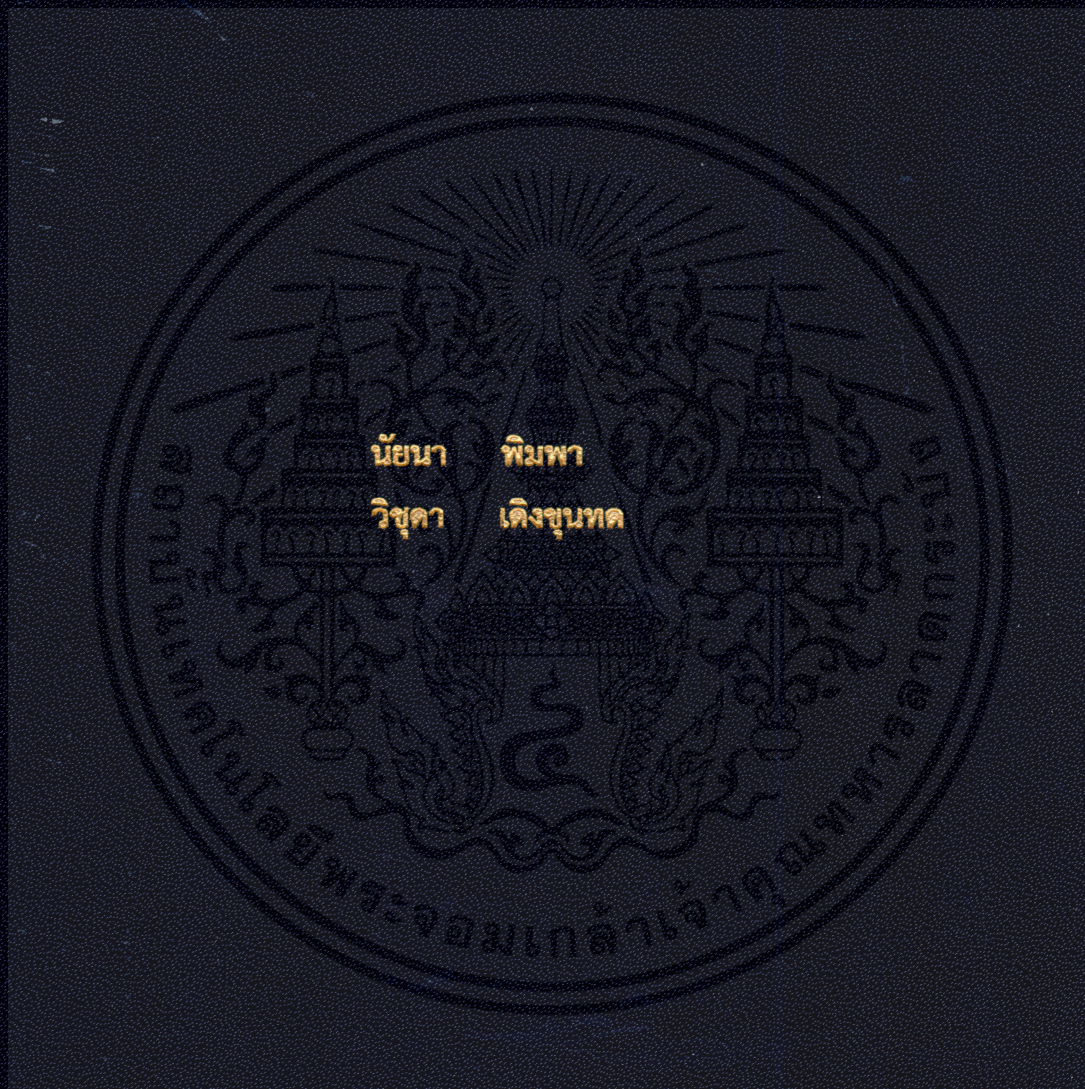
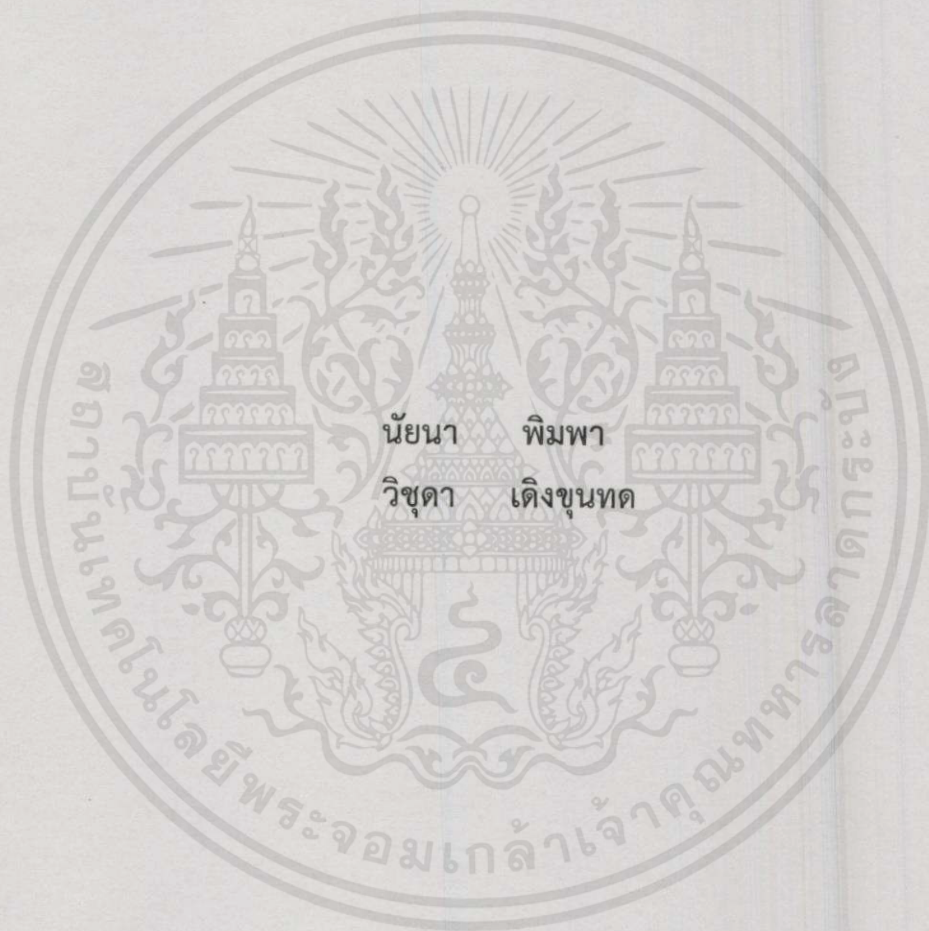


การสังเคราะห์อนุภาคประกอบนาโนซิลิกาที่มีรูพรุนชนิดเมโซกับไทเทเนียมไดออกไซด์
เพื่อประยุกต์ใช้ในการลดการกักคาร์บอนของเหล็กกล้า



ปริญญาานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาคตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2557

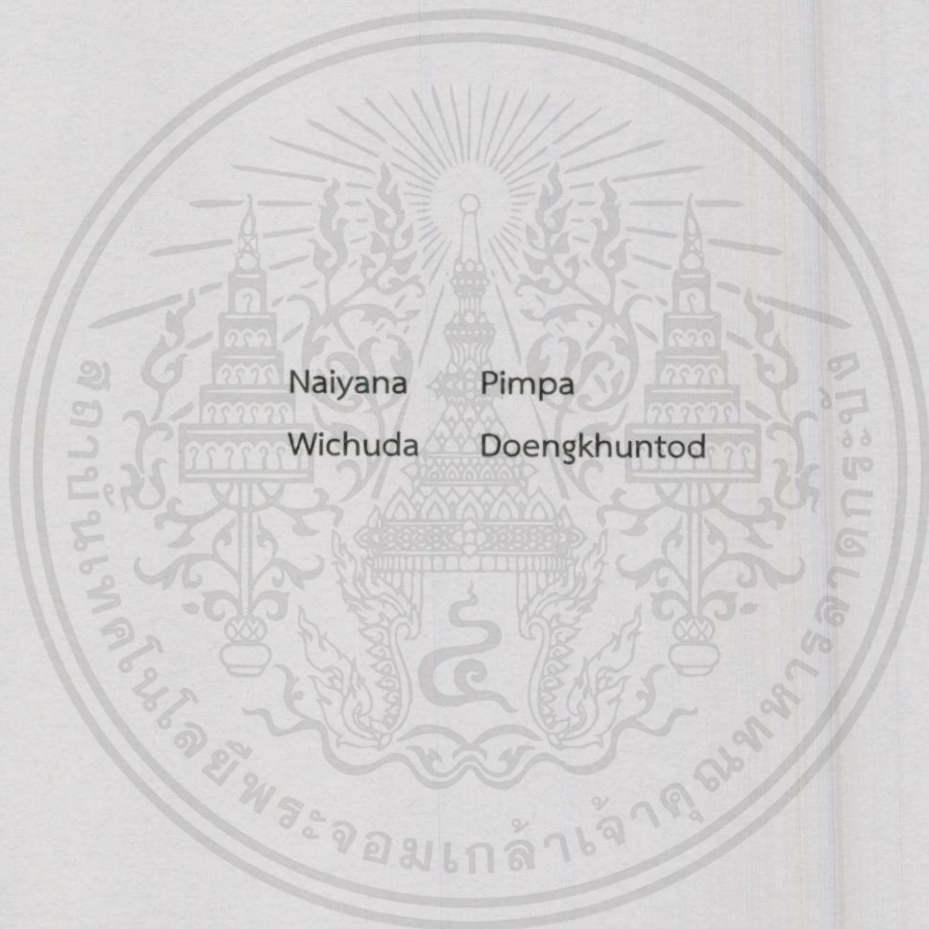
การสังเคราะห์อนุภาคประกอบนาโนซิลิกาที่มีรูพรุนชนิดเมโซกับไทเทเนียมไดออกไซด์
เพื่อประยุกต์ใช้ในการลดการกักต่อนของเหล็กกล้า



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาและวิจัยเท่านั้น ไม่ใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาสาระของเอกสารส่งถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
ปีการศึกษา 2557

Synthesis and Characterization of TiO_2 -based MSNs
as Anticorrosive Materials



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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น มิฉะนั้นผู้ใดที่นำเอกสารนี้ไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา 2014 ของอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาานิพนธ์เรื่อง การสังเคราะห์อนุภาคประกอบนาโนซิลิกาที่มีรูพรุนชนิดเมโซกับไทเทเนียม ไดออกไซด์เพื่อประยุกต์ใช้ในการลดการกักตัวของเหล็กกล้า

โดย นางสาวนัยนา ทิมพา
นางสาววิชุดา เดิงขุนทด

อาจารย์ที่ปรึกษา ดร. วลัยรัตน์ จันทระอัมพร
ดร. อีรพร สุธีวงศ์

ปริญญาานิพนธ์ ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปริญญาานิพนธ์นี้ได้รับการพิจารณาอนุมัติให้นับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเคมี
คณะกรรมการตรวจสอบปริญญาานิพนธ์

ธีรพร สุธีวงศ์ ประธานกรรมการ

(ดร.ธีรพร สุธีวงศ์)

ธีรฤดี เบลูจางคประเสริฐ กรรมการ

(ผศ.ธีรฤดี เบลูจางคประเสริฐ)

วัลย์รัตน์ จันทระอัมพร กรรมการ

(ดร.วัลย์รัตน์ จันทระอัมพร)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสาร ทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาานิพนธ์เรื่อง	การสังเคราะห์อนุภาคประกอบนาโนซิลิกาที่มีรูพรุนชนิดเมโซกับไทเทเนียมไดออกไซด์เพื่อประยุกต์ใช้ในการลดการกักตรอนของเหล็กของเหล็กกล้า		
โดย	นางสาว นัยนา พิมพ์	รหัสนักศึกษา	54010696
	นางสาว วิชุดา เดิงขุนทด	รหัสนักศึกษา	54011193
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตร์		
สาขาวิชา	วิศวกรรมเคมี		
ปีการศึกษา	2557		
อาจารย์ที่ปรึกษา	ดร. วลัยรัตน์	จันทรอำพร	
	ดร. ชีรพร	สุธีวงศ์	

บทคัดย่อ

การสังเคราะห์สารเคลือบวัสดุเหล็กกล้าเพื่อช่วยลดปัญหาการกักตรอนบนผิวเหล็กกล้าที่พบในงานอุตสาหกรรมทั่วไป สามารถสังเคราะห์อนุภาคนาโนซิลิกาที่มีรูพรุนชนิดเมโซได้ โดยมีเตตระเอทิลอโทซิลิเกตเป็นสารตั้งต้นในการทำปฏิกิริยาในสภาวะต่าง และใช้สารลดแรงตึงผิวเฮกซะเดซิลไตรเมทิลแอมโมเนียมโบรไมด์ซึ่งเป็นสารลดแรงตึงผิวชนิดประจุบวกในการกำหนดโครงสร้างของอนุภาค และมีไตรเมทิลเบนซีนเป็นสารขยายขนาดรูพรุนของอนุภาค โดยทำการศึกษาปริมาณของไตรเมทิลเบนซีนที่มีผลต่อขนาดอนุภาค พบว่า ที่ปริมาตรไตรเมทิลเบนซีน 0.712 มิลลิลิตร ลักษณะทางสัมฐานวิทยาของอนุภาคนาโนซิลิกาที่ได้ผ่านกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องผ่านมีขนาดประมาณ 50 นาโนเมตร มีการเรียงตัวของรูพรุนแบบเฮกซะโกนอล จากนั้นนำอนุภาคนาโนซิลิกาที่ได้มาสังเคราะห์ร่วมกับสารประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์ โดยศึกษาอัตราส่วนของอนุภาคนาโนซิลิกาต่อสารประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์และศึกษาความเข้มข้นของอนุภาคประกอบนาโนซิลิกาและไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ใช้เป็นส่วนประกอบสารเคลือบผิวเหล็ก พบว่าที่ความเข้มข้นต่ำสุดในการทดลองของสารเคลือบผิวอัตราส่วนอนุภาคประกอบนาโนซิลิกาต่อไทเทเนียมไดออกไซด์ 1:3 ให้ค่าอัตราการกักตรอนต่ำที่สุด จากนั้นนำชิ้นเคลือบผิวไปศึกษาคุณสมบัติของความไม่ชอบน้ำด้วยเทคนิคการวัดมุมสัมผัสกับของเหลว พบว่า ที่อัตราส่วนของอนุภาคประกอบนาโนซิลิกาต่อไทเทเนียมไดออกไซด์ 1:3 ให้ค่ามุมสัมผัสกับของเหลวที่เปลี่ยนไปเมื่อเทียบกับเหล็กที่ไม่ผ่านการเคลือบผิว และเทียบกับสารเคลือบผิวอนุภาคนาโนซิลิกาที่มีไม่ได้ปรับแต่งคุณสมบัติด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์ โดยค่ามุมสัมผัสที่เปลี่ยนไปคิดเป็น 45.10% และ 34.30% ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Report by Synthesis and Characterization of TiO₂-based MSNs
as Anticorrosive Materials

By Miss Naiyana Pimpa ID. 54010696
Miss Wichuda Doengkuntod ID. 54011193

Degree Bachelor of Engineering

Program Chemical Engineering

Year 2014

Advisor Dr. Walairut Chandara-ambron
Dr. Teeraporn Suteewong

Abstract

In this work, syntheses of titaniumdioxide (TiO₂)-based mesoporous silica nanoparticle (MSNs) for anticorrosion applications of steel were reported, using tetraethyl orthosilicate (TEOS) as a precursor in basic condition in presence of cationic surfactant and trimethyl benzene, pore expander were reported. After removal of surfactant, surface of MSN was functionalized using titanium butoxide (TBT). TiO₂-MSN nanocomposites were prepared by impregnating TBT into MSNs. Effects of MSNs to TBT mass ratio (at 1:2, 1:3 and 1:5) and concentration of MSN for surface coating which is effected to anticorrosion and hydrophobic properties were studied. Potentiodynamic polarization is the effective measurement for anticorrosive properties of surface coating. It was found that the lowest corrosion rate when at MSNs to TBT mass ratio of 1:3 and lowest concentration of MSNs. Contact angle was the effective measurement for hydrophobic, inferred that the steel coated with MSNs-TiO₂ showed the higher contact angle than uncoated steel and coated with pure MSNs, suggestion the increase of hydrophobicity.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาานิพนธ์นี้สำเร็จได้ด้วยความอนุเคราะห์ และความช่วยเหลือดูแลเอาใจใส่เป็นอย่างดี จากบุคคลหลายท่าน โดยเฉพาะอย่างยิ่ง ดร.ธีรพร สุธีวงศ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ซึ่งท่านได้ให้คำแนะนำและข้อคิดเห็นต่างๆ อันเป็นประโยชน์อย่างยิ่งในการศึกษา อีกทั้งยังช่วยแก้ปัญหาต่างๆ ที่เกิดขึ้นระหว่างการดำเนินงาน ตลอดจนตรวจสอบแก้ไขจนปริญญาานิพนธ์นี้เสร็จให้สมบูรณ์

ขอขอบคุณ ดร.วัลย์รัตน์ จันทระอัมพร และ ผศ.ดร.รีนฤดี เบญจางคประเสริฐ กรรมการสอบปริญญาานิพนธ์ที่ได้กรุณาให้ข้อเสนอแนะเพิ่มเติม และแนวคิดที่เป็นประโยชน์ในงานวิจัย

ขอขอบคุณคณาจารย์และเจ้าหน้าที่ทุกท่านในภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง สำหรับความช่วยเหลือในการทำงานวิจัย

ขอขอบคุณวิทยาลัยนวัตกรรมการจัดการข้อมูล สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง สำหรับความอนุเคราะห์ด้านเครื่องมือในการวัดผลการทำงานวิจัย

สุดท้ายนี้ขอขอบพระคุณบิดามารดา และครอบครัว ซึ่งเปิดโอกาสให้ได้รับการศึกษาเล่าเรียน ตลอดจนช่วยเหลือและคอยให้กำลังใจเสมอมาจนสำเร็จการศึกษา

นัยนา พิมพ์า

วิชุดา เต็งขุนทด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	I
Abstract	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญตาราง	VI
สารบัญรูป	VII
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ที่มาและความสำคัญของปริญญานิพนธ์	1
1.2 วัตถุประสงค์ของปริญญานิพนธ์	2
1.3 ขอบเขตการศึกษา	2
1.4 ประโยชน์ที่ได้รับ	2
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	
2.1 การกักกรอง	3
2.1.1 การกักกรอง	3
2.2.2 ประเภทของการกักกรอง	3
2.2 อนุภาคซิลิกา	4
2.3 อนุภาคซิลิกาที่มีรูพรุนชนิดเมโซ	4
2.3.1 ที่มาของอนุภาคนาโนซิลิกาที่มีรูพรุนชนิดเมโซ	4
2.3.2 การสังเคราะห์อนุภาคนาโนซิลิกาที่มีรูพรุนชนิดเมโซ	5
2.3.3 คุณสมบัติและประเภทของอนุภาคนาโนซิลิกาที่มีรูพรุนชนิดเมโซ	5
2.4 ไทเทเนียมไดออกไซด์	6
2.5 สารเคลือบผิว	7
2.5.1 วัตถุประสงค์ของการเคลือบผิว	7
2.5.2 ส่วนประกอบของสารเคลือบผิว	8
2.5.3 เรซินสังเคราะห์	8
2.5.3.1 อีพอกซีเรซิน (Epoxy resins)	8
2.6 การวัดมุมสัมผัสกับของเหลว	9

เอกสารนี้เป็นของงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ทรัพยากรใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงาน	
3.1 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง	13
3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง	14
3.3 ขั้นตอนการทดลอง	15
3.4 การวิเคราะห์คุณสมบัติของอนุภาค	20
บทที่ 4 ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผล	
4.1 การศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาของอนุภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน ชนิดส่องผ่าน (Transmission electron microscopy; TEM)	23
4.2 การศึกษาองค์ประกอบของอนุภาคโดยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-ray diffraction; XRD)	26
4.3 การศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาของอนุภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน ชนิดส่องกราด (Scanning electron microscopy; SEM)	28
4.4 การศึกษาผลของอัตราส่วนเชิงปริมาตรของอนุภาคนาโนซิลิกาต่อไทเทเนียมไดออกไซด์ ที่มีผลต่ออัตราการกัดกร่อน (Corrosion measurement)	30
4.5 การศึกษาคุณสมบัติความไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic) ของชั้นเคลือบผิวด้วยเทคนิคการ วัดมุมสัมผัสของของเหลวบนผิววัสดุ (Contact angle measurement)	37
บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง	
5.1 สรุปผลการทดลอง	42
5.2 ข้อเสนอแนะ	43
เอกสารอ้างอิง	44
ภาคผนวก ก	48
ภาคผนวก ข	58
ภาคผนวก ค	61

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
3.1 อัตราส่วนที่ใช้ในการสังเคราะห์อนุภาค TiO ₂ -based MSNs	17
3.2 อัตราส่วนที่ใช้ในการเคลือบผิวเหล็กกล้า (MSNs:TBT:IPA; 1:2:20)	18
3.3 อัตราส่วนที่ใช้ในการเคลือบผิวเหล็กกล้า (MSNs:TBT:IPA; 1:3:20)	18
3.4 อัตราส่วนที่ใช้ในการเคลือบผิวเหล็กกล้า (MSNs:TBT:IPA; 1:5:20)	19
4.1 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของอนุภาคประกอบนาโนซิลิกาและไทเทเนียมไดออกไซด์ ผ่านกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องผ่าน (TEM)	24
4.2 อัตราการกักตร้อนบนเหล็กกล้าที่ผ่านการเคลือบผิวด้วยสารเคลือบผิวที่มีอัตราส่วนเชิงปริมาตรของอนุภาคนาโนซิลิกาและไทเทเนียมไดออกไซด์ 1:2	32
4.3 อัตราการกักตร้อนบนเหล็กกล้าที่ผ่านการเคลือบผิวด้วยสารเคลือบผิวที่มีอัตราส่วนเชิงปริมาตรของอนุภาคนาโนซิลิกาและไทเทเนียมไดออกไซด์ 1:3	33
4.4 อัตราการกักตร้อนบนเหล็กกล้าที่ผ่านการเคลือบผิวด้วยสารเคลือบผิวที่มีอัตราส่วนเชิงปริมาตรของอนุภาคนาโนซิลิกาและไทเทเนียมไดออกไซด์ 1:5	34
4.5 ผลการเปรียบเทียบระหว่างชิ้นงานที่ไม่ได้ผ่านการเคลือบผิวและชิ้นงานที่ผ่านการเคลือบด้วยสารเคลือบผิวอัตราส่วนเชิงปริมาตรของอนุภาคนาโนซิลิกาและไทเทเนียมไดออกไซด์ 1:2 1:3 และ 1:5	38
ก.1 อัตราส่วนไตรเมทิลเบนซีน (TMB) ที่ใช้ในการปรับขนาดรูพรุนของอนุภาคนาโนซิลิกาที่มีรูพรุนชนิดเมโซสำหรับปฏิกิริยา 100 มิลลิลิตร	49
ก.2 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของอนุภาคนาโนซิลิกาที่มีรูพรุนชนิดเมโซหลังการปรับแต่งขนาดของรูพรุนด้วยไตรเมทิลเบนซีน สำหรับปฏิกิริยา 100 มิลลิลิตรผ่านกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องผ่าน (TEM)	49
ก.3 อัตราส่วนอนุภาคนาโนซิลิกาที่มีรูพรุนชนิดเมโซต่อไทเทเนียมไดออกไซด์ต่อตัวทำละลายไอโซโพรพานอลที่ใช้ในการสังเคราะห์อนุภาคประกอบนาโนซิลิกาและไทเทเนียมไดออกไซด์	53
ก.4 ความเข้มข้นของอนุภาคประกอบนาโนซิลิกาและไทเทเนียมไดออกไซด์ในสารละลายเมทานอล	53
ก.5 อัตราส่วนความเข้มข้นของสารเคลือบผิวในอัตราส่วนเชิงปริมาตรของอนุภาคสารประกอบนาโนซิลิกาและไทเทเนียมไดออกไซด์ต่างๆ	54
ก.6 ผลการวิเคราะห์จากกราฟ Polarization ของเหล็กกล้าทั้งก่อนและหลังการเคลือบผิวในสารละลายน้ำเกลือความเข้มข้น 1% โดยมวล	56
ก.7 ค่ามุมสัมผัสระหว่างชั้นเคลือบผิวและหยดน้ำ	57

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับใช้ในการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์อื่นใด
ไม่ว่ากรรมใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 ขนาดมุมสัมผัสของสมบัติความเป็นไฮโดรฟิลิกและสมบัติไฮโดรโฟบิกของผิวสัมผัส	9
3.1(ก) อนุภาคนาโนซิลิกาที่มีรูพรุนชนิดเมโซที่เตรียมได้หลังสิ้นสุดปฏิกิริยา	16
3.1(ข) อนุภาคนาโนซิลิกาที่มีรูพรุนชนิดเมโซหลังจากการเหวี่ยงแยก	16
3.2(ก) การสังเคราะห์อนุภาคประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์กับอนุภาคนาโนซิลิกา	17
3.2(ข) อนุภาคประกอบนาโนซิลิกาและไทเทเนียมไดออกไซด์หลังจากการเหวี่ยง	17
3.3 เหล็กกล้าที่ผ่านการขัดผิวเพื่อเตรียมเคลือบด้วยสารเคลือบผิว	18
3.4(ก) เครื่องปั่นเคลือบผิวชิ้นงาน (Home-build spin coater)	19
3.4(ข) เหล็กที่ผ่านการเคลือบผิวด้วยสารเคลือบผิว	19
3.5 เครื่องทดสอบการกัดกร่อน (Corrosion apparatus)	21
3.6 เครื่องทดสอบมุมสัมผัส (Contact angle equipment)	22
4.1(ก) รูป TEM ของอนุภาคนาโนซิลิกากำลังขยาย 25000 เท่า สเกลบาร์ 100 นาโนเมตร	24
4.1(ข) รูป TEM ของอนุภาคนาโนซิลิกากำลังขยาย 62000 เท่า สเกลบาร์ 50 นาโนเมตร	24
4.2 องค์ประกอบของไทเทเนียมไดออกไซด์ในอนุภาคประกอบนาโนซิลิกาและไทเทเนียมไดออกไซด์ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (XRD)	26
4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า 2θ และค่า Intensity ที่วัดได้จากเทคนิค XRD ของไทเทเนียมไดออกไซด์ในรูปของผลึก	27
4.4(ก) รูป SEM ของเหล็กกล้าที่ไม่ผ่านการขัดผิวกำลังขยาย 10,000 เท่า สเกลบาร์ 10 ไมโครเมตร	28
4.4(ข) รูป SEM ของเหล็กกล้าที่ผ่านการขัดผิวกำลังขยาย 10,000 เท่า สเกลบาร์ 10 ไมโครเมตร	28
4.4(ค) รูป SEM ของเหล็กกล้าที่เคลือบด้วยอนุภาคนาโนซิลิกากำลังขยาย 10,000 เท่า สเกลบาร์ 10 ไมโครเมตร	28
4.5(ก) รูป SEM ของเหล็กกล้าเคลือบด้วยอนุภาคนาโนซิลิกาต่ออีพอกซี 0.01:1 (g/ml) กำลังขยาย 10,000 เท่า สเกลบาร์ 10 ไมโครเมตร	29
4.5(ข) รูป SEM ของเหล็กกล้าเคลือบด้วยอนุภาคนาโนซิลิกาต่ออีพอกซี 0.01:1 (g/ml) กำลังขยาย 20,000 เท่า สเกลบาร์ 2 ไมโครเมตร	29

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับงานวิจัยเพื่อการเรียนการสอน ไม่ควรนำข้อมูลไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ หากมีข้อสงสัยหรือต้องการข้อมูลเพิ่มเติม กรุณาติดต่อเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.6(ก) รูป SEM ของเหล็กกล้าเคลือบด้วยอนุภาคประกอบนาโนซิลิกาและไทเทเนียมไดออกไซด์อัตราส่วนเชิงปริมาตร 1:2 กำลังขยาย 10,000 เท่า สเกลบาร์ 10 ไมโครเมตร	30
4.6(ข) รูป SEM ของเหล็กกล้าเคลือบด้วยอนุภาคประกอบนาโนซิลิกาและไทเทเนียมไดออกไซด์อัตราส่วนเชิงปริมาตร 1:2 กำลังขยาย 20,000 เท่า สเกลบาร์ 10 ไมโครเมตร	30
4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์และกระแสที่เกิดขึ้นบนเหล็ก ที่ผ่านการเคลือบผิวด้วยสารเคลือบผิวอัตราส่วนเชิงปริมาตร MSNs:TiO ₂ 1:2	31
4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์และกระแสที่เกิดขึ้นบนเหล็ก ที่ผ่านการเคลือบผิวด้วยสารเคลือบผิวอัตราส่วนเชิงปริมาตร MSNs:TiO ₂ 1:3	32
4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์และกระแสที่เกิดขึ้นบนเหล็ก ที่ผ่านการเคลือบผิวด้วยสารเคลือบผิวอัตราส่วนเชิงปริมาตร MSNs:TiO ₂ 1:5	33
4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์และกระแสที่เกิดขึ้นบนเหล็กที่ผ่านการเคลือบผิวด้วยสารเคลือบผิวอนุภาคประกอบนาโนซิลิกาและไทเทเนียมไดออกไซด์	35
4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการกัดกร่อนในหน่วยมิลลิเมตรต่อปีบนเหล็กกล้า ที่ผ่านการเคลือบผิวด้วยสารเคลือบผิวอัตราส่วนต่างๆ	36
4.12 แผ่นกระจกบางที่ผ่านการเคลือบผิวด้วยสารเคลือบผิวอนุภาคประกอบนาโนซิลิกาและไทเทเนียมไดออกไซด์	40
4.13 ความสัมพันธ์มุมสัมผัสและสารเคลือบผิวในอัตราส่วนต่างๆ กับเหล็กที่ไม่ผ่านการเคลือบผิว	41
ก.1 ผลการวิเคราะห์ FTIR ของอนุภาคนาโนซิลิกาที่มีรูพรุนชนิดเมโซ	51
ก.2 การวิเคราะห์ FTIR ของอนุภาคประกอบนาโนซิลิกาและไทเทเนียมไดออกไซด์อัตราส่วนเชิงปริมาตร 1:2	51
ก.3 ผลการวิเคราะห์ FTIR ของอนุภาคประกอบนาโนซิลิกาและไทเทเนียมไดออกไซด์อัตราส่วนเชิงปริมาตร 1:3	52
ก.4 ผลการวิเคราะห์ FTIR ของอนุภาคประกอบนาโนซิลิกาและไทเทเนียมไดออกไซด์อัตราส่วนเชิงปริมาตร 1:5	52

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ในงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
ก.6(ก) เหล็กกล้าที่ผ่านการเคลือบผิวด้วยสารเคลือบผิวอนุภาคประกอบนาโนซิลิกาและไทเทเนียมไดออกไซด์	54
ก.6(ข) แผ่นกระจกบางที่ผ่านการเคลือบผิวด้วยสารเคลือบผิวอนุภาคประกอบนาโนซิลิกาและไทเทเนียมไดออกไซด์	54
ก.7(ก) รูป SEM ของเหล็กกล้าเคลือบด้วยอนุภาคประกอบนาโนซิลิกาและไทเทเนียมไดออกไซด์อัตราส่วนเชิงปริมาตร 1:3 กำลังขยาย 5,000 เท่า สเกลบาร์ 20 ไมโครเมตร	55
ก.7(ข) รูป SEM ของเหล็กกล้าเคลือบด้วยอนุภาคประกอบนาโนซิลิกาและไทเทเนียมไดออกไซด์อัตราส่วนเชิงปริมาตร 1:5 กำลังขยาย 5,000 เท่า สเกลบาร์ 20 ไมโครเมตร	55
ก.7(ค) รูป SEM ของเหล็กกล้าเคลือบด้วยอนุภาคประกอบนาโนซิลิกาและไทเทเนียมไดออกไซด์อัตราส่วนเชิงปริมาตร 1:5 กำลังขยาย 10,000 เท่า สเกลบาร์ 10 ไมโครเมตร	55
ก.8 ความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์และกระแสที่เกิดขึ้นบนเหล็กที่ผ่านการเคลือบผิวด้วยสารเคลือบผิวอนุภาคประกอบนาโนซิลิกาและไทเทเนียมไดออกไซด์	56
ข.1 วิธีการหาค่ากระแสการกัดกร่อน (i_{corr}) จากกราฟ Polarization	60
ค.1 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องผ่าน (SEM)	62
ค.2 ส่วนประกอบของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องผ่าน (SEM)	63
ค.3 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องผ่าน (TEM)	63
ค.4 ส่วนประกอบของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องผ่าน (TEM)	64
ค.5 เครื่องมือวิเคราะห์สารด้วยอินฟราเรด (FTIR)	64
ค.6 เครื่องมือวิเคราะห์สารด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (XRD)	66
ค.7 การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ในผลึก	67
ค.8(ก) เครื่องโพเทนชิโอสแตท (Potentiostat)	67
ค.8(ข) อุปกรณ์วัดการกัดกร่อน	67
ค.9 การติดตั้งขั้วอิเล็กโทรดทั้ง 3 ขั้ว ต่อเชื่อมกับเครื่อง Potentiostat ในการทดสอบหาค่าการกัดกร่อน	68
ค.10(ก) ตัวอย่างเส้นโพลาริเซชันที่ได้จากการทดลองของชิ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิม	
ดูเพล็กซ์ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์	69
ค.10(ข) ส่วนต่างๆ ที่สำคัญของเส้นโค้งโพลาริเซชัน	69
ค.11 เครื่องทดสอบมุมสัมผัสระหว่างชิ้นงานกับหยดน้ำ (Contact angle equipment)	70

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนไว้สำหรับใช้ในงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะในรูปแบบใดก็ตาม ลเว้นแต่การนำเพื่อวัตถุประสงค์อื่น และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของปริญญานิพนธ์

ประเทศไทยมีการใช้งานวัสดุอุปกรณ์ที่มีโลหะเป็นส่วนประกอบอย่างหลากหลายทั้งในอุตสาหกรรมการผลิต และในงานก่อสร้าง ซึ่งมักจะเกิดปัญหาต่างๆ ตามมามากมาย การกัดกร่อนถือเป็นปัญหาหลักที่มักพบในงานอุตสาหกรรม ที่ก่อให้เกิดความเสียหายทั้งด้านคุณภาพของงาน ค่าใช้จ่ายในการปรับปรุงซ่อมแซม รวมไปถึงอาจจะทำให้สูญเสียทัศนียภาพที่สวยงาม ทำให้ต้องมีการศึกษาและพัฒนาวิธีการที่จะช่วยป้องกันและลดการกัดกร่อนที่เกิดขึ้นกับโลหะซึ่งเป็นวัสดุหลักในงานทางวิศวกรรม การใช้สารเคลือบถือเป็นแนวทางหนึ่งที่จะช่วยป้องกันการกัดกร่อนโดยสามารถทำได้หลายรูปแบบ การเคลือบด้วยอนุภาคนาโนซิลิกาที่มีรูพรุนชนิดเมโซเป็นอีกรูปแบบหนึ่งที่จะช่วยแก้ปัญหการกัดกร่อนที่เกิดขึ้นได้

การนำอนุภาคนาโนซิลิกาที่มีรูพรุนชนิดเมโซมาประยุกต์ใช้ในการเคลือบผิวโลหะเป็นวิธีการที่สามารถช่วยลดการกัดกร่อนที่เกิดขึ้นกับโลหะ โดยสามารถปรับหมู่ฟังก์ชันของอนุภาคนาโนซิลิกาให้เหมาะสมกับการนำไปใช้งานได้ อีกทั้งยังสามารถปรับแต่งขนาดของรูพรุน และยังมีพื้นที่ผิว ปริมาณของรูพรุน รวมไปถึงปริมาตรจำเพาะของรูพรุนมาก ปริญญานิพนธ์นี้ทำการศึกษาการปรับคุณสมบัติทางเคมีของอนุภาคนาโนซิลิกาที่มีรูพรุนชนิดเมโซด้วยสารประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์ซึ่งเป็นสารประกอบออกไซด์ของโลหะไทเทเนียม มีคุณสมบัติทนต่อการกัดกร่อนและสามารถทำความสะอาดตัวเองได้เมื่อถูกกระตุ้นด้วยแสง โดยทำการสังเคราะห์อนุภาคนาโนซิลิกาที่มีรูพรุนชนิดเมโซในสถานะที่เป็นต่าง และใช้สารลดแรงตึงผิวชนิดประจุบวกเป็นตัวกำหนดโครงสร้างของอนุภาค จากนั้นปรับแต่งคุณสมบัติทางเคมีด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์ โดยมีไทเทเนียมเตตระไบวาทอกไซด์เป็นสารตั้งต้นแล้วศึกษาตัวแปรที่มีผลต่อคุณสมบัติทางเคมีและทางกายภาพของอนุภาคประกอบของซิลิกาและไทเทเนียมที่เตรียมได้ เช่น อุณหภูมิ ชนิดสารตั้งต้น และสัดส่วนของสารตั้งต้น ศึกษาคุณสมบัติและลักษณะโครงสร้างของอนุภาคนาโนซิลิกาที่มีรูพรุนชนิดเมโซที่สังเคราะห์ได้ทั้งก่อนและหลังการปรับแต่ง โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องผ่านเพื่อดูลักษณะทางสัณฐานวิทยา ใช้เทคนิคการดูดกลืนรังสีในช่วงอินฟราเรดวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันบนอนุภาค ใช้เครื่องทดสอบการกัดกร่อนโดยอาศัยปฏิกิริยาทางไฟฟ้าเคมีวิเคราะห์อัตราการกัดกร่อน รวมไปถึงใช้เทคนิคการวัดมุมสัมผัสระหว่างน้ำและผิวชิ้นงานเพื่อตรวจสอบคุณสมบัติความไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic) ของอนุภาคซิลิกาที่ปรับแต่งคุณสมบัติด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนไว้สำหรับกรใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.2 วัตถุประสงค์ของปริญญาโท

ศึกษาและพัฒนาการสังเคราะห์อนุภาคประกอบของอนุภาคนาโนซิลิกาที่มีรูพรุนชนิดเมโซกับไทเทเนียมไดออกไซด์ เพื่อประยุกต์ใช้ในการลดการกักตรอนของเหล็กกล้า

- 1.2.1 ศึกษาผลของปริมาตรไตรเมทิลเบนซีนที่มีต่อลักษณะโครงสร้างของอนุภาคนาโนซิลิกา
- 1.2.2 ศึกษาผลของอัตราส่วนระหว่างอนุภาคนาโนซิลิกาและไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีผลต่อการป้องกันอัตราการกักตรอนบนเหล็กกล้า

1.3 ขอบเขตการศึกษา

- 1.3.1 สังเคราะห์อนุภาคซิลิกาที่มีรูพรุนชนิดเมโซโดยมีการปรับขนาดของรูพรุนในสภาวะที่เป็นต่างและใช้สารลดแรงตึงผิวชนิดประจุบวกเป็นตัวกำหนดโครงสร้างของอนุภาค
- 1.3.2 ศึกษาและวิเคราะห์ลักษณะโครงสร้างของอนุภาคซิลิกาที่มีรูพรุนชนิดเมโซ โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องผ่านในการศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยา ใช้เครื่องทดสอบการกักตรอนโดยอาศัยปฏิกิริยาทางไฟฟ้าเคมีวิเคราะห์อัตราการกักตรอน และใช้เทคนิคการวัดมุมสัมผัสระหว่างน้ำและผิวชิ้นงานวิเคราะห์คุณสมบัติในการเป็นไฮโดรโฟบิก
- 1.3.3 ศึกษาและพัฒนาสภาวะต่างๆ ที่เหมาะสมในการสังเคราะห์อนุภาค โดยมีตัวแปรที่ศึกษา เช่น สัดส่วนของสารตั้งต้น สัดส่วนของสารที่ใช้ปรับขนาดรูพรุนของอนุภาคนาโนซิลิกา
- 1.3.4 ทดสอบคุณสมบัติในการลดการกักตรอนบนพื้นผิวโลหะ ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์

1.4 ประโยชน์ที่ได้รับ

- 1.4.1 สามารถสังเคราะห์อนุภาคนาโนซิลิกาที่มีรูพรุนชนิดเมโซและสามารถปรับแต่งขนาดของรูพรุนของอนุภาคได้
- 1.4.2 สามารถหาสภาวะที่เหมาะสมในการสังเคราะห์อนุภาคนาโนซิลิกาที่มีรูพรุนชนิดเมโซเข้ากับไทเทเนียมไดออกไซด์
- 1.4.3 สามารถหาสภาวะและอัตราส่วนที่เหมาะสมของอนุภาคนาโนซิลิกาที่มีรูพรุนชนิดเมโซกับไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ใช้ในการเคลือบผิวลดการกักตรอนในเหล็กกล้า
- 1.4.4 พัฒนาคุณสมบัติของอนุภาคนาโนซิลิกาที่ใช้สังเคราะห์ร่วมกับไทเทเนียมไดออกไซด์เพื่อนำไปต่อยอดในอนาคตในการปรับแต่งคุณสมบัติอื่นๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 การกัดกร่อน

2.1.1) การกัดกร่อน [1]

การกัดกร่อน (Corrosion) หมายถึงภาวะซึ่งวัตถุหรือสิ่งประดิษฐ์ทางด้านวิศวกรรมทำปฏิกิริยากับสภาพแวดล้อม ทำให้เกิดการเสื่อมสภาพของวัตถุนั้น ส่งผลให้ประสิทธิภาพการทำงานหรือวัตถุประสงค์การใช้งานลดลง

2.1.2) ประเภทของการกัดกร่อน [2]

ในสภาพแวดล้อมโดยทั่วไปสาเหตุการกัดกร่อนเกิดได้หลายอย่างเช่น ปฏิกิริยาเคมี ปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมี หรืออาจเกิดจากปฏิกิริยาทางกายภาพของวัตถุนั้นเอง ลักษณะการกัดกร่อนที่พบสามารถแบ่งออกเป็นหลายแบบ เช่น แบ่งตามกลไกของการกัดกร่อน แบ่งตามลักษณะทางกายภาพ หรือตัวแปรที่ส่งผลต่อการกัดกร่อน

การกัดกร่อนแบบสม่ำเสมอ (Uniform Corrosion) เกิดขึ้นเนื่องจากวัตถุสัมผัสกับสิ่งแวดล้อม โดยอัตราความสูญเสียพื้นผิวของวัตถุที่บริเวณที่สัมผัสปัจจัยให้เกิดการกัดกร่อนต่างๆ โดยเฉลี่ยจะใกล้เคียงกัน

การกัดกร่อนเนื่องจากความต่างศักย์ (Galvanic Corrosion) เกิดจากวัตถุโลหะที่เป็นตัวนำไฟฟ้าได้ 2 ชนิดที่ต่างกันหรือวัตถุชนิดเดียวกันแต่ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าต่างกัน มาเชื่อมต่อกัน จะเกิดความต่างศักย์ไฟฟ้าขึ้น ทำให้เกิดการไหลของอิเล็กตรอนระหว่างวัตถุทั้งสอง ทำให้การสูญเสียอิเล็กตรอนของวัตถุที่มีค่าความต่างศักย์ต่ำกว่าและจะถูกกัดกร่อนในที่สุด

การกัดกร่อนแบบช่องแคบ (Crevice Corrosion) เกิดจากวัตถุสัมผัสสารละลายบางชนิดที่สามารถแตกตัวเป็นประจุไฟฟ้า หรือเกิดจากบริเวณพื้นผิวที่การถ่ายเทของเหลวไม่ดี ส่งผลต่อการทำปฏิกิริยาออกซิเดชันแตกต่างกัน มักเกิดตามรอยแยกหรือตามซอกต่างๆ ของวัตถุ

การกัดกร่อนแบบเป็นหลุม (Pitting) ส่วนมากเกิดจากวัตถุสัมผัสสารละลายพวกคลอไรด์ เช่น น้ำทะเล เมื่อวัตถุถูกกัดกร่อน บริเวณกัดกร่อนจะเป็นรูหรือหลุม อาจถูกบดบังด้วยตัวกัดกร่อนเอง มักเกิดแบบเฉียบพลันตรวจพบได้ยาก มีขนาดเล็ก ส่วนใหญ่พบในวัตถุโลหะที่สามารถสร้างชั้นป้องกันได้

การกัดกร่อนตามขอบเกรน (Intergranular Corrosion) มักเกิดกับเหล็กกล้าไร้สนิม ในบริเวณที่มีการเชื่อมต่อ โดยเหล็กจะสูญเสียโครเมียมในรูปคาร์ไบด์ เมื่อเกิดการสูญเสียจะขาดโครเมียมในการสร้างการป้องกันเนื้อเหล็ก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษานานาชาติ ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ผู้ใช้ต้องรับผิดชอบต่อเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การผุกร่อนแบบเลือก (Selective Leaching or Dealloying) เกิดวัตถุที่เป็นโลหะผสมที่ธาตุโลหะหนึ่งเสถียรกว่าธาตุอีกธาตุหนึ่งเมื่อสัมผัสกับสภาพแวดล้อม เช่น การผุกร่อนแบบ Dezincification ของทองเหลือง (ทองแดงผสมสังกะสี) ที่สังกะสีจะถูกละลายออกไปเหลือไว้แต่ทองแดงที่เป็นรูปพรุน ซึ่งแม้ว่ารูปทรงจะเหมือนเดิมแต่ความแข็งแรงจะลดลง สามารถแก้ไขปัญหาดังกล่าวได้โดยการเติมดีบุกประมาณร้อยละ 1 ลงในทองเหลือง

การกัดกร่อนแบบกัดเซาะ (Erosion Corrosion) เกิดจากปฏิกิริยาเคมีและการเคลื่อนที่ เช่น การไหลหรือเคลื่อนที่ของสารละลายหรือของเหลวที่มีผลต่อการกัดกร่อน

การกัดกร่อนโดยความเค้น (Stress corrosion) เกิดจากความเค้นหรือแรงเค้นของสภาพแวดล้อม เช่น การตัด การดัด ความร้อนภายนอก การสั่นสะเทือน หรือความเค้นจากภายในของวัตถุที่อาจหลงเหลือจากการขึ้นรูป การเย็นตัวที่ไม่สม่ำเสมอ

2.2 อนุภาคซิลิกา [3]

ซิลิกอนไดออกไซด์ หรือ ซิลิกา คือสารประกอบออกไซด์ของซิลิกอน มีสูตรทางเคมีคือ SiO_2 เป็นของแข็งสีขาว ไม่ละลายน้ำ สามารถเกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ และจากการสังเคราะห์ซึ่งมีทั้งซิลิกาในรูปผลึก และซิลิกาอสัณฐานที่เกิดจากสิ่งมีชีวิต พบได้ทั่วไปในธรรมชาติอยู่ในรูปของทราย หรือควอตซ์ และผนังเซลล์ของไดอะตอม สามารถใช้เป็นวัสดุเบื้องต้นในการผลิตแก้ว กระจก แก้วน้ำ ขวดแก้ว โดยปัจจุบันซิลิกามีบทบาทสำคัญในอุตสาหกรรม และการศึกษาวิจัยเป็นอย่างมาก โดยมีการนำไปใช้ในอุตสาหกรรมหลากหลาย ทั้งอุตสาหกรรมซีเมนต์ ยา อาหาร สี เครื่องสำอาง อุตสาหกรรมเซรามิกส์ แก้ว สามารถนำไปประยุกต์ในเชิงสิ่งแวดล้อมได้ โดยนำไปใช้เป็นตัวดูดซับสารเคมีอันตราย นอกจากนี้ยังใช้ซิลิกาเป็นสารตั้งต้นในการสังเคราะห์อนุภาคนาโนหลายชนิด เช่น อนุภาคนาโนซิลิกาที่มีรูพรุนชนิดเมโซ

2.3 อนุภาคนาโนซิลิกาที่มีรูพรุนชนิดเมโซ

2.3.1) ที่มาของอนุภาคนาโนซิลิกาที่มีรูพรุนชนิดเมโซ [4]

อนุภาคนาโนซิลิกาที่มีรูพรุนชนิดเมโซคือรูปแบบหนึ่งของอนุภาคซิลิกาที่ถูกพัฒนาด้วยนาโนเทคโนโลยี ประเภทของอนุภาคนาโนซิลิกาที่มีรูพรุนชนิดเมโซที่มักพบ คือ MCM-41 และ SBA-15 ได้มีงานวิจัยศึกษาเกี่ยวกับอนุภาคนาโนซิลิกาที่มีรูพรุนชนิดเมโซอย่างต่อเนื่องและพบว่าสามารถนำอนุภาคดังกล่าวไปประยุกต์ใช้งานได้อย่างหลากหลาย เช่น ในการเร่งปฏิกิริยา และในกระบวนการนำส่งยา เป็นต้น

สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.2) การสังเคราะห์อนุภาคนาโนซิลิกาที่มีรูพรุนชนิดเมโซ [5]

ในปี ค.ศ.1990 นักวิจัยจาก Exxon Mobil ได้ทำการสังเคราะห์อนุภาคนาโนซิลิกาที่มีรูพรุนเรียกว่า อนุภาค Mobil Crystalline Materials หรือ MCM-41 ขึ้น โดยใช้เตตระเอทิลออร์โทซิลิเกต (Tetraethoxysilane, TEOS) เป็นสารตั้งต้นควบคู่กับการใช้ไมเซลล์ของสารลดแรงตึงผิวเป็นตัวกำหนดโครงสร้างของอนุภาค หลังจากนั้นจะนำสารที่เป็นตัวกำหนดโครงสร้างดังกล่าวออกโดยการล้างด้วยตัวทำละลายที่มีค่า pH ที่เหมาะสม ผลที่ได้คือเกิดอนุภาคที่มีลักษณะที่ทั้งเป็นทรงกลมและทรงกระบอกที่เต็มไปด้วยรูพรุน การสังเคราะห์ซิลิกาเมโซพอร์เริ่มจากการนำสารกำหนดโครงสร้างมาละลายในตัวทำละลาย จากนั้นโมเลกุลสารกำหนดโครงสร้างในตัวทำละลายซึ่งมีสภาพเป็นขั้วจะเกาะกันเป็นกลุ่มในตัวกลางที่เป็นน้ำหรือตัวทำละลายอื่น โดยโมเลกุลที่มีขั้วจะเกาะกันล้อมรอบโมเลกุลที่ไม่มีขั้ว ซึ่งสามารถเกาะกลุ่มกันเป็นรูปทรงกลม กลมรี หรือแท่ง ขึ้นกับความเข้มข้นของสารกำหนดโครงสร้างในตัวทำละลายนั้นๆ ขั้นตอนนี้ เรียกว่า เคมีไมเซลล์ ขั้นตอนต่อไปเป็นการเติมสารอินทรีย์ซึ่งเป็นโครงสร้างหลักเพื่อให้ไปเกาะกับสารกำหนดโครงสร้างขั้นตอนนี้เรียกว่า กระบวนการโซล-เจล ในขั้นตอนของกระบวนการโซล-เจล เริ่มจากการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส ได้อนุภาคของแข็งขนาดเล็กที่เรียกว่า โซล (Sol) อนุภาคโซลเหล่านี้จะเกิดการรวมตัวกันกลายเป็นโครงข่ายผ่านกลไกแบบคอนเดนเซชัน (Condensation polymerization) เกิดเป็นเจล (Gel) ซึ่งเป็นวัสดุภาคที่มีสมบัติระหว่างของแข็งกับของเหลว จากนั้นทำการกำจัดสิ่งเจือปนต่างๆออก เช่น สารอินทรีย์ใช้เป็นสารกำหนดโครงสร้าง รวมทั้งไอออนบวกและไอออนลบที่ไม่เสถียร เมื่อสารกำหนดโครงสร้างสลายตัวออกไปจะทิ้งโครงสร้างรูพรุนไว้ในอนุภาคอินทรีย์ที่ได้ การกำหนดลักษณะโครงสร้างและขนาดของรูพรุนของอนุภาคนาโนซิลิกาชนิดเมโซสามารถทำได้โดยการเลือกกระบวนการสังเคราะห์ ชนิดของวัตถุดิบ และชนิดของสารกำหนดโครงสร้างเป็นหลัก ในการสังเคราะห์อนุภาคนาโนซิลิกาที่มีรูพรุนชนิดเมโซมักนิยมใช้สารกำหนดโครงสร้างเพื่อช่วยในการกำหนดลักษณะรูพรุน และใช้สารประกอบซิลิกา เช่น เตตระเอทิลออร์โทซิลิเกต (Tetraethyl orthosilicate; TEOS) เป็นสารตั้งต้น และอากาศ เป็นต้น อย่างไรก็ตามการใช้ประโยชน์วัสดุมาโครพอร์สังคังมีข้อจำกัด คือ สารตั้งต้นที่นำมาใช้สังเคราะห์มีราคาสูง และใช้พลังงานในการผลิตสูง

2.3.3) คุณสมบัติและประเภทของอนุภาคนาโนซิลิกาที่มีรูพรุนชนิดเมโซ [6]

คุณสมบัติที่โดดเด่นของอนุภาคนาโนซิลิกาชนิดเมโซคือ มีพื้นที่ผิวสัมผัสสูง ลักษณะโครงสร้างของรูพรุนเป็นระเบียบ มีขนาดสม่ำเสมอ สามารถควบคุมขนาดของรูพรุนได้ตามต้องการ โดยใช้สารกำหนดโครงสร้างที่มีขนาดต่างๆ กัน และยังทนต่อความร้อน ทนต่อกระบวนการทางเคมี นอกจากนี้อนุภาคนาโนซิลิกาสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้หลากหลาย เช่น ใช้เป็นตัวดูดซับ เป็นตัวคัดขนาดระดับโมเลกุล (Molecular sieves) และตัวรองรับตัวเร่งปฏิกิริยา เป็นต้น โดยทั่วไปอนุภาคนาโนซิลิกาสามารถแบ่งออกเป็น 3 กลุ่มใหญ่ๆ ตามขนาดของรูพรุน ได้แก่

- 1) อนุภาคไมโครพอร์ส (Microporous) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรูพรุนน้อยกว่า 2

นาโนเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

- 2) อนุภาคเมโซพอร์ส (Mesoporous) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรูพรุน 2 - 50 นาโนเมตร

3) อนุภาคไมโครพอร์รัส (Macroporous) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรูพรุนมากกว่า 50 นาโนเมตร

อนุภาคไมโครพอร์รัส เป็นอนุภาคที่มีรูพรุนขนาดเล็กกว่า 2 นาโนเมตร มีหลากหลายชนิด ขึ้นอยู่กับชนิดและการจัดเรียงโครงสร้างของรูพรุน อนุภาคกลุ่มนี้ที่รู้จักกันดี คือ ซีโอไลต์ (Zeolite) ซึ่งประกอบด้วยซิลิกอนอะลูมิเนียม และออกซิเจนจัดเรียงตัวกันเป็นโครงข่าย 3 มิติ มีการกระจายรูพรุนแคบและเป็นระเบียบ ซีโอไลต์นิยมนำไปใช้เป็นตัวดูดซับ เนื่องจากมีสมบัติในการเลือกทำปฏิกิริยาตามรูปร่างของรูพรุน

อนุภาคเมโซพอร์รัส (Mesoporous) มีหลายชนิด ได้แก่ ซิลิกาเมโซพอร์รัสจำพวก MCM-41 SBA-15 MSU FDU HMS และ KIT เป็นต้น โดยซิลิกาเมโซพอร์รัสที่นิยมสังเคราะห์กันอย่างแพร่หลายคือ MCM-41 และ SBA-15 เนื่องจากมีการกระจายขนาดของรูพรุนแคบ และรูพรุนมีความเป็นระเบียบสูง จึงนิยมนำมาใช้เป็นตัวดูดซับ และตัวรองรับตัวเร่งปฏิกิริยา

ส่วนวัสดุมาโครพอร์รัสซึ่งมีขนาดรูพรุนใหญ่กว่า 50 นาโนเมตร สามารถพบได้ตามธรรมชาติ เช่น ดินเบา (Diatoms) ฟองน้ำ (Sponges) ไม้คอร์ก (Cork) และเนื้อไม้ (Wood) รวมทั้งสารอินทรีย์อื่นๆ สารในกลุ่มนี้นิยมนำไปใช้เป็นตัวรองรับตัวเร่งปฏิกิริยา และเซรามิกส์รูพรุนสำหรับใช้บำบัดน้ำ และอากาศ เป็นต้น อย่างไรก็ตามการใช้ประโยชน์วัสดุมาโครพอร์รัสยังคงมีข้อจำกัด คือ สารตั้งต้นที่นำมาใช้สังเคราะห์มีราคาสูง และใช้พลังงานในการผลิตสูง

2.4 ไทเทเนียมไดออกไซด์ [7]

ไทเทเนียมไดออกไซด์ หรือ ไทเทเนีย (Titania) มีสูตรโมเลกุล คือ TiO_2 เป็นสารประกอบออกไซด์ของโลหะไทเทเนียม อยู่ในกลุ่มของโลหะทรานซิชัน เป็นของแข็งสีขาว ไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นวัสดุที่มีสมบัติเป็นสารกึ่งตัวนำ ซึ่งมีโครงสร้างผลึกที่แตกต่างกัน 3 รูปแบบ คือ อะนาเทส รูไทล์ และบรูคไคต์ มีความเสถียรทางเคมี ไม่เป็นพิษ และราคาถูก มีการใช้งานในอุตสาหกรรมหลายประเภท เช่น อุตสาหกรรมการทำสีผสมอาหารที่เป็นสีขาว ยาสีฟัน เป็นส่วนประกอบในแปรง สบู่ เครื่องสำอาง ลิปสติก ครีมกันแดด ใช้ในผลิตภัณฑ์บรรจุอาหาร และสีทาอาคาร เป็นต้น ไทเทเนียมไดออกไซด์จึงเป็นสารที่มีความปลอดภัยต่อมนุษย์สูงมาก เมื่อทำให้ TiO_2 เป็นอนุภาคนาโน จะมีคุณสมบัติเป็นสารตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง เมื่อแสงตกกระทบจะเกิดปฏิกิริยาเคมีทำให้เกิดคุณสมบัติในการฆ่าเชื้อ และย่อยสลายพันธะไฮโดรคาร์บอน โดยไม่เสื่อมสภาพหลังการเกิดปฏิกิริยาแล้ว มีประสิทธิภาพสามารถสลายสารประกอบอินทรีย์เกือบทุกชนิดเมื่ออยู่ภายใต้แสงอัลตราไวโอเล็ต จึงถูกนำมาประยุกต์ในชีวิตประจำวันอย่างแพร่หลาย เช่น การบำบัดน้ำเสีย การบำบัดมลพิษในอากาศ การเคลือบบนกระจกเพื่อป้องกันการเกิดฝ้า การเคลือบบนผิวโลหะเพื่อป้องกันการกัดกร่อน เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

สมบัติโฟโตแคตะไลติกของไทเทเนียมไดออกไซด์ภายใต้การรับแสง สามารถทำลายและสลายสารอินทรีย์เกือบทุกชนิด ทั้งในดิน อากาศ และแหล่งน้ำ อีกทั้งไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นสารที่ไม่มีพิษ จึงไม่เป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิตและสิ่งแวดล้อม โดยกลไกของปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติกเริ่มจากเมื่อ

ไทเทเนียมไดออกไซด์ถูกกระตุ้นด้วยแสงที่มีความยาวคลื่นที่ให้พลังงานมากกว่าแถบช่องว่าง พลังงานไปกระตุ้นอิเล็กตรอนที่แถบเวเลนซ์จะเหนี่ยวนำให้อิเล็กตรอนเคลื่อนที่ไปยังแถบการนำไฟฟ้าเกิดเป็นช่องว่างอิเล็กตรอน เรียกว่า โฮล โดยที่ช่องว่างอิเล็กตรอนจะทำปฏิกิริยากับน้ำและหมู่ไฮดรอกซิล (OH^-) เกิดเป็นไฮดรอกซิลเรดิคัล (OH^\cdot) ซึ่งเป็นตัวออกซิไดส์ที่แรง สามารถทำให้โมเลกุลของสารอินทรีย์แตกตัวกลายเป็นน้ำ และคาร์บอนไดออกไซด์ ส่วนอิเล็กตรอนจะทำปฏิกิริยากับออกซิเจน เกิดเป็นซูเปอร์ออกไซด์แอนไอออน (O_2^-) และจะทำปฏิกิริยากับคาร์บอนในสารอินทรีย์กลายเป็นคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งสามารถระเหย และสลายไปในอากาศ

ดังนั้นในงานวิจัยจึงทำการปรับหมู่ฟังก์ชันหรือคุณสมบัติทางเคมีของอนุภาคนาโนซิลิกาที่มีรูพรุนชนิดเมโซด้วยสารประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์ เพื่อใช้เป็นสารเคลือบผิวเหล็กป้องกันการกัดกร่อน โดยเน้นการกัดกร่อนของวัสดุเหล็กที่เกิดจากการกัดกร่อนของน้ำเกลือ โซเดียมคลอไรด์ หรือการกัดกร่อนที่เกิดจากปฏิกิริยาจากสิ่งแวดล้อม ด้วยคุณสมบัติของไทเทเนียมไดออกไซด์ในการทำ ความสะอาดตนเองเมื่อถูกกระตุ้นด้วยแสง

2.5 สารเคลือบผิว [8]

2.5.1 วัตถุประสงค์ของการเคลือบผิว

สารเคลือบผิว (Surface coating) นักอุตสาหกรรมใช้สารเคลือบผิวป้องกันพื้นผิววัสดุ โครงสร้างให้มีความคงทนถาวรขึ้น โดยวัตถุประสงค์ของการเคลือบผิวมีอยู่ด้วยกัน 2 ประการ คือ

1. เพื่อป้องกันพื้นผิววัสดุจากมลภาวะต่างๆ สารเคลือบผิวจะช่วยให้ผิวหน้าของวัสดุที่ถูกเคลือบมีความทนทานต่ออากาศ น้ำ สารเคมีต่างๆ นอกจากนี้สารเคลือบผิวยังช่วยให้ผิวหน้าของวัสดุมีความแข็งแรงขึ้น ทนทานต่อการขัดสีได้มากขึ้น และอายุการใช้งานยาวนานขึ้น ตัวอย่างของการป้องกันพื้นผิววัสดุ เช่น การใช้สีทาไม้เพื่อป้องกันการผุพังของไม้อันเนื่องมาจากความชื้น หรือการเคลือบผิวภายในกระป๋องโลหะเพื่อป้องกันการเกิดการกัดกร่อนจากอาหารหรือสารเคมีที่บรรจุภายใน หรือการเคลือบผิวชิ้นส่วนอุปกรณ์ไฟฟ้าเพื่อไม่ให้สัมผัสกับความชื้น สารเคลือบผิวบางประเภทใช้ทาหน้าที่มีรูพรุน เช่น ผิวคอนกรีต และพลาสติก เพื่อช่วยให้ทำความสะอาดได้ง่ายขึ้น
2. เพื่อตกแต่งให้แลดูสวยงาม ความสวยงามของวัสดุหลังการเคลือบผิวหน้าด้วยสารเคลือบผิว อาจมาจากสี (Color) จากความเงา (Gloss) จากสวดลายตกแต่ง (Texture) หรือจากความสว่าง (Lighting) หรือจากทั้งหมดรวมกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5.2 ส่วนประกอบของสารเคลือบผิว

1. ผงสี เป็นสารที่ให้สี อาจเป็นสารประกอบอินทรีย์หรืออนินทรีย์ก็ได้
2. สารยึด ทำหน้าที่ยึดประสานอนุภาคเข้าไว้ด้วยกัน ให้เกิดเป็นฟิล์มแล้วอนุภาคยึดติดกับพื้นผิวที่เคลือบ ตัวอย่างของสารยึด ได้แก่ น้ำมัน เรซินธรรมชาติ เรซินสังเคราะห์
3. ตัวทำละลาย คือของเหลวที่ระเหยได้ ซึ่งใช้ในสารเคลือบผิว เพื่อละลายสารยึดที่เป็นของแข็ง หรือที่มีความหนืดสูงให้ได้เป็นเนื้อเดียวกัน ซึ่งสมบัติทั่วไปของตัวทำละลายที่ใช้ในงานเคลือบผิว มีดังนี้
 1. ความสามารถในการทำละลาย (Solvency)
 2. เสถียรภาพทางเคมี (Chemical stability)
 3. สมบัติทางกายภาพ เช่น สีและกลิ่น (Colour and Odour) จุดเดือด (Boiling point)
 4. การกัดกร่อน (Corrosive properties)

2.5.3 เรซินสังเคราะห์

ตัวอย่างของเรซินสังเคราะห์ เช่น อัลคิเดเรซิน (Alkyd resins) ฟีนอลิกเรซิน (Phenolic resins) ยูเรียเรซิน (Urea resins) อีพอกซีเรซิน (Epoxy resins) โพลียูรีเทน (Polyurethane) โพลีไวนิลแอซีเตต (Polyvinyl acetate) โดยเรซินสังเคราะห์ที่นำมาใช้ในงานวิจัยนี้คือ อีพอกซีเรซิน

2.5.3.1 อีพอกซีเรซิน (Epoxy resins)

อีพอกซีเรซิน (Epoxy resins) เป็นเรซินที่ใช้ประโยชน์ได้มากในอุตสาหกรรม 60 % ของพอกซีเรซินเตรียมได้จากปฏิกิริยาระหว่างไดโหรือโพลีไฮดริคฟีนอลและอีพิฮาโลไฮดริน (Epihalohydrin) โพลีไฮดริคฟีนอลที่ใช้กันมาก ได้แก่ บิสฟีนอลเอ (Bisphenol - A) คุณสมบัติที่ดีของอีพอกซีเรซินที่ช่วยในงานด้านการเคลือบผิวหน้า มีดังต่อไปนี้

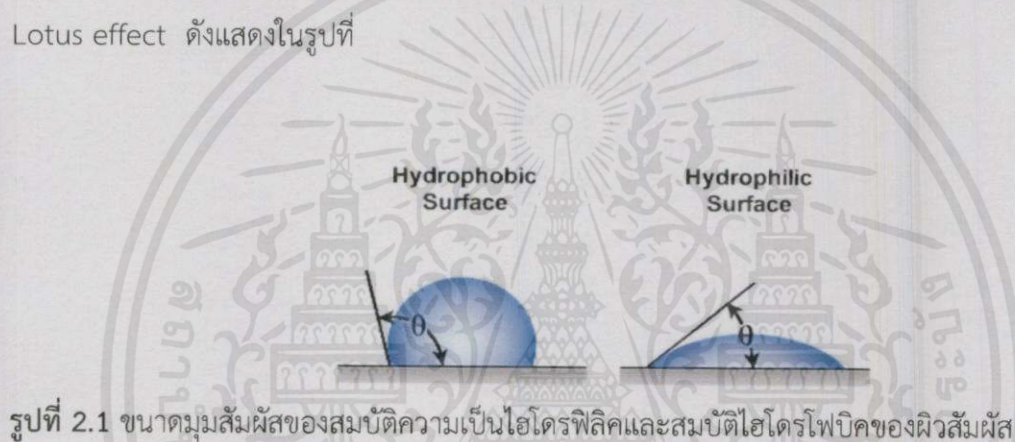
1. มีความทนทานต่อเคมีภัณฑ์ต่างๆ ดี โดยเฉพาะอย่างยิ่งต่อด่าง ทั้งนี้เพราะในโมเลกุลไม่มีหมู่เอสเทอร์ที่ถูกสะพอนิฟายได้ มีเฉพาะพันธะอีเทอร์และพันธะคาร์บอน - คาร์บอน เท่านั้น
2. มีสมบัติยึดกับผิวหน้าต่างๆ ได้ดี ทั้งนี้เพราะโซ่พอลิเมอร์มีปริมาณของหมู่ที่มีขั้วสูง นอกจากนี้การมีหมู่ไฮดรอกซิลอยู่ห่างกันอย่างเป็นระเบียบในโมเลกุล จะทำให้เกิดพันธะไฮโดรเจนได้ดีเป็นผลให้มีแรงดึงดูดระหว่างโซ่สูง
3. มีความแข็งแรง และอ่อนตัวไม่เปราะ การที่โมเลกุลมีหมู่อะโรมาติกอยู่บนโซ่ทำให้โซ่แข็งแรง จึงทำให้อีพอกซีเรซินทนความร้อนได้ดี ในขณะที่เดียวกันจากการที่โซ่มีพันธะเดี่ยว จึงทำให้โมเลกุลสามารถเกิดการหมุน (Rotation) รอบๆ พันธะเดี่ยวได้ จึงทำให้อีพอกซีเรซินมีความอ่อนตัว ไม่เปราะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับงานวิจัยเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น ไม่สามารถนำข้อมูลไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น การนำข้อมูลไปใช้โดยไม่ขออนุญาตจากเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. หมู่อีพอกซีและหมูไฮดรอกซิลที่มีอยู่ในโมเลกุล ทำให้อีพอกซีเรซินสามารถเกิดโพลิเมอร์ไรเซชัน หรือเกิดการปมต่อไป ทำให้ได้เป็นโครงสร้าง 3 มิติ ที่แข็งแรงทนทานและใช้ประโยชน์ได้ดี

2.6 การวัดมุมสัมผัสกับของเหลว [9]

การวัดมุมสัมผัสจะแสดงถึงสภาพเปียกน้ำของผิว (Hydrophilic surface) หรือผิวไม่เปียกน้ำ (Hydrophobic) ของผิวเคลือบ โดยมุมสัมผัสมีค่าต่ำแสดงถึงความชอบน้ำของผิวมาก ในขณะที่มุมสัมผัสมีค่าสูงแสดงถึงผิวที่ไม่ชอบน้ำมากขึ้น และหยดน้ำจะมีลักษณะกลมมากขึ้น ถ้ามุมสัมผัสของหยดน้ำบนผิวกระจกมีค่ามากกว่า 100 องศาจะมีลักษณะคล้ายหยดน้ำที่กลิ้งบนใบบัว หรือที่เรียกว่า Lotus effect ดังแสดงในรูปที่



รูปที่ 2.1 ขนาดมุมสัมผัสของสมบัติความเป็นไฮโดรฟิลิกและสมบัติไฮโดรโฟบิกของผิวสัมผัส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Qian และคณะ (2013) [10] ได้เสนอการสังเคราะห์ไทเทเนียมไดออกไซด์เข้ากับอนุภาคนาโนซิลิกาที่มีรูพรุนชนิดเมโซ (SBA-15) ด้วยวิธีการไฮโดรไลซิส โดยเตรียมไทเทเนียมเตตระบิวทอกไซด์ (TBT) ซึ่งเป็นสารตั้งต้นของไทเทเนียม จำนวน 2.0 กรัม และนำไปละลายในไอโซโพรพานอล จำนวน 20 กรัม หรือในอัตราส่วนเชิงมวล 1:10 จากนั้นฉีดสารละลายที่ได้เข้าไปในสารละลายอนุภาคนาโนซิลิกาที่มีรูพรุนชนิดเมโซ (SBA-15) จำนวน 1.0 กรัม ในสภาวะเฉื่อยที่ประกอบด้วยธาตุอาร์กอนและทำการหมุนกวนเป็นระยะเวลา 2 ชั่วโมงเพื่อให้ไทเทเนียมเตตระบิวทอกไซด์ถูกดูดซับอย่างสมบูรณ์ในอนุภาคนาโนซิลิกาที่มีรูพรุนชนิดเมโซ (SBA-15) ต่อมาจะเติมน้ำที่ปราศจากไอออน (Deionized water) เพื่อให้ไทเทเนียมเตตระบิวทอกไซด์ถูกไฮโดรไลซ์อย่างสมบูรณ์แล้วเก็บอนุภาคที่ได้ด้วยการกรองและทำการล้างสารละลายที่ไม่ต้องการออกด้วยไอโซโพรพานอลตามด้วยการทำให้แห้งที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียสเป็นระยะเวลาหนึ่งคืน และทำการเผาที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียสเป็นระยะเวลา 4 ชั่วโมง โดยมีอัตราการให้ความร้อน 2 องศาเซลเซียสต่อนาที

Dahl และคณะ (2013) [11] ศึกษาคุณสมบัติประกอบด้วยดัชนีการหักเหและการเป็นตัวดูดซึมแสง อัลตราไวโอเล็ต (UV) ของไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) ซึ่งสนใจคุณสมบัติความเป็นสารกึ่งตัวนำ ซึ่งถึงแม้จะมีคุณสมบัติของเม็ดสี และดูดซึมอัลตราไวโอเล็ต เป็นไปตามปกติของการใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์บริสุทธิ์ แต่มีความเหมาะสมไม่เพียงพอสำหรับการใช้ประโยชน์จากคุณสมบัติทางเคมีโฟโตอิเล็กโทรไลต์ ตลอดจนคุณสมบัติทางชีววิทยา จึงมีงานวิจัยในการสร้างอนุภาคเป็นระดับนาโนของวัสดุผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO_2 composite materials) เช่น การเจือไทเทเนียมไดออกไซด์ด้วยโลหะออกไซด์ โลหะทรานซิชัน คาร์บอน และวัสดุผสมเทมเพลต โดยวัสดุเชิงประกอบเทมเพลตง่ายต่อการควบคุมรูปร่างพื้นฐาน เช่น ซิลิกอนไดออกไซด์ โพลิสไตรีน ซึ่งใช้เทคนิคการจุ่มชุบ (incipient wetness impregnation) และกระบวนการโซลเจล นำเสนอโดยใช้ซิลิกาที่สังเคราะห์มีโครงสร้างที่มีความเป็นระเบียบสูง (Ordered Mesoporous Silica, OMS) เช่น MCM-41, SBA-15 ซีโอไลต์ ซึ่งมีความยากในการสังเคราะห์ซิลิกาชนิดเมโซเป็นวัสดุประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์ และสามารถใช้คุณสมบัติในการย่อยสลายโมเลกุลสารอินทรีย์จากปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติกส์ และกำจัดเทมเพลตออกได้ด้วยไฮเดียมไฮดรอกไซด์ หรือ กรดไฮโดรฟลูออริก โดยงานวิจัยของ Yue et al. (2009) [9] ใช้ SBA-15 เป็นเทมเพลต และใช้สารตั้งต้นเป็นไทเทเนียมไดออกไซด์ โดยควบคุมเฟสและโครงสร้าง โดยใช้สารละลายไทเทเนียมไอโซโพรพอกไซด์ (Titanium (IV) isopropoxide) เป็นสารไฮโดรไลส์ และยุติปฏิกิริยาด้วยกรด ได้ไทเทเนียมไนเตรท หรือ ไทเทเนียมเตตระคลอไรด์เป็นสารตั้งต้น แล้วบรรจุสารเข้าสู่อนุภาค SBA-15 โดยการเผาและกำจัดเทมเพลตด้วยไฮเดียมไฮดรอกไซด์

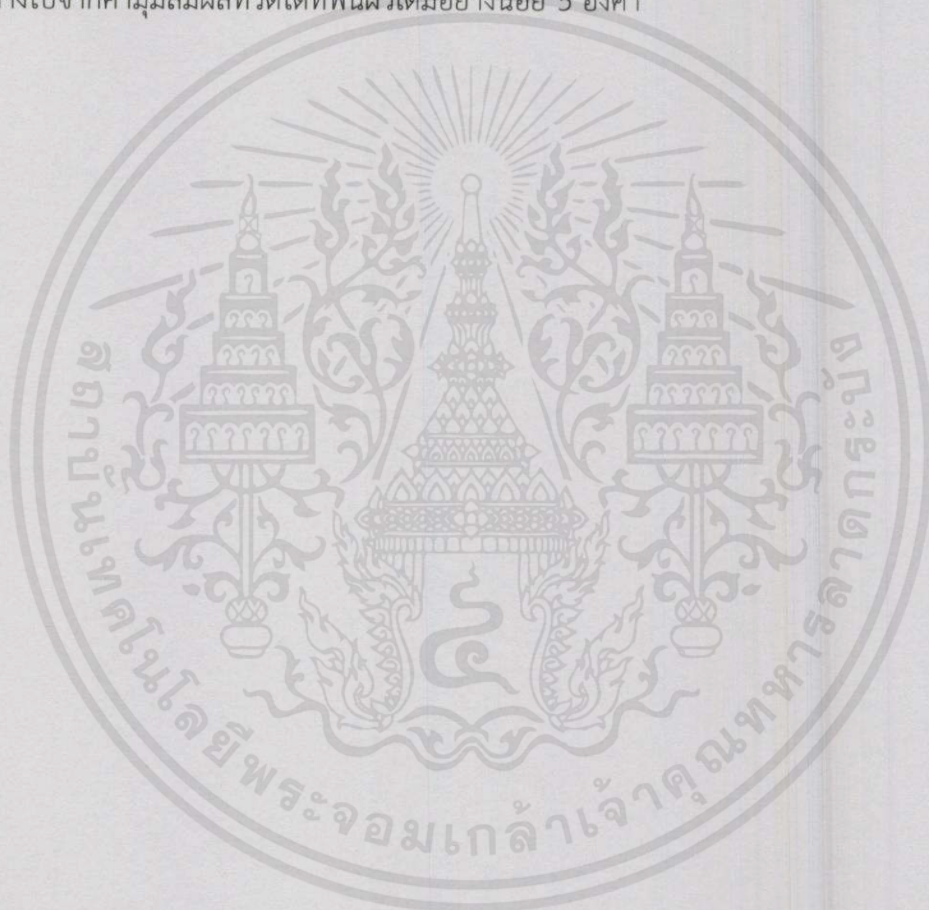
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Minglin and Randal (2006) [12] ได้รวบรวมงานวิจัยเกี่ยวกับพื้นผิวที่ไม่ชอบน้ำอย่างยิ่งยวด (Superhydrophobic surface) โดยพื้นผิวที่มีสมบัติไม่ชอบน้ำจะมีความมุมสัมผัส (Contact angle) สูง และหยดน้ำไหลได้ง่าย โดยศึกษาหลักความสัมพันธ์ของพื้นผิว (Surface morphology) ความสามารถของภาวการณ์เปียก (Wettability) และการไหลของหยดน้ำ (Droplet sliding) เทคนิคในการทำพื้นผิวที่ไม่ชอบน้ำทำได้สองวิธี คือ การทำพื้นผิวขรุขระจากพื้นผิวพลังงานต่ำ และการปรับแต่งพื้นผิวพลังงานต่ำด้วยพื้นผิวขรุขระ โดยแบ่งวัสดุที่มีผิวขรุขระ และพื้นผิวพลังงานต่ำเป็น 4 แบบ คือ 1. ฟลูออโรคาร์บอน (Fluorocarbon) ซึ่งมีส่วนประกอบของพอลิเมอร์ทำให้ผิวขรุขระ 2. ซิลิกอน (Silicon) จะทำให้เกิดพื้นผิวพลังงานต่ำ (Low surface energy) ยกตัวอย่างเช่นการใช้โพลีไดเมทิลซิลอกซ์เซน (Polydimethylsiloxane; PDMS) จะทำให้เกิดลักษณะคล้ายใบบัว 3. วัสดุอินทรีย์ (Organic material) เป็นวัสดุที่เตรียมขึ้นง่ายและราคาไม่แพง แล้วให้สมบัติไม่ชอบน้ำที่ดี เช่น พอลิเอไมด์ (polyamide) โพลีคาร์บอเนต (Polycarbonate เป็นต้น 4. วัสดุอนินทรีย์ (Inorganic materials) เช่น เซอร์โคเนีย (ZrO_2) และ ไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) การทำให้ผิวของวัสดุมีความขรุขระและเป็นพื้นผิวพลังงานต่ำมีหลายวิธีการ เช่น การใช้วิธีการกัดกร่อน (Etching and Lithography) การเตรียมแบบโซลเจล การเตรียมแบบการใช้นาโนคอมพอสิต (Layer-by-Layer) และคอลลอยด์ (Colloidal) เป็นต้น

Fen Zhang และคณะ (2011) [13] ได้เสนอการเตรียมฟิล์มบางเคลือบผิวที่มีคุณสมบัติไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic) วัสดุไทเทเนียมเพื่อเป็นวัสดุป้องกันการกัดกร่อน โดยฟิล์มบางป้องกันการกัดกร่อนนี้สามารถเตรียมได้โดยปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีของสารประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์กับไทเทเนียมที่เป็นธาตุ ผ่านเทคนิคการจุ่มลงในสารละลายเมทานอลเพื่อช่วยในการไฮโดรไลซ์ โดยมีไฮเลนที่ใช้เป็นตัวประสานคือ 1H,1H,2H,2H-perfluorooctyltriethoxysilane หรือ PTES จากนั้นแช่ทิ้งไว้เป็นระยะเวลา 1 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิห้อง และนำตัวอย่างที่ได้มาศึกษาคุณสมบัติในการป้องกันการกัดกร่อน เช่น คุณสมบัติในการไม่ชอบน้ำ โดยการวัดมุมสัมผัสกับน้ำซึ่งให้ค่ามุมสัมผัสที่แสดงความเป็น hydrophobic สูงถึง 160 องศา จากนั้นยังนำตัวอย่างที่เตรียมได้ไปศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาพบว่า มีลักษณะพิเศษแบบ hierarchical หรือมีลักษณะคล้ายเป็นขั้นๆ ซึ่งลักษณะดังกล่าวมีพื้นผิวในการป้องกันน้ำที่สูง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

E. Certhoux และคณะ (2013) [14] ได้ศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพในการป้องกันการกัดกร่อนด้วยกระบวนการสังเคราะห์แบบโซลเจล โดยใช้เทคนิคการจุ่มเคลือบผิวสแตนเลส โดยมีเตตระเอทิลอโทซิลิเกต (TEOS) และ 3-โพรพิล เมทาซิเลต (MAP) เป็นสารตั้งต้นในการสังเคราะห์ จากนั้นทำการศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีโดยศึกษาปริมาตรของโพลิเอทิลีนไกลคอล (PEG) ที่เติมลงไป ซึ่งประสิทธิภาพในการป้องกันการกัดกร่อนเมื่อนำสารที่สังเคราะห์ได้มาเคลือบลงบนสแตนเลสจะถูกศึกษาด้วยปฏิกิริยาทางไฟฟ้าเคมีผ่านกราฟ potentiodynamic polarization โดยมีสารละลายอิเล็กโทรไลต์เป็นน้ำเกลือที่ความเข้มข้น 3.5% ให้ค่า Current density 0.05 mA/cm^2 จากนั้นยังได้ศึกษาคุณสมบัติในการไม่ชอบน้ำโดยการวัดมุมสัมผัสกับน้ำ พบว่าค่าเฉลี่ยมุมสัมผัสที่วัดได้แตกต่างไปจากค่ามุมสัมผัสที่วัดได้ที่พื้นผิวเดิมอย่างน้อย 5 องศา



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงาน

ปริญญานิพนธ์นี้สนใจศึกษาการสังเคราะห์อนุภาคที่มีสมบัติเหมาะสมในการเคลือบวัสดุเหล็ก เพื่อป้องกันการกัดกร่อน โดยสังเคราะห์เป็นอนุภาคนาโนซิลิกาที่มีรูพรุนชนิดเมโซ และทำการปรับคุณสมบัติทางเคมีด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์ การสังเคราะห์อนุภาคนาโนซิลิกาที่มีรูพรุนชนิดเมโซในสภาวะต่างโดยใช้เตตระเอทิลออร์โทซิลิเกต (Tetraethyl orthosilicate; TEOS) เป็นสารตั้งต้น มีน้ำเป็นตัวทำละลาย ทำการทดลองที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส และใช้สารลดแรงตึงผิวชนิดประจุบวก เป็นสารกำหนดโครงสร้าง โดยทำการขยายรูพรุนอนุภาคด้วย 1,3,5-ไตรเมทิลเบนซีน (Trimethyl benzene; TMB) ซึ่งจะทำให้การปรับปริมาณของ 1,3,5-ไตรเมทิลเบนซีนที่ใช้เพื่อเตรียมอนุภาคนาโนซิลิกาที่มีรูพรุนขนาดต่างกัน จากนั้นนำอนุภาคซิลิกาที่เตรียมได้มาปรับแต่งคุณสมบัติทางเคมีด้วยสารประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์โดยใช้อัตราส่วนปริมาตรระหว่างอนุภาคนาโนซิลิกาที่มีรูพรุนชนิดเมโซกับสารประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์และตัวทำละลายไอโซโพรพานอล เป็น 1:2:20 1:3:20 และ 1:5:20 ตามลำดับด้วยเทคนิค impregnation จากนั้นศึกษาคุณสมบัติที่เปลี่ยนไปของอนุภาคหลังการปรับแต่งคุณสมบัติทางเคมี เพื่อใช้เป็นสารเคลือบป้องกันการกัดกร่อนในวัสดุเหล็กกล้า

3.1 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

- 1) เตตระเอทิลออร์โทซิลิเกต (Tetraethyl orthosilicate; TEOS)
- 2) เฮกซะเดซิลไตรเมทิลแอมโมเนียมโบรไมด์ (Hexadecyltrimethyl ammonium bromide; CTAB)
- 3) 1,3,5-ไตรเมทิลเบนซีน (Trimethyl benzene; TMB)
- 4) ไทเทเนียม เตตระบิวทอกไซด์ (Titanium butoxide; TBT)
- 5) แอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ (Ammonium hydroxide; NH_4OH)
- 6) เอทิลอะซิเตท (Ethyl acetate; EtOAc)
- 7) น้ำกลั่น (Deionized water)
- 8) เอทานอล (Ethanol; EtOH)
- 9) กรดอะซิติก (Acetic acid)
- 10) เมทานอล (Methanol; MeOH)
- 11) ไอโซโพรพานอล (Isopropanol; IPA)
- 12) ซิลิกาเจล (Silica gel)

13) สารละลายอีพอกซี (3-Glycidoxypropyltrimethoxysilane)

14) โซเดียมคลอไรด์ (Sodium chloride; NaCl)

3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

- 1) ช้อนตักสาร (Spatula)
- 2) บีกเกอร์ (Beaker)
- 3) ขวดก้นกลม (Round bottom flask) และจุกปิดขวด (Cocker)
- 4) กระจกบอทดวง (Cylinder)
- 5) ขาตั้ง และตัวหนีบบิวเรต (burette stand and holder)
- 6) แท่งกวนแม่เหล็ก (Magnetic bar)
- 7) หลอดเหวี่ยงแยก (Centrifugal tube)
- 8) เครื่องกวนสารละลายพร้อมเตาให้ความร้อน (Magnetic stirrer)
- 9) ปิเปต และไมโครปิเปต (Pipette and micropipette)
- 10) เครื่องเหวี่ยงแยก (Centrifuge)
- 11) เครื่องโซนิเคท (Sonicater)
- 12) แผ่นพาราฟิล์ม (Para film)
- 13) เครื่องชั่งน้ำหนัก (Analytical balance)
- 14) เครื่องปั่นเคลือบผิวเหล็ก (Home-build spin coater)
- 15) ตู้อบสูญญากาศ (Vacuum oven)
- 16) ตู้อบ (Oven)
- 17) กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องผ่าน (Transmission electron microscope; TEM)
- 18) กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด (Scanning electron microscope; SEM)
- 19) เครื่องวิเคราะห์ ตรวจสอบโครงสร้างของสารด้วยการดูดกลืนรังสีในช่วงอินฟราเรด (Fourier Transform Infrared Spectrometer; FT-IR)
- 20) เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (X-ray diffractometer; XRD)
- 21) เครื่องทดสอบการกัดกร่อน (Corrosion measurement)
- 22) เครื่องทดสอบมุมสัมผัส (Contact angle measurement)

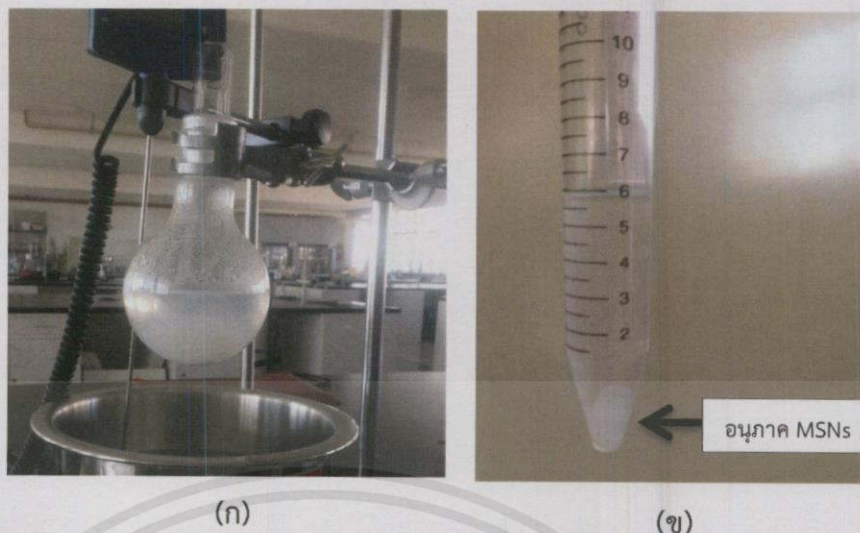
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3 ขั้นตอนการทดลอง

ตอนที่ 1 การสังเคราะห์อนุภาค (TMB-blank MSNs) ที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส

- 1) เตรียมสารละลาย CTAB เข้มข้น 54.8 มิลลิโมลาร์
- 2) จัดเตรียมอุปกรณ์ขาดัง และตั้งเครื่องควบคุมอุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส
- 3) เตรียมน้ำ 100 มิลลิลิตร ลงในขวดก้นกลมขนาด 250 มิลลิลิตร แล้วเปิดสารละลาย CTAB ที่เตรียมได้ 5 มิลลิลิตร ลงในน้ำ คนด้วยเครื่องกวน ประมาณ 2 นาที ให้ละลายเป็นเนื้อเดียว
- 4) เติม EtOAc 0.88 มิลลิลิตร และ TMB 0.356 มิลลิลิตร คนต่อเนื่องด้วยเครื่องกวน 30 นาที
- 5) เติม TEOS 0.50 มิลลิลิตร กวนต่อเนื่องเป็นเวลา 5 นาที
- 6) เติมน้ำ (quenching) 36.9 มิลลิลิตร กวนต่อเนื่องอีกประมาณ 30 นาที
- 7) แบ่งสารละลายใส่หลอด หลอดละเท่าๆกัน นำไปแยกโดยใช้เครื่องเหวี่ยงแยก (Centrifuge)
- 8) เทสารละลายชั้นบนออกเหลือแต่อนุภาค เติมเอทานอล แล้วใช้เครื่องโซนิเคทกระจาย ให้สารละลายและอนุภาคเป็นเนื้อเดียวกัน
- 9) นำ CTAB ออกด้วยการแลกเปลี่ยนไอออนโดยใช้กรด เทสารละลายลงในบีกเกอร์ เติมกรดอะซิติก 5-10 % โดยปริมาตร คนด้วยเครื่องกวนประมาณ 30 นาที
- 10) เทออกใส่หลอดแยก ใช้เครื่องเหวี่ยงแยก โดยทำซ้ำ 2 ครั้ง แล้วเก็บอนุภาคไว้ในเอทานอล
- 11) ทดลองซ้ำโดยเปลี่ยนแปลงปริมาตร TMB ที่ใช้ปรับขนาดรูพรุน เป็น 0.356 0.712 1.068 และ 1.424 มิลลิลิตร ตามลำดับ โดยกำหนดให้ความเข้มข้นของสารตั้งต้นที่ใช้คงที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.1(ก) อนุภาคนาโนซิลิกาที่มีรูพรุนชนิดเมโซที่เตรียมได้หลังสิ้นสุดปฏิกิริยา
(ข) อนุภาคนาโนซิลิกาที่มีรูพรุนชนิดเมโซหลังจากการเหวี่ยงแยก

ตอนที่ 2 การสังเคราะห์อนุภาค TiO_2 -based MSNs ที่อุณหภูมิ 36 องศาเซลเซียส (อุณหภูมิห้อง)

หลังจากกำจัดสารลดแรงตึงผิวออกจากรูพรุนของอนุภาค จะนำอนุภาคนาโนซิลิกาที่เตรียมได้มาละลายในไอโซโพรพานอล และเติมสารละลายไทเทเนียมบิวทอกไซด์ โดยมีวิธีการสังเคราะห์ดังต่อไปนี้

- 1) หาความเข้มข้นของอนุภาคนาโนซิลิกาที่สังเคราะห์ได้ โดยการนำสารละลายที่มีอนุภาคนาโนซิลิกาจำนวน 1 มิลลิลิตร อดด้วยตุ้บสูญญากาศอุณหภูมิ 40 องศา เป็นเวลา 3 ชั่วโมง จากนั้นชั่งน้ำหนักของอนุภาคและหาความเข้มข้นในหน่วยกรัมของอนุภาคต่อมิลลิลิตรของสารละลายที่มีอนุภาคแขวนลอยอยู่
- 2) นำอนุภาคนาโนซิลิกาและไอโซโพรพานอลใส่ขวดก้นกลมในอัตราส่วนที่กำหนดไว้ จากนั้นหมุนกวนด้วยเครื่องกวนต่อเนื่องเป็นระยะเวลาประมาณ 2 นาที
- 3) เติมสารละลายไทเทเนียมบิวทอกไซด์ในอัตราส่วนที่กำหนดลงในขวดก้นกลม จากนั้นหมุนกวนด้วยเครื่องกวนต่อเนื่องเป็นระยะเวลา 2 ชั่วโมง
- 4) เติมน้ำ (quenching) ปริมาณ 4 เท่าของอัตราส่วนไทเทเนียมบิวทอกไซด์ที่ใช้ กวนต่อเนื่องอีกเป็นระยะเวลา 12 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิห้อง
- 5) นำสารละลายที่ได้เทใส่หลอดแยก แล้วนำไปเหวี่ยงเพื่อแยกอนุภาคออกจากสารละลายด้วยเครื่องเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง เก็บอนุภาคที่สังเคราะห์ได้ในสารละลายเมทานอล
- 6) ทดลองซ้ำโดยเปลี่ยนอัตราส่วนของอนุภาคนาโนซิลิกากับสารประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์และสารละลายไอโซโพรพานอล เป็น 1:2:20 1:3:20 และ 1:5:20 ตามลำดับ



(ก)



(ข)

รูปที่ 3.2(ก) การสังเคราะห์อนุภาคประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์กับอนุภาคนาโนซิลิกา
(ข) อนุภาคประกอบนาโนซิลิกาและไทเทเนียมไดออกไซด์หลังจากการเหวี่ยง

ตารางที่ 3.1 อัตราส่วนที่ใช้ในการสังเคราะห์อนุภาค TiO_2 -based MSNs ที่อุณหภูมิ 36 องศาเซลเซียส (อุณหภูมิห้อง)

ความเข้มข้นของอนุภาคนาโนซิลิกาต่อสารละลายเมทานอล เท่ากับ 0.024 กรัม/มิลลิลิตร
ความหนาแน่นของไทเทเนียมเตตระโบรไมด์ (TBT) เท่ากับ 1 กรัม/มิลลิลิตร
ความหนาแน่นของไอโซโพรพานอล (IPA) เท่ากับ 0.785 กรัม/มิลลิลิตร

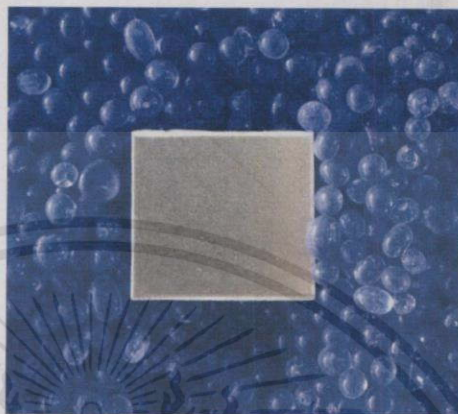
Sample code	สัดส่วนโดยปริมาตร (MSNs:TBT:IPA)	สารละลาย อนุภาค MSNs (g/mL _{EtOH})	TBT (mL)	IPA (mL)	DI- H ₂ O (mL)
1-2	1:2:20	1	0.48	6.10	1.92
1-3	1:3:20	1	0.72	6.10	2.88
1-5	1:5:20	1	1.20	6.10	4.80

ตอนที่ 3 การเตรียมผิวเหล็กกล้าที่ใช้ทดสอบการกัดกร่อนและการเตรียมสารเคลือบผิว

- นำเหล็กกล้าความหนา 1 มิลลิเมตร ขนาด (กว้างxยาว) 1 นิ้ว x 1 นิ้ว มาขัดด้วยการกัดกระดาษทรายเบอร์หยาบ (150) เก็บชิ้นงานไว้ในอนุภาคซิลิกาเจลเพื่อป้องกันความชื้น
- นำสารละลายเมทานอลที่มีอนุภาคประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์และนาโนซิลิกา มาผสมเข้ากับสารละลายอีพอกซีชนิด 3-Glycidoxypropyltrimethoxysilane ในอัตรา

ส่วนต่างๆ ทั้งแบบที่มีอนุภาคเข้มข้นและเจือจาง เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมที่สุดในการเคลือบลงบนผิวเหล็กและช่วยป้องกันการกัดกร่อน

- 3) นำสารละลายที่เตรียมได้ในข้อ 2) ทดลองเคลือบลงบนผิวเหล็กผ่านเครื่องปั่นเคลือบผิวเหล็ก (Spin coating) ทั้งนี้



รูปที่ 3.3 เหล็กกล้าที่ผ่านการขัดผิวเพื่อเตรียมเคลือบด้วยสารเคลือบผิว

ตารางที่ 3.2 อัตราส่วนที่ใช้ในการเคลือบผิวเหล็กกล้า (MSNs:TBT:IPA; 1:2:20)

อัตราส่วนโดยปริมาตรตัวอย่าง MSNs:TBT:IPA; 1:2:20

ตัวอย่าง	MSNs (g)	MeOH (ml)	Epoxy (ml)	ปริมาณที่ใช้ต่อหนึ่งแผ่นเหล็กกล้า (μL)
A	0.0127	1	0.5	1000
B	0.0127	1	1	1000
C	0.0127	1	2	1000

ตารางที่ 3.3 อัตราส่วนที่ใช้ในการเคลือบผิวเหล็กกล้า (MSNs:TBT:IPA; 1:3:20)

อัตราส่วนโดยปริมาตรตัวอย่าง MSNs:TBT:IPA; 1:3:20

ตัวอย่าง	MSNs (g)	MeOH (ml)	Epoxy (ml)	ปริมาณที่ใช้ต่อหนึ่งแผ่นเหล็กกล้า (μL)
A	0.0160	1	0.5	1000
B	0.0160	1	1	1000
C	0.0160	1	2	1000

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้ทำซ้ำหรือใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.4 อัตราส่วนที่ใช้ในการเคลือบผิวเหล็กกล้า (MSNs:TBT:IPA; 1:5:20)

อัตราส่วนโดยปริมาตรตัวอย่าง MSNs:TBT:IPA; 1:5:20

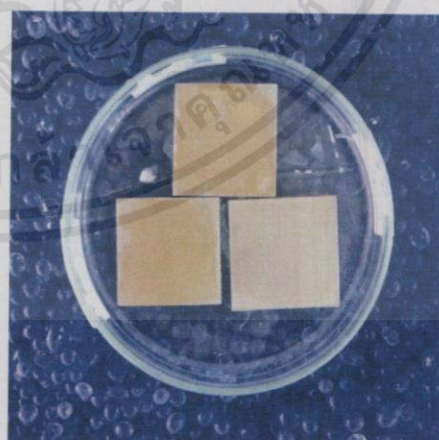
ตัวอย่าง	MSNs (g)	MeOH (ml)	Epoxy (ml)	ปริมาณที่ใช้ต่อหนึ่งแผ่นเหล็กกล้า (μl)
A	0.038	1	0.5	1000
B	0.038	1	1	1000
C	0.038	1	2	1000

ตอนที่ 4 การเคลือบผิวเหล็กกล้าด้วยสารเคลือบผิว

- 1) นำแผ่นเหล็กกล้าที่ผ่านการเตรียมผิววางลงบนแท่นของเครื่องปั่นเคลือบผิวเหล็ก (Spin coating)
- 2) หมุนแผ่นเหล็กกล้าด้วยความเร็วรอบ 600 RPM และหยดสารเคลือบผิวที่เตรียมได้ ลงบนเหล็กกล้าในปริมาตร 1000 ไมโครลิตรต่อเหล็กหนึ่งแผ่น
- 3) หมุนแผ่นเหล็กกล้าที่ผ่านการเคลือบผิวด้วยเป็นระยะเวลา 3-5 นาที
- 4) นำแผ่นเหล็กกล้าที่ผ่านการเคลือบผิวไปอบด้วยตู้อบที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 4 ชั่วโมง
- 5) เก็บแผ่นเหล็กกล้าที่ผ่านการเคลือบผิวและอบให้แห้งไว้ในภาชนะบรรจุสุญญากาศ เพื่อป้องกันความชื้น และนำไปวัดผลเพื่อวิเคราะห์ผลการทดลองในด้านต่างๆ ต่อไป



(ก)



(ข)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ **รูปที่ 3.4(ก)** เครื่องปั่นเคลือบผิวชิ้นงาน (Home-build spin coater) วัตถุประสงค์ให้ข้อมูลไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้าม **(ข)** เหล็กที่ผ่านการเคลือบผิวด้วยสารเคลือบผิว เอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4) การวิเคราะห์คุณสมบัติของอนุภาค

การวิเคราะห์คุณสมบัติและคุณลักษณะของอนุภาคที่สังเคราะห์ได้ โดยมีรายละเอียดของเครื่องมือวิเคราะห์สารดังต่อไปนี้

1) กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องผ่าน (Transmission electron microscope; TEM) [15]

วิเคราะห์โครงสร้างของอนุภาคผ่าน Transmission electron microscope (TEM) ซึ่งเป็นกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนที่ใช้ศึกษาตัวอย่างชนิดบาง ซึ่งเตรียมขึ้นโดยวิธีพิเศษเพื่อให้ลำอนุภาคอิเล็กตรอนผ่านทะลุได้ การสร้างภาพจากกล้องประเภทนี้ทำได้โดยการตรวจวัดอิเล็กตรอนที่ทะลุผ่านตัวอย่าง เครื่อง TEM เหมาะสำหรับศึกษารายละเอียดขององค์ประกอบภายในของตัวอย่าง เช่น องค์ประกอบภายในเซลล์ ลักษณะของเยื่อหุ้มเซลล์ ผนังเซลล์ เป็นต้น

2) กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด (Scanning electron microscope; SEM) [16]

วิเคราะห์โครงสร้างของอนุภาคและการกระจายตัวลงบนแผ่นเหล็กกล้าผ่าน Scanning electron microscope (SEM) ซึ่งเป็นกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนที่มีกำลังขยายไม่สูงเท่ากับเครื่อง TEM (เครื่อง SEM มีกำลังขยายสูงสุดประมาณ 10 นาโนเมตร) การเตรียมตัวอย่างเพื่อที่จะดูด้วยเครื่อง SEM จึงไม่จำเป็นต้องที่ตัวอย่างจะต้องมีขนาดบางเท่ากับเมื่อดูด้วยเครื่อง TEM (เพราะไม่ได้ตรวจวัดจากการที่อิเล็กตรอนเคลื่อนที่ทะลุผ่านตัวอย่าง) การสร้างภาพทำได้โดยการตรวจวัดอิเล็กตรอนที่สะท้อนจากพื้นผิวหน้าของตัวอย่างที่ทำการสำรวจ ซึ่งภาพที่ได้จากเครื่อง SEM นี้จะเป็นภาพลักษณะของ 3 มิติ ดังนั้นเครื่อง SEM จึงถูกนำมาใช้ในการศึกษาสัณฐานและรายละเอียดของลักษณะพื้นผิวของตัวอย่าง เช่น ลักษณะพื้นผิวด้านนอกของเนื้อเยื่อและเซลล์ หน้าที่ดของโลหะและวัสดุ เป็นต้น

ข้อดีของเครื่อง SEM เมื่อเปรียบเทียบกับเครื่อง TEM คือ ภาพโครงสร้างที่เห็นจากเครื่อง SEM จะเป็นภาพลักษณะ 3 มิติ ในขณะที่ภาพจากเครื่อง TEM จะให้ภาพลักษณะ 2 มิติ อีกทั้งวิธีการใช้งานเครื่อง SEM จะมีความรวดเร็วและใช้งานง่ายกว่าเครื่อง TEM มาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3) เครื่องวิเคราะห์ ตรวจสอบโครงสร้างของสารด้วยการดูดกลืนรังสีในช่วงอินฟราเรด (Fourier Transform Infrared Spectrometer; FT-IR) [17]

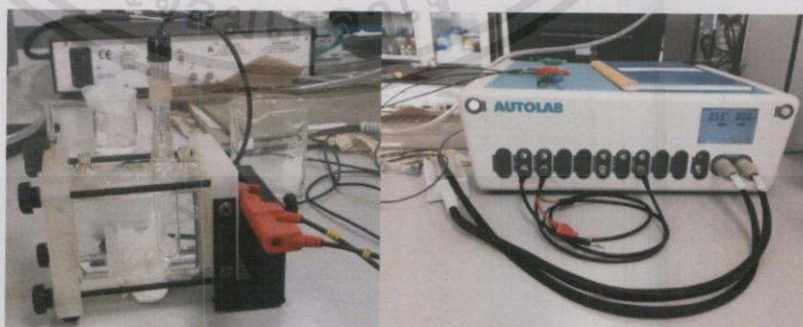
วิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของอนุภาคโดยการวัดการดูดกลืนรังสีที่อยู่ในช่วงอินฟราเรด ซึ่งสามารถวิเคราะห์ตัวอย่างได้ทั้ง ของแข็ง ของเหลว และก๊าซ ที่อยู่ในช่วงเลขคลื่น (Wave number) ประมาณ $12800 - 10 \text{ cm}^{-1}$ การใช้เครื่อง FT-IR spectrometer วิเคราะห์ตัวอย่าง ใช้เวลาน้อยและไม่สิ้นเปลืองสารเคมีจึงนิยมนำมาใช้เพื่อการตรวจสอบสารในเชิงคุณภาพหรือเพื่อยืนยันสูตรโครงสร้างของตัวอย่าง

4) เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (X-ray diffractometer; XRD) [18]

วิเคราะห์สมบัติของอนุภาค หาองค์ประกอบของตัวอย่าง โดยอาศัยหลักการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ สามารถทำการวิเคราะห์ได้ทั้งสารประกอบที่มีอยู่ในสารตัวอย่าง และนำมาใช้ศึกษารายละเอียดเกี่ยวกับโครงสร้างผลึกของสารตัวอย่างได้อีกด้วย ในผลึกของตัวอย่างแต่ละชนิด จะมีขนาดของ Unit cell ที่ไม่เท่ากัน ทำให้รูปแบบของการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ ที่ออกมาไม่เท่ากัน ทำให้เราสามารถหาความสัมพันธ์ของสารประกอบต่างๆ กับ Pattern การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ได้ ซึ่งจะช่วยให้ทราบว่า ในตัวอย่างนั้นๆ ประกอบไปด้วยสารประกอบใดบ้าง

5) เครื่องทดสอบการกัดกร่อน (Corrosion apparatus) [19]

วัดอัตราการกัดกร่อนบนแผ่นเหล็กกล้า โดยจำลองสภาวะการทดสอบที่ใกล้เคียงกับสภาวะจริงมากที่สุดกล่าวคือ ขนาดวัสดุ ปริมาณสาร ความเข้มข้น โดยอาศัยปฏิกิริยาทางไฟฟ้าเคมีที่เกิดขึ้นระหว่างผิวหน้าวัสดุกับสารละลายในสภาวะต่างๆ จากนั้นใช้กฎของฟาราเดย์ในการคำนวณหาอัตราการกัดกร่อนที่เกิดขึ้นกับวัสดุตัวอย่าง ซึ่งจะแสดงผลออกมาในรูปของอัตราการกัดกร่อนที่เกิดขึ้นบนเหล็กกล้าในหน่วยมิลลิเมตรต่อปี โดยรายละเอียดและสูตรการคำนวณจะแสดงในภาคผนวก



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับรูปที่ 3.5 เครื่องทดสอบการกัดกร่อน (Corrosion apparatus) โยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6) เครื่องทดสอบมุมสัมผัส (Contact angle equipment) [20]

ทดสอบมุมสัมผัสของของเหลวบนผิววัสดุ สามารถวัดค่า Static Contact Angle และค่า Dynamic Contact Angle ของตัวอย่างชิ้นงาน เช่น เซรามิก แก้ว กระดาษฟิล์ม ผ้า หรือผงตัวอย่าง



รูปที่ 3.6 เครื่องทดสอบมุมสัมผัส (Contact angle equipment)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

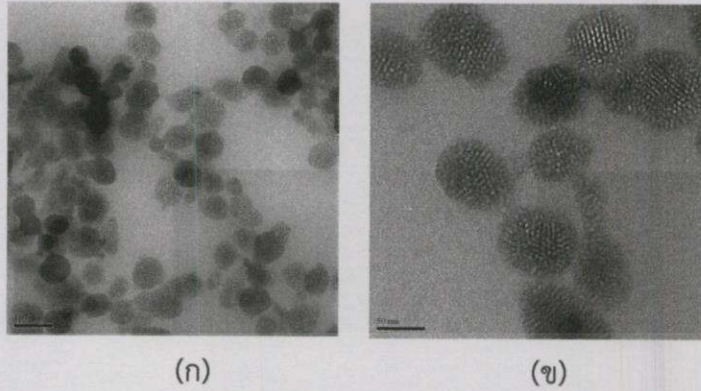
ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผล

ปริญญานิพนธ์นี้ศึกษาการสังเคราะห์อนุภาคประกอบระหว่างอนุภาคนาโนซิลิกาที่มีรูพรุนชนิดเมโซเข้ากับสารประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์เพื่อศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการสังเคราะห์สารเคลือบผิวเพื่อป้องกันการกัดกร่อนที่เกิดขึ้นบนเหล็กกล้า เริ่มจากศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาของอนุภาคโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน จากนั้นศึกษาหมู่ฟังก์ชันของอนุภาคโดยเทคนิคการวัดการดูดกลืนรังสีที่อยู่ในช่วงอินฟราเรด และวิเคราะห์องค์ประกอบของอนุภาคด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ จากนั้นนำอนุภาคประกอบที่เตรียมได้มาเคลือบลงบนเหล็กกล้าและนำไปทดสอบการกัดกร่อนโดยอาศัยปฏิกิริยาทางไฟฟ้าเคมี สุดท้ายนำมาทดสอบมุมสัมผัสของของเหลวบนผิววัสดุ เพื่อศึกษาคุณสมบัติความไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic) ของอนุภาคซิลิกาที่ปรับแต่งด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์

4.1 การศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาของอนุภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องผ่าน (Transmission electron microscopy; TEM)

การศึกษาลักษณะโครงสร้างทางสัณฐานวิทยาของอนุภาคนาโนซิลิกาทั้งก่อนและหลังปรับแต่ง คุณสมบัติด้วยสารประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์ผ่านกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องผ่าน (TEM) จะพบว่าอนุภาคนาโนซิลิกาที่ใช้ไตรเมทิลเบนซีนปริมาณ 0.712 มิลลิลิตร (ลักษณะทางสัณฐานวิทยาอัตราส่วนอื่นๆ ของไตร-เมทิลเบนซีนแสดงในภาคผนวก) ในการปรับขนาดของรูพรุนก่อนปรับแต่งคุณสมบัติด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์นั้นมีลักษณะดังรูปที่ 4.4 โดยพบว่าจุดสีขาวคือรูพรุนที่เกิดขึ้นจากนำสารกำหนดโครงสร้างออก ส่วนที่เป็นสีเทาเข้มคือส่วนของซิลิกา จากภาพ (TEM) พบว่าอนุภาคนาโนซิลิกามีขนาดประมาณ 50-80 นาโนเมตร และมีการเรียงตัวของรูพรุนแบบเฮกซะโกนอล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.1 (ก) รูป TEM ของอนุภาคนาโนซิลิกากำลังขยาย 25000 เท่า
สเกลบาร์ 100 นาโนเมตร

(ข) รูป TEM ของอนุภาคนาโนซิลิกากำลังขยาย 62000 เท่า
สเกลบาร์ 50 นาโนเมตร

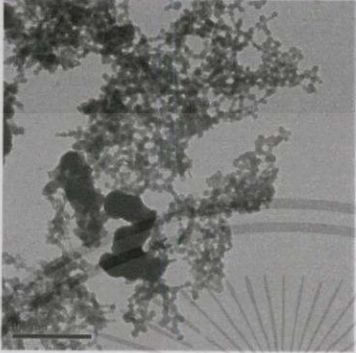
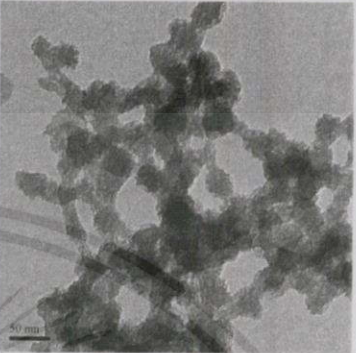
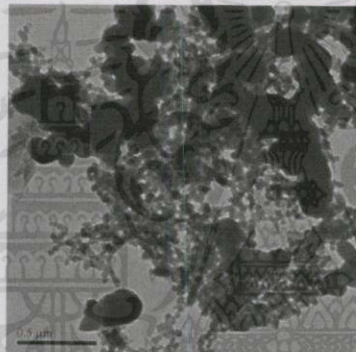

เมื่อนำอนุภาคนาโนซิลิกาที่ปรับขนาดรูพรุนด้วยไตรเมทิลเบนซีน (0.712 มิลลิลิตร) มาปรับแต่งคุณสมบัติด้วยสารประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์ พบว่าอนุภาคมีรูปร่างคล้ายกับก่อนปรับแต่งคุณสมบัติแต่จะไม่พบรูพรุนชัดเจน อาจเป็นผลจากการมีอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์เข้ามาเกาะบริเวณรูพรุนของอนุภาคนาโนซิลิกา รวมไปถึงบริเวณภายนอกของอนุภาค จึงทำให้ภาพที่ได้มีลักษณะเป็นสีเทาเข้มเนื่องจากการเกาะติดของอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์บนรูพรุนและพื้นผิวของอนุภาคซิลิกา ดังแสดงในตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของอนุภาคประกอบนาโนซิลิกาและไทเทเนียมไดออกไซด์ผ่านกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องผ่าน (TEM)

อัตราส่วน*	ลักษณะทางสัณฐานวิทยา**
1-2	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ภายในเท่านั้น ไม่ควรเผยแพร่ไปยังประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามทำซ้ำหรือดัดแปลงเอกสารนี้โดยไม่ได้รับอนุญาตให้นำไปใช้

ตารางที่ 4.1(ต่อ) ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของอนุภาคประกอบนาโนซิลิกาและไทเทเนียมไดออกไซด์ผ่านกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องผ่าน (TEM)

อัตราส่วน*	ลักษณะทางสัณฐานวิทยา**	
1-3		
1-5		

*อัตราส่วนเชิงปริมาตรระหว่างอนุภาคนาโนซิลิกาและสารประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์

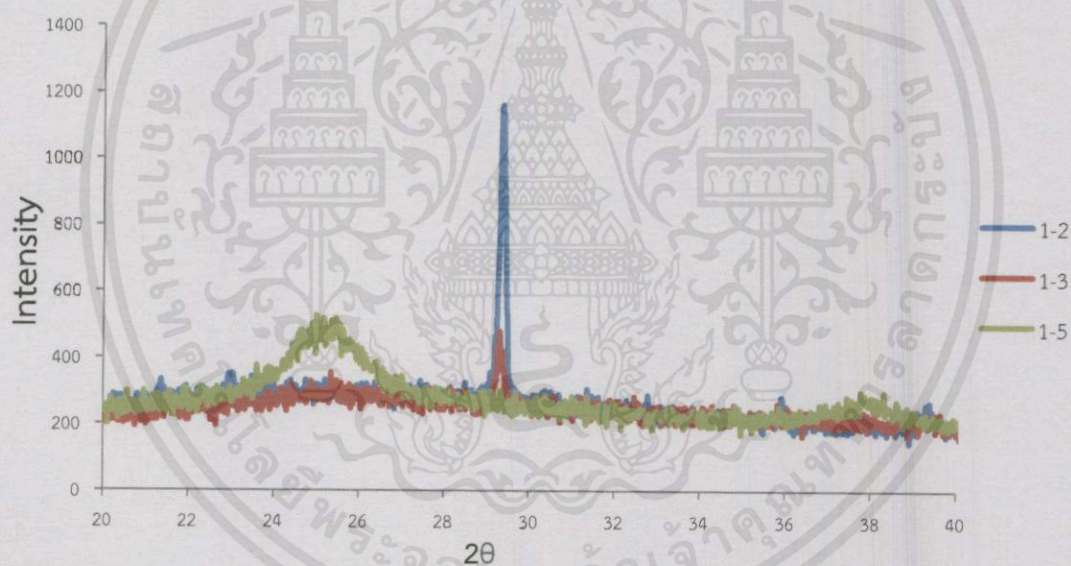
**ภาพถ่ายมือแสดงลักษณะทางสัณฐานวิทยาของอนุภาคนาโนซิลิกาที่มีรูพรุนชนิดเมโซหลังการปรับแต่งขนาดของรูพรุนด้วยไตรเมทิลเบนซีน และปรับแต่งคุณสมบัติด้วยสารประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์ด้วยกำลังขยาย 25000 เท่า สเกลบาร์ 0.5 ไมโครเมตร

ภาพขวามือแสดงลักษณะทางสัณฐานวิทยาของอนุภาคนาโนซิลิกาที่มีรูพรุนชนิดเมโซหลังการปรับแต่งขนาดของรูพรุนด้วยไตรเมทิลเบนซีน และปรับแต่งคุณสมบัติด้วยสารประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์ด้วยกำลังขยาย 50000 เท่า สเกลบาร์ 50 นาโนเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2 การศึกษาองค์ประกอบของอนุภาคโดยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-ray diffraction; XRD)

จากการศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องผ่าน (TEM) ของอนุภาคประกอบนาโนซิลิกาและไทเทเนียมไดออกไซด์จะพบว่า ลักษณะที่ได้มีลักษณะของอนุภาคคล้ายอนุภาคนาโนซิลิกา ก่อนการปรับแต่งคุณสมบัติด้วยสารประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์แต่จะไม่พบรูพรุนของอนุภาคที่ชัดเจน จึงเป็นข้อสันนิษฐานว่าเป็นผลจากการมีอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์เข้ามาเกาะบริเวณรูพรุนของอนุภาคนาโนซิลิกา รวมไปถึงบริเวณภายนอกของอนุภาค ดังแสดงในรูปจากตารางที่ 4.1 ดังนั้นการศึกษาองค์ประกอบของอนุภาคด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (XRD) สามารถช่วยยืนยันข้อสันนิษฐานดังกล่าวได้ โดยผลจากการนำอนุภาคประกอบนาโนซิลิกาและไทเทเนียมไดออกไซด์ไปศึกษาองค์ประกอบ พบว่า กราฟที่ได้แสดงผลในช่วงพีคใกล้เคียงกันในทั้งสามอัตราส่วนเชิงปริมาตรระหว่างอนุภาคนาโนซิลิกาและไทเทเนียมไดออกไซด์ โดยค่าพีคดังกล่าวเป็นค่าพีคในช่วงที่บ่งบอกถึงการมีองค์ประกอบของอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ ดังแสดงในรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 กราฟแสดงองค์ประกอบของไทเทเนียมไดออกไซด์ในอนุภาคประกอบนาโนซิลิกาและไทเทเนียมไดออกไซด์ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (XRD)

หมายเหตุ: เส้นกราฟ 1-2 หมายถึง อัตราส่วนเชิงปริมาตรของอนุภาคประกอบนาโนซิลิกาและ

ไทเทเนียมไดออกไซด์ 1:2

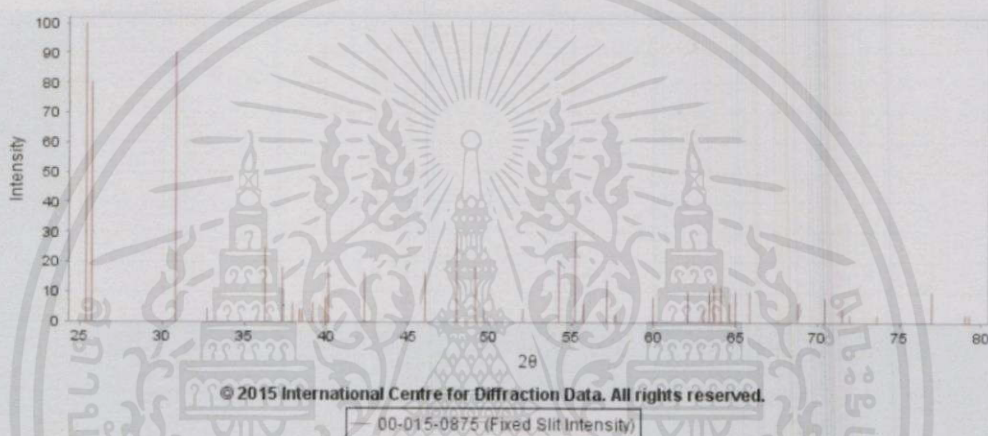
เส้นกราฟ 1-3 หมายถึง อัตราส่วนเชิงปริมาตรของอนุภาคประกอบนาโนซิลิกาและ

ไทเทเนียมไดออกไซด์ 1:3

เส้นกราฟ 1-5 หมายถึง อัตราส่วนเชิงปริมาตรของอนุภาคประกอบนาโนซิลิกาและ

ไทเทเนียมไดออกไซด์ 1:5

นำผลการทดลองที่อ่านได้จากกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า 2θ และ ค่า Intensity ของแต่ละอัตราส่วนเชิงปริมาตรของอนุภาคประกอบนาโนซิลิกาและไทเทเนียมไดออกไซด์ เปรียบเทียบกับค่าอ้างอิงของพีคช่วงที่เกิดไทเทเนียมไดออกไซด์ (รูปที่ 4.3) จะพบว่า ทั้งสามอัตราส่วนมีพีคที่เกิดขึ้นในช่วงที่ใกล้เคียงกับพีคอ้างอิงของอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ แต่พีคที่ได้จากการทดลองจะเกิดขึ้นเพียงพีคเดียวที่ช่วง 2θ เท่ากับ 20 – 40 องศา เนื่องจากอุณหภูมิที่ใช้ในการสังเคราะห์อนุภาคประกอบนาโนซิลิกาและไทเทเนียมไดออกไซด์ที่นำไปตรวจสอบองค์ประกอบนั้น เป็นอุณหภูมิห้อง (36 องศาเซลเซียส) ทำให้อนุภาคที่สังเคราะห์ได้ไม่มีลักษณะเป็นผลึก (Crystal) ค่าที่ได้จึงแตกต่างจากกราฟอ้างอิงซึ่งเป็นการวัดค่า Intensity ของไทเทเนียมไดออกไซด์ในรูปของผลึก



รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า 2θ และค่า Intensity ที่วัดได้จากเทคนิค XRD ของไทเทเนียมไดออกไซด์ในรูปของผลึก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

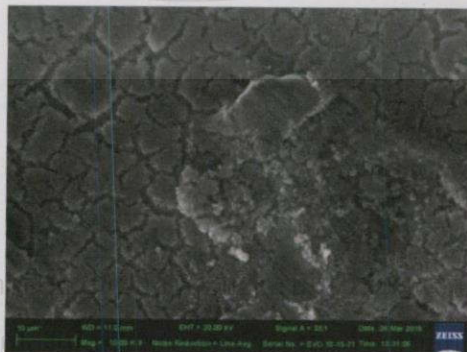
4.3 การศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาของอนุภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด (Scanning electron microscopy; SEM)

จากการศึกษาลักษณะโครงสร้างทางสัณฐานวิทยาของชั้นอนุภาคนาโนซิลิกาทั้งก่อนและหลังปรับแต่งคุณสมบัติด้วยสารประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เคลือบอยู่บนผิวเหล็กกล้าผ่านกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด (SEM) จากรูป 4.4(ค) เป็นรูป SEM ของชั้นอนุภาคที่เคลือบลงบนผิวเหล็กกล้าโดยตรง ไม่มีสารที่ช่วยในการประสานตัวของอนุภาค พบว่าอนุภาคนาโนซิลิกาที่มีรูพรุนชนิดเมโซก่อนปรับแต่งคุณสมบัตินั้นมีการกระจายตัวบนแผ่นเหล็กอย่างหนาแน่นแต่จะมีการแตกตัวของแผ่นฟิล์มของอนุภาคออกเป็นแผ่นๆ อย่างเห็นได้ชัด เนื่องจากไม่มีสารที่ช่วยในการประสานตัวกันของอนุภาคนาโนซิลิกา ต่อมาศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาของระบบสารเคลือบผิวที่ประกอบด้วยอนุภาคนาโนซิลิกาและอีพอกซีพบว่ามีการกระจายตัวของอนุภาคซิลิกาบนแผ่นเหล็กค่อนข้างดีและไม่มีมีการแตกตัวของอนุภาคแต่ความหนาแน่นของอนุภาคต่อแผ่นเหล็กมีไม่มากพอ ดังแสดงในรูปที่ 4.5(ก) และ (ข) ทั้งนี้อาจเนื่องจากอนุภาคนาโนซิลิกาที่นำมาใช้เตรียมเป็นสารเคลือบผิวเท่ากับความเข้มข้นของอนุภาคต่ออีพอกซี 0.01:1 (g/ml) ซึ่งเป็นความเข้มข้นที่ต่ำทำให้สังเกตเห็นความหนาแน่นของอนุภาคได้น้อย โดยกรอบสีแดงแสดงกลุ่มตัวอย่างอนุภาคนาโนซิลิกาที่มีการกระจายตัวบนผิวเหล็กกล้า



(ก)

(ข)



(ค)

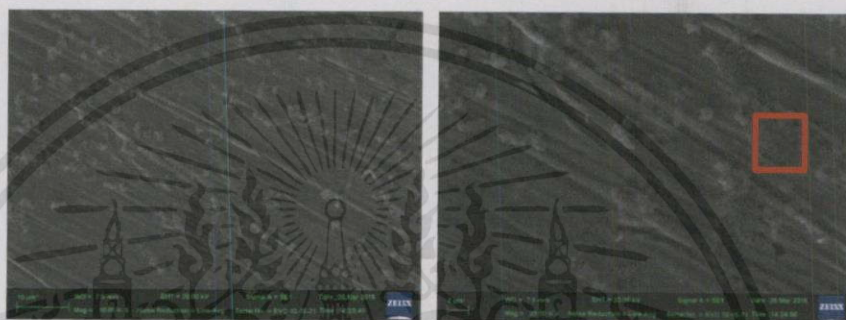
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับก
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัด

หน้าไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
การทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.4 (ก) รูป SEM ของเหล็กกล้าที่ไม่ผ่านการขัดผิวกำลังขยาย 10,000 เท่า สเกลบาร์ 10 ไมโครเมตร

(ข) รูป SEM ของเหล็กกล้าที่ผ่านการขัดผิวกำลังขยาย 10,000 เท่า สเกลบาร์ 10 ไมโครเมตร

(ค) รูป SEM ของเหล็กกล้าที่เคลือบด้วยอนุภาคนาโนซิลิกากำลังขยาย 10,000 เท่า สเกลบาร์ 10 ไมโครเมตร



(ก)

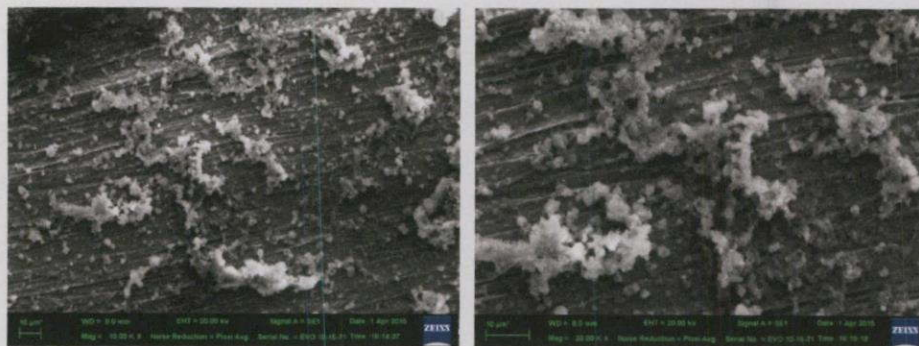
(ข)

รูปที่ 4.5 (ก) รูป SEM ของเหล็กกล้าเคลือบด้วยอนุภาคนาโนซิลิกาต่ออีพอกซี 0.01:1 (g/ml) กำลังขยาย 10,000 เท่า สเกลบาร์ 10 ไมโครเมตร

(ข) รูป SEM ของเหล็กกล้าเคลือบด้วยอนุภาคนาโนซิลิกาต่ออีพอกซี 0.01:1 (g/ml) กำลังขยาย 20,000 เท่า สเกลบาร์ 2 ไมโครเมตร

จากนั้นศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาของอนุภาคที่ปรับแต่งคุณสมบัติด้วยสารประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์ในอัตราส่วนเชิงปริมาตร 1:2 ที่ความเข้มข้นของอนุภาคสูงสุดในการทดลองพบว่าอนุภาคมีการเกาะตัวกันเป็นกลุ่มก้อน การกระจายตัวของอนุภาคค่อนข้างน้อย ดังแสดงในรูปที่ 4.6(ก) และ (ข) ทั้งนี้เนื่องมาจากอนุภาคที่ได้มาจากการทำปฏิกิริยาระหว่างอนุภาคนาโนซิลิกาและสารประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์มีลักษณะค่อนข้างชั้นและเหนียวทำให้การกระจายตัวบนชั้นเคลือบผิวเป็นไปได้ยาก ส่วนอนุภาคประกอบนาโนซิลิกาและไทเทเนียมไดออกไซด์ที่อัตราส่วนเชิงปริมาตรอื่นๆ นั้น มีลักษณะเป็นสีดำเข้มคล้ายรอยไหม้ ซึ่งจะแสดงในภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก)

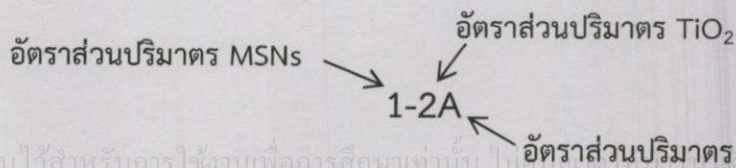
(ข)

รูปที่ 4.6 (ก) รูป SEM ของเหล็กกล้าเคลือบด้วยอนุภาคประกอบนาโนซิลิกาและไทเทเนียม ไดออกไซด์อัตราส่วนเชิงปริมาตร 1:2 กำลังขยาย 10,000 เท่า สเกลบาร์ 10 ไมโครเมตร

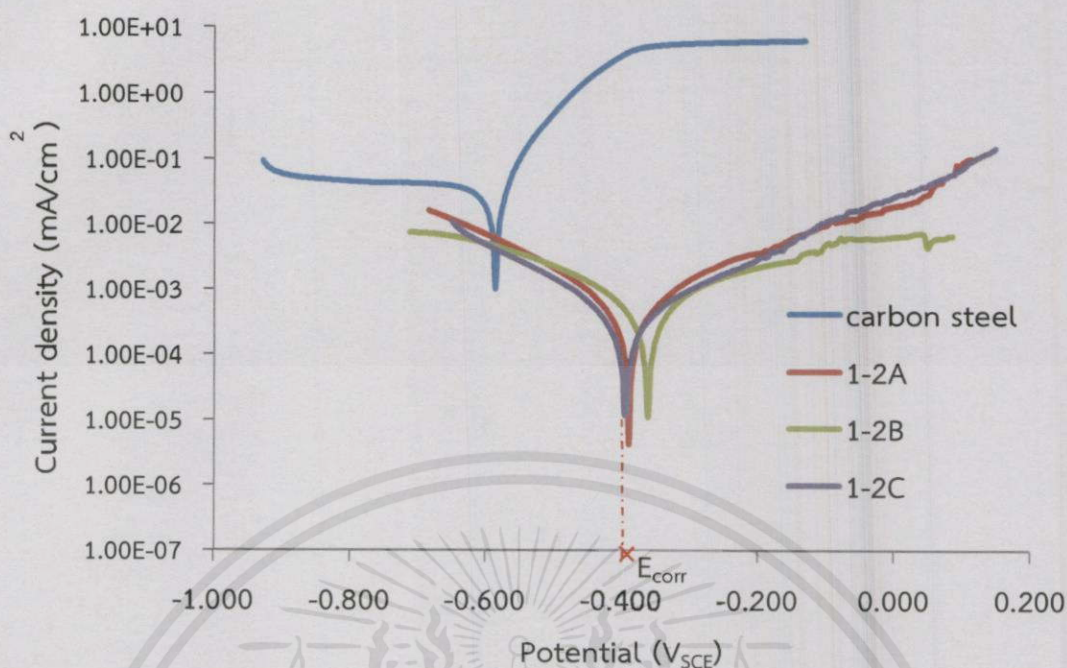
(ข) รูป SEM ของเหล็กกล้าเคลือบด้วยอนุภาคประกอบนาโนซิลิกาและไทเทเนียม ไดออกไซด์อัตราส่วนเชิงปริมาตร 1:2 กำลังขยาย 20,000 เท่า สเกลบาร์ 10 ไมโครเมตร

4.4 การศึกษาผลของอัตราส่วนเชิงปริมาตรของอนุภาคนาโนซิลิกาต่อไทเทเนียมไดออกไซด์ ที่มีผลต่ออัตราการกัดกร่อน (Corrosion measurement)

การศึกษาการกัดกร่อนที่เกิดขึ้นบนเหล็กกล้าทั้งก่อนและหลังการเคลือบผิวด้วยสารเคลือบผิว จะแสดงผลในรูปของกราฟระหว่างความต่างศักย์ที่จ่ายให้ชิ้นงานเทียบกับกระแสที่เกิดขึ้นจากนั้นนำค่ากระแสการกัดกร่อนที่ได้จากการสร้างจุดตัดบนกราฟ (i_{corr}) โดยวิธี Tafel slope มาคำนวณหาอัตราการกัดกร่อนที่เกิดขึ้นบนแผ่นเหล็กในหน่วยมิลลิเมตรต่อปี (ตัวอย่างการคำนวณแสดงในภาคผนวก) โดยสารละลายที่ใช้ในการทดสอบอัตราการกัดกร่อนในทุกอัตราส่วนของสารเคลือบผิวคือ สารละลายน้ำเกลือความเข้มข้น 1% โดยมวล กำหนดให้ตัวอักษร A B และ C แทนความเข้มข้นของอนุภาคสารประกอบนาโนซิลิกาและไทเทเนียม ไดออกไซด์ในอัตราส่วนเชิงปริมาตร 1:2 โดยเรียงลำดับจากความเข้มข้นของอนุภาคสูงไปหาต่ำตามลำดับ ตัวอักษร (อัตราส่วนของความเข้มข้นแสดงในตารางที่ 3.1 ถึง 3.4)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่สามารถนำเอกสารนี้ไปทำซ้ำหรือเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต
 ไม่ว่ากรณีใดๆ รูปที่ 4.7 แสดงค่าความต่างศักย์เทียบกับกระแสที่เกิดขึ้นของชิ้นงานที่ผ่านการเคลือบผิวด้วยสารเคลือบผิวด้วยสารเคลือบผิวที่มีอัตราส่วนเชิงปริมาตรของอนุภาคนาโนซิลิกาต่อไทเทเนียมไดออกไซด์เป็น 1:2 (1:2; MSNs:TBT) เปรียบเทียบกับเหล็กกล้าที่ไม่ผ่านการเคลือบผิว



รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์และกระแสที่เกิดขึ้นบนเหล็ก ที่ผ่านการเคลือบผิวด้วยสารเคลือบผิวอัตราส่วนเชิงปริมาตร MSNs:TiO₂ 1:2

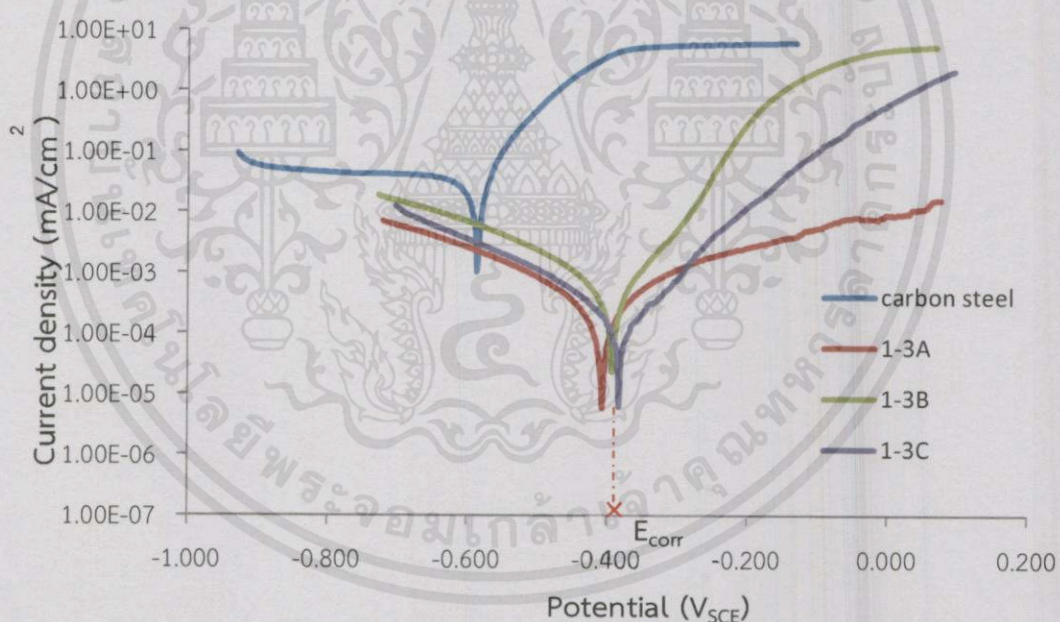
จากกราฟจะมีการจ่ายความต่างศักย์ให้กับชิ้นงานที่ผ่านการเคลือบผิว เริ่มจากด้านซ้ายของ แกน X ไป จนถึงจุดที่เริ่มเกิดการกัดกร่อน (E_{corr}) เมื่อถึงจุดนี้ค่ากระแสที่เกิดในแกน Y จะมีค่าสูงขึ้น เนื่องจากมีการกัดกร่อนเกิดขึ้น โดยค่ากระแสในแกน Y นั้นสามารถเทียบได้กับจำนวนอิเล็กตรอน ที่มีอยู่ในสารละลายน้ำเกลือซึ่ง สัมผัสกับผิวหน้าเหล็กกล้าที่ผ่านการเคลือบ กล่าวคือ เมื่อเหล็กถูกกัด กร่อนจะปลดปล่อยอิเล็กตรอนออกสู่อิเล็กโทรด สารละลายน้ำเกลือที่สัมผัสอยู่กับผิวหน้าเหล็ก ทำให้จำนวน อิเล็กตรอนที่มีอยู่ในสารละลายน้ำเกลือสูงขึ้น ส่งผลให้กระแสที่วัดได้จากสารละลายน้ำเกลือสูงขึ้น เช่นกัน ดังนั้นหากกราฟที่จุด E_{corr} มีค่ากระแสที่วัดได้สูงหมายความว่า เกิดอัตราการกัดกร่อนขึ้นมาก จากนั้นนำมาหาจุดตัดกราฟด้วยวิธีของ Tafel slope เพื่อหาค่ากระแสการกัดกร่อน (i_{corr}) เพื่อนำไป คำนวณหาอัตราการกัดกร่อนที่เกิดขึ้นในหน่วยมิลลิเมตรต่อปีในแต่ละตัวอย่างชิ้นงาน (ตัวอย่างการ คำนวณแสดงในภาคผนวก)

จากรูปที่ 4.7 สามารถนำมาคำนวณหาอัตราการกัดกร่อนที่เกิดขึ้นได้ โดยจะพบว่าที่ความ เข้มข้นต่ำสุดของอัตราส่วนระหว่างสารประกอบนาโนซิลิกาและไทเทเนียมไดออกไซด์ 1:2C ให้ค่า อัตราการกัดกร่อนต่ำสุดเมื่อเทียบกับเหล็กกล้าที่ไม่ผ่านการเคลือบ และยังให้ผลที่ดีกว่าเมื่อเทียบกับ ความเข้มข้นอื่นๆ ที่อัตราส่วนเดียวกัน (ค่าอัตราการกัดกร่อนน้อยที่สุด) โดยค่าอัตราการกัดกร่อนที่ คำนวณได้มีค่าเท่ากับ 0.003259 ซึ่งคิดเป็นประสิทธิภาพการหน่วงกัดกร่อน (Inhibition Efficiency; %IE) สูงถึง 88.1% เมื่อเทียบกับเหล็กกล้าที่ไม่ผ่านการเคลือบผิว ส่วนอัตราการกัดกร่อนที่ความ เข้มข้นอื่นๆ แสดงในตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 อัตราการกัดกร่อนบนเหล็กกล้าที่ผ่านการเคลือบผิวด้วยสารเคลือบผิวที่มีอัตราส่วนเชิงปริมาตรของอนุภาคนาโนซิลิกาและไทเทเนียมไดออกไซด์ 1:2

ตัวอย่าง	E_{Corr} (V)	i_{Corr} (mA/cm ²)	อัตราการกัดกร่อน (mm/yr)
Carbon steel	-0.5868	2.40×10^{-5}	0.2789400
1-2A	-0.3901	3.43×10^{-7}	0.0039851
1-2B	-0.3629	4.02×10^{-7}	0.0046747
1-2C	-0.3956	2.86×10^{-7}	0.0033259

จากนั้นทำการทดลองเช่นเดิมในอัตราส่วนระหว่างอนุภาคนาโนซิลิกาและไทเทเนียมไดออกไซด์ 1:3 และ 1:5 โดยกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์และกระแสที่วัดได้ของอัตราส่วนระหว่างอนุภาคนาโนซิลิกาและไทเทเนียมไดออกไซด์ 1:3 และ 1:5 แสดงในรูปที่ 4.8 และ 4.9 ตามลำดับ



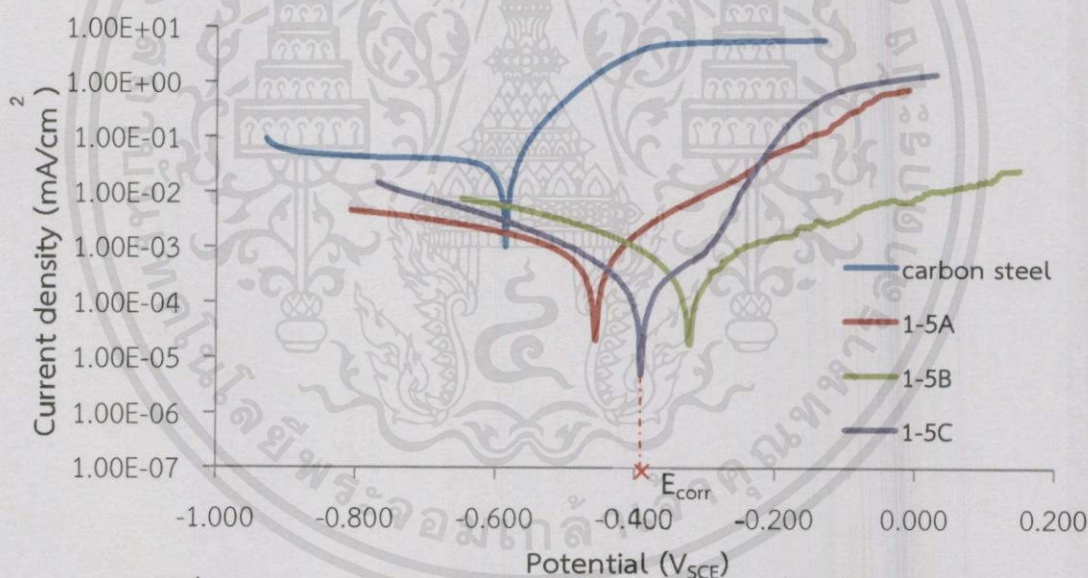
รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์และกระแสที่เกิดขึ้นบนเหล็กที่ผ่านการเคลือบผิวด้วยสารเคลือบผิวอัตราส่วนเชิงปริมาตร MSNs:TiO₂ 1:3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.3 อัตราการกัดกร่อนบนเหล็กกล้าที่ผ่านการเคลือบผิวด้วยสารเคลือบผิวที่มีอัตราส่วนเชิงปริมาตรของอนุภาคนาโนซิลิกาและไทเทเนียมไดออกไซด์ 1:3

ตัวอย่าง	E_{Corr} (V)	i_{Corr} (mA/cm ²)	อัตราการกัดกร่อน (mm/yr)
Carbon steel	-0.58682	2.40×10^{-5}	0.2789400
1-3A	-0.40854	1.81×10^{-7}	0.0021089
1-3B	-0.39347	4.35×10^{-7}	0.0050506
1-3C	-0.38458	1.33×10^{-7}	0.0015456

ผลการวัดอัตราการกัดกร่อนบนเหล็กกล้าที่ผ่านการเคลือบผิวด้วยสารเคลือบผิวที่มีอัตราส่วนระหว่างอนุภาคนาโนซิลิกาและไทเทเนียมไดออกไซด์ 1:3 มีแนวโน้มเช่นเดียวกับอัตราส่วน 1:2 คือ ที่ความเข้มข้นของอนุภาคต่ำสุดจะให้ค่าอัตราการกัดกร่อนที่ต่ำที่สุดถึง 0.0015456 มิลลิเมตรต่อปี



รูปที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์และกระแสที่เกิดขึ้นบนเหล็กที่ผ่านการเคลือบผิวด้วยสารเคลือบผิวอัตราส่วนเชิงปริมาตร MSNs:TiO₂ 1:5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

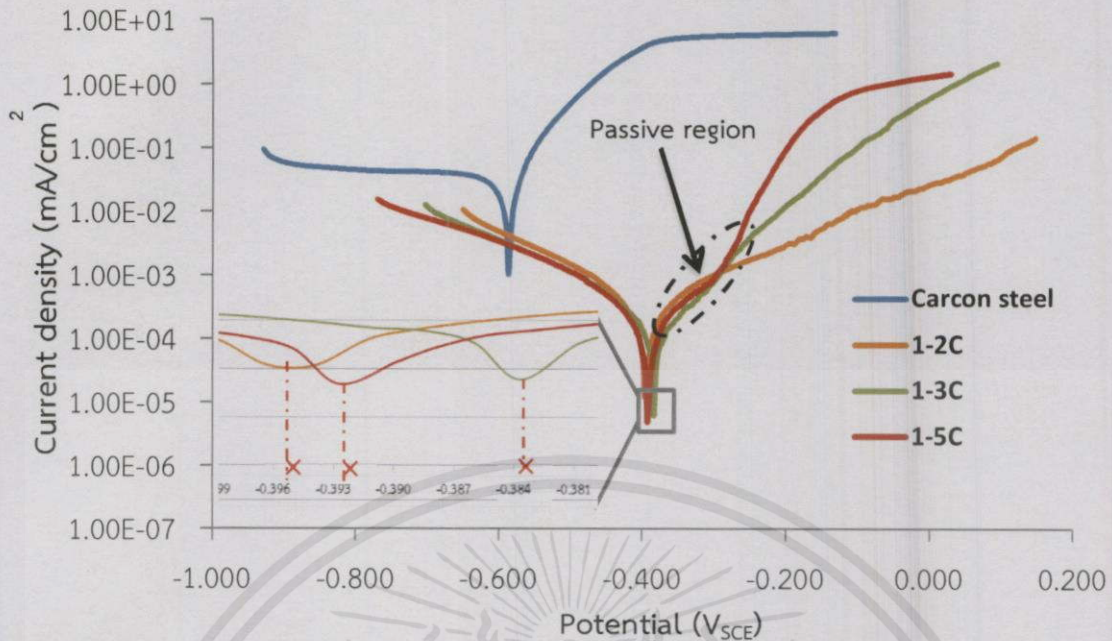
ตารางที่ 4.4 อัตราการกัดกร่อนบนเหล็กกล้าที่ผ่านการเคลือบผิวด้วยสารเคลือบผิวที่มีอัตราส่วนเชิงปริมาตรของอนุภาคนาโนซิลิกาและไทเทเนียมไดออกไซด์ 1:5

ตัวอย่าง	E_{Corr} (V)	i_{Corr} (mA/cm ²)	อัตราการกัดกร่อน (mm/yr)
Carbon steel	-0.58682	2.40×10^{-5}	0.2789400
1-5A	-0.45819	5.66×10^{-7}	0.0065761
1-5B	-0.32405	2.62×10^{-7}	0.0030431
1-5C	-0.39261	1.84×10^{-7}	0.0021332

ผลการวัดอัตราการกัดกร่อนบนเหล็กกล้าที่ผ่านการเคลือบผิวด้วยสารเคลือบผิวที่มีอัตราส่วนเชิงปริมาตรของอนุภาคนาโนซิลิกาและไทเทเนียมไดออกไซด์ 1:5 มีแนวโน้มเช่นเดียวกับอัตราส่วน 1:2 และ 1:3 คือ ที่ความเข้มข้นของอนุภาคต่ำสุดจะให้ค่าอัตราการกัดกร่อนที่ต่ำที่สุดถึง 0.0021332 มิลลิเมตรต่อปี

จากการทดลองทั้งสามอัตราส่วนเชิงปริมาตรของอนุภาคนาโนซิลิกาและไทเทเนียมไดออกไซด์ คือ 1:2 1:3 และ 1:5 พบว่าผลการทดลองที่ได้มีแนวโน้มไปในทางเดียวกัน คือ ที่ความเข้มข้นต่ำสุดของทั้งสามอัตราส่วนให้ผลการวัดอัตราการกัดกร่อนดีที่สุดเมื่อเทียบกับความเข้มข้นอื่นๆ ที่อัตราส่วนเดียวกัน โดยที่อัตราส่วน 1:3C ให้ค่าอัตราการกัดกร่อนต่ำถึง 0.0015456 มิลลิเมตรต่อปี คิดเป็นประสิทธิภาพการหน่วงกัดกร่อนที่เปลี่ยนไปสูงถึง 99.45% ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากสารเคลือบผิวอนุภาคประกอบนาโนซิลิกาและ ไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีความเข้มข้นสูงสุดในการทดลอง เมื่อนำมาศึกษาผลทางสัณฐานวิทยาผ่านกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด (SEM) พบว่ามีลักษณะของอนุภาคไม่กระจายตัว จับตัวกันเป็นกลุ่มก้อน ดังแสดงในรูปที่ 4.6(ข) โดยมีสาเหตุมาจากสารประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์เมื่อนำมาสังเคราะห์ร่วมกับอนุภาคนาโนซิลิกาจะมีลักษณะทางกายภาพที่เหนียวและข้น ทำให้เมื่อนำสารเคลือบผิวอนุภาคนาโนซิลิกาและไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีความเข้มข้นสูงมาเคลือบลงบนผิวเหล็กส่งผลให้เกิดการจับตัวเป็นกลุ่มของอนุภาค มีการกระจายตัวที่ไม่ดี ส่งผลให้ไม่สามารถกระจายอนุภาคไปลงบนแผ่นเหล็กได้อย่างทั่วถึง ทำให้ชั้นฟิล์มบางที่เคลือบนั้นถูกกัดกร่อนได้ง่ายกว่าสารเคลือบผิวอนุภาคนาโนซิลิกาและไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีความเข้มข้นต่ำซึ่งมีการกระจายตัวของอนุภาคดีกว่า

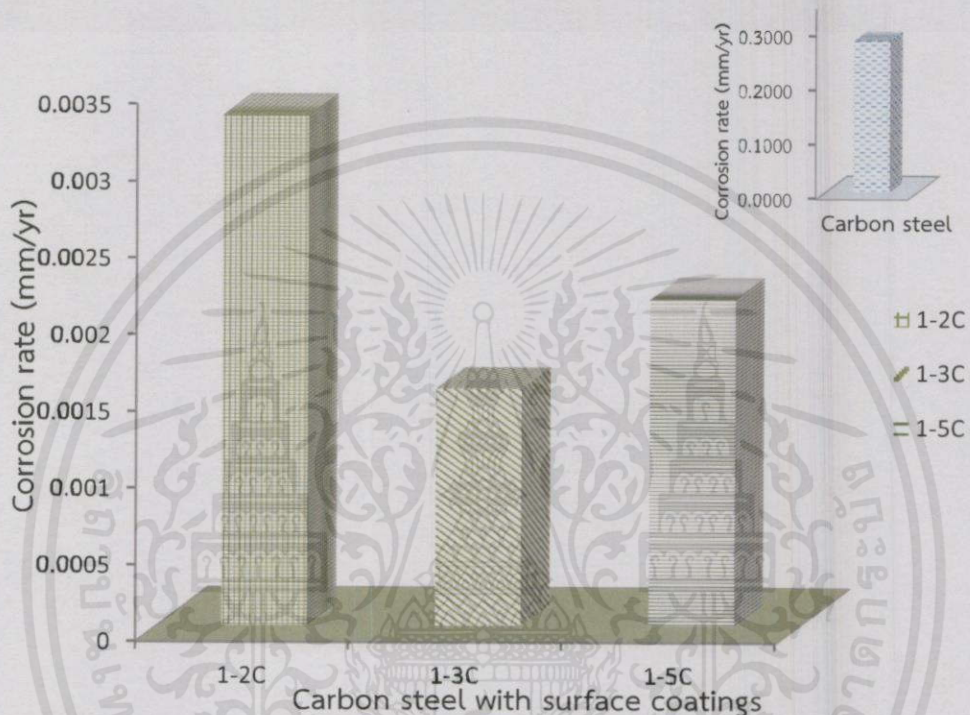
เมื่อนำผลการวัดอัตราการกัดกร่อนที่ให้ผลดีที่สุดในทุกอัตราส่วนเชิงปริมาตรของอนุภาคนาโนซิลิกาและไทเทเนียมไดออกไซด์ คือ 1:2C 1:3C และ 1:5C มาวิเคราะห์หาผลการวัดอัตราการกัดกร่อนที่ดีที่สุดในการทดลอง โดยกราฟความสัมพันธ์ระหว่างศักย์ไฟฟ้าที่ป้อนให้กับชิ้นงานและการกัดกร่อนที่วัดได้ของทั้งสามอัตราส่วนแสดงดังรูปที่ 4.10 อย่างไรก็ตามเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์และกระแสที่เกิดขึ้นบนเหล็กที่ผ่านการเคลือบผิวด้วยสารเคลือบผิวอนุภาคประกอบนาโนซิลิกาและไทเทเนียมไดออกไซด์

จากรูปที่ 4.10 จะพบว่าค่า E_{corr} (จุดตัดสีแดงบนแกน X) ที่แสดงถึงจุดเริ่มต้นเกิดการกัดกร่อนบนแผ่นเหล็กที่ผ่านการเคลือบผิวมีค่าแตกต่างกันน้อยมากในทั้งสามอัตราส่วน ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากสภาวะในการเคลือบของตัวอย่างชิ้นงานทั้งสาม คือ ความเร็วรอบ ระยะเวลาในการหมุน รวมไปถึงปริมาณสารเคลือบผิวที่ใช้ เป็นสภาวะเดียวกันส่งผลให้การกระจายตัวของอนุภาคนาโนซิลิกาและไทเทเนียมไดออกไซด์ที่อยู่ในสารเคลือบผิวมีการกระจายตัวของอนุภาคใกล้เคียงกันในลักษณะเป็นชั้นฟิล์มบาง ส่งผลให้ค่า E_{corr} ที่ได้ใกล้เคียงกัน นอกจากนี้ค่ากระแสที่วัดได้จากชิ้นงานทั้งสามก็มีค่าใกล้เคียงกัน ซึ่งอาจจะมีสาเหตุมาจากสภาวะที่ใช้เคลือบเป็นสภาวะเดียวกันเช่นกัน แต่เมื่อนำค่ากระแสการกัดกร่อนที่ได้ (i_{corr}) มาคำนวณหาอัตราการกัดกร่อนที่เกิดขึ้นบนชิ้นงาน พบว่าที่อัตราส่วนเชิงปริมาตรของอนุภาคนาโนซิลิกาและไทเทเนียมไดออกไซด์ 1:3 ให้ค่าอัตราการกัดกร่อนที่ต่ำที่สุด เพราะจากรูปที่ 4.10 สามารถสังเกตเห็นช่วงสั้นๆ ของ passive region ที่อัตราส่วนสารเคลือบผิว 1:3C และ 1:5C ที่เกิดขึ้นทางฝั่งแอนโนดิกของกราฟ กล่าวคือ เมื่อเหล็กกล้าถูกกัดกร่อนผ่านชั้นเคลือบเข้าไปแล้วนั้น เหล็กกล้าที่ผ่านการเคลือบผิวด้วยสารเคลือบผิวสองอัตราส่วนดังกล่าว จะแสดงให้เห็นชั้นฟิล์มบางภายในชิ้นงาน (passive film) ที่ถูกกัดกร่อนไปแล้วทำให้เนื้อเหล็กกล้าเกิดการกัดกร่อนได้ยากขึ้นแต่เนื่องจากความชันของกราฟอัตราส่วนสารเคลือบผิว 1:3C เพิ่มขึ้นน้อยกว่าอัตราส่วนสารเคลือบผิว 1:5C ณ ความต่างศักย์เดียวกัน ส่งผลให้ค่า i_{corr} ที่จะนำมาใช้คำนวณหาอัตราการกัดกร่อนมีค่าต่ำกว่า ทำให้อัตราการกัดกร่อนที่คำนวณได้จากอัตราส่วนสารเคลือบผิว 1:3C การคำนวณค่าต่ำกว่า ซึ่งส่งผลดีต่อการป้องกันการกัดกร่อน ส่วนที่อัตราส่วน 1:2C นั้นจะพบว่าไม่เกิด passive region ทางฝั่งของแอนโนดิกกราฟ ทั้งนี้อาจมีสาเหตุมาจากปริมาณของสารประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์น้อยเกินไป ดังนั้นจากผลการทดลองสามารถบอกได้ว่าปริมาณของไทเทเนียม

ไดออกไซด์มีผลต่อการเกิด passive film ภายในเหล็กกล้า นอกจากนี้จากรูปที่ 4.10 แสดงให้เห็นว่า เมื่อกราฟผ่านจุด E_{corr} ความชันของกราฟจะเพิ่มขึ้น ซึ่งแสดงถึงการกัดกร่อนที่เกิดขึ้นในเนื้อเหล็กผ่านชั้นสารเคลือบ โดยรูปที่ 4.11 แสดงผลการเปรียบเทียบอัตราการกัดกร่อนที่เกิดขึ้นในหน่วยมิลลิเมตรต่อปีที่ความเข้มข้นต่ำสุดของทั้งสามอัตราส่วนเทียบกับอัตราการกัดกร่อนที่เกิดขึ้นกับเหล็กกล้าที่ไม่ผ่านการเคลือบผิว



รูปที่ 4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการกัดกร่อนในหน่วยมิลลิเมตรต่อปีบนเหล็กกล้าที่ผ่านการเคลือบผิวด้วยสารเคลือบผิวอัตราส่วนต่างๆ

จากรูปที่ 4.11 พบว่าที่ความเข้มข้นต่ำสุดในการทดลองของอัตราส่วนเชิงปริมาตรของอนุภาคนาโนซิลิกาและไทเทเนียมไดออกไซด์ 1:3 ให้ค่าอัตราการกัดกร่อนที่ต่ำที่สุดถึง 0.0015456 มิลลิเมตรต่อปี นอกจากนี้เมื่อนำค่าอัตราการกัดกร่อนของเหล็กกล้าที่ผ่านเคลือบผิวด้วยสารเคลือบผิวที่อัตราส่วนเชิงปริมาตรของอนุภาคนาโนซิลิกาและไทเทเนียมไดออกไซด์ต่างๆ มาเปรียบเทียบกับเหล็กกล้าที่ไม่ผ่านการเคลือบผิว (Carbon steel) ยังพบว่ามีค่าอัตราการกัดกร่อนต่ำกว่าเหล็กกล้าที่ไม่ผ่านการเคลือบผิวมากอย่างมีนัยสำคัญ โดยหากนำมาคิดเป็นประสิทธิภาพการหน่วงกัดกร่อน (Inhibition Efficiency; %IE) จะพบว่า เหล็กกล้าที่ผ่านการเคลือบผิวโดยสารเคลือบผิวนั้นมีประสิทธิภาพการหน่วงกัดกร่อน (Inhibition Efficiency; %IE) ดีกว่าเหล็กที่ไม่ผ่านการเคลือบผิวมากกว่า 90%

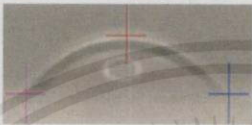






ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.5 การศึกษาคุณสมบัติความไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic) ของชั้นเคลือบผิวด้วยเทคนิคการวัดมุมสัมผัสของของเหลวบนผิววัสดุ (Contact angle measurement)

การศึกษาคุณสมบัติความไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic) ของชั้นเคลือบอนุภาคประกอบนาโนซิลิกาและไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นองค์ประกอบทำได้โดยการวัดมุมสัมผัสระหว่างผิวหน้าชิ้นงานที่ผ่านการเคลือบผิวด้วยความเข้มข้นอัตราส่วนเชิงปริมาตรของอนุภาคนาโนซิลิกาและไทเทเนียมไดออกไซด์ทั้งสามอัตราส่วน ซึ่งจะแสดงผลออกมาในรูปของมุมสัมผัสหน่วยเป็นองศา โดยจะต้องเตรียมผิวชิ้นงานที่เรียบสนิทเพื่อป้องกันการไหลของหยดน้ำ นอกจากนี้เมื่อหยดน้ำลงบนชิ้นงานควรวัดค่ามุมสัมผัสระหว่างหยดน้ำและผิวหน้าชิ้นงานทันทีเพื่อป้องกันการกระจายตัวของหยดน้ำซึ่งจะทำให้มุมสัมผัสที่วัดได้มีค่าคลาดเคลื่อนไปจากที่ควรจะเป็น ดังนั้นการเตรียมผิวเหล็กกล้าให้เรียบสนิทเพื่อป้องกันการไหลของหยดน้ำจึงเป็นการยาก ในการทดลองจึงเลือกใช้แผ่นกระจกแบบบาง (glass slide) ที่มีความเรียบของผิวหน้ามากกว่าเป็นชิ้นงานที่นำมาเคลือบผิวด้วยสารเคลือบผิวที่มีอัตราส่วนเชิงปริมาตรของอนุภาคนาโนซิลิกาและไทเทเนียมไดออกไซด์ 1:2 1:3 และ 1:5 ตามลำดับ นอกจากนี้ได้ทำการวัดมุมสัมผัสของเหล็กกล้าและแผ่นกระจกแบบบางก่อนเคลือบด้วยสารเคลือบผิวเพื่อเปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างมุมสัมผัสที่เกิดขึ้น ซึ่งภาพหยดน้ำที่ถ่ายได้จากการวัดมุมสัมผัสกับผิวหน้าชิ้นงานที่ผ่านการเคลือบผิวนั้นมีความไม่ชัดเจนอยู่บ้าง เนื่องจากเมื่อหยดน้ำลงบนชิ้นงานแล้วจำเป็นต้องกดวัดมุมสัมผัสทันทีก่อนการปรับโฟกัสภาพให้ชัดเจนเพื่อป้องกันการกระจายตัวของหยดน้ำ

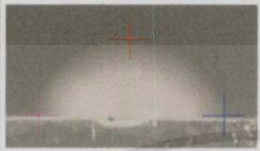



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.5 ผลการเปรียบเทียบระหว่างชิ้นงานที่ไม่ได้ผ่านการเคลือบผิวและชิ้นงานที่ผ่านการเคลือบด้วยสารเคลือบผิวอัตราส่วนเชิงปริมาตรของอนุภาคนาโนซิลิกาและไทเทเนียมไดออกไซด์ 1:2 1:3 และ 1:5

ตัวอย่างชิ้นงาน	ตัวอย่างภาพถ่าย	มุมสัมผัสเฉลี่ย (องศา)	%Change (treated-untreated)
เหล็กกล้าที่ผ่านการขัดผิว (Carbon steel)		43.235	-
สารเคลือบผิว pure-MSNs		50.54	15.45%
สารเคลือบผิว อัตราส่วน 1-2A		68.66	37.03%
สารเคลือบผิว อัตราส่วน 1-2B		73.50	41.18%
สารเคลือบผิว อัตราส่วน 1-2C		72.238	40.15%
สารเคลือบผิว อัตราส่วน 1-3A		62.53	30.86%
สารเคลือบผิว อัตราส่วน 1-3B		76.93	45.10%

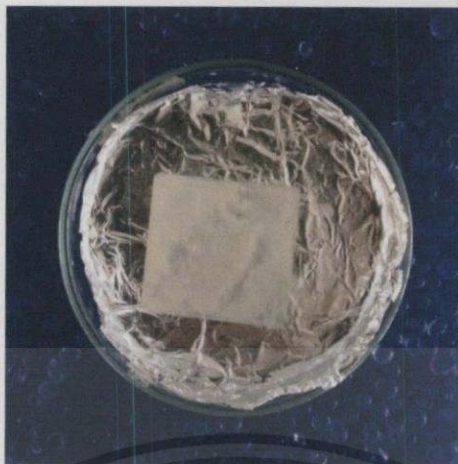
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ หากมีข้อผิดพลาดประการใดขออภัยเป็นอย่างสูงถึงเจ้าของเอกสารผู้เกี่ยวข้องที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.5(ต่อ) ผลการเปรียบเทียบระหว่างชิ้นงานที่ไม่ได้ผ่านการเคลือบผิวและชิ้นงานที่ผ่านการเคลือบด้วยสารเคลือบผิวอัตราส่วนเชิงปริมาตรของอนุภาคนาโนซิลิกาและไทเทเนียมไดออกไซด์ 1:2 1:3 และ 1:5

ตัวอย่างชิ้นงาน	ตัวอย่างภาพถ่าย	มุมสัมผัสเฉลี่ย (องศา)	%Change (treated-untreated)
สารเคลือบผิว อัตราส่วน 1-3C		73.26	40.98%
สารเคลือบผิว อัตราส่วน 1-5A		55.79	22.50%
สารเคลือบผิว อัตราส่วน 1-5B		76.06	44.47%
สารเคลือบผิว อัตราส่วน 1-5C		75.46	42.70%

จากคุณสมบัติความไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic) ของสารประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์ ตามทฤษฎีแล้วมุมสัมผัสที่มากกว่า 90° โดยทั่วไปจะหมายถึง ภาวะการเปียกของพื้นผิวอยู่ในระดับไม่ดี และของเหลวจะสัมผัสกับพื้นผิวของเหลวเพียงเล็กน้อยและจะก่อตัวเป็นทรงหยดน้ำค้าง แต่ผลการทดลองที่ได้มีความคลาดเคลื่อนไปจากค่าทางทฤษฎี ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากผิวหน้าชิ้นงานเมื่อผ่านการเคลือบผิวด้วยสารเคลือบผิวอนุภาคประกอบนาโนซิลิกาและไทเทเนียมไดออกไซด์มีลักษณะขรุขระไม่เรียบเนียน ส่งผลให้เมื่อหยดน้ำลงบนผิวหน้าชิ้นงานที่ผ่านการเคลือบหยดน้ำจึงกระจายตัวออกส่งผลให้มุมสัมผัสที่วัดได้มีค่าคลาดเคลื่อนไปจากที่ควรจะเป็น อีกทั้งระยะเวลาในการปรับโพกัสของภาพหยดน้ำมีผลทำให้การกระจายตัวของหยดน้ำมีมากขึ้น

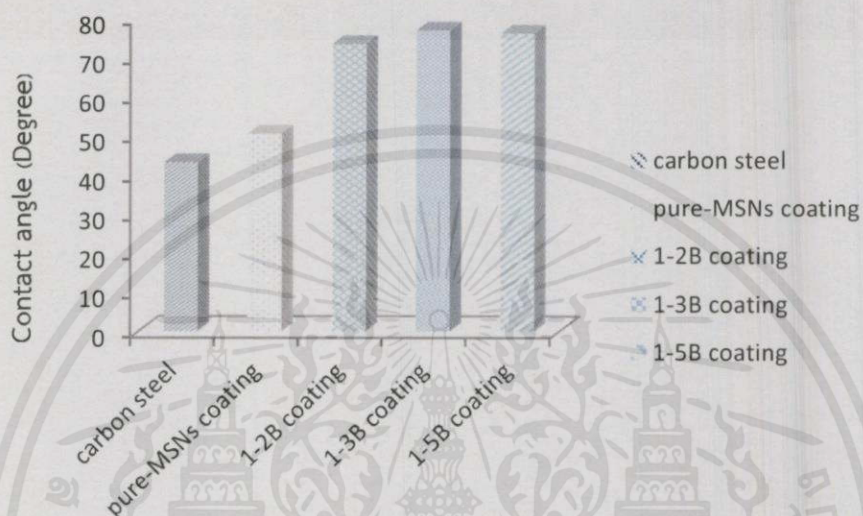
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.12 แผ่นกระจกบางที่ผ่านการเคลือบผิวด้วยสารเคลือบผิวอนุภาคประกอบนาโนซิลิกาและไทเทเนียมไดออกไซด์

ผลการทดลองการวัดมุมสัมผัสระหว่างผิวหน้าของเหล็กที่ผ่านการเคลือบผิวด้วยสารเคลือบผิวอนุภาคประกอบนาโนซิลิกาและไทเทเนียมไดออกไซด์ในอัตราส่วนเชิงปริมาตร 1:2 1:3 และ 1:5 พบว่าค่ามุมสัมผัสที่ดีที่สุดเมื่อเทียบกับค่ามุมสัมผัสอ้างอิงที่วัดจากเหล็กที่ไม่ผ่านการเคลือบผิวในแต่ละอัตราส่วน คือ ตัวอย่างชิ้นงานที่ผ่านการเคลือบผิวด้วยอัตราส่วน 1:2B 1:3B และ 1:5B สาเหตุที่เป็นเช่นนี้อาจเนื่องมาจากสารเคลือบผิวที่มีความเข้มข้นของอนุภาคสูงที่สุดในการทดลองนั้น (1:2A 1:3A และ 1:5A) มีการเกาะตัวกันของอนุภาคประกอบนาโนซิลิกาและไทเทเนียมไดออกไซด์ การกระจายตัวของอนุภาคจึงไม่ดีเท่าที่ควร ส่งผลให้เมื่อนำมาเคลือบลงบนชิ้นงานทำให้ ผิวหน้าชิ้นงานเกิดความไม่สม่ำเสมอ ดังแสดงในรูปที่ 4.12 เมื่อหยดน้ำลงบนชิ้นงานจึงทำให้น้ำกระจายตัวได้ง่ายมุมสัมผัสที่วัดได้จึงมีค่าน้อย โดยจะเห็นว่าที่ความเข้มข้นสูงสุดของอัตราส่วน 1:5 หรือตัวอย่างสารเคลือบผิว 1-5A นั้นให้ค่ามุมสัมผัสที่น้อยที่สุดเนื่องจากการเกาะตัวของอนุภาคเป็นกลุ่มก้อนอย่างหนาแน่น (รูปที่ก.2(ค)) ส่วนที่ความเข้มข้นต่ำสุดของแต่ละอัตราส่วนนั้น (1:2C 1:3C และ 1:5C) ให้ค่ามุมสัมผัสต่ำ อาจเนื่องมาจากความเข้มข้นของอนุภาคประกอบนาโนซิลิกาและไทเทเนียมไดออกไซด์ในสารเคลือบผิวนั้นมีค่าต่ำไป ส่งผลให้อนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ที่จะช่วยป้องกันการสัมผัสของหยดน้ำกับผิวหน้าชิ้นงานที่ผ่านการเคลือบมีน้อยกว่าที่ความเข้มข้นสูงๆ จึงส่งผลให้มุมสัมผัสที่ได้มีค่าน้อย แต่เมื่อเทียบกับที่ความเข้มข้นสูงสุดในการทดลองของแต่ละอัตราส่วนที่ความเข้มข้นต่ำนั้นถือว่าให้ผลการทดลองที่ดีกว่า ซึ่งถึงแม้ว่าจากผลการวัดมุมสัมผัสระหว่างผิวหน้าสารเคลือบผิวทุกอัตราส่วนกับหยดน้ำจะให้ผลการทดลองที่ยังไม่แสดงคุณสมบัติความไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic) ตามที่ทฤษฎีได้กล่าวไว้ แต่จากการทดลองแสดงให้เห็นว่าสารเคลือบผิวนั้นมีคุณสมบัติการป้องกันน้ำที่ดีกว่าเมื่อเทียบกับเหล็กที่ไม่ได้ผ่านการเคลือบผิว และกระจกบางที่ผ่านการเคลือบด้วยอนุภาคนาโนซิลิกาที่ไม่มีการปรับแต่งคุณสมบัติด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์ โดยสารเคลือบผิวที่ให้ค่ามุมสัมผัสที่ดีที่สุดเมื่อเทียบกับเหล็กที่ไม่ผ่านการเคลือบผิวคือ สารเคลือบผิวอัตราส่วน 1:3B

โดยให้ประสิทธิภาพที่เปลี่ยนไปสูงถึง 46.92% รูปที่ 4.13 แสดงการเปรียบเทียบมุมสัมผัสระหว่างผิวหน้าชิ้นงานที่ไม่ผ่านการเคลือบผิวกับชิ้นงานที่ผ่านการเคลือบด้วยสารเคลือบผิวที่ให้ผลดีที่สุดในทุกสามอัตราส่วน โดยจะเห็นได้ว่าค่าที่ได้ในทุกสามอัตราส่วนมีความแตกต่างกันน้อยมากอย่างไม่มีนัยสำคัญ แต่จากกราฟสามารถบอกได้ว่าปริมาณสารประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ใช้ไม่จำเป็นต้องมีปริมาณมาก ก็สามารถที่จะช่วยปรับพื้นผิวเหล็กกล้าให้มีคุณสมบัติในการป้องกันน้ำเพิ่มขึ้นได้



รูปที่ 4.13 ความสัมพันธ์มุมสัมผัสและสารเคลือบผิวในอัตราส่วนต่างๆ กับเหล็กที่ไม่ผ่านการเคลือบผิว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลการทดลอง

5.1 สรุปผลการทดลอง

การทดลองนี้ศึกษาและพัฒนาการสังเคราะห์อนุภาคประกอบนาโนซิลิกาที่มีรูพรุนชนิดเมโซ และ โทเทเนียมได-ออกไซด์ เพื่อประยุกต์ใช้ในการลดการกัดกร่อนของเหล็กกล้า โดยมีสารตั้งต้นคือ เตตระเอทิลอโทซิลิเกต (TEOS) สารกำหนดโครงสร้างคือ เฮกซะเดซิลไตรเมทิลแอมโมเนียมโบรไมด์ (CTAB) และใช้ไตรเมทิลเบนซีน (TMB) ปรับแต่งขนาดของรูพรุนของอนุภาคนาโนซิลิกาที่สังเคราะห์ได้ โดยสังเคราะห์ที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส จากนั้นนำอนุภาคที่ผ่านการปรับแต่งรูพรุนด้วยไตรเมทิลเบนซีนปริมาณต่างๆ มาศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาเพื่อหาอนุภาคนาโนซิลิกาที่มีลักษณะทางสัณฐานวิทยาที่เหมาะสมในการสังเคราะห์ร่วมกับสารประกอบโทเทเนียมไดออกไซด์ ด้วยการศึกษาก่อนกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องผ่าน (TEM) จากผลการทดลองพบว่า ที่ปริมาตรไตรเมทิลเบนซีน 0.712 มิลลิลิตร ให้ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของอนุภาคนาโนซิลิกาลักษณะทรงเฮกซะโกนอล ดังนั้นในการทดลองจึงเลือกใช้อุณหภูมิของอนุภาคนาโนซิลิกาที่มีรูพรุนชนิดเมโซที่ถูกปรับแต่งขนาดรูพรุนด้วยไตรเมทิลเบนซีน 0.712 มิลลิลิตร มาสังเคราะห์ร่วมกับสารประกอบโทเทเนียมไดออกไซด์ด้วยวิธี Impregnation เพื่อศึกษาคุณสมบัติในการลดการกัดกร่อนบนเหล็กกล้า โดยการสังเคราะห์อนุภาคประกอบนาโนซิลิกาและโทเทเนียมไดออกไซด์มีตัวแปรที่ศึกษาคือ อัตราส่วนเชิงปริมาตรของอนุภาคนาโนซิลิกาต่อสารประกอบโทเทเนียมไดออกไซด์ คือ 1:2 1:3 และ 1:5 สังเคราะห์ที่อุณหภูมิ 36 องศาเซลเซียส (อุณหภูมิห้อง) จากนั้นนำอนุภาคประกอบนาโนซิลิกาและโทเทเนียมไดออกไซด์ที่สังเคราะห์ได้ทั้งสามอัตราส่วนมาศึกษาผลการลดอัตราการกัดกร่อนในเหล็กกล้า โดยผสมอนุภาคประกอบนาโนซิลิกาและโทเทเนียมไดออกไซด์เข้ากับตัวทำละลายเมทานอล และสารยึดประสาน (Epoxy) ซึ่งสารละลายที่ได้จะถูกเรียกว่าสารเคลือบผิวอนุภาคประกอบนาโนซิลิกาและโทเทเนียมไดออกไซด์ จากนั้นนำสารเคลือบผิวดังกล่าวเคลือบลงบนแผ่นเหล็กกล้าผ่านเครื่องปั่นเคลือบผิว (Home-build spin coater) โดยปรับเปลี่ยนความเข้มข้นของสารเคลือบผิวจากสูงไปต่ำในทั้งสามอัตราส่วน จากนั้นนำเหล็กกล้าที่ผ่านการเคลือบผิวไปอบแห้ง และศึกษาผลการลดอัตราการกัดกร่อนของเหล็กกล้าผ่านเครื่อง Potentiostat พบว่าที่อัตราส่วนเชิงปริมาตรของอนุภาคประกอบนาโนซิลิกาและโทเทเนียมไดออกไซด์ 1:3 ที่ความเข้มข้นต่ำสุดในการทดลองให้ผลการลดอัตราการกัดกร่อนดีที่สุดเมื่อเทียบกับเหล็กกล้าที่ไม่ผ่านการเคลือบผิว โดยอัตราการกัดกร่อนต่ำถึง 0.0015456 มิลลิเมตรต่อปี ซึ่งเมื่อนำมาคิดเป็นประสิทธิภาพการหน่วงการกัดกร่อน (Inhibition efficiency, %E) เทียบกับเหล็กกล้าที่ไม่ผ่านการเคลือบผิวจะให้ค่าสูงถึง 99.45% จากนั้นศึกษาคุณสมบัติอีกประการที่จะช่วยในการลดการกัดกร่อนบนเหล็กกล้าคือ คุณสมบัติความไม่ชอบน้ำ

(Hydrophobic) ซึ่งเป็นคุณสมบัติเฉพาะของสารประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์ ด้วยวิธีการวัดมุมสัมผัสระหว่างของเหลวและชิ้นงานที่ผ่านการเคลือบผิว ซึ่งจากผลการทดลองพบว่าที่ความเข้มข้นอนุภาคประกอบนาโนซิลิกาและไทเทเนียมไดออกไซด์ต่อตัวทำละลายเมทานอลต่อสารที่ทำหน้าที่ยัดประสาน 0.0160:1:1 (กรัม/มล./มล.) ในอัตราส่วนเชิงปริมาตรของอนุภาคประกอบนาโนซิลิกาและไทเทเนียมไดออกไซด์ 1:3 ให้ค่ามุมสัมผัสเฉลี่ยที่ดีที่สุด คือ 76.93 องศา คิดเป็นเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างเมื่อเทียบกับเหล็กที่ไม่ผ่านการเคลือบผิว 45.10%

ดังนั้นจากการทดลองสามารถสรุปได้ว่า เมื่อนำอนุภาคนาโนซิลิกามาปรับแต่งคุณสมบัติด้วยสารประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์ โดยใช้อัตราส่วนเชิงปริมาตร 1:3 และนำอนุภาคประกอบนาโนซิลิกาและไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ได้มาผสมกับตัวทำละลายและสารยัดประสาน จะได้สารเคลือบผิวที่ช่วยลดอัตราการกัดกร่อนในเหล็กกล้าสูงที่สุดถึง 99.45% และให้มุมสัมผัสกับหยดน้ำที่เปลี่ยนไป 45.10 องศา เมื่อเทียบกับเหล็กที่ไม่ผ่านการเคลือบผิว

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ควรศึกษาผลของอุณหภูมิที่ใช้ในการสังเคราะห์อนุภาคประกอบนาโนซิลิกาและไทเทเนียมไดออกไซด์เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติของอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ที่สังเคราะห์ได้
2. ควรศึกษาอัตราส่วนเชิงปริมาตรของอนุภาคนาโนซิลิกาและสารประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์เพิ่มมากขึ้น
3. ควรศึกษาผลของความเข้มข้นของอนุภาคที่เป็นส่วนประกอบของสารเคลือบผิวที่นำมาใช้เคลือบบนผิวเหล็กกล้า
4. ควรศึกษาผลของระยะเวลาในการสังเคราะห์อนุภาคประกอบนาโนซิลิกาและไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO_2 -MSNs)
5. ควรศึกษาผลของคุณสมบัติอื่นๆ ของสารประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์ เช่น คุณสมบัติในการทำความสะอาดตัวเอง ความสามารถในการทำให้น้ำสะอาด เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

- [1] สุธา สุทธิเรืองวงศ์. “พฤติกรรมการกักตร้อนของเหล็กกล้าไร้สนิม พ.ศ. 2557”. [ออนไลน์].เข้าถึงได้จาก: www.kmitl.ac.th/~kssutha. (สืบค้นข้อมูลวันที่: 10 พฤศจิกายน 2557)
- [2] บริษัท แอลพีเอ็น เพลต มิล จำกัด (มหาชน). “ความรู้เกี่ยวกับเหล็ก”. [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก: www.lpnpm.co.th/th/knowledge6.php. (สืบค้นข้อมูลวันที่: 10 พฤศจิกายน 2557)
- [3] พัทรินทร์ วรธนกุล. “Sol-Gel เทคโนโลยี สังเคราะห์ซิลิกาจากขานอ้อย”. Technology Bio, ฉบับที่ 36, หน้า 39-43, 2010
- [4] Amit Katiyar, Santosh Yadav, Panagiotis G. Smirniots, Neville G. Pinto. “Synthesis of ordered large pore SBA-15 spherical particles for adsorption of biomolecules”. Journal of Chromatography A, Vol.1112 (1-2), pp.13-20, 2006
- [5] อรอนงค์ จุลพันธ์, ชงไทย วิฑูรย์, เมตตา เจริญพานิช. “การผลิตวัสดุดูดซับชนิดซิลิกาเมโซพอร์จากกากของเสียจากธรรมชาติ”. วิศวกรรมสาร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, ฉบับที่ 75, หน้า 108-109, 2554
- [6] อรอนงค์ จุลพันธ์, ชงไทย วิฑูรย์, เมตตา เจริญพานิช. “การผลิตวัสดุดูดซับชนิดซิลิกาเมโซพอร์จากกากของเสียจากธรรมชาติ”. วิศวกรรมสาร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, ฉบับที่ 75, หน้า 105-107, 2554
- [7] ทัยทิพย์ พันธุ์ดำ. “การสังเคราะห์อนุภาคไทเนียมไดออกไซด์ระดับนาโนเพื่อฆ่าเชื้อราที่ทำให้เกิดโรคใบร่วงของต้นยางพารา”. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมวัสดุ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์. หน้า 2-7, 2556
- [8] อรุษา สรวารี. “สารเคลือบผิว (สี วาร์นิช และแล็กเกอร์)”. กรุงเทพฯ: พิมพ์ครั้งที่ 2. สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2539
- [9] Reme-hart information on contact angle. “Contact angle”. [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก: <http://www.ramehart.com/contactangle.htm>. (สืบค้นข้อมูลวันที่: 27 เมษายน 2558)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [10] Xufang Qian, Takashi Kamegawa, Kohsuke Mori, Hexing Li, Hiromi Yamashita. "Calcium Phosphate Coatings Incorporated in Mesoporous TiO₂/SBA-15 by a Facile Inner-Pore Sol-Gel Process Toward Enhanced Adsorption-Photocatalysis Performances". Journal of physical chemistry C, pp.1-35, 2013
- [11] Michael Dahl, Yiding Liu, Yadong Yin. "Composite Titanium Dioxide Nanomaterials". Department of Chemistry and Materials Science and Engineering Program, University of California at Riverside, 2013
- [12] Minglin Ma, Randal M. Hill. "Superhydrophobic surfaces". Current opinion in colloid and interface science 11, pp.193-202, 2006
- [13] Fen Zhang, Shougang Chen, Lihua Dong, Yanhua Lei, Tao Liu, Yansheng Yin. "Preparation of superhydrophobic films on titanium as effective corrosion barriers". Journal of Applied surface science 257, pp. 2587-2591, 2011
- [14] E. Certhoux, F. Ansart, V. Turq, J.P. Bonino, J.M. Sobrino, J.Garcia, J.Reby. "New sol-gel formulations to increase the barrier effect of a protective coating against corrosion of steels". Journal of Progress in organic coatings 76, pp. 165-172, 2013
- [15] สถาบันนวัตกรรมและพัฒนาระบบการเรียนรู้มหาลัยมหิดล. "Transmission Electron Microscope". [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก: <http://www.il.mahidol.ac.th/e-media/nano/Page/Unit4-5.html>. (สืบค้นข้อมูลวันที่: 7 พฤษภาคม 2558)
- [16] สถาบันนวัตกรรมและพัฒนาระบบการเรียนรู้มหาลัยมหิดล. "Scanning Electron Microscope". [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก: <http://www.il.mahidol.ac.th/e-media/nano/Page/Unit4-5.html>. (สืบค้นข้อมูลวันที่: 7 พฤษภาคม 2558)
- [17] ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีมหาวิทยาลัยแม่ฟ้าหลวง. "FTIR-Raman spectrometer". [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก: <http://www.mfu.ac.th/center/stic/index.php/chemical-analysis-instrument-menu/itemlist/tag/FTIR.html> (สืบค้นข้อมูลวันที่: 7 พฤษภาคม 2558)

- [18] ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีมหาวิทยาลัยแม่ฟ้าหลวง. “X-ray diffractometer XRD”. [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก: <http://www.mfu.ac.th/center/stic/index.php/chemical-analysis-instrument-menu/itemlist/tag/XRD.html> (สืบค้นข้อมูลวันที่: 7 พฤษภาคม 2558)
- [19] วิทยาลัยนวัตกรรมการจัดการข้อมูล. “Corrosion Measurement (เครื่องศึกษาการกัดกร่อนพร้อมส่วนประกอบ)”. [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก: <http://www.dstar.kmitl.ac.th/?q=node/539>. (สืบค้นข้อมูลวันที่: 7 พฤษภาคม 2558)
- [20] วิทยาลัยนวัตกรรมการจัดการข้อมูล. “Contact Angle Goniometer (เครื่องวัดมุมสัมผัส)”. [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก: http://www.dstar.kmitl.ac.th/bookingsys/system.php?page=viewspec&machine_id=9 (สืบค้นข้อมูลวันที่: 7 พฤษภาคม 2558)
- [21] JEOL Solution for innovation. “Scanning Electron Microscope SEM”. [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก: [http://www.jeolusa.com/PRODUCTS/ScanningElectronMicroscopes\(SEM\)](http://www.jeolusa.com/PRODUCTS/ScanningElectronMicroscopes(SEM)) (สืบค้นข้อมูลวันที่: 15 พฤษภาคม 2558)
- [22] JEOL Solution for innovation. “Transmission Electron Microscope TEM”. [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก: [http://www.jeolusa.com/PRODUCTS/TransmissionElectronMicroscopes\(TEM\)](http://www.jeolusa.com/PRODUCTS/TransmissionElectronMicroscopes(TEM)) (สืบค้นข้อมูลวันที่: 15 พฤษภาคม 2558)
- [23] Medical Expo. “Shimadzu’s IRTracer-100 Fourier Transform Infrared Spectrophotometer”. [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก: <http://news.medicaexpo.es/press/shimadzu/shimadzus-irtracer-100-nuevo-fourier-transformadores-petrofotometro-infrarrojo-71044-162455.html> (สืบค้นข้อมูลวันที่: 15 พฤษภาคม 2558)
- [24] Geochemical Instrumentation and Analysis. “X-ray Powder Diffraction (XRD)”. [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก: http://serc.carleton.edu/research_education/geochemsheets/techniques/XRD.html (สืบค้นข้อมูลวันที่: 15 พฤษภาคม 2558)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่ เช่น ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมีเหตุผลแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [25] พรรวสา วงศ์ปัญญา. “การทดสอบการกัดกร่อนด้วยเครื่องโพเทนชิโอสแตท”. สาขาวิชาโลหกรรม มหาวิทยาลัยสุรนารี, หน้า 1-7
- [26] ศูนย์เทคโนโลยีเซรามิก. “เครื่องทดสอบมุมสัมผัส”. [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก: <http://ceramic.dss.go.th/index.php/th/service/testing-service/237-contact-angle-measurement> (สืบค้นข้อมูลวันที่: 15 พฤษภาคม 2558)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



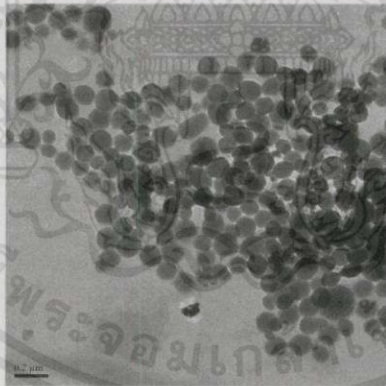

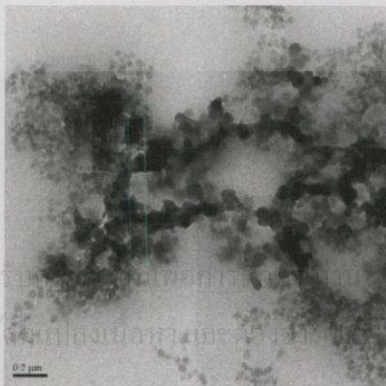
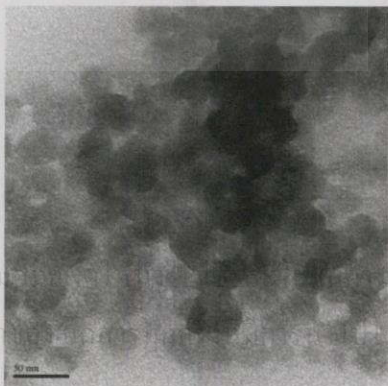
ภาคผนวก ก ข้อมูลผลการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.1 อัตราส่วนไตรเมทิลเบนซีน (TMB) ที่ใช้ในการปรับขนาดรูพรุนของอนุภาคนาโนซิลิกาที่มีรูพรุนชนิดเมโซสำหรับปฏิกิริยา 100 มิลลิลิตร

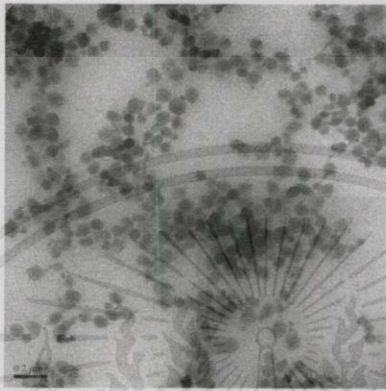
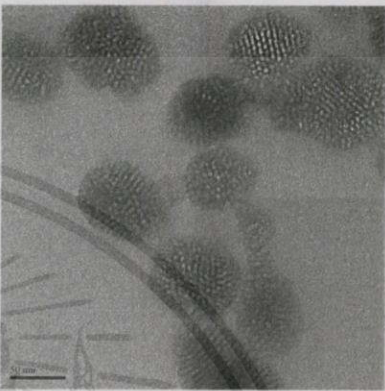
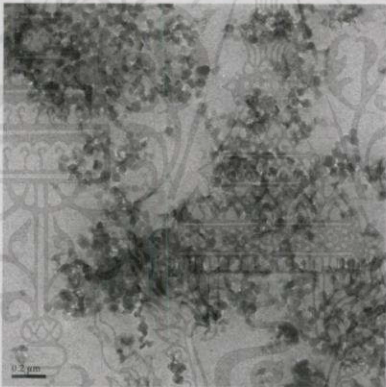
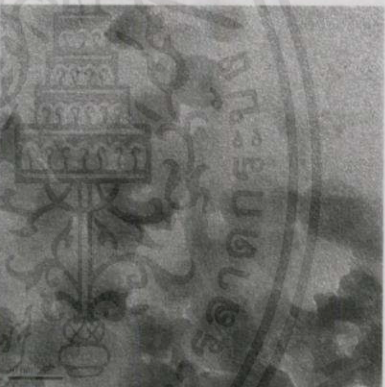
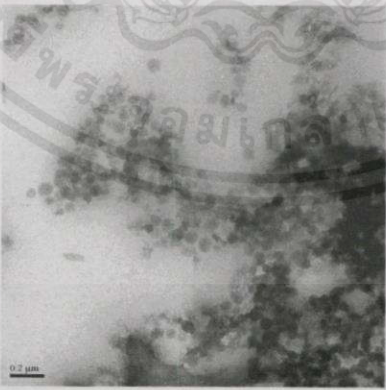
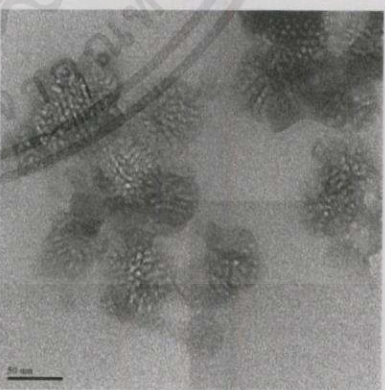
Sample	CTAB solution (mL)	DI-H ₂ O (mL)	Ethyl Acetate (mL)	TMB (mL)	NH ₄ OH (mL)	TEOS (mL)	Quenching DI-H ₂ O (mL)
1	5	100	0.88	0.356	2.7	0.5	36.9
2	5	100	0.88	0.712	2.7	0.5	39.6
3	5	100	0.88	1.068	2.7	0.5	36.9
4	5	100	0.88	1.424	2.7	0.5	36.9

ตารางที่ ก.2 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของอนุภาคนาโนซิลิกาที่มีรูพรุนชนิดเมโซหลังการปรับแต่งขนาดของรูพรุนด้วยไตรเมทิลเบนซีน สำหรับปฏิกิริยา 100 มิลลิลิตรผ่านกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องผ่าน (TEM)

ปริมาณไตรเมทิลเบนซีน TMB (mL)	ลักษณะทางสัณฐานวิทยา	
0		
0.356		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ภายในเท่านั้น ไม่สามารถเผยแพร่หรือใช้เพื่อการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ลงชื่อหรือทำซ้ำโดยไม่ได้รับอนุญาต

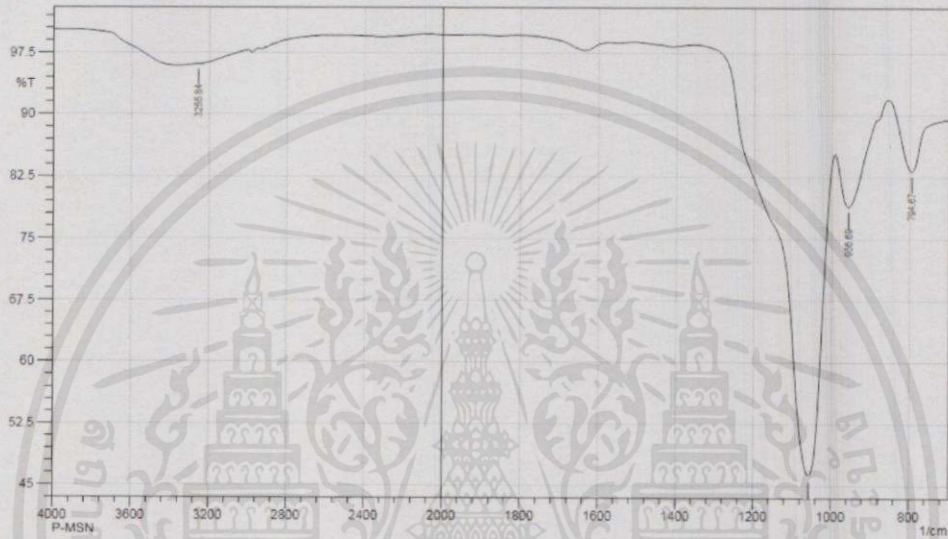
ตารางที่ ก.2(ต่อ) ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของอนุภาคนาโนซิลิกาที่มีรูพรุนชนิดเมโซหลังการปรับแต่งขนาดของรูพรุนด้วยไตรเมทิลเบนซีน สำหรับปฏิกิริยา 100 มิลลิลิตรผ่านกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องผ่าน (TEM)

ปริมาณไตรเมทิลเบนซีน TMB (mL)	ลักษณะทางสัณฐานวิทยา	
0.712		
1.068		
1.424		

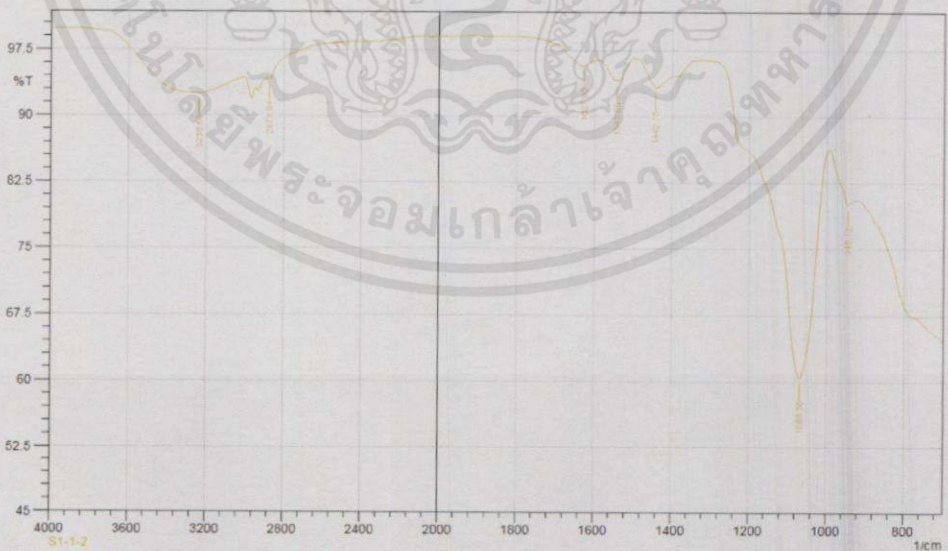
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หมายเหตุ: ภาพซ้ายมือแสดงลักษณะทางสัณฐานวิทยาของอนุภาคนาโนซิลิกาที่มีรูพรุนชนิดเมโซหลังการปรับแต่งขนาดของรูพรุนด้วยไตรเมทิลเบนซีนด้วยกำลังขยาย 9600 เท่า สเกลบาร์ 0.2 ไมโครเมตร

ภาพขวามือแสดงลักษณะทางสัณฐานวิทยาของอนุภาคนาโนซิลิกาที่มีรูพรุนชนิดเมโซหลังการปรับแต่งขนาดของรูพรุนด้วยไตรเมทิลเบนซีนด้วยกำลังขยาย 250,000 เท่า สเกลบาร์ 50 นาโนเมตร

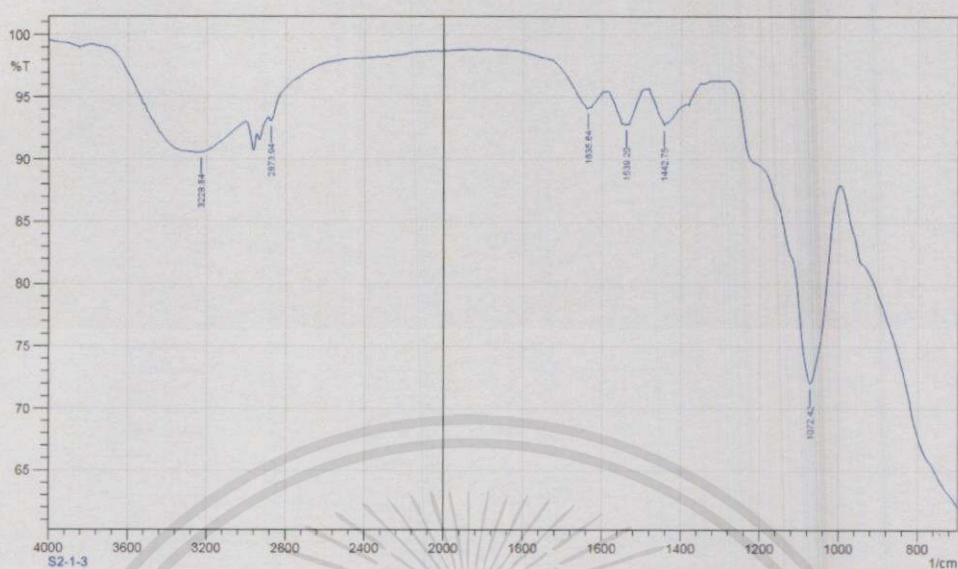


รูปที่ ก.1 ผลการวิเคราะห์ FTIR ของอนุภาคนาโนซิลิกาที่มีรูพรุนชนิดเมโซ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ ก.2 ผลการวิเคราะห์ FTIR ของอนุภาคประกอบนาโนซิลิกาและไทเทเนียม-ไดออกไซด์

ไม่ว่าจะอัตราส่วนเชิงปริมาตร 1:2 ให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ก.3 ผลการวิเคราะห์ FTIR ของอนุภาคประกอบนาโนเซลลูโลสและโพลิเอทิลีนไดออกไซด์ อัตราส่วนเชิงปริมาตร 1:3



รูปที่ ก.4 ผลการวิเคราะห์ FTIR ของอนุภาคประกอบนาโนเซลลูโลสและโพลิเอทิลีนไดออกไซด์ อัตราส่วนเชิงปริมาตร 1:5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.3 อัตราส่วนอนุภาคนาโนซิลิกาที่มีรูพรุนชนิดเมโซต่อไทเทเนียมไดออกไซด์ต่อตัวทำละลายไอโซโพรพานอลที่ใช้ในการสังเคราะห์อนุภาคประกอบนาโนซิลิกาและไทเทเนียมไดออกไซด์

ตัวอย่าง	สารละลายอนุภาค MSNs* (mL)	TBT (mL)	IPA (mL)	Quenching DI-H ₂ O (mL)
1-2	1	0.048	0.610	1.92
1-3	1	0.072	0.610	2.88
1-5	1	0.12	0.610	4.80

*อนุภาค MSNs ในสารละลายเอทานอลความเข้มข้น เท่ากับ 0.024 g/mL

ตารางที่ ก.4 ความเข้มข้นของอนุภาคประกอบนาโนซิลิกาและไทเทเนียมไดออกไซด์ในสารละลายเมทานอล

ตัวอย่าง	ความเข้มข้นของอนุภาค (g/mL)
1-2	0.0127
1-3	0.0160
1-5	0.0380

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.5 อัตราส่วนความเข้มข้นของสารเคลือบผิวในอัตราส่วนเชิงปริมาตรของอนุภาคสารประกอบนาโนซิลิกาและไทเทเนียมไดออกไซด์ต่างๆ

ตัวอย่าง	อนุภาค MSNs-TiO ₂ (g)	MeOH (mL)	Epoxy (mL)
1-2A	0.0127	1	0.5
1-2B	0.0127	1	1
1-2C	0.0127	1	2
1-3A	0.0160	1	0.5
1-3B	0.0160	1	1
1-3C	0.0160	1	2
1-5A	0.0380	1	0.5
1-5B	0.0380	1	1
1-5C	0.0380	1	2



(ก)

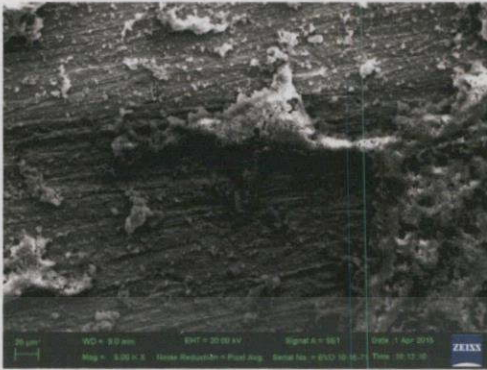


(ข)

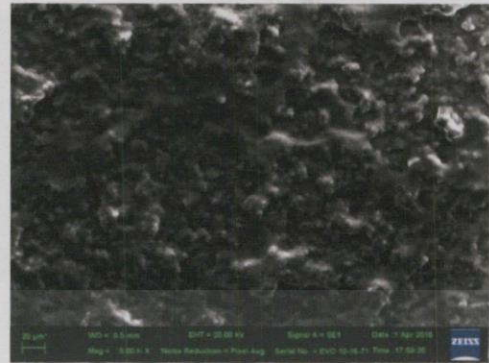
รูปที่ ก.6(ก) เหล็กกล้าที่ผ่านการเคลือบผิวด้วยสารเคลือบผิวอนุภาคประกอบนาโนซิลิกาและไทเทเนียมไดออกไซด์

(ข) แผ่นกระจกบางที่ผ่านการเคลือบผิวด้วยสารเคลือบผิวอนุภาคประกอบนาโนซิลิกาและไทเทเนียมไดออกไซด์

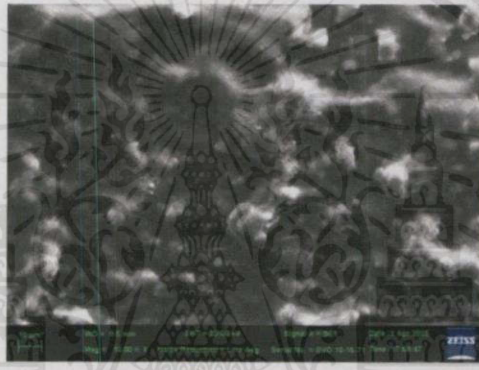
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก)



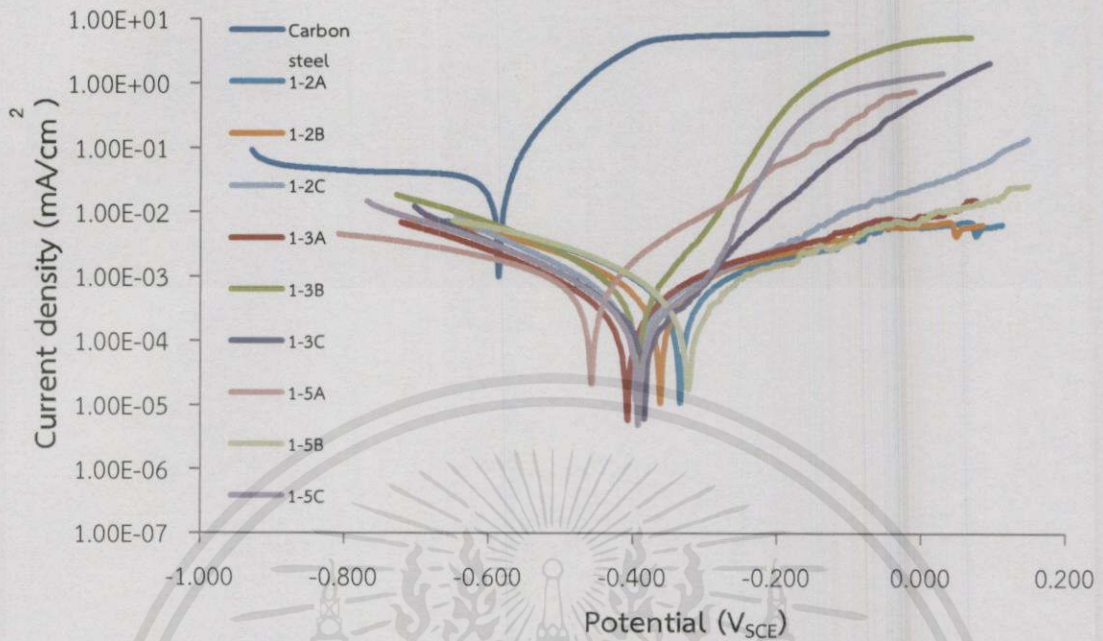
(ข)



(ค)

- รูปที่ ก.7 (ก) รูป SEM ของเหล็กกล้าเคลือบด้วยอนุภาคประกอบนาโนซิลิกาและไทเทเนียม ไดออกไซด์อัตราส่วนเชิงปริมาตร 1:3 กำลังขยาย 5,000 เท่า สเกลบาร์ 20 ไมโครเมตร
- (ข) รูป SEM ของเหล็กกล้าเคลือบด้วยอนุภาคประกอบนาโนซิลิกาและไทเทเนียม ไดออกไซด์อัตราส่วนเชิงปริมาตร 1:5 กำลังขยาย 5,000 เท่า สเกลบาร์ 20 ไมโครเมตร
- (ค) รูป SEM ของเหล็กกล้าเคลือบด้วยอนุภาคประกอบนาโนซิลิกาและไทเทเนียม ไดออกไซด์อัตราส่วนเชิงปริมาตร 1:5 กำลังขยาย 10,000 เท่า สเกลบาร์ 10 ไมโครเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 8.8 ความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์และกระแสที่เกิดขึ้นบนเหล็กที่ผ่านการเคลือบผิวด้วยสารเคลือบผิวอนุภาคประกอบนาโนซิลิกาและไทเทเนียมไดออกไซด์

ตารางที่ 6.6 ผลการวิเคราะห์จากกราฟ Polarization ของเหล็กกล้าทั้งก่อนและหลังการเคลือบผิวในสารละลายน้ำเกลือความเข้มข้น 1% โดยมวล

อัตราส่วน*	ความเข้มข้น	E_{corr} (V)	I_{corr} (mA/cm ²)	Passive region	Corrosion rate (mm/yr)	%IE
1:2	A	-0.39013	3.43×10^{-7}	✗	0.0039851	98.57
	B	-0.36285	4.02×10^{-7}	✗	0.0046747	98.32
	C	-0.39566	2.86×10^{-7}	✗	0.0033259	98.80
1:3	A	-0.40854	1.81×10^{-7}	✗	0.0021089	99.24
	B	-0.39347	4.35×10^{-7}	✗	0.0050506	98.18
	C	-0.38458	1.33×10^{-7}	✓	0.0015456	99.44
1:5	A	-0.45819	5.66×10^{-7}	✗	0.0065761	97.64
	B	-0.32405	2.62×10^{-7}	✗	0.0030431	98.90
	C	-0.39261	1.84×10^{-7}	✓	0.0021332	99.23

*อัตราส่วนเชิงปริมาตรระหว่างอนุภาคนาโนซิลิกาและสารประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์

ตารางที่ ก.7 ค่ามูมสัมพัทธ์ระหว่างชั้นเคลือบผิวและหยดน้ำ

ตัวอย่าง	ครั้งที่			ค่ามูมสัมพัทธ์เฉลี่ย (องศา)
	1	2	3	
Pure Carbon steel	43.235	-	-	43.24
MSNs surface coatings	56.564	43.219	51.833	50.54
1-2A surface coatings	69.633	67.682	-	68.66
1-2B surface coatings	66.481	74.520	79.476	73.50
1-2C surface coatings	72.469	74.253	69.992	72.238
1-3A surface coatings	63.652	61.407	-	62.53
1-3B surface coatings	77.415	72.017	81.458	76.93
1-3C surface coatings	70.633	77.704	71.438	73.26
1-5A surface coatings	56.355	55.234	-	55.79
1-5B surface coatings	71.873	75.125	81.184	76.06
1-5C surface coatings	78.628	77.000	70.763	75.46

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก ข
ตัวอย่างการคำนวณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข.1 การคำนวณหาความเข้มข้นของอนุภาคนาโนซิลิกาในสารละลายเอทานอล

- น้ำหนักหลอดเปล่าขนาด 15 mL (Centrifuge tube) เท่ากับ 5.431 g
- น้ำหนักหลอดเปล่า + น้ำหนักอนุภาคนาโนซิลิกาหลังอบแห้ง (สารละลายอนุภาคนาโนซิลิกาที่นำมาอบแห้งมีปริมาตร 1 mL) เท่ากับ 5.645 g
- น้ำหนักอนุภาคนาโนซิลิกา $(5.645 \text{ g} - 5.431 \text{ g}) / 1 \text{ mL}$ เท่ากับ 0.0237 g/mL

ข.2 การคำนวณหาความเข้มข้นของอนุภาคประกอบนาโนซิลิกาและไทเทเนียมไดออกไซด์ในสารละลายเมทานอล

- น้ำหนักหลอดเปล่าขนาด 15 mL (Centrifuge tube) เท่ากับ 5.474 g
- น้ำหนักหลอดเปล่า + น้ำหนักอนุภาคนาโนซิลิกาหลังอบแห้ง (สารละลายอนุภาคนาโนซิลิกาที่นำมาอบแห้งจะต้องมีปริมาตร 3 mL) เท่ากับ 5.588 g
- น้ำหนักอนุภาคนาโนซิลิกา $(5.588 \text{ g} - 5.474 \text{ g}) / 3 \text{ mL}$ เท่ากับ 0.038 g/mL

ข.3 การคำนวณหาค่าอัตราการกัดกร่อนที่เกิดขึ้นบนแผ่นเหล็กกล้า (Corrosion rate)

การคำนวณหาค่าอัตราการกัดกร่อนบนแผ่นเหล็กกล้าสามารถทำได้โดยใช้กฎของฟาราเดย์ (Faraday's Law) ดังสมการต่อไปนี้

$$C. R. (\text{mmpy}) = K_1 \frac{i_{\text{corr}}}{\rho} EWz \quad (1)$$

เมื่อ C.R. คือ อัตราการกัดกร่อน (mm/yr)

K_1 เท่ากับ 3.21×10^{-3} (mm g/ $\mu\text{A cm yr}$)

i_{corr} คือ กระแสการกัดกร่อน ($\mu\text{A/cm}^2$)

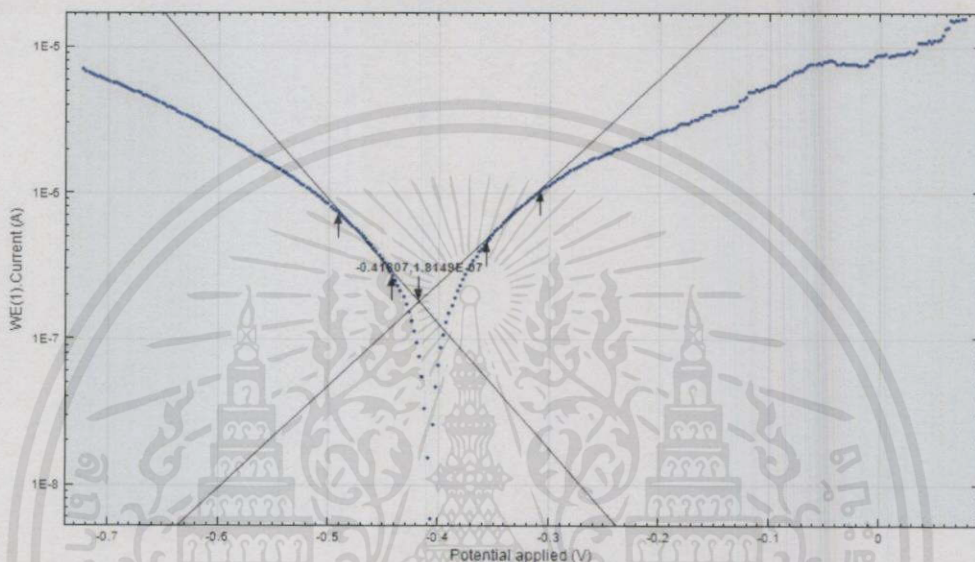
EW คือ มวลสมมูลของโลหะตัวอย่างซึ่งมีค่าเท่ากับ มวลอะตอม/ประจุ (หรือ n)

ρ คือ ความหนาแน่นของโลหะ (g/cm^3)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการทดลองนี้กำหนดให้ค่า EW (อ้างอิงจากวัสดุที่ใช้คือ) เท่ากับ 27.925 g/mol
 ρ ความหนาแน่นของเหล็กกล้า เท่ากับ 7.86 g/cm³

ค่า i_{corr} หาได้จากวิธีการ Tafel slope โดยการสร้างจุดตัดบนกราฟ polarization



รูปที่ ข.1 วิธีการหาค่ากระแสการกัดกร่อน (i_{corr}) จากกราฟ Polarization
 จากนั้นนำค่าที่ได้แทนลงในสมการที่ (1) เพื่อหาค่าอัตราการกัดกร่อน (C.R.) ในหน่วย
 มิลลิเมตรต่อปี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก ค
เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค.1 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด (Scanning Electron Microscope; SEM)

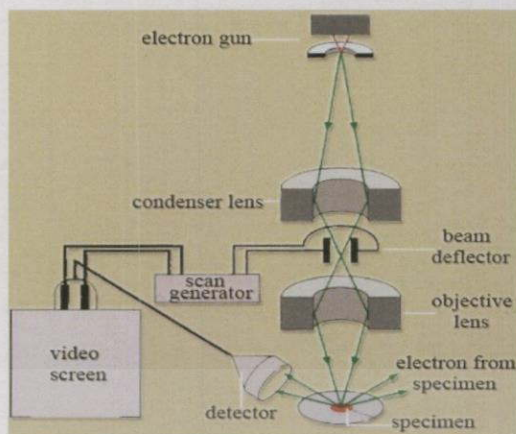


รูปที่ ค.1 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องผ่าน (SEM) รุ่น EVO[®] MA 10 Versatile multipurpose SEM [21]

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด (Scanning Electron Microscope; SEM) มีกำลังขยายสูงสุดประมาณ 10 นาโนเมตร) การเตรียมตัวอย่างเพื่อที่จะดูด้วยเครื่องกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราดไม่จำเป็นต้องมีขนาดบางเท่ากับเมื่อดูด้วยเครื่องกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องผ่าน การสร้างภาพทำได้โดยการตรวจวัดอิเล็กตรอนที่สะท้อนจากพื้นผิวหน้าของตัวอย่างที่ทำการสำรวจ ซึ่งภาพที่ได้จากเครื่องกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราดนี้จะเป็นภาพลักษณะของ 3 มิติ ดังนั้นกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราดจึงถูกนำมาใช้ในการศึกษาสัณฐานและรายละเอียดของลักษณะพื้นผิวของตัวอย่าง เช่น ลักษณะพื้นผิวด้านนอกของเนื้อเยื่อและเซลล์ หน้าที่ตัดของโลหะและวัสดุ เป็นต้น

หลักการการทำงานของเครื่อง SEM [16]

หลักการการทำงานของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด จะประกอบไปด้วยแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอนซึ่งทำหน้าที่ผลิตอิเล็กตรอนเพื่อป้อนให้กับระบบ โดยกลุ่มอิเล็กตรอนที่ได้จากแหล่งกำเนิดจะถูกเร่งด้วยสนามไฟฟ้า จากนั้นกลุ่มอิเล็กตรอนจะผ่านเลนส์รวบรวมรังสี (condenser lens) เพื่อทำให้กลุ่มอิเล็กตรอนกลายเป็นลำอิเล็กตรอน ซึ่งสามารถปรับให้ขนาดของลำอิเล็กตรอนใหญ่หรือเล็กได้ตามต้องการ หากต้องการภาพที่มีความคมชัดจะปรับให้ลำอิเล็กตรอนมีขนาดเล็ก หลังจากนั้นอิเล็กตรอนจะถูกปรับระยะโฟกัสโดยเลนส์ใกล้วัตถุ (objective lens) ลงไปบนผิวชิ้นงานที่ต้องการศึกษา หลังจากลำอิเล็กตรอนถูกกราดลงบนชิ้นงานจะทำให้เกิดอิเล็กตรอนทุติยภูมิ (secondary electron) ซึ่งสัญญาณจากอิเล็กตรอนทุติยภูมินี้จะถูกบันทึกและแปลงไปเป็นสัญญาณทางอิเล็กทรอนิกส์ และถูกนำไปสร้างเป็นภาพบนจอโทรทัศน์ต่อไป และสามารถบันทึกภาพจากหน้าจอโทรทัศน์ได้เลย



รูปที่ ค.2 ส่วนประกอบของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องผ่าน (SEM) [16]

ค.2 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด (Transmission Electron Microscope; TEM)



รูปที่ ค.3 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องผ่าน (TEM) [22]

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องผ่านใช้ศึกษาตัวอย่างชนิดบาง ซึ่งเตรียมชิ้นงานขึ้นโดยพิเศษเพื่อให้ลำอนุภาคอิเล็กตรอนผ่านทะลุได้ การสร้างภาพจากกล้องประเภทนี้จะทำได้โดยการตรวจวัดอิเล็กตรอนที่ทะลุผ่านตัวอย่าง กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องผ่านเหมาะสำหรับศึกษารายละเอียดขององค์ประกอบภายในของตัวอย่าง เช่น องค์ประกอบภายในเซลล์ ลักษณะเยื่อหุ้มเซลล์ผนังเซลล์ เป็นต้น ซึ่งรายละเอียดสูงกว่ากล้องจุลทรรศน์ชนิดอื่นๆ เนื่องจากมีกำลังขยายและประสิทธิภาพในการแจกแจงรายละเอียดสูงมาก (กำลังขยายสูงสุดประมาณ 0.1 นาโนเมตร)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
หลักการทางานของเครื่อง TEM [15]
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งนั้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องผ่านจะประกอบด้วยแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอน ซึ่งทำหน้าที่ผลิตอิเล็กตรอนเพื่อป้อนให้กับระบบ โดยกลุ่มอิเล็กตรอนที่ได้จากแหล่งกำเนิดจะถูกเร่งด้วย

สนามไฟฟ้า จากนั้นกลุ่มอิเล็กตรอนจะผ่านเลนส์รวบรวมรังสี (condenser lens) เพื่อทำให้กลุ่มอิเล็กตรอนกลายเป็นลำอิเล็กตรอน ซึ่งสามารถปรับให้มีขนาดของลำอิเล็กตรอนใหญ่หรือเล็กได้ตามต้องการ จากนั้นลำอิเล็กตรอนจะผ่านตัวอย่างที่จะศึกษา ซึ่งตัวอย่างที่จะศึกษาจะต้องมีลักษณะที่บางมาก (บ่อยครั้งที่พบว่าอยู่ในช่วงระหว่าง 1 - 100 นาโนเมตร) จากนั้นจะเกิดการกระเจิงอนุภาคขึ้นเมื่ออิเล็กตรอนทะลุผ่านตัวอย่างไป และอิเล็กตรอนที่ทะลุผ่านตัวอย่างนี้ก็จะถูกปรับโฟกัสของภาพโดยเลนส์ใกล้วัตถุ (objective lens) ซึ่งเป็นเลนส์ที่ทำหน้าที่ขยายภาพให้ได้รายละเอียดมากที่สุด จากนั้นจะได้รับการขยายด้วยเลนส์ทอดภาพไปสู่จอร์รับ (projector lens) และปรับโฟกัสของลำอนุภาคอิเล็กตรอนให้ยาวพอดีที่จะปรากฏบนฉากเรืองแสง สุดท้ายจะเกิดการสร้างภาพขึ้นมาได้



รูปที่ ค.4 ส่วนประกอบของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องผ่าน (TEM) [15]

ค.3 เครื่องมือวิเคราะห์สารด้วยอินฟราเรด (Fourier Transform Infrared Spectrometer; FTIR) [17]



รูปที่ ค.5 เครื่องมือวิเคราะห์สารด้วยอินฟราเรด (FTIR) [23]

เทคนิคการวัดการดูดกลืนรังสีที่อยู่ในช่วงอินฟราเรด (Fourier Transform Infrared Spectroscopy; FT-IR) เป็นหนึ่งในเทคนิคทางด้าน Infrared Spectroscopic ที่มีประสิทธิภาพในการจำแนกประเภทของสารอินทรีย์ สารอนินทรีย์ และพอลิเมอร์โมเลกุล รวมถึงสามารถบอกถึงปริมาณองค์ประกอบที่มีอยู่ในโมเลกุลของสารผสมตัวอย่างที่ไม่ทราบชนิด เทคนิค FTIR นี้มีความไวใช้

ระยะเวลาในการตรวจสอบน้อยกว่าเทคนิคอื่นๆ มีประโยชน์มากสำหรับการจำแนกประเภทของสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ทั้งที่เป็นของแข็ง ของเหลว และแก๊ส โดย FTIR ได้เข้ามาแทนที่ Dispersive Infrared Spectrometer เมื่อไม่นานมานี้ เพื่อใช้ในงานที่ต้องการความรวดเร็วและความไวสูง นอกจากนี้ยังช่วยให้สามารถวิเคราะห์สารในช่วงที่ Dispersive วิเคราะห์ได้ยากหรือเกือบจะเป็นไปไม่ได้

ส่วนประกอบของเครื่องมือวิเคราะห์สารด้วยอินฟราเรด

1. แหล่งกำเนิด Laser เพื่อใช้แสง Laser ในการปรับระยะของ Mobile Mirror
2. Mobile Mirror เป็นกระจกเงาที่สามารถสะท้อน รังสีอินฟราเรดและสามารถที่จะเคลื่อนที่ได้
3. Fixed Mirror เป็นกระจกเงาที่สามารถสะท้อนรังสีอินฟราเรดเช่นเดียวกับ Mobile Mirror แต่ไม่สามารถที่จะเคลื่อนที่ได้
4. Beam Splitter เป็นส่วนที่จะทำการแยกอินฟราเรดที่ผ่านเข้ามาให้เป็นสองส่วนคือ สามารถให้แสงทะลุผ่านได้ 50 % และจะสะท้อนกลับ 50 %
5. เป็นกระจกเงาที่สามารถสะท้อนรังสีอินฟราเรดใช้ในการบังคับทิศทางเดินรังสีอินฟราเรดให้เป็นไปตามทิศทางที่ต้องการ
6. Sample Compartment เป็นส่วนที่จะใช้ในการบรรจุ Sample เข้าไปเพื่อการวิเคราะห์
7. Detector ใช้วัดความเข้มแสงที่เหลือจากการดูดกลืนของตัวอย่าง

หลักการทํางานเครื่องมือวิเคราะห์สารด้วยอินฟราเรด

รังสีอินฟราเรดจากแหล่งกำเนิดจะถูกฉายไปยัง Interferometer ซึ่งตัวที่นิยมใช้คือ Michelson Interferometer ซึ่งประกอบด้วยกระจกที่สามารถเคลื่อนที่ได้ กระจกที่ตรึงอยู่กับที่ โดยทั้งสองตั้งฉากซึ่งกันและกัน และตัวแยกแสงซึ่งเป็นอุปกรณ์กึ่งสะท้อนแสงที่ตัวแยกแสง ลำรังสีครึ่งหนึ่งจะทะลุผ่านไปยังกระจกที่ตรึงอยู่กับที่ และอีกครึ่งหนึ่งจะสะท้อนไปยังกระจกที่สามารถเคลื่อนที่ได้ หลังจากนั้นลำรังสีก็จะสะท้อนจากกระจกกลับมาวมกันที่ตัวแยกแสง เกิดการแทรกสอดขึ้น หลังจากนั้นลำรังสีก็จะผ่านไปยังตัวอย่าง และในที่สุดก็จะตกลงบนเครื่องตรวจวัด Path difference ระหว่างลำรังสีที่ถูกแยกออกเกิดขึ้นจากระยะทางสัมพัทธ์ระหว่างกระจกทั้งสอง ถ้าแขนยึดกระจกทั้งสองข้างของ Interferometer ยาวเท่ากัน ลำรังสีทั้งสองก็จะเดินทางด้วยระยะทางที่เท่ากัน มีเฟสตรงกัน ทำให้สัญญาณที่ไปถึงเครื่องตรวจวัดมีค่ามากที่สุด เมื่อกระจกเคลื่อนที่เป็นระยะทาง $\lambda/4$ ระยะทางเดินของรังสีจะเปลี่ยนเป็น $\lambda/2$ รังสีทั้งสองมีเฟสต่างกัน 180 องศา การแทรกสอดจะอยู่ในตำแหน่งหักล้าง เมื่อเคลื่อนกระจกเป็นระยะทางอีก $\lambda/4$ ระยะทางเดินของรังสีจะเปลี่ยนเป็น λ รังสีทั้งสองลำจะกลับมามีเฟสตรงกัน เมื่อกระจกเคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่ ความเข้มของสัญญาณที่เครื่องตรวจวัดวัดได้จะมีลักษณะของ Interferogram เป็นรูปคลื่น sine โดยกราฟจะ

พล็อตระหว่างการตอบสนองที่เครื่องตรวจวัดบันทึกได้และเวลาที่กระจกมีการเคลื่อนที่ ถ้าตัวอย่างเกิดการดูดกลืนรังสีที่ค่าความถี่นี้ขนาดของแอมพลิจูดจะลดลงโดยสัมพันธ์กับปริมาณของตัวอย่าง หลังจากนั้นใช้ Fourier Transform ซึ่งเป็นฟังก์ชันทางคณิตศาสตร์ในการแปลงผลที่ได้ (ขึ้นกับเวลา) ให้กลายเป็นค่าความเข้มกับความถี่

ค.4 เครื่องมือวิเคราะห์สารด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray Diffractometer; XRD) [18]



รูปที่ ค.6 เครื่องมือวิเคราะห์สารด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (XRD) [24]

เทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray Diffraction; XRD) เป็นเทคนิคหนึ่งที่ใช้ในการศึกษาวิเคราะห์โครงสร้างผลึกที่ไม่ทำลายชิ้นงานตัวอย่าง โดยรังสีเอ็กซ์จะเลี้ยวเบนไปตามช่องว่างระหว่างอะตอมภายในผลึก จะถูกบันทึกค่า แล้วทำการวิเคราะห์ธรรมชาติของโครงสร้างผลึกนั้นๆ โดยระยะห่างระหว่างอะตอมนั้นสามารถคำนวณได้จากสมการของ Bragg เทคนิคนี้เป็นที่นิยมใช้อย่างแพร่หลายในงานด้านเคมีและเคมีชีวภาพ โดยใช้ในการตรวจวัดโครงสร้างของโมเลกุลต่างๆ ไม่ว่าจะเป็นสารประกอบอนินทรีย์ ดีเอ็นเอ โปรตีนที่มีอยู่ตามธรรมชาติ รวมถึงวัสดุที่สังเคราะห์ขึ้น การวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRD นั้นจะใช้คุณสมบัติการเลี้ยวเบนรังสีของโครงสร้างผลึก เป็นไปตามสมการของ Bragg

$$n\lambda = 2d\sin\theta$$

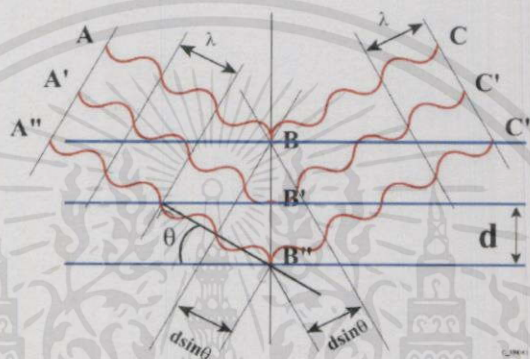
เมื่อ n คือ ค่าความยาวคลื่นของรังสีเอ็กซ์ ($n = 1, 2, 3, \dots, \lambda$)

d คือ ระยะห่างระหว่างระนาบผลึก

θ คือ มุมตกกระทบของรังสีเอ็กซ์กับระนาบผลึก

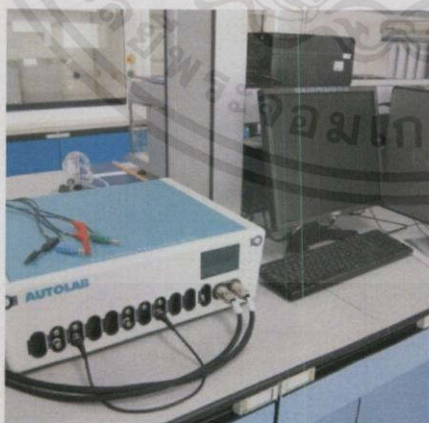
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับใช้ในเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกสิ่งเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในขั้นตอนแรกทำการปลูกผลึกที่สนใจ แล้วนำผลึกที่ได้ไปแช่ในโตรเจนเหลว ผลึกที่แช่แข็งนี้ จะไปลด radiation damage ซึ่งเกิดขึ้นในระหว่างการเก็บรวบรวมข้อมูลและลดการเคลื่อนไหวของ อุณหภูมิภายในผลึก ผลึกจะถูกวางในเครื่อง diffractometer แล้วฉายด้วยรังสีเอ็กซ์ รังสีที่เกิดการ เลี้ยวเบนจะถูกบันทึกลงบนแผ่นฟิล์มหรือคอมพิวเตอร์ ข้อมูลที่ได้จะถูกรวบรวม แล้วนำมาสร้างเป็น แผนผังของความหนาแน่นอิเล็กตรอนของโมเลกุล หลังจากนั้นจะถูกรวบรวมแล้วนำมาสร้างเป็น แผนผังของความหนาแน่นอิเล็กตรอนของโมเลกุล หลังจากนั้นอะตอมจะถูกปรับค่าตัวแปรต่างๆ เช่น ตำแหน่ง เทียบกับผังความหนาแน่นเพื่อให้ได้ค่าที่เหมาะสมที่สุด ค่าความเข้ม



รูปที่ ค.7 การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ในผลึก [18]

ค.5 เครื่องวัดอัตราการกัดกร่อน (Corrosion apparatus) [25]



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับ(ก) ใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้(ข) ใช้อุปกรณ์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกข้อมูลใดๆไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของลิขสิทธิ์ที่มีการนำไปใช้

รูปที่ ค.8(ก) เครื่องโพเทนชิโอสแตท (Potentiostat)

(ข) อุปกรณ์วัดการกัดกร่อน

เครื่องวัดอัตราการกัดกร่อน (Corrosion apparatus) เป็นการใช้ประโยชน์จากปฏิกิริยาทางเคมีไฟฟ้าของการกัดกร่อนโดยอาศัยการป้อนพลังงานจากเครื่อง Potentiostat ให้แก่ชิ้นงานตัวอย่างที่เป็นขั้วทำงาน (Working electrode) ผ่านทางขั้วช่วย (Counter electrode) ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ต่างๆ เพื่อเร่งให้เกิดการกัดกร่อนแบบทั่วผิวหน้า แล้วตรวจวัดสมบัติทางไฟฟ้าของชิ้นงานที่เปลี่ยนไปผ่านทางขั้วอ้างอิง (Reference electrode) (รูปที่ ค.9) จากนั้นใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ (เทคนิค Potentiodynamic polarization) เพื่อติดตามผลเป็นเส้นกราฟ polarization ซึ่งข้อมูลที่ได้รับจากเทคนิคนี้ คือ พฤติกรรมของการกัดกร่อนของวัสดุ โดยพิจารณาจากค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อน (E_{corr}) กระแสไฟฟ้าการกัดกร่อน (i_{corr}) และคำนวณหาอัตราการกัดกร่อน โดยสมการต่อไปนี้

$$C. R. (mmpy) = K_1 \frac{i_{corr}}{\rho} EW$$

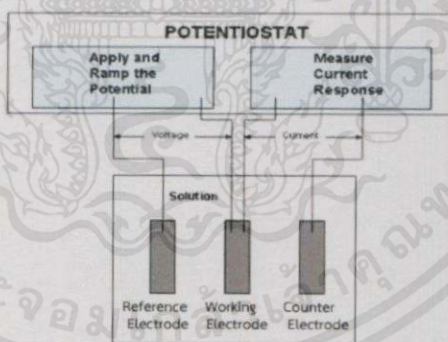
เมื่อ C.R. คือ อัตราการกัดกร่อน (mm/yr)

K_1 เท่ากับ 3.21×10^3 (mm g/ μ A cm yr)

i_{corr} คือ กระแสการกัดกร่อน (μ A/cm²)

EW คือ มวลสมมูลของโลหะตัวอย่างซึ่งมีค่าเท่ากับ มวลอะตอม/ประจุ (หรือ n)

ρ คือ ความหนาแน่นของโลหะ (g/cm³)



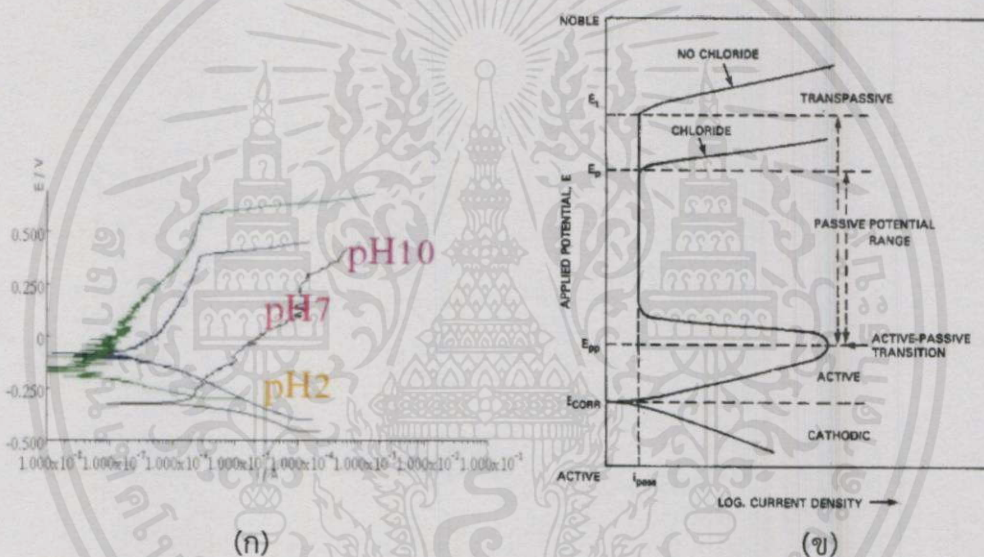
รูปที่ ค.9 การติดตั้งขั้วอิเล็กโทรดทั้ง 3 ขั้ว ต่อเชื่อมกับเครื่อง Potentiostat ในการทดสอบหาการกัดกร่อน [25]

หลักการทำงานของเครื่องโพเทนชิโอสแตท

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ประยุกต์มาจากสมการของเนินส์ โดยวัดค่าแรงขับเคลื่อนไฟฟ้า (Electromotive force, หรือค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าของเซลล์ไฟฟ้าเคมีโดยต่อเข้ากับแหล่งจ่ายศักย์ไฟฟ้า คือ เครื่อง Potentiostat ขั้วไฟฟ้า (Electrode) ที่ใช้มี 3 ส่วนดังนี้

1. Reference electrode เป็นขั้วอ้างอิงเมื่อวัดเทียบกับ working electrode จะได้ศักย์ไฟฟ้าของโลหะนั้น
2. Counter electrode เป็นขั้วอ้างอิงเมื่อวัดเทียบกับ working electrode จะได้กระแสไฟฟ้าของโลหะนั้น
3. Working electrode เป็นขั้วที่ต่อเข้ากับโลหะที่ต้องการทดสอบ

ค่าสำคัญที่วัดได้จากเครื่องโพเทนชิโอสแตท คือ ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า (Current density ใน หน่วยแอมป์) และศักย์ไฟฟ้า (ในช่วงที่สนใจทดสอบมีหน่วยเป็นโวลต์) เมื่อนำค่าทั้งสองมาสร้างกราฟแสดงความสัมพันธ์จะได้ Polarization curve ดังแสดงในรูปที่ ค.10(ก)



รูปที่ ค.10(ก) ตัวอย่างเส้นโพลาริเซชันที่ได้จากการทดลองของชิ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิม ดูเหล็กซีในสารละลายไฮเดียมคลอไรด์

(ข) ส่วนต่างๆ ที่สำคัญของเส้นโค้งโพลาริเซชัน [25]

จากเส้นโค้งโพลาริเซชัน สามารถแบ่งได้เป็น 3 ช่วงที่สำคัญ คือ

1. ช่วงที่โลหะเกิดความว่องไวต่อการกัดกร่อน เรียกว่า Active region ตัวแปรสำคัญที่วัดได้ในช่วงนี้ คือ ศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อน และความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อน
2. ช่วงที่โลหะไม่ว่องไวต่อการกัดกร่อน เรียกว่า Passive region ตัวแปรสำคัญที่วัดได้ในช่วงนี้ คือ

ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าและศักย์ไฟฟ้าการเกิดพาสซีฟฟิล์ม

3. ช่วงที่โลหะเกิดการละลายสูญเสียเนื้อโลหะอีกครั้ง เนื่องจากการแตกออกของพาสซีฟฟิล์ม

เรียกว่า Transpassive region

ซึ่งช่วง passive region คือ ช่วงที่เป็นส่วนเว้าของเส้นกราฟหลังจากผ่านจุด E_{corr} โดยจะแสดงถึงการเกิดขึ้นของชั้นฟิล์มบางภายในเนื้อเหล็กกล้าหลังจากการกัดกร่อนที่ผ่านชั้นเคลือบผิวไปแล้ว ซึ่งจะสามารถบ่งบอกคุณสมบัติในการลดอัตราการกัดกร่อนที่ดีของสารเคลือบผิว

ค.6 เครื่องทดสอบมุมสัมผัส (Contact angle equipment) [26]



รูปที่ ค.11 เครื่องทดสอบมุมสัมผัสระหว่างชิ้นงานกับหยดน้ำ (Contact angle equipment)

สำหรับทดสอบมุมสัมผัสของของเหลวบนผิววัสดุ (Measuring range 0 - 180°) สามารถวัดค่า Static Contact Angle Dynamic Contact Angle Surface tension/Interfacial Tension by Pendant Drop method Surface energy Polar/dispersive properties Adhesion Force และ Absorption ของเซรามิก แก้ว กระจก ฟิล์ม ผ้า หรือ ผงตัวอย่าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้