

พฤติกรรมการณ์ก่อนบนผิวเหล็กกล้าไร้สนิมชนิด 304L



นาย จรัส ทรัพย์เสรี

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
ศูนย์วิทยุทรัพยากร

ภาควิชาวิศวกรรมโลหการ  
บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

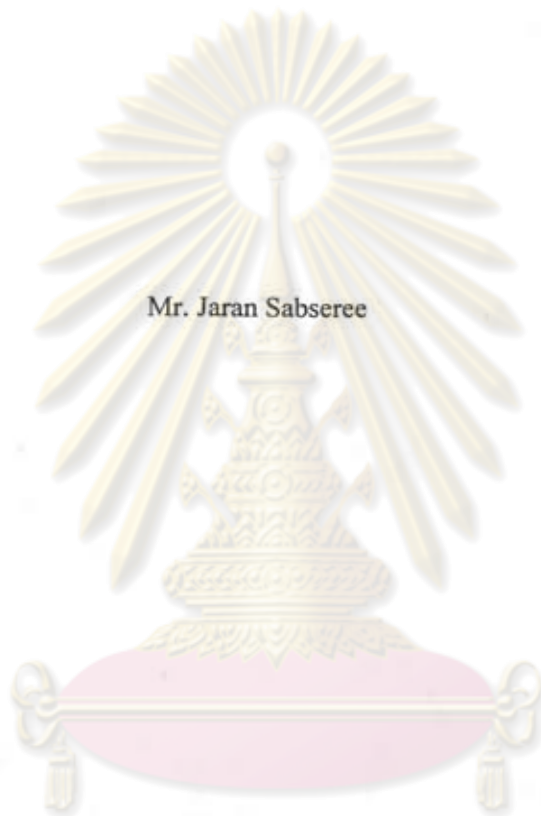
ปีการศึกษา 2539

ISBN 974-636-294-1

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

**SURFACE CORROSION BEHAVIOR OF THE 304L STAINLESS STEEL**

**Mr. Jaran Sabseree**



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

**Graduate School**

**Chulalongkorn University**

**Academic Year 1996**

**ISBN 974-636-294-1**

หัวข้อวิทยานิพนธ์      พฤติกรรมการสุกร่อนบนผิวเหล็กกล้าไร้สนิมชนิด 304L

โดย                              นาย จรัส ทรัพย์เสรี

ภาควิชา                        วิศวกรรมโลหการ

อาจารย์ที่ปรึกษา            อาจารย์ ดร. กอบบุญ หล่อทองคำ

---

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่ง  
ของการศึกษาตามหลักสูตรมหาบัณฑิต


  
\_\_\_\_\_      คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย  
(ศาสตราจารย์ นายแพทย์ สุภวัฒน์ ชุตินวงศ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

  
\_\_\_\_\_      ประธานกรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. นิตรัชช สมศิริ)

  
\_\_\_\_\_      อาจารย์ที่ปรึกษา  
(อาจารย์ ดร. กอบบุญ หล่อทองคำ)

  
\_\_\_\_\_      กรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ประสงค์ ศรีเจริญชัย)

  
\_\_\_\_\_      กรรมการ  
(อาจารย์ ดร. สุมาลี วงศ์จันทร์)

พิมพ์ต้นฉบับบทคัดย่อวิทยานิพนธ์ภายในกรอบสี่เหลี่ยมนี้เพียงแผ่นเดียว

จรัส ทรัพย์เสรี : พฤติกรรมการผุกร่อนบนผิวเหล็กกล้าไร้สนิมชนิด 304L

( SURFACE CORROSION BEHAVIOR OF THE 304L STAINLESS STEEL )

อ. ที่ปรึกษา: คร. กอบบุญ หล่อทองคำ ; 92 หน้า, ISBN 974-636-294-1

งานวิจัยนี้ศึกษาพฤติกรรมการผุกร่อนบนผิวเหล็กกล้าไร้สนิมชนิด 304L ในสารละลายกรดไฮโดรคลอริก สารละลายโซเดียมคลอไรด์ และสารละลายผสมของสารประกอบทั้งสอง ที่ความเข้มข้นและอุณหภูมิต่าง ๆ โดยการวัดเส้นโพลาไรเซชันและวิเคราะห์องค์ประกอบของชั้นฟิล์มที่ผิวด้วยเครื่อง XPS ชั้นฟิล์มที่ผิวเหล็กกล้าไร้สนิมชนิด 304L เรียงตามลำดับจากผิวฟิล์มนอกสุดเข้าไปในเนื้อโลหะ ประกอบด้วยชั้นไฮดรอกไซด์ของโลหะ ชั้นออกไซด์ของโลหะ ชั้นออกไซด์ของโครเมียมรวมอยู่กับโลหะเหล็กและนิกเกิล ความหนาชั้นฟิล์มมีค่าประมาณ 3-4 นาโนเมตร

องค์ประกอบของชั้นฟิล์มที่ผิวเหล็กกล้าไร้สนิมชนิด 304L ที่ผ่านการทำปฏิกิริยากับสารละลายดังกล่าว จะขึ้นอยู่กับความเข้มข้นและอุณหภูมิของสารละลาย เมื่อความเข้มข้นของสารละลายกรดไฮโดรคลอริกหรือความเข้มข้นรวมของคลอไรด์ในสารละลายผสมระหว่างกรดไฮโดรคลอริกและโซเดียมคลอไรด์เพิ่มขึ้น สัดส่วนของโลหะไฮดรอกไซด์ในชั้นฟิล์มมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น แต่สัดส่วนของโลหะออกไซด์ และสัดส่วนของธาตุโครเมียมและของเหล็กมีแนวโน้มลดลง ความหนาแน่นกระแสของช่วงพาสซีฟเพิ่มขึ้น ศักย์ไฟฟ้าของการเกิดครุพุนลดลง ในกรณีของสารละลายโซเดียมคลอไรด์ เมื่อเพิ่มความเข้มข้น สัดส่วนของโลหะไฮดรอกไซด์ในชั้นฟิล์มมีแนวโน้มลดลง สัดส่วนเหล็กออกไซด์มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น แต่แนวโน้มสัดส่วนของธาตุโครเมียมไม่เปลี่ยนแปลง ความหนาแน่นกระแสช่วงพาสซีฟเปลี่ยนแปลงเล็กน้อย ศักย์ไฟฟ้าของการเกิดครุพุนลดลง

โดยทั่วไป การเพิ่มอุณหภูมิทำให้องค์ประกอบของชั้นฟิล์มมีแนวโน้มลดสัดส่วนของธาตุโครเมียมและเหล็ก และมีแนวโน้มลดสัดส่วนออกซิเจนในชั้นฟิล์มที่ผ่านการทำปฏิกิริยากับสารละลายกรดไฮโดรคลอริกหรือสารละลายผสมของกรดไฮโดรคลอริกกับโซเดียมคลอไรด์ แต่สัดส่วนออกซิเจนในฟิล์มมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ในกรณีที่ฟิล์มผ่านการทำปฏิกิริยากับสารละลายโซเดียมคลอไรด์ ชั้นฟิล์มที่วิเคราะห์ทั้งหมดไม่พบว่ามีคลอไรด์เป็นองค์ประกอบร่วม คลอไรด์มีผลทำลายเสถียรภาพของฟิล์ม ผลการทดลองสนับสนุนกลไกการเกิดชั้นฟิล์มตามสมมุติฐานการเกิดดีโพสิทในเซชันของน้ำ

ภาควิชา ..... วิศวกรรมโลหการ

สาขาวิชา .....

ปีการศึกษา ..... 2539

ลายมือชื่อนิติ ..... *จรัส ทรัพย์เสรี*

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา ..... *กอบบุญ หล่อทองคำ*

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม .....

พิมพ์ต้นฉบับบทคัดย่อวิทยานิพนธ์ภายในกรอบสี่เหลี่ยมนี้เพียงแผ่นเดียว

##C718180 : MAJOR METALLURGICAL ENGINEERING  
KEY WORD: XPS / HYDROCHLORIC ACID / SODIUM CHLORIDE / SURFACE FILM /  
304L STAINLESS STEEL

JARAN SABSEREE : SURFACE CORROSION BEHAVIOR OF THE 304L  
STAINLESS STEEL. THESIS ADVISOR : Dr.-Ing. GOBBOON LOTHONGKUM  
92 pp. ISBN 974-636-294-1

Surface corrosion behavior the of 304L stainless steel in hydrochloric acid, sodium chloride, and mixtures of both solutions was investigated by measuring polarization curves at various concentrations and temperatures. Surface films on test samples were analyzed by XPS. They were found to be composed of layers of metal hydroxide, metal oxide, a mixture of chromium oxide and metallic iron/nickel. Chemical compositions of the films depend on concentration and temperature. For the case of hydrochloric acid and mixtures of hydrochloric acid and sodium chloride solutions, increasing total chloride concentration increases the concentrations of metal hydroxide, whereas those of metal oxide, chromium, and iron are decreased. It also raises the passive current density while pitting potential is reduced.

For the case of sodium chloride solutions, increasing chloride concentration decreases metal hydroxide content of the films. It also reduces the pitting potential. However, it has negligible effects on the passive current density and the chromium content of the film.

Chromium and iron contents of the films were found to decrease with increasing solution temperature. In the samples which were treated with acid solutions, the oxygen content of the films was decreased with increasing temperature whereas that of the sodium chloride-treated was increased. Destabilizing chloride was not found in the film layers. All the results implies that the deprotonization of water is the dominant film-generating mechanism.

ภาควิชา.....วิศวกรรมโลหการ

สาขาวิชา.....-

ปีการศึกษา.....2539

ลายมือชื่อนิสิต.....*ชว. ทวีพงษ์*

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....*ทอง วัฒน*

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม.....-



## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยความช่วยเหลือเป็นอย่างดีของท่าน อาจารย์ ดร.กอบบุญ หล่อทองคำ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ซึ่งได้ให้คำแนะนำและข้อคิดเห็นต่าง ๆ ในการวิจัยมาด้วยดีมาโดยตลอด ขอขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ฉัตรชัย สมศิริ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ประสงค์ ศรีเจริญชัย และอาจารย์ ดร. สุมาลี วงศ์จันทร์ คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ซึ่งได้ให้คำแนะนำที่เป็นประโยชน์ ขอขอบพระคุณท่านอาจารย์ ชากร จารุพิสิฐธร และอาจารย์ ดร. อธิพิณ เต็มวณิชย์ ที่ได้ช่วยเหลือในการตรวจสอบแก้ไขวิทยานิพนธ์ ขอขอบคุณศูนย์นวัตกรรมเทคโนโลยีไทย-ฝรั่งเศส ที่ให้ความอนุเคราะห์ให้ใช้เครื่องโพเทนทิโอสแตตในการทำการทดลอง ขอขอบคุณ Prof. T. Umeda คุณ Nakamura และ ภาควิชาวิศวกรรมโลหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยโตเกียว ที่ให้ใช้ห้องสมุดเพื่อค้นคว้าเอกสารที่ใช้ในงานวิจัย และให้การอบรมการใช้เครื่องเอกซเรย์โฟโตอิเล็กตรอนสเปกโตรสโคปี ขอขอบคุณ คุณ K. Asami คุณ R. Nishimura และ คุณ A.M. Beccaria ที่ได้สละเวลาในการแสดงความคิดเห็นและตอบข้อซักถามที่เป็นประโยชน์ต่องานวิจัยชิ้นนี้ และเนื่องจากทุนการวิจัยครั้งนี้ได้รับมาจากทุนอุดหนุนการวิจัยของกองทุนโลหการ สวทช. จึงขอขอบพระคุณมา ณ ที่นี้ด้วย

ท้ายนี้ ผู้เขียนใคร่ขอกราบขอบพระคุณ บิดา-มารดา ซึ่งสนับสนุนในด้านการเงิน และให้กำลังใจแก่ผู้เขียนเสมอมาจนสำเร็จการศึกษา

ศุภยวีทยาทรัพย์ากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฉ
สารบัญรูป.....	ฅ
คำอธิบายคำย่อ.....	น
<b>บทที่</b>	
1 บทนำ.....	1
1.1 ความสำคัญของงานวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	2
1.3 ขอบเขตของการศึกษา.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
2 การปรีทัศน์วรรณกรรม.....	3
3 ขั้นตอนและวิธีดำเนินการทดลอง.....	15
4 ผลการทดลองและอภิปรายผลการทดลอง.....	17
4.1 ลักษณะของฟิล์มบนผิวเหล็กกล้าไร้สนิมชนิด 304L.....	17
4.2 พฤติกรรมการสุกร่อนที่ผิวของเหล็กกล้าไร้สนิมชนิด 304L ในสารละลายกรดไฮโดรคลอริก.....	24
4.3 พฤติกรรมการสุกร่อนที่ผิวของเหล็กกล้าไร้สนิมชนิด 304L ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์.....	33
4.4 พฤติกรรมการสุกร่อนที่ผิวของเหล็กกล้าไร้สนิมชนิด 304L ในสารละลายผสมของกรดไฮโดรคลอริกและโซเดียมคลอไรด์.....	39
4.5 ผลของอุณหภูมิต่อพฤติกรรมการสุกร่อนที่ผิวของเหล็กกล้าไร้สนิมชนิด 304L ในสารละลายกรดไฮโดรคลอริก สารละลายโซเดียมคลอไรด์ และสารละลายผสมระหว่างกรดไฮโดรคลอริกและโซเดียมคลอไรด์ .....	54
4.6 ผลการวิเคราะห์คลอไรด์ที่ผิวชั้นนอกของเหล็กกล้าไร้สนิมชนิด 304L ซึ่งผ่านการทำปฏิกิริยากับสารละลายคลอไรด์.....	61
4.7 ผลการคำนวณความหนาของชั้นฟิล์ม.....	63
4.8 ผลการทดลองกับทฤษฎีพาสซีวิตี.....	64

## สารบัญ ( ต่อ )

บทที่	หน้า
5 สรุปลผลการทดลอง.....	67
รายการอ้างอิง.....	69
ภาคผนวก ก. ....	71
ภาคผนวก ข.....	74
ภาคผนวก ค. ....	80
ประวัติผู้เขียน.....	92



ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 แสดงผลการวิเคราะห์ผิวของ เหล็กกล้าไร้สนิมชนิด 304 ซึ่งผ่านการทำปฏิกิริยากับสารละลายกรดไฮโดรคลอริก 0.5 โมล ผสมกับ โซเดียมคลอไรด์ 1 โมล/ลิตร ที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 2 ชั่วโมง .....	13
3.1 แสดงความเข้มข้นและอุณหภูมิของสารละลายต่าง ๆ ที่ใช้ในการทดลอง .....	15
4.1 แสดงผลวิเคราะห์สารละลาย HCl ซึ่งผ่านการทำปฏิกิริยากับเหล็กกล้า AISI 304L ด้วยเครื่องอะตอมมิกแอบซอร์พชัน ( AA ) .....	32
4.2 แสดงค่าศักย์ไฟฟ้าที่วงจรมืด ( Eoc ) ค่าความหนาแน่นกระแสของช่วงพาสซีฟ ( Ip ) และค่าศักย์ไฟฟ้าของการเกิดรูพรุน ( Ep ) ของเหล็ก AISI 304L ในสารละลาย HCl ความเข้มข้นต่าง ๆ ที่อุณหภูมิ 30°C .....	32
4.3 แสดงค่าศักย์ไฟฟ้าที่วงจรมืด ( Eoc ) ค่าความหนาแน่นกระแสของช่วงพาสซีฟ ( Ip ) และค่าศักย์ไฟฟ้าของการเกิดรูพรุน ( Ep ) ของเหล็ก AISI 304L ในสารละลาย NaCl ความเข้มข้นต่าง ๆ ที่อุณหภูมิ 30°C .....	38
4.4 แสดงผลการวิเคราะห์ผสมของ HCl 0.1 โมล/ลิตร กับ NaCl ที่ความเข้มข้นรวมของคลอไรด์ต่างกัน โดยผ่านการทำปฏิกิริยากับเหล็ก AISI 304L ที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 120 ชั่วโมง ( วิเคราะห์สารละลายด้วยเครื่องอะตอมมิกแอบซอร์พชัน ) .....	45
4.5 แสดงค่าศักย์ไฟฟ้าวงจรมืด ( Eoc ) ความหนาแน่นกระแสของช่วงพาสซีฟ ( Ip ) และศักย์ไฟฟ้าของการเกิดรูพรุน ( Ep ) ของเหล็ก AISI 304L ในสารละลายผสมของ HCl 0.1 โมล/ลิตรกับ NaCl ที่ความเข้มข้นรวมของคลอไรด์เป็น 0.1 , 1 และ 4 โมล/ลิตร .....	46
4.6 แสดงผลการวัดเส้น โพลาริเซชันในสารละลายกรดไฮโดรคลอริก และ/หรือ โซเดียมคลอไรด์ ความเข้มข้นต่างๆ ที่อุณหภูมิ 30 , 50 และ 80 C° .....	60
ก.1 ผลการวิเคราะห์เทียบค่าพลังงานยึดเหนี่ยวที่วิเคราะห์ได้จากเครื่อง XPS และค่าพลังงานยึดเหนี่ยวมาตรฐาน.....	71
ก.2 ผลการวิเคราะห์เทียบค่าพลังงานยึดเหนี่ยวที่วิเคราะห์ได้จากเครื่อง XPS และค่าพลังงานยึดเหนี่ยวมาตรฐาน.....	72
ก.3 แสดงความคลาดเคลื่อนของการวิเคราะห์ที่ความเข้มข้นของพีดต่าง ๆ ที่ได้จากวิเคราะห์ผิวของเหล็กกล้าไร้สนิมชนิด 304L ด้วยเครื่อง XPS.....	73
ข.1 แสดงค่าพลังงานยึดเหนี่ยวของออกซิเจน ( O1s ) ในสภาวะต่าง ๆ.....	74
ข.2 แสดงค่าพลังงานยึดเหนี่ยวของโครเมียม ( Cr2p3/2 ) ในสภาวะต่าง ๆ.....	75
ข.3 แสดงค่าพลังงานยึดเหนี่ยวของเหล็ก ( Fe2p3/2 ) ในสภาวะต่าง ๆ.....	75





## สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1	ผลของความเข้มข้นของ HCl ต่ออัตราการผุกร่อน และชนิดของการผุกร่อนของเหล็กกล้าไร้สนิมชนิด 304 ..... 3
2.2	เส้นโพลาริเซชันของเหล็กกล้าไร้สนิมชนิด 304 ในสารละลาย HCl ที่ความเข้มข้นต่างๆ ..... 4
2.3	ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการผุกร่อนของเหล็กกล้าไร้สนิมชนิด 304 กับความเป็นกรด (acidity) และปริมาณคลอไรด์ หลังจากจุ่มในสารละลายที่อุณหภูมิ 25 °C เป็นเวลา 150 ชั่วโมง ..... 5
2.4	ชนิดของการเกิดการผุกร่อนมีความสัมพันธ์กับความเป็นกรดและปริมาณคลอไรด์..... 6
2.5	เส้นโพลาริเซชันของเหล็กกล้าไร้สนิม 304 ในสารละลาย HCl และ NaCl ..... 6
2.6	แสดงความสัมพันธ์ของอุณหภูมิต่อเวลาการแตกหัก ( $t_f$ ) และ อัตราการยึดตัวในสถานะคงตัว ( $i_{ss}$ ) ของเหล็กกล้าไร้สนิมชนิด 304 และชนิด 316 ในสารละลาย HCl ความเข้มข้น 0.82 โมล/ลิตร ซึ่งรับความเค้น 437 เมกกะปาสกาล ..... 7
2.7	แสดงความสัมพันธ์ของความเข้มข้นของสารละลาย NaCl กับศักย์ไฟฟ้าของการเกิดการผุกร่อนแบบรูพรุน และศักย์ไฟฟ้าของการป้องกันการผุกร่อนแบบรูพรุนของเหล็กกล้าไร้สนิมชนิด 304 ที่อุณหภูมิ 22 °C และ 64 °C ..... 8
2.8	ผลการวิเคราะห์ฟิล์มของเหล็กกล้าไร้สนิม 18%Cr ซึ่งผ่านการจุ่มในสารละลาย HNO <sub>3</sub> ความเข้มข้น 4 นอร์มอล ที่ช่วงพาสซีฟ และช่วงทรานส์พาสซีฟ..... 9
2.9	แสดงความหนาของชั้นฟิล์มที่เกิดขึ้นบนผิวของเหล็กกล้าไร้สนิมเฟอร์ริติกชนิด 30Cr และ ชนิด 30Cr-2 Mo ซึ่งผ่านการทำให้โพลาริเซชันที่ศักย์ไฟฟ้าค่าต่างๆ เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ในสารละลาย HCl เข้มข้น 1 โมล/ลิตร ..... 10
2.10	แสดงปริมาณของไอออนบวกในฟิล์มที่เกิดขึ้นบนผิวเหล็กกล้าไร้สนิมเฟอร์ริติกชนิด 19 Cr และ 19 Cr-2 Mo ซึ่งผ่านการทำให้โพลาริเซชันที่ศักย์ไฟฟ้าค่าต่างๆ เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ในสารละลาย HCl เข้มข้น 1 โมล/ลิตร ..... 11
2.11	แสดงปริมาณของ O <sup>2-</sup> , OH <sup>-</sup> , Cl <sup>-</sup> และ น้ำ (bound water) ต่อจำนวนไอออนบวกในฟิล์มที่เกิดขึ้นบนผิวเหล็กกล้าไร้สนิมเฟอร์ริติกชนิด 19Cr และ 19Cr-Mo ซึ่งผ่านการทำให้โพลาริเซชันที่ศักย์ไฟฟ้าค่าต่างๆเป็นเวลา 1 ชั่วโมง ในสารละลาย HCl เข้มข้น 1 โมล/ลิตร ..... 11

## สารบัญรูป ( ต่อ )

รูปที่	หน้า
4.10 ผลการวิเคราะห์โครเมียม ( Cr2p ) ด้วยเครื่อง XPS ที่ผิวของเหล็ก AISI 304L หลังผ่านการทำปฏิกิริยากับสารละลาย HCl ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ ที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 120 ชั่วโมง .....	29
4.11 ผลของความเข้มข้นของ HCl ต่อความเข้มของพีคโครเมียมที่ผิวของเหล็ก AISI 304L หลังผ่านการปฏิกิริยากับสารละลายที่ความเข้มข้นต่าง ๆ ที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 120 ชั่วโมง .....	29
4.12 ผลของความเข้มข้นของ HCl ต่อความเข้มของพีคเหล็กที่ผิวของเหล็ก AISI 304L หลังผ่านการปฏิกิริยากับสารละลายที่ความเข้มข้นต่าง ๆ ที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 120 ชั่วโมง .....	30
4.13 ผลการวิเคราะห์เหล็ก ( Fe2p3/2 ) ด้วยเครื่อง XPS ที่ผิวของเหล็ก AISI 304L หลังผ่านการทำปฏิกิริยากับสารละลาย HCl ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ ที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 120 ชั่วโมง .....	30
4.14 ผลการวิเคราะห์นิกเกิล ( Ni2p3/2 ) ด้วยเครื่อง XPS ที่ผิวของเหล็ก AISI 304L หลังผ่านการทำปฏิกิริยากับสารละลาย HCl ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ ที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 120 ชั่วโมง .....	31
4.15 แสดงผลการวัดเส้น โพลาริเซชันของเหล็ก AISI 304 L ในสารละลาย HCl ความเข้มข้น 0.01 , 0.1 และ 1 โมล/ลิตร ที่อุณหภูมิ 30 ° C .....	31
4.16 ผลการวิเคราะห์ออกซิเจน ( O1s ) ด้วยเครื่อง XPS ที่ผิวของเหล็ก AISI 304L หลังผ่านการทำปฏิกิริยากับสารละลาย NaCl ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ ที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 120 ชั่วโมง .....	35
4.17 ผลของความเข้มข้นของ NaCl ต่อความเข้มของพีคออกซิเจนที่ผิวของเหล็ก AISI 304L หลังผ่านการปฏิกิริยากับสารละลายที่ความเข้มข้นต่าง ๆ ที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 120 ชั่วโมง .....	35
4.18 แสดงผลการวิเคราะห์ออกซิเจน ( O1s ) ด้วยเครื่อง XPS ที่ผิวของเหล็ก AISI 304L หลังผ่านการทำปฏิกิริยากับสารละลาย NaCl เข้มข้น 4 โมล/ลิตร ที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 120 ชั่วโมง โดยเอียงชิ้นงานขณะวิเคราะห์เป็นมุม 0° , 60° และ 80° .....	36
4.19 ผลการวิเคราะห์โครเมียม ( Cr2p ) ด้วยเครื่อง XPS ที่ผิวของเหล็ก AISI 304L หลังผ่านการทำปฏิกิริยากับสารละลาย NaCl ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ ที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 120 ชั่วโมง .....	36

## สารบัญรูป ( ต่อ )

รูปที่	หน้า
4.20 ผลของความเข้มข้นของ NaCl ต่อความเข้มของพีคเหล็กที่ผิวของเหล็ก AISI 304L หลังผ่านการปฏิบัติกับสารละลายที่ความเข้มข้นต่าง ๆ ที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 120 ชั่วโมง .....	37
4.21 ผลการวิเคราะห์เหล็ก ( Fe2p3/2 ) ด้วยเครื่อง XPS ที่ผิวของเหล็ก AISI 304L หลังผ่านการปฏิบัติกับสารละลาย NaCl ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ ที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 120 ชั่วโมง .....	37
4.22 แสดงผลการวัดเส้นโพลาไรเซชันของเหล็ก AISI 304 L ในสารละลาย NaCl ที่ความเข้มข้น 0.1 , 0.4 และ 1 โมล/ลิตร ที่อุณหภูมิ 30 ° C .....	38
4.23 ผลการวิเคราะห์ออกซิเจน ( O1s ) ด้วยเครื่อง XPS ที่ผิวของเหล็ก AISI 304L หลังผ่านการปฏิบัติกับสารละลายผสมของ HCl 0.1 โมล/ลิตรกับ NaCl ที่ความเข้มข้นรวมของคลอไรด์ต่างกัน ที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 120 ชั่วโมง .....	41
4.24 ผลการวิเคราะห์ออกซิเจน ( O1s ) ด้วยเครื่อง XPS ที่ผิวของเหล็ก AISI 304L หลังผ่านการปฏิบัติกับสารละลายผสมของ HCl 0.1 โมล/ลิตรกับ NaCl ที่ความเข้มข้นรวมของคลอไรด์ต่างกัน ที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 120 ชั่วโมง .....	41
4.25 ผลของความเข้มข้นของคลอไรด์ต่อความเข้มของพีคออกซิเจนที่ผิวของเหล็ก AISI 304L หลังผ่านการปฏิบัติกับสารละลายผสมของ HCl 0.1 โมล/ลิตร กับ NaCl ที่ความเข้มข้นรวมของคลอไรด์ต่างกัน ที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 120 ชั่วโมง .....	42
4.26 ผลการวิเคราะห์โครเมียม ( Cr2p ) ด้วยเครื่อง XPS ที่ผิวของเหล็ก AISI 304L หลังผ่านการปฏิบัติกับสารละลายผสมของ HCl 0.1 โมล/ลิตรกับ NaCl ที่ความเข้มข้นรวมของคลอไรด์ต่างกัน ที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 120 ชั่วโมง .....	42
4.27 ผลของความเข้มข้นรวมของคลอไรด์ต่อความเข้มของพีคโครเมียมที่ผิวของเหล็ก AISI 304L หลังผ่านการปฏิบัติกับสารละลายผสมของ HCl 0.1 โมล/ลิตร กับ NaCl ที่ความเข้มข้นรวมของคลอไรด์ต่างกัน ที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 120 ชั่วโมง .....	43
4.28 ผลของความเข้มข้นรวมของคลอไรด์ต่อความเข้มของพีคเหล็กที่ผิวของเหล็ก AISI 304L หลังผ่านการปฏิบัติกับสารละลายผสมของ HCl 0.1 โมล/ลิตร กับ NaCl ที่ความเข้มข้นรวมของคลอไรด์ต่างกัน ที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 120 ชั่วโมง .....	43

สารบัญรูป ( ต่อ )

รูปที่		หน้า
4.29	ผลการวิเคราะห์เหล็ก ( Fe <sub>2p</sub> 3/2 ) ด้วยเครื่อง XPS ที่ผิวของเหล็ก AISI 304L หลังผ่านการทำปฏิกิริยากับสารละลายผสมของ HCl 0.1 โมล/ลิตรกับ NaCl ที่ความเข้มข้นรวมของคลอไรด์ต่างกัน ที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 120 ชั่วโมง.....	44
4.30	ผลการวิเคราะห์นิกเกิล ( Ni <sub>2p</sub> 3/2 ) ด้วยเครื่อง XPS ที่ผิวของเหล็ก AISI 304L หลังผ่านการทำปฏิกิริยากับสารละลายผสมของ HCl 0.1 โมล/ลิตรกับ NaCl ที่ความเข้มข้นรวมของคลอไรด์ต่างกัน ที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 120 ชั่วโมง .....	44
4.31	แสดงเส้นโพลาริเซชันของเหล็ก AISI 304L ในสารละลายผสมของ HCl 0.1 โมล/ลิตรกับ NaCl ที่ความเข้มข้นรวมของคลอไรด์ เท่ากับ 0.1 , 1 และ 4 โมล/ลิตร ที่อุณหภูมิ 30 °C .....	45
4.32	ผลการวิเคราะห์ออกซิเจน ( O1s ) ด้วยเครื่อง XPS ที่ผิวของเหล็ก AISI 304L หลังผ่านการทำปฏิกิริยากับสารละลายผสมของ HCl ที่ความเข้มข้นต่างๆ กับ NaCl ที่ความเข้มข้นรวมของคลอไรด์เท่ากับ 1 โมล/ลิตร ที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 120 ชั่วโมง .....	49
4.33	ผลการวิเคราะห์ออกซิเจน ( O1s ) ด้วยเครื่อง XPS ที่ผิวของเหล็ก AISI 304L หลังผ่านการทำปฏิกิริยากับสารละลายผสมของ HCl ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ กับ NaCl ที่ความเข้มข้นรวมของคลอไรด์เท่ากับ 4 โมล/ลิตร ที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 120 ชั่วโมง .....	49
4.34	ผลของความเข้มข้นของ HCl ต่อความเข้มของฟิสิกออกซิเจนที่ผิวของเหล็ก AISI 304L หลังผ่านการทำปฏิกิริยากับสารละลายผสมของ HCl ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ กับ NaCl ที่ความเข้มข้นรวมของ Cl <sup>-</sup> เท่ากับ 4 โมล/ลิตร ที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 120 ชั่วโมง .....	50
4.35	ผลการวิเคราะห์ โครเมียม ( Cr <sub>2p</sub> ) ด้วยเครื่อง XPS ที่ผิวของเหล็ก AISI 304L หลังผ่านการทำปฏิกิริยากับสารละลายผสมของ HCl ที่ความเข้มข้นต่างๆ กับ NaCl ที่ความเข้มข้นรวมของคลอไรด์เท่ากับ 1 โมล/ลิตร ที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 120 ชั่วโมง .....	50
4.36	ผลของความเข้มข้นของ HCl ต่อความเข้มของฟิสิก Cr ที่ผิวของเหล็ก AISI 304L หลังผ่านการทำปฏิกิริยากับสารละลายผสมของ HCl ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ กับ NaCl ที่ความเข้มข้นรวมของ Cl <sup>-</sup> เท่ากับ 1 โมล/ลิตร ที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 120 ชั่วโมง .....	51

## สารบัญรูป ( ต่อ )

รูปที่	หน้า
4.37 ผลการวิเคราะห์ โครเมียม ( Cr <sub>2p</sub> ) ด้วยเครื่อง XPS ที่ผิวของเหล็ก AISI 304L หลังผ่านการทำปฏิกิริยากับสารละลายผสมของ HCl ที่ความเข้มข้นต่างๆ กับ NaCl ที่ความเข้มข้นรวมของคลอไรด์เท่ากับ 4 โมล/ลิตร ที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 120 ชั่วโมง ( วิเคราะห์ด้วยเครื่อง XPS โดยไม่ผ่านการลอกผิว ) .....	51
4.38 ผลของความเข้มข้นของ HCl ต่อความเข้มข้นของพีก Cr ที่ผิวของเหล็ก AISI 304L หลังผ่านการทำปฏิกิริยากับสารละลายผสมของ HCl ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ กับ NaCl ที่ความเข้มข้นรวมของ Cl <sup>-</sup> เท่ากับ 4 โมล/ลิตร ที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 120 ชั่วโมง .....	52
4.39 ผลของความเข้มข้นของ HCl ต่อความเข้มข้นของพีกเหล็กที่ผิวของเหล็ก AISI 304L หลังผ่านการทำปฏิกิริยากับสารละลายผสมของ HCl ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ กับ NaCl ที่ความเข้มข้นรวมของ Cl <sup>-</sup> เท่ากับ 1 และ 4 โมล/ลิตร ที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 120 ชั่วโมง .....	52
4.40 ผลการวิเคราะห์เหล็ก ( Fe <sub>2p<sub>3/2</sub></sub> ) ด้วยเครื่อง XPS ที่ผิวของเหล็ก AISI 304L หลังผ่านการทำปฏิกิริยากับสารละลายผสมของ HCl ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ กับ NaCl ที่ความเข้มข้นรวมของคลอไรด์เท่ากับ 1 โมล/ลิตร ที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 120 ชั่วโมง .....	53
4.41 ผลของอุณหภูมิต่อความเข้มข้นของพีกออกซิเจน ที่ผิวของเหล็ก AISI 304L หลังทำปฏิกิริยากับสารละลาย NaCl เข้มข้น 1 โมล/ลิตร เป็นเวลา 120 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 30 , 50 และ 80°C .....	53
4.42 ผลของอุณหภูมิต่อความเข้มข้นของพีกออกซิเจน ที่ผิวของเหล็ก AISI 304L หลังทำปฏิกิริยากับสารละลาย HCl เข้มข้น 0.1 และ 1 โมล/ลิตร และสารละลายผสมของ HCl 0.1 โมลกับ NaCl 0.9 โมลในสารละลาย 1 ลิตร เป็นเวลา 120 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 30 , 50 และ 80°C .....	56
4.43 ผลการวิเคราะห์ออกซิเจน ( O1s ) ด้วยเครื่อง XPS ที่ผิวเหล็ก AISI 304L หลังทำปฏิกิริยากับสารละลาย NaCl เข้มข้น 1 โมล/ลิตร เป็นเวลา 120 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 30 , 50 และ 80°C.....	56
4.44 ผลการวิเคราะห์ออกซิเจน ( O1s ) ด้วยเครื่อง XPS ที่ผิวเหล็ก AISI 304L หลังทำปฏิกิริยากับสารละลายผสมของ HCl 0.1 โมลกับ NaCl 0.9 โมลในสารละลาย 1 ลิตร เป็นเวลา 120 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 30 , 50 และ 80°C.....	57



สารบัญรูป ( ต่อ )

รูปที่	หน้า
4.45 ผลของอุณหภูมิต่อความเข้มของพีคโครเมียม ที่ผิวของเหล็ก AISI 304L หลังทำปฏิกิริยากับสารละลาย HCl และ/หรือ NaCl ความเข้มข้นต่าง ๆ เป็นเวลา 120 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 30 , 50 และ 80°C.....	57
4.46 ผลของอุณหภูมิต่อความเข้มของพีคเหล็กที่ผิวของเหล็ก AISI 304L หลังทำปฏิกิริยากับสารละลาย HCl และ/หรือ NaCl ความเข้มข้นต่าง ๆ เป็นเวลา 120 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 30 , 50 และ 80°C.....	58
4.47 ผลการวิเคราะห์เหล็ก ( Fe2p3/2 ) ด้วยเครื่อง XPS ที่ผิวเหล็ก AISI 304L หลังทำปฏิกิริยากับสารละลาย NaCl เข้มข้น 1 โมล/ลิตร เป็นเวลา 120 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 30 , 50 และ 80°C.....	58
4.48 ผลการวิเคราะห์เหล็ก ( Fe2p3/2 ) ด้วยเครื่อง XPS ที่ผิวเหล็ก AISI 304L หลังทำปฏิกิริยากับสารละลาย HCl เข้มข้น 1 โมล/ลิตร เป็นเวลา 120 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 30 , 50 และ 80°C.....	59
4.49 ผลการวิเคราะห์ Cl <sup>-</sup> ( Cl2p ) ด้วยเครื่อง XPS ที่ผิวชั้นนอกของเหล็ก AISI 304L หลังผ่านการทำปฏิกิริยากับสารละลาย Cl <sup>-</sup> เข้มข้น 4 โมล/ลิตร ที่อุณหภูมิ 30 °C เป็นเวลา 120 ชั่วโมง .....	62
4.50 ผลการวิเคราะห์ Cl <sup>-</sup> ( Cl2p ) ด้วยเครื่อง XPS ที่ผิวชั้นนอกของเหล็ก AISI 304L หลังผ่านการทำปฏิกิริยากับสารละลาย Cl <sup>-</sup> เข้มข้น 1 โมล/ลิตร ที่อุณหภูมิ 80 °C เป็นเวลา 120 ชั่วโมง .....	62
4.52 ผลการคำนวณความหนาของชั้นฟิล์มของเหล็ก AISI 304L ที่ผ่านการทำปฏิกิริยา กับสารละลายต่าง ๆ กัน.....	63
4.53 ขั้นตอนการเกิดชั้นฟิล์มโดยสมมุติฐานการเกิดดีโพสิทไนเซชันของน้ำ .....	65
4.54 แสดงแบบจำลองของชั้นฟิล์มของเหล็กกล้าไร้สนิมชนิด 304L ในสารละลายต่างๆ.....	66
ข.1 แสดงชั้นฟิล์มของเหล็กกล้าไร้สนิมชนิด 304L .....	78
ข.2 แสดงพีคของโครเมียมที่ผิวของเหล็กกล้าไร้สนิมชนิด 304L หลังผ่านการลอกผิว เวลา t. ....	78

## คำอธิบายคำย่อ

คำย่อ	คำเต็ม	ความหมาย
B.E.	binding energy	พลังงานยึดเหนี่ยว
Cr-met	metallic chromium	โครเมียมในสภาวะโลหะ
Cr-ox	oxidized chromium	โครเมียมในสภาวะถูกออกซิไดซ์
Eoc	opened circuit potential	ศักย์ไฟฟ้าที่วงจรเปิด
Ep	pitting potential	ศักย์ไฟฟ้าของการเกิดรูพรุน
Fe-met	metallic iron	เหล็กในสภาวะโลหะ
Fe-ox	oxidized iron	เหล็กในสภาวะถูกออกซิไดซ์
Ip	passive current density	ความหนาแน่นกระแสของช่วงพาสซีฟ
M-O	metal hydroxide	โลหะไฮดรอกไซด์
M-OH	metal oxide	โลหะออกไซด์
N ( E )	number of photoelectron	จำนวนโฟโตอิเล็กตรอน
Ni-met	metallic nickel	นิกเกิลในสภาวะโลหะ
Ni-ox	oxidized nickel	นิกเกิลในสภาวะถูกออกซิไดซ์
XPS	X-ray photoelectron spectroscopy	เครื่องเอกซเรย์โฟโตอิเล็กตรอนสเปกโตรสโคปี

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย