



รายงานการวิจัย

ความต้านทานการกัดกร่อนของเหล็กกล้า AISI 4140 ที่เคลือบผิว
ด้วยไอทางกายภาพ
(Corrosion resistance of AISI 4140 steel surface-coated
by physical vapor deposition)

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจาก
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว



รายงานการวิจัย

ความต้านทานการกัดกร่อนของเหล็กกล้า AISI 4140 ที่เคลือบผิว ด้วยไอทางกายภาพ

(Corrosion resistance of AISI 4140 steel surface-coated
by physical vapor deposition)

คณะผู้วิจัย

หัวหน้าโครงการ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พรวิสา วงศ์ปัญญา

สาขาวิชาวิศวกรรมโลหการ

สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ผู้ร่วมวิจัย

1. รองศาสตราจารย์ ดร.ประยูร ส่งศิริฤทธิกุล

2. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นิรันดร์ วิทิตอนันต์

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ปีงบประมาณ พ.ศ. 2553

ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว

กรกฎาคม 2555

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีและสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ ผู้ให้
ทุนอุดหนุนงานวิจัย ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2553 เรื่อง “ความต้านทานการกัดกร่อนของเหล็กกล้า
AISI 4140 ที่เคลือบผิวด้วยการเคลือบไอทางกายภาพ” และ ขอขอบคุณผู้ทรงคุณวุฒิที่ได้เสียสละเวลาทำ
หน้าที่ตรวจข้อเสนอโครงการ และตรวจร่างรายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์

พรวิสา วงศ์ปัญญา

กรกฎาคม 2555



บทคัดย่อ

ความต้านทานการกัดกร่อนของเหล็กกล้า AISI 4140 ที่เคลือบผิวด้วย การเคลือบไอทางกายภาพ

จุดประสงค์ของงานวิจัยนี้คือศึกษาความต้านทานการกัดกร่อนของเหล็กกล้า AISI 4140 ที่เคลือบผิวด้วยการเคลือบไอทางกายภาพ โดยศึกษาผลของความหยาบผิวของเหล็กกล้า AISI 4140 ก่อนเคลือบและผลของค่าความเป็นกรด-ด่างของสารละลายที่มีต่อความต้านทานการกัดกร่อน ในเบื้องต้นตัวอย่างชิ้นงานเหล็กกล้า AISI 4140 ที่มีขนาด $10 \times 10 \times 2$ มิลลิเมตร และผ่านการเตรียมผิวที่ความหยาบต่างกันถูกเคลือบผิวด้วยโครเมียมไนไตรด์และไทเทเนียมไนไตรด์ที่มีความหนา 914 นาโนเมตรและ 1,200 นาโนเมตรตามลำดับ จากนั้นตรวจสอบคุณลักษณะของโครเมียมไนไตรด์และไทเทเนียมไนไตรด์ด้วยเทคนิคเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (XRD) และกล้องจุลทรรศน์แบบแรงอะตอม (AFM) แล้วศึกษาความต้านทานการกัดกร่อนของชิ้นงานเหล็กกล้า AISI 4140 ที่ไม่ถูกเคลือบผิวและชิ้นงานเหล็กกล้า AISI 4140 ที่ถูกเคลือบผิวด้วยโครเมียมไนไตรด์และชิ้นงานเหล็กกล้า AISI 4140 ที่ถูกเคลือบผิวด้วยไทเทเนียมไนไตรด์ ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้นร้อยละ 3.5 โดยน้ำหนักที่มีค่าพีเอชเท่ากับ 2, 7 และ 10 ด้วยวิธีทางไฟฟ้าเคมี หลังทดสอบการกัดกร่อนพื้นผิวของชิ้นงานถูกตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราดและเทคนิคเอกซเรย์โฟโตอิเล็กตรอนสเปกโทรสโกปี (XPS) จากการวิจัยพบว่าชิ้นงานเหล็กกล้า AISI 4140 ที่ถูกเคลือบผิวด้วยโครเมียมไนไตรด์และชิ้นงานเหล็กกล้า AISI 4140 ที่ถูกเคลือบผิวด้วยไทเทเนียมไนไตรด์มีความต้านทานการกัดกร่อนที่ใกล้เคียงกันและดีกว่าชิ้นงานเหล็กกล้าที่ไม่ถูกเคลือบที่ทุกค่าพีเอช โดยความหยาบของเหล็กกล้า 4140 ก่อนการเคลือบผิวที่ลดลง และสารละลายที่มีค่าพีเอชเพิ่มมากขึ้นส่งผลให้ชิ้นงานมีความต้านทานการกัดกร่อนดีขึ้น นอกจากนี้พบว่าพื้นผิวของชิ้นงานเหล็กกล้า AISI 4140 ที่ถูกเคลือบผิวด้วยโครเมียมไนไตรด์และชิ้นงานเหล็กกล้า AISI 4140 ที่ถูกเคลือบผิวด้วยไทเทเนียมไนไตรด์หลังทดสอบการกัดกร่อนมีพื้นที่ถูกกัดกร่อนและปริมาณผลิตภัณฑ์การกัดกร่อนที่น้อยกว่าชิ้นงานที่ไม่ถูกเคลือบผิว

Abstract

Corrosion resistance of AISI 4140 steel surface-coated by physical vapor deposition

The objective of this research is to study the corrosion resistance of AISI 4140 steel surface-coated by physical vapor deposition. The effect of surface roughness before coating and the effect of solution pH on corrosion resistance were evaluated. Firstly, the AISI 4140 steel samples with the dimension of 10×10×2 mm were coated with chromium nitride (CrN) and titanium nitride (TiN) with a thickness of 914 nm and 1200 nm, respectively. The characteristics of CrN and TiN were examined by X-ray diffraction (XRD) and atomic force microscopy (AFM) technique. The corrosion resistance of uncoated and CrN and TiN coated onto AISI 4140 steel samples was studied in air-saturated 3.5 wt% NaCl solution at the pH values of 2, 7 and 10 by electrochemical technique. After corrosion testing, the surface of the samples was evaluated by using the scanning electron microscopy (SEM) and the synchrotron X-ray Photoelectron Spectroscopy (XPS) technique. The results showed that the CrN and TiN coated samples exhibited better corrosion resistance than the uncoated samples at all pH values. Corrosion resistance increased by decreasing surface roughness of substrate prior to coating and increasing pH of solution. In addition, the CrN and TiN coated samples showed less corroded area and corrosion product than the uncoated samples.

สารบัญ

| | หน้า |
|--|------|
| กิตติกรรมประกาศ | ก |
| บทคัดย่อภาษาไทย | ข |
| บทคัดย่อภาษาอังกฤษ | ค |
| สารบัญ | ง |
| สารบัญตาราง | ญ |
| สารบัญภาพ | ฎ |
| บทที่ 1 บทนำ | 1 |
| 1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาการวิจัย | 1 |
| 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย | 2 |
| 1.3 ขอบเขตของการวิจัย | 2 |
| 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการวิจัย | 3 |
| บทที่ 2 ปรีทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง | 4 |
| 2.1 กระบวนการเคลือบผิวแข็งด้วยไอทางกายภาพ | 4 |
| 2.1.1 การเคลือบผิวแข็งด้วยไอทางเคมี | 4 |
| 2.1.2 การเคลือบผิวแข็งด้วยไอทางกายภาพ | 4 |
| 2.2 กระบวนการการกัดกร่อน | 6 |
| 2.3 การกัดกร่อนแบบรูเข็ม | 8 |
| 2.4 การวัดศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อน ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อน และอัตราการกัดกร่อน..... | 9 |
| 2.5 เส้นโพลาริเซชัน | 11 |
| 2.6 การวิเคราะห์ชั้นเคลือบ | 12 |
| 2.6.1 X-ray photoelectron spectroscopy (XPS) และ X-ray photoemission electron microscopy (X-PEEM) | 12 |
| 2.6.2 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope ,SEM) | 13 |

สารบัญ (ต่อ)

| | หน้า |
|--|------|
| 2.7 การทบทวนวรรณกรรม (reviewed literature) และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง | 14 |
| บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย | 17 |
| 3.1 วัสดุและสารเคมีที่ใช้ในการดำเนินการวิจัย | 17 |
| 3.1.1 ชิ้นงานที่ใช้ในการดำเนินการวิจัย | 17 |
| 3.1.2 สารเคมีที่ใช้ในการดำเนินการวิจัย | 17 |
| 3.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการดำเนินการวิจัย | 17 |
| 3.2.1 อุปกรณ์สำหรับเตรียมตัวอย่างก่อนการเคลือบผิว | 17 |
| 3.2.2 อุปกรณ์สำหรับกระบวนการเคลือบผิว | 19 |
| 3.2.3 อุปกรณ์สำหรับทดสอบการกัดกร่อน | 20 |
| 3.2.4 อุปกรณ์สำหรับตรวจสอบพื้นผิว | 22 |
| 3.3 ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย | 24 |
| 3.3.1 ขั้นตอนเตรียมชิ้นงานก่อนการเคลือบผิว | 25 |
| 3.3.2 ขั้นตอนกระบวนการเคลือบผิวไอทางกายภาพ | 26 |
| 3.3.3 ขั้นตอนการตรวจสอบพื้นผิวก่อนทดสอบการกัดกร่อน | 27 |
| 3.3.4 ขั้นตอนการทดสอบการกัดกร่อน | 27 |
| 3.3.5 ขั้นตอนการตรวจสอบพื้นผิวหลังทดสอบการกัดกร่อน | 29 |
| บทที่ 4 ผลการวิจัยและการอภิปรายผลการวิจัย | 30 |
| 4.1 คุณลักษณะของชิ้นงานเหล็กกล้า AISI 4140 ก่อนการเคลือบผิว | 30 |
| 4.1.1 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานเหล็กกล้า AISI 4140 ก่อนการเคลือบผิว | 30 |
| 4.1.2 ค่าความแข็งของชิ้นงานเหล็กกล้า AISI 4140 ก่อนการเคลือบผิว | 31 |
| 4.1.3 ค่าความหยาบผิวของชิ้นงานเหล็กกล้า AISI 4140 | 31 |

สารบัญ (ต่อ)

| | หน้า |
|---|------|
| 4.2 คุณสมบัติของชิ้นงานเหล็กกล้า AISI 4140 หลังการเคลือบผิวด้วยฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์ และฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรด์ | 33 |
| 4.2.1 ค่าความหยาบผิวของชิ้นงานเหล็กกล้า AISI 4140 หลังการเคลือบผิวด้วยฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์ และฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรด์ | 33 |
| 4.2.2 การวิเคราะห์คุณสมบัติของฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์ ที่เคลือบบนเหล็กกล้า AISI 4140 ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (XRD) | 36 |
| 4.2.3 การวิเคราะห์คุณสมบัติของฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรด์ ที่เคลือบบนเหล็กกล้า AISI 4140 ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (XRD)..... | 37 |
| 4.2.4 การวิเคราะห์คุณสมบัติของฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรด์ ที่เคลือบบนเหล็กกล้า AISI 4140 ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแรงอะตอม (AFM) | 37 |
| 4.2.5 การวิเคราะห์คุณสมบัติของฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรด์ ที่เคลือบบนเหล็กกล้า AISI 4140 ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแรงอะตอม (AFM) | 40 |
| 4.3 พฤติกรรมการกัดกร่อน | 42 |
| 4.3.1 ผลของความหยาบผิวของเหล็กกล้า AISI 4140 ที่มีต่อพฤติกรรมการกัดกร่อน | 50 |
| 4.3.2 ผลของค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ของสารละลายที่มีต่อพฤติกรรมการกัดกร่อน | 54 |
| 4.4 การวิเคราะห์พื้นผิวภายหลังทดสอบการกัดกร่อน | 58 |

สารบัญ (ต่อ)

| | หน้า |
|---|------|
| 4.4.1 การวิเคราะห์พื้นผิวภายหลังทดสอบการกัดกร่อนด้วย กล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (SEM) | 58 |
| 4.4.2 การวิเคราะห์ห้วงค์ประกอบทางเคมีบนพื้นผิวของชิ้นงาน ภายหลังทดสอบการกัดกร่อนด้วยเทคนิค EDX | 63 |
| 4.4.3 การวิเคราะห์คุณลักษณะของฟิล์มบางโครเมียมในทรายดี ที่เคลือบบนเหล็กกล้า AISI 4140 ด้วยเทคนิค X-ray Photoelectron Spectroscopy (XPS)..... | 66 |
| 4.4.4 การวิเคราะห์คุณลักษณะของฟิล์มบางไทเทเนียมในทรายดี ที่เคลือบบนเหล็กกล้า AISI 4140 ด้วยเทคนิค X-ray Photoelectron Spectroscopy (XPS)..... | 68 |
| บทที่ 5 บทสรุป | 70 |
| 5.1 สรุปผลการวิจัย | 70 |
| 5.2 ข้อเสนอแนะ | 71 |
| บรรณานุกรม | 72 |
| ภาคผนวก | |
| ภาคผนวก ก | 78 |
| ภาคผนวก ข | 81 |
| ภาคผนวก ค | 85 |
| ภาคผนวก ง | 88 |
| ภาคผนวก จ | 113 |
| ประวัติคณะผู้วิจัย | 133 |

สารบัญตาราง

| ตารางที่ | | หน้าที่ |
|--------------|--|---------|
| ตารางที่ 3.1 | ส่วนผสมทางเคมี (เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก) ของเหล็กกล้า AISI 4140 | 17 |
| ตารางที่ 3.2 | ตัวแปรในกระบวนการตัวแปรในการผลิตฟิล์มบาง โครเมียมไนไตรด์ (CrN) โดยกระบวนการเคลือบผิวแบบไอทางกายภาพ | 26 |
| ตารางที่ 3.3 | ตัวแปรในกระบวนการตัวแปรในการผลิตฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรด์ (TiN) โดยกระบวนการเคลือบผิวแบบไอทางกายภาพ | 27 |
| ตารางที่ 3.4 | จำนวนชิ้นงานที่ไม่ถูกเคลือบผิวและสภาวะที่ใช้ทดสอบการกัดกร่อน | 28 |
| ตารางที่ 3.5 | จำนวนชิ้นงานที่ถูกเคลือบผิวด้วยโครเมียมไนไตรด์และสภาวะที่ใช้ทดสอบการกัดกร่อน | 28 |
| ตารางที่ 3.6 | จำนวนชิ้นงานที่ถูกเคลือบผิวด้วยไทเทเนียมไนไตรด์และสภาวะที่ใช้ทดสอบการกัดกร่อน | 28 |
| ตารางที่ 4.1 | ค่าความแข็งของเหล็กกล้า AISI 4140 ก่อนและหลังการอบชุบทางความร้อน ... | 31 |
| ตารางที่ 4.2 | แสดงผลของลักษณะภาพพื้นผิวแบบสามมิติและค่าความหยาบผิวของชิ้นงานเหล็กกล้า AISI 4140 ก่อนการเคลือบผิว | 32 |
| ตารางที่ 4.3 | ผลของลักษณะภาพพื้นผิวแบบสามมิติและค่าความหยาบผิวของชิ้นงานเหล็กกล้า AISI 4140 หลังเคลือบผิวด้วยฟิล์มบาง โครเมียมไนไตรด์ | 34 |
| ตารางที่ 4.4 | ผลของลักษณะภาพพื้นผิวแบบสามมิติและค่าความหยาบผิวของชิ้นงานเหล็กกล้า AISI 4140 หลังเคลือบผิวด้วยฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรด์ | 35 |
| ตารางที่ 4.5 | ค่าที่ได้จากเส้น โพลาริเซชันของชิ้นงานเหล็กกล้า AISI 4140 ที่ไม่ถูกเคลือบผิว (ชิ้นงาน B1 B2 และ B3) ชิ้นงานเหล็กกล้า AISI 4140 ที่ถูกเคลือบผิวด้วยฟิล์มบาง โครเมียมไนไตรด์ (ชิ้นงาน C1 C2 และ C3) และชิ้นงานเหล็กกล้า AISI 4140 ที่ถูกเคลือบผิวด้วยฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรด์ (ชิ้นงาน T1 T2 และ T3) ที่ทำการทดสอบการกัดกร่อนในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้นร้อยละ 3.5 โดยน้ำหนักที่มีค่าพีเอช 2, 7 และ 10 | 49 |
| ตารางที่ ข.1 | ค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนของชิ้นงานในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้นร้อยละ 3.5 โดยน้ำหนักที่มีค่าพีเอช 2 | 82 |

สารบัญตาราง (ต่อ)

| ตารางที่ | | หน้าที่ |
|--------------|---|---------|
| ตารางที่ ข.2 | ค่าอัตราการกัดกร่อนของชิ้นงานในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้น ร้อยละ 3.5 โดยน้ำหนักที่ค่าพีเอช 2..... | 82 |
| ตารางที่ ข.3 | ค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนของชิ้นงานในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้น ร้อยละ 3.5 โดยน้ำหนักที่ค่าพีเอช 7..... | 83 |
| ตารางที่ ข.4 | ค่าอัตราการกัดกร่อนของชิ้นงานในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้น ร้อยละ 3.5 โดยน้ำหนักที่ค่าพีเอช 7..... | 83 |
| ตารางที่ ข.5 | ค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนของชิ้นงานในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้น ร้อยละ 3.5 โดยน้ำหนักที่ค่าพีเอช 10..... | 84 |
| ตารางที่ ข.6 | ค่าอัตราการกัดกร่อนของชิ้นงานในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้น ร้อยละ 3.5 โดยน้ำหนักที่ค่าพีเอช 10..... | 84 |
| ตารางที่ ค.1 | ค่าพีเอชก่อนและหลังการทดสอบการกัดกร่อนของชิ้นงานเหล็กกล้า AISI 4140 | 86 |
| ตารางที่ ค.2 | ค่าพีเอชก่อนและหลังการทดสอบการกัดกร่อนของชิ้นงานเหล็กกล้า AISI 4140 ที่ถูกเคลือบผิวด้วยฟิล์มบางโครเมียมไนไตรต์ | 86 |
| ตารางที่ ค.3 | ค่าพีเอชก่อนและหลังการทดสอบการกัดกร่อนของชิ้นงานเหล็กกล้า AISI 4140 ที่ถูกเคลือบผิวด้วยฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรต์ | 87 |

สารบัญรูป

| รูปที่ | หน้าที่ |
|---|---------|
| รูปที่ 2.1 กลไกการทำ Sputtering | 5 |
| รูปที่ 2.2 องค์ประกอบของการกัดกร่อนในโลหะ | 7 |
| รูปที่ 2.3 การกัดกร่อนแบบรูเข็ม (Pitting corrosion) | 9 |
| รูปที่ 2.4 การวัดกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อนและศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อน โดยเครื่องโพเทนชิโอสแตท | 10 |
| รูปที่ 2.5 ศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนและความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อน..... | 11 |
| รูปที่ 2.6 ส่วนต่าง ๆ ที่สำคัญของเส้นโพลาริเซชัน | 11 |
| รูปที่ 2.7 ระดับชั้นพลังงานของ XPS | 13 |
| รูปที่ 3.1 เตาอบชิ้นงาน | 18 |
| รูปที่ 3.2 เครื่องขัดผิวชิ้นงานแบบจานหมุนยี่ห้อ BUEHLER รุ่น ECOMET 6 | 18 |
| รูปที่ 3.3 เครื่องวัดความหยาบผิวแบบใช้แสง | 19 |
| รูปที่ 3.4 เครื่องเคลือบสุญญากาศ | 20 |
| รูปที่ 3.5 เครื่องโพเทนชิโอสแตท (Potentiostat) | 20 |
| รูปที่ 3.6 อิเล็กโทรดอ้างอิง (Ag/AgCl 3M KCl) | 21 |
| รูปที่ 3.7 อิเล็กโทรดวัดกระแส (Graphite) | 21 |
| รูปที่ 3.8 อิเล็กโทรดตัวอย่าง (Working electrode)..... | 22 |
| รูปที่ 3.9 กล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM) | 22 |
| รูปที่ 3.10 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน Photoelectron Emission Spectroscopy (PES) | 23 |
| รูปที่ 3.11 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน Photoemission electron microscopy (PEEM) | 24 |
| รูปที่ 3.12 แผนภาพระเบียบวิธีการทำวิจัย | 25 |
| รูปที่ 4.1 โครงสร้างจุลภาคของเหล็กกล้า AISI 4140 ก่อนการอบชุบทางความร้อน (กำลังขยาย 50 เท่า) | 30 |
| รูปที่ 4.2 โครงสร้างจุลภาคของเหล็กกล้า AISI 4140 หลังการอบชุบทางความร้อน (กำลังขยาย 50 เท่า) | 30 |
| รูปที่ 4.3 การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์ | 36 |

สารบัญรูป (ต่อ)

| รูปที่ | หน้าที่ |
|--|---------|
| รูปที่ 4.4 การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรด์ | 37 |
| รูปที่ 4.5 การหาค่าความหนาของฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์ | 38 |
| รูปที่ 4.6 ลักษณะเกรนของฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์ที่เคลือบบน เหล็กกล้า AISI 4140 | 39 |
| รูปที่ 4.7 การหาขนาดเกรนของฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์ที่เคลือบ บนเหล็กกล้า AISI 4140 | 40 |
| รูปที่ 4.8 การหาค่าความหนาของฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์ | 40 |
| รูปที่ 4.9 ลักษณะเกรนของฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรด์ที่เคลือบบน เหล็กกล้า AISI 4140 | 41 |
| รูปที่ 4.10 เส้นโค้งโพลาไรเซชันของชิ้นงานเหล็กกล้า AISI 4140 ที่ไม่ถูกเคลือบผิว ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้น ร้อยละ 3.5 โดยน้ำหนักที่ค่าพีเอช 2 | 44 |
| รูปที่ 4.11 เส้นโค้งโพลาไรเซชันของชิ้นงานเหล็กกล้า AISI 4140 ที่ไม่ถูกเคลือบผิว ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้น ร้อยละ 3.5 โดยน้ำหนักที่ค่าพีเอช 7 | 45 |
| รูปที่ 4.12 เส้นโค้งโพลาไรเซชันของชิ้นงานเหล็กกล้า AISI 4140 ที่ไม่ถูกเคลือบผิว ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้น ร้อยละ 3.5 โดยน้ำหนักที่ค่าพีเอช 10 | 45 |
| รูปที่ 4.13 เส้นโค้งโพลาไรเซชันของชิ้นงานเหล็กกล้า AISI 4140 ที่ถูกเคลือบด้วย โครเมียมไนไตรด์ผิวในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ ความเข้มข้นร้อยละ 3.5 โดยน้ำหนักที่ค่าพีเอช 2 | 46 |
| รูปที่ 4.14 เส้นโค้งโพลาไรเซชันของชิ้นงานเหล็กกล้า AISI 4140 ที่ถูกเคลือบด้วย โครเมียมไนไตรด์ผิวในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ ความเข้มข้นร้อยละ 3.5 โดยน้ำหนักที่ค่าพีเอช 7 | 46 |

สารบัญรูป (ต่อ)

| รูปที่ | หน้าที่ |
|---|---------|
| รูปที่ 4.15 เส้นโค้ง โพลาริเซชันของชิ้นงานเหล็กกล้า AISI 4140 ที่ถูกเคลือบด้วย โครเมียมไนไตรต์ผิวในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ ความเข้มข้นร้อยละ 3.5 โดยน้ำหนักที่ค่าพีเอช 10 | 47 |
| รูปที่ 4.16 เส้นโค้ง โพลาริเซชันของชิ้นงานเหล็กกล้า AISI 4140 ที่ถูกเคลือบด้วย ไทเทเนียมไนไตรต์ผิวในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ ความเข้มข้นร้อยละ 3.5 โดยน้ำหนักที่ค่าพีเอช 2 | 47 |
| รูปที่ 4.17 เส้นโค้ง โพลาริเซชันของชิ้นงานเหล็กกล้า AISI 4140 ที่ถูกเคลือบด้วย ไทเทเนียมไนไตรต์ผิวในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ ความเข้มข้นร้อยละ 3.5 โดยน้ำหนักที่ค่าพีเอช 7 | 48 |
| รูปที่ 4.18 เส้นโค้ง โพลาริเซชันของชิ้นงานเหล็กกล้า AISI 4140 ที่ถูกเคลือบด้วย ไทเทเนียมไนไตรต์ผิวในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ ความเข้มข้นร้อยละ 3.5 โดยน้ำหนักที่ค่าพีเอช 10 | 48 |
| รูปที่ 4.19 ค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนของชิ้นงานที่มีค่าความหยาบผิวของเหล็กกล้า AISI 4140 แตกต่างกันในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ ความเข้มข้นร้อยละ 3.5 โดยน้ำหนักที่ค่าพีเอช 2 | 50 |
| รูปที่ 4.20 ค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนของชิ้นงานที่มีค่าความหยาบผิวของเหล็กกล้า AISI 4140 แตกต่างกันในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ ความเข้มข้นร้อยละ 3.5 โดยน้ำหนักที่ค่าพีเอช 7 | 51 |
| รูปที่ 4.21 ค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนของชิ้นงานที่มีค่าความหยาบผิวของเหล็กกล้า AISI 4140 แตกต่างกันในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ ความเข้มข้นร้อยละ 3.5 โดยน้ำหนักที่ค่าพีเอช 10 | 51 |
| รูปที่ 4.22 ค่าอัตราการกัดกร่อนของชิ้นงานที่มีค่าความหยาบผิวของเหล็กกล้า AISI 4140 แตกต่างกันในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ ความเข้มข้นร้อยละ 3.5 โดยน้ำหนักที่ค่าพีเอช 2 | 53 |

สารบัญรูป (ต่อ)

| รูปที่ | หน้าที่ |
|--|---------|
| รูปที่ 4.23 ค่าอัตราการกัดกร่อนของชิ้นงานที่ค่าความหยาบผิวของเหล็กกล้า AISI 4140 แตกต่างกันในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ ความเข้มข้นร้อยละ 3.5 โดยน้ำหนักที่ค่าพีเอช 7 | 53 |
| รูปที่ 4.24 ค่าอัตราการกัดกร่อนของชิ้นงานที่ค่าความหยาบผิวของเหล็กกล้า AISI 4140 แตกต่างกันในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ ความเข้มข้นร้อยละ 3.5 โดยน้ำหนักที่ค่าพีเอช 10 | 54 |
| รูปที่ 4.25 ค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนของชิ้นงานเหล็กกล้า AISI 4140 ที่ไม่ถูกเคลือบชิ้นงาน เหล็กกล้า AISI 4140 ที่ถูกเคลือบผิวด้วยฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์และชิ้นงานเหล็กกล้า AISI 4140 ที่ถูกเคลือบผิวด้วยฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรด์ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ ความเข้มข้นร้อยละ 3.5 โดยน้ำหนักที่ค่าพีเอช 2, 7 และ 10 | 55 |
| รูปที่ 4.26 ค่าอัตราการกัดกร่อนของชิ้นงานเหล็กกล้า AISI 4140 ที่ไม่ถูกเคลือบชิ้นงานเหล็กกล้า AISI 4140 ที่ถูกเคลือบผิวด้วยฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์และชิ้นงานเหล็กกล้า AISI 4140 ที่ถูกเคลือบผิวด้วยฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรด์ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ ความเข้มข้นร้อยละ 3.5 โดยน้ำหนักที่ค่าพีเอช 2, 7 และ 10 | 56 |
| รูปที่ 4.27 ภาพพื้นผิวหลังการทดสอบการกัดกร่อนของชิ้นงานเหล็กกล้า AISI 4140 ที่ไม่ถูกเคลือบชิ้นงานเหล็กกล้า AISI 4140 ที่ถูกเคลือบผิวด้วยฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์ และชิ้นงานเหล็กกล้า AISI 4140 ที่ถูกเคลือบผิวด้วยฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรด์ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ ความเข้มข้นร้อยละ 3.5 โดยน้ำหนักที่ค่าพีเอช 2 | 60 |
| รูปที่ 4.28 ภาพพื้นผิวหลังการทดสอบการกัดกร่อนของชิ้นงานเหล็กกล้า AISI 4140 ที่ไม่ถูกเคลือบ ชิ้นงานเหล็กกล้า AISI 4140 ที่ถูกเคลือบผิวด้วยฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์ และชิ้นงานเหล็กกล้า AISI 4140 ที่ถูกเคลือบผิวด้วยฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรด์ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ ความเข้มข้นร้อยละ 3.5 โดยน้ำหนักที่ค่าพีเอช 7 | 61 |

สารบัญรูป (ต่อ)

| รูปที่ | หน้าที่ |
|--|---------|
| รูปที่ 4.29 ภาพพื้นผิวหลังการทดสอบการกัดกร่อนของชิ้นงานเหล็กกล้า AISI 4140 ที่ไม่ถูกเคลือบ ชิ้นงานเหล็กกล้า AISI 4140 ที่ถูกเคลือบผิวด้วยฟิล์มบาง โครเมียมไนไตรด์ และชิ้นงานเหล็กกล้า AISI 4140 ที่ถูกเคลือบผิวด้วยฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรด์ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ ความเข้มข้นร้อยละ 3.5 โดยน้ำหนักที่ค่าพีเอช 10 | 62 |
| รูปที่ 4.30 ภาพถ่าย SEM และผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีบนพื้นผิวของชิ้นงาน T1 หลังทดสอบการกัดกร่อนในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ ความเข้มข้น ร้อยละ 3.5 โดยน้ำหนักที่ค่าพีเอช 2 | 64 |
| รูปที่ 4.31 ภาพถ่าย SEM และผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีบนพื้นผิวของชิ้นงาน C1 หลังทดสอบการกัดกร่อนในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ ความเข้มข้นร้อยละ 3.5 โดยน้ำหนักที่ค่าพีเอช 2 | 65 |
| รูปที่ 4.32 ภาพถ่าย SEM และผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีบนพื้นผิวของชิ้นงาน T1 หลังทดสอบการกัดกร่อนในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ ความเข้มข้นร้อยละ 3.5 โดยน้ำหนักที่ค่าพีเอช 2 | 66 |
| รูปที่ 4.33 ผลสเปกตรัมของ XPS ของชิ้นงานที่ถูกเคลือบผิวด้วยฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์ก่อนและหลังทดสอบการกัดกร่อน | 67 |
| รูปที่ 4.34 ผลสเปกตรัมของ XPS ของชิ้นงานที่ถูกเคลือบผิวด้วยฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรด์ก่อนและหลังทดสอบการกัดกร่อน | 69 |
| รูปที่ ก.1 วิธีการหาค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนและค่ากระแสไฟฟ้าการกัดกร่อนจากเส้น โพลาริเซชัน | 79 |
| รูปที่ ง.1 ภาพถ่าย SEM และผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีบนพื้นผิวของชิ้นงาน B2 ภายหลังทดสอบการกัดกร่อนที่ค่าพีเอช 2 | 89 |
| รูปที่ ง.2 ภาพถ่าย SEM และผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีบนพื้นผิวของชิ้นงาน B3 ภายหลังทดสอบการกัดกร่อนที่ค่าพีเอช 2 | 90 |
| รูปที่ ง.3 ภาพถ่าย SEM และผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีบนพื้นผิวของชิ้นงาน B1 ภายหลังทดสอบการกัดกร่อนที่ค่าพีเอช 7 | 91 |

สารบัญรูป (ต่อ)

| รูปที่ | หน้าที่ |
|---|---------|
| รูปที่ ง.17 ภาพถ่าย SEM และผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีบนพื้นผิวของ ชิ้นงาน T2 ภายหลังจากทดสอบการกัดกร่อนที่ค่าพีเอช 2 | 105 |
| รูปที่ ง.18 ภาพถ่าย SEM และผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีบนพื้นผิวของ ชิ้นงาน T3 ภายหลังจากทดสอบการกัดกร่อนที่ค่าพีเอช 2 | 106 |
| รูปที่ ง.19 ภาพถ่าย SEM และผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีบนพื้นผิวของ ชิ้นงาน T1 ภายหลังจากทดสอบการกัดกร่อนที่ค่าพีเอช 7 | 107 |
| รูปที่ ง.20 ภาพถ่าย SEM และผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีบนพื้นผิวของ ชิ้นงาน T2 ภายหลังจากทดสอบการกัดกร่อนที่ค่าพีเอช 7 | 108 |
| รูปที่ ง.21 ภาพถ่าย SEM และผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีบนพื้นผิวของ ชิ้นงาน T3 ภายหลังจากทดสอบการกัดกร่อนที่ค่าพีเอช 7 | 109 |
| รูปที่ ง.22 ภาพถ่าย SEM และผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีบนพื้นผิวของ ชิ้นงาน T1 ภายหลังจากทดสอบการกัดกร่อนที่ค่าพีเอช 10 | 110 |
| รูปที่ ง.23 ภาพถ่าย SEM และผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีบนพื้นผิวของ ชิ้นงาน T2 ภายหลังจากทดสอบการกัดกร่อนที่ค่าพีเอช 10 | 111 |
| รูปที่ ง.24 ภาพถ่าย SEM และผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีบนพื้นผิวของ ชิ้นงาน T3 ภายหลังจากทดสอบการกัดกร่อนที่ค่าพีเอช 10 | 112 |

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาการวิจัย

เหล็กกล้า AISI 4140 (ตามมาตรฐานญี่ปุ่น เรียก SCM 440) (H. Avner., 1974) หรือที่ถูกเรียกในท้องตลาดว่า เหล็กหัวฟ้า เป็นเหล็กกล้าทนแรงดึงสูงที่มีส่วนผสมทางเคมีโดยเฉลี่ยคือ 0.2-0.3%Mo, 1.65-2.0%Ni, 0.8-0.9%Cr และ 0.4%C เนื่องจากปริมาณธาตุผสมที่ใช้มีเพียงเล็กน้อย และธาตุผสมหลักที่จำเป็น คือ โครเมียม และ โมลิบดีนัม จึงทำให้เหล็กกล้า AISI 4140 มีราคาถูกเมื่อเปรียบเทียบกับเหล็กกล้าเครื่องมือชนิดอื่น เช่น H13 และ D2 เป็นต้น สามารถทนแรงดึงได้ระหว่าง 800-1300 เมกะปาสกาล (MPa) สามารถชุบแข็งได้ทั้งชิ้น หรือเฉพาะที่ผิวทั้งนี้ขึ้นอยู่กับจุดประสงค์ของการใช้งาน นิยมทำเป็นชิ้นส่วนทนแรงดึงสูง ชิ้นส่วนในอุตสาหกรรมยานยนต์ เช่น เพลาคอห้อย เฟือง เฟืองขับ และสลัก เป็นต้น

เทคโนโลยีการปรับปรุงพื้นผิวโลหะ (Surface modification of metal and its alloy) กำลังได้รับความสนใจในภาคอุตสาหกรรมของประเทศไทย โดยเฉพาะอย่างยิ่งในอุตสาหกรรมผลิตชิ้นส่วนรถยนต์ และเครื่องจักรกลที่นำไปใช้งานที่มีสภาพการเสียดสี (Abrasion) การสึกหรอ (Wear) และการกัดกร่อน (Corrosion) ซึ่งชิ้นส่วนรถยนต์ และเครื่องจักรกลเหล่านี้ เช่น เพลาคอห้อย เฟือง เฟืองขับ และสลัก เป็นต้น โดยชิ้นส่วนดังกล่าว ต้องการความแข็งแรงที่ผิวเพื่อป้องกันการเสียดสี และสึกหรอที่ผิว ในขณะที่เดียวกันต้องการความแข็งแรงเหนียวภายในเพื่อรับแรงกระทำทางกล มักทำจากเหล็กกล้า AISI 4140 ที่ต้องผ่านกระบวนการเพิ่มความแข็งแรงที่ผิวก่อนนำไปใช้งานด้วยวิธีดั้งเดิม เช่น คาร์บูไรซ์ซึ่ง คาร์โบไนตรายด์ดิ่ง ซึ่งมีผลภาวะสูง และอันตรายเพราะมีส่วนประกอบในแง่เกลือเป็นไฮยาไนด์ นอกจากนี้ ในปัจจุบันมีกระบวนการอื่นๆ ที่นิยมในภาคอุตสาหกรรมของประเทศไทย เช่น พลาสมาไนตรายด์ดิ่ง (Plasma nitriding) การเคลือบไอทางกายภาพ (Physical Vapor Deposition, PVD) และการเคลือบไอเคมี (Chemical Vapor Deposition, CVD) ที่เป็นกระบวนการที่สะอาด ปลอดภัยมากกว่าคาร์บูไรซ์ซึ่ง แต่ยังคงทำวิจัย และพัฒนาอีกมากในประเทศไทย

อย่างไรก็ตามทิศทางการวิจัย และพัฒนาเทคโนโลยีในกลุ่มนี้เป็นไปในทิศทางเดียวคือ มุ่งหมายเพื่อเพิ่มความต้านทานการเสียดสีและการต้านทานการสึกหรอ (ฐาปนพงศ์ พาสนพัฒน์ และ ไชยา คำคำ, 2551; ณีฐนันท์ มูลสระคู และคณะ, 2548) โดยขาดการคำนึงถึงคุณสมบัติการต้านทานการกัดกร่อนที่เกิดขึ้นจากสภาพการใช้งาน ดังนั้นในงานวิจัย จึงมุ่งเน้นไปที่การศึกษาผลของกระบวนการปรับปรุงพื้นผิววัสดุด้วยกระบวนการเคลือบผิวไอทางกายภาพที่มีต่อความต้านทานการกัดกร่อนของเหล็กกล้า AISI 4140 และคาดหวังว่างานวิจัยนี้จะทำให้การวิจัย และพัฒนา

เทคโนโลยีในกลุ่มนี้สมบูรณ์มากยิ่งขึ้น และอาจนำไปเป็นข้อมูลพื้นฐานสำหรับงานวิจัย และกระบวนการพัฒนาผลิตภัณฑ์ต่อไปในอนาคต

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษาพฤติกรรมการกัดกร่อนของเหล็กกล้า AISI 4140 ที่เคลือบผิวด้วยการเคลือบไอทางกายภาพ

1.2.2 เพื่อศึกษาผลของความหยาบผิวของเหล็กกล้า AISI 4140 ก่อนการเคลือบผิวที่มีผลต่อพฤติกรรมการกัดกร่อนของเหล็กกล้า AISI 4140 ที่เคลือบผิวด้วยการเคลือบไอทางกายภาพ

1.2.3 เพื่อศึกษาผลค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ของสารละลายที่ใช้ในการทดสอบที่มีต่อพฤติกรรมการกัดกร่อนของเหล็กกล้า AISI 4140 ที่เคลือบผิวด้วยการเคลือบไอทางกายภาพ

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1.3.1 โลหะที่ถูกเคลือบผิว หรือวัสดุพื้น (Substrate) เพื่อปรับปรุงสมบัติที่ผิว คือ เหล็กกล้า AISI 4140

1.3.2 กระบวนการปรับปรุงพื้นผิวที่สนใจศึกษา คือ กระบวนการเคลือบผิวด้วยไอทางกายภาพ (PVD) โดยชั้นเคลือบผิวที่ต้องการทดสอบ คือ ไทเทเนียมไนไตรด์ (TiN) และ โครเมียมไนไตรด์ (CrN) อย่างไรก็ตาม กระบวนการเคลือบผิวด้วยวิธีไอทางกายภาพ มีตัวแปรที่ต้องควบคุมดังนี้ คือ

- 1) ค่าอัตราส่วนระหว่างแก๊สไนโตรเจน และอาร์กอนคงที่
- 2) ค่าความดัน (Pressure) คงที่
- 3) อุณหภูมิ (สำหรับวัสดุพื้น) ที่ใช้ในการเคลือบไอทางกายภาพคงที่ในที่นี้คือ อุณหภูมิห้อง
- 4) เวลาที่ใช้ในการเคลือบไอทางกายภาพคงที่
- 5) ความหยาบของพื้นผิววัสดุที่ถูกเคลือบ (Roughness of substrate)

1.3.3 ภายหลังเสร็จสิ้นกระบวนการเตรียมชิ้นงานตามข้อ 1.3.2 แล้ว จำเป็นต้องศึกษาส่วนประกอบ (Constitute) และส่วนผสมทางเคมี (Chemical composition) ของชั้นเคลือบในกระบวนการเคลือบไอทางกายภาพนั้นๆ เพื่อเป็นข้อมูลพื้นฐานก่อนนำไปทดสอบการกัดกร่อนด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (XRD) กล้องจุลทรรศน์แบบแรงอะตอม (AFM)

1.3.4 ศึกษาพฤติกรรมการกัดกร่อนของเหล็กกล้า AISI 4140 ที่เคลือบผิวด้วยการเคลือบไอทางกายภาพ ด้วยวิธีทางไฟฟ้าเคมีในสารละลายตามมาตรฐานสากล เช่น ASTM Standard โดยมีส่วนประกอบของสารละลายโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้น 3.5 กรัมละลายในน้ำกลั่น 96.5

มิลลิลิตร โดยวัดเส้นโค้งโพลาริเซชันของเหล็กกล้า AISI 4140 ที่เคลือบผิวด้วยไอทางกายภาพแล้ว แปลความหมายจากเส้นโพลาริเซชันที่วัดได้เป็นความหมายทางการกัดกร่อน กล่าวคือ วิเคราะห์หาค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อน (Corrosion potential) ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อน (Corrosion current density) ค่าอัตราการกัดกร่อน (Corrosion rate)

1.3.5 หลังจากนั้นตรวจสอบพื้นที่ที่ถูกกัดกร่อน ตลอดจนความลึก และส่วนผสมทางเคมีของชั้นเคลือบที่ถูกกัดกร่อนด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด (Scanning Electron Microscope, SEM) หรือ X-ray photoelectron spectroscopy (XPS) หรือ X-ray photoemission electron microscopy (X-PEEM)

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการวิจัย

1.4.1 ทราบถึงพฤติกรรมการกัดกร่อนของเหล็กกล้าคาร์บอน เกรด AISI 4140 ที่เคลือบผิวด้วยการเคลือบไอทางกายภาพ

1.4.2 ทราบถึงผลความหยาบของผิวชิ้นงานที่มีผลต่อพฤติกรรมการกัดกร่อนของเหล็กกล้า AISI 4140 ที่เคลือบผิวด้วยการเคลือบไอทางกายภาพ

1.4.3 ทราบถึงผลของความเป็นกรด-ด่าง (pH) ของสารละลายที่มีต่อพฤติกรรมการกัดกร่อนของเหล็กกล้า AISI 4140 ที่เคลือบผิวด้วยการเคลือบไอทางกายภาพ

1.4.4 ในเชิงอุตสาหกรรม ผลสำเร็จของงานวิจัยในโครงการนี้มีผลประโยชน์โดยตรงต่อภาคอุตสาหกรรม โดยเฉพาะในกิจการการชุบแข็งผิวของโลหะเพื่อใช้งานด้านต้านทานการกัดกร่อน คือ การได้มาซึ่งพฤติกรรมการกัดกร่อนของเหล็กกล้า AISI 4140 ที่เคลือบผิวด้วยการเคลือบไอทางกายภาพ และเป็นข้อมูลพื้นฐานประกอบการพิจารณาเลือกใช้กรรมวิธีการเพิ่มผิวแข็งที่เหมาะสมทั้งในแง่เศรษฐศาสตร์ และวิศวกรรม

1.4.5 นอกจากนี้ภาคอุตสาหกรรมสามารถใช้เป็นข้อมูลพื้นฐานอ้างอิง หากผู้ใช้ผลิตภัณฑ์ดังกล่าวต้องการทราบรายละเอียดเกี่ยวกับพฤติกรรมการกัดกร่อน ตลอดจนการประมาณการอายุการใช้งานของชิ้นส่วนวิศวกรรมที่ผ่านการเคลือบไอทางกายภาพ เมื่อต้องอยู่ในสภาวะการใช้งานที่มีสภาพสิ่งแวดล้อมที่เสี่ยงต่อการกัดกร่อน เป็นต้น

บทที่ 2

ปรีทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 กระบวนการเคลือบผิวแข็งด้วยไอทางกายภาพ

กระบวนการเคลือบชั้นผิวแข็งของสารประกอบเซรามิกบนผิวชิ้นงานเหล็ก เหล็กกล้า เครื่องมือ และ โลหะ เพื่อเพิ่มความต้านทานต่อการสึกหรอ ความต้านทานต่อการกัดกร่อน และยืดอายุการใช้งานเครื่องมือทางวิศวกรรมแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภท (A. Medina-Flores and et al., 2004) คือ

2.1.1 การเคลือบผิวแข็งด้วยไอเคมี (Chemical Vapor Deposition, CVD)

การเคลือบผิวแข็งด้วยไอเคมีเป็นกระบวนการเคลือบผิวชิ้นงานด้วยสารเคลือบที่อยู่ในสถานะก๊าซ โดยที่ก๊าซเหล่านี้จะทำปฏิกิริยากันจนได้สารผลิตภัณฑ์แล้วเคลือบอยู่บนวัสดุผิวชิ้นงาน (Substrate)

2.1.2 การเคลือบผิวแข็งด้วยไอทางกายภาพ (Physical Vapor Deposition, PVD)

การเคลือบผิวแข็งด้วยไอทางกายภาพเป็นกระบวนการสร้างผลิตระลอกของสารเคลือบให้อยู่ในรูปของไอระเหยแล้วไปเคลือบอยู่บนผิวชิ้นงาน (Substrate) ในระบบที่เป็นสุญญากาศ

ในงานวิจัยนี้กระบวนการหลักที่ใช้เตรียมผิวชิ้นงาน คือ การเคลือบผิวแข็งด้วยไอทางกายภาพ (PVD) ดังนั้นจะกล่าวรายละเอียดอย่างย่อเฉพาะกระบวนการเคลือบด้วยไอทางกายภาพเท่านั้น

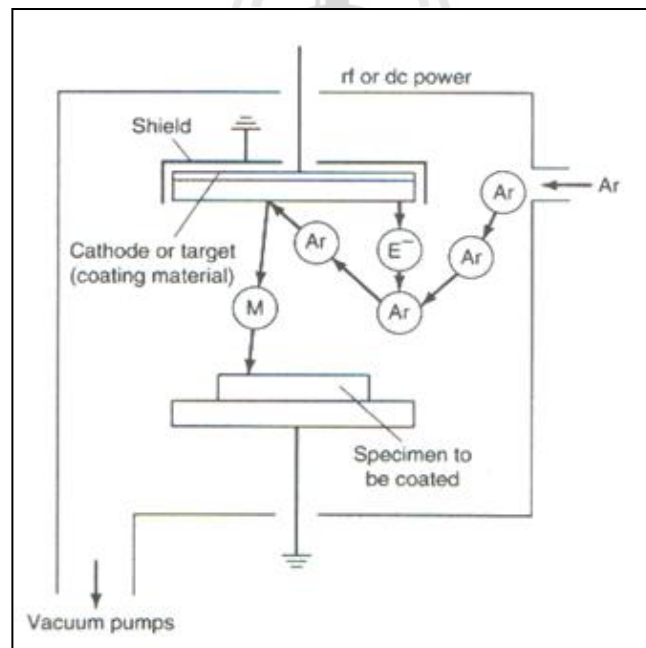
การเคลือบผิวแข็งด้วยไอทางกายภาพ เป็นกระบวนการที่กระทำในระบบสุญญากาศ และอะตอมที่จะเคลือบบนผิวชิ้นงานจะมีการเคลื่อนที่โดยปราศจากการชน (Collision) กัน ด้วยเหตุนี้ PVD จึงเป็น Line-of Sight Process ส่วนการเคลือบผิวแข็งด้วยไอเคมี หรือ CVD Process เป็นกระบวนการที่กระทำภายใต้ความดันบรรยากาศ (Atmospheric pressure) จึงสามารถควบคุมลักษณะชั้นเคลือบ และสามารถเคลือบชิ้นงานที่มีรูปร่างซับซ้อนได้ดีกว่า PVD Process

PVD Process สำหรับการเคลือบ Titanium nitride (Ti_xN) บน Substrate ซึ่งตัว Substrate ก่อนจะเคลือบได้ต้องให้ความร้อนจนมีอุณหภูมิประมาณ $500^{\circ}C$ ในขณะที่การเคลือบไทเทเนียมไนไตรด์ด้วย CVD Process จะต้องมีการให้ความร้อนแก่ชิ้นงาน หรือ Substrate ถึง $1000^{\circ}C$ ดังนั้นเหล็กกล้าเครื่องมือ (Tool steels) ที่ผ่านการเคลือบผิวแข็งด้วย PVD Process ไม่จำเป็นต้องผ่านกรรมวิธีการชุบแข็งด้วยความร้อน ส่วนเหล็กกล้าเครื่องมือที่ผ่านการเคลือบผิวแข็งด้วย CVD Process จำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องเพิ่มความแข็งให้กับโครงสร้างภายในของชิ้นงานเหล็กกล้า

ด้วยกรรมวิธีทางความร้อน อย่างไรก็ตามจากงานวิจัยพบว่าในเหล็กกล้าเครื่องมือสำหรับงานขึ้นรูปเย็นเกรด D2 ที่ผ่านการเคลือบผิวแข็งไทเทเนียมไนไตรด์ด้วย CVD Process (CVD TiN-Coated D2 tool steel) เมื่อนำไปให้ความร้อนอีกครั้ง (เป็นการให้ความร้อนจากการเพิ่มความแข็งด้วยกระบวนการทางความร้อน ภายหลังกระบวนการเคลือบผิวแข็ง) ยังคงรักษาชั้นเคลือบที่มีคุณภาพปราศจากรอยบกร่อง และค่าความเค้นเหลือค้างแบบกดบนผิวชั้นเคลือบ (Residual surface compressive stress) ไว้ได้ และมีค่าถึง -1000 MPa

อะตอมของชั้นเคลือบ (Coating atom) จะถูกผลิตขึ้นในระบบสุญญากาศ กล่าวคือ เมื่อก๊าซที่ต้องการใช้เป็นวัสดุเคลือบ เช่น ไนโตรเจน มีเทน หรือออกซิเจนถูกนำเข้าไปในหลอดสุญญากาศ อะตอมของโลหะก็จะทำปฏิกิริยากับอะตอมของก๊าซเพื่อฟอร์มไนไตรด์ คาร์ไบด์ หรือออกไซด์ ซึ่งแบ่งออกเป็น 3 แบบ คือ

1) Evaporating กระทำโดยการนำเอาวัสดุต้นกำเนิดของชั้นเคลือบ ไปให้ความร้อนในสภาวะที่เป็นสุญญากาศ (10^{-6} kPa or $7.5 \times 10^{-6} \text{ torr}$) ทำให้เกิดการระเหยของอะตอม หรือโมเลกุลภายในท่อระบบสุญญากาศแล้วเคลื่อนที่ไปเกาะบนผิวชิ้นงาน (Substrate) อย่างไรก็ตามกรรมวิธีที่ให้ประสิทธิภาพได้ดีกว่าคือ Sputtering หรือ Ion plating



รูปที่ 2.1 กลไกการทำ Sputtering (G. Robert., 1998)

2) Sputtering เป็น PVD Coating Process ที่อะตอมของวัสดุเคลือบถูกขับออกมาโดยอ้ายอะตอมที่มีพลังงานสูงดังแสดงในรูปที่ 2.1 โดยชั้นแรกภายในห้องเคลือบ (Chamber) จะถูกทำให้เป็นสุญญากาศ หลังจากนั้นจะปล่อยก๊าซอาร์กอน (Ar Gas) เข้าไป และวัสดุ

สำหรับเคลือบ (ในที่นี้ขอเรียกว่า Target ครอบประอบ) จะถูกทำให้เป็นขั้วลบ (Cathode) โดยการป้อนศักย์ไฟฟ้ากระแสตรง (DC Potential) ระหว่าง -500 ถึง -5000 โวลต์ ก็จะทำให้เกิด Low-Pressure Glow Discharge Plasma ณ บริเวณรอบ ๆ วัสดุสำหรับเคลือบ (Target Cathode) แล้วปล่อยประจุบวกของก๊าซอาร์กอน (Ar^+) ออกมา ซึ่ง Ar^+ จะถ่ายเทโมเมนตัมให้กับวัสดุสำหรับเคลือบ กระตุ้นให้วัสดุสำหรับเคลือบปลดปล่อยอะตอมออกมาแล้วอะตอมนั้นก็เคลื่อนที่ไปเกาะบนผิวชิ้นงาน (Substrate) และบริเวณภายในของห้องเคลือบ

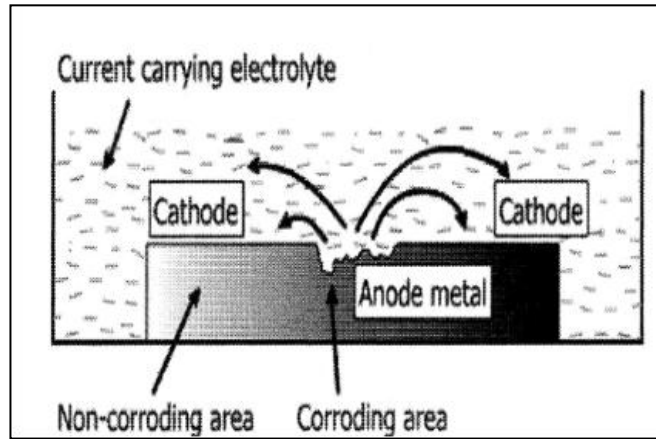
3) Ion Plating หมายถึง Plasma-Assisted PVD หรือ Evaporative-Source PVD Process ซึ่ง Plasma ที่เกิดขึ้นนี้จะอาศัยความร้อนในการกระตุ้นให้เกิดการระเหย การพุ่งเข้าชน (Bombardment) ของ Plasma ที่มีพลังงานสูงไปยังผิวชิ้นงาน (Substrate) ทำให้ได้ชั้นเคลือบที่มีความแน่น และการยึดเกาะ (Adhesion) ที่ดีเยี่ยม

2.2 กระบวนการการกัดกร่อน

การกัดกร่อน คือ การสูญเสียเนื้อโลหะโดยการเกิดปฏิกิริยาเคมีกับสิ่งแวดล้อม อาจเป็นปฏิกิริยาทางเคมี หรือปฏิกิริยาทางไฟฟ้าเคมี การกัดกร่อนเป็นปรากฏการณ์ทางธรรมชาติอย่างหนึ่ง กล่าวคือ สิ้นแร่ต่าง ๆ ที่มีอยู่บนพื้นโลกเป็นสภาพที่มีเสถียรภาพอยู่แล้ว เมื่อนำสินแร่เหล่านี้มาถลุงให้ได้เนื้อโลหะบริสุทธิ์ทำให้โลหะอยู่ในสภาวะไม่มีเสถียรภาพมากขึ้น โลหะที่ไม่มีเสถียรภาพจะพยายามกลับคืนสู่สภาพเดิม คือสินแร่ตามธรรมชาติที่มีเสถียรภาพสูงกว่า ซึ่งก็คือกระบวนการกัดกร่อน จึงต้องใช้ความพยายามในการที่จะรักษาสภาพของโลหะเหล่านี้ให้เสื่อมสภาพเพราะการกัดกร่อนน้อยที่สุดและมีอายุการใช้งานนาน

การกัดกร่อนของโลหะ (Corrosion of metal) สามารถเกิดได้เมื่อครบองค์ประกอบของเซลล์การกัดกร่อน (Corrosion cell) ดังแสดงในรูปที่ 2.2 คือ

- แอโนด (Anode)
- แคโทด (Cathode)
- อิเล็กโทรไลต์ (Electrolyte)
- ตัวกลางในการถ่ายโอนอิเล็กตรอน (Electron transfer) หรือให้กระแสไฟฟ้าไหลระหว่างขั้วแอโนด และขั้วแคโทด (Metallic path)



รูปที่ 2.2 องค์ประกอบของการกัดกร่อนในโลหะ (Z. AHMAD., 2006)

ในกระบวนการการกัดกร่อนที่กำลังดำเนินอยู่นั้นจะเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidation) ของโลหะ (M) เกิดการสูญเสียแรงยึดระหว่างอะตอมของโลหะนั้น แล้วอะตอมนั้นก็กลายเป็นไอออนหลุดเข้าไปในสิ่งแวดล้อมที่ทำให้เกิดการกัดกร่อนดังสมการ

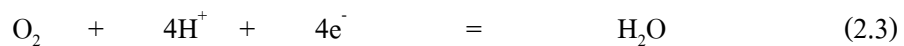


ปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidation) หรือปฏิกิริยาแอโนดิก (Anodic reaction) นี้ จะเกิดขึ้นที่ขั้วแอโนด (Anode) เพื่อให้เกิดสมดุลขึ้นภายในระบบ จะมีการเกิดปฏิกิริยารีดักชัน (Reduction reaction) หรือปฏิกิริยาแคโทดิก (Cathodic reaction) ขึ้นที่ขั้วแคโทด (Cathode) โดยทั่วไปปฏิกิริยารีดักชันแบ่งออกเป็น 4 แบบดังนี้

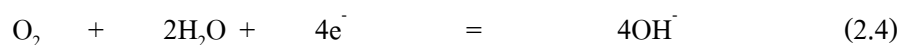
- 1) มีไฮโดรเจนเกิดขึ้น (ภายในน้ำที่มีฤทธิ์เป็นกรด)



- 2) เกิดรีดักชันของออกซิเจน (ภายในน้ำที่มีค่าพีเอชน้อยกว่า 5)



- 3) เกิดรีดักชันของออกซิเจน (ภายในน้ำที่มีค่าพีเอชมากกว่า 5)

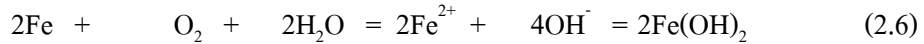


- 4) เกิดรีดักชันของไอออนของโลหะ



หลังจากการเกิดปฏิกิริยาของการกัดกร่อนเบื้องต้น ต่อไปก็คือการรวมตัวของไอออนในสารละลาย ทำให้เกิดผลิตภัณฑ์จากการกัดกร่อน ตัวอย่างเช่น ในกรณีเหล็กที่เกิดการกัดกร่อนใน

สารละลายที่มีฤทธิ์เป็นกลาง ปฏิกิริยาของการกัดกร่อนทั้งหมดจะเป็นไปตามสมการ (2.1) และ (2.4) รวมกัน ทำให้เกิดสารประกอบของเฟอร์รัสไฮดรอกไซด์ $\text{Fe}(\text{OH})_2$ ขึ้นที่ผิวของเนื้อเหล็กตามสมการ



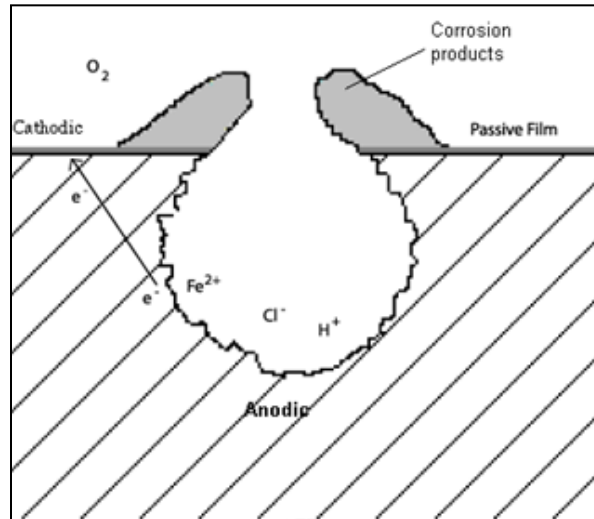
สารประกอบนี้ยังเกิดการออกซิเดชันได้อย่างรวดเร็วด้วยออกซิเจนที่มีอยู่ในระบบ ทำให้เกิด $\text{Fe}(\text{OH})_3$ ดังสมการ



กระบวนการต่อไปก็คือ การที่สารประกอบนี้จะสูญเสียน้ำกลายเป็นสารประกอบตัวใหม่ คือ FeOOH หรือ $\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ (สนิมเหล็กสีแดง) แต่ถ้าปริมาณออกซิเจนไม่เพียงพอปฏิกิริยาจะไม่ดำเนินไปจนได้ Fe_2O_3 แต่จะหยุดในรูปของ $\text{Fe}_3\text{O}_4 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ (สนิมเหล็กสีดำ)

2.3 การกัดกร่อนแบบรูเข็ม

การกัดกร่อนแบบสนิมขุมหรือการกัดกร่อนแบบรูเข็ม เป็นปัญหาที่เกิดขึ้นมาก โดยเฉพาะกับโลหะที่ได้พัฒนาให้มีฟิล์มป้องกันการกัดกร่อนแบบทั่วผิวหน้าได้แล้ว แต่เมื่อฟิล์มบางแตกแยกออกเฉพาะบางที่ ก็จะเกิดการกัดกร่อนเฉพาะ ที่กัดกร่อนลึกลงไปเรื่อยๆ ทำให้สังเกตเห็นได้ยากเนื่องจากผลิตภัณฑ์การกัดกร่อนได้ปกคลุมเอาไว้ การกัดกร่อนแบบนี้ทำให้ทำนายได้ยาก โดยทั่วไปสนิมขุมมักจะเกิดทิศทางเดียวกันกับแรงโน้มถ่วงของโลก การเกิดการกัดกร่อนในแนวอื่นก็เกิดได้แต่น้อย Pitting เป็นลักษณะที่ทำให้เป็นรูหรือหลุมในเนื้อโลหะ รูเหล่านี้อาจมีขนาดเล็กหรือใหญ่ก็ได้ แต่โดยส่วนมากจะมีขนาดเล็ก บางครั้งจะเห็นรูกระจายอยู่ห่างกัน หรืออาจอยู่ใกล้กัน จนดูคล้ายผิวโลหะที่ขรุขระ ดังแสดงในรูป 2.3 การกัดกร่อนแบบ Pitting เป็นการกัดกร่อนที่ก่อให้เกิดความเสียหายและรุนแรงที่สุด ซึ่งทำให้อุปกรณ์ เครื่องมือ หรือชิ้นส่วนต่างๆ เกิดความเสียหายเนื่องจากการเจาะลึกด้วยเปอร์เซ็นต์การสูญเสียน้ำหนักของโครงสร้างทั้งหมดที่น้อย ลักษณะมักยากที่จะตรวจสอบพบยากเพราะมีขนาดเล็ก นอกจากนั้นยังยากที่จะตรวจวัดเชิงปริมาณและ ตรวจวัดการขยายตัวของสภาพการกัดกร่อนของ Pitting ได้ เพราะความลึกและจำนวนของรูที่เปลี่ยนแปลงภายใต้สภาวะเฉพาะสภาวะใดสภาวะหนึ่ง การเกิด Pitting ยังยากที่จะทำนายได้จากการทดสอบในห้องทดลองอีกด้วย บางครั้งอาจใช้เวลานานจึงปรากฏสภาพของการกัดกร่อน การเกิด Pitting เป็นการเกิดเฉพาะที่และ เป็นรูปแบบการกัดกร่อนที่รุนแรง ความเสียหายที่เกิดขึ้นมักจะเกิดอย่างฉับพลัน



รูปที่ 2.3 การกัดกร่อนแบบรูเข็ม (Pitting corrosion) (Z. AHMAD., 2006)

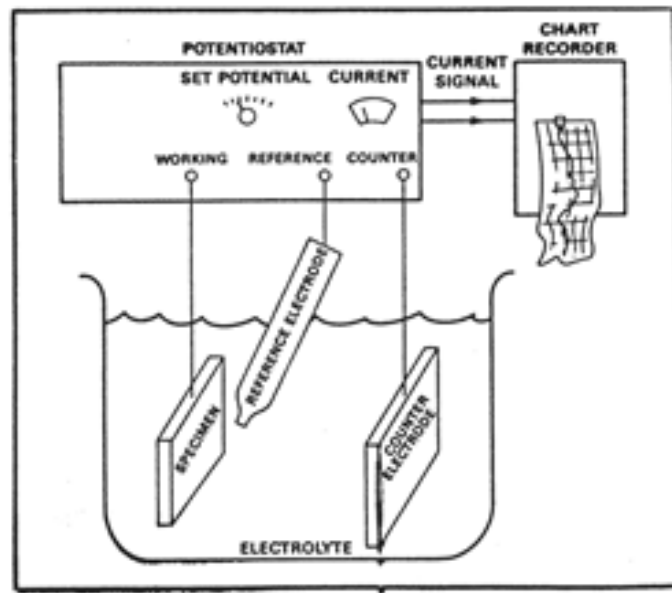
2.4 การวัดศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อน ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อนและอัตราการกัดกร่อน

ศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อน (Corrosion potential, E_{corr}) คือ ศักย์ไฟฟ้าที่อัตราส่วนของปฏิกิริยาแอโนดิกทั้งหมดเท่ากับอัตราส่วนของปฏิกิริยาแคโทดิกโดยความหนาแน่นกระแสที่ศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อน เรียกว่า ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อน (Corrosion current density, I_{corr}) ซึ่งถือเป็นตัวบ่งชี้อัตราการกัดกร่อน การวัดศักย์ไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าขณะเกิดการกัดกร่อน (ภาณุพงษ์ กอปรศรีสวัสดิ์, 2544) สามารถทำได้โดยใช้เครื่องโพเทนชิโอสแตต (Potentiostat) ซึ่งมีลักษณะการวัดดังแสดงในรูปที่ 2.4

อิเล็กโทรดที่ใช้มี 3 ชนิดคือ

- อิเล็กโทรดอ้างอิง (Reference electrode) คือ Ag/AgCl (3M KCl)
- อิเล็กโทรดกระแส (Counter electrode) คือ Pt หรือ คาร์บอน
- อิเล็กโทรดตัวอย่าง (Specimen) คือ ชิ้นงานตัวอย่างที่ต้องการทดสอบ

ค่าศักย์ไฟฟ้าจะวัดจากการวัดเทียบค่าศักย์ไฟฟ้าระหว่างอิเล็กโทรดอ้างอิงกับอิเล็กโทรดตัวอย่าง ค่ากระแสไฟฟ้าจะวัดจากการวัดเทียบระหว่างอิเล็กโทรดกระแสกับอิเล็กโทรดตัวอย่าง จากค่าศักย์ไฟฟ้า และค่ากระแสไฟฟ้าที่วัดได้ เมื่อนำมาสร้างกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าทั้งสองจะได้กราฟที่เรียกว่า กราฟเส้นโพลาไรเซชัน (Polarization curve)



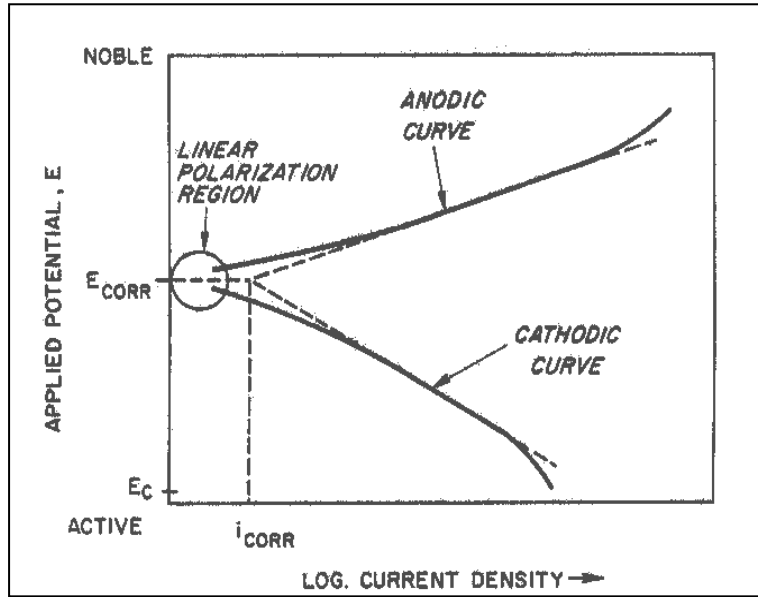
รูปที่ 2.4 การวัดกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อน และศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนโดยเครื่องโพเทนชิโอสแตท (ภาณุพงศ์ กอประศรีสวัสดิ์, 2544)

จากรูปที่ 2.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างศักย์ไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าของปฏิกิริยาแอโนดิกและปฏิกิริยาแคโทดิกบนพื้นผิวของโลหะที่กำลังเกิดการกัดกร่อน เมื่อมีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านขั้วไฟฟ้าที่ผิว ความต่างศักย์ของขั้วทั้งสองจะเกิดการเปลี่ยนแปลงดังในเส้นกราฟแอโนดิก (Anodic curve) และเส้นกราฟแคโทดิก (Cathodic curve) ตามลำดับ โดยที่ความต่างศักย์ของแอโนดจะเปลี่ยนค่าไปในทางบวก ส่วนความต่างศักย์ของแคโทดจะเปลี่ยนค่าไปในทางลบ ในลักษณะเช่นนี้ แสดงถึงการเกิดโพลาริเซชันของขั้วทั้งสอง (M. G. Fontana., 1987) สามารถหาค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนและกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อนได้จากจุดตัดของเส้นความชันของเส้นกราฟแอโนดและเส้นกราฟแคโทด

เมื่อทราบค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนและกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อนแล้วสามารถหาอัตราการกัดกร่อนได้จาก

$$R_{\text{mpy}} = 0.13 i_{\text{corr}} e / \rho \quad (2.8)$$

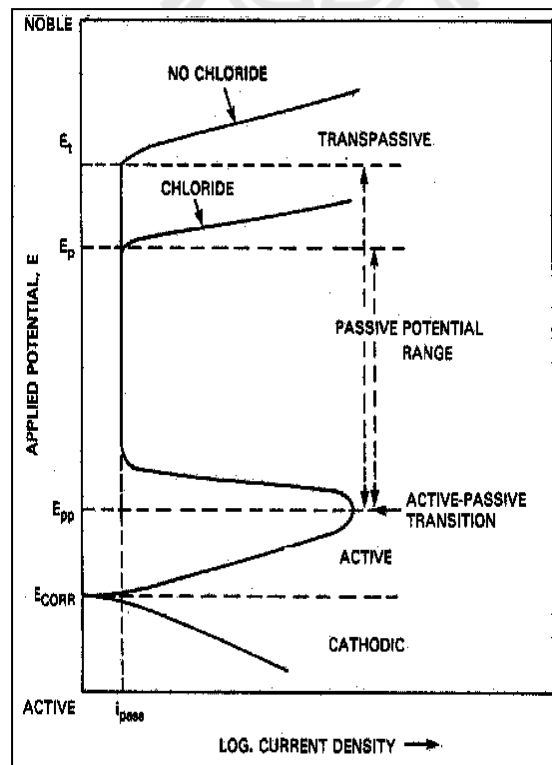
| | | | |
|-------|-------------------|---|--|
| เมื่อ | R_{mpy} | = | อัตราการเกิดการกัดกร่อน (มิลต่อปี) |
| | i_{corr} | = | ความหนาแน่นกระแสการกัดกร่อน (ไมโครแอมป์ต่อตารางเซนติเมตร) |
| | e | = | น้ำหนักกรัมสมมูลของโลหะ |
| | ρ | = | ความหนาแน่นของโลหะ (กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร) |



รูป 2.5 ศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนและความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อน (A. J. Sedriks, 1996)

2.5 เส้นโพลาริเซชัน

ตัวอย่างการศึกษากลไกพาสซีวิตี (Passivity) ของเหล็กกล้าไร้สนิม (ประทีป วงศ์บัณฑิต, 2543) โดยศึกษาจากกราฟเส้นโพลาริเซชันเมื่อทำการทดลองต่อจากรูปที่ 2.5 โดยเพิ่มศักย์ไฟฟ้าไปทางโนเบิล (Noble) จาก E_{CORR} และบันทึกค่ากระแสที่ได้ จะได้ดังรูปที่ 2.6



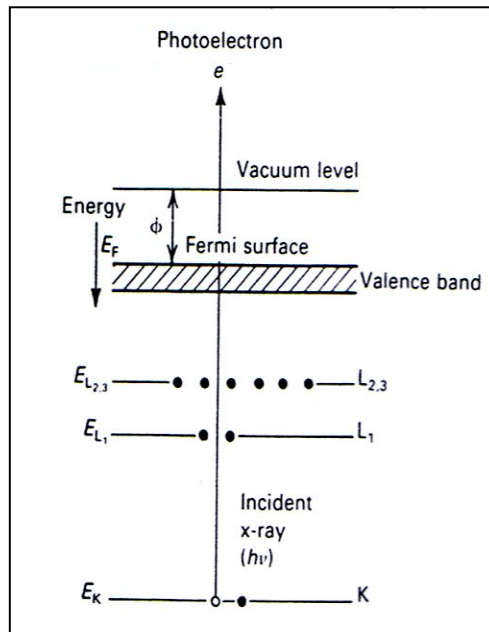
รูปที่ 2.6 ส่วนต่าง ๆ ที่สำคัญของเส้นโพลาริเซชัน (ประทีป วงศ์บัณฑิต, 2543)

จากกราฟรูปที่ 2.6 ทราบว่าจุดตัดของเส้นกราฟแคโทดิก และเส้นกราฟแอนอดิก คือค่าศักย์ไฟฟ้ากัดกร่อน หรือ E_{corr} เมื่อเพิ่มศักย์ไฟฟ้าต่อถึงจุดหนึ่ง กระแสกลับลดลงเนื่องจากเกิดชั้นฟิล์มพาสซีฟบนผิวโลหะ เรียกค่าศักย์ไฟฟ้าที่วัดว่าเป็นจุดการเปลี่ยนแปลงแอคทีฟ-พาสซีฟ (Active-passive transition) และค่าศักย์ไฟฟ้าที่จุดนี้เรียกว่า ศักย์ไฟฟ้าพาสซีวชันปฐม (Primarily passive potentials) ใช้สัญลักษณ์ E_{pp} เมื่อป้อนศักย์ไฟฟ้าต่อไปกระแสจะเริ่มลดลงจนคงที่ที่ค่าหนึ่งแม้จะเพิ่มศักย์ไฟฟ้าให้แก่เซลล์ต่อไปความหนาแน่นของกระแสก็ยังคงไม่เปลี่ยนแปลง ช่วงกราฟที่กระแสคงที่นี้เรียกว่าช่วงพาสซีฟ (Passive zone) ซึ่งเป็นลักษณะเฉพาะตัวที่แสดงถึงความทนทานของฟิล์มบนผิวโลหะ ถ้ายังเพิ่มศักย์ไฟฟ้าต่อไปอีกจนถึงค่าหนึ่งที่ชั้นฟิล์มพาสซีฟแตกทำให้กระแสเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเรียกช่วงที่เลยจุดนี้ว่า ช่วงทรานพาสซีฟ (Transpassive zone) และเรียกศักย์ไฟฟ้าที่จุดนี้ว่า ศักย์ไฟฟ้าทรานพาสซีฟ ใช้สัญลักษณ์ E_t ศักย์ไฟฟ้าที่จุดนี้เป็นค่าที่โลหะเริ่มกัดกร่อนเฉพาะที่ คือการกัดกร่อนแบบรูเข็มหรือหลุม (Pitting corrosion) ซึ่งหากป้อนศักย์ไฟฟ้าเกินค่า E_t จะเกิดการแตกของชั้นฟิล์มพาสซีฟจุดใหม่เพิ่มขึ้น และชั้นฟิล์มจุดที่แตกเดิมจะมีการขยายตัวของรูเข็มหรือหลุมใหญ่ขึ้น เมื่อเปรียบเทียบเส้นโพลาริเซชันที่ได้จากการทดลองของโลหะตัวอย่างในสารละลายที่ไม่มีคลอไรด์ และสารละลายที่มีคลอไรด์พบว่าในสารละลายที่มีคลอไรด์จะให้ค่า E_t หรืออีกนัยหนึ่งเรียกว่า ศักย์ไฟฟ้ากัดกร่อนแบบรูเข็มหรือหลุม (Pitting potential) ใช้สัญลักษณ์ E_p ต่ำกว่า และมีความกว้างช่วงพาสซีฟแคบกว่าเส้นโพลาริเซชันที่ได้จากการทดลองในสารละลายที่ไม่มีคลอไรด์ ตัวแปรที่มีผลต่อเส้นโพลาริเซชันได้แก่ ปริมาณออกซิเจนในสารละลาย อัตราการสแกน อุณหภูมิที่ใช้ในการทดลอง ความเข้มข้นของสารละลายและอัตราการกวน กล่าวโดยทางอ้อมตัวแปรต่างๆ เหล่านี้มีผลต่อพฤติกรรมการกัดกร่อนของชิ้นงานตัวอย่าง

2.6 การวิเคราะห์ขั้นเคลื่อน

สำหรับการวิเคราะห์ขั้นเคลื่อนในการวิจัยในครั้งนี้จะใช้ X-ray photoelectron spectroscopy (XPS), X-ray photoemission electron microscopy (X-PEEM) และ Scanning Electron Microscope (SEM) ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

2.6.1 X-ray photoelectron spectroscopy (XPS) และ X-ray photoemission electron microscopy (X-PEEM)



รูปที่ 2.7 ระดับชั้นพลังงานของ XPS (A. Einstein., 1905)

XPS และ X-PEEM ที่ใช้แสงซินโครตรอนจะอยู่ในช่วงพลังงาน 50 -1000 eV จากระบบลำแสง BL3 ของห้องปฏิบัติการแสงสยาม โดยแสงในช่วงพลังงานดังกล่าวมีประโยชน์ในการศึกษาสภาวะทางเคมีที่ผิวหน้าสารทำให้สามารถระบุปฏิกิริยาตัวกลาง (Intermediate reaction) ที่เกิดขึ้นบริเวณพื้นผิวและรอยต่อระหว่างพื้นผิวสารหรือการสึกหรือได้ การตรวจสอบดังกล่าวสามารถทำได้ เนื่องจากมีการเพิ่มขีดความสามารถในการแยกแยะสเปกตรัม (Spectral resolution) และความไวในการวิเคราะห์พื้นผิววัสดุจากการใช้แสงซินโครตรอนที่สามารถปรับเปลี่ยนค่าพลังงานได้ ดังรูปที่ 2.7 นอกเหนือข้อมูลเชิงเคมีที่ได้ เทคนิค X-PEEM ยังสามารถทำการถ่ายภาพบริเวณที่ทำการวัด และยังสามารถเลือกบริเวณที่จะศึกษาโดยมีความสามารถในการแยกแยะในเรือน 100 นาโนเมตร

2.6.2 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (SEM) นับได้ว่าเป็นหัวใจของการตรวจสอบผิวการสึกหรือ เนื่องจาก SEM มีกำลังขยายตั้งแต่ 20 – 30,000 เท่า และสามารถวิเคราะห์ชั้นเคลือบในแนวลึกได้กว่า 300 เท่าของกล้องจุลทรรศน์ปกติ ทำให้เป็นผลดีต่อการวิเคราะห์ผิวในรายละเอียดได้ ขึ้นทดสอบสำหรับการวิเคราะห์ด้วย SEM จะมีขนาดเล็ก เช่น บางกว่า 20 มิลลิเมตร (≤ 0.8 นิ้ว) และความสูงไม่เกิน 80 มิลลิเมตร (≤ 3.5 นิ้ว) และต้องทำความสะอาดด้วยสารละลายอย่างดี ทั้งนี้เนื่องจากขึ้นทดสอบต้องอยู่ในสภาวะสุญญากาศที่ความดันต่ำกว่า 1.3 มิลลิพาสกาล (mPa) (10^{-5} บาร์) และหากขึ้นทดสอบไม่นำไฟฟ้าก็ต้องเคลือบด้วยคาร์บอนหรือทองคำเพื่อให้อิเล็กตรอนไป

สะสมตัวบนผิวชิ้นงานได้ โดยทั่วไป SEM มักต่อพ่วงอยู่กับการวิเคราะห์ด้วยรังสีเอกซ์ ทั้งนี้เพื่อช่วยวิเคราะห์ชนิดของธาตุที่เป็นส่วนผสมของเนื้อวัสดุหรือพื้นผิวบริเวณที่ถูกกัดกร่อน

2.7 การทบทวนวรรณกรรม (Reviewed literature) และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

จากวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องกับงานโครงการวิจัยนี้ (G. Bertrand and et al., 2000) พบว่าเหล็กกล้าถูกเคลือบผิวด้วยโครเมียมในทรายด์โดยวิธีการกระบวนการเคลือบผิวด้วยไอทางกายภาพ (Physical Vapor Deposition, PVD) นั้นสามารถเพิ่มคุณสมบัติการต้านทานการกัดกร่อนให้กับเหล็กกล้าให้ดียิ่งขึ้น โดยสรุปว่าโครเมียมในทรายด์ฟิล์มเป็นฟิล์มที่มีเสถียรภาพสูงและมีพฤติกรรมเมื่อต่อสภาวะแวดล้อมที่เป็นสภาวะแวดล้อมการกัดกร่อนเป็นอย่างดี จึงสามารถป้องกันชิ้นงานเหล็กกล้าจากการกัดกร่อนของสารละลายได้ แต่ก็ไม่สามารถป้องกันการกัดกร่อนจากสารละลายได้อย่างสมบูรณ์ เนื่องจากการต้านทานการกัดกร่อนของชั้นเคลือบจะถูกจำกัดด้วยข้อบกพร่อง (Defect) และรูพรุน (Porosity) ภายในโครงสร้างของชั้นเคลือบ นอกจากนี้ (D.K. Merl and et al., 2004) ได้ศึกษาผลของการเคลือบผิวด้วยโครเมียมในทรายด์บนเหล็กกล้าละมุน (Mild steel) และเหล็กกล้าไร้สนิม (Stainless steel) โดยกระบวนการเคลือบผิวไอทางกายภาพต่อคุณสมบัติการต้านทานการกัดกร่อน จากการทดสอบการกัดกร่อนด้วยวิธีทางไฟฟ้าเคมีในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้น 0.5 โมลาร์ แสดงผลการทดลองเป็นเส้นโค้งโพลาไรเซชัน (Polarization curves) ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า (Current density) และศักย์ไฟฟ้า (Potential) เปรียบเทียบระหว่างชิ้นงานที่ยังไม่ผ่านการเคลือบผิวและชิ้นงานที่ผ่านการเคลือบผิวด้วยโครเมียมในทรายด์ ภายหลังจากการเคลือบผิวเหล็กกล้าทั้งสองชนิดด้วยโครเมียมในทรายด์ฟิล์มนั้นส่งผลให้สมบัติการต้านทานการกัดกร่อนดีขึ้น เนื่องจากค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนมีค่าเพิ่มสูงขึ้นและความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อนมีค่าลดลงภายหลังจากการเคลือบผิวด้วยโครเมียมในทรายด์

นอกจากการศึกษากิจกรรมการกัดกร่อนของชั้นเคลือบโครเมียมในทรายด์แล้ว ยังได้มีการศึกษาวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องกับพฤติกรรมการกัดกร่อนของชั้นเคลือบไทเทเนียมในทรายด์ โดยในรายงานของ (J. Yang and et al., 2000) ได้ศึกษาพฤติกรรมการกัดกร่อนของไทเทเนียมในทรายด์ฟิล์มที่ผลิตจากกระบวนการเคลือบผิวแบบไอทางกายภาพ โดยการเคลือบไทเทเนียมในทรายด์ฟิล์มบนพื้นผิวของเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด AISI 304 โดยทดสอบการกัดกร่อนในสารละลาย $1\text{ N H}_2\text{SO}_4 + 0.05\text{ M KSCN}$ ด้วยวิธี Potentiodynamic polarization และวัดการยึดเกาะของชั้นฟิล์มด้วยวิธี Periodic cracking จากผลการศึกษาพบว่าภายหลังจากการเคลือบผิวเหล็กกล้าไร้สนิมด้วยไทเทเนียมในทรายด์ฟิล์ม ทำให้มีการต้านทานการกัดกร่อนที่ดีกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับเหล็กกล้าไร้สนิมที่ยังไม่ผ่านการเคลือบผิว นอกจากนี้ยังพบว่าพฤติกรรมการกัดกร่อนของไทเทเนียมในทรายด์ฟิล์มจะขึ้นอยู่กับลักษณะโครงสร้างของชั้นฟิล์มและการยึดเกาะของชั้นฟิล์ม โดยกล่าวไว้ว่าโครงสร้างของชั้น

ฟิล์มที่มีปริมาณข้อบกพร่อง (Defect) มากและการยึดเกาะระหว่างชั้นเคลือบและชิ้นงานที่ไม่ดีจะส่งผลให้ความสามารถในการต้านทานการกัดกร่อนลดลง และจากผลการวิจัยของ (E. Lunarska and et al., 1996) พบว่าชั้นเคลือบไทเทเนียมไนไตรด์ที่เคลือบบนผิวของเหล็กกล้าเครื่องมือความเร็วสูงสามารถปรับปรุงการต้านทานการกัดกร่อนของเหล็กกล้าเครื่องมือความเร็วสูงให้ดีขึ้น แต่อย่างไรก็ตามก็ผู้วิจัยได้เสนอว่าประสิทธิภาพในการต้านทานการกัดกร่อนของไทเทเนียมไนไตรด์ฟิล์มนั้นจะขึ้นอยู่กับคุณภาพของชั้นเคลือบ เช่น รูพรุนที่เกิดขึ้นในชั้นเคลือบ เป็นต้น ปัจจัยที่มีผลต่อพฤติกรรมกัดกร่อนของวัสดุและชั้นเคลือบ นอกจากชนิดของชั้นเคลือบแล้วยังขึ้นกับตัวแปรที่สำคัญอีกสองตัวแปรคือ ค่าความหยาบผิวของวัสดุก่อนการเคลือบผิวและค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ของสารละลายที่ใช้ในการทดสอบอีกด้วย

(H.A Jehn., 2000) ได้ศึกษาผลของตัวแปรที่มีผลต่อพฤติกรรมกัดกร่อน ได้แก่ ความหยาบผิวของชิ้นงานก่อนการเคลือบ ซึ่งตัวแปรดังกล่าวจะมีผลต่อคุณสมบัติทางด้านการกัดกร่อนของชั้นเคลือบที่ผลิตจากกระบวนการเคลือบผิวไอทางกายภาพ จากการศึกษาพบว่าความหยาบผิวของชิ้นงานก่อนการเคลือบที่ละเอียดกว่าจะส่งผลทำให้ชิ้นงานมีการต้านทานการกัดกร่อนที่ดีกว่า เนื่องจากความหยาบผิวชิ้นงานที่ละเอียดกว่าจะทำให้ชั้นเคลือบมีความสามารถในการยึดเกาะกับชิ้นงานที่ดีกว่า ซึ่งสอดคล้องกับผลของ (C. Liu et al., 1995) ที่ได้ศึกษาผลของความหยาบผิวของเหล็กกล้าก่อนการเคลือบผิวด้วยโครเมียมไนไตรด์ที่ผลิตด้วยกระบวนการไอทางกายภาพต่อพฤติกรรมการกัดกร่อน ก่อนการเคลือบผิวได้ทำการเตรียมผิวเหล็กกล้าให้มีความหยาบแตกต่างกัน ได้แก่ ขัดด้วยกระดาษทรายเบอร์ 240 ขัดด้วยผงเพชรขนาด 45 ไมครอนและขัดด้วยผงเพชรขนาด 6 ไมครอน หลังจากนั้นทำการทดสอบการกัดกร่อนในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้นร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก ด้วยการวัดความต้านทานเชิงซ้อน (Impedance) จากการศึกษาพบว่าเมื่อความหยาบผิวละเอียดมากขึ้นจะส่งผลให้การต้านทานการกัดกร่อนดีขึ้น โดยมีข้อสันนิษฐานว่าชิ้นงานที่มีความหยาบผิวละเอียดขึ้นอาจส่งผลให้พื้นผิววัสดุมีปริมาณข้อบกพร่อง (Defects) ที่น้อยลงส่งผลให้ได้ชั้นเคลือบที่เรียบและมีการยึดเกาะที่ดีกว่ากับวัสดุ ทำให้ได้ชั้นเคลือบที่มีความหนาแน่นและสม่ำเสมอสามารถป้องกันการกัดกร่อนได้ดีขึ้น

จากรายงานของ (B. Zaid and et al., 2008) ได้ศึกษาผลของค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ของสารละลายและความเข้มข้นของคลอไรด์ไอออน (Cl⁻) ต่อพฤติกรรมการกัดกร่อนของโลหะผสมแมกนีเซียมเกรด AA6061 ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้นร้อยละ 3.5 โดยน้ำหนัก จากการศึกษาด้วยวิธีทางไฟฟ้าเคมีและการจุ่มแช่พบว่าพฤติกรรมการกัดกร่อนของโลหะผสมแมกนีเซียมเกรด AA6061 ขึ้นกับค่า pH ของสารละลาย และความเข้มข้นของคลอไรด์ไอออน (Cl⁻) ในสารละลาย

(H. Altun and S.i Sen, 2004) ได้ศึกษาอิทธิพลของความเข้มข้นของคลอไรด์ไอออน และค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ต่อพฤติกรรมการกัดกร่อนของโลหะผสมแมกนีเซียมเกรด AZ63 ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ โดยทำการสอบการกัดกร่อนของโลหะผสมแมกนีเซียมเกรด AZ63 ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ที่มีความเข้มข้นแตกต่างกันได้แก่ 0.01, 0.2, 0.6, 1 และ 2 โมลาร์ และค่า pH ที่แตกต่างกันได้แก่ 2, 3, 8, 11 และ 11.5 จากผลการศึกษพบว่าเมื่อความเข้มข้นของสารละลายเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ค่าอัตราการกัดกร่อนเพิ่มสูงขึ้น เนื่องจากมีปริมาณความเข้มข้นของคลอไรด์ไอออนเพิ่มขึ้น และจากผลการศึกษาผลของค่า pH ต่อพฤติกรรมการกัดกร่อน จะพบว่าเมื่อค่า pH ของสารละลายโซเดียมคลอไรด์ลดลงจะทำให้ค่าอัตราการกัดกร่อนเพิ่มสูงขึ้น โดยที่ค่า pH 2 จะแสดงค่าอัตราการกัดกร่อนสูงที่สุด ส่วนที่ค่า pH 11.5 จะแสดงค่าอัตราการกัดกร่อนต่ำที่สุด โดยมีข้อสันนิษฐานว่า สารละลายที่มีค่า pH ประมาณ 11 ตามแผนภาพ Pourbaix นั้น โลหะแมกนีเซียมจะทำปฏิกิริยากับไฮดรอกไซด์ (OH) เกิดเป็นแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ (Mg(OH)₂) ซึ่งช่วยในการป้องกันการกัดกร่อนได้ดีกว่าที่ค่า pH อื่นๆ (Y. Hamlaoui and et al., 2010) ได้ศึกษาผลของความเข้มข้นและค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ของสารละลายที่มีต่อพฤติกรรมการต้านทานการกัดกร่อนของชั้นเคลือบสังกะสี (Zinc coating) ซึ่งได้ทำการชุบเคลือบผิวชิ้นงานด้วยสังกะสีโดยวิธีการชุบเคลือบผิวด้วยไฟฟ้า ภายหลังจากการชุบเคลือบผิวทำการทดสอบการต้านทานการกัดกร่อนด้วยเทคนิคไฟฟ้าเคมีทั้งแบบการวัดโพลาไรเซชัน (Polarization) และการวัดความต้านทานเชิงซ้อน (Impedance) พบว่าค่า pH ของสารละลายที่เพิ่มมากขึ้นจะส่งผลให้ชิ้นงานที่ถูกเคลือบผิวด้วยสังกะสีมีความสามารถในการต้านทานการกัดกร่อนที่ดีขึ้น

จากผลที่รายงานในวรรณกรรมดังกล่าวข้างต้น พบว่าการวิจัย และศึกษาเกี่ยวกับพฤติกรรมการต้านทานการกัดกร่อนในเหล็กที่ผ่านการเคลือบด้วยไอทากายภาพ หรือการเคลือบด้วยไอเคมี เลือกทำที่ตัวแปรใดตัวแปรหนึ่งเท่านั้น เช่น ที่เวลาใดเวลาหนึ่ง หรือที่สารประกอบชนิดเดียว (เช่น ไทเทเนียมไนไตรด์) ทำให้ไม่เห็นภาพรวมของผลของอุณหภูมิ เวลา และชนิดของสารประกอบที่เคลือบบนผิววัสดุพื้นที่มีผลต่อพฤติกรรมการกัดกร่อนของเหล็กที่ผ่านการเคลือบผิวด้วยวิธีดังกล่าวนอกจากนี้ยังไม่มีการศึกษาใดที่ทำการเปรียบเทียบสมบัติความต้านทานการกัดกร่อนของเหล็กกล้าคาร์บอน AISI 4140 ที่ผ่านกรรมวิธีการเคลือบผิวแข็งด้วยไอทากายภาพ โดยมีชั้นเคลือบหลายชนิด เช่น ไทเทเนียมไนไตรด์ และโครเมียมไนไตรด์มาก่อน นอกจากนี้พฤติกรรมการกัดกร่อนของวัสดุและชั้นเคลือบผิวยังขึ้นอยู่กับตัวแปรที่สำคัญได้แก่ ความหยาบผิวของวัสดุก่อนการเคลือบผิวและสถานะแวดล้อมการใช้งาน ดังนั้นการศึกษาพฤติกรรมการกัดกร่อนของเหล็กดังกล่าวจึงมีความสำคัญอย่างยิ่ง เพื่อเป็นพื้นฐานต่อการวิจัย และพัฒนาผลิตภัณฑ์ต่อไปในอนาคต ซึ่งการศึกษาดังกล่าวมีวิธีดำเนินงานวิจัย ตลอดจนผลการทดลองและการวิเคราะห์ผลการทดลองดังแสดงในบทต่อไป

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

3.1 วัสดุและสารเคมีที่ใช้ในการดำเนินการวิจัย

3.1.1 ชิ้นงานที่ใช้ในการดำเนินการวิจัย

โลหะที่ถูกเคลือบหรือวัสดุพื้น (Substrate) เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติผิว คือ เหล็กกล้า AISI 4140 ก่อนทำการทดลองนำชิ้นงานเหล็กกล้า AISI 4140 ไปทำการตรวจสอบ ส่วนผสมทางเคมีโดยเครื่องสเปกโตรมิเตอร์ จากการตรวจสอบได้ผลดังแสดงในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 ส่วนผสมทางเคมี (เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก) ของเหล็กกล้า AISI 4140

| ชิ้นงาน | เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก (%Wt) | | | | | | |
|-----------|-----------------------------|-------|-------|-------|-------|--------|----------|
| | C | Si | Mn | Cr | Mo | V | Fe |
| AISI 4140 | 0.470 | 0.260 | 0.780 | 0.810 | 0.190 | 0.0027 | Balanced |

3.1.2 สารเคมีที่ใช้ในการดำเนินการวิจัย

- 1) โซเดียมคลอไรด์ (NaCl)
- 2) กรดไฮโดรคลอริก (HCl)
- 3) โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH)
- 4) น้ำปราศจากไอออน (Deionized water)
- 5) ก๊าซอาร์กอน ไนโตรเจน และออกซิเจน

3.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการดำเนินการวิจัย

เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย สามารถแบ่งออกเป็นกลุ่มตามลักษณะการใช้งานในแต่ละขั้นตอนการทดลอง ดังนี้

3.2.1 อุปกรณ์สำหรับเตรียมตัวอย่างก่อนการเคลือบผิว

1) เตาอบชิ้นงาน รุ่น CARBOLITE TYPE CWF 12/13 ใช้เป็นอุปกรณ์ในกระบวนการอบชุบทางความร้อนให้กับชิ้นงานก่อนเข้าสู่กระบวนการเคลือบผิวด้วยโครเมียมไนไตรด์และไทเทเนียมไนไตรด์ ดังแสดงในรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 เตอบชิ้นงาน

2) เครื่องขัดผิวชิ้นงานแบบจานหมุนยี่ห้อมETKON FORCIPOL 2V GRINDER POLISHER ใช้เป็นอุปกรณ์ในการขัดหยาบและขัดละเอียดผิวชิ้นงานก่อนเข้าสู่กระบวนการเคลือบผิวด้วยโครเมียมไนไตรต์และไทเทเนียมไนไตรต์ ดังแสดงในรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 เครื่องขัดผิวชิ้นงานแบบจานหมุนยี่ห้อม BUEHLER รุ่น ECOMET 6

3) เครื่องวัดความหยาบผิวแบบใช้แสงรุ่น WYKO NT1100 ยี่ห้อม VEEGO

INSTRUMENT INC. ใช้วัดความหยาบผิวของชิ้นงานก่อนและหลังการเคลือบผิวด้วยฟิล์มบาง โครเมียมไนไตรด์และไทเทเนียมไนไตรด์ ดังแสดงในรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 เครื่องวัดความหยาบผิวแบบใช้แสง

4) กระจกทรายเบอร์ 180 320 400 600 800 1000 และ 1200 และผง อะลูมิน่าใช้ในการขัดหยาบและขัดละเอียดผิวชิ้นงาน

3.2.2 อุปกรณ์สำหรับกระบวนการเคลือบผิว

1) เครื่องเคลือบระบบสุญญากาศ เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการผลิตชั้นเคลือบผิว ด้วยกระบวนการเคลือบด้วยไอทางกายภาพ ซึ่งติดตั้ง ณ ห้องปฏิบัติการวิจัยเทคโนโลยีสุญญากาศ และฟิล์มบาง ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา เครื่องเคลือบสุญญากาศ ดังแสดง ในรูปที่ 3.4



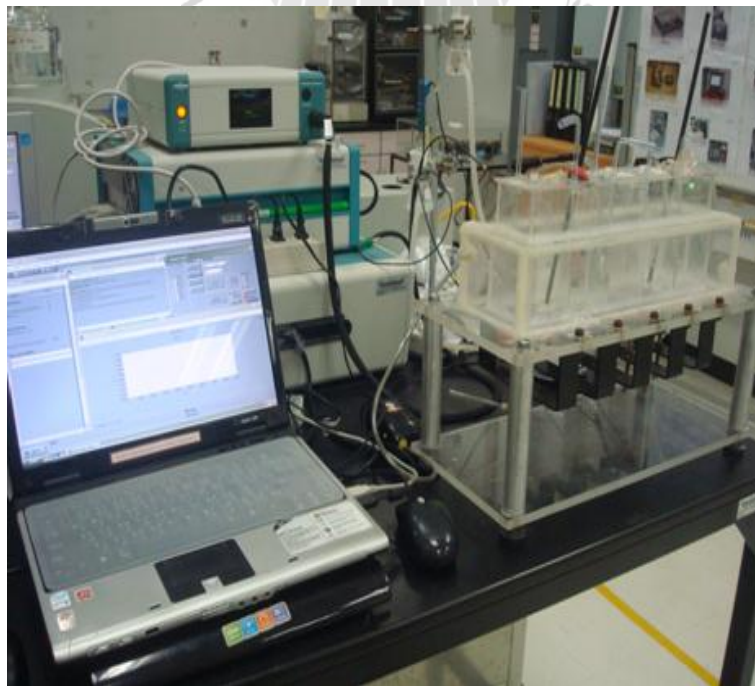
ก)

ข)

รูปที่ 3.4 เครื่องเคลือบสุญญากาศ ก) ตัวเครื่องเคลือบสุญญากาศ ข) ห้องเคลือบสุญญากาศ

3.2.3 อุปกรณ์สำหรับทดสอบการกัดกร่อน

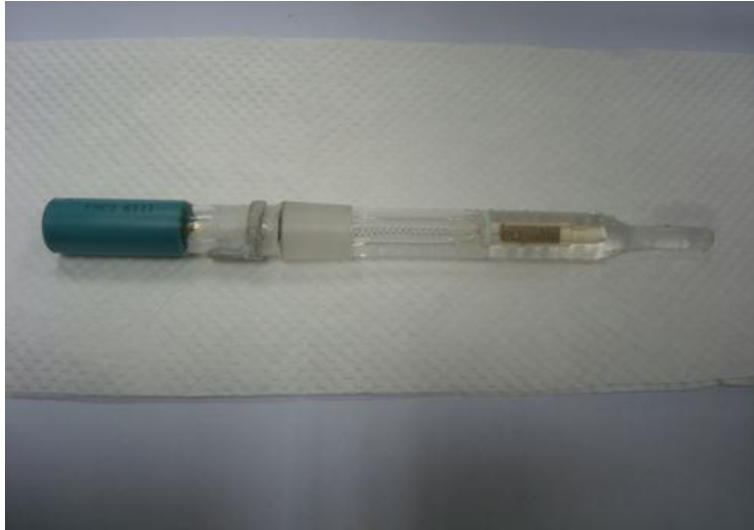
1) เครื่อง Potentiostat หรือ Galvanostat เป็นเครื่องใช้ทดสอบการกัดกร่อนโดยควบคุมความต่างศักย์หรือกระแสให้กับระบบแล้วประมวลผลในรูปของเส้นโค้งโพลาริเซชัน หลังจากนั้นนำเส้นโค้งโพลาริเซชันไปหาค่าอัตราการกัดกร่อน โดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูป เช่น General Purpose Electrochemical Software (GPES) ที่เป็นโปรแกรมสำเร็จรูปในเครื่องโพเทนชิโอสแตต ดังแสดงในรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 เครื่องโพเทนชิโอสแตต (Potentiostat)

2) อิเล็กโทรดที่ใช้ในการทดสอบการกัดกร่อน

- อิเล็กโทรดอ้างอิง (Reference electrode) คือ Ag / AgCl (3 M KCl) (Silver chloride electrode) ดังแสดงในรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 อิเล็กโทรดอ้างอิง (Ag/AgCl 3M KCl)

- อิเล็กโทรดตัวกระแส (Counter electrode) คือ แท่งกราไฟต์ (Graphite) ดังแสดงในรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.7 อิเล็กโทรดตัวกระแส (Graphite)

- อิเล็กโทรดตัวอย่าง คือ ชิ้นงานของเหล็กกล้า AISI 4140 ที่ยังไม่ผ่านการเคลือบผิวและผ่านการเคลือบผิวไอทางกายภาพ ดังแสดงในรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.8 อิเล็กโทรดตัวอย่าง (Working electrode)

3.2.4 อุปกรณ์สำหรับตรวจสอบพื้นผิว

1) กล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM)

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (SEM) นับได้ว่าเป็นหัวใจของการตรวจสอบผิวการสึกหรอ เนื่องจาก SEM มีกำลังขยายตั้งแต่ 20 – 30,000 เท่า และสามารถวิเคราะห์ชั้นเคลือบในแนวลึกได้กว่า 300 เท่าของกล้องจุลทรรศน์ปกติ โดยทั่วไป SEM มักต่อพ่วงอยู่กับการวิเคราะห์ด้วยรังสีเอกซ์ (EDX) ทั้งนี้เพื่อช่วยวิเคราะห์ชนิดของธาตุที่เป็นส่วนผสมของเนื้อวัสดุหรือพื้นผิวบริเวณที่ถูกกัดกร่อน ดังแสดงในรูปที่ 3.9



รูปที่ 3.9 กล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM)

2) กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน Photoelectron Emission Spectroscopy (PES) และ Photoemission electron microscopy (PEEM)

ซึ่ง XPS และ X-PEEM เป็นเทคนิคทางด้าน Spectroscopy ด้วยการใช้แสงซินโครตรอน ดังแสดงในรูปที่ 3.10 และ 3.11 ตามลำดับ ซึ่งการใช้เทคนิคนี้กับแสงซินโครตรอน ทำให้สามารถเลือกและเปลี่ยนค่าพลังงานแสงที่ใช้กระตุ้นอิเล็กตรอนให้หลุดออกจากผิวของสารตัวอย่าง จึงสามารถวิเคราะห์ธาตุและองค์ประกอบทางเคมีของวัตถุนบนสารตัวอย่างได้ นอกจากนี้เทคนิค X-PEEM ยังสามารถทำการถ่ายภาพบริเวณที่ทำการวัดและยังสามารถเลือกบริเวณที่จะศึกษาโดยมีความสามารถในการแยกแยะในเรื่อ 100 นาโนเมตร



รูปที่ 3.10 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน Photoelectron Emission Spectroscopy (PES)

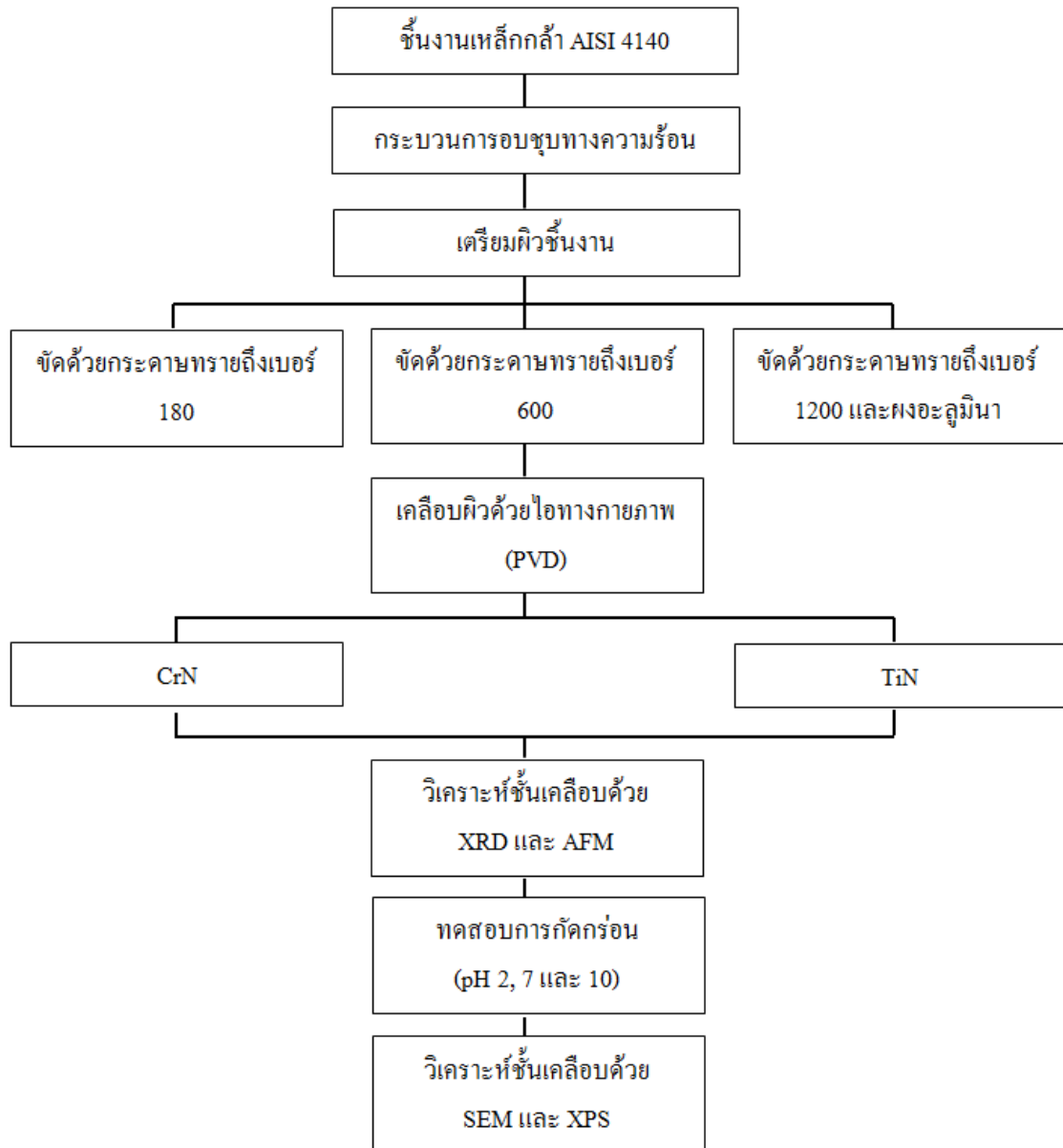


รูปที่ 3.11 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน Photoemission electron microscopy (PEEM)

3.3 ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย

ในงานวิจัยนี้มีขั้นตอนการทำวิจัยตามแผนภาพระเบียบวิธีการทำวิจัย แสดงดังรูปที่ 3.12





รูปที่ 3.12 แผนภาพระเบียบวิธีการทำวิจัย

3.3.1 ขั้นตอนเตรียมชิ้นงานก่อนการเคลือบผิว

1) นำชิ้นงานเหล็กกล้า AISI 4140 ตัดให้ได้ขนาด 10x10x2 มิลลิเมตร แล้วอบชุบทางความร้อนเพื่อเพิ่มความแข็งแรง โดยการให้ความร้อนแก่ชิ้นงานที่อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที หลังจากนั้นทำให้ชิ้นงานเย็นตัวอย่างรวดเร็วด้วยน้ำมัน

2) นำชิ้นงานก่อนและหลังอบชุบทางความร้อนไปทำการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค โดยการขัดหยาบด้วยกระดาษทรายตั้งแต่เบอร์ 180 ถึง 1200 และขัดละเอียดด้วยผล

อะลูมิน่า ทำการกัดผิวหน้าชิ้นงานด้วยกรด Nital 2% หลังจากนั้นทำการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง

3) ก่อนนำชิ้นงานไปเคลือบผิว นำชิ้นงานเหล็กกล้า AISI 4140 ทำการเตรียมผิวชิ้นงานให้มีความหยาบ (Surface roughness) จำนวน 3 ค่า เพื่อศึกษาผลของความหยาบของพื้นผิววัสดุที่มีต่อการยึดเกาะของชั้นเคลือบ โดยใช้กระดาษทรายขนาดดังต่อไปนี้

- ชั้นที่ 1 ขัดด้วยกระดาษทรายเบอร์ 180
- ชั้นที่ 2 ขัดด้วยกระดาษทรายเบอร์ 180, 320, 400 และ 600
- ชั้นที่ 3 ขัดด้วยกระดาษทรายเบอร์ 180, 320, 400, 600, 800, 1000, 1200 และผงอะลูมิน่า

3.3.2 ขั้นตอนกระบวนการเคลือบผิวไอทางกายภาพ

นำชิ้นงานที่ผ่านการเตรียมผิวแล้วไปทำการเคลือบผิวด้วยไอทางกายภาพเพื่อให้ได้สารเคลือบที่เป็นโครเมียมไนไตรด์ (CrN) และ ไทเทเนียมไนไตรด์ (TiN) โดยมีการควบคุมตัวแปรต่างๆ ดังแสดงในตารางที่ 3.2 และ 3.3

ตารางที่ 3.2 ตัวแปรในกระบวนการตัวแปรในการผลิตฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์(CrN) โดยกระบวนการเคลือบผิวแบบไอทางกายภาพ

| ตัวแปร | ค่ากำหนด |
|--|--------------------------------|
| เป้าสารเคลือบ (Target) | โครเมียม |
| ความดันฐาน (Base pressure) | 5.0×10^{-3} มิลลิบาร์ |
| ความดันขณะเคลือบ (Working pressure) | 3.5×10^{-5} มิลลิบาร์ |
| กำลังไฟฟ้า (Power) | 350 วัตต์ |
| กระแสไฟฟ้า (Current) | 800 มิลลิแอมป์ |
| ระยะห่างระหว่างเป้าสารเคลือบถึงวัสดุรองรับ | 15 เซนติเมตร |
| ความต่างศักย์ไบแอส (Voltage) | -456 โวลต์ |
| อุณหภูมิขณะเคลือบ (Temperature) | อุณหภูมิห้อง |
| เวลาในการเคลือบ (Deposition time) | 40 นาที |
| ความหนาชั้นเคลือบ (Coating thickness) | 900 นาโนเมตร |

ตารางที่ 3.3 ตัวแปรในกระบวนการเคลือบผิวในการผลิตฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรด์(TiN) โดยกระบวนการเคลือบผิวแบบไอทางกายภาพ

| ตัวแปร | ค่ากำหนด |
|--|--------------------------------|
| เป้าสารเคลือบ (Target) | ไทเทเนียม |
| ความดันฐาน (Base pressure) | 5.0×10^{-3} มิลลิบาร์ |
| ความดันขณะเคลือบ (Working pressure) | 2.5×10^{-5} มิลลิบาร์ |
| กำลังไฟฟ้า (Power) | 350 วัตต์ |
| กระแสไฟฟ้า (Current) | 800 มิลลิแอมป์ |
| ระยะห่างระหว่างเป้าสารเคลือบถึงวัสดุรองรับ | 10 เซนติเมตร |
| ความต่างศักย์ไบแอส (Voltage) | -369 โวลต์ |
| อุณหภูมิขณะเคลือบ (Temperature) | อุณหภูมิห้อง |
| เวลาในการเคลือบ (Deposition time) | 60 นาที |
| ความหนาชั้นเคลือบ (Coating thickness) | 900 นาโนเมตร |

3.3.3 ขั้นตอนการตรวจสอบพื้นผิวก่อนทดสอบการกัดกร่อน

- 1) นำชิ้นงานที่ผ่านการเคลือบผิวด้วยไอทางกายภาพไปวัดส่วนประกอบ (Constitute) และส่วนผสมทางเคมี (Chemical composition) ด้วยเทคนิค X-ray diffraction (XRD)
- 2) นำชิ้นงานที่ผ่านการเคลือบผิวด้วยไอทางกายภาพไปตรวจสอบขนาดเกรนและความหนาของชั้นฟิล์มด้วยเทคนิค Atomic force microscopy (AFM)

3.3.4 ขั้นตอนการทดสอบการกัดกร่อน

- 1) นำไปชิ้นงานที่ไม่ถูกเคลือบผิว ชิ้นงานที่ถูกเคลือบผิวด้วยโครเมียมไนไตรด์ และชิ้นงานที่ถูกเคลือบผิวด้วยไทเทเนียมไนไตรด์ไปทำการทดสอบการกัดกร่อนด้วยเครื่องโพเทนชิโอสแตท (Potentiostat) ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้น 3.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ที่มีค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) เท่ากับ 2, 7 และ 10 โดยควบคุมสภาวะการทดลองให้คงที่ คือ
 - เวลาที่ใช้ในการที่ทำให้ออกซิเจนในอากาศอิ่มตัวในสารละลายเท่ากับ 5 นาที
 - อัตราการแสกนเท่ากับ 1 มิลลิโวลต์ต่อวินาที
 - อุณหภูมิที่ใช้ในการทดลองเท่ากับ 27 องศาเซลเซียส
 - ความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์เท่ากับ 3.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

2) โดยทำการปรับค่า pH ของสารละลายให้มีค่าเท่ากับ 2 ด้วยกรดไฮโดรคลอริก (HCl) ความเข้มข้น 3 โมลาร์ประมาณ 6 หยด และทำการปรับค่า pH ของสารละลายให้มีค่าเท่ากับ 7 และ 10 โดยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) เข้มข้น 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ประมาณ 5-6 หยด ต่อสารละลาย 300 ลูกบาศก์เซนติเมตร

3) แช่ชิ้นงานลงในสารละลายที่อิมมัวด้วยออกซิเจน โดยให้ชิ้นงานสัมผัสกับสารละลายเป็นพื้นที่ 0.85 ตารางเซนติเมตร

4) โดยมีเงื่อนไขและจำนวนของชิ้นงานที่ไม่ถูกเคลือบผิว ชิ้นงานที่ถูกเคลือบผิวด้วยโครเมียมไนไตรด์ และชิ้นงานที่ถูกเคลือบผิวด้วยไทเทเนียมไนไตรด์ในการทดสอบการกัดกร่อนดังแสดงในตารางที่ 3.4 ถึง 3.6 ตามลำดับ

ตารางที่ 3.4 จำนวนชิ้นงานที่ไม่ถูกเคลือบผิวและสภาวะที่ใช้ทดสอบการกัดกร่อน

| ความหยาบผิวของวัสดุ | สัญลักษณ์ชิ้นงาน | จำนวนชิ้นงาน | | | จำนวนชิ้นงานทั้งหมด |
|---------------------|------------------|--------------|---------|----------|---------------------|
| | | พีเอช 2 | พีเอช 7 | พีเอช 10 | |
| ความหยาบที่ 1 | B1 | 2 | 2 | 2 | 6 |
| ความหยาบที่ 2 | B2 | 2 | 2 | 2 | 6 |
| ความหยาบที่ 3 | B3 | 2 | 2 | 2 | 6 |

ตารางที่ 3.5 จำนวนชิ้นงานที่ถูกเคลือบผิวด้วยโครเมียมไนไตรด์และสภาวะที่ใช้ทดสอบการกัดกร่อน

| ความหยาบผิวของวัสดุ | สัญลักษณ์ชิ้นงาน | จำนวนชิ้นงาน | | | จำนวนชิ้นงานทั้งหมด |
|---------------------|------------------|--------------|---------|----------|---------------------|
| | | พีเอช 2 | พีเอช 7 | พีเอช 10 | |
| ความหยาบที่ 1 | C1 | 2 | 2 | 2 | 6 |
| ความหยาบที่ 2 | C2 | 2 | 2 | 2 | 6 |
| ความหยาบที่ 3 | C3 | 2 | 2 | 2 | 6 |

ตารางที่ 3.6 จำนวนชิ้นงานที่ถูกเคลือบผิวด้วยไทเทเนียมไนไตรด์และสภาวะที่ใช้ทดสอบการกัดกร่อน

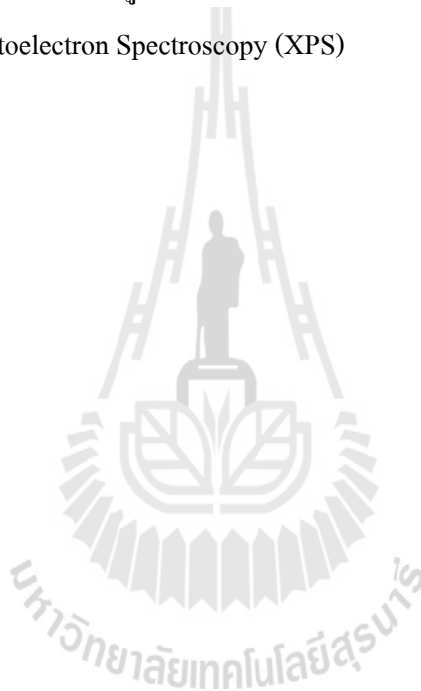
| ความหยาบผิวของวัสดุ | สัญลักษณ์ชิ้นงาน | จำนวนชิ้นงาน | | | จำนวนชิ้นงานทั้งหมด |
|---------------------|------------------|--------------|---------|----------|---------------------|
| | | พีเอช 2 | พีเอช 7 | พีเอช 10 | |
| ความหยาบที่ 1 | T1 | 2 | 2 | 2 | 6 |
| ความหยาบที่ 2 | T2 | 2 | 2 | 2 | 6 |
| ความหยาบที่ 3 | T3 | 2 | 2 | 2 | 6 |

5) แปลความหมายของเส้นกราฟที่ได้จากการทดลองเพื่อหาค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อน (Corrosion potential, E_{corr}) ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อน (Corrosion current density, I_{corr}) และค่าอัตราการกัดกร่อน (Corrosion rate, R_{mpy})

3.3.5 ขั้นตอนการตรวจสอบพื้นผิวหลังทดสอบการกัดกร่อน

1) นำชิ้นงานภายหลังจากการทดสอบการกัดกร่อนทำการตรวจสอบพื้นผิว (Surface) ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกวาด (Scanning Electron Microscope, SEM)

2) นำชิ้นงานภายหลังจากการทดสอบการกัดกร่อนทำการตรวจสอบผสมทางเคมี (Chemical composition) ของบริเวณที่ถูกกัดกร่อนของชิ้นงานด้วยเทคนิค Energy-Dispersive Spectroscopy และ X-Ray Photoelectron Spectroscopy (XPS)



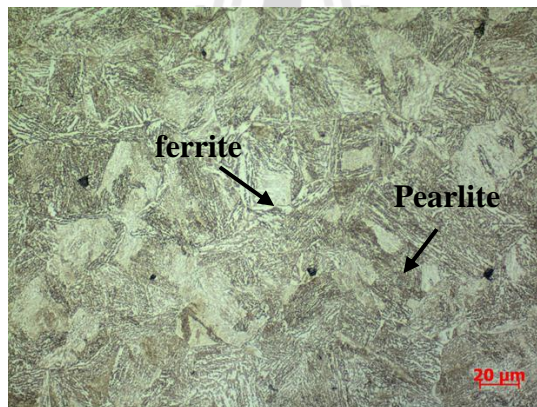
บทที่ 4

ผลการวิจัยและการอภิปรายผลการวิจัย

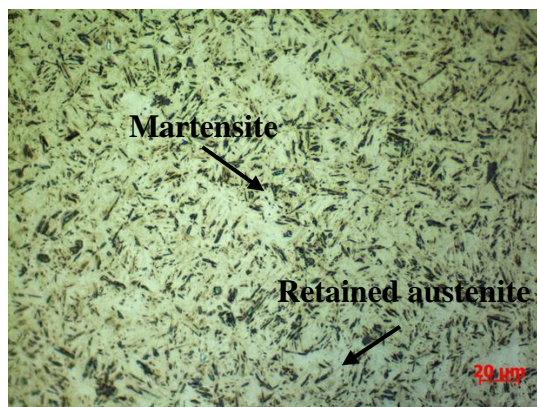
4.1 คุณลักษณะของชิ้นงานเหล็กกล้า AISI 4140 ก่อนการเคลือบผิว

4.1.1 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานเหล็กกล้า AISI 4140

รูปที่ 4.1 และ 4.2 แสดงโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานเหล็กกล้า AISI 4140 ก่อนและหลังอบชุบทางความร้อนที่ถูกถ่ายโดยกล้องจุลทรรศน์แบบแสงด้วยกำลังขยาย 50 เท่า ตามลำดับพบว่าชิ้นงานเหล็กกล้า AISI 4140 ก่อนอบชุบทางความร้อนมีโครงสร้างจุลภาคประกอบด้วยเฟอไรต์ (Ferrite) และเพิร์ลไลต์ (Pearlite) ส่วนชิ้นงานเหล็กกล้า AISI 4140 หลังการอบชุบทางความร้อนมีโครงสร้างจุลภาคประกอบด้วยมาร์เทนไซต์ (Martensite) และออสเตนไนท์เหลือค้าง (Retained austenite) ซึ่งโครงสร้างที่เปลี่ยนแปลงไปเป็นมาร์เทนไซต์ภายหลังการอบชุบทางความร้อนจะส่งผลให้พื้นผิววัสดุมีความแข็งเพิ่มมากขึ้น



รูปที่ 4.1 โครงสร้างจุลภาคของเหล็กกล้า AISI 4140 ก่อนการอบชุบทางความร้อน



รูปที่ 4.2 โครงสร้างจุลภาคของเหล็กกล้า AISI 4140 หลังการอบชุบทางความร้อน

4.1.2 ค่าความแข็งของชิ้นงานเหล็กกล้า AISI 4140

ตารางที่ 4.1 แสดงค่าความแข็งของชิ้นงานเหล็กกล้า AISI 4140 ก่อนและหลังการอบชุบทางความร้อนที่ทำการวัดความแข็งด้วยเครื่องวัดความแข็งแบบรีอคเวล (สเกลซี) พบว่าหลังอบชุบทางความร้อนเหล็กกล้า AISI 4140 มีค่าความแข็งเพิ่มมากขึ้นจาก 30.0 HRC เป็น 57.0 HRC เนื่องจากหลังการอบชุบทางความร้อนโครงสร้างของเหล็กกล้า AISI 4140 มีการเปลี่ยนแปลงจากโครงสร้างเพิร์ลไลท์และเฟอร์ไรท์ไปเป็นมาร์เทนไซต์และออสเทนไนท์เหลือค้าง เป็นที่ทราบดีว่ามาร์เทนไซต์เป็นโครงสร้างที่มีความแข็งสูง จึงส่งผลให้พื้นผิวชิ้นงานหลังการอบชุบทางความร้อนมีค่าความแข็งเพิ่มมากขึ้น (Wolfhang Bleck., 2007)

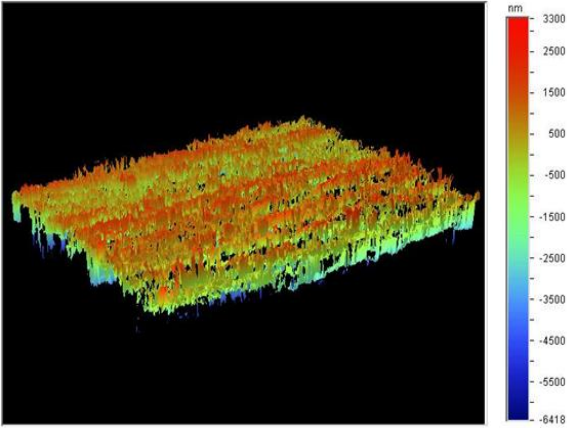
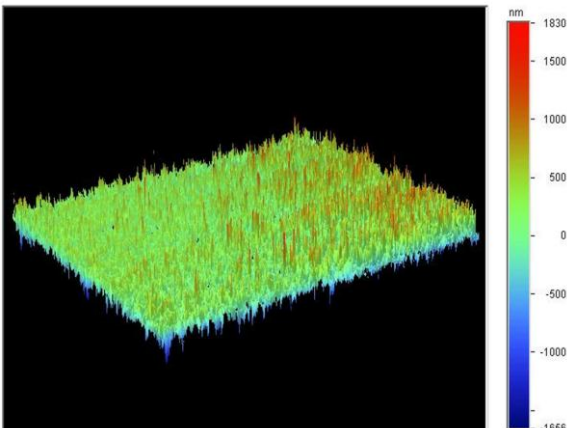
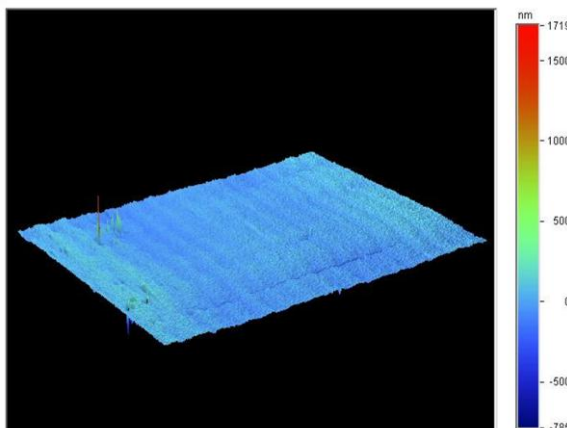
ตารางที่ 4.1 ค่าความแข็งของเหล็กกล้า AISI 4140 ก่อนและหลังการอบชุบทางความร้อน

| ชิ้นงาน | ค่าความแข็ง (HRC) |
|---|-------------------|
| เหล็กกล้า AISI 4140 ก่อนการอบชุบทางความร้อน | 30.0 |
| เหล็กกล้า AISI 4140 หลังการอบชุบทางความร้อน | 57.0 |

4.1.3 ค่าความหยาบผิวของชิ้นงานเหล็กกล้า AISI 4140

ตารางที่ 4.2 แสดงผลของลักษณะภาพพื้นผิวแบบสามมิติและค่าความหยาบผิวของชิ้นงานเหล็กกล้า AISI 4140 ก่อนการเคลือบผิว พบว่าเมื่อขัดผิวด้วยกระดาษทรายที่มีเบอร์กระดาษสูงขึ้น (มีความละเอียดมากขึ้น) ส่งผลให้ชิ้นงานเหล็กกล้า AISI 4140 มีค่าความหยาบผิวลดลง

ตารางที่ 4.2 ผลของลักษณะภาพพื้นผิวแบบสามมิติและค่าความหยาบผิวของชิ้นงานเหล็กกล้า AISI 4140 ก่อนการเคลือบผิว

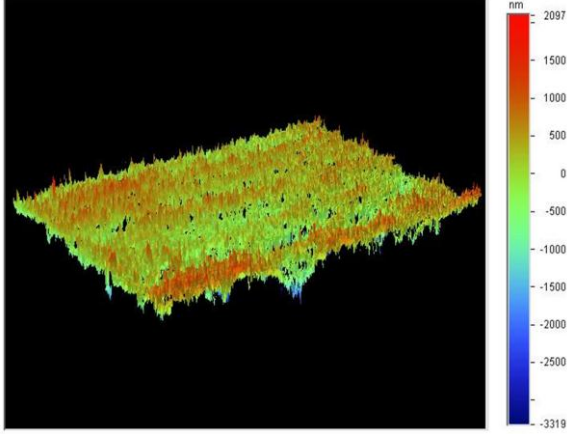
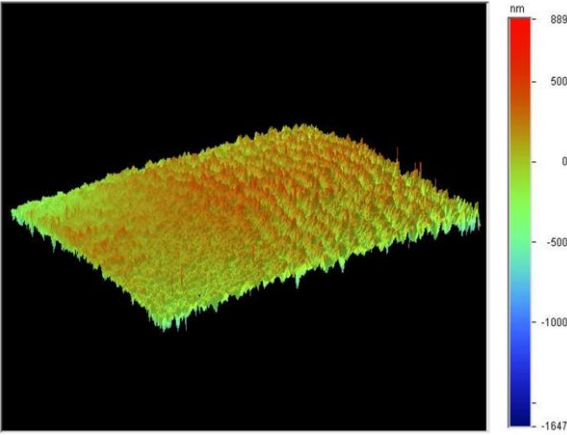
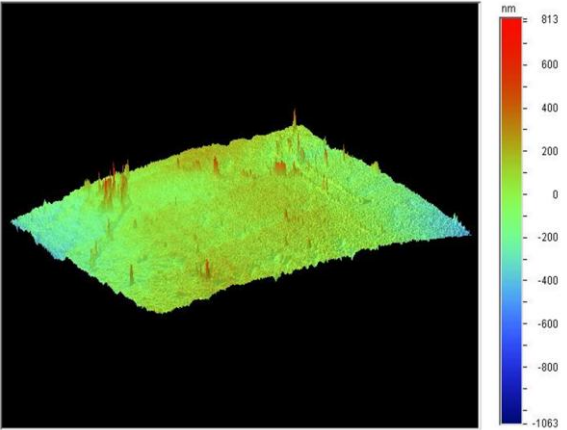
| ชิ้นงาน | ภาพพื้นผิวแบบสามมิติ | ค่าความหยาบผิว (nm) |
|------------|--|---------------------|
| ชิ้นงาน B1 |  | 563.13 |
| ชิ้นงาน B2 |  | 200.12 |
| ชิ้นงาน B3 |  | 31.14 |

4.2 คุณลักษณะของชิ้นงานเหล็กกล้า AISI 4140 หลังการเคลือบผิวด้วยฟิล์มบางโครเมียมไนไตรต์และฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรต์

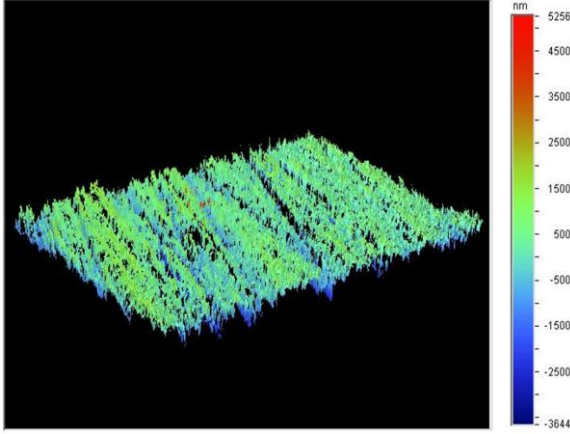
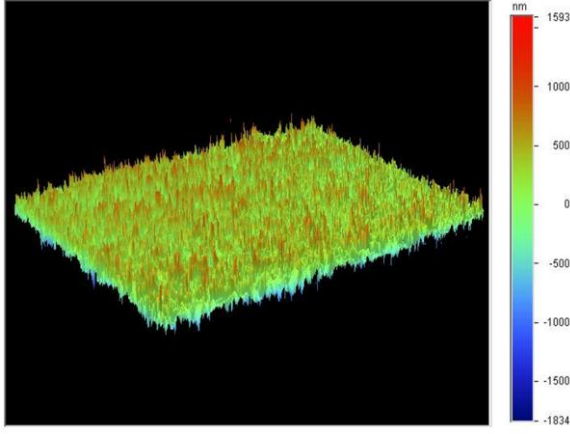
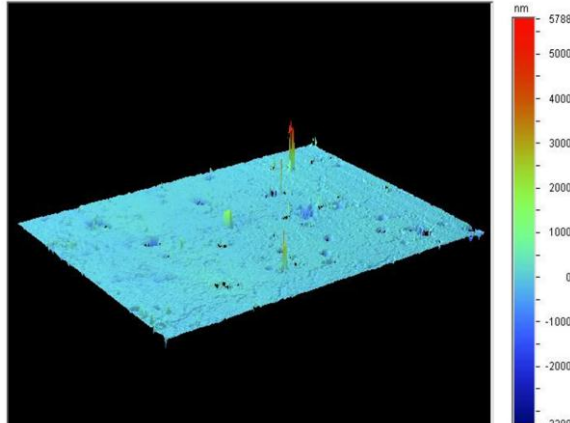
4.2.1 ค่าความหยาบผิวของชิ้นงานเหล็กกล้า AISI 4140 หลังการเคลือบผิวด้วยฟิล์มบางโครเมียมไนไตรต์และฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรต์

ตารางที่ 4.3 และ 4.4 แสดงผลของลักษณะภาพพื้นผิวแบบสามมิติและค่าความหยาบผิวของชิ้นงานเหล็กกล้า AISI 4140 หลังการเคลือบผิวด้วยฟิล์มบางโครเมียมไนไตรต์และฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรต์ ตามลำดับ พบว่าค่าความหยาบผิวของเหล็กกล้า AISI 4140 ก่อนการเคลือบผิวมีผลต่อความหยาบผิวภายหลังการเคลือบผิวด้วยฟิล์มบางโครเมียมไนไตรต์และฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรต์ โดยค่าความหยาบผิวของชิ้นงานภายหลังการเคลือบผิวด้วยฟิล์มบางโครเมียมไนไตรต์และฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรต์มีแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงเช่นเดียวกันกับค่าความหยาบผิวของเหล็กกล้า AISI 4140 ก่อนการเคลือบผิวคือ เมื่อค่าความหยาบผิวของเหล็กกล้า AISI 4140 ลดลง ส่งผลให้ค่าความหยาบผิวของชิ้นงานที่ถูกเคลือบผิวด้วยฟิล์มบางโครเมียมไนไตรต์และชิ้นงานที่ถูกเคลือบผิวด้วยฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรต์ลดลงตามไปด้วย และเมื่อเปรียบเทียบค่าความหยาบผิวของชิ้นงานที่ถูกเคลือบผิวด้วยฟิล์มบางโครเมียมไนไตรต์และชิ้นงานที่ถูกเคลือบผิวด้วยฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรต์ที่วัสดุถูกขัดด้วยกระดาษทรายเบอร์เดียวกัน พบว่าชิ้นงานที่ถูกเคลือบผิวด้วยฟิล์มบางโครเมียมไนไตรต์มีค่าความหยาบผิวน้อยกว่าชิ้นงานที่ถูกเคลือบผิวด้วยฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรต์เล็กน้อย

ตารางที่ 4.3 ผลของลักษณะภาพพื้นผิวแบบสามมิติและค่าความหยาบผิวของชิ้นงานเหล็กกล้า AISI 4140 หลังเคลือบผิวด้วยฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์

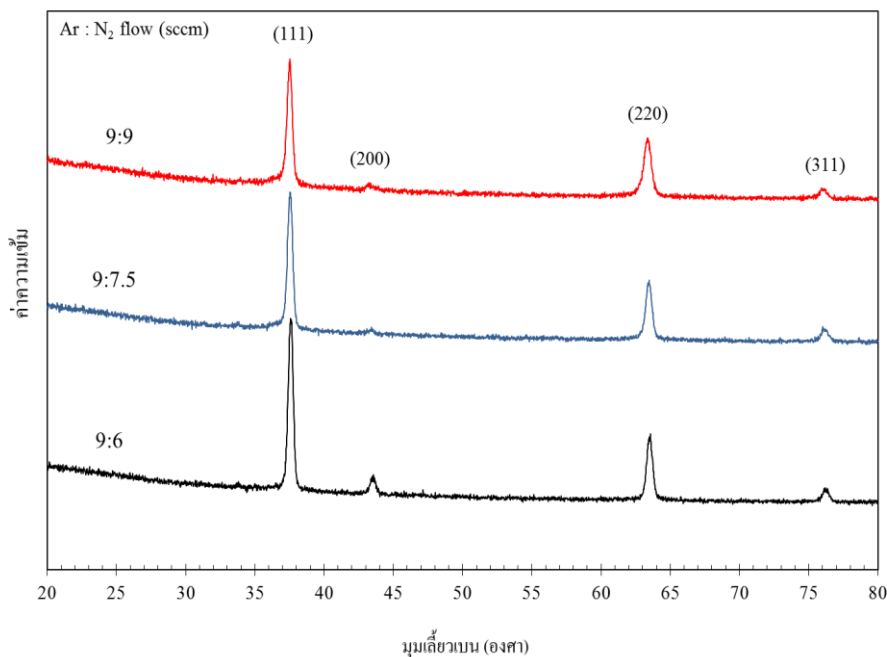
| ชิ้นงาน | ภาพพื้นผิวแบบสามมิติ | ค่าความหยาบผิว (nm) |
|------------|--|---------------------|
| ชิ้นงาน C1 |  | 294.32 |
| ชิ้นงาน C2 |  | 165.56 |
| ชิ้นงาน C3 |  | 30.92 |

ตารางที่ 4.4 ผลของลักษณะภาพพื้นผิวแบบสามมิติและค่าความหยาบผิวของชิ้นงานเหล็กกล้า AISI 4140 หลังเคลือบผิวด้วยฟิล์มบางไทเทเนียมในทรายด์

| ชิ้นงาน | ภาพพื้นผิวแบบสามมิติ | ค่าความหยาบผิว (nm) |
|------------|--|---------------------|
| ชิ้นงาน T1 |  | 552.79 |
| ชิ้นงาน T2 |  | 202.40 |
| ชิ้นงาน T3 |  | 73.55 |

4.2.2 การวิเคราะห์คุณสมบัติของฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์ที่เคลือบบนเหล็กกล้า AISI 4140 ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (XRD)

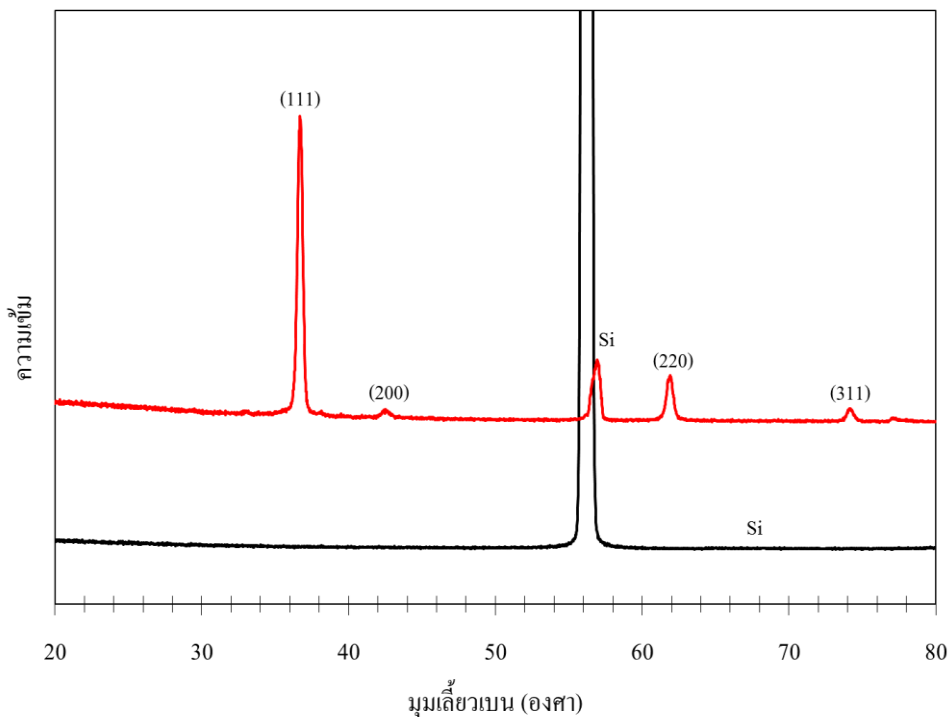
รูปที่ 4.3 แสดงผลการวิเคราะห์คุณสมบัติของฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์ที่เคลือบบนเหล็กกล้า AISI 4140 ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (XRD) การเคลือบฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์ที่อัตราการไหลมวลของแก๊สอาร์กอนต่อแก๊สไนโตรเจนทุกค่า เกิดสารประกอบโครเมียมไนไตรด์บนพื้นผิวชิ้นงาน โดยสารประกอบโครเมียมไนไตรด์ที่ปรากฏเป็นโครงสร้างผลึกที่มีการจัดเรียงตัวของอะตอมในระนาบ (111), (200), (220) และ (311) อย่างไรก็ตามพบว่าโครงสร้างผลึกของโครเมียมไนไตรด์มีการจัดเรียงตัวในระนาบ (111) ชัดเจนที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับ การจัดเรียงตัวในระนาบอื่นๆ จากผลดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าในงานวิจัยนี้ ฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์ที่ได้จากกระบวนการเคลือบไอทางกายภาพจะมีโครงสร้างผลึกที่มีการจัดเรียงตัวของอะตอมในระนาบ (111) เป็นส่วนใหญ่ และนอกจากนี้ยังพบว่าอัตราการไหลมวลของแก๊สอาร์กอนต่อแก๊สไนโตรเจนมีผลต่อโครงสร้างผลึกของฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์ โดยอัตราการไหลมวลของแก๊สอาร์กอนต่อแก๊สไนโตรเจนเท่ากับ 9:6 แสดงให้เห็นการปรากฏของฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์ชัดเจนมากกว่าที่เงื่อนไขอื่นๆ ด้วยเหตุนี้ ชั้นเคลือบโครเมียมไนไตรด์ที่ผลิตในงานวิจัยนี้จึงเลือกเคลือบที่อัตราฯ ดังกล่าว จากการวิเคราะห์ผลดังกล่าวสอดคล้องกับรายงานวิจัยของ (M. Novakovic, M. Popovic and N. Bibic., 2010; Hui-Ping Feng and et al., 2003; S. Hanand et al., 2000)



รูปที่ 4.3 การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์

4.2.3 การวิเคราะห์คุณสมบัติของฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรด์ที่เคลือบบนเหล็กกล้า AISI 4140 ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (XRD)

รูปที่ 4.4 แสดงผลการวิเคราะห์คุณสมบัติของฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรด์ที่เคลือบบนเหล็กกล้า AISI 4140 ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (XRD) พบสารประกอบไทเทเนียมไนไตรด์ โดยสารประกอบไทเทเนียมไนไตรด์ ที่ปรากฏเป็นโครงสร้างผลึกที่มีการจัดเรียงตัวของอะตอมในระนาบ (111), (200), (220) และ (311) อย่างไรก็ตามพบว่า โครงสร้างผลึกของไทเทเนียมไนไตรด์ มีการจัดเรียงตัวในระนาบ (111) ชัดเจนที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับการจัดเรียงตัวในระนาบอื่นๆ จากผลดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าในงานวิจัยนี้ ฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรด์ที่ได้จากกระบวนการเคลือบไอทางกายภาพจะมีโครงสร้างผลึกที่มีการจัดเรียงตัวของอะตอมในระนาบ (111) เป็นส่วนใหญ่ จากการวิเคราะห์ผลดังกล่าวสอดคล้องกับรายงานวิจัยของ (L. Fengqun, and Y. Zhiming, 2001; C.V. Franco, et al., 1998)

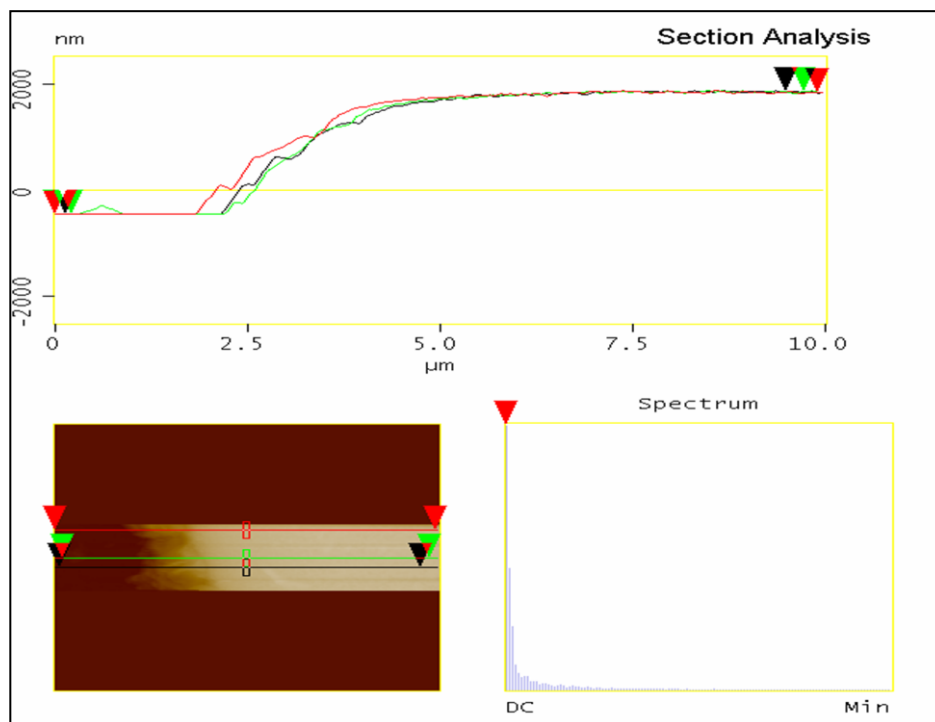


รูปที่ 4.4 การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรด์

4.2.4 การวิเคราะห์คุณสมบัติของฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรด์ที่เคลือบบนเหล็กกล้า AISI 4140 ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแรงอะตอม (AFM)

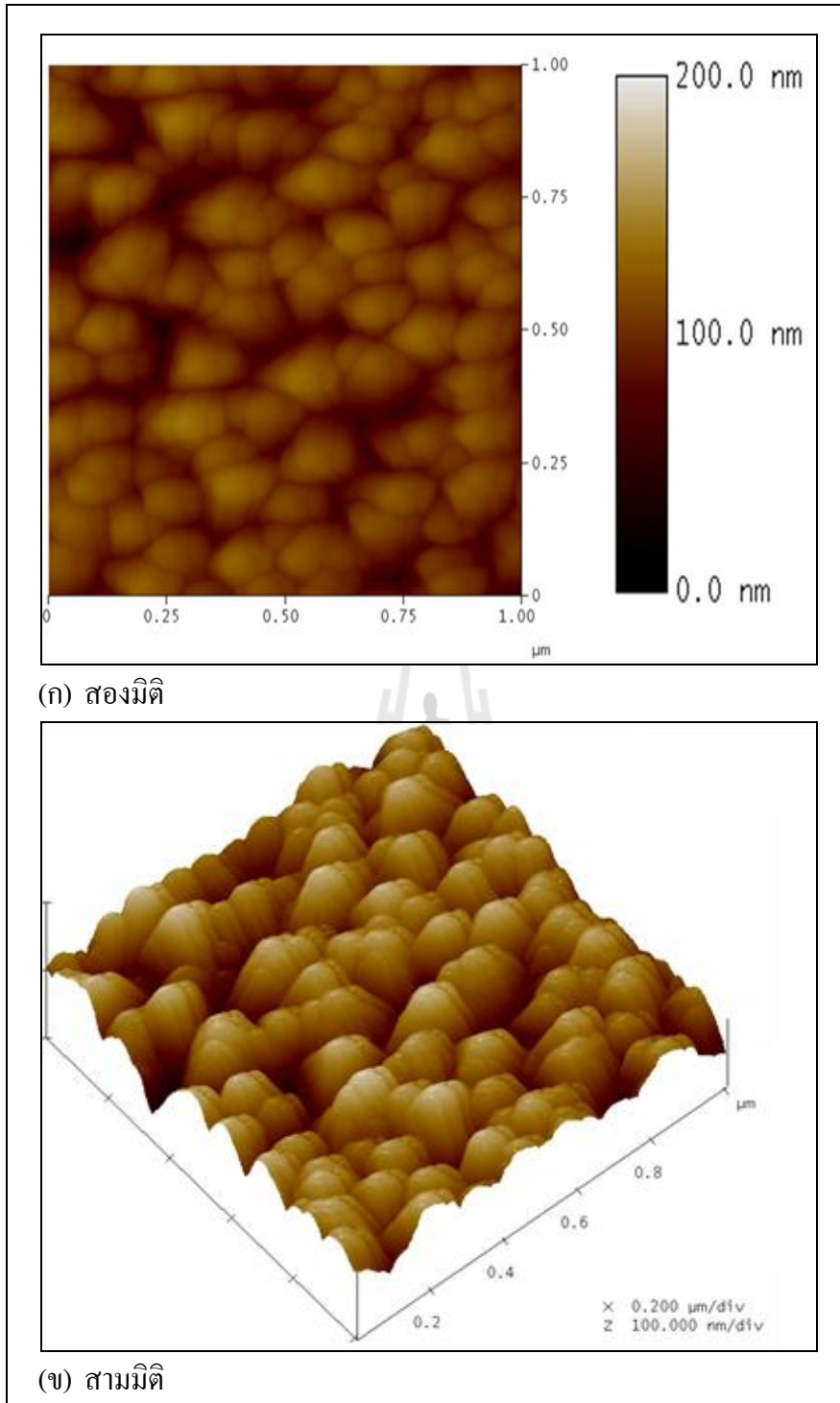
รูปที่ 4.5 แสดงผลการวิเคราะห์หาค่าความหนาของชั้นฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรด์ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแรงอะตอม (AFM) ในการทดลองจะทำการสแกน

ทั้งหมด 3 ครั้ง ในแต่ละครั้งจะสแกนเป็นระยะเท่ากับ 10 ไมโครเมตร แล้วหาค่าเฉลี่ยของความหนาของชั้นฟิล์มหรือค่า RMS จากการวิเคราะห์พบว่าฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์มีความหนาเฉลี่ย (RMS) ประมาณ 914 นาโนเมตร ซึ่งในงานวิจัยนี้จะมีการควบคุมค่าความหนาของฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์ให้คงที่ตลอดการทดลอง

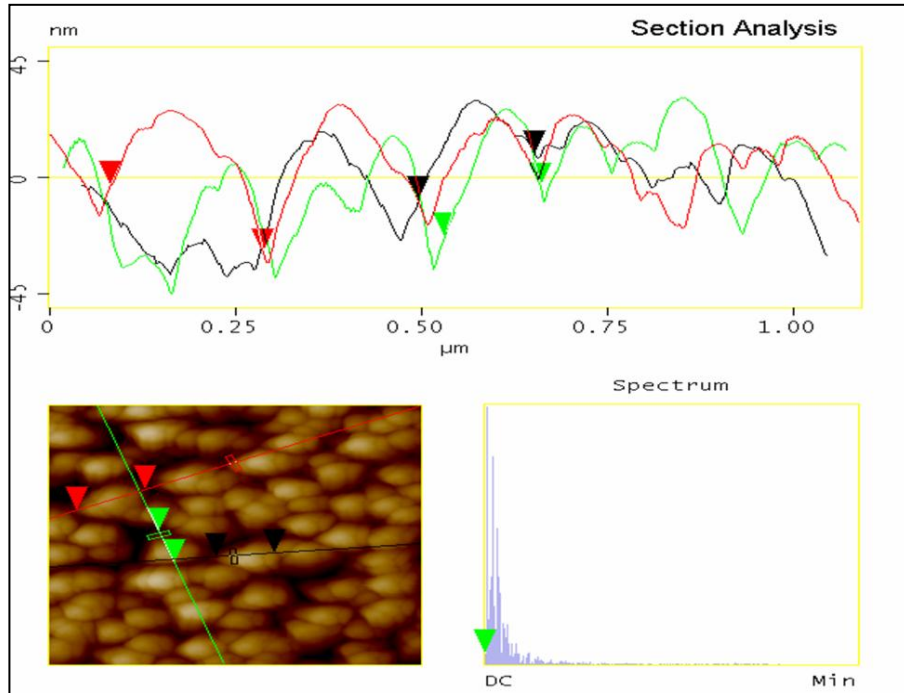


รูปที่ 4.5 การหาค่าความหนาของฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์

รูปที่ 4.6 แสดงการวิเคราะห์ลักษณะเกรนของฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์ที่เคลือบบนเหล็กกล้า AISI 4140 ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแรงอะตอม พบว่าเกรนของฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์มีลักษณะกลมและมีการจัดเรียงตัวที่หนาแน่น และเมื่อพิจารณาจากรูป พบบริเวณพื้นสีดำซึ่งมีลักษณะเป็นร่องลึกปรากฏในเนื้อฟิล์ม ร่องลึกที่ปรากฏในเนื้อฟิล์มนี้อาจเป็นข้อบกพร่องของเนื้อฟิล์ม เช่น รูพรุน เป็นต้น โดยข้อบกพร่องนี้อาจส่งผลต่อคุณสมบัติการต้านทานการกัดกร่อนของฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์ นอกจากนี้ได้มีการวิเคราะห์คำนวณหาขนาดเกรนเฉลี่ยของฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแรงอะตอม โดยเลือกบริเวณที่จะวัดขนาดเกรนแล้วลากเส้นทั้งหมด 3 เส้น เป็นระยะ 1 ไมโครเมตร พร้อมกับใช้โปรแกรมในการคำนวณเพื่อหาค่าเฉลี่ยดังแสดงในรูปที่ 4.7 พบว่าขนาดเฉลี่ยของเกรนของฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์มีค่าเท่ากับ 14.6 นาโนเมตร

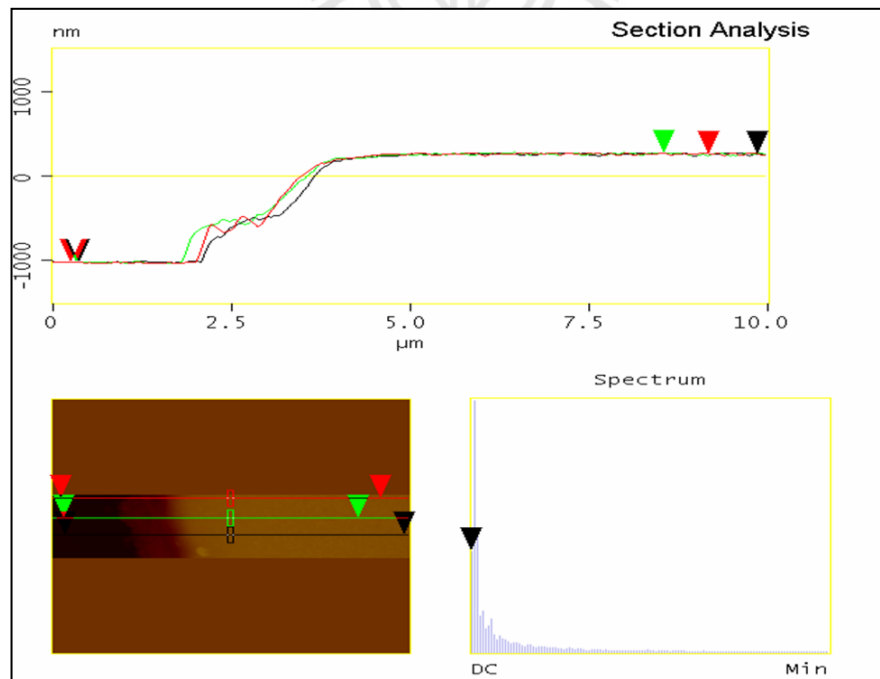


รูปที่ 4.6 ลักษณะเกรนของฟิล์มบางโครเมียมไนตรายด์ที่เคลือบบนเหล็กกล้า AISI 4140

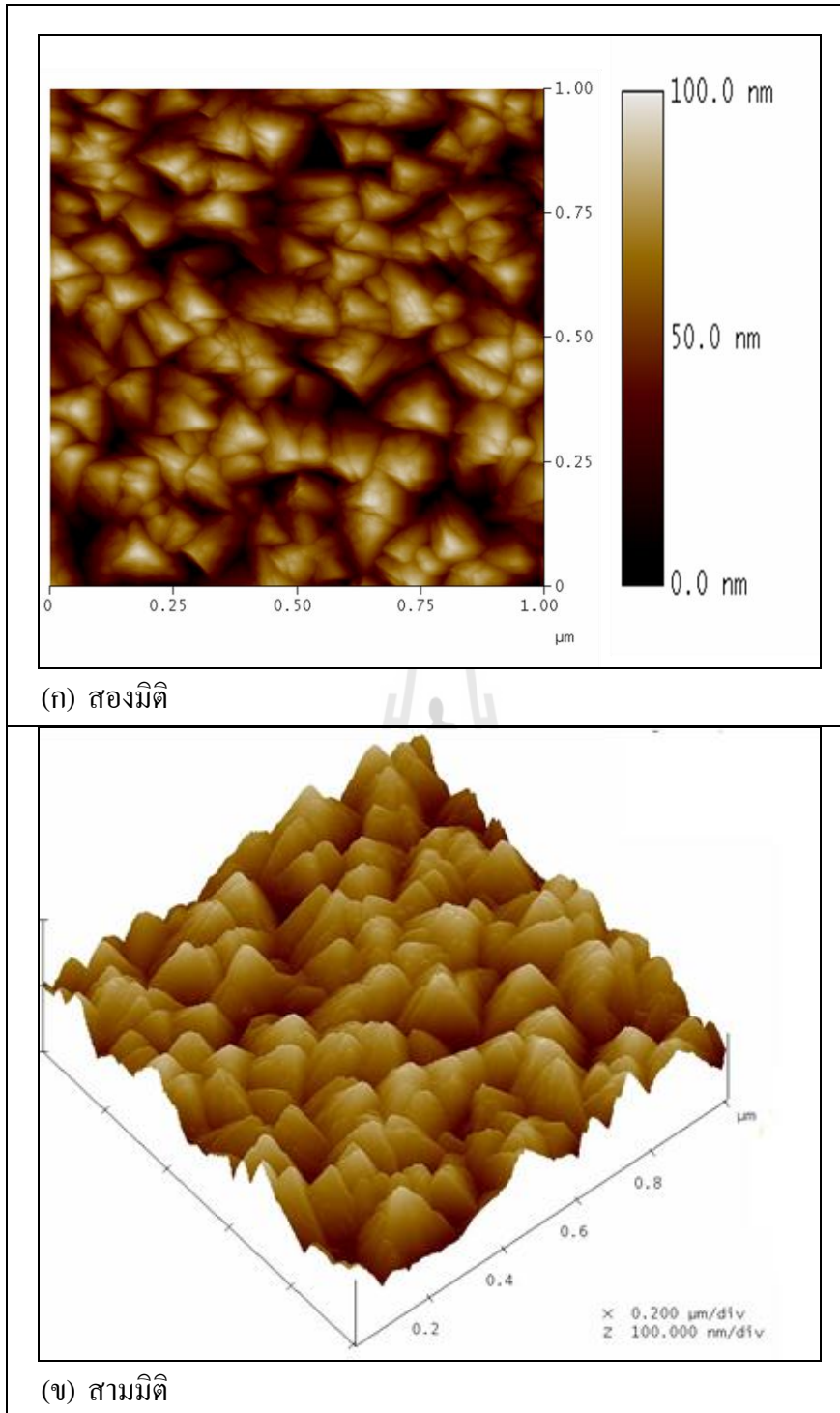


รูปที่ 4.7 การหาขนาดเกรนของฟิล์มบางโครเมียมไนตรายด์ที่เคลือบบนเหล็กกล้า AISI 4140

4.2.5 การวิเคราะห์คุณลักษณะของฟิล์มบางไทเทเนียมไนตรายด์ที่เคลือบบนเหล็กกล้า AISI 4140 ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแรงอะตอม (AFM)



รูปที่ 4.8 การหาค่าความหนาของฟิล์มบางไทเทเนียมไนตรายด์



รูปที่ 4.9 ลักษณะเกรนของฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรด์ที่เคลือบบนเหล็กกล้า AISI 4140

รูปที่ 4.8 แสดงผลการวิเคราะห์หาค่าความหนาของชั้นฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรด์ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแรงอะตอม (AFM) ในการทดลองจะทำการสแกนทั้งหมด 3 ครั้งในแต่ละครั้งจะสแกนเป็นระยะเท่ากับ 10 ไมโครเมตรเช่นเดียวกับกรณีฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์แล้วหาค่าเฉลี่ยของความหนาของชั้นฟิล์มหรือค่า RMS จากการวิเคราะห์พบว่าฟิล์มบางไทเทเนียม

ในทรายด์มีความหนาเฉลี่ย (RMS) ประมาณ 1.2 ไมโครเมตร ซึ่งในงานวิจัยนี้จะมีการควบคุมค่าความหนาของฟิล์มบางไทเทเนียมในทรายด์ให้คงที่ตลอดการทดลอง

รูปที่ 4.9 แสดงการวิเคราะห์ลักษณะเกรนในรูปแบบสองมิติและสามมิติของฟิล์มบางไทเทเนียมในทรายด์ที่เคลือบบนเหล็กกล้า AISI 4140 ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแรงอะตอมพบว่าเกรนของฟิล์มบางไทเทเนียมในทรายด์มีลักษณะเป็นแท่ง (Columnar) และมีการจัดเรียงตัวที่ไม่สม่ำเสมอ และเมื่อพิจารณาจากรูป พบบริเวณพื้นสีดำซึ่งมีลักษณะเป็นร่องลึกปรากฏในเนื้อฟิล์ม ร่องลึกที่ปรากฏในเนื้อฟิล์มนี้อาจเป็นข้อบกพร่องของเนื้อฟิล์ม เช่น รูพรุนหรือรูโพรง เป็นต้น เช่นเดียวกับในฟิล์มบางโครเมียมในทรายด์ แต่พบว่าข้อบกพร่องในฟิล์มบางไทเทเนียมในทรายด์มีปริมาณที่มากกว่าในฟิล์มบางโครเมียมในทรายด์ โดยลักษณะโครงสร้างและข้อบกพร่องนี้อาจส่งผลกระทบต่อคุณสมบัติการต้านทานการกัดกร่อนของฟิล์มบางไทเทเนียมในทรายด์

4.3 พฤติกรรมการกัดกร่อน

จากผลการศึกษาพฤติกรรมการกัดกร่อนของชิ้นงานเหล็กกล้า AISI 4140 ที่ไม่ถูกเคลือบผิว (ชิ้นงาน B1 B2 และ B3) ชิ้นงานเหล็กกล้า AISI 4140 ที่ถูกเคลือบผิวด้วยฟิล์มบางโครเมียมในทรายด์ (ชิ้นงาน C1 C2 และ C3) และชิ้นงานเหล็กกล้า AISI 4140 ที่ถูกเคลือบผิวด้วยฟิล์มบางไทเทเนียมในทรายด์ (ชิ้นงาน T1 T2 และ T3) ที่มีค่าความหยาบผิวของเหล็กกล้า AISI 4140 แตกต่างกันด้วยเครื่องโพเทนชิโอสแตท (Potentiostat) ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้นร้อยละ 3.5 โดยน้ำหนักที่ค่าพีเอช 2, 7 และ 10 ได้ผลการทดลองดังแสดงด้วยตัวอย่างเส้นโค้งโพลาริเซชันดังแสดงในรูปที่ 4.10 ถึง 4.18 จะเห็นได้ชัดเจนว่าพฤติกรรมการกัดกร่อนของชิ้นงานมีการเปลี่ยนแปลงไปตามความหยาบผิวของเหล็กกล้า AISI 4140 และค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ของสารละลายที่ใช้ในการทดสอบ จากเส้นโค้งโพลาริเซชันของชิ้นงานเหล็กกล้า AISI 4140 ที่ไม่ถูกเคลือบผิว ชิ้นงานเหล็กกล้า AISI 4140 ที่ถูกเคลือบผิวด้วยฟิล์มบางโครเมียมในทรายด์ และชิ้นงานเหล็กกล้า AISI 4140 ที่ถูกเคลือบผิวด้วยฟิล์มบางไทเทเนียมในทรายด์ สามารถนำมาหาค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อน (Corrosion potential, E_{corr}) ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อน (Corrosion current density, I_{corr}) และสามารถนำค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อนไปคำนวณเป็นค่าอัตราการกัดกร่อน (Corrosion rate, R_{mmy}) ได้ โดยค่าทั้งหมดดังแสดงในตารางที่ 4.5 (ตัวอย่างการหาค่าต่างๆ เหล่านี้แสดงในภาคผนวก ก)

จากตารางที่ 4.5 พบว่าชิ้นงานเหล็กกล้า AISI 4140 ที่ไม่ถูกเคลือบผิวมีค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนน้อยกว่าชิ้นงานเหล็กกล้า AISI 4140 ที่ถูกเคลือบผิวด้วยฟิล์มบางโครเมียมในทรายด์ และชิ้นงานเหล็กกล้า AISI 4140 ที่ถูกเคลือบผิวด้วยฟิล์มบางไทเทเนียมในทรายด์ที่ค่าความหยาบผิวและค่าพีเอชเดียวกัน นอกจากนี้ยังพบว่าชิ้นงานเหล็กกล้า AISI 4140 ที่ไม่ถูกเคลือบผิวมีค่าความ

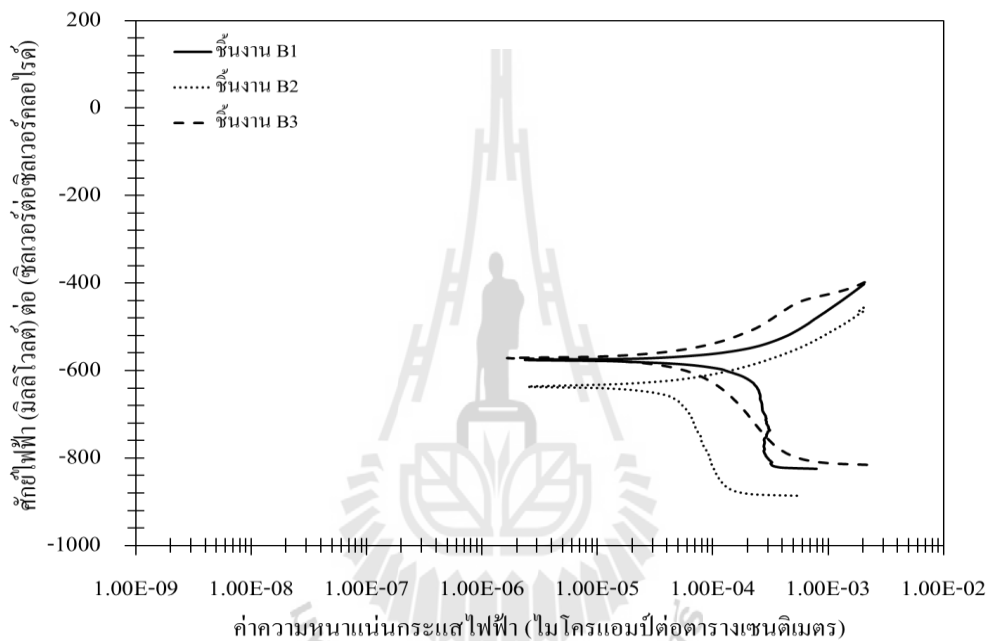
หนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อนมากกว่าชิ้นงานเหล็กกล้า AISI 4140 ที่ถูกเคลือบผิวด้วยฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์ และชิ้นงานเหล็กกล้า AISI 4140 ที่ถูกเคลือบผิวด้วยฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรด์ที่ค่าความหนาผิวและค่าพีเอชเดียวกัน และค่าอัตราการกัดกร่อนที่แนวโน้มการเปลี่ยนแปลงเช่นเดียวกันค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อน ทั้งนี้เพราะค่าอัตราการกัดกร่อนคำนวณจากค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อน ด้วยเหตุนี้จึงกล่าวได้ว่าชิ้นงานเหล็กกล้า AISI 4140 ที่ถูกเคลือบผิวด้วยฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์ และชิ้นงานเหล็กกล้า AISI 4140 ที่ถูกเคลือบผิวด้วยฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรด์มีการต้านทานการกัดกร่อนที่ดีกว่าชิ้นงานที่ไม่ถูกเคลือบผิว (S.H. Ahn and et al., 2002; Darja K.M. And et al., 2004; Feng H.P. and et al., 2003; Chen J.Y., Yu G.P. and Huang J.H., 2000; Yun Ha Yoo and et al., 2008; S. Rudenja and et al., 1999; L. Cunha and et al., 1998.) ซึ่งอาจเป็นผลเนื่องมาจากไนโตรเจนอะตอมในฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์และไทเทเนียมไนไตรด์เกิดการละลายออกมาอยู่ในรูปประจุลบ (N^-) บริเวณผิวชิ้นงาน ซึ่งจะช่วยให้การผลัดอะตอมของคลอไรด์ (Cl^-) ที่อยู่ในสารละลายที่จะเข้ามาทำลายผิวชิ้นงานให้ออกจากบริเวณผิวชิ้นงาน และเกิดการทำปฏิกิริยากับไฮโดรเจนไอออน (H^+) ในสารละลายเกิดเป็นสารประกอบแอมโมเนีย (NH_4^+) ดังสมการที่



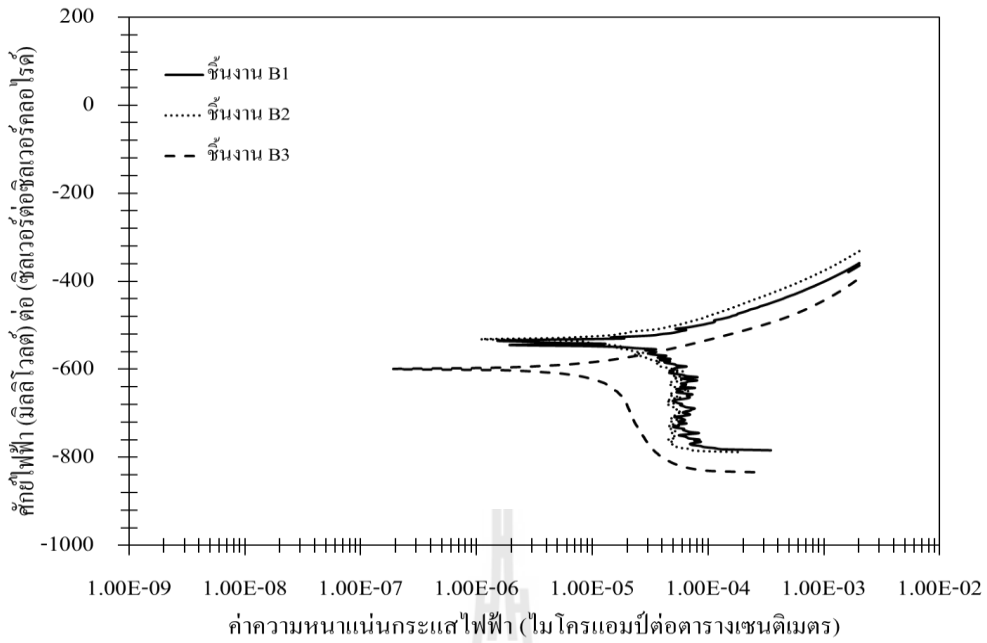
จากสมการที่ 4.1 จะทำให้ค่าพีเอชของสารละลายเพิ่มขึ้น ซึ่งส่งผลในการช่วยลดการกัดกร่อนจากสารละลายได้ (Chyou S. D. and Shih H. C., 1991; Grabke H. J., 1996; A. Medina-Flores and ey al., 2004) ซึ่งสอดคล้องกับการวัดค่าพีเอชภายหลังการทดสอบการกัดกร่อนที่ค่าพีเอช 2 ที่ค่าพีเอชมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น โดยค่าพีเอชของสารละลายภายหลังการทดสอบการกัดกร่อนของชิ้นงานที่ถูกเคลือบผิวด้วยฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์และชิ้นงานที่ถูกเคลือบผิวด้วยฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรด์มีค่าโดยเฉลี่ยเท่ากับ 2.15 และ 2.10 ตามลำดับ ส่วนที่ค่าพีเอช 7 และ 10 ภายหลังการทดสอบการกัดกร่อนค่าพีเอชมีแนวโน้มลดลง (ค่าพีเอชก่อนและหลังทดสอบการกัดกร่อนของชิ้นงานทั้งหมดแสดงในภาคผนวก ข)

นอกจากนี้เมื่อทำการเปรียบเทียบค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนของชิ้นงานเหล็กกล้า AISI 4140 ที่ถูกเคลือบผิวด้วยฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์ และชิ้นงานเหล็กกล้า AISI 4140 ที่ถูกเคลือบผิวด้วยฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรด์ พบว่าค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนมีแนวโน้มมีค่าใกล้เคียงกัน ในขณะที่เดียวกันก็พบว่าค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อนและค่าอัตราการกัดกร่อนก็มีแนวโน้มมีค่าใกล้เคียงกัน แสดงให้เห็นว่าชิ้นงานเหล็กกล้า AISI 4140 ที่ถูกเคลือบผิวด้วยฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์ และชิ้นงานเหล็กกล้า AISI 4140 ที่ถูกเคลือบผิวด้วยฟิล์มบาง

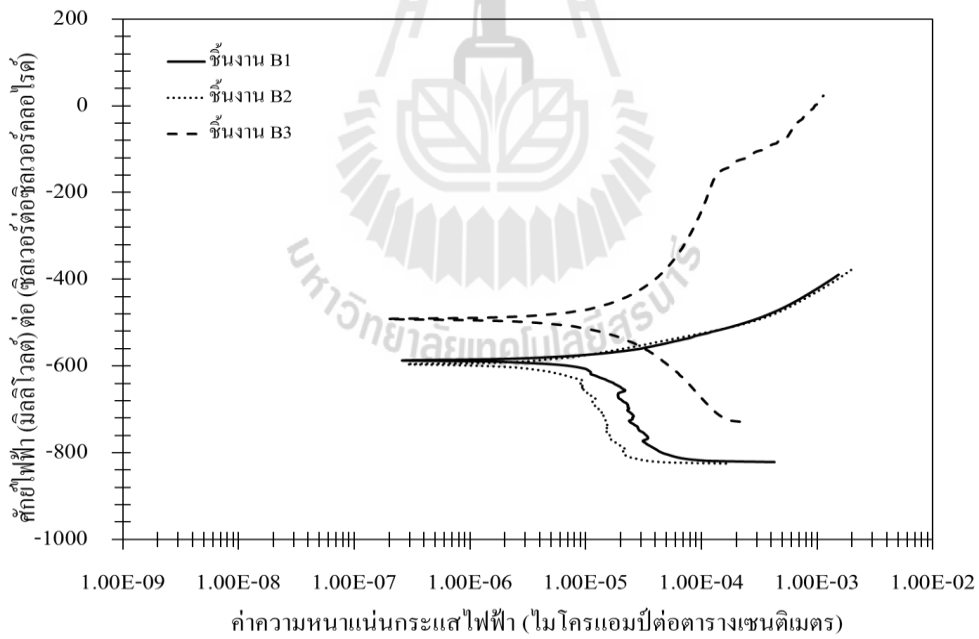
ไทเทเนียมไนไตรด์มีความสามารถต้านทานการกัดกร่อนใกล้เคียงกัน แต่โดยส่วนใหญ่ตามรายงานการวิจัยของ (C. Liu and et al., 2001; V.K. William Grips and et al., 2006; M.A.M Ibrahim, S.F. Korablov and M. Yoshimura., 2002) พบว่าฟิล์มโครเมียมไนไตรด์จะสามารถต้านทานการกัดกร่อนได้ดีกว่าฟิล์มไทเทเนียมไนไตรด์ เนื่องจากฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์ที่มีโครงสร้างที่หนาแน่น มีความสม่ำเสมอ ส่วนฟิล์มไทเทเนียมไนไตรด์เป็นฟิล์มที่มีโครงสร้างเป็นลักษณะแท่ง (Columnar) และมีข้อบกพร่อง เช่น รูพรุนในเนื้อฟิล์มที่มากกว่าฟิล์มโครเมียมไนไตรด์ ทำให้สารละลายมีโอกาสที่จะแพร่เข้าสู่ชั้นฟิล์มและทำปฏิกิริยาการกัดกร่อนชั้นฟิล์มได้ง่าย



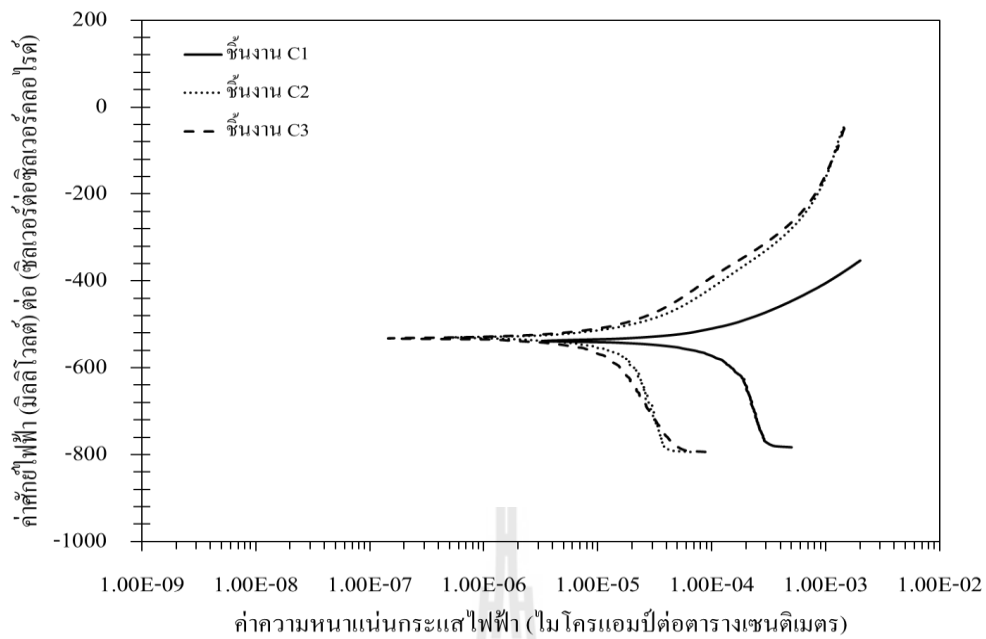
รูปที่ 4.10 ตัวอย่างเส้นโค้งโพลาริเซชันของชิ้นงานเหล็กกล้า AISI 4140 ที่ไม่ถูกเคลือบผิวในสารละลาย โซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้นร้อยละ 3.5 โดยน้ำหนักที่ค่าพีเอช 2



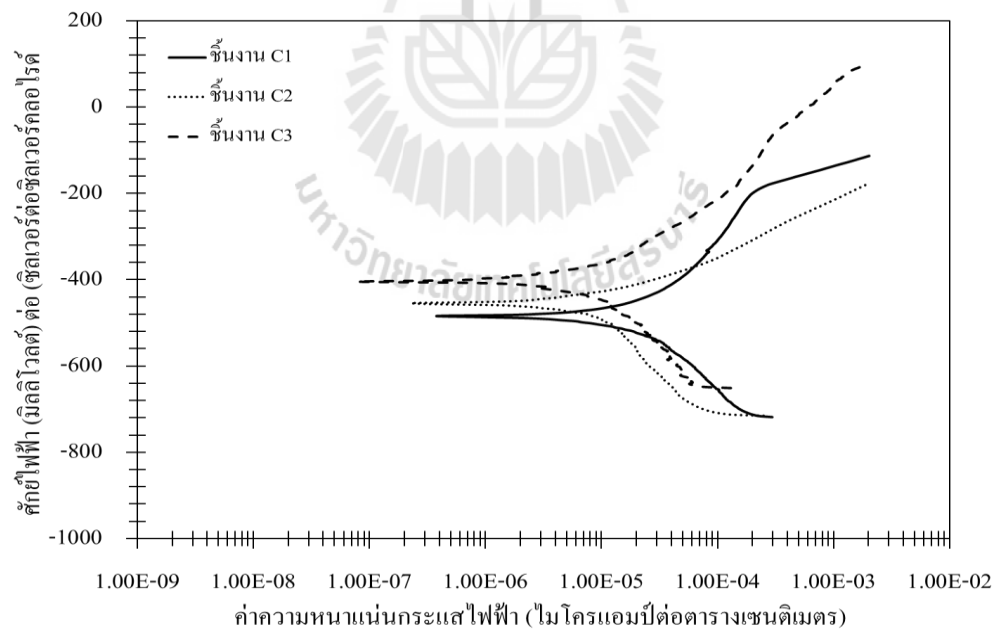
รูปที่ 4.11 ตัวอย่างเส้นโค้งโพลาริเซชันของชิ้นงานเหล็กกล้า AISI 4140 ที่ไม่ถูกเคลือบผิวในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้นร้อยละ 3.5 โดยน้ำหนักที่ค่าพีเอช 7



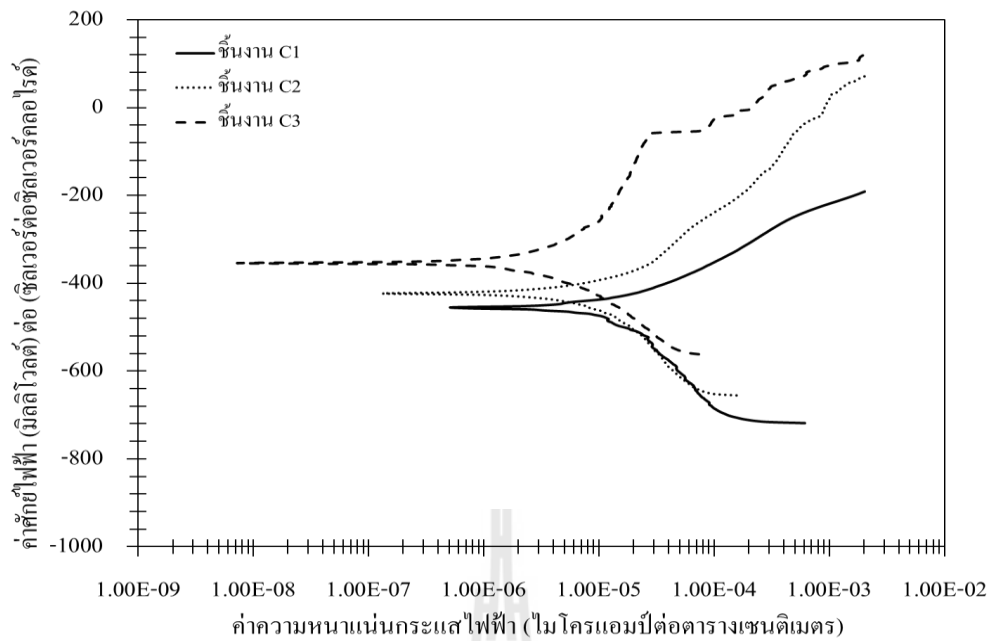
รูปที่ 4.12 ตัวอย่างเส้นโค้งโพลาริเซชันของชิ้นงานเหล็กกล้า AISI 4140 ที่ไม่ถูกเคลือบผิวในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้นร้อยละ 3.5 โดยน้ำหนักที่ค่าพีเอช 10



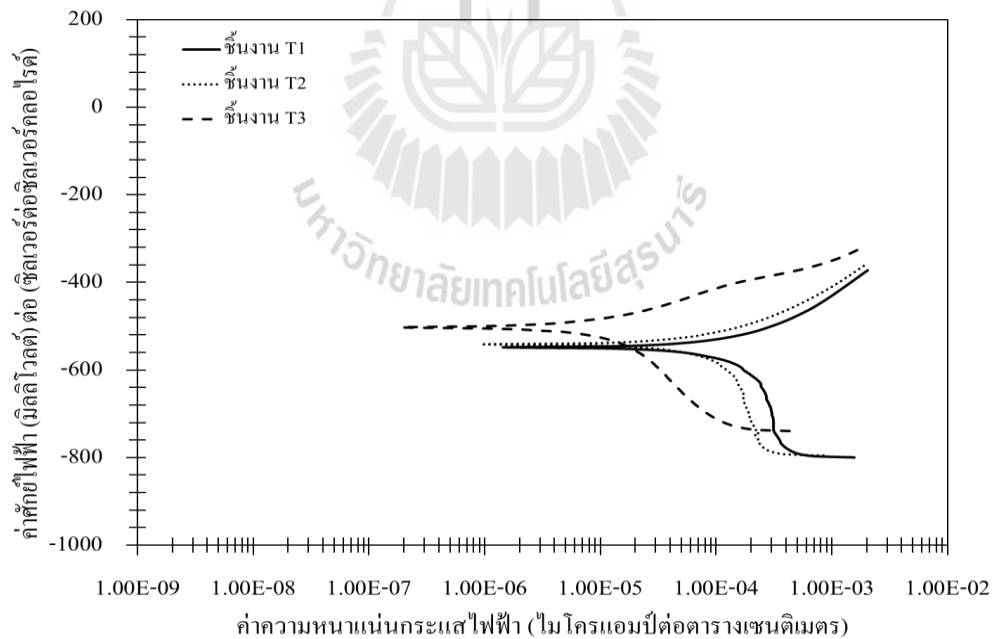
รูปที่ 4.13 ตัวอย่างเส้นโค้งโพลาริเซชันของชิ้นงานเหล็กกล้า AISI 4140 ที่ถูกเคลือบผิวด้วยโครเมียมในทรายดีในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้นร้อยละ 3.5 โดยน้ำหนักที่ค่าพีเอช 2



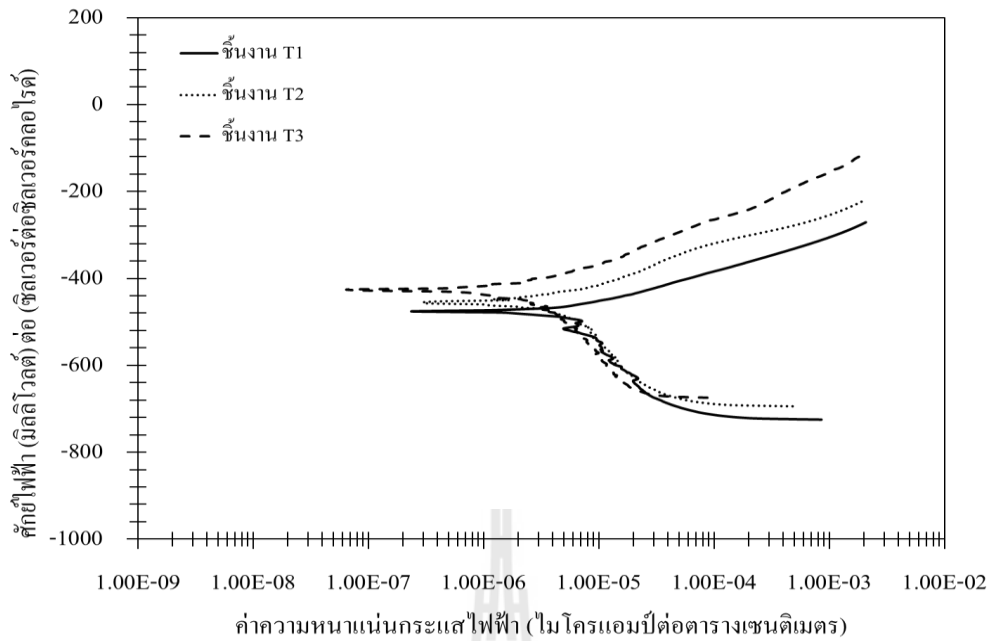
รูปที่ 4.14 ตัวอย่างเส้นโค้งโพลาริเซชันของชิ้นงานเหล็กกล้า AISI 4140 ที่ถูกเคลือบผิวด้วยโครเมียมในทรายดีในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้นร้อยละ 3.5 โดยน้ำหนักที่ค่าพีเอช



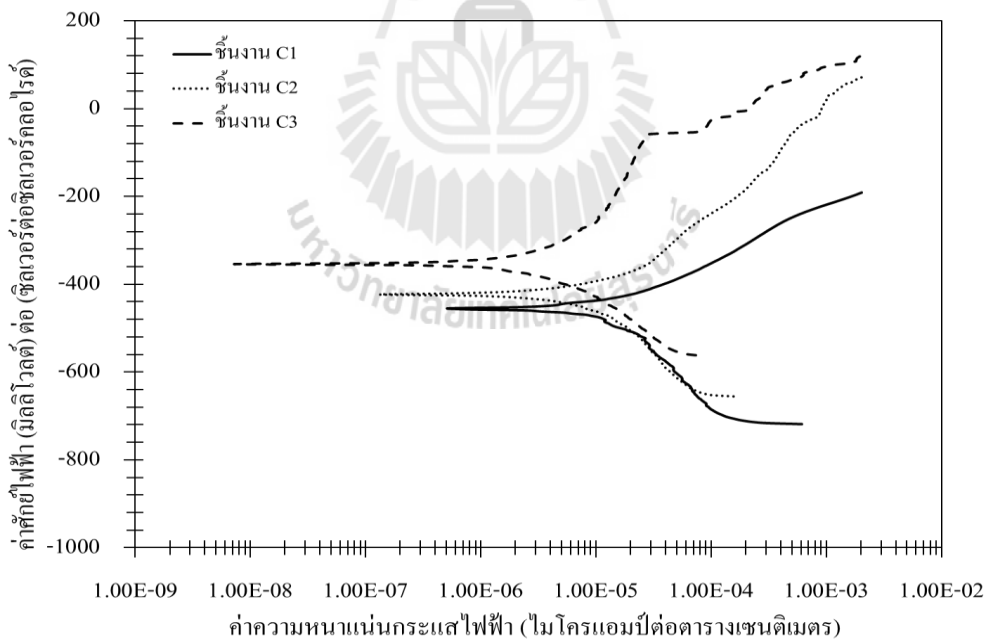
รูปที่ 4.15 ตัวอย่างเส้นโค้งโพลาริเซชันของชิ้นงานเหล็กกล้า AISI 4140 ที่ถูกเคลือบผิวด้วยโครเมียมในทรายดีในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้นร้อยละ 3.5 โดยน้ำหนัก ที่ค่าพีเอช 10



รูปที่ 4.16 ตัวอย่างเส้นโค้งโพลาริเซชันของชิ้นงานเหล็กกล้า AISI 4140 ที่ถูกเคลือบผิวด้วยไทเทเนียมในทรายดีในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้นร้อยละ 3.5 โดยน้ำหนัก ที่ค่าพีเอช 2



รูปที่ 4.17 ตัวอย่างเส้นโค้งโพลาริเซชันของชิ้นงานเหล็กกล้า AISI 4140 ที่ถูกเคลือบผิวด้วยไทเทเนียมในรายคี่ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้นร้อยละ 3.5 โดยน้ำหนักที่ค่าพีเอช 7



รูปที่ 4.18 ตัวอย่างเส้นโค้งโพลาริเซชันของชิ้นงานเหล็กกล้า AISI 4140 ที่ถูกเคลือบผิวด้วยไทเทเนียมในรายคี่ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้นร้อยละ 3.5 โดยน้ำหนักที่ค่าพีเอช 10

ตารางที่ 4.5 ค่าที่ได้จากเส้น โพลาริเซชันของชิ้นงานเหล็กกล้า AISI 4140 ที่ไม่ถูกเคลือบผิว (ชิ้นงาน B1 B2 และ B3) ชิ้นงานเหล็กกล้า AISI 4140 ที่ถูกเคลือบผิวด้วยฟิล์มบาง โครเมียมไนไตรด์ (ชิ้นงาน C1, C2 และ C3) และชิ้นงานเหล็กกล้า AISI 4140 ที่ถูกเคลือบผิวด้วยฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรด์ (ชิ้นงาน T1, T2 และ T3) ที่ทำการทดสอบการกัดกร่อนในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้นร้อยละ 3.5 โดยน้ำหนักที่มีค่าพีเอช 2, 7 และ 10

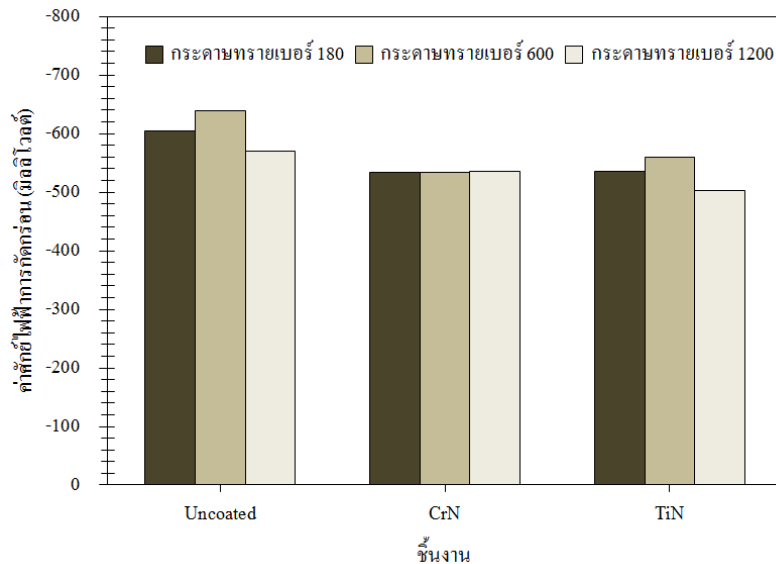
| ชิ้นงาน | พีเอช 2 | | | พีเอช 7 | | | พีเอช 10 | | |
|---------|------------|------------|-----------|------------|------------|-----------|------------|------------|-----------|
| | E_{corr} | I_{corr} | R_{mmy} | E_{corr} | I_{corr} | R_{mmy} | E_{corr} | I_{corr} | R_{mmy} |
| B1 | -605 | 11.23 | 0.1318 | -535 | 8.01 | 0.0941 | -582 | 0.72 | 0.0084 |
| B2 | -639 | 5.38 | 0.0631 | -535 | 4.52 | 0.0531 | -595 | 0.63 | 0.0074 |
| B3 | -570 | 5.42 | 0.0636 | -598 | 0.59 | 0.0069 | -559 | 0.46 | 0.0054 |
| C1 | -534 | 7.47 | 0.0220 | -526 | 0.75 | 0.0022 | -465 | 0.72 | 0.0021 |
| C2 | -534 | 2.61 | 0.0077 | -492 | 0.58 | 0.0017 | -421 | 0.57 | 0.0017 |
| C3 | -536 | 0.92 | 0.0027 | -411 | 0.42 | 0.0012 | -419 | 0.25 | 0.0007 |
| T1 | -536 | 4.10 | 0.0129 | -468 | 0.62 | 0.0019 | -469 | 0.66 | 0.0021 |
| T2 | -560 | 4.07 | 0.0128 | -456 | 0.53 | 0.0017 | -463 | 0.69 | 0.0019 |
| T3 | -502 | 1.25 | 0.0039 | -426 | 0.21 | 0.0007 | -433 | 0.66 | 0.0020 |

หมายเหตุ E_{corr} หมายถึง ค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อน (มิลลิโวลต์)
 I_{corr} หมายถึง ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อน (ไมโครแอมป์ต่อตารางเซนติเมตร)
 R_{mmy} หมายถึง ค่าอัตราการกัดกร่อน (มิลลิเมตรต่อปี)

อย่างไรก็ตามเพื่อแสดงให้เห็นถึงผลของความหยาบผิวของเหล็กกล้า AISI 4140 ก่อนการเคลือบผิว และค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ของสารละลายที่ใช้ในการทดสอบที่มีต่อพฤติกรรมการกัดกร่อนของชิ้นงานทั้งหมด ผู้วิจัยจึงขอนำเสนอผลการทดลองและการวิเคราะห์ผลการทดลอง ดังแสดงในหัวข้อต่อไปนี้

4.3.1 ผลของความหยาบผิวของเหล็กกล้า AISI 4140 ที่มีต่อพฤติกรรมการกัดกร่อน

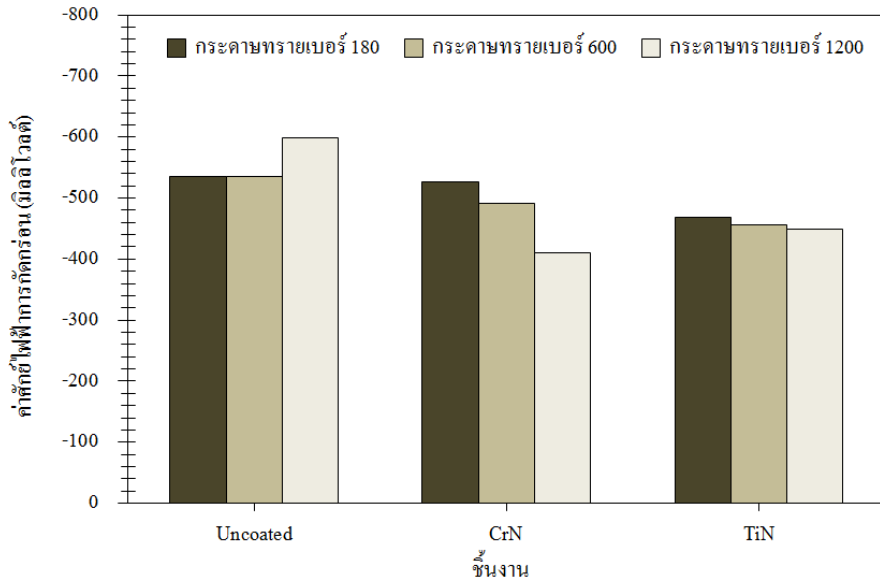
รูปที่ 4.19 ถึง 4.21 แสดงค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนของชิ้นงานเหล็กกล้า AISI 4140 ที่ไม่ถูกเคลือบ ชิ้นงานเหล็กกล้า AISI 4140 ที่ถูกเคลือบผิวด้วยฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์ และชิ้นงานเหล็กกล้า AISI 4140 ที่ถูกเคลือบผิวด้วยฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรด์ที่มีค่าความหยาบผิวของเหล็กกล้า AISI 4140 แตกต่างกันในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้นร้อยละ 3.5 โดยน้ำหนักที่ค่าพีเอช 2, 7 และ 10 ตามลำดับ



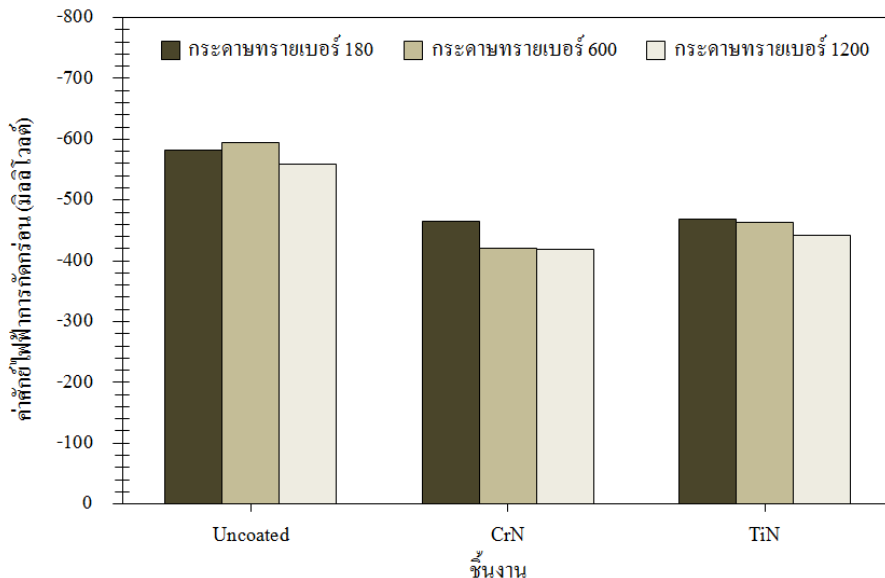
รูปที่ 4.19 ค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนของชิ้นงานที่มีค่าความหยาบผิวของเหล็กกล้า AISI 4140 แตกต่างกันในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้นร้อยละ 3.5 โดยน้ำหนักที่ค่าพีเอช 2

พบว่าค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนแต่ละชิ้นงานมีค่าเปลี่ยนแปลงไปตามความหยาบผิวของเหล็กกล้า AISI 4140 ที่ทุกค่าพีเอช โดยที่ค่าพีเอช 2 และ 10 พบว่าชิ้นงานเหล็กกล้า AISI 4140 ที่ไม่ถูกเคลือบผิวที่ขัดด้วยกระดาษเบอร์ 600 มีค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนน้อยที่สุด และชิ้นงานที่ขัดด้วยกระดาษเบอร์ 1200 มีค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนมากที่สุด ส่วนที่ค่าพีเอช 7 นั้น ชิ้นงานที่ขัดด้วยกระดาษเบอร์ 1200 มีค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนน้อยที่สุด และชิ้นงานขัดด้วยกระดาษเบอร์ 600 มีแนวโน้มมีค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนมากที่สุด แต่อย่างไรก็ตามสำหรับชิ้นงานเหล็กกล้า AISI 4140 ที่ถูกเคลือบผิวด้วยฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์ และชิ้นงานเหล็กกล้า AISI

4140 ที่ถูกเคลือบผิวด้วยฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรด์ พบว่าเมื่อความหยาบผิวของเหล็กกล้า AISI 4140 ลดลง ส่งผลให้ค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนของชิ้นงานมีแนวโน้มมีค่าสูงขึ้นที่ทุกค่าพีเอช แสดงให้เห็นว่าเมื่อเคลือบฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์และฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรด์บนวัสดุที่มีความหยาบผิวลดลง ทำให้ชิ้นงานมีความสามารถในการต้านทานการกัดกร่อนเพิ่มมากขึ้น



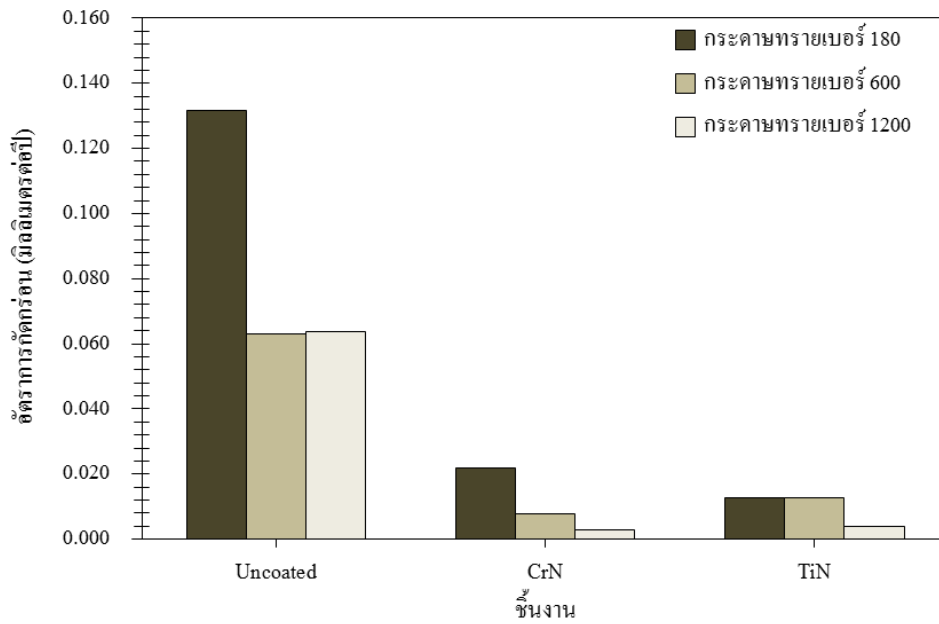
รูปที่ 4.20 ค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนของชิ้นงานที่มีค่าความหยาบผิวของเหล็กกล้า AISI 4140 แตกต่างกันในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้นร้อยละ 3.5 โดยน้ำหนัก ที่ค่าพีเอช 7



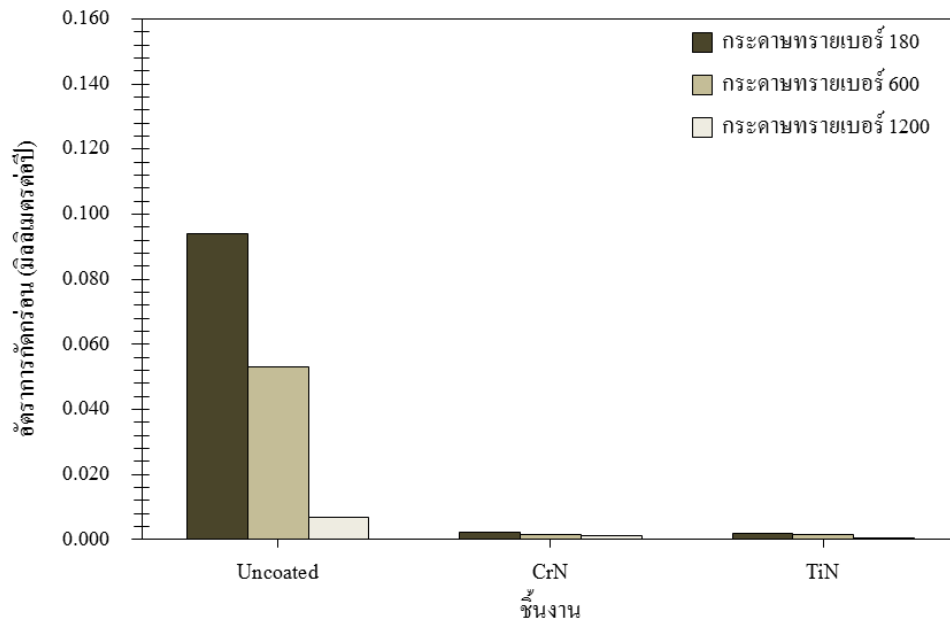
รูปที่ 4.21 ค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนของชิ้นงานที่มีค่าความหยาบผิวของเหล็กกล้า AISI 4140 แตกต่างกันในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้นร้อยละ 3.5 โดยน้ำหนัก ที่ค่าพีเอช 10

รูปที่ 4.22 ถึง 4.24 แสดงค่าอัตราการกัดกร่อนของชิ้นงานเหล็กกล้า AISI 4140 ที่ไม่ถูกเคลือบ ชิ้นงานเหล็กกล้า AISI 4140 ที่ถูกเคลือบผิวด้วยฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์ และ ชิ้นงานเหล็กกล้า AISI 4140 ที่ถูกเคลือบผิวด้วยฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรด์ที่มีค่าความหยาบผิวของเหล็กกล้า AISI 4140 แตกต่างกันในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้นร้อยละ 3.5 โดย น้ำหนักที่ค่าพีเอช 2, 7 และ 10 ตามลำดับ พบว่าค่าอัตราการกัดกร่อนแต่ละชิ้นงานมีค่าเปลี่ยนแปลงไปตามความหยาบผิวของเหล็กกล้า AISI 4140 ที่ทุกค่าพีเอชเช่นเดียวกันกับค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อน โดยที่ค่าพีเอช 2 และ 7 พบว่าเมื่อความหยาบผิวของเหล็กกล้า AISI 4140 ลดลง ค่าอัตราการกัดกร่อนของชิ้นงานเหล็กกล้า AISI 4140 ที่ไม่ถูกเคลือบผิวมีแนวโน้มมีค่าลดลงอย่างชัดเจน ส่วนที่ค่าพีเอช 10 นั้น พบว่าเมื่อความหยาบผิวของเหล็กกล้า AISI 4140 ลดลง ส่งผลให้ค่าอัตราการกัดกร่อนของชิ้นงานลดลงเพียงเล็กน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับผลที่ค่าพีเอช 2 และ 7 สำหรับอัตราการกัดกร่อนของชิ้นงานที่ถูกเคลือบผิวด้วยฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์และชิ้นงานที่ถูกเคลือบผิวด้วยฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรด์มีแนวโน้มการเปลี่ยนแปลง คือ ที่ค่าพีเอช 2 เมื่อความหยาบผิวของเหล็กกล้า AISI 4140 ลดลง ส่งผลให้ค่าอัตราการกัดกร่อนของชิ้นงานลดลงอย่างชัดเจน ส่วนที่ค่าพีเอช 7 และ 10 นั้น พบว่าเมื่อค่าความหยาบผิวของเหล็กกล้า AISI 4140 ลดลง ส่งผลให้ค่าอัตราการกัดกร่อนของชิ้นงานลดลงเพียงเล็กน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับผลที่ค่าพีเอช 2

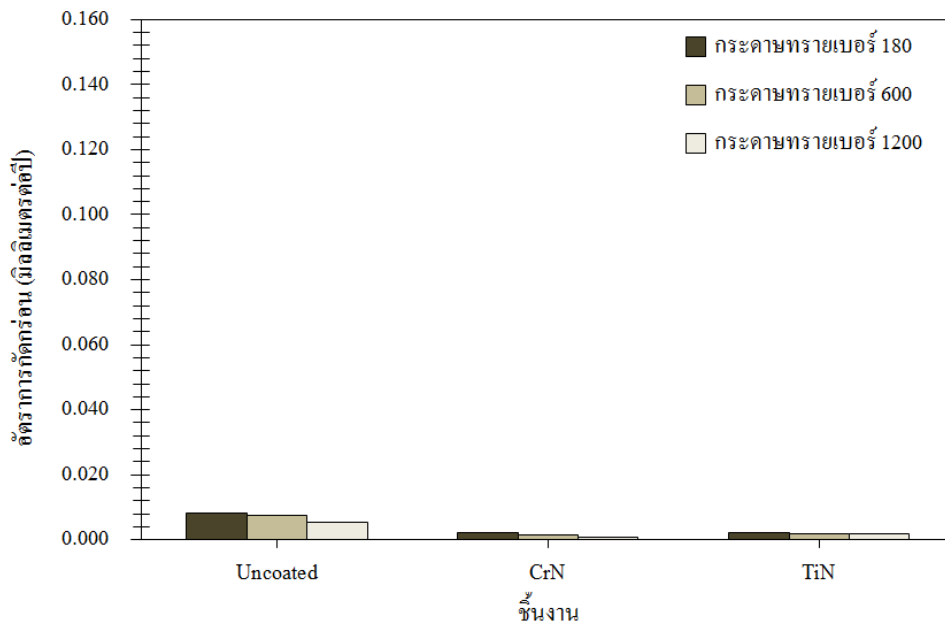
จากผลค่าความหยาบผิวของเหล็กกล้า AISI 4140 ก่อนการเคลือบผิวที่มีต่อค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนและอัตราการกัดกร่อนแสดงให้เห็นว่าชิ้นงานที่ค่าความหยาบผิวของวัสดุที่มากขึ้น ส่งผลให้ชิ้นงานเกิดการกัดกร่อนมากขึ้นหรือมีความสามารถต้านทานการกัดกร่อนลดลง อาจเป็นเพราะชิ้นงานที่มีความหยาบผิวที่มากขึ้นจะส่งผลให้เกิดความไม่เรียบและไม่สม่ำเสมอของพื้นผิว ทำให้มีพื้นที่ที่สารละลายสามารถเข้าไปทำการกัดกร่อนผิวหน้าได้มากขึ้น และหลังการเคลือบผิวด้วยฟิล์มบางบนวัสดุที่มีความหยาบผิวมากกว่า อาจส่งผลให้ฟิล์มบางที่ได้มีปริมาณข้อบกพร่องที่มากกว่าการเคลือบบนวัสดุที่มีความละเอียดหรือส่งผลให้ชั้นฟิล์มและวัสดุมีการยึดเกาะที่ไม่ดี ทำให้คุณสมบัติต้านทานการกัดกร่อนของชิ้นฟิล์มลดลง (Walter R. and Bobby Kannan M., 2011; Shen-Chih Lee, Wei-Yu Ho and F.D. Lai., 1996; O Durst, J. ellermeier and C. Berger., 2008) นอกจากนี้ จากกราฟโพลาริเซชันของชิ้นงานที่มีความหยาบผิวที่ละเอียดที่สุด คือ ชิ้นงาน B3 ที่ค่าพีเอช 10 ชิ้นงาน C3 ที่ค่าพีเอช 7 และ 10 และชิ้นงาน T3 ที่ค่าพีเอช 10 แสดงให้เห็นถึงพาสซีฟฟิล์ม (passive film) บนผิวของชิ้นงาน ซึ่งพาสซีฟฟิล์มที่เกิดขึ้นจะช่วยต้านทานการกัดกร่อนได้ จากผลดังกล่าวจะแสดงให้เห็นว่าความหยาบผิวของวัสดุก่อนการเคลือบผิวนั้นเป็นตัวแปรที่สำคัญต่อคุณสมบัติการต้านทานการกัดกร่อนของฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์และไทเทเนียมไนไตรด์ กล่าวคือ เมื่อทำการเคลือบฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์และไทเทเนียมไนไตรด์บนวัสดุที่มีความหยาบผิวที่ละเอียดขึ้น จะส่งผลให้ชิ้นงานมีคุณสมบัติการต้านทานการกัดกร่อนที่ดีขึ้น



รูปที่ 4.22 ค่าอัตราการกัดกร่อนของชิ้นงานที่ค่าความหยาบผิวของเหล็กกล้า AISI 4140 แตกต่างกันในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้นร้อยละ 3.5 โดยน้ำหนักที่ค่าพีเอช 2



รูปที่ 4.23 ค่าอัตราการกัดกร่อนของชิ้นงานที่ค่าความหยาบผิวของเหล็กกล้า AISI 4140 แตกต่างกันในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้นร้อยละ 3.5 โดยน้ำหนักที่ค่าพีเอช 7

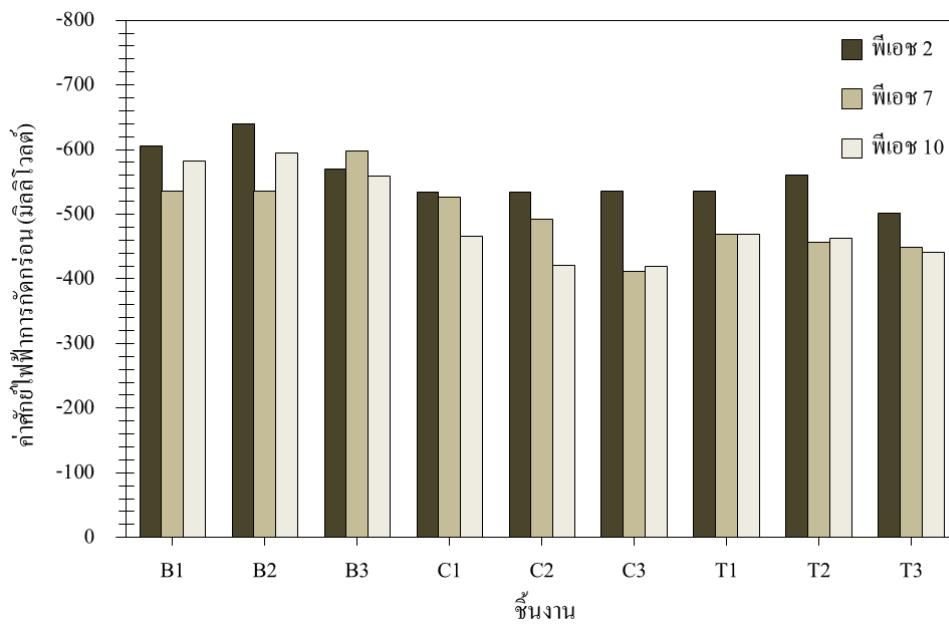


รูปที่ 4.24 ค่าอัตราการกัดกร่อนของชิ้นงานที่ค่าความหยาบผิวของเหล็กกล้า AISI 4140 แตกต่างกันในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้นร้อยละ 3.5 โดยน้ำหนักที่ค่าพีเอช 10

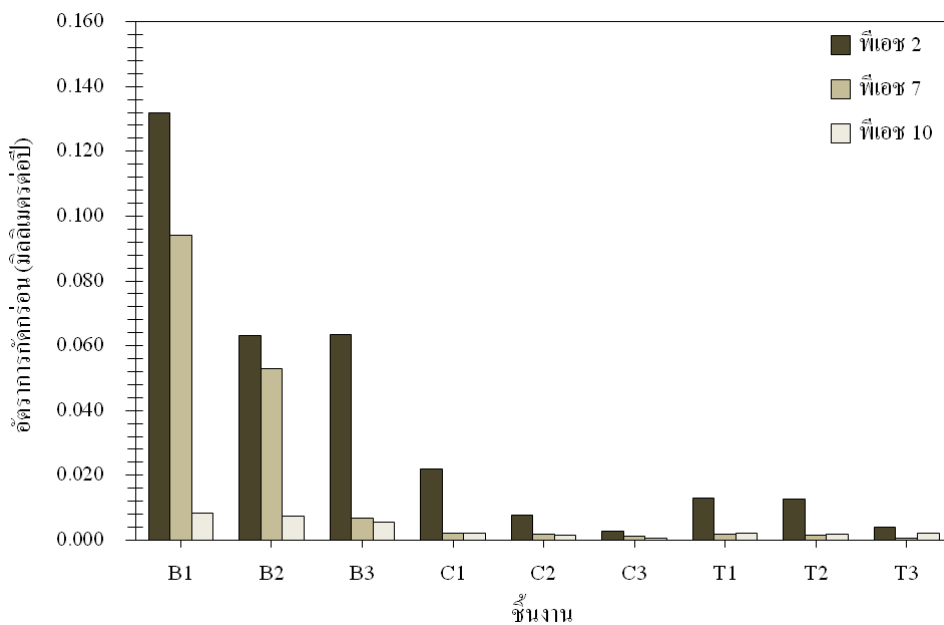
4.3.2 ผลของค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ของสารละลายที่มีต่อพฤติกรรมการกัดกร่อน

รูปที่ 4.25 แสดงค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนของชิ้นงานเหล็กกล้า AISI 4140 ที่ไม่ถูกเคลือบ ชิ้นงานเหล็กกล้า AISI 4140 ที่ถูกเคลือบผิวด้วยฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์ และชิ้นงานเหล็กกล้า AISI 4140 ที่ถูกเคลือบผิวด้วยฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรด์ที่ทดสอบในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้นร้อยละ 3.5 โดยน้ำหนักที่ค่าพีเอช 2, 7 และ 10 พบว่าค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนของชิ้นงานที่ไม่ถูกเคลือบผิวมีการเปลี่ยนแปลงตามค่าพีเอชของสารละลาย ส่วนค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนของชิ้นงานเหล็กกล้า AISI 4140 ที่ถูกเคลือบผิวด้วยฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์ และชิ้นงานเหล็กกล้า AISI 4140 ที่ถูกเคลือบผิวด้วยฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรด์ที่แนวโน้มนีมีค่าสูงขึ้นเมื่อค่าพีเอชของสารละลายเพิ่มมากขึ้น

รูปที่ 4.26 แสดงค่าอัตราการกัดกร่อนของชิ้นงานเหล็กกล้า AISI 4140 ที่ไม่ถูกเคลือบ ชิ้นงานเหล็กกล้า AISI 4140 ที่ถูกเคลือบผิวด้วยฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์ และชิ้นงานเหล็กกล้า AISI 4140 ที่ถูกเคลือบผิวด้วยฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรด์ที่ทดสอบในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้นร้อยละ 3.5 โดยน้ำหนักที่ค่าพีเอช 2, 7 และ 10 พบว่าค่าอัตราการกัดกร่อนของชิ้นงานมีการเปลี่ยนแปลงตามค่าพีเอชของสารละลายเช่นเดียวกันกับค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนโดยเมื่อค่าพีเอชของสารละลายเพิ่มมากขึ้น ค่าอัตราการกัดกร่อนของชิ้นงานทั้งหมดมีแนวโน้มลดลง



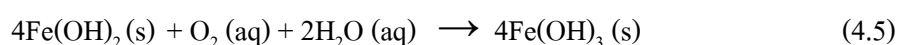
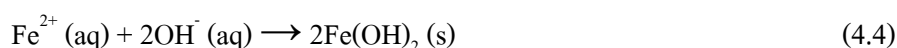
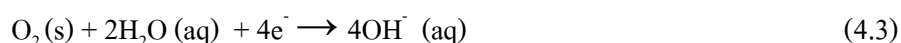
รูปที่ 4.25 ค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนของชิ้นงานเหล็กกล้า AISI 4140 ที่ไม่ถูกเคลือบ ชิ้นงานเหล็กกล้า AISI 4140 ที่ถูกเคลือบผิวด้วยฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์ และชิ้นงานเหล็กกล้า AISI 4140 ที่ถูกเคลือบผิวด้วยฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรด์ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้นร้อยละ 3.5 โดยน้ำหนักที่ค่าพืเอช 2, 7 และ 10



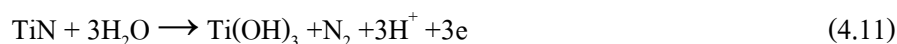
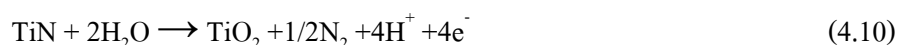
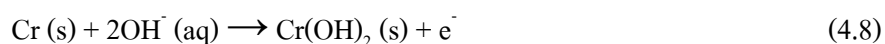
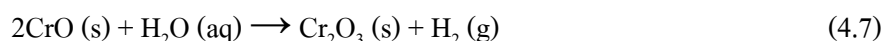
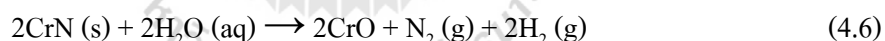
รูปที่ 4.26 ค่าอัตราการกัดกร่อนของชิ้นงานเหล็กกล้า AISI 4140 ที่ไม่ถูกเคลือบ ชิ้นงานเหล็กกล้า AISI 4140 ที่ถูกเคลือบผิวด้วยฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์ และชิ้นงานเหล็กกล้า AISI 4140 ที่ถูกเคลือบผิวด้วยฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรด์ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้นร้อยละ 3.5 โดยน้ำหนักที่ค่าพืเอช 2, 7 และ 10

จากผลของค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนและค่าอัตราการกัดกร่อนของชิ้นงานดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าค่าพีเอชของสารละลายที่ใช้ในการทดสอบมีผลต่อพฤติกรรมการกัดกร่อนของชิ้นงานทั้งหมด โดยคุณสมบัติการต้านทานการกัดกร่อนของชิ้นงานที่ค่าพีเอช 2 จะน้อยกว่าที่ค่าพีเอช 7 และ 10 ตามลำดับ ซึ่งอาจเป็นผลเนื่องมาจากในสารละลายที่มีค่าพีเอช 2 นั้นมีไฮโดรเจนไอออน (H^+) ที่มีอยู่มากในสารละลายที่มีความเป็นกรดสูง และ H^+ ที่เพิ่มขึ้นมาจากการปรับค่าพีเอชโดยใช้กรดไฮโดรคลอริก (HCl) ส่งผลให้เกิดการรวมตัวของไฮโดรเจนไอออน (H^+) เกิดเป็นก๊าซไฮโดรเจน (H_2) ขึ้นดังสมการที่ 4.2 ซึ่งก๊าซ H_2 ที่เกิดขึ้นจะเกิดเป็นแรงดันทำลายพื้นผิววัสดุและผิวฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์และไทเทเนียมไนไตรด์ให้เสียหายได้ นอกจากนี้ยังมีอิทธิพลของคลอไรด์ไอออน (Cl^-) ที่มีมากในสารละลายและจากการปรับค่าพีเอชโดยกรด HCl ซึ่ง Cl^- จะเข้ากัดกร่อนผิววัสดุได้มากขึ้น และสำหรับชิ้นงานที่ผ่านการเคลือบผิวด้วยโครเมียมไนไตรด์นั้นฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์และไทเทเนียมไนไตรด์นั้น ผิวของฟิล์มบางจะถูกกัดกร่อนผ่านทางข้อบกพร่องที่มีอยู่ในฟิล์มบาง เช่น รูพรุน (porosity) หรือรอยแตก (crack) เป็นต้น (L.Cunha and et al., 1999) ทำให้ฟิล์มบางเกิดการสูญเสียคุณสมบัติการต้านทานการกัดกร่อน จึงทำให้ที่ค่าพีเอช 2 มีการเกิดการกัดกร่อนมากที่สุด

สำหรับชิ้นงานที่ไม่ถูกเคลือบผิวที่ค่าพีเอช 7 และ 10 นั้น จะเกิดปฏิกิริยารีดักชันของออกซิเจน (ภายในน้ำที่มีสภาพเป็นกลางและด่าง) แล้วแตกตัวให้ OH^- ดังสมการที่ 4.3 และยังมี OH^- ที่มากจากการแตกตัวของโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ที่ใช้ในการปรับค่าพีเอชของสารละลายทำปฏิกิริยากับ Fe ในเนื้อวัสดุเกิดเป็นสารประกอบ $Fe(OH)_2$ ดังสมการที่ 4.4 ซึ่งสารประกอบ $Fe(OH)_2$ นี้จะเป็นฟิล์มเสถียรภาพที่ช่วยป้องกันการกัดกร่อนจากสารละลายได้ (Z. AHMAD., 2006) แต่สารประกอบ $Fe(OH)_2$ นี้ยังสามารถทำปฏิกิริยากับออกซิเจน (O_2) ที่มีอยู่ในสารละลายและน้ำ (H_2O) เกิดเป็นสารประกอบ $Fe(OH)_3$ ดังสมการที่ 4.5 โดยเป็นฟิล์มที่ไม่มีเสถียรภาพและสามารถเกิดเป็นสารประกอบ Fe_2O_3 หรือสนิมเหล็กบนผิววัสดุได้



ชิ้นงานเหล็กกล้า AISI 4140 ที่ถูกเคลือบผิวด้วยฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์ และชิ้นงานเหล็กกล้า AISI 4140 ที่ถูกเคลือบผิวด้วยฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรด์ที่ค่าพีเอช 7 และ 10 นั้น ฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์บนเหล็กกล้า AISI 4140 จะทำปฏิกิริยากับน้ำ (H₂O) เกิดเป็นสารประกอบโครเมียมออกไซด์ (CrO) ดังสมการที่ 4.6 หรือทำปฏิกิริยากับน้ำ (H₂O) เกิดเป็นสารประกอบโครเมียมออกไซด์ (Cr₂O₃) ดังสมการที่ 4.7 นอกจากนี้โครเมียม (Cr) ในฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์อาจทำปฏิกิริยากับ OH⁻ เกิดเป็นสารประกอบโครเมียมไฮดรอกไซด์ (Cr(OH)₂) อีกด้วย ดังสมการที่ 4.8 ซึ่งสารประกอบเหล่านี้มีความสามารถในการต้านทานการกัดกร่อนได้ (L.Cunha and et al., 1998; I. Milosev, H.-H. Strehblow and B. Navinsek., 1997; L.Cunha and et al., 1999; M. Fenker, M. Balzer and H. Kappl., 2006) แต่ CrO และ Cr₂O₃ เป็นฟิล์มที่มีเสถียรภาพและคุณสมบัติในการต้านทานการกัดกร่อนได้ดีกว่าสารประกอบ Cr(OH)₂ ที่เป็นฟิล์มที่สามารถต้านทานการกัดกร่อนได้ในระดับหนึ่งเท่านั้น (You H. -xia and et al., 2010) ในขณะเดียวกันฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรด์จะทำปฏิกิริยากับออกซิเจน (O₂) หรือน้ำ (H₂O) ที่มีอยู่ในสารละลายเกิดเป็นสารประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO₂) ดังสมการที่ 4.9 และ 4.10 นอกจากนี้ฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรด์อาจทำปฏิกิริยากับน้ำ (H₂O) เกิดเป็นสารประกอบไทเทเนียมไฮดรอกไซด์ (Ti(OH)₃) ดังสมการที่ 4.11 ซึ่งสารประกอบ (TiO₂) และ Ti(OH)₃ เป็นฟิล์มที่มีความสามารถในการต้านทานการกัดกร่อนได้ (Ying Li, Li Qu and Fuihui Wang., 2003; L.Cunha and et al., 1998) แต่ TiO₂ จะเป็นฟิล์มที่มีเสถียรภาพและความสามารถต้านทานการกัดกร่อนได้ดีกว่า Ti(OH)₃ ที่เป็นฟิล์มที่ไม่มีเสถียรภาพ (Bharat avasara and Pradeep Haldar., 2010)

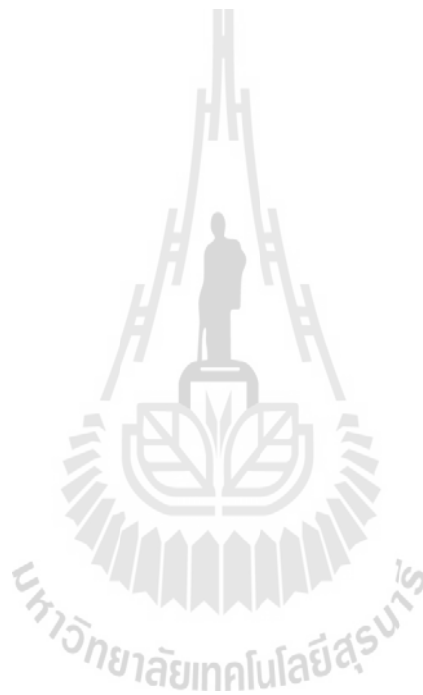


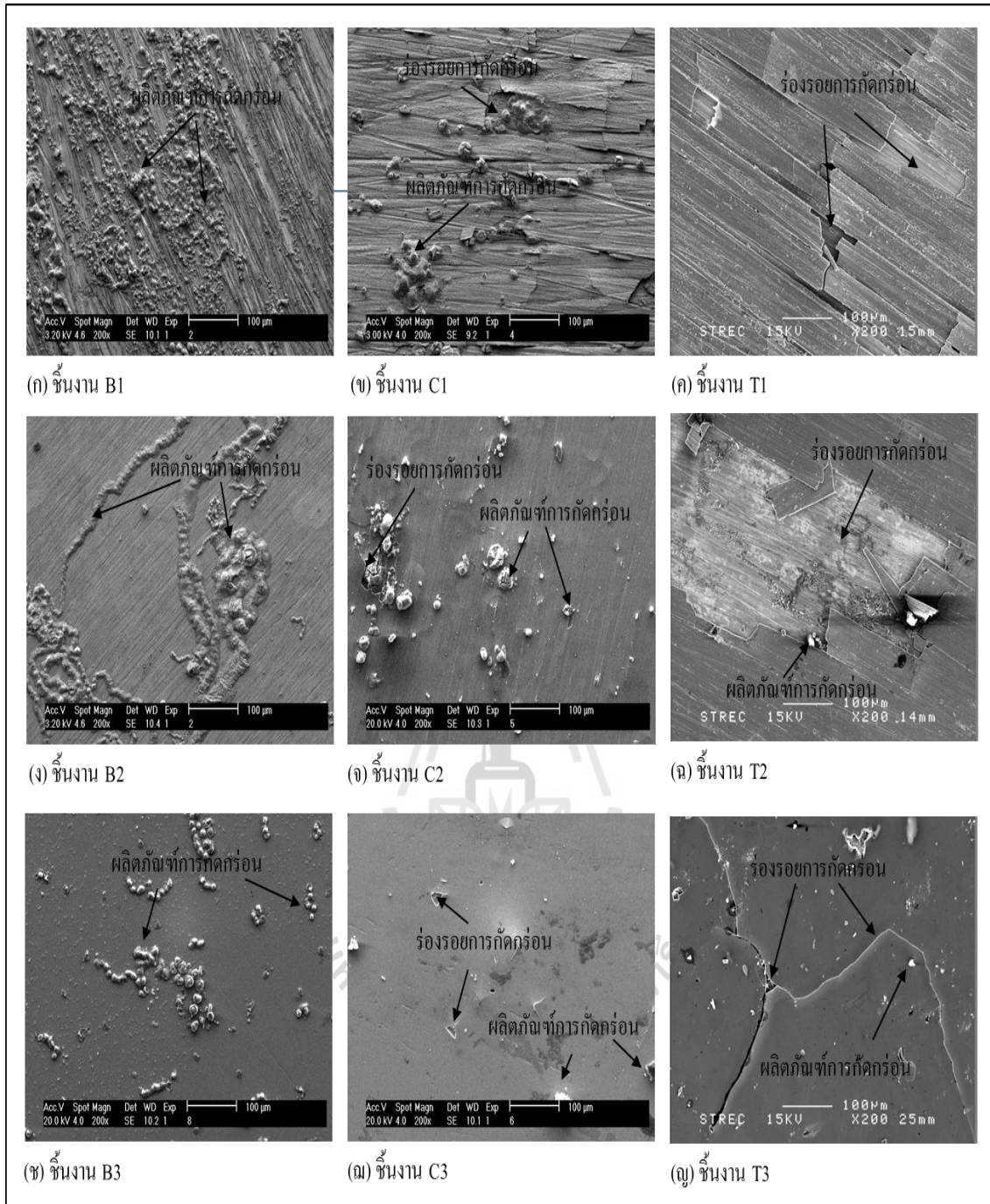
4.4 การวิเคราะห์พื้นผิวภายหลังทดสอบการกัดกร่อน

4.4.1 การวิเคราะห์พื้นผิวภายหลังทดสอบการกัดกร่อนด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (SEM)

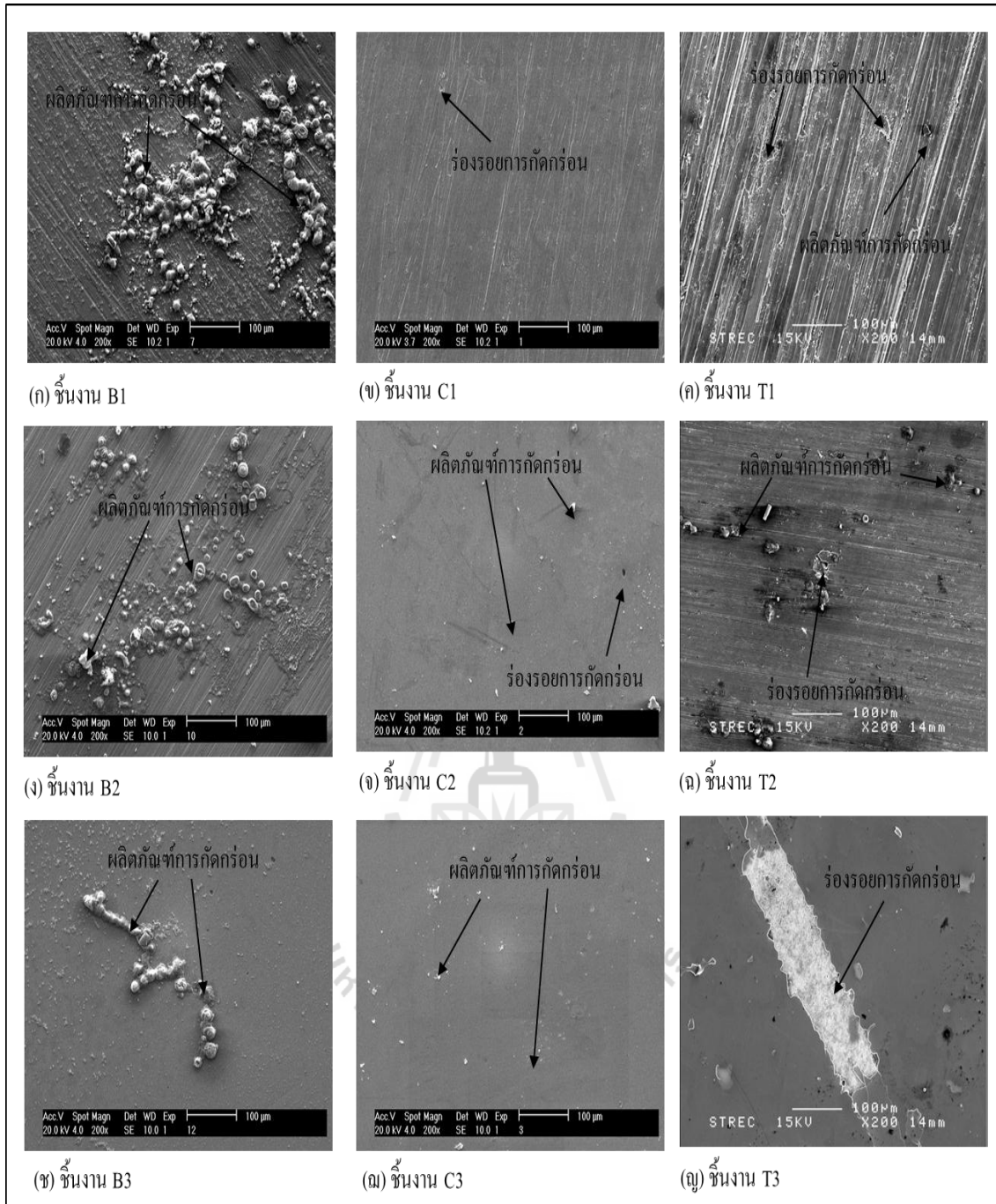
รูปที่ 4.27 ถึง 4.29 แสดงพื้นผิวของชิ้นงานที่ไม่ถูกเคลือบผิว ชิ้นงานเหล็กกล้า AISI 4140 ที่ถูกเคลือบผิวด้วยฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์ และชิ้นงานเหล็กกล้า AISI 4140 ที่ถูกเคลือบผิวด้วยฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรด์หลังทดสอบการกัดกร่อนของในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้นร้อยละ 3.5 โดยน้ำหนักที่ค่าพีเอช 2, 7 และ 10 พบว่าชิ้นงานที่ถูกเคลือบผิวด้วยฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์ และชิ้นงานที่ถูกเคลือบผิวด้วยฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรด์มีบริเวณที่ถูกกัดกร่อนและปริมาณผลิตภัณฑ์การกัดกร่อนที่น้อยกว่าชิ้นงานที่ไม่ถูกเคลือบผิวเนื่องจากมีฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์และฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรด์ที่สามารถเป็นตัวช่วยลดหรือป้องกันการกัดกร่อนจากสารละลายได้ จึงทำให้พบบริเวณที่ถูกกัดกร่อนและผลิตภัณฑ์การกัดกร่อนที่น้อยลง และเมื่อเปรียบเทียบพื้นผิวของชิ้นงานเหล็กกล้า AISI 4140 ที่ถูกเคลือบผิวด้วยฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์ และชิ้นงานเหล็กกล้า AISI 4140 ที่ถูกเคลือบผิวด้วยฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรด์หลังการทดสอบการกัดกร่อน พบว่ามีลักษณะพื้นผิวที่แตกต่างกันเพียงเล็กน้อยเท่านั้น นอกจากนี้ยังพบว่าบริเวณที่ถูกกัดกร่อนและผลิตภัณฑ์การกัดกร่อนที่เกิดขึ้นของชิ้นงานที่ไม่ถูกเคลือบผิวมีการเปลี่ยนแปลงไปตามความหยาบผิวของวัสดุและค่าพีเอชของสารละลาย โดยพบว่าเมื่อค่าพีเอชของสารละลายเพิ่มขึ้นและค่าความหยาบผิวของวัสดุลดลง บริเวณที่ถูกกัดกร่อนและปริมาณผลิตภัณฑ์การกัดกร่อนบนผิวของชิ้นงานที่ไม่ถูกเคลือบผิวมีจำนวนลดน้อยลง ซึ่งจะเห็นได้ว่าผิวของชิ้นงาน B1 และ B2 ที่ขัดด้วยกระดาษเบอร์ 180 และ 600 ตามลำดับ ปรากฏเห็นรอยขีดอย่างชัดเจน และพบว่าผลิตภัณฑ์การกัดกร่อนที่เกิดขึ้นจะเกิดตามแนวรอยของกระดาษทราย ส่วนชิ้นงาน B3 ที่ขัดด้วยกระดาษเบอร์ 1200 จะพบว่าผลิตภัณฑ์การกัดกร่อนที่เกิดขึ้นจะมีลักษณะเป็นอนุภาคขนาดเล็กและกระจายทั่วตามพื้นผิว และพบว่าบริเวณที่ถูกกัดกร่อนและผลิตภัณฑ์การกัดกร่อนที่เกิดขึ้นบนผิวของชิ้นงานเหล็กกล้า AISI 4140 ที่ถูกเคลือบผิวด้วยฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์ และชิ้นงานเหล็กกล้า AISI 4140 ที่ถูกเคลือบผิวด้วยฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรด์มีการเปลี่ยนแปลงไปตามความหยาบผิวของวัสดุและค่าพีเอชของสารละลายเช่นเดียวกันกับชิ้นงานที่ไม่ถูกเคลือบผิว โดยบริเวณที่ถูกกัดกร่อนและปริมาณผลิตภัณฑ์การกัดกร่อนลดลงเมื่อความหยาบผิวของวัสดุก่อนการเคลือบผิวลดลง ซึ่งชิ้นงานที่มีค่าความหยาบผิวมากที่สุด (ชิ้นงาน C1 และ T1) ที่ค่าพีเอช 2 จะพบว่าชั้นฟิล์มบางเกิดการแตกร้าวและบางส่วนเกิดการแตกและหลุดออกจากผิวชิ้นงานหลังการทดสอบการกัดกร่อน อาจเป็นผลเนื่องมาจากความหยาบผิววัสดุที่มากขึ้นจะส่งผลให้การยึดเกาะระหว่างชั้นฟิล์มและวัสดุลดน้อยลงทำให้ชั้นฟิล์มเกิดการแตกและหลุดออกจากผิววัสดุขณะทดสอบการกัดกร่อน

เป็นสาเหตุที่ทำให้สารละลายสามารถแทรกซึมผ่านชั้นฟิล์มเข้าทำปฏิกิริยากับเนื้อวัสดุและเกิดการกัดกร่อนได้ง่ายขึ้น (Liu C. and et al., 1995) ส่วนที่ความหนาของวัสดุที่ละเอียดกว่า จะพบรอยแตกของชั้นฟิล์มและปริมาณผลิตภัณฑ์การกัดกร่อนที่น้อยลงตามลำดับ ส่วนที่ค่าพีเอช 7 และ 10 จะพบว่าเมื่อความหนาของวัสดุก่อนการเคลือบผิวลดลง ส่งผลให้บริเวณที่ถูกกัดกร่อนและปริมาณผลิตภัณฑ์การกัดกร่อนบนผิวของชั้นฟิล์มหลังการทดสอบการกัดกร่อนมีจำนวนเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย

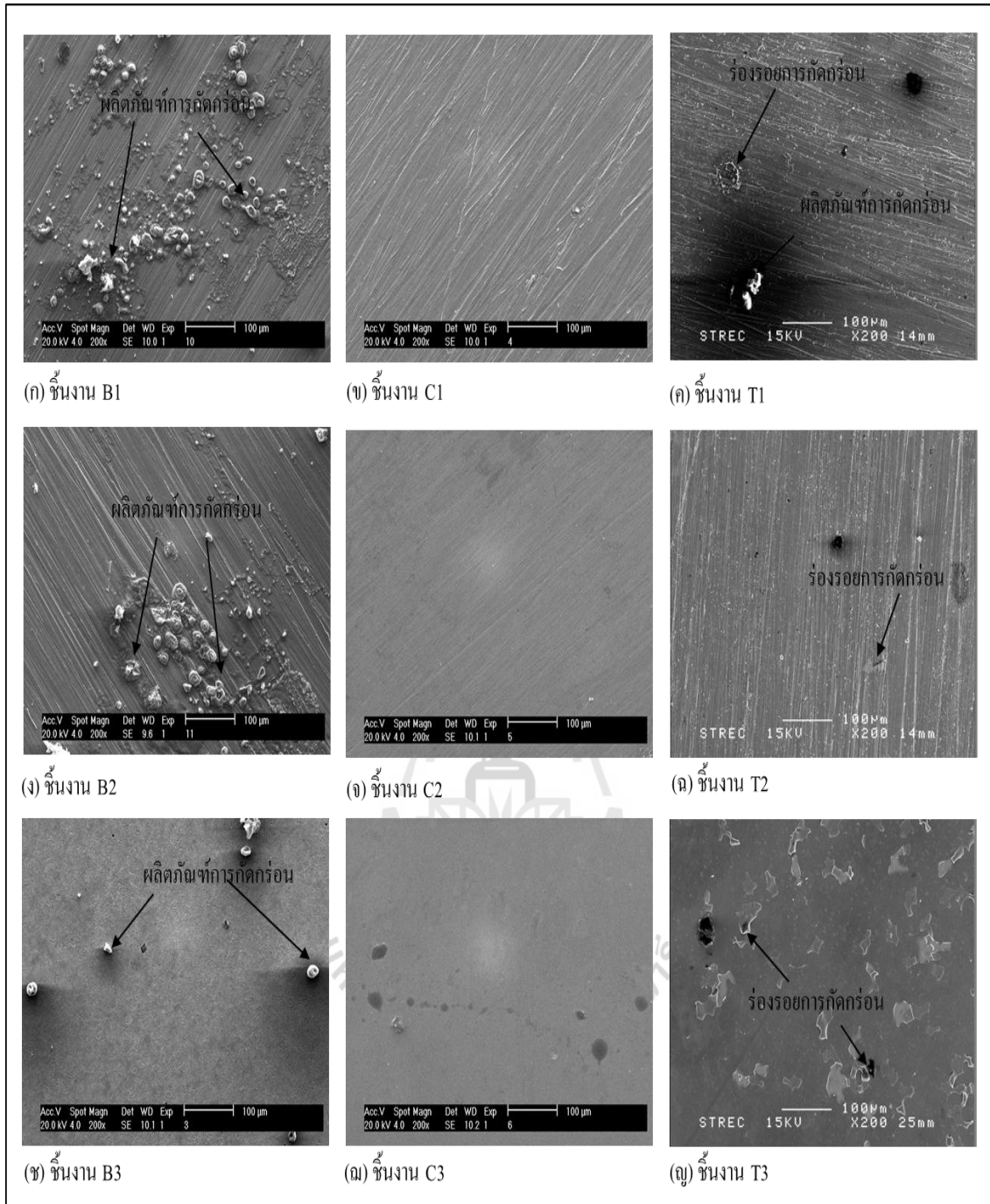




รูปที่ 4.27 ภาพพื้นผิวหลังการทดสอบการกัดกร่อนของชิ้นงานเหล็กกล้า AISI 4140 ที่ไม่ถูกเคลือบ ชิ้นงานเหล็กกล้า AISI 4140 ที่ถูกเคลือบผิวด้วยฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์ และชิ้นงานเหล็กกล้า AISI 4140 ที่ถูกเคลือบผิวด้วยฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรด์ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้นร้อยละ 3.5 โดยน้ำหนักที่ค่าพีเอช 2



รูปที่ 4.28 ภาพพื้นผิวหลังการทดสอบการกัดกร่อนของชิ้นงานเหล็กกล้า AISI 4140 ที่ไม่ถูกเคลือบ
 ชิ้นงานเหล็กกล้า AISI 4140 ที่ถูกเคลือบผิวด้วยฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์ และชิ้นงาน
 เหล็กกล้า AISI 4140 ที่ถูกเคลือบผิวด้วยฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรด์ในสารละลาย
 โซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้นร้อยละ 3.5 โดยน้ำหนักที่ค่าพีเอช 7

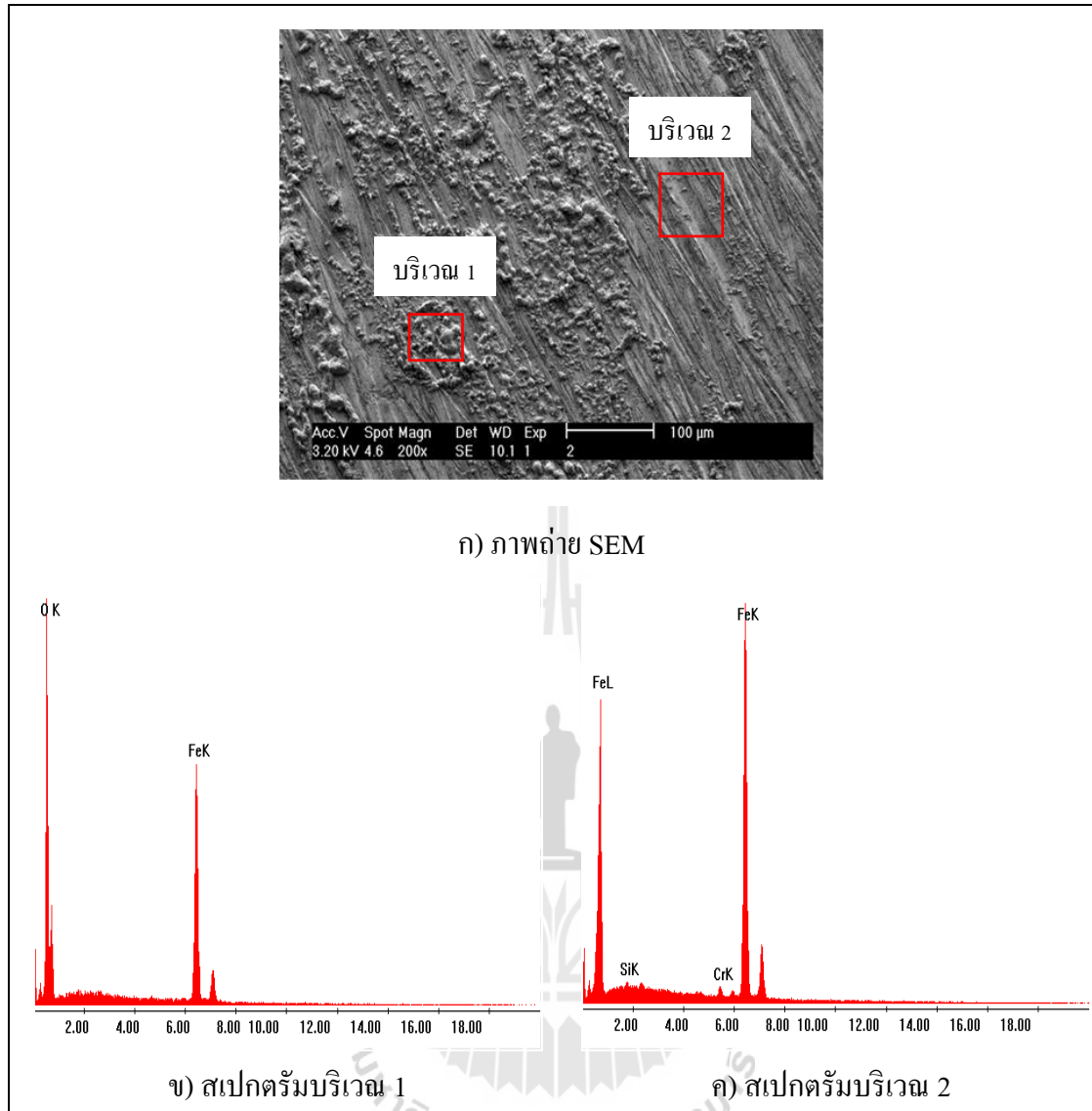


รูปที่ 4.29 ภาพพื้นผิวหลังการทดสอบการกัดกร่อนของชิ้นงานเหล็กกล้า AISI 4140 ที่ไม่ถูกเคลือบ ชิ้นงานเหล็กกล้า AISI 4140 ที่ถูกเคลือบผิวด้วยฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์ และชิ้นงานเหล็กกล้า AISI 4140 ที่ถูกเคลือบผิวด้วยฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรด์ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้นร้อยละ 3.5 โดยน้ำหนักที่ค่าพีเอช 10

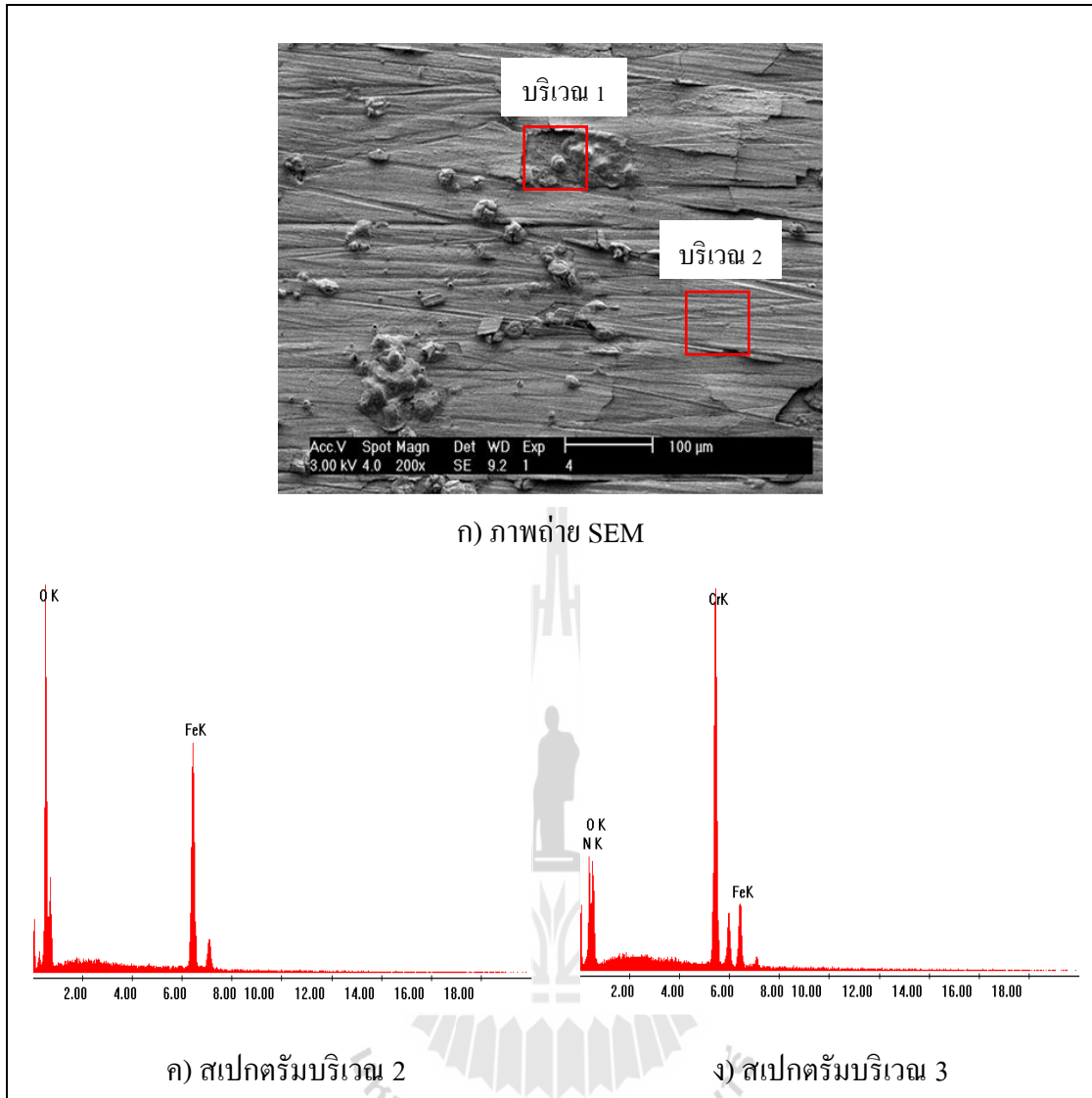
4.4.2 การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีบนพื้นผิวของชิ้นงานภายหลังทดสอบการกัดกร่อนด้วยเทคนิค EDX

หลังการทดสอบการกัดกร่อนได้มีการตรวจสอบองค์ประกอบทางเคมีบนพื้นผิวชิ้นงานหลังการทดสอบการกัดกร่อนด้วยเทคนิค EDX ซึ่งเป็นเทคนิคที่ใช้ร่วมกับกล้อง SEM โดยจะยกตัวอย่างการตรวจสอบส่วนผสมทางเคมี ณ บริเวณที่ถูกกัดกร่อนและผลิตภัณฑ์การกัดกร่อนที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวชิ้นงาน B1 C1 และ T1 หลังทดสอบการกัดกร่อนในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้นร้อยละ 3.5 โดยน้ำหนักที่ค่าพีเอช 2 ซึ่งเป็นชิ้นงานที่เกิดการกัดกร่อนมากที่สุด (ผลของการตรวจสอบองค์ประกอบทางเคมีบนพื้นผิวของชิ้นงานอื่นๆ ด้วยเทคนิค EDX แสดงในภาคผนวก ค)

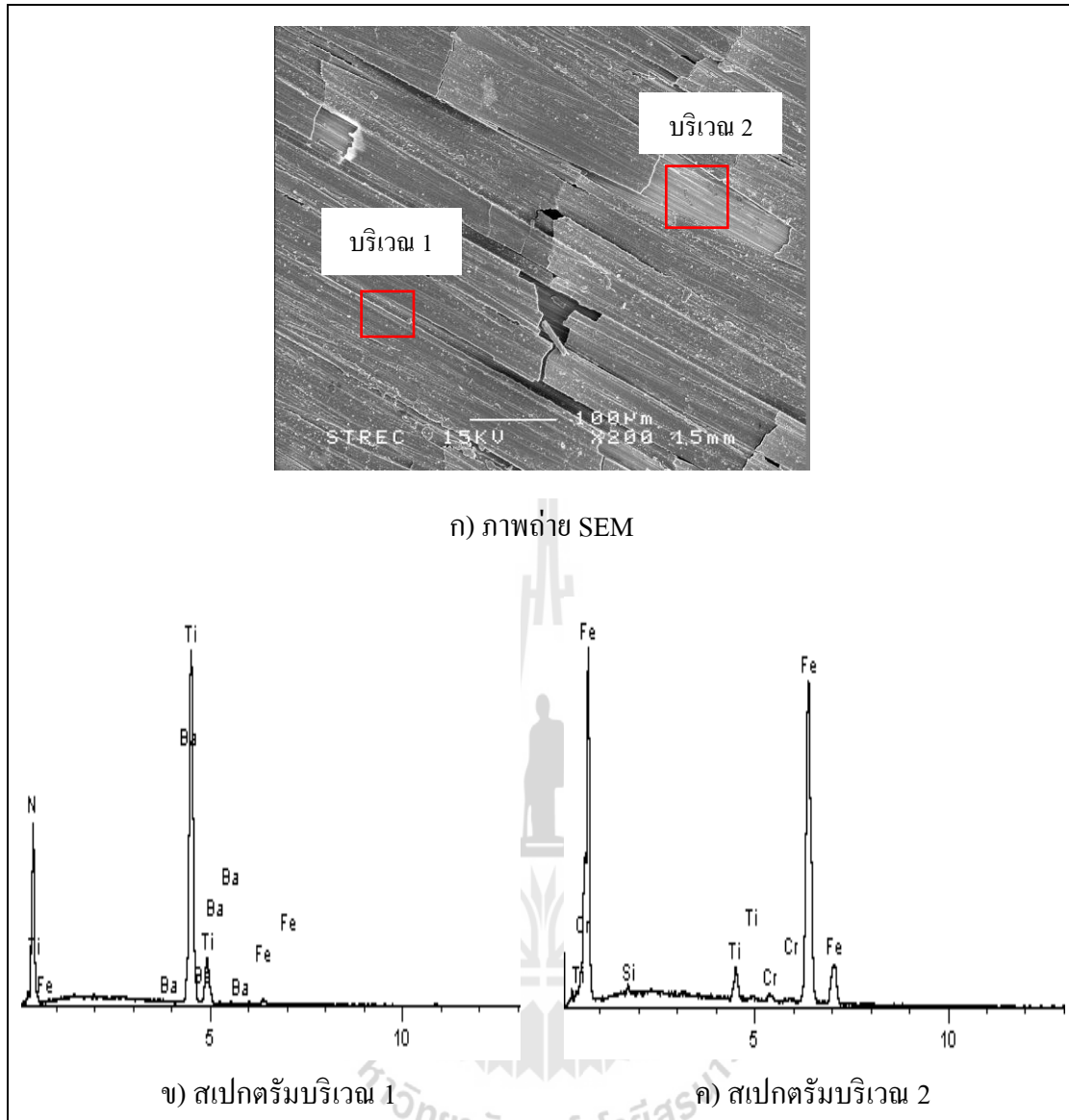
รูปที่ 4.30 ถึง 4.32 แสดงตัวอย่างผลของการตรวจสอบองค์ประกอบทางเคมีของบริเวณที่ถูกกัดกร่อนและผลิตภัณฑ์การกัดกร่อนของชิ้นงาน B1 C1 และ T1 ที่ค่าพีเอช 2 ด้วยเทคนิค EDX พบว่าบริเวณที่ถูกกัดกร่อนหรือบริเวณ 1 ของชิ้นงาน B1 และ C1 มีองค์ประกอบของธาตุเหล็ก (Fe) และ ออกซิเจน (O) เป็นหลัก (รูปที่ 4.30 และ 4.31) ซึ่งอาจสันนิษฐานได้ว่าเป็นผลิตภัณฑ์การกัดกร่อนที่เกิดขึ้นในรูปแบบของออกไซด์ของเหล็กหรือสนิมเหล็ก แสดงให้เห็นว่าบริเวณนี้ฟิล์มฟิล์มบางโครเมียมในทรายด์ถูกกัดกร่อนจนหลุดออกจากพื้นผิวจนหมดทำให้สารละลายกัดกร่อนผิววัสดุจนเกิดเป็นเหล็กออกไซด์ ส่วนชิ้นงาน T1 บริเวณที่ถูกกัดกร่อนหรือบริเวณ 1 มีองค์ประกอบของธาตุเหล็ก (Fe) เป็นหลัก อย่างไรก็ตามไม่พบธาตุ O เนื่องจากบริเวณนี้ไม่พบผลิตภัณฑ์การกัดกร่อนเกิดขึ้นเหมือนกับชิ้นงาน B1 และ C1 ซึ่งคาดว่าบริเวณนี้ชั้นฟิล์มได้ถูกกัดกร่อนจนหลุดออกจนหมด จึงพบธาตุ Fe ที่เป็นส่วนผสมหลักของวัสดุหรือเหล็กกล้า AISI 4140 เพียงอย่างเดียว ในขณะที่เดียวกันได้ทำการวิเคราะห์บริเวณที่ไม่ถูกกัดกร่อนหรือบริเวณ 2 เพื่อให้เห็นความแตกต่างขององค์ประกอบทางเคมีหลังการทดสอบการกัดกร่อนระหว่างบริเวณที่ถูกกัดกร่อนและไม่ถูกกัดกร่อนอีกด้วย โดยบริเวณ 2 ของชิ้นงาน B1 จะพบองค์ประกอบของธาตุเหล็ก (Fe) เป็นหลัก ซึ่งเป็นธาตุองค์ประกอบหลักของวัสดุหรือเหล็กกล้า AISI 4140 ส่วนชิ้นงาน C1 พบองค์ประกอบของธาตุโครเมียม (Cr) และ ไนโตรเจน (N) เป็นหลัก และชิ้นงาน T1 พบองค์ประกอบของธาตุไทเทเนียม (Ti) และ ไนโตรเจน (N) เป็นหลัก ซึ่งธาตุเหล่านี้เป็นองค์ประกอบหลักของฟิล์มบางโครเมียมในทรายด์และฟิล์มบางไทเทเนียมในทรายด์



รูปที่ 4.30 ภาพถ่าย SEM และผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีบนพื้นผิวของ
ชิ้นงาน B1 หลังทดสอบการกัดกร่อนในสารละลายโซเดียมคลอไรด์
ความเข้มข้นร้อยละ 3.5 โดยน้ำหนักที่ค่าพีเอช 2



รูปที่ 4.31 ภาพถ่าย SEM และผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีบนพื้นผิวของ
 ชิ้นงาน C1 หลังทดสอบการกัดกร่อนในสารละลายโซเดียมคลอไรด์
 ความเข้มข้นร้อยละ 3.5 โดยน้ำหนักที่ค่าพีเอช 2

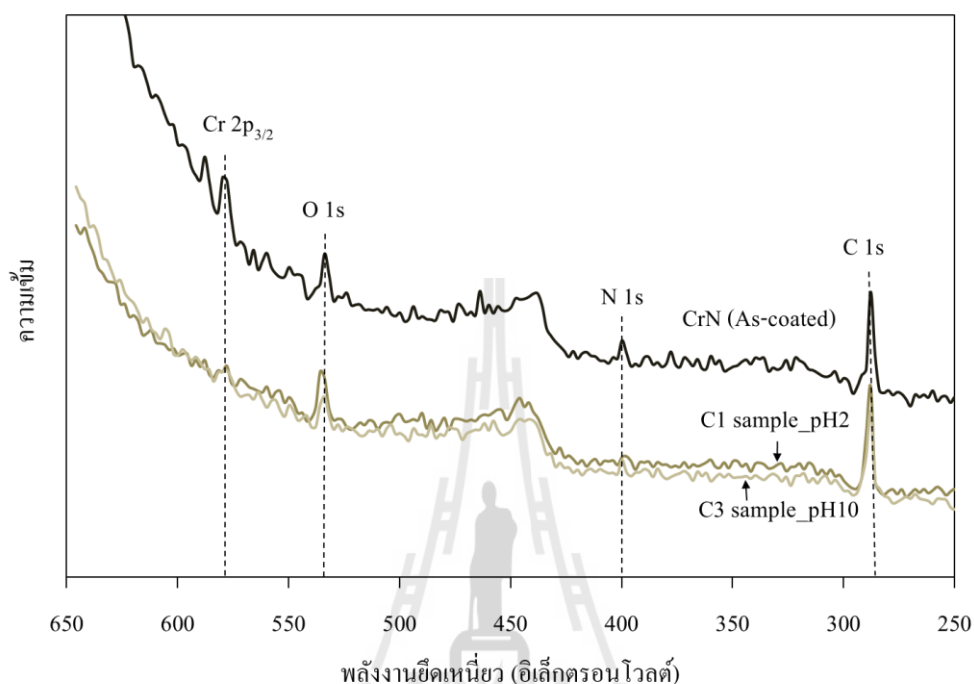


รูปที่ 4.32 ภาพถ่าย SEM และผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีบนพื้นผิวของชิ้นงาน T1 หลังทดสอบการกัดกร่อนในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ ความเข้มข้น ร้อยละ 3.5 โดยน้ำหนักที่ค่าพีเอช 2

4.4.3 การวิเคราะห์คุณลักษณะของฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์ที่เคลือบบนเหล็กกล้า AISI 4140 ด้วยเทคนิค X-ray Photoelectron Spectroscopy (XPS)

รูปที่ 4.33 แสดงผลสเปกตรัมของ XPS ของชิ้นงานที่ถูกเคลือบผิวด้วยฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์ก่อนและหลังทดสอบการกัดกร่อน พบส่วนผสมทางเคมีที่ค่าระดับพลังงาน 577.5 (587.8), 399.4, 533.8 และ 287.8 eV ซึ่งค่าระดับพลังงานดังกล่าวมีค่าใกล้เคียงกับค่าระดับพลังงานของธาตุ Cr 2p_{3/2}, O 1s, N 1s และ C 1s ตามลำดับ (C. Emery, A.R. Chourasia and P. Yashar., 1999; A.Vyas and et al., 2008; A. Lippitz and Th. Hubert., 2005; I. Bertoti., 2002) โดยชิ้นงานหลังการ

ทดสอบการกัดกร่อนนั้น ชิ้นงาน C1 ที่ค่าพีเอช 2 และชิ้นงาน C3 ที่ค่าพีเอช 10 ถูกเลือกเพื่อตรวจสอบด้วยเทคนิค XPS เพราะชิ้นงานดังกล่าวเป็นชิ้นงานที่มีอัตราการกัดกร่อนสูงที่สุด ส่วนชิ้นงาน C3 ที่ค่าพีเอช 10 เป็นชิ้นงานที่มีอัตราการกัดกร่อนต่ำที่สุด



รูปที่ 4.33 ผลสเปกตรัมของ XPS ของชิ้นงานที่ถูกเคลือบผิวด้วยฟิล์มบางโครเมียมในไตรายด์ก่อนและหลังทดสอบการกัดกร่อน

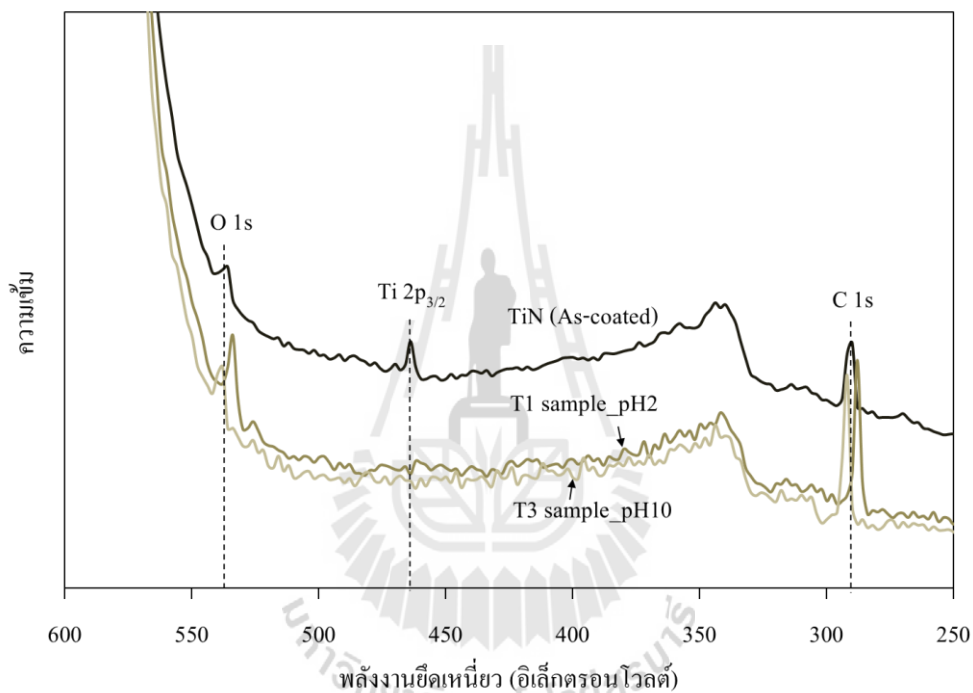
หลังการทดสอบการกัดกร่อนพบว่าชิ้นงานทั้งสองมีปริมาณของธาตุโครเมียมลดลงแทบจะไม่ปรากฏเห็นบนเส้นสเปกตรัม และชิ้นงาน C1 ที่ค่าพีเอช 2 มีปริมาณไนโตรเจนที่ลดลงจนแทบจะปรากฏเห็นบนเส้นสเปกตรัมเช่นเดียวกัน แต่ชิ้นงาน C3 ที่ค่าพีเอช 10 นั้นยังพบปริมาณธาตุไนโตรเจนอยู่เล็กน้อย จากผลดังกล่าวอาจกล่าวได้ว่าหลังการทดสอบการกัดกร่อนชิ้นฟิล์มบางโครเมียมในไตรายด์ได้ถูกกัดกร่อนจนฟิล์มบางส่วนได้หลุดออกจากพื้นผิววัสดุจึงทำให้ปริมาณของธาตุโครเมียมและไนโตรเจนลดลง อย่างไรก็ตามสำหรับชิ้นงาน C3 ที่ค่าพีเอช 10 ที่ยังพบธาตุไนโตรเจนอยู่นั้น เนื่องจากพื้นผิวของฟิล์มบางโครเมียมในไตรายด์ของชิ้นงาน C3 ที่ค่าพีเอช 10 ถูกกัดกร่อนน้อยกว่าชิ้นงาน C1 ที่ค่าพีเอช 2 สำหรับปริมาณของธาตุออกซิเจนที่ถูกตรวจพบพบว่าชิ้นงาน C1 ที่ค่าพีเอช 2 มีปริมาณธาตุออกซิเจนที่เพิ่มขึ้น ส่วนชิ้นงาน C3 ที่ค่าพีเอช 10 นั้นมีปริมาณธาตุออกซิเจนที่ใกล้เคียงกับชิ้นงานก่อนทดสอบการกัดกร่อน และธาตุคาร์บอนที่ถูกตรวจพบมีปริมาณที่ใกล้เคียงกันทุกชิ้นงาน ซึ่งธาตุออกซิเจนและคาร์บอนที่ถูกตรวจพบบนพื้นผิวของฟิล์มบางโครเมียมในไตรายด์นั้นมีความเป็นไปได้ว่าเป็นธาตุออกซิเจนและคาร์บอนที่เป็นสารมลทินอยู่ใน

อากาศทั่วไป หรือจากกระบวนการเคลือบไอทางกายภาพ (Tunmee, S. and et al., 2011) หรือธาตุออกซิเจนที่มาจากเกิดการเกิดออกซิเดชันของฟิล์มบางหรือการเกิดออกซิเดชันของวัสดุในกรณีที่ฟิล์มบางหลุดออกจากผิววัสดุขณะทดสอบการกัดกร่อน แต่อย่างไรก็ตามพบว่าค่าระดับพลังงานของธาตุโครเมียมที่ถูกตรวจบนผิวของชิ้นงานก่อนทดสอบการกัดกร่อนพบมีค่าใกล้เคียงกับค่าพลังงานของโครเมียมออกไซด์ (Cr_2O_3) ตามรายงานวิจัยของ (Flavio Kieckow and et al., 2006) ซึ่งอาจเกิดจากธาตุโครเมียมในเนื้อฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์ทำปฏิกิริยากับออกซิเจนเกิดเป็นสารประกอบ Cr_2O_3 โดยสารประกอบชนิดนี้เป็นฟิล์มที่สามารถต้านทานการกัดกร่อนได้ดี

4.4.4 การวิเคราะห์คุณลักษณะของฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรด์ที่เคลือบบนเหล็กกล้า AISI 4140 ด้วยเทคนิค X-ray Photoelectron Spectroscopy (XPS)

รูปที่ 4.34 แสดงผลสเปกตรัมของ XPS ของชิ้นงานที่ถูกเคลือบผิวด้วยฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรด์ก่อนและหลังทดสอบการกัดกร่อน พบส่วนผสมทางเคมีที่ค่าระดับพลังงาน 463.1, 535.2 และ 289.8 eV ซึ่งค่าระดับพลังงานดังกล่าวมีค่าใกล้เคียงกับค่าระดับพลังงานของธาตุ Ti $2p_{1/2}$, O 1s, และ C 1s ตามลำดับ (Diana Lopez, Carlos Sanchez and Alejandro Toro., 2005; B. Subramanian and et al., 2011; I. Milosev, H.-H Strehblow and B. Navinsek., 1995; I. Bertoti., 2002) แต่ไม่พบการปรากฏของค่าระดับพลังงานของธาตุไนโตรเจน ซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักของฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรด์ (อาจเป็นผลเนื่องธาตุคาร์บอนที่เป็นสารมลทินมีอยู่มากบนพื้นผิวส่งผลให้สเปกตรัมของธาตุไนโตรเจนไม่ปรากฏให้เห็นอย่างชัดเจน) โดยชิ้นงาน T1 ที่ค่าพีเอช 2 และชิ้นงาน T3 ที่ค่าพีเอช 10 ถูกเลือกเพื่อตรวจสอบด้วยเทคนิค XPS เพราะชิ้นงานดังกล่าวเป็นชิ้นงานที่มีอัตราการกัดกร่อนสูงที่สุด ส่วนชิ้นงาน T3 ที่ค่าพีเอช 10 เป็นชิ้นงานที่มีอัตราการกัดกร่อนต่ำที่สุด หลังการทดสอบการกัดกร่อนพบว่าชิ้นงานทั้งสองมีปริมาณของธาตุไทเทเนียมลดลงแทบจะไม่ปรากฏเห็นบนเส้นสเปกตรัม และพบว่าธาตุออกซิเจนมีปริมาณเพิ่มมากขึ้น แต่ชิ้นงาน T1 ที่ค่าพีเอช 2 มีแนวโน้มมีปริมาณของธาตุออกซิเจนที่มากกว่าชิ้นงาน T3 ที่ค่าพีเอช 10 จากผลดังกล่าวอาจกล่าวได้ว่าหลังการทดสอบการกัดกร่อนฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรด์ได้ถูกกัดกร่อนจนฟิล์มบางส่วนได้หลุดออกจากพื้นผิววัสดุจึงทำให้ปริมาณของธาตุไทเทเนียมลดลง และปริมาณของธาตุออกซิเจนที่เพิ่มขึ้นหลังทดสอบการกัดกร่อนคาดว่าเป็นผลมาจากการเกิดออกซิเดชันของฟิล์มบางหรือการเกิดออกซิเดชันของวัสดุในกรณีที่ฟิล์มบางหลุดออกจากผิววัสดุขณะทดสอบการกัดกร่อน โดยชิ้นงาน T1 ที่ค่าพีเอช 2 ถูกกัดกร่อนมากกว่า ส่งผลให้เกิดออกซิเดชันมากขึ้น จึงพบปริมาณปริมาณของธาตุออกซิเจนที่มากกว่าชิ้นงาน T3 ที่ค่าพีเอช 10 อย่างไรก็ตามพบว่าค่าระดับพลังงานของธาตุไทเทเนียมที่ถูกตรวจพบบนผิวของชิ้นงานก่อนทดสอบการกัดกร่อนมีค่าใกล้เคียงกับค่าพลังงานของไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) ตามรายงานวิจัยของ (R. Ananthakumar and et al., 2011)

ซึ่งอาจเกิดจากธาตุไทเทเนียมเนื้อฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรด์ทำปฏิกิริยากับออกซิเจนเกิดเป็นสารประกอบ TiO_2 โดยสารประกอบชนิดนี้เป็นฟิล์มที่สามารถต้านทานการกัดกร่อนได้ดี นอกจากนี้ยังพบว่าค่าระดับพลังงานของธาตุออกซิเจนที่ถูกตรวจบนผิวของชิ้นงาน T1 ที่ค่าพีเอช 2 มีค่าเปลี่ยนแปลงไปเป็น 533.8 eV แสดงให้เห็นว่า Oxidation state ของธาตุออกซิเจนเปลี่ยนแปลงไป แต่ยังไม่เป็นที่แน่ชัดว่าเป็น Oxidation state ในรูปแบบใด ซึ่งในอนาคตอาจจะมีการทดสอบเพิ่มเติมเพื่อให้ได้ข้อมูลที่สมบูรณ์มากยิ่งขึ้น โดยในการวิจัยครั้งนี้การวิเคราะห์ผลของสเปกตรัมยังมีสัญญาณรบกวนในกระบวนการวัดอยู่มาก โดยอาจจะเกิดจากสมรรถนะของเครื่อง XPS



รูปที่ 4.34 ผลสเปกตรัมของ XPS ของชิ้นงานที่ถูกเคลือบผิวด้วยฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรด์ ก่อนและหลังทดสอบการกัดกร่อน

จากผลของการทดสอบด้วยเทคนิค XPS ดังกล่าวเป็นเพียงข้อมูลเบื้องต้น โดยอนาคตอาจจะมีการทำการวิจัยและวิเคราะห์เพิ่มเติมเพื่อให้ได้ข้อมูลที่สมบูรณ์ แม่นยำ และสามารถใช้ประโยชน์ในด้านกระบวนการเคลือบผิวโลหะได้มากยิ่งขึ้น

บทที่ 5

บทสรุป

5.1 สรุปผลการวิจัย

5.1.1 สามารถผลิตชั้นเคลือบฟิล์มบางโครเมียมในทรายด์และฟิล์มบางไทเทเนียมในทรายด์ด้วยวิธีการเคลือบไอทางกายภาพบนพื้นผิวเหล็กกล้า AISI 4140 ได้สำเร็จโดยฟิล์มบางทั้งสองชนิดมีลักษณะการจัดเรียงตัวของอะตอมในระนาบ (111) มีขนาดเกรนที่ละเอียด และมีปริมาณรูพรุนเล็กน้อยบนผิวฟิล์มบาง และมีค่าความหนาของฟิล์มที่ 914 นาโนเมตร และ 1200 นาโนเมตร ตามลำดับ

5.1.2 ชิ้นงานเหล็กกล้า AISI 4140 ที่ถูกเคลือบผิวด้วยฟิล์มบางโครเมียมในทรายด์และฟิล์มบางไทเทเนียมในทรายด์มีความต้านทานการกัดกร่อนได้ดีกว่าเหล็กกล้า AISI 4140 ที่ไม่ถูกเคลือบผิวที่ทุกค่าพีเอช

5.1.3 ชิ้นงานเหล็กกล้า AISI 4140 ที่ถูกเคลือบผิวด้วยฟิล์มบางโครเมียมในทรายด์มีความต้านทานการกัดกร่อนใกล้เคียงกับชิ้นงานเหล็กกล้า AISI 4140 ที่ถูกเคลือบผิวด้วยฟิล์มบางไทเทเนียมในทรายด์

5.1.4 ค่าความหยาบผิวที่น้อยลง ส่งผลให้ชิ้นงานเหล็กกล้า AISI 4140 ที่ไม่ถูกเคลือบผิว ชิ้นงานเหล็กกล้า AISI 4140 ที่ถูกเคลือบผิวด้วยฟิล์มบางโครเมียมในทรายด์และชิ้นงานเหล็กกล้า AISI 4140 ที่ถูกเคลือบผิวด้วยฟิล์มบางไทเทเนียมในทรายด์มีความต้านทานการกัดกร่อนดีขึ้น

5.1.5 ค่าพีเอชของสารละลายที่ใช้ในการทดสอบเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ชิ้นงานเหล็กกล้า AISI 4140 ที่ไม่ถูกเคลือบผิว ชิ้นงานเหล็กกล้า AISI 4140 ที่ถูกเคลือบผิวด้วยฟิล์มบางโครเมียมในทรายด์และชิ้นงานเหล็กกล้า AISI 4140 ที่ถูกเคลือบผิวด้วยฟิล์มบางไทเทเนียมในทรายด์มีความต้านทานการกัดกร่อนดีขึ้น

5.1.6 ชิ้นงานเหล็กกล้า AISI 4140 ที่ถูกเคลือบผิวด้วยโครเมียมในทรายด์และชิ้นงานเหล็กกล้า AISI 4140 ที่ถูกเคลือบผิวด้วยไทเทเนียมในทรายด์หลังทดสอบการกัดกร่อนมีพื้นที่ถูกกัดกร่อนและปริมาณผลติการกัดกร่อนที่น้อยกว่าชิ้นงานที่ไม่ถูกเคลือบผิว และพบว่าค่าความหยาบผิวที่ลดลงและสารละลายที่มีค่าพีเอชเพิ่มมากขึ้นส่งผลให้ชิ้นงานมีพื้นที่ถูกกัดกร่อนและปริมาณผลติการกัดกร่อนที่ลดลง

5.2 ข้อเสนอแนะ

พฤติกรรมการกัดกร่อนของชิ้นงานเหล็กกล้า AISI 4140 ที่ไม่ถูกเคลือบผิว ชิ้นงานเหล็กกล้า AISI 4140 ที่ถูกเคลือบผิวด้วยฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์และชิ้นงานเหล็กกล้า AISI 4140 ที่ถูกเคลือบผิวด้วยฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรด์ขึ้นอยู่กับหลายตัวแปร เช่น ชนิดของฟิล์มที่เคลือบบนผิวชิ้นงาน ความหยาบผิวของวัสดุพื้นก่อนการเคลือบผิว ค่าพีเอชของสารละลายหรือสภาวะแวดล้อมที่มีฤทธิ์การกัดกร่อน ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาผลของตัวแปรเหล่านี้ โดยได้ทดลองและผลการทดลองดังแสดงในบทที่ผ่านมา แต่ข้อมูลดังกล่าวเป็นเพียงข้อมูลเบื้องต้น แต่เพื่อการประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมจริงควรมีการทำวิจัยศึกษาเพิ่มเติม ดังนั้นผู้ทำวิจัยจึงมีข้อเสนอแนะในการทำวิจัยต่อไป ดังนี้

5.2.1 ควรศึกษาผลของความหนาของชั้นฟิล์มที่มีผลต่อพฤติกรรมการกัดกร่อน เพื่อใช้เป็นแนวทางในการเลือกใช้งานในภาคอุตสาหกรรมต่อไป

5.2.2 ควรปรับค่าความหยาบผิวของวัสดุพื้นให้มีหลายช่วงค่าความหยาบ เพื่อให้เห็นความแตกต่างของพฤติกรรมการกัดกร่อนของชิ้นงานที่มีค่าความหยาบผิวต่างกันได้ชัดเจน

- ความหยาบที่ 1 เตรียมผิวด้วยกระดาษทรายเบอร์ 180
- ความหยาบที่ 2 เตรียมผิวด้วยกระดาษทรายเบอร์ 320
- ความหยาบที่ 3 เตรียมผิวด้วยกระดาษทรายเบอร์ 600
- ความหยาบที่ 4 เตรียมผิวด้วยกระดาษทรายเบอร์ 800
- ความหยาบที่ 5 เตรียมผิวด้วยกระดาษทรายเบอร์ 1200
- ความหยาบที่ 6 เตรียมผิวด้วยกระดาษทรายเบอร์ 2000
- ความหยาบที่ 7 เตรียมผิวด้วยผงอะลูมินา
- ความหยาบที่ 8 เตรียมผิวด้วยผงเพชรความละเอียด 1 ไมครอน
- ความหยาบที่ 9 เตรียมผิวด้วยผงเพชรความละเอียด 3 ไมครอน

5.2.3 ควรมีการทดสอบคุณสมบัติเชิงกลของชั้นฟิล์มเพิ่มเติม เช่น ค่าความแข็ง ความสามารถในการยึดเกาะ และการสึกหรอของชั้นฟิล์ม เพื่อนำผลมาใช้ประโยชน์ร่วมกับผลทางด้านพฤติกรรมการกัดกร่อน

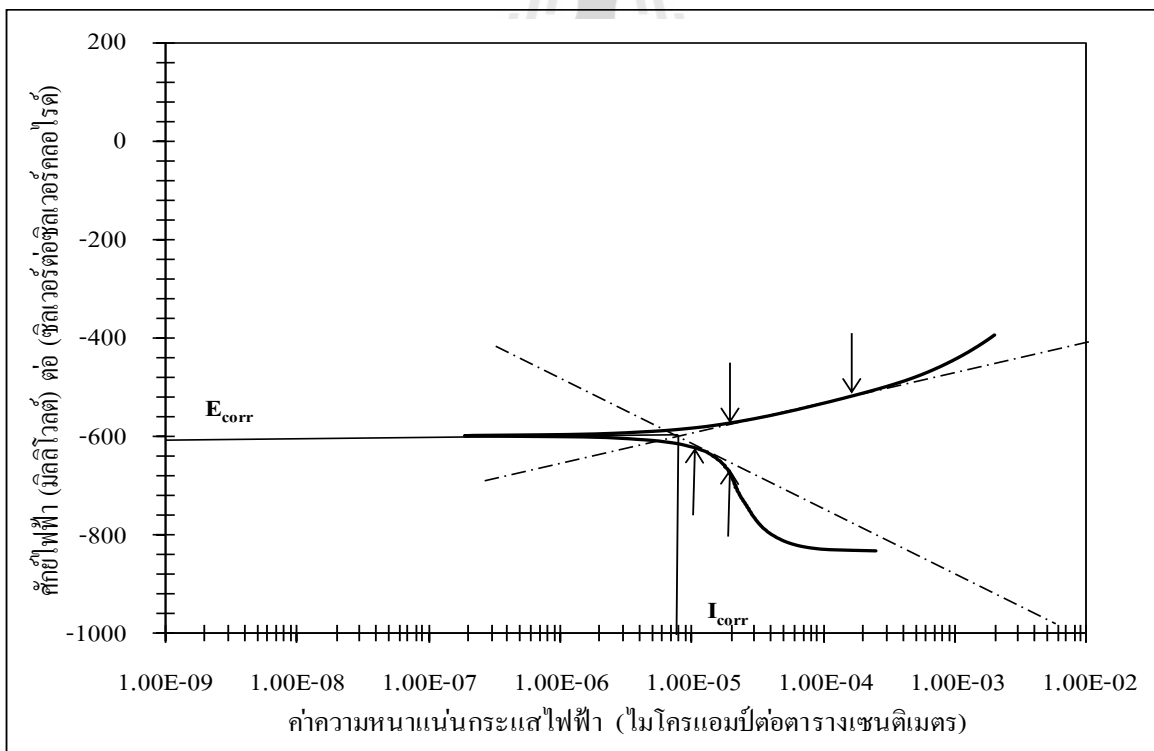
ภาคผนวก ก

การหาค่าศักย์ไฟฟ้าการกักถ่วง กระแสไฟฟ้าการกักถ่วง
และอัตราการกักถ่วง

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

การหาค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนและความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อนของชิ้นงานเหล็กกล้า AISI 4140 ชิ้นงานเหล็กกล้า AISI 4140 ที่ถูกเคลือบผิวด้วยฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์ และชิ้นงานเหล็กกล้า AISI 4140 ที่ถูกเคลือบผิวด้วยฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรด์

ค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนและค่ากระแสไฟฟ้าการกัดกร่อนของชิ้นงานภายหลังทดสอบการกัดกร่อนหาได้จากการใช้โปรแกรมลิเนียร์รีเกรสชัน (Linear regression program) ที่อยู่ในเครื่อง AUTOLAB PGSTAT 302H ซึ่งมีวิธีการหาโดยกำหนดตำแหน่ง 2 จุดบนบนเส้นโค้งโพลาไรเซชันแล้วใช้คำสั่งทำลิเนียร์รีเกรสชัน โปรแกรมจะทำการคำนวณเส้นตรงระหว่างจุด 2 จุด ที่กำหนดไว้ดังรูปที่ ก.1 ซึ่งแสดงจุดตัดระหว่างเส้นความชันของเส้นกราฟช่วงที่เกิดปฏิกิริยาแอโนด และเส้นความชันของเส้นกราฟช่วงที่เกิดปฏิกิริยาแคโทด โดยที่จุดตัดนี้จะสามารถหาค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนและค่ากระแสไฟฟ้าการกัดกร่อนได้



รูปที่ ก.1 วิธีการหาค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนและค่ากระแสไฟฟ้าการกัดกร่อน จากเส้น โพลาไรเซชัน

การคำนวณหาอัตราการกัดกร่อนของชิ้นงานเหล็กกล้า AISI 4140 ชิ้นงานเหล็กกล้า AISI 4140 ที่ถูกเคลือบผิวด้วยฟิล์มบางโครเมียมไนไตรต์ และชิ้นงานเหล็กกล้า AISI 4140 ที่ถูกเคลือบผิวด้วยฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรต์

การคำนวณหาอัตราการกัดกร่อนสามารถหาได้จากการนำค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อนที่อ่านได้จากเส้นโค้งโพลาไรเซชัน น้ำหนักสมมูลของโลหะ และความหนาแน่นของโลหะแทนลงในสมการที่ ก.1 โดยค่าอัตราการกัดกร่อนที่คำนวณได้จะแสดงผลในหน่วยมิลลิเมตรต่อปี

$$R_{mm/year} = (0.00327 * I_{corr} * e) / \rho \quad (ก.1)$$

| | | | |
|--------|---------------|-----|--|
| โดยที่ | $R_{mm/year}$ | คือ | อัตราการเกิดการกัดกร่อน (มิลลิเมตรต่อปี) |
| | I_{corr} | คือ | ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อน (ไมโครแอมป์ต่อตารางเซนติเมตร) |
| | e | คือ | น้ำหนักกรัมสมมูลของโลหะ |
| | ρ | คือ | ความหนาแน่นของโลหะ (กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร) |

ภาคผนวก ข
ข้อมูลที่ได้จากการวัดเส้นโพลาไรเซชันที่ทำการทดลอง
จากเครื่องโพเทนชิโอสแตท



- ข.1 ข้อมูลดิบที่ได้จากการวัดเส้นโพลาริเซชันในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้นร้อยละ 3.5 โดยน้ำหนักที่ค่าพีเอช 2

ตารางที่ ข.1 ค่าศักย์ไฟฟ้าการกักร้อนของชิ้นงานในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้นร้อยละ 3.5 โดยน้ำหนักที่ค่าพีเอช 2

| ชิ้นงาน | ครั้งที่ | | ค่าเฉลี่ย | ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน |
|---------|----------|------|-----------|---------------------|
| | 1 | 2 | | |
| B1 | -572 | -638 | -605 | 46.67 |
| B2 | -636 | -642 | -639 | 4.24 |
| B3 | -572 | -568 | -570 | 2.83 |
| C1 | -538 | -531 | -534.5 | 4.95 |
| C2 | -531 | -538 | -534.5 | 4.95 |
| C3 | -532 | -540 | -536 | 5.66 |
| T1 | -548 | -524 | -536 | 16.97 |
| T2 | -541 | -580 | -560.5 | 27.58 |
| T3 | -502 | -502 | -502 | 0.00 |

ตารางที่ ข.2 ค่าอัตราการกักร้อนของชิ้นงานในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้นร้อยละ 3.5 โดยน้ำหนักที่ค่าพีเอช 2

| ชิ้นงาน | ครั้งที่ | | ค่าเฉลี่ย | ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน |
|---------|----------|--------|-----------|---------------------|
| | 1 | 2 | | |
| B1 | 0.1289 | 0.1348 | 0.1318 | 0.0041 |
| B2 | 0.0652 | 0.0610 | 0.0631 | 0.0029 |
| B3 | 0.0609 | 0.0663 | 0.0636 | 0.0039 |
| C1 | 0.0219 | 0.0221 | 0.0220 | 0.0002 |
| C2 | 0.0059 | 0.0095 | 0.0077 | 0.0025 |
| C3 | 0.0026 | 0.0028 | 0.0027 | 0.0001 |
| T1 | 0.0237 | 0.0020 | 0.0129 | 0.0153 |
| T2 | 0.0238 | 0.0017 | 0.0128 | 0.0156 |
| T3 | 0.0039 | 0.0041 | 0.0040 | 0.0001 |

- ข.2 ข้อมูลดิบที่ได้จากการวัดเส้นโพลาริเซชันในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้นร้อยละ 3.5 โดยน้ำหนักที่ค่าพีเอช 7

ตารางที่ ข.3 ค่าศักย์ไฟฟ้าการกักร้อนของชิ้นงานในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้นร้อยละ 3.5 โดยน้ำหนักที่ค่าพีเอช 7

| ชิ้นงาน | ครั้งที่ | | ค่าเฉลี่ย | ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน |
|---------|----------|------|-----------|---------------------|
| | 1 | 2 | | |
| B1 | -533 | -537 | -535 | 2.83 |
| B2 | -532 | -539 | -535.5 | 4.95 |
| B3 | -599 | -598 | -598.5 | 0.71 |
| C1 | -485 | -568 | -526.5 | 58.69 |
| C2 | -455 | -529 | -492 | 52.33 |
| C3 | -405 | -418 | -411.5 | 9.19 |
| T1 | -476 | -461 | -468.5 | 10.61 |
| T2 | -455 | -457 | -456 | 1.41 |
| T3 | -426 | -472 | -449 | 32.53 |

ตารางที่ ข.4 ค่าอัตราการกักร้อนของชิ้นงานในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้นร้อยละ 3.5 โดยน้ำหนักที่ค่าพีเอช 7

| ชิ้นงาน | ครั้งที่ | | ค่าเฉลี่ย | ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน |
|---------|----------|--------|-----------|---------------------|
| | 1 | 2 | | |
| B1 | 0.0952 | 0.0930 | 0.0941 | 0.0016 |
| B2 | 0.0399 | 0.0662 | 0.0531 | 0.0186 |
| B3 | 0.0071 | 0.0067 | 0.0069 | 0.0003 |
| C1 | 0.0023 | 0.0021 | 0.0022 | 0.0001 |
| C2 | 0.0018 | 0.0016 | 0.0017 | 0.0001 |
| C3 | 0.0011 | 0.0014 | 0.0012 | 0.0003 |
| T1 | 0.0020 | 0.0019 | 0.0019 | 0.0001 |
| T2 | 0.0016 | 0.0017 | 0.0017 | 0.0000 |
| T3 | 0.0007 | 0.0006 | 0.0006 | 0.0001 |

- ข.3 ข้อมูลดิบที่ได้จากการวัดเส้นโพลาริเซชันในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้นร้อยละ 3.5 โดยน้ำหนักที่ค่าพีเอช 10

ตารางที่ ข.5 ค่าศักย์ไฟฟ้าการกักร้อนของชิ้นงานในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้นร้อยละ 3.5 โดยน้ำหนักที่ค่าพีเอช 10

| ชิ้นงาน | ครั้งที่ | | ค่าเฉลี่ย | ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน |
|---------|----------|------|-----------|---------------------|
| | 1 | 2 | | |
| B1 | -587 | -577 | -582 | 7.07 |
| B2 | -596 | -594 | -595 | 1.41 |
| B3 | -560 | -558 | -559 | 1.41 |
| C1 | -473 | -458 | -465.5 | 10.61 |
| C2 | -423 | -420 | -421.5 | 2.12 |
| C3 | -354 | -485 | -419.5 | 92.63 |
| T1 | -459 | -480 | -469.5 | 14.85 |
| T2 | -477 | -450 | -463.5 | 19.09 |
| T3 | -433 | -449 | -441 | 11.31 |

ตารางที่ ข.6 ค่าอัตราการกักร้อนของชิ้นงานในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้นร้อยละ 3.5 โดยน้ำหนักที่ค่าพีเอช 10

| ชิ้นงาน | ครั้งที่ | | ค่าเฉลี่ย | ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน |
|---------|----------|--------|-----------|---------------------|
| | 1 | 2 | | |
| B1 | 0.0080 | 0.0088 | 0.0084 | 0.0006 |
| B2 | 0.0079 | 0.0069 | 0.0074 | 0.0007 |
| B3 | 0.0053 | 0.0055 | 0.0054 | 0.0001 |
| C1 | 0.0021 | 0.0022 | 0.0021 | 0.0001 |
| C2 | 0.0017 | 0.0016 | 0.0017 | 0.0001 |
| C3 | 0.0003 | 0.0011 | 0.0007 | 0.0006 |
| T1 | 0.0021 | 0.0021 | 0.0021 | 0.0000 |
| T2 | 0.0017 | 0.0036 | 0.0019 | 0.0003 |
| T3 | 0.0019 | 0.0021 | 0.0020 | 0.0001 |

ภาคผนวก ค

ค่าพีเอชก่อนและหลังการทดสอบการกัดกร่อน



ตารางที่ ค.1 ค่าพีเอชก่อนและหลังการทดสอบการกัดกร่อนของชิ้นงานเหล็กกล้า AISI 4140

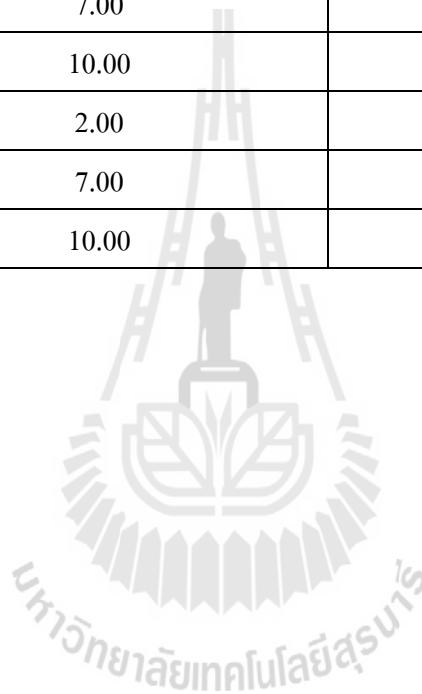
| ชิ้นงาน | ค่าพีเอชก่อนการทดสอบการกัดกร่อน | ค่าพีเอชหลังการทดสอบการกัดกร่อน |
|---------|---------------------------------|---------------------------------|
| B1 | 2.00 | 1.93 |
| | 7.00 | 6.25 |
| | 10.00 | 7.26 |
| B2 | 2.00 | 1.95 |
| | 7.00 | 6.50 |
| | 10.00 | 7.45 |
| B3 | 2.00 | 1.97 |
| | 7.00 | 6.55 |
| | 10.00 | 7.90 |

ตารางที่ ค.2 ค่าพีเอชก่อนและหลังการทดสอบการกัดกร่อนของชิ้นงานเหล็กกล้า AISI 4140 ที่ถูกเคลือบผิวด้วยฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์

| ชิ้นงาน | ค่าพีเอชก่อนการทดสอบการกัดกร่อน | ค่าพีเอชหลังการทดสอบการกัดกร่อน |
|---------|---------------------------------|---------------------------------|
| C1 | 2.00 | 2.10 |
| | 7.00 | 6.78 |
| | 10.00 | 8.32 |
| C2 | 2.00 | 2.13 |
| | 7.00 | 6.80 |
| | 10.00 | 8.34 |
| C3 | 2.00 | 2.15 |
| | 7.00 | 6.53 |
| | 10.00 | 7.81 |

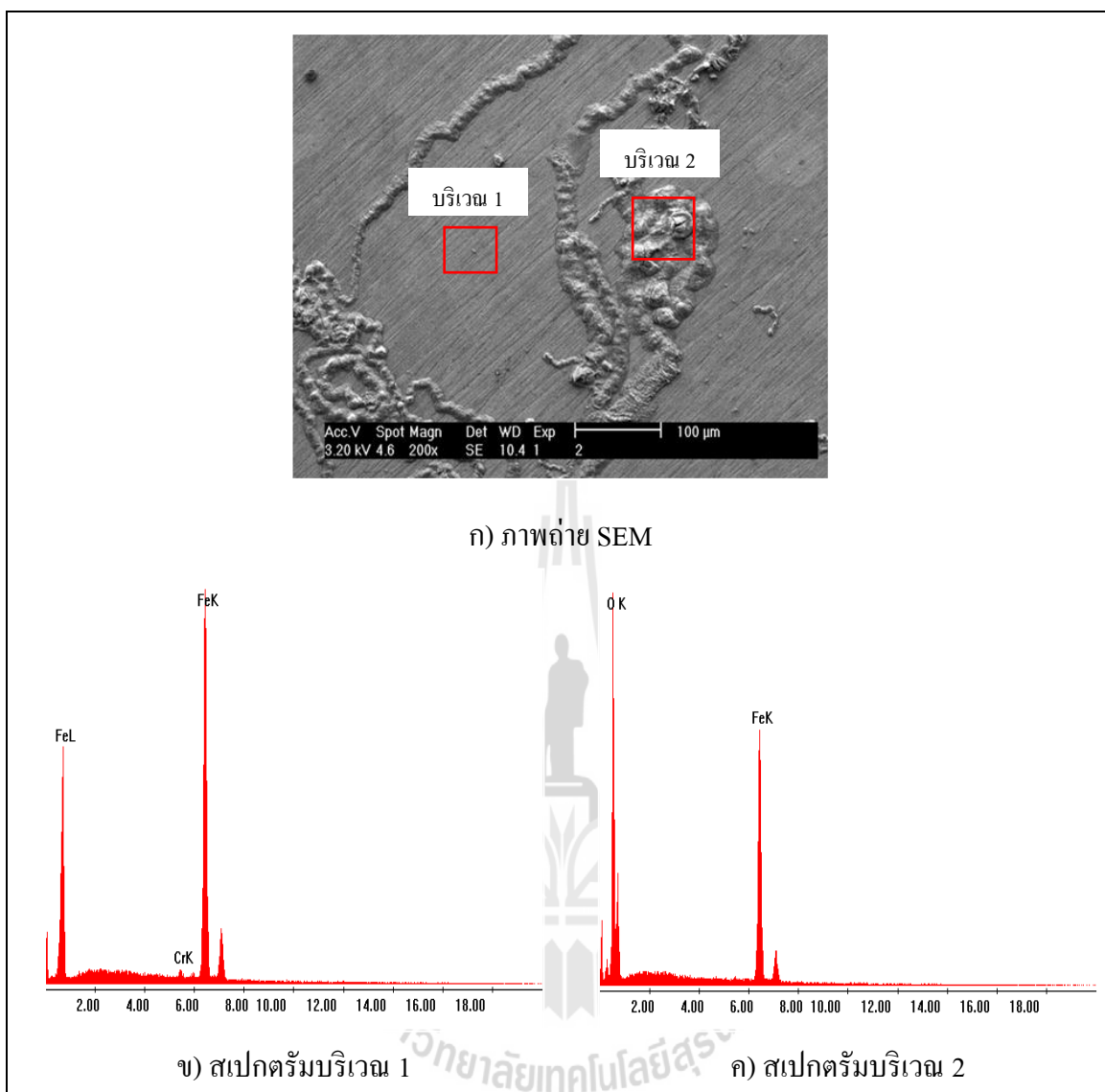
ตารางที่ ค.3 ค่าพีเอชก่อนและหลังการทดสอบการกัดกร่อนของชิ้นงานเหล็กกล้า AISI 4140 ที่ถูกเคลือบผิวด้วยฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรด์

| ชิ้นงาน | ค่าพีเอชก่อนการทดสอบการกัดกร่อน | ค่าพีเอชหลังการทดสอบการกัดกร่อน |
|---------|---------------------------------|---------------------------------|
| T1 | 2.00 | 2.11 |
| | 7.00 | 6.04 |
| | 10.00 | 7.95 |
| T2 | 2.00 | 2.00 |
| | 7.00 | 6.53 |
| | 10.00 | 7.65 |
| T3 | 2.00 | 2.04 |
| | 7.00 | 6.14 |
| | 10.00 | 7.51 |

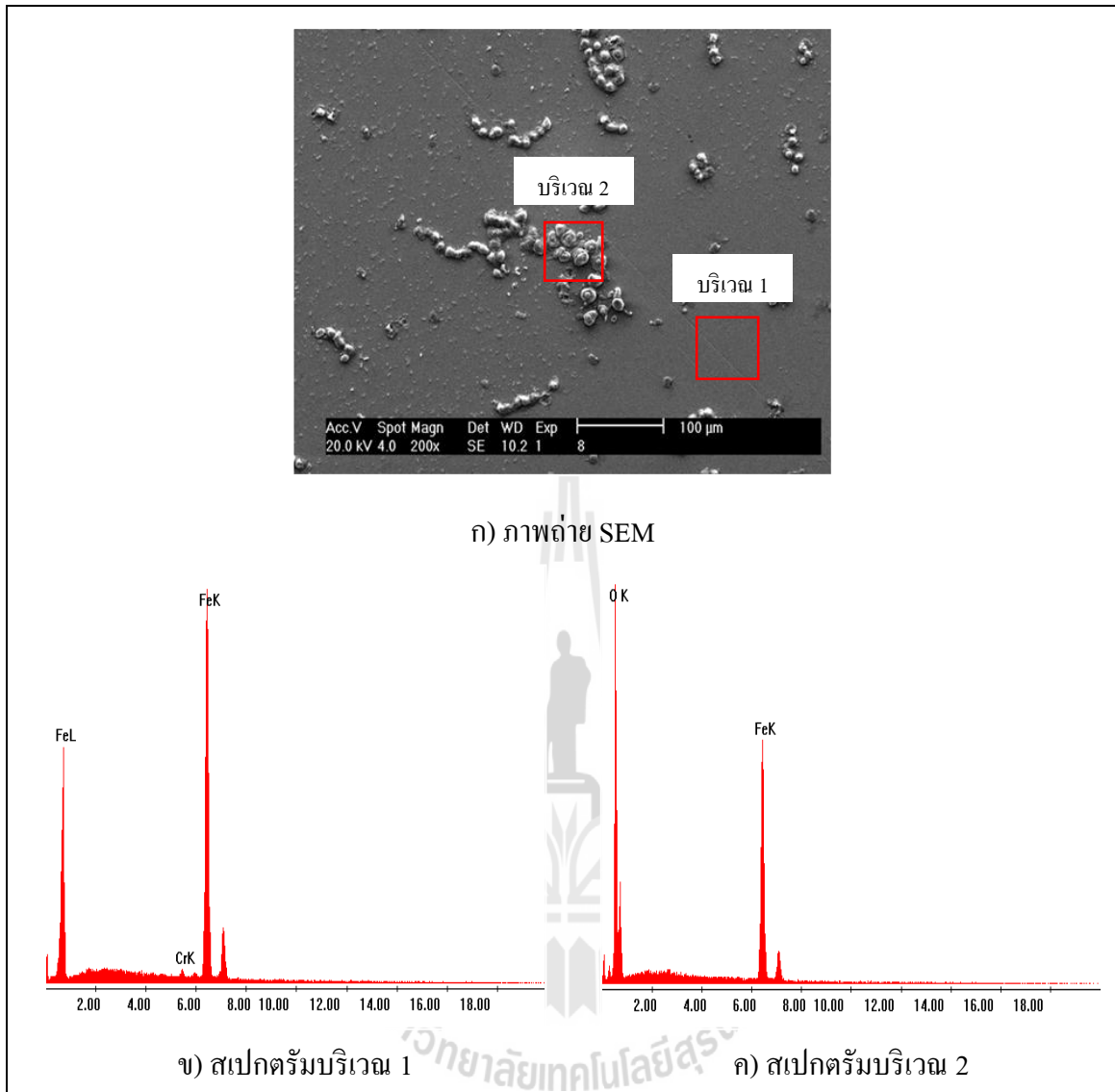


ภาคผนวก ง
ผลการวิเคราะห์ห้องค์ประกอบทางเคมีด้วยเทคนิค EDX
หลังการทดสอบการกัดกร่อน

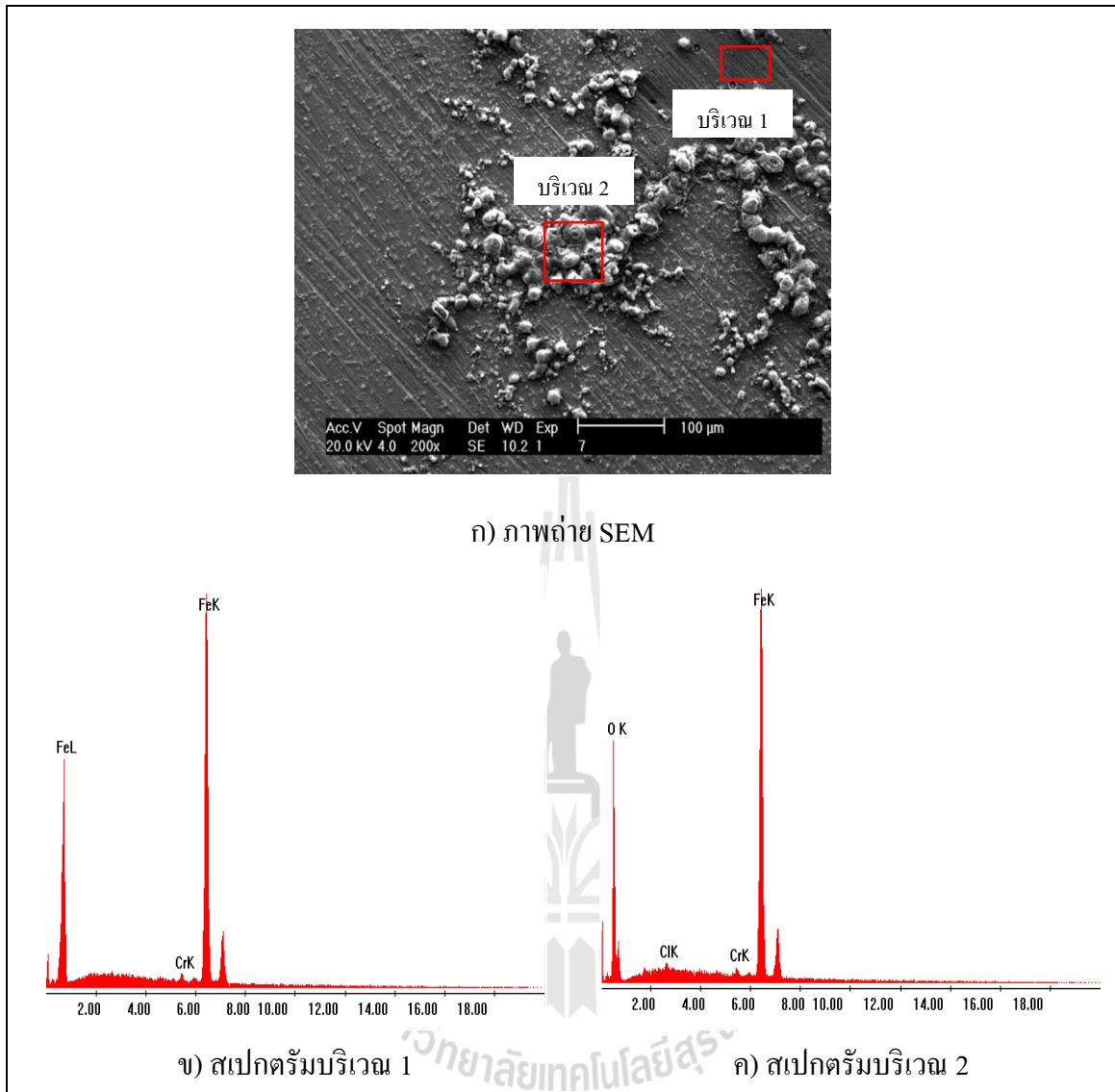




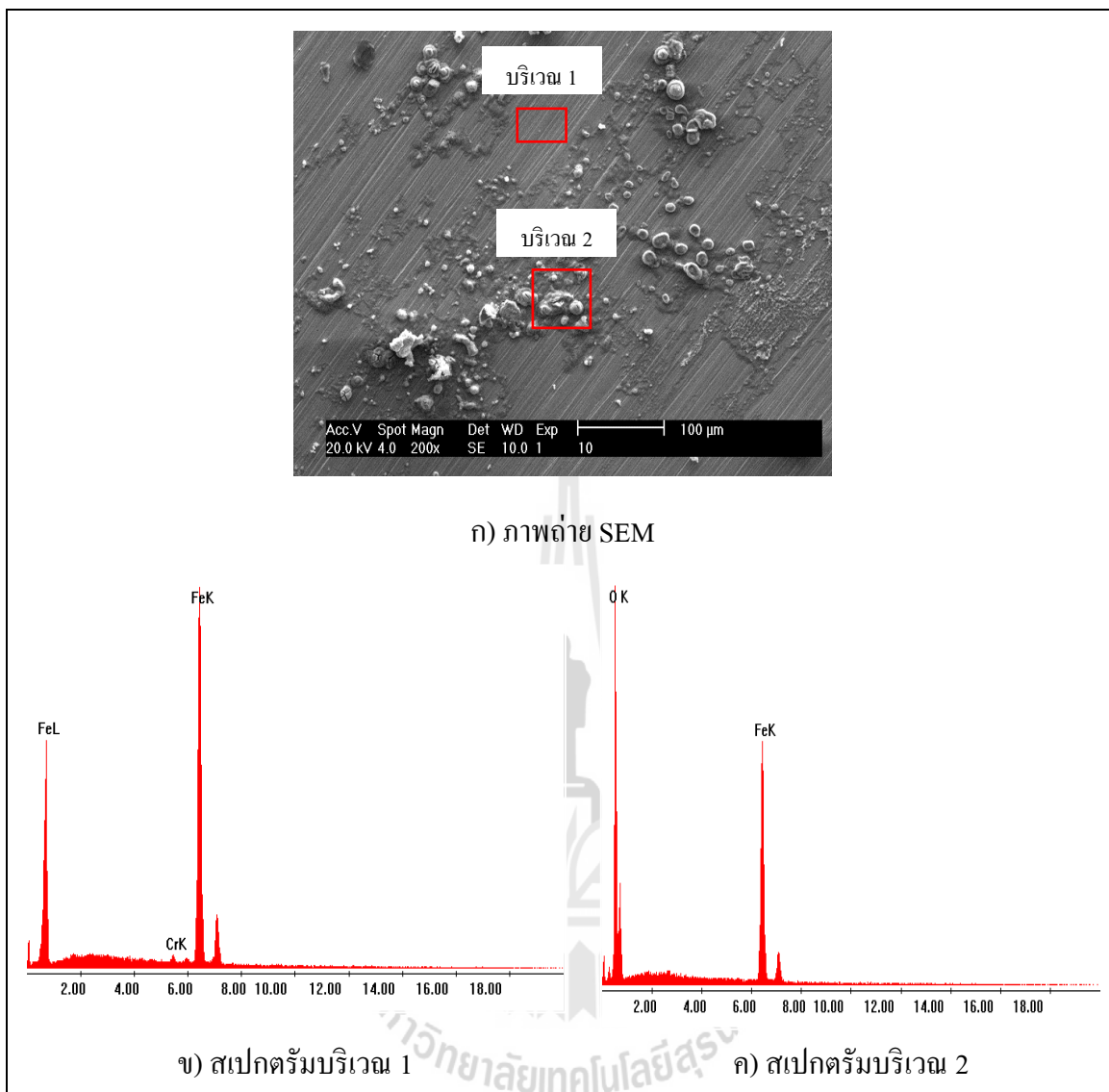
รูปที่ ง.1 ภาพถ่าย SEM และผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีบนพื้นผิวของ
ชิ้นงาน B2 หลังทดสอบการกัดกร่อนในสารละลายโซเดียมคลอไรด์
ความเข้มข้นร้อยละ 3.5 โดยน้ำหนักที่ค่าพีเอช 2



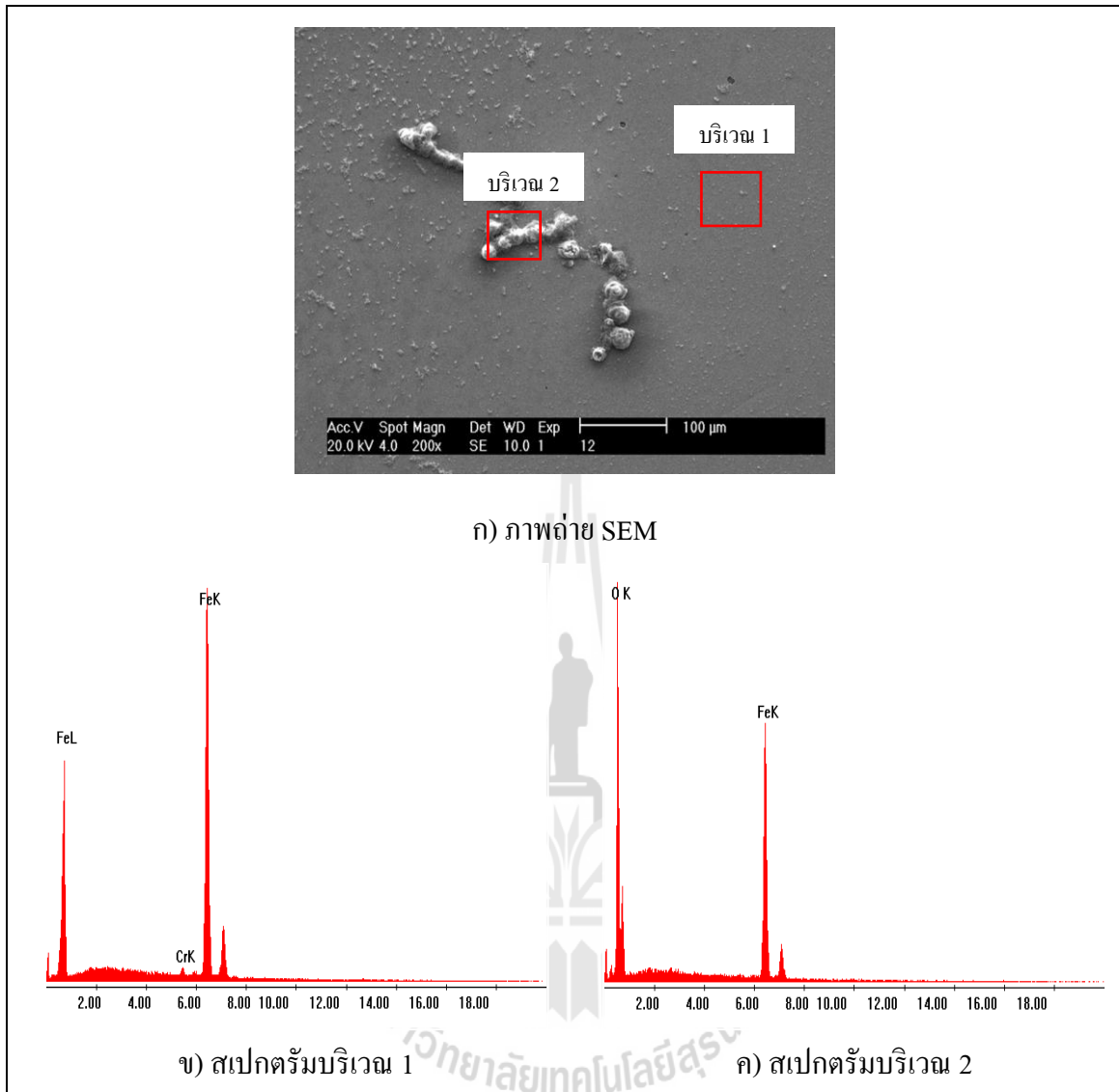
รูปที่ ๓.2 ภาพถ่าย SEM และผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีบนพื้นผิวของ
ชิ้นงาน B3 หลังทดสอบการกัดกร่อนในสารละลายโซเดียมคลอไรด์
ความเข้มข้นร้อยละ 3.5 โดยน้ำหนักที่ค่าพีเอช 2



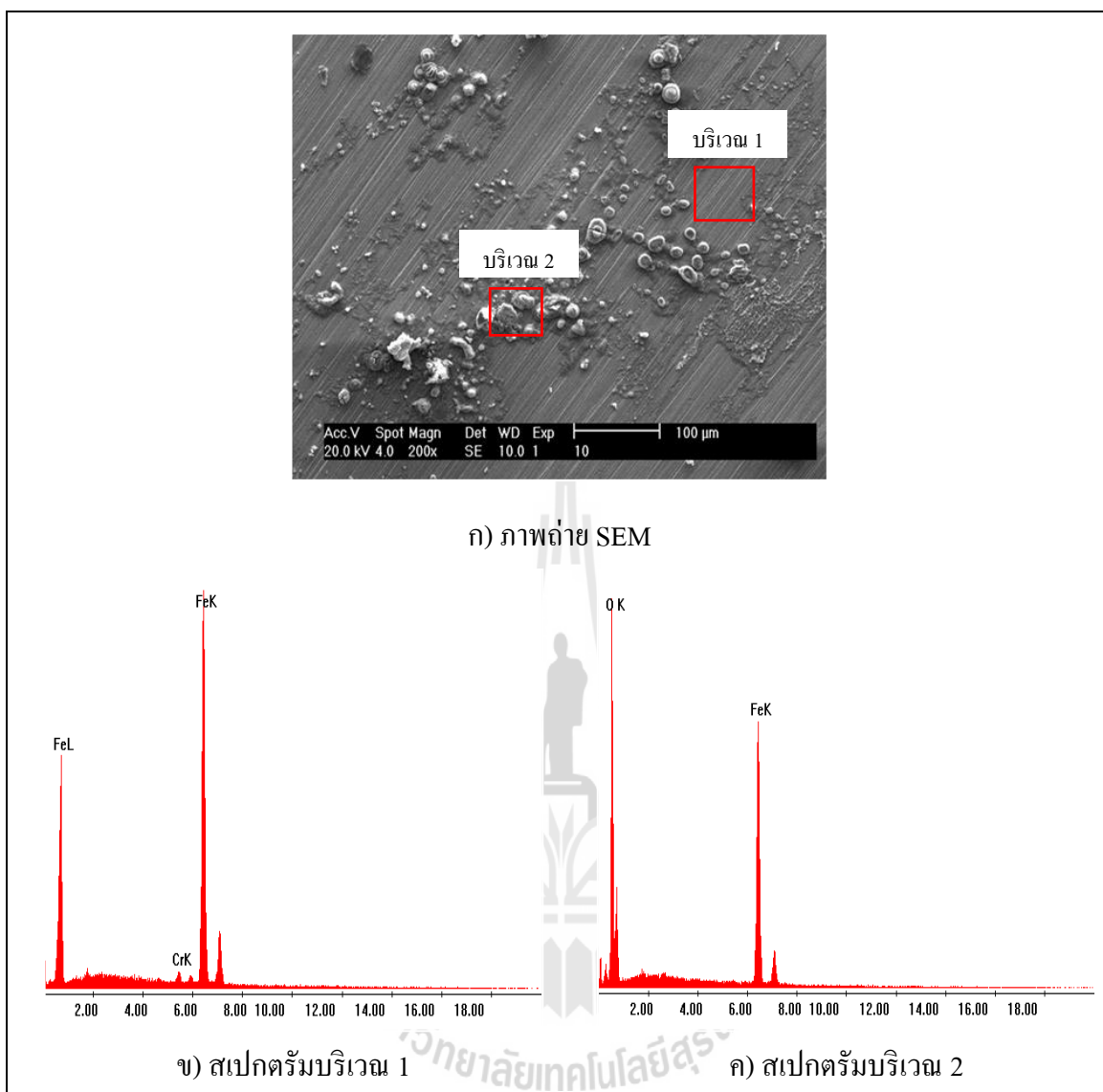
รูปที่ 3.3 ภาพถ่าย SEM และผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีบนพื้นผิวของ
ชิ้นงาน B1 หลังทดสอบการกัดกร่อนในสารละลายโซเดียมคลอไรด์
ความเข้มข้นร้อยละ 3.5 โดยน้ำหนักที่ค่าพีเอช 7



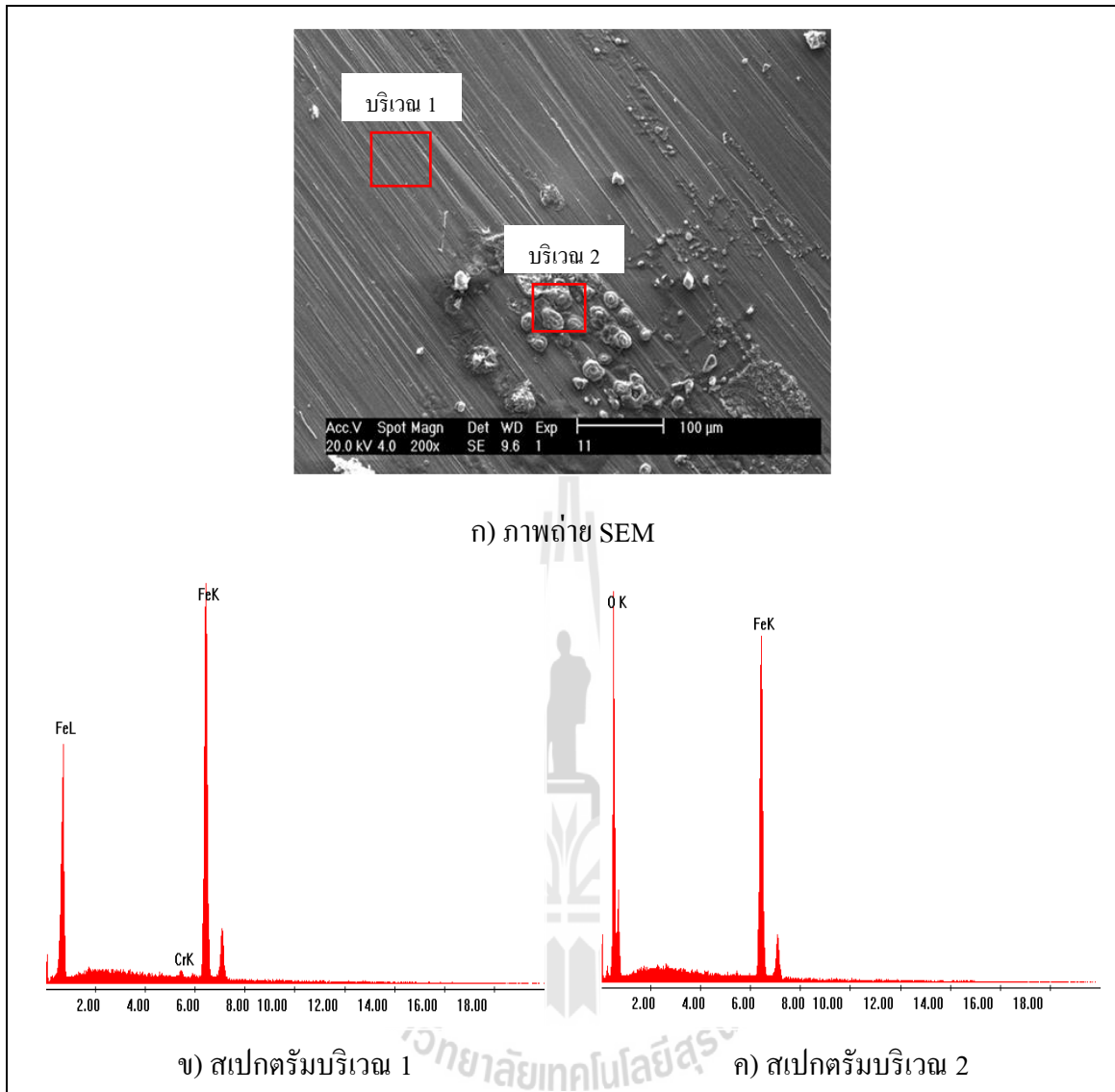
รูปที่ ง.4 ภาพถ่าย SEM และผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีบนพื้นผิวของ
ชิ้นงาน B2 หลังทดสอบการกัดกร่อนในสารละลายโซเดียมคลอไรด์
ความเข้มข้นร้อยละ 3.5 โดยน้ำหนักที่ค่าพีเอช 7



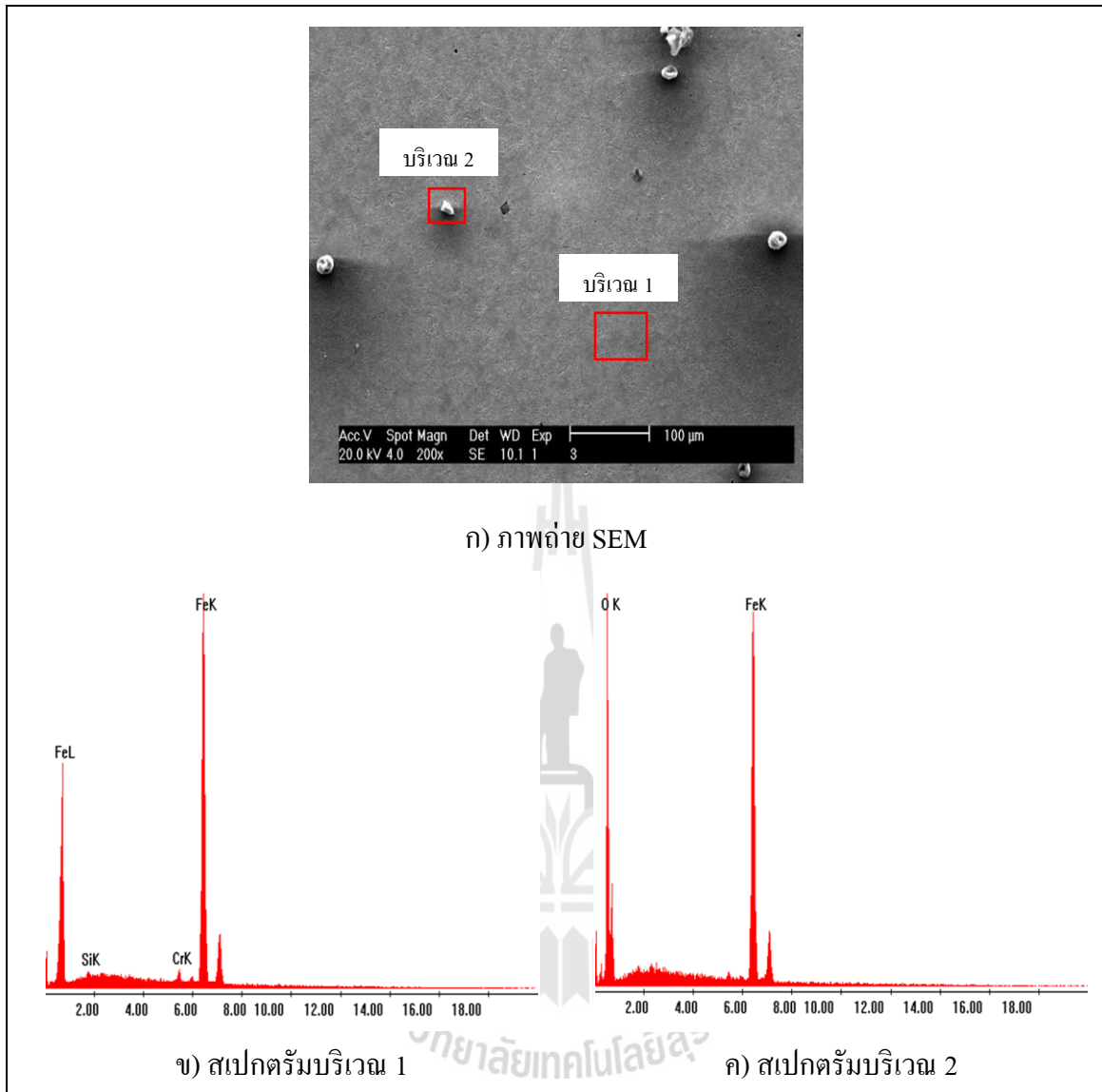
รูปที่ ๓.5 ภาพถ่าย SEM และผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีบนพื้นผิวของ
ชิ้นงาน B3 หลังทดสอบการกัดกร่อนในสารละลายโซเดียมคลอไรด์
ความเข้มข้นร้อยละ 3.5 โดยน้ำหนักที่ค่าพีเอช 7



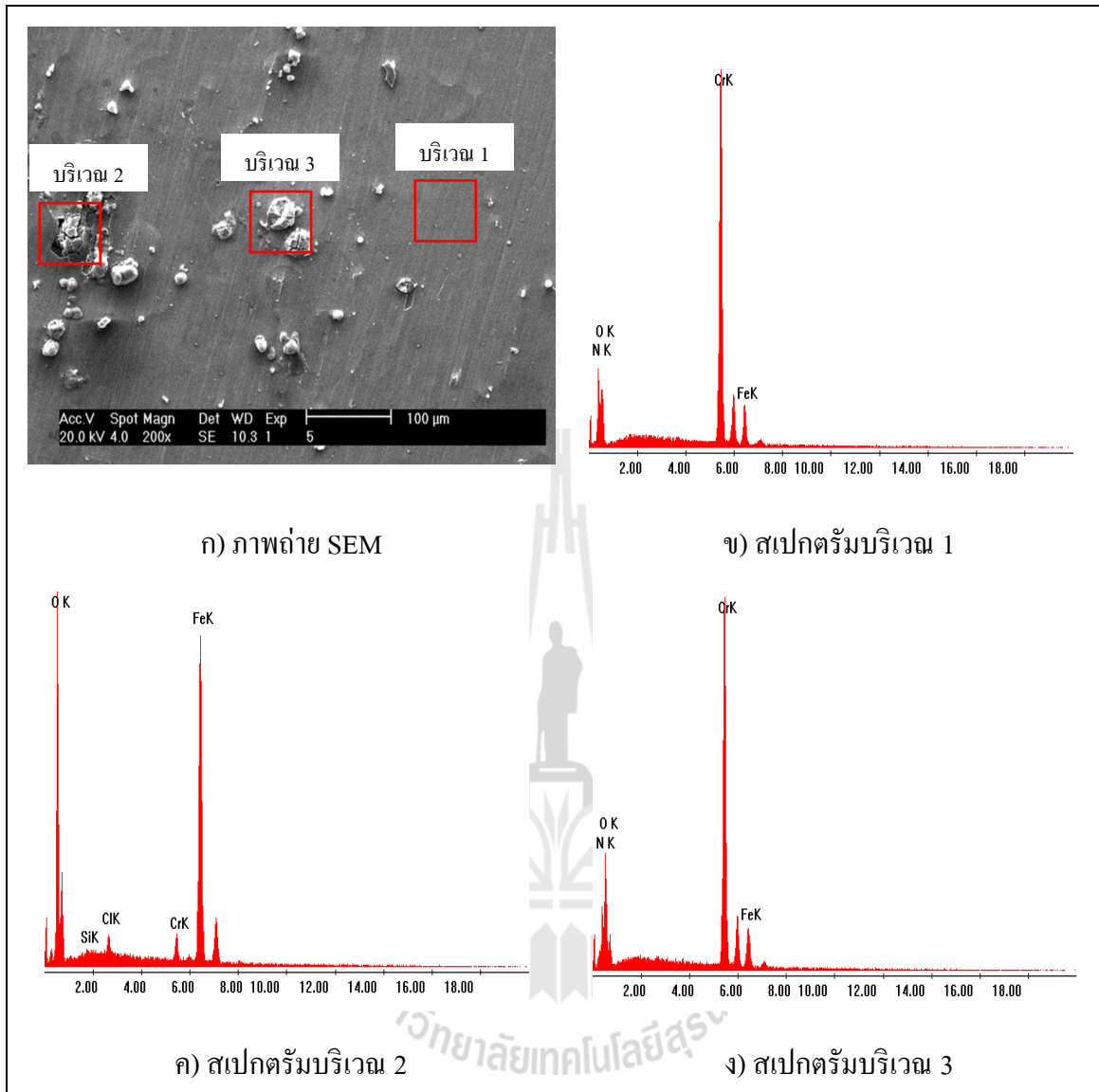
รูปที่ ง.6 ภาพถ่าย SEM และผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีบนพื้นผิวของ
ชิ้นงาน B1 หลังทดสอบการกัดกร่อนในสารละลายโซเดียมคลอไรด์
ความเข้มข้นร้อยละ 3.5 โดยน้ำหนักที่ค่าพีเอช 10



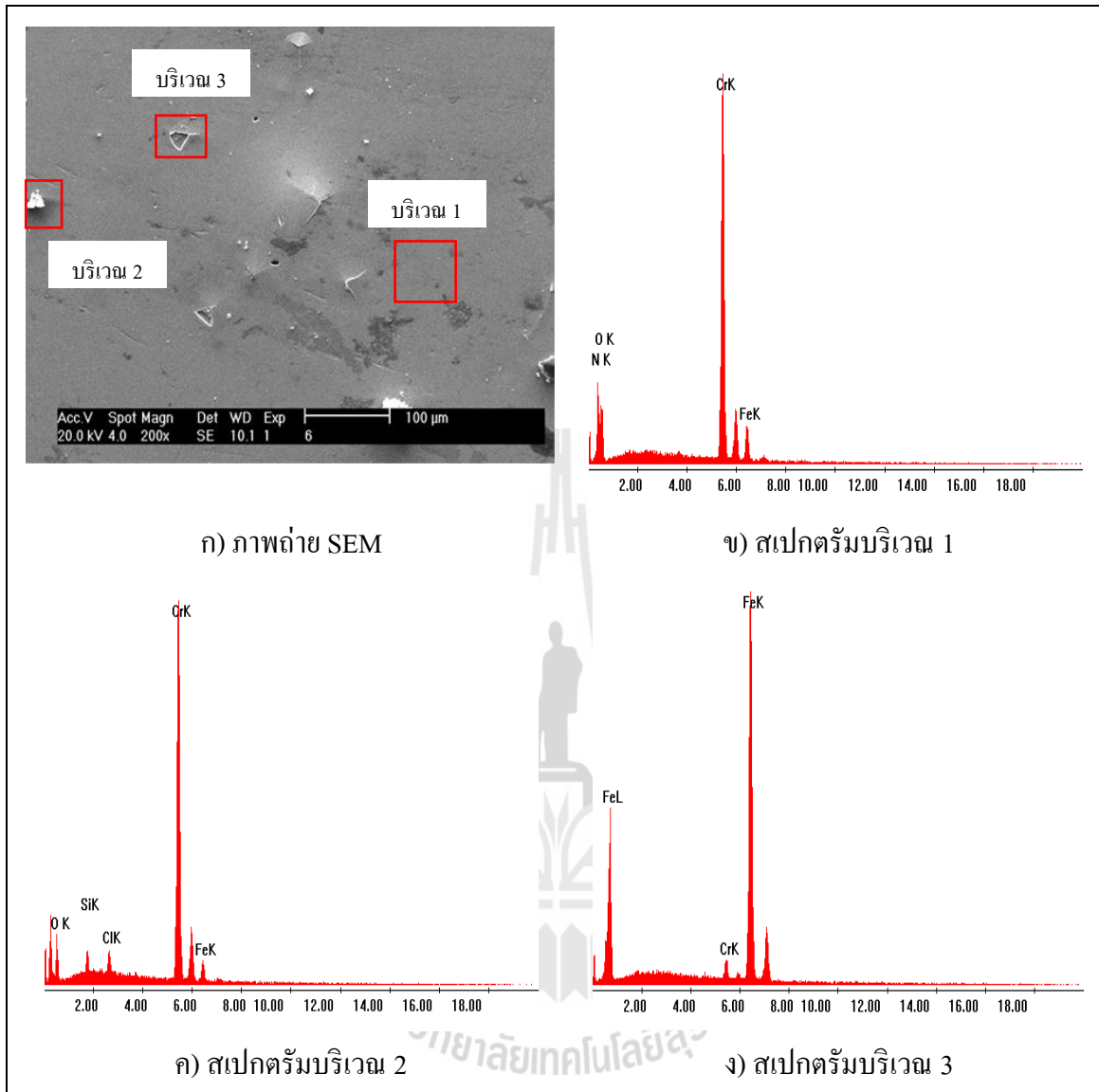
รูปที่ ๗.7 ภาพถ่าย SEM และผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีบนพื้นผิวของ
ชิ้นงาน B2 หลังทดสอบการกัดกร่อนในสารละลายโซเดียมคลอไรด์
ความเข้มข้นร้อยละ 3.5 โดยน้ำหนักที่ค่าพีเอช 10



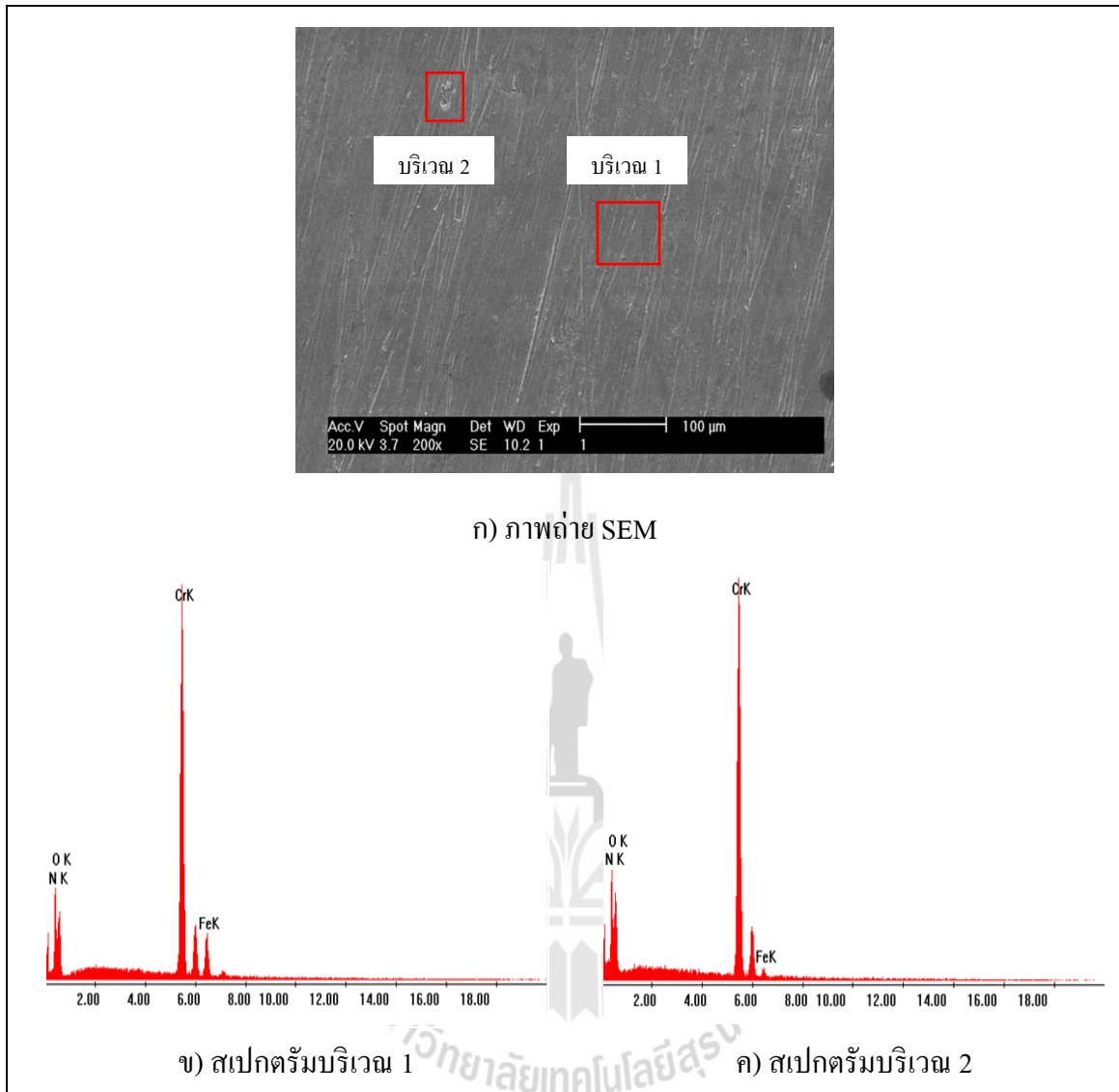
รูปที่ ง.8 ภาพถ่าย SEM และผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีบนพื้นผิวของ
ชิ้นงาน B3 หลังทดสอบการกัดกร่อนในสารละลายโซเดียมคลอไรด์
ความเข้มข้นร้อยละ 3.5 โดยน้ำหนักที่ค่าพีเอช 10



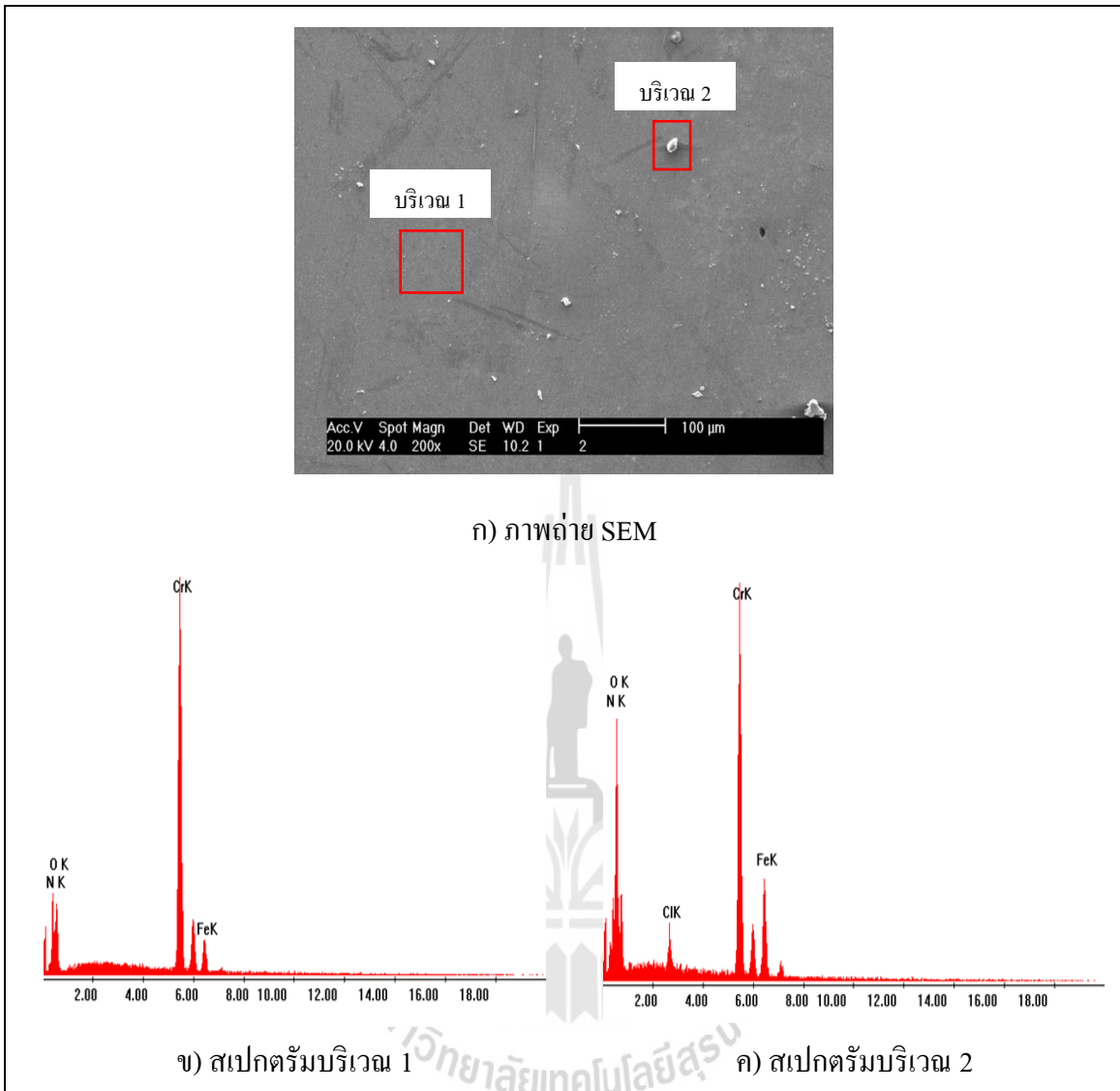
รูปที่ ๙.๙ ภาพถ่าย SEM และผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีบนพื้นผิวของ
ชิ้นงาน C2 หลังทดสอบการกัดกร่อนในสารละลายโซเดียมคลอไรด์
ความเข้มข้นร้อยละ 3.5 โดยน้ำหนักที่ค่าพีเอช 2



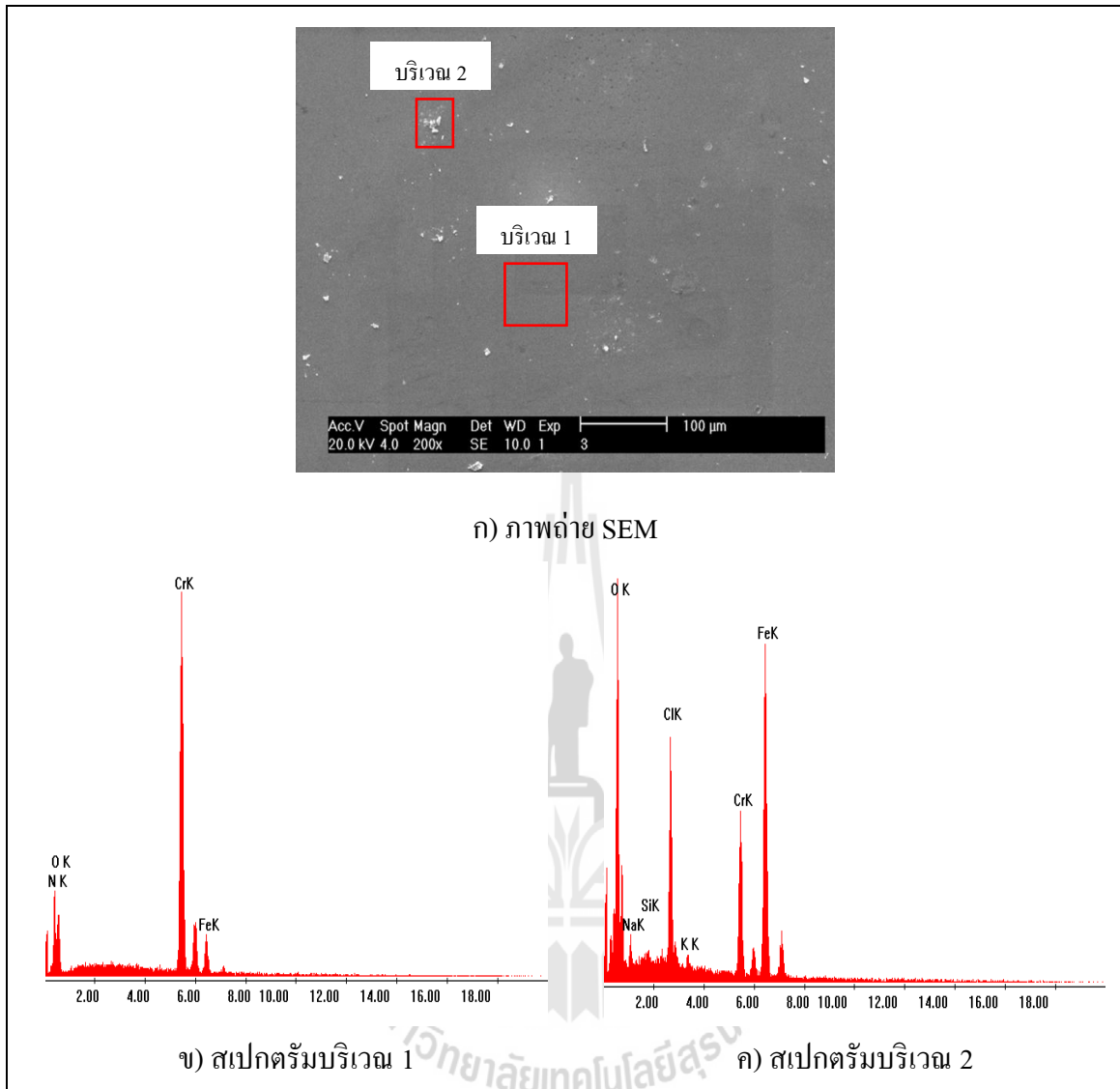
รูปที่ ๑.10 ภาพถ่าย SEM และผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีบนพื้นผิวของ
ชิ้นงาน C3 หลังทดสอบการกัดกร่อนในสารละลายโซเดียมคลอไรด์
ความเข้มข้นร้อยละ 3.5 โดยน้ำหนักที่ค่าพีเอช 2



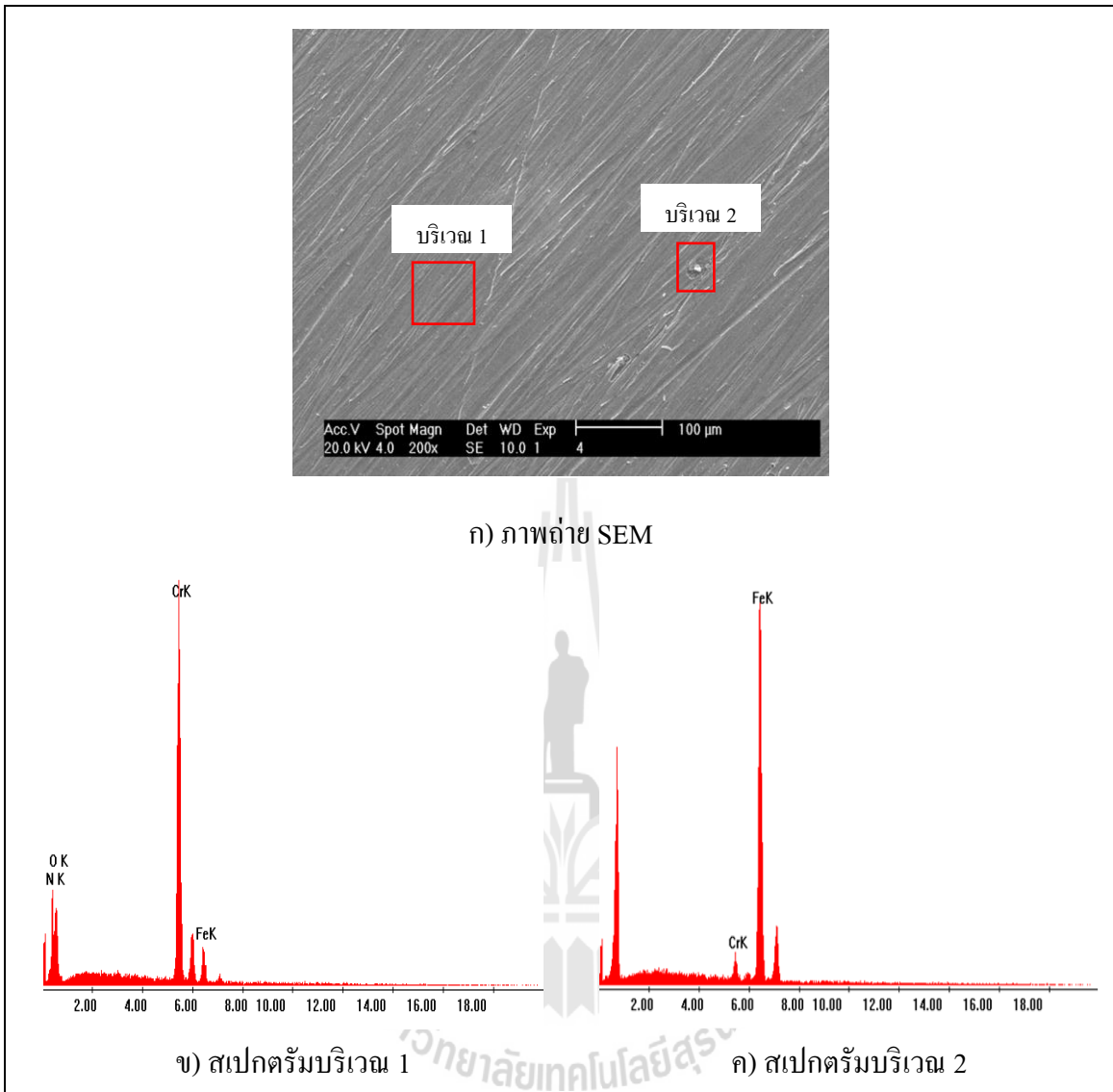
รูปที่ 11.11 ภาพถ่าย SEM และผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีบนพื้นผิวของ
ชิ้นงาน C1 หลังทดสอบการกัดกร่อนในสารละลายโซเดียมคลอไรด์
ความเข้มข้นร้อยละ 3.5 โดยน้ำหนักที่ค่าพีเอช 7



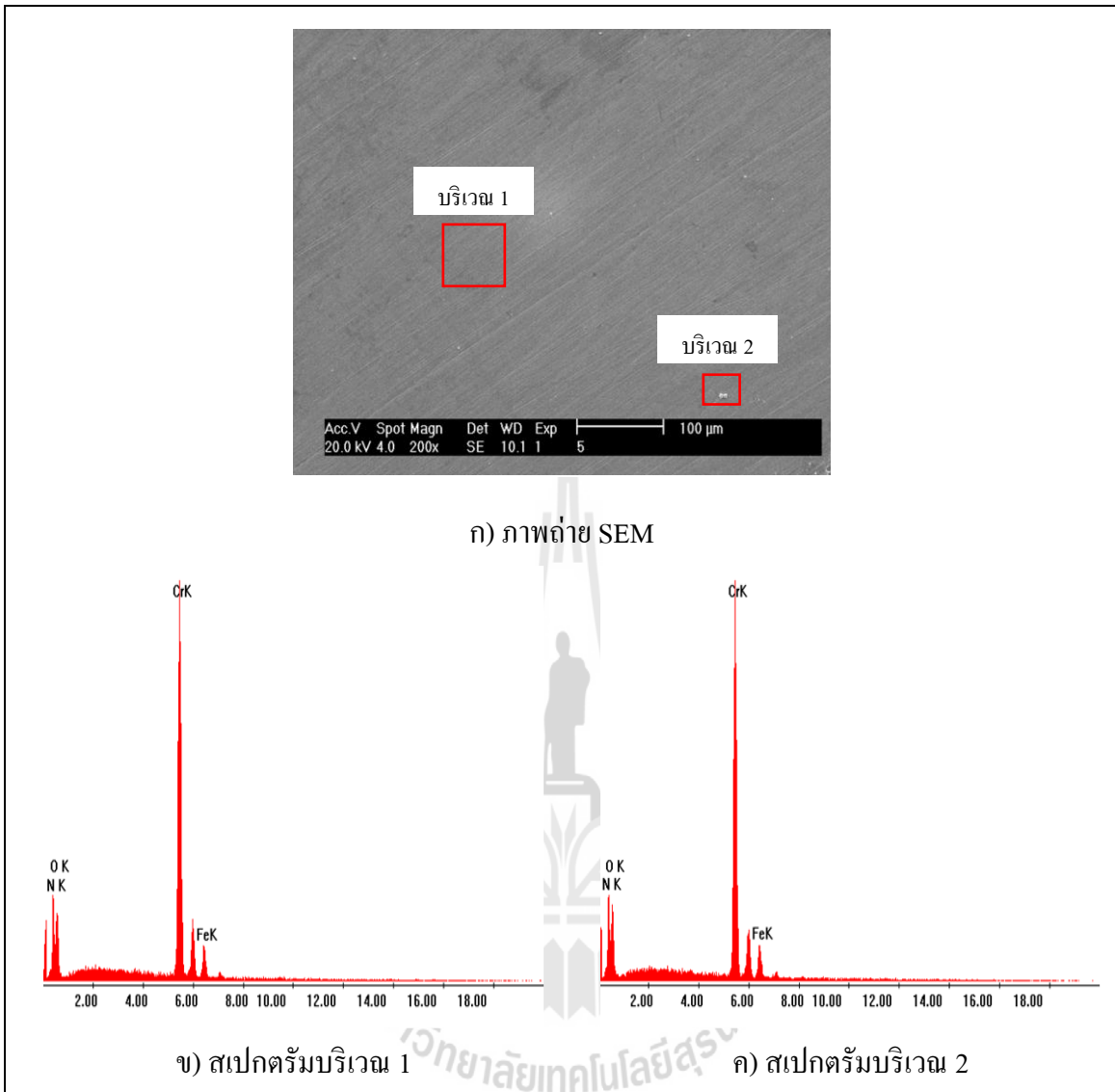
รูปที่ ง.12 ภาพถ่าย SEM และผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีบนพื้นผิวของ
 ชิ้นงาน C2 หลังทดสอบการกัดกร่อนในสารละลายโซเดียมคลอไรด์
 ความเข้มข้นร้อยละ 3.5 โดยน้ำหนักที่ค่าพีเอช 7



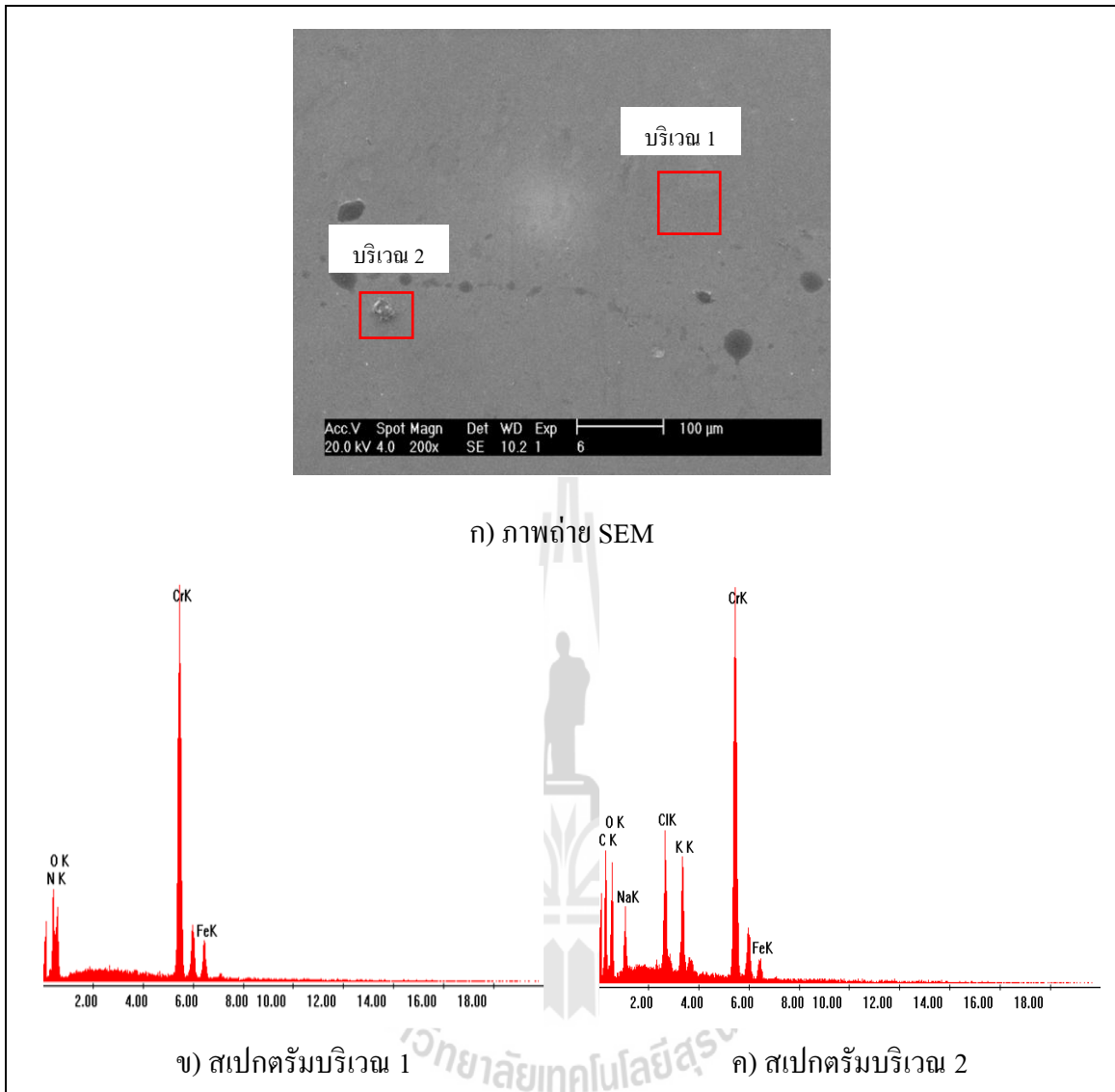
รูปที่ ง.13 ภาพถ่าย SEM และผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีบนพื้นผิวของ
ชิ้นงาน C3 หลังทดสอบการกัดกร่อนในสารละลายโซเดียมคลอไรด์
ความเข้มข้นร้อยละ 3.5 โดยน้ำหนักที่ค่าพีเอช 7



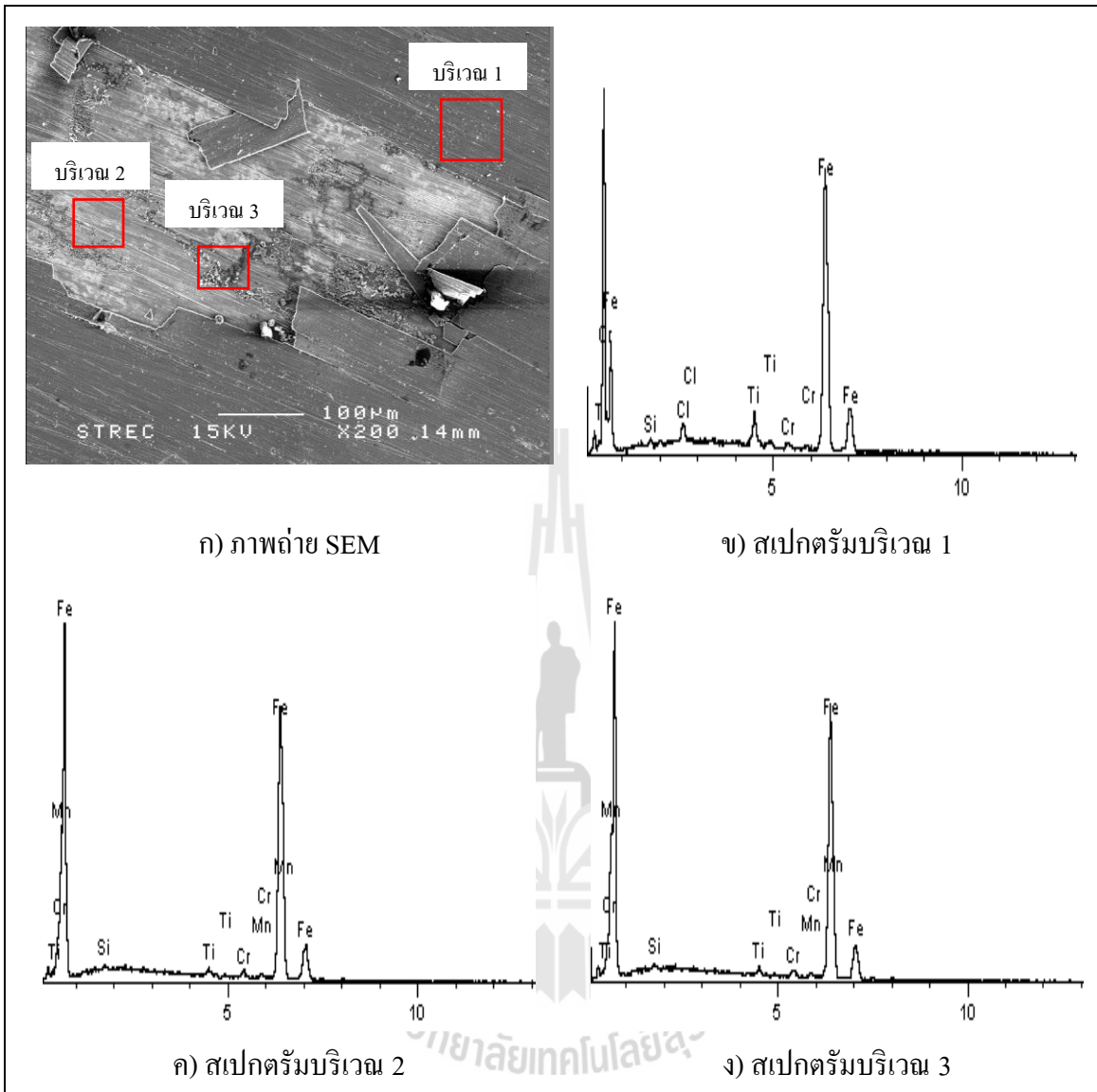
รูปที่ ง.14 ภาพถ่าย SEM และผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีบนพื้นผิวของ
ชิ้นงาน C1 หลังทดสอบการกัดกร่อนในสารละลายโซเดียมคลอไรด์
ความเข้มข้นร้อยละ 3.5 โดยน้ำหนักที่ค่าพีเอช 10



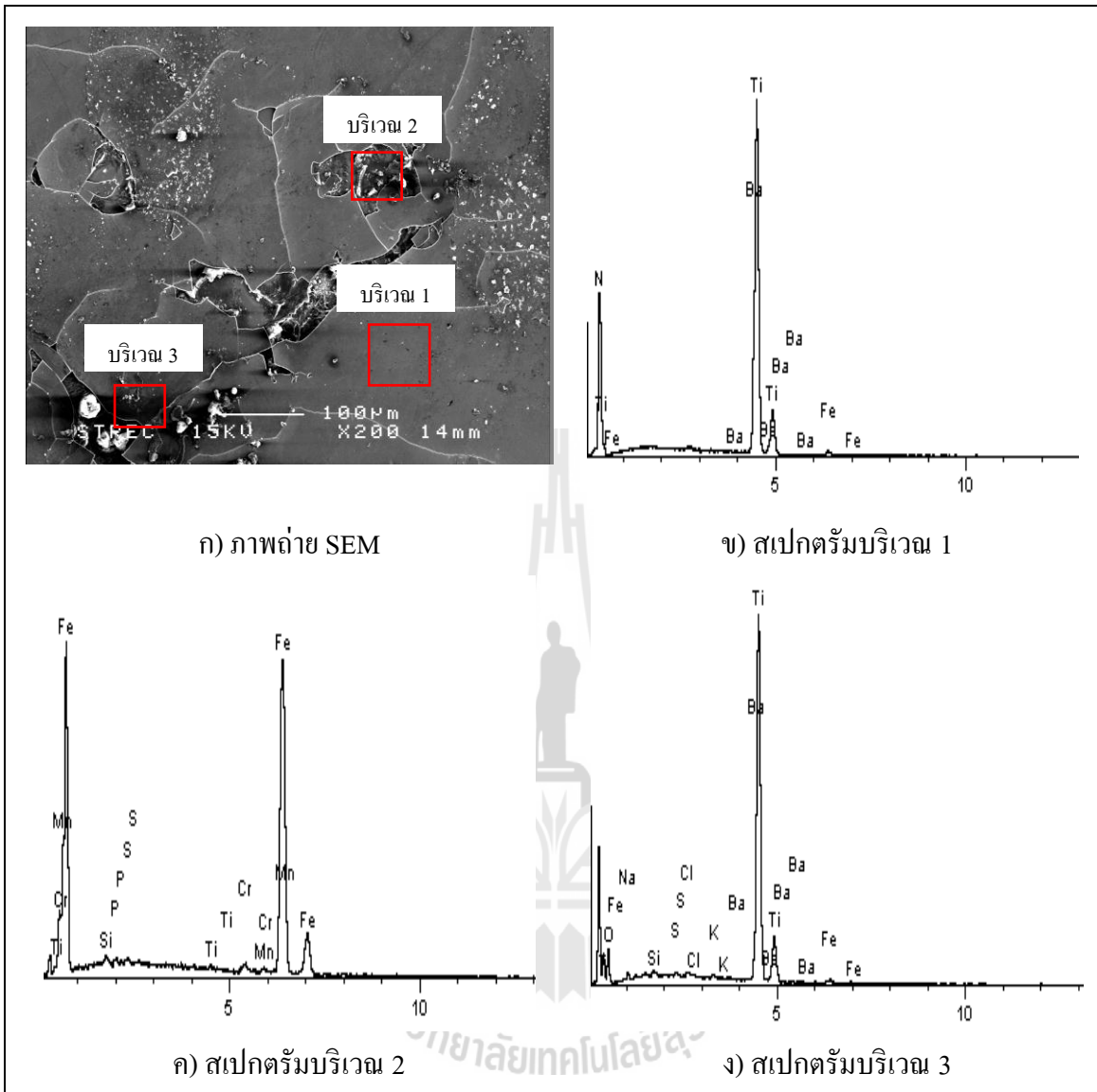
รูปที่ ง.15 ภาพถ่าย SEM และผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีบนพื้นผิวของ
ชิ้นงาน C2 หลังทดสอบการกัดกร่อนในสารละลายโซเดียมคลอไรด์
ความเข้มข้นร้อยละ 3.5 โดยน้ำหนักที่ค่าพีเอช 10



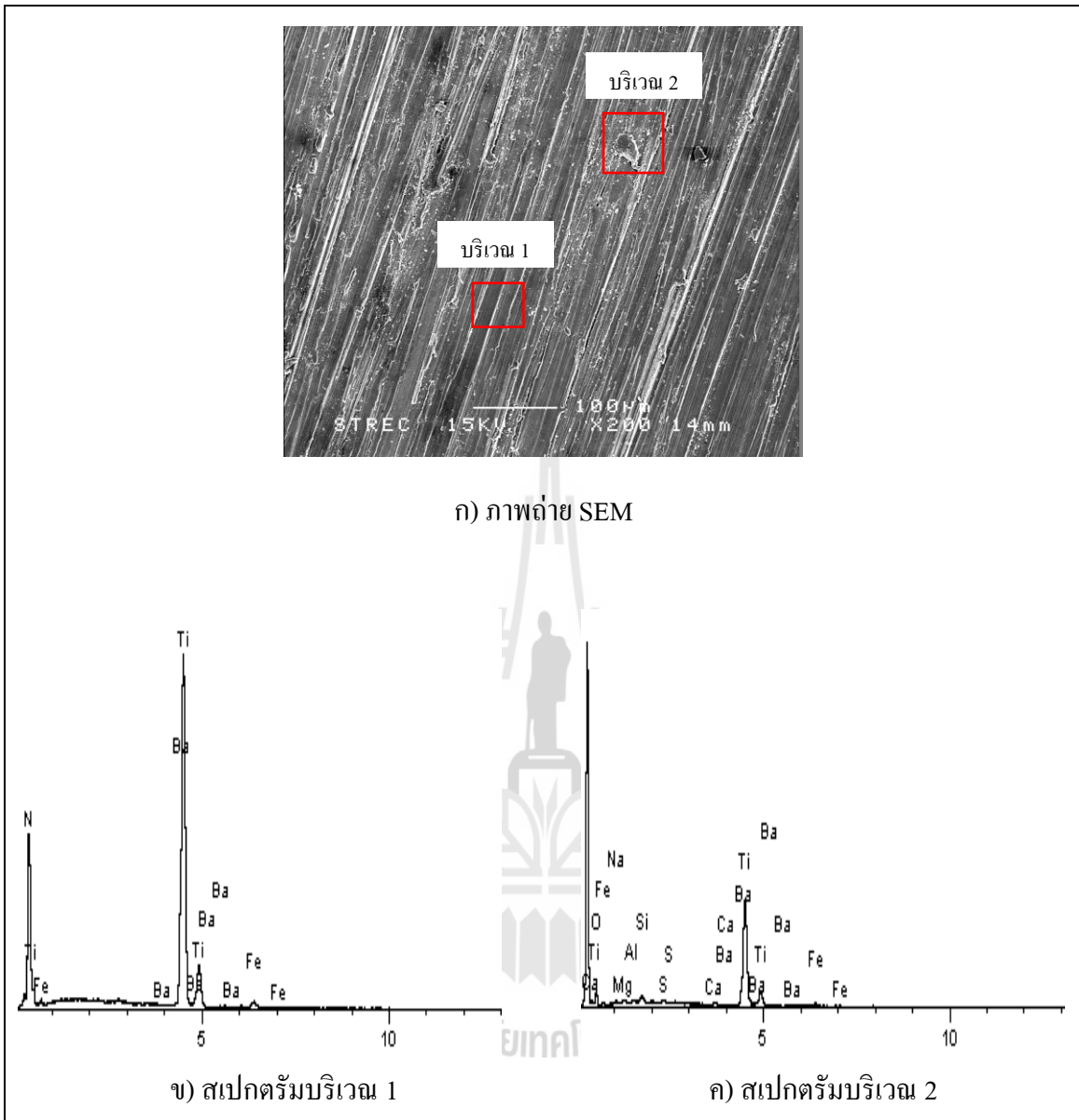
รูปที่ ง.16 ภาพถ่าย SEM และผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีบนพื้นผิวของ
ชิ้นงาน C3 หลังทดสอบการกัดกร่อนในสารละลายโซเดียมคลอไรด์
ความเข้มข้นร้อยละ 3.5 โดยน้ำหนักที่ค่าพีเอช 10



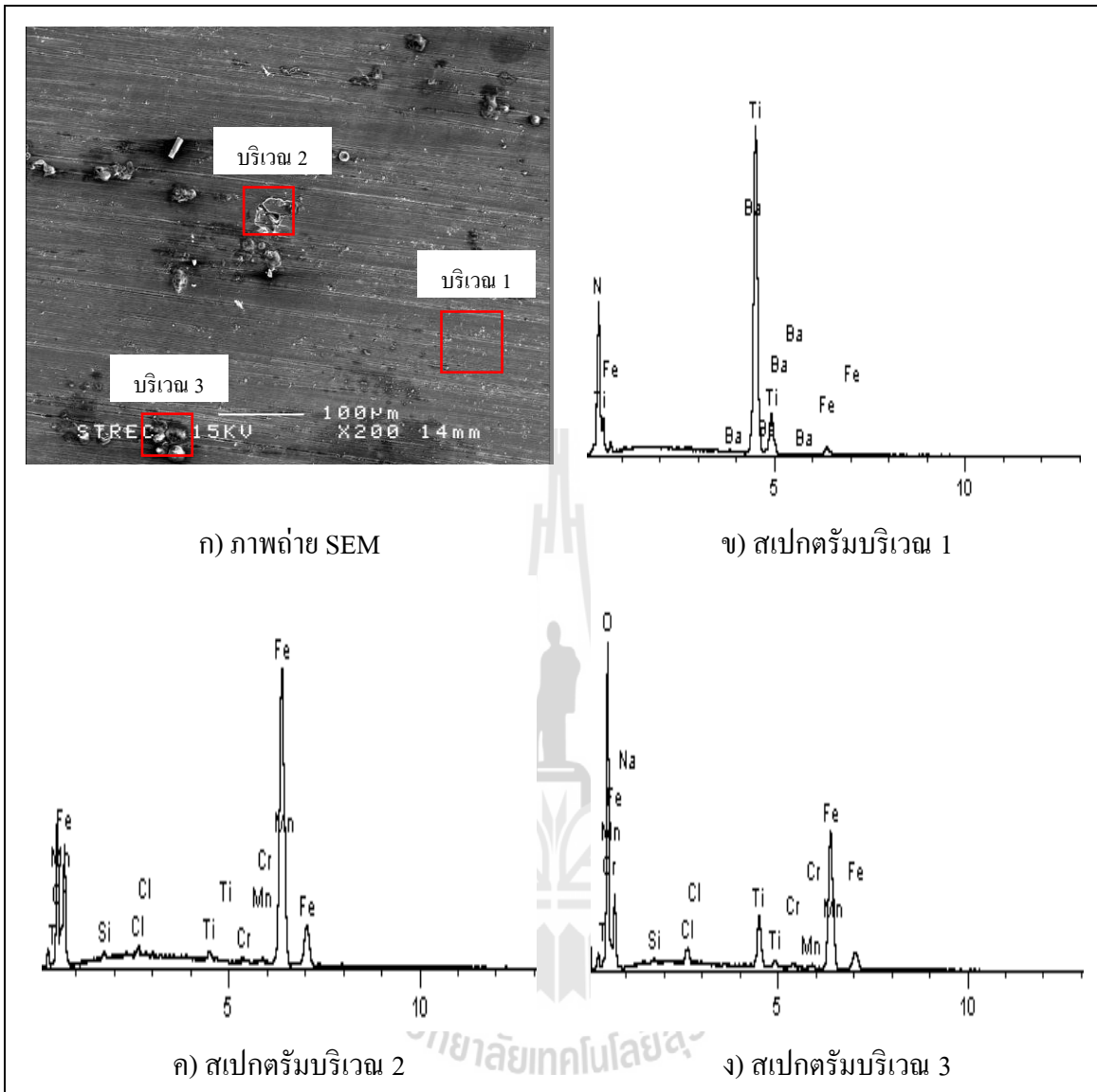
รูปที่ ง.17 ภาพถ่าย SEM และผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีบนพื้นผิวของ
ชิ้นงาน T2 หลังทดสอบการกัดกร่อนในสารละลายโซเดียมคลอไรด์
ความเข้มข้นร้อยละ 3.5 โดยน้ำหนักที่ค่าพีเอช 2



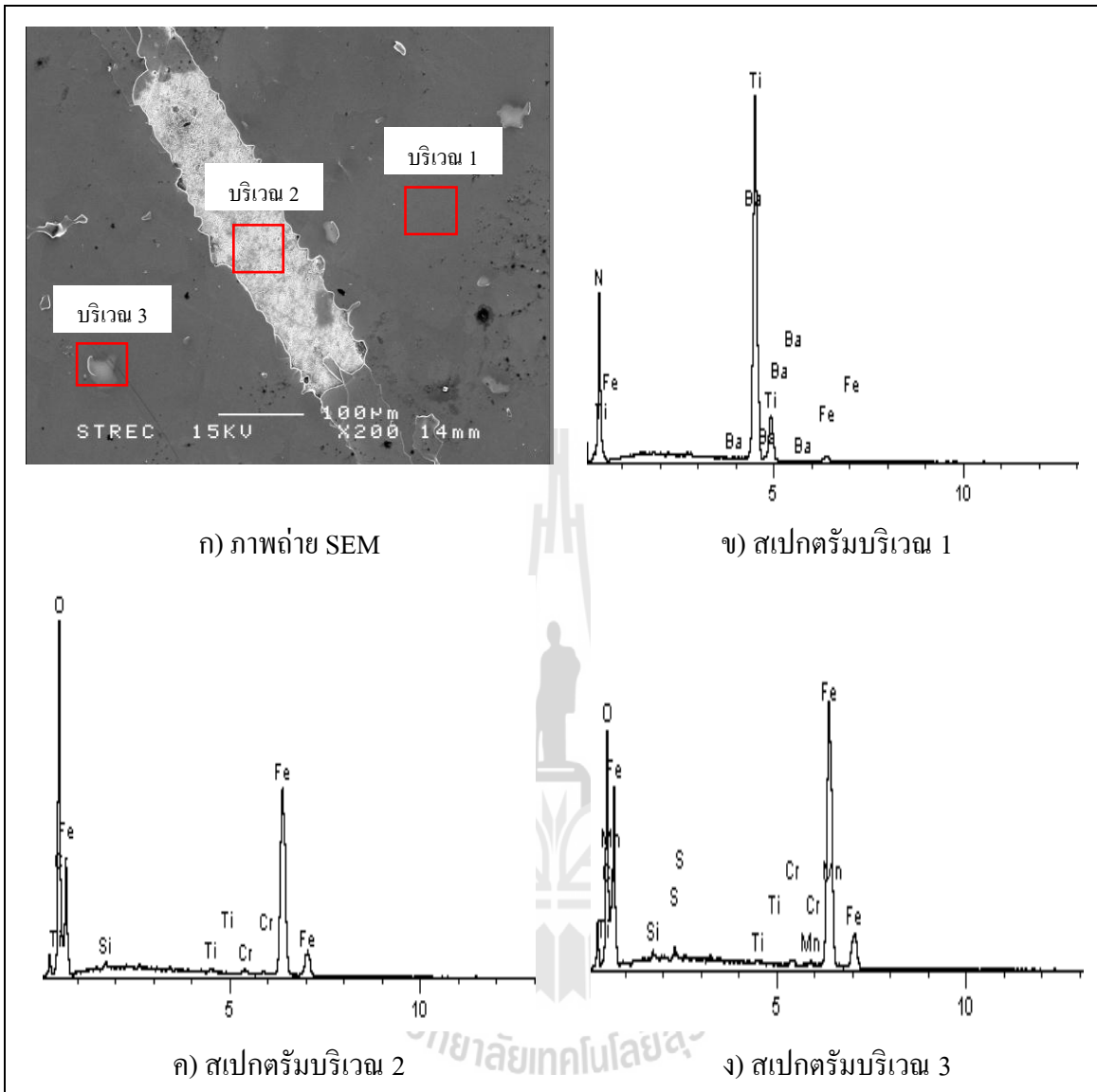
รูปที่ ง.18 ภาพถ่าย SEM และผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีบนพื้นผิวของ
ชิ้นงาน T3 หลังทดสอบการกัดกร่อนในสารละลายโซเดียมคลอไรด์
ความเข้มข้นร้อยละ 3.5 โดยน้ำหนักที่ค่าพีเอช 2



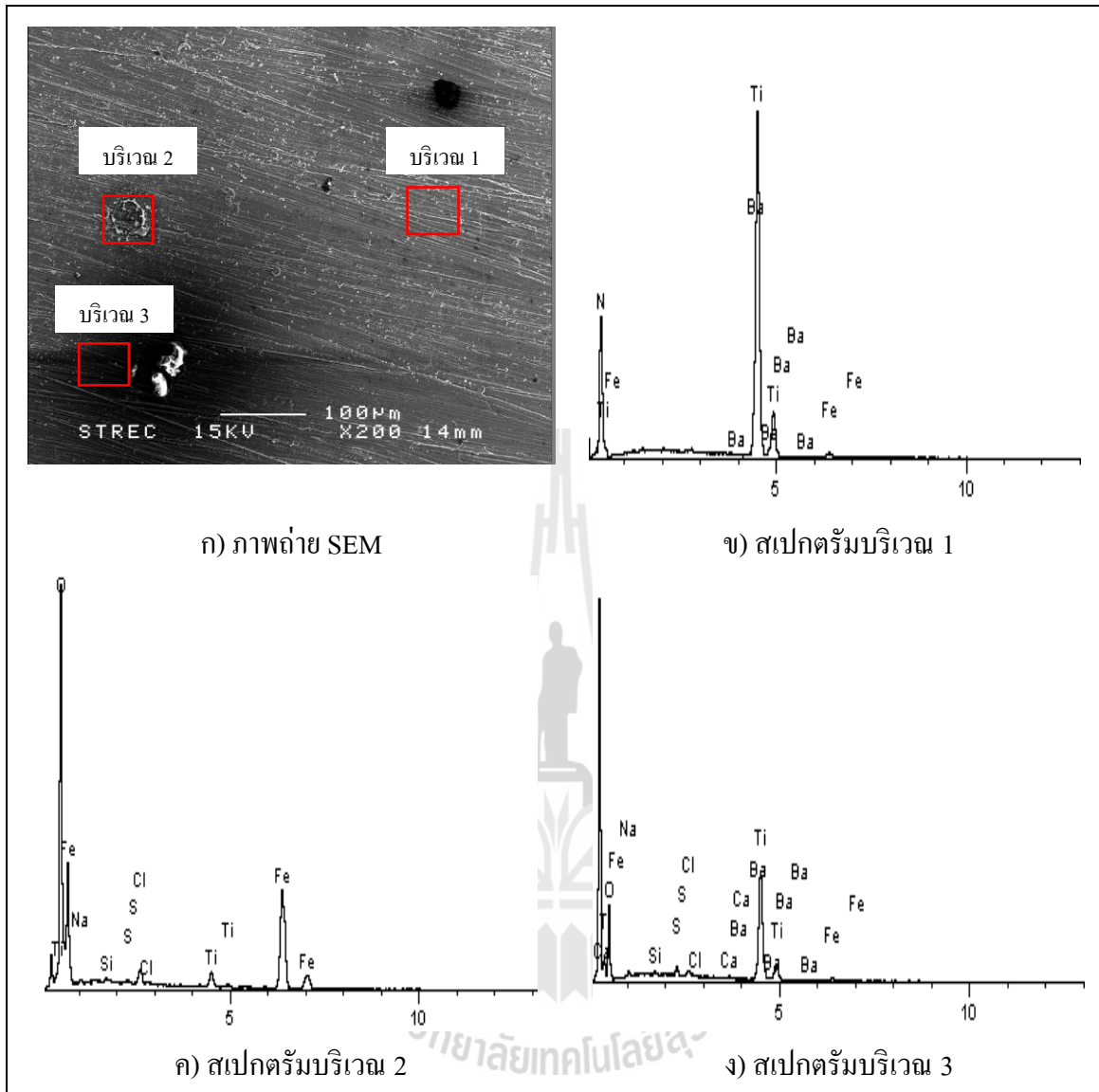
รูปที่ ง.19 ภาพถ่าย SEM และผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีบนพื้นผิวของ
ชิ้นงาน T1 หลังทดสอบการกัดกร่อนในสารละลายโซเดียมคลอไรด์
ความเข้มข้นร้อยละ 3.5 โดยน้ำหนักที่ค่าพีเอช 7



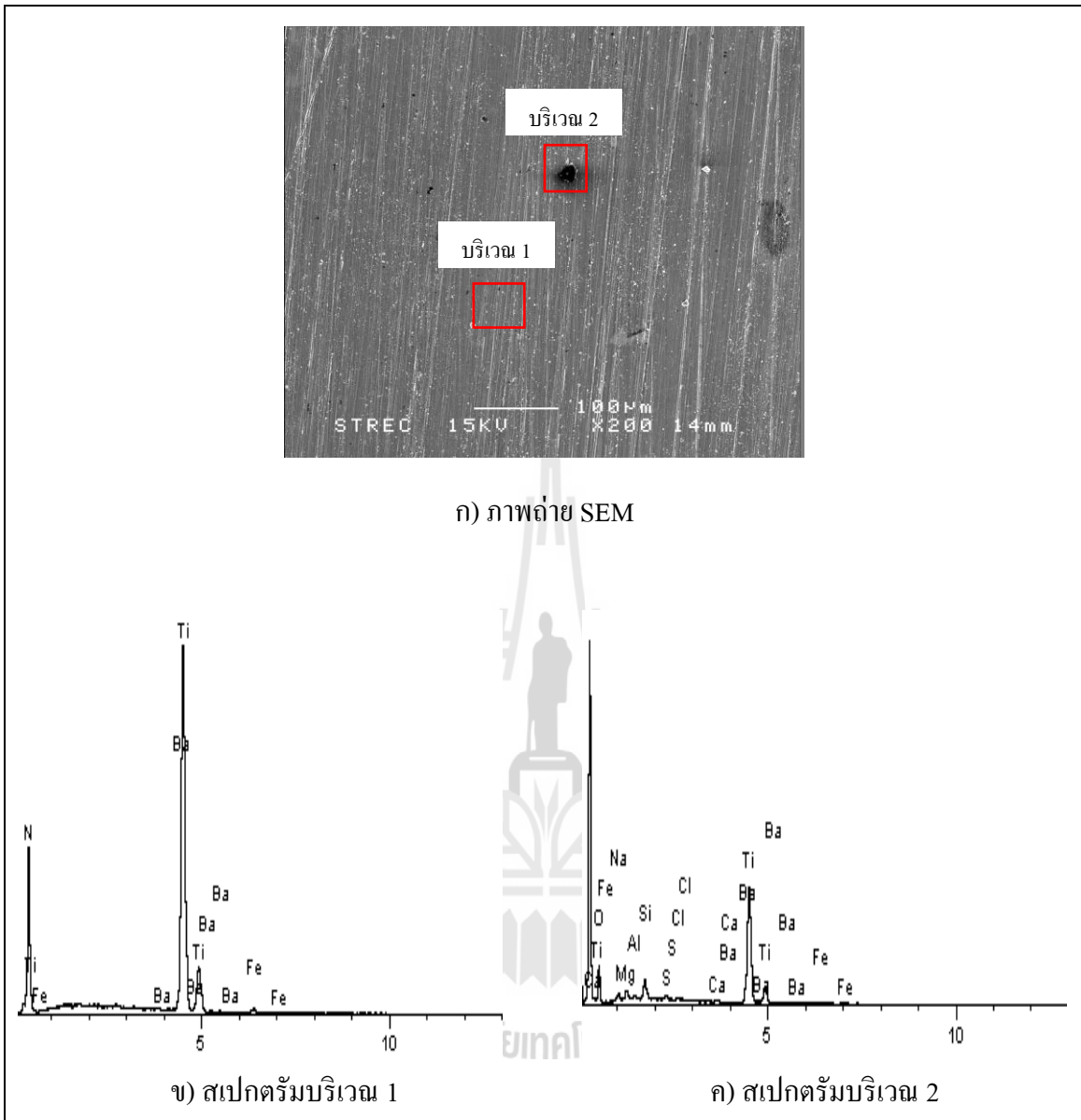
รูปที่ ง.20 ภาพถ่าย SEM และผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีบนพื้นผิวของ
ชิ้นงาน T2 หลังทดสอบการกัดกร่อนในสารละลายโซเดียมคลอไรด์
ความเข้มข้นร้อยละ 3.5 โดยน้ำหนักที่ค่าพีเอช 7



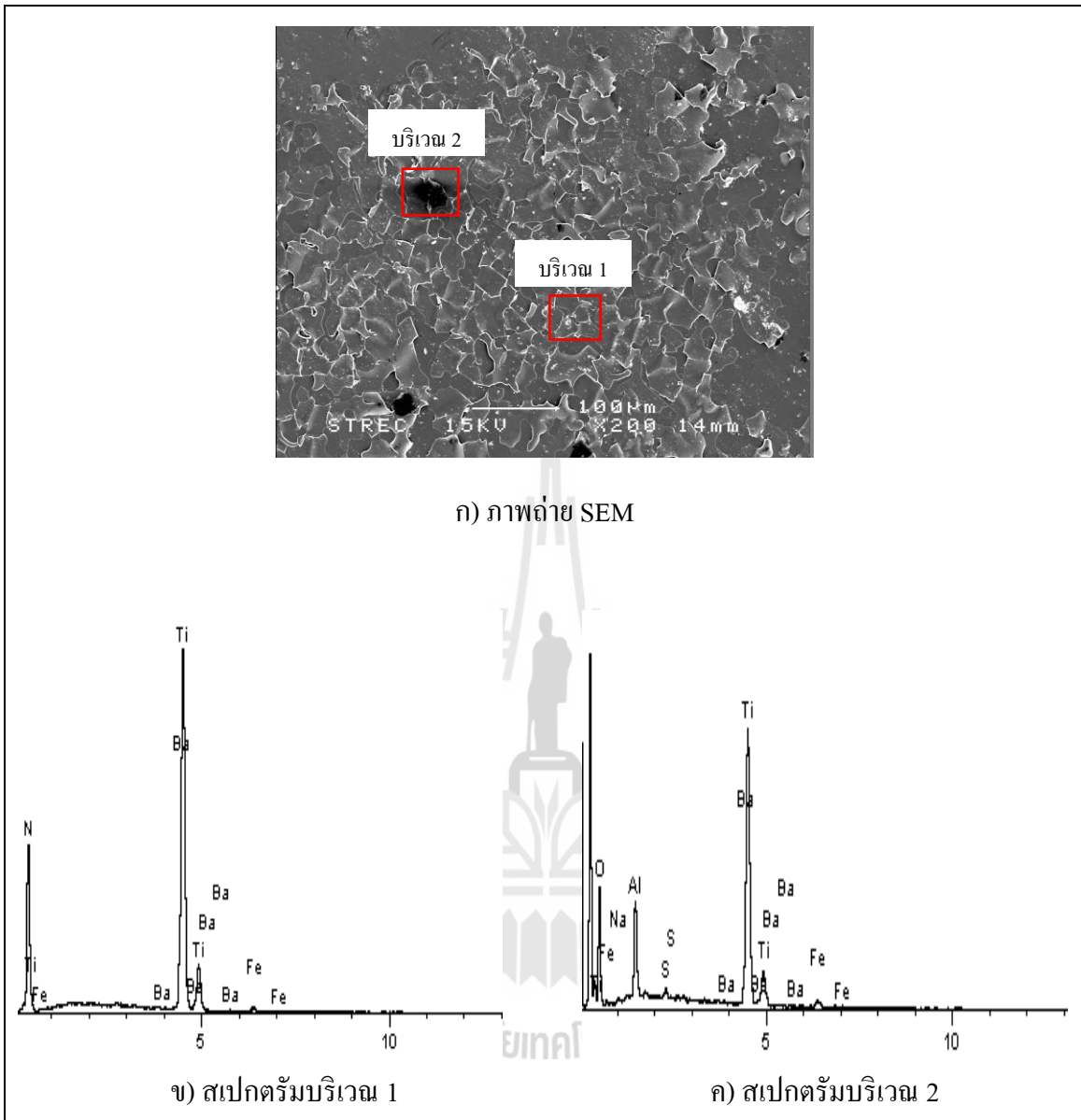
รูปที่ ง.21 ภาพถ่าย SEM และผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีบนพื้นผิวของ
ชิ้นงาน T3 หลังทดสอบการกัดกร่อนในสารละลายโซเดียมคลอไรด์
ความเข้มข้นร้อยละ 3.5 โดยน้ำหนักที่ค่าพีเอช 7



รูปที่ ง.22 ภาพถ่าย SEM และผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีบนพื้นผิวของ
 ชิ้นงาน T1 หลังทดสอบการกัดกร่อนในสารละลายโซเดียมคลอไรด์
 ความเข้มข้นร้อยละ 3.5 โดยน้ำหนักที่ค่าพีเอช 10



รูปที่ ง.23 ภาพถ่าย SEM และผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีบนพื้นผิวของ
ชิ้นงาน T2 หลังทดสอบการกัดกร่อนในสารละลายโซเดียมคลอไรด์
ความเข้มข้นร้อยละ 3.5 โดยน้ำหนักที่ค่าพีเอช 10



รูปที่ ง.24 ภาพถ่าย SEM และผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีบนพื้นผิวของ
 ชิ้นงาน T3 หลังทดสอบการกัดกร่อนในสารละลายโซเดียมคลอไรด์
 ความเข้มข้นร้อยละ 3.5 โดยน้ำหนักที่ค่าพีเอช 10

ภาคผนวก จ
ส่วนหนึ่งของรายงานวิจัยที่ได้รับการเผยแพร่



เนื่องด้วยส่วนหนึ่งของงานวิจัยฉบับนี้ได้นำเสนอในการประชุมทางวิชาการและได้รับการตอบรับให้ตีพิมพ์ดังรายละเอียดต่อไปนี้

1. C. Keawhan, P. Wongpanya, P. Songsiriritthigu, N. Witit-Anun, “Corrosion Behavior of AISI 4140 Steel Surface Coated by Physical Vapor Deposition”, Proceedings of the 5th Thailand Metallurgy Conference (TMETC-5), 19-20 January 2012, Miracle Grand Hotel, Bangkok, Thailand
2. C. Keawhan, P. Wongpanya, P. Songsiriritthigu, N. Witit-Anun, “Corrosion Behavior of AISI 4140 Steel Surface Coated by Physical Vapor Deposition”, Journal of Metals, Materials and Minerals, Vol.22, No.1, pp. 69-76, 2012

