

การศึกษามลของหมู่ฟังก์ชันอินทรีย์ของอนุภาคนาโนซิลิกาที่มีรูพรุนชนิดเมโซที่ใช้ในการ
ป้องกันการกักกรอนแบบสมานคัวเอง



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2557

การศึกษาผลของหมู่ฟังก์ชันอินทรีย์ของอนุภาคนาโนซิลิกาที่มีรูพรุนชนิดเมโซที่ใช้ในการ
ป้องกันการกัดกร่อนแบบสมานตัวเอง



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

ภาควิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ปีการศึกษา 2557

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Organically modified MSNs as reservoir for self-healing anticorrosion Plain,
Aminated and Thiolated silica



A REPORT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENTS FOR THE DEGREE OF
BACHELOR IN CHEMICAL ENGINEERING
FACULTY OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
2014

ปริญญานิพนธ์เรื่อง การศึกษาผลของหมูปิ้งกัซันอินทรีย์ของอนุภาคนาโนซิลิกาที่มีรูพรุน ชนิดเมโซไซท์ใช้ในการป้องกันการกัดกร่อนแบบสมานตัวเอง

โดย นายนาวินท์ สมสวัสดิ์
นายธนวัฒน์ สุรวินนท์

อาจารย์ที่ปรึกษา ดร.ธีรพร สุธีวงศ์

ปริญญานิพนธ์ ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปริญญานิพนธ์นี้ได้รับการพิจารณาอนุมัติให้นับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเคมี
คณะกรรมการตรวจสอบปริญญานิพนธ์

ธีรพร สุธีวงศ์ ประธานกรรมการ
(ดร.ธีรพร สุธีวงศ์)

ธีรฤดี เบนจางคประเสริฐ กรรมการ
(ผศ.ธีรฤดี เบนจางคประเสริฐ)

วัลย์รัตน์ จันทร์อัมพร กรรมการ
(ดร.วัลย์รัตน์ จันทร์อัมพร)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญานิพนธ์เรื่อง	การศึกษาผลของหมู่ฟังก์ชันอินทรีย์ของอนุภาคนาโนซิลิกาที่มีรูพรุนชนิดเมเซที่ใช้ในการป้องกันการกัดกร่อนแบบสมานตัวเอง		
โดย	นายธวัชณ์ สุรวินนท์	รหัสนักศึกษา	54010566
	นายนาวินท์ สมสวัสดิ์	รหัสนักศึกษา	54010703
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตร์		
สาขาวิชา	วิศวกรรมเคมี		
ปีการศึกษา	2557		
อาจารย์ที่ปรึกษา	ดร.ธีรพร สุธีวงศ์		

บทคัดย่อ

ผลของการปรับแต่งอนุภาคนาโนซิลิกาที่มีรูพรุนชนิดเมโซด้วยหมู่ฟังก์ชันต่อคุณสมบัติการป้องกันการกัดกร่อน โดยการสังเคราะห์อนุภาคขึ้นจากสารตั้งต้นเตตระเอทิลออร์โทซิลิเกต (Tetraethyl Orthosilicate; TEOS) ทำปฏิกิริยาในสภาวะต่างๆ จากนั้นปรับแต่งหมู่ฟังก์ชันด้วยอะมิโนโพรพิลไตรเอทอกซีไซเลน (3-Aminopropyl Triethoxysilane; APTES) และเมอร์แคปโตโพรพิลไตรเมทอกซีไซเลน (3-Mercaptopropyl Trimethoxysilane; MPTMS) โดยศึกษาผลของการสังเคราะห์ร่วมกับหมู่ฟังก์ชันอินทรีย์ซึ่งสังเคราะห์ที่อุณหภูมิ 20 และ 40 องศาเซลเซียส พบว่าอนุภาคที่เตรียมโดยใช้ 20% ของสารตั้งต้นไซเลนที่มีหมู่อินทรีย์ ที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียสให้การกระจายตัวของอนุภาคที่ดี สามารถสังเคราะห์รูพรุนได้ชัดเจน จากการนำอนุภาคที่สังเคราะห์ร่วมกับหมู่ฟังก์ชันอินทรีย์ที่เตรียมได้ไปบรรจุสารป้องกันการกัดกร่อน BTA แล้วนำไปเคลือบผิวเหล็กกล้า พบว่าเมื่อนำไปตรวจสอบการกัดกร่อนด้วยเทคนิคโพลาไรซ์ (Potentiodynamic polarization) ในสารละลาย 3 ชนิด คือสารละลายโซเดียมคลอไรด์ (ร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก) สภาวะต่าง (NaCl+KOH) ที่มีค่า pH 9.25 และในสภาวะกรด (NaCl+H₂SO₄) ที่มีค่า pH 4.4 พบว่าทุกสภาวะเหล็กกล้าที่เคลือบด้วยอนุภาคสังเคราะห์ร่วมกับหมู่ซิลไฮดริลจะทนต่อการกัดกร่อนมากที่สุดในทุกสภาวะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Report Organically Modified MSNs as Reservoir for Self-Healing Anticorrosion

By Mr.Thanawat Suravinon ID. 54010566
Mr. Nawin Somsawat ID. 54010703

Degree Bachelor of Engineering

Program Chemical Engineering

Year 2014

Advisor Dr. Teeraporn Suteewong

ABSTRACT

In this work, functional mesoporous Silica Nanoparticles (MSNs) were prepared as functional materials for anticorrosion applications. Syntheses of MSNs were performed using co-condensation method between TEOS and organosilane (APTES or MPTMS) using 20% mole of organosilane. Effect of synthesis temperature (20 and 40 °C) were studied. Both aminated and thiolated MSNs prepared at 20 °C yielded the well-dispersed and narrow size distributed particles. Then, MSNs (both non-modified and modified) were loaded with benzotriazole (BTA) before coating on the surface of carbon steel. Anticorrosion properties of the particle-coated steel were tested in solutions, i.e, NaCl (aq.), NaCl+H₂SO₄ and NaCl+KOH using potentiostatic polarization. It was found that the corrosion rate of thiolated MSNs was the lowest.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี เนื่องด้วยได้รับความช่วยเหลือจากหลายฝ่าย และปริญญาานิพนธ์เล่มนี้จะไม่สามรถเกิดได้เลยหากขาดคำปรึกษาจาก ดร. อีรพร สุธีวงศ์ อาจารย์ที่ปรึกษา ในการแนะนำปรึกษาให้ข้อเสนอแนะในการแก้ปัญหา ตลอดจนตรวจแก้ไขจนปริญญาานิพนธ์นี้เสร็จสมบูรณ์

ขอขอบคุณ ดร.วัลย์รัตน์ จันทระอัมพร และ ผศ. รื่นฤดี เบญจางคประเสริฐ กรรมการสอบปริญญาานิพนธ์ที่ได้กรุณาให้ข้อเสนอแนะ และให้แนวทางในการปรับปรุงงาน ทำให้สามารถพัฒนางานให้ดีขึ้น

ขอขอบพระคุณอาจารย์และเจ้าหน้าที่ทุกท่านในสาขาวิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ และศูนย์นาโนเทคโนโลยี สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง สำหรับความอนุเคราะห์ด้านเครื่องมือ สถานที่ ความรู้ คำแนะนำตลอดการทำปริญญาานิพนธ์ และสุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณบิดามารดาที่ช่วยเหลือสนับสนุน และให้กำลังใจตลอดมา

ธนวัฒน์ สุรวินนท์
นาวินท์ สมสวัสดิ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

เรื่อง	หน้า
บทคัดย่อ	I
Abstract	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญตาราง	VII
สารบัญรูป	VIII
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของปริญยานิพนธ์	2
1.3 ขอบเขตการศึกษา	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	
2.1 การกีดกร่อนของโลหะ	3
2.1.1 ผลของสภาวะแวดล้อม	5
2.1.2 รูปแบบของการกีดกร่อน	5
2.2 การป้องกันการกีดกร่อน	6
2.3 ซิลิกา	6
2.4 อนุภาคที่มีรูพรุนชนิดเมโซ	6
2.4.1 คุณสมบัติและลักษณะของอนุภาคนาโนซิลิกาที่มีรูพรุนชนิดเมโซ	6
2.4.2 ประโยชน์ของอนุภาคซิลิกาที่มีรูพรุนชนิดเมโซ	7
2.5 หมู่ฟังก์ชันอินทรีย์	7
2.5.1 หมู่เอมีน	7
2.5.2 หมู่ซิลไฮดริลหรือหมู่ไทเออล	7
2.6 สารเคลือบผิว	8
2.6.1 วัตถุประสงค์ของสารเคลือบผิว	8
2.6.2 ส่วนประกอบของสารเคลือบผิว	8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่แต่งขึ้นเพื่อให้บริการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

เรื่อง	หน้า
2.6.2.2 ตัวทำละลาย	9
2.6.2.3 การเกิดฟิล์ม	10
2.7 สารยับยั้งการกัดกร่อน	10
2.7.1 เบนโซไตรอะโซล	10
2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	12
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงาน	
3.1 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง	14
3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้	15
3.3 วิธีการทดลอง	15
3.3.1 การสังเคราะห์อนุภาคนาโนซิลิกาที่มีรูพรุนชนิดเมโซ	15
3.3.2 การสังเคราะห์อนุภาคนาโนซิลิกาที่มีรูพรุนชนิดเมโซร่วมกับหมู่อินทรีย์	17
3.3.2.1 การสังเคราะห์ร่วมกับเอมีน	17
3.3.2.2 การสังเคราะห์ร่วมกับหมู่เมอร์แคปโต	17
3.3.3 การสังเคราะห์อนุภาคนาโนซิลิกาที่มีรูพรุนชนิดเมโซที่อุณหภูมิต่ำ	18
3.3.4 การบรรจุเบนโซไตรอะโซล	18
3.3.4.1 การสร้างกราฟมาตรฐานเพื่อหาปริมาณเบนโซไตรอะโซลที่บรรจุเข้าไปในอนุภาค	18
3.3.4.2 การบรรจุเบนโซไตรอะโซลในอนุภาคนาโนซิลิกาที่มีรูพรุนชนิดต่างๆ	19
3.3.5 การเคลือบผิวแผ่นเหล็กกล้า	20
3.3.5.1 การเคลือบพื้นแผ่นเหล็กกล้า	20
3.3.5.2 การเคลือบผิวชิ้นงาน	20
3.3.6 การวิเคราะห์คุณลักษณะและคุณสมบัติของอนุภาค	22
บทที่ 4 ผลการทดลองและการวิเคราะห์	
4.1 การศึกษาผลของการสังเคราะห์อนุภาคนาโนซิลิกาที่มีรูพรุนชนิดเมโซร่วมกับหมู่ฟังก์ชันอินทรีย์ และผลจากสัดส่วนของหมู่อินทรีย์	24
4.2 การศึกษาผลของอุณหภูมิที่ใช้ในการสังเคราะห์อนุภาคนาโนซิลิกาที่มีรูพรุนชนิดเมโซ	29

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

เรื่อง	หน้า
4.3 การศึกษาความสามารถในการบรรจุสารยับยั้งการป้องกันการกัดกร่อน ของอนุภาคที่มีรูพรุนชนิดเมโซ	33
4.4 การศึกษาลักษณะพื้นผิวของเหล็กกล้าและการกระจายตัว ของอนุภาคนาโนซิลิกาที่มีรูพรุนชนิดเมโซบนเหล็กกล้า	34
4.5 การศึกษาประสิทธิภาพของชั้นเคลือบผิวอนุภาคนาโนซิลิกา ที่มีรูพรุนชนิดเมโซในแต่ละชนิดในการต้านทานการกัดกร่อน ของเหล็กกล้าในสภาวะน้ำเกลือ	37
4.6 การศึกษาประสิทธิภาพของชั้นเคลือบผิวอนุภาคนาโนซิลิกา ที่มีรูพรุนชนิดเมโซในแต่ละชนิดในการต้านทานการกัดกร่อน ของเหล็กกล้าในสภาวะต่าง	40
4.7 การศึกษาประสิทธิภาพของชั้นเคลือบผิวอนุภาคนาโนซิลิกา ที่มีรูพรุนชนิดเมโซในแต่ละชนิดในการต้านทานการกัดกร่อน ของเหล็กกล้าในสภาวะกรด	42
4.8 การศึกษาความสามารถของชั้นเคลือบอนุภาคนาโนซิลิกาที่มีรูพรุนชนิดเมโซ ที่ไม่ผ่านการปรับแต่งหมู่ฟังก์ชัน สังเคราะห์ร่วมกับเอมีน และสังเคราะห์ร่วมกับหมู่ซิลไฮดริลในแต่ละสภาวะ	44
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ	
5.1 สรุปผลการทดลอง	47
5.2 ข้อเสนอแนะ	48
เอกสารอ้างอิง	49
ภาคผนวก ก	52
ภาคผนวก ข	63
ภาคผนวก ค	70

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
4.1 แสดงปริมาณหมู่ฟังก์ชันอินทรีย์ที่อยู่ในอนุภาค	29
4.2 ค่า i_{corr} , E_{corr} และค่าอัตราการกัดกร่อนของอนุภาคก่อนบรรจุเบนโซไตรอะโซล ในสถานะเกลือ	38
4.3 ค่า i_{corr} , E_{corr} และค่าอัตราการกัดกร่อนของอนุภาคหลังบรรจุเบนโซไตรอะโซล ในสถานะต่าง	40
4.4 ค่า i_{corr} , E_{corr} และค่าอัตราการกัดกร่อนของอนุภาคหลังบรรจุเบนโซไตรอะโซล ในสถานะต่าง	41
4.5 ค่า i_{corr} , E_{corr} และค่าอัตราการกัดกร่อนของอนุภาคหลังบรรจุเบนโซไตรอะโซล ในสถานะกรด	43
ก.1.1 ส่วนประกอบของสารเคมีที่ใช้ในการสังเคราะห์อนุภาคนาโนซิลิกาที่มีรูพรุนชนิดเมโซ	53
ก.2.1 แสดงค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายเบนโซไตรอะโซลที่ไว้ที่ค่าความเข้มข้นต่างๆ เพื่อสร้างกราฟมาตรฐาน	54
ก.2.2 แสดงค่าการดูดกลืนแสงของของเบนโซไตรอะโซลเหลือในของเหลวใสหลังบรรจุใน อนุภาคนาโนซิลิกาที่มีรูพรุนชนิดเมโซแต่ละชนิด	55
ก.2.3 แสดงค่าความสามารถในการบรรจุเบนโซไตรอะโซลในเอทานอล ความเข้มข้น 3 โมลาร์ ในอนุภาคแต่ละชนิด	55
ก.3.1 แสดงค่าศักย์การกัดกร่อน (Corrosion potential, E_{corr}) ค่ากระแสการกัดกร่อน (Corrosion current density, i_{corr}) และค่าอัตราการกัดกร่อน (Corrosion rate) ของอนุภาคแต่ละชนิดในแต่ละสถานะ	56
ก.3.2 แสดงค่าประสิทธิภาพการหน่วงการกัดกร่อน (Inhibition efficiency)	57
ข.1 ค่าการดูดกลืนแสงที่ความเข้มข้นต่างๆของเบนโซไตรอะโซลในเอทานอล	65

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 2.1 ปฏิกริยาไฟฟ้าเคมีสำหรับการกัดกร่อนของเหล็ก	4
รูปที่ 3.1 การติดตั้งเครื่องปฏิกรณ์และควบคุมอุณหภูมิให้เป็น 40 องศาเซลเซียส	16
รูปที่ 3.2 อนุภาคภายในหลอดเหวี่ยงแยกหลังจากทำการเหวี่ยง 30 นาที	17
รูปที่ 3.3 เครื่อง UV-vis spectrophotometer	18
รูปที่ 3.4 เครื่องเขย่าแบบปรับอุณหภูมิได้	19
รูปที่ 3.5 สีของอนุภาคที่ผ่านการบรรจุสารยับยั้ง	20
รูปที่ 3.6 ภาพถ่ายผิวของเหล็กกล้า	20
รูปที่ 3.7 เครื่องเคลือบแบบหมุนที่สามารถปรับความเร็วรอบได้	21
รูปที่ 3.8 ตัวอย่างชิ้นงานที่ผ่านการเคลือบและอบ	21
รูปที่ 4.1 อนุภาคนาโนซิลิกาที่มีรูพรุนชนิดเมโซที่ไม่ผ่านการปรับแต่งหมู่ฟังก์ชัน ขนาดสเกลบาร์ 200 นาโนเมตร	25
รูปที่ 4.2 อนุภาคนาโนซิลิกาที่มีรูพรุนชนิดเมโซที่ไม่ผ่านการปรับแต่งหมู่ฟังก์ชัน ขนาดสเกลบาร์ 50 นาโนเมตร	25
รูปที่ 4.3 อนุภาคนาโนซิลิกาที่มีรูพรุนชนิดเมโซที่สังเคราะห์ร่วมกับหมู่เอมีนที่สังเคราะห์ ด้วยสัดส่วนโดยปริมาตร 10%APTES	26
รูปที่ 4.4 อนุภาคนาโนซิลิกาที่มีรูพรุนชนิดเมโซที่สังเคราะห์ร่วมกับหมู่เอมีนที่สังเคราะห์ ด้วยสัดส่วนโดยปริมาตร 20%APTES	26
รูปที่ 4.5 อนุภาคนาโนซิลิกาที่มีรูพรุนชนิดเมโซที่สังเคราะห์ร่วมกับหมู่เอมีนที่สังเคราะห์ ที่สัดส่วนโดยปริมาตร 40%APTES	27
รูปที่ 4.6 อนุภาคนาโนซิลิกาที่มีรูพรุนชนิดเมโซที่สังเคราะห์ร่วมกับหมู่ซิลไฮดริล	28
รูปที่ 4.7 อนุภาคนาโนซิลิกาที่มีรูพรุนชนิดเมโซที่ไม่ผ่านการปรับแต่งหมู่ฟังก์ชัน สังเคราะห์ที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส	30
รูปที่ 4.8 อนุภาคนาโนซิลิกาที่มีรูพรุนชนิดเมโซที่สังเคราะห์ร่วมกับหมู่เอมีน สังเคราะห์ที่สังเคราะห์ที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส	31
รูปที่ 4.9 อนุภาคนาโนซิลิกาที่มีรูพรุนชนิดเมโซที่สังเคราะห์ร่วมกับหมู่เอมีน สังเคราะห์ที่สังเคราะห์ที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส	31

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

หน้า

รูปที่ 4.10 อนุภาคนาโนซิลิกาที่มีรูพรุนชนิดเมโซที่สังเคราะห์ร่วมกับหมู่ซัลไฮดริล สังเคราะห์ที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส	32
รูปที่ 4.11 อนุภาคนาโนซิลิกาที่มีรูพรุนชนิดเมโซที่สังเคราะห์ร่วมกับหมู่ซัลไฮดริล สังเคราะห์ที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส	32
รูปที่ 4.12 การเปรียบเทียบความสามารถในการบรรจุเบนโซลไตรอะโซล ของอนุภาคแต่ละชนิด	34
รูปที่ 4.13 พื้นผิวของเหล็กกล้าก่อนและหลังการเตรียมพื้นผิว	35
รูปที่ 4.14 ลักษณะของพื้นผิวของเหล็กกล้าหลังเคลือบด้วยสารยึด	35
รูปที่ 4.15 ลักษณะของพื้นผิวของเหล็กกล้าหลังเคลือบผิวด้วย ตัวทำละลาย (เมทานอล) และอนุภาค	36
รูปที่ 4.16 ลักษณะของพื้นผิวของเหล็กกล้าหลังเคลือบผิวด้วย สารยึด ตัวทำละลาย (เมทานอล) และอนุภาค	36
รูปที่ 4.17 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าและศักย์ไฟฟ้า ในสถานะน้ำเกลือร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก	37
รูปที่ 4.18 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าและศักย์ไฟฟ้า ในสถานะน้ำเกลือร้อยละ 1 โดยน้ำหนักก่อนและหลัง บรรจุเบนโซไตรอะโซล	39
รูปที่ 4.19 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าและศักย์ไฟฟ้าในสถานะต่าง (pH = 9.25)	41
รูปที่ 4.20 แผนภาพอย่างง่ายแสดงการทำงานของอนุภาคที่สังเคราะห์ร่วมกับเอมีน	42
รูปที่ 4.21 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าและศักย์ไฟฟ้าในสถานะกรด (pH = 4.4)	43
รูปที่ 4.22 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าและศักย์ไฟฟ้าในอนุภาคแต่ละชนิด ในแต่ละสถานะ	45
รูปที่ 4.23 การเปรียบเทียบอัตราการกัดกร่อนของอนุภาคแต่ละชนิดในแต่ละสถานะ	46
รูปที่ ก.1.1 กราฟมาตรฐานสารละลายเบนโซไตรอะโซลในสารละลายเอทานอล ที่ความเข้มข้นต่างๆ	54
รูปที่ ก.4.1 เทอร์โมแกรมจากการวิเคราะห์ MSN-SH 10% (V/V) ที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส	58

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ ก.4.2 เทอร์โมแกรมจากการวิเคราะห์ MSN-SH 20% (V/V) ที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส	58
รูปที่ ก.4-3 เทอร์โมแกรมจากการวิเคราะห์ MSN-NH ₂ 20% (V/V) ที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส	59
รูปที่ ก.4.4 เทอร์โมแกรมจากการวิเคราะห์ MSN- NH ₂ 40% (V/V) ที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส	59
รูปที่ ก.4.5 เทอร์โมแกรมจากการวิเคราะห์ MSN-SH 20% (V/V) ที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส	60
รูปที่ ก.4.6 เทอร์โมแกรมจากการวิเคราะห์ MSN- NH ₂ 20% (V/V) ที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส	60
รูปที่ ก.5.1 อินฟราเรดสเปกตรัมจากการวิเคราะห์ MSN ที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส	61
รูปที่ ก.5.2 อินฟราเรดสเปกตรัมจากการวิเคราะห์ MSN-SH ที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส	61
รูปที่ ก.4.6 อินฟราเรดสเปกตรัมจากการวิเคราะห์ MSN-NH ₂ ที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส	62
รูปที่ ข.1 กราฟมาตรฐานสารละลายเบนโซไตรอะโซลในสารละลายเอทานอล ที่ความเข้มข้นต่างๆ	66
รูปที่ ข.2 ลักษณะโพลาริเซชันของเหล็กกล้าในสารละลายกรด	68
รูปที่ ค.1 แสดงการทำงานของ Scanning Electron Microscope	71
รูปที่ ค.3 ส่วนประกอบของเครื่อง UV-vis spectrophotometer	74
รูปที่ ค.4 ขั้วแต่ละชนิดในเซลล์ไฟฟ้าเคมี	76
รูปที่ ค.5 องค์ประกอบของเซลล์ไฟฟ้าเคมีแบบสามขั้ว	77
รูปที่ ค.6 เครื่องจ่ายศักย์ไฟฟ้าให้กับเซลล์ไฟฟ้า	77
รูปที่ ค.8 ตัวอย่างเทอร์โมแกรมที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วย TGA	78
รูปที่ ค.9 เครื่องมือวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของสารโดยอาศัยคุณสมบัติทางความร้อน	79

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

เหล็กเป็นวัสดุที่มีความสำคัญทางวิศวกรรมเป็นอย่างมาก เนื่องจากคุณสมบัติที่สำคัญของเหล็ก ได้แก่ ความสามารถในการขึ้นรูป ความทนทาน ความยืดหยุ่น และการนำความร้อนที่ดี จึงมีการนำเหล็กมาใช้ในอุตสาหกรรมต่างๆ เช่น สิ่งก่อสร้าง เครื่องบิน เครื่องจักร ซึ่งปัญหาของเหล็กที่พบมากคือการกัดกร่อน

การกัดกร่อนเกิดขึ้นเมื่อโลหะเกิดปฏิกิริยาเคมีกับสิ่งแวดล้อมทำให้เนื้อโลหะสูญเสียคุณสมบัติทางโครงสร้าง ก่อให้เกิดการชำรุดหรือเสื่อมสภาพของอุปกรณ์ การป้องกันและการลดปัญหาทางด้านการกัดกร่อนจะช่วยยืดอายุการใช้งานของโลหะและมีความสำคัญอย่างมากทางด้านเศรษฐศาสตร์ของอุตสาหกรรมรวมถึงความปลอดภัยในการใช้งาน การเคลือบผิวโลหะเป็นวิธีการป้องกันการกัดกร่อนที่ได้รับความสนใจและได้รับการพัฒนาอย่างหลากหลาย เมื่อโลหะได้รับผลกระทบที่เกิดจากสภาวะแวดล้อม เช่น คลอไรด์ไอออน ออกซิเจน และแคทไอออน ทำให้โลหะเกิดการกัดกร่อน และสูญเสียโครงสร้าง จึงมีการนำสารอินทรีย์และอนินทรีย์มาช่วยเคลือบผิวโลหะ แต่ก็ยังพบปัญหา เช่น ฟิล์มไม่ยึดติดกับผิวโลหะ ทำให้ต้องมีการพัฒนาระบบการป้องกันการกัดกร่อนเพื่อช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการป้องกันผิวโลหะ ซึ่งการเคลือบด้วยสารเคลือบที่มีส่วนประกอบของนาโนซิลิกาที่มีรูพรุนชนิดเมโซ เป็นวิธีการหนึ่งซึ่งช่วยให้การป้องกันการกัดกร่อนดีขึ้น

อนุภาคนาโนซิลิกาที่มีรูพรุนชนิดเมโซเป็นอนุภาคอินทรีย์ที่ถูกนำมาประยุกต์ใช้กันอย่างแพร่หลาย อาทิ ตัวเร่งปฏิกิริยา ตัวดูดซับ และตัวบรรจุสารเคมี ซึ่งในงานด้านการป้องกันการกัดกร่อน อนุภาคชนิดนี้สามารถนำมาใช้เป็นตัวบรรจุสารยับยั้งการกัดกร่อน เนื่องจากคุณสมบัติของอนุภาคที่มีรูพรุน และพื้นที่ผิวสูง มีความเสถียรต่ออุณหภูมิและสารเคมี สำหรับปริญญานิพนธ์นี้ทำการศึกษาผลของการปรับแต่งอนุภาคนาโนซิลิกาที่มีรูพรุนชนิดเมโซด้วยหมู่ฟังก์ชันต่อคุณสมบัติการป้องกันการกัดกร่อน เริ่มจากการสังเคราะห์อนุภาคโดยใช้เตตระเอทิลออร์โทซิลิเกต (Tetraethyl Orthosilicate; TEOS) เป็นสารตั้งต้นทำปฏิกิริยาในสภาวะต่าง และกำหนดโครงสร้างด้วยสารลดแรงตึงผิว จากนั้นปรับแต่งหมู่ฟังก์ชันด้วยอะมิโนโพรพิลไตรเอทอกซีไซเลน (3-Aminopropyl Triethoxysilane; APTES) และเมอร์แคปโตโพรพิลไตรเมทอกซีไซเลน (3-Mercaptopropyl Trimethoxysilane; MPTMS) แล้วนำมาศึกษาผลของความเข้มข้นระหว่างสารตั้งต้นกับหมู่ฟังก์ชันที่นำมาปรับแต่ง และอุณหภูมิที่ใช้ในการสังเคราะห์ จากนั้นการวิเคราะห์ลักษณะและโครงสร้างของอนุภาค โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราดและชนิดส่อง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น ไม่สามารถเผยแพร่หรือใช้ในการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งหากมีการนำไปใช้

ผ่าน เพื่อวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันในอนุภาคโดยวิธีวิเคราะห์สารด้วยอินฟราเรด และการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของสารโดยอาศัยคุณสมบัติทางความร้อน การทดสอบคุณสมบัติการป้องกันการกักกร่อนโดยใช้เทคนิคโพเทนซิโอสแตติกโพลาริเซชัน ทั้งในสภาวะกลาง กรด และเบส โดยใช้เหล็กเป็นวัสดุรองรับสารเคลือบ

1.2 วัตถุประสงค์ของปริญญาโท

ศึกษาผลของการปรับแต่งอนุภาคซิลิกาที่มีรูพรุนขนาดนาโนชนิดเมโซไซท์ด้วยหมู่ฟังก์ชันอินทรีย์ต่อคุณสมบัติการป้องกันการกักกร่อนของเหล็กกล้า ในสภาวะต่างๆ

1.3 ขอบเขตการศึกษา

1. สังเคราะห์อนุภาคซิลิกาที่มีรูพรุนขนาดนาโนชนิดเมโซไซท์เพื่อใช้ในการปลดปล่อยสารยับยั้งการกักกร่อน ในสภาวะที่เป็นด่างและกำหนดโครงสร้างด้วยสารลดแรงตึงผิวชนิดประจุบวก
2. ศึกษาและพัฒนาสภาวะที่เหมาะสมในการสังเคราะห์อนุภาค เช่น อุณหภูมิและสัดส่วนระหว่างหมู่ฟังก์ชันกับสารตั้งต้น
3. ศึกษาคุณสมบัติและลักษณะเฉพาะของอนุภาคซิลิกาที่มีรูพรุนขนาดนาโนชนิดเมโซไซท์ด้วยหมู่ฟังก์ชันอินทรีย์
4. ทดสอบคุณสมบัติการป้องกันการกักกร่อน ในสารละลายสภาวะกรด กลาง และเบส โดยใช้เหล็กกล้าเป็นวัสดุรองรับสารเคลือบ

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. สามารถเข้าใจและสังเคราะห์อนุภาคนาโนซิลิกาที่มีรูพรุนชนิดเมโซไซท์
2. สามารถสังเคราะห์อนุภาคนาโนซิลิกาที่มีรูพรุนชนิดเมโซไซท์ร่วมกับหมู่ฟังก์ชันอินทรีย์
3. ได้สภาวะที่เหมาะสมต่อการสังเคราะห์อนุภาคนาโนซิลิกาที่มีรูพรุนชนิดเมโซไซท์
4. สามารถพัฒนาอนุภาคนาโนซิลิกาที่มีรูพรุนชนิดเมโซไซท์เพื่อให้เหมาะสมกับการนำไปใช้เป็นสารเคลือบผิวเหล็กกล้าเพื่อป้องกันการกักกร่อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 การกัดกร่อนของโลหะ

การกัดกร่อนของโลหะ คือ การสูญเสียคุณสมบัติของเนื้อโลหะอันเนื่องมาจากปฏิกิริยาเคมีกับสิ่งแวดล้อม โดยโลหะจะเปลี่ยนสภาพเป็นสารประกอบประเภทออกไซด์หรือไฮดรอกไซด์

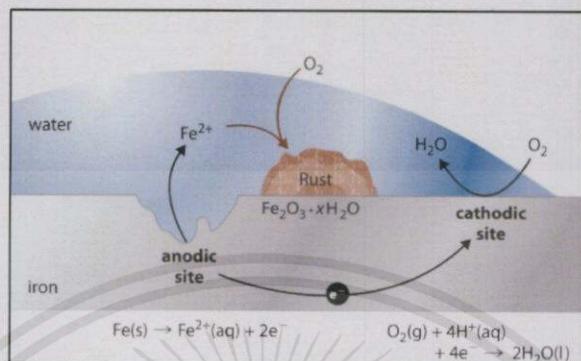
การกัดกร่อนเป็นปรากฏการณ์ทางธรรมชาติ เนื่องจากสินแร่ต่างๆที่มีอยู่ทั่วไปบนพื้นผิวโลก ซึ่งสินแร่นั้นมีความเสถียรเมื่อถูกนำมาคลุ้งให้ได้เนื้อโลหะบริสุทธิ์ทำให้โลหะที่ได้อยู่ในสถานะที่ไม่เสถียร โลหะที่ไม่เสถียรจึงพยายามกลับสู่สภาพเดิม ซึ่งก็คือกระบวนการกัดกร่อน จึงจำเป็นที่จะต้องหาทางรักษาสภาพของโลหะไม่ให้เสื่อมสภาพเนื่องจากการกัดกร่อน เพื่อช่วยเพิ่มอายุการใช้งานของวัสดุ หลักการของการกัดกร่อนของโลหะแยกเป็น 2 ประเภทใหญ่ๆ คือ

1. เกิดจากปฏิกิริยาเคมีโดยตรง (Direct Chemical Corrosion) เป็นการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันโดยตรงระหว่างก๊าซในชั้นบรรยากาศ เช่น ฮาโลเจน ออกซิเจน ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ไนโตรเจน กับพื้นผิวของโลหะ
2. เกิดจากปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมี (Electrochemical Corrosion) ประกอบด้วย 2 ปฏิกิริยาเซลล์ไฟฟ้าเคมี ปฏิกิริยาออกซิเดชันที่ด้านแอโนด และปฏิกิริยารีดักชันที่ด้านแคโทด โดยอิเล็กตรอนจากปฏิกิริยาออกซิเดชัน (ด้านแอโนด) ของโลหะที่ถูกร่อนจะเคลื่อนที่ไปยังโลหะที่สัมผัสทางด้านแอโนด เกิดเป็นปฏิกิริยารีดักชันกับโลหะที่สัมผัส (ด้านแคโทด) ซึ่งเป็นขั้วที่มีประจุบวก (cation) และเกิดเป็นเซลล์ไฟฟ้าครบวงจรกับขั้วแอโนดซึ่งเป็นขั้วประจุลบ (anion)

ทั้งนี้การถูกร่อนของโลหะเกิดจากสาเหตุหลายประการ โลหะในธรรมชาติเกิดการกัดกร่อนได้จากหลายสาเหตุ สาเหตุหนึ่งคือการสัมผัสระหว่างผิวของโลหะกับน้ำ (H_2O) ก๊าซออกซิเจน (O_2) และคลอไรด์ไอออน (Cl^-) หรืออาจเป็นก๊าซที่มนุษย์เป็นผู้ก่อให้เกิดขึ้น เช่น คาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) คาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO_2) ก็มีอยู่ในกระบวนการกัดกร่อน โดยอะตอมของโลหะจะถูกออกซิไดซ์เป็นไอออนของโลหะแล้วไปรวมตัวกับออกซิเจนในอากาศ เกิดเป็นออกไซด์ของโลหะนั้นๆ เช่น สนิมเหล็ก (Fe_2O_3) สนิมทองแดง (CuO) หรือสนิมอะลูมิเนียม (Al_2O_3) ปฏิกิริยาของการเกิดสนิมเหล็กในธรรมชาติเป็นดังนี้

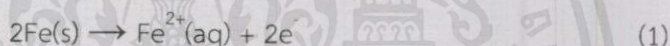
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปฏิกิริยาของกระบวนการเกิดสนิมเหล็กในน้ำซึ่งมีก๊าซออกซิเจนละลายอยู่ มีดังนี้

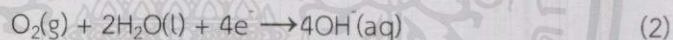


รูปที่ 2.1 ปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีสำหรับการกัดกร่อนของเหล็ก [1]

ปฏิกิริยาออกซิเดชัน (ขั้วแอโนด)

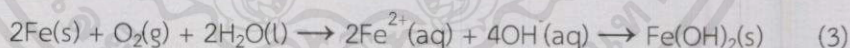


ปฏิกิริยารีดักชัน (ขั้วแคโทด)



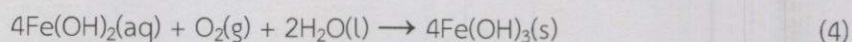
กระบวนการเกิดขึ้น 2 ขั้นตอน

ขั้นตอนแรก Fe ถูกออกซิไดซ์กลายเป็น Fe²⁺



จากสมการปฏิกิริยารวม 2Fe²⁺(aq) และ OH⁻(aq) จะรวมกันได้ Fe(OH)₂ ซึ่งไม่ละลายน้ำ

ขั้นตอนที่สอง Fe(OH)₂ ทำปฏิกิริยากับน้ำและออกซิเจนต่อไปได้ Fe³⁺ ดังสมการ (4)



สารประกอบ Fe(OH)₃ คือสนิมเหล็ก ไอร์ออน(III) ไฮดรอกไซด์ [Fe(OH)₃] ที่เกิดขึ้นโดยทั่วไปจะเขียนในรูปไอร์ออน(III) ออกไซด์ที่มีน้ำผลึกอยู่ในโมเลกุล และผลึกของน้ำมีปริมาณที่แตกต่างกัน จึงเขียนสูตรทั่วไปเป็น Fe₂O₃·nH₂O

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.1 ผลของสภาวะแวดล้อม [2]

ตัวแปรที่ส่งผลต่อการกัดกร่อน ได้แก่ อัตราเร็วของไหล อุณหภูมิ และส่วนผสมของโลหะ โดยตัวแปรทั้งหมดนี้มีอิทธิพลต่อสมบัตการกัดกร่อนของวัสดุ เช่น การเพิ่มอัตราเร็วในการไหลเพิ่มอัตราเร็วในการกัดกร่อน การเพิ่มอุณหภูมิส่งผลต่ออัตราเร็วของปฏิกิริยาเคมี และการเพิ่มความเข้มข้นของสารที่กัดกร่อนทำให้อัตราการกัดกร่อนสูงขึ้น

2.1.2 รูปแบบของการกัดกร่อน [2]

ลักษณะการผุกร่อนของโลหะที่เป็นผลจากปฏิกิริยาเคมีกับสิ่งแวดล้อมถูกแบ่งออกโดยขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุ สิ่งแวดล้อม หรือสัณฐานที่เกิดจากผลกระทบจากการกัดกร่อน สามารถจำแนกออกเป็นหมวดหมู่ ดังนี้

1. การกัดกร่อนแบบสม่ำเสมอ (Uniform Corrosion) เป็นผลจากสารเคมีหรือปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีซึ่งเกิดในพื้นที่สัมผัสเดียวกันในอัตราเดียวกัน โดยผลของการกัดกร่อนมีลักษณะบาง และสามารถเปลี่ยนแปลงลักษณะที่ปรากฏบนพื้นผิวได้ ทั้งนี้ผลของการกัดกร่อนประเภทนี้ส่งผลกระทบต่อความแข็งแรงเชิงกลของส่วนประกอบ และความหนาของพื้นผิว ตัวอย่างเช่น การหมองของเครื่องเงิน
2. การกัดกร่อนในบริเวณจำเพาะ (Localized Corrosion) เป็นผลจากสารเคมีหรือปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีที่เกิดเฉพาะบริเวณใดบริเวณหนึ่ง บางลักษณะไม่สามารถสังเกตเห็นการกัดกร่อนได้ด้วยตาเปล่า เช่น
 - 2.1 การกัดกร่อนแบบหลุม (Pitting Corrosion) เป็นการกัดกร่อนด้วยอัตราสูงภายในหลุมขนาดเล็กบนผิวของวัสดุ เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันภายในหลุม และปฏิกิริยารีดักชันขึ้นที่ผิว สารละลายภายในหลุมเข้มข้นและหนาแน่นขึ้น โดยหลุมอาจเริ่มต้นเกิดจากรอยร้าวที่พื้นผิว หลุมที่เกิดขึ้นมีหลายลักษณะ เช่น หลุมแบบปากกว้าง หลุมแบบรูเข็ม หลุมแบบปากแคบแต่ภายในกลวง
 - 2.2 การกัดกร่อนบริเวณซอก (Crevice Corrosion) เป็นผลเมื่อวัสดุเกิดการแตกร้าว โดยเกิดขึ้นเมื่อถ่ายเทกับบรรยากาศภายนอกไม่ดี ส่งผลให้การแพร่ของสารเคมีบางชนิด เช่น ออกซิเจน ทำได้ยากทำให้ความสามารถในการออกซิไดซ์ภายในและภายนอกแตกต่างกัน คุณสมบัติทางเคมีของในบริเวณนั้นจึงทำผลที่เกิดจากการกัดกร่อนแตกต่างออกไป การกัดกร่อนบริเวณซอกเป็นผลทำให้คุณสมบัติเชิงกลของวัสดุเกิดความเสียหาย การป้องกันการกัดกร่อนในซอกป้องกันได้โดยการเชื่อมแทน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนการต่อด้วยการใช้หมดหรืออนุครศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2 การป้องกันการกัดกร่อน [3]

เมื่อผิวของโลหะได้รับผลกระทบที่มาจากสภาวะสิ่งแวดล้อมทำให้โครงสร้างของวัสดุเกิดการสูญเสีย วิธีการป้องกันการเกิดสนิมของเหล็กที่นิยมมากที่สุดคือการป้องกันไม่ให้โลหะสัมผัสกับก๊าซออกซิเจนและความชื้น ทำได้โดยการเคลือบซึ่งเป็นวิธีที่ง่ายและได้ประสิทธิภาพในการป้องกันสนิมเหล็กสูง การเคลือบผิวมีหลายชนิด เช่น การเคลือบผิวด้วยพลาสติก การเคลือบผิวด้วยสี การเคลือบผิวด้วยน้ำมัน การเคลือบผิวด้วยการรมดำ เป็นต้น

การเคลือบผิวโลหะด้วยสารหรือฟิล์มที่มีคุณลักษณะ คงตัว บาง ยึดหยุ่น มีความสามารถในการเกาะติดสูง และสามารถซ่อมแซมตัวเองได้เมื่อโครงสร้างได้รับความเสียหาย การปรับแต่งผิวของโลหะสามารถปรับแต่งด้วยสารตั้งต้นที่หลากหลาย เช่น สารอินทรีย์ และพอลิเมอร์ซึ่งช่วยปรับปรุง และป้องกันการร่อนของผิวโลหะ อีกทั้งปฏิกิริยาออกซิเดชัน และการป้องกันการกัดกร่อนจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพเชิงกลในการป้องกันระหว่างโลหะกับสิ่งแวดล้อมที่ไม่เหมาะสม อาทิ คลอไรด์ไอออน ออกซิเจน โปรตรอน โดยพอลิเมอร์ที่นิยมใช้ป้องกันพื้นผิวของโลหะ เช่น อีพ็อกซี พอลิเอสเตอร์ พอลิยูรีเทน เป็นต้น อย่างไรก็ตามการเคลือบด้วยพอลิเมอร์ไม่สามารถป้องกันการกัดกร่อนได้อย่างถาวร จึงได้มีการพัฒนาคุณสมบัติของการเคลือบด้วยพอลิเมอร์โดยการเติมสารอนินทรีย์ลงในระบบ อนุภาคขนาดนาโนถูกนำมากระจายลงบนระบบพอลิเมอร์ เพื่อช่วยเพิ่มการยึดติดระหว่างโลหะกับสารเคลือบ ลดการซึมผ่านของน้ำบริเวณผิวเคลือบ เพิ่มประสิทธิภาพในการป้องกันการกัดกร่อน และเพิ่มอายุของการเคลือบผิวของโลหะ

2.3 ซิลิกา (Silicon dioxide; SiO₂) [4]

ซิลิกาหรือซิลิกอนไดออกไซด์เป็นสารประกอบอนินทรีย์ โดยอนุภาคซิลิกามีทั้งแบบที่เป็นสัณฐานและอสัณฐาน หาได้ง่ายและสามารถพบได้ทั่วไป เนื่องจากอนุภาคซิลิกามีคุณสมบัติไม่ไวต่อการทำปฏิกิริยา อุณหภูมิ และความดัน การบรรจุสารต่างๆได้มีการนำอนุภาคซิลิกาไปประยุกต์ใช้ในงานในหลายประเภทไม่ว่าจะเป็น ด้านชีวการแพทย์ อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ และในงานทางด้าน การเคลือบ

2.4 อนุภาคนาโนซิลิกาที่มีรูพรุนชนิดเมโซ

2.4.1 คุณสมบัติและลักษณะของอนุภาคนาโนซิลิกาที่มีรูพรุนชนิดเมโซ [5]

วัสดุรูพรุนสามารถจำแนกออกได้เป็น 3 ชนิด โดยใช้ขนาดของรูพรุนเป็นเกณฑ์ แบ่งออกได้เป็นสามชนิดคือ ไมโครพอร์ส (Microporous) เมโซพอร์ส (Mesoporous) และมาโครพอร์ส (Macroporous) โดยวัสดุไมโครพอร์สจะมีขนาดรูพรุนขนาดเล็กกว่า 2 นาโนเมตร เมโซพอร์สจะเป็นวัสดุที่มีรูพรุนอยู่ในช่วง 2-50 นาโนเมตร และมาโครพอร์สจะมีขนาดรูพรุนใหญ่กว่า 50 นาโนเมตร วัสดุรูพรุนชนิดเมโซส่วนใหญ่จะใช้อนุภาคซิลิกา โดยอนุภาคนาโนซิลิกาที่มีรูพรุนชนิดเม

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ไม่สามารถนำข้อมูลไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โซที่รู้จักกันดีคือ MCM-41 และ SBA-15 สังเคราะห์โดยใช้เตตระเอทิลอโทซิลเกต (Tetraethoxysilane; TEOS) เป็นสารตั้งต้น มีลักษณะมีความเป็นรูพรุน พื้นที่ผิว และปริมาตรจำเพาะรูพรุนมาก ทั้งยังมีคุณสมบัติของซิลิกาคือไม่ไวต่อการเกิดปฏิกิริยา สามารถอยู่ในอุณหภูมิ และความดันที่สูงได้ และสามารถนำไปปรับแต่งคุณสมบัติทางด้านเคมีได้ จึงทำให้อุณหภูมิของซิลิกาที่มีรูพรุนชนิดเมโซนั้นถูกนำไปใช้อย่างแพร่หลาย

2.4.2 ประโยชน์ของอนุภาคนาโนซิลิกาที่มีรูพรุนชนิดเมโซ

เนื่องจากอนุภาคนาโนซิลิกาที่มีรูพรุนชนิดเมโซมีความเป็นรูพรุนสูง มีพื้นที่ผิว และปริมาตรจำเพาะของรูพรุนมาก ดังนั้นอนุภาคนีจึงเหมาะสมที่จะนำไปใช้เป็นตัวบรรจุสารต่างๆ และสามารถประยุกต์ใช้ในงานได้หลายประเภท เช่น ใช้บรรจุตัวยาเพื่อทำการนำส่งในร่างกายสิ่งมีชีวิต [6] ใช้บรรจุสารเคมีที่ช่วยยับยั้งการกัดกร่อน [7] หรือใช้ในกระบวนการเร่งปฏิกิริยา เนื่องมาจากการที่มีพื้นที่ผิวสูงส่งผลให้สามารถช่วยเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างตัวเร่งปฏิกิริยากับสารตั้งต้นในปฏิกิริยาเคมีได้ [8]

2.5 หมูฟังก์ชันอินทรีย์

2.5.1 หมูเอมีน [9]

เอมีนเป็นสารประกอบอินทรีย์ เมื่ออยู่ในน้ำเอมีนจะมีคุณสมบัติเป็นด่าง โดยความเป็นด่างจะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับหมู่อัลคิลที่มาเกาะอยู่กับอะตอมไนโตรเจน สารประกอบเอมีนสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้หลากหลาย ทั้งในอุตสาหกรรมสี ย้อม ยา และในกระบวนการผลิตก๊าซ หมูเอมีนสามารถกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจนซัลไฟด์ซึ่งเป็นสารที่ทำให้เกิดการกัดกร่อนได้ และเนื่องจากเกลือของเอมีนมีคุณสมบัติเป็นตัวช่วยยับยั้งการกัดกร่อน ทั้งยังมีความสามารถในการตอบสนองต่อความเป็นกรด-ด่างได้ดี ทำให้นิยมนำสารประกอบเอมีนมาประยุกต์ใช้ในการสังเคราะห์เมโซพอร์สเพื่อปรับแต่งคุณสมบัติทางด้านเคมีของอนุภาค

2.5.2 หมูซัลไฮดริลหรือหมูไทออล [10]

สารประกอบซัลไฮดริลเป็นหนึ่งในสารประกอบอินทรีย์ โดยหมูซัลไฮดริลเมื่ออยู่ในสภาวะต่างจะประพฤติตัวเป็นสารออกซิไดซ์ ซึ่งสามารถนำมาประยุกต์ใช้ในงานด้านการเคลือบเพื่อป้องกันการกัดกร่อน

2.6 สารเคลือบผิว [11]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อให้บริการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.6.1 วัตถุประสงค์ของการเคลือบผิว

สารเคลือบผิวมีจุดประสงค์หลักคือการปกปิดผิวของวัสดุ โดยจุดประสงค์หลักในการปกปิดผิวจะประกอบด้วยสาเหตุสองประการคือ เพื่อความสวยงาม เช่น สี ความเงา ลวดลาย ความสว่าง และการป้องกันพื้นผิววัสดุจากมลภาวะต่างๆ เช่น ความชื้น การป้องกันไฟ ทำให้ผิวของวัสดุมีอายุการใช้งานยาวนานมากยิ่งขึ้น

2.6.2 ส่วนประกอบของสารเคลือบผิว

สารเคลือบผิวโดยส่วนใหญ่แล้วจะมีองค์ประกอบหลักคือ

1. ผงสี เป็นของแข็งที่สามารถเป็นได้ทั้งอินทรีย์และอนินทรีย์
2. สารยึด ทำหน้าที่ยึดประสานอนุภาคเข้าไว้ด้วย และเมื่อเกิดเป็นฟิล์มแล้วจะมีสมบัติในการยึดติดกับผิววัสดุ
3. ตัวทำละลาย มีหน้าที่เป็นตัวช่วยปรับความหนืด ในระหว่างการผสมองค์ประกอบต่างๆ ของสารเคลือบผิว
4. สารเติมแต่ง เติมเพื่อทำให้สารเคลือบมีคุณสมบัติพิเศษขึ้นเช่น แข็งเร็วขึ้น กันเชื้อรา

2.6.2.1 สารยึด

สารยึดมีหน้าที่หลักในการช่วยให้อนุภาคที่อยู่ภายในสารเคลือบผิวนั้นสามารถคงอยู่ได้ ทั้งเป็นส่วนที่ช่วยในการป้องกันไม่ให้พื้นผิวชิ้นงานนั้นสัมผัสกับสภาพแวดล้อมภายนอกที่อาจก่อให้เกิดผลเสียต่อพื้นผิวเช่น ความชื้น ละอองน้ำเกลือ ไอกรด เป็นต้น โดยสารยึดสามารถแบ่งออกได้หลายประเภท เช่น น้ำมัน เรซินธรรมชาติ เรซินสังเคราะห์ เป็นต้น

น้ำมัน เป็นสารยึดที่ถูกนำมาใช้ในยุคแรก ซึ่งปัจจุบันนี้ไม่นิยมใช้น้ำมันเป็นสารยึดแล้วแต่ใช้น้ำมันเป็นตัวช่วยในการเพิ่มความอ่อนตัวของฟิล์ม ไม่เปราะ

เรซินธรรมชาติ เป็นอีกหนึ่งทางเลือกของสารยึด ซึ่งเป็นสารโพลีเมอร์ที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่ซึ่งอาจใช้ร่วมกับน้ำมันได้ แต่เรซินธรรมชาติมีข้อกีดเนื่องจากความสามารถกลายเป็นไอต่ำ ทำให้บริสุทธิ์ยาก จุดหลอมเหลวไม่แน่นอน และละลายได้เฉพาะในตัวทำละลายอินทรีย์

เรซินสังเคราะห์ จากข้อจำกัดของเรซินธรรมชาติทำให้มีการสังเคราะห์เรซินขึ้นเองโดยตัวอย่างของเรซินสังเคราะห์เช่น อัลคิเดเรซิน (Alkyd Resin) ยูเรียเรซิน (Formaldehyde Resin) ฟีนอลิกเรซิน (Phenolic Resin) และอีพอกซีเรซิน (Epoxy Resin) ซึ่งในหัวข้อนี้จะยกตัวอย่างอีพอกซีเรซิน (Epoxy Resin) ารศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อีพอกซีเรซิน (Epoxy Resin) เตรียมได้จากโพลีไฮดรอกซีฟีนอล (Polyhydric phenol) และอีพิฮาลอไฮดริน (Epihalohydrin) ซึ่งในส่วนอีพิไฮดรินนั้นสำหรับอีพอกซีเรซินจะใช้เป็น อีพิคลอโรไฮดริน (Epichlorohydrin) ซึ่งอีพอกซีเรซินมีคุณสมบัติที่เหมาะสมกับการเคลือบผิวดังนี้

1. ทนทานสารเคมีเพราะไม่มีหมู่เอสเทอร์ที่จะถูกสaponนิฟายได้
2. มีสมบัติในการยึดเกาะผิวหน้าต่างๆได้ดี เนื่องจากโซ่พอลิเมอร์มีปริมาณหมู่ที่มีขั้วสูง และการจัดเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบในโมเลกุลของหมู่ไฮดรอกซิลส่งผลให้เกิดพันธะไฮโดรเจนช่วยในการเกาะติด
3. อีพอกซีเรซิน มีความอ่อนตัวไม่เปราะเพราะมีโซ่พันธะเดี่ยวซึ่งทำให้โมเลกุลเกิดการหมุนรอบพันธะเดี่ยวได้

2.6.2.2 ตัวทำละลาย

ตัวทำละลายในสารเคลือบผิวมีบทบาทในการช่วยลดความหนืดของสารยึดและละลายของแข็งในสารเคลือบเพื่อให้สารเคลือบผสมเป็นเนื้อเดียวกัน ซึ่งสมบัติทั่วไปของตัวทำละลายสำหรับใช้ในงานเคลือบผิวมีดังนี้

1. ความสามารถในการทำละลาย (Solvency)
2. เสถียรภาพทางเคมี (Chemical stability)
3. สมบัติทางกายภาพ เช่น สี กลิ่น ช่วงของจุดเดือด (Physiological properties)
4. สมบัติการกัดกร่อน (Corrosive properties)

โดยการเลือกตัวทำละลายให้เหมาะสมกับพอลิเมอร์หรือเรซิน จะต้องเลือกให้เหมาะสม หากเลือกตัวทำละลายไม่เหมาะสมกับสารยึด ฟิล์มที่เคลือบจะมีข้อบกพร่อง ทำให้เกิดปัญหาในการเกาะติด การเลือกตัวทำละลายจากค่าพารามิเตอร์การละลาย (Solubility parameters; δ) ซึ่งเป็นตัวแปรที่ขึ้นกับอุณหภูมิ พลังงานการกลายเป็นไอ และพลังงานเสรี โดยการจะเลือกตัวทำละลายให้เหมาะสมกับสารยึดต้องเลือกให้มีค่าพารามิเตอร์การละลายที่ใกล้เคียงกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.6.3 การเกิดฟิล์ม (Film Formation)

การที่สารเคลือบผิวซึ่งมีสถานะเป็นของเหลวเปลี่ยนไปเป็นชั้นฟิล์มบนผิววัสดุได้จะต้องผ่านกระบวนการหลักสามขั้นตอนด้วยกันดังนี้

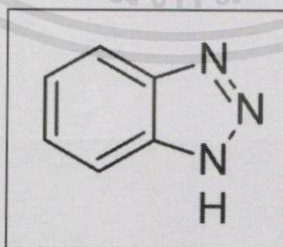
1. แอปพลิเคชัน (Application) เป็นการนำสารเคลือบผิวไปเคลือบบนผิวหน้าวัสดุเป็นชั้นฟิล์ม ซึ่งมีหลายวิธี เช่น การใช้แปรง ลูกกลิ้ง การพ่น หรือการจุ่ม
2. ฟิกเซชัน (Fixation) เป็นการทำให้ชั้นเคลือบผิวซึ่งยังคงเป็นชั้นฟิล์มเหลวบางให้ติดแน่นขึ้น เช่น ในกรณีที่สารเคลือบผิวมีตัวทำละลายเป็นตัวทำละลายอินทรีย์ขั้นตอนนี้จะทำโดยการระเหยตัวทำละลาย เป็นต้น
3. การป่ม (Curing) เป็นการนำเอาชั้นฟิล์มที่ผ่านขั้นตอนฟิกเซชันแล้วมาเพิ่มคุณสมบัติให้ดีขึ้นด้วยวิธีการต่างๆ เช่น การใช้แสง อากาศ หรือความร้อน เป็นต้น

2.7 สารยับยั้งการกัดกร่อน (Anti-Corrosion) [12]

สารยับยั้งการกัดกร่อน คือ สารที่ช่วยปกป้องพื้นผิวโลหะจากการเกิดการกัดกร่อนในสภาพแวดล้อมต่างๆ เมื่อพื้นผิวของโลหะอยู่ในสภาพแวดล้อมที่อาจเกิดการกัดกร่อน สารยับยั้งเหล่านี้จะเกิดปฏิกิริยาเคมีกับอากาศหรือน้ำ

2.7.1 เบนโซไตรอะโซล (Benzotriazole; BTA)

เบนโซไตรอะโซลเป็นสารประกอบอินทรีย์ ประกอบด้วย เบนซีน (benzene) และวงแหวนของไตรอะโซล (triazole ring) สูตรโครงสร้าง $C_6H_5N_3$ ซึ่งสังเคราะห์มาจากปฏิกิริยาระหว่าง ออโท-ฟีนิลีนไดเอมีน (o-phenylenediamine) โซเดียมไนไตรท์ (sodium nitrite) และกรดอะซิติก (acetic acid) ด้วยกระบวนการ diazotization ของหมู่เอมีน ที่สภาวะอุณหภูมิต่ำ (5-10 องศาเซลเซียส) ผ่านการฉายรังสีในเครื่องล้างความถี่สูง



จากโครงสร้างของเบนโซไตรอะโซล สารชนิดนี้สามารถประพฤติตัวเป็นกรดอ่อนด้วย

เอกสารนี้เป็น การปล่อยปลดโปรตอน หรือเบส โดยรับโปรตอนด้วยอิเล็กตรอนคู่โดดเดี่ยวของไนโตรเจน ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสาร ทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นอกจากนี้เบนโซไตรอะโซลสามารถให้อิเล็กตรอนคู่โดดเดี่ยวที่มีอยู่บนอะตอมไนโตรเจน เพื่อที่จะเชื่อมตัวมันเองกับผิวของโลหะ ทั้งนี้ประสิทธิภาพการป้องกันของเบนโซไตรอะโซลขึ้นอยู่กับคุณสมบัติทางเคมีของเบนโซไตรอะโซลในแต่ละสภาวะสิ่งแวดล้อม

มีการนำเบนโซไตรอะโซลมาใช้ในงานต่างๆเนื่องจากคุณสมบัติที่หลากหลาย เช่น งานด้านเภสัชภัณฑ์นำมาเป็นสารตั้งต้นในการขนส่งยา จากคุณสมบัติทางเคมีและทางชีวภาพ ก่อให้เกิดกลไกการปฏิกิริยาตอบสนองเบนโซไตรอะโซลของโปรตีนชนิดต่างๆ มีการนำเบนโซไตรอะโซลมาใช้เป็นสารยับยั้งการกัดกร่อนประสิทธิภาพสูงสำหรับทองแดง และโลหะผสม ที่สภาวะต่างๆ ทำหน้าที่เป็นชั้นผิวป้องกันปฏิกิริยาบริเวณพื้นผิวที่ไม่ต้องการ (passive layer) ทั้งนี้ยังนำไปใช้ในงานด้านอื่นๆ อาทิ สารด้านการเยือกแข็ง สารทำความเย็น และทำความร้อนในกระบวนการต่างๆ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Ekaterina V. Skorb และคณะ [13] ได้พัฒนาระบบการป้องกันการกัดกร่อนสำหรับพื้นผิวโลหะ ซึ่งเป็นปัญหาสำคัญสำหรับอุตสาหกรรม โดยงานวิจัยนี้แสดงให้เห็นการออกแบบการป้องกันการกัดกร่อนซึ่งอยู่บนพื้นฐานของการปรับเปลี่ยนพื้นผิวของอนุภาคนาโนซิลิกาที่มีรูพรุน โดยการรวมตัวกันของอนุภาคซิลิกาที่สามารถซ่อมแซมตัวเองได้ ความสามารถในการซ่อมแซมตัวเองเมื่อเกิดการกัดกร่อนเกิดขึ้นจากการปล่อยสารยับยั้งการกัดกร่อนเนื่องจากปฏิกิริยาตอบสนองต่อค่าความเป็นกรด-ด่าง อนุภาคซิลิกาและเซอร์โคเนียบนฟิล์มไฮบริดที่ใช้เคลือบบนอะลูมิเนียมผสมชนิด AA2024 อนุภาคซิลิกาชนิดเมโซนี้บรรจุสารป้องกันการกัดกร่อน [2-(benzothiazol-2-ylsulfanyl)-succinic acid] ซึ่งถูกครอบคลุมด้วยชั้นพอลิเล็กโทรไลต์หลายชั้น ฟิล์มไฮบริดฟิล์มนี้ช่วยเพิ่มระยะเวลาของการป้องกันการกัดกร่อนเมื่อเปรียบเทียบกับฟิล์มจากวิธีโซลเจล เมื่อนำมาทดสอบด้วยเทคนิคการสั่นสะเทือนด้วยขั้วไฟฟ้า (Scanning Vibrating Electrode Technique; SVET) แสดงให้เห็นความสามารถการซ่อมแซมตัวเองของอนุภาคต่อผลกระทบของการกัดกร่อน อันเป็นผลจากการปลดปล่อยสารป้องกันการกัดกร่อนเมื่อเกิดกระบวนการกัดกร่อนต่อโพรง วิธีการที่อธิบายในงานวิจัยนี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้หลากหลายเพื่อที่จะใช้ป้องกันการกัดกร่อนของวัสดุโลหะ

สำหรับผลตอบสนองต่อสภาวะค่าความเป็นกรดและด่าง Jiajun Fu และคณะ [14] ศึกษาโลกของอนุภาคนาโนซิลิกาที่มีรูพรุนชนิดเมโซ โดยการสังเคราะห์อนุภาคด้วยการปรับแต่งผิวโดยใช้บิสเทเบิลพรีซูโดเทกเซน (Bistable Pseudotaxanes) ซึ่งทำหน้าที่เปรียบเสมือนวาล์วเพื่อที่จะสามารถควบคุมการปลดปล่อยสารยับยั้งการกัดกร่อนที่ถูกบรรจุอยู่ในอนุภาคนาโนซิลิกา งานวิจัยนี้ใช้คาเฟอีนเป็นสารยับยั้งการกัดกร่อน โดยความสามารถของอนุภาคที่ปรับแต่งผิวแล้วจะสามารถกักเก็บสารยับยั้งการกัดกร่อนไว้ได้ในสภาวะปกติ แต่จะตอบสนองทันทีและปลดปล่อยสารยับยั้งเมื่ออยู่ในสภาวะกรดหรือด่าง งานวิจัยนี้ได้ทำการทดลองโดยวัสดุโลหะผสมอะลูมิเนียมชนิด AA2024 เป็นวัสดุรองรับสารเคลือบ และตรวจสอบด้วยเครื่องวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าทางเคมี (Electrochemical Impedance Spectroscopy; EIS) และเทคนิคการสั่นสะเทือนของขั้วไฟฟ้า (Scanning- Vibrating Electrode Technique; SVET) นำไปเปรียบเทียบกับอนุภาคซิลิกาที่ไม่ได้ผ่านการปรับแต่งผิว พบว่าเมื่อปรับแต่งผิวแล้วทำให้การกระจายตัวของอนุภาคดีขึ้น และยังสามารถชะลอการปลดปล่อยทำให้สารเคลือบผิวมีอายุการใช้งานยาวนานขึ้นอีกด้วย

Isaline Recloux และคณะ ได้ทำการพัฒนาสารเคลือบผิวที่จะใช้เคลือบกับโลหะอะลูมิเนียม AA2024 เพื่อนำมาใช้แทนเฮกซะวาเลนทโครเมียม [15] (Hexavalent chromium) ซึ่งมีความเป็นพิษ โดยทางคณะได้ทำการศึกษาสารเคลือบผิวอนุภาคนาโนซิลิกาที่มีรูพรุนชนิดเมโซที่ผ่านการบรรจุสารเบนโซไตรอะโซล (Benzotriazole; BTA) ซึ่งเป็นสารยับยั้งการกัดกร่อน ซึ่งได้มีการศึกษาความสัมพันธ์

ระหว่างความสามารถในการบรรจุสารยับยั้งและลักษณะของรูพรุน ศึกษาการปลดปล่อยสารยับยั้งซึ่งขึ้นกับค่าความเป็นกรด ต่าง และความสามารถในการป้องกันการกัดกร่อน ซึ่งจากการศึกษาพบว่าลักษณะของรูพรุนไม่มีผลต่อความสามารถในการบรรจุสารยับยั้ง และค่าความเป็นกรด ต่างส่งผลน้อยมากสำหรับการปลดปล่อยสารยับยั้ง โดยเมื่อนำไปทดสอบในน้ำเกลือ 0.05 โมลาร์ เพื่อเปรียบเทียบค่าความต้านทานการกัดกร่อนระหว่างอนุภาคนาโนซิลิกาที่มีรูพรุนชนิดเมโซที่ผ่านการบรรจุและไม่ผ่านการบรรจุสารยับยั้ง พบว่าโลหะอลูมิเนียมที่ผ่านการบรรจุแล้วจะสามารถป้องกันการกัดกร่อนได้ดีกว่า

M.M. Mennucci และคณะ [16] ทำการศึกษาผลของสารยับยั้งการกัดกร่อนที่ใช้กับเหล็กกล้าซึ่งปกติในงานการก่อสร้างภายในคอนกรีตจะต้องมีเหล็กคาร์บอนเป็นโครงสร้างหลักในการคงตัวของอาคาร ซึ่งการใช้ตัวยับยั้งเป็นอีกทางเลือกหนึ่งในการป้องกันการกัดกร่อน ซึ่งไนไตรท์ (Nitrite) จะนิยมใช้เป็นสารช่วยในการยับยั้งการกัดกร่อนจากกรดที่เกิดขึ้นกับโลหะคาร์บอน แต่มีข้อจำกัดในเรื่องของความเป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อม และมีราคาแพง ดังนั้นทางคณะจึงได้ทำการศึกษาเพื่อนำเบนโซโทรอะโซล (Benzotriazole; BTA) มาเป็นสารช่วยในการยับยั้งการกัดกร่อน โดยทางคณะผู้ทดลองได้ทำการทดลองเพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพสารยับยั้งทั้งสองตัวระหว่างไนไตรท์และเบนโซโทรอะโซล ทำการทดลองโดยการนำโลหะคาร์บอนตัวอย่างไปจุ่มในสารยับยั้งเป็นเวลา 30 วัน หลังจากนั้นจึงนำไปทดสอบกับน้ำเกลือความเข้มข้นร้อยละ 3.5 ซึ่งจากการตรวจวัดด้วยวิธีไฟฟ้าเคมีพบว่าค่าความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อน (i_{corr}) ของเบนโซโทรอะโซล และจากการทดสอบด้วยวิธีจุ่ม (Immersion) ทำให้ทราบว่าเบนโซโทรอะโซลจะมีการจัดรูปแบบโมเลกุลเพื่อเกาะกับพื้นผิวของเหล็กอย่างซับซ้อนทำให้เปรียบเสมือนเป็นเกราะป้องกันที่จะป้องกันไม่ให้เบนโซโทรอะโซลรั่วไหลไปสู่สิ่งแวดล้อมได้ง่าย

N.H.N. Kamarudin และคณะ [17] ได้พัฒนาอนุภาคนาโนซิลิกาที่มีรูพรุนชนิดเมโซบน platforms เพื่อศึกษาการควบคุมการขนส่งยา (Ibuprofen) โดยการสังเคราะห์อนุภาคที่มีรูพรุนปรับแต่งด้วย 3-Aminopropyltrimethoxysilane (APTMS) ด้วยวิธี co-condensation (MSN_{co}) และ post-grafting (MSN_{post}) แล้วนำไปทดสอบการเกิดเป็นโครงสร้างอนุภาคด้วยเครื่องมือ X-ray diffraction (XRD) และ transmission electron microscopy (TEM) ทำการตรวจสอบประสิทธิภาพของอนุภาคในการตรึง และปลดปล่อยยา โดยวิธีการ simulated biological fluid เป็นเวลา 20 ชั่วโมง พบว่าอนุภาคนาโนซิลิกาที่ไม่ได้ปรับแต่ง ความสามารถในการตรึงสูง และบรรจุไอบูโพรเฟน ได้ถึง 98% และปริมาณการดูดซับไอบูโพรเฟนของ MSN_{co} และ MSN_{post} เท่ากับ 78% และ 71% ตามลำดับ ทั้งนี้ผลของ FT-IR แสดงให้เห็นว่าความหนาแน่นของหมู่ซิลิกา เป็นปัจจัยร่วมในการดูดซับ อีกทั้งขนาดรูพรุน และหมู่เอมีนส่งผลต่ออัตราการปลดปล่อยไอบูโพรเฟน ซึ่งสามารถสรุปได้ว่า MSN_{co} สามารถเริ่มต้นปลดปล่อยยาได้รวดเร็วที่สุด ส่วน MSN และ MSN_{post} ความสามารถในการปลดปล่อยคงที่ช้าๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

วิธีดำเนินงาน

ปริญญาโทศึกษาระดับปริญญาโทใช้ของอนุภาคนาโนซิลิกาที่มีรูพรุนชนิดเมโซในกระบวนการเคลือบเหล็กกล้าเพื่อป้องกันการกัดกร่อน ในการสังเคราะห์อนุภาคโดยใช้เตตระเอทิลออร์โธซิลิเกต (Tetraethyl-Orthosilicate; TEOS) เป็นสารตั้งต้นและใช้สารลดแรงตึงผิวชนิดประจุบวกเป็นสารกำหนดโครงสร้าง ใช้ น้ำเป็นตัวทำละลาย ทำปฏิกิริยาในสภาวะต่างที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส นอกจากนี้ยังทำการสังเคราะห์อนุภาคที่มีรูพรุนชนิดเมโซที่ปรับแต่งด้วยหมู่อินทรีย์โดยใช้อะมิโนโพรพิลไตรเอทอกซีไซเลน (3-Aminopropyltriethoxysilane; APTES) และเมอร์แคปโตโพรพิลไตรเอทอกซีไซเลน (3-Mercaptopropyl trimthoxysilane; MPTMS) โดยทำการปรับสัดส่วนโดยโมลระหว่างเตตระเอทิลออร์โธซิลิเกต และอะมิโนโพรพิลไตรเอทอกซีไซเลน หรือเมอร์แคปโตโพรพิลไตรเอทอกซีไซเลนที่ใช้

3.1 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

- 1) เตตระเอทิลออร์โธซิลิเกต (Tetraethyl orthosilicate; TEOS)
- 2) เฮกซะเดซิลไตรเมทิลแอมโมเนียมโบรไมด์ (Hexadecyltrimethyl ammonium bromide; CTAB)
- 3) เอทิลอะซิเตท (Ethyl acetate; EtOAc)
- 4) อะมิโนโพรพิลไตรเอทอกซีไซเลน (3-Aminopropyltriethoxysilane; APTES)
- 5) เมอร์แคปโตโพรพิลไตรเอทอกซีไซเลน (3-Mercaptopropyltrimthoxysilane; MPTMS)
- 6) แอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ (Ammonium hydroxide; NH_4OH)
- 7) กรดอะซิติก (Acetic acid)
- 8) เอทานอล (Ethanol)
- 9) เมทานอล (Methanol)
- 10) น้ำกลั่น (Deionized water)
- 11) เบนโซไตรอะโซล (Benzotriazole; BTA)
- 12) ไกลซิโดรอกซีโพรพิลไตรเมทอกซีไซเลน (3-glycidoxypropyltrimethoxysilane)
- 13) ซิลิกาเจล (Silica gel)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้

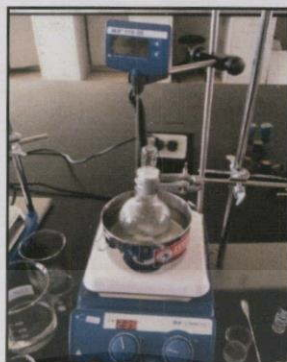
- 1) ช้อนตักสาร (Spatula)
- 2) กระบอกตวง (Cylinder)
- 3) ปิเปต และไมโครปิเปต (Pipette and Micropipette)
- 4) แท่งกวนแม่เหล็ก (Magnetic bar)
- 5) เครื่องกวนชนิดควบคุมอุณหภูมิ (Magnetic stirrer)
- 6) เครื่องเหวี่ยงแยก (Centrifuge)
- 7) เครื่องควบคุมอุณหภูมิ (Temperature controller)
- 8) หลอดเหวี่ยงแยกขนาด 15 มิลลิลิตร (Centrifugal tube 15 mL.)
- 9) หลอดเหวี่ยงแยกขนาด 50 มิลลิลิตร (Centrifugal tube 50 mL.)
- 10) แผ่นพาราฟิล์ม (Para film)
- 11) เครื่องชั่งน้ำหนัก (Balance)
- 12) เครื่องกระจายอนุภาค (Sonicater)
- 13) ปีกเกอร์ (Beaker)
- 14) ขวดก้นกลมขนาด 250 มิลลิลิตร (Round bottom flask 250 mL.)
- 15) ขวดก้นกลมขนาด 500 มิลลิลิตร (Round bottom flask 500 mL.)
- 16) เครื่องเคลือบแบบหมุนที่สามารถปรับความเร็วรอบได้ (Home-build spin coater)
- 17) เครื่อง UV-vis spectrophotometer
- 18) เครื่องเขย่าแบบปรับอุณหภูมิได้ (Shaking incubator)
- 19) ตู้อบสูญญากาศ (Vacuum dryer)
- 20) กระดาษทรายน้ำเบอร์ 150
- 21) แผ่นอะคริลิก

3.3 วิธีการทดลอง

3.3.1 การสังเคราะห์อนุภาคนาโนซิลิกาที่มีรูพรุนชนิดเมโซ

1. จัดอุปกรณ์โดยให้เครื่องปฏิกรณ์อยู่ในภาชนะที่บรรจุน้ำตั้งอยู่บนเครื่องกวนชนิดควบคุมอุณหภูมิ ตั้งอุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส และกวนเพื่อให้อุณหภูมิในน้ำเท่ากันทั้งภาชนะดังรูป 3.1

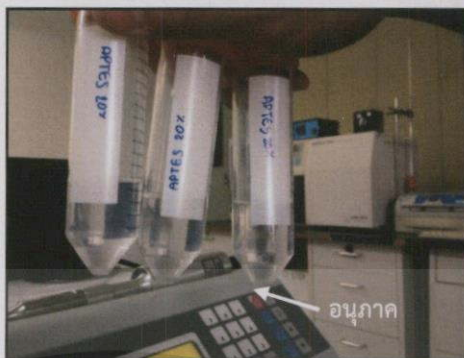
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.1 การติดตั้งเครื่องปฏิกรณ์และควบคุมอุณหภูมิให้เป็น 40 องศาเซลเซียส

2. เตรียมสารละลายเฮกซะเดซิลไตรเมทิลแอมโมเนียมโบรไมด์ (Hexadecyltrimethyl ammonium bromide; CTAB) เข้มข้น 54.8 มิลลิโมลาร์โดยเติมสารละลายเฮกซะเดซิลไตรเมทิลแอมโมเนียมโบรไมด์ ปริมาณ 5 มิลลิลิตร ลงในเครื่องปฏิกรณ์ที่บรรจุน้ำ 100 มิลลิลิตร กวนประมาณ 2 นาที
3. ทำการเติมเอทิลอะซิเตท (Ethyl acetate; EtOAc) ปริมาณ 0.88 มิลลิลิตร และเติมสารละลายแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ (Ammonium hydroxide; NH_4OH) ปริมาณ 2.7 มิลลิลิตรลงในเครื่องปฏิกรณ์ เพื่อให้ทำให้อยู่ในสภาวะต่าง กวนประมาณ 2 นาที
4. เติมสารเตตระเอทิลออร์โธซิลิเกต (Tetraethyl orthosilicate; TEOS) ปริมาณ 0.5 มิลลิลิตร กวนทิ้งไว้ประมาณ 5 นาที
5. เจือจางโดยการเติมน้ำกลั่นปริมาณ 36.9 มิลลิลิตร ลงในปฏิกิริยาแล้วกวนต่ออีก 30 นาที
6. นำสารละลายที่มีอนุภาคนาโนซิลิกาที่มีรูพรุนชนิดเมโซพอร์จูลงในหลอดเหวี่ยงแยกขนาด 50 มิลลิลิตร จำนวน 4 หลอด โดยให้ทุกหลอดมีน้ำหนักเท่ากัน
7. นำไปใส่เครื่องเหวี่ยงแยก (Centrifuge) เพื่อแยกสารละลายออกจากอนุภาค ด้วยความเร็วรอบ 4000 รอบต่อนาที ใช้เวลา 30 นาที อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส
8. ทำการแยกสารละลายชั้นบนออก จากนั้นเติมเอทานอล (Ethanol) ลงในหลอดเหวี่ยงแยกที่มีอนุภาคอยู่ จากนั้นทำให้อนุภาคกระจายตัวด้วยเครื่องโซนิคแล้วนำไปแยกด้วยเครื่องเหวี่ยงแยก ทำซ้ำเช่นเดิมประมาณ 2 รอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.2 อนุภาคภายในหลอดเหวี่ยงแยกหลังจากทำการเหวี่ยง 30 นาที

9. นำอนุภาคที่ได้มาทำการกำจัดสารลดแรงตึงผิวที่ใช้ออกจากรูพรุน ด้วยการเติมกรดอะซิติก (Acetic acid) กวนประมาณ 60 นาที จากนั้นทำซ้ำตามขั้นตอนที่ 8 และ 9 เพื่อล้างสารลดแรงตึงผิวออกจนหมด

3.3.2 การสังเคราะห์อนุภาคนาโนซิลิกาที่มีรูพรุนชนิดเมโซที่มีหมู่อินทรีย์

3.3.2.1 การสังเคราะห์ร่วมกับหมู่เอมีน

ทำการสังเคราะห์ด้วยวิธีเดียวกับการเตรียมอนุภาคนาโนซิลิกาที่มีรูพรุนชนิดเมโซที่ไม่มีหมู่อินทรีย์ แต่ในขั้นตอนที่ 4 เติมสารผสมของเตตระเอทิลออร์โธซิลิเกต (Tetraethyl Orthosilicate; TEOS) ร่วมกับอะมิโนโพรพิลไตรเอทอกซีไซเลน (3-Aminopropyltriethoxysilane; APTES) โดยใช้สัดส่วนโดยปริมาตรของ TEOS:APTES เท่ากับ 0.45:0.05 0.40:0.10 และ 0.3:0.2 มิลลิลิตร โดยทำการผสม TEOS และ APTES เข้าด้วยกันก่อนเติมไปในปฏิกิริยา

3.3.2.2 การสังเคราะห์ร่วมกับหมู่เมอร์แคปโต

ทำการสังเคราะห์อนุภาคนาโนซิลิกาที่มีรูพรุนชนิดเมโซที่ไม่มีหมู่อินทรีย์ แต่ในขั้นตอนที่ 4 เติมสารผสมของ TEOS ร่วมกับเมอร์แคปโตโพรพิลไตรเอทอกซีไซเลน (3-Mercaptopropyltrimethoxysilane; MPTMS) ใช้สัดส่วนโดยปริมาตรของ TEOS:MPTMS เท่ากับ 0.45:0.05 0.40:0.10 และ 0.3:0.2 มิลลิลิตร โดยทำการผสม TEOS ร่วมกับ MPTMS เข้าด้วยกันก่อนเติมไปในปฏิกิริยา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.3 การสังเคราะห์อนุภาคนาโนซิลิกาที่มีรูพรุนชนิดเมโซที่อุณหภูมิต่ำ

ทำเช่นเดียวกับการสังเคราะห์อนุภาคนาโนซิลิกาที่มีรูพรุนชนิดเมโซที่มีและไม่มีหมู่อินทรีย์ ซึ่งสำหรับอนุภาคที่มีการปรับแต่งสังเคราะห์โดยใช้สัดส่วนโดยปริมาตรของหมู่อินทรีย์เท่ากับ 0.40:0.10 มิลลิลิตร สังเคราะห์ที่อุณหภูมิต่ำ 20 องศาเซลเซียส

3.3.4 การบรรจุเบนโซไตรอะโซล (Benzotriazole; BTA)

3.3.4.1 การสร้างกราฟมาตรฐานเพื่อหาปริมาณเบนโซไตรอะโซลที่บรรจุเข้าไปในอนุภาค

- เตรียมความเข้มข้นของ BTA 0.325 0.75 1.5 และ 3 โมลาร์ ตามลำดับ โดยใช้เอทานอลเป็นตัวทำละลาย

ความเข้มข้นของ BTA (โมลาร์)	ปริมาตรเอทานอล (มิลลิลิตร)	น้ำหนัก BTA (กรัม)
0.375	10	0.446
0.75	10	0.892
1.5	10	1.785
3	10	3.569

- นำไปตรวจวัดค่าการดูดกลืนแสงโดยใช้เครื่องมือตรวจวัด UV-vis spectrophotometer ซึ่งใช้ λ_{MAX} ที่ได้จากการใช้โหมด full spectrum ในช่วง 200-800 นาโนเมตร ด้วยใช้อัตราการตรวจวัด



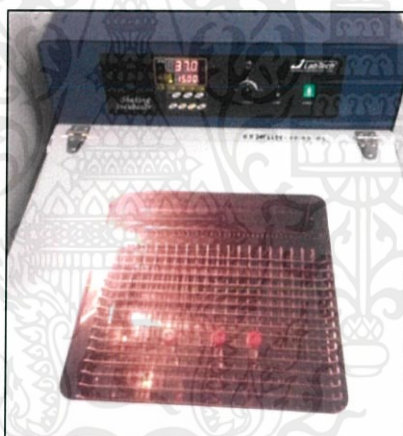
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
รูปที่ 3.3 เครื่อง UV-vis spectrophotometer

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. สร้างกราฟมาตรฐานระหว่างค่าความเข้มข้นของ BTA และค่าการดูดกลืนแสงที่วัดได้

3.3.4.2 การบรรจุ BTA ในอนุภาคนาโนซิลิกาที่มีรูพรุนชนิดต่างๆ

1. เตรียมอนุภาคนาโนซิลิกาที่มีรูพรุนชนิดเมโซทุกชนิด (ไม่มีหมู่อินทรีย์ และมีหมู่อินทรีย์) น้ำหนัก 0.01 กรัมโดยอนุภาคยังคงอยู่ในตัวทำละลายเอทานอล
2. นำอนุภาคผสมกับสารละลายเบนโซไตรอะโซลความเข้มข้น 3 โมลาร์ ปริมาตร 10 มิลลิลิตรในหลอดเหวี่ยงแยก
3. นำหลอดเหวี่ยงแยกเข้าเครื่องเขย่าแบบปรับอุณหภูมิได้ (Shaking Incubator) โดยเขย่าที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส รอบการหมุน 240 รอบต่อนาที เป็นเวลา 24 ชั่วโมง



รูปที่ 3.4 เครื่องเขย่าแบบปรับอุณหภูมิได้

4. นำไปเข้าเครื่องเหวี่ยงแยกเพื่อแยกเอาอนุภาคไปใช้ ส่วนสารละลายที่ได้ นำไปตรวจวัดค่าการดูดกลืนแสง เพื่อตรวจสอบปริมาณ BTA ที่เข้าไปในอนุภาค

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

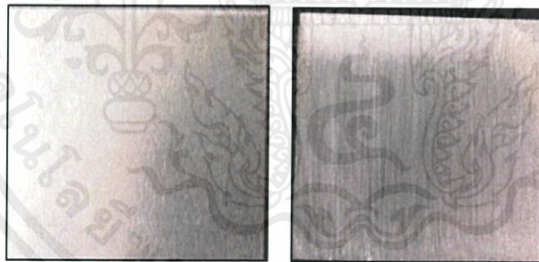


รูปที่ 3.5 สีสของอนุภาคที่ผ่านการบรรจุสารยับยั้ง

3.5.5 การเคลือบผิวแผ่นเหล็กกล้า

3.3.5.1 การเตรียมพื้นแผ่นเหล็กกล้า

นำแผ่นเหล็กกล้าขนาด 1×1 นิ้ว มาเตรียมผิวชิ้นงานโดยใช้กระดาษทรายน้ำเบอร์ 150 ขัดผิวชิ้นงานไปในทิศทางเดียวกันจนผิวชิ้นงานนั้นมีระนาบเดียวกัน ล้างผิวชิ้นงานให้สะอาดด้วยน้ำ เช็ดให้แห้ง และเก็บไว้ในกล่องที่บรรจุซิลิกาเพื่อป้องกันความชื้น



(ก)

(ข)

รูปที่ 3.6 ภาพถ่ายผิวของเหล็กกล้า ก) ก่อนเตรียมผิวชิ้นงาน ข) หลังเตรียมผิวชิ้นงานด้วยการขัด

3.3.5.2 การเคลือบผิวชิ้นงาน

1. เตรียมสารเคลือบผิว โดยที่สารเคลือบผิวมีอัตราส่วนระหว่างสารยึด ตัวทำละลาย (เมทานอล) และอนุภาคนาโนซิลิกาที่มีรูพรุนชนิดเมโซที่ผ่านการบรรจุ BTA เป็น 1 มิลลิลิตร/1 มิลลิลิตร/0.01 กรัม
2. ทำการผสมลงในปิกเกอร์ กวนทิ้งไว้ประมาณ 5 นาที

3. นำสารเคลือบผิวที่ผ่านการผสมแล้วมา 1 มิลลิตร ไปเคลือบบนผิวเหล็กกล้า โดยการเคลือบนั้นจะใช้เครื่องเคลือบที่สามารถหมุนได้ (Spin coater) แสดงดังรูปที่ 3.7 ที่ความเร็วรอบ 500 รอบต่อนาที เป็นเวลา 5 นาที



รูปที่ 3.7 เครื่องเคลือบแบบหมุนที่สามารถปรับความเร็วรอบได้

4. นำชิ้นงานที่ผ่านการเคลือบแล้วเข้าตู้อบ โดยอบที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง



รูปที่ 3.8 ตัวอย่างชิ้นงานที่ผ่านการเคลือบและอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.6 การวิเคราะห์คุณลักษณะและคุณสมบัติของอนุภาค

ในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาคุณสมบัติของอนุภาคโดยใช้เครื่องมือวิเคราะห์สารด้วยอินฟราเรด (Fourier Transform Infrared Spectroscopy; FTIR) และเครื่องวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของสารโดยอาศัยคุณสมบัติทางความร้อน (Thermogravimetric Analysis; TGA) ในการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันและปริมาณสารอินทรีย์อนุภาค กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องผ่าน (Transmission electron microscopy; TEM) และกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด (Scanning electron microscope; SEM) ในการวิเคราะห์โครงสร้างของอนุภาค และเครื่องวัดการป้องกันการกัดกร่อนโดยใช้เทคนิคโพเทนชิโอสแตติกโพลาริเซชัน (Potentiostat galvanostat) ซึ่งหลักการเครื่องวิเคราะห์ต่างๆ สามารถแสดงได้ดังนี้

3.3.6.1 เครื่องวิเคราะห์สารด้วยอินฟราเรด (Fourier Transform Infrared Spectroscopy; FTIR)

ใช้วิเคราะห์สารอินทรีย์ อนินทรีย์ และพันธะเคมีโดยอาศัยหลักการความสามารถในการดูดกลืนรังสีอินฟราเรดที่แตกต่างกันของตัวอย่าง ทำให้สามารถจำแนกประเภทของสารตัวอย่างและบอกปริมาณได้

3.3.6.2 เครื่องวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของสารโดยอาศัยคุณสมบัติทางความร้อน (Thermogravimetric Analysis; TGA)

ใช้ในการวิเคราะห์หาปริมาณของสารอินทรีย์ในตัวอย่างโดยการใช้ความร้อนในการทำให้สารอินทรีย์เปลี่ยนแปลงไป จากนั้นตรวจวัดน้ำหนักที่หายไปเพื่อหาปริมาณสารอินทรีย์หรือองค์ประกอบอื่นๆที่หายไป

3.3.6.3 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องผ่าน (Transmission electron microscopy; TEM)

ใช้ศึกษาตัวอย่างชนิดบางและมีขนาดเล็กมาก ซึ่งเตรียมขึ้นโดยวิธีพิเศษ เพื่อที่จะสามารถทำให้ลำอนุภาคอิเล็กตรอนผ่านทะลุได้ โดยกำลังขยายของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องผ่านมีกำลังขยายสูงสุดอยู่ที่ 0.1 นาโนเมตร การสร้างภาพจากกล้องประเภทนี้จะทำได้โดยการตรวจวัดอิเล็กตรอนที่ทะลุผ่านตัวอย่างใช้ในการศึกษาโครงสร้างทางสัณฐานของอนุภาคซึ่งใช้การตรวจจับอิเล็กตรอนที่ทะลุผ่านทำให้ได้ภาพที่มีลักษณะเป็น 2 มิติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.6.4 จุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด (Scanning electron microscope; SEM)

เครื่องมือวิเคราะห์และศึกษาพื้นผิวของชิ้นงานโดยอาศัยหลักการการสะท้อนกลับของอิเล็กตรอนเมื่อตกกระทบพื้นผิว ทำให้ได้ภาพตัวอย่างแสดงเป็น 3 มิติ โดยใช้เพื่อศึกษาวัสดุในระดับจุลภาคมีกำลังขยายอยู่ในช่วง 3,000 – 100,000 เท่า

3.3.6.5 เครื่องวัดการป้องกันการกัดกร่อนโดยใช้เทคนิคโพลาไรเซชัน (Potentiodynamic polarization)

เครื่องมือเพื่อทดสอบความต้านทานการกัดกร่อน โดยอาศัยหลักการโพลาไรเซชัน ซึ่งเครื่องมือวิเคราะห์นี้จะมีการผ่านกระแสไฟฟ้าเข้าไปทำให้ปฏิกิริยาออกซิเดชันเกิดได้เร็วขึ้นโดยเครื่องเครื่องตรวจวัดนี้ สามารถตรวจวัดความหนาแน่นของกระแสการกัดกร่อนที่เปลี่ยนแปลงไปตามค่าแรงดันไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้น ในสภาวะของสารละลายต่างๆ ซึ่งสามารถเตรียมได้เอง โดยรายละเอียดของเครื่องมือจะแสดงในภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

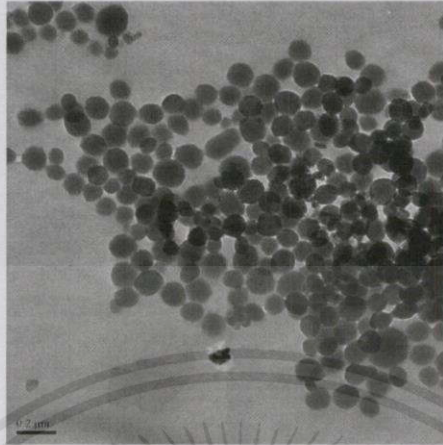
ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผล

ปริญญานิพนธ์เล่มนี้ได้ทำการศึกษการสังเคราะห์อนุภาคนาโนซิลิกาที่มีรูพรุนชนิดเมโซ (Mesoporous Silica Nanoparticle; MSN) เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมต่อการสังเคราะห์ โดยศึกษาผลของอุณหภูมิที่ใช้ในการสังเคราะห์ ศึกษาการสังเคราะห์ร่วมกับหมู่ฟังก์ชันอินทรีย์ ซึ่งสังเคราะห์ร่วมกับหมู่เอมีน (MSN-NH₂) และหมู่ซัลไฮดริล (MSN-SH) ศึกษาผลของอัตราส่วนระหว่างซิลิกา กับหมู่ฟังก์ชันอินทรีย์ สำหรับเครื่องมือวิเคราะห์โครงสร้างและลักษณะของอนุภาคใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องผ่าน (Transmission electron microscopy; TEM) ในการวิเคราะห์ และใช้เทคนิควิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของสารโดยอาศัยคุณสมบัติทางความร้อน (Thermo Gravimetric Analysis; TGA) เพื่อวิเคราะห์หาปริมาณสารอินทรีย์ ใช้การวิเคราะห์สารด้วยอินฟราเรด (Fourier Transform Infrared Spectroscopy; FTIR) ในการตรวจสอบหมู่ฟังก์ชัน อีกทั้งยังศึกษาการเคลือบผิวเหล็กกล้าโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope; SEM) ในการศึกษาลักษณะพื้นผิวเหล็กกล้า การเคลือบ คุณสมบัติการกระจายตัวของสารเคลือบ และศึกษาคุณสมบัติในการป้องกันการกัดกร่อนของสารเคลือบผิวโดยใช้เครื่องวัดการป้องกันการกัดกร่อนซึ่งใช้เทคนิคโพเทนชิโอสแตติก โพลาริเซชัน (Potentiostat galvanostat) โดยทดสอบในสภาวะต่างๆ

4.1 การศึกษาผลของการสังเคราะห์อนุภาคนาโนซิลิกาที่มีรูพรุนชนิดเมโซร่วมกับหมู่ฟังก์ชันเอมีน กับหมู่ฟังก์ชันซัลไฮดริลและผลของสัดส่วนหมู่อินทรีย์

การสังเคราะห์อนุภาคนาโนซิลิกาที่มีรูพรุนชนิดเมโซสามารถปรับแต่งหมู่ฟังก์ชันโดยสังเคราะห์ร่วมกับหมู่ฟังก์ชันอินทรีย์ โดยสังเคราะห์ที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส จากการส่องกล้องจุลทรรศน์ชนิดส่องผ่าน(TEM) พบว่า อนุภาคที่ไม่ได้ผ่านการปรับแต่งหมู่ฟังก์ชันมีลักษณะค่อนข้างเกาะกลุ่มกัน สังเกตจากรูปที่ 4.1 ส่วนสีเข้มเป็นส่วนของซิลิกาของอนุภาคที่มีรูพรุนชนิดเมโซที่ไม่ผ่านการปรับแต่งหมู่ฟังก์ชัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.1 อนุภาคนาโนซิลิกาที่มีรูพรุนชนิดเมโซที่ไม่ผ่านการปรับแต่งหมู่ฟังก์ชัน ขนาดสเกลบาร์ 200 นาโนเมตร

เมื่อเพิ่มกำลังขยายมากขึ้นจะสังเกตเห็นจุดสีขาวแทรกอยู่ตามเนื้อของซิลิกาซึ่งเป็นส่วนของรูพรุน ซึ่งอาจจะเห็นไม่ชัดเจนอาจเนื่องจากผลของการล้างสารกำหนดโครงสร้างไม่สะอาดพอ ดังแสดงในรูปที่

4.2

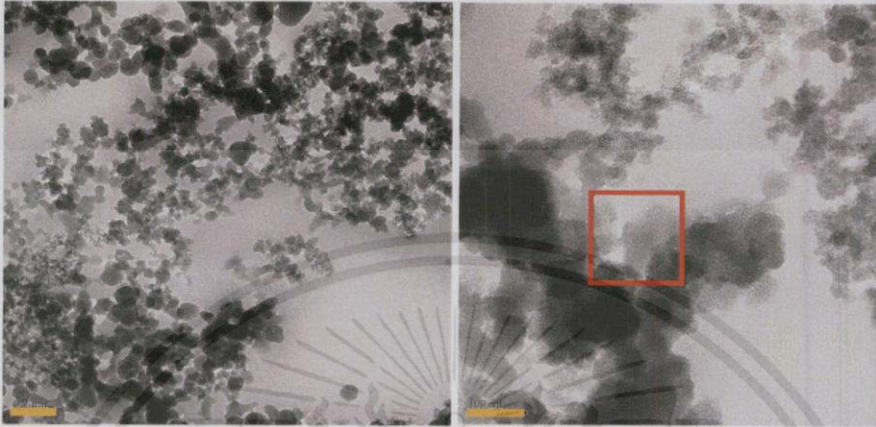


รูปที่ 4.2 อนุภาคนาโนซิลิกาที่มีรูพรุนชนิดเมโซที่ไม่ผ่านการปรับแต่งหมู่ฟังก์ชัน ขนาดสเกลบาร์ 50 นาโนเมตร

เมื่อทำการสังเคราะห์ร่วมกับหมู่ฟังก์ชันอินทรีย์ โดยเริ่มจากการสังเคราะห์ร่วมกับหมู่ฟังก์ชันเอมีน โดยสังเคราะห์ในสัดส่วนโดยปริมาตรระหว่าง TEOS:APTES เท่ากับ 0.45:0.05(10% โดยปริมาตรของ APTES) 0.40:0.10 (20% โดยปริมาตรของ APTES) 0.3:0.2 (40% โดยปริมาตรของ APTES) มิลลิกรัมเริ่มต้น 10% APTES พบว่าอนุภาคมีลักษณะไม่เป็นรูปร่างมีการเกาะติดกันอย่างแน่นหนาสังเกต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ห้ามการเผยแพร่โดยไม่อนุญาตให้ใช้โดยไม่ได้รับอนุญาต
ไม่ว่ากรณีใดๆทางสน อื่นๆห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ได้จากรูปที่ 4.3 (ก) แต่เมื่อเพิ่มกำลังขยายให้มากขึ้นจะสังเกตเห็นว่ามีรูพรุนเกิดขึ้นอยู่เล็กน้อยเป็นบางส่วนแสดงในพื้นที่กรอบสี่เหลี่ยมสีแดงในรูปที่ 4.3 (ข)

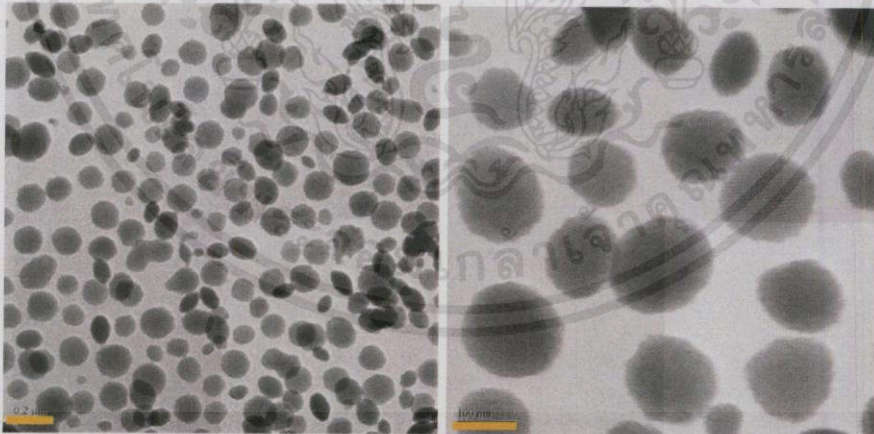


(ก)

(ข)

รูปที่ 4.3 อนุภาคนาโนซิลิกาที่มีรูพรุนชนิดเมโซที่สังเคราะห์ร่วมกับหมู่อินทรีย์ (MSN-NH₂) ที่สังเคราะห์ด้วยสัดส่วนโดยปริมาตร 10%APTES (ก) สเกลบาร์ 200 นาโนเมตร (ข) สเกลบาร์ 100 นาโนเมตร

จากนั้นที่ 20%APTES จะเห็นได้ชัดเจนว่ามีลักษณะเป็นอนุภาคมากขึ้นและมีการกระจายตัวที่ดี และมีรูพรุนมากกว่าสัดส่วนที่ได้จากสัดส่วนโดยปริมาตรก่อนหน้านั้นซึ่งไม่ชัดเจน สังเกตจากรูปที่ 4.4



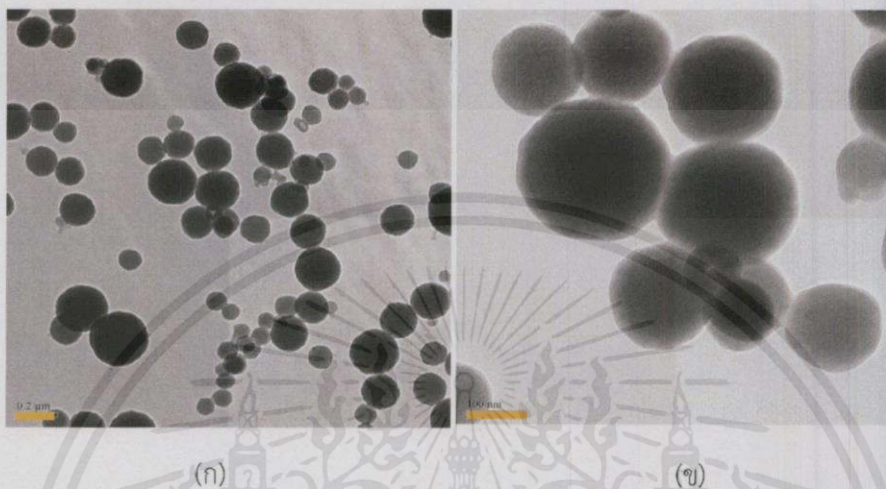
(ก)

(ข)

รูปที่ 4.4 อนุภาคนาโนซิลิกาที่มีรูพรุนชนิดเมโซที่สังเคราะห์ร่วมกับหมู่อินทรีย์ (MSN-NH₂) ที่สังเคราะห์ด้วย 20%APTES (ก) สเกลบาร์ 200 นาโนเมตร (ข) สเกลบาร์ 100 นาโนเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

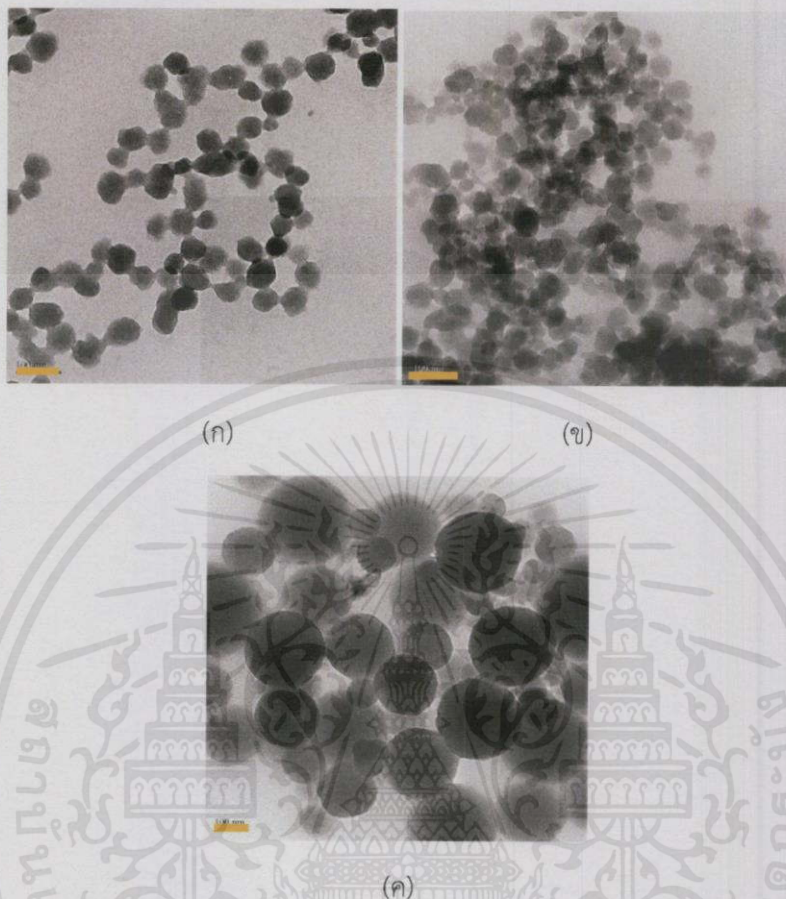
เมื่อทำการสังเคราะห์ที่สัดส่วนโดยปริมาตร 40%APTES สังเกตได้ว่าอนุภาคมีลักษณะเป็นทรงกลมเช่นเดียวกับการใช้สัดส่วนโดยปริมาตร 20%APTES แต่ไม่สามารถมองเห็นรูพรุนได้แสดงดังภาพที่ 4.5



รูปที่ 4.5 อนุภาคนาโนซิลิกาที่มีรูพรุนชนิดเมโซที่สังเคราะห์ร่วมกับหมู่ฟังก์ชันเอมีน (MSN-NH₂) ที่สังเคราะห์ด้วย 40%APTES ก) สเกลบาร์ 200 นาโนเมตร ข) สเกลบาร์ 100 นาโนเมตร

เมื่อมีการสังเคราะห์ร่วมกับหมู่ฟังก์ชันซิลไฮดริล โดยสังเคราะห์ด้วยสัดส่วนโดยปริมาตรระหว่าง TEOS:MPTMS เท่ากับหมู่ฟังก์ชันเอมีนคือ 0.45:0.05(10% โดยปริมาตรของ MPTMS) 0.4:0.1(20% โดยปริมาตรของ MPTMS) 0.3:0.2(40% โดยปริมาตรของ MPTMS) มิลลิลิตร พบว่าในสัดส่วนโดยปริมาตร 10%MPTMS และ 20%MPTMS มิลลิลิตร อนุภาคเป็นไปในลักษณะเดียวกันคือไม่มีลักษณะเป็นอนุภาค ไม่สามารถสังเกตรูพรุนได้ สำหรับสัดส่วน 40%MPTMS มิลลิลิตรจะเป็นอนุภาคมากขึ้น แต่ก็ยังไม่สามารถเห็นรูพรุนได้เช่นเดียวกับสังเกตรูพรุนได้จากรูปที่ 4.6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.6 อนุภาคนาโนซิลิกาที่มีรูพรุนชนิดเมโซที่สังเคราะห์ร่วมกับหมู่ฟังก์ชันซิลไฮดริล (MSN-SH) สเกลบาร์ 100 นาโนเมตร ที่สังเคราะห์ด้วย ก) 10 ข) 20 ค) 40 %MPTMS

จากการสังเคราะห์ร่วมกับหมู่อินทรีย์โดยใช้สัดส่วนของหมู่อินทรีย์ที่แตกต่างกัน ได้ทำการวิเคราะห์ผลโดยใช้เทคนิควิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของสารโดยอาศัยคุณสมบัติทางความร้อน (TGA) เพื่อหาปริมาณหมู่ฟังก์ชันอินทรีย์ที่อยู่ในอนุภาค พบว่าในอนุภาคที่มีการสังเคราะห์ร่วมกับหมู่ซิลไฮดริลที่สัดส่วนโดยปริมาตรเท่ากับ 0.45:0.05 (10%MPTMS) พบว่าที่สัดส่วนดังกล่าวจะมีหมู่ซิลไฮดริลประมาณร้อยละ 10.981 โดยน้ำหนัก ซึ่งอาจลดเคลื่อนเล็กน้อยเนื่องจากการล้างสารกำหนดโครงสร้างไม่หมด โดยเมื่อเทียบกับอนุภาคที่สังเคราะห์ร่วมกับหมู่ซิลไฮดริลที่สัดส่วน 0.40:0.10 (20%MPTMS) พบว่าที่สัดส่วนนี้จะมีหมู่ปริมาณซิลไฮดริลมากกว่าผลที่สังเกตจากตารางที่ 4.1 โดยพบว่ามีปริมาณหมู่ซิลไฮดริลอยู่ประมาณร้อยละ 14.856 โดยน้ำหนัก โดยแนวโน้มดังกล่าวนี้เป็นแนวโน้มเดียวกับการสังเคราะห์ร่วมกับเอมีน คือการสังเคราะห์ที่ใช้ APTES จะให้หมู่ฟังก์ชันเอมีนมาก โดยเมื่อเปรียบเทียบระหว่างหมู่เอมีนและหมู่ซิลไฮดริลที่สัดส่วนเดียวกันจะเห็นว่าลักษณะการสลายตัวของหมู่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซัลไฮดริลสลายตัวได้ง่ายกว่าและมีปริมาณของหมู่ฟังก์ชันติดเข้าไปในอนุภาคมากหรือน้อยกว่า เปรียบเทียบกันดังรูปที่ ก.4.2 และ ก.4.3 ในภาคผนวก ก

ตารางที่ 4.1 แสดงปริมาณสารตั้งต้นโซเลนที่มีหมู่อินทรีย์ที่อยู่ในอนุภาค

ตัวอย่าง	ร้อยละโดยปริมาตร	ปริมาณหมู่อินทรีย์ที่อยู่ในอนุภาค (ร้อยละโดยน้ำหนัก)
APTES	10	-
	20	5.33
	40	26.55
MPTMS	10	10.981
	20	14.856
	40	-

หมายเหตุ: 10%APTES และ 40%MPTMS ไม่สามารถแสดงผลได้เนื่องจากมีตัวอย่างปริมาณน้อยมากจึงไม่สามารถตรวจวัดหาปริมาณหมู่ฟังก์ชันในอนุภาคได้

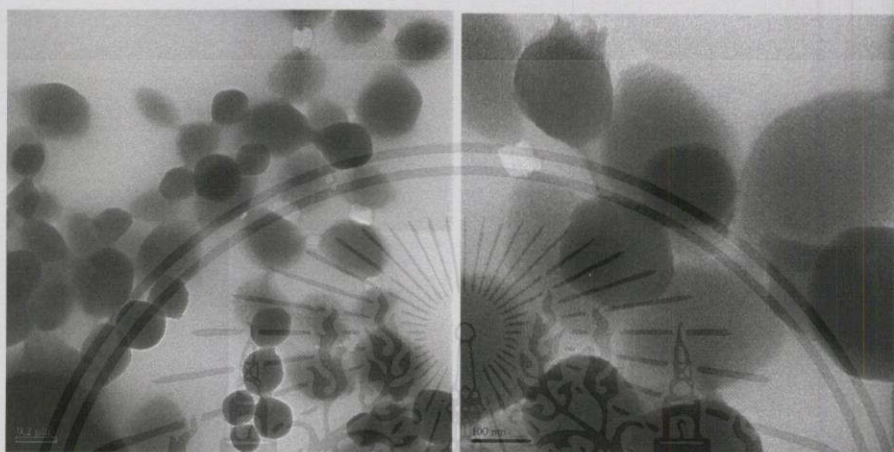
*สารอินทรีย์ คือสารตั้งต้นโซเลนที่มีหมู่อินทรีย์ในการสังเคราะห์

จากการศึกษาผลของการสังเคราะห์ร่วมกับหมู่ฟังก์ชันแต่ละชนิดและสัดส่วนของหมู่ฟังก์ชัน สามารถสรุปได้ว่าปริมาณของ APTES/MPTMS ที่นำไปสังเคราะห์ร่วมกับอนุภาคนั้นมีผลต่อลักษณะของอนุภาค จะเห็นว่าปริมาณของหมู่ฟังก์ชันเอมีนหรือซัลไฮดริลที่น้อยเกินไปจะทำให้อนุภาคไม่เป็นรูปร่าง แต่ถ้าใส่มากเกินไปจะส่งผลให้รูพรุนของอนุภาคลดลง ดังนั้นผู้ทำงานวิจัยจึงสนใจจะศึกษาพัฒนาอนุภาคที่สังเคราะห์ร่วมกับหมู่อินทรีย์ที่สัดส่วนโดยปริมาตรร้อยละ 20 และจากการวิเคราะห์ด้วย TGA พบว่า หมู่ฟังก์ชันซัลไฮดริลจะสามารถอยู่ในอนุภาคได้มากกว่าเมื่อเทียบกับหมู่ฟังก์ชันเอมีน

4.2 การศึกษาผลของอุณหภูมิที่ใช้ในการสังเคราะห์อนุภาคนาโนซิลิกาที่มีรูพรุนชนิดเมโซ

การศึกษาผลของอุณหภูมิที่ใช้ในการสังเคราะห์อนุภาคนาโนซิลิกาที่มีรูพรุนชนิดเมโซ โดยสังเคราะห์ที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส จากการศึกษาโดยใช้กล้องจุลทรรศน์ชนิดส่องผ่าน (TEM) รูปที่ 4.7 เปรียบเทียบกับรูปที่ 4.1 และ 4.2 อนุภาคนาโนซิลิกาที่มีรูพรุนชนิดเมโซที่ไม่ผ่านการปรับแต่งหมู่ฟังก์ชันที่สังเคราะห์ที่อุณหภูมิ 20 และ 40 องศาเซลเซียส ตามลำดับ ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีให้คิดแปลลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ศึกษาลักษณะพื้นฐานโครงสร้างของอนุภาค พบว่าการสังเคราะห์อนุภาคที่ไม่มีการปรับแต่งหมู่ฟังก์ชันที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส จะมีการกระจายตัวและมีลักษณะเป็นอนุภาคมากกว่าอนุภาคที่สังเคราะห์ที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส โดยขนาดของอนุภาคที่สังเคราะห์ที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียสมีขนาดใหญ่เมื่อสังเกตจากสเกลบาร์



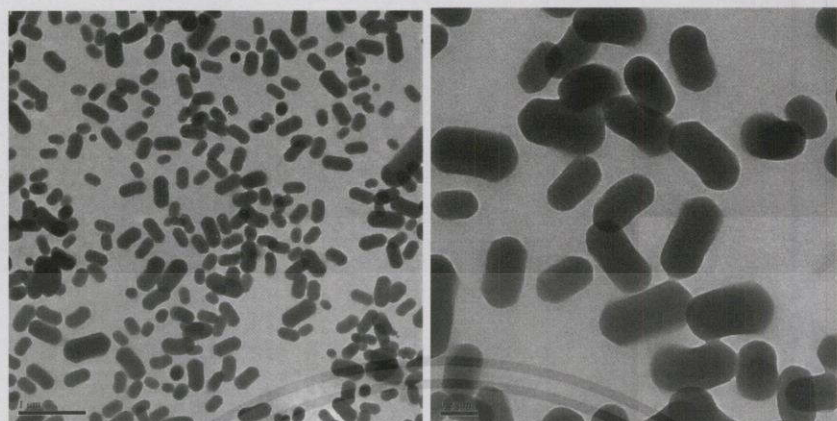
(ก)

(ข)

รูปที่ 4.7 โครงสร้างอนุภาคนาโนซิลิกาที่มีรูพรุนชนิดเมโซที่ไม่มีการปรับแต่งหมู่ฟังก์ชัน สังเคราะห์ที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส ก) สเกลบาร์ 200 นาโนเมตร ข) สเกลบาร์ 100 นาโนเมตร

ในปริณิญาณิพนธ์เรื่องนี้ผู้ทดลองได้ทำการสังเคราะห์ร่วมกับหมู่ฟังก์ชันเอมีนและหมู่ซิลไฮดริล โดยพบว่าในอนุภาคที่สังเคราะห์ร่วมกับเอมีนในสัดส่วนโดยปริมาตรของ TEOS:APTES 0.40:0.10 พบว่าให้ผลในทางกลับกันกับอนุภาคที่ไม่มีการปรับแต่งหมู่ฟังก์ชัน โดยจะสังเกตได้ว่าอนุภาคที่สังเคราะห์ที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียสจะได้เป็นอนุภาคที่มีลักษณะของอนุภาคที่มีระเบียบมากกว่า จะเห็นว่ารูปร่างที่ 4.8 โครงสร้างอนุภาคที่มีรูพรุนชนิดเมโซที่สังเคราะห์ร่วมกับเอมีนที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส จะมีลักษณะโครงสร้างเป็นเฮกซะโกนอลอย่างชัดเจน สังเกตจากรูปที่ 4.8 (ข) เมื่อเปรียบเทียบกับอนุภาคที่สังเคราะห์ที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียสซึ่งแสดงไว้ในรูปที่ 4.9 แสดงโครงสร้างของอนุภาคที่สังเคราะห์ที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส

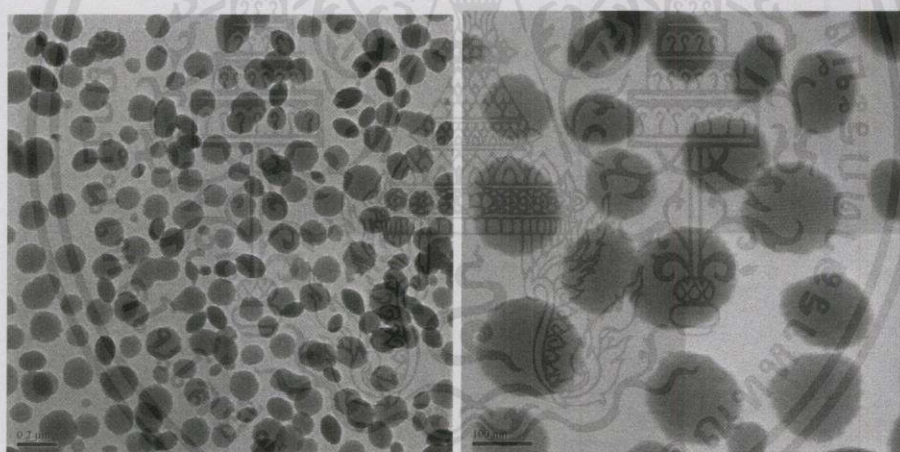
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก)

(ข)

รูปที่ 4.8 โครงสร้างอนุภาคนาโนซิลิกาที่มีรูพรุนชนิดเมโซที่สังเคราะห์ร่วมกับหมู่ฟังก์ชันเอมีน (MSN-NH₂) สังเคราะห์ที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส ก) สเกลบาร์ 1000 นาโนเมตร ข) สเกลบาร์ 200 นาโนเมตร



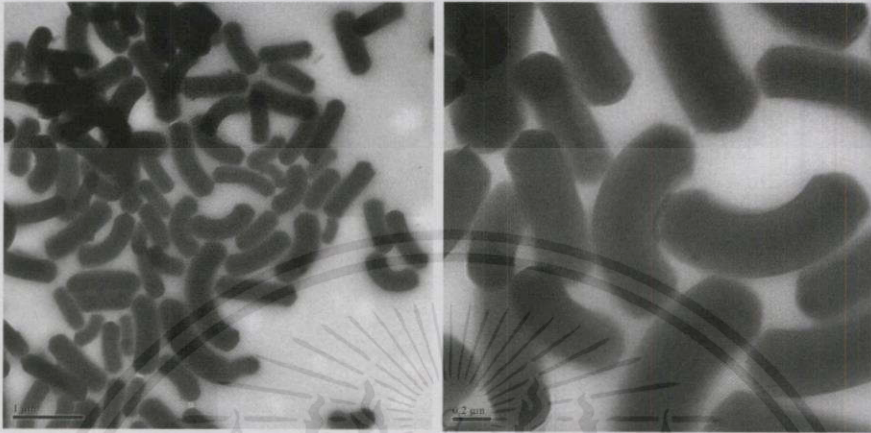
(ก)

(ข)

รูปที่ 4.9 โครงสร้างอนุภาคนาโนซิลิกาที่มีรูพรุนชนิดเมโซที่สังเคราะห์ร่วมกับหมู่ฟังก์ชันเอมีนสังเคราะห์ (MSN-NH₂) ที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส ก) สเกลบาร์ 200 นาโนเมตร ข) สเกลบาร์ 100 นาโนเมตร

จากรูปที่ 4.8 และ 4.9 ได้สังเกตว่าการสังเคราะห์ร่วมกับเอมีนจะให้การกระจายตัวของอนุภาคที่มากกว่าอนุภาคที่ไม่ผ่านการปรับแต่งหมู่ฟังก์ชันสามารถเปรียบได้กับรูปที่ 4.2 และ 4.7 ซึ่งในลักษณะเดียวกันกับการสังเคราะห์ร่วมกับหมู่ซิลไฮดริล โดยสังเคราะห์ที่สัดส่วนโดยปริมาตรของ TEOS:MPTMS เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

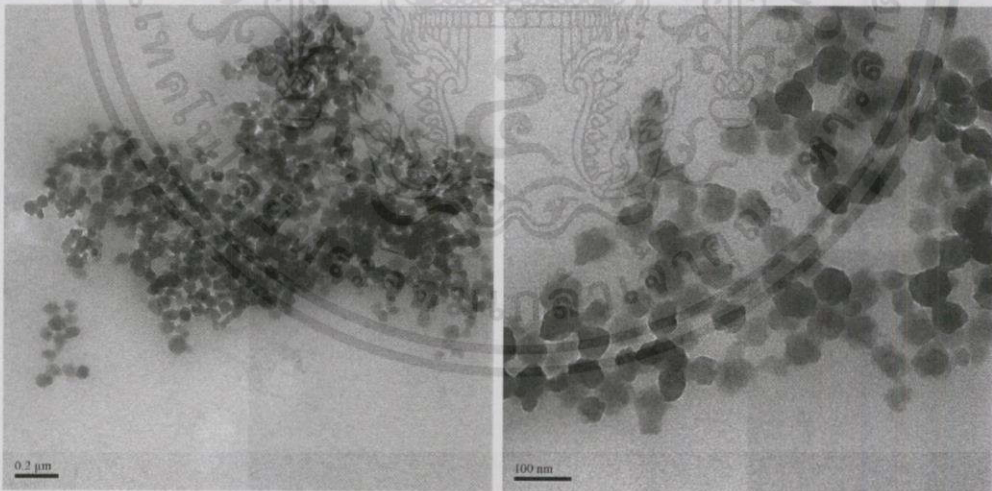
0.40:0.10 อนุภาคที่ได้จากการสังเคราะห์ที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียสจะมีลักษณะเป็นท่อยาว สังเกตได้จากรูปที่ 4.10



(ก)

(ข)

รูปที่ 4.10 โครงสร้างอนุภาคนาโนซิลิกาที่มีรูพรุนชนิดเมโซที่สังเคราะห์ร่วมกับหมู่ฟังก์ชันซิลไฮดริลที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส ก) สเกลบาร์ 1000 นาโนเมตร ข) สเกลบาร์ 200 นาโนเมตร ซึ่งต่างกับอนุภาคที่สังเคราะห์ที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียสที่มีลักษณะไม่เป็นระเบียบและคงรูปเป็นอนุภาคไว้ไม่สามารถสังเกตุได้จากรูปที่ 4.11



(ก)

(ข)

รูปที่ 4.11 โครงสร้างอนุภาคนาโนซิลิกาที่มีรูพรุนชนิดเมโซที่สังเคราะห์ร่วมกับหมู่ฟังก์ชันซิลไฮดริลที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส ก) สเกลบาร์ 200 นาโนเมตร ข) สเกลบาร์ 100 นาโนเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาด้านนี้ ไม่อนุญาตให้เผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของลิขสิทธิ์
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

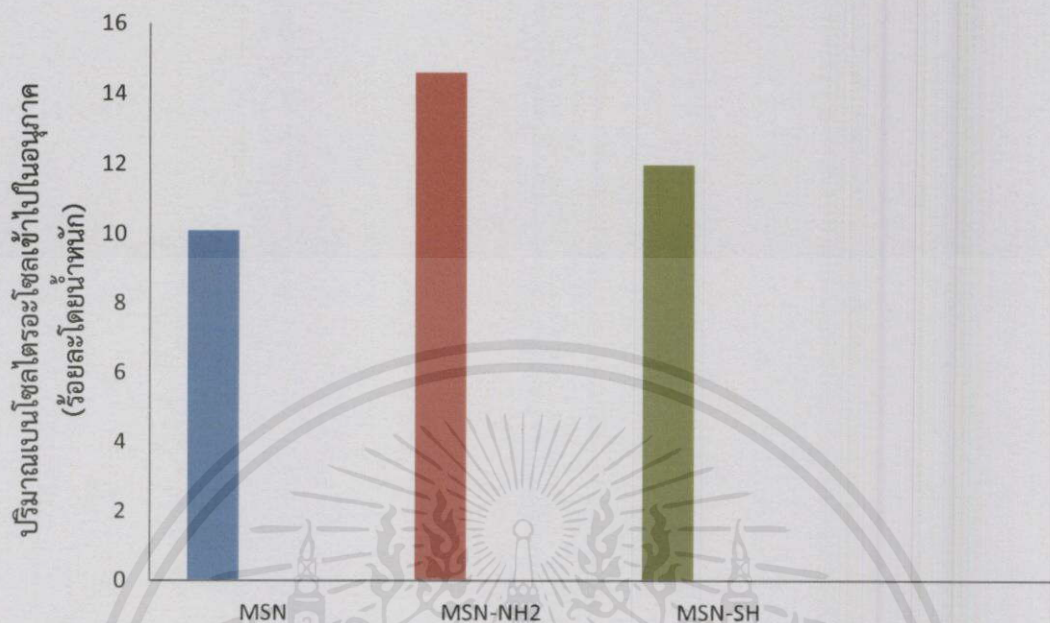
จากการสังเคราะห์ที่อุณหภูมิต่างกันสามารถทำมาวิเคราะห์ผลโดยใช้เทคนิควิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของสารโดยอาศัยคุณสมบัติทางความร้อน (TGA) โดยเปรียบเทียบกันระหว่างอนุภาคที่สังเคราะห์ร่วมกับเอมีนโดยใช้สัดส่วนโดยปริมาตร 0.40:0.10 พบว่าที่อุณหภูมิสูงหมู่ฟังก์ชันเอมีนจะเข้าไปได้มากกว่า โดยที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียสจะมีปริมาณหมู่ฟังก์ชันที่อยู่ในอนุภาคร้อยละ 3.954 โดยน้ำหนัก และจากตารางที่ 4.1 ที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียสจะมีหมู่ฟังก์ชันร้อยละ 5.33 โดยน้ำหนัก โดยข้อมูลเพิ่มเติมการสังเคราะห์อนุภาคแต่ละชนิดที่อุณหภูมิที่ 20 องศาเซลเซียสดังแสดงในรูปที่ ก เป็นการตรวจวัดผลด้วยเครื่องมือวิเคราะห์สารด้วยอินฟราเรด (FTIR)

จากการทดลองการศึกษาผลของอุณหภูมิที่ใช้ในการสังเคราะห์อนุภาคนาโนซิลิกาที่มีรูพรุนชนิดเมโซ พบว่าสำหรับการสังเคราะห์อนุภาคที่ไม่มีการปรับแต่งหมู่ฟังก์ชัน การสังเคราะห์ที่อุณหภูมิที่ 40 องศาเซลเซียสให้ผลที่ดีกว่าการสังเคราะห์ที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียสทั้งความเป็นอนุภาคและการกระจายตัว ส่วนการสังเคราะห์ร่วมกับหมู่ฟังก์ชันอินทรีย์ พบการสังเคราะห์ที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียสให้ผลดีกว่า สังเกตจากการสังเคราะห์ร่วมกับหมู่เอมีนที่มีโครงสร้างที่เป็นระเบียบมากกว่า และในการสังเคราะห์ร่วมกับหมู่ซิลไฮดริลมีความเป็นรูพรุนอนุภาคมากกว่า และจากการเปรียบเทียบระหว่างอนุภาคที่ไม่ผ่านการปรับแต่งหมู่ฟังก์ชันกับอนุภาคที่ผ่านการปรับแต่งหมู่ฟังก์ชันแล้ว พบว่าอนุภาคที่ผ่านการปรับแต่งหมู่ฟังก์ชันแล้วจะมีการกระจายตัวที่ดีกว่า เนื่องจากที่พื้นผิวของอนุภาคมีความเป็นขั้วเพิ่มมากขึ้นทำให้แต่ละอนุภาคผลักกันเพิ่มความสามารถในการกระจายตัวได้ดีขึ้น ดังนั้นปัญญานิพนธ์เล่มนี้จึงสนใจจะศึกษาพัฒนาอนุภาคที่สังเคราะห์ที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียสในหัวข้อการศึกษาต่อจากนี้ไป

4.3 การศึกษาความสามารถในการบรรจุสารยับยั้งการป้องกันการกัดกร่อนของอนุภาคนาโนซิลิกาที่มีรูพรุนชนิดเมโซ

การศึกษาความสามารถในการบรรจุสารยับยั้งการกัดกร่อนของอนุภาคนาโนซิลิกาที่มีรูพรุนชนิดเมโซ ซึ่งสารยับยั้งการกัดกร่อนคือ เบนโซไตรอะโซล (Benzotriazole) โดยใช้อนุภาคที่สังเคราะห์ที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส มาเปรียบเทียบความสามารถในการบรรจุเบนโซไตรอะโซลระหว่าง อนุภาคที่ไม่ได้ปรับแต่งหมู่ฟังก์ชันและอนุภาคที่สังเคราะห์ร่วมกับหมู่เอมีนและหมู่ซิลไฮดริล 0.40:0.10 มิลลิลิตร จะพบว่าอนุภาคที่สังเคราะห์ร่วมกับหมู่ฟังก์ชันเอมีนมีความสามารถในการบรรจุเบนโซลไตรอะโซลได้ดีที่สุด รองลงมาคือหมู่ฟังก์ชันซิลไฮดริล และอนุภาคที่ไม่มีการปรับแต่งหมู่ฟังก์ชัน แสดงได้ดังรูปที่ 4.12

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



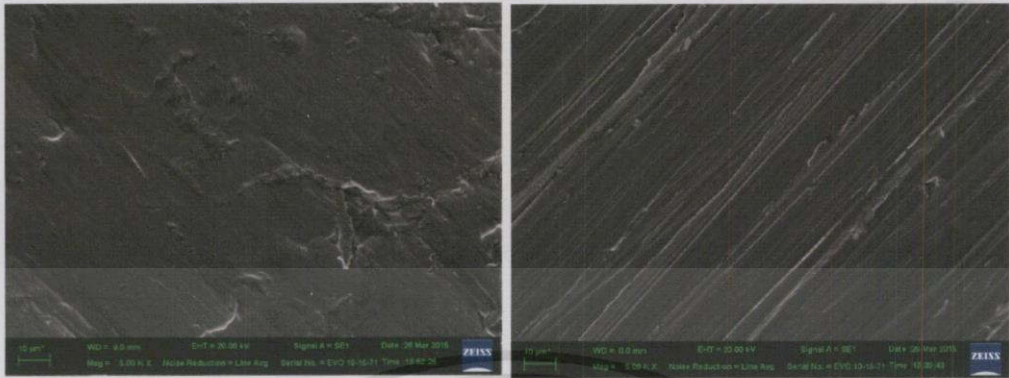
รูปที่ 4.12 การแท่งเปรียบเทียบความสามารถในการบรรจุเบนโซอิกแอซิดของอนุภาคแต่ละชนิด

เนื่องจากอนุภาคที่สังเคราะห์ร่วมกับเอมีนมีลักษณะอนุภาคที่เป็นระเบียบเมื่อเทียบกับหมู่ฟังก์ชันซิลไฮดรอลและอนุภาคที่ไม่ได้ปรับแต่งหมู่ฟังก์ชันส่งผลให้สารเบนโซอิกแอซิดนั้นเข้าไปได้ง่ายกว่า ทำให้สามารถบรรจุเบนโซอิกแอซิดได้มากกว่าอนุภาคชนิดอื่น และสำหรับหมู่ซิลไฮดรอลอนุภาคมีลักษณะเป็นปล้องยาวทำให้สามารถบรรจุเบนโซอิกแอซิดได้มากกว่าอนุภาคที่ไม่ได้ผ่านการปรับแต่งหมู่ฟังก์ชันจึงทำให้เมื่อเปรียบเทียบกันระหว่างอนุภาคที่สังเคราะห์ร่วมกับหมู่ซิลไฮดรอลและอนุภาคที่ไม่มีการปรับแต่งหมู่ฟังก์ชัน อนุภาคที่สังเคราะห์ร่วมกับหมู่ไฮดรอลจะสามารถบรรจุเบนโซอิกแอซิดได้มากกว่า

4.4 การศึกษาลักษณะพื้นผิวของเหล็กกล้าและการกระจายตัวของอนุภาคนาโนซิลิกาที่มีรูพรุนชนิดเมโซบนเหล็กกล้า

การศึกษาลักษณะพื้นผิวของเหล็กกล้าและการกระจายตัวของอนุภาคนาโนซิลิกาที่มีรูพรุนชนิดเมโซบนเหล็กกล้า โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด (Scanning electron microscopy; SEM) จากรูปที่ 4.13(ก) จะเห็นว่าเหล็กกล้าที่นำมาทดลองมีความไม่สม่ำเสมอของพื้นผิว เมื่อเปรียบเทียบกับภาพที่ 4.13(ข) ซึ่งเป็นรอยบนพื้นผิวของเหล็กกล้าจะมีความสม่ำเสมอเนื่องจากการขัดมากกว่า แสดงได้ดังรูปที่ 4.13

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

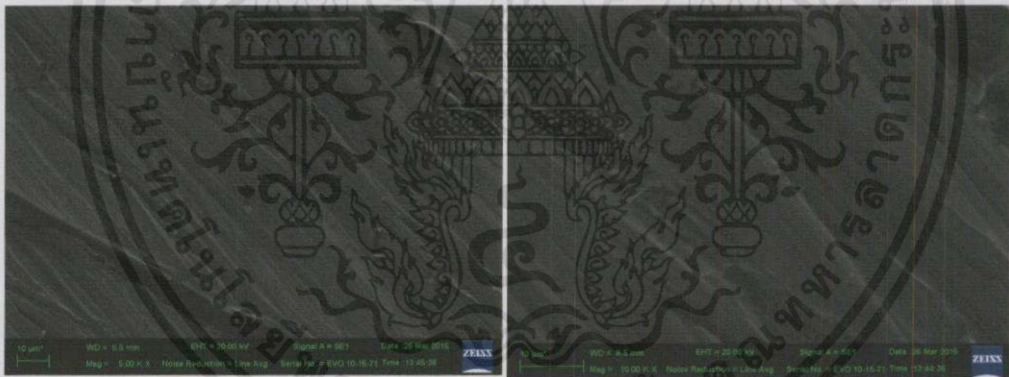


(ก)

(ข)

รูปที่ 4.13 พื้นผิวแผ่นเหล็กกล้า ก) ก่อนเตรียมพื้นผิว ข) หลังเตรียมพื้นผิว ที่กำลังขยาย 5000 เท่า สเกลบาร์ขนาด 10 ไมโครเมตร

เมื่อนำแผ่นเหล็กกล้าที่ไปผ่านการเคลือบด้วยสารยัดจะสังเกตเห็นรอยขีดนั้นมึลักษณะจางลง แสดงดังรูปที่ 4.14 เมื่อเปรียบเทียบกับรูปที่ 4.14(ข) แสดงให้เห็นว่าสารยัดสามารถเกาะติดกับพื้นผิวจริง และการเตรียมพื้นผิวหน้าของเหล็กกล้ายังช่วยในการเกาะติดของสารเคลือบผิวด้วย



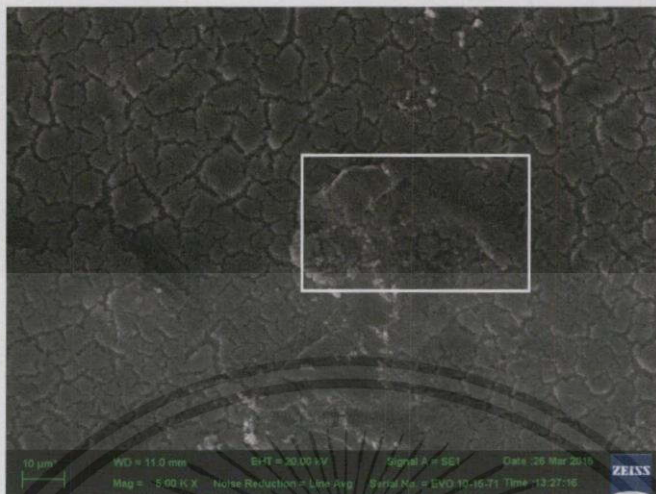
(ก)

(ข)

รูปที่ 4.14 ลักษณะของพื้นผิวแผ่นเหล็กกล้าหลังเคลือบผิวด้วยสารยัดปริมาตร 1 มิลลิลิตร ที่กำลังขยาย ก) 5000 เท่า ข) 10,000 เท่า

จากการศึกษาการกระจายตัวของอนุภาคบนแผ่นเหล็ก ซึ่งใช้อนุภาคนาโนซิลิกาที่มีรูพรุนชนิดเมโซที่ ไม่มีการปรับแต่งหมู่ฟังก์ชัน (MSN) มาทดลองเคลือบลงบนพื้นผิวเหล็กกล้าโดยไม่ได้ใส่สารยัดพบว่าอนุภาคจับตัวกันเป็นก้อน สังเกตได้ในบริเวณพื้นที่สี่เหลี่ยมสีขาวในรูปที่ 4.15 และเกิดรอยแตกของชั้นเคลือบอย่างชัดเจน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.15 ลักษณะของพื้นแผ่นเหล็กกล้าหลังเคลือบผิวด้วยอัตรา ตัวทำละลาย (เมทานอล) และอนุภาคนาโนซิลิกาที่มีรูพรุนชนิดเมโซ เป็น 1 มิลลิลิตร/0.01 กรัม ที่กำลังขยาย 5000 เท่า สเกลบาร์ 10 ไมโครเมตร

เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับลักษณะการกระจายของอนุภาค หลังจากทีที่เติมสารยึดเข้ากับตัวทำละลาย (เมทานอล) และอนุภาคด้วยอัตราส่วน 1:1:0.01 (มิลลิลิตร:มิลลิลิตร:กรัม) รูปที่ 4.16 พบว่าลักษณะของการกระจายตัวของอนุภาคกระจายตัวได้ดีขึ้น ไม่เกิดรอยแตกในชั้นเคลือบผิว เป็นผลมาจากการเติมสารยึดซึ่งมีสมบัติกระจายตัวดีและตัวทำละลายที่ช่วยละลายสารยึดให้เป็นเนื้อเดียวกัน

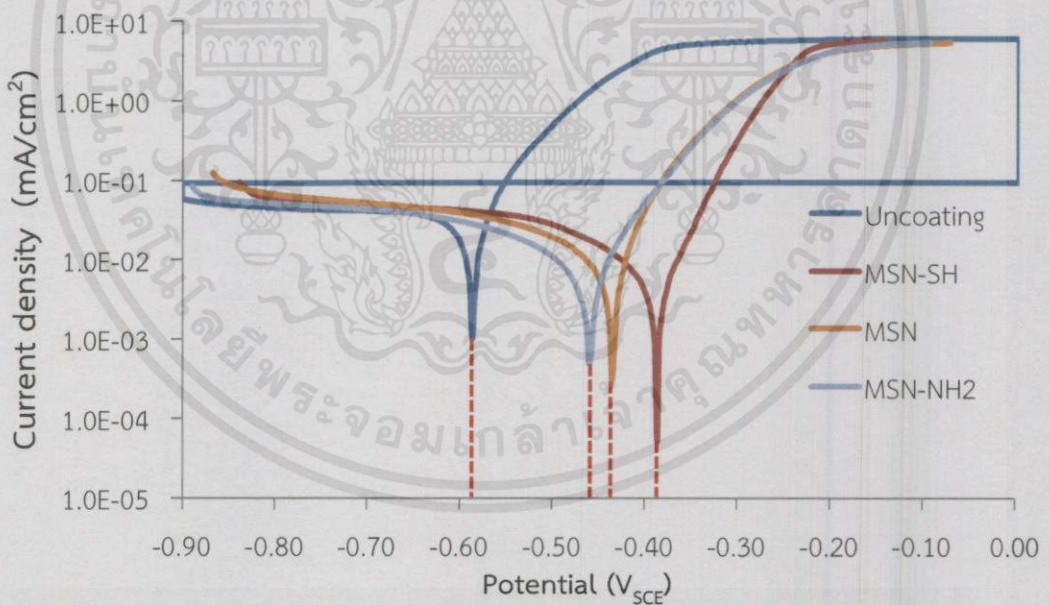


รูปที่ 4.16 ลักษณะของพื้นแผ่นเหล็กกล้าหลังเคลือบผิวด้วยอัตราส่วนสารยึด ตัวทำละลาย (เมทานอล) และอนุภาค 1:1:0.01 (มิลลิลิตร:มิลลิลิตร:กรัม) ที่กำลังขยาย 20000 เท่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.5 การศึกษาประสิทธิภาพของชั้นเคลือบผิวอนุภาคนาโนซิลิกาที่มีรูพรุนชนิดเมโซในแต่ ละชนิด ในการต้านทานการกัดกร่อนของเหล็กกล้าในสภาวะน้ำเกลือ

การศึกษาความสามารถในการต้านทานการกัดกร่อนของชั้นเคลือบผิวอนุภาคนาโนซิลิกาที่มีรูพรุนชนิดเมโซโดยใช้เครื่องวัดการป้องกันการกัดกร่อนซึ่งใช้เทคนิคโพลาไรไรซ์ (Potentiodynamic polarization) โดยเทคนิคการวัดนี้จะใช้หลักการการเปลี่ยนแปลงไปของค่ากระแสไฟฟ้าเมื่อเทียบกับค่า แรงดันไฟฟ้าที่เครื่องป้อนเข้า สร้างกราฟที่ได้จากเครื่องวัดโดยใช้วิธีการของ Tafel slope ในการหา ค่ากระแสการกัดกร่อน (Corrosion current density; i_{corr}) และเปรียบเทียบค่าแรงดันไฟฟ้าที่ทำให้เริ่ม เกิดการกัดกร่อน (Corrosion potential; E_{corr}) โดยค่าเหล่านี้สามารถนำไปหาอัตราการกัดกร่อนได้ เมื่อ ทำการทดลองในสภาวะน้ำเกลือความเข้มข้นร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส สามารถเปรียบเทียบได้ดังนี้ ในรูปที่ 4.17 เป็นการเปรียบเทียบกันระหว่างเหล็กกล้าที่เคลือบด้วยอนุภาค ในแต่ละชนิดที่ยังไม่ผ่านการบรรจุเบนโซไตรอะโซลพบว่า i_{corr} ยังอยู่ในช่วงที่ใกล้เคียงกันแต่ค่า E_{corr} จะ ต่างกันอย่างเห็นได้ชัด



รูปที่ 4.17 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าและศักย์ไฟฟ้าในสภาวะน้ำเกลือร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก

จากกราฟสามารถสรุปค่า i_{corr} และ E_{corr} ได้ดังตารางที่ 4.2 ซึ่งจะเห็นอนุภาคที่สังเคราะห์ร่วมกับ หมู่ซิลไฮดริลมีค่าอัตราการป้องกันการกัดกร่อนน้อยที่สุด รองลงมาเป็นอนุภาคที่สังเคราะห์ร่วมกับเอมีน เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

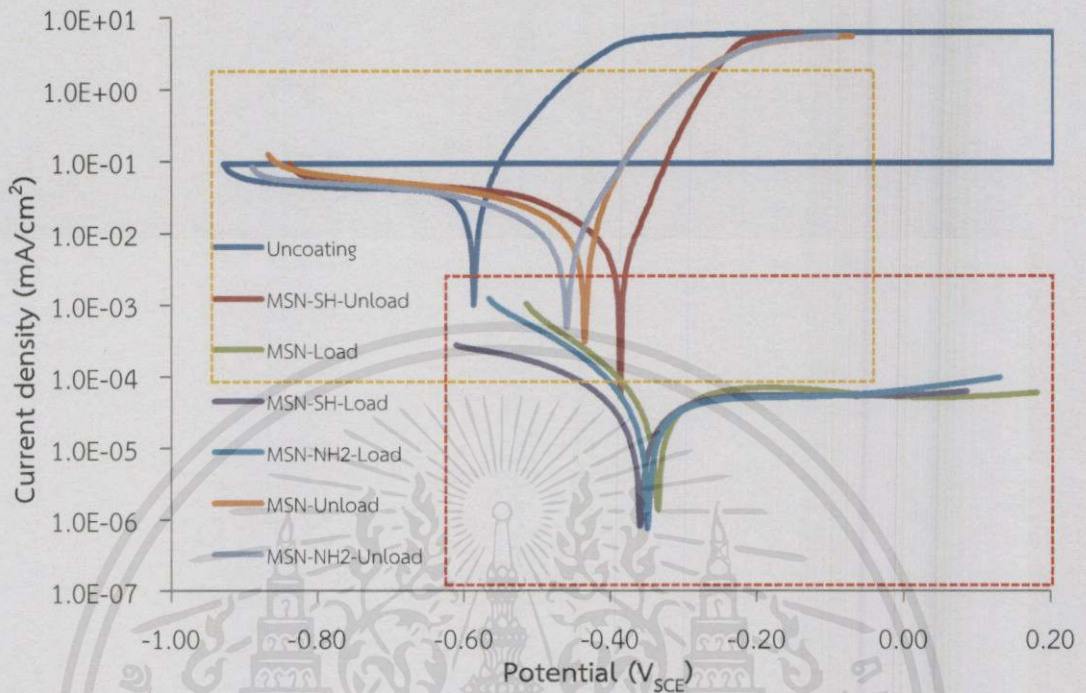
และอนุภาคที่ไม่ปรับแต่งหมู่ฟังก์ชัน ตามลำดับ ซึ่งจากกราฟแสดงให้เห็นอย่างชัดเจนว่าการเคลือบด้วยอนุภาค MSN มีผลช่วยป้องกันการกัดกร่อน

ตารางที่ 4.2 ค่า i_{corr} , E_{corr} และค่าอัตราการกัดกร่อนของอนุภาคก่อนบรรจุเบนโซไตรอโซลในสภาวะเกลือ

สารตัวอย่าง	i_{corr} (A/cm^2)	E_{corr} (V)	อัตราการกัดกร่อน (mm/year)
Uncoating	2.4×10^{-5}	-0.586	0.278
MSN	1.2×10^{-5}	-0.435	0.137
MSN-SH	5.13×10^{-6}	-0.387	0.059
MSN-NH ₂	1.07×10^{-5}	-0.459	0.124

เมื่อนำอนุภาคไปบรรจุเบนโซไตรอโซลทำให้คุณสมบัติในการป้องกันการกัดกร่อนเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากเบนโซไตรอโซลช่วยในการยับยั้งการกัดกร่อน ซึ่งจากรูปที่ 4.18 เห็นได้ชัดเจนว่าเบนโซไตรอโซลมีส่วนช่วยในการป้องกันการกัดกร่อนจริงโดยเปรียบเทียบกันระหว่างก่อนและหลังบรรจุเบนโซไตรอโซล ซึ่งเบนโซลไตรอโซลจะไปช่วยไม่ให้เหล็กกล้าสูญเสียอิเล็กตรอนให้กับไอออนของคลอไรด์ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยที่ได้ศึกษามาในก่อนหน้านี้ [18]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.18 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าและศักย์ไฟฟ้าในสถานะน้ำเกลือร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก ก่อนและหลังบรรจุเบนโซไตรออะโซล

จะเห็นได้ว่าค่า E_{corr} และ i_{corr} นั้นได้ค่าที่ดีขึ้นสังเกตได้จากในกราฟสีเหลืองเป็นอนุภาคก่อนบรรจุเบนโซไตรออะโซลและในกราฟสีเหลืองคืออนุภาคหลังบรรจุเบนโซไตรออะโซล โดยแสดงให้เห็นว่าการกัดกร่อนเกิดขึ้นได้น้อยลงและช้าลง ซึ่งถ้าสังเกตเส้นกราฟที่เลขค่า E_{corr} ไปจะเห็นว่ากราฟในกราฟสีเหลืองมีความชันมากกว่า และในกราฟสีแดงมีความชันลดลงอย่างเห็นได้ชัด หมายความว่าเมื่อผ่านจุด E_{corr} หรือจุดที่เริ่มการกัดกร่อนผ่านชั้นเคลือบเข้าไปในเนื้อเหล็กกล้าแล้ว ซึ่งเป็นอีกหนึ่งข้อยืนยันว่าเบนโซไตรออะโซลไปช่วยลดความสามารถในการกัดกร่อนของน้ำเกลือได้ สามารถแสดงผลเป็นอัตราการการกัดกร่อนได้ในตารางที่ 4.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.3 ค่า i_{corr} , E_{corr} และค่าอัตราการกัดกร่อนของอนุภาคหลังบรรจุเบนโซไตรอะโซลในสภาวะต่าง

Sample	i_{corr} (A/cm^2)	E_{corr} (V)	อัตราการกัดกร่อน (mm/year)
MSN	2.59×10^{-8}	-0.336	0.0003
MSN-SH	1.39×10^{-8}	-0.359	0.00016
MSN-NH ₂	1.78×10^{-8}	-0.348	0.00021

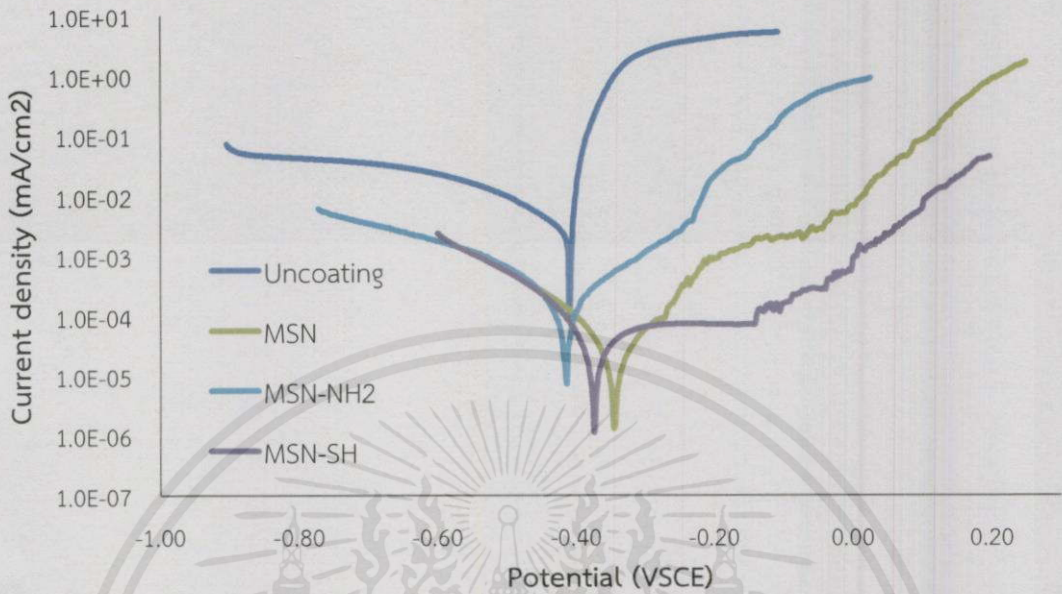
จากค่าอัตราการกัดกร่อนจะเห็นว่าอนุภาคที่สังเคราะห์ร่วมกับหมู่ซัลไฮดริลและเอมีนยังคงให้ค่าอัตราการกัดกร่อนที่ต่ำกว่ากว่าอนุภาคที่ไม่มีการปรับแต่งหมู่ฟังก์ชัน ซึ่งจะเห็นว่าหมู่ซัลไฮดริลมีอัตราการกัดกร่อนต่ำกว่าอนุภาคที่ไม่มีการปรับแต่งหมู่ฟังก์ชันอย่างมีนัยสำคัญ

โดยค่าอัตราการกัดกร่อนจากผลการทดลองที่ได้ เมื่อนำไปอ้างอิงกับงานวิจัยที่ได้ศึกษามา [19] ซึ่งเป็นงานวิจัยที่ศึกษาการใช้เบนโซไตรอะโซลป้องกันการกัดกร่อนของทองเหลืองในน้ำเกลือ ค่าอัตราการกัดกร่อนที่ได้มีค่าที่ต่ำกว่า

4.6 การศึกษาความสามารถของชั้นเคลือบผิวอนุภาคนาโนซิลิกาที่มีรูพรุนชนิดเมไซในแต่ละชนิด ในการต้านทานการกัดกร่อนของเหล็กกล้าในสภาวะต่าง

ปัจจุบันกระบวนการผลิตส่วนใหญ่จะต้องเผชิญกับสารที่มีความเป็นกรดหรือด่างสูง ดังนั้นความสามารถในการป้องกันการกัดกร่อนในสภาวะอื่นจึงเป็นสิ่งจำเป็นที่จะต้องคำนึงถึง ซึ่งการศึกษาด้วยเทคนิคโพลาไรซ์ สามารถเปลี่ยนสารละลายที่ใช้ทดสอบกับเหล็กกล้าได้ทำให้สามารถศึกษาในสภาวะต่าง โดยทำการศึกษาในสภาวะต่าง (NaCl + KOH) ที่มีค่า pH 9.25 ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียสซึ่งรายงานผลได้ดังรูปที่ 4.19 โดยเปรียบเทียบระหว่างอนุภาคแต่ละชนิดหลังจากบรรจุสารยับยั้งแล้ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



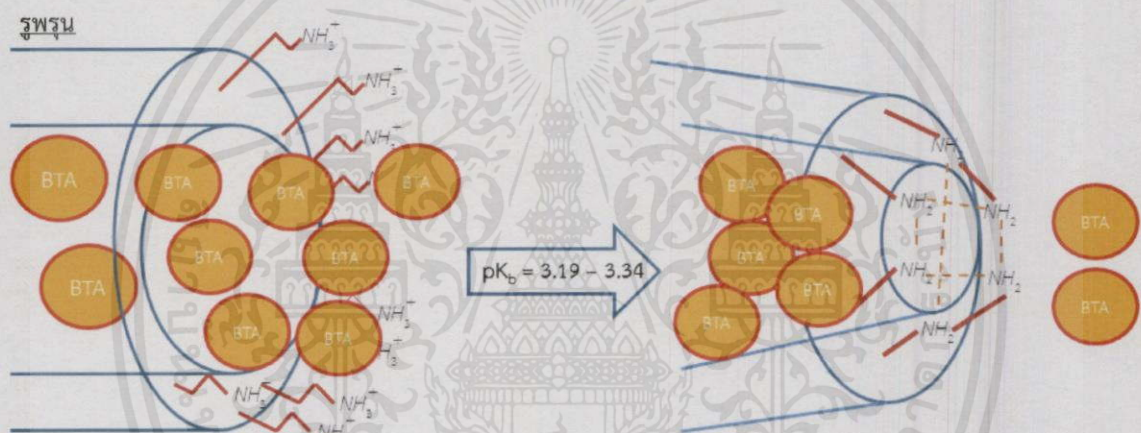
รูปที่ 4.19 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าและศักย์ไฟฟ้าในสภาวะต่าง (pH = 9.25)

พบว่า การเคลือบช่วยลดการกัดกร่อนได้สังเกตจากเหล็กกล้าที่ไม่ผ่านการเคลือบที่ใช้อ้างอิง อนุภาคที่สังเคราะห์ร่วมกับเอมีนจะให้ค่าอัตราการกัดกร่อนมากกว่าอนุภาคชนิดอื่น และจะเห็นว่า เส้นกราฟของเหล็กกล้าที่นำมาอ้างอิงซึ่งไม่เคลือบหลังค่า E_{corr} จะให้เส้นกราฟค่อนข้างชัน โดยเมื่อ เปรียบเทียบกับเหล็กกล้าที่เคลือบแล้วพบว่าความชันลดลงเล็กน้อย แสดงให้เห็นว่าเบนโซไตรอะโซลมี ความสามารถในการยับยั้งการกัดกร่อนในสภาวะต่างได้น้อย ซึ่งอนุภาคที่สังเคราะห์ร่วมกับหมู่ซัลไฮดริล และอนุภาคที่ไม่ผ่านการปรับแต่งจะให้อัตราการกัดกร่อนที่ใกล้เคียงกันแสดงในตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 ค่า i_{corr} , E_{corr} และค่าอัตราการกัดกร่อนของแผ่นเหล็กที่เคลือบด้วยอนุภาคหลังบรรจุเบนโซ ไตรอะโซลในสภาวะต่าง

Sample	i_{corr} (A/cm ²)	E_{corr} (V)	อัตราการกัดกร่อน (mm/year)
Uncoating	5.10×10^{-6}	-0.409	0.05930
MSN	2.68×10^{-8}	-0.345	0.00031
MSN-SH	2.42×10^{-8}	-0.374	0.00039
MSN-NH ₂	1.86×10^{-6}	-0.415	0.00216

จากการทดสอบในสภาวะต่าง สรุปได้ว่าอนุภาคที่สังเคราะห์ร่วมกับหมู่ซัลไฮดริลและอนุภาคที่ไม่ผ่านการปรับแต่งหมู่ฟังก์ชันจะให้อัตราการกักต่อน้ำที่ใกล้เคียงกันซึ่งต่ำกว่าอนุภาคที่สังเคราะห์ร่วมกับหมู่เอมีนอย่างมีนัยสำคัญทั้งที่อนุภาคที่สังเคราะห์ร่วมกับหมู่เอมีนสามารถบรรจุเบนโซลไตรอะโซลมากที่สุด ซึ่งอาจจะมีผลจากสารละลายต่างมีค่าความเป็นด่างไม่สูงพอที่จะทำให้หมู่เอมีนที่ติดอยู่ที่ผิวของอนุภาคนั้นเปลี่ยนเป็นเอมีนปรวมภูมิ [20] จึงเป็นสาเหตุให้เอมีนที่ติดอยู่ที่ผิวไม่สามารถทำหน้าที่เป็นตัวชะลอการปลดปล่อยเบนโซลไตรอะโซลได้ ทำให้ความสามารถในการป้องกันการกักต่อน้ำลดลงเมื่อเทียบกับอนุภาคชนิดอื่นแสดงในรูปที่ 4.20

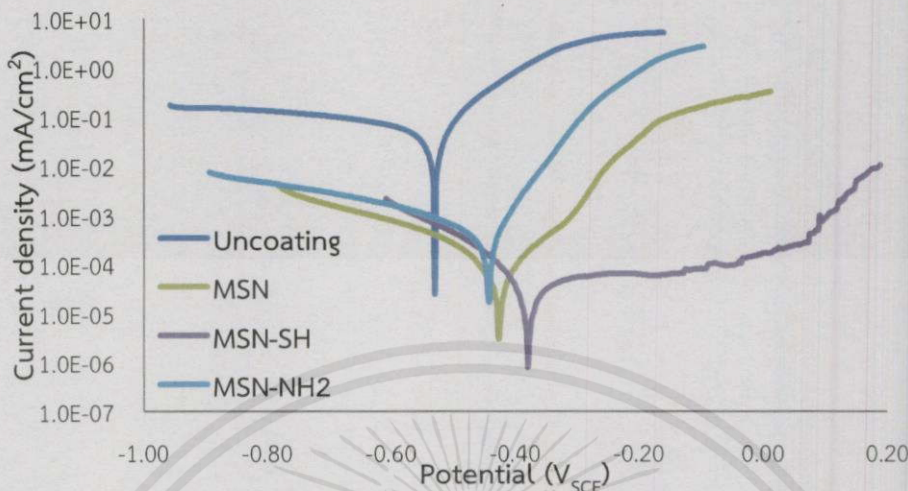


รูปที่ 4.20 แผนภาพอย่างง่ายแสดงการทำงานของอนุภาคที่สังเคราะห์ร่วมกับเอมีน

4.7 การศึกษาความสามารถของชั้นเคลือบผิวอนุภาคนาโนซิลิกาที่มีรูปพรุนชนิดเมโซในแต่ ละชนิด ในการต้านทานการกักต่อน้ำของเหล็กกล้าในสภาวะกรด

ในการทดสอบในสภาวะกรด ($\text{NaCl} + \text{H}_2\text{SO}_4$) ซึ่งมีค่า pH เท่ากับ 4.4 โดยทำการทดสอบที่ อุณหภูมิที่ 25 องศาเซลเซียสซึ่งสามารถแสดงผลได้ดังรูปที่ 4.21 โดยเปรียบเทียบระหว่างอนุภาคแต่ละ ชนิดหลังจากบรรจุสารยับยั้งแล้ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.21 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าและศักย์ไฟฟ้าในสภาวะกรด (pH = 4.4)

จากกราฟแสดงให้เห็นว่าการกัดกร่อนในสภาวะกรดมีความรุนแรงกว่าสองสภาวะที่กล่าวมาโดยอนุภาคที่มีกระแสการกัดกร่อนต่ำที่สุดจะเป็นอนุภาคที่สังเคราะห์ร่วมกับหมู่ซัลไฮดริล รองลงมาเป็นอนุภาคที่ไม่มีการปรับแต่งหมู่ฟังก์ชันและหมู่เอมีนตามลำดับ โดยสามารถสรุปได้เป็นค่าอัตราการกัดกร่อนแสดงดังตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.5 ค่า i_{corr} , E_{corr} และค่าอัตราการกัดกร่อนของอนุภาคหลังบรรจุเบนโซโทรอะโซลในสภาวะกรด

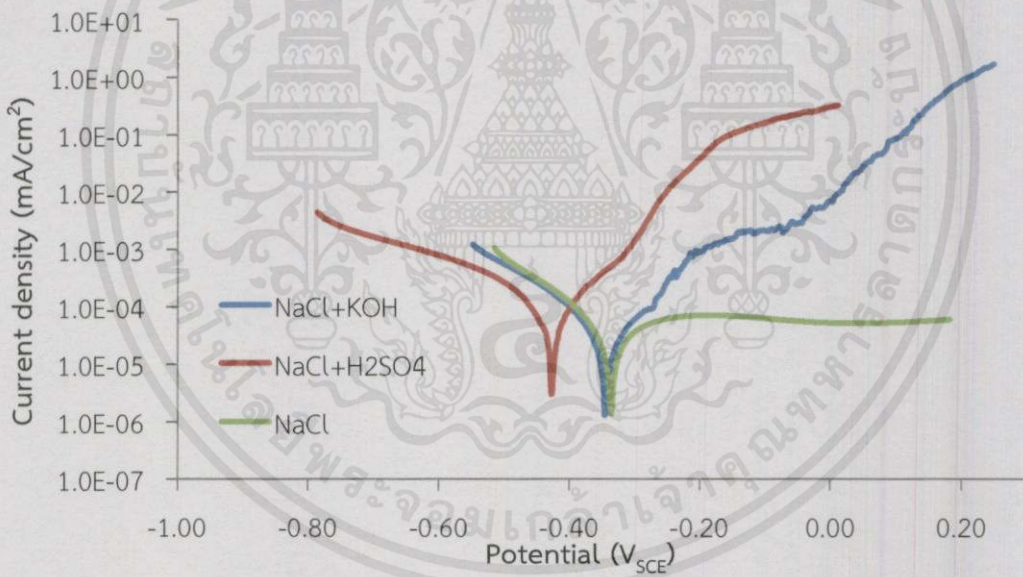
Sample	i_{corr} (A/cm ²)	E_{corr} (V)	อัตราการกัดกร่อน (มิลลิเมตร/ปี)
Uncotaing	4.43×10^{-5}	-0.531	0.51471
MSN	8.98×10^{-8}	-0.427	0.00104
MSN-SH	2.42×10^{-8}	-0.379	0.00028
MSN-NH ₂	3.58×10^{-7}	-0.443	0.00415

จากการศึกษาการกัดกร่อนในแต่ละสภาวะ ในทุกสภาวะเหล็กกล้าที่เคลือบด้วยอนุภาคที่สังเคราะห์ร่วมกับหมู่ซัลไฮดริลจะให้อัตราการกัดกร่อนที่ต่ำที่สุด ซึ่งอาจจะมีเหตุผลมาจากการที่หมู่ซัลไฮดริลสามารถชะลอการปลดปล่อยเบนโซโทรอะโซลได้ดีกว่าอนุภาคชนิดอื่น โดยที่อนุภาคชนิดนี้อาศัย

ปฏิกิริยารีดอกซ์ในการควบคุมเบนโซไตรอะโซลที่อยู่ในอนุภาค ทำให้ลักษณะการป้องกันการกัดกร่อน เป็นไปในลักษณะที่สารละลายภายนอกเข้ามาสัมผัสกับเบนโซไตรอะโซลภายในรูพรุน ซึ่งต่างกับเอมีนที่จะ เป็นการส่งเบนโซลไตรอะโซลไปนอกอนุภาค ดังนั้นจึงเป็นเหตุผลให้อนุภาคที่สังเคราะห์ร่วมกับหมู่ซัลไฮดริลสามารถกักเก็บเบนโซไตรอะโซลได้ดีกว่า

4.8 การศึกษาความสามารถของชั้นเคลือบอนุภาคนาโนซิลิกาที่มีรูพรุนชนิดเมโซที่ไม่ผ่าน การปรับแต่งหมู่ฟังก์ชัน สังเคราะห์ร่วมกับหมู่เอมีน และสังเคราะห์ร่วมกับหมู่ซัลไฮดริล ในแต่ละสถานะ

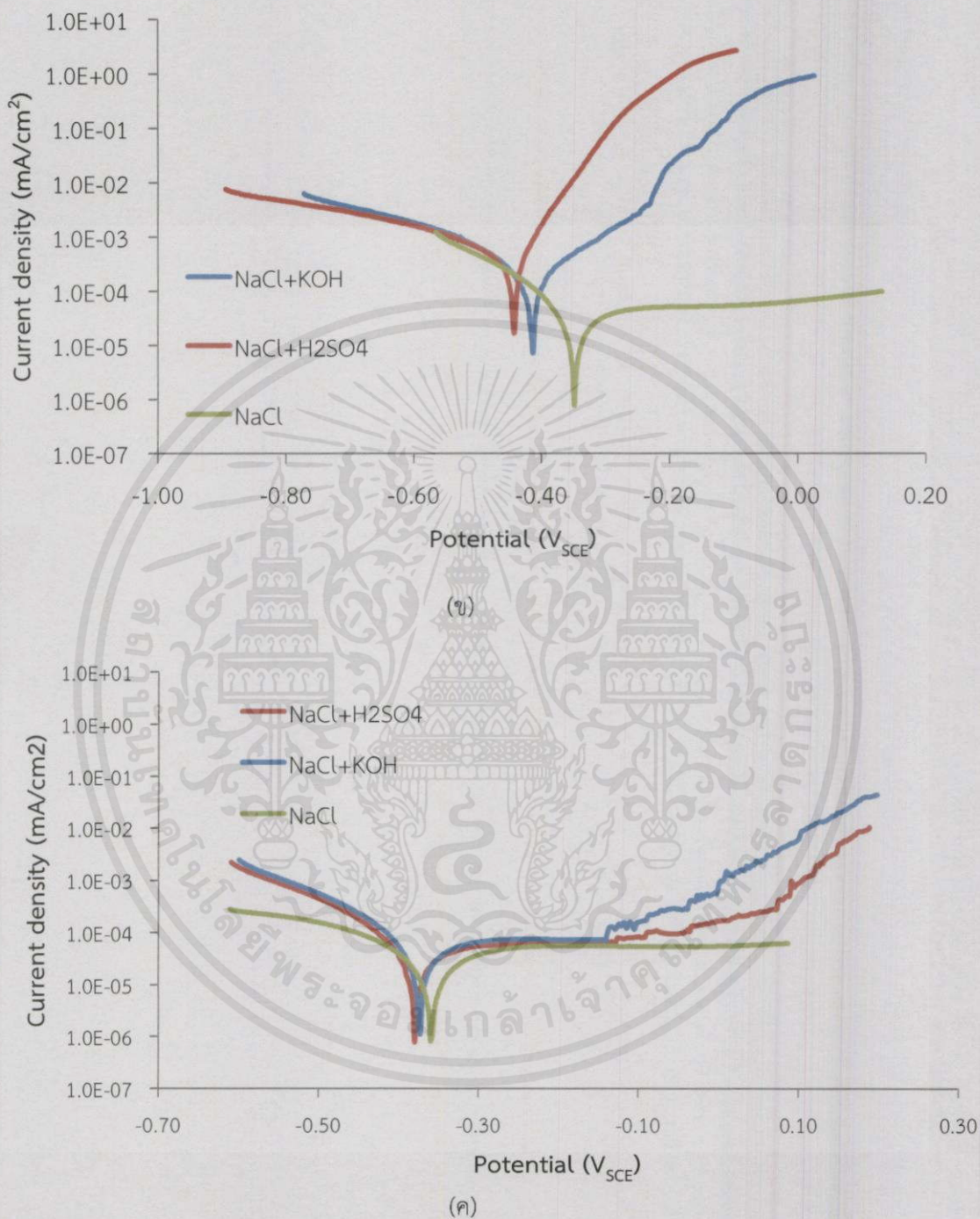
จากหัวข้อศึกษา 4.5 4.6 และ 4.7 ทำให้เราสามารถนำข้อมูลที่นำมาเปรียบเทียบกันโดย เปรียบเทียบความสามารถของอนุภาคแต่ละชนิด ในแต่ละสถานะซึ่งจะสามารถแสดงข้อมูลได้ดังรูปที่ 4.22



(ก)

รูปที่ 4.22 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าและศักย์ไฟฟ้าในของอนุภาคที่ ก) ไม่มีการปรับแต่งหมู่ฟังก์ชัน และสังเคราะห์ร่วมกับ ข) หมู่เอมีน ค) หมู่ซัลไฮดริล ในแต่ละสถานะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



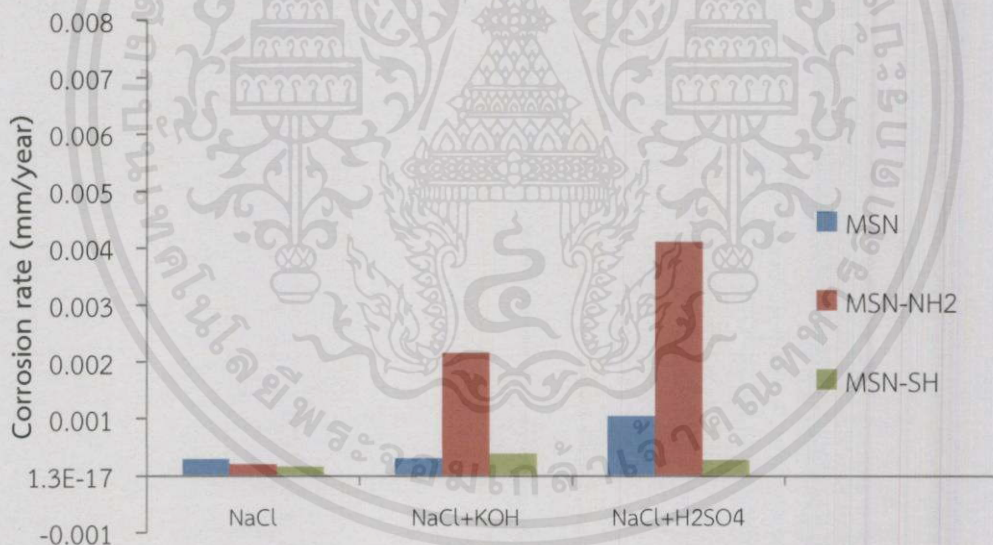
รูปที่ 4.22 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าและศักย์ไฟฟ้าในของอนุภาคที่ ก) ไม่มีการปรับแต่งหมู่

ฟังก์ชัน และสังเคราะห์ร่วมกับ ข) หมูเอมีน ค) หมูซิลไฮดริล ในแต่ละสภาวะ (ต่อ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.22(ก) และ 4.22(ข) สามารถสังเกตลักษณะการกัดกร่อนสารละลายในแต่ละสภาวะได้ จะเห็นว่าความชันของทั้งสองรูปมีลักษณะที่คล้ายกันโดยการกัดกร่อนในกรดจะรุนแรงมากที่สุด รองลงมาเป็นด่างและน้ำเกลือสังเกตได้จากความชันของเส้นหลังจากผ่านจุด E_{corr} ซึ่งเป็นการกัดกร่อนที่ผ่านชั้นเคลือบแล้ว เห็นได้ว่าความชันในสภาวะกรดจะมากที่สุด โดยการกัดกร่อนที่เกิดในน้ำเกลือน้อยที่สุดเป็นผลมาจากเบนโซลไตรอะโซลมีความสามารถในการสร้างพันธะร่วมกับโลหะและคลอไรด์ไอออนได้ดีกว่าประจุชนิดอื่น [18]

อนุภาคที่สังเคราะห์ร่วมกับหมู่อัลไฮดริลจะให้ค่า i_{corr} ต่ำที่สุดในทุกสภาวะสังเกตได้จากรูปที่ 4.22(ค) พบว่าหมู่อัลไฮดริลนั้นนอกเหนือไปจากในสภาวะน้ำเกลือแล้ว ในสภาวะอื่นๆก็ยังสามารถที่ดีในการป้องกันการกัดกร่อน แสดงให้เห็นว่าหมู่อัลไฮดริลนั้นมีคุณสมบัติในการช่วยป้องกันและลดความสามารถในการกัดกร่อนของสารละลายทั้งในสภาวะเกลือ กรด หรือด่าง อาจเป็นเพราะมีคุณสมบัติในการกักเก็บเบนโซลไตรอะโซลได้ดีกว่าอนุภาคชนิดอื่น และเมื่อสังเกตความชันบริเวณที่ผ่านจุด E_{corr} ไปแล้วจะมีลักษณะการเกิดช่วงที่ทำให้โลหะนั้นไม่ไวต่อการกัดกร่อน (Passive region) แสดงว่าอนุภาคที่สังเคราะห์ร่วมกับหมู่อัลไฮดริลอาจมีการสร้างชั้นเคลือบใหม่บนผิวเหล็กกล้า



รูปที่ 4.23 การเปรียบเทียบอัตราการกัดกร่อนของอนุภาคแต่ละชนิดในแต่ละสภาวะ

จากรูปที่ 4.23 จะเห็นได้ว่าอนุภาคที่สังเคราะห์ร่วมกับหมู่อัลไฮดริลนั้นมีความสามารถในการป้องกันการกัดกร่อนได้ดีที่สุดเมื่อเทียบกับอนุภาคชนิดอื่น ซึ่งน่าจะเป็นผลมาจากการที่หมู่อัลไฮดริลมีวิธีการกักเก็บเบนโซลไตรอะโซลได้ดีกว่า และจากผล TGA จะเห็นว่าหมู่อัลไฮดริลจะอยู่ในอนุภาคมากกว่าเมื่อเทียบกับเอมีนซึ่งสอดคล้องกับผลของการป้องกันการกัดกร่อน

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

จากการศึกษาการสังเคราะห์อนุภาคนาโนซิลิกาที่มีรูพรุนชนิดเมโซโดยศึกษาคุณสมบัติต่างๆของอนุภาคและการปรับแต่งหมู่ฟังก์ชัน รวมไปถึงการนำอนุภาคไปประยุกต์ใช้ในงานสารเคลือบผิวเหล็กกล้าสามารถสรุปได้ดังนี้

ตอนที่ 1 ผลการวิเคราะห์การสังเคราะห์อนุภาคนาโนซิลิกาที่มีรูพรุนชนิดเมโซ

จากผลการทดลองพบว่าจากการสังเคราะห์อนุภาคที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส โดยสังเคราะห์อนุภาคร่วมกับหมู่ซิลไฮดริลและเอมีนทำให้อนุภาคมีลักษณะต่างจากอนุภาคที่ไม่ผ่านการปรับแต่งหมู่ฟังก์ชัน โดยทำการสังเคราะห์อนุภาคที่มีสัดส่วนโดยปริมาตรระหว่าง TEOS:APTES และ MPTMS เท่ากับ 0.45:0.05 0.40:0.10 และ 0.30:0.10 มิลลิลิตร โดยจากการทดลองพบว่าสัดส่วนของ APTES และ MPTMS พบว่ามีแนวโน้มที่หมู่ฟังก์ชันในอนุภาคจะเพิ่มขึ้นตามปริมาณหมู่ฟังก์ชันที่นำไปสังเคราะห์ร่วมด้วย และพบว่าการเพิ่มปริมาณหมู่ฟังก์ชันส่งผลต่อลักษณะและรูพรุนของอนุภาคและการกระจายตัว ทั้งนี้เมื่อทำการสังเคราะห์อนุภาคที่อุณหภูมิ 20 และ 40 องศาเซลเซียสจะพบว่าอนุภาคมีโครงสร้างทางสัณฐานต่างกัน ซึ่งสามารถสรุปได้ว่าสภาวะที่เหมาะสมในการสังเคราะห์อนุภาคนาโนซิลิกาที่มีรูพรุนชนิดเมโซสำหรับอนุภาคที่ไม่มีการปรับแต่งหมู่ฟังก์ชันที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส และอนุภาคที่สังเคราะห์ร่วมกับหมู่ซิลไฮดริลและเอมีนที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียสโดยสัดส่วนโดยปริมาตรที่ใช้ระหว่าง TEOS:APTES และ MPTMS เท่ากับ 0.40:0.10

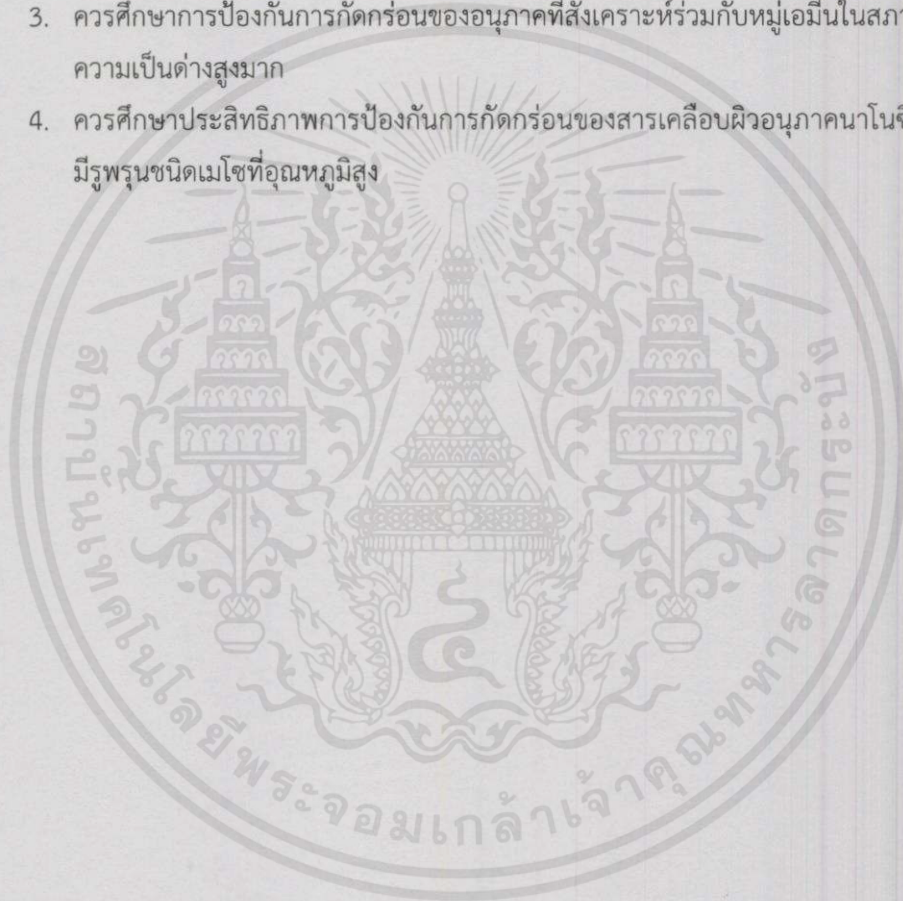
ตอนที่ 2 ผลการวิเคราะห์การนำอนุภาคนาโนซิลิกาที่มีรูพรุนชนิดเมโซไปใช้ในงานสารเคลือบผิวเหล็กกล้า

จากการทดลองพบว่าในการบรรจุเบนโซไตรอะโซลอนุภาคที่สังเคราะห์ร่วมกับหมู่เอมีนมีความสามารถในการบรรจุเบนโซไตรอะโซลมากที่สุดเนื่องจากความเป็นระเบียบของอนุภาคและลักษณะ แต่เมื่อทำการทดลองโดยนำอนุภาคแต่ละชนิดไปเป็นสารเคลือบผิว ซึ่งการเคลือบผิวจะต้องประกอบไปด้วยอนุภาคและสารยึดเพื่อช่วยในการประสานอนุภาคให้เป็นเนื้อเดียวกันและมีส่วนช่วยในการยึดเกาะบนผิวเหล็กกล้า ซึ่งจากการทดสอบความสามารถในการต้านทานการกัดกร่อนของอนุภาคที่ไม่มีการปรับแต่งหมู่ฟังก์ชัน อนุภาคที่สังเคราะห์ร่วมกับหมู่เอมีน และสังเคราะห์ร่วมกับหมู่ซิลไฮดริล ในสภาวะเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้า ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะในรูปแบบใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

น้ำเกลือ ต่าง และกรดจะพบว่าการกัดกร่อนในกรดจะรุนแรงมากที่สุด รองลงมาเป็นสภาวะต่าง และ น้ำเกลือ และพบว่าอนุภาคที่ให้อัตราการกัดกร่อนที่น้อยที่สุดคืออนุภาคที่สังเคราะห์ร่วมกับหมู่ซัลไฮดริล

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ควรศึกษาผลของปริมาณสารกำหนดโครงสร้างที่มีอยู่ในอนุภาค เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติ ให้เหมาะสมต่อการบรรจุเบนโซลไตรอะโซลและการป้องกันการกัดกร่อน
2. ควรศึกษาผลของชนิดของสารยับยั้งการกัดกร่อน
3. ควรศึกษาการป้องกันการกัดกร่อนของอนุภาคที่สังเคราะห์ร่วมกับหมู่เอมีนในสภาวะที่มีความเป็นด่างสูงมาก
4. ควรศึกษาประสิทธิภาพการป้องกันการกัดกร่อนของสารเคลือบผิวอนุภาคนาโนซิลิกาที่มีรูพรุนชนิดเมโซที่อุณหภูมิสูง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสาร ทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

- [1] Bruce A. Averill. (2006). **Chemistry: Principles, Patterns, and Applications**. (1st ed). New Jersey: Prentice Hall.
- [2] William D. Callister, Jr. (2003). **Materials Science and Engineering**. (8th ed). New York: John Wiley & Sons.
- [3] Marjetka Conradi, Aleksandra Kocijan, Ivan Jerman. Effect of silica/PVC composite coatings on steel-substrate corrosion protection. **Progress in Organic Coatings**, 2012(75), 392-397.
- [4] Gl David Krupadanam, Vijaya Prasad D, Varaprasad Rao K. (2012). **Analytical Chemistry**. (1st ed). Hyderabad: Orient Longman Private Limited.
- [5] J. Ying, Mehnert, and M. S. Wong. Synthesis and Application of Supramolecular-Templated Mesoporous Materials, **Angew. Chem**, 1999(38), 56-77
- [6] Lgor L. Sloqwing Juan L. Vivero-Escoto, Chia-Wen Wu, Victor S.-Y. Lin. Mesoporous silica nanoparticles as controlled release drug delivery and gene transfection carriers. **Advanced Drug Delivery Reviews**, 2008(60), 1278-1288.
- [7] Dimitriya Borisova, Helmuth Mohwald, and Dmitry G. Shchukin. Mesoporous Silica Nanoparticles for Active Corrosion Protection. **American Chemical Society**, 2011(3), 1939-1946.
- [8] Peter T. Tanev, Malama Chibwe & Thomas J. Pinnavaia. Titanium-containing mesoporous molecular sieves for catalytic oxidation of aromatic compounds. **Nature**, 1994(368), 321-323.
- [9] T.W. Graham Solomons, Craig B. Fryhle, Scott A. Snyder. (2011). **Organic Chemistry**. (11th ed). New York: John Wiley & Sons.
- [10] Alec Groysman. (2014). **Corrosion in Systems for Storage and Transportation of Petroleum Products and Biofuels**. New York London: Springer Dordrecht Heidelberg.

- [11] อรุษา สรวารี. (2539). สารเคลือบผิว (สี วาร์นิช และแล็กเกอร์). พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [12] Nageh K. Allem, Ahmed Abdel Nazeer and Elsayed A. Ashour. A review of the effects of benzotriazole on the corrosion of copper and copper alloys in clean and polluted environments. **J Appl Electrochem**, 2009(39), 961-969.
- [13] Ekaterina V. Skorb, Dmitri Fix, Daria V. Andreeva, Helmuth Mohwald, and Dmitry G. Shchukin. Surface-Modified Mesoporous SiO₂ Containers for Corrosion Protection. **Advanced Functional Materials**, 2009(19), 2373-2379.
- [14] Jiajun Fu, Tao Chen, Mingdong Wang, Nianwang Wang, Suning Li, Ying Wang, and Xiaodong Liu. Acid and alkaline Dual Stimuli Responsive Mechanized Hollow Mesoporous Silica Nanoparticles as Smart Nanocontainers for Intelligent Anticorrosion Coating. **American Chemical Society**, 2013(12), 11397-11408.
- [15] Isaline Recloux, Maixent Mouanga, Marie-Eve Druart, Yoann Paint and Marie-Georges Olivier. Silica mesoporous thin films as containers for benzotriazole for cession protection of 2024 aluminium alloys. **Applied Surface Science**, 2015(346), 124-133.
- [16] M.M. Mennucci, E.P. Benczek, P.R.P. Rodrigues, I. Costa. Evaluation of benzotriazole as corrosion inhibitor for carbon steel in stimulated pore solution. **Cement & Concrete Composition**, 2009(31), 418-424.
- [17] N.H.N. Kamarudin, A.A. Jalil, S. Triwahyona, N.F.M. Salleh, A.H. Karim, R.R. Mukti, B.H. Hameed, A. Ahmad. Role of 3-aminopropyltriethoxysilane in the preparation of mesoporous silica nanoparticles for ibuprofen delivery: Effect on physicochemical. **Microporous and Mesoporous Materials**, 2013(180), 235-241.
- [18] Matjaz Finsgar, Ingrid Milisev. Inhibition of copper corrosion by 1,2,3-benzotriazole: A review. **Corrosion Science**, 2010(52), 2737-2749.
- [19] R. Ravichandran, S. Nanjundan, N. Rajendran. Effect of benzotriazole derivatives on the corrosion of brass in NaCl solutions. **Applied Surface Science**, 2014(236), 241-250.
- [20] H. Mawatari, M. Fukuda, Y. Tohmori. Degradation behavior of the active region and passive region in buried heterostructure (BH) distributed Bragg reflector (DBR) laser. **Microelectronics Reliability**, 1999(39), 1857-1861.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อใช้ในการเรียนการสอนเท่านั้น ไม่ควรนำเอกสารนี้ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [21] Rupak Kishor, Alope Kumar Ghoshal. APTES grafted ordered mesoporous silica KIT-6 for CO₂ adsorption. **Chemical Engineering Journal**, 2015(262), 882-890.
- [22] ดนัย กิจชัยนุกูล. เรื่องนำรู้ของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM). [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก : <http://www.rmutphysics.com/charud/oldnews/192/SEM.pdf>. (วันที่สืบค้น : 16 พฤษภาคม 2558).
- [23] จินดาพร บุญวัฒนา. UV-Visible spectrophotometer. [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก : <http://www.rmutphysics.com/c-harud/oldnews/192/SEM.pdf>. (วันที่สืบค้น : 16 พฤษภาคม 2558).
- [24] นุรฮาย์ ศรีสวัสดิ์. FTIR เครื่องมือวิเคราะห์สารด้วยอินฟราเรด. [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก : web.yru.ac.th/~dolah/notes/4034605-2-48/.../PRT_404841039-22.doc (วันที่สืบค้น: 16 พฤษภาคม 2558)
- [25] A Bard, L. Faulkner, *Electrochemical Methods-fundamental and Applications*, 2nd Edition. New York: John Wiley and sons
- [26] วีระพงศ์ สังวาล. Thermogravimetric Analysis (TGA). [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก: <http://www.mfu.ac.th/center/stic/index.php/thermal-analysis-instrument-menu/item/111-thermogravimetric-analysis-tga.html> (วันที่สืบค้น: 16 พฤษภาคม 2558)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก ก
ข้อมูลผลการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ก.1 การสังเคราะห์อนุภาคนาโนซิลิกาที่มีรูพรุนชนิดเมโซ

ตารางที่ ก.1.1 ส่วนประกอบของสารเคมีที่ใช้ในการสังเคราะห์อนุภาคนาโนซิลิกาที่มีรูพรุนชนิดเมโซ

ชนิดของอนุภาค	%(V/V)	CTAB solution (ml)	H ₂ O (ml)	Ethyl acetate (ml)	Ammonium hydroxide (ml)	TEOS (mL)	APTES (ml)	Quenching H ₂ O (ml)
MSN	-	5	100	0.88	2.7	0.5	0	36.9
MSN-SH	10	5	100	0.88	2.7	0.45	0.05	36.9
	20	5	100	0.88	2.7	0.4	0.1	36.9
	40	5	100	0.88	2.7	0.3	0.2	36.9
MSN-NH ₂	10	5	100	0.88	2.7	0.45	0.05	36.9
	20	5	100	0.88	2.7	0.4	0.1	36.9
	40	5	100	0.88	2.7	0.3	0.2	36.9

ก.2 การดูดกลืนแสงและความเข้มข้นของสารละลายเบนโซไตรอะโซล

ตารางที่ ก.2.1 แสดงค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายเบนโซไตรอะโซลที่ไว้ที่ค่าความเข้มข้นต่างๆ เพื่อสร้างกราฟมาตรฐาน

ความเข้มข้น (โมลาร์)	ค่าการดูดกลืนแสง
0.3	0.1
0.75	0.24
1.5	0.481
2.25	0.75
3	1.234



รูปที่ ก.1.1 กราฟมาตรฐานสารละลายเบนโซไตรอะโซลในสารละลายเอทานอลที่ความเข้มข้นต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง ก.2.2 แสดงค่าการดูดกลืนแสงของของเบนโซไตรอะโซลเหลือในของเหลวใสหลังบรรจุในอนุภาคนาโนซิลิกาที่มีรูพรุนชนิดเมโซแต่ละชนิด

ชนิดของอนุภาค	ค่าการดูดกลืนแสง			ค่าการดูดกลืนแสงเฉลี่ย
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	
MSN	1.109	1.044	0.952	1.035
MSN-NH2	0.915	1.081	0.940	0.978
MSN-SH	1.031	1.058	0.947	1.012

ตาราง ก.2.3 แสดงค่าความสามารถในการบรรจุเบนโซไตรอะโซลในเอทานอล ความเข้มข้น 3 โมลาร์ ในอนุภาคแต่ละชนิด

ชนิดของอนุภาค	ค่าการดูดกลืนแสงเฉลี่ย	ความเข้มข้น BTA ที่เหลือในของเหลวใสหลังบรรจุ (M)	ความเข้มข้น BTA ที่บรรจุ (M)	น้ำหนักของ BTA ที่บรรจุ (g)	เปอร์เซ็นต์การบรรจุ (%)
MSN	1.035	2.6975	0.3025	0.149	13.75
MSN-SH	0.978	2.5623	0.4377	0.703	19.69
MSN-NH2	1.012	2.6418	0.3582	0.371	10.37

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ก.3 การกัดกร่อนบนผิวเหล็กกล้า

ตาราง ก.3.1 แสดงค่าศักย์การกัดกร่อน (E_{corr}) ค่ากระแสการกัดกร่อน (Corrosion current density, i_{corr}) และค่าอัตราการกัดกร่อน (Corrosion rate) ของอนุภาคแต่ละชนิดในแต่ละสภาวะ

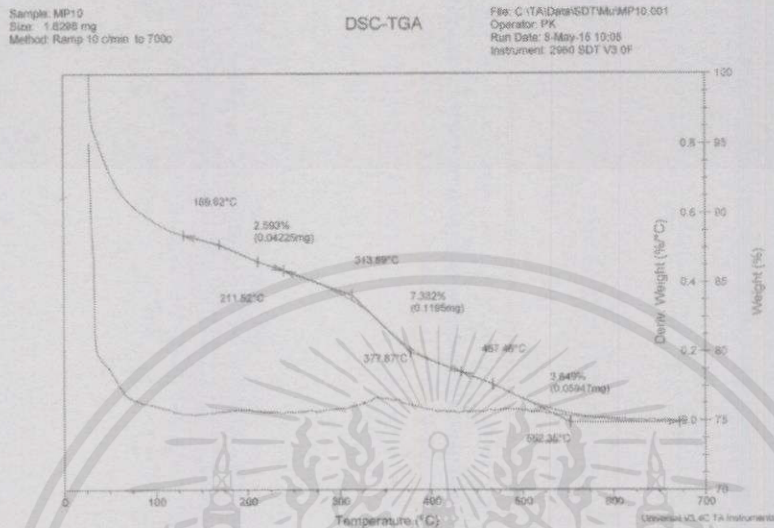
ชนิดของอนุภาค	สภาวะเกลือ			สภาวะกรด (pH 4.4)			สภาวะด่าง (pH 9.25)		
	E_{corr} (V)	i_{corr} (A/cm ²)	Corrosion rate (mm/year)	E_{corr} (V)	i_{corr} (A/cm ²)	Corrosion rate (mm/year)	E_{corr} (V)	i_{corr} (A/cm ²)	Corrosion rate (mm/year)
Uncoating	-0.5868	2.40×10^{-5}	0.27894	-0.5309	4.30×10^{-5}	0.51471	-0.4096	5.1×10^{-6}	0.05930
MSN	-0.3362	2.59×10^{-8}	0.00030	-0.4272	8.98×10^{-8}	0.001044	-0.3449	2.68×10^{-8}	0.00031
MSN-SH	-0.3594	1.39×10^{-8}	0.00016	-0.4514	6.82×10^{-7}	0.007928	-0.4148	1.86×10^{-7}	0.00215
MSN-NH ₂	-0.3489	1.78×10^{-8}	0.00021	-0.4439	3.58×10^{-7}	0.004158	-0.3451	2.59×10^{-8}	0.00030

ตาราง ก.3.2 แสดงค่าประสิทธิภาพการหน่วงการกัดกร่อน (Inhibition efficiency)

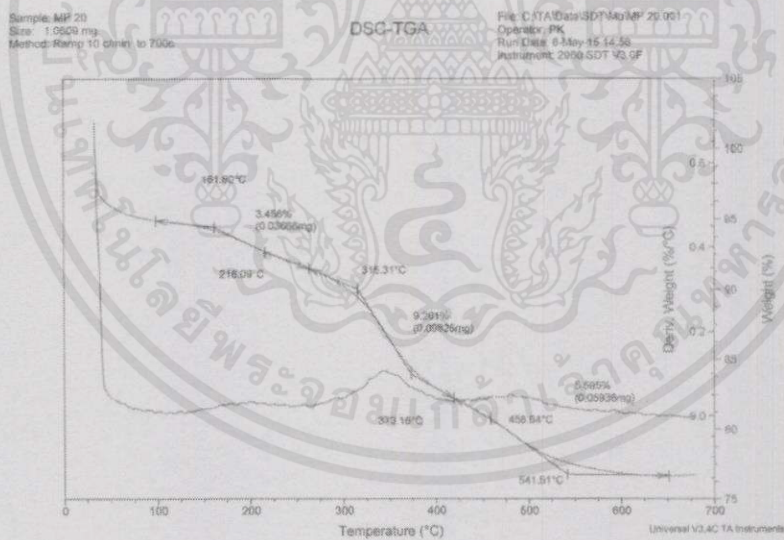
ชนิดของ อนุภาค	สภาวะเกลือ		สภาวะกรด (pH 4.4)		สภาวะด่าง (pH 9.25)	
	Corrosion rate (mm/year)	%IE	Corrosion rate (mm/year)	%IE	Corrosion rate (mm/year)	%IE
Uncoating	0.27894	-	0.51471	-	0.059304	-
MSN	0.00030	99.89%	0.0010435	99.79%	0.0003115	99.47%
MSN-SH	0.00016	99.94%	0.0079281	98.46%	0.0021588	96.35%
MSN-NH ₂	0.00021	99.99%	0.0041582	99.19%	0.0003012	99.49%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ก.4 กราฟเทอร์โมแกรมจากการวิเคราะห์สารด้วยเครื่อง TGA



รูปที่ ก.4.1 เทอร์โมแกรมจากการวิเคราะห์ MSN-SH 10% (V/V) ที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส



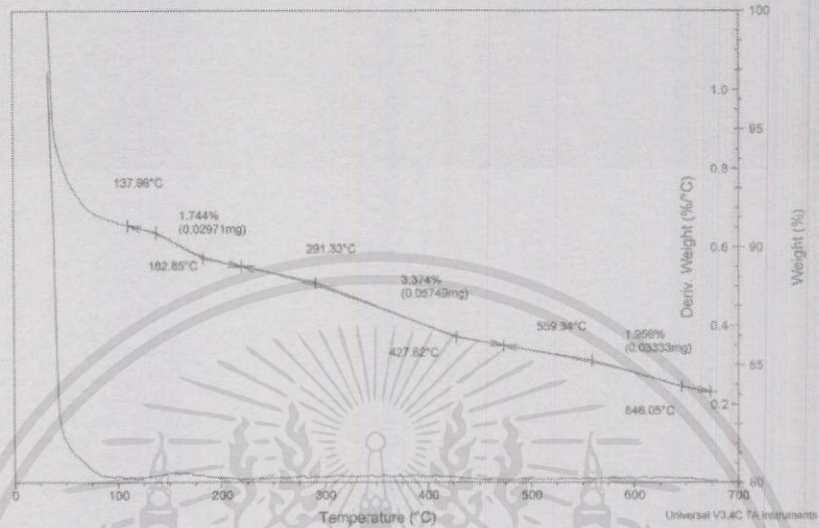
รูปที่ ก.4.2 เทอร์โมแกรมจากการวิเคราะห์ MSN-SH 20% (V/V) ที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Sample: AP 20
Size: 1.7938 mg
Method: Ramp 10 c/min to 700c

DSC-TGA

File: C:\TA\Data\SDTM\AP 20.001
Operator: PK
Run Date: 8-May-15 13:14
Instrument: 2960 SDT V3.0F

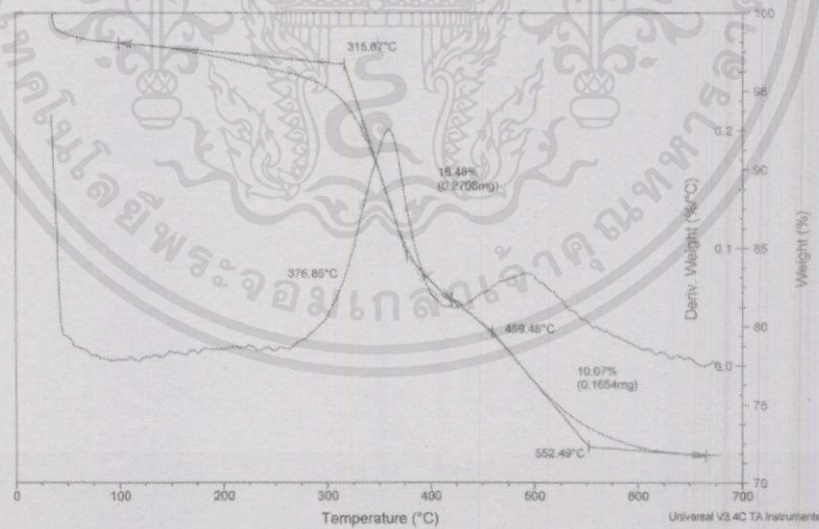


รูปที่ ก.4.3 เทอร์โมแกรมจากการวิเคราะห์ MSN-NH₂ 20% (V/V) ที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส

Sample: AP40
Size: 1.6429 mg
Method: Ramp 10 c/min to 700c

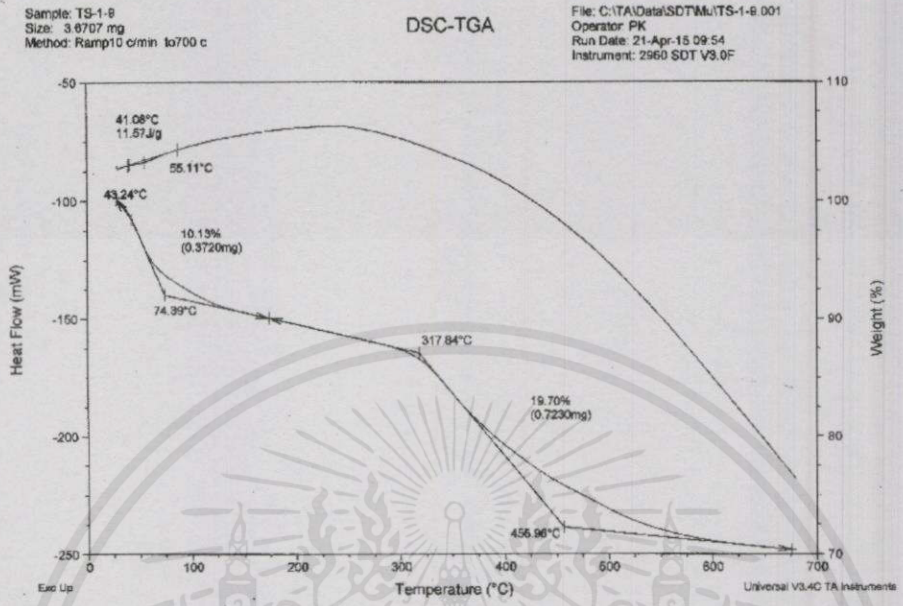
DSC-TGA

File: C:\TA\Data\SDTM\AP40.001
Operator: PK
Run Date: 7-May-15 15:02
Instrument: 2960 SDT V3.0F

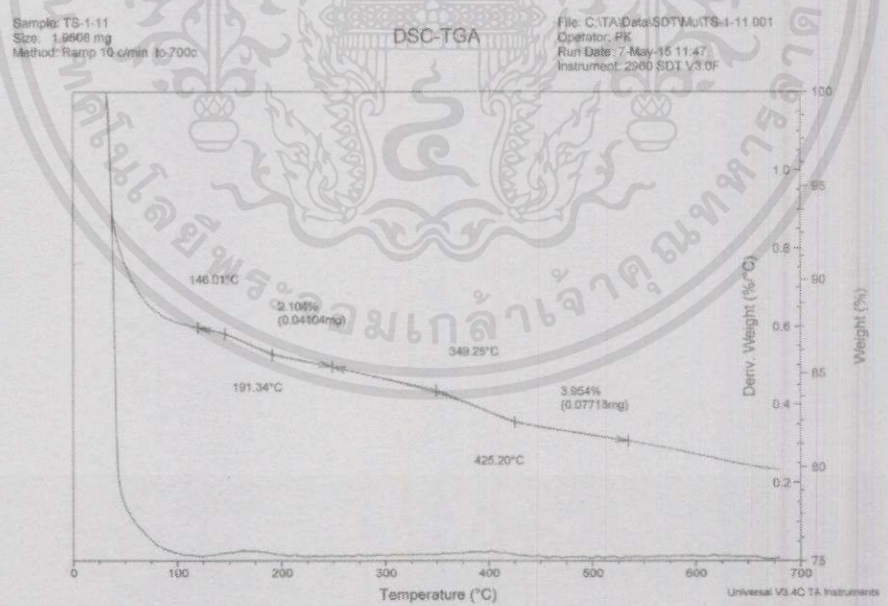


รูปที่ ก.4.4 เทอร์โมแกรมจากการวิเคราะห์ MSN-NH₂ 40% (V/V) ที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



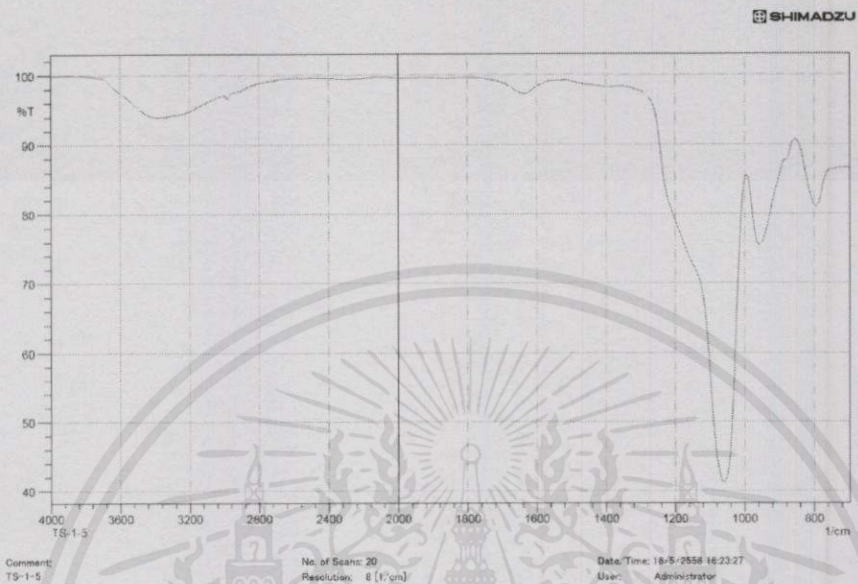
รูปที่ ก.4.5 เทอร์โมแกรมจากการวิเคราะห์ MSN-SH 20% (V/V) ที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส



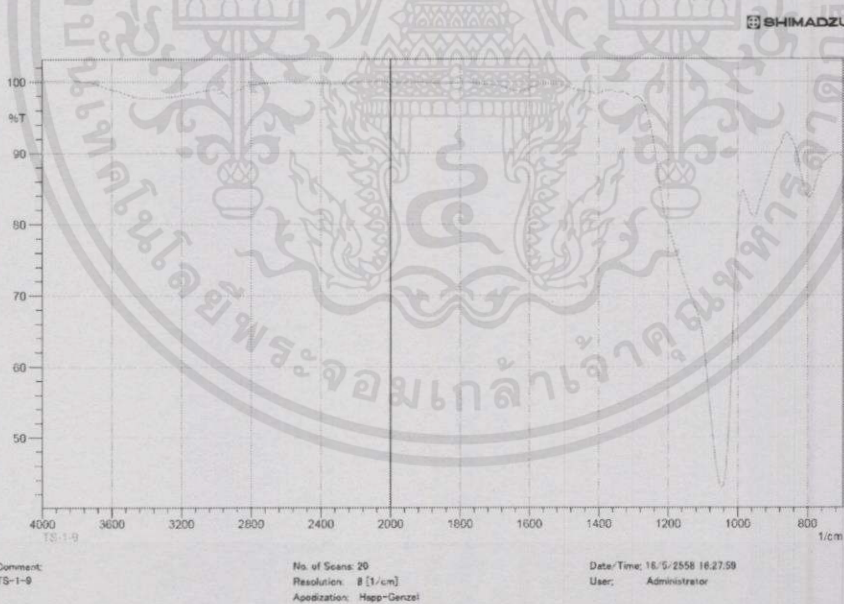
รูปที่ ก.4.6 เทอร์โมแกรมจากการวิเคราะห์ MSN-NH₂ 20% (V/V) ที่อุณหภูมิ 20 องศา

เซลเซียส เอกสารนี้เป็นเอกสารงานวิจัยสำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ก.5 กราฟอินฟราเรดสเปกตรัมจากเครื่องวิเคราะห์สารด้วยอินฟราเรด (FTIR)



รูปที่ ก.5.1 อินฟราเรดสเปกตรัมจากการวิเคราะห์ MSN ที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส



รูปที่ ก.5.2 อินฟราเรดสเปกตรัมจากการวิเคราะห์ MSN-SH 20% (V/V) ที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ก.5.2 อินฟราเรดสเปกตรัมจากการวิเคราะห์ MSN-NH₂ 20% (V/V) ที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก ข

วิธีการคำนวณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข.1 การสร้างกราฟมาตรฐานสารละลายเบนโซไตรอะโซลในเอทานอล

การสร้างกราฟมาตรฐานระหว่างค่าดูดกลืนแสงและความเข้มข้นของสารละลายเบนโซไตรอะโซลในเอทานอลทำได้โดย

- 1) เตรียมสารละลายเบนโซไตรอะโซลในเอทานอล ความเข้มข้น 3 โมลาร์โดยละลายเบนโซไตรอะโซล 17.85 กรัมด้วยเอทานอล แล้วปรับปริมาตรเป็น 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)
 ϵ = สมบัติจำเพาะของสารที่ดูดกลืนและวัดที่ความยาวค่าหนึ่ง เรียกว่า molar absorptivity (L/mol·cm)
 L = ระยะทางที่แสงผ่านตัวอย่าง หรือความกว้างของเซลล์
 C = ความเข้มข้นเป็น โมล/ลิตร หรือ โมลาร์

ตัวอย่าง

นำสารละลายเบนโซไตรอะโซล ความเข้มข้น 3 M มาใส่ในเซลล์ความกว้าง 1 cm. แล้ววัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่นสูงสุด 355 nm. อ่านค่าการดูดกลืนได้ 1.014 การคำนวณหาช่วงความเข้มข้นทำได้โดย (ค่าการดูดกลืนของเบนโซไตรอะโซลจะอยู่ในช่วงการใช้งานปกติ $A = 0.1-1$)

หา ϵ_{355}

จากสมการที่ ข-1

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

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะในรูปแบบใดก็ตาม อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หาช่วงการใช้งานปกติ ($A=0.1-1.0$) จากสมการ

$$A = \mathcal{E}_{355} CL$$

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

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

$$A = \mathcal{E}_{355} CL$$

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

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

ดังนั้นควรเตรียมสารละลายมาตรฐานในช่วงประมาณ 0.3 ถึง 3 M

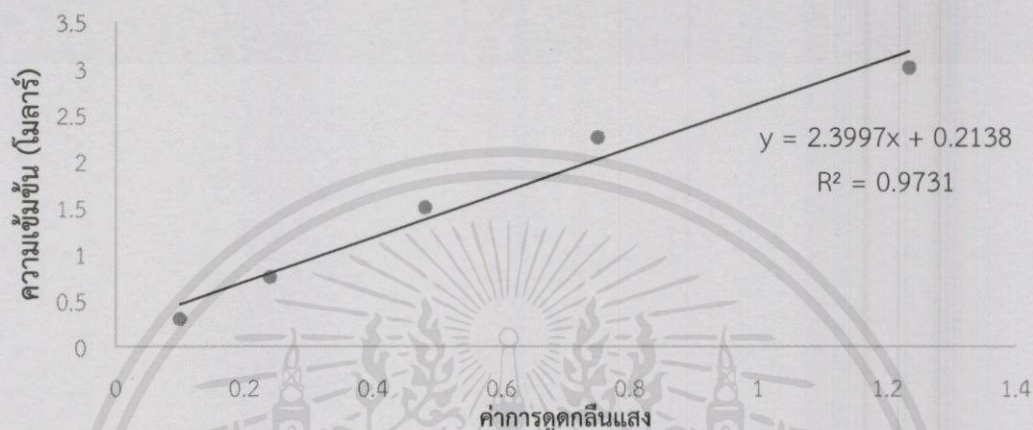
- 4) หลังจากได้ช่วงความเข้มข้นที่เหมาะสม เตรียมสารละลายเบนโซไตรอะโซลในเอทานอล ให้มีความเข้มข้น 2.25 1.5 0.75 0.3 ระหว่างช่วง ตรวจหาค่าการดูดกลืนแสง ตารางที่ ข.1

ตารางที่ ข.1 ค่าการดูดกลืนแสงที่ความเข้มข้นต่างๆของเบนโซไตรอะโซลในเอทานอล

ความเข้มข้นเบนโซไตรอะโซลในเอทานอล (โมลาร์)	ค่าการดูดกลืนแสง
3.00	1.23
2.25	0.75
1.50	0.48
0.75	0.24
0.30	0.10

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5) นำมาสร้างกราฟมาตรฐานสารละลายเบนโซไตรอะโซลในสารละลายเอทานอลได้ดังรูปที่ ข.1



รูปที่ ข.1 กราฟมาตรฐานสารละลายเบนโซไตรอะโซลในสารละลายเอทานอลที่ความเข้มข้นต่างๆ

ข.2 เปอร์เซ็นต์การบรรจุเบนโซไตรอะโซล

วิธีการคำนวณเปอร์เซ็นต์การบรรจุเบนโซไตรอะโซลสามารถคำนวณได้จากสมการ

$$\% \text{Loading} = \frac{\text{Weight}_{\text{Loaded}}}{\text{Weight}_{\text{BTA}}} \times 100$$

(ข-2)

เมื่อน้ำหนักของเบนโซไตรอะโซลที่บรรจุ

= น้ำหนักของเบนโซไตรอะโซลเริ่มต้น - น้ำหนักของเบนโซไตรอะโซลเหลือในของเหลวใสหลังบรรจุ

ตัวอย่าง

จากตารางที่ ก.2.3 การศึกษาความสามารถการบรรจุเบนโซไตรอะโซล โดยเบนโซไตรอะโซลในเอทานอล ความเข้มข้น 3 M (3.57 กรัม/10 มิลลิลิตร) บรรจุเข้าสู่อนุภาคนาโนซิลิกาที่มีรูพรุนชนิดเมโซ (MSN) 0.01 กรัม คำนวณเปอร์เซ็นต์การบรรจุเบนโซไตรอะโซลได้เท่ากับ

จากสมการที่ ข-2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

ข.3 การคำนวณความเข้มข้นของสารละลายเบนโซไตรอะโซลในเอทานอล

วิธีการคำนวณหาความเข้มข้นของสารละลายเบนโซไตรอะโซลในเอทานอล สามารถหาได้จากกราฟมาตรฐาน ดังรูป ข.1 สมการเส้นตรงคือ

$$Y = 2.3997X + 0.2138 \quad (\text{ข-3})$$

เมื่อ X คือ ค่าการดูดกลืนแสงจากการวิเคราะห์ด้วย UV-VIS spectrophotometer

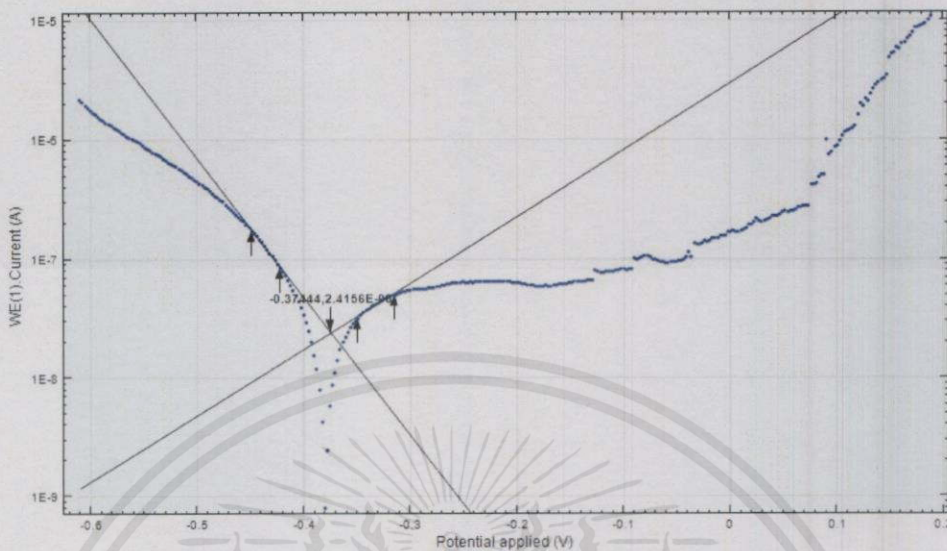
Y คือ ค่าความเข้มข้นของสารละลายเบนโซไตรอะโซลในเอทานอล (โมลาร์)

ข.4 การคำนวณอัตราการกัดกร่อน

การคำนวณอัตราการกัดกร่อนคำนวณได้จากเทคนิค Tafel extrapolation และ polarization resistance วิธีทั้งสองสามารถช่วยลดระยะเวลาการทดลองในการหาน้ำหนักของโลหะตัวอย่างที่สูญเสียจากการกัดกร่อน ความสัมพันธ์ของเทคนิค Tafel อาศัยหลักการทำงานของกระบวนการปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมี ประกอบด้วย ขั้วแอโนด (Anode) และ ขั้วแคโทด (Cathode) โดยกราฟโพลาริเซชันแสดงความสัมพันธ์เป็นเส้นตรงระหว่าง ความต่างศักย์ไฟฟ้า และ ลอการิทึมความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า เรียกว่า Tafel behavior

ความลาดชันในกราฟโพลาริเซชันของเหล็กกล้าที่เคลือบผิวด้วยอนุภาคชนิด MSN-SH บรรจุสารเบนโซไตรอะโซล ทดสอบในสารละลายกรด (pH 4.4) กราฟ Tafel แสดงได้โดยค่าศักย์การกัดกร่อน (Corrosion potential, E_{corr}) กับค่าความหนาแน่นกระแสการกัดกร่อน (Corrosion current density, i_{corr}) แสดงในรูปที่ ข.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น "ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้"



รูปที่ ข.2 ลักษณะโพลาริเซชันของเหล็กกล้าในสารละลายกรด

การประมาณค่า E_{corr} และ i_{corr}

การประมาณค่าศักย์การกัดกร่อน (Corrosion potential, E_{corr}) และค่าความหนาแน่นกระแสการกัดกร่อน (Corrosion current density, i_{corr}) จากรูปที่ กราฟโพลาริเซชันของเหล็กกล้า ในสารละลายกรด

ปฏิกิริยาแอโนดิก (Anodic Reaction) หรือ ออกซิเดชัน (Oxidation)



ปฏิกิริยาแคโทดิก (Cathodic Reaction) หรือ รีดักชัน (Reduction)



ค่า E_{corr} และ i_{corr} สามารถคาดการณ์ได้จากจุดตัดของกราฟขั้วแอโนด (Anode) และขั้วแคโทด (Cathode)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข.4.1 การคำนวณอัตราการกัดกร่อน

จากกฎของฟาราเดย์ (Faraday's Law) สามารถใช้เพื่อคำนวณอัตราการกัดกร่อน

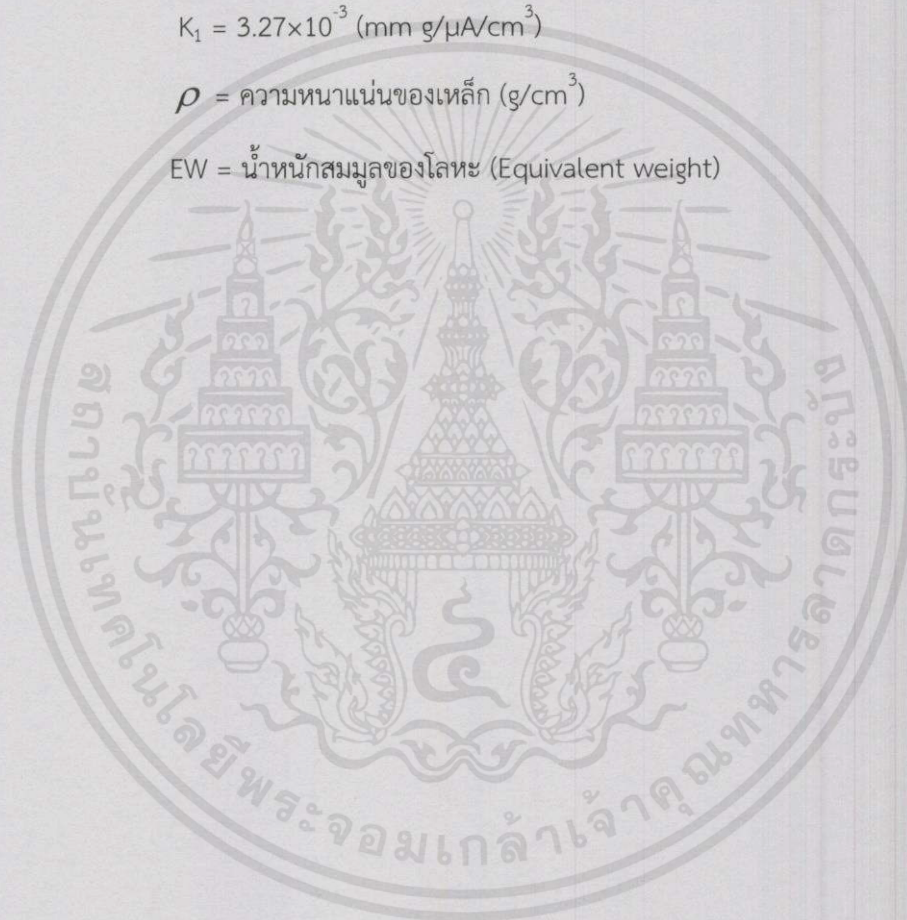
$$CR = \frac{K_1 \times i_{corr} \times EW}{\rho} \quad (\text{ข-6})$$

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

$$K_1 = 3.27 \times 10^{-3} \text{ (mm g}/\mu\text{A}/\text{cm}^3)$$

ρ = ความหนาแน่นของเหล็ก (g/cm^3)

EW = น้ำหนักสมมูลของโลหะ (Equivalent weight)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

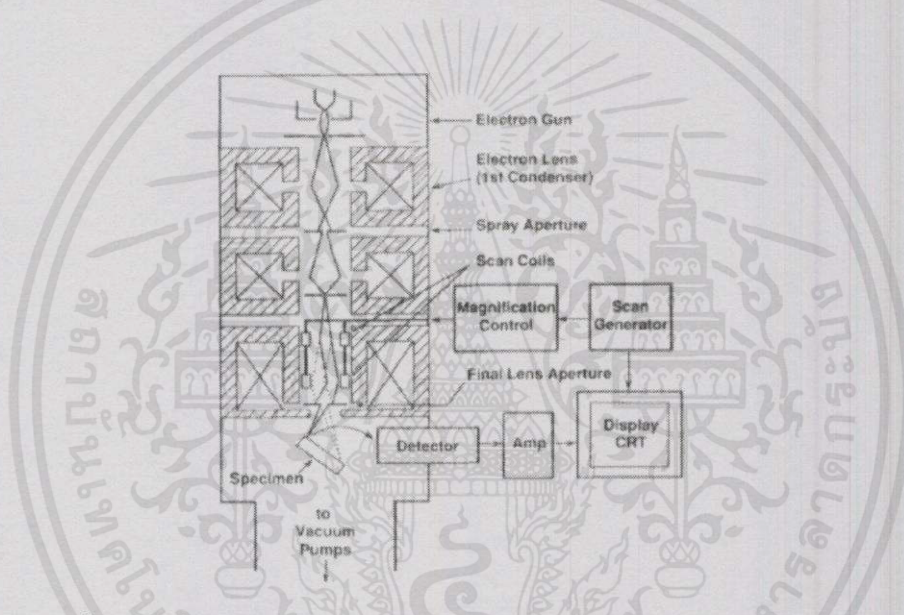


ภาคผนวก ค
เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์ผล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค.1 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope; SEM)

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope; SEM) เป็นกล้องจุลทรรศน์ที่ใช้อิเล็กตรอนเป็นแหล่งกำเนิดแสง เป็นเครื่องมือที่ใช้ศึกษาลักษณะสัณฐานของวัสดุในระดับจุลภาค ซึ่งเป็นรายละเอียดที่เล็กมาก โดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดมีกำลังขยายมากกว่า 3,000 เท่า จนถึงระดับมากกว่า 100,000 เท่า และสามารถแจกแจงรายละเอียดของภาพซึ่งขึ้นกับลักษณะตัวอย่างได้ตั้งแต่ 3 ถึง 100 นาโนเมตร อีกทั้งยังสามารถใช้งานร่วมกับเทคนิคการวิเคราะห์อื่น เช่น Energy Dispersive Spectrometry (EDS) และ Wavelength Dispersive Spectrometry (WDS) ที่เป็นข้อมูลทางเคมี จึงทำให้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดเป็นที่นิยมใช้กันอย่างกว้างขวางในปัจจุบัน



รูปที่ ค.1 แสดงการทำงานของ Scanning Electron Microscope (SEM) [22]

ค.1.1 หลักการทำงานของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)

ส่วนประกอบและหลักการทำงานโดยสังเขปก้องจุลทรรศน์แบบส่องกราดแสดงในรูปที่ ค.1 ส่วนบนสุดเป็นแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอนที่เรียกว่า ปืนอิเล็กตรอน (Electron gun) อิเล็กตรอนจากแหล่งกำเนิดจะถูกเร่งให้เคลื่อนที่ลงมาตามคอลัมน์ซึ่งมีสภาพสุญญากาศ ด้วยความต่างศักย์เร่ง (Accelerating Voltage) ในช่วง 0-30 kV (บางเครื่องอาจสูงถึง 50 kV) โดยทิศทางการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนควบคุมโดยแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic lens) 2 ชุดหรือมากกว่า และปริมาณอิเล็กตรอนควบคุมโดยช่องเปิด (Aperture) ซึ่งมีขนาดต่างๆกัน ตามลักษณะการใช้งาน

เลนส์แม่เหล็กไฟฟ้าชุดแรกเรียกว่า เลนส์คอนเดนเซอร์ (Condenser lens) ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่มีความสำคัญที่สุดต่อการควบคุมทัศนศาสตร์อิเล็กตรอน (Electron optics) เพราะเป็นเลนส์ที่บีบอัดลำอิเล็กตรอนให้เล็กลงและให้ลำอิเล็กตรอนที่พุ่งเข้าหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีกรณีนำไปใช้

อิเล็กตรอนที่วิ่งเคลื่อนมาจากแหล่งกำเนิดให้เป็นลำที่มีขนาดพื้นที่หน้าตัดเล็กลง ส่วนเลนส์วัตถุ (Objective lens) ซึ่งเป็นเลนส์ตัวสุดท้ายจะทำหน้าที่โฟกัสลำแสงอิเล็กตรอน (Electron beam) ให้ตกบนผิวของตัวอย่างโดยมีสแกนคอยล์ (Scan coil) ทำหน้าที่กราดลำอิเล็กตรอนให้ไปบนผิวของตัวอย่างภายในกรอบพื้นที่สี่เหลี่ยมเล็กๆซึ่งพื้นที่ผิวที่ถูกยิงด้วยลำแสงอิเล็กตรอนนี้จะเกิดสัญญาณ (Signal) ต่างๆ ขึ้นหลายชนิดในเวลาเดียวกัน และกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดจะมีอุปกรณ์สำหรับตรวจจับสัญญาณ (Detector) ชนิดต่างๆ เหล่านั้น แล้วส่งไปประมวลผลเป็นภาพแสดงบนจอต่อไปตัวอย่างสัญญาณที่เกิดขึ้น ได้แก่

1. อิเล็กตรอนทุติยภูมิ (Secondary Electrons, SE) สัญญาณชนิดนี้จะให้ข้อมูลเกี่ยวกับลักษณะพื้นผิวตัวอย่าง เป็นสัญญาณที่ถูกนำมาใช้ในการสร้างภาพมากที่สุด ภาพที่ได้จากสัญญาณชนิดนี้ เรียกว่า ภาพอิเล็กตรอนทุติยภูมิ (Secondary Electrons Image, SEI)
2. อิเล็กตรอนกระเจิงกลับ (Back Scattered Electrons, BSE) ให้ข้อมูลเกี่ยวกับส่วนประกอบทางเคมีบนผิวของตัวอย่าง และแสดงให้เห็นลักษณะความสูงต่ำของพื้นผิว

นอกเหนือจากสัญญาณเหล่านี้แล้ว ยังมีสัญญาณอีกหลายชนิดเกิดขึ้น เช่น เอ็กซ์เรย์ (X-Ray) คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic wave) โอลิเจอร์อิเล็กตรอน (Auger electron) เป็นต้น ซึ่งสัญญาณแต่ละชนิดจะให้ข้อมูลของตัวอย่างแตกต่างกันไป

ค.2 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องผ่าน (Transmission Electron Microscope; TEM)

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องผ่าน (Transmission electron microscope, TEM) เป็นกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนที่ใช้ศึกษาตัวอย่างชนิดบาง ซึ่งเตรียมขึ้นโดยวิธีพิเศษเพื่อให้ลำอนุภาคอิเล็กตรอนผ่านทะลุได้ การสร้างภาพจากกล้องประเภทนี้จะทำได้โดยการตรวจวัดอิเล็กตรอนที่ทะลุผ่านตัวอย่าง เครื่อง TEM จะให้รายละเอียดสูงกว่ากล้องจุลทรรศน์ชนิดอื่นๆ เนื่องจากมีกำลังขยายและประสิทธิภาพในการแจกแจงรายละเอียดสูงมาก กำลังขยายสูงสุดประมาณ 0.1 นาโนเมตร

ค.2.1 หลักการทำงานของกล้องจุลทรรศน์ชนิดส่องผ่าน (TEM)

กล้องจุลทรรศน์ชนิดส่องผ่านจะประกอบด้วยแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอนซึ่งทำหน้าที่ผลิตอิเล็กตรอนเพื่อป้อนให้กับระบบ โดยกลุ่มอิเล็กตรอนที่ได้จากแหล่งกำเนิดจะถูกเร่งด้วยสนามไฟฟ้า จากนั้นกลุ่มอิเล็กตรอนที่เร่งแล้วจะเคลื่อนที่ผ่านรูกริด (Grid) ซึ่งทำหน้าที่กรองอิเล็กตรอนที่มีพลังงานต่ำเกินไปออก และปล่อยให้เฉพาะอิเล็กตรอนที่มีพลังงานสูงพอที่จะทะลุผ่านตัวอย่างได้เท่านั้น เมื่ออิเล็กตรอนเหล่านี้ผ่านตัวอย่างแล้ว จะเกิดสัญญาณต่างๆ ขึ้น เช่น สัญญาณที่มาจากพื้นผิวของตัวอย่าง (Secondary Electrons) สัญญาณที่มาจากภายในของตัวอย่าง (Backscattered Electrons) และสัญญาณที่มาจากอนุภาคที่หลุดออกมาจากตัวอย่าง (X-ray) เป็นต้น สัญญาณเหล่านี้จะถูกตรวจจับโดยอุปกรณ์ตรวจจับสัญญาณ (Detector) และส่งไปประมวลผลเป็นภาพแสดงบนจอต่อไป

อเล็กตรอนจะผ่านเลนส์รวบรวมรังสี (Condenser lens) เพื่อทำให้กลุ่มอเล็กตรอนกลายเป็นลำแสงอเล็กตรอน ซึ่งสามารถปรับให้ขนาดของลำอเล็กตรอนใหญ่หรือเล็กได้ตามต้องการ หลังจากนั้นลำอเล็กตรอนจะเคลื่อนที่ผ่านตัวอย่างที่จะศึกษา (Specimen) ไป ซึ่งตัวอย่างที่จะศึกษาจะต้องมีลักษณะที่แบนและบางมาก (อยู่ในช่วงระหว่าง 1 - 100 นาโนเมตร) จากนั้นจะเกิดการกระเจิงอนุภาคขึ้นเมื่ออเล็กตรอนทะลุผ่านตัวอย่างไป และอเล็กตรอนที่ทะลุผ่านตัวอย่างนี้ก็จะถูกปรับโฟกัสของภาพโดยเลนส์ใกล้วัตถุ (Objective lens) ซึ่งเป็นเลนส์ที่ทำหน้าที่ขยายภาพให้ได้รายละเอียดมากที่สุด จากนั้นจะได้รับการขยายด้วยเลนส์ทอดภาพไปสู่จอร์รับ (Projector lens) และปรับโฟกัสของลำแสงอนุภาคอเล็กตรอนให้ยาวพอดีที่จะปรากฏบนฉากเรืองแสง สุดท้ายจะเกิดการสร้างภาพขึ้นมาได้

ค.3 UV-VIS spectrophotometer [23]

UV-VIS spectrophotometer เป็นเครื่องมือที่ใช้วิเคราะห์สารโดยอาศัยหลักการดูดกลืนรังสีของสารที่อยู่ในช่วง ultra violet (UV) และ visible (VIS) ความยาวคลื่นประมาณ 190-1000 nm ส่วนใหญ่เป็นสารอินทรีย์ สารประกอบเชิงซ้อน หรือสารอนินทรีย์ ทั้งที่มีสีและไม่มีสี สารแต่ละชนิดจะดูดกลืนรังสีในช่วงความยาวคลื่นที่แตกต่างกันและปริมาณการดูดกลืนรังสีขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของสารนั้น การดูดกลืนแสงของสารต่างๆเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเข้มข้นของสาร จึงสามารถวิเคราะห์ได้ในเชิงคุณภาพและปริมาณ เป็นเทคนิคที่สะดวกรวดเร็วและใช้กันอย่างแพร่หลาย ผลที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคนี้จะแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดกลืนแสง (Absorbance) และค่าความยาวคลื่น (Wavelength)

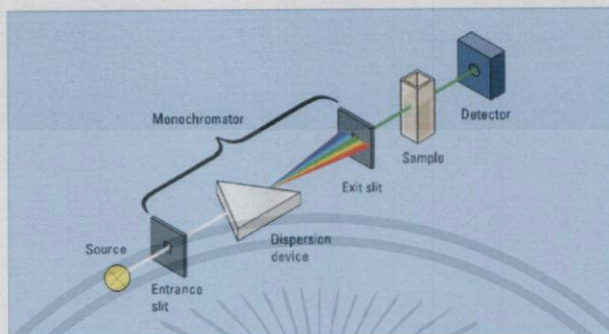
ค.3.1 ส่วนประกอบที่สำคัญของเครื่อง UV-VIS spectrophotometer

แหล่งกำเนิดรังสี (Light source) เป็นส่วนที่ให้รังสีในช่วงความยาวคลื่นที่ต้องการออกมาอย่างต่อเนื่องและคงที่ รวมทั้งมีความเข้มแสงที่มากพอ หลอดกำเนิดรังสีมีหลายชนิดตามความยาวคลื่นรังสีที่เปล่งออกมา เช่น ช่วงรังสีเหนือม่วง (Ultraviolet; UV) จะใช้หลอด H₂ and D₂ lamp ให้ความยาวคลื่นอยู่ในย่าน 160-380 nm และช่วงแสงที่สามารถมองเห็นได้ (Visible) ใช้หลอด Tungsten/halogen ให้ความยาวคลื่นในช่วง 240-2,500 nm เป็นต้น

1. ตัวแยกแสง (Monochromator) เป็นส่วนที่ใช้ควบคุมแสงโดยจะทำให้แสงที่ออกมาจากต้นกำเนิดแสงซึ่งเป็นพอลิโครเมติก ให้เป็นแสงโมโนโครเมติก ซึ่งเป็นแถบแสงแคบๆ หรือมีความยาวคลื่นเดียวใช้ฟิลเตอร์ปริซึมหรือ เกรตติง
2. เซลล์ที่ใช้บรรจุสารละลายตัวอย่าง (Cell sample) บางครั้งอาจเรียกว่า Cuvettes ที่ใช้กันทั่วไปได้แก่เซลล์ที่ทำด้วยแก้วจะใช้ได้เฉพาะช่วงวิสิเบิล เพราะแก้วจะดูดกลืนรังสีในช่วงยูวีได้ และเซลล์ที่ทำด้วยซิลิกา และควอร์ตซ์ ซึ่งใช้ได้ทั้งช่วงแสงเหนือม่วงและแสงที่มองเห็นได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาด้านนี้ ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. ตัวตรวจวัดแสง (Detector) ทำหน้าที่ในการวัดความเข้มของรังสีที่ถูกดูดกลืนโดยการแปลงพลังงานคลื่นรังสีเป็นพลังงานไฟฟ้า เครื่องวัดรังสีมีหลายชนิดที่นิยม ได้แก่ Photomultiplier tube และ เครื่องวัดแสงชนิดซิลิกอนไดโอด Silicon diode detector



รูปที่ ค.3 ส่วนประกอบเครื่อง UV-VIS spectrophotometer [23]

ค.4 เครื่องวิเคราะห์สารด้วยอินฟราเรด (Fourier Transform Infrared FTIR Spectrometer; FTIR) [24]

เครื่องวิเคราะห์สารด้วยอินฟราเรด (FTIR) เป็นหนึ่งในเทคนิคทางด้าน Infrared Spectroscopic ที่มีประสิทธิภาพในการจำแนกประเภทของสารอินทรีย์ สารอนินทรีย์ และพันธะเคมีในโมเลกุล รวมถึงสามารถบอกถึงปริมาณองค์ประกอบที่มีอยู่ในโมเลกุลของสารผสมตัวอย่างที่ไม่ทราบชนิดโดยทำการตรวจวัดการดูดกลืนรังสีอินฟราเรดของตัวอย่างที่ความถี่ต่างๆ ซึ่งเป็นลักษณะเฉพาะของแต่ละพันธะของสารตัวอย่าง

ค.4.1 หลักการทำงานของเครื่องวิเคราะห์สารด้วยอินฟราเรด (FTIR)

รังสีอินฟราเรดจากแหล่งกำเนิดจะถูกฉายไปยัง Interferometer ซึ่งประกอบด้วยกระจกที่สามารถเคลื่อนที่ได้ที่กระจกที่ตรึงอยู่กับที่โดยทั้งสองตั้งฉากซึ่งกันและกัน และตัวแยกแสงซึ่งเป็นอุปกรณ์กึ่งสะท้อนแสงที่ตัวแยกแสง ลำรังสีครึ่งหนึ่งจะทะลุผ่านไปยังกระจกที่ตรึงอยู่กับที่ และอีกครั้งหนึ่งจะสะท้อนไปยังกระจกที่สามารถเคลื่อนที่ได้ หลังจากนั้นลำรังสีก็จะสะท้อนจากกระจกกลับมารวมกันที่ตัวแยกแสงเกิดการแทรกสอดขึ้น หลังจากนั้นลำรังสีก็จะผ่านไปยังตัวอย่างและในที่สุดก็จะตกลงบนเครื่องตรวจวัด

Path difference ระหว่างลำรังสีที่ถูกแยกออกเกิดขึ้นจากระยะทางสัมพัทธ์ระหว่างกระจกทั้งสอง ถ้าแขนยึดกระจกทั้งสองข้างของ Interferometer ยาวเท่ากัน ลำรังสีทั้งสองก็จะเดินทางด้วยระยะทางที่เท่ากัน มีเฟสตรงกันทำให้สัญญาณที่ไปถึงเครื่องตรวจวัดมีค่ามากที่สุด เมื่อกระจกเคลื่อนที่เป็นระยะทาง $\lambda/4$ ระยะทางเดินของรังสีจะเปลี่ยนเป็น $\lambda/2$ รังสีทั้งสองมีเฟสต่างกัน 180 องศา การแทรกสอดจะอยู่ในตำแหน่งหักล้าง เมื่อเคลื่อนกระจกเป็นระยะทางอีก $\lambda/4$ ระยะการเดินทางของรังสี

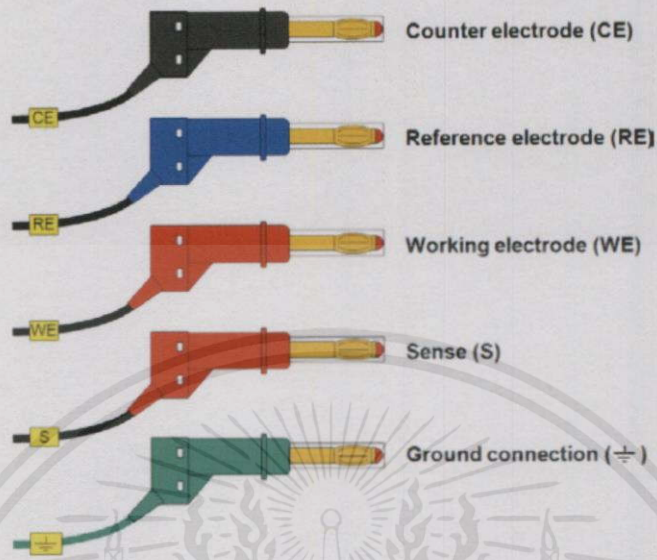
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่ควรนำออกจำหน่ายไปใช้ในเชิงพาณิชย์ การค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะเปลี่ยนเป็น λ รังสีทั้งสองลำจะกลับมามีเฟสตรงกันเมื่อกระจกเคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่ ความเข้มของสัญญาณที่เครื่องตรวจวัดได้จะมีลักษณะของ Interferogram เป็นรูปคลื่นไซน์ โดยกราฟจะพล็อตระหว่างการตอบสนองที่เครื่องตรวจวัดบันทึกได้และเวลาที่กระจกมีการเคลื่อนที่ ถ้าตัวอย่างเกิดการดูดกลืนรังสีที่ค่าความถี่นี้ ขนาดของแอมพลิจูดจะลดลงโดยสัมพันธ์กับปริมาณของตัวอย่าง หลังจากนั้นใช้ Fourier Transform ซึ่งเป็นฟังก์ชันทางคณิตศาสตร์ในการแปลงผลที่ได้ (ขึ้นกับเวลา) ให้กลายเป็นค่าความเข้มกับความถี่

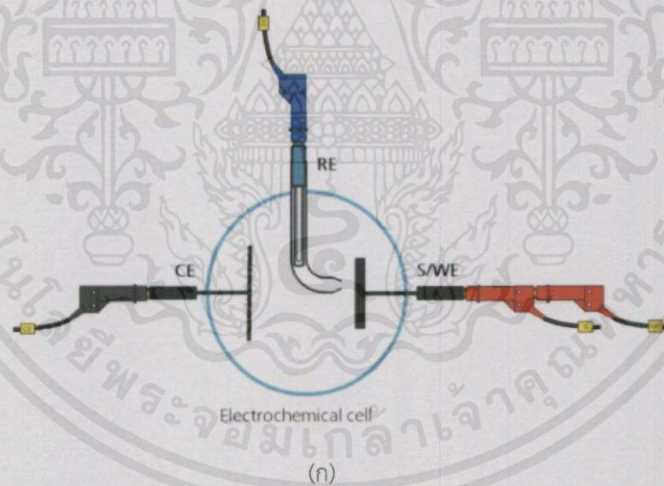
ค.5 เครื่องวัดความต้านทานความกักร่อนโดยใช้เทคนิคโพลาไรซ์ (Potentiodynamic polarization) [25]

วิธีการโพเทนทิโอไดนามิกส์เป็นเทคนิคการวิเคราะห์พฤติกรรมการกักร่อนของชิ้นงานโลหะ ตัวอย่างในสิ่งแวดล้อมที่กำหนด โดยใช้เซลล์ไฟฟ้าเคมีแบบสามขั้ว ประกอบด้วยชิ้นงานโลหะตัวอย่างเป็นขั้วไฟฟ้าใช้งาน (Working electrode: WE) จากรูปที่ ค.4 ในวงกลมซึ่งเป็นขั้วไฟฟ้าในระบบเคมีไฟฟ้าที่ใช้ศึกษาการกักร่อน อยู่ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่มีสภาวะความเข้มข้น อุณหภูมิ ปริมาณออกซิเจนในสารละลายตามกำหนด โดยอ้างอิงศักย์ไฟฟ้าที่จ่ายให้ชิ้นงานด้วยขั้วอ้างอิงมาตรฐาน (Reference electrode: RE) แสดงในวงกลมสีเขียว เนื่องจากเมื่อเกิดปฏิกิริยาที่ขั้วไฟฟ้าใช้งานและขั้วไฟฟ้าคู่ใช้งาน จะเกิดค่าความต่างศักย์ตกคร่อมขั้วทั้งสอง ทำให้การวัดค่าความต่างศักย์บริเวณนี้มีความคลาดเคลื่อน ดังนั้นจึงใช้ขั้วไฟฟ้าอ้างอิงวัดค่าความต่างศักย์ของขั้วไฟฟ้าใช้งาน โดยขั้วไฟฟ้านี้ต้องไม่มีกระแสที่เกิดจากขั้วไฟฟ้าใช้งานไหลผ่าน จากนั้นต่อให้ครบวงจรด้วยขั้วไฟฟ้าคู่ใช้งาน (Counter Electrode: CE หรือ Auxiliary electrode) จากรูปที่ ค.4 ในวงกลมสีส้ม ซึ่งเป็นขั้วไฟฟ้าที่รับอิเล็กตรอนที่ชิ้นงานสูญเสียทำให้เกิดกระแสไหลผ่านครบวงจร โดยขั้วไฟฟ้านี้จะถูกรอกแบบให้กระแสที่เกิดขึ้นในวงจรไหลผ่านได้โดยป้อนความต่างศักย์ไฟฟ้าไปทางบวกเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ เพื่อเร่งอัตราการกักร่อน และติดตามกระแสไฟฟ้าที่เปลี่ยนไปที่ค่าศักย์ไฟฟ้าต่างๆ ทำให้ได้ความสัมพันธ์ระหว่างศักย์ไฟฟ้า และความหนาแน่นของกระแส (i) หรือกราฟโพลาไรเซชัน (Polarisation curve) ซึ่งแสดงพฤติกรรมการกักร่อนของโลหะ ทั้งการกักร่อน การเกิดฟิล์ม การคงอยู่ของฟิล์ม และการแตกของฟิล์ม นอกจากนี้ยังประกอบไปด้วยไฟฟ้าอื่นๆ เช่น ขั้วสายดิน (Ground connection) ขั้วสัมผัส (Sense) แสดงดังรูปที่ ค.4 และแผนภาพอย่างง่ายแสดงการติดตั้งขั้วไฟฟ้าในเซลล์ไฟฟ้าเคมี

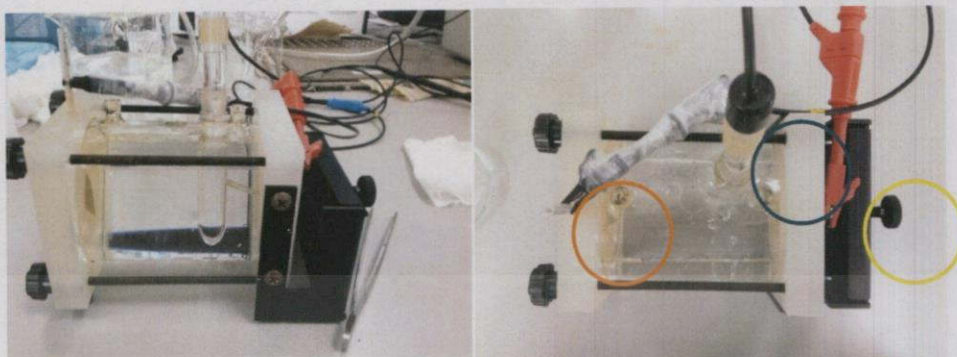
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ค.4 ขั้วแต่ละชนิดในเซลล์ไฟฟ้าเคมี [25]

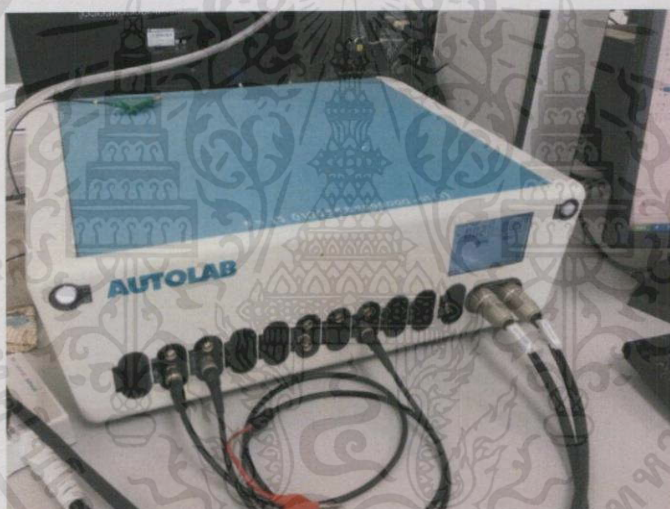


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ข)

รูปที่ ค.5 องค์ประกอบของเซลล์ไฟฟ้าแบบสามขั้ว ก) แผนภาพอย่างง่าย ข) เครื่องมือในห้องทดลอง

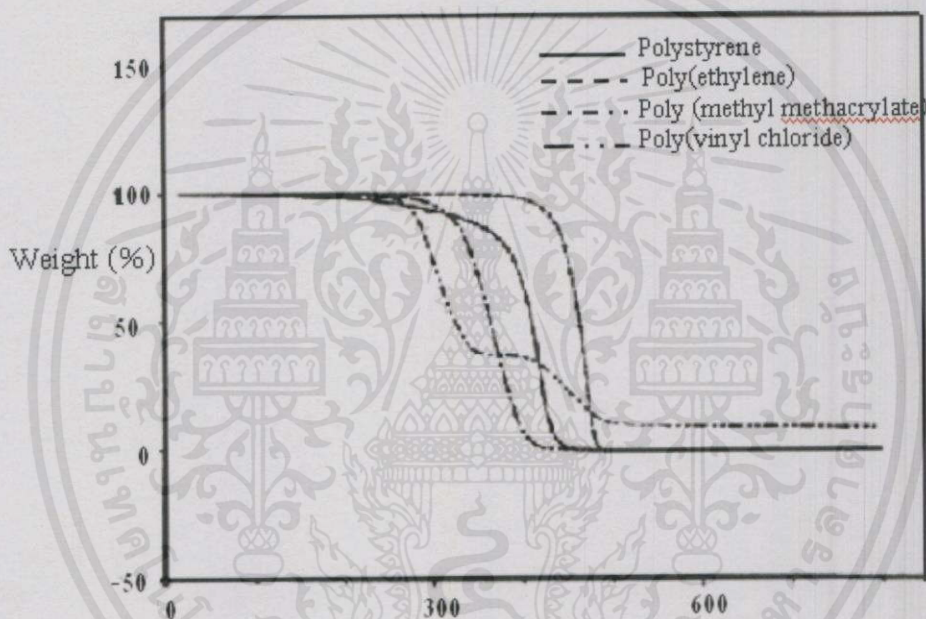


รูปที่ ค.6 เครื่องจ่ายศักย์ไฟฟ้าให้กับเซลล์ไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค.6 เครื่องวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของสารโดยอาศัยคุณสมบัติทางความร้อน (Thermogravimetric Analysis; TGA) [26]

เครื่องวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของสารโดยอาศัยคุณสมบัติทางความร้อน (TGA) ใช้วิเคราะห์ความเสถียรของวัสดุโดยเฉพาะพอลิเมอร์เมื่อได้รับความร้อน โดยใช้พื้นฐานการชั่งน้ำหนักอย่างต่อเนื่องด้วยเครื่องชั่งที่มีความไวสูง (Thermo balance) ในการวิเคราะห์อุณหภูมิของตัวอย่างในบรรยากาศปกติหรือก๊าซเฉื่อยขึ้นอยู่กับการใช้งานจะเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง โดยข้อมูลที่วัดผลได้เป็นน้ำหนักจะถูกบันทึกเป็นเทอร์โมแกรมที่แสดงการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของตัวอย่าง และอุณหภูมิแสดงตัวอย่างในรูปที่ ค.7 การสูญเสียน้ำหนักในช่วงแรกที่อุณหภูมิประมาณ 100 องศาเซลเซียสจะเป็นสูญเสียเนื่องจากการระเหยของน้ำ แต่ที่อุณหภูมิสูงขึ้นไปก็จะเป็นพอลิเมอร์หรือสารอินทรีย์อื่นๆที่สามารถระเหยได้



รูปที่ ค.8 ตัวอย่างเทอร์โมแกรมที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง TGA



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานภายในของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ ค.9 เครื่องวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของสารโดยอาศัยคุณสมบัติทางความร้อน



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้