

การป้องกันการกัดกร่อนของเหล็กกล้าไร้สนิมชนิด 316L
ที่เคลือบด้วยนาโนคอมโพสิตของซิลิกาและไทเทเนียม

CORROSION PROTECTION PROPERTY OF TITANIA-MESOPOROUS SILICA
NANOCOMPOSITE COATING ON 316L STAINLESS STEEL



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2560

KMITL-2017-EN-M-220-102

การป้องกันการกัดกร่อนของเหล็กกล้าไร้สนิมชนิด 316L
ที่เคลือบด้วยนาโนคอมโพสิตของซิลิกาและไทเทเนียม

CORROSION PROTECTION PROPERTY OF TITANIA-MESOPOROUS SILICA
NANOCOMPOSITE COATING ON 316L STAINLESS STEEL



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2560

KMITL-2017-EN-M-220-102

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

CORROSION PROTECTION PROPERTY OF TITANIA-MESOPOROUS SILICA
NANOCOMPOSITE COATING ON 316L STAINLESS STEEL



A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENTS FOR THE DEGREE OF
MASTER OF ENGINEERING IN CHEMICAL ENGINEERING
FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

2017

KMITL-2017-EN-M-220-102

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2017

FACULTY OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การป้องกันการกัดกร่อนของเหล็กกล้าไร้สนิมชนิด 316L ที่เคลือบด้วยนาโนคอมโพสิต
เคลือบด้วยนาโนคอมโพสิตของซิลิกาและไทเทเนียม

Thesis Title Corrosion Protection Property of Titania-mesoporous Silica Nanocomposite
Coating on 316L Stainless Steel

นักศึกษา นายไพบุลย์ แซ่เจี๋ย

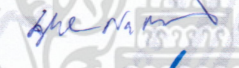
รหัสประจำตัว 57601358

ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชา วิศวกรรมเคมี

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผศ.ดร.ธีรพร สุธีวงศ์

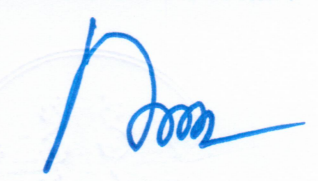
หมายเลขวิทยานิพนธ์ KMITL-2017-EN-M-220-102

| คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ | | ลายมือชื่อ |
|--------------------------|--------------|--|
| ผศ.ดร.สมหมาย | ผิวสอาด |  |
| รศ.ดร.ดวงกมล | ณ ระนอง |  |
| ดร.เมทินี | จรรยาสุภาพ |  |
| รศ.ดร.เกรียงศักดิ์ | ไกรวัฒนาวงศ์ |  |
| ผศ.ดร.ธีรพร | สุธีวงศ์ |  |

วัน / เดือน / ปี ที่สอบ วันจันทร์ที่ 17 กรกฎาคม พ.ศ. 2560 เวลา 15.00-17.00 น.
สถานที่สอบ ณ อาคาร A ชั้น 5 ห้องประชุม 1

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

คณะวิศวกรรมศาสตร์ รับรองแล้ว


(รองศาสตราจารย์ ดร. คมสัน มาลีสี)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ฉบับนี้ คณะวิศวกรรมศาสตร์
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องนำอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
วันที่ 17 กรกฎาคม พ.ศ. 2560

| | |
|-----------------------------|--|
| หัวข้อวิทยานิพนธ์ | การป้องกันการกัดกร่อนของเหล็กกล้าไร้สนิมชนิด 316L ที่เคลือบด้วยนาโนคอมโพสิตของซิลิกาและไทเทเนียม |
| นักศึกษา | นายไพบูลย์ แซ่เจี๋ย |
| รหัสประจำตัว | 57601358 |
| ปริญญา | วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต |
| สาขาวิชา | วิศวกรรมเคมี |
| พ.ศ. | 2560 |
| อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ | ผศ.ดร.ธีรพร สุธีวงศ์ |

บทคัดย่อ

การเคลือบผิวด้วยชั้นเคลือบผสมระหว่างสารอินทรีย์และอนินทรีย์ เช่น ชั้นเคลือบอีพอกซีไซเลน เป็นหนึ่งวิธีที่ใช้เพื่อป้องกันการกัดกร่อนแบบรูเข็มเนื่องจากโลหะสัมผัสน้ำทะเลเป็นระยะเวลานานเนื่องจากใช้งาน มีความหลากหลาย และไม่เป็นพิษ ชั้นเคลือบประเภทนี้ถูกนำมาแทนที่ชั้นเคลือบที่ประกอบด้วยไตรบิวทิลทินและเฮกซะวาเลนต์โครเมียมที่สามารถป้องกันการกัดกร่อนได้สูง แต่เป็นพิษต่อสิ่งมีชีวิต ในปัจจุบันชั้นเคลือบผสมยังป้องกันการกัดกร่อนได้น้อยมากเมื่อเทียบกับชั้นเคลือบที่ประกอบด้วยไตรบิวทิลทินและเฮกซะวาเลนต์โครเมียม ดังนั้นการเพิ่มขีดความสามารถดังกล่าวให้แก่ชั้นเคลือบผสมจึงมีความสำคัญ งานวิจัยนี้นำเสนอการเพิ่มประสิทธิภาพการป้องกันการกัดกร่อนของชั้นเคลือบอีพอกซีไซเลนด้วยการใช้นาโนคอมโพสิตของอนุภาคเมโซพอร์ซิลิกาที่เคลือบผิวด้วยอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์และบรรจุสารยับยั้งการกัดกร่อนเบนโซไตรอะโซลเป็นสารเติมเต็มในชั้นเคลือบ อนุภาคเมโซพอร์ซิลิกาที่เป็นแกนกลางมีสมบัติเป็นฉนวนไฟฟ้าและมีปริมาตรรูพรุนสูงเหมาะสำหรับบรรจุสารยับยั้งการกัดกร่อนเบนโซไตรอะโซลที่สามารถสร้างชั้นฟิล์มเพื่อยับยั้งความรุนแรงเมื่อเกิดการกัดกร่อนซึ่งเป็นการป้องกันแบบแอคทีฟ แล้วเสริมความไม่ชอบน้ำและการทนสารเคมีโดยการเคลือบผิวด้วยอนุภาคไททาเนียมไดออกไซด์ จากผลการทดลองพบว่าการเคลือบผิวเมโซพอร์ซิลิกาด้วยอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ทำให้ค่ามัมสัมผัสเพิ่มขึ้นจาก 80.62 เป็น 91.21 องศาซึ่งจัดเป็นชั้นเคลือบที่ไม่ชอบน้ำและสามารถบรรจุสารยับยั้งการกัดกร่อนเพิ่มขึ้นร้อยละ 17.34 และประสิทธิภาพการป้องกันการกัดกร่อนเพิ่มขึ้นร้อยละ 77.8 เมื่อเทียบกับชั้นเคลือบอีพอกซีไซเลนที่ไม่ใช้สารเติมเต็ม นอกจากนี้ชั้นเคลือบยังสามารถลดความรุนแรงของการกัดกร่อนในสารละลายที่มีฤทธิ์เป็นกรด (pH 3) และด่าง (pH 9) ได้ถึงร้อยละ 29.9 และ 15.4 ตามลำดับเมื่อเทียบกับค่าความเป็นกรด-ด่างปกติของสารละลาย (pH 7.6)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

| | |
|-----------------------|--|
| Thesis | Corrosion Protection Property of Titania-mesoporous Silica Nanocomposite Coating on 316L Stainless Steel |
| Student | Mr. Paiboon Saejear |
| Student ID. | 57601358 |
| Degree | Master of Engineering |
| Program | Chemical Engineering |
| Year | 2016 |
| Thesis Advisor | Asst. Prof. Dr. Teeraporn Suteewong |

ABSTRACT

Organic-inorganic hybrid coating, e.g. epoxy-silane coating, is one of methods used to protect the pitting corrosion of metals, caused by a long-term contact with sea water as it is easy, available in various formula and non-toxic. This coating has been employed to replace tributyl and hexavalent chromium-based coatings that have high corrosion protection ability but high toxicity. To dates, compared to tributyl and hexavalent chromium-based coatings, organic-inorganic hybrid coating still has low anticorrosion efficiency. Its corrosion protection is thus needed to be improved. In this work, we report the method used to improve anticorrosion of epoxy-silane coating using nanocomposite of titanium dioxide-coated mesoporous silica, containing corrosion inhibitor (benzotriazole; BTA) as active coating filler. Mesoporous silica (core) is an electrical insulator and has large pore volume which is suitable to store large amount of BTA. BTA can form passive film to slow or stop the corrosion process, called active corrosion protection. Then, hydrophobicity and chemical resistance are further improved by coating titanium dioxide nanoparticles on mesoporous silica. It was found that the presence of titanium dioxide on mesoporous silica increased contact angle of coating from 80.62 to 91.21 degree which is considered to be hydrophobic surface and corrosion inhibitor loading efficiency by 17.34%. Compare to filler-free epoxy-silane coating, corrosion protection efficiency was improved by 77.8%. Moreover, this coating can reduce corrosion aggression in acidic (pH 3) and basic (pH 9) solution by 29.9 and 15.4% compare to neutral pH (pH 7.6).

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้สำเร็จได้ด้วยความช่วยเหลือจากหลายบุคคล โดยเฉพาะอย่างยิ่งอาจารย์ที่ปรึกษา
ผศ.ดร.ธีรพร สุธีวงศ์ ที่ให้ความรู้ คำปรึกษาและความช่วยเหลือ สุดท้ายนี้ข้าพเจ้าขอขอบคุณบิดา
มารดาที่คอยเป็นกำลังใจและอบรมสั่งสอน

ไพบุลย์ แซ่เจี๋ย



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

| เรื่อง | หน้า |
|--|------|
| บทคัดย่อภาษาไทย | I |
| บทคัดย่อภาษาอังกฤษ | II |
| กิตติกรรมประกาศ | III |
| สารบัญ..... | IV |
| สารบัญตาราง..... | VI |
| สารบัญรูป | VII |
| บทที่ 1 บทนำ..... | 1 |
| 1.1 ที่มาและความสำคัญ..... | 1 |
| 1.2 วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์..... | 3 |
| 1.3 ขอบเขตของการศึกษา..... | 3 |
| 1.4 ประโยชน์ที่ได้รับ..... | 4 |
| บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง..... | 5 |
| 2.1 สมบัติและการกักกรองของเหล็กกล้าไร้สนิม..... | 5 |
| 2.2 การกักกรองแบบรูเข็ม..... | 8 |
| 2.3 การป้องกันการกักกรองโดยการเคลือบผิว..... | 11 |
| 2.4 การตรวจสอบการกักกรองด้วยเทคนิคโพเทนชิโอไดนามิก..... | 16 |
| 2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง..... | 20 |
| บทที่ 3 วิธีการดำเนินงาน | 22 |
| 3.1 การใช้อนุภาคนาโนคอมโพสิตของเมโซพอร์ซิลิกาและไทเทเนียมไดออกไซด์ที่บรรจุสารยับยั้งการกักกรอง BTA เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพความสามารถในการป้องกันการกักกรองของชั้นเคลือบ..... | 23 |
| 3.2 ศึกษาอิทธิพลของความเป็นกรด-ด่างต่อการป้องกันกักกรองของเหล็กกล้าไร้สนิมเคลือบด้วยชั้นเคลือบอีพอกซีไซเลนที่ใช้ MSN@TiO ₂ ซึ่งบรรจุสารยับยั้งการ กักกรอง BTA | 25 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

| เรื่อง | หน้า |
|---|------|
| บทที่ 4 ผลการทดลองและวิเคราะห์ผล..... | 27 |
| 4.1 การเตรียมอนุภาคและชั้นเคลือบ | 27 |
| 4.2 การทดสอบการป้องกันการกัดกร่อนของชั้นเคลือบชนิดต่างๆ | 35 |
| 4.3 อิทธิพลของความเป็นกรด-ด่างต่อการป้องกันการกัดกร่อนของเหล็กกล้าไร้สนิมเคลือบด้วยชั้นเคลือบต่างๆ..... | 44 |
| บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ | 50 |
| 5.1 สรุปผลการทดลอง | 50 |
| 5.2 ข้อเสนอแนะ | 51 |
| บรรณานุกรม..... | 52 |
| ภาคผนวก ก สารเคมีและอุปกรณ์..... | 57 |
| ก.1 สารเคมี | 58 |
| ก.2 อุปกรณ์..... | 59 |
| ก.3 เครื่องมือวิเคราะห์..... | 60 |
| ภาคผนวก ข การคำนวณ..... | 61 |
| ข.1 การคำนวณปริมาณ BTA ที่เหลืออยู่ในสารละลายหลังบรรจุ | 62 |
| ข.2 การคำนวณประสิทธิภาพการบรรจุสารยับยั้งการกัดกร่อน BTA..... | 63 |
| ข.3 การคำนวณประสิทธิภาพการป้องกันการกัดกร่อนแบบบูรณาการ..... | 64 |
| ภาคผนวก ค ข้อมูลการทดลอง | 65 |
| ค.1 ค่ามอดูลสัมพัทธ์ของหยดน้ำของชั้นเคลือบชนิดต่างๆ | 66 |
| ค.2 ประสิทธิภาพการบรรจุสารยับยั้งการกัดกร่อน BTA..... | 67 |
| ค.3 การกัดกร่อนของชั้นเคลือบชนิดต่างๆ ที่ pH 3 5 7.6 และ 9..... | 69 |
| ประวัติผู้เขียน..... | 71 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

| ตารางที่ | หน้า |
|---|------|
| 2.1.1 องค์ประกอบของเหล็กกล้าไร้สนิมตามมาตรฐาน AISI..... | 5 |
| 2.1.2 ศักย์ไฟฟ้ามาตรฐานของโลหะต่างๆ เทียบกับขั้วไฮโดรเจนมาตรฐานที่อุณหภูมิ 25 °C..... | 7 |
| 2.3.1 สมบัติของชั้นเคลือบอินทรีย์ชนิดต่างๆ..... | 11 |
| 2.3.2 สมบัติของชั้นสารเติมเต็มชนิดต่างๆ..... | 15 |
| 3.1.1 ชั้นเคลือบที่ใช้ในการทดลอง..... | 23 |
| 3.1.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบการป้องกันการกัดกร่อนของชั้นเคลือบ..... | 25 |
| 4.1.1 ประสิทธิภาพการบรรจุสารยับยั้งการกัดกร่อน BTA ของ MSN และ MSN@TiO ₂ | 29 |
| 4.2.1 ประสิทธิภาพการป้องกันการกัดกร่อนแบบรูเข็มของชั้นเคลือบชนิดต่างๆ..... | 37 |
| 4.3.1 ร้อยละการเปลี่ยนแปลง Epit ของชั้นเคลือบชนิดต่างๆ ที่ pH 3 5 และ 9 เทียบกับ pH เท่ากับ 7.6 ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์เข้มข้นร้อยละ 3.5 โดยมวล..... | 47 |
| 4.3.2 ร้อยละการเปลี่ยนแปลง Jpit ของชั้นเคลือบชนิดต่างๆ ที่ pH 3 5 และ 9 เทียบกับ pH เท่ากับ 7.6 ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์เข้มข้นร้อยละ 3.5 โดยมวล..... | 47 |
| ก.1.1 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง..... | 58 |
| ก.3.1 เครื่องมือวิเคราะห์ที่ใช้ในงานวิจัย..... | 60 |
| ค.1.1 มุมสัมผัสของหยดน้ำของชั้นเคลือบชนิดต่างๆ..... | 66 |
| ค.2.1 ค่าการดูดแสงของสารละลายเบนโซไทรอะโซลในเอทานอลที่ความเข้มข้นต่างๆ สำหรับสร้างกราฟมาตรฐาน..... | 67 |
| ค.2.2 ค่าการดูดแสงของสารละลายที่เหลือจากการบรรจุสารยับยั้งการกัดกร่อน BTA ในอนุภาค MSN@TiO ₂ | 67 |
| ค.2.3 ประสิทธิภาพการบรรจุสารยับยั้งการกัดกร่อน..... | 67 |
| ค.3.1 E _{pit} และ J _{pit} ของ Bare 316L ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์เข้มข้นร้อยละ 3.5 โดยมวลที่ pH 3 5 7.6 และ 9..... | 69 |
| ค.3.2 E _{pit} และ J _{pit} ของชั้นเคลือบ GPTMS Coating ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์เข้มข้นร้อยละ 3.5 โดยมวลที่ pH 3 5 7.6 และ 9..... | 69 |
| ค.3.3 E _{pit} และ J _{pit} ของชั้นเคลือบ MSN/GPTMS Coating ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์เข้มข้นร้อยละ 3.5 โดยมวลที่ pH 3 5 7.6 และ 9..... | 70 |
| ค.3.4 E _{pit} และ J _{pit} ของชั้นเคลือบ MSN@TiO ₂ /GPTMS Coating ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์เข้มข้นร้อยละ 3.5 โดยมวลที่ pH 3 5 7.6 และ 9..... | 70 |
| ค.3.5 E _{pit} และ J _{pit} ของชั้นเคลือบ BTA-MSN/GPTMS Coating ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์เข้มข้นร้อยละ 3.5 โดยมวลที่ pH 3 5 7.6 และ 9..... | 71 |
| ค.3.4 E _{pit} และ J _{pit} ของชั้นเคลือบ BTA-MSN@TiO ₂ /GPTMS Coating ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์เข้มข้นร้อยละ 3.5 โดยมวลที่ pH 3 5 7.6 และ 9..... | 71 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

| รูปที่ | หน้า |
|--|------|
| 2.1.1 กลไกการกักกรองของเหล็กในน้ำที่ประกอบด้วยออกซิเจน..... | 6 |
| 2.2.1 ลักษณะของการกักกรองแบบรูเข็ม (ก) แบบลึก (ข) แบบตื้น (ค) แบบวงรี และ (ง) แบบ โพรง..... | 8 |
| 2.2.2 กลไกการขยายตัวของรูเข็ม..... | 9 |
| 2.3.1 ชั้นเคลือบที่ประกอบด้วยชั้นย่อยหลายชั้น..... | 12 |
| 2.3.2 สูตรโครงสร้างทั่วไปของสารประกอบออร์กาโนไฮโดรเจน..... | 13 |
| 2.3.3 สูตรโครงสร้างของ (ก) GPMMS และ (ข) GPTMS..... | 13 |
| 2.3.4 การสร้างพันธะระหว่างซิลิกาในอีพอกซีไฮไลต์กับ (ก) ผิวดิน (ข) สารเติมเต็ม..... | 14 |
| 2.3.5 กลไกการสร้างพันธะไฮดรอกซิลกับวัสดุอินทรีย์..... | 14 |
| 2.3.6 กลไกการสร้างพันธะไฮดรอกซิล..... | 14 |
| 2.4.1 เซลล์สำหรับทดสอบการกักกรองด้วยเทคนิคโพเทนชิโอไดนามิก..... | 16 |
| 2.4.2 เส้นโค้งโพลาริแกรม..... | 16 |
| 2.4.3 เส้นทาเฟล (ก) แคโทดิก และ (ข) แอโนดิก..... | 17 |
| 2.4.4 เส้นโค้งโพลาริแกรมของเหล็กกล้าไร้สนิม..... | 19 |
| 3.1.1 ขั้นตอนการวิจัยในหัวข้อ 3.1..... | 23 |
| 3.2.2 ลักษณะของสารผสมภายในเครื่องปฏิกรณ์; (ก) ก่อนเติม TEOS และ (ข) หลังเติม TEOS..... | 24 |
| 4.1.1 ภาพถ่าย TEM ของ MSNที่กำลังขยาย (ก) 50,000 เท่า และ (ข) ภาพขยายของบริเวณที่ตี กรอบสีแดงของภาพ 4.1.1.ก..... | 27 |
| 4.1.2 ภาพถ่าย TEM ของอนุภาคคอมโพสิต MSN@TiO ₂ ที่กำลังขยาย (ก) 50,000 เท่า และ (ข) ภาพขยายของบริเวณที่ตีกรอบสีแดงของภาพ 4.1.2.ก..... | 28 |
| 4.1.3 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของอนุภาคคอมโพสิต MSN@TiO ₂ ด้วยเทคนิค EDX..... | 28 |
| 4.1.4 รูปถ่าย (ก) แผ่นเหล็ก (Bare 316L) แผ่นเหล็กที่ผ่านการเคลือบด้วย (ข) GPTMS Coating (ค) MSN/GPTMS Coating (ง) MSN@TiO ₂ /GPTMS Coating (จ) BTA-MSN/GPTMS Coating และ (ฉ) BTA-MSN@TiO ₂ /GPTMS Coating..... | 30 |
| 4.1.5 ภาพถ่าย SEM ของ Bare 316Lที่กำลังขยาย (ก) 500 เท่า และ (ข) 3,000 เท่า..... | 30 |
| 4.1.6 ภาพถ่าย SEM ของของชั้นเคลือบ GPTMS Coatingที่กำลังขยาย (ก) 500 เท่า และ (ข) 3,000 เท่า..... | 31 |
| 4.1.7 ภาพถ่าย SEM ของ MSN/GPTMS Coatingที่กำลังขยาย (ก) 500 เท่า และ (ข) 3,000 เท่า..... | 31 |
| 4.1.8 ภาพถ่าย SEM ของชั้นเคลือบ MSN@TiO ₂ /GPTMS Coatingที่กำลังขยาย (ก) 500 เท่า และ (ข) 3,000 เท่า..... | 32 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

| รูปที่ | หน้า |
|---|------|
| 4.1.9 ภาพถ่าย SEM ของชั้นเคลือบ BTA-MSN/GPTMS Coating ที่กำลังขยาย (ก) 500 เท่า และ (ข) กำลังขยาย 3,000 เท่า..... | 32 |
| 4.1.10 ภาพถ่าย SEM ของชั้นเคลือบ BTA-MSN@TiO ₂ /GPTMS Coating ที่กำลังขยาย (ก) 500 เท่า และ (ข) กำลังขยาย 3,000 เท่า..... | 32 |
| 4.1.11 มุมสัมผัสของหยดน้ำของเหล็กกล้าไร้สนิมชนิด 316L เคลือบด้วย GPTMS Coating (เทา) MSN/GPTMS Coating (น้ำเงิน) MSN@TiO ₂ /GPTMS Coating (เขียว) BTA-MSN/GPTMS Coating (แดง) และ BTA-MSN@TiO ₂ /GPTMS Coating (ม่วง) ที่เวลา 0 150 และ 300 วินาที ตามลำดับ..... | 33 |
| 4.1.12 มุมสัมผัสและความไม่ชอบน้ำของชั้นเคลือบ..... | 34 |
| 4.2.1 เส้นโค้งโพลาริเซชันของเหล็กกล้าไร้สนิมชนิด 316L ที่ไม่ผ่านการเคลือบ (ดำ) และเคลือบด้วย GPTMS Coating (เทา) MSN/GPTMS Coating (น้ำเงิน) MSN@TiO ₂ /GPTMS Coating (เขียว) BTA-MSN/GPTMS Coating (แดง) และ BTA-MSN@TiO ₂ /GPTMS Coating (ม่วง) ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์เข้มข้นร้อยละ 3.5 โดยมวลที่ pH 7.6..... | 35 |
| 4.2.2 E _{pit} ของเหล็กกล้าไร้สนิมชนิด 316L ที่ไม่ผ่านการเคลือบ (ดำ) และเคลือบด้วย GPTMS Coating (เทา) MSN/GPTMS Coating (น้ำเงิน) MSN@TiO ₂ /GPTMS Coating (เขียว) BTA-MSN/GPTMS Coating (แดง) และ BTA-MSN@TiO ₂ /GPTMS Coating (ม่วง) ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์เข้มข้นร้อยละ 3.5 โดยมวลที่ pH 7.6..... | 36 |
| 4.2.3 J _{pit} ของเหล็กกล้าไร้สนิมชนิด 316L ที่ไม่ผ่านการเคลือบ (ดำ) และเคลือบด้วย GPTMS Coating (เทา) MSN/GPTMS Coating (น้ำเงิน) MSN@TiO ₂ /GPTMS Coating (เขียว) BTA-MSN/GPTMS Coating (แดง) และ BTA-MSN@TiO ₂ /GPTMS Coating (ม่วง) ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์เข้มข้นร้อยละ 3.5 โดยมวลที่ pH 7.6..... | 36 |
| 4.2.4 ภาพถ่าย SEM ของ Bare 316L หลังจากถูกกัดกร่อนที่กำลังขยาย (ก) 20 เท่า และ (ข) 150 เท่า..... | 38 |
| 4.2.5 ภาพถ่าย SEM ของ GPTMS Coating หลังจากถูกกัดกร่อนที่กำลังขยาย (ก) 20 เท่า และ (ข) 150 เท่า..... | 38 |
| 4.2.6 ภาพถ่าย SEM ของ MSN/GPTMS Coating หลังจากถูกกัดกร่อนที่กำลังขยาย (ก) 20 เท่า และ (ข) 150 เท่า..... | 39 |
| 4.2.7 ภาพถ่าย SEM ของ BTA-MSN/GPTMS Coating หลังจากถูกกัดกร่อนที่กำลังขยาย (ก) 20 เท่า และ (ข) 150 เท่า..... | 40 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

| รูปที่ | หน้า |
|--|------|
| 4.2.8 ภาพถ่าย SEM ของ MSN@TiO ₂ /GPTMS Coating หลังจากถูกกัดกร่อนที่กำลังขยาย (ก) 20 เท่า และ (ข) 150 เท่า..... | 41 |
| 4.2.9 ภาพถ่าย SEM ของ BTA-MSN@TiO ₂ /GPTMS Coating หลังจากถูกกัดกร่อนที่กำลังขยาย (ก) 20 เท่า และ (ข) 150 เท่า..... | 42 |
| 4.2.10 แผนภาพเสนอการทำงานของชั้นเคลือบ BTA-MSN@TiO ₂ /Epoxy-silane Coating ในการป้องกันการกัดกร่อนบนผิวเหล็กกล้าไร้สนิม 316..... | 42 |
| 4.3.1 E _{pit} ของเหล็กกล้าไร้สนิมชนิด 316L ที่ไม่ผ่านการเคลือบ (ดำ) และเคลือบด้วย GPTMS Coating (เทา) MSN/GPTMS Coating (น้ำเงิน) MSN@TiO ₂ /GPTMS Coating (เขียว) BTA-MSN/GPTMS Coating (แดง) และ BTA-MSN@TiO ₂ /GPTMS Coating (ม่วง) ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ เข้มข้นร้อยละ 3.5 โดยมวลที่ pH 3 5 7.6 และ 9..... | 44 |
| 4.3.2 J _{pit} ของเหล็กกล้าไร้สนิมชนิด 316L ที่ไม่ผ่านการเคลือบ (ดำ) และเคลือบด้วย GPTMS Coating (เทา) MSN/GPTMS Coating (น้ำเงิน) MSN@TiO ₂ /GPTMS Coating (เขียว) BTA-MSN/GPTMS Coating (แดง) และ BTA-MSN@TiO ₂ /GPTMS Coating (ม่วง) ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ เข้มข้นร้อยละ 3.5 โดยมวลที่ pH 3 5 7.6 และ 9..... | 44 |
| 4.3.3 ลักษณะโมเลกุลของ BTA ในสารละลาย (ก) BTAH ₂ ⁺ (ข) BTAH และ (ค) BTA ⁻ | 49 |
| ค.2.1 กราฟมาตรฐานของของสารละลาย BTA ในเอทานอล..... | 67 |

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

เหล็กกล้าไร้สนิมที่ต้องสัมผัสกับน้ำทะเล เช่น เรือขนส่งสินค้า แท่นขุดเจาะ หรือระบบท่อใต้ทะเล ล้วนต้องเผชิญกับการกัดกร่อนจากน้ำทะเลซึ่งมีปริมาณไอออนของคลอไรด์สูง การกัดกร่อนที่เกิดขึ้นจากน้ำทะเลเป็นการกัดกร่อนแบบเฉพาะที่ (Localized corrosion) เช่น การกัดกร่อนแบบรูเข็มและการกัดกร่อนแบบในซอก (Pitting and crevice corrosion) ซึ่งมีความรุนแรงมากกว่าการกัดกร่อนแบบสม่ำเสมอ (Uniform corrosion) ที่มักเกิดจากการสัมผัสกับน้ำ ออกซิเจน และสารเคมีอื่นๆ เพราะว่าการกัดกร่อนแบบเฉพาะที่มักเกิดในแนวตั้งฉากกับผิวโลหะมากกว่าแนวขนานกับผิวโลหะ ซึ่งผิวโลหะจะถูกกัดกร่อนเพียงเล็กน้อยแต่การกัดกร่อนจะเกิดลึกลงในเนื้อโลหะ ส่งผลให้โลหะชำรุดอย่างรวดเร็ว (Atul, T. 2015)

วิธีที่นิยมใช้ป้องกันการกัดกร่อนของโลหะจากน้ำทะเล คือ การเคลือบผิวโลหะด้วยชั้นเคลือบที่ประกอบด้วยไตรบิวทิลทิน (Tributyltin, TBT) และเฮกซะวาเลนต์โครเมียม (Hexavalent chromium, Cr^{6+}) โดยใช้งานร่วมกับการป้องกันการกัดกร่อนแบบแคโทดิกและกัลวานิก (Cathodic and galvanic protection) แต่ TBT และ Cr^{6+} เป็นสารที่มีความเป็นพิษสูงและส่งผลเสียต่อระบบนิเวศใต้ทะเลจึงถูกสั่งห้ามใช้สารดังกล่าวในกลุ่มสหภาพยุโรป (Yebara, D. M. 2004; Zhang, X. S. 2011)

ในปัจจุบันชั้นเคลือบอินทรีย์ (Organic coating) เป็นตัวเลือกที่ถูกนำมาใช้เนื่องจากไม่ส่งผลกระทบต่อธรรมชาติ แต่ความสามารถในการป้องกันการกัดกร่อนยังคงน้อยกว่าชั้นเคลือบที่ประกอบด้วย TBT และ Cr^{6+} จึงมีงานวิจัยจำนวนมากที่มุ่งพัฒนาสมบัติการป้องกันการกัดกร่อนของชั้นเคลือบอินทรีย์ด้วยวิธีการที่หลากหลาย เช่น การใช้สารเติมเต็มชนิดอนินทรีย์ (Inorganic filler) เพื่อเพิ่มการป้องกันการกัดกร่อนโดยขัดขวางการแพร่ของน้ำ อากาศและไอออนต่างๆ (Patil, S. S. 2015) หรือการทำให้ชั้นเคลือบมีสมบัติไม่ชอบน้ำ (Amiri, S. and Rahimi, A 2016; Lai Y. K. 2016) เพื่อลดอัตราการแพร่ของน้ำ อากาศและไอออนต่างๆ จากสารละลายเข้าสู่ชั้นเคลือบ แต่การป้องกันการกัดกร่อนด้วยวิธีการดังกล่าวเป็นป้องกันการกัดกร่อนแบบพาสซีฟ (Passive corrosion prection) คือสามารถปกป้องและยืดระยะเวลาก่อนที่การกัดกร่อนจะเกิดขึ้นเท่านั้น จึงเป็นที่มาของการป้องกันการกัดกร่อนแบบแอคทีฟ (Active corrosion prection) ที่มีวัตถุประสงค์เพื่อลดความรุนแรงของการกัดกร่อนแม้ว่าการกัดกร่อนจะเริ่มเกิดขึ้นแล้วก็ตาม (Saji, V. S., and Cook, R. M. 2012: 5) ตัวอย่างการป้องกันการกัดกร่อนแบบแอคทีฟ เช่น การทำให้ชั้นเคลือบมีสมบัติรักษาตัวเอง (Self-healing) จากการกัดกร่อน เช่น การบรรจุสารที่สามารถเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันในไมโคร

แคปซูล เมื่อแคปซูลแตกตัวจากการกัดกร่อนจะปล่อยสารดังกล่าวรวมตัวกับสารตั้งต้นเกิดปฏิกิริยาเอกสสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พอลิเมอร์เซชันซ่อมแซมชั้นเคลือบ (Cho, S. H. 2009; Wei, H. G. 2015) หรือการใช้สารยับยั้งการกัดกร่อน (Corrosion inhibitor) ที่มีสมบัติสร้างชั้น Passive film ที่สามารถยับยั้งการกัดกร่อน (Finsgar, M and Jackson, J. 2014)

การป้องกันการกัดกร่อนด้วยวิธีการข้างต้นมีข้อดีแตกต่างกัน หากนำข้อดีของแต่ละวิธีมารวมกันได้จะทำให้ความสามารถในการป้องกันการกัดกร่อนเพิ่มขึ้น ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงพัฒนาชั้นเคลือบที่สามารถป้องกันการกัดกร่อนทั้งแบบพาสซีฟและแอคทีฟโดยมีจุดเด่นคือมีสมบัติไม่ชอบน้ำและยังสามารถบรรจุสารยับยั้งการกัดกร่อนได้ โดยใช้อนุภาคนาโนคอมโพสิตของเมโซพอร์ซิลิกาหุ้มด้วยอนุภาคของไททาเนียมไดออกไซด์ (Titanium dioxide-mesoporous silica nanocomposite; MSN@TiO₂) และบรรจุสารยับยั้งการกัดกร่อนชนิดเบนโซไตรอะโซล (Benzotriazole; BTA) เพื่อใช้เป็น Anticorrosion filler ในชั้นเคลือบอีพอกซีไซเลน 3-Glycidoxypropyl trimethoxysilane (GPTMS) บนเหล็กกล้าไร้สนิมชนิด 316L โดยสภาวะการกัดกร่อนที่เลือกใช้คือสารละลายโซเดียมคลอไรด์เข้มข้นร้อยละ 3.5 โดยมวล ซึ่งมีปริมาณเทียบเท่ากับน้ำทะเลและศึกษาอิทธิพลของค่าความเป็นกรด-ด่างตั้งแต่ 3 ถึง 9 ต่อการป้องกันการกัดกร่อน

อนุภาคเมโซพอร์ซิลิกา (Mesoporous silica nanoparticle, MSN) ถูกเลือกให้เป็นแกนกลาง (Core) ของวัสดุคอมโพสิตเนื่องจากมีสมบัติการป้องกันการกัดกร่อนและเป็นฉนวนไฟฟ้า (Patil, S. S. 2015) และมีปริมาตรรูพรุนสูงเหมาะสำหรับบรรจุสารยับยั้งการกัดกร่อน (Wang, N. 2012; Siva, T. 2015) นอกจากนี้ MSN ยังสามารถใช้งานร่วมกับชั้นเคลือบชนิดอีพอกซีไซเลนเพื่อเพิ่มการป้องกันการกัดกร่อน (Skorb, E. V. 2009; Maia, F. 2016) เนื่องจากสามารถสร้างพันธะไฮดรอกเซนกับซิลิกาในชั้นเคลือบได้ (Yuan, X. 2016; Wang, N. 2012; Siva, T. 2015) แต่ MSN ยังมีข้อจำกัดที่เป็นอุปสรรคต่อการป้องกันการกัดกร่อนคือชอบน้ำ (Hydrophilic) (Musso, G. E. 2015)

ข้อจำกัดดังกล่าวถูกปรับปรุงโดยใช้อนุภาคไททาเนียมไดออกไซด์ซึ่งมีสมบัติไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic) ทนทานต่อสารเคมี และอุณหภูมิสูง (Lenz, D. M. 2003; Shanaghi, A. 2009) โดยทำหน้าที่เป็นเปลือกนอก (Shell) แต่อนุภาคไททาเนียมไดออกไซด์มีสมบัติเป็นกึ่งตัวนำไฟฟ้า (Semiconductor) การใช้งานร่วมกับเมโซพอร์ซิลิกาอาจทำให้ความสามารถในการนำไฟฟ้าของระบบโดยรวมเพิ่มขึ้นได้

สารยับยั้งการกัดกร่อน BTA ถูกบรรจุในอนุภาคนาโนคอมโพสิต MSN@TiO₂ เพื่อให้อนุภาคมีความสามารถในการป้องกันการกัดกร่อนแบบแอคทีฟโดยสร้างชั้น film ของ BTA ปกคลุมบริเวณที่ถูกกัดกร่อนทำให้ความรุนแรงของการกัดกร่อนลดลง (Finsgar, M. and Milosev, I. 2010) และหลีกเลี่ยงผลกระทบในแง่ลบหากบรรจุสารยับยั้งการกัดกร่อนในชั้นเคลือบโดยตรง (Rahsepar, M. 2017)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.2 วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์

- 1) เพิ่มการป้องกันการกัดกร่อนของชั้นเคลือบอีพอกซีไซเลนด้วยการใช้นาโนคอมโพสิตของอนุภาค เมโซพอร์ซิซิลิกาที่เคลือบผิวด้วยอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ (MSN@TiO_2) และบรรจุสารยับยั้งการกัดกร่อนเบนโซโทรอะโซล (BTA) เป็นสารเติมเต็มในชั้นเคลือบ
- 2) ศึกษาผลการใช้ออนุภาคนาโนคอมโพสิต MSN@TiO_2 ที่บรรจุ BTA ต่อพฤติกรรมการกัดกร่อนของชั้นเคลือบบนผิวเหล็กกล้าไร้สนิมชนิด 316L
- 3) ศึกษาอิทธิพลของค่าความเป็นกรด-ด่างต่อการป้องกันการกัดกร่อนของชั้นเคลือบที่มีอนุภาคนาโนคอมโพสิต MSN@TiO_2 ที่บรรจุ BTA ในช่วงค่าความเป็นกรด-ด่างตั้งแต่ 3 ถึง 9

1.3 ขอบเขตของการศึกษา

- 1) สังเคราะห์และตรวจสอบสมบัติของอนุภาค MSN และ MSN@TiO_2 ในกรณีที่บรรจุและไม่บรรจุสารยับยั้งการกัดกร่อน BTA ดังนี้
 - ขนาดของอนุภาค MSN และ MSN@TiO_2
 - ปริมาณสารยับยั้งการกัดกร่อนที่สามารถบรรจุในรูพรุน
 - ความไม่ชอบน้ำของชั้นเคลือบหลังจากใช้ออนุภาค MSN และ MSN@TiO_2 เป็นสารเติมเต็มทั้งในกรณีที่บรรจุและไม่บรรจุสารยับยั้งการกัดกร่อน BTA
 - การป้องกันการกัดกร่อนของชั้นเคลือบหลังจากใช้ MSN และ MSN@TiO_2 เป็นสารเติมเต็มทั้งในกรณีที่บรรจุและไม่บรรจุสารยับยั้งการกัดกร่อน BTA
- 2) ตรวจสอบการป้องกันการกัดกร่อนของชั้นเคลือบอีพอกซีไซเลน GPTMS ที่ใช้ออนุภาค MSN และ MSN@TiO_2 ในกรณีที่บรรจุและไม่บรรจุสารยับยั้งการกัดกร่อน BTA ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์เข้มข้นร้อยละ 3.5 โดยมวล ด้วยเทคนิคโพเทนชิโอดินามิก ซึ่งข้อมูลที่ตรวจสอบ ได้แก่
 - ความต่างศักย์ ณ ตำแหน่งที่เริ่มเกิดการกัดกร่อนแบบรูเข็ม (Pitting potential; E_{pit})
 - ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า ณ ตำแหน่งที่เริ่มเกิดการกัดกร่อนแบบรูเข็ม (Pitting current density; J_{pit})
- 3) ตรวจสอบอิทธิพลของค่าความเป็นกรด-ด่างตั้งแต่ 3 ถึง 9 ต่อการป้องกันการกัดกร่อนของชั้นเคลือบอีพอกซีไซเลน GPTMS ที่ใช้ออนุภาค MSN และ MSN@TiO_2 ในกรณีที่บรรจุและไม่บรรจุสารยับยั้งการกัดกร่อน BTA ด้วยเทคนิคโพเทนชิโอดินามิกในสารละลายโซเดียมคลอไรด์เข้มข้นร้อยละ 3.5 โดยมวล โดยใช้กรดซัลฟิวริก (Sulfuric acid) และโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (Potassium hydroxide) ปรับค่าความเป็นกรด-ด่าง ซึ่งข้อมูลที่ตรวจสอบเป็นไปตามหัวข้อ 2)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.4 ประโยชน์ที่ได้รับ

- 1) เข้าใจการป้องกันการกัดกร่อนโดยการปรับปรุง MSN ให้เป็นนาโนคอมโพสิต $MSN@TiO_2$ และบรรจุสารยับยั้งการกัดกร่อน BTA
- 2) พัฒนาการใช้นาโนคอมโพสิต $MSN@TiO_2$ ที่บรรจุ BTA เพื่อเพิ่มการป้องกันการกัดกร่อนของชั้นเคลือบอีพอกซีไซเลน
- 3) สามารถอธิบายอิทธิพลของค่าความเป็นกรด-ด่างต่อการป้องกันกัดกร่อนของเหล็กกล้าไร้สนิมเคลือบด้วยชั้นเคลือบอีพอกซีไซเลนที่ใช้นาโนคอมโพสิต $MSN@TiO_2$ ที่บรรจุ BTA เป็น Anticorrosion filler



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 สมบัติและการกัดกร่อนของเหล็กกล้าไร้สนิม

เหล็กกล้าไร้สนิม (Stainless steel) คือโลหะผสม (Alloy) ประกอบด้วยเหล็กเป็นองค์ประกอบหลักและเติมโลหะชนิดอื่น เช่น นิกเกิล (Nickel) เพื่อเพิ่มความต้านทานแรงดึง (Tensile strength) โครเมียมและโมลิบดีนัมเพื่อเพิ่มการต้านทานการกัดกร่อน องค์ประกอบของเหล็กกล้าไร้สนิมชนิดต่างๆ ตามมาตรฐาน AISI (American Iron and Steel Institute) แสดงในตารางที่ 2.1.1 (Khatak, H.S. 2002)

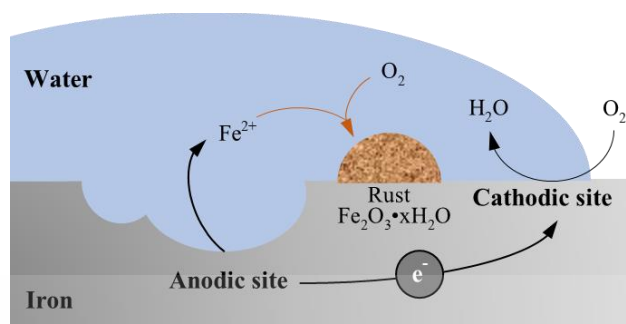
ตารางที่ 2.1.1 องค์ประกอบของเหล็กกล้าไร้สนิมตามมาตรฐาน AISI (American Iron and Steel Institute. 1991)

| ชนิด | ร้อยละเชิงมวลของธาตุต่างๆ (%) | | | | | | | | |
|------|-------------------------------|-----------|-----------|----------|----------|-----------|-----------|-----------|--------------|
| | Carbon (Max.) | Si (Max.) | Mn (Max.) | S (Max.) | P (Max.) | Ni | Cr | Mo (Max.) | Fe |
| 304 | 0.08 | 1.0 | 2.0 | 0.045 | 0.03 | 8.0-10.5 | 18.0-20.0 | - | ส่วนที่เหลือ |
| 304L | 0.03 | 1.0 | 2.0 | 0.045 | 0.03 | 8.0-12.0 | 18.0-20.0 | - | |
| 316 | 0.08 | 1.0 | 2.0 | 0.045 | 0.03 | 10.0-14.0 | 16.0-18.0 | 2.0-3.0 | |
| 316L | 0.03 | 1.0 | 2.0 | 0.045 | 0.03 | 10.0-14.0 | 16.0-18.0 | 1.2-2.75 | |

เหล็กกล้าไร้สนิมชนิด 304 เหมาะสำหรับการใช้งานอุณหภูมิห้องและที่อุณหภูมิต่ำ (Cryogenic) สามารถป้องกันการกัดกร่อนจากสารเคมีบางชนิด เช่น กรดซัลฟิวริกที่ความเข้มข้นน้อย แต่ไม่สามารถป้องกันการกัดกร่อนจากสารประกอบคลอไรด์และกรดที่มีความเข้มข้นสูง จากข้อจำกัดดังกล่าวจึงได้พัฒนาเหล็กกล้าไร้สนิมชนิด 316 โดยลดอัตราส่วนของโครเมียมและเติมโมลิบดีนัมเพื่อเพิ่มการป้องกันการกัดกร่อนจากสภาวะแวดล้อมที่ประกอบด้วยสารประกอบคลอไรด์ (น้ำทะเล) และกรดที่มีความเข้มข้นสูง แต่ยังคงพบการกัดกร่อนแบบรูเข็มเมื่อสภาวะแวดล้อมที่มีความเข้มข้นของคลอไรด์มากกว่า 100 ppm (Malik, A. U. 1992) โดยเครื่องหมาย L แสดงถึงโลหะผสมที่มีปริมาณคาร์บอนต่ำเพื่อลดโอกาสเกิดโครเมียมคาร์ไบด์ (Chromium carbide) จากการเชื่อม การเกิดโครเมียมคาร์ไบด์จะทำให้บริเวณขอบรอยเชื่อมปราศจากโครเมียมนำไปสู่การกัดกร่อนตามขอบเกรน (Intergranular corrosion) (AISI. 1991; Schade, C. T. 2008)

เมื่อโลหะสัมผัสกับสภาวะแวดล้อมที่ประกอบด้วยอากาศและน้ำ กรด ต่าง หรือสารประกอบคลอไรด์จะทำให้เกิดปฏิกิริยารีดอกซ์ซึ่งประกอบด้วยปฏิกิริยาออกซิเดชันและรีดักชัน (Oxidation and reduction reaction) (Roberge, P. R. 2008; Kaesche, H. 2012) ดังรูปที่ 2.1.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

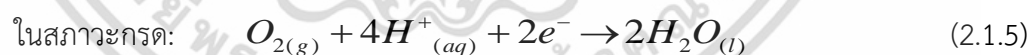
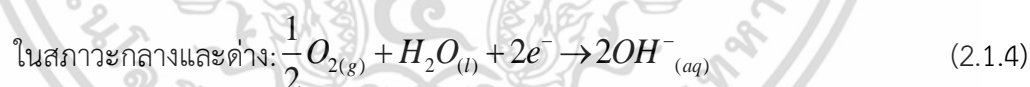


รูปที่ 2.1.1 กลไกการกัดกร่อนของเหล็กในน้ำที่ประกอบด้วยออกซิเจน (Schmitz, A. 2012)

ปฏิกิริยาออกซิเดชัน คือ ปฏิกิริยาที่โลหะสูญเสียอิเล็กตรอนให้กับสภาวะแวดล้อม ดังสมการที่ 2.1.1 ถึง 2.1.3 บริเวณที่เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันจะกลายเป็นขั้วแอโนด (Anode electrode)



ปฏิกิริยารีดักชัน คือ ปฏิกิริยาที่สภาวะแวดล้อมรับอิเล็กตรอนจากโลหะ ดังสมการที่ 2.1.4 ถึง 2.1.5 บริเวณที่เกิดปฏิกิริยารีดักชันจะกลายเป็นขั้วแคโทด (Cathode electrode)



ในกรณีของเหล็กกล้าไร้สนิม เมื่อสัมผัสกับสภาวะแวดล้อมที่สามารถทำให้เกิดการกัดกร่อนโครเมียมซึ่งมีค่าศักย์ไฟฟ้ามาตรฐาน (Standard electrode potential; E°) ต่ำกว่าเหล็ก (ตารางที่ 2.1.2) จะเริ่มสูญเสียอิเล็กตรอนและสร้างพาสซีฟฟิล์ม (Passive film) ที่มีองค์ประกอบทางเคมี คือ โครเมียม (III) ออกไซด์ (Cr_2O_3) ไอร์รอน (II,III) ออกไซด์ (Fe_3O_4) และ โมลิบดีนัม (VI) ออกไซด์ (MoO_3) ที่มีสมบัติป้องกันการเคลื่อนที่ผ่านของน้ำและอากาศ (Landolt, D. 2007)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.1.2 ศักย์ไฟฟ้ามาตรฐานของโลหะต่างๆ เทียบกับขั้วไฮโดรเจนมาตรฐาน (Standard Hydrogen Electrode) ที่อุณหภูมิ 25 °C (Saji, V. S. 2012)

| ปฏิกิริยาที่ขั้วไฟฟ้า (Reaction electrode) | ศักย์ไฟฟ้ามาตรฐาน (E°) (V) |
|--|-------------------------------------|
| $Au^{2+} + 2e^- \rightarrow Au$ | +1.69 |
| $Pt^{2+} + 2e^- \rightarrow Pt$ | +1.18 |
| $O_2 + H_2O + 4e^- \rightarrow 4OH^-$ | +0.401 |
| $2H^+ + 2e^- \rightarrow H_2$ | 0.000 |
| $Ni^{2+} + 2e^- \rightarrow Ni$ | -0.236 |
| $Fe^{2+} + 2e^- \rightarrow Fe$ | -0.440 |
| $Cr^{3+} + 3e^- \rightarrow Cr$ | -0.74 |

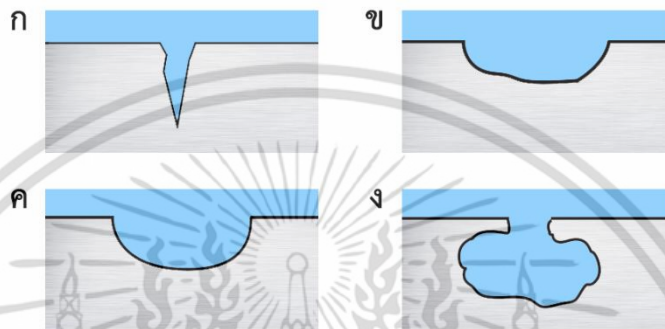
เมื่อชั้น Passive film สัมผัสกับสภาวะแวดล้อมที่ประกอบด้วยสารประกอบของคลอไรด์ ซัลเฟต หรือไฮดรอกไซด์เป็นเวลานาน จะทำให้ชั้นพาสซีฟฟิล์มแตก (Breakdown) และนำไปสู่การกัดกร่อนเฉพาะที่แบบต่างๆ เช่น การกัดกร่อนแบบรูเข็ม (Pitting) และการกัดกร่อนในซอก (Crevice)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2 การกัดกร่อนแบบรูเข็ม (Pitting)

การกัดกร่อนแบบรูเข็ม คือการกัดกร่อนแบบเฉพาะที่ (Localized corrosion) โดยผิวโลหะที่ถูกกัดกร่อนมีพื้นที่เล็กเมื่อเทียบกับปริมาตรโพรงที่เกิดขึ้น ดังรูปที่ 2.2.1

การกัดกร่อนแบบรูเข็มมักเกิดกับโลหะที่สามารถสร้างชั้น Passive film ได้ เช่น อลูมิเนียม และเหล็กกล้าไร้สนิม และสัมพันธ์กับสารละลายที่มีสมบัติกัดกร่อน เช่น สารละลายที่ประกอบด้วยไอออนของคลอไรด์และไฮโดรเจนไดออกไซด์ กรดไนตริก หรือกรดซัลฟิวริก เป็นต้น (Smialowska, Z. S. 2005: 2)



รูปที่ 2.2.1 ลักษณะของการกัดกร่อนแบบรูเข็ม (ก) แบบลึก (Deep pitting) (ข) แบบตื้น (Shallow pitting) (ค) แบบวงรี (Elliptical pitting) และ (ง) แบบโพรง (Subsurface pitting)

การกัดกร่อนแบบรูเข็มประกอบด้วย 2 ขั้นตอนหลัก ได้แก่ การเริ่มเกิดของรูเข็ม (Pitting nucleation) และการขยายตัวของรูเข็ม (Pitting growth)

2.2.1 การเริ่มเกิดของรูเข็ม (Pitting nucleation) (Khatak, H.S and Raj, B. 2002: 89-91)

กลไกการเริ่มเกิดของรูเข็มแบ่งเป็น 3 ขั้นตอน ได้แก่ การดูดซับไอออนลบ การเคลื่อนที่ผ่านของไอออนและการแตกของชั้นฟิล์ม

- 1) การดูดซับไอออน (Adsorption) เนื่องจากไอออนลบต่างๆ เช่น ไอออนของคลอไรด์ตามธรรมชาติจะพยายามเคลื่อนที่เข้าสู่ชั้นออกไซด์ฟิล์มเพื่อไปปรับอิเล็กทรอนิกส์บนผิวหน้าโลหะ แต่ชั้น Passive oxide film ของโลหะบางชนิด เช่น เหล็กกล้าไร้สนิมสามารถป้องกันไม่ให้ไอออนลบบางส่วนเคลื่อนที่ไปถึงผิวโลหะ ไอออนลบต่างๆ จึงถูกดูดซับไว้ในชั้นเคลือบ
- 2) การเคลื่อนที่ผ่านของไอออน (Penetration) ไอออนลบที่ถูกดูดซับจะเข้าไปแทนที่และไล่ออกซิเจนที่มีอยู่เดิมในชั้น Passive film ทำให้พันธะระหว่างไอออนโลหะในชั้นออกไซด์ฟิล์มอ่อนแรง ส่งผลให้ไอออนลบสามารถเคลื่อนที่ไปยังผิวโลหะได้มากขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

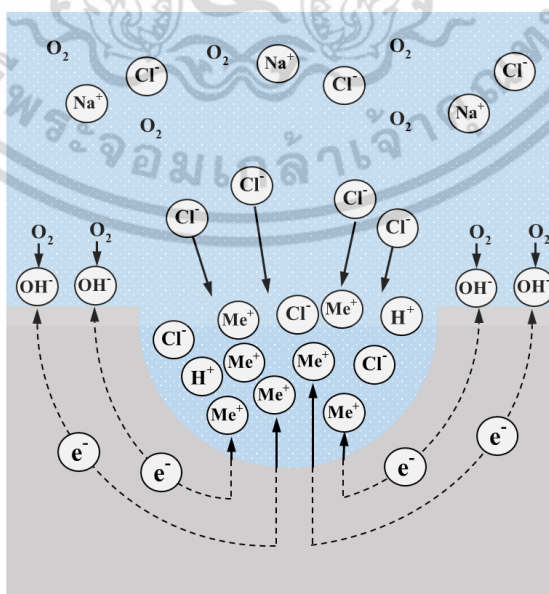
- 3) การแตกของชั้นฟิล์ม (Film breaking) การที่ไอออนลบเคลื่อนที่เข้าไปรับอิเล็กตรอนที่ผิวโลหะได้มากขึ้นหมายถึงอัตราการสูญเสียอิเล็กตรอนของโลหะมากกว่าอัตราการสร้างชั้น Passive film ในช่วงแรกยังพบชั้นออกไซด์ฟิล์มในบริเวณที่ถูกกัดกร่อน แต่ชั้นฟิล์มในบริเวณนี้มีความเสถียรน้อยกว่าบริเวณผิวโลหะที่ไม่ถูกกัดกร่อน ส่งผลให้เกิดการดูดซับและเคลื่อนที่ผ่านของไอออนลบอีกครั้ง จนกระทั่งโลหะไม่สามารถสร้างชั้นฟิล์มได้อีกจึงเกิดการแตกของชั้นฟิล์ม และนำไปสู่การขยายตัวของการกัดกร่อนแบบรูเข็ม

2.2.2 การขยายตัวของรูเข็ม

การขยายตัวของรูเข็มเริ่มขึ้นเมื่อปริมาณออกซิเจนภายในรูเข็มเหลือน้อยมากหรือเท่ากับศูนย์ เนื่องจากถูกใช้ในปฏิกิริยาแคโทดิกหรือปฏิกิริยารีดักชันอย่างต่อเนื่อง ภายในรูเข็มจึงเกิดปฏิกิริยาแอโนดิกหรือปฏิกิริยาออกซิเดชันเพียงอย่างเดียวส่งผลให้ไอออนของโลหะมีปริมาณเพิ่มมากขึ้น จนกระทั่งภายในรูเข็มเต็มไปด้วยประจุบวก เพื่อดุลประจุในรูเข็มให้เป็นศูนย์ ไอออนของคลอไรด์ซึ่งเป็นประจุลบจะถูกดึงเข้าสู่รูเข็มและเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส ดังสมการที่ 2.2.1



ผลลัพธ์ที่ได้จากปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสทำให้สารละลายภายในรูเข็มมีฤทธิ์เป็นกรดรุนแรง อัตราการกัดกร่อนจึงเพิ่มมากขึ้น เมื่อการกัดกร่อนเพิ่มมากขึ้นปริมาณไอออนของโลหะภายในรูเข็มจึงเพิ่มขึ้นอีกครั้งเกิดเป็นวัฏจักรการกัดกร่อนแบบรูเข็ม ส่งผลให้ความรุนแรงของการกัดกร่อนมากขึ้นเรื่อยๆ (สม ฤกษ์ จันทรอัมพร. 2558: 262-263) กลไกการขยายตัวของการกัดกร่อนแบบรูเข็มแสดงดังรูปที่ 2.2.2



รูปที่ 2.2.2 กลไกการขยายตัวของรูเข็ม (Fontana, M. G. 1986: 67)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.3 การป้องกันการกัดกร่อนแบบรูเข็ม

การป้องกันการกัดกร่อนแบบรูเข็มที่นิยมใช้ในปัจจุบัน ได้แก่

- 1) การใช้โลหะผสมที่ประกอบด้วยธาตุที่มีสมบัติป้องกันการกัดกร่อนแบบรูเข็ม เช่น เหล็กกล้าไร้สนิมที่ประกอบด้วยโครเมียมและโมลิบดีนัม ซึ่งสามารถสร้างชั้นฟิล์มที่แข็งแรงส่งผลให้ค่าความต่างศักย์ที่ตำแหน่งเริ่มเกิดการกัดกร่อนแบบรูเข็มเพิ่มขึ้น (Smialowska, Z. S. 2005: 281-284)
- 2) การใช้หลักการป้องกันแบบแคโทดิก (Cathodic protection) โดยให้โลหะที่มีค่าศักย์ไฟฟ้ามาตรฐานต่ำกว่าโลหะที่ต้องการปกป้องถูกกัดกร่อนแทน เช่น การปกป้องอะลูมิเนียมหรือเหล็กโดยให้สังกะสีถูกกัดกร่อนแทน (Landolt, D. 2007: 565-566)
- 3) การใช้หลักการการเบี่ยงเบนของศักย์ไฟฟ้าเพื่อให้โลหะอยู่ในช่วงที่สามารถสร้างชั้นพาสซีฟฟิล์ม (Protection by polarization into passive region) โดยการจ่ายหรือดึงกระแสไฟฟ้าเข้าสู่โลหะ (Landolt, D. 2007: 567)
- 4) การเคลือบผิวโลหะด้วยวัสดุอินทรีย์ (Organic material) และวัสดุอนินทรีย์ (Inorganic material) เพื่อป้องกันไม่ให้โลหะสัมผัสกับสภาวะแวดล้อมที่มีสมบัติกัดกร่อนโดยตรง (Makhlouf, A. S. 2014: 17-24)

วิธีที่กล่าวข้างต้นสามารถใช้ร่วมกันมากกว่า 1 วิธี ซึ่งการเคลือบผิวเป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพสะดวกและสามารถปรับใช้ร่วมกับชิ้นงานหลากหลายรูปแบบ และสามารถพัฒนาเพิ่มสมบัติเฉพาะได้

2.3 การป้องกันการกัดกร่อนโดยการเคลือบผิว (Makhlouf, A. S. 2014: 17-24)

การเคลือบผิวโลหะมีวัตถุประสงค์เพื่อไม่ให้โลหะสัมผัสกับสภาวะแวดล้อมโดยตรง ชั้นเคลือบจะทำหน้าที่จำกัดปริมาณและลดอัตราการแพร่ของสารที่มีฤทธิ์กัดกร่อน เช่น น้ำ อากาศ และไอออนของคลอไรด์ที่จะเคลื่อนที่เข้าสู่ผิวหน้าโลหะ อัตราการเกิดปฏิกิริยารีดอกซ์จึงลดลงและนำไปสู่ความสามารถในการป้องกันการกัดกร่อนของชั้นเคลือบที่เพิ่มขึ้น

ชั้นเคลือบสามารถแบ่งได้หลายประเภท เช่น ชั้นเคลือบอินทรีย์ (Organic coating) ที่ไม่เป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อม แต่มีข้อจำกัดของสมบัติเชิงกล เช่น ความแข็งแรงของชั้นเคลือบน้อยและเกิดรอยเนื่องจากการขัดถูได้ง่าย ชั้นเคลือบอนินทรีย์ (Inorganic coating) ที่มีวัตถุประสงค์ที่ต้องการสมบัติเด่นของสารอนินทรีย์ เช่น ความสามารถในการทนความร้อนของเซรามิก และชั้นเคลือบโลหะ (Metallic coating) ซึ่งทำหน้าที่ถูกกัดกร่อนแทนโลหะที่ถูกเคลือบ ชั้นเคลือบแต่ละชนิดมีสมบัติเฉพาะตัวที่ต่างกันจึงมีการพัฒนาชั้นเคลือบแบบผสม (Hybrid coating) ของชั้นเคลือบอินทรีย์และอนินทรีย์ซึ่งไม่เป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อมและมีสมบัติเชิงกลที่ดี เช่น อีพอกซีไซเลน

2.3.1 ชั้นเคลือบอินทรีย์ (Forsgren, A. 2006: 11-26)

ชั้นเคลือบอินทรีย์ที่นิยมใช้ ได้แก่ อีพอกซี อะคริลิก พอลิยูรีเทน พอลิเอสเทอร์ และยางที่ผ่านการทำปฏิกิริยากับคลอรีน (Chlorinated Rubber) สามารถปกป้องโลหะจากสภาวะแวดล้อมที่แตกต่างกันตามสมบัติเฉพาะตัวของวัสดุเคลือบผิว ดังแสดงในตารางที่ 2.3.1 เช่น อีพอกซีเหมาะสำหรับใช้เคลือบผิวโลหะในสภาวะที่ต้องสัมผัสกับน้ำหรือสารเคมีและสามารถใช้ในงานที่ต้องสัมผัสกับของไหลหรือความดันซึ่งเสี่ยงต่อการแยกตัวของชั้นเคลือบเนื่องจากอีพอกซีสามารถยึดติดกับผิวโลหะได้ดี นอกจากนี้ยังสามารถปรับปรุงสมบัติเพิ่มเติมตามชนิดของชั้นเคลือบ

ตารางที่ 2.3.1 สมบัติของชั้นเคลือบอินทรีย์ชนิดต่างๆ (Forsgren, A. 2006: 11-26)

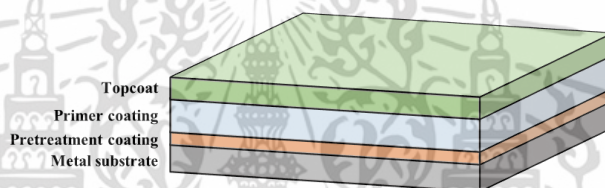
| ชนิดของชั้นเคลือบ | สมบัติ |
|--------------------------|---|
| อีพอกซี (Epoxy) | - มีสมบัติเชิงกลที่แข็งแรง - สามารถยึดติดกับผิวโลหะได้ดี - ทนทานต่อสารเคมีและน้ำ - ง่ายต่อการสลายตัวเมื่อสัมผัสกับรังสี UV - ง่ายต่อการปรับปรุงสมบัติ |
| อะคริลิก (Acrylic) | - ทนทานต่อรังสี UV - มีสมบัติเชิงกลที่แข็งแรงโดยเฉพาะ |
| พอลิเอสเทอร์ (Polyester) | - ทนทานต่อสารละลาย กรด - ไม่เหมาะกับแอลคาไลน์ |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.3.1 สมบัติของชั้นเคลือบอินทรีย์ชนิดต่างๆ (ต่อ) (Forsgren, A. 2006: 11-26)

| ชนิดของชั้นเคลือบ | สมบัติ |
|--|--|
| ยางที่ผ่านการทำปฏิกิริยากับคลอรีน (Chlorinated Rubber) | <ul style="list-style-type: none"> - ทนทานต่อน้ำ ไขมัน และสารเคมี - สามารถยึดติดกับโลหะได้ดี - ไม่เหมาะกับตัวทำละลาย - สลายตัวที่อุณหภูมิ 134 °C |
| พอลิยูรีเทน (Polyurethane) | <ul style="list-style-type: none"> - ทนทานต่อน้ำ สารละลาย และตัวทำละลาย - ทนทานต่อแอลคาไลน์มากที่สุดในพอลิเมอร์ - ทนทานต่อการขัดถู (Abrasion) |

การใช้งานชั้นเคลือบอาจใช้งานเพียงหนึ่งชั้นเคลือบ (Single layer) หรือมากกว่าหนึ่งชั้น (Multiple layer) ซึ่งอาจใช้งานร่วมกับชั้นเคลือบอินทรีย์หรือชั้นเคลือบโลหะดังรูปที่ 2.3.1



รูปที่ 2.3.1 ชั้นเคลือบที่ประกอบด้วยชั้นย่อยหลายชั้น (Makhlouf, A. S. 2014: 18)

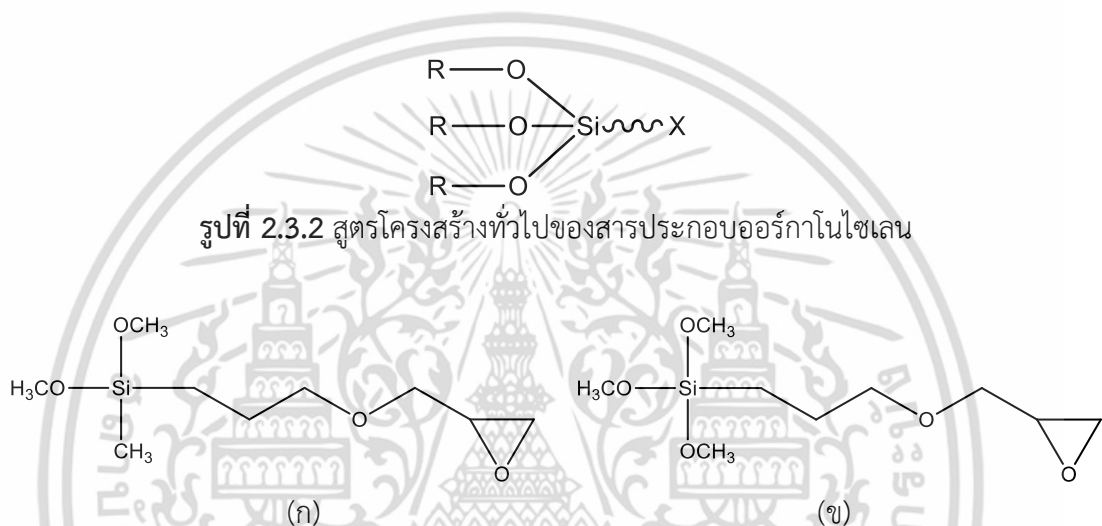
นอกจากนี้ชั้นเคลือบมักนิยมใช้ร่วมกับสารเพิ่มสมบัติ (Additive) เช่น สารเพิ่มแรงยึดติด สารเพิ่มความเหนียว (Plasticizer) สารลดความหนืด และสารเติมเต็ม (Filler) เช่น อนุภาคซิลิกา ไททาเนียมไดออกไซด์ และซิงค์ออกไซด์ เป็นต้น เพื่อเพิ่มสมบัติเชิงกล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.2 ชั้นเคลือบอีพอกซีไซเลน (Forsgren, A. 2006: 12-15)

ชั้นเคลือบอีพอกซีไซเลนคือชั้นเคลือบที่ทำจากสารประกอบไซเลนที่มีหมู่ฟังก์ชันอินทรีย์ (Organo silane) ดังรูปที่ 2.3.2 ซึ่งประกอบด้วยซิลิกอน (Si) หมู่อัลคอกไซด์ (Alkoxide group; RO) ทำหน้าที่สร้างพันธะกับสารอินทรีย์ และหมู่ฟังก์ชัน (Functional group; X) ทำหน้าที่สร้างพันธะกับสารอินทรีย์ ในกรณีของอีพอกซีไซเลนหมู่ฟังก์ชันคือหมู่อีพอกไซด์ (Epoxide group)

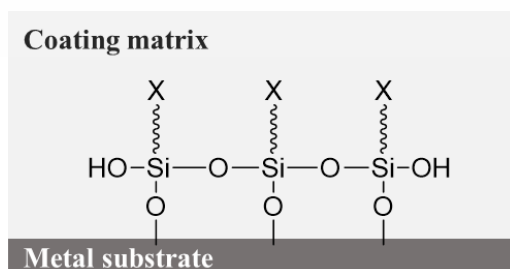
ตัวอย่างของอีพอกซีไซเลนที่นิยมใช้ในการเคลือบผิวโลหะเพื่อป้องกันการกัดกร่อน เช่น 3-Glycidoxypropyl dimethoxymethylsilane (GPMMS) และ 3-Glycidoxypropyl trimethoxysilane (GPTMS) ดังรูปที่ 2.3.3



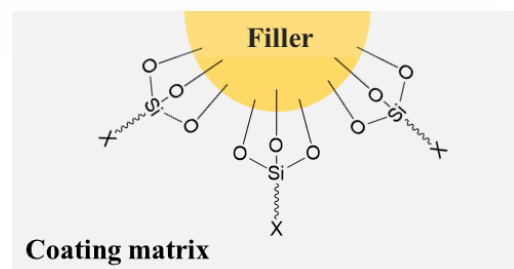
รูปที่ 2.3.3 สูตรโครงสร้างของ (ก) GPMMS และ (ข) GPTMS

หมู่อีพอกไซด์ (Epoxide) ทำหน้าที่เป็นสารควบคู่ (Coupling agent) ซึ่งสามารถรวมตัวกับพอลิเมอร์ชนิดอื่นๆ เกิดเป็นพอลิเมอร์ที่มีสายยาวและมีความซับซ้อน (Crosslink)

หมู่อัลคอกไซด์ทำหน้าที่เพิ่มความแข็งแรงให้กับชั้นเคลือบและแรงยึดติดกับผิวโลหะและสารเติมเต็มอินทรีย์ โดยการสร้างพันธะซิลอกเซน (Siloxane bond) ดังรูปที่ 2.3.4 และกลไกการสร้างพันธะดังกล่าวแสดงดังรูปที่ 2.3.5



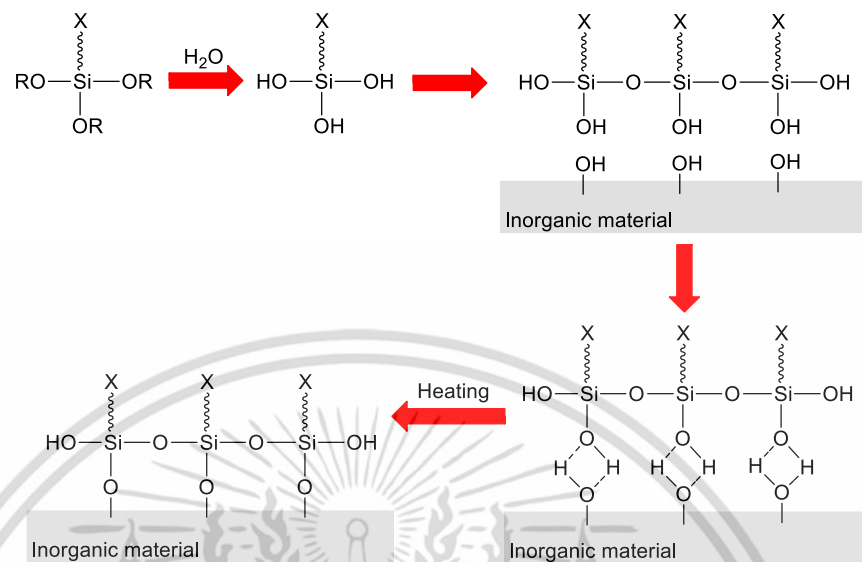
(ก)



(ข)

รูปที่ 2.3.4 การสร้างพันธะระหว่างซิลิกาในอีพอกซีไซเลนกับ (ก) ผิวโลหะ และ (ข) สารเติมเต็ม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.3.5 กลไกการสร้างพันธะซิลอกเซนกับวัสดุอินทรีย์

พันธะซิลอกเซน (Siloxane bond) ในชั้นเคลือบช่วยขัดขวางการแพร่ผ่านของอากาศ น้ำ และไอออนต่างๆ (Changjean, W. C. 2014) นอกจากนี้ยังพบว่าพันธะระหว่างผิวโลหะกับอีพอกซีไซเลน (Me-O-Si; Me คือโลหะ) ช่วยให้ชั้นเคลือบสามารถยึดติดกับผิวโลหะได้ดีและไม่เกิดการแยกตัวของชั้นเคลือบ (Delamination) (Wu, L. K. 2012 และ Wang, P. 2008) แต่อย่างไรก็ดีตำหนิ (Defect) หรือรอยแยกและรูพรุนที่มีขนาดระดับไมโครเมตรบนผิวหน้าและในชั้นเคลือบเกิดจากขั้นตอนการอบเพื่อให้ชั้นเคลือบยึดเกาะกับโลหะผ่านพันธะโคเวเลนต์ซึ่งทำให้เกิดน้ำขึ้น และน้ำจะถูกระเหยออกจากชั้นเคลือบเนื่องจากความร้อนที่ใช้ในการอบทำให้เกิดช่องว่างในชั้นเคลือบหรือรูพรุนบนผิวของชั้นเคลือบเมื่อชั้นเคลือบที่มีตำหนิเหล่านี้สัมผัสกับสภาวะแวดล้อมที่มีฤทธิ์กัดกร่อนเป็นระยะเวลานาน ไอออนจากสภาวะแวดล้อมสามารถเคลื่อนที่เข้าสู่ชั้นเคลือบผ่านทางตำหนิแล้วพัฒนาไปสู่การกัดกร่อนเฉพาะที่ (Borisova, D. 2011) หลังจากนั้นบริเวณที่ถูกกัดกร่อนจะมีขนาดเพิ่มขึ้นและนำไปสู่การกัดกร่อนแบบรูเข็มและการกัดกร่อนแบบในซอก (Zarras, P. 2003) ปริมาณและขนาดของรอยแยกและรูพรุนดังกล่าวสามารถลดได้โดยการใช้สารเติมเต็ม (Filler) ที่ประกอบด้วยอนุภาคขนาดระดับนาโนเมตรในชั้นเคลือบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.3 สารเติมเต็ม (Filler)

สารเติมเต็มอนินทรีย์ที่มีขนาดระดับนาโนเมตร (Nano-sized inorganic filler) สามารถปรับปรุงสมบัติของชั้นเคลือบตามคุณลักษณะของอนุภาคนั้นๆ (Wang, N. 2015) ดังแสดงในตารางที่ 2.3.2

ตารางที่ 2.3.2 สมบัติของชั้นสารเติมเต็มชนิดต่างๆ (Patil, S. S. 2015; Wang, N. 2015; Lamaka, S. V. 2007; Dhoke, S. K. 2009)

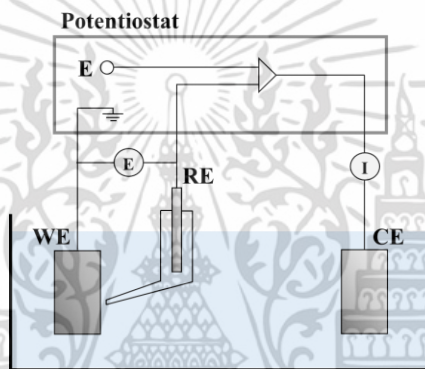
| ชนิดของสารเติมเต็ม | สมบัติ |
|--|--|
| อะลูมิเนียมออกไซด์ (Aluminium oxide; Al_2O_3) | สามารถเพิ่มการนำไฟฟ้า |
| ซิลิกอนคาร์ไบด์ (Silicon carbide; SiC) | สามารถเพิ่มความแข็ง (Hardness) และแรงต้านทานการดึง (Tensile strength) |
| ซิลิกา (Silica; SiO_2) | สามารถเพิ่มความแข็งแรง ความทนทานต่อความร้อนและสารเคมี การต้านทานการนำไฟฟ้า และการป้องกันการกัดกร่อน |
| ซิงค์ออกไซด์ (Zinc oxide; ZnO) และซิงค์เพอร์ออกไซด์ (Zinc peroxide; ZnO_2) | สามารถเพิ่มการป้องกันการกัดกร่อน |
| ไททาเนียมไดออกไซด์ (Titanium dioxide; TiO_2) | สามารถเพิ่มความไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic) มีสมบัติเป็นตัวออกซิไดซ์ที่ดีส่งผลให้เกิดความสามารถในการทำความสะอาดตัวเอง (Self-cleaning) และเป็นกึ่งตัวนำไฟฟ้า |

นอกจากนี้สารเติมเต็มยังมีบทบาทในการป้องกันการกัดกร่อนด้วยการเติมเต็มรูพรุนภายในชั้นเคลือบทำให้ปริมาณน้ำหรือไอออนต่างๆที่ถูกดูดซับในชั้นเคลือบลดลงและขัดขวางการแพร่ของน้ำและไอออนจากชั้นเคลือบสู่ผิวโลหะ (Bano, S. 2013; Shen, G. X. 2005)

2.4 การตรวจสอบการกัดกร่อนด้วยเทคนิคโพเทนชิโอดีนามิก (Landolt, D. 2007)

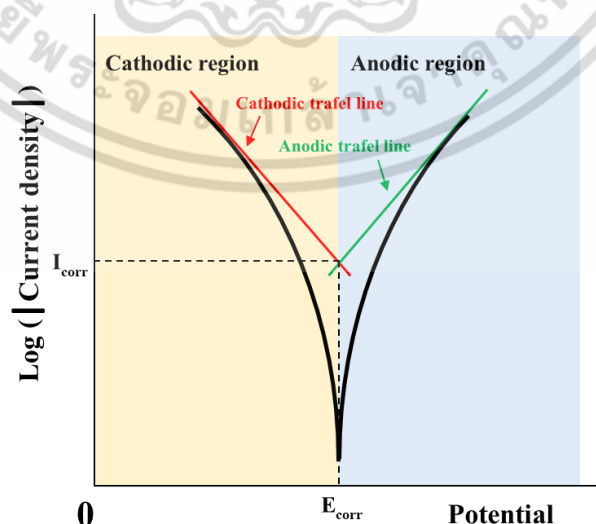
เทคนิคโพเทนชิโอดีนามิกสามารถตรวจสอบการกัดกร่อนโลหะและชั้นเคลือบได้โดยวัดค่าความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า (Current density) จากปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นเมื่อค่าศักย์ไฟฟ้า (Potential) ภายในเซลล์สำหรับทดสอบการกัดกร่อนเปลี่ยนแปลง โดยความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าแสดงถึงปริมาณอิเล็กตรอนที่เกิดหรือได้รับจากปฏิกิริยาการกัดกร่อนที่ค่าศักย์ไฟฟ้าต่างๆ

เซลล์สำหรับทดสอบการกัดกร่อนด้วยเทคนิคโพเทนชิโอดีนามิกประกอบด้วยขั้วทำงาน (Working electrode; WE) คือตัวอย่างที่ต้องการใช้วัดการกัดกร่อน ขั้วอ้างอิง (Reference electrode; RE) ขั้วไฟฟ้าช่วย (Counter electrode; CE) และสารละลาย ดังรูปที่ 2.4.1 ความต่างศักย์จะถูกวัดระหว่างขั้ว WE และ RE และกระแสไฟฟ้าถูกวัดระหว่างขั้ว WE และ CE



รูปที่ 2.4.1 เซลล์สำหรับทดสอบการกัดกร่อนด้วยเทคนิคโพเทนชิโอดีนามิก

ผลลัพธ์ที่ได้จะอยู่ในรูปของเส้นโค้งโพลาริเซชัน (Polarization curve) แสดงกระแสไฟฟ้าสุทธิของทุกปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในเซลล์ทดสอบการกัดกร่อน ดังรูปที่ 2.4.2



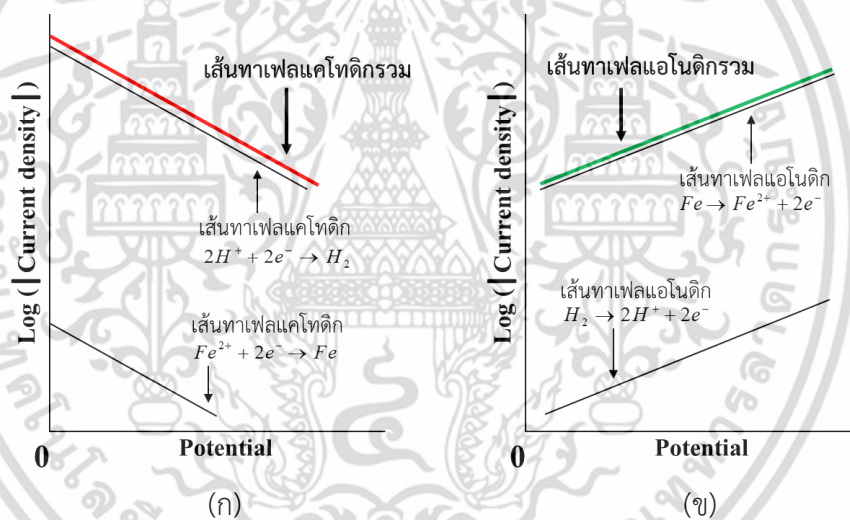
รูปที่ 2.4.2 เส้นโค้งโพลาริเซชัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 2.4.2 เส้นโค้งโพลาริเซชันแบ่งเป็น 2 บริเวณ ได้แก่ บริเวณแคโทดิก (Cathodic region) และบริเวณแอโนดิก (Anodic region) โดยบริเวณแคโทดิก (Cathodic region) อยู่ในช่วงที่ความต่างศักย์ของเซลล์น้อยกว่าความต่างศักย์ที่เกิดการกัดกร่อน (Corrosion potential; E_{corr}) แสดงถึงการเกิดปฏิกิริยารีดักชันมากกว่าออกซิเดชัน ตัวอย่างของปฏิกิริยารีดักชันที่เกิดขึ้นเมื่อเหล็กเกิดการกัดกร่อนในสภาวะที่เป็นกรด แสดงดังสมการที่ 2.4.1 และ 2.4.2



ดังนั้นเส้นทาเฟลแคโทดิก (Cathodic Tafel line) จึงประกอบด้วยเส้นทาเฟลแคโทดิกของปฏิกิริยาที่ 2.4.1 และ 2.4.2 ดังรูปที่ 2.4.3.ก โดยที่ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าของปฏิกิริยาที่ 2.4.2 จากการคำนวณจริงมีค่าน้อยมากจนสามารถละได้เมื่อเทียบกับปฏิกิริยาที่ 2.4.1



รูปที่ 2.4.3 เส้นทาเฟล (ก) แคโทดิก และ (ข) แอโนดิก

บริเวณที่สองคือบริเวณแอโนดิก (Anodic region) ซึ่งอยู่ในช่วงที่ความต่างศักย์ของเซลล์มากกว่าความต่างศักย์ที่เกิดการกัดกร่อน ในบริเวณนี้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันมากกว่ารีดักชัน ตัวอย่างของปฏิกิริยาแอโนดิกที่เกิดขึ้นเมื่อเหล็กเกิดการกัดกร่อนในกรด แสดงดังสมการที่ 2.4.3 และ 2.4.4 ดังนั้นเส้นทาเฟลแอโนดิก (Anodic Tafel line) จึงประกอบด้วยเส้นทาเฟลแอโนดิกของปฏิกิริยาที่ 2.4.3 และ 2.4.4 โดยที่ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าของปฏิกิริยาที่ 2.4.4 จากการคำนวณจริงมีค่าน้อยมากจนสามารถละได้เมื่อเทียบกับปฏิกิริยาที่ 2.4.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ค่าความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าที่เกิดการกัดกร่อน (Corrosion current; i_{corr}) สามารถคำนวณได้จากสมการของ Butler-Volmer (สมการที่ 2.4.5) ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้า (i) และศักย์ไฟฟ้า (E) ของปฏิกิริยาแอโนดิกและแคโทดิก

$$i = i_{corr} \left(e^{\frac{2.303\eta}{\beta_a}} - e^{\frac{2.303\eta}{\beta_c}} \right) \quad (2.4.5)$$

และ $\eta = E - E_{corr} \quad (2.4.6)$

โดยที่ E = ศักย์ไฟฟ้าที่ป้อนเข้าสู่เซลล์ (Applied potential) (V)

E_{corr} = ศักย์ไฟฟ้าที่เกิดการกัดกร่อน (Corrosion potential) (V)

i = ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าที่วัดได้ (Measured current) (A/cm²)

η = ผลต่างระหว่างศักย์ไฟฟ้าที่ป้อนเข้าสู่เซลล์และศักย์ไฟฟ้าที่เกิดการกัดกร่อน (Overpotential) (V)

β_a = ค่าคงที่ Tafel ของปฏิกิริยาแอโนดิก (Anodic Tafel constant) (V/decade)

β_c = ค่าคงที่ Tafel ของปฏิกิริยาแคโทดิก (Cathodic Tafel constant) (V/decade)

เมื่อนำข้อมูลของเส้นโค้งโพลาไรเซชัน (Polarization curve) มาหาสมการซึ่งเป็นตัวแทนของชุดข้อมูล (Curve fitting) ในรูปของสมการ Butler-Volmer (สมการที่ 2.4.5) จะทำให้ทราบค่าของ i_{corr} , β_a และ β_c

อัตราการกัดกร่อนของโลหะสามารถคำนวณได้จากกฎของ Faraday (สมการที่ 2.4.7) ซึ่งจะเห็นว่าอัตราการกัดกร่อนของโลหะสามารถพิจารณาได้จากความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าที่เกิดการกัดกร่อน

$$R_m = \frac{M}{nF\rho} i_{corr} \quad (2.4.7)$$

โดยที่ R_m = อัตราการกัดกร่อน (Corrosion rate) (mm/year)

M = น้ำหนักอะตอม (Atomic weight) (g/mol)

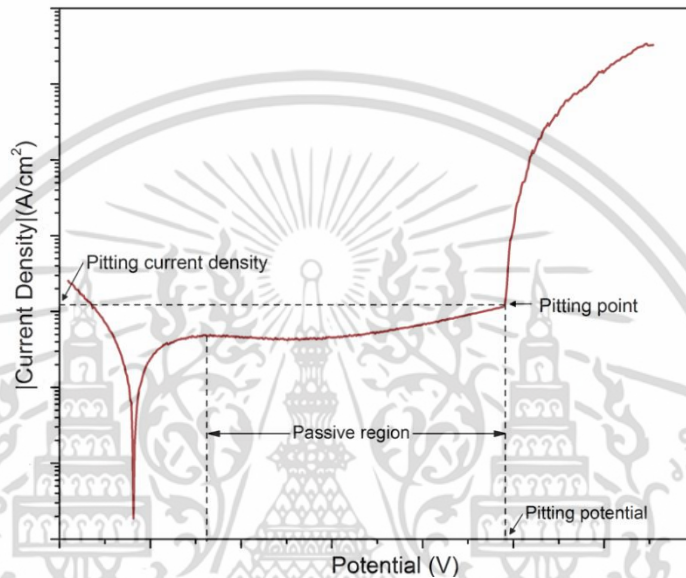
ρ = ความหนาแน่นของโลหะ (g/cm³)

n = จำนวนอิเล็กตรอนที่แลกเปลี่ยนในปฏิกิริยาออกซิเดชันและรีดักชัน

F = ค่าคงที่ Faraday หรือ 96.485 C/mol

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในกรณีของเหล็กกล้าไร้สนิม การเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันจะสร้างชั้นพาสซีฟของโครเมียม (III) ออกไซด์ (Cr_2O_3) ไอร์ออน (II,III) ออกไซด์ (Fe_3O_4) และ โมลิบดีนัม (VI) ออกไซด์ (MoO_3) ซึ่งมีสมบัติป้องกันการกัดกร่อน เมื่อชั้นดังกล่าวสัมผัสกับสภาวะแวดล้อมเป็นเวลานานจะทำให้ชั้นฟิล์มแตกและเหล็กกล้าไร้สนิมเริ่มถูกกัดกร่อน การกัดกร่อนที่เกิดขึ้นจะมีลักษณะเป็นแบบรูเข็ม (Pitting) เนื่องจากการดูดซับน้ำและไอออนลบต่างๆ ทำให้ชั้นฟิล์มแตกตัว ดังที่ได้อธิบายในหัวข้อที่ 2.2 เส้นโค้งโพลาริเซชันของพฤติกรรมกัดกร่อนของเหล็กกล้าไร้สนิมแสดงดังรูปที่ 2.4.4



รูปที่ 2.4.4 เส้นโค้งโพลาริเซชันของเหล็กกล้าไร้สนิม

เส้นโค้งโพลาริเซชันของเหล็กกล้าไร้สนิม สามารถให้ข้อมูลการกัดกร่อนได้ดังนี้

- ค่าศักย์ไฟฟ้าที่เกิดการกัดกร่อนแบบรูเข็ม (Pitting potential; E_{pit}) แสดงถึงความทนทานก่อนที่จะเกิดการกัดกร่อนแบบรูเข็ม โดยที่ค่า E_{pit} สูงหมายถึงความทนทานก่อนเกิดการกัดกร่อนของตัวอย่างที่ทดสอบสูง
- ค่าความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าที่เกิดการกัดกร่อนแบบรูเข็ม (Pitting current density; J_{pit}) แสดงถึงความรุนแรงของการกัดกร่อนแบบรูเข็มเมื่อเริ่มเกิดการกัดกร่อน โดยที่ค่า J_{pit} ต่ำหมายถึงความรุนแรงของการกัดกร่อนแบบรูเข็มต่ำ
- ความเร่งของอัตราการเกิดปฏิกิริยารีดักชันและออกซิเดชันสามารถระบุได้จากความชันของเส้นทาเฟลแคโทดิกและแอนอดิกตามลำดับ ถ้ากราฟมีความชันมากหมายความว่ามีความเร่งของอัตราการเกิดปฏิกิริยาสูง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Tammy L. Metroke และคณะ (2001) รวบรวมงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการเคลือบโลหะด้วยชั้นเคลือบโซล-เจล (Sol-gel coating) พบว่าชั้นเคลือบประเภทนี้สามารถทำหน้าที่เป็นกำแพง (barrier) ป้องกันการแพร่ผ่านของออกซิเจนและไอออนของคลอไรด์ได้ ส่งผลให้ชั้นเคลือบชนิดนี้มีสมบัติป้องกันการกัดกร่อนและช่วยป้องกันการกัดกร่อนของโลหะให้ดียิ่งขึ้น และมีศักยภาพที่จะนำไปใช้แทนที่การเคลือบผิวด้วยสารประกอบของโครเมต (Chromate) อย่างไรก็ตามพบว่าชั้นเคลือบโซล-เจลมีข้อจำกัดคือในขั้นตอนการอบเพื่อให้ชั้นเคลือบยึดเกาะกับโลหะผ่านพันธะโคเวเลนต์กับผิวโลหะจะเกิดน้ำขึ้นและน้ำจะถูกกระเหยออกจากชั้นเคลือบเนื่องจากความร้อนที่ใช้ในการอบทำให้เกิดช่องว่างระดับไมโครเมตรหรือนาโนเมตรในชั้นเคลือบ

Vignesh Palanivel และคณะ (2003) ศึกษาการเติมอนุภาคนาโนซิลิกาในซิลิโคนฟิล์ม (Silane film) พบว่าอนุภาคนาโน สามารถเข้าไปเติมเต็มและลดช่องว่างดังกล่าวได้ โดยที่ปริมาณอนุภาคเป็นสัดส่วนผกผันกับปริมาณช่องว่าง และสามารถเพิ่มประสิทธิภาพป้องกันการกัดกร่อนได้ เนื่องจากอนุภาคนาโนซิลิกาสามารถสร้างพันธะไฮดรอกเซนกับโครงสร้างร่างแหของซิลิกาที่มีอยู่เดิมในซิลิโคนฟิล์ม ทำให้โครงสร้างร่างแหของซิลิกานาแน่นขึ้น สามารถป้องกันการเคลื่อนที่ของไอออนได้ดีขึ้น แต่การป้องกันดังกล่าวเป็นการป้องกันการกัดกร่อนแบบพาสซีฟ (Passive corrosion protection) เมื่อการกัดกร่อนเกิดจะไม่สามารถลดความรุนแรงของการกัดกร่อน จึงได้พัฒนาการป้องกันการกัดกร่อนแบบแอคทีฟ (Active corrosion protection) ทำให้ชั้นเคลือบสามารถลดความรุนแรงของการกัดกร่อนเมื่อเกิดการกัดกร่อน เช่น การใช้สารยับยั้งการกัดกร่อน เป็นต้น

ตัวอย่างงานวิจัยที่ศึกษาเกี่ยวกับสารยับยั้งการกัดกร่อน เช่น Mikhail Zheludkevich และคณะ (2005) ศึกษาการใช้เบนโซไตรอะโซลเป็นสารยับยั้งการกัดกร่อน พบว่าเบนโซไตรอะโซลจะรวมตัวกันเป็นชั้นฟิล์มบนผิวของโลหะส่งผลให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันและรีดักชันลดลง ต่อมาจึงได้มีการพยายามใช้สารยับยั้งการกัดกร่อนร่วมกับชั้นเคลือบโซล-เจลที่ประกอบด้วยซิลิกา เช่น Dominik Raps และคณะ (2009) ได้ทำการผสมสารยับยั้งการกัดกร่อนชนิดเบนโซไตรอะโซลในชั้นเคลือบโซล-เจลที่ประกอบด้วยซิลิกาลงไปโดยตรงและพบว่าเกิดผลลบต่อชั้นเคลือบโซล-เจลคือทำให้ความสามารถในการป้องกันการกัดกร่อนลดลง ซึ่งอาจเป็นผลมาจากการที่เบนโซไตรอะโซลขัดขวางพันธะไฮดรอกเซนภายในชั้นเคลือบโซล-เจล ในภายหลัง Dmitry G. Shchukin และคณะ (2007) ได้ศึกษาการใช้อนุภาคเมโซพอร์ซิลิกาที่ผ่านการดัดแปลงผิวให้มีชั้นของพอลิอิเล็กโทรไลต์ (Polyelectrolyte) ด้วยวิธีการที่เรียกว่า Layer-by-layer เพื่อบรรจุเบนโซไตรอะโซล พบว่าอนุภาคนาโนซิลิกาที่ถูกดัดแปลงพื้นผิวมีประสิทธิภาพการบรรจุสารยับยั้งการกัดกร่อนถึงร้อยละ 20 และสารยับยั้งการกัดกร่อนจะถูกปล่อยออกมาเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าความเป็นกรด-ด่าง ข้อจำกัดของวิธีการนี้คือความซับซ้อนในการสังเคราะห์ซึ่งไม่สามารถสังเคราะห์ได้ในปริมาณมากได้ ต่อมา Dimitriya Borisova และคณะ (2011) ศึกษาการใช้อนุภาคเมโซพอร์ซิลิกาซึ่งมีช่องว่างภายในและพื้นที่ผิวสูง

เพื่อบรรจุสารยับยั้งการกัดกร่อนชนิดเบนโซไตรอะโซล พบว่าสารยับยั้งดังกล่าวจะถูกปล่อยออกจากเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ผ่านการอนุญาต ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อนุภาคเมโซพอร์สซิลิกาเมื่อชั้นเคลือบเสียหายและสร้างชั้นฟิล์มบนผิวโลหะทำให้ประสิทธิภาพป้องกันการกัดกร่อนมากกว่าการใช้อนุภาคเมโซพอร์สซิลิกาที่ไม่บรรจุสารยับยั้งการกัดกร่อนเพียงอย่างเดียว

ถึงแม้ว่าอนุภาคเมโซพอร์สซิลิกาจะสามารถนำมาใช้บรรจุสารยับยั้งการกัดกร่อนและสามารถใช้เป็นสารเติมเต็มเพื่อเพิ่มสมบัติเชิงกลให้กับชั้นเคลือบได้ดี แต่ด้วยสมบัติเฉพาะตัวที่ชอบน้ำ (Hydrophilic) ซึ่งอาจส่งผลให้เกิดการดึงดูดสารที่มีฤทธิ์กัดกร่อนที่มีขี้ได้ ดังนั้นการทำให้อนุภาคเมโซพอร์สซิลิกามีสมบัติที่ไม่ชอบน้ำมากขึ้นอาจช่วยเพิ่มความสามารถในการป้องกันการกัดกร่อนมากขึ้นไปอีก ทางผู้วิจัยจึงพิจารณาถึงการใช้เมโซพอร์สซิลิกาเป็นอนุภาคคอมโพสิทร่วมกับโลหะชนิดอื่นที่มีสมบัติไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic) โดยทำการสังเคราะห์เมโซพอร์สซิลิกาและปรับผิวด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์ โดยที่จากการวิจัยของ Minglin Ma และ Randal M. Hill (2006) พบว่าการใช้อนุภาคที่มีพลังงานผิวดำ (Low surface energy) ในชั้นเคลือบ เช่น อนุภาคของไทเทเนียมไดออกไซด์ จะทำให้ผิวของชั้นเคลือบขรุขระและทำให้สมบัติไม่ชอบน้ำของชั้นเคลือบเพิ่มขึ้น



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงาน

ในงานวิจัยนี้แบ่งการทดลองเป็น 2 ส่วน คือ

1. การใช้อนุภาคนาโนคอมโพสิตของเมโซพอร์ซิลิกาและไทเทเนียมไดออกไซด์ (MSN@TiO_2) ที่บรรจุสารยับยั้งการกัดกร่อน BTA เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพความสามารถในการป้องกันการกัดกร่อนของชั้นเคลือบอีพอกซีไซเลน GPTMS ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์เข้มข้นร้อยละ 3.5 โดยมวล
2. ศึกษาอิทธิพลของค่าความเป็นกรด-ด่างต่อการป้องกันกัดกร่อนของเหล็กกล้าไร้สนิมเคลือบด้วยชั้นเคลือบอีพอกซีไซเลนที่ใช้ MSN@TiO_2 ซึ่งบรรจุสารยับยั้งการกัดกร่อน BTA ชั้นเคลือบที่ใช้ในการวิจัยแบ่งออกเป็น 6 ประเภท ดังแสดงในตารางที่ 3.1.1 สารเคมี อุปกรณ์และเครื่องมือวิเคราะห์ที่ใช้แสดงในภาคผนวก ก.1 ก.2 และ ก.3 ตามลำดับ

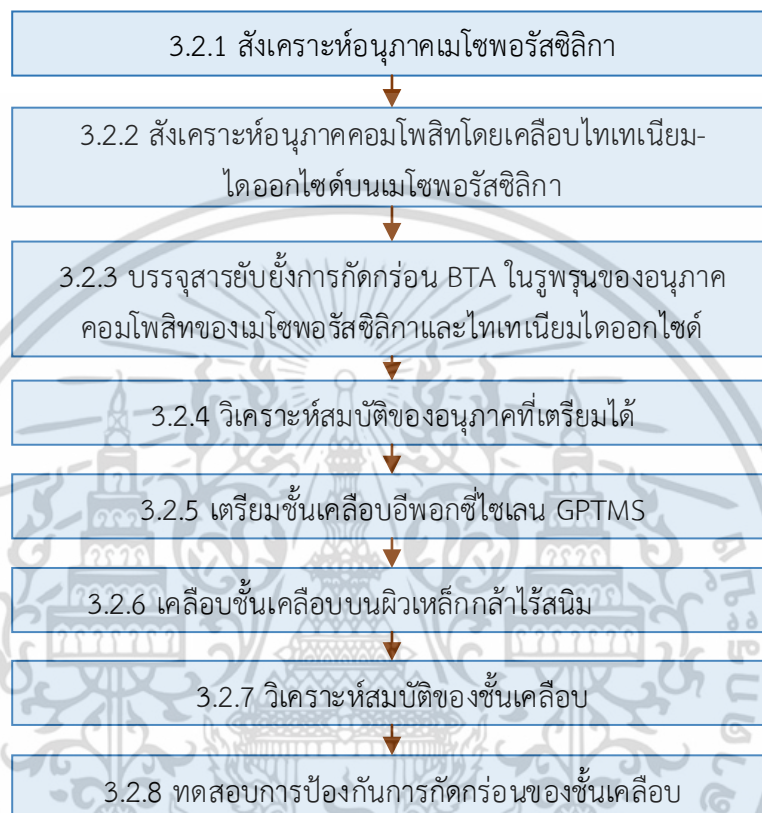
ตารางที่ 3.1.1 ชั้นเคลือบที่ใช้ในการทดลอง

| ชั้นเคลือบ | ลักษณะชั้นเคลือบ | โลหะ |
|--|--|----------------------------------|
| Bare 316L | ไม่มีชั้นเคลือบ | เหล็กกล้าไร้ สนิมชนิด 316L |
| GPTMS Coating | ชั้นเคลือบอีพอกซีไซเลน GPTMS | |
| MSN/GPTMS Coating | ชั้นเคลือบอีพอกซีไซเลน GPTMS ที่มีอนุภาค MSN | |
| MSN@TiO_2 /GPTMS Coating | ชั้นเคลือบอีพอกซีไซเลน GPTMS ที่มีอนุภาค MSN@TiO_2 | |
| BTA-MSN /GPTMS Coating | ชั้นเคลือบอีพอกซีไซเลน GPTMS ที่มีอนุภาค MSN และ บรรจุสารยับยั้งการกัดกร่อน BTA | |
| BTA-MSN@TiO_2 /GPTMS Coating | ชั้นเคลือบอีพอกซีไซเลน GPTMS ที่มีอนุภาค MSN@TiO_2 และบรรจุสารยับยั้งการกัดกร่อน BTA | |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1 การใช้อุณหภูมิของเมโซพอร์สซิลิกาและไทเทเนียมไดออกไซด์ที่บรรจุสารยับยั้งการกัดกร่อน BTA เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพความสามารถในการป้องกันการกัดกร่อนของชั้นเคลือบ

ขั้นตอนของงานวิจัยแบ่งออกเป็น 8 ขั้นตอน ดังแสดงในรูปที่ 3.1.1



รูปที่ 3.1.1 ขั้นตอนการวิจัยในหัวข้อ 3.1

3.1.1 การสังเคราะห์อนุภาคเมโซพอร์สซิลิกา (MSN)

- 1) สอบเทียบอ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิ (Water bath)
- 2) เชื่อมต่ออ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิที่ 20 องศาเซลเซียสเข้ากับเครื่องปฏิกรณ์ขนาด 1 ลิตรที่บรรจุน้ำกลั่น 700 มิลลิลิตร
- 3) เติมนสารละลายเฮกซะเดซิลไตรเมทิลแอมโมเนียมโบรไมด์ (CTAB) เข้มข้น 54.8 มิลลิโมลต่อลิตร ปริมาตร 35 มิลลิลิตรในเครื่องปฏิกรณ์ และปั่นกวนให้สารละลายผสมกัน
- 4) เติมนเอทิลอะซีเตทปริมาตร 6.16 มิลลิลิตรลงในสารละลายข้อ 3)
- 5) เติมนแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์และไตรเมทิลเบนซีน (TMB) 18.9 และ 4.98 มิลลิลิตรตามลำดับ และรอ 30 นาที
- 6) เติมนเตตระเอทิลออร์โทซิลิเกต (TEOS) ปริมาณ 3.5 มิลลิลิตร และรอ 30 นาที ภายในเครื่องปฏิกรณ์จะเกิดการเปลี่ยนแปลงดังรูปที่ 3.2.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก)

(ข)

รูปที่ 3.1.2 ลักษณะของสารผสมภายในเครื่องปฏิกรณ์; (ก) ก่อนเติม TEOS และ (ข) หลังเติม TEOS

- 7) เติมน้ำกลั่น 258 มิลลิลิตรแล้วปั่นกวน 30 นาที
- 8) เทสารละลายผลิตภัณฑ์ที่เตรียมได้ออกจากเครื่องปฏิกรณ์และนำไปเหวี่ยงแยกสารเคมีที่เหลือจากการเกิดปฏิกิริยาออกจากอนุภาคเมโซพอร์สซิลิกาที่ความเร็ว 4,000 รอบต่อนาทีเป็นเวลา 40 นาที
- 9) เทสารละลายที่อยู่บนเมโซพอร์สซิลิกาออก เติมเอทานอลบนของแข็งและใช้เครื่องโซนิเคททำให้เมโซพอร์สซิลิกาและเอทานอลผสมกัน
- 10) แล้วนำไปเหวี่ยงตามขั้นตอนที่ 9 อีกครั้ง
- 11) เทสารละลายลงในบีกเกอร์ เติมเอทานอลให้มีปริมาตรรวม 156 มิลลิลิตร และเติมกรดแอสติก 11.25 มิลลิลิตร เพื่อดึง CTAB ออกจากรูพรุนของเมโซพอร์สซิลิกา
- 12) นำไปเหวี่ยงตามขั้นตอนที่ 8 และ 9 จำนวน 2 ครั้ง
- 13) หาความเข้มข้นโดยมวลต่อปริมาตรของอนุภาคเมโซพอร์สซิลิกาในเอทานอลและเก็บไว้ที่อุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียส

3.1.2 การสังเคราะห์อนุภาคนาโนคอมโพสิตโดยเคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์บนเมโซพอร์สซิลิกา (MSN@TiO₂)

- 1) จุ่มขวดก้นกลมลงในซิลิโคนออยล์และควบคุมอุณหภูมิเท่ากับ 72 องศาเซลเซียส
- 2) เติมไอโซโพรพานอล 4 มิลลิลิตรและเมโซพอร์สซิลิกา 0.1 กรัม และปั่นกวน 10 นาที
- 3) เติมไทเทเนียมเตตระบิวทอกไซด์ (TBT) ปริมาตร 0.3 มิลลิลิตรและรอ 2 ชั่วโมง
- 4) เติมน้ำกลั่นปริมาตร 1.2 มิลลิลิตร
- 5) นำไปเหวี่ยงแยกตามขั้นตอนที่ 8 และ 9 ของหัวข้อ 3.1.1 จำนวน 2 ครั้ง
- 6) หาความเข้มข้นโดยมวลต่อปริมาตรของอนุภาคนาโนคอมโพสิต MSN@TiO₂

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.3 การบรรจุสารยับยั้งการกัดกร่อนในอนุภาคของ MSN@TiO₂

- 1) เตรียมอนุภาคเมโซพอร์ซิซิลิกา 0.01 กรัมในหลอดเหวี่ยงแยกและเติมสารละลายเบนโซไตรอะโซล (BTA) ในเอทานอลเข้มข้น 3 โมลต่อลิตร ปริมาตร 1 มิลลิลิตร
- 2) ใช้เครื่องโซนิเคทกระจายเมโซพอร์ซิซิลิกาในสารละลาย BTA
- 3) นำหลอดเหวี่ยงแยกใส่ในเครื่องเขย่าที่ความเร็ว 240 รอบต่อนาที อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง
- 4) นำไปเหวี่ยงแยกที่ความเร็ว 8,000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 5 นาที
- 5) คำนวณหาปริมาณ BTA ที่ถูกบรรจุในรูพรุนของ MSN@TiO₂

3.1.4 การวิเคราะห์สมบัติของ MSN และ MSN@TiO₂

- 1) วิเคราะห์ขนาดและลักษณะของอนุภาคโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (Transmission electron microscope; TEM)
- 2) ปริมาณสารยับยั้งการกัดกร่อนที่สามารถบรรจุในรูพรุนโดยใช้เครื่องวัดการดูดกลืนแสง (UV-VIS spectrophotometer)

3.1.5 การเตรียมชั้นเคลือบ

- 1) ผสมเมนาทอลและอีพอกซีไซเลนชนิด GPTMS อย่างละ 1 มิลลิลิตร
- 2) เติมอนุภาคนาโนคอมโพสิต 0.02 กรัม และคนให้เข้ากันนาน 5 นาที

3.1.6 การเคลือบชั้นเคลือบบนผิวเหล็กกล้าไร้สนิม

- 1) ติตแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมบนเครื่องเคลือบแบบหมุน (Spin coater) และตั้งค่าให้เครื่องหมุนด้วยความเร็ว 250 รอบต่อนาที
- 2) หยดสารละลายที่เตรียมได้ในหัวข้อ 3.2.5 ปริมาตร 2 มิลลิลิตรลงบนเหล็กกล้าไร้สนิม และรอเวลา 5 นาที
- 3) ปรับความเร็วรอบเป็น 500 รอบต่อนาที และรอ 1 นาที
- 4) นำตัวอย่างที่ถูกเคลือบไปอบที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.7 การวิเคราะห์สมบัติชั้นเคลือบ

- 1) วิเคราะห์ลักษณะของชั้นเคลือบโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope; SEM)
- 2) วิเคราะห์ความไม่ชอบน้ำของชั้นเคลือบโดยใช้เครื่องวัดมุมสัมผัส (Contact angle goniometer)

3.1.8 การทดสอบการป้องกันการกัดกร่อนของชั้นเคลือบ

- 1) ติดตั้งตัวอย่างและอิเล็กโทรดเข้ากับเซลล์สำหรับวัดการกัดกร่อน (Corrosion cell) และเชื่อมต่อเซลล์เข้ากับเครื่องโพเทนชิโอสแตท (Potentiostat) รายละเอียดของอุปกรณ์แสดงดังตารางที่ 3.1.2

ตารางที่ 3.1.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบการป้องกันการกัดกร่อนของชั้นเคลือบ

| อุปกรณ์ | รายละเอียด |
|--|---|
| เครื่องโพเทนชิโอสแตท (Potentiostat) | AUTOLAB PGSTAT302N |
| ขั้วไฟฟ้าทำงาน (Working electrode) | ตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบ |
| ขั้วไฟฟ้าอ้างอิง (Reference electrode) | คาโลเมลชนิดอิ่มตัว |
| ขั้วไฟฟ้าช่วย (Auxiliary or counter electrode) | ทองคำขาว |
| สารละลายที่ใช้นำกระแสไฟฟ้า (Electrolyte) | สารละลายโซเดียมคลอไรด์ร้อยละ 3.5 โดยมวล |

- 2) ตั้งค่าเครื่องควบคุมความต่างศักย์โดยกำหนดให้อัตราการเพิ่มขึ้นของความต่างศักย์เท่ากับ 1 มิลลิโวลต์ต่อวินาที และเริ่มการทดสอบการป้องกันการกัดกร่อนของชั้นเคลือบ

3.2 ศึกษาอิทธิพลของความเป็นกรด-ด่างต่อการป้องกันการกัดกร่อนของเหล็กกล้าไร้สนิมเคลือบด้วยชั้นเคลือบอีพอกซีไซเลนที่ใช้ MSN@TiO₂ ซึ่งบรรจุสารยับยั้งการกัดกร่อน BTA

- 1) เตรียมตัวอย่างชั้นเคลือบตามหัวข้อ 3.1.5 และเคลือบบนเหล็กกล้าไร้สนิมตามหัวข้อ 3.1.6
- 2) เตรียมสารละลายโซเดียมคลอไรด์เข้มข้นร้อยละ 3.5 โดยมวล และปรับความเป็นกรด-ด่างให้เท่ากับ 3.5 และ 9 โดยใช้กรดซัลฟิวริกและโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์
- 3) ทดสอบการป้องกันการกัดกร่อนของชั้นเคลือบต่างๆ ที่ค่าความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 3.5 และ 9 ตามหัวข้อ 3.1.8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

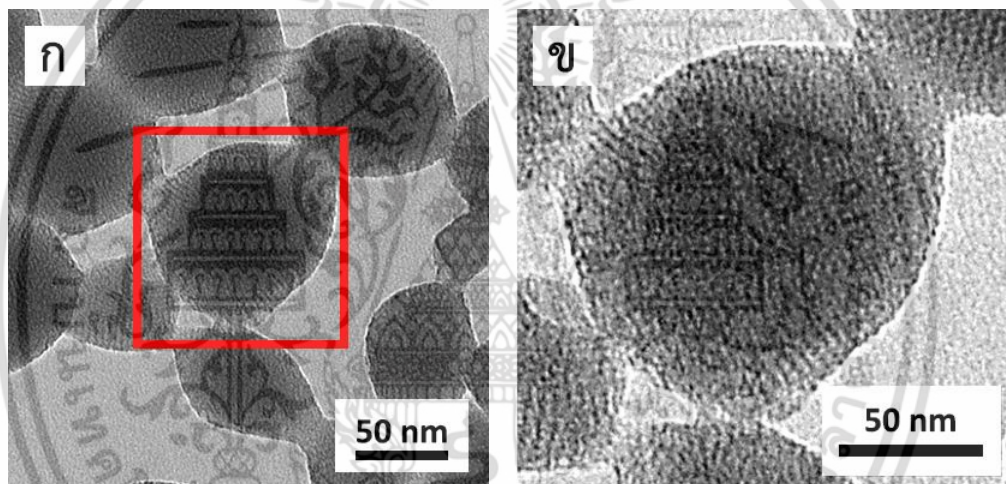
บทที่ 4

ผลการทดลองและวิเคราะห์ผล

4.1 การเตรียมอนุภาคและชั้นเคลือบ

4.1.1 การสังเคราะห์และตรวจสอบลักษณะของเมโซพอร์ซิลิกา (MSN) และอนุภาคนาโนคอมโพสิตของซิลิกาและไทเทเนียม (MSN@TiO₂)

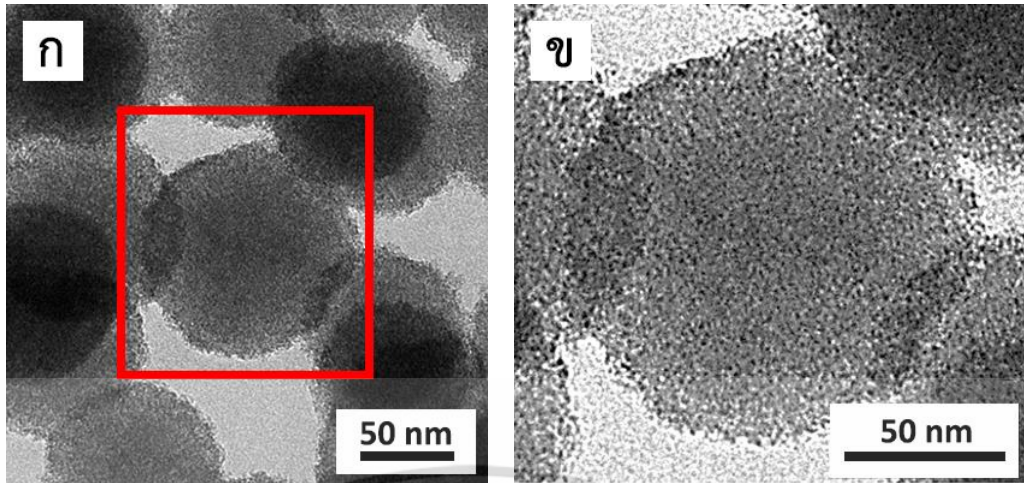
รูปที่ 4.1.1 แสดงโครงสร้างพื้นฐานของอนุภาคของเมโซพอร์ซิลิกา (MSN) ที่ได้จากการสังเคราะห์และล้างสารกำหนดโครงสร้างที่มีประจุบวกออก โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (TEM)



รูปที่ 4.1.1 ภาพถ่าย TEM ของ MSN ที่กำลังขยาย (ก) 50,000 เท่า และ (ข) ภาพขยายของบริเวณที่ตีกรอบของภาพ 4.1.1.ก

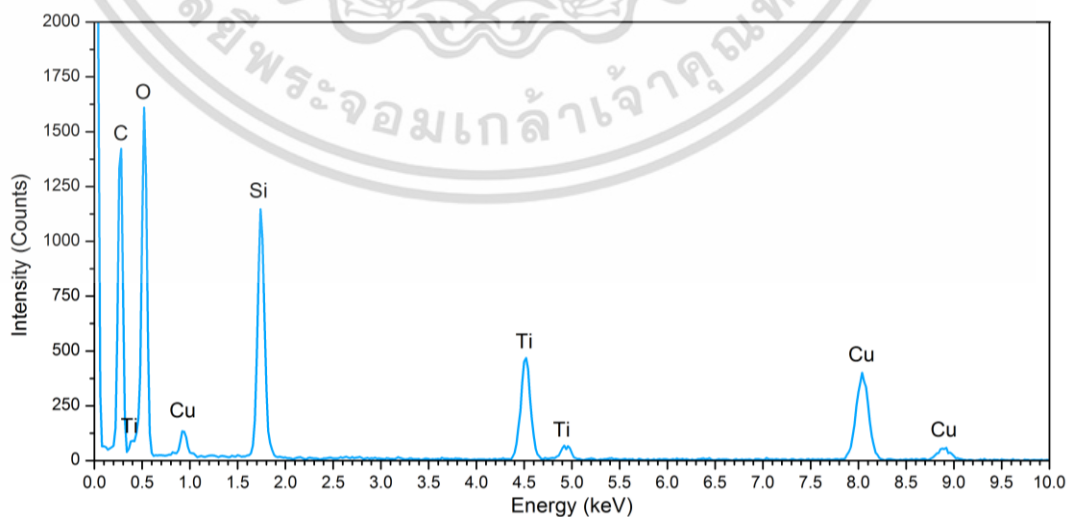
อนุภาคเมโซพอร์ซิลิกาที่สังเคราะห์ได้มีลักษณะค่อนข้างกลม ขนาดอนุภาคที่ได้จากการคำนวณโดยใช้ซอฟต์แวร์ ImageJ มีค่าประมาณ 98 ± 21.4 นาโนเมตร อนุภาคที่สังเคราะห์ได้มีรูพรุนจำนวนมาก แต่ละอนุภาคกระจายตัวกันได้ดีและมีผิวภายนอกเรียบ

ขั้นตอนถัดไปคือการเคลือบอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์บนผิวอนุภาคเมโซพอร์ซิลิกา (อนุภาคคอมโพสิต MSN@TiO₂) นำอนุภาคที่สังเคราะห์ได้ไปตรวจสอบโครงสร้างพื้นฐาน ขนาดและองค์ประกอบด้วยกล้อง TEM และเครื่องวิเคราะห์ธาตุเชิงปริมาณ (EDX) ตามลำดับ



รูปที่ 4.1.2 ภาพถ่าย TEM ของอนุภาคคอมโพสิต MSN@TiO_2 ที่กำลังขยาย (ก) 50,000 เท่า และ (ข) ภาพขยายของบริเวณที่ตีกรอบของภาพ 4.1.2.ก

จากรูป 4.1.2 แสดงถึงความสำเร็จในการสังเคราะห์อนุภาคคอมโพสิต MSN@TiO_2 ซึ่งสังเกตได้จากเดิมอนุภาค MSN ที่มีผิวภายนอกเรียบกลายเป็นอนุภาคที่มีผิวขรุขระซึ่งเป็นผลมาจากมีอนุภาคนาโนของไทเทเนียมไดออกไซด์ขนาดเล็กจำนวนมากเกาะอยู่ที่ผิวของเมโซพอร์ซิลิกาแต่ยังสามารถเห็นร่องรอยรูพรุนของอนุภาคเมโซพอร์ซิลิกา โดยขนาดอนุภาคเพิ่มขึ้นจาก 98 ± 21.4 เป็น 118 ± 5.7 นาโนเมตร โดยรูปร่างอนุภาคมีความกลมมากขึ้นและพบการรวมตัวกันของอนุภาคเล็กน้อย เพื่อยืนยันว่าอนุภาคที่อยู่บนผิวของเมโซพอร์ซิลิกาคือไทเทเนียมไดออกไซด์จึงตรวจสอบอนุภาคดังกล่าวด้วยเครื่อง EDX และพบการมีอยู่ของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ตำแหน่ง 0.401 0.452 4.932 และ 4.511 และซิลิกาที่ตำแหน่ง 1.740 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์ (keV) ดังรูปที่ 4.1.3 ส่วนธาตุอื่นๆ เช่น คาร์บอน คอปเปอร์ และออกซิเจนมาจากแผ่นรองรับตัวอย่าง (Carbon-coated copper grid)



รูปที่ 4.1.3 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของอนุภาคคอมโพสิต MSN@TiO_2 ด้วยเทคนิค EDX

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.2 การบรรจุสารยับยั้งการกัดกร่อนในรูปพูนของ MSN และ MSN@TiO₂

ทำการบรรจุสารยับยั้งการกัดกร่อนเบนโซไตรอะโซล (BTA) ในอนุภาค MSN และ MSN@TiO₂ โดยกระจาย MSN และ MSN@TiO₂ ในสารละลาย BTA แล้วเขย่าด้วยเครื่องเขย่า (Shaking incubator) ที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 ชั่วโมง ภายหลังจากบรรจุตรวจสอบความเข้มข้นของสารละลาย BTA ที่เหลืออยู่ด้วยเครื่องวัดการดูดกลืนแสง (UV-VIS spectrophotometer) เพื่อตรวจสอบประสิทธิภาพการบรรจุ BTA ในอนุภาค ผลลัพธ์ที่ได้แสดงในตารางที่ 4.1.1 และวิธีการคำนวณประสิทธิภาพการบรรจุ BTA แสดงในภาคผนวก ข.1 และ ข.2

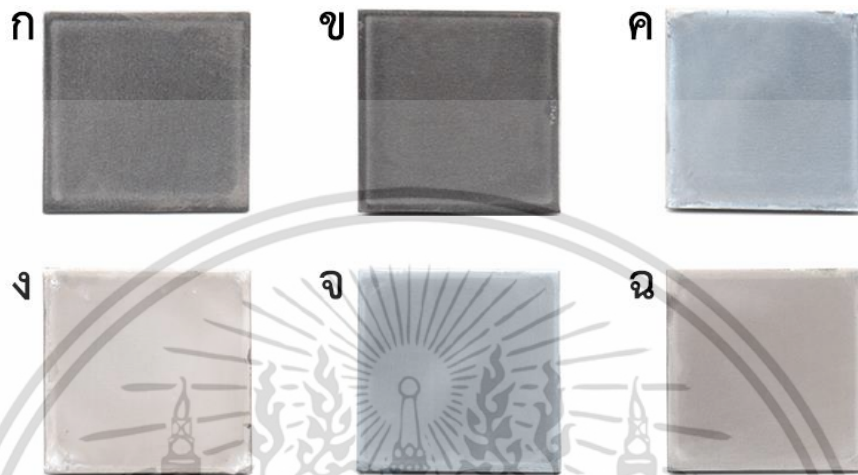
ตารางที่ 4.1.1 ประสิทธิภาพการบรรจุสารยับยั้งการกัดกร่อน BTA ของ MSN และ MSN@TiO₂

| วัสดุ | ความเข้มข้นของ BTA (mol/L) | | ประสิทธิภาพการบรรจุ BTA (%) |
|----------------------|----------------------------|-------------|-----------------------------|
| | ก่อนบรรจุ | หลังบรรจุ | |
| MSN | 3.00 | 2.11 ± 0.10 | 29.77 ± 3.37 |
| MSN@TiO ₂ | 3.00 | 1.59 ± 0.35 | 47.11 ± 11.73 |

จากตารางที่ 4.1.1 พบว่าการเคลือบผิว MSN ด้วย TiO₂ ส่งผลให้ประสิทธิภาพการบรรจุ BTA สูงขึ้น อาจเป็นผลเนื่องจากสารยับยั้งการกัดกร่อน BTA ถูกบรรจุในรูปพูนแล้วติดอยู่ตามผิวด้านนอกของ MSN@TiO₂ ที่มีลักษณะขรุขระ ปริมาณ BTA ที่ถูกบรรจุในรูปพูนเพิ่มขึ้นจะทำให้มีปริมาณ BTA ที่ถูกนำมาใช้ในการป้องกันการกัดกร่อนมากขึ้นหรือช่วยป้องกันหรือชะลอการกัดกร่อนได้นานขึ้น (Satpati, A. K. 2008; Mehdipour, M. 2014)

4.1.3 การเคลือบผิวและสมบัติของชั้นเคลือบ

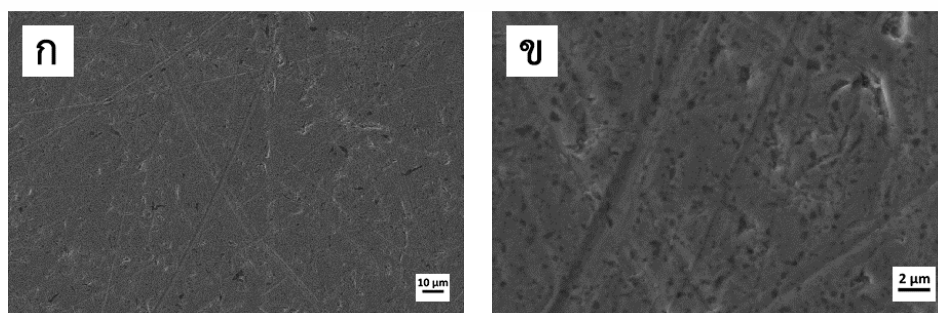
อนุภาค MSN และ MSN@TiO₂ ที่บรรจุและไม่บรรจุสารยับยั้งการกัดกร่อน BTA จะถูกผสมรวมกับอีพอกซีไซเลน GPTMS โดยใช้เมทานอลเป็นตัวทำละลาย และเคลือบบนแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม 316L ด้วยเครื่องเคลือบแบบหมุน ผลลัพธ์จากการเคลือบแสดงดังรูปที่ 4.1.4



รูปที่ 4.1.4 รูปถ่าย (ก) แผ่นเหล็ก (Bare 316L) แผ่นเหล็กที่ผ่านการเคลือบด้วย (ข) GPTMS Coating (ค) MSN/GPTMS Coating (ง) MSN@TiO₂/GPTMS Coating (จ) BTA-MSN/GPTMS Coating และ (ฉ) BTA-MSN@TiO₂/GPTMS Coating

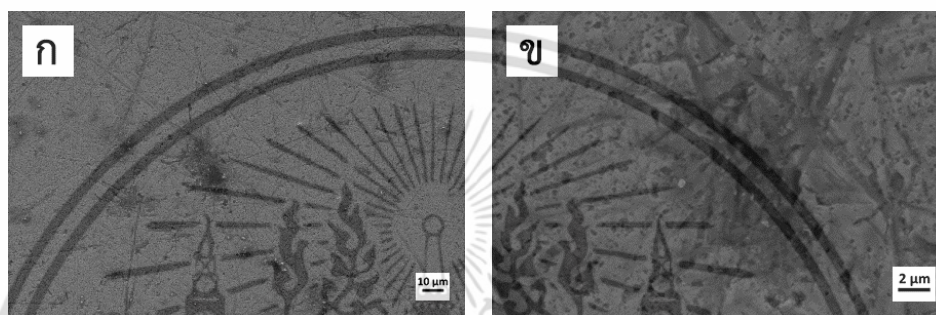
จากการเคลือบพบว่าชั้นเคลือบกระจายตัวอยู่ทั่วแผ่นโลหะ ไม่พบการแยกตัวระหว่างชั้นเคลือบและโลหะ โดยชั้นเคลือบ GPTMS มีลักษณะใส ขณะที่ชั้นเคลือบที่มีอนุภาค MSN มีสีขาวและชั้นเคลือบที่มีอนุภาค MSN@TiO₂ มีสีขาวปนเหลือง ซึ่งสีของชั้นเคลือบเป็นไปตามสีของอนุภาคที่ถูกผสมโดยที่สารยับยั้งการกัดกร่อน BTA ไม่ส่งผลต่อสีของชั้นเคลือบ

จากการศึกษาลักษณะผิวของชั้นเคลือบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด (SEM) ดังรูปที่ 4.1.5 ถึง 4.1.10 ภาพถ่าย SEM ของเหล็กกล้าไร้สนิมที่ผ่านการขัดเพื่อเตรียมพื้นผิวสำหรับการเคลือบแสดงดังรูปที่ 4.1.5 พบว่าพื้นผิวมีลักษณะเรียบโดยพบรอยบากและตำหนิขนาดเล็กกว่า 1 ไมโครเมตรซึ่งเป็นผลจากการขัดด้วยกระดาษทราย



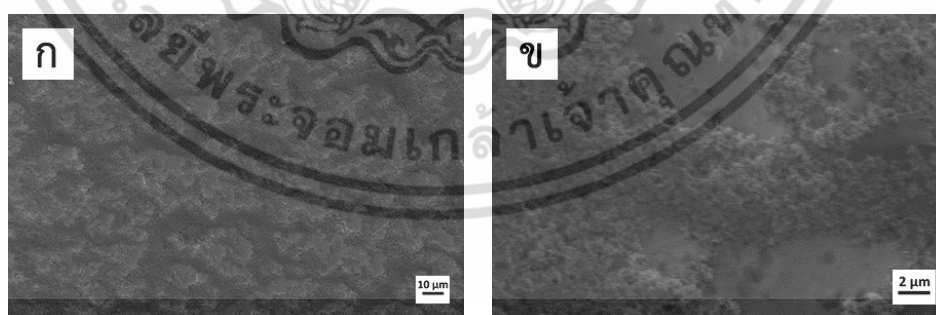
รูปที่ 4.1.5 ภาพถ่าย SEM ของ Bare 316L ที่กำลังขยาย (ก) 500 เท่า และ (ข) 3,000 เท่า เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่บนสื่อออนไลน์ใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาพถ่าย SEM ของชั้นเคลือบ GPTMS แสดงดังรูปที่ 4.1.6 พบว่ามีตำหนิในลักษณะของรูพรุนขนาด 1 ถึง 4 ไมโครเมตรซึ่งมีขนาดใหญ่กว่าตำหนิของเหล็กกล้าไร้สนิมก่อนถูกเคลือบผิวและกระจายตามผิวของชั้นเคลือบ ตำหนิเหล่านี้มาจากขั้นตอนการอบเพื่อให้ชั้นเคลือบยึดเกาะกับโลหะผ่านพันธะโคเวเลนต์และมีน้ำเกิดขึ้นจากปฏิกิริยาการควบแน่นของส่วนประกอบต่างๆ ของชั้นเคลือบ น้ำจะระเหยออกจากชั้นเคลือบระหว่างการอบทำให้เกิดรูพรุนในหรือบนผิวของชั้นเคลือบ (Metroke, T. L. 2001)



รูปที่ 4.1.6 ภาพถ่าย SEM ของของชั้นเคลือบ GPTMS Coating ที่กำลังขยาย (ก) 500 เท่า และ (ข) 3,000 เท่า

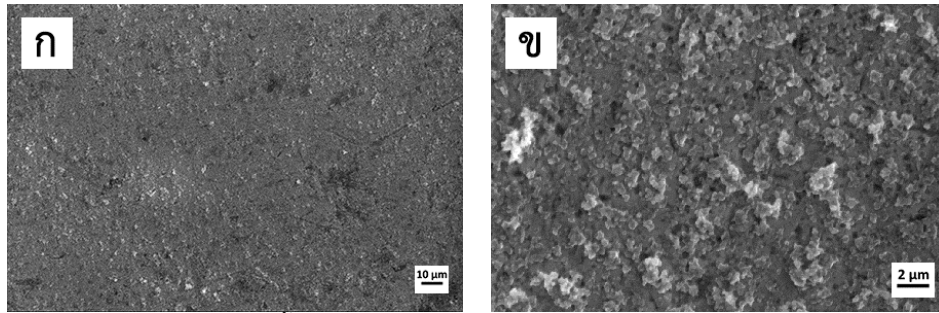
รูปที่ 4.1.7 แสดงภาพถ่าย SEM ของชั้นเคลือบ MSN/GPTMS พบว่าผิวของชั้นเคลือบมีลักษณะขรุขระ และไม่พบตำหนิเหมือนชั้นเคลือบ GPTMS ซึ่งเป็นผลจากการที่อนุภาค MSN ซึ่งมีขนาดประมาณ 100 นาโนเมตรทำหน้าที่เติมเต็มช่องว่างและรูพรุนที่เกิดจากอบ (Zheludkevich, M. 2006)



รูปที่ 4.1.7 ภาพถ่าย SEM ของ MSN/GPTMS Coating ที่กำลังขยาย (ก) 500 เท่า และ (ข) 3,000 เท่า

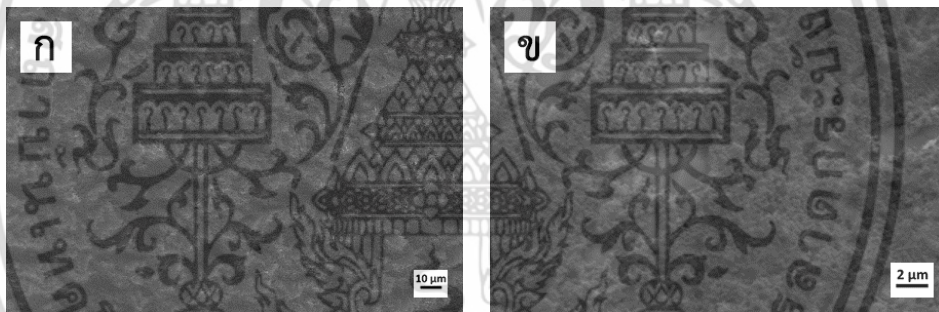
ภาพถ่าย SEM ของชั้นเคลือบ MSN@TiO₂/GPTMS แสดงดังรูปที่ 4.1.8 พบว่าชั้นเคลือบที่ประกอบด้วยอนุภาค MSN@TiO₂ มีลักษณะขรุขระอย่างชัดเจน ซึ่งเป็นผลจากนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ซึ่งมีพลังงานพื้นผิวดำ (Ma, M. and Hill, R. M. 2006) ความขรุขระที่เกิดขึ้นจะส่งผลให้ค่ามุมสัมผัสของหยดน้ำและความไม่ชอบน้ำของชั้นเคลือบเพิ่มขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

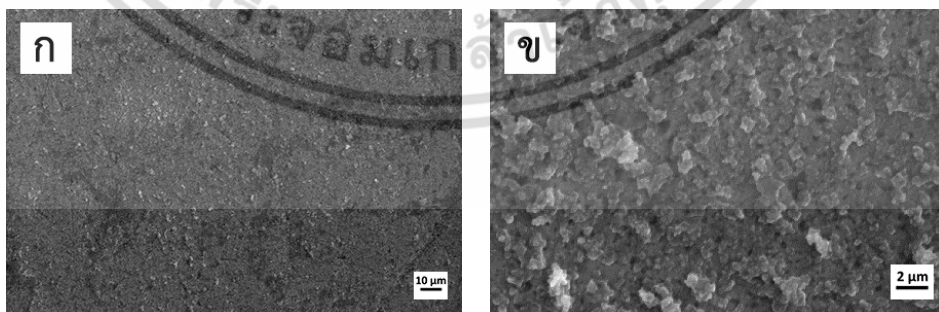


รูปที่ 4.1.8 ภาพถ่าย SEM ของชั้นเคลือบ MSN@TiO₂/GPTMS Coating ที่กำลังขยาย (ก) 500 เท่า และ (ข) 3,000 เท่า

ภาพถ่าย SEM ของชั้นเคลือบ BTA-MSN/GPTMS Coating และ BTA-MSN@TiO₂/GPTMS Coating แสดงดังรูปที่ 4.1.9 และ 4.1.10 ตามลำดับ พบว่าเมื่อเทียบกับชั้นเคลือบที่ไม่มีการบรรจุ BTA การบรรจุ BTA ในรูพรุนของอนุภาค MSN และ MSN@TiO₂ ไม่ส่งผลต่อลักษณะผิวของชั้นเคลือบอย่างมีนัยสำคัญ



รูปที่ 4.1.9 ภาพถ่าย SEM ของชั้นเคลือบ BTA-MSN/GPTMS Coating ที่กำลังขยาย (ก) 500 เท่า และ (ข) กำลังขยาย 3,000 เท่า

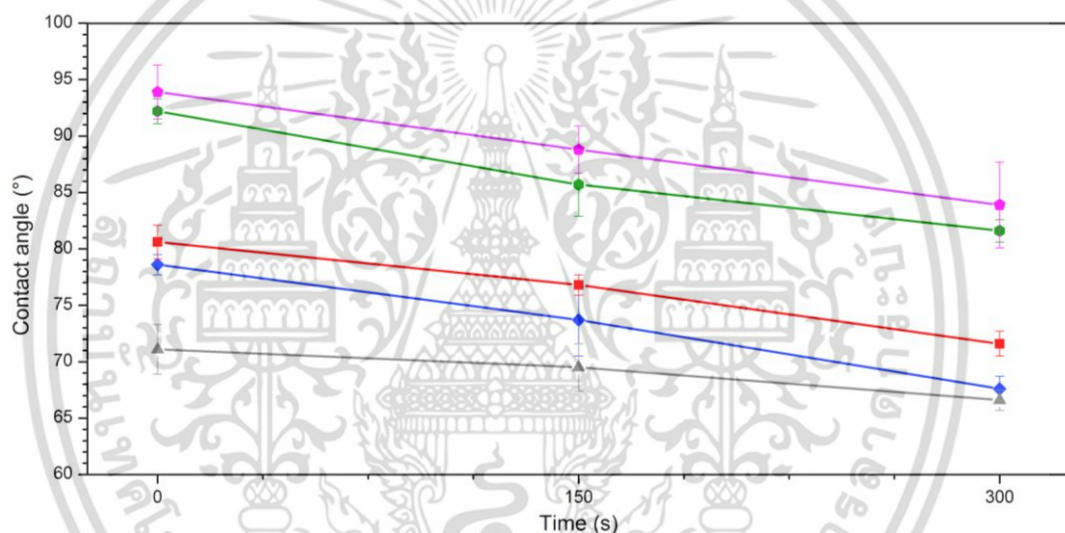


รูปที่ 4.1.10 ภาพถ่าย SEM ของชั้นเคลือบ BTA-MSN@TiO₂/GPTMS Coating ที่กำลังขยาย (ก) 500 เท่า และ (ข) กำลังขยาย 3,000 เท่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.1.5 ถึง 4.1.10 พบว่าลักษณะผิวของชั้นเคลือบเปลี่ยนแปลงตามอนุภาคที่ใช้เป็นสารเติมเต็ม และการใช้สารยับยั้งการกัดกร่อน BTA ไม่ส่งผลต่อผิวชั้นเคลือบ โดยที่อนุภาค MSN และ MSN@TiO_2 สามารถลดค่าหีนบนผิวชั้นเคลือบและทำให้ชั้นเคลือบอ็อกซีไฮไลนมีผิวขรุขระเพิ่มขึ้นโดยที่ชั้นเคลือบซึ่งประกอบด้วยอนุภาค MSN@TiO_2 มีความขรุขระและการรวมตัวกันของอนุภาคมากกว่าชั้นเคลือบที่มีอนุภาค MSN เป็นส่วนประกอบ

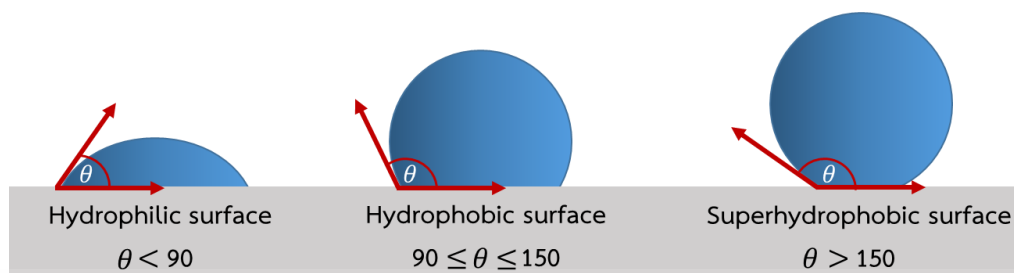
เนื่องจากลักษณะผิวของชั้นเคลือบเปลี่ยนไปตามองค์ประกอบหรือชนิดของอนุภาคที่ผสม ความเรียบของผิวที่เปลี่ยนไปจะทำให้สภาวะการเปียก (Wettability) ของชั้นเคลือบเปลี่ยนแปลงตามค่าสภาวะการเปียกบ่งบอกถึงความชอบน้ำ และไม่ชอบน้ำของชั้นเคลือบ ซึ่งสามารถตรวจสอบได้โดยใช้ค่ามุมสัมผัสของหยดน้ำ ผลการวัดมุมสัมผัสของหยดน้ำของชั้นเคลือบชนิดต่างๆ แสดงดังรูปที่ 4.1.11



รูปที่ 4.1.11 มุมสัมผัสของหยดน้ำของเหล็กกล้าไร้สนิมชนิด 316L เคลือบด้วย GPTMS Coating (เทา) MSN/GPTMS Coating (น้ำเงิน) MSN@TiO_2 /GPTMS Coating (เขียว) BTA-MSN/GPTMS Coating (แดง) และ BTA-MSN@TiO_2 /GPTMS Coating (ม่วง) ที่เวลา 0 150 และ 300 วินาที ตามลำดับ

จากรูปที่ 4.1.11 พบว่าค่ามุมสัมผัสของหยดน้ำแบ่งเป็น 2 กลุ่ม คือ กลุ่มที่หนึ่งคือชั้นเคลือบที่ไม่มีอนุภาคคอมโพสิต ได้แก่ ชั้นเคลือบ GPTMS Coating MSN/GPTMS Coating และ BTA-MSN/GPTMS Coating ซึ่งมีค่ามุมสัมผัสของหยดน้ำเมื่อเริ่มต้นหยดอยู่ในช่วง 77 ถึง 81 องศา และเมื่อเวลาผ่านไป 300 วินาทีค่ามุมสัมผัสของหยดน้ำลดลงเหลือประมาณ 67 ถึง 72 องศา บ่งชี้ว่าของเหลวบนชั้นจึงถูกจัดว่าเป็นชั้นเคลือบที่ชอบน้ำ (Hydrophilic) เคลือบสามารถกระจายตัวได้ดี ดังรูปที่ 4.1.12.ก เนื่องจากแรงยึดติดระหว่างโลหะและชั้นเคลือบมีค่ามากกว่าแรงยึดติดระหว่างโมเลกุลของของเหลว (Bracco, G. and Holst, B. 2013: 3-4)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



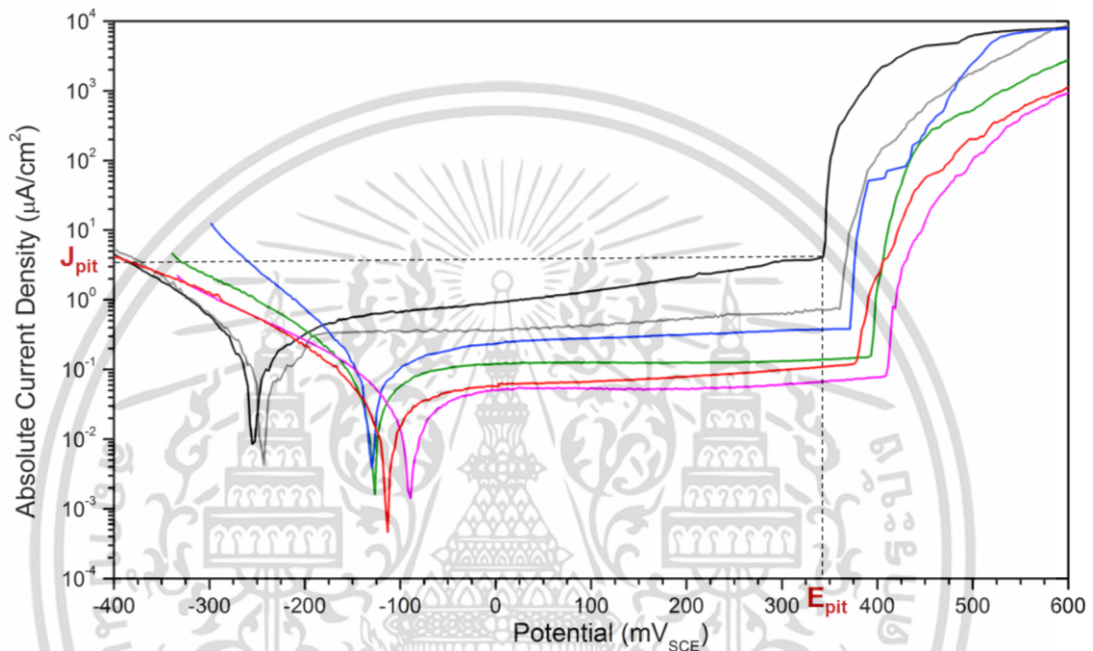
รูปที่ 4.1.12 มุมสัมผัสและความไม่ชอบน้ำของชั้นเคลือบ

กลุ่มที่สองคือชั้นเคลือบที่ประกอบด้วยอนุภาคคอมโพสิต ได้แก่ ชั้นเคลือบ MSN@TiO₂/GPTMS Coating และ BTA-MSN@TiO₂/GPTMS Coating ซึ่งมีค่ามุมสัมผัสของหยดน้ำเมื่อเริ่มต้นหยด ประมาณ 92 ถึง 94 องศา และเมื่อเวลาผ่านไป 300 วินาทีค่ามุมสัมผัสของหยดน้ำลดลงเหลือ ประมาณ 81 ถึง 84 องศา บ่งชี้ว่าชั้นเคลือบในกลุ่มนี้จึงถูกจัดว่าเป็นชั้นเคลือบที่ไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic) แต่ไม่จัดว่าเป็น Superhydrophobic เพราะค่ามุมสัมผัสต่ำกว่า 150 องศา

นอกจากนี้ยังพบว่าการใช้สารยับยั้งการกัดกร่อน BTA ไม่ส่งผลต่อมุมสัมผัสของหยดน้ำอย่าง มีนัยยะสำคัญ และการเคลือบผิว MSN ด้วย TiO₂ จะทำให้ชั้นเคลือบมีความไม่ชอบน้ำเพิ่มขึ้นซึ่งเป็นไปตามจุดประสงค์ที่กำหนดไว้ โดยความไม่ชอบน้ำที่เพิ่มขึ้นเป็นผลมาจากการที่ไทเทเนียมไดออกไซด์ซึ่งมีค่าพลังงานพื้นผิวต่ำเมื่อบรรจุไว้ในชั้นเคลือบจึงทำให้ผิวของชั้นเคลือบขรุขระ (Ma, M. and Hill, R. M. 2006) ซึ่งชั้นเคลือบที่ผิวขรุขระจาก TiO₂ จะมีความไม่ชอบน้ำสูง ทำให้น้ำและ ไอออนต่างๆ ที่อยู่ใต้น้ำเคลื่อนที่เข้าสู่ชั้นเคลือบได้ลดลงหรือผ่านชั้นเคลือบได้ช้าลง

4.2 การทดสอบการป้องกันการกัดกร่อนของชั้นเคลือบชนิดต่างๆ

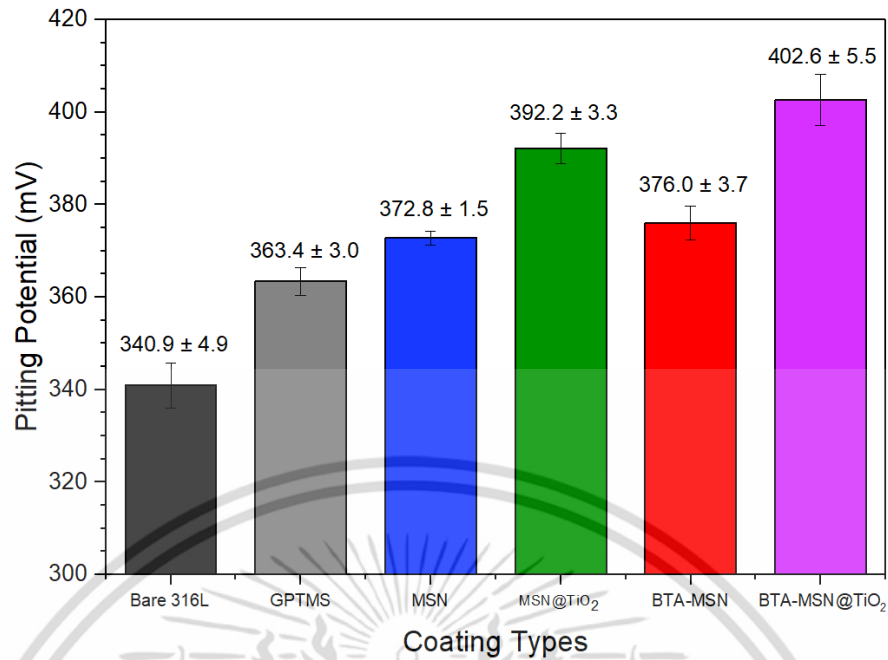
เหล็กที่ผ่านการเคลือบชนิดต่างๆ ถูกนำมาทดสอบการป้องกันการกัดกร่อนด้วยเทคนิคโพเทนซิโอดีนามิกในสารละลายโซเดียมคลอไรด์เข้มข้นร้อยละ 3.5 โดยมีผลซึ่งมีค่า pH เท่ากับ 7.6 ผลลัพธ์จากการทดลองคือเส้นโค้งโพลาริเซชันซึ่งแสดงถึงพฤติกรรมการกัดกร่อนของชั้นเคลือบชนิดต่างๆ ดังรูปที่ 4.2.1 เมื่อการทดสอบสิ้นสุดที่ค่าความต่างศักย์ภายในเซลล์มีค่าเท่ากับ 1,500 mV นำตัวอย่างไปศึกษาลักษณะของการกัดกร่อนที่เกิดขึ้นใช้กล้อง SEM



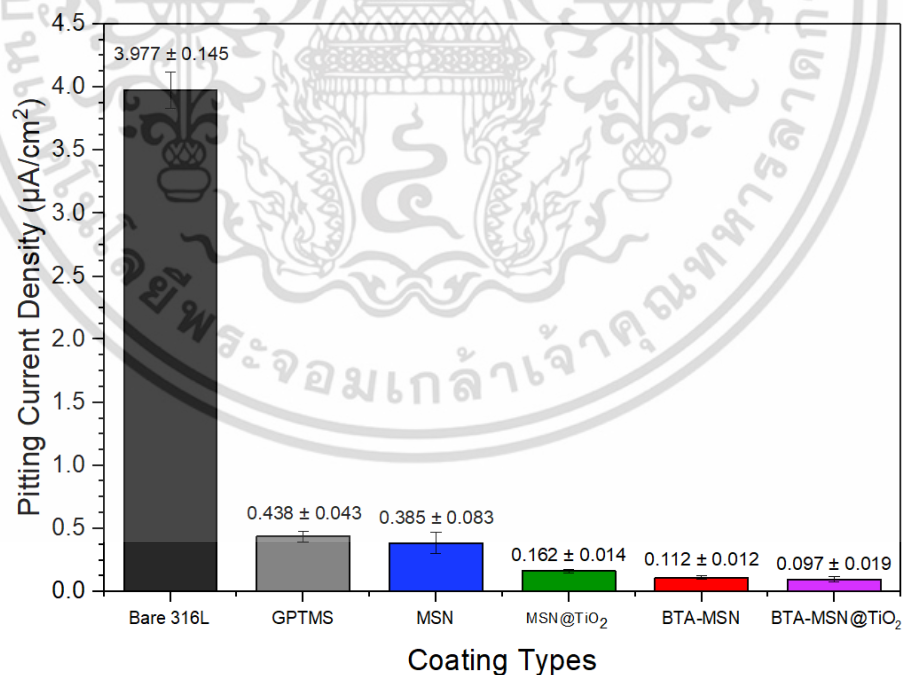
รูปที่ 4.2.1 เส้นโค้งโพลาริเซชันของเหล็กกล้าไร้สนิมชนิด 316L ที่ไม่ผ่านการเคลือบ (ดำ) และเคลือบด้วย GPTMS Coating (เทา) MSN/GPTMS Coating (น้ำเงิน) MSN@TiO₂/GPTMS Coating (เขียว) BTA-MSN/GPTMS Coating (แดง) และ BTA-MSN@TiO₂/GPTMS Coating (ม่วง) ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์เข้มข้นร้อยละ 3.5 โดยมีผลที่ pH 7.6

เส้นโค้งโพลาริเซชันแสดงข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับพฤติกรรมการกัดกร่อนของชั้นเคลือบชนิดต่างๆ เช่น ค่าศักย์ไฟฟ้าที่ตำแหน่งที่เริ่มเกิดการกัดกร่อนแบบรูเข็ม (Pitting potential; E_{pit}) ที่บ่งบอกถึงความทนทานของชั้นเคลือบก่อนที่จะเกิดการกัดกร่อนแบบรูเข็ม และความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า (Pitting current density; J_{pit}) บ่งบอกถึงความรุนแรงหรืออัตราการกัดกร่อนแบบรูเข็ม ดังแสดงในรูปที่ 4.2.2 และ 4.2.3 ตามลำดับ นอกจากนี้เมื่อทราบค่าความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้างกล่าวสามารถคำนวณค่าประสิทธิภาพการป้องกันการกัดกร่อนแบบรูเข็ม (Pitting protection efficiency; η_{pit}) ซึ่งใช้สำหรับเปรียบเทียบความสามารถในการป้องกันการกัดกร่อนแบบรูเข็ม (Roberge, P. R. 2008) ดังแสดงในตารางที่ 4.2.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.2.2 E_{pit} ของเหล็กกล้าไร้สนิมชนิด 316L ที่ไม่ผ่านการเคลือบ (ดำ) และเคลือบด้วย GPTMS Coating (เทา) MSN/GPTMS Coating (น้ำเงิน) MSN@TiO₂/GPTMS Coating (เขียว) BTA-MSN/GPTMS Coating (แดง) และ BTA-MSN@TiO₂/GPTMS Coating (ม่วง) ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์เข้มข้นร้อยละ 3.5 โดยมีค่า pH 7.6



รูปที่ 4.2.3 J_{pit} ของเหล็กกล้าไร้สนิมชนิด 316L ที่ไม่ผ่านการเคลือบ (ดำ) และเคลือบด้วย GPTMS Coating (เทา) MSN/GPTMS Coating (น้ำเงิน) MSN@TiO₂/GPTMS Coating (เขียว) BTA-MSN/GPTMS Coating (แดง) และ BTA-MSN@TiO₂/GPTMS Coating (ม่วง) ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์เข้มข้นร้อยละ 3.5 โดยมีค่า pH 7.6

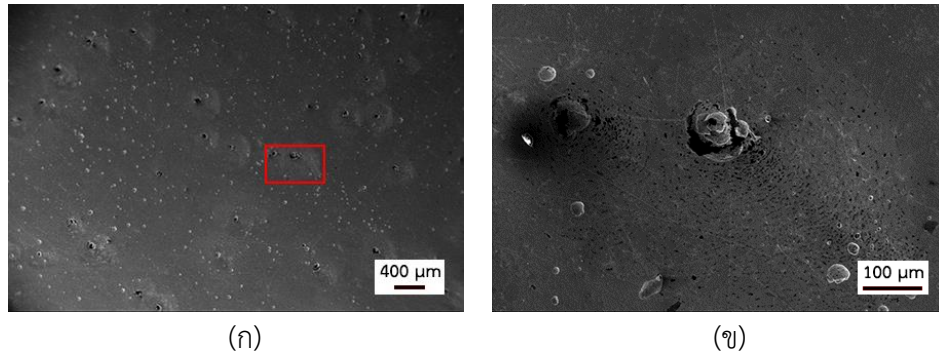
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.2.1 ประสิทธิภาพการป้องกันการกัดกร่อนแบบรูเข็มของชั้นเคลือบชนิดต่างๆ

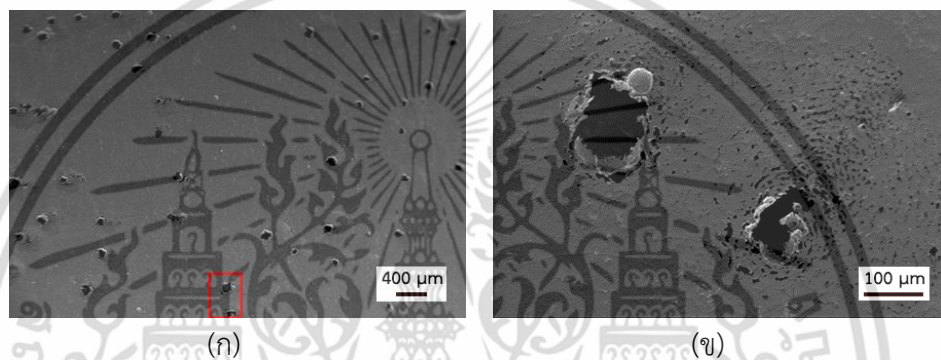
| ชั้นเคลือบ | ประสิทธิภาพการป้องกันการกัดกร่อนแบบรูเข็ม (%) | |
|--|---|------------------------|
| | เทียบกับ Bare 316L | เทียบกับ GPTMS Coating |
| Bare 316L | อ้างอิง | - |
| GPTMS Coating | 89.0 ± 1.1 | อ้างอิง |
| MSN/GPTMS Coating | 90.3 ± 2.1 | 16.7 ± 12.8 |
| MSN@TiO ₂ / GPTMS Coating | 95.9 ± 0.4 | 63.0 ± 3.3 |
| BTA-MSN / GPTMS Coating | 97.2 ± 0.3 | 74.4 ± 2.8 |
| BTA-MSN@TiO ₂ / GPTMS Coating | 97.6 ± 0.5 | 77.8 ± 4.3 |

เมื่อพิจารณาพฤติกรรมการกัดกร่อนของเหล็กกล้าไร้สนิมที่ไม่ได้เคลือบผิว (Bare 316L) เทียบกับชั้นเคลือบ GPTMS Coating พบว่าการเคลือบผิวเหล็กกล้าไร้สนิมด้วยอีพอกซีไซเลน GPTMS ทำให้โลหะที่ถูกเคลือบสามารถทนทานต่อการกัดกร่อนแบบรูเข็มได้มากขึ้น ซึ่งสังเกตได้จากค่า E_{pit} ที่เพิ่มขึ้นจาก 340.9 ± 4.9 เป็น 363.4 ± 3.0 mV เนื่องจากชั้นเคลือบทำหน้าที่ป้องกันไม่ให้ออกซิเจนที่มีฤทธิ์กัดกร่อน เช่น ออกซิเจน น้ำ และไอออนของคลอไรด์ สัมผัสกับผิวโลหะโดยตรง สารเหล่านี้จึงต้องใช้เวลามากขึ้นในการแพร่ผ่านชั้นเคลือบและทำให้ชั้นเคลือบเริ่มสลายตัว ซึ่งในกรณีของอีพอกซีไซเลน (GPTMS) สามารถรวมตัวกันเป็นโครงสร้างร่างแหของซิลิกา (Silica network) ทำหน้าที่ขัดขวางการแพร่ของสารที่มีฤทธิ์กัดกร่อนเสมือนเป็นการป้องกันชั้นที่สองนอกจากอีพอกซี (Metroke, T. L. 2001) อัตราการแพร่ของสารที่มีฤทธิ์กัดกร่อนที่ลดลง ส่งผลให้อัตราการกัดกร่อนลดลงด้วยเช่นกัน ซึ่งสังเกตได้จากค่า J_{pit} ที่ลดลงจาก 3.977 ± 0.145 เป็น 0.438 ± 0.043 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ เมื่อตรวจสอบลักษณะการกัดกร่อนที่เกิดขึ้นของ Bare 316L ด้วยกล้อง SEM (รูปที่ 4.2.4) พบว่าการกัดกร่อนแบบรูเข็ม 2 ลักษณะ คือ รูเข็มที่อยู่ในขั้นตอนซึ่งมีขนาด 76.9 ± 13.2 μm และรูเข็มที่อยู่ในขั้นตอนการเริ่มเกิดกระจายทั่วผิวหน้าของโลหะ ในขณะที่ชั้นเคลือบ GPTMS Coating (รูปที่ 4.2.5) พบการกัดกร่อนแบบรูเข็มที่มีขนาดเพิ่มขึ้นเป็น 82.6 ± 23.2 μm แต่จำนวนของรูเข็มน้อยกว่าของ Bare 316L ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองของ ชั้นเคลือบ GPTMS Coating ที่สามารถเพิ่มความสามารถในการป้องกันการกัดกร่อนแบบรูเข็มของเหล็กกล้าไร้สนิมให้ดีขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



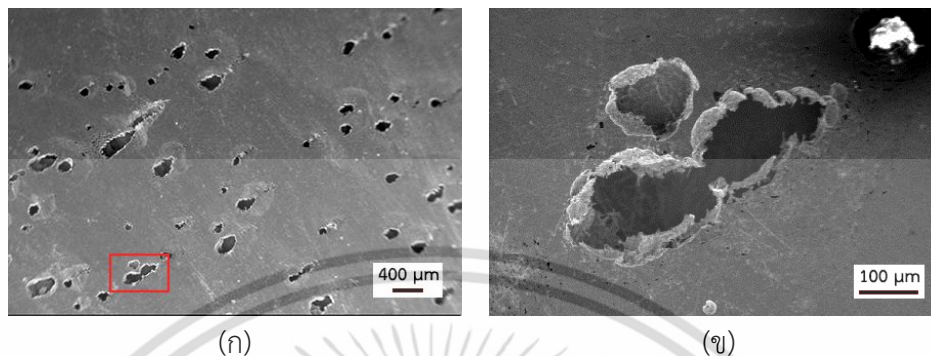
รูปที่ 4.2.4 ภาพถ่าย SEM ของ Bare 316L หลังจากถูกกัดกร่อนที่กำลังขยาย (ก) 20 เท่า และ (ข) 150 เท่า



รูปที่ 4.2.5 ภาพถ่าย SEM ของของชั้นเคลือบ GPTMS Coating หลังจากถูกกัดกร่อนที่กำลังขยายที่ กำลังขยาย (ก) 20 เท่า และ (ข) 150 เท่า

เมื่อเทียบพฤติกรรมการกัดกร่อนระหว่าง GPTMS Coating กับ MSN/GPTMS Coating พบว่าการบรรจุ MSN ในอีพอกซีไซเลน GPTMS ทำให้ชั้นเคลือบสามารถป้องกันการกัดกร่อนแบบรูเข็มได้มากขึ้น ซึ่งสังเกตได้จาก J_{pit} ที่ลดลงจาก 0.438 ± 0.043 เป็น $0.385 \pm 0.083 \mu A/cm^2$ และ E_{pit} ที่เพิ่มขึ้นจาก 363.4 ± 3.0 เป็น 372.8 ± 1.5 mV เนื่องจาก MSN สามารถสร้างพันธะกับซิลิกา ในอีพอกซีไซเลน GPTMS ทำให้โครงสร้างร่างแหของซิลิกาหนาแน่นและมีความซับซ้อนมากขึ้น โครงสร้างร่างแหของซิลิกาที่หนาแน่นขึ้นสามารถจำกัดปริมาณสารที่มีสมบัติกัดกร่อนที่แพร่เข้าสู่ผิวของโลหะ และให้อัตราการแพร่ของสารเข้าสู่ผิวหน้าโลหะลดลง ส่งผลให้ J_{pit} และอัตราการกัดกร่อนต่ำลง (Yuan, X. 2016; Wang, N. 2012; Siva, T. 2015) นอกจากนี้อนุภาค MSN ซึ่งมีขนาดประมาณ 100 นาโนเมตรสามารถเข้าไปเติมเต็มช่องว่างซึ่งมีขนาดในระดับไมโครเมตรที่ผิวหน้าหรือภายในชั้นเคลือบ (Palanivel, V. 2003) ทำให้ปริมาณน้ำและไอออนที่ชั้นเคลือบสามารถดูดซับได้ เนื่องจากมีช่องว่างในชั้นเคลือบลดลง จึงใช้เวลาเพิ่มขึ้นในการสลายตัวของชั้นเคลือบ (Khatak, H.S and Raj, B. 2002) ส่งผลให้ E_{pit} เพิ่มขึ้นและชั้นเคลือบทนทานต่อการกัดกร่อนมากขึ้น เมื่อตรวจสอบลักษณะการกัดกร่อนที่เกิดขึ้นของชั้นเคลือบที่มี MSN (รูปที่ 4.2.6) พบว่าการกัดกร่อนของรูเข็มมีจำนวนและขนาดเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับชั้นเคลือบ GPTMS ซึ่งรูเข็มที่ปรากฏมีขนาด $272.9 \pm$ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

62.5 μm แต่ความลึกของรูเข็มลดลงอย่างเห็นได้ชัด ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองของชั้นเคลือบ GPTMS Coating ที่แสดงความสามารถในการป้องกันการกัดกร่อนแบบรูเข็มของเหล็กกล้าไร้สนิมให้ดีขึ้นเมื่อบรรจุ MSN ในชั้นเคลือบ GPTMS

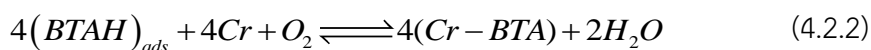


รูปที่ 4.2.6 ภาพถ่าย SEM ของชั้นเคลือบ MSN/GPTMS Coating หลังจากถูกกัดกร่อนที่กำลังขยาย (ก) 20 เท่า และ (ข) 150 เท่า

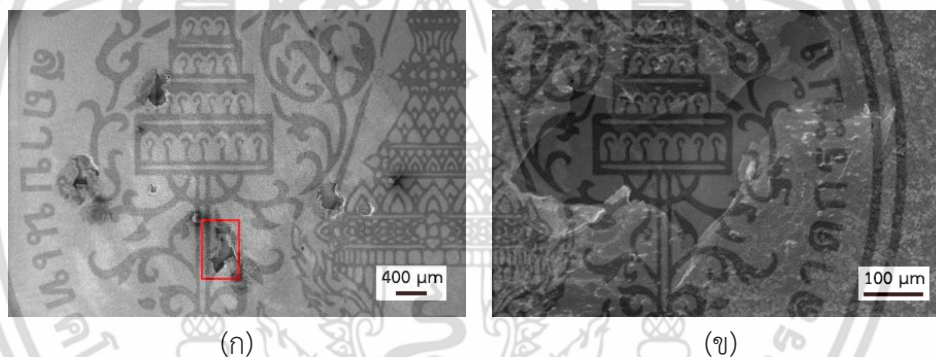
จากผลการทดลองกลุ่มตัวอย่างประกอบด้วย MSN@TiO₂/GPTMS Coating BTA-MSN/GPTMS Coating และ BTA-MSN@TiO₂/GPTMS Coating พบว่า BTA-MSN@TiO₂/GPTMS Coating มีสมบัติป้องกันการกัดกร่อนแบบรูเข็มดีที่สุดเนื่องจากมีค่า J_{pit} ต่ำที่สุด ($0.097 \pm 0.019 \mu\text{A}/\text{cm}^2$) และค่า E_{pit} สูงที่สุด ($402.6 \pm 5.5 \text{ mV}$) นอกจากนี้ยังพบว่าผลของการปรับปรุงอนุภาค MSN ด้วยการเคลือบด้วย TiO₂ หรือบรรจุ BTA จะส่งผลให้เกิดลักษณะการป้องกันการกัดกร่อนแบบรูเข็มที่แตกต่างกัน โดยที่ BTA-MSN/GPTMS Coating มีค่า J_{pit} และ E_{pit} ต่ำกว่า MSN@TiO₂/GPTMS Coating บ่งชี้ว่าอนุภาค BTA-MSN สามารถลดอัตราการกัดกร่อนได้ดีกว่าอนุภาค MSN@TiO₂ แต่ชั้นเคลือบสามารถทนต่อการกัดกร่อนได้น้อยกว่า

อนุภาค BTA-MSN สามารถป้องกันการกัดกร่อนได้ดีในแง่ของการลดอัตราการกัดกร่อนแต่ความหนาของชั้นเคลือบเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยเทียบกับชั้นเคลือบ MSN/GPTMS Coating ซึ่งสังเกตได้จากการลดลงของ J_{pit} จาก 0.385 ± 0.083 เป็น $0.112 \pm 0.012 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ และการเพิ่มขึ้นของ E_{pit} จาก 372.8 ± 1.5 เป็น $376.0 \pm 3.7 \text{ mV}$ บ่งชี้ว่า BTA สามารถลดอัตราการกัดกร่อนได้เนื่องจากเมื่อการกัดกร่อนเกิดขึ้นบนชั้นเคลือบ BTA จะถูกปล่อยออกมาจากอนุภาค MSN และรวมตัวกันเป็นชั้น film ของ BTA ทั่วบริเวณที่เกิดการกัดกร่อน (Finsgar, M. and Milosev, I. 2010; Borisova, D. 2011) และจากงานวิจัยของ D. Tromans และ R. H. Sun (1991) พบว่าชั้น film ของ BTA เกิดจากการดูดซับ BTAH บนผิวโลหะและสร้างพันธะกับโลหะ และ Y. S. Kim et al. (2015) ได้ อธิบายการดูดซับและการสร้างพันธะของ BTAH ในสารละลายกับโครเมียมบนเหล็กกล้าไร้สนิม ดังแสดงในสมการที่ 4.2.1 และ 4.2.2 ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



แต่ในกรณีของชั้นเคลือบ BTA-MSN/GPTMS Coating เมื่อการกัดกร่อนเกิดขึ้นในบริเวณที่มีอนุภาค BTA-MSN สารยับยั้งการกัดกร่อน BTA จะถูกปลดปล่อยจากอนุภาค ในรูปของ BTAH และรวมตัวกันเกิดเป็นชั้น film ของ BTA ปกคลุมบริเวณชั้นเคลือบ ซึ่งโดยรอบมีไม่มีอนุภาคหรืออะตอมของโลหะให้ BTAH ยึดติดแต่มีเพียงซิลิกาจากอนุภาค MSN และ GPTMS ในชั้นเคลือบเท่านั้น ชั้น film ของ BTA ที่เกิดขึ้นจึงยึดติดกับชั้นเคลือบได้น้อยกว่าเมื่อเทียบกับชั้น film ที่เกิดบนผิวโลหะโดยตรง จึงเป็นเหตุผลที่ E_{pit} เพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยเมื่อเทียบกับชั้นเคลือบ MSN/GPTMS Coating เมื่อตรวจสอบลักษณะการกัดกร่อนที่เกิดขึ้นของชั้นเคลือบที่มี BTA-MSN (รูปที่ 4.2.7) พบว่าการกัดกร่อนของรูเข็มมีจำนวนและความลึกลดลงอย่างเห็นได้ชัด แต่ขนาดของรูเข็มลดลงเพียงเล็กน้อยเป็น $260.3 \pm 67.1 \mu m$ ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองของชั้นเคลือบที่มี BTA สามารถลดความรุนแรงของการกัดกร่อนแบบรูเข็ม

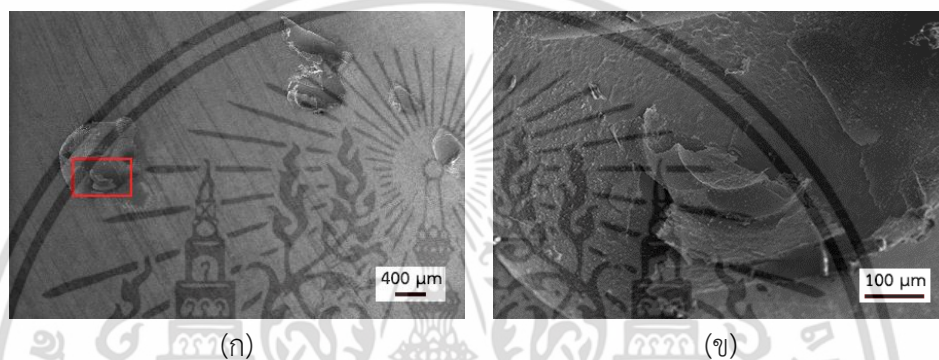


รูปที่ 4.2.7 ภาพถ่าย SEM ของชั้นเคลือบ BTA-MSN/GPTMS Coating หลังจากถูกกัดกร่อนที่กำลังขยาย (ก) 20 เท่า และ (ข) กำลังขยาย 150 เท่า

อนุภาค $MSN@TiO_2$ สามารถป้องกันการกัดกร่อนได้ดีทั้งในแง่ของการลดอัตราการกัดกร่อนและเพิ่มความทนทานของชั้นเคลือบ ซึ่งสังเกตได้จากการลดลงของ J_{pit} จาก 0.385 ± 0.083 เป็น $0.162 \pm 0.014 \mu A/cm^2$ และ E_{pit} เพิ่มขึ้นจาก 372.8 ± 1.5 เป็น $392.2 \pm 3.3 mV$ เมื่อเทียบกับ MSN การเคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์ซึ่งมีพลังงานพื้นผิวต่ำบนผิวอนุภาค MSN ในรูปของอนุภาคคอมโพสิตจะทำให้ชั้นเคลือบมีพลังงานพื้นผิวต่ำเช่นกัน นอกจากนี้ $MSN@TiO_2$ ทำให้ผิวของชั้นเคลือบขรุขระ (รูปที่ 4.1.8) ชั้นเคลือบที่มีพลังงานพื้นผิวต่ำและขรุขระจะทำให้ค่าความไม่ชอบน้ำของชั้นเคลือบเพิ่มขึ้น (Ma, M. และ Hill, R. M. 2006) ซึ่งจากการทดลองในหัวข้อที่ 4.1.3 พบว่าค่ามุมสัมผัสของชั้นเคลือบที่บรรจุมีค่าเท่ากับ 92.4 องศา บ่งชี้ว่ามีสมบัติไม่ชอบน้ำ ส่งผลให้ปริมาณน้ำและไอออนอื่นๆ เช่น คลอไรด์ เคลื่อนที่เข้าสู่ชั้นเคลือบลดลงส่งผลให้อัตราการกัดกร่อนต่ำลง นอกจากนี้

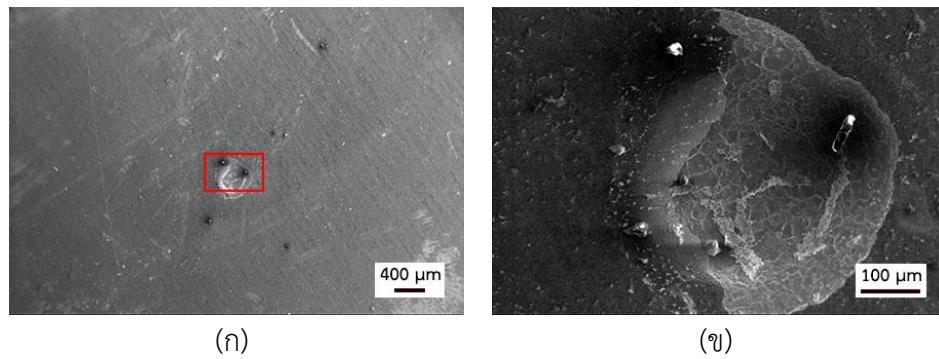
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การที่ปริมาณไอออนเคลื่อนที่เข้าสู่ชั้นเคลือบลดลงหมายความว่าปริมาณไอออนที่ถูกดูดซับในชั้นเคลือบจะลดลงด้วยเช่นกัน ปริมาณของไอออนต่างๆ ในชั้นเคลือบเป็นปัจจัยสำคัญที่ทำให้ชั้นเคลือบเริ่มเกิดการสลายตัวและเกิดการกัดกร่อน ดังนั้นความทนทานของชั้นเคลือบจึงมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อตรวจสอบลักษณะการกัดกร่อนที่เกิดขึ้นของชั้นเคลือบที่มี MSN@TiO₂ (รูปที่ 4.2.8) พบว่าการกัดกร่อนของรูเข็มมีจำนวนและความลึกลดลงอย่างเห็นได้ชัด แต่ขนาดของรูเข็มเพิ่มขึ้นเป็น $554.1 \pm 294.1 \mu\text{m}$ ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองของชั้นเคลือบที่มี MSN@TiO₂ ที่ไม่ชอบน้ำสามารถลดความรุนแรงของการกัดกร่อนแบบรูเข็มและเปลี่ยนรูปแบบของการรูเข็มจากแบบลึกเป็นแบบตื้น ดังแสดงในรูปที่ 2.2.1



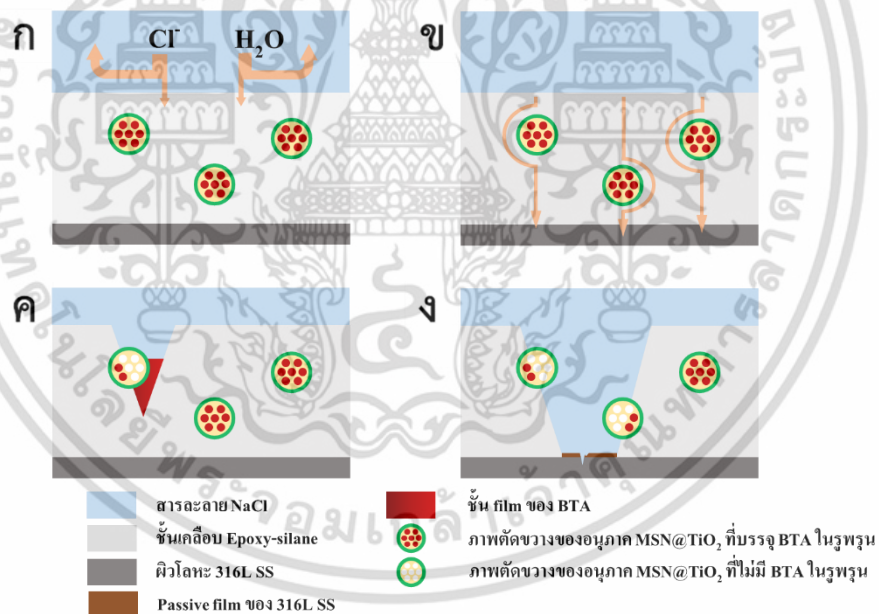
รูปที่ 4.2.8 ภาพถ่าย SEM ของชั้นเคลือบ MSN@TiO₂/GPTMS Coating หลังจากถูกกัดกร่อนที่กำลังขยาย (ก) 20 เท่า และ (ข) 150 เท่า

เมื่อพิจารณาอนุภาค BTA-MSN@TiO₂ ซึ่งเป็นการปรับปรุงอนุภาค MSN โดยหุ้มด้วย TiO₂ แล้วบรรจุ BTA พบว่ามีสมบัติป้องกันการกัดกร่อนแบบรูเข็มดีที่สุดทั้งในแง่ของความทนทานและการลดอัตราการกัดกร่อน บ่งชี้ว่าทั้งการปรับปรุง MSN ด้วยการหุ้ม TiO₂ และบรรจุ BTA ต่างสนับสนุนกันและไม่เกิดผลลบจากการใช้งานร่วมกันของทั้งสองวิธี นอกจากนี้การหุ้มด้วย TiO₂ ทำให้สามารถบรรจุ BTA ในอนุภาคได้มากขึ้นประมาณร้อยละ 17 BTA ที่มากขึ้นนี้จะทำให้ความสามารถในการป้องกันการกัดกร่อนเพิ่มขึ้น (Mehdipour, M. 2014) เมื่อตรวจสอบลักษณะการกัดกร่อนที่เกิดขึ้นของชั้นเคลือบที่มี BTA-MSN@TiO₂ (รูปที่ 4.2.9) พบว่าการกัดกร่อนของรูเข็มเพียง 1 ตำแหน่ง ขนาดและความลึกของรูเข็มลดลงอย่างเห็นได้ชัด ซึ่งขนาดของรูเข็มลดลงเป็น $238.8 \mu\text{m}$ ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลอง



รูปที่ 4.2.9 ภาพถ่าย SEM ของชั้นเคลือบ BTA-MSN@TiO₂/GPTMS Coating หลังจากถูกกัดกร่อนที่ กำลังขยาย (ก) 20 เท่า และ (ข) กำลังขยาย 150 เท่า

จากผลการทดลองและข้อมูลจากงานวิจัยต่างๆ ผู้ทดลองจึงเสนอรูปแบบการทำงานของ การป้องกันการกัดกร่อนของเหล็กกล้าไร้สนิมเคลือบด้วยอีพอกซีไซเลนและภายในชั้นเคลือบประกอบด้วยอนุภาค MSN ซึ่งถูกปรับปรุงด้วยการหุ้มด้วย TiO₂ แล้วบรรจุสารยับยั้งการกัดกร่อน BTA ในรูพรุนของอนุภาค (BTA-MSN@TiO₂/Epoxy-silane Coating) ดังรูปที่ 4.2.4



รูปที่ 4.2.10 แผนภาพเสนอการทำงานของชั้นเคลือบ BTA-MSN@TiO₂/Epoxy-silane Coating ในการป้องกันการกัดกร่อนบนผิวเหล็กกล้าไร้สนิม 316L

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

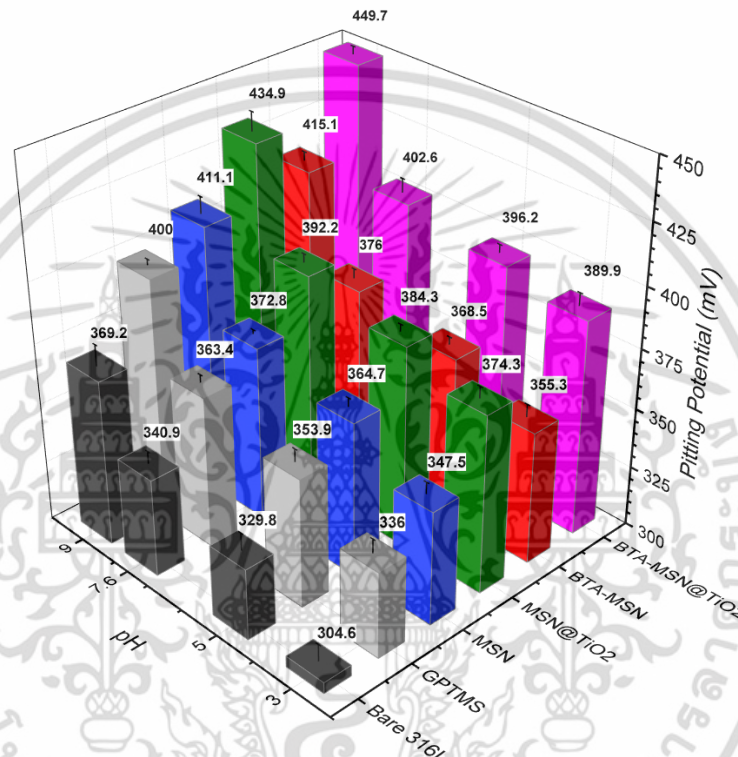
กระบวนการทำงานจากรูปที่ 4.2.4 สามารถอธิบายได้ดังนี้

- (ก) เมื่อน้ำและไอออนต่างๆ ที่อยู่ในน้ำ เช่น ไอออนของคลอไรด์เคลื่อนที่จากสารละลายเข้าสู่ชั้นเคลือบ ชั้นเคลือบซึ่งมีสมบัติไม่ชอบน้ำ จะยอมให้น้ำและไอออนต่างๆ เข้าสู่ชั้นเคลือบน้อยมากเมื่อเทียบกับส่วนที่ไม่สามารถเคลื่อนที่เข้าสู่ชั้นเคลือบได้ ปริมาณน้ำและไอออนที่ต่ำจะส่งผลให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาแคโทดิกลดลงและปริมาณน้ำและไอออนที่ถูกดูดซับลดลง ส่งผลให้อัตราการกัดกร่อนต่ำลงและชั้นเคลือบทนทานต่อการกัดกร่อนดีขึ้น (รูป 4.2.10.ก)
- (ข) หลังจากทีน้ำและไอออนต่างๆ ที่อยู่ในสภาวะแวดล้อมเคลื่อนที่เข้าสู่ชั้นเคลือบ น้ำและไอออนเหล่านี้จะพยายามแพร่ผ่านชั้นเคลือบเข้าสู่ผิวหน้าของโลหะ ซึ่งอนุภาค BTA-MSN@TiO₂ จะขัดขวางและเพิ่มระยะทางการแพร่ดังกล่าว อัตราการแพร่ของน้ำและไอออนจากชั้นเคลือบเข้าสู่ผิวโลหะจึงลดลง ทำให้อัตราการกัดกร่อนต่ำลง นอกจากนี้ในระหว่างการแพร่สู่ผิวโลหะ น้ำและไอออนบางส่วนจะถูกดูดซับในช่องว่างของชั้นเคลือบ ซึ่งช่องว่างส่วนใหญ่ในชั้นเคลือบถูกเติมเต็มด้วยอนุภาคที่บรรจุอยู่ก่อนแล้ว ปริมาณน้ำและไอออนที่ถูกดูดซับในชั้นเคลือบจึงมีปริมาณน้อย การสลายตัวของชั้นเคลือบจึงต้องใช้เวลาเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ชั้นเคลือบทนทานต่อการกัดกร่อนมากขึ้น (รูปที่ 4.2.10.ข)
- (ค) เมื่อชั้นเคลือบเกิดการสลายตัวจากน้ำและไอออนที่ถูกดูดซับจะเกิดตำหนิขึ้นที่ผิวชั้นเคลือบ ซึ่งตำแหน่งนี้จะเป็นจุดที่เริ่มเกิดการกัดกร่อนแบบรูเข็ม ถ้าการกัดกร่อนแบบรูเข็มเกิดจนกระทั่งถึงตำแหน่งที่มีอนุภาค BTA-MSN@TiO₂ จะทำให้ BTA ถูกปล่อยออกจากอนุภาคเนื่องจากความแตกต่างของความเข้มข้นของ BTA ในอนุภาคและสารละลายและสร้างชั้น film ของ BTA ปกคลุมบริเวณที่เกิดรูเข็ม พื้นที่เกิดการกัดกร่อนและความลึกของรูเข็มจึงลดลง ซึ่งเป็นการยับยั้งการขยายตัวของรูเข็มในขั้นตอนก่อนที่จะเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันเพียงอย่างเดียว เนื่องจากออกซิเจนจากสารละลายสามารถเข้าไปทดแทนส่วนที่ถูกใช้ไปได้ ดังที่ได้อธิบายในหัวข้อที่ 2.2.2 ถึงแม้ว่าชั้น BTA จะช่วยลดอัตราการกัดกร่อน แต่กระบวนการดังกล่าวยังคงเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่อง โดยที่มีการสลายตัวของชั้น film BTA และการปลดปล่อย BTA ออกจากอนุภาคอย่างต่อเนื่อง จนกระทั่งไม่มีการปลดปล่อย BTA ออกจากอนุภาค รูเข็มจึงเกิดการขยายตัวไปถึงตำแหน่งอื่นที่มีอนุภาค BTA-MSN@TiO₂ และเริ่มมีการสร้างชั้น film BTA อีกครั้ง (รูปที่ 4.2.10.ค)
- (ง) เมื่อชั้นเคลือบสลายตัวจนกระทั่งสารละลายสัมผัสกับผิวโลหะโดยตรงและไม่เกิดการสร้างชั้น film BTA เหล็กกล้าไร้สนิมจะสร้างชั้น passive film ซึ่งมีองค์ประกอบหลักคือโครเมียมออกไซด์และโครเมียมไฮดรอกไซด์ซึ่งเป็นการป้องกันชั้นสุดท้ายก่อนที่โลหะจะเริ่มเกิดการกัดกร่อน (รูป 4.2.10.ง)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

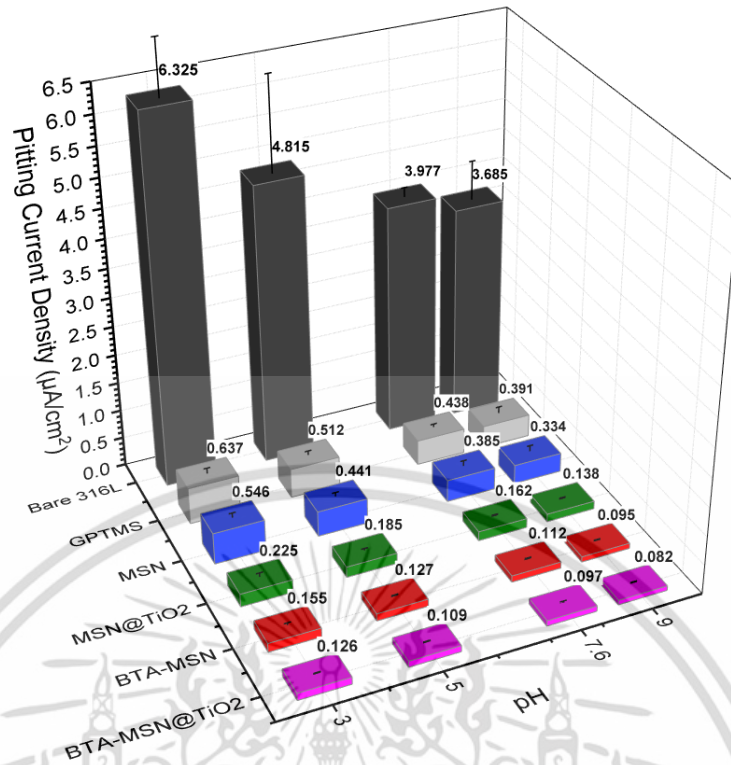
4.3 อิทธิพลของความเป็นกรด-ด่างต่อการป้องกันการกัดกร่อนของเหล็กกล้าไร้สนิมเคลือบด้วยชั้นเคลือบต่างๆ

ชั้นเคลือบชนิดต่างๆ ถูกนำมาทดสอบการป้องกันการกัดกร่อนที่ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) เท่ากับ 3 5 7.6 และ 9 โดยใช้เทคนิคโพเทนซิโอดีนามิกในสารละลาย NaCl เข้มข้นร้อยละ 3.5 โดยมวล และใช้กรดซัลฟิวริกและโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ปรับค่าความเป็นกรด-ด่าง ค่า E_{pit} และ J_{pit} จากการทดลองแสดงในรูปที่ 4.3.1



รูปที่ 4.3.1 E_{pit} ของเหล็กกล้าไร้สนิมชนิด 316L ที่ไม่ผ่านการเคลือบ (ดำ) และเคลือบด้วย GPTMS Coating (เทา) MSN/GPTMS Coating (น้ำเงิน) MSN@TiO₂/GPTMS Coating (เขียว) BTA-MSN/GPTMS Coating (แดง) และ BTA-MSN@TiO₂/GPTMS Coating (ม่วง) ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์เข้มข้นร้อยละ 3.5 โดยมีค่า pH 3 5 7.6 และ 9

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.3.2 J_{pit} ของเหล็กกล้าไร้สนิมชนิด 316L ที่ไม่ผ่านการเคลือบ (ดำ) และเคลือบด้วย GPTMS Coating (เทา) MSN/GPTMS Coating (น้ำเงิน) MSN@TiO₂/GPTMS Coating (เขียว) BTA-MSN/GPTMS Coating (แดง) และ BTA-MSN@TiO₂/GPTMS Coating (ม่วง) ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์เข้มข้นร้อยละ 3.5 โดยมวลที่ pH 3 5 7.6 และ 9

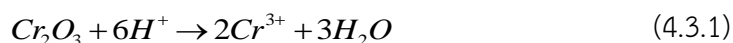
จากรูปที่ 4.3.1 และ 4.3.2 เมื่อพิจารณาการป้องกันการกัดกร่อนของชั้นเคลือบต่างๆ ที่ค่า pH เท่ากันพบว่า มีลักษณะเป็นไปตามผลการทดลองในหัวข้อที่ 4.2 คือการป้องกันการกัดกร่อนของ MSN/GPTMS Coating มากกว่า GPTMS Coating การปรับปรุงชั้นเคลือบในรูปของ MSN@TiO₂/GPTMS Coating และ BTA-MSN/GPTMS Coating สามารถเพิ่มการป้องกันการกัดกร่อนของ MSN/GPTMS Coating ทั้งสองวิธี โดยที่ชั้นเคลือบ MSN@TiO₂/GPTMS Coating ทนทานต่อการกัดกร่อนมากกว่า BTA-MSN/GPTMS Coating ในขณะที่สามารถลดความรุนแรงของการกัดกร่อนได้น้อยกว่า และชั้นเคลือบ BTA-MSN@TiO₂/GPTMS Coating แสดงการป้องกันการกัดกร่อนได้ดีที่สุด ดังที่ได้อธิบายในหัวข้อที่ 4.2

จากรูปที่ 4.3.1 เมื่อพิจารณาการป้องกันการกัดกร่อนของชั้นเคลือบแต่ละชนิดที่ค่า pH ต่างๆ พบว่าในกรณีที่สารละลายมีฤทธิ์เป็นกรด การกัดกร่อนจะรุนแรงมากขึ้นแปรผันตามความเป็นกรด และกรณีที่สารละลายมีฤทธิ์เป็นด่าง ความรุนแรงของการกัดกร่อนจะลดลง ทั้งนี้เป็นผลจากพฤติกรรม การกัดกร่อนของเหล็กกล้าไร้สนิมชนิด 316L ที่ถูกเคลือบ

ในกรณีของเหล็กกล้าไร้สนิม 316L ที่ไม่ผ่านการเคลือบ ความรุนแรงของการกัดกร่อนจะแปรผันตามความเป็นกรด ซึ่งสังเกตได้จากการลดลงของ E_{pit} เป็นร้อยละ 3.3 และ 10.6 และการเพิ่มของ I_{pit}

ร้อยละ 21.1 และ 59.1 ที่ค่า pH เท่ากับ 5 และ 3 ตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองของเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการแข่งขันเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ดูแลเห็นเป็นประโยชน์ในการศึกษา ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

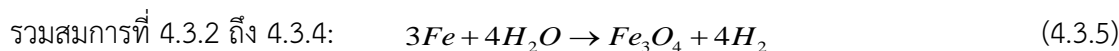
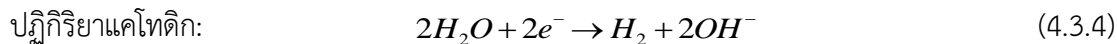
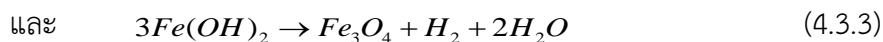
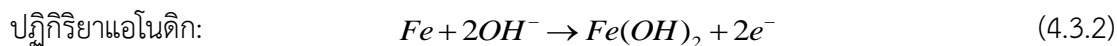
Ramana, K. V. S. (2009) Deng, B (2007) และ G. Rujini (1989) เนื่องจากในสถานะที่เป็นกรด ไอออนของไฮโดรเจนจะทำปฏิกิริยากับโครเมียม (III) ออกไซด์ของ Passive film ดังแสดงในสมการที่ 4.3.1 (Sharma, S. K. and Sato, N. 2011: 8-9) เนื่องจากโครเมียม (III) ออกไซด์เป็นองค์ประกอบหลักที่ทำให้ชั้น Passive film มีสมบัติการป้องกันการกัดกร่อน (Stoychev, D. 2002) ปริมาณที่ลดลงของโครเมียม (III) ออกไซด์ส่งผลให้ Passive film อ่อนแอต่อการกัดกร่อน



บทบาทของซัลเฟต (Sulfate) สามารถยับยั้งและส่งเสริมการกัดกร่อน โดยที่ซัลเฟตสามารถยับยั้งการเริ่มเกิดของรูเข็มเมื่อซัลเฟตมีปริมาณใกล้เคียงกับไอออนของคลอไรด์ เนื่องจากซัลเฟตสามารถถูกดูดซับบนผิวหน้าของโลหะได้ดีกว่าไอออนของคลอไรด์ เนื่องจากในกรณีที่ไอออนทั้งสองถูกดูดซับในบริเวณเดียวกันไอออนของคลอไรด์จะมีแนวโน้มเคลื่อนที่ออกจากชั้น Passive film มากกว่าซัลเฟต ซึ่งเป็นผลจากแรงผลัก (Repulsive force) ระหว่างไอออนของคลอไรด์และซัลเฟตซึ่งมีมวลมากกว่า (Deng, B. 2007) เมื่อไอออนของคลอไรด์ถูกดูดซับน้อยลง การเริ่มเกิดการกัดกร่อนแบบรูเข็มจึงลดลง (Meng, G. 2014) นอกจากนี้ซัลเฟตสามารถส่งเสริมการขยายตัวของรูเข็ม เมื่อเกิดรูเข็มทำให้ไอออนในสารละลายรวมตัวกับไอออนของโลหะเกิดเป็นเกลือของ $FeCl_2$ และ $FeSO_4$ ที่ก้นของรูเข็ม (Pistorius, P. C. and Burstein, G. T. 1992) โดยที่เกลือของ $FeCl_2$ สามารถละลายได้ดีกว่าเกลือของ $FeSO_4$ จึงทำให้เกลือที่เหลืออยู่ที่ก้นของรูเข็มมีส่วนประกอบหลักคือ $FeSO_4$ เกลือเหล่านี้จะขัดขวางการแพร่ของก๊าซหรือไอออนต่างๆที่จะเข้าสู่ผิวหน้าของโลหะจึงทำให้ทิศทางการแพร่และการกัดกร่อนเปลี่ยนไปจากตามแนวลิขของรูเข็มเป็นบริเวณด้านข้างของรูเข็มซึ่งไม่มีเกลืออยู่ (Deng, B. 2007) จึงทำให้เกิดพื้นที่บริเวณด้านข้างของรูเข็มซึ่งสามารถเกิดปฏิกิริยาแอโนดิกเพิ่มขึ้น จึงทำให้การกัดกร่อนเกิดรุนแรงมากขึ้น แต่ในการทดลองนี้ปริมาณกรดซัลฟิวริกที่เติมเพื่อปรับค่า pH มีปริมาณน้อยมากเมื่อเทียบกับปริมาณไอออนของคลอไรด์ที่มีความเข้มข้นมากถึง 35,000 ppm ทำให้บทบาทของซัลเฟตในการทดลองนี้มีเพียงแค่ส่งเสริมการกัดกร่อนแบบรูเข็มทั้งในขั้นตอนการเริ่มเกิดของรูเข็มและการขยายตัวของรูเข็ม

นอกจากนี้ในสถานะที่สารละลายมีฤทธิ์เป็นด่าง (pH 9) ความรุนแรงของการกัดกร่อนของเหล็กกล้าไร้สนิม 316L ที่ไม่ผ่านการเคลือบจะลดลงซึ่งสังเกตได้จากการเพิ่มของ E_{pit} ร้อยละ 8.3 และการลดลงของ I_{pit} ร้อยละ 7.3 บ่งบอกถึงการป้องกันการกัดกร่อนที่ดีขึ้น ซึ่งเป็นผลจากการมีอยู่ของไอออนของไฮดรอกไซด์ (Khatak, H. S. 2002: 88) สอดคล้องกับการทดลองของ Chandra-ambhorn, S. (2016) และ Malik, A. U. (1992) ไอออนของไฮดรอกไซด์สามารถทำปฏิกิริยากับไอออนของเหล็กเกิดเป็นไฮดรอกไซด์ (II,III) ออกไซด์ (Fe_3O_4) ซึ่งมีสมบัติในการป้องกันการกัดกร่อน ขั้นตอนของปฏิกิริยาดังกล่าวแสดงในสมการที่ 4.3.2 ถึง 4.3.5 (Rihan, R. O. and Nestic, S. 2006)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เพื่อพิจารณาความเสถียรของชั้นเคลือบที่ pH ต่างๆ จึงนำข้อมูลจากรูปที่ 4.3.1 และ 4.3.2 แปลงให้อยู่ในรูปของร้อยละการเปลี่ยนแปลงของ E_{pit} และ J_{pit} ที่ pH 3 5 และ 9 เทียบกับ pH เท่ากับ 7.6 ดังตารางที่ 4.3.1 และ 4.3.2 ตามลำดับ

ตารางที่ 4.3.1 ร้อยละการเปลี่ยนแปลง E_{pit} ของชั้นเคลือบชนิดต่างๆ ที่ pH 3 5 และ 9 เทียบกับ pH เท่ากับ 7.6 ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์เข้มข้นร้อยละ 3.5 โดยมวล

| ชั้นเคลือบ | pH | | | |
|---|-------|------|---------|------|
| | 3 | 5 | 7.6 | 9 |
| Bare 316L | -10.6 | -3.3 | อ้างอิง | 8.3 |
| GPTMS Coating | -7.5 | -2.6 | อ้างอิง | 10.1 |
| MSN/GPTMS Coating | -6.6 | -2.2 | อ้างอิง | 10.3 |
| MSN@TiO ₂ /GPTMS Coating | -4.5 | -2.0 | อ้างอิง | 10.9 |
| BTA-MSN/GPTMS Coating | -5.5 | -2.0 | อ้างอิง | 10.4 |
| BTA-MSN@TiO ₂ /GPTMS Coating | -3.2 | -1.6 | อ้างอิง | 11.7 |

ตารางที่ 4.3.2 ร้อยละการเปลี่ยนแปลง J_{pit} ของชั้นเคลือบชนิดต่างๆ ที่ pH 3 5 และ 9 เทียบกับ pH เท่ากับ 7.6 ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์เข้มข้นร้อยละ 3.5 โดยมวล

| ชั้นเคลือบ | pH | | | |
|---|------|------|---------|-------|
| | 3 | 5 | 7.6 | 9 |
| Bare 316L | 59.1 | 21.1 | อ้างอิง | -7.3 |
| GPTMS Coating | 45.5 | 16.9 | อ้างอิง | -10.7 |
| MSN/GPTMS Coating | 41.8 | 14.5 | อ้างอิง | -13.2 |
| MSN@TiO ₂ /GPTMS Coating | 38.9 | 14.2 | อ้างอิง | -14.8 |
| BTA-MSN/GPTMS Coating | 38.4 | 13.4 | อ้างอิง | -15.2 |
| BTA-MSN@TiO ₂ /GPTMS Coating | 29.9 | 12.4 | อ้างอิง | -15.4 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากตารางที่ 4.3.1 และ 4.3.2 พบว่าเหล็กกล้าไร้สนิมที่เคลือบด้วยชั้นเคลือบ GPTMS Coating สามารถเพิ่มการป้องกันการกัดกร่อนสูงขึ้นทุกค่าความเป็นกรด-ด่างทั้งในแง่ของความทนทานและอัตราการกัดกร่อน โดยในสภาวะที่สารละลายมีฤทธิ์เป็นกรด (pH 3) ร้อยละการเปลี่ยนแปลงของ E_{pit} เพิ่มขึ้นจากร้อยละ -10.6 เป็น -7.5 และร้อยละการเปลี่ยนแปลงของ J_{pit} ลดลงจากร้อยละ 59.1 เป็น 45.5 บ่งชี้ว่าการเคลือบผิวด้วยชั้นเคลือบ GPTMS Coating สามารถลดความรุนแรงของการกัดกร่อนในสารละลายที่มีความเป็นกรดได้ สอดคล้องกับการทดลองของ G. Chawada และ B. Z. Dholakiya (2013) และเมื่อสารละลายมีฤทธิ์เป็นด่าง (pH 9) ร้อยละการเปลี่ยนแปลงของ J_{pit} เมื่อสารละลายมีฤทธิ์เป็นด่างมากขึ้น เพิ่มขึ้นจากร้อยละ 7.3 เป็น 10.7 และร้อยละการเปลี่ยนแปลงของ E_{pit} เพิ่มขึ้นจากร้อยละ 8.3 เป็น 10.1 ที่ pH เท่ากับ 9 เนื่องจากชั้นเคลือบ GPTMS ทำหน้าที่ป้องกันไม่ให้ไอออนของซัลเฟต ไฮโดรเจน และไฮดรอกไซด์สัมผัสกับผิวโลหะโดยตรง ความสามารถในการต้านทานกรดและด่างนี้เป็นสมบัติพื้นฐานของอีพอกซี (Forsgren, A. 2006: 12 และ Khanna, A. S. 2008: 231)

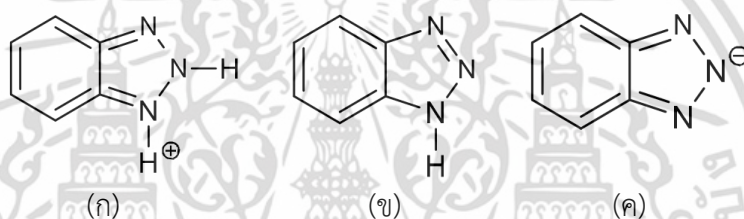
การใช้ออกไซด์ MSN เป็นสารเติมเต็มในชั้นเคลือบ GPTMS ส่งผลให้ความสามารถในการป้องกันการกัดกร่อนสูงขึ้นทุกค่าความเป็นกรด-ด่างเมื่อเทียบกับชั้นเคลือบที่ไม่ใช้ออกไซด์ MSN ทั้งในแง่ของความทนทานและอัตราการกัดกร่อน โดยที่ร้อยละการเปลี่ยนแปลงของ E_{pit} เท่ากับ -6.6 -2.2 และ 10.3 ที่ pH เท่ากับ 3 5 และ 9 ตามลำดับเมื่อเทียบกับ pH เท่ากับ 7.6 และร้อยละการเปลี่ยนแปลงของ J_{pit} เท่ากับ 41.8 16.9 และ -10.7 ที่ pH เท่ากับ 3 5 และ 9 ตามลำดับเมื่อเทียบกับ pH เท่ากับ 7.6 ความสามารถในการป้องกันการกัดกร่อนที่เกิดขึ้นเป็นสาเหตุจากการที่ชั้นเคลือบมีปริมาณพันธะไฮดรอกเซนที่ซับซ้อนขึ้น ระยะทางที่ไอออนต้องเคลื่อนที่ผ่านจึงมากขึ้นส่งผลให้อัตราการแพร่ลดลงและการดูดซับของน้ำและไอออนต่างๆ ส่งผลให้ชั้นเคลือบทนทานต่อการกัดกร่อนและการสลายตัว

การปรับปรุงออกไซด์ MSN โดยการเคลือบผิวด้วย TiO_2 ซึ่งมีสมบัติต้านทานการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Shanaghi, A. 2009) และสมบัติไม่ชอบน้ำ ส่งผลให้ปริมาณน้ำและไอออนเข้าสู่ชั้นเคลือบน้อยลง จากการทดลองพบว่าอัตราการเปลี่ยนแปลงของ E_{pit} เท่ากับ -4.5 -2.0 และ 10.9 ที่ pH เท่ากับ 3 5 และ 9 ตามลำดับ และอัตราการเปลี่ยนแปลงของ J_{pit} เท่ากับ 38.9 14.2 และ -14.8 ที่ pH เท่ากับ 3 5 และ 9 ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับชั้นเคลือบ MSN/GPTMS Coating พบว่าความสามารถในการป้องกันการกัดกร่อนสูงขึ้นทุกค่าความเป็นกรด-ด่างทั้งในแง่ของความทนทานของชั้นเคลือบและอัตราการกัดกร่อน โดยเฉพาะความทนทานต่อการกัดกร่อนในสารละลายที่มีฤทธิ์เป็นกรดซึ่งอาจเป็นผลจากปริมาณซัลเฟตที่สามารถเคลื่อนที่สู่ผิวหน้าลดลงเนื่องจากความไม่ชอบน้ำของชั้นเคลือบเมื่อเทียบกับชั้นเคลือบ MSN/GPTMS Coating

เมื่อบรรจุสารยับยั้งการกัดกร่อน BTA ลงใน MSN ทำให้ชั้นเคลือบสามารถป้องกันการกัดกร่อนแบบแอคทีฟ ความสามารถในการป้องกันการกัดกร่อนสูงขึ้นทุกค่าความเป็นกรด (pH 3 และ 5) ทั้งในแง่ของความทนทานของชั้นเคลือบและอัตราการกัดกร่อน โดยที่ร้อยละการเปลี่ยนแปลงของ E_{pit} เท่ากับ -5.5 และ -2.0 ที่ pH เท่ากับ 3 และ 5 ตามลำดับเมื่อเทียบกับที่ pH 7.6 และร้อยละการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เปลี่ยนแปลงของ J_{pit} เท่ากับ 38.4 และ 13.4 ที่ pH เท่ากับ 3 และ 5 ตามลำดับเมื่อเทียบกับที่ pH 7.6 ในสภาวะที่สารละลายที่มีฤทธิ์เป็นด่างความสามารถในการป้องกันการกัดกร่อนในแง่ของความทนทานไม่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญโดยที่ร้อยละการเปลี่ยนแปลงของ E_{pit} จาก 10.3 เป็น 10.4 แต่อัตราการกัดกร่อนลดลงโดยที่ร้อยละการเปลี่ยนแปลงของ J_{pit} จาก -13.2 เป็น -15.2 เมื่อเทียบกับชั้นเคลือบ MSN/GPTMS Coating เนื่องจากสารยับยั้งการกัดกร่อน BTA บางส่วนที่ถูกปล่อยออกจากรูพรุนของอนุภาคไม่สามารถรวมตัวเป็นชั้น film ได้ดีในสารละลายที่มีฤทธิ์เป็นด่าง (pH 9) (Kim, Y. S. 2015) ลักษณะโมเลกุลของ BTA ในสารละลายแบ่งเป็น 3 ชนิด ดังรูปที่ 4.3.3 ได้แก่ $BTAH_2^+$ ในสภาวะที่ pH มีค่าประมาณหรือน้อยกว่า 1 BTAH ในสภาวะที่ pH มีค่ามากกว่า 1 แต่น้อยกว่า 8 และ BTA^- ในสภาวะที่ pH มีค่าประมาณหรือมากกว่า 8 ซึ่งมีเพียง BTA ในรูปของ BTAH เท่านั้นที่สามารถรวมตัวกันเป็นชั้น film บนผิวโลหะได้ (Tromans, D. and Sun, R. H. 1991) การเปลี่ยนแปลงลักษณะโมเลกุลของ BTA แสดงในสมการที่ 4.3.6 และ 4.3.7



รูปที่ 4.3.3 ลักษณะโมเลกุลของ BTA ในสารละลาย (ก) $BTAH_2^+$ (ข) BTAH และ (ค) BTA^-



เมื่อพิจารณาการใช้อนุภาค BTA-MSN@TiO₂ ซึ่งเป็นการปรับปรุงอนุภาค MSN โดยหุ้มด้วย TiO₂ แล้วบรรจุ BTA พบว่าความสามารถในการป้องกันการกัดกร่อนสูงสุดทุกค่าความเป็นกรด-ด่างทั้งในแง่ของความทนทานของชั้นเคลือบและอัตราการกัดกร่อน เมื่อเปรียบเทียบกับชั้นเคลือบต่างๆ โดยที่อัตราการเปลี่ยนแปลงของ E_{pit} เท่ากับ -3.2 -1.6 และ 11.7 ที่ pH เท่ากับ 3 5 และ 9 ตามลำดับ และอัตราการเปลี่ยนแปลงของ J_{pit} เท่ากับ 29.9 12.4 และ -15.4 ที่ pH เท่ากับ 3 5 และ 9 ตามลำดับ นอกจากนี้ยังสามารถลดข้อจำกัดของความทนทานของชั้นเคลือบ BTA-MSN/GPTMS Coating ในสารละลายที่มีฤทธิ์เป็นด่าง จากข้อมูลการทดลองเมื่อเปรียบเทียบ E_{pit} ของชั้นเคลือบกลุ่มที่บรรจุ BTA ในอนุภาค ได้แก่ ชั้นเคลือบของ BTA-MSN และ BTA-MSN@TiO₂ เทียบกับชั้นเคลือบ MSN พบว่าการเคลือบอนุภาค TiO₂ บน MSN ทำให้ความทนทานของชั้นเคลือบโดยรวมเพิ่มขึ้น อาจบ่งชี้ว่า BTA ที่ปล่อยออกจากอนุภาคสามารถสร้าง film และยึดติดกับชั้นเคลือบ BTA-MSN@TiO₂ ได้ดีกว่าชั้นเคลือบ BTA-MSN

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ที่จะเพิ่มการป้องกันการกัดกร่อนของชั้นเคลือบอีพ็อกซีไซเลนด้วยนาโนคอมโพสิตของอนุภาคเมโซพอร์ซิลิกาที่เคลือบผิวด้วยอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ ($MSN@TiO_2$) ซึ่งบรรจุสารยับยั้งการกัดกร่อนเบนโซไตรอะโซล (BTA) เป็นสารเติมเต็มในชั้นเคลือบและศึกษาผลการใช้อนุภาคดังกล่าวที่มีต่อพฤติกรรมการกัดกร่อนของชั้นเคลือบบนผิวเหล็กกล้าไร้สนิม 316L ที่ค่าความเป็นกรดและด่างต่างๆ ซึ่งสามารถสรุปได้ดังนี้

การบรรจุอนุภาค MSN ในชั้นเคลือบ GPTMS ส่งผลให้โครงสร้างร่างแหของซิลิกาหนาแน่นและมีความซับซ้อนมากขึ้น ทำให้เวลาที่ใช้ในการแพร่ของสารที่มีฤทธิ์กัดกร่อนเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ยังเข้าไปเติมเต็มช่องว่างในและบนผิวชั้นเคลือบ ชั้นเคลือบจึงทนทานต่อการกัดกร่อนมากขึ้น ประสิทธิภาพการป้องกันการกัดกร่อนแบบรูเข็มเพิ่มขึ้นร้อยละ 16.7 เมื่อเทียบกับชั้นเคลือบ GPTMS ที่ pH เท่ากับ 7.6

การปรับปรุงอนุภาค MSN ในรูปของนาโนคอมโพสิต ($MSN@TiO_2$) ส่งผลให้ความไม่ชอบน้ำของชั้นเคลือบสูงขึ้น ชั้นเคลือบจึงทนทานและสามารถลดความรุนแรงของการกัดกร่อนเพิ่มขึ้น โดยมีประสิทธิภาพของการป้องกันการกัดกร่อนแบบรูเข็มเพิ่มขึ้นร้อยละ 63.0 เมื่อเทียบกับชั้นเคลือบ GPTMS ที่ pH เท่ากับ 7.6 ในขณะที่ชั้นเคลือบที่มีอนุภาค BTA-MSN เป็นส่วนประกอบเมื่อเกิดการกัดกร่อน BTA จะสร้างชั้น film ปกคลุมชั้นเคลือบซึ่งเป็นการป้องกันการกัดกร่อนแบบแอคทีฟทำให้ความรุนแรงของการกัดกร่อนลดลง ซึ่งประสิทธิภาพของการป้องกันการกัดกร่อนแบบรูเข็มเพิ่มขึ้นร้อยละ 74.4 เมื่อเทียบกับชั้นเคลือบ GPTMS ที่ pH เท่ากับ 7.6 แต่ชั้น film ของ BTA ที่เกิดขึ้นสามารถยึดติดกับชั้นเคลือบโดยสร้างพันธะกับ Si ในชั้นเคลือบเท่านั้น ทำให้แรงยึดติดระหว่างชั้นเคลือบและชั้น film ของ BTA มีค่าน้อย ส่วนชั้นเคลือบที่มีอนุภาคนาโนคอมโพสิต BTA- $MSN@TiO_2$ ซึ่งรวมวิธีการปรับปรุงอนุภาค MSN ทั้ง 2 วิธี สามารถป้องกันการกัดกร่อนแบบแอคทีฟและพาสซีฟได้ดีอันเป็นผลจาก BTA และความไม่ชอบน้ำ ทำให้ชั้นเคลือบสามารถลดความรุนแรงของการกัดกร่อนและมีความทนทานที่ดีกว่าชั้นเคลือบที่ประกอบด้วยอนุภาค $MSN@TiO_2$ หรือ BTA-MSN เพียงอย่างเดียว ซึ่งประสิทธิภาพของการป้องกันการกัดกร่อนแบบรูเข็มเท่ากับ 77.8 เมื่อเทียบกับชั้นเคลือบ GPTMS ที่ pH เท่ากับ 7.6

ในกรณีที่สารละลายมีฤทธิ์เป็นกรด การกัดกร่อนจะรุนแรงมากขึ้นแปรผันตามความเป็นกรด และกรณีที่สารละลายมีฤทธิ์เป็นด่าง (pH 9) ความรุนแรงของการกัดกร่อนจะลดลง ทั้งนี้เป็นผลจากสมบัติการป้องกันการกัดกร่อนของเหล็กกล้าไร้สนิมที่ถูกเคลือบสามารถสร้าง passive film ได้ดีในสถานะที่เป็นด่างแต่ passive film ไม่เสถียรในสถานะที่เป็นกรด ในกรณีของชั้นเคลือบที่ใช้อนุภาคเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คอมโพสิต BTA-MSN@TiO₂ อนุภาค TiO₂ จะทำให้ชั้นเคลือบทนทานต่อสารเคมีมากขึ้น ร้อยละการเปลี่ยนแปลงของ J_{pit} จากร้อยละ 45.5 เป็น 29.9 ที่ค่า pH เท่ากับ 3 และจาก -10.7 เป็น -15.4 ค่า pH เท่ากับ 9 เมื่อเทียบกับค่า pH 7.6

5.2 ข้อเสนอแนะ

- 1) เนื่องจากการตรวจสอบการป้องกันการกัดกร่อนด้วยเทคนิคโพเทนชิโอดินามิกให้ข้อมูลของการกัดกร่อนในแง่ภาพรวมเท่านั้น การตรวจสอบการป้องกันการกัดกร่อนด้วยเทคนิคอื่น เช่น Electrical impedance spectroscopy (EIS) อาจสามารถระบุรายละเอียดของการป้องกันการกัดกร่อนที่กัดกร่อนเพิ่มเติม
- 2) จากงานวิจัยต่างๆ การใช้อนุภาคอนินทรีย์เป็นสารเติมเต็มในชั้นเคลือบนอกจากจะทำให้การป้องกันการกัดกร่อนของชั้นเคลือบเพิ่มขึ้นแล้วยังส่งผลให้สมบัติเชิงกลของชั้นเคลือบเพิ่มขึ้น เช่น ความทนทานต่อความร้อนและความแข็งแรง จึงควรศึกษาสมบัติเชิงกลชั้นเคลือบที่ได้จากการทดลองนี้เพิ่มเติม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บรรณานุกรม

- สมฤกษ์ จันทอัมพร. 2558. หลักการพื้นฐานของการกัดกร่อน. พิมพ์ครั้งที่ 5. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- American Iron and Steel Institute. 1991. **Design Guidelines for the Selection and Use of Stainless Steel**. Washington, D.C.: American Iron and Steel Institute.
- Amiri, S. and Rahimi, A. 2016. "Hybrid Nanocomposite Coating by Sol-gel Method: a Review". **Iranian Polymer Journal**. 25 (6): 559-577.
- Atul, T. Rawlins, J. and Hihara, L. H. 2015. **Intelligent Coatings for Corrosion Control**. Oxford: Butterworth-Heinemann.
- Bano, S. Javed, K. Ahmad, S. Rathish, I. G. Singh, S. Chaitanya, M. Arunasree, K. M. and Alam, M. S. 2013. "Synthesis of Some Novel Chalcones, Flavanones and Flavones and Evaluation of Their Anti-Inflammatory Activity". **European Journal of Medicinal Chemistry**. 65 (1): 51-59.
- Borisova, D. Mohwald, H. and Shchukin, D. G. 2011. "Mesoporous Silica Nanoparticles for Active Corrosion Protection". **ACS Nano**. 5 (3): 1939-1946.
- Bracco, G. and Holst, B. 2013. **Surface Science Techniques**. New York: Springer Heidelberg.
- Chandra-ambhorn, S. Wachirasiri, W. and Lothongkum, G. 2016. "E-pH Diagrams for 316L Stainless Steel in Chloride Solutions Containing SO_4^{2-} Ions". **Anti-Corrosion Methods and Materials**. 63 (6): 431-436.
- Changjean, W. C. Huang, L. Y. Liu, P. Y. and Tsai, T. C. 2014. "Repairable Mesoporous Silica Film with Replenishing Corrosion Inhibitor as Corrosion Protection Layer of Aluminum Alloy". **Microporous and Mesoporous Materials**. 192 (1): 82-88.
- Chawada, G. and Dholakiya, B. Z. 2015. "Organic-inorganic Hybrid Sol-Gel Pretreatments for Corrosion Protection of Mild Steel in Neutral and Acidic Solutions". **Research on Chemical Intermediates**. 41 (6): 3659-3674.
- Cho, S. H. White, S. R. and Braun, P. V. 2008. "Self-Healing Polymer Coatings". **Advanced Materials**. 21 (6): 645-649.
- Deng, B. Jiang, Y. M. Liao, J. X. Hao, Y. W. Zhong, C. and Li, J. 2007. "Dependence of Critical Pitting Temperature on the Concentration of Sulphate Ion in Chloride-containing Solutions". **Applied Surface Science**. 253 (18): 7369-7375.
- Dhoke, S. K. Khanna, A. S. and Sinha, T. J. M. 2009. "Effect of Nano-ZnO Particles on the Corrosion Behavior of Alkyd-based Waterborne Coatings". **Progress in Organic Coatings**. 64 (4): 371-382.
- Finsgar, M. and Jackson, J. 2014. "Application of Corrosion Inhibitors for Steels in Acidic Media for the Oil and Gas Industry: A Review". **Corrosion Science**. 86 (1): 17-41.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บรรณานุกรม (ต่อ)

- Finsgar, M. and Milosev, I. 2010. "Inhibition of Copper Corrosion by 1,2,3-benzotriazole: A Review". **Corrosion Science**. 52 (9): 2737–2749.
- Fontana, M. G. 1986. **Corrosion Engineering**, 3rd. 67. Singapore: McGraw-Hill Education.
- Forsgren, A. 2006. **Corrosion Control through Organic Coatings**. Miami: CRC Press.
- Kaesche, H. 2012. **Corrosion of Metals: Physicochemical Principles and Current Problems**. New York: Springer Berlin Heidelberg.
- Khanna, A. S. 2008. **High-Performance Organic Coatings**. Cambridge: Woodhead Publishing.
- Khatak, H.S and Raj, B. 2002. **Corrosion of Austenitic Stainless Steels: Mechanism, Mitigation and Monitoring**. Cambridge: Woodhead Publishing.
- Kim, Y. S. Kim, S. H. and Kim, J. G. 2015. "Effect of 1, 2, 3-Benzotriazole on the Corrosion Properties of 316L Stainless steel in Synthetic Tap Water". **Metals and Materials International**. 21 (6): 1013-1022.
- Lai, Y. K. Huang, J. Y. Cui, Z. Q. Ge, M. Z. Zhang, K. Q. Chen, Z. and Chi, L. F. 2016. "Recent Advances in TiO₂-Based Nanostructured Surfaces with Controllable Wettability and Adhesion". **Small**. 12 (16): 2203-2224.
- Lamaka, S. V. Zheludkevich, M. L. Yasakau, K. A. Serra, R. Poznyak, S. K. and Ferreira, M. G. S. 2007. "Nanoporous Titania Interlayer as Reservoir of Corrosion Inhibitors for Coatings with Self-Healing Ability". **Progress in Organic Coatings**. 58 (2-3): 127-135.
- Landolt, D. 2007. **Corrosion and Surface Chemistry of Metals**. Boca Raton: EFPL Press.
- Lenz, D. M. Delamar, M. and Ferreira, C. A. 2003. "Application of Polypyrrole/TiO₂ Composite Films as Corrosion Protection of Mild Steel". **Journal of Electroanalytical Chemistry**. 540 (1): 35–44.
- Ma, M. and Hill, R. M. 2006. "Superhydrophobic Surfaces". **Current Opinion in Colloid & Interface Science**. 11 (4): 193–202.
- Maia, F. Tedim, J. Lisenkov, A. D. Salak, A. N. Zheludkevich, M. L. and Ferreira, M. G. S. 2016. "Silica Nanocontainers for Active Corrosion Protection". **Nanoscale**. 4 (4): 1287-1298.
- Makhlouf, A. S. 2014. **Handbook of Smart Coatings for Materials Protection**. Cambridge: Woodhead Publishing.
- Malik, A. U. Kutty, P. C. Siddiqi, N. A. and Ahmed, S. 1992. "The Influence of Ph and Chloride Concentration on the Corrosion Behaviour of AISI 316L Steel in Aqueous Solutions". **Corrosion Science**. 33 (11): 1809-1827.
- Mehdipour, M. Naderi, R. and Markhali, B. P. 2014. "Electrochemical Study of Effect of the Concentration of Azole Derivatives on Corrosion Behavior of Stainless Steel in H₂SO₄". **Progress in Organic Coatings**. 77 (11): 1761-1767.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บรรณานุกรม (ต่อ)

- Meng, G. Li, Y. Shao, Y. Zhang, T. Wang, Y. and Wang, F. 2014. "Effect of Cl^- on the Properties of the Passive Films Formed on 316L Stainless Steel in Acidic Solution". **Journal of Materials Science & Technology**. 30 (3): 253-258.
- Metroke, T. L. Parkhill, R. L. and Knobbe, E. T. 2001. "Passivation of Metal Alloys Using Sol-gel-Derived Materials — a Review". **Progress in Organic Coatings**. 41 (4): 233-238.
- Musso, G. E. Bottinelli, E. Celi, L. Magnacca, G. and Berlier. G. 2015. "Influence of Surface Functionalization on the Hydrophilic Character of Mesoporous Silica Nanoparticles". **Physical Chemistry Chemical Physics**. 17 (21): 13882-13894.
- Palanivel, V. Danqing, Z. and Ooij, W. J. 2003. "Nanoparticle-filled Silane Films as Chromate Replacements for Aluminum Alloys". **Progress in Organic Coatings**. 47 (3-4): 384-392.
- Patil, S. S. Jadhav, S. A. Narute, S. T. Jayaja, P. Nikhadw, R. Rane, A. V. and Abitha. V. K. 2015. "Nanofillers In Surface Coatings: A Review". **Moroccan Journal of Chemistry**. 3 (4): 730-740.
- Pistorius, P. C. and Burstein, G. T. 1992. "Growth of Corrosion Pits on Stainless Steel in Chloride Solution Containing Dilute Sulphate". **Corrosion Science**. 33 (12): 1885-1897.
- Rahsepar, M. Mohebbi, F. and Hayatdavoudi, H. 2017. "Synthesis and Characterization of Inhibitor-Loaded Silica Nanospheres for Active Corrosion Protection of Carbon Steel Substrate". **Journal of Alloys and Compounds**. 709 (1): 519-530.
- Ramana, K. V. S. Anita, T. Mandal, S. Kaliappan, S. Shaikh, H. Sivaprasas, P.V. Dayal, R. K. and Khatak, H. S. 2009. "Effect of Different Environmental Parameters on Pitting Behavior of AISI Type 316L Stainless Steel: Experimental Studies and Neural Network Modeling". **Material & Design**. 30 (9): 3770-3775.
- Raps, D. Hack, T. Wehr, J. Zheludkevich, M. L. Bastos, A. C. Ferreira, O. and Nuyken, O. 2009. "Electrochemical Study of Inhibitor-containing Organic-inorganic Hybrid Coatings on AA2024". **Corrosion Science**. 51 (5): 1012-1021.
- Rihan, R. O. and Nestic, S. 2006. "Erosion-corrosion of Mild Steel in Hot Caustic. Part I: NaOH Solution". **Corrosion Science**. 48 (9): 2633-2659.
- Roberge, P. R. 2008. **Corrosion Engineering: Principles and Practice**. New York: McGraw-Hill Education.
- Ruijini, G. Srivastava, S. C. and Ives, M. B. 1989. "Pitting Corrosion Behavior of UNS N08904 Stainless Steel in a Chloride/Sulfate Solution". **Corrosion Science**. 45 (11): 874-882.
- Saji, V. S., and Cook, R. M. 2012. **Corrosion Protection and Control using Nanomaterials**. Cambridge: Woodhead Publishing Ltd.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บรรณานุกรม (ต่อ)

- Satpati, A. K. and Ravindran, P. V. 2008. "Electrochemical Study of the Inhibition of Corrosion of Stainless Steel by 1,2,3-benzotriazole in Acidic Media". **Materials Chemistry and Physics**. 109 (2-3): 352-359.
- Schade, C. T. Schaberl, J. W. and Lawley, A. 2008. "Stainless steel AISI grades for PM applications". **International Journal of Powder Metallurgy**. 44 (3): 57-67.
- Schmitz, A. 2012. **Principles of General Chemistry**. Creative Commons.
- Shanaghi, A. Sabour, A. R. Shahrabi, T. and Aliofkhaeze, M. 2009. "Corrosion Protection of Mild Steel by Applying TiO₂ Nanoparticle Coating via Sol-Gel Method". **Protection of Metals and Physical Chemistry of Surfaces**. 45 (3): 305-311.
- Sharma, S. K. and Sato, N. 2011. **Green Corrosion Chemistry and Engineering: Opportunities and Challenges**. Weinheim: Wiley-VCH.
- Shchukin, D. G. and Mohwald, H. 2007. "Surface-Engineered Nanocontainers for Entrapment of Corrosion Inhibitors". **Advanced Functional Materials**. 17 (9): 1451-1458.
- Shen, G. X. et al. 2005. "Corrosion Protection of 316L Stainless Steel by A TiO₂ Nanoparticle Coating Prepared By Sol-gel Method". **Thin Solid Films**. 489 (1-2): 130-136.
- Siva, T. Mayavan, S. Sreejakumari, S. S. and Sathiyarayanan, S. 2015. "Mesoporous Silica Based Reservoir for The Active Protection of Mild Steel in an Aggressive Chloride Ion Environment". **RSC Advances**. 5 (49): 39278-39284.
- Skorb, E. V. Fix, D. Andreeva, D. V. Mohwald, H. and Shchukin, D. G. 2009. "Surface-Modified Mesoporous SiO₂ Containers for Corrosion Protection". **Advanced Functional Materials**. 19 (15): 2373-2379.
- Smialowska, Z. S. 2005. **Pitting and Crevice Corrosion**. Texas: National Association of Corrosion Engineers.
- Stoychev, D. Stefanov, P. Nicolova, D. Valov, I. and Marinova, T. S. 2002. "Chemical Composition and Corrosion Resistance of Passive Chromate Films Formed on Stainless Steels 316 L and 1.4301". **Materials Chemistry and Physics**. 73 (2-3): 252-258.
- Tromans, D. and Sun, R. H. 1991. "Anodic Polarization Behavior of Copper in Aqueous Chloride/Benzotriazole Solutions". **Journal of The Electrochemical Society**. 138 (11): 3235-3244.
- Wang, N. Chen, K. Q. Wu, H. Wang, C. Wang, Q. C. and Wang, F. H. 2012. "Effect of Nano-sized Mesoporous Silica MCM-41 and MMT on Corrosion Properties of Epoxy Coating". **Progress in Organic Coatings**. 75 (4): 386-391.
- Wang, N. Fu, W. L. Zhang, J. Li, X. R. and Fang, Q. H. 2015. "Corrosion Performance of Waterborne Epoxy Coatings Containing Polyethylenimine Treated Mesoporous-TiO₂ Nanoparticles on Mild Steel". **Progress in Organic Coatings**. 89 (1): 114-122.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บรรณานุกรม (ต่อ)

- Wang, N. Wu, Y. H. Cheng, K. Q. and Zhang, J. 2014. "Investigation on Anticorrosion Performance of Polyaniline-Mesoporous MCM-41 Composites in New Water-Based Epoxy Coating". **Materials and Corrosion**. 65 (10): 968-976.
- Wang, P. and Schaefer, D. W. 2008. "Why does Silane Enhance the Protective Properties of Epoxy Films?". **Langmuir**. 24 (23): 13496-13501.
- Wei, H. G. Wang, Y. R. Guo, J. Shen, N. Z. Jiang, D. W. Zhang, X. Yan, X. R. Zhu, J. H. Wang, Q. and Shao, L. Lin, H. F. Wei, S. Y. and Guo, Z. H. 2015. "Advanced Micro/nanocapsules for Self-healing Smart Anticorrosion Coatings". **Journal of Materials Chemistry A**. 3 (2): 469-480.
- Wu, L. K. Zhang, J. T. Hu, J. M. and Zhang, J. Q. 2012. "Improved Corrosion Performance of Electrophoretic Coatings by Silane Addition". **Corrosion Science**. 56 (1): 58-66.
- Yebrá, D. M. Kiil, S. and Johansen, K. D. 2004. "Antifouling technology—past, present and Future Steps Towards Efficient and Environmentally Friendly Antifouling Coatings". **Progress in Organic Coatings**. 50 (2): 75-104.
- Yuan, X. Yue, Z. F. Chen, X. Wen, S. F. Li, L. and Feng, T. 2016. "The Protective and Adhesion Properties of Silicone-Epoxy Hybrid Coatings on 2024 Al-alloy with a Silane Film as Pretreatment". **Corrosion Science**. 104 (1): 84-97.
- Zarras, P. E. Anderson, N. Webber, C. Irvin, D. J. Irvin, A. Guenther, J. A. and Smith, S. 2003. "Progress in Using Conductive Polymers as Corrosion-Inhibiting Coatings". **Corrosion Science**. 68 (3): 387-394.
- Zhang, X. S. Wang, J. X. Xu, K. Le, Y. and Chen, J. F. 2011. "Monodisperse Ag@SiO₂ Core-shell Nanoparticles as Active Inhibitors for Marine Anticorrosion Applications". **Journal of Nanoscience and Nanotechnology**. 11 (4): 3481-3487.
- Zheludkevich, M. L. Serra, R. Montemor, M. F. Salvado, I. M. M. and Ferreira, M. G. S. 2006. "Corrosion Protective Properties of Nanostructured Sol-gel Hybrid Coatings to AA2024-T3". **Surface and Coatings Technology**. 200 (9): 3084-3094.
- Zheludkevich, M. L. Yasakau, K. A. Poznyaka, S. K. and Ferreira, M. G. S. 2005. "Triazole and Thiazole Derivatives as Corrosion Inhibitors for AA2024 Aluminium Alloy". **Corrosion Science**. 47 (12): 3368-3383.
- Atik, M. Neto, P. D. Avaca, L. A. Aegerter, M. A. and Zarzycki, J. 1994. "Protection of 316L Stainless Steel Against Corrosion by SiO₂ Coatings". **Journal of Materials Science Letters**. 13 (15): 1081-1085.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก ก
สารเคมีและอุปกรณ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ก.1 สารเคมี

ตารางที่ ก.1.1 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

| ชื่อสารเคมีภาษาไทย | ชื่อสารเคมีภาษาอังกฤษ | อักษรย่อ |
|--------------------------------------|-------------------------------------|----------|
| กรดซัลฟิวริก | Sulfuric acid | - |
| กรดแอซิติก | Acetic acid | - |
| โซเดียมคลอไรด์ | Sodium chloride | - |
| เตตระเอทิลออร์โทซิลิเกต | Tetraethyl orthosilicate | TEOS |
| ไตรเมทิลเบนซีน | 1,3,5-Trimethylbenzene | TMB |
| ไทเทเนียมเตตระบิวทอกไซด์ | Titanium (IV) butoxide | TBT |
| น้ำกลั่น | Deionized water | DI |
| เบนโซไตรอะโซล | Benzotriazole | BTA |
| เมทานอล | Methanol | - |
| อีพอกซีไซเลน | 3-Glycidoxypropyltrimethoxysilane | GPTMS |
| เอทิลอะซิเตท | Ethyl acetate | - |
| เอทานอล | Ethanol | - |
| แอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ | Ammonium hydroxide | - |
| ไอโซโพรพานอล | Isopropanol | IPA |
| เฮกซะเดซิลไตรเมทิล-แอมโมเนียมโบรไมด์ | Hexadecyltrimethyl-ammonium bromide | CTAB |
| โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ | Potassium hydroxide | - |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ก.2 อุปกรณ์

- 1) ปีกเกอร์ (Beaker)
- 2) ขวดก้นกลม และจุกปิดขวด (Round bottom flask and Cocker)
- 3) กระบอกตวง (Cylinder)
- 4) หลอดเหวี่ยงแยก (Centrifugal tube)
- 5) ปิเปต และไมโครปิเปต (Pipette and Micropipette)
- 6) แท่งกวนแม่เหล็ก (Magnetic bar)
- 7) แผ่นพาราฟิล์ม (Para film)
- 8) เครื่องกวนสารละลายพร้อมเตาให้ความร้อน (Magnetic stirrer)
- 9) เครื่องเหวี่ยงแยก (Centrifuge)
- 10) เครื่องโซนิเคต (Sonicater)
- 11) เครื่องชั่งน้ำหนัก (Analytical balance)
- 12) เครื่องเคลือบแบบหมุน (Home-build spin coater)
- 13) ตู้อบ (Oven)
- 14) อ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิ (Water bath)
- 15) ตู้อบสุญญากาศ (Vacuum oven)
- 16) เครื่องวัดความเป็นกรดและด่าง (pH meter)
- 17) เครื่องเขย่า (Shaking incubator)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ก.3 เครื่องมือวิเคราะห์

ตารางที่ ก.3.1 เครื่องมือวิเคราะห์ที่ใช้ในงานวิจัย

| ชื่อเครื่องมือวิเคราะห์ | อักษรย่อ | รุ่น |
|--------------------------------------|----------|-----------------------|
| Scanning electron microscope | SEM | Carl Zeiss EVO MA10 |
| Transmission electron microscope | TEM | JEOL JEM-2100F |
| Potentiostat | - | Autolab PGSTAT302N |
| Contact angle measurement | - | UnitedTest JYSP-360 |
| Energy dispersive X-ray spectrometer | EDX | JEOL JEM-2100F |
| UV-VIS spectrophotometer | - | |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก ข
การคำนวณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข.1 การคำนวณปริมาณ BTA ที่เหลืออยู่ในสารละลายหลังบรรจุ

ความเข้มข้นของสารละลาย BTA ที่เหลืออยู่ในสารละลายหลังบรรจุในอนุภาคหาค่าการดูดกลืนแสงและคำนวณโดยใช้ความสัมพันธ์ของความเข้มข้นของ BTA และค่าการดูดกลืนแสงซึ่งได้จากกราฟมาตรฐานของสารละลาย BTA ในเอทานอล (ภาคผนวก ค.2) ความสัมพันธ์ของความเข้มข้นของ BTA และค่าการดูดกลืนแสง แสดงดังสมการที่ ข.1.1

$$Absorption_{BTA} = 0.2403 \cdot C_{BTA} + 0.0077 \quad (\text{ข.1.1})$$

จัดรูปสมการ

$$C_{BTA} = \frac{Absorption_{BTA} - 0.0077}{0.2403} \quad (\text{ข.1.2})$$

โดยที่ $Absorption_{BTA}$ คือ ค่าการดูดกลืนแสงของสารละลาย BTA (A)
 C_{BTA} คือ ความเข้มข้นของ BTA ในสารละลาย (mol/L)

ตัวอย่างการคำนวณ

ต้องการหาความเข้มข้นของ BTA ในสารละลายหลังบรรจุสารยับยั้งการกัดกร่อนในอนุภาคคอมโพสิต $MSN@TiO_2$ และจากการทดสอบค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายดังกล่าวมีค่าเท่ากับ 0.451

$$\begin{aligned} C_{BTA,MSN@TiO_2} &= \frac{Absorption_{BTA,MSN@TiO_2} - 0.0077}{0.2403} \\ &= \frac{0.451 - 0.0077}{0.2403} = 1.84 \text{ mol / L} \end{aligned}$$

ข.2 การคำนวณประสิทธิภาพบรรจุสารยับยั้งการกัดกร่อน BTA

ความเข้มข้นของสารละลาย BTA ที่เหลืออยู่ในสารละลายหลังบรรจุสามารถตรวจสอบได้จากการนำไปทดสอบค่าการดูดกลืนแสงและคำนวณโดยใช้ความสัมพันธ์ของความเข้มข้นของ BTA และค่าการดูดกลืนแสงซึ่งได้จากกราฟมาตรฐานของสารละลาย BTA ในเอทานอล (ภาคผนวก ค.2) ความสัมพันธ์ของความเข้มข้นของ BTA และค่าการดูดกลืนแสง แสดงดังสมการที่ ข.1.1

$$\eta_{BTAloading} = \left(\frac{C_{BTA, before loading} - C_{BTA, after loading}}{C_{BTA, before loading}} \right) \times 100 \quad (\text{ข.2.1})$$

โดยที่ $C_{BTA, before loading}$ คือ ความเข้มข้นของ BTA ในสารละลายก่อนบรรจุในอนุภาค (mol/L)
 $C_{BTA, after loading}$ คือ ความเข้มข้นของ BTA ในสารละลายหลังบรรจุในอนุภาค (mol/L)

ตัวอย่างการคำนวณ

จากภาคผนวก ข.1 ต้องการคำนวณประสิทธิภาพบรรจุสารยับยั้งการกัดกร่อน BTA ของอนุภาคคอมโพสิต MSN@TiO₂

$$\begin{aligned} \eta_{BTAloading} &= \left(\frac{C_{BTA, before loading} - C_{BTA, after loading}}{C_{BTA, before loading}} \right) \times 100 \\ &= \left(\frac{3.0 - 1.84}{3.0} \right) \times 100 = 38.67\% \end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข.3 การคำนวณประสิทธิภาพการป้องกันการกัดกร่อนแบบรูเข็ม

ประสิทธิภาพการป้องกันการกัดกร่อนแบบรูเข็ม สามารถคำนวณได้จากสมการ ข.3.1

$$\eta_{pit} = \frac{|J_{pit} - J_{pit.ref}|}{J_{pit.ref}} \times 100 \quad (\text{ข.3.1})$$

โดยที่ η_{pit} คือ ประสิทธิภาพการป้องกันการกัดกร่อนแบบรูเข็ม (%)

J_{pit} คือ ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าที่ตำแหน่งที่เริ่มเกิดการกัดกร่อนแบบรูเข็มของวัสดุที่ต้องการหาประสิทธิภาพ

$J_{pit.ref}$ คือ ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าที่ตำแหน่งที่เริ่มเกิดการกัดกร่อนแบบรูเข็มของวัสดุที่ใช้อ้างอิง

ตัวอย่างการคำนวณ

ต้องการคำนวณหาประสิทธิภาพการป้องกันการกัดกร่อนแบบรูเข็มของชั้นเคลือบ BTA-MSN@TiO₂/GPTMS Coating โดยเทียบกับชั้นเคลือบอีพอกซีไซเลน GPTMS ที่ pH 7.6 ซึ่งมีค่า J_{pit} เท่ากับ 0.093 และ 0.389 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ ตามลำดับ

$$\begin{aligned} \eta_{pit} &= \frac{|J_{pit} - J_{pit.ref}|}{J_{pit.ref}} \times 100 \\ &= \frac{|0.093 - 0.389|}{0.389} \times 100 = 76.09\% \end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก ค
ข้อมูลการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค.1 ค่ามุมสัมผัสของหยดน้ำบนชั้นเคลือบชนิดต่างๆ

ตารางที่ ค.1.1 มุมสัมผัสของหยดน้ำบนชั้นเคลือบชนิดต่างๆ

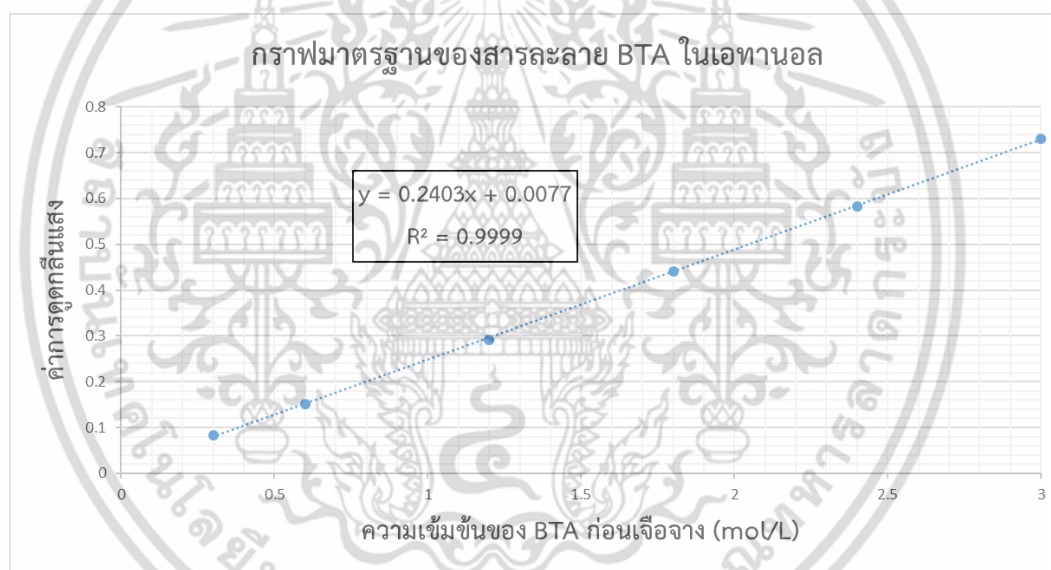
| ชั้นเคลือบ | เวลา (s) | มุมสัมผัสของหยดน้ำ (°) | | | |
|---|----------|------------------------|-------|-------|------------|
| | | 1 | 2 | 3 | เฉลี่ย |
| GPTMS Coating | 0 | 76.39 | 79.64 | 75.32 | 77.1 ± 2.2 |
| | 150 | 67.18 | 70.01 | 71.21 | 69.5 ± 2.1 |
| | 300 | 65.55 | 66.71 | 67.43 | 66.6 ± 0.9 |
| MSN/GPTMS Coating | 0 | 77.86 | 78.34 | 79.58 | 78.6 ± 0.9 |
| | 150 | 70.02 | 75.10 | 75.86 | 73.7 ± 3.2 |
| | 300 | 67.89 | 68.56 | 66.46 | 67.6 ± 1.1 |
| MSN@TiO ₂ /GPTMS Coating | 0 | 90.89 | 92.87 | 92.80 | 92.2 ± 1.1 |
| | 150 | 82.70 | 88.25 | 86.13 | 85.7 ± 2.8 |
| | 300 | 80.73 | 82.67 | 81.52 | 81.6 ± 1.0 |
| BTA-MSN/GPTMS Coating | 0 | 80.62 | 79.15 | 82.23 | 80.7 ± 1.5 |
| | 150 | 77.81 | 76.23 | 76.40 | 76.8 ± 0.9 |
| | 300 | 71.88 | 70.45 | 72.56 | 71.6 ± 1.1 |
| BTA-MSN@TiO ₂ /GPTMS Coating | 0 | 91.21 | 94.57 | 95.81 | 93.9 ± 2.4 |
| | 150 | 87.26 | 91.12 | 87.89 | 88.8 ± 2.1 |
| | 300 | 82.36 | 88.00 | 81.04 | 83.9 ± 3.8 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค.2 ประสิทธิภาพการบรรจุสารยับยั้งการกัดกร่อน BTA

ตารางที่ ค.2.1 ค่าการดูดแสงของสารละลายเบนโซไตรอะโซลในเอทานอลที่ความเข้มข้นต่างๆ สำหรับสร้างกราฟมาตรฐาน

| ความเข้มข้นของสารละลาย BTA (mol/L) | | ค่าการดูดกลืนแสง |
|------------------------------------|----------------------|------------------|
| ก่อนเจือจาง | หลังเจือจาง | |
| 3.0 | 1.0×10^{-4} | 0.7309 |
| 2.4 | 0.8×10^{-4} | 0.5827 |
| 1.8 | 0.6×10^{-4} | 0.4409 |
| 1.2 | 0.4×10^{-4} | 0.2917 |
| 0.6 | 0.2×10^{-4} | 0.1518 |
| 0.3 | 0.1×10^{-4} | 0.0827 |



รูปที่ ค.2.1 กราฟมาตรฐานของของสารละลาย BTA ในเอทานอล

ตารางที่ ค.2.2 ค่าการดูดแสงของสารละลายที่เหลือจากการบรรจุสารยับยั้งการกัดกร่อน BTA ในอนุภาค MSN และ MSN@TiO₂

| อนุภาค | ค่าการดูดกลืนแสง | | | | |
|----------------------|------------------|-------|-------|-------|-------------------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | เฉลี่ย |
| MSN | 0.516 | 0.491 | 0.547 | 0.502 | 0.514 ± 0.024 |
| MSN@TiO ₂ | 0.451 | 0.306 | 0.472 | 0.327 | 0.389 ± 0.085 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค.2.3 ประสิทธิภาพการบรรจุสารยับยั้งการกัดกร่อน

| อนุภาค | ความเข้มข้นของ สารละลาย BTA (mol/L) | | ปริมาณ BTA ที่ถูกบรรจุในอนุภาค | | ประสิทธิภาพการ บรรจุ BTA (%) |
|----------------------|--|-------------|-----------------------------------|---------------|---------------------------------|
| | ก่อนบรรจุ | หลังบรรจุ | โมล (mmol) | มวล (g) | |
| MSN | 3.0 | 2.11 ± 0.10 | 2.11 ± 0.10 | 0.251 ± 0.012 | 29.77 ± 3.37 |
| MSN@TiO ₂ | 3.0 | 1.59 ± 0.35 | 1.59 ± 0.35 | 0.189 ± 0.042 | 47.11 ± 11.73 |



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค.3 การกัดกร่อนของชั้นเคลือบชนิดต่างๆ ที่ pH 3 5 7.6 และ 9

ตารางที่ ค.3.1 E_{pit} และ J_{pit} ของ Bare 316L ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์เข้มข้นร้อยละ 3.5 โดยมวลที่ pH 3 5 7.6 และ 9

| pH | E_{pit} (mV) | | | | | J_{pit} ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$) | | | | |
|-----|----------------|-------|-------|--------------------|-----------------------|---|-------|-------|----------------------|-----------------------|
| | 1 | 2 | 3 | เฉลี่ย | ร้อยละการเปลี่ยนแปลง* | 1 | 2 | 3 | เฉลี่ย | ร้อยละการเปลี่ยนแปลง* |
| 3 | 312.1 | 298.5 | 303.2 | 304.6 ± 6.9 | -10.6 | 6.123 | 7.325 | 5.528 | 6.325 ± 0.915 | 59.1 |
| 5 | 321.7 | 335.1 | 332.5 | 329.8 ± 7.1 | -3.3 | 4.812 | 3.242 | 6.391 | 4.815 ± 1.575 | 21.1 |
| 7.6 | 343.0 | 344.1 | 335.6 | 340.9 ± 4.9 | อ้างอิง | 3.818 | 4.102 | 4.011 | 3.977 ± 0.145 | อ้างอิง |
| 9 | 359.8 | 371.2 | 376.4 | 369.2 ± 8.6 | 8.3 | 3.317 | 3.305 | 4.433 | 3.685 ± 0.648 | -7.3 |

*ร้อยละการเปลี่ยนแปลงเทียบกับชั้นเคลือบเดียวกันที่ค่า pH 7.6

ตารางที่ ค.3.2 E_{pit} และ J_{pit} ของชั้นเคลือบ GPTMS Coating ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์เข้มข้นร้อยละ 3.5 โดยมวลที่ pH 3 5 7.6 และ 9

| pH | E_{pit} (mV) | | | | | J_{pit} ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$) | | | | |
|-----|----------------|-------|-------|--------------------|-----------------------|---|-------|-------|----------------------|-----------------------|
| | 1 | 2 | 3 | เฉลี่ย | ร้อยละการเปลี่ยนแปลง* | 1 | 2 | 3 | เฉลี่ย | ร้อยละการเปลี่ยนแปลง* |
| 3 | 334.8 | 342.1 | 331.2 | 336.0 ± 5.6 | -7.5 | 0.576 | 0.601 | 0.734 | 0.637 ± 0.085 | 45.5 |
| 5 | 354.2 | 348.7 | 358.9 | 353.9 ± 5.1 | -2.6 | 0.444 | 0.556 | 0.537 | 0.512 ± 0.060 | 16.9 |
| 7.6 | 366.8 | 362.1 | 361.2 | 363.4 ± 3.0 | อ้างอิง | 0.389 | 0.472 | 0.452 | 0.438 ± 0.043 | อ้างอิง |
| 9 | 402.3 | 398.2 | 399.5 | 400.0 ± 2.1 | 10.1 | 0.322 | 0.346 | 0.506 | 0.391 ± 0.100 | -10.7 |

*ร้อยละการเปลี่ยนแปลงเทียบกับชั้นเคลือบเดียวกันที่ค่า pH 7.6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค.3.3 E_{pit} และ J_{pit} ของชั้นเคลือบ MSN/GPTMS Coating ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ เข้มข้นร้อยละ 3.5 โดยมวลที่ pH 3 5 7.6 และ 9

| pH | E_{pit} (mV) | | | | | J_{pit} ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$) | | | | |
|-----|-----------------------|-------|-------|--------------------|-----------------------|--|-------|-------|----------------------|-----------------------|
| | 1 | 2 | 3 | เฉลี่ย | ร้อยละการเปลี่ยนแปลง* | 1 | 2 | 3 | เฉลี่ย | ร้อยละการเปลี่ยนแปลง* |
| 3 | 345.2 | 344.4 | 352.8 | 347.5 ± 4.6 | -6.6 | 0.498 | 0.513 | 0.626 | 0.546 ± 0.070 | 41.8 |
| 5 | 361.2 | 364.8 | 368.0 | 364.7 ± 3.4 | -2.2 | 0.493 | 0.378 | 0.452 | 0.441 ± 0.058 | 14.5 |
| 7.6 | 373.1 | 371.2 | 374.1 | 372.8 ± 1.5 | อ้างอิง | 0.302 | 0.385 | 0.468 | 0.385 ± 0.083 | อ้างอิง |
| 9 | 403.9 | 412.5 | 416.8 | 411.1 ± 6.6 | 10.3 | 0.312 | 0.432 | 0.258 | 0.334 ± 0.089 | -13.2 |

*ร้อยละการเปลี่ยนแปลงเทียบกับชั้นเคลือบเดียวกันที่ค่า pH 7.6

ตารางที่ ค.3.4 E_{pit} และ J_{pit} ของชั้นเคลือบ MSN@TiO₂/GPTMS Coating ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์เข้มข้นร้อยละ 3.5 โดยมวลที่ pH 3 5 7.6 และ 9

| pH | E_{pit} (mV) | | | | | J_{pit} ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$) | | | | |
|-----|-----------------------|-------|-------|--------------------|-----------------------|--|-------|-------|----------------------|-----------------------|
| | 1 | 2 | 3 | เฉลี่ย | ร้อยละการเปลี่ยนแปลง* | 1 | 2 | 3 | เฉลี่ย | ร้อยละการเปลี่ยนแปลง* |
| 3 | 371.2 | 372.3 | 379.5 | 374.3 ± 4.5 | -4.5 | 0.216 | 0.288 | 0.170 | 0.225 ± 0.059 | 38.9 |
| 5 | 382.7 | 382.8 | 387.5 | 384.3 ± 2.7 | -2.0 | 0.168 | 0.174 | 0.212 | 0.185 ± 0.024 | 14.2 |
| 7.6 | 388.5 | 394.7 | 393.3 | 392.2 ± 3.3 | อ้างอิง | 0.178 | 0.151 | 0.157 | 0.162 ± 0.014 | อ้างอิง |
| 9 | 427.1 | 435.5 | 442.1 | 434.9 ± 7.5 | 10.9 | 0.148 | 0.126 | 0.140 | 0.138 ± 0.011 | -14.8 |

*ร้อยละการเปลี่ยนแปลงเทียบกับชั้นเคลือบเดียวกันที่ค่า pH 7.6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค.3.5 E_{pit} และ J_{pit} ของชั้นเคลือบ BTA-MSN/GPTMS Coating ในสารละลายโซเดียม-คลอไรด์เข้มข้นร้อยละ 3.5 โดยมวลที่ pH 3 5 7.6 และ 9

| pH | E_{pit} (mV) | | | | | J_{pit} ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$) | | | | |
|-----|----------------|-------|-------|--------------------|-----------------------|---|-------|-------|----------------------|-----------------------|
| | 1 | 2 | 3 | เฉลี่ย | ร้อยละการเปลี่ยนแปลง* | 1 | 2 | 3 | เฉลี่ย | ร้อยละการเปลี่ยนแปลง* |
| 3 | 360.2 | 355.6 | 350.2 | 355.3 ± 5.0 | -5.5 | 0.137 | 0.143 | 0.186 | 0.155 ± 0.027 | 38.4 |
| 5 | 368.9 | 371.2 | 365.5 | 368.5 ± 2.9 | -2.0 | 0.115 | 0.125 | 0.140 | 0.127 ± 0.013 | 13.4 |
| 7.6 | 376.1 | 372.3 | 379.6 | 376.0 ± 3.7 | อ้างอิง | 0.122 | 0.099 | 0.115 | 0.112 ± 0.012 | อ้างอิง |
| 9 | 411.3 | 417.2 | 416.8 | 415.1 ± 3.3 | 10.4 | 0.098 | 0.099 | 0.088 | 0.095 ± 0.006 | -15.2 |

*ร้อยละการเปลี่ยนแปลงเทียบกับชั้นเคลือบเดียวกันที่ค่า pH 7.6

ตารางที่ ค.3.6 E_{pit} และ J_{pit} ของชั้นเคลือบ BTA-MSN@TiO₂/GPTMS Coating ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์เข้มข้นร้อยละ 3.5 โดยมวลที่ pH 3 5 7.6 และ 9

| pH | E_{pit} (mV) | | | | | J_{pit} ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$) | | | | |
|-----|----------------|-------|-------|--------------------|-----------------------|---|-------|-------|----------------------|-----------------------|
| | 1 | 2 | 3 | เฉลี่ย | ร้อยละการเปลี่ยนแปลง* | 1 | 2 | 3 | เฉลี่ย | ร้อยละการเปลี่ยนแปลง* |
| 3 | 385.7 | 395.4 | 388.6 | 389.9 ± 5.0 | -3.2 | 0.116 | 0.126 | 0.137 | 0.126 ± 0.010 | 29.9 |
| 5 | 399.5 | 399.3 | 395.8 | 396.2 ± 3.1 | -1.6 | 0.099 | 0.112 | 0.116 | 0.109 ± 0.009 | 12.4 |
| 7.6 | 401.2 | 398.0 | 408.7 | 402.6 ± 5.5 | อ้างอิง | 0.118 | 0.093 | 0.081 | 0.097 ± 0.019 | อ้างอิง |
| 9 | 448.2 | 453.0 | 447.8 | 449.7 ± 2.9 | 11.7 | 0.093 | 0.071 | 0.082 | 0.082 ± 0.011 | -15.5 |

*ร้อยละการเปลี่ยนแปลงเทียบกับชั้นเคลือบเดียวกันที่ค่า pH 7.6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล นายไพบุลย์ แซ่เจี๋ย
ที่อยู่ 236/5 หมู่ 1 ต.ปงแสนทอง อ.เมือง จ.ลำปาง 52100
ประวัติการศึกษา 2557 วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี
2560 วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ประสบการณ์การทำงานและผลงานวิจัย

- พ.ศ. 2556 ฝึกงานในตำแหน่ง Process Engineer ที่โรงงานน้ำตาลมิตรภาพสินธุ์และได้รับมอบหมายงานวิจัยหัวข้อ “Capacity Improvement of Shelf Dryer”
- พ.ศ. 2556 เข้าร่วมโครงการสหกิจศึกษาในตำแหน่ง Process Engineer ที่บริษัท ฟอสเตอร์ วิลเลอร์ (ประเทศไทย) จำกัด และได้รับมอบหมายงานหัวข้อ “Calculations for Reliability Improvement of Wash Oil Loop and Steam Ejector Condenser System in High Vacuum Distillation Unit”
- พ.ศ. 2557 งานประชุมวิชาการ Thai Institute of Chemical Engineering and Applied Science Conference (TICHe 2014) หัวข้อ “Calculations for Reliability Improvement of Wash Oil Loop and Steam Ejector Condenser System in High Vacuum Distillation Unit”
- พ.ศ. 2559 งานประชุมวิชาการ International Thai Institute of Chemical Engineering and Applied Science Conference (ITICHe 2016) หัวข้อ “Effect of pH on Corrosion Protection Property of Titania-Mesoporous Silica Nanocomposite Coating on 316L Stainless Steel”

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้