

ผลของไนโตรเจนต่อความต้านทานการกัดกร่อนของเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ที่มีส่วนผสม
โครเมียม 28% นิกเกิล 7% ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้น 3.5 % โดยน้ำหนัก

นางสาวพรวสา วงศ์ปัญญา

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโลหการ ภาควิชาวิศวกรรมโลหการ

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2546

ISBN 974-17-4021-2

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

EFFECTS OF NITROGEN ON CORROSION RESISTANCE OF 28%Cr-7%Ni DUPLEX STAINLESS
STEELS IN 3.5 %wt NaCl SOLUTION

Miss Pornwasa Wongpanya

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering in Metallurgical Engineering

Department of Metallurgical Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2003

ISBN 974-17-4021-2

หัวข้อวิทยานิพนธ์

ผลของไนโตรเจนต่อความต้านทานการกัดกร่อนของเหล็กกล้าไร้สนิม
ดูเพล็กซ์ที่มีส่วนผสมโครเมียม 28% นิกเกิล 7% ในสารละลายไฮเดียม
คลอไรด์ความเข้มข้น 3.5% โดยน้ำหนัก

โดย

นางสาวพรวิสา วงศ์ปัญญา

สาขาวิชา

วิศวกรรมโลหการ

อาจารย์ที่ปรึกษา

รองศาสตราจารย์ ดร. กอบบุญ หล่อทองคำ

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยรับนี้เป็นส่วน
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต




..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร.สมศักดิ์ ปัญญาแก้ว)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์



..... ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ชاکร จารุพิสิฐธร)

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

..... กรรมการ
(อาจารย์ ดร.เอกสิทธิ์ นิสารัตนพร)

พรพสา วงศ์ปัญญา : ผลของไนโตรเจนต่อความต้านทานการกัดกร่อนของเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ที่มี
ส่วนผสมโครเมียม 28% นิกเกิล 7% ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้น 3.5 % โดยน้ำหนัก
(Effects of Nitrogen on Corrosion Resistance of 28%Cr-7%Ni Duplex Stainless Steels in 3.5
%wt NaCl Solution) อ. ที่ปรึกษา : รองศาสตราจารย์ ดร.กอบบุญ หล่อทองคำ, 141 หน้า. ISBN 974
- 17 - 4021 - 2

วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้ศึกษาผลของไนโตรเจนต่อความต้านทานการกัดกร่อนของเหล็กกล้าไร้สนิมดู
เพล็กซ์และเหล็กกล้าไร้สนิมไมโครดูเพล็กซ์ที่มีส่วนผสมโครเมียม 28 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก นิกเกิล 7 เปอร์เซ็นต์
โดยน้ำหนัก ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้น 3.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก อุณหภูมิ 27 องศาเซลเซียส
ค่าพีเอช 2, 7 และ 10 โดยอาศัยเทคนิคทางไฟฟ้าเคมีวัดเส้นโพลาริเซชันแล้วหาค่าตัวแปรการกัดกร่อน ผลการ
ศึกษาพบว่าพฤติกรรมการกัดกร่อนของเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ที่แต่ละค่าพีเอชแตกต่างกัน ที่พีเอช 2 ไนโตรเจน
ช่วยเพิ่มค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อน (corrosion potential, E_{corr}) และค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนแบบรูเข็มหรือหลุม
(pitting potential, E_p) ลดค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อน (corrosion current density, I_{corr}) ค่า
อัตราการกัดกร่อน (corrosion rate, R_{mpy}) และค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าขณะวัสดุเกิดฟิล์มที่ผิว (passive
current density, I_p) ที่พีเอช 7 และ 10 ไนโตรเจนไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อน
(corrosion potential, E_{corr}) ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อน (corrosion current density, I_{corr}) และ
ค่าอัตราการกัดกร่อน (corrosion rate, R_{mpy}) แต่พบว่าไนโตรเจนช่วยเพิ่มค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าขณะวัสดุ
เกิดฟิล์มที่ผิว (passive current density, I_p) และค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนแบบรูเข็มหรือหลุม (pitting
potential, E_p) เหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์และเหล็กกล้าไร้สนิมไมโครดูเพล็กซ์มีพฤติกรรมการกัดกร่อนคล้ายกัน
ผลการทดสอบแสดงว่าปริมาณความเข้มข้นของโปรตรอนในสารละลายมีผลต่อพฤติกรรมการกัดกร่อนโดยเฉพาะ
อย่างยิ่งในการกระบวนการเกิดฟิล์มพาสซีฟ

ผลการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของบริเวณที่ถูกกัดกร่อนในช่วงค่าศักย์ไฟฟ้าทรานพาสซีฟ
(transpassive potentials) พบว่าความต้านทานการกัดกร่อนของโครงสร้างออสเตไนต์เพิ่มขึ้นเมื่อส่วนผสม
ไนโตรเจนเพิ่มขึ้น ที่ส่วนผสมไนโตรเจนน้อย ๆ โครงสร้างออสเตไนต์ถูกกัดกร่อน สำหรับเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์
ที่มีส่วนผสมไนโตรเจนมากกว่า 0.1100 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และสำหรับเหล็กกล้าไร้สนิมไมโครดูเพล็กซ์ที่มีส่วน
ผสมไนโตรเจนมากกว่า 0.0440 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักพบว่าโครงสร้างเฟอร์ไรต์ถูกกัดกร่อน

ปริมาณส่วนผสมไนโตรเจนที่เหมาะสมสำหรับเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ที่มีส่วนผสมโครเมียม 28
เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก นิกเกิล 7 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก คือ 0.2300 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ส่วนเหล็กกล้าไร้สนิม
ไมโครดูเพล็กซ์ยังไม่สามารถสรุปได้แน่ชัดและควรมีการศึกษาต่อไป

ภาควิชา...วิศวกรรมโลหการ.....ลายมือชื่อนิสิต พรพสา วงศ์ปัญญา.....
สาขาวิชา...วิศวกรรมโลหการ.....ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา โทณูญ หล่อทองคำ.....
ปีการศึกษา.....2546.....ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม.....

4470711521: MAJOR METALLURGICAL ENGINEERING

KEY WORD: DUPLEX AND MICRO-DUPLEX STAINLESS STEEL / NITROGEN / CORROSION RESISTANCE /

PORNWASA WONGPANYA: EFFECTS OF NITROGEN ON CORROSION RESISTANCE OF 28%Cr-7%Ni DUPLEX STAINLESS STEELS IN 3.5 %wt NaCl SOLUTION. THESIS ADVISOR: ASSOC. PROF. Dr-Ing. GOBBOON LOTHONGKUM, 141 pp. ISBN 974 – 17 – 4021 - 2

The objective of this research is to study the effect of nitrogen on the corrosion behaviors of duplex and micro-duplex stainless steels with 28%Cr and 7%Ni in 3.5 wt.% NaCl solution at 27°C. The specimens were tested at pH 2, 7 and 10 by electrochemical technique to measure the polarization curves, which can be interpreted for studying the corrosion behaviors. The corrosion behaviors of duplex and micro-duplex stainless steels are similar, but are different at each pH. At pH 2, when nitrogen contents increase the corrosion potential (E_{corr}) as well as pitting potential (E_p) increase, but corrosion current density (i_{corr}), corrosion rate (R_{mpy}) and passive current density (i_p) decrease. At pH 7 and 10, the nitrogen effect on corrosion potential (E_{corr}), corrosion current density (i_{corr}) and corrosion rate (R_{mpy}) cannot be observed. However, passive current density (i_p) and pitting potential (E_p) increase. From the results, it can be seen that the amount of $[H^+]$ in the solution influences on corrosion behaviors of duplex and micro-duplex stainless steels especially forming passive film.

From metallography examination of the corroded phase at transpassive potentials, it was found that the corrosion resistance of austenite increases with increasing the nitrogen content. At the very low nitrogen content, the corroded phase is austenite, but at the high nitrogen content the ferrite is corroded.

The suitable nitrogen content for good corrosion resistance of duplex stainless steels in this study should be 0.2300 %wt because of the minimum corrosion rate. In the case of micro-duplex stainless steel, the further study should be continued to specify the suitable nitrogen content.

Department...Metallurgical Engineering..... Student's signature Pornwasa Wongpanya
 Field of studies...Metallurgical Engineering..... Advisor's signature Gobboon Lothongkum
 Academic year ...2003..... Co-advisor's signature.....

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงลงได้ด้วยความช่วยเหลืออย่างยิ่งของ รองศาสตราจารย์ ดร. กอบบุญ หล่อทองคำ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ซึ่งผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงที่ท่านได้ให้ทั้งความรู้ คำแนะนำ ตลอดจนคำปรึกษาที่มีคุณค่ายิ่งในการนำไปประยุกต์ใช้ในงานวิจัย และการทำงานในอนาคต

ขอกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ชاکร จารุพิสิฐธร อาจารย์ ดร. เอกสิทธิ์ นิสาร์ตนพร ที่ได้ให้คำแนะนำที่มีค่ายิ่ง ซึ่งทำให้วิทยานิพนธ์มีความสมบูรณ์มากขึ้น ขอขอบคุณศาสตราจารย์ ดร. T. Maki ภาควิชาวัสดุศาสตร์และวัสดุวิศวกรรม มหาวิทยาลัยเกียวโต และบริษัท Nisshin Steel Co., Ltd. ที่ให้ความอนุเคราะห์เหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์สำหรับการวิจัยในครั้งนี้ ขอขอบคุณท่านอาจารย์และเจ้าหน้าที่ประจำภาควิชาวิศวกรรมโลหการทุกท่าน รวมถึงเพื่อน ๆ พี่ ๆ ทุกท่านที่ได้ให้ความช่วยเหลือจนงานวิจัยในครั้งนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี ขอขอบพระคุณ คุณเสนีย์ มณีเพชร ที่ได้แนะนำและช่วยเหลือในการเตรียมชิ้นงานทดสอบ

สุดท้ายนี้ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณบิดามารดา ที่ให้กำลังใจและสนับสนุนการศึกษาของผู้วิจัยเสมอมา ตลอดจนพี่ชายและน้องสาวที่น่ารัก และคุณค่าอันใดที่ได้รับจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ขอมอบเป็นกตัญญูตราบาแต่บิดา มารดา ครูอาจารย์ ผู้มีพระคุณทุกท่าน ตลอดจนสถาบันการศึกษาอันเป็นที่รักยิ่ง

สารบัญ

บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฌ
สารบัญรูป.....	ฐ
อธิบายคำย่อ.....	ฬ
บทที่	
1. บทนำ.....	1
1.1 ความสำคัญของงานวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	2
1.3 ขอบเขตการศึกษา.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
2. การศึกษาข้อมูลและทฤษฎีเบื้องต้น.....	4
2.1 นิยามและกระบวนการทางไฟฟ้าเคมีของการกักก่อน.....	4
2.2 การวัดศักย์ไฟฟ้าการกักก่อน ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกักก่อน และอัตราการกักก่อน.....	5
2.3 เส้นโพลาริเซชัน.....	8
2.4 ผลของไนโตรเจนต่อความต้านทานการกักก่อนของเหล็กกล้าไร้สนิม.....	10
2.5 เหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์.....	17
3. ขั้นตอนและวิธีดำเนินการทดลอง.....	26
3.1 วัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง.....	26
3.2 ขั้นตอนการทดลอง.....	34
3.3 วิธีการทดลอง.....	34
4. ผลการทดลองและอภิปรายผลการทดลอง.....	36
5. สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะการทดลองต่อไป.....	65
รายการอ้างอิง.....	69
ภาคผนวก.....	72
ภาคผนวก ก.....	73

สารบัญ (ต่อ)

ภาคผนวก ข.....	78
ภาคผนวก ค.....	80
ภาคผนวก ง.....	83
ภาคผนวก จ.....	120
ภาคผนวก ฉ.....	132
ภาคผนวก ช.....	137
ภาคผนวก ฌ.....	138
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	141

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ส่วนผสมทางเคมีของเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ที่กำลังพัฒนาให้มีความต้านทานการกัดกร่อนและมีสมบัติเชิงกลที่ดีขึ้น.....	18
3.1 ส่วนผสมทางเคมี (เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก) ของเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ (K1-K4).....	26
3.2 คุณสมบัติที่ใช้ในกระบวนการอบชุบด้วยความร้อนเพื่อควบคุมสัดส่วนโครงสร้างออสเตไนต์ต่อโครงสร้างเฟอร์ไรต์ให้ได้ประมาณ 1:1.....	27
3.3 สัดส่วนโครงสร้างออสเตไนต์ต่อโครงสร้างเฟอร์ไรต์ (สัดส่วนโดยปริมาตร).....	27
3.4 ส่วนผสมทางเคมี (เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก) ของเหล็กกล้าไร้สนิมไมโครดูเพล็กซ์ (L1-L4).....	29
3.5 สัดส่วนโครงสร้างออสเตไนต์ต่อโครงสร้างเฟอร์ไรต์ (สัดส่วนโดยปริมาตร).....	29
3.6 ผลการทดสอบปริมาณไนโตรเจน.....	30
4.1 ค่าที่ได้จากเส้นโพลาริเซชันของเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์และเหล็กกล้าไร้สนิมไมโครดูเพล็กซ์ที่มีส่วนผสมโครเมียม 28 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก นิกเกิล 7 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก.....	39
ก.1 สัดส่วนโครงสร้างออสเตไนต์ของชิ้นงาน K1.....	75
ก.2 สัดส่วนโครงสร้างออสเตไนต์ของชิ้นงาน K2.....	75
ก.3 สัดส่วนโครงสร้างออสเตไนต์ของชิ้นงาน K3.....	75
ก.4 สัดส่วนโครงสร้างออสเตไนต์ของชิ้นงาน K4.....	76
ก.5 สัดส่วนโครงสร้างออสเตไนต์ของชิ้นงาน L1.....	76
ก.6 สัดส่วนโครงสร้างออสเตไนต์ของชิ้นงาน L2.....	76
ก.7 สัดส่วนโครงสร้างออสเตไนต์ของชิ้นงาน L3.....	77
ก.8 สัดส่วนโครงสร้างออสเตไนต์ของชิ้นงาน L4.....	77
ข.1 ปริมาณไนโตรเจนในชิ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ (K1-K4).....	78
ข.2 ปริมาณไนโตรเจนในชิ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิมไมโครดูเพล็กซ์ (L1-L4).....	78
จ.1 ค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนที่วัดได้ของชิ้นงาน K1-K4 ที่พีเอช 2.....	120

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
จ.2 ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกักร้อนที่วัดได้ของชิ้นงาน K1-K4 ที่พีเอช 2.....	120
จ.3 ค่าอัตราการกักร้อนของชิ้นงาน K1-K4 ที่พีเอช 2.....	121
จ.4 ค่าศักย์ไฟฟ้าการกักร้อนแบบรูเข็มหรือหลุมที่วัดได้ของชิ้นงาน K1-K4 ที่พีเอช 2.....	121
จ.5 ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าขณะวัสดุเกิดฟิล์มที่ผิวที่วัดได้ของชิ้นงาน K1-K4 ที่พีเอช 2.....	121
จ.6 ค่าศักย์ไฟฟ้าการกักร้อนที่วัดได้ของชิ้นงาน L1-L4 ที่พีเอช 2.....	122
จ.7 ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกักร้อนที่วัดได้ของชิ้นงาน L1-L4 ที่พีเอช 2.....	122
จ.8 ค่าอัตราการกักร้อนของชิ้นงาน L1-L4 ที่พีเอช 2.....	122
จ.9 ค่าศักย์ไฟฟ้าการกักร้อนแบบรูเข็มหรือหลุมที่วัดได้ของชิ้นงาน L1-L4 ที่พีเอช 2.....	123
จ.10 ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าขณะวัสดุเกิดฟิล์มที่ผิวที่วัดได้ของชิ้นงาน L1-L4 ที่พีเอช 2.....	123
จ.11 ค่าศักย์ไฟฟ้าการกักร้อนที่วัดได้ของชิ้นงาน K1-K4 ที่พีเอช 7.....	124
จ.12 ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกักร้อนที่วัดได้ของชิ้นงาน K1-K4 ที่พีเอช 7.....	124
จ.13 ค่าอัตราการกักร้อนของชิ้นงาน K1-K4 ที่พีเอช 7.....	124
จ.14 ค่าศักย์ไฟฟ้าการกักร้อนแบบรูเข็มหรือหลุมที่วัดได้ของชิ้นงาน K1-K4 ที่พีเอช 7.....	125
จ.15 ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าขณะวัสดุเกิดฟิล์มที่ผิวที่วัดได้ของชิ้นงาน K1-K4 ที่พีเอช 7.....	125
จ.16 ค่าศักย์ไฟฟ้าการกักร้อนที่วัดได้ของชิ้นงาน L1-L4 ที่พีเอช 7.....	126
จ.17 ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกักร้อนที่วัดได้ของชิ้นงาน L1-L4 ที่พีเอช 7.....	126
จ.18 ค่าอัตราการกักร้อนของชิ้นงาน L1-L4 ที่พีเอช 7.....	126

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
จ.19 ค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนแบบรูเข็มหรือหลุมที่วัดได้ของชิ้นงาน L1-L4 ที่พีเอช 7.....	127
จ.20 ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าขณะวัสดุเกิดฟิล์มที่ผิวที่วัดได้ของชิ้นงาน L1-L4 ที่พีเอช 7.....	127
จ.21 ค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนที่วัดได้ของชิ้นงาน K1-K4 ที่พีเอช 10.....	128
จ.22 ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อนที่วัดได้ของชิ้นงาน K1-K4 ที่พีเอช 10.....	128
จ.23 ค่าอัตราการกัดกร่อนของชิ้นงาน K1-K4 ที่พีเอช 10.....	128
จ.24 ค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนแบบรูเข็มหรือหลุมที่วัดได้ของชิ้นงาน K1-K4 ที่พีเอช 10.....	129
จ.25 ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าขณะวัสดุเกิดฟิล์มที่ผิวที่วัดได้ของชิ้นงาน K1-K4 ที่พีเอช 10.....	129
จ.26 ค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนที่วัดได้ของชิ้นงาน L1-L4 ที่พีเอช 10.....	129
จ.27 ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อนที่วัดได้ของชิ้นงาน L1-L4 ที่พีเอช 10.....	130
จ.28 ค่าอัตราการกัดกร่อนของชิ้นงาน L1-L4 ที่พีเอช 10.....	130
จ.29 ค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนแบบรูเข็มหรือหลุมที่วัดได้ของชิ้นงาน L1-L4 ที่พีเอช 10.....	131
จ.30 ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าขณะวัสดุเกิดฟิล์มที่ผิวที่วัดได้ของชิ้นงาน L1-L4 ที่พีเอช 10.....	131
ฉ.1 ปริมาณธาตุโครเมียม และนิกเกิล (เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก) ของชิ้นงาน K1 (0.0018 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก).....	132
ฉ.2 ปริมาณธาตุโครเมียม และนิกเกิล (เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก) ของชิ้นงาน K2 (0.1100 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก).....	132
ฉ.3 ปริมาณธาตุโครเมียม และนิกเกิล (เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก) ของชิ้นงาน K3 (0.2300 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก).....	133

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
จ.4 ปริมาณธาตุโครเมียม และนิกเกิล (เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก) ของชิ้นงาน K4 (0.3400 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก).....	133
จ.5 ปริมาณธาตุโครเมียม และนิกเกิล (เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก) ของชิ้นงาน L1 (0.0020 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก).....	133
จ.6 ปริมาณธาตุโครเมียม และนิกเกิล (เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก) ของชิ้นงาน L2 (0.0440 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก).....	134
จ.7 ปริมาณธาตุโครเมียม และนิกเกิล (เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก) ของชิ้นงาน L3 (0.0920 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก).....	134
จ.8 ปริมาณธาตุโครเมียม และนิกเกิล (เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก) ของชิ้นงาน L4 (0.1800 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก).....	134
จ.9 ปริมาณธาตุโครเมียม และนิกเกิล (เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก) ในโครงสร้างออกสเตนิต์และโครงสร้างเฟอร์ไรต์ของชิ้นงาน K1-K4.....	135
จ.10 ปริมาณธาตุโครเมียม และนิกเกิล (เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก) ในโครงสร้างออกสเตนิต์และโครงสร้างเฟอร์ไรต์ของชิ้นงาน L1-L4.....	135
ข.1 ค่าศักย์ไฟฟ้าวงจรเปิดของชิ้นงานในสารละลายไฮเดียมคลอไรด์เข้มข้น 3.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ณ เวลาต่าง ๆ.....	137
ฉ.1 อุณหภูมิที่ใช้ในกระบวนการอบชุบด้วยความร้อน.....	140

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1	ลักษณะการวัดกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อนและศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนโดยเครื่องโพเทนชิโอสแตท {3}.....6
2.2	ศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนและความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อน {5}.....7
2.3	ส่วนต่าง ๆ ที่สำคัญของเส้นโพลาริเซชัน {6}.....9
2.4	ความหนาแน่นกระแสของโลหะผสม Fe-20Cr-20Ni-6Mo-0.2N และ Fe-20Cr-20Ni-6Mo-0.11N ที่ถูกโพลาริเซชันที่ 500 มิลลิโวลต์ (Saturated Calomel Electrode, SCE) ในสารละลายกรดไฮโดรคลอริก 0.1 โมลาร์ + โซเดียมคลอไรด์ 0.4 โมลาร์ เมื่อเวลาเปลี่ยนไปในอุณหภูมิ a) 22 องศาเซลเซียส b) 22 องศาเซลเซียส c) 65 องศาเซลเซียส {3}..... 11
2.5	กลไกการแทรกซึม เมื่อมีไอออนที่มีประจุลบสะสมที่บริเวณรอยต่อระหว่างฟิล์มพาสซีฟและออกไซด์ทำให้เกิดความแตกต่างของค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าลดลง {16}.....15
2.6	กลไกการดูดซับ ภายใต้สมมติฐานว่าไอออนไนโตรเจนในรูปประจุลบ ผลักไอออนของคลอไรด์ทำให้เกิดฟิล์มใหม่ (repassivation) {17}.....15
2.7	ปริมาณไนโตรเจนในผิวเหล็กกล้าไร้สนิม Fe-17Cr-13Ni-0.15N ที่ความลึกต่าง ๆ ภายหลังจากทำให้เกิดฟิล์มที่ 650 มิลลิโวลต์ (SHE) ทดสอบด้วย XPS {20}.....17
2.8	ผลของโครเมียมต่ออัตราการกัดกร่อนแบบรูเข็มหรือหลุมของเหล็กกล้าไร้สนิม ดูเพล็กซ์ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์เข้มข้น 3 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส {21}..... 19
2.9	อิทธิพลของนิเกิลต่ออัตราการกัดกร่อนแบบรูเข็มหรือหลุมของเหล็กกล้าไร้สนิม ดูเพล็กซ์ที่มีส่วนผสมโครเมียม 22 และ 25 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ในสารละลายเพอร์ริกคลอไรด์เข้มข้น 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส {21}..... 19
2.10	ผลของธาตุผสมในเหล็กกล้าไร้สนิมต่อเส้นโพลาริเซชัน {21}.....20
2.11	การเกิดการกัดกร่อนของเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ {22}
	ก. การกัดกร่อนที่โครงสร้างอสเทนไนต์ในชิ้นงานเหล็กหล่อ
	ข. การกัดกร่อนที่โครงสร้างเฟอร์ไรต์ในชิ้นงานที่ผ่านการขึ้นรูป..... 21

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.12 ผลของปริมาณโครเมียมต่อความต้านทานการกัดกร่อนในน้ำทะเล ที่อุณหภูมิห้อง {24}.....	22
2.13 แผนภูมิสมดุลง 3 เฟส ของเหล็ก โครเมียม นิกเกิล ที่อุณหภูมิ 1200 องศาเซลเซียส แสดงส่วนผสมทางเคมีของเหล็กกล้าไร้สนิม จากการศึกษาของ H. Hoffmeister และ G. Lothongkum {25}.....	22
2.14 ผลของปริมาณธาตุผสมต่อความต้านทานการกัดกร่อนของเหล็กกล้าไร้สนิม ออสเทนนิติก เฟอร์ริติก และดูเพล็กซ์ในน้ำทะเลจำลอง ตามมาตรฐาน DIN 50905 ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส {25} ก. ผลของโครเมียม ข. ผลของนิกเกิล ค. ผลของเหล็ก.....	23
2.15 การเริ่มต้นของการเกิดการกัดกร่อนของเหล็กกล้าไร้สนิม {25} ก. การกัดกร่อนที่โครงสร้างออสเตไนต์ในเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ ข. การกัดกร่อนที่โครงสร้างเฟอร์ไรต์ในเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์.....	24
3.1 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานทดสอบเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ (K1-K4).....	28
3.2 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานทดสอบเหล็กกล้าไร้สนิมไมโครดูเพล็กซ์ (L1-L4).....	31
3.3 เครื่องโพเทนชิโอสแตทรุ่น PGSTAT 20.....	32
3.4 อิเล็กโทรดอ้างอิง (Ag/AgCl 3M KCl).....	32
3.5 อิเล็กโทรดวัดกระแส (Pt).....	33
4.1 ตัวอย่างเส้นโพลาริเซชันของเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ (K1-K4).....	37
4.2 ตัวอย่างเส้นโพลาริเซชันของเหล็กกล้าไร้สนิมไมโครดูเพล็กซ์ (L1-L4).....	38
4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนและปริมาณไนโตรเจน ของชิ้นงาน K1-K4.....	40
4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนและปริมาณไนโตรเจน ของชิ้นงาน L1-L4.....	40
4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อนและปริมาณ ไนโตรเจนของชิ้นงาน K1-K4.....	41
4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อนและปริมาณ ไนโตรเจนของชิ้นงาน L1-L4.....	42

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราการกัดกร่อนและปริมาณไนโตรเจนของชิ้นงาน K1-K4.....	43
4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราการกัดกร่อนและปริมาณไนโตรเจนของชิ้นงาน L1-L4.....	43
4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าขณะวัสดุเกิดฟิล์มที่ผิวและปริมาณไนโตรเจนของชิ้นงาน K1-K4.....	44
4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าขณะวัสดุเกิดฟิล์มที่ผิวและปริมาณไนโตรเจนของชิ้นงาน L1-L4.....	45
4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนแบบรูเข็มหรือหลุมและปริมาณไนโตรเจนของชิ้นงาน K1-K4.....	47
4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนแบบรูเข็มหรือหลุมและปริมาณไนโตรเจนของชิ้นงาน L1-L4.....	47
4.13 ปริมาณไนโตรเจนในฟิล์มพาสซีฟที่ปรากฏในโครงสร้างออสเตไนต์และโครงสร้างเฟอร์ไรต์ของเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ 2205 ที่ความลึกต่างๆ ภายหลังการทำให้เกิดฟิล์มที่ 600 มิลลิโวลต์ (SCE) ทดสอบด้วย AES {25}.....	49
4.14 กลไกการดูดซับ ภายใต้สมมติฐานว่าไอออนไนโตรเจนในรูปประจุลบ ผลักไอออนของคลอไรด์ทำให้เกิดฟิล์มใหม่ {16, 17}.....	50
4.15 บริเวณที่ถูกกัดกร่อนของชิ้นงาน K1 ที่มีปริมาณไนโตรเจน 0.0018 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนักในสภาวะ ก. pH 2 ค. pH 7 ค. pH 10.....	51
4.16 บริเวณที่ถูกกัดกร่อนของชิ้นงาน K2 ที่มีปริมาณไนโตรเจน 0.1100 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนักในสภาวะ ก. pH 2 ค. pH 7 ค. pH 10.....	52
4.17 บริเวณที่ถูกกัดกร่อนของชิ้นงาน K3 ที่มีปริมาณไนโตรเจน 0.2300 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนักในสภาวะ ก. pH 2 ค. pH 7 ค. pH 10.....	53
4.18 บริเวณที่ถูกกัดกร่อนของชิ้นงาน K4 ที่มีปริมาณไนโตรเจน 0.3400 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนักในสภาวะ ก. pH 2 ค. pH 7 ค. pH 10.....	54

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.19 ปริมาณโครเมียม นิกเกิล (เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก) ในโครงสร้างออสเตไนต์และโครงสร้างเฟอร์ไรต์ของชิ้นงาน K1-K4 ที่มีส่วนผสมไนโตรเจนต่างกัน วิเคราะห์โดย EDX.....	55
4.20 จุดเริ่มต้นของการกัดกร่อนบริเวณรอยต่อโครงสร้างออสเตไนต์และเฟอร์ไรต์.....	56
4.21 รอยต่อระหว่างโครงสร้างออสเตไนต์และเฟอร์ไรต์ในชิ้นงาน K2-K4.....	57
4.22 บริเวณที่ถูกกัดกร่อนของชิ้นงาน L1 ที่มีปริมาณไนโตรเจน 0.0020 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนักในสภาวะ ก. pH 2 ค. pH 7 ค. pH 10.....	58
4.23 บริเวณที่ถูกกัดกร่อนของชิ้นงาน L2 ที่มีปริมาณไนโตรเจน 0.0440 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนักในสภาวะ ก. pH 2 ค. pH 7 ค. pH 10.....	59
4.24 บริเวณที่ถูกกัดกร่อนของชิ้นงาน L3 ที่มีปริมาณไนโตรเจน 0.0920 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนักในสภาวะ ก. pH 2 ค. pH 7 ค. pH 10.....	60
4.25 บริเวณที่ถูกกัดกร่อนของชิ้นงาน L4 ที่มีปริมาณไนโตรเจน 0.1800 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนักในสภาวะ ก. pH 2 ค. pH 7 ค. pH 10.....	61
4.26 ปริมาณโครเมียม นิกเกิล (เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก) ในโครงสร้างออสเตไนต์และโครงสร้างเฟอร์ไรต์ของชิ้นงาน L1-L4 ที่มีส่วนผสมไนโตรเจนต่างกัน วิเคราะห์โดย EDX.....	62
4.27 จุดเริ่มต้นของการกัดกร่อนบริเวณรอยต่อโครงสร้างของเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์....	63
4.28 รอยต่อระหว่างโครงสร้างออสเตไนต์และเฟอร์ไรต์ในชิ้นงาน L2-L4.....	64
5.1 เปรียบเทียบเส้นโพลาริเซชันของเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ในสารละลาย โซเดียมคลอไรด์เข้มข้น 3.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ที่มีไอออนต่างกัน.....	67
ก.1 ตำแหน่งการวัดค่า λ และ $(L_3)_\gamma$ จากเส้นทดสอบ.....	74
ข.1 ความสัมพันธ์ของการวิเคราะห์ปริมาณไนโตรเจน (เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก) ระหว่างบริษัท Nisshin Steel Co., Ltd. และ ภาควิชาวิศวกรรมโลหการ.....	79
ค.1 วิธีการหาค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนและค่ากระแสไฟฟ้าการกัดกร่อน จากเส้นโพลาริเซชัน.....	80

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
ค.2	วิธีการหาค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนแบบรูเข็มหรือหลุม..... 81
ค.3	วิธีการหาค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนแบบรูเข็มหรือหลุม..... 81
ง.1	เส้นโพลาริเซชันของเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ (K1, 0.0018 wt.%) ในสารละลาย โซเดียมคลอไรด์เข้มข้น 3.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก อุณหภูมิ 27 องศาเซลเซียส ที่ค่าพีเอช 2 ครั้งที่ 1..... 84
ง.2	เส้นโพลาริเซชันของเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ (K1, 0.0018 wt.%) ในสารละลาย โซเดียมคลอไรด์เข้มข้น 3.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก อุณหภูมิ 27 องศาเซลเซียส ที่ค่าพีเอช 2 ครั้งที่ 2..... 84
ง.3	เส้นโพลาริเซชันของเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ (K1, 0.0018 wt.%) ในสารละลาย โซเดียมคลอไรด์เข้มข้น 3.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก อุณหภูมิ 27 องศาเซลเซียส ที่ค่าพีเอช 2 ครั้งที่ 3..... 85
ง.4	เส้นโพลาริเซชันของเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ (K2, 0.1100 wt.%) ในสารละลาย โซเดียมคลอไรด์เข้มข้น 3.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก อุณหภูมิ 27 องศาเซลเซียส ที่พีเอช 2 ครั้งที่ 1..... 85
ง.5	เส้นโพลาริเซชันของเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ (K2, 0.1100 wt.%) ในสารละลาย โซเดียมคลอไรด์เข้มข้น 3.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก อุณหภูมิ 27 องศาเซลเซียส ที่พีเอช 2 ครั้งที่ 2..... 86
ง.6	เส้นโพลาริเซชันของเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ (K2, 0.1100 wt.%) ในสารละลาย โซเดียมคลอไรด์เข้มข้น 3.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก อุณหภูมิ 27 องศาเซลเซียส ที่พีเอช 2 ครั้งที่ 3..... 86
ง.7	เส้นโพลาริเซชันของเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ (K3, 0.2300 wt.%) ในสารละลาย โซเดียมคลอไรด์เข้มข้น 3.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก อุณหภูมิ 27 องศาเซลเซียส ที่ค่าพีเอช 2 ครั้งที่ 1..... 87
ง.8	เส้นโพลาริเซชันของเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ (K3, 0.2300 wt.%) ในสารละลาย โซเดียมคลอไรด์เข้มข้น 3.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก อุณหภูมิ 27 องศาเซลเซียส ที่ค่าพีเอช 2 ครั้งที่ 2..... 87

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
ง.9 เส้นโพลาริเซชันของเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ (K3, 0.2300 wt.%) ในสารละลาย โซเดียมคลอไรด์เข้มข้น 3.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก อุณหภูมิ 27 องศาเซลเซียส ที่ค่าพีเอช 2 ครั้งที่ 3.....	88
ง.10 เส้นโพลาริเซชันของเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ (K4, 0.3400 wt.%) ในสารละลาย โซเดียมคลอไรด์เข้มข้น 3.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก อุณหภูมิ 27 องศาเซลเซียส ที่ค่าพีเอช 2 ครั้งที่ 1.....	88
ง.11 เส้นโพลาริเซชันของเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ (K4, 0.3400 wt.%) ในสารละลาย โซเดียมคลอไรด์เข้มข้น 3.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก อุณหภูมิ 27 องศาเซลเซียส ที่ค่าพีเอช 2 ครั้งที่ 2.....	89
ง.12 เส้นโพลาริเซชันของเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ (K4, 0.3400 wt.%) ในสารละลาย โซเดียมคลอไรด์เข้มข้น 3.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก อุณหภูมิ 27 องศาเซลเซียส ที่ค่าพีเอช 2 ครั้งที่ 3.....	89
ง.13 เส้นโพลาริเซชันของเหล็กกล้าไร้สนิมไมโครดูเพล็กซ์ (L1, 0.0020 wt.%) ในสารละลาย โซเดียมคลอไรด์เข้มข้น 3.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก อุณหภูมิ 27 องศาเซลเซียส ที่ค่าพีเอช 2 ครั้งที่ 1.....	90
ง.14 เส้นโพลาริเซชันของเหล็กกล้าไร้สนิมไมโครดูเพล็กซ์ (L1, 0.0020 wt.%) ในสารละลาย โซเดียมคลอไรด์เข้มข้น 3.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก อุณหภูมิ 27 องศาเซลเซียส ที่ค่าพีเอช 2 ครั้งที่ 2.....	90
ง.15 เส้นโพลาริเซชันของเหล็กกล้าไร้สนิมไมโครดูเพล็กซ์ (L1, 0.0020 wt.%) ในสารละลาย โซเดียมคลอไรด์เข้มข้น 3.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก อุณหภูมิ 27 องศาเซลเซียส ที่ค่าพีเอช 2 ครั้งที่ 3.....	91
ง.16 เส้นโพลาริเซชันของเหล็กกล้าไร้สนิมไมโครดูเพล็กซ์ (L2, 0.0440 wt.%) ในสารละลาย โซเดียมคลอไรด์เข้มข้น 3.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก อุณหภูมิ 27 องศาเซลเซียส ที่ค่าพีเอช 2 ครั้งที่ 1.....	91
ง.17 เส้นโพลาริเซชันของเหล็กกล้าไร้สนิมไมโครดูเพล็กซ์ (L2, 0.0440 wt.%) ในสารละลาย โซเดียมคลอไรด์เข้มข้น 3.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก อุณหภูมิ 27 องศาเซลเซียส ที่ค่าพีเอช 2 ครั้งที่ 2.....	92

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
ง.18 เส้นโพลาริเซชันของเหล็กกล้าไร้สนิมไมโครดูเพล็กซ์ (L2, 0.0440 wt.%) ในสารละลาย โซเดียมคลอไรด์เข้มข้น 3.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก อุณหภูมิ 27 องศาเซลเซียส ที่ค่าพีเอช 2 ครั้งที่ 3.....	92
ง.19 เส้นโพลาริเซชันของเหล็กกล้าไร้สนิมไมโครดูเพล็กซ์ (L3, 0.0920 wt.%) ในสารละลาย โซเดียมคลอไรด์เข้มข้น 3.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก อุณหภูมิ 27 องศาเซลเซียส ที่ค่าพีเอช 2 ครั้งที่ 1.....	93
ง.20 เส้นโพลาริเซชันของเหล็กกล้าไร้สนิมไมโครดูเพล็กซ์ (L3, 0.0920 wt.%) ในสารละลาย โซเดียมคลอไรด์เข้มข้น 3.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก อุณหภูมิ 27 องศาเซลเซียส ที่ค่าพีเอช 2 ครั้งที่ 2.....	93
ง.21 เส้นโพลาริเซชันของเหล็กกล้าไร้สนิมไมโครดูเพล็กซ์ (L3, 0.0920 wt.%) ในสารละลาย โซเดียมคลอไรด์เข้มข้น 3.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก อุณหภูมิ 27 องศาเซลเซียส ที่ค่าพีเอช 2 ครั้งที่ 3.....	94
ง.22 เส้นโพลาริเซชันของเหล็กกล้าไร้สนิมไมโครดูเพล็กซ์ (L4, 0.1800 wt.%) ในสารละลาย โซเดียมคลอไรด์เข้มข้น 3.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก อุณหภูมิ 27 องศาเซลเซียส ที่ค่าพีเอช 2 ครั้งที่ 1.....	94
ง.23 เส้นโพลาริเซชันของเหล็กกล้าไร้สนิมไมโครดูเพล็กซ์ (L4, 0.1800 wt.%) ในสารละลาย โซเดียมคลอไรด์เข้มข้น 3.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก อุณหภูมิ 27 องศาเซลเซียส ที่ค่าพีเอช 2 ครั้งที่ 2.....	95
ง.24 เส้นโพลาริเซชันของเหล็กกล้าไร้สนิมไมโครดูเพล็กซ์ (L4, 0.1800 wt.%) ในสารละลาย โซเดียมคลอไรด์เข้มข้น 3.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก อุณหภูมิ 27 องศาเซลเซียส ที่ค่าพีเอช 2 ครั้งที่ 3.....	95
ง.25 เส้นโพลาริเซชันของเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ (K1, 0.0018 wt.%) ในสารละลาย โซเดียมคลอไรด์เข้มข้น 3.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก อุณหภูมิ 27 องศาเซลเซียส ที่ค่าพีเอช 7 ครั้งที่ 1.....	96
ง.26 เส้นโพลาริเซชันของเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ (K1, 0.0018 wt.%) ในสารละลาย โซเดียมคลอไรด์เข้มข้น 3.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก อุณหภูมิ 27 องศาเซลเซียส ที่ค่าพีเอช 7 ครั้งที่ 2.....	96

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
ง.27 เส้นโพลาริเซชันของเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ (K1, 0.0018 wt.%) ในสารละลาย โซเดียมคลอไรด์เข้มข้น 3.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก อุณหภูมิ 27 องศาเซลเซียส ที่ค่าพีเอช 7 ครั้งที่ 3.....	97
ง.28 เส้นโพลาริเซชันของเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ (K2, 0.1100 wt.%) ในสารละลาย โซเดียมคลอไรด์เข้มข้น 3.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก อุณหภูมิ 27 องศาเซลเซียส ที่ค่าพีเอช 7 ครั้งที่ 1.....	97
ง.29 เส้นโพลาริเซชันของเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ (K2, 0.1100 wt.%) ในสารละลาย โซเดียมคลอไรด์เข้มข้น 3.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก อุณหภูมิ 27 องศาเซลเซียส ที่ค่าพีเอช 7 ครั้งที่ 2.....	98
ง.30 เส้นโพลาริเซชันของเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ (K2, 0.1100 wt.%) ในสารละลาย โซเดียมคลอไรด์เข้มข้น 3.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก อุณหภูมิ 27 องศาเซลเซียส ที่ค่าพีเอช 7 ครั้งที่ 3.....	98
ง.31 เส้นโพลาริเซชันของเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ (K3, 0.2300 wt.%) ในสารละลาย โซเดียมคลอไรด์เข้มข้น 3.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก อุณหภูมิ 27 องศาเซลเซียส ที่ค่าพีเอช 7 ครั้งที่ 1.....	99
ง.32 เส้นโพลาริเซชันของเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ (K3, 0.2300 wt.%) ในสารละลาย โซเดียมคลอไรด์เข้มข้น 3.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก อุณหภูมิ 27 องศาเซลเซียส ที่ค่าพีเอช 7 ครั้งที่ 2.....	99
ง.33 เส้นโพลาริเซชันของเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ (K3, 0.2300 wt.%) ในสารละลาย โซเดียมคลอไรด์เข้มข้น 3.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก อุณหภูมิ 27 องศาเซลเซียส ที่ค่าพีเอช 7 ครั้งที่ 3.....	100
ง.34 เส้นโพลาริเซชันของเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ (K4, 0.3400 wt.%) ในสารละลาย โซเดียมคลอไรด์เข้มข้น 3.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก อุณหภูมิ 27 องศาเซลเซียส ที่ค่าพีเอช 7 ครั้งที่ 1.....	100
ง.35 เส้นโพลาริเซชันของเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ (K4, 0.3400 wt.%) ในสารละลาย โซเดียมคลอไรด์เข้มข้น 3.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก อุณหภูมิ 27 องศาเซลเซียส ที่ค่าพีเอช 7 ครั้งที่ 2.....	101

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
ง.36 เส้นโพลาริเซชันของเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ (K4, 0.3400 wt.%) ในสารละลาย โซเดียมคลอไรด์เข้มข้น 3.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก อุณหภูมิ 27 องศาเซลเซียส ที่ค่าพีเอช 7 ครั้งที่ 3.....	101
ง.37 เส้นโพลาริเซชันของเหล็กกล้าไร้สนิมไมโครดูเพล็กซ์ (L1, 0.0020 wt.%) ในสารละลาย โซเดียมคลอไรด์เข้มข้น 3.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก อุณหภูมิ 27 องศาเซลเซียส ที่ค่าพีเอช 7 ครั้งที่ 1.....	102
ง.38 เส้นโพลาริเซชันของเหล็กกล้าไร้สนิมไมโครดูเพล็กซ์ (L1, 0.0020 wt.%) ในสารละลาย โซเดียมคลอไรด์เข้มข้น 3.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก อุณหภูมิ 27 องศาเซลเซียส ที่ค่าพีเอช 7 ครั้งที่ 2.....	102
ง.39 เส้นโพลาริเซชันของเหล็กกล้าไร้สนิมไมโครดูเพล็กซ์ (L1, 0.0020 wt.%) ในสารละลาย โซเดียมคลอไรด์เข้มข้น 3.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก อุณหภูมิ 27 องศาเซลเซียส ที่ค่าพีเอช 7 ครั้งที่ 3.....	103
ง.40 เส้นโพลาริเซชันของเหล็กกล้าไร้สนิมไมโครดูเพล็กซ์ (L2, 0.0440 wt.%) ในสารละลาย โซเดียมคลอไรด์เข้มข้น 3.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก อุณหภูมิ 27 องศาเซลเซียส ที่ค่าพีเอช 7 ครั้งที่ 1.....	103
ง.41 เส้นโพลาริเซชันของเหล็กกล้าไร้สนิมไมโครดูเพล็กซ์ (L2, 0.0440 wt.%) ในสารละลาย โซเดียมคลอไรด์เข้มข้น 3.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก อุณหภูมิ 27 องศาเซลเซียส ที่ค่าพีเอช 7 ครั้งที่ 2.....	104
ง.42 เส้นโพลาริเซชันของเหล็กกล้าไร้สนิมไมโครดูเพล็กซ์ (L2, 0.0440 wt.%) ในสารละลาย โซเดียมคลอไรด์เข้มข้น 3.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก อุณหภูมิ 27 องศาเซลเซียส ที่ค่าพีเอช 7 ครั้งที่ 3.....	104
ง.43 เส้นโพลาริเซชันของเหล็กกล้าไร้สนิมไมโครดูเพล็กซ์ (L3, 0.0920 wt.%) ในสารละลาย โซเดียมคลอไรด์เข้มข้น 3.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก อุณหภูมิ 27 องศาเซลเซียส ที่ค่าพีเอช 7 ครั้งที่ 1.....	105
ง.4 เส้นโพลาริเซชันของเหล็กกล้าไร้สนิมไมโครดูเพล็กซ์ (L3, 0.0920 wt.%) ในสารละลาย โซเดียมคลอไรด์เข้มข้น 3.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก อุณหภูมิ 27 องศาเซลเซียส ที่ค่าพีเอช 7 ครั้งที่ 2.....	105

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
ง.45 เส้นโพลาริเซชันของเหล็กกล้าไร้สนิมไมโครดูเพล็กซ์ (L3, 0.0920 wt.%) ในสารละลาย โซเดียมคลอไรด์เข้มข้น 3.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก อุณหภูมิ 27 องศาเซลเซียส ที่ค่าพีเอช 7 ครั้งที่ 3.....	106
ง.46 เส้นโพลาริเซชันของเหล็กกล้าไร้สนิมไมโครดูเพล็กซ์ (L4, 0.1800 wt.%) ในสารละลาย โซเดียมคลอไรด์เข้มข้น 3.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก อุณหภูมิ 27 องศาเซลเซียส ที่ค่าพีเอช 7 ครั้งที่ 1.....	106
ง.47 เส้นโพลาริเซชันของเหล็กกล้าไร้สนิมไมโครดูเพล็กซ์ (L4, 0.1800 wt.%) ในสารละลาย โซเดียมคลอไรด์เข้มข้น 3.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก อุณหภูมิ 27 องศาเซลเซียส ที่ค่าพีเอช 7 ครั้งที่ 2.....	107
ง.48 เส้นโพลาริเซชันของเหล็กกล้าไร้สนิมไมโครดูเพล็กซ์ (L4, 0.1800 wt.%) ในสารละลาย โซเดียมคลอไรด์เข้มข้น 3.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก อุณหภูมิ 27 องศาเซลเซียส ที่ค่าพีเอช 7 ครั้งที่ 3.....	107
ง.49 เส้นโพลาริเซชันของเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ (K1, 0.0018 wt.%) ในสารละลาย โซเดียมคลอไรด์เข้มข้น 3.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก อุณหภูมิ 27 องศาเซลเซียส ที่ค่าพีเอช 10 ครั้งที่ 1.....	108
ง.50 เส้นโพลาริเซชันของเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ (K1, 0.0018 wt.%) ในสารละลาย โซเดียมคลอไรด์เข้มข้น 3.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก อุณหภูมิ 27 องศาเซลเซียส ที่ค่าพีเอช 10 ครั้งที่ 2.....	108
ง.51 เส้นโพลาริเซชันของเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ (K1, 0.0018 wt.%) ในสารละลาย โซเดียมคลอไรด์เข้มข้น 3.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก อุณหภูมิ 27 องศาเซลเซียส ที่ค่าพีเอช 10 ครั้งที่ 3.....	109
ง.52 เส้นโพลาริเซชันของเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ (K2, 0.1100 wt.%) ในสารละลาย โซเดียมคลอไรด์เข้มข้น 3.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก อุณหภูมิ 27 องศาเซลเซียส ที่ค่าพีเอช 10 ครั้งที่ 1.....	109
ง.53 เส้นโพลาริเซชันของเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ (K2, 0.1100 wt.%) ในสารละลาย โซเดียมคลอไรด์เข้มข้น 3.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก อุณหภูมิ 27 องศาเซลเซียส ที่ค่าพีเอช 10 ครั้งที่ 2.....	110

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
ง.54 เส้นโพลาริเซชันของเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ (K2, 0.1100 wt.%) ในสารละลาย โซเดียมคลอไรด์เข้มข้น 3.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก อุณหภูมิ 27 องศาเซลเซียส ที่ค่าพีเอช 10 ครั้งที่ 3.....	110
ง.55 เส้นโพลาริเซชันของเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ (K3, 0.2300 wt.%) ในสารละลาย โซเดียมคลอไรด์เข้มข้น 3.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก อุณหภูมิ 27 องศาเซลเซียส ที่ค่าพีเอช 10 ครั้งที่ 1.....	111
ง.56 เส้นโพลาริเซชันของเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ (K3, 0.2300 wt.%) ในสารละลาย โซเดียมคลอไรด์เข้มข้น 3.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก อุณหภูมิ 27 องศาเซลเซียส ที่ค่าพีเอช 10 ครั้งที่ 2.....	111
ง.57 เส้นโพลาริเซชันของเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ (K3, 0.2300 wt.%) ในสารละลาย โซเดียมคลอไรด์เข้มข้น 3.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก อุณหภูมิ 27 องศาเซลเซียส ที่ค่าพีเอช 10 ครั้งที่ 3.....	112
ง.58 เส้นโพลาริเซชันของเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ (K4, 0.3400 wt.%) ในสารละลาย โซเดียมคลอไรด์เข้มข้น 3.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก อุณหภูมิ 27 องศาเซลเซียส ที่ค่าพีเอช 10 ครั้งที่ 1.....	112
ง.59 เส้นโพลาริเซชันของเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ (K4, 0.3400 wt.%) ในสารละลาย โซเดียมคลอไรด์เข้มข้น 3.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก อุณหภูมิ 27 องศาเซลเซียส ที่ค่าพีเอช 10 ครั้งที่ 2.....	113
ง.60 เส้นโพลาริเซชันของเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ (K4, 0.3400 wt.%) ในสารละลาย โซเดียมคลอไรด์เข้มข้น 3.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก อุณหภูมิ 27 องศาเซลเซียส ที่ค่าพีเอช 10 ครั้งที่ 3.....	113
ง.61 เส้นโพลาริเซชันของเหล็กกล้าไร้สนิมไมโครดูเพล็กซ์ (L1, 0.0020 wt.%) ในสารละลาย โซเดียมคลอไรด์เข้มข้น 3.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก อุณหภูมิ 27 องศาเซลเซียส ที่ค่าพีเอช 10 ครั้งที่ 1.....	114
ง.62 เส้นโพลาริเซชันของเหล็กกล้าไร้สนิมไมโครดูเพล็กซ์ (L1, 0.0020 wt.%) ในสารละลาย โซเดียมคลอไรด์เข้มข้น 3.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก อุณหภูมิ 27 องศาเซลเซียส ที่ค่าพีเอช 10 ครั้งที่ 2.....	114

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
ง.72 เส้นโพลาริเซชันของเหล็กกล้าไร้สนิมไมโครดูเพล็กซ์ (L4, 0.1800 wt.%) ในสารละลายไฮเดียมคลอไรด์เข้มข้น 3.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก อุณหภูมิ 27 องศาเซลเซียส ที่ค่าพีเอช 10 ครั้งที่ 3.....	119
จ.1 ตัวอย่างผลการวิเคราะห์ปริมาณธาตุโครเมียม และนิกเกิล (เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก) ของเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ ตรวจสอบด้วย EDX.....	136
ฉ.1 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณโครงสร้างอสเตไนต์และเวลาที่ใช้ในกระบวนการอบชุบด้วยความร้อนโดยแยกตามอุณหภูมิของชิ้นงาน K1 และ L1.....	138
ฉ.2 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณโครงสร้างอสเตไนต์และเวลาที่ใช้ในกระบวนการอบชุบด้วยความร้อนโดยแยกตามอุณหภูมิของชิ้นงาน K2 และ L3.....	139
ฉ.3 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณโครงสร้างอสเตไนต์และเวลาที่ใช้ในกระบวนการอบชุบด้วยความร้อนโดยแยกตามอุณหภูมิของชิ้นงาน K3 และ L4.....	139
ฉ.4 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณโครงสร้างอสเตไนต์และเวลาที่ใช้ในกระบวนการอบชุบด้วยความร้อนโดยแยกตามอุณหภูมิของชิ้นงาน K4 และ L2.....	140

คำอธิบายคำย่อ

คำย่อ	ความหมาย
E_{corr}	ศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อน (corrosion potential)
E_{ocp}	ศักย์ไฟฟ้าวงจรเปิด (open circuit potential)
E_p	ศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนแบบรูเข็มหรือหลุม (pitting potential)
I_{corr}	ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อน (corrosion current density)
I_p	ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าช่วงที่เกิดพาสซีฟฟิล์ม (passive current density)
R_{mpy}	อัตราการกัดกร่อน (corrosion rate, mils / year)
e	น้ำหนักสมมูลย์ (equivalent weight)
α	โครงสร้างเฟอร์ไรต์
γ	โครงสร้างออสเตไนต์