การสร้างแผนภูมิพอร์เบซ์ของเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ในสารละลายที่มีคลอไรด์ผสมด้วยเทคนิคทางไฟฟ้าเคมี

นางสาวพัทธิมา รัตนตระกูล

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมโลหการ ภาควิชาวิศวกรรมโลหการ
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2546

ISBN 974-17-5432-9

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

CONSTRUCTION OF POURBAIX DIAGRAMS FOR THE DUPLEX STAINLESS STEEL IN AQUEOUS SOLUTION CONTAINING CHLORIDE BY ELECTROCHEMICAL TECHNIQUE

Miss Pattima Rattanatrakool

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

A Thesis Submitted in Partial Fullfillment for 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 974-17-5432-9

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การสร้างแผนภูมิพอร์เบซ์ของเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ในสารละลายที่มีคลอไรด์ผสมด้วยเทคนิคทางไฟฟ้าเคมี
โดย	นางสาวพัทธิมา รัตนตระกูล
สาขาวิชา	วิศวกรรมโลหการ
อาจารย์ที่ปรึกษา	รองศาสตราจารย์ ดร. กอบบุญ หล่อทองคำ

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

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

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ชาคร จารุพิสิฐธร)

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

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

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

พัทธิมา รัตนตระกูล : การสร้างแผนภูมิพอร์เบซ์ของเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ในสารละลายที่มีคลอไรด์ผสมโดยเทคนิคทางไฟฟ้าเคมี (CONSTRUCTION OF POURBAIX DIAGRAMS FOR DUPLEX STAINLESS STEEL IN AQUEOUS SOLUTION CONTAINING CHLORIDE BY ELECTROCHEMICAL TECHNIQUE) อาจารย์ที่ปรึกษา : รองศาสตราจารย์ ดร.กอบบุญ หล่อทองคำ, 91 หน้า.ISBN 974-17-5432-9

วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้เพื่อสร้างแผนภูมิพอร์เบซ์ของเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ในสภาวะของสารละลายที่มีคลอไรด์ผสม ในระดับความเข้มข้น 4,975, 9,900, 19,607, 33,816 พีพีเอ็ม และช่วงพีเอช 2 ถึง 12 ที่ อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส สารละลายอิ่มตัวด้วยอากาศ โดยอาศัยเทคนิคทางไฟฟ้าเคมี อัตราการสแกน 0.166 มิลลิโวลต์ต่อวินาที เพื่อให้ได้เส้นโพลาไรเซชันซึ่งใช้ในการหาค่าศักย์ไฟฟ้ากัดกร่อน (corrosion potential, E_{corr}) ค่าศักย์ไฟฟ้าพาสซิเวชั่นปฐม (primary passivation potentials, E_{pp}) ค่าศักย์ไฟฟ้าป้องกัน (protective potential, E_{pr}) และค่าศักย์ไฟฟ้าทรานพาสซีพ (transpassive potentials, E_t) เพื่อนำไปสร้างเป็นแผนภูมิพอร์เบซ์ ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าศักย์ไฟฟ้าของโลหะ และค่าพีเอช (Potential / pH Diagram) จากผลการศึกษาที่ความเข้มข้นของคลอไรด์คงที่ พบว่าไม่สังเกตเห็นการเปลี่ยนแปลงค่าศักย์ไฟฟ้ากัดกร่อน (E_{corr}) และค่าศักย์ไฟฟ้าพาสซิเวชันปฐม (E_{pp}) ในช่วงพีเอชที่ศึกษา ทำให้ขนาดพื้นที่กราฟในส่วนของการกัดกร่อนแบบสม่ำเสมอ (general corrosion) ไม่มีการเปลี่ยนแปลง ที่ความเข้มข้นเดียวกันค่าศักย์ไฟฟ้าทรานพาสซีพ (E_t) และ ค่าศักย์ไฟฟ้าป้องกัน (E_{pr}) มีค่าเพิ่มขึ้นจากพีเอช 2 ถึง 4 และลดลงที่พีเอช 12 ทำให้พื้นที่พาสซิวิตี้ และพื้นที่ของชั้นฟิล์มสมบูรณ์ลดลง ที่ความเข้มข้นของคลอไรด์สูงขึ้นไม่สังเกตเห็นการเปลี่ยนแปลงค่าศักย์ไฟฟ้ากัดกร่อน ส่วนค่าศักย์ไฟฟ้าพาสซิเวชั่นปฐม ค่าศักย์ไฟฟ้าทรานพาสซีพ และค่าศักย์ไฟฟ้าป้องกันลดลง พื้นที่พาสซิวิตี้นช่วงค่าพีเอชสูงลดลง นอกจากนี้อัตราการกัดกร่อน (corrosion rate, R_{mpy}) ของเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ จะแปรผันตรงตามความเข้มข้นของคลอไรด์ และแปรผกผันกับพีเอชของสารละลายในพีเอช 2 ถึง 10

ผลการตรวจไอออนเชิงคุณภาพในสารละลายช่วงการกัดกร่อนแบบสม่ำเสมอ พบเฟอร์ริกไอออน (Fe^{3+}) เท่านั้น ที่พีเอช 2 ความเข้มข้นคลอไรด์ 33,816 พีพีเอ็ม ส่วนช่วงทรานพาสซีฟซึ่งจะเกิดการกัดกร่อนแบบรูเข็ม ไอออนที่ตรวจพบได้แก่ เฟอร์ริกไอออน (Fe^{3+}) โครมิกไอออน (Cr^{3+}) นิกเกิลลัสไอออน (Ni^{2+}) ที่ทุกค่าพีเอช และความเข้มข้น 4,975 ถึง 33,816 พีพีเอ็ม ส่วนโมลิบเดตไอออน (MoO_4^{2-}) ความเข้มข้นของคลอไรด์ 19,607 และ 33,816 พีพีเอ็ม ที่พีเอช 2 และตรวจพบเฉพาะโมโนโครเมตไอออน (CrO_4^{2-}) ที่พีเอช 2 ความเข้มข้นของคลอไรด์ 33,816 พีพีเอ็ม

ผลการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของบริเวณที่ถูกกัดกร่อนในช่วงค่าศักย์ไฟฟ้าทรานพาสซีฟ (transpassive potentials, E_t) พบว่าโครงสร้างออสเตนไนต์ถูกกัดกร่อนมากกว่าโครงสร้างเฟอร์ไรต์

ภาควิชา....วิศวกรรมโลหการ.....ลายมือชื่อนิสิต.....

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

ปีการศึกษา.....2546.....ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม.....

4470436021: MAJOR METALLURGICAL ENGINEERING

KEY WORD: POURBAIX DIAGRAMS / DUPLEX STAINLESS STEEL / SODIUM CHLORIDE SOLUTION ELECTROCHEMICAL TECHNIQUE / CORROSION RATE

PATTIMA RATTANATRAKOOL CONSTRUCTION OF POURBAIX DIAGRAMS FOR DUPLEX STAINLESS STEELS IN AQUEOUS SOLUTION CONTAINING CHLORIDE BY ELECTROCHEMICAL TECHNIQUE. THESIS ADVISOR: ASSOC. PROF. Dr. GOBBOON LOTHONGKUM, 91 pp. ISBN 974-17-5432-9

The objective of this research is to construct the Pourbaix diagrams for duplex stainless steels in aqueous solution containing chloride 4,975, 9,900, 19,607, 33,816 ppm, pH 2 to 12 saturated with air and temperature 25^{o}C by electrochemical technique. The specimens were tested at all conditions to measure the polarization curves at scan rate 0.166 mV/s, which can be interpreted for studying the corrosion potentials (E_{corr}), the primary passivation potentials (E_{pp}), the protective potentials (E_{pr}), and the transpassive potentials (E_{t}). All these potentials would be used to construct the Pourbaix diagrams, represented the relation between the potentials of metals and the pH (Potentials / pH Diagrams). It is observed that for all solution containing chloride, the corrosion potentials and primary passivasion potential did not changed within the pH studied range, resulting in no changed for the general corrosion area. The transpassive potentials and the protective potentials increase within the pH ranges 2 to 4 but decrease at pH 12 for constant chloride concentration.Corrosion rate (R_{mpy}), of the duplex stainless steels is directly proportional to chloride concentration and inversely proportional to chloride concentration in the ranges pH 2 to10.

From the chemical qualitative analysis, in general corrosion only ferric ion (Fe^{3+}) was found in solution containing chloride 33,816 ppm, pH 2. In transpassive range the ferric ion (Fe^{3+}), nickellus ion (Ni^{2+}), chromic ion (Cr^{3+}) were found at all tested solution condition but molybdate ion (MoO_4^{2-}) was found only in the solution containing chloride 19,607 and 33,816 ppm, pH 2 and monochromate ion (CrO_4^{2-}) was found only in the solution containing chloride 33,816 ppm, pH 2.

From metallography examination of the corroded structure occurred within the range of the transpassive potentials, it was found that the corroded structure is austenite more than ferrite.

Department...Metallurgical Engineering..... Student's signature P. Rattanatrakool

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

Academic year ...2003..... Co-advisor's signature.....

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีด้วยความช่วยเหลือของ รองศาสตราจารย์ ดร.กอบบุญ หล่อทองคำ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผู้ทำการวิจัยขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงที่ท่านได้ให้ทั้งความรู้ คำแนะนำ ตลอดจนคำปรึกษาที่สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในงานวิจัยและการทำงาน

ขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.ปริทรรศน์ พันธุบรรยงค์ ผู้อำนวยการศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ รองศาสตราจารย์. ศิริลักษณ์ นิวิฐจรรยงค์ ที่ท่านทั้งสองได้กรุณาให้คำแนะนำ ข้อคิดเห็นต่าง ๆ ในการวิจัยตลอดมา ขอกราบขอบพระคุณ พลตรี ดร.วีระ พลวัฒน์ และ พี่สรนันท์ ตุลยานนท์ ได้กรุณาตรวจความถูกต้อง และแก้ไขข้อผิดพลาด ทำให้วิทยานิพนธ์สมบูรณ์มากขึ้น ขอขอบพระคุณ ดร.ณฏฐพล วุฒิพันธุ์ หัวหน้างานวิเคราะห์ความเสียหายและการเสื่อมสภาพของวัสดุ ได้กรุณาอนุเคราะห์ในการใช้เครื่องโพเทนชิโอสแตท เครื่องวัดพีเอช เครื่องวัดปริมาณออกซิเจน เครื่องควบคุมอุณหภูมิ รวมทั้งอุปกรณ์ในการทำวิจัยต่าง ๆ ตลอดการทำงานวิจัยในครั้งนี้จนสำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี

ขอกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ชาคร จารุพิสิฐธร และ อาจารย์ ดร. เอกสิทธิ์ นิสารัตนพร คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ซึ่งได้กรุณาให้คำแนะนำอันเป็นประโยชน์ อันทำให้วิทยานิพนธ์มีความสมบูรณ์ขึ้น ขอขอบคุณ ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ (MTEC) และเพื่อน ๆ ร่วมงานเอ็มเทคทุกท่าน ที่ให้ความช่วยเหลือตลอดงานวิจัยในครั้งนี้

ขอขอบคุณท่านอาจารย์และเจ้าหน้าที่ประจำภาควิชาวิศวกรรมโลหการทุกท่านที่ได้ให้ความรู้ คำแนะนำตลอดจนให้ความช่วยเหลือในงานวิจัยจนสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี และเนื่องจากทุนการวิจัยได้รับการสนับสนุนจากกองทุนบัณฑิตวิทยาลัยจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ผู้วิจัยจึงขอขอบคุณมา ณ ที่นี้ด้วย

ท้ายนี้ผู้วิจัยใคร่กราบขอบพระคุณบิดา มารดา ญาติ ๆ เพื่อนที่รักที่สุด ที่ให้กำลังใจและสนับสนุนการศึกษาของผู้วิจัยเสมอมา คุณค่าอันใดที่ได้รับจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ขอมอบเป็นกตัญญุตาบูชาแด่คุณของบิดา มารดา ครูอาจารย์ ผู้มีพระคุณทุกท่าน ตลอดจนสถาบันการศึกษาอันเป็นที่รักยิ่ง

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....จ
กิตติกรรมประกาศ.....ฉ
สารบัญ.....ช
สารบัญตาราง.....ฌ
สารบัญรูป.....ญ
อธิบายคำย่อ.....ฒ
บทที่
1. บทนำ.....1
1.1 ความสำคัญของงานวิจัย.....1
1.2 วัตถุประสงค์.....3
1.3 ขอบเขตการศึกษา.....3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....4
2. การศึกษาข้อมูลและทฤษฎีเบื้องต้น.....5
2.1 ข้อมูลเกี่ยวกับแผนภูมิพอร์เบซ์.....5
2.2 ข้อมูลเกี่ยวกับเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์.....12
2.3 ทฤษฎีศักย์ไฟฟ้าร่วม.....13
2.4 การวัดศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อน ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อน และอัตราการกัดกร่อน.....15
2.5 เส้นโพลาไรเซชัน.....18
2.6 การวิเคราะห์เชิงคุณภาพ.....20
3. ขั้นตอนและวิธีดำเนินการทดลอง.....23
3.1 การเตรียมวัสดุและอุปกรณ์.....23
3.2 ขั้นตอนการทดลอง.....28
3.3 วิธีการทดลอง.....30

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4. ผลการทดลองและอภิปรายผลการทดลอง.....34
4.1 การหาเวลาทำให้ออกซิเจนจากอากาศอิ่มตัวในสารละลาย.....34
4.2 การหาเวลาที่เหมาะสมสำหรับชิ้นงานก่อนการสแกน.....35
4.3 การหาตราการสแกนที่เหมาะสมในการหาเส้นโพลาไรเซชัน.....37
4.4 การหาเส้นโพลาไรเซชันของเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์.....42
เพื่อนำไปสร้างแผนภูมิพอร์เบซ์
4.5 การหาไอออนของโลหะในพื้นที่การกัดกร่อนแบบสม่ำเสมอ.....49
และพื้นที่การกัดกร่อนแบบรูเข็ม
5 อภิปรายผลการทดลอง.....50
6 สรุปผลการทดลอง.....61
รายการอ้างอิง.....62
ภาคผนวก.....64
ภาคผนวก ก.....65
ภาคผนวก ข.....70
ภาคผนวก ค.....71
ภาคผนวก ง.....75
ภาคผนวก จ.....88
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....91

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญตาราง

ตารางที่ **หน้า**

2.1 แสดงรีเอเจนต์ที่ใช้ในการทดสอบอิออนในองค์ประกอบของเหล็กกล้าไร้สนิม.....21
ดูเพล็กซ์และปฏิกิริยาที่เกิดขึ้น

3.1 แสดงผลการวิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมีของเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์.....28

4.1 แสดงผลการวัดปริมาณออกซิเจนที่ละลายในสารละลายที่อุณหภูมิ 25°C ค่า.....34
พีเอช 2 และ 12 ความเข้มข้นคลอไรด์ 4975 และ 33,816 พีพีเอ็ม

4.2 แสดงค่าศักย์ไฟฟ้าเปิด(open circuit potential; E_{ocp}) ของชิ้นงานในสารละลาย.....36
ณ เวลาต่างๆ ที่ค่าพีเอช 2 และ 12 ความเข้มข้นคลอไรด์ 4975 และ 33,816 พีพีเอ็ม
ที่อุณหภูมิ 25°C

4.3 แสดงค่าการวัดค่า E_{corr}, E_{pp}, E_t และ E_{pr} ของเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์.....43
ในสารละลายที่มีคลอไรด์ 4,975 พีพีเอ็ม ที่ค่าพีเอช 2, 4, 6, 8, 10 และ 12

4.4 แสดงค่าการวัดค่า E_{corr}, E_{pp} , E_t และ E_{pr} ของเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์.....44
ในสารละลายที่มีคลอไรด์ 9,900 พีพีเอ็ม ที่ค่าพีเอช 2, 4, 6, 8, 10 และ 12

4.5 แสดงค่าการัดค่า E_{corr}, E_{pp}, E_t และ E_{pr} ของเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์.....45
ในสารละลายที่มีคลอไรด์ 19,607 พีพีเอ็ม ที่ค่าพีเอช 2, 4, 6, 8, 10 และ 12

4.6 แสดงค่าการัดค่า E_{corr}, E_{pp}, E_t และ E_{pr} ของเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์.....46
ในสารละลายที่มีคลอไรด์ 33,816 พีพีเอ็ม ที่ค่าพีเอช 2, 4, 6, 8, 10 และ 12.

4.7 แสดงผลการทดสอบไอออน ที่ละลายลงสู่สารละลายที่ใช้ทดสอบที่ศักย์ไฟฟ้า.....49
E_{corr} และ E_t ที่ค่าพีเอช 2, 6 และ12

5.1 แสดงค่าอัตราการกัดกร่อนของเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ที่ความเข้มข้นคลอไรด์ต่างกัน 56

ก.1 สัดส่วนโครงสร้างออสเตนไนต์ต่อเฟอร์ไรต์ของชิ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ 68
● แทนปริมาณโครงสร้างเฟอร์ไรต์ ∇ แทนปริมาณโครงสร้างออสเตนไนต์

ข. แสดงปริมาณการละลายของออกซิเจนในน้ำที่ความดัน 760 มิลลิเมตรปรอท.....70

สารบัญรูป

รูปที่ **หน้า**

2.1 (ก) เส้นกราฟ โพเทนชิโอไคนีติกโพลาไรเซชัน ของเหล็กในสารละลายที่ไม่มี.....6
คลอไรด์ผสมที่ค่าพีเอชต่าง ๆและ (ข) แผนภูมิพอร์เบซ์ ที่สร้างขึ้นจากชุดข้อมูลในรูป (ก)
2.2 (ก) เส้นกราฟ โพเทนชิโอไคนีติกโพลาไรเซชัน มาตราฐานของเหล็กในสารละลายมี.....6
คลอไรด์ 10^{-2} โมลาร์ ที่ค่าพีเอชต่าง ๆ และ (ข) แผนภูมิพอร์เบซ์ ที่สร้างขึ้นจากชุด
ข้อมูลในรูป (ก)
2.3 E_{corr} และ $E_{localized}$ ของ 304 และ 316 ในสารละลายสภาวะต่าง ๆ.....7
2.4 แผนภูมิพอร์เบซ์ ของเหล็กกล้าไร้สนิม 304 ที่อุณหภูมิ 20 °C.....9
โดยวิธีการวัดเส้นโพลาไรเซชัน (ก) ไม่มีคลอไรด์ผสมอยู่ (ข) มีคลอไรด์ผสม 3550 พีพีเอ็ม
2.5 แผนภูมิเบอร์เบซ์ของโลหะเจือระบบเทอร์นารี Fe-Cr-Ni (ก) สปีชีส์เหล็ก.....10
(ข) สปีชีส์โครเมียม (ค) สปีชีส์นิกเกิล
2.6 ตัวอย่างความสัมพันธ์ระหว่างศักย์ไฟฟ้าและกระแสที่ได้จากการวัดด้วยเทคนิค.....14
ทางไฟฟ้าเคมีเปรียบเทียบกับการประยุกต์ใช้ ทฤษฎีไฟฟ้าร่วม
2.7 (ก) ภาพแสดงลักษณะการวัดกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อนและศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อน 15
(ข) เซลทดสอบกับเครื่องโพเทนชิโอสแตท 16
2.8 ศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนและความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อน.....17
2.9 ส่วนต่างๆ ที่สำคัญของเส้นโพลาไรเซชัน.....18
2.10 ภาพแสดงจุดต่างๆ ที่สำคัญของเส้นโพลาไรเซชัน.....20
3.1 เครื่องโพเทนชิโอสแตทรุ่น Model 273 A 23
3.2 อิเล็กโทรดอ้างอิง (Ag/AgCl 3M KCl).....24
3.3 อิเล็กโทรดวัดกระแส (แท่งคาร์บอน).....24
3.4 เครื่องกวนและเครื่องควบคุมอุณหภูมิ.....25
3.5 เครื่องวัดปริมาณออกซิเจนที่ละลายในน้ำ.....26
3.6 เครื่องวัดความเป็นกรด ด่าง (pH meter).....26
4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณออกซิเจนที่ละลายในสารละลายกับเวลาที่ค่าพีเอช 35
2 และ 12 ความเข้มข้นคลอไรด์ 4,975 และ 33,816 พีพีเอ็ม อุณหภูมิ 25 °C
4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างศักไฟฟ้าของชิ้นงานกับเวลาหลังจากแช่ชิ้งานที่ค่าพีเอช.....37
2 และ 12 ความเข้มข้นคลอไรด์ 4,975 และ 33,816 พีพีเอ็ม อุณหภูมิ 25 °C

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ **หน้า**

4.3 ค่า E_{corr} ที่ค่าพีเอช 2 ความเข้มข้นคลอไรด์ 4,975 พีพีเอ็ม โดยใช้อัตราการสแกน.....38
1.667, 0.332 และ 0.166 มิลลิโวลต์ต่อวินาที
4.4 ค่า E_{corr} ที่ได้จากการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง ที่ค่าพีเอช 2 ความเข้มข้นคลอไรด์ 4,975 พีพีเอ็ม...38
โดยใช้อัตราการสแกน 0.166 มิลลิโวลต์ต่อวินาที
4.5 ค่า E_{corr} ที่ค่าพีเอช 12 ความเข้มข้นคลอไรด์ 4,975 พีพีเอ็ม โดยใช้อัตราการสแกน.....39
1.667, 0.332 และ 0.166 มิลลิโวลต์ต่อวินาที
4.6 ค่า E_{corr} ที่ได้จากการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง ที่ค่าพีเอช 12 ความเข้มข้นคลอไรด์ 4,975 พีพีเอ็ม...39
โดยใช้อัตราการสแกน 0.166 มิลลิโวลต์ต่อวินาที
4.7 ค่า E_{corr} ที่มีค่าพีเอช 2 ความเข้มข้นคลอไรด์ 33,816 พีพีเอ็ม โดยใช้อัตราการสแกน.....40
1.667, 0.332 และ 0.166 มิลลิโวลต์ต่อวินาที
4.8 ค่า E_{corr} ที่ได้จากการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง ที่ค่าพีเอช 2 ความเข้มข้นคลอไรด์ 33,816 พีพีเอ็ม...40
โดยใช้อัตราการสแกน 0.166 มิลลิโวลต์ต่อวินาที
4.9 ค่า E_{corr} ที่มีค่าพีเอช 12 ความเข้มข้นคลอไรด์ 33,816 พีพีเอ็ม โดยใช้อัตราการสแกน.....41
1.667, 0.332 และ 0.166 มิลลิโวลต์ต่อวินาที
4.10 ค่า E_{corr} ที่ได้จากการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง ที่ค่าพีเอช 12 ความเข้มข้นคลอไรด์.....41
33,816 พีพีเอ็ม โดยใช้อัตราการสแกน 0.166 มิลลิโวลต์ต่อวินาที
4.11 แผนภูมิพอร์เบซ์ของเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ ในสารละลายที่ไม่มีคลอไรด์.....47
4,975 พีพีเอ็ม ที่อุณหภูมิ 25 °C
4.12 แผนภูมิพอร์เบซ์ของเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ ในสารละลายที่มีคลอไรด์.....47
9,900 พีพีเอ็ม ที่อุณหภูมิ 25 °C
4.13 แผนภูมิพอร์เบซ์ของเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ ในสารละลายที่มีคลอไรด์.....48
19,607 พีพีเอ็ม ที่อุณหภูมิ 25 °C
4.14 แผนภูมิพอร์เบซ์ของเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ ในสารละลายที่มีคลอไรด์.....48
33,816 พีพีเอ็ม ที่อุณหภูมิ 25 °C
5.1 ความสัมพันธ์ระหว่าง E_{corr} กับความเข้มข้นคลอไรด์ ที่ค่าพีเอชต่างๆ.....50
5.2 ความสัมพันธ์ระหว่าง E_{pp} กับความเข้มข้นคลอไรด์ ที่ค่าพีเอชต่างๆ.....51
5.3 ความสัมพันธ์ระหว่าง E_t กับความเข้มข้นคลอไรด์ ที่ค่าพีเอชต่างๆ.....51
5.4 ความสัมพันธ์ระหว่าง E_{pr} กับความเข้มข้นคลอไรด์ ที่ค่าพีเอชต่างๆ.....52

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ **หน้า**

5.5 แสดงโครงสร้างจุลภาคเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ที่เกิดการกัดกร่อน.....58
ที่เฟสออสเตนไนต์ ที่พีเอช 2 ความเข้มข้นคลอไรด์ 4,975 พีพีเอ็ม
5.6 แสดงโครงสร้างจุลภาคเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ที่เกิดการกัดกร่อน 58
ที่เฟสออสเตนไนต์ ที่พีเอช 12 ความเข้มข้นคลอไรด์ 4,975 พีพีเอ็ม
5.7 แสดงโครงสร้างจุลภาคเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ที่เกิดการกัดกร่อน 59
ที่เฟสออสเตนไนต์ ที่พีเอช 2 ความเข้มข้นคลอไรด์ 33,816 พีพีเอ็ม
5.8 แสดงโครงสร้างจุลภาคเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ที่เกิดการกัดกร่อน 59
ที่เฟสออสเตนไนต์ ที่พีเอช 12 ความเข้มข้นคลอไรด์ 33,816 พีพีเอ็ม
5.9 แสดงการกัดกร่อนแบบรูเข็มของเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ซึ่งขยายจาก.....60
ชิ้นงานทดสอบที่พีเอช 2 ความเข้มข้นของคลอไรด์ 33,816 พีพีเอ็ม
ก.1 ตำแหน่งการวัดค่า λ และ $(L_3)_\gamma$ จากเส้นทดสอบ.....66
ก.2 ภาพโครงสร้างจุลภาคเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ ขนาดกำลังขยาย 200 เท่า.....67
ก.3 ภาพโครงสร้างจุลภาคเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ ขนาดกำลังขยาย 200 เท่า.....67
ง1 เส้นโพลาไรเซชันของเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ ในสารละลายที่มี.....76
ความเข้มข้นคลอไรด์ 4,975 พีพีเอ็ม อุณหภูมิของสารละลาย 25 °C และค่าพีเอช 2
ง 2 เส้นโพลาไรเซชันของเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ ในสารละลายที่มี.....76
ความเข้มข้น คลอไรด์ 4,975 พีพีเอ็ม อุณหภูมิของสารละลาย 25 °C และค่าพีเอช 4
ง 3 เส้นโพลาไรเซชันของเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ ในสารละลายที่มี.....77
ความเข้มข้นคลอไรด์ 4,975 พีพีเอ็ม อุณหภูมิของสารละลาย 25 °C และค่าพีเอช 6
ง 4 เส้นโพลาไรเซชันของเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ ในสารละลายที่มี.....77
ความเข้มข้นคลอไรด์ 4,975 พีพีเอ็ม อุณหภูมิของสารละลาย 25 °C และค่าพีเอช 8
ง 5 เส้นโพลาไรเซชันของเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ ในสารละลายที่มี.....78
ความเข้มข้นคลอไรด์ 4,975 พีพีเอ็ม อุณหภูมิของสารละลาย 25 °C และค่าพีเอช 10
ง 6 เส้นโพลาไรเซชันของเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ ในสารละลายที่มี.....78
ความเข้มข้นคลอไรด์ 4,975 พีพีเอ็ม อุณหภูมิของสารละลาย 25 °C และค่าพีเอช 12
ง 7 เส้นโพลาไรเซชันของเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ ในสารละลายที่มี.....79
ความเข้มข้นคลอไรด์ 9,900 พีพีเอ็ม อุณหภูมิของสารละลาย 25 °C และค่าพีเอช 2

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ **หน้า**

ง 8 เส้นโพลาไรเซชันของเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ ในสารละลายที่มี.....79
ความเข้มข้นคลอไรด์ 9,900 พีพีเอ็ม อุณหภูมิของสารละลาย 25 °C และค่าพีเอช 4
ง 9 เส้นโพลาไรเซชันของเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ ในสารละลายที่มี.....80
ความเข้มข้นคลอไรด์ 9,900 พีพีเอ็ม อุณหภูมิของสารละลาย 25 °C และค่าพีเอช 6
ง 10 เส้นโพลาไรเซชันของเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ ในสารละลายที่มี.....80
ความเข้มข้นคลอไรด์ 9,900 พีพีเอ็ม อุณหภูมิของสารละลาย 25 °C และค่าพีเอช 8
ง 11 เส้นโพลาไรเซชันของเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ ในสารละลายที่มี.....81
ความเข้มข้นคลอไรด์ 9,900 พีพีเอ็ม อุณหภูมิของสารละลาย 25 °C และค่าพีเอช 10
ง 12 เส้นโพลาไรเซชันของเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ ในสารละลายที่มี.....81
ความเข้มข้นคลอไรด์ 9,900 พีพีเอ็ม อุณหภูมิของสารละลาย 25 °C และค่าพีเอช 12
ง 13 เส้นโพลาไรเซชันของเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ ในสารละลายที่มี.....82
ความเข้มข้นคลอไรด์ 19,607 พีพีเอ็ม อุณหภูมิของสารละลาย 25 °C และค่าพีเอช 2
ง 14 เส้นโพลาไรเซชันของเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ ในสารละลายที่มี.....82
ความเข้มข้นคลอไรด์ 19,607 พีพีเอ็ม อุณหภูมิของสารละลาย 25 °C และค่าพีเอช 4
ง 15 เส้นโพลาไรเซชันของเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ ในสารละลายที่มี.....83
ความเข้มข้นคลอไรด์ 19,607 พีพีเอ็ม อุณหภูมิของสารละลาย 25 °C และค่าพีเอช 6
ง 16 เส้นโพลาไรเซชันของเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ ในสารละลายที่มี.....83
ความเข้มข้นคลอไรด์ 19,607 พีพีเอ็ม อุณหภูมิของสารละลาย 25 °C และค่าพีเอช 8
ง 17 เส้นโพลาไรเซชันของเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ ในสารละลายที่มี.....84
ความเข้มข้นคลอไรด์ 19,607 พีพีเอ็ม อุณหภูมิของสารละลาย 25 °C และค่าพีเอช 10
ง 18 เส้นโพลาไรเซชันของเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ ในสารละลายที่มี.....84
ความเข้มข้นคลอไรด์ 19,607 พีพีเอ็ม อุณหภูมิของสารละลาย 25 °C และค่าพีเอช 12
ง 19 เส้นโพลาไรเซชันของเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ ในสารละลายที่มี.....85
ความเข้มข้นคลอไรด์ 33,816 พีพีเอ็ม อุณหภูมิของสารละลาย 25 °C และค่าพีเอช 2
ง 20 เส้นโพลาไรเซชันของเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ ในสารละลายที่มี.....85
ความเข้มข้นคลอไรด์ 33,816 พีพีเอ็ม อุณหภูมิของสารละลาย 25 °C และค่าพีเอช 4
ง 21 เส้นโพลาไรเซชันของเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ ในสารละลายที่มี.....86
ความเข้มข้นคลอไรด์ 33,816 พีพีเอ็ม อุณหภูมิของสารละลาย 25 °C และค่าพีเอช 6

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ **หน้า**

ง 22 เส้นโพลาไรเซชันของเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ ในสารละลายที่มี.....86
ความเข้มข้นคลอไรด์ 33,816 พีพีเอ็ม อุณหภูมิของสารละลาย 25 °C และค่าพีเอช 8
ง 23 เส้นโพลาไรเซชันของเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ ในสารละลายที่มี.....87
ความเข้มข้นคลอไรด์ 33,816 พีพีเอ็ม อุณหภูมิของสารละลาย 25 °C และค่าพีเอช 10
ง 24 เส้นโพลาไรเซชันของเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ ในสารละลายที่มี.....87
ความเข้มข้นคลอไรด์ 33,816 พีพีเอ็ม อุณหภูมิของสารละลาย 25 °C และค่าพีเอช 12
จ 1 แสดงการหาค่า E_{corr} จากเส้นโค้งโพลาไรเซชัน.....88
จ 2 แสดงการหาค่า E_{pp} จากเส้นโค้งโพลาไรเซชัน.....89
จ 3 แสดงการหาค่า E_t และ E_{pp} จากเส้นโค้งโพลาไรเซชัน.....89
จ 4 แสดงการหาค่า E_t และ E_{pr} จากเส้นโค้งโพลาไรเซชัน.....90

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

คำอธิบายคำย่อ

คำย่อ	ความหมาย
a_{ox}	ค่าแอคติวิตี้ (activity)ของตัวออกซิไดซ์
a_{re}	ค่าแอคติวิตี้ของตัวรีดิวซ์
E	ศักย์ไฟฟ้าของปฏิกิริยา
E^0	ศักย์ไฟฟ้ามาตรฐานของปฏิกิริยา
E_{corr}	ศักย์ไฟฟ้ากัดกร่อน (corrosion potential)
E_{ocp}	ศักย์ไฟฟ้าวงจรเปิด (open circuit potential)
E_{pp}	ศักย์ไฟฟ้าพาสซิเวชั่นปฐม (primary passivation potential)
E_{pr}	ศักย์ไฟฟ้าป้องกัน (protection potential)
E_t	ศักย์ไฟฟ้าทรานพาสซีพ (transpassive potential)
E_p	ศักย์ไฟฟ้ากัดกร่อนแบบรูเข็ม (pitting potential)
F	ค่าคงที่ฟาราเดย์
Gen.Corr	การกัดกร่อนแบบสม่ำเสมอ (general corrosion)
n	จำนวนอิเล็กตรอนของปฏิกิริยา
SHE	ศักย์ไฟฟ้ามาตรฐานของเซลล์ไฮโดรเจน
I_{corr}	ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อน (corrosion current density)
I_p	ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าช่วงที่เกิดพาสสีฟฟิล์ม (passive current density)
R_{mpy}	อัตราการกัดกร่อน (corrosion rate, mils / year)
e	น้ำหนักสมมูลย์ (equivalent weight)
α	โครงสร้างเฟอร์ไรต์
γ	โครงสร้างออสเตนไนต์

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย