

อิทธิพลของการปรับแต่งพื้นผิวอนุภาคเมโซพอร์รัสซิลิกาต่อพฤติกรรมการกัดกร่อน  
ของเหล็กกล้า

INFLUENCE OF SURFACE FUNCTIONALIZATION OF MESOPOROUS SILICA  
NANOPARTICLES ON CORROSION BEHAVIOR OF CARBON STEEL



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาต่อหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2559

KMITL-2016-EN-M-220-130

อิทธิพลของการปรับแต่งพื้นผิวอนุภาคเมโซพอร์ซิลิกาต่อพฤติกรรมการกัดกร่อน  
ของเหล็กกล้า

INFLUENCE OF SURFACE FUNCTIONALIZATION OF MESOPOROUS SILICA  
NANOPARTICLES ON CORROSION BEHAVIOR OF CARBON STEEL



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง


พ.ศ. 2559

KMITL-2016-EN-M-220-130

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

INFLUENCE OF SURFACE FUNCTIONALIZATION OF MESOPOROUS SILICA  
NANOPARTICLES ON CORROSION BEHAVIOR OF CARBON STEEL

NAWIN SOMSAWAT



A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT  
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF  
MASTER OF ENGINEERING IN CHEMICAL ENGINEERING  
FACULTY OF ENGINEERING  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG  
2016  
KMITL-2016-EN-M-220-130

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2016

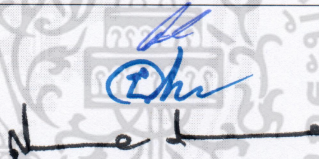
FACULTY OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

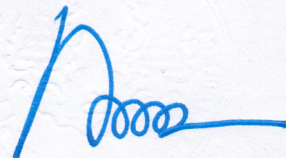
หัวข้อวิทยานิพนธ์ อิทธิพลของการปรับแต่งพื้นผิวอนุภาคเมโซพอร์ัสซิลิกาต่อพฤติกรรมการกัดกร่อนของเหล็กกล้า  
Thesis Title Influence of Surface Functionalization of Mesoporous Silica Nanoparticles on Corrosion Behavior of Carbon Steel  
นักศึกษา นายนาวินท์ สมสวัสดิ์  
รหัสประจำตัว 58601268  
ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชา วิศวกรรมเคมี  
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผศ.ดร.ธีรพร สุธีวงศ์  
หมายเลขวิทยานิพนธ์ KMITL-2016-EN-M-220-130

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์	ลายมือชื่อ
รศ.ดร.ประกอบ กิจไชยา	 วลักษณ์ จันทร์อัมพร ธีรพร สุธีวงศ์
ผศ.ดร.อภิวัฒน์ นัมคณิสร์	
ผศ.ดร.สมหมาย ผิวสอาด	
ผศ.ดร.วัลย์รัตน์ จันทร์อัมพร	
ผศ.ดร.ธีรพร สุธีวงศ์	

วัน / เดือน / ปี ที่สอบ วันจันทร์ที่ 11 กรกฎาคม พ.ศ. 2559 เวลา 09.00-11.00 น.  
สถานที่สอบ ณ อาคารเฉลิมพระเกียรติ ห้อง HM-301

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

คณะวิศวกรรมศาสตร์ รับรองแล้ว



(รองศาสตราจารย์ ดร.คมสัน มาลีสี)  
คณบดี คณะวิศวกรรมศาสตร์  
วันที่ 11 กรกฎาคม พ.ศ. 2559

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	อิทธิพลของการปรับแต่งพื้นผิวอนุภาคเมโซพอร์รัสซิลิกาต่อพฤติกรรม การกักกรองของเหล็กกล้า
นักศึกษา	นายนาวินท์ สมสวัสดิ์
รหัสประจำตัว	58601268
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมเคมี
พ.ศ.	2559
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	ผศ.ดร.ธีรพร สุธีวงศ์

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ในการพัฒนาวิธียับยั้งการกักกรองเหล็กคาร์บอนโดยการใช้อนุภาคซิลิกาที่มีรูพรุนชนิดเมโซที่ผ่านการปรับแต่งหมู่ฟังก์ชันร่วมกับสารยับยั้งการกัดกร่อน โดยใช้อนุภาค 3 ชนิด คือ อนุภาคเมโซพอร์รัสซิลิกาที่ไม่ผ่านการปรับแต่งหมู่ฟังก์ชัน และที่ปรับแต่งหมู่ฟังก์ชันด้วยหมู่เอมีน และหมู่ไฮดรอกซิลเป็นตัวกักเก็บสารยับยั้งการกัดกร่อน (เบนโซไตรอะโซล) จากการทดลองพบว่าอนุภาคที่ผ่านการปรับแต่งหมู่ฟังก์ชันมีความสามารถในการกักเก็บสารยับยั้งการกัดกร่อนได้มากกว่าอนุภาคอนุภาคที่ไม่ผ่านการปรับแต่งหมู่ฟังก์ชัน แผ่นเหล็กที่ผ่านการเคลือบด้วยสารเคลือบที่มีอนุภาคที่บรรจุสารยับยั้งการกัดกร่อนกระจายตัวอยู่ เมื่อทดสอบความสามารถในการป้องกันการกัดกร่อนโดยใช้เครื่องโพเทนชิโอสแตติก/กัลวานอสแตท พบว่าอนุภาคที่สังเคราะห์ร่วมกับหมู่ไฮดรอกซิลมีความสามารถในการป้องกันการกัดกร่อนในสภาวะที่ความเป็นกรดได้ดีเนื่องจากความสามารถในการควบคุมการปลดปล่อยสารยับยั้งการกัดกร่อนและความสามารถในการไม่ชอบน้ำ ส่วนอนุภาคที่สังเคราะห์ร่วมกับหมู่เอมีนสามารถควบคุมการปลดปล่อยสารยับยั้งได้ดีที่สุดในสภาวะที่มีความเป็นด่าง ส่งผลให้สามารถป้องกันการกัดกร่อนได้ดีในสภาวะดังกล่าว

<b>Thesis</b>	Influence of Surface Functionalization of Mesoporous Silica Nanoparticles on Corrosion Behavior of Carbon Steel
<b>Student</b>	Nawin Somsawat
<b>Student ID.</b>	58601268
<b>Degree</b>	Master of engineering
<b>Program</b>	Chemical engineering
<b>Year</b>	2016
<b>Thesis Advisor</b>	Asst.Dr.Teeraporn Suteewong

### ABSTRACT

This work aims to develop the active anticorrosion system for carbon steel using organically modified mesoporous silica nanoparticles (MSNs) and corrosion inhibitor, benzotriazole, 3 types of particles, i.e., plain, aminated and thiolated MSNs were used as inhibitor reservoir. Organically modified MSNs showed higher loading capacity of benzotriazole than the plain MSNs. Anticorrosion properties of carbon steel coated with inhibitor-loaded organically modified particles were observed using potentiostat/gulvanostat. It was found that thiolated MSNs showed the highest performance in acid condition due to its control-released behavior and hydrophobicity. While in basic condition, corrosion resistance of aminated MSNs was the highest because of good control-released that lead to well preserve bezotriazole. Therefore, benzotriazole could show higher effective more than others.

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดีเนื่องจากได้รับความร่วมมือ ช่วยเหลือจากหลายฝ่ายโดยเฉพาะอย่างยิ่งอาจารย์ที่ปรึกษา ดร.ธีรพร สุธีวงศ์ ที่ให้คำปรึกษา ความรู้ และแนวทางในการแก้ไขปัญหา ตลอดจนการตรวจสอบผลงานจนปริญญาานิพนธ์เล่มนี้เสร็จสมบูรณ์

นอกจากนี้ขอขอบคุณ ผศ.ดร.วัลย์รัตน์ จันทระอัมพร ผศ.ดร.อภิรักษ์ นัมคณิสสรณ์ รศ.ดร.ประกอบกิจไชยา และอาจารย์ ดร. ณัฐนนท์ ไพบูลย์ศิลป์ กรรมการสอบปริญญาานิพนธ์และกรรมการในการสอบสัมภาษณ์ที่กรุณาให้ข้อเสนอแนะ และแนวทางในการปรับปรุงงาน ทำให้ปริญญาานิพนธ์เล่มนี้มีความสมบูรณ์มากขึ้น

สุดท้ายนี้ขอขอบพระคุณอาจารย์และเจ้าหน้าที่ทุกท่านในภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ ศูนย์นาโนเทคโนโลยี ศูนย์นวัตกรรมวิทยาศาสตร์ และคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง สำหรับความอนุเคราะห์ด้านเครื่องมือ สถานที่ ความรู้ คำแนะนำตลอดการทำวิทยานิพนธ์ และสุดท้ายของสุดท้ายขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดาที่ช่วยเหลือ สนับสนุนและให้กำลังใจโดยตลอดมา

นาวิณ์ สมสวัสดิ์

## สารบัญ

เรื่อง	หน้า
บทคัดย่อ .....	I
Abstract.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญรูป .....	VI
สารบัญตาราง.....	VII
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์ .....	3
1.3 ขอบเขตการศึกษา.....	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	
2.1 การกักกรอง .....	4
2.1.1 อุณหพลศาสตร์ของปฏิกิริยาการกักกรอง .....	5
2.1.2 การเกิดชั้นปกป้อง.....	6
2.1.3 จลนศาสตร์ในปฏิกิริยาการกักกรอง.....	8
2.1.4 สมการของปฏิกิริยาการกักกรอง .....	10
2.1.5 การประยุกต์ใช้งานร่วมกับระบบไฟฟ้า .....	11
2.2 ผลของการเคลือบเพื่อป้องกันการกักกรอง.....	13
2.2.1 การเคลือบผิวเพื่อป้องกันสิ่งแวดล้อมภายนอก .....	13
2.2.2 การเคลือบเพื่อปกป้องผิวของโลหะโดยใช้ร่วมกับสารยับยั้งการกักกรอง.....	15
2.2.3 การเคลือบแบบแคโทด.....	17
2.3 การป้องกันการกักกรองด้วยเทคโนโลยีระดับนาโน.....	19
2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	19

## สารบัญ (ต่อ)

เรื่อง	หน้า
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงาน	
3.1 สารเคมี.....	23
3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือ.....	24
3.3 วิธีการทดลอง.....	24
3.3.1 การสังเคราะห์อนุภาคที่มีรูพรุนชนิดเมโซ.....	24
3.3.2 การสังเคราะห์อนุภาคซิลิกาที่มีรูพรุนชนิดเมโซที่ถูกปรับแต่งด้วยหมู่อินทรีย์.....	25
3.3.3 การบรรจุ BTA ในอนุภาคที่มีรูพรุนชนิดเมโซ.....	26
3.3.4 การเคลือบผิวแผ่นเหล็กคาร์บอน.....	26
3.4 การวิเคราะห์ลักษณะและสมบัติ.....	27
บทที่ 4 ผลและการวิเคราะห์ผลการทดลอง	
4.1 การศึกษาผลของออร์กาโนโซเลนที่มีผลต่ออนุภาคซิลิกาที่มีรูพรุนชนิดเมโซ.....	29
4.2 ความสามารถในการบรรจุสารยับยั้งของอนุภาคซิลิกาที่มีรูพรุนชนิดเมโซ.....	32
4.3 การศึกษาลักษณะของสารเคลือบผิวที่ใช้ร่วมกับอนุภาคซิลิกาที่มีรูพรุนชนิดเมโซ.....	33
4.4 ความสามารถในการป้องกันการกัดกร่อน.....	35
4.4.1 ความสามารถในการป้องกันการกัดกร่อนในสภาวะน้ำเกลือ.....	35
4.4.2 ความสามารถในการป้องกันการกัดกร่อนในสภาวะน้ำเกลือที่มีความเป็นกรด.....	40
4.4.3 ความสามารถในการป้องกันการกัดกร่อนในสภาวะน้ำเกลือที่มีความเป็นด่าง.....	43
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ	
5.1 สรุปผลการทดลอง.....	49
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	50
เอกสารอ้างอิง.....	51
ภาคผนวก.....	54

## สารบัญรูปภาพ

รูปภาพ	หน้า
2.1 โพรเบ็คไดอะแกรมของระบบทองแดง .....	7
2.2 แผนภาพแสดงลักษณะของระบบในแต่ละขั้นตอน .....	9
2.3 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าและศักย์ไฟฟ้าสำหรับระบบที่เกิดการกัดกร่อน .....	12
2.4 ระบบชั้นเคลือบหลายชั้น .....	14
2.5 การใช้สารเคลือบเป็นโลหะที่มีความสามารถในการนำไฟฟ้า .....	15
2.6 การใช้สารเคลือบที่ไม่นำไฟฟ้า .....	16
2.7 แสดงผลของสารยับยั้งการกัดกร่อน .....	17
2.8 การเคลือบโดยที่สารเคลือบสูญเสียอิเล็กตรอนแทนโลหะ .....	18
2.9 แสดงผลของการเคลือบแบบแคโทดโดยใช้สารเคลือบที่สูญเสียอิเล็กตรอนแทน .....	18
2.10 แสดงผลของการเคลือบแบบแคโทดโดยใช้สารเคลือบที่เป็นสารกึ่งตัวนำที่มีคุณสมบัติไวต่อแสง .....	19
4.1 ภาพถ่าย TEM อนุภาคซิลิกาที่มีรูพรุนชนิดเมโซไซท์ที่ไม่ผ่านการปรับแต่งหมู่ฟังก์ชัน .....	30
4.2 ภาพถ่าย TEM อนุภาคซิลิกาที่มีรูพรุนชนิดเมโซไซท์ที่ผ่านการปรับแต่งหมู่ฟังก์ชัน .....	30
4.3 กราฟเปรียบเทียบแสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักและอุณหภูมิของอนุภาคแต่ละชนิด .....	31
4.4 กราฟแก่งเปรียบเทียบความสามารถในการดูดซับเบนโซไตรอะโซล .....	32
4.5 แสดงชั้นเคลือบผิวบนเหล็กคาร์บอน .....	33
4.6 กราฟแสดงการหาค่า $E_{corr}$ และ $i_{corr}$ โดยวิธี Tafel slope .....	34
4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าและศักย์ไฟฟ้า ในสภาวะน้ำเกลือร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก .....	36
4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าและศักย์ไฟฟ้า ในสภาวะน้ำเกลือร้อยละ 1 โดยในน้ำหนักก่อนและหลังบรรจุเบนโซไตรอะโซล .....	36
4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าและศักย์ไฟฟ้า ในสภาวะน้ำเกลือร้อยละ 1 โดยน้ำหนักที่มีความเป็นกรด (pH 4.4) .....	38
4.10 ความเข้มข้นเบนโซไตรอะโซลที่ปลดปล่อยออกมาจากอนุภาคแต่ละชนิด ในสภาวะน้ำเกลือที่มีความเป็นกรด .....	40
4.11 ความเข้มข้นและอัตราการปลดปล่อยเบนโซไตรอะโซล	

ที่ปลดปล่อยออกมาจากอนุภาคแต่ละชนิดในสภาวะน้ำเกลือที่มีความเป็นกรด .....	42
4.12 แผนภาพแสดงการควบคุมการปลดปล่อยเบนโซไตรอะโซลของอนุภาค ที่มีหมู่ไทโอดในสภาวะน้ำเกลือที่มีความเป็นกรด .....	43
4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าและศักย์ไฟฟ้า ในสภาวะน้ำเกลือร้อยละ 1 โดยน้ำหนักที่มีความเป็นต่าง (pH 9.4).....	43
4.14 แผนภาพแสดงการควบคุมการปลดปล่อยเบนโซไตรอะโซลของอนุภาค ที่มีหมู่เอมีนในสภาวะน้ำเกลือที่มีความเป็นต่าง .....	44
4.15 ความเข้มข้นของเบนโซไตรอะโซลและอัตราการปลดปล่อย ที่ปลดปล่อยออกมาจากอนุภาคแต่ละชนิดในสภาวะน้ำเกลือที่สภาวะต่าง .....	43
4.16 ความเข้มข้นของเบนโซไตรอะโซลและอัตราการปลดปล่อย ที่ปลดปล่อยออกมาจากอนุภาคแต่ละชนิดในสภาวะน้ำเกลือที่สภาวะต่างๆ.....	46
4.17 กราฟแท่งแสดงค่า $i_{corr}$ ของอนุภาคแต่ละชนิดในแต่ละสภาวะ .....	47
4.18 ตัวอย่างการประยุกต์ใช้อนุภาคแต่ละชนิดในระบบชั้นเคลือบหลายชั้น.....	48

## สารบัญตาราง

ตาราง	หน้า
2.1 ตารางแสดงศักย์ไฟฟ้าที่ใช้ในการเกิดปฏิกิริยารีดักชันในโลหะ .....	5
2.2 สารเคลือบระดับนาโนในการป้องกันการกัดกร่อน.....	20
4.1 ความหนาของชั้นเคลือบที่ใช้ร่วมกับอนุภาคแต่ละชนิด .....	33
4.2 แสดงผลจากเครื่องตรวจวัดมูมหยดน้ำ.....	35
4.3 ค่า $i_{corr}$ $E_{corr}$ ของแผ่นเหล็กคาร์บอนที่ถูกเคลือบด้วยสารเคลือบที่มีอนุภาค ก่อนบรรจุเบนโซไตรออะโซล.....	37
4.4 ค่า $i_{corr}$ $E_{corr}$ ของแผ่นเหล็กคาร์บอนที่ถูกเคลือบด้วยสารเคลือบที่มีอนุภาค หลังบรรจุเบนโซไตรออะโซล .....	39
4.5 ค่า $i_{corr}$ $E_{corr}$ ของอนุภาคหลังบรรจุเบนโซไตรออะโซลในสภาวะกรด .....	41
4.6 ค่า $i_{corr}$ $E_{corr}$ ของอนุภาคหลังบรรจุเบนโซไตรออะโซลในสภาวะด่าง.....	44
ก.1.1 แสดงค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายเบนโซไตรออะโซล ที่ความเข้มข้นต่างๆเพื่อสร้างกราฟมาตรฐานในตัวทำละลายเอทานอล .....	55
ก.1.2 แสดงค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายเบนโซไตรออะโซล ที่ความเข้มข้นต่างๆเพื่อสร้างกราฟมาตรฐานในน้ำเกลือ.....	55
ก.1.3 แสดงค่าการดูดกลืนแสงของเบนโซไตรออะโซลที่เหลือจากการ บรรจุในอนุภาคซิลิกาที่มีรูพรุนชนิดเมโซแต่ละชนิด.....	56
ก.1.4 แสดงค่าความสามารถในการบรรจุเบนโซไตรออะโซลในเอทานอล ที่ความเข้มข้น 3 โมลาร์ในอนุภาคแต่ละชนิด.....	57
ก.2.1 แสดงค่าศักย์การกัดกร่อน (Corrosion potential; $E_{corr}$ ) ค่ากระแสการกัดกร่อน (Corrosion current density; $i_{corr}$ ) และอัตราการกัดกร่อน (Corrosion rate) ของอนุภาคแต่ละชนิดในแต่ละสภาวะ.....	57

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

โลหะเป็นวัสดุที่มีความจำเป็นอย่างยิ่งในงานทางด้านวิศวกรรม โครงสร้าง อุตสาหกรรม การขนส่ง หรือแม้แต่การสาธารณสุขไปหมด ถึงแม้ว่าในปัจจุบันจะมีวัสดุทางเลือกที่เข้ามาแทนที่โลหะ ยกตัวอย่างเช่น พอลิเมอร์ชนิดต่างๆ แต่การใช้งานโลหะในปัจจุบันยังคงมีมากวัสดุโลหะสามารถจำแนกได้หลายชนิดขึ้นกับส่วนประกอบในโลหะ ในงานด้านการก่อสร้างมักนิยมใช้โลหะเหล็กคาร์บอนเนื่องจากมีคุณสมบัติเชิงกลที่ดี ความสามารถในการรับแรงสูง โดยความแข็งแรงของเหล็กคาร์บอนขึ้นกับปริมาณของคาร์บอนในเนื้อของเหล็ก แต่เหล็กคาร์บอนมีข้อบกพร่องที่สำคัญคือเกิดการกัดกร่อนได้ง่ายเมื่ออยู่ในสภาพแวดล้อมที่มีความชื้นหรือความเข้มข้นของไอออนสูง ส่งผลให้เกิดการผุพังของวัสดุ ในกรณีที่น่าไปใช้ทำโครงสร้างอาคารอาจทำให้อาคารต่างๆเสียหาย หรือในกรณีที่น่าไปใช้เป็นวัสดุบรรจุอาหาร หากเกิดการกัดกร่อนขึ้นก่อให้เกิดสนิมปนเปื้อนไปกับอาหารหรือในกระบวนการทางสาธารณสุขไปหมด ผลกระทบเหล่านี้เทียบได้กับจำนวนเงินมหาศาลที่ต้องเสียไปในแต่ละปี ดังนั้นการแก้ปัญหาการกัดกร่อนของวัสดุโลหะจึงเป็นปัญหาสำคัญอย่างยิ่ง

การป้องกันการกัดกร่อนได้ถูกพัฒนาอย่างต่อเนื่องจากอดีตถึงปัจจุบัน โดยการป้องกันสามารถทำได้หลายวิธี ไม่ว่าจะเป็นการใช้โลหะที่มีความต้านทานการกัดกร่อน เช่น การใช้เหล็กกล้าสแตนเลสที่มีส่วนผสมของโครเมียมซึ่งมีความสามารถในการป้องกันการกัดกร่อน แต่การป้องกันด้วยวิธีนี้มีข้อจำกัดในการใช้งาน เนื่องจากเหล็กชนิดนี้จะไม่แข็งแรงมากจึงไม่นิยมใช้ในงานก่อสร้าง การป้องกันการกัดกร่อนด้วยวิธีแคโทดจะสามารถปกป้องพื้นผิวได้โดยเลือกใช้โลหะชนิดอื่นมาสูญเสียอิเล็กตรอนแทนแต่มีความยุ่งยากในการใช้โลหะสองชนิดร่วมกัน และวิธีสุดท้ายคือการเคลือบหรือปกปิดผิวด้วยสารเคลือบผิวอินทรีย์หรืออนินทรีย์ วิธีนี้เป็นวิธีที่ง่าย สะดวก ใช้เวลาไม่นาน และสามารถประยุกต์การใช้งานได้หลากหลายขึ้นอยู่กับวัสดุที่ต้องการเคลือบ ไม่ว่าจะเป็น การทา การฉีดยา การพ่นเพื่อใช้ในการเคลือบ

การเคลือบผิวเพื่อป้องกันการกัดกร่อนสามารถจำแนกได้เป็นสองวิธีหลัก หนึ่งคือชั้นเคลือบแบบแพซีฟ (Passive coating) ชั้นเคลือบลักษณะนี้สามารถป้องกันไม่ให้พื้นผิวของโลหะสัมผัสกับสิ่งแวดล้อมภายนอกได้ เพราะชั้นเคลือบจะเป็นตัวกั้นขวางไม่ให้ปัจจัยที่ก่อให้เกิดการกัดกร่อนเข้าไปกับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โลหะได้ ทำให้สามารถป้องกันการกัดกร่อนได้ แต่เมื่อเวลาผ่านไป สิ่งแวดล้อมภายนอก เช่น น้ำ ไอออน จากภายนอกจะสามารถแพร่เข้ามาผ่านชั้นเคลือบหรือรูพรุนที่อาจเกิดขึ้นได้ในขั้นตอนของการแข็งตัวของ ชั้นเคลือบ (formation) ส่งผลให้เกิดการกัดกร่อนขึ้นได้เมื่อเวลาผ่านไป จึงนำไปสู่การพัฒนาการใช้สาร เคลือบชนิดที่สองซึ่งจะมีลักษณะคล้ายกับชนิดแรกแต่มีการใช้สารยับยั้งการกัดกร่อน (Corrosion inhibitor) ร่วมด้วยกับสารเคลือบ ในกรณีนี้สิ่งแวดล่อมทำลายชั้นเคลือบ หรือแพร่ผ่านเข้ามา สารยับยั้ง จะเริ่มทำงานเพื่อป้องกันการเกิดการกัดกร่อน

สารยับยั้งการกัดกร่อนสามารถกระจายอยู่ในชั้นเคลือบได้โดยตรง หรืออาจบรรจุในตัวกักเก็บ ระดับนาโน (Nanocontainer) ตัวกักเก็บอาจเป็นอนุภาคพอลิเมอร์ แคปซูล หรืออนุภาคนาโนซิลิกาที่มีรูพรุนชนิดเมโซ การกักเก็บสารยับยั้งการกัดกร่อนในอนุภาคช่วยป้องกันการกัดกร่อนในระยะยาวได้โดยตัว กักเก็บจะช่วยชะลอไม่ให้อายุขัยการกัดกร่อนสูญเสียดังกล่าวออกไปสู่สิ่งแวดล้อมภายนอกได้ไว อย่างไรก็ตาม ถึงแม้ว่าตัวกักเก็บจะช่วยกักเก็บสารยับยั้งได้จริง แต่อาจควบคุมการปลดปล่อยสารยับยั้งได้ไม่ดีทำให้ ประสิทธิภาพการป้องกันการกัดกร่อนไม่ดีเท่าที่ควร จึงมีการพัฒนาให้อนุภาคเหล่านี้สามารถควบคุมการ ปลดปล่อยสารยับยั้งได้ ซึ่งการปรับแต่งผิวของอนุภาคเป็นวิธีหนึ่งที่น่าสนใจ ซึ่งการปรับแต่งผิวส่งผลให้ ประจุ รูปร่าง ขนาดของอนุภาคเปลี่ยนไป ทำให้คุณสมบัติเปลี่ยนไปทำให้ความสามารถในการบรรจุ หรือ การปลดปล่อยสารยับยั้งมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น ทั้งนี้ยังขึ้นอยู่กับว่าสภาพแวดล้อมในการกัดกร่อนและ ลักษณะเฉพาะของสารยับยั้ง

อนุภาคนาโนซิลิกาที่มีรูพรุนชนิดเมโซเป็นอนุภาคอนินทรีย์ที่ถูกนำมาประยุกต์ใช้กันอย่าง แพร่หลายในงานด้านต่างๆ อาทิ ตัวเร่งปฏิกิริยา ตัวดูดซึม และตัวบรรจุสารเคมี ซึ่งในงานด้านการป้องกัน การกัดกร่อน อนุภาคชนิดนี้สามารถนำมาใช้ในการบรรจุสารยับยั้งการกัดกร่อน เนื่องจากสมบัติความเป็น รูพรุนของอนุภาค มีปริมาตรที่เข้าถึงสูง พื้นที่ผิวมาก สมบัติไม่เปลี่ยนแปลงไปตามความร้อน ไม่อวบน้ำต่อ การทำปฏิกิริยาของสารเคมี สำหรับวิทยานิพนธ์นี้ทำการศึกษาผลของการปรับแต่งหมู่ฟังก์ชันต่อสมบัติ การป้องกันการกัดกร่อน โดยสังเคราะห์อนุภาคซิลิกาที่มีรูพรุนชนิดเมโซด้วยวิธีโซล-เจลแบบการทำ ปฏิกิริยาควบแน่นแบบร่วม (Sol-gel based cocondensation method) ระหว่างสารตั้งต้นซิลิกา 2 ชนิด คือ เตตระออร์โธซิลิเกต (Tetraethyl Orthosilicate; TEOS) และสารตั้งต้นที่มีหมู่อินทรีย์ (Organosilane) ในสภาวะต่างโดยใช้สารลดแรงตึงผิวที่มีประจุบวกเป็นสารกำหนดโครงสร้าง สารตั้งต้น อินทรีย์ที่ทำการศึกษามี 2 ชนิดคือ อะมิโนโพรพิลไตรเอทอกซีไซเลน (3-Aminopropyl Triethoxysilane; APTES) และเมอร์แคปโตโพรพิลไตรเอทอกซีไซเลน (3-Mercaptopropyl Trimethoxysilane; MPTMS) อนุภาคที่ได้จะถูกนำไปศึกษาเพื่อโครงสร้างสัณฐานของอนุภาคโดยใช้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กล้องอิเล็กตรอนชนิดส่องผ่าน (Transmission electron microscopy; TEM) หาปริมาณหมู่อินทรีย์ที่อยู่ในอนุภาคโดยใช้เทคนิคการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของสารโดยอาศัยคุณสมบัติทางความร้อน (Thermogravimetric Analysis; TGA) วิเคราะห์ธาตุในอนุภาคโดยใช้เทคนิควิเคราะห์ด้วยอินฟราเรด (Fourier Transform Infrared Spectroscopy; FTIR) ทดสอบคุณสมบัติการป้องกันการกัดกร่อนโดยใช้เทคนิคโพเทนชิโอสแตติกโพลาริเซชัน ทั้งในสภาวะน้ำเกลือที่เป็นกลาง กรด และเบส โดนใช้เหล็กคาร์บอนเป็นวัสดุรองรับสารเคลือบ

## 1.2 วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์

พัฒนาอนุภาคซิลิกาที่มีรูพรุนชนิดเมโซเพื่อนำไปใช้ในสารเคลือบเพื่อป้องกันกัดกร่อนของเหล็กกล้าคาร์บอนในสภาวะต่างๆ

## 1.3 ขอบเขตการศึกษา

1. ศึกษาสมบัติและลักษณะเฉพาะของอนุภาคซิลิกาที่มีรูพรุนชนิดเมโซที่ผ่านการปรับแต่งหมู่ฟังก์ชัน
2. ศึกษาความสามารถในการดูดซับสารยับยั้งการกัดกร่อนของอนุภาคซิลิกาที่มีรูพรุนชนิดเมโซแต่ละชนิด
3. ทดสอบสมบัติการป้องกันการกัดกร่อนในสารละลายเกลือที่มีความเป็นกรด กลาง และเบส โดยใช้เหล็กกล้าเป็นวัสดุรองรับสารเคลือบ
4. ศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพในการป้องกันการกัดกร่อน

## 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. สามารถพัฒนาระบบการเคลือบเพื่อป้องกันการกัดกร่อนโดยการใช้ร่วมกับสารยับยั้งการกัดกร่อน
2. สามารถพัฒนาอนุภาคซิลิกาที่มีรูพรุนชนิดเมโซเพื่อให้เหมาะสมกับการนำไปใช้เป็นสารเคลือบผิวเหล็กกล้าเพื่อป้องกันการกัดกร่อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

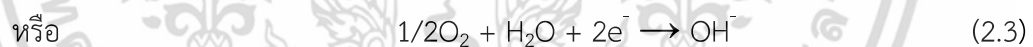
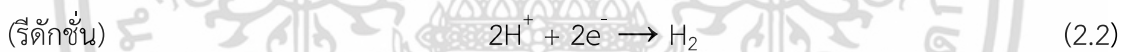
## บทที่ 2

# ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

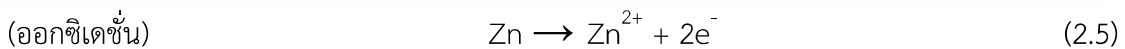
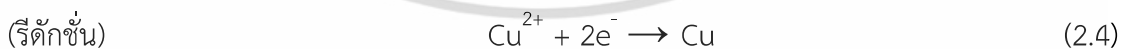
### 2.1 การกัดกร่อน [1]

การกัดกร่อนสามารถเกิดขึ้นในสภาวะแวดล้อมที่มีน้ำหรือความชื้น โดยสิ่งสำคัญที่ก่อให้เกิดการกัดกร่อนก็คือโปรตรอนและออกซิเจนซึ่งมีอยู่ทั่วไปตามธรรมชาติ โดยโปรตรอนและน้ำจะลดความเสถียรของโลหะโดยการรับอิเล็กตรอนมาจากโลหะซึ่งมีความสามารถในการให้อิเล็กตรอนและกลายเป็นไอออนที่มีความเป็นบวกได้ ในความเป็นจริงแล้วมีโลหะหลายชนิดที่มีความสามารถในการคงสภาวะดั้งเดิมของตนเอง กล่าวคือไม่สูญเสียอิเล็กตรอนได้ง่าย ยกตัวอย่างเช่น แพลตตินัม ทอง เป็นต้น โลหะเหล่านี้มีชื่อเรียกอีกอย่างหนึ่งว่าโลหะมีตระกูล หรือแม้แต่ในกรณีที่ระบบไม่มีออกซิเจน ถ้าในระบบนั้นๆมีตัวรีดิวซ์อื่นๆ ก็สามารถทำให้เกิดการกัดกร่อนได้เช่นเดียวกัน ยกตัวอย่างเช่น ซัลเฟอร์ หรือ ไนเตรต เป็นต้น

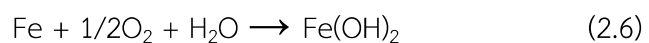
ตัวอย่างของการกัดกร่อนที่เกิดขึ้นในโลหะในกรณีของเหล็กสามารถแสดงเป็นปฏิกิริยาเคมีได้ดังนี้

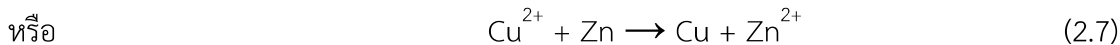


การเกิดปฏิกิริยาคู่ควบในลักษณะข้างต้นสามารถเกิดระหว่างโลหะที่แตกต่างกันสองชนิดได้ ซึ่งการกัดกร่อนในลักษณะนี้เรียกว่าการกัดกร่อนแบบกัลวานิกซ์ ยกตัวอย่างในกรณีของโลหะทองแดงและสังกะสี เมื่อโลหะทั้งสองเกิดการสัมผัสกันจะส่งผลให้เกิดการกัดกร่อนเกิดขึ้นกับสังกะสีเนื่องจากว่าสังกะสีมีความสามารถในการสูญเสียอิเล็กตรอนได้มากกว่า



จากสมการทั้งหมดในข้างต้นสามารถรวมเป็นสมการในแต่ละกรณีได้ดังนี้





ปฏิกิริยาการเกิดการกัดกร่อนสามารถเรียกอีกอย่างหนึ่งได้ว่าปฏิกิริยารีดอกซ์ ซึ่งเป็นปฏิกิริยาสำคัญที่มีการถ่ายโอนอิเล็กตรอนระหว่างกัน สำหรับสมการที่ (2) และ (3) ในกรณีที่มีการกัดกร่อนเกิดขึ้นในระบบไม่มีออกซิเจน ลักษณะจะคล้ายกันเพียงแต่เปลี่ยนออกซิเจนเป็นซัลเฟอร์หรือไนเตรต จะเห็นว่าการบวนการในการเกิดการกัดกร่อนเป็นเหตุการณ์ที่ไม่สามารถหลีกเลี่ยงได้ จึงจำเป็นที่จะต้องเข้าใจถึงอุณหพลศาสตร์ในการเกิดปฏิกิริยาการกัดกร่อน

### 2.1.1 อุณหพลศาสตร์ในปฏิกิริยาการกัดกร่อน

การกัดกร่อนหรือการเสื่อมสลายของโลหะมีสาเหตุมาจากการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน โดยกลไกการเกิดปฏิกิริยาเริ่มจากการที่โลหะมีค่าศักย์ไฟฟ้าเคมีแตกต่างกัน ตารางที่ 2.1 แสดงศักย์ไฟฟ้าเคมีของโลหะแต่ละชนิดโดยเทียบกับศักย์ไฟฟ้าเคมีของออกซิเจนและโปรตรอน

ตารางที่ 2.1 ตารางแสดงศักย์ไฟฟ้าที่ใช้ในการเกิดปฏิกิริยารีดอกซ์ในโลหะ

ปฏิกิริยา	$E^0 / V$
$\text{Au}^+ + e^- \leftrightarrow \text{Au}$	+1.69
$\text{Pt}^{2+} + 2e^- \leftrightarrow \text{Pt}$	+1.18
$\text{Ag}^+ + e^- \leftrightarrow \text{Ag}$	+0.799
$\text{Cu}^+ + e^- \leftrightarrow \text{Cu}$	+0.518
$\text{O}_2 + \text{H}_2\text{O} + 4e^- \leftrightarrow 4\text{OH}^-$	+0.401
$\text{Cu}^{2+} + 2e^- \leftrightarrow \text{Cu}$	+0.339
$2\text{H}^+ + 2e^- \leftrightarrow \text{H}_2$	+0.000
$\text{Sn}^{2+} + 2e^- \leftrightarrow \text{Sn}$	-0.141
$\text{Ni}^{2+} + 2e^- \leftrightarrow \text{Ni}$	-0.236
$\text{Fe}^{2+} + 2e^- \leftrightarrow \text{Fe}$	-0.440
$\text{Zn}^{2+} + 2e^- \leftrightarrow \text{Zn}$	-0.762
$\text{Cr}^{3+} + 3e^- \leftrightarrow \text{Cr}$	-0.74
$\text{Ti}^{2+} + 2e^- \leftrightarrow \text{Ti}$	-1.60
$\text{Al}^{3+} + 3e^- \leftrightarrow \text{Al}$	-1.68

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากที่กล่าวไปในข้างต้นมีโลหะเพียงไม่กี่ชนิดที่สามารถคงความเสถียรไว้ได้ในธรรมชาติ ในความเป็นจริงงานทางด้านวิศวกรรมหรือก่อสร้างล้วนแล้วแต่ใช้วัสดุที่มีความไม่เสถียร เช่น เหล็ก สังกะสี เป็นที่น่าสนใจว่าโลหะบางประเภท ยกตัวอย่างเช่น นิกเกิล โครเมียม หรือไทเทเนียมมีความสามารถในการป้องกันการกัดกร่อนทั้งที่สามารถเกิดปฏิกิริยาได้ง่าย

การป้องกันการกัดกร่อนสำหรับวัสดุโลหะตามธรรมชาติพัฒนามาจากชั้นป้องกัน (Protective layer) ของโลหะ ซึ่งเป็นชั้นที่ทั้งประจุลบหรือบวกไม่สามารถผ่านได้ กล่าวคือ เป็นชั้นที่ไม่นำไฟฟ้า โดยชั้นปกป้องนี้เกิดมาจากการเกิดปฏิกิริยาระหว่างผิวโลหะกับสิ่งแวดล้อมภายนอก ซึ่งโดยธรรมชาติชั้นนี้จะมีขนาดระดับนาโนเมตร จึงอาจกล่าวได้ว่านี่คือเทคโนโลยีระดับนาโนในยุคเริ่มแรกที่เกิดจากธรรมชาติก็ว่าได้ ถึงแม้ว่าไม่มีสิ่งใดสามารถผ่านชั้นปกป้องที่เกิดบริเวณผิวของโลหะนี้ได้ แต่ชั้นปกป้องนี้สามารถละลายออกจากผิวของโลหะไปสู่สิ่งแวดล้อมได้ ส่งผลให้น้ำหนักของโลหะลดลง ซึ่งเป็นที่มาของการวัดผลการกัดกร่อนนั่นก็คือการใช้การชั่งน้ำหนักเพื่อหาความสามารถในการป้องกันการกัดกร่อนนั่นเอง

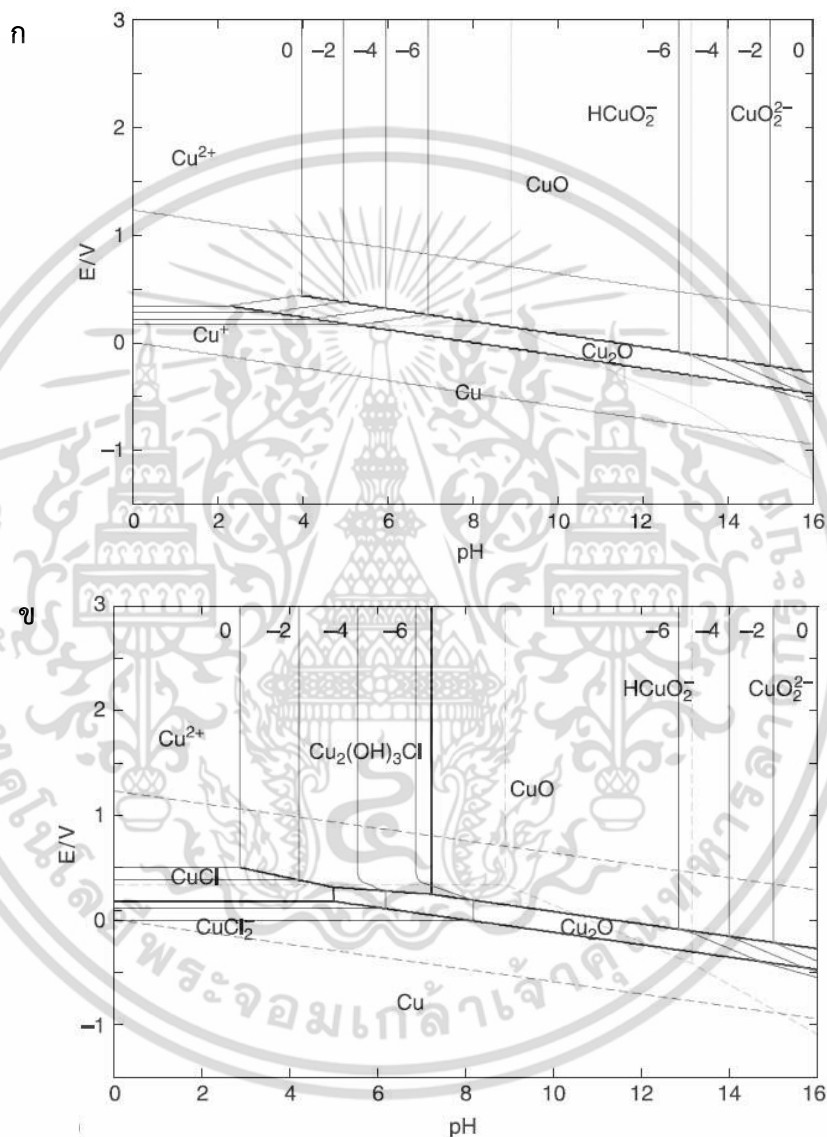
การที่ชั้นปกป้องของโลหะสามารถละลายได้หมายความว่าอัตราการเกิดการกัดกร่อนเทียบได้กับอัตราการความเสถียรและการสลายไปของชั้นปกป้อง ในบรรดาโลหะที่เกิดปฏิกิริยาได้ง่าย (ถูกออกซิไดซ์ได้ง่าย) จะสามารถสร้างชั้นปกป้องมาปกป้องผิวได้ง่าย ตารางที่ 2.1 โลหะที่เกิดปฏิกิริยาได้ง่ายหรือสูญเสียอิเล็กตรอนได้ง่ายคือ โครเมียม ไทเทเนียม หรืออะลูมิเนียม สามารถสร้างชั้นที่เสถียรหรือชั้นที่กันไม่ให้สิ่งแวดล้อมภายนอกซึมผ่านได้ ซึ่งสามารถปกป้องผิวของโลหะ ดังนั้นจึงมีงานวิจัยจำนวนมากที่ศึกษาและหาวิธีที่ทำให้เกิดชั้นปกป้องบนพื้นผิวของโลหะเพื่อถูกกัดกร่อน

### 2.1.2 การเกิดชั้นปกป้อง (Formation of stable film)

ในการก่อตัวของชั้นปกป้องต้องพิจารณาปฏิกิริยาทั้งหมดที่เกิดบริเวณระหว่างพื้นผิวของโลหะและสิ่งแวดล้อม การเกิดปฏิกิริยารีดักชันที่เกิดขึ้นส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันตามมานำไปสู่ชั้นออกไซด์บนพื้นผิวของโลหะ ยกตัวอย่างรูปที่ 2.1 โพรเบโตอะแกรมแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเป็นกรด-ด่างและศักย์ไฟฟ้าในระบบโลหะทองแดง (ก) สัมผัสกับน้ำ และ (ข) สัมผัสกับสารละลายคลอไรด์ ทั้งสองระบบมีความแตกต่างกันที่ชนิดและความเข้มข้นของประจุลบในสารละลาย จะเห็นว่ามีผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นจากเกิดปฏิกิริยาระหว่างพื้นผิวโลหะและสิ่งแวดล้อมภายนอก ยกตัวอย่างเช่น ออกไซด์ของทองแดง ( $\text{CuO}$  หรือ  $\text{CuO}_2$ ) ซึ่งในบริเวณที่เกิดผลิตภัณฑ์ ผลิตภัณฑ์จะเป็นตัวแยกสารตั้งต้นทั้งสองออกจากกัน (ทองแดงและน้ำ) ซึ่งชั้นปกป้องหรือชั้นออกไซด์ที่ได้จะเป็นชั้นที่มีความพรุนต่ำ ในส่วนของระบบที่ทองแดงสัมผัสกับสารละลายคลอไรด์ก็สามารถเกิดชั้นออกไซด์เช่นกัน แต่ชั้นออกไซด์ที่เกิดในกรณีนี้จะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มีอัตราการละลายที่เร็วกว่าเนื่องจากว่ามีช่วงของเกลือของคลอไรด์ ( $\text{CuCl}$ ) ดังนั้นจากทั้งสองระบบเมื่อเปรียบเทียบกันทองแดงจะเสถียรในระบบที่มีการสัมผัสกับน้ำมากกว่าระบบที่สัมผัสกับสารละลายคลอไรด์มากกว่า และจากกราฟแสดงให้เห็นในระบบสัมผัสกับน้ำ ทองแดงจะมีความเสถียรในช่วงที่น้ำมีความเป็นกรด



รูปที่ 2.1 โพรเบไดอะแกรมแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเป็นกรด-ด่างและศักย์ไฟฟ้าของระบบทองแดงสัมผัสกับ (ก) น้ำ (ข) สารละลายคลอไรด์

โพรเบไดอะแกรมสามารถใช้ทำนายความเสถียรของโลหะในระยะยาวได้เพียงอย่างเดียว เนื่องจากกราฟนี้แสดงกรณีที่ปฏิกิริยาเกิดชั้นปกป้องที่เสถียรที่สุด แต่ไม่ได้พิจารณาสื่อกลางระหว่าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลิตภัณฑ์ ความเสถียรหรือความพรุนของชั้นปกป้อง กล่าวคือกราฟนี้ไม่สามารถบอกได้ว่าปฏิกิริยาที่พื้นผิวจะเข้าสู่สมดุลได้อย่างไร ใช้เวลาเท่าใด ระหว่างเกิดปฏิกิริยาเกิดสิ่งใดขึ้น ซึ่งการที่ไม่พิจารณาสิ่งต่างๆ เหล่านี้อาจจะทำให้ได้เกิดผลค้างเคียงอย่างอื่นที่ไม่ได้คาดการณ์ไว้ในขณะที่เกิดปฏิกิริยาเกิดเป็นชั้นปกป้อง ดังนั้นการสังเกตช่วงเวลาในการเกิดการกัดกร่อนทั้งหมดจึงเป็นสิ่งสำคัญ ตัวอย่างที่สำคัญที่นิยมนำมาใช้อธิบายคือ  $\alpha$ - และ  $\gamma$ - FeOOH ซึ่งเกิดขึ้นกับการกัดกร่อนที่สัมผัสกับอากาศ เนื่องจากความสามารถในการปกป้องของสารสองชนิดนี้มีความแตกต่างกันค่อนข้างน้อย ทำให้อัตราการเกิดการกัดกร่อนขึ้นอยู่กับความเสถียรของชั้นฟิล์ม และความพรุนของฟิล์มที่แตกต่างกันซึ่งไม่สามารถนำมาแสดงให้อยู่ในรูปของโพรเบไดอะแกรมได้

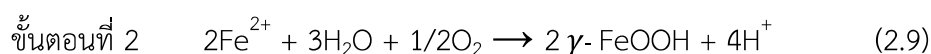
โพรเบไดอะแกรมทำนายมาจากค่าพลังงานอิสระเพื่อใช้ในการบ่งบอกความเสถียรของวัสดุ ซึ่งโดยปกติแล้วค่าพลังงานอิสระจะแม่นยำในช่วงกลุ่มอะตอมประมาณ 100-1,000 อะตอม และจะคลาดเคลื่อนในกรณีที่วัสดุมีขนาดใหญ่ ดังนั้นการที่พลังงานอิสระมีผลกระทบต่อโพรเบไดอะแกรมทำให้ความแม่นยำในการหาค่าพลังงานอิสระจำเป็นเป็นอย่างมาก

### 2.1.3 จลนศาสตร์ในปฏิกิริยาการกัดกร่อน

อีกหนึ่งเรื่องที่สำคัญสำหรับโพรเบไดอะแกรมคือกราฟนี้ไม่ได้บ่งบอกความเร็วที่วัสดุจะเกิดการกร่อนหรือการสูญเสียอิเล็กตรอนในระหว่างกระบวนการเกิดชั้นปกป้อง นั่นหมายความว่ากราฟนี้ไม่สามารถบ่งบอกได้ว่าระหว่างกระบวนการเกิดชั้นปกป้องนั้นมีการเกิดการกร่อนไปมากน้อยเพียงใดเพื่อให้ได้ชั้นปกป้องที่มีความเสถียร ดังนั้นจลนศาสตร์จึงมีความสำคัญเพื่อนำมาใช้ในการทำนายอายุการใช้งานของวัสดุ อัตราการกัดกร่อนจึงเป็นสิ่งสำคัญ เพื่อที่จะเข้าใจจลนศาสตร์ของกระบวนการกัดกร่อนต้องแยกการละลายที่มีอยู่ในโลหะให้ออก ยกตัวอย่างเช่น ในกรณีการเกิดการกัดกร่อนของเหล็กที่สัมผัสกับน้ำที่มีออกซิเจน การเกิดรีดักชันของออกซิเจนจะมาเกิดขึ้นพร้อมกับการละลายของเหล็กดังสมการ



ขั้นตอนต่อมาเกิดการเกิดปฏิกิริยาที่พื้นผิวส่งผลให้เกิดตะกอนของปฏิกิริยาเกิดขึ้น

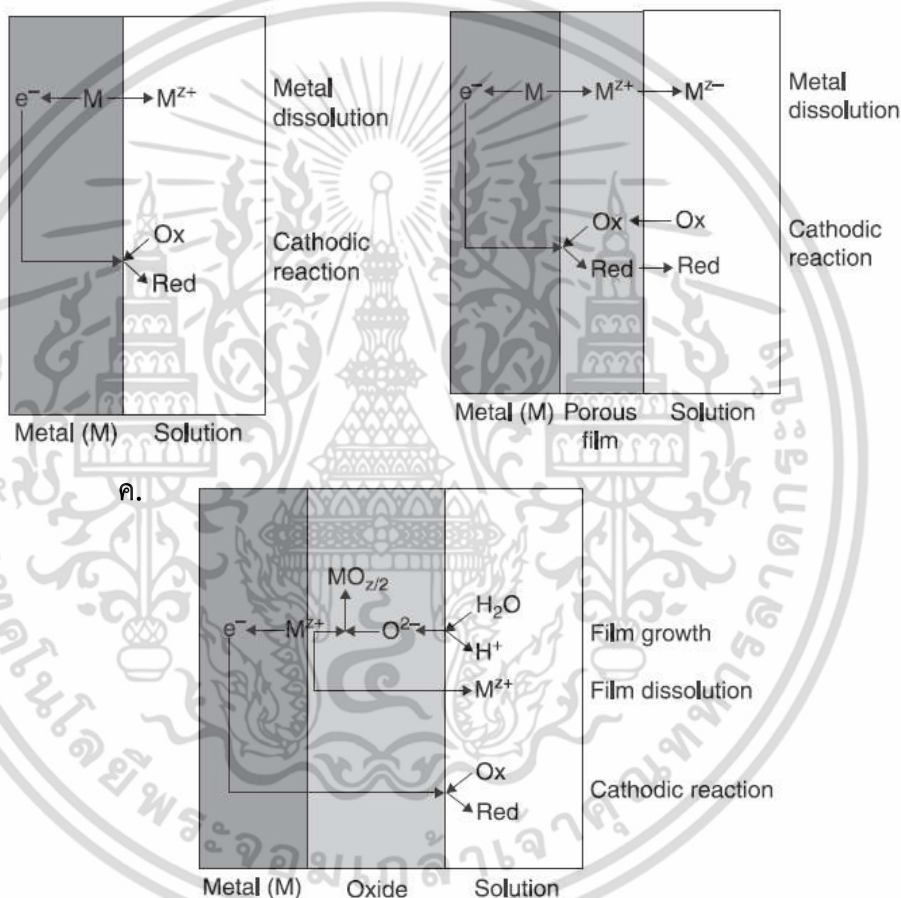


ออกไซด์ทรอกไซด์เกิดขึ้นบนพื้นผิวของวัสดุซึ่งเกิดปฏิกิริยาต่อเนื่องจนกระทั่งเกิดเป็นชั้นออกไซด์ของเหล็ก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ในขั้นตอนแรกพื้นผิวของโลหะเกิดการสูญเสียอิเล็กตรอนเนื่องจากการสัมผัสกับสิ่งแวดล้อมโดยตรง ต่อมาในปฏิกิริยาที่สองได้เกิดขึ้นของออกไซด์บริเวณระหว่างโลหะและออกซิเจนซึ่งเป็นชั้นที่มีรูพรุน สิ่งแวดล้อมภายนอกจะต้องแพร่ผ่านรูพรุนของชั้นนี้เพื่อเข้ามาสัมผัสกับโลหะ และในขั้นตอนที่ 3 เป็นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่างโลหะและชั้นออกไซด์เกิดเป็นชั้นออกไซด์ของเหล็กที่มีรูพรุนน้อยกว่า



รูปที่ 2.2 แผนภาพแสดงลักษณะของระบบในขั้นตอน (ก) เริ่มต้น (ข) การเกิดชั้นรูพรุน (ค) การเกิดชั้นออกไซด์

รูปที่ 2.2 (ก) ภาพอย่างง่ายแสดงโลหะสัมผัสกับสารละลายโดยตรง โลหะจะถูกละลายเนื่องจากปฏิกิริยารีดอกซ์ และสามารถเกิดของแข็งแข็งขึ้นบริเวณพื้นผิวของโลหะได้ ยกตัวอย่างเช่นในกรณีปฏิกิริยารีดักชันของไอออนของทองแดง ซึ่งสิ่งต่างๆที่จะเกิดขึ้นสามารถทำนายได้จากสภาพแวดล้อม เช่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความชื้น เป็นต้น หรืออาจสามารถเกิดขึ้นที่มีรูพรุนบนพื้นผิวของโลหะ ซึ่งสิ่งแวดล้อมภายนอกจำเป็นต้องแพร่ผ่านรูพรุนเข้ามาเพื่อเข้ามาถึงเนื้อโลหะดังแสดงในรูปที่ 2.2 (ข)

รูปที่ 2.2 (ค) เป็นขั้นตอนที่เกิดขึ้นออกไซด์ ซึ่งชั้นดังกล่าวสามารถเกิดได้ในกรณีวัสดุที่มีความสามารถในการต้านทานการกัดกร่อน เช่น โครเมียม นิกเกิล และอื่นๆ ซึ่งขั้นตอนนี้จลนศาสตร์ของปฏิกิริยาอาจถูกควบคุมโดยการถ่ายโอนอิเล็กตรอนของชั้นออกไซด์หรืออัตราการละลายของชั้นออกไซด์ที่บริเวณผิวสัมผัสชั้นออกไซด์กับสารละลาย เนื่องจากความหนาของชั้น ส่วนประกอบ และการละลายสามารถเปลี่ยนแปลงไปได้ตามเวลา ทำให้เป็นการยากที่จะทำนายอัตราการกัดกร่อนได้ในกรณีนี้

#### 2.1.4 สมการของปฏิกิริยาการกัดกร่อน

อัตราการกัดกร่อนสามารถประเมินได้จากค่ากระแสการกัดกร่อน (corrosion current;  $j$ ) มีหน่วยเป็นมิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร ซึ่งค่าดังกล่าวนี้สามารถคำนวณเป็นอัตราการกัดกร่อนที่มีหน่วยเป็นมิลลิเมตรต่อปีได้ โดยคุณสมบัติและโวลเมอ์เสนอความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าและศักย์ไฟฟ้าของระบบที่มีโลหะสัมผัสกับสารละลายที่มีน้ำเป็นส่วนประกอบได้ดังความสัมพันธ์นี้

$$j = Fk_a C_M \exp\left[\frac{\alpha z F}{RT} (E - E_{rev})\right] - Fk_c C_{M^{2+}} \exp\left[-\frac{(1-\alpha)z F}{RT} (E - E_{rev})\right] \quad (2.11)$$

หลักการของสมการนี้คือผลรวมของค่ากระแสไฟฟ้าทั้งหมดซึ่งประกอบไปด้วยกระแสไฟฟ้าทั้งขั้วแอโนดและแคโทด เทอมแรกของสมการเป็นกระแสไฟฟ้าฝั่งแอโนดและเทอมที่สองเป็นฝั่งแคโทด ซึ่งจากสมการถ้าหากผลต่างของศักย์ไฟฟ้ามีค่าเป็นบวกหมายความว่ากระแสไฟฟ้าไหลมาจากฝั่งแอโนด แต่ถ้าหากเป็นลบหมายความว่ามาจากฝั่งแคโทด โดยค่าตัวแปรอื่นๆ เช่น  $\alpha$  คือสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนอิเล็กตรอน  $z$  คือจำนวนอิเล็กตรอนที่มีการแลกเปลี่ยนในปฏิกิริยา  $F$  คือค่าคงที่ของฟาราเดย์ และ  $k$  คือค่าคงที่ของปฏิกิริยาโดย  $E_{rev}$  แทนศักย์ไฟฟ้าที่สมดุล

ถ้าหากค่าศักย์ไฟฟ้ามีค่าต่างจากค่า  $E_{rev}$  มากเพียงพอจะส่งผลให้ละเทอมแอโนดหรือแคโทดิกได้เทอมหนึ่ง เนื่องจากค่าอื่นๆจะถือว่ามิต่างน้อยสามารถละได้ ยกตัวอย่างการกัดกร่อนในกรณีที่โลหะเป็นเหล็กได้สำหรับกระแสไฟฟ้าที่ขั้วแอโนด (ปฏิกิริยาการกัดกร่อนของโลหะ) ดังสมการที่ 12

$$j_{Fe} = j_{0,Fe} \left\{ \exp\left(\frac{\alpha z F}{RT} (E - E_{rev})\right) \right\} \quad (2.12)$$

โดยที่  $j_0$  คือค่าความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าที่แลกเปลี่ยนกัน และสำหรับปฏิกิริยารีดักชันของออกซิเจนสามารถเขียนได้ดังสมการ

$$j_{O_2} = j_{0,O_2} \left\{ -\exp\left(-\frac{(1-\alpha)zF}{RT}(E - E_{rev,O_2})\right) \right\} \quad (2.13)$$

โดยที่ทั้งสองสมการสามารถเขียนให้อยู่ในรูปแบบของลอการิทึมได้ดังนี้

$$\ln j_{Fe} = \ln j_{0,Fe} + \frac{\alpha zF}{RT}(E - E_{rev,Fe}) \quad \text{สำหรับปฏิกิริยาที่แอโนด}$$

$$\ln |j_{O_2}| = \ln j_{0,O_2} - \frac{(1-\alpha)zF}{RT}(E - E_{rev,O_2}) \quad \text{สำหรับปฏิกิริยาที่แคโทด}$$

โดยปฏิกิริยารีดอกซ์นี้ขึ้นอยู่กับออกซิเจน อัตราการปลดปล่อยของออกซิเจนจะถูกควบคุมโดยอัตราการถ่ายโอนมวลมากกว่าโคเนตริกเนื่องจากออกซิเจนละลายในน้ำได้น้อยมาก ซึ่งอัตราการละลายออกซิเจนสามารถหาได้ดังสมการ

$$|j_{O_2}| = k_{m,O_2} c_{O_2} \quad (2.16)$$

ในสมการที่ 16  $k_{m,O_2}$  เป็นค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลของออกซิเจนในระบบและ  $CO_2$  คือค่าการทำละลายของออกซิเจนในน้ำ ซึ่งถ้าหากในกรณีที่เกิดชั้นที่มีรูพรุนบนพื้นผิวของโลหะจะทำให้ความเข้มข้นของออกซิเจนที่พื้นผิวของโลหะมีน้อยลงเนื่องจากออกซิเจนต้องแพร่ผ่านรูพรุนมาที่พื้นผิว และเมื่อเกิดชั้นปกป้องขึ้น ปฏิกิริยาออกซิเดชันจะเกิดเท่ากับปฏิกิริยารีดักชัน ณ บริเวณผิวสัมผัสระหว่างโลหะและชั้นออกไซด์ และอัตราการก่อตัวของชั้นจะเท่ากับอัตราที่ชั้นเสียหายไป ณ บริเวณที่ชั้นสัมผัสกับสารละลาย โดยชั้นปกป้องหรือชั้นออกไซด์ไม่นำไฟฟ้าทำให้เกิดการลดลงของศักย์ไฟฟ้า ซึ่งการถ่ายโอนกระแสไฟฟ้าในบริเวณใกล้ชั้นปกป้องนี้จะสามารถเขียนได้ดังสมการที่ 17

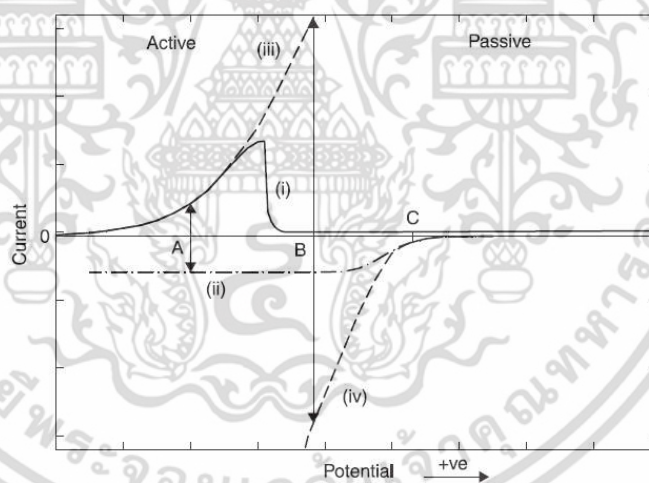
$$j = A' \exp(B' \Delta\Phi_2 / t) \quad (2.17)$$

โดยที่ A และ B คือค่าคงที่ของศักย์ไฟฟ้าอิสระ  $\Phi_2$  คือค่าความต่างศักย์ระหว่างชั้นออกไซด์ และ t คือความหนาของชั้นออกไซด์ นั้นหมายความว่าที่ศักย์ไฟฟ้าช่วงกว้างนี้จะมีค่ากระแสไฟฟ้าที่ต่ำ และเมื่อชั้นออกไซด์เกิดมากขึ้นจะก่อให้เกิดกระแสไฟฟ้าพุ่งขึ้นสูงอย่างมากอีกครั้งเนื่องจากโลหะเกิดการสูญเสียอิเล็กตรอน ซึ่งอัตราการกัดกร่อนจะถูกกำหนดด้วยโครงสร้างและความเสถียรของชั้นออกไซด์ ถ้าชั้นปกป้องมีความสามารถในการก่อตัวได้ไว้นั้นหมายความว่าสามารถซ่อมแซมตัวได้ไวซึ่งเกิดได้ในกรณีของ

โลหะ เช่น โครเมียม นิกเกิล เป็นต้น ซึ่งการซ่อมแซมตัวเองได้ไว้นี้จะส่งผลให้ชั้นออกไซด์มีความเสถียรมากกว่าต่างกับโลหะบางชนิดที่มีความสามารถในการสร้างชั้นปกป้องได้ช้า ยกตัวอย่างเช่น ทองแดง เหล็ก เป็นต้น ในระหว่างที่เกิดการก่อตัวของชั้นออกไซด์โลหะบางส่วนก็จะสูญเสียไปเนื่องจากการกัดกร่อน ดังนั้นความสามารถในการก่อตัวของชั้นออกไซด์จึงเป็นตัวแปรสำคัญ และเพื่อที่จะทำให้สามารถทำนายความเร็วในการก่อตัวของชั้นออกไซด์ได้ การวิเคราะห์จลนศาสตร์ทั้งในส่วนปฏิกิริยาที่แคโทดหรือแอโนดจึงเป็นสิ่งจำเป็น

### 2.1.5 การประยุกต์ใช้งานร่วมกับระบบไฟฟ้า

เนื่องจากการกัดกร่อนเกิดจากปฏิกิริยารีดอกซ์ดังนั้นการนำหลักการทางไฟฟ้าเคมีมาช่วยจึงเป็นอีกหนึ่งวิธีที่ใช้ในการวัดค่าการกัดกร่อนได้ รูปที่ 2.3 แสดงปฏิกิริยาที่แอโนดและแคโทดที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวของโลหะ โดยเหล็กสามารถมีทั้งส่วนที่เป็นแอคทีฟหรือแพชซีฟได้ ในส่วนของแอคทีฟ กระแสไฟฟ้าที่เกิดจากการที่เหล็กสูญเสียอิเล็กตรอนแล้วเกิดการกร่อนไปมีความสัมพันธ์กับค่าศักย์ไฟฟ้าเป็นแบบเอ็กซ์โปเนนเชียลซึ่งสังเกตจากรูปที่เส้น (i) ในช่วงที่ศักย์ไฟฟ้าต่ำ



รูปที่ 2.3 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าและศักย์ไฟฟ้าสำหรับระบบที่เกิดการกัดกร่อน (i) แทนการละลายในสถานะแอคทีฟและแพชซีฟ (ii) ) ปฏิกิริยาที่แคโทดโดยที่อัตราการถ่ายโอนมวลเป็นตัวกำหนดปฏิกิริยา (iii) และ (iv) คือเส้นที่ทำการเอ็กซ์โพเนนเชียลออกมาในบริเวณแอคทีฟ จุด A แทนศักย์ไฟฟ้ากัดกร่อนที่สถานะแอคทีฟ จุด C แทนสถานะแพชซีฟ และจุด B แทนศักย์ไฟฟ้าที่ชั้นออกไซด์เกิดการผุพัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อศักย์ไฟฟ้าในระบบค่อยๆ เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ความต้องการอิเล็กตรอนของปฏิกิริยารีดักชันของออกซิเจนมีมากขึ้นซึ่งจะสมดุลกับการละลายออกไปของโลหะดังแสดงที่จุด A แต่ในกรณีที่มิขึ้น ออกไซด์เกิดขึ้นปริมาณอิเล็กตรอนที่ปลดปล่อยออกมาเนื่องจากการละลายของโลหะมีค่าลดลงถึงแม้ว่าค่าศักย์ไฟฟ้าจะเพิ่มขึ้นแสดงที่จุด C ในจุดนี้ขึ้นกำหนดปฏิกิริยารีดักชันของออกซิเจนจะไม่ใช้อัตราการถ่ายโอนมวลของออกซิเจนแต่เป็นอัตราการละลายออกของชั้นออกไซด์

ความเสียหายใดๆ ก็ตามที่เกิดขึ้นกับชั้นออกไซด์ส่งผลให้โลหะกลับไปสัมผัสกับตัวออกซิไดซ์ที่อยู่ในสิ่งแวดล้อมภายนอกโดยตรงจะส่งผลให้กราฟกลับไปสู่โซนแคโทด ส่งผลให้กระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นพุ่งขึ้นสูงมากสังเกตได้จากจุด B ซึ่งชั้นออกไซด์ควรจะต้องมีการซ่อมแซมตัวเองอย่างรวดเร็ว ถ้าหากไม่สามารถซ่อมแซมตัวเองได้การกัดกร่อนก็จะเกิดขึ้น อย่างไรก็ตามอาจเกิดความเสียหายที่รุนแรงจากสารตั้งต้นเพียงน้อยนิด เช่น ออกซิเจนที่ละลายในน้ำ จนไม่สามารถที่จะทำให้ชั้นออกไซด์นั้นกลับคืนมาได้ ในกรณีนี้ความเสียหายเนื่องจากการกัดกร่อนจะยังคงเกิดต่อไปเท่าที่มีการแพร่เข้าของออกซิเจนซึ่งจะส่งผลให้การก่อตัวของชั้นออกไซด์เกิดช้าออกไป

ในบริเวณแพชชีฟเส้นกราฟสามารถไปได้ไกลเพียงใดก็ได้ขึ้นกับความหนาและความสามารถในการนำไฟฟ้าของชั้นออกไซด์ ยกตัวอย่างเช่น ในกรณีที่ชั้นออกไซด์มีความหนาหรือมีความสามารถในการนำไฟฟ้าต่ำจะส่งผลให้กราฟคงที่ไปทางขวามาก แต่ในบางครั้งการกัดกร่อนสามารถเกิดในสิ่งแวดล้อมที่ไอออนมาก เช่น คลอไรด์ไอออน ซึ่งอาจส่งผลให้การก่อตัวของชั้นออกไซด์เกิดได้น้อย สำหรับสมมุติฐานที่จะนำมาใช้เมื่อใช้หลักการทางไฟฟ้ามาทำนายการเกิดการกัดกร่อนคือ หนึ่งปฏิกิริยาที่เกิดตลอดทั่วทั้งพื้นผิวมีศักย์ไฟฟ้าเท่ากัน และสองอิเล็กตรอนทั้งหมดที่ออกจากแอโนดไปยังแคโทดทั้งหมด นั้นหมายความว่ากระแสไฟฟ้าทั้งหมดที่ขั้วแอโนดจะสมดุลกับขั้วแคโทด ดังนั้นจะสามารถสรุปได้ว่าผลรวมของกระแสไฟฟ้าทั้งหมดในระบบจะเท่ากับศูนย์

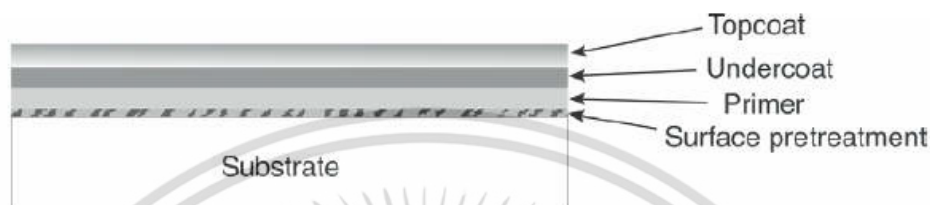
$$j = \sum_i j_i = 0 \quad (2.18)$$

## 2.2 ผลของการเคลือบเพื่อป้องกันการกัดกร่อน [2]

ระบบการเคลือบและความต้านทานเฉพาะในแต่ละชั้นเคลือบมีผลต่อลักษณะการป้องกันการกัดกร่อนของโลหะ ไม่ว่าจะเป็นระบบที่ใช้สารเคลือบเป็นการป้องกันการสัมผัสความชื้นและสิ่งต่างๆที่จะทำให้เกิดการกัดกร่อน การใช้สารยับยั้งร่วมด้วยเพื่อยับยั้งการกัดกร่อน หรือการใช้ระบบการป้องกันแบบแคโทด ซึ่งการเคลือบอาจมีชั้นเดียวหรือเป็นระบบที่มีชั้นเคลือบหลายชั้นก็ได้ โดยในระบบที่มีการเคลือบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หลายชั้นสามารถแบ่งออกเป็นชั้นที่มีหน้าที่แตกต่างกันไปยกตัวอย่างเช่น ชั้นรองพื้น (Primer) เพื่อเพิ่มความสามารถในการยึดเกาะของชั้นเคลือบ ชั้นที่มีความยืดหยุ่น (Undercoat) เพื่อช่วยในการคงทนของสารเคลือบ และชั้นบนสุดของชั้นเคลือบ (Top coat) เพื่อเพิ่มการป้องกันจากสิ่งแวดล้อมภายนอกแสดงดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 ระบบชั้นเคลือบหลายชั้น

### 2.2.1 การเคลือบเพื่อปกป้องผิวของโลหะจากสิ่งแวดล้อมภายนอก (Barrier coating)

การกัดกร่อนจะไม่สามารถเกิดขึ้นได้หากความชื้นหรือสิ่งแวดล้อมภายนอกที่ก่อให้เกิดการกัดกร่อนไม่สามารถเข้ามาสัมผัสกับโลหะได้ แต่เมื่อชั้นเคลือบเกิดช่องว่างหรือช่องโหว่ซึ่งส่งผลให้สิ่งแวดล้อมภายนอกเข้าไปสัมผัสกับโลหะได้ คุณสมบัติทางไฟฟ้าของชั้นเคลือบสามารถส่งผลต่อการกัดกร่อนที่เริ่มที่ช่องโหว่นั้นๆ โดยในช่วงที่เกิดการกัดกร่อนกระแสทั้งหมดที่เกิดขึ้นที่แอโนดและแคโทดมีค่าเท่ากัน

$$\sum I_{A,j} = \sum I_{C,k} \quad (2.19)$$

จากสมการข้างต้นสามารถกระจายเป็นค่าความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าต่อพื้นที่เท่ากับ A ได้ดังสมการ

$$i_{A,breach} A_{breach} + i_{A,coating} A_{coating} = i_{C,breach} A_{breach} + i_{C,coating} A_{coating} \quad (2.20)$$

โดยที่ A และ C แทนที่แอโนดและแคโทดตามลำดับ และ breach แทนการเกิดในพื้นที่ช่องโหว่ของชั้นเคลือบจากสมการที่ 20 สามารถจัดรูปได้

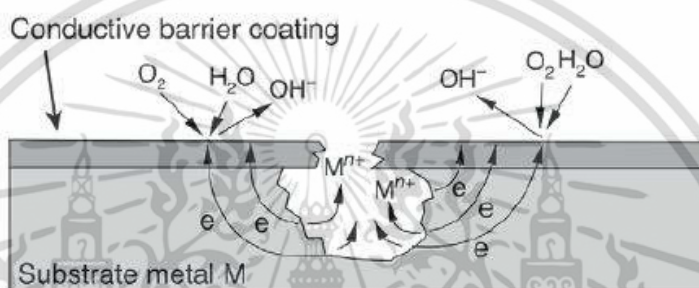
$$i_{A,breach} = \frac{i_{C,breach} A_{breach} + i_{C,coating} A_{coating} - i_{A,coating} A_{coating}}{A_{breach}} \quad (2.21)$$

สำหรับในส่วนที่มีชั้นปกป้องไม่เกิดการกัดกร่อนดังนั้นกระแสไฟฟ้าที่จุดนี้ ( $i_{A,coating}$ ) จึงเท่ากับศูนย์

$$i_{A,breach} = i_{C,breach} + i_{C,coating} \frac{A_{coating}}{A_{breach}} \quad (2.22)$$

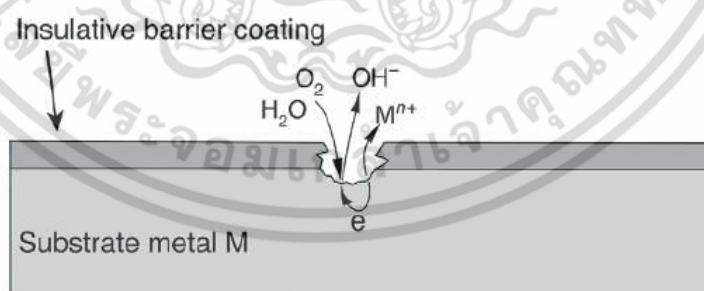
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการจะเห็นได้ว่าการละลายของโลหะที่แอโนดที่ช่องโหว่ขึ้นอยู่กับกระแสไฟฟ้าที่แคโทดที่ช่องโหว่ และกระแสไฟฟ้าที่แคโทดคูณกับสัดส่วนของพื้นที่ระหว่างพื้นที่ที่เคลือบและพื้นที่ช่องโหว่ ชั้นเคลือบที่มีความสามารถในการนำไฟฟ้ามากจะส่งผลให้ค่า  $I_{C,coating}$  มีค่าสูงมากขึ้นด้วย และด้วยสัดส่วนระหว่างพื้นที่ที่เคลือบต่อพื้นที่ช่องโหว่มักจะมีค่ามากส่งผลให้การกัดกร่อนหรือค่า  $i_{A,coating}$  มีค่าสูงมากทำให้การกัดกร่อนเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่อง ดังนั้นจึงเป็นการไม่ควรหากจะใช้วิธีในการใช้ชั้นเคลือบเป็นโลหะมีตระกูลมากกว่าเช่น ทองแดง เงิน หรือทอง ในการป้องกันโลหะที่มีตระกูลต่ำกว่าเช่น อะลูมิเนียม เหล็กกล้า เนื่องจากชั้นเคลือบชนิดนี้มีความสามารถในการนำไฟฟ้าสูงดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 การใช้สารเคลือบเป็นโลหะที่มีความสามารถในการนำไฟฟ้า

ดังนั้นจึงนิยมในการใช้พอลิเมอร์ในการเคลือบผิวเพื่อที่ว่าจะเป็นฉนวนและไม่ทำให้เกิดปฏิกิริยารีดักชันของออกซิเจนและไฮโดรเจนที่แคโทดได้ง่าย ในกรณีที่ที่ดีที่สุดที่ชั้นเคลือบไม่นำไฟฟ้าเลยจะส่งผลให้  $I_{C,coating}$  เท่ากับศูนย์อัตราการกัดกร่อนจะเกิดจะเท่ากับกระแสที่เกิดขึ้นที่ช่องโหว่ กล่าวคือเกิดการกัดกร่อนที่ช่องโหว่นั้น ดังแสดงในรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 การใช้สารเคลือบที่ไม่นำไฟฟ้า

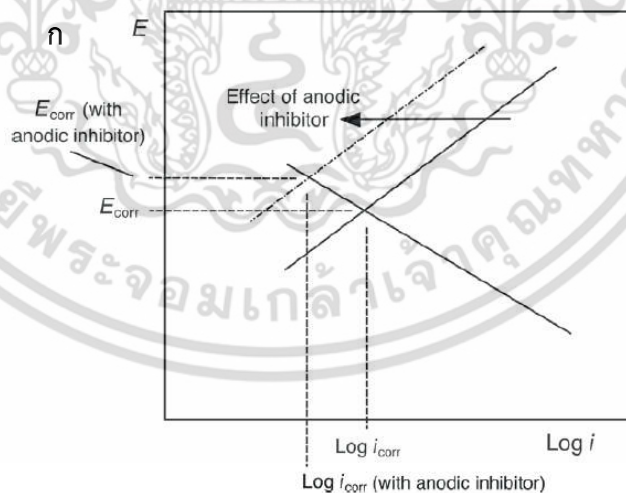
ชั้นเคลือบที่เป็นสารอินทรีย์ เช่น อีพอกซี อัลคิต อะคริลิก และอื่นๆ ซึ่งปกติแล้วอาจเคลือบด้วยวิธีการใช้สเปรย์หรือทา ชั้นเคลือบประเภทนี้สามารถดูดซับความชื้นและรักษาสมดุลความชื้นระหว่างภายในและภายนอกชั้นเคลือบได้ ในกรณีที่ชั้นเคลือบผิวมีความสามารถในการยึดติดที่ดีน้ำอาจเข้าไปอยู่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

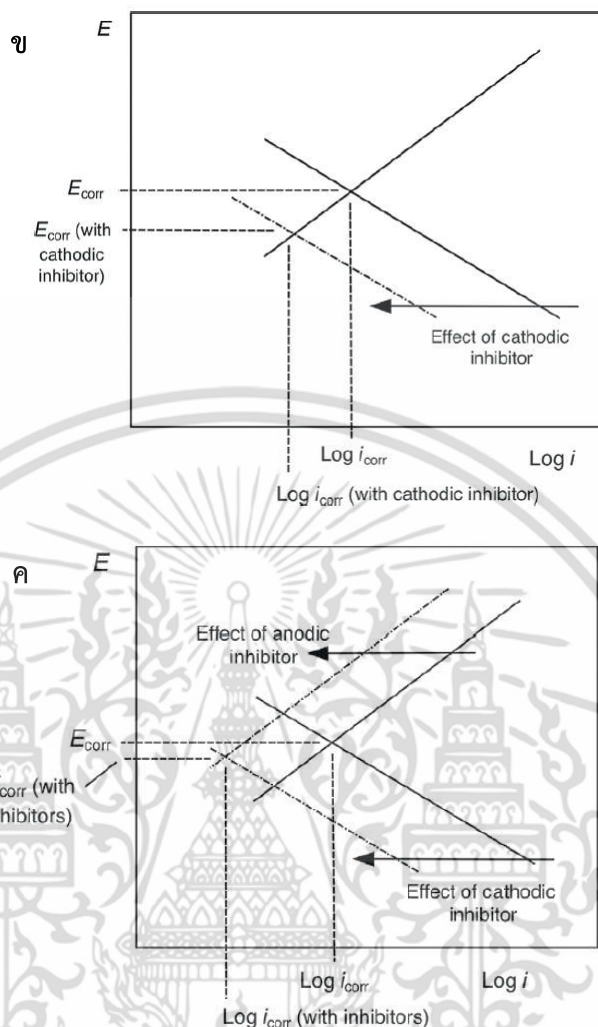
ภายในโครงสร้างของชั้นเคลือบได้แต่จะไม่ไปสะสมที่บริเวณระหว่างชั้นเคลือบและผิวของโลหะ แต่อาจเกิดกรณีที่ชั้นเคลือบมีการยึดเกาะได้ไม่ดีอาจมีสาเหตุมาจากคุณสมบัติของชั้นเคลือบหรือคุณสมบัติของโลหะส่งผลให้มีความชื้นเข้าไปสะสมในระหว่างชั้นเคลือบกับผิวของโลหะได้เกิดเป็นลักษณะคล้ายตุ่ม (Blister) หรือการพองตัวของชั้นเคลือบซึ่งจะนำไปสู่การกัดกร่อนได้

สำหรับชั้นเคลือบอนินทรีย์ อาทิ ออกไซด์ ไนไตรด์ คาร์ไบด์ โดยส่วนใหญ่จะใช้วิธีการแตกตัวการระเหยในการเคลือบ ซึ่งชั้นเคลือบชนิดนี้จะไม่ค่อยยอมให้ความชื้นแพร่เข้ามา แต่ชั้นเคลือบสามารถเปราะหรือแตกหักได้ การเคลือบด้วยเคลือบอนินทรีย์สามารถเคลือบโดยการให้เกิดการก่อตัวของผิวของโลหะได้โดยตรง ซึ่งการใช้วิธีนี้จะทำให้น้ำซึมผ่านได้ยากและรูพรุนบนเนื้อของชั้นเคลือบเกิดได้น้อยขึ้น

2.2.2 การเคลือบเพื่อปกป้องผิวของโลหะโดยใช้ร่วมกับสารยับยั้งการกัดกร่อน โดยปกติแล้วสารยับยั้งการกัดกร่อนที่ใช้ร่วมกับสารเคลือบจะใช้ในปริมาณที่ไม่มาก สารยับยั้งการกัดกร่อนสามารถแบ่งออกเป็นสองประเภทด้วยกัน หนึ่งคือสารยับยั้งการกัดกร่อนชนิดแอโนด (Anodic inhibitor) ซึ่งจะช่วยลดกระแสการกัดกร่อนที่แอโนดได้แต่ค่า  $E_{corr}$  จะเพิ่มขึ้นสังเกตได้จากรูปที่ 2.7 (ก) และสารยับยั้งการกัดกร่อนที่แคโทดที่จะลดการเกิดปฏิกิริยาที่แคโทด (Cathodic inhibitor) ทำให้ค่ากระแสการกัดกร่อนต่ำลงและทำให้ค่า  $E_{corr}$  ต่ำลงด้วยดังรูปที่ 2.7 (ข) สารยับยั้งการกัดกร่อนทั้งสองแบบส่งผลให้กราฟมีการเลื่อนไปในทิศทางต่างกันนั่นเอง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



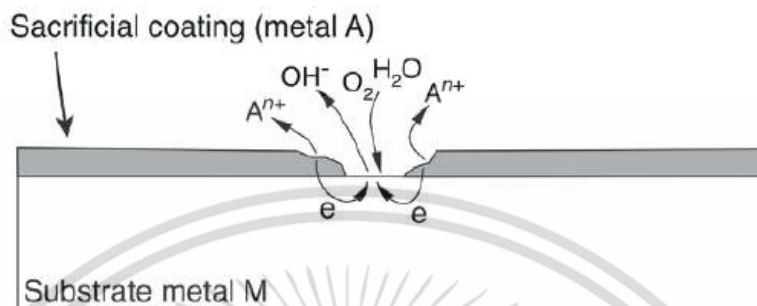
รูปที่ 2.7 แสดงผลของสารยับยั้งการกัดกร่อน (ก) ชนิดแอโนด (ข) ชนิดแคโทด และ (ค) ชนิดแอโนดและแคโทด

สารยับยั้งการกัดกร่อนที่ในอดีตเคยมีการใช้งานอย่างแพร่หลายเนื่องจากมีประสิทธิภาพในการยับยั้งการกัดกร่อนสูงคือเฮกซะวาเลนต์โครเมียม (Hexavalent Chromium) แต่สารยับยั้งชนิดนี้มีความเป็นพิษสูงทำให้ต่อมาได้มีการห้ามใช้

**2.2.3 การเคลือบแบบแคโทด** การเคลือบในลักษณะนี้สิ่งื่อนำมาเคลือบสามารถเป็นได้ทั้งโลหะและวัสดุที่มีสมบัติเป็นกึ่งตัวนำ โดยโลหะที่นำมาเป็นสารเคลือบจะต้องเป็นโลหะที่สูญเสียอิเล็กตรอนได้ง่ายกว่าจึงจะสามารถนำมาปกป้องโลหะได้ และวัสดุกึ่งตัวนำที่จะนำมาใช้ต้องเป็นชนิด N

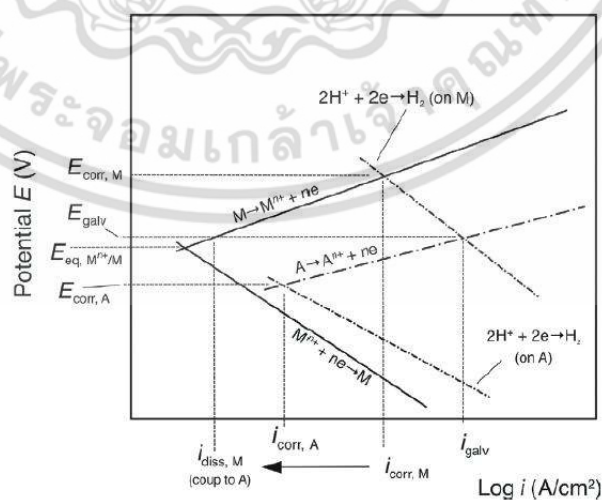
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารเคลือบแบบจ่ายอิเล็กตรอนแทน ตัวอย่างที่เห็นได้อย่างแพร่หลายสำหรับการเคลือบประเภทนี้คือ เหล็กกล้าไนซ์ซึ่งก็คือเหล็กกล้าคาร์บอนที่ถูกเคลือบด้วยสังกะสี โดยที่การกัดกร่อนจะเกิดที่ชั้นเคลือบผิวแทนทำให้สามารถปกป้องเหล็กกล้าคาร์บอนได้ดังแสดงในรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 การเคลือบโดยที่ชั้นเคลือบสูญเสียอิเล็กตรอนแทนโลหะ

สำหรับกราฟโพลาร์ไรเซชันสามารถเกิดปรากฏการณ์ดังต่อไปนี้ โดยโลหะจะมีค่าศักย์ไฟฟ้าที่ทำให้เกิดการกัดกร่อนเท่ากับค่า  $E_{m,corr}$  และมีกระแสการกัดกร่อนเท่ากับ  $i_{M,corr}$  ในกรณีที่โลหะ M เชื่อมต่อกับโลหะ A ซึ่งมีความสามารถในการสูญเสียอิเล็กตรอนได้ง่ายกว่า ซึ่งโลหะ A จะมีค่า  $E_{corr}$  เป็นลบมากกว่าโลหะ M โลหะทั้ง M และ A ที่เชื่อมต่อกันจะมีค่าศักย์ไฟฟ้ารวมกันอยู่ที่  $E_{galv}$  ค่ากระแสการกัดกร่อนของโลหะ M จะลดลงเหลือเท่ากับค่า  $i_{diss,M}$  และสามารถลงต่อไปได้อีกจนกว่าค่าศักย์ไฟฟ้าจะไม่เกินค่า  $E_{eq,M^{n+}/M}$  ซึ่งจะตรงกันข้ามกับโลหะ A ที่ค่ากระแสการกัดกร่อนจะเพิ่มขึ้นจากค่า  $i_{A,corr}$  ไปสู่ค่า  $i_{galv}$  เพื่อให้โลหะ M สูญเสียอิเล็กตรอนได้น้อยลง กล่าวคือโลหะชนิด A เสียอิเล็กตรอนแทนโลหะชนิด M นั้นเอง ดังรูปที่ 2.9

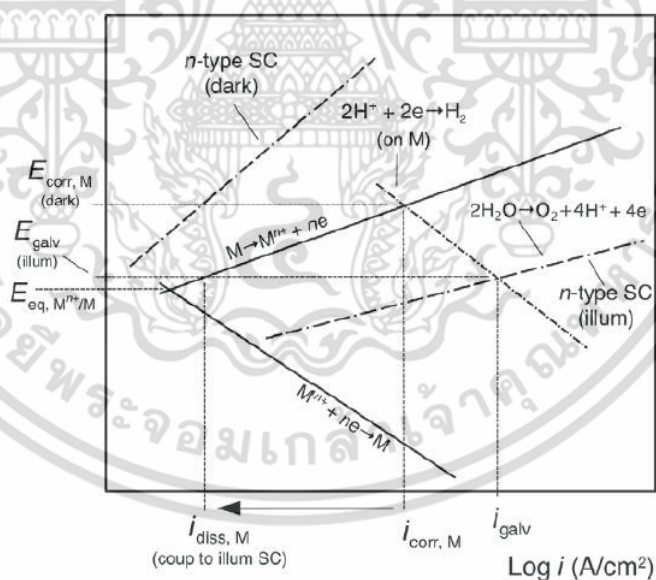


รูปที่ 2.9 แสดงผลของการเคลือบแบบแคโทดโดยใช้สารเคลือบที่สูญเสียอิเล็กตรอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การใช้การเคลือบในลักษณะนี้สารเคลือบจะต้องนำไฟฟ้าและเชื่อมอยู่กับโลหะจึงจะสามารถช่วยป้องกันการกัดกร่อนได้ โดยวิธีการที่ใช้ในการเคลือบในลักษณะนี้มีหลายวิธีอาทิ การจุ่มร้อน การใช้สเปรย์ ความร้อนสูง หรือการเคลือบด้วยประจุไฟฟ้าในการให้สารเคลือบติดกับพื้นผิวของโลหะ บางกรณีอาจทำให้โลหะที่จะนำมาเคลือบอยู่ในรูปของอนุภาคและพ่นลงไปบนสารยึดอินทรีย์อาทิ อีพอกซี ยาง หรือไวนิล เป็นต้น

**สารเคลือบกึ่งตัวนำชนิด N** การป้องกันแบบแคโทดสามารถใช้สารเคลือบที่มีคุณสมบัติเป็นกึ่งตัวนำไฟฟ้าได้ ซึ่งการใช้สารเคลือบชนิดนี้เป็นวิธีป้องกันแบบแคโทดแต่ไม่ใช้การใช้วิธีการสละอิเล็กตรอนของสารเคลือบ แต่ใช้คุณลักษณะที่ไวต่อแสงของสารเคลือบกึ่งตัวนำชนิด N ในการป้องกัน ในกรณีนี้ อิเล็กตรอนที่ได้จะมาจากสารเคลือบที่อยู่ในสภาวะที่โดนแสงแดดส่งผลให้สารเคลือบสามารถสร้างอิเล็กตรอนมาเพื่อนำไปใช้ในปฏิกิริยาออกซิเดชันได้ เช่น การออกซิเดชันในน้ำ ด้วยคุณสมบัตินี้ส่งผลให้โลหะที่ถูกเคลือบมีค่าศักย์ไฟฟ้าต่ำลงจาก  $E_{\text{corr},M}(\text{dark})$  ไปสู่จุด  $E_{\text{galv}}(\text{illum})$  และค่าการละลายหรือเกิดการกัดกร่อนลดลงจาก  $i_{\text{corr},M}$  ไปสู่  $i_{\text{diss},M}(\text{coup to illum SC})$  ดังรูปที่ 2.10 เนื่องจากข้อจำกัดการใช้งานชนิดที่ต้องการแสง ดังนั้นการป้องกันด้วยสารเคลือบชนิดนี้จำเป็นที่จะต้องใช้เวลากลางวันหรือเวลาที่มีแสง



รูปที่ 2.10 แสดงผลของการเคลือบแบบแคโทดโดยใช้สารเคลือบที่เป็นสารกึ่งตัวนำชนิด N ที่มีคุณสมบัติไวต่อแสง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.3 เทคโนโลยีระดับนาโนในการป้องกันการกัดกร่อน [3]

การป้องกันการกัดกร่อนมีทำได้หลายวิธี หนึ่งในเหล่านั้นคือการเคลือบซึ่งเป็นวิธีป้องกันการกัดกร่อนที่ทำได้ง่าย ได้ผลดี และสามารถใช้ร่วมกับวัสดุระดับนาโนได้ค่อนข้างดี สารเคลือบนาโนสามารถตีความได้หลายแบบ ไม่ว่าจะเป็นความหนาของชั้นเคลือบที่มีความหนาระดับนาโน หรือชั้นเคลือบอาจแบ่งเป็นส่วนที่มีอนุภาคระดับนาโนกระจายตัวอยู่ในชั้นเคลือบ ดังนั้นสารเคลือบนาโนแบ่งได้เป็นสองแบบหลักๆคือ สารเคลือบที่มีโครงสร้างระดับนาโน และสารเคลือบที่มีส่วนประกอบระดับนาโนปนอยู่จำแนกได้ดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 สารเคลือบระดับนาโนในการป้องกันการกัดกร่อน

ชั้นเคลือบบาง (Thin films)	สารเคลือบที่มีเกรนระดับนาโน (Nanograined coatings)	สารเคลือบที่มีส่วนประกอบของวัสดุนาโน (Nanocomposite coatings)	ชั้นเคลือบอัจฉริยะ (Smart coatings)
เซรามิก โลหะ และสารประกอบนาโน (เกรนระดับนาโนหรือไม่โคร)	เซรามิก โลหะ และสารประกอบนาโน (ชั้นหนาหรือบาง)	สารประกอบพอลิเมอร์-เซรามิกสารประกอบโลหะ-เซรามิก และสารประกอบพอลิเมอร์-โลหะ	ชั้นเคลือบที่สามารถสร้างด้วยตัวเอง และชั้นเคลือบพอลิเมอร์อัจฉริยะ

ชั้นเคลือบระดับนาโนสามารถเกิดขึ้นได้หลายรูปแบบ ยกตัวอย่างเช่น การใช้วิธีโซล-เจล [3] การให้ศักย์ไฟฟ้า [4] การถ่ายเทประจุไฟฟ้า [5] สนามแม่เหล็ก [6] แสงเลเซอร์ [7] และอื่นๆ เป็นต้น ซึ่งวิธีการต่างๆเหล่านี้ขึ้นอยู่กับลักษณะการกัดกร่อน อุณหภูมิขณะเกิดการกัดกร่อน และความต้านทานในการกัดกร่อนของวัสดุ

การพัฒนาสารเคลือบโดยใช้สารเคลือบผิวร่วมกับวัสดุระดับนาโนเพื่อพัฒนาคุณสมบัติเชิงกล ความสามารถในการต้านทานรอย การปกป้องจากรังสีอัลตราไวโอเล็ต ความสามารถในการกันน้ำ และความสามารถในการป้องกันการซึมผ่านของแก๊ส ยกตัวอย่างเช่น การใช้ฮิพอกซีร่วมกับอนุภาคระดับนาโนซิลิกาหรืออะลูมินาในการเพิ่มความต้านทานในการป้องกันรอยขีดข่วน อีกทั้งยังช่วยในการลดความมีรู

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พูนของสารเคลือบและเส้นทางที่สิ่งแวดล้อมภายนอกจะแพร่ผ่านเข้ามาได้ส่งผลให้ความสามารถในการป้องกันการกัดกร่อนเพิ่มมากขึ้น [8]

## 2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

เทคโนโลยีการเคลือบโดยใช้สารยับยั้งการกัดกร่อนร่วมมีมาเป็นเวลานาน โดยในยุคแรกของการใช้สารยับยั้งการกัดกร่อนนิยมใช้เฮกซะวาเลนต์โครเมียม (Hexavalent chromium) ซึ่งมีความไวต่อการกัดกร่อนและสร้างออกไซด์ที่สามารถยับยั้งการกัดกร่อนได้ดี โดยคุณ M. Kendig และคณะ [9] ได้ทำการศึกษาประสิทธิภาพในการป้องกันการกัดกร่อนของเฮกซะวาเลนต์โครเมียมเพื่อป้องกันการกัดกร่อนของอะลูมิเนียมอัลลอยด์ พบว่าเฮกซะวาเลนต์โครเมียมสามารถแสดงประสิทธิภาพในการยับยั้งการกัดกร่อนได้ดี เนื่องจากสามารถสร้างชั้นออกไซด์ที่เกิดจากโครเมียมและสามารถทำให้เกิดชั้นออกไซด์ของอะลูมิเนียมได้อีกด้วย แต่ถึงแม้ว่าเฮกซะวาเลนต์โครเมียมจะให้ประสิทธิภาพในการป้องกันการกัดกร่อนที่สูง แต่ในทางกลับกันกลับมีความเป็นพิษที่สูงเช่นกันทำให้มีกฎหมายในการนำมาควบคุมการใช้งาน

ดังนั้นการที่สามารถลดความเป็นพิษของโครเมียมหรือปริมาณการใช้โครเมียมให้น้อยลงจึงมีความสำคัญที่จะศึกษาค้นคว้า ในปี 2001 คุณ N. N. Voevodin และคณะ [10] ได้สนใจศึกษาการเคลือบแบบโซล-เจลร่วมที่มีการบรรจุสารยับยั้งประเภทโครเมียม จากผลการทดลองพบว่าสามารถใช้สารยับยั้งการกัดกร่อนในปริมาณที่น้อยลงเพื่อให้ได้ประสิทธิภาพในการป้องกันการกัดกร่อนที่มีประสิทธิภาพเทียบเท่าหรือเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากชั้นเคลือบผิวโซล-เจลสามารถช่วยในการเพิ่มความสามารถในการป้องกันแบบปกป้องได้ (barrier property)

ต่อมาได้มีนักวิจัยหลายคนพยายามศึกษาค้นคว้าเพื่อหาวิธีการป้องกันการกัดกร่อนเพื่อให้ได้ประสิทธิภาพเทียบกับโครเมียมแต่ไม่เป็นพิษกับสิ่งแวดล้อม ยกตัวอย่างเช่น คุณ G. Bierwagen และคณะ [11] ได้ทำการพัฒนาสารเคลือบผิวโดยใช้แมกนีเซียมในการป้องกันการกัดกร่อนให้กับโลหะอะลูมิเนียมซึ่งใช้ในงานการบิน อากาศยาน ซึ่งการใช้แมกนีเซียมเป็นชั้นเคลือบสามารถช่วยเพิ่มประสิทธิภาพได้ใกล้เคียงกับโครเมียม แต่การใช้แมกนีเซียมในสารเคลือบจะต้องใช้ในระบบสารเคลือบหลายชั้นโดยให้ชั้นแมกนีเซียมอยู่ในชั้นรองพื้น

การเลือกใช้วัสดุนาโนร่วมกับสารเคลือบนับว่าเป็นอีกวิธีหนึ่งที่น่าสนใจ โดยคุณ N. Wang และคณะ [12] ได้ศึกษาการใช้อนุภาคซิลิกาที่มีรูพรุนต่างชนิดกันในการที่นำไปใช้ร่วมกับสารเคลือบเพื่อช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการป้องกันการกัดกร่อน อนุภาคซิลิกาที่ถูกนำมาศึกษาคืออนุภาคชนิด MCM-41

และ MMT ซึ่งมีลักษณะที่แตกต่างกัน พบว่าการใช้อุณหภูมิทั้งสองชนิดสามารถช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการป้องกันการกัดกร่อนได้ โดยเฉพาะอย่างยิ่งอุณหภูมิที่มีรูพรุนชนิดเมโซชนิด MCM-41 เพราะพันธะโคเวเลนต์ที่สร้างขึ้นที่บริเวณรอยต่อระหว่างเรซินที่มีความแข็งแรงน้อยกว่าพันธะที่เกิดระหว่างอนุภาคกับเรซิน ซึ่งอนุภาคที่มีรูพรุนชนิดเมโซสามารถเกิดพันธะภายในรูพรุนได้อีกด้วยทำให้พันธะมีความแข็งแรงยึดแน่นส่งผลให้ความสามารถในการป้องกันการกัดกร่อนเพิ่มมากขึ้น

ต่อมาคุณ I. Recloux และคณะ [13] ได้พัฒนาโดยการใช้วิธีการโซล-เจลในการสร้างชั้นเคลือบซิลิกาที่มีรูพรุนชนิดเมโซเพื่อใช้ในการบรรจุเบนโซไตรอะโซลซึ่งเป็นสารยับยั้งการกัดกร่อนชนิดอินทรีย์ที่ไม่มีความเป็นพิษต่อธรรมชาติและสิ่งแวดล้อมเพื่อใช้ในการป้องกันการกัดกร่อนของอะลูมิเนียมอัลลอยด์ชนิด 2024 งานวิจัยนี้ได้ศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อลักษณะรูพรุนของชั้นเคลือบและปริมาณของสารยับยั้งที่จะก่อให้เกิดการสร้างชั้นของสารยับยั้งได้ โดยผลของการปลดปล่อยเบนโซไตรอะโซลจากรูพรุนของชั้นเคลือบผิว พบว่าการปลดปล่อยเบนโซไตรอะโซลไม่ขึ้นการค่าความเป็นกรด-เบส การปลดปล่อยเบนโซไตรอะโซลทั้งสองสภาวะเข้าสู่จุดสมดุลในเวลาใกล้เคียงกัน ทั้งยังใช้เวลาสั้นมากในการเข้าสู่จุดสมดุล นั้นหมายความว่าชั้นเคลือบผิวซิลิกาไม่สามารถควบคุมการปลดปล่อยได้ แต่ทั้งนี้ถึงแม้ว่าชั้นเคลือบผิวจะไม่สามารถควบคุมการปลดปล่อยได้แต่ชั้นเคลือบผิวสามารถช่วยชะลอการเกิดการกัดกร่อนได้สังเกตโดยใช้เทคนิคการสั่นสะเทือนของขั้ว (Scanning vibration electrode technique, SVET) และภาพถ่าย optical

เนื่องจากปัญหาการควบคุมการปลดปล่อยของสารยับยั้ง ส่งผลให้ในงานวิจัยที่พยายามจะแก้ปัญหาในส่วนนี้ยกตัวอย่างเช่น คุณ E.V. Skorb และคณะ [14] พัฒนาอนุภาคซิลิกาที่มีรูพรุนชนิดเมโซด้วยการเพิ่มคุณสมบัติที่ผิวของอนุภาคโดยหลังจากที่สังเคราะห์แล้วใช้พอลิเอทิลีนไดออกไซด์ที่มีทั้งประจุบวกและประจุลบสลับกันเพื่อช่วยในการควบคุมการปลดปล่อยของสารยับยั้งการกัดกร่อน และคุณ M. Yeganeh และคณะ [15] ทำการปรับแต่งผิวของอนุภาคซิลิกาโดยใช้หมู่เอมีนและไอออนเชิงซ้อนในการปรับแต่งหมู่ซิลานอลที่ผิวของอนุภาค ผลคือการปลดปล่อยสารยับยั้งขึ้นอยู่กับปริมาณกรด-ด่างทำให้สามารถควบคุมการปลดปล่อยช่วยในการป้องกันการกัดกร่อน

## บทที่ 3

### วิธีการดำเนินงาน

วิทยานิพนธ์ศึกษาการประยุกต์ใช้ออนุภาคนาโนซิลิกาที่มีรูพรุนชนิดเมโซในการเคลือบเหล็กคาร์บอน อนุภาคถูกสังเคราะห์ด้วยวิธีการควบแน่นแบบร่วม (Sol-gel based cocondensation method) โดยใช้เตตระเอทิลออร์โธซิลิเกต (Tetraethyl Orthosilicate; TEOS) เป็นสารตั้งต้นร่วมกับสารตั้งต้นซิลิกาที่มีหมู่อินทรีย์ (Organosilane) ที่ต่างชนิดกันคือ อะมิโนโพรพิลไตรเอทอกซีไซเลน (3-Aminopropyltriethoxysilane; APTES) และเมอร์แคปโตโพรพิลไตรเมทอกซีไซเลน (3-Mercaptopropyltrimethoxysilane; MPTMS) โดยใช้สารลดแรงตึงผิวชนิดประจุบวกเป็นสารกำหนดโครงสร้าง ใช้น้ำเป็นตัวทำละลาย ทำปฏิกิริยาในสภาวะต่างที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส อนุภาคที่ได้จะถูกนำไปใช้ร่วมกับสารยึดหรืออีพอกซีเรซินซึ่งใช้ไกลซิโดอกซีโพรพิลไตรเมทอกซีไซเลน (3-glycidoxypropyltrimethoxysilane) เป็นสารยึดของสารเคลือบ

#### 3.1 สารเคมี

1. เตตระเอทิลออร์โธซิลิเกต (Tetraethyl orthosilicate; TEOS)
2. เฮกซะเดซิลไตรเมทิลแอมโมเนียมโบรไมด์ (Hexadecyltrimethyl ammonium bromide; CTAB)
3. เอทิลอะซิเตท (Ethyl acetate; EtOAc)
4. อะมิโนโพรพิลไตรเอทอกซีไซเลน (3-Aminopropyltriethoxysilane; APTES)
5. เมอร์แคปโตโพรพิลไตรเมทอกซีไซเลน (3-Mercaptopropyltrimethoxysilane; MPTMS)
6. แอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ (Ammonium hydroxide;  $\text{NH}_4\text{OH}$ )
7. กรดอะซิติก (Acetic acid)
8. เอทานอล (Ethanol)
9. เมทานอล (Methanol)
10. น้ำกลั่น (Deionized water)
11. เบนโซไตรอะโซล (Benzotriazole; BTA)
12. ไกลซิโดอกซีโพรพิลไตรเมทอกซีไซเลน (3-glycidoxypropyltrimethoxysilane)
13. ซิลิกาเจล (Silica gel)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้

1. ช้อนตักสาร (Spatula)
2. กระจกบอทวง (Cylinder)
3. ปิเปต และไมโครปิเปต (Pipette and Micropipette)
4. แท่งกวนแม่เหล็ก (Magnetic bar)
5. เครื่องกวนชนิดควบคุมอุณหภูมิ (Magnetic stirrer)
6. เครื่องเหวี่ยงแยก (Centrifuge)
7. เครื่องควบคุมอุณหภูมิ (Temperature controller)
8. หลอดเหวี่ยงแยกขนาด 15 มิลลิลิตร (Centrifugal tube 15 mL.)
9. หลอดเหวี่ยงแยกขนาด 50 มิลลิลิตร (Centrifugal tube 50 mL.)
10. แผ่นพาราฟิล์ม (Parafilm)
11. เครื่องชั่งน้ำหนัก (Balance)
12. เครื่องกระจายอนุภาค (Sonicater)
13. ปีกเกอร์ (Beaker)
14. ขวดก้นกลม (Round bottom flask)
15. เครื่องแบบหมุน (Home-build spin coater)
16. เครื่องตรวจวัดค่าการดูดกลืนแสง (UV-vis spectrophotometer)
17. เครื่องเขย่าแบบปรับอุณหภูมิได้ (Shaking incubator)
18. ตู้อบสูญญากาศ (Vacuum dryer)
19. กระจกทรายเบอร์ 200
20. กระจกทรายเบอร์ 1000
21. เครื่องขัดเหล็ก

## 3.3 วิธีการทดลอง

### 3.3.1 การสังเคราะห์อนุภาคซิลิกาที่มีรูพรุนชนิดเมโซ

1. ทำการสังเคราะห์โดยการเตรียมสารละลาย CTAB ความเข้มข้น 54.8 มิลลิโมลาร์ ปริมาตร 5 มิลลิลิตร กรณีที่อยู่ในเครื่องปฏิกรณ์ที่บรรจุน้ำ 100 มิลลิลิตร ปั่นกวนประมาณ 2 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เพื่อให้สารละลาย CTAB กระจายตัวได้ดี โดยปรับอุณหภูมิของเครื่องทำความเย็นที่ใช้เท่ากับ 20 องศาเซลเซียส

2. ทำการเติม EtOAc ปริมาณ 0.88 มิลลิลิตร และเติมสารละลายแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ ( $\text{NH}_4\text{OH}$ ) ปริมาณ 2.7 มิลลิลิตรลงในเครื่องปฏิกรณ์ เพื่อให้ CTAB เกิดการจัดเรียงตัวแบบไมเซลล์ (Micell) ในสภาวะต่าง ปั่นกวนประมาณ 2 นาที
3. เติม TEOS ปริมาณ 0.5 มิลลิลิตร กวนทิ้งไว้ประมาณ 5 นาที อนุภาคจะเริ่มเกิดขึ้นในขั้นตอนนี้สังเกตได้จากสีของสารละลายที่เปลี่ยนแปลงไปเป็นสีขาวขุ่น
4. เติมน้ำกลั่นลงไปเพื่อเจือจางด้วยน้ำกลั่นปริมาตร 36.9 มิลลิลิตร ลงในปฏิกรณ์แล้วปั่นกวนต่ออีก 30 นาทีเพื่อปล่อยให้ปฏิกิริยาเกิดอย่างสมบูรณ์
5. ทิ้งไว้เพื่อให้อนุภาคตกตะกอนเพื่อให้สามารถแยกอนุภาคออกจากสารละลายได้ง่ายขึ้น
6. สารละลายอนุภาคจะถูกนำไปแยกเอาน้ำออกโดยใช้เครื่องเหวี่ยงแยกความเร็วรอบ 4,000 – 9,000 รอบต่อนาทีขึ้นอยู่กับความยากง่ายในการตกตะกอนของอนุภาค โดยทำการเหวี่ยงแยก 2 ครั้งเพื่อทำการกำจัดสารเคมีส่วนเกินออก
7. ทำการกำจัด CTAB ออกจากโครงสร้างรูพรุนของอนุภาคโดยใช้กรด Acetic ปริมาณร้อยละ 10 ของปริมาณเอทานอลในขณะนั้น จากนั้นนำไปผ่านการเหวี่ยงแยกอนุภาคออกเพื่อแยกเอาสารละลายเอทานอลที่ผสมกับกรดอะซิติกออกจากอนุภาค
8. อนุภาคที่เหลืออยู่จะถูกเก็บอยู่ในตัวทำละลายเอทานอล

### 3.3.2 การสังเคราะห์อนุภาคซิลิกาที่มีรูพรุนชนิดเมโซที่ถูกปรับแต่งด้วยหมู่อินทรีย์

#### 1. การสังเคราะห์ร่วมกับหมู่เอมีน

ทำการสังเคราะห์ด้วยวิธีเดียวกับการเตรียมอนุภาคซิลิกาที่มีรูพรุนชนิดเมโซที่ไม่ผ่านการปรับแต่งหมู่ฟังก์ชัน แต่ในขั้นตอนการเติมสารเตตระเอทิลอโรซิเลตจะมีการเติมสารออร์กาโนซิลเลนลงไปร่วมด้วยเป็นส่วนโดยปริมาตรร้อยละ 20 ของปริมาตรเตตระเอทิลอโรซิเลต โดยใช้ออร์กาโนซิลเลนซีอะมิโนโพรพิลไตรเอทอกซีซิลเลน (3-aminopropyltriethoxysilane) เตตระเอทิลอโรซิเลตและออร์กาโนซิลเลนจะถูกผสมเข้ากันเป็นเนื้อเดียวกันก่อนเติมลงไปในการปฏิกิริยา

## 2. การสังเคราะห์ร่วมกับหมู่ไทออล

ทำการสังเคราะห์ด้วยวิธีเดียวกับการเตรียมอนุภาคซิลิกาที่มีรูพรุนชนิดเมโซที่ไม่ผ่านการปรับแต่งหมู่ฟังก์ชัน แต่ในขั้นตอนการเติมสารเตตระเอทิลออร์โธซิลิเกตจะมีการเติมสารออร์กาโนซิลเลนลงไปด้วยเป็นส่วนหนึ่งโดยปริมาตรร้อยละ 20 ของปริมาตรเตตระเอทิลออร์โธซิลิเกต โดยใช้ออร์กาโนซิลเลนชื่อเมอร์แคปโตโพรพิลไตรเมทอกซีซิลเลน (3-mercaptopropyltrimethoxysilane) เตตระเอทิลออร์โธซิลิเกตและออร์กาโนซิลเลนจะถูกผสมเข้าจนเป็นเนื้อเดียวกันก่อนเติมลงไปในปฏิกิริยา

### 3.3.3 การบรรจุ BTA ในอนุภาคซิลิกาที่มีรูพรุนชนิดเมโซ

1. เตรียมสารละลายอนุภาค (อนุภาค/เอทานอล) แต่ละชนิด (มีหมู่อินทรีย์และไม่มีหมู่อินทรีย์) ที่ความเข้มข้น 0.01 กรัมต่อมิลลิลิตร
2. ผสมสารละลายอนุภาคร่วมกับสารละลายเบนโซไตรอะโซลความเข้มข้น 6 โมลาร์ในปริมาตรที่สารละลายทั้งสองเท่ากัน (ยกตัวอย่างเช่น สารละลายอนุภาค 0.01 กรัมต่อมิลลิลิตรเป็นปริมาตร 1 มิลลิลิตรต่อสารละลายเบนโซไตรอะโซลความเข้มข้น 6 โมลาร์ 1 มิลลิลิตร) อนุภาคที่อยู่ในเอทานอลเท่ากับ 0.01 กรัมผสมอยู่ในเบนโซไตรอะโซลที่ความเข้มข้นสุดท้าย 3 โมลาร์
3. นำสารที่เตรียมไปผ่านเครื่องเขย่าแบบปรับอุณหภูมิได้ โดยเขย่าด้วยความเร็วรอบที่ 240 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิ 24 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 ชั่วโมง
4. ใช้เครื่องเหวี่ยงแยกเพื่อแยกเอาอนุภาคแต่ละชนิดไปใช้ต่อ สารละลายที่ถูกแยกเอาอนุภาคออกแล้ว (Supernatant) จะถูกนำไปตรวจวัดค่าดูดกลืนแสง เพื่อตรวจสอบปริมาณ BTA ในอนุภาค

### 3.3.4 การเคลือบผิวแผ่นเหล็กคาร์บอน

1. แผ่นเหล็กกล้าขนาด 1 x 1 นิ้ว ถูกเตรียมพื้นผิวโดยใช้เครื่องขัดเหล็กชนิดสันสะเทือน โดยใช้ร่วมกับกระดาษทรายน้ำเบอร์ 200 และ 1,000 เพื่อขัดหยาบและขัดละเอียดตามลำดับ หลังจากการขัดเตรียมพื้นผิวชิ้นงาน ล้างให้สะอาด เช็ดให้แห้ง และชำระผิวหน้าของเหล็กด้วยเอทานอลหรืออะซิโตน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 2.เตรียมสารเคลือบผิวโดยใช้อัตราส่วนระหว่างสารยึด/ตัวทำละลาย (เมทานอล)/อนุภาคซิลิกาที่มีรูพรุนชนิดเมโซในแต่ละชนิดทั้งที่ผ่านและไม่ผ่านการบรรจุสารยับยั้งเท่ากับ 1 มิลลิลิตร/1 มิลลิลิตร/0.01 กรัม ผสมให้เป็นเนื้อเดียวกัน
- 3.นำสารเคลือบผิวที่ผ่านการผสมเคลือบบนผิวเหล็กกล้าในปริมาตรที่เท่ากัน (1 มิลลิลิตร) ซึ่งใช้วิธีการเคลือบแบบหมุนที่ความเร็วรอบ 420 รอบต่อนาทีเป็นเวลา 2 นาที
- 4.เหล็กคาร์บอนที่ถูกเคลือบแล้วจะไปผ่านการอบเพื่อให้แข็งตัว (Curing) ที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 3 ชั่วโมง

### 3.4 การวิเคราะห์คุณลักษณะและคุณสมบัติ

ในวิทยานิพนธ์นี้ได้ศึกษาคุณสมบัติของอนุภาคโดยใช้เครื่องมือวิเคราะห์สารด้วยอินฟราเรด (Fourier Transform Infrared Spectroscopy; FTIR) และเครื่องวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของสารโดยอาศัยคุณสมบัติทางความร้อน (Thermogravimetric Analysis; TGA) ในการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันและปริมาณสารอินทรีย์ของอนุภาค กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องผ่าน (Transmission electron microscopy; TEM) เพื่อวิเคราะห์ลักษณะทางสัณฐานของอนุภาค และใช้กล้องจุลทรรศน์ชนิดส่องกราด (Scanning electron microscopy; SEM) ในการศึกษาลักษณะของชั้นเคลือบ ศึกษาคุณสมบัติในการป้องกันการกัดกร่อนของสารเคลือบผิวโดยใช้เครื่องวัดการป้องกันการกัดกร่อนซึ่งใช้เทคนิคโพเทนชิโอสแตทโพลาริเซชัน (Potentiostat/gulvanostat) โดยทดสอบในสภาวะต่างๆซึ่งหลักการเครื่องวิเคราะห์ต่างๆ สามารถแสดงได้ดังนี้

#### 3.4.1 เครื่องวิเคราะห์สารด้วยอินฟราเรด (Fourier Transform Infrared Spectroscopy; FTIR)

ใช้วิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันโดยอาศัยความสามารถในการดูดกลืนรังสีอินฟราเรดที่แตกต่างกันของธาตุและพันธะในตัวอย่าง ทำให้สามารถจำแนกประเภทของสารตัวอย่าง

### 3.4.2 เครื่องวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของสารโดยอาศัยคุณสมบัติทางความร้อน (Thermogravimetric Analysis; TGA)

ใช้ในการวิเคราะห์หาปริมาณของสารอินทรีย์ในตัวอย่างโดยใช้ความร้อนส่งผลให้น้ำหนักขององค์ประกอบอินทรีย์หายไปเนื่องจากการสลายตัว หรือองค์ประกอบอื่นๆ ขึ้นกับอุณหภูมิที่ใช้ในการสังเกต

### 3.4.3 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องผ่าน (Transmission electron microscope; TEM)

ใช้ในการสังเกตวัตถุขนาดเล็กมาก เพื่อศึกษาโครงสร้างสัณฐาน ขนาดอนุภาค และพื้นผิว ตัวอย่างที่มีโครงสร้างภายใน โดยกำลังขยายสูงสุดของเครื่องมือนี้อยู่ที่ 0.1 นาโนเมตร การเกิดภาพเกิดจากการที่อิเล็กตรอนทะลุผ่านตัวอย่างและตกกระทบกับแผงตรวจจับอิเล็กตรอนภาพที่ได้จะมีลักษณะเป็น 2 มิติ (แต่มีความเข้มอ่อนของสีทำให้เสมือนเป็น 3 มิติ)

### 3.4.4 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด (Scanning electron microscope; SEM)

เครื่องมือวิเคราะห์และศึกษาพื้นผิวของชิ้นงานโดยอาศัยหลักการสะท้อนกลับของอิเล็กตรอนเมื่อตกกระทบพื้นผิว ทำให้ได้ภาพตัวอย่างแสดงเป็น 3 มิติ นอกเหนือจากการสังเกตพื้นผิวยังสามารถใช้สังเกตวัสดุในระดับจุลภาคได้อีกด้วย (กำลังขยาย 3,000 – 1,000 เท่า)

### 3.4.5 เครื่องวัดการป้องกันการกัดกร่อนโดยใช้เทคนิคโพลาไรซ์เซชัน (Potentiostat/gulvanostat)

เครื่องมือเพื่อทดสอบคุณสมบัติการป้องกันการกัดกร่อน โดยใช้สังเกตการกัดกร่อนของวัสดุโลหะในแต่สภาวะได้ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับเซลล์ที่ใช้ในการวัด โดยรายละเอียดของเครื่องมือจะแสดงในภาคผนวก ข

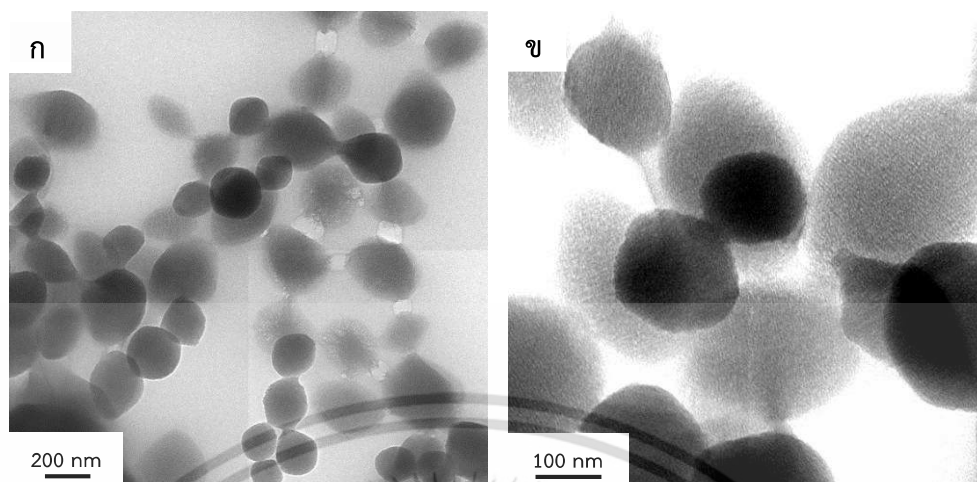
## บทที่ 4

### ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผล

วิทยานิพนธ์เล่มนี้พัฒนาสารเคลือบผิวโดยใช้อนุภาคซิลิกาที่มีรูพรุนชนิดเมโซที่ผ่านและไม่ผ่านการปรับแต่งหมู่ฟังก์ชันที่บรรจุสารยับยั้งการกัดกร่อน โดยศึกษาปัจจัยที่ส่งผลให้สารเคลือบที่ใช้ร่วมกับอนุภาคสามารถช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการป้องกันการกัดกร่อนได้ ลักษณะทางสัณฐานของอนุภาคที่มีรูพรุนชนิดเมโซโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องผ่าน (Transmission electron microscopy; TEM) เทคนิควิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของสารโดยอาศัยคุณสมบัติทางความร้อน (Thermo Gravimetric Analysis; TGA) และการวิเคราะห์สารด้วยเทคนิคอินฟราเรด (Fourier Transform Infrared Spectroscopy; FTIR) ในการวิเคราะห์ชนิดของสารและหมู่ฟังก์ชันอินทรีย์ เครื่องตรวจวัดการดูดกลืนแสง (UV-visible spectrophotometer) ในการตรวจวัดค่าการดูดกลืนแสงของสารยับยั้งเพื่อหาปริมาณและความสามารถในการดูดซับสารยับยั้งของอนุภาค อีกทั้งใช้ในการศึกษาความสามารถในการปลดปล่อยสารยับยั้งของอนุภาค กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด (Scanning electron microscopy; SEM) ถูกใช้เพื่อศึกษาความหนาและลักษณะของชั้นเคลือบ และศึกษาคุณสมบัติการป้องกันการกัดกร่อนของเหล็กคาร์บอนที่ผ่านการเคลือบแล้วที่สภาวะต่างๆโดยใช้เครื่องโพเทนชิโอสแตทิกส์ควานอสแตท

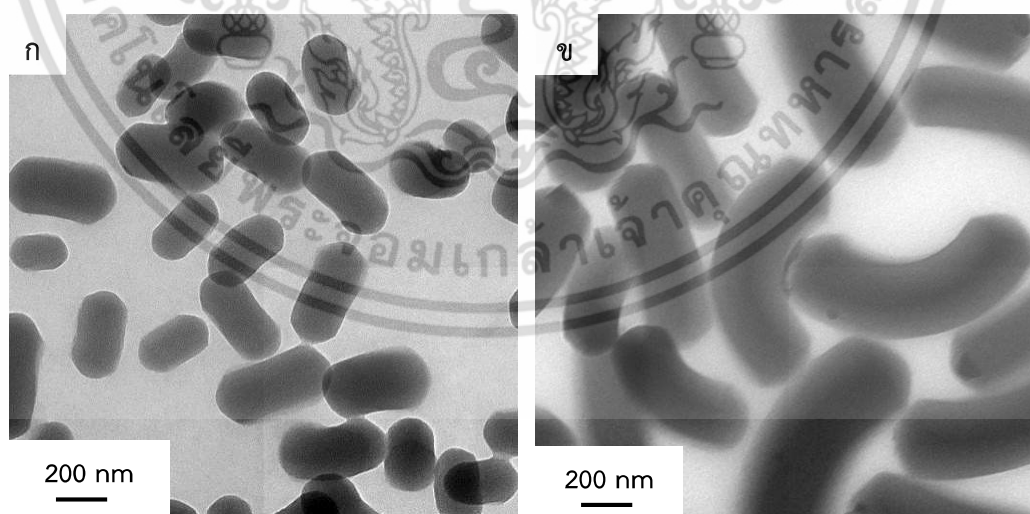
#### 4.1 การศึกษาผลของออร์กาโนซิลอนที่มีผลต่ออนุภาคซิลิกาที่มีรูพรุนชนิดเมโซ

อนุภาคที่มีรูพรุนชนิดเมโซที่ถูกสังเคราะห์ที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส โดยใช้ออร์กาโนซิลอนต่างชนิดกันในการปรับแต่งพื้นผิวของอนุภาคโดยใช้เป็นสัดส่วนโดยปริมาตรร้อยละ 20 ของปริมาตรเตตระเอทิลออร์ซิลิเกต จากผล TEM พบว่าอนุภาคที่ไม่ผ่านการปรับแต่งผิวมีขนาดประมาณ 200 นาโนเมตร ค่อนข้างเกาะตัวกันและมีรูพรุนค่อนข้างชัดเจนดังแสดงในรูปที่ 1 ก และ ข



รูปที่ 4.1 ภาพถ่าย TEM อนุภาคซิลิกาที่มีรูพรุนชนิดเมโซที่ไม่มีการปรับแต่งหมู่ฟังก์ชัน (ก) สเกลบาร์ 200 นาโนเมตร (ข) สเกลบาร์ 100 นาโนเมตร

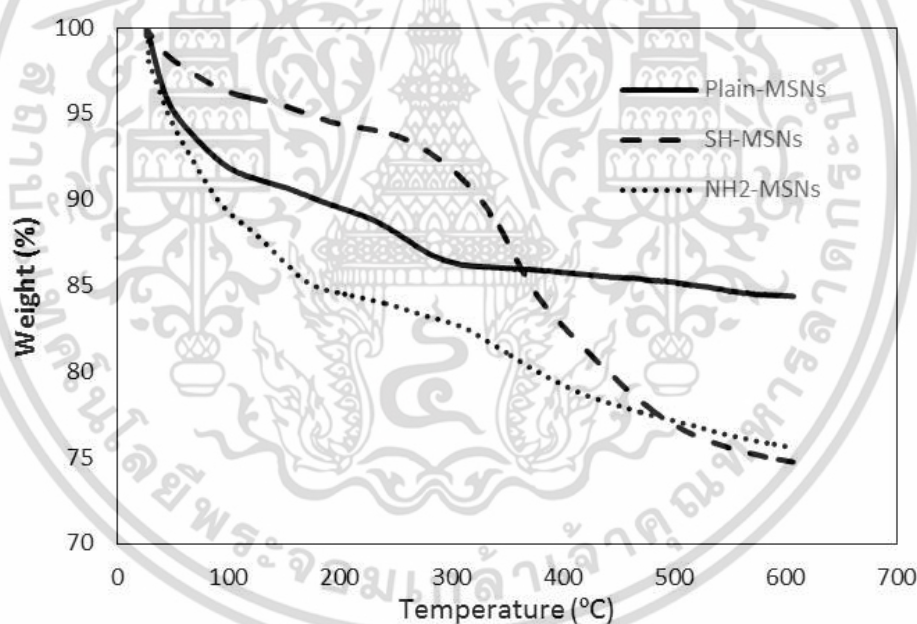
เมื่อสังเกตอนุภาคซิลิกาที่มีรูพรุนชนิดเมโซที่ผ่านการปรับแต่งผิวโดยใช้หมู่ฟังก์ชันอินทรีย์เอมีนและหมู่ไทออล อนุภาคที่ถูกปรับแต่งพื้นผิวด้วยเอมีนจะให้ลักษณะของอนุภาคเป็นรูปหกเหลี่ยมและมีการกระจายตัวค่อนข้างดี ส่วนอนุภาคที่สังเคราะห์ร่วมกับหมู่ไทออลจะมีลักษณะเป็นท่อยาวมีขนาดใหญ่กว่าอนุภาคชนิดอื่นแสดงดังรูปที่ 4.2ข จากรูป TEM จะเห็นว่ารูปร่างของอนุภาคที่ผ่านการปรับแต่งที่ผิวจะมีรูปทรงที่ต่างจากอนุภาคที่ไม่ผ่านการปรับแต่งหมู่ฟังก์ชัน ทั้งนี้สามารถสรุปได้ว่าสารออร์แกนโซิลเลนที่ใส่ร่วมลงไปในการสังเคราะห์จะส่งผลต่อขนาดและรูปร่างของอนุภาค [16]



รูปที่ 4.2 ภาพถ่าย TEM อนุภาคซิลิกาที่มีรูพรุนชนิดเมโซที่ผ่านการปรับแต่งหมู่ฟังก์ชันด้วย ก) หมู่เอมีน ข) หมู่ไทออล สเกลบาร์ 200 นาโนเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการวิเคราะห์ผลโดยใช้เทคนิคการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของสารโดยอาศัยคุณสมบัติทางความร้อน (TGA) เพื่อหาปริมาณสารอินทรีย์ที่อยู่ในอนุภาคที่สังเคราะห์ร่วมกับหมู่ฟังก์ชันอินทรีย์ พบว่าปริมาณสารอินทรีย์ที่ไล่ไปร้อยละ 20 ของปริมาณสารตั้งต้นไซเลนรวมในอนุภาคมีปริมาณใกล้เคียงกันถึงแม้ว่าสารอินทรีย์ที่ไล่ไปในอนุภาคมีชนิดที่แตกต่างกัน แต่ลักษณะการสลายตัวเนื่องจากความร้อนมีความแตกต่างกัน สังเกตว่าลักษณะการสลายตัวของหมู่เอมีนในอนุภาคมีการสลายตัวอย่างช้าๆในช่วงอุณหภูมิที่กว้างซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยที่ศึกษาการสังเคราะห์อนุภาคซิลิกาที่มีรูพรุนชนิดเมโซร่วมกับหมู่เอมีน [17] แตกต่างกับหมู่ไทโอดอลที่มีการสลายตัวเนื่องจากความร้อนอย่างรวดเร็วในช่วงอุณหภูมิที่แคบกว่า ซึ่งจะเห็นว่ากราฟของอนุภาคที่สังเคราะห์ร่วมกับหมู่อินทรีย์ทั้งสองชนิดมีการสูญเสียของน้ำหนักมากกว่าอนุภาคที่ไม่ได้ผ่านการปรับแต่งหมู่ฟังก์ชันเนื่องจากว่าอนุภาคที่ไม่มีการปรับแต่งหมู่ฟังก์ชันไม่สารอินทรีย์ที่ไล่เพิ่มเข้าไป แต่จะเห็นว่ามีการหายไปของน้ำหนักบางส่วนซึ่งเป็นการหายไปของน้ำและสารอินทรีย์ CTAB ที่ถูกกำจัดออกไม่หมดในขั้นตอนการล้างกรดสังเกตจากรูปที่ 4.3

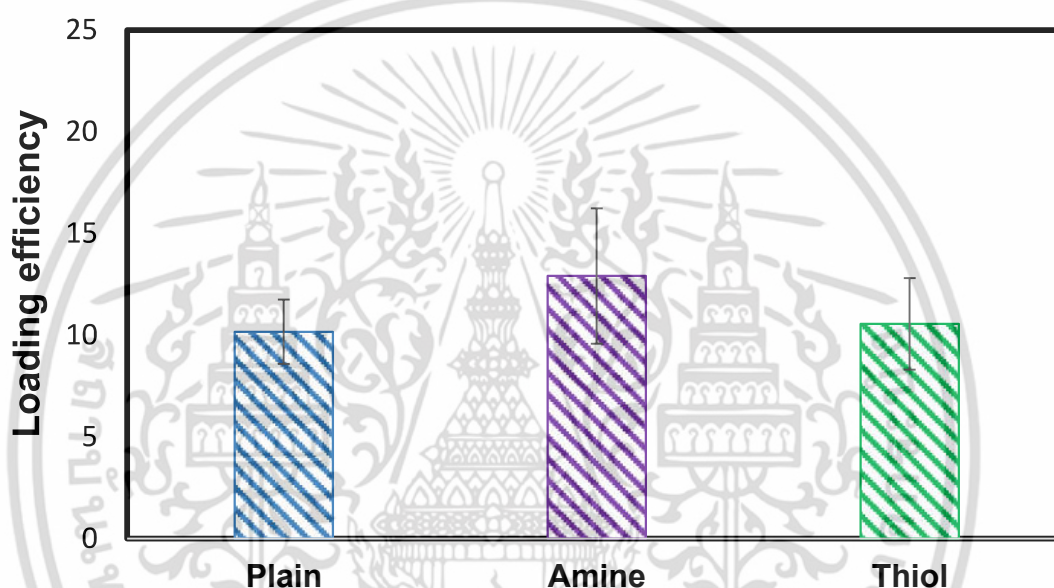


รูปที่ 4.3 กราฟเปรียบเทียบแสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักและอุณหภูมิของอนุภาคแต่ละชนิด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 4.2 ความสามารถในการบรรจุสารยับยั้งของอนุภาคซิลิกาที่มีรูพรุนชนิดเมโซ

การศึกษาความสามารถในการบรรจุสารยับยั้งการกัดกร่อนของอนุภาคนาโนซิลิกาที่มีรูพรุนชนิดเมโซที่มีหมู่ฟังก์ชันต่างกัน โดยสารยับยั้งการกัดกร่อนคือเบนโซไตรอะโซล (Benzotriazole; BTA) จากผลการทดลองพบว่าอนุภาคที่สังเคราะห์ร่วมกับหมู่ฟังก์ชันเอมีนมีความสามารถในการบรรจุเบนโซไตรอะโซลได้มากที่สุด รองลงมาคือหมู่ฟังก์ชันไทออล และอนุภาคที่ไม่ผ่านการปรับแต่งหมู่ฟังก์ชันตามลำดับแสดงดังรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.4 กราฟแท่งเปรียบเทียบความสามารถในการดูดซับเบนโซไตรอะโซล

ในขั้นตอนการบรรจุเบนโซไตรอะโซลซึ่งใช้ตัวทำละลายเป็นเอทานอลซึ่งมีค่าความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 6 ซึ่งเบนโซไตรอะโซลจะอยู่ในรูปที่มีโปรตรอน ( $BTAH^+$ ) ซึ่งทำให้สามารถเกิดพันธะไฮโดรเจนบริเวณที่ผิวของอนุภาคที่สังเคราะห์ร่วมกับหมู่เอมีนได้ ส่งผลให้อนุภาคที่สังเคราะห์ร่วมกับหมู่เอมีนสามารถดูดกลืนเบนโซไตรอะโซลได้มากที่สุด และอนุภาคที่สังเคราะห์ร่วมกับหมู่ไทออลซึ่งมีลักษณะเป็นทรงกระบอกยาวใหญ่อาจจะส่งผลให้เบนโซไตรอะโซลดูดซับเข้าไปไม่ถึงข้างในสุดของรูพรุนทำให้ดูดซับสารยับยั้งไม่ได้มากเท่าที่ควร อนุภาคที่ไม่ผ่านการปรับแต่งหมู่ฟังก์ชันที่ผิวสามารถเกิดแรงดึงดูดประจุระหว่างหมู่ไฮดรอกซิลกับโมเลกุลของเบนโซไตรอะโซลซึ่งส่งให้เปิดติดอยู่ที่ผิว และอุดตันทำให้ไม่สามารถดูดซับเบนโซไตรอะโซลเพิ่มได้อีกทำให้ความสามารถในการดูดซับเบนโซไตรอะโซลมีน้อย

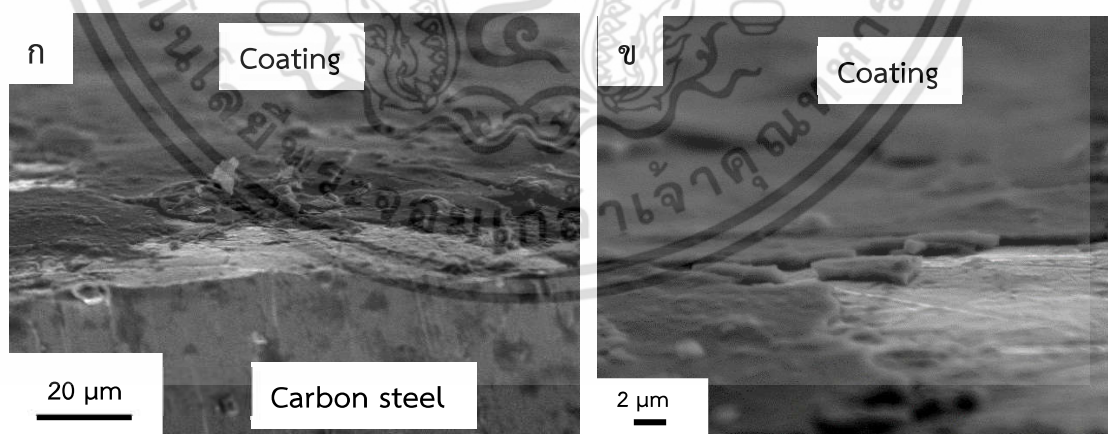
### 4.3 การศึกษาลักษณะของสารเคลือบผิวที่ใช้ร่วมกับอนุภาคซิลิกาที่มีรูพรุนชนิดเมโซ

การศึกษาลักษณะของสารเคลือบผิวที่ใช้ร่วมกับอนุภาคซิลิกาที่มีรูพรุนชนิดเมโซ โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด (Scanning microscope electron; SEM) เพื่อสังเกตลักษณะของชั้นเคลือบผิวพบว่าชั้นเคลือบผิวที่เคลือบด้วยอนุภาคที่แตกต่างชนิดกันมีความหนาของชั้นเคลือบใกล้เคียงกันแม้ว่าขนาดอนุภาคจะมีขนาดที่แตกต่างกันโดยความหนาของชั้นเคลือบสามารถแสดงได้ดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ความหนาของชั้นเคลือบที่ใช้ร่วมกับอนุภาคแต่ละชนิด

ชนิดของอนุภาคที่ใช้ร่วมกับสารเคลือบ	ความหนา ( $\mu\text{m}$ )
Plain-MSNs	$1.14 \pm 0.4$
SH-MSNs	$1.19 \pm 0.2$
$\text{NH}_2$ -MSNs	$1.21 \pm 0.3$

เหล็กกล้าคาร์บอนเมื่อผ่านการเคลือบผิวด้วยวิธีการเคลือบแบบหมุน (ความเร็วรอบ 420 รอบต่อนาที) จะถูกนำไปตัดให้มีขนาดเล็กเพื่อนำไปส่องด้วยกล้อง SEM แบบภาพตัดขวางเพื่อสังเกตลักษณะชั้นเคลือบดังรูปที่ 4.5 แสดงภาพของชั้นเคลือบผิวที่อยู่บนชั้นเหล็กกล้าคาร์บอน

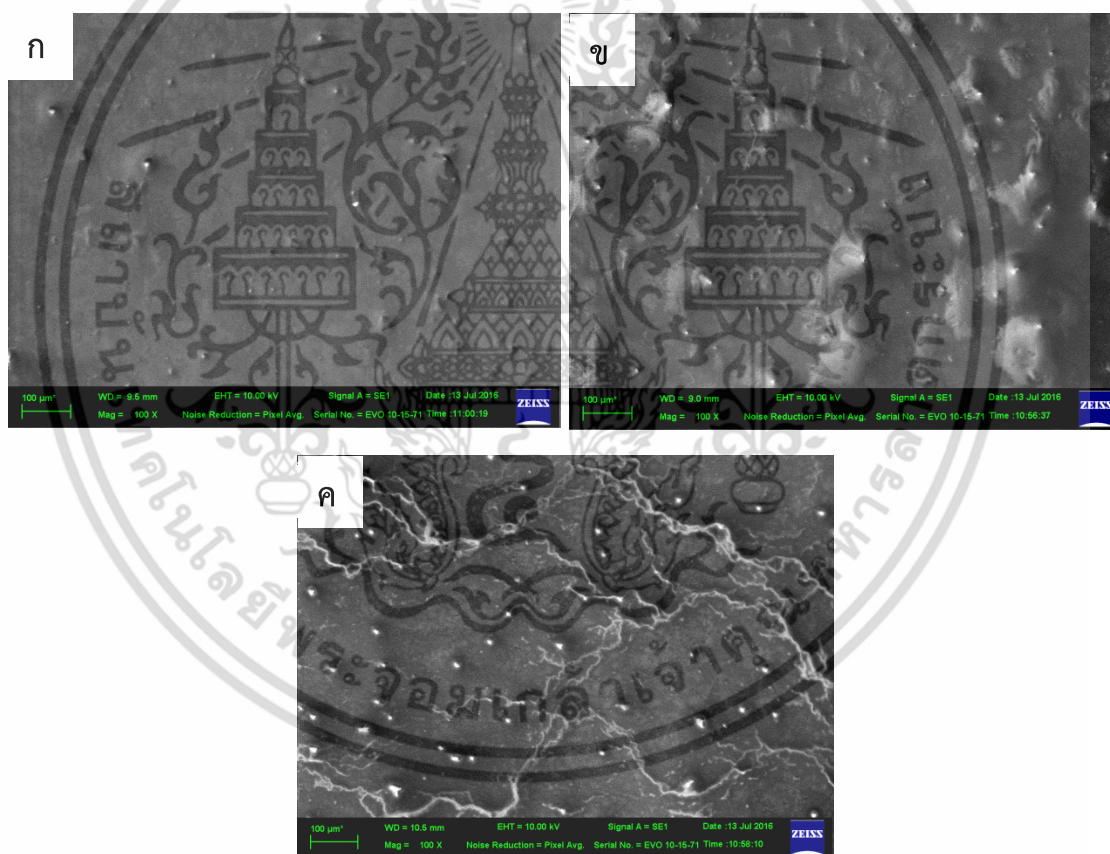


รูปที่ 4.5 แสดงชั้นเคลือบผิวบนเหล็กกล้าคาร์บอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.5 จะสังเกตเห็นว่าชั้นเคลือบมีรอยแตกเนื่องมาจากการใช้กรรไกรตัดเหล็ก ซึ่งเหล็กกล้าคาร์บอนมีความแข็งมากจึงส่งผลให้สารเคลือบเกิดการรอยแตก (Cracking) ที่บริเวณใกล้กับรอยตัดเหล็กได้

ซึ่งขนาดและรูปร่างที่ต่างกันส่งผลให้อนุภาคที่ผ่านการบรรจุสารยับยั้งการกัดกร่อนเมื่อนำไปใช้ร่วมกับสารเคลือบมีลักษณะพื้นผิวที่ต่างกันไปดังแสดงในรูปที่ 4.6 จะเห็นว่าชั้นเคลือบที่มีอนุภาคหมู่เอมีนจะให้พื้นผิวที่เรียบไม่มีรอยแตก (แสดงดังรูปที่ 4.6ก) แตกต่างจากชั้นเคลือบที่มีอนุภาคที่มีหมู่ไฮดรอกซิลซึ่งอนุภาคมีลักษณะที่มีขนาดใหญ่ส่งผลให้ชั้นเคลือบมีลักษณะขรุขระเป็นเนิน (แสดงดังรูปที่ 4.6ข) และชั้นเคลือบที่มีอนุภาคที่ไม่ผ่านการปรับแต่งผิวเมื่อใช้ร่วมกับสารยับยั้งให้ลักษณะสารเคลือบที่มีรอยเป็นแนวยาวเนื่องจากการกระจายตัวที่ไม่ดีของอนุภาค (แสดงดังรูปที่ 4.6ค)



รูปที่ 4.6 ภาพแสดงพื้นผิวของชั้นเคลือบที่มีอนุภาคชนิด ก) ที่มีหมู่เอมีน ข) ที่มีหมู่ไฮดรอกซิล และ ค) ที่ไม่ผ่านการปรับแต่งหมู่ฟังก์ชัน (สเกลบาร์ 100 ไมครอน)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความสามารถในการป้องกันน้ำหรือความไม่ชอบน้ำ (Hydrophobicity) สามารถสังเกตโดยใช้เครื่องการตรวจวัดมุมสัมผัสของหยดน้ำ (Contact angle) เหล็กกล้าหลังจากผ่านการเคลือบด้วยสารเคลือบที่มีส่วนผสมของอนุภาคต่างชนิดกันจะถูกนำมาสังเกต โดยจากผลการทดลองพบว่าหมู่ไทโอลหรือซัลไฮดริลมีความสามารถในการไม่ชอบน้ำมากที่สุดสังเกตได้จากค่ามุมที่วัดได้จากเครื่องวัดมุมของหยดน้ำ ดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 แสดงผลจากเครื่องตรวจวัดมุมของหยดน้ำ

ชนิดของอนุภาคที่ใช้ร่วมกับสารเคลือบ	มุมสัมผัสของหยดน้ำ ( $^{\circ}$ )
Bare carbon steel	48.3 $\pm$ 0.2
Plain-MSNs	71.8 $\pm$ 3.1
SH-MSNs	81.9 $\pm$ 2.2
NH <sub>2</sub> -MSNs	71.5 $\pm$ 2.5

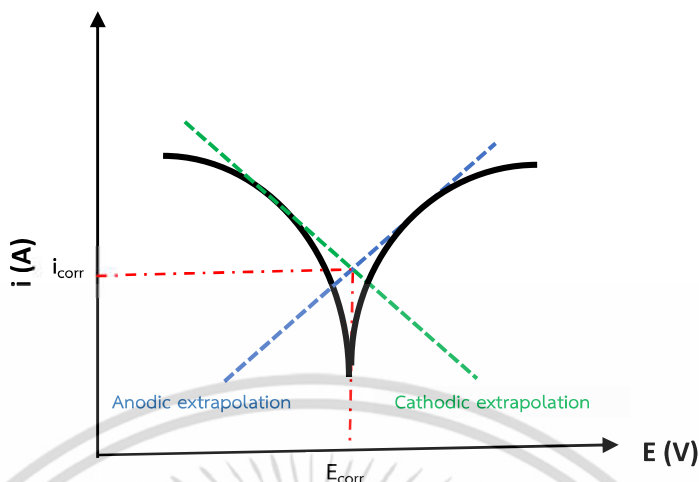
เนื่องจากหมู่ซัลไฮดริลหรือหมู่ไทโอลมีความเป็นขั้วน้อยกว่าอนุภาคชนิดอื่นส่งผลให้มีความสามารถในการไม่ชอบน้ำมากกว่าอนุภาคชนิดอื่นซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยที่ได้ศึกษามา [18] ทำให้สถานะสิ่งแวดล้อมภายนอกซึ่งมีส่วนผสมของน้ำ ความชื้น แพร่เข้าผ่านชั้นเคลือบได้ยากมากขึ้นอีกด้วย

#### 4.4 ความสามารถในการป้องกันการกัดกร่อนในน้ำเกลือที่ pH ต่างๆ

##### 4.4.1 ความสามารถในการป้องกันการกัดกร่อนในสถานะน้ำเกลือที่ pH 6

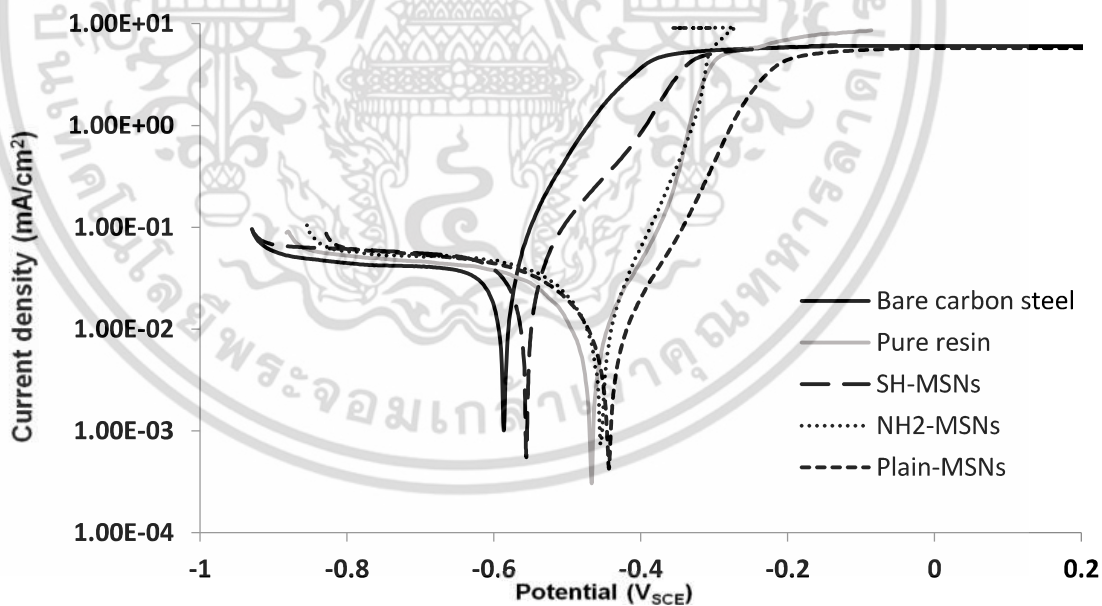
การศึกษาความสามารถในการต้านทานการกัดกร่อนของชั้นเคลือบผิวที่ใช้ร่วมกับอนุภาคซิลิกาที่มีรูพรุนชนิดเมโซโดยใช้เครื่องวัดการป้องกันการกัดกร่อนโดยใช้เทคนิคโพลาริซ (Potentiostat/galvanostat) โดยเทคนิคนี้วัดการเปลี่ยนแปลงไปของกระแสไฟฟ้าเมื่อเทียบกับศักย์ไฟฟ้าที่เครื่องป้อนเข้าไป กระแสไฟฟ้าที่วัดได้เป็นรวมของกระแสไฟฟ้าของทั้งระบบจากทั้งขั้วแคโทดและแอโนด ค่ากระแสการกัดกร่อน (Corrosion current density;  $i_{corr}$ ) และ ศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อน (Corrosion potential;  $E_{corr}$ ) จะถูกหาโดยวิธีการ Tafel slope

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.7 กราฟแสดงวิธี Tafel slope ในการหาค่า  $E_{corr}$  และ  $i_{corr}$

เมื่อทำการทดลองในสภาวะน้ำเกลือความเข้มข้นร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส โดยค่า  $i_{corr}$  ที่วัดได้จากเทคนิคนี้จะสามารถบ่งชี้ได้ว่าโลหะเกิดการกัดกร่อนไปได้มากน้อยเพียงใด ส่วนค่า  $E_{corr}$  จะสามารถบอกได้ว่ากระบวนการกัดกร่อนเกิดขึ้นได้ง่ายหรือยากกว่ากัน



รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าและศักย์ไฟฟ้าในสภาวะน้ำเกลือร้อยละ 1 โดยน้ำหนักของแผ่นเหล็กกล้าและแผ่นเหล็กกล้าที่ผ่านการเคลือบแบบต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.3 ค่า  $i_{corr}$  และ  $E_{corr}$  ของแผ่นเหล็กคาร์บอนที่ถูกเคลือบด้วยสารเคลือบที่มีอนุภาคก่อนบรรจุ เบนโซไตรอะโซล

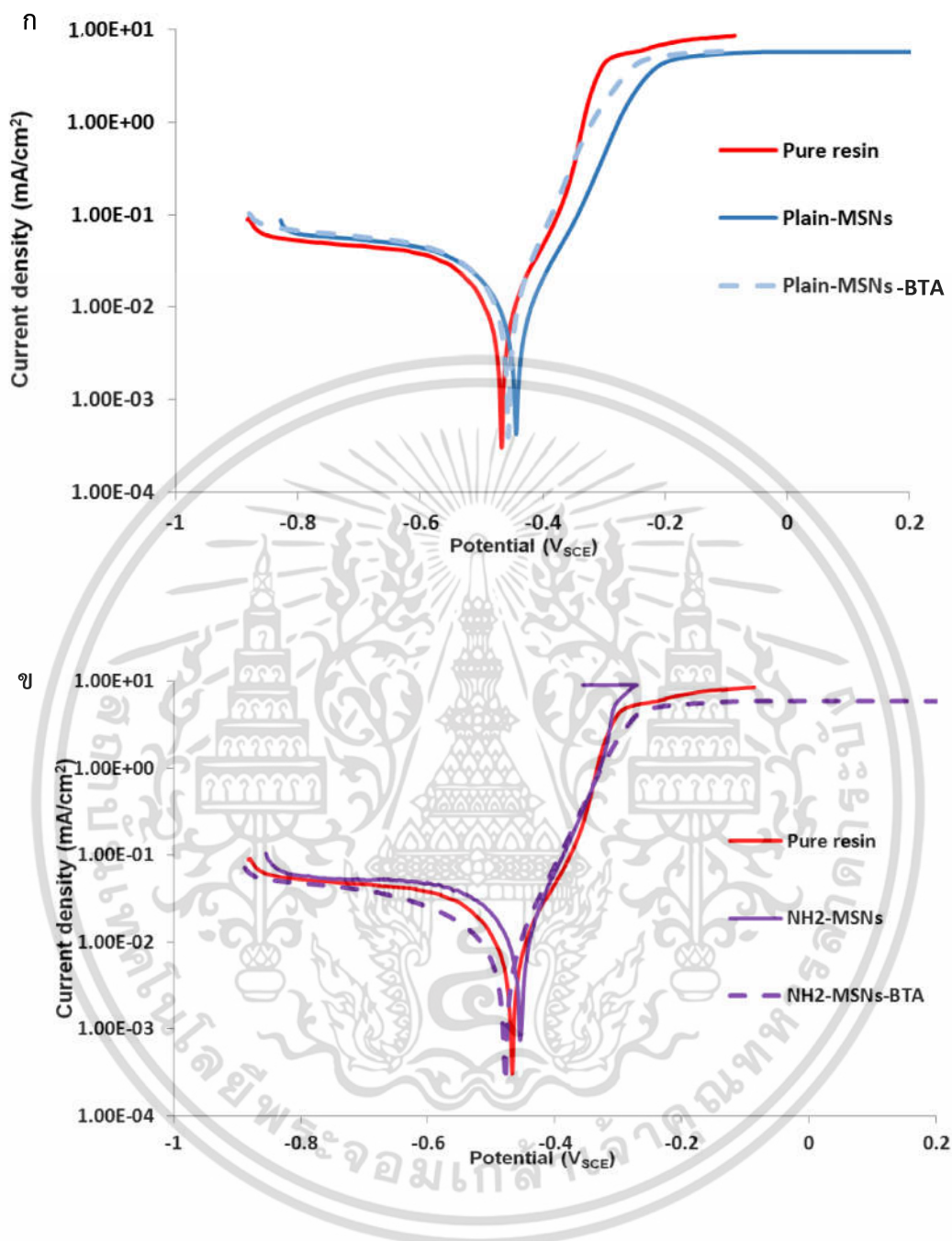
ตัวอย่าง	$J_{corr}$ (A/cm <sup>2</sup> )	$E_{corr}$ (V)	*ประสิทธิภาพที่เพิ่มขึ้น (%)
Bare carbon steel	$2.4 \times 10^{-5}$	-0.578	อ้างอิง
Pure resin	$6.6 \pm 0.6 \times 10^{-6}$	-0.443 $\pm$ 0.02	72.5
Plain-MSNs	$5.8 \pm 0.06 \times 10^{-6}$	-0.417 $\pm$ 0.01	75.8
NH <sub>2</sub> -MSNs	$9.7 \pm 0.5 \times 10^{-6}$	-0.488 $\pm$ 0.03	59.6
SH-MSNs	$1.3 \pm 0.06 \times 10^{-5}$	-0.458 $\pm$ 0.01	45.83

\*ประสิทธิภาพเทียบกับเหล็กกล้าคาร์บอนที่ไม่ผ่านการเคลือบ

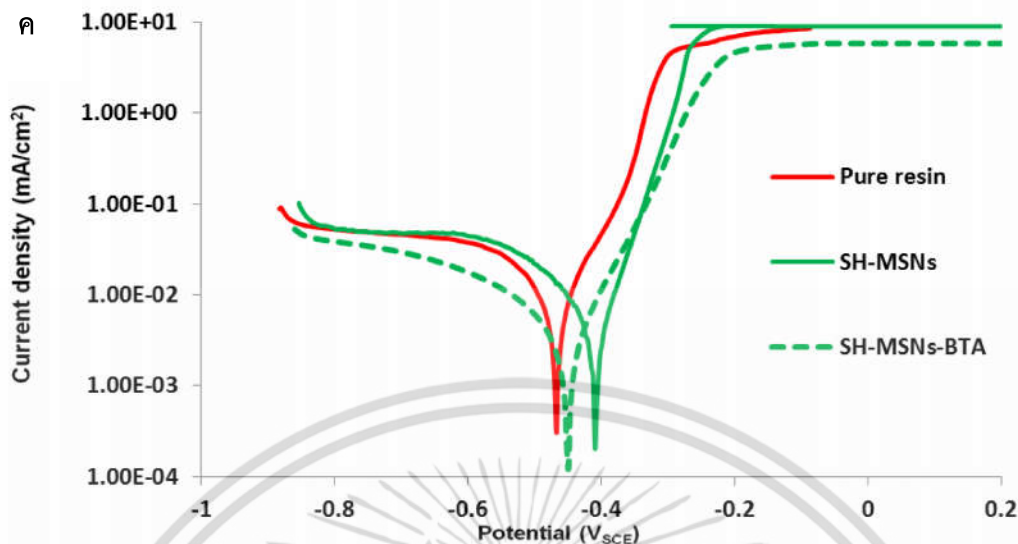
จากตารางที่ 4.2 เหล็กคาร์บอนผ่านการเคลือบด้วยสารเคลือบที่ใช้ร่วมกับอนุภาคแต่ละชนิดโดยที่ยังไม่ได้บรรจุสารยับยั้ง ในค่ากระแสการกัดกร่อนลดลงกล่าวคือสารเคลือบช่วยในการป้องกันการกัดกร่อน โดยเมื่อเปรียบเทียบกันระหว่างสารเคลือบกับสารเคลือบผิวที่มีอนุภาครวมอยู่ด้วยพบว่าชั้นเคลือบผิวที่มีอนุภาคกระจายตัวอยู่ให้ค่ากระแสการกัดกร่อนที่น้อยกว่า เนื่องจากว่าการมีเรซินเพียงอย่างเดียวอาจเกิดรอยแตกหรือรูพรุนขนาดเล็กได้ส่งผลให้การกัดกร่อนสามารถเกิดขึ้นได้ง่ายกว่าในสารเคลือบที่มีอนุภาค สาเหตุมาจากการมีอนุภาคระดับนาโนจะส่งผลให้เกิดรูพรุนได้น้อยลงและเกิดพันธะโครงผลึกว่างตาข่ายที่แข็งแรงมากกว่าเกิดพันธะระหว่างเรซินกับเรซินส่งผลให้มีความสามารถในการป้องกันแบบกันขวางได้ดีกว่า (Barrier protection) แต่พบว่าอนุภาคที่สังเคราะห์ร่วมกับหมู่ไทออลและหมู่เอมีนเกิดการกัดกร่อนมากกว่าสารเคลือบที่ไม่มีอนุภาค อาจจะเนื่องมาจากอนุภาคมีขนาดที่ไม่เหมาะสมกับชั้นเคลือบ โดยเฉพาะอย่างยิ่งอนุภาคที่มีหมู่ไทออลซึ่งมีความสามารถในการกระจายตัวที่ต่ำเนื่องจากความมีขั้วน้อย [19]

เมื่อนำอนุภาคไปบรรจุเบนโซไตรอะโซลพบว่าคุณสมบัติในการป้องกันการกัดกร่อนเพิ่มมากขึ้น เมื่อชั้นเคลือบผิวเกิดความเสียหายเบนโซไตรอะโซลมีความสามารถในการสร้างชั้น (Complex film) ที่สามารถช่วยในการยับยั้งการส่งผ่านอิเล็กตรอนทำให้เกิดการกัดกร่อนได้ยากยิ่งขึ้นซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยที่ได้ศึกษามา [16] ดังแสดงดังตารางที่ 4.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าและศักย์ไฟฟ้าสภาวะน้ำเกลือร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก ก่อนและหลังบรรจุเบนโซไตรอะโซลของอนุภาค ก) ที่ไม่ผ่านการปรับแต่งหมู่ฟังก์ชัน ข) อนุภาคที่มีหมู่เอมีน และ ค) อนุภาคที่มีหมู่ไทออล

ตารางที่ 4.4 ค่า  $i_{\text{corr}}$ ,  $E_{\text{corr}}$  ของแผ่นเหล็กคาร์บอนที่ถูกเคลือบด้วยสารเคลือบที่มีอนุภาคหลังบรรจุเบนโซไตรอะโซลในน้ำเกลือ

ตัวอย่าง	$J_{\text{corr}}$ ( $\text{A}/\text{cm}^2$ )	$E_{\text{corr}}$ (V)	*ประสิทธิภาพที่เพิ่มขึ้น (%)	**ประสิทธิภาพที่เพิ่มขึ้น (%)
Plain-MSNs	$8.5 \pm 1.8 \times 10^{-6}$	$-0.417 \pm 0.02$	64.6	-46.5
$\text{NH}_2$ -MSNs	$3.6 \pm 0.8 \times 10^{-6}$	$-0.488 \pm 0.02$	84.9	62.8
SH-MSNs	$2.2 \pm 0.7 \times 10^{-6}$	$-0.458 \pm 0.05$	90.8	83.1

\*ประสิทธิภาพที่เพิ่มขึ้นเปรียบเทียบกับค่า  $i_{\text{corr}}$  ของ carbon steel ที่ไม่ผ่านการเคลือบ

\*\*ประสิทธิภาพที่เพิ่มขึ้นเปรียบเทียบกับค่า  $i_{\text{corr}}$  ของอนุภาคแต่ละชนิดก่อนบรรจุเบนโซไตรอะโซล

จากผลการทดลองจะเห็นว่าสารยับยั้งการกัดกร่อนช่วยเพิ่มความสามารถในการป้องกันการกัดกร่อนได้อย่างชัดเจน โดยเฉพาะสารเคลือบที่มีอนุภาคที่ปรับแต่งด้วยหมู่ซัลไทออลซึ่งมีความสามารถในการไม่ชอบน้ำ และสามารถควบคุมการปลดปล่อยได้ดีกว่าทำให้สารเคลือบที่มีหมู่ไทออลและเอมีนสามารถป้องกันการกัดกร่อนได้ดีกว่า ต่างกับอนุภาคที่ไม่ผ่านการปรับแต่งหมู่ฟังก์ชันอาจจะเนื่องมาจากการที่สารยับยั้งติดอยู่แค่บริเวณผิวไม่ได้เข้าไปในรูพรุนส่งผลให้สารยับยั้งถูกปลดปล่อยออกอย่างรวดเร็วหรือสลายตัวไปในขั้นตอนของการอบสารเคลือบเนื่องจากเบนโซไตรอะโซลไม่ได้อยู่ภายในอนุภาค อีกทั้ง

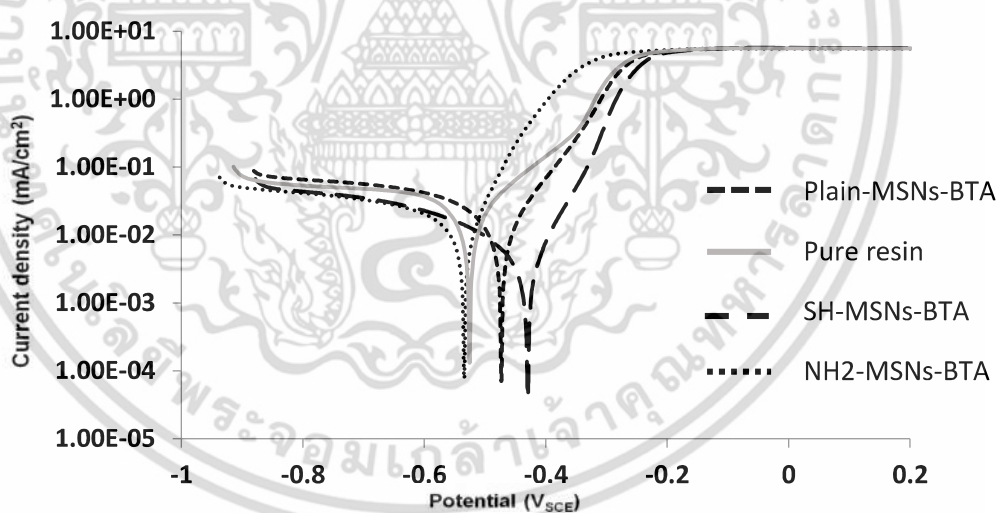
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เบนโซไตรอะโซลทำให้การกระจายตัวของอนุภาคเกิดขึ้นไม่ดี กล่าวคือให้นอกจากเบนโซไตรอะโซลจะไม่ช่วยในการป้องกันการกัดกร่อนแล้วแต่ยังทำให้การป้องกันการกัดกร่อนด้อยลงอีกด้วย

#### 4.4.2 ความสามารถในการป้องกันการกัดกร่อนในสภาวะน้ำเกลือที่มีความเป็นกรด (pH 4.4)

ปัจจุบันกระบวนการผลิตส่วนใหญ่ต้องเผชิญกับสารเคมีที่หลากหลาย มีความเป็นกรด-ด่างสูง ดังนั้นความสามารถในการป้องกันการกัดกร่อนในสภาวะอื่นจึงเป็นสิ่งจำเป็นที่ต้องคำนึงถึง การศึกษาด้วยเทคนิคโพเทนชิโอสแตท/กัลวานอสแตท สามารถเปลี่ยนสารละลายที่ใช้ทดสอบกับโลหะได้ ทำให้สามารถศึกษาในสภาวะอื่นได้ สำหรับสภาวะน้ำเกลือที่มีความเป็นกรดในงานวิจัยนี้เราจะทำการศึกษาที่สภาวะกรด ( $\text{NaCl} + \text{H}_2\text{SO}_4$ ) ที่มีค่าความเป็นกรด-ด่าง 4.4 ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส

ในการทดลองเพื่อหาประสิทธิภาพในการป้องกันการกัดกร่อนในน้ำเกลือที่มีความเป็นกรด พบว่าสารเคลือบที่มีอนุภาคที่ปรับแต่งผิวด้วยหมู่ไทโอสสามารถป้องกันการกัดกร่อนได้ดีที่สุดสังเกตจากตารางที่ 4.5 รองลงมาคืออนุภาคที่ปรับแต่งด้วยหมู่เอมีน และอนุภาคที่ไม่ผ่านการปรับแต่งผิวตามลำดับ

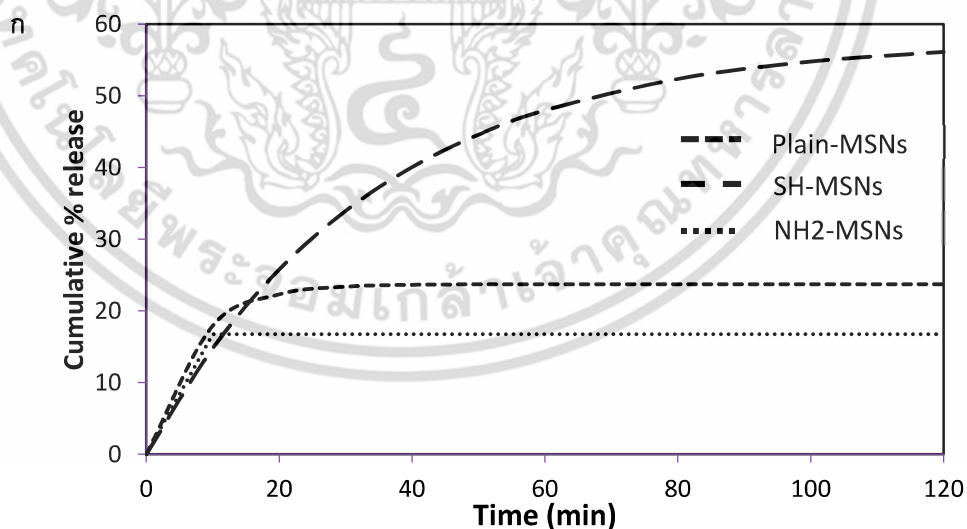


รูปที่ 4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าและศักย์ไฟฟ้าในสภาวะน้ำเกลือร้อยละ 1 โดยน้ำหนักที่มีความเป็นกรด (pH 4.4) ของแผ่นเหล็กกล้าและแผ่นเหล็กกล้าที่ผ่านการเคลือบแบบต่างๆ

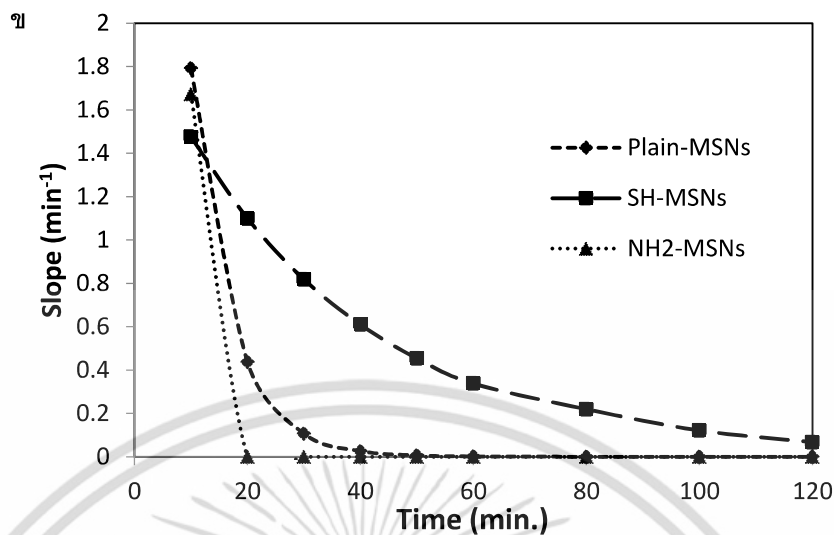
ตารางที่ 4.5 ค่า  $i_{corr}$  และ  $E_{corr}$  ของอนุภาคหลังบรรจุเบนโซไตรอะโซลในสภาวะกรด

ตัวอย่าง	$J_{corr}$ (A/cm <sup>2</sup> )	$E_{corr}$ (V)	ประสิทธิภาพที่ เพิ่มขึ้น (%)
Pure resin	$1.57 \times 10^{-5}$	-0.457	อ้างอิง
Plain-MSNs	$1.0 \pm 0.02 \times 10^{-6}$	-0.468 $\pm$ 0.03	36.3
NH <sub>2</sub> -MSNs	$9.34 \pm 0.5 \times 10^{-6}$	-0.515 $\pm$ 0.02	40.5
SH-MSNs	$9.02 \pm 1.0 \times 10^{-6}$	-0.513 $\pm$ 0.02	42.5

สาเหตุที่ทำให้สารเคลือบที่มีอนุภาคที่ถูกปรับแต่งผิวด้วยหมู่ไทโอลสามารถแสดงประสิทธิภาพในการป้องกันการกัดกร่อนได้ดีที่สุดเนื่องจากความสามารถในการเป็นชั้นปกป้องที่ดีกว่า และความสามารถในการควบคุมการปลดปล่อยเบนโซไตรอะโซลในสภาวะกรดได้ดีกว่าอนุภาคชนิดอื่นสังเกตจากรูปที่ 4.10ก และ ข ชั้นเคลือบที่มีอนุภาคที่ปรับแต่งด้วยหมู่ไทโอลในช่วงแรกจะสามารถปลดปล่อยเบนโซไตรอะโซลได้ช้าที่สุด แต่ต่อเนืองและท้ายที่สุดสามารถปลดปล่อยเบนโซไตรอะโซลได้มากที่สุด ด้วยเหตุนี้เองจึงทำให้อนุภาคที่ปรับแต่งผิวด้วยหมู่ไทโอลสามารถป้องกันการกัดกร่อนได้ดีเนื่องจากเก็บรักษาไม่ให้เบนโซไตรอะโซลสูญเสียไปโดยเร็ว

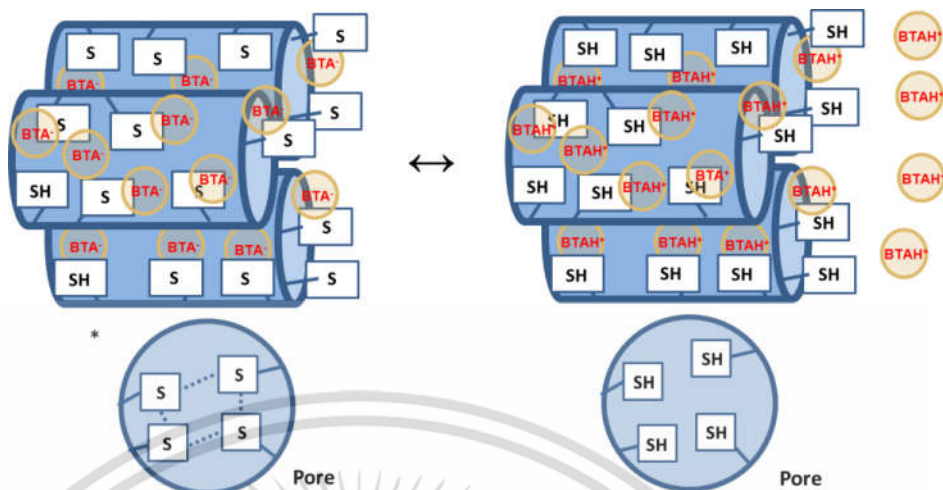


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.11 ก) ความเข้มข้นของเบนโซไตรอะโซล ข) อัตราการปลดปล่อยเบนโซไตรอะโซลที่ปลดปล่อยออกมาจากอนุภาคแต่ละชนิดในสถานะน้ำเกลือที่มีความเป็นกรด

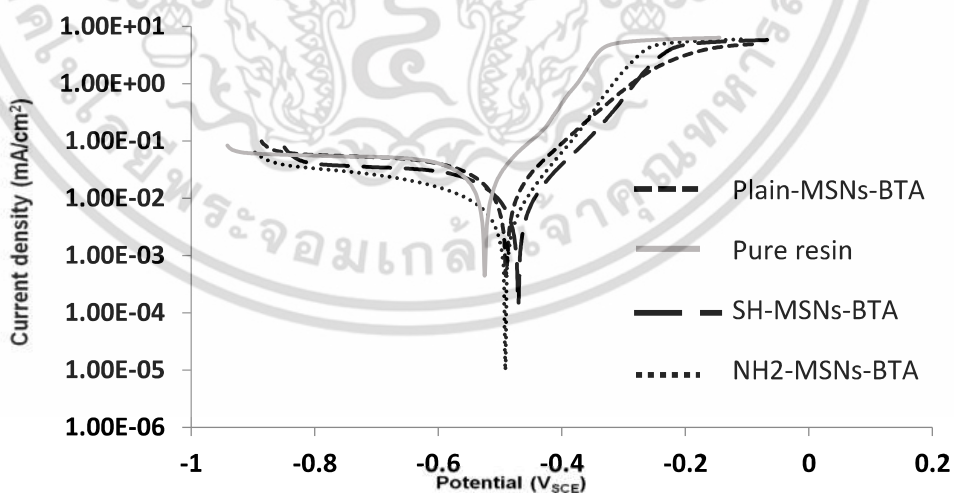
หมู่ไทออลที่ผิวของอนุภาคในสถานะที่ไม่มีตัวรีดิวซ์ (reducing agent) จะอยู่ในรูปที่มีพันธะไดซัลไฟด์ (di-sulfide bond) เมื่อเกิดพันธะนี้รูพรุนจะถูกปิดในลักษณะเหมือนกับเกตวาล์วทำให้สารยับยั้งการกัดกร่อนไม่สามารถปลดปล่อยสารยับยั้งการกัดกร่อนออกไปได้ดังแสดงในรูปที่ 4.11 ซึ่งเมื่ออนุภาคอยู่ในสถานะน้ำเกลือที่มีกรดส่งผลให้ตัวรีดิวซ์ทำให้พันธะไดซัลไฟด์เปลี่ยนแปลงไปเนื่องจากการเกิดปฏิกิริยารีดอกซ์ทำให้สามารถปลดปล่อยเบนโซไตรอะโซลออกมาได้ ด้วยการทำงานในลักษณะนี้ส่งผลให้ไทออลสามารถควบคุมการปลดปล่อยเบนโซไตรอะโซลได้



รูปที่ 4.12 แผนภาพแสดงการควบคุมการปลดปล่อยเบนโซไตรอะโซลของอนุภาคที่มีหมู่ไทออลในสถานะน้ำเกลือที่มีความเป็นกรด

#### 4.4.3 ความสามารถในการป้องกันการกัดกร่อนในสถานะน้ำเกลือที่มีความเป็นด่าง (pH 9.4)

เหล็กกล้าคาร์บอนที่ถูกเคลือบแล้วจะถูกนำไปทดสอบในสถานะน้ำเกลือที่มีความเป็นด่าง (NaCl + KOH) ค่าความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 9.4 ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียสโดยเปรียบเทียบสารเคลือบที่มีอนุภาคแต่ละชนิดที่บรรจุสารยับยั้งแล้ว



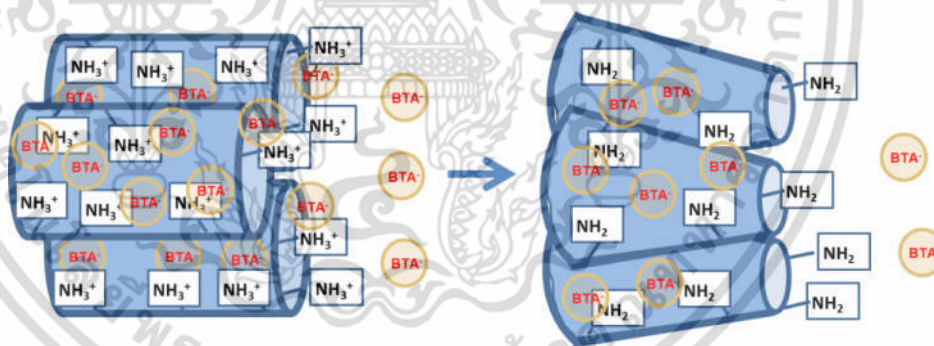
รูปที่ 4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าและศักย์ไฟฟ้าในสถานะน้ำเกลือร้อยละ 1 โดยน้ำหนักที่มีความเป็นด่าง (pH 9.4) ของแผ่นเหล็กกล้าและแผ่นเหล็กกล้าที่ผ่านการเคลือบแบบต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.6 ค่า  $i_{\text{corr}}$  และ  $E_{\text{corr}}$  ของอนุภาคหลังบรรจุเบนโซไตรอะโซลในสถานะต่าง

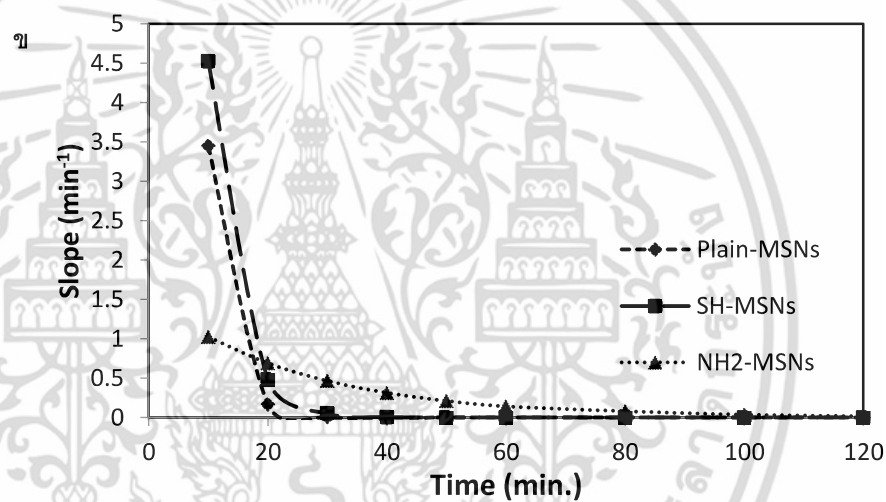
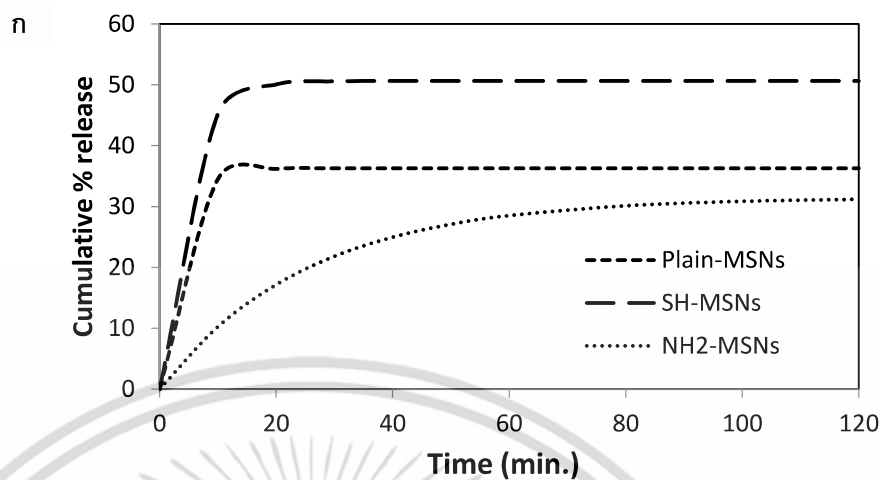
ตัวอย่าง	$J_{\text{corr}}$ ( $\text{A}/\text{cm}^2$ )	$E_{\text{corr}}$ (V)	ประสิทธิภาพที่เพิ่มขึ้น (%)
Pure resin	$1.6 \times 10^{-5}$	-0.478	อ้างอิง
Plain-MSNs	$9.5 \pm 1.7 \times 10^{-5}$	$-0.497 \pm 0.004$	$40.62 \pm 17$
SH-MSNs	$3.3 \pm 0.7 \times 10^{-6}$	$-0.537 \pm 0.005$	$79.38 \pm 21$
$\text{NH}_2$ -MSNs	$6.3 \pm 0.8 \times 10^{-6}$	$-0.513 \pm 0.01$	$60.38 \pm 13$

จากตารางที่ 4.6 จะเห็นว่าสารเคลือบที่นำมาใช้ร่วมกับอนุภาคที่สังเคราะห์ร่วมกับหมู่เอมีนให้ความสามารถในการป้องกันการกัดกร่อนได้ดีที่สุดเนื่องจากสามารถควบคุมการปลดปล่อยได้ช้าที่สุดเนื่องจากความหุ่มเอมีนในสถานะน้ำเกลือที่ความเป็นกลางจะอยู่ในรูปเอมีนประจุบวก (Protonated amine;  $\text{NH}_3^+$ ) เปลี่ยนไปเป็นไพรมารีเอมีน (Primary amine;  $\text{NH}_2$ ) ซึ่งในรูปนี้หมู่เอมีนสามารถเกิดแรงพันธะไฮโดรเจนระหว่างกันได้ส่งผลให้รูพรุนมีการหดตัวเข้าหากันทำให้การปลดปล่อยสารเบนโซไตรอะโซลมีปริมาณน้อยลงดังแผนภาพที่ 4.14



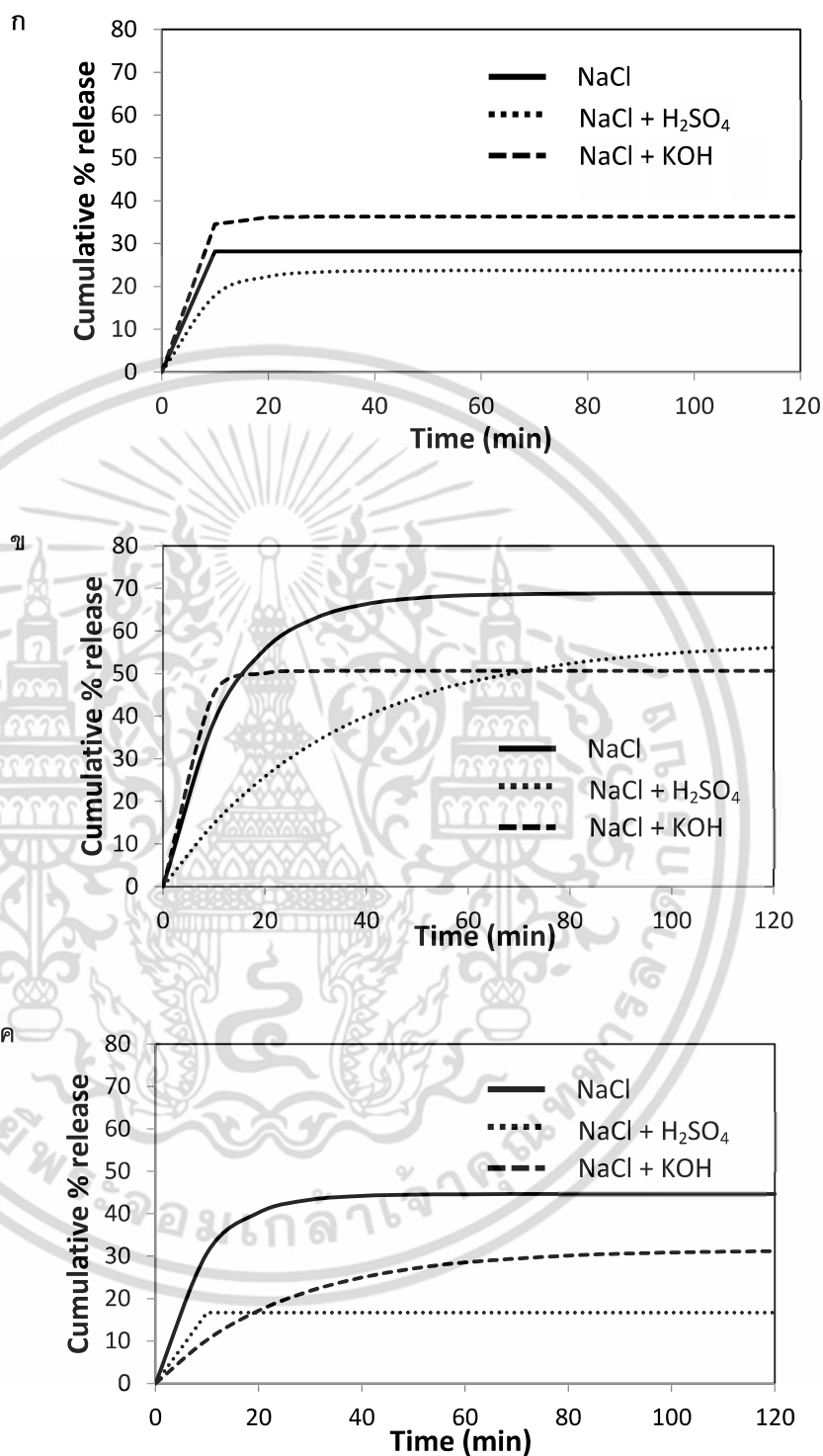
รูปที่ 4.14 แผนภาพแสดงการชะลอการปลดปล่อยเบนโซไตรอะโซลของหมู่เอมีน

รองลงมาคืออนุภาคที่สังเคราะห์ร่วมกับหมู่ไทออลเนื่องจากอนุภาคที่ไม่ผ่านการปรับแต่งที่ผิวและอนุภาคที่ปรับแต่งด้วยหมู่ไทออล จากกราฟแสดงการปลดปล่อยเบนโซไตรอะโซลจะเห็นว่า การปลดปล่อยเท่ากับค่าคงที่ตั้งแต่เริ่มแสดงว่าไม่สามารถควบคุมการปลดปล่อยได้ แต่หมู่ไทออลปลดปล่อยออกมาได้มากกว่าและมีคุณสมบัติในการไม่ชอบน้ำทำให้สามารถป้องกันการกัดกร่อนได้ดีกว่า



รูปที่ 4.15 ก) ความเข้มข้นของเบนโซไตรอะโซล ข) อัตราการปลดปล่อยเบนโซไตรอะโซลที่ปลดปล่อยออกมาจากอนุภาคแต่ละชนิดในสภาวะน้ำเกลือที่มีความเป็นด่าง (pH 9.4)

จากการเปรียบเทียบความสามารถในการปลดปล่อยสารยับยั้งการกัดกร่อนในแต่ละสภาวะ จะเห็นว่าอนุภาคที่มีการปรับแต่งที่ผิวจะมีความสามารถในการตอบสนองต่อค่าความเป็นกรด-ด่างได้ดีกว่าเมื่อเทียบกับอนุภาคที่ไม่ผ่านการปรับแต่งที่ผิวสังเกตจากรูปที่ 4.16ก

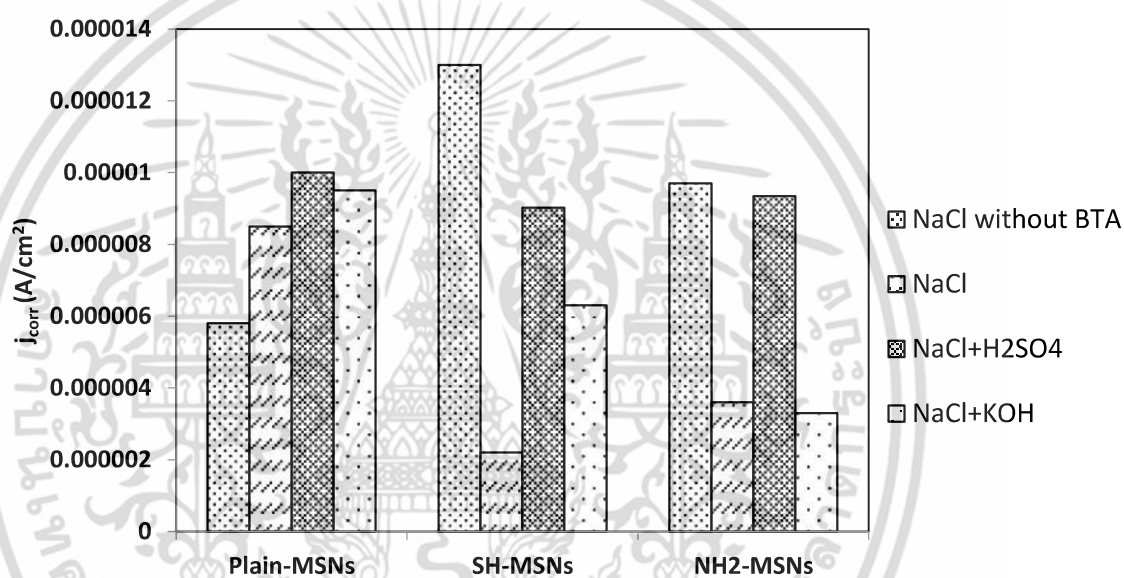


รูปที่ 4.16 ความเข้มข้นของเบนโซอิกที่ปลดปล่อยออกมาจากอนุภาค (ก) ที่ไม่ผ่านการปรับแต่งหมู่ฟังก์ชัน (ข) อนุภาคที่ผ่านการปรับแต่งหมู่ฟังก์ชันไทออลและ (ค) เอมิน ในสภาวะน้ำเกลือที่ค่าความเป็นกรด-ต่างต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูป 4.16 จะเห็นว่าอนุภาคที่ไม่ผ่านการปรับแต่งที่ผิวมีลักษณะการปลดปล่อยโดยทันทีทันใด (Burst release) [20] โดยจะปลดปล่อยได้มากในสภาวะต่างเนื่องจากแรงผลักของประจุไฟฟ้าสังเกตได้จากรูป 4.16g แตกต่างกับอนุภาคที่ผ่านการปรับผิว ด้วยความสามารถที่ตอบสนองต่อค่าความเป็นกรด-ด่างมีส่วนช่วยให้สามารถควบคุมการปลดปล่อยของสารยับยั้งทำให้อนุภาคที่ผ่านการปรับแต่งที่ผิวสามารถช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการป้องกันการกัดกร่อนได้

จากการทดลองเมื่อพิจารณาความคุณสมบัติต่างๆของอนุภาคแต่ละชนิดในสภาวะต่างๆเทียบกับความสามารถในการป้องกันการกัดกร่อนจะสามารถสรุปได้ดังต่อไปนี้



รูปที่ 4.17 กราฟแท่งแสดงค่า  $j_{\text{corr}}$  ของอนุภาคแต่ละชนิดในแต่ละสภาวะ

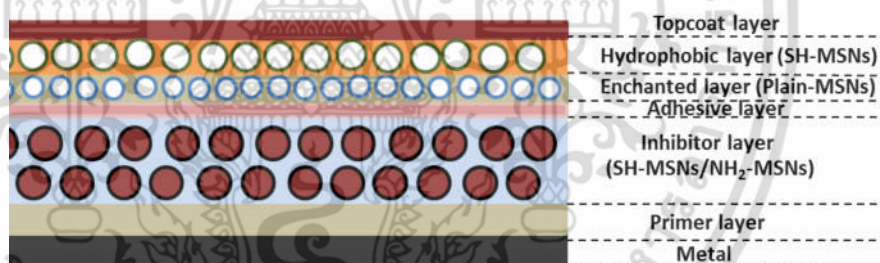
เมื่อพิจารณาจากกราฟแท่งจะเห็นว่าอนุภาคที่ไม่ผ่านการปรับแต่งผิวจะเหมาะสมในการใช้งานในกรณีที่ชั้นเคลือบมีข้อจำกัดในเรื่องของความหนาในระบบที่ชั้นเคลือบไม่มีการใช้สารยับยั้งการกัดกร่อน ในระบบที่ไม่มีการใช้สารยับยั้งการกัดกร่อนเบนโซไตรอะโซลจะสามารถกระจายตัวได้ค่อนข้างดีและช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการป้องกันการกัดกร่อนได้มีประสิทธิภาพ แต่ในกรณีที่ชั้นเคลือบมีความหนามากยิ่งขึ้นอนุภาคที่มีหมู่ไทออลจะเหมาะสมมากกว่าเนื่องจากอนุภาคที่มีหมู่ไทออลมีความสามารถในการป้องกันน้ำจึงสามารถช่วยในการป้องกันการกัดกร่อน

ในระบบที่มีการใช้สารยับยั้งการกัดกร่อนอนุภาคแต่ละชนิดจะเหมาะสมในระบบที่มีค่าความเป็นกรด-ด่างต่างกัน โดยในสภาวะน้ำเกลือปกติหมู่ไทออลจะแสดงผลได้ดีเนื่องจากสามารถควบคุมการปลดปล่อยได้ดีกว่าเมื่อเทียบกับอนุภาคชนิดอื่น ในสภาวะน้ำเกลือที่มีความเป็นกรดอนุภาคที่มีหมู่ไทออล

แสดงความสามารถในการควบคุมการปลดปล่อยสารยับยั้งการกัดกร่อนได้ดีกว่าอีกเช่นกันส่งผลให้อนุภาคที่มีหมู่ไทออลเหมาะสมที่จะนำไปใช้ในสภาวะน้ำเกลือที่มีความเป็นกรด หรือในสภาวะที่มีตัวรีดิวซ์ที่รุนแรงซึ่งจะสนับสนุนการทำงานในการควบคุมการปลดปล่อยของหมู่ไทออล

อนุภาคที่มีหมู่ฟังก์ชันเอมีนจากรูป 4.17 จะพบว่าอนุภาคชนิดนี้จะแสดงผลได้ดีในสภาวะที่มีความเป็นด่างเนื่องจากการทำงานของหมู่เอมีนสามารถควบคุมการปลดปล่อยได้ดีในสภาวะที่มีความเป็นด่าง ถึงแม้ว่าสารยับยั้งการกัดกร่อนที่อนุภาคที่มีหมู่เอมีนปล่อยออกมาจะมีน้อยเมื่อเทียบกับอนุภาคชนิดอื่นในสภาวะเดียวกัน แต่อนุภาคที่มีหมู่เอมีนสามารถแสดงความสามารถในการป้องกันการกัดกร่อนได้อย่างมีนัยยะสำคัญ แสดงว่าอิทธิพลของอัตราการปลดปล่อยสารยับยั้งมีมากกว่าปริมาณของสารยับยั้งที่ปลดปล่อยออกมา

กรณีที่ระบบชั้นเคลือบสามารถมีหลายชั้น การประยุกต์ใช้อนุภาคแต่ละชนิดเข้าด้วยกันเป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่น่าสนใจ เนื่องจากหมู่ไทออลมีความสามารถในการป้องกันน้ำจึงเหมาะที่จะนำมาใช้เป็นชั้นเคลือบที่ติดกับชั้นบนสุดของชั้นเคลือบ ในชั้นต่อมาจึงใช้อนุภาคที่เอมีนและไทออลในชั้นต่อมาขึ้นอยู่กับว่าระบบมีความเป็นกรดหรือด่าง



รูปที่ 4.18 ตัวอย่างการประยุกต์ใช้อนุภาคแต่ละชนิดในระบบชั้นเคลือบหลายชั้น

## บทที่ 5

# สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

### 5.1 สรุปผลการทดลอง

จากการศึกษาอิทธิพลของอนุภาคนาโนซิลิกาที่มีรูพรุนชนิดเมโซที่ใช้ร่วมกับสารเคลือบผิวเพื่อพัฒนาความสามารถในการป้องกันการกัดกร่อนที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวของเหล็กกล้าคาร์บอน สามารถสรุปได้ดังนี้

จากการทดลองพบว่าในการบรรจุเบนโซไตรอะโซลอนุภาคที่สังเคราะห์ร่วมกับหมู่เอมีนมีความสามารถในการบรรจุเบนโซไตรอะโซลได้มากที่สุดเนื่องจากความเป็นระเบียบของอนุภาคและคุณลักษณะที่พื้นผิวของหมู่เอมีน แต่ทั้งนี้อนุภาคที่สังเคราะห์ร่วมกับหมู่ไทออลสามารถทำให้ชั้นเคลือบมีความไม่ชอบน้ำอย่างเด่นชัดทำให้ในน้ำเกลือที่ค่าความเป็นกรด-ด่างปกติอนุภาคที่มีหมู่ไทออลแสดงประสิทธิภาพในการป้องกันการกัดกร่อนได้ดีกว่าสังเกตได้จากผลการทดลองทั้งก่อนและหลังการบรรจุเบนโซไตรอะโซล ซึ่งอนุภาคที่ยังไม่ได้บรรจุเบนโซไตรอะโซลช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการป้องกันการกัดกร่อนของสารเคลือบที่มีแต่เพียงเรซินเพียงอย่างเดียวสำหรับอนุภาคที่ไม่ผ่านการปรับแต่งและอนุภาคที่มีหมู่ไทออล เนื่องจากอนุภาคที่ไม่ได้ผ่านการปรับแต่งหมู่ฟังก์ชันช่วยลดรูพรุนที่เกิดจากการแข็งตัวของสารเคลือบและความไม่ชอบน้ำของอนุภาคที่มีหมู่ไทออล แต่สำหรับอนุภาคที่มีหมู่เอมีนมีขนาดใหญ่และมีคุณสมบัติที่ชอบน้ำมากกว่าจึงทำให้ไม่สามารถแสดงประสิทธิภาพในการป้องกันการกัดกร่อนได้ดี อีกทั้งอนุภาคที่มีหมู่ไทออลยังแสดงความสามารถในการควบคุมการปลดปล่อยเบนโซไตรอะโซลได้ซ้ำอีกด้วย ซึ่งในสภาวะน้ำเกลือที่มีความเป็นกรด (pH 4.4) อนุภาคที่สังเคราะห์ร่วมกับหมู่ไทออลยังคงแสดงความสามารถในการปลดปล่อยได้ซ้ำ อีกทั้งยังสามารถปลดปล่อยในปริมาณที่มากกว่าอนุภาคชนิดอื่น ส่งผลให้อนุภาคที่สังเคราะห์ร่วมกับหมู่ไทออลมีความสามารถในการต้านทานการกัดกร่อนได้ดีมากกว่าในทางตรงกันข้ามที่สภาวะน้ำเกลือที่มีความเป็นด่าง (pH 9.4) อนุภาคที่สังเคราะห์ร่วมกับหมู่เอมีนสามารถแสดงประสิทธิภาพในการป้องกันการกัดกร่อนได้ดีกว่าอนุภาคที่สังเคราะห์ร่วมกับหมู่ไทออล เนื่องจากความสามารถในการควบคุมการปลดปล่อยของเบนโซไตรอะโซลได้ซ้ำ และปริมาณที่มากกว่า

อนุภาคที่ผ่านการปรับแต่งหมู่ฟังก์ชันด้วยหมู่เอมีนและไทออลแสดงความสามารถในการตอบสนองต่อค่าความเป็นกรด-ด่างในแต่ละสภาวะ ด้วยความสามารถนี้ทำให้อนุภาคที่ผ่านการปรับแต่งที่

ผิวเมื่อถูกนำไปใช้ร่วมกับสารยึดเพื่อเป็นสารเคลือบผิวทำให้แสดงประสิทธิภาพในการป้องกันการกัดกร่อนได้ดียิ่งกว่าอนุภาคที่ไม่ผ่านการปรับแต่งผิว

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

1. สารยับยั้งในงานวิจัยนี้เป็นสารยับยั้งประเภทอินทรีย์ซึ่งมีข้อจำกัดในการใช้งานที่มีอุณหภูมิสูง ควรทดลองเพื่อหาขีดจำกัดความสามารถในการป้องกันการกัดกร่อนของสารยับยั้งประเภทนี้
2. อนุภาคที่สังเคราะห์ร่วมกับหมู่เอมีนอาจแสดงประสิทธิภาพที่ดีกว่านี้ได้ในสภาวะที่มีความเป็นกรด-ด่างสูงกว่า ควรลองทดสอบเพื่อหาความสามารถในการป้องกันการกัดกร่อนของอนุภาคชนิดนี้และสังเกตการปลดปล่อยเบนโซไตรอะโซลที่เวลาใดๆ ในสภาวะที่มีความเป็นด่างสูง
3. อนุภาคที่สังเคราะห์ร่วมกับหมู่ไฮดรอกซิลมีความสามารถในการไม่ชอบน้ำที่ดีเหมาะแก่การนำไปใช้เคลือบบริเวณผิวหน้าในระบการเคลือบหลายชั้น (Multilayer coating) หรือใช้เป็นชั้นของสารยับยั้งเพื่อป้องกันการกัดกร่อนในสภาวะกรดก็ได้

## เอกสารอ้างอิง

- [1] Viswanathan S. Saji, Ronald Cook (2012). **Corrosion protection and control using nanomaterials**. Philadelphia: Woodhead Publishing Limited.
- [2] Atul Tiwari, James Rawlins, Lloyd H. Hihara (2015). **Intelligent Coatings for Corrosion Control**. Kidlington: Butterworth Heinemann.
- [3] Viswanathan S. Saji, Ronald Cook (2012). **Corrosion protection and control using nanomaterials**. Philadelphia: Woodhead Publishing Limited.
- [4] C. T. J. Low, R. G. A. Wills, F. C. Walsh, “Electrodeposition of composite coatings containing nanoparticles in a metal deposit”, **Surface & Coatings Technology**, Vol. 201, 2006, 371-383.
- [5] R. C. Agarwala, R. Sharma, “Electroless Ni-P nanocoating technology”, **Synthesis and Reactivity in Inorganic, Metal-Organic, and Nano-Metal Chemistry**, Vol. 38, 2008, pp. 299-36.
- [6] K. van Dijk, H. G. Schaecken, J. G. C. Wolke, J. A. Jansen, “Influence of annealing temperature on RF magnetron sputtered calcium phosphate coatings”, **Biomaterials**, Vol. 17, 1996, pp. 405-410.
- [7] Z. Li, W. Gao, Y. He, “Protection of a Ti<sub>3</sub>Al-Nb alloy by electro-spark deposition coating”, **Scripta Materialia**, Vol. 45, 2001, pp. 1099-1105.
- [8] R. H. Fernando, “Nanocomposite and Nanostructured Coatings: Recent Advancements”, **Nanotechnology applications in coatings**, 2009, 2-21.
- [9] M. Kendig, S. Jeanjaquet, R. Addison, J. Waldrop, “Role of hexavalent chromium the inhibition of corrosion of aluminium alloys”, **Surface and Coatings Technology**, Vol. 140, 2001, pp. 58-66.
- [10] N. N. Voevodin, N.T. Grebasch, W.S. Soto, F.E. Arnold, M.S. Donley, “Potentiodynamic evaluation of sol-gel coatings with inorganic inhibitors”, **Surface and Coatings Technology**, Vol. 140, 2001, pp. 24-28.

## เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- [11] G. Bierwagen, R. Brown, D. Battochi, S. Hayes, “Active metal-based corrosion protective coating systems for aircraft requiring no-chromate pretreatment”, **Progress in organic coating**, Vol. 68, 2010, pp. 48-61.
- [12] N. Wang, K. Cheng, H. Wu, C. Wang, Q. Wang, F. Wang, “Effect of nano-sized mesoporous silica MCM-41 on corrosion properties of epoxy coating”, **Progress in Organic Coatings**, Vol. 75, 2012, pp. 386-391.
- [13] I. Recloux, M. Mouanga, M.-E. Druart, Y. Paint, M.-G. Olivier, “Silica mesoporous thin films as containers for benzotriazole for corrosion protection of 2024 aluminium alloys. **Applied Surface Science**, Vol. 346, 2015, 124-133.
- [14] E. V. Skorb, D. Fix, D. V. Andreeva, H. Mohwald, D. G. Shchukin, “ Surface-Modified Mesoporous SiO<sub>2</sub> Containers for Corrosion Protection”, **Advanced Functional Materials**, Vol. 19, 2009, pp. 2373-2378.
- [15] M. Yeganeh, M. Saremi, H. Rezeyan, “Corrosion inhibition of steel using mesoporous silica nanocontainers incorporated in the polypyrrole”, **Progress in Organic Coatings**, Vol. 77, 2014, pp. 1428-1435.
- [16] S. Sadasivan, D. Khushalan, S. Mann, “Synthesis and shape modification of organofunctionlised silica nanoparticles with ordered mesoporous structured interiors”, **Jounal of Materials Chemistry**, Vol. 13, 2003, pp. 1023-1029.
- [17] T. Suteewong, H. Sai, R. Cohen, S. Wang, M. Bradbury, B. Baird, S. M. Gruner, U. Wiesner, “Highly Aminated Mesoporous Silica Nanoparticles with Cubic Pore Structure”, **Jounal of American Chemical Society**, Vol. 2, 2011, pp. 172-175.
- [18] R. P. Hodgkins, A. Ahniyaz, K. Parekh, L. M. Belova, L. Bergstrom, “Maghemite Nanocrstal Impregnation by Hydrophobic Surface Modification of Mesoporous Silica”, **Langmuir**, Vol. 23, 2007, pp. 8838-8844.

## เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- [19] R. L. Williams, M. J. Hadley, P. J. Jiang, N. A. Rowson, P. M. Mendes, J. Z. Rappoport, L. M. Grover, “ Thiol modification of silicon-substituted hydroxyapatite nanocrystals facilitated fluorescent labeling and visualization of cellular internalization”, **J. Mater. Chem. B**, Vol. 1, 2013, pp. 4370.
- [20] L. Ejenstam, A. Swerin, J. Pan, P. M. Claesson, “Corrosion protection by hydrophobic silica particle polydimethylsiloxane composite coating”, **Corrosion science**, Vol. 99, 2015, pp. 89-97.
- [21] X. Huang, C. S. Brazel, “On the importance and mechanisms of burst release in matrix-controlled drug delivery systems”, **Journal of controlled release**, Vol. 73, 2001, 121-136.
- [22] A. Bard, L. Faulkner, “Electrochemical Methods-fundamentals and Applications, 2<sup>nd</sup> Edition, New York: John Wiley and sons.
- [23] Y. Yuan, T. R. Lee, “Chapter 1: Contact angle and Wetting Properties”, Houston: Springer.

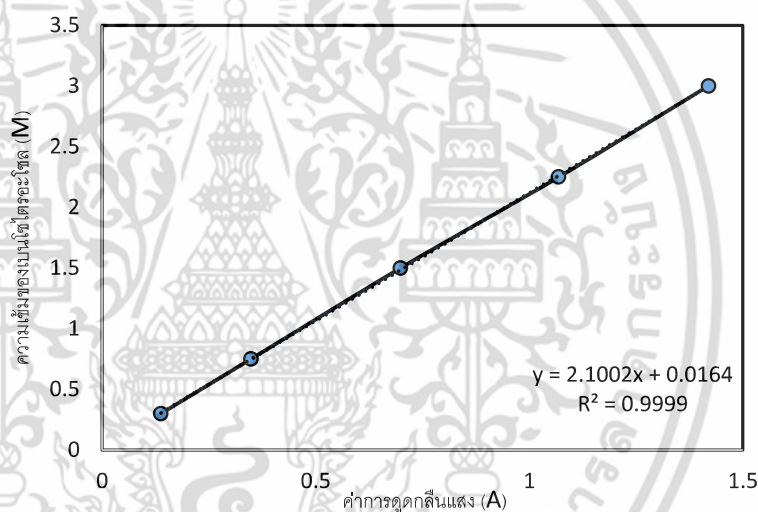


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### ก.1 การดูดกลืนแสงและความเข้มข้นของเบนโซไตรอะโซล

ตารางที่ ก.1.1 แสดงค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายเบนโซไตรอะโซลที่ค่าความเข้มข้นต่างๆเพื่อสร้างกราฟมาตรฐานในสารละลายเอทานอล

ความเข้มข้น (โมลาร์)	ค่าการดูดกลืนแสง
3	1.420
2.25	1.069
1	0.699
0.75	0.349
0.3	0.138

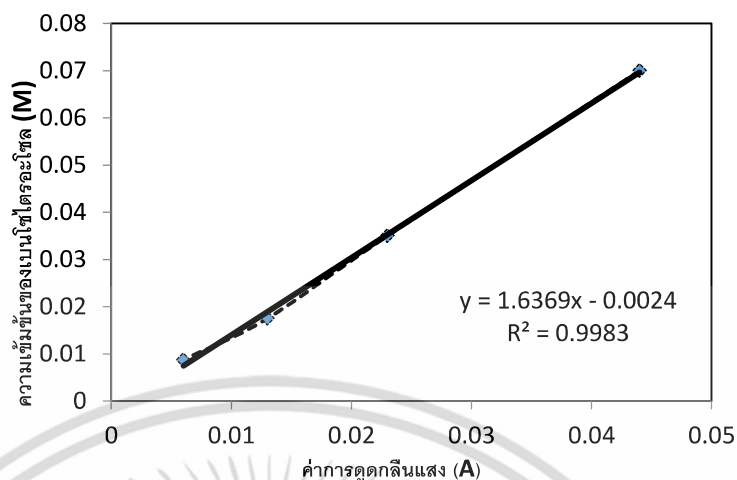


รูปที่ ก.1.1 กราฟมาตรฐานสารละลายเบนโซไตรอะโซลในสารละลายเอทานอลที่ความเข้มข้นต่างๆ

ตารางที่ ก.1.2 แสดงค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายเบนโซไตรอะโซลที่ค่าความเข้มข้นต่างๆเพื่อสร้างกราฟมาตรฐานในน้ำเกลือ

ความเข้มข้น (โมลาร์)	ค่าการดูดกลืนแสง
0.07	0.044
0.035	0.023
0.0175	0.013
0.0087	0.006

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ก.1.1 กราฟมาตรฐานสารละลายเบนโซไตรอะโซลในน้ำเกลือที่ความเข้มข้นต่างๆ

ตาราง ก.1.3 แสดงค่าการดูดกลืนแสงของเบนโซไตรอะโซลที่เหลือในของเหลวใสหลังบรรจุในอนุภาคซิลิกาที่มีรูพรุนชนิดเมโซแต่ละชนิด

ชนิดของอนุภาค	ค่าการดูดกลืนแสง								ค่าการดูดกลืนแสงเฉลี่ย
	1.284	1.269	1.267	1.265	1.281	1.242	1.23	1.32	
MSNs	1.284	1.269	1.267	1.265	1.281	1.242	1.23	1.32	1.275±0.02
SH-MSNs	1.271	1.288	1.234	1.248	1.222	1.222	1.287	1.288	1.269±0.03
NH2-MSNs	1.115	1.172	1.245	1.256	1.246	1.201	1.288	1.26	1.236±0.05

ตาราง ก.1.4 แสดงค่าความสามารถในการบรรจุเบนโซไตรอะโซลในเอทานอลที่ความเข้มข้น 3 โมลาร์ในอนุภาคแต่ละชนิด

ชนิดของอนุภาค	ค่าการดูดกลืนแสง	ความเข้มข้น	ความเข้มข้น	น้ำหนักของ BTA ที่บรรจุ (g)	เปอร์เซ็นต์การบรรจุ (%)
		BTA ที่เหลือในของเหลวใสหลังบรรจุ (M)	BTA ที่อยู่ในอนุภาค (M)		
MSNs	1.275	2.694	0.305	0.545	10.17±1.5
SH-MSNs	1.269	2.683	0.317	0.566	10.56±2.2
NH2-MSNs	1.236	2.612	0.387	0.692	12.91±3.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ก.2 การกัดกร่อนบนพื้นผิวของเหล็กกล้าคาร์บอน

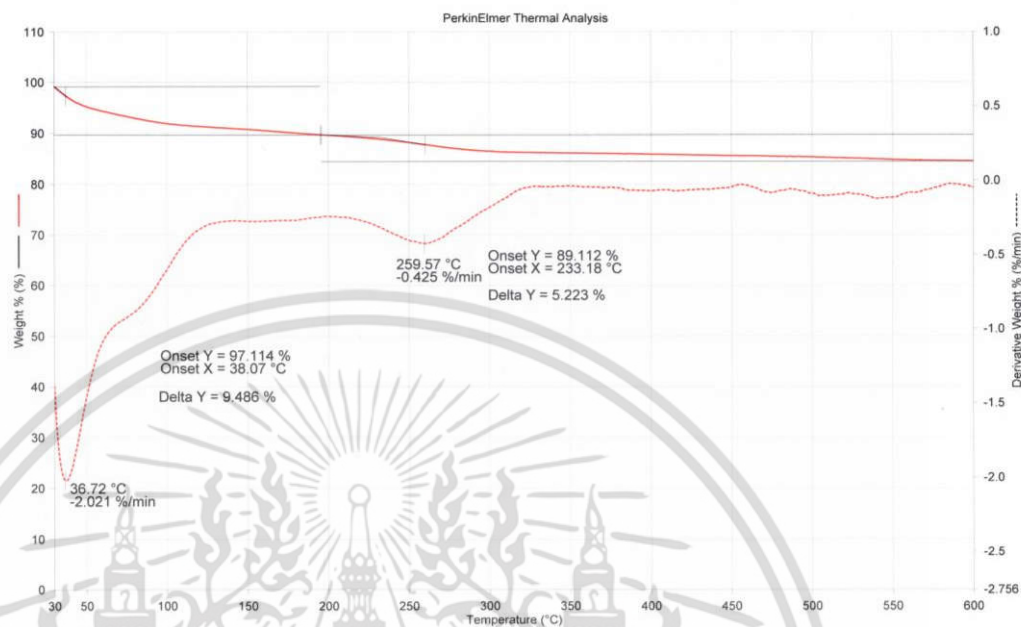
ตารางที่ ก.2.1 แสดงค่าศักย์การกัดกร่อน ( $E_{\text{corr}}$ ) ค่ากระแสการกัดกร่อน (Corrosion current density;  $i_{\text{corr}}$ ) และอัตราการกัดกร่อน (Corrosion rate) ของอนุภาคแต่ละชนิดในแต่ละสภาวะ

ชนิดของอนุภาค	สภาวะเกลือ			สภาวะเกลือ+กรด			สภาวะเกลือ+ด่าง		
	$E_{\text{corr}}$ (V)	$J_{\text{corr}}$ ( $\text{A}/\text{cm}^2$ )	Corrosion rate ( $\text{mm}/\text{y}$ )	$E_{\text{corr}}$ (V)	$J_{\text{corr}}$ ( $\text{A}/\text{cm}^2$ )	Corrosion rate ( $\text{mm}/\text{y}$ )	$E_{\text{corr}}$ (V)	$J_{\text{corr}}$ ( $\text{A}/\text{cm}^2$ )	Corrosion rate ( $\text{mm}/\text{y}$ )
MSN	-0.417	$8.5 \times 10^{-6}$	0.0995	-0.477	$1.0 \times 10^{-5}$	0.1164	-0.478	$9.5 \times 10^{-5}$	0.1103
SH-MSN	-0.458	$2.2 \times 10^{-6}$	0.0422	-0.492	$9.3 \times 10^{-6}$	0.1049	-0.537	$6.3 \times 10^{-6}$	0.0736
$\text{NH}_2$ -MSN	-0.488	$3.6 \times 10^{-6}$	0.0256	-0.538	$9.0 \times 10^{-6}$	0.1086	-0.513	$3.3 \times 10^{-6}$	0.0385

ตารางที่ ก.2.2 แสดงค่าศักย์การกัดกร่อน ( $E_{\text{corr}}$ ) ค่ากระแสการกัดกร่อน (Corrosion current density;  $i_{\text{corr}}$ ) และอัตราการกัดกร่อน (Corrosion rate) ของอนุภาคแต่ละชนิดในสภาวะน้ำเกลือโดยใช้ความเร็วรอบในการเคลื่อน 750 รอบต่อนาที

ชนิดของอนุภาค	สภาวะเกลือ		
	$E_{\text{corr}}$ (V)	$J_{\text{corr}}$ ( $\text{A}/\text{cm}^2$ )	Corrosion rate ( $\text{mm}/\text{y}$ )
MSN	-0.490	$1.1 \times 10^{-5}$	0.1220
SH-MSN	-0.466	$5.4 \times 10^{-6}$	0.0624
$\text{NH}_2$ -MSN	-0.507	$6.7 \times 10^{-6}$	0.0783

### ก.3 กราฟเทอร์โมแกรมจากการวิเคราะห์สารด้วยเครื่อง TGA

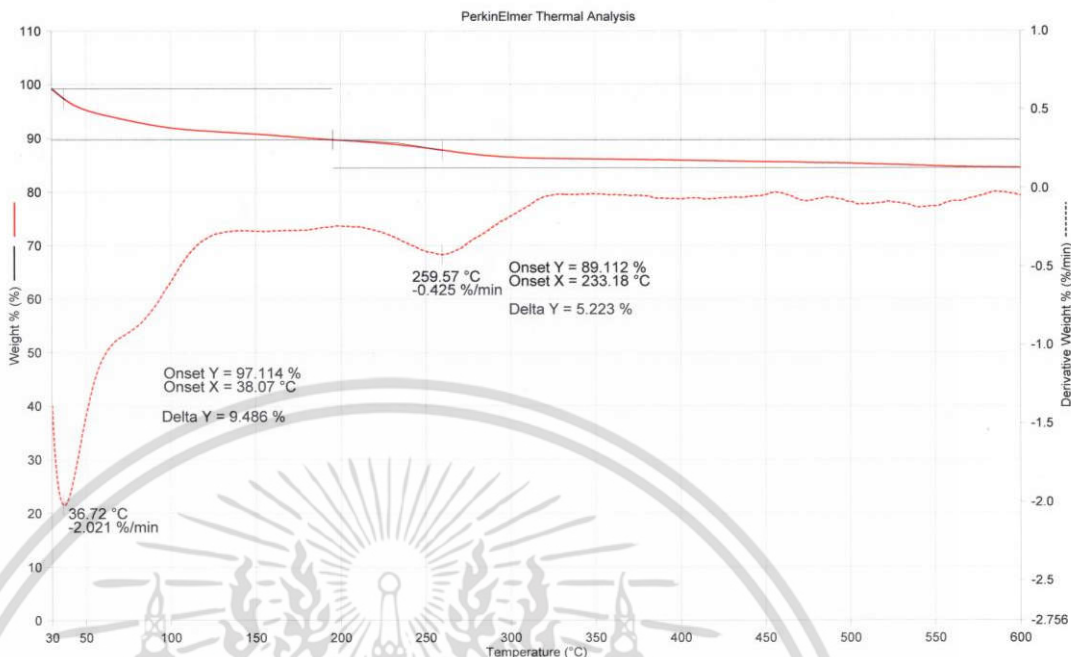


รูปที่ ก.3.1 เทอร์โมแกรมจากการวิเคราะห์ Plain-MSNs ที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส



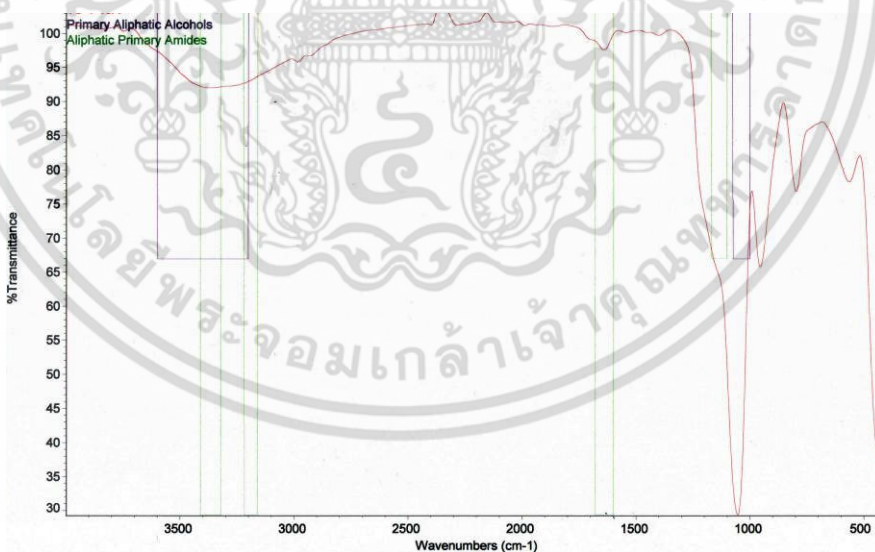
รูปที่ ก.3.2 เทอร์โมแกรมจากการวิเคราะห์ SH-MSNs (ร้อยละ 20 โดยปริมาตร) ที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



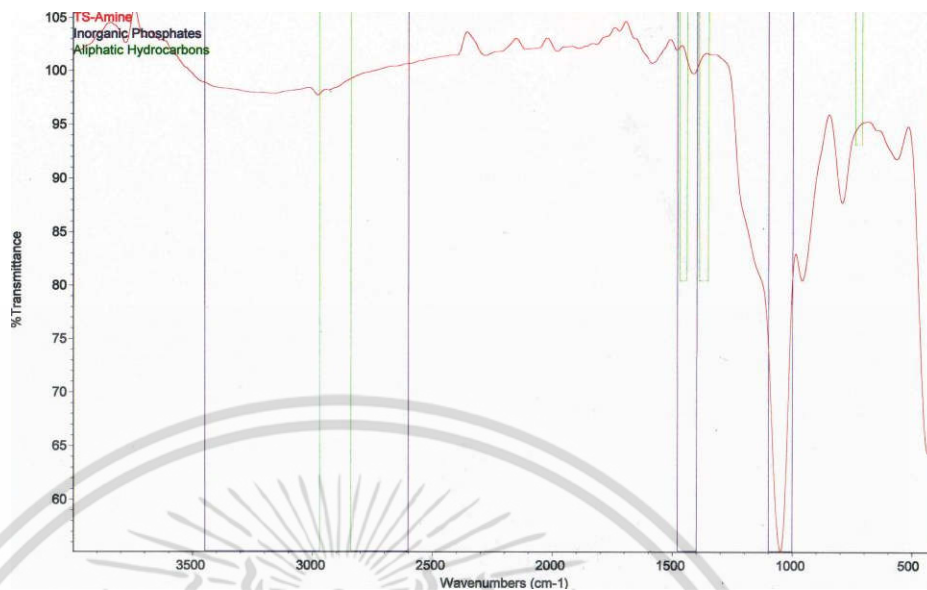
รูปที่ ก.3.3 เทอร์โมแกรมจากการวิเคราะห์ NH<sub>2</sub>-MSNs (ร้อยละ 20 โดยปริมาตร) ที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส

ก.4 กราฟอินฟราเรดสเปกตรัมจากเครื่องวิเคราะห์สารด้วยอินฟราเรด (FTIR)

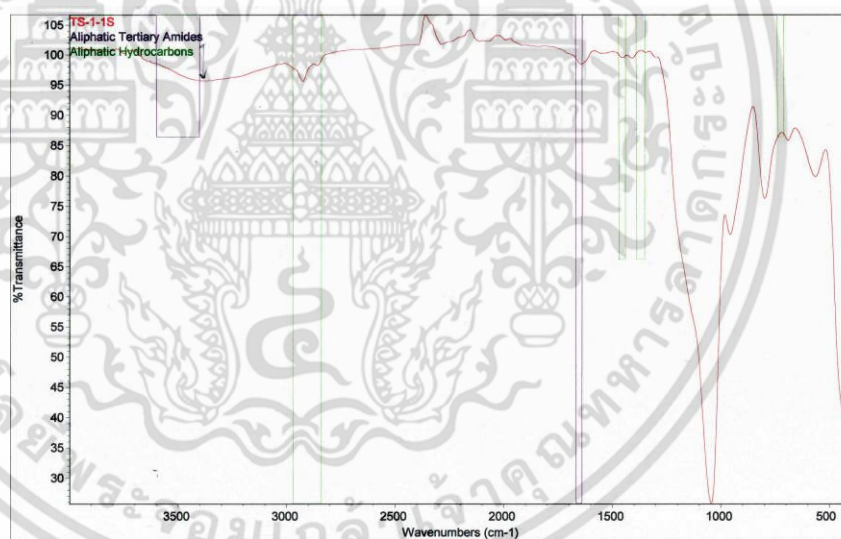


รูปที่ ก.4.1 อินฟราเรดสเปกตรัมจากการวิเคราะห์ Plain-MSNs ที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ก.4.2 อินฟราเรดสเปกตรัมจากการวิเคราะห์  $\text{NH}_2\text{-MSNs}$  ที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส



รูปที่ ก.4.3 อินฟราเรดสเปกตรัมจากการวิเคราะห์  $\text{SH-MSNs}$  ที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ข.1 การสร้างกราฟมาตรฐานสารละลายเบนโซไตรอะโซลในเอทานอล

การสร้างกราฟมาตรฐานระหว่างค่าการดูดกลืนแสงและความเข้มข้นของสารละลายเบนโซไตรอะโซลในเอทานอลทำได้โดย

1. เตรียมสารละลายเบนโซไตรอะโซลในเอทานอล ความเข้มข้น 3 โมลาร์โดยละลายเบนโซไตรอะโซล 17.85 กรัมด้วยเอทานอลแล้วปรับปริมาตรเป็น 50 มิลลิลิตร
2. นำสารละลายเบนโซไตรอะโซล ความเข้มข้น 3 โมลาร์ มาตรวจหาค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่อง UV-vis spectrophotometer
3. คำนวณหาช่วงความสัมพันธ์ของการดูดกลืนและความเข้มข้นที่เหมาะสมต่อการวิเคราะห์ โดยกฎของเบียร์ แลมเบิร์ต (Beer-Lambert law) ดังสมการ

$$A = \epsilon CL \quad (\text{ข-1})$$

เมื่อ  $A$  = ค่าการดูดกลืนแสงของสาร (absorbance)

$\epsilon$  = สมบัติจำเพาะของสารที่ดูดกลืนและวัดที่ความยาวค่าหนึ่งเรียกว่า molar absorptivity (L/mol x cm)

$L$  = ระยะทางที่แสงผ่านตัวอย่าง หรือความกว้างของเซลล์

$C$  = ความเข้มข้น (โมล/ลิตร)

### ตัวอย่าง

นำสารละลายเบนโซไตรอะโซลความเข้มข้น 3 โมลาร์ใส่ในเซลล์ความกว้าง 1 เซนติเมตร แล้ววัดค่าการดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่นที่มีการดูดกลืนมากที่สุดที่ 355 นาโนเมตร อ่านค่าการดูดกลืนได้ 1.014 การคำนวณหาช่วงความเข้มข้นทำได้โดย (ค่าการดูดกลืนแสงของเบนโซไตรอะโซลจะอยู่ในช่วงการใช้งานปกติ  $A = 0.1 - 1$ )

จากสมการที่ ข-1

$$1.014 = \epsilon_{355} (1.000 \text{ cm})(3 \text{ M})$$

$$\epsilon_{355} = 0.338 \text{ L}/(\text{mol} \times \text{cm})$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หาช่วงการใช้งานปกติ ( $A = 0.1 - 1.0$ ) จากสมการ

$$A = \varepsilon_{355} CL$$

$$0.100 = 0.338(1.000)(C)$$

$$C = 0.295 \text{ M.}$$

$$A = \varepsilon_{355} CL$$

$$1.000 = 0.338(1.000)(C)$$

$$C = 2.958 \text{ M.}$$

ดังนั้นควรเตรียมสารละลายในช่วง 0.3 ถึง 3 โมลาร์

## ข.2 สัดส่วนการบรรจุเบนโซไตรอะโซล

วิธีการคำนวณเปอร์เซ็นต์การบรรจุเบนโซไตรอะโซลสามารถคำนวณได้จากสมการ

$$\%Loading = \frac{Weight_{loaded}}{Weight_{BTA}} \times 100 \quad (\text{ข-2})$$

เมื่อน้ำหนักของเบนโซไตรอะโซลที่บรรจุ - น้ำหนักของเบนโซไตรอะโซลเริ่มต้น = น้ำหนักของเบนโซไตรอะโซลที่อยู่ในของเหลวใส

### ตัวอย่าง

จากตารางที่ ก.2.3 การศึกษาความสามารถการบรรจุเบนโซไตรอะโซล โดยเบนโซไตรอะโซลในเอทานอลความเข้มข้น 3 โมลาร์ (3.57 กรัม/10 มิลลิลิตร) บรรจุเข้าสู่อนุภาคที่มีรูพรุนชนิดเมโซ 0.01 กรัม คำนวณเปอร์เซ็นต์การบรรจุเบนโซไตรอะโซลได้เท่ากับ

จากสมการที่ ข-2

$$\%Loading = \frac{3.57 - 0.149}{3.57} \times 100 = 13.75\%$$

## ข.2 การคำนวณความเข้มข้นของเบนโซไตรอะโซลในเอทานอล

วิธีการคำนวณหาความเข้มข้นของเบนโซไตรอะโซลในเอทานอล สามารถหาได้จากกราฟมาตรฐาน ดังรูปที่ ข.1 สมการเส้นตรงคือ

$$Y = 2.100X + 0.0164 \quad (\text{ข-3})$$

เมื่อ X คือ ค่าการดูดกลืนแสงจากการวิเคราะห์ด้วย UV-VIS spectrophotometer

Y คือ ค่าความเข้มข้นของสารละลายเบนโซไตรอะโซลในเอทานอล (โมลาร์)

## ข.3 การคำนวณความเข้มข้นของเบนโซไตรอะโซลในน้ำเกลือ

วิธีการคำนวณหาความเข้มข้นของเบนโซไตรอะโซลในน้ำเกลือ สามารถหาได้จากกราฟมาตรฐาน ดังรูปที่ ข.1 สมการเส้นตรงคือ

$$Y = 0.6099X + 0.0015 \quad (\text{ข-3})$$

เมื่อ X คือ ค่าการดูดกลืนแสงจากการวิเคราะห์ด้วย UV-VIS spectrophotometer

Y คือ ค่าความเข้มข้นของสารละลายเบนโซไตรอะโซลในเอทานอล (โมลาร์)

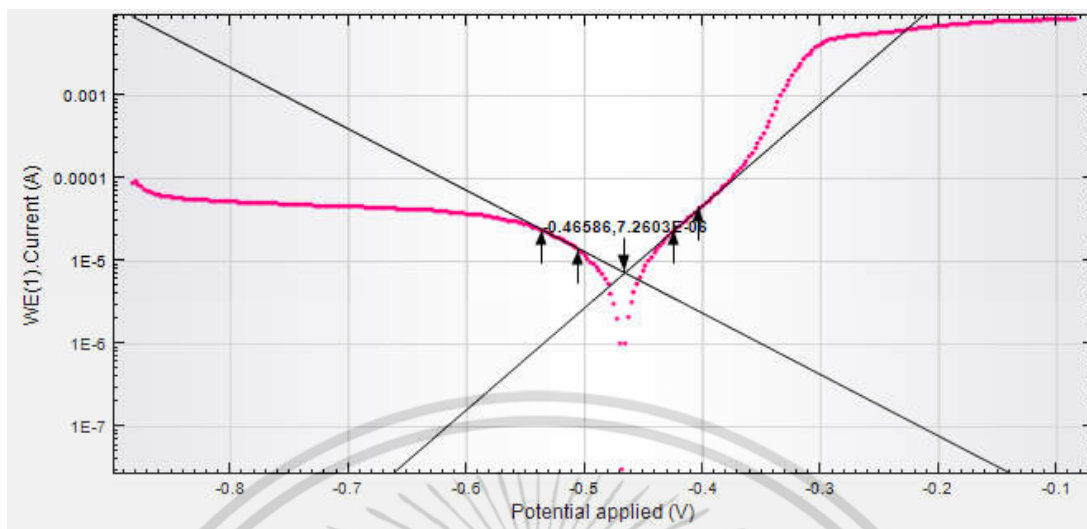
## ข.4 การคำนวณอัตราการกัดกร่อน

การคำนวณอัตราการกัดกร่อนคำนวณได้จาก Tafel extrapolation วิธีนี้มีข้อดีกว่าวิธี weight loss เนื่องจากประหยัดเวลา โดยการนำ Tafel extrapolation จะทำจากกราฟของขั้วแอโนด (Anode) และแคโทด (Cathode)

### ตัวอย่าง

การประมาณค่า  $E_{\text{corr}}$  และ  $i_{\text{corr}}$

การประมาณค่าศักย์การกัดกร่อนและค่าความหนาแน่นของกระแสการกัดกร่อนทำได้โดยการ extrapolation โดยใช้โปรแกรม NOVA 1.11 ดังรูป



รูปที่ ข.4.1 การ Tafel extrapolation เพื่อหาค่า  $E_{corr}$  และ  $i_{corr}$

จากรูปเป็นการหา  $i_{corr}$  และ  $E_{corr}$  ด้วยการ Anode extrapolation และ Cathode extrapolation ของ Pure resin ในสภาวะน้ำเกลือร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก โดยค่าที่ได้จะนำไปคำนวณโดยใช้กฎของฟาราเดย์ (Faraday's law) เพื่อใช้คำนวณอัตราการกัดกร่อนได้ดังสมการ

$$CR = \frac{K_i \times i_{corr} \times EW}{\rho} \quad (\text{ข-4})$$

โดยสมมุติฐานของการคำนวณนี้กำหนดให้

$CR$  (mm/yr) และ  $i_{corr}$  ( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ )

$K_i = 3.27 \times 10^{-3}$  (mmg/ $\mu\text{Acm}^2$ )

$\rho$  เท่ากับความหนาแน่นของเหล็ก =  $7.86$  ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )

$EW$  เท่ากับน้ำหนักสมมูลของโลหะ (Equivalent weight) =  $27.925$  (g/mol)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ค.1 เครื่องวัดความต้านทานการกัดกร่อนโดยใช้เทคนิคโพลาริซ์ (Potentiostat/gulvanostat) [21]

วิธีการโพเทนชิโอสแตท/กัลวานอสแตทเป็นวิธีการที่ใช้ในการวัดความสามารถในการป้องกันการกัดกร่อน ซึ่งเครื่องมือวัดความสามารถในการป้องกันการกัดกร่อนนี้สามารถแบ่งออกเป็นสองส่วนหลักๆได้คือ ส่วนจ่ายศักย์ไฟฟ้า และส่วนของเซลล์ไฟฟ้า ซึ่งส่วนที่จ่ายศักย์ไฟฟ้าสามารถจ่ายได้ละเอียดมากน้อยขึ้นอยู่กับคุณภาพของเครื่องเพื่อจ่ายศักย์ไฟฟ้า และวัดกระแสไฟฟ้าที่ได้จากการกัดกร่อน ซึ่งในส่วนของเซลล์ไฟฟ้าจะประกอบไปด้วยขั้วสามชนิดด้วยกันประกอบด้วย

1. ขั้วงาน (Working electrode)
2. ขั้วอ้างอิงมาตรฐาน (Reference electrode)
3. ขั้วไฟฟ้าคู่ใช้งาน (Counter electrode)

โดยที่ตัวอย่างของโลหะจะอยู่ที่ขั้วงานซึ่งโลหะจะสัมผัสกับสารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่มีสถานะความเข้มข้น อุณหภูมิ และปริมาณออกซิเจนในสารละลายตามกำหนด เครื่องจ่ายศักย์ไฟฟ้า จะทำการจ่ายศักย์ไฟฟ้าโดยใช้ขั้วอ้างอิงมาตรฐานเป็นขั้วอ้างอิงในการจ่ายศักย์ไฟฟ้า ซึ่งเมื่อเริ่มเกิดปฏิกิริยาการกัดกร่อนขั้วไฟฟ้าคู่ใช้งานจะเป็นขั้วที่รับอิเล็กตรอนที่ขึ้นงานสูญเสียทำให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่านครบวงจร ซึ่งการกัดกร่อนจะเริ่มเกิดขึ้นเมื่อค่าศักย์ไฟฟ้าที่เครื่องจ่ายป้อนให้ถึงค่าศักย์ไฟฟ้าที่ก่อให้เกิดปฏิกิริยา ซึ่งลักษณะกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าและศักย์ไฟฟ้าสามารถบ่งบอกพฤติกรรมการกัดกร่อน การเกิดขึ้นออกไซด์หรือชั้นเคลือบ และเซลล์ไฟฟ้าอาจมีขั้วชนิดอื่น อาทิ ขั้วสายดิน (Ground connection) ขั้วสัมผัส (Sense)

## ค.2 เครื่องวัดมุมตกกระทบของหยดน้ำ (Contact angle) [22]



รูปที่ ค.1 เครื่องวัดมุมตกกระทบของหยดน้ำ

รูปที่ ค.1 เครื่องทดสอบมุมสัมผัสระหว่างชิ้นงานกับหยดน้ำ (Contact angle equipment) สำหรับทดสอบมุมสัมผัสของของเหลวบนพื้นผิววัสดุ (Measuring range 0 – 180 °) สามารถวัดค่า มุมสแตติกส์ มุมไดนามิกส์ Surface tension/Interfacial tension พลังงานพื้นผิว สมบัติการกระจายตัว แรงยึดเกาะของผิว และการดูดซับของเซรามิก แก้ว กระดาษ ฟิล์ม ฝ้า หรือผงตัวอย่าง

## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล นายนาวินท์ สมสวัสดิ์  
วัน เดือน ปีเกิด 22 กันยายน 2535 ที่เชียงใหม่  
ที่อยู่ 127 หมู่ 9 ต.เหมืองง่า อ.เมืองลำพูน ลำพูน 51000 โทร. 053531515  
ประวัติการศึกษา 2555 วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาเคมี  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
2556 วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเคมี  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ความชำนาญเฉพาะด้าน 1.) การกัดกร่อน  
2.) วัสดุศาสตร์

ประสบการณ์การทำงานและผลงานวิจัย

พ.ศ.2554 ฝึกงานในตำแหน่ง Technical plant ที่บริษัท พีทีที โกลบอลเคมีคอล จำกัดมหาชน  
- Changing a new hot combined feed heat exchanger and monitoring  
Oleflex heater.

พ.ศ.2559 งานประชุมวิชาการนานาชาติ Pure and Applied Chemistry International  
Conference (Paccon 2016) ในหัวข้อชื่อ Organically modified MSNs as  
Reservoir for self-healing anticorrosion.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้