขณะวัสดุเกิดฟิล์มที่ผิวในสารละลาย B มากกว่าในสารละลาย A เล็กน้อย

5. การกักถ่วงแบบรูเข็มหรือหลุมในช่วงศักย์ไฟฟ้าทรานพาสซีพของเหล็กกล้าโครเมียมและเหล็กกล้านิกเกิลกระจายตัวทั่วไปภายในเกรนและที่ขอบเกรน



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## รายการอ้างอิง

1. A. J. Sedriks, Corrosion of Stainless Steels, 2<sup>nd</sup> ed., John-Wiley & Sons, NewYork, 1996. p. 6-114.
2. P. Marcus and J.Oudar, Corrosion Mechanism in Theory and Practice 1<sup>st</sup>ed., Marcel Dekker,Inc., Newyork,1995. p. 56-197.
3. P. Lacombe, B.Baroux and G. Berranger, Stainless Steels, 1<sup>st</sup> ed., Les Editions de Physique Les Ulis, France, 1993 . p.117-124.
4. D. A. Jones, Principle and Prevention of Corrosion, 2<sup>nd</sup> ed., Maxwell Macmillan International Publishing Group, Singapore, 1991. p. 42-120.
5. พรพสา วงษ์ปัญญา ผลของไนโตรเจนต่อความต้านทานการกัดกร่อนของเหล็กกล้าไร้สนิม ดูปิเล็กซ์ที่มีส่วนผสมโครเมียม 28% นิกเกิล 7% ในสารละลายไฮเดียมคลอไรด์ความเข้มข้น 3.5 % โดยน้ำหนัก วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต 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 นิรัฐจรรยาองค์ 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 Evaluation<sup>3rd</sup>,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, Electrochimica 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, 1<sup>st</sup> 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", Electrochimica 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, "Electrochemical polarization 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.



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## ภาคผนวก ก

### เส้นโพลาริเซชันที่ได้จากการทดลอง

#### สภาวะที่ใช้ในการทดลอง

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

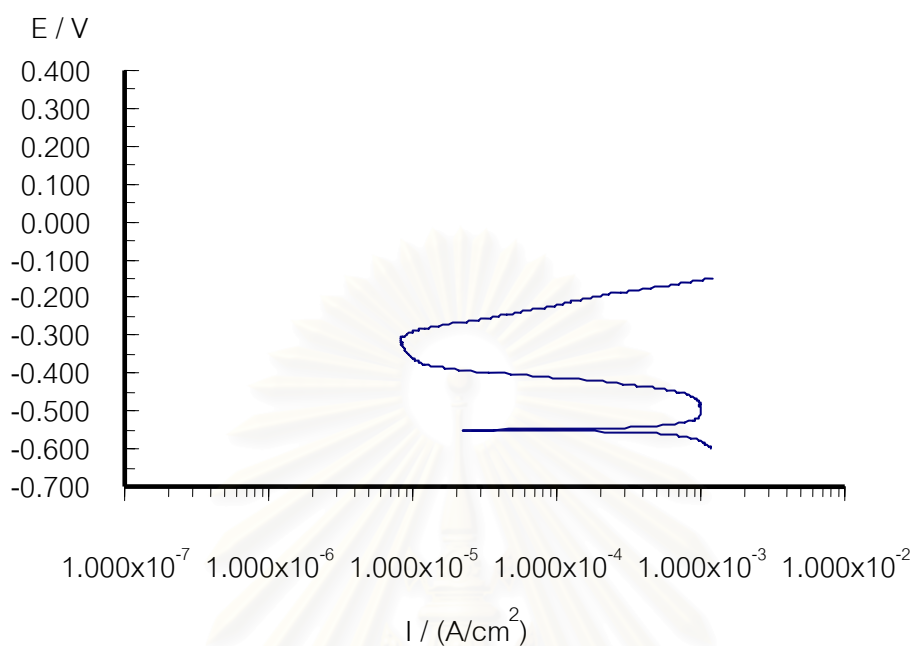
ตารางที่ ก.1 ผลของ equilibrium time ต่อศักย์ไฟฟ้าวงจรเปิดของชิ้นงานในสารละลาย

โซเดียมคลอไรด์เข้มข้น 3.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส

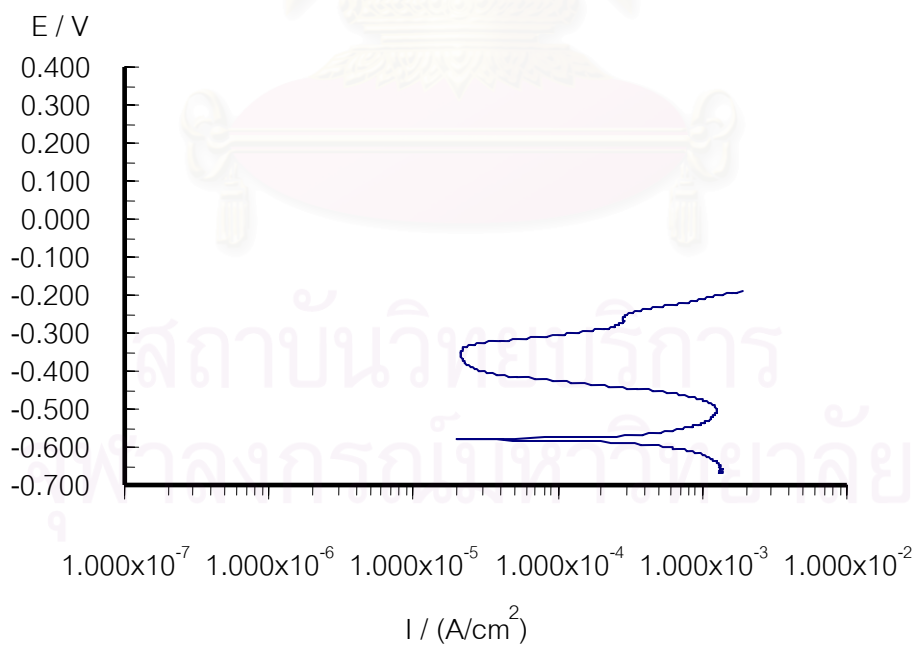
เวลาที่ใช้ (นาที)	ค่าศักย์ไฟฟ้า (โวลต์)
5	-0.092
10	-0.082
15	-0.086
20	-0.083
30	-0.072
40	-0.075
45	-0.075
50	-0.075
60	-0.075



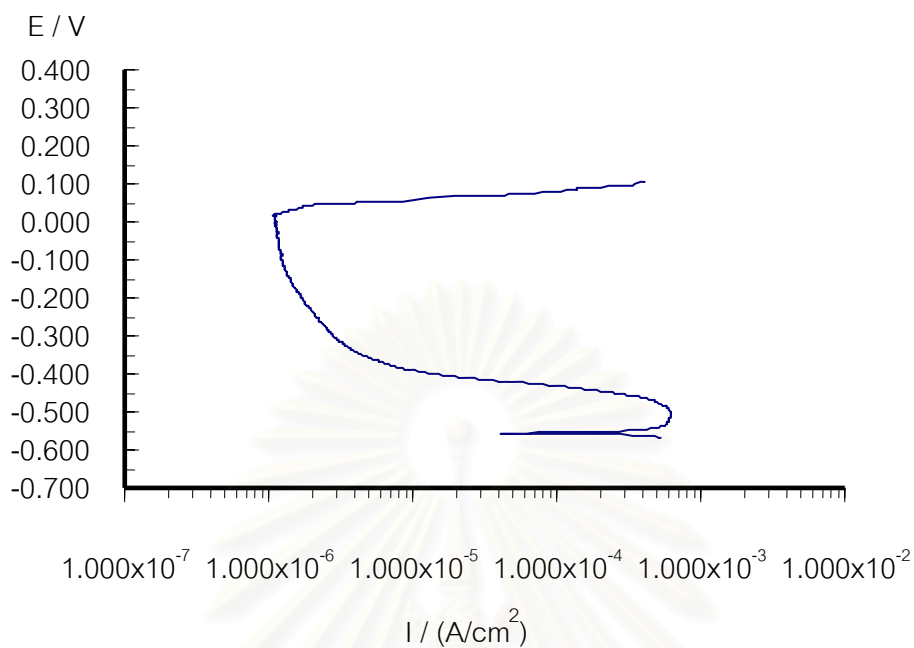
ก.1 เส้นโพลาริเซชันของเหล็กกล้าโครเมียมในสารละลาย A และ B อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส



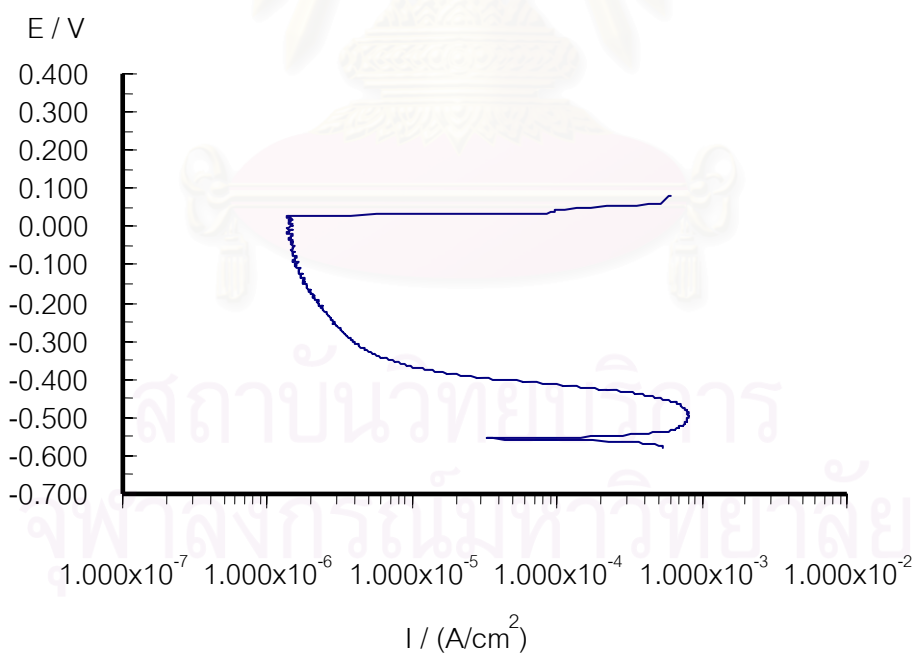
รูปที่ ก.1 เส้นโพลาริเซชันของเหล็กกล้าโครเมียม Fe-13Cr ในสารละลาย A พีเอช 2 (พีเอช 2.00 - 1.98)



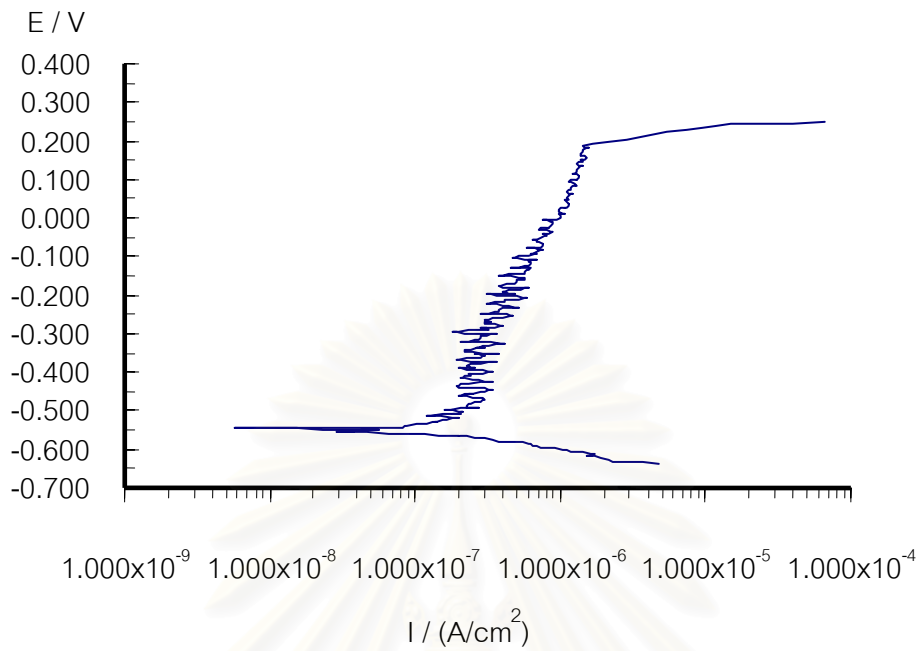
รูปที่ ก.2 เส้นโพลาริเซชันของเหล็กกล้าโครเมียม Fe-13Cr ในสารละลาย B พีเอช 2 (พีเอช 2.00 - 1.98)



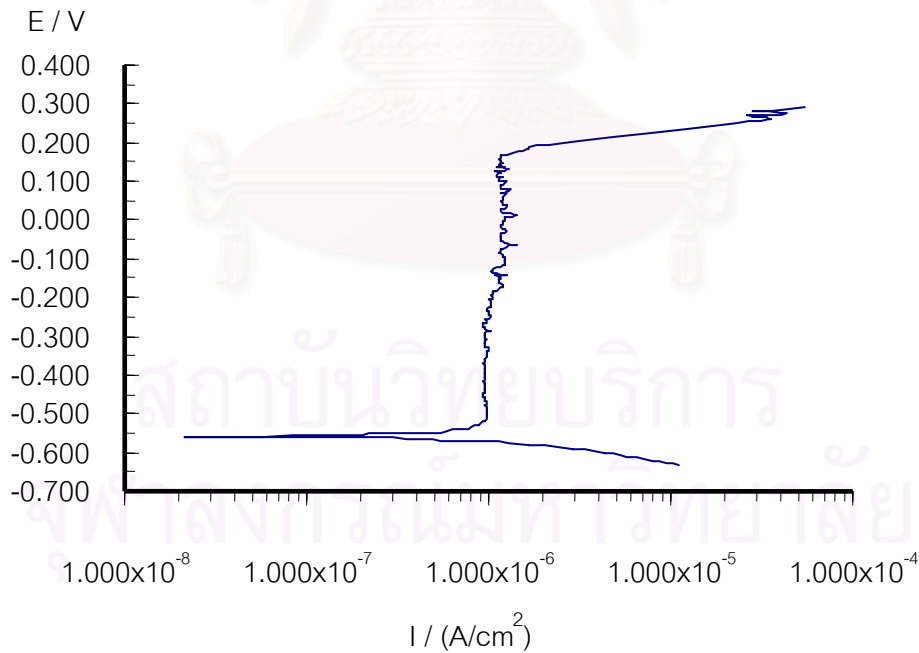
รูปที่ ก.3 เส้นโพลาริเซชันของเหล็กกล้าโครเมียม Fe-15Cr ในสารละลาย A พีเอช 2 (พีเอช 2.00 - 1.99)



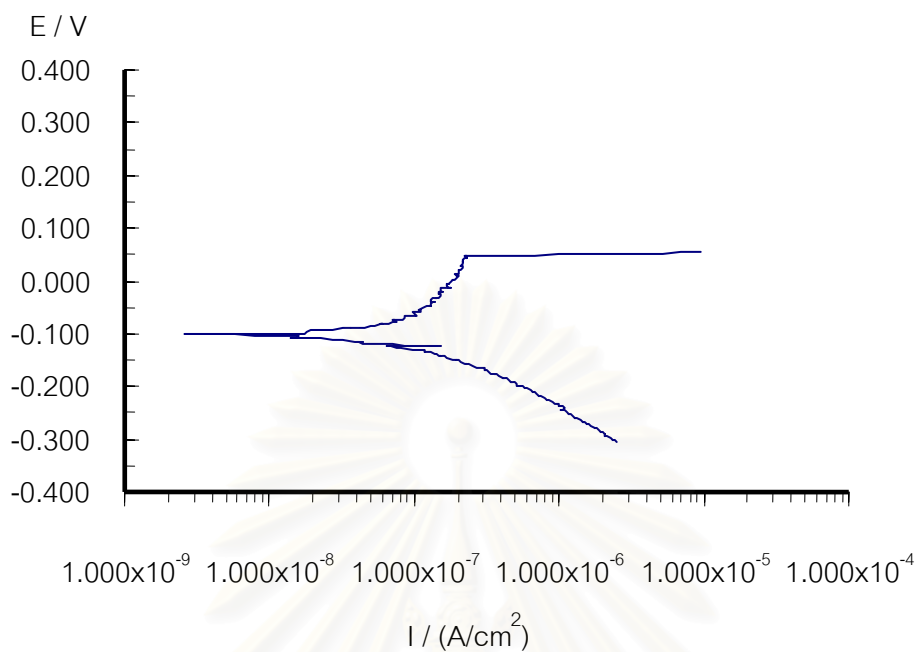
รูปที่ ก.4 เส้นโพลาริเซชันของเหล็กกล้าโครเมียม Fe-15Cr ในสารละลาย B พีเอช 2 (พีเอช 2.00 - 1.98)



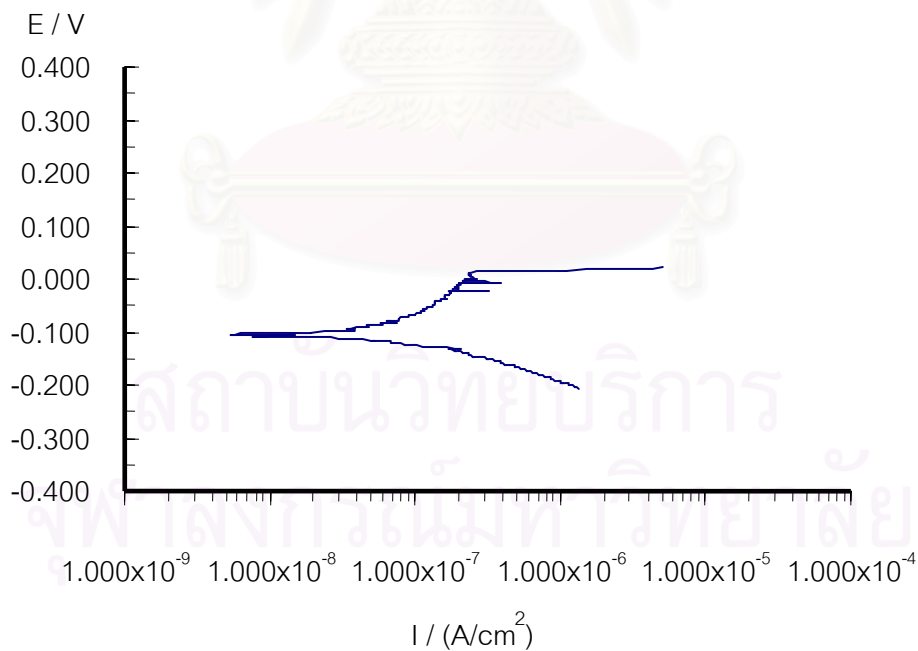
รูปที่ ก.5 เส้นโพลาริเซชันของเหล็กกล้าโครเมียม Fe-18Cr ในสารละลาย A พีเอช 2 (พีเอช 2.00 - 1.98)



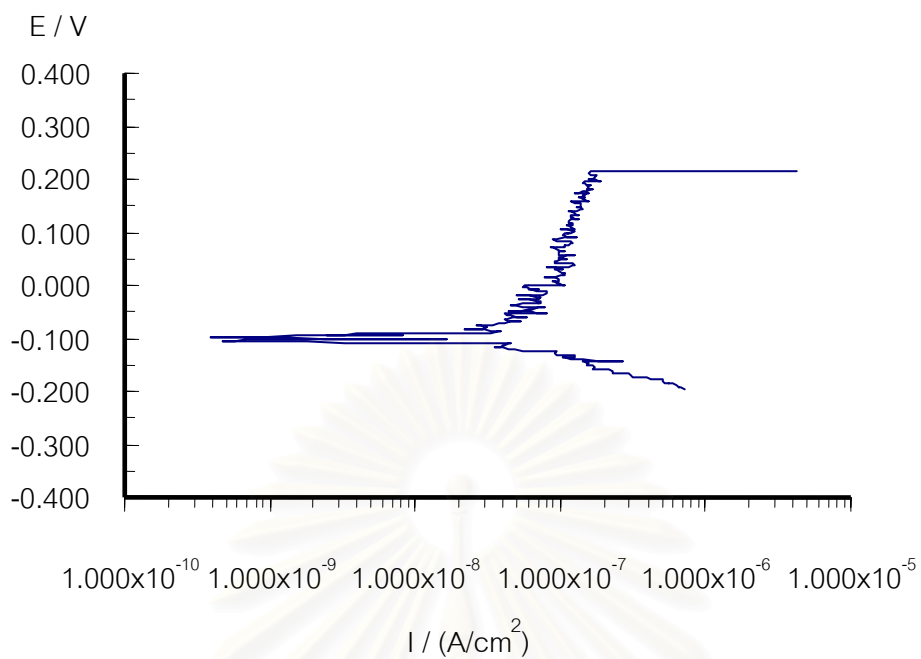
รูปที่ ก.6 เส้นโพลาริเซชันของเหล็กกล้าโครเมียม Fe-18Cr ในสารละลาย B พีเอช 2 (พีเอช 2.00 - 1.99)



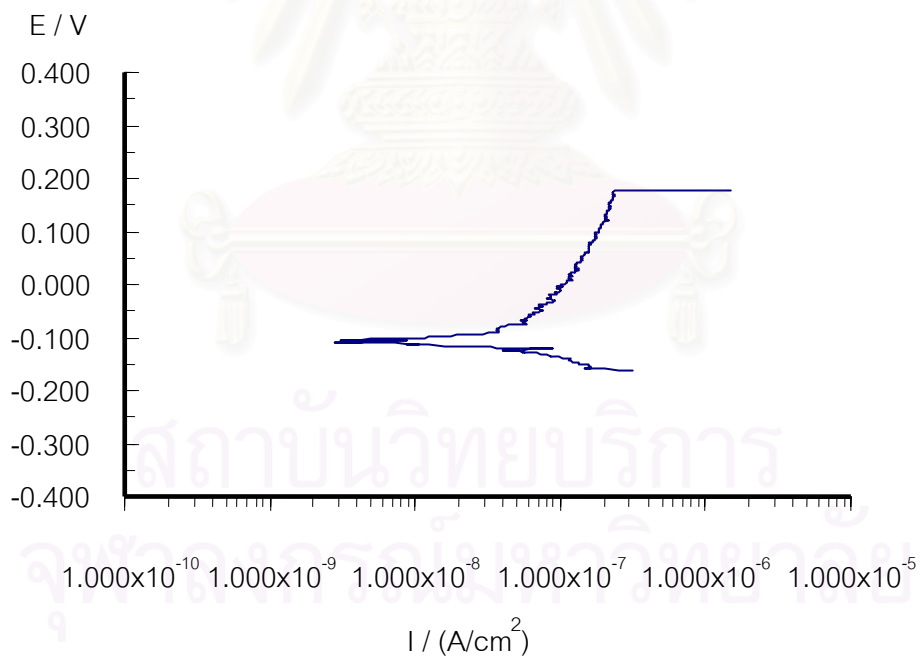
รูปที่ ก.7 เส้นโพลาริเซชันของเหล็กกล้าโครเมียม Fe-13Cr ในสารละลาย A พีเอช 7 (พีเอช 7.00 - 6.97)



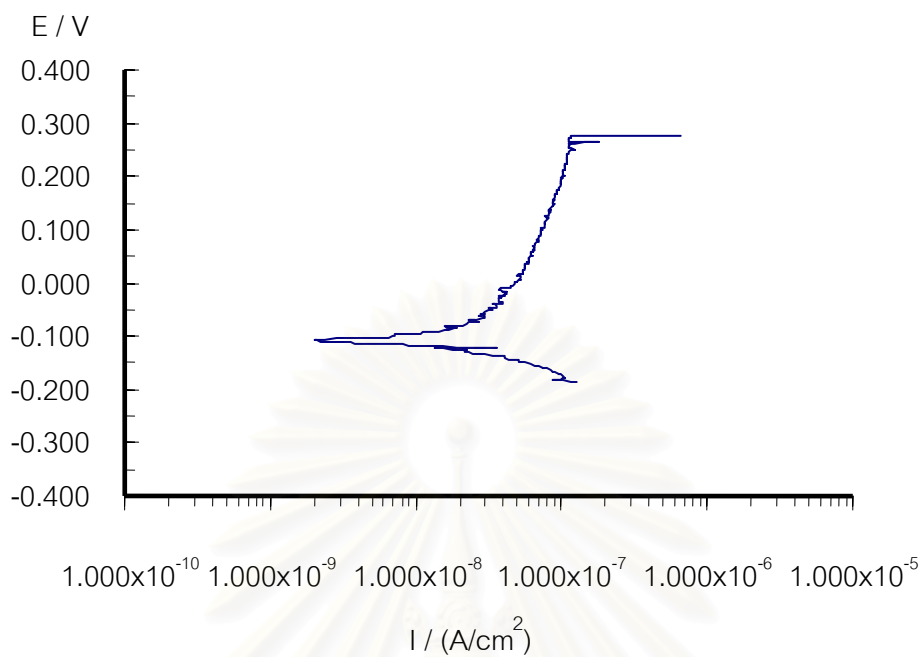
รูปที่ ก.8 เส้นโพลาริเซชันของเหล็กกล้าโครเมียม Fe-13Cr ในสารละลาย B พีเอช 7 (พีเอช 7.00 - 6.97)



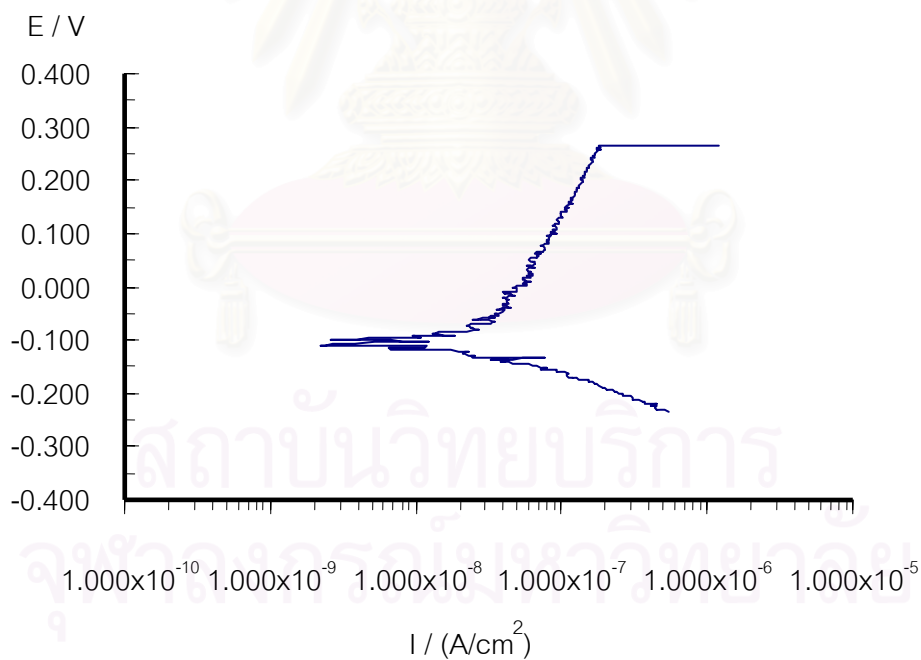
รูปที่ ก.9 เส้นโพลาริเซชันของเหล็กกล้าโครเมียม Fe-15Cr ในสารละลาย A พีเอช 7 (พีเอช 7.00 -6.99)



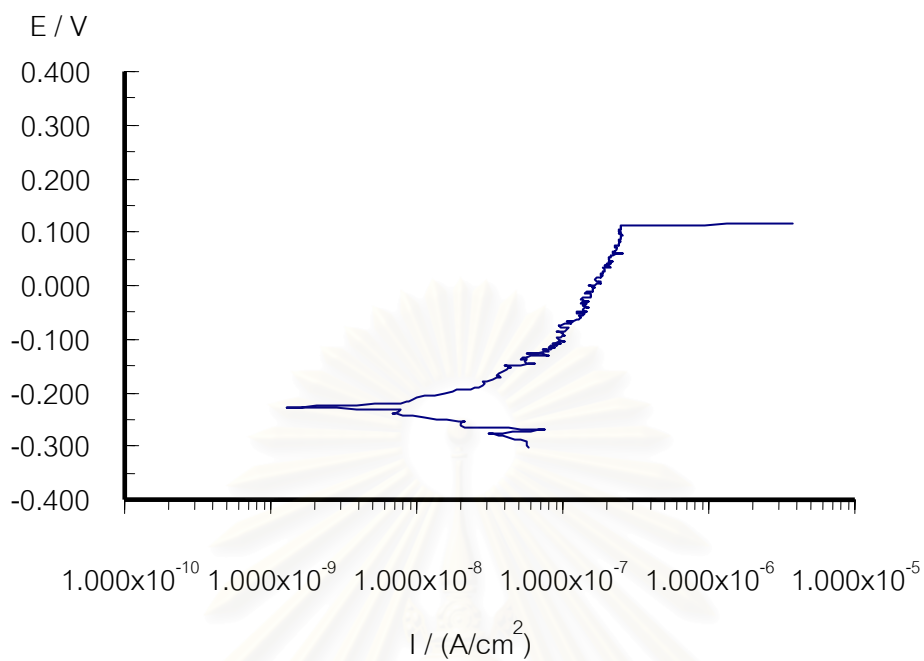
รูปที่ ก.10 เส้นโพลาริเซชันของเหล็กกล้าโครเมียม Fe-15Cr ในสารละลาย B พีเอช 7 (พีเอช 7.00 -6.99)



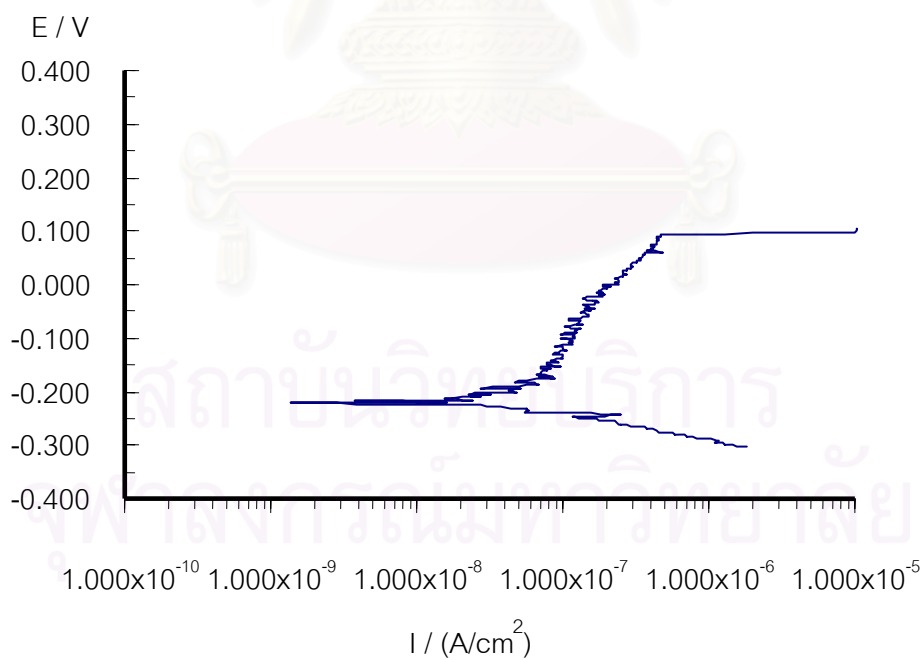
รูปที่ ก.11 เส้นโพลาริเซชันของเหล็กกล้าโครเมียม Fe-18Cr ในสารละลาย A พีเอช 7 (พีเอช 7.00 -6.99)



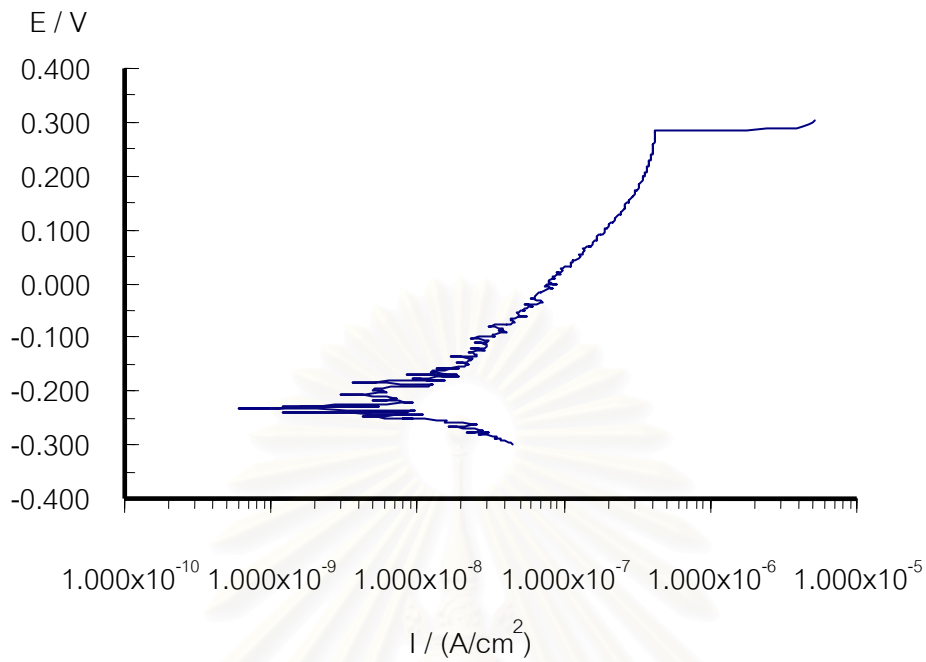
รูปที่ ก.12 เส้นโพลาริเซชันของเหล็กกล้าโครเมียม Fe-18Cr ในสารละลาย B พีเอช 7 (พีเอช 7.00 -6.99)



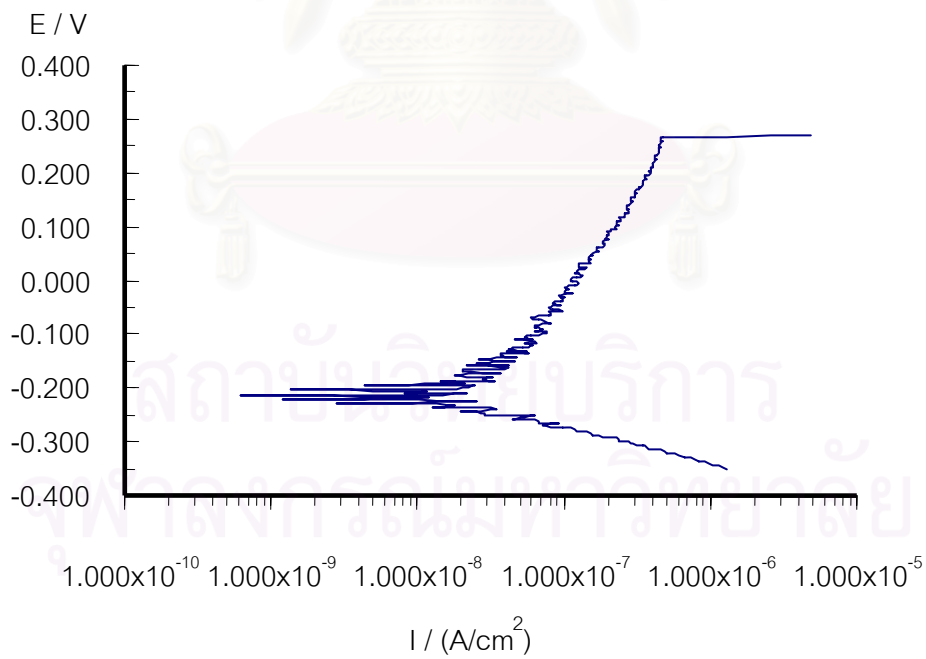
รูปที่ ก.13 เส้นโพลาริเซชันของเหล็กกล้าโครเมียม Fe-13Cr ในสารละลาย A พีเอช 10 (พีเอช 10.00-9.99)



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

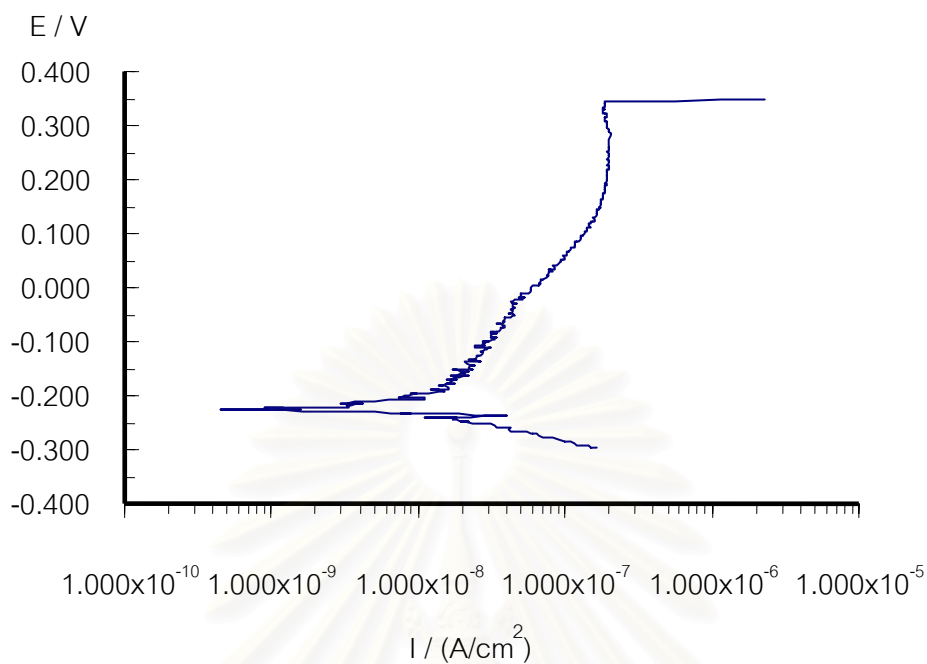


รูปที่ ก.15 เส้นโพลาริเซชันของเหล็กกล้าโครเมียม Fe-15Cr ในสารละลาย A พีไอช 10 (พีไอช 10.01-9.99)

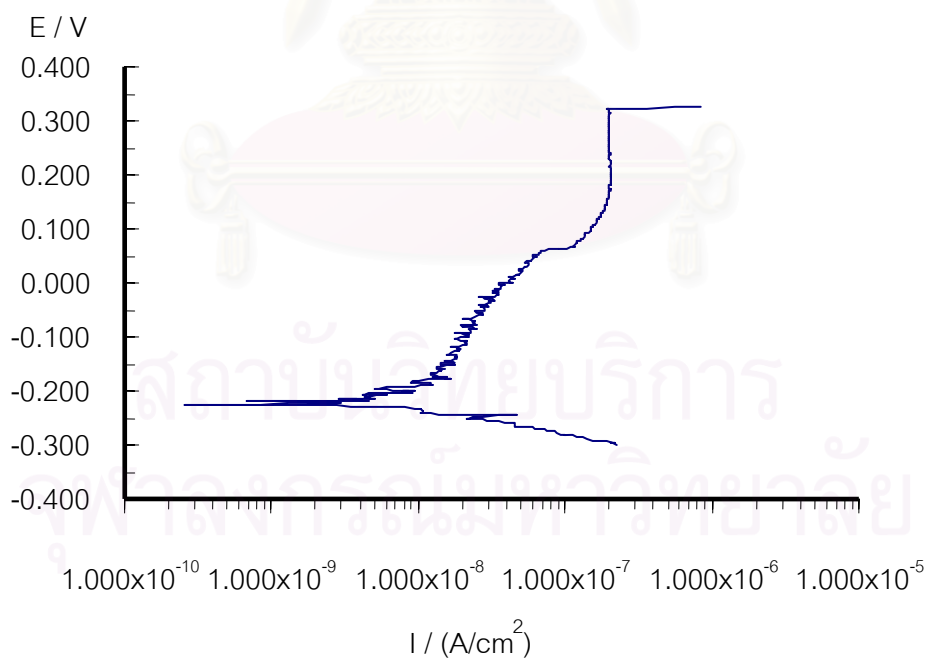


รูปที่ ก.16 เส้นโพลาริเซชันของเหล็กกล้าโครเมียม Fe-15Cr ในสารละลาย B พีไอช 10 (พีไอช 10.01-9.99)



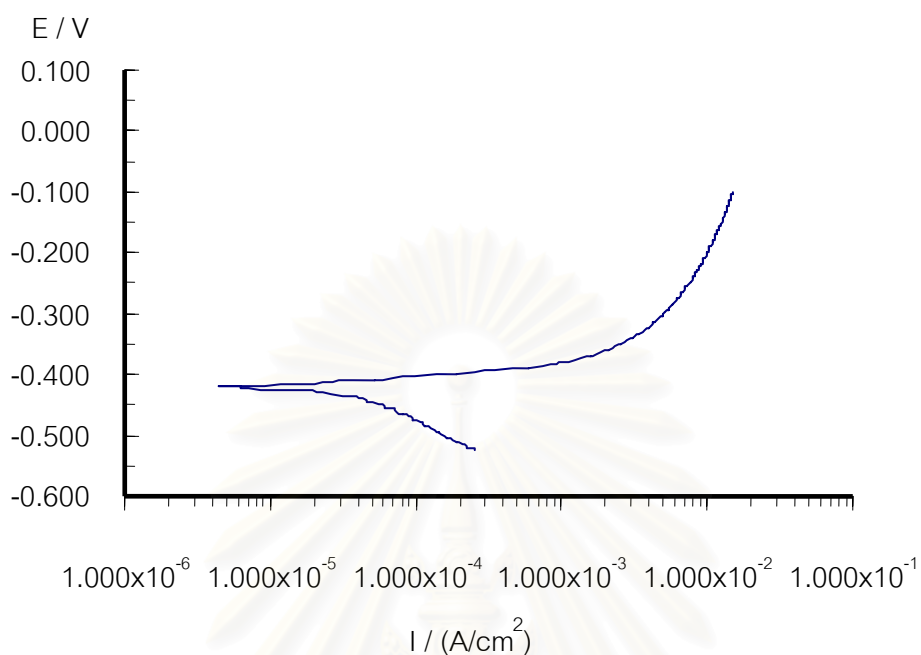


รูปที่ ก.17 เส้นโพลาริเซชันของเหล็กกล้าโครเมียม Fe-18Cr ในสารละลาย A พีเอช 10 (พีเอช 10.00-9.99)

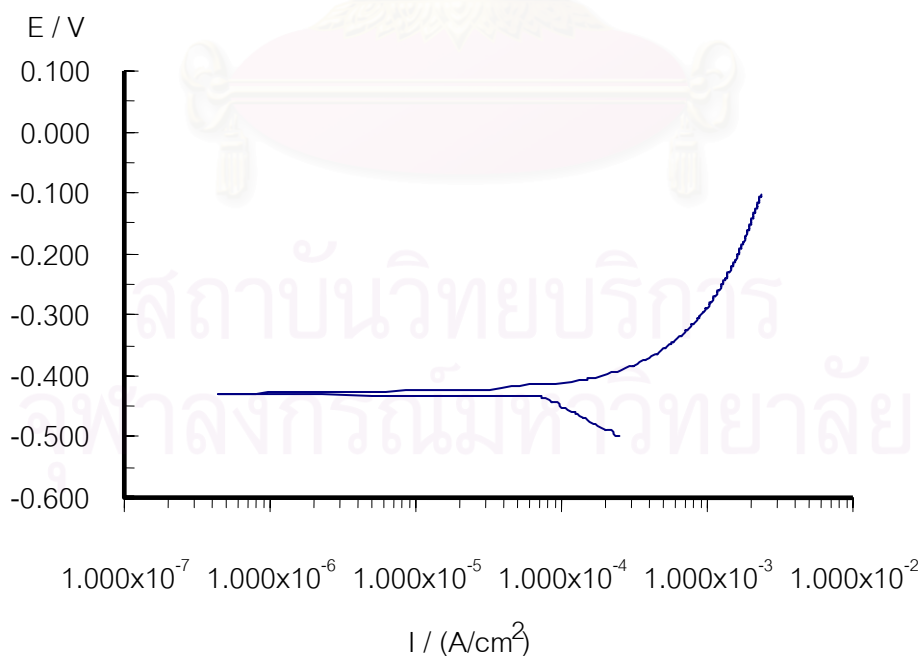


รูปที่ ก.18 เส้นโพลาริเซชันของเหล็กกล้าโครเมียม Fe-18Cr ในสารละลาย B พีเอช 10 (พีเอช 10.00-9.99)

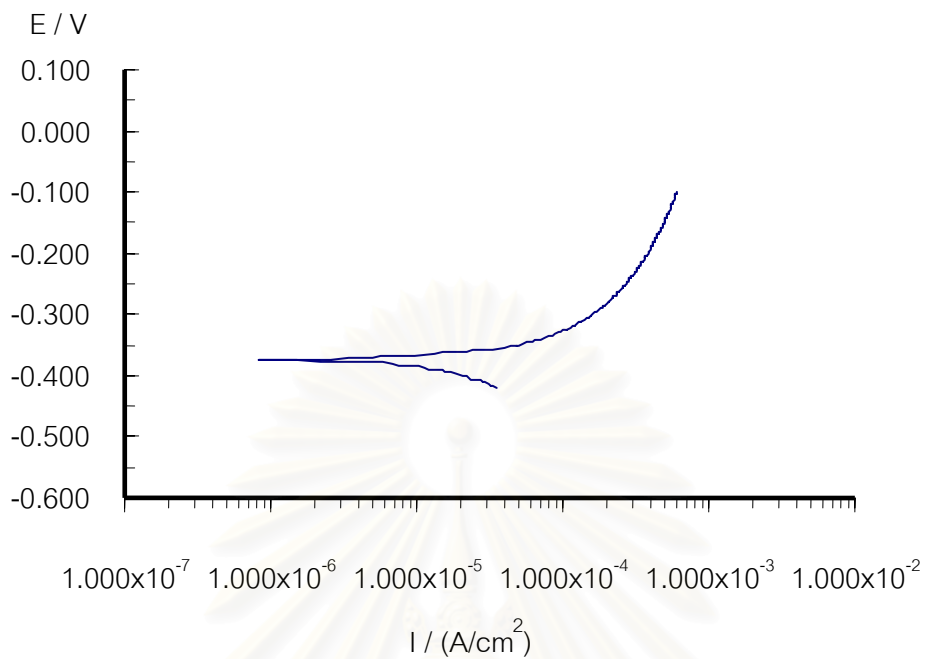
ก.2 เส้นโพลาริเซชันของเหล็กกล้าชนิดเกิดในสารละลาย A และ B อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส



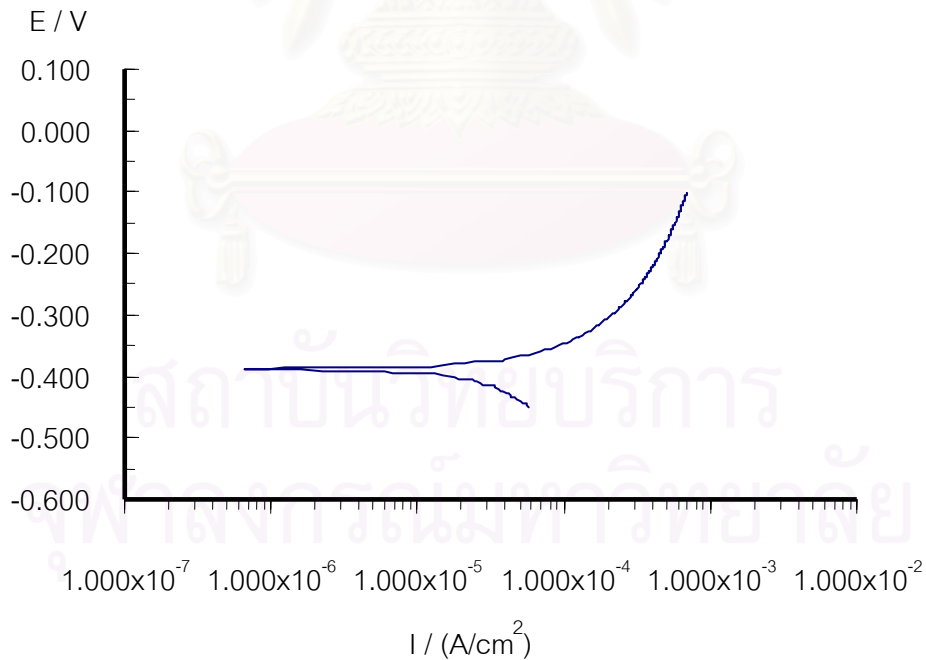
รูปที่ ก.19 เส้นโพลาริเซชันของเหล็กกล้าชนิดเกิด Fe-15Ni ในสารละลาย A พีเอช 2 (พีเอช 2.00-1.98)



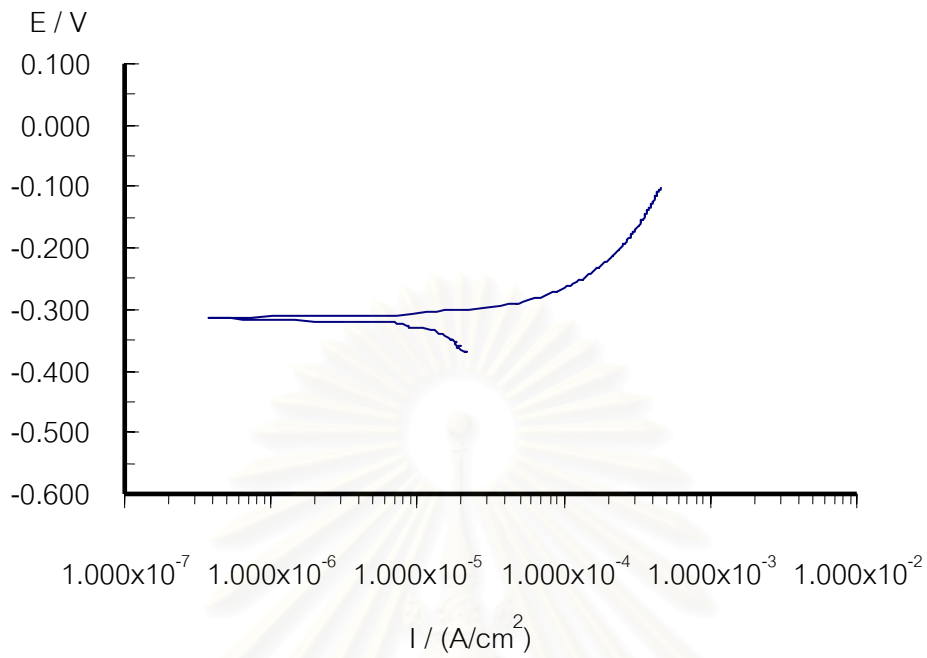
รูปที่ ก.20 เส้นโพลาริเซชันของเหล็กกล้าชนิดเกิด Fe-15Ni ในสารละลาย B พีเอช 2 (พีเอช 2.01-1.99)



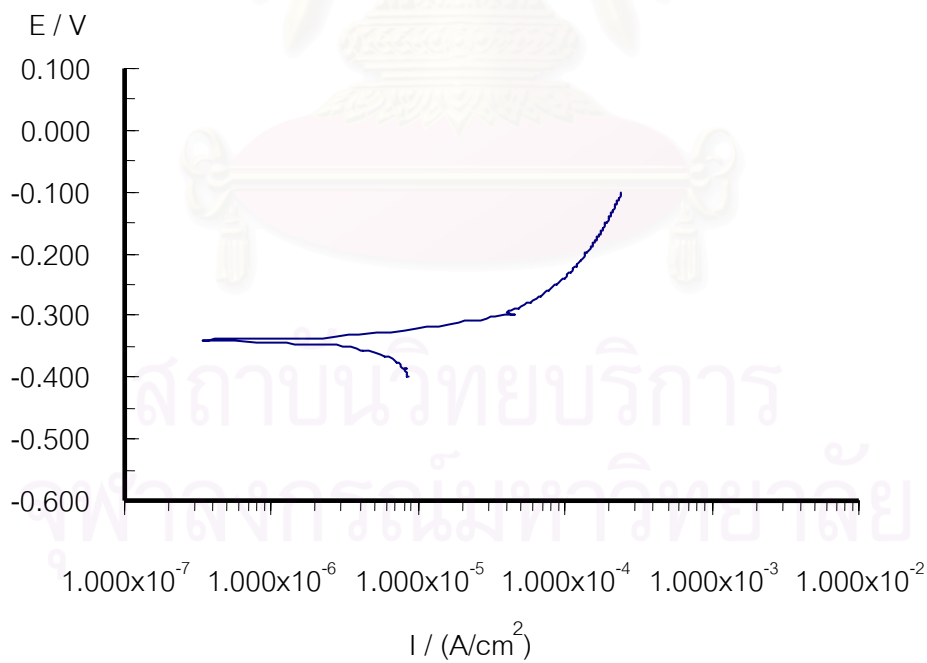
รูปที่ ก.21 เส้นโพลาริเซชันของเหล็กกล้าชนิด Fe-23Ni ในสารละลาย A พีเอช 2 (พีเอช 2.01-1.99)



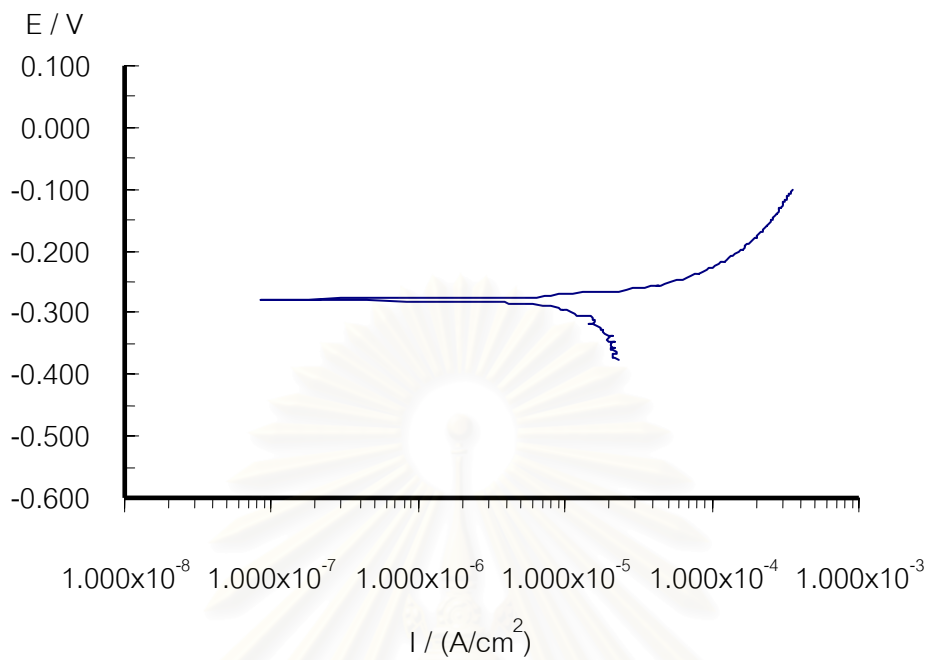
รูปที่ ก.22 เส้นโพลาริเซชันของเหล็กกล้าชนิด Fe-23Ni ในสารละลาย B พีเอช 2 (พีเอช 2.01-2.00)



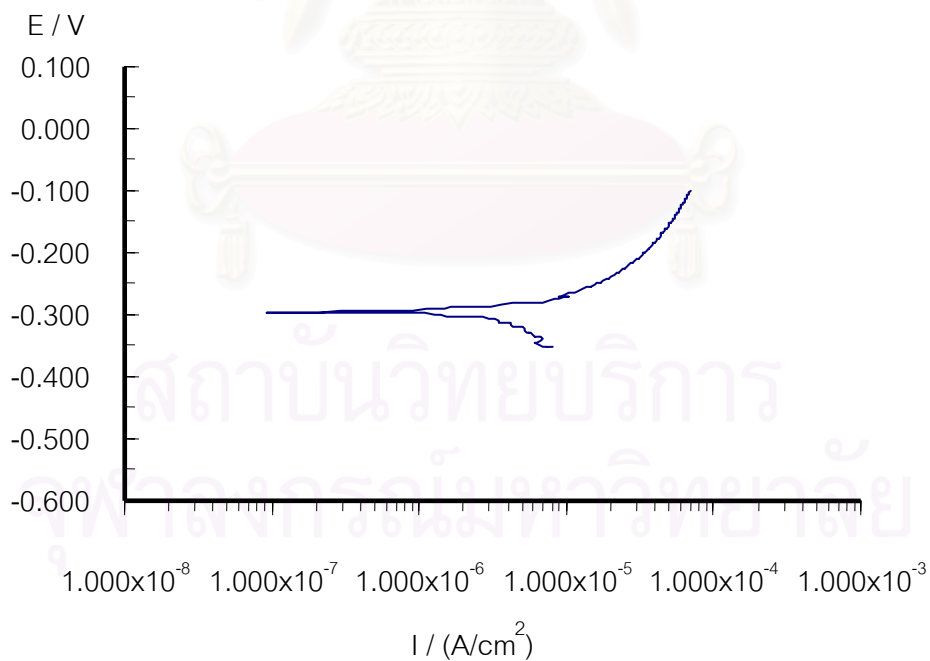
รูปที่ ก.23 เส้นโพลาริเซชันของเหล็กกล้าชนิด Fe-31Ni ในสารละลาย A พีเอช 2 (พีเอช 2.00-1.99)



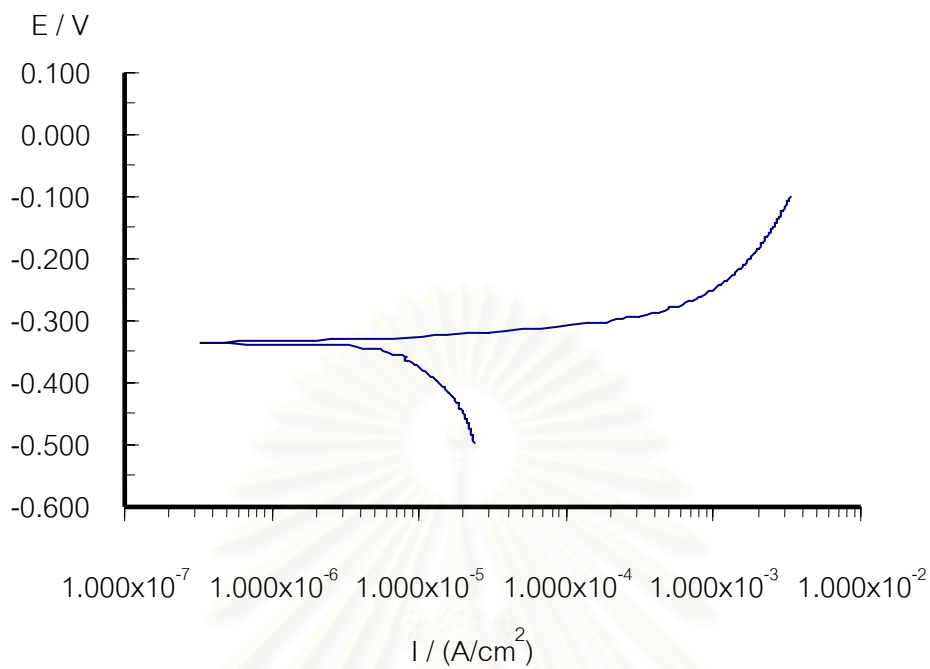
รูปที่ ก.24 เส้นโพลาริเซชันของเหล็กกล้าชนิด Fe-31Ni ในสารละลาย B พีเอช 2 (พีเอช 2.00-1.98)



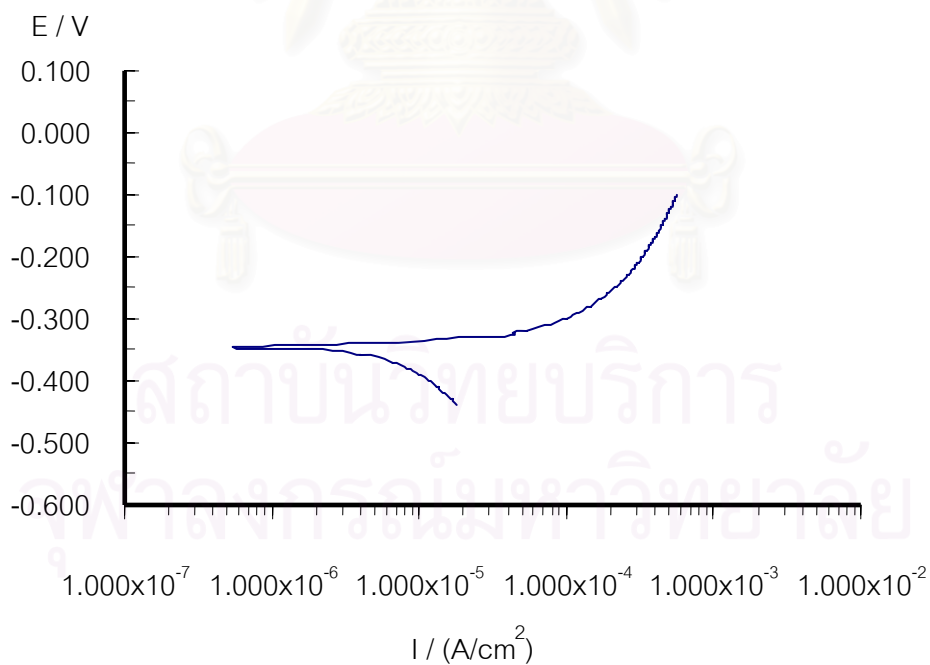
รูปที่ ก.25 เส้นโพลาริเซชันของเหล็กกล้าชนิด Fe-40Ni ในสารละลาย A พีเอช 2 (พีเอช 2.01-1.99)



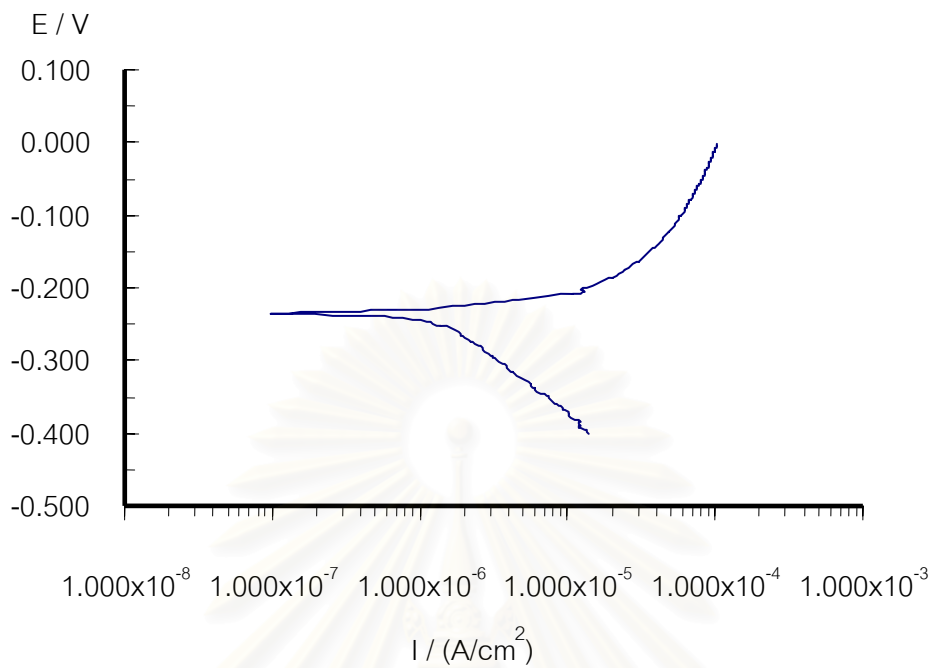
รูปที่ ก.26 เส้นโพลาริเซชันของเหล็กกล้าชนิด Fe-40Ni ในสารละลาย B พีเอช 2 (พีเอช 2.00-1.98)



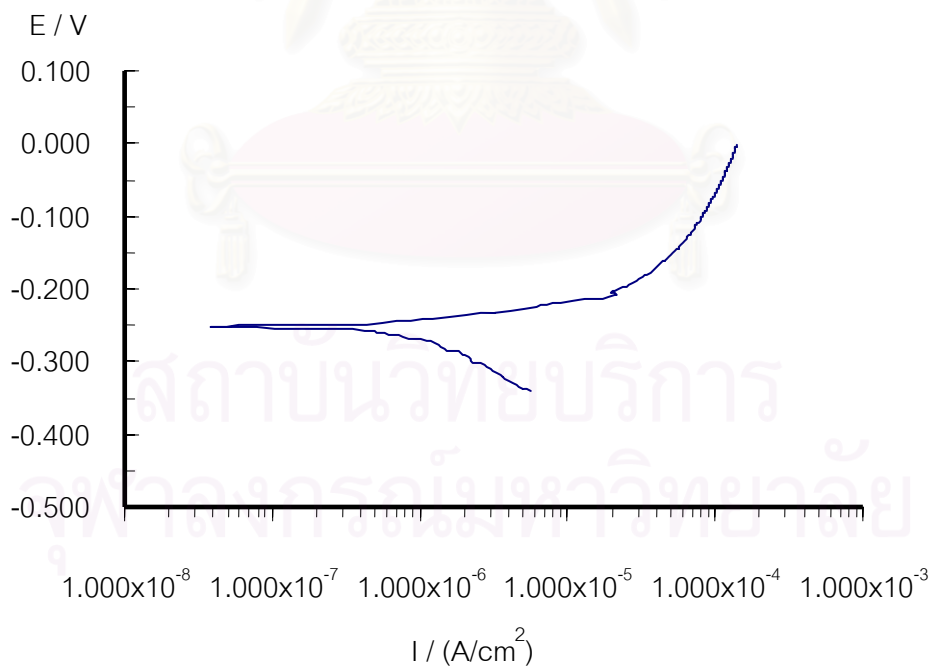
รูปที่ ก.27 เส้นโพลาริเซชันของเหล็กกล้าชนิด Fe-15Ni ในสารละลาย A พีเอช 7 (พีเอช 7.00-6.97)



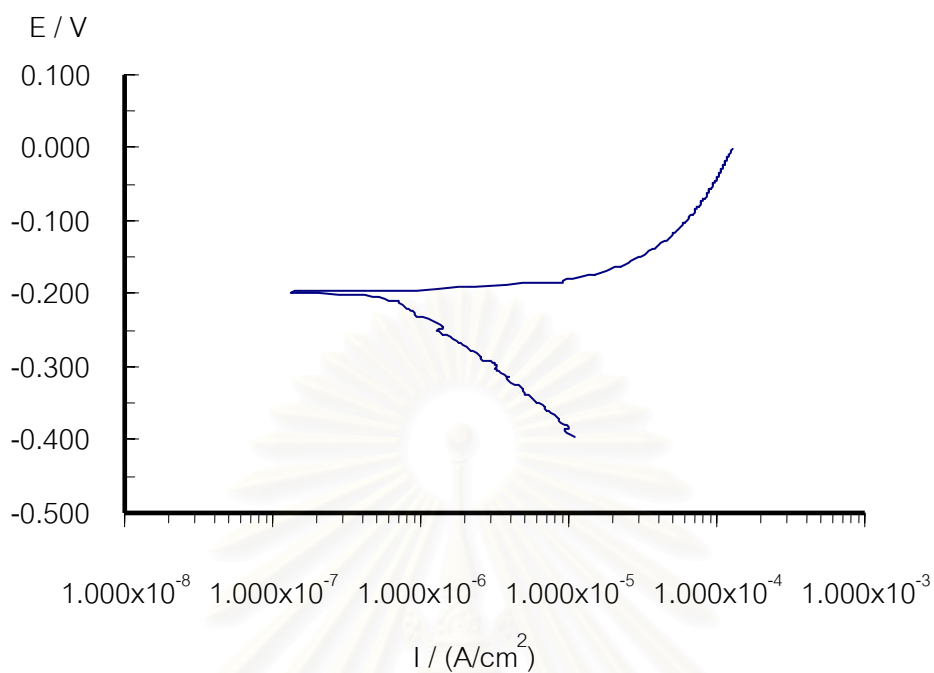
รูปที่ ก.28 เส้นโพลาริเซชันของเหล็กกล้าชนิด Fe-15Ni ในสารละลาย B พีเอช 7 (พีเอช 7.00-6.97)



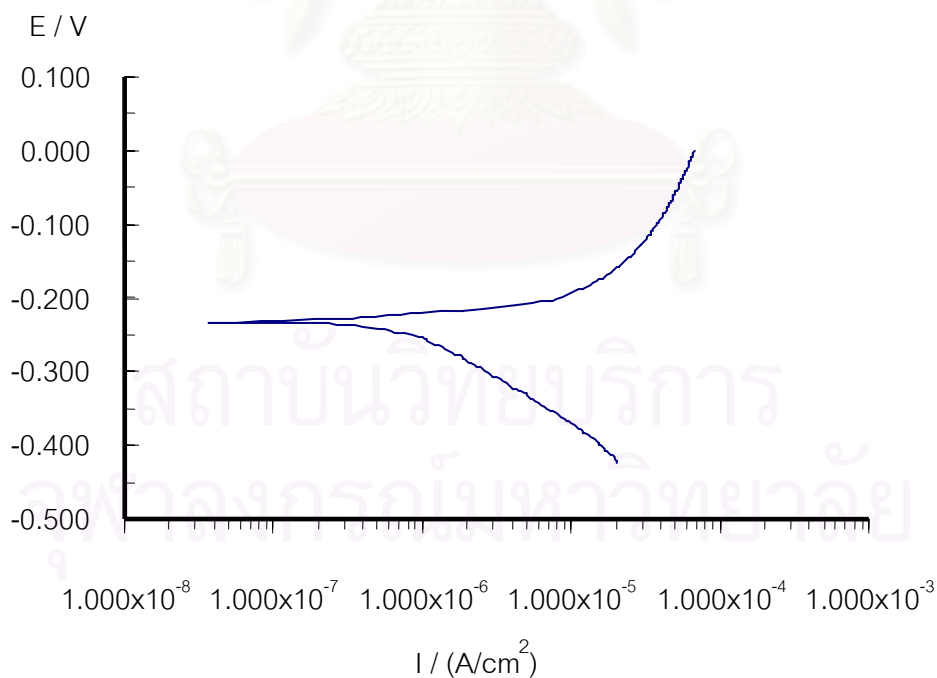
รูปที่ ก.29 เส้นโพลาริเซชันของเหล็กกล้าชนิด Fe-23Ni ในสารละลาย A พีเอช 7 (พีเอช 7.01-6.97)



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

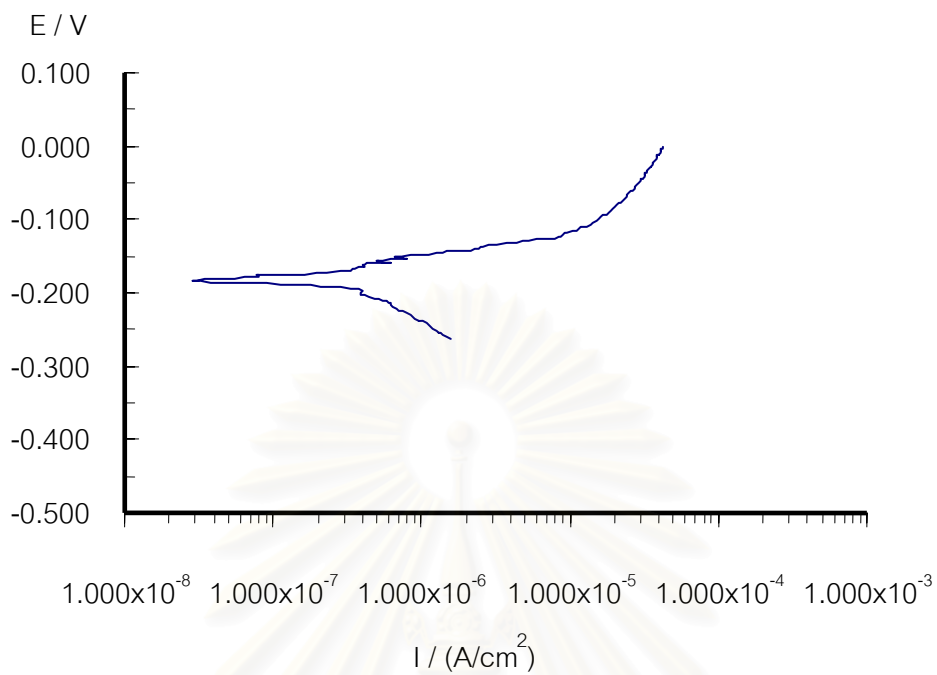


รูปที่ ก.31 เส้นโพลาริเซชันของเหล็กกล้าชนิด Fe-31Ni ในสารละลาย A พีเอช 7 (พีเอช 7.01-6.98)

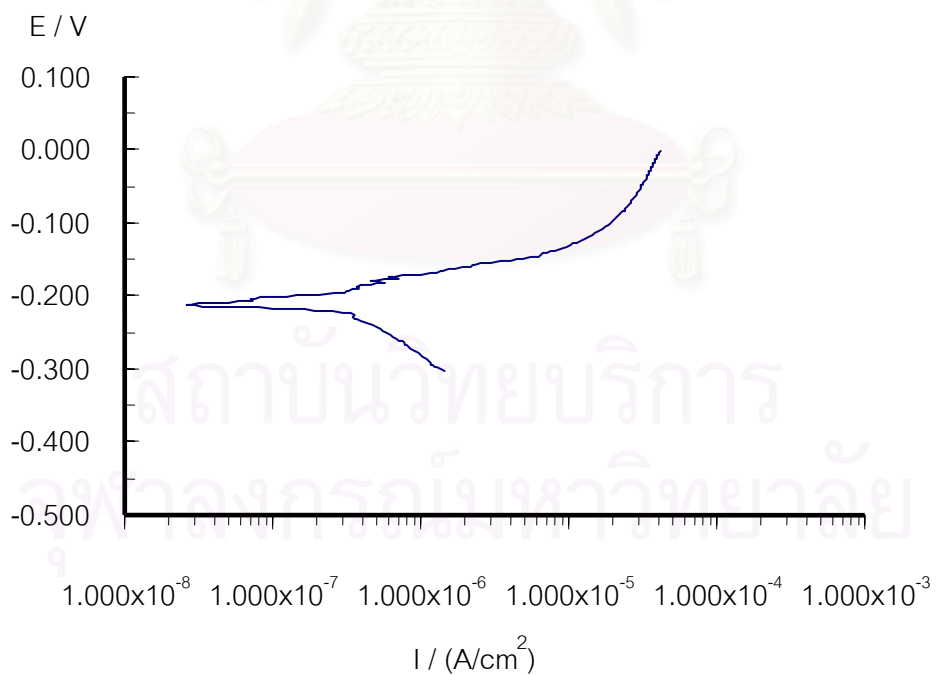


รูปที่ ก.32 เส้นโพลาริเซชันของเหล็กกล้าชนิด Fe-31Ni ในสารละลาย B พีเอช 7 (พีเอช 7.00-6.99)

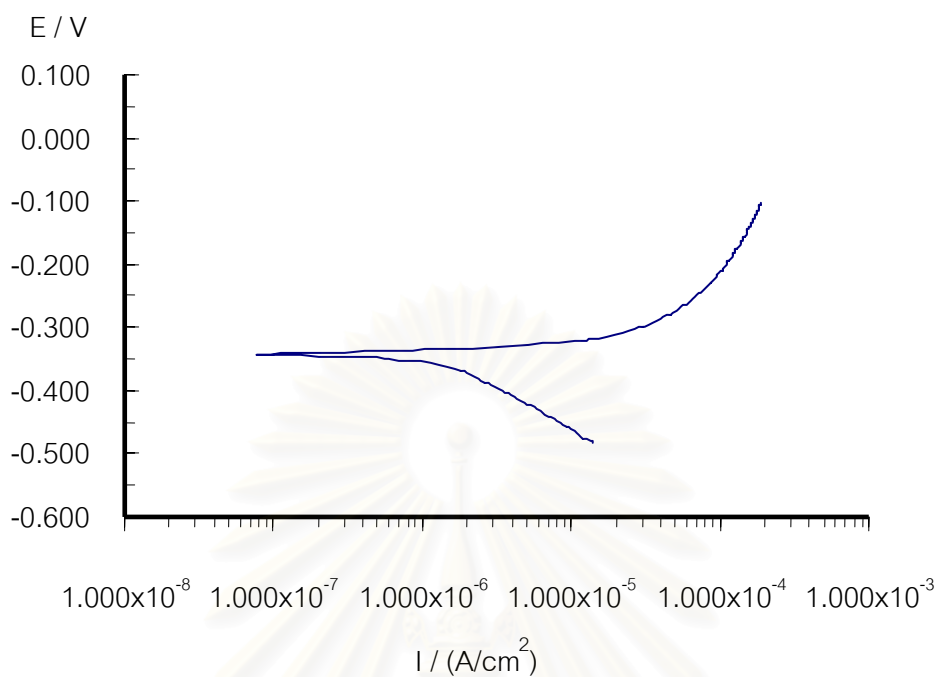




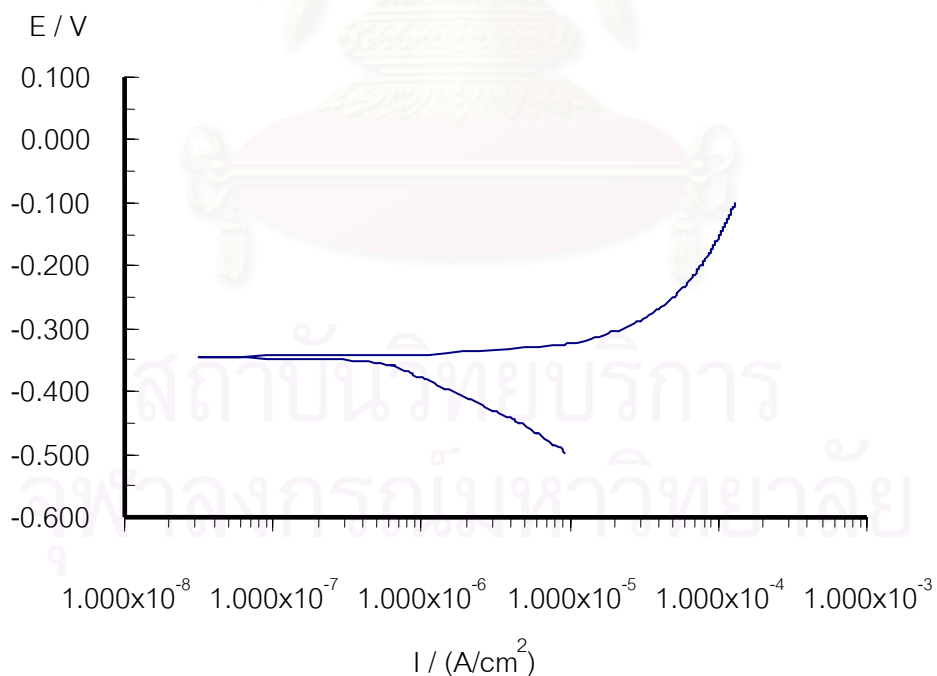
รูปที่ ก.33 เส้นโพลาริเซชันของเหล็กกล้าชนิด Fe-40Ni ในสารละลาย A พีเอช 7 (พีเอช 7.00-6.98)



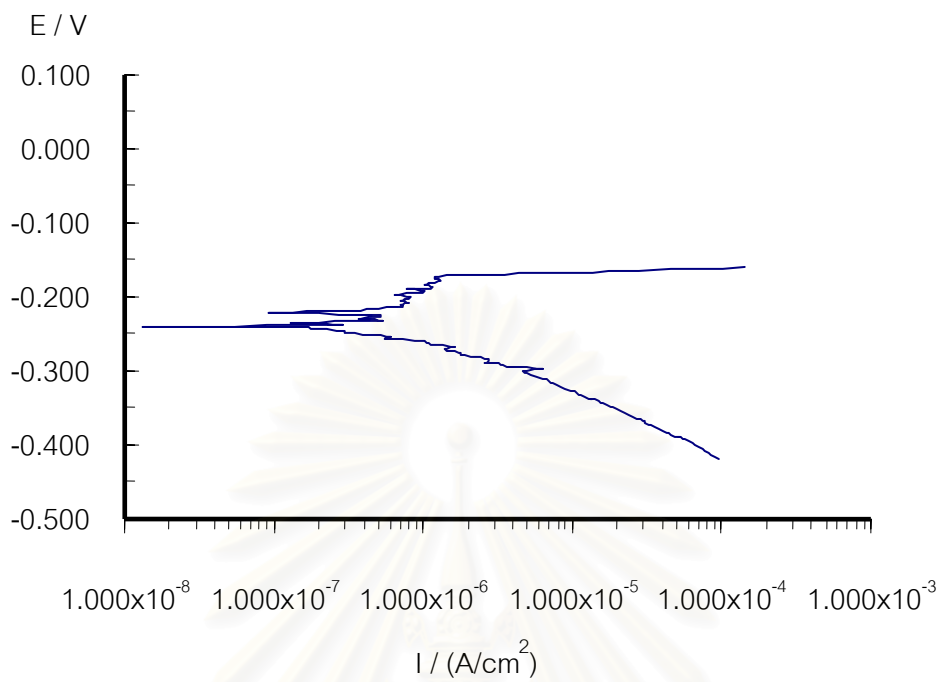
รูปที่ ก.34 เส้นโพลาริเซชันของเหล็กกล้าชนิด Fe-40Ni ในสารละลาย B พีเอช 7 (พีเอช 7.00-6.98)



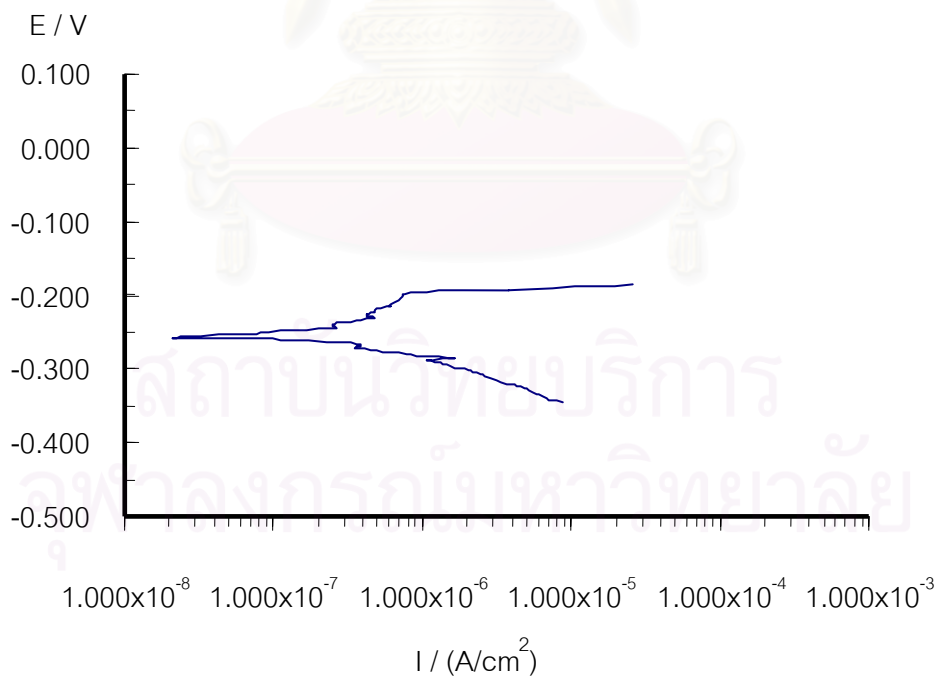
รูปที่ ก.35 เส้นโพลาริเซชันของเหล็กกล้าชนิด Fe-15Ni ในสารละลาย A พีเอช 10 (พีเอช 10.00-9.98)



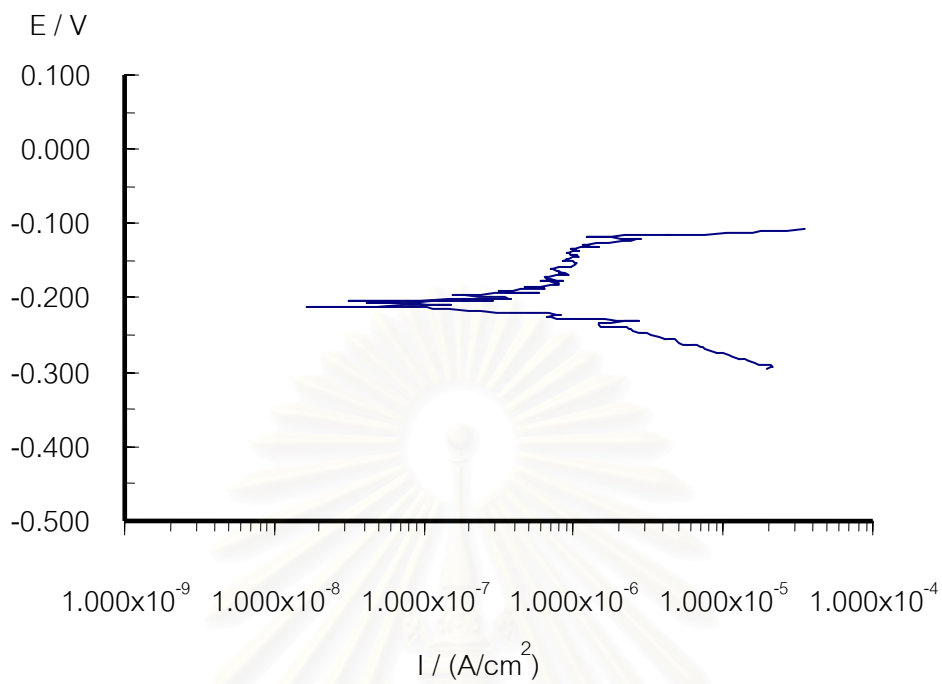
รูปที่ ก.36 เส้นโพลาริเซชันของเหล็กกล้าชนิด Fe-15Ni ในสารละลาย B พีเอช 10 (พีเอช 10.00-9.99)



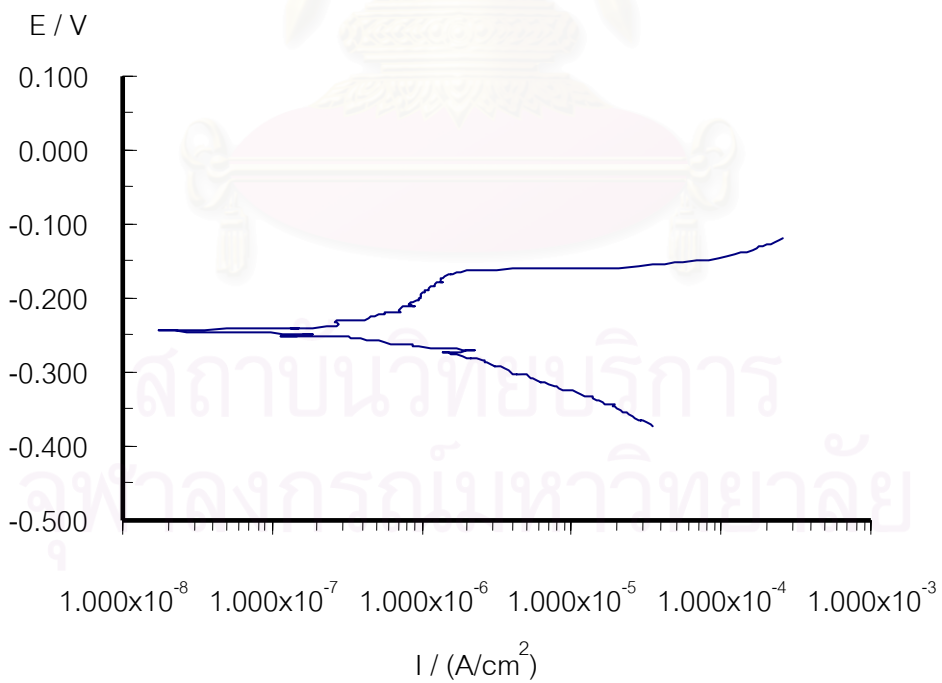
รูปที่ ก.37 เส้นโพลาริเซชันของเหล็กกล้าชนิด Fe-23Ni ในสารละลาย A พีเอช 10 (พีเอช 10.00-9.99)



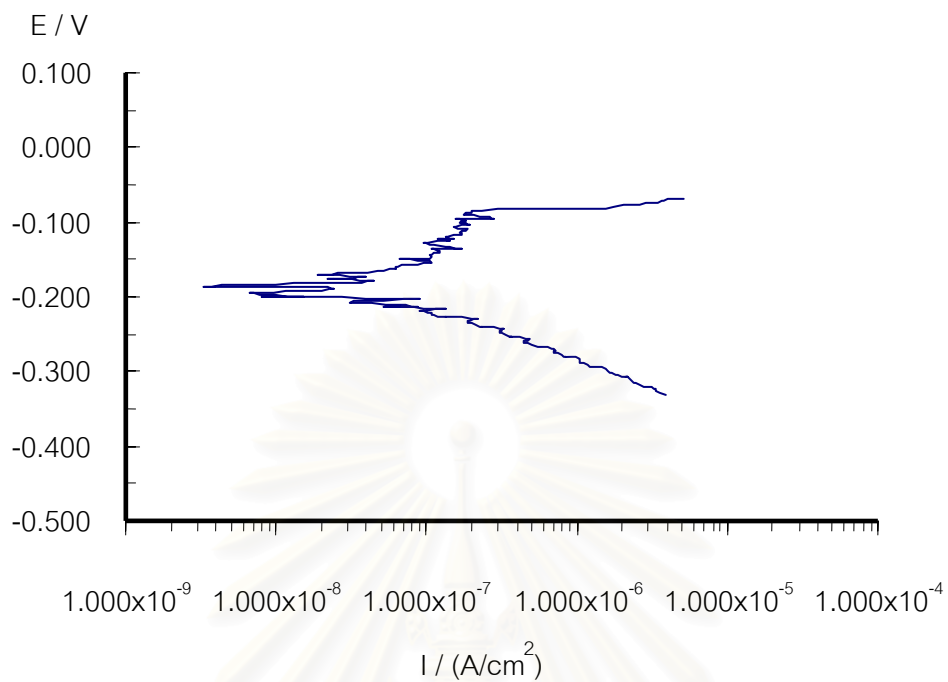
รูปที่ ก.38 เส้นโพลาริเซชันของเหล็กกล้าชนิด Fe-23Ni ในสารละลาย B พีเอช 10 (พีเอช 10.01-9.98)



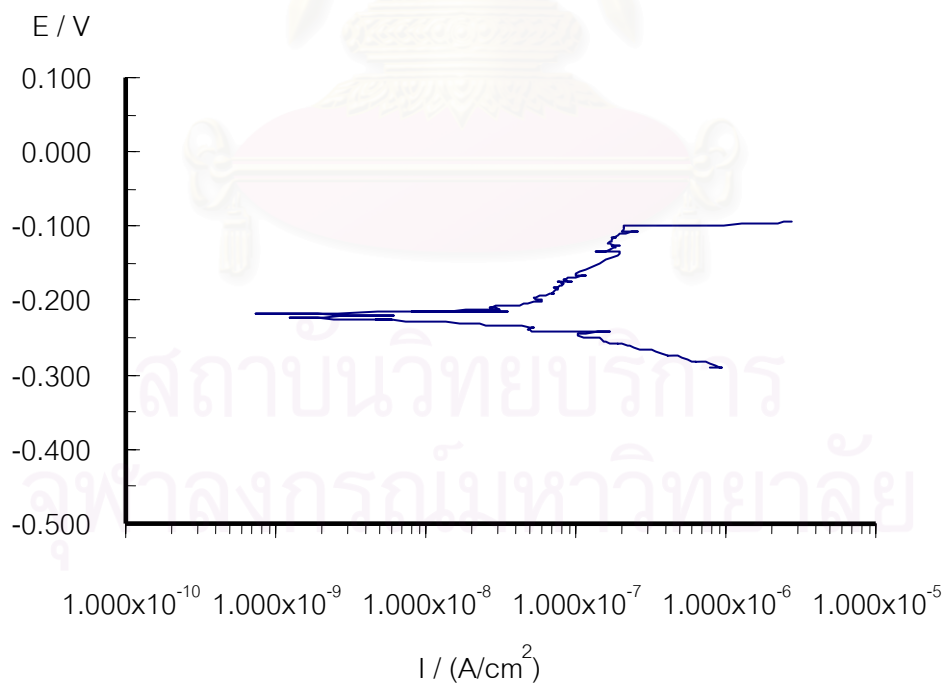
รูปที่ ก.39 เส้นโพลาริเซชันของเหล็กกล้าชนิด Fe-31Ni ในสารละลาย A พีเอช 10 (พีเอช 10.00-10.00)



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



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



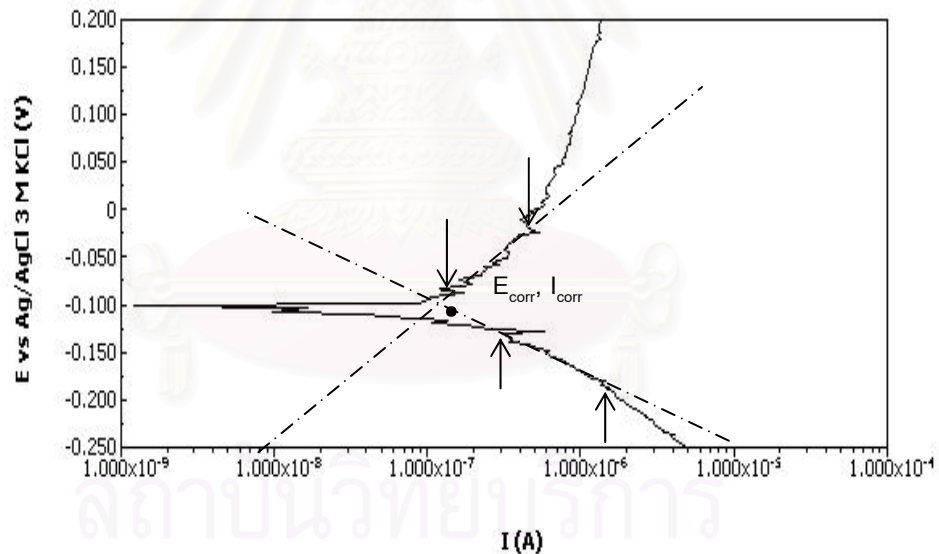
รูปที่ ก.42 เส้นโพลาริเซชันของเหล็กกล้าชนิด Fe-40Ni ในสารละลาย B พีเอช 10 (พีเอช 10.01-10.01)

## ภาคผนวก ข

การหาค่าตัวแปรการกัดกร่อนจากเส้นโพลาริเซชัน

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

ศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนและกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อนหาได้โดยวิธีหาจุดตัดของเส้น Tafel ในที่นี้ใช้โปรแกรมลิเนียร์รีเกรสชัน มีวิธีการหาโดยกำหนดตำแหน่ง 2 จุดบนบนเส้นโค้งโพลาริเซชันแล้วใช้คำสั่งทำลิเนียร์รีเกรสชัน โปรแกรมจะคำนวณเส้นตรงระหว่างจุด 2 จุด ที่กำหนดไว้ ดังรูปที่ ข.1 ซึ่งแสดงจุดตัดระหว่างเส้นความชันของเส้นกราฟช่วงที่เกิดปฏิกิริยาแอโนด และเส้นความชันของเส้นกราฟช่วงที่เกิดปฏิกิริยาแคโทด จุดตัดคือศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนและกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อนได้



รูปที่ ข.1 วิธีการหาค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนและกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อนจากเส้นโพลาริเซชัน

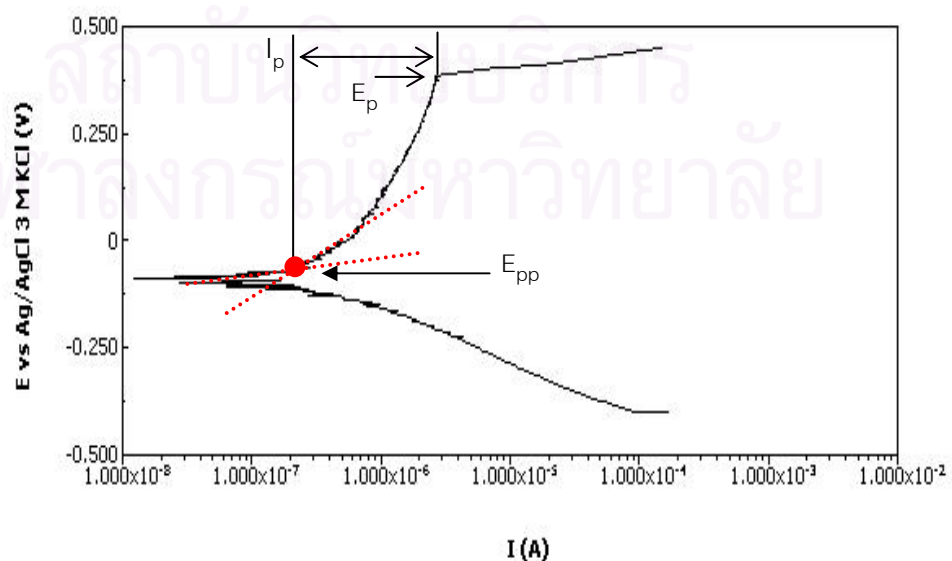
การคำนวณอัตราการกัดกร่อน ( $R_{\text{umpy}}$ ) สามารถคำนวณหาอัตราการกัดกร่อนได้จาก

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

เมื่อ	$R_{\text{umpy}}$	คือ	อัตราการเกิดการกัดกร่อน (ไมโครเมตรต่อปี)
	$I_{\text{corr}}$	คือ	ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อน (ไมโครแอมป์ต่อตารางเซนติเมตร)
	$e$	คือ	น้ำหนักกรัมสมมูลของโลหะ
	$\rho$	คือ	ความหนาแน่นของโลหะ

การหาค่าศักย์ไฟฟ้าเริ่มเกิดพาสซีฟ ค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนแบบรูเข็มหรือหลุมและความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าขณะเกิดฟิล์ม ( $E_p$  และ  $I_p$ )

เมื่อศักย์ไฟฟ้าเพิ่มขึ้นจากค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนถึงจุดที่กระแสไฟฟ้าเริ่มมีอัตราการเพิ่มลดลง (จุดเริ่มเปลี่ยนแปลงความชัน) ศักย์ไฟฟ้าที่จุดนี้เรียกว่าศักย์ไฟฟ้าเริ่มเกิดพาสซีฟ โดยศักย์ไฟฟ้าเริ่มเกิดพาสซีฟหาจากจุดตัดจากเส้นสัมผัสของเส้นกราฟแอนดิกที่เริ่มมีความชันต่างกัน กรณีที่กระแสช่วงพาสซีฟเพิ่มอย่างกะทันหันกลายเป็นกระแสช่วงทรานพาสซีฟ จะกำหนดให้จุดดังกล่าวเป็นค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนแบบรูเข็มหรือหลุม ดังแสดงในรูปที่ ข.2 กรณีค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าขณะเกิดฟิล์มที่ผิวนั้น สามารถหาได้จากการนำข้อมูลช่วงพาสซีฟมาทำการคำนวณเพื่อหาค่าเฉลี่ย



รูปที่ ข.2 วิธีการหาค่าศักย์ไฟฟ้าเริ่มเกิดพาสซีฟ ค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนแบบรูเข็มหรือหลุมและความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าขณะเกิดฟิล์ม

## ภาคผนวก ค

### ค่าตัวแปรต่างๆที่ได้จากเส้นโพลาริเซชัน

#### ค.1 เหล็กกล้าโครเมียมในสารละลาย A และ B พีเอช 2

ตารางที่ ค.1 ค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนของเหล็กกล้าโครเมียมในสารละลาย A พีเอช 2

ครั้งที่ \ / ชิ้นงาน	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

ครั้งที่ \ ชิ้นงาน	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 ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อนและอัตราการกัดกร่อนของเหล็กกล้า  
โครเมียมในสารละลาย A พีเอช 2

ครั้งที่ / ชิ้นงาน	Fe-13Cr ( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ )	Fe-15Cr ( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ )	Fe-18Cr ( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ )
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	( $\mu\text{mpy}$ )	( $\mu\text{mpy}$ )	( $\mu\text{mpy}$ )
	6448.2	5376.6	6.479

ตารางที่ ค.4 ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อนและอัตราการกัดกร่อนของเหล็กกล้า  
โครเมียมในสารละลาย B พีเอช 2

ครั้งที่ / ชิ้นงาน	Fe-13Cr ( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ )	Fe-15Cr ( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ )	Fe-18Cr ( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ )
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	( $\mu\text{mpy}$ )	( $\mu\text{mpy}$ )	( $\mu\text{mpy}$ )
	3530.4	2742.3	1655.6

ตารางที่ ค.5 ค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนเริ่มเกิดพาสซีฟของเหล็กกล้าโครเมียมในสารละลาย 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 ค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนเริ่มเกิดพาสซีฟของเหล็กกล้าโครเมียมในสารละลาย 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

ครั้งที่ / ชิ้นงาน	Fe-13Cr ( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ )	Fe-15Cr ( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ )	Fe-18Cr ( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ )
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

ครั้งที่ / ชิ้นงาน	Fe-13Cr ( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ )	Fe-15Cr ( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ )	Fe-18Cr ( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ )
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 ค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนของเหล็กกล้าโครเมียมในสารละลาย 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 ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อนและอัตราการกัดกร่อนของเหล็กกล้า  
โครเมียมในสารละลาย A พีเอช 7

ชั้นงาน ครั้งที่	Fe-13Cr ( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ )	Fe-15Cr ( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ )	Fe-18Cr ( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ )
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	( $\mu\text{mpy}$ )	( $\mu\text{mpy}$ )	( $\mu\text{mpy}$ )
	0.133	0.0624	0.0266

ตารางที่ ค.14 ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อนและอัตราการกัดกร่อนของเหล็กกล้า  
โครเมียมในสารละลาย B พีเอช 7

ชั้นงาน ครั้งที่	Fe-13Cr ( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ )	Fe-15Cr ( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ )	Fe-18Cr ( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ )
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	( $\mu\text{mpy}$ )	( $\mu\text{mpy}$ )	( $\mu\text{mpy}$ )
	0.0832	0.0536	0.0183

ตารางที่ ค.15 ค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนเริ่มเกิดพาสซีฟของเหล็กกล้าโครเมียมในสารละลาย 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 ค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนเริ่มเกิดพาสซีฟของเหล็กกล้าโครเมียมในสารละลาย 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 ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าขณะวัสดุเกิดฟิล์มที่ผิวของเหล็กกล้าโครเมียมใน  
สารละลาย A พีเอช 7

ครั้งที่ \	ชิ้นงาน	Fe-13Cr ( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ )	Fe-15Cr ( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ )	Fe-18Cr ( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ )
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 ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าขณะวัสดุเกิดฟิล์มที่ผิวของเหล็กกล้าโครเมียมใน  
สารละลาย B พีเอช 7

ครั้งที่ \	ชิ้นงาน	Fe-13Cr ( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ )	Fe-15Cr ( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ )	Fe-18Cr ( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ )
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 ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อนและอัตราการกัดกร่อนของเหล็กกล้า  
โครเมียมในสารละลาย A พีเอช 10

ครั้งที่ \	ชิ้นงาน	Fe-13Cr ( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ )	Fe-15Cr ( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ )	Fe-18Cr ( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ )
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	( $\mu\text{mpy}$ )	( $\mu\text{mpy}$ )	( $\mu\text{mpy}$ )
		0.0139	0.0106	0.0061

ตารางที่ ค.24 ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อนและอัตราการกัดกร่อนของเหล็กกล้า  
โครเมียมในสารละลาย B พีเอช 10

ครั้งที่ \	ชิ้นงาน	Fe-13Cr ( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ )	Fe-15Cr ( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ )	Fe-18Cr ( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ )
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	( $\mu\text{mpy}$ )	( $\mu\text{mpy}$ )	( $\mu\text{mpy}$ )
		0.0124	0.0101	0.0049

ตารางที่ ค.25 ค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนเริ่มเกิดพาสซีฟของเหล็กกล้าโครเมียมในสารละลาย 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 ค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนเริ่มเกิดพาสซีฟของเหล็กกล้าโครเมียมในสารละลาย 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 ( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ )	Fe-15Cr ( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ )	Fe-18Cr ( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ )
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 ( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ )	Fe-15Cr ( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ )	Fe-18Cr ( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ )
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 เหล็กกล้าชนิดเกิดในสารละลาย A และ B พีเอช 2

ตารางที่ ค.31 ค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนของเหล็กกล้าชนิดเกิดในสารละลาย 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
ส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐาน	5.01428	5.902663	4.334219	4.104312

ตารางที่ ค.32 ค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนของเหล็กกล้าชนิดเกิดในสารละลาย 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
ส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐาน	8.387711	5.349542	1.77151	5.277885

ตารางที่ ค.33 ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อนและอัตราการกัดกร่อนของเหล็กกล้า  
 นิกเกิลในสารละลาย A พีเอช 2

ชั้นงาน ครั้งที่	Fe-15Ni ( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ )	Fe-23Ni ( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ )	Fe-31Ni ( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ )	Fe-40Ni ( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ )
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
ส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐาน	0.343746	0.4608	0.338501	0.779002
อัตราการกัดกร่อน	( $\mu\text{mpy}$ )	( $\mu\text{mpy}$ )	( $\mu\text{mpy}$ )	( $\mu\text{mpy}$ )
	204.84	107.09	83.32	5.37

ตารางที่ ค.34 ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อนและอัตราการกัดกร่อนของเหล็กกล้า  
 นิกเกิลในสารละลาย A พีเอช 2

ชั้นงาน ครั้งที่	Fe-15Ni ( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ )	Fe-23Ni ( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ )	Fe-31Ni ( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ )	Fe-40Ni ( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ )
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
ส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐาน	0.494076	0.147697	0.115235	0.057026
อัตราการกัดกร่อน	( $\mu\text{mpy}$ )	( $\mu\text{mpy}$ )	( $\mu\text{mpy}$ )	( $\mu\text{mpy}$ )
	183.49	108.01	30.93	27.03



### ค.5 เหล็กกล้าชนิดเกิดในสารละลาย A และ B พีเอช 7

ตารางที่ ค.35 ค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนของเหล็กกล้าชนิดเกิดในสารละลาย A พีเอช 7

ครั้งที่ \ ชั้นงาน	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
ส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐาน	2.578542	2.066554	2.627626	5.454728

ตารางที่ ค.36 ค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนของเหล็กกล้าชนิดเกิดในสารละลาย B พีเอช 7

ครั้งที่ \ ชั้นงาน	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
ส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐาน	3.067785	5.786646	5.014144	6.340298

ตารางที่ ค.37 ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อนและอัตราการกัดกร่อนของเหล็กกล้า  
 นิกเกิลในสารละลาย A พีเอช 7

ชั้นงาน ครั้งที่	Fe-15Ni ( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ )	Fe-23Ni ( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ )	Fe-31Ni ( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ )	Fe-40Ni ( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ )
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
ส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐาน	0.226628	0.023643	0.045133	0.024038
อัตราการกัดกร่อน	( $\mu\text{mpy}$ )	( $\mu\text{mpy}$ )	( $\mu\text{mpy}$ )	( $\mu\text{mpy}$ )
	60.59	10.49	7.84	2.62

ตารางที่ ค.38 ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อนและอัตราการกัดกร่อนของเหล็กกล้า  
 นิกเกิลในสารละลาย B พีเอช 7

ชั้นงาน ครั้งที่	Fe-15Ni ( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ )	Fe-23Ni ( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ )	Fe-31Ni ( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ )	Fe-40Ni ( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ )
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
ส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐาน	0.019157	0.047286	0.016643	0.010817
อัตราการกัดกร่อน	( $\mu\text{mpy}$ )	( $\mu\text{mpy}$ )	( $\mu\text{mpy}$ )	( $\mu\text{mpy}$ )
	44.659	6.554	3.797	2.273

### ค.6 เหล็กกล้า นิกเกิลในสารละลาย A และ B พีเอช 10

ตารางที่ ค.39 ค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนของเหล็กกล้า นิกเกิลในสารละลาย A พีเอช 10

ครั้ง/ ชั่วโมง	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
ส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐาน	0.857939	3.093436	2.430138	2.409905

ตารางที่ ค.40 ค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนของเหล็กกล้า นิกเกิลในสารละลาย B พีเอช 10

ครั้ง/ ชั่วโมง	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
ส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐาน	1.829843	1.914963	2.63424	3.240605

ตารางที่ ค.41 ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อนและอัตราการกัดกร่อนของเหล็กกล้า  
เหล็กกล้าชนิดเกิดในสารละลาย A พีเอช 10

ชั้นงาน ครั้งที่	Fe-15Ni ( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ )	Fe-23Ni ( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ )	Fe-31Ni ( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ )	Fe-40Ni ( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ )
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
ส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐาน	0.01852	0.013	0.008888	0.004359
อัตราการกัดกร่อน	( $\mu\text{mpy}$ )	( $\mu\text{mpy}$ )	( $\mu\text{mpy}$ )	( $\mu\text{mpy}$ )
	15.810	5.966	5.366	0.969

ตารางที่ ค.42 ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อนและอัตราการกัดกร่อนของเหล็กกล้า  
ชนิดเกิดในสารละลาย B พีเอช 10

ชั้นงาน ครั้งที่	Fe-15Ni ( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ )	Fe-23Ni ( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ )	Fe-31Ni ( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ )	Fe-40Ni ( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ )
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
ส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐาน	0.041102	0.012767	0.014731	0.001732
อัตราการกัดกร่อน	( $\mu\text{mpy}$ )	( $\mu\text{mpy}$ )	( $\mu\text{mpy}$ )	( $\mu\text{mpy}$ )
	9.323	1.316	0.482	0.192

ตารางที่ ค.43 ค่าศักย์ไฟฟ้าเริ่มเกิดพาสซีฟของเหล็กกล้าชนิดเกิลในสารละลาย A พีเอช 10

ครั้งที่ \ ชั้นงาน	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
ส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐาน	-	7.45517	10.2163	10.55984

ตารางที่ ค.44 ค่าศักย์ไฟฟ้าเริ่มเกิดพาสซีฟของเหล็กกล้าชนิดเกิลในสารละลาย B พีเอช 10

ครั้งที่ \ ชั้นงาน	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
ส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐาน	-	8.01797	2.15606	6.43146

ตารางที่ ค.45 ค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนแบบรูเข็มหรือหลุมของเหล็กกล้าชนิดเกิลในสารละลาย 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
ส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐาน	-	5.304739	3.634471	3.301576

ตารางที่ ค.46 ค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนแบบรูเข็มหรือหลุมของเหล็กกล้าชนิดเกิลในสารละลาย 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
ส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐาน	-	4.489128	8.274607	5.340003

ตารางที่ ค.47 ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าขณะวัสดุเกิดฟิล์มที่ผิวของเหล็กกล้าชนิดเกิดใน

สารละลาย A พีเอช 10

ครั้งที่ / ชั้นงาน	Fe-15Ni ( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ )	Fe-23Ni ( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ )	Fe-31Ni ( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ )	Fe-40Ni ( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ )
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
ส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐาน	-	0.049923	0.022113	0.004703

ตารางที่ ค.48 ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าขณะวัสดุเกิดฟิล์มที่ผิวของเหล็กกล้าชนิดเกิดใน

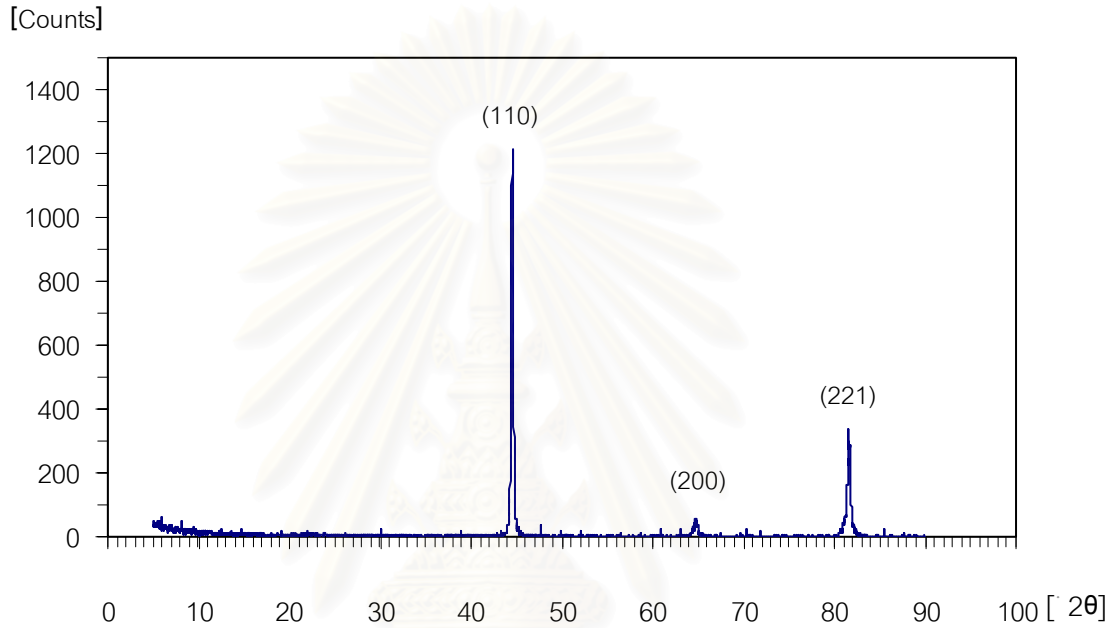
สารละลาย B พีเอช 10

ครั้งที่ / ชั้นงาน	Fe-15Ni ( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ )	Fe-23Ni ( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ )	Fe-31Ni ( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ )	Fe-40Ni ( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ )
1	-	0.638947	0.513478	0.096941
2	-	0.594681	0.568384	0.095483
3	-	0.684236	0.532567	0.106322
ค่าเฉลี่ย	-	0.639288	0.538143	0.099582
ส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐาน	-	0.04478	0.02787	0.00588

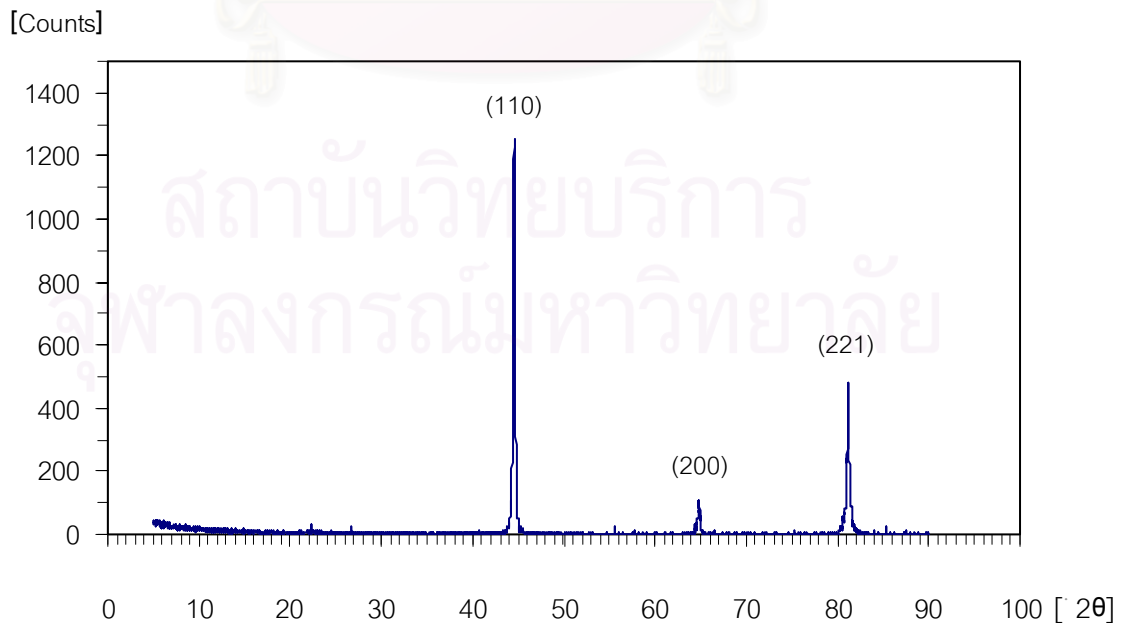
## ภาคผนวก ง

### ผลทดสอบ X-ray diffraction (XRD) ของเหล็กกล้าโครเมียมและเหล็กกล้านิกเกิล

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

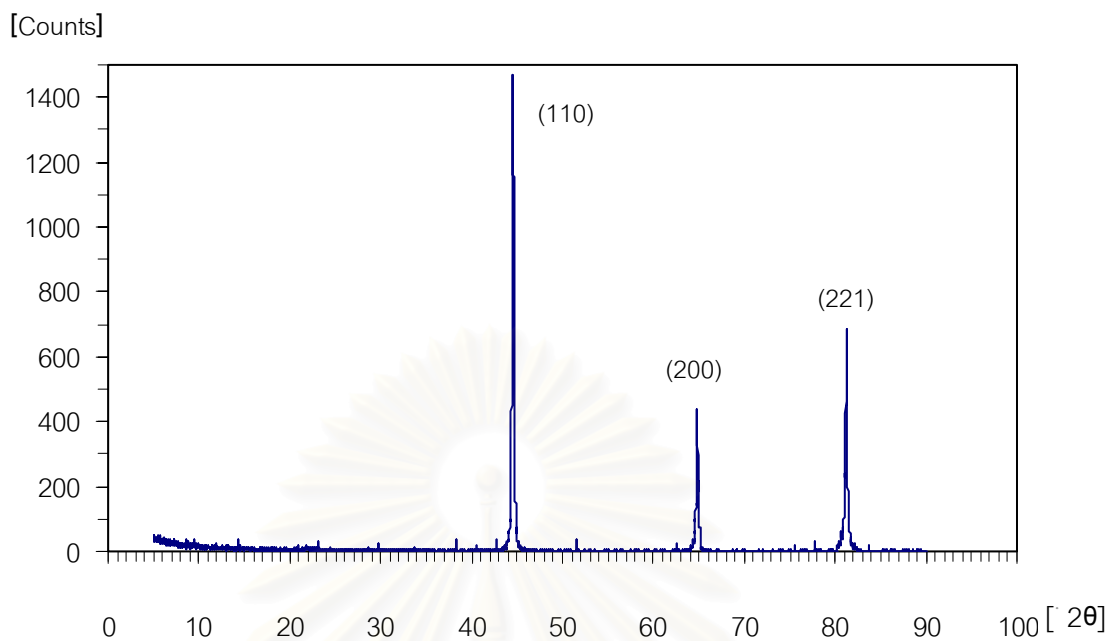


รูปที่ ง.1 ผลการทดสอบ XRD ของเหล็กกล้าโครเมียม Fe-13Cr



รูปที่ ง.2 ผลการทดสอบ XRD ของเหล็กกล้าโครเมียม Fe-15r





รูปที่ 3 ผลการทดสอบ XRD ของเหล็กกล้าโครเมียม Fe-18Cr

ตารางที่ 1 การคำนวณเพื่อระบุดัชนี (hkl) พีคตัวอย่าง XRD ของเหล็กกล้าโครเมียม

ชิ้นงาน	พีคลำดับที่	2θ	sin(θ)	$d_{hkl}$	$\sin^2(\theta)$	$\{\sin^2(\theta) \times 2\} / \text{min of } \sin^2(\theta)$	$h^2+k^2+l^2$	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)

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

โดย  $\lambda$  (ความยาวคลื่น X-ray จาก anode tube  $\text{Cu}\alpha_1$ ) = 0.1541 nm

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

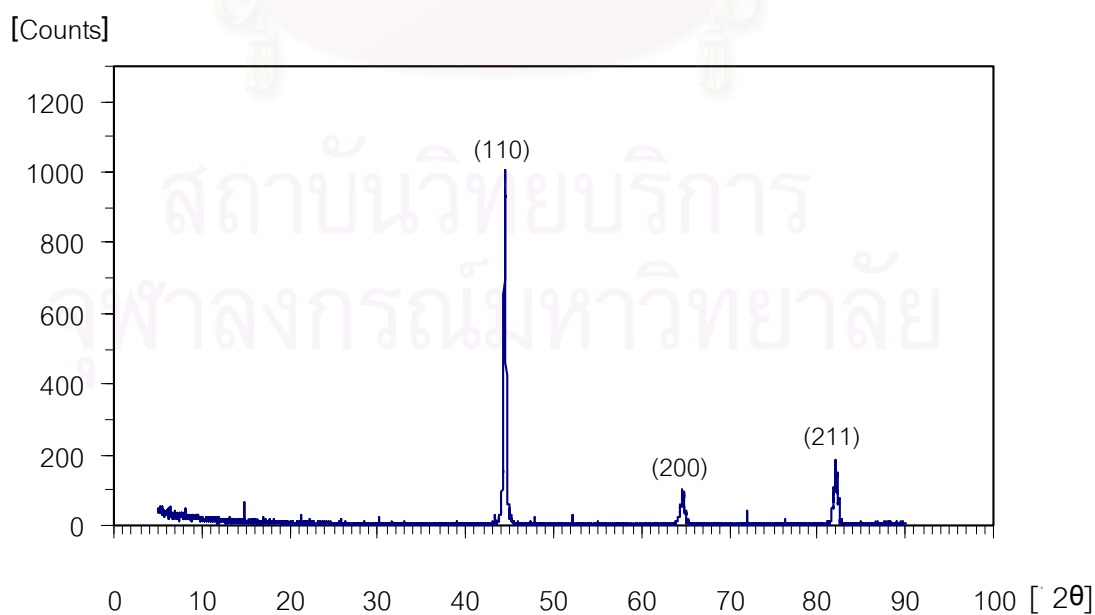
โดย  $a$  คือแลตทิซพารามิเตอร์

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

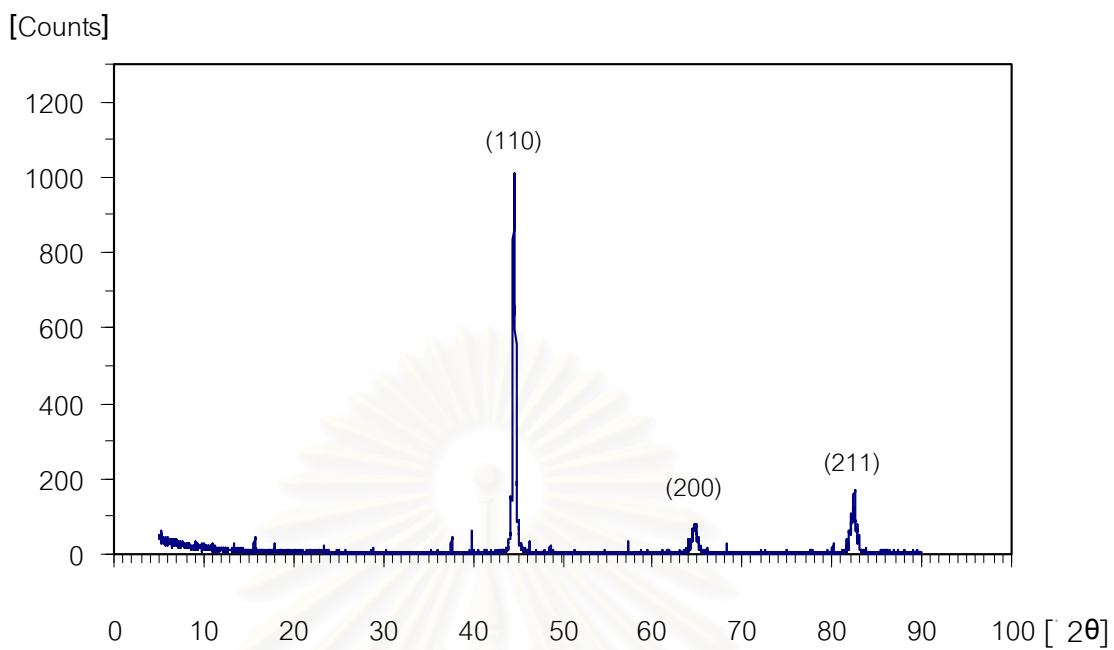
$$h^2+k^2+l^2 = (2a/\lambda)^2 \sin^2(\theta) \quad (3)$$

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

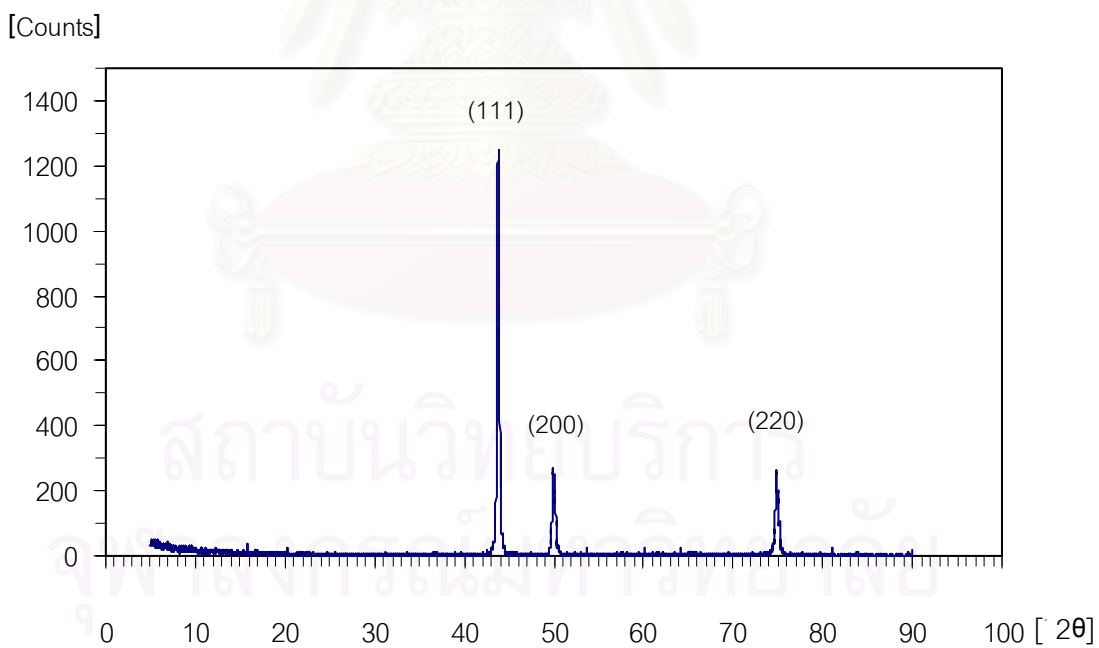
ผลการทดสอบ X-ray diffraction (XRD) ของเหล็กกล้าชนิด Fe-15Ni, Fe-23Ni, Fe-31Ni และ Fe-40Ni ดังแสดงในรูปที่ ง.4-ง.7 โดยการระบุดัชนีของพีคตัวอย่างแสดงในตารางที่ ง.2 (มีหลักการคำนวณแบบเดียวกับตารางที่ ง. 1)



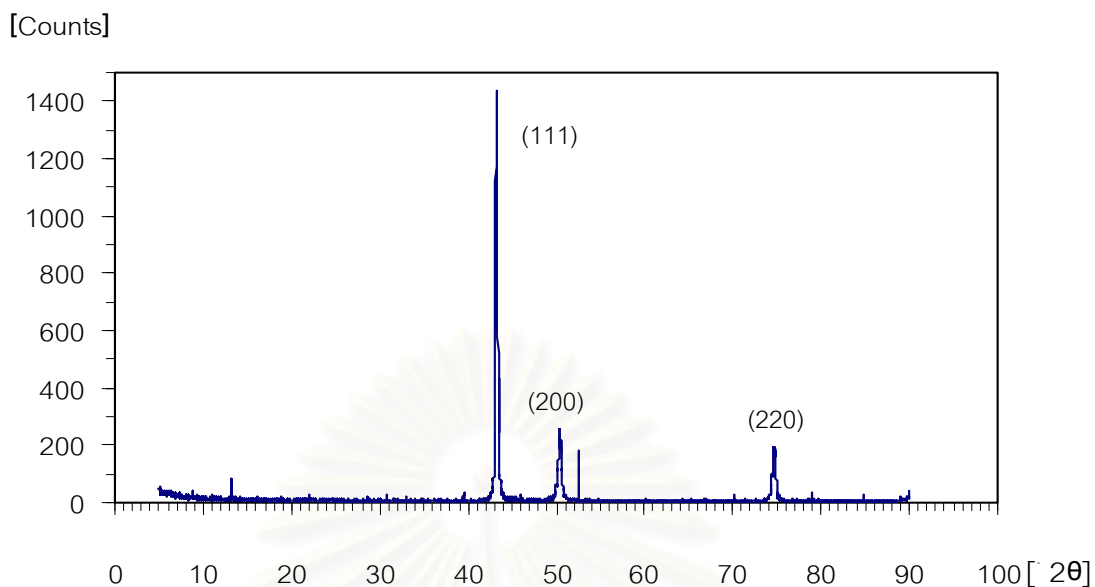
รูปที่ ง.4 ผลการทดสอบ XRD ของเหล็กกล้าชนิด Fe-15Ni



รูปที่ ง.5 ผลการทดสอบ XRD ของเหล็กกล้าชนิด Fe-23Ni



รูปที่ ง.6 ผลการทดสอบ XRD ของเหล็กกล้าชนิด Fe-31Ni



รูปที่ ง.7 ผลการทดสอบ XRD ของเหล็กกล้าชนิด Fe-40Ni

ตารางที่ ง.2 การคำนวณเพื่อระบุดัชนี (hkl) พีคตัวอย่าง XRD ของเหล็กกล้าชนิด

ชิ้นงาน	พีคลำดับที่	2θ	sin(θ)	$d_{hkl}$	$\sin^2(\theta)$	$\{\sin^2(\theta) \times 3\} / \text{min of } \sin^2(\theta)$	$h^2+k^2+l^2$	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 XRD ของเหล็กกล้าโครเมียมและเหล็กกล้า นิกเกิล จาก JCPDS

วัสดุ	พีค ลำดับที่	$2\theta$	$d_{hkl}$	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

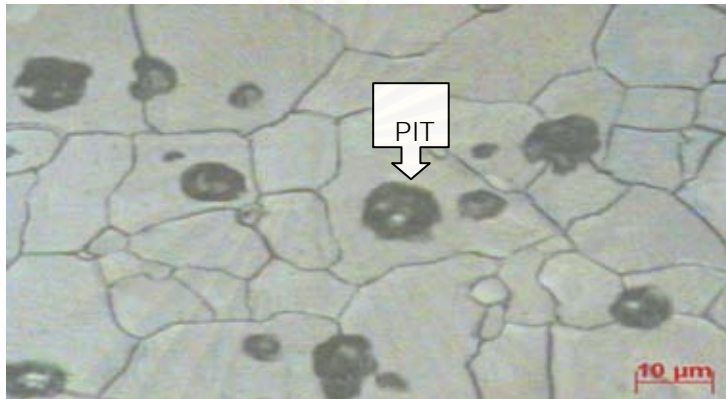
จากการเปรียบเทียบค่ามุม  $2\theta$  , ระยะห่างระหว่างระนาบผลึก ( $d_{hkl}$ ) และ ระนาบผลึก hkl ที่คำนวณจากผลทดสอบ XRD ของเหล็กกล้าโครเมียม Fe-13Cr, Fe-15Cr และ Fe-18Cr กับ ข้อมูล XRD จาก JCPDS ในตารางที่ ง.3 พบว่าใกล้เคียงกับข้อมูลของเหล็กโครเมียมและเหล็กกล้าไร้สนิม 434L ที่มีโครงสร้างผลึกแบบ body-center-cubic (bcc) กรณีผลทดสอบ XRD ของเหล็กกล้า นิกเกิล Fe-15Ni และ Fe-23Ni พบว่าใกล้เคียงกับข้อมูลของเหล็กผสมนิกเกิลที่มีโครงสร้างผลึกแบบ body-center-tetragonal (bct) ขณะที่ผลทดสอบ XRD ของเหล็กกล้า นิกเกิล Fe-31Ni และ Fe-40Ni ใกล้เคียงกับข้อมูลของเหล็กกล้าไร้สนิม 304L และเหล็กกล้า นิกเกิลที่มีโครงสร้างผลึกแบบ face-center-cubic (fcc)

## ภาคผนวก จ

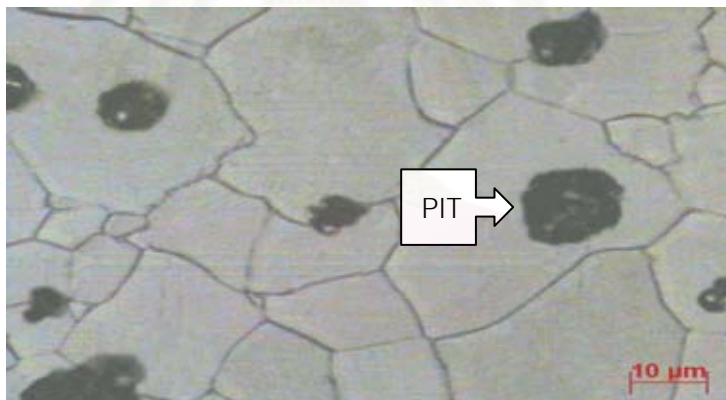
### โครงสร้างจุลภาคบริเวณที่ถูกกัดกร่อนในช่วงค่าศักย์ไฟฟ้าทรานพาสซีฟ

ภาพตัวอย่างโครงสร้างจุลภาคที่ถูกกัดกร่อนของเหล็กกล้าโครเมียมและเหล็กกล้านิกเกิลที่ค่าศักย์ไฟฟ้าคงที่ในช่วงศักย์ไฟฟ้าทรานพาสซีฟเป็นเวลา 5 – 50 นาที

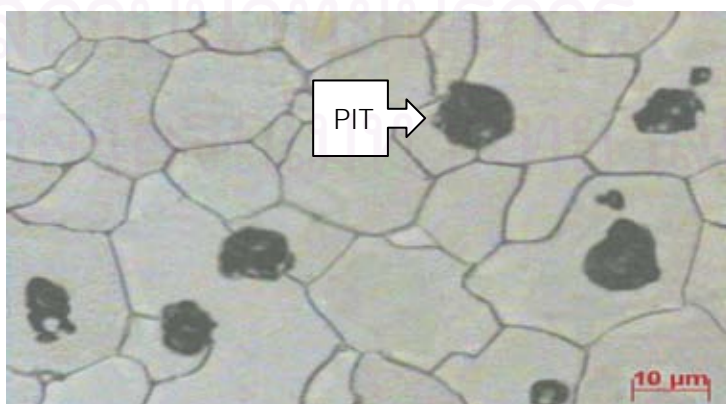
#### จ.1 โครงสร้างจุลภาคบริเวณที่ถูกกัดกร่อนของเหล็กกล้าโครเมียม



ก. พีเอช 2



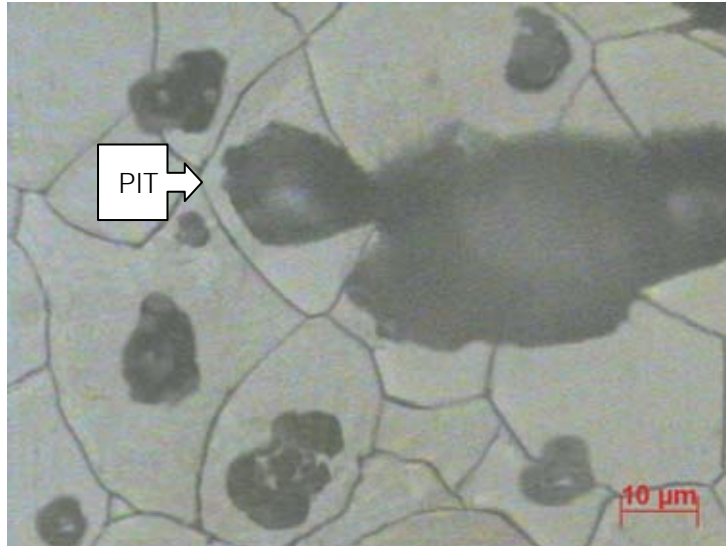
ข. พีเอช 7



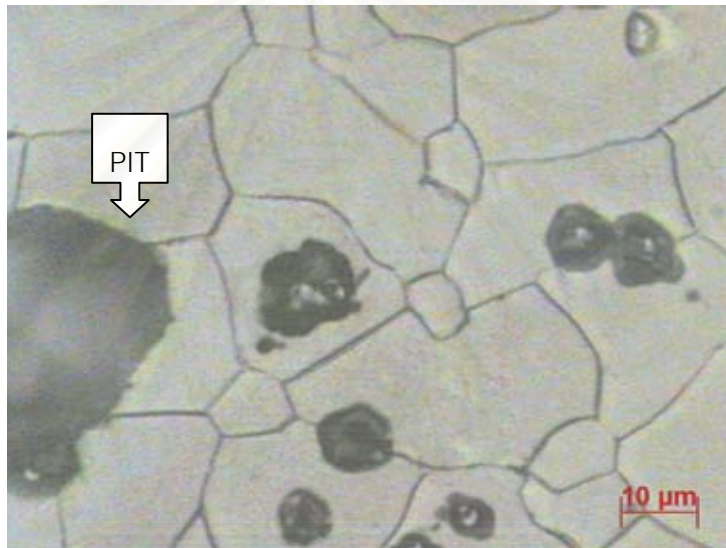
ค. พีเอช 10

รูปที่ จ.1 บริเวณที่ถูกกัดกร่อนของเหล็กกล้าโครเมียม Fe-13Cr ในสารละลาย A

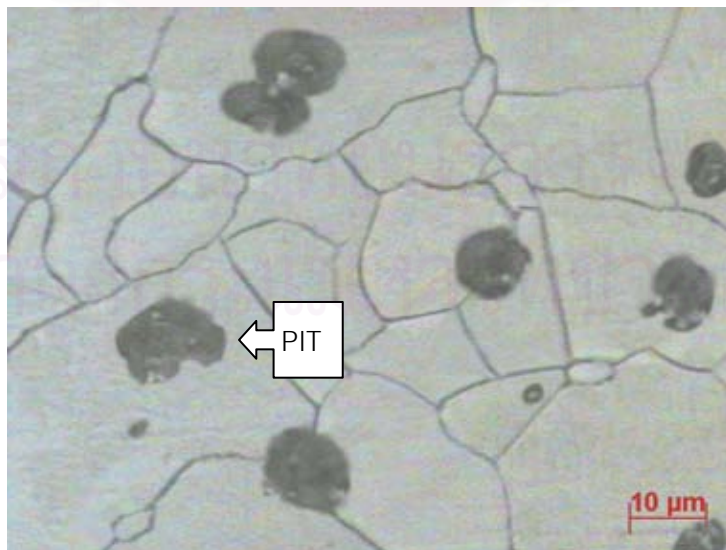
ที่ค่า ก.พีเอช 2 ข. พีเอช 7 ค. พีเอช 10



ก. พีเอช 2



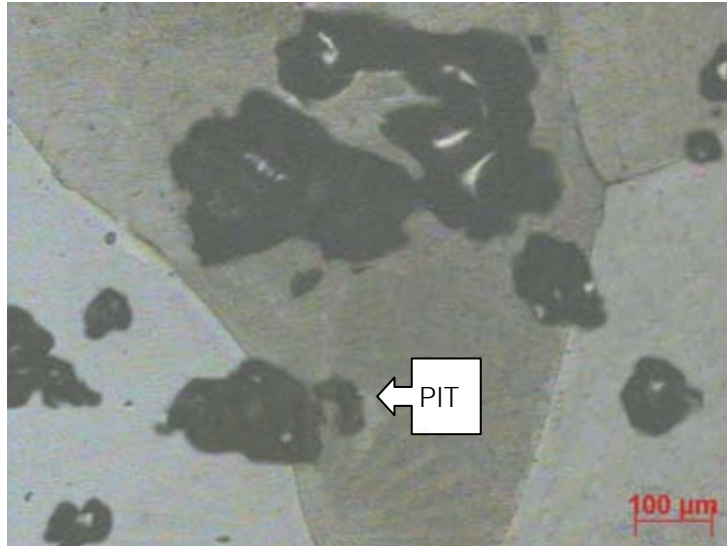
ข. พีเอช 7



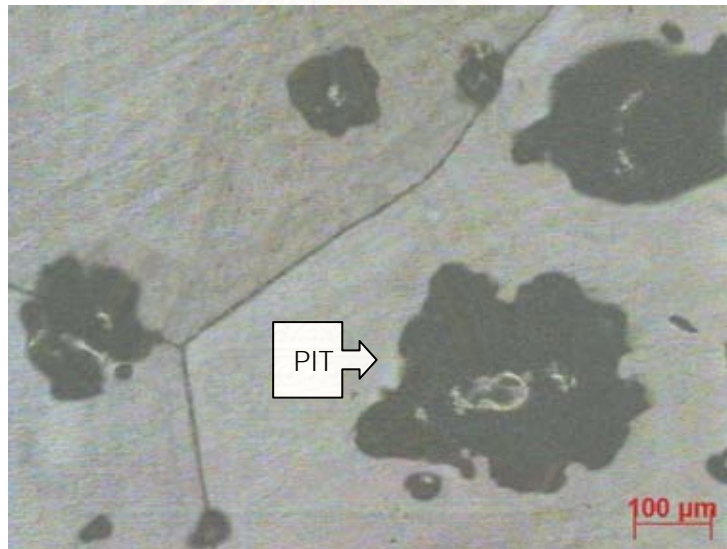
ค. พีเอช 10

รูปที่ ๑.2 บริเวณที่ถูกกัดกร่อนของเหล็กกล้าโครเมียม Fe-13Cr ในสารละลาย B

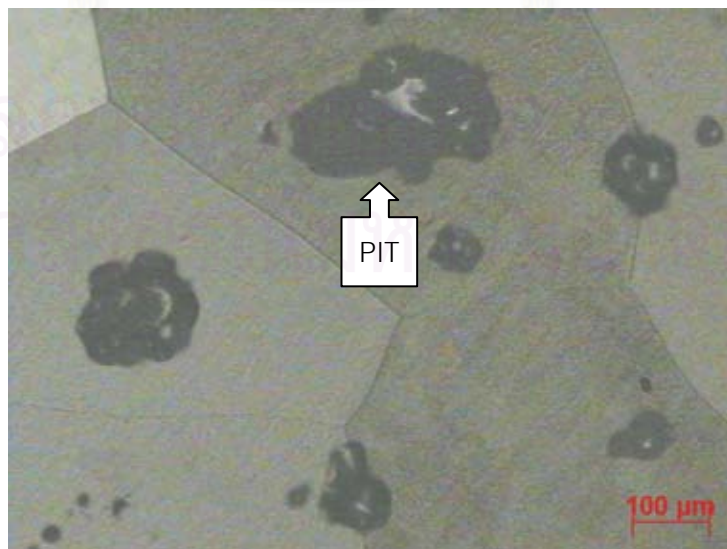
ที่ค่า ก.พีเอช 2 ข. พีเอช 7 ค. พีเอช 10



ก. พีไอช 2



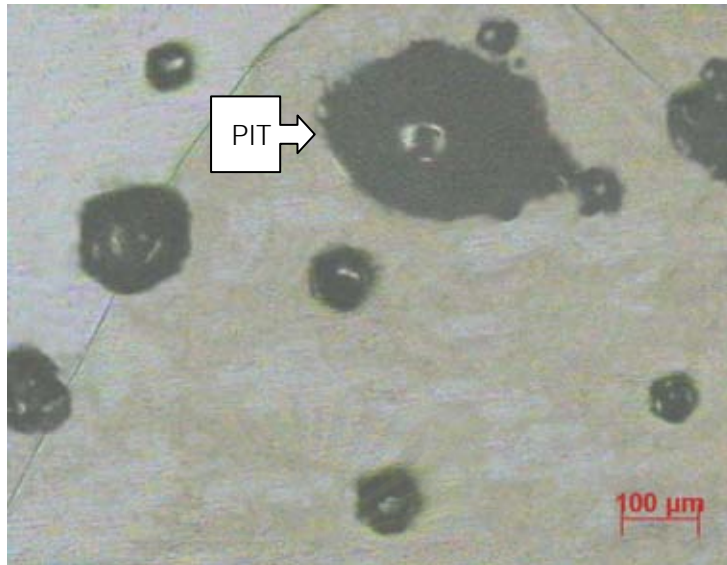
ข. พีไอช 7



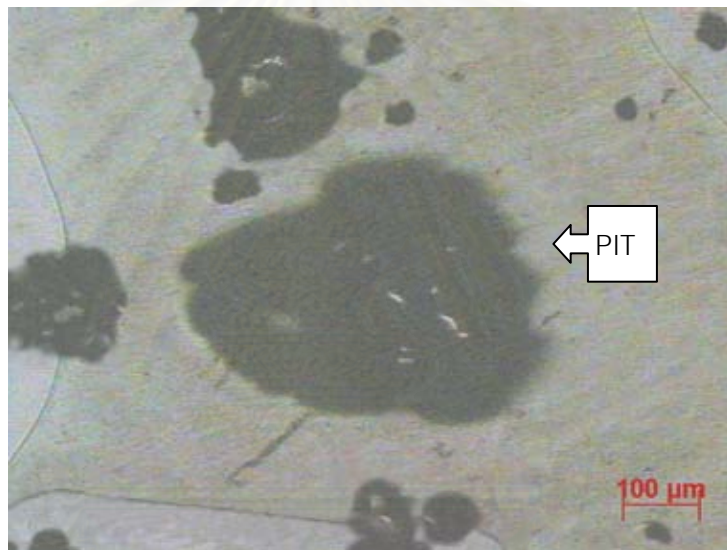
ค. พีไอช 10

รูปที่ ๑.3 บริเวณที่ถูกกัดกร่อนของเหล็กกล้าโครเมียม Fe-15Cr ในสารละลาย A  
ที่ค่า ก.พีไอช 2 ข. พีไอช 7 ค. พีไอช 10

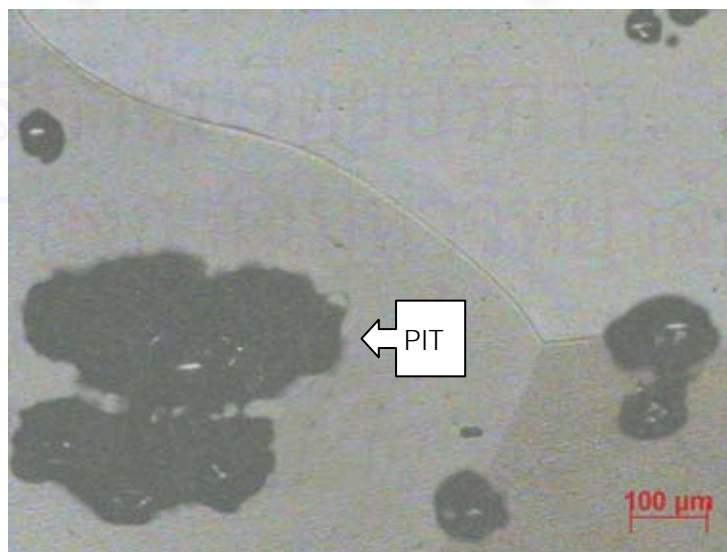




ก. พีไอช 2

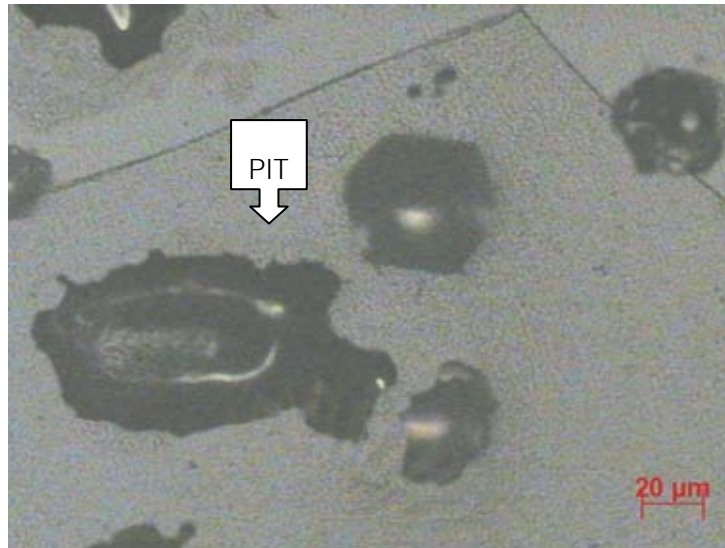


ข. พีไอช 7

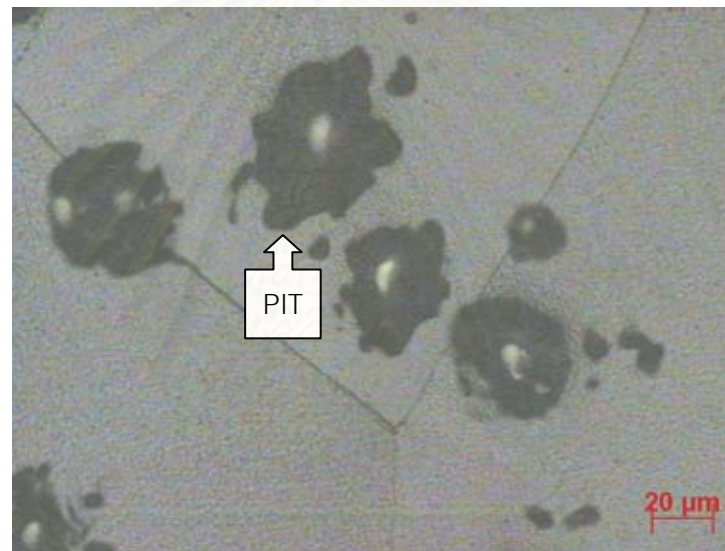


ค. พีไอช 10

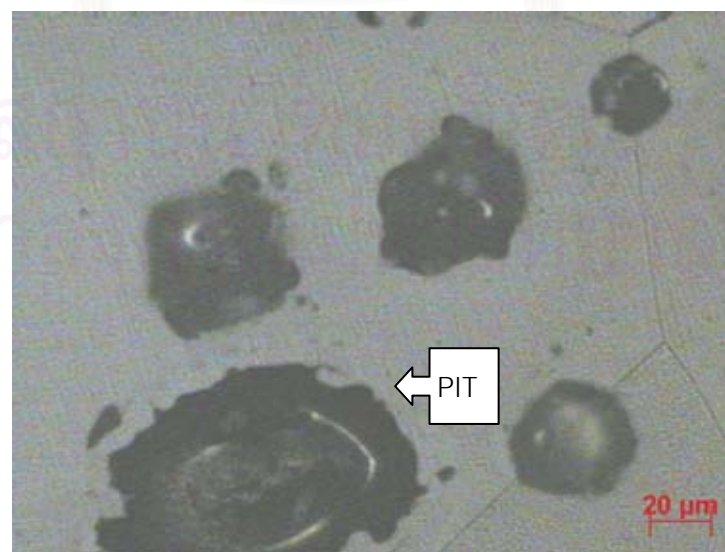
รูปที่ ๑.4 บริเวณที่ถูกกัดกร่อนของเหล็กกล้าโครเมียม Fe-15Cr ในสารละลาย B  
ที่ค่า ก.พีไอช 2 ข. พีไอช 7 ค. พีไอช 10



ก. พีเอช 2

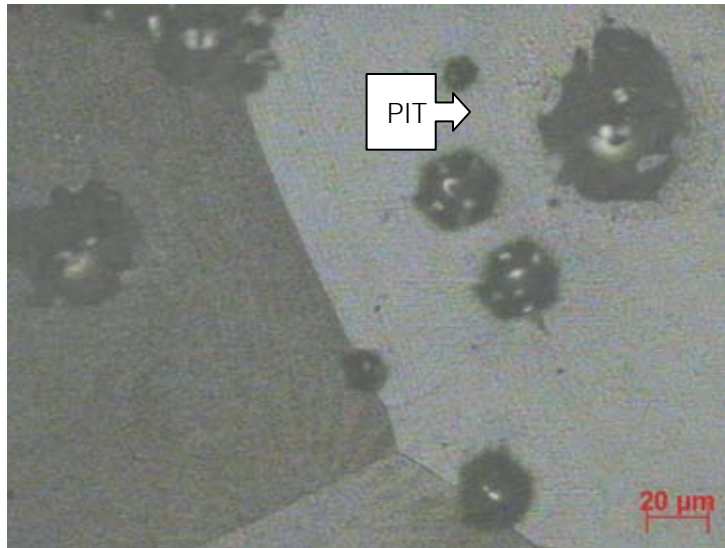


ข. พีเอช 7

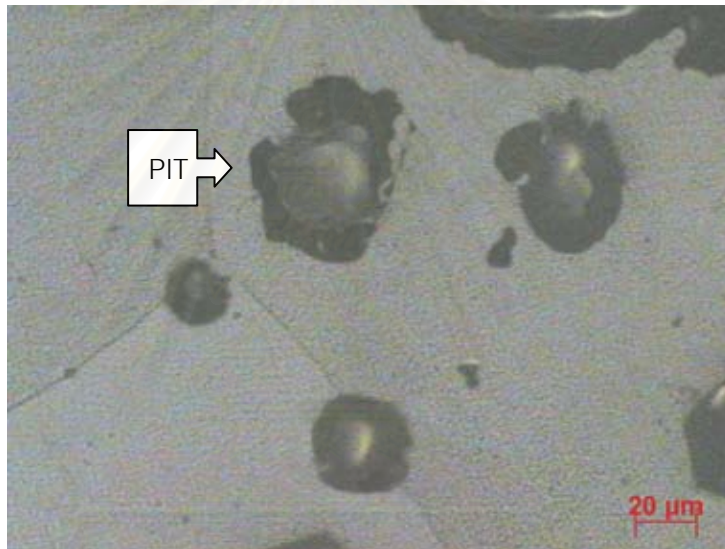


ค. พีเอช 10

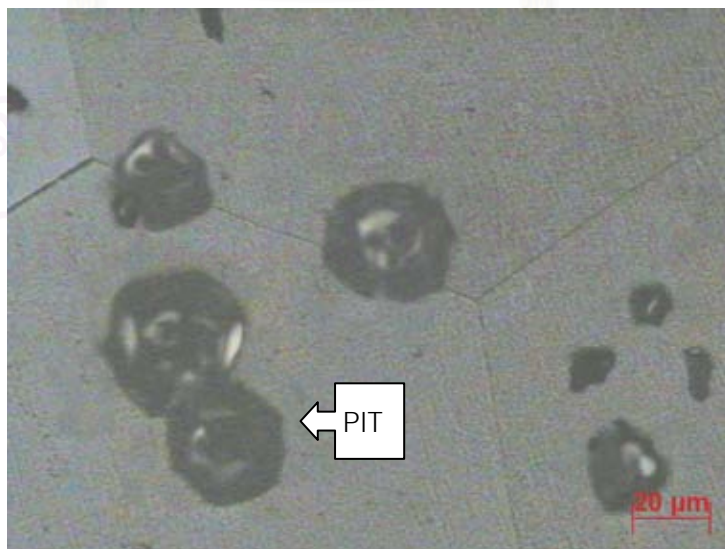
รูปที่ ๑.5 บริเวณที่ถูกกัดกร่อนของเหล็กกล้าโครเมียม Fe-18Cr ในสารละลาย A  
ที่ค่า ก.พีเอช 2 ข. พีเอช 7 ค. พีเอช 10



ก. พีไอช 2



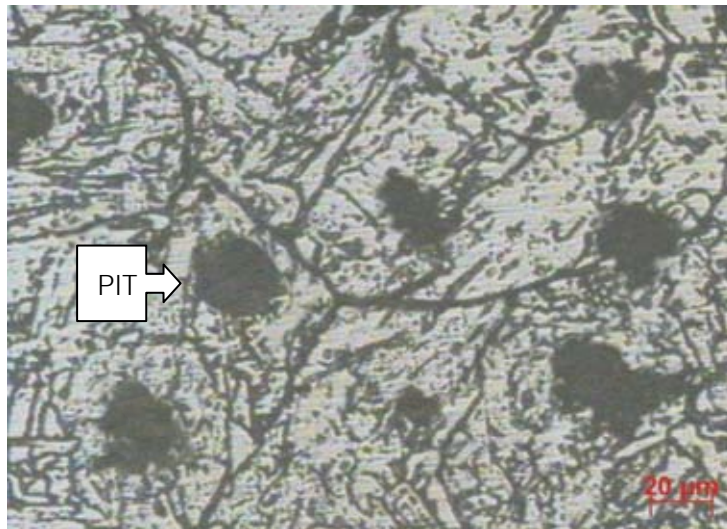
ข. พีไอช 7



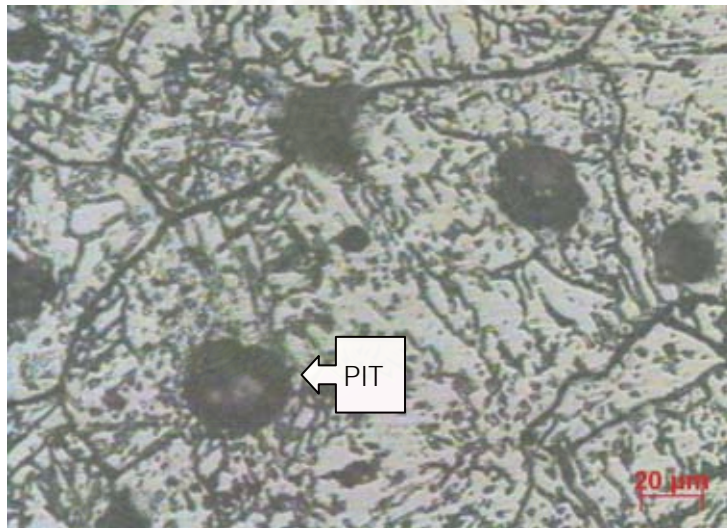
ค. พีไอช 10

รูปที่ ๑.6 บริเวณที่ถูกกัดกร่อนของเหล็กกล้าโครเมียม Fe-18Cr ในสารละลาย B  
ที่ค่า ก.พีไอช 2 ข. พีไอช 7 ค. พีไอช 10

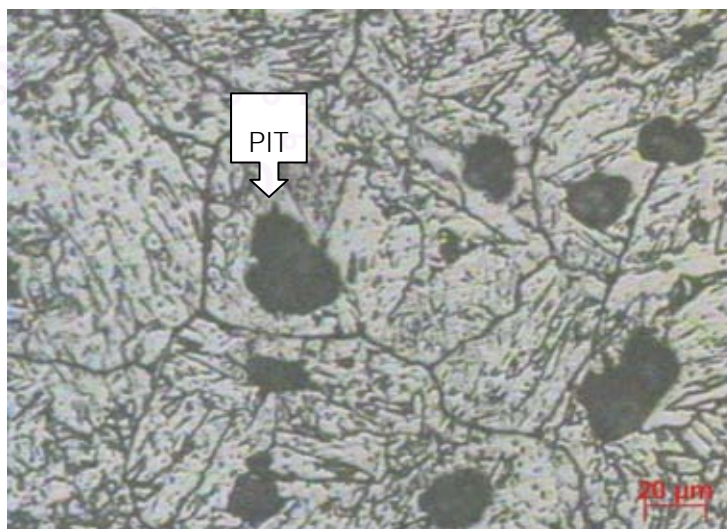
## จ.2 โครงสร้างจุลภาคบริเวณที่ถูกกัดกร่อนของเหล็กกล้าชนิด Fe-15Ni



ก. พีเอช 2

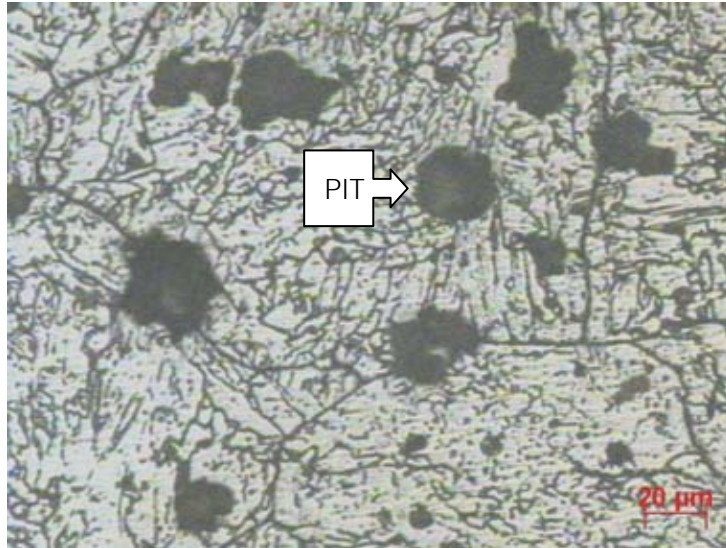


ข. พีเอช 7

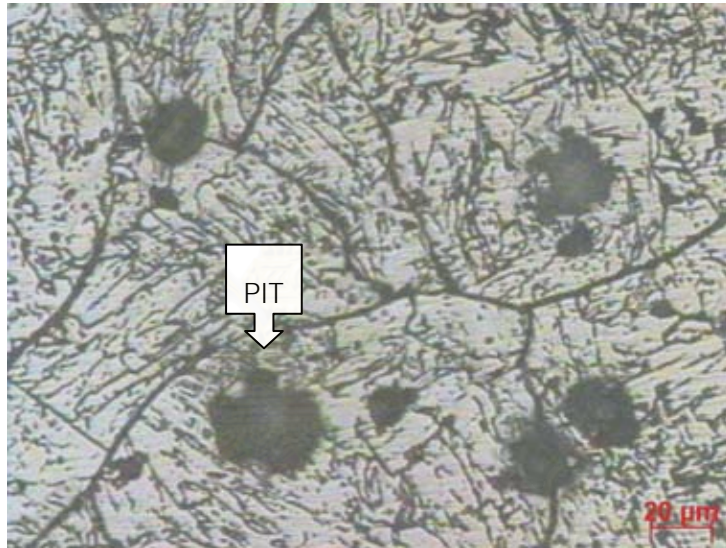


ค. พีเอช 10

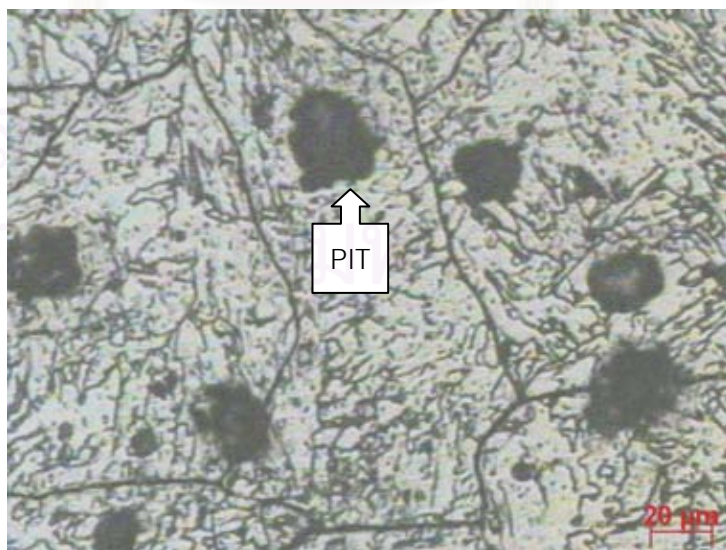
รูปที่ จ.7 บริเวณที่ถูกกัดกร่อนของเหล็กกล้าชนิด Fe-15Ni ในสารละลาย A  
ที่ค่า ก.พีเอช 2 ข. พีเอช 7 ค. พีเอช 10



ก. พีไอช 2

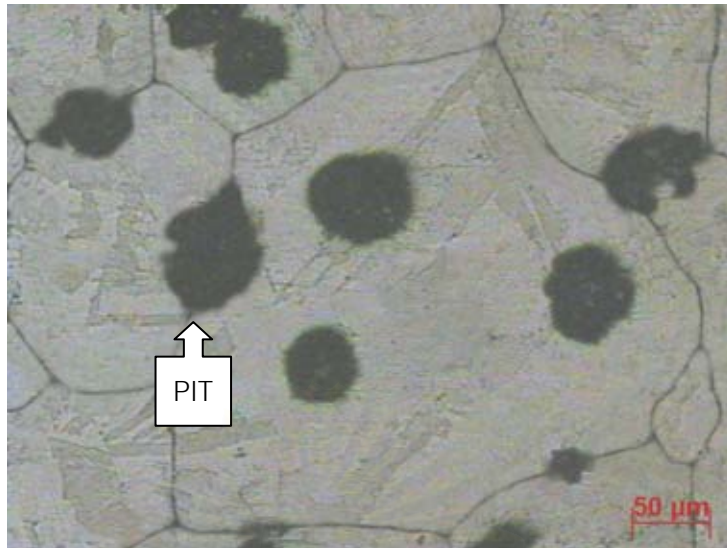


ข. พีไอช 7

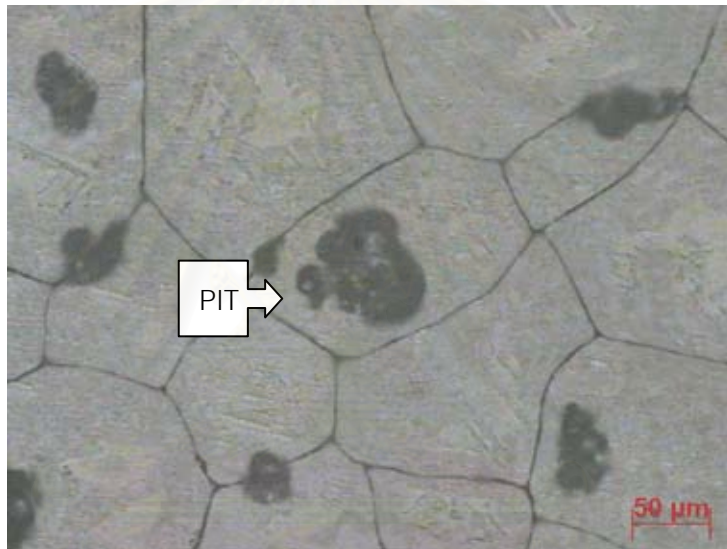


ค. พีไอช 10

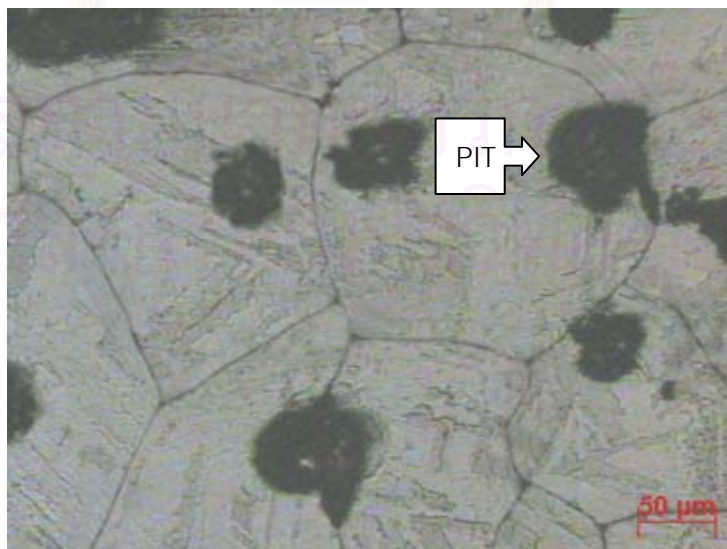
รูปที่ ๑.8 บริเวณที่ถูกกัดกร่อนของเหล็กกล้าชนิด Fe-15Ni ในสารละลาย B  
ที่ค่า ก.พีไอช 2 ข. พีไอช 7 ค. พีไอช 10



ก. พีไอช 2

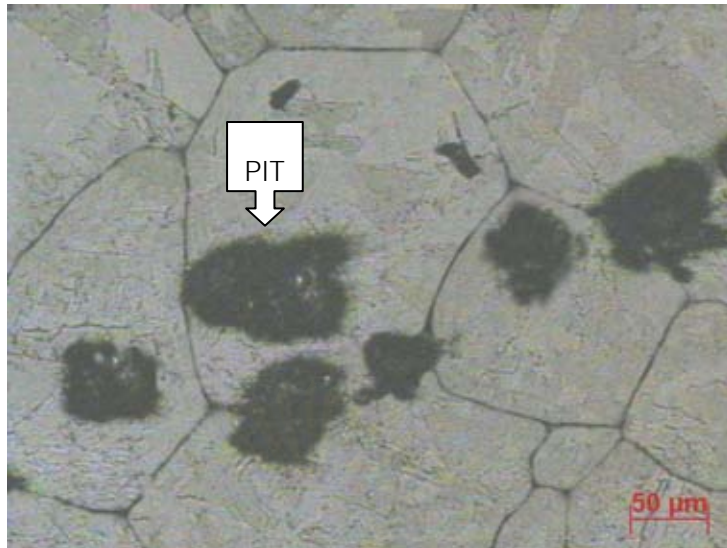


ข. พีไอช 7

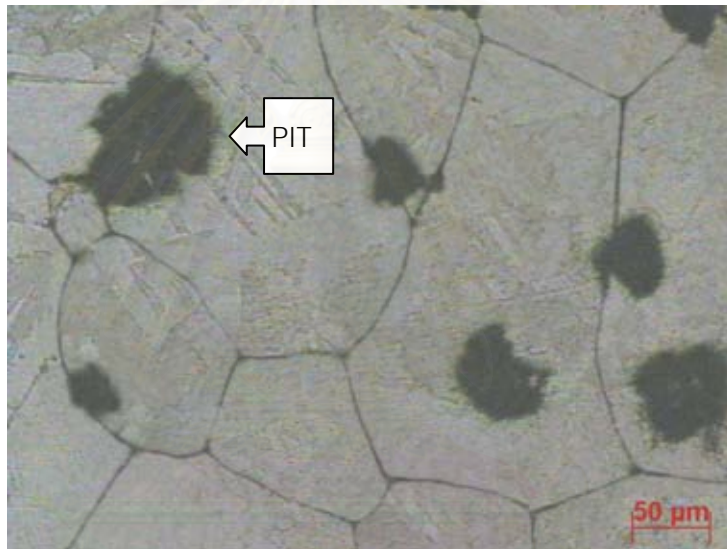


ค. พีไอช 10

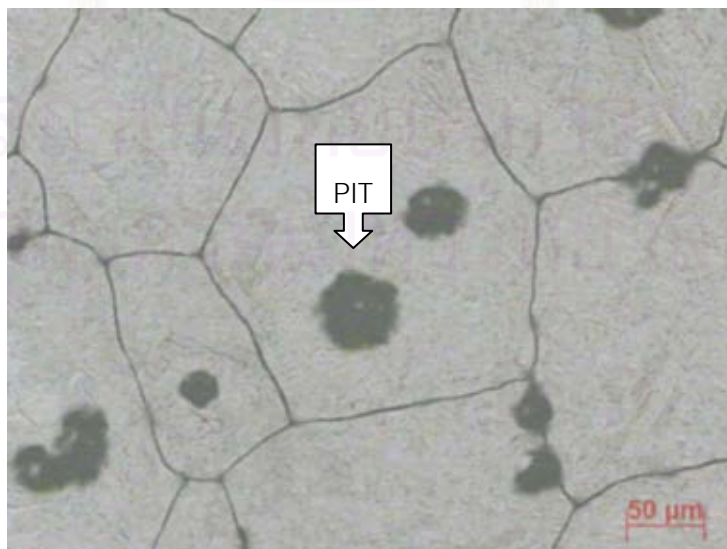
รูปที่ ๑.9 บริเวณที่ถูกกัดกร่อนของเหล็กกล้าชนิด Fe-23Ni ในสารละลาย A  
ที่ค่า ก.พีไอช 2 ข. พีไอช 7 ค. พีไอช 10



ก. พีไอช 2

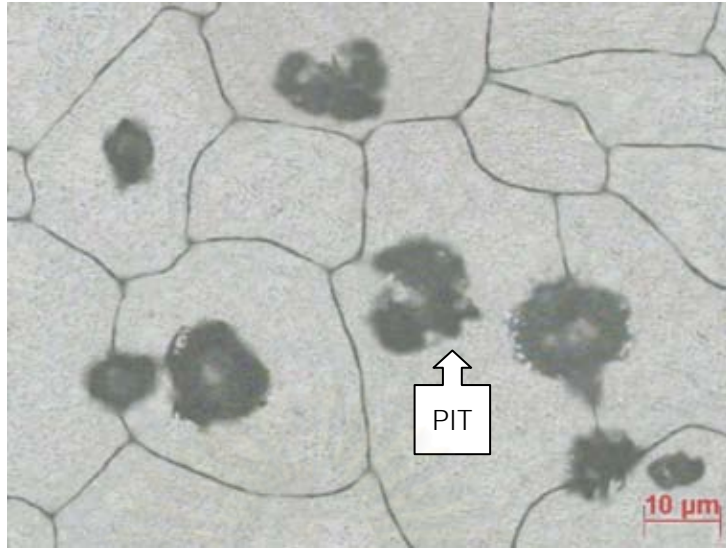


ข. พีไอช 7

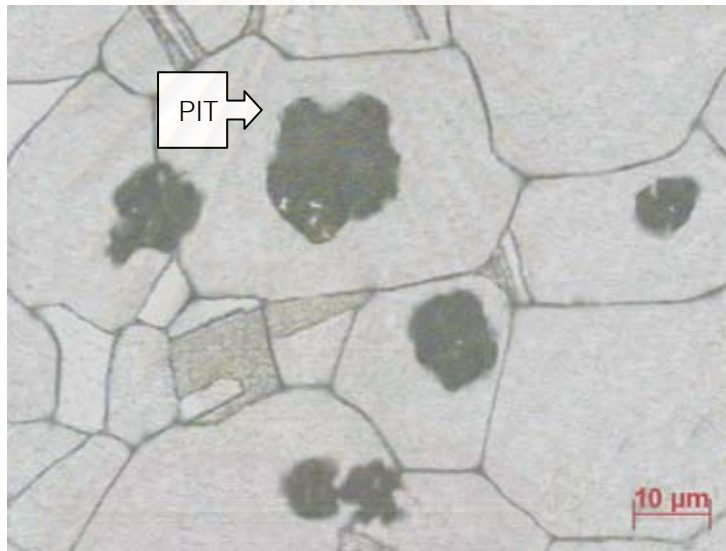


ค. พีไอช 10

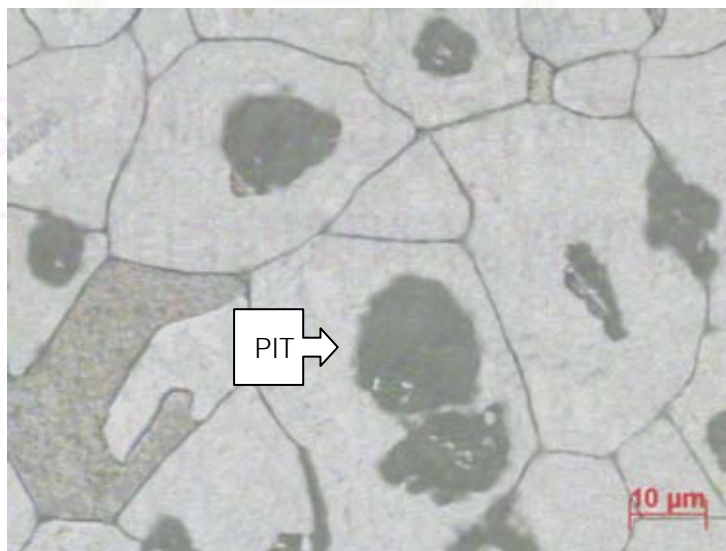
รูปที่ ๑.10 บริเวณที่ถูกกัดกร่อนของเหล็กกล้าชนิด Fe-23Ni ในสารละลาย B  
ที่ค่า ก.พีไอช 2 ข. พีไอช 7 ค. พีไอช 10



ก. พีเอช 2



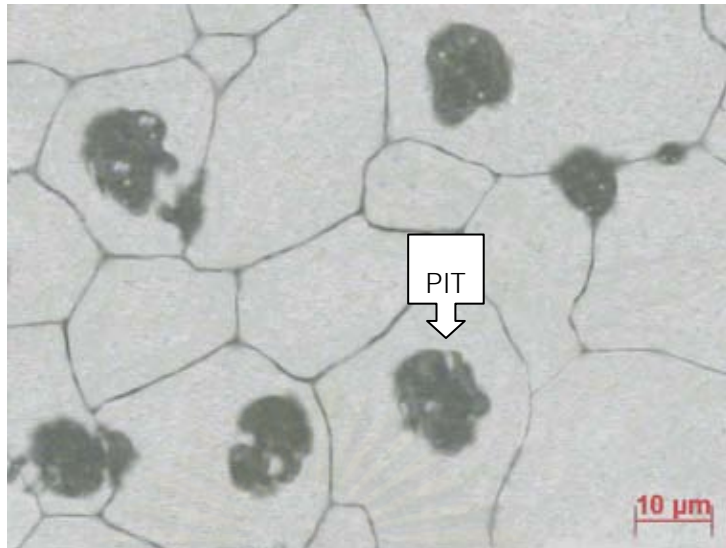
ข. พีเอช 7



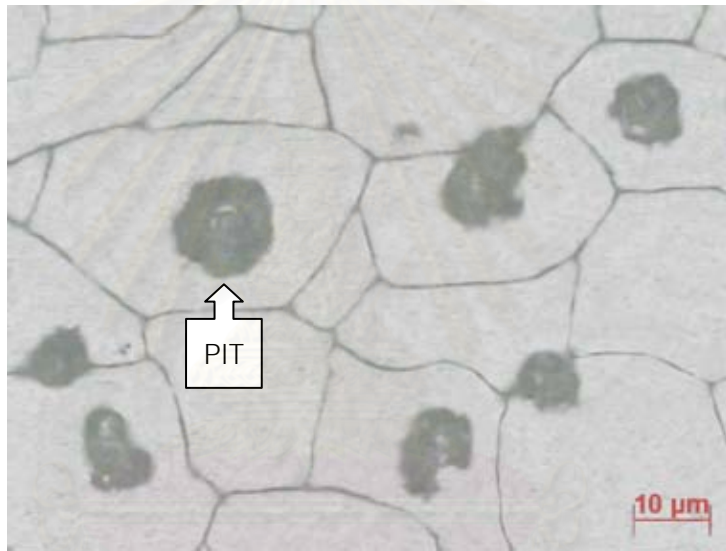
ค. พีเอช 10

รูปที่ ๑.11 บริเวณที่ถูกกัดกร่อนของเหล็กกล้าชนิด Fe-31Ni ในสารละลาย A  
ที่ค่า ก.พีเอช 2 ข. พีเอช 7 ค. พีเอช 10

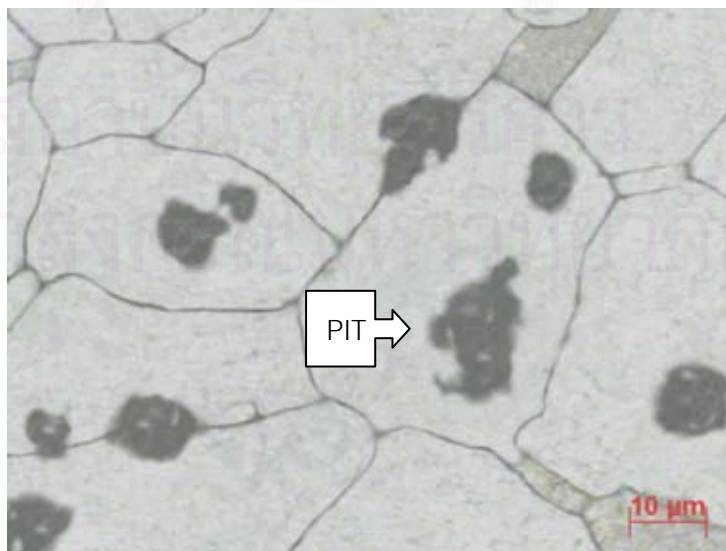




ก. พีไอเอช 2

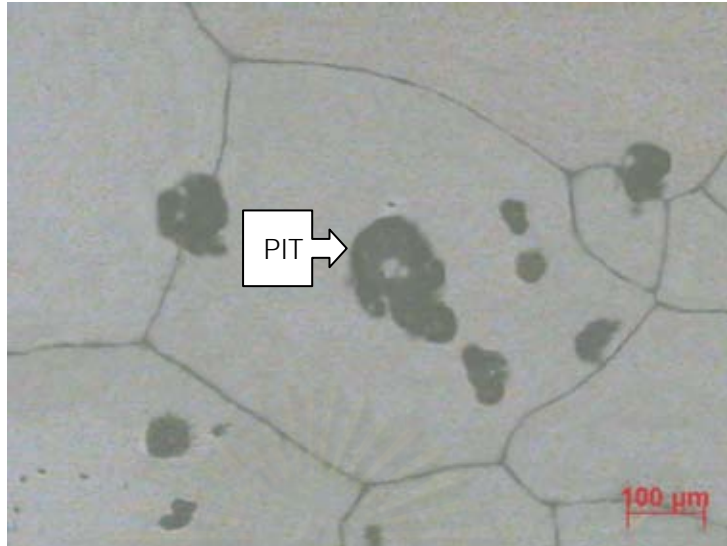


ข. พีไอเอช 7

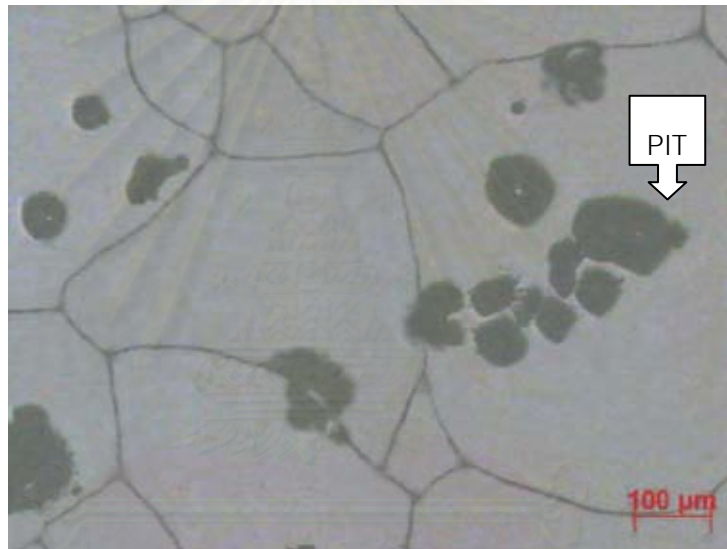


ค. พีไอเอช 10

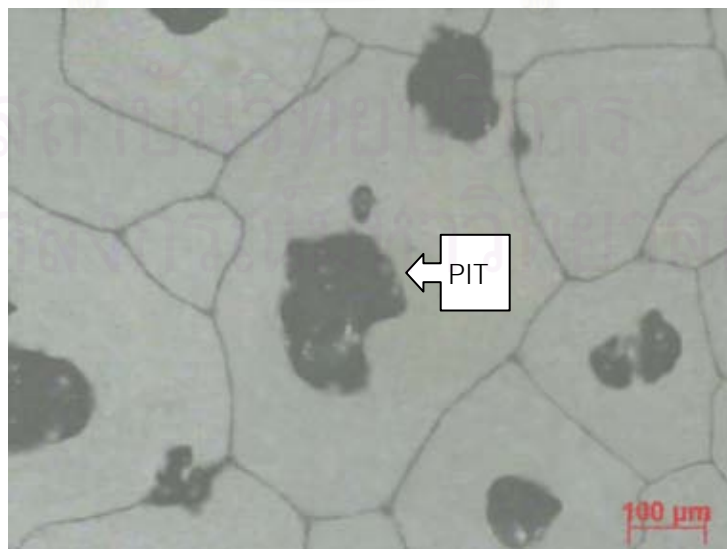
รูปที่ ๑.12 บริเวณที่ถูกกัดกร่อนของเหล็กกล้าชนิด Fe-31Ni ในสารละลาย B  
ที่ค่า ก.พีไอเอช 2 ข. พีไอเอช 7 ค. พีไอเอช 10



ก. พีเอช 2

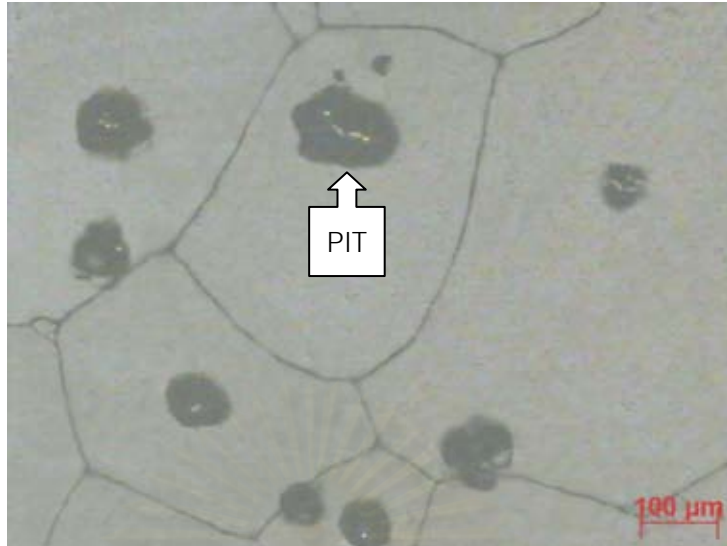


ข. พีเอช 7

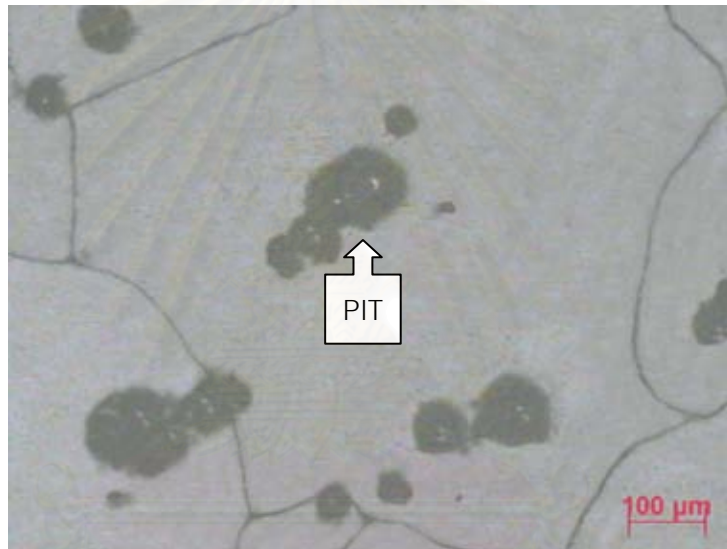


ค. พีเอช 10

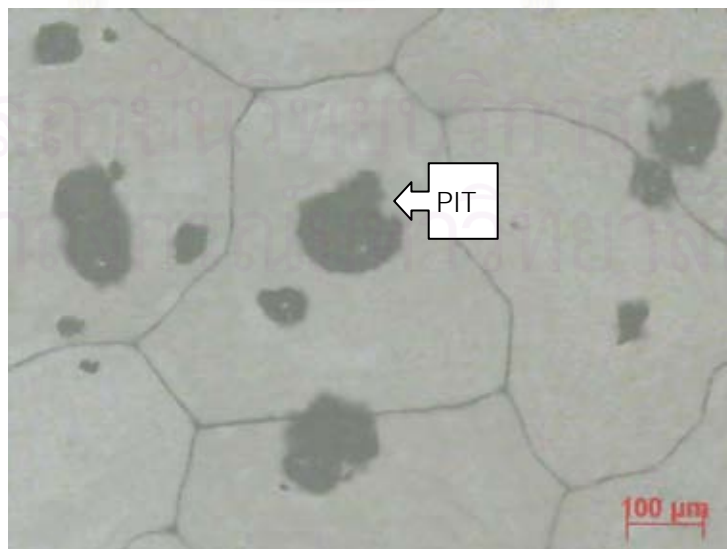
รูปที่ ๑.13 บริเวณที่ถูกกัดกร่อนของเหล็กกล้าชนิด Fe-40Ni ในสารละลาย A  
ที่ค่า ก.พีเอช 2 ข. พีเอช 7 ค. พีเอช 10



ก. พีเอช 2



ข. พีเอช 7



ค. พีเอช 10

รูปที่ ๑.14 บริเวณที่ถูกกัดกร่อนของเหล็กกล้าชนิด Fe-40Ni ในสารละลาย B  
ที่ค่า ก.พีเอช 2 ข. พีเอช 7 ค. พีเอช 10

## ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

ชื่อ-นามสกุล	นายกานต์ ภาวุฒานนท์
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

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย