

พฤติกรรมการกัดกร่อนของเหล็กกล้า AISI 4140 ที่เคลือบผิว
ด้วยการเคลือบไอทางกายภาพ

นางสาวชลธิชาแก้วหาญ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมโลหการ
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ปีการศึกษา 2555

**CORROSION BEHAVIOR OF AISI 4140
STEEL SURFACE-COATED BY PHYSICAL
VAPOR DEPOSITION**

Chonthicha Keawhan

**A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the
Degree of Master of Engineering in Metallurgical Engineering
Suranaree University of Technology
Academic Year 2012**

พหุติกรรมการคัดกรองของหลักสูตร AISI 4140 ที่เคลื่อนผิว

ด้วยการเคลื่อนไอทางกายภาพ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

คณะกรรมการสอบบัณฑิตวิทยาลัย

(อ. ดร.ฐาปนี พัทธวิชัย)

ประธานกรรมการ

(ผศ. ดร.พรวิสา วงศ์ปัญญา)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาบัณฑิตวิทยาลัย)

(ผศ. ดร.นิรันดร์ วิทิตอนันต์)

กรรมการ

(รศ. ดร.ประยูร ส่งศิริฤทธิกุล)

กรรมการ

(ศ. ดร.ชูกิจ ลิมปิจำนงค์)

รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการ

(รศ. ร.อ. ดร.กนต์ธร ชำนิประศาสน์)

คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

ชลธิชา แก้วหาญ: พฤติกรรมการกัดกร่อนของเหล็กกล้า AISI 4140 ที่เคลือบผิวด้วยการเคลือบไอทางกายภาพ(CORROSION BEHAVIOR OF AISI 4140 STEEL SURFACE-COATED BY PHYSICAL VAPOR DEPOSITION) อาจารย์ที่ปรึกษา :
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พรวสา วงศ์ปัญญา,155หน้า.

ชิ้นงานเหล็กกล้า AISI 4140 ที่มีความหยาบพื้นผิวแตกต่างกันถูกเคลือบผิวด้วยฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์และฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรด์ด้วยกระบวนการเคลือบทางไอทางกายภาพโดยคุณลักษณะของฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์และฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรด์ก่อนทดสอบการกัดกร่อนถูกตรวจสอบด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์และกล้องจุลทรรศน์แบบแรงอะตอมแล้วศึกษาพฤติกรรมการกัดกร่อนของชิ้นงานเหล็กกล้า AISI 4140 ที่ไม่ถูกเคลือบผิว ชิ้นงานเหล็กกล้า AISI 4140 ที่ถูกเคลือบผิวด้วยฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์และชิ้นงานเหล็กกล้า AISI 4140 ที่ถูกเคลือบผิวด้วยฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรด์ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้นร้อยละ 3.5 โดยน้ำหนักที่ค่าพีเอช 2 7 และ 10 ด้วยวิธีทางเคมีไฟฟ้า พื้นผิวของชิ้นงานหลังทดสอบการกัดกร่อนถูกตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดและเทคนิคเอ็กซ์เรย์โฟโตอิเล็กตรอนสเปกโทรสโคปีจากการวิจัยพบว่าชิ้นงานเหล็กกล้า AISI 4140 ที่ถูกเคลือบผิวด้วยโครเมียมไนไตรด์และชิ้นงานเหล็กกล้า AISI 4140 ที่ถูกเคลือบผิวด้วยไทเทเนียมไนไตรด์มีความต้านทานการกัดกร่อนที่ดีกว่าชิ้นงานเหล็กกล้า AISI 4140 ที่ไม่ถูกเคลือบผิวและชิ้นงานเหล็กกล้า AISI 4140 ที่ถูกเคลือบผิวด้วยโครเมียมไนไตรด์มีความต้านทานการกัดกร่อนที่ดีกว่าชิ้นงานเหล็กกล้า AISI 4140 ที่ถูกเคลือบผิวด้วยไทเทเนียมไนไตรด์ที่ทุกค่าพีเอช ค่าความหยาบของเหล็กกล้า 4140 ก่อนการเคลือบผิวที่ลดลงและสารละลายที่มีค่าพีเอชเพิ่มมากขึ้นส่งผลให้ชิ้นงานมีความต้านทานการกัดกร่อนที่ดีขึ้น นอกจากนี้พบว่าพื้นที่ที่ถูกกัดกร่อนและปริมาณผลิตภัณฑ์การกัดกร่อนบนพื้นผิวของชิ้นงานเหล็กกล้า AISI 4140 ที่ถูกเคลือบผิวด้วยโครเมียมไนไตรด์และชิ้นงานเหล็กกล้า AISI 4140 ที่ถูกเคลือบผิวด้วยไทเทเนียมไนไตรด์มีปริมาณน้อยกว่าชิ้นงานเหล็กกล้า AISI 4140 ที่ไม่ถูกเคลือบผิว และค่าความหยาบผิวที่ลดลงและสารละลายที่มีค่าพีเอชเพิ่มมากขึ้นส่งผลให้ชิ้นงานมีพื้นที่ที่ถูกกัดกร่อนและปริมาณผลิตภัณฑ์การกัดกร่อนที่ลดลงอีกด้วย

สาขาวิชา วิศวกรรมโลหการ

ปีการศึกษา 2555

ลายมือชื่อนักศึกษา _____

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา _____

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม _____

CHONTHICHAKEAWHAN : CORROSION BEHAVIOR OF AISI 4140
STEEL SURFACE-COATED BY PHYSICAL VAPOR DEPOSITION.

THESIS ADVISOR : ASST. PROF. PORNWASA WONGPANYA, Dr.-Ing.,
155PP.

CORROSION/CHROMIUM NITRIDE FILM/TITANIUM NITRIDE/SURFACE
ROUGHNESS/PVD

The AISI 4140 steel samples with different surface roughnesses were coated with CrN and TiN films by physical vapor deposition. The CrN and TiN coated samples were characterized by X-ray diffraction technique and atomic force microscopy prior to corrosion testing. Then, the corrosion behavior of the uncoated, CrN and TiN coated AISI 4140 steel samples was studied in air-saturated 3.5 wt% NaCl solution at pH 2, 7 and 10 by electrochemical technique. The surface of sample after corrosion testing was examined by the scanning electron microscopy and X-ray photoelectron spectroscopy. From the results, the results revealed that the CrN and TiN coated AISI 4140 steel samples exhibited better corrosion resistance than the uncoated samples. The CrN coated AISI 4140 steel samples have better corrosion resistance than the TiN coated AISI 4140 steel samples at all pH values. Decrease of surface roughness of AISI 4140 steel prior to coating and increase of solution pH result in better corrosion resistance. Moreover, the corroded area and corrosion products on the surface of CrN and TiN coated AISI 4140 steel samples were less than those of the uncoated samples. Decreases of the surface roughness of AISI 4140

steel prior to coating and increases of the pH values of the solution resulted in less corroded area and corrosion products.



School of Metallurgical Engineering

Academic Year 2012

Student's Signature _____

Advisor's Signature _____

Co-advisor's Signature _____

กิตติกรรมประกาศ

สำหรับวิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี เนื่องจากได้รับความช่วยเหลืออย่างดียิ่ง ทั้งด้านวิชาการและด้านการดำเนินงานวิจัย จากหน่วยงานและบุคคลต่าง ๆ ในโอกาสนี้ผู้วิจัยขอขอบพระคุณหน่วยงานและบุคคลต่าง ๆ ได้แก่

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีและสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ ผู้ให้ทุนสนับสนุนในการดำเนินการวิจัย

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พรวิสา วงศ์ปัญญา อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผู้ให้ความรู้ทางวิชาการในด้านต่าง ๆ และให้คำปรึกษาที่มีประโยชน์อย่างยิ่งตลอดการทำวิทยานิพนธ์ในครั้งนี้

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นิรันดร์ วิทิตอนันต์ อาจารย์ที่ปรึกษาร่วมวิทยานิพนธ์ อาจารย์ประจำภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา โดยให้ความรู้ในด้านกระบวนการเคลื่อนผิวด้วยวิธีไอทางกาย ซึ่งเป็นส่วนสำคัญของการวิจัยครั้งนี้

รองศาสตราจารย์ ดร.ประยูร ส่งศิริฤทธิกุล อาจารย์ประจำสาขาวิชาฟิสิกส์ สำนักวิชาวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี และดร.ชนรรค์ เอื้อรักสกุล ผู้จัดการระบบลำเลียงแสง BL3.2b: PEEM สถาบันวิจัยแสงซินโครตรอนผู้ให้องค์ความรู้ทางวิชาการในด้านแสงซินโครตรอน ซึ่งมีประโยชน์อย่างยิ่งต่อการวิจัยครั้งนี้

เจ้าหน้าที่ประจำศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี (อาคารเครื่องมือ 6) และเจ้าหน้าที่ประจำสถานีทดลอง 3.2 สถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน (องค์การมหาชน)ซึ่งให้คำแนะนำในการใช้เครื่องมือต่าง ๆ ตลอดการทำวิจัยครั้งนี้เป็นอย่างดี

สำหรับคุณงามความดีอันใดที่เกิดจากวิทยานิพนธ์เล่มนี้ ผู้วิจัยขอมอบให้กับบิดา มารดา ตลอดคนญาติพี่น้องอันเป็นที่เคารพรักยิ่ง ซึ่งบุคคลเหล่านี้เป็นผู้ให้กำลังใจแก่ผู้วิจัยมาโดยตลอด อันเป็นส่วนสำคัญอย่างยิ่งที่ทำให้การทำวิจัยครั้งนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี

ชลธิชา แก้วหาญ

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย)	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ)	ข
กิตติกรรมประกาศ	ง
สารบัญ	จ
สารบัญตาราง	ญ
สารบัญรูปภาพ	ฉ
บทที่	
1 บทนำ	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาการวิจัย	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการวิจัย	3
2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	5
2.1 กระบวนการเคลือบผิวแข็งด้วยไอทางกายภาพ	5
2.1.1 Evaporating	6
2.1.2 Sputtering	6
2.1.3 Ion Plating	7
2.2 กระบวนการการกัดกร่อน	7
2.2.1 การกัดกร่อนแบบรูเข็ม	10
2.3 การวัดศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อน ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า การกัดกร่อนและอัตราการกัดกร่อน	12
2.4 เส้นโพลาริเซชัน	14
2.5 การวิเคราะห์ชั้นเคลือบ	15
2.5.1 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM)	16

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.5.2	กล้องจุลทรรศน์โฟโตอิเล็กตรอนสเปกโทรสโกปี (Photoelectron Emission Spectroscopy ,PES)	17
2.6	การทบทวนวรรณกรรม (reviewed literature) และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	18
3	วิธีดำเนินการวิจัย	27
3.1	วัสดุ อุปกรณ์ และสารเคมีที่ใช้ในการดำเนินการวิจัย	27
3.1.1	วัสดุที่ใช้ในการดำเนินการวิจัย	27
3.1.2	สารเคมีที่ใช้ในการดำเนินการวิจัย	27
3.2	อุปกรณ์ที่ใช้ในการดำเนินการวิจัย	28
3.2.1	อุปกรณ์สำหรับเตรียมตัวอย่างก่อนการเคลือบผิว	28
3.2.2	อุปกรณ์สำหรับกระบวนการเคลือบผิว	30
3.2.3	อุปกรณ์สำหรับทดสอบการกัดกร่อน	33
3.2.4	อุปกรณ์สำหรับการวิเคราะห์และตรวจสอบพื้นผิว	36
3.3	ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย	39
3.3.1	ขั้นการเตรียมชิ้นงานก่อนการเคลือบผิว	40
3.3.2	ขั้นตอนกระบวนการเคลือบผิวไอทางกายภาพ	46
3.3.3	ขั้นตอนการตรวจสอบพื้นผิวก่อนทดสอบการกัดกร่อน	48
3.3.4	ขั้นตอนการทดสอบการกัดกร่อน	48
3.3.5	ขั้นตอนการตรวจสอบพื้นผิวหลังทดสอบการกัดกร่อน	51
4	ผลการวิจัยและการอภิปรายผลการวิจัย	52
4.1	คุณลักษณะของฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์ที่เคลือบบน เหล็กกล้า AISI 4140 ก่อนการทดสอบการกัดกร่อน	52
4.1.1	การวิเคราะห์คุณลักษณะของฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์ ที่เคลือบบนเหล็กกล้า AISI 4140 ด้วยเทคนิค การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (XRD)	52

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.1.2	การวิเคราะห์คุณลักษณะของฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์ ที่เคลือบบนเหล็กกล้า AISI 4140 ด้วยกล้องจุลทรรศน์ แบบแรงอะตอม (AFM)	53
4.1.3	การวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคตามแนวภาคตัดขวางของฟิล์มบาง โครเมียมไนไตรด์ที่เคลือบบนเหล็กกล้า AISI 4140 ด้วยกล้อง จุลทรรศน์แบบส่องกวาด (scanning electron microscope, SEM)	56
4.2	คุณลักษณะของฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรด์ที่เคลือบบน เหล็กกล้า AISI 4140 ก่อนการทดสอบการกัดกร่อน	57
4.2.1	การวิเคราะห์คุณลักษณะของฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรด์ ที่เคลือบบนเหล็กกล้า AISI 4140 ด้วยเทคนิค การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (XRD)	57
4.2.2	การวิเคราะห์คุณลักษณะของฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรด์ ที่เคลือบบนเหล็กกล้า AISI 4140 ด้วยกล้องจุลทรรศน์ แบบแรงอะตอม (AFM)	58
4.2.3	การวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคตามแนวภาคตัดขวางของฟิล์มบาง ไทเทเนียมไนไตรด์ที่เคลือบบนเหล็กกล้า AISI 4140 ด้วยกล้อง จุลทรรศน์แบบส่องกวาด (scanning electron microscope, SEM)	61
4.3	พฤติกรรมการกัดกร่อน	62
4.3.1	ผลของการเคลือบฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์และฟิล์มบาง ไทเทเนียมไนไตรด์บนเหล็กกล้า AISI 4140 ที่มีต่อ พฤติกรรมการกัดกร่อน	69
4.3.2	ผลของค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ของสารละลายโซเดียมคลอไรด์ ความเข้มข้นร้อยละ 3.5 โดยน้ำหนักที่มีต่อพฤติกรรมการกัดกร่อน.....	75
4.3.3	ผลของค่าความหยาบผิวของเหล็กกล้า AISI 4140 ต่อพฤติกรรมการกัดกร่อน	81

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.4	คุณลักษณะของชิ้นงานเหล็กกล้า AISI 4140 ที่ไม่ถูกเคลือบผิว ชิ้นงาน เหล็กกล้า AISI 4140 ที่ถูกเคลือบผิวด้วยฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์ และชิ้นงานเหล็กกล้า AISI 4140 ที่ถูกเคลือบผิวด้วยฟิล์มบาง ไทเทเนียมไนไตรด์หลังทดสอบการกัดกร่อน86	86
4.4.1	การวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวของชิ้นงานเหล็กกล้า AISI 4140 ที่ไม่ ถูกเคลือบผิว ชิ้นงานเหล็กกล้า AISI 4140 ที่ถูกเคลือบผิวด้วย ฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์ และชิ้นงานเหล็กกล้า AISI 4140 ที่ถูกเคลือบผิวด้วยฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรด์ด้วยกล้อง จุลทรรศน์แบบส่องกราด (SEM)86	86
4.4.2	การวิเคราะห์คุณลักษณะของฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์ ที่เคลือบบนเหล็กกล้า AISI 4140 ด้วยเทคนิค X-ray Photoelectron Spectroscopy (XPS)96	96
4.4.3	การวิเคราะห์คุณลักษณะของฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรด์ ที่เคลือบบนเหล็กกล้า AISI 4140 ด้วยเทคนิค X-ray Photoelectron Spectroscopy (XPS)97	97
5	บทสรุปและข้อเสนอแนะ 100	100
5.1	สรุปผลการวิจัย100	100
5.2	ข้อเสนอแนะ101	101
	รายการอ้างอิง102	102
	ภาคผนวก	
ภาคผนวก ก.	การหาค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อน กระแสไฟฟ้าการกัดกร่อน และการคำนวณอัตราการกัดกร่อนของชิ้นงานเหล็กกล้า AISI 4140 ชิ้นงานเหล็กกล้า AISI 4140 ที่ถูกเคลือบผิวด้วย ฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์ และชิ้นงานเหล็กกล้า AISI 4140 ที่ถูกเคลือบผิวด้วยฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรด์108	108

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

ภาคผนวก ข.	ข้อมูลดิบที่ได้จากการวัดเส้น โพลาริเซชันที่ทำการทดลอง จากเครื่องโพเทนชิโอสแตท111
ภาคผนวก ค.	ค่าพีเอชของชิ้นงานเหล็กกล้า AISI 4140 ที่ไม่ถูกเคลือบผิว ชิ้นงานเหล็กกล้า AISI 4140 ที่ถูกเคลือบผิวด้วยฟิล์มบาง โครเมียมไนไตรด์ และชิ้นงานเหล็กกล้า AISI 4140 ที่ถูก เคลือบผิวด้วยฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรด์ก่อน และหลังการทดสอบการกัดกร่อน115
ภาคผนวก ง.	ภาพลักษณะพื้นผิวของชิ้นงานเหล็กกล้า AISI 4140 ที่ไม่ถูกเคลือบ ผิวชิ้นงานเหล็กกล้า AISI 4140 ที่ถูกเคลือบผิวด้วยฟิล์มบาง โครเมียมไนไตรด์ และชิ้นงานเหล็กกล้า AISI 4140 ที่ถูก เคลือบผิวด้วยฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรด์ก่อน ทดสอบการกัดกร่อน118
ภาคผนวก จ.	ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีด้วยเทคนิค EDX ของชิ้นงาน เหล็กกล้า AISI 4140 ชิ้นงานเหล็กกล้า AISI 4140 ที่ถูกเคลือบผิว ด้วยฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์ และชิ้นงานเหล็กกล้า AISI 4140 ที่ถูกเคลือบผิวด้วยฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรด์ ก่อนและหลังการทดสอบการกัดกร่อน120
ภาคผนวก ช.	บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์145
ประวัติผู้เขียน155

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1	ความหนาของโครเมียมไนไตรด์ฟิล์มและความหยาบผิวของ ชิ้นงานตัวอย่างก่อนและหลังการเคลือบผิว26
3.1	ส่วนผสมทางเคมีของเหล็กกล้า AISI 414027
3.2	ค่าความแข็งของเหล็กกล้า AISI 4140 ก่อนและหลังการอบชุบทางความร้อน42
3.3	ผลการวัดค่าความหยาบพื้นผิวของเหล็กกล้า AISI 4140 ก่อนการเคลือบผิว43
3.4	ผลการวัดค่าความหยาบพื้นผิวของชิ้นงานหลังการเคลือบผิวด้วยฟิล์มบาง โครเมียมไนไตรด์44
3.5	ผลการวัดค่าความหยาบพื้นผิวของชิ้นงานหลังการเคลือบผิวด้วยฟิล์มบาง ไทเทเนียมไนไตรด์45
3.6	ตัวแปรในการเคลือบฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์ (CrN) ในกระบวนการ เคลือบผิวแบบไอทางกายภาพ47
3.7	ตัวแปรในการเคลือบฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรด์ (TiN) ในกระบวนการ เคลือบผิวแบบไอทางกายภาพ47
3.8	จำนวนชิ้นงานที่ไม่ถูกเคลือบผิวและสภาวะที่ใช้ทดสอบการกัดกร่อน50
3.9	จำนวนชิ้นงานที่ถูกเคลือบผิวด้วยโครเมียมไนไตรด์และสภาวะที่ใช้ ทดสอบการกัดกร่อน50
3.10	จำนวนชิ้นงานที่ถูกเคลือบผิวด้วยไทเทเนียมไนไตรด์และสภาวะที่ใช้ ทดสอบการกัดกร่อน50
4.1	ค่าที่ได้จากเส้นโพลาริเซชันของชิ้นงานเหล็กกล้า AISI 4140 ที่ไม่ถูก เคลือบผิว ชิ้นงานเหล็กกล้า AISI 4140 ที่ถูกเคลือบผิวด้วยฟิล์มบาง โครเมียมไนไตรด์ และชิ้นงานเหล็กกล้า AISI 4140 ที่ถูกเคลือบผิว ด้วยฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรด์ ที่ทำการทดสอบการกัดกร่อนใน สารละลายโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้นร้อยละ 3.5 โดยน้ำหนัก ที่มีค่าพีเอช 2.7 และ 1068

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่		หน้า
ข.1	ค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนของชิ้นงานในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ ความเข้มข้นร้อยละ 3.5 โดยน้ำหนักที่ค่าพีเอช 2	112
ข.2	ค่าอัตราการกัดกร่อนของชิ้นงานในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ ความเข้มข้นร้อยละ 3.5 โดยน้ำหนักที่ค่าพีเอช 2	112
ข.3	ค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนของชิ้นงานในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ ความเข้มข้นร้อยละ 3.5 โดยน้ำหนักที่ค่าพีเอช 7	113
ข.4	ค่าอัตราการกัดกร่อนของชิ้นงานในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ ความเข้มข้นร้อยละ 3.5 โดยน้ำหนักที่ค่าพีเอช 7	113
ข.5	ค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนของชิ้นงานในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ ความเข้มข้นร้อยละ 3.5 โดยน้ำหนักที่ค่าพีเอช 10	114
ข.6	ค่าอัตราการกัดกร่อนของชิ้นงานในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ ความเข้มข้นร้อยละ 3.5 โดยน้ำหนักที่ค่าพีเอช 10	114
ค.1	ค่าพีเอชก่อนและหลังการทดสอบการกัดกร่อนของชิ้นงานเหล็กกล้า AISI 4140	116
ค.2	ค่าพีเอชก่อนและหลังการทดสอบการกัดกร่อนของชิ้นงานเหล็กกล้า AISI 4140 ถูกเคลือบผิวด้วยฟิล์มบางโครเมียมไนไตรต์	116
ค.3	ค่าพีเอชก่อนและหลังการทดสอบการกัดกร่อนของชิ้นงานเหล็กกล้า AISI 4140 ที่ถูกเคลือบผิวด้วยฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรต์	117

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1	กลไกการทำ Sputtering6
2.2	องค์ประกอบของเซลล์การกัดกร่อนของโลหะ8
2.3	คลอไรด์ในน้ำที่มีผลต่อการกัดกร่อนในโลหะ10
2.4	รูปแบบการกัดกร่อนแบบรูเข็ม (pitting corrosion)11
2.5	การวัดกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อนและศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อน โดยเครื่องโพเทนชิโอสแตท12
2.6	ศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนและความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อน14
2.7	ส่วนต่างๆ ที่สำคัญของเส้นโพลาริเซชัน15
2.8	องค์ประกอบของ SEM16
2.9	ระดับชั้นพลังงานของ XPS17
2.10	เส้นโพลาริเซชันของชิ้นงานที่ไม่ถูกเคลือบผิวและชิ้นงานที่ถูกเคลือบผิว ด้วยชั้นเคลือบ Cr-(C,N) ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้น 0.5 โมลาร์19
2.11	เส้นแอมโนดิกโพลาริเซชันของชิ้นเคลือบต่างๆ ในกรดซัลฟูริกความเข้มข้น 0.1 โมลาร์ที่อัตราการสแกน 0.2 มิลลิโวลต์ต่อวินาที21
2.12	อัตราการกัดกร่อนที่ได้จากการทดสอบจุ่มแช่ในสารละลาย โซเดียมคลอไรด์ที่ค่า pH ต่างๆ.....23
2.13	ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเกิด Hydrogen evolution กับค่า pH24
3.1	เตาอบชิ้นงาน28
3.2	เครื่องขัดผิวชิ้นงานแบบจานหมุนยี่ห้อ BUEHLER รุ่น ECOMET 629
3.3	กระดาษทรายที่ใช้ในการขัดผิวชิ้นงาน29
3.4	เครื่องวัดความหยาบผิวแบบใช้แสง30
3.5	เครื่องเคลือบสุญญากาศระบบรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสเป็คเตอริง31

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.6	ส่วนประกอบของระบบสุญญากาศ32
3.7	ส่วนประกอบของระบบเคลือบผิว33
3.8	เครื่องโพเทนชิโอสแตท34
3.9	อิเล็กโทรดอ้างอิง (reference electrode)34
3.10	อิเล็กโทรดวัดกระแส (counter electrode)35
3.11	อิเล็กโทรดตัวอย่าง (working electrode)35
3.12	กล้องจุลทรรศน์แบบแสง (optical microscope)36
3.13	กล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (scanning electron Microscope, SEM)37
3.14	กล้องจุลทรรศน์โฟโตอิมิชชันอิเล็กตรอนสเปกโตรสโคปี (photoelectron emission spectroscopy, PES)38
3.15	แผนภาพระเบียบวิธีการทำวิจัย39
3.16	โครงสร้างจุลภาคของเหล็กกล้า AISI 4140 ก่อนอบชุบทางความร้อน (กำลังขยาย 50 เท่า)41
3.17	โครงสร้างจุลภาคของเหล็กกล้า AISI 4140 หลังอบชุบทางความร้อน (กำลังขยาย 50 เท่า)41
3.18	แผนภาพการต่อเซลล์ทดสอบการกัดกร่อน49
4.1	การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์53
4.2	การหาค่าความหนาของฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์54
4.3	ลักษณะเกรนของชิ้นงานที่ถูกเคลือบผิวด้วยฟิล์มบาง โครเมียมไนไตรด์55
4.4	การหาขนาดเกรนของฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์ที่56
4.5	โครงสร้างจุลภาคตามแนวภาคตัดขวางของฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์ ที่เคลือบบนเหล็กกล้า AISI 414057
4.6	การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรด์58
4.7	การหาค่าความหนาของฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรด์59

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.8	ลักษณะเกรนของฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรด์ที่เคลือบบน เหล็กกล้า AISI 414060
4.9	โครงสร้างจุลภาคตามแนวภาคตัดขวางของฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรด์ ที่เคลือบบนเหล็กกล้า AISI 414061
4.10	เส้นโค้งโพลาไรเซชันของชิ้นงานเหล็กกล้า AISI 4140 ที่ไม่ถูกเคลือบผิว ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้น ร้อยละ 3.5 โดยน้ำหนักที่ค่าพีเอช 263
4.11	เส้นโค้งโพลาไรเซชันของชิ้นงานเหล็กกล้า AISI 4140 ที่ไม่ถูกเคลือบผิว ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้น ร้อยละ 3.5 โดยน้ำหนักที่ค่าพีเอช 763
4.12	เส้นโค้งโพลาไรเซชันของชิ้นงานเหล็กกล้า AISI 4140 ที่ไม่ถูกเคลือบผิว ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้น ร้อยละ 3.5 โดยน้ำหนักที่ค่าพีเอช 1064
4.13	เส้นโค้งโพลาไรเซชันของชิ้นงานเหล็กกล้า AISI 4140 ที่ถูกเคลือบด้วย โครเมียมไนไตรด์ผิวในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ ความเข้มข้นร้อยละ 3.5 โดยน้ำหนักที่ค่าพีเอช 264
4.14	เส้นโค้งโพลาไรเซชันของชิ้นงานเหล็กกล้า AISI 4140 ที่ถูกเคลือบด้วย โครเมียมไนไตรด์ผิวในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ ความเข้มข้นร้อยละ 3.5 โดยน้ำหนักที่ค่าพีเอช 765
4.15	เส้นโค้งโพลาไรเซชันของชิ้นงานเหล็กกล้า AISI 4140 ที่ถูกเคลือบด้วย โครเมียมไนไตรด์ผิวในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ ความเข้มข้นร้อยละ 3.5 โดยน้ำหนักที่ค่าพีเอช 1065
4.16	เส้นโค้งโพลาไรเซชันของชิ้นงานเหล็กกล้า AISI 4140 ที่ถูกเคลือบด้วย ไทเทเนียมไนไตรด์ผิวในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ ความเข้มข้นร้อยละ 3.5 โดยน้ำหนักที่ค่าพีเอช 266

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.17	เส้นโค้งโพลาริเซชันของชิ้นงานเหล็กกล้า AISI 4140 ที่ถูกเคลือบด้วย ไทเทเนียมไนไตรด์ผิวในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ ความเข้มข้นร้อยละ 3.5 โดยน้ำหนักที่ค่าพีเอช 766
4.18	เส้นโค้งโพลาริเซชันของชิ้นงานเหล็กกล้า AISI 4140 ที่ถูกเคลือบด้วย ไทเทเนียมไนไตรด์ผิวในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ ความเข้มข้นร้อยละ 3.5 โดยน้ำหนักที่ค่าพีเอช 1067
4.19	ค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนของชิ้นงานเหล็กกล้า AISI 4140 ที่ไม่ถูกเคลือบผิว ชิ้นงานเหล็กกล้า AISI 4140 ที่ถูกเคลือบผิวด้วยฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์ และชิ้นงานเหล็กกล้า AISI 4140 ที่ถูกเคลือบผิวด้วยฟิล์มบางไทเทเนียม ไนไตรด์ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้น ร้อยละ 3.5 โดยน้ำหนักที่ค่าพีเอช 270
4.20	ค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนของชิ้นงานเหล็กกล้า AISI 4140 ที่ไม่ถูกเคลือบผิว ชิ้นงานเหล็กกล้า AISI 4140 ที่ถูกเคลือบผิวด้วยฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์ และชิ้นงานเหล็กกล้า AISI 4140 ที่ถูกเคลือบผิวด้วยฟิล์มบางไทเทเนียม ไนไตรด์ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้น ร้อยละ 3.5 โดยน้ำหนักที่ค่าพีเอช 770
4.21	ค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนของชิ้นงานเหล็กกล้า AISI 4140 ที่ไม่ถูกเคลือบผิว ชิ้นงานเหล็กกล้า AISI 4140 ที่ถูกเคลือบผิวด้วยฟิล์มบางโครเมียม ไนไตรด์ และชิ้นงานเหล็กกล้า AISI 4140 ที่ถูกเคลือบผิวด้วย ฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรด์ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ ความเข้มข้นร้อยละ 3.5 โดยน้ำหนักที่ค่าพีเอช 1071
4.22	ค่าอัตราการกัดกร่อนของชิ้นงานเหล็กกล้า AISI 4140 ที่ไม่ถูกเคลือบผิว ชิ้นงานเหล็กกล้า AISI 4140 ที่ถูกเคลือบผิวด้วยฟิล์มบางโครเมียม ไนไตรด์ และชิ้นงานเหล็กกล้า AISI 4140 ที่ถูกเคลือบผิวด้วย ฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรด์ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ ความเข้มข้นร้อยละ 3.5 โดยน้ำหนักที่ค่าพีเอช 272

สารบัญญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.23	ค่าอัตราการกัดกร่อนของชิ้นงานเหล็กกล้า AISI 4140 ที่ไม่ถูกเคลือบผิว ชิ้นงานเหล็กกล้า AISI 4140 ที่ถูกเคลือบผิวด้วยฟิล์มบางโครเมียม ไนไตรต์ และชิ้นงานเหล็กกล้า AISI 4140 ที่ถูกเคลือบผิวด้วย ฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรต์ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ ความเข้มข้นร้อยละ 3.5 โดยน้ำหนักที่ค่าพีเอช 772
4.24	ค่าอัตราการกัดกร่อนของชิ้นงานเหล็กกล้า AISI 4140 ที่ไม่ถูกเคลือบผิว ชิ้นงานเหล็กกล้า AISI 4140 ที่ถูกเคลือบผิวด้วยฟิล์มบางโครเมียม ไนไตรต์ และชิ้นงานเหล็กกล้า AISI 4140 ที่ถูกเคลือบผิวด้วย ฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรต์ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ ความเข้มข้นร้อยละ 3.5 โดยน้ำหนักที่ค่าพีเอช 1073
4.25	ค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนของชิ้นงานเหล็กกล้า AISI 4140 ที่ไม่ถูกเคลือบ ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้นร้อยละ 3.5 โดยน้ำหนักที่ค่าพีเอช 2 7 และ 1075
4.26	ค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนของชิ้นงานเหล็กกล้า AISI 4140 ที่ถูกเคลือบด้วย ฟิล์มบางโครเมียมไนไตรต์ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ ความเข้มข้นร้อยละ 3.5 โดยน้ำหนักที่ค่าพีเอช 2 7 และ 1076
4.27	ค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนของชิ้นงานเหล็กกล้า AISI 4140 ที่ถูกเคลือบด้วย ฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรต์ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ ความเข้มข้นร้อยละ 3.5 โดยน้ำหนักที่ค่าพีเอช 2 7 และ 1076
4.28	ค่าอัตราการกัดกร่อนของชิ้นงานเหล็กกล้า AISI 4140 ที่ไม่ถูกเคลือบใน สารละลายโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้นร้อยละ 3.5 โดยน้ำหนักที่ค่าพีเอช 2 7 และ 1077
4.29	ค่าอัตราการกัดกร่อนของชิ้นงานเหล็กกล้า AISI 4140 ที่ถูกเคลือบด้วย ฟิล์มบางโครเมียมไนไตรต์ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ ความเข้มข้นร้อยละ 3.5 โดยน้ำหนักที่ค่าพีเอช 2 7 และ 1078

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.30	ค่าอัตราการกัดกร่อนของชิ้นงานเหล็กกล้า AISI 4140 ที่ถูกเคลือบด้วยฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรด์ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ ความเข้มข้นร้อยละ 3.5 โดยน้ำหนักที่ค่าพีเอช 2 7 และ 1078
4.31	ค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนของชิ้นงาน AISI 4140 ที่ไม่ถูกเคลือบผิวที่มีค่าความหยาบผิวของเหล็กกล้า AISI 4140แตกต่างกันในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้นร้อยละ 3.5 โดยน้ำหนักที่ค่าพีเอช 2 7 และ 1082
4.32	ค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนของชิ้นงาน AISI 4140 ที่ถูกเคลือบผิวด้วยฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์ ที่มีค่าความหยาบผิวของเหล็กกล้า AISI 4140 แตกต่างกันในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้นร้อยละ 3.5 โดยน้ำหนักที่ค่าพีเอช 2 7 และ 1083
4.33	ค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนของชิ้นงาน AISI 4140 ที่ถูกเคลือบผิวด้วยฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรด์ที่มีค่าความหยาบผิวของเหล็กกล้า AISI 4140 แตกต่างกันในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้นร้อยละ 3.5 โดยน้ำหนักที่ค่าพีเอช 2 7 และ 1083
4.34	ค่าอัตราการกัดกร่อนของชิ้นงาน AISI 4140 ที่ไม่ถูกเคลือบผิวที่มีค่าความหยาบผิวของเหล็กกล้า AISI 4140 แตกต่างกันในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้นร้อยละ 3.5 โดยน้ำหนักที่ค่าพีเอช 2 7 และ 1084
4.35	ค่าอัตราการกัดกร่อนของชิ้นงาน AISI 4140 ที่ถูกเคลือบผิวด้วยฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์ที่มีค่าความหยาบผิวของเหล็กกล้า AISI 4140 แตกต่างกันในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้นร้อยละ 3.5 โดยน้ำหนักที่ค่าพีเอช 2 7 และ 1085
4.36	ค่าอัตราการกัดกร่อนของชิ้นงาน AISI 4140 ที่ถูกเคลือบผิวด้วยฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรด์ที่มีค่าความหยาบผิวของเหล็กกล้า AISI 4140 แตกต่างกันในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้นร้อยละ 3.5 โดยน้ำหนักที่ค่าพีเอช 2 7 และ 1085

สารบัญญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
4.37	ภาพพื้นผิวของชิ้นงานเหล็กกล้า AISI 4140 ที่ไม่ถูกเคลือบชิ้นงานเหล็กกล้า AISI 4140 ที่ถูกเคลือบผิวด้วยฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์ และชิ้นงานเหล็กกล้า AISI 4140 ที่ถูกเคลือบผิวด้วยฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรด์ ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้นร้อยละ 3.5 โดยน้ำหนักที่ค่าพีเอช 2	89
4.38	ภาพพื้นผิวของชิ้นงานเหล็กกล้า AISI 4140 ที่ไม่ถูกเคลือบ ชิ้นงานเหล็กกล้า AISI 4140 ที่ถูกเคลือบผิวด้วยฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์ และชิ้นงานเหล็กกล้า AISI 4140 ที่ถูกเคลือบผิวด้วยฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรด์ ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้นร้อยละ 3.5 โดยน้ำหนักที่ค่าพีเอช 7	90
4.39	ภาพพื้นผิวของชิ้นงานเหล็กกล้า AISI 4140 ที่ไม่ถูกเคลือบ ชิ้นงานเหล็กกล้า AISI 4140 ที่ถูกเคลือบผิวด้วยฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์ และชิ้นงานเหล็กกล้า AISI 4140 ที่ถูกเคลือบผิวด้วยฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรด์ ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้นร้อยละ 3.5 โดยน้ำหนักที่ค่าพีเอช 10	91
4.40	ภาพถ่าย SEM และผลการวิเคราะห์ห้องปฏิบัติการทางเคมีบนพื้นผิวของ ชิ้นงาน B1 หลังทดสอบการกัดกร่อนในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ ความเข้มข้น ร้อยละ 3.5 โดยน้ำหนักที่ค่าพีเอช 2	93
4.41	ภาพถ่าย SEM และผลการวิเคราะห์ห้องปฏิบัติการทางเคมีบนพื้นผิวของ ชิ้นงาน C1 หลังทดสอบการกัดกร่อนในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ ความเข้มข้นร้อยละ 3.5 โดยน้ำหนักที่ค่าพีเอช 2	94
4.42	ภาพถ่าย SEM และผลการวิเคราะห์ห้องปฏิบัติการทางเคมีบนพื้นผิวของ ชิ้นงาน T1 หลังทดสอบการกัดกร่อนในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ ความเข้มข้นร้อยละ 3.5 โดยน้ำหนักที่ค่าพีเอช 2	95

สารบัญญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.43	ผลสเปกตรัมของ XPS ของชิ้นงานที่ถูกเคลือบผิวด้วยฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์ก่อนและหลังทดสอบการกัดกร่อน97
4.44	ผลสเปกตรัมของ XPS ของชิ้นงานที่ถูกเคลือบผิวด้วยฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรด์ก่อนและหลังทดสอบการกัดกร่อน99
ก.1	วิธีการหาค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนและค่ากระแสไฟฟ้าการกัดกร่อนจากเส้นโพลาริเซชัน109
ง.1	ภาพลักษณะพื้นผิวของชิ้นงานเหล็กกล้า AISI 4140 ที่ไม่ถูกเคลือบผิว ชิ้นงานเหล็กกล้า AISI 4140 ที่ถูกเคลือบผิวด้วยฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์ และชิ้นงานเหล็กกล้า AISI 4140 ที่ถูกเคลือบผิวด้วยฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรด์ก่อนทดสอบการกัดกร่อน119
จ.1	ภาพถ่าย SEM และผลการวิเคราะห์ห้องค้ำประกอบทางเคมีบนพื้นผิวของชิ้นงาน B2 ภายหลังทดสอบการกัดกร่อนที่ค่าพีเอช 2121
จ.2	ภาพถ่าย SEM และผลการวิเคราะห์ห้องค้ำประกอบทางเคมีบนพื้นผิวของชิ้นงาน B3 ภายหลังทดสอบการกัดกร่อนที่ค่าพีเอช 2122
จ.3	ภาพถ่าย SEM และผลการวิเคราะห์ห้องค้ำประกอบทางเคมีบนพื้นผิวของชิ้นงาน B1 ภายหลังทดสอบการกัดกร่อนที่ค่าพีเอช 7123
จ.4	ภาพถ่าย SEM และผลการวิเคราะห์ห้องค้ำประกอบทางเคมีบนพื้นผิวของชิ้นงาน B2 ภายหลังทดสอบการกัดกร่อนที่ค่าพีเอช 7124
จ.5	ภาพถ่าย SEM และผลการวิเคราะห์ห้องค้ำประกอบทางเคมีบนพื้นผิวของชิ้นงาน B3 ภายหลังทดสอบการกัดกร่อนที่ค่าพีเอช 7125
จ.6	ภาพถ่าย SEM และผลการวิเคราะห์ห้องค้ำประกอบทางเคมีบนพื้นผิวของชิ้นงาน B1 ภายหลังทดสอบการกัดกร่อนที่ค่าพีเอช 10126
จ.7	ภาพถ่าย SEM และผลการวิเคราะห์ห้องค้ำประกอบทางเคมีบนพื้นผิวของชิ้นงาน B2 ภายหลังทดสอบการกัดกร่อนที่ค่าพีเอช 10127
จ.8	ภาพถ่าย SEM และผลการวิเคราะห์ห้องค้ำประกอบทางเคมีบนพื้นผิวของชิ้นงาน B3 ภายหลังทดสอบการกัดกร่อนที่ค่าพีเอช 10128

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
จ.22	ภาพถ่าย SEM และผลการวิเคราะห์ห้องค้ประกอบทางเคมีบนพื้นผิวของ ชิ้นงาน T1 ภายหลังทดสอบการกัดกร่อนที่ค่าพีเอช 10142
จ.23	ภาพถ่าย SEM และผลการวิเคราะห์ห้องค้ประกอบทางเคมีบนพื้นผิวของ ชิ้นงาน T2 ภายหลังทดสอบการกัดกร่อนที่ค่าพีเอช 10143
จ.24	ภาพถ่าย SEM และผลการวิเคราะห์ห้องค้ประกอบทางเคมีบนพื้นผิวของ ชิ้นงาน T3 ภายหลังทดสอบการกัดกร่อนที่ค่าพีเอช 10144



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาการวิจัย

เหล็กกล้า AISI 4140 เป็นเหล็กกล้าผสมต่ำที่มีความแข็งแรงสูงและมีความสามารถในการขึ้นรูปทางกลดี มีปริมาณของธาตุผสม คือ โครเมียม และ โมลิบดีนัม อยู่ในปริมาณที่ต่ำ จึงทำให้เหล็กกล้า AISI 4140 มีราคาถูกเมื่อเปรียบเทียบกับเหล็กกล้าเครื่องมือชนิดอื่น เช่น H13 และ D2 เป็นต้น นอกจากนี้ยังเป็นเหล็กกล้าที่มีความต้านทานแรงดึงสูง สามารถทนแรงดึงได้ระหว่าง 800-1300 เมกะปาสกาล (MPa) สามารถชุบแข็งได้ทั้งชิ้นหรือเฉพาะที่ผิวทั้งนี้ขึ้นอยู่กับจุดประสงค์การใช้งาน นิยมทำเป็นชิ้นส่วนทนแรงดึงสูงเช่น ชิ้นส่วนในงานอุตสาหกรรมรถยนต์ เช่น เฟลาข้อเหวี่ยง เพือง เพืองขับ เกียร์ สลัก เป็นต้น ซึ่งส่วนใหญ่ชิ้นส่วนเหล่านี้จะถูกนำไปใช้งานในสภาวะที่มีการเสียดสี (abrasion) และการสึกหรอ (wear) จึงต้องการความแข็งที่ผิวเพื่อป้องกันการเสียดสีและการสึกหรอที่ผิว (Sivitski, A., Ajaots, M., Podra, P., 2008) แต่ทั้งนี้ยังไม่ได้คำนึงถึงเรื่องการกัดกร่อน (corrosion) ที่เกิดจากสภาพแวดล้อมการใช้งาน ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีการปรับปรุงคุณสมบัติทางด้านพื้นผิวของวัสดุเพื่อให้มีคุณสมบัติทางกลที่ดีขึ้นและมีความต้านทานต่อการกัดกร่อนที่สูงขึ้นเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพและอายุการใช้งานของวัสดุให้ยาวนานยิ่งขึ้น การปรับปรุงพื้นผิววัสดุให้มีความต้านทานการกัดกร่อนที่ดีขึ้นนั้นมีหลายวิธีที่ใช้ในภาคอุตสาหกรรมปรับปรุงพื้นผิว เช่น คาร์โบไนไตรด์ดิ่ง (carbonitriding) ไนไตรด์ดิ่ง (nitriding) และการเคลือบผิวด้วยไอทางเคมี (chemical vapor deposition, CVD) เป็นต้น แต่มีวิธีหนึ่งที่เป็นนิยมในอุตสาหกรรมปรับปรุงพื้นผิววัสดุ คือ การเคลือบผิวไอทางกายภาพ (physical vapor deposition, PVD) ซึ่งเป็นกระบวนการที่สะอาด และชั้นเคลือบที่ผลิตจากกระบวนการเคลือบผิวไอทางกายภาพส่วนใหญ่จะเป็นชั้นเคลือบของสารประกอบเซรามิก เช่น ไทเทเนียมไนไตรด์ (TiN) ไทเทเนียมอะลูมิเนียมไนไตรด์ (TiAlN) โครเมียมไนไตรด์ (CrN) เป็นต้น ซึ่งเป็นชั้นเคลือบที่มีความแข็งแรงสูง มีความทนทานต่อสารเคมี (chemical inert) และมีเสถียรภาพทางความร้อนที่ดี (thermal stability) ช่วยในการปรับปรุงคุณสมบัติการต้านทานการกัดกร่อนให้ดียิ่งขึ้น (Zhou, Q.G., Bai, X.D., Chen, X.W., Peng, D.Q., Ling, Y.H., Wang, D.R., 2003; Darja, K.M., Peter P., Miha, C., Marijan M., 2004) คุณสมบัติการต้านทานการกัดกร่อนของชั้นเคลือบจะขึ้นอยู่กับตัวแปรหลายตัวแปร เช่น วัสดุที่ถูกเคลือบผิว (substrate) ชนิดของสารประกอบของชั้นเคลือบ (chemical composition) ตัวแปรใน

กระบวนการเคลือบ (deposition parameters) โครงสร้างของชั้นเคลือบ (microstructure) เป็นต้น นอกจากนี้พฤติกรรมการกัดกร่อนของชั้นเคลือบยังขึ้นอยู่กับสถานะแวดล้อมการใช้งานอีกด้วย ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีความสนใจในการศึกษาพฤติกรรมการกัดกร่อนของเหล็กกล้า AISI 4140 ที่เคลือบผิวด้วยสารประกอบของชั้นเคลือบต่างชนิดกัน ได้แก่ โครเมียมไนไตรด์และไทเทเนียมไนไตรด์ และสนใจในการศึกษาสถานะแวดล้อมการใช้งานที่แตกต่างกัน โดยมีความสนใจในการศึกษาพฤติกรรมการกัดกร่อนในสารละลายที่มีความเป็นกรด-ด่าง (pH) ที่แตกต่างกัน นอกจากนี้ยังไม่ปรากฏแน่ชัดว่าความหยาบผิวของวัสดุมีผลต่อพฤติกรรมการกัดกร่อนของชั้นเคลือบทั้งสองชนิดเช่นไร

งานวิจัยนี้จึงศึกษาผลของการเคลือบผิวบนเหล็กกล้า AISI 4140 ที่มีความหยาบผิวแตกต่างกันด้วยชั้นเคลือบที่แตกต่างชนิดกัน ได้แก่ โครเมียมไนไตรด์และไทเทเนียมไนไตรด์ ต่อพฤติกรรมการกัดกร่อนในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 3.5 % โดยน้ำหนักที่ค่าพีเอชเท่ากับ 2 7 และ 10 ด้วยเทคนิคทางเคมีไฟฟ้า (electrochemical technique) คาดว่าผลสำเร็จของงานวิจัยนี้จะเป็นประโยชน์โดยตรงต่อภาคอุตสาหกรรมและเป็นข้อมูลพื้นฐานในการพิจารณาเลือกกรรมวิธีปรับปรุงพื้นผิววัสดุให้เหมาะสมในแง่เศรษฐศาสตร์ และวิศวกรรม

1.2 วัตถุประสงค์ของการทำวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษาพฤติกรรมการกัดกร่อนของเหล็กกล้า AISI 4140 ที่เคลือบผิวด้วยการเคลือบไอทางกายภาพ

1.2.2 เพื่อศึกษาผลค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ของสารละลายที่ใช้ในการทดสอบที่มีต่อพฤติกรรมการกัดกร่อนของเหล็กกล้า AISI 4140 ที่เคลือบผิวด้วยการเคลือบไอทางกายภาพ

1.2.3 เพื่อศึกษาผลของความหยาบผิวของเหล็กกล้า AISI 4140 ก่อนการเคลือบผิวที่มีผลต่อพฤติกรรมการกัดกร่อนของเหล็กกล้า AISI 4140 ที่เคลือบผิวด้วยการเคลือบไอทางกายภาพ

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1.3.1 โลหะที่ถูกเคลือบผิว หรือวัสดุพื้น (substrate) เพื่อปรับปรุงสมบัติที่ผิว คือเหล็กกล้าเกรด AISI 4140 โดยมีขนาด คือ กว้าง 10 มิลลิเมตร ยาว 10 มิลลิเมตร และหนา 2 มิลลิเมตร

1.3.2 กระบวนการปรับปรุงพื้นผิวที่สนใจศึกษา คือ กระบวนการเคลือบผิวด้วยการเคลือบไอทางกายภาพ โดยชั้นเคลือบผิวที่ต้องการศึกษา คือ ฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์และฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรด์ โดยมีตัวแปรที่ต้องควบคุมดังนี้

- ก) ค่าอัตราส่วนระหว่างแก๊สไนโตรเจน และอาร์กอนคงที่
- ข) ค่าความดัน (pressure) คงที่
- ค) อุณหภูมิ (สำหรับวัสดุพื้น) ที่ใช้ในการเคลือบไอทางกายภาพคงที่ในที่นี้คือ อุณหภูมิห้อง
- ง) เวลาที่ใช้ในการเคลือบไอทางกายภาพคงที่
- จ) ความหยาบของพื้นผิววัสดุที่ถูกเคลือบ (roughness of substrate)

1.3.3 ภายหลังจากเสร็จสิ้นกระบวนการเตรียมชิ้นงานตามข้อ 1.3.2 แล้วทำการศึกษาคุณลักษณะพื้นผิว และส่วนผสมทางเคมี (chemical composition) ของฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์ และฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรด์ที่ได้จากกระบวนการเคลือบผิวด้วยการเคลือบไอทางกายภาพ โดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด (scanning electron microscope, SEM) เทคนิค X-ray diffraction (XRD) และเทคนิค atomic force microscopy (AFM)

1.3.4 ศึกษาพฤติกรรมการกัดกร่อนของเหล็กกล้า AISI 4140 ที่เคลือบผิวด้วยการเคลือบไอทางกายภาพ ด้วยวิธีทางไฟฟ้าเคมีในสารละลายตามมาตรฐานสากล เช่น ASTM Standard เป็นต้น โดยวัดเส้นโค้งโพลาริเซชันของเหล็กกล้า AISI 4140 ที่เคลือบผิวด้วยการเคลือบไอทางกายภาพเปรียบเทียบกับเหล็กกล้า AISI 4140 ที่ยังไม่ผ่านเคลือบผิว แล้วแปลความหมายจากเส้นโพลาริเซชันที่วัดได้เป็นความหมายทางการกัดกร่อน กล่าวคือ วิเคราะห์หาค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อน (corrosion potential, E_{corr}) ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อน (corrosion current density, I_{corr}) และค่าอัตราการกัดกร่อน (corrosion rate, R_{mmy})

1.3.5 หลังจากนั้นตรวจสอบพื้นที่ที่ถูกกัดกร่อน และส่วนผสมทางเคมีของชั้นเคลือบที่ถูกกัดกร่อนด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด (scanning electron microscope, SEM) และเทคนิคเทคนิคเอกซเรย์โฟโตอิเล็กตรอนสเปกโตรสโคปี (X-ray photoelectron spectroscopy, XPS)

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 ทราบถึงพฤติกรรมการกัดกร่อนของเหล็กกล้าคาร์บอน AISI 4140 ที่เคลือบผิวด้วยการเคลือบไอทางกายภาพ

1.4.2 ทราบถึงผลของความเป็นกรด-ด่าง (pH) ของสารละลายที่มีต่อพฤติกรรมการกัดกร่อนของเหล็กกล้า AISI 4140 ที่เคลือบผิวด้วยการเคลือบไอทางกายภาพ

1.4.3 ทราบถึงผลของความหยาบของผิวชิ้นงานที่มีผลต่อพฤติกรรมการกัดกร่อนของเหล็กกล้า AISI 4140 ที่เคลือบผิวด้วยการเคลือบไอทางกายภาพ

1.4.4 ผลสำเร็จของงานวิจัยนี้คาดหวังว่าจะเป็นประโยชน์โดยตรงต่อภาคอุตสาหกรรม โดยเฉพาะในการปรับปรุงพื้นผิวของโลหะเพื่อใช้งานด้านต้านทานการกัดกร่อน



บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 กระบวนการเคลือบผิวแข็งด้วยการเคลือบไอทางกายภาพ

กระบวนการเคลือบชั้นผิวแข็งของสารประกอบเซรามิกบนผิวชิ้นงานเหล็กกล้าเครื่องมือ เพื่อเพิ่มความต้านทานต่อการสึกหรอ ความต้านทานต่อการกัดกร่อน และยืดอายุการใช้งาน เครื่องมือทางวิศวกรรมแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภท (Medina-Flores, A., Arganis, C., Santiago, P., Oseguer., 2004) คือ

- การเคลือบผิวแข็งด้วยไอทางกายภาพ (physical vapor deposition, PVD) ที่มีการสร้างผลิตอะตอมของสารเคลือบให้อยู่ในรูปของไอระเหยแล้วไปเคลือบอยู่บนผิวชิ้นงาน (substrate) ในระบบที่เป็นสุญญากาศ

- การเคลือบผิวแข็งด้วยไอเคมี (chemical vapor deposition, CVD) เป็นกระบวนการเคลือบผิวชิ้นงานด้วยสารเคลือบที่อยู่ในสถานะก๊าซ โดยที่ก๊าซเหล่านี้จะทำปฏิกิริยากันจนได้สารผลิตภัณฑ์แล้วเคลือบอยู่บนชิ้นงาน (substrate) 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 และสามารถเคลือบชิ้นงานที่มีรูปร่างซับซ้อนได้ดีกว่ากระบวนการเคลือบด้วยไอทางกายภาพ (PVD process)

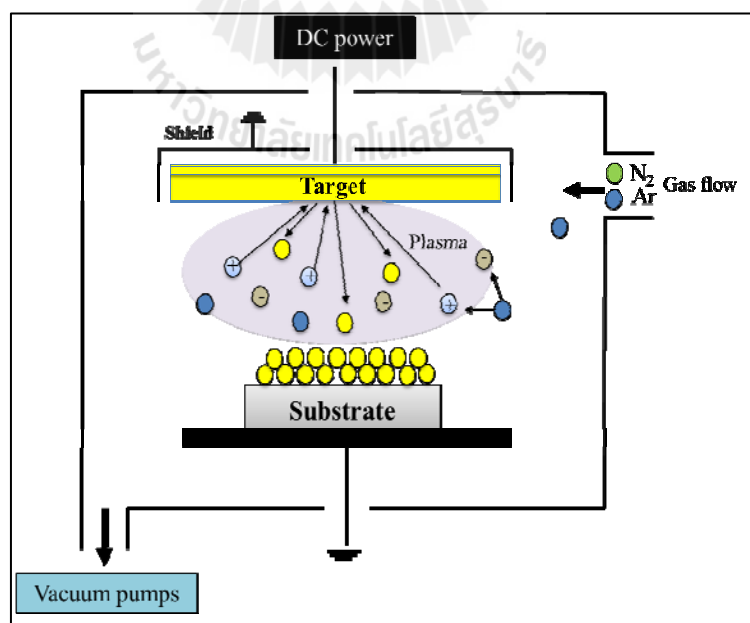
อะตอมของชั้นเคลือบ (coating atom) จะถูกผลิตขึ้นในระบบสุญญากาศ กล่าวคือ เมื่อก๊าซที่ต้องการใช้เป็นวัสดุเคลือบ เช่น ไนโตรเจน มีเทน หรือออกซิเจนถูกนำเข้าไปในหลอดสุญญากาศ อะตอมของโลหะก็จะทำปฏิกิริยากับอะตอมของก๊าซเพื่อฟอร์มไนไตรด์ คาร์ไบด์ หรือออกไซด์ ซึ่งแบ่งออกเป็น 3 แบบ (Roberts, G., 1998) คือ

2.1.1 Evaporating

evaporating กระทำโดยการนำเอาวัสดุต้นกำเนิดของชั้นเคลือบ ไปให้ความร้อนในสภาวะที่เป็นสุญญากาศ (10^{-6} kPa หรือ 7.5×10^{-6} torr) ทำให้เกิดการระเหยของอะตอม หรือโมเลกุลภายในท่อระบบสุญญากาศแล้วเคลื่อนที่ไปเกาะบนผิวชิ้นงาน (substrate) อย่างไรก็ตามกรรมวิธีที่ให้ประสิทธิภาพได้ดีกว่าคือ sputtering หรือ ion plating

2.1.2 Sputtering

sputtering เป็น PVD coating process ที่อะตอมของวัสดุเคลือบถูกขับออกมาโดยอาศัยอะตอมที่มีพลังงานสูงดังแสดงในรูปที่ 2.1 โดยชั้นแรกภายในห้องเคลือบ (chamber) จะถูกทำให้เป็นสุญญากาศ หลังจากนั้นจะปล่อยก๊าซอาร์กอน (Ar gas) เข้าไป และวัสดุสำหรับเคลือบ (ในที่นี้ขอเรียกว่า target คุรูปประกอบ) 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



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

2.1.3 Ion Plating

ion plating หมายถึง plasma-assisted PVD หรือ evaporative-source PVD process ซึ่ง plasma ที่เกิดขึ้นนี้จะอาศัยความร้อนในการกระตุ้นให้เกิดการระเหย การพุ่งเข้าชน (bombardment) ของ plasma ที่มีพลังงานสูงไปยังผิวชิ้นงาน (substrate) ทำให้ได้ชั้นเคลือบที่มีความแน่น และการยึดเกาะ (adhesion) ที่ดีเยี่ยม

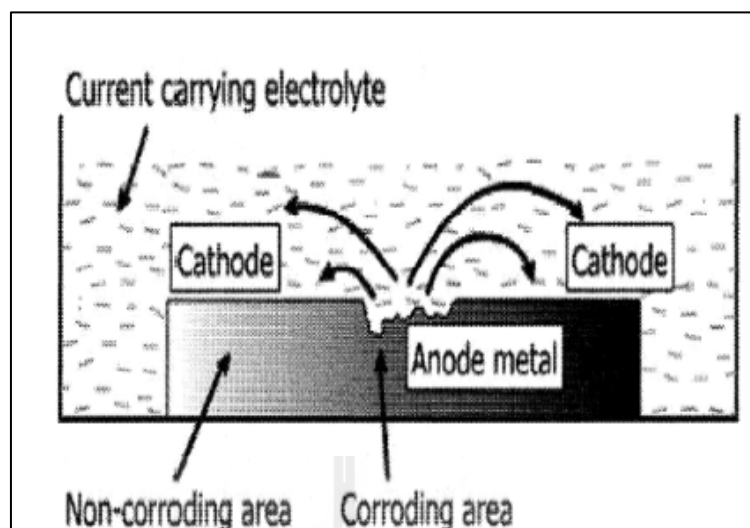
2.2 กระบวนการกัดกร่อน

การกัดกร่อน คือ การสูญเสียเนื้อโลหะ โดยการเกิดปฏิกิริยาเคมีกับสิ่งแวดล้อม อาจเป็นปฏิกิริยาทางเคมี หรือปฏิกิริยาทางไฟฟ้าเคมี การกัดกร่อนเป็นปรากฏการณ์ทางธรรมชาติอย่างหนึ่ง กล่าวคือ สิ้นแร่ต่าง ๆ ที่มีอยู่บนพื้นโลกเป็นสภาพที่มีเสถียรภาพอยู่แล้ว เมื่อนำสิ้นแร่เหล่านี้มาดลึงให้ได้เนื้อโลหะบริสุทธิ์ทำให้โลหะอยู่ในสภาวะไม่มีเสถียรภาพมากขึ้น โลหะที่ไม่มีเสถียรภาพจะพยายามกลับคืนสู่สภาพเดิม คือสิ้นแร่ตามธรรมชาติที่มีเสถียรภาพสูงกว่า ซึ่งก็คือกระบวนการกัดกร่อน จึงต้องใช้ความพยายามในการที่จะรักษาสภาพของโลหะเหล่านี้ให้เสื่อมสภาพเพราะการกัดกร่อนน้อยที่สุดและมีอายุการใช้งานนาน

การกัดกร่อนของโลหะ (corrosion of metal) สามารถเกิดได้เมื่อครบสี่องค์ประกอบของเซลล์การกัดกร่อน (corrosion cell) ดังแสดงในรูปที่ 2.2 คือ

- แอโนด (anode)
- แคโทด (cathode)
- อิเล็กโทรไลต์ (electrolyte)
- ตัวกลางในการถ่ายโอนอิเล็กตรอน (electron transfer) หรือให้กระแสไฟฟ้า

ไหลระหว่างขั้วแอโนด และขั้วแคโทด (metallic path)



รูปที่ 2.2 องค์ประกอบของเซลล์การกัดกร่อนของโลหะ (AHMAD, Z., 2006)

ในกระบวนการการกัดกร่อนที่กำลังดำเนินอยู่นั้นจะเกิดปฏิกิริยาทางเคมีไฟฟ้า (electrochemical reaction) ที่มีการถ่ายเทประจุไฟฟ้าหรือแลกเปลี่ยนอิเล็กตรอนในสารละลายของน้ำหรือในน้ำ จะประกอบด้วย 2 ส่วน คือ ปฏิกิริยาออกซิเดชัน (oxidation) ของโลหะ (M) เกิดการสูญเสียแรงยึดระหว่างอะตอมของโลหะนั้น แล้วอะตอมนั้นก็กลายเป็นอิเล็กตรอนหลุดเข้าไปในสิ่งแวดล้อมที่ทำให้เกิดการกัดกร่อน ปฏิกิริยาออกซิเดชัน (oxidation) หรือปฏิกิริยาแอโนดิก (anodic reaction) นี้ จะเกิดขึ้นที่ขั้วแอโนด (anode) และปฏิกิริยารีดักชัน (reduction reaction) หรือปฏิกิริยาแคโทดิก (cathodic reaction) เกิดขึ้นที่ขั้วแคโทด (cathode) ซึ่งจะเป็นปฏิกิริยาที่รับอิเล็กตรอน

ปฏิกิริยาออกซิเดชันของโลหะที่ถูกกัดกร่อนเป็น ดังนี้

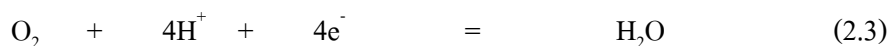


สำหรับปฏิกิริยารีดักชันจะแบ่งออกเป็นได้ 4 แบบ ดังนี้

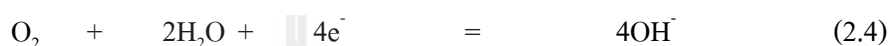
- 1) มีไฮโดรเจนเกิดขึ้น (ภายในน้ำที่มีสภาพเป็นกรด)



2) เกิดรีดักชันของออกซิเจน (ภายในน้ำที่มีสภาพเป็นกรด)



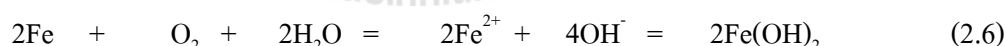
3) เกิดรีดักชันของออกซิเจน (ภายในน้ำที่มีสภาพเป็นกลางและด่าง)



4) เกิดรีดักชันของไอออนของโลหะ



หลังจากการเกิดปฏิกิริยาของการกัดกร่อนเบื้องต้น ต่อไปก็คือการรวมตัวของไอออนในสารละลาย ทำให้เกิดผลิตภัณฑ์จากการกัดกร่อน ตัวอย่างเช่น ในกรณีเหล็กที่เกิดการกัดกร่อนในสารละลายที่มีฤทธิ์เป็นกลาง ปฏิกิริยาของการกัดกร่อนทั้งหมดจะเป็นไปตามสมการ (2.1) และ (2.4) รวมกัน ทำให้เกิดสารประกอบของเฟอร์รัสไฮดรอกไซด์ $\text{Fe}(\text{OH})_2$ ขึ้นที่ผิวของเนื้อเหล็กตามสมการที่ (2.6)

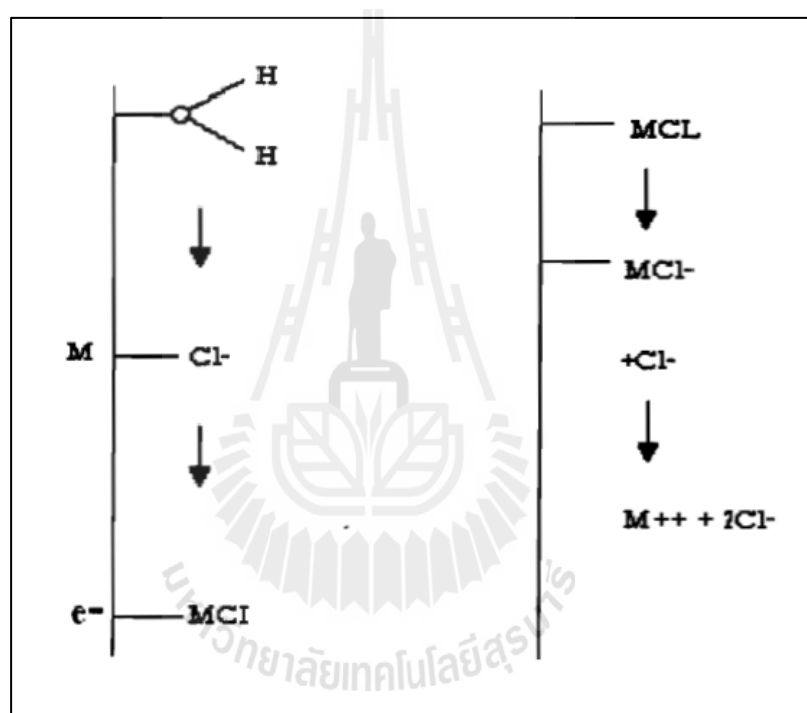


สารประกอบนี้ยังเกิดการออกซิเดชันได้อย่างรวดเร็วด้วยออกซิเจนที่มีอยู่ในระบบ ทำให้เกิด $\text{Fe}(\text{OH})_3$ ดังสมการ



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

สำหรับการกัดกร่อนเมื่อมีคลอไรด์ร่วมด้วย (chloride assisted corrosion process) ในกรณีที่มีน้ำมี Cl^- ผสมอยู่ในสารละลาย เมื่อโลหะสัมผัสกับโมเลกุลของ Cl^- จะถูกดูดซับไว้ที่ผิวโลหะแทนที่จะเป็นโมเลกุลน้ำ จากนั้นจะเกิด MCl และทำปฏิกิริยาต่อไปในที่สุดจะได้ $\text{M}^{2+} + 2\text{e}^-$ ดังรูปที่ 2.3 จากนั้นจะเกิดปฏิกิริยารีดักชันแล้วเกิดก๊าซไฮโดรเจนเหมือนกับกรณีการกัดกร่อนในน้ำที่มีสภาพเป็นกรดทั่วไป ซึ่งกรณีที่มีคลอไรด์นี้จะไม่สามารถสร้างฟิล์มได้อีก กลไกนี้จะเกิดขึ้นซ้ำๆ กัน และก๊าซไฮโดรเจนที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยานี้จะเกาะอยู่ตามผิวของวัสดุซึ่งจะนำไปสู่การกัดกร่อนต่อไป (อภิชาติ พันธุ์เสถียร, 2552)

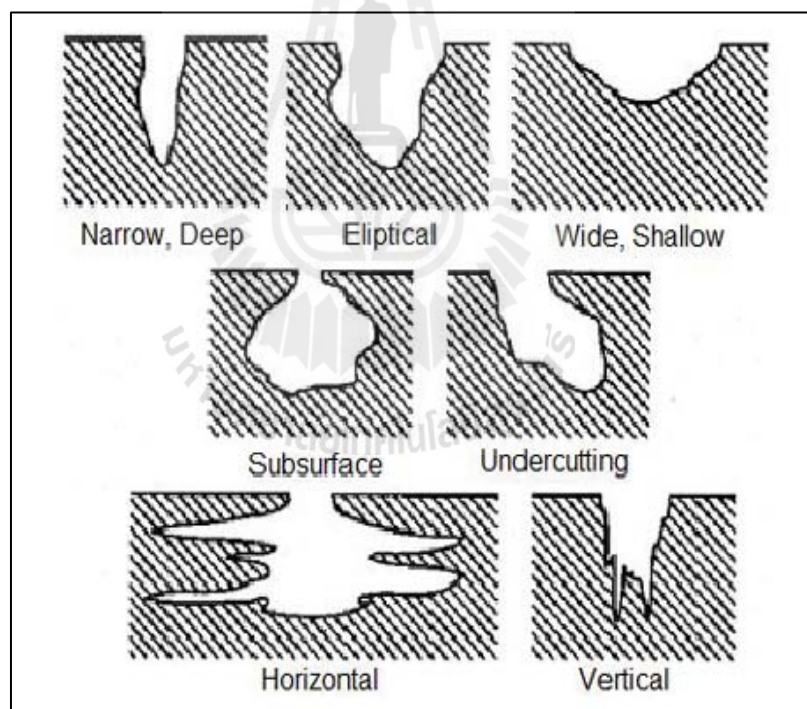


รูปที่ 2.3 คลอไรด์ในน้ำที่มีผลต่อการกัดกร่อนในโลหะ (อภิชาติ พันธุ์เสถียร, 2552)

2.2.1 การกัดกร่อนแบบรูเข็ม

การกัดกร่อนแบบรูเข็ม (pitting corrosion) เป็นการกัดกร่อนแบบเกิดเฉพาะที่ที่มีผลให้เกิดความเสียหายค่อนข้างรวดเร็วในบริเวณเฉพาะที่ ซึ่งเป็นปัญหาการกัดกร่อนที่เกิดขึ้นมาก โดยเฉพาะกับโลหะที่ได้พัฒนาให้มีฟิล์มป้องกันการกัดกร่อนแบบทั่วผิวหน้า แต่เมื่อฟิล์มบางแตกแยกออกเฉพาะบางที่ ก็จะเกิดการกัดกร่อนเฉพาะ ที่กัดกร่อนลึกลงไปเรื่อยๆ ทำให้สังเกตเห็นได้ยากเนื่องจากผลิตภัณฑ์การกัดกร่อนได้ปกคลุมเอาไว้ การกัดกร่อนแบบนี้ทำให้ทำนายได้ยาก โดยทั่วไปมักจะเกิดทิศทางเดียวกันกับแรงโน้มถ่วงของโลก การเกิดการกัดกร่อนในแนวอื่นก็เกิด

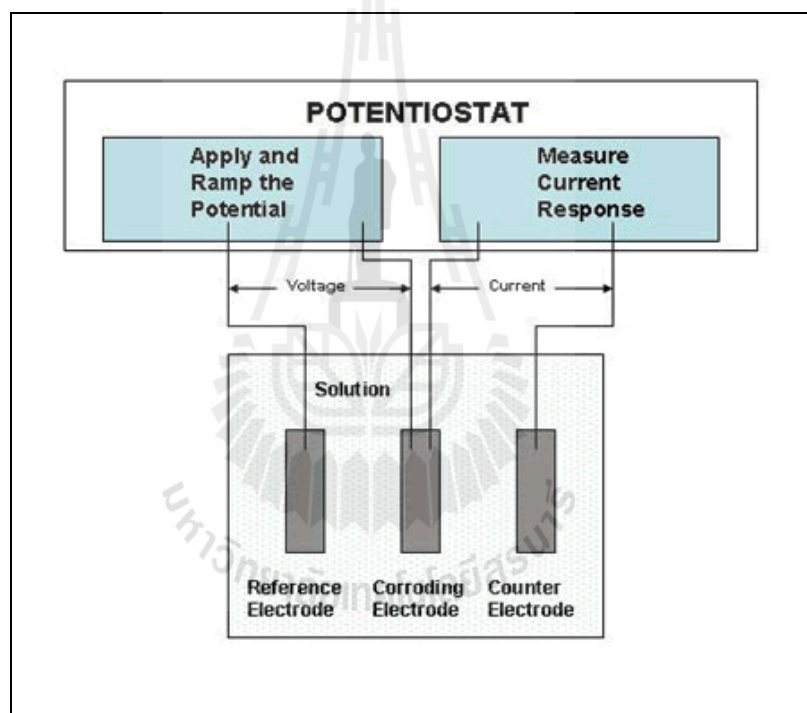
ได้แต่น้อย pitting เป็นลักษณะที่ทำให้เป็นรูหรือหลุมในเนื้อโลหะ รูเหล่านี้อาจมีขนาดเล็กหรือใหญ่ก็ได้ แต่โดยส่วนมากจะมีขนาดเล็ก บางครั้งจะเห็นรูกระจายอยู่ห่างกัน หรืออาจอยู่ใกล้กันจนดูคล้ายผิวโลหะที่ขรุขระ pitting เป็นการกัดกร่อนที่ก่อให้เกิดความเสียหายและรุนแรงที่สุด ซึ่งทำให้อุปกรณ์ เครื่องมือ หรือชิ้นส่วนต่างๆ เกิดความเสียหายเนื่องจากการเจาะลึกด้วยเปอร์เซ็นต์การสูญเสีย น้ำหนักของโครงสร้างทั้งหมดที่น้อย ลักษณะมักยากที่จะตรวจสอบพบยากเพราะมีขนาดเล็ก นอกจากนั้นยังยากที่จะตรวจวัดเชิงปริมาณและ ตรวจวัดการขยายตัวของสภาพการกัดกร่อนของ pitting ได้ เพราะความลึกและจำนวนของรูที่เปลี่ยนแปลงภายใต้สภาวะเฉพาะสภาวะใดสภาวะหนึ่ง การเกิด pitting ยังยากที่จะทำนายได้จากการทดสอบในห้องทดลองอีกด้วย บางครั้งอาจใช้เวลานานจึงปรากฏสภาพของการกัดกร่อน การเกิด pitting เป็นการเกิดเฉพาะที่และ เป็นรูปแบบการกัดกร่อนที่รุนแรง ความเสียหายที่เกิดขึ้นมักจะเกิดอย่างฉับพลัน (Fontana, M.G., 1987) รูปแบบการกัดกร่อนแบบรูเข็มในรูปแบบต่างๆ แสดงดังในรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 รูปแบบการกัดกร่อนแบบรูเข็ม (pitting corrosion) (ASTM-G46 standard, 2005)

2.3 การวัดศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อน ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อน และอัตราการกัดกร่อน

ศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อน (corrosion potential, E_{corr}) คือ ศักย์ไฟฟ้าที่อัตราการรวมของปฏิกิริยาแอโนดิกทั้งหมดเท่ากับอัตราการรวมของปฏิกิริยาแคโทดิก โดยความหนาแน่นกระแสที่ศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อน เรียกว่า ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อน (corrosion current density, I_{corr}) ซึ่งถือเป็นตัวบ่งชี้อัตราการกัดกร่อน การวัดศักย์ไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าขณะเกิดการกัดกร่อน (ภาณุพงศ์ กอประศรีสวัสดิ์, 2544) ทำการวัดศักย์ไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าขณะเกิดการกัดกร่อน โดยใช้เครื่องโพเทนชิโอสแตท (potentiostat) ซึ่งมีลักษณะการวัดดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 การวัดกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อน และศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อน โดยเครื่องโพเทนชิโอสแตท (ภาณุพงศ์ กอประศรีสวัสดิ์, 2544)

อิเล็กโทรดที่ใช้มี 3 ชนิดคือ

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

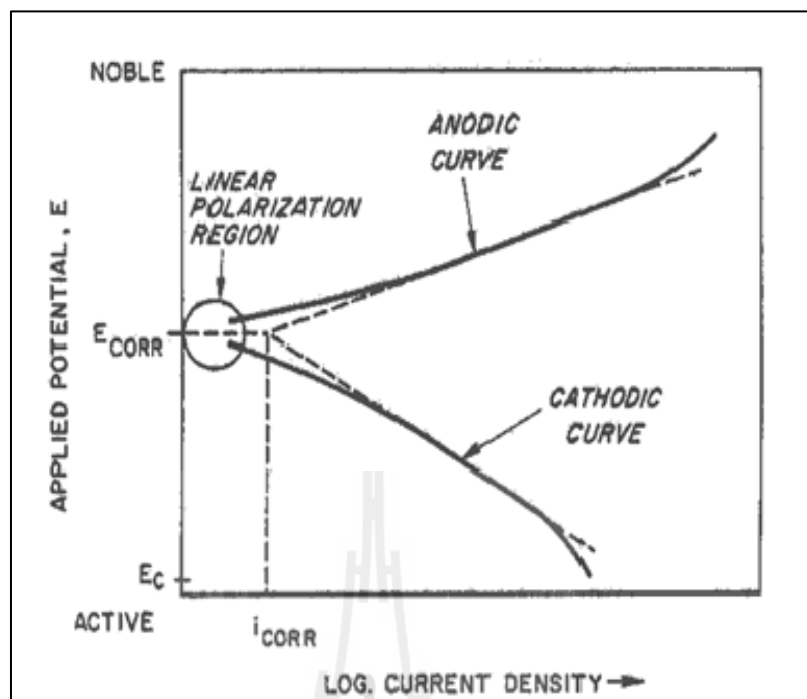
ค่าศักย์ไฟฟ้าจะวัดจากการวัดเทียบค่าศักย์ไฟฟ้าระหว่างอิเล็กโทรดอ้างอิงกับอิเล็กโทรดตัวอย่าง ค่ากระแสไฟฟ้าจะวัดจากการวัดเทียบระหว่างอิเล็กโทรดกระแสกับอิเล็กโทรดตัวอย่าง จากค่าศักย์ไฟฟ้า และค่ากระแสไฟฟ้าที่วัดได้ เมื่อนำมาสร้างกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าทั้งสองจะได้กราฟที่เรียกว่า กราฟเส้นโพลาริเซชัน (polarization curve)

จากรูปที่ 2.6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างศักย์ไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าของปฏิกิริยาแอโนดิก และปฏิกิริยาแคโทดิกบนพื้นผิวของโลหะที่กำลังเกิดการกัดกร่อน เมื่อมีกระแสไฟฟ้าไหลผ่าน ขั้วไฟฟ้าที่ผิว ความต่างศักย์ของขั้วทั้งสองจะเกิดการเปลี่ยนแปลงดังในเส้นกราฟแอโนดิก (anodic curve) และเส้นกราฟแคโทดิก (cathodic curve) ตามลำดับ โดยที่ความต่างศักย์ของแอโนดจะเปลี่ยนค่าไปในทางบวก ส่วนความต่างศักย์ของแคโทดจะเปลี่ยนค่าไปในทางลบ ในลักษณะเช่นนี้ แสดงถึงการเกิดโพลาริเซชันของขั้วทั้งสอง (Fontana, M.G., 1987) สามารถหาค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนและกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อนได้จากจุดตัดของเส้นความชันของเส้นกราฟแอโนดและเส้นกราฟแคโทด

เมื่อทราบค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนและกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อน แล้วสามารถหาอัตราการกัดกร่อน (Sedriks, A. J., 1996) ได้จาก

$$R_{\text{mmy}} = 0.00327 i_{\text{corr}} e / \rho \quad (2.8)$$

โดยที่	R_{mmy}	คือ	อัตราการเกิดการกัดกร่อน (มิลลิเมตรต่อปี)
	i_{corr}	คือ	ความหนาแน่นกระแสการกัดกร่อน (ไมโครแอมป์ต่อตารางเซนติเมตร)
	e	คือ	น้ำหนักกรัมสมมูลของโลหะ
	ρ	คือ	ความหนาแน่นของโลหะ (กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร)



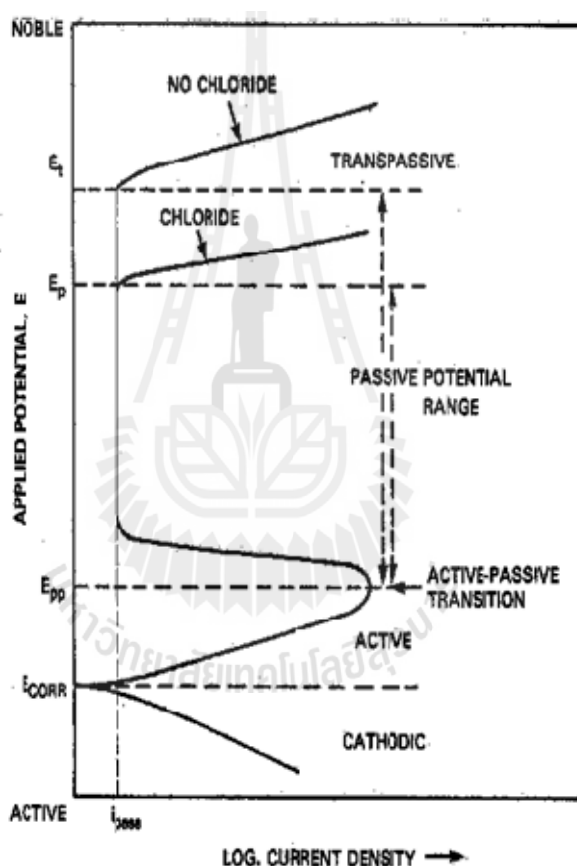
รูปที่ 2.6 ศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนและความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อน
(Sedriks, A.J., 1996)

2.4 เส้นโพลาริเซชัน

(ประทีป วงศ์บัณฑิต, 2543) ได้ทำการศึกษากลไกพาสซีวิตี (passivity) ของเหล็กกล้าไร้สนิม โดยศึกษาจากกราฟเส้นโพลาริเซชันเมื่อทำการทดลองต่อจากรูปที่ 2.6 โดยเพิ่มศักย์ไฟฟ้าไปทางโนเบิล (noble) จาก E_{corr} และบันทึกค่ากระแสที่ได้ จะได้ดังรูปที่ 2.7

จากกราฟรูปที่ 2.6 ทราบว่าจุดตัดของเส้นกราฟแคโทดิก และเส้นกราฟแอโนดิก คือ ค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อน หรือ E_{corr} เมื่อเพิ่มศักย์ไฟฟ้าต่อถึงจุดหนึ่ง กระแสกลับลดลงเนื่องจากเกิดชั้นฟิล์มพาสซีฟบนผิวโลหะ เรียกค่าศักย์ไฟฟ้าที่จุดนี้เรียกว่าเป็นจุดการเปลี่ยนแปลงแอคทีฟ-พาสซีฟ (active-passive transition) และค่าศักย์ไฟฟ้าที่จุดนี้เรียกว่า ศักย์ไฟฟ้าพาสซีเวชันปฐม (primarily passive potentials) ใช้สัญลักษณ์ E_{pp} ดังรูปที่ 2.7 เมื่อป้อนศักย์ไฟฟ้าต่อไปกระแสจะเริ่มลดลงจนคงที่ที่ค่าหนึ่งแม้จะเพิ่มศักย์ไฟฟ้าให้แก่เซลล์ต่อไปความหนาแน่นของกระแสก็ยังคงไม่เปลี่ยนแปลง ช่วงกราฟที่กระแสคงที่นี้เรียกว่าช่วงพาสซีฟ (passive zone) ซึ่งเป็นลักษณะเฉพาะตัวที่แสดงถึงความทนทานของฟิล์มบนผิวโลหะ ถ้ายังเพิ่มศักย์ไฟฟ้าต่อไปอีกจนถึงค่าหนึ่งที่ชั้นฟิล์มพาสซีฟแตกทำให้กระแสเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเรียกช่วงที่เลยจุดนี้ว่า ช่วงทรานพาสซีฟ (transpassive zone) และเรียกศักย์ไฟฟ้าที่จุดนี้ว่าศักย์ไฟฟ้าทรานพาสซีฟ ใช้สัญลักษณ์ E_t ศักย์ไฟฟ้าที่จุดนี้เป็น

ค่าที่โลหะเริ่มกัดกร่อนเฉพาะที่ คือ การกัดกร่อนแบบรูเข็มหรือหลุม (pitting corrosion) ซึ่งหากป้อนศักย์ไฟฟ้าเกินค่า E_p จะเกิดการแตกของชั้นฟิล์มพาสซีฟจุดใหม่เพิ่มขึ้น และชั้นฟิล์มจุดที่แตกเดิมจะมีการขยายตัวของรูเข็มหรือหลุมใหญ่ขึ้น เมื่อเปรียบเทียบเส้นโพลาริเซชันที่ได้จากการทดลองของโลหะตัวอย่างในสารละลายที่ไม่มีคลอไรด์ และสารละลายที่มีคลอไรด์พบว่าในสารละลายที่มีคลอไรด์จะให้ค่า E_p หรืออีกนัยหนึ่งเรียกว่า ศักย์ไฟฟ้ากัดกร่อนแบบรูเข็มหรือหลุม (pitting potential) ใช้สัญลักษณ์ E_p ต่ำกว่า และมีความกว้างช่วงพาสซีฟแคบกว่าเส้นโพลาริเซชันที่ได้จากการทดลองในสารละลายที่ไม่มีคลอไรด์



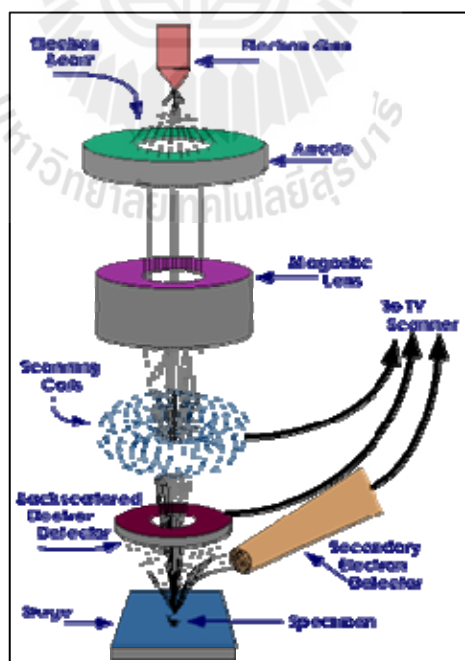
รูปที่ 2.7 ส่วนต่าง ๆ ที่สำคัญของเส้นโพลาริเซชัน (ประทีป วงศ์บัณฑิต, 2543)

2.5 การวิเคราะห์ชั้นเคลือบ

สำหรับการวิเคราะห์ชั้นเคลือบในการวิจัยในครั้งนี้จะใช้ X-ray photoelectron spectroscopy (XPS) หรือ X-ray photoemission electron microscopy (X-PEEM) และ scanning electron microscope (SEM) ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

2.5.1 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscope, SEM)

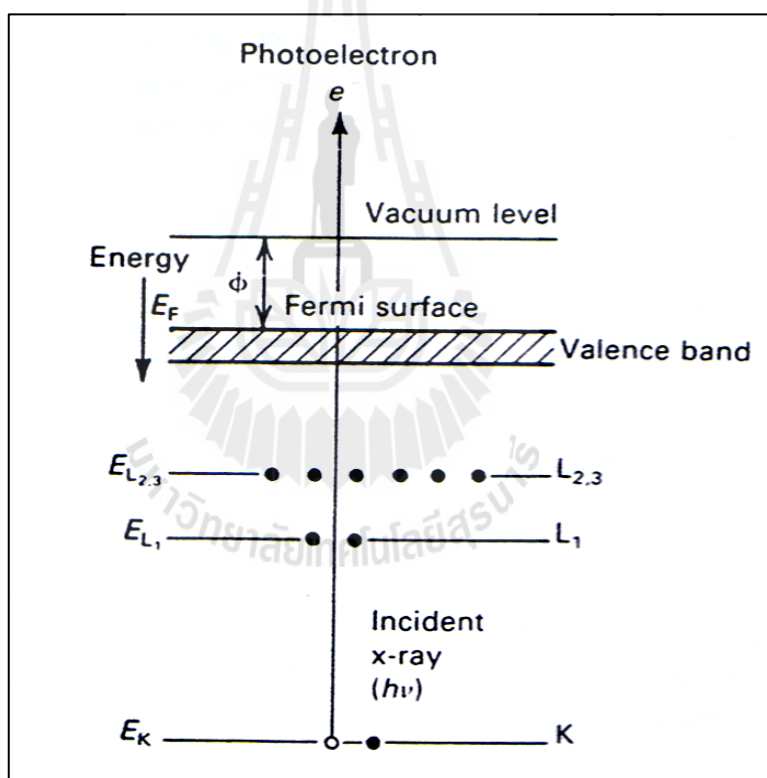
กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) เป็นเทคนิคที่สำคัญการตรวจสอบคุณสมบัติของพื้นผิวของวัสดุและชั้นเคลือบ เนื่องจาก SEM มีกำลังขยายตั้งแต่ 20 – 30,000 เท่า และใช้คุณสมบัติคลื่นของอิเล็กตรอน สามารถวิเคราะห์ชั้นเคลือบในแนวลึกได้กว่า 300 เท่าของกล้องจุลทรรศน์ปกติ ทำให้เป็นผลดีต่อการวิเคราะห์ผิวในรายละเอียด หลักการทำงานของเครื่อง SEM จะประกอบด้วยแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอนซึ่งทำหน้าที่ผลิตอิเล็กตรอนเพื่อป้อนให้กับระบบ โดยกลุ่มอิเล็กตรอนที่ได้จากแหล่งกำเนิดจะถูกเร่งด้วยสนามไฟฟ้า จากนั้นกลุ่มอิเล็กตรอนจะผ่านเลนส์รวบรวมรังสี (condenser lens) เพื่อทำให้กลุ่มอิเล็กตรอนกลายเป็นลำอิเล็กตรอน ซึ่งสามารถปรับให้ขนาดของลำอิเล็กตรอนใหญ่หรือเล็กได้ตามต้องการ หากต้องการภาพที่มีความคมชัดจะปรับให้ลำอิเล็กตรอนมีขนาดเล็ก หลังจากนั้นลำอิเล็กตรอนจะถูกปรับระยะโฟกัสโดยเลนส์ใกล้วัตถุ (objective lens) ลงไปบนผิวชิ้นงานที่ต้องการศึกษา หลังจากลำอิเล็กตรอนถูกกราดลงบนชิ้นงานจะทำให้เกิดอิเล็กตรอนทุติยภูมิ (secondary electron) ขึ้นซึ่งสัญญาณจากอิเล็กตรอนทุติยภูมินี้จะถูกบันทึก และแปลงไปเป็นสัญญาณทางอิเล็กทรอนิกส์ และถูกนำไปสร้างเป็นภาพบนจอโทรทัศน์ต่อไปและสามารถบันทึกภาพจากหน้าจอตีพิมพ์ได้เลย ดังแสดงในรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 องค์ประกอบของ SEM

2.5.2 กล้องจุลทรรศน์โฟโตอิเล็กตรอนสเปกโตรสโคปี (photoelectron emission spectroscopy, PES)

XPS ใช้แสงซินโครตรอนจะอยู่ในช่วงพลังงาน 50 -1000 eV จากระบบลำแสง BL3 ของห้องปฏิบัติการแสงสยาม โดยแสงในช่วงพลังงานดังกล่าวมีประโยชน์ในการศึกษาสภาวะทางเคมีที่ผิวหน้าสารทำให้สามารถระบุปฏิกิริยาดังกลาง (intermediate reaction) ที่เกิดขึ้นบริเวณพื้นผิว และรอยต่อระหว่างพื้นผิวสารหรือการสึกหรือได้ การตรวจสอบดังกล่าวสามารถทำได้ เนื่องจากมีการเพิ่มขีดความสามารถในการแยกแยะสเปกตรัม (spectral resolution) และความไวในการวิเคราะห์พื้นผิววัสดุจากการใช้แสงซินโครตรอนที่สามารถปรับเปลี่ยนค่าพลังงานได้ตามรูปที่ 2.9

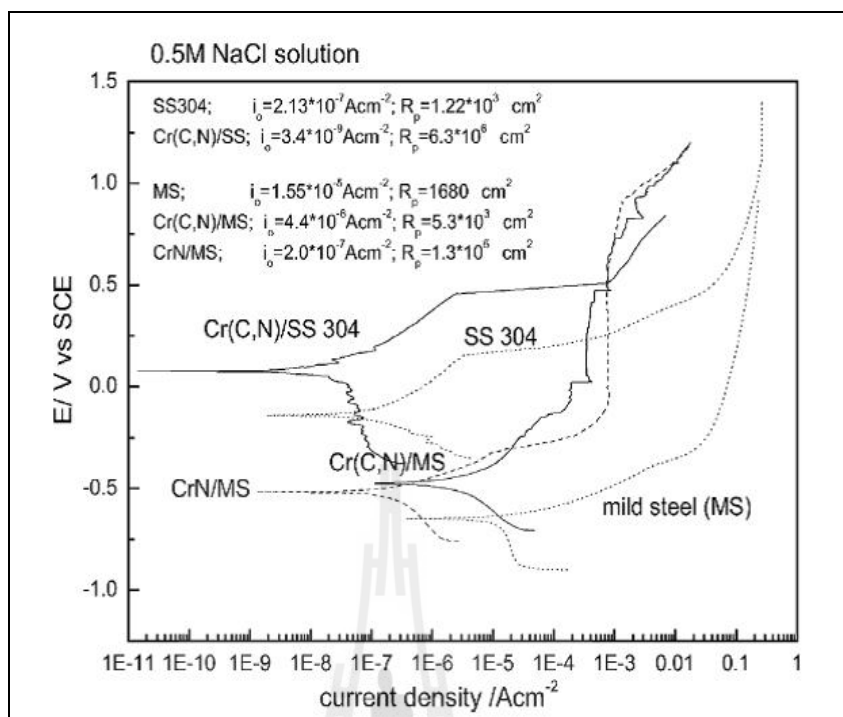


รูปที่ 2.9 ระดับชั้นพลังงานของ XPS (Einstein, A., 1905)

2.6 การทบทวนวรรณกรรม (reviewed literature) และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การเคลือบผิวด้วยกระบวนการเคลือบด้วยไอทางกายภาพเป็นที่นิยมใช้มากในปัจจุบัน สำหรับการปรับปรุงคุณสมบัติของพื้นผิววัสดุประเภทเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำและเหล็กกล้าเครื่องมือชนิดต่างๆ ส่วนใหญ่ชั้นเคลือบที่ได้จากกระบวนการเคลือบผิวด้วยไอทางกายภาพจะเป็นสารประกอบประเภทไนไตรด์ (Ibrahim, M.A.M., Korablov S.F., Yoshimura, M., 2002) ซึ่งเป็นชั้นเคลือบที่มีคุณสมบัติทางด้านการต้านทานการสึกหรอและการต้านทานการกัดกร่อนที่ดี และ (Medina-Flores, A., Arganis, C., Santiago, P., Oseguera., 2004) ได้เสนอว่าผลของไนไตรด์ที่สามารถช่วยในการปรับปรุงการต้านทานการกัดกร่อนของชิ้นงานเกิดการละลายของธาตุไนโตรเจนที่มีอยู่ในชั้นเคลือบไนไตรด์ออกสู่สารละลาย และทำปฏิกิริยากับไฮโดรเจนไอออน (H^+) ที่มีอยู่ในสารละลายกลายเป็นแอมโมเนียม (NH_4^+) ทำให้สารละลายมีค่าความเป็นด่างมากขึ้นทำให้อัตราการกัดกร่อนลดลง

Darja, K.M., Peter P., Miha, C., Marijan M. (2004) ได้ทำการศึกษาผลของเคลือบผิวด้วยโครเมียมไนไตรด์ฟิล์มบนเหล็กกล้า (mild steel) และเหล็กกล้าไร้สนิม (stainless steel) โดยกระบวนการเคลือบผิวไอทางกายภาพแบบ ion plating ต่อคุณสมบัติการต้านทานการกัดกร่อน จากการทดสอบการกัดกร่อนด้วยวิธีทางเคมีไฟฟ้าในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้น 0.5 โมลาร์ จะได้ผลการทดลองเป็นกราฟโพลาไรเซชัน (polarization curves) ดังรูปที่ 2.11 ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า (current density) และศักย์ไฟฟ้า (potential) เปรียบเทียบระหว่างชิ้นงานที่ยังไม่ผ่านการเคลือบผิว และชิ้นงานที่ผ่านการเคลือบผิวด้วยโครเมียมไนไตรด์ ภายหลังจากการเคลือบผิวเหล็กกล้าทั้งสองชนิดด้วยโครเมียมไนไตรด์ฟิล์มนั้น ส่งผลให้คุณสมบัติการต้านทานการกัดกร่อนดีขึ้น เนื่องจากค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนมีค่าเพิ่มสูงขึ้นและความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อนมีค่าลดลงภายหลังการเคลือบผิวด้วยฟิล์มโครเมียมไนไตรด์



รูปที่ 2.10 เส้นโพลาริเซชันของชิ้นงานที่ไม่ถูกเคลือบผิวและชิ้นงานที่ถูกเคลือบผิวด้วยชั้นเคลือบ Cr-(C,N) ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้น 0.5 โมลาร์ (Darja, K.M., Peter P., Miha, C., Marijan M. (2004))

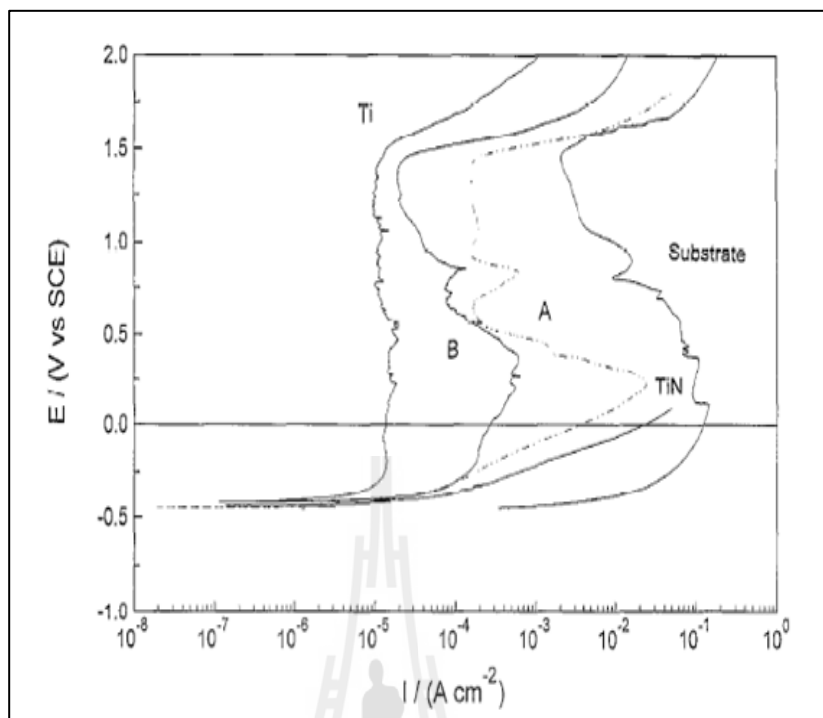
Bertrand, G., Mahdjoub, H., Meunier, C. (2004) ได้ศึกษาผลของโครเมียมไนไตรด์ฟิล์มต่อคุณสมบัติการต้านทานการกัดกร่อนของเหล็กกล้าเช่นเดียวกัน แต่โครเมียมไนไตรด์ฟิล์มนี้ได้มาจากกระบวนการเคลือบผิวไอทางกายภาพแบบ magnetron reactive sputtering จากการทดสอบด้วยวิธีทางเคมีไฟฟ้าพบว่าโครเมียมไนไตรด์ฟิล์มสามารถปรับปรุงคุณสมบัติการต้านทานการกัดกร่อนของเหล็กกล้าให้ดีขึ้น โดยนักวิจัยกลุ่มนี้สรุปว่าโครเมียมไนไตรด์ฟิล์มจะแสดงพฤติกรรมเฉื่อยและมีเสถียรภาพสามารถที่จะป้องกันชิ้นงานเหล็กกล้าจากการกัดกร่อนของสารละลายได้ แต่ก็ไม่สามารถป้องกันการกัดกร่อนจากสารละลายได้อย่างสมบูรณ์ ในการศึกษาที่ยังกล่าวไว้อีกว่าการต้านทานการกัดกร่อนของชั้นเคลือบจะถูกจำกัดด้วยข้อบกพร่อง (defect) และรูพรุน (porosity) ภายในโครงสร้างของชั้นเคลือบ นอกจากนี้ Ahn, S.H., Choi, Y.S., Kim, J.G., Han, J.G. (2002) ยังเสนออีกว่าการเกิดการกัดกร่อนของชั้นเคลือบโครเมียมไนไตรด์จะมีความสัมพันธ์กับคุณภาพของชั้นเคลือบ ได้แก่ โครงสร้างพื้นผิวและข้อบกพร่อง (รูพรุนหรือรูโพรง) ของชั้นเคลือบ ซึ่งส่งผลโดยตรงต่อการต้านทานการกัดกร่อนของชั้นเคลือบ ปริมาณของรูพรุนจะสามารถประเมินจากค่า

อัตราส่วนระหว่างค่า polarization resistance ของชิ้นงานที่ยังไม่เคลือบผิวและชิ้นงานที่ผ่านการเคลือบผิวดังสมการ

$$P = R_{p,u} / R_{p,r-u} \quad (2.9)$$

โดย P คือ ผลรวมของรูพรุนในชั้นเคลือบ (total coating porosity)
 $R_{p,u}$ คือ ความต้านทานโพลาไรเซชันของชิ้นงาน
 (polarization resistance of substrate)
 $R_{p,r-u}$ คือ ความต้านทานโพลาไรเซชันของชั้นเคลือบ
 (polarization resistance of coating-substrate)

นอกจากชั้นเคลือบชนิดโครเมียมไนไตรด์ที่ได้มีการศึกษาวิจัยมาแล้วในหลายงานวิจัยแล้ว ยังมีงานวิจัยอื่นๆ ที่สนใจในการศึกษาชั้นเคลือบที่ต่างชนิดกันออกไป เช่น Herranen, M., Wiklund U., Carlsson, J.O., Hogmark. (1998) ทำการศึกษาพฤติกรรมการกัดกร่อนของไทเทเนียมไนไตรด์ฟิล์มที่เคลือบบนผิวเหล็กกล้าเครื่องมือ พบว่าชิ้นงานที่ถูกเคลือบไทเทเนียมไนไตรด์ฟิล์มจะแสดงการต้านทานการกัดกร่อนที่ดีกว่า โดยมีค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนที่สูงกว่า และค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อนที่น้อยกว่าชิ้นงานที่ยังไม่ผ่านการเคลือบผิว ดังแสดงในรูปที่ 2.12 นอกจากนี้ผู้วิจัยยังมีข้อเสนอว่าคุณสมบัติการต้านทานการกัดกร่อนจะมีความสัมพันธ์กับลักษณะโครงสร้างของชั้นฟิล์ม โครงสร้างของไทเทเนียมไนไตรด์ที่ปรากฏในงานวิจัยนี้จะมีลักษณะเป็นแท่งยาว (columnar structure) ทำให้สารละลายมีโอกาสที่จะแพร่ และซึมผ่านเข้าไปในชั้นฟิล์มได้ง่าย ซึ่งอาจจะส่งผลให้ชั้นฟิล์มมีคุณสมบัติการต้านทานการกัดกร่อนที่ไม่ดีเท่าที่ควร



รูปที่ 2.11 เส้นแอโนดิกโพลาริเซชันของชั้นเคลือบต่างๆ ในกรดซัลฟูริกความเข้มข้น 0.1 โมลาร์ ที่อัตราสแกน 0.2 มิลลิโวลต์ต่อวินาที. (Herranen, M., Wiklund U., Carlsson, J.O., Hogmark., 1998)

Yang, J., Ping Yu, G., Hong H.J. (2000) ได้ทำการศึกษาผลของการเคลือบผิวเหล็กกล้าไร้สนิมด้วยไทเทเนียมไนไตรด์ฟิล์มด้วยวิธี potentiodynamic polarization จากการศึกษาพบว่าเมื่อเคลือบผิวด้วยไทเทเนียมไนไตรด์ฟิล์มแล้ว ทำให้ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อนของเหล็กกล้าไร้สนิมลดลงจาก 231.96 nA/cm^2 เป็น 195.9 nA/cm^2 หรือเกิดการกัดกร่อนน้อยลง นอกจากนี้จากการศึกษาพบว่าพฤติกรรมการกัดกร่อนของไทเทเนียมไนไตรด์ฟิล์มจะขึ้นอยู่กับลักษณะโครงสร้างของชั้นฟิล์ม และการยึดเกาะของชั้นฟิล์ม โดยกล่าวไว้ว่าโครงสร้างของชั้นฟิล์มที่มีปริมาณข้อบกพร่อง (defect) มากและการยึดเกาะระหว่างชั้นเคลือบและชิ้นงานที่ไม่ดีจะส่งผลให้ความสามารถในการต้านทานการกัดกร่อนลดน้อยลง และ Souto, R.M, Alanyali, H. (2000) ได้กล่าวเพิ่มเติมอีกว่าการที่ชั้นเคลือบมีข้อบกพร่องหรือรูพรุนมากนั้น จะส่งผลให้สารละลายที่มีฤทธิ์การกัดกร่อนสามารถแพร่และซึมเข้าสู่ชั้นเคลือบและแพร่ผ่านไปจนถึงตัววัสดุนำไปสู่การกัดกร่อนในรูปแบบการกัดกร่อนแบบเฉพาะที่

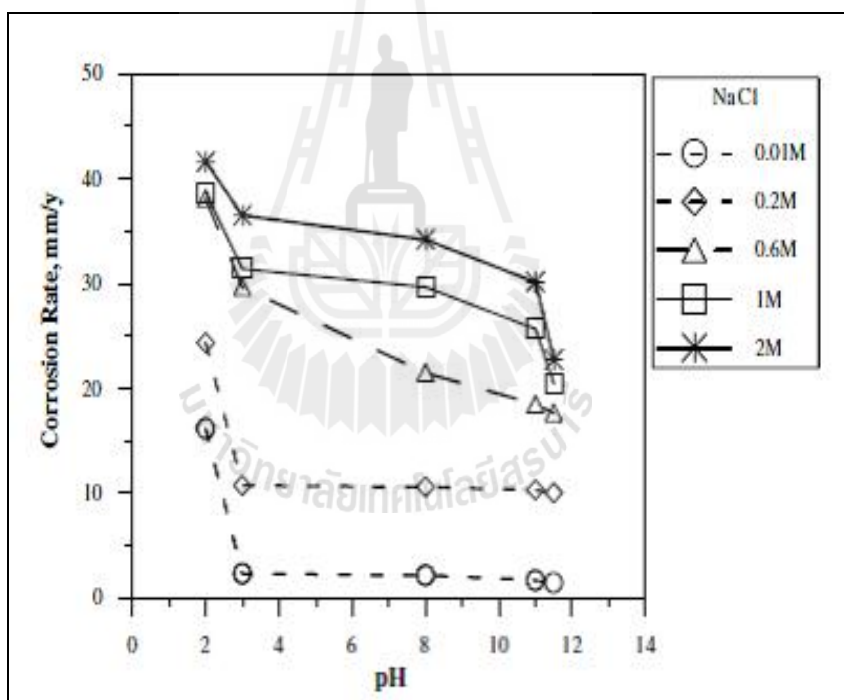
นอกจากนี้ยังได้มีการศึกษาค้นคว้าวิจัยเพื่อเปรียบเทียบคุณสมบัติทางการกัดกร่อนของชั้นเคลือบที่แตกต่างชนิดกัน โดย Cunha, L., Andritschky M., Rebouta L., Pischow. (1999) ได้ศึกษาพฤติกรรมทางการกัดกร่อนของชั้นเคลือบโครเมียมไนไตรด์ และไทเทเนียมอะลูมิเนียมไนไตรด์ที่ผลิตจากกระบวนการเคลือบผิวแบบไอทางกายภาพ พบว่าเมื่อเปรียบเทียบระหว่างชิ้นงานที่ผ่านการเคลือบโครเมียมไนไตรด์ และที่ผ่านการเคลือบไทเทเนียมอะลูมิเนียมไนไตรด์ด้วยเครื่องโพเทนชิโอสแตท (potentiostat) จากการทดสอบสรุปว่าชั้นเคลือบโครเมียมไนไตรด์มีความสามารถในการต้านทานการกัดกร่อนที่ดีกว่าชั้นเคลือบไทเทเนียมอะลูมิเนียมไนไตรด์ และได้อธิบายถึงกลไกการเกิดการกัดกร่อนของชั้นเคลือบในสารละลายกรดไฮโดรคลอริก จากผลการทดลองด้วยเทคนิค X-ray photoelectron spectroscopy (XPS) พบว่าการกัดกร่อนเกิดขึ้นจากการแพร่ของสารละลายผ่านข้อบกพร่อง (defect) ของชั้นเคลือบในรูปแบบการกัดกร่อนแบบรูเข็ม (pitting corrosion) ทำให้เกิดการสูญเสียไนโตรเจนในชั้นเคลือบ และส่งผลให้ออกซิเจนสามารถแพร่เข้าไปชั้นเคลือบและเกิดการออกซิเดชันกลายเป็นผลิตภัณฑ์การกัดกร่อนหรือออกไซด์ของเหล็กได้

Liu, C., Bi, Q., Matthews, A. (2001) ได้ศึกษาเปรียบเทียบคุณสมบัติต้านทานการกัดกร่อนของชั้นเคลือบไทเทเนียมไนไตรด์และโครเมียมไนไตรด์ในสารละลายไฮเดียมคลอไรด์ 0.5 N โดยทำการทดสอบการต้านทานการกัดกร่อนด้วยการวัดความต้านทานเชิงซ้อน (ac impedance) ในการจุ่มแช่ชิ้นงานที่เวลาแตกต่างกัน พบว่าค่าความต้านทานเชิงซ้อน (ac impedance) ของชิ้นงานที่เคลือบโครเมียมไนไตรด์ และไทเทเนียมไนไตรด์จะมีค่าลดลงเมื่อเวลาในการจุ่มแช่ชิ้นงานเพิ่มมากขึ้น แต่ชั้นเคลือบโครเมียมไนไตรด์จะไม่แสดงการลดลงอย่างชัดเจนในช่วงเวลาแรกเมื่อเปรียบเทียบกับชั้นเคลือบไทเทเนียมไนไตรด์ จากผลการทดลองนี้ผู้วิจัยจึงเสนอว่าชั้นเคลือบโครเมียมไนไตรด์เกิดการกัดกร่อนได้ช้ากว่าชั้นเคลือบไทเทเนียมไนไตรด์ ซึ่งสอดคล้องกับผลการตรวจสอบโครงสร้างของชั้นเคลือบทั้งสองชนิด พบว่าลักษณะโครงสร้างของชั้นเคลือบไทเทเนียมไนไตรด์จะมีลักษณะเป็นแท่ง (columnar structure) และผิวหยาบ มีรูพรุนมาก ส่วนชั้นเคลือบโครเมียมไนไตรด์จะมีโครงสร้างที่หนาแน่นและสม่ำเสมอ มีรูพรุนที่น้อยกว่า ซึ่งจะช่วยให้สารละลายสามารถแพร่เข้าไปในชั้นเคลือบและเกิดการกัดกร่อนได้ยากกว่า

ปัจจัยที่มีผลต่อพฤติกรรมทางการกัดกร่อนของวัสดุและชั้นเคลือบ นอกจากชนิดของสารละลายแล้วยังขึ้นกับค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ของสารละลายอีกด้วย ในงานวิจัยของ Hiroki, T. (2008) ได้ศึกษากลไกการกัดกร่อนขั้นต้น (initial stage) ของเหล็กในสถานะที่เป็นน้ำและมีออกซิเจนร่วมอยู่ด้วยจะสามารถอธิบายได้โดยกลไกทางเคมีไฟฟ้า เหล็ก (Fe) จะเกิดการละลายออกมาอยู่ในรูปของ Fe^{2+} และออกซิเจนจะถูกรีดิวซ์ฟอร์มเป็น OH^- และทำปฏิกิริยากันกลายเป็น

เหล็กไฮดรอกไซด์ ($\text{Fe}(\text{OH})_2$) มีลักษณะเป็นชั้นเจล (gel) ที่หนาสามารถป้องกันการแพร่ผ่านของน้ำ และออกซิเจนเข้าไปสัมผัสกับผิวหน้าเหล็กได้ยากขึ้น ซึ่งจะช่วยลดอัตราการกัดกร่อนลงได้จากการคำนวณทางสมมูล $\text{Fe}(\text{OH})_2$ จะฟอร์มตัวขึ้นในสารละลายที่มีค่า pH เท่ากับ 9.31 หลังจากนั้นจะทำปฏิกิริยากับออกซิเจนที่อยู่สลายจาก $\text{Fe}(\text{OH})_2$ ไปเป็น $\text{Fe}(\text{OH})_3$ ที่มีลักษณะเป็นชั้นเจลที่บางหรือสนิม ทำให้น้ำและออกซิเจนสามารถแพร่ผ่านได้ง่ายขึ้นไม่สามารถป้องกันการกัดกร่อนได้

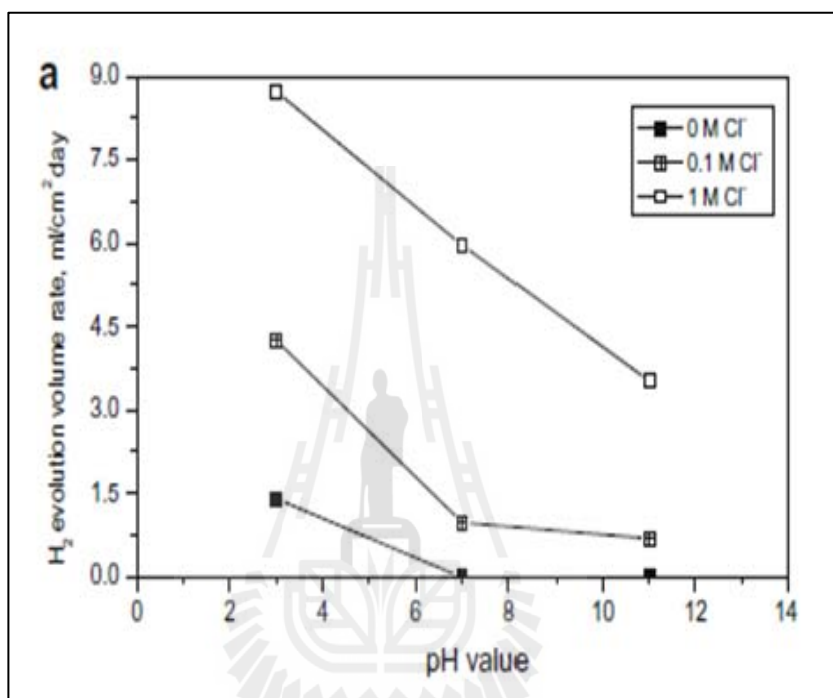
ในงานวิจัยของ Altun, H., Sen, S.I. (2008) ได้ศึกษาอิทธิพลของค่า pH ต่อพฤติกรรมการกัดกร่อนของโลหะผสมแมกนีเซียมโดยการจุ่มแช่ชิ้นงานในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ที่แตกต่างกัน และพบว่าที่ค่าความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมคลอไรด์หนึ่งๆค่า pH 2 จะแสดงค่าอัตราการกัดกร่อนสูงที่สุด และค่าอัตราการกัดกร่อนจะลดลงเมื่อค่า pH เพิ่มขึ้นตามลำดับดังแสดงในรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.12 อัตราการกัดกร่อนที่ได้จากการทดสอบจุ่มแช่ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ที่ค่า pH ต่างๆ (Altun, H., Sen, S.I. (2008))

ผลการวิจัยในปีเดียวกันของ Ming, C.Z., Ming, L., Guang, L.S., Andrej, A. (2008) ยืนยันผลการศึกษาของอิทธิพลของค่า pH ต่อพฤติกรรมการกัดกร่อนของโลหะผสมแมกนีเซียมเช่นเดียวกัน และยังได้ศึกษาเพิ่มเติมของการเกิด H_2 evolution โดยการวัดค่าอัตราการเกิด H_2

evolution ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ที่มีค่า pH แตกต่างกันและจากการศึกษาพบว่าที่ สารละลายที่มีค่าความเป็นกรดสูง (pH = 3) อัตราการเกิด H₂ evolution จะมีค่ามากกว่าสารละลายที่มีค่าความเป็นกลางและด่าง ดังแสดงผลในรูปที่ 2.14 ซึ่งสอดคล้องกับผลของค่าอัตราการกัดกร่อน ที่แสดงให้เห็นว่าเมื่อค่า pH ลดลงอัตราการเกิด H₂ evolution และอัตราการกัดกร่อนจะมีค่าสูงขึ้น



รูปที่ 2.13 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเกิด Hydrogen evolution กับค่า pH

(Ming, C.Z., Ming, L., Guang, L.S., Andrej, A. (2008))

นอกจากนี้ผลการวิจัยทั้งของ Zaid, B., Saidi, D., Benzaid, A., Hadji, S. (2008) ได้รายงานถึงผลของค่า pH ต่อการเกิดการกัดกร่อนแบบรูเข็ม (pitting corrosion) ของโลหะผสมอะลูมิเนียมเกรด AA6061 ซึ่งปกติทั่วไปจะมีพฤติกรรมการเกิดพาสซีฟฟิล์ม (passive film) ที่มีความสามารถในการต้านทานการกัดกร่อนได้ ทำการทดสอบการกัดกร่อนด้วยวิธีทางเคมีไฟฟ้าในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้น 3.5 เปอร์เซ็นต์ที่มีค่า pH 2 6 และ 12 จากการทดสอบพบว่าพฤติกรรมการกัดกร่อนของวัสดุจะขึ้นอยู่กับค่า pH ของสารละลาย ค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนแบบรูเข็มหรือหลุมมีความสัมพันธ์กับความกว้างของช่วงพาสซีฟ โดยที่ค่า pH 12 มีความกว้างของช่วงพาสซีฟมากกว่าที่ค่า pH 2 และ 6 และมีค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนแบบรูเข็ม (pitting potential) สูง

กว่าที่ค่า pH 2 และ 6 เพราะในสารละลายที่มีค่า pH เท่ากับ 12 มี OH⁻ (hydroxyl group) ทำให้เกิดการซ่อมแซมตัวเองของพาสซีฟฟิล์ม

ความหยาบของพื้นผิววัสดุก็เป็นตัวแปรที่สำคัญอย่างหนึ่งที่มีอิทธิพลต่อคุณสมบัติทางด้านการกัดกร่อนของวัสดุ โดย Walter, R., Bobby, K. M. (2006) ได้ทำการเตรียมพื้นผิวของโลหะหล่อผสมแมกนีเซียมเกรด AZ91 ให้มีความหยาบผิวแตกต่างกันด้วยการขัดด้วยกระดาษทรายเบอร์ 320 600 1200 และผงเพชรความละเอียด 3 ไมครอน หลังจากนั้นนำไปทดสอบการกัดกร่อนในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้นร้อยละ 0.5 โดยน้ำหนักด้วยวิธีทางเคมีไฟฟ้า จากการทดสอบพบว่าชิ้นงานที่หยาบที่สุด (ขัดด้วยกระดาษเบอร์ 320) จะมีค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อนมากที่สุด และค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อนจะลดลงเมื่อความหยาบผิววัสดุละเอียดขึ้น และพบว่าชิ้นงานที่มีความหยาบผิวที่ละเอียดที่สุด (ขัดด้วยผงเพชรความละเอียด 3 ไมครอน) จะแสดงการเกิดพาสซีฟฟิล์ม (passive film) ซึ่งเป็นฟิล์มที่ช่วยในการป้องกันการกัดกร่อนจากสารละลาย ทำให้มีค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อนน้อยที่สุด

Liu, C., Leyland, A., Lyon, S., Matthews, A. (1995) ได้ศึกษาผลของความหยาบผิวของเหล็กกล้าก่อนการเคลือบผิวด้วยโครเมียมไนไตรด์ที่ผลิตด้วยกระบวนการไอกายภาพต่อพฤติกรรม การกัดกร่อน ก่อนการเคลือบผิวได้ทำการเตรียมผิวเหล็กกล้าให้มีความหยาบแตกต่างกัน ได้แก่ ขัดด้วยกระดาษทรายเบอร์ 240 ขัดด้วยผงเพชรขนาด 45 ไมครอน และขัดด้วยผงเพชรขนาด 6 ไมครอน หลังจากนั้นทำการทดสอบการกัดกร่อนในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้นร้อยละ 3 โดยน้ำหนักด้วยการวัดความต้านทานเชิงซ้อน (impedance) จากการศึกษาพบว่าเมื่อความหยาบผิวละเอียดมากขึ้นจะส่งผลให้การต้านทานการกัดกร่อนดีขึ้น โดยมีข้อสันนิษฐานว่าชิ้นงานที่มีความหยาบผิวละเอียดขึ้นอาจส่งผลให้พื้นผิววัสดุมีปริมาณข้อบกพร่อง (defects) ที่น้อยลงส่งผลให้ได้ชั้นเคลือบที่เรียบและมีการยึดเกาะที่ดีกว่ากับวัสดุ ทำให้ได้ชั้นเคลือบที่มีความหนาแน่นและสม่ำเสมอ สามารถป้องกันการกัดกร่อนได้ดีขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับข้อสรุปของ Durst, O., Ellermeier, J., Berger, C. (2008) ที่มีข้อสรุปว่า เมื่อความหยาบผิวเพิ่มมากขึ้นจะเปรียบเสมือนการเพิ่มปริมาณข้อบกพร่องในชั้นเคลือบให้เพิ่มมากขึ้น ทำให้ประสิทธิภาพการต้านทานการกัดกร่อนของชั้นเคลือบลดน้อยลง ในปีต่อมา Shen-Chih, L., Wei-Yu, H., Lai, F.D. (1996) ได้มีการศึกษาผลของความหยาบพื้นผิววัสดุก่อนการเคลือบผิวด้วยชั้นเคลือบโครเมียมไนไตรด์เช่นเดียวกันด้วยการเตรียมพื้นผิววัสดุก่อนการเคลือบผิวที่แตกต่างกัน ก่อนและภายหลังการเคลือบผิวได้มีการวัดความหยาบผิวของชิ้นงาน จะพบว่าความหยาบผิววัสดุก่อนการเคลือบผิวมีผลต่อความหยาบผิวของชิ้นงานภายหลังการเคลือบผิว ความหยาบผิวภายหลังการเคลือบผิวจะมีแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงตามความหยาบพื้นผิววัสดุก่อนการเคลือบผิว ดังแสดงผลในตารางที่ 2.1 นอกจากนี้ผู้วิจัยยังศึกษา

ผลของความหยาบผิวนี้ต่อคุณสมบัติการกัดกร่อนด้วยการทดสอบการกัดกร่อน โดยการจุ่มแช่ชิ้นงาน จากการทดสอบการกัดกร่อนจะพบว่าชิ้นงาน A มีค่าอัตราการกัดกร่อนมากที่สุด (58 มิลลิกรัมต่อวัน) ตามด้วยชิ้นงาน B (25 มิลลิกรัมต่อวัน) และชิ้นงาน C (2 มิลลิกรัมต่อวัน) ที่มีค่าอัตราการกัดกร่อนน้อยที่สุดตามลำดับ โดยเสนอเหตุผลที่ว่า การเคลือบผิวด้วยชั้นเคลือบโครเมียมไนไตรด์บนชิ้นงานที่มีความหยาบผิวมากจะส่งผลให้โครงสร้างของชั้นเคลือบที่ได้มีลักษณะเป็นแท่ง (columnar) และมีรูเข็ม (pinhole) ภายในชั้นเคลือบได้ง่ายกว่าการเคลือบผิวบนชิ้นงานที่มีความหยาบผิวที่ละเอียดกว่า

ตารางที่ 2.1 ความหนาของโครเมียมไนไตรด์ฟิล์มและความหยาบผิวของชิ้นงานตัวอย่างก่อนและหลังการเคลือบผิว

ชิ้นงาน	ความหนาของโครเมียมไนไตรด์ฟิล์ม (ไมโครเมตร)	ความหยาบผิว (Ra)	
		ก่อนการเคลือบผิว	หลังการเคลือบผิว
A	2.36	0.31	0.33
B	2.36	0.20	0.22
C	2.36	0.10	0.13

จากทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องดังที่กล่าวมาแล้ว จะเห็นได้ว่ามีกระบวนการเคลือบผิวด้วยไอพลาสมา วิธีการทดสอบการกัดกร่อน การตรวจสอบและวิเคราะห์ผลต่างๆ ของวัสดุและชั้นเคลือบผิว รวมทั้งงานวิจัยที่ศึกษาผลของตัวแปรต่างๆ เช่น วัสดุที่ถูกเคลือบผิว (substrate) ความหยาบผิวของวัสดุ (surface roughness) ชนิดของสารประกอบของชั้นเคลือบ (chemical composition) ตัวแปรในกระบวนการเคลือบ (deposition parameters) โครงสร้างของชั้นเคลือบ (microstructure) และสภาวะการใช้งานต่างๆ ที่มีต่อพฤติกรรมกัดกร่อนของวัสดุและชั้นเคลือบ ซึ่งจะเป็นแนวทางที่มีประโยชน์ต่อการดำเนินงานวิจัยศึกษาพฤติกรรมกัดกร่อนของเหล็กกล้า AISI 4140 ที่เคลือบผิวด้วยการเคลือบไอพลาสมา ซึ่งมีวิธีดำเนินงานวิจัย ตลอดจนผลการทดลองและการวิเคราะห์ผลการทดลองดังแสดงในบทต่อไป

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

3.1 วัสดุ อุปกรณ์ และสารเคมีที่ใช้ในการดำเนินการวิจัย

3.1.1 วัสดุที่ใช้ในการดำเนินการวิจัย

เนื่องจากงานวิจัยนี้สนใจพฤติกรรมการกัดกร่อนของเหล็กกล้า AISI 4140 ที่เคลือบผิวด้วยการเคลือบไอทางกายภาพ จึงเลือกใช้โลหะหรือวัสดุพื้น (substrate) ที่นำมาเคลือบผิวคือ เหล็กกล้า AISI 4140 ซึ่งเป็นเหล็กกล้าผสมต่ำที่มีความแข็งแรงสูงและมีความสามารถในการขึ้นรูปทางกลได้ง่าย โดยมีส่วนผสมทางเคมีดังในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 ส่วนผสมทางเคมีของเหล็กกล้า AISI 4140

วัสดุ	ส่วนผสมทางเคมี (เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก)						
	C	Si	Mn	Cr	Mo	V	Fe
เหล็กกล้า AISI 4140	0.470	0.260	0.780	0.810	0.190	0.0027	Balance

3.1.2 สารเคมีที่ใช้ในการวิจัย

- ก) สารเคมีสำหรับการเตรียมตัวอย่าง
- กรดไนตริก (HNO_3) ใช้สำหรับการกัดผิวหน้าชิ้นงานเพื่อตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคก่อนและหลังกระบวนการอบชุบทางความร้อน
 - อะซิโตน (CH_3COCH_3) เอทานอล และน้ำกลั่น ใช้สำหรับทำความสะอาดชิ้นงานก่อนการเคลือบผิว การวิเคราะห์พื้นผิว และภายหลังการทดสอบการกัดกร่อน
- ข) สารเคมีสำหรับกระบวนการเคลือบผิว
- ก๊าซอาร์กอน
 - ก๊าซไนโตรเจน
- ค) สารเคมีสำหรับการทดสอบการกัดกร่อน
- โซเดียมคลอไรด์ (NaCl) ใช้สำหรับการเตรียมสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 3.5 % โดยน้ำหนักที่ใช้ในการทดสอบ

- กรดไฮโดรคลอริก (HCl) ความเข้มข้น 1 โมลาร์ ใช้สำหรับปรับค่าพีเอชของสารละลายให้มีค่าน้อยลง
- โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ความเข้มข้น 1.25 โมลาร์ ใช้สำหรับปรับค่าพีเอชของสารละลายให้มีค่ามากขึ้น

3.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการดำเนินการวิจัย

เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย สามารถแบ่งออกเป็นกลุ่มตามลักษณะการใช้งานในแต่ละขั้นตอนการทดลอง ดังนี้

3.2.1 อุปกรณ์สำหรับเตรียมตัวอย่างก่อนการเคลือบผิว

ก) เตาอบชิ้นงาน รุ่น CARBOLITE TYPE CWF 12/13 ใช้เป็นอุปกรณ์ในกระบวนการอบชุบทางความร้อนให้กับชิ้นงานก่อนเข้าสู่กระบวนการเคลือบผิวด้วยฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์และฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรด์ ดังแสดงในรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 เตาอบชิ้นงาน

ข) เครื่องขัดผิวชิ้นงานแบบจานหมุนยี่ห้อ METKON FORCIPOL 2V GRINDER POLISHER ใช้เป็นอุปกรณ์ในการขัดหยาบและขัดละเอียดผิวชิ้นงานก่อนเข้าสู่กระบวนการเคลือบผิวด้วยโครเมียมไนไตรด์และไทเทเนียมไนไตรด์ดังแสดงในรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 เครื่องขัดผิวชิ้นงานแบบจานหมุนอีท้อ BUEHLER รุ่น ECOMET 6

ค) กระดาษทรายเบอร์ 180 320 400 600 800 1000 และ 1200 ใช้ในการขัดหยาบผิวชิ้นงาน ดังแสดงในรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 กระดาษทรายที่ใช้ในการขัดผิวชิ้นงาน

ง) เครื่องวัดความหยาบผิวแบบใช้แสงรุ่น WYKO NT1100 ยี่ห้อ VEEGO INSTRUMENT INC. ดังแสดงในรูปที่ 3.4 ใช้ในการวัดความหยาบผิวของชิ้นงานเหล็กกล้า AISI 4140 ก่อนและหลังการเคลือบผิวด้วยฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์และฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรด์ ผลที่ได้จะแสดงค่าความหยาบผิวเฉลี่ย (Ra) ของชิ้นงานและภาพลักษณะ 2 มิติและ 3 มิติ



รูปที่ 3.4 เครื่องวัดความหยาบผิวแบบใช้แสง

3.2.2 อุปกรณ์สำหรับกระบวนการเคลือบผิว

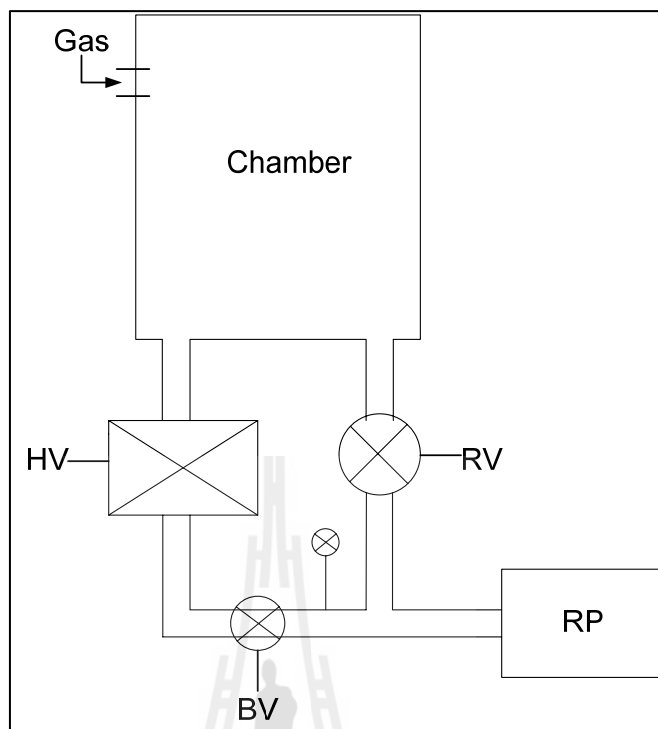
ก) เครื่องเคลือบระบบสุญญากาศระบบรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสเป็คเตอริง เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการผลิตชั้นเคลือบผิวด้วยวิธีสปัตเตอริง (sputtering) กระบวนการเคลือบด้วยไอทางกายภาพ ซึ่งติดตั้ง ณ ห้องปฏิบัติการวิจัยเทคโนโลยีสุญญากาศและฟิล์มบาง ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา ดังแสดงในรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 เครื่องเคลือบสุญญากาศระบบรีแอกตีฟดีซีแมกนีตรอนสปีดเตอร์ริง

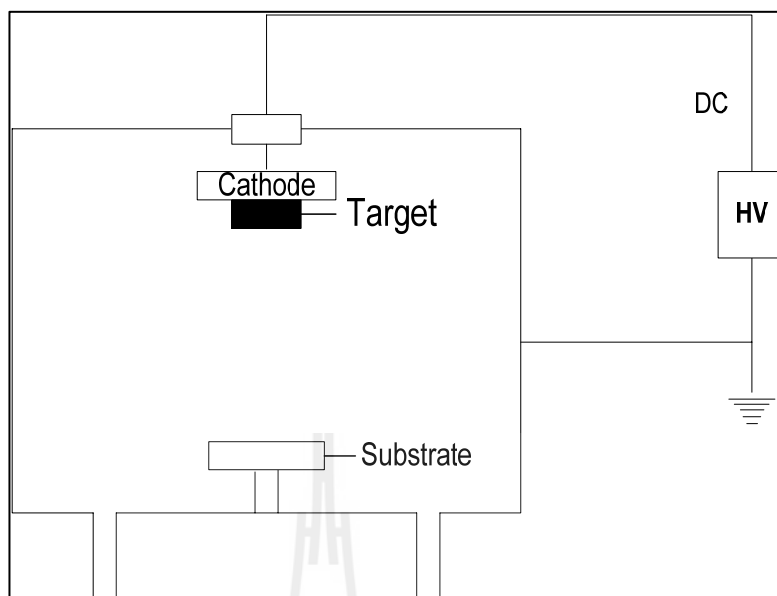
ข) เครื่องเคลือบระบบสุญญากาศระบบรีแอกตีฟดีซีแมกนีตรอนสปีดเตอร์ริงจะประกอบด้วย 2 ส่วน ได้แก่ ส่วนระบบสุญญากาศ (vacuum parts) และ ส่วนของระบบเคลือบ (coating parts) โดยมีรายละเอียดดังนี้

- ส่วนระบบสุญญากาศ ประกอบด้วย ห้องเคลือบทรงกระบอกทำจากสแตนเลส ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 353.0 มิลลิเมตร สูง 370.0 มิลลิเมตร ระบบเครื่องสูบลสุญญากาศประกอบด้วยเครื่องสูบบางแปรไอแบบระบายความร้อนด้วยน้ำและมีเครื่องสูบลโรตารีเป็นเครื่องสูบลท้าย การวัดความดันภายในภาชนะสุญญากาศใช้มาตรวัดความดันของ Balzers รุ่น TPG300 โดยใช้หัววัดแบบพิรานีรุ่น TPR010 และหัววัดแบบเพนนิ่งรุ่น IKR050 ดังแสดงในรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 ส่วนประกอบของระบบสุญญากาศ

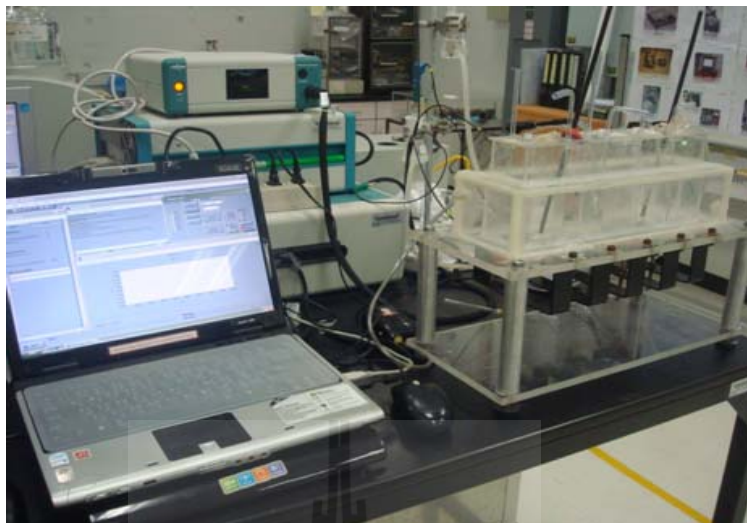
- ส่วนของระบบเคลือบ เป็นส่วนเตรียมฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์และไทเทเนียมไนไตรด์ประกอบด้วย หัวแมกนีตรอนคาโทด ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 50.0 มิลลิเมตร ระบายความร้อนด้วยน้ำติดตั้งเป้าโครเมียมและไทเทเนียม (99.97%) ที่คาโทด พร้อมภาคจ่ายไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรง ใช้แก๊สอาร์กอนความบริสุทธิ์สูง (99.999%) เป็นแก๊สสปัตเตอร์ ใช้แก๊สไนโตรเจนความบริสุทธิ์สูง (99.995%) เป็นแก๊สไวปฏิกิริยา สำหรับการจ่ายแก๊สอาร์กอนและแก๊สไนโตรเจนในกระบวนการเคลือบจะควบคุมด้วย mass flow controller ของ MKS type247D ดังแสดงในรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.7 ส่วนประกอบของระบบเคลือบผิว

3.2.3 อุปกรณ์สำหรับทดสอบการกัดกร่อน

ก) เครื่องโพเทนชิโอสแตต (potentiostat) รุ่น PGSTAT 302H ของบริษัท ECO CHEMIE B.V. KANALWEG 29-G 3526 KM UTRECHT THE NETHERLANDS เป็นเครื่องใช้ทดสอบการกัดกร่อนโดยควบคุมความต่างศักย์ให้กับระบบ โดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูปที่มีชื่อว่า general purpose electrochemical software (GPES) ที่เป็นโปรแกรมสำเร็จรูปในเครื่องโพเทนชิโอสแตต แล้วประมวลผลการทดสอบออกมาในรูปของเส้นโค้งโพลาริเซชัน หลังจากนั้นนำเส้นโค้งโพลาริเซชันหาค่าสำคัญทางด้านการกัดกร่อน เช่น ค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อน ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อน และค่าอัตราการกัดกร่อน เป็นต้น ดังแสดงในรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.8 เครื่องโพเทนชิโอสแตท

ข) อิเล็กโทรดอ้างอิง (reference electrode) คือ ซิลเวอร์ต่อซิลเวอร์คลอไรด์ (Ag/AgCl, 3M KCl) ใช้สำหรับการวัดเทียบค่าศักย์ไฟฟ้ากับอิเล็กโทรดตัวอย่างดังแสดงในรูปที่ 3.9



รูปที่ 3.9 อิเล็กโทรดอ้างอิง (reference electrode)

ค) อิเล็กโทรดวัดกระแส (counter electrode) คือ แท่งกราไฟต์ (graphite) ใช้สำหรับวัดเทียบค่ากระแสไฟฟ้ากับอิเล็กโทรดตัวอย่าง ดังแสดงในรูปที่ 3.10



รูปที่ 3.10 อิเล็กโทรดวัดกระแส (counter electrode)

จ) อิเล็กโทรดตัวอย่าง คือ ชิ้นงานเหล็กกล้า AISI 4140 ที่ไม่ถูกเคลือบผิว ชิ้นงานที่ถูกเคลือบผิวด้วยโครเมียมไนไตรด์ และชิ้นงานที่ถูกเคลือบผิวไทเทเนียมไนไตรด์ ดังแสดงในรูปที่ 3.11



รูปที่ 3.11 อิเล็กโทรดตัวอย่าง (working electrode)

3.2.4 อุปกรณ์สำหรับการวิเคราะห์และตรวจสอบพื้นผิว

ก) กล้องจุลทรรศน์แบบแสง (optical microscope) รุ่น ZIESS AX10 ใช้ในการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานก่อนและหลังกระบวนการอบชุบทางความร้อน ดังแสดงในรูปที่ 3.12



รูปที่ 3.12 กล้องจุลทรรศน์แบบแสง (optical microscope)

ข) กล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (scanning electron microscope, SEM) ใช้สำหรับตรวจสอบพื้นผิวหรือลักษณะโครงสร้างของวัสดุและชั้นเคลือบ มีกำลังขยายตั้งแต่ 20 – 30,000 เท่า และสามารถวิเคราะห์ชั้นเคลือบในแนวลึกได้กว่า 300 เท่าของกล้องจุลทรรศน์ปกติ ทำให้เป็นผลดีต่อการวิเคราะห์ผิวที่ต้องการความละเอียด โดยทั่วไป SEM มักต่อพ่วงอยู่กับการวิเคราะห์ด้วยรังสีเอกซ์ (EDX) ทั้งนี้เพื่อช่วยวิเคราะห์ชนิดของธาตุที่เป็นส่วนผสมของเนื้อวัสดุหรือพื้นผิวบริเวณที่ถูกกัดกร่อน ดังแสดงในรูปที่ 3.13



รูปที่ 3.13 กล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (scanning electron microscope, SEM)

ค) กล้องจุลทรรศน์โฟโตอิเล็กตรอนสเปกโตรสโคปี (photoelectron emission spectroscopy, PES) ซึ่งติดตั้ง ณ ระบบลำเลียงแสง 3.2a ของห้องปฏิบัติการแสงสยาม สถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน เป็นกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนที่อาศัยโฟโตอิเล็กตรอนที่หลุดจากผิวตัวอย่างเพื่อทำให้เกิดภาพนอกจากนี้ยังสามารถวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีและโครงสร้างทางผลึกของวัตถุดิบผิวของสารตัวอย่างได้อีกด้วย โดยใช้แสงซินโครตรอนในช่วงพลังงาน 40 -160 และ 220-1040 eV ใช้สำหรับการตรวจสอบและวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีและสำหรับการศึกษาโครงสร้างบริเวณพื้นผิวของวัสดุและชั้นเคลือบ โดยใช้แสงซินโครตรอนในช่วงพลังงาน 40 -160 และ 220-1040 eV ดังแสดงในรูปที่ 3.14

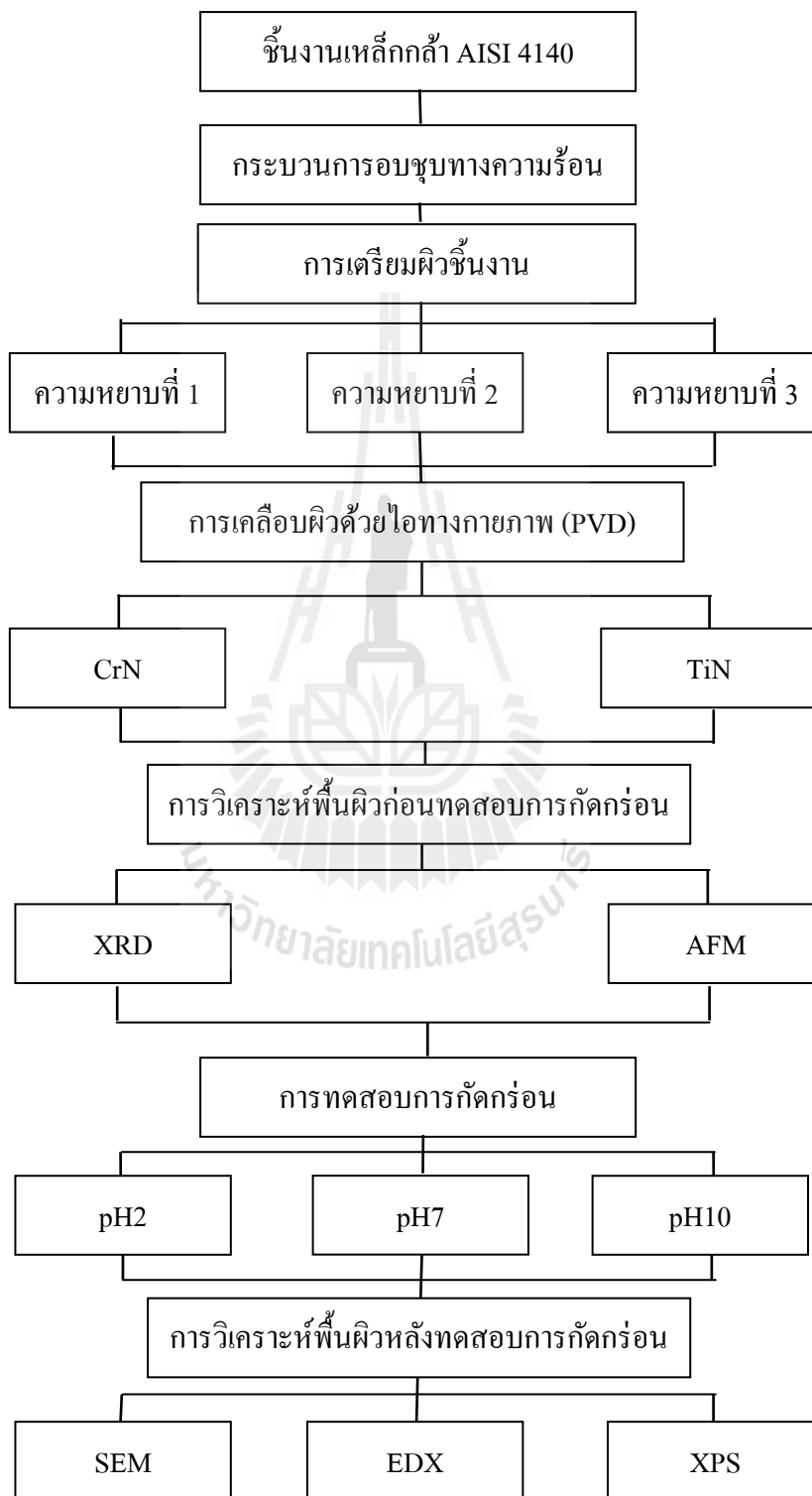


รูปที่ 3.14 กล้องจุลทรรศน์โฟโตอิเล็กตรอนสเปกโทรสโกปี
(photoelectron emission spectroscopy, PES)



3.3 ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย

ในงานวิจัยนี้มีขั้นตอนการทำวิจัยตามแผนภาพระเบียบวิธีการทำวิจัย แสดงดังรูปที่ 3.15



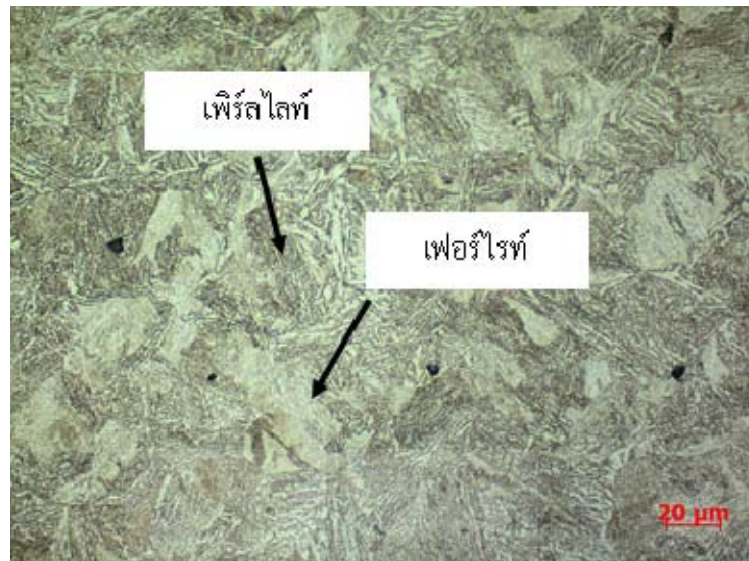
รูปที่ 3.15 แผนภาพระเบียบวิธีการทำวิจัย

3.3.1 ขั้นตอนการเตรียมชิ้นงานก่อนการเคลือบผิว

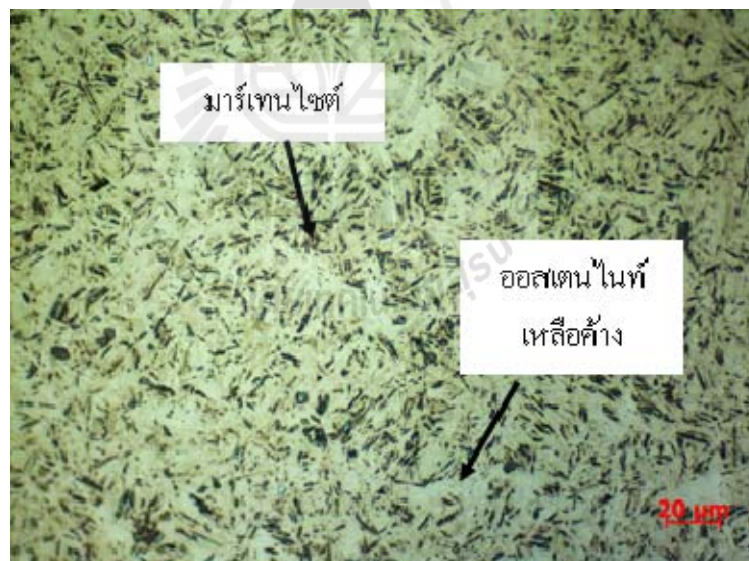
ก) การเตรียมชิ้นงานก่อนการเคลือบผิว

นำเหล็กกล้า AISI 4140 ตัดให้ได้ขนาดกว้าง 10 มิลลิเมตร ยาว 10 มิลลิเมตร และหนา 2 มิลลิเมตร จากนั้นนำชิ้นงานอบชุบทางความร้อนเพื่อเพิ่มความแข็งแรง โดยการให้ความร้อนแก่ชิ้นงานที่อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 30 นาที จากนั้นทำให้ชิ้นงานเย็นตัวอย่างรวดเร็วด้วยน้ำมัน แล้วตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคก่อนและหลังกระบวนการอบชุบทางความร้อน โดยนำชิ้นงานไปทำการขัดผิวด้วยกระดาษเบอร์ 180 320 400 600 800 1000 และ 1200 และนำชิ้นงานไปขัดผิวแบบละเอียดด้วยผ้าสักหลาดโดยใช้ผงอะลูมินาขนาด 0.5 และ 0.03 ไมครอนตามลำดับ จากนั้นทำความสะอาดด้วยน้ำสะอาดและเอทานอลตามลำดับ แล้วกัดชิ้นรอยบริเวณผิวชิ้นงานด้วยสารละลายกรดไนตริกความเข้มข้น 2 % โดยการจุ่มผิวหน้าชิ้นงานลงในสารละลายเป็นเวลาประมาณ 8 วินาที ภายหลังจากกัดผิวชิ้นงานในสารละลายแล้ว ทำการล้างชิ้นงานด้วยเอทานอลและเป่าให้แห้ง จากนั้นตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง ได้ผลดังแสดงในรูปที่ 3.16 และ 3.17 ตามลำดับ พบว่าชิ้นงานเหล็กกล้า AISI 4140 ก่อนอบชุบทางความร้อน โครงสร้างจุลภาคประกอบด้วยเฟอร์ไรท์ (ferrite) และเพิร์ลไลท์ (pearlite) และชิ้นงานเหล็กกล้า AISI 4140 หลังอบชุบทางความร้อนมีโครงสร้างจุลภาคประกอบด้วยมาร์เทนไซต์ (martensite) และออสเตนไนท์เหลือค้าง (retained austenite)





รูปที่ 3.16 โครงสร้างจุลภาคของเหล็กกล้า AISI 4140 ก่อนอบชุบทางความร้อน (กำลังขยาย 50 เท่า)



รูปที่ 3.17 โครงสร้างจุลภาคของเหล็กกล้า AISI 4140 หลังอบชุบทางความร้อน (กำลังขยาย 50 เท่า)

จากนั้นนำชิ้นงานเหล็กกล้า AISI 4140 ก่อนและหลังอบชุบทางความร้อนไปวัดความแข็งด้วยเครื่องวัดความแข็งแบบร็อคเวล (สเกลซี) ค่าความแข็งที่ได้แสดงดังตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 ค่าความแข็งของเหล็กกล้า AISI 4140 ก่อนและหลังการอบชุบทางความร้อน

	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย
ก่อนการอบชุบทางความร้อน	30.0	29.3	30.5	30.0
หลังการอบชุบทางความร้อน	57.1	56.8	56.9	57.0

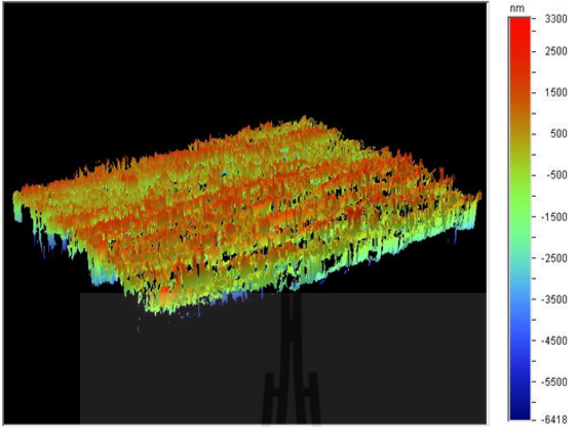
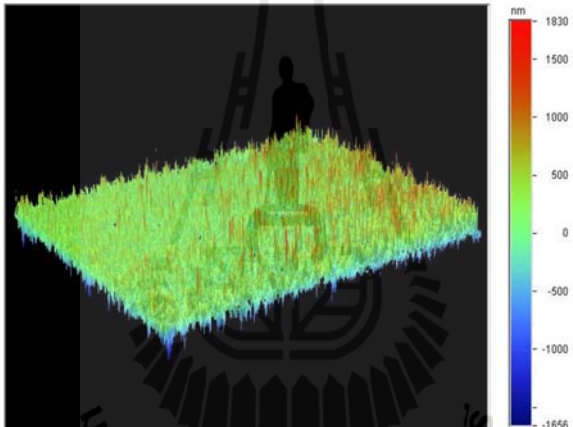
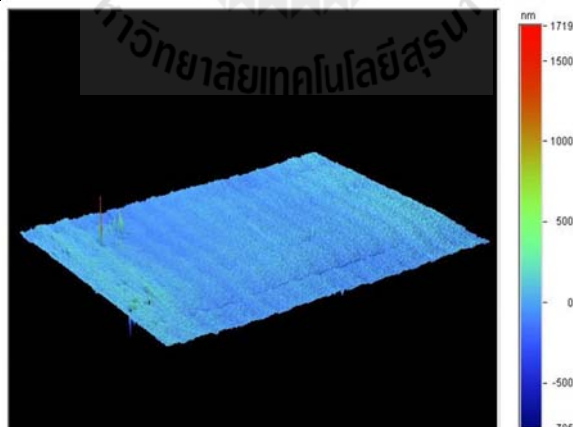
ข) การเตรียมผิวชิ้นงานก่อนการเคลือบผิว

ภายหลังจากอบชุบทางความร้อน นำชิ้นงานมาทำการเตรียมผิวชิ้นงานให้มี ความหยาบผิว (surface roughness) จำนวน 3 ค่า เพื่อศึกษาผลของความหยาบพื้นผิววัสดุก่อนการเคลือบผิวต่อคุณสมบัติการต้านทานการกัดกร่อนของชั้นเคลือบ โดยใช้กระดาษทรายขัดชิ้นงานดังต่อไปนี้

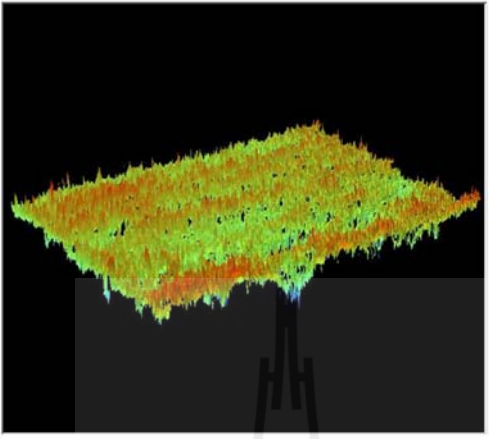
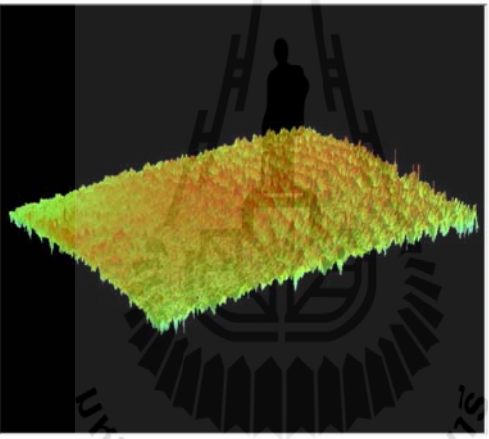
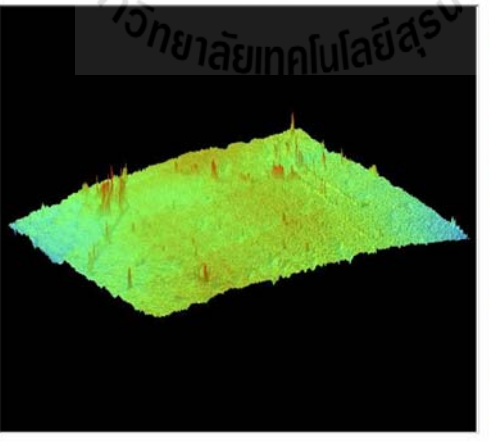
- ความหยาบที่ 1 ขัดด้วยกระดาษทรายเบอร์ 180 กรณีนี้เป็นผิวที่หยาบที่สุด
- ความหยาบที่ 2 ขัดด้วยกระดาษทรายเบอร์ 180 320 400 และ 600 ตามลำดับ กรณีนี้เป็นผิวที่ละเอียดปานกลาง
- ความหยาบที่ 3 ขัดด้วยกระดาษทรายเบอร์ 180 320 400 600 800 1000 1200 และผงอะลูมินา ตามลำดับ กรณีนี้เป็นผิวที่ละเอียดที่สุด

หลังจากนั้นทำการล้างชิ้นงานด้วยน้ำสะอาด เอทานอลและเป่าให้แห้งตามลำดับ ทำการวัดความหยาบพื้นผิวของชิ้นงานทั้ง 3 สภาวะก่อนและภายหลังจากการเคลือบผิวด้วยเครื่องวัดความหยาบผิวแบบ a profile-meter (veeco) model จากการทดสอบวัดความหยาบผิวของชิ้นงานที่ไม่ถูกเคลือบผิว ชิ้นงานที่ถูกเคลือบผิวด้วยฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์ และชิ้นงานถูกเคลือบผิวด้วยฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรด์ จะได้ผลของลักษณะภาพพื้นผิวแบบสามมิติและค่าความหยาบผิวเฉลี่ย (Ra) ดังแสดงในตารางที่ 3.3 3.4 และ 3.5 ตามลำดับ

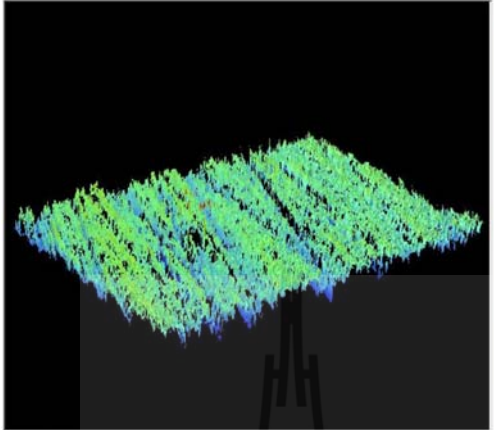
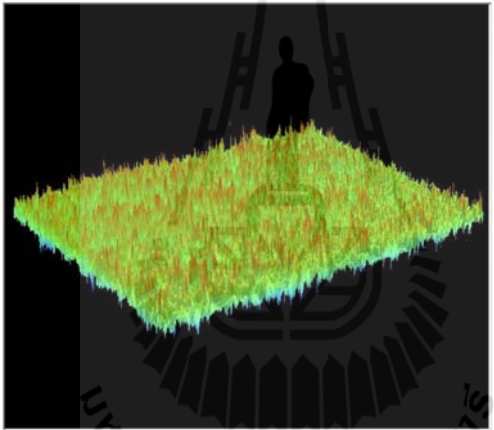
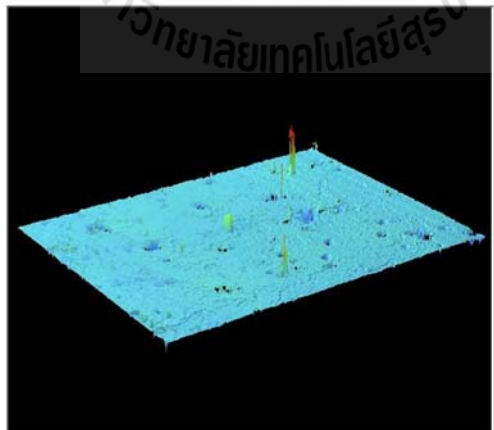
ตารางที่ 3.3 ผลการวัดค่าความหยาบพื้นผิวของเหล็กกล้า AISI 4140 ก่อนการเคลือบผิว

ชิ้นงาน	ภาพพื้นผิวแบบสามมิติ	ค่าความหยาบผิวเฉลี่ย (นาโนเมตร)
ชิ้นงาน B1		563.13
ชิ้นงาน B2		200.12
ชิ้นงาน B3		31.14

ตารางที่ 3.4 ผลการวัดค่าความหยาบพื้นผิวของชิ้นงานหลังการเคลือบผิวด้วยฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์

ชิ้นงาน	ภาพพื้นผิวแบบสามมิติ	ค่าความหยาบผิวเฉลี่ย (นาโนเมตร)
ชิ้นงาน C1		294.32
ชิ้นงาน C2		165.56
ชิ้นงาน C3		30.92

ตารางที่ 3.5 ผลการวัดค่าความหยาบพื้นผิวของชิ้นงานหลังการเคลือบผิวด้วยฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรด์

ชิ้นงาน	ภาพพื้นผิวแบบสามมิติ	ค่าความหยาบผิวเฉลี่ย (นาโนเมตร)
ชิ้นงาน T1		552.79
ชิ้นงาน T2		202.40
ชิ้นงาน T3		73.55

3.3.2 ขั้นตอนกระบวนการเคลือบผิวไอทางกายภาพ

กระบวนการเคลือบฟิล์มบาง โครเมียมไนไตรด์และฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรด์มีตัวแปรในกระบวนการเคลือบดังแสดงในตารางที่ 3.6 และ 3.7 ตามลำดับ และมีรายละเอียดของขั้นตอนการเคลือบดังนี้

ก) ก่อนการเคลือบผิว นำวัสดุรองรับมาเคลือบฟิล์มต้องนำมาทำความสะอาดเพื่อขจัดสิ่งสกปรก ได้แก่ คราบฝุ่น ไขมันสารอินทรีย์ต่าง ๆ ก่อน ซึ่งจะทำให้ได้ผิววัสดุรองรับที่ได้มีความสะอาด ทำให้ฟิล์มที่เคลือบยึดติดแน่นลงบนผิวหน้าของวัสดุรองรับ สำหรับการทำความสะอาดวัสดุรองรับ เริ่มจากนำวัสดุรองรับไปล้างด้วยไตรคลอโรเอทิลีน (trichloroethylene) โดยใช้อัลตราโซนิคส์ เป็นเวลา 5 นาที จากนั้นนำไปล้างด้วยอะซิโตนโดยใช้อัลตราโซนิคส์เป็นเวลา 5 นาที แล้วนำไปล้างต่อด้วยไอโซโพรพานอล (isopropanol) โดยใช้อัลตราโซนิคส์อีก 5 นาที นำวัสดุรองรับขึ้นด้วยคีมคีบ เป่าด้วยลมร้อนให้แห้ง

ข) นำวัสดุรองรับที่เตรียมไว้วางบนแท่นวางวัสดุรองรับ แล้วปิดฝาภาชนะสุญญากาศ

ค) ลดความดันภายในภาชนะสุญญากาศเท่ากับ 5×10^{-5} มิลลิบาร์ กำหนดเป็นค่าความดันพื้นของระบบก่อนทำการเคลือบฟิล์ม บันทึกค่าความดันที่อ่านได้

ง) ทำความสะอาดหน้าเป่าสารเคลือบด้วยกระบวนการ pre-sputtering เป็นเวลา 3 นาที

จ) ขั้นตอนนี้เป็นการเคลือบฟิล์มโดยเริ่มจากการปล่อยแก๊สอาร์กอนและแก๊สไนโตรเจนเข้าสู่ภาชนะสุญญากาศ ตามค่าที่กำหนดไว้ในเงื่อนไขการทดลอง

ฉ) จ่ายศักย์ไฟฟ้าลบให้แก่คาโทด จนเกิดโกลว์ดีสชาร์จ (ชัตเตอร์ยังคงปิดอยู่) เมื่อความต่างศักย์ไฟฟ้าที่จ่ายให้คาโทดและกระแสน้ำไอที่วัดได้ไม่เปลี่ยนแปลง จะเริ่มการเคลือบฟิล์มบาง โดยเปิดชัตเตอร์ที่ปิดหน้าเป่าออก เพื่อเริ่มกระบวนการเคลือบฟิล์มลงบนวัสดุรองรับ พร้อมทั้งบันทึกผลค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า ค่ากระแสไฟฟ้า และความดันรวมที่เกิดขึ้นขณะเริ่มเคลือบฟิล์ม และทำการเคลือบฟิล์มตามเวลาที่กำหนด

ช) หลังจากเสร็จสิ้นกระบวนการเคลือบฟิล์ม ปิดแหล่งจ่ายไฟ ปิดแก๊สอาร์กอน ปิดแก๊สไนโตรเจน และปล่อยอากาศเข้าไปในภาชนะสุญญากาศเพื่อนำวัสดุรองรับออก

ตารางที่ 3.6 ตัวแปรในการเคลือบฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์ (CrN) ในกระบวนการเคลือบผิวแบบไอทางกายภาพ

ตัวแปร	ค่ากำหนด
เป้าสารเคลือบ	โครเมียม
ความดันฐาน (มิลลิบาร์)	5.0×10^{-3}
ความดันขณะเคลือบ (มิลลิบาร์)	3.5×10^{-5}
กำลังไฟฟ้า (วัตต์)	350
กระแสไฟฟ้า (มิลลิแอมป์)	800
ระยะห่างระหว่างเป้าสารเคลือบถึงวัสดุรองรับ (เซนติเมตร)	15
ความต่างศักย์ไบแอส (โวลต์)	-456
เวลาในการเคลือบ (นาที)	40
อุณหภูมิขณะเคลือบผิว	อุณหภูมิห้อง
ความหนาของฟิล์ม (นาโนเมตร)	914

ตารางที่ 3.7 ตัวแปรในการเคลือบฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรด์ (TiN) ในกระบวนการเคลือบผิวแบบไอทางกายภาพ

ตัวแปร	ค่ากำหนด
เป้าสารเคลือบ (Target)	ไทเทเนียม
ความดันฐาน (มิลลิบาร์)	5.0×10^{-3}
ความดันขณะเคลือบ (มิลลิบาร์)	2.5×10^{-5}
กำลังไฟฟ้า (วัตต์)	350
กระแสไฟฟ้า (มิลลิแอมป์)	800
ระยะห่างระหว่างเป้าสารเคลือบถึงวัสดุรองรับ (เซนติเมตร)	10
ความต่างศักย์ไบแอส (โวลต์)	-369
เวลาในการเคลือบ (นาที)	60
อุณหภูมิขณะเคลือบผิว	อุณหภูมิห้อง
ความหนาของฟิล์ม (นาโนเมตร)	1200

3.3.3 ขั้นตอนการตรวจสอบพื้นผิวก่อนทดสอบการกัดกร่อน

- ก) นำชิ้นงานที่ผ่านการเคลือบผิวด้วยไอทางกายภาพไปตรวจวัดโครงสร้างผลึกด้วยเทคนิค X-ray diffraction (XRD)
- ข) นำชิ้นงานที่ผ่านการเคลือบผิวด้วยไอทางกายภาพไปตรวจสอบขนาดเกรนและความหนาของชั้นฟิล์มด้วยเทคนิค atomic force microscopy (AFM)
- ค) นำชิ้นงานที่ผ่านการเคลือบผิวด้วยไอทางกายภาพไปตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคตามแนวภาคตัดขวางด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกวาด (scanning electron microscope, SEM)

3.3.4 ขั้นตอนการทดสอบการกัดกร่อน

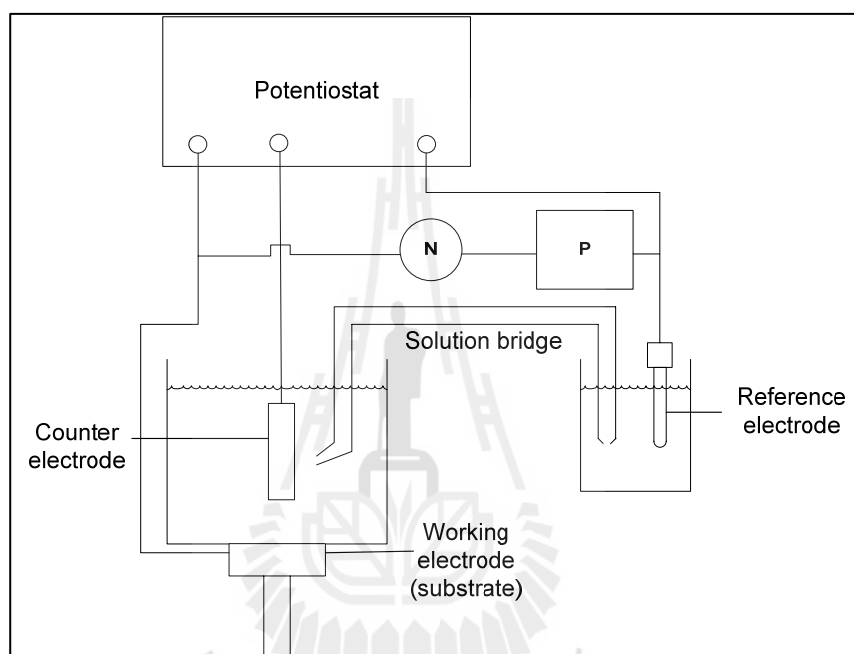
นำชิ้นงานที่ยังไม่ถูกเคลือบผิว ชิ้นงานที่ถูกเคลือบผิวด้วยโครเมียมไนไตรด์ และชิ้นงานที่ถูกเคลือบผิวด้วยโครเมียมไนไตรด์ไปทดสอบการกัดกร่อนด้วยเครื่องโพเทนชิโอสแตต (potentiostat) ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 3.5 % โดยนำหนักที่มีค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) เท่ากับ 2 7 และ 10 โดยมีการควบคุมตัวแปรในการทดลอง ได้แก่

- เวลาที่ใช้ในการที่ทำให้ออกซิเจนในอากาศอิ่มตัวในสารละลายเท่ากับ 5 นาที
- อัตราการแสกนเท่ากับ 1 มิลลิโวลต์ต่อวินาที
- อุณหภูมิที่ใช้ในการทดลองเท่ากับ 27 องศาเซลเซียส
- ความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์เท่ากับ 3.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก
- เวลาที่ใช้ในการแช่ชิ้นงานก่อนการสแกนเท่ากับ 45 นาที

ขั้นตอนในการทดสอบการกัดกร่อน มีรายละเอียดดังนี้

- ก) เตรียมสารละลายโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) 3.5% โดยน้ำหนัก ปริมาตร 300 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อการทดลอง 1 ครั้ง เมื่อใช้ทดสอบแล้วเปลี่ยนสารละลายใหม่ทุกครั้ง
- ข) หลังจากเตรียมสารละลายเรียบร้อยแล้ว ทำการปรับค่า pH ของสารละลายให้มีค่าเท่ากับ 2 ด้วยกรดไฮโดรคลอริก (HCl) ความเข้มข้น 3 โมลาร์ประมาณ 6 หยด และทำการปรับค่าพีเอช ของสารละลายให้มีค่าเท่ากับ 7 และ 10 โดยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) เข้มข้น 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ประมาณ 5-6 หยด ต่อสารละลาย 300 ลูกบาศก์เซนติเมตร
- ค) ใช้เครื่องพ่นอากาศพ่นอากาศลงในสารละลายเป็นเวลา 5 นาที เพื่อให้ ออกซิเจนอิ่มตัวในสารละลาย
- ง) หลังจากนั้นทำการติดตั้งเซลล์ทดสอบการกัดกร่อน เริ่มต้นจากการติดตั้งชิ้นงานทดสอบเข้ากับเซลล์ใส่สารละลายโดยให้ชิ้นงานสัมผัสกับสารละลายเป็นพื้นที่ 0.85 ตาราง

เซนติเมตร ซึ่งงานทดสอบจะเป็นอิเล็กโทรดตัวอย่าง (working electrode) ต่อเข้ากับอิเล็กโทรดอ้างอิง (reference electrode) ที่เป็น Ag/AgCl และใช้แท่งกราไฟต์เป็นอิเล็กโทรดกระแส (counter electrode) จุ่มลงในสารละลาย นอกจากนี้ทำการพ่นอากาศลงในสารละลายตลอดช่วงการทำการทดลอง ต่อขั้วอิเล็กโทรดอ้างอิง (reference electrode) และอิเล็กโทรดกระแส (counter electrode) เข้ากับเครื่องโพเทนชิโอสเตท และโปรแกรมคอมพิวเตอร์ประมวลผล ดังแสดงในรูปที่ 3.18



รูปที่ 3.18 แผนภาพการต่อเซลล์ทดสอบการกัดกร่อน

จ) เปิดเครื่อง potentiostat และคอมพิวเตอร์ประมวลผล โดยใช้โปรแกรม a μ -autolab software (general purpose electrochemical, GPES) ในการทดสอบ เริ่มการทดสอบโดยขั้นตอนแรกเป็นการวัดค่าศักย์ไฟฟ้าวงจรเปิด (open circuit potential, OCP) และต่อด้วยขั้นตอนที่สองเป็นการวัดเส้นโพลาไรเซชัน ทำการป้อนศักย์ไฟฟ้าด้วยอัตราการป้อนเท่ากับ 1 มิลลิโวลต์ต่อวินาที ผลที่ได้จะเป็นลักษณะการวัดเส้นโพลาไรเซชัน (polarization) ซึ่งจะบ่งบอกถึงพฤติกรรมการกัดกร่อนและค่าสำคัญทางการกัดกร่อนของชิ้นงานทดสอบ โดยมีเงื่อนไขและจำนวนของชิ้นงานที่ไม่ถูกเคลื่อนผิว ชิ้นงานที่ถูกเคลื่อนผิวด้วยโครเมียมไนไตรด์และไทเทเนียมไนไตรด์ในการทดสอบการกัดกร่อน (ในงานวิจัยจะทำการทดสอบการกัดกร่อนแต่ละสภาวะจำนวน 2 ชิ้นแล้วนำค่าเฉลี่ยไปทำการวิเคราะห์ผล) ดังแสดงในตารางที่ 3.8 3.9 และ 3.10 ตามลำดับ

ตารางที่ 3.8 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 3.9 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 3.10 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

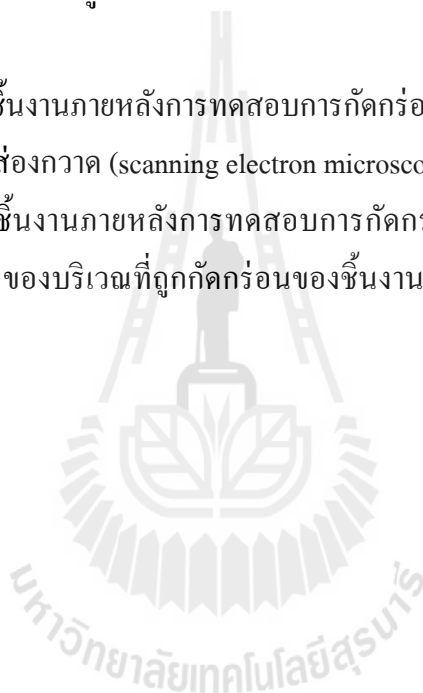
ฉ) แปลความหมายของเส้นกราฟโพลาไรเซชันที่ได้จากการทดลองด้วยการวิเคราะห์แบบ tafel เพื่อหาค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อน (corrosion potential, E_{corr}) ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อน (corrosion current density, I_{corr}) และค่าอัตราการกัดกร่อน (corrosion rate, R_{mmy})

3.3.5 ขั้นตอนการตรวจสอบพื้นผิวหลังทดสอบการกัดกร่อน

ภายหลังการทดสอบการกัดกร่อน ทำการตรวจสอบพื้นผิว บริเวณที่ถูกกัดกร่อน ส่วนผสมทางเคมีของชิ้นงานที่ไม่ผ่านการเคลือบผิวและผ่านการเคลือบผิวด้วยโครเมียมไตรด์และไทเทเนียมไตรด์ก่อนการตรวจสอบทำการล้างชิ้นงานด้วยอะซิโตนและเอทานอลเพื่อกำจัดคราบไขมันออก โดยเฉพาะสำหรับกรณีการตรวจสอบด้วยเทคนิค XPS นอกจากทำความสะอาดโดยการล้างด้วยด้วยอะซิโตนและเอทานอลแล้ว จำเป็นจะต้องมีการทำความสะอาดด้วยเครื่องอัลตราโซนิคเพิ่มเติมอีกด้วย เนื่องจากในระบบการตรวจสอบนั้นเป็นระบบที่มีความเป็นสุญญากาศสูง จึงต้องการชิ้นงานที่มีความสะอาดสูง หลังจากนั้นนำชิ้นงานไปทำการตรวจสอบด้วยเทคนิคต่างๆ ดังนี้

ก) นำชิ้นงานภายหลังการทดสอบการกัดกร่อนทำการตรวจสอบพื้นผิว (surface) ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกวาด (scanning electron microscope, SEM) ร่วมด้วยเทคนิค EDX

ข) นำชิ้นงานภายหลังการทดสอบการกัดกร่อนทำการตรวจสอบผสมทางเคมี (chemical composition) ของบริเวณที่ถูกกัดกร่อนของชิ้นงานด้วยเทคนิค X-ray photoelectron spectroscopy (XPS)



บทที่ 4

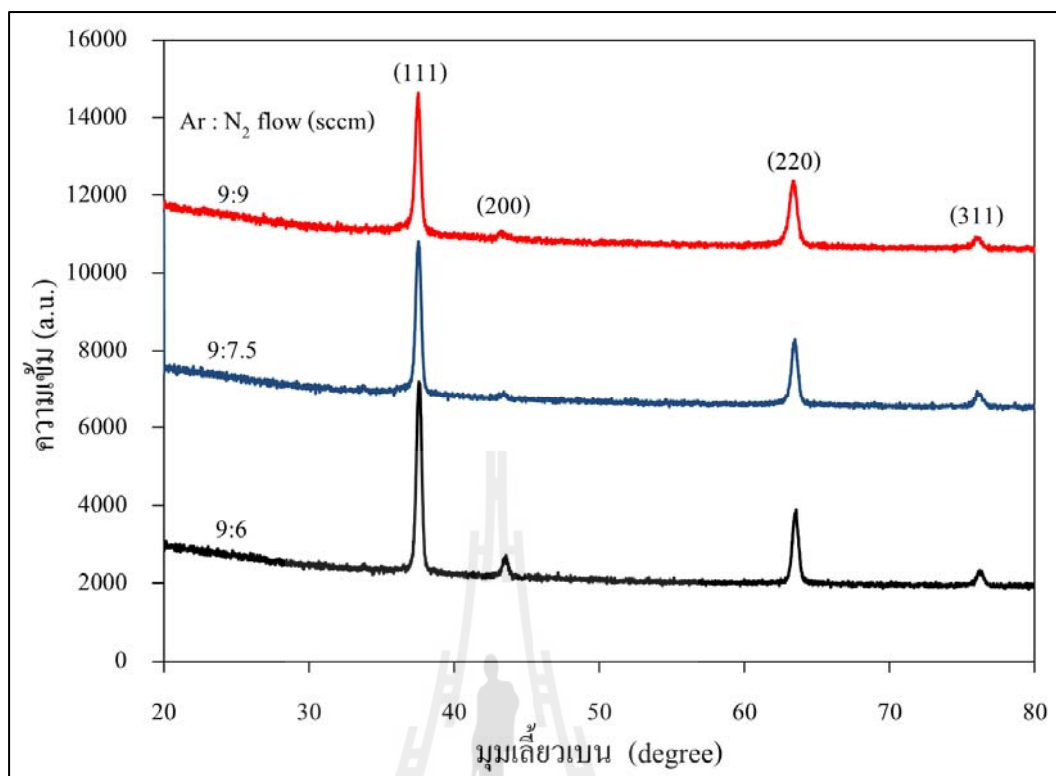
ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผลการทดลอง

4.1 คุณลักษณะของฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์ที่เคลือบบนเหล็กกล้า AISI 4140

ก่อนการทดสอบการกัดกร่อน

4.1.1 การวิเคราะห์คุณลักษณะของฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์ที่เคลือบบนเหล็กกล้า AISI 4140 ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (XRD)

รูปที่ 4.1 แสดงผลการวิเคราะห์คุณลักษณะของฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์ที่เคลือบบนเหล็กกล้า AISI 4140 ด้วยกระบวนการเคลือบไอทางกายภาพที่มีการควบคุมอัตราการไหลมวลของแก๊สอาร์กอนต่อแก๊สไนโตรเจนที่แตกต่างกัน ได้แก่ อัตราการไหลมวลของแก๊สอาร์กอนต่อแก๊สไนโตรเจนเท่ากับ 9:9 9:7.5 และ 9:6 จากผลการวิเคราะห์พบการปรากฏของสารประกอบโครเมียมไนไตรด์ที่ทุกอัตราการไหลมวลของแก๊สอาร์กอนต่อแก๊สไนโตรเจน โดยสารประกอบโครเมียมไนไตรด์ที่ปรากฏมีโครงสร้างผลึกที่มีการจัดเรียงตัวของอะตอมในระนาบ (111) ที่มีมุม 37.38 องศา ระนาบ (220) ที่มีมุม 63.20 องศา และระนาบ (311) ที่มีมุม 75.30 องศา แต่อย่างไรก็ตามพบว่าที่อัตราการไหลมวลของแก๊สอาร์กอนต่อแก๊สไนโตรเจนเท่ากับ 9:6 แสดงให้เห็นการปรากฏของฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์ชัดเจนที่สุดเมื่อเทียบกับที่เงื่อนไขอื่นๆ และนอกจากนี้ยังพบว่าการจัดเรียงตัวของอะตอมในระนาบ (111) มีค่าความเข้มของพลังงานสูงที่สุด ดังนั้นจากผลการวิเคราะห์แสดงให้เห็นว่าอัตราการไหลมวลของแก๊สอาร์กอนต่อแก๊สไนโตรเจนมีผลต่อโครงสร้างผลึกของฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์ และในงานวิจัยนี้ฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์ที่ได้มีโครงสร้างผลึกที่มีการจัดเรียงอะตอมในระนาบ (111) เป็นส่วนใหญ่ จากการวิเคราะห์ผลดังกล่าวสอดคล้องกับรายงานวิจัยของ (Novakovic, M., Popovic, M., Bibic, N., 2010; Feng, H.P., Cheng, H.H., Jung, K.L., Yih H.S., 2003; Hanand, S., Lin, J.H., Tsai, S.H., Chung, S.C., Wang, D.Y., Lu, F.H., Shih, H.C., 2000)



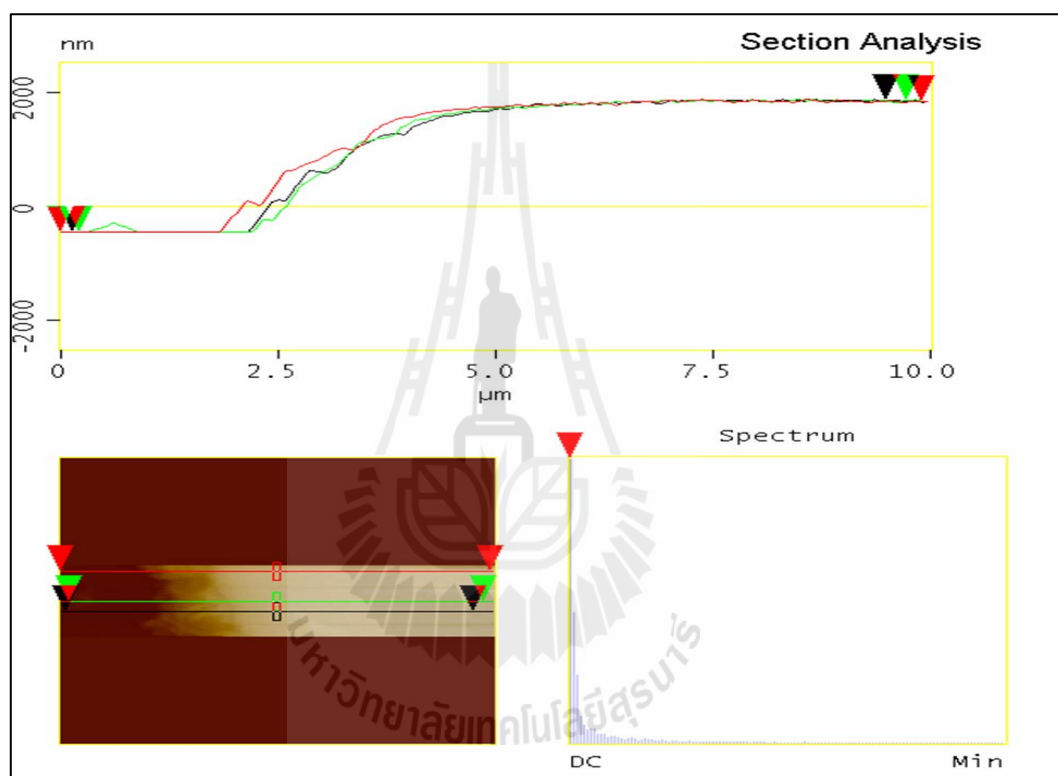
รูปที่ 4.1 การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์

4.1.2 การวิเคราะห์คุณลักษณะของฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์ที่เคลือบบนเหล็กกล้า AISI 4140 ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแรงอะตอม (AFM)

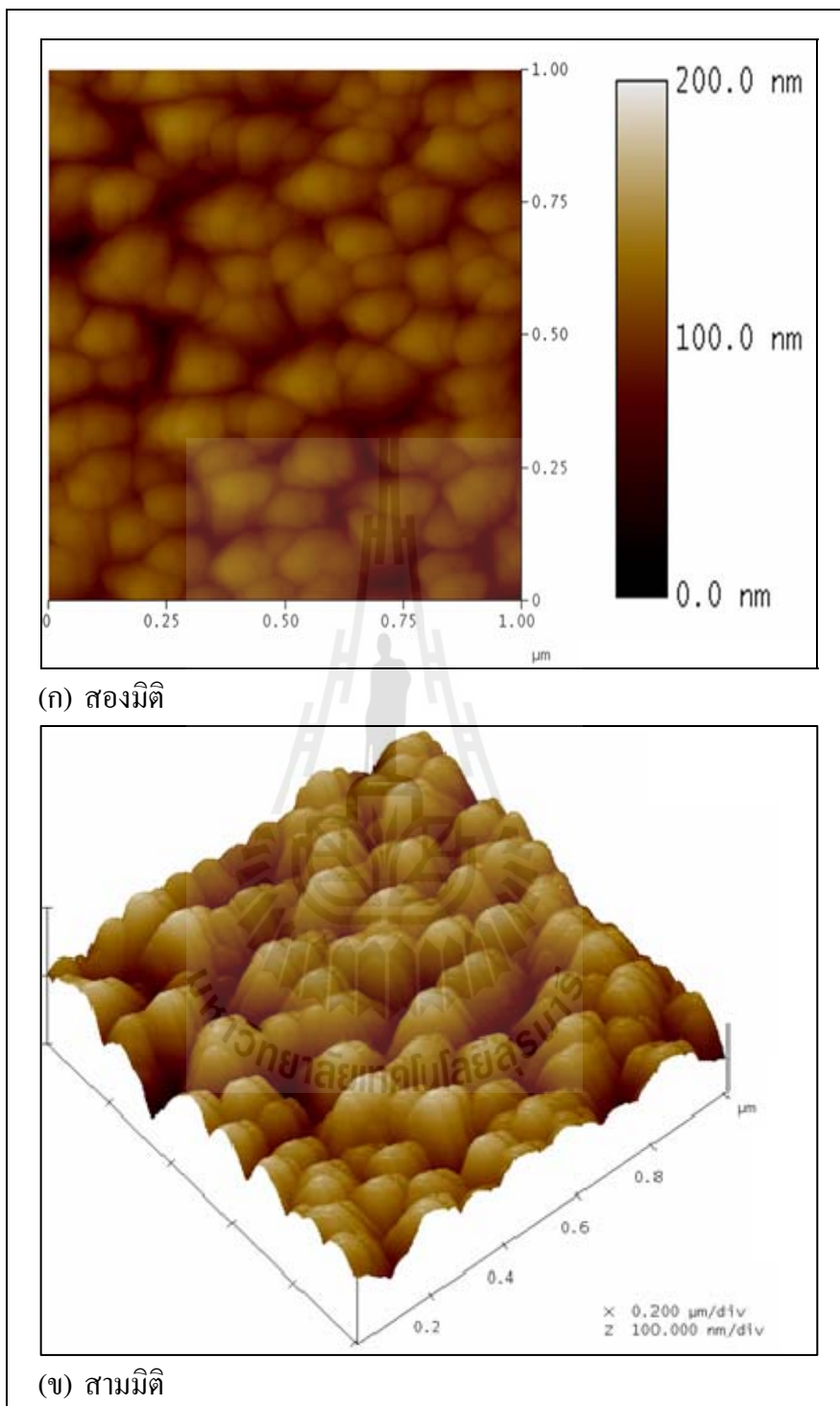
รูปที่ 4.2 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างระยะของการสแกนกับความหนาของชั้นฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแรงอะตอม ในการทดลองจะทำการสแกนทั้งหมด 3 ครั้ง ในแต่ละครั้งจะสแกนเป็นระยะเท่ากับ 10 ไมโครเมตร แล้วหาค่าเฉลี่ยของความหนาของชั้นฟิล์ม จากการวิเคราะห์พบว่าฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์มีความหนาเฉลี่ยประมาณ 0.9 ไมครอนเมตร

รูปที่ 4.3 แสดงการวิเคราะห์ลักษณะเกรนของฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์ที่เคลือบบนเหล็กกล้า AISI 4140 ในลักษณะภาพสองมิติและสามมิติด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแรงอะตอม พบว่าเกรนของฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์มีลักษณะกลม มีการจัดเรียงตัวที่หนาแน่นและสม่ำเสมอ และนอกจากนี้ได้มีการวิเคราะห์คำนวณหาขนาดเกรนเฉลี่ยของฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแรงอะตอม โดยเลือกบริเวณที่จะวัดขนาดเกรนแล้วลากเส้นทั้งหมด 3 เส้น เป็นระยะ 1 ไมโครเมตร พร้อมกับใช้โปรแกรมในการคำนวณเพื่อหาค่าเฉลี่ย ดังแสดงในรูปที่ 4.4

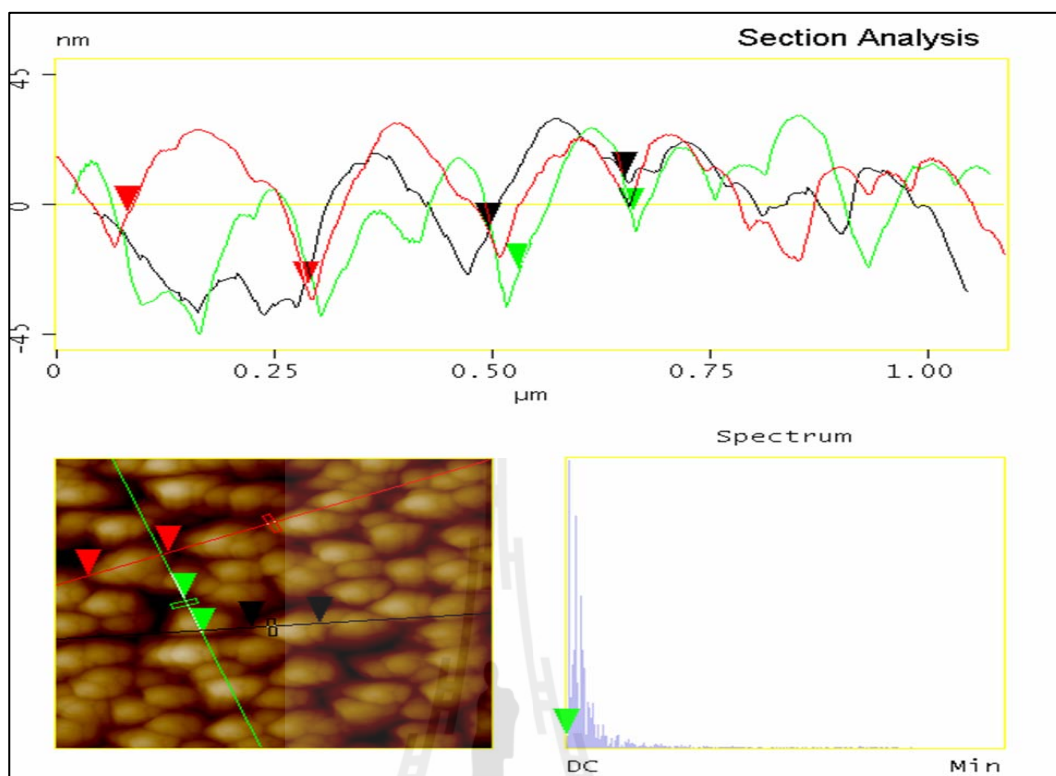
พบว่าขนาดเกรนเฉลี่ยของฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์มีค่าเท่ากับ 14.6 นาโนเมตร ซึ่งในงานวิจัยนี้ จะมีการควบคุมค่าความหนาของฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์ให้คงที่ตลอดการทดลอง และเมื่อพิจารณาบริเวณพื้นที่ดำในรูปที่ 4.3 ซึ่งมีลักษณะเป็นร่องลึกปรากฏในเนื้อฟิล์ม ร่องลึกที่ปรากฏในเนื้อฟิล์มนี้คือ ข้อบกพร่องชนิดหนึ่ง que เรียกว่า รุพรุณ โดยรุพรุณที่เกิดขึ้นในเนื้อฟิล์มนี้อาจจะส่งผลต่อคุณสมบัติการต้านทานการกัดกร่อนของฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์ (Ahn, S.H., Choi, Y.S., Kim, J.G., Han, J.G., 2002)



รูปที่ 4.2 การหาค่าความหนาของฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์



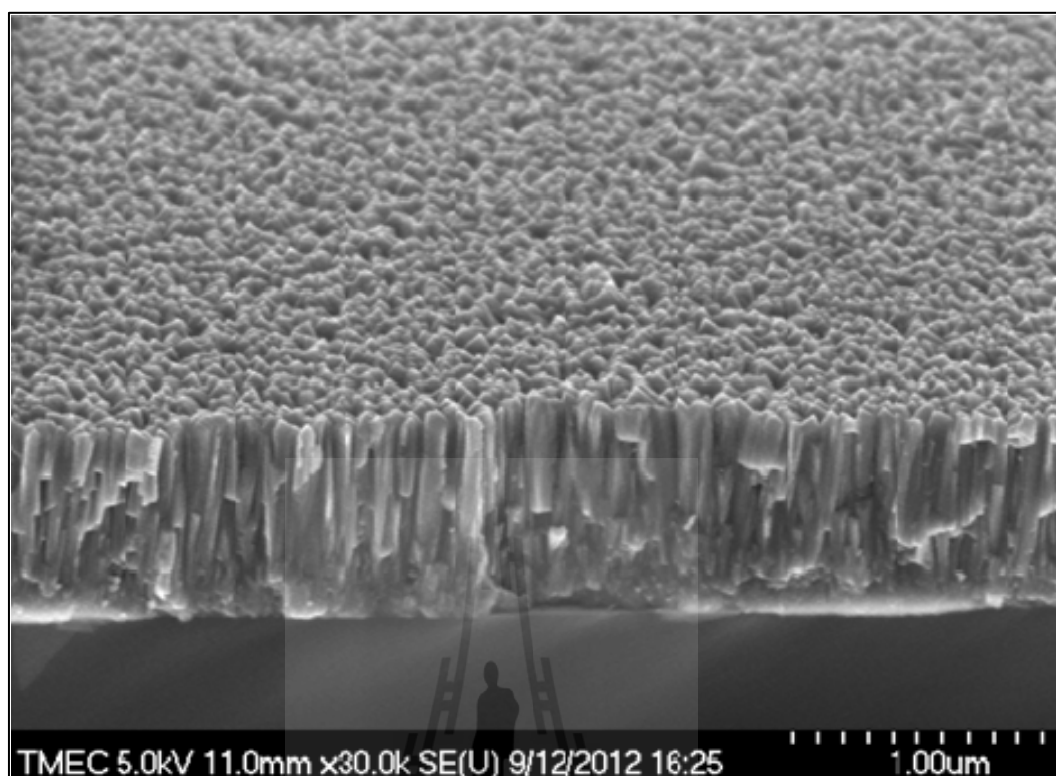
รูปที่ 4.3 ลักษณะเกรนของชิ้นงานเหล็กกล้า AISI 4140 ที่ถูกเคลือบผิวด้วยฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์



รูปที่ 4.4 การหาขนาดเกรนของฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์

4.1.3 การวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคตามแนวภาคตัดขวางของฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์ที่เคลือบบนเหล็กกล้า AISI 4140 ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกวาด (scanning electron microscope, SEM)

รูปที่ 4.5 แสดงโครงสร้างจุลภาคตามแนวภาคตัดขวางของฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์ที่เคลือบบนเหล็กกล้า AISI 4140 พบว่าฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์มีลักษณะเกรนเป็นแท่ง (columnar) ลักษณะเกรนมีการจัดเรียงตัวที่หนาแน่น และมีปริมาณรูพรุนบนพื้นผิวน้อย (สามารถพิจารณาควบคู่กับผลทางด้านกล้องจุลทรรศน์แบบแรงอะตอม)



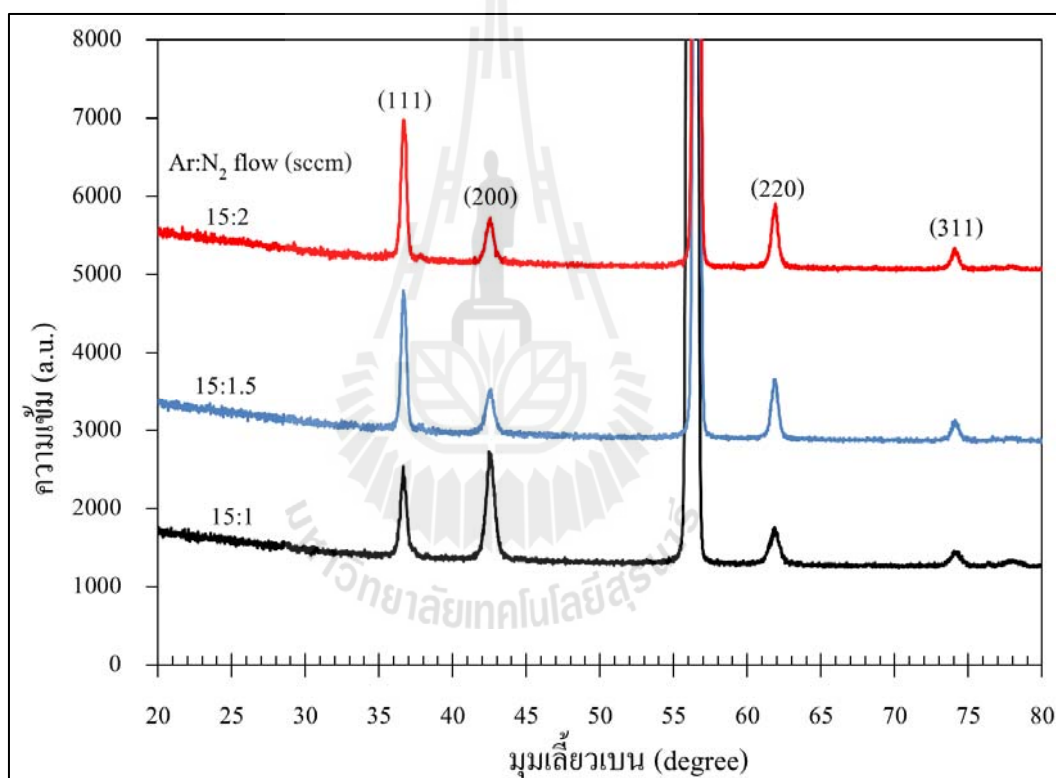
รูปที่ 4.5 โครงสร้างจุลภาคตามแนวภาคตัดขวางของฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์
ที่เคลือบบนเหล็กกล้า AISI 4140

4.2 คุณลักษณะของฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรด์ที่เคลือบบนเหล็กกล้า AISI 4140 ก่อนการทดสอบการกัดกร่อน

4.2.1 การวิเคราะห์คุณลักษณะของฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรด์ที่เคลือบบนเหล็กกล้า AISI 4140 ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (XRD)

รูปที่ 4.6 แสดงผลการวิเคราะห์คุณลักษณะของฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรด์ที่เคลือบบนเหล็กกล้า AISI 4140 ด้วยกระบวนการเลี้ยวเบนไอทางกายภาพที่มีการควบคุมอัตราการไหลมวลของแก๊สอาร์กอนต่อแก๊สไนโตรเจนที่แตกต่างกัน ได้แก่ อัตราการไหลของแก๊สอาร์กอนต่อแก๊สไนโตรเจนเท่ากับ 15:2 15:1.5 และ 15:1 จากการวิเคราะห์พบการปรากฏของสารประกอบไทเทเนียมไนไตรด์ที่ทุกอัตราการไหลของแก๊สอาร์กอนต่อแก๊สไนโตรเจน โดยสารประกอบไทเทเนียมไนไตรด์ที่ปรากฏเป็นโครงสร้างผลึกที่มีการจัดเรียงตัวของอะตอมในระนาบ (111) ที่มีมุม 36.68 องศา ระนาบ (200) ที่มีมุม 42.06 องศา ระนาบ (220) ที่มีมุม 61.70 องศา และระนาบ (331) ที่มีมุม 73.78 องศา แต่อย่างไรก็ตามพบว่าที่ค่าอัตราการไหลของแก๊สอาร์กอนต่อแก๊สไนโตรเจนเท่ากับ

15:2 แสดงให้เห็นการปรากฏของสารประกอบไทเทเนียมไนไตรด์ชัดเจนที่สุดเมื่อเทียบกับที่อื่น ๆ และนอกจากนี้ยังพบว่าการจัดเรียงตัวของอะตอมในระนาบ (111) มีค่าความเข้มของพลังงานสูงที่สุด ดังนั้นจากผลการวิเคราะห์แสดงให้เห็นว่าอัตราการไหลมวลของแก๊สอาร์กอนต่อแก๊สไนโตรเจนมีผลต่อโครงสร้างผลึกของฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรด์ และในงานวิจัยนี้ฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรด์ที่ได้จากกระบวนการเคลือบไอทางกายภาพมีโครงสร้างผลึกที่มีการจัดเรียงตัวของอะตอมในระนาบ (111) เป็นส่วนใหญ่ จากการวิเคราะห์ผลดังกล่าวสอดคล้องกับรายงานวิจัยของ (Fengqun, L., Zhiming, Y., 2001; Franco, C.V., Fontana, L.C., Bechi, D., Martinelli, A.E., Muzart, J.L.R., 1998)

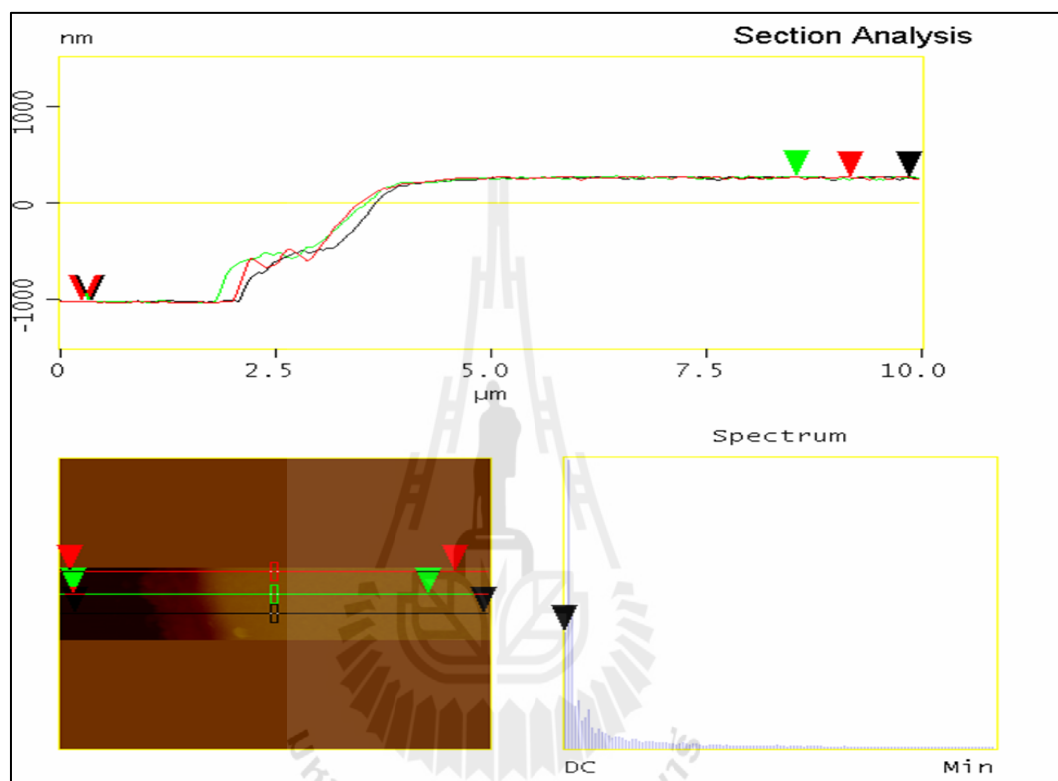


รูปที่ 4.6 การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรด์

4.2.2 การวิเคราะห์คุณลักษณะของฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรด์ที่เคลือบบนเหล็กกล้า AISI 4140 ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแรงอะตอม (AFM)

รูปที่ 4.7 แสดงผลการวิเคราะห์หาค่าความหนาของชั้นฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรด์ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแรงอะตอม ในการทดลองจะทำการสแกนทั้งหมด 3 ครั้ง ในแต่

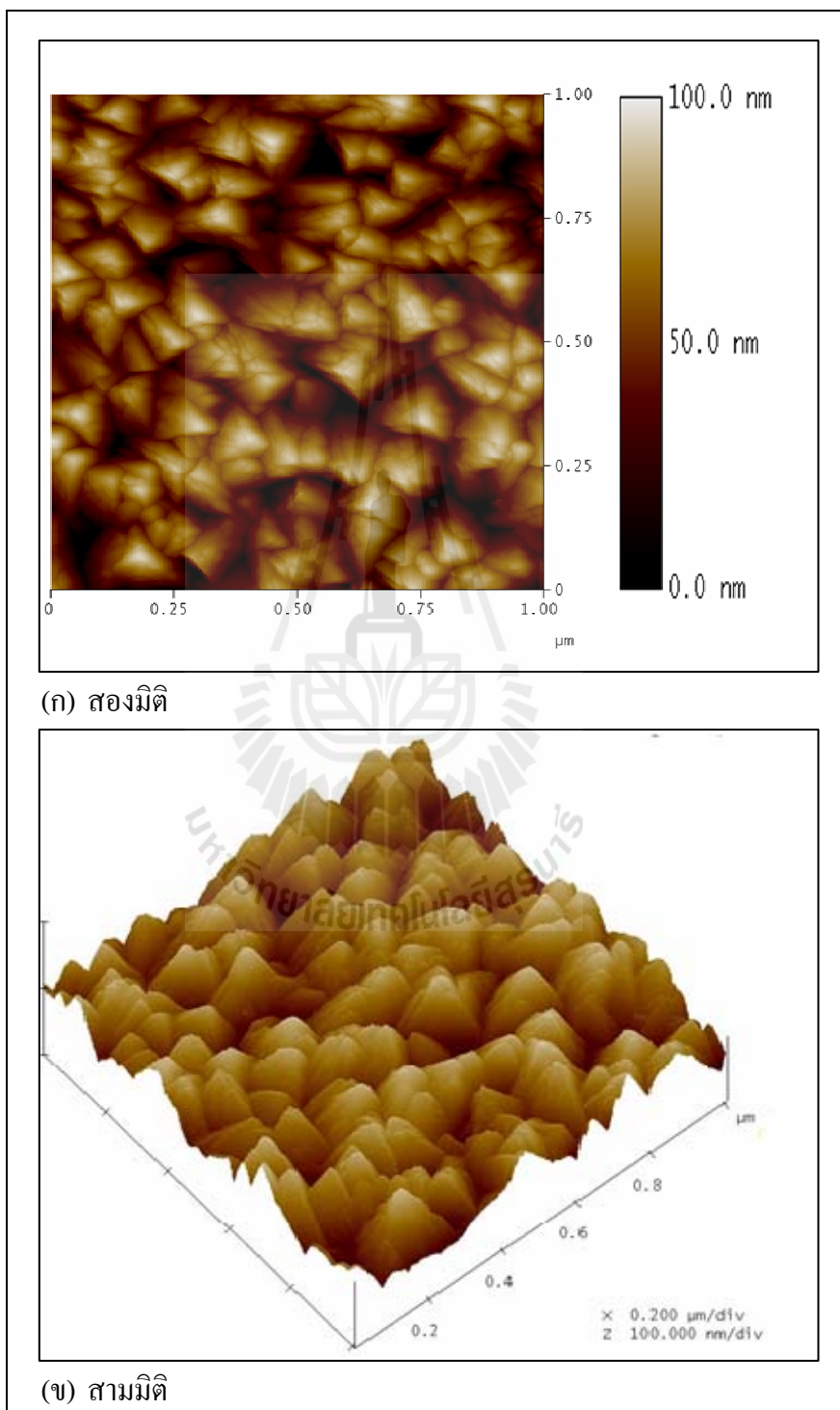
ละครั้งจะสแกนเป็นระยะเท่ากับ 10 ไมโครเมตรเช่นเดียวกับกรณีฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์แล้วหาค่าเฉลี่ยของความหนาของชั้นฟิล์ม จากการวิเคราะห์พบว่าฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรด์มีความหนาเฉลี่ยประมาณ 1.2 ไมโครเมตร ซึ่งในงานวิจัยนี้จะมีการควบคุมค่าความหนาของฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรด์ให้คงที่ตลอดการทดลอง



รูปที่ 4.7 การหาค่าความหนาของฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรด์

รูปที่ 4.8 แสดงการวิเคราะห์ลักษณะเกรนของฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรด์ที่เคลือบบนเหล็กกล้า AISI 4140 ในลักษณะภาพสองมิติและสามมิติด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแรงอะตอม พบว่าเกรนของฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรด์มีลักษณะเป็นแท่งยาว (columnar) และมีการจัดเรียงตัวที่ไม่สม่ำเสมอ และพบบริเวณพื้นสีดำซึ่งมีลักษณะเป็นร่องลึกปรากฏในเนื้อฟิล์ม ซึ่งร่องลึกที่ปรากฏในเนื้อฟิล์มนี้อาจเป็นข้อบกพร่องของเนื้อฟิล์ม เช่น รูพรุนหรือรูโพรง เป็นต้น เช่นเดียวกับในฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์ แต่พบว่าข้อบกพร่องในฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรด์มีปริมาณที่มากกว่าในฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์ โดยลักษณะโครงสร้างและข้อบกพร่องนี้อาจส่งผล

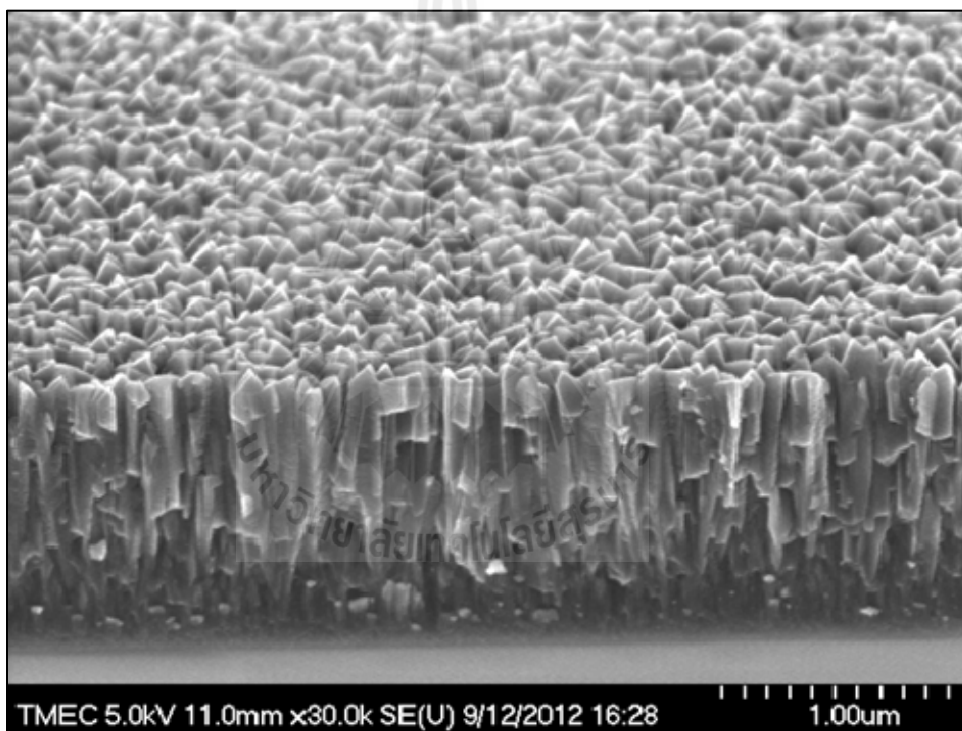
ต่อคุณสมบัติการต้านทานการกัดกร่อนของฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรด์ (Rudenja, S., Kulu, P., Tallimets E., Mikli, V., Straede C.A.,1999)



รูปที่ 4.8 ลักษณะเกรนของฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรด์ที่เคลือบบนเหล็กกล้า AISI 4140

4.2.3 การวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคตามแนวภาคตัดขวางฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรด์ที่เคลือบบนเหล็กกล้า AISI 4140 ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกวาด (scanning electron microscope, SEM)

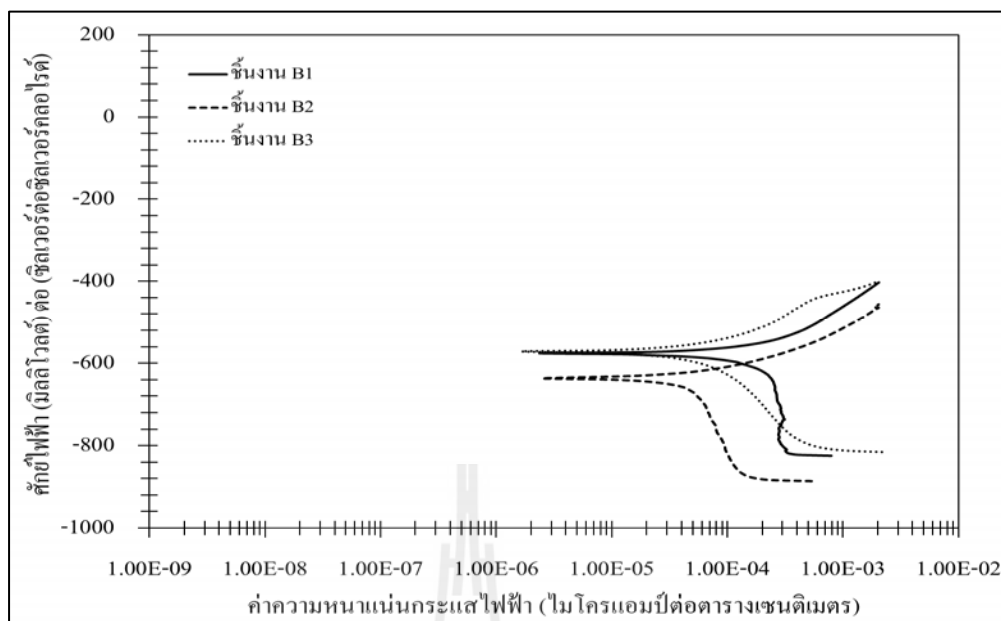
รูปที่ 4.9 แสดงโครงสร้างจุลภาคตามแนวภาคตัดขวางของฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรด์ที่เคลือบบนเหล็กกล้า AISI 4140 พบว่าฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรด์มีลักษณะเกรนเป็นแท่ง (columnar) เช่นเดียวกันกับกรณีฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์ แต่เกรนมีลักษณะการจัดเรียงตัวที่ไม่หนาแน่น มีความไม่สม่ำเสมอ และมีปริมาณรูพรุนบนพื้นผิวมากกว่าฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์ (สามารถพิจารณาควบคู่กับผลทางด้านกล้องจุลทรรศน์แบบแรงอะตอม)



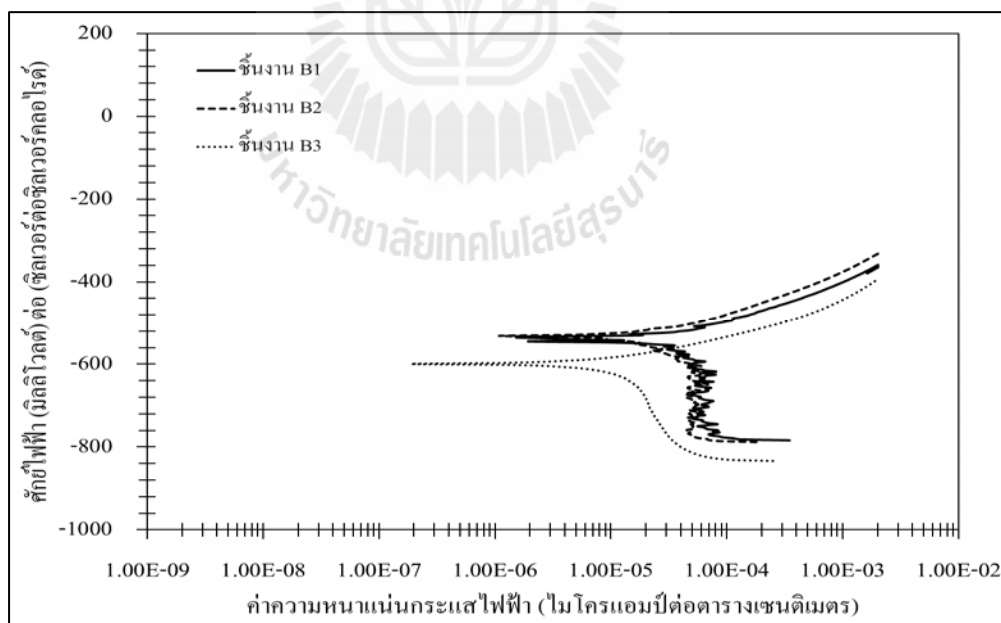
รูปที่ 4.9 โครงสร้างจุลภาคตามแนวภาคตัดขวางของฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรด์ที่เคลือบบนเหล็กกล้า AISI 4140

4.3 พฤติกรรมการกัดกร่อน

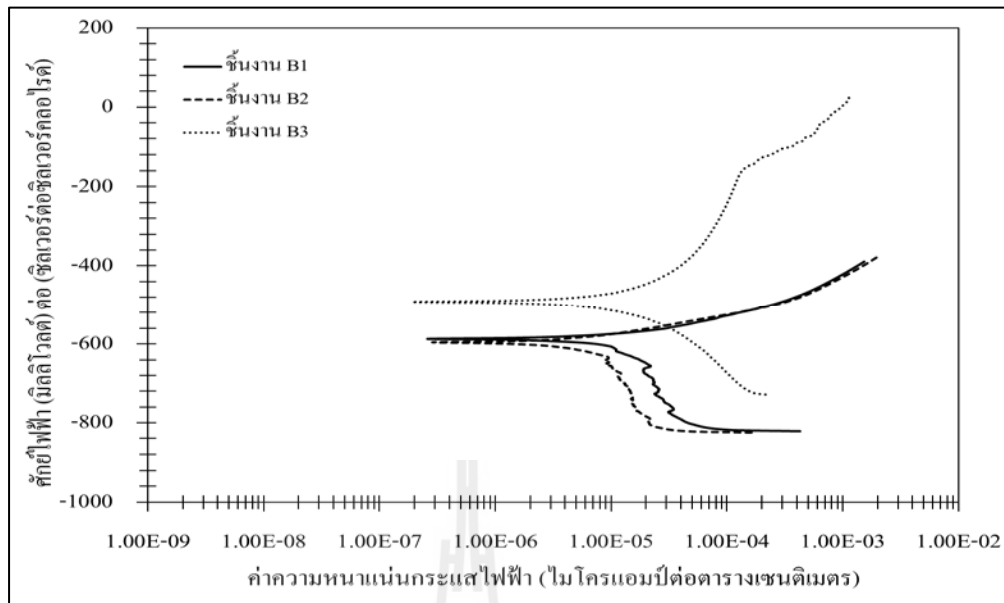
จากผลการทดลองพฤติกรรมการกัดกร่อนของชิ้นงานเหล็กกล้า AISI 4140 ที่ไม่ถูกเคลือบผิว (ชิ้นงาน B1 B2 และ B3) ชิ้นงานเหล็กกล้า AISI 4140 ที่ถูกเคลือบผิวด้วยฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์ (ชิ้นงาน C1 C2 และ C3) และชิ้นงานเหล็กกล้า AISI 4140 ที่ถูกเคลือบผิวด้วยฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรด์ (ชิ้นงาน T1 T2 และ T3) ที่มีค่าความหนาของฟิล์มของเหล็กกล้า AISI 4140 แตกต่างกันด้วยวิธีทางเคมีไฟฟ้าในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้นร้อยละ 3.5 โดยน้ำหนัก ที่ค่าพีเอชเท่ากับ 2.7 และ 10 จะได้ผลการทดลองแสดงดังตัวอย่างเส้นโค้งโพลาริเซชัน ดังแสดงในรูปที่ 4.10 ถึง 4.18 ตามลำดับ พบว่าค่าศักย์ไฟฟ้าที่ได้จากการทดลองจะอยู่ในช่วงระหว่าง -1000 ถึง 200 มิลลิโวลต์ และค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าอยู่ในช่วงระหว่าง 10^{-9} ถึง 10^{-2} แอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร และพบว่าพฤติกรรมการกัดกร่อนของชิ้นงานเหล็กกล้า AISI 4140 มีการเปลี่ยนแปลงเมื่อทำการเคลือบฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์และฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรด์บนผิวชิ้นงาน AISI 4140 นอกจากนี้ยังพบว่าพฤติกรรมการกัดกร่อนของชิ้นงานทั้งหมดมีการเปลี่ยนแปลงตามค่าพีเอชของสารละลายที่ใช้ในการทดสอบและความหนาของเหล็กกล้า AISI 4140 ก่อนการเคลือบผิวอย่างชัดเจน จากเส้นโค้งโพลาริเซชันของชิ้นงานทั้งหมดนี้สามารถนำมาหาค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อน (corrosion potential, E_{corr}) ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อน (corrosion current density, I_{corr}) และสามารถนำค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อนที่ได้ไปคำนวณเพื่อหาค่าอัตราการกัดกร่อน (corrosion rate, R_{mmy}) ได้ผลดังแสดงในตารางที่ 4.1 โดยค่าที่แสดงในตารางที่ 4.1 เป็นค่าเฉลี่ยที่ได้จากการทดลองทั้งหมดจำนวน 2 ครั้ง (ตัวอย่างการหาค่าต่างๆเหล่านี้ และข้อมูลทั้งหมดแสดงภาคผนวก ก และ ข ตามลำดับ)



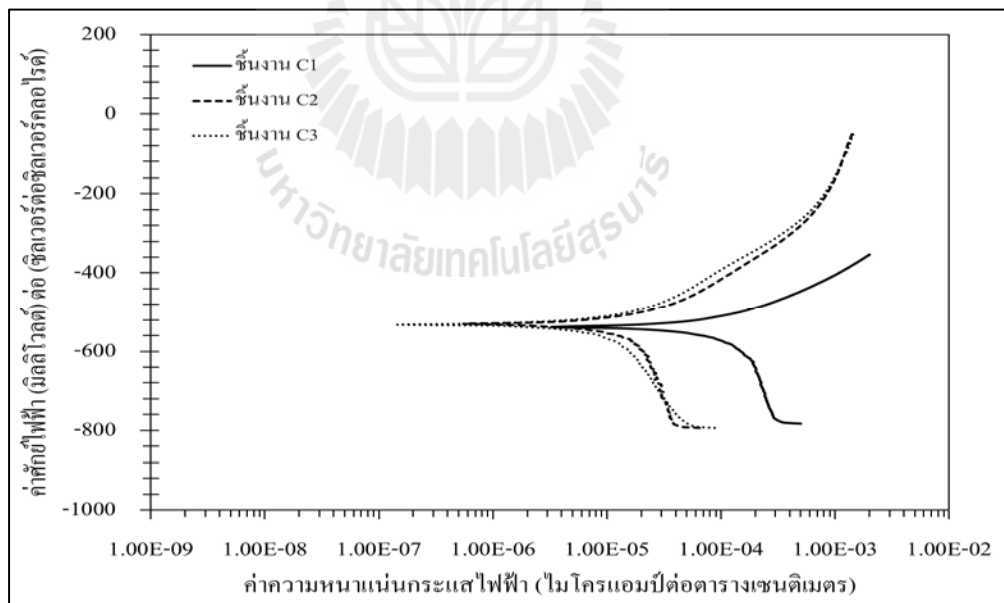
รูปที่ 4.10 เส้นโค้งโพลาริเซชันของชิ้นงานเหล็กกล้า AISI 4140 ที่ไม่ถูกเคลือบผิวในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้นร้อยละ 3.5 โดยน้ำหนักที่ค่าพีเอช 2



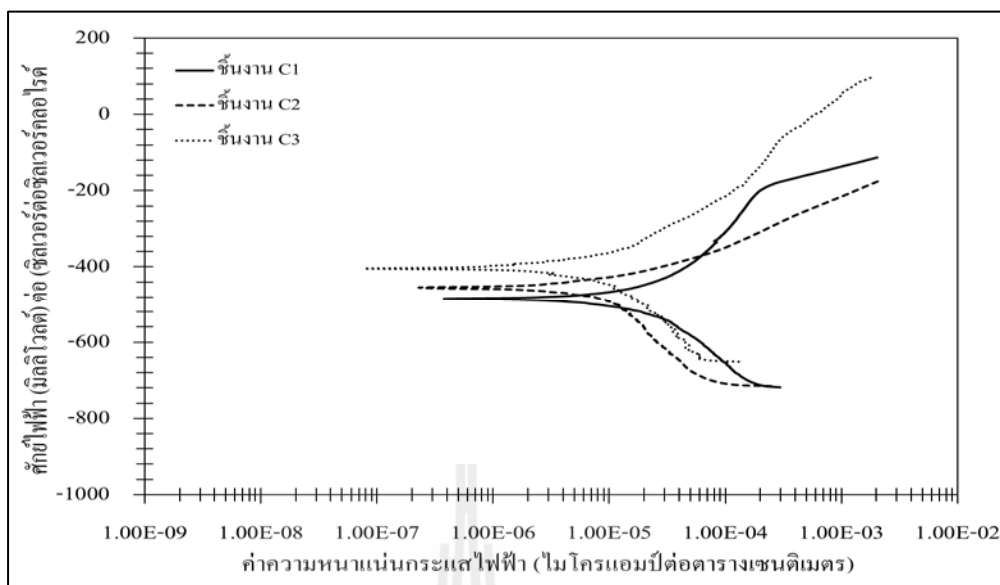
รูปที่ 4.11 เส้นโค้งโพลาริเซชันของชิ้นงานเหล็กกล้า AISI 4140 ที่ไม่ถูกเคลือบผิวในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้นร้อยละ 3.5 โดยน้ำหนักที่ค่าพีเอช 7



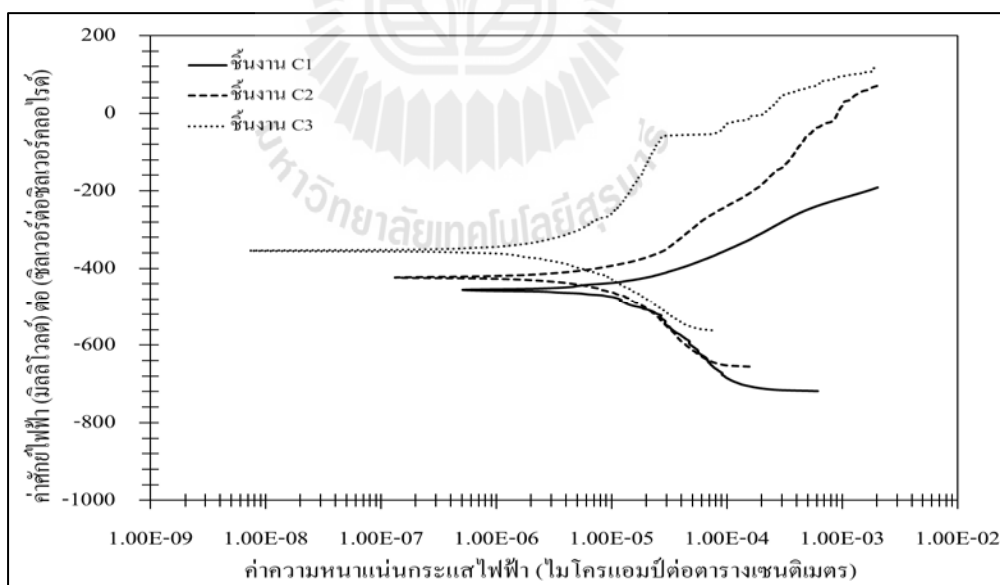
รูปที่ 4.12 เส้นโค้งโพลาไรเซชันของชิ้นงานเหล็กกล้า AISI 4140 ที่ไม่ถูกเคลือบผิวในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้นร้อยละ 3.5 โดยน้ำหนักที่ค่าพีเอช 10



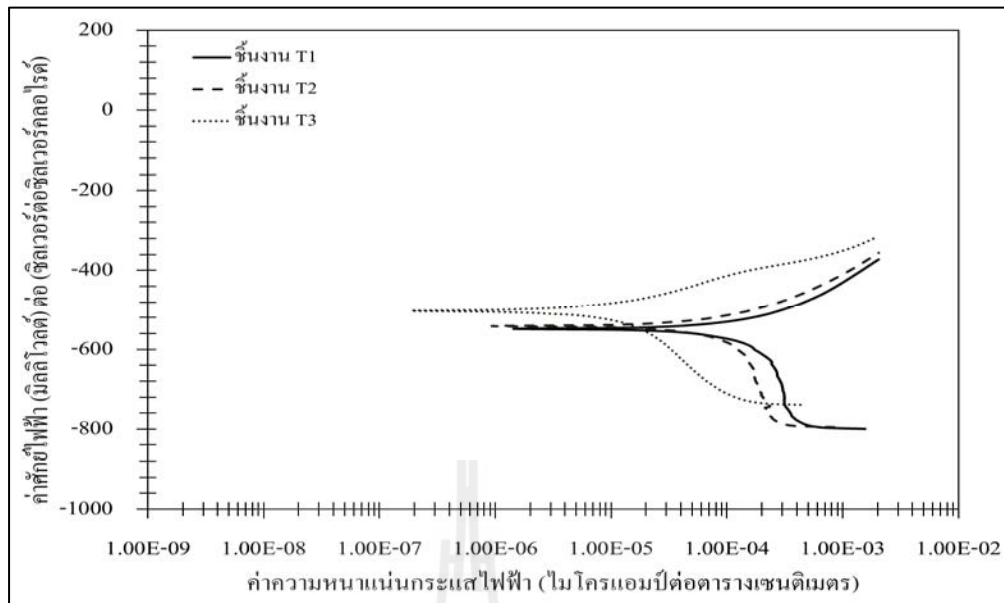
รูปที่ 4.13 เส้นโค้งโพลาไรเซชันของชิ้นงานเหล็กกล้า AISI 4140 ที่ถูกเคลือบผิวด้วยฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้นร้อยละ 3.5 โดยน้ำหนักที่ค่าพีเอช 2



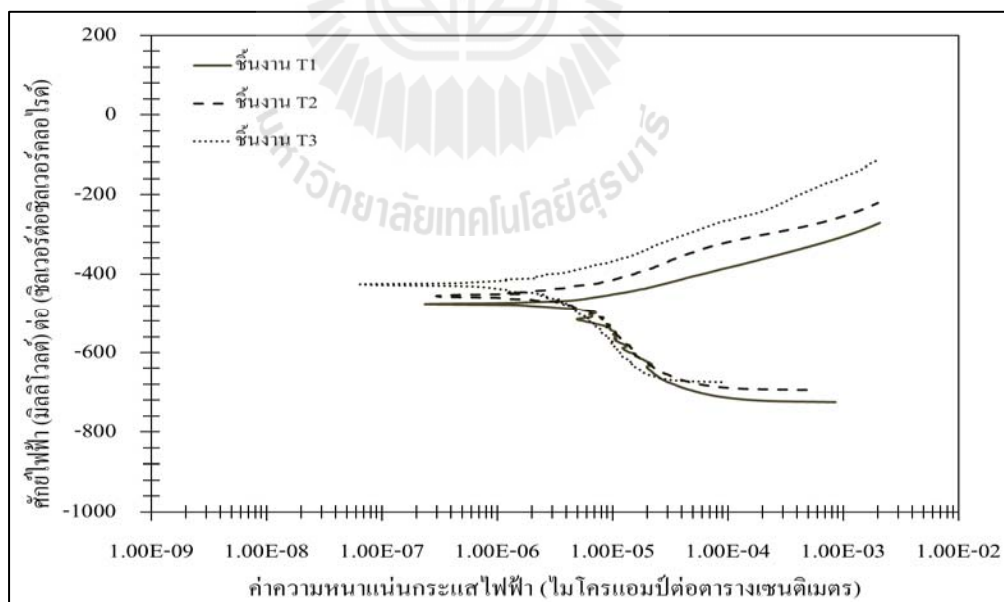
รูปที่ 4.14 เส้นโค้งโพลาริเซชันของชิ้นงานเหล็กกล้า AISI 4140 ที่ถูกเคลือบผิวด้วยฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ ความเข้มข้นร้อยละ 3.5 โดยน้ำหนักที่ค่าพีเอช 7



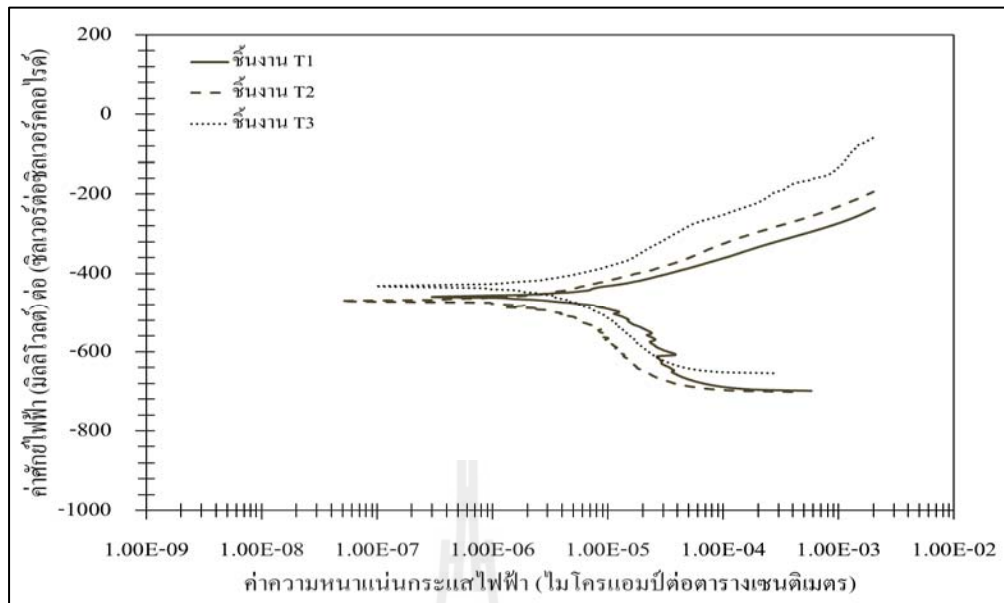
รูปที่ 4.15 เส้นโค้งโพลาริเซชันของชิ้นงานเหล็กกล้า AISI 4140 ที่ถูกเคลือบผิวด้วยฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ ความเข้มข้นร้อยละ 3.5 โดยน้ำหนักที่ค่าพีเอช 10



รูปที่ 4.16 เส้นโค้งโพลาริเซนชันของชิ้นงานเหล็กกล้า AISI 4140 ที่ถูกเคลือบผิวด้วยฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรด์ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ ความเข้มข้นร้อยละ 3.5 โดยน้ำหนักที่ค่าพีเอช 2



รูปที่ 4.17 เส้นโค้งโพลาริเซนชันของชิ้นงานเหล็กกล้า AISI 4140 ที่ถูกเคลือบผิวด้วยฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรด์ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ ความเข้มข้นร้อยละ 3.5 โดยน้ำหนักที่ค่าพีเอช 7



รูปที่ 4.18 เส้นโค้งโพลาริเซชันของชิ้นงานเหล็กกล้า AISI 4140 ที่ถูกเคลือบผิวด้วยฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรด์ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ ความเข้มข้นร้อยละ 3.5 โดยน้ำหนักที่ค่าพีเอช 10



ตารางที่ 4.1 ค่าที่ได้จากเส้นโพลาริเซชันของชิ้นงานเหล็กกล้า AISI 4140 ที่ไม่ถูกเคลือบผิว ชิ้นงานเหล็กกล้า AISI 4140 ที่ถูกเคลือบผิวด้วยฟิล์มบาง โครเมียมไนไตรด์และชิ้นงานเหล็กกล้า AISI 4140 ที่ถูกเคลือบผิวด้วยฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรด์ในสารละลาย โซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้นร้อยละ 3.5 โดยน้ำหนักที่มีค่าพีเอชเท่ากับ 2.7 และ 10

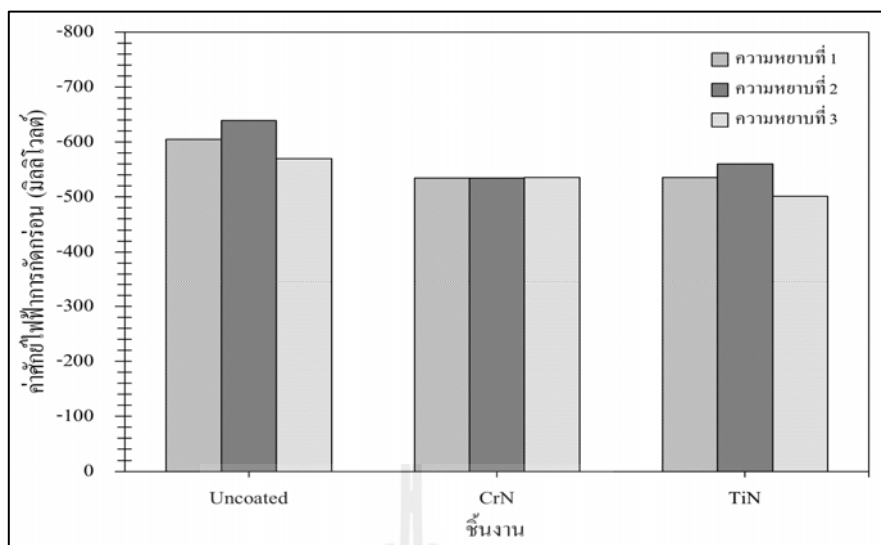
ชิ้นงาน	พีเอช 2			พีเอช 7			พีเอช 10		
	E_{corr}	I_{corr}	R_{mmy}	E_{corr}	I_{corr}	R_{mmy}	E_{corr}	I_{corr}	R_{mmy}
B1	-605	11.23	0.1318	-535	8.01	0.0941	-582	0.72	0.0084
B2	-639	5.38	0.0631	-535.5	4.52	0.0531	-595	0.63	0.0074
B3	-570	5.42	0.0636	-598.5	0.59	0.0069	-559	0.46	0.0054
C1	-534.5	7.47	0.0220	-526.5	0.75	0.0022	-465.5	0.72	0.0021
C2	-534.5	2.61	0.0077	-492	0.58	0.0017	-421.5	0.57	0.0017
C3	-536	0.92	0.0027	-411.5	0.42	0.0012	-419.5	0.25	0.0007
T1	-536	4.10	0.0129	-468.5	0.62	0.0019	-469.5	0.66	0.0021
T2	-560.5	4.07	0.0128	-456	0.53	0.0017	-463.5	0.69	0.0019
T3	-502	1.25	0.0039	-426	0.21	0.0007	-433	0.66	0.0020

หมายเหตุ E_{corr} ค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อน (มิลลิโวลต์)
 I_{corr} ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อน (ไมโครแอมป์/ตารางเซนติเมตร)
 R_{mmy} ค่าอัตราการกัดกร่อน (มิลลิเมตร/ปี)

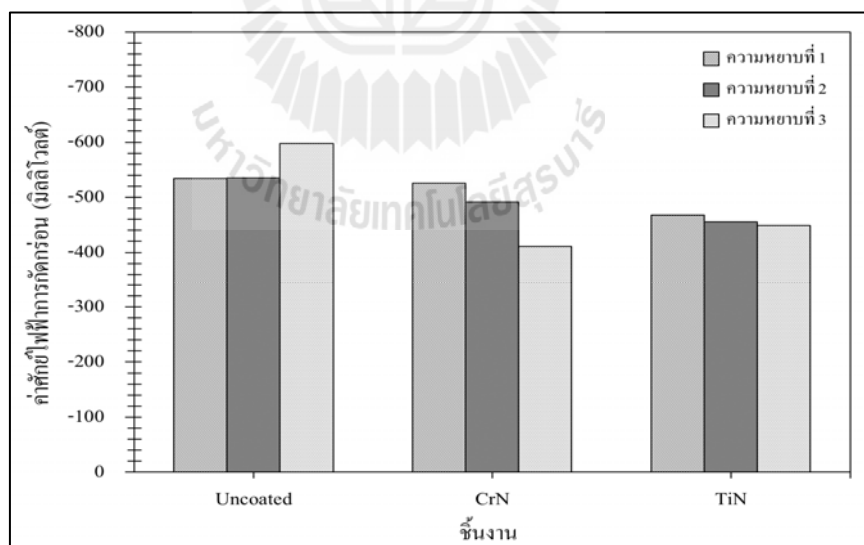
เพื่ออธิบายถึงผลของการศึกษาการเคลือบผิวเหล็กกล้า AISI 4140 ด้วยฟิล์มบางที่แตกต่างชนิดกัน คือ โครเมียมไนไตรด์และไทเทเนียมไนไตรด์ ตลอดจนค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ของสารละลายที่ใช้ในการทดสอบ และผลของความหยาบผิวของเหล็กกล้า AISI 4140 ก่อนการเคลือบผิวที่มีต่อพฤติกรรมการกัดกร่อนของชิ้นงาน ผู้วิจัยจึงขอนำเสนอผลการทดลองและการวิเคราะห์ผลการทดลองดังแสดงในหัวข้อต่อไป

4.3.1 ผลของการเคลือบฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์และฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรด์บนเหล็กกล้า AISI 4140 ที่มีต่อพฤติกรรมการกัดกร่อน

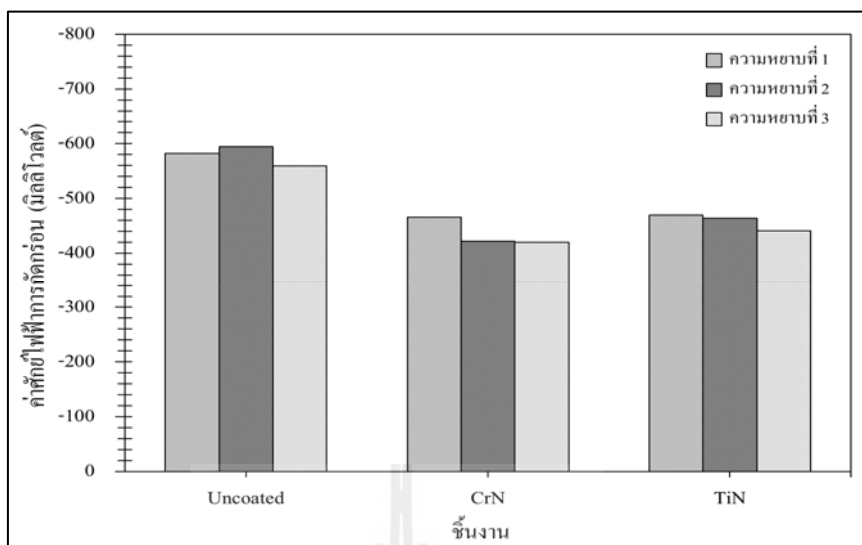
รูปที่ 4.19 ถึง 4.21 แสดงค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนของชิ้นงานเหล็กกล้า AISI 4140 ที่ไม่ถูกเคลือบผิว ชิ้นงานเหล็กกล้า AISI 4140 ที่ถูกเคลือบผิวด้วยฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์ และชิ้นงานเหล็กกล้า AISI 4140 ที่ถูกเคลือบผิวด้วยฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรด์ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้นร้อยละ 3.5 โดยน้ำหนักที่ค่าพีเอช 2 7 และ 10 ตามลำดับ พบว่าค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนของชิ้นงานเหล็กกล้า AISI 4140 มีการเปลี่ยนแปลงเมื่อถูกเคลือบผิวด้วยฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์และฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรด์ โดยชิ้นงานที่ถูกเคลือบผิวด้วยฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์และชิ้นงานเหล็กกล้าที่ถูกเคลือบผิวด้วยฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรด์มีค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนสูงกว่าชิ้นงานที่ไม่ถูกเคลือบผิวที่ค่าความหยาบผิวและค่าพีเอชเดียวกัน ค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนที่เพิ่มสูงขึ้นหลังการเคลือบผิวด้วยฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์และฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรด์นั้น แสดงให้เห็นว่าชิ้นงานมีเสถียรภาพและมีความต้านทานการกัดกร่อนเพิ่มมากขึ้น



รูปที่ 4.19 ค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนของชิ้นงานเหล็กกล้า AISI 4140 ที่ไม่ถูกเคลือบผิว ชิ้นงานเหล็กกล้า AISI 4140 ที่ถูกเคลือบผิวด้วยฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์ และชิ้นงานเหล็กกล้า AISI 4140 ที่ถูกเคลือบผิวด้วยฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรด์ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้นร้อยละ 3.5 โดยน้ำหนักที่ค่าพีเอช 2



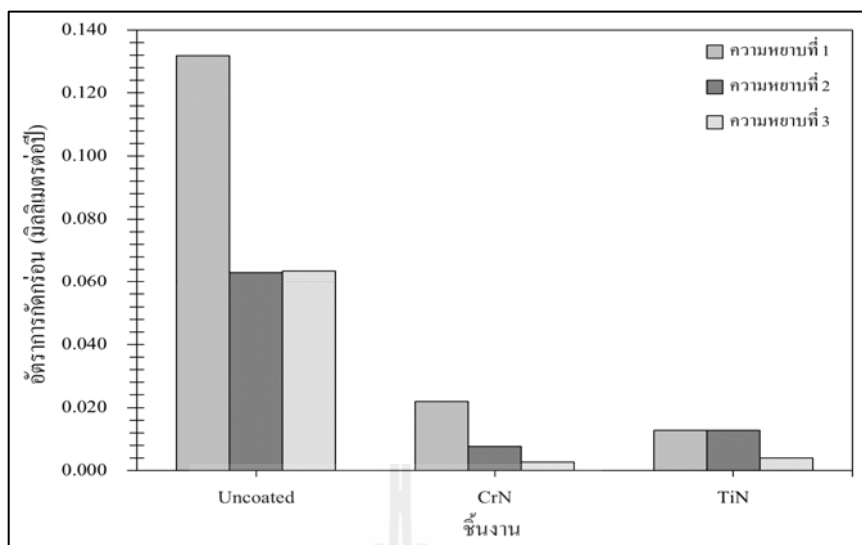
รูปที่ 4.20 ค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนของชิ้นงานเหล็กกล้า AISI 4140 ที่ไม่ถูกเคลือบผิว ชิ้นงานเหล็กกล้า AISI 4140 ที่ถูกเคลือบผิวด้วยฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์ และชิ้นงานเหล็กกล้า AISI 4140 ที่ถูกเคลือบผิวด้วยฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรด์ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้นร้อยละ 3.5 โดยน้ำหนักที่ค่าพีเอช 7



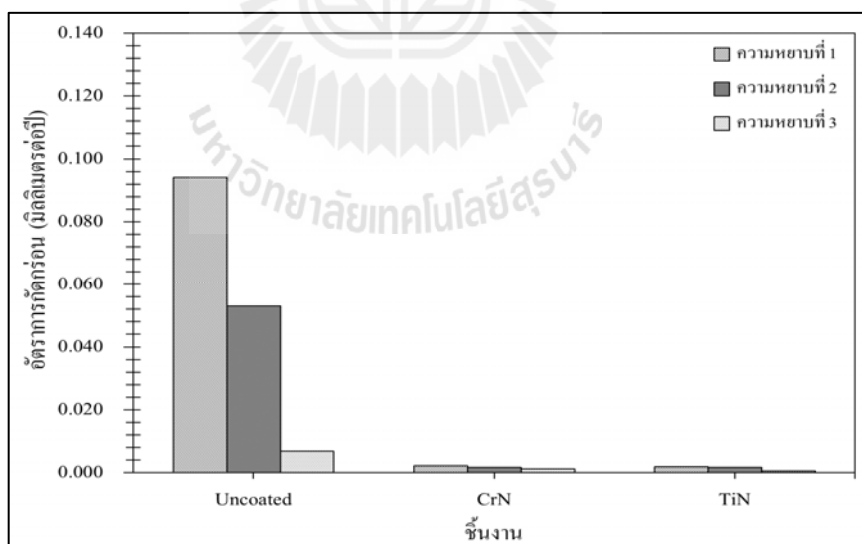
รูปที่ 4.21 ค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนของชั้นงานเหล็กกล้า AISI 4140 ที่ไม่ถูกเคลือบผิว ชั้นงานเหล็กกล้า AISI 4140 ที่ถูกเคลือบผิวด้วยฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์ และชั้นงานเหล็กกล้า AISI 4140 ที่ถูกเคลือบผิวด้วยฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรด์ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้นร้อยละ 3.5 โดยน้ำหนักที่ค่าพีเอช 10

รูปที่ 4.22 ถึง 4.24 แสดงค่าอัตราการกัดกร่อนของชั้นงานเหล็กกล้า AISI 4140 ที่ไม่ถูกเคลือบผิว ชั้นงานเหล็กกล้า AISI 4140 ที่ถูกเคลือบผิวด้วยฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์ และชั้นงานเหล็กกล้า AISI 4140 ที่ถูกเคลือบผิวด้วยฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรด์ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้นร้อยละ 3.5 โดยน้ำหนักที่ค่าพีเอช 2 7 และ 10 พบว่าค่าอัตราการกัดกร่อนของเหล็กกล้า AISI 4140 มีการเปลี่ยนแปลงเมื่อถูกเคลือบผิวด้วยฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์และฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรด์ โดยค่าอัตราการกัดกร่อนของชั้นงานที่ถูกเคลือบผิวด้วยฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์ และชั้นงานเหล็กกล้า AISI 4140 ที่ถูกเคลือบผิวด้วยฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรด์มีค่าน้อยกว่าชั้นงานที่ไม่ถูกเคลือบผิวที่ค่าความหยาบผิวและค่าพีเอชเดียวกัน

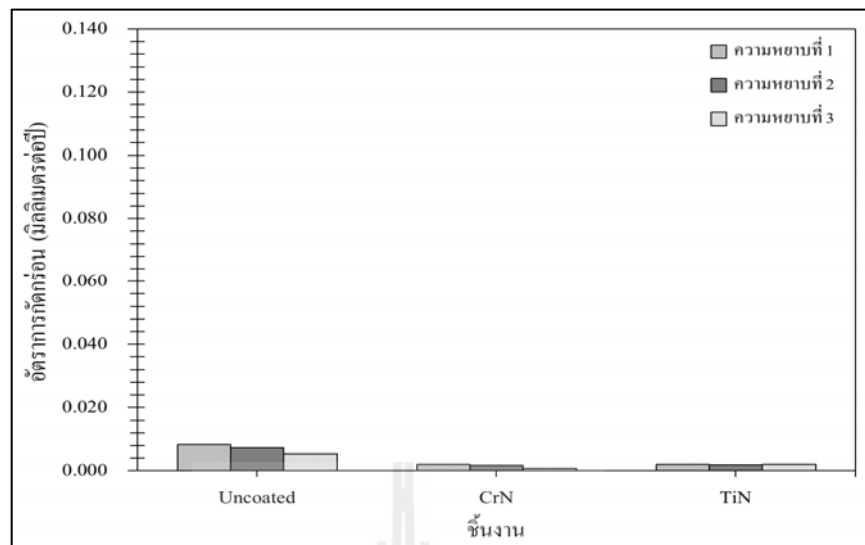
จากผลของค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนและค่าอัตราการกัดกร่อนของชั้นงานทั้งหมด จึงกล่าวได้ว่าชั้นงานที่ถูกเคลือบผิวด้วยฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์ และชั้นงานที่ถูกเคลือบผิวด้วยฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรด์มีการต้านทานการกัดกร่อนที่ดีกว่าชั้นงานที่ไม่ถูกเคลือบผิว (Ahm, S.H., Choi, Y.S., Kim, J.G., Han, J.G., 2002; Darja, K.M., Peter P., Miha, C., Marijan M., 2004; Feng, H.P., Cheng, H.H., Jung, K.L., Yih H.S., 2003; Chen J.Y., Yu G.P., Huang J.H., 2000; You, H. -xia., Xu, H.-bin., Zhang, Y., Zheng, S.-li., Gao, Y.-ying., 2008; Rudenja, S., Kulu, P., Tallimets E., Mikli, V., Straede C.A., 1999.)



รูปที่ 4.22 ค่าอัตราการกัดกร่อนของชิ้นงานเหล็กกล้า AISI 4140 ที่ไม่ถูกเคลือบผิว ชิ้นงานเหล็กกล้า AISI 4140 ที่ถูกเคลือบผิวด้วยฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์และชิ้นงานเหล็กกล้า AISI 4140 ที่ถูกเคลือบผิวด้วยฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรด์ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้นร้อยละ 3.5 โดยน้ำหนักที่ค่าพีเอช 2

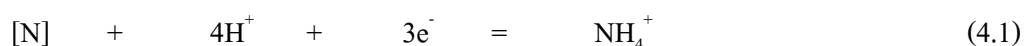


รูปที่ 4.23 ค่าอัตราการกัดกร่อนของชิ้นงานเหล็กกล้า AISI 4140 ที่ไม่ถูกเคลือบผิว ชิ้นงานเหล็กกล้า AISI 4140 ที่ถูกเคลือบผิวด้วยฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์และชิ้นงานเหล็กกล้า AISI 4140 ที่ถูกเคลือบผิวด้วยฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรด์ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้นร้อยละ 3.5 โดยน้ำหนักที่ค่าพีเอช 7



รูปที่ 4.24 ค่าอัตราการกัดกร่อนของชิ้นงานเหล็กกล้า AISI 4140 ที่ไม่ถูกเคลือบผิว ชิ้นงานเหล็กกล้า AISI 4140 ที่ถูกเคลือบผิวด้วยฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์ และชิ้นงานเหล็กกล้า AISI 4140 ที่ถูกเคลือบผิวด้วยฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรด์ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้นร้อยละ 3.5 โดยน้ำหนักที่ค่าพีเอช 10

การที่ชิ้นงานที่ถูกเคลือบผิวด้วยฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์และชิ้นงานที่ถูกเคลือบผิวด้วยฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรด์มีความสามารถต้านทานการกัดกร่อนได้ดีกว่าชิ้นงานที่ไม่ถูกเคลือบผิวนั้น อธิบายได้ว่าเป็นผลจากฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์และฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรด์ที่เคลือบบนผิวของเหล็กกล้า AISI 4140 มีส่วนช่วยในการต้านทานการกัดกร่อนที่จะเกิดขึ้นบนผิวเหล็กกล้า AISI 4140 เนื่องจากไนโตรเจนอะตอมในฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์และฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรด์เกิดการละลายระหว่างการทดสอบการกัดกร่อน และปรากฏเป็นไนโตรเจนในรูปประจุลบ (N^-) บริเวณผิวชิ้นงาน ซึ่งจะช่วยในการผลัดอะตอมของคลอไรด์ (Cl^-) ที่อยู่ในสารละลายที่จะเข้ามาทำลายผิวชิ้นงานให้ออกจากบริเวณผิวชิ้นงาน ขณะเดียวกัน (N^-) ที่ละลายในสารละลายจะรวมตัวกับไฮโดรเจนไอออน (H^+) เกิดเป็นแอมโมเนีย (NH_4^+) ดังสมการที่ 4.1



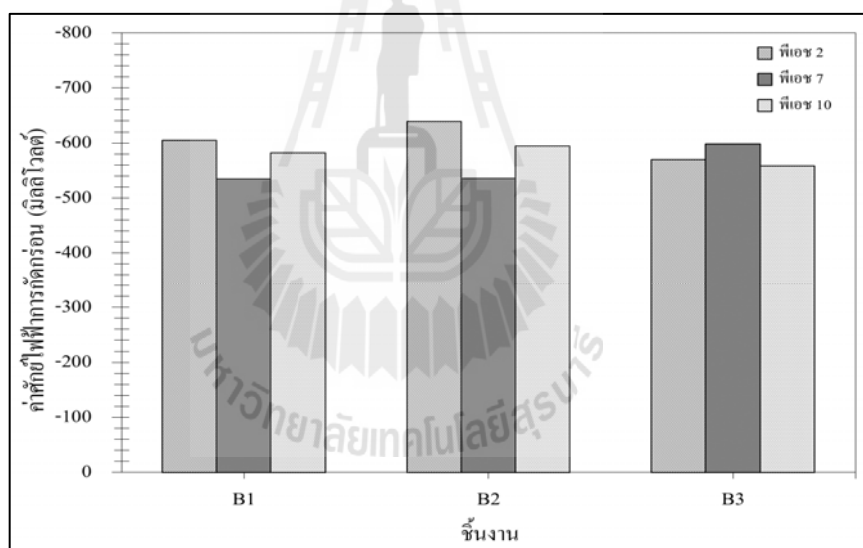
จากสมการที่ 4.1 สารประกอบแอมโมเนีย (NH_4^+) ที่เกิดขึ้นจะทำให้ค่าพีเอชของสารละลายเพิ่มขึ้นทำให้การกัดกร่อนที่เกิดจากสารละลายลดน้อยลง (Chyou S. D., Shih H. C.,

1991; Grabke H. J., 1996; Medina-Flores, A., Arganis, C., Santiago, P., Oseguera., 2004) ซึ่งสอดคล้องกับการวัดค่าพีเอชภายหลังการทดสอบการกัดกร่อนที่ค่าพีเอช 2 ที่มีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น โดยค่าพีเอชของสารละลายภายหลังการทดสอบการกัดกร่อนของชิ้นงานที่ถูกเคลือบผิวด้วยฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์ และชิ้นงานที่ถูกเคลือบผิวด้วยฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรด์มีค่าโดยเฉลี่ยเท่ากับ 2.15 และ 2.10 ตามลำดับ ส่วนที่ค่าพีเอช 7 และ 10 ภายหลังการทดสอบการกัดกร่อนค่าพีเอชมีแนวโน้มลดลง (ค่าพีเอชก่อนและหลังทดสอบการกัดกร่อนของชิ้นงานทั้งหมดแสดงในภาคผนวก ก)

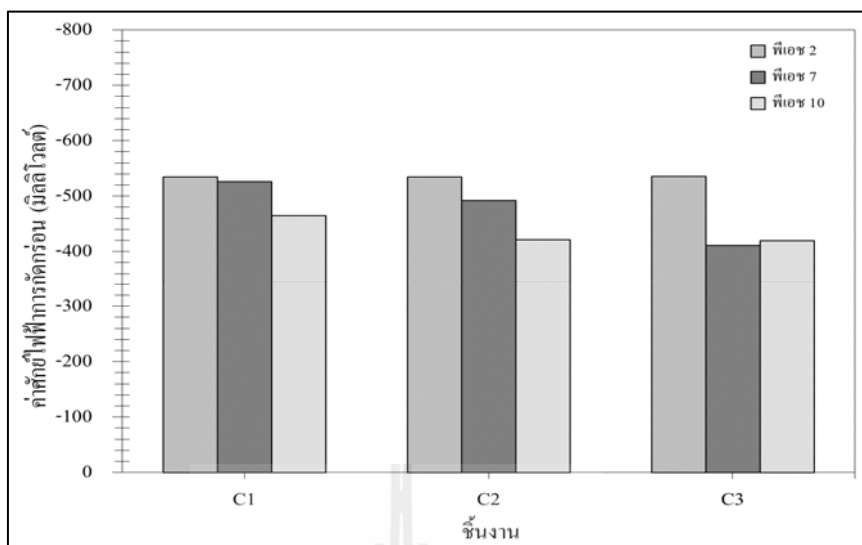
นอกจากนี้เมื่อเปรียบเทียบค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนของชิ้นงานที่ถูกเคลือบผิวด้วยฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์และชิ้นงานที่ถูกเคลือบผิวด้วยฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรด์ พบว่าค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนของชิ้นงานที่ถูกเคลือบผิวด้วยฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์มีแนวโน้มมีค่าสูงกว่าชิ้นงานที่ถูกเคลือบผิวด้วยฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรด์ และในขณะเดียวกันเมื่อพิจารณาเปรียบเทียบค่าอัตราการกัดกร่อนของชิ้นงานที่ถูกเคลือบผิวด้วยฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์และชิ้นงานที่ถูกเคลือบผิวด้วยฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรด์ พบว่าค่าอัตราการกัดกร่อนของชิ้นงานที่ถูกเคลือบผิวด้วยฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์มีค่าน้อยกว่าชิ้นงานที่ถูกเคลือบผิวด้วยฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรด์ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าชิ้นงานที่ถูกเคลือบผิวด้วยฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์มีความต้านทานการกัดกร่อนที่ดีกว่าชิ้นงานที่ถูกเคลือบผิวด้วยฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรด์ (Ibrahim, M.A.M., Korablov S.F., Yoshimura, M. 2002; Liu, C., Bi, Q., Matthews, A. 2001) และแสดงให้เห็นว่าแม้ฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์จะมีความหนาน้อยกว่าฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรด์ก็ยังคงมีคุณสมบัติการต้านทานการกัดกร่อนที่ดีกว่า (ในงานวิจัยนี้ฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์หนา 0.9 ไมครอนเมตร และฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรด์หนา 1.2 ไมครอนเมตร) ผลดังกล่าวอาจเนื่องจากฟิล์มไทเทเนียมไนไตรด์เป็นฟิล์มที่มีโครงสร้างเป็นลักษณะแท่ง (columnar) และมีข้อบกพร่อง เช่น รูพรุน ในเนื้อฟิล์มมาก ทำให้สารละลายมีโอกาสที่จะแพร่เข้าสู่ชั้นฟิล์มและทำปฏิกิริยาการกัดกร่อนชั้นฟิล์มได้ง่ายกว่าฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์ที่มีโครงสร้างเป็นลักษณะแท่ง (columnar) เช่นเดียวกัน แต่มีความหนาแน่น มีความสม่ำเสมอ และปริมาณรูพรุนที่น้อยกว่าฟิล์มไทเทเนียมไนไตรด์ ดังแสดงในผลจากการวิเคราะห์พื้นผิวด้วย AFM และการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคตามแนวภาคตัดขวางด้วย SEM (Liu, C., Leyland, A., Lyon, S., Matthews, A. 2001; William Grips, V.K., Harish, C.B., Ezhil Selvi, V., Kalavati, Rajam K.S. 2006)

4.3.2 ผลของค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ของสารละลายโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้นร้อยละ 3.5 โดยน้ำหนักที่มีต่อพฤติกรรมการกัดกร่อน

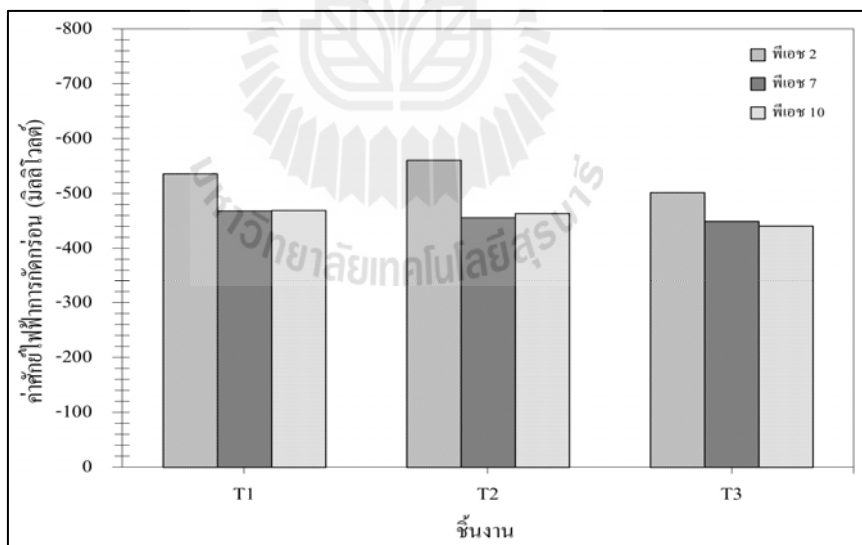
รูปที่ 4.25 ถึง 4.27 แสดงค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนของชิ้นงานเหล็กกล้า AISI 4140 ที่ไม่ถูกเคลือบ ชิ้นงานเหล็กกล้า AISI 4140 ที่ถูกเคลือบผิวด้วยฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์ และชิ้นงานเหล็กกล้า AISI 4140 ที่ถูกเคลือบผิวด้วยฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรด์ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้นร้อยละ 3.5 โดยน้ำหนักที่ค่าพีเอช 2 7 และ 10 พบว่าค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนของชิ้นงานที่ไม่ถูกเคลือบผิวมีการเปลี่ยนแปลงตามค่าพีเอชของสารละลาย ส่วนค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนของชิ้นงานเหล็กกล้า AISI 4140 ที่ถูกเคลือบผิวด้วยฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์ และชิ้นงานเหล็กกล้า AISI 4140 ที่ถูกเคลือบผิวด้วยฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรด์มีแนวโน้มสูงขึ้นเมื่อค่าพีเอชของสารละลายเพิ่มมากขึ้น ศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนที่เพิ่มสูงขึ้นแสดงให้เห็นว่าชิ้นงานมีเสถียรภาพและความสามารถต้านทานการกัดกร่อนเพิ่มมากขึ้น



รูปที่ 4.25 ค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนของชิ้นงานเหล็กกล้า AISI 4140 ที่ไม่ถูกเคลือบในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้นร้อยละ 3.5 โดยน้ำหนักที่ค่าพีเอช 2 7 และ 10

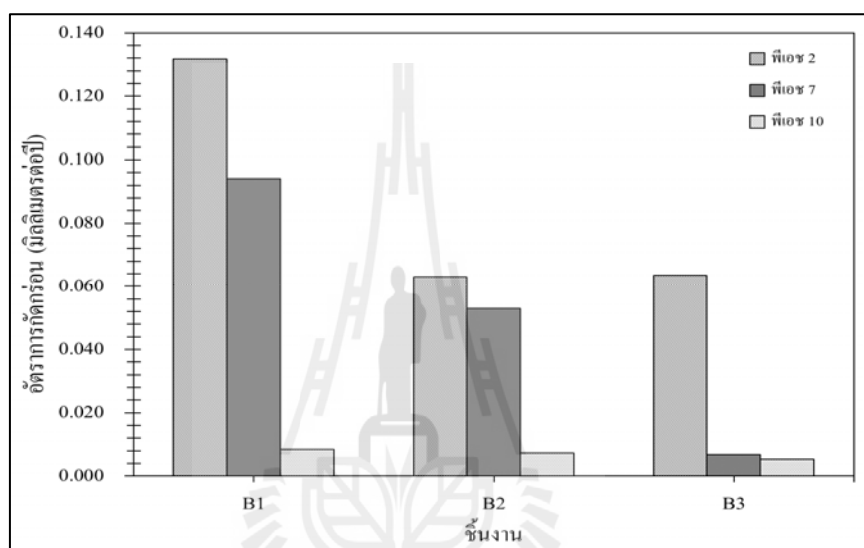


รูปที่ 4.26 ค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนของชิ้นงานเหล็กกล้า AISI 4140 ที่ถูกเคลือบด้วยฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ ความเข้มข้นร้อยละ 3.5 โดยน้ำหนักที่ค่าพีเอช 2 7 และ 10

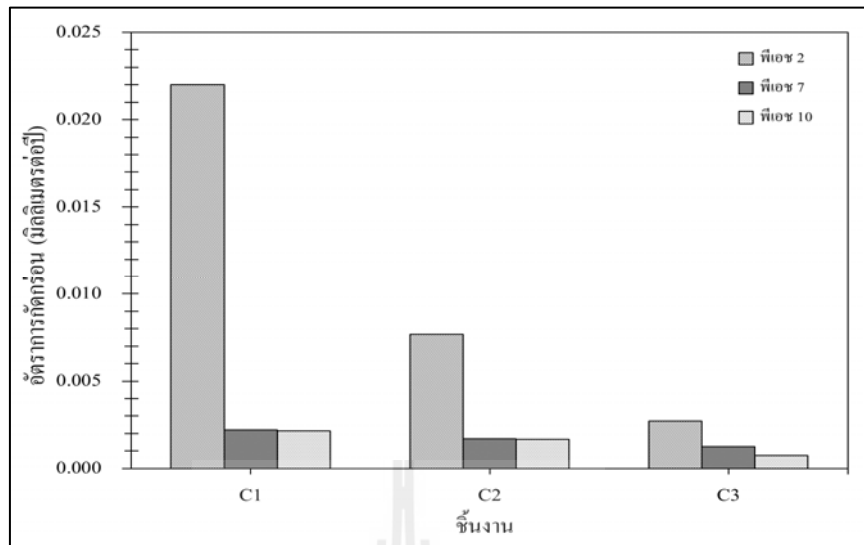


รูปที่ 4.27 ค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนของชิ้นงานเหล็กกล้า AISI 4140 ที่ถูกเคลือบด้วยฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรด์ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ ความเข้มข้นร้อยละ 3.5 โดยน้ำหนักที่ค่าพีเอช 2 7 และ 10

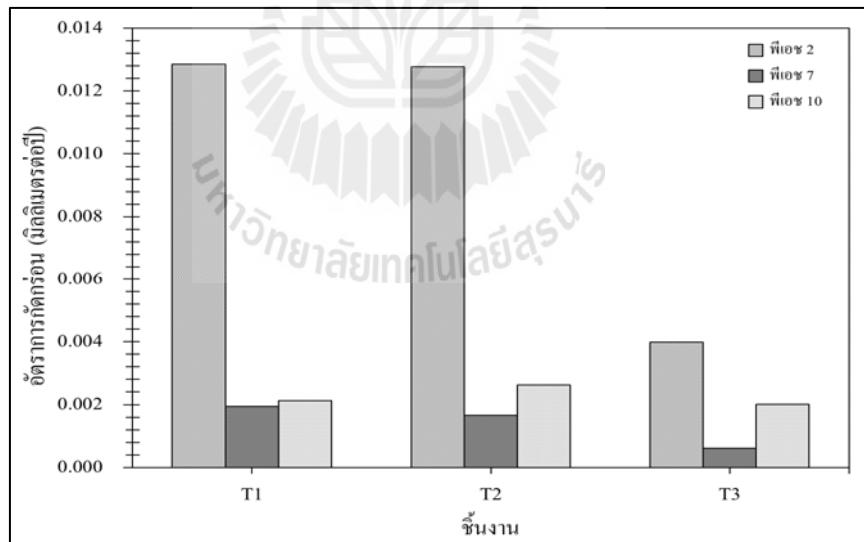
รูปที่ 4.28 ถึง 4.30 แสดงผลของค่าอัตราการกัดกร่อนของชิ้นงานเหล็กกล้า AISI 4140 ที่ไม่ถูกเคลือบ ชิ้นงานเหล็กกล้า AISI 4140 ที่ถูกเคลือบผิวด้วยฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์ และชิ้นงานเหล็กกล้า AISI 4140 ที่ถูกเคลือบผิวด้วยฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรด์ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้นร้อยละ 3.5 โดยน้ำหนักที่ค่าพีเอช 2 7 และ 10 พบว่าเมื่อค่าพีเอชของสารละลายเพิ่มขึ้น ค่าอัตราการกัดกร่อนของชิ้นงานทั้งหมดมีแนวโน้มลดลง โดยที่ค่าพีเอช 2 ชิ้นงานจะมีค่าอัตราการกัดกร่อนมากที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับที่ค่าพีเอช 7 และ 10 ตามลำดับ



รูปที่ 4.28 ค่าอัตราการกัดกร่อนของชิ้นงานเหล็กกล้า AISI 4140 ที่ไม่ถูกเคลือบ
ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้นร้อยละ 3.5
โดยน้ำหนักที่ค่าพีเอช 2 7 และ 10

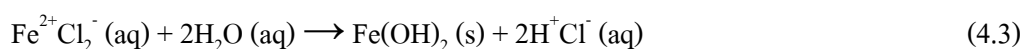


รูปที่ 4.29 ค่าอัตราการกัดกร่อนของชิ้นงานเหล็กกล้า AISI 4140 ที่ถูกเคลือบด้วยฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ ความเข้มข้นร้อยละ 3.5 โดยน้ำหนักที่ค่าพีเอช 2 7 และ 10



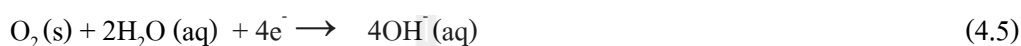
รูปที่ 4.30 ค่าอัตราการกัดกร่อนของชิ้นงานเหล็กกล้า AISI 4140 ที่ถูกเคลือบด้วยฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรด์ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ ความเข้มข้นร้อยละ 3.5 โดยน้ำหนักที่ค่าพีเอช 2 7 และ 10

จากผลของค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนและอัตราการกัดกร่อนของชิ้นงานทั้งหมด จึงกล่าวได้ว่าค่าพีเอชของสารละลายที่เพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้ชิ้นงานมีความต้านทานการกัดกร่อนที่ดีขึ้น การที่พฤติกรรมการกัดกร่อนของชิ้นงานมีค่าแตกต่างกันในค่าพีเอชนั้น อาจเนื่องมาจากผลของไอออนที่ปรากฏในสารละลายที่ส่งผลต่อพฤติกรรมการกัดกร่อนของชิ้นงานในแต่ละค่าพีเอช กล่าวคือ ที่ค่าพีเอช 2 ได้ทำการปรับค่าพีเอชโดยใช้กรดไฮโดรคลอริก (HCl) ทำให้มีปริมาณคลอไรด์ไอออน (Cl⁻) ในสารละลายเพิ่มมากขึ้น ซึ่ง Cl⁻ จะเข้าไปทำลายเนื้อวัสดุได้มากยิ่งขึ้น และเมื่อผิวของวัสดุสัมผัสกับสารละลาย Cl⁻ ในสารละลายจะทำปฏิกิริยากับเหล็ก (Fe²⁺) ในเนื้อเหล็กกล้า AISI 4140 เกิดเป็นสารประกอบเฟอร์ริกคลอไรด์ (Fe²⁺Cl⁻) ดังสมการที่ 4.2 หลังจากนั้น Fe²⁺Cl⁻ จะปฏิกิริยากับน้ำ (H₂O) เกิดเป็นสารประกอบกรดไฮโดรคลอริก (HCl) และสารประกอบเฟอร์รัสไฮดรอกไซด์ (Fe(OH)₂) ดังสมการที่ 4.3 สำหรับชิ้นงานที่ถูกเคลือบผิวด้วยฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์และชิ้นงานที่ถูกเคลือบผิวด้วยฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรด์นั้น ผิวของฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์และฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรด์จะถูกกัดกร่อนโดย Cl⁻ ณ บริเวณขอบบพร่องของฟิล์ม เช่น รูพรุน และรอยแตก เป็นต้น (Cunha, L., Andritschky M., Rebouta L., Pischow., 1999) นอกจากนี้ยังมีการเกิดปฏิกิริยารีดักชันของไฮโดรเจนไอออน (H⁺) ที่มีอยู่มากในสารละลายที่มีความเป็นกรดสูงและเพิ่มขึ้นจากการปรับค่าพีเอชโดยใช้กรดไฮโดรคลอริก (HCl) โดย (H⁺) เกิดการรวมตัวกับ e⁻ เป็นก๊าซไฮโดรเจนดังสมการที่ 4.4 และก๊าซไฮโดรเจนที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยานี้จะเกาะอยู่ตามผิวของวัสดุ และฟิล์มบางเกิดแรงดันทำลายผิวของวัสดุและผิวของฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์ และไทเทเนียมไนไตรด์ให้เกิดความเสียหายได้



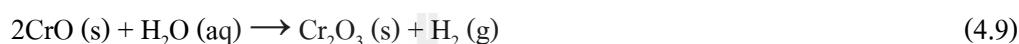
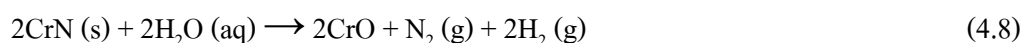
สำหรับในกรณีชิ้นงานไม่ถูกเคลือบผิวที่เกิดการกัดกร่อนในสารละลายที่มีค่าพีเอช 7 และ 10 นั้น ปฏิกิริยาการกัดกร่อนที่เกิดขึ้นจะเกิดจากปฏิกิริยารีดักชันของออกซิเจน (ภายในน้ำที่มีสภาพเป็นกลางและด่าง) ทำปฏิกิริยาแล้วแตกตัวให้ OH⁻ ดังสมการที่ 4.5 และ OH⁻ ที่มาจากการแตกตัวของโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ที่ใช้ในการปรับค่าพีเอชของสารละลายทำปฏิกิริยากับ Fe²⁺ ในเนื้อเหล็กกล้า AISI 4140 ที่สัมผัสกับสารละลายเกิดเป็นสารประกอบ Fe(OH)₂

ดังสมการที่ 4.6 สารประกอบ $\text{Fe}(\text{OH})_2$ นี้เป็นฟิล์มที่สามารถช่วยในการต้านทานการกัดกร่อนได้ (AHMAD, Z., 2006) แต่สารประกอบ $\text{Fe}(\text{OH})_2$ นี้ยังสามารถเกิดการออกซิเดชันต่อไปได้อย่างรวดเร็วด้วยออกซิเจนที่มีอยู่ในระบบและน้ำเกิดเป็นสารประกอบเฟอร์ริกไฮดรอกไซด์ ($\text{Fe}(\text{OH})_3$) ดังสมการที่ 4.7 ซึ่งสารประกอบ $\text{Fe}(\text{OH})_3$ เป็นสารประกอบที่ไม่มีเสถียรภาพจะเกิดปฏิกิริยาต่อไป กลายเป็นสารประกอบใหม่ คือ สารประกอบไฮดรทเฟอร์ริกออกไซด์ (Fe_2O_3) หรือเรียกกันอย่างไม่ทั่วไประยะสั้นว่า สนิมเหล็กสีแดง



ส่วนในกรณีของชิ้นงานที่ถูกเคลือบผิวด้วยฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์และชิ้นงานที่ถูกเคลือบผิวด้วยฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรด์ที่ค่าพีเอช 7 และ 10 นั้น กระบวนการกัดกร่อนที่เกิดขึ้นจะแตกต่างกัน เนื่องด้วยชนิดของฟิล์มบางที่เคลือบบนผิววัสดุแตกต่างกัน โดยการกัดกร่อนที่เกิดขึ้นบนผิวของชิ้นงานที่ถูกเคลือบผิวด้วยฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์นั้นเกิดขึ้นจากฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์ทำปฏิกิริยากับน้ำ (H_2O) เกิดเป็นสารประกอบโครเมียม (II) ออกไซด์ (CrO) ดังสมการที่ 4.8 หรือทำปฏิกิริยากับน้ำ (H_2O) เกิดเป็นสารประกอบโครเมียม (III) ออกไซด์ (Cr_2O_3) ดังสมการที่ 4.9 ซึ่งสารประกอบทั้งสองชนิดนี้เป็นฟิล์มที่มีเสถียรภาพและคุณสมบัติในการต้านทานการกัดกร่อนได้ดี (Cunha, L., Andritschky, M., Rebouta, L., Silva, R., 1997; Cunha, L., Andritschky M., Rebouta L., Pischow., 1999; Fenker, M., Balzer M., Kappl H., 2006) นอกจากนี้โครเมียม (Cr) ในฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์อาจทำปฏิกิริยากับ OH^- เกิดเป็นสารประกอบโครเมียมไฮดรอกไซด์ ($\text{Cr}(\text{OH})_2$) อีกด้วย ดังสมการที่ 4.10 โดยสารประกอบ $\text{Cr}(\text{OH})_2$ นี้เป็นฟิล์มที่มีความสามารถต้านทานการกัดกร่อนได้ แต่เนื่องจากเป็นฟิล์มที่ไม่มีเสถียรภาพ จึงมีความสามารถต้านทานการกัดกร่อนได้น้อยกว่าฟิล์ม Cr_2O_3 (You, H. -xia., Xu, H.-bin., Zhang, Y., Zheng, S.-li., Gao, Y.-ying., 2010) ในขณะเดียวกันในกรณีของชิ้นงานที่ถูกเคลือบผิวด้วยฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรด์ที่ค่าพีเอช 7 และ 10 นั้น กระบวนการกัดกร่อนที่เกิดขึ้นเกิดจากฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรด์ทำปฏิกิริยากับออกซิเจน (O_2) ที่มีอยู่ในสารละลายหรือน้ำ (H_2O) เกิดเป็นสารประกอบ

ไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) ดังสมการที่ 4.11 และ 4.12 หรือฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรด์อาจทำปฏิกิริยากับน้ำ (H_2O) เกิดเป็นสารประกอบไทเทเนียมไฮดรอกไซด์ ($\text{Ti}(\text{OH})_3$) ดังสมการที่ 4.13 ซึ่งสารประกอบ TiO_2 และ $\text{Ti}(\text{OH})_3$ ทั้งสองชนิดนี้เป็นฟิล์มที่สามารถช่วยในการต้านทานการกัดกร่อนให้กับชิ้นงานได้ (Ying, L., Li, Q., Fuihui, W., 2003) แต่ทั้งนี้ TiO_2 เป็นสารประกอบที่มีเสถียรภาพและความสามารถต้านทานการกัดกร่อนได้ดีกว่า $\text{Ti}(\text{OH})_3$ (Bharat, A., Pradeep H. 2010)

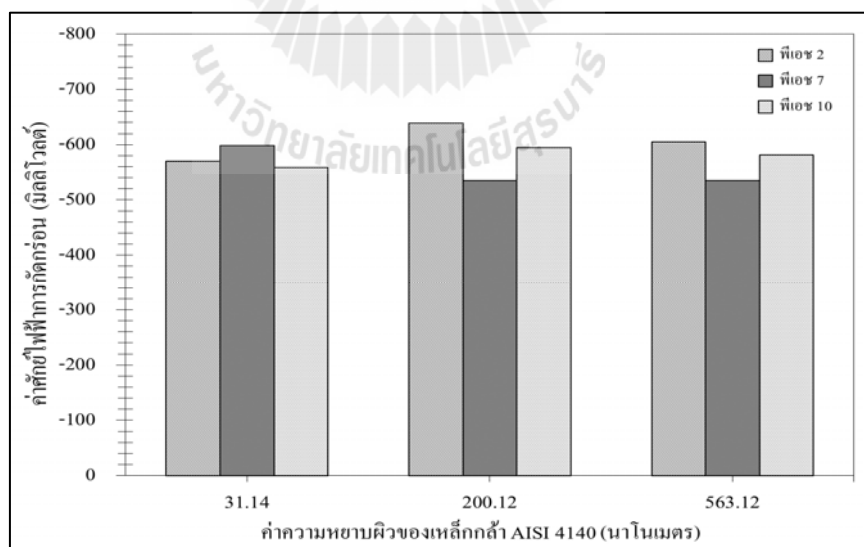


4.3.3 ผลของค่าความหยาบผิวของเหล็กกล้า AISI 4140 ต่อพฤติกรรมการกัดกร่อน

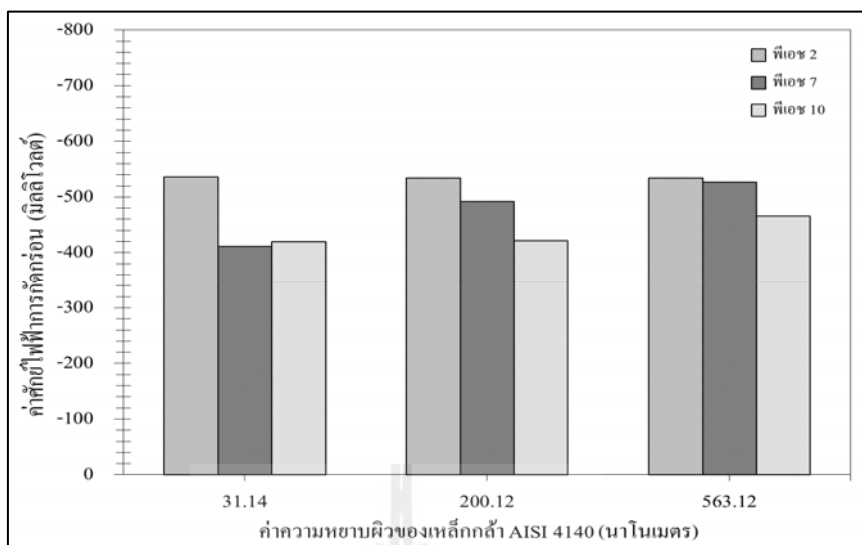
ในงานวิจัยนี้ได้มีการศึกษาผลของความหยาบผิวของวัสดุหรือเหล็กกล้า AISI 4140 ที่มีต่อพฤติกรรมการกัดกร่อนของชิ้นงานเหล็กกล้า AISI 4140 ที่ไม่ถูกเคลือบ ชิ้นงานเหล็กกล้า AISI 4140 ที่ถูกเคลือบผิวด้วยฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์ และชิ้นงานเหล็กกล้า AISI 4140 ที่ถูกเคลือบผิวด้วยฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรด์ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้นร้อยละ 3.5 โดยน้ำหนักที่ค่าพีเอช 2 7 และ 10 จึงได้มีการวัดความหยาบผิวของเหล็กกล้า AISI 4140 ก่อนและหลังการเคลือบผิวด้วยฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์และฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรด์ (ดังแสดงในตารางที่ 3.3 3.4 และ 3.5 ในบทที่ 3) พบว่าความหยาบผิวของชิ้นงานจะมีค่าลดลงเมื่อกระดาศที่ใช้ในการขัดผิววัสดุมีความละเอียดมากขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่าความหยาบผิวของเหล็กกล้า AISI 4140 ก่อนการเคลือบผิวมีผลต่อความหยาบผิวภายหลังการเคลือบผิวด้วยฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์และฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรด์ ซึ่งแนวโน้มค่าความหยาบผิวของชิ้นงาน

ภายหลังการเคลือบผิวด้วยฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์ และฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรด์มีลักษณะการเปลี่ยนแปลงเช่นเดียวกันกับความหยาบผิวของเหล็กกล้า AISI 4140 ก่อนการเคลือบผิว

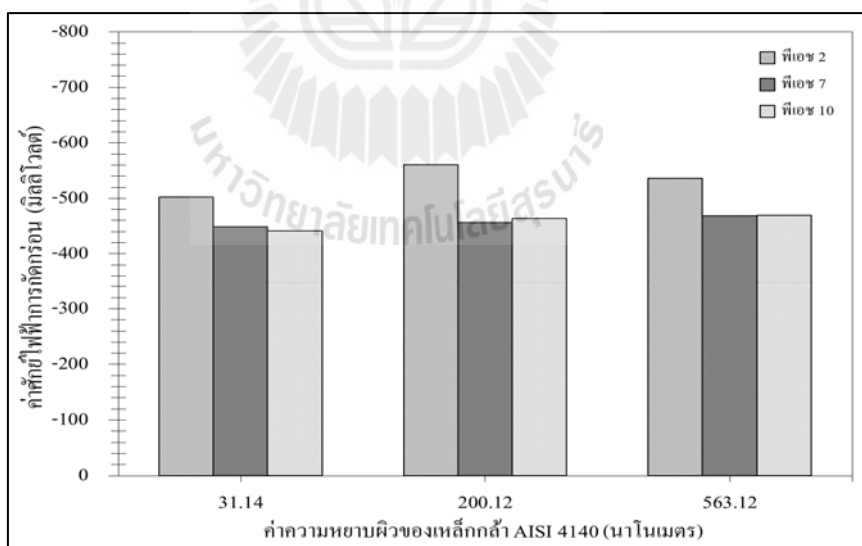
รูปที่ 4.31 ถึง 4.33 แสดงค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนของชิ้นงานเหล็กกล้า AISI 4140 ที่ไม่ถูกเคลือบ ชิ้นงานเหล็กกล้า AISI 4140 ที่ถูกเคลือบผิวด้วยฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์ และชิ้นงานเหล็กกล้า AISI 4140 ที่ถูกเคลือบผิวด้วยฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรด์ที่มีค่าความหยาบผิวของเหล็กกล้า AISI 4140 แตกต่างกันในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้นร้อยละ 3.5 โดยน้ำหนักที่ค่าพีเอช 2 7 และ 10 ตามลำดับ พบว่าค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนของชิ้นงานมีค่าเปลี่ยนแปลงไปตามค่าความหยาบผิวของเหล็กกล้า AISI 4140 ที่ทุกค่าพีเอช โดยที่ค่าพีเอช 2 และ 10 พบว่าเมื่อค่าความหยาบผิวของเหล็กกล้า AISI 4140 เพิ่มมากขึ้น ค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนของชิ้นงานที่ไม่ถูกเคลือบผิวมีแนวโน้มมีค่าลดลง ส่วนที่ค่าพีเอช 7 นั้นเมื่อค่าความหยาบผิวของเหล็กกล้า AISI 4140 เพิ่มมากขึ้น ค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนของชิ้นงานที่ไม่ถูกเคลือบผิวมีแนวโน้มมีค่าเพิ่มมากขึ้น และพบว่าเมื่อค่าความหยาบผิวของเหล็กกล้า AISI 4140 เพิ่มมากขึ้น ค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนของชิ้นงานเหล็กกล้า AISI 4140 ที่ถูกเคลือบผิวด้วยฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์ และชิ้นงานเหล็กกล้า AISI 4140 ที่ถูกเคลือบผิวด้วยฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรด์มีแนวโน้มลดลงที่ทุกค่าพีเอช ศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนที่ลดลงแสดงให้เห็นว่าชิ้นงานมีเสถียรภาพและความสามารถต้านทานการกัดกร่อนลดน้อยลง



รูปที่ 4.31 ค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนของชิ้นงาน AISI 4140 ที่ไม่ถูกเคลือบผิวที่มีค่าความหยาบผิวของเหล็กกล้า AISI 4140 แตกต่างกันในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้นร้อยละ 3.5 โดยน้ำหนักที่ค่าพีเอช 2 7 และ 10

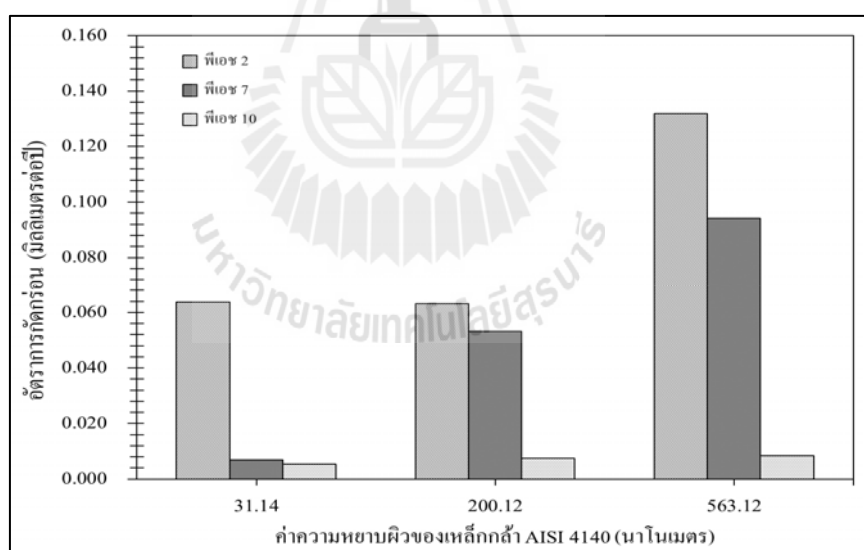


รูปที่ 4.32 ค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนของชิ้นงาน AISI 4140 ที่ถูกเคลือบผิวด้วยฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์ที่มีค่าความหยาบผิวของเหล็กกล้า AISI 4140 แตกต่างกันในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้นร้อยละ 3.5 โดยน้ำหนักที่ค่าฟิโชน 2 7 และ 10

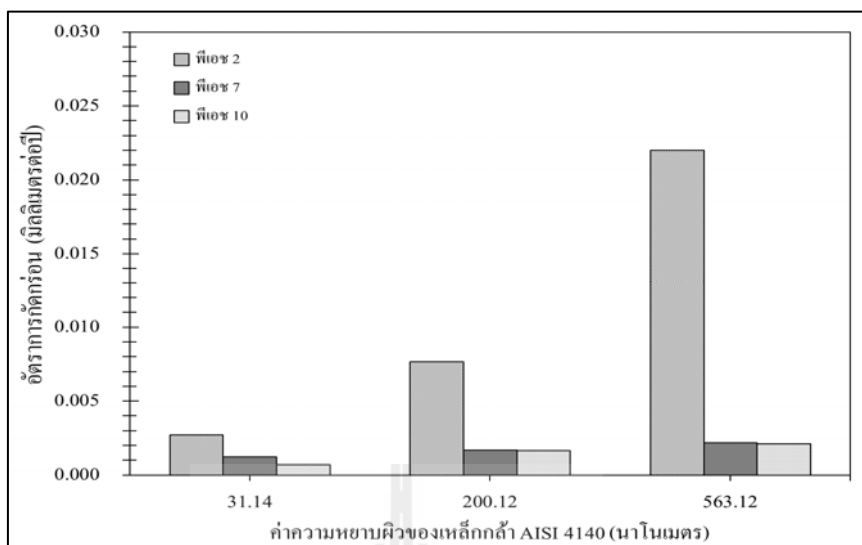


รูปที่ 4.33 ค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนของชิ้นงาน AISI 4140 ที่ถูกเคลือบผิวด้วยฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรด์ที่มีค่าความหยาบผิวของเหล็กกล้า AISI 4140 แตกต่างกันในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้นร้อยละ 3.5 โดยน้ำหนักที่ค่าฟิโชน 2 7 และ 10

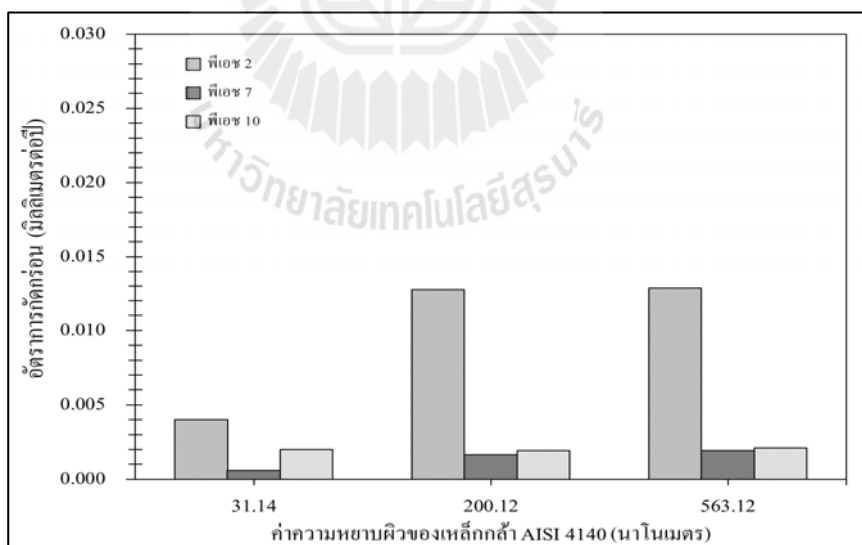
รูปที่ 4.34 ถึง 4.36 แสดงค่าอัตราการกัดกร่อนของชิ้นงานเหล็กกล้า AISI 4140 ที่ไม่ถูกเคลือบ ชิ้นงานเหล็กกล้า AISI 4140 ที่ถูกเคลือบผิวด้วยฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์ และชิ้นงานเหล็กกล้า AISI 4140 ที่ถูกเคลือบผิวด้วยฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรด์ที่มีค่าความหยาบผิวของเหล็กกล้า AISI 4140 แตกต่างกันในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้นร้อยละ 3.5 โดยน้ำหนักที่ค่าพีเอช 2 7 และ 10 พบว่าเมื่อค่าความหยาบผิวของเหล็กกล้า AISI 4140 เพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้ค่าอัตราการกัดกร่อนของชิ้นงานที่ไม่ถูกเคลือบผิวมีค่าเพิ่มมากขึ้นอย่างชัดเจนที่ค่าพีเอช 2 และ 7 ส่วนที่ค่าพีเอช 10 เมื่อค่าความหยาบผิวของเหล็กกล้า AISI 4140 เพิ่มมากขึ้น ค่าอัตราการกัดกร่อนเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับที่ค่าพีเอช 2 และ 7 นอกจากนี้ยังพบว่าอัตราการกัดกร่อนของชิ้นงานที่ถูกเคลือบผิวด้วยฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์และชิ้นงานที่ถูกเคลือบผิวด้วยฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรด์มีแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงเช่นเดียวกัน คือ เมื่อค่าความหยาบผิวของเหล็กกล้า AISI 4140 เพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้อัตราการกัดกร่อนของชิ้นงานมีค่าเพิ่มมากขึ้นอย่างชัดเจนที่ค่าพีเอช 2 ส่วนที่ค่าพีเอช 7 และ 10 เมื่อค่าความหยาบผิวของเหล็กกล้า AISI 4140 เพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้อัตราการกัดกร่อนมีการเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับที่ค่าพีเอช 2



รูปที่ 4.34 ค่าอัตราการกัดกร่อนของชิ้นงาน AISI 4140 ที่ไม่ถูกเคลือบผิวที่มีค่าความหยาบผิวของเหล็กกล้า AISI 4140 แตกต่างกันในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้นร้อยละ 3.5 โดยน้ำหนักที่ค่าพีเอช 2 7 และ 10



รูปที่ 4.35 ค่าอัตราการกัดกร่อนของชิ้นงาน AISI 4140 ที่ถูกเคลือบผิวด้วยฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์ที่มีค่าความหยาบผิวของเหล็กกล้า AISI 4140 แตกต่างกันในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้นร้อยละ 3.5 โดยน้ำหนักที่ค่าฟิเอช 2 7 และ 10



รูปที่ 4.36 ค่าอัตราการกัดกร่อนของชิ้นงาน AISI 4140 ที่ถูกเคลือบผิวด้วยฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรด์ที่มีค่าความหยาบผิวของเหล็กกล้า AISI 4140 แตกต่างกันในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้นร้อยละ 3.5 โดยน้ำหนักที่ค่าฟิเอช 2 7 และ 10

จากผลของศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนและอัตราการกัดกร่อนแสดงให้เห็นว่าชิ้นงานที่ค่าความหยาบผิวของวัสดุที่มากขึ้น ส่งผลให้ชิ้นงานเกิดการกัดกร่อนมากขึ้นหรือมีความสามารถต้านทานการกัดกร่อนลดลง เนื่องจากชิ้นงานที่มีความหยาบผิวที่มากขึ้น อาจส่งผลให้เกิดความไม่เรียบและไม่สม่ำเสมอของพื้นผิวทำให้มีพื้นที่ที่สารละลายสามารถเข้าไปทำการกัดกร่อนผิวหน้าได้มากขึ้น และหลังการเคลือบฟิล์มบางบนผิววัสดุที่มีค่าความหยาบผิวมากขึ้น อาจทำให้ฟิล์มบางที่ได้หลังกระบวนการเคลือบผิวมีปริมาณข้อบกพร่องที่มากขึ้น และทำให้การยึดเกาะระหว่างชั้นฟิล์มและวัสดุลดลง จึงส่งผลให้คุณสมบัติต้านทานการกัดกร่อนของชิ้นฟิล์มลดลง (Walter, R., Bobby Kannan, M., 2011; Durst, O., Ellermeier, J., Berger, C., 2008) นอกจากนี้จากกราฟโพลาริเซชัน (รูปที่ 4.10 4.13 และ 4.16) พบว่าชิ้นงานที่มีความหยาบผิวที่ละเอียดที่สุด คือ ชิ้นงาน B3 ที่ค่าพีเอช 10 ชิ้นงาน C3 ที่ค่าพีเอช 7 และ 10 และชิ้นงาน T3 ที่ค่าพีเอช 10 แสดงให้เห็นถึงพาสซีฟฟิล์ม (passive film) เกิดขึ้นบนผิวของชิ้นงาน ซึ่งพาสซีฟฟิล์มที่เกิดขึ้นนี้จะสามารถช่วยต้านทานการกัดกร่อนได้ ดังนั้นจึงกล่าวได้ว่าความหยาบผิวของวัสดุก่อนการเคลือบผิวนั้นเป็นตัวแปรที่สำคัญต่อคุณสมบัติการต้านทานการกัดกร่อนของฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์และฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรด์ กล่าวคือ เมื่อทำการเคลือบฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์และฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรด์บนวัสดุที่มีค่าความหยาบผิวลดลง สามารถช่วยเพิ่มคุณสมบัติการต้านทานการกัดกร่อนของชิ้นงานให้ดียิ่งขึ้น (Shen-Chih, Lee, Wei-Yu, H., Lai, F.D. 1996; Liu, C., Leyland, A., Lyon, S., Matthews, A. 1995)

4.4 คุณลักษณะของชิ้นงานเหล็กกล้า AISI 4140 ที่ไม่ถูกเคลือบผิว ชิ้นงานเหล็กกล้า AISI 4140 ที่ถูกเคลือบผิวด้วยฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์และชิ้นงานเหล็กกล้า AISI 4140 ที่ถูกเคลือบผิวด้วยฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรด์หลังทดสอบการกัดกร่อน

4.4.1 การวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวของชิ้นงานเหล็กกล้า AISI 4140 ที่ไม่ถูกเคลือบผิว ชิ้นงานเหล็กกล้า AISI 4140 ที่ถูกเคลือบผิวด้วยฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์ และชิ้นงานเหล็กกล้า AISI 4140 ที่ถูกเคลือบผิวด้วยฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรด์ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (SEM)

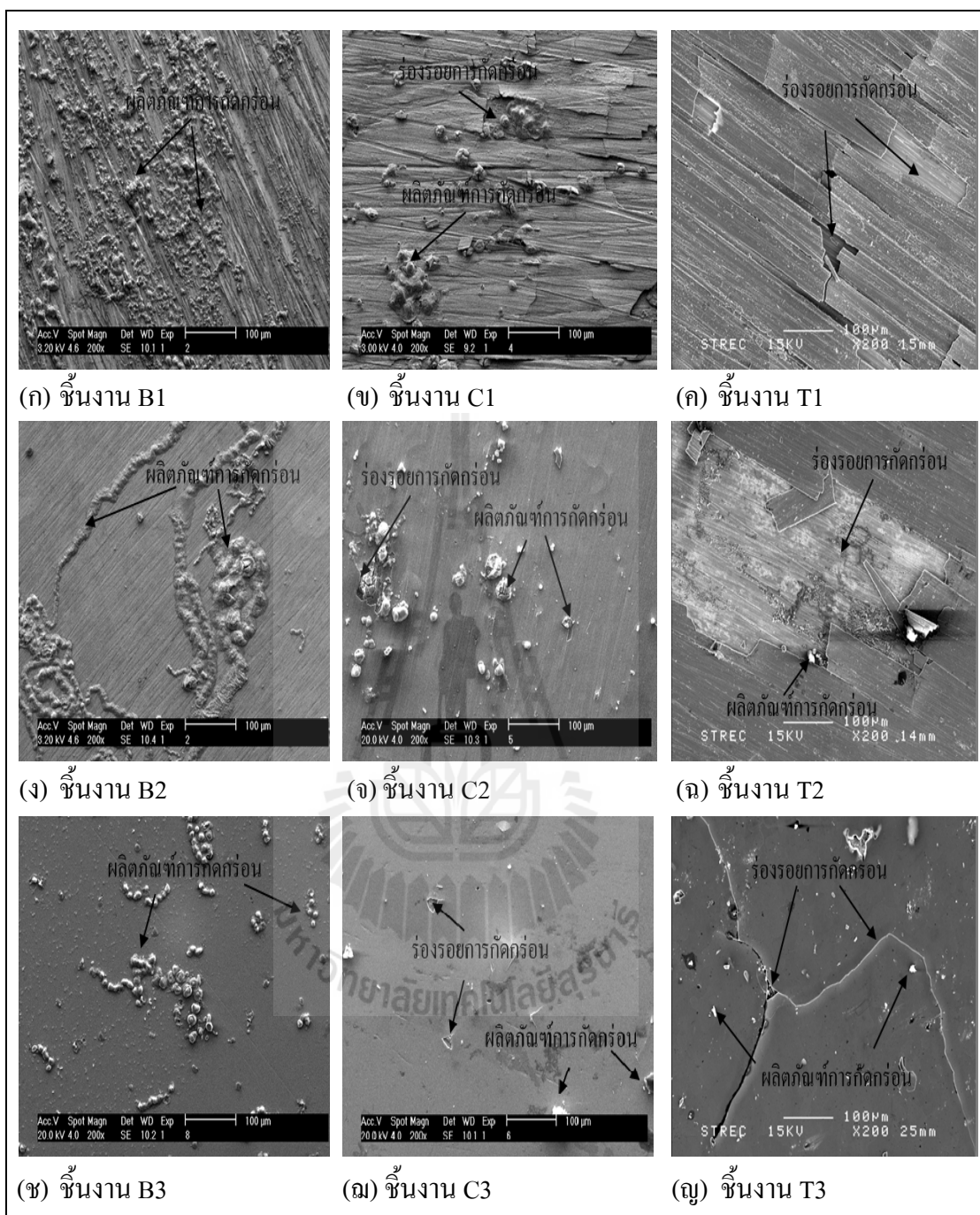
รูปที่ 4.37 ถึง 4.39 แสดงภาพลักษณะพื้นผิวของชิ้นงานเหล็กกล้า AISI 4140 ที่ไม่ถูกเคลือบ ชิ้นงานเหล็กกล้า AISI 4140 ที่ถูกเคลือบผิวด้วยฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์ และชิ้นงานเหล็กกล้า AISI 4140 ที่ถูกเคลือบผิวด้วยฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรด์ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ ความเข้มข้นร้อยละ 3.5 โดยน้ำหนักที่ค่าพีเอช 2 7 และ 10 ตามลำดับ พบว่าพื้นผิวชิ้นงานที่ไม่ถูกเคลือบผิวถูกกัดกร่อนและมีผลิตภัณฑ์การกัดกร่อนเกิดขึ้นบนผิวชิ้นงานมากกว่าชิ้นงานที่ถูกเคลือบ

ผิวด้วยฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์และชิ้นงานที่ถูกเคลือบผิวด้วยฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรด์ที่ทุกค่าพีเอช อาจเป็นผลเนื่องจากชิ้นงานที่ไม่ถูกเคลือบเป็นชิ้นงานเปลือยไม่มีฟิล์มบางเคลือบผิวเพื่อป้องกันการกัดกร่อนจากสารละลาย พื้นผิวจึงถูกกัดกร่อนจากสารละลายได้ง่ายกว่าชิ้นงานที่ถูกเคลือบผิวด้วยฟิล์มบาง โดยร่องรอยการกัดกร่อนที่เกิดขึ้นบนผิวของชิ้นงานที่ไม่ถูกเคลือบผิวนั้นมีลักษณะการกัดกร่อนแบบทั่วไป (general corrosion) กล่าวคือ ชิ้นงานจะถูกสารละลายกัดกร่อนทั่วทั้งผิวน้ำ ซึ่งสามารถสังเกตได้จากผลิตภัณฑ์การกัดกร่อนที่เกิดขึ้นทั่วทั้งผิวน้ำชิ้นงาน ในขณะที่ผิวของฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์และฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรด์ จะเกิดการกัดกร่อนเฉพาะที่ (localized corrosion) ฟิล์มจะถูกกัดกร่อนเกิดเป็นรอยแตกเฉพาะบางบริเวณบนผิวของฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์และฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรด์เท่านั้น และหากพิจารณาเปรียบเทียบพื้นผิวของชิ้นงานที่ถูกเคลือบผิวด้วยฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์ และชิ้นงานที่ถูกเคลือบผิวด้วยฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรด์หลังทดสอบการกัดกร่อน พบว่าที่ถูกเคลือบผิวด้วยฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรด์มีร่องรอยการกัดกร่อนบนผิวชิ้นงานมากกว่าชิ้นงานที่ถูกเคลือบผิวด้วยฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์เพียงเล็กน้อย

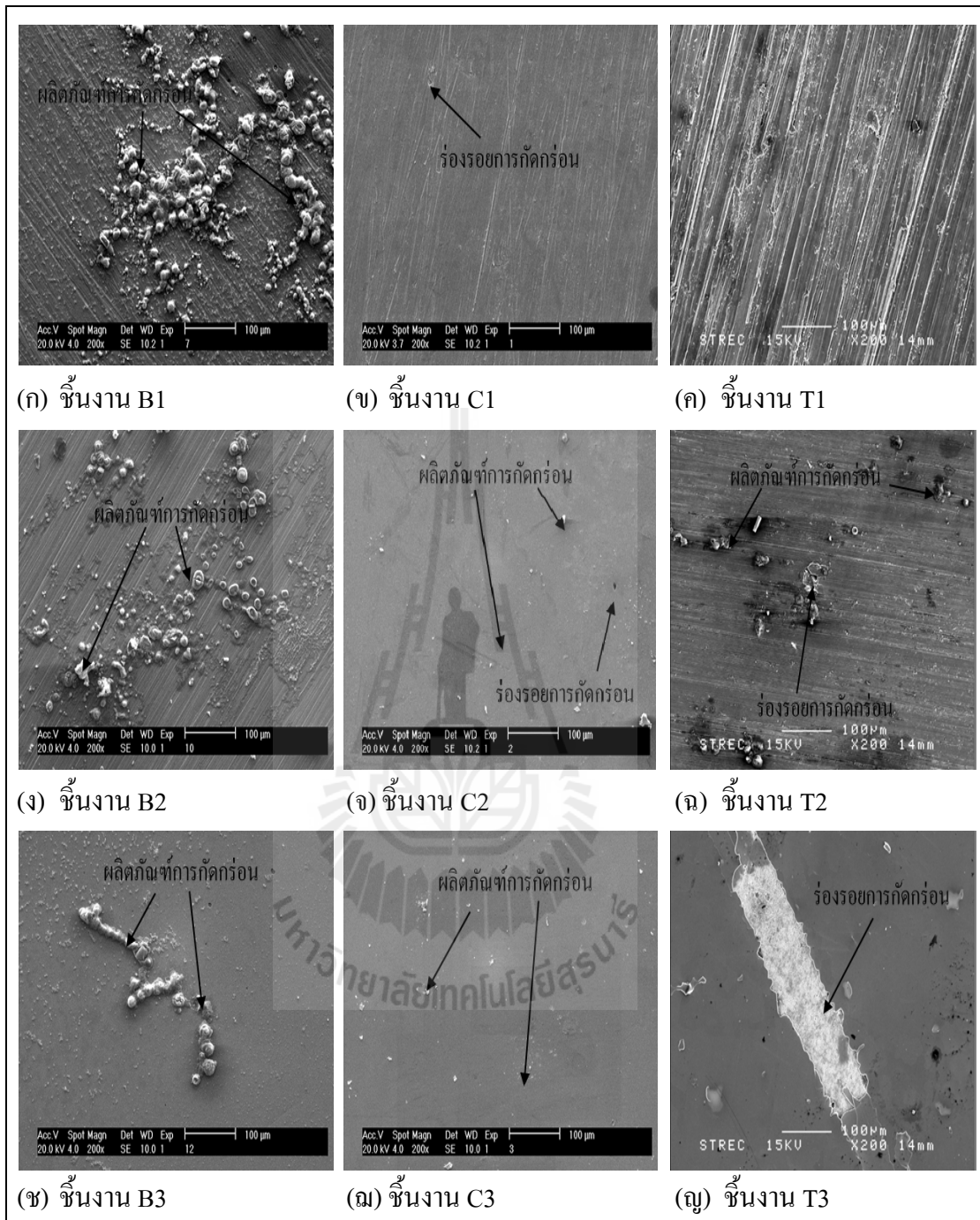
นอกจากนี้ยังพบว่าบริเวณที่ถูกกัดกร่อนและผลิตภัณฑ์การกัดกร่อนที่เกิดขึ้นของชิ้นงานที่ไม่ถูกเคลือบผิวมีการเปลี่ยนแปลงไปตามความหยาบผิวของวัสดุและค่าพีเอชของสารละลาย โดยเมื่อค่าความหยาบผิวของเหล็กกล้า AISI 4140 เพิ่มมากขึ้น บริเวณที่ถูกกัดกร่อนและปริมาณผลิตภัณฑ์การกัดกร่อนที่เกิดขึ้นบนผิวของชิ้นงานมีจำนวนเพิ่มมากขึ้นที่ทุกค่าพีเอช และเป็นที่ยอมรับได้ว่าผลิตภัณฑ์การกัดกร่อนที่เกิดขึ้นบนผิวชิ้นงาน B1 และ B2 (จัดด้วยกระดาษเบอร์ 180 และ 600 ตามลำดับ) จะเกิดขึ้นตามรอยแนวขีดของกระดาษทราย ส่วนผลิตภัณฑ์การกัดกร่อนที่เกิดขึ้นบนผิวชิ้นงาน B3 (จัดด้วยกระดาษเบอร์ 1200) มีลักษณะเป็นอนุภาคขนาดเล็กและกระจายทั่วผิวน้ำชิ้นงาน แสดงให้เห็นว่าผลของการขัดผิวชิ้นงานด้วยกระดาษทรายที่แตกต่างกัน ส่งผลต่อการเกิดการกัดกร่อนบนผิวชิ้นงาน และพบว่าบริเวณที่ถูกกัดกร่อนและผลิตภัณฑ์การกัดกร่อนที่เกิดขึ้นบนผิวของชิ้นงานที่ถูกเคลือบผิวด้วยฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์ และชิ้นงานที่ถูกเคลือบผิวด้วยฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรด์มีการเปลี่ยนแปลงไปตามความหยาบผิวของเหล็กกล้า AISI 4140 เช่นเดียวกับกับชิ้นงานที่ไม่ถูกเคลือบผิว กล่าวคือ เมื่อเคลือบฟิล์มบางบนเหล็กกล้า AISI 4140 ที่มีค่าความหยาบผิวมากขึ้น ส่งผลให้บริเวณที่ถูกกัดกร่อนและผลิตภัณฑ์การกัดกร่อนบนผิวของชิ้นงานเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจนที่ค่าพีเอช 2 โดยจะเห็นชัดเจนได้ว่าชั้นฟิล์มบางส่วนของชิ้นงาน C1 และ T1 ที่ค่าพีเอช 2 ซึ่งเป็นชิ้นงานที่มีค่าความหยาบผิวของเหล็กกล้า AISI 4140 มากที่สุด พบว่ามีรอยแตกและหลุดออกจากผิวชิ้นงานหลังทดสอบการกัดกร่อน ซึ่งเป็นผลเนื่องมาจากความหยาบผิวของวัสดุพื้นที่มากขึ้น ส่งผลให้ภายหลังการเคลือบผิวด้วยฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์

นั้นผิวชิ้นงานเกิดความไม่สม่ำเสมอ และมีการยึดเกาะระหว่างชั้นฟิล์มและผิววัสดุลดลง ทำให้เกิดรอยแตกบนผิวฟิล์มบางและหลุดออกจากผิววัสดุขณะทดสอบการกัดกร่อนเป็นสาเหตุให้สารละลายสามารถแทรกซึมผ่านชั้นฟิล์มเข้าไปกัดกร่อนผิววัสดุได้ง่ายขึ้น ส่วนที่ค่าความหยาบผิวของเหล็กกล้า AISI 4140 ที่ลดลง จะพบรอยแตกของชั้นฟิล์มและปริมาณผลิตภัณฑ์การกัดกร่อนที่น้อยลงตามลำดับ สำหรับที่ค่าพีเอช 7 และ 10 นั้น พบว่าเมื่อค่าความหยาบผิวของเหล็กกล้า AISI 4140 ลดลง พื้นผิวของชิ้นงานที่ถูกเคลือบผิวด้วยฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์และชิ้นงานที่ถูกเคลือบผิวด้วยฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรด์มีการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยหลังการทดสอบการกัดกร่อน นอกจากนี้ได้ทำการวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวของชิ้นงานเหล็กกล้า AISI 4140 ที่ไม่ถูกเคลือบ ชิ้นงานเหล็กกล้า AISI 4140 ที่ถูกเคลือบผิวด้วยฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์ และชิ้นงานเหล็กกล้า AISI 4140 ที่ถูกเคลือบผิวด้วยฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรด์ก่อนทดสอบการกัดกร่อนดังแสดงในภาคผนวก ง เพื่อให้เห็นความแตกต่างของลักษณะพื้นผิวของชิ้นงานก่อนและหลังทดสอบการกัดกร่อน

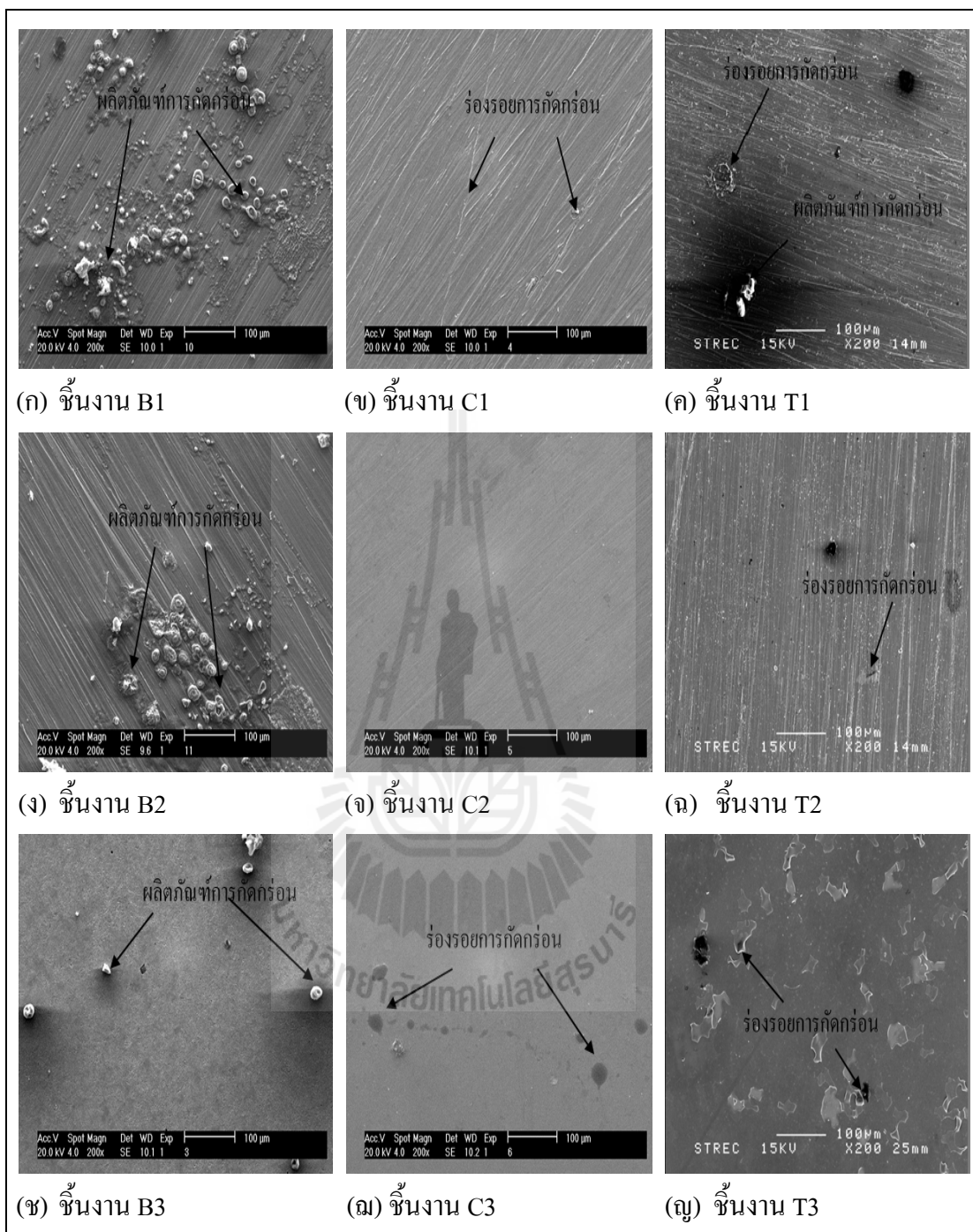
จากผลการวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวดังกล่าวสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ของผลการเคลือบผิวด้วยฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์และฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรด์ ผลของค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) และความหยาบผิวของเหล็กกล้า AISI 4140 ที่มีต่อพฤติกรรมการกัดกร่อนของชิ้นงาน (ในหัวข้อ 4.2.1 4.2.2 และ 4.2.3) ที่แสดงให้เห็นว่าเมื่อเคลือบผิววัสดุด้วยฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์และฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรด์ ค่าพีเอชของสารละลายที่เพิ่มขึ้น และค่าความหยาบผิวที่ลดลงจะส่งผลให้ชิ้นงานมีการต้านทานการกัดกร่อนที่ดีขึ้น



รูปที่ 4.37 ภาพลักษณะพื้นผิวของชิ้นงานเหล็กกล้า AISI 4140 ที่ไม่ถูกเคลือบผิว ชิ้นงานเหล็กกล้า AISI 4140 ที่ถูกเคลือบผิวด้วยฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์และชิ้นงานเหล็กกล้า AISI 4140 ที่ถูกเคลือบผิวด้วยฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรด์ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้นร้อยละ 3.5 โดยน้ำหนักที่ค่าพีเอช 2

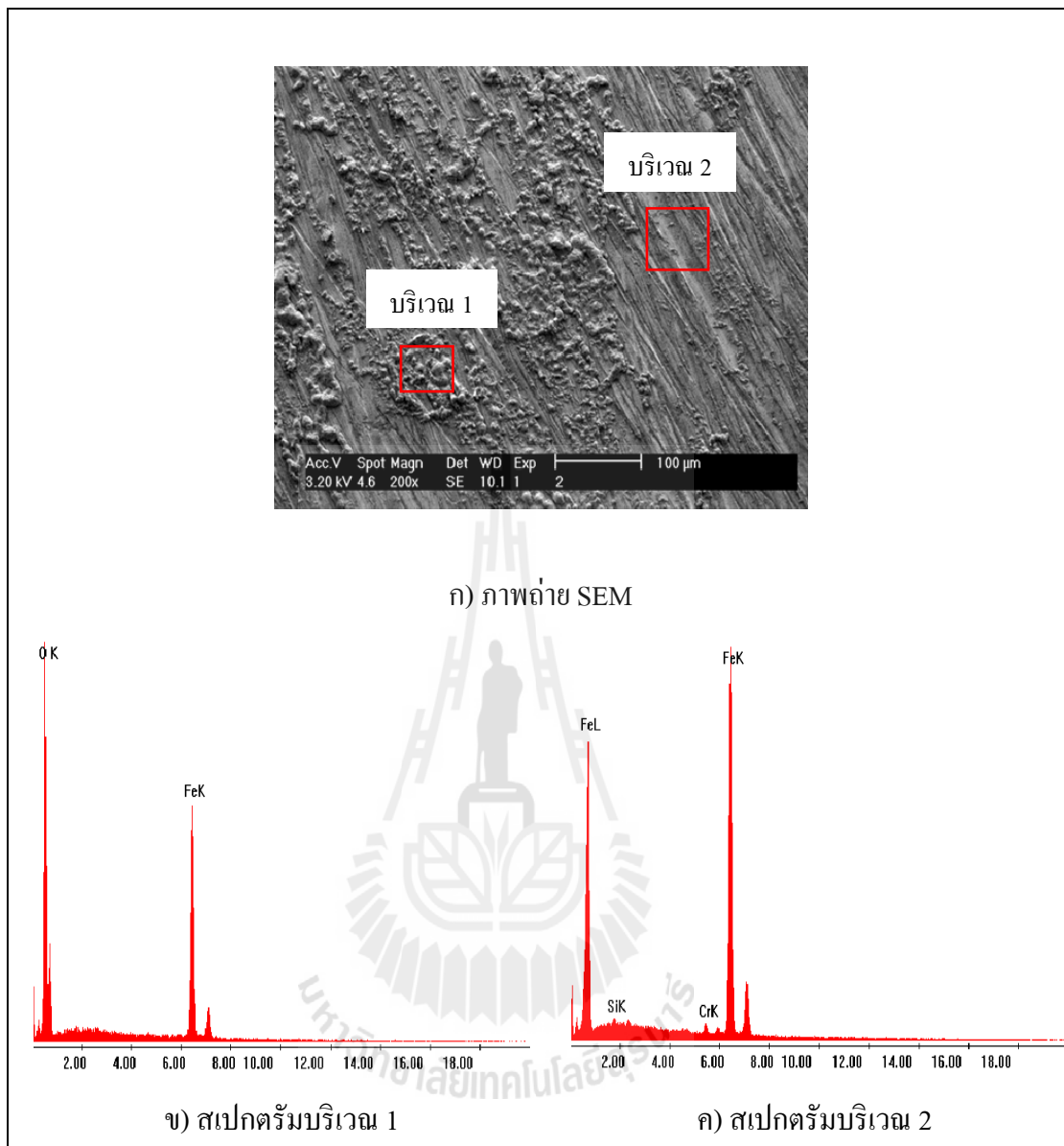


รูปที่ 4.38 ภาพลักษณะพื้นผิวของชิ้นงานเหล็กกล้า AISI 4140 ที่ไม่ถูกเคลือบผิว ชิ้นงานเหล็กกล้า AISI 4140 ที่ถูกเคลือบผิวด้วยฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์และชิ้นงานเหล็กกล้า AISI 4140 ที่ถูกเคลือบผิวด้วยฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรด์ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้นร้อยละ 3.5 โดยน้ำหนักที่ค่าพีเอช 7

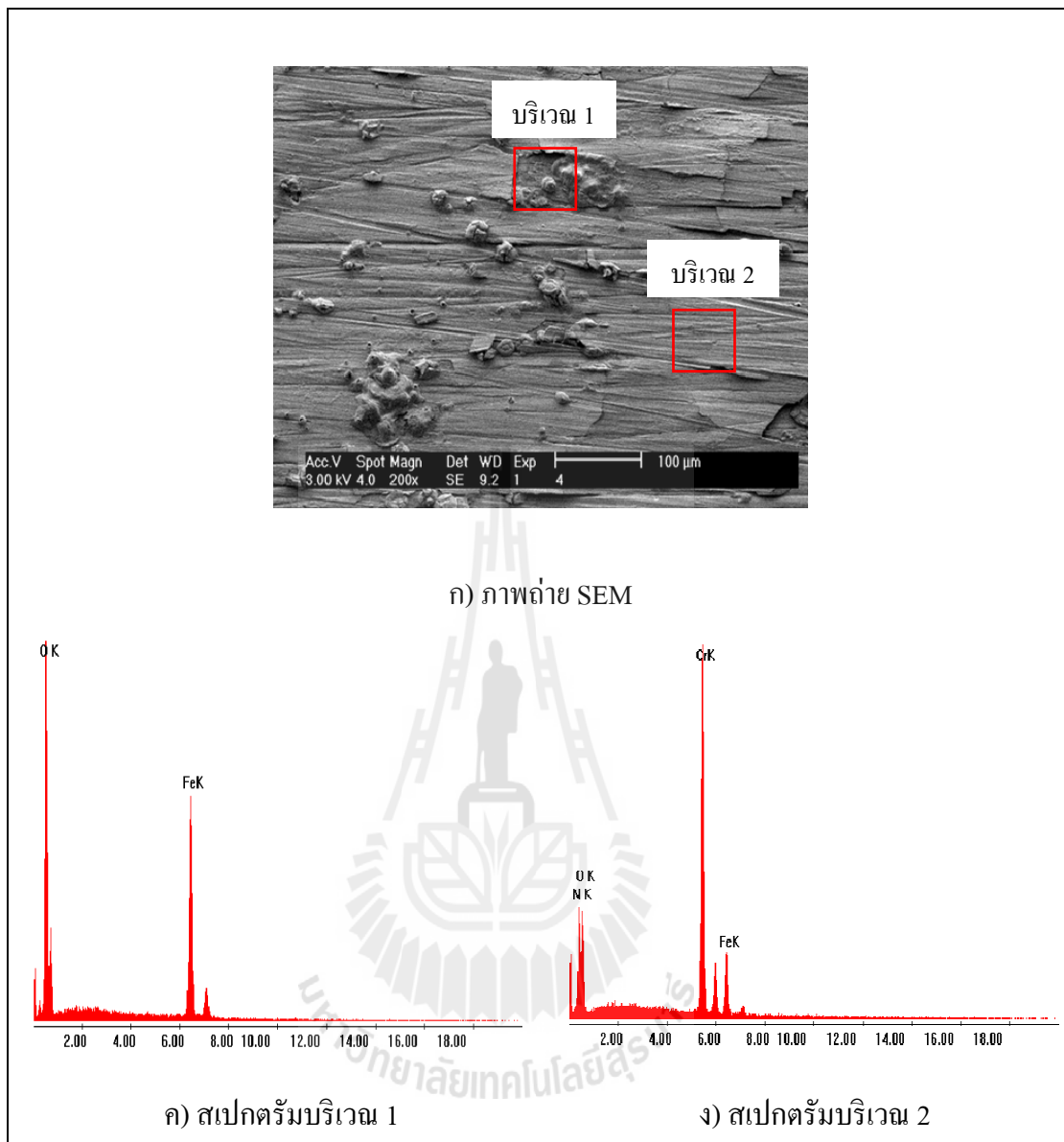


รูปที่ 4.39 ภาพลักษณะพื้นผิวของชิ้นงานเหล็กกล้า AISI 4140 ที่ไม่ถูกเคลือบผิว ชิ้นงานเหล็กกล้า AISI 4140 ที่ถูกเคลือบผิวด้วยฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์และชิ้นงานเหล็กกล้า AISI 4140 ที่ถูกเคลือบผิวด้วยฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรด์ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้นร้อยละ 3.5 โดยน้ำหนักที่ค่าพีเอช 10

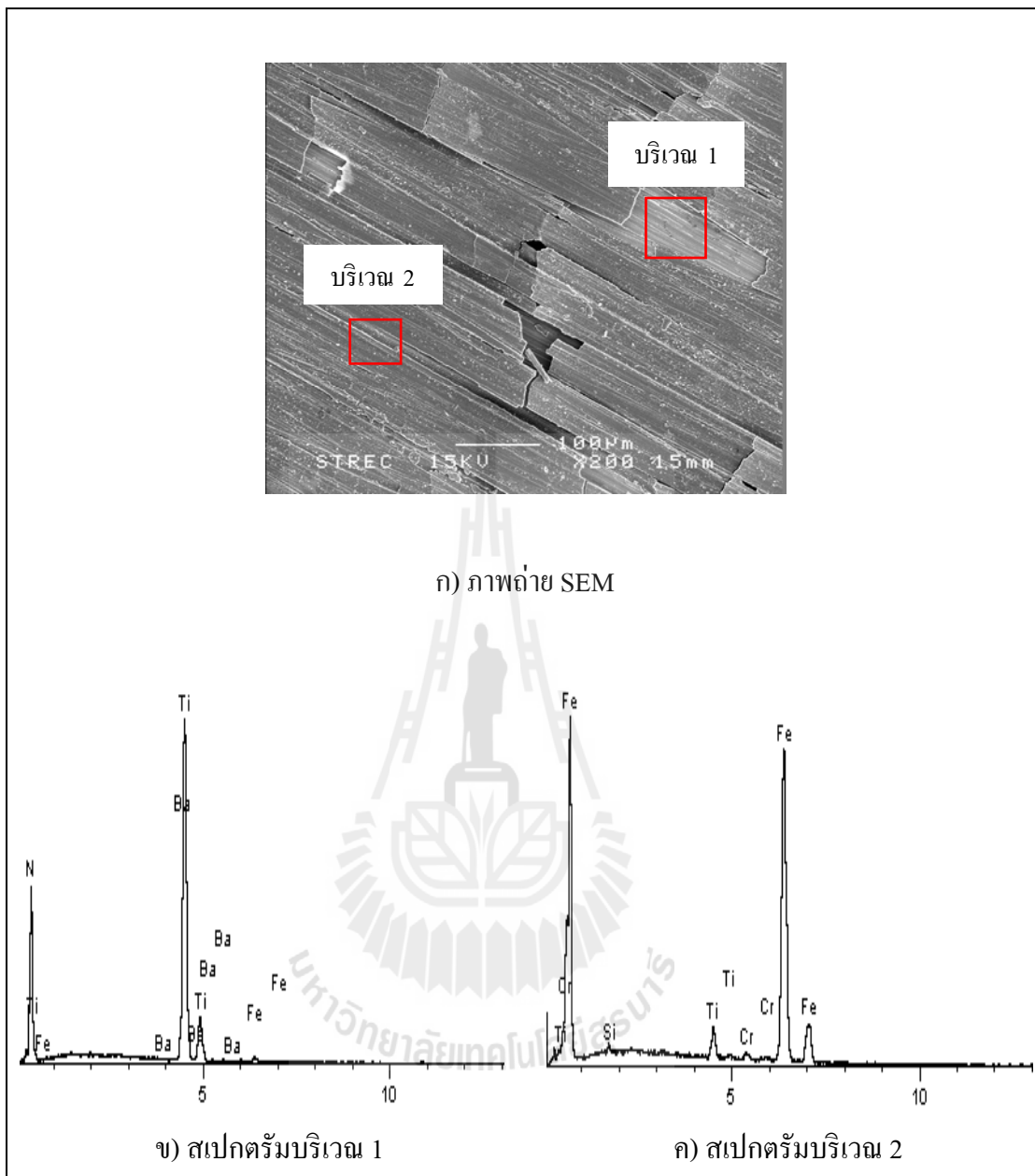
นอกจากการวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวของชิ้นงานหลังการทดสอบการกัดกร่อนด้วยกล้อง SEM แล้วได้มีการตรวจสอบส่วนผสมทางเคมี ณ บริเวณร่องรอยการกัดกร่อนและผลิตภัณฑ์การกัดกร่อนที่เกิดขึ้นบนผิวชิ้นงานด้วยเทคนิค EDX ซึ่งเป็นเทคนิคที่ใช้ร่วมกับกล้อง SEM โดยจะยกตัวอย่างการตรวจสอบส่วนผสมทางเคมี ณ บริเวณที่ถูกกัดกร่อนและผลิตภัณฑ์การกัดกร่อนที่เกิดขึ้นบนผิวของชิ้นงาน B1 C1 และ T1 หลังทดสอบการกัดกร่อนในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ ความเข้มข้นร้อยละ 3.5 โดยน้ำหนักที่ค่าพีเอช 2 ซึ่งเป็นชิ้นงานที่ไม่ถูกเคลือบผิว ชิ้นงานที่ถูกเคลือบผิวด้วยโครเมียมไนไตรด์และชิ้นงานที่ถูกเคลือบผิวด้วยไทเทเนียมไนไตรด์ที่มีการเกิดกัดกร่อนมากที่สุด ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 4.40 ถึง 4.42 ตามลำดับ หลังการตรวจสอบส่วนผสมทางเคมีบนพื้นผิวชิ้นงาน B1 และ C1 พบว่าบริเวณที่ถูกกัดกร่อนและผลิตภัณฑ์การกัดกร่อนที่เกิดขึ้นหรือบริเวณ 1 มีธาตุเหล็ก (Fe) และธาตุออกซิเจน (O) เป็นส่วนผสมทางเคมีเป็นหลัก ซึ่งธาตุ Fe และ O ที่พบอาจเป็นส่วนผสมทางเคมีของเหล็กออกไซด์ที่เกิดจากสารละลายเข้าไปกัดกร่อนโดยตรงที่ผิววัสดุของชิ้นงาน B1 และเกิดจากสารละลายแพร่ซึมผ่านชั้นฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์เข้าไปกัดกร่อนผิววัสดุของชิ้นงาน C1 จนเกิดเป็นเหล็กออกไซด์ขึ้นบนผิวชิ้นงาน สำหรับบริเวณที่ถูกกัดกร่อนของชิ้นงาน T1 หลังการตรวจสอบพบธาตุ Fe เป็นส่วนผสมทางเคมีเป็นหลัก ซึ่งสามารถระบุได้ว่าบริเวณนี้ฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรด์ถูกกัดกร่อนจนหลุดออกจากผิววัสดุจนหมด จึงพบธาตุ Fe ที่เป็นส่วนผสมหลักของวัสดุเพียงอย่างเดียว และเนื่องจากบริเวณนี้ไม่พบผลิตภัณฑ์การกัดกร่อนบนผิวชิ้นงาน จึงไม่พบธาตุ O เช่นเดียวกับกรณีชิ้นงาน B1 และ C1 ในขณะเดียวกันได้ทำการวิเคราะห์บริเวณที่ไม่ถูกกัดกร่อนหรือบริเวณ 2 เพื่อให้เห็นความแตกต่างขององค์ประกอบทางเคมีหลังการทดสอบการกัดกร่อนระหว่างบริเวณที่ถูกกัดกร่อนและไม่ถูกกัดกร่อนอีกด้วย โดยบริเวณ 2 ของชิ้นงาน B1 พบองค์ประกอบของธาตุเหล็ก (Fe) เป็นหลัก ซึ่งเป็นธาตุองค์ประกอบหลักของวัสดุหรือเหล็กกล้า AISI 4140 ส่วนชิ้นงาน C1 พบองค์ประกอบของธาตุโครเมียม (Cr) และไนโตรเจน (N) ซึ่งเป็นธาตุองค์ประกอบหลักของฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์ และชิ้นงาน T1 พบองค์ประกอบของธาตุไทเทเนียม (Ti) และไนโตรเจน (N) เป็นหลัก ซึ่งเป็นธาตุองค์ประกอบหลักของฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรด์ (สำหรับการตรวจสอบส่วนผสมทางเคมี ณ บริเวณร่องรอยการกัดกร่อนและผลิตภัณฑ์การกัดกร่อนของชิ้นงานอื่นๆ สามารถศึกษาเพิ่มเติมได้ที่ภาคผนวก จ)



รูปที่ 4.40 ภาพถ่าย SEM และผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีบนพื้นผิวของ
ชิ้นงาน B1 หลังทดสอบการกัดกร่อนในสารละลายโซเดียมคลอไรด์
ความเข้มข้นร้อยละ 3.5 โดยน้ำหนักที่ค่าพีเอช 2



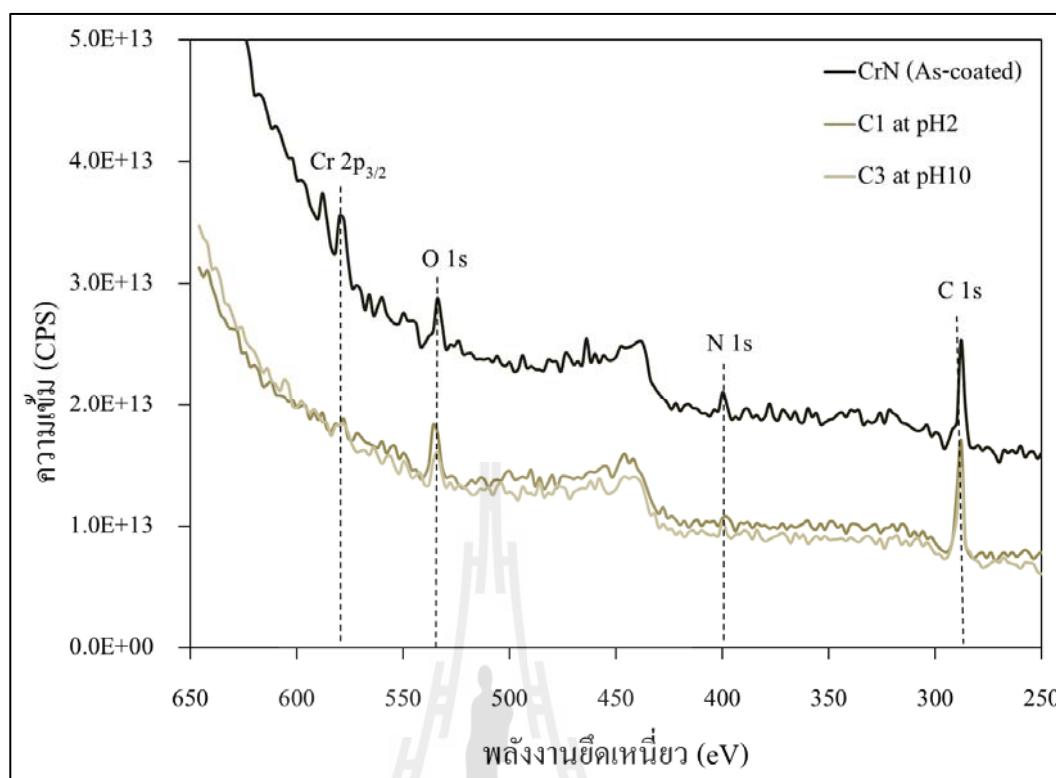
รูปที่ 4.41 ภาพถ่าย SEM และผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีบนพื้นผิวของ
ชิ้นงาน C1 หลังทดสอบการกัดกร่อนในสารละลายโซเดียมคลอไรด์
ความเข้มข้นร้อยละ 3.5 โดยน้ำหนักที่ค่าพีเอช 2



รูปที่ 4.42 ภาพถ่าย SEM และผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีบนพื้นผิวของ
ชิ้นงาน T1 หลังทดสอบการกัดกร่อนในสารละลายโซเดียมคลอไรด์
ความเข้มข้นร้อยละ 3.5 โดยน้ำหนักที่ค่าพีเอช 2

4.4.2 การวิเคราะห์คุณสมบัติของฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์ที่เคลือบบนเหล็กกล้า AISI 4140 ด้วยเทคนิค X-ray Photoelectron Spectroscopy (XPS)

รูปที่ 4.43 แสดงผลสเปกตรัมของ XPS ของชิ้นงานที่ถูกเคลือบผิวด้วยฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์ก่อนและหลังทดสอบการกัดกร่อน โดยชิ้นงาน C1 ที่ค่าพีเอช 2 และชิ้นงาน C3 ที่ค่าพีเอช 10 หลังทดสอบการกัดกร่อนถูกเลือกเพื่อตรวจสอบด้วยเทคนิค XPS เพราะชิ้นงานดังกล่าวเป็นชิ้นงานที่มีอัตราการกัดกร่อนสูงที่สุด และเป็นชิ้นงานที่มีอัตราการกัดกร่อนต่ำที่สุด ตามลำดับจากการตรวจสอบพบส่วนผสมทางเคมีที่ค่าระดับพลังงาน 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 (Emery, C., Chourasia A.R., Yashar, P., 1999; A.Vyas and et al., 2008; Vyas, A., Shen, Y.G., Zhou, Z.F., Li, K.Y., 2005; Bertoti, I. 2002) และพบว่าชิ้นงานที่ถูกเคลือบผิวด้วยโครเมียมไนไตรด์ก่อนการทดสอบการกัดกร่อนพบการปรากฏของธาตุโครเมียมและไนโตรเจนอย่างชัดเจน แต่หลังการทดสอบการกัดกร่อน พบว่าชิ้นงาน C1 ที่ค่าพีเอช 2 และชิ้นงาน C3 ที่ค่าพีเอช 10 มีปริมาณของธาตุโครเมียมลดลงแทบจะไม่ปรากฏเห็นบนเส้นสเปกตรัม และชิ้นงาน C1 ที่ค่าพีเอช 2 มีปริมาณไนโตรเจนที่ลดลงจนแทบจะปรากฏเห็นบนเส้นสเปกตรัมเช่นเดียวกัน แต่ชิ้นงาน C3 ที่ค่าพีเอช 10 นั้นยังพบปริมาณธาตุไนโตรเจนอยู่เล็กน้อย จากผลดังกล่าวอาจกล่าวได้ว่าหลังการทดสอบการกัดกร่อนฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์ที่เคลือบบนผิววัสดุได้ถูกกัดกร่อนจนฟิล์มบางส่วนได้หลุดออกจากพื้นผิววัสดุ ส่งผลทำให้ปริมาณของธาตุโครเมียมและไนโตรเจนลดลงอย่างไรก็ตามเนื่องจากพื้นผิวของฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์ของชิ้นงาน C3 ที่ค่าพีเอช 10 ถูกกัดกร่อนน้อยกว่าชิ้นงาน C1 ที่ค่าพีเอช 2 จึงยังพบธาตุไนโตรเจนปรากฏอยู่บนพื้นผิวของชิ้นงานธาตุออกซิเจนและคาร์บอนที่ถูกตรวจพบบนพื้นผิวของฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์ก่อนการทดสอบการกัดกร่อน และชิ้นงาน C3 ที่ค่าพีเอช 10 นั้นมีความเป็นไปได้ว่าเป็นธาตุออกซิเจนและคาร์บอนที่เป็นสารมลทินอยู่ในอากาศทั่วไป หรือจากกระบวนการเคลือบไอทางกายภาพ (Tunmee, S. Euaruksakul, C., Songsiriritthigul, P., Witit-Anun, N., Wongpanya, P., 2011) หรือเป็นธาตุออกซิเจนที่มาจากเกิดการเกิดออกซิเดชันของฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์ และธาตุออกซิเจนที่ถูกตรวจพบในชิ้นงาน C1 ที่ค่าพีเอช 2 พบว่ามีปริมาณที่เพิ่มขึ้น ซึ่งเกิดจากการเกิดออกซิเดชันที่มากขึ้นเนื่องจากการกัดกร่อนที่มากขึ้น แต่อย่างไรก็ตามพบว่าค่าระดับพลังงานของธาตุโครเมียมที่ถูกตรวจบนผิวของชิ้นงานก่อนทดสอบการกัดกร่อนพบมีค่าใกล้เคียงกับค่าพลังงานของโครเมียมออกไซด์ (Cr_2O_3) ตามรายงานวิจัยของ (Fenker, M., Balzer, M., Kappl, H, 2006) ซึ่งอาจเกิดจากธาตุโครเมียมในเนื้อฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์ทำปฏิกิริยากับออกซิเจนเกิดเป็นสารประกอบ Cr_2O_3 โดยสารประกอบชนิดนี้เป็นฟิล์มที่สามารถต้านทานการกัดกร่อนได้ดี



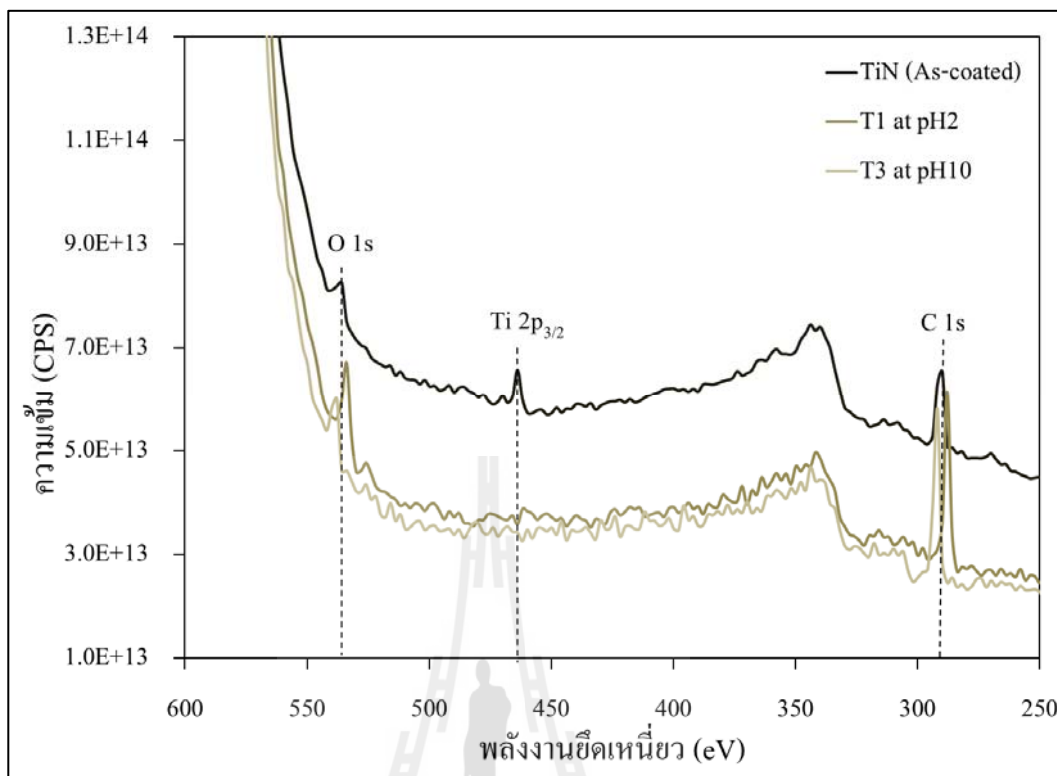
รูปที่ 4.43 ผลสเปกตรัมของ XPS ของชิ้นงานที่ถูกเคลือบผิวด้วยฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์ ก่อนและหลังทดสอบการกัดกร่อน

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

รูปที่ 4.44 แสดงผลสเปกตรัมของ XPS ของชิ้นงานที่ถูกเคลือบผิวด้วยฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรด์ก่อนและหลังทดสอบการกัดกร่อน โดยชิ้นงาน T1 ที่ค่าพีเอช 2 และชิ้นงาน T3 ที่ค่าพีเอช 10 หลังทดสอบการกัดกร่อนถูกเลือกเพื่อตรวจสอบด้วยเทคนิค XPS เพราะชิ้นงานดังกล่าวเป็นชิ้นงานที่มีอัตราการกัดกร่อนสูงที่สุด และเป็นชิ้นงานที่มีอัตราการกัดกร่อนต่ำที่สุด ตามลำดับ จากการตรวจสอบพบส่วนผสมทางเคมีที่ค่าระดับพลังงาน 463.1, 535.2 และ 289.8 eV ซึ่งค่าระดับพลังงานดังกล่าวมีค่าใกล้เคียงกับค่าระดับพลังงานของธาตุ Ti 2p_{3/2}, O 1s, และ C 1s ตามลำดับ (Diana, L., Carlos, S., Alejandro, T., 2005; Subramanian, B., Muraleedharan, C.V., Ananthakumat, R., Jayachandran., 2011; Milosev, I., Strehblow, H.-H., Navinsek, B., 1995; Bertoti, I. 2002) แต่ไม่พบการปรากฏของค่าระดับพลังงานของธาตุไนโตรเจน ซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักของฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรด์ (อาจเป็นผลเนื่องจากธาตุคาร์บอนที่เป็นสาร

มลทินมีอยู่มากบนพื้นผิว ส่งผลให้สเปกตรัมของธาตุไนโตรเจนไม่ปรากฏให้เห็นอย่างชัดเจน) และพบว่าชิ้นงานที่ถูกเคลือบผิวด้วยไทเทเนียมไนไตรด์ก่อนการทดสอบการกัดกร่อนพบการปรากฏของธาตุไทเทเนียมอย่างชัดเจน แต่หลังการทดสอบการกัดกร่อนพบว่าชิ้นงาน T1 ที่ค่าพีเอช 2 และชิ้นงาน T3 ที่ค่าพีเอช 10 มีปริมาณของธาตุไทเทเนียมลดลงแทบจะไม่ปรากฏเห็นบนเส้นสเปกตรัม และพบว่าธาตุออกซิเจนมีปริมาณเพิ่มมากขึ้น แต่ชิ้นงาน T1 ที่ค่าพีเอช 2 มีแนวโน้มมีปริมาณของธาตุออกซิเจนที่มากกว่าชิ้นงาน T3 ที่ค่าพีเอช 10 จากผลดังกล่าวอาจกล่าวได้ว่าหลังการทดสอบการกัดกร่อนฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรด์ถูกกัดกร่อนจนฟิล์มบางส่วนได้หลุดออกจากพื้นผิววัสดุ จึงส่งผลให้ปริมาณของธาตุไทเทเนียมลดลง และปริมาณของธาตุออกซิเจนที่เพิ่มขึ้น หลังทดสอบการกัดกร่อนคาดว่าเป็นผลมาจากการเกิดออกซิเดชันของฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรด์ หรือการเกิดออกซิเดชันของวัสดุในกรณีที่ฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรด์หลุดออกจากผิววัสดุขณะทดสอบการกัดกร่อน โดยชิ้นงาน T1 ที่ค่าพีเอช 2 พบปริมาณของธาตุออกซิเจนที่มากกว่าชิ้นงาน T3 ที่ค่าพีเอช 10 เนื่องจากถูกกัดกร่อนมากกว่า จึงส่งผลให้เกิดการออกซิเดชันมากขึ้น อย่างไรก็ตามพบว่าค่าระดับพลังงานของธาตุไทเทเนียมที่ถูกตรวจพบบนผิวของชิ้นงานก่อนทดสอบการกัดกร่อนมีค่าใกล้เคียงกับค่าพลังงานของไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) ตามรายงานวิจัยของ (Ananthakumar, R., Subramanian, Akira, K., Jayachandran M., 2011) ซึ่งอาจเกิดจากธาตุไทเทเนียมเนื้อฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรด์ทำปฏิกิริยากับออกซิเจนเกิดเป็นสารประกอบ TiO_2 โดยสารประกอบชนิดนี้เป็นฟิล์มที่สามารถต้านทานการกัดกร่อนได้ดี นอกจากนี้ยังพบว่าค่าระดับพลังงานของธาตุออกซิเจนที่ถูกตรวจพบบนผิวของชิ้นงาน T1 ที่ค่าพีเอช 2 มีค่าเปลี่ยนแปลงจาก 535.2 ไปเป็น 533.8 eV แสดงให้เห็นว่า oxidation state ของธาตุออกซิเจนเปลี่ยนแปลงไป แต่ยังไม่เป็นที่แน่ชัดว่าเป็น oxidation state ในรูปแบบใด ซึ่งในอนาคตอาจจะมีการทดสอบเพิ่มเติมเพื่อให้ได้ข้อมูลที่สมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

จากผลของการทดสอบด้วยเทคนิค XPS ในงานวิจัยนี้เป็นเพียงข้อมูลเบื้องต้น และการวิเคราะห์ผลของสเปกตรัมยังมีสัญญาณรบกวนในกระบวนการวัดอยู่มาก โดยอาจจะเกิดจากสมรรถนะของเครื่อง XPS ซึ่งในอนาคตอาจจะมีการทำการวิจัยและวิเคราะห์เพิ่มเติมเพื่อให้ได้ข้อมูลที่สมบูรณ์ แม่นยำ และสามารถใช้ประโยชน์ในด้านกระบวนการเคลือบผิวโลหะได้มากยิ่งขึ้น



รูปที่ 4.44 ผลสเปกตรัมของ XPS ของชิ้นงานที่ถูกเคลือบผิวด้วยฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรด์ ก่อนและหลังทดสอบการกัดกร่อน

บทที่ 5

บทสรุปและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

5.1.1 จากผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRD พบว่าฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์มีโครงสร้างผลึกระนาบ (111) (200) (220) และ (311) โดยมีระนาบ (111) เป็น preferred orientation

5.1.2 จากผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRD พบว่าฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรด์มีโครงสร้างผลึกระนาบ (111) (200) (220) และ (311) โดยมีระนาบ (111) เป็น preferred orientation

5.1.3 ชิ้นงานเหล็กกล้า AISI 4140 ที่ถูกเคลือบผิวด้วยฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์และชิ้นงานเหล็กกล้า AISI 4140 ที่ถูกเคลือบผิวด้วยฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรด์มีความสามารถต้านทานการกัดกร่อนได้ดีกว่าชิ้นงานเหล็กกล้า AISI 4140 ที่ไม่ถูกเคลือบผิวที่ทุกค่าพีเอช

5.1.4 ชิ้นงานเหล็กกล้า AISI 4140 ที่ถูกเคลือบผิวด้วยฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์มีความสามารถต้านทานการกัดกร่อนดีกว่าชิ้นงานเหล็กกล้า AISI 4140 ที่ถูกเคลือบผิวด้วยฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรด์

5.1.5 ค่าความหยาบผิวของเหล็กกล้า AISI 4140 ที่ลดลง ส่งผลให้ชิ้นงานเหล็กกล้า AISI 4140 ที่ไม่ถูกเคลือบผิว ชิ้นงานเหล็กกล้า AISI 4140 ที่ถูกเคลือบผิวด้วยฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์ และชิ้นงานเหล็กกล้า AISI 4140 ที่ถูกเคลือบผิวด้วยฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรด์มีความสามารถต้านทานการกัดกร่อนดีขึ้น

5.1.6 ค่าพีเอชของสารละลายที่ใช้ในการทดสอบเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ชิ้นงานเหล็กกล้า AISI 4140 ที่ไม่ถูกเคลือบผิว ชิ้นงานเหล็กกล้า AISI 4140 ที่ถูกเคลือบผิวด้วยฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์ และชิ้นงานเหล็กกล้า AISI 4140 ที่ถูกเคลือบผิวด้วยฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรด์มีความสามารถต้านทานการกัดกร่อนดีขึ้น

5.1.7 ชิ้นงานเหล็กกล้า AISI 4140 ที่ถูกเคลือบผิวด้วยโครเมียมไนไตรด์และชิ้นงานเหล็กกล้า AISI 4140 ที่ถูกเคลือบผิวด้วยไทเทเนียมไนไตรด์หลังทดสอบการกัดกร่อนมีพื้นที่ถูกกัดกร่อนและปริมาณผลิตภัณฑ์การกัดกร่อนที่น้อยกว่าชิ้นงานเหล็กกล้า AISI 4140 ที่ไม่ถูกเคลือบผิว และค่าความหยาบผิวที่ลดลงและสารละลายที่มีค่าพีเอชเพิ่มมากขึ้นส่งผลให้ชิ้นงานมีพื้นที่ถูกกัดกร่อนและปริมาณผลิตภัณฑ์การกัดกร่อนที่ลดลง

5.2 ข้อเสนอแนะ

พฤติกรรมการกัดกร่อนของชิ้นงานเหล็กกล้า AISI 4140 ที่ไม่ถูกเคลือบผิว ชิ้นงานเหล็กกล้า AISI 4140 ที่ถูกเคลือบผิวด้วยฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์ และชิ้นงานเหล็กกล้า AISI 4140 ที่ถูกเคลือบผิวด้วยฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรด์ขึ้นอยู่กับหลายตัวแปร เช่น ชนิดของฟิล์มที่เคลือบบนผิวชิ้นงาน ความหนาของผิวของวัสดุพื้นก่อนการเคลือบผิว ค่าพีเอชของสารละลายหรือสถานะแวดล้อมที่มีฤทธิ์การกัดกร่อน ซึ่งในวิทยานิพนธ์เล่มนี้ได้ศึกษาผลของตัวแปรเหล่านี้ โดยได้ทดลองและผลการทดลองดังแสดงในบทที่ผ่านมา แต่ข้อมูลดังกล่าวเป็นเพียงข้อมูลเบื้องต้น แต่เพื่อการประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมจริงควรมีการทำวิจัยศึกษาเพิ่มเติม ดังนั้นผู้ทำวิจัยจึงมีข้อเสนอแนะในการทำวิจัยต่อไป ดังนี้

5.2.1 ควรเพิ่มความหนาของชั้นฟิล์มให้อยู่ระดับ 2-3 ไมครอนเมตรขึ้นไป เพื่อการใช้งานได้จริง เนื่องจากส่วนใหญ่ในอุตสาหกรรมจะทำการเคลือบผิววัสดุด้วยชั้นฟิล์มที่มีความหนาในระดับนี้

5.2.2 ควรปรับค่าความหนาของผิวของวัสดุพื้นให้มีหลายช่วงค่าความหนา เพื่อให้เห็นความแตกต่างของพฤติกรรมการกัดกร่อนของชิ้นงานที่มีค่าความหนาผิวต่างกัน ได้ชัดเจน

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

5.2.3 ควรมีการทดสอบคุณสมบัติเชิงกลของชั้นฟิล์มเพิ่มเติม เช่น ค่าความแข็ง ความสามารถในการยึดเกาะ และอัตราการสึกหรอของชั้นฟิล์ม เพื่อนำผลมาใช้ประโยชน์ร่วมกับผลทางด้านพฤติกรรมการกัดกร่อน

รายการอ้างอิง

- ประทีป วงศ์บัณฑิต. (2543). การสร้างแผนภูมิพอร์แบบซ์ของเหล็กกล้าไร้สนิม 316L ในสารละลายที่มีคลอไรด์ผสม ด้วยเทคนิคทางไฟฟ้าเคมี. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโลหการ บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ภาณุพงศ์ กอประศรีสวัสดิ์. (2544). ผลของไนโตรเจนต่อความต้านทานการกัดกร่อนของเหล็กกล้าไร้สนิมชนิดออสเทนนิติกเกรด 304L. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโลหการ บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- อภิชาติ พันธุ์เสถียร. (2552). การศึกษาเปรียบเทียบความต้านทานการกัดกร่อนของเหล็กกล้าไร้สนิมหล่อเกรด 201 และเหล็กกล้าไร้สนิมหล่อเกรด 304. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโลหการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
- Ahmad, Z. 2006. Principles of corrosion engineering and corrosion control. Institution of Chemical Engineering.
- Ahn, S.H., Choi, Y.S., Kim, J.G., Han, J.G. (2002). A study on corrosion resistance characteristics of PVD Cr-N coated steels by electrochemical method. **Surface and Coatings Technology**. (150): 319-326.
- Altun, H., Sen, S.i. (2004). Studies on the influence of chloride ion concentration and pH on the corrosion and electrochemical behavior of AZ63 magnesium alloy. **Material and Design**. (25): 637-643.
- Ananthakumar, R., Subramanian, Akira, K., Jayachandran, M. (2011). Electrochemical corrosion and material properties of reactively sputtered TiN/TiAlN multilayer coatings. **Ceramics International**:1-9.
- Bertoti, I. (2002). Characterization of nitride coatings by XPS. **Surface and Coatings Technology**. (151-152): 194-203.

- Bertrand, G., Mahdjoub, H., Meunier, C. (2000). A study of the corrosion behavior and protective quality of sputtered chromium nitride coatings. **Surface and Coatings Technology**. (126): 199-209.
- Bharat, a., Pradeep, H. (2010). Electrochemical oxidation behavior of titanium nitride based electrocatalysts under PEM fuel cell conditions. **Electrochimica Acta**. (55): 9024-9034.
- Chen, J.Y., Yu, G.P., Huang, J.H. (2000). Corrosion behavior and adhesion of ion-plated TiN films on AISI 304 steel. **Materials Chemistry and Physics**. (65): 310-315
- Chyou, S. D., Shih, H. C. (1991). The Effect of nitrogen on the corrosion of plasma-nitrided 4140 Steel. **Corrosion**. (47(1)): 31-34.
- Cunha, L., Andritschky, M., Rebouta, L., Silva, R. (1998), Corrosion of TiN (TiAl)N and CrN hard coating produced by magnetron sputtering. **Surface and Coatings Technology**. (317): 351-355.
- Cunha, L., Andritschky M., Rebouta L., Pischow. (1999). Corrosion of CrN and TiAlN coatings in chloride-containing atmospheres. **Surface and Coatings Technology**. (116-119): 1152-1160.
- Darja, K.M., Peter P., Miha, C., Marijan M. (2004). The corrosion behavior of Cr-(C,N) PVD hard Coatings deposited on various substrates. **Electrochimica Acta**. (49(9-10)): 1527-1533.
- Diana, L., Carlos, S., Alejandro, T. (2005). Corrosion-erosion behavior of TiN-coated stainless steels in aqueous slurries. **Wear**. (258): 684-692.
- Durst, O., Ellermeier, J., Berger, C. (2008). Influence of plasma-nitriding and surface roughness on the wear and corrosion resistance of thin films (PVD/PECVD). **Surface and Coatings Technology**. (203): 848-854.
- Einstein, A. (1905). *Ann. Physik*. (17): 132.
- Emery, C., Chourasia A.R., Yashar, P. (1999). A study of CrN_x thin film by X-ray photoelectron spectroscopy. **Journal of Electron Spectroscopy**. (104): 91-97.

- Feng, H.P., Cheng, H.H., Jung, K.L., Yih H.S. (2003). Effects of PVD sputtered coatings on the corrosion resistance of AISI 304 stainless steel. **Materials Science and Engineering A**. (347): 123-129.
- Fengqun, L., Zhiming, Y. (2001). The corrosion resistance and wear resistance of thick TiN coatings deposited by arc ion plating. **Surface and Coatings Technology**. (145): 80-87.
- Fenker, M., Balzer, M., Kappl, H. (2006). Corrosion behavior of decorative and wear resistant coating on steel deposited by reactive magnetron sputtering-Tests and improvements. **Thin Solid Films**. (515): 27-32.
- Fontana, M. G. (1987). Corrosion Engineering. 3rd Edition, McGraw-Hill Book Company. Singapore.
- Franco, C.V., Fontana, L.C., Bechi, D., Martinelli, A.E., Muzart, J.L.R. (1998). An electrochemical study of magnetron-sputtered Ti-And TiN-coated steel. **Corrosion Science**. (40): 103-112.
- Grabke, H. J. (1996). The Role of nitrogen in the corrosion of iron and steels (review). **ISIJ International**. (36(7)): 777-786.
- Hanand, S., Lin, J.H., Tsai, S.H., Chung, S.C., Wang, D.Y., Lu, F.H., Shih, H.C. (2000). Corrosion and tribological studies of chromium nitride coated on steel with an interlayer of electroplated chromium. **Surface and Coatings Technology**. (133-134): 460-465.
- Herranen, M., Wiklund U., Carlsson, J.O., Hogmark. (1998). Corrosion behavior of Ti/TiN multilayer coated tool steel. **Surface and Coatings Technology**. (99): 191-196.
- Hiroki, T. (2008). The role of rusts corrosion and corrosion protection of iron and steel. **Corrosion science**. (50): 1872-1883.
- Ibrahim, M.A.M., Korablov S.F., Yoshimura, M. (2002). Corrosion of stainless steel coated with TiN, (TiAl)N and CrN in aqueous environments. **Corrosion Science**. (44): 815-828.

- Liu, C., Leyland, A., Lyon, S., Matthews, A. (1995). An a.c impedance study on PVD-coated mild steel with different surface roughness. **Surface and Coatings Technology**. (76-77(part2)): 623-631.
- Liu, C., Bi, Q., Matthews, A. (2001). Corrosion resistance of multi-layered plasma-assisted physical vapour deposition TiN and CrN coating. **Surface and Coatings Technology**. (141): 164-173.
- Liu, C., Bi, Q., Matthews, A. (2001). EIS comparison on corrosion performance of PVD TiN and CrN coated mild steel in 0.5 N NaCl aqueous solution. **Corrosion Science**. (43): 1953-1961.
- Medina-Flores, A., Arganis, C., Santiago, P., Oseguera. (2004). Electrochemical corrosion tests of an AISI-SAE 4140 steel nitride by post-discharges wave plasma. **Surface and Coatings Technology**. (188-189): 140-145.
- Milosev, I., Strehblow, H.-H., Navinsek, B. (1995). XPS in the study of high-temperature oxidation of CrN and TiN hard coatings. **Surface and Coatings Technology**. (74-75): 897-902.
- Ming, C.Z., Ming, L., Guang, L.S., Andrej, A. (2008). Influence of pH and Chloride ion concentration on the corrosion of Mg alloy ZE41. **Corrosion Science**. (50): 3168-3178.
- Novakovic, M., Popovic, M., Bibic, N. (2010). Ion-beam irradiation effects on reactively sputtered CrN thin films. **Beam Interactions with Materials and Atoms**. (268): 2883-2887.
- Rober, G. (1998). Tool steels. 5th Edition, Materials Park, OH: ASM International.
- Rudenja, S., Kulu, P., Tallimets E., Mikli, V., Straede C.A. (1999). Duplex TiN coatings deposited by arc plating for increased corrosion resistance of stainless steel substrates. **Surface and Coatings Technology**. (114): 129-136.
- Sedriks, A. J. (1996). Corrosion of stainless steels. 2nd Edition, John-Wiley & Sons. New York.
- Shen-Chih, L., Wei-Yu, H., Lai, F.D. (1996). Effect of substrate surface roughness on the characteristics of CrN hard film. **Materials Chemistry and Physics**. (43): 266-273.

- Sivitski A., Ajaots M. and Podra P., (2008). Wear PVD hard coatings in sliding contacts. **In the Proceedings of the 6th International DAAAM Baltic Conference Industrial Engineering, Tallinn, Estonia:** 549-554
- Souto, R.M., Alanyali, H. (2000). Electrochemical characteristics of steel coated with TiN and TiAlN coating. **Corrosion Science.** (42): 2201-2211.
- Standard guide for examination and evaluation of pitting corrosion. (2005). ASTM-G46.
- Subramanian, B., Muraleedharan, C.V., Ananthakumat, R., Jayachandran. (2011). A comparative study of titanium nitride (TiN), titanium oxy nitride (TiON) and titanium aluminum nitride (TiAlN), as surface coatings for bio implants. **Surface and Coatings Technology.** (205): 5014-5020.
- Tunmee, S. Euaruksakul, C., Songsiriritthigul, P., Witit-Anun, N., Wongpanya, P. (2011). The study of sputtered CrN films on the AISI H13 tool steel. **Proceeding of the 6th Annual Conference of the Thai Physics Society:** 325-329.
- Vyas, A., Shen, Y.G., Zhou, Z.F., Li, K.Y. (2008). Nano-structured CrN/CN_x multilayer films deposited by magnetron sputtering. **Composites Science and Technolgy.** (68): 2922-2929.
- Walter, R., Bobby, K. M. (2011). Influence of surface roughness on the corrosion behavior of magnesium alloy. **Material and Design.** (32(4)): 2350-2354.
- William Grips, V.K., Harish, C.B., Ezhil Selvi, V., Kalavati, Rajam K.S.. (2006). Electrochemical behavior of single layer CrN, TiN, TiAlN coatings and nanolayered TiAlN/CrN multilayer coatings prepared by reactive direct current magnetron sputtering. **Thin Solid Films.** (514): 204-211.
- Yang, J., Ping Yu, G., Hong H.J. (2000). Corrosion behavior and adhesion of ion-plated TiN films on AISI 304 steel. **Material Chemistry and Physics.** (65): 310-315.
- Ying, L., Li, Q., Fuihui, W. (2003) The electrochemical corrosion behavior of TiN and (Ti,Al)N coating in acid and salt solution. **Corrosion Science.** (45): 1367-1381.

- You, H. -xia., Xu, H.-bin., Zhang, Y., Zheng, S.-li., Gao, Y.-ying. (2010). Potential-pH diagrams of Cr-H₂O system at elevated temperatures. **Transactions of Nonferrous Metals Society of China.** (20): s26-s31.
- Zaid, B., Saidi, D., Benzaid, A., Hadji, S. (2008). Effects of pH and chloride concentration on pitting corrosion of AA6061 aluminum alloy. **Corrosion Science.** (50): 1841-1847.
- Zhou, Q.G., Bai, X.D., Chen, X.W., Peng, D.Q., Ling, Y.H., Wang, D.R., (2003). Corrosion Resistance of Duplex and Gradient CrN_x Coated H13 Steel. **Applied Surface Science.** (211(1-11)): 293-299.





ภาคผนวก ก

การหาค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อน

ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อน

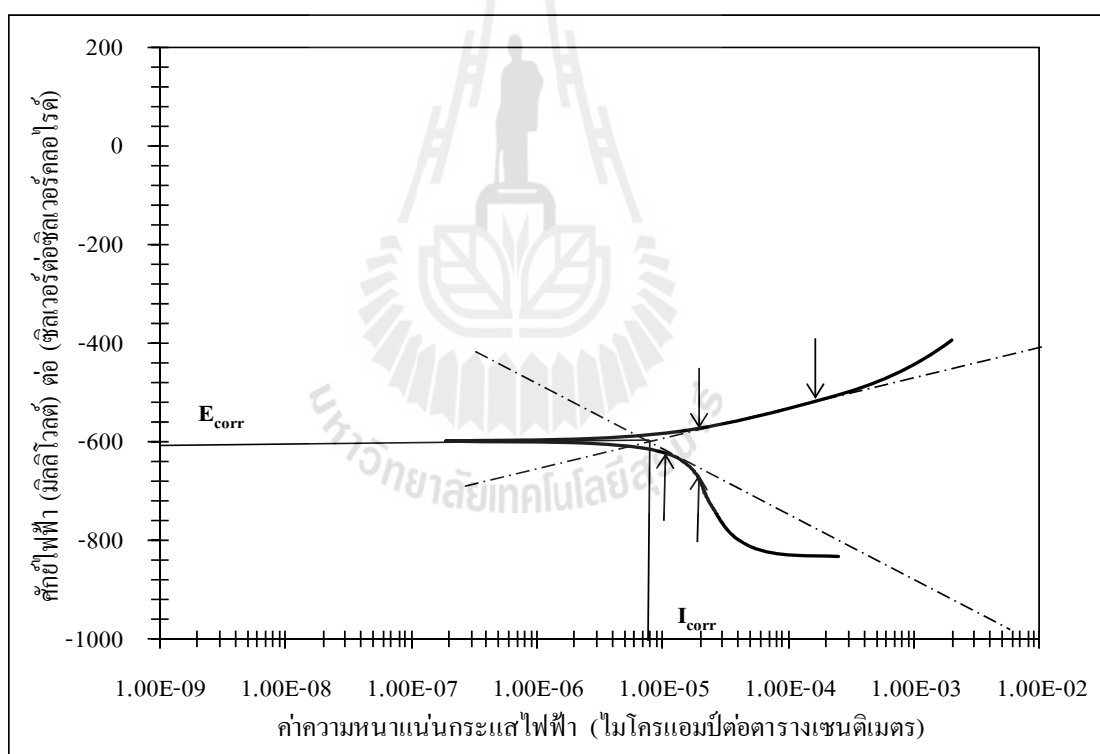
และการคำนวณอัตราการกัดกร่อนของชิ้นงานเหล็กกล้า AISI4140

ชิ้นงานเหล็กกล้า AISI 4140 ที่ถูกเคลือบผิวด้วยฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์

และชิ้นงานเหล็กกล้า AISI 4140 ที่ถูกเคลือบผิวด้วยฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรด์

การหาค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อน และความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อนของชิ้นงานเหล็กกล้า AISI 4140 ชิ้นงานเหล็กกล้า AISI 4140 ที่ถูกเคลือบผิวด้วยฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์ และชิ้นงานเหล็กกล้า AISI 4140 ที่ถูกเคลือบผิวด้วยฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรด์

ค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนและค่ากระแสไฟฟ้าการกัดกร่อนของชิ้นงานภายหลังทดสอบการกัดกร่อนหาได้จากการใช้โปรแกรมถดถอยเชิงเส้น (linear regression program) ที่อยู่ในเครื่อง AUTOLAB PGSTAT 302H ซึ่งมีวิธีการหาโดยกำหนดตำแหน่ง 2 จุดบนบนเส้นโค้งโพลาริเซชันแล้วใช้คำสั่งทำถดถอยเชิงเส้น โปรแกรมจะทำการคำนวณเส้นตรงระหว่างจุด 2 จุดที่กำหนดไว้ดังรูปที่ ก.1 ซึ่งแสดงจุดตัดระหว่างเส้นความชันของเส้นกราฟช่วงที่เกิดปฏิกิริยาแอโนด และเส้นความชันของเส้นกราฟช่วงที่เกิดปฏิกิริยาแคโทด โดยที่จุดตัดนี้จะสามารถหาค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนและค่ากระแสไฟฟ้าการกัดกร่อนได้



รูปที่ ก.1 วิธีการหาค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนและค่ากระแสไฟฟ้าการกัดกร่อนจากเส้นโพลาริเซชัน

การคำนวณหาอัตราการกัดกร่อนของชิ้นงานเหล็กกล้า AISI 4140 ที่ไม่ถูกเคลือบผิว ชิ้นงานเหล็กกล้า AISI 4140 ที่ถูกเคลือบผิวด้วยฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์ และชิ้นงานเหล็กกล้า AISI 4140 ที่ถูกเคลือบผิวด้วยฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรด์

การคำนวณหาอัตราการกัดกร่อนสามารถหาได้จากการนำค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า การกัดกร่อนที่อ่านได้จากเส้นโค้งโพลาไรเซชัน น้ำหนักสมมูลของโลหะ และความหนาแน่นของโลหะ แทนลงในสมการที่ ก.1 โดยค่าอัตราการกัดกร่อนที่คำนวณได้จะแสดงผลในหน่วยมิลลิเมตรต่อปี

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

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

The logo of Sakon Nakhon Rajabhat University is a circular emblem. It features a central figure of a person standing on a pedestal, surrounded by a gear-like border. The text 'มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี' (Mahavithayalai Techno Suranaree) is written around the bottom of the circle. Above the main text, the text 'ภาคผนวก ข' (Appendix B) is centered.

ภาคผนวก ข

ข้อมูลดิบที่ได้จากการวัดเส้นโพลาริเซชัน
ที่ทำการทดลองจากเครื่องโพเทนชิโอสแตท

ตารางที่ ข.1 ค่าศักย์ไฟฟ้าการกักตัวของชิ้นงานในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้น ร้อยละ 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 ค่าอัตราการกักตัวของชิ้นงานในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้น ร้อยละ 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

ตารางที่ ข.3 ค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนของชิ้นงานในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้น ร้อยละ 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 ค่าอัตราการกัดกร่อนของชิ้นงานในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้น ร้อยละ 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

ตารางที่ ข.5 ค่าศักย์ไฟฟ้าการกักตัวของชิ้นงานในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้น ร้อยละ 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 ค่าอัตราการกักตัวของชิ้นงานในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้น ร้อยละ 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

ค่าพีเอชของชิ้นงานเหล็กกล้า AISI 4140

ที่ไม่ถูกเคลือบผิว ชิ้นงานเหล็กกล้า AISI 4140 ที่ถูกเคลือบผิว

ด้วยฟิล์มบางโครเมียมไนไตรต์ และชิ้นงานเหล็กกล้า AISI 4140 ที่ถูก

เคลือบผิวด้วยฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรต์ก่อนและหลังการทดสอบการกัดกร่อน

ตารางที่ ค.1 ค่าพีเอชก่อนและหลังการทดสอบการกัดกร่อนของชิ้นงานเหล็กกล้า AISI 4140

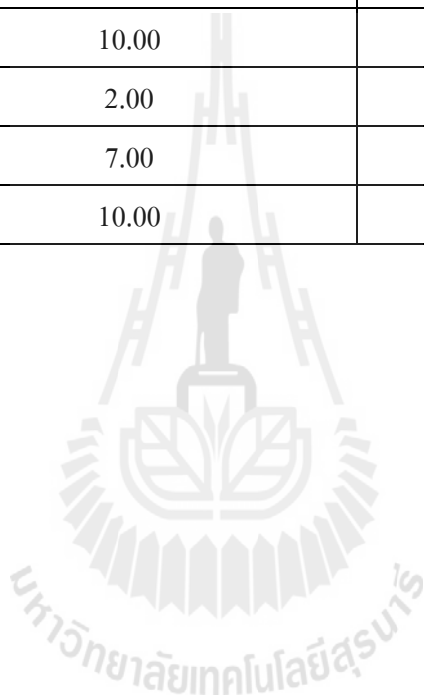
ชิ้นงาน	ค่าพีเอชก่อนการทดสอบการกัดกร่อน	ค่าพีเอชหลังการทดสอบการกัดกร่อน
B1	2.00	1.93
	7.00	6.25
	10.00	7.26
B2	2.00	1.95
	7.00	6.50
	10.00	7.45
B3	2.00	1.97
	7.00	6.55
	10.00	7.90

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

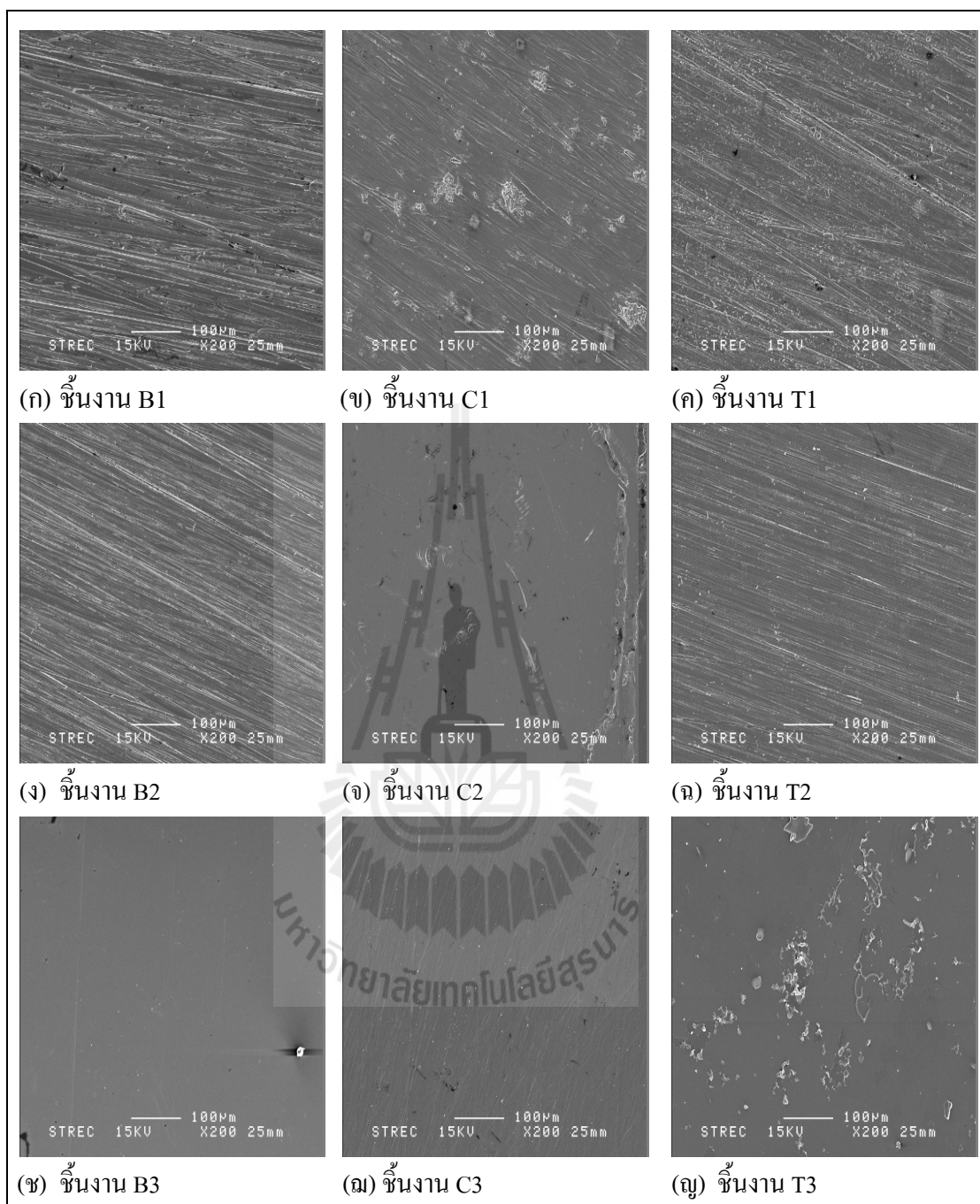
ชิ้นงาน	ค่าพีเอชก่อนการทดสอบการกัดกร่อน	ค่าพีเอชหลังการทดสอบการกัดกร่อน
T1	2.00	2.11
	7.00	6.04
	10.00	7.95
T2	2.00	2.00
	7.00	6.53
	10.00	7.65
T3	2.00	2.04
	7.00	6.14
	10.00	7.51





ภาคผนวก ง

ภาพลักษณะพื้นผิวของชิ้นงานเหล็กกล้า AISI 4140
ที่ไม่ถูกเคลือบผิวชิ้นงานเหล็กกล้า AISI 4140 ที่ถูกเคลือบผิว
ด้วยฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์ และชิ้นงานเหล็กกล้า AISI 4140
ที่ถูกเคลือบผิวด้วยฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรด์ก่อนทดสอบการกัดกร่อน

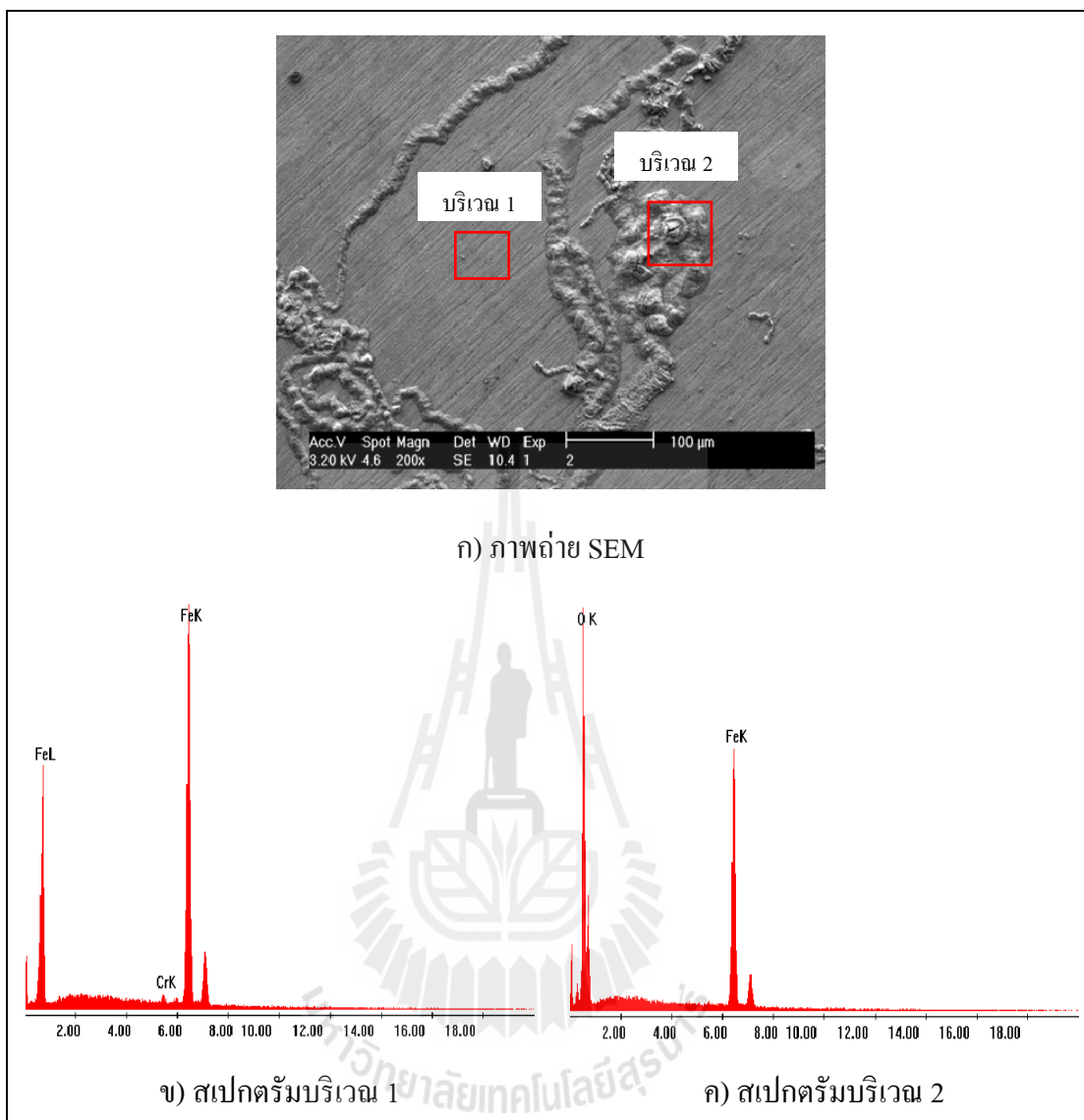


รูปที่ 1.1 ภาพลักษณะพื้นผิวของชิ้นงานเหล็กกล้า AISI 4140 ที่ไม่ถูกเคลือบผิว ชิ้นงานเหล็กกล้า AISI 4140 ที่ถูกเคลือบผิวด้วยฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์ และชิ้นงานเหล็กกล้า AISI 4140 ที่ถูกเคลือบผิวด้วยฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรด์ ก่อนทดสอบการกัดกร่อน

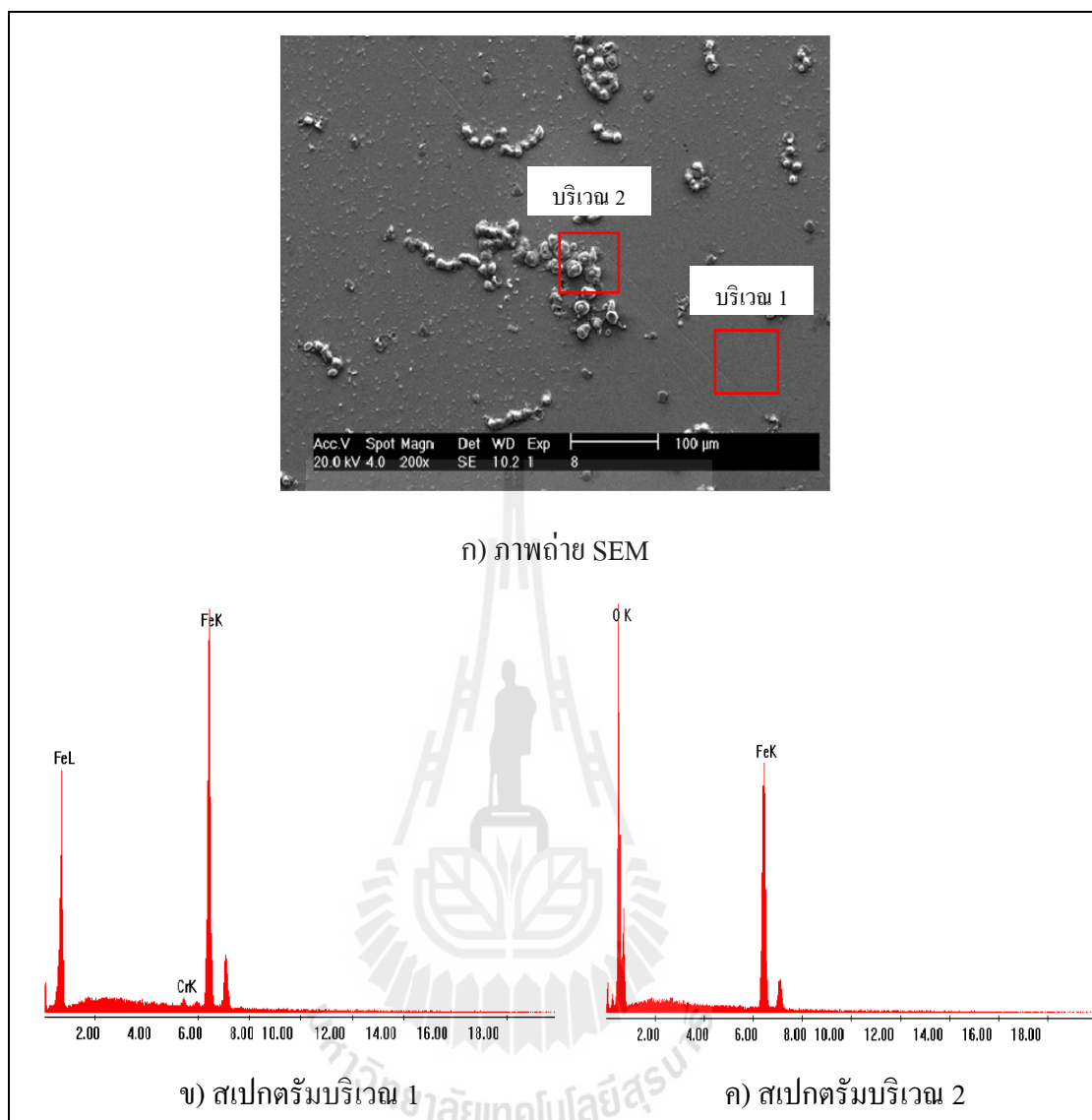


ภาคผนวก จ

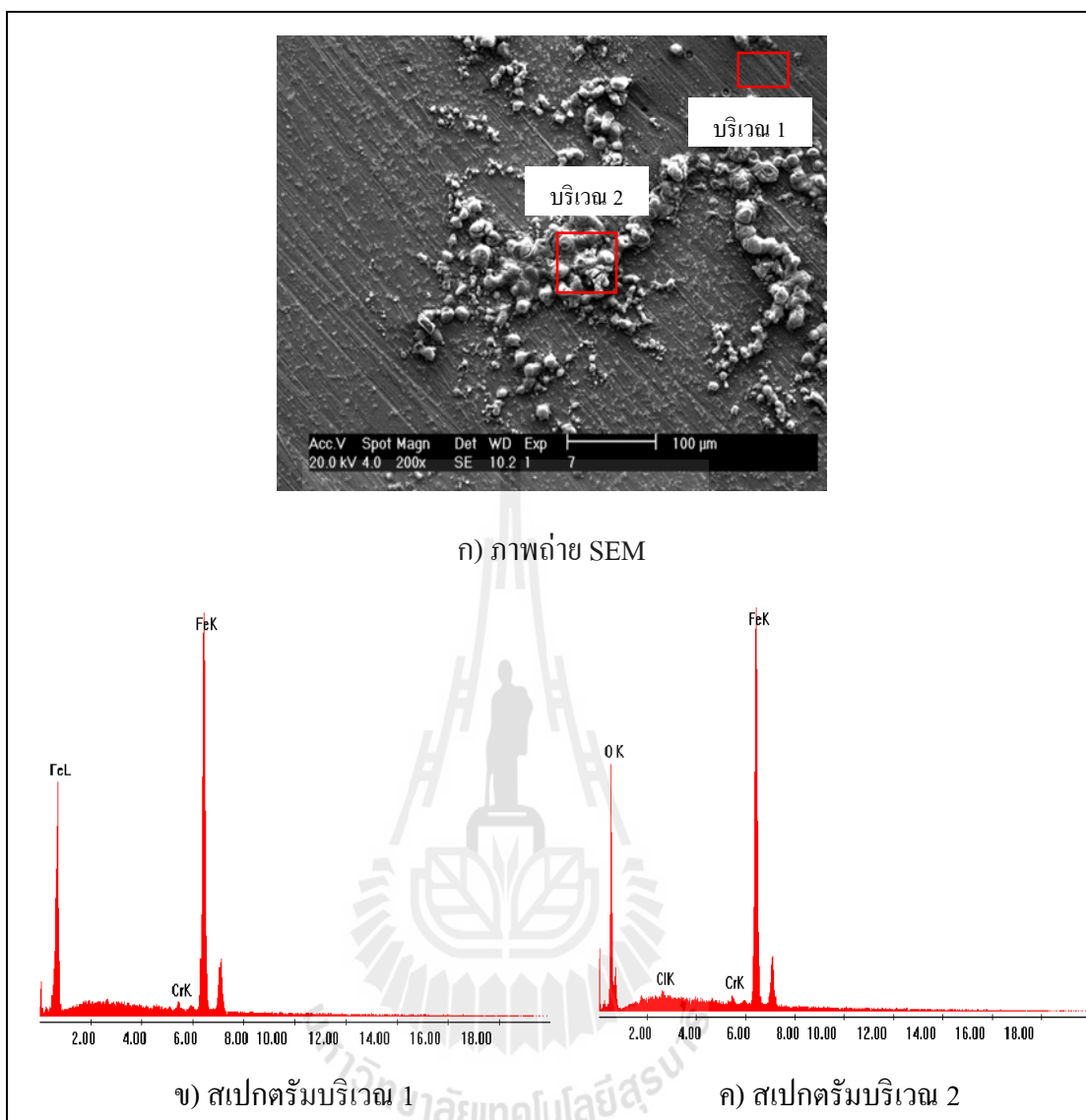
ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีด้วยเทคนิค EDX
ของชิ้นงานเหล็กกล้า AISI 4140 ชิ้นงานเหล็กกล้า AISI 4140 ที่ถูกเคลือบ
ผิวด้วยฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์ และชิ้นงานเหล็กกล้า AISI 4140 ที่ถูก
เคลือบผิวด้วยฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรด์ก่อนและหลังการทดสอบการกัดกร่อน



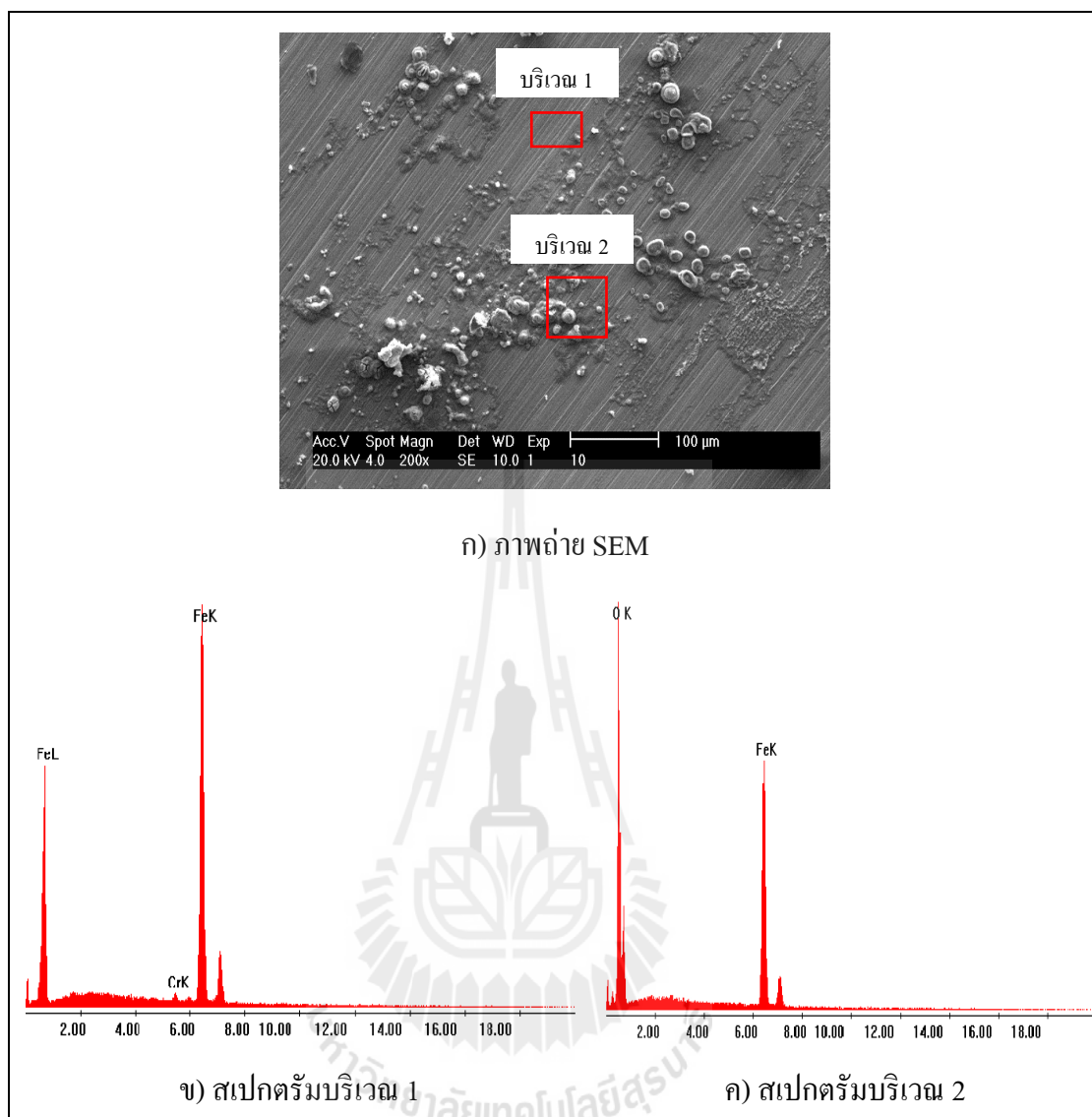
รูปที่ จ.1 ภาพถ่าย SEM และผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีบนพื้นผิวของ
ชิ้นงาน B2 ภายหลังจากทดสอบการกัดกร่อนที่ค่าพีเอช 2



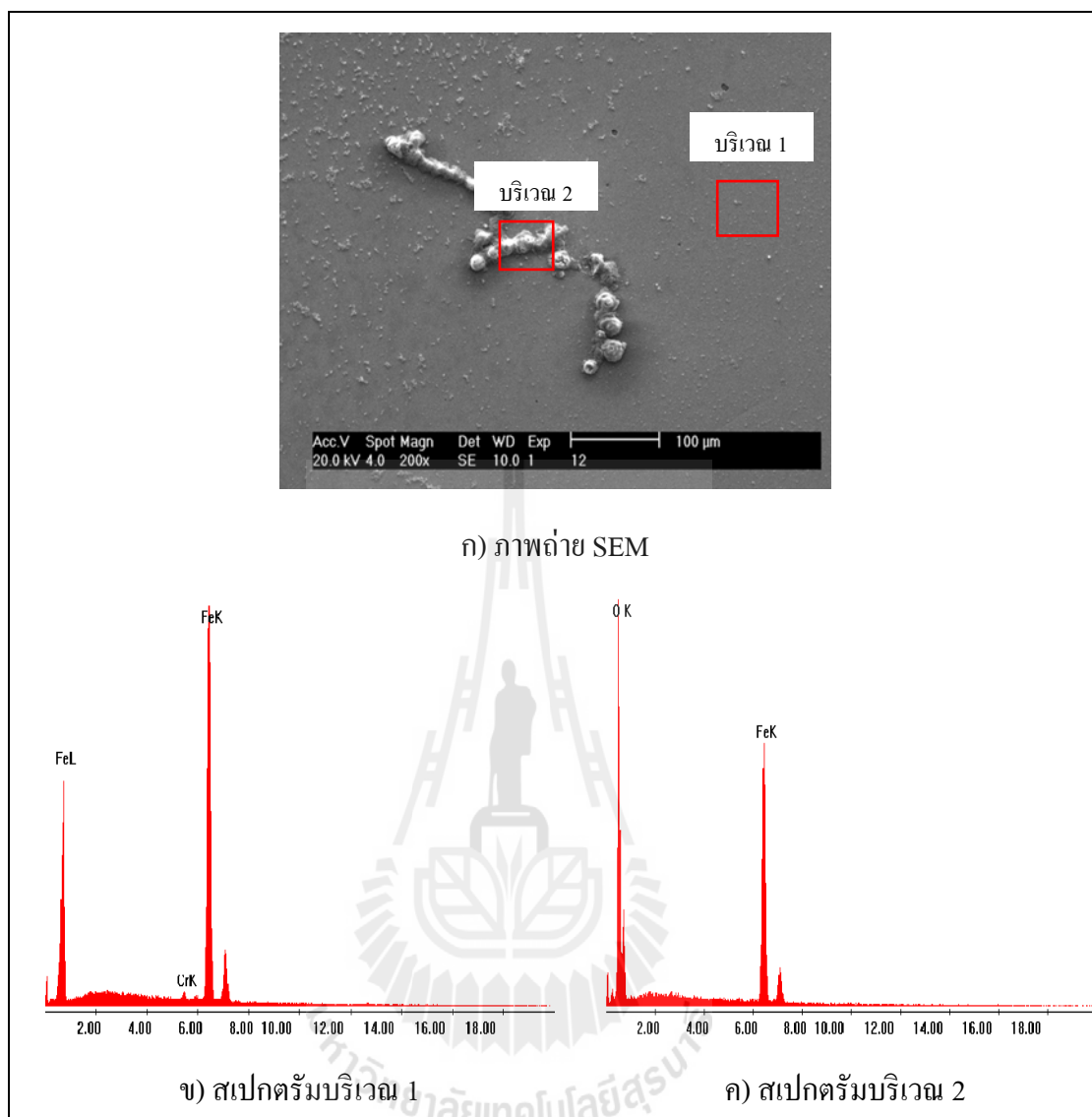
รูปที่ จ.2 ภาพถ่าย SEM และผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีบนพื้นผิวของ
ชิ้นงาน B3 ภายหลังจากทดสอบการกัดกร่อนที่ค่าพีเอช 2



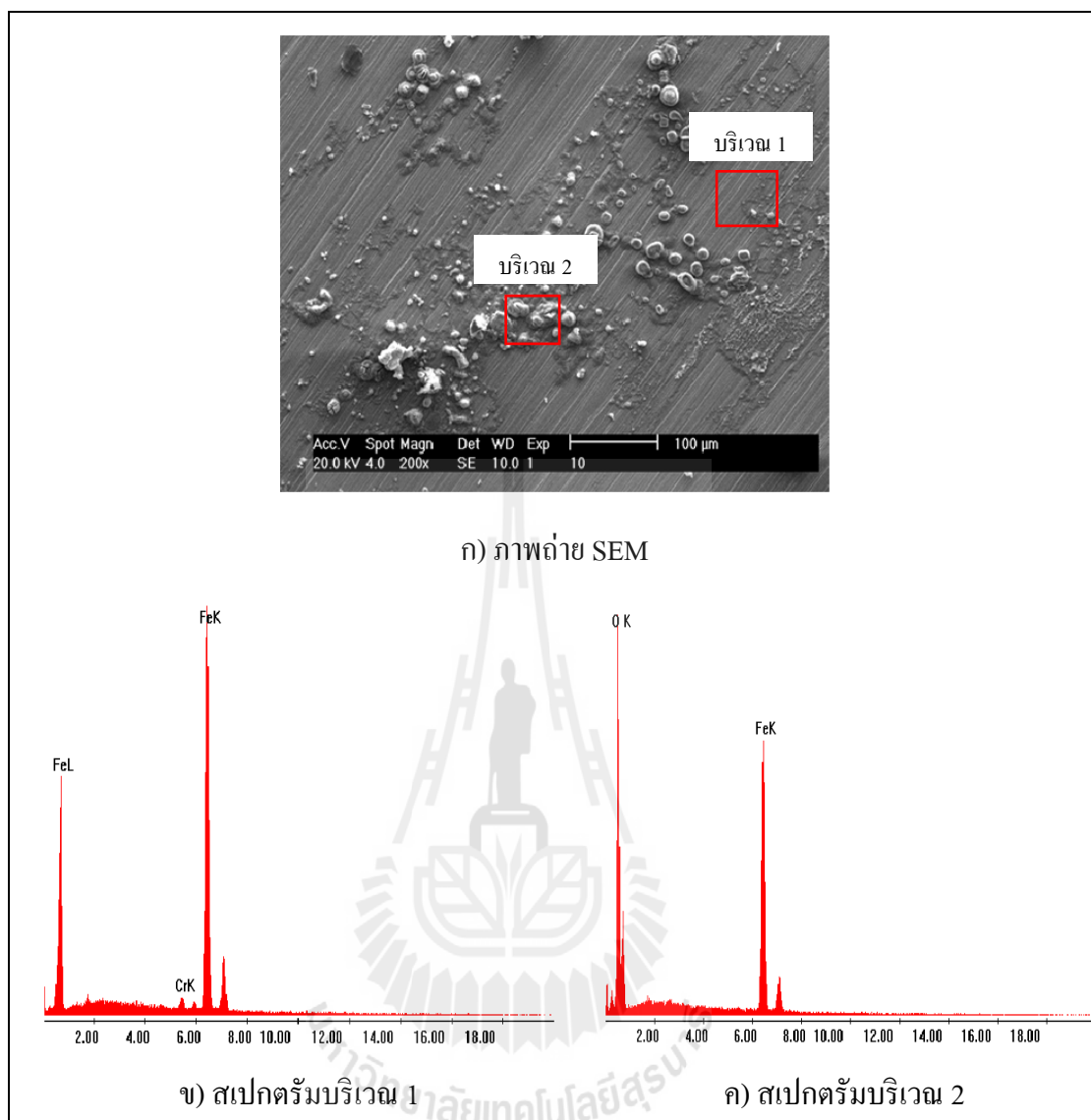
รูปที่ จ.3 ภาพถ่าย SEM และผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีบนพื้นผิวของ
ชิ้นงาน B1 ภายหลังจากทดสอบการกัดกร่อนที่ค่าพีเอช 7



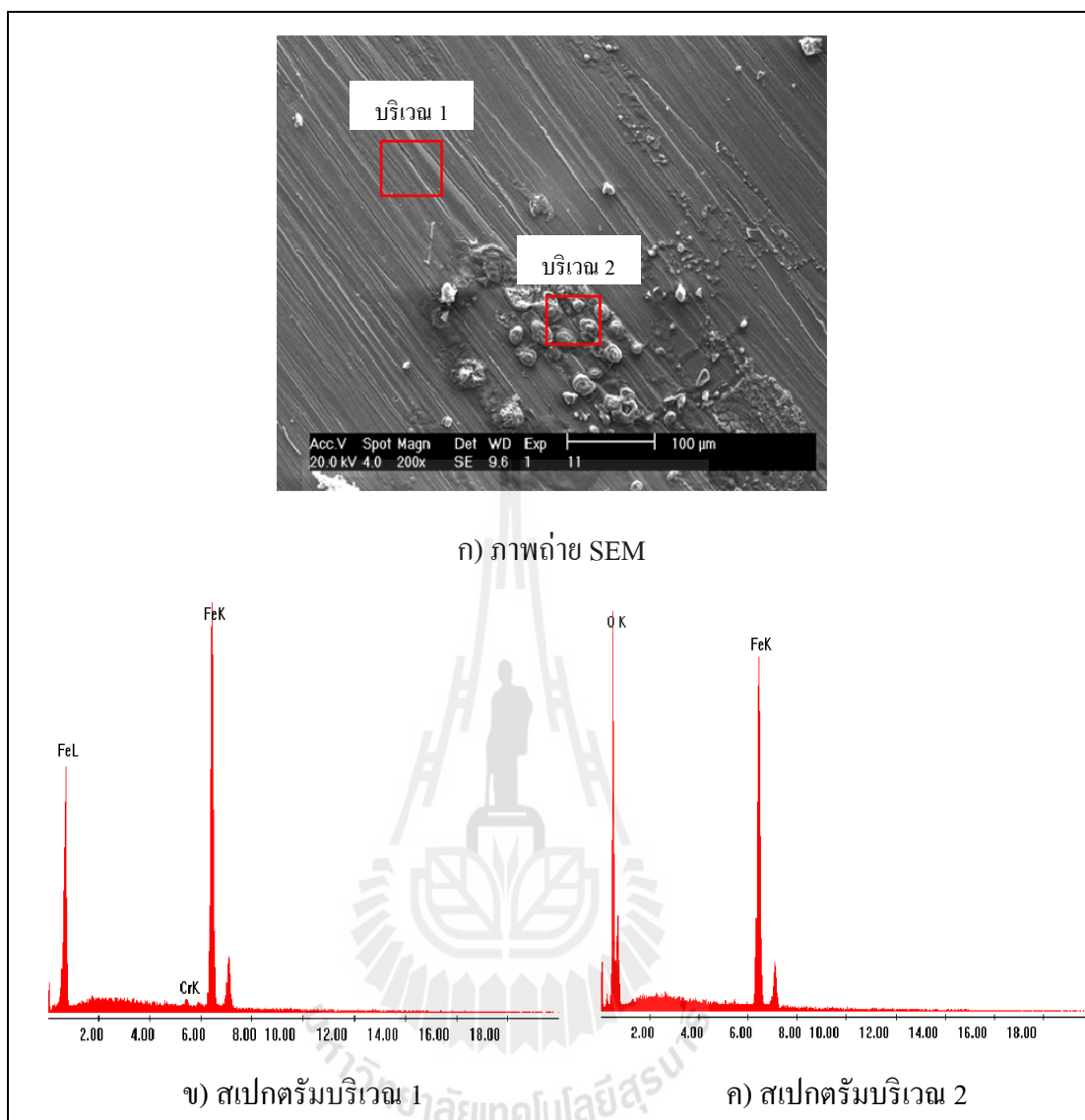
รูปที่ จ.4 ภาพถ่าย SEM และผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีบนพื้นผิวของ
ชิ้นงาน B2 ภายหลังทดสอบการกัดกร่อนที่ค่าพีเอช 7



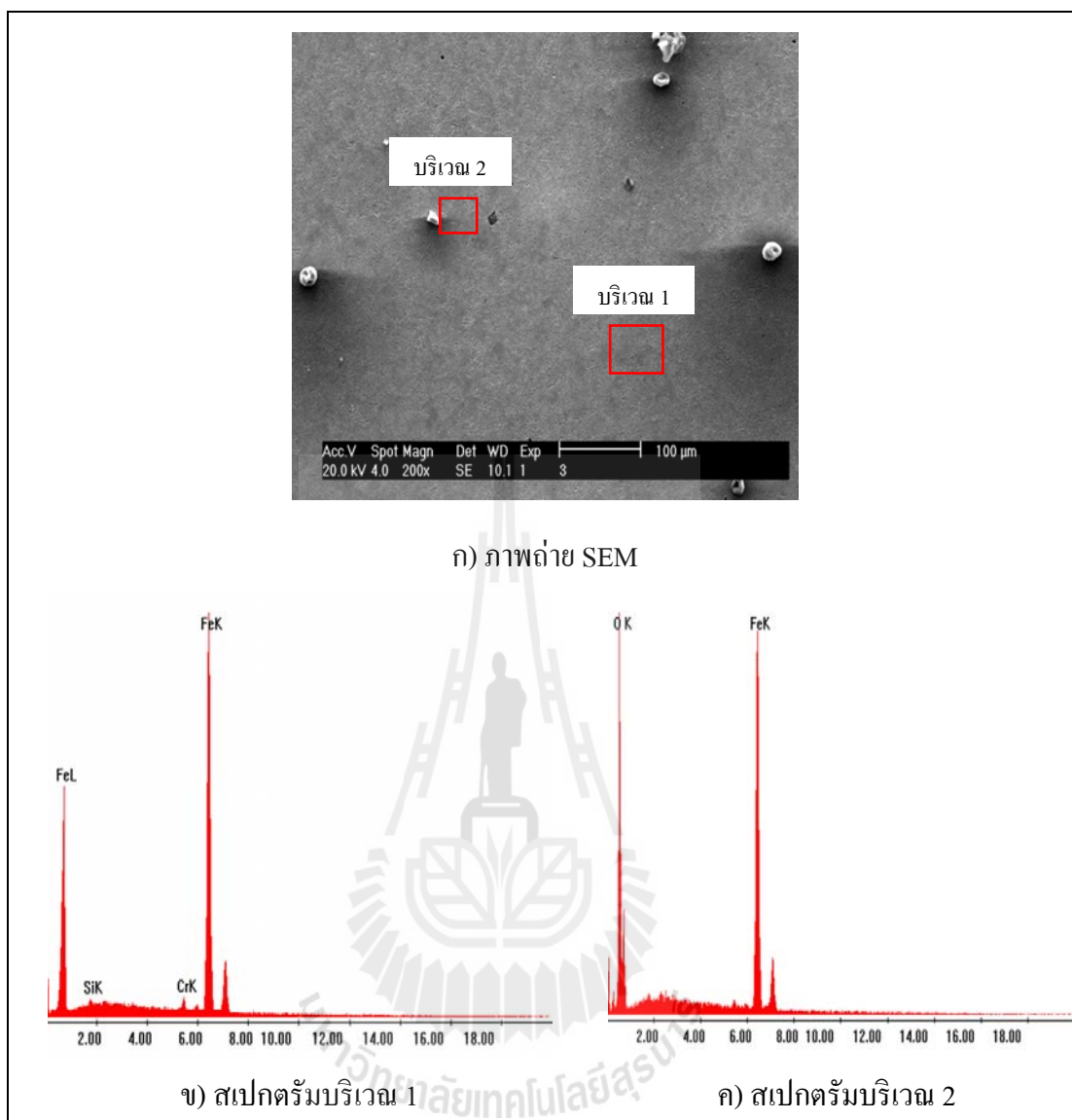
รูปที่ จ.5 ภาพถ่าย SEM และผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีบนพื้นผิวของ
ชิ้นงาน B3 ภายหลังทดสอบการกัดกร่อนที่ค่าพีเอช 7



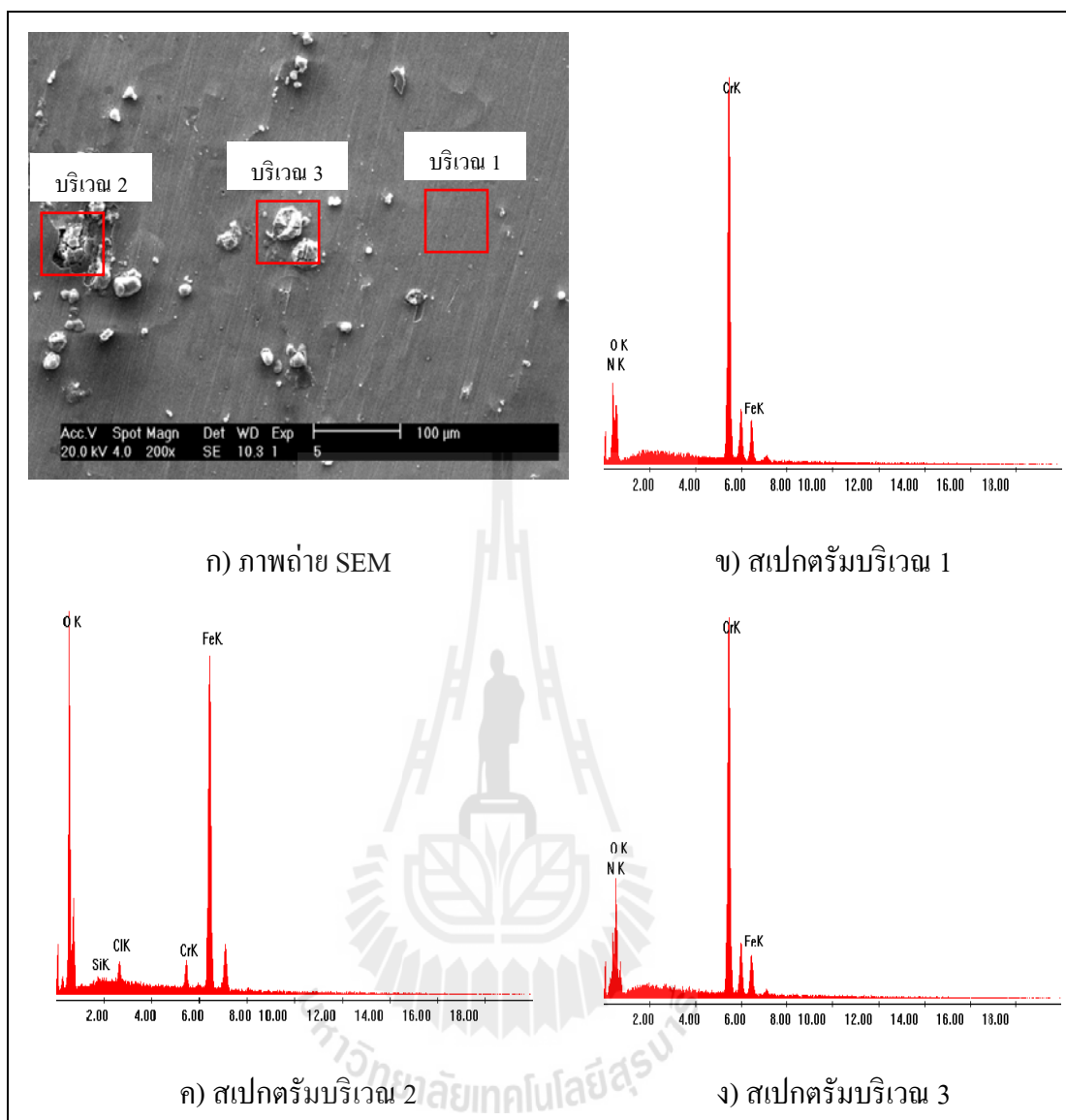
รูปที่ จ.6 ภาพถ่าย SEM และผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีบนพื้นผิวของ
ชิ้นงาน B1 ภายหลังทดสอบการกัดกร่อนที่ค่าพีเอช 10



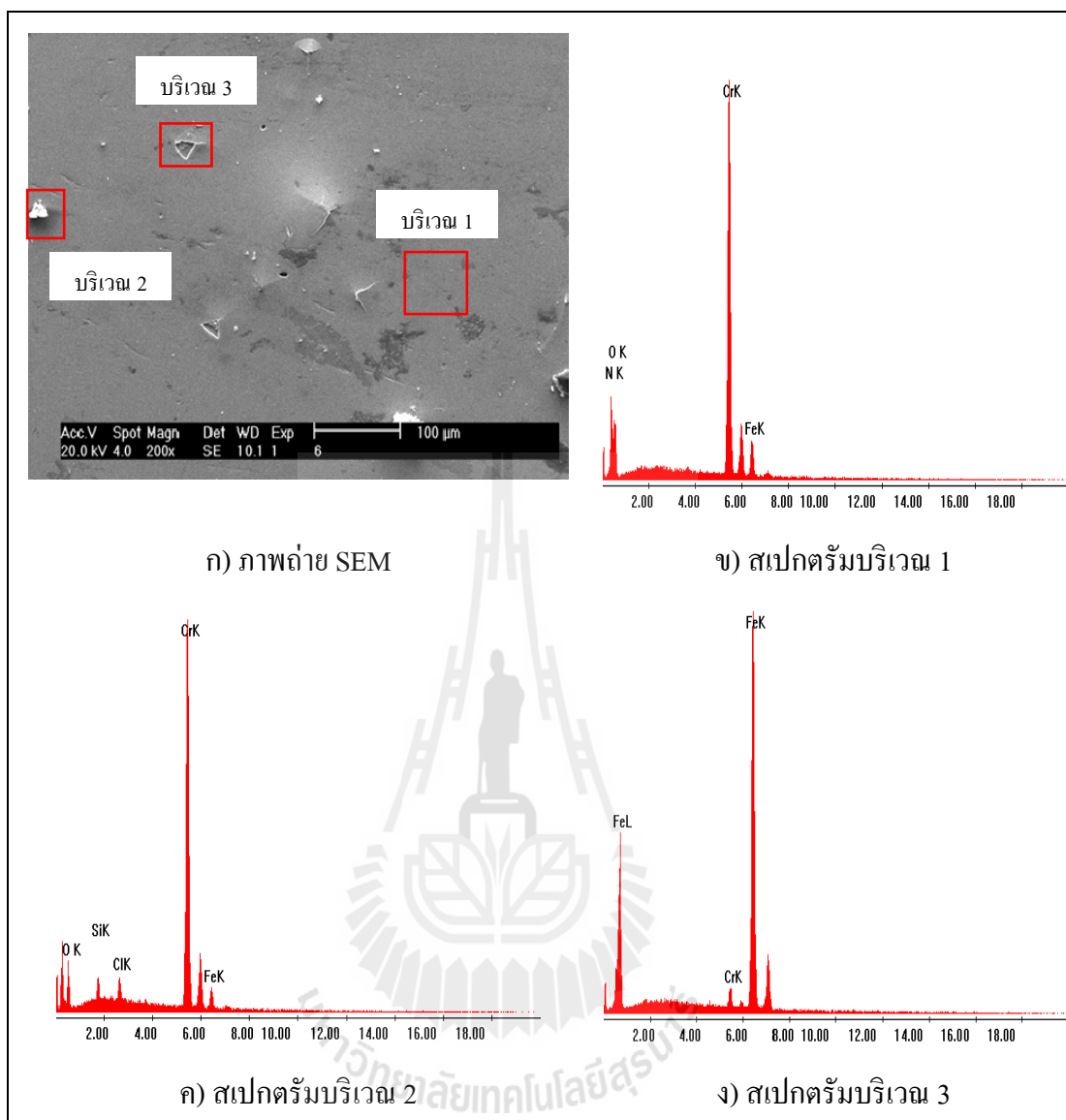
รูปที่ จ.7 ภาพถ่าย SEM และผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีบนพื้นผิวของ
ชิ้นงาน B2 ภายหลังทดสอบการกัดกร่อนที่ค่าพีเอช 10



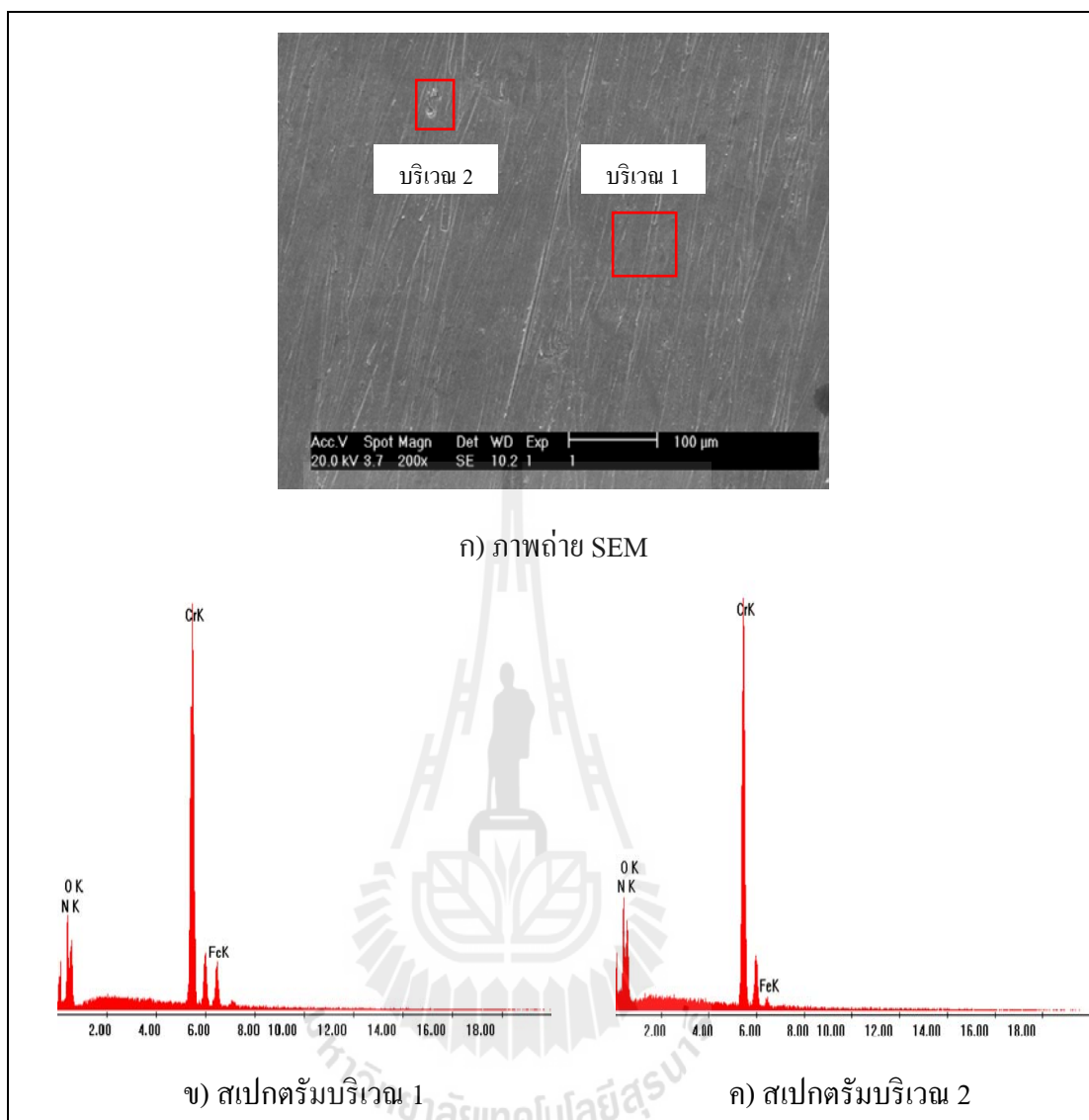
รูปที่ จ.8 ภาพถ่าย SEM และผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีบนพื้นผิวของ
ชิ้นงาน B3 ภายหลังทดสอบการกัดกร่อนที่ค่าพีเอช 10



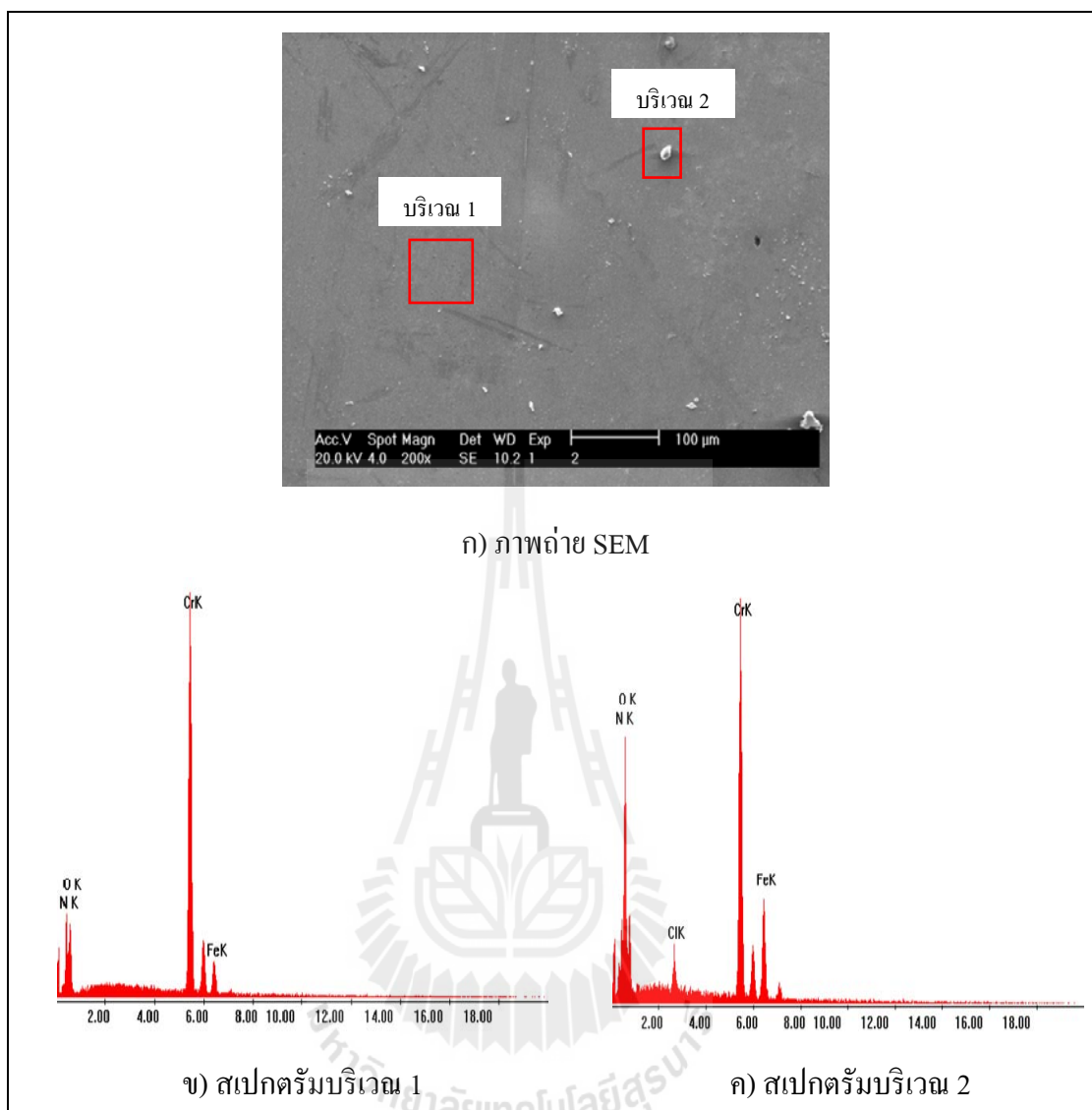
รูปที่ จ.9 ภาพถ่าย SEM และผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีบนพื้นผิวของ
ชิ้นงาน C2 ภายหลังทดสอบการกัดกร่อนที่ค่าพีเอช 2



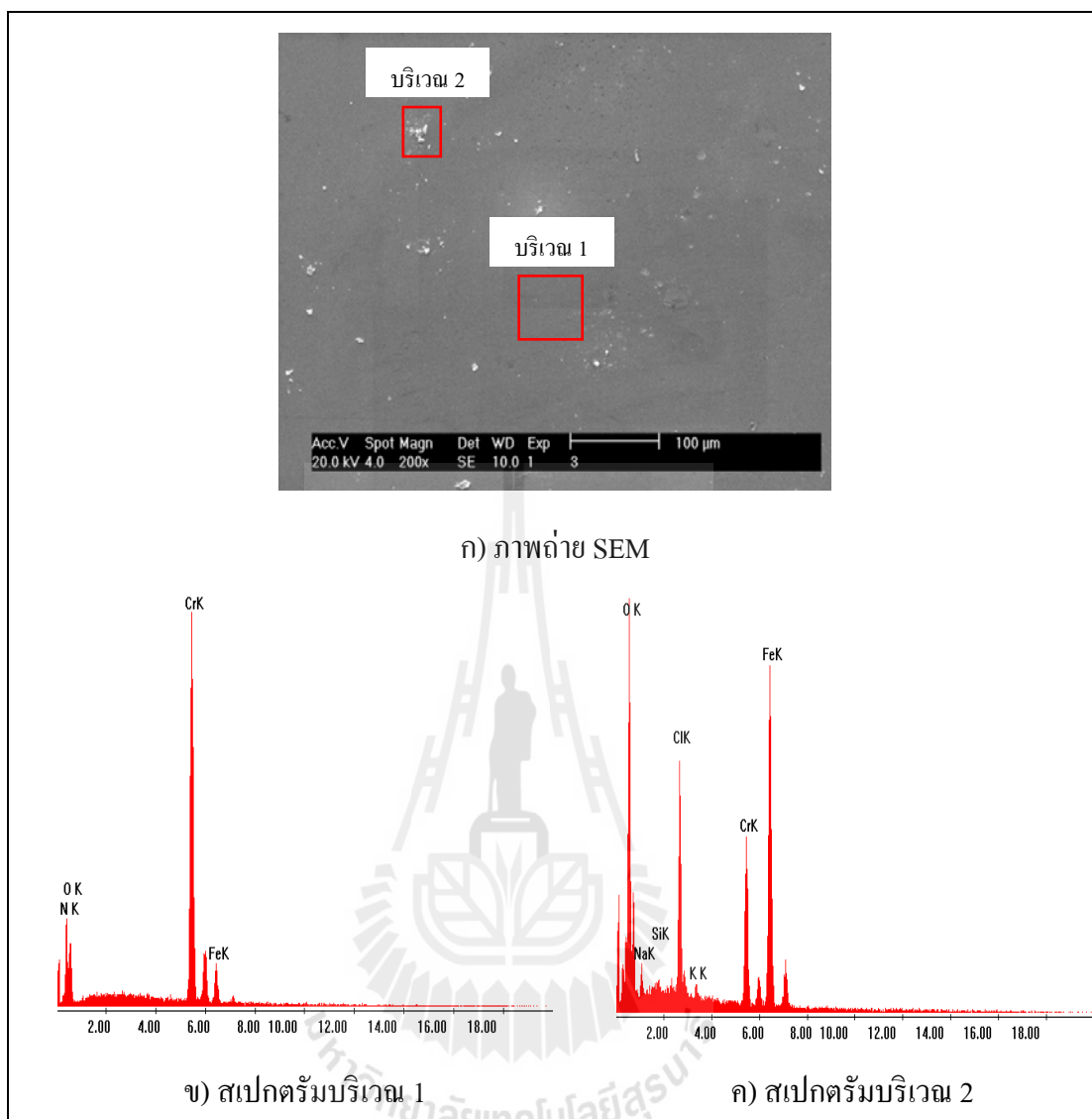
รูปที่ จ.10 ภาพถ่าย SEM และผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีบนพื้นผิวของ
ชิ้นงาน C3 ภายหลังจากทดสอบการกัดกร่อนที่ค่าพีเอช 2



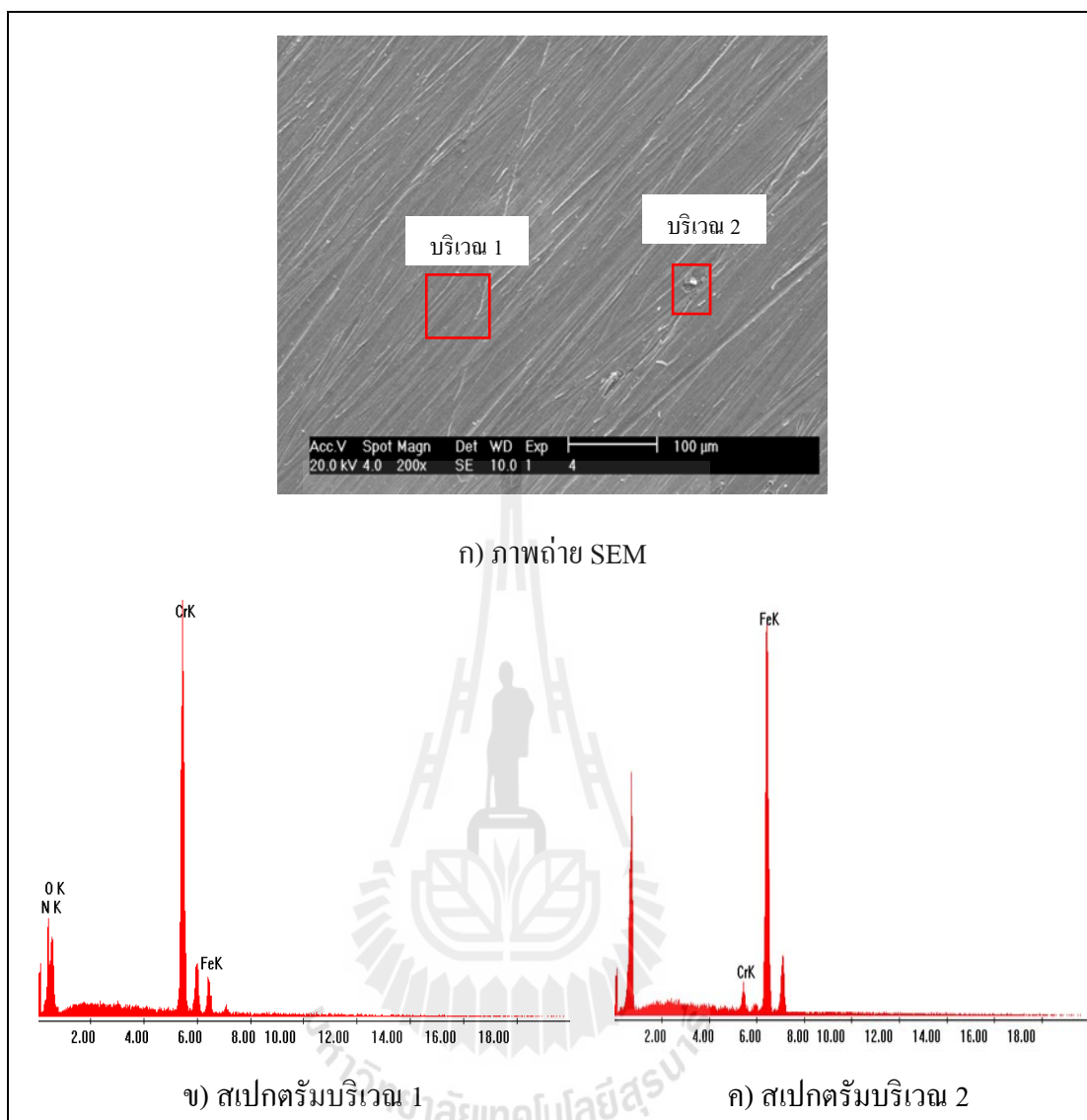
รูปที่ จ.11 ภาพถ่าย SEM และผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีบนพื้นผิวของ
ชิ้นงาน C1 ภายหลังจากทดสอบการกัดกร่อนที่ค่าพีเอช 7



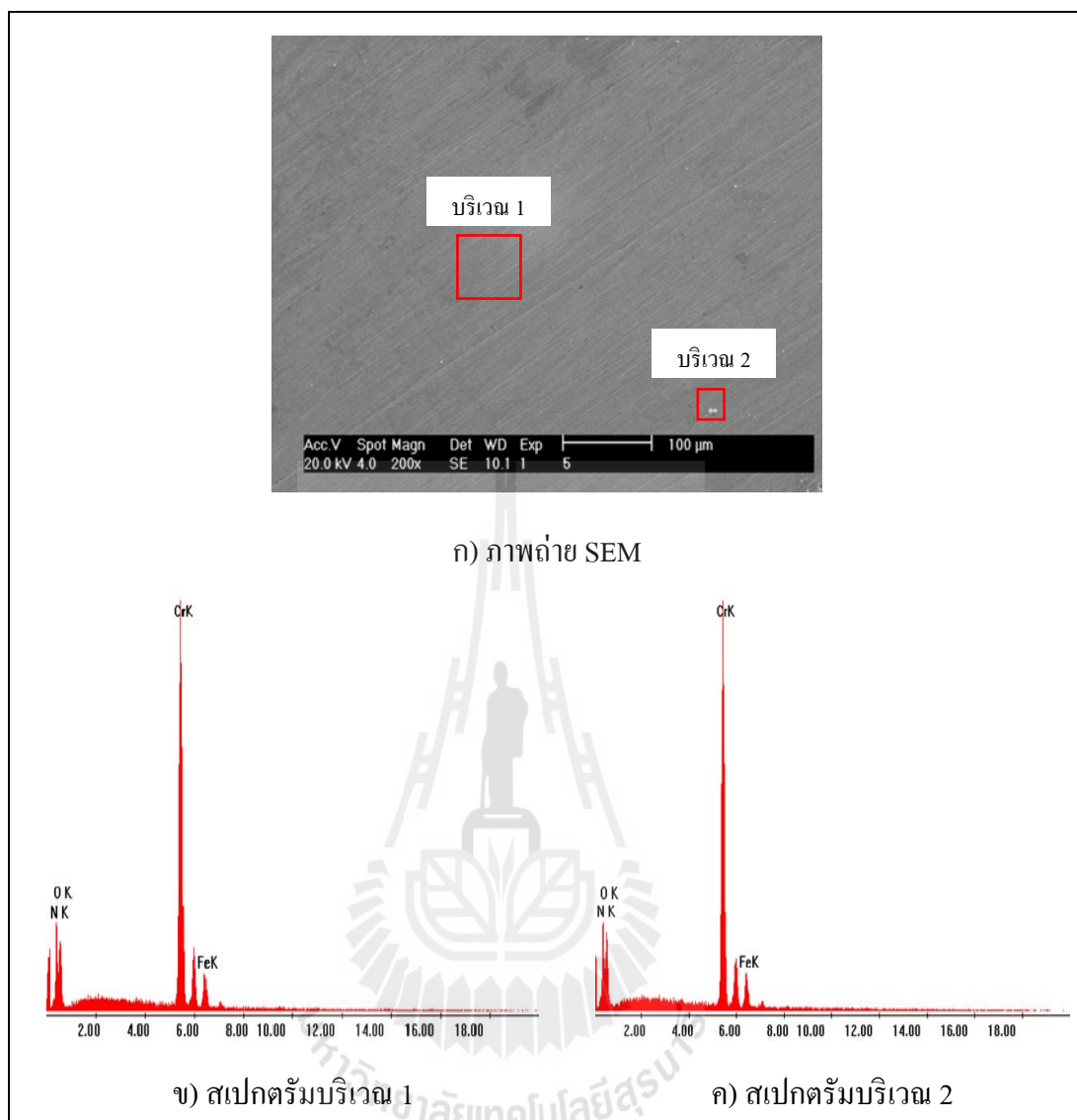
รูปที่ จ.12 ภาพถ่าย SEM และผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีบนพื้นผิวของ
ชิ้นงาน C2 ภายหลังจากทดสอบการกัดกร่อนที่ค่าพีเอช 7



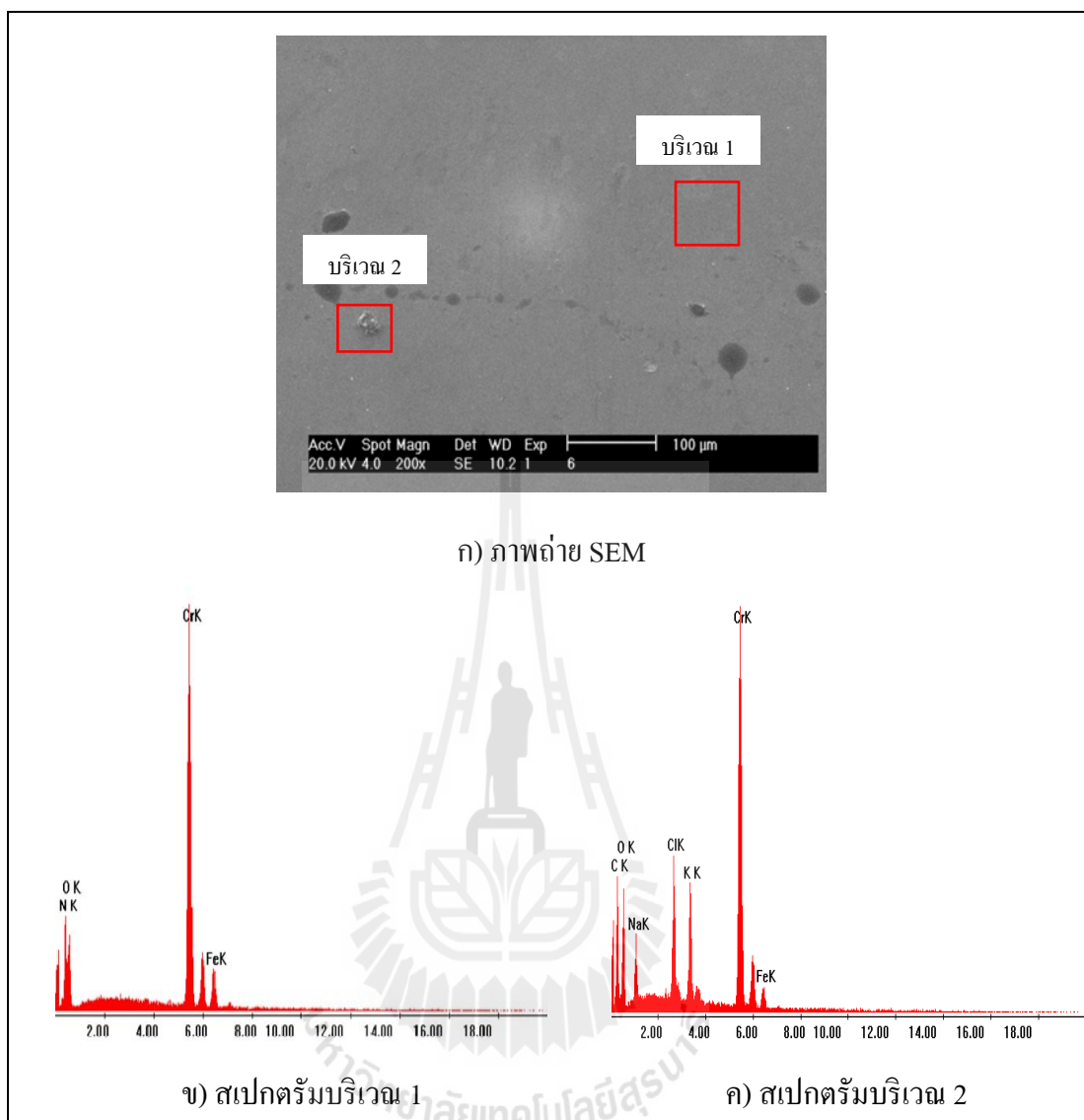
รูปที่ จ.13 ภาพถ่าย SEM และผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีบนพื้นผิวของ
ชิ้นงาน C3 ภายหลังจากทดสอบการกัดกร่อนที่ค่าพีเอช 7



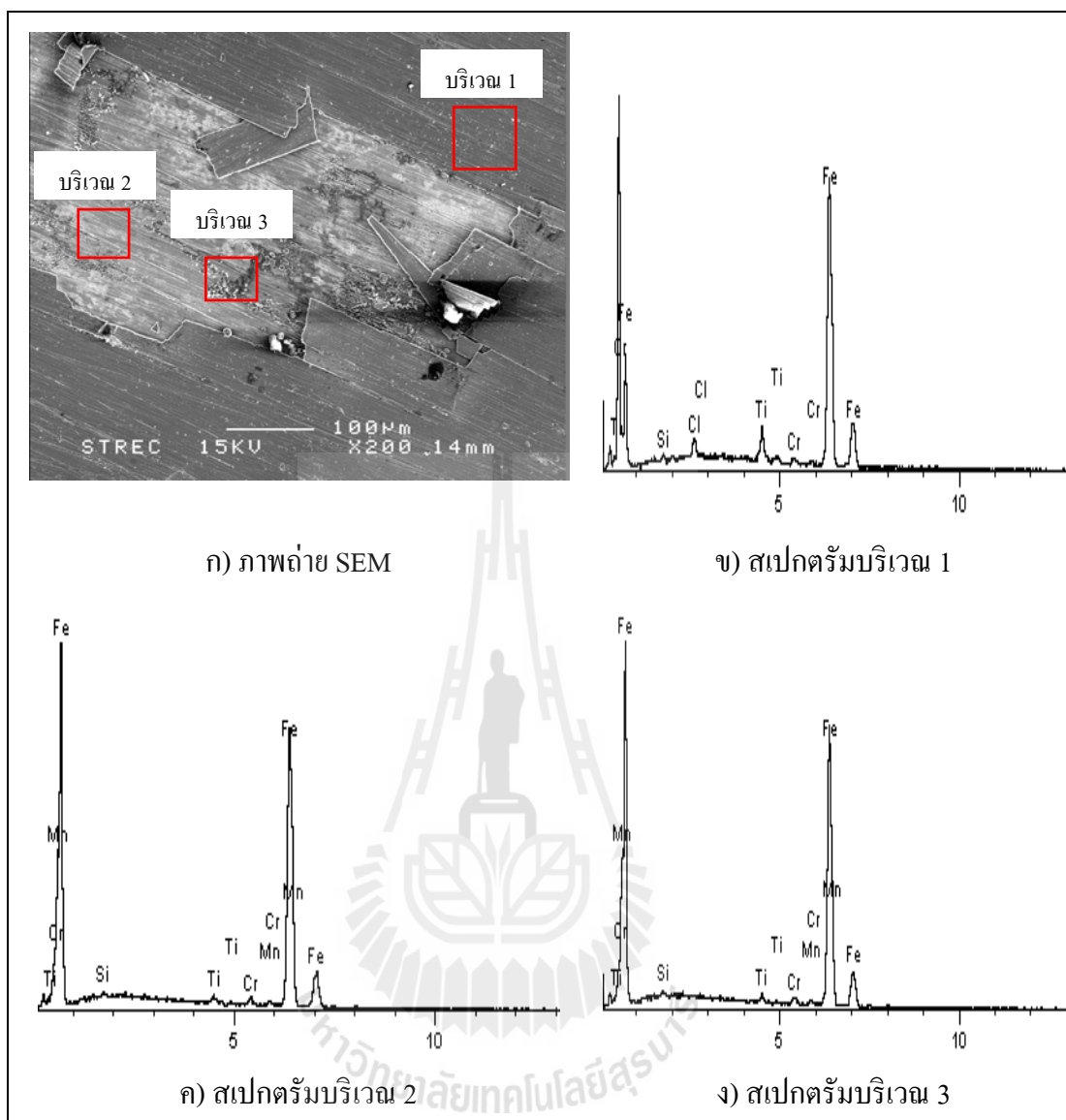
รูปที่ จ.14 ภาพถ่าย SEM และผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีบนพื้นผิวของ
ชิ้นงาน C1 ภายหลังจากทดสอบการกัดกร่อนที่ค่าพีเอช 10



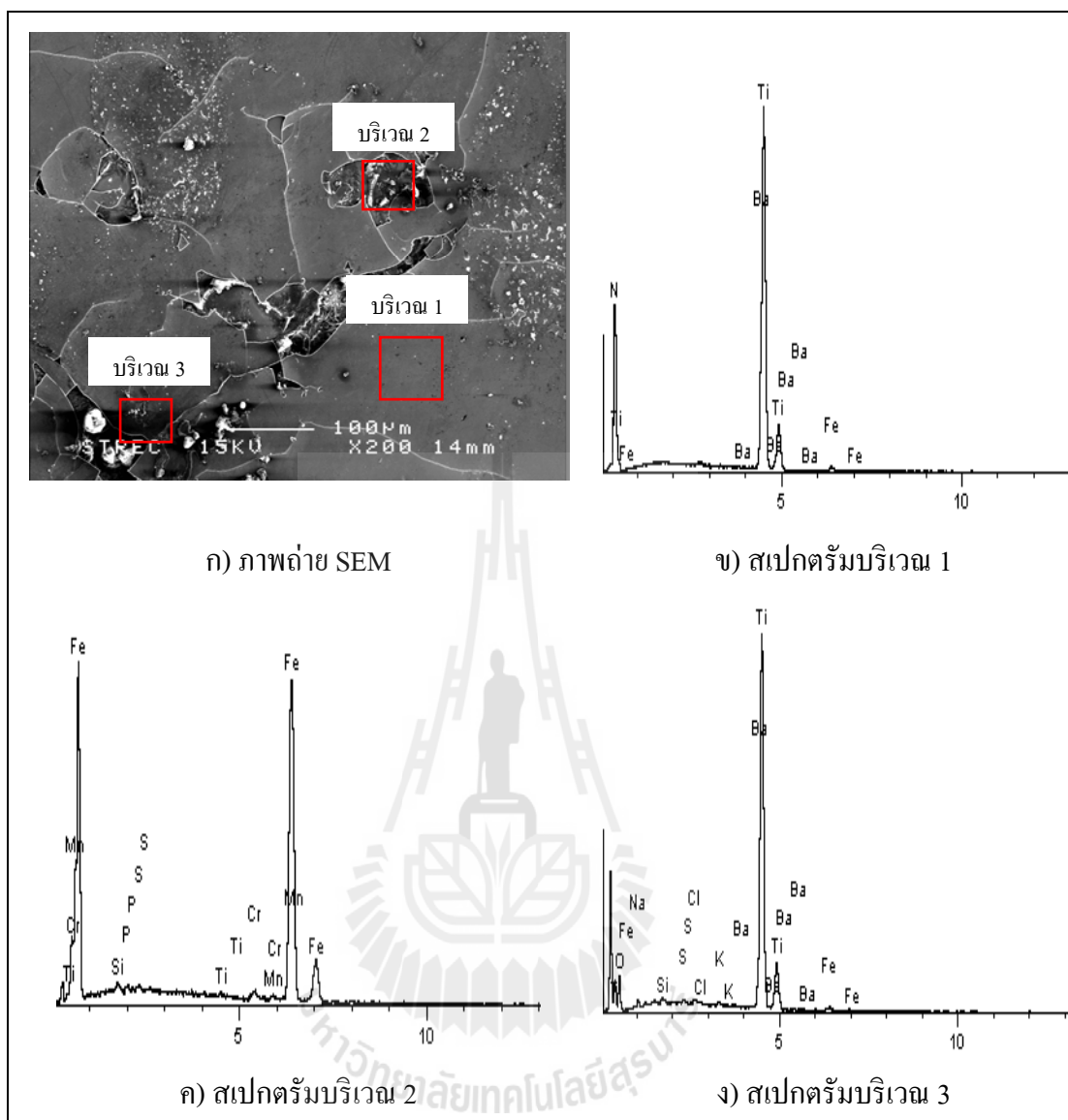
รูปที่ จ.15 ภาพถ่าย SEM และผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีบนพื้นผิวของ
ชิ้นงาน C2 ภายหลังจากทดสอบการกัดกร่อนที่ค่าพีเอช 10



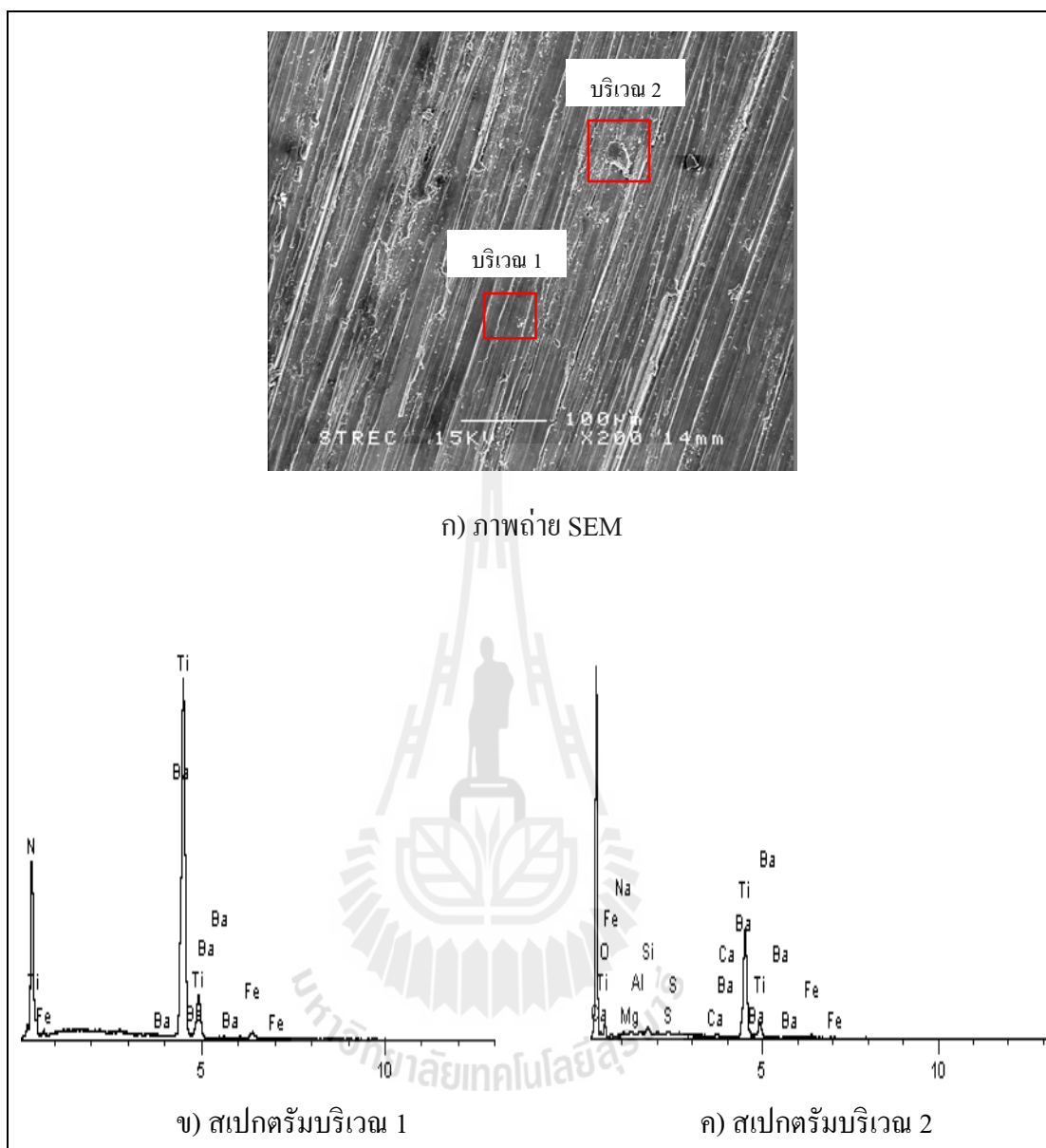
รูปที่ จ.16 ภาพถ่าย SEM และผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีบนพื้นผิวของ
ชิ้นงาน C3 ภายหลังจากทดสอบการกัดกร่อนที่ค่าพีเอช 10



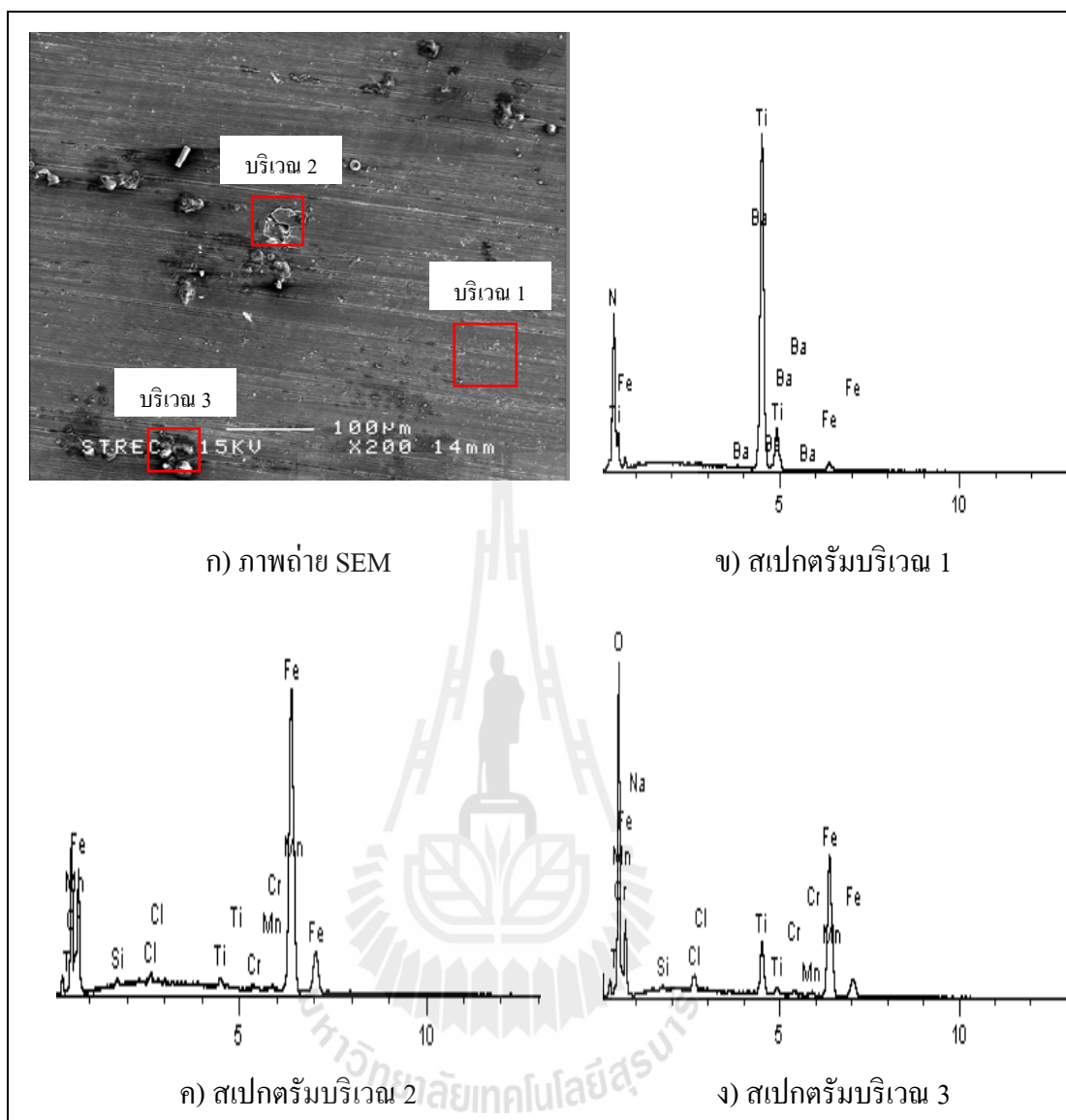
รูปที่ จ.17 ภาพถ่าย SEM และผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีบนพื้นผิวของ
ชิ้นงาน T2 ภายหลังทดสอบการกัดกร่อนที่ค่าพีเอช 2



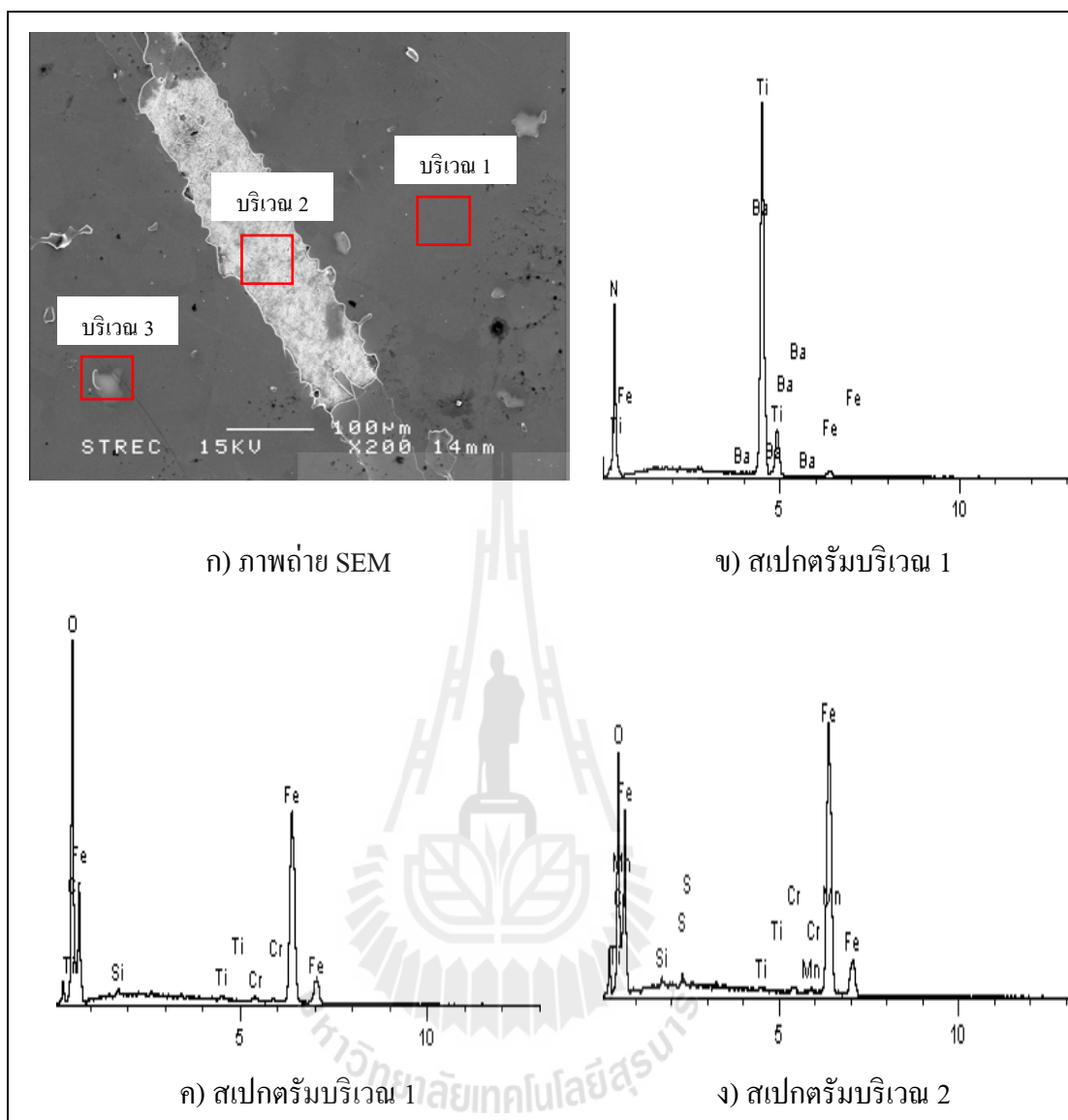
รูปที่ จ.18 ภาพถ่าย SEM และผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีบนพื้นผิวของ
ชิ้นงาน T3 ภายหลังทดสอบการกัดกร่อนที่ค่าพีเอช 2



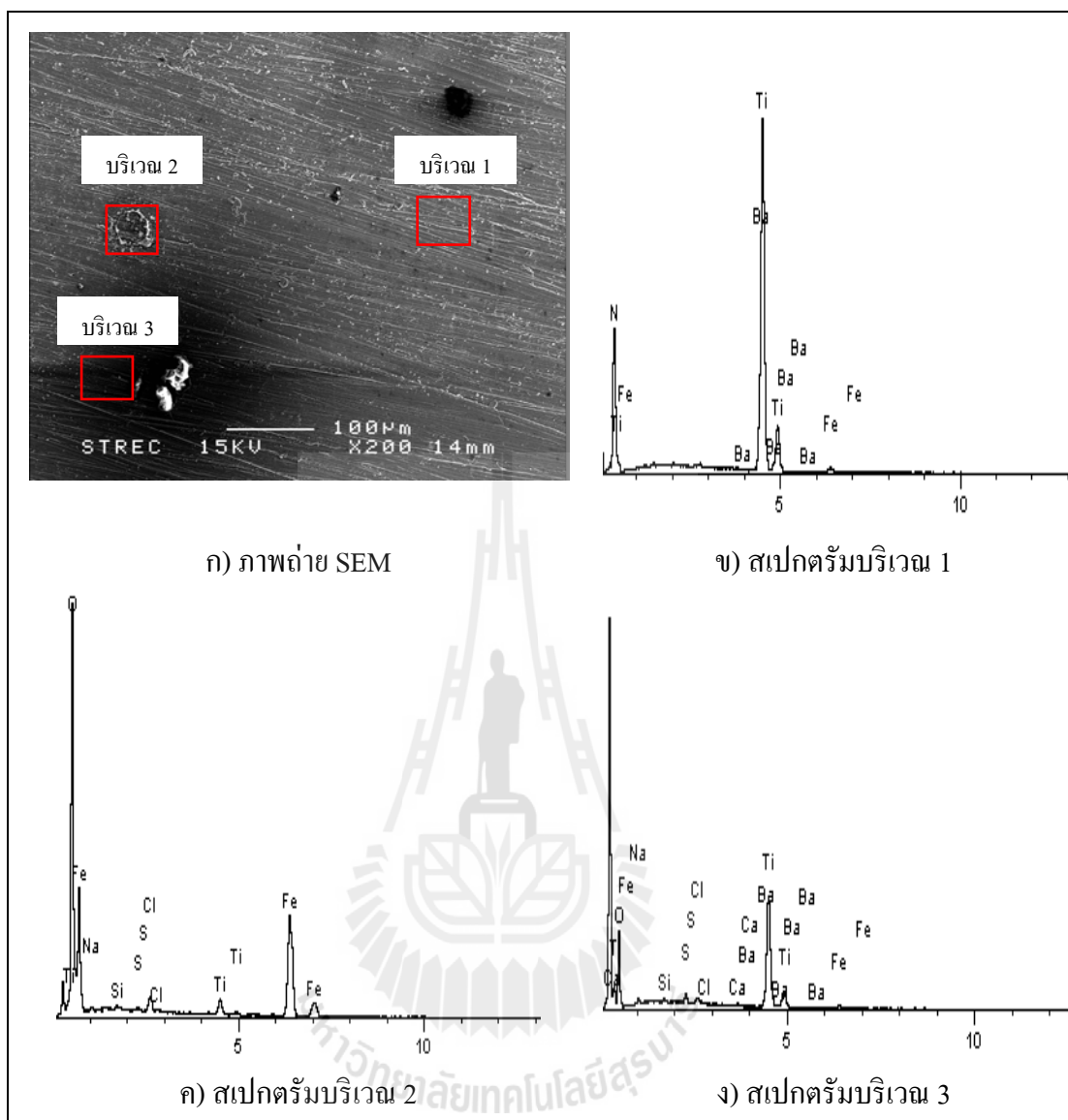
รูปที่ จ.19 ภาพถ่าย SEM และผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีบนพื้นผิวของ
ชิ้นงาน T1 ภายหลังจากทดสอบการกัดกร่อนที่ค่าพีเอช 7



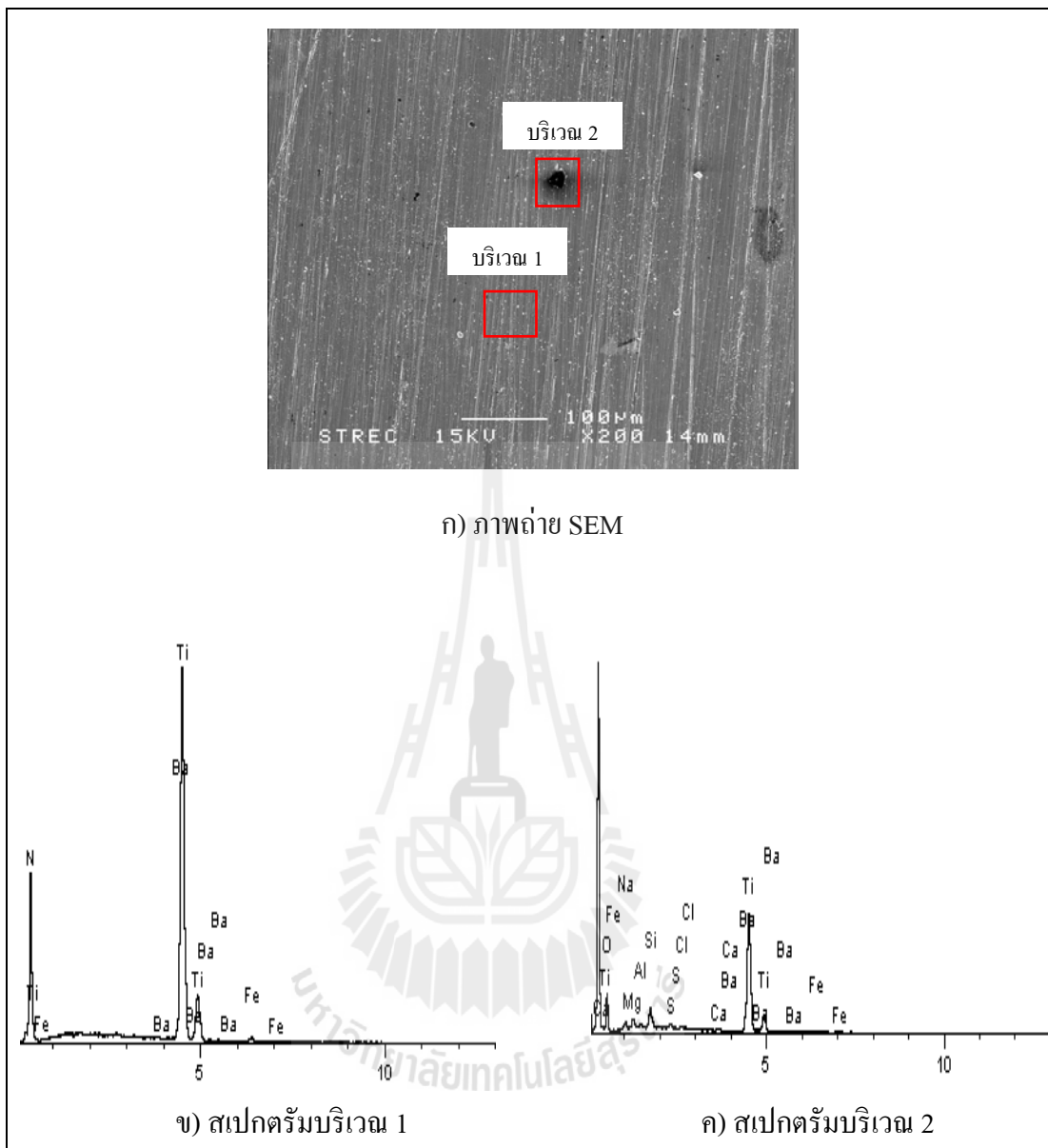
รูปที่ จ.20 ภาพถ่าย SEM และผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีบนพื้นผิวของ
ชิ้นงาน T2 ภายหลังจากทดสอบการกัดกร่อนที่ค่าพีเอช 7



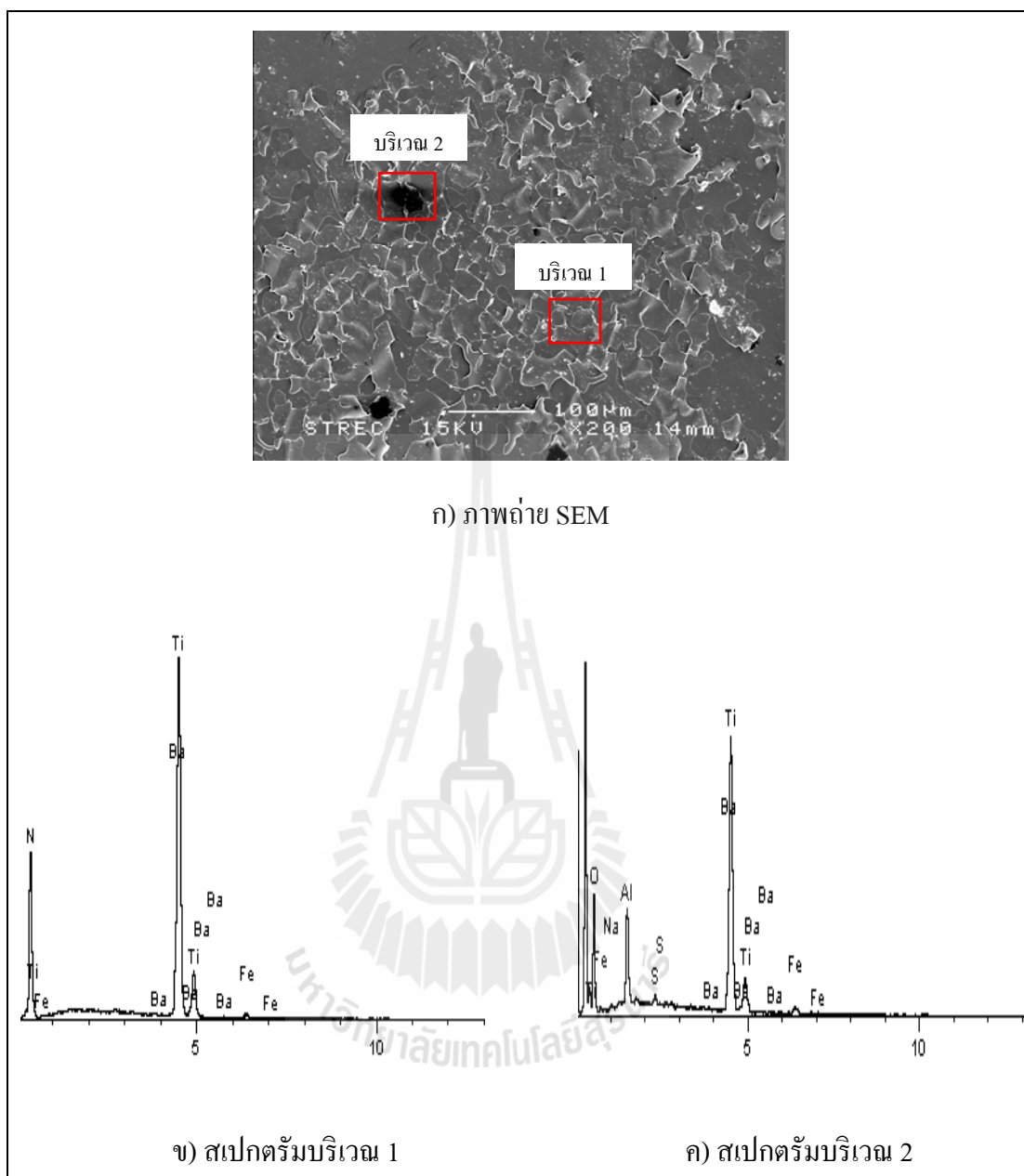
รูปที่ จ.21 ภาพถ่าย SEM และผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีบนพื้นผิวของ
ชิ้นงาน T3 ภายหลังจากทดสอบการกัดกร่อนที่ค่าพีเอช 7



รูปที่ จ.22 ภาพถ่าย SEM และผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีบนพื้นผิวของ
ชิ้นงาน T1 ภายหลังจากทดสอบการกัดกร่อนที่ค่าพีเอช 10



รูปที่ จ.23 ภาพถ่าย SEM และผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีบนพื้นผิวของ
ชิ้นงาน T2 ภายหลังจากทดสอบการกัดกร่อนที่ค่าพีเอช 10



รูปที่ จ.24 ภาพถ่าย SEM และผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีบนพื้นผิวของ
ชิ้นงาน T3 ภายหลังทดสอบการกัดกร่อนที่ค่าพีเอช 10



ภาคผนวก ข

บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

รายชื่อบทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

C. Keawhan, P. Songsiriritthigul, N. Witit-Anan, P. Wongpanya, **Corrosion Behavior of AISI 4140 Steel Surface Coated by Physical Vapor Deposition**. Journal of Metals, Material and Minerals, Vol. 22 No. 1 pp. 69-76, 2012.



Corrosion Behavior of AISI 4140 Steel Surface Coated by Physical Vapor Deposition

**Chonthicha KEAWHAN¹, Pornwasa WONGPANYA^{1*},
Nirun WITIT-ANUN² and Prayoon SONGSIRIRITTHIGUL³**

¹*School of Metallurgical Engineering, Institute of Engineering,
Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima, 30000 Thailand,*

²*Department of Physics, Burapha University, Chonburi, 20131, Thailand,*

³*School of Physics, Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima, 30000, Thailand,*

³*Synchrotron Light Research Institute (Public Organization),
Nakhon Ratchasima, 30000, Thailand,*

Abstract

The corrosion behavior of uncoated and CrN-coated onto AISI 4140 steel was studied by electrochemical technique. Firstly, the AISI 4140 steel samples were solution heat treated and oil quenched in order to achieve proper hardness. Then, they were surface-prepared with alteration of surface roughness by using SiC paper at different numbers of 180, 600, and 1200 prior to CrN coating. The samples were coated with CrN film by physical vapor deposition (PVD) technique. The corrosion behavior of the uncoated and CrN-coated samples was studied in air-saturated 3.5 wt% NaCl solution at the pH values of 2, 7 and 10 at room temperature. Before and after corrosion testing, the surface of the uncoated and CrN-coated samples was characterized by scanning electron microscopy (SEM) with chemical composition analysis by energy dispersive X-rays (EDX). The results showed that the CrN-coated samples exhibited lower corrosion rate than the uncoated samples at all pH values. In addition, it was found that corrosion rate of the uncoated and CrN-coated samples significantly altered with the surface roughness of the substrate prior to coating. The finer surface roughness is, the more corrosion resistance is.

Keywords: AISI 4140 steel, Chromium nitride coating, Electrochemical technique, 3.5-wt% NaCl solution.

Introduction

Low alloy steels have been commonly used in many engineering applications, especially parts in the automotive industry such as crankshaft, gear, pinion, bolt and various machine tool components because they have good mechanical properties and they are easily fabricated. In general, those parts are usually used for wear and abrasion applications. Therefore, the parts require high hardness of surface for increasing wear and abrasion resistance. The properties of the

parts are focused on wear and hardness.⁽¹⁾ But, in several services they have been used in corrosive environments such as lubricant, gaseous and liquid environments resulting in reduction of performance and lifetime of those parts. As a result, surface modifications, i.e. Physical Vapor Deposition (PVD), Chemical Vapor Deposition (CVD), Nitriding, Carbonitriding and Thermal spraying, are widely used to improve their surface in order to achieve better wear, abrasion and corrosion resistance. However, the PVD technique is a popular method used for improvement of surface because it is safe and clean technology.⁽²⁾ PVD coatings are

mostly composed of metal nitrides such as TiAlN, CrN and etc. that are employed as a protective film due to it has good hardness, chemically inert and thermal stability leading to improve corrosion resistance.⁽³⁾ Properties of PVD coatings, such as corrosion, wear and abrasion resistance, depend on various parameters in accordance with type of substrates, microstructure of substrates, thickness and porosity of the PVD coatings. However, it still remains in question about the effective surface roughness of substrate prior to PVD coating on properties of the coating in particular for NaCl solutions with various pHs. In order to understand the effect of surface roughness of substrate on the corrosion behavior of AISI 4140 steel surface coated by physical vapor deposition (PVD) in air-saturated 3.5 wt% NaCl solution at pH 2, 7 and 10, the electrochemical technique has been used in this study. After electrochemical testing, the corroded surface of samples was investigated by scanning electron microscopy (SEM) with chemical composition analysis by energy dispersive X-rays (EDX).

Materials and Experimental Procedures

Sample Preparation

Low alloy steel with code name AISI 4140 was employed as the substrate in this study. The chemical compositions of AISI 4140 were measured and listed in Table 1. Firstly, the AISI 4140 steels were cut to obtain dimension 10x10x2 mm. After that, the samples were austenitized at 850°C for 30 minutes and oil-quenched. Then, the samples were polished by using SiC at various grit numbers, i.e. 180, 600 and 1200, in order to prepare difference of surface roughness. In addition, the surface roughness (R_a value) of the samples was measured by a profile-meter (Veeco) model as shown in Table 2. Then, the samples were rinsed by distilled water, acetone and were air-dried before PVD coating.

Table 1 : Chemical compositions of 4140 steel (in wt. %).

Grade	C	Mn	Cr	Si	Mo	Fe
4140	0.47	0.78	0.81	0.26	0.19	bal.

Table 2 : The average surface roughness (R_a).

Substrate	R_a (in nm)	
	Prior to coating	After coating
180 SiC	563.13	294.32
600 SiC	200.12	165.56
1200 SiC	31.14	30.92

Coating Preparation

The PVD sputtering process was employed to prepare chromium nitride (CrN) coating. The target used for coating process was made of chromium with 99.9% purity. The samples were cleaned in an ultrasonic cleaner for 20 minutes and were dried prior to coating process. The chromium nitride (CrN) coating was deposited onto the samples with the deposition conditions as shown in Table 3.

Table 3 : Deposition conditions of CrN coating.

Ar flow rate	9 sccm
N ₂ flow rate	6 sccm
Base pressure	5.0×10^{-3} mbar
Working pressure	3.5×10^{-3} mbar
Current	800 mA
Voltage	-456 V
Deposition time	45 min
Target-to-substrate spacing	15 cm
Coating thickness	0.914 μ m

Corrosion Testing

Electrochemical technique was used to study the corrosion behavior of the CrN coating onto the AISI 4140 steel and carried out by using a μ -Autolab software (General Purpose Electrochemical, GPES). A three-electrode cell was used for the polarization measurements. A silver/silver chloride (Ag/AgCl) electrode and graphite electrode were used as a counter and reference electrode, respectively. The study of corrosion behavior was firstly started by measuring the open circuit potential (OCP). Then, the samples were polarized to potentials ranking from -900 mV to +200 mV at a scan rate of 1.0 mV/s in air-saturated 3.5 wt% NaCl solution at pH 2, 7 and 10 and 27°C. The pH of solution was adjusted by addition of hydrochloric acid (HCl) and sodium hydroxide (NaOH) for acidic and alkaline solutions, respectively. The tested areas of the samples were 0.85 cm². The polarization curves were used to evaluate corrosion behavior in terms of corrosion potential (E_{corr}) and corrosion current density (I_{corr}) on the basis of the Tafel analysis after potentiodynamic polarization measurements. The corrosion rate (R_{mmy}) was calculated from the corrosion current density after the Faraday's law. Before and after the electrochemical testing, the surface of the uncoated and CrN coated samples was examined by using scanning electron microscopy (SEM) with chemical composition analysis by energy dispersive X-rays (EDX).

Results and Discussion

Effect of CrN Coatings on the Corrosion Behaviour

Figure 1 shows the polarization curves of the uncoated and CrN coated samples with alteration of surface roughness tested in air-saturated 3.5 wt% NaCl solution at pH 2, 7 and 10. The polarization curves were

recorded from -900 mV to +200 mV with the scan rate of 1.0 mV/s. The important parameters estimated from the polarization curves are listed in Table 4.

Table 4 : Important values evaluated from the polarization curves of uncoated and CrN coated samples tested in air-saturated 3.5 wt% NaCl solution.

pH	Samples	Sic paper	E_{corr}	I_{corr}	R_{mmy}
pH2	Uncoated	No.180	-571	10.98	0.1289
		No.600	-636	5.55	0.0652
		No.1200	-572	5.19	0.0609
	CrN	No.180	-538	7.43	0.0219
		No.600	-531	2.00	0.0059
		No.1200	-532	0.89	0.0026
pH7	Uncoated	No.180	-533	8.11	0.0952
		No.600	-532	3.40	0.0399
		No.1200	-599	0.60	0.0071
	CrN	No.180	-485	0.77	0.0023
		No.600	-455	0.60	0.0018
		No.1200	-405	0.36	0.0011
pH10	Uncoated	No.180	-587	0.68	0.0080
		No.600	-596	0.67	0.0079
		No.1200	-560	0.45	0.0053
	CrN	No.180	-473	0.70	0.0021
		No.600	-423	0.59	0.0017
		No.1200	-354	0.10	0.0003

E_{corr} Corrosion potential (mV, Ag/AgCl)

I_{corr} Corrosion current density ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)

R_{mmy} Corrosion rate (mm/year)

It is obvious that the CrN coating significantly affects corrosion properties of the AISI 4140 steel in particular the corrosion potential (E_{corr}) and corrosion current density (I_{corr}). From the comparison of the corrosion potential (E_{corr}) of the CrN-coated samples and uncoated samples, it is found that the corrosion potential (E_{corr}) is shifted to more positive value, if the samples were surface-coated by CrN.

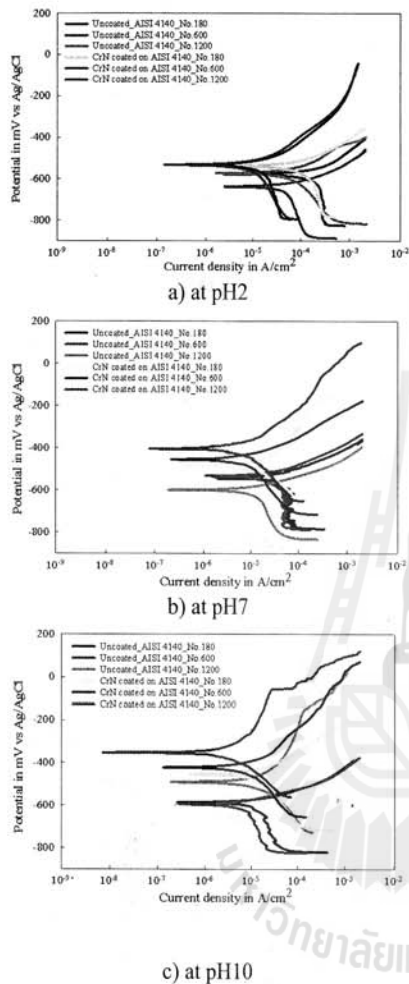


Figure 1: The polarization curves of uncoated and CrN-coated samples tested in air-saturated 3.5 wt% NaCl solution.

For example, at pH 2 the corrosion potential (E_{corr}) of the uncoated sample with the highest surface roughness (No.180) is -571 mV, while the corrosion potential (E_{corr}) of the CrN-coated sample is increased to -538 mV. And, there is the same trend at pH 7 and pH 10. In addition, it is found that the CrN-coated samples have lower corrosion

current densities (I_{corr}) than the uncoated samples at all pHs.⁽⁴⁾ Those results indicate that after application of CrN coating onto the surface of bare steel, the corrosion resistance is better. The reason, why CrN enhances the corrosion resistance, is due to the fact that nitrogen atom in the nitride layer firstly dissolved into the solution, and it could repel the Chloride ion (Cl^-) away from the sample surface. The nitrogen anion (N^-) then combines with hydrogen ion (H^+) in the solution to form the ammonium (NH_4^+) resulting increase of solution pH. Finally, corrosion attack from the solutions decreases.^(5,6)

Effect of pH of Solution on Corrosion Behaviour

In order to study the effect of pH of solution on corrosion behavior of the uncoated and CrN coated samples tested in air-saturated 3.5 wt% NaCl solution, the solution was pH adjusted by addition of hydrochloric acid (HCl) and sodium hydroxide (NaOH) for pH 2 and 10, respectively. Then, the corrosion testing was done at the same procedure. From the polarization curves, shown in Figure 1, corrosion rate in terms of millimetre per year (mm/yr) is calculated and plotted with various pHs of solution as shown in Figure 2.

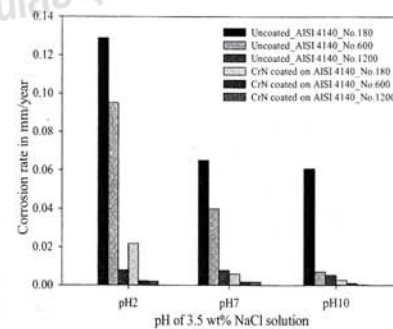


Figure 2: Corrosion rate of uncoated and CrN coated samples with various pHs of solution.

Corrosion Behavior of AISI 4140 Steel Surface Coated by Physical Vapor Deposition

It is obvious that the corrosion rate decreases as the pH of solution increases. The highest corrosion rate is observed at pH 2 because the solution was adjusted by HCl acid that significantly increased chloride (Cl^-) ion and hydrogen ion (H^+) in the solution. This means that the solution at pH 2 is more aggressive than that at pH 7 and pH 10. The corrosion attack is more severe in the uncoated samples than in the CrN-coated samples. Even though the Cl^- ion still attacks the CrN coating as the same in the uncoated samples, corrosion appearance is not the same. Because the Cl^- ion attacks at the specific area of CrN coating i.e. pore and crack, then it penetrates to the substrate resulting in pitting corrosion.⁽⁷⁾ Moreover, there is more available hydrogen ion (H^+) in solution causing H_2 evolution resulting increase in the corrosion rate at pH 2 more than pH 7 and 10. At pH 10, it was found that the uncoated sample with the smoothest surface shows passive behavior. This is due to the fact that iron can form hydroxide film at basic pH more than 7.⁽⁸⁾ As a result, the corrosion resistance in basic solution is better than in acid solution.

Effect of Surface Roughness on Corrosion Behavior

In order to investigate the effect of surface roughness on corrosion behavior, the samples prior to PVD coating were surface-prepared by using different SiC numbers. The average surface roughness in R_a values of each sample both before and after coating was measured by using the profile-meter (Veeco) model as listed in Table 2. It clearly demonstrates that the average surface roughness (R_a) of the samples prior to coating decreases with the number of grinding paper increases. Moreover, it is obvious that the surface roughness of sample prior to coating also affects the surface roughness of the CrN-

coated samples. The effect of surface roughness of uncoated samples on corrosion rate at pH 2, 7 and 10 is shown in Figure 3. It is obvious that corrosion rate significantly increases with the surface roughness of the substrate, especially at pH 2 and pH 7. In case of pH 7, surface roughness slightly affects the corrosion rate. Figure 4 also shows effect of surface roughness on corrosion rate of the CrN-coated samples. It is obvious that the CrN coated onto the rougher surface has a higher corrosion rate than the CrN coated onto the smoother surface. The evidence of increasing corrosion rate can be observed at pH 2. In contrast to pH 2, there is slightly increasing of corrosion rate at pH 7 and 10. This is due to the fact that higher surface roughness leads to a higher number of defects in the coating and also results in lower complete coverage of the sample by the coating. Those results also have the same trend as shown in the uncoated samples. And, those can be used to confirm that the surface roughness of substrate prior to coating significantly effects on the deposition of CrN film.^(9,10)

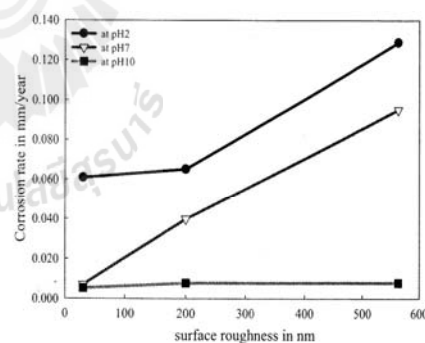


Figure 3: Corrosion rate of uncoated samples with different surface roughness in air - saturated 3.5 wt% NaCl solution at pH 2, 7 and 10.

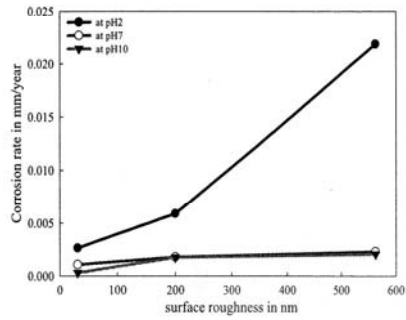
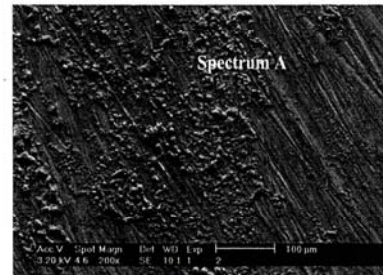


Figure 4 : Corrosion rate of CrN - coated samples with different surface roughness in air - saturated 3.5 wt% NaCl solution at pH 2, 7 and 10.

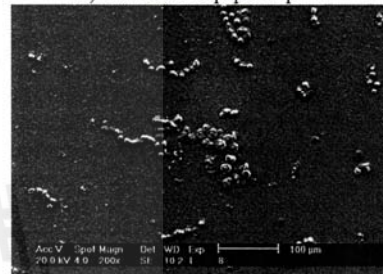
Corrosion Morphology

The SEM images of the uncoated samples after corrosion testing in air-saturated 3.5 wt% NaCl solution are shown in Figure 5. Corrosion products appear on corroded surface of all samples, but there is different in the amount and location of corrosion products. There are more corroded areas in the sample with the highest surface roughness than in the sample with the finest surface roughness. This is certainly true, if the pH of solutions is 2. And, it can be observed in Figure 5a and the corrosion products appear along the scratch of grinding.

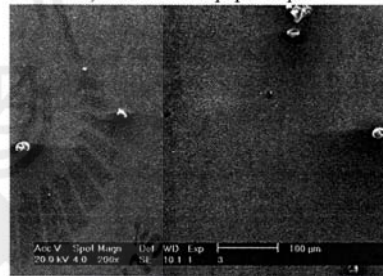
Moreover, it is found that the uncoated samples with the finest surface have a little amount of corrosion products in particular at pH 10 and they represent the best corrosion resistance. The compositions of corrosion products evaluated by EDX are shown in Figure 6. From the EDX analysis, it reveals the content of Fe and O representing the corrosion products.



a) No. 180 SiC paper at pH 2



b) No. 600 SiC paper at pH 7



c) No. 1200 SiC paper at pH 10

Figure 5 : SEM images of the uncoated samples after corrosion testing in air - saturated 3.5 wt% NaCl solution at pH 2, 7 and 10.

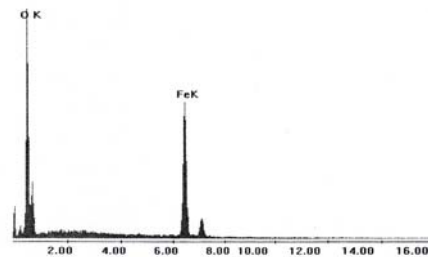
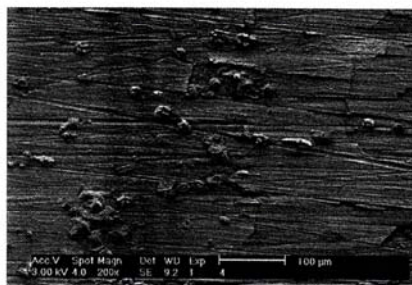
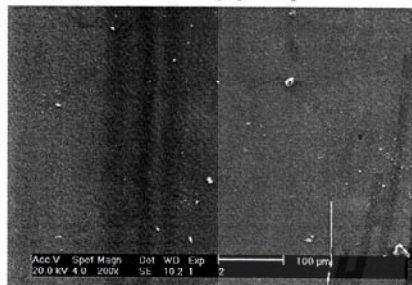


Figure 6 : The EDX analysis of spectrum A.

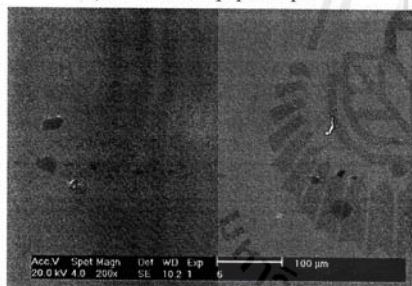
Corrosion Behavior of AISI 4140 Steel Surface Coated by Physical Vapor Deposition



a) No. 180 SiC paper at pH 2



b) No. 600 SiC paper at pH 7



c) No. 1200 SiC paper at pH 10

Figure 7: SEM images of the CrN coated samples after corrosion test in air-saturated 3.5 wt% NaCl solution.

Figure 7 shows the SEM images of the CrN coated samples after corrosion testing in air-saturated 3.5 wt% NaCl solution. It is obvious that the CrN-coated samples have less corrosion products in comparison with the uncoated samples (Figure 5) at the same condition for testing. From the results, it is shown that the CrN film represents as a protective film which can be used to reduce corrosion attack of NaCl solution. In addition,

the results show that the corrosion resistance of the CrN film drastically depends on the roughness of substrate and pH of solution. For example, the CrN coated samples with the highest surface roughness and tested in solution at pH 2 (Figure 7a) exhibit the worst corrosion resistance. This is due to the fact that some parts of the CrN film break and remove from the substrate resulting in the ion penetrates easily into the CrN coating and attacks the surface of substrate. The breakdown of the CrN film is a result from an imperfection of adhesion between the CrN coating and substrate. In contrast, the CrN coated samples with smoother surface and tested at pH 7 and 10 almost have no corroded area as shown in Figure 7b and 7c. From those results, it is corresponding to the previous results ⁽¹¹⁾ that corrosion resistance of the samples is better, if the surface of samples is smoother and pH of solution is higher.

Conclusions

The corrosion behavior of AISI4140 steel surface coated with chromium nitride (CrN) film by physical vapor deposition (PVD) was studied. The following conclusions are:

1. The CrN coated samples exhibited better corrosion resistance than the uncoated samples in 3.5 wt% NaCl solution at all pH values.
2. The corrosion resistance of the uncoated and CrN coated samples significantly altered with pH of solution. And, the corrosion resistance of the samples at pH 10 was better than at pH 7 and pH 2 respectively.
3. The surface roughness of substrate prior to coating significantly effected on the deposition and breakdown of CrN film during corrosion testing. And, the

corrosion rate increased with increasing surface roughness of substrate.

4. The corroded area in the CrN-coated samples was less than that in the uncoated samples.

Acknowledgments

The authors gratefully acknowledge the financial support of this work by Office of the National Research Council of Thailand (NRCT) and Suranaree University of Technology with the Contract No. 61/2553 and Code name SUT7-713-53-24-35.

References

1. Sivitski, A., Ajaots, M. and Podra, P. (2008). Wear PVD Hard Coatings in Sliding Contacts. In : *Proceedings of the 6th International DAAAM Baltic Conference Industrial Engineering*. Tallinn, Estonia : 549-554
2. Darja, K.M., Peter, P., Miha, C. and Marijan, M. (2004). The corrosion behavior of Cr-(C,N) PVD hard coatings deposited on various substrates. *Electrochim. Acta* **49** (9-10) : 1527-1533.
3. Zhou, Q.G., Bai, X.D., Chen, X.W., Peng, D.Q., Ling, Y.H. and Wang, D.R. (2003). Corrosion Resistance of Duplex and Gradient CrN_x Coated H13 Steel. *Appl. Surf. Sci.* **211** (1-11) : 293-299.
4. Cunha, L., Andritschky, M., Rebouta, L. and Pischow, K. (1999). Corrosion of CrN TiAlN coatings in chloride - containing atmosphere. *Surf. Coat. Technol.* **116-119** : 1152-1160.
5. Chyou, S. D. and Shih, H. C. (1991). The effect of nitrogen on the corrosion of plasma - nitrided 4140 steel. *Corrosion.* **47(1)** : 31-34.
6. Grabke, H. J. (1996). The role of nitrogen in the corrosion of iron and steels (review). *ISIJ. Int.* **36(7)** : 777-786.
7. Hui, P.F., Cheng, H.H., Jung, K.L. and Yih, H.S. (2003). Effects of PVD sputtered coating on the corrosion resistance of AISI304 stainless steel. *Mater. Sci. Eng.* **347(1-2)**: 123-129.
8. Jones, D. A. (1996). *Principles and prevention of corrosion*. 2nd ed. London : Prentice Hall : 292-304.
9. Liu, C., Leyland, A., Lyon, S. and Matthews, A. (1995). An a.c impedance study on PVD-coated mild steel with different surface roughness. *Surf. Coat. Technol.* (part2) : 76 - 77 : 623-631.
10. Walter, R. and Bobby Kannan, M. (2011). Influence of surface roughness on the corrosion behavior of magnesium alloy. *Mater. Des.* **32(4)** : 2350-2354.
11. Ahn, S.H., Yoo, J.H., Choi, Y.S., Kim, J.G. and Han, J.G. (2003). Corrosion behavior of PVD-Grown WC-(Ti_{1-x}Al_x)N Films in a 3.5 wt% NaCl solution. *Surf. Coat. Technol.* **162(2-3)** : 212-221.

ประวัติผู้เขียน

นางสาวชลธิชา แก้วหาญ เกิดเมื่อวันที่ 19 กุมภาพันธ์ พุทธศักราช 2528 สำเร็จการศึกษา ระดับชั้นมัธยมศึกษาจากโรงเรียนวชิรวิทย์ จังหวัดมหาสารคาม เมื่อปีพุทธศักราช 2547 และสำเร็จ การศึกษาระดับปริญญาตรี สาขาวิชาวิศวกรรมโลหการ สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัย เทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา เมื่อปีพุทธศักราช 2551 หลังจากสำเร็จการศึกษาระดับ ปริญญาตรี ได้เข้าศึกษาต่อระดับปริญญาโท สาขาวิชาวิศวกรรมโลหการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยี สุรนารี จังหวัดนครราชสีมา เมื่อปีพุทธศักราช 2553 โดยได้รับทุนการศึกษาแก่นักศึกษา ระดับบัณฑิตศึกษาที่คณาจารย์ได้รับทุนวิจัย จากแหล่งทุนภายนอกจากกองทุนสนับสนุนการวิจัย และพัฒนามหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี มีบทความทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ดังนี้

(1) C. Keawhan, P. Songsiriritthigul, N. Witit-Anan, P. Wongpanya, Corrosion Behavior of AISI 4140 Steel Surface Coated by Physical Vapor Deposition. Journal of Metals, Material and Minerals, Vol. 22 No. 1 pp. 69-76, 2012.

