

การศึกษาผลของแมงกานีสและทองแดงต่อการกำจัดสเกลออกไซด์  
ของเหล็กกล้าไร้สนิมรีดร้อนเกรด 304L ในสารละลายผสม HCl และ H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>

EFFECTS OF Mn AND Cu ON DESCALING OF HOT-ROLLED 304L STAINLESS  
STEEL IN HCl AND H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> MIXTURES



บุญญา เบญจมาลัย  
BOONYAPA BENJAMALAI

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี

คณะวิศวกรรมศาสตร์


สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ.2566

KMITL-2023-EN-M-220-122

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

EFFECTS OF Mn AND Cu ON DESCALING OF HOT-ROLLED 304L STAINLESS  
STEEL IN HCl AND H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> MIXTURES



BOONYAPA BENJAMALAI

A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF THE REQUIREMENTS  
FOR THE DEGREE OF MASTER OF ENGINEERING IN CHEMICAL ENGINEERING

SCHOOL OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

2023

KMITL-2023-EN-M-220-122

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2023

SCHOOL OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การศึกษาผลของแมงกานีสและทองแดงต่อการกำจัดสเกลออกไซด์ของเหล็กกล้าไร้สนิมรีดร้อนเกรด 304L ในสารละลายผสม HCl และ H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>
นักศึกษา	นางสาวบุญญา เบญจมาลัย
รหัสประจำตัว	61601082
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมเคมี
พ.ศ.	2566
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	ศ.ดร.อัญชลีพร วาริตสวัสดิ์ หล่อทองคำ
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม	ศ.ดร.กอบบุญ หล่อทองคำ

#### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาผลของแมงกานีสและทองแดงต่อพฤติกรรมการกำจัดสเกลออกไซด์ออกจากผิวเหล็กกล้าไร้สนิมรีดร้อนหรือเหล็กคอยล์ดำ (Black Coil) เกรด 304L และได้เหล็กคอยล์ขาว (White Coil) ที่มีพื้นผิวเรียบและมันวาวสำหรับการใช้งาน เหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 304L ที่ใช้ทดสอบได้รับจากโรงงานผลิต มีองค์ประกอบของแมงกานีส (Mn) 1.08-1.71 wt% และทองแดง (Cu) 0.22-0.40 wt% การกำจัดสเกลออกไซด์ใช้วิธีเชิงเคมีด้วยการกัดกรวดร่วมกับกระแสไฟฟ้าในสารละลายอิเล็กโทรไลต์โดยใช้เทคนิคโพเทนทิโอสแตติกโพลาริเซชันที่อุณหภูมิ 25 °C สารละลายอิเล็กโทรไลต์ ได้แก่ กรดไฮโดรคลอริก (HCl) 0.50 M และสารละลายผสมของ HCl 0.5 M กับสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>) 0.50, 0.88 และ 1.76 M ผลการศึกษาเส้นโค้งโพลาริเซชันของเหล็กคอยล์ดำและเหล็กคอยล์ขาวที่ได้จากการกัดกรวดในสารละลายผสม HCl-H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> ที่ทุกความเข้มข้น ไม่พบช่วงพาสซีฟ (Passive Region) ในการทดสอบกับเหล็กคอยล์ดำ เมื่อความเข้มข้นของ H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> เพิ่มขึ้น พบว่าอัตราการกำจัดสเกลออกไซด์หรืออัตราการกัดกร่อน (Corrosion Rate: CR) และศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อน (E<sub>corr</sub>) เพิ่มขึ้น อัตราการกำจัดสเกลออกไซด์จากตัวอย่างเหล็กคอยล์ดำที่มี Mn ต่ำที่สุด (1.08%Mn0.23%Cu) สูงกว่าเหล็กคอยล์ดำที่มี Mn สูงกว่า (1.20, 1.45 และ 1.71 wt%) อย่างไรก็ตามพบว่า Cu ไม่ส่งผลที่มีนัยสำคัญต่ออัตราการกำจัดสเกลออกไซด์ ส่วนการทดสอบกับเหล็กคอยล์ขาวในสารละลาย HCl 0.5 M เปรียบเทียบกับสารละลายผสมของ HCl 0.5 M กับสารละลาย H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 0.88 M พบว่าอัตราการกัดกร่อนใกล้เคียงกัน แต่กรณีที่ใช้สารละลายผสม HCl-H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> ตัวออกซิไดส์ H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> จะทำให้ชั้นฟิล์มพาสซีฟบนพื้นผิวเหล็กคอยล์ขาวสลายตัว

เพิ่มขึ้นและพบการกัดกร่อนแบบรูเข็ม โดยสรุปศักยภาพไฟฟ้าการกัดกร่อนของเหล็กคอลล่าและเหล็กคอลล่า  
ขาวมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อเติม  $H_2O_2$  ในสารละลายกรด HCl แสดงว่าเกิดปฏิกิริยาแคโทดิกเพิ่มขึ้นเนื่องจาก  
 $H_2O_2$  เพิ่มการละลายของออกซิเจนในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ ตัวอย่างเหล็กคอลล่าดำและเหล็กคอลล่าขาว  
ที่มีปริมาณ Mn สูง พบปริมาณออกไซด์ของ Mn มากกว่า และมีศักยภาพไฟฟ้าการกัดกร่อนสูงกว่าตัวอย่างที่มี  
ปริมาณ Mn ต่ำ ( $1.08\%Mn0.23\%Cu$ ) ทำให้อัตราการสลายตัวของสเกลออกไซด์ต่ำกว่า

**คำสำคัญ:** การกำจัดสเกลออกไซด์ กระบวนการกัดกร่อนร่วมกับกระแสไฟฟ้า เหล็กกล้าไร้สนิมรีดร้อนเกรด  
304L ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ โพลาริเซชัน



<b>Thesis</b>	Effects of Mn and Cu on Descaling of Hot-rolled 304L Stainless Steel in HCl and H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> Mixtures
<b>Student</b>	Miss. Boonyapa Benjamalai
<b>Student ID.</b>	61601082
<b>Degree</b>	Master of Engineering
<b>Program</b>	Chemical Engineering
<b>Year</b>	2023
<b>Thesis Advisor</b>	Prof. D.Eng. Anchaleeporn Waritswat Lothongkum
<b>Thesis Co-advisor</b>	Prof. Dr.-Ing. Gobboon Lothongkum

### ABSTRACT

This work studies the effects of Mn and Cu on descaling behavior of hot-rolled 304L stainless steel or black coil to obtain smooth and glossy-surface white coil. The AISI 304L black and white coils from a co-operated company contain 1.08-1.71%Mn and 0.22-0.40%Cu (wt%). Descaling process by electrolytic pickling and potentiodynamic polarization technique at 25 °C was investigated. The pickling solutions were 0.5 M HCl, and 0.5 M HCl mixed with H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> of 0.5, 0.88 and 1.76 M. The polarization curves of black and white coil samples measured in HCl-H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> mixture showed no passive regions. The descaling rate or the corrosion rate, and the corrosion potential or E<sub>corr</sub> of black coil samples increased with H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> concentration. Low-Mn sample, that is 1.08%Mn0.23%Cu sample, showed higher descaling rate than high-Mn samples (1.20, 1.45 และ 1.71 wt%). No effect of Cu on the descaling rate was observed. For white coil samples, the corrosion rates, which were observed by using 0.5 M HCl, and 0.5 M HCl mixed with H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> of 0.88 M, were almost the same. The pitting corrosion was found on white samples indicating that H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> enhanced the elimination of passive films on white coil surfaces. In conclusion, the corrosion potentials of black and white coil samples increased when adding H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> in HCl solution as the cathodic reaction increased due to an increase in dissolved oxygen in the electrolyte. High-Mn black and white coil samples having high Mn-oxides showed higher

corrosion potentials and lower corrosion descaling rates of the oxide scales than the 1.08%Mn0.23%Cu sample having low Mn-oxides.

**Keywords:** Descaling, Electrolytic Pickling, Hot-rolled 304L Stainless Steel, Hydrogen Peroxide, Polarization



## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงด้วยดีจากความช่วยเหลือของบุคคลต่าง ๆ และได้รับความอนุเคราะห์จากหลายหน่วยงาน ผู้วิจัยขอขอบพระคุณคณะผู้บริหารบริษัท โพลโค-ไทยน็อกซ์ จำกัด (มหาชน) ที่ให้ความอนุเคราะห์ชิ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิมรีดร้อนเกรด 304L ขอขอบพระคุณ ศ.ดร.อัญชลีพร วาริตสวัสดิ์ หล่อทองคำ อาจารย์ที่ปรึกษางานวิจัย และ ศ.ดร.กอบบุญ หล่อทองคำ อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ที่ได้ให้คำปรึกษา ตรวจสอบแก้ไขวิทยานิพนธ์ และชี้แนะแนวทางการแก้ปัญหาด้วยความเอาใจใส่ตลอดระยะเวลาทำงานวิจัย ผู้วิจัยรู้สึกซาบซึ้งในความเอาใจใส่ของท่าน และขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมโลหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และวิทยาลัยนวัตกรรมการผลิตขั้นสูง สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้ความอนุเคราะห์การใช้เครื่องมือวิเคราะห์ต่าง ๆ ขอขอบคุณ Dr. Mark Francis Hoolahan สำนักงานบริหารวารสารวิชาการ ที่กรุณาตรวจภาษาอังกฤษเบื้องต้นเพื่อการตีพิมพ์บทความวิชาการ

ขอขอบคุณอาจารย์ทุกท่านที่อบรมสั่งสอน พี่ เพื่อน น้อง และเจ้าหน้าที่ที่ให้ความช่วยเหลือในด้านต่าง ๆ และเป็นกำลังใจในการทำงาน

ขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่ และทุกคนในครอบครัวที่คอยอยู่เคียงข้าง และให้กำลังใจพร้อมการสนับสนุนทุกด้านมาโดยตลอด

ประโยชน์อันใดที่เกิดขึ้นจากวิทยานิพนธ์นี้ ย่อมเกิดจากความเมตตากรุณาของท่านทั้งหลาย ทั้งที่กล่าวนามมาข้างต้น และที่ไม่ได้กล่าวนาม หากมีข้อผิดพลาดประการใด ผู้วิจัยขอน้อมรับ ณ ที่นี้

บุญญา เบญจมาลัย



## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.5.2 เทคนิคโพเทนทีโอไดนามิก.....	16
2.6 เทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-ray Diffraction: XRD).....	19
2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	21
<b>บทที่ 3</b> ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย.....	37
3.1 สารเคมี เครื่องมือ และอุปกรณ์.....	37
3.1.1 สารเคมี.....	37
3.1.2 เครื่องมือ และอุปกรณ์.....	37
3.2 ชิ้นงานทดสอบ ขั้นตอนการเตรียมชิ้นงานทดสอบ และการเตรียม สารละลายอิเล็กโทรไลต์.....	38
3.2.1 เหล็กกล้าไร้สนิมรีดร้อนเกรด 304L จากบริษัท โพลโค-ไทยน็อคซ์ จำกัด (มหาชน).....	38
3.2.2 ขั้นตอนการเตรียมชิ้นงานทดสอบ.....	38
3.2.2.1 เหล็กกล้าไร้สนิมรีดร้อนเกรด 304L (เหล็กคอยล์ดำ).....	38
3.2.2.2 เหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 304L ที่ปราศจากสเกลออกไซด์ (เหล็กคอยล์ขาว).....	38
3.2.3 การเตรียมสารละลายอิเล็กโทรไลต์.....	38
3.3 การกำจัดสเกลออกไซด์จากเหล็กคอยล์ดำและการศึกษาพฤติกรรมการกัดกร่อนของ เหล็กคอยล์ขาวด้วยเทคนิคโพเทนทีโอไดนามิกโพลาริเซชัน.....	39
3.4 การวิเคราะห์ชิ้นงานทดสอบ.....	39
3.5 การทดสอบวัดเส้นโพลาริเซชัน.....	40
3.5.1 เหล็กกล้าไร้สนิมรีดร้อนเกรด 304L (เหล็กคอยล์ดำ).....	40
3.5.2 เหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 304L ที่ปราศจากสเกลออกไซด์ (เหล็กคอยล์ขาว)....	41
<b>บทที่ 4</b> ผลการทดลองและการอภิปรายผล.....	42
4.1 การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีและสเกลออกไซด์ของเหล็กกล้าไร้สนิม รีดร้อนเกรด 304L.....	42

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และ VIII อ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.2 การวิเคราะห์เส้นแคโทดิกโพลาริเซชันและเส้นแอนโอดิกโพลาริเซชันของ เหล็กคอลลิตาเกรด 304L ที่ผ่านการกัดกรวดร่วมกับกระแสไฟฟ้าใน สารละลาย HCl 0.5 M .....	44
4.3 การวิเคราะห์เส้นแคโทดิกโพลาริเซชันและเส้นแอนโอดิกโพลาริเซชันของ เหล็กคอลลิตาเกรด 304L ที่ผ่านการกัดกรวดร่วมกับกระแสไฟฟ้าในสารละลายผสม ของ HCl 0.5 M กับสารละลาย H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> 0.5, 0.88 และ 1.76 M.....	46
4.4 การวิเคราะห์เส้นแอนโอดิกโพลาริเซชันและเส้นแคโทดิกโพลาริเซชันของ เหล็กคอลลิตาเกรด 304L ที่ผ่านการกัดกรวดร่วมกับกระแสไฟฟ้าในสารละลาย HCl 0.5 M และสารละลายผสมของ HCl 0.5 M กับสารละลาย H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> 0.5, 0.88 และ 1.76 M .....	51
4.5 การวิเคราะห์พื้นผิวเหล็กคอลลิตาเกรด 304L ที่ผ่านการกัดกรวดด้วยสารละลายเคมี ร่วมกับกระแสไฟฟ้าในสารละลาย HCl 0.5 M และสารละลายผสมของ HCl 0.5 M กับสารละลาย H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> 0.5, 0.88 และ 1.76 M ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (Optical Microscope).....	56
4.6 การวิเคราะห์พื้นผิวเหล็กคอลลิตาเกรด 304L ที่ผ่านการกัดกรวดร่วมกับกระแสไฟฟ้า ในสารละลาย HCl 0.5 M และสารละลายผสมของ HCl 0.5 M กับสารละลาย H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> 0.88 M ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (Optical Microscope).....	59
<b>บทที่ 5</b> สรุปผลการศึกษาและข้อเสนอแนะ.....	61
5.1 สรุปผลการศึกษาของเหล็กคอลลิตา.....	61
5.2 สรุปผลการศึกษาของเหล็กคอลลิตาขาว.....	62
5.3 ข้อเสนอแนะ .....	63
บรรณานุกรม.....	65
ภาคผนวก ก. การวิเคราะห์ความหยาบผิว.....	69
ภาคผนวก ข. ข้อมูลผลการทดลอง.....	72
ประวัติผู้เขียน.....	74

# สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1	องค์ประกอบทางเคมีของเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 304L (wt%) ..... 5
2.2	ผลการทดลองจากกราฟโพลาไรเซชันของชิ้นงานทดสอบแช่ในสารละลาย $H_2SO_4$ 30 wt% 1 ชั่วโมง ที่ $25^\circ C$ ..... 22
2.3	ผลการทดสอบ $E_{corr}$ และ $i_{corr}$ ของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำในสารละลาย $H_2SO_4$ 10 wt% ด้วยเทคนิคโพเทนทิโอสแตติก ..... 23
2.4	ช่วงพาสซีฟและค่า $i_{corr}$ ของเหล็กกล้าไร้สนิมรีดร้อนเกรด 430 ในสารละลาย HCl..... 31
2.5	การจำลองกระบวนการกัดกร่อนเพื่อกำจัดสเกลออกไซด์ออกจากเหล็กกล้าไร้สนิมรีดร้อนเกรด 304..... 33
2.6	สเกลออกไซด์ที่พบบนพื้นผิวโลหะทดสอบก่อนและหลังการกัดกร่อนร่วมกับกระแสไฟฟ้าในสารละลาย $Na_2SO_4$ และสารละลายผสมของ $Na_2SO_4$ กับ $H_2O_2$ ..... 35
3.1	สรุปตัวอย่างและสารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่ใช้ทดสอบการวัดเส้นโพลาไรเซชัน..... 41
4.1	องค์ประกอบทางเคมีของเหล็กกล้าไร้สนิมรีดร้อนเกรด 304L วิเคราะห์ด้วยเทคนิค OES (wt%)..... 42
4.2	ชนิดของออกไซด์ที่ตรวจพบบนสเกลออกไซด์ของเหล็กกล้าไร้สนิมรีดร้อนเกรด 304L.. 43
ข.1	ความหนาของฟิล์มของเหล็กคอปเปอร์เกรด 304L หลังการกัดกร่อนร่วมกับกระแสไฟฟ้าในสารละลาย HCl 0.5 M และสารละลายผสมของ HCl 0.5 M กับสารละลาย $H_2O_2$ 0.5, 0.88 และ 1.76 M..... 72
ข.2	ความหนาของฟิล์มของเหล็กคอปเปอร์เกรด 304L หลังการกัดกร่อนร่วมกับกระแสไฟฟ้าในสารละลาย HCl 0.5 M และสารละลายผสมของ HCl 0.5 M กับสารละลาย $H_2O_2$ 0.88 M ..... 73

# สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1	แผนภาพสมมูลของเหล็กและคาร์บอน..... 5
2.2	กระบวนการผลิตเหล็กกล้าไร้สนิมของบริษัท โพลโค-ไทยน็อคซ์ จำกัด (มหาชน) (ก) ขั้นตอนการอบอ่อนและการกำจัดสเกลออกไซด์จากเหล็กคอยล์ดำ (ข) ขั้นตอนการรีดเย็นและการปรับปรุงสมบัติเชิงกลของเหล็กคอยล์ขาว (ค) การกำจัดสเกลออกไซด์และการขัดให้พื้นผิวเหล็กของคอยล์ขาวเรียบและมันวาว... 7
2.3	กระบวนการเกิดสเกลออกไซด์..... 8
2.4	พฤติกรรมการกัดกร่อนของเหล็กคอยล์ขาวในสารละลาย $H_2SO_4$ 30 wt% (a) พิล์มพาสซีฟสลายตัว (b) ไอออนของเหล็กสลายตัว (c) ไอออนของ $Mo^{6+}$ ก่อตัว บริเวณพื้นผิวของเหล็กกล้าไร้สนิม และ (d) การก่อตัวของ $MoO_3$ บนพื้นผิวของโลหะ 11
2.5	กระบวนการกัดกร่อนร่วมกับกระแสไฟฟ้าในสารละลายอิเล็กโทรไลต์แบบ Ruthener Neolyte..... 13
2.6	แผนภาพแสดงการสลายของโลหะ M ในสารละลาย HCl ทำให้โลหะอยู่ในรูป $M^{2+}$ และ อิเล็กตรอนรวมเข้ากับโปรตอนกลายเป็นแก๊สไฮโดรเจน..... 15
2.7	เครื่องโพเทนทิโอสแตต (Potentiostat) (ก) องค์ประกอบของเซลล์ทดสอบประเภท 3 ขั้วไฟฟ้า (ข) ตัวอย่างเครื่องโพเทนทิโอสแตตที่ใช้ทดสอบการกัดกร่อนร่วมกับ กระแสไฟฟ้าด้วยสารละลายอิเล็กโทรไลต์..... 16
2.8	กราฟโพลาริเซชันจากเทคนิคโพเทนทิโอดนามิก..... 17
2.9	การวัดค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อน ( $E_{corr}$ ) และความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อน ( $i_{corr}$ ) ด้วยเส้นทาเฟล..... 18
2.10	แบบจำลองการแทรกสอดของรังสีเอกซ์บนระนาบของอะตอม A-A' และระนาบของ อะตอม B-B'..... 20
2.11	การเปลี่ยนแปลงของอัตราการกัดกร่อนของเหล็กกล้าไร้สนิม 304 และ 316 เทียบกับปริมาณของ Mn และ Mo ที่ 25 และ 50°C ในสารละลาย $H_2SO_4$ 30 wt%.. 21
2.12	กราฟ Nyquist Plot ของเหล็กคอยล์ขาวในสารละลาย $H_2SO_4$ 10 wt% 1 ชั่วโมง (a), (b) และ (c) ปริมาณ Mn 0.7, 2.0 และ 5.0 wt% ตามลำดับ..... 24
2.13	วงจรมุมลที่เหมاسبกับข้อมูลผลการทดลองจาก EIS..... 24

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.14	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างโพลาริเซชันเนื่องจากความต้านทานกระแสไฟฟ้า (Polarization Resistance: $R_p$ ) กับระยะเวลาที่แช่เหล็กคอยล์ขาวในสารละลาย $H_2SO_4$ 10 wt% ..... 25
2.15	กราฟโพเทนทีโอไดนามิกโพลาริเซชันของเหล็กกล้าไร้สนิมอสเทนไนต์ (เหล็กคอยล์ขาว) ที่มี Cu 0.41, 2.00, 2.62 และ 3.09 wt% ในสารละลาย $H_2SO_4$ 0.1 M 2 ชั่วโมง ณ ภาวะที่ไม่มีแก๊สออกซิเจน ..... 26
2.16	กราฟโพเทนทีโอไดนามิกโพลาริเซชันของเหล็กกล้าไร้สนิมอสเทนไนต์ (เหล็กคอยล์ขาว) ที่มี Cu 0.41, 2.62 และ 3.09 wt% ในสารละลาย $H_2SO_4$ 0.1 M 2 ชั่วโมง ณ ภาวะที่มีแก๊สออกซิเจน ..... 26
2.17	ผลของ Cu 0.41, 2.00, 2.62 และ 3.09 wt% ต่อศักย์ไฟฟ้าสลายตัวในสารละลาย $H_2SO_4$ 0.1 M ณ ภาวะที่มีแก๊สออกซิเจน ..... 27
2.18	เปอร์เซ็นต์การลดลงของน้ำหนักเหล็กคอยล์ดำหลังการกัดกรวดร่วมกับกระแสไฟฟ้าในสารละลาย HCl 5-8 wt% ที่ $50^\circ C$ และมีตัวออกซิไดส์ $H_2O_2$ 1 และ 2 wt%, $KMnO_4$ 1 และ 2 wt%, $KClO_3$ 1 และ 2 wt% ..... 28
2.19	แบบจำลองความหยาบผิวด้วยกล้อง CLSM ของเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 430 หลังการกัดกรวดร่วมกับกระแสไฟฟ้าในสารละลาย HCl 5-8 wt% ที่ $50^\circ C$ ที่มีตัวออกซิไดส์ (a) $H_2O_2$ , (b) $KMnO_4$ และ (c) $KClO_3$ ..... 29
2.20	กราฟโพเทนทีโอไดนามิกโพลาริเซชันของเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 430 ในสารละลาย HCl 5-8 wt% (a) มีตัวออกซิไดส์ $H_2O_2$ , $KMnO_4$ และ $KClO_3$ และ (b) ไม่มีตัวออกซิไดส์ $H_2O_2$ , $KMnO_4$ และ $KClO_3$ ..... 30
2.21	กราฟโพเทนทีโอไดนามิกโพลาริเซชันของเหล็กกล้าไร้สนิมรีดร้อนเกรด 430 ในสารละลาย HCl 0.024-4.11 mol/L ..... 31
2.22	ภาพถ่าย 3 มิติที่แสดงความขรุขระของพื้นผิวของเหล็กกล้าไร้สนิมรีดร้อนเกรด 430 ที่ถูกกัดกรวด 400 วินาที (a) ในสารละลาย HCl, $R_a=2.496$ (b) ในสารละลายผสมของ $HNO_3$ -HF, $R_a=2.974$ ..... 32

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.23	กราฟโพเทนทีโอไดนามิกโพลาริเซชันของเหล็กกล้าไร้สนิมรีดร้อนเกรด 304L ที่ผ่าน การอบอ่อนและกัดกรดร่วมกับกระแสไฟฟ้าในสารละลาย $\text{Na}_2\text{SO}_4$ 190 $\text{kg}/\text{m}^3$ ที่ 298, 318 และ 333 K..... 34
2.24	กราฟโพเทนทีโอไดนามิกโพลาริเซชันของเหล็กกล้าไร้สนิมรีดร้อนเกรด 304L ที่ผ่าน การอบอ่อนและกัดกรดร่วมกับกระแสไฟฟ้าในสารละลายผสมของ $\text{Na}_2\text{SO}_4$ 190 $\text{kg}/\text{m}^3$ กับ $\text{H}_2\text{O}_2$ 10 $\text{kg}/\text{m}^3$ ที่ 298, 318 และ 333 K ..... 34
2.25	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนาผิวและอุณหภูมิของเหล็กกล้าไร้สนิมรีดร้อน เกรด 304L หลังการกัดกรดร่วมกับกระแสไฟฟ้าในสารละลาย $\text{Na}_2\text{SO}_4$ 190 $\text{kg}/\text{m}^3$ และสารละลายผสมของ $\text{Na}_2\text{SO}_4$ 190 $\text{kg}/\text{m}^3$ กับสารละลาย $\text{H}_2\text{O}_2$ 10 $\text{kg}/\text{m}^3$ ..... 36
3.1	เครื่องโพเทนทีโอสแตต AUTOLAB รุ่น PGSTAT 302N ..... 40
3.2	ชุดเซลล์ทดสอบประเภท 3 ขั้วไฟฟ้า..... 40
4.1	ผลการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของสเกลออกไซด์ของเหล็กกล้าไร้สนิมรีดร้อนเกรด 304L ที่มีแมงกานีส 1.08-1.71 wt% และทองแดง 0.22-0.40 wt% ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบน ของรังสีเอกซ์ ..... 43
4.2	กราฟโพลาริเซชันจากเทคนิคโพเทนทีโอไดนามิกของเหล็กคอลลด์ดำเกรด 304L ที่มี Mn 1.08-1.71 wt% และ Cu 0.22-0.40 wt% ในสารละลาย HCl 0.5 M ..... 45
4.3	กราฟโพลาริเซชันจากเทคนิคโพเทนทีโอไดนามิกของเหล็กคอลลด์ดำเกรด 304L ที่มี Mn 1.08-1.71 wt% และ Cu 0.22-0.40 wt% ในสารละลายผสมของ HCl 0.5 M กับสารละลาย $\text{H}_2\text{O}_2$ 0.5 M..... 47
4.4	กราฟโพลาริเซชันจากเทคนิคโพเทนทีโอไดนามิกของเหล็กคอลลด์ดำเกรด 304L ที่มี Mn 1.08-1.71 wt% และ Cu 0.22-0.40 wt% ในสารละลายผสมของ HCl 0.5 M กับสารละลาย $\text{H}_2\text{O}_2$ 0.88 M ..... 48
4.5	กราฟโพลาริเซชันจากเทคนิคโพเทนทีโอไดนามิกของเหล็กคอลลด์ดำเกรด 304L ที่มี Mn 1.08-1.71 wt% และ Cu 0.22-0.40 wt% ในสารละลายผสมของ HCl 0.5 M กับสารละลาย $\text{H}_2\text{O}_2$ 1.76 M ..... 49

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.6	แผนภูมิสรุปรูปอัตราการกัดกร่อนและศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อน ( $E_{corr}$ ) ของเหล็กคอลลี่ดำเกรด 304L ที่มี Mn 1.08-1.71 wt% และ Cu 0.22-0.40 wt% หลังการกัดกร่อนร่วมกับกระแสไฟฟ้าในสารละลาย HCl 0.5 M และสารละลายผสมของ HCl 0.5 M กับสารละลาย $H_2O_2$ 0.5, 0.88 และ 1.76 M..... 50
4.7	กราฟโพลาริเซชันจากเทคนิคโพเทนทิโอดินามิกของเหล็กคอลลี่ขาวเกรด 304L ที่มี Mn 1.08-1.71 wt% และ Cu 0.22-0.40 wt% ในสารละลาย HCl 0.5 M ..... 52
4.8	กราฟโพลาริเซชันจากเทคนิคโพเทนทิโอดินามิกของเหล็กคอลลี่ขาวเกรด 304L ที่มี Mn 1.08-1.71 wt% และ Cu 0.22-0.40 wt% ในสารละลายผสมของ HCl 0.5 M กับสารละลาย $H_2O_2$ 0.88 M ..... 53
4.9	แผนภูมิสรุปรูปอัตราการกัดกร่อนและค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อน ( $E_{corr}$ ) ของเหล็กคอลลี่ขาวเกรด 304L ที่มี Mn 1.08-1.71 wt% และ Cu 0.22-0.40 wt% ในสารละลาย HCl 0.5 M หลังการกัดกร่อนร่วมกับกระแสไฟฟ้าในสารละลาย HCl 0.5 M และสารละลายผสมของ HCl 0.5 M กับสารละลาย $H_2O_2$ 0.88 M..... 54
4.10	ภาพพื้นผิวเหล็กคอลลี่ดำเกรด 304L ที่มี Mn 1.08-1.71 wt% และ Cu 0.22-0.40 wt% หลังการกัดกร่อนร่วมกับกระแสไฟฟ้าใน (a) – (d) สารละลาย HCl 0.5 M และ (e) – (h) สารละลายผสมของ HCl 0.5 M กับสารละลาย $H_2O_2$ 0.5 M .... 57
4.11	ภาพพื้นผิวเหล็กคอลลี่ดำเกรด 304L ที่มี Mn 1.08-1.71 wt% และ Cu 0.22-0.40 wt% หลังการกัดกร่อนร่วมกับกระแสไฟฟ้าใน (a) – (d) สารละลายผสมของ HCl 0.5 M กับสารละลาย $H_2O_2$ 0.88 M และ (e) – (h) สารละลายผสมของ HCl 0.5 M กับสารละลาย $H_2O_2$ 1.76 M ..... 58
4.12	ภาพพื้นผิวเหล็กคอลลี่ขาวเกรด 304L 1.20%Mn0.40%Cu และ 1.71%Mn0.37%Cu หลังการกัดกร่อนร่วมกับกระแสไฟฟ้าใน (a) – (b) สารละลาย HCl 0.5 M และ (c) – (d) สารละลายผสมของ HCl 0.5 M กับสารละลาย $H_2O_2$ 0.88 M ..... 59
ก.1	หน้าจอแสดงตัวอย่างเส้นโปรไฟล์ของพื้นผิวชิ้นงานที่ได้จากพื้นผิวที่ทดสอบด้วยเครื่องวัดความหยาบผิว Mitutoyo รุ่น SJ-210 ..... 69
ก.2	นิยามระยะพีกสูงสุดและระยะพีกต่ำสุดของการวิเคราะห์ค่าเฉลี่ยความหยาบผิวแบบสิบจุด (Rz)..... 70

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และ XIII อ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ก.3	นิยามค่าเฉลี่ยของความสูงและความลึกของพื้นผิวของการวิเคราะห์ค่าเฉลี่ยเลขคณิตของความหยาบผิว (Ra).....	71
ก.4	นิยามความสูงและความลึกของพื้นผิวของชิ้นงานทดสอบของการวิเคราะห์ความหยาบผิวเฉลี่ยกำลังสอง (Rq).....	71



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และ **xiv** อ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ

เหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มออสเทนไนต์ หรือเหล็กกล้าไร้สนิมตระกูล 300 เช่น เกรด 301, 302, 304 และ 304L มีความสำคัญมาก พบว่าประมาณ 66-77 % ของผลิตภัณฑ์จากเหล็กกล้าไร้สนิมที่ใช้อย่างแพร่หลายผลิตจากเหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มออสเทนไนต์เนื่องจากมีความต้านทานการกัดกร่อนและความต้านทานการเกิดออกซิเดชันสูง ขึ้นรูปได้ง่าย และสามารถใช้งานที่อุณหภูมิต่ำได้ดีมาก (Cryogenic Property) (George Krauss. 1991; Anil K. Sinha. 2003) จึงนิยมใช้สำหรับบรรจุภัณฑ์อาหารและเครื่องดื่ม งานสถาปัตยกรรม ชิ้นส่วนที่เกี่ยวข้องกับอุตสาหกรรมเคมีและปิโตรเคมี และยานอวกาศ เป็นต้น กระบวนการผลิตแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมมีขั้นตอนการรีดร้อนเพื่อลดขนาดของสแลบ (Slab) ให้ได้แผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมรีดร้อนหรือเหล็กคอยล์ดำ (Black Coil) หลังการรีดร้อนจะเกิดสเกลออกไซด์และชั้นพร่องโครเมียม (Oxide Scales and Chromium Depleted Layers) ทำให้ความต้านทานการกัดกร่อนลดลง จึงต้องทำการอบอ่อนและกัดกรด (Annealing and Pickling) เพื่อกำจัดสเกลออกไซด์และชั้นพร่องโครเมียมและลดความเครียดเหลือค้าง (Residual Stress) อย่างไรก็ตามในขั้นตอนอบอ่อน ออกซิเจนในอากาศจะทำปฏิกิริยากับเหล็กกล้าไร้สนิมและเกิดสเกลออกไซด์ขึ้นบนผิวของเหล็กกล้าไร้สนิมอีก ซึ่งจะต้องกำจัดออกเพื่อให้ได้เหล็กกล้าไร้สนิมที่ปราศจากสเกลออกไซด์หรือเหล็กคอยล์ขาว (White Coil) ที่มีพื้นผิวเรียบ หากต้องการเหล็กกล้าไร้สนิมที่มีผิวสำเร็จมันวาวจะต้องทำการรีดเย็น (Cold Rolling) ซึ่งจะทำให้เหล็กกล้าไร้สนิมมีความเครียดเพิ่มขึ้น แม้แต่เปราะจึงต้องทำการอบอ่อนและกัดกรดอีกครั้งเพื่อลดความเครียด (กอบบุญ หล่อทองคำ. 2564; โชคอนันต์ ดิยะวัฒน์วิทยา. 2562)

กระบวนการกำจัดสเกลออกไซด์ทำได้โดยการกำจัดเชิงกลและตามด้วยกระบวนการกัดกรด (Lian-Fu Li et al. 2008; กอบบุญ หล่อทองคำ. 2564; Wanna Homjabok et al. 2010) กระบวนการกัดกรดแบ่งเป็นการกัดกรดด้วยสารเคมี (Chemical Pickling) โดยใช้สารละลายกรดสลายสเกลออกไซด์ เช่น กรดซัลฟิวริก ( $H_2SO_4$ ) หรือสารละลายผสมของกรดไนตริกกับกรดไฮโดรฟลูออริก ( $HNO_3$ -HF) และการกัดกรดร่วมกับกระแสไฟฟ้าในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ (Electrolytic Pickling with Electrolyte) การกัดกรดร่วมกับกระแสไฟฟ้าในสารละลาย  $H_2SO_4$  เริ่มใช้ตั้งแต่ปี 1920 โดยผ่านกระแสไฟฟ้าเข้าไปในขั้วไฟฟ้า (Electrode) และใช้ความต่างศักย์ของแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมและขั้วไฟฟ้าใน

สารละลาย  $H_2SO_4$  สลายสเกลออกไซด์บนแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม กระบวนการกัดกรดไม่สามารถกำจัดเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สเกลออกไซด์บนผิวเหล็กกล้าไร้สนิมรีดร้อนเกรด 304L ที่มีแมงกานีส (Mn) > 1.6 wt% ได้ทั้งหมด สเกลออกไซด์ที่เหลือจะทำให้ลูกรีดในกระบวนการรีดเย็นเหล็กกล้าไร้สนิมสึกเร็วขึ้นและพื้นผิวของผลิตภัณฑ์ไม่เรียบตามมาตรฐาน (โซคอนันต์ ดิยะวัฒน์วิทยา. 2562) สารละลาย  $H_2SO_4$  ภายใต้บรรยากาศที่มีแก๊สออกซิเจนจะสร้าง  $Cu_2O$  บนผิวเหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มเฟอร์ไรต์ที่มีทองแดง (Cu)  $\geq 0.4$  wt% ขึ้นไป ทำให้อัตราการกัดกร่อนลดลง (Hann-Tuw Lin et al. 1992) Wanna Homjabok et al. (Wanna Homjabok et al. 2010) ศึกษาการกำจัดสเกลออกไซด์จากเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 304 โดยผสมสารละลายตัวออกซิไดส์ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ( $H_2O_2$ ) ในสารละลายกรดไฮโดรคลอริก (HCl) เทียบกับการกำจัดสเกลออกไซด์ในสารละลายกรดต่าง ๆ ได้แก่  $H_2SO_4$ ,  $HNO_3$ -HF และ HCl และการกัดกร่อนร่วมกับกระแสไฟฟ้าในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ ได้แก่  $H_2SO_4$  และ HCl พบว่าสารละลายผสมของ HCl กับสารละลาย  $H_2O_2$  สามารถกำจัดสเกลออกไซด์ออกจากเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 304L ได้ดีและให้ผิวสำเร็จเรียบ

สำหรับงานวิจัยนี้จะศึกษาผลของแมงกานีสและทองแดงต่อการกำจัดสเกลออกไซด์ของเหล็กกล้าไร้สนิมรีดร้อนเกรด 304L ด้วยการกัดกร่อนร่วมกับกระแสไฟฟ้าในสารละลาย HCl และสารละลายผสมของ HCl กับสารละลาย  $H_2O_2$  และศึกษาพฤติกรรมการกัดกร่อนของเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 304L ที่ปราศจากสเกลออกไซด์

## 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1.2.1 ศึกษาการกำจัดสเกลออกไซด์จากเหล็กกล้าไร้สนิมรีดร้อนเกรด 304L ที่มีองค์ประกอบ Mn 1.08-1.71 wt% และ Cu 0.22-0.40 wt% ด้วยการกัดกร่อนร่วมกับกระแสไฟฟ้าในสารละลาย HCl 0.5 M และสารละลายผสมของ HCl 0.5 M กับสารละลาย  $H_2O_2$  0.50, 0.88 และ 1.76 M ที่ 25°C

1.2.2 ศึกษาพฤติกรรมการกัดกร่อนของเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 304L ที่ปราศจากสเกลออกไซด์ที่มีองค์ประกอบ Mn 1.08-1.71 wt% และ Cu 0.22-0.40 wt% ด้วยสารละลาย HCl 0.5 M และสารละลายผสมของ HCl 0.5 M กับสารละลาย  $H_2O_2$  0.88 M ที่ 25°C

## 1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1.3.1 ศึกษาองค์ประกอบทางเคมีและโครงสร้างผลึกของสเกลออกไซด์ของเหล็กกล้าไร้สนิมรีดร้อนเกรด 304L ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์

1.3.2 ศึกษาการกำจัดสเกลออกไซด์จากเหล็กกล้าไร้สนิมรีดร้อนเกรด 304L ที่มีองค์ประกอบ Mn 1.08-1.71 wt% และ Cu 0.22-0.40 wt% ด้วยการกัดกร่อนร่วมกับกระแสไฟฟ้าในสารละลาย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อิเล็กโทรไลต์ ได้แก่ สารละลาย HCl 0.50 M และสารละลายผสมของ HCl 0.5 M กับสารละลาย  $H_2O_2$  0.50, 0.88 และ 1.76 M ที่ 25°C ด้วยเทคนิคโพเทนทิโอดนามิกโพลาริเซชัน

1.3.3 ศึกษาพฤติกรรมการกัดกร่อนของเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 304L ที่ปราศจากสเกลออกไซด์ที่มืองค์ประกอบ Mn 1.08-1.71 wt% และ Cu 0.22-0.40 wt% ด้วยสารละลาย HCl 0.50 M และสารละลายผสมของ HCl 0.5 M กับสารละลาย  $H_2O_2$  0.88 M ที่ 25°C ด้วยเทคนิคโพเทนทิโอดนามิกโพลาริเซชัน

1.3.4 ศึกษาพื้นผิวของเหล็กกล้าไร้สนิมรีดร้อนเกรด 304L และเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 304L ที่ปราศจากสเกลออกไซด์หลังการทดสอบด้วยเทคนิคโพเทนทิโอดนามิกโพลาริเซชันโดยใช้กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (Optical Microscopy: OM) และศึกษาความหยาบผิวเฉลี่ยกำลังสอง (Roughness Root Mean Square: Rq) โดยใช้เครื่องมือวัดความหยาบผิว

## 1.4 ประโยชน์ที่ได้รับ

1.4.1 ทราบผลของ Mn 1.08-1.71 wt% และ Cu 0.22-0.40 wt% ต่อการกำจัดสเกลออกไซด์บนพื้นผิวของเหล็กกล้าไร้สนิมรีดร้อนเกรด 304L ด้วยการกัดกรดร่วมกับกระแสไฟฟ้าที่ 25°C ด้วยเทคนิคโพเทนทิโอดนามิกโพลาริเซชัน

1.4.2 ทราบผลของสารละลาย  $H_2O_2$  0.50, 0.88 และ 1.76 M ต่อการกำจัดสเกลออกไซด์บนพื้นผิวของเหล็กกล้าไร้สนิมรีดร้อนเกรด 304L ด้วยการกัดกรดร่วมกับกระแสไฟฟ้าที่ 25°C ด้วยเทคนิคโพเทนทิโอดนามิกโพลาริเซชัน

1.4.3 ทราบผลของ Mn 1.08-1.71 wt% และ Cu 0.22-0.40 wt% ต่อความต้านทานการกัดกร่อนของเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 304L ที่ปราศจากสเกลออกไซด์

1.4.4 ทราบผลของสารละลาย  $H_2O_2$  0.88 M ต่อพฤติกรรมการกัดกร่อนของเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 304L ที่ปราศจากสเกลออกไซด์

## บทที่ 2

# ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

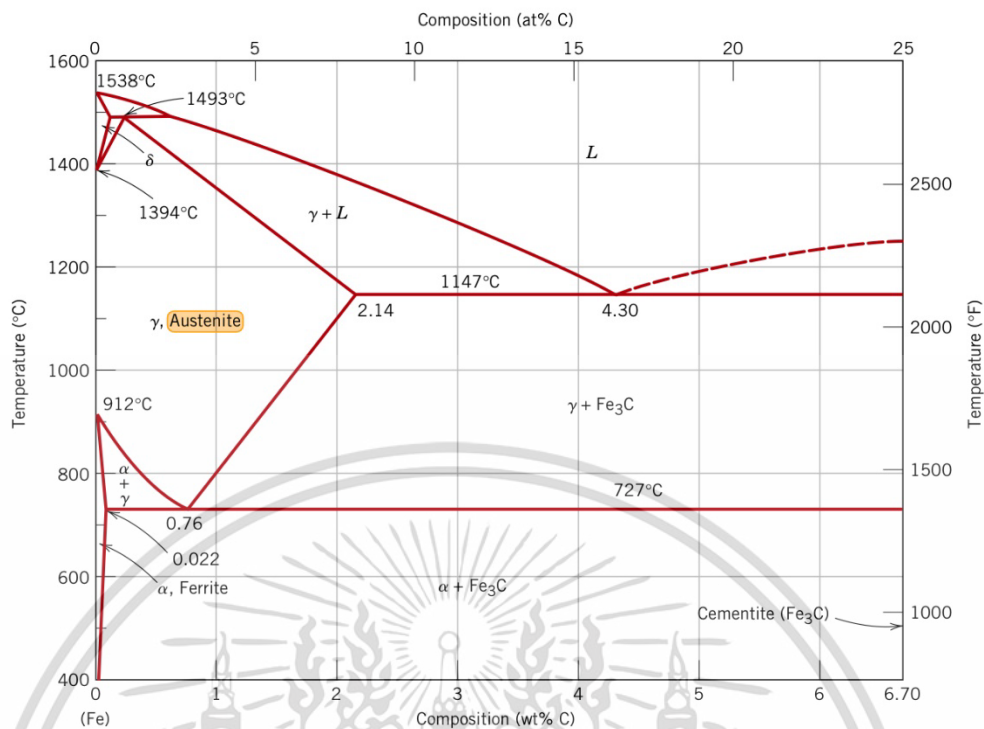
การอบชุบทางความร้อน (Heat Treatment) เหล็กกล้าไร้สนิมทำเพื่อปรับปรุงสมบัติเชิงกลของเหล็กกล้าไร้สนิม แต่ทำให้เกิดสเกลออกไซด์และผิวเหล็กกล้าไร้สนิมมีสีดำหรือที่เรียกว่าเหล็กคอยล์ดำ (Black Coil) ซึ่งไม่เหมาะสมต่อการใช้งาน นอกจากนี้ทำให้เกิดชั้นพร่องโครเมียมบริเวณใกล้ขอบเกรดทำให้เกิดการกัดกร่อนได้ง่าย จึงต้องมีกระบวนการกัดกรดเพื่อกำจัดสเกลออกไซด์ที่เกิดขึ้นและทำให้เหล็กกล้าไร้สนิมมีพื้นผิวเรียบและมันวาว ดังนั้นบทนี้จะอธิบายกระบวนการผลิตเหล็กกล้าไร้สนิม การเกิดสเกลออกไซด์ สาเหตุต่าง ๆ ที่มีผลต่อสมบัติของเหล็กกล้าไร้สนิมและการเกิดสเกลออกไซด์ วิธีการกำจัดสเกลออกไซด์เชิงกลและเชิงเคมี เทคนิคที่ใช้ศึกษาพฤติกรรมการกัดกร่อนและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ดังต่อไปนี้

### 2.1 กระบวนการผลิตเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 304L

เหล็กกล้าไร้สนิมแบ่งตามมาตรฐาน AISI เป็น 5 กลุ่มหลัก ได้แก่ เหล็กกล้าไร้สนิมเฟอร์ไรต์ เหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนไซต์ เหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนไนต์ เหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนไนต์เฟอร์ไรต์หรือดูเพล็กซ์ และเหล็กกล้าไร้สนิมชุบแข็งตกตะกอนหรือเหล็กกล้าไร้สนิมพีเอช รูปที่ 2.1 แสดงแผนภาพสมดุลของเหล็กและคาร์บอนซึ่งอธิบายโครงสร้างจุลภาคตามองค์ประกอบของเหล็กกล้าไร้สนิมที่มีส่วนผสมของสารประกอบของเหล็ก (Fe) อย่างน้อย 93.30 wt% และคาร์บอน (C) ไม่เกิน 6.70 wt% ซึ่งเป็นสัดส่วนของเหล็กหล่อที่ใช้งาน คาร์บอนที่ผสมในเหล็กทำให้เกิดสารประกอบเหล็กคาร์ไบด์ ( $Fe_3C$ ) เฟสต่าง ๆ สำหรับเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนไนต์มีสัดส่วนคาร์บอนไม่เกิน 2.14 wt% เนื่องจากคาร์บอนมีขีดจำกัดการละลายในเฟสออสเทนไนต์ ( $\gamma$ ) เมื่อเหล็กหล่อผ่านการการอบอ่อนด้วยความร้อนที่อุณหภูมิสูงกว่า  $1,050-1,100^{\circ}C$  โครงสร้างจุลภาคจะเปลี่ยนจากเฟอร์ไรต์เป็นออสเทนไนต์ทั้งหมด มีความอ่อนตัว ความเครียดเหลือค้างลดลง ทำให้เหล็กเหนียว ขึ้นรูปง่าย เหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนไนต์มีโครงสร้างผลึกแบบ FCC (Face Centered Cubic) ไม่มีสมบัติการเป็นแม่เหล็ก เกรดที่นิยมคือ 304 และ 304L ซึ่งมีองค์ประกอบทางเคมีดังตารางที่ 2.1 เหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนไนต์เกรด 304L มีปริมาณคาร์บอน 0.03 wt% ทำให้ง่ายต่อการขึ้นรูปและการเชื่อม มีปริมาณโครเมียมคาร์ไบด์ (Chromium Carbide) ที่ขอบเกรนต่ำลง จึงลดการกัดกร่อนบริเวณขอบเกรน (Intergranular Corrosion) (William D. Callister & Rethwisch. 1991; กอบบุญ หล่อทองคำ.

2564)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.1 แผนภาพสมดุลของเหล็กและคาร์บอน (William D. Callister & Rethwisch. 1991)

ตารางที่ 2.1 องค์ประกอบทางเคมีของเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 304L (wt%) (กอบบุญ หล่อทองคำ. 2564)

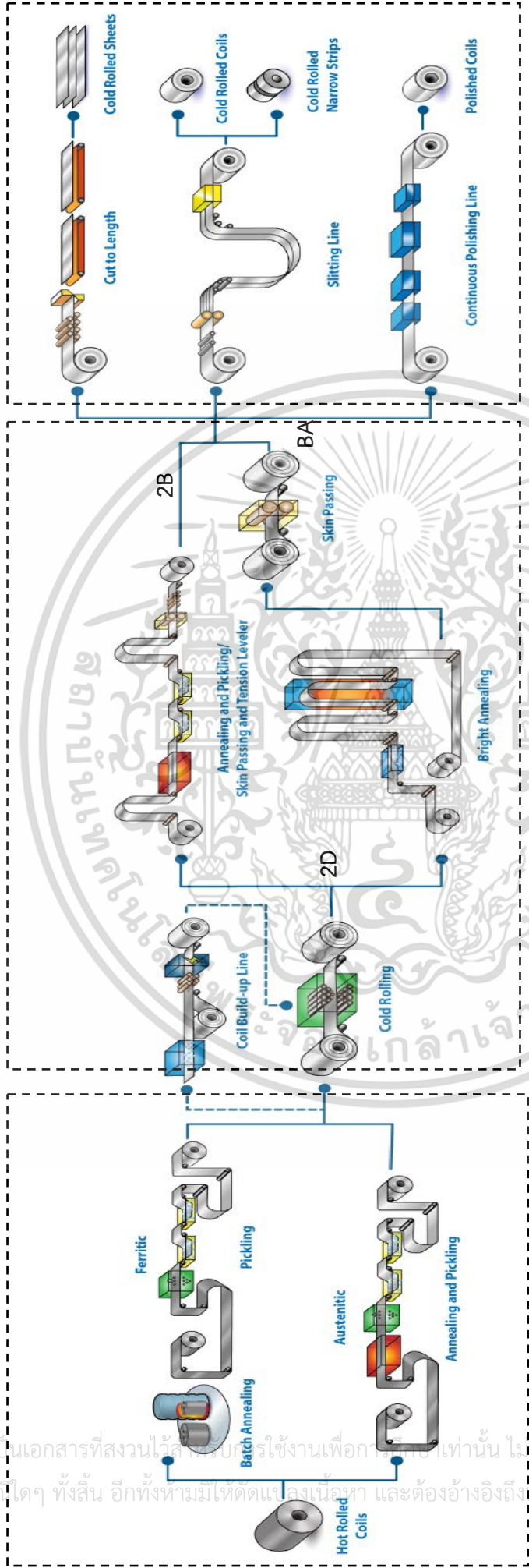
ชนิดของโลหะ (AISI)	C	Mn	Cr	Ni	Others	Fe
304	0.08	2.0	18.0-20.0	8.0-10.5	0.025 (Ni)	Bal.
304L	0.03	2.0	18.0-20.0	8.0-12.0	-	Bal.

งานวิจัยนี้ใช้เหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 304L ที่บริษัท โพลโค-ไทยน็อคซ์ จำกัด (มหาชน) อนุเคราะห์ซึ่งงานทดสอบ กระบวนการผลิตเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนไนต์แสดงในรูปที่ 2.2 โดยนำเหล็กม้วนรีดร้อนเกรด 304L มาทำการอบอ่อน การรีดร้อนและการอบอ่อนทำให้เกิดสเกลออกไซด์บนผิวเหล็กกล้าไร้สนิม การกำจัดสเกลออกไซด์ใช้วิธีเชิงกลและวิธีเชิงเคมีโดยการกัดกรดด้วยสารละลายกรด HNO<sub>3</sub>-HF ที่ APR Line จากนั้นจึงทำการรีดเย็นเพื่อปรับปรุงสมบัติเชิงกลของเหล็กกล้าไร้สนิมให้มีความเหนียว มีความแข็งเพิ่มขึ้น และมีผิวเรียบ ได้เหล็กกล้าไร้สนิมที่มีผิวระดับ 2D จากนั้นนำเหล็กกล้าไร้สนิมที่มีผิวระดับ 2D ไปอบอ่อนภายใต้บรรยากาศอีกครั้ง เพื่อให้ได้เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เหล็กกล้าไร้สนิมที่มีผิวสำเร็จเรียบและมันวาวขึ้น ผิวของเหล็กกล้าไร้สนิมที่ผ่านการรีดเย็นและอบอ่อนเรียกว่าผิวระดับ 2B จากนั้นจะนำไปกำจัดสเกลออกไซด์และรีดเย็นอีกครั้ง ก่อนนำไปผ่านลูกกลิ้งขัดผิวเหล็กกล้าไร้สนิมที่ APL Line ส่วนผิวระดับ BA ได้จากการอบอ่อนเหล็กกล้าไร้สนิมที่มีผิวระดับ 2D ด้วยแก๊สไฮโดรเจนเพื่อป้องกันการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันในระหว่างการอบอ่อน เรียกกระบวนการดังกล่าวว่า การอบอ่อนสำหรับผิวมันเงา (Bright Annealing) และปรับความเรียบผิวหน้าเหล็กกล้าไร้สนิม ก่อนจะนำไปตัดเป็นแผ่นหรือแถบต่อไป (Posco-Thainox. 2023; โฆคอนันต์ ตียะวัฒน์วิทยา. 2562)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ค)

(ข)

(ก)

รูปที่ 2.2 กระบวนการผลิตเหล็กกล้าไร้สนิมของบริษัท โพลโค-ไทยน็อคซ์ จำกัด (มหาชน)

(ก) ขั้นตอนการอบอ่อนและการกำจัดสเกลออกไซด์จากเหล็กคอยล์ดำ

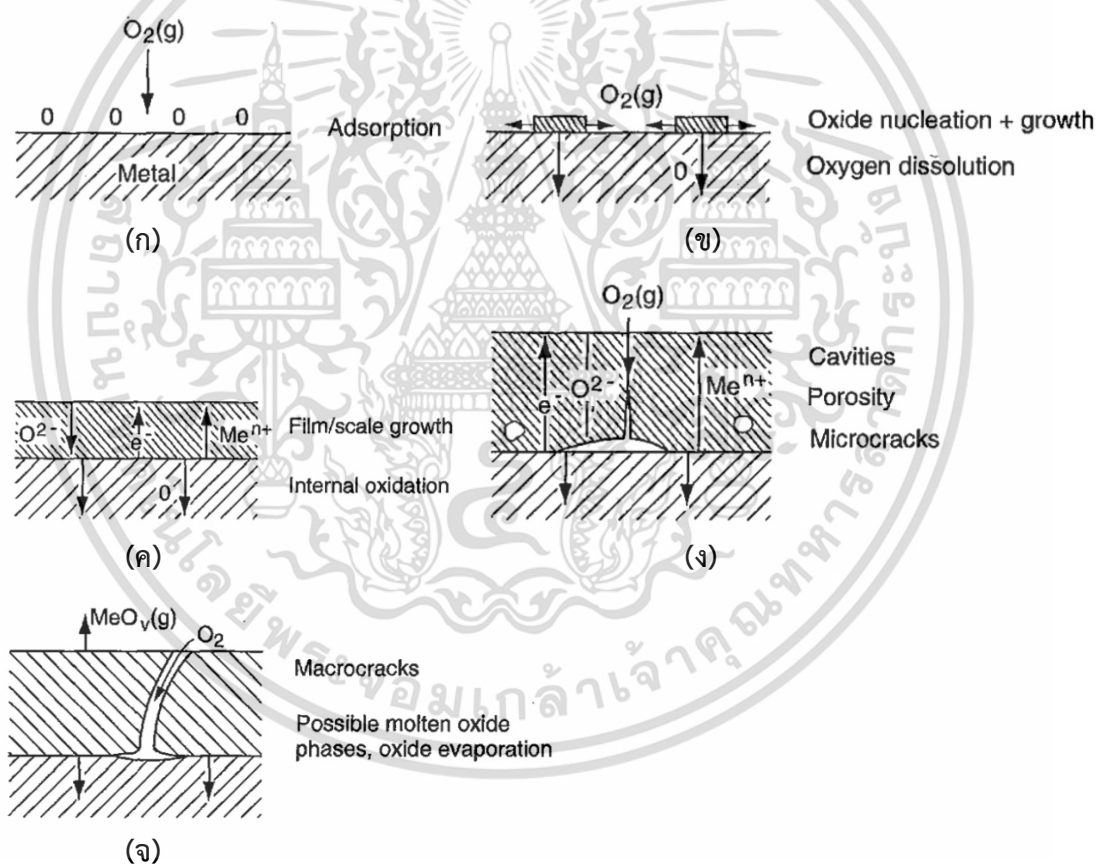
(ข) ขั้นตอนการรีดเย็นและการปรับปรุงสมบัติเชิงกลของเหล็กคอยล์ขาว

(ค) การกำจัดสเกลออกไซด์และการขัดให้พื้นผิวเหล็กของคอยล์ขาวเรียบและมันวาว (Posco-Thainox. 2023)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ของบริษัทฯ ใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแต่งแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.2 การเกิดสเกลออกไซด์ (Denny A. Jones. 1996)

การอบชุบทางความร้อนทำให้เกิดชั้นฟิล์มออกไซด์บนพื้นผิวของโลหะดังรูปที่ 2.3 โดยเริ่มจากองค์ประกอบของธาตุโลหะที่บริเวณผิวของโลหะเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidation Reaction) กับแก๊สออกซิเจนในอากาศ (รูปที่ 2.3(ก)) และได้ชั้นฟิล์มออกไซด์ปกคลุมผิวของโลหะหรือสเกลออกไซด์ (Oxide Scale) ซึ่งทำหน้าที่ต้านทานการกัดกร่อนบนเนื้อโลหะด้านล่าง (รูปที่ 2.3(ข) และ 2.3(ค)) แต่เมื่อปฏิกิริยาออกซิเดชันดำเนินต่อไป สเกลออกไซด์หนาขึ้นอย่างต่อเนื่อง จนชั้นฟิล์มแตก เกิดรูขนาดเล็ก ทำให้ไม่สามารถต้านทานการกัดกร่อน (รูปที่ 2.3(ง)) เนื่องจากสเกลออกไซด์มีรอยแตกขนาดเล็ก และเกิดรูไปถึงผิวของเหล็กกล้าไร้สนิม เนื้อโลหะจึงมีโอกาสเกิดปฏิกิริยากับน้ำและออกซิเจนในอากาศและเกิดการกัดกร่อนแบบรูเข็มได้ (รูปที่ 2.3(จ))



รูปที่ 2.3 กระบวนการเกิดสเกลออกไซด์ (Denny A. Jones. 1996)

ปฏิกิริยาออกซิเดชันของโลหะกับแก๊สออกซิเจนในบรรยากาศที่อุณหภูมิสูง แสดงดังสมการที่ (2.1)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปฏิกิริยาออกซิเดชันของโลหะที่อุณหภูมิสูง ยังสามารถเกิดขึ้นได้กับน้ำหรือแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ดังสมการที่ (2.2–2.3)



นอกจากนี้การเติมธาตุต่าง ๆ เช่น แมงกานีส (Mn) ทองแดง (Cu) โมลิบดีนัม (Mo) และอื่น ๆ ยังมีผลต่อสมบัติเชิงกลและทำให้เกิดสเกลออกไซด์บนพื้นผิวเหล็กกล้าไร้สนิมต่างกันดังนี้

## 2.3 ธาตุต่าง ๆ ที่มีผลต่อสมบัติของเหล็กกล้าไร้สนิมและการเกิดสเกลออกไซด์

การเติมธาตุต่าง ๆ ในเหล็กกล้าไร้สนิมในปริมาณที่เหมาะสมจะส่งผลต่อสมบัติเชิงกลและสมบัติทางเคมีภายในของเหล็กกล้าไร้สนิมที่แตกต่างกันดังนี้

### 2.3.1 แมงกานีส

การเติมแมงกานีส (Mn) ในเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนไนต์ช่วยเพิ่มค่า Yield Strength ทำให้เหล็กเหนียวขึ้น ยืดหยุ่นดี ง่ายต่อการขึ้นรูป เนื่องจาก Mn ทำปฏิกิริยากับออกซิเจนในอากาศได้ดี ช่วยลดออกซิเจน (Deoxidizer) ระหว่างการอบชุบทางความร้อน ทำให้เกิดออกไซด์ของแมงกานีส เช่น  $Mn_2O_3$  ที่ผิวของเหล็กซึ่งช่วยต้านทานการกัดกร่อนและลดการเกิดโครเมียมคาร์ไบด์ที่บริเวณขอบเกรน จึงลดการกัดกร่อนบริเวณขอบเกรนได้ นอกจากนี้ Mn ยังเพิ่มความสามารถในการแพร่ของไนโตรเจนเข้าไปในเหล็กกล้าไร้สนิม ทำให้โครงสร้างออสเทนไนต์เสถียร และช่วยลดการกัดกร่อนเฉพาะจุด (Localized Corrosion) อย่างไรก็ตามหากมี Mn สูงกว่า 2–10 wt% จะทำให้เหล็กแข็งแต่เปราะ ไม่เหมาะในการนำมาใช้งาน (M. V. Pridantsev and F. L. Levin. 1966; A. Pardo et al. 2008)

### 2.3.2 ทองแดง

การเติมทองแดง (Cu) ในเหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มออสเทนไนต์ช่วยเพิ่มความแข็งแรง (Mechanical Strength) และเพิ่มความเหนียวของเหล็กกล้าไร้สนิมที่อุณหภูมิสูง เนื่องจากทองแดงมีส่วนช่วยเพิ่มอัตราการเกิดนิวเคลียสของโลหะคาร์ไบด์ (Metal Carbide: MC) ซึ่งมีจุดหลอมเหลวและความเสถียรสูง ทำให้ค่า Stacking Fault Energy เพิ่มขึ้น เหล็กกล้าไร้สนิมจึงมีความเหนียวมากขึ้น (Tong Xi et al. 2017) นอกจากนี้ยังมีหลายงานวิจัยที่แสดงว่าการเติมทองแดงในเหล็กกล้าไร้สนิมช่วยเพิ่มความต้านทานการกัดกร่อน เนื่องจากเกิดฟิล์มพาสซีฟ (Passive Film) ของ  $Cu_2O$  ปกคลุมพื้นผิวเหล็กกล้าไร้สนิม (Hann-Tuw Lin et al. 1992; Emeka E. Oguzie et al. 2010)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.3.3 โมลิบดีนัม

การเติมโมลิบดีนัม (Mo) ในเหล็กกล้าไร้สนิมช่วยเพิ่มความต้านทานการกัดกร่อนเนื่องจากเกิดฟิล์มพาสซีฟที่เสถียรซึ่งช่วยป้องกันผิวเหล็กกล้าไร้สนิมโดยเฉพาะในภาวะที่มีไอออนคลอไรด์ จากการศึกษาผลของการเติม Mo และ Mn ต่อความต้านทานการกัดกร่อนของเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 304 และ 316 ของ A. Pardo et al. (A. Pardo et al. 2008) สรุปพฤติกรรมการกัดกร่อนของเหล็กคอลลิวได้ดังรูปที่ 2.4

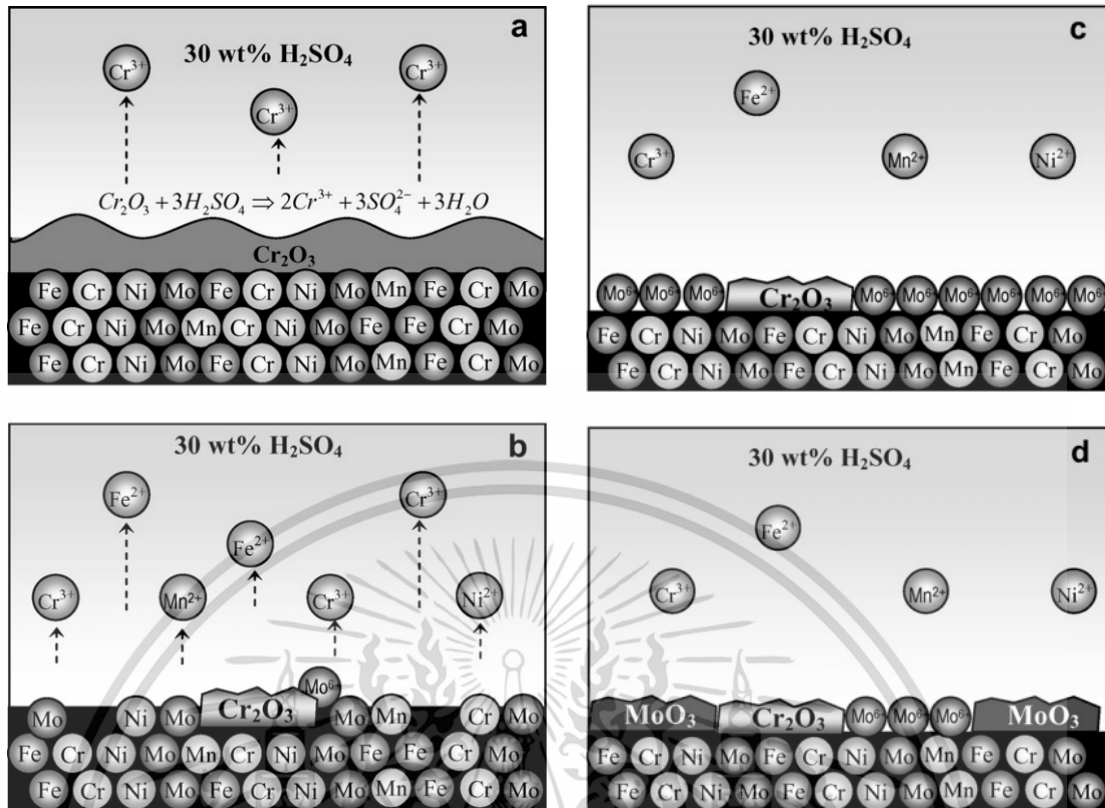
(a) เมื่อเหล็กคอลลิวสัมผัสกับสารละลาย  $H_2SO_4$  30 wt% ที่ใช้ในการกัดกรด ทำให้ชั้นฟิล์มพาสซีฟ  $Cr_2O_3$  เริ่มสลายตัว และสารละลายกลายเป็นสีเขียวเนื่องจากมีไอออนของ Cr(III) ละลายในสารละลาย

(b) เมื่อชั้นฟิล์มพาสซีฟสลายจนหมดแล้ว เนื้อโลหะจะถูกกัดกร่อน ดังนั้นสารละลายจะมีไอออนที่เป็นองค์ประกอบในเหล็กกล้าไร้สนิม ได้แก่  $Cr^{3+}$ ,  $Fe^{2+}$ ,  $Ni^{2+}$  และ  $Mn^{2+}$

(c) จากนั้นเนื้อโลหะจึงเริ่มถูกกัดกร่อนจนบริเวณผิวของโลหะเต็มไปด้วยไอออนของ  $Mo^{6+}$  ซึ่งทำให้ที่ผิวของโลหะอยู่ในภาวะง่ายต่อการเกิดออกไซด์ของโมลิบดีนัม

(d) โมลิบดีนัมเริ่มก่อตัวเป็นชั้นฟิล์มออกไซด์  $MoO_3$  ป้องกันพื้นผิวของเหล็กคอลลิวต่อไป

แม้ว่าการเกิดสภาพพาสซีฟของเหล็กกล้าไร้สนิม (Passivity) ช่วยป้องกันผิวเหล็กกล้าไร้สนิมจากการกัดกร่อน แต่สเกลออกไซด์ที่เกิดจากการอบชุบทางความร้อนระหว่างกระบวนการผลิต ทำให้พื้นผิวของเหล็กกล้าไร้สนิมไม่เรียบและเป็นมันวาว ดังนั้นจึงต้องมีกระบวนการกำจัดสเกลออกไซด์เพื่อให้ได้เหล็กกล้าไร้สนิมที่มีพื้นผิวตามเกรดที่ต้องการ (Denny A. Jones. 1996; Winston Revie. 2011; กอบบุญ หล่อทองคำ. 2564)



รูปที่ 2.4 พฤติกรรมการกัดกร่อนของเหล็กคอลลี่ขาวในสารละลาย H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 30 wt% (a) ฟิล์มพาสซีฟสลายตัว (b) ไอออนของเหล็กสลายตัว (c) ไอออนของ Mo<sup>6+</sup> ก่อตัวบริเวณพื้นผิวของเหล็กกล้าไร้สนิม และ (d) การก่อตัวของ MoO<sub>3</sub> บนพื้นผิวของโลหะ (A. Pardo et al. 2008)

## 2.4 การกำจัดสเกลออกไซด์ (Descaling)

### 2.4.1 การกำจัดสเกลออกไซด์เชิงกล (Mechanical Descaling)

การกำจัดสเกลออกไซด์เชิงกล คือ การทำให้สเกลออกไซด์ที่เกาะบนผิวโลหะแตกและหลุดออกด้วยแรงเชิงกล เช่น การยิงลูกเหล็กบนผิวโลหะ (Abrasive Blasting) การขัดเจีย (Grinding) และการขัดด้วยกระดาษทราย (Sanding) เป็นต้น การกำจัดสเกลออกไซด์เชิงกลมีข้อดีคือไม่ก่อให้เกิดภาวะเชิงเคมีที่ส่งผลต่อสมบัติเชิงกลของเหล็กกล้าไร้สนิม เช่น การกัดกร่อนบริเวณขอบเกรน (Intergranular Attack) การกัดกร่อนแบบรูเข็ม (Pitting Corrosion) การแตกเปราะเนื่องจากไฮโดรเจน (Hydrogen Embrittlement) เป็นต้น อย่างไรก็ตามการกำจัดสเกลออกไซด์เชิงกลเพียงขั้นตอนเดียวมีค่าใช้จ่ายสูงกว่าการกำจัดสเกลออกไซด์เชิงเคมี และทำให้แผ่นโลหะมีตำหนิ เช่น เกิดแอ่ง หลุมขนาดเล็ก หรืออาจหลงเหลือคราบสเกลออกไซด์ขนาดเล็กบนพื้นผิวของเหล็กกล้าไร้สนิมที่สังเกตได้ยาก ซึ่งทำให้ผิวโลหะมีองค์ประกอบทางเคมีที่แตกต่างกัน และมีผลต่อภาวะความต้านทาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

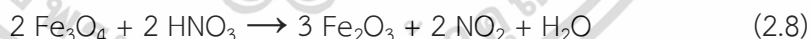
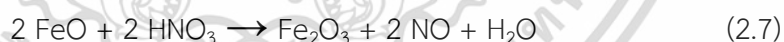
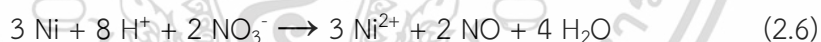
การกัดกร่อนต่างกันจึงอาจทำให้เกิดการกัดกร่อนเฉพาะจุด ดังนั้นในกระบวนการอุตสาหกรรมหลังจากกำจัดสเกลออกไซด์เชิงกลที่สามารถกำจัดสเกลออกไซด์ออกได้บางส่วน จะต้องนำเหล็กกล้าไร้สนิมเข้ากระบวนการกำจัดสเกลออกไซด์เชิงเคมีเพื่อกำจัดสเกลออกไซด์ที่เหลือ (ASTM International. 2006)

#### 2.4.2 การกำจัดสเกลออกไซด์เชิงเคมี (Chemical Descaling)

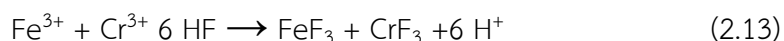
การกำจัดสเกลออกไซด์เชิงเคมี คือ กระบวนการที่ทำให้สเกลออกไซด์สลายหรือหลุดออกจากผิวเหล็กกล้าไร้สนิมด้วยสารเคมี กระบวนการกำจัดสเกลออกไซด์ด้วยสารเคมีที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรมผลิตเหล็กกล้าไร้สนิมมี 2 กระบวนการ ดังนี้

##### 2.4.2.1 การกัดกรดด้วยสารเคมี (Chemical Pickling) (F. Li and J. P. Celis. 2003)

การกัดกรดด้วยสารเคมีทำภายหลังการอบชุบทางความร้อนและการกำจัดสเกลออกไซด์เชิงกล นิยมใช้สารผสมกรดไนตริกและกรดไฮโดรฟลูออริก (HNO<sub>3</sub>-HF) เนื่องจากสามารถกำจัดสเกลออกไซด์และชั้นพรองโครเมียมบนผิวเหล็กกล้าไร้สนิมได้ดี ในระหว่างการกัดกรด HNO<sub>3</sub> เป็นกรดที่มีสมบัติออกซิไดส์ (Oxidizing Acid) ที่สามารถสลายโลหะ สเกลออกไซด์ และชั้นพรองโครเมียม ดังสมการที่ (2.4–2.9)



และกรด HF ทำหน้าที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ทำให้ไอออนของโลหะที่สลายตัวอยู่ในรูปสารประกอบเชิงซ้อนฟลูออไรด์และตกตะกอน ดังสมการที่ (2.10–2.13)

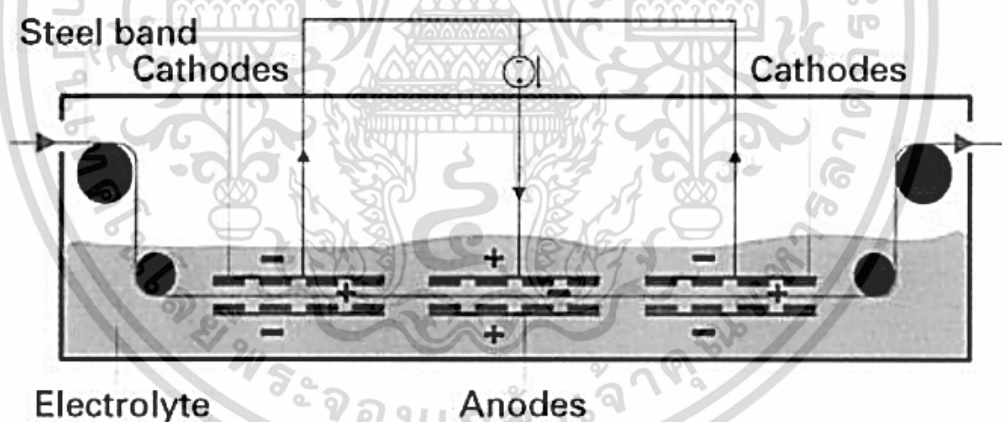


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากปฏิกิริยาเคมีข้างต้นพบว่าในกระบวนการกัดกรดด้วย  $\text{HNO}_3\text{-HF}$  เกิดแก๊ส  $\text{NO}_x$  ซึ่งเป็นอันตรายต่อระบบทางเดินหายใจและเป็นมลพิษทางอากาศ ดังนั้นจึงมีงานวิจัยต่าง ๆ ที่ศึกษาการใช้สารละลายอื่น หรือวิธีการกัดกรดรูปแบบอื่นทดแทนการใช้  $\text{HNO}_3\text{-HF}$  ในกระบวนการกัดกรด เช่น การกัดกรดร่วมกับกระแสไฟฟ้าด้วยสารละลายอิเล็กโทรไลต์ เป็นต้น

#### 2.4.2.2 การกัดกรดร่วมกับกระแสไฟฟ้าด้วยสารละลายอิเล็กโทรไลต์ (Electrolytic Pickling) (N. Ipek et al. 2005)

กระบวนการกัดกรดร่วมกับกระแสไฟฟ้าด้วยสารละลายอิเล็กโทรไลต์ ที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรมคือระบบ Ruthener Neolyte ดังรูปที่ 2.5 โดยใช้สารละลายโซเดียมซัลเฟต ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ) เป็นสารละลายอิเล็กโทรไลต์และใช้กระแสไฟฟ้าระหว่าง  $0.8\text{-}1.0\text{ kA/m}^2$  โดยใช้ขั้วไฟฟ้าขั้วลบและขั้วบวกวางประกบด้านบนและด้านล่างของแผ่นโลหะ โดยวางสลับขั้วลบและขั้วบวกอย่างละ 4 คู่ ซึ่งขั้วไฟฟ้างกล่าวทำให้แผ่นโลหะที่อยู่ระหว่างขั้วไฟฟ้ามีสภาพขั้วตรงข้ามกับขั้วไฟฟ้า โดยบริเวณที่ใช้ขั้วไฟฟ้าขั้วลบจะทำให้แผ่นโลหะมีสภาพขั้วบวกหรือเรียกว่าขั้วไฟฟ้าแคโทดิก (Cathodic Electrode) และบริเวณที่ใช้ขั้วไฟฟ้าขั้วบวกจะทำให้แผ่นโลหะมีสภาพขั้วลบหรือเรียกว่าขั้วไฟฟ้าแอโนดิก (Anodic Electrode)



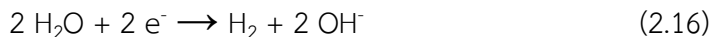
รูปที่ 2.5 กระบวนการกัดกรดร่วมกับกระแสไฟฟ้าในสารละลายอิเล็กโทรไลต์แบบ Ruthener Neolyte (N. Ipek et al. 2005)

ช่วงที่แผ่นโลหะมีสภาพขั้วเป็นลบ สเกลออกไซด์จะสลายตัวและเกิดแก๊สออกซิเจน ดังสมการที่ (2.14 –2.15)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ช่วงที่แผ่นโลหะมีสภาพขี้เป็นบวจะเกิดปฏิกิริยาไฮโดรลิซิส (Hydrolysis) และเกิดแก๊สไฮโดรเจน ดังสมการที่ (2.16)

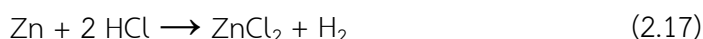


ซึ่งฟองแก๊สออกซิเจนและแก๊สไฮโดรเจนช่วยปั่นกวานสารละลายในระบบและมีส่วนช่วยดันสเกลออกไซด์ให้หลุดออกจากผิวของโลหะ อย่างไรก็ตามการใช้สารละลาย  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  เป็นสารละลายอิเล็กโทรไลต์ในระบบ แม้ว่าจะช่วยทำให้พื้นที่ผิวของโลหะหลังการกัดกรวดอยู่ในสภาพพาสซีฟ (Passive State) และเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม แต่ไม่สามารถกำจัดสเกลออกไซด์และชั้นพร่องโครเมียมได้ทั้งหมด ดังนั้นในโรงงานอุตสาหกรรมจึงนิยมใช้กระบวนการกัดกรวดด้วยสารละลายกรดแก่ เช่น  $\text{H}_2\text{SO}_4$  หลังการกัดกรวดร่วมกับกระแสไฟฟ้าเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการกำจัดสเกลออกไซด์และชั้นพร่องโครเมียม รวมถึงช่วยให้พื้นผิวของโลหะหลังการกัดกรวดอยู่ในสภาพพาสซีฟ ในงานวิจัยนี้มีความสนใจใช้สารละลายกรดไฮโดรคลอริก (HCl) แทนการใช้สารละลายโซเดียมซัลเฟต ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ) สำหรับเป็นสารละลายอิเล็กโทรไลต์ในการกัดกรวดร่วมกับกระแสไฟฟ้าเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการกำจัดสเกลออกไซด์และชั้นพร่องโครเมียม ลดขั้นตอนการกัดกรวดในกระบวนการให้เหลือเพียงการกัดกรวดร่วมกับกระแสไฟฟ้าเพียงขั้นตอนเดียว ทำให้สามารถลดการใช้สารเคมีที่เป็นต้นเหตุของปัญหาสิ่งแวดล้อม ส่วนการวิเคราะห์อัตราการกัดกร่อนในเหล็กกล้าไร้สนิมใช้เทคนิคโพเทนชิโอสแตติกโพลาริเซชัน

## 2.5 การวิเคราะห์อัตราการกัดกร่อนของเหล็กกล้าไร้สนิมด้วยเทคนิคโพเทนชิโอสแตติกโพลาริเซชัน (Denny A. Jones. 1996)

### 2.5.1 ปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีของการกัดกร่อน (Electrochemical Reaction)

ปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีของการกัดกร่อนสามารถแสดงให้เห็นได้จากการทดลองจุ่มสังกะสี (Zn) ในสารละลายกรดไฮโดรคลอริก จากการทดลองพบว่าฟองแก๊สไฮโดรเจนเกิดขึ้นบนพื้นผิวของสังกะสี และแผ่นสังกะสีสลายตัวอยู่ในรูปของสารประกอบคลอไรด์ ดังสมการที่ (2.17)

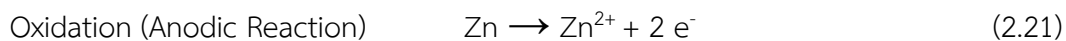
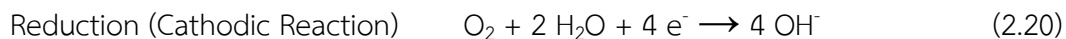
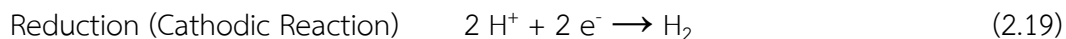


หากพิจารณาการสลายตัวของ Zn ในรูปของไอออน สามารถแสดงปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นได้ดังสมการ

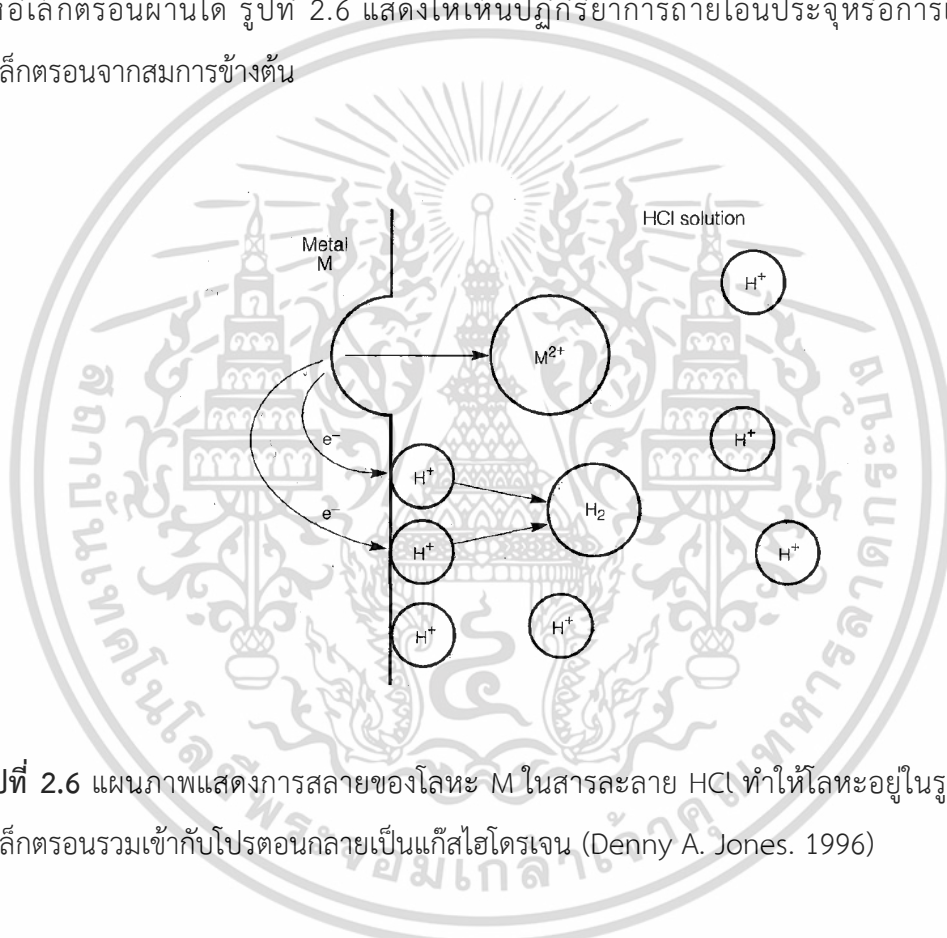


จากสมการที่ (2.18) พบว่า Zn ถูกออกซิไดส์เป็นไอออน  $\text{Zn}^{2+}$  ส่วนไอออน  $\text{H}^+$  ถูกรีดิวซ์เป็นแก๊สไฮโดรเจน จากสมการที่ (2.17) สามารถแบ่งออกเป็นปฏิกิริยารีดักชันหรือปฏิกิริยาแคโทดิก และ

ปฏิกิริยาออกซิเดชันหรือปฏิกิริยาแอโนดิก กล่าวได้ว่า “ในระหว่างการกัดกร่อนของโลหะ อัตราการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันมีค่าเท่ากับอัตราการเกิดปฏิกิริยารีดักชัน” ดังสมการ



ปฏิกิริยาดังสมการที่ (2.19 – 2.21) เกิดขึ้นพร้อมกันในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ (Electrolyte) ที่ยอมให้อิเล็กตรอนผ่านได้ รูปที่ 2.6 แสดงให้เห็นปฏิกิริยาการถ่ายโอนประจุหรือการแลกเปลี่ยนอิเล็กตรอนจากสมการข้างต้น



รูปที่ 2.6 แผนภาพแสดงการสลายของโลหะ M ในสารละลาย HCl ทำให้โลหะอยู่ในรูป M<sup>2+</sup> และอิเล็กตรอนรวมเข้ากับโปรตอนกลายเป็นแก๊สไฮโดรเจน (Denny A. Jones. 1996)

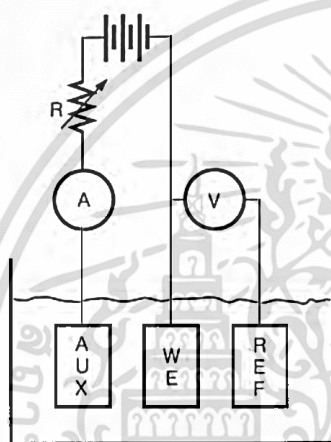
จากความรู้ความเข้าใจปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีข้างต้น หากมีอิเล็กตรอนที่พร้อมเกิดปฏิกิริยาแคโทดิกสะสมอยู่บริเวณพื้นผิวโลหะมากพอที่ทำให้ค่าศักย์ไฟฟ้าที่วัดได้บริเวณพื้นผิวโลหะมีค่าเป็นลบ เรียกความต่างศักย์ที่เป็นลบนี้อีกว่า “แคโทดิกโพลาไรเซชัน (Cathodic Polarization)” และในทางกลับกันหากปริมาณอิเล็กตรอนที่โลหะถูกออกซิไดส์ออกมาจากปฏิกิริยาแอโนดิกไม่เพียงพอต่อการเกิดปฏิกิริยา ทำให้ค่าศักย์ไฟฟ้าที่วัดได้บริเวณพื้นผิวโลหะมีค่าเป็นบวก เรียกความต่างศักย์ที่เป็นบวกนี้ว่า “แอโนดิกโพลาไรเซชัน (Anodic Polarization)” ซึ่งแอโนดิกโพลาไรเซชันจึงแสดงให้เห็นพฤติกรรมการกัดกร่อนของโลหะ ระบบปฏิกิริยาแอโนดิก-แคโทดิกที่เกิดจากการทดลองการจุ่มโลหะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในสารละลายกรดนี้เรียกว่า ระบบสองคู่อิทธิกริยาขั้วไฟฟ้า ซึ่งสามารถใช้เทคนิคโพเทนทีโอดนามิก (Potentiodynamic Technique) ในการตรวจสอบอัตราการกัดกร่อนของโลหะโดยใช้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านโลหะนั้นเทียบกับโลหะตัวกลางหรือขั้วไฟฟ้าอ้างอิงได้

### 2.5.2 เทคนิคโพเทนทีโอดนามิก

เทคนิคโพเทนทีโอดนามิกโดยใช้เครื่องโพเทนทีโอสแตตหรือกัลวานอสแตต (Galvanostat) ใช้ศึกษาพฤติกรรมและวิเคราะห์อัตราการกัดกร่อนของโลหะในระบบสองคู่อิทธิกริยาขั้วไฟฟ้าโดยใช้เซลล์ทดสอบ 3 ขั้วไฟฟ้า ดังรูปที่ 2.7



(a)

(ก)



(ข)

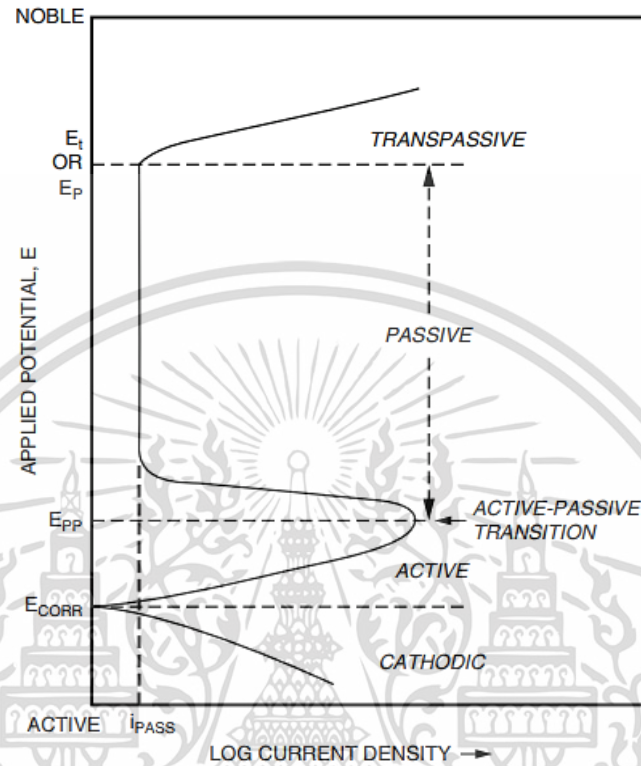
รูปที่ 2.7 เครื่องโพเทนทีโอสแตต (Potentiostat) (ก) องค์ประกอบของเซลล์ทดสอบประเภท 3 ขั้วไฟฟ้า (Denny A. Jones. 1996) (ข) ตัวอย่างเครื่องโพเทนทีโอสแตตที่ใช้ทดสอบการกัดกร่อนร่วมกับกระแสไฟฟ้าด้วยสารละลายอิเล็กโทรไลต์

เซลล์ทดสอบประเภท 3 ขั้วไฟฟ้า ประกอบไปด้วย

1. ขั้วไฟฟ้าทำงาน (Working Electrode) คือ ชิ้นงานทดสอบ
2. ขั้วไฟฟ้ากระแส (Counter Electrode หรือ Auxiliary Electrode) คือ ขั้วไฟฟ้าที่ทำหน้าที่ให้ศักย์ไฟฟ้าแก่ขั้วไฟฟ้าทำงานเพื่อเร่งให้ชิ้นงานทดสอบเกิดการกัดกร่อน ซึ่งในงานวิจัยนี้ใช้แท่งแพลทินัมเป็นขั้วไฟฟ้ากระแส
3. ขั้วไฟฟ้าอ้างอิง (Referent Electrode) คือ ขั้วไฟฟ้ามาตรฐานคงที่ที่ใช้เพื่อเปรียบเทียบและวัดศักย์ไฟฟ้าจากขั้วไฟฟ้าทำงาน ซึ่งในงานวิจัยนี้ใช้ Ag/AgCl ในสารละลาย KCl 3 M

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เครื่องโพเทนทีโอสแตตทำหน้าที่ปล่อยศักย์ไฟฟ้าจากต่ำไปสูง และวัดความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้น เมื่อนำค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ได้มาสร้างกราฟ จะมีลักษณะดังรูปที่ 2.8

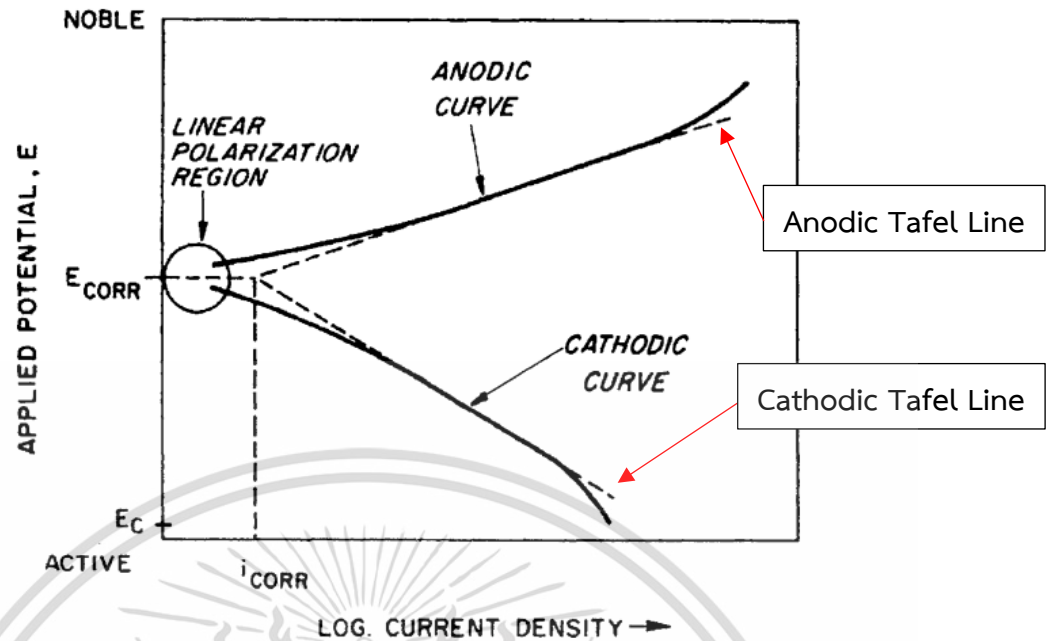


รูปที่ 2.8 กราฟโพลาริเซชันจากเทคนิคโพเทนทีโอดินามิก (Alicia Durán et al. 2018)

กราฟโพลาริเซชันในรูปที่ 2.8 สามารถใช้ศึกษาพฤติกรรมการกัดกร่อนของโลหะได้ 4 ช่วงจากล่าง - บน ดังนี้

1. **ช่วงแคโทดิก (Cathodic Region)** คือ ช่วงที่เกิดปฏิกิริยาตามสมการที่ (2.19-2.20) และโลหะยังไม่เกิดการกัดกร่อน ช่วงนี้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าแคโทดิกรวม ( $i_{0,H^+/H_2}$ ) สูงกว่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าแอโนดิกรวม ( $i_{0,M/M^+}$ )
2. **ช่วงแอโนดิก (Anodic Region)** คือ ช่วงที่เกิดปฏิกิริยาตามสมการที่ (2.21) และพื้นผิวโลหะเกิดการกัดกร่อนอย่างสม่ำเสมอ หรือเรียกอีกอย่างว่า **ช่วงแอคทีฟ (Active Region)** และโลหะเกิดการแตกตัวเป็นโลหะไอออน

ซึ่งสามารถคำนวณอัตราการกัดกร่อนของโลหะได้จากเส้นโค้งช่วงแคโทดิกและช่วงแอโนดิก ดังรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 การวัดค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อน ( $E_{\text{CORR}}$ ) และความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อน ( $i_{\text{CORR}}$ ) ด้วยเส้นทาเฟล (Alicia Durán et al. 2018)

จากรูปที่ 2.9 เส้นตรงที่สัมผัสกราฟช่วงศักย์เบี่ยงเบนไปทางช่วงแคโทดิกและช่วงแอโนดิก เรียกว่าเส้นทาเฟลแคโทดิก (Cathodic Tafel Line) และเส้นทาเฟลแอโนดิก (Anodic Tafel Line) ตามลำดับ จุดตัดระหว่างเส้นตรงสองเส้นคือจุดที่ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าแคโทดิกรวมเท่ากับ ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าแอโนดิกรวมเรียกว่า ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อน (Corrosion Current Density:  $i_{\text{CORR}}$ ) ซึ่งแปรผันตามอัตราการกัดกร่อน และสามารถนำไปใช้คำนวณอัตราการกัดกร่อน (Corrosion Rate: CR) ได้ ตามสมการที่ (2.22) (Denny A. Jones. 1996)

$$CR = \frac{k \times i_{\text{CORR}} \times EW}{A \times D} \quad (2.22)$$

- เมื่อ  $k$  คือ ค่าคงที่แปลงหน่วย = 0.00327 mmpy  
 $i_{\text{CORR}}$  คือ ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อน (Corrosion Current Density, mmpy)  
 $EW$  คือ น้ำหนักสมมูล (Equivalent Weight)  
 $A$  คือ พื้นที่ทดสอบ (Surface Area,  $\text{cm}^2$ )  
 $D$  คือ ความหนาแน่น (Density,  $\text{g}/\text{cm}^3$ )

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ศักย์ไฟฟ้าที่จุด  $i_{corr}$  เรียกว่า ศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อน (Corrosion Applied Potential:  $E_{corr}$ ) ซึ่งสามารถบอกพฤติกรรมของการกัดกร่อนโลหะหรือความยากง่ายในการกัดกร่อนโลหะ ดังนี้

$E_{corr}$  ต่ำ อาจเกิดจากในกระบวนการเกิดปฏิกิริยาแอโนดิกมาก ทำให้เหล็กถูกกัดกร่อนได้ง่าย มีภาวะความต้านทานการกัดกร่อนต่ำ

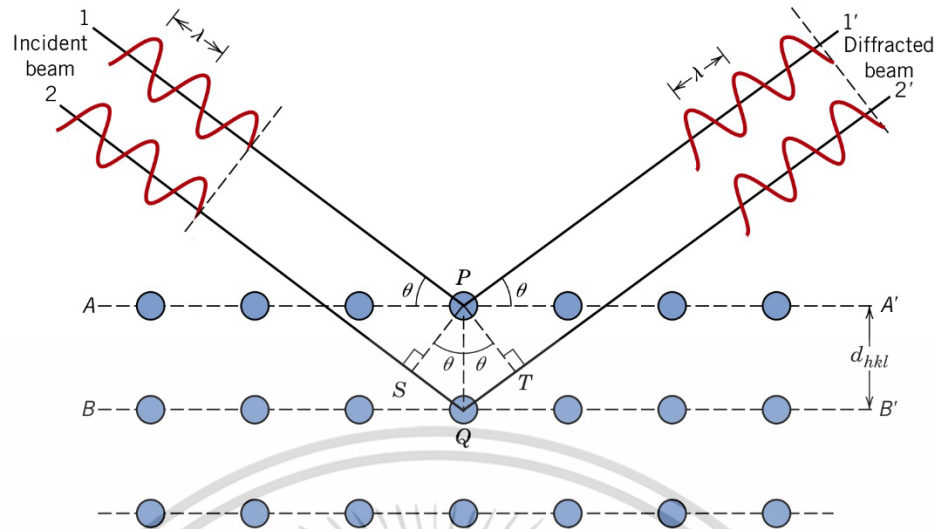
$E_{corr}$  สูง อาจเกิดจากในกระบวนการเกิดปฏิกิริยาแอโนดิกน้อย เนื่องจากเกิดชั้นฟิล์มพาสซีฟ (Passive Film) ป้องกันพื้นผิวโลหะ หรือเกิดจากมีปฏิกิริยาแคโทดิกเพิ่มขึ้น เพราะมีการละลายของแก๊สออกซิเจนในสารละลายอิเล็กโทรไลต์เพิ่มขึ้น

3. ช่วงพาสซีฟ (Passive Region) คือ ช่วงที่โลหะเกิดฟิล์มพาสซีฟบนพื้นผิวและมีสภาพพาสซีฟของเหล็ก (Passivity) ซึ่งช่วยป้องกันผิวเหล็กกล้าไร้สนิมจากการกัดกร่อน ช่วงนี้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าช่วงแอโนดิกลดลงและคงที่ เรียกความหนาแน่นของกระแสที่ลดลงและคงที่ ณ จุดต่ำสุดว่า ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าพาสซีฟ (Passive Current Density:  $i_p$  หรือ  $i_{pass}$ ) หากค่า  $i_p$  ต่ำ จะแสดงความแข็งแรงของฟิล์มพาสซีฟที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวโลหะซึ่งทำให้ต้านทานการกัดกร่อนได้ดี เนื่องจากพฤติกรรมการกัดกร่อนตามปฏิกิริยาออกซิเดชัน-รีดักชัน (Oxidation-Reduction) ของโลหะที่เกิดขึ้นพร้อม ๆ กัน ผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นจะละลายในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ หรือตกตะกอนเป็นออกไซด์ของโลหะ หรือเกิดเป็นชั้นฟิล์มออกไซด์บาง ๆ เคลือบบนพื้นผิวโลหะ (หรือฟิล์มพาสซีฟ) ทำหน้าที่ป้องกันไม่ให้โลหะสัมผัสกับออกซิเจนหรือสารกัดกร่อนโดยตรง เรียกการเกิดฟิล์มพาสซีฟเคลือบพื้นผิวโลหะนี้ว่า การเกิดพาสซีเวชัน (Passivation) (ณรงค์ ผึ้งวิวัฒน์. 2547)

4. ช่วงทรานส์พาสซีฟ (Transpassive Region) คือ ช่วงที่ฟิล์มพาสซีฟที่ปกคลุมพื้นผิวโลหะแตกหรือสลายไป สังเกตได้จากความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าช่วงแอโนดิกจะเพิ่มขึ้นอีกครั้ง

## 2.6 เทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-ray Diffraction: XRD) (William D. Callister and Rethwisch. 1991; ศุภฤกษ์ เห็นประเสริฐแท้. 2555)

เทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ใช้วิเคราะห์ชนิดของธาตุ หรือสารประกอบ และโครงสร้างผลึกของสสารทั้งในเชิงคุณภาพและเชิงปริมาณ เช่น Body-centered Cubic (BCC) หรือ Face-centered Cubic (FCC) หรือ Hexagonal Close-packed (HCP) เป็นต้น โดยอาศัยหลักการจากแนวคิดของเซอร์วิลเลียม เฮนรี แบร์ริก (W.H. Bragg) และเซอร์วิลเลียม ลอเรนซ์ แบร์ริก (W.L. Bragg) เมื่อรังสีเอกซ์พลังงานเดี่ยวตกกระทบผลึกหรือโครงสร้างที่มีการจัดเรียงตัวเป็นระนาบซ้อนกันเป็นชั้น ๆ จะเกิดการสะท้อนบนระนาบของผลึก โดยมุมตกกระทบมีค่าเท่ากับมุมสะท้อน ดังรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 แบบจำลองการแทรกสอดของรังสีเอกซ์บนระนาบของอะตอม A-A' และระนาบของอะตอม B-B' (William D. Callister and Rethwisch. 1991)

และจากพฤติกรรมดังกล่าวสามารถคำนวณหาระยะห่างระหว่างระนาบได้จากกฎของแบร์ริก (Bragg's Law) ดังสมการที่ (2.23)

$$n\lambda = d_{hkl} \sin\theta \quad (2.23)$$

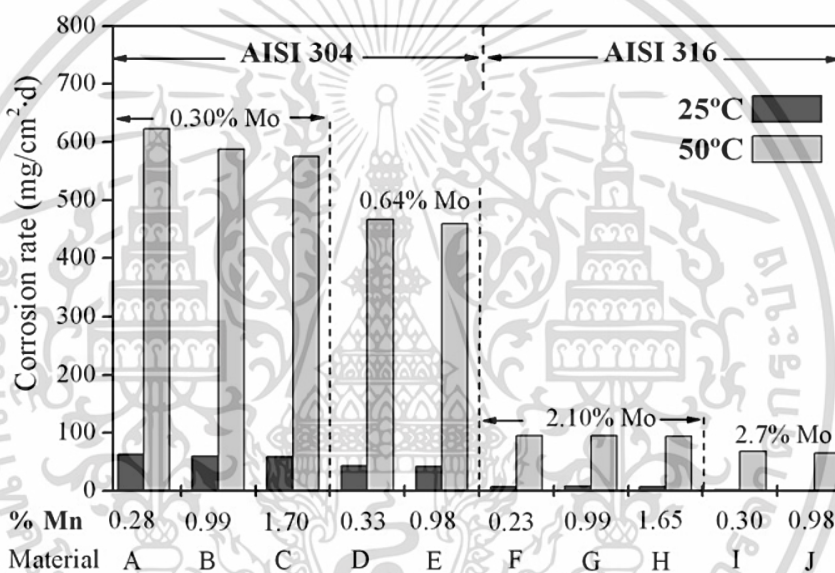
เมื่อ	$n$	คือ	ลำดับของการสะท้อน
	$\lambda$	คือ	ความยาวของคลื่นรังสีเอกซ์
	$d_{hkl}$	คือ	ระยะห่างระหว่างระนาบ $h k l$
	$\theta$	คือ	มุมตกกระทบและมุมสะท้อนเมื่อวัดจากระนาบที่กำลังพิจารณา

จากสมการที่ (2.23) หากยิงรังสีเอกซ์ที่ทราบค่าความยาวคลื่นไปยังสสารทดสอบที่มีความเป็นผลึก และทราบค่าของมุมตกกระทบที่ได้ จะสามารถคำนวณหาระยะ  $d_{hkl}$  และนำไปเปรียบเทียบกับตำแหน่งมุมของพีกที่ได้จากการทดสอบวัสดุอ้างอิง ซึ่งรวบรวมไว้เป็นฐานข้อมูลโดยองค์กร The International Centre for Diffraction Data (ICDD) ก็จะสามารถระบุได้ว่าเป็นธาตุหรือสารประกอบใด และมีโครงสร้างผลึกแบบใด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

A. Pardo et al. (A. Pardo et al. 2008) ศึกษาผลของแมงกานีส (Mn) และโมลิบดีนัม (Mo) ต่อความต้านทานการกัดกร่อนของเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 304 (Mn 0.28-1.70 wt% และ Mo 0.30-0.64 wt%) และ 316 (Mn 0.23-1.65 wt% และ Mo 0.32-2.10 wt%) ที่ผ่านการกำจัดสเกลออกไซด์โดยการขัดด้วยกระดาษทราย (เหล็กคอยล์ขาว) ในสารละลาย  $H_2SO_4$  30 wt% ที่อุณหภูมิ 25 และ 50°C พบว่าหลังจากแช่ชิ้นโลหะทดสอบในสารละลายกรด  $H_2SO_4$  30 wt% เป็นเวลา 6 วัน อัตราการกัดกร่อนของเหล็กคอยล์ขาวที่อุณหภูมิ 50°C สูงกว่าอัตราการกัดกร่อนที่อุณหภูมิ 25°C ดังรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 การเปลี่ยนแปลงของอัตราการกัดกร่อนของเหล็กกล้าไร้สนิม 304 และ 316 เทียบกับปริมาณของ Mn และ Mo ที่ 25 และ 50°C ในสารละลาย  $H_2SO_4$  30 wt% (A. Pardo et al. 2008)

จากการวัดอัตราการกัดกร่อนโดยการชั่งน้ำหนักก่อนและหลังการทดสอบพบว่าที่อุณหภูมิ 50°C เหล็กคอยล์ขาวเกรด 304 ที่มี Mn และ Mo สูง (1.70 และ 0.64 wt% ตามลำดับ) อัตราการกัดกร่อนในสารละลายกรด  $H_2SO_4$  30 wt% ลดลง และสำหรับเหล็กคอยล์ขาวเกรด 316 พบว่าเมื่อ Mn ในเหล็กคอยล์ขาวเพิ่มขึ้น อัตราการกัดกร่อนไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ในขณะที่เมื่อ Mo เพิ่มขึ้น อัตราการกัดกร่อนของเหล็กคอยล์ขาวลดลงเล็กน้อย ในงานวิจัยนี้สรุปได้ว่าอัตราการกัดกร่อนของเหล็กคอยล์ขาวเกรด 316 ต่ำ จึงต้านทานการกัดกร่อนได้ดี

การศึกษาพฤติกรรมความต้านทานการกัดกร่อนของเหล็กคอยล์ขาว 304 และ 316 โดยพิจารณาจาก  $i_{corr}$  ด้วยเทคนิคโพเทนทิโอดินามิก หลังการแช่ชิ้นงานทดสอบในสารละลาย  $H_2SO_4$  30 wt% 1 ชม. ที่  $25^{\circ}C$  แสดงให้เห็นว่าที่ปริมาณ Mo เท่ากัน เมื่อปริมาณ Mn เพิ่มขึ้น ค่า  $i_{corr}$  ลดลง แสดงว่าอัตราการกัดกร่อนลดลงเนื่องจากเกิดฟิล์มออกไซด์บนผิวเหล็กคอยล์ขาว ดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 ผลการทดลองจากกราฟโพลาไรเซชันของชิ้นงานทดสอบแช่ในสารละลายกรด  $H_2SO_4$  30 wt% 1 ชั่วโมง ที่  $25^{\circ}C$

ชนิดของโลหะ	ชิ้นงานทดสอบ	Mo (wt%)	Mn (wt%)	$E_{corr}$ (V)	$R_p$ ( $\Omega$ cm <sup>2</sup> )	$i_{corr}$ (A/cm <sup>2</sup> )
AISI 304	A	0.29	0.28	-0.329	9.03	$2.91 \times 10^{-3}$
	B	0.30	0.99	-0.327	9.37	$2.71 \times 10^{-3}$
	C	0.29	1.70	-0.314	10.02	$2.69 \times 10^{-3}$
	D	0.64	0.33	-0.312	12.07	$2.19 \times 10^{-3}$
	E	0.64	0.98	-0.294	12.87	$2.12 \times 10^{-3}$
AISI 316	F	2.10	0.23	-0.291	24.84	$1.44 \times 10^{-3}$
	G	2.09	0.99	-0.279	25.16	$1.36 \times 10^{-3}$
	H	2.11	1.65	-0.272	26.05	$1.27 \times 10^{-3}$
	I	2.71	0.30	-0.265	30.13	$9.03 \times 10^{-4}$
	J	2.74	0.98	-0.260	31.69	$8.10 \times 10^{-4}$

จากตารางที่ 2.2 การวิเคราะห์พฤติกรรมการเกิดฟิล์มออกไซด์ด้วยเทคนิคอิมพีแดนซ์สเปกโทรสโกปี (Electrochemical Impedance Spectroscopy: EIS) จากความต้านทานเชิงเคมีไฟฟ้าในการส่งผ่านอิเล็กตรอนในเหล็กคอยล์ขาวเกรด 304 และ 316 ที่มี Mo ใกล้เคียงกัน พบว่าเมื่อ Mn เพิ่มขึ้น ค่า  $R_p$  เพิ่มขึ้น ( $R_p$  คือ ค่าโพลาไรเซชันความต้านทานกระแสไฟฟ้า (Polarization Resistance)) แสดงการแพร่ผ่านในสารละลายกรดยากเนื่องจากการก่อตัวของชั้นฟิล์มออกไซด์ (Sebastián Feliu. 2020) นอกจากนี้จากการทดสอบชนิดของฟิล์มออกไซด์ด้วยเทคนิค X-ray Photoelectron Spectroscopy (XPS) พบออกไซด์ของ  $MoO_3$  และ Mo บนผิวของชิ้นงานทดสอบแต่ไม่พบออกไซด์ของแมงกานีส ผลของเทคนิคโพเทนทิโอดินามิก และ EIS แสดงให้เห็นว่า Mn ในเหล็กคอยล์ขาวเกรด 304 และ 316 มีผลต่อการเพิ่มความต้านทานการกัดกร่อนได้ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Min J. Kim and Jung G. Kim (Min J. Kim and Jung G. Kim. 2015) ที่ศึกษา

ผลของปริมาณ Mn 0.7, 2.0 และ 5.0 wt% ต่อความต้านทานการกัดกร่อนในสารละลายกรด  $H_2SO_4$  เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

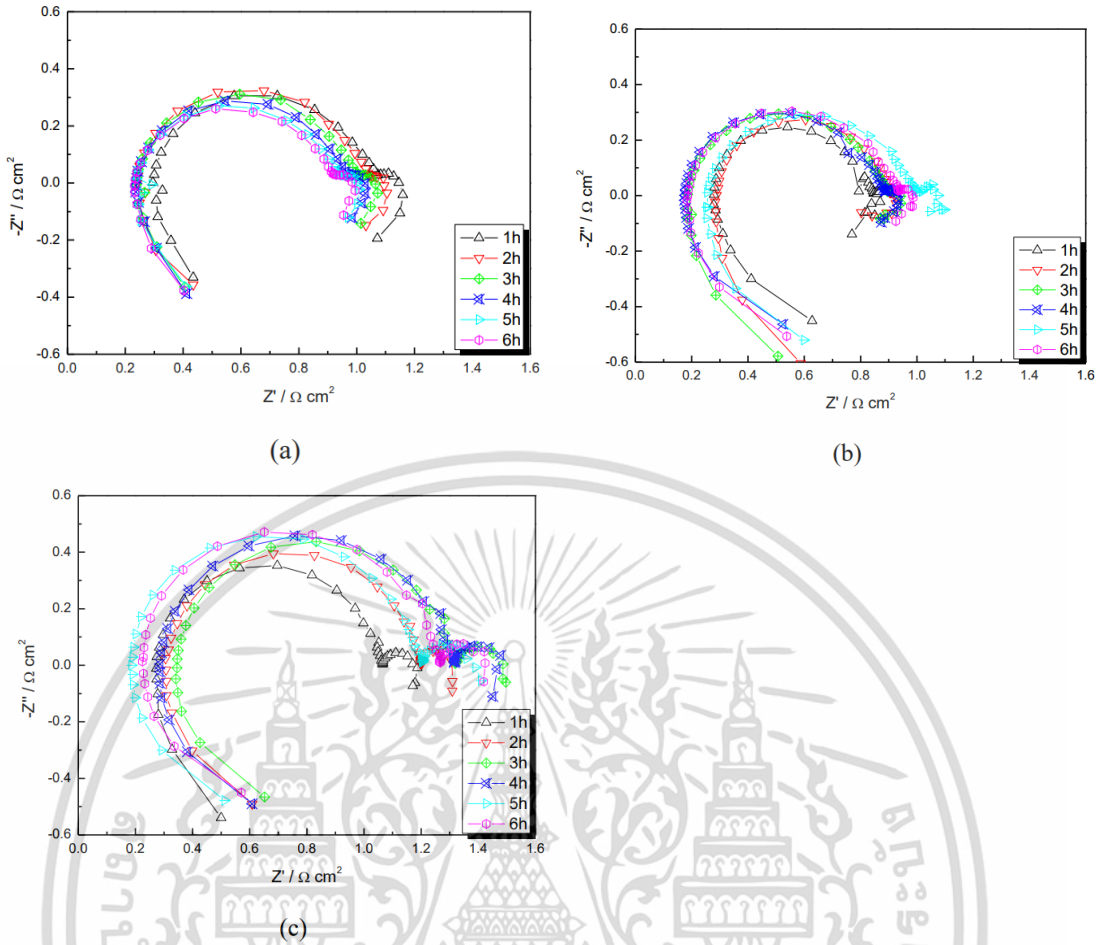
10 wt% ของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ 0.07 wt% และผ่านการกำจัดสเกลออกไซด์โดยการขัดด้วยกระดาษทราย (เหล็กคอปเปอร์ขาว) เมื่อทดสอบด้วยเทคนิคโพเทนทิโอสแตติกหลังจากแช่เหล็กคอปเปอร์ขาวในสารละลาย  $H_2SO_4$  10 wt% เป็นเวลา 6 ชั่วโมง พบว่าเมื่อปริมาณแมงกานีสในเหล็กคอปเปอร์ขาว 5.0 wt% ค่า  $i_{corr}$  ลดลง ดังตารางที่ 2.3 แสดงว่าความต้านทานการกัดกร่อนสูงขึ้น

**ตารางที่ 2.3** ผลการทดสอบ  $E_{corr}$  และ  $i_{corr}$  ของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำในสารละลาย  $H_2SO_4$  10 wt% ด้วยเทคนิคโพเทนทิโอสแตติก (Min J. Kim and Jung G. Kim. 2015)

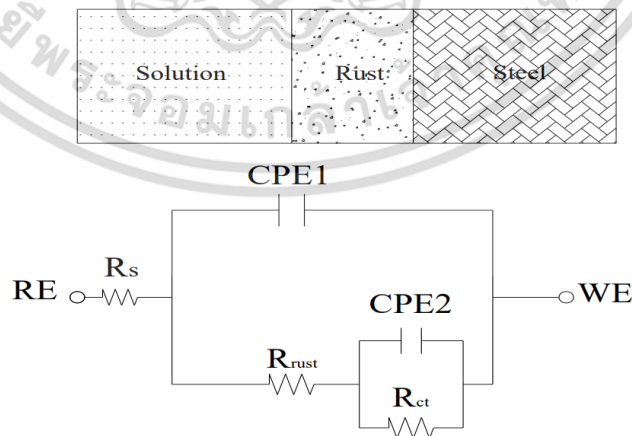
ชิ้นงานทดสอบ Mn (wt%)	ระยะเวลาการแช่ชิ้นงาน ก่อนการทดสอบ (ชั่วโมง)	$E_{corr}$ (mV)	$i_{corr}$ (mA/cm <sup>2</sup> )
0.7	0.5	-444.00	1.25
	6.0	-453.99	6.09
2.0	0.5	-494.78	4.77
	6.0	-481.20	6.96
5.0	0.5	-507.00	4.97
	6.0	-484.70	3.85

การศึกษาพฤติกรรมของการเกิดฟิล์มออกไซด์ด้วยเทคนิคอิมพีแดนซ์สเปกโทรสโกปี (Electrochemical Impedance Spectroscopy: EIS) จาก Nyquist Plot ดังรูปที่ 2.12 ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ของอิมพีแดนซ์ (Z คือ ค่าความต้านทานที่เกิดจากการเคลื่อนที่ของประจุในสารละลาย) กับความต้านทานกระแสไฟฟ้าที่เกิดจากชั้นฟิล์มออกไซด์และพื้นผิวของชิ้นงานทดสอบที่มีการแพร่ของสารละลาย  $H_2SO_4$  10 wt% จะได้วงจรสมมูล (Equivalent Circuit Model) ของระบบ ซึ่งอธิบายการเกิดฟิล์มออกไซด์หรือสนิม (Rust) ของเหล็กคอปเปอร์ขาวที่เกิดการกัดกร่อน ดังรูปที่ 2.13 (เมื่อ  $R_p$  = ค่าโพลาริเซชันเนื่องจากความต้านทานกระแสไฟฟ้า ซึ่งคำนวณได้จากผลรวมของความต้านทานของชั้นฟิล์มออกไซด์ (Rust Resistance:  $R_{rust}$ ) และความต้านทานเนื่องจากการแพร่ของสารละลาย (Charge Transfer Resistance:  $R_{ct}$ ))

รูปที่ 2.14 แสดงค่าโพลาริเซชันเนื่องจากความต้านทานกระแสไฟฟ้า (Polarization Resistance:  $R_p$ ) กับระยะเวลาที่แช่เหล็กคอปเปอร์ขาวในสารละลาย  $H_2SO_4$  10 wt% 1-6 ชั่วโมง ซึ่งคำนวณได้จาก Nyquist Plot

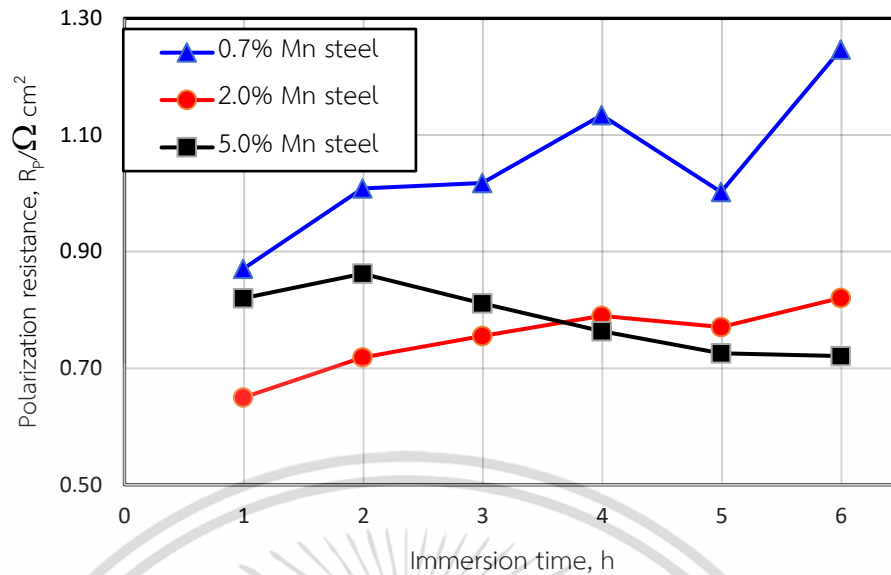


รูปที่ 2.12 กราฟ Nyquist Plot ของเหล็กคอยล์ขาวในสารละลาย  $H_2SO_4$  10 wt% 1 ชั่วโมง (a), (b) และ (c) ปริมาณ Mn 0.7, 2.0 และ 5.0 wt% ตามลำดับ (Min J. Kim and Jung G. Kim. 2015)



รูปที่ 2.13 วงจรสมมูลที่เหมาะสมกับข้อมูลผลการทดลองจาก EIS (Min J. Kim and Jung G. Kim. 2015)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

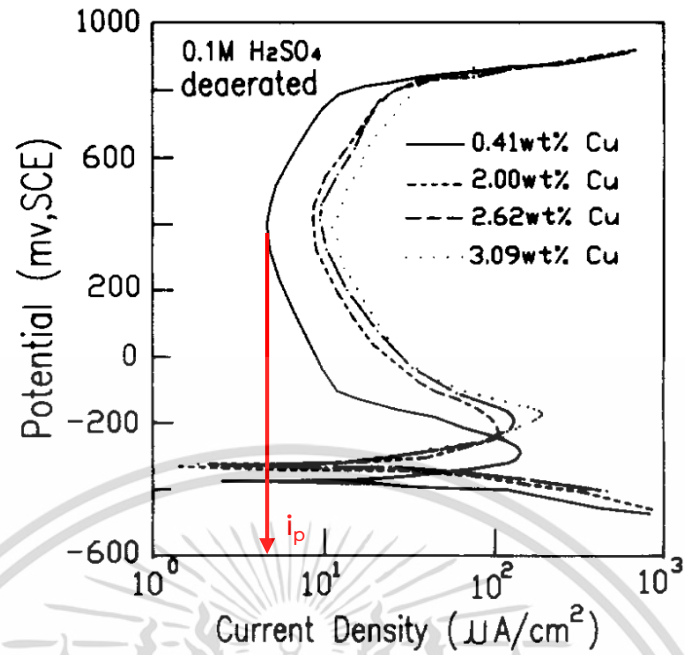


รูปที่ 2.14 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างโพลาไรเซชันเนื่องจากความต้านทานกระแสไฟฟ้า (Polarization Resistance:  $R_p$ ) กับระยะเวลาที่แช่เหล็กคอยล์ขาวในสารละลาย  $H_2SO_4$  10 wt% (Min J. Kim and Jung G. Kim. 2015)

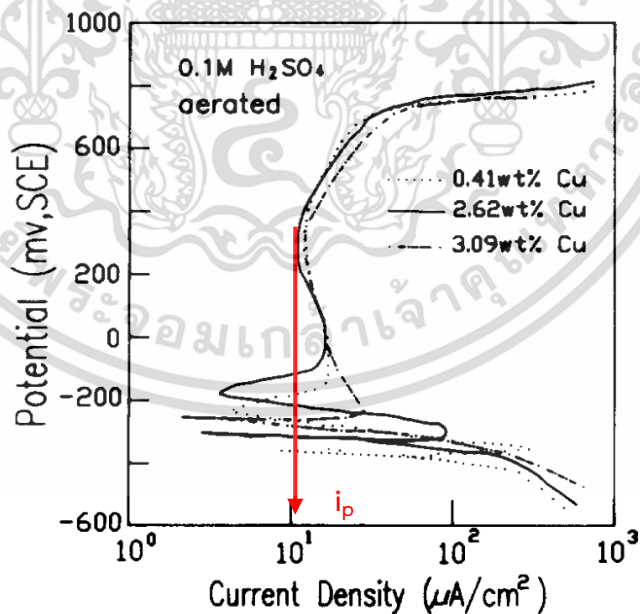
จากรูปที่ 2.14 พบว่าค่า  $R_p$  ของเหล็กคอยล์ขาวคาร์บอนต่ำ 0.07 wt% และมี Mn 0.7 wt% มีแนวโน้มลดลงเมื่อระยะเวลาที่แช่ในสารละลาย  $H_2SO_4$  10 wt% เพิ่มขึ้น แสดงว่าความต้านทานการกัดกร่อนลดลง ในขณะที่เหล็กคอยล์ขาวที่มี Mn 2.0 wt% และ 5.0 wt% ค่า  $R_p$  มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อระยะเวลาที่แช่ในสารละลาย  $H_2SO_4$  10 wt% เพิ่มขึ้น แสดงว่าความต้านทานการกัดกร่อนเพิ่มขึ้น กล่าวได้ว่ามีออกไซด์ของ Mn ปกคลุมพื้นผิวของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำที่มี Mn 2.0 และ 5.0 wt% (ยืนยันด้วยผลการทดสอบโดยเทคนิค X-ray Photoelectron Spectroscopy (XPS) พบผลิตภัณฑ์จากการกัดกร่อน ได้แก่  $MnO_2$ ,  $Mn_2O_3$ ,  $Mn_3O_4$ ,  $MnSO_4$  และ  $MnS$ ) สรุปได้ว่า Mn ในเหล็กคอยล์ขาวคาร์บอนต่ำ (0.07 wt%) มีผลต่อการเพิ่มความต้านทานการกัดกร่อนในสารละลายกรด  $H_2SO_4$  ได้เช่นกัน

Hann-Tuw Lin et al. (Hann-Tuw Lin et al. 1992) ศึกษาผลของ Cu ต่อการกัดกร่อนในเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนไนต์ 18Cr-8Ni และผสม Cu 0.41-3.09 wt% ที่ผ่านการกำจัดสเกลออกไซด์โดยการขัดด้วยกระดาษทราย (เหล็กคอยล์ขาว) ในสารละลายกรด  $H_2SO_4$  0.1 M ในเวลา 2 ชั่วโมงที่ไม่มีออกซิเจน (รูปที่ 2.15) และมีออกซิเจน (รูปที่ 2.16) โดยใช้เทคนิคโพเทนทิโอสแตติก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



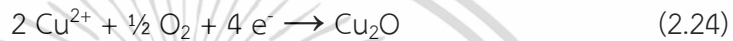
รูปที่ 2.15 กราฟโพเทนทีโอไดนามิกโพลาริเซชันของเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนไนต์ (เหล็กคอยล์ขาว) ที่มี Cu 0.41, 2.00, 2.62 และ 3.09 wt% ในสารละลาย  $\text{H}_2\text{SO}_4$  0.1 M 2 ชั่วโมง ณ ภาวะที่ไม่มีแก๊สออกซิเจน (Hann-Tuw Lin et al. 1992)



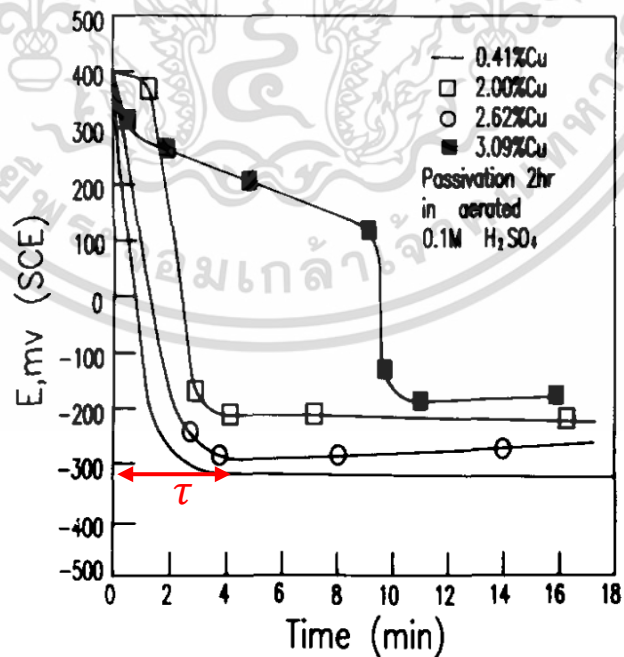
รูปที่ 2.16 กราฟโพเทนทีโอไดนามิกโพลาริเซชันของเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนไนต์ (เหล็กคอยล์ขาว) ที่มี Cu 0.41, 2.62 และ 3.09 wt% ในสารละลาย  $\text{H}_2\text{SO}_4$  0.1 M 2 ชั่วโมง ณ ภาวะที่มีแก๊สออกซิเจน (Hann-Tuw Lin et al. 1992)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูป 2.15 พบว่าในสารละลายกรด  $\text{H}_2\text{SO}_4$  0.1 M ที่ไม่มีออกซิเจน เมื่อปริมาณ Cu เพิ่มขึ้นถึง 3.09 wt% ค่า  $i_{\text{corr}}$  ของทุกตัวอย่างเหล็กคอปเปอร์มีค่าใกล้เคียงกัน แต่ค่า  $i_p$  มีแนวโน้มลดลง แสดงให้เห็นว่าปริมาณ Cu มีผลทำให้ความแข็งแรงของฟิล์มพาสซีฟลดลงหรือความต้านทานการกัดกร่อนลดลง จากรูป 2.16 พบว่าในสารละลายกรด  $\text{H}_2\text{SO}_4$  0.1 M ที่มีแก๊สออกซิเจน เมื่อปริมาณ Cu เพิ่มขึ้น ค่า  $i_{\text{corr}}$  มีแนวโน้มลดลง แต่ค่า  $i_p$  มีค่าใกล้เคียงกัน ในภาวะที่มีออกซิเจน Cu มีความสามารถในการทำปฏิกิริยาออกซิเดชันกับแก๊สออกซิเจนและเกิดขึ้นฟิล์มออกไซด์ของ  $\text{Cu}_2\text{O}$  ป้องกันผิวโลหะตามสมการที่ (2.24) (ยืนยันด้วยผลการทดสอบโดยเทคนิค X-ray Photoelectron Spectroscopy (XPS) พบ  $\text{Cu}_2\text{O}$ )



ในการทดสอบความเสถียรของชั้นฟิล์มออกไซด์ของ  $\text{Cu}_2\text{O}$  ที่วิเคราะห์จากกราฟศักย์ไฟฟ้าสลายตัว (Potential Decay Curve) พบว่า ณ ตำแหน่งที่ค่าศักย์ไฟฟ้าคงที่ เมื่อปริมาณ Cu เพิ่มขึ้น ระยะเวลาการฟื้นฟูศักย์ไฟฟ้า (Reactivation Time;  $\tau$ ) มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ดังรูปที่ 2.17 แสดงว่าฟิล์มออกไซด์ของ  $\text{Cu}_2\text{O}$  ที่เกิดจากการพาสซีเวชัน (Passivation) มีความเสถียรและสลายตัวได้ยาก นั่นคือทำให้เหล็กคอปเปอร์มีความต้านทานการกัดกร่อนสูง



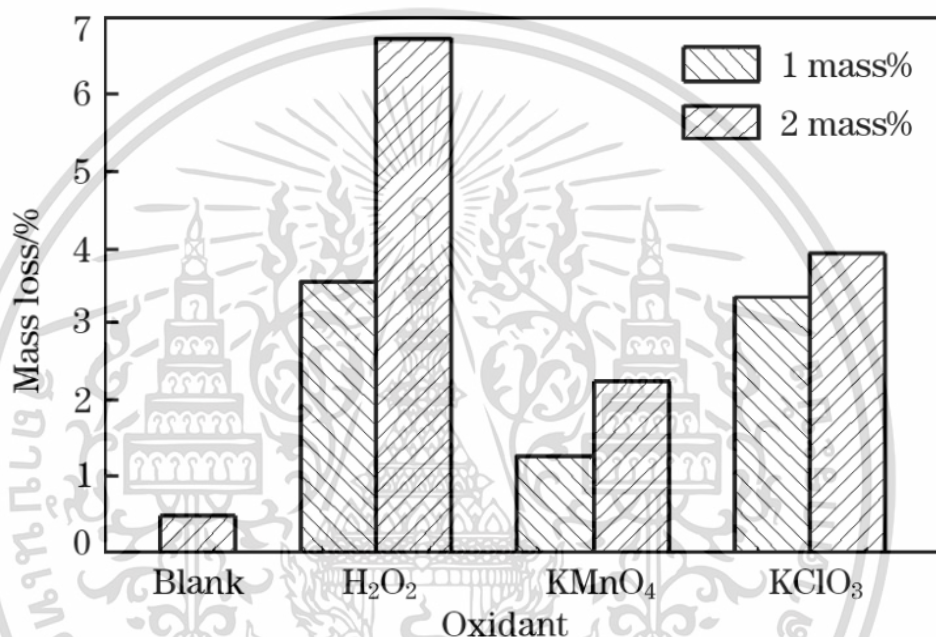
รูปที่ 2.17 ผลของ Cu 0.41, 2.00, 2.62 และ 3.09 wt% ต่อศักย์ไฟฟ้าสลายตัวในสารละลาย  $\text{H}_2\text{SO}_4$

0.1 M ณ ภาวะที่มีแก๊สออกซิเจน (Hann-Tuw Lin et al. 1992)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

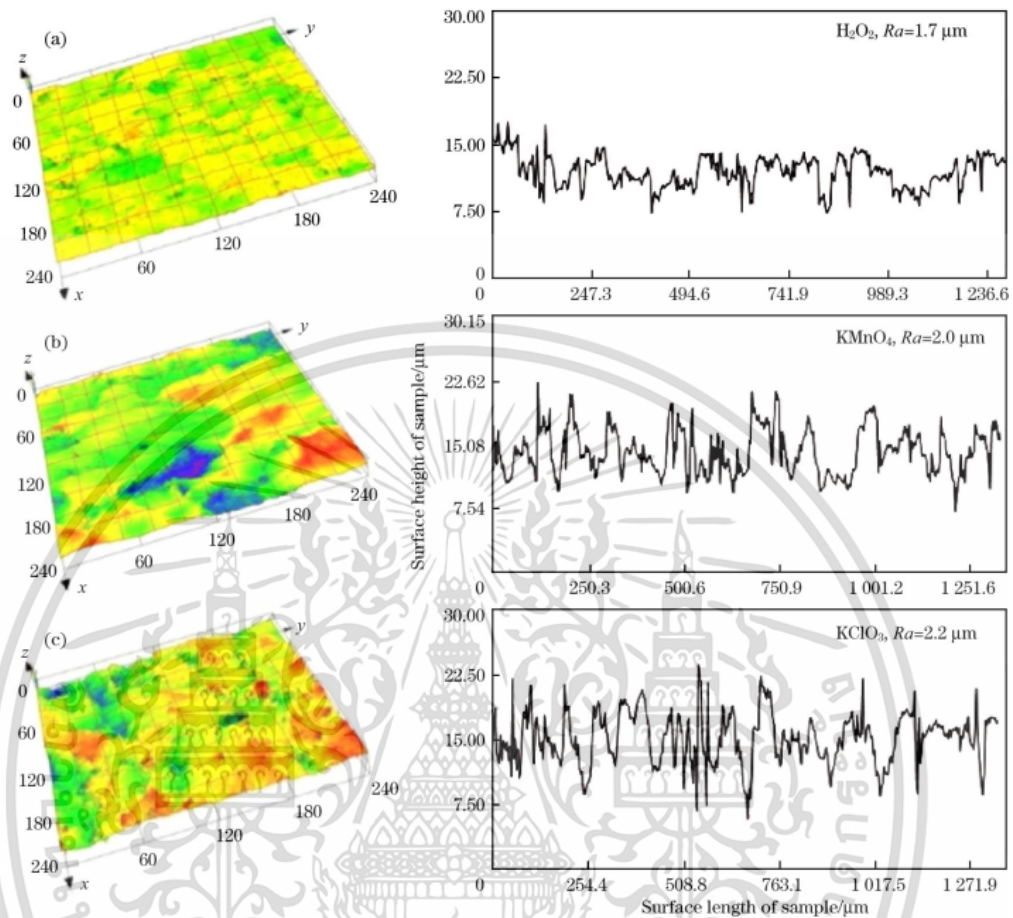
Qiong Xie et al. (Qiong Xie et al. 2016) ศึกษาการกำจัดสเกลออกไซด์บนเหล็กกล้าไร้สนิมรีดร้อนเกรด 480 (เหล็กคอยล์ดำ) ที่  $50^{\circ}\text{C}$  โดยใช้สารละลายอิเล็กโทรไลต์คือ HCl 5-8 wt% และสารละลายผสมของ HCl 5-8 wt% ที่มีตัวออกซิไดส์ต่าง ๆ ได้แก่  $\text{H}_2\text{O}_2$  1 wt%,  $\text{H}_2\text{O}_2$  2 wt%,  $\text{KMnO}_4$  1 wt%,  $\text{KMnO}_4$  2 wt%,  $\text{KClO}_3$  1 wt% และ  $\text{KClO}_3$  2 wt% ในเวลา 50 วินาที พบว่าน้ำหนักของเหล็กคอยล์ดำหลังการกัดกรวดในสารละลาย HCl ที่มี  $\text{H}_2\text{O}_2$  2 wt% ลดลงมากที่สุด นั่นคือสเกลออกไซด์ถูกกำจัดได้มากที่สุด (รูปที่ 2.18)



รูปที่ 2.18 เปอร์เซ็นต์การลดลงของน้ำหนักเหล็กคอยล์ดำหลังการกัดกรวดร่วมกับกระแสไฟฟ้าในสารละลาย HCl 5-8 wt% ที่  $50^{\circ}\text{C}$  และมีตัวออกซิไดส์  $\text{H}_2\text{O}_2$  1 และ 2 wt%,  $\text{KMnO}_4$  1 และ 2 wt%,  $\text{KClO}_3$  1 และ 2 wt% (Qiong Xie et al. 2016)

หลังการกัดกรวดในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ทุกความเข้มข้น จากการวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy: SEM) ไม่พบสเกลออกไซด์หลงเหลือบนพื้นผิวเหล็กคอยล์ดำ แต่พบการกัดกร่อนบริเวณขอบเกรน (Intergranular Corrosion) ในสารละลายผสมของ HCl 5-8 wt% กับสารละลาย  $\text{H}_2\text{O}_2$  2 wt% และสารละลายผสมของ HCl 5-8 wt% กับสารละลาย  $\text{KMnO}_4$  1 และ 2 wt% นอกจากนี้การวัดความหยาบผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบคอนโฟคอลชนิดที่ใช้เลเซอร์ในการสแกน (Confocal Laser Scanning Microscopy: CLSM) ดังรูปที่ 2.19 แสดงให้เห็นว่าความหยาบผิวของเหล็กกล้าไร้สนิมรีดร้อนเกรด 480 เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

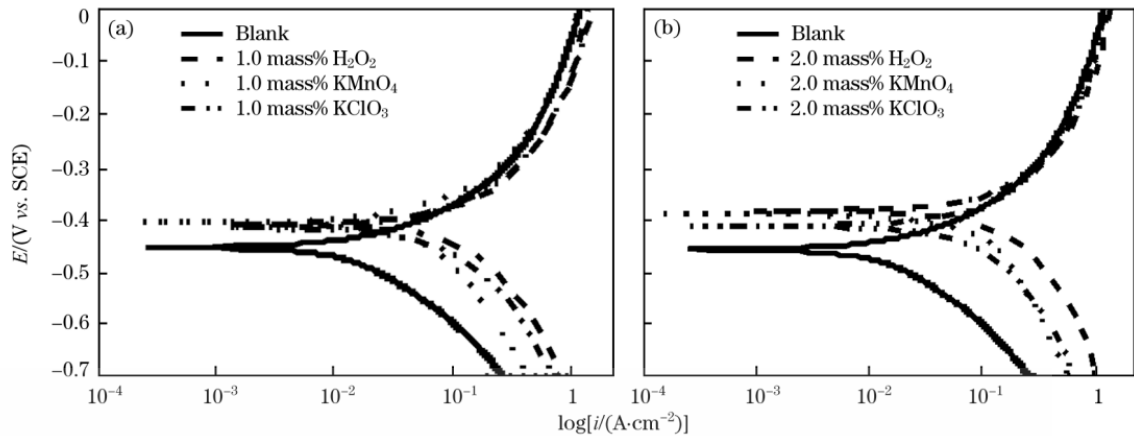
(เหล็กคอยล์ดำ) หลังการกัดกรดในสารละลายผสมของ HCl 5-8 wt% กับสารละลาย  $H_2O_2$  มีความหยาบผิวต่ำที่สุด ( $R_a = 1.7 \mu m$ )



รูปที่ 2.19 แบบจำลองความหยาบผิวด้วยกล้อง CLSM ของเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 430 หลังการกัดกรดร่วมกับกระแสไฟฟ้าในสารละลาย HCl 5-8 wt% ที่  $50^{\circ}C$  ที่มีตัวออกซิไดส์ (a)  $H_2O_2$ , (b)  $KMnO_4$  และ (c)  $KClO_3$  (Qiong Xie et al. 2016)

จากการศึกษาผลของการเติมตัวออกซิไดส์ในสารละลาย HCl 5-8 wt% โดยเทคนิคอิมพีแดนซ์สเปกโทรสโกปี (Electrochemical Impedance Spectroscopy: EIS) พบว่าการเติมตัวออกซิไดส์ทำให้ค่าความต้านทานเนื่องจากการแพร่ของสารละลายเข้าไปในฟิล์มพาสซีฟ ( $R_{ct}$ ) ลดลง แสดงว่าความต้านทานการกัดกร่อนของเหล็กคอยล์ดำลดลง การกำจัดสเกลออกไซด์ดีขึ้น ค่า  $R_{ct}$  ของการกัดกรดในสารละลายผสม HCl 5-8 wt% กับ  $H_2O_2$  2 wt% มีค่าต่ำที่สุด ( $0.41 \Omega$ ) แสดงว่าสามารถกำจัดสเกลออกไซด์ได้มากที่สุด ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดสอบด้วยเทคนิคโพเทนทิโอดนามิก พบว่าค่า  $i_{corr}$  ที่วัดได้มีค่าสูงที่สุด ( $0.591 A/cm^2$ ) ดังรูปที่ 2.20

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.20 กราฟโพเทนทีโอไดนามิกโพลาริเซชันของเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 430 ในสารละลาย HCl 5-8 wt% (a) มีตัวออกซิไดส์  $\text{H}_2\text{O}_2$ ,  $\text{KMnO}_4$  และ  $\text{KClO}_3$  และ (b) ไม่มีตัวออกซิไดส์  $\text{H}_2\text{O}_2$ ,  $\text{KMnO}_4$  และ  $\text{KClO}_3$  (Qiong Xie et al. 2016)

ดังนั้นสรุปได้ว่าไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เป็นตัวออกซิไดส์ที่แรงกว่า  $\text{KMnO}_4$  และ  $\text{KClO}_3$  จึงสามารถกำจัดสเกลออกไซด์ได้ดีที่สุด และทำให้ผิวของเหล็กกล้าไร้สนิมหลังการกัดกรวดเรียกว่าการกัดกรวดในสารละลายกรดที่ไม่เติมตัวออกซิไดส์

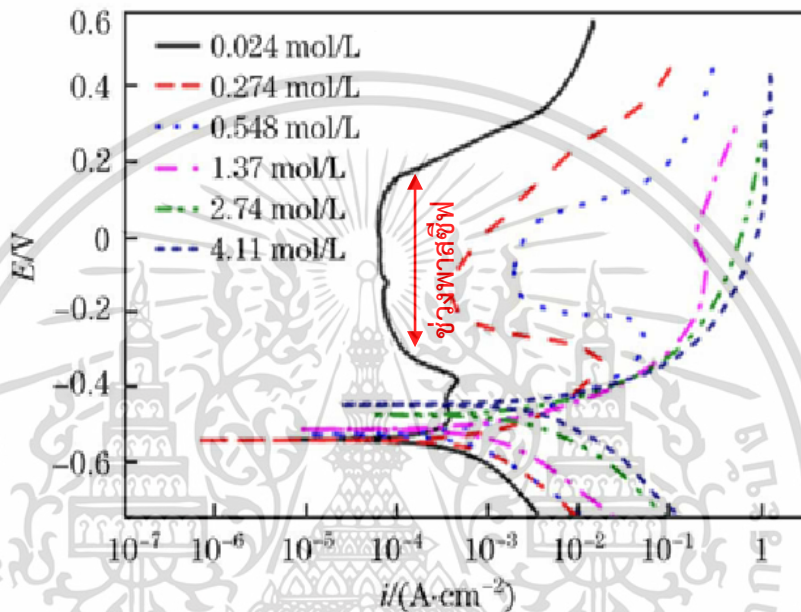
Ying-ying Yue et al. (Ying-ying Yue et al. 2016) ศึกษาพฤติกรรมการกัดกรวดของเหล็กกล้าไร้สนิมรีดร้อนเกรด 430 (เหล็กคอปเปอร์ต่ำ) ในสารละลาย HCl เป็นองค์ประกอบ (HCl-based Solution) เพื่อพิจารณาทดแทนการใช้สารละลาย  $\text{HNO}_3\text{-HF}$  ที่นิยมใช้กัดกรวดในอุตสาหกรรมการผลิตเหล็กกล้าไร้สนิม ผลการศึกษาพฤติกรรมการกัดกรวดในสารละลาย HCl เป็นองค์ประกอบเพื่อกำจัดสเกลออกไซด์โดยการวัดการเปลี่ยนแปลงค่าศักย์ไฟฟ้าระหว่างการกัดกรวดสรุปได้ดังนี้

1. สารละลายกัดกรวดแทรกซึมเข้าไปในเนื้อโลหะผ่านรอยแตกของชั้นสเกลออกไซด์
2. สเกลออกไซด์ ชั้นพร่องโครเมียม และเนื้อโลหะ ถูกสลายได้ด้วยสารละลายกรด
3. สเกลออกไซด์ถูกกำจัดได้หมด

ในการทดสอบความเข้มข้นของ HCl ในองค์ประกอบที่เหมาะสม คณะวิจัยทดลองเปรียบเทียบการกัดกรวดของเหล็กคอปเปอร์ต่ำในสารละลาย HCl 0.024, 0.274, 0.548, 1.37, 2.74 และ 4.11 mol/L ด้วยเทคนิคโพเทนทีโอไดนามิก จากกราฟโพลาริเซชัน (รูปที่ 2.21) ไม่พบช่วงพาสซีฟ (Passive Region) เมื่อใช้สารละลายที่มีความเข้มข้นของ HCl สูงกว่า 1.37 mol/L แสดงว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารละลาย HCl ที่มีความเข้มข้นตั้งแต่ 1.37 mol/L สามารถกำจัดสเกลออกไซด์ออกจากเหล็กกล้าไร้สนิมรีดร้อนเกรด 430 นอกจากนี้พบว่าเมื่อความเข้มข้นของสารละลาย HCl เพิ่มขึ้น ช่วงพาสซีฟลดลง เช่นเดียวกับผลที่รายงานในตารางที่ 2.4 และค่า  $i_{corr}$  เพิ่มขึ้น ซึ่งแสดงว่าอัตราการกัดกร่อนของเหล็กกล้าไร้สนิมรีดร้อนเกรด 430 เพิ่มขึ้น ความต้านทานการกัดกร่อนลดลง สามารถกำจัดสเกลออกไซด์ได้ดีขึ้น



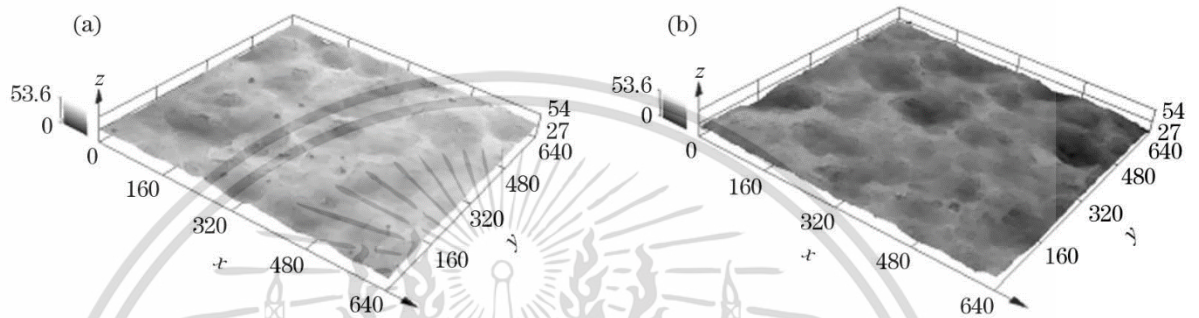
รูปที่ 2.21 กราฟโพเทนทีโอไดนามิกโพลาริเซชันของเหล็กกล้าไร้สนิมรีดร้อนเกรด 430 ในสารละลาย HCl 0.024-4.11 mol/L (Ying-ying Yue et al. 2016)

ตารางที่ 2.4 ช่วงพาสซีฟและค่า  $i_{corr}$  ของเหล็กกล้าไร้สนิมรีดร้อนเกรด 430 ในสารละลาย HCl (Ying-ying Yue et al. 2016)

$n_{HCl}$ (mol/L)	0.024	0.274	0.548
ช่วงพาสซีฟ (V)	0.443	0.207	0.116
$i_{corr}$ (A/cm <sup>2</sup> )	$7 \times 10^{-5}$	$7 \times 10^{-4}$	$2 \times 10^{-3}$

สำหรับการกำจัดสเกลออกไซด์ศึกษาโดยใช้สารละลายผสมของ HCl 1.370 mol/L กับสารละลาย H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 0.88 mol/L เปรียบเทียบกับการกัดกรดด้วยสารละลายผสมของ HNO<sub>3</sub> 2.40 mol/L กับสารละลาย HF 0.82 mol/L (HNO<sub>3</sub>-HF) โดยวัดความแตกต่างของน้ำหนักของโลหะก่อนเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และหลังการกัดกรด พบว่าเมื่อใช้ในสารละลายผสมของ HCl 1.370 mol/L กับสารละลาย  $H_2O_2$  0.88 mol/L อัตราการกำจัดสเกลออกไซด์ของเหล็กคอลล่าสูงกว่าที่ทดสอบกับสารละลายผสมของ  $HNO_3$ -HF และพื้นผิวของเหล็กคอลล่าหลังการกัดกรด 400 วินาที ด้วยสารละลายผสมของ HCl 1.370 mol/L กับสารละลาย  $H_2O_2$  0.88 mol/L เรียกว่าเมื่อใช้สารละลายผสมของ  $HNO_3$ -HF ดังแสดงในรูปที่ 2.22



รูปที่ 2.22 ภาพถ่าย 3 มิติที่แสดงความขรุขระของพื้นผิวของเหล็กกล้าไร้สนิมรีดร้อนเกรด 430 ที่ถูกกัดกรด 400 วินาที (a) ในสารละลาย HCl,  $R_a=2.496$  (b) ในสารละลายผสมของ  $HNO_3$ -HF,  $R_a=2.974$  (Ying-ying Yue et al. 2016)

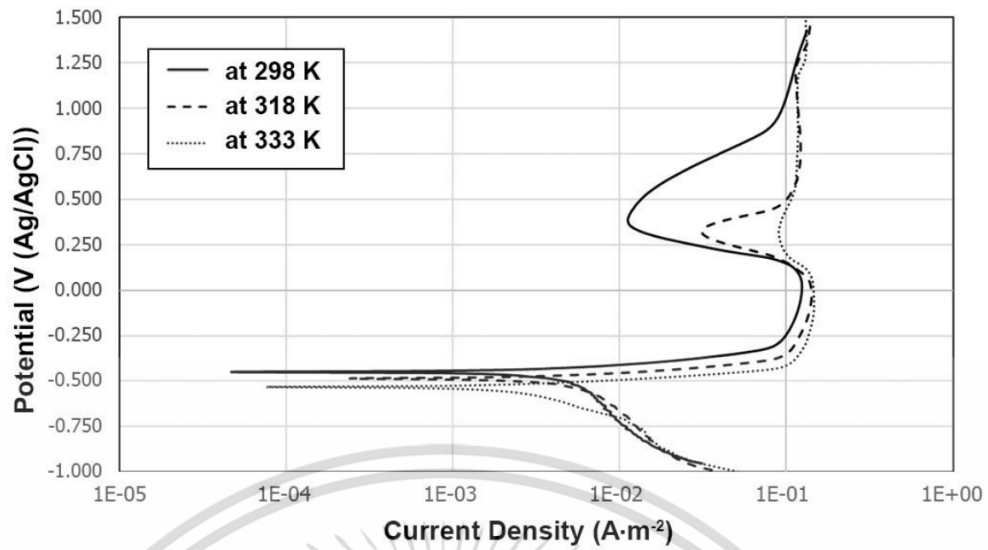
Wanna Homjabok et al. (Wanna Homjabok et al. 2010) ทดสอบประสิทธิภาพการกำจัดสเกลออกไซด์ออกจากเหล็กกล้าไร้สนิมรีดร้อนเกรด 304 ด้วยวิธีต่าง ๆ โดยการกัดกรด 2 ขั้นตอน ดังตารางที่ 2.5 พบว่าหลังการกัดกรดด้วยวิธีที่ 2 และ 3 ยังมีสเกลออกไซด์หลงเหลือ และเมื่อเติม  $H_2O_2$  ในการกัดกรดด้วยวิธีที่ 4 พบว่าไม่พบสเกลออกไซด์บนผิวเหล็กกล้าไร้สนิมรีดร้อนเกรด 304 และเมื่อพิจารณาความหยาบผิวของการกัดกรดด้วยวิธีที่ 3 และ 4 พบว่ามีค่าความหยาบผิวเท่ากับ  $3.24 \mu m$  และ  $2.93 \mu m$  ตามลำดับ แสดงว่าการเติมตัวออกซิไดส์  $H_2O_2$  ในสารละลาย HCl 4 M เพิ่มประสิทธิภาพในการกำจัดสเกลออกไซด์ และได้พื้นผิวสำเร็จที่เรียบขึ้นหลังการกัดกรดทั้ง 2 ขั้นตอน

ตารางที่ 2.5 การจำลองกระบวนการกัดกรวดเพื่อกำจัดสเกลออกไซด์ออกจากเหล็กกล้าไร้สนิมรีดร้อนเกรด 304 (Wanna Homjabok et al. 2010)

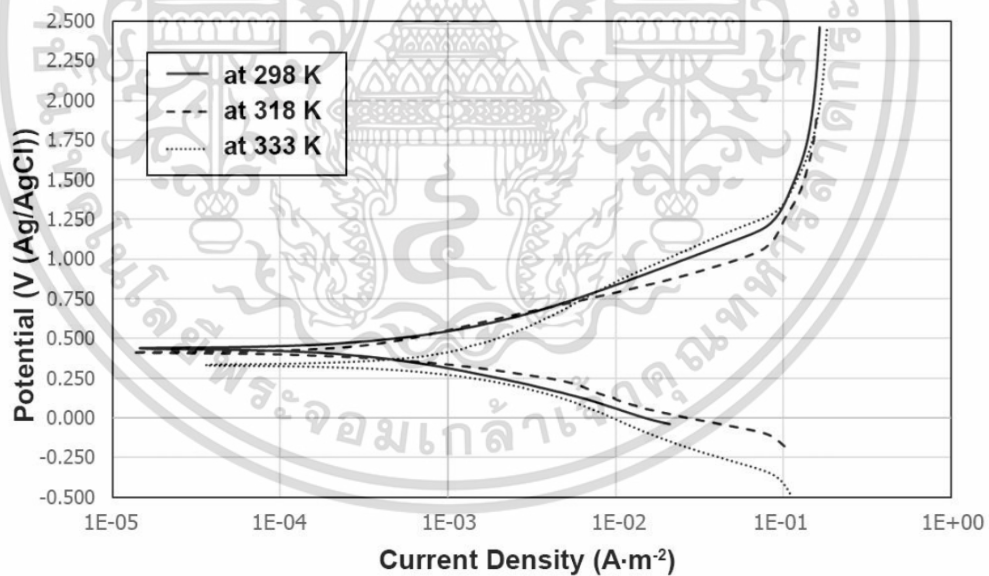
การทดสอบ	ขั้นตอนที่ 1	ขั้นตอนที่ 2
การกัดกรวดแบบดั้งเดิม	กัดกรวดร่วมกับกระแสไฟฟ้าในสารละลาย $H_2SO_4$ 4 M	กัดกรวดด้วยสารละลาย HF 1 M + $HNO_3$ 1 M
การกัดกรวดวิธีที่ 1	กัดกรวดด้วยสารละลาย $H_2SO_4$ 4 M	กัดกรวดด้วยสารละลาย HF 1 M + $HNO_3$ 1 M
การกัดกรวดวิธีที่ 2	กัดกรวดร่วมกับกระแสไฟฟ้าในสารละลาย HCl 4 M	กัดกรวดด้วยสารละลาย HF 1 M + $HNO_3$ 1 M
การกัดกรวดวิธีที่ 3	กัดกรวดด้วยสารละลาย HCl	กัดกรวดด้วยสารละลาย HF 1 M + $HNO_3$ 1 M
การกัดกรวดวิธีที่ 4	กัดกรวดด้วยสารละลาย HCl 4 M + $H_2O_2$ 10 g/L	กัดกรวดด้วยสารละลาย HF 1 M + $HNO_3$ 1 M

Kunrayaphus Tipves et al. (Kunrayaphus Tipves et al. 2020) ศึกษาผลของสารละลาย  $H_2O_2$  10 kg/m<sup>3</sup> (0.29 M) ในสารละลาย  $Na_2SO_4$  180 kg/m<sup>3</sup> (1.34 M) และผลของอุณหภูมิของสารละลายผสมต่อการกัดกรวดร่วมกับกระแสไฟฟ้า (Electrolytic Pickling) ของเหล็กกล้าไร้สนิมรีดร้อนเกรด 304 L (เหล็กคอยล์ดำ) ที่ผ่านการอบอ่อน พบว่าจากการทดสอบด้วยเทคนิคโพเทนทิโอดนามิก ในสารละลาย  $Na_2SO_4$  190 kg/m<sup>3</sup> ที่อุณหภูมิ 298, 318 และ 333 K ค่า  $i_{corr}$  คงที่ประมาณ 0.05 A/m<sup>2</sup> และ  $E_{corr}$  มีค่าประมาณ -0.500 V (Ag/AgCl) ที่ทุกอุณหภูมิ และพบช่วงพาสซีฟที่ทุกอุณหภูมิ แต่เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ช่วงพาสซีฟลดลง แสดงว่าอุณหภูมิสูงขึ้นช่วยกำจัดสเกลออกไซด์ได้ดีขึ้น ดังรูปที่ 2.23

จากการศึกษาผลของการเติมตัวออกซิไดส์  $H_2O_2$  10 kg/m<sup>3</sup> ในสารละลาย  $Na_2SO_4$  190 kg/m<sup>3</sup> ที่ 298, 318 และ 333 K พบว่า  $i_{corr}$  มีค่าคงที่ประมาณ 0.05 A/m<sup>2</sup> ที่ทุกอุณหภูมิ และมีค่าใกล้เคียงกับการทดสอบที่ไม่เติม  $H_2O_2$  ทั้งนี้เมื่อเติม  $H_2O_2$  ไม่พบช่วงพาสซีฟที่ทุกอุณหภูมิ และค่า  $E_{corr}$  สูงขึ้นเป็น 0.40 V(Ag/AgCl) ดังรูปที่ 2.24 เนื่องจากการเติมสารละลาย  $H_2O_2$  ทำให้มีปริมาณออกซิเจนละลายในสารละลายเพิ่มขึ้นจึงเกิดปฏิกิริยาแคโทดิกเพิ่มขึ้น



รูปที่ 2.23 กราฟโพเทนทีโอไดนามิกโพลาริเซชันของเหล็กกล้าไร้สนิมรีดร้อนเกรด 304L ที่ผ่านการอบอ่อนและกัดกรุดร่วมกับกระแสไฟฟ้าในสารละลาย  $\text{Na}_2\text{SO}_4$   $190 \text{ kg/m}^3$  ที่ 298, 318 และ 333 K (Kunrayaphus Tipves et al. 2020)



รูปที่ 2.24 กราฟโพเทนทีโอไดนามิกโพลาริเซชันของเหล็กกล้าไร้สนิมรีดร้อนเกรด 304L ที่ผ่านการอบอ่อนและกัดกรุดร่วมกับกระแสไฟฟ้าในสารละลายผสมของ  $\text{Na}_2\text{SO}_4$   $190 \text{ kg/m}^3$  กับ  $\text{H}_2\text{O}_2$   $10 \text{ kg/m}^3$  ที่ 298, 318 และ 333 K (Kunrayaphus Tipves et al. 2020)

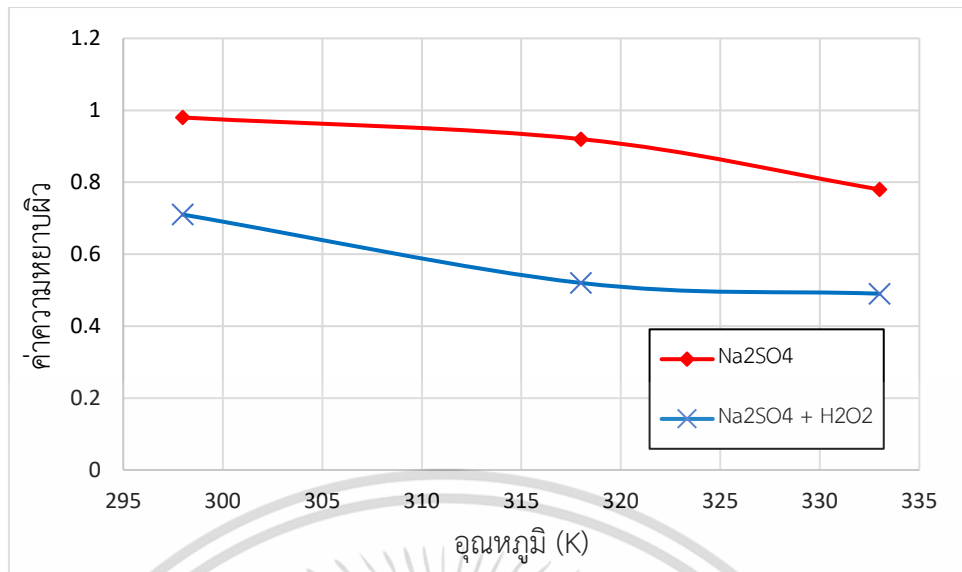
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การทดสอบด้วย X-ray Diffraction (XRD) พบว่าก่อนและหลังการกัดกรวดร่วมกับกระแสไฟฟ้า ในสารละลาย  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  และสารละลายผสมของ  $\text{Na}_2\text{SO}_4$   $190 \text{ kg/m}^3$  กับ  $\text{H}_2\text{O}_2$   $10 \text{ kg/m}^3$  พบสเกลออกไซด์ที่ผิวเหล็กกล้าไร้สนิมรีดร้อนเกรด 304L ที่ผ่านการอบอ่อน ดังที่แสดงในตารางที่ 2.6 นั่นคือการใช้สารละลายผสมของ  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  กับ  $\text{H}_2\text{O}_2$  สามารถกำจัดสเกลออกไซด์ออกได้มากกว่า

**ตารางที่ 2.6** สเกลออกไซด์ที่พบบนพื้นผิวโลหะทดสอบก่อนและหลังการกัดกรวดร่วมกับกระแสไฟฟ้า ในสารละลาย  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  และสารละลายผสมของ  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  กับ  $\text{H}_2\text{O}_2$  (Kunrayaphus Tipves et al. 2020)

สารเคมี	$\text{FeCr}_2\text{O}_4$	$\text{Cr}_2\text{O}_3$	$\text{Fe}_2\text{O}_3$	$\text{Cr}_{1.5}\text{Mn}_{1.5}\text{O}_4$
ก่อนการกัดกรวด	✓	✓	✓	✓
$\text{Na}_2\text{SO}_4$	✓	✓	✗	✓
$\text{Na}_2\text{SO}_4+\text{H}_2\text{O}_2$	พบเล็กน้อย	✓	✗	พบเล็กน้อย

ในการทดสอบความหยาบผิวของเหล็กกล้าไร้สนิมรีดร้อนเกรด 304L ที่ผ่านการอบอ่อน ดังรูปที่ 2.20 พบว่าเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น (298-333 K) ค่าความหยาบผิวหลังการกัดกรวดร่วมกับกระแสไฟฟ้า ในสารละลายผสมของ  $\text{Na}_2\text{SO}_4$   $190 \text{ kg/m}^3$  กับ  $\text{H}_2\text{O}_2$   $10 \text{ kg/m}^3$  มีค่าน้อยกว่าเมื่อใช้สารละลาย  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  สรุปลงได้ว่าการเติมสารละลาย  $\text{H}_2\text{O}_2$  ในสารละลาย  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  ช่วยกำจัดสเกลออกไซด์ได้มากขึ้น และทำให้ผิวหลังการกัดกรวดเรียบขึ้น



รูปที่ 2.25 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นและอุณหภูมิของเหล็กกล้าไร้สนิมรีดร้อนเกรด 304L หลังการกัดกรวดร่วมกับกระแสไฟฟ้าในสารละลาย  $\text{Na}_2\text{SO}_4$   $190 \text{ kg/m}^3$  และสารละลายผสมของ  $\text{Na}_2\text{SO}_4$   $190 \text{ kg/m}^3$  กับสารละลาย  $\text{H}_2\text{O}_2$   $10 \text{ kg/m}^3$  (Plot from the data of Kunrayaphus Tipves et al. 2020)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 3

### ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

บทนี้แสดงสารเคมี เครื่องมือ และอุปกรณ์ที่ใช้ศึกษาการกำจัดสเกลออกไซด์จากเหล็กกล้าไร้สนิมรีดร้อนเกรด 304L (เหล็กคอยล์ดำ) และการศึกษาพฤติกรรมการกัดกร่อนของเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 304L ที่ปราศจากสเกลออกไซด์ (เหล็กคอยล์ขาว) ด้วยเทคนิคโพเทนทิโอดนามิกโพลาริเซชัน อธิบายวิธีการเตรียมชิ้นงานทดสอบ 2 ชนิด ได้แก่ เหล็กคอยล์ดำ และเหล็กคอยล์ขาว อธิบายขั้นตอนการเตรียมสารละลายอิเล็กโทรไลต์สำหรับการทดสอบ ได้แก่ สารละลายกรดไฮโดรคลอริก (HCl) และสารละลายผสมของ HCl กับสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ( $H_2O_2$ ) การวิเคราะห์ชิ้นงานทดสอบก่อนและหลังการกัดกร่อนร่วมกับกระแสไฟฟ้าด้วยสารละลายอิเล็กโทรไลต์โดยเทคนิคโพเทนทิโอดนามิกโพลาริเซชัน การวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของสเกลออกไซด์ และแสดงการวัดเส้นแวนดิกโพลาริเซชันและเส้นแคโทดิกโพลาริเซชัน

#### 3.1 สารเคมี เครื่องมือ และอุปกรณ์

##### 3.1.1 สารเคมี

1. สารละลายกรดไฮโดรคลอริก (Hydrochloric Acid: HCl) 37 wt% AR Grade
2. สารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (Hydrogen Peroxide:  $H_2O_2$ ) 35 wt% AR Grade
3. แอซีโตน (Acetone:  $C_3H_6O$ ) เกรดวิเคราะห์

##### 3.1.2 เครื่องมือ และอุปกรณ์

1. เครื่องล้างอัลตราโซนิค (Ultrasonic Cleaner) Elmasonic รุ่น E 30 H
2. เครื่องขัดพื้นผิวชิ้นงานงานเดี่ยว รุ่น SAPHIR 320
3. เครื่องโพเทนทิโอสแตต (Potentiostat) AUTOLAB รุ่น PGSTAT 302N
4. เครื่องวัดความหยาบผิว รุ่น SJ-210
5. เครื่องวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของโลหะ (Optical Emission Spectrometer: OES) ICP-OES
6. กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (Optical Microscopy: OM) Xinp 1600
7. เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (X-ray Diffraction: XRD) Rigaku
8. โถดูดความชื้น (Desiccator)
9. กระจกทรายน้ำเบอร์ 80, 180, 320, 480 และ 600

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

10. ขวดปรับปริมาตรขนาด 1,000 ml

### 3.2 ชิ้นงานทดสอบ ขั้นตอนการเตรียมชิ้นงานทดสอบ และการเตรียมสารละลายอิเล็กโทรไลต์

#### 3.2.1 เหล็กกล้าไร้สนิมรีดร้อนเกรด 304L จากบริษัท โพลโค-ไทยน็อคซ์ จำกัด (มหาชน)

ชิ้นงานทดสอบเหล็กกล้าไร้สนิมรีดร้อนเกรด 304L ขนาดกว้าง 25 mm ยาว 50 mm และหนา 2 mm ได้รับอนุเคราะห์จากบริษัท โพลโค-ไทยน็อคซ์ จำกัด (มหาชน)

#### 3.2.2 ขั้นตอนการเตรียมชิ้นงานทดสอบ

ชิ้นงานทดสอบแบ่งเป็น 2 ชุด ดังนี้

##### 3.2.2.1 เหล็กกล้าไร้สนิมรีดร้อนเกรด 304L (เหล็กคอยล์ดำ)

1) ทำความสะอาดชิ้นงานทดสอบด้วยเครื่องล้างอัลตราโซนิค เป็นเวลา 5 นาที โดยใช้แอซีโตนเป็นของเหลวตัวกลางในการทำความสะอาดเพื่อล้างคราบไขมันและสิ่งสกปรกขนาดเล็ก

2) เก็บชิ้นงานทดสอบในโถดูดความชื้นก่อนทำการทดลองอย่างน้อย 1 วัน

##### 3.2.2.2 เหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 304L ที่ปราศจากสเกลออกไซด์ (เหล็กคอยล์ขาว)

1) เตรียมพื้นผิวชิ้นงานทดสอบด้วยเครื่องขัดพื้นผิวชิ้นงานแบบจานเดี่ยว รุ่น SAPHIR 320 ด้วยกระดาษทรายน้ำเบอร์ 80, 180, 320, 480 และ 600 ตามลำดับ

2) ทำความสะอาดและเก็บชิ้นงานทดสอบเช่นเดียวกับข้อ 3.2.2.1

#### 3.2.3 การเตรียมสารละลายอิเล็กโทรไลต์

1) สารละลาย HCl 0.5 M

ใส่ HCl 37 wt% 40.8 ml ในขวดปรับปริมาตร เติมน้ำปราศจากไอออนเป็น 1,000 ml ปิดฝาและเขย่าให้เข้ากัน

2) สารละลายผสมของ HCl 0.5 M กับสารละลาย H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 0.5 M

ใส่ H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 35 wt% 47.2 ml ลงในขวดปรับปริมาตร ผสมสารละลาย HCl 0.5 M ที่เตรียมตามข้อที่ 1) และปรับปริมาตรเป็น 1,000 ml ปิดฝาและเขย่าให้เข้ากัน

3) สารละลายผสมของ HCl 0.5 M กับสารละลาย H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 0.88 M

ใส่ H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 35 wt% 76.4 ml ลงในขวดปรับปริมาตร ผสมสารละลาย HCl 0.5 M ที่เตรียมตามข้อที่ 1) และปรับปริมาตรเป็น 1,000 ml ปิดฝาและเขย่าให้เข้ากัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4) สารละลายผสมของ HCl 0.5 M กับสารละลาย  $H_2O_2$  1.76 M

ใส่  $H_2O_2$  35 wt% 152.7 ml ลงในขวดปรับปริมาตร ผสมสารละลาย HCl 0.5 M ที่เตรียมตามข้อที่ 1) และปรับปริมาตรเป็น 1,000 ml ปิดฝาและเขย่าให้เข้ากัน

### 3.3 การกำจัดสเกลออกไซด์จากเหล็กคอยล์ดำและการศึกษาพฤติกรรมการกัดกร่อนของเหล็กคอยล์ขาวด้วยเทคนิคโพเทนทิโอสแตติกโพลาริเซชัน

เครื่องโพเทนทิโอสแตต ดังรูปที่ 3.1 ใช้ศึกษาการกำจัดสเกลออกไซด์และพฤติกรรมการกัดกร่อนของเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 304L โดยวัดเส้นแคโทดิกโพลาริเซชันและเส้นแอโนดิกโพลาริเซชันของชิ้นงานทดสอบที่อุณหภูมิ  $25^{\circ}C$  ติดตั้งชุดเซลล์ทดสอบประเภท 3 ขั้วไฟฟ้า ดังรูปที่ 3.2 ได้แก่ ชิ้นงานทดสอบเป็นขั้วไฟฟ้าทำงาน (Working Electrode) แท่งแพลทินัมเป็นขั้วไฟฟ้ากระแส (Counter Electrode) และ Ag/AgCl ในสารละลาย KCl 3 M เป็นขั้วไฟฟ้าอ้างอิง (Reference Electrode) ชิ้นงานทดสอบจะถูกแช่ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ประมาณ 30 นาที ก่อนการทดสอบวัดค่าศักย์ไฟฟ้าเริ่มต้นหรือศักย์ไฟฟ้าวงจรเปิด (Open Circuit Potential: OCP) หลังจากนั้นวัดเส้นแคโทดิกโพลาริเซชันและเส้นแอโนดิกโพลาริเซชันในช่วงศักย์ไฟฟ้า  $-0.5$  V ถึง  $1.5$  V เทียบกับศักย์ไฟฟ้าเริ่มต้นด้วยอัตราศักย์ไฟฟ้า  $1$  mV/s จนถึง  $1.5$  V

ผลการทดสอบแสดงด้วยเส้นกราฟแคโทดิกและแอโนดิกโพลาริเซชันดังกล่าวในบทที่ 2 รูปที่ 2.8 ซึ่งเป็นความสัมพันธ์ระหว่างลอการิทึมของค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า (Current Density:  $i$ ) และค่าศักย์ไฟฟ้า (Applied Potential:  $E$ ) จากเส้นกราฟสามารถคำนวณค่ากระแสไฟฟ้าการกัดกร่อน (Corrosion Current Density:  $i_{corr}$ ) และค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อน (Corrosion Applied Potential:  $E_{corr}$ ) ด้วยเทคนิคทาเฟล (Tafel Extrapolation) และคำนวณอัตราการกัดกร่อน (Corrosion Rate: CR) จากค่ากระแสไฟฟ้าการกัดกร่อน ตามสมการที่ 2.22

### 3.4 การวิเคราะห์ชิ้นงานทดสอบ

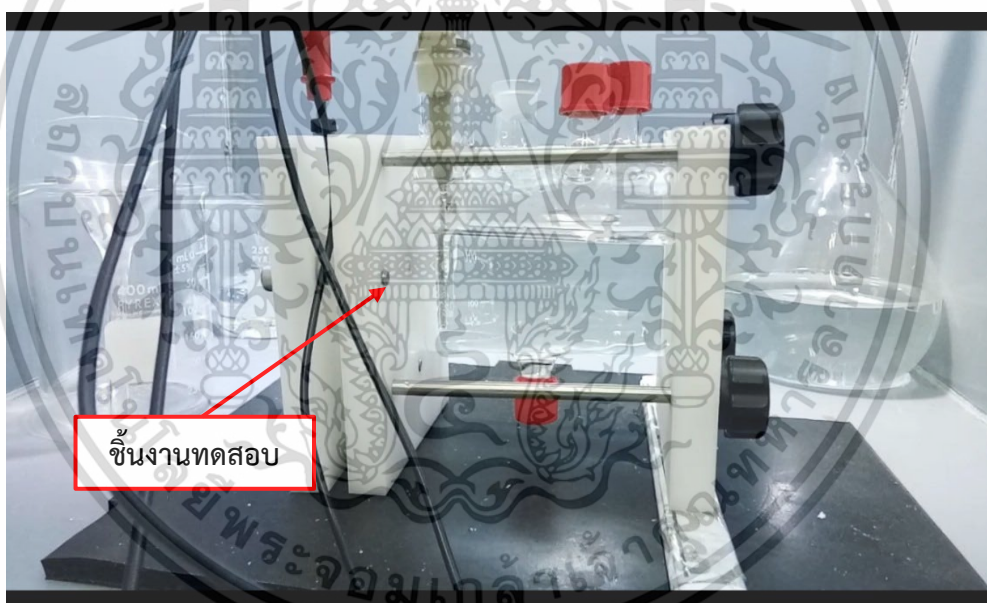
ก่อนการทดสอบด้วยเทคนิคโพเทนทิโอสแตติกโพลาริเซชัน ศึกษาองค์ประกอบทางเคมีของเหล็กกล้าไร้สนิมรีดร้อนเกรด 304L โดยใช้เทคนิคการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของโลหะ (Optical Emission Spectrometer: OES) และวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของสเกลออกไซด์ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-ray Diffraction: XRD)

หลังการทดสอบด้วยเทคนิคโพเทนทิโอสแตติกโพลาริเซชัน ศึกษาพื้นผิวของเหล็กกล้าไร้สนิมรีดร้อนเกรด 304L ที่มีสเกลออกไซด์ และปราศจากสเกลออกไซด์ (เหล็กคอยล์ดำและเหล็กคอยล์ขาว) โดยใช้กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (Optical Microscopy: OM) และศึกษาเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความหยาบผิวเฉลี่ยกำลังสอง (Roughness Root Mean Square: Rq) โดยใช้เครื่องมือวัดความหยาบผิว



รูปที่ 3.1 เครื่องโพเทนทีโอสแตต AUTOLAB รุ่น PGSTAT 302N



รูปที่ 3.2 ชุดเซลล์ทดสอบประเภท 3 ขั้วไฟฟ้า

### 3.5 การทดสอบวัดเส้นโพลาริเซชัน

#### 3.5.1 เหล็กกล้าไร้สนิมรีดร้อนเกรด 304L (เหล็กคอยล์ดำ)

1) ศึกษาการกำจัดสเกลออกไซด์บนพื้นผิวของเหล็กกล้าไร้สนิมรีดร้อนเกรด 304L 1.08%Mn0.23%Cu ด้วยการกัดกร่วมกับกระแสไฟฟ้าในสารละลาย HCl 0.50 M ที่ 25°C และวัดเส้นโพลาริเซชัน ทำการทดสอบซ้ำอีก 2 ครั้งเพื่อยืนยันผล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2) ทำการทดสอบเช่นเดียวกับข้อ 1) โดยใช้ชิ้นงานทดสอบเหล็กกล้าไร้สนิมรีดร้อนเกรด 304L 1.20%Mn0.40%Cu, 1.45%Mn0.22%Cu และ 1.71%Mn0.37%Cu

3) ทำการทดสอบเช่นเดียวกับข้อ 1) และ 2) ด้วยสารละลายผสมของ HCl 0.5 M กับสารละลาย  $H_2O_2$  0.5 M, 0.88 M และ 1.76 M

### 3.5.2 เหล็กกล้าไร้สนิมรีดร้อนเกรด 304L ที่ปราศจากสเกลออกไซด์ (เหล็กคอยล์ขาว)

การศึกษาพฤติกรรมการกัดกร่อน ดังนี้

1) ทำการทดสอบเช่นเดียวกับข้อ 3.5.1 ข้อ 1) แต่ใช้ชิ้นงานทดสอบเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 304L ที่ปราศจากสเกลออกไซด์ 1.08%Mn0.23%Cu, 1.20%Mn0.40%Cu, 1.45%Mn0.22%Cu และ 1.71%Mn0.37%Cu

2) ทำการทดสอบเช่นเดียวกับข้อ 1) แต่ใช้สารละลายอิเล็กโทรไลต์เป็นสารละลายผสมของ HCl 0.5 M กับสารละลาย  $H_2O_2$  0.88 M

ตารางที่ 3.2 แสดงสรุปตัวอย่างและสารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่ใช้ทดสอบการวัดเส้นโพลาไรเซชัน

ตารางที่ 3.1 สรุปตัวอย่างและสารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่ใช้ทดสอบการวัดเส้นโพลาไรเซชัน

ตัวอย่าง	สารละลายอิเล็กโทรไลต์			
	HCl 0.5 M	HCl 0.5 M + $H_2O_2$ 0.5 M	HCl 0.5 M + $H_2O_2$ 0.88 M	HCl 0.5 M + $H_2O_2$ 1.76 M
<b>เหล็กคอยล์ดำเกรด 304L</b>				
1.08%Mn0.23%Cu	✓	✓	✓	✓
1.20%Mn0.40%Cu	✓	✓	✓	✓
1.45%Mn0.22%Cu	✓	✓	✓	✓
1.71%Mn0.37%Cu	✓	✓	✓	✓
<b>เหล็กคอยล์ขาว เกรด 304L</b>				
1.08%Mn0.23%Cu	✓		✓	
1.20%Mn0.40%Cu	✓		✓	
1.45%Mn0.22%Cu	✓		✓	
1.71%Mn0.37%Cu	✓		✓	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 4

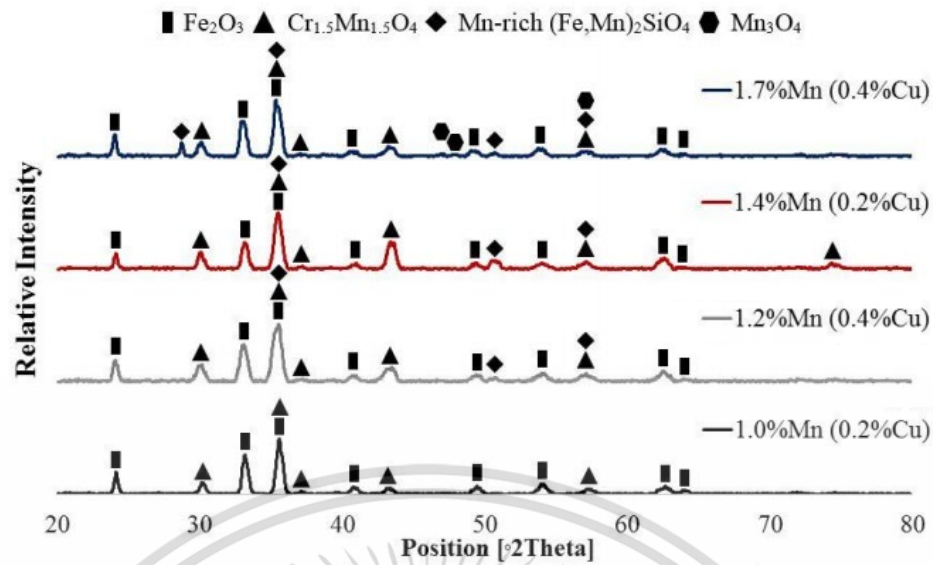
### ผลการทดลองและการอภิปรายผล

#### 4.1 การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีและสเกลออกไซด์ของเหล็กกล้าไร้สนิมรีดร้อนเกรด 304L

ในงานวิจัยนี้เหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 304L ที่ผ่านการรีดร้อนในช่วงอุณหภูมิ 900-1,000 °C หรือเหล็กคอยล์ดำ (Black Coil) ได้รับจากบริษัท โพลโค-ไทยน็อคซ์ จำกัด (มหาชน) ตารางที่ 4.1 แสดงองค์ประกอบทางเคมีที่วิเคราะห์ด้วยเทคนิค OES เช่นเดียวกับผลงานวิจัยของ โชคอนันต์ ตริยะวัฒน์วิทยา (โชคอนันต์ ตริยะวัฒน์วิทยา. 2562) สำหรับโครงสร้างผลึกของสเกลออกไซด์วิเคราะห์ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-ray Diffraction: XRD) และแสดงผลดังรูปที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 องค์ประกอบทางเคมีของเหล็กกล้าไร้สนิมรีดร้อนเกรด 304L วิเคราะห์ด้วยเทคนิค OES (wt%)

ตัวอย่าง	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Cu	Fe
1.08Mn0.23Cu	0.051	0.43	1.085	0.030	0.003	18.13	8.03	0.112	0.23	Bal.
1.20Mn0.40Cu	0.053	0.44	1.203	0.031	0.004	18.26	8.08	0.114	0.40	Bal.
1.45Mn0.22Cu	0.023	0.46	1.451	0.032	0.003	18.43	8.09	0.124	0.22	Bal.
1.71Mn0.37Cu	0.029	0.32	1.710	0.031	0.001	18.09	8.05	0.280	0.37	Bal.



รูปที่ 4.1 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของสเกลออกไซด์ของเหล็กกล้าไร้สนิมรีดร้อนเกรด 304L ที่มีแมงกานีส 1.08-1.71 wt% และทองแดง 0.22-0.40 wt% ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์

จากรูปที่ 4.1 สามารถสรุปชนิดของออกไซด์ที่ตรวจพบบนสเกลออกไซด์ของเหล็กกล้าไร้สนิมรีดร้อนเกรด 304L ได้ดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 ชนิดของออกไซด์ที่ตรวจพบบนสเกลออกไซด์ของเหล็กกล้าไร้สนิมรีดร้อนเกรด 304L

ตัวอย่าง	$\text{Fe}_2\text{O}_3$	$\text{Cr}_{1.5}\text{Mn}_{1.5}\text{O}_4$	Mn-rich (Fe,Mn) $_2$ SiO $_4$	$\text{Mn}_3\text{O}_4$
1.08Mn0.23Cu	✓	✓		
1.20Mn0.40Cu	✓	✓	✓	
1.45Mn0.22Cu	✓	✓	✓	
1.71Mn0.37Cu	✓	✓	✓	✓

จากตารางที่ 4.2 พบออกไซด์  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  และ  $\text{Cr}_{1.5}\text{Mn}_{1.5}\text{O}_4$  ในทุกตัวอย่าง และพบออกไซด์ Mn-rich (Fe,Mn) $_2$ SiO $_4$  เพิ่มเติมในตัวอย่าง 1.20Mn0.40Cu, 1.45Mn0.22Cu และ 1.71Mn0.37Cu แต่พบออกไซด์ที่มีโครงสร้างสปิเนล ( $\text{Mn}_3\text{O}_4$ ) ในตัวอย่าง 1.71Mn0.37Cu เท่านั้น ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Xiaojie Jin et al. (Xiaojie Jin et al. 2017) ที่พบออกไซด์  $\text{Cr}_{1.5}\text{Mn}_{1.5}\text{O}_4$  บนพื้นผิวของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำที่มีปริมาณ Mn มากกว่า 0.47 wt% (Xiaojie Jin et al. 2017) ส่วน Mn-rich (Fe,Mn) $_2$ SiO $_4$  พบในเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 304L ที่รีดร้อนที่อุณหภูมิ 900-1,000°C ซึ่งเกิด

จากปฏิกิริยาระหว่าง  $\text{Fe}_2\text{SiO}_4$  กับ  $\text{Mn}_2\text{SiO}_4$  (โซคอนันต์ ตียะวัฒน์วิทยา, 2562)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น มิใช่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

งานวิจัยของ Min Jun Kim et al. (Min Jun Kim et al. 2015) ที่ศึกษาองค์ประกอบของออกไซด์ในเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ (เหล็กคอปเปอร์) 0.07 wt% ที่มี Mn 0.7, 2.0 และ 5.0 wt% ด้วยเทคนิค X-ray Photoelectron Spectroscopy (XPS) พบออกไซด์  $Mn_3O_4$  บนพื้นผิวของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำที่มี Mn 2.0 และ 5.0 wt%

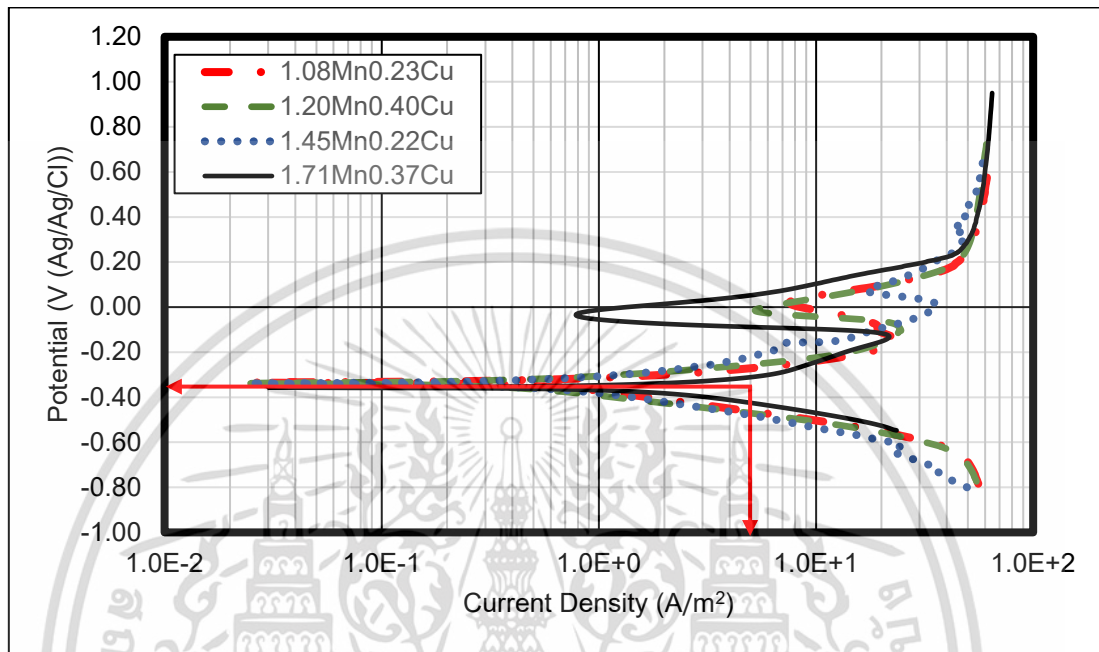
ส่วนงานวิจัยนี้จากตารางที่ 4.2 สำหรับเหล็กคอปเปอร์ด้าเกรด 304L พบออกไซด์  $Mn_3O_4$  บนพื้นผิวของตัวอย่าง  $1.71Mn0.37Cu$  เท่านั้น (Mn 1.71 wt%) ทั้งนี้ผู้วิจัยตั้งสมมติฐานว่าอาจพบออกไซด์  $Mn_3O_4$  บนพื้นผิวของเหล็กคอปเปอร์ด้าที่มีปริมาณ Mn  $> 1.45$  wt% ได้ หากมีตัวอย่างที่จะทดสอบ

เมื่อปริมาณ Mn เพิ่มขึ้น พบออกไซด์ของ Mn หลายชนิดบนพื้นผิวของเหล็กคอปเปอร์ด้า (ดังรูปที่ 4.1 และตารางที่ 4.2) เนื่องจากการเกิดออกไซด์บนผิวเหล็กขึ้นกับปริมาณและชนิดขององค์ประกอบทางเคมีของเนื้อเหล็ก และสัมประสิทธิ์การแพร่ (Diffusivity) ถ้าเหล็กมีปริมาณและชนิดของธาตุ เช่น Mn และสัมประสิทธิ์การแพร่สูง จะมีโอกาสเกิดออกไซด์บนพื้นผิวได้มาก ยกตัวอย่างเหล็กคอปเปอร์ด้าเกรด 304L ที่อุณหภูมิการรีดร้อน  $1,000^{\circ}C$  ในงานวิจัยนี้ที่มีปริมาณโครเมียม (Cr) 18 wt% สัมประสิทธิ์การแพร่ของ Cr เท่ากับ  $2.20 \times 10^{-6} m^2/s$  (คำนวณจาก Xiaojie Jin et al., 2017) จะพบ Cr ในสเกลออกไซด์ สำหรับเหล็กคอปเปอร์ด้าที่มีปริมาณ Mn 1.08-1.71 wt% สัมประสิทธิ์การแพร่ของ Mn เท่ากับ  $4.64 \times 10^{-6} m^2/s$  (คำนวณจาก Xiaojie Jin et al., 2017) จะพบ Mn ในสเกลออกไซด์เช่นกัน แม้ว่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของ Mn สูงกว่า Cr แต่เนื่องจากมีปริมาณน้อยกว่า จึงพบสเกลออกไซด์ของ Mn น้อยกว่า กรณีเหล็กคอปเปอร์ด้าที่มีปริมาณ Cu 0.22-0.40 wt% สัมประสิทธิ์การแพร่ต่ำ เท่ากับ  $1.60 \times 10^{-13} m^2/s$  (Wojciech Stanisław Skibiński and Bartłomiej Wierzba. 2013) จึงไม่พบ Cu ในสเกลออกไซด์

#### 4.2 การวิเคราะห์เส้นแคโทดิกโพลาริเซชันและเส้นแอโนดิกโพลาริเซชันของเหล็กคอปเปอร์ด้าเกรด 304L ที่ผ่านการกัดกร่อนร่วมกับกระแสไฟฟ้าในสารละลาย HCl 0.5 M

เพื่อให้เข้าใจเรื่องการกำจัดสเกลออกไซด์ออกจากเหล็กคอปเปอร์ด้าด้วยการกัดกร่อนร่วมกับกระแสไฟฟ้า หัวข้อที่ 4.2 และ 4.3 ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อน (Corrosion Current Density:  $i_{corr}$ ) หมายถึง ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ใช้กำจัดสเกลออกไซด์ ศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อน (Corrosion Applied Potential:  $E_{corr}$ ) หมายถึง ศักย์ไฟฟ้าที่ใช้กำจัดสเกลออกไซด์ ส่วนความต้านทานการกัดกร่อน หมายถึง ความต้านทานการกำจัดสเกลออกไซด์ และอัตราการกัดกร่อน (Corrosion Rate: CR) หมายถึง อัตราการกำจัดสเกลออกไซด์

กราฟโพลาริเซชันจากเทคนิคโพเทนทิโอดินามิกที่แสดงเส้นแคโทดิกโพลาริเซชันและเส้นแอโนดิกโพลาริเซชันของเหล็กคอลล่าที่มี Mn 1.08-1.71 wt% และ Cu 0.22-0.40 wt% ในสารละลายกรดไฮโดรคลอริก (HCl) 0.5 M แสดงดังรูปที่ 4.2

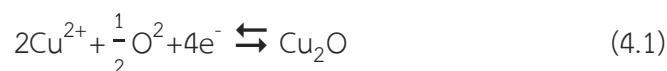


รูปที่ 4.2 กราฟโพลาริเซชันจากเทคนิคโพเทนทิโอดินามิกของเหล็กคอลล่าเกรด 304L ที่มี Mn 1.08-1.71 wt% และ Cu 0.22-0.40 wt% ในสารละลาย HCl 0.5 M

จากรูปที่ 4.2 พบว่า  $i_{corr}$  และ  $E_{corr}$  ของเหล็กคอลล่าตัวอย่าง มีค่าประมาณ  $5 \text{ A/m}^2$  และ  $-0.35 \text{ V}$  ตามลำดับ แสดงว่าปริมาณของ Mn และ Cu ในตัวอย่างไม่มีผลต่อการกัดกร่อนร่วมกับกระแสไฟฟ้าในสารละลาย HCl 0.5 M และช่วงแอคทีฟ (หรือช่วงแอโนดิก) ของกราฟโพลาริเซชันของเหล็กคอลล่าพบสภาพพาสซีฟ (Passivity) ที่ศักย์ไฟฟ้าตั้งแต่  $-0.14$  ถึง  $0.26 \text{ V}$  จากรูปเหล็กคอลล่าที่มี Mn 1.71 wt% มีความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าพาสซีฟ (Passive Current Density:  $i_p$ ) ต่ำที่สุดเท่ากับ  $0.80 \text{ A/m}^2$  ซึ่งอธิบายได้ว่าหากความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าพาสซีฟมีค่าต่ำ แสดงว่าฟิล์มพาสซีฟแข็งแรงหรือกำจัดสเกลออกไซด์ออกได้ยาก (Denny A. Jones. 1996) คาดว่าเนื่องจากสเกลของออกไซด์  $\text{Mn}_2\text{O}_3$  ที่พบมีส่วนเพิ่มความต้านทานการกำจัดสเกลออกไซด์ออกจากเหล็กคอลล่าในสารละลาย HCl 0.5 M ในงานวิจัยนี้สรุปได้ว่าการกำจัดสเกลออกไซด์ออกจากเหล็กคอลล่าเกรด 304L ที่มีปริมาณ Mn สูง (1.71 wt%) ทำได้ยาก

เมื่อพิจารณาผลของ Cu ต่อการกำจัดสเกลออกไซด์ พบว่าเหล็กคอลล่าที่มี Cu สูง ได้แก่ 1.20%Mn0.40%Cu และ 1.71%Mn0.37%Cu มีค่า  $i_p$  เท่ากับ 5.5 และ  $0.80 \text{ A/m}^2$  ตามลำดับ ส่วนเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้เผยแพร่โดยไม่ระบุชื่อมหาวิทยาลัยไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เหล็กคอลลด์ด้าที่มี Cu ต่ำ ได้แก่ 1.08%Mn0.23%Cu และ 1.45%Mn0.22%Cu มีค่า  $i_p$  เท่ากับ 7.1 และ 18.2 A/m<sup>2</sup> ตามลำดับ แสดงว่าฟิล์มพาสซีฟบนผิวของเหล็กคอลลด์ด้าที่มีปริมาณ Cu สูง (0.40 wt%) มีความแข็งแรงกว่าและการกำจัดสเกลออกไซด์ออกจากเหล็กคอลลด์ด้าในสารละลาย HCl ได้ยากกว่าเหล็กคอลลด์ด้าที่มีปริมาณ Cu ต่ำ (0.22 wt%) คาดว่าเนื่องจาก Cu ทำปฏิกิริยากับออกซิเจน เกิดเป็นออกไซด์ของทองแดง (Cu<sub>2</sub>O) ครอบคลุมพื้นผิวของเหล็กคอลลด์ด้าดังสมการที่ (4.1)



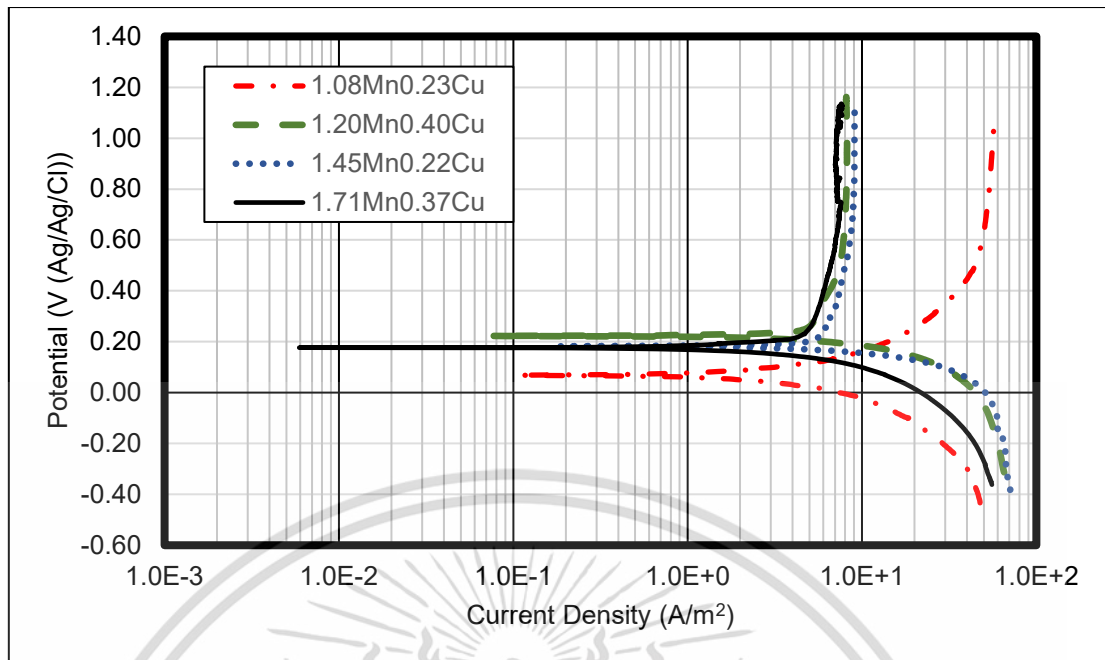
ในงานวิจัยนี้สรุปได้ว่าการกำจัดสเกลออกไซด์ออกจากเหล็กคอลลด์ด้าเกรด 304L ที่มีปริมาณ Cu สูง (0.40 wt%) ทำได้ยาก

#### 4.3 การวิเคราะห์เส้นแคโทดิกโพลาริเซชันและเส้นแอโนดิกโพลาริเซชันของเหล็กคอลลด์ด้าเกรด 304L ที่ผ่านการกัดกรวดร่วมกับกระแสไฟฟ้าในสารละลายผสมของ HCl 0.5 M กับสารละลาย H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 0.5, 0.88 และ 1.76 M

การศึกษาการกัดกรวดร่วมกับกระแสไฟฟ้าในสารละลายผสมของ HCl 0.5 M กับสารละลาย H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 0.5, 0.88 และ 1.76 M ต่อการกำจัดสเกลออกไซด์บนผิวเหล็กคอลลด์ด้าที่มี Mn 1.08-1.71 wt% และ Cu 0.22-0.40 wt% ด้วยเทคนิคโพเทนทิโอดนามิกโพลาริเซชัน แสดงผลดังรูปที่ 4.3-4.5 และสรุปผลอัตราการกัดกร่อน (Corrosion Rate: CR) หรือในที่นี้คืออัตราการกำจัดสเกลออกไซด์ และศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อน ( $E_{\text{corr}}$ ) ในรูปที่ 4.6

จากรูปที่ 4.3 เมื่อผสม H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 0.5 M ในสารละลาย HCl 0.5 M พบว่าเหล็กคอลลด์ด้า 1.08%Mn0.23%Cu, 1.20%Mn0.40%Cu, 1.45%Mn0.22%Cu และ 1.71%Mn0.37%Cu มีค่า  $i_{\text{corr}}$  เท่ากับ 2.9, 3.3, 3.5 และ 2.6 A/m<sup>2</sup> ตามลำดับ จากค่า  $i_{\text{corr}}$  คำนวณอัตราการกัดกร่อน ด้วยสมการที่ (2.22) ในบทที่ 2

เมื่อเปรียบเทียบรูปที่ 4.3 กับรูปที่ 4.2 พบว่าเมื่อผสมตัวออกซิไดส์ H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> ในสารละลาย HCl 0.5 M ค่า CR สูงขึ้น แสดงว่า H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> สามารถเพิ่มอัตราการกำจัดสเกลออกไซด์ออกจากเหล็กคอลลด์ด้า



รูปที่ 4.3 กราฟโพลาริเซชันจากเทคนิคโพเทนทิโอดินามิกของเหล็กคอยล์ดำเกรด 304L ที่มี Mn 1.08-1.71 wt% และ Cu 0.22-0.40 wt% ในสารละลายผสมของ HCl 0.5 M กับสารละลาย  $H_2O_2$  0.5 M

สำหรับค่า  $E_{corr}$  ของเหล็กคอยล์ดำ 1.08%Mn0.23%Cu, 1.20%Mn0.40%Cu, 1.45%Mn0.22%Cu และ 1.71%Mn0.37%Cu ที่ได้จากการทดสอบการกัดกร่อนร่วมกับกระแสไฟฟ้าในสารละลายผสมของ HCl 0.5 M กับสารละลาย  $H_2O_2$  0.5 M เท่ากับ 0.05, 0.21, 0.21 และ 0.19 V ตามลำดับ ซึ่งสูงกว่าค่า  $E_{corr}$  กรณีที่ใช้สารละลาย HCl 0.5 M เพียงอย่างเดียว (ค่าประมาณ -0.35 V ในเหล็กคอยล์ดำทุกตัวอย่าง)

ค่า  $E_{corr}$  ที่เพิ่มขึ้นเกิดจาก  $H_2O_2$  ทำปฏิกิริยาออกซิเดชันและได้แก๊สออกซิเจน ดังแสดงในสมการที่ (4.2) ทำให้มีแก๊สออกซิเจนละลายในสารละลายผสมของ HCl กับสารละลาย  $H_2O_2$  สูงขึ้น และค่า  $E_{corr}$  เพิ่มขึ้นตามสมการของเนิร์ส (Nernst's Equation) (สมการที่ 4.3) (Marcel Pourbaix. 1974)



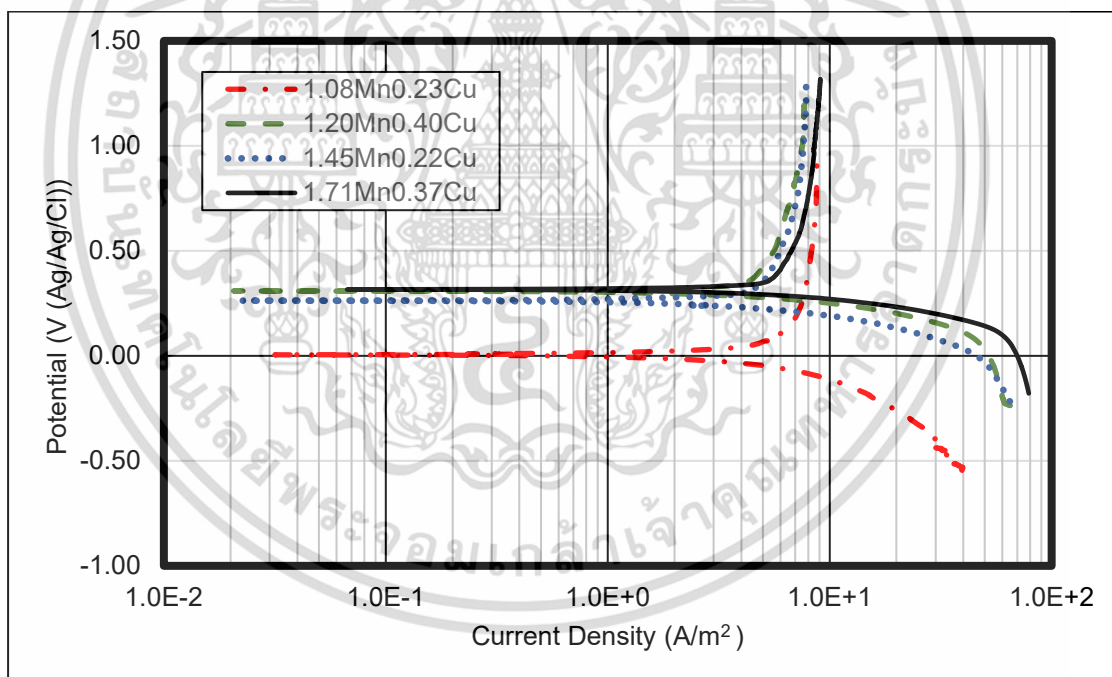
$$E_{H_2O_2/H_2O} = 0.682 - 0.0591pH + 0.0295 \log \frac{P_{O_2}}{(H_2O_2)} \quad (4.3)$$

กลไกการกำจัดสเกลออกไซด์ออกจากเหล็กคอยล์ดำ กรณีใดกรณีหนึ่ง หรือเกิดทั้ง 2 กรณีพร้อมกัน ทำให้ค่า  $E_{corr}$  ที่สูงขึ้น (S. Hiromoto. 2010) ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

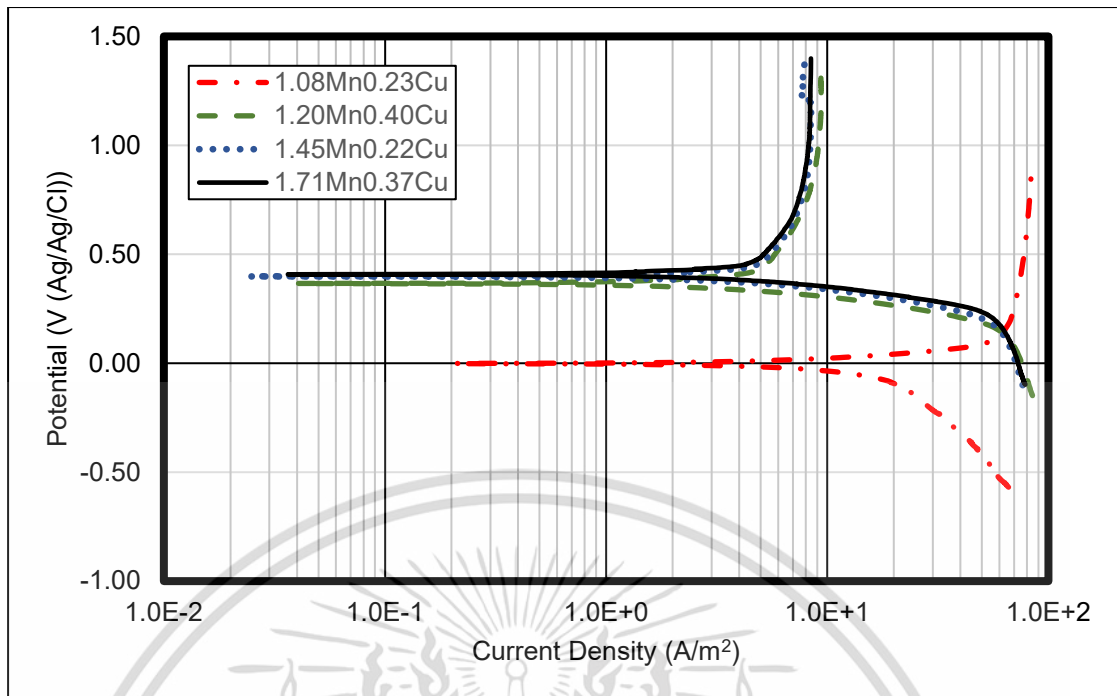
1.  $E_{\text{corr}}$  สูงขึ้น เนื่องจากมีปริมาณของแก๊สออกซิเจนในสารละลายเพิ่มขึ้น ทำให้เกิดปฏิกิริยาแคโทดิก (Cathodic Reaction) เกิดได้มากขึ้น จึงเพิ่มความสามารถในการกำจัดสเกลออกไซด์และไม่พบช่วงสภาพพาสซีฟ (Passivity)
2.  $E_{\text{corr}}$  สูงขึ้น เนื่องจากผิวของเหล็กคอยล์ดำได้รับอิเล็กตรอนจาก  $\text{H}_2\text{O}_2$  (สมการที่ (4.2)) ทำให้การเกิดปฏิกิริยาแอโนดิก (Anodic Reaction) น้อยลง ผลของปฏิกิริยาแคโทดิกจึงมากกว่า

จากรูปที่ 4.3 - 4.5 ไม่ปรากฏช่วงสภาพพาสซีฟ (Passivity) บนผิวเหล็กคอยล์ดำในทุกตัวอย่างที่มี Mn 1.08-1.71 wt% และ Cu 0.22-0.40 wt% ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Kunrayaphus Tipves et al. (Kunrayaphus Tipves et al. 2020) ที่ศึกษาผลของการผสม  $\text{H}_2\text{O}_2$  ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ) ต่อการกำจัดสเกลออกไซด์ออกจากเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 304L ที่ผ่านการอบอ่อนที่อุณหภูมิ 1,448 K เป็นเวลา 300 วินาที พบว่าการใช้  $\text{H}_2\text{O}_2$  ความเข้มข้น 10  $\text{kg/m}^3$  ทำให้ไม่ปรากฏช่วงสภาพพาสซีฟ และได้ผิวสำเร็จหลังการกัดกรดเรียบ



รูปที่ 4.4 กราฟโพลาริเซชันจากเทคนิคโพเทนทีโอไดนามิกของเหล็กคอยล์ดำเกรด 304L ที่มี Mn 1.08-1.71 wt% และ Cu 0.22-0.40 wt% ในสารละลายผสมของ HCl 0.5 M กับสารละลาย  $\text{H}_2\text{O}_2$  0.88 M

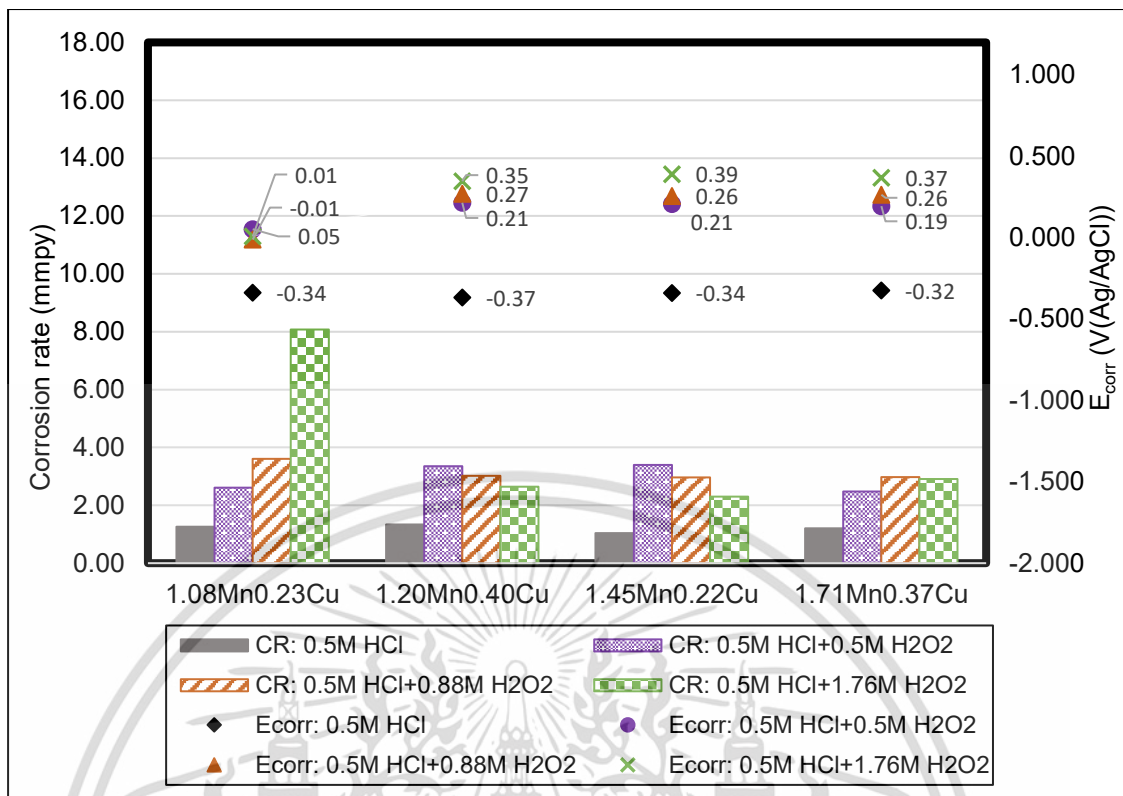
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.5 กราฟโพลาริเซชันจากเทคนิคโพเทนทีโอไดนามิกของเหล็กคอยล์ดำเกรด 304L ที่มี Mn 1.08-1.71 wt% และ Cu 0.22-0.40 wt% ในสารละลายผสมของ HCl 0.5 M กับสารละลาย  $H_2O_2$  1.76 M

รูปที่ 4.6 สรุปลักษณะการกัดกร่อนและศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อน ( $E_{corr}$ ) ของเหล็กคอยล์ดำเกรด 304L ที่มี Mn 1.08-1.71 wt% และ Cu 0.22-0.40 wt% หลังการกัดกร่อนร่วมกับกระแสไฟฟ้าในสารละลาย HCl 0.5 M และสารละลายผสมของ HCl 0.5 M กับสารละลาย  $H_2O_2$  0.5, 0.88 และ 1.76 M

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.6 แผนภูมิสรูปอัตราการกัดกร่อนและศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อน ( $E_{corr}$ ) ของเหล็กคอยล์ดำเกรด 304L ที่มี Mn 1.08–1.71 wt% และ Cu 0.22–0.40 wt% หลังการกัดกร่รรวมกับกระแสไฟฟ้าในสารละลาย HCl 0.5 M และสารละลายผสมของ HCl 0.5 M กับสารละลาย  $H_2O_2$  0.5, 0.88 และ 1.76 M (กราฟแท่งแสดงอัตราการกัดกร่อน สัญลักษณ์แสดงค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนตามลำดับ)

จากรูปที่ 4.6 เมื่อพิจารณาผลของ Mn และ Cu ต่อการกำจัดสเกลออกไซด์ พบว่าอัตราการกัดกร่อน (CR) ซึ่งแสดงอัตราการกำจัดสเกลออกไซด์ในสารละลาย HCl 0.5 M ของเหล็กคอยล์ดำ 1.08%Mn0.23%Cu มีค่าต่ำที่สุดเท่ากับ 1.3 mmpy และอัตราการกำจัดสเกลออกไซด์เพิ่มขึ้นเป็น 2.6, 3.6 และ 8.1 mmpy ในสารละลายผสมของ HCl 0.5 M กับสารละลาย  $H_2O_2$  0.5, 0.88 และ 1.76 M ตามลำดับ แสดงว่าสารละลาย  $H_2O_2$  ช่วยในการกำจัดสเกลออกไซด์

อัตราการกำจัดสเกลออกไซด์ออกจากเหล็กคอยล์ดำ 1.20%Mn0.40%Cu, 1.45%Mn0.22%Cu และ 1.71%Mn0.37%Cu (Mn 1.20–1.71 และ Cu 0.22–0.40 wt%) ในสารละลายผสมของ HCl กับสารละลาย  $H_2O_2$  สูงกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับการใช้สารละลาย HCl 0.5 M เพียงอย่างเดียว แต่การเพิ่มความเข้มข้นของสารละลาย  $H_2O_2$  จาก 0.5 เป็น 0.88 และ 1.76 M ไม่มีผลต่ออัตราการกำจัดสเกลออกไซด์อย่างมีนัยสำคัญ ในงานวิจัยนี้ (ตารางที่ 4.2) พบ Mn-rich  $(Fe, Mn)_2SiO_4$  ซึ่งเกิดจากปฏิกิริยาระหว่าง  $Fe_2SiO_4$  กับ  $Mn_2SiO_4$  ที่ถูกรีดร้อนในอุณหภูมิเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

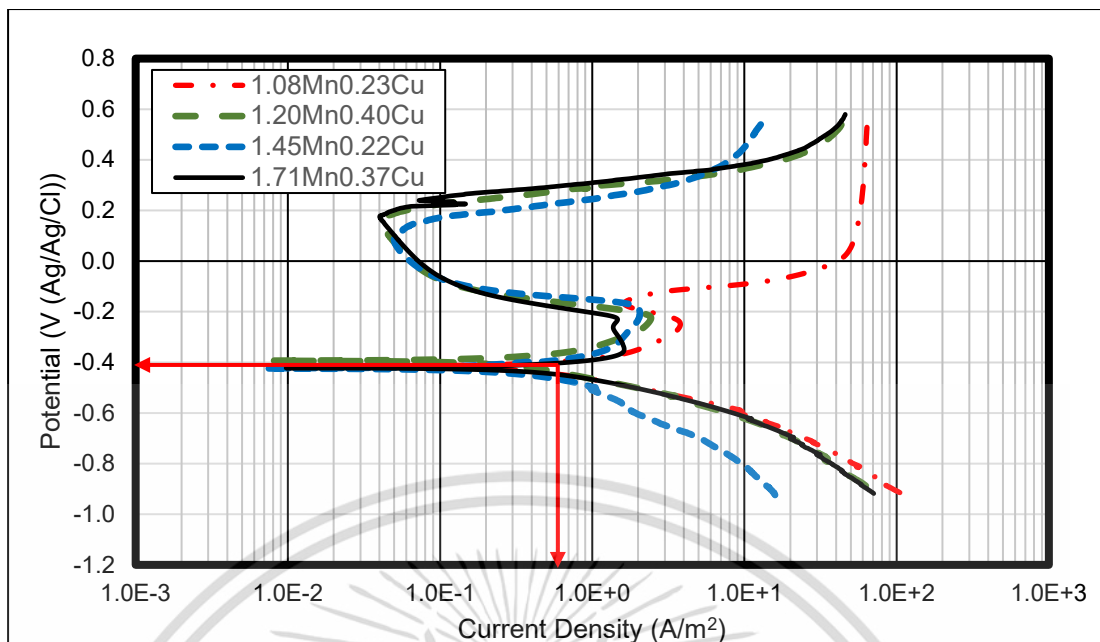
900-1,000 °C ความดัน 2 kbar (200 MPa) บนผิวเหล็กคอยล์ดำที่มี Mn ตั้งแต่ 1.20 wt% ขึ้นไป Mn-rich  $(\text{Fe,Mn})_2\text{SiO}_4$  เป็นออกไซด์ที่กำจัดสเกลออกไซด์ออกได้ยาก เพราะมีความหนาแน่นสูง และจำกัดการแพร่ของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ (คือสารละลายผสมของ HCl กับสารละลาย  $\text{H}_2\text{O}_2$ ) เข้าไป สัมผัสกับชั้นของสเกลออกไซด์บนผิวเหล็ก (โซคอนันต์ ตีระวัฒน์วิทยา. 2562) ดังนั้นสรุปได้ว่าสเกลออกไซด์บนเหล็กคอยล์ดำที่มีปริมาณ Mn ตั้งแต่ 1.20 wt% ขึ้นไป ถูกกำจัดออกได้ยาก

$E_{\text{corr}}$  ของเหล็กคอยล์ดำ 1.20%Mn0.40%Cu, 1.45%Mn0.22%Cu และ 1.71%Mn0.37%Cu ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ พบว่าค่า  $E_{\text{corr}}$  เหล็กคอยล์ดำ 1.08%Mn0.23%Cu ในสารละลายผสมของ HCl 0.5 M กับสารละลาย  $\text{H}_2\text{O}_2$  0.5, 0.88 และ 1.76 M มีค่าเฉลี่ย ประมาณ 0.02 V (เฉลี่ยจาก 0.05, -0.01, 0.01 V ตามลำดับ ดังรูปที่ 4.6) ซึ่งต่ำกว่าค่าเฉลี่ยของเหล็กคอยล์ดำ ตัวอย่างอื่น (1.20%Mn0.40%Cu, 1.45%Mn0.22%Cu และ 1.71%Mn0.37%Cu) ที่มีค่าเฉลี่ย ประมาณ 0.28 V เมื่อค่า  $E_{\text{corr}}$  ต่ำแสดงว่าการกำจัดสเกลออกไซด์ออกจากผิวของเหล็กคอยล์ดำ 1.08%Mn0.23%Cu สามารถทำได้ง่ายกว่าเหล็กคอยล์ดำตัวอย่างอื่น

งานวิจัยนี้ไม่สามารถวิเคราะห์ผลของปริมาณ Cu ต่อการกำจัดสเกลออกไซด์ของเหล็กกล้าไร้สนิมรีดร้อนเกรด 304L ด้วยการกัดกรวดร่วมกับกระแสไฟฟ้าในสารละลายผสมของ HCl 0.5 M กับสารละลาย  $\text{H}_2\text{O}_2$  0.5, 0.88 และ 1.76 M ได้ (รูปที่ 4.6) เนื่องจากปริมาณ Cu ในเหล็กคอยล์ดำค่อนข้างต่ำจึงไม่พบสารประกอบออกไซด์ของ Cu บนผิวของเหล็กคอยล์ดำที่ทดสอบด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-ray Diffraction: XRD)

#### 4.4 การวิเคราะห์เส้นแวนไดคโพลาริเซชันและเส้นแคโทดิกโพลาริเซชันของเหล็กคอยล์ขาวเกรด 304L ที่ผ่านการกัดกรวดร่วมกับกระแสไฟฟ้าในสารละลาย HCl 0.5 M และสารละลายผสมของ HCl 0.5 M กับสารละลาย $\text{H}_2\text{O}_2$ 0.5, 0.88 และ 1.76 M

ผลการศึกษาพฤติกรรมการกัดกร่อนของเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 304L ที่ปราศจากสเกลออกไซด์หรือเรียกว่า เหล็กคอยล์ขาว (White Coil) ที่มี Mn 1.08-1.71 wt% และ Cu 0.22-0.40 wt% ในสารละลาย HCl 0.5 M ด้วยเทคนิคโพเทนทิโอสแตติกโพลาริเซชัน แสดงดังรูปที่ 4.7



รูปที่ 4.7 กราฟโพลาริเซชันจากเทคนิคโพเทนทีโอไดนามิกของเหล็กคอยล์ขาวเกรด 304L ที่มี Mn 1.08-1.71 wt% และ Cu 0.22-0.40 wt% ในสารละลาย HCl 0.5 M

จากรูปที่ 4.7 พบว่าเหล็กคอยล์ขาวที่มี Mn 1.08-1.71 wt% และ Cu 0.22-0.40 wt% ทุกตัวอย่างมีค่า  $i_{corr}$  และ  $E_{corr}$  ใกล้เคียงกัน ประมาณ  $0.50 \text{ A/m}^2$  และ  $-0.40 \text{ V}$  ตามลำดับ แสดงว่าปริมาณ Mn และ Cu ในตัวอย่างไม่มีผลต่ออัตราการกัดกร่อนของเหล็กคอยล์ขาวในสารละลาย HCl 0.5 M และพบว่าช่วงแอคทีฟ (หรือช่วงแอโนดิก) ของกราฟโพลาริเซชันของเหล็กคอยล์ขาวมีช่วงสภาพพาสซีฟในช่วงศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนตั้งแต่  $-0.26$  ถึง  $0.36 \text{ V}$  จากรูปเหล็กคอยล์ขาวที่มี Mn 1.20, 1.45 และ 1.71 wt% มีค่า  $i_p$  ใกล้เคียงกันประมาณ  $0.04 \text{ A/m}^2$  ซึ่งต่ำกว่าค่า  $i_p$  ของเหล็กคอยล์ขาวที่มี Mn 1.08 wt% ซึ่งมีค่า  $i_p$  ประมาณ  $1.7 \text{ A/m}^2$  แสดงว่าฟิล์มพาสซีฟของเหล็กคอยล์ขาวที่มี Mn 1.20, 1.45 และ 1.71 wt% แข็งแรงกว่า ซึ่งคาดว่าอาจเกิดออกไซด์ของโลหะ  $\text{Cr}_{1.5}\text{Mn}_{1.5}\text{O}_4$ , Mn-rich $(\text{Fe},\text{Mn})_2\text{SiO}_4$  และ  $\text{Mn}_3\text{O}_4$  บนผิวของเหล็กคอยล์ขาว 1.20%Mn0.40%Cu, 1.45%Mn0.22%Cu และ 1.71%Mn0.37%Cu ที่มีส่วนช่วยลดอัตราการกัดกร่อน (หรือเพิ่มความต้านทานการกัดกร่อน) ในสารละลาย HCl 0.5 M

ในงานวิจัยนี้สรุปได้ว่าปริมาณ Mn สูง ส่งผลดีต่อเหล็กคอยล์ขาว อัตราการกัดกร่อนของเหล็กคอยล์ขาวเกรด 304L ที่มีปริมาณ Mn 1.20-1.71 wt% มีค่าต่ำกว่าเหล็กคอยล์ขาวที่มี Mn 1.08 wt%

พฤติกรรมการกัดกร่อนของเหล็กคอยล์ขาวที่มี Mn 1.08-1.71 wt% และ Cu 0.22-0.40 wt%

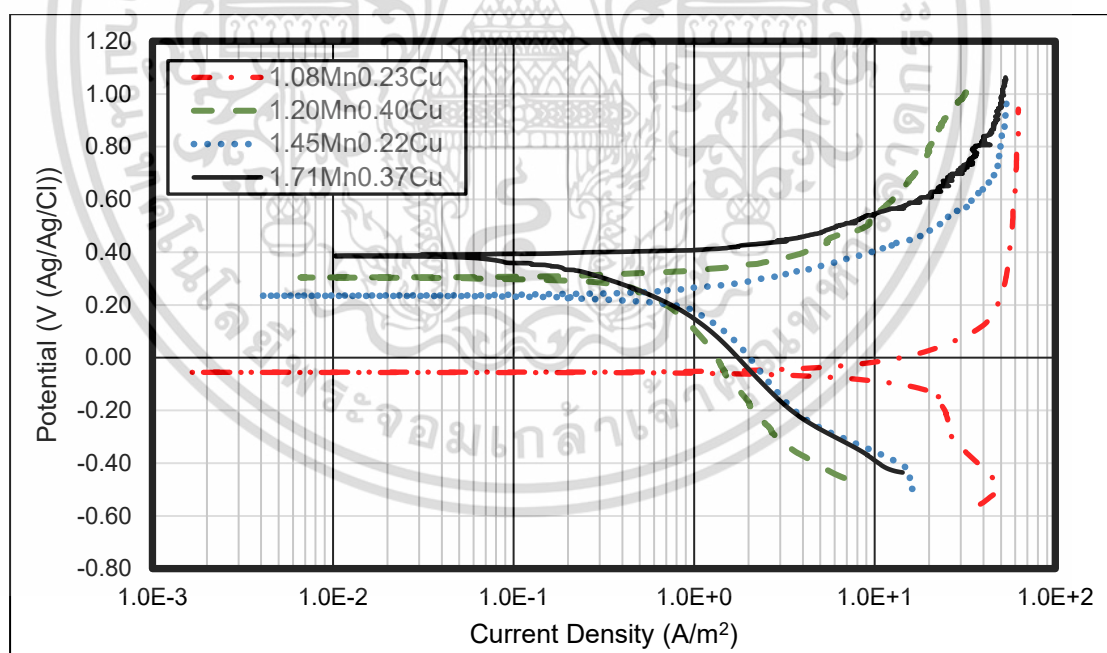
ในสารละลาย HCl 0.5 M พบช่วงสภาพพาสซีฟเช่นเดียวกับผลการวิเคราะห์เส้นแคโทดิก เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โพลาริเซชันและเส้นแวนดิกโพลาริเซชันของเหล็กคอลลี่ดำที่มี Mn 1.08-1.71 wt% และ Cu 0.22-0.40 wt% ที่ทดสอบการกัดกร่อนร่วมกับกระแสในสารละลาย HCl 0.5 M (หัวข้อที่ 4.2)

จากหัวข้อที่ 4.3 พบว่าการผสมสารละลาย  $H_2O_2$  ในสารละลาย HCl 0.5 M เพิ่มอัตราการกัดกร่อนของเหล็กคอลลี่ดำเมื่อเปรียบเทียบกับการใช้สารละลาย HCl 0.5 M เพียงอย่างเดียว แต่การเพิ่มความเข้มข้นของสารละลาย  $H_2O_2$  จาก 0.5 เป็น 0.88 และ 1.76 M ไม่มีผลต่ออัตราการกัดกร่อนอย่างมีนัยสำคัญ ดังนั้นในหัวข้อนี้จึงพิจารณาพฤติกรรมการกัดกร่อนของเหล็กคอลลี่ดำที่มี Mn 1.08-1.71 wt% และ Cu 0.22-0.40 wt% ในสารละลายผสมของ HCl 0.5 M กับสารละลาย  $H_2O_2$  0.88 M เท่านั้น ซึ่งผลการทดสอบแสดงในรูปที่ 4.8

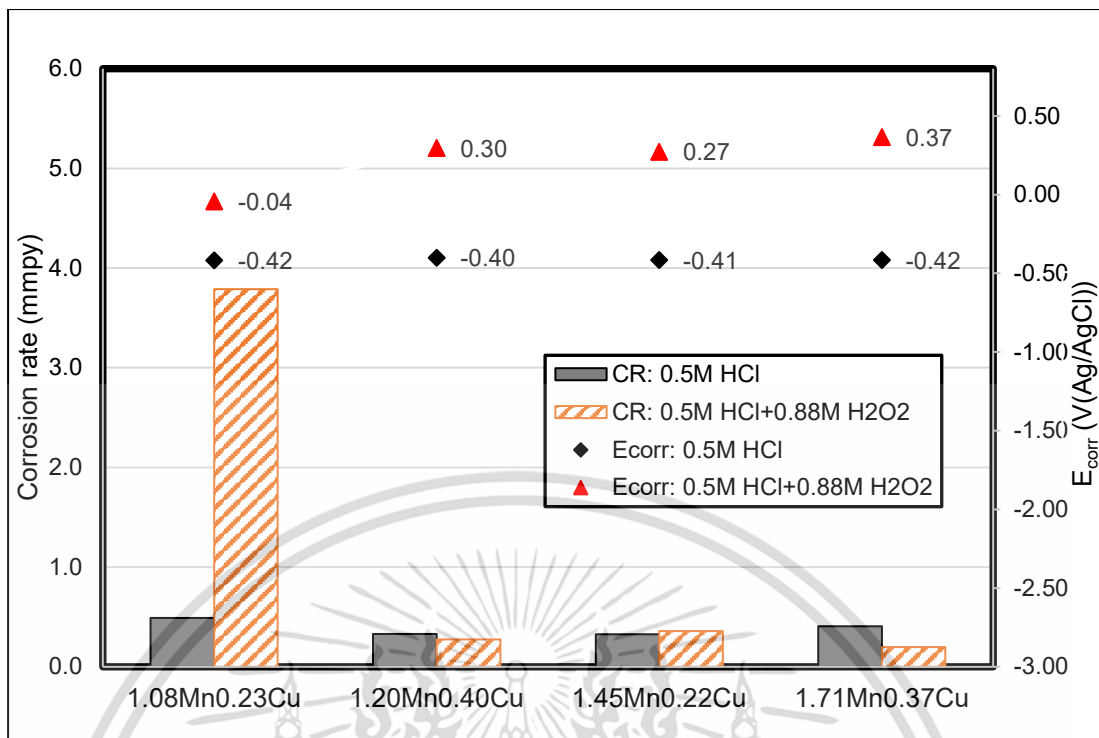
จากรูปที่ 4.8 พบว่ากราฟโพลาริเซชันของเหล็กคอลลี่ดำที่มี Mn 1.08-1.71 wt% และ Cu 0.22-0.40 wt% ในสารละลายผสมของ HCl 0.5 M กับสารละลาย  $H_2O_2$  0.88 M ไม่พบช่วงสภาพพาสซีฟ (เช่นเดียวกับในหัวข้อที่ 4.3)

รูปที่ 4.9 สรุปลักษณะการกัดกร่อนและศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อน ( $E_{corr}$ ) ของเหล็กคอลลี่ดำเกรด 304L ที่มี Mn 1.08-1.71 wt% และ Cu 0.22-0.40 wt% หลังการกัดกร่อนในสารละลาย HCl 0.5 M และสารละลายผสมของ HCl 0.5 M กับสารละลาย  $H_2O_2$  0.88 M



รูปที่ 4.8 กราฟโพลาริเซชันจากเทคนิคโพเทนทิโอดินามิกของเหล็กคอลลี่ดำเกรด 304L ที่มี Mn 1.08-1.71 wt% และ Cu 0.22-0.40 wt% ในสารละลายผสมของ HCl 0.5 M กับสารละลาย  $H_2O_2$  0.88 M

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.9 แผนภูมิสรูปอัตราการกัดกร่อนและค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อน ( $E_{corr}$ ) ของเหล็กคอยล์ชาวเกรด 304L ที่มี Mn 1.08-1.71 wt% และ Cu 0.22-0.40 wt% ในสารละลาย HCl 0.5 M หลังการกัดกร่รวมกับกระแสไฟฟ้าในสารละลาย HCl 0.5 M และสารละลายผสมของ HCl 0.5 M กับสารละลาย  $H_2O_2$  0.88 M (กราฟแท่งแสดงอัตราการกัดกร่อน สัญลักษณ์แสดงค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนตามลำดับ)

จากรูปที่ 4.9 เมื่อเปรียบเทียบอัตราการกัดกร่อนของเหล็กคอยล์ชาวในสารละลาย HCl 0.5 M และสารละลายผสมของ HCl 0.5 M กับสารละลาย  $H_2O_2$  0.88 M พบว่าเหล็กคอยล์ชาว 1.08%Mn0.23%Cu ที่มีอัตราการกัดกร่อนสูงขึ้นจาก 0.5 เป็น 3.8 mmpy ส่วนเหล็กคอยล์ชาว 1.20%Mn0.40%Cu, 1.45%Mn0.22%Cu และ 1.71%Mn0.37%Cu อัตราการกัดกร่อนไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ แสดงว่าการผสมสารละลาย  $H_2O_2$  ในสารละลาย HCl 0.5 M และปริมาณ Mn ในเหล็กคอยล์ชาวต่ำ (1.08 wt%) ไม่ดีต่อเหล็กคอยล์ชาว เพราะทำลายชั้นฟิล์มพาสซีฟบนผิวของเหล็กคอยล์ชาว ทำให้อัตราการกัดกร่อนสูงขึ้น หรือมีความต้านทานกัดกร่อนลดลง แต่สำหรับเหล็กคอยล์ชาวที่มี Mn สูง (1.20 - 1.71 wt%) ไม่พบผลของ Mn ต่ออัตราการกัดกร่อนอย่างมีนัยสำคัญ

เมื่อเปรียบเทียบค่า  $E_{\text{corr}}$  ของเหล็กคอปเปอร์ในสารละลาย HCl 0.5 M และสารละลายผสมของ HCl 0.5 M กับสารละลาย  $\text{H}_2\text{O}_2$  0.88 M พบว่าค่า  $E_{\text{corr}}$  ของเหล็กคอปเปอร์ทุกตัวอย่างสูงขึ้น (รูปที่ 4.9) เนื่องจาก  $\text{H}_2\text{O}_2$  ทำปฏิกิริยาออกซิเดชันและเกิดแก๊สออกซิเจน ดังแสดงในสมการที่ (4.2) จากรูปที่ 4.9 พบว่าเมื่อปริมาณ Mn ในเหล็กคอปเปอร์สูง (1.20 - 1.71 wt%) ค่า  $E_{\text{corr}}$  สูงกว่าเหล็กคอปเปอร์ที่มีปริมาณ Mn ต่ำ (1.08 wt%) แสดงว่าฟิล์มพาสซีฟที่ปกคลุมผิวของเหล็กคอปเปอร์ถูกกัดกร่อนได้ยากกว่า อธิบายโดยทฤษฎีตาม Denny A. Jones. (Denny A. Jones. 1996)

จากการศึกษาการกำจัดสเกลออกไซด์และการกัดกร่อนของเหล็กคอปเปอร์ดำและเหล็กคอปเปอร์ขาว 1.08%Mn0.23%Cu พบว่าการผสมสารละลาย  $\text{H}_2\text{O}_2$  ในสารละลาย HCl 0.5 M ทำให้อัตราการกำจัดสเกลออกไซด์ของเหล็กคอปเปอร์ดำ หรืออัตราการกัดกร่อนของเหล็กคอปเปอร์ขาวสูงขึ้น

ในการศึกษาการกำจัดสเกลออกไซด์ของเหล็กคอปเปอร์ดำและการศึกษาพฤติกรรมการกัดกร่อนของเหล็กคอปเปอร์ขาว ตัวอย่าง 1.20%Mn0.40%Cu, 1.45%Mn0.22%Cu และ 1.71%Mn0.37%Cu ที่มีปริมาณ Mn มากกว่า 1.08 wt% พบออกไซด์ของโลหะ ได้แก่ Mn-rich(Fe,Mn) $_2$ SiO $_4$  และ Mn $_3$ O $_4$  บนผิวของเหล็กคอปเปอร์ดำส่งผลให้การกำจัดสเกลออกไซด์ทำได้ยากขึ้น อย่างไรก็ตามในงานวิจัยนี้ ปริมาณ Cu ในเหล็กคอปเปอร์ดำค่อนข้างต่ำ และไม่พบสารประกอบออกไซด์ของ Cu บนผิวของเหล็กคอปเปอร์ดำที่วิเคราะห์ด้วย XRD ปริมาณ Cu ไม่ส่งผลต่ออัตราการกำจัดสเกลออกไซด์ของเหล็กคอปเปอร์ดำและอัตราการกัดกร่อนของเหล็กคอปเปอร์ขาวอย่างมีนัยสำคัญทั้งในสารละลาย HCl 0.5 M และสารละลายผสมของ HCl 0.5 M กับสารละลาย  $\text{H}_2\text{O}_2$

งานวิจัยของ Hann-Tuw Lin et al. (Hann-Tuw Lin et al. 1992) ศึกษาพฤติกรรมการกัดกร่อนของเหล็กคอปเปอร์ขาวที่มี 1.05%Mn2.00%Cu และ 1.15%Mn3.09%Cu ในสารละลายกรดซัลฟิวริก 0.1 M ด้วยเทคนิคโพเทนทีโอสแตต พบว่าการสลายฟิล์มพาสซีฟ (ฟิล์มออกไซด์ของ Cu $_2$ O) บนผิวเหล็กคอปเปอร์ขาว 1.05%Mn2.00%Cu และ 1.15%Mn3.09%Cu ใช้เวลา 4 และ 10 นาที ตามลำดับ แสดงว่าความต้านทานการกัดกร่อนของเหล็กคอปเปอร์ขาวสูงขึ้น เมื่อปริมาณ Cu สูงขึ้นจาก 2.00 เป็น 3.09 wt% (ปริมาณ Cu สูงกว่างานวิจัยนี้ประมาณ 7.7 เท่า)

#### 4.5 การวิเคราะห์พื้นผิวเหล็กคอลล่าเกรด 304L ที่ผ่านการกัดกรวดร่วมกับกระแสไฟฟ้าในสารละลาย HCl 0.5 M และสารละลายผสมของ HCl 0.5 M กับสารละลาย H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 0.5, 0.88 และ 1.76 M ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (Optical Microscope)

รูปที่ 4.10-4.11 แสดงภาพพื้นผิวเหล็กคอลล่าที่มี Mn 1.08-1.71 wt% และ Cu 0.22-0.40 wt% หลังการทดสอบการกัดกรวดร่วมกับกระแสไฟฟ้าในสารละลาย HCl 0.5 M และสารละลายผสมของ HCl 0.5 M กับสารละลาย H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 0.5, 0.88 และ 1.76 M

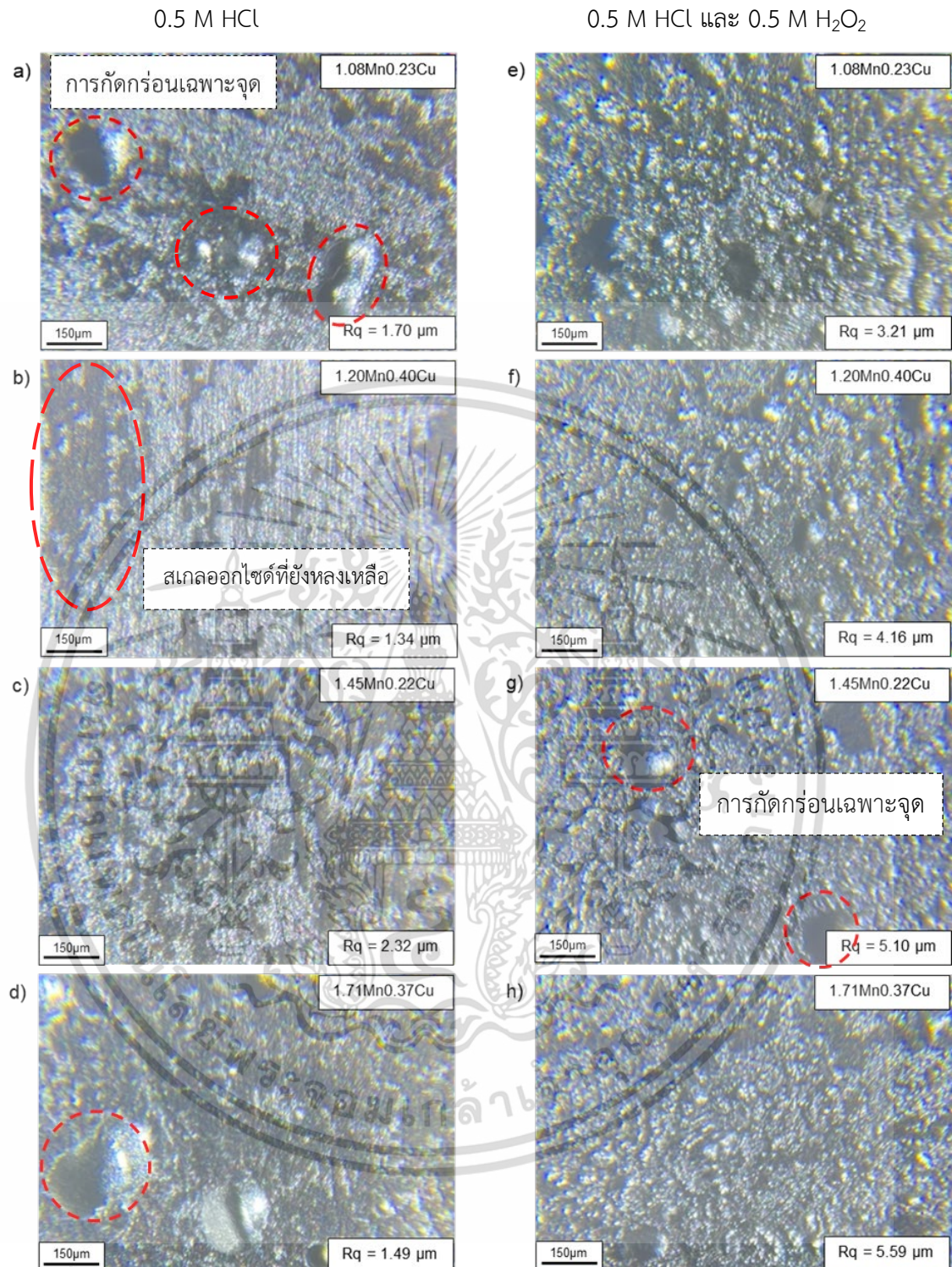
จากรูปที่ 4.10 (a) – (d) พบว่าบนพื้นผิวเหล็กคอลล่าหลังจากการกัดกรวดร่วมกับกระแสไฟฟ้าในสารละลาย HCl 0.5 M เมื่อปริมาณ Mn สูงขึ้นจาก 1.08 เป็น 1.20, 1.45 และ 1.71 wt% จะมีสเกลออกไซด์หลงเหลือมากขึ้นตามลำดับ (บริเวณสีแดงในรูป) และจากรูปที่ 4.10 (e) – (h) พบว่าพื้นผิวเหล็กคอลล่าหลังจากการกัดกรวดร่วมกับกระแสไฟฟ้าในสารละลายผสมของ HCl 0.5 M กับสารละลาย H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 0.5 M มีสเกลออกไซด์หลงเหลือน้อยลงเมื่อเปรียบเทียบกับ การกัดกรวดร่วมกับกระแสไฟฟ้าในสารละลาย HCl 0.5 M เพียงอย่างเดียว แต่พบการกัดกร่อนเฉพาะที่หรือการกัดกร่อนแบบรูเข็ม (Pitting Corrosion) (บริเวณสีแดงในรูป) เนื่องจากไอออนของ Cl<sup>-</sup> มีค่าอิเล็กโตรเนกาติวิตี (Electronegativity) สูง จึงมีความว่องไวในการรับอิเล็กตรอนสามารถทำลายสเกลออกไซด์ และทำให้เกิดการกัดกร่อนแบบรูเข็ม ส่วนค่าความหยาบผิวเฉลี่ยกำลังสอง (Roughness Root Mean Square: Rq) ที่ตรวจพบเพิ่มขึ้นจาก 1.34 – 2.32 μm เป็น 3.21 – 5.59 μm

เมื่อเปรียบเทียบรูปที่ 4.10 และรูปที่ 4.11 พบว่าการเพิ่มความเข้มข้นของสารละลาย H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> จาก 0.5 M เป็น 0.88 (รูปที่ 4.11 (a)-(d)) และ 1.76 M (รูปที่ 4.11 (e)-(h)) ตามลำดับ ทำให้สเกลออกไซด์เหลือน้อยลงบนพื้นผิวเหล็กคอลล่าหลังจากการกัดกรวดร่วมกับกระแสไฟฟ้า และมีพื้นผิวเรียบขึ้น (ค่าความหยาบผิวเฉลี่ยกำลังสองมีแนวโน้มลดลง) ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Wanna Homjabok et al. (2010) ที่ศึกษาการกัดกรวดของเหล็กกล้าไร้สนิมรีดร้อนเกรด 304 พบว่าการเติม H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> ในสารละลาย HCl 4 M ช่วยเพิ่มอัตราการกำจัดสเกลออกไซด์ และได้พื้นผิวที่เรียบกว่าการกัดกรวดในสารละลาย HCl 4 M เพียงอย่างเดียว จากรูปที่ 4.10 และรูปที่ 4.11 พบว่าหลังการกัดกรวดร่วมกับกระแสไฟฟ้าในสารละลายผสมของ HCl 0.5 M กับสารละลาย H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 0.5, 0.88 และ 1.76 M เหล็กคอลล่าที่มี Mn 1.08 wt% มีความหยาบผิวสูงกว่าเหล็กคอลล่าที่มี Mn 1.20, 1.45 และ 1.71 wt% (เหล็กคอลล่าที่มี Mn 1.20, 1.45 และ 1.71 wt% มีความหยาบผิวใกล้เคียงกัน) เนื่องจากเหล็กคอลล่าที่มี Mn 1.20, 1.45 และ 1.71 wt% มีออกไซด์ Mn-rich(Fe,Mn)<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub> และ Mn<sub>3</sub>O<sub>4</sub> ที่ทำให้พื้นผิวหลังการกัดกรวดร่วมกับกระแสไฟฟ้าเรียบสม่ำเสมอ อย่างไรก็ตามปริมาณ

Cu ในเหล็กคอลล่าไม่ส่งผลต่อค่าความหยาบผิวอย่างมีนัยสำคัญ

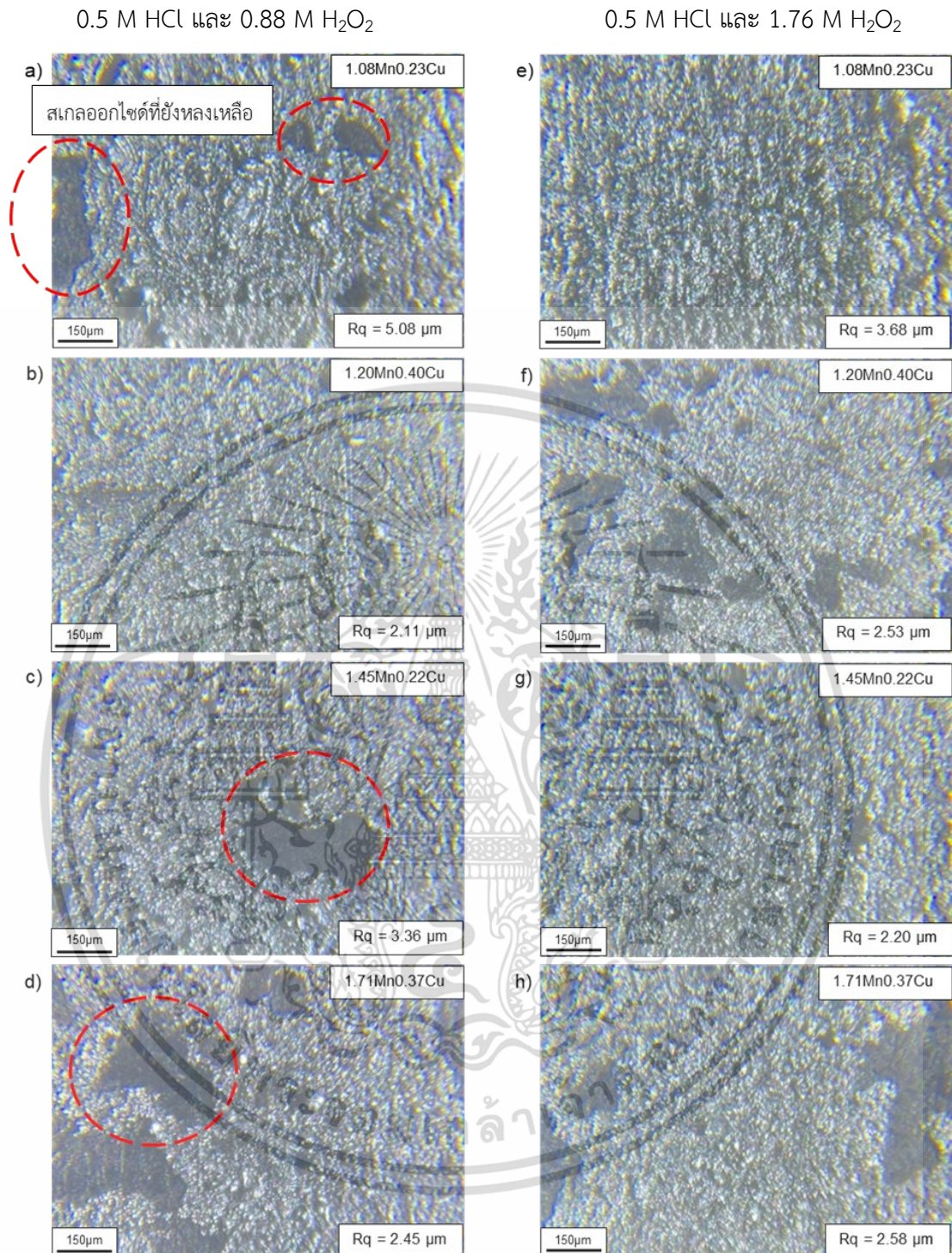
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



**รูปที่ 4.10** ภาพพื้นผิวเหล็กคอยล์ดำเกรด 304L ที่มี Mn 1.08-1.71 wt% และ Cu 0.22-0.40 wt% หลังการกัดกรดร่วมกับกระแสไฟฟ้าใน (a) – (d) สารละลาย HCl 0.5 M และ (e) – (h) สารละลายผสมของ HCl 0.5 M กับสารละลาย H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 0.5 M

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

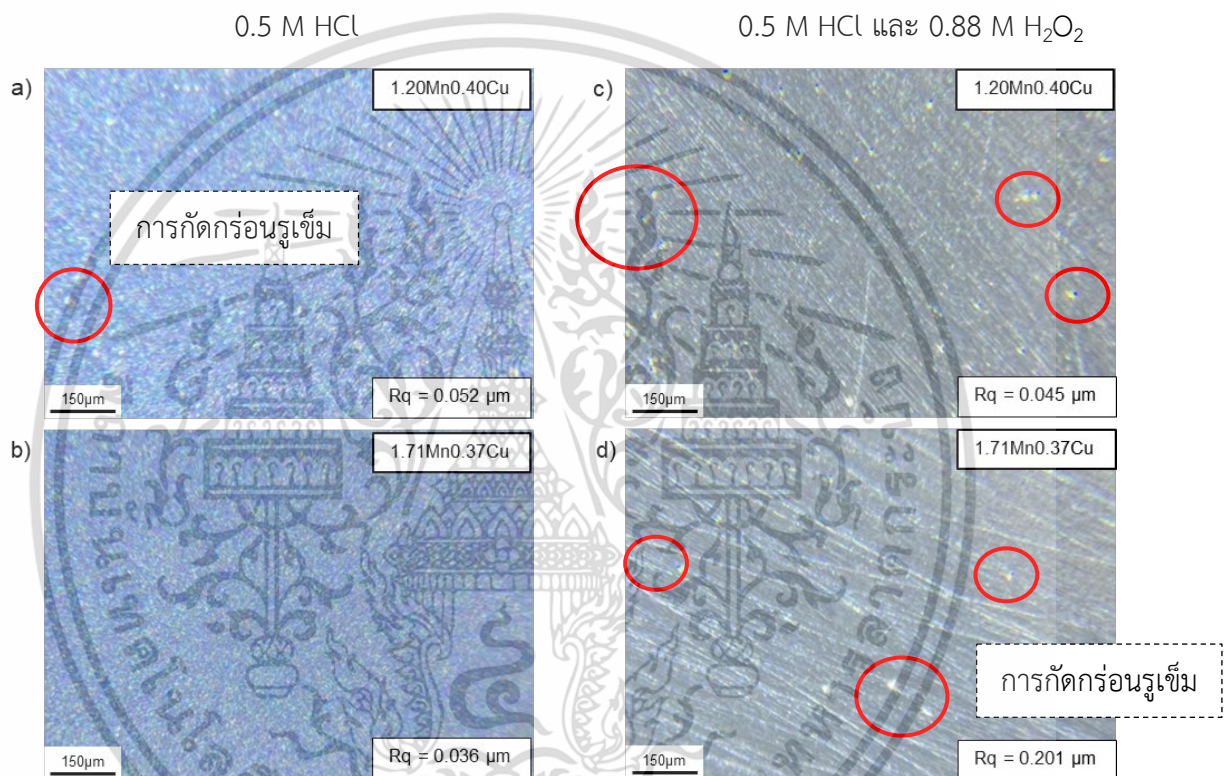


**รูปที่ 4.11** ภาพพื้นผิวเหล็กคอยล์ดำเกรด 304L ที่มี Mn 1.08-1.71 wt% และ Cu 0.22-0.40 wt% หลังการกัดกรวดร่วมกับกระแสไฟฟ้าใน (a) – (d) สารละลายผสมของ HCl 0.5 M กับสารละลาย H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 0.88 M และ (e) – (h) สารละลายผสมของ HCl 0.5 M กับสารละลาย H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 1.76 M

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.6 การวิเคราะห์พื้นผิวเหล็กคอลลิวเกรด 304L ที่ผ่านการกัดกรวดร่วมกับกระแสไฟฟ้าในสารละลาย HCl 0.5 M และสารละลายผสมของ HCl 0.5 M กับสารละลาย  $H_2O_2$  0.88 M ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (Optical Microscope)

รูปที่ 4.12 แสดงภาพพื้นผิวเหล็กคอลลิวเกรด 1.20%Mn0.40%Cu และ 1.71%Mn0.37%Cu หลังการทดสอบด้วยเทคนิคโพเทนชิโอดินามิกโพลาริเซชันในสารละลาย HCl 0.5 M และสารละลายผสมของ HCl 0.5 M กับสารละลาย  $H_2O_2$  0.88 M



รูปที่ 4.12 ภาพพื้นผิวเหล็กคอลลิวเกรด 304L 1.20%Mn0.40%Cu และ 1.71%Mn0.37%Cu หลังการกัดกรวดร่วมกับกระแสไฟฟ้าใน (a) – (b) สารละลาย HCl 0.5 M และ (c) – (d) สารละลายผสมของ HCl 0.5 M กับสารละลาย  $H_2O_2$  0.88 M

จากรูปที่ 4.12 (a) – (b) บนพื้นผิวของเหล็กคอลลิวเกรดหลังการทดสอบด้วยเทคนิคโพเทนชิโอดินามิกโพลาริเซชันในสารละลาย HCl 0.5 M พบการกัดกร่อนแบบรูเข็มเล็กน้อย และจากรูปที่ 4.12 (c) – (d) บนพื้นผิวเหล็กคอลลิวเกรดที่ทดสอบในสารละลายผสมของ HCl 0.5 M กับสารละลาย  $H_2O_2$  0.88 M พบการกัดกร่อนแบบรูเข็มมากขึ้น และความหยาบผิวสูงขึ้นจาก 0.036-0.052  $\mu\text{m}$  เป็น 0.045-0.201  $\mu\text{m}$  แสดงว่าการผสมสารละลาย  $H_2O_2$  0.88 M ในสารละลาย HCl 0.5 M ทำให้เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เกิดการกัดกร่อนบนพื้นผิวของเหล็กคอยล์ขาวมากขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับผลในหัวข้อที่ 4.5 ที่มีการผสมสารละลาย  $H_2O_2$  0.5, 0.88 และ 1.76 M ในสารละลาย HCl 0.5 M ที่เพิ่มการกำจัดสเกลออกไซด์บนพื้นผิวของเหล็กคอยล์ดำ เนื่องจาก  $H_2O_2$  เป็นตัวออกซิไดส์ให้แก่สออกซิเจนและเพิ่มปฏิกิริยาแคโทดิก ดังสมการที่ (4.2) จึงกระตุ้นให้เกิดการกัดกร่อนแบบรูเข็มบนพื้นผิวของเหล็กคอยล์ขาวในสารละลายที่มี  $Cl^-$



ผลการทดลองสอดคล้องกับงานวิจัยของ Qiong Xie et al. (2016) ที่ทดสอบการกัดกรดของเหล็กกล้าไร้สนิมรีดร้อนเกรด 430 ในสารละลายผสมของ HCl 5-8 wt% กับสารละลาย  $H_2O_2$  1-2 wt% พบว่าสามารถกำจัดสเกลออกไซด์ได้หมด แต่พบการกัดกร่อนบริเวณขอบเกรนเมื่อความเข้มข้นของสารละลาย  $H_2O_2$  สูงกว่า 1 wt% นอกจากนี้งานวิจัยของ M. Naoun et al. (M. Naoun et al. 2014) ยังยืนยันว่าพบหลุมขนาดเล็ก (Riddled Surface) บนพื้นผิวเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 316L ที่แช่ในสารละลายแฮงค์ (Hank's Solusion) ซึ่งมี  $Cl^-$  ผสมกับสารละลาย  $H_2O_2$  ความเข้มข้นสูงกว่า 100 nmol/g เป็นเวลา 72 ชั่วโมง

## บทที่ 5

### สรุปผลการศึกษาและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลการศึกษาของเหล็กคอยล์ดำ

การศึกษาผลของแมงกานีส 1.08-1.71%Mn และทองแดง 0.22-0.40%Cu wt% ต่อการกัดกร่อนร่วมกับกระแสไฟฟ้าเพื่อกำจัดสเกลออกไซด์ออกจากเหล็กกล้าไร้สนิมรีดร้อนหรือเหล็กคอยล์ดำเกรด 304L ในสารละลาย HCl 0.5 M และสารละลายผสมของ HCl 0.5 M กับสารละลาย H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 0.5, 0.88 และ 1.76 M ด้วยเทคนิคโพเทนทิโอดินามิกโพลาริเซชัน สรุปได้ดังนี้

5.1.1 ในการกัดกร่อนร่วมกับกระแสไฟฟ้าในสารละลาย HCl 0.5 M พบว่าอัตราการกำจัดสเกลออกไซด์ออกจากเหล็กคอยล์ดำทุกตัวอย่าง (1.08%Mn0.23%Cu, 1.20%Mn0.40%Cu, 1.45%Mn0.22%Cu และ 1.71%Mn0.37%Cu) อยู่ในช่วง 1.0-1.3 mmpy ส่วนศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนของทุกตัวอย่างอยู่ในช่วง -0.37 ถึง -0.33 V และทุกตัวอย่างแสดงช่วงพาสซีฟ

5.1.2 ในการกัดกร่อนร่วมกับกระแสไฟฟ้าในสารละลายผสมของ HCl 0.5 M กับสารละลาย H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 0.5 M พบว่าอัตราการกำจัดสเกลออกไซด์ออกจากเหล็กคอยล์ดำทุกตัวอย่างอยู่ในช่วง 2.98-3.61 mmpy สูงกว่าอัตราการกำจัดสเกลออกไซด์ในสารละลาย HCl 0.5 M เพียงอย่างเดียว แสดงว่าการผสม H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 0.5 M ทำให้อัตราการกำจัดสเกลออกไซด์เพิ่มขึ้น

5.1.3 ในการกัดกร่อนร่วมกับกระแสไฟฟ้าในสารละลายผสมของ HCl 0.5 M กับสารละลาย H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 0.5, 0.88 และ 1.76 M พบว่าเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารละลาย H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> อัตราการกำจัดสเกลออกไซด์ออกจากเหล็กคอยล์ดำที่มี Mn 1.08 wt% เพิ่มขึ้นจาก 2.6 เป็น 3.6 และ 8.1 mmpy ตามลำดับ แสดงว่าการเพิ่มความเข้มข้นของ H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> ทำให้อัตราการกำจัดสเกลออกไซด์เพิ่มขึ้น

การเพิ่มความเข้มข้นของสารละลาย H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> จาก 0.5 เป็น 0.88 และ 1.76 M ไม่มีผลต่ออัตราการกำจัดสเกลออกไซด์ออกจากเหล็กคอยล์ดำที่มี Mn 1.20-1.71 wt% เนื่องจากเหล็กคอยล์ดำที่มี Mn 1.20-1.71 wt% เกิดออกไซด์ประเภท Mn-rich (Fe,Mn)<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub> ซึ่งเป็นออกไซด์ที่กำจัดออกได้ยาก เพราะมีความหนาแน่นสูง และจำกัดการแพร่ของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ (คือสารละลายผสมของ HCl กับสารละลาย H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>) เข้าไปสัมผัสกับชั้นของสเกลออกไซด์บนผิวเหล็ก

5.1.4 ในการกัดกร่อนร่วมกับกระแสไฟฟ้าในสารละลายผสมของ HCl 0.5 M กับสารละลาย H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 0.5, 0.88 และ 1.76 M พบว่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนของเหล็กคอยล์ดำที่มี Mn 1.08-1.71 wt% เพิ่มขึ้นอยู่ในช่วง -0.012 ถึง 0.390 V เมื่อเทียบกับการใช้สารละลาย HCl 0.5 M เพียงอย่างเดียว เนื่องจาก H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> เพิ่มปฏิกิริยาออกซิเดชันและการละลายของแก๊สออกซิเจนในสารละลายผสม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เหล็กคอลล่าที่มี Mn 1.08 wt% ในสารละลายผสมของ HCl 0.5 M กับสารละลาย  $H_2O_2$  0.5, 0.88 และ 1.76 M มีศักย์ไฟฟ้ากักร่อนอยู่ในช่วง -0.01 ถึง 0.05 V ซึ่งต่ำกว่าศักย์ไฟฟ้าการกักร่อนของเหล็กคอลล่าที่มี Mn 1.20-1.71 wt% ที่อยู่ในช่วง 0.19-0.39 V แสดงว่าหากปริมาณ Mn ในเหล็กคอลล่าต่ำ (1.08 wt%) ทำให้การกำจัดสเกลออกไซด์ทำได้ง่ายกว่าเหล็กคอลล่าที่มี Mn สูง (1.20-1.71 wt%)

5.1.5 ปริมาณ Cu ไม่ส่งผลต่ออัตราการกำจัดสเกลออกไซด์ของเหล็กคอลล่าอย่างมีนัยสำคัญ ทั้งในสารละลาย HCl 0.5 M และสารละลายผสมของ HCl 0.5 M กับสารละลาย  $H_2O_2$  0.5, 0.88 และ 1.76 M

## 5.2 สรุปผลการศึกษาของเหล็กคอลล่าขาว

การศึกษามวลของแมงกานีส 1.08-1.71%Mn และทองแดง 0.22-0.40%Cu wt% ต่ออัตราการกักร่อนของเหล็กกล้าไร้สนิมรีดร้อนที่ปราศจากสเกลออกไซด์ หรือเหล็กคอลล่าขาวเกรด 304L ในสารละลาย HCl 0.5 M และสารละลายผสมของ HCl 0.5 M กับสารละลาย  $H_2O_2$  0.88 M ด้วยเทคนิคโพเทนทิโอสแตติกไมโครโวลตาโรกราฟี สรุปลงได้ดังนี้

5.2.1 ปริมาณ Mn และ Cu ในตัวอย่างไม่มีผลต่ออัตราการกักร่อนของเหล็กคอลล่าขาวในสารละลาย HCl 0.5 M อัตราการกักร่อนของเหล็กคอลล่าขาวทุกตัวอย่าง (1.08%Mn0.23%Cu, 1.20%Mn0.40%Cu, 1.45%Mn0.22%Cu และ 1.71%Mn0.37%Cu) ในสารละลาย HCl 0.5 M อยู่ในช่วง 0.3-0.5 mmpy และทุกตัวอย่างแสดงช่วงพาสซีฟ

5.2.2 ในสารละลายผสมของ HCl 0.5 M กับสารละลาย  $H_2O_2$  0.88 M พบว่าเหล็กคอลล่าขาวที่มี Mn 1.08 wt% มีอัตราการกักร่อนของเท่ากับ 3.8 mmpy ซึ่งสูงกว่าอัตราการกักร่อนของเหล็กคอลล่าขาวที่มี Mn 1.20-1.71 wt% อยู่ในช่วง 0.2-0.4 mmpy และทุกตัวอย่างไม่แสดงช่วงพาสซีฟ นอกจากนี้พบการกักร่อนแบบรูเข็ม แสดงว่าการผสมสารละลาย  $H_2O_2$  0.88 M กำจัดฟิล์มพาสซีฟและทำลายผิวเหล็กคอลล่าขาว

จากงานวิจัยนี้ สรุปลงว่าอัตราการกักร่อนของเหล็กคอลล่าขาวที่มีปริมาณ Mn 1.20-1.71 wt% มีค่าต่ำกว่าเหล็กคอลล่าขาวที่มี Mn 1.08 wt%

5.2.3 ในสารละลาย HCl 0.5 M พบว่าศักย์ไฟฟ้ากักร่อนของเหล็กคอลล่าขาวทุกตัวอย่างอยู่ในช่วง -0.42 ถึง -0.40 V และในสารละลายผสมของ HCl 0.5 M กับสารละลาย  $H_2O_2$  0.88 M ศักย์ไฟฟ้าการกักร่อนเพิ่มขึ้นอยู่ในช่วง -0.04 ถึง 0.37 V แสดงว่ามีแก๊สออกซิเจนละลายในสารละลายผสมเพิ่มขึ้น

ศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนของเหล็กคอยล์ขาวที่มี Mn 1.08 wt% มีค่าต่ำสุดเท่ากับ -0.04 V นั่นคือฟิล์มพาสของเหล็กคอยล์ขาวที่มี Mn ต่ำ (1.08 wt%) ถูกกัดกร่อนได้ง่ายกว่าเหล็กคอยล์ขาวที่มี Mn สูง (1.20-1.71 wt%) แสดงว่าปริมาณ Mn ในเหล็กคอยล์ขาวต่ำ (1.08 wt%) มีผลให้เหล็กคอยล์ขาวที่มี Mn สูง (1.20-1.71 wt%) มีอัตราการกัดกร่อนสูงกว่า หรือมีความต้านทานการกัดกร่อนต่ำกว่า (ซึ่งสอดคล้องกับการทดสอบของเหล็กคอยล์ดำพบว่า การกำจัดสเกลออกไซด์ออกจากเหล็กคอยล์ดำที่ปริมาณ Mn ต่ำ (1.08 wt%) ทำได้ง่ายกว่าเหล็กคอยล์ดำที่มี Mn สูง (1.20-1.71 wt%)

5.2.4 ปริมาณ Cu ไม่ส่งผลต่ออัตราการกัดกร่อนของเหล็กคอยล์ขาวอย่างมีนัยสำคัญทั้งในสารละลาย HCl 0.5 M และสารละลายผสมของ HCl 0.5 M กับสารละลาย H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 0.88 M

### 5.3 ข้อเสนอแนะ

5.3.1 จากงานวิจัยนี้พบว่า H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> เป็นตัวออกซิไดส์ที่สามารถกำจัดสเกลออกไซด์ได้ดี จึงมีข้อเสนอแนะสำหรับการกำจัดสเกลออกไซด์โดยการกัดกรดร่วมกับกระแสไฟฟ้าในกระบวนการผลิตเหล็กกล้าไร้สนิมรีดร้อนเกรด 304L (1.08-1.71%Mn และ 0.22-0.40%Cu wt%) ควรใช้สารละลายผสมของ HCl 0.5 M กับสารละลาย H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> ความเข้มข้นของสารละลาย H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> ที่เหมาะสมคือ 0.88 M เนื่องจากความเข้มข้นที่สูงกว่า 0.88 M ไม่ส่งผลต่อการกำจัดสเกลออกไซด์ได้มากขึ้น

5.3.2 การยืนยันชนิดของออกไซด์บนพื้นผิวเหล็กกล้าไร้สนิมได้อย่างถูกต้อง ควรวิเคราะห์ด้วยเทคนิค X-ray Photoelectron Spectroscopy (XPS) ควบคู่กับการตรวจโครงสร้างผลึกของสเกลออกไซด์ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-ray Diffraction)

5.3.3 งานวิจัยนี้ทำการวิเคราะห์ชิ้นงานทดสอบหลังการกัดกรดร่วมกับกระแสไฟฟ้าด้วยเทคนิค OM (Optical Microscopy) เพื่อพิจารณาการกำจัดสเกลออกไซด์ออกจากเหล็กกล้าไร้สนิมโดยรวมเท่านั้น แต่หากต้องการเข้าใจพฤติกรรมการกัดกร่อนที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวชิ้นงานทดสอบโดยละเอียดขึ้น เช่น การกัดกร่อนที่ขอบเกรน ควรวิเคราะห์ชิ้นงานทดสอบโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy: SEM)

5.3.4 ควรศึกษาผลของอุณหภูมิขณะกำจัดสเกลออกไซด์จากเหล็กคอยล์ดำ เนื่องจากเหล็กคอยล์ดำต้องผ่านก่อนกระบวนการอบอ่อนที่อุณหภูมิสูงประมาณ 1,050 °C ก่อนกระบวนการกำจัดสเกลออกไซด์

5.3.5 เพื่อศึกษาผลของปริมาณแมงกานีสและทองแดงอย่างชัดเจนต่อการกำจัดสเกลออกไซด์ออกจากเหล็กคอยล์ดำ และความต้านทานการกัดกร่อนของเหล็กคอยล์ขาว ควรใช้ตัวอย่างชิ้นงาน

ทดสอบที่มีปริมาณแมงกานีสต่างกันแต่องค์ประกอบธาตุอื่นเหมือนกัน และตัวอย่างที่มีปริมาณทองแดงต่างกันแต่องค์ประกอบธาตุอื่นเหมือนกัน



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บรรณานุกรม

- กอบบุญ หล่อทองคำ. **เหล็กกล้าไร้สนิม Stainless Steel**. พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพฯ : สำนักพิมพ์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. หน้า 25, 26, 128, 327
- โชคอนันต์ ตริยะวัฒน์วิทยา. 2562. “พฤติกรรมการกัดกรวดของเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 304L ม้วนดัดที่มีซิลิคอน 0.3-0.4 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักและปริมาณแมงกานีสต่างกัน.” วิทยานิพนธ์ วิศวกรรมศาสตร มหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโลหการและวัสดุ ภาควิชาวิศวกรรมโลหการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ณรงค์ ผึ้งวิวัฒน์. **การกัดกร่อนและการเลือกใช้วัสดุ Corrosion and Material Selection**. จีระชัยการพิมพ์. กรุงเทพมหานคร. 2547.
- บริษัท โปสโค-ไทยน็อกซ์ จำกัด (มหาชน). “**กระบวนการผลิต**.” [Online]. Available: <http://www.poscothainox.com/product-quality-process.php>. 2023.
- ศุภฤกษ์ เท็นประเสริฐแท้. “ทำไมต้องมีเทคนิคการเลี้ยวเบนด้วยรังสีเอกซ์ (X-Ray Diffraction).” **Materials Characterization**, กรกฎาคม-กันยายน, 2555. pp. 12–18.
- สมฤกษ์ จันทอัมพร. 2558. **หลักการพื้นฐานของการกัดกร่อน (Foundations of Corrosion)**. สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. กรุงเทพมหานคร. หน้า 215.
- William D. Callister, Jr., David G. Rethwisch. 2005. **Materials Science and Engineering: An Introduction**. วัสดุศาสตร์และวิศวกรรมวัสดุพื้นฐาน. แปลโดย สุวันชัย พงษ์สุกิจวัฒน์, กอบบุญ หล่อทองคำ, เอกสิทธิ์ นิสารัตนพร, ธาชาย เหลืองวรานันท์, มาวิน สุประดิษฐ์ ณ ออยุธยา และ ปฐมา วิสุทธิพิทักษ์กุล. กรุงเทพฯ : Top Publishing.
- A. Pardo., M. C. Merino., A. E. Coy., F. Viejo., R. Arrabal., E. Matykina. “Effect of Mo and Mn additions on the corrosion behaviour of AISI 304 and 316 stainless steels in H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>.” **Corros. Sci.**, vol. 50, no. 3, Nov. 2008. pp. 780–794. doi: 10.1016/j.corsci.2007.11.004.
- Alicia Durán., Yolanda Castro., Ana Conde., Juan José de Damborenea. “Sol-Gel Protective Coatings for Metals.” 2370–2433. In L. Klein., M. Aparicio., A. Jitianu. (Eds.). **Handbook of Sol-Gel Science and Technology**. 2nd ed. Spain: Springer International Publishing. 2018.
- Anil K. Sinha. **Physical Metallurgy Handbook**. McGraw-Hill, New York, 2003.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บรรณานุกรม (ต่อ)

- ASTM International. “ASTM A380/A380M-17: Standard Practice for Cleaning, Descaling, and Passivation of Stainless Steel Parts, Equipment, and Systems.” **Annual Book of ASTM Standards**. ASTM International Publisher. Pennsylvania, 2006.
- Denny A. Jones. **Principles and Prevention of Corrosion**. 2nd ed. Prentice-Hall, New Jersey, 1996.
- Emeka E. Oguzie., Jibiao Li., Demin Chen., Ying Li., Ke Yang., Fuhui Wang. “The effect of Cu addition on the electrochemical corrosion and passivation behavior of stainless steels.” **Electrochim. Acta**, vol. 55, no. 17, 2010. pp. 5028–5035. doi: 10.1016/j.electacta.2010.04.015.
- E.S. Gadelmawla., M.M. Koura., T.M.A. Maksoud., I.M. Elewa., H.H. Soliman. “Roughness parameters.” **Journal of Materials Processing Technology**., vol. 123, 2002. pp. 133-145. doi: 10.1016/S0924-0136(02)00060-2
- George Krauss. **STEELS: Processing, Structure, and Performance**. 2nd ed. ASM International, Ohio, 2015.
- Hann-Tuw Lin., Wen-Ta Tsai., Ju-Tung Lee., Chi-Shang Huang. “The electrochemical and corrosion behavior of austenitic stainless steel containing Cu.” **Corros. Sci.**, vol. 33, no. 5, 1992. pp. 691–697. doi: 10.1016/0010-938X(92)90103-A.
- Joanna Dudała., Jolanta Gilewicz-Wolter., Zdzislaw Stegowski. “Simultaneous measurement of Cr, Mn and Fe diffusion in chromium-manganese steels.” **Nukleonika**, vol. 50, no. 2, 2005. pp. 67–71.
- Kunrayaphus Tipves., Gobboon Lothongkum., Anchaleeporn Waritswat Lothongkum. “Effects of H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> and temperature on electrolytic pickling of austenitic stainless steel 304L in Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> solution.” **Mater. Test.**, vol. 62, no. 11, 2020. pp. 993–997. doi: 10.3139/120.111587.
- F. Li., J. P. Celis. “Pickling of austenitic stainless steels: A review.” **Can. Metall. Q.**, vol. 42, no. 3, 2003. pp. 365–376. doi: 10.1179/cmqr.2003.42.3.365.

## บรรณานุกรม (ต่อ)

- Lian-Fu Li., Peter Caenen., Mao-Fa Jiang. “Electrolytic pickling of the oxide layer on hot-rolled 304 stainless steel in sodium sulphate.” **Corros. Sci.**, vol. 50, no. 10, Jul. 2008. pp. 2824–2830. doi: 10.1016/j.corsci.2008.07.004.
- L. Naoun., A. B. Bouzida., N. Bouzegaia. “Electrochemical study of the influence of H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> on 316L stainless steel implants in Hank’s solution at body temperatures.” **Mater. Tech.**, vol. 102, no. 1, 2014. pp. 1–12. doi: 10.1051/mattech/2014005.
- M. V. Pridantsev., F. L. Levin. “Effect of Manganese on the Structure and Properties of Nonmagnetic Stainless Steels.” **Met. Sci. Heat Treat.**, vol. 7, Dec. 1966. pp. 786–789. doi: 10.1007/BF00666966.
- Marcel Pourbaix. **Atlas of Electrochemical Equilibria in Aqueous Solutions**. 2nd ed. National Association of Corrosion Engineers, Texas, 1974.
- Min J. Kim, Jung G. Kim. “Effect of manganese on the corrosion behavior of low carbon steel in 10 wt.% sulfuric acid.” **Int. J. Electrochem. Sci.**, vol. 10, no. 9, 2015. pp. 6872–6885.
- Mitutoyo. “Portable Surface Roughness Tester SurfTest SJ-210/310 Series.” **Mitutoyo Quality**, No. 2307, Dec. 2021. pp. 1-19
- N. Ipek., N. Lior., A. Eklund. “Improvement of the electrolytic metal pickling process by inter-electrode insulation.” **Ironmaking & Steelmaking**, vol. 32, no. 1, 2005. pp. 87–96. doi: 10.1179/174328105X23996.
- Qiong XIE., Pei-yang SHI, Cheng-jun LIU, Mao-fa JIANG. “Effects of Different Oxidants on HCl-based Pickling Process of 430 Stainless Steel.” **J. Iron Steel Res. Int.**, vol. 23, no. 8, 2016. pp. 778–783. doi: 10.1016/S1006-706X(16)30120-0.
- R. Winston Revie. **Uhlig’s Corrosion Handbook**. 3rd ed. John Wiley & Sons, Inc., New Jersey, 2011. pp. 761–763.
- Sebastián F. Jr. “Electrochemical Impedance Spectroscopy for the Measurement of the Corrosion Rate of Magnesium Alloys: Brief Review and Challenges.” **Metals (Basel)**, vol. 10, no. 6, 2020. pp. 1–22. doi: 10.3390/met10060775.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บรรณานุกรม (ต่อ)

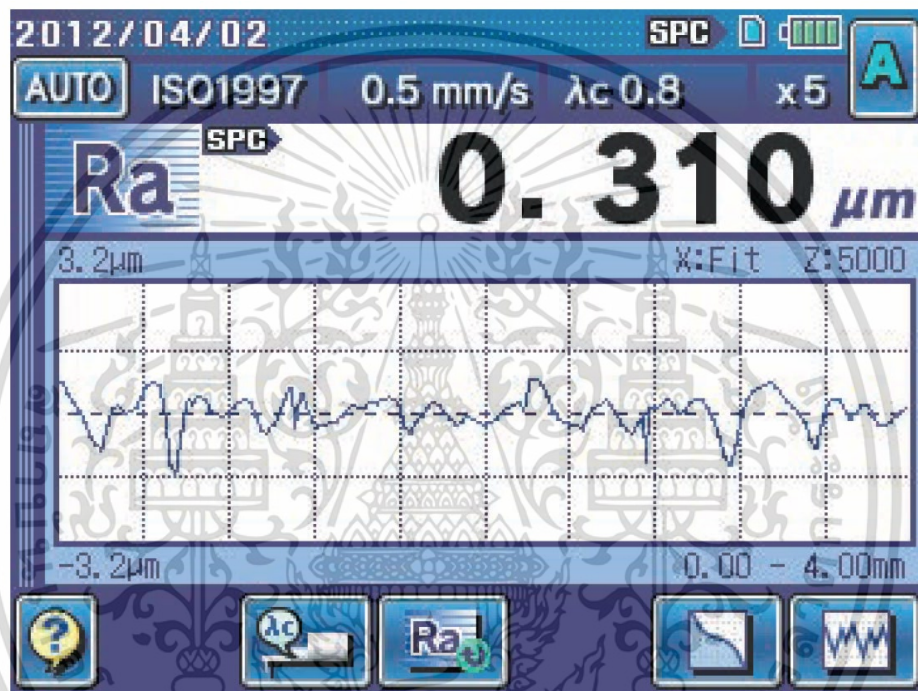
- S Hiromoto. 2010. “Corrosion of metallic biomaterials.” pp. 99–121. In M. Niinomi. **Metals for Biomedical Devices**. 1st ed. Woodhead Publishing. doi; 10.1533/9781845699246.2.99.
- Tong Xi., M. Babar Shahzad., Dake Xu., Ziqing Sun., Jinlong Zhao., Chunguang Yang., Min Qi., Ke Yang. “Effect of copper addition on mechanical properties, corrosion resistance and antibacterial property of 316L stainless steel.” **Mater. Sci. Eng. C.**, vol. 71, Feb. 2017. pp. 1079–1085. doi: 10.1016/j.msec.2016.11.022.
- Wanna Homjabok., Siriwan Permpoon., Gobboon Lothongkum. “Pickling Behavior of AISI 304 Stainless Steel in Sulfuric and Hydrochloric Acid Solutions.” **Journal of Metals, Materials and Minerals.**, vol. 20, no. 2, 2010. pp. 1–6.
- Wojciech Stanisław Skibiński and Bartłomiej Wierzba. “The generalization of the Boltzmann-Matano method.” **Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications**, vol. 392, no. 19, 2013. pp. 4316–4324. doi: 10.1016/j.physa.2013.05.055
- William D. Callister, Jr., David G. Rethwisch. **Materials Science and Engineering: An Introduction**. 8th ed. John Wiley & Sons, Inc., New Jersey, 1991.
- Xiaojie Jin., Shenghu Chen., Lijian Rong. “Effects of Mn on the mechanical properties and high temperature oxidation of 9Cr2WVTa steel.” **J. Nucl. Mater.**, vol. 494, 2017. pp. 103–113. doi: 10.1016/j.jnucmat.2017.07.024.
- Ying-ying YUE., Cheng-jun LIU., Pei-yang SHI., Mao-fa JIANG., Li-yan QIN., Guang-wei FAN. “Descaling Behavior of 430 Hot-rolled Stainless Steel in HCl-based Solution.” **J. Iron Steel Res. Int.**, vol. 23, no. 3, 2016. pp. 190–196. doi: 10.1016/S1006706X(16)30033-4.

## ภาคผนวก ก.

### การวิเคราะห์ความหยาบผิว

#### ก.1 การวัดความหยาบผิวด้วยเข็มลากมาตรฐาน

เครื่องมือวัดความหยาบผิวด้วยเข็มลาก (Stylus-type Surface Roughness Instruments) คือ การใช้หัวโพรบลากไปบนผิวชิ้นงานและส่งสัญญาณอิเล็กทรอนิกส์ผ่านหัวเข็มลากและแสดงพื้นผิวจริงเป็นเส้นโปรไฟล์ ดังรูปที่ ก.1



รูปที่ ก.1 หน้าจอแสดงตัวอย่างเส้นโปรไฟล์ของพื้นผิวชิ้นงานที่ได้จากพื้นผิวที่ทดสอบด้วยเครื่องวัดความหยาบผิว Mitutoyo รุ่น SJ-210 (Mitutoyo.2021)

เส้นโปรไฟล์ได้จากการที่หัวโพรบวัดความสูงต่ำของผิวหน้าตามระยะทางที่กำหนด L (ระยะที่วัดความหยาบผิว สำหรับในงานวิจัยนี้เท่ากับ 1 cm)

#### ก.2 การวิเคราะห์ความหยาบของพื้นผิว (E.S. Gadelmawla. 2002)

##### ก.2.1 ค่าเฉลี่ยความหยาบผิวแบบสิบจุด (Ten-point Mean Roughness: Rz)

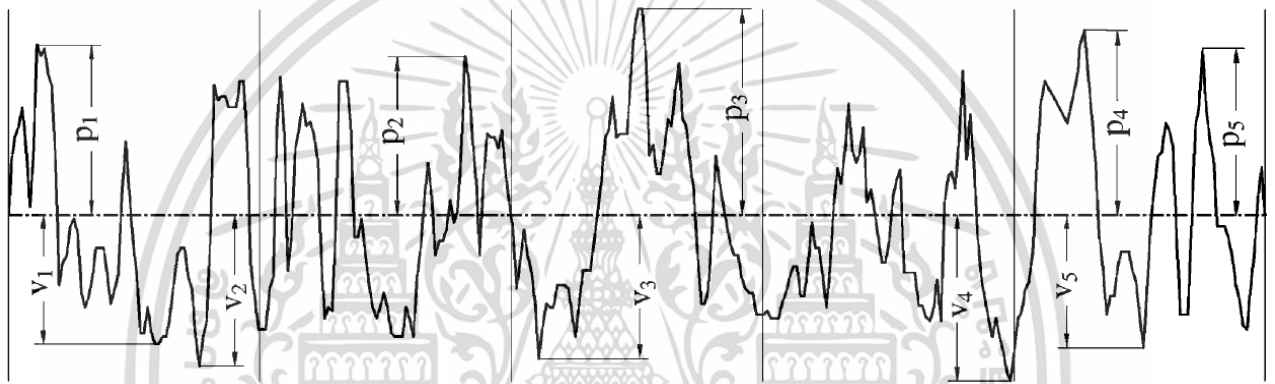
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าเฉลี่ยความหยาบผิวแบบลิบจุด (Rz) คือ ค่าเฉลี่ยของระยะห่างระหว่างจุดสูงสุดของกราฟโปรไฟล์ 5 จุด และจุดต่ำสุดของกราฟโปรไฟล์ 5 จุดในช่วงการวัด 5 ช่วง ดังสมการ (ก.1) ซึ่งค่า Rz สามารถแสดงถึงความลึกหรือแนวโน้มการเกิดการกัดกร่อนแบบรูเข็มบนผิวชิ้นงานทดสอบได้ ดังรูปที่ ก.2

$$Rz = \frac{1}{5} (\sum_1^5 p_i - \sum_1^5 v_i) \quad (\text{ก.1})$$

เมื่อ  $p_i$  = ระยะพีกสูงสุดของกราฟโปรไฟล์แต่ละช่วง ( $\mu\text{m}$ )

$v_i$  = ระยะพีกต่ำสุดของกราฟโปรไฟล์แต่ละช่วง ( $\mu\text{m}$ )



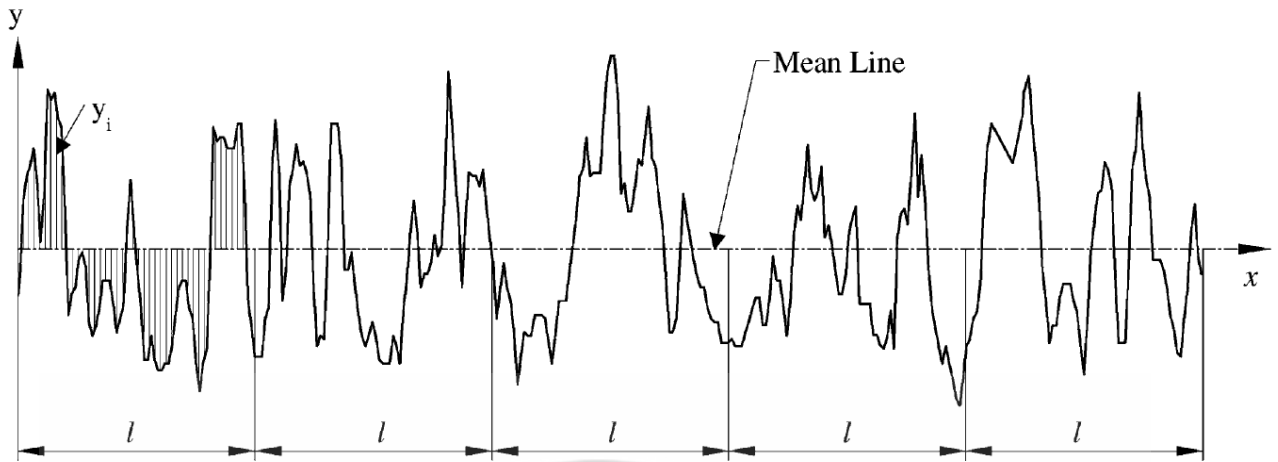
รูปที่ ก.2 นิยามระยะพีกสูงสุดและระยะพีกต่ำสุดของการวิเคราะห์ค่าเฉลี่ยความหยาบผิวแบบลิบจุด (Rz) (E.S. Gadelmawla. 2002)

### ก.2.2 ค่าเฉลี่ยเลขคณิตของความหยาบผิว (Roughness Arithmetical Mean: Ra)

ค่าเฉลี่ยเลขคณิตของความหยาบผิว (Ra) คือ ค่าเฉลี่ยของผลรวมของค่าสัมบูรณ์ของความหยาบผิวตามการขึ้นหรือลงของเส้นโปรไฟล์ ดังสมการที่ (ก.2) ซึ่ง Ra เป็นพารามิเตอร์ที่นิยมใช้อ้างอิงความหยาบพื้นผิวทั่วไปเนื่องจากคำนวณง่าย แต่ไม่แสดงค่าสูงสุด-ต่ำสุดของโปรไฟล์ หรือการกระจายของความสูงและความลึกในพื้นที่ทดสอบ ดังรูปที่ ก.3

$$Ra = \frac{1}{l} \int_0^l |y(x)| dx \quad (\text{ก.2})$$

เมื่อ  $y_i$  = ค่าเฉลี่ยของความสูงและความลึกของพื้นผิวของชิ้นงานทดสอบตลอดเส้นโปรไฟล์ ( $\mu\text{m}$ )  
 เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการใช้งานในเชิงวิชาการเท่านั้น เมื่อผู้ใดเห็นประโยชน์ในการนำ  
 ไปว่ากรณใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



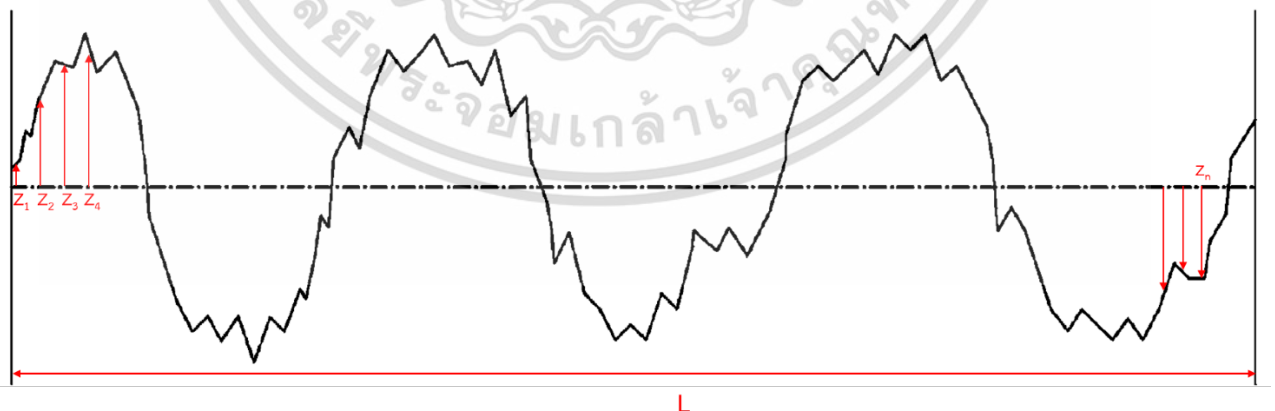
รูปที่ ก.3 นิยามค่าเฉลี่ยของความสูงและความลึกของพื้นผิวของการวิเคราะห์ค่าเฉลี่ยเลขคณิตของความหยาบผิว (Ra) (E.S. Gadelmawla. 2002)

ก.2.3 ความหยาบผิวเฉลี่ยกำลังสอง (Roughness Root Mean Square: Rq)

ค่าความหยาบผิวเฉลี่ยกำลังสอง (Rq) คือ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานที่คำนวณจากรากที่สองของค่าเฉลี่ยความหยาบผิวกำลังสอง ดังสมการที่ (ก.3) ซึ่งค่า Rq จะแสดงถึงการกระจายตัวของความสูงและความลึกในพื้นที่ทดสอบ หาก Rq มีค่าสูง หมายถึง พื้นผิวทดสอบหยาบและมีการกระจายตัวของความสูงและความลึกในพื้นที่ทดสอบมาก ดังรูปที่ ก.4

$$Rq = \sqrt{\frac{Z_1^2 + Z_2^2 + Z_3^2 + \dots + Z_n^2}{n}} = \sqrt{\frac{1}{L} \int_0^L Z^2 dy} \quad (ก.3)$$

เมื่อ  $Z_i$  = ความสูงและความลึกของพื้นผิวของชิ้นงานทดสอบตลอดเส้นโปรไฟล์ ( $\mu\text{m}$ )



รูปที่ ก.4 นิยามความสูงและความลึกของพื้นผิวของชิ้นงานทดสอบของการวิเคราะห์ความหยาบผิวเฉลี่ยกำลังสอง (Rq) (E.S. Gadelmawla. 2002)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ข.

### ข้อมูลผลการทดลอง

#### ข.1 ผลการทดสอบวัดความหยาบผิว

ตารางที่ ข.1 ความหยาบผิวของเหล็กคอยล์ดำเกรด 304L หลังการกัดกรวดร่วมกับกระแสไฟฟ้าในสารละลาย HCl 0.5 M และสารละลายผสมของ HCl 0.5 M กับ สารละลาย H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 0.5, 0.88 และ 1.76 M

ตัวอย่าง	0.5 M HCl			0.5 M HCl +0.5 M H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>			0.5 M HCl +0.88 M H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>			0.5 M HCl +1.76 M H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>		
	Rz	Ra	Rq	Rz	Ra	Rq	Rz	Ra	Rq	Rz	Ra	Rq
1.08Mn0.23Cu	7.467	1.380	1.700	13.650	2.528	3.206	21.260	3.902	5.084	15.533	2.990	3.683
1.20Mn0.40Cu	5.622	1.110	1.338	17.507	3.375	4.156	9.951	1.620	2.106	11.714	2.011	2.533
1.45Mn0.22Cu	9.654	1.920	2.318	19.988	4.199	5.098	14.567	2.625	3.359	9.502	1.783	2.195
1.71Mn0.37Cu	6.640	1.203	1.492	21.429	4.535	5.594	11.190	1.954	2.454	11.515	1.987	2.583

หมายเหตุ R<sub>z</sub> = ค่าระยะเฉลี่ย (μm), R<sub>a</sub> = ค่าเฉลี่ยเลขคณิตของความหยาบผิว (μm), R<sub>q</sub> = ความหยาบผิวเฉลี่ยกำลังสอง (μm)

ตารางที่ ข.2 ความหยาบผิวของเหล็กคอยล์ชาวเกรด 304L หลังการกัดกรวดร่วมกับกระแสไฟฟ้าในสารละลาย HCl 0.5 M และสารละลายผสมของ HCl 0.5 M กับสารละลาย  $H_2O_2$  0.88 M

ตัวอย่าง	0.5 M HCl			0.5 M HCl +0.88 M $H_2O_2$		
	Rz	Ra	Rq	Rz	Ra	Rq
1.20Mn0.40Cu	0.307	0.040	0.051	0.267	0.034	0.045
1.71Mn0.37Cu	0.204	0.028	0.036	1.318	0.084	0.201

หมายเหตุ  $R_z$  = ค่าระยะเฉลี่ย ( $\mu\text{m}$ ),  $R_a$  = ค่าเฉลี่ยเลขคณิตของความหยาบผิว ( $\mu\text{m}$ ),

$R_q$  = ความหยาบผิวเฉลี่ยกำลังสอง ( $\mu\text{m}$ )



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล                    บุญญา เบญจมาลัย  
วัน เดือน ปีเกิด                21 กรกฎาคม 2537  
ที่อยู่                                129/2 หมู่บ้านเพชรสยาม 3 ซอยบางบอน3ซอย14 แขวงหลักสอง  
เขตบางแค กรุงเทพฯ 10160  
E-mail                                boonyapa.ben@gmail.com  
โทรศัพท์                            082-491-4961

### ประวัติการศึกษา

พ.ศ. 2561-2565                    วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมเคมี)  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
พ.ศ. 2557-2560                    วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมปิโตรเคมี)  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
พ.ศ. 2553-2555                    ระดับมัธยมศึกษาตอนปลาย  
โรงเรียนวัดอินทาราม กรุงเทพฯ

### ประสบการณ์

พ.ศ. 2565-ปัจจุบัน                วิศวกรกระบวนการผลิต บริษัท ทีทีซีแอล จำกัด (มหาชน) กรุงเทพฯ  
พ.ศ. 2564                            การฝึกงานอุตสาหกรรม (Online)  
หน่วยการผลิตเมทิลเอสเทอร์ (Methyl Ester Plant)  
บริษัท โกลบอลกรีนเคมิคอล จำกัด (มหาชน) จ.ระยอง  
20 มิถุนายน - 31 กรกฎาคม 2564 (ระยะเวลา 42 วัน)  
พ.ศ. 2560                            การฝึกงานอุตสาหกรรม หน่วยวิจัยด้านยางธรรมชาติ  
สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ (สวทช.) จ.ปทุมธานี  
1 มิถุนายน - 27 กรกฎาคม 2560 (ระยะเวลา 57 วัน)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### ผลงานทางวิชาการ

Anchaleeporn Waritswat Lothongkum., Boonyapa Benjamalai., Nichit Hongbin., Nipa Prawetpai., Chockanan Tiyaawatwitthaya., Piyabutr Wanichpongpan., Gobboon Lothongkum. “Effects of Mn and Cu on descaling of hot-rolled 304L stainless steel in HCl and H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> mixtures.” **Materials Testing.**, vol. 65, issue 8, 2023. pp. 1167-1178. doi: 10.1515/mt-2023-0072 (Web of Science Q2, Impact Factor: 2.5)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้