

ผลของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ต่อการกัดกรวดด้วยกระแสไฟฟ้าของ
ชั้นออกไซด์บนเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 304L ที่ผ่านการอบอ่อนในสารละลาย
โซเดียมซัลเฟต



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2559

ผลของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ต่อการกัดกรวดด้วยกระแสไฟฟ้าของ
ชั้นออกไซด์บนเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 304L ที่ผ่านการอบอ่อนในสารละลาย
โซเดียมซัลเฟต



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2559

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

EFFECT OF HYDROGEN PEROXIDE ON ELECTROLYTIC PICKLING OF
THE OXIDE LAYERS ON ANNEALED 304L STAINLESS STEEL IN
SODIUM SULPHATE SOLUTION




A REPORT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENTS FOR THE DEGREE OF
BACHELOR OF ENGINEERING IN CHEMICAL ENGINEERING
FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LARDKRABANG
ACADEMIC YEAR 2016

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้


ปริญญานิพนธ์เรื่อง ผลของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ต่อการกัดกรวดด้วยกระแสไฟฟ้าของ
ชั้นออกไซด์บนเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 304L ที่ผ่านการอบอ่อนใน
สารละลายโซเดียมซัลเฟต
โดย นางสาวโสรยา แพสุวรรณ
อาจารย์ที่ปรึกษา ผศ.ดร.สันติ วัฒนานุกรณ์
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม รศ.ดร. อัญชลีพร วาริตสวัสดิ์ หล่อทองคำ
ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปริญญานิพนธ์นี้ได้รับการพิจารณาอนุมัติให้นับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี

คณะกรรมการตรวจสอบปริญญานิพนธ์


.....ประธานกรรมการ
(ผศ.ดร. สันติ วัฒนานุกรณ์)


.....กรรมการ
(รศ.ดร. อัญชลีพร วาริตสวัสดิ์ หล่อทองคำ)


.....กรรมการ
(ผศ.ดร. วลัยรัตน์ จันทอัมพร)


.....กรรมการ
(อ.ศิริพันธ์ มุราธาญลักษณ์)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญานิพนธ์เรื่อง	ผลของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ต่อการกัดกรดด้วยกระแสไฟฟ้าของ ชั้นออกไซด์บนเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 304L ที่ผ่านการอบอ่อนใน สารละลายโซเดียมซัลเฟต
โดย	นางสาวโสรยา แพสุวรรณ
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมเคมี
ปีการศึกษา	2559
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผศ.ดร. สันติ วัฒนานุกรณ์
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	รศ.ดร. อัญชลีพร วาริทสวัสดิ์ หล่อทองคำ

บทคัดย่อ

ปริญญานิพนธ์นี้ศึกษาผลของสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ในการกำจัดชั้นของสเกลออกไซด์บนพื้นผิวของเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 304L โดยการกัดกรดด้วยกระแสไฟฟ้าในสารละลายโซเดียมซัลเฟต สเกลออกไซด์เป็นผลมาจากการรีดร้อนและการอบอ่อนที่อุณหภูมิสูงซึ่งจะทำให้ความแข็งแรงและการทนต่อการกัดกร่อนของเหล็กกล้าไร้สนิมต่ำลง สารละลายโซเดียมซัลเฟตที่ใช้ในงานวิจัยนี้มีความเข้มข้น 190 กรัมต่อลิตร pH 4 ทำการศึกษาที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส และใช้สารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ความเข้มข้น 10 กรัมต่อลิตร การติดตามผลของการกำจัดชั้นของสเกลออกไซด์ใช้วิธีโพเทนทิโอสแตติกโพลาริเซชันและโพเทนทิโอสแตติกโพลาริเซชัน การวิเคราะห์สเกลออกไซด์ใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด และเครื่องวิเคราะห์โครงสร้างผลึกด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ ผลการศึกษาโพเทนทิโอสแตติกโพลาริเซชันพบว่า การกัดกรดด้วยกระแสไฟฟ้าในสารละลายโซเดียมซัลเฟตเกิดที่ค่าศักย์ไฟฟ้า 1 V (Ag/AgCl) สามารถกำจัดออกไซด์ของเหล็กและโครเมียมออกจากพื้นผิวของเหล็กกล้าไร้สนิม เกรด 304L ที่ผ่านการอบอ่อนได้ภายในเวลา 30 วินาที ทั้งนี้แม้ว่าไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์จะเป็นตัวออกซิไดส์ที่แรง แต่ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส พบว่าไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ไม่มีผลเร่งให้การกัดกรดด้วยกระแสไฟฟ้าในสารละลายโซเดียมซัลเฟตเร็วขึ้น แต่ช่วยให้ผิวของเหล็กกล้าไร้สนิมเรียบขึ้นเท่านั้น

Report Title EFFECT OF HYDROGEN PEROXIDE ON ELECTROLYTIC PICKLING OF THE OXIDE LAYERS ON ANNEALED 304L STAINLESS STEEL IN SODIUM SULPHATE SOLUTION

By Ms. Soraya Phaesuwan

Degree Bachelor of Engineering

Program Chemical Engineering

Year 2016

Advisor Asst.Prof.Dr. Santi Wattananusorn

Co-Advisor Assoc.Prof.Dr. Anchaleeporn Waritswat Lothongkum

ABSTRACT

The effect of hydrogen peroxide solution on the elimination of metal oxide layers on annealed 304L stainless steel by electrolytic pickling in sodium sulphate solution was studied. Metal oxide scales, which were occurred in stainless steel production after hot-rolling and annealing processes at high temperature, resulted in low strength and low corrosion resistance of stainless steel. In this study, the experimental parameters were sodium sulphate solution 190 g/L, pH 4 at 25°C, and hydrogen peroxide solution 10 g/L. Potentiodynamic and potentiostatic polarization techniques were used to investigate how metal oxide scales were eliminated. The oxide layer was analyzed by scanning electron microscope (SEM) and X-ray diffractometer (XRD). The results from potentiostatic polarization showed that electrolytic pickling in sodium sulphate solution occurred at the intermediate potential of 1 V (Ag/AgCl), and iron and chromium oxides from the surface of annealed 304L stainless steel could be eliminated within 30 seconds. Although hydrogen peroxide is a strong oxidizing agent, at room temperature experiments it showed no effect on the elimination of metal oxide layers by electrolytic pickling in sodium sulphate solution. However, the smooth surface of stainless steel sample was observed.

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณบริษัท โพลโค-ไทยน็อคซ์ จำกัด ที่อนุเคราะห์ชิ้นงานตัวอย่าง และสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัยที่สนับสนุนทุนวิจัยบางส่วนในการดำเนินงาน ขอขอบคุณ ผศ.ดร.สันติ วัฒนานุสรณ์ และ รศ.ดร. อัญชลีพร วาริตสวัสต์ หล่อทองคำ ที่ให้คำแนะนำในการวางแผนการดำเนินงานวิจัยและแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆ ของปริญญานิพนธ์ ทำให้งานนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี

ขอขอบคุณ รศ.ดร. กอบบุญ หล่อทองคำ และรุ่นพี่ที่ภาควิชาวิศวกรรมโลหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้คำแนะนำและอนุเคราะห์การใช้อุปกรณ์และเครื่องมือวิเคราะห์ต่างๆ

สุดท้ายนี้ กราบขอบพระคุณ บิดา มารดา และญาติพี่น้อง ที่สนับสนุนการศึกษาและให้กำลังใจมาโดยตลอด

คุณความดีและประโยชน์ที่พึงบังเกิดจากปริญญานิพนธ์นี้ ขอมอบแต่บิดา มารดา ผู้เป็นที่รัก และเคารพยิ่ง ครูและคณาจารย์ทุกท่านที่ได้อบรม สั่งสอน และประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ และผู้มีพระคุณทุกท่าน หากมีข้อผิดพลาดในปริญญานิพนธ์นี้ ผู้วิจัยขอน้อมรับ และขออภัยมา ณ ที่นี้

นางสาวโสรยา แพสุวรรณ

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VIII
สารบัญรูป	IX
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความสำคัญของปริญญาโท.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	2
1.3 ขอบเขตของการดำเนินงาน.....	2
1.4 ประโยชน์ที่ได้รับ	2
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	3
2.1 เหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มออสเทนิต.....	3
2.2 กระบวนการผลิตเหล็กกล้าไร้สนิม	4
2.2.1 กระบวนการหลอมและหล่อ (Melting and Casting Processes)	4
2.2.2 กระบวนการรีดร้อน (Hot-rolling Process)	6
2.2.3 กระบวนการอบอ่อนและการกำจัดสเกลออกไซด์ (Annealing and Descaling Processes).....	6
2.2.4 กระบวนการรีดเย็น (Cold-rolling Process)	7
2.3 การกัดกร่อนของโลหะ	7
2.4 หลักการเกิดการกัดกร่อนโดยปฏิกิริยาเคมี.....	10
2.5 หลักการเกิดการกัดกร่อนโดยปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมี.....	11
2.6 เซลล์ไฟฟ้าเคมี (Electrochemical Cell).....	11
2.6.1 เซลล์กัลวานิก (Galvanic Cell)	11
2.6.2 เซลล์อิเล็กโทรไลต์ (Electrolytic Cell)	13

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.7 เทคนิคไฟฟ้าเคมีสำหรับติดตามการกัดกร่อนของโลหะ	14
2.8 เทคนิคโพเทนทีโอไดนามิก (Potentiodynamic)	15
2.9 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope: SEM)	17
2.10 เครื่องวิเคราะห์โครงสร้างผลึกด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray Diffractometer: XRD).....	18
2.11 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	19
บทที่ 3 ขั้นตอนการทดลอง	24
3.1 สารเคมีและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง.....	24
3.1.1 ชิ้นงานตัวอย่าง.....	24
3.1.2 สารละลายอิเล็กโทรไลต์	24
3.1.2.1 สารละลายโซเดียมซัลเฟต	24
3.1.2.1 สารละลายโซเดียมซัลเฟตที่เติมสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์.....	24
3.1.3 เครื่องชั่งน้ำหนักทศนิยม 2 ตำแหน่ง.....	25
3.1.4 เครื่องวัดค่า pH.....	25
3.1.5 เทอร์โมมิเตอร์.....	25
3.1.6 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	25
3.1.7 เครื่องวิเคราะห์โครงสร้างผลึกด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์	25
3.1.8 เครื่องโพเทนทีโอสเตทท์กลาโนสเตท (Potentiostat Galvanostat).....	26
3.2 ขั้นตอนการทดลอง	27
บทที่ 4 ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผลการทดลอง	28
4.1 ผลการทดลองโดยวิธีโพเทนทีโอไดนามิกโพลาราไรเซชัน.....	28
4.1.1 กรณีสารละลายโซเดียมซัลเฟต	28
4.1.2 กรณีสารละลายโซเดียมซัลเฟตที่เติมสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ความเข้มข้น 10 กรัมต่อลิตร	29

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.2 ผลการทดลองโดยวิธีโพเทนทิโอสแตติกโพลาริเซชัน	31
4.2.1 กรณีสารละลายโซเดียมซัลเฟต	31
4.2.2 กรณีสารละลายโซเดียมซัลเฟตที่เติมสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ค ความเข้มข้น 10 กรัมต่อลิตร	31
4.3 การศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยาของออกไซด์บนเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 304L ที่ผ่านการอบอ่อนที่อุณหภูมิ 1,175 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 นาที ก่อนและหลัง การกัดกรด	33
4.3.1 กรณีก่อนการกัดกรดด้วยกระแสไฟฟ้า	33
4.3.2 กรณีการกัดกรดด้วยสารละลายโซเดียมซัลเฟตที่ค่าศักย์ไฟฟ้า -0.1 V (Ag/AgCl) และ 1.0 V (Ag/AgCl)	33
4.3.3 กรณีการกัดกรดด้วยสารละลายโซเดียมซัลเฟตที่เติมสารละลายไฮโดรเจน เปอร์ออกไซด์ที่ค่าศักย์ไฟฟ้า 1.2 V (Ag/AgCl)	34
4.4 ผลการวิเคราะห์ชั้นของออกไซด์ของเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 304L ที่ผ่านการอบอ่อน ที่อุณหภูมิ 1,175 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 นาที ก่อนและหลังการกัดกรด	35
4.4.1 กรณีก่อนการกัดกรดด้วยกระแสไฟฟ้า	35
4.4.2 กรณีการกัดกรดด้วยสารละลายโซเดียมซัลเฟตที่ค่าศักย์ไฟฟ้า -0.1 V (Ag/AgCl)	35
4.4.3 กรณีการกัดกรดด้วยสารละลายโซเดียมซัลเฟตที่ค่าศักย์ไฟฟ้า 1.0 V (Ag/AgCl)	36
4.4.4 กรณีการกัดกรดด้วยสารละลายโซเดียมซัลเฟตที่เติมสารละลายไฮโดรเจน เปอร์ออกไซด์ที่ค่าศักย์ไฟฟ้า 1.2 V (Ag/AgCl)	37
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ	39
5.1 สรุปผลการทดลอง	39
5.2 ข้อเสนอแนะ	40
บรรณานุกรม	41

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
ภาคผนวก.....	44
ภาคผนวก ก รูปแบบสเปกตรัมมาตรฐานของออกไซด์.....	44
ภาคผนวก ข ค่ามาตรฐานทางเทอร์โมไดนามิกส์.....	47



สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 องค์ประกอบทางเคมีของเหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มออสเทนิต์	4
2.2 ศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์มาตรฐาน	12
3.1 องค์ประกอบทางเคมีของเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 304L ที่ผ่านการอบอ่อน.....	24
ก.1 รูปแบบสเปกตรัมมาตรฐานของเหล็กโครไมต์ (FeCr_2O_4).....	44
ก.2 รูปแบบสเปกตรัมมาตรฐานของโครเมียมออกไซด์ (Cr_2O_3).....	44
ก.3 รูปแบบสเปกตรัมมาตรฐานของเหล็กออกไซด์ (Fe_2O_3).....	45
ข.1 ค่ามาตรฐานทางเทอร์โมไดนามิกส์	47



สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 เตาอาร์กไฟฟ้า.....	5
2.2 เตาถลุงอาร์กอนออกซิเจน.....	5
2.3 กระบวนการรีดร้อนของเหล็กกล้าไร้สนิม	6
2.4 กระบวนการอบอ่อนและการกำจัดสเกลออกไซด์	7
2.5 กระบวนการรีดเย็นของเหล็กกล้าไร้สนิมแบบย้อนกลับไปมา	7
2.6 เซลล์กัลวานิก.....	12
2.7 เซลล์อิเล็กโทรไลต์	13
2.8 ลักษณะการต่อเซลล์ที่ใช้ในการตรวจติดตามพฤติกรรมการกัดกร่อนของโลหะเข้ากับ เครื่องโพเทนทิโอสแตท	14
2.9 กราฟโพลาริเซชันของเหล็กกล้าไร้สนิม	16
2.10 การทำงานของกล่องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด.....	18
2.11 กราฟแอนอดิกโพลาริเซชันของเหล็กกล้าไร้สนิมที่ถูกออกซิไดส์และของเหล็กกล้าไร้สนิมเปล่า: อัตราเร็วในการเพิ่มศักย์ไฟฟ้าที่ 5 mVs^{-1}	20
2.12 กราฟโพลาริเซชันของเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 430 ในสารละลายกรดไฮโดรคลอริก ที่เติมและไม่เติมตัวออกซิไดส์	21
2.13 ค่าน้ำหนักที่หายไปของชิ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 430 หลังการกัดกรดในสารละลาย กรดไฮโดรคลอริกที่เติมและไม่เติมตัวออกซิไดส์.....	21
2.14 ค่าน้ำหนักที่หายไปของชิ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 304 หลังผ่านการกัดกรดหลายขั้นตอน	22
3.1 เครื่องวิเคราะห์โครงสร้างผลึกด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์	25
3.2 เครื่องโพเทนทิโอสแตทกัลวานอสแตท	26
3.3 การติดตั้งขั้วไฟฟ้า	26
4.1 กราฟโพลาริเซชันของการกัดกรดด้วยกระแสไฟฟ้าของเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 304L ที่ผ่านการอบอ่อนที่อุณหภูมิ 1,175 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 นาที ในสารละลาย โซเดียมซัลเฟต 190 กรัมต่อลิตร ที่ pH 4 อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส	29
4.2 กราฟโพลาริเซชันของการกัดกรดด้วยกระแสไฟฟ้าของเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 304L ที่ผ่านการอบอ่อนที่อุณหภูมิ 1,175 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 นาที ในสารละลาย โซเดียมซัลเฟต 190 กรัมต่อลิตร ที่ pH 4 อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ที่เติมสารละลาย ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 10 กรัมต่อลิตร	30

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.3 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแสไฟฟ้ากับเวลาของการกัดกรวดด้วยกระแสไฟฟ้าของเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 304L ที่ผ่านการอบอ่อนที่อุณหภูมิ 1,175 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 นาที ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต ที่ค่าศักย์ไฟฟ้า -0.1 V และ 1.0 V (Ag/AgCl)	31
4.4 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแสไฟฟ้ากับเวลาของการกัดกรวดด้วยกระแสไฟฟ้าของเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 304L ที่ผ่านการอบอ่อนที่อุณหภูมิ 1,175 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 นาที ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตที่เติมสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ความเข้มข้น 10 กรัมต่อลิตร ที่ค่าศักย์ไฟฟ้า 1.2 V (Ag/AgCl)	32
4.5 ผิวของเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 304L ที่ผ่านการอบอ่อนที่อุณหภูมิ 1,175 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 นาที.....	33
4.6 ผิวของเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 304L ที่ผ่านการอบอ่อนที่อุณหภูมิ 1,175 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 นาที หลังการกัดกรวดด้วยกระแสไฟฟ้าในสารละลายโซเดียมซัลเฟตที่ค่าศักย์ไฟฟ้า -0.1 V (Ag/AgCl)	33
4.7 ผิวของเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 304L ที่ผ่านการอบอ่อนที่อุณหภูมิ 1,175 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 นาที หลังการกัดกรวดด้วยกระแสไฟฟ้าในสารละลายโซเดียมซัลเฟตที่ค่าศักย์ไฟฟ้า 1.0 V (Ag/AgCl).....	34
4.8 ผิวของเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 304L ที่ผ่านการอบอ่อนที่อุณหภูมิ 1,175 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 นาที หลังการกัดกรวดด้วยกระแสไฟฟ้าในสารละลายโซเดียมซัลเฟตที่เติมสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ค่าศักย์ไฟฟ้า 1.2 V (Ag/AgCl)	34
4.9 รูปแบบสเปกตรัมของออกไซด์บนเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 304L ที่ผ่านการอบอ่อนที่อุณหภูมิ 1,175 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 นาที.....	35
4.10 รูปแบบสเปกตรัมของออกไซด์บนเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 304L ที่ผ่านการอบอ่อนที่อุณหภูมิ 1,175 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 นาที หลังการกัดกรวดด้วยกระแสไฟฟ้าในสารละลายโซเดียมซัลเฟตที่ค่าศักย์ไฟฟ้า -0.1 V (Ag/AgCl)	36
4.11 รูปแบบสเปกตรัมของเหล็กโครไมต์ (FeCr_2O_4) บนเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 304L ที่ผ่านการอบอ่อนที่อุณหภูมิ 1,175 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 นาที หลังการกัดกรวดด้วยกระแสไฟฟ้าในสารละลายโซเดียมซัลเฟตที่ค่าศักย์ไฟฟ้า 1 V (Ag/AgCl).....	37

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.12	
รูปแบบสเปกตรัมของเหล็กโครไมต์ (FeCr_2O_4) บนเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 304L ที่ผ่านการอบอ่อนที่อุณหภูมิ 1,175 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 นาทีหลังการกัดกรด ด้วยกระแสไฟฟ้าในสารละลายโซเดียมซัลเฟตที่เติมสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ที่ค่าศักย์ไฟฟ้า 1.2 V (Ag/AgCl)	38



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญของปริญญานิพนธ์

เหล็กกล้าไร้สนิมมีการใช้งานอย่างแพร่หลายเนื่องจากมีความแข็งแรงและทนต่อการกัดกร่อนสูง (J. Beddoes, 1999) ขั้นตอนการรีดร้อนและการอบอ่อนในกระบวนการผลิตเหล็กกล้าไร้สนิมต้องใช้อุณหภูมิสูง ทำให้เกิดชั้นของสเกลออกไซด์ของโลหะ (Metal Oxide Scales) ที่มีความหนาประมาณ 50 μm บนพื้นผิวของเหล็กกล้าไร้สนิม และภายใต้ชั้นของสเกลออกไซด์จะเกิดแถบที่มีโครเมียมต่ำกว่าเนื้อวัสดุ เรียกแถบนี้ว่า แถบพร่องโครเมียม (Chromium Depleted Zone) ซึ่งจะทำให้ความแข็งแรงและการทนต่อการกัดกร่อนของเหล็กกล้าไร้สนิมต่ำลง ดังนั้นจึงจำเป็นต้องกำจัดชั้นของสเกลออกไซด์และแถบพร่องโครเมียมนี้ด้วยวิธีการกัดกรด (Pickling) (L. F. Li, et al., 2003)

การกำจัดชั้นของออกไซด์ของโลหะโดยวิธีการกัดกรดแบ่งออกเป็น การกัดกรดด้วยกระแสไฟฟ้า (Electrolytic Pickling) และการกัดกรดด้วยสารเคมี (Chemical Pickling) การกัดกรดด้วยกระแสไฟฟ้าเป็นวิธีการทางไฟฟ้าเคมีเพื่อเพิ่มความสามารถของสารละลายที่ใช้สำหรับการกัดกรดในการกำจัดออกไซด์ หรือการออกซิไดส์โลหะที่อยู่ในสเกลออกไซด์ หรือกำจัดแถบพร่องโครเมียม (Li, et al., 2005; Li, et al., 2006) การกัดกรดด้วยกระแสไฟฟ้าแบ่งออกเป็น การกัดกรดด้วยกระแสไฟฟ้าโดยใช้กรด (Electrolytic Acid Pickling) การกัดกรดด้วยกระแสไฟฟ้าโดยใช้อ่างเกลือหลอมละลาย (Salt Bath Pickling) และการกัดกรดด้วยกระแสไฟฟ้าโดยใช้สารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่เป็นกลาง (Electrolytic Neutral Pickling) ส่วนใหญ่ในอุตสาหกรรมนิยมใช้วิธีการกัดกรดด้วยกระแสไฟฟ้าโดยใช้สารละลายโซเดียมซัลเฟต (Na_2SO_4) ที่มีความเป็นกรดเล็กน้อย เพราะมีข้อดีคือได้พื้นผิวของเหล็กกล้าไร้สนิมเรียบ สูญเสียเหล็กกล้าไร้สนิมต่ำ สามารถควบคุมอัตราการกัดกร่อนได้ง่าย อายุการใช้งานนาน ค่าใช้จ่ายของวิธีการกัดกรดด้วยกระแสไฟฟ้าโดยใช้สารละลายโซเดียมซัลเฟตและการบำรุงรักษาต่ำและเกิดของเสียน้อย (E. Braun, 1980; E. T. Shapovalov, et al., 1982) มีรายงานการศึกษาลงของการเติมสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) ซึ่งเป็นตัวออกซิไดส์ที่แรงในการกัดกรดด้วยกระแสไฟฟ้าโดยใช้สารละลายไฮโดรคลอริก พบว่าการเติมสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์สามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการกัดกรดด้วยกระแสไฟฟ้า (W. Homjabok, et al., 2010; Q. Xie, et al., 2016) ดังนั้นจึงเป็นที่มาของการศึกษาการกัดกรดด้วยกระแสไฟฟ้าโดยใช้สารละลายโซเดียมซัลเฟตที่เติมสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ในงานวิจัยนี้

1.2 วัตถุประสงค์

ศึกษาผลของสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ในการกำจัดชั้นของสเกลออกไซด์บนพื้นผิวของเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 304L ที่ผ่านการอบอ่อน โดยการกัดกรดด้วยกระแสไฟฟ้าในสารละลายโซเดียมซัลเฟต

1.3 ขอบเขตของการดำเนินงาน

1.3.1 ศึกษาการกัดกรดด้วยกระแสไฟฟ้าในสารละลายโซเดียมซัลเฟต ความเข้มข้น 190 กรัมต่อลิตร pH 4 อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส

1.3.2 ศึกษาผลของสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ความเข้มข้น 10 กรัมต่อลิตร ในการกำจัดชั้นของออกไซด์บนเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 304L ที่ผ่านการอบอ่อนที่อุณหภูมิ 1,175 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 นาที โดยการกัดกรดด้วยกระแสไฟฟ้าในสารละลายโซเดียมซัลเฟต

1.3.3 ติดตามผลของการกำจัดชั้นของออกไซด์ของโลหะบนเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 304L ที่ผ่านการอบอ่อนโดยวิธีโพเทนทิโอดนามิกโพลาริเซชัน (Potentiodynamic Polarization) และวิธีโพเทนทิโอสแตติกโพลาริเซชัน (Potentiostatic Polarization)

1.3.4 วิเคราะห์ลักษณะและองค์ประกอบทางเคมีของชั้นของออกไซด์ของโลหะบนเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 304L ที่ผ่านการอบอ่อน ก่อนและหลังการกัดกรดด้วยกระแสไฟฟ้าในสารละลายโซเดียมซัลเฟตที่เติมและไม่เติมสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope: SEM) และเครื่องวิเคราะห์โครงสร้างผลึกด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray Diffractometer: XRD)

1.4 ประโยชน์ที่ได้รับ

1.4.1 สามารถกำจัดชั้นของออกไซด์ของโลหะบนเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 304L ที่ผ่านการอบอ่อนที่อุณหภูมิ 1,175 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 นาที โดยการกัดกรดด้วยกระแสไฟฟ้าในสารละลายโซเดียมซัลเฟต

1.4.2 ทราบผลของสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ในการกำจัดชั้นของออกไซด์ของโลหะบนเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 304L ที่ผ่านการอบอ่อนที่อุณหภูมิ 1,175 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 นาที ด้วยวิธีการกัดกรดด้วยกระแสไฟฟ้าในสารละลายโซเดียมซัลเฟต

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

บทนี้ประกอบด้วยทฤษฎีที่เกี่ยวกับเหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มออสเทนไนต์ กระบวนการผลิตเหล็กกล้าไร้สนิม การกัดกร่อนของโลหะ หลักการเกิดการกัดกร่อนโดยปฏิกิริยาเคมี หลักการเกิดการกัดกร่อนโดยปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมี เซลล์ไฟฟ้าเคมี เทคนิคไฟฟ้าเคมีสำหรับติดตามการกัดกร่อนของโลหะ เทคนิคโพเทนทิโอสแตติก กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด เครื่องวิเคราะห์โครงสร้างผลึกด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ และบทพจนานุกรมวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 เหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มออสเทนไนต์ (J. R. Davis, 1996)

เหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มออสเทนไนต์นับว่าเป็นกลุ่มที่นำมาใช้งานมากที่สุด มีโครงสร้างผลึกเป็นแบบลูกบาศก์กลางหน้า (Face-centered Cubic: FCC) เหล็กกล้ากลุ่มนี้ไม่สามารถเพิ่มความแข็งได้ด้วยกระบวนการทางความร้อน แต่สามารถทำให้แข็งขึ้นได้โดยการขึ้นรูปเย็น (Work Hardening) มีสมบัติที่ไม่ดูดติดแม่เหล็ก (Nonmagnetic) ในสภาพหลังผ่านการอบอ่อน (Annealed Condition) ยกเว้นในกรณีที่มีการรีดเย็นที่มีอัตราในการลดขนาดพื้นที่หน้าตัดสูงและไม่ได้อบอ่อน ส่งผลให้เหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มออสเทนไนต์มีสมบัติที่ดูดติดแม่เหล็กได้ เพราะเกิดการเปลี่ยนเฟสเป็นมาเทนไซต์ที่ดูดติดแม่เหล็กได้ ยกเว้นบางเกรด เช่น เกรด AISI 904L ที่ไม่ดูดติดแม่เหล็กในทุกสภาวะ

เหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มออสเทนไนต์มีองค์ประกอบทางเคมีดังแสดงในตารางที่ 2.1 แบ่งเป็น 2 ประเภท คือ เหล็กผสมโครเมียม-นิกเกิล (Chromium-Nickel Alloy) เช่น เกรด AISI 304 และ AISI 316 เป็นต้น และเหล็กผสมโครเมียม-แมงกานีส-ไนโตรเจน (Chromium-Manganese-Nitrogen Alloy) เช่น เกรด AISI 201 และ AISI 202 เป็นต้น เหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มออสเทนไนต์สามารถผสมธาตุโมลิบดีนัม ไทเทเนียม หรือทองแดง เพื่อปรับปรุงให้สามารถใช้งานในสภาวะแวดล้อมที่รุนแรงต่าง ๆ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในสภาวะการใช้งานที่อุณหภูมิสูงหรือเมื่อมีการกัดกร่อนสูง ธาตุโมลิบดีนัมจะเพิ่มความต้านทานการกัดกร่อนในสภาวะแวดล้อมที่มีคลอไรด์เป็นองค์ประกอบ เช่น เกรด AISI 316 ส่วนเกรดที่มีโครเมียมในปริมาณสูง เช่น เกรด AISI 309 และ AISI 310 จะเหมาะสำหรับการใช้งานในสภาวะแวดล้อมที่ถูกรอกออกไซด์ (Oxidizing Condition) และการใช้งานที่อุณหภูมิสูง แต่ไม่เกิน 1,150 องศาเซลเซียส ถ้าอุณหภูมิสูงกว่านี้ ฟิล์มโครเมียมออกไซด์จะมีความไม่ต่อเนื่องและสูญเสียความต้านทานการกัดกร่อน ในกรณีที่ต้องการสมบัติความต้านทานการกัดกร่อนตามขอบเกรนเมื่ออยู่ภายใต้สภาวะการใช้งานที่กัดกร่อน มักเติมไทเทเนียมและไนโอเบียมเพื่อไม่ให้เกิดสารประกอบโครเมียมคาร์ไบด์ที่ขอบเกรน เป็นการป้องกันบริเวณพร่องโครเมียมที่

ขอบเกรน เช่น เกรด AISI 321 และ AISI 347 นอกจากนี้ เกรดที่มีคาร์บอนต่ำ เช่น เกรด AISI 304L หรือ AISI 316L จะมีสมบัติต้านทานการกัดกร่อนตามขอบเกรนและมีความสามารถในการเชื่อมที่ดี

ตารางที่ 2.1 องค์ประกอบทางเคมีของเหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มออสเทนไนต์ (Daido Steel, 2005)

เกรด	องค์ประกอบทางเคมีของเหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มออสเทนไนต์ (wt%)							
	Cr	Ni	C	Mn	Si	P	S	Other
201	16-18	3.5-5.5	0.15	5.5-7.5	1	0.06	0.03	N 0.25
202	17-19	4-6	0.15	7.5-10	1	0.06	0.03	N 0.25
304	18-20	8-10	0.08	2	1	0.045	0.03	
304L	18-20	8-12	0.03	2	1	0.045	0.03	
309	22-24	12-15	0.08	2	1	0.045	0.03	
310	24-26	19-22	0.08	2	1.5	0.045	0.03	
316	16-18	10-14	0.08	2	1	0.045	0.03	Mo 2-3
316L	16-18	12-15	0.03	2	1	0.045	0.03	Mo 2-3
321	17-19	9-13	0.08	2	1	0.045	0.03	Ti 5xC%
347	17-19	9-13	0.08	2	1	0.045	0.03	Nb 10xC%

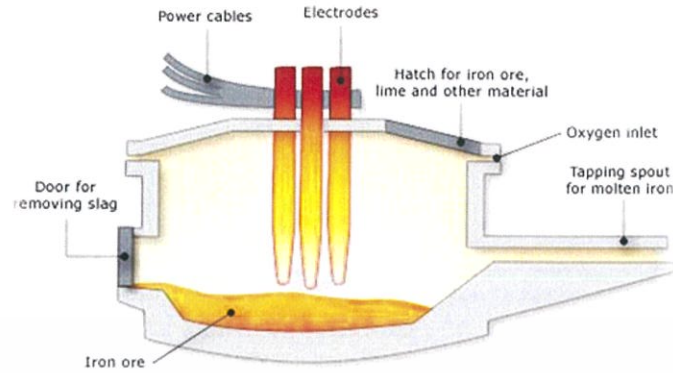
2.2 กระบวนการผลิตเหล็กกล้าไร้สนิม (Davis, 1996)

เหล็กกล้าไร้สนิมสำคัญต่อธุรกิจโลหะผสมเพราะมีความแข็งแรงและทนการกัดกร่อนสูง ความต้องการเหล็กกล้าไร้สนิมจึงเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว โดยทั่วไปโรงงานผลิตเหล็กกล้าไร้สนิมแบ่งออกเป็น 2 กลุ่ม ได้แก่ โรงงานขนาดใหญ่และขนาดปานกลาง ซึ่งขึ้นอยู่กับขนาดของหน่วยการผลิต โรงงานขนาดใหญ่เริ่มต้นกระบวนการผลิตด้วยการหลอมเหล็ก ส่วนโรงงานขนาดปานกลางจะรับเหล็กกล้าไร้สนิมร้อนจากโรงงานขนาดใหญ่เพื่อใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิต

กระบวนการผลิตเหล็กกล้าไร้สนิมประกอบด้วยขั้นตอนดังต่อไปนี้

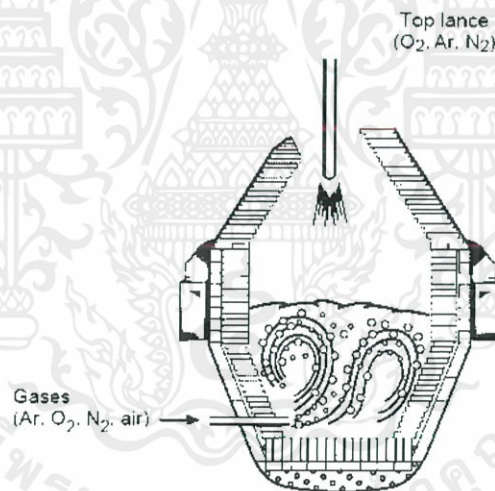
2.2.1 กระบวนการหลอมและหล่อ (Melting and Casting Processes)

การหลอมวัตถุดิบ เศษเหล็ก และโลหะผสมเหล็ก (Ferro-Alloys) ในเตาอาร์กไฟฟ้า (Electric Arc Furnace) (รูปที่ 2.1) ทำที่อุณหภูมิสูงประมาณ 3,500 องศาเซลเซียส และเหล็กหลอมเหลวจะมีอุณหภูมิถึง 1,800 องศาเซลเซียส



รูปที่ 2.1 เตาอาร์กไฟฟ้า (F. Templeton, 2006)

เหล็กที่ผ่านกระบวนการหลอมจะเข้าสู่เตาถลุงอาร์กอนออกซิเจน (Argon-Oxygen Decarburization: AOD) (รูปที่ 2.2) วัตถุประสงค์หลักของขั้นตอนนี้ คือ การลดปริมาณคาร์บอนตามที่ต้องการโดยการฉีดแก๊สออกซิเจนผสมกับแก๊สอาร์กอนเข้าไปในเตาถลุง นอกจากนั้นยังเพื่อลดกำมะถันและไนโตรเจน



รูปที่ 2.2 เตาถลุงอาร์กอนออกซิเจน (Satyendra, 2014)

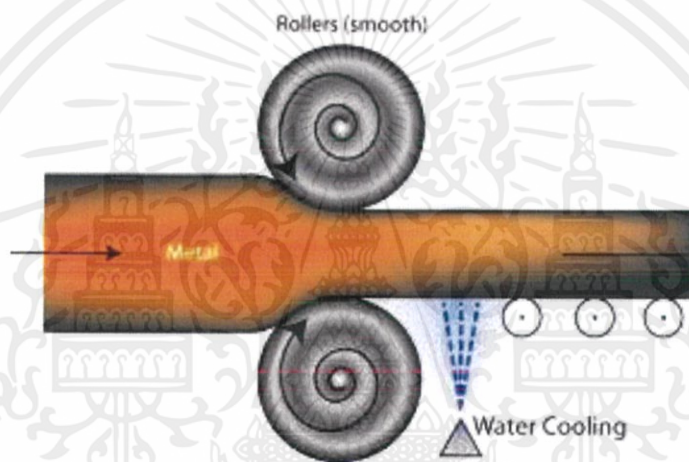
การปรับแต่งองค์ประกอบของเหล็ก คือ การปรับแต่งองค์ประกอบทางเคมีที่ต้องการ โดยการผสมธาตุที่ต้องการ และกวนอย่างช้า ๆ เพื่อกำจัดธาตุและสารประกอบที่ไม่ต้องการและทำให้เหล็กเป็นเนื้อเดียวกัน

การหล่อให้เป็นแผ่นหนา (Slab) แท่งเล็ก (Billet) หรือแท่งใหญ่ (Bloom) เหล็กที่ผ่านการปรับแต่งองค์ประกอบแล้วจะถูกเทใส่แม่พิมพ์ทองแดงและระบายความร้อนด้วยน้ำหล่อเย็น และควบคุมการไหลของเหล็กหลอมเหลวเพื่อรักษาระดับในแม่พิมพ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.2 กระบวนการรีดร้อน (Hot-rolling Process)

เป็นกระบวนการรีดเหล็กกล้าไร้สนิมให้เป็นรูปร่างตามที่ต้องการ เช่น แผ่นม้วนรีดร้อนหรือลวด และส่งต่อไปกระบวนการรีดเย็นเพื่อผลิตเหล็กกล้าไร้สนิมแผ่นหนา แท่งเล็ก หรือแท่งใหญ่ ระหว่างกระบวนการรีดร้อนเหล็กกล้าไร้สนิมรีดร้อนอาจบิดเบี้ยวหรือแตกได้ จึงต้องตัดออกบางส่วน จากนั้นจึงขัดผิวให้สม่ำเสมอ เหล็กกล้าไร้สนิมต้องผ่านการอบอ่อนที่อุณหภูมิประมาณ 1,000-1,200 องศาเซลเซียส เพื่อปรับโครงสร้างของเหล็กกล้าไร้สนิมให้สม่ำเสมอเพื่อเตรียมรีดเหล็กกล้าไร้สนิมให้ได้ความหนาหรือขนาดตามที่ต้องการ แล้วจึงทำการม้วน การรีดร้อนโดยทั่วไปจะรีดที่อุณหภูมิสูงกว่า 870 องศาเซลเซียส เหล็กกล้าไร้สนิมขณะรีดร้อนมีสีเหลืองและสามารถเกิดสเกลออกไซด์ขณะรีดได้ เพราะเกิดการออกซิเดชันที่อุณหภูมิสูง รูปที่ 2.3 แสดงกระบวนการรีดร้อนของเหล็กกล้าไร้สนิม



รูปที่ 2.3 กระบวนการรีดร้อนของเหล็กกล้าไร้สนิม (Perforated Steel, 2015)

2.2.3 กระบวนการอบอ่อนและการกำจัดสเกลออกไซด์ (Annealing and Descaling Processes)

การกำจัดคาร์ไบด์และปรับโครงสร้างภายในแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมที่ได้จากกระบวนการรีดร้อน ทำโดยการอบอ่อนที่อุณหภูมิประมาณ 1,000-1,200 องศาเซลเซียส เหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มออสเทนไนต์จะอบอ่อนในเตาอบต่อเนื่อง ในขณะที่เหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มเฟอร์ไรต์จะอบอ่อนในเตาอบแบบกะ ระหว่างขั้นตอนการอบอ่อนนี้ทำให้เกิดสเกลออกไซด์บนพื้นผิวของแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมอย่างต่อเนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน สเกลออกไซด์จะถูกกำจัดโดยวิธีทางกล (Mechanical Descaling) โดยการตัดให้สเกลออกไซด์แตก (Scale Breaking) และการยิงด้วยเม็ดเหล็ก (Shot Blasting) ทำให้สเกลออกไซด์ที่ผิวแตกและหลุดออกไปบางส่วน จากนั้นจึงกำจัดสเกลออกไซด์ที่เหลือด้วยการกัดกรด (Pickling) โดยวิธีการกัดกรดด้วยกระแสไฟฟ้า (Electrolytic Pickling) แล้วตามด้วยการกัดกรดด้วยสารเคมี (Chemical Pickling) รูปที่ 2.4 แสดงกระบวนการอบอ่อนและการกำจัดสเกลออกไซด์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.4 กระบวนการอบอ่อนและการกำจัดสเกลออกไซด์ (โพสโค-ไทยน็อคซ์, 2557)

2.2.4 กระบวนการรีดเย็น (Cold-rolling Process)

กระบวนการรีดเย็นจะทำที่อุณหภูมิที่ไม่ทำให้โครงสร้างจุลภาคภายในเนื้อเหล็กเปลี่ยนแปลง หรือที่อุณหภูมิต่ำกว่าค่าอุณหภูมิการจัดเรียงผลึกใหม่ (Recrystallization) เพื่อลดความหนาของ เหล็กแผ่นที่ผ่านการรีดเย็นจะมีผิวที่มันกว่าเหล็กแผ่นรีดร้อนซึ่งมีผิวด้าน อย่างไรก็ตาม เหล็กแผ่นที่ผ่านการรีดเย็นยังมีความเครียดภายในเนื้อเหล็กเหลือค้าง ทำให้มีความแข็งแรงสูง ความสามารถในการยืดตัว (Elongation) ต่ำ และมีความไม่สม่ำเสมอของสมบัติเชิงกลสูง ทำให้ไม่เหมาะแก่การใช้งานในลักษณะที่ต้องการนำไปขึ้นรูป จึงต้องผ่านกระบวนการอบอ่อนอีกครั้ง เพื่อให้เหล็กแผ่นคลายความเครียด (Stress) ในเนื้อเหล็กลง เหล็กที่ผ่านการอบอ่อนแล้ว จะผ่านการรีดเย็นอีกเล็กน้อย โดยความหนาแทบไม่เปลี่ยนแปลง เพื่อปรับความเรียบ คุณภาพผิว และขจัดกาวยืดตัว รูปที่ 2.5 แสดงกระบวนการรีดเย็นของเหล็กกล้าไร้สนิมแบบย้อนกลับไปมา (Sendzimer Mill)



รูปที่ 2.5 กระบวนการรีดเย็นของเหล็กกล้าไร้สนิมแบบย้อนกลับไปมา (โพสโค-ไทยน็อคซ์, 2557)

2.3 การกัดกร่อนของโลหะ (เสกศักดิ์ อัสวะวิสิทธิ์ชัย, 2557)

การกัดกร่อนของโลหะคือสาเหตุสำคัญที่ทำให้โลหะเกิดการเสื่อมสภาพและมีสมบัติเปลี่ยนไปจากเดิม การกัดกร่อนอาจหมายถึงการที่โลหะสูญเสียอิเล็กตรอนให้แก่สิ่งแวดล้อม เช่น โลหะเสียอิเล็กตรอนให้กับน้ำหรือออกซิเจน หรือโลหะเสียอิเล็กตรอนให้กับออกซิเจนและเกิดปฏิกิริยารวมตัวกันเป็นสารประกอบออกไซด์ของโลหะซึ่งก็คือสนิมเหล็ก

ในเชิงวิศวกรรมศาสตร์ การกัดกร่อน หมายถึง การเกิดปฏิกิริยาเคมี (Chemical Reaction) หรือการเกิดปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมี (Electrochemical Reaction) ระหว่างผิวของวัสดุกับสิ่งแวดล้อม ส่วนใหญ่วัสดุเกือบทั้งหมดที่เกิดการกัดกร่อนแบบปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีจะเป็นโลหะ เนื่องจากโลหะสามารถทำปฏิกิริยากับสิ่งแวดล้อมได้ดีและมีสมบัตินำไฟฟ้าที่ดีด้วย สำหรับวัสดุที่ไม่ใช่โลหะมักเกิดการกัดกร่อนเนื่องจากปฏิกิริยาเคมีเท่านั้น โดยทั่วไปอาจแบ่งประเภทของการกัดกร่อนได้เป็น 2 แบบหลัก ได้แก่

- การกัดกร่อนแบบชื้น (Wet/Aqueous Corrosion) จะเกิดขึ้นได้ต้องอาศัยความชื้นหรือสารละลายเป็นตัวกลางในการทำให้เกิดปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมี การกัดกร่อนประเภทนี้จะเกิดขึ้นได้ก็ต่อเมื่อมีเซลล์ไฟฟ้าเคมีที่ครบวงจร โดยทั่วไปเมื่อก้าวถึงการกัดกร่อนของโลหะจะหมายถึงการกัดกร่อนแบบชื้นเท่านั้น

- การกัดกร่อนแบบแห้ง (Dry Corrosion) เป็นการทำปฏิกิริยาเคมีระหว่างโลหะกับแก๊ส โดยไม่จำเป็นต้องอาศัยความชื้นหรือสารละลายเป็นตัวกลาง อาจเรียกการกัดกร่อนแบบแห้งได้ว่าเป็นการเกิดออกซิเดชัน

ในการตรวจสอบและวิเคราะห์ความเสียหายเนื่องจากการกัดกร่อน นิยมแยกประเภทของการกัดกร่อนโดยพิจารณาจากลักษณะผิวและรอยแตกที่เกิดจากการกัดกร่อนเป็นสำคัญ ซึ่งสามารถแบ่งการกัดกร่อนออกเป็น 8 ลักษณะ ดังนี้

1. การกัดกร่อนแบบสม่ำเสมอ (Uniform/General Corrosion) หรืออาจเรียกว่าการกัดกร่อนแบบทั่วผิวหน้า เป็นการกัดกร่อนที่พบเห็นได้ทั่วไป การกัดกร่อนแบบสม่ำเสมอเป็นรูปแบบการกัดกร่อนที่เกิดขึ้นเนื่องจากปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีที่เกิดขึ้นระหว่างโลหะกับสิ่งแวดล้อม ทั้งนี้ความไม่สม่ำเสมอของส่วนผสม ความแตกต่างของโครงสร้างจุลภาค หรือขนาดในการขึ้นรูปเย็นจะทำให้พื้นที่ผิวบางแห่งของโลหะสามารถทำหน้าที่เป็นได้ทั้งแคโทดและแอโนด และทำให้การถ่ายเทอิเล็กตรอน ปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีที่เกิดขึ้นจะมีความสม่ำเสมอตลอดทั่วพื้นผิวของโลหะ ซึ่งจะทำให้ผิวของโลหะถูกกัดกร่อนเป็นพื้นที่กว้าง ความลึกของการกัดกร่อนมีขนาดไม่แตกต่างกัน ส่วนใหญ่การกัดกร่อนแบบสม่ำเสมอมีสาเหตุมาจากการเปิดผิวของโลหะให้สัมผัสกับบรรยากาศที่กัดกร่อน แม้ว่า การกัดกร่อนประเภทนี้จะทำให้เกิดการสูญเสียเนื้อโลหะมากที่สุด แต่ก็ไม่ได้สร้างปัญหาหรือทำให้เกิดความเสียหายที่รุนแรง เนื่องจากสามารถทำนายอัตราการกัดกร่อนได้ จึงสามารถประเมินอายุการใช้งานของวัสดุอุปกรณ์ได้อย่างแม่นยำ นอกจากนี้ยังสามารถออกแบบเพื่อป้องกันการกัดกร่อนประเภทนี้ได้ง่าย

2. การกัดกร่อนแบบกัลวานิก (Galvanic Corrosion) เป็นการกัดกร่อนที่เกิดขึ้นในพื้นที่เฉพาะบางแห่งที่มีการใช้โลหะต่างชนิดกันต่อกัน เช่น เหล็กต่อกับเหล็กกล้าไร้สนิม เหล็กต่อกับทองแดง หรือเกิดขึ้นเมื่อเนื้อโลหะมีส่วนผสมทางเคมีไม่คงที่ แต่ละพื้นที่จะเกิดการกัดกร่อนที่

อัตราการกัดกร่อนแตกต่างกัน สาเหตุมาจากความแตกต่างของศักย์ไฟฟ้าของโลหะ (Electrode Potential)

3. การกัดกร่อนในซอก (Crevice Corrosion) จัดเป็นการกัดกร่อนแบบเฉพาะที่ที่เกิดขึ้นในส่วนใดส่วนหนึ่งของโลหะที่เป็นช่องแคบ ๆ หรือบริเวณที่ผิวถูกปกคลุมที่เป็นที่อับ หรือบริเวณที่ไม่มีการไหลเวียนของของไหล เช่น บริเวณที่อยู่ใต้ตะกอนสะสม (Deposit) บริเวณที่อยู่ใต้สลักเกลียว ตะปู หรือตะเข็บรอยต่อของโลหะ เป็นต้น

4. การกัดกร่อนแบบรูเข็ม (Pitting Corrosion) อาจเรียกอีกอย่างได้ว่า การกัดกร่อนแบบจุดหรือการกัดกร่อนแบบขุม เป็นการกัดกร่อนเฉพาะที่ที่รุนแรงและอันตรายมากแม้ว่ามีการสูญเสียน้ำหนักโดยรวมน้อยมาก การกัดกร่อนแบบรูเข็มจะทำให้เกิดรูหรือหลุมขนาดเล็กแต่ลึกในเนื้อโลหะ การกัดกร่อนแบบรูเข็มพบมากในโลหะที่มีฟิล์มที่ช่วยป้องกันการกัดกร่อน (Passive Film) เช่น เหล็กกล้าไร้สนิม ไทเทเนียม หรืออะลูมิเนียม เป็นต้น

5. การกัดกร่อนแบบกัดเซาะ (Erosion Corrosion) มีสาเหตุมาจากการเคลื่อนที่ของของเหลวที่กัดกร่อนโลหะผ่านผิวโลหะอย่างรวดเร็ว ทำให้เกิดการกัดเซาะและกัดกร่อนขึ้นที่ผิวโลหะ จากการกระแทกของของเหลวเหล่านี้กับผิวโลหะ อาจกล่าวได้ว่า การกัดกร่อนแบบกัดเซาะเป็นการกัดกร่อนที่เป็นผลมาจากปฏิกิริยาเคมีและแรงกระทำทางกลของของเหลวที่กระทำต่อผิวโลหะ

6. การกัดกร่อนตามขอบเกรน (Intergranular Corrosion) เป็นการกัดกร่อนที่เกิดขึ้นในกรณีที่ขอบเกรนของโครงสร้างจุลภาคของโลหะมีแนวโน้มที่จะถูกกัดกร่อนได้ง่ายกว่าในเนื้อเกรน การกัดกร่อนประเภทนี้มีสาเหตุมาจากการตกตะกอนของสารประกอบที่ขอบเกรนและทำให้เกิดบริเวณพร่องของธาตุสำคัญ เช่น การตกตะกอนของโครเมียมคาร์ไบด์ที่ขอบเกรนของเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 304 ทำให้เกิดบริเวณพร่องโครเมียมระหว่างเนื้อเกรนและตะกอนโครเมียมคาร์ไบด์ โครเมียมเป็นธาตุสำคัญที่ช่วยป้องกันการกัดกร่อนของเหล็กกล้าไร้สนิมเพราะสร้าง Passive Film โครเมียมออกไซด์ที่ผิว

7. การแตกหักแบบกัดกร่อนร่วมกับความเค้น (Stress Corrosion Cracking: SCC) สามารถเกิดขึ้นได้เมื่อโลหะผสมมีความเค้นดึงตกค้าง (Residual Tensile Stress) หรือได้รับความเค้นภายนอก (Applied Stress) และมีการสัมผัสกับสภาวะแวดล้อมที่มีฤทธิ์กัดกร่อน การที่จะเกิดการแตกหักแบบกัดกร่อนร่วมกับความเค้นได้ จะต้องประกอบด้วยปัจจัยสำคัญ 3 อย่าง คือ ต้องอยู่ในสภาวะแวดล้อมที่ทำให้เกิดการกัดกร่อน โลหะผสมต้องไวต่อการเกิดการแตกหักแบบกัดกร่อนร่วมกับความเค้น และต้องมีความเค้นดึงกระทำในโลหะผสม

8. การกัดกร่อนร่วมกับความล้า (Corrosion Fatigue) เป็นความเสียหายที่เกิดขึ้นเนื่องจากโลหะได้รับความเค้นหรือแรงกระทำทางกลแบบรอบ (Stress Cycle) ร่วมกับการกัดกร่อน แรงกระทำทางกลแบบรอบจะทำให้เกิดความล้าขึ้นในชิ้นงาน โดยจะทำให้ Passive Film ที่ช่วยป้องกันการกัดกร่อนของโลหะแตกและหลุดออกไป จึงทำให้เกิดการกัดกร่อนขึ้นในเนื้อโลหะ การที่

โลหะต้องรับความเค้นหรือแรงกระทำทางกลแบบรอบและอยู่ในสภาวะแวดล้อมที่มีฤทธิ์กัดกร่อนจะเร่งให้ความเสียหายที่เกิดขึ้นมีความรุนแรงมากยิ่งขึ้น ทั้งนี้เพราะความล้าจะทำให้โลหะเกิดการกัดกร่อนเร็วขึ้น โดยเฉพาะรอบบริเวณที่มีความเค้นดึง

2.4 หลักการเกิดการกัดกร่อนโดยปฏิกิริยาเคมี (เสกศักดิ์ อัสวะวิสิทธิ์ชัย, 2557; อินทิรา หาญพงษ์พันธ์ และ บัญชา พูลโพคา, 2549)

การกัดกร่อนอาจเกิดจากปฏิกิริยาเคมีโดยตรง โดยมีแก๊สเป็นสื่อที่ทำให้เกิดการกัดกร่อนของผิวโลหะ ซึ่งมักเกิดจากอากาศที่มีความชื้นสูง แก๊สออกซิเจนในอากาศเป็นตัวการสำคัญในการเกิดปฏิกิริยาเคมีกับโลหะ ทำให้โลหะเกิดสนิมเหล็กและเกิดการกัดกร่อนเร็วขึ้น การกัดกร่อนของโลหะจะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ ถ้าอุณหภูมิยิ่งสูง อัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมีระหว่างโลหะกับแก๊สออกซิเจนยิ่งเร็ว เช่น เหล็กที่ถูกเผาจะเกิดสนิมเหล็กได้ง่ายกว่าเหล็กที่อยู่ในอากาศที่อุณหภูมิห้อง การกัดกร่อนเกิดจากปฏิกิริยาเคมีดังนี้

1. เกิดจากปฏิกิริยาเคมีระหว่างโลหะกับแก๊สออกซิเจน แบ่งเป็น 2 ลักษณะคือ

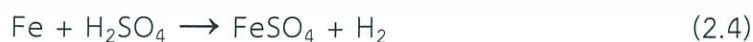
1.1 มีความชื้นร่วมทำปฏิกิริยา เช่น การเกิดสนิมเหล็กในอากาศที่มีความชื้น ดังสมการที่ 2.1 และ 2.2



1.2 ไม่มีความชื้นร่วมทำปฏิกิริยา เช่น การรวมตัวของออกซิเจนกับเหล็กเมื่ออุณหภูมิสูงและอากาศแห้งมาก ทำให้เกิดเป็นสนิมเหล็กขึ้น ดังสมการที่ 2.3



2. เกิดจากการแตกตัวของไฮโดรเจนในกรด เช่น การกัดกร่อนของเหล็กที่จุ่มอยู่ในกรดกำมะถัน ดังสมการที่ 2.4



3. เกิดจากการส่งถ่ายไอออนจากโลหะชนิดหนึ่งไปแทนที่ไอออนของโลหะอีกชนิดหนึ่ง ระหว่างการเกิดปฏิกิริยาในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ เช่น การกัดกร่อนของเหล็กที่จุ่มในสารละลายคอปเปอร์ซัลเฟต ดังสมการที่ 2.5



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5 หลักการเกิดการกัดกร่อนโดยปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมี (เสกศักดิ์ อัสวะวิสิทธิ์ชัย, 2557; อินทิตรา หาญพงษ์พันธ์ และ บัญชา พูลโพคา, 2549)

ปฏิกิริยาการกัดกร่อนของโลหะส่วนใหญ่เป็นปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมี โดยที่โลหะที่เกิดการกัดกร่อนจะเป็นขั้วแอโนด (Anode) และเกิดปฏิกิริยาแอโนดิก (Anodic Reaction) ดังสมการที่ 2.6



เมื่อ M คือ อะตอมของโลหะที่ให้อิเล็กตรอนออกมา n ตัว แล้วเปลี่ยนสภาพเป็นไอออนบวก สำหรับปฏิกิริยาแคโทดิก (Cathodic Reaction) ซึ่งเป็นปฏิกิริยารับอิเล็กตรอน เกิดขึ้นที่ขั้วแคโทด (Cathode) อาจเกิดได้หลายรูปแบบซึ่งจะขึ้นอยู่กับสภาพแวดล้อม ในสภาพของเหลวที่ไม่มีออกซิเจน เช่น กรดไฮโดรคลอริก ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นอาจทำให้เกิดการปลดปล่อยแก๊สไฮโดรเจน เรียกว่า ขั้วไฟฟ้าไฮโดรเจน (Hydrogen Electrode) ดังสมการที่ 2.7



สำหรับในน้ำซึ่งมีออกซิเจนละลายอยู่นั้น ปฏิกิริยาแคโทดิกจะเรียกว่าขั้วไฟฟ้าออกซิเจน (Oxygen Electrode) ดังสมการที่ 2.8



ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นนี้จะทำให้ได้ไอออน OH^- เพิ่มขึ้นในสารละลาย จากนั้น OH^- จะทำปฏิกิริยากับไอออนของโลหะ M^{n+} เกิดเป็นของแข็งจากการกัดกร่อนหรือสนิมเหล็ก

การกัดกร่อนของโลหะจะเกิดขึ้นได้ต้องประกอบด้วยส่วนสำคัญ 4 อย่าง ได้แก่ ขั้วแอโนด ขั้วแคโทด สารละลายอิเล็กโทรไลต์ซึ่งเป็นสารละลายที่นำไฟฟ้า และทางเชื่อมต่อกระแสไฟฟ้า หากขาดส่วนประกอบใดก็ตามจะไม่เกิดการกัดกร่อน

2.6 เซลล์ไฟฟ้าเคมี (Electrochemical Cell) (S. G. Bratsch, 1989; G. Milazzo, et al., 1978; เสกศักดิ์ อัสวะวิสิทธิ์ชัย, 2557; อินทิตรา หาญพงษ์พันธ์ และ บัญชา พูลโพคา, 2549)

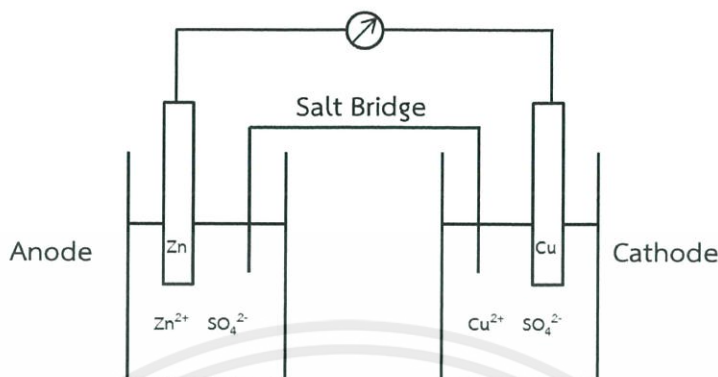
เซลล์ไฟฟ้าเคมี คือ เครื่องมือหรืออุปกรณ์ทางเคมีที่เปลี่ยนแปลงพลังงานเคมีของสารเป็นพลังงานไฟฟ้าหรือกลับกัน เซลล์ไฟฟ้าเคมีแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ

2.6.1 เซลล์กัลวานิก (Galvanic Cell)

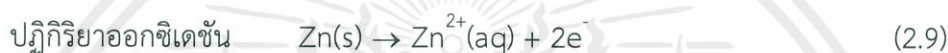
เซลล์กัลวานิก คือ เซลล์ที่สร้างกระแสไฟฟ้าจากการเกิดปฏิกิริยาเคมี ประกอบด้วยครึ่งเซลล์ปฏิกิริยาออกซิเดชันที่เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันที่ขั้วแอโนด และครึ่งเซลล์ปฏิกิริยารีดักชันที่เกิดปฏิกิริยารีดักชันที่ขั้วแคโทด การต่อครึ่งเซลล์ใช้สะพานเกลือ (Salt Bridge) เพื่อรักษาสมดุล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของไอออน รูปที่ 2.6 แสดงตัวอย่างเซลล์กัลวานิก สมการที่ 2.9-2.11 แสดงปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในเซลล์กัลวานิก



รูปที่ 2.6 เซลล์กัลวานิก (เสกศักดิ์ อัสวะวิสิทธิ์ชัย, 2557)



ศักย์ไฟฟ้าของเซลล์และศักย์ไฟฟ้ามาตรฐานครึ่งเซลล์

ศักย์ไฟฟ้าของเซลล์ (E°_{Cell}) ได้มาจากศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์แคโทด (E°_{Cathode}) ลบด้วยครึ่งเซลล์แอโนด (E°_{Anode}) ดังสมการที่ 2.12

$$E^\circ_{\text{Cell}} = E^\circ_{\text{Cathode}} - E^\circ_{\text{Anode}} \quad (2.12)$$

ครึ่งเซลล์ไฟฟ้าเคมีแต่ละชนิดจะมีค่าศักย์ไฟฟ้าเฉพาะตัว ซึ่งเป็นค่าที่บอกให้ทราบถึงความสามารถในการให้หรือรับอิเล็กตรอน การวัดศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์จะต้องวัดเทียบกับศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์มาตรฐาน นิยมวัดเทียบกับศักย์ไฟฟ้ามาตรฐานไฮโดรเจน โดยกำหนดให้ศักย์ไฟฟ้ามาตรฐานไฮโดรเจน เท่ากับ 0 โวลต์ ค่าศักย์ไฟฟ้าที่วัดได้นั้น เรียกว่า ศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์มาตรฐาน (E°) แสดงดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 ศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์มาตรฐาน (S. G. Bratsch, 1989; G. Milazzo, et al., 1978)

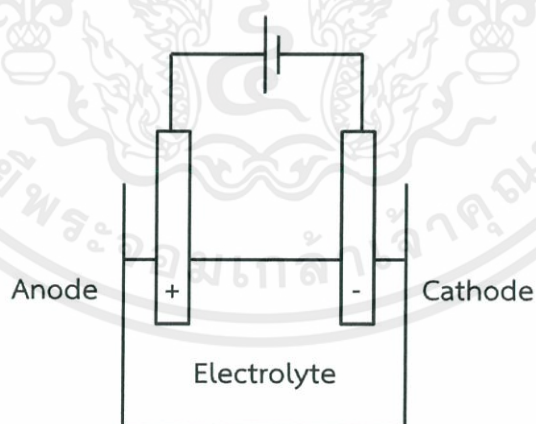
Reaction	E° (V)
$\text{FeO}_4^{2-}(\text{aq}) + 8\text{H}^+(\text{aq}) + 3\text{e}^- \rightarrow \text{Fe}^{3+}(\text{aq}) + 4\text{H}_2\text{O}(\text{l})$	2.20
$\text{H}_2\text{O}_2(\text{aq}) + 2\text{H}^+(\text{aq}) + 2\text{e}^- \rightarrow 2\text{H}_2\text{O}(\text{l})$	1.78
$\text{MnO}_4^-(\text{aq}) + 8\text{H}^+(\text{aq}) + 5\text{e}^- \rightarrow \text{Mn}^{2+}(\text{aq}) + 4\text{H}_2\text{O}(\text{l})$	1.51
$\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}(\text{aq}) + 14\text{H}^+(\text{aq}) + 6\text{e}^- \rightarrow 2\text{Cr}^{3+}(\text{aq}) + 7\text{H}_2\text{O}(\text{l})$	1.36

ตารางที่ 2.2 ศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์มาตรฐาน (S. G. Bratsch, 1989; G. Milazzo, et al., 1978) (ต่อ)

Reaction	E° (V)
$\text{Cl}_2(\text{g}) + 2\text{e}^- \rightarrow 2\text{Cl}^-(\text{aq})$	1.36
$\text{CrO}_4^{2-}(\text{aq}) + 8\text{H}^+(\text{aq}) + 3\text{e}^- \rightarrow \text{Cr}^{3+}(\text{aq}) + 4\text{H}_2\text{O}(\text{l})$	1.35
$\text{Ag}^+(\text{aq}) + \text{e}^- \rightarrow \text{Ag}(\text{s})$	0.80
$\text{O}_2(\text{g}) + 2\text{H}^+(\text{aq}) + 4\text{e}^- \rightarrow 2\text{H}_2\text{O}_2(\text{aq})$	0.70
$2\text{H}^+(\text{aq}) + 2\text{e}^- \rightarrow \text{H}_2(\text{g})$	0.00
$\text{Ni}^{2+}(\text{aq}) + 2\text{e}^- \rightarrow \text{Ni}(\text{s})$	-0.26
$\text{Fe}^{2+}(\text{aq}) + 2\text{e}^- \rightarrow \text{Fe}(\text{s})$	-0.45
$\text{Cr}^{3+}(\text{aq}) + 3\text{e}^- \rightarrow \text{Cr}(\text{s})$	-0.74
$2\text{H}_2\text{O}(\text{l}) + 2\text{e}^- \rightarrow \text{H}_2(\text{g}) + 2\text{OH}^-$	-0.83
$\text{Al}^{3+}(\text{aq}) + 3\text{e}^- \rightarrow \text{Al}(\text{s})$	-1.66
$\text{Mg}^{2+}(\text{aq}) + 2\text{e}^- \rightarrow \text{Mg}(\text{s})$	-2.37

2.6.2 เซลล์อิเล็กโทรไลต์ (Electrolytic Cell)

เซลล์อิเล็กโทรไลต์ คือ เซลล์ไฟฟ้าเคมีที่ใช้พลังงานไฟฟ้าจ่ายเข้าไปในเซลล์เพื่อทำให้เกิดปฏิกิริยาเคมี รูปที่ 2.7 แสดงตัวอย่างเซลล์อิเล็กโทรไลต์



รูปที่ 2.7 เซลล์อิเล็กโทรไลต์ (อินทिरา หาญพงษ์พันธ์ และ บัญชา พูลโพคา, 2549)

ส่วนประกอบของเซลล์อิเล็กโทรไลต์

1. ขั้วไฟฟ้า (Electrode) เป็นโลหะหรือแกรไฟต์ที่นำไฟฟ้าได้ดี โดยทั่วไปมักจะใช้ขั้วเฉื่อย เช่น ขั้วแพลทินัม สามารถจำแนกขั้วไฟฟ้าเป็น ขั้วแอโนดซึ่งเป็นขั้วที่เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน และขั้วแคโทดซึ่งเป็นขั้วที่เกิดปฏิกิริยารีดักชัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. สารละลายอิเล็กโทรไลต์ (Electrolyte) คือ ของเหลวที่ประกอบด้วยไอออนที่เคลื่อนที่และนำไฟฟ้าได้ เช่น สารละลายกรด สารละลายด่าง สารละลายเกลือ

3. แหล่งพลังงานไฟฟ้าจากภายนอก

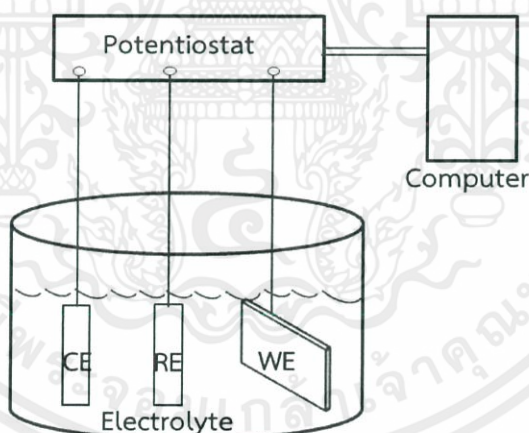
2.7 เทคนิคไฟฟ้าเคมีสำหรับติดตามการกัดกร่อนของโลหะ (Standard Reference Test Method for Making Potentiostatic and Potentiodynamic Anodic Polarization Measurement, 1992)

การศึกษาการกัดกร่อนโดยวิธีทางไฟฟ้าเคมี อาศัยความสัมพันธ์ระหว่างค่าต่างศักย์ไฟฟ้ากับกระแสไฟฟ้า มีเทคนิคที่สำคัญ 2 เทคนิค คือ

1. เทคนิคการควบคุมกระแสที่ป้อน (Controlled Current Test) โดยวัดค่าศักย์ไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงด้วยวิธีกัลวานอสแตท (Galvanostat)

2. เทคนิคการควบคุมศักย์ไฟฟ้าที่ป้อน (Controlled Potential Test) โดยวัดค่ากระแสไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงด้วยวิธีโพเทนทิโอสแตท (Potentiostat)

เทคนิคการควบคุมศักย์ไฟฟ้าที่ป้อน นิยมใช้ในห้องปฏิบัติการ เนื่องจากได้ข้อมูลการเกิดฟิล์มที่ผิวโลหะ ซึ่งจะมีกระแสไฟฟ้าคงที่



รูปที่ 2.8 ลักษณะการต่อเซลล์ที่ใช้ในการตรวจติดตามพฤติกรรมกัดกร่อนของโลหะเข้ากับเครื่องโพเทนทิโอสแตท (Standard Reference Test Method for Making Potentiostatic and Potentiodynamic Anodic Polarization Measurement, 1992)

จากรูปที่ 2.8

WE คือ ขั้วไฟฟ้าทำงาน (Working Electrode) หรือขั้วตัวอย่างที่ศึกษา

CE คือ ขั้วไฟฟ้าวัดกระแส (Counter Electrode)

RE คือ ขั้วไฟฟ้าอ้างอิง (Reference Electrode) ใช้วัดความต่างศักย์ไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การศึกษาพฤติกรรมของการกัดกร่อนของโลหะทำได้โดยต่อเซลล์ให้ครบวงจรดังรูปที่ 2.8 จะได้เซลล์อิเล็กโทรไลต์ ใช้เครื่องโพเทนทีโอสแตทป้อนศักย์ไฟฟ้าให้แก่เซลล์โดยผ่านขั้วไฟฟ้าอ้างอิง (Reference Electrode) และขั้วไฟฟ้าทำงาน (Working Electrode) หรือขั้วตัวอย่างที่ศึกษา และวัดกระแสไฟฟ้าระหว่างขั้วไฟฟ้าทำงานกับขั้วไฟฟ้าวัดกระแส (Counter Electrode) โดยป้อนศักย์ไฟฟ้าให้เป็นค่าบวกจากค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนมากขึ้นเป็นลำดับ โลหะตัวอย่างจะเร่งผลิตอิเล็กตรอนออกมามากล้นประจุกับศักย์บวก และเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน เป็นการเร่งให้โลหะตัวอย่างที่ใช้เป็นขั้วไฟฟ้าทำงานเกิดการกัดกร่อน ซึ่งจะมีผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงกระแสไฟฟ้า

ค่าศักย์ไฟฟ้าได้จากการวัดเทียบค่าศักย์ไฟฟ้าระหว่างขั้วไฟฟ้าอ้างอิงกับขั้วไฟฟ้าทำงาน สำหรับค่ากระแสไฟฟ้าจะได้ออกมาจากการวัดเทียบระหว่างขั้วไฟฟ้าวัดกระแสกับขั้วไฟฟ้าทำงาน จากนั้นนำค่าศักย์ไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้ามาสร้างกราฟแสดงความสัมพันธ์ในรูปแบบเส้นโค้งโพลาริเซชัน ซึ่งจะให้ข้อมูลการกัดกร่อน เช่น ค่าศักย์ไฟฟ้าของการกัดกร่อน (Corrosion Potential) (E_{corr}) ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าของการกัดกร่อน (Corrosion Current Density) (I_{corr}) และนำไปคำนวณอัตราการกัดกร่อนตามกฎของฟาราเดย์ (Faraday's Law) (สมการที่ 2.13) การเกิดฟิล์มป้องกันตนเอง (Passive Film) ความหนาของฟิล์ม การแตกของฟิล์มที่จะนำไปสู่การกัดกร่อนเฉพาะที่ สามารถทำนายองค์ประกอบของฟิล์มได้จากค่าศักย์ไฟฟ้าของฟิล์ม

$$R_{mpy} = [0.13 I_{corr} e] / p \quad (2.13)$$

เมื่อ	R_{mpy}	คือ อัตราการเกิดการกัดกร่อน (มิลลิเมตรต่อปี)
	I_{corr}	คือ ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าของการกัดกร่อน (ไมโครแอมป์ต่อตารางเซนติเมตร)
	e	คือ น้ำหนักกรัมสมมูลของโลหะ
	p	คือ ความหนาแน่นของโลหะ

2.8 เทคนิคโพเทนทีโอไดนามิก (Potentiodynamic) (Standard Reference Test Method for Making Potentiostatic and Potentiodynamic Anodic Polarization Measurement, 1992)

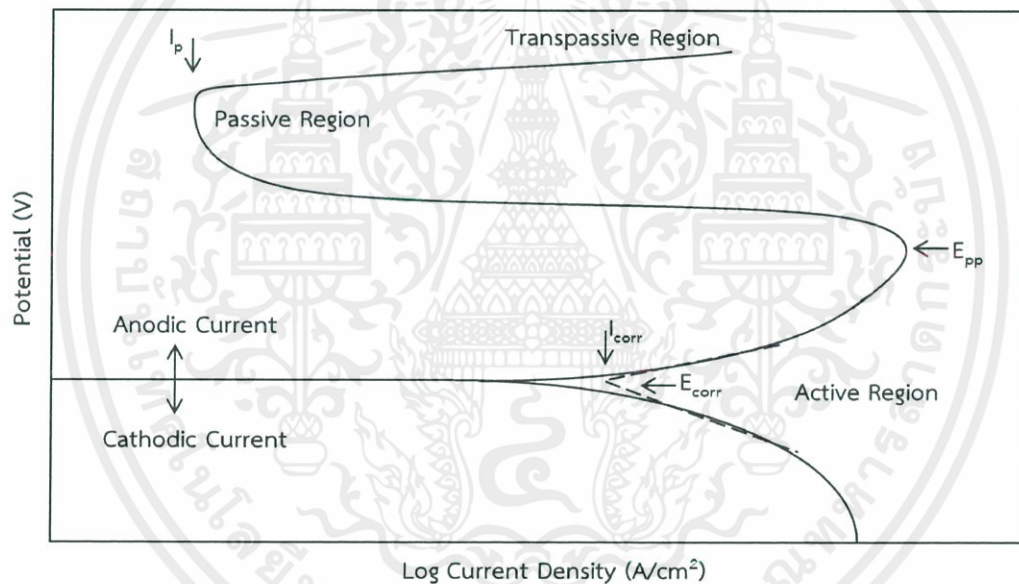
จากรูปที่ 2.9 เมื่อควบคุมการป้อนศักย์ไฟฟ้าแก่เซลล์ให้เป็นบวกเพิ่มขึ้น จะเกิดสภาวะแอโนดิกโพลาริเซชัน (Anodic Polarization) เป็นการเร่งปฏิกิริยาออกซิเดชันของขั้วไฟฟ้าทำงาน เหล็กกล้าไร้สนิมจะเกิดการกัดกร่อน แล้วมีปรากฏการณ์ต่าง ๆ เกิดขึ้น เช่น เกิด Passive Film ดังนั้นจึงควรเริ่มป้อนศักย์ไฟฟ้าต่ำกว่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนของโลหะในสารละลายนั้น ส่วนของเส้นโค้งก่อนศักย์ไฟฟ้าของการกัดกร่อนเป็นส่วนของแคโทดิกโพลาริเซชัน (Cathodic Polarization) และเปลี่ยนเป็นแอโนดิกโพลาริเซชันในส่วนหลังศักย์ไฟฟ้าของการกัดกร่อน จุดตัดของเส้นโค้งแคโทดิกที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผ่านเข้าสู่เส้นโค้งแอโนดิกกับแกนศักย์ไฟฟ้า คือ ค่าศักย์ไฟฟ้าของการกัดกร่อน (Corrosion Potential: E_{corr}) ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่จุดนี้ คือ ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าของการกัดกร่อน (Corrosion Current Density: i_{corr}) ซึ่งสามารถนำค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าของการกัดกร่อนไปคำนวณอัตราการกัดกร่อนตามกฎของฟาราเดย์ได้ ซึ่งเป็นอัตราการกัดกร่อนทั่วผิวหน้า นิยมแสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\log i$ กับศักย์ไฟฟ้า เพราะความสัมพันธ์เป็นไปตามสมการทาเฟล (Tafel) ดังสมการที่ 2.14

$$\eta = b \log i \quad (2.14)$$

- เมื่อ η คือ ความแตกต่างระหว่างศักย์ไฟฟ้าที่ป้อนกับศักย์ไฟฟ้าของการกัดกร่อน
 b คือ ค่าคงที่
 i คือ ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า (Current Density)



รูปที่ 2.9 กราฟโพลาริเซชันของเหล็กกล้าไร้สนิม (Standard Reference Test Method for Making Potentiostatic and Potentiodynamic Anodic Polarization Measurement, 1992)

เมื่อป้อนศักย์ไฟฟ้าเกินศักย์ไฟฟ้าของการกัดกร่อน (E_{corr}) ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าจะเพิ่มขึ้นตามสมการทาเฟล เส้นกราฟความสัมพันธ์จะยังอยู่ในช่วงแอคทีฟ (Active Region) เหล็กกล้าไร้สนิมจะแสดงพฤติกรรมของการกัดกร่อนแบบทั่วผิวหน้า เมื่อเพิ่มศักย์ไฟฟ้าต่อถึงจุดหนึ่ง ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าจะคงที่และกลับลดลง เนื่องจากเหล็กกล้าไร้สนิมเกิด Passive Film ซึ่งเป็นฟิล์มปกป้อง เรียกเส้นโค้งช่วงนี้ว่า พรีพาสซีฟ (Prepassive) และค่าศักย์ไฟฟ้า ณ จุดที่เปลี่ยนความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า เรียกว่า ศักย์ไฟฟ้าเริ่มต้นพาสซีฟ (Primary Passive Potential: E_{pp}) เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

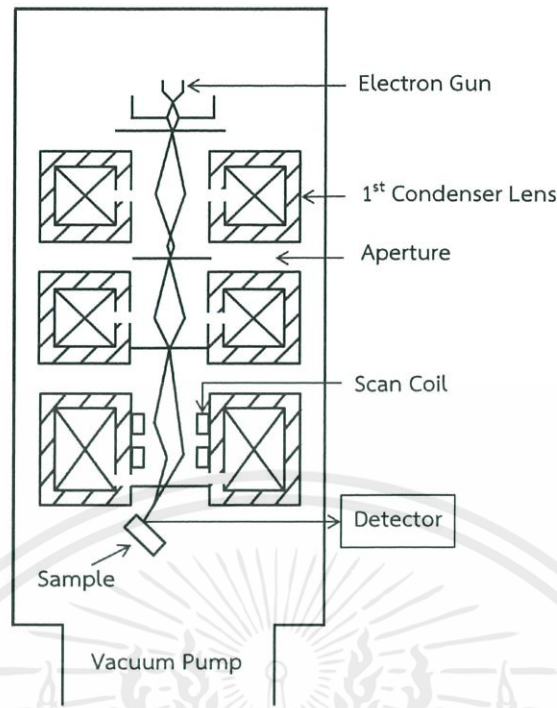
เมื่อป้อนศักย์ไฟฟ้าต่อ ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าจะเริ่มลดลงจนคงที่ที่ค่าหนึ่ง เรียกความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่จุดนี้ว่า ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าพาสซีฟ (Passive Current Density: I_p) และช่วงที่ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าคงที่จะเป็นช่วงพาสซีฟ (Passive Region) ซึ่งเป็นลักษณะเฉพาะของโลหะบางชนิดที่แสดงความต้านทานการกัดกร่อน เช่น เหล็กกล้าไร้สนิม เมื่อเพิ่มศักย์ไฟฟ้าไปถึงอีกค่าหนึ่ง Passive Film นั้นจะแยกจากกันในบางบริเวณที่อ่อนแอกว่า และความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ช่วงนี้เรียกว่าช่วงทรานส์พาสซีฟ (Transpassive Region) ศักย์ไฟฟ้า ณ จุดนี้จะแสดงการกัดกร่อนเฉพาะที่ โดยเฉพาะอย่างยิ่งการกัดกร่อนแบบรูเข็ม จึงนิยมเรียกค่าศักย์ไฟฟ้าที่จุดนี้ว่า ศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนแบบรูเข็ม (Pitting Potential: E_p)

2.9 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope: SEM) (รศ. แม้น อมรสิทธิ์, 2552)

เป็นกล้องจุลทรรศน์ที่ใช้ศึกษาพื้นผิวและลักษณะสัญญาณวิทยาของตัวอย่าง เช่น ลักษณะรูปร่าง ลวดลาย ตลอดจนขนาดของตัวอย่าง และสามารถศึกษาได้ทั้งตัวอย่างทางชีวภาพและวัสดุศาสตร์ ได้ภาพมีลักษณะแบบ 3 มิติ

ส่วนประกอบและหลักการทำงานของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (รูปที่ 2.10) ส่วนบนสุด เรียกว่า ปืนอิเล็กตรอน (Electron Gun) เป็นแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอน อิเล็กตรอนจากแหล่งกำเนิดจะถูกเร่งให้เคลื่อนที่ลงมาตามคอลัมน์ซึ่งมีสภาพสุญญากาศ ด้วยความต่างศักย์เร่ง (Accelerating Voltage) ในช่วง 0 – 30 kV โดยเลนส์แม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic Lens) 2 ชุดหรือมากกว่าจะควบคุมทิศทางการเคลื่อนที่ และอะเพอร์เจอร์ (Aperture) หรือช่องเปิด จะควบคุมปริมาณอิเล็กตรอน

เลนส์แม่เหล็กไฟฟ้าชุดแรก ที่เรียกว่า เลนส์คอนเดนเซอร์ (Condenser Lens) เป็นอุปกรณ์ที่มีความสำคัญที่สุดต่อการควบคุมทัศนศาสตร์อิเล็กตรอน (Electron Optics) เพราะเป็นเลนส์ที่ทำหน้าที่บีบลำอิเล็กตรอน (Electron Beam) ที่วิ่งลงมาจากแหล่งกำเนิดให้มีขนาดพื้นที่หน้าตัดเล็กลง ส่วนเลนส์วัตถุ (Objective Lens) ซึ่งเป็นเลนส์ชุดสุดท้าย จะทำหน้าที่โฟกัสลำอิเล็กตรอนให้ไปตกบนผิวของตัวอย่าง โดยมีสแกนคอยล์ (Scan Coil) ทำหน้าที่กราดลำอิเล็กตรอนไปบนผิวของตัวอย่าง ภายในกรอบพื้นที่สี่เหลี่ยมเล็ก ๆ ซึ่งพื้นที่ผิวของตัวอย่างบริเวณที่ถูกยิงด้วยลำอิเล็กตรอนจะผลิตรังสีเอ็กซ์ (X-ray) ที่ค่าพลังงานต่าง ๆ กัน ซึ่งเป็นลักษณะเฉพาะของแต่ละธาตุที่เป็นองค์ประกอบในตัวอย่างการวิเคราะห์ และจะมีอุปกรณ์สำหรับตรวจจับรังสีเอ็กซ์ (Detector) ส่งไปประมวลผลแล้วแสดงบนจอภาพต่อไป



รูปที่ 2.10 การทำงานของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (M. T. Postek, 1980)

สามารถเชื่อมต่อกับกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดกับอุปกรณ์วิเคราะห์รังสีเอ็กซ์ที่ปลดปล่อยออกมาในเชิงพลังงาน (Energy Dispersive X-ray Spectrometer: EDX) ซึ่งช่วยในการศึกษาชนิด ปริมาณ และการกระจายขององค์ประกอบธาตุของวัสดุที่ศึกษาได้

2.10 เครื่องวิเคราะห์โครงสร้างผลึกด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray Diffractometer: XRD) (ดร. บัญชา ธนบุญสมบัติ, 2544)

เครื่องวิเคราะห์โครงสร้างผลึกด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์เป็นเครื่องมือวิเคราะห์รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ในผลึกของตัวอย่าง ใช้ในการวิเคราะห์วัสดุขั้นพื้นฐาน เป็นการวิเคราะห์แบบไม่ทำลายตัวอย่าง อาศัยหลักการเลี้ยวเบนและการกระเจิงของรังสีเอ็กซ์ ตาม Bragg's Law (สมการที่ 2.15) สามารถวิเคราะห์ลักษณะเฉพาะของวัสดุได้หลากหลาย เช่น ชนิดของธาตุ หรือสารประกอบ โครงสร้างของผลึก ขนาดของผลึก และค่าแลตทิซพารามิเตอร์ เป็นต้น

สมการที่ 2.15 ใช้ในการคำนวณค่าการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ที่ยังผ่านชั้นผลึกที่อยู่ในตัวอย่าง โดยจะใช้อุปกรณ์สำหรับตรวจจับรังสีเอ็กซ์รับความเข้มของรังสีเอ็กซ์ที่เกิดจากการเลี้ยวเบนในมุมต่างๆ ของการทดสอบ

$$2d \sin \theta = n\lambda \quad (2.15)$$

เมื่อ d คือ ระยะห่างระหว่างระนาบในผลึก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- θ คือ มุมตกกระทบระหว่างรังสีเอ็กซ์กับระนาบในผลึก
- n คือ ลำดับการเลี้ยวเบนซึ่งเป็นเลขจำนวนเต็ม
- λ คือ ความยาวคลื่นของรังสีเอ็กซ์

ผลการวิเคราะห์จากเครื่องวิเคราะห์โครงสร้างผลึกด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ ทำให้สามารถแยกประเภทและชนิดของตัวอย่างว่ามีโครงสร้างผลึกรูปแบบใด หรือมีองค์ประกอบอะไรบ้าง โดยทำการวัดค่าความเข้มของรังสีที่สะท้อนออกมาที่มุมต่างๆ เปรียบเทียบกับข้อมูลมาตรฐานที่ตรวจวัดโดยองค์กร JCPDs (Joint Committee on Powder Diffraction Standard) เนื่องจากสารแต่ละชนิดมีรูปแบบโครงสร้างผลึกแตกต่างกันและระยะห่างระหว่างระนาบของอะตอมที่จัดเรียงกันอย่างเป็นระเบียบก็แตกต่างกัน โดยที่ขนาดและประจุของอะตอมของสารประกอบแต่ละชนิดจะมีรูปแบบ XRD Pattern ที่เป็นมาตรฐานเฉพาะตัว

2.11 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

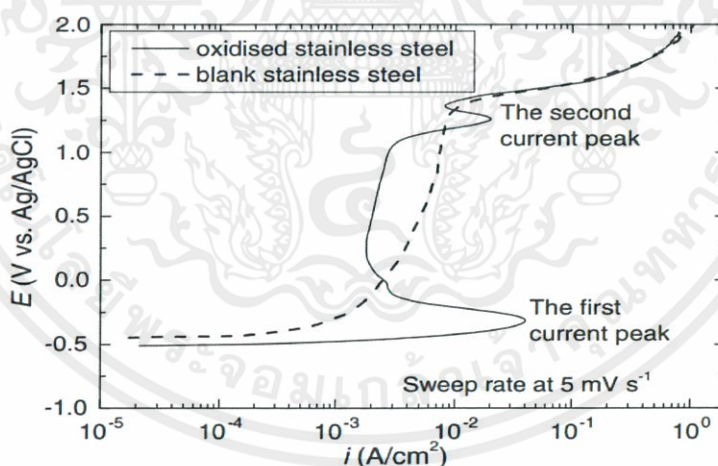
บทวนการศึกษาเกี่ยวกับการกัดกรดด้วยกระแสไฟฟ้าโดยใช้สารละลายโซเดียมซัลเฟตของเหล็กกล้าไร้สนิมและการกัดกรดด้วยกระแสไฟฟ้าโดยใช้สารละลายต่าง ๆ ของเหล็กกล้าไร้สนิมดังนี้

J. M. K. Hildén, et al. (J. M. K. Hildén, et al., 2000) ศึกษาการกัดกรดด้วยกระแสไฟฟ้าของเหล็กกล้าไร้สนิมอบอ่อนเกรด 304 และ 316L ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตที่เป็นกลาง ความเข้มข้น 15% โดยน้ำหนัก โดยวิธีโพเทนชิโอสแตติกโพลาริเซชันและวิธีกัลวานอสแตติกโพลาริเซชัน พบว่ากลไกของการกัดกรดด้วยการสลายตัว (Dissolution) มี 3 ขั้นตอน ในขั้นตอนแรก โครเมียมและแมงกานีสที่อยู่ชั้นนอกของสเกลออกไซด์จะละลาย ขั้นตอนที่สอง เมื่อปริมาณโครเมียมลดลง สเกลออกไซด์จึงมีสัดส่วนของเหล็กมากขึ้น และเมื่อการสลายตัวของชั้นของสเกลออกไซด์ลดลง ศักย์ไฟฟ้าจะเพิ่มขึ้น ส่วนขั้นตอนสุดท้าย ศักย์ไฟฟ้าของสเกลออกไซด์ลดลงและเข้าสู่ค่าคงที่ ความหนาของสเกลออกไซด์ลดลง และในชั้นของสเกลออกไซด์มีปริมาณโครเมียมต่ำ ที่ค่าศักย์ไฟฟ้าคงที่นี้ สเกลออกไซด์ที่เหลือจะมีปริมาณเหล็กและซิลิคอนสูง ซิลิคอนจะไม่ถูกสลายโดยปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมี และจะยังคงอยู่บนผิวของเหล็กกล้าไร้สนิมหลังจากการทำโพลาริเซชัน

T. Matsubashi, et al. (T. Matsubashi, et al., 2004) ศึกษาการสลายตัวของสเกลออกไซด์บนเหล็กกล้าไร้สนิมอบอ่อนเกรด 304 ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต พบว่าการสลายตัวของสเกลออกไซด์ลดลง ขณะที่ปริมาณแมงกานีสและซิลิคอนสูงขึ้น ปริมาณแมงกานีสที่สูงขึ้นทำให้สเกลออกไซด์ชั้นนอกเป็นแบบสปีเนลที่หนาขึ้น อัตราการสลายตัวของสเกลสปีเนลจะต่ำกว่าอัตราการสลายตัวของสเกลออกไซด์ชั้นใน (Corundum Scale) ดังนั้นเวลาในการกำจัดสเกลออกไซด์จึงนานขึ้น ปริมาณซิลิคอนที่สูงขึ้นทำให้สเกลออกไซด์ชั้นในและสเกลซิลิคอนออกไซด์หนาขึ้น เมื่อสเกลออกไซด์หนาขึ้น เวลาในการสลายด้วยสารละลายโซเดียมซัลเฟตจึงนานขึ้น นอกจากนี้ สเกลซิลิคอน

ออกไซด์ที่หนาจะขัดขวางสารละลาย $\text{HNO}_3\text{-HF}$ ไม่ให้กำจัดชั้นพอร์โครเมียมที่อยู่ใต้ชั้นสเกลซิลิโคนออกไซด์

L. F. Li et al. (L. F. Li, et al., 2008) ศึกษาการกัดกรวดด้วยกระแสไฟฟ้าของชั้นออกไซด์บนเหล็กกล้าไร้สนิมรีดร้อนเกรด 304 ในสารละลายไฮเดียมซัลเฟต ความเข้มข้น 10% โดยน้ำหนัก ที่ pH 4 พบว่ามีความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าสูงสุด 2 พีค (รูปที่ 2.11) ซึ่งความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าพีคแรกสอดคล้องกับการสลายตัวแบบแอคทีฟ ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าพีคที่ 2 สอดคล้องกับการสลายตัวแบบทรานส์พาสซีฟ การสลายตัวทั้งสองแบบเกิดขึ้นระหว่างกระบวนการแอโนดิกโพลาริเซชันของเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 304 ที่ถูกออกซิไดส์ เหล็กและนิกเกิลในชั้นออกไซด์เกิดการสลายตัวระหว่างกระบวนการโพเทนทิโอสแตติกโพลาริเซชัน ณ ค่าศักย์ไฟฟ้า -0.20 V (Ag/AgCl) เมื่อสัมผัสกับสารละลายอิเล็กโทรไลต์ ชั้นออกไซด์บนผิวหน้าของเหล็กกล้าไร้สนิมจะถูกกัดเซาะออกไปใน 70 วินาที ผลลัพธ์ที่ได้คือเหล็กและนิกเกิลซึ่งเป็นส่วนประกอบหลักในชั้นออกไซด์จะถูกกำจัดออก และเมื่อทำโพเทนทิโอสแตติกโพลาริเซชันที่ค่าศักย์ไฟฟ้า 1.25 V (Ag/AgCl) โครเมียมออกไซด์ในชั้นออกไซด์จะถูกออกซิไดส์ไปเป็นไอออนเฮกซะวาเลนต์โครเมียม (Cr^{6+}) ด้วยอัตราที่ค่อนข้างคงที่ ทำให้เหล็กออกไซด์ถูกกัดเซาะออกไปใน 150 วินาที พบว่าประสิทธิภาพการกัดกรวดในกระบวนการแอโนดิกโพลาริเซชันช่วงแอคทีฟสูงกว่าช่วงทรานส์พาสซีฟส่งผลให้เวลาที่ใช้ในการกำจัดชั้นออกไซด์ลดลง

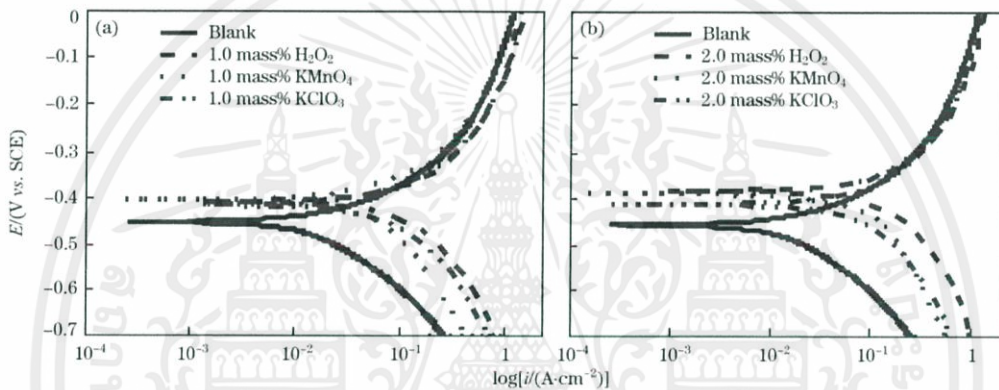


รูปที่ 2.11 กราฟแอโนดิกโพลาริเซชันของเหล็กกล้าไร้สนิมที่ถูกออกซิไดส์และของเหล็กกล้าไร้สนิมเปล่า: อัตราเร็วในการเพิ่มศักย์ไฟฟ้าที่ 5 mVs^{-1} (Li, et al., 2008)

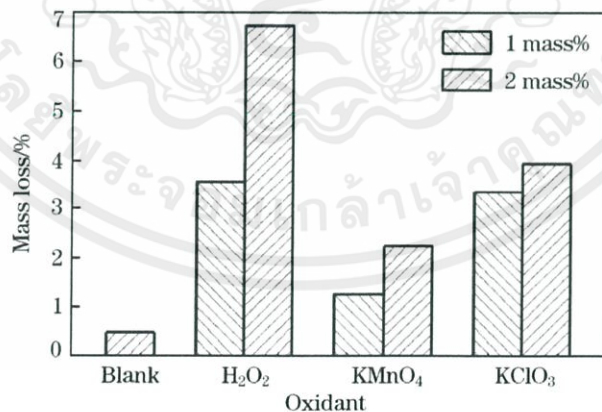
Q. Xie, et al. (Q. Xie, et al., 2016) ศึกษาการลดเวลาของการกัดกรวดด้วยกระแสไฟฟ้าที่ใช้กำจัดชั้นของสเกลออกไซด์บนแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมเพิร์ทเกรด 430 โดยศึกษาผลของตัวออกซิไดส์ ได้แก่ สารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) สารละลายโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต และ สารละลายโพแทสเซียมคลอเรต (KClO_3) ต่อพฤติกรรมการกัดกรวดด้วยกระแสไฟฟ้าในสารละลายกรด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไฮโดรคลอริกที่เติมและไม่เติมตัวออกซิไดส์ การติดตามผลของการกำจัดชั้นของสเกลออกไซด์ ในงานวิจัยนี้ใช้การวัดน้ำหนักที่ลดลงหลังกระบวนการกัดกรด การศึกษาโครงสร้าง และการวัดทางไฟฟ้าเคมี โดยพิจารณาอัตราการกัดกร่อนจากความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าของเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 430 พบว่าการเติมตัวออกซิไดส์ไม่เกิน 2% โดยน้ำหนัก ช่วยเร่งกระบวนการกัดกรดด้วยกระแสไฟฟ้าของเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 430 ในสารละลายกรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 5-8% โดยน้ำหนัก อุณหภูมิ 40-60°C จากรูปที่ 2.12 พบว่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าของการกัดกรดด้วยกระแสไฟฟ้าในสารละลายกรดไฮโดรคลอริกที่เติมตัวออกซิไดส์มีค่าสูงกว่ากรณีที่ไม่เติมตัวออกซิไดส์ เมื่อเพิ่มค่าความเข้มข้นของตัวออกซิไดส์ ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าจะมีค่าสูงขึ้น (รูปที่ 2.12a และ 2.12b) ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าสูง ทำให้เวลาในการกำจัดชั้นออกไซด์เร็วขึ้น



รูปที่ 2.12 กราฟโพลาริเซชันของเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 430 ในสารละลายกรดไฮโดรคลอริกที่เติมและไม่เติมตัวออกซิไดส์ (Q. Xie, et al., 2016)



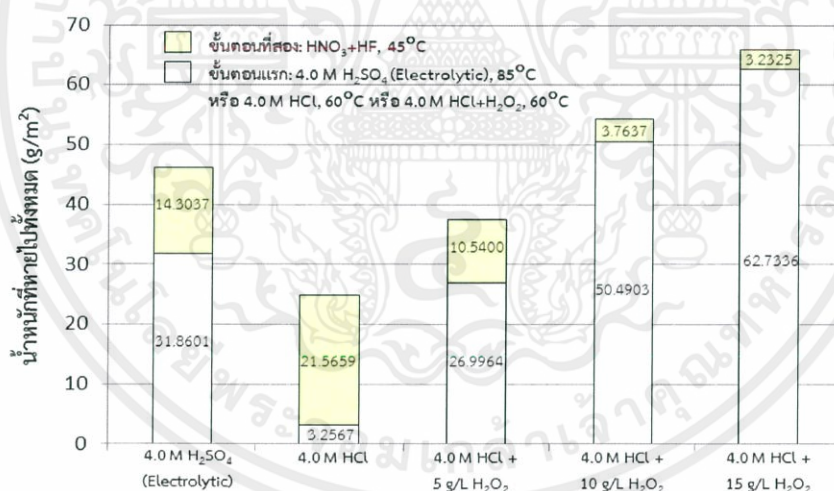
รูปที่ 2.13 ค่าน้ำหนักที่หายไปของชิ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 430 หลังการกัดกรดในสารละลายกรดไฮโดรคลอริกที่เติมและไม่เติมตัวออกซิไดส์ (Xie, et al., 2016)

จากรูปที่ 2.13 พบว่าน้ำหนักที่หายไปของชิ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 430 หลังการกัดกรดในสารละลายกรดไฮโดรคลอริกที่เติมสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์มีค่ามากกว่ากรณีที่ไม่เติม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารละลายโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตและสารละลายโพแทสเซียมคลอเรต แสดงว่าสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ให้ผลในการกำจัดชั้นของสเกลออกไซด์ดีกว่าสารละลายโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตและสารละลายโพแทสเซียมคลอเรต

W. Homjabok, et al. (W. Homjabok, et al., 2010) ศึกษาพฤติกรรมการกัดกรดด้วยกระแสไฟฟ้าของเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 304 ในสารละลายกรดซัลฟิวริก ความเข้มข้น 4 mol/L และกรดไฮโดรคลอริก ความเข้มข้น 4 mol/L ที่เติมสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ความเข้มข้น 5, 10 และ 15 กรัมต่อลิตร พบว่าการเติมสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 10 และ 15 กรัมต่อลิตรลงในกรดไฮโดรคลอริกช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการกัดกรดอย่างเห็นได้ชัด พิจารณาค่าน้ำหนักที่หายไปของชิ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 304 หลังผ่านกระบวนการกัดกรดหลายขั้นตอน จากรูปที่ 2.14 พบว่าน้ำหนักที่หายไปของชิ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 304 ในสารละลายกรดไฮโดรคลอริกที่เติมสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ความเข้มข้น 10 และ 15 กรัมต่อลิตร มีค่ามากกว่ากรณีสารละลายกรดซัลฟิวริกและกรดไฮโดรคลอริก นอกจากนี้เมื่อวิเคราะห์สเกลออกไซด์โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด พบว่าผิวของเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 304 ในสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 10 กรัมต่อลิตร มีความเรียบกว่ากรณีใช้สารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 15 กรัมต่อลิตร



รูปที่ 2.14 ค่าน้ำหนักที่หายไปของชิ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 304 หลังผ่านการกัดกรดหลายขั้นตอน (Homjabok, et al., 2010)

จากการทบทวนงานวิจัยที่ผ่านมา การกำจัดชั้นออกไซด์บนเหล็กกล้าไร้สนิมนิยมใช้การกัดกรดด้วยกระแสไฟฟ้าในสารละลายโซเดียมซัลเฟต และมีการศึกษาผลของการเติมสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ลงในสารละลายกรดไฮโดรคลอริก แต่ยังไม่พบการศึกษาการกัดกรดด้วยกระแสไฟฟ้าในสารละลายโซเดียมซัลเฟตที่เติมสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงจะศึกษาการกำจัดชั้นของออกไซด์บนเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 304L ที่ผ่านการอบอ่อนที่อุณหภูมิ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1,175 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 นาที โดยการกักกรดด้วยกระแสไฟฟ้าในสารละลายโซเดียมซัลเฟต ความเข้มข้น 190 กรัมต่อลิตร ที่ pH 4 อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส และศึกษาผลของการเติมสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ความเข้มข้น 10 กรัมต่อลิตร ต่อการกักกรดด้วยกระแสไฟฟ้าในสารละลายโซเดียมซัลเฟต (ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมซัลเฟต และค่า pH เป็นค่าปฏิบัติการที่บริษัท โพลโค-ไทยน็อคซ์ จำกัด ซึ่งมีความร่วมมือในงานวิจัยนี้)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

ขั้นตอนการทดลอง

บทนี้แสดงวิธีการกัดกรดด้วยกระแสไฟฟ้า สารเคมี อุปกรณ์ และเครื่องมือต่างๆ ที่ใช้ศึกษาการกำจัดชั้นของออกไซด์บนเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 304L ที่ผ่านการอบอ่อนจากกระบวนการผลิตเหล็กกล้าไร้สนิมของบริษัท โพลโค-ไทยน็อคซ์ จำกัด กระบวนการอบอ่อนทำที่อุณหภูมิ 1,175 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 นาที สารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่ใช้คือสารละลายโซเดียมซัลเฟตที่เติมและไม่เติมสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์

3.1 สารเคมีและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

3.1.1 ชิ้นงานตัวอย่าง

แผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 304L พื้นที่ขนาด 5.25 cm^2 ที่ผ่านการอบอ่อนที่ 1,175 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 นาที ได้รับอนุเคราะห์จากบริษัท โพลโค-ไทยน็อคซ์ จำกัด มีองค์ประกอบทางเคมีดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 องค์ประกอบทางเคมีของเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 304L ที่ผ่านการอบอ่อน

องค์ประกอบทางเคมีของเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 304L ที่ผ่านการอบอ่อน (wt%)						
Cr	Ni	C	Mn	Si	P	S
18.00-20.00	8.00-12.00	0.03	2.00	1.00	0.045	0.03

3.1.2 สารละลายอิเล็กโทรไลต์

3.1.2.1 สารละลายโซเดียมซัลเฟต

เตรียมสารละลายโซเดียมซัลเฟต ความเข้มข้น 190 กรัมต่อลิตร ใช้สารเคมีเกรดวิเคราะห์และน้ำที่ปราศจากไอออน (Deionized Water) ค่า pH ของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ ถูกควบคุมอยู่ที่ระดับ pH 4 โดยใช้กรดซัลฟิวริก (ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมซัลเฟต และค่า pH เป็นค่าปฏิบัติการที่บริษัท โพลโค-ไทยน็อคซ์ จำกัด ซึ่งมีความร่วมมือในงานวิจัยนี้)

3.1.2.2 สารละลายโซเดียมซัลเฟตที่เติมสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์

เตรียมสารละลายโซเดียมซัลเฟต ความเข้มข้น 190 กรัมต่อลิตร เติมสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ความเข้มข้น 10 กรัมต่อลิตร ใช้สารเคมีเกรดวิเคราะห์และ

น้ำที่ปราศจากไอออน ค่าความเป็นกรดของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ ถูกควบคุมอยู่ที่ระดับ pH 4 โดยใช้กรดซัลฟิวริก

3.1.3 เครื่องชั่งน้ำหนัก ทศนิยม 2 ตำแหน่ง

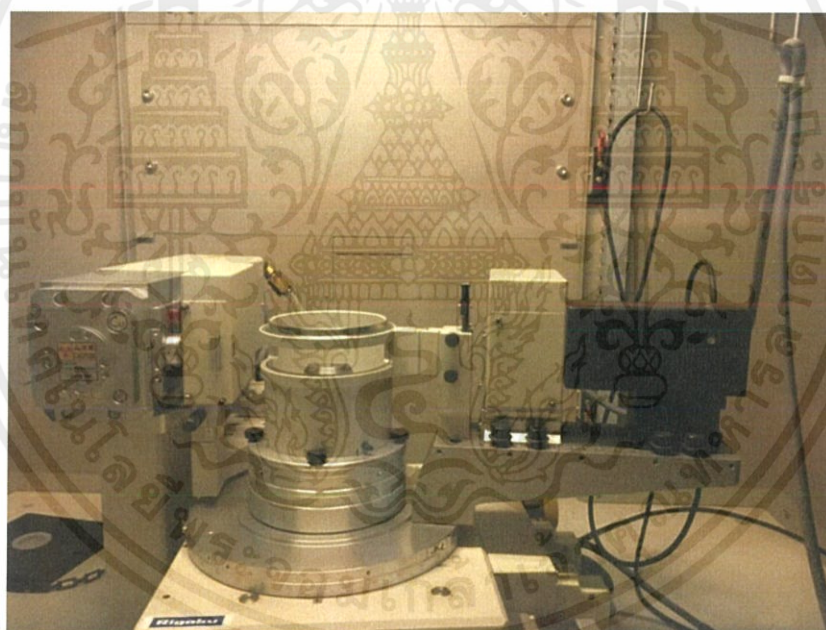
3.1.4 เครื่องวัดค่า pH

3.1.5 เทอร์โมมิเตอร์

3.1.6 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

3.1.7 เครื่องวิเคราะห์โครงสร้างผลึกด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray Diffractometer)

ศึกษาองค์ประกอบทางเคมีของชั้นของออกไซด์ที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวของชิ้นตัวอย่าง โดยใช้เครื่องวิเคราะห์โครงสร้างผลึกด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray Diffractometer, XRD) ของบริษัท Rigaku



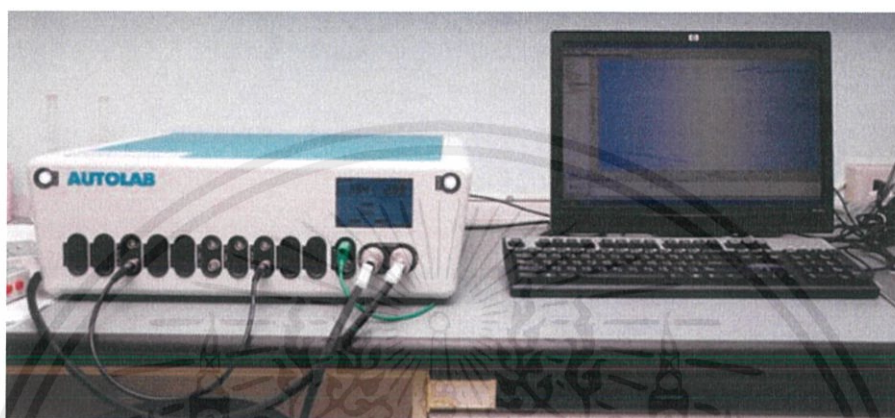
รูปที่ 3.1 เครื่องวิเคราะห์โครงสร้างผลึกด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์

การวิเคราะห์ออกไซด์บนชิ้นงานตัวอย่าง สแกนค่า 2θ (2-Theta) ตั้งแต่ $20-90^\circ$ ด้วยอัตราเร็ว 2° ต่อนาที กราฟที่ได้เป็นความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มของรังสีเอ็กซ์ที่วัดได้ (Intensity) กับมุมที่ทำการวัด 2θ (2-Theta) นำรูปแบบสเปกตรัมมาเปรียบเทียบกับรูปแบบสเปกตรัมมาตรฐานจากองค์กร JCPDs (Joint Committee on Powder Diffraction Standard)

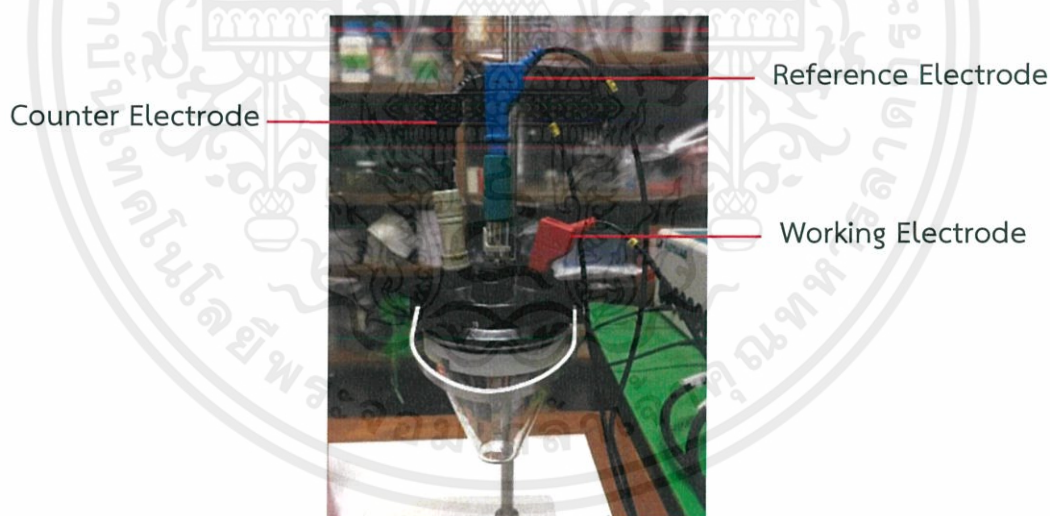
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.8 เครื่องโพเทนทีโอสแตทกัลวานอสแตท (Potentiostat Galvanostat)

เครื่องโพเทนทีโอสแตทกัลวานอสแตท (รูปที่ 3.2) ของบริษัท AUTOLAB ใช้ในการศึกษาการกัดกรวดด้วยกระแสไฟฟ้าโดยวิธีโพเทนทีโอไดนามิกโพลาริเซชัน (Potentiodynamic Polarization) และโพเทนทีโอสแตติกโพลาริเซชัน (Potentiostatic Polarization)



รูปที่ 3.2 เครื่องโพเทนทีโอสแตทกัลวานอสแตท



รูปที่ 3.3 การติดตั้งขั้วไฟฟ้า

การศึกษาการกัดกรวดด้วยกระแสไฟฟ้าโดยวิธีโพเทนทีโอไดนามิกโพลาริเซชันและวิธีโพเทนทีโอสแตติกโพลาริเซชัน จะติดตั้งขั้วไฟฟ้าหรืออิเล็กโทรด 3 ชนิด ซึ่งประกอบด้วย ขั้วไฟฟ้าทำงาน (Working Electrode) ขั้วไฟฟ้าวัดกระแส (Counter Electrode) ที่ทำจากโลหะแพลตตินัม และขั้วไฟฟ้า Ag/AgCl ซึ่งเป็นขั้วไฟฟ้าวัดศักย์ไฟฟ้าอ้างอิง (Reference Electrode) (รูปที่ 3.3)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 ขั้นตอนการทดลอง

3.2.1 ศึกษาลักษณะและองค์ประกอบทางเคมีของชั้นของออกไซด์ที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวของเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 304L ที่ผ่านการอบอ่อนที่อุณหภูมิ 1,175 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 นาที โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด และเครื่องวิเคราะห์โครงสร้างผลึกด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์

3.2.2 ศึกษาการกัดกรวดด้วยกระแสไฟฟ้าของเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 304L ที่ผ่านการอบอ่อนที่อุณหภูมิ 1,175 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 นาที ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต ความเข้มข้น 190 กรัมต่อลิตร ที่ pH 4 อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ด้วยวิธีโพเทนทิโอสแตติกโพลาริเซชัน โดยป้อนค่าความต่างศักย์ระหว่าง -0.5 V และ 2.0 V (Ag/AgCl) ใช้อัตราเร็วในการเพิ่มศักย์ไฟฟ้าที่ 5 mVs^{-1} จะได้กราฟความสัมพันธ์ระหว่างศักย์ไฟฟ้า (Potential) กับความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า (Current Density) หรือเรียกว่ากราฟโพลาริเซชัน (Polarization Curve) ก่อนการวัดค่าแต่ละครั้ง ขั้วไฟฟ้าทั้งสามจะถูกแช่อยู่ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์เป็นเวลา 30 นาที เพื่อหาค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนของโลหะ (Corrosion Potential: E_{corr} หรือ Open Circuit Potential: OCP)

3.2.3 ศึกษาการกัดกรวดด้วยกระแสไฟฟ้าของเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 304L ที่ผ่านการอบอ่อนที่อุณหภูมิ 1,175 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 นาที ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต ความเข้มข้น 190 กรัมต่อลิตร ที่ pH 4 อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ด้วยวิธีโพเทนทิโอสแตติกโพลาริเซชัน โดยป้อนค่าศักย์ไฟฟ้าที่เท่ากับค่าศักย์ไฟฟ้าที่ทำให้เกิดการสลายตัวแบบแอคทีฟและทรานส์พาสซีฟ ซึ่งได้จากกราฟในข้อ 3.2.2 การทดลองนี้จะได้กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแสไฟฟ้ากับเวลา

3.2.4 ศึกษาลักษณะและองค์ประกอบทางเคมีของชั้นของออกไซด์บนเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 304L ที่ผ่านการอบอ่อนที่อุณหภูมิ 1,175 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 นาที และผ่านกระบวนการกัดกรวดด้วยกระแสไฟฟ้า จากข้อ 3.2.3 ที่ทำการทดลองเช่นเดียวกับข้อ 3.2.1

3.2.5 ทำเช่นเดียวกับข้อ 3.2.2 - 3.2.4 แต่ใช้สารละลายโซเดียมซัลเฟต ความเข้มข้น 190 กรัมต่อลิตร ที่ pH 4 อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ที่เติมสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ความเข้มข้น 10 กรัมต่อลิตร

3.2.6 วิเคราะห์ผลการทดลอง

3.2.7 สรุปผลการทดลองและเขียนรายงาน

บทที่ 4

ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผลการทดลอง

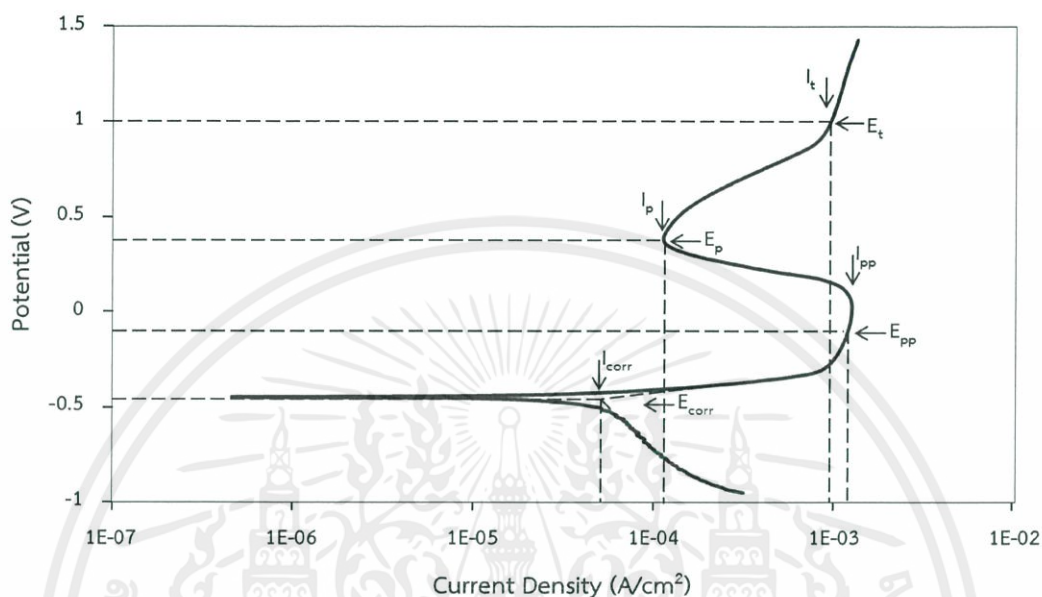
การกำจัดชั้นของออกไซด์บนเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 304L ที่ผ่านการอบอ่อนที่อุณหภูมิ 1,175 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 นาที โดยการกัดกรดด้วยกระแสไฟฟ้าในสารละลายโซเดียมซัลเฟต ความเข้มข้น 190 กรัมต่อลิตร ที่ pH 4 อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ที่เดิมและไม่เติมสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ความเข้มข้น 10 กรัมต่อลิตร การกัดกรดด้วยกระแสไฟฟ้าโดยวิธีโพเทนทิโอดินามิกโพลาริเซชัน บ่อนค่าความต่างศักย์ระหว่าง -0.5 V และ 2.0 V (Ag/AgCl) ใช้อัตราเร็วในการเพิ่มศักย์ไฟฟ้าที่ 5 mVs^{-1} แสดงรายละเอียดผลศึกษาดังนี้

4.1 ผลการทดลองโดยวิธีโพเทนทิโอดินามิกโพลาริเซชัน

4.1.1 กรณีสารละลายโซเดียมซัลเฟต การทดลองโดยวิธีโพเทนทิโอดินามิกโพลาริเซชัน ในการกัดกรดด้วยกระแสไฟฟ้าของเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 304L ที่ผ่านการอบอ่อนที่อุณหภูมิ 1,175 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 นาที ได้กราฟโพลาริเซชัน (Polarization Curve) ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างศักย์ไฟฟ้า (Potential) กับความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า (Current Density) ดังรูปที่ 4.1

จากรูปที่ 4.1 ค่าศักย์ไฟฟ้าของการกัดกร่อน (Corrosion Potential: E_{corr}) เท่ากับ -0.45 V (Ag/AgCl) ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าของการกัดกร่อน (Corrosion Current Density: I_{corr}) เท่ากับ $4 \times 10^{-5} \text{ A/cm}^2$ จากนั้นค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าจะเพิ่มขึ้นจนถึงค่าศักย์ไฟฟ้าประมาณ 0.1 V (Ag/AgCl) คือช่วงแอคทีฟ ซึ่งในช่วงนี้เหล็กกล้าไร้สนิมจะเกิดการกัดกร่อนแบบสม่ำเสมอ (เนื่องจากชั้นของออกไซด์เกิดการสลายตัว) พบว่าเมื่อค่าศักย์ไฟฟ้าเพิ่มขึ้น ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าจะลดลง เพราะเริ่มเกิดฟิล์มบางที่ผิวซึ่งเป็นฟิล์มที่ต้านทานการกัดกร่อน (Passive Film) ค่าศักย์ไฟฟ้านี้เรียกว่าศักย์ไฟฟ้าเริ่มเกิดฟิล์ม (Primary Passive Potential: E_{pp}) ในที่นี้มีค่าเท่ากับ -0.1 V (Ag/AgCl) ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ค่าศักย์ไฟฟ้าเริ่มเกิดฟิล์มเรียกว่าค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าเริ่มเกิดฟิล์ม (Primary Passive Current Density: I_{pp}) ซึ่งมีค่าเท่ากับ $1.3 \times 10^{-3} \text{ A/cm}^2$ เมื่อศักย์ไฟฟ้ามีค่าตั้งแต่ -0.1 ถึง 1.0 V (Ag/AgCl) เรียกช่วงพาสซีฟ ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าจะเริ่มต้นจากค่าค่อนข้างสูง แล้วลดลงจนถึงค่าต่ำสุดที่ค่าศักย์ไฟฟ้า 0.35 V (Ag/AgCl) ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าช่วงพาสซีฟ (Passive Current Density: I_{p}) ต่ำสุดคือ $1.2 \times 10^{-4} \text{ A/cm}^2$ ค่าศักย์ไฟฟ้า 0.35 V (Ag/AgCl) ที่มีค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าต่ำสุดเรียกว่าค่าศักย์ไฟฟ้าช่วงพาสซีฟ (Passive Potential: E_{p}) จากนั้นความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเนื่องจาก Passive Film ที่เกิดขึ้นเกิดการแตก และเกิดการกัดกร่อนขึ้นซึ่งส่วนมากเป็นการกัดกร่อนเฉพาะที่ ค่าศักย์ไฟฟ้าตั้งแต่ 1.0 V (Ag/AgCl) เป็นต้นไปคือช่วง

ทรานส์พาสซีฟ ศักย์ไฟฟ้าที่เริ่มเกิดช่วงทรานส์พาสซีฟ (Transpassive Potential: E_t) เท่ากับ 1.0 V (Ag/AgCl) สำหรับค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่เริ่มเกิดช่วงทรานส์พาสซีฟ (Transpassive Current Density: I_t) เท่ากับ $9.5 \times 10^{-4} \text{ A/cm}^2$

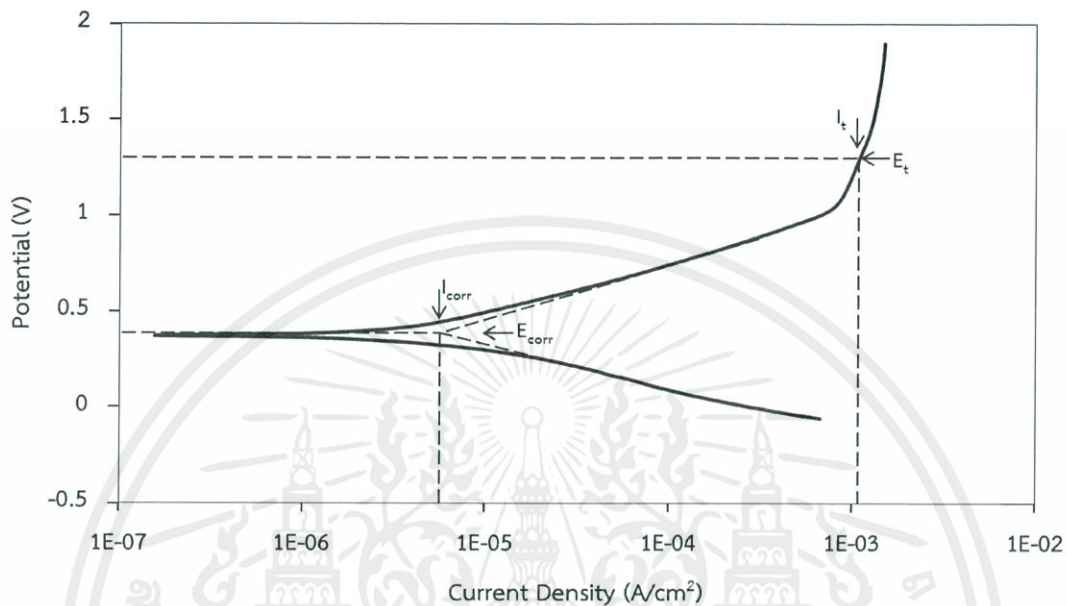


รูปที่ 4.1 กราฟโพลาริเซชันของการกัดกร่อนด้วยกระแสไฟฟ้าของเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 304L ที่ผ่านการอบอ่อนที่อุณหภูมิ 1,175 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 นาที ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต 190 กรัมต่อลิตร ที่ pH 4 อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส

4.1.2 กรณีสารละลายโซเดียมซัลเฟตที่เติมสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ความเข้มข้น 10 กรัมต่อลิตร การทดลองโดยวิธีโพเทนทิโอสแตติกโพลาริเซชันในการกัดกร่อนด้วยกระแสไฟฟ้าของเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 304L ที่ผ่านการอบอ่อนที่อุณหภูมิ 1,175 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 นาที ได้กราฟโพลาริเซชัน ดังรูปที่ 4.2 จากรูปจะเห็นว่าไม่มีช่วงพาสซีฟเกิดขึ้นเมื่อเทียบกับรูปที่ 4.1 แสดงให้เห็นว่าการเติมสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ทำให้ไม่เกิดฟิล์มบางที่ต้านทานการกัดกร่อนที่ผิวของเหล็กกล้าไร้สนิม จึงเกิดการกัดกร่อนได้ดี ในรูปนี้ค่าศักย์ไฟฟ้าของการกัดกร่อน (E_{corr}) เท่ากับ 0.4 V (Ag/AgCl) ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าของการกัดกร่อน (I_{corr}) เท่ากับ $4.7 \times 10^{-6} \text{ A/cm}^2$ ในช่วงทรานส์พาสซีฟพบว่าศักย์ไฟฟ้าที่เริ่มเกิดช่วงทรานส์พาสซีฟ (E_t) มีค่าเท่ากับ 1.2 V (Ag/AgCl) ส่วนความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่เริ่มเกิดช่วงทรานส์พาสซีฟ (I_t) มีค่าเท่ากับ $1.2 \times 10^{-3} \text{ A/cm}^2$ เมื่อพิจารณาค่าศักย์ไฟฟ้าของการกัดกร่อนและค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าของการกัดกร่อนในสารละลายโซเดียมซัลเฟตที่เติมสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ พบว่าค่าศักย์ไฟฟ้าของการกัดกร่อนมีค่าสูงกว่ากรณีไม่เติมสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ แสดงว่าการเติมสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์จะทำให้การกัดกร่อนเกิดได้ยากขึ้นเนื่องจากจะต้อง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ป้อนค่าศักย์ไฟฟ้าในการกักกรดสูงกว่า ส่วนค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าของการกักกร่อนกรณีเติมสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์มีค่าต่ำลง ดังนั้นตามกฎของฟาราเดย์แสดงว่าอัตราการกักกรดจะมีค่าต่ำกว่ากรณีไม่เติมสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์

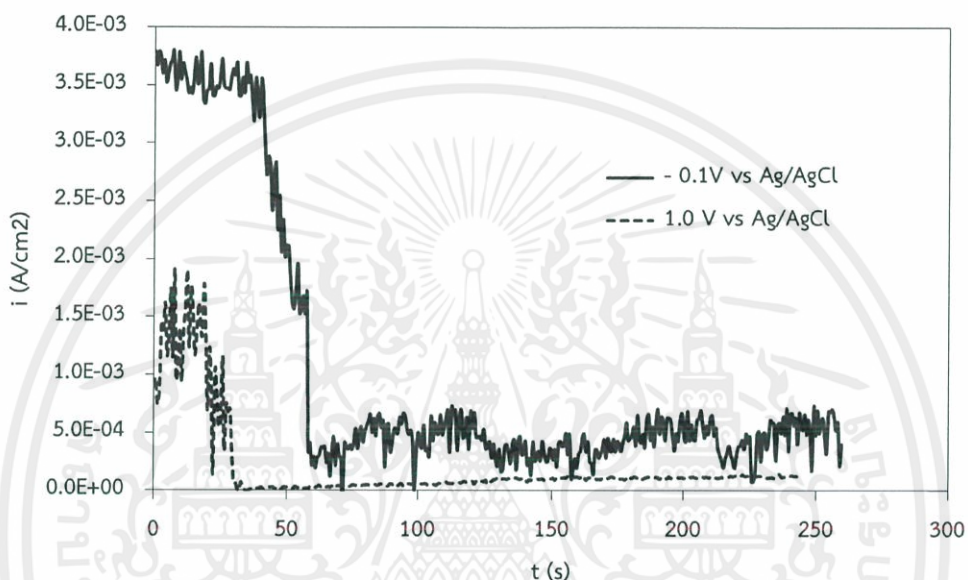


รูปที่ 4.2 กราฟโพลาริเซชันของการกักกรดด้วยกระแสไฟฟ้าของเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 304L ที่ผ่านการอบอ่อนที่อุณหภูมิ 1,175 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 นาที ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต 190 กรัมต่อลิตร ที่ pH 4 อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ที่เติมสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 10 กรัมต่อลิตร

จากผลการทดลองในรูปที่ 4.1 และ 4.2 ในการใช้งานในกระบวนการผลิตจึงต้องใช้กระแสไฟฟ้าบังคับให้เกิดการกักกรดที่สถานะเหนือกว่าศักย์ไฟฟ้าการกักกร่อน ซึ่งอาจเป็นช่วงศักย์ไฟฟ้าที่เริ่มเกิดฟิล์ม (E_{pp}) และช่วงทรานส์พาสซีฟ (E_t) เป็นต้นไปเพื่อให้สารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ช่วยเพิ่มความสามารถในการกักกรดของสารละลายโซเดียมซัลเฟต ดังนั้นจากการทดลองนี้การศึกษาโดยวิธีโพเทนทิโอสแตติกโพลาริเซชันในหัวข้อที่ 4.2 จึงใช้ค่าศักย์ไฟฟ้า -0.1 V และ 1.0 V (Ag/AgCl) ในกรณีไม่เติมสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ และค่าศักย์ไฟฟ้า 1.2 V (Ag/AgCl) ในกรณีเติมสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์

4.2 การทดลองโดยวิธีโพเทนทิโอสแตติกโพลาริเซชัน

4.2.1 กรณีสารละลายโซเดียมซัลเฟต การทดลองโดยวิธีโพเทนทิโอสแตติกโพลาริเซชันของการกัดกรดด้วยกระแสไฟฟ้าของเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 304L ที่ผ่านการอบอ่อนที่อุณหภูมิ 1,175 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 นาที ค่าศักย์ไฟฟ้าที่ทำให้ชั้นของออกไซด์เกิดการสลายตัวแบบแอคทีฟและทรานส์พาสซีฟ คือ -0.1 V และ 1.0 V เทียบกับขั้วไฟฟ้า Ag/AgCl ตามลำดับ ได้ผลดังรูปที่ 4.3



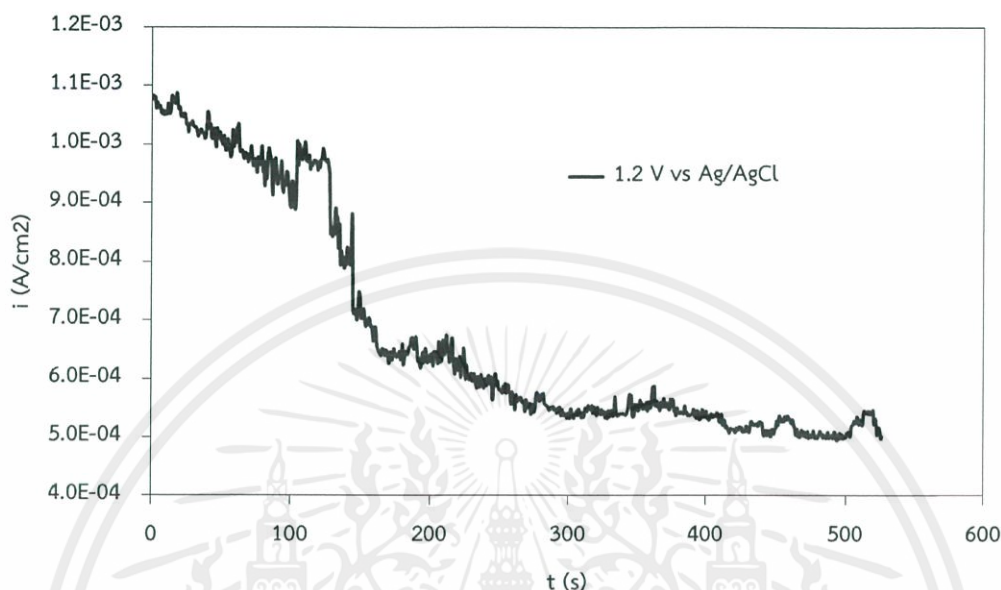
รูปที่ 4.3 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแสไฟฟ้ากับเวลาของการกัดกรดด้วยกระแสไฟฟ้าของเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 304L ที่ผ่านการอบอ่อนที่อุณหภูมิ 1,175 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 นาที ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต ที่ค่าศักย์ไฟฟ้า -0.1 V และ 1.0 V (Ag/AgCl)

จากรูปที่ 4.3 ที่ค่าศักย์ไฟฟ้า -0.1 V (Ag/AgCl) ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้ามีค่าสูงในช่วงเริ่มต้นแล้วจะลดลงอย่างรวดเร็วภายใน 60 วินาที ที่ค่าศักย์ไฟฟ้าเท่ากับ 1.0 V (Ag/AgCl) ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้ามีค่าสูงในช่วงเริ่มต้นแล้วจะลดลงอย่างรวดเร็วภายใน 30 วินาที แสดงว่าที่ค่าศักย์ไฟฟ้าเท่ากับ 1 V (Ag/AgCl) เกิดการกัดกรดได้ดีกว่า การที่ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าสูงขึ้นแล้วลดลงอย่างรวดเร็วจนถึงค่าคงที่ แสดงว่าออกไซด์ชั้นนอกถูกกัดออกหมดจนถึงออกไซด์ชั้นในที่ไม่สามารถกัดออกได้

4.2.2 กรณีสารละลายโซเดียมซัลเฟตที่เติมสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ความเข้มข้น 10 กรัมต่อลิตร การทดลองโดยวิธีโพเทนทิโอสแตติกโพลาริเซชันของการกัดกรดด้วยกระแสไฟฟ้าของเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 304L ที่ผ่านการอบอ่อนที่อุณหภูมิ 1,175 องศาเซลเซียส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เป็นเวลา 5 นาที ที่ค่าศักย์ไฟฟ้าที่ทำให้ชั้นของออกไซด์เกิดการสลายตัวแบบทรานส์พาสซีฟ คือ 1.2 V (Ag/AgCl) ได้ผลดังรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.4 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแสไฟฟ้ากับเวลาของการกักรดด้วยกระแสไฟฟ้าของเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 304L ที่ผ่านการอบอ่อนที่อุณหภูมิ 1,175 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 นาที ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตที่เติมสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ความเข้มข้น 10 กรัมต่อลิตร ที่ค่าศักย์ไฟฟ้า 1.2 V (Ag/AgCl)

จากรูปที่ 4.4 ที่ค่าศักย์ไฟฟ้า 1.2 V (Ag/AgCl) ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าจะสูงในช่วงเริ่มต้นแล้วจะลดลงอย่างรวดเร็วภายใน 160 วินาที หลังจากนั้นความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าจะค่อยๆ ลดลงจนคงที่ แสดงว่าออกไซด์ชั้นนอกถูกกัดออกหมดจนถึงออกไซด์ชั้นในที่ไม่สามารถกัดออกได้

งานวิจัยของ Q. Xie และคณะ พบว่าสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่อุณหภูมิ 40-60 องศาเซลเซียส สามารถเร่งการกักรดด้วยกระแสไฟฟ้าของชั้นออกไซด์บนเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 430 ในสารละลายกรดไฮโดรคลอริกเร็วขึ้น (Q. Xie, et al., 2016) แต่ในงานวิจัยนี้จากรูปที่ 4.3 และ 4.4 จะเห็นว่าที่ศักย์ไฟฟ้าช่วงทรานส์พาสซีฟ กรณีเติมสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ใช้เวลาในการกำจัดชั้นของออกไซด์นานกว่าเมื่อไม่เติมสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ แสดงว่าแม้ว่าไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์จะเป็นตัวออกซิไดส์ที่แรง แต่ที่อุณหภูมิห้อง (25 องศาเซลเซียส) ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ไม่มีผลเร่งการกักรดด้วยกระแสไฟฟ้าในสารละลายโซเดียมซัลเฟตให้เร็วขึ้น

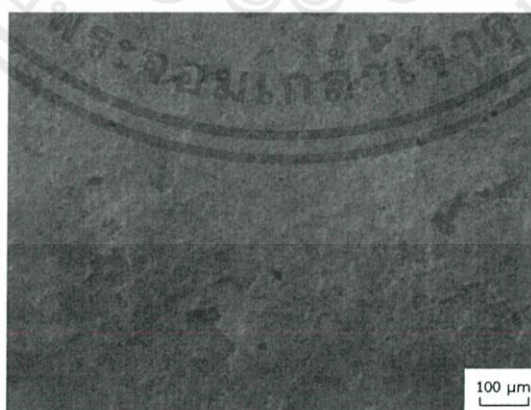
4.3 การศึกษาลักษณะพื้นฐานวิทยาของออกไซด์บนเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 304L ที่ผ่านการอบอ่อนที่อุณหภูมิ 1,175 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 นาที ก่อนและหลังการกัดกรด

4.3.1 กรณีก่อนการกัดกรดด้วยกระแสไฟฟ้า รูปที่ 4.5 แสดงภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของผิวของเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 304L ที่ผ่านการอบอ่อนที่อุณหภูมิ 1,175 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 นาที



รูปที่ 4.5 ผิวของเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 304L ที่ผ่านการอบอ่อนที่อุณหภูมิ 1,175 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 นาที

4.3.2 กรณีการกัดกรดด้วยสารละลายโซเดียมซัลเฟตที่ค่าศักย์ไฟฟ้า -0.1 V (Ag/AgCl) และ 1.0 V (Ag/AgCl) รูปที่ 4.6-4.7 แสดงภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของผิวของเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 304L ที่ผ่านการอบอ่อนที่อุณหภูมิ 1,175 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 นาที หลังการกัดกรดด้วยสารละลายโซเดียมซัลเฟต



รูปที่ 4.6 ผิวของเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 304L ที่ผ่านการอบอ่อนที่อุณหภูมิ 1,175 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 นาที หลังการกัดกรดด้วยกระแสไฟฟ้าในสารละลายโซเดียมซัลเฟตที่ค่าศักย์ไฟฟ้า -0.1 V (Ag/AgCl)



รูปที่ 4.7 ผิวของเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 304L ที่ผ่านการอบอ่อนที่อุณหภูมิ 1,175 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 นาที หลังการกัดกรวดด้วยกระแสไฟฟ้าในสารละลายโซเดียมซัลเฟตที่ค่า ศักย์ไฟฟ้า 1.0 V (Ag/AgCl)

4.3.3 กรณีการกัดกรวดด้วยสารละลายโซเดียมซัลเฟตที่เติมสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ ออกไซด์ ความเข้มข้น 10 กรัมต่อลิตร ที่ค่าศักย์ไฟฟ้า 1.2 V (Ag/AgCl) รูปที่ 4.8 แสดงภาพถ่าย จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของผิวของเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 304L ที่ผ่านการ อบอ่อนที่อุณหภูมิ 1,175 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 นาที หลังการกัดกรวดด้วยสารละลาย โซเดียมซัลเฟตที่เติมสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์



รูปที่ 4.8 ผิวของเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 304L ที่ผ่านการอบอ่อนที่อุณหภูมิ 1,175 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 นาที หลังการกัดกรวดด้วยกระแสไฟฟ้า ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตที่เติม สารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ค่าศักย์ไฟฟ้า 1.2 V (Ag/AgCl)

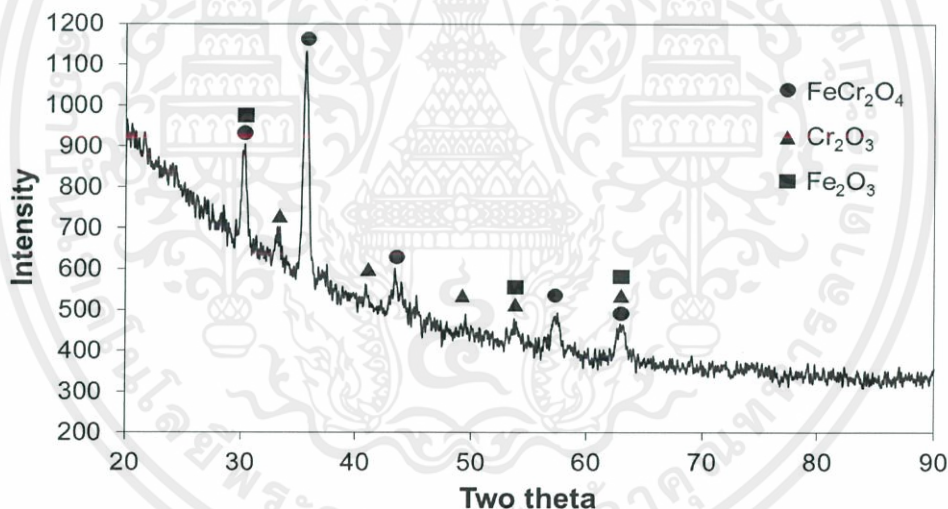
จากรูปที่ 4.6-4.8 จะเห็นว่าผิวของเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 304L ที่ผ่านการอบอ่อนที่อุณหภูมิ 1,175 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 นาที หลังการกัดกรวดในกรณีที่เติมสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ ออกไซด์ที่ค่าศักย์ไฟฟ้า 1.2 V (Ag/AgCl) เรียกว่ากรณีที่ไม่เติมสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าศักย์ไฟฟ้า -0.1 และ 1.0 V (Ag/AgCl) แม้ว่าสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ไม่มีผลเร่งการกัดกรวดด้วยกระแสไฟฟ้าในสารละลายโซเดียมซัลเฟต แต่ช่วยกำจัดออกไซด์และทำให้ผิวของเหล็กกล้าไร้สนิมเรียบขึ้น

4.4 ผลการวิเคราะห์ชั้นของออกไซด์ของเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 304L ที่ผ่านการอบอ่อนที่อุณหภูมิ 1,175 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 นาที ก่อนและหลังการกัดกรวด

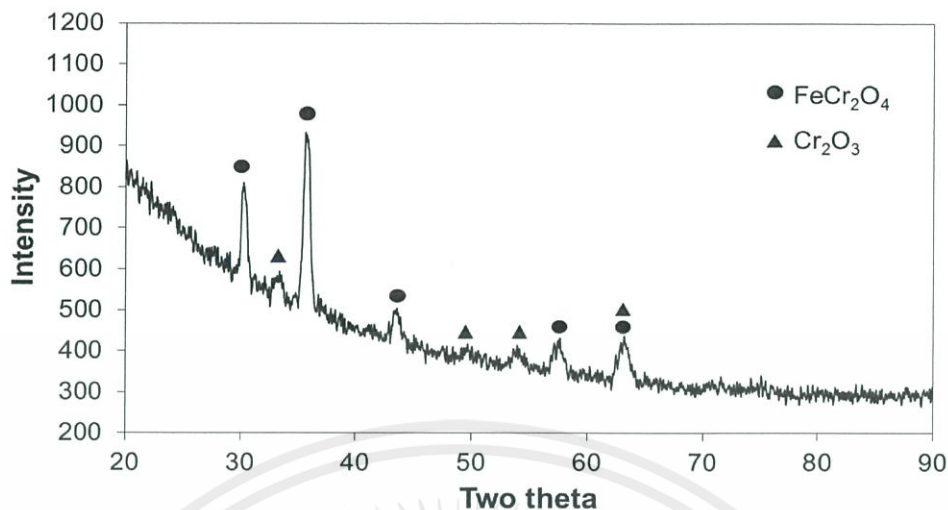
4.4.1 กรณีก่อนการกัดกรวดด้วยกระแสไฟฟ้า ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของชั้นของออกไซด์ที่เกิดขึ้นบนผิวเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 304L ที่ผ่านการอบอ่อนที่อุณหภูมิ 1,175 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 นาที โดยเครื่องวิเคราะห์โครงสร้างผลึกด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ แสดงดังรูปที่ 4.9 พบว่าองค์ประกอบของชั้นของออกไซด์ประกอบด้วยเหล็กโครไมต์ (FeCr_2O_4) โครเมียมออกไซด์ (Cr_2O_3) และเหล็กออกไซด์ (Fe_2O_3) รูปแบบสเปกตรัมมาตรฐานของออกไซด์แสดงในภาคผนวก ก



รูปที่ 4.9 รูปแบบสเปกตรัมของออกไซด์บนเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 304L ที่ผ่านการอบอ่อนที่อุณหภูมิ 1,175 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 นาที

4.4.2 กรณีการกัดกรวดด้วยสารละลายโซเดียมซัลเฟตที่ค่าศักย์ไฟฟ้า -0.1 V (Ag/AgCl) ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของชั้นของออกไซด์ที่เกิดขึ้นบนผิวเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 304L ที่ผ่านการอบอ่อนที่อุณหภูมิ 1,175 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 นาที โดยเครื่องวิเคราะห์โครงสร้างผลึกด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ แสดงดังรูปที่ 4.10 พบว่าองค์ประกอบของชั้นของออกไซด์ที่เหลือหลังการกัดกรวดด้วยสารละลายโซเดียมซัลเฟตที่ค่าศักย์ไฟฟ้า -0.1 V (Ag/AgCl) ประกอบด้วยเหล็กโครไมต์ (FeCr_2O_4) และโครเมียมออกไซด์ (Cr_2O_3)

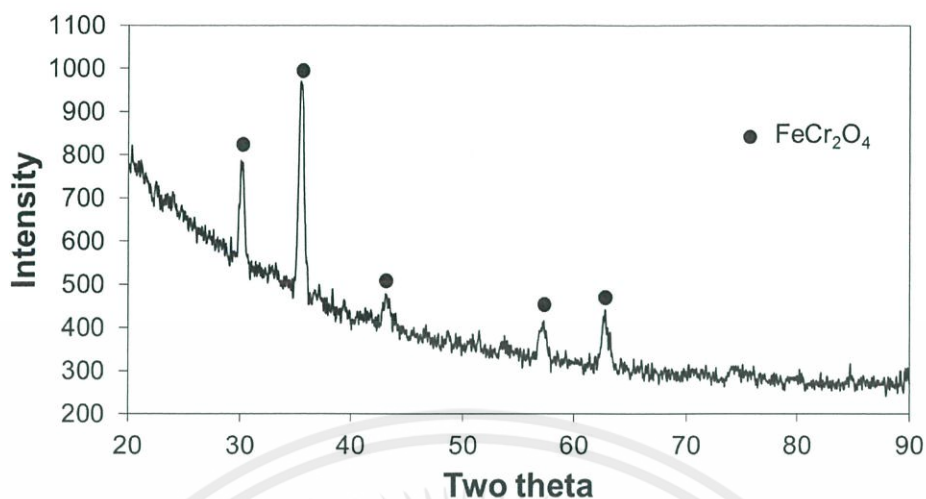
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.10 รูปแบบสเปกตรัมของออกไซด์บนเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 304L ที่ผ่านการอบอ่อนที่อุณหภูมิ 1,175 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 นาที หลังการกัดกรดด้วยกระแสไฟฟ้าในสารละลายโซเดียมซัลเฟตที่ค่าศักย์ไฟฟ้า -0.1 V (Ag/AgCl)

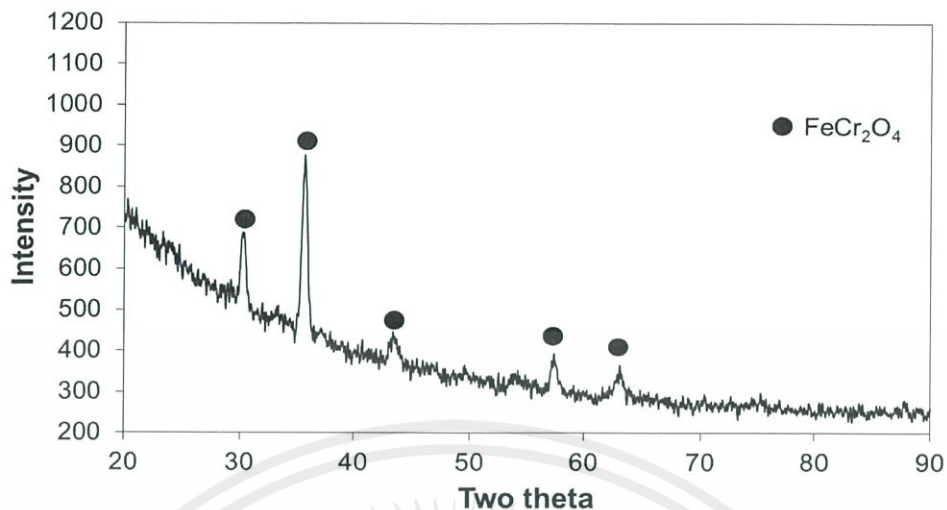
4.4.3 กรณีการกัดกรดด้วยสารละลายโซเดียมซัลเฟตที่ค่าศักย์ไฟฟ้า 1.0 V (Ag/AgCl)

รูปที่ 4.11 แสดงผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของชั้นของออกไซด์บนผิวเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 304L ที่ผ่านการอบอ่อนที่อุณหภูมิ 1,175 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 นาที โดยเครื่องวิเคราะห์โครงสร้างผลึกด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ เมื่อเปรียบเทียบองค์ประกอบของชั้นของออกไซด์กับรูปที่ 4.9 คือ ก่อนการกัดกรด และรูปที่ 4.10 คือ หลังการกัดกรดที่ค่าศักย์ไฟฟ้า -0.1 V (Ag/AgCl) พบว่าชั้นของออกไซด์ในรูปที่ 4.11 ประกอบด้วยเหล็กโครไมต์ (FeCr_2O_4) เท่านั้น แสดงว่าการกัดกรดด้วยค่าศักย์ไฟฟ้าสูงขึ้น สามารถกำจัดออกไซด์ได้มากขึ้น อธิบายได้ว่าเหล็กออกไซด์ (Fe_2O_3) ถูกกัดด้วยกรดได้ง่ายกว่าโครเมียมออกไซด์ (Cr_2O_3) และเหล็กโครไมต์ (FeCr_2O_4) เพราะเหล็กออกไซด์ (Fe_2O_3) มีเสถียรภาพต่ำกว่าโครเมียมออกไซด์ (Cr_2O_3) และเหล็กโครไมต์ (FeCr_2O_4) พิจารณาจากค่าพลังงานอิสระของกิบส์ (Gibbs Free Energy) ในภาคผนวก ข พลังงานอิสระของกิบส์ของเหล็กออกไซด์ (Fe_2O_3) มีค่า -742.2416 kJ/mol พลังงานอิสระของกิบส์ของโครเมียมออกไซด์ (Cr_2O_3) มีค่า $-1,053.1128$ kJ/mol และพลังงานอิสระของกิบส์ของเหล็กโครไมต์ (FeCr_2O_4) มีค่าเท่ากับ $-1,343.9008$ kJ/mol



รูปที่ 4.11 รูปแบบสเปกตรัมของเหล็กโครไมต์ (FeCr_2O_4) บนเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 304L ที่ผ่านการอบอ่อนที่อุณหภูมิ 1,175 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 นาที หลังการกัดกรวดด้วยกระแสไฟฟ้าในสารละลายโซเดียมซัลเฟตที่ค่าศักย์ไฟฟ้า 1.0 V (Ag/AgCl)

4.4.4 กรณีการกัดกรวดด้วยสารละลายโซเดียมซัลเฟตที่เติมสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ความเข้มข้น 10 กรัมต่อลิตร ที่ค่าศักย์ไฟฟ้า 1.2 V (Ag/AgCl) ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของชั้นออกไซด์ที่เกิดขึ้นบนผิวเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 304L ที่ผ่านการอบอ่อนที่อุณหภูมิ 1,175 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 นาที โดยเครื่องวิเคราะห์โครงสร้างผลึกด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ แสดงดังรูปที่ 4.12 พบว่าองค์ประกอบทางเคมีของชั้นออกไซด์ประกอบด้วยเหล็กโครไมต์ (FeCr_2O_4) เช่นเดียวกับการกัดกรวดด้วยกระแสไฟฟ้าที่ไม่เติมสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ค่าศักย์ไฟฟ้า 1.0 V (Ag/AgCl) แต่ Intensity ของเหล็กโครไมต์ (FeCr_2O_4) ในกรณีที่เติมสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ค่าศักย์ไฟฟ้า 1.2 V (Ag/AgCl) มีค่าต่ำกว่า แสดงว่าสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ช่วยกำจัดออกไซด์ได้เพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองที่พบว่าผิวของเหล็กกล้าไร้สนิมเรียบขึ้นเมื่อเติมสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต



รูปที่ 4.12 รูปแบบสเปกตรัมของเหล็กโครไมต์ (FeCr_2O_4) บนเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 304L ที่ผ่านการอบอ่อนที่อุณหภูมิ 1,175 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 นาที หลังการกัดกรวดด้วยกระแสไฟฟ้าในสารละลายโซเดียมซัลเฟตที่เติมสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ค่าศักย์ไฟฟ้า 1.2 V (Ag/AgCl)

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

องค์ประกอบทางเคมีของชั้นของสเกลออกไซด์บนผิวเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 304L ที่ผ่านการอบอ่อนที่อุณหภูมิ 1,175 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 นาที ประกอบด้วยเหล็กโครไมต์ (FeCr_2O_4) โครเมียมออกไซด์ (Cr_2O_3) และเหล็กออกไซด์ (Fe_2O_3)

การศึกษาผลของการเติมสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ความเข้มข้น 10 กรัมต่อลิตร ในการกำจัดชั้นของสเกลออกไซด์บนเหล็กกล้าไร้สนิม 304L ที่ผ่านการอบอ่อนที่อุณหภูมิ 1,175 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 นาที โดยการกักกรดด้วยกระแสไฟฟ้าในสารละลายโซเดียมซัลเฟต ความเข้มข้น 190 กรัมต่อลิตร ที่ pH 4 อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส สามารถสรุปได้ดังนี้

1. จากการทำให้โพเทนทิโอดินามิกโพลาริเซชัน ค่าศักย์ไฟฟ้าของการกักกร่อนของการกักกรดด้วยกระแสไฟฟ้าของเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 304L ที่ผ่านการอบอ่อนที่อุณหภูมิ 1,175 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 นาที กรณีที่เติมสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์มีค่าสูงกว่ากรณีที่ไม่เติมสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (0.4 V (Ag/AgCl) และ -0.45 V (Ag/AgCl) ตามลำดับ) ส่วนความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าของการกักกร่อนมีค่าต่ำกว่า (4.7×10^{-6} A/cm² และ 4×10^{-5} A/cm² ตามลำดับ)

2. การกักกรดด้วยกระแสไฟฟ้าในสารละลายโซเดียมซัลเฟตที่ค่าศักย์ไฟฟ้า -0.1 V (Ag/AgCl) สามารถกำจัดเหล็กออกไซด์ (Fe_2O_3) ภายในเวลา 60 วินาที

3. การกักกรดด้วยกระแสไฟฟ้าในสารละลายโซเดียมซัลเฟตที่ค่าศักย์ไฟฟ้า 1.0 V (Ag/AgCl) สามารถกำจัดเหล็กออกไซด์ (Fe_2O_3) และโครเมียมออกไซด์ (Cr_2O_3) ภายในเวลา 30 วินาที

4. การเติมสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ไม่มีช่วงพาสซีฟเกิดขึ้น แสดงว่าไม่มี Passive Film ที่ช่วยต้านทานการกักกร่อนที่ผิวของเหล็กกล้าไร้สนิมเกิดขึ้น ดังนั้นการใช้สารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ร่วมกับสารละลายโซเดียมซัลเฟตในการกักกรดด้วยกระแสไฟฟ้า สามารถช่วยให้เกิดการกักกรดได้ดี

5. การใช้สารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ร่วมกับสารละลายโซเดียมซัลเฟตที่ค่าศักย์ไฟฟ้า 1.2 V (Ag/AgCl) สามารถกำจัดเหล็กออกไซด์ (Fe_2O_3) และโครเมียมออกไซด์ (Cr_2O_3) ภายในเวลา 160 วินาที ซึ่งนานกว่าเมื่อใช้สารละลายโซเดียมซัลเฟตเพียงอย่างเดียว แสดงว่าแม้ว่าไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์จะเป็นตัวออกซิไดส์ที่แรง แต่ที่อุณหภูมิห้อง (25 องศาเซลเซียส) ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ไม่มีผลเร่งการกักกรดด้วยกระแสไฟฟ้าในสารละลายโซเดียมซัลเฟตให้เร็วขึ้น

อย่างไรก็ตามจากการวิเคราะห์ลักษณะสัญญาณวิทยาของออกไซด์บนเหล็กกล้าไร้สนิมด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด พบว่าสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ช่วยให้ผิวของเหล็กกล้าไร้สนิมเรียกว่ากรณีที่ไม่เติมสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์

5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 ควรศึกษาการกัดกรดด้วยกระแสไฟฟ้าของชั้นออกไซด์บนเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 304L ที่ผ่านการอบอ่อนที่อุณหภูมิ 1,175 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 นาที ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต ที่เติมสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ที่อุณหภูมิ 40-60 องศาเซลเซียส

5.2.2 ควรศึกษาผลของสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ต่อการกัดกรดด้วยกระแสไฟฟ้าของชั้นออกไซด์บนเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 304L ที่ผ่านการอบอ่อนที่อุณหภูมิ 1,175 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 นาที ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ชนิดอื่น เช่น กรดไฮโดรคลอริก กรดไนตริก กรดซัลฟิวริก



บรรณานุกรม

A. Iwamoto., Trans. Iron Steel Inst. Japan, 6, 188, 1966.

All About Hot-rolling Process, Manufacturing Metal Perforated Steel,
<http://www.steelperforatedsheet.com/steel-processing/all-about-hot-rolling-process> (Published 23 July 2015)

E. T. Shapovalov, A. P. Shlyamney, E. A. Ul'yanin, V. D. Nikitin, A. R. Fisher, D. B. Gol'dzon, L. V. Popova, and I. I. Milovanov, Steel USSR 12, 215–219, 1982.

E. Braun, Iron Steel Eng. 46 (4), 79–81, 1980.

F. Templeton, Iron and Steel, Te Ara - the Encyclopedia of New Zealand,
<http://www.TeAra.govt.nz/en/diagram/5885/electric-arc-furnace> (Published 12 June 2006)

G. Milazzo, S. Caroil, and V. K. Sharma, Table of Standard Electrode Potentials, Wiley, Chichester, 1978.

Hanawalt, et al., Anal. Chem., 10, 475, 1938.

J. A. Dean, Lange's Handbook of Chemistry, 12th ed, New York, 1979.

J. Beddoes, Introduction to Stainless Steels, ASM International, Ohio, 1999.

J. M. K. Hildén, J. V. A. Virtanen, and R. L. K. Ruoppa, J. Mat. Corros., 728–739, 2000.

J. R. Davis, Davis & Associates, Stainless Steels, ASM Specialty Handbook, ASM International, 1996.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- L. F. Li, and J. P. Celis, *Can. Metal. Q.*, 365–376, 2003.
- L. F. Li, M. Daerden, C. Peter, and J. P. Celis, *J. Electrochem. Soc.* 153, B145–B150, 2006.
- L. F. Li, P. Caenen, and J. P. Celis, *J. Electrochem. Soc.* 152, B352–B357, 2005.
- L. F. Li, P. Caenen, and M. F. Jiang, *J. Corros. Sci.*, 2824-2830, 2008.
- M. T. Postek, K. S. Howard, A. H. Johnson, and K. L. McMichael, *Scanning Electron Microscopy: A Student's Handbook*, 1980.
- Q. Xie, P. Y. Shi, C. J. Liu, and M. F. Jiang, *J. Iron Steel Res. Int.*, 778-783, 2016.
- Satyendra, Argon Oxygen Decarburization Process, ISPAT Guru, <http://ispatguru.com/argon-oxygen-decarburization-process> (Published 28 April 2014)
- S. G. Bratsch, *J. Phys. Chem. Ref. Data*, 18, 1-21, 1989.
- Stainless Steel Chemical Composition (JIS), Daido Steel, JISG4303, www.daido.co.jp/en/products/stainless/sus_jis (Published 2005)
- Standard Reference Test Method for Making Potentiostatic and Potentiodynamic Anodic Polarization Measurement, G5 Annual Book of ASTM Standards, 1992.
- T. Matsushashi, H. Okada, and S. Kiya, *Tetsu-to-Hagane* 90, 487–493, 2004.
- W. Homjabok, S. Permpoon, and G. Lothongkum, *J. Met. Matt. Min.* 20, 1-6, 2010.

กระบวนการผลิตเหล็กกล้าไร้สนิมรีดเย็นของบริษัทโพสโค-ไทยน็อกซ์. โพสโค-ไทยน็อกซ์.

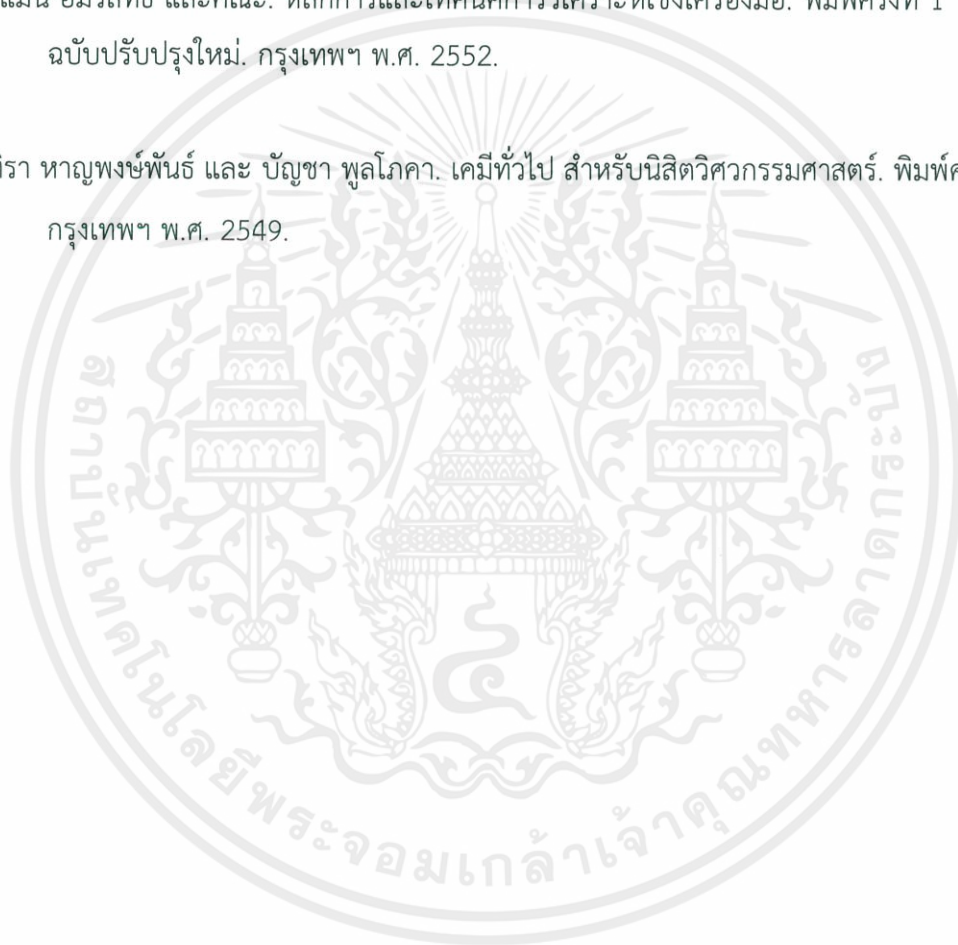
http://www.poscothainox.com/th/production_process.php (เผยแพร่ พ.ศ. 2557)

ดร. บัญชา ธนบุญสมบัติ. การศึกษาวัสดุโดยเทคนิคดิฟแฟรกชัน. กรุงเทพฯ พ.ศ. 2544

เสกศักดิ์ อัสวะวิสิทธิ์ชัย. การวิเคราะห์ความเสียหายทางโลหการ. พิมพ์ครั้งที่ 2 กรุงเทพฯ พ.ศ. 2557.

รศ. แม้น อมรสิทธิ์ และคณะ. หลักการและเทคนิคการวิเคราะห์เชิงเครื่องมือ. พิมพ์ครั้งที่ 1 ฉบับปรับปรุงใหม่. กรุงเทพฯ พ.ศ. 2552.

อินทิรา หาญพงษ์พันธ์ และ บัญชา พูลโกศา. เคมีทั่วไป สำหรับนิสิตวิศวกรรมศาสตร์. พิมพ์ครั้งที่ 8 กรุงเทพฯ พ.ศ. 2549.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก

รูปแบบสเปกตรัมมาตรฐานของออกไซด์

รูปแบบสเปกตรัมมาตรฐานของเหล็กโครไมต์ (FeCr_2O_4) โครเมียมออกไซด์ (Cr_2O_3) และเหล็กออกไซด์ (Fe_2O_3) จากข้อมูลมาตรฐานที่ตรวจวัดโดยองค์กร JCPDs (Joint Committee on Powder Diffraction Standard)

ก.1 รูปแบบสเปกตรัมมาตรฐานของเหล็กโครไมต์ (FeCr_2O_4)

ตารางที่ ก.1 รูปแบบสเปกตรัมมาตรฐานของเหล็กโครไมต์ (FeCr_2O_4) (A. Iwamoto., 1966)

No.	d [Å]	2Theta[deg]	I [%]
1	3.00	29.797	20
2	2.94	30.336	50
3	2.55	35.151	100
4	2.48	36.222	30
5	2.42	37.185	20
6	2.13	42.444	20
7	1.72	53.078	15
8	1.63	56.441	25
9	1.61	57.091	20
10	1.57	58.642	10
11	1.50	61.708	20
12	1.47	63.348	30

ก.2 รูปแบบ สเปกตรัมมาตรฐานของโครเมียมออกไซด์ (Cr_2O_3)

ตารางที่ ก.2 รูปแบบสเปกตรัมมาตรฐานของโครเมียมออกไซด์ (Cr_2O_3) (Hanawalt, et al., 1938)

No.	d [Å]	2Theta[deg]	I [%]
1	3.62	24.572	45
2	2.67	33.537	70
3	2.47	36.343	70
4	2.17	41.584	30
5	2.03	44.600	4

ตารางที่ ก.2 รูปแบบสเปกตรัมมาตรฐานของโครเมียมออกไซด์ (Cr_2O_3) (Hanawalt, et al., 1938) (ต่อ)

No.	d [Å]	2Theta[deg]	I [%]
6	1.81	50.375	45
7	1.67	54.937	100
8	1.58	58.357	6
9	1.47	63.204	30
10	1.43	65.186	45
11	1.29	73.330	16
12	1.24	76.809	6
13	1.21	79.079	6
14	1.17	82.352	5
15	1.15	84.107	6
16	1.12	86.907	6
17	1.09	89.934	12
18	1.04	95.578	10
19	1.03	96.811	2
20	0.95	108.357	6

ก.3 รูปแบบสเปกตรัมมาตรฐานของเหล็กออกไซด์ (Fe_2O_3)

ตารางที่ ก.3 รูปแบบสเปกตรัมมาตรฐานของเหล็กออกไซด์ (Fe_2O_3) (Hanawalt, et al., 1938)

No.	d [Å]	2Theta[deg]	I [%]
1	3.68	24.165	18
2	2.69	33.280	100
3	2.51	35.744	75
4	2.20	40.991	18
5	1.84	49.498	63
6	1.69	54.233	63
7	1.60	57.559	13
8	1.49	62.260	50
9	1.45	64.179	50
10	1.35	69.583	3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.3 รูปแบบสเปกตรัมมาตรฐานของเหล็กออกไซด์ (Fe_2O_3) (Hanawalt, et al., 1938) (ต่อ)

No.	d [Å]	2Theta[deg]	I [%]
11	1.31	72.033	18
12	1.26	75.374	13
13	1.23	77.549	3
14	1.19	80.678	8
15	1.16	83.219	5
16	1.14	85.017	13
17	1.10	88.898	10
18	1.06	93.221	8
19	0.96	106.719	10
20	0.95	108.357	5
21	0.90	117.716	3
22	0.88	122.171	5
23	0.84	132.990	5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข

ค่ามาตรฐานทางเทอร์โมไดนามิกส์

ตารางที่ ข.1 ค่ามาตรฐานทางเทอร์โมไดนามิกส์ (J. A. Dean, 1979)

Formula	State of Matter	Enthalpy (kJ/mol)	Entropy (mol/K)	Gibbs Free Energy (kJ/mol)
C	(s graphite)	0	5.6944	0
C ₁₂ H ₂₂ O ₁₁	(s)	-2225.4696	360.2424	-1544.6491
C ₂	(g)	837.6368	199.2839	781.5712
C ₂ ⁻	(g)	443.5040	196.48064	393.2960
C ₃	(g)	820.0640	237.2328	754.3752
C ₃ H ₆	(g cyclopropane)	53.3041	237.4420	104.3908
C ₃ O ₂	(l)	-117.2775	181.0835	-105.0184
C ₃ O ₂	(g)	-93.7216	276.3532	-109.8300
C ₄ H ₁₀ CH ₃ (CH ₂) ₂ CH ₃	(g n-butane)	-126.1476	-17.1544	310.1180
C ₄ H ₈	(g cyclobutane)	26.6520	265.3911	110.0392
C ₄ N ₂	(g)	533.4600	289.9930	510.8664
C ₅ H ₁₀	(g cyclopentane)	-77.2366	292.8800	38.6183
C ₅ H ₁₀	(l cyclopentane)	-105.7715	204.2628	36.4008
C ₆ H ₁₂	(g cyclohexane)	-123.1351	298.2355	31.7565
C ₆ H ₁₂	(l cyclohexane)	-156.2305	204.3465	26.6520
C ₆ H ₅ CH ₃	(l toluene)	12.0080	220.9570	113.7629
C ₆ H ₅ CH ₃	(g toluene)	49.9988	320.6617	122.0054
C ₆ H ₅ COOH	(s benzoic acid)	-385.0535	167.5692	-245.2660
C ₆ H ₅ OH	(g phenol)	-96.3575	315.5991	-32.8862
C ₆ H ₅ OH	(s phenol)	-165.0169	144.0132	-50.4172
C ₆ H ₆	(l benzene)	48.9946	173.2594	124.3484
C ₆ H ₆	(g benzene)	82.9268	269.1985	129.6621
C ₇ H ₁₄	(l cycloheptane)	-156.7744	242.5464	54.0572
C ₈ H ₁₆	(l cyclooctane)	-169.7867	262.0020	77.8224

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.1 ค่ามาตรฐานทางเทอร์โมไดนามิกส์ (J. A. Dean, 1979) (ต่อ)

Formula	State of Matter	Enthalpy (kJ/mol)	Entropy (mol/K)	Gibbs Free Energy (kJ/mol)
Ca	(s)	0	41.4216	0
Ca(CLO ₄) ₂ •4H ₂ O	(s)	-1948.9072	433.4624	-1476.8264
Ca(H ₂ PO ₄) ₂ •H ₂ O	(s)	-3409.6671	259.8264	-3058.4203
Ca(IO ₃) ₂	(s)	-1002.4864	230.1200	-839.3104
Ca(IO ₃) ₂ •6H ₂ O	(s)	-2780.6864	451.8720	-2267.7280
Ca(NO ₃) ₂	(s)	-938.3875	193.3008	-743.2039
Ca(NO ₃) ₂ •2H ₂ O	(s)	-1540.7580	269.4496	-1229.3428
Ca(NO ₃) ₂ •3H ₂ O	(s)	-1838.0312	319.2392	-1471.9312
Ca(NO ₃) ₂ •4H ₂ O	(s)	-2132.3337	375.3048	-1713.4735
Ca(OH) ₂	(s)	-986.1688	83.3871	-898.5140
Ca[Mg(CO ₃) ₂]	(s dolomite)	-2326.3040	155.1845	-2163.5464
Ca ⁺	(g)	775.2952	160.5358	733.4552
Ca ²⁺	(aq)	-542.8321	-53.1368	-553.5432
Ca ₁₀ (PO ₄) ₆ (OH) ₂	(s hydroxyapatite)	-13476.6640	780.7344	-12677.5200
Ca ₁₀ (PO ₄) ₆ F ₂	(s fluorapatite)	-13744.4400	775.7136	-12982.9520
Ca ₂ P ₂ O ₇	(s beta)	-3338.8320	189.2423	-3132.1424
Ca ₂ SiO ₄	(s beta)	-2307.4760	127.7375	-2192.8344
Ca ₂ SiO ₄	(s gamma)	-2317.9360	120.7920	-2201.2024
Ca ₃ (AsO ₄) ₂	(s)	-3298.6656	225.9360	-3063.1064
Ca ₃ (PO ₄) ₂	(s beta)	-4120.8216	235.9776	-3884.8440
Ca ₃ (PO ₄) ₂	(s alpha)	-4109.9432	240.9147	-3875.6392
CaBr ₂	(g)	-384.9280	314.6368	-420.9522
CaBr ₂	(s)	-683.2472	129.7040	-664.1263
CaBr ₂	(l)	-662.9966	147.8625	-649.3149
CaBr ₂ •6H ₂ O	(s)	-2506.2160	410.0320	-2153.0864
CaC ₂	(s)	-59.8312	69.9564	-64.8520
CaC ₂ O ₄ •H ₂ O	(s)	-1674.8552	156.4816	-1513.9804
CaCl ₂	(s)	-795.7968	104.6000	-748.0992

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.1 ค่ามาตรฐานทางเทอร์โมไดนามิกส์ (J. A. Dean, 1979) (ต่อ)

Formula	State of Matter	Enthalpy (kJ/mol)	Entropy (mol/K)	Gibbs Free Energy (kJ/mol)
CaCl ₂	(l)	-774.0400	123.8464	-732.2000
CaCl ₂	(g)	-471.5368	289.9512	-479.0680
CaCO ₃	(s aragonite)	-1207.1258	88.7008	-1127.7972
CaCO ₃	(s calcite)	-1206.9166	92.8848	-1128.8432
CaCrO ₄	(s)	-1379.0464	133.8880	-1277.3752
CaF ₂	(g)	-782.4080	273.6336	-794.9600
CaF ₂	(s)	-1219.6360	68.8686	-1167.3360
CaF ₂	(l)	-1184.0720	92.5919	-1142.2320
CaH ₂	(s)	-186.1880	41.8400	-147.2768
CaHPO ₄	(s)	-1814.3916	111.3780	-1681.2567
CaHPO ₄ •2H ₂ O	(s)	-2403.5824	189.4515	-2154.7600
CaI ₂	(l)	-500.1553	178.9496	-506.5150
CaI ₂	(s)	-536.8072	145.2684	-533.1252
CaI ₂	(g)	-258.1528	327.4398	-308.7792
CaMoO ₄	(s)	-1541.3856	122.5912	-1434.6936
CaO	(s)	-635.1312	38.1999	-603.5420
CaO	(l)	-557.3506	62.2997	-532.9579
CaO•2Al ₂ O ₃	(s)	-3977.7288	177.8200	-3770.6208
CaO•2B ₂ O ₃	(s)	-3360.2540	134.7248	-3167.1206
CaO•Al ₂ O ₃	(s)	-2326.3040	114.2232	-2208.7336
CaO•B ₂ O ₃	(s)	-2030.9554	104.8510	-1924.0960
CaO•Fe ₂ O ₃	(s)	-1520.3400	145.3521	-1412.8112
CaO•MgO•2SiO ₂	(s diopside)	-3206.1992	142.9254	-3032.1448
CaO•V ₂ O ₅	(s)	-2329.2746	179.0752	-2169.6968
CaS	(s)	-474.8840	56.4840	-469.8632
CaSe	(s)	-368.1920	66.9440	-363.1712
CaSeO ₄ •2H ₂ O	(s)	-1706.6536	221.7520	-1486.9936
CaSiO ₃	(s wollastonite)	-1634.9398	81.9227	-1549.7117

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้ใช้ประโยชน์ทางการค้า

ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.1 ค่ามาตรฐานทางเทอร์โมไดนามิกส์ (J. A. Dean, 1979) (ต่อ)

Formula	State of Matter	Enthalpy (kJ/mol)	Entropy (mol/K)	Gibbs Free Energy (kJ/mol)
CaSO ₄	(s alpha soluble)	-1425.2377	108.3656	-1313.4831
CaSO ₄	(s beta soluble)	-1420.8027	108.3656	-1309.0480
CaSO ₄ •0.5H ₂ O	(s beta micro)	-1574.6484	134.3064	-1435.8651
CaSO ₄ •0.5H ₂ O	(s alpha macro)	-1576.7404	130.5408	-1436.8274
CaSO ₄ •2H ₂ O	(s)	-2022.6292	194.1376	-1797.4464
CaTiO ₃	(s perovskite)	-1660.6296	93.6379	-1575.2760
CaTiSiO ₅	(s sphene)	-2603.2848	129.2019	-2461.8656
CaWO ₄	(s)	-1645.1488	126.3986	-1538.4986
CaZrO ₃	(s)	-1766.9032	100.0812	-1681.1312
CBr	(g)	510.4480	233.4672	464.4240
CCL	(g)	502.0800	224.3042	468.6080
Cd	(s)	0	51.7560	0
Cd(CN) ₄ ²⁻	(aq)	428.0232	322.1680	507.5192
Cd(NH ₃) ₄ ²⁺	(aq)	-450.1984	336.3936	-226.3544
CdBr ₂	(s)	-316.1848	137.2352	-296.3108
CdBr ₂ •4H ₂ O	(s)	-1492.5583	316.3104	-1248.0328
CdCl ₂	(s)	-391.4968	115.2692	-343.9666
CdCl ₂ •2.5H ₂ O	(s)	-1131.9393	227.1912	-944.0944
CdCl ₃ ⁻	(aq)	-561.0744	202.9240	-487.0176
CdCO ₃	(s)	-750.6096	92.4664	-669.4400
CdF ₂	(s)	-700.4016	77.4040	-647.6832
CdI ₂	(s)	-202.9240	161.0840	-201.3759
CdI ₄ ²⁻	(aq)	-341.8328	326.3520	-315.8920
CdO	(s)	-258.1528	54.8104	-228.4464
CdS	(s)	-161.9208	64.8520	-156.4816
CdSb	(s)	-14.3929	92.8848	-13.0122
CdSeO ₃	(s)	-575.3000	142.2560	-497.8960

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.1 ค่ามาตรฐานทางเทอร์โมไดนามิกส์ (J. A. Dean, 1979) (ต่อ)

Formula	State of Matter	Enthalpy (kJ/mol)	Entropy (mol/K)	Gibbs Free Energy (kJ/mol)
CdSeO ₄	(s)	-633.0392	164.4312	-531.7864
CdSiO ₃	(s)	-1189.0928	97.4872	-1105.4128
CdSO ₄	(s)	-933.2830	123.0388	-822.7836
CdSO ₄ •8/3H ₂ O	(s)	-1729.3727	229.6304	-1465.3372
CdSO ₄ •H ₂ O	(s)	-1239.5518	154.0297	-1068.8446
CdTe	(s)	-92.4664	100.4160	-92.0480
CF	(g)	255.2240	212.9237	221.7520
CF ⁺	(g)	1149.3448	201.2504	1115.0360
CF ₂	(g)	-182.0040	240.7055	-191.6272
CF ₂ ⁺	(g)	941.8184	246.6468	924.2456
CH ₃ (CH ₂) ₂ CH ₂ OH	(g 2-butanol)	-274.6796	362.7528	-150.7913
CH ₃ (CH ₂) ₂ CH ₂ OH	(l 1-butanol)	-327.1051	226.3544	-162.5065
CH ₃ (CH ₂) ₂ CH ₃	(l n-butane)	-147.6533	230.9568	-15.0624
CH ₃ (CH ₂) ₃ CH ₃	(g pentane)	-146.4400	348.9456	-8.3680
CH ₃ (CH ₂) ₄ CH ₃	(g hexane)	-167.1926	388.4007	-0.2510
CH ₃ (CH ₂) ₄ CH ₃	(l hexane)	-198.8236	296.0598	-3.8074
CH ₃ (CH ₂) ₅ CH ₃	(g heptane)	-187.7779	427.8976	7.9914
CH ₃ (CH ₂) ₅ CH ₃	(l heptane)	-224.3879	326.0172	1.7572
CH ₃ (CH ₂) ₆ CH ₃	(l octane)	-249.9521	357.7320	7.4056
CH ₃ (CH ₂) ₆ CH ₃	(g octane)	-208.4468	466.7252	16.4012
CH ₃ (CH ₂) ₇ CH ₃	(l nonane)	-275.4745	393.6725	11.7570
CH ₃ (CH ₂) ₇ CH ₃	(g nonane)	-229.0321	505.6782	24.8111
CH ₃ (CH ₂) ₈ CH ₃	(l decane)	-301.0388	425.5128	-17.5309
CH ₃ CH ₂ CH ₂ OH	(l 1-propanol)	-304.0094	194.5560	-170.6235
CH ₃ CH ₂ CH ₂ OH	(g 1-propnaol)	-256.3955	324.7202	-161.7952
CH ₃ CH ₂ CH ₃	(g propane)	-103.8468	270.2027	-23.5559
CH ₃ CH ₂ CHOHCH ₃	(g 2-butanol)	-292.6289	358.9872	-167.6110

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.1 ค่ามาตรฐานทางเทอร์โมไดนามิกส์ (J. A. Dean, 1979) (ต่อ)

Formula	State of Matter	Enthalpy (kJ/mol)	Entropy (mol/K)	Gibbs Free Energy (kJ/mol)
CH ₃ CH ₂ CHOHCH ₃	(l 2-butanol)	-342.5859	225.0992	-177.0250
CH ₃ CH ₂ OCH ₂ CH ₃	(l diethyl ether)	-273.2152	253.1320	-116.6499
CH ₃ CH ₂ OCH ₂ CH ₃	(g diethyl ether)	-252.1278	342.6696	-122.3401
CH ₃ CH ₂ OH	(l ethanol)	-276.9808	161.0421	-174.1799
CH ₃ CH ₂ OH	(g ethanol)	-234.4295	282.5873	-167.9039
CH ₃ CH ₃	(g ethane)	-84.6841	229.1158	-32.8025
CH ₃ CHOHCH ₃	(g 2-propanol)	-272.4202	309.9088	-173.3849
CH ₃ CHOHCH ₃	(l 2-propanol)	-317.8584	180.5814	-180.2885
CH ₃ COCH ₃	(l acetone)	-247.6091	200.4136	-155.7284
CH ₃ COCH ₃	(g acetone)	-216.6475	294.9301	-153.0507
CH ₃ COOH	(l acetic acid)	-484.1306	159.8288	-389.9488
CH ₃ COOH	(g acetic acid)	-434.8431	282.5036	-376.6855
CH ₃ OCH ₃	(g dimethyl ether)	-184.0541	267.0647	-112.9261
CH ₃ OH	(g methanol)	-201.0830	239.7013	-162.4228
CH ₃ OH	(l methanol)	-239.0319	127.2354	-166.8160
CH ₄	(g methane)	-74.8517	186.2716	-50.8356
Cl ⁻	(aq)	-167.1508	56.4840	-131.2520
Cl ₂	(g)	0	222.9653	0
Cl ₂ F ₆	(g)	-339.3224	489.5280	-237.2328
Cl ₂ O	(g)	80.3328	267.8596	97.4872
ClF	(g)	-54.47568	217.7772	-55.9400
ClF ₃	(g)	-158.9920	281.4995	-118.8256
ClF ₃ •HF	(g)	-450.6168	359.8240	-384.0912
ClF ₅	(g)	-238.488	310.62016	-146.4400
ClO	(g)	101.2109	226.5636	97.4872
ClO ⁻	(aq)	-107.1104	41.8400	-36.8192
ClO ₂	(g)	102.508	256.77208	120.3318

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.1 ค่ามาตรฐานทางเทอร์โมไดนามิกส์ (J. A. Dean, 1979) (ต่อ)

Formula	State of Matter	Enthalpy (kJ/mol)	Entropy (mol/K)	Gibbs Free Energy (kJ/mol)
ClO_2^-	(aq)	-66.5256	101.2528	17.1544
ClO_3^-	(aq)	-99.1608	162.3392	-3.3472
ClO_3F	(g)	-27.15416	278.8636	44.8524
ClO_4^-	(aq)	-129.3274	182.0040	-8.6190
CN	(g)	435.1360	202.5474	405.0112
CN^+	(g)	1802.8856	213.3421	1763.1376
CN^-	(aq)	150.6240	94.1400	172.3808
CN^-	(g)	60.6680	195.8112	38.7438
CN_2	(g)	581.5760	231.5844	573.2080
CNBr	(g)	181.3764	247.1488	160.6237
CNCl	(g)	132.2144	235.4755	125.4781
CNI	(g)	225.0992	256.6047	196.1459
CNI	(s)	160.2472	128.8672	169.3683
Co	(s hexagonal)	0	30.0411	0
$\text{Co}(\text{IO}_3)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	(s)	-1081.9824	267.7760	-795.7968
$\text{Co}(\text{NH}_3)_6^{3+}$	(aq)	-584.9232	146.4400	-157.3184
$\text{Co}(\text{OH})_2$	(s pink)	-539.7360	79.4960	-454.3824
Co^{2+}	(aq)	-58.1576	-112.9680	-54.3920
Co^{3+}	(aq)	92.0480	-305.432	133.888
CO_2	(g)	-393.5052	213.6768	-394.3838
CO_2	(aq undissoc)	-413.7976	117.5704	-386.0158
CO_3^{2-}	(aq)	-677.1385	-56.9024	-527.8952
Co_3O_4	(s)	-910.0200	114.2232	-794.9600
COBr_2	(g)	-96.2320	308.9884	-110.8760
CoCl_2	(s)	-312.5448	109.1605	-269.8680
COCl_2	(g)	-220.9152	283.7588	-206.7732
$\text{CoCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	(s)	-922.9904	188.2800	-764.8352

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.1 ค่ามาตรฐานทางเทอร์โมไดนามิกส์ (J. A. Dean, 1979) (ต่อ)

Formula	State of Matter	Enthalpy (kJ/mol)	Entropy (mol/K)	Gibbs Free Energy (kJ/mol)
CoCl ₂ •6H ₂ O	(s)	-2115.4304	343.0880	-1725.4816
CoCl ₃	(g)	-163.5944	334.0924	-154.5151
CoF ₂	(s)	-692.0336	81.9645	-647.2648
COF ₂	(g)	-640.1520	258.7385	-624.5875
CoF ₃	(s)	-790.7760	94.5584	-719.6480
CoO	(s)	-237.9440	52.9694	-214.2208
COS	(g)	-138.4067	231.4588	-165.6445
CoSi	(s)	-100.4160	43.0952	-98.7420
CoSO ₄	(s)	-888.2632	117.9888	-782.4080
CoSO ₄ •6H ₂ O	(s)	-2683.6176	367.6062	-2235.7204
CoSO ₄ •7H ₂ O	(s)	-2979.9284	406.0572	-2473.8318
Cr	(s)	0	23.6186	0
Cr ₂₃ C ₆	(s)	-364.8448	610.0272	-373.6312
Cr ₂ N	(s)	-125.5200	64.8520	-102.2151
Cr ₂ O ₃	(s)	-1134.7008	81.1696	-1053.1128
Cr ₂ O ₃	(l)	-1018.3856	125.6036	-950.0608
Cr ₂ O ₇ ²⁻	(aq)	-1490.3408	261.9184	-1301.2240
Cr ₃ C ₂	(s)	-85.3536	85.4372	-86.3159
Cr ₇ C ₃	(s)	-161.9208	200.8320	-166.9416
CrCl ₂	(s)	-395.3880	115.3110	-356.0584
CrCl ₃	(s)	-556.4720	123.0096	-486.1808
CrF ₃	(s)	-1158.9680	93.8889	-1087.8400
CrN	(g)	505.0088	230.4547	471.9133
CrN	(s)	-117.1520	37.6978	-92.8011
CrO	(g)	188.2800	239.1574	154.5988
CrO ₂	(g)	-75.3120	269.1148	-87.3619
CrO ₂ Cl ₂	(l)	-579.4840	221.7520	-510.8664

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.1 ค่ามาตรฐานทางเทอร์โมไดนามิกส์ (J. A. Dean, 1979) (ต่อ)

Formula	State of Matter	Enthalpy (kJ/mol)	Entropy (mol/K)	Gibbs Free Energy (kJ/mol)
CrO_2Cl_2	(g)	-538.0624	329.6992	-501.6616
CrO_3	(g)	-292.8800	266.0605	-273.4662
CrO_4^{2-}	(aq)	-881.1504	50.2080	-727.8486
Cs	(s)	0	85.1444	0
Cs^+	(aq)	458.5664	169.7239	427.1864
CS_2	(g)	117.0683	237.7767	66.9021
CS_2	(l)	89.7049	151.3352	65.2704
Cs_2O	(g)	-92.0480	317.9840	-104.6000
$\text{CsAl}(\text{SO}_4)_2 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$	(s)	-6064.7080	686.1760	-5098.2040
CsBr	(s)	-405.6806	113.3864	-384.9280
CsCl	(s)	-442.8345	101.1816	-414.2160
CsCl	(l)	-434.2992	101.7130	-406.2664
CsCl	(g)	-240.1616	255.9771	-257.7344
CsF	(s)	-554.7984	88.2824	-525.5104
CsF	(l)	-543.8363	90.0815	-515.0922
CsF	(g)	-356.4768	243.0904	-373.2128
CsH	(g)	121.3360	214.4300	101.6712
CsI	(s)	-336.8120	125.5200	-333.7158
CsOH	(s)	-416.7264	98.7424	-362.3344
CsOH	(g)	-259.4080	255.1403	-259.8264
CsOH	(l)	-406.0153	118.4490	-365.8908
Cu	(s)	0	33.1498	0
$\text{Cu}(\text{C}_2\text{O}_4)_2^{2-}$	(aq)	-1592.0120	146.4400	-1335.9512
$\text{Cu}(\text{IO}_3)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$	(s)	-692.0336	247.2744	-468.6080
$\text{Cu}(\text{NH}_3)^{2+}$	(aq)	-38.9112	12.1336	15.5644
$\text{Cu}(\text{NH}_3)_2^{2+}$	(aq)	-142.2560	111.2944	-30.4595
$\text{Cu}(\text{NH}_3)_3^{2+}$	(aq)	-245.6008	199.5768	-73.1363

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.1 ค่ามาตรฐานทางเทอร์โมไดนามิกส์ (J. A. Dean, 1979) (ต่อ)

Formula	State of Matter	Enthalpy (kJ/mol)	Entropy (mol/K)	Gibbs Free Energy (kJ/mol)
$\text{Cu}(\text{NH}_3)_4^{2+}$	(aq)	-348.5272	273.6336	-111.2944
$\text{Cu}(\text{OH})_2$	(s)	-450.1984	108.3656	-372.7944
Cu^+	(aq)	71.6719	40.5848	49.9988
Cu^{2+}	(aq)	64.7683	-99.5792	65.5214
Cu_2	(g)	484.1724	241.4586	431.9561
Cu_2O	(s)	-168.6152	93.1358	-146.0216
Cu_2S	(s alpha)	-79.4960	120.9176	-86.1904
CuBr	(s)	-104.6000	96.1064	-100.8344
CuCl	(s)	-137.2352	86.1904	-119.8716
CuCl_2	(s)	-205.8528	108.0727	-161.9208
$\text{CuCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	(s)	-821.3192	167.3600	-656.0512
CuCN	(s)	94.9768	89.9978	108.3656
$\text{CuCO}_3 \cdot \text{Cu}(\text{OH})_2$	(s malachite)	-1051.4392	186.1880	-893.7024
CuF	(s)	-192.4640	64.8520	-171.5440
CuF_2	(s)	-548.9408	68.6176	-499.1512
CuFe_2O_4	(s)	-965.2069	141.0008	-858.8078
CuFeO_2	(s)	-532.6232	88.7008	-479.9048
CuN_3	(s)	279.0728	100.4160	344.7616
CuO	(s)	-157.3184	42.6349	-129.7040
CuS	(s)	-53.1368	66.5256	-53.5552
CuSO_4	(s)	-771.3622	108.7840	-661.9088
$\text{CuSO}_4 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$	(s)	-1684.3110	221.3336	-1400.1756
$\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$	(s)	-2279.6524	300.4112	-1880.0552
$\text{CuSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$	(s)	-1085.8316	146.0216	-918.2206
F	(g)	78.9939	158.6572	61.9232
F^-	(g)	-255.6424	145.4776	-262.3368
F_2	(g)	0	202.7148	0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.1 ค่ามาตรฐานทางเทอร์โมไดนามิกส์ (J. A. Dean, 1979) (ต่อ)

Formula	State of Matter	Enthalpy (kJ/mol)	Entropy (mol/K)	Gibbs Free Energy (kJ/mol)
Fe	(s alpha)	0	27.2796	0
Fe	(l)	13.1293	34.2878	11.0499
Fe(CN) ₆ ³⁻	(aq)	561.9112	270.2864	729.2712
Fe(CN) ₆ ⁴⁻	(aq)	455.6376	94.9768	694.9205
Fe(CO) ₅	(l)	-774.0400	338.0672	-705.4224
Fe(CO) ₅	(g)	-733.8736	445.1776	-697.2636
Fe(OH) ²⁺	(aq)	-290.7880	-142.2560	-229.4087
Fe ²⁺	(aq)	-89.1192	-137.6536	-78.8684
Fe ³⁺	(aq)	-48.5344	-315.8920	-4.6024
Fe ₂ (SO ₄) ₃	(s)	-2581.5280	307.5240	-2263.1256
Fe ₂ O ₃	(s hematite)	-824.2480	87.4037	-742.2416
Fe ₂ SiO ₄	(s fayalite)	-1479.8808	145.1848	-1379.0464
Fe ₃ C	(s alpha-cementite)	25.1040	104.6000	20.0832
Fe ₃ O ₄	(s magnetite)	-1118.3832	146.4400	-1015.4568
Fe ₃ Si	(s)	-93.7216	103.7632	-94.5584
Fe ₄ N	(s)	-10.4600	156.0632	3.7656
Fe ₇ S ₈	(s pyrrhotite)	-736.3840	485.7624	-748.5176
FeAl ₂ O ₄	(s)	-1966.4800	106.2736	-1849.3280
FeAsS	(s)	-41.8400	121.3360	-50.2080
FeBr ₂	(s)	-249.7848	140.6660	-237.2328
FeCl ₂	(s)	-341.7909	117.9469	-302.3358
FeCl ₃	(s)	-399.4883	142.2560	-334.0505
FeCO ₃	(s siderite)	-740.5680	92.8848	-666.7204
FeCr ₂ O ₄	(s)	-1444.7352	146.0216	-1343.9008
FeF ₂	(s)	-702.9120	86.9853	-661.0720
FeF ₃	(s)	-1041.8160	98.3240	-970.6880
FeI ₂	(s)	-104.6000	167.3600	-112.9680

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.1 ค่ามาตรฐานทางเทอร์โมไดนามิกส์ (J. A. Dean, 1979) (ต่อ)

Formula	State of Matter	Enthalpy (kJ/mol)	Entropy (mol/K)	Gibbs Free Energy (kJ/mol)
FeMoO ₄	(s)	-1075.2880	129.2856	-974.8720
FeO	(s)	-271.9600	60.7516	-251.4584
FeOH ⁺	(aq)	-324.6784	-29.2880	-277.3992
FePO ₄ •2H ₂ O	(s strengite)	-1888.2392	171.2511	-1657.7008
FeS	(s pyrrhotite)	-99.9976	60.2914	-100.4160
FeS ₂	(s pyrite)	-178.2384	52.9276	-166.9416
FeSi	(s)	-73.6384	46.0240	-73.6384
FeSi ₂	(s beta-lebanite)	-81.1696	55.6472	-78.2408
FeSO ₄	(s)	-928.4296	120.9176	-825.0848
FeSO ₄ •7H ₂ O	(s)	-3014.5720	409.1952	-2510.2744
FeWO ₄	(s)	-1154.7840	131.7960	-1054.3680

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้