

การยับยั้งการกัดกร่อนของเหล็กกล้าไร้สนิมชนิด 304 ด้วยสารสกัดจากขิง ใบกะเพราแดง และใบมังคุด ในกรดไฮโดรคลอริก

CORROSION INHIBITION OF 304 STAINLESS STEEL BY GINGER, HOLY BASIL LEAVES AND MANGOSTEEN LEAVES EXTRACT IN HYDROCHLORIC ACID



โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาเคมีอุตสาหกรรม
ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานปีการศึกษา 2561 มอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

CORROSION INHIBITION OF 304 STAINLESS STEEL BY
GINGER, HOLY BASIL LEAVES AND MANGOSTEEN
LEAVES EXTRACT IN HYDROCHLORIC ACID



A SPECIAL PROJECT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF
THE REQUIREMENT FOR
THE DEGREE OF BACHELOR OF SCIENCE (INDUSTRIAL CHEMISTRY)
DEPARTMENT OF CHEMISTRY, FACULTY OF SCIENCE
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ภายในเท่านั้น ไม่ควรนำออกเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ

การยับยั้งการกัดกร่อนของเหล็กกล้าไร้สนิมชนิด 304 ด้วยสารสกัดจากขิง ใบกะเพราแดง และใบมังคุด ในกรดไฮโดรคลอริก
CORROSION INHIBITION OF 304 STAINLESS STEEL BY GINGER, HOLY BASIL LEAVES AND MANGOSTEEN LEAVES EXTRACT IN HYDROCHLORIC ACID

ชื่อนักศึกษา

นางสาวกนกนาฏ อึ้งพลาชัย รหัสนักศึกษา 58050428

นางสาวฐาปนิก ทางาม รหัสนักศึกษา 58050457

ปริญญา

วิทยาศาสตร์บัณฑิต (เคมีอุตสาหกรรม)

ภาควิชา

เคมี

ปีการศึกษา

2561

อาจารย์ที่ปรึกษา

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุธา สุทธิเรืองวงศ์

คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง (สจล.) อนุมัติให้โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (เคมีอุตสาหกรรม) ประจำปีการศึกษา 2561

| คณะกรรมการสอบ | ลายมือชื่อ |
|---|--|
| ผศ.ดร.ปณณมา ศิริพันธ์โนน ประธานกรรมการ |  |
| ผศ.ดร.ชลลดา ถุดวิรุฬห์ กรรมการ |  |
| ผศ.ดร.สุธา สุทธิเรืองวงศ์ กรรมการและอาจารย์ที่ปรึกษา |  |

ลิขสิทธิ์ของคณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

| | |
|--------------------|--|
| หัวข้อโครงการพิเศษ | การยับยั้งการกักต้อนของเหล็กกล้าไร้สนิมชนิด 304 ด้วยสารสกัดจากขิง ใบกะเพราแดง และใบมังคุด ในกรดไฮโดรคลอริก |
| ชื่อนักศึกษา | นางสาวกนกนาฏ อึ้งพลาชัย รหัสนักศึกษา 58050428 นางสาวฐาปนิก ทางาม รหัสนักศึกษา 58050457 |
| ปริญญา | วิทยาศาสตร์บัณฑิต (เคมีอุตสาหกรรม) |
| ภาควิชา | เคมี |
| ปีการศึกษา | 2561 |
| อาจารย์ที่ปรึกษา | ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุธา สุทธิเรืองวงศ์ |

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษากายยับยั้งการกักต้อนของเหล็กกล้าไร้สนิมชนิด 304 ด้วยการเติมสารสกัดจากขิง ใบกะเพราแดง และใบมังคุด ลงในสารละลายกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 0.05 โมลาร์ การสกัดพืชสมุนไพรทั้งสามชนิดใช้วิธีการแช่เปื่อย (Maceration) ซึ่งสารสกัดที่ได้ออกมาจัดเป็นสารสกัดแบบหยาบ (Crude extract) โดยในการสกัดใช้เอทานอลเป็นตัวทำละลาย นำสารสกัดที่ได้มาทดสอบการยับยั้งการกักต้อนของเหล็กกล้าไร้สนิมชนิด 304 ในสารละลายกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 0.05 โมลาร์ ด้วยเทคนิคโพเทนซิโอดนามิกโพลาริเซชัน (Potentiodynamic polarization) และทำการเปรียบเทียบการกักต้อนของเหล็กกล้าไร้สนิมชนิด 304 ที่ไม่ได้เติมและเติมสารสกัดจากขิง ใบกะเพราแดง และใบมังคุด ที่ความเข้มข้น 10 100 500 และ 1000 mg/L พบว่าเมื่อเติมสารสกัดจากขิงและใบกะเพราแดง ประสิทธิภาพการยับยั้งการกักต้อนมีค่าที่ดีที่สุดคือร้อยละ 98.2 และ 92.0 ตามลำดับ สำหรับใบมังคุดนั้นให้ประสิทธิภาพการยับยั้งการกักต้อนที่ดีที่สุดคือร้อยละ 91.7 ที่ความเข้มข้น 10 mg/L นอกจากนี้เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารสกัดจากขิงและใบกะเพราแดง สามารถยับยั้งการเกิดการกักต้อนแบบหลุมบนเหล็กกล้าไร้สนิมชนิด 304 ในสารละลายกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 0.05 โมลาร์ ได้ดีขึ้น

คำสำคัญ : การยับยั้งการกักต้อน, ขิง, ใบกะเพราแดง, ใบมังคุด, โพเทนซิโอดนามิกโพลาริเซชัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

| | |
|----------------------|---|
| Title | CORROSION INHIBITION OF 304 STAINLESS STEEL BY GINGER, HOLY BASIL LEAVES AND MANGOSTEEN LEAVES EXTRACT IN HYDROCHLORIC ACID |
| Students | Miss Kanoknat Ongphalachai Student ID 58050428 Miss Tapanick Ta-ngam Student ID 58050457 |
| Degree | Bachelor of Science (Industrial Chemistry) |
| Department | Chemistry |
| Faculty | Science |
| University | King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang (KMITL) |
| Academic Year | 2018 |
| Advisor | Asst. Prof. Dr. Sutha Sutthiruangwong |

Abstract

The corrosion inhibition of 304 stainless steel by ginger roots, holy basil leaves and mangosteen leaves extract in 0.05 M HCl solution was studied. These herbal plants were extracted by using maceration technique that yielded crude extract. Ethanol was a solvent used for extraction. The extracts were tested for corrosion inhibition efficiency of 304 stainless steel in 0.05 M HCl solution by potentiodynamic polarization. The results revealed that increasing extracts concentration made the inhibition efficiency to increase. The ginger roots and holy basil leaves extract concentration of 1000 mg/L gave a good inhibition efficiency for 304 stainless steel in 0.05 M HCl solution at 98.2% and 92.0%, respectively. The inhibition efficiency by mangosteen leaves extract was 91.7% at concentration of 10 mg/L in 0.05 M HCl solution. Moreover, both of ginger roots and holy basil leaves extracts showed an increase in pitting potential which indicated higher pitting resistance of 304 stainless steel in 0.05 M HCl.

Keywords : corrosion inhibition, ginger roots, holy basil leaves, mangosteen leaves, potentiodynamic polarization

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

หัวข้อโครงการพิเศษฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีเพราะความอนุเคราะห์ของบุคลากรหลายฝ่ายที่คอยให้คำปรึกษาคำแนะนำ รวมถึงเสนอแนะให้กับคณะผู้จัดทำมาอย่างดี ซึ่งคณะผู้จัดทำขอขอบพระคุณ ดังนี้

ขอขอบพระคุณบิดา มารดา ที่ให้คำปรึกษาและให้กำลังใจมาโดยตลอด

ขอขอบพระคุณคณาจารย์ เจ้าหน้าที่ ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้คำปรึกษาในการใช้เครื่องมือ อุปกรณ์ รวมทั้งคำแนะนำต่างๆ ตลอดจนการให้ความอนุเคราะห์ในการใช้ห้องปฏิบัติการ อุปกรณ์ และเครื่องมือเป็นอย่างดี

ขอขอบพระคุณ ผศ.ดร.ปณณมา ศิริพันธ์โนน และ ผศ.ดร.ชลลดา ฤตวิรุฬห์ กรรมการตรวจสอบโครงการพิเศษฉบับนี้ที่ให้คำแนะนำดีชม ตลอดจนข้อเสนอแนะต่างๆเป็นอย่างดี

สุดท้ายนี้ ขอขอบพระคุณ ผศ.ดร.สุธา สุทธิเรืองวงศ์ อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการพิเศษ ที่ให้ความช่วยเหลือในด้านทฤษฎีและปฏิบัติการ คอยสนับสนุน และให้คำปรึกษามาโดยตลอด เป็นผลให้สามารถทำโครงการพิเศษเรื่องนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี ซึ่งคณะผู้จัดทำขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูง และขออภัยหากมีข้อผิดพลาดประการใดไว้ ณ ที่นี้



กณณนาฏ อังพลาชัย
ธำปณิก ทางาม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

| | หน้า |
|---|------|
| บทคัดย่อภาษาไทย..... | ก |
| บทคัดย่อภาษาอังกฤษ..... | ข |
| กิตติกรรมประกาศ..... | ค |
| สารบัญ..... | ง |
| สารบัญตาราง..... | ช |
| สารบัญรูป..... | ซ |
| บทที่ 1 บทนำ..... | 1 |
| 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ..... | 1 |
| 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย..... | 2 |
| 1.3 ขอบเขตของงานวิจัย..... | 2 |
| 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ..... | 2 |
| บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง..... | 3 |
| 2.1 หลักการพื้นฐานของการกักกรอง..... | 3 |
| 2.1.1 การกักกรอง..... | 3 |
| 2.1.2 กลไกการกักกรอง..... | 3 |
| 2.2 สารยับยั้งการกักกรอง..... | 6 |
| 2.2.1 ประเภทของสารยับยั้งการกักกรอง..... | 6 |
| 2.2.2 การทำงานของสารยับยั้งการกักกรองแต่ละประเภท..... | 6 |
| 2.2.2.1 สารยับยั้งอนินทรีย์..... | 6 |
| 2.2.2.2 สารยับยั้งอินทรีย์..... | 9 |
| 2.3 เทคนิคโพเทนซีโอไดนามิกโพลาริเซชัน..... | 11 |
| 2.3.1 การวัดค่าศักย์ไฟฟ้า ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า และอัตราการกักกรอง..... | 11 |
| 2.4 เหล็กกล้าไร้สนิมชนิด 304..... | 12 |
| 2.4.1 คุณสมบัติของเหล็กกล้าไร้สนิมชนิด 304..... | 12 |
| 2.4.2 การใช้งาน..... | 12 |
| 2.5 พืชที่ใช้ในงานวิจัย..... | 13 |
| 2.5.1 ชিং..... | 13 |
| 2.5.1.1 สรรพคุณ..... | 13 |
| 2.5.1.2 สารสกัดจากชিং..... | 14 |
| 2.5.2 ใบกะเพราแดง..... | 14 |
| 2.5.2.1 สรรพคุณ..... | 15 |
| 2.5.2.2 สารสกัดจากใบกะเพราแดง..... | 15 |
| 2.5.3 ใบมังคุด..... | 15 |
| 2.5.3.1 สรรพคุณ..... | 16 |
| 2.5.3.2 สารสกัดจากใบมังคุด..... | 16 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ภายในเท่านั้น ไม่อนุญาตให้ไปแจ้งประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

| | หน้า |
|--|-----------|
| 2.6 การสกัด | 17 |
| 2.6.1 การเลือกตัวทำละลาย | 17 |
| 2.6.2 วิธีการสกัด | 17 |
| 2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง | 17 |
| บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย | 20 |
| 3.1 พีชที่ใช้ในงานวิจัย | 20 |
| 3.1.1 ชิง | 20 |
| 3.1.2 ใบกะเพราแดง | 20 |
| 3.1.3 ใบมังคุด | 20 |
| 3.2 สารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย | 20 |
| 3.3 วัสดุ อุปกรณ์ และเครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย | 20 |
| 3.3.1 สำหรับการสกัดชิง | 20 |
| 3.3.2 สำหรับการสกัดใบกะเพราแดง | 20 |
| 3.3.3 สำหรับการสกัดใบมังคุด | 21 |
| 3.3.4 สำหรับทำเทคนิคโพเทนชิโอดนามิกโพลาริเซชัน | 21 |
| 3.4 วิธีการดำเนินงานวิจัย | 22 |
| 3.4.1 การเตรียมและการสกัดพืช | 22 |
| 3.4.1.1 ชิง | 22 |
| 3.4.1.2 ใบกะเพราแดง | 22 |
| 3.4.1.3 ใบมังคุด | 23 |
| 3.4.2 การทดสอบการกักร้อน | 23 |
| 3.4.2.1 การเตรียมกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 0.05 โมลาร์ | 23 |
| 3.4.2.2 การเตรียมกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 0.05 โมลาร์ กับสารสกัดชิง ใบกะเพราแดง และใบมังคุด ที่ความเข้มข้น 10 100 500 และ 1000 mg/L | 23 |
| 3.4.2.3 การเตรียมกรดไนตริกเข้มข้น 6 นอร์มอล สำหรับการทำ Passivation | 23 |
| 3.4.2.4 การเตรียมชิ้นงานตัวอย่าง | 23 |
| 3.4.2.5 การทดสอบการกักร้อนโดยใช้ เทคนิคโพเทนชิโอดนามิกโพลาริเซชัน | 24 |
| บทที่ 4 ผลการวิจัยและการอภิปรายผล | 25 |
| 4.1 การยับยั้งการกักร้อนของเหล็กกล้าไร้สนิมชนิด 304 ด้วยสารสกัดจากชิง | 25 |
| 4.2 การยับยั้งการกักร้อนของเหล็กกล้าไร้สนิมชนิด 304 ด้วยสารสกัดจาก ใบกะเพราแดง | 28 |
| 4.3 การยับยั้งการกักร้อนของเหล็กกล้าไร้สนิมชนิด 304 ด้วยสารสกัดจากใบมังคุด | 31 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี หากมีการนำเอกสารนี้ไปใช้โดยไม่ได้รับอนุญาตถือว่าผิดกฎหมาย

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

| | หน้า |
|---|------|
| 4.4 การดูดซับบนพื้นผิวโลหะ..... | 33 |
| 4.5 ค่าประสิทธิภาพความต้านทานการกัดกร่อนแบบหลุม | 34 |
| 4.6 แบบจำลองไอโซเทอมของการดูดซับ | 36 |
| 4.7 ค่า pH ของกรดไฮโดรคลอริก 0.05 โมลาร์ เมื่อเติมสารสกัดจากขิง ใบกะเพราแดง และใบมังคุด..... | 39 |
| บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ | 40 |
| 5.1 สรุปผลการวิจัย..... | 40 |
| 5.2 ข้อเสนอแนะ | 40 |
| เอกสารอ้างอิง..... | 41 |



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

| ตารางที่ | หน้า |
|--|------|
| 2.1 ค่าศักย์ไฟฟ้ามาตรฐานของครึ่งเซลล์รีดอกซ์ | 5 |
| 2.2 แสดงสมบัติทางเคมีของเหล็กกล้าไร้สนิมชนิด 304 | 12 |
| 2.3 แสดงสมบัติทางกายภาพของเหล็กกล้าไร้สนิมชนิด 304 | 12 |
| 4.1 ผลการทดสอบการยับยั้งการกัดกร่อนของเหล็กกล้าไร้สนิมชนิด 304 ในกรดไฮโดรคลอริก 0.05 โมลาร์ เมื่อเติมสารสกัดจากขิงที่ความเข้มข้นต่างๆ..... | 26 |
| 4.2 ผลการทดสอบการยับยั้งการกัดกร่อนของเหล็กกล้าไร้สนิมชนิด 304 ในกรดไฮโดรคลอริก 0.05 โมลาร์ เมื่อเติมสารสกัดจากใบกะเพราแดงที่ความเข้มข้นต่างๆ | 28 |
| 4.3 ผลการทดสอบการยับยั้งการกัดกร่อนของเหล็กกล้าไร้สนิมชนิด 304 ในกรดไฮโดรคลอริก 0.05 โมลาร์ เมื่อเติมสารสกัดจากใบมังคุดที่ความเข้มข้นต่างๆ..... | 31 |
| 4.4 ค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนแบบหลุม (Pitting potential, E_{pit}) ค่าประสิทธิภาพ ความต้านทานการกัดกร่อนแบบหลุม (Pitting inhibition efficiency, %PIE) และค่าประสิทธิภาพการยับยั้งการกัดกร่อน (Inhibition efficiency, IE%) ที่ความเข้มข้นต่างๆของสารสกัดจากขิง..... | 35 |
| 4.5 ค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนแบบหลุม (Pitting potential, E_{pit}) ค่าประสิทธิภาพ ความต้านทานการกัดกร่อนแบบหลุม (Pitting inhibition efficiency, %PIE) และค่าประสิทธิภาพการยับยั้งการกัดกร่อน (Inhibition efficiency, IE%) ที่ความเข้มข้นต่างๆของสารสกัดจากใบกะเพราแดง..... | 35 |
| 4.6 ค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนแบบหลุม (Pitting potential, E_{pit}) ค่าประสิทธิภาพ ความต้านทานการกัดกร่อนแบบหลุม (Pitting inhibition efficiency, %PIE) และค่าประสิทธิภาพการยับยั้งการกัดกร่อน (Inhibition efficiency, IE%) ที่ความเข้มข้นต่างๆของสารสกัดจากใบมังคุด..... | 36 |
| 4.7 ความเข้มข้นของสารสกัดจากขิง ใบกะเพราแดง และใบมังคุดที่เป็นสารยับยั้งการกัดกร่อน (C) กับอัตราส่วนระหว่าง C กับ θ | 37 |
| 4.8 ค่าคงที่สมดุลของการดูดซับ และพลังงานอิสระของการดูดซับของสารยับยั้งการกัดกร่อน ที่สกัดจากขิง ใบกะเพราแดง และใบมังคุด | 38 |
| 4.9 ค่า pH ของกรดไฮโดรคลอริก 0.05 โมลาร์ เมื่อเติมสารสกัดจากขิง ใบกะเพราแดง และใบมังคุดที่ความเข้มข้นต่างๆ | 39 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

| รูปที่ | หน้า |
|--|------|
| 2.1 ทิศทางการไหลของกระแสไฟฟ้า เนื่องจากปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมี | 4 |
| 2.2 การเกิดปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีของสนิมเหล็ก..... | 4 |
| 2.3 การจำแนกประเภทของสารยับยั้ง | 6 |
| 2.4 แผนภาพโพเทนชิโอสแตตติกโพลาริเซชัน แสดงพฤติกรรมทางไฟฟ้าเคมีของโลหะในสารละลายที่มีสารยับยั้งแอนโอดิก (ก) เทียบกับสารละลายที่ไม่มีสารยับยั้ง (ข) | 7 |
| 2.5 ผลยับยั้งอนินทรีย์แอนโอดิกและการทำงานของสารยับยั้ง | 7 |
| 2.6 แผนภาพโพเทนชิโอสแตตติกโพลาริเซชัน แสดงพฤติกรรมทางไฟฟ้าเคมีของโลหะในสารละลายที่มีสารยับยั้งแคโทดิก (ก) เทียบกับสารละลายที่ไม่มีสารยับยั้ง (ข) | 8 |
| 2.7 แสดงกลไกการทำงานของสารยับยั้งแคโทดิก | 9 |
| 2.8 แผนภาพโพเทนชิโอสแตตติกโพลาริเซชัน แสดงพฤติกรรมทางไฟฟ้าเคมีของโลหะในสารละลายที่มีสารยับยั้งแคโทดิกและแอนโอดิก (ก) เทียบกับสารละลายที่ไม่มีสารยับยั้ง (ข)... | 10 |
| 2.9 แสดงกลไกการทำงานของสารยับยั้งอินทรีย์เมื่อสารยับยั้งถูกดูดซับไปยังพื้นผิวโลหะโดย Inhibitor หมายถึงโมเลกุลของสารยับยั้ง | 10 |
| 2.10 การวัดกระแสไฟฟ้ากัณฑ์และศักย์ไฟฟ้าการกัณฑ์โดยเครื่องโพเทนชิโอสแตต | 11 |
| 2.11 ชิง | 13 |
| 2.12 โครงสร้างทางเคมีของสารสำคัญที่พบในชิง | 14 |
| 2.13 ไบกะเพราแดง | 14 |
| 2.14 โครงสร้างทางเคมีของสารสำคัญที่พบในไบกะเพราแดง | 15 |
| 2.15 ไบมังคุด | 15 |
| 2.16 โครงสร้างทางเคมีของสารสำคัญที่พบในไบมังคุด | 16 |
| 4.1 กราฟโพลาริเซชันของเหล็กกล้าไร้สนิมชนิด 304 ในกรดไฮโดรคลอริก 0.05 โมลาร์ที่ไม่เติมและเติมสารสกัดจากชิงที่ความเข้มข้น 10 100 500 และ 1000 mg/L..... | 25 |
| 4.2 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารสกัดจากชิงกับค่าศักย์ไฟฟ้าการกัณฑ์แบบหลุม | 27 |
| 4.3 กราฟโพลาริเซชันของเหล็กกล้าไร้สนิมชนิด 304 ในกรดไฮโดรคลอริก 0.05 โมลาร์ที่ไม่เติมและเติมสารสกัดจากไบกะเพราแดงที่ความเข้มข้น 10 100 500 และ 1000 mg/L.. | 28 |
| 4.4 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารสกัดจากไบกะเพราแดงกับค่าศักย์ไฟฟ้าการกัณฑ์แบบหลุม | 30 |
| 4.5 กราฟโพลาริเซชันของเหล็กกล้าไร้สนิมชนิด 304 ในกรดไฮโดรคลอริก 0.05 โมลาร์ที่ไม่เติมและเติมสารสกัดจากไบมังคุดที่ความเข้มข้น 10 100 500 และ 1000 mg/L..... | 31 |
| 4.6 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารสกัดจากไบมังคุดกับค่าศักย์ไฟฟ้าการกัณฑ์แบบหลุม | 33 |
| 4.7 กลไกการเพิ่มความต้านทานการกัณฑ์แบบหลุมของสารสกัดจากชิง ไบกะเพราแดง และไบมังคุด (A) ชั้นป้องกันที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ (B) การทำลายชั้นป้องกันโดยคลอไรด์ไอออน (C) การป้องกันการกัณฑ์แบบหลุม | 34 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์ภายใต้การคุ้มครองของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

| รูปที่ | หน้า |
|--|------|
| 4.8 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารสกัดจากขิง ใบกะเพราแดง และใบมังคุด ที่เป็นสารยับยั้งการกัดกร่อน (C) กับอัตราส่วนระหว่าง C กับ θ | 37 |



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ

การกัดกร่อนของวัสดุ เป็นปัญหาหนึ่งที่เกิดขึ้นเสมอในโรงงานอุตสาหกรรม และสามารถพบเห็นได้ในชีวิตประจำวัน จากข้อมูลที่ได้มีการสำรวจ พบว่า ประมาณร้อยละ 3-5 ของผลิตภัณฑ์มวลรวมภายในประเทศ (Gross Domestic Product, GDP) สูญเสียไปกับการกัดกร่อน ซึ่งความสูญเสียนี้คิดเป็นจำนวนเงินมหาศาล เมื่อเกิดขึ้นแล้วทำให้มีผลกระทบต่อด้านเศรษฐกิจ สังคม และสิ่งแวดล้อม บางครั้งอาจก่อให้เกิดการสูญเสียชีวิต อันเป็นผลมาจากสาเหตุหลายประการ ไม่ว่าจะเป็น การขาดความรู้พื้นฐานทางด้านการกัดกร่อน ขาดความเข้าใจในการเลือกใช้วัสดุในสภาวะสิ่งแวดล้อมที่เหมาะสม รวมไปถึงการป้องกันและบำรุงรักษาอย่างไม่ถูกต้อง

ภาคอุตสาหกรรมเป็นหนึ่งในกลไกสำคัญที่จะนำพาประเทศไปสู่การเพิ่มขีดความสามารถในการแข่งขัน จึงมีการพัฒนาอุตสาหกรรมอย่างต่อเนื่อง โดยเฉพาะในเรื่องของโครงสร้างโรงงานและกระบวนการผลิตที่ต้องมีความแข็งแกร่งทนทาน วัสดุโลหะที่ถูกเลือกใช้ในกระบวนการผลิตทางอุตสาหกรรมส่วนใหญ่มีเหล็กเป็นองค์ประกอบ และมีการเจือโลหะบางประเภทเข้าไป เพื่อเพิ่มคุณสมบัติด้านต่างๆ เช่น เหล็กกล้าไร้สนิมจะมีการเติมธาตุโครเมียม นิกเกิล โมลิบดีนัม และไทเทเนียม เข้าไปเพื่อต้านทานการกัดกร่อน ภายใต้การขึ้นรูป ทนต่ออุณหภูมิสูงและอุณหภูมิต่ำ โลหะผสมเหล็กจึงเข้ามามีบทบาทในการเลือกใช้ใช้งานมากขึ้น เช่น เหล็กกล้าไร้สนิมชนิด 304 เหล็กกล้าไร้สนิมชนิด 316 เป็นต้น ด้วยเหตุนี้จึงนำไปสู่การศึกษาการยับยั้งการกัดกร่อนของเหล็กกล้าไร้สนิมชนิด 304 โดยสารสกัดจากขิง ใบกะเพราแดง และใบมังคุด

การป้องกันการกัดกร่อนของโลหะสามารถทำได้หลายวิธี เช่น การเคลือบผิวโลหะ การป้องกันการกัดกร่อนแบบแคโทดิก การป้องกันการกัดกร่อนแบบแอโนดิก หรือการเติมสารยับยั้งการกัดกร่อน ซึ่งการเติมสารยับยั้งการกัดกร่อนเป็นการเติมสารเคมีบางชนิดเข้าไปเพื่อไปยับยั้งปฏิกิริยาออกซิเดชัน ในปัจจุบันนี้สังคมได้ให้ความสำคัญต่อสิ่งแวดล้อมและส่งเสริมให้มีการเลือกใช้สารเคมีที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมมากขึ้น โดยการใช้สารสกัดจากธรรมชาติ อาทิ พืช ผัก และสมุนไพรชนิดต่างๆ เพื่อนำมาใช้แทนสารเคมีสังเคราะห์ จึงได้มีผู้ศึกษาการใช้สารยับยั้งการกัดกร่อนจากธรรมชาติโดยใช้สารสกัดจากพืชสมุนไพร Kadapparambil S. *et al.* [1] ทำการศึกษาความสามารถในการยับยั้งการกัดกร่อนของเหล็กกล้าไร้สนิมชนิด 304 ในกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 2 โมลาร์ โดยใช้สารสกัดจากใบสัก Saxena A. *et al.* [2] ศึกษาการยับยั้งการกัดกร่อนของเหล็กกล้าในกรดซัลฟิวริกเข้มข้น 0.05 โมลาร์ โดยการสกัดจากผลเครือเขาค้ำ สุธา สุทธิเรืองวงศ์ และคณะ [3] ศึกษาความสามารถในการยับยั้งการกัดกร่อนของเหล็กกล้า AISI 1045 ในกรดซัลฟิวริกเข้มข้น 0.05 โมลาร์ โดยการสกัดจากใบพลูจากงานวิจัยทั้งหมดที่กล่าวมาในข้างต้น ชี้ให้เห็นว่าการยับยั้งการกัดกร่อนโดยใช้สารสกัดจากพืชนั้นเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม สามารถสกัดได้ด้วยเทคโนโลยีที่มีราคาไม่แพง โดยสารสกัดที่ได้จากพืชดังกล่าวมีสารประกอบประเภทฟีนอลิกเป็นองค์ประกอบ

จากปัญหาข้างต้น จึงได้มีการจัดทำโครงการพิเศษนี้ขึ้น เพื่อใช้สารสกัดจากพืชในการยับยั้งการกัดกร่อนของโลหะและไม่เป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อม โดยเลือกใช้สารสกัดจากพืช 3 ชนิด คือ ขิง ใบกะเพราแดง และใบมังคุด จากการศึกษาขององค์ประกอบทางเคมี ทางคณะผู้จัดทำคาดว่าโครงสร้างทางเคมีของสารสกัดดังกล่าวจะสามารถยับยั้งการกัดกร่อนของโลหะได้ เนื่องจากมีเอกลักษณ์เฉพาะตัวที่ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คู่อิสรระบริเวณอะตอมของออกซิเจนของหมู่คาร์บอนิล ซึ่งสามารถถูกดูดซับบนผิวหน้าของโลหะ จึงได้มีการเลือกใช้พีซทั้ง 3 ชนิดนี้มาทดลองเป็นสารยับยั้งการกัดกร่อนของเหล็กกล้าไร้สนิมชนิด 304 ในสารละลายกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 0.05 โมลาร์

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. เพื่อศึกษาการยับยั้งการกัดกร่อนของเหล็กกล้าไร้สนิมชนิด 304 โดยสารสกัดจากขิง ใบกะเพราแดง และใบมังคุด ในสารละลายกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 0.05 โมลาร์
2. เพื่อศึกษาทฤษฎีของการป้องกันการกัดกร่อนโดยการใช้สารยับยั้งการกัดกร่อน

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

ศึกษาและทดลองใช้สารสกัดจากขิง ใบกะเพราแดง และใบมังคุด เพื่อใช้เป็นสารยับยั้งการกัดกร่อนของเหล็กกล้าไร้สนิมชนิด 304 ในสารละลายกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 0.05 โมลาร์ โดยวิธีการเปรียบเทียบการกัดกร่อนของเหล็กกล้าไร้สนิมชนิด 304 ที่ไม่ได้เติมสารสกัดกับเติมสารสกัดจากขิง ใบกะเพราแดง และใบมังคุด ที่ความเข้มข้น 10 100 500 และ 1000 mg/L

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. มีความรู้ความเข้าใจเกี่ยวกับการกัดกร่อน และการป้องกันการกัดกร่อน โดยการใช้สารยับยั้งการกัดกร่อนที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม
2. สามารถนำสารสกัดจากขิง ใบกะเพราแดง และใบมังคุดมาใช้เป็นสารยับยั้งการกัดกร่อนของเหล็กกล้าไร้สนิมชนิด 304 ในสารละลายกรดแทนสารเคมีสังเคราะห์ได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 หลักการพื้นฐานของการกัดกร่อน

2.1.1 การกัดกร่อน (Corrosion) [4,5]

การกัดกร่อน คือ ปฏิกิริยาระหว่างวัสดุโลหะกับสิ่งแวดล้อม แล้วทำให้โลหะนั้นเปลี่ยนสภาพไปเป็นสารประกอบประเภทออกไซด์หรือไฮดรอกไซด์ เช่น สนิมเหล็ก (Fe_2O_3) สนิมทองแดง (CuO) สนิมอลูมิเนียม (Al_2O_3) เป็นต้น หรือเรียกกง่าย ๆ ว่า เนื้อโลหะสูญเสียไป ซึ่งนำไปสู่การเสื่อมสภาพของวัสดุนั้นและยังส่งผลให้ความสามารถในการทำหน้าที่ของวัสดุดังกล่าวเสียไป โดยส่วนใหญ่ปฏิกิริยาดังกล่าวจะเป็นปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้า แต่ทั้งนี้สามารถเป็นปฏิกิริยาเคมี หรือปฏิกิริยาทางกายภาพของโลหะได้เช่นกัน นอกจากนี้ยังมีรายงานจาก WCO (World Corrosion Organization) ว่าความสูญเสียเนื่องจากการกัดกร่อนมีมูลค่าประมาณ 3-5% ของผลิตภัณฑ์มวลรวมภายในประเทศของทั้งโลก

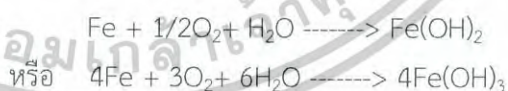
2.1.2 กลไกการกัดกร่อน (Mechanism of corrosion)

กลไกการกัดกร่อนสามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภทใหญ่ คือ การกัดกร่อนเกิดจากปฏิกิริยาเคมีโดยตรงและการกัดกร่อนเกิดจากปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้า

1. การกัดกร่อนเกิดจากปฏิกิริยาเคมีโดยตรง (Direct chemical corrosion) [6]

การกัดกร่อนเกิดจากปฏิกิริยาเคมีโดยตรง เป็นปฏิกิริยาที่ทำให้โลหะกัดกร่อนโดยอาศัยก๊าซเป็นสื่อขึ้นบนผิวโลหะ ซึ่งมักเกิดจากสภาพอากาศเป็นตัวการสำคัญ เช่น ความชื้นในอากาศมีมาก ทำให้โลหะเป็นสนิมเร็วขึ้น ก๊าซออกซิเจนในอากาศเป็นตัวการสำคัญที่ทำให้เกิดการกัดกร่อนโดยอาศัยปฏิกิริยาเคมีง่าย ๆ กับโลหะ การกัดกร่อนจะมากขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ ถ้าอุณหภูมิยิ่งสูง การรวมตัวระหว่างก๊าซออกซิเจนกับโลหะยิ่งรวดเร็ว เช่น เหล็กที่เผา ร้อนแดงจะเกิดสนิมเหล็กได้ง่ายกว่าเหล็กที่อยู่ในอากาศปกติ ซึ่งการกัดกร่อนจากปฏิกิริยาเคมีเกิดขึ้นได้จากการรวมตัวระหว่างโลหะ (Metal) กับก๊าซออกซิเจน (O_2) แบ่งออกได้ 2 ลักษณะคือ

1.1 โดยมีน้ำและความชื้นเป็นตัวร่วมทำปฏิกิริยา (Reaction) เช่น การเกิดสนิมเหล็กในอากาศปกติที่มีความชื้น ดังสมการต่อไปนี้



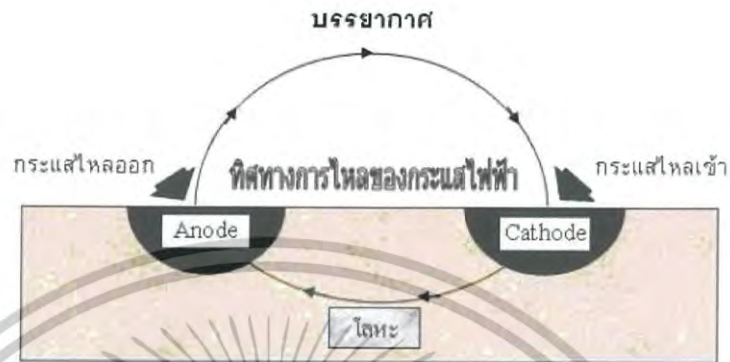
1.2 โดยไม่มีความชื้นร่วมทำปฏิกิริยา เช่น การรวมตัวของออกซิเจนกับเหล็ก เมื่ออุณหภูมิสูงๆ และอากาศแห้งมากๆ ทำให้เกิดเป็นสนิมเหล็กชั้น (เหล็กออกไซด์) ดังสมการต่อไปนี้



2. การกัดกร่อนเกิดจากปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้า (Electrochemical corrosion) [5]

โลหะจะกัดกร่อนได้จะต้องมีสารละลายอิเล็กโทรไลต์ ซึ่งอาจจะเป็นบรรยากาศที่ชื้นหรือของเหลวใดๆที่โลหะสัมผัสอยู่ ปฏิกิริยาแบบนี้จะเกิดการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนจากโลหะที่กัดกร่อนซึ่งเรียกว่าแอโนด (Anode) ไปยังโลหะหรือธาตุซึ่งแอโนดสัมผัสอยู่ โลหะหรือธาตุตัวหลังนี้ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เรียกว่า แคโทด (Cathode) เป็นขั้วที่มีประจุบวก (Cation) ในขณะที่ขั้วแอโนดมีประจุลบ (Anion) วิ่งไปหาขั้วแคโทด เซลล์ไฟฟ้าจะครบวงจร เนื่องจากกระแสอิเล็กตรอนไหลสวนทางกับกระแสไฟฟ้า จึงได้แสดงทิศทางการไหลของกระแสไฟฟ้า เนื่องจากปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมี ดังแสดงในรูปที่ 2.1

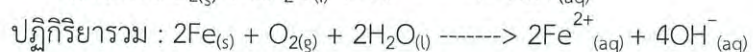
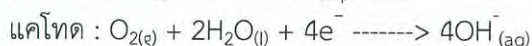


รูปที่ 2.1 ทิศทางการไหลของกระแสไฟฟ้า เนื่องจากปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมี

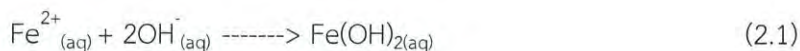
โลหะในธรรมชาติเกิดการกัดกร่อนมีสาเหตุหลายประการ สาเหตุหนึ่งคือเกิดจากผิวของโลหะสัมผัสกับน้ำและก๊าซออกซิเจน การกัดกร่อนของโลหะเกิดจากการที่อะตอมของโลหะถูกออกซิไดซ์เป็นไอออนแล้วรวมตัวกับก๊าซออกซิเจนในอากาศได้ผลิตภัณฑ์เป็นออกไซด์ของโลหะนั้น เช่น สนิมเหล็ก (Fe_2O_3) สนิมทองแดง (CuO) หรือสนิมอะลูมิเนียม (Al_2O_3) ปฏิกิริยาการเกิดสนิมมีกระบวนการซับซ้อนมาก และมีลักษณะเฉพาะตัว เช่น การเกิดสนิมเหล็กเนื่องจากบริเวณผิวเหล็กที่สัมผัสน้ำจะมีการให้และรับอิเล็กตรอนโดยอะตอมของเหล็กจะเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันหรือถูกออกซิไดซ์เป็น Fe^{2+} ส่วนน้ำและก๊าซออกซิเจนในอากาศจะรับอิเล็กตรอนหรือถูกรีดิวซ์เป็น OH^- ซึ่งปฏิกิริยาการเกิดสนิมเหล็กในธรรมชาติ ดังแสดงในรูปที่ 2.2



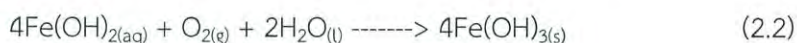
รูปที่ 2.2 การเกิดปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีของสนิมเหล็ก



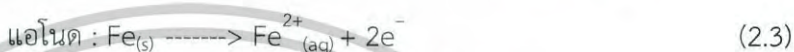
$2\text{Fe}^{2+}_{(aq)}$ และ $\text{OH}^-_{(aq)}$ จะรวมกันได้ $\text{Fe}(\text{OH})_2$ ซึ่งไม่ละลายน้ำ ดังสมการที่ 2.1 เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้า ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



Fe(OH)_2 ที่เกิดขึ้นจะทำปฏิกิริยากับน้ำและออกซิเจนในอากาศต่อไปได้ Fe(OH)_3 ดังสมการที่ 2.2



ไฮดรอกไซด์ (III) ไฮดรอกไซด์ [Fe(OH)_3] ที่เกิดขึ้นโดยทั่วไปจะเขียนในรูปไฮดรอกไซด์ที่มีน้ำผลึกอยู่ในโมเลกุล และน้ำผลึกอาจมีปริมาณแตกต่างกัน จึงเขียนสูตรทั่วไปเป็น $\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ ก๊าซ CO_2 มีส่วนทำให้เกิดสนิมในธรรมชาติได้เนื่องจาก CO_2 ละลายน้ำได้ H_2CO_3 ซึ่งแตกตัวให้ H^+ จากนั้น H^+ จะรับอิเล็กตรอนจากเหล็กและเกิดการเปลี่ยนแปลง ดังสมการที่ 2.3 และ 2.4



Fe^{2+} ที่เกิดขึ้นถูกออกซิไดซ์ต่อไปได้สนิมเหล็ก ดังสมการที่ 2.5



การกัดกร่อนของเหล็กหรือเกิดสนิมอาจเกิดได้เร็วขึ้นเมื่อเหล็กสัมผัสกับสารเคมีที่เป็นตัวออกซิไดซ์ เช่น กรดสารละลายของสารประกอบไอออนิกบางชนิด เช่น NaCl หรือสัมผัสกับโลหะที่มีศักย์ไฟฟ้ามาตรฐานของครึ่งเซลล์สูงกว่า ดังแสดงในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ค่าศักย์ไฟฟ้ามาตรฐานของครึ่งเซลล์รีดักชัน [7]

| Reduction Half-Reaction | E° (V) |
|---|---------------|
| $\text{F}_2(g) + 2e^- \rightarrow 2\text{F}^-(aq)$ | 2.87 |
| $\text{H}_2\text{O}_2(aq) + 2\text{H}^+(aq) + 2e^- \rightarrow 2\text{H}_2\text{O}(l)$ | 1.78 |
| $\text{MnO}_4^-(aq) + 8\text{H}^+(aq) + 5e^- \rightarrow \text{Mn}^{2+}(aq) + 4\text{H}_2\text{O}(l)$ | 1.51 |
| $\text{Cl}_2(g) + 2e^- \rightarrow 2\text{Cl}^-(aq)$ | 1.36 |
| $\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}(aq) + 14\text{H}^+(aq) + 6e^- \rightarrow 2\text{Cr}^{3+}(aq) + 7\text{H}_2\text{O}(l)$ | 1.33 |
| $\text{O}_2(g) + 4\text{H}^+(aq) + 4e^- \rightarrow 2\text{H}_2\text{O}(l)$ | 1.23 |
| $\text{Br}_2(l) + 2e^- \rightarrow 2\text{Br}^-(aq)$ | 1.09 |
| $\text{Ag}^+(aq) + e^- \rightarrow \text{Ag}(s)$ | 0.80 |
| $\text{Fe}^{3+}(aq) + e^- \rightarrow \text{Fe}^{2+}(aq)$ | 0.77 |
| $\text{O}_2(g) + 2\text{H}^+(aq) + 2e^- \rightarrow \text{H}_2\text{O}_2(aq)$ | 0.70 |
| $\text{I}_2(s) + 2e^- \rightarrow 2\text{I}^-(aq)$ | 0.54 |
| $\text{O}_2(g) + 2\text{H}_2\text{O}(l) + 4e^- \rightarrow 4\text{OH}^-(aq)$ | 0.40 |
| $\text{Cu}^{2+}(aq) + 2e^- \rightarrow \text{Cu}(s)$ | 0.34 |
| $\text{Sn}^{4+}(aq) + 2e^- \rightarrow \text{Sn}^{2+}(aq)$ | 0.15 |
| $2\text{H}^+(aq) + 2e^- \rightarrow \text{H}_2(g)$ | 0 |
| $\text{Pb}^{2+}(aq) + 2e^- \rightarrow \text{Pb}(s)$ | -0.13 |
| $\text{Ni}^{2+}(aq) + 2e^- \rightarrow \text{Ni}(s)$ | -0.26 |
| $\text{Cd}^{2+}(aq) + 2e^- \rightarrow \text{Cd}(s)$ | -0.40 |
| $\text{Fe}^{2+}(aq) + 2e^- \rightarrow \text{Fe}(s)$ | -0.45 |
| $\text{Zn}^{2+}(aq) + 2e^- \rightarrow \text{Zn}(s)$ | -0.76 |
| $2\text{H}_2\text{O}(l) + 2e^- \rightarrow \text{H}_2(g) + 2\text{OH}^-(aq)$ | -0.83 |
| $\text{Al}^{3+}(aq) + 3e^- \rightarrow \text{Al}(s)$ | -1.66 |
| $\text{Mg}^{2+}(aq) + 2e^- \rightarrow \text{Mg}(s)$ | -2.37 |
| $\text{Na}^+(aq) + e^- \rightarrow \text{Na}(s)$ | -2.71 |
| $\text{Li}^+(aq) + e^- \rightarrow \text{Li}(s)$ | -3.04 |

หมายเหตุ : ศักย์ไฟฟ้ารีดักชันมาตรฐานที่ 25°C (298 K) ไม่นิยามให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2 สารยับยั้งการกัดกร่อน (Corrosion Inhibitors) [8]

สมาคมวิศวกรการกัดกร่อนแห่งชาติ (National Association of Corrosion Engineers : NACE) ได้ให้ความหมายของสารยับยั้งการกัดกร่อนว่าเป็น “สารชนิดหนึ่งที่มีความเข้มข้นเพียงเล็กน้อย ซึ่งเป็นอุปสรรคต่อการกัดกร่อนเมื่อเข้ามาอยู่สภาพแวดล้อมหนึ่ง” และอีกความหมายหนึ่งตามสมาคมอเมริกาสำหรับการทดสอบและวัสดุ (American Society for Testing and Materials : ASTM) คือ “สารเคมีหรือการรวมกันของสารที่เมื่ออยู่ในความเข้มข้นและรูปแบบที่เหมาะสมในสภาพแวดล้อมจะป้องกันหรือช่วยลดการกัดกร่อนได้”

2.2.1 ประเภทของสารยับยั้งการกัดกร่อน

สารยับยั้งการกัดกร่อนสามารถเป็นได้ทั้งสารเคมี สารสังเคราะห์หรือสารจากธรรมชาติ โดยสามารถจำแนกตาม

1. ลักษณะทางเคมีเป็นอินทรีย์ (Organic) หรืออนินทรีย์ (Inorganic)
2. กลไกของการทำงานเป็นแอโนดิก (Anodic) แคโทดิก (Cathodic) หรือผสมทั้งแอโนดิก-แคโทดิก โดยการทำหน้าที่การดูดซับ (Adsorption action)
3. เป็นสารที่ทำให้สารอื่นรวมตัวกับออกซิเจน (Oxidants) หรือไม่เป็นสารที่ทำให้สารอื่นรวมตัวกับออกซิเจน (Not Oxidants) โดยทั่วไปสารยับยั้งอนินทรีย์จะมีความทำงานเป็นแคโทดิกหรือแอโนดิก สารยับยั้งอินทรีย์จะมีความทำงานเป็นทั้งแบบแคโทดิกและแอโนดิกซึ่งป้องกันโดยการดูดซับ (Adsorption) บนพื้นผิวโลหะ ดังนั้นจึงสามารถแบ่งประเภทของสารยับยั้ง ดังแสดงในรูปที่ 2.3



2.2.2 การทำงานของสารยับยั้งการกัดกร่อนแต่ละประเภท

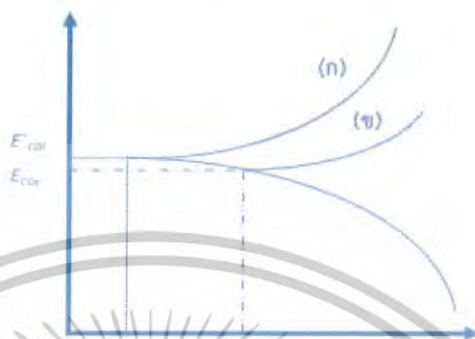
2.2.2.1 สารยับยั้งอนินทรีย์ (Inorganic inhibitors)

1. สารยับยั้งแบบแอโนดิก (Anodic inhibitors)

สารยับยั้งแบบแอโนดิก (หรือที่เรียกว่าสารยับยั้งแบบสร้างฟิล์มปกป้อง) จะขัดขวางการทำปฏิกิริยาแอโนด (Anode reaction) และสนับสนุนปฏิกิริยาตามธรรมชาติของพื้นผิวโลหะในการสร้างชั้นฟิล์มปกป้อง เนื่องจากการสร้างฟิล์มจะต้องเกิดการดูดซับบนโลหะ โดยทั่วไปสารยับยั้งจะทำปฏิกิริยากับผลิตภัณฑ์ที่กัดกร่อน เริ่มสร้างการเกิดชั้นฟิล์มยึดติดและไม่ละลายน้ำบนพื้นผิวโลหะ

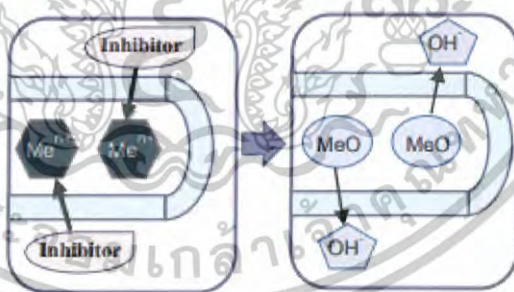
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังแสดงในรูปที่ 2.4 แสดงแผนภาพโพเทนชิโอสแตติกโพลาริเซชัน (Potentio static polarization) ของสารละลายกับพฤติกรรมของสารยับยั้งแบบแอนอดิกปฏิกิริยาแอนอดิกจะได้รับผลกระทบจากสารยับยั้งการกัดกร่อน และศักย์การกัดกร่อนของโลหะที่จะถูกเลื่อนไปเป็นค่าบวกมากขึ้น รวมทั้งค่าของกระแสในเส้นโค้งลดลง พร้อมกับสารยับยั้งการกัดกร่อนที่มีอยู่ด้วย



รูปที่ 2.4 แผนภาพโพเทนชิโอสแตติกโพลาริเซชัน แสดงพฤติกรรมทางไฟฟ้าเคมีของโลหะในสารละลายที่มีสารยับยั้งแอนอดิก (ก) เทียบกับสารละลายที่ไม่มีสารยับยั้ง (ข)

สารยับยั้งแอนอดิกทำปฏิกิริยากับไอออนโลหะ Me^{n+} สร้างชั้นบนแอนอดิกการเปลี่ยนรูปโดยทั่วไปจะเป็นไฮดรอกไซด์ที่ไม่ละลายน้ำซึ่งจะถูกวางลงบนพื้นผิวโลหะเหมือนเป็นชั้นฟิล์มที่ไม่ละลายน้ำ และไม่สามารถซึมผ่านไอออนโลหะได้จากสารที่โมเลกุลของน้ำเข้าทำปฏิกิริยาสลายโมเลกุล (ไฮโดรไลซิส หรือ Hydrolysis) ของสารยับยั้งทำให้เกิดไอออน OH^- ดังแสดงในรูปที่ 2.5 แสดงให้เห็นผลของการยับยั้งแบบแอนอดิก



รูปที่ 2.5 ผลยับยั้งอนินทรีย์แอนอดิกและการทำงานของสารยับยั้ง

เมื่อความเข้มข้นของสารยับยั้งการกัดกร่อนสูงมากพอที่ทำให้ความหนาแน่นกระแสแคโทดิกที่ศักย์ไฟฟ้าของชั้นฟิล์มโลหะสูงกว่าความหนาแน่นกระแสแอนอดิก ส่งผลให้ศักย์ไฟฟ้าของชั้นฟิล์มโลหะมีค่าสูงขึ้น ทำให้โลหะสร้างชั้นฟิล์ม สำหรับผลของสารยับยั้งแอนอดิกดังกล่าวจะเกิดขึ้นได้ สิ่งที่สำคัญมากคือความเข้มข้นของสารยับยั้งควรจะสูงมากพอในสารละลายสัดส่วนความเข้มข้นที่ไม่เหมาะสมของสารยับยั้งจะส่งผลกระทบต่อการทำงานของชั้นฟิล์มป้องกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เพราะฟิล์มจะไม่ครอบคลุมโลหะอย่างสมบูรณ์หลุดออกจากของโลหะ ทำให้ผิวโลหะเปิดออกสัมผัสกับสภาพแวดล้อมจนก่อให้เกิดการกัดกร่อน

ความเข้มข้นที่ต่ำกว่าค่าวิกฤตเป็นผลร้ายยิ่งกว่าไม่มีสารยับยั้งเสียอีก โดยทั่วไปสามารถก่อให้เกิดการกัดกร่อนแบบรูพรุน (Pitting) เนื่องจากปฏิกิริยารีดักชัน (Reduction) ที่บริเวณแอโนดิกซึ่งสัมพันธ์กับแคโทดิก หรือสามารถเร่งการกัดกร่อนเหมือนการกัดกร่อนทั่วไป เนื่องจากการสลายของชั้นฟิล์มของโลหะ ตัวอย่างของสารยับยั้งอนินทรีย์แบบแอโนดิก เช่น ไนเตรต (Nitrate) โมลิบเดต (Molybdates) โซเดียมโครเมต (Sodium chromates) ฟอสเฟต (Phosphates) ไฮดรอกไซด์ (Hydroxides) และซิลิเกต (Silicates)

2. สารยับยั้งแบบแคโทดิก (Cathodic inhibitors)

ในระหว่างกระบวนการกัดกร่อนสารยับยั้งการกัดกร่อนแบบแคโทดิกจะป้องกันการเกิดปฏิกิริยาแคโทดิกของโลหะ สารยับยั้งเหล่านี้มีไอออนของโลหะที่สามารถทำให้เกิดปฏิกิริยาแคโทดิกเนื่องจากความเป็นด่าง (Alkalinity) ดังนั้นจึงผลิตสารประกอบที่ไม่ละลายน้ำ ซึ่งจะตกตะกอนด้านแคโทดิกรวมกันแน่นติดอยู่ เหนือฟิล์มโลหะและจำกัดการแพร่กระจายของสิ่งต่างๆ ให้อยู่ในพื้นที่บริเวณนี้ ดังนั้นการเพิ่มความต้านทานของพื้นผิวและการจำกัดการแพร่กระจายของสิ่งต่างๆ ทำให้การแพร่กระจายออกซิเจนและอิเล็กตรอนจะมีการเหนี่ยวนำอยู่ในพื้นที่บริเวณนี้ สิ่งเหล่านี้ส่งผลให้สารยับยั้งเกิดการยับยั้งแคโทดิกที่สูง

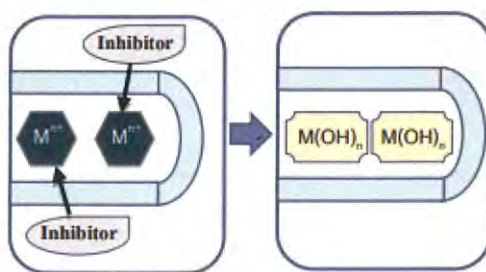
แสดงตัวอย่างเส้นโค้งการโพลาริเซชันของโลหะในสารละลายที่มีสารยับยั้งแคโทดิก เมื่อปฏิกิริยาแคโทดิกมีผลกระทบต่อกิจกรรมการกัดกร่อน ทำให้ค่าจะเลื่อนไปเป็นค่าลบมากขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 แผนภาพโพเทนชิโอสแตติกโพลาริเซชัน แสดงพฤติกรรมทางไฟฟ้าเคมีของโลหะในสารละลายที่มีสารยับยั้งแคโทดิก (ก) เทียบกับสารละลายที่ไม่มีสารยับยั้ง (ข)

สารยับยั้งแคโทดิกจะสร้างตะกอนที่ไม่ละลายน้ำให้เป็นอุปสรรคบนโลหะ ครอบคลุมไว้ ดังนั้นจึงเป็นการจำกัดการสัมผัสของโลหะกับสภาพแวดล้อม ถึงแม้ว่าโลหะจะถูกแช่ไว้ในสารละลายทั้งชิ้นงานก็สามารถป้องกันการเกิดปฏิกิริยาการกัดกร่อนได้ เนื่องจากสารยับยั้งแคโทดิกไม่ได้มีสัมพันธ์กับความเข้มข้น ทำให้เกิดความมั่นใจสำหรับการนำไปใช้งานมากกว่าสารยับยั้งแอโนดิก ดังแสดงในรูปที่ 2.7 แสดงให้เห็นภาพของกลไกการทำงานของสารยับยั้งแคโทดิกเพื่อยับยั้งกระบวนการการกัดกร่อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.7 แสดงกลไกการทำงานของสารยับยั้งแคโทดิก

ตัวอย่างของสารยับยั้งอนินทรีย์แบบแคโทดิก เช่น ไอออนของแมกนีเซียม (Magnesium) สังกะสี (Zinc) และนิกเกิล (Nickel) ที่ทำปฏิกิริยากับไฮดรอกไซด์ (OH^-) ของน้ำเกิดการสร้างรูปเป็นไฮดรอกไซด์ที่ไม่ละลายน้ำ เช่น $\text{Mg}(\text{OH})_2$, $\text{Zn}(\text{OH})_2$, $\text{Ni}(\text{OH})_2$ ซึ่งจะไปอยู่บนด้านแคโทดิกของพื้นผิวโลหะที่ปกป้อง

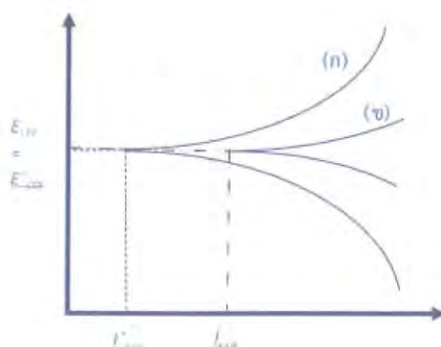
นอกจากนี้ยังสามารถใช้โพลีฟอสเฟต (Polyphosphates) ฟอสโฟเนต (Phosphonates) แทนนิน (Tannins) ลิกนิน (Lignins) และเกลือแคลเซียม (Calcium salts) เป็นสารยับยั้งที่ทำให้เกิดกลไกปฏิกิริยาเดียวกันกับที่กล่าวมาได้

2.2.2.2 สารยับยั้งอินทรีย์ (Organic inhibitors)

สารประกอบอินทรีย์ที่ใช้เป็นสารยับยั้ง บางครั้งจะทำหน้าที่เป็นแคโทดิก แอโนดิกหรือร่วมกัน เป็นสารยับยั้งแคโทดิก-แอโนดิก แต่ยังคงเป็นไปหลักทั่วไปโดยมีกระบวนการของการดูดซับพื้นผิว การสร้างฟิล์มปกป้องตามธรรมชาติ การเกิดขึ้นของโมเลกุลจะมีการปฏิสัมพันธ์ที่แข็งแกร่งกับพื้นผิวโลหะ เพื่อแสดงประสิทธิภาพการยับยั้งที่ดีและเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม สารยับยั้งเหล่านี้จะสร้างฟิล์มไฮโดรโฟบิกปกป้อง (Protective hydrophobic film) ดูดซับโมเลกุลบนพื้นผิวโลหะ ซึ่งจะเป็นอุปสรรคต่อการสลายตัวของโลหะในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ สารยับยั้งนี้จะต้องละลายน้ำหรือกระจายในตัวกลางที่อยู่รอบโลหะได้

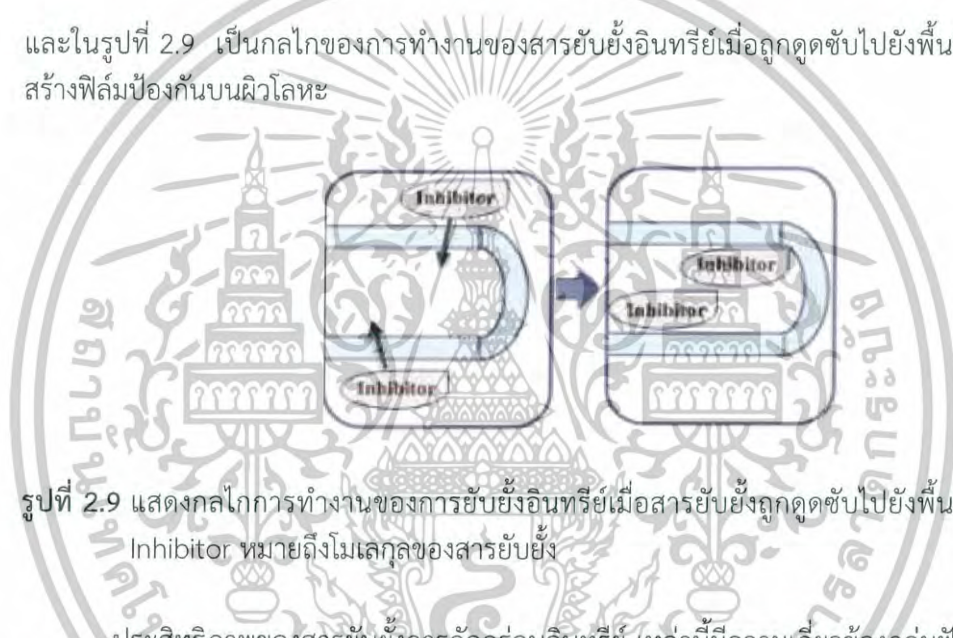
ดังแสดงในรูปที่ 2.8 แสดงให้เห็นเส้นโค้ง ทีโอริก โปเทนชิโอสแตติกโพลาริเซชัน (Theoric potentiostatic polarization curve) ให้เห็นผลกระทบของสารละลายที่มีสารยับยั้งอินทรีย์บนโลหะที่มีพฤติกรรมเป็นแบบแอโนดิกและแคโทดิก หลังจากที่ได้เติมสารยับยั้งการกัดกร่อน ศักย์การกัดกร่อนยังคงเหมือนเดิม แต่ค่ากระแสการกัดกร่อนลดลงจาก I_{cor} ไปเป็น I_{cor}

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.8 แผนภาพโพเทนติโอสแตตติกโพลาริเซชัน แสดงพฤติกรรมทางไฟฟ้าเคมีของโลหะในสารละลายที่มีสารยับยั้งแคโทดิกและแอโนดิก (ก) เทียบกับสารละลายที่ไม่มีสารยับยั้ง (ข)

และในรูปที่ 2.9 เป็นกลไกของการทำงานของสารยับยั้งอินทรีย์เมื่อถูกดูดซับไปยังพื้นผิวโลหะและสร้างฟิล์มป้องกันบนผิวโลหะ



รูปที่ 2.9 แสดงกลไกการทำงานของสารยับยั้งอินทรีย์เมื่อสารยับยั้งถูกดูดซับไปยังพื้นผิวโลหะโดย Inhibitor หมายถึงโมเลกุลของสารยับยั้ง

ประสิทธิภาพของสารยับยั้งการกัดกร่อนอินทรีย์ เหล่านี้มีความเกี่ยวข้องกับกลุ่มฟังก์ชันแบบมีขั้วกับอะตอมกำมะถัน (S) ออกซิเจน (O) และไนโตรเจน (N) ในโมเลกุลสารประกอบเฮเทอโรไซคลิก (Heterocyclic) และไพอิเล็กตรอน (Pi electrons) ทั่วไปจะสามารถแตกไอออนได้ในส่วนที่มีไฮโดรฟิลิก (Hydrophilic) หรือไฮโดรโฟบิก (Hydrophobic) ฟังก์ชันที่มีขั้วมักจะเป็นศูนย์กลางปฏิกิริยาสำหรับดำเนินการกระบวนการดูดซับ สารยับยั้งกรดอินทรีย์ที่มี O N หรือ S จะถูกดูดซับบนพื้นผิวโลหะ เพื่อการปิดกั้นไม่ให้เกิดการกัดกร่อน แม้ว่าสารยับยั้งอินทรีย์ส่วนใหญ่ที่มีประสิทธิภาพเป็นสารประกอบที่มีพันธะ π ซึ่งเป็นพิษทางชีวภาพและมีคุณลักษณะที่เป็นอันตรายต่อสิ่งแวดล้อมในปัจจุบัน เนื่องจากพื้นผิวโลหะที่ครอบคลุมเป็นสัดส่วนกับความเข้มข้นของสารยับยั้ง ดังนั้นความเข้มข้นของสารยับยั้งในสื่อตัวกลางจึงเป็นสิ่งสำคัญ

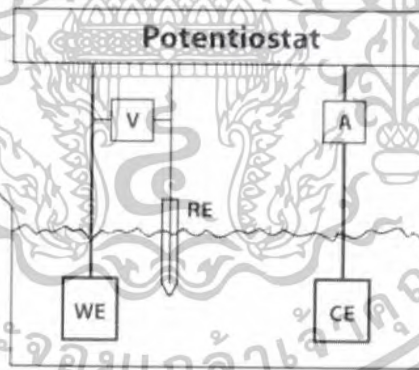
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3 เทคนิคโพเทนซิโอดนามิกโพลาริเซชัน (Potentiodynamicpolarization) [9]

เทคนิคโพเทนซิโอดนามิกโพลาริเซชัน เป็นเทคนิคการวิเคราะห์พฤติกรรมการกัดกร่อนของชิ้นงานโลหะตัวอย่างในสภาพสิ่งแวดล้อมที่กำหนด โดยเฉพาะโลหะหรือโลหะผสมที่มีสมบัติสภาวะกัดกร่อน-สภาวะป้องกัน (Active-passive) หรือฟิล์มบางที่มีสมบัติป้องกัน (Passive film) โดยใช้เซลล์ไฟฟ้าเคมีแบบสามขั้ว ซึ่งประกอบด้วยชิ้นงานโลหะตัวอย่างเป็นขั้วทำงาน (Working electrode, WE) ซึ่งเป็นขั้วไฟฟ้าในระบบเคมีไฟฟ้าที่ใช้ศึกษาการกัดกร่อน อยู่ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่มีสภาวะของความเข้มข้น อุณหภูมิ ปริมาณออกซิเจนในสารละลายตามกำหนด โดยใช้ขั้วอ้างอิงมาตรฐาน (Reference electrode, RE) เพื่อสร้างความเสถียรให้กับการวัดค่าความต่างศักย์ในระบบ จากนั้นต่อวงจรไฟฟ้าให้ครบวงจรด้วยขั้วไฟฟ้าคู่ใช้งานหรือขั้วไฟฟ้าช่วย (Counter electrode, CE) สำหรับขั้วไฟฟ้านี้จะถูกออกแบบให้กระแสที่เกิดขึ้นในวงจรไหลผ่านได้ โดยป้อนศักย์ไฟฟ้าไปทางบวกเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ เพื่อเร่งการกัดกร่อน และติดตามกระแสไฟฟ้าที่เปลี่ยนไปที่ค่าศักย์ไฟฟ้าต่างๆ ทำให้ได้กราฟความสัมพันธ์ระหว่างศักย์ไฟฟ้าและความหนาแน่นกระแส (i) หรือกราฟโพลาริเซชัน (Polarization curve) ซึ่งแสดงพฤติกรรมการกัดกร่อนของโลหะ

2.3.1 การวัดค่าศักย์ไฟฟ้า ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า และอัตราการกัดกร่อน [10]

ศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อน (Corrosion potential, E_{cor}) คือศักย์ไฟฟ้าที่ปฏิกิริยาแอโนดิกทั้งหมดเท่ากับปฏิกิริยาแคโทดิก โดยความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อน (Corrosion current density, i_{cor}) ถือเป็นตัวบ่งชี้อัตราการกัดกร่อน การวัดศักย์ไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าขณะเกิดปฏิกิริยาการกัดกร่อน สามารถหาได้โดยใช้เครื่องโพเทนซิโอสแตท (Potentiostat) ซึ่งมีลักษณะกระบวนการทำงาน ดังแสดงในรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 การวัดกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อนและศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนโดยเครื่องโพเทนซิโอสแตท

ขั้วไฟฟ้า ทำหน้าที่นำไฟฟ้าต่อเชื่อมระหว่างสารละลายอิเล็กโทรไลต์ และเป็นอุปกรณ์สำหรับการวัดสัญญาณทางไฟฟ้า ในการวิเคราะห์การกัดกร่อนของวัสดุจะต้องประกอบด้วยเซลล์ไฟฟ้า 3 ขั้ว ได้แก่ [11]

1. ขั้วไฟฟ้าอ้างอิง (Reference electrode)

ขั้วไฟฟ้าอ้างอิง ทำจากสารละลายอิเล็กโทรไลต์ สามารถรักษาสภาพของศักย์ไฟฟ้าให้คงที่ ศักย์ไฟฟ้าของครึ่งเซลล์ชนิดนี้จะเป็นค่าที่ทราบแน่นอน ไม่เปลี่ยนแปลงตามความเข้มข้นของสารใดๆ ในสารละลายที่ทำการศึกษา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์การเขียนเพื่อการศึกษเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. ขั้วไฟฟ้าช่วย (Counter electrode)

ขั้วไฟฟ้าช่วย ทำหน้าที่เป็นตัวนำไฟฟ้าได้ดี เป็นขั้วที่รับพลังงานไฟฟ้าจากขั้วไฟฟ้าอ้างอิงส่งต่อผ่านสารละลายไปยังขั้วไฟฟ้าใช้งาน เพื่อให้เกิดปฏิกิริยาเคมีกับสารตัวอย่างที่ขั้วไฟฟ้าจุ่มอยู่โดยขั้วไฟฟ้าร่วมนี้ ไม่มีส่วนเกี่ยวข้องกับหรือไม่มีการเปลี่ยนแปลงใดๆ เกิดขึ้น ซึ่งขั้วไฟฟ้าช่วยจะทำมาจากวัสดุที่ไม่ว่องไวต่อปฏิกิริยา เช่น แพลทินัม ทองคำ

3. ขั้วไฟฟ้าทำงาน (Working electrode)

ขั้วไฟฟ้าทำงาน เป็นขั้วไฟฟ้าที่ปฏิกิริยาของสารที่ต้องการวิเคราะห์จะเกิดขึ้น โดยทั่วไปทำด้วยวัสดุที่มีความเสถียรสูง

2.4 เหล็กกล้าไร้สนิมชนิด 304 (304 Stainless steel)

2.4.1 คุณสมบัติของเหล็กกล้าไร้สนิมชนิด 304

ตารางที่ 2.2 แสดงสมบัติทางเคมีของเหล็กกล้าไร้สนิมชนิด 304 [12]

Material : Stainless steel - Grade 304 (UNS S30400)

| Component | C | Cr | Fe | Ni |
|-----------------|------|-------------|-----------|----------|
| %Weight maximum | 0.08 | 18.0 - 20.0 | 66.345-74 | 8.0-10.5 |

ตารางที่ 2.3 แสดงสมบัติทางกายภาพของเหล็กกล้าไร้สนิมชนิด 304 [13]

| Property | Value |
|------------------------|---|
| Density | 8.00 g/cm ³ |
| Melting Point | 1450 °C |
| Modulus of Elasticity | 193 GPa |
| Electrical Resistivity | 0.072 × 10 ⁻⁶ |
| Thermal Conductivity | 16.2 W/m·K |
| Thermal Expansion | 17.2 × 10 ⁻⁶ K ⁻¹ |

2.4.2 การใช้งาน (Application)

เหล็กกล้าไร้สนิมชนิด 304 ถูกนำมาใช้งานอย่างแพร่หลายในทางอุตสาหกรรมช่วยอำนวยความสะดวกในการดำเนินชีวิตประจำวัน ไม่ว่าจะเป็นอุปกรณ์เครื่องใช้ไฟฟ้า อุปกรณ์ในการผลิตผลิตภัณฑ์อาหารและเครื่องดื่ม งานตกแต่งอาคาร รวมไปถึงงานด้านสถาปัตยกรรมเนื่องจากป้องกันการเกิดสนิมได้ สามารถใช้งานที่อุณหภูมิต่ำติดลบในถังเก็บก๊าซเหลว และสามารถใช้งานที่อุณหภูมิสูงสำหรับทำท่อแลกเปลี่ยนอุณหภูมิความร้อน อุปกรณ์ควบคุมหรือกำจัดมลภาวะ งานท่อถึงเก็บภาชนะทนความดันที่ใช้ในอุตสาหกรรมเคมี อุตสาหกรรมเหมืองแร่การผลิตเนื้อเยื่อกระดาษ เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5 พืชที่ใช้ในงานวิจัย

2.5.1 ชิง [14]



รูปที่ 2.11 ชิง

ชื่อวิทยาศาสตร์ : *Zingiber officinale* Roscoe.

ชื่อสามัญ : Ginger

วงศ์ : Zingiberaceae

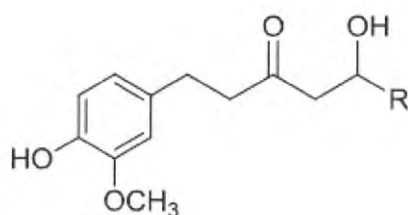
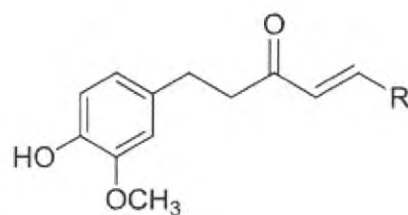
ชิงเป็นพืชล้มลุก มีเหง้าอยู่ใต้ดินสีน้ำตาลอมเหลือง ส่วนเนื้อในจะเป็นสีนวลๆ มีกลิ่นอันเป็นเอกลักษณ์ของชิง ขึ้นโดยการแทงหน่อหรือลำต้นเทียมขึ้นมาบนดิน ส่วนใบเป็นใบเดี่ยวออกแบบเรียงสลับกันเป็นรูปขอบขนาน แผ่นใบสีเขียวเข้ม ขอบเรียบ และดอกนั้นจะออกเป็นช่อสีเหลืองอมเขียวแทงออกมาจากเหง้าใต้ดิน ส่วนผลจะมีลักษณะกลมและแห้ง ช้างในมีเมล็ดมากมาย

2.5.1.1 สรรพคุณ

- เหง้า ช่วยในการกระตุ้นการบีบตัวของกระเพาะอาหารและลำไส้ ช่วยขับเสมหะ แก้โรคบิดช่วยเจริญอากาศธาตุ ตลอดจนขับลม ช่วยแก้ท้องอืด จุกเสียด แน่นท้อง หอบไอ และคลื่นไส้อาเจียนให้รสหวานเผ็ดร้อน
- ต้น ช่วยแก้อาการท้องร่วงหรือจุกเสียด ช่วยขับลมให้ผายเร็ว ให้รสเผ็ดร้อน
- ใบ ช่วยแก้อาการนิ้ว ฟกช้ำ บำรุงกำเดา รวมทั้งช่วยขับปัสสาวะ ฆ่าพยาธิ และแก้โรคเกี่ยวกับตา ให้รสเผ็ดร้อน
- ดอก ช่วยในการย่อยอาหาร แก้อาการปัสสาวะขัด และช่วยแก้โรคอาการประสาทที่ทำให้จิตใจขุ่นมัว ให้รสเผ็ดร้อน
- ราก ช่วยในการเจริญอาหาร แก้แน่น ช่วยขับเสมหะในลำคอ แก้ลม แก้พรรตึก และช่วยบำรุงเสียงให้กังวานไพเราะ ให้รสหวานเผ็ดร้อนและขม
- ผล เป็นยาอายุวัฒนะ ช่วยแก้อาการไข้ บำรุงน้ำนม แก้ไอ เจ็บคอ คอแห้ง ตลอดจนตาฝ้าฟาง ให้รสหวานและเผ็ด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5.1.2 สารสกัดจากขิง [15]

6-Gingerol [R = (CH₂)₄CH₃]8-Gingerol [R = (CH₂)₆CH₃]10-Gingerol [R = (CH₂)₈CH₃]6-Shogaol [R = (CH₂)₄CH₃]

รูปที่ 2.12 โครงสร้างทางเคมีของสารสำคัญที่พบในขิง

2.5.2 ใบกะเพราแดง [16]



รูปที่ 2.13 ใบกะเพราแดง

ชื่อวิทยาศาสตร์ : *Ocimum sanctum* Linn.ชื่อพ้อง : *Ocimum tenuiflorum* Linn.

ชื่อสามัญ : Holy Basil

วงศ์ : Labiata

กะเพราแดง เป็นพืชล้มลุก มีทรงพุ่ม ลำต้นมีลักษณะกลมๆ มีสีเขียวอมแดง โคนเนื้อแข็ง ใบเป็นใบเดี่ยวมีลักษณะทรงรีเล็กๆ ขอบใบเป็นรอยหยักเล็กๆ ใบมีสีเขียวอมม่วงแดง หรือสีน้ำตาลอมแดง ใบด้านบนสีเข้มกว่าใบด้านล่าง มีก้านใบยาวรองรับ มีขนสีขาวเล็กๆปกคลุม รสชาติเผ็ดร้อน มีกลิ่นหอมแรง มีกลิ่นฉุนเฉพาะตัว ดอกออกเป็นช่อ ก้านช่อดอกยาว ตั้งขึ้นคล้ายฉัตร กลีบดอกมีสีขาวแกมม่วงแดง เมื่อผลแก่แห้งแล้วจะแตกออก ภายในจะมีเมล็ดอยู่มากมาย เมล็ดมีลักษณะทรงรีเล็กๆ มีสีดำ

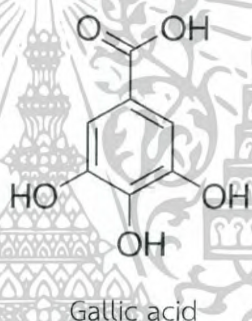
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5.2.1 สรรพคุณ

ตำรายาไทย : ใช้ใบและยอดกระเพราะ ลดอาการท้องอืดเพื่อ ขับลม แก้ปวดท้อง บำรุงธาตุ ขับผายลม แก้อาการจุกเสียดในท้อง ทำให้เรอ แก้อาการท้องผูก แก้กลิ้นไส้อาเจียน ขับเสมหะ ขับเหงื่อ ใช้ทาภายนอกแก้โรคผิวหนัง แก้อาการปวดท้องในเด็กทารก ใช้ใบสดตำให้ละเอียด คั้นเอาแต่น้ำนำมาผสมกับน้ำยาล้างจานแล้วใช้ทาบริเวณ รอบๆสะดือ และทาที่ฝ่าเท้าแก้อาการปวดท้องของเด็กได้ ใช้เป็นยาเพิ่มน้ำนมสตรีหลังคลอด ขับน้ำนม บรรเทาอาการไข้เรื้อรัง แก้ปวดฟัน

ตำรายาไทยระบุว่า “กระเพราะทั้ง 2” (กระเพราขาว-กระเพราแดง) มีรสเผ็ดร้อน เป็นยาบำรุงธาตุ แก้ปวดท้อง ขับผายลม แก้อาการท้องอืด แต่ในทางยานิยมใช้กระเพราแดงมากกว่ากระเพราขาว เพราะมีฤทธิ์ทางยามากกว่าโบราณใช้น้ำคั้นใบกระเพราขาวเพื่อขับเหงื่อ แก้ไข้ ขับเสมหะ ขับลม แก้ปวดท้อง แก้อาการเสียด ทาผิวหนังแก้กลากเกลื้อนและโรคผิวหนังอื่นๆ ใช้หยอดหู แก้อาการปวดหู ใบกระเพราะทำเป็นยาชง ใช้เป็นยาบำรุงธาตุ และขับลมในเด็กก่อน คนไทยสมัยก่อนนิยมกินแกงเลียงใบกระเพราหลังคลอดบุตร เพื่อขับลมและบำรุงธาตุให้เป็นปกติ

2.5.2.2 สารสกัดจากใบกระเพราแดง [17]



รูปที่ 2.14 โครงสร้างทางเคมีของสารสำคัญที่พบในใบกระเพราแดง

2.5.3 ใบมังคุด [18]



รูปที่ 2.15 ใบมังคุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชื่อวิทยาศาสตร์ : *Garcinia mangostana* L.

ชื่อสามัญ : Mangosteen

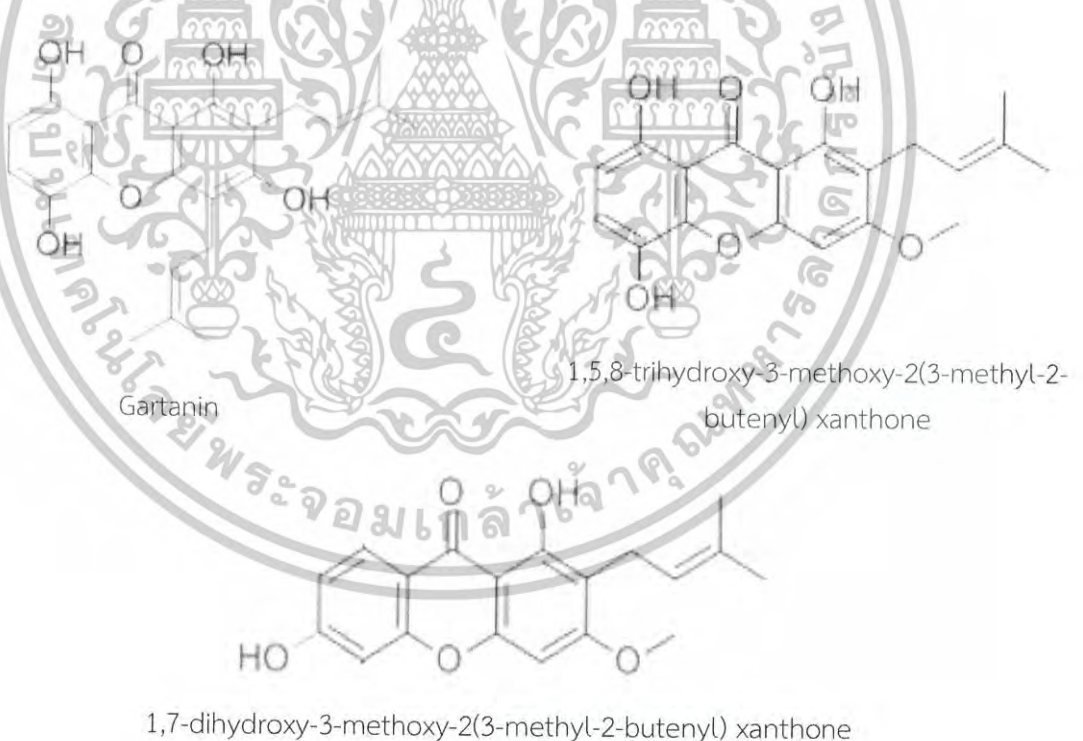
วงศ์ : Guttiferae

ไม้ต้น สูง 10 - 12 เมตร ทุกส่วนมียางสีเหลือง ใบเดี่ยว เรียงตรงข้าม รูปไข่ หรือรูปวงรีแกมขอบขนาน กว้าง 6 - 11 ซม. ยาว 15 - 25 ซม. เนื้อใบหนา และค่อนข้างเหนียว คล้ายหนังหลังใบสีเขียวเข้ม เป็นมัน ท้องใบสีอ่อน ดอกเดี่ยวหรือเป็นคู่ ออกที่ซอกใบ โกล่ปลายกิ่ง สมบูรณ์เพศหรือแยกเพศกลีบเลี้ยงสีเขียวอมเหลือง กลีบดอกสีแดง ฉ่ำน้ำ ผลเป็นผลสด ค่อนข้างกลม

2.5.3.1 สรรพคุณ

- ราก ทำให้ประจำเดือนมาตามปกติ รักษาโรคบิดมูกเลือด
- ต้น ใบ และดอก รักษาโรคบิดมูกเลือด
- เปลือกต้น ชะล้างบาดแผล รักษาแผล
- ผลดิบ สมานแผล แก้บาดแผล แก้ท้องร่วง แก้บิด
- เปลือกผล แก้ท้องร่วง สมานแผล แก้ท้องเสีย
- เนื้อในผล บำรุงกำลัง บำรุงร่างกาย

2.5.3.2 สารสกัดจากใบมังคุด [19]



รูปที่ 2.16 โครงสร้างทางเคมีของสารสำคัญที่พบในใบมังคุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.6 การสกัด (Extraction) [20]

การสกัดด้วยตัวทำละลาย (Solvent extraction) เป็นหนึ่งวิธีที่ใช้สกัดสารสำคัญจากพืชสมุนไพร โดยทั่วไปจะต้องประกอบเป็นของผสมหรือสารสกัดอย่างหยาบ (Crude extract)

2.6.1 การเลือกตัวทำละลาย

การเลือกตัวทำละลายให้เหมาะสมกับชนิดของสารที่ต้องการสกัด โดยตัวทำละลายดังกล่าวควรมีคุณสมบัติ ดังนี้

1. มีความสามารถในการละลายสารสำคัญมากที่สุด
2. มีความคงตัวดี หาง่าย ราคาถูก และไม่เป็นพิษต่อร่างกาย
3. ไม่ระเหยง่ายหรือยากเกินไป มีจุดเดือดต่ำ และแยกตัวออกจากสารที่ต้องการสกัดได้ง่าย

4. สภาพของพืชสมุนไพรที่ทำการสกัด

2.6.2 วิธีการสกัด

1. มาเซอเรชัน (Maceration)

เป็นวิธีการสกัดสารสำคัญจากพืชโดยวิธีการหมักสมุนไพรกับตัวทำละลายจนกระทั่งเนื้อเยื่อของสมุนไพรอ่อนนุ่ม และตัวทำละลายสามารถแทรกซึมเข้าไปละลายองค์ประกอบภายในผงสมุนไพรออกมาได้

2. เพอร์โคเลชัน (Percolation)

เป็นวิธีการสกัดสารสำคัญจากพืชสมุนไพรโดยการปล่อยให้ตัวทำละลายไหลผ่านผงสมุนไพรอย่างช้าๆพร้อมกับละลายเอาองค์ประกอบออกจากผงสมุนไพรออกมา โดยใช้เครื่องมือที่เรียกว่า เพอร์โคเลเตอร์ (Percolator)

3. การสกัดแบบต่อเนื่อง (Continuous extraction)

เป็นวิธีการสกัดสารสำคัญจากสมุนไพรทำนองเดียวกันกับเพอร์โคเลชัน แต่วิธีนี้ต้องใช้ความร้อนเข้าช่วย และใช้ซอกซ์เลตเอกซ์แทรกเตอร์ (Soxhlet extractor) ซึ่งเป็นระบบปิด โดยใช้ตัวทำละลายซึ่งมีจุดเดือดต่ำ เมื่อได้รับความร้อนจากฮีตติ้งแมนเทิล (Heating mantle) ตัวทำละลายในภาชนะระเหยขึ้นไปแล้วกลั่นตัวลงในทิมเบอร์ (Thimble) ซึ่งบรรจุสมุนไพรไว้ ตัวทำละลายจะผ่านผงสมุนไพรซ้ำแล้วซ้ำอีกไปเรื่อยๆ จนกระทั่งการสกัดสมบูรณ์

2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Kadapparambil S. *et al.* [1] ได้ทำการศึกษาสารสกัดจากใบสักเพื่อใช้เป็นสารยับยั้งการกักกร่อนของเหล็กกล้าไร้สนิมชนิด 304 ในสารละลายกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 2 โมลาร์ โดยการนำผงใบสักบดละเอียด 100 กรัมมาสกัดด้วยเอทานอลปริมาตร 500 มิลลิลิตร เป็นเวลา 24 ชั่วโมง แล้วนำไปรีฟลักซ์ 5 ชั่วโมง จากนั้นนำมารอง และนำสารสกัดมาระเหยตัวทำละลายออกด้วยเครื่องกลั่นระเหยสารแบบหมุน (Rotary evaporator) จากการศึกษา พบว่าสารสกัดจากใบสักสามารถยับยั้งการกักกร่อนได้ และเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารสกัดจากใบสัก ก็ส่งผลให้การยับยั้งการกักกร่อนมากขึ้น โดยที่ความเข้มข้น 1 กรัมต่อลิตรของสารสกัดจากใบสัก จะให้ผลประสิทธิภาพในการยับยั้งการกักกร่อนของระบบนี้สูงที่สุดถึง 71.7% และจากกราฟโพลาริเซชัน พบว่าสารสกัดจากใบสักมีสมบัติเป็นสารยับยั้งชนิดผสม (Mixed-type inhibitor)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Saxena A. *et al.* [2] ได้ศึกษาการยับยั้งการกัดกร่อนและความสามารถในการดูดซับสารสกัดจากเครื่องเขาดำของเหล็กกล้าในสารละลายกรดซัลฟิวริกเข้มข้น 0.5 โมลาร์ สกัดโดยการรีฟลักซ์ด้วยเอทานอล 450 มิลลิลิตร ที่อุณหภูมิ 75 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 72 ชั่วโมง และได้ทำการทดสอบสารสกัดที่ความเข้มข้น 100 200 300 400 และ 500 มิลลิกรัมต่อลิตรตามลำดับ โดยใช้เทคนิคโพเทนชิโอดีนามิกส์โพลาริเซชัน จัดเป็นสารยับยั้งชนิดผสม (Mixed-type inhibitor) สารสกัดจากเครื่องเขาดำมี methoxy-3,4,5,7-tetrahydroxy flavone เป็นองค์ประกอบ ซึ่งช่วยลดอัตราการกัดกร่อนของเหล็กกล้าได้ พบว่าสารสกัดที่ความเข้มข้น 500 มิลลิกรัมต่อลิตร มีประสิทธิภาพในการยับยั้งการกัดกร่อนมากที่สุด โดยมีผลการคำนวณประมาณค่าทางไฟฟ้าเคมีสูงถึง 95.47% และเมื่อความเข้มข้นของสารยับยั้งเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ประสิทธิภาพเพิ่มขึ้นตามไปด้วย สำหรับการวิเคราะห์พื้นผิวของโลหะใช้หลักการของการดูดซับ ซึ่งเกี่ยวข้องกับ Langmuir adsorption isotherm, Scanning Electron Microscopy (SEM) และ Atomic Force Microscope (AFM)

Gadow H.S. and Motawea M.M. [21] ได้ทำการศึกษาสารสกัดจากขิงเพื่อยับยั้งการกัดกร่อนของเหล็กกล้าในสารละลายกรดไฮโดรคลอริก 1.0 โมลาร์ ที่อุณหภูมิแตกต่างกัน จากการวิเคราะห์ผลพบว่า เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารสกัดจากขิงและลดอุณหภูมิ ส่งผลให้ประสิทธิภาพในการยับยั้งการกัดกร่อนเพิ่มขึ้น โดยที่ความเข้มข้น 200 ppm อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส สารสกัดจากขิงมีประสิทธิภาพในการยับยั้งการกัดกร่อนสูงถึง 94 % ในทางอุณหพลศาสตร์บ่งบอกว่ากระบวนการที่เกิดขึ้นคือการได้จากอุณหภูมิ จากเทคนิคโพเทนชิโอดีนามิกส์โพลาริเซชันแสดงให้เห็นว่าเป็นสารยับยั้งแบบผสม (Mixed-type inhibitor) ซึ่งถูกดูดซับบนพื้นผิวของเหล็กกล้า สอดคล้องกับ Langmuir adsorption isotherm และได้ทำการพิสูจน์เอกลักษณ์ด้วยเทคนิค Fourier Transform Infrared Spectrometer (FT-IR) และ Ultra violet-Visible Spectrophotometer (UV-VIS)

Ho S.-C. *et al.* [15] ศึกษาความสามารถในการต้านการอักเสบของระบบประสาทจากสารสกัดขิงโดยสกัดขิงด้วยวิธีการแช่เปื่อย (Maceration) ใช้เอทานอลร้อยละ 90 เป็นตัวทำละลาย แล้วระเหยตัวทำละลายออกด้วยเครื่องกลั่นระเหยสารแบบหมุน (Rotary evaporator) ใช้เทคนิค High Performance Liquid Chromatography (HPLC) และ Liquid Chromatograph-Mass Spectrometer (LC-MS) เพื่อทำปริมาณวิเคราะห์และวิเคราะห์องค์ประกอบ พบว่าในสารสกัดจากขิงมีสารสำคัญ คือ 6-Gingerol ซึ่งเป็นสารประกอบที่พบมากที่สุดตามด้วย 10-Gingerol จากผลการทดสอบฤทธิ์ต้านการอักเสบ พบว่า 10-Gingerol มีจำนวนของหมู่อัลคิลที่มากกว่า 6-Gingerol ส่งผลให้มีประสิทธิภาพในการต้านการอักเสบของระบบประสาทดีกว่า

ปารมี สงชัย และวรางคณา สมพงษ์ [17] ได้ทำการวิจัยโดยมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาปริมาณสารประกอบฟีนอลิก และปริมาณแทนนินของสารสกัดจากใบพีช 10 ชนิด ได้แก่ กุยช่าย บล็อกโคลี บัวบก ย่านาง ตำลึง ชมวง ยอ โหระพา กะเพราแดง และผักแพว ได้ทำการสกัดพีชโดยใช้วิธีการแช่เปื่อย (Maceration) ด้วยเอทานอลร้อยละ 70 พบว่าปริมาณสารประกอบฟีนอลิก และปริมาณแทนนินสูงที่สุด คือ ผักแพว 197.86 ± 3.15 และ 171.77 ± 3.30 มิลลิกรัม gallic acid/กรัม ตัวอย่างแห้ง ตามลำดับ รองลงมา ได้แก่ กะเพราแดง 119.47 ± 18.97 และ 98.74 ± 18.68 มิลลิกรัม gallic acid/กรัมตัวอย่างแห้ง ตามลำดับ เมื่อเติมสารสกัดจากใบพีชลงในแอคโตไมโอซินธรรมชาติ (Natural actomyosin, NAM) ที่สกัดจากซูริมิปลาถาซี (Mulloidichthys martinicus) พบว่าการเติมสารสกัดจากผักแพวที่ถูกออกซิไดซ์ลงใน NAM จากซูริมิปลาถาซีมีประสิทธิภาพในการเชื่อม

ประสานโปรตีนเส้นใยกล้ามเนื้อในระดับความเข้มข้นที่น้อยกว่าการเติมสารสกัดจากกะเพราแดง และ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการรักษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการศึกษาปริมาณของสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดในกะเพราแดงที่ใช้น้ำในการสกัด มีปริมาณของสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดอยู่ในช่วง 38.48-75.26 มิลลิกรัม gallic acid/กรัมตัวอย่างแห้ง ซึ่งเป็นปริมาณที่ค่อนข้างน้อย เหตุนี้จึงได้เลือกเอทานอลร้อยละ 70 มาทำการสกัดกะเพราแดง และที่เลือกใช้กะเพราแดง เนื่องจากหาซื้อได้ง่ายกว่าผักแพว ราคาถูกและพบได้ทั่วไปตามท้องตลาด

แจ่มจันทร์ เพชรศิริ และคณะ [19] ศึกษาผลของสารฟลาโวนอยด์ที่มีต่อการแปลงเพศปลานิล โดยใช้สารสกัดหยาบจากใบมังคุดด้วยเอทานอลเข้มข้นร้อยละ 80 แล้วนำสารสกัดมาระเหยตัวทำละลายออกด้วยเครื่องกลั่นระเหยสารแบบหมุน (Rotary evaporator) จะได้สารสกัดหยาบที่มีลักษณะหนืด จากนั้นทำการศึกษาโครงสร้างทางเคมีโดยวิธี Ultra violet – Visible Spectrophotometer (UV-VIS) และ Fourier Transform Infrared Spectrometer (FT-IR) ซึ่งสารสกัดจากใบมังคุดมีโครงสร้างเป็นสารประกอบแซนโทน มีฤทธิ์คล้ายฮอร์โมนพลาสเตอร์อยด์ และจากการนำสารสกัดมาผสมในอาหารที่ระดับความเข้มข้น 0 60 120 150 และ 200 มิลลิกรัมต่ออาหาร 1 กิโลกรัม ให้ปลากินตั้งแต่วันที่ปลาเริ่มกินอาหาร เป็นระยะเวลา 21 และ 30 วัน พบว่าปลานิลที่ได้รับสารสกัดจากใบมังคุดที่ระดับความเข้มข้น 150 และ 200 มิลลิกรัมต่ออาหาร 1 กิโลกรัม มีอัตราส่วนเพศผู้ต่อเพศเมียที่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติโดยมีเพศผู้มากกว่าเพศเมีย



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

3.1 พืชที่ใช้ในงานวิจัย

- 3.1.1 จิง
- 3.1.2 ใบกะเพราแดง
- 3.1.3 ใบมังคุด

3.2 สารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย

1. เอทานอลเกรดวิเคราะห์ 95%
2. เอทานอลบริสุทธิ์ (Absolute ethanol)
3. กรดไฮโดรคลอริกเกรดวิเคราะห์ความเข้มข้น 37% (w/w)
4. กรดไนตริกเกรดวิเคราะห์ความเข้มข้น 65% (w/w)
5. น้ำปราศจากไอออน (Deionized water)
6. น้ำกลั่น
7. ก๊าซไนโตรเจน (บริษัท ยูไนเต็อินดัสเตรียลแก๊ส จำกัด)

3.3 วัสดุ อุปกรณ์ และเครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย

3.3.1 สำหรับการสกัดขิง

1. ถุงซิปล็อค
2. ครก
3. เครื่องชั่งน้ำหนัก 4 ตำแหน่ง
4. เดซิเคเตอร์
5. ชุดเครื่องแก้ว
6. แท่งแก้ว และชิ้นคอนสาร
7. ชุดเครื่องกรองแบบลดความดัน
8. กระดาษกรอง Whatman เบอร์ 2
9. เครื่องกลั่นระเหยสารแบบหมุน (Rotary evaporator)
10. ถาดอลูมิเนียม
11. ตู้อบ
12. พาราฟิล์ม
13. ขวดสีชา
14. เครื่องเขย่า

3.3.2 สำหรับการสกัดใบกะเพราแดง

1. ถุงซิปล็อค
2. ครก
3. เครื่องชั่งน้ำหนัก 4 ตำแหน่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. เดซิเคเตอร์
5. ชุดเครื่องแก้ว
6. แท่งแก้ว และช้อนคนสาร
7. ชุดเครื่องกรองแบบลดความดัน
8. กระดาษกรอง Whatman เบอร์ 1
9. เครื่องกลั่นระเหยสารแบบหมุน (Rotary evaporator)
10. ถาดอลูมิเนียม
11. ตู้อบ
12. พาราฟิล์ม
13. ขวดสีชา
14. เครื่องเขย่า

3.3.3 สำหรับการสกัดใบมังคุด

1. มีด เขียง และถุงซิปล็อค
2. ครก
3. เครื่องชั่งน้ำหนัก 4 ตำแหน่ง
4. เดซิเคเตอร์
5. ชุดเครื่องแก้ว
6. แท่งแก้วและช้อนคนสาร
7. ชุดเครื่องกรองแบบลดความดัน
8. กระดาษกรอง Whatman เบอร์ 1
9. เครื่องกลั่นระเหยสารแบบหมุน (Rotary evaporator)
10. ถาดอลูมิเนียม
11. ตู้อบ
12. พาราฟิล์ม
13. ขวดสีชา

3.3.4 สำหรับทำเทคนิคโพเทนชิโอไดนามิกโพลาริเซชัน

1. เหล็กกล้าไร้สนิมชนิด 304
2. กระดาษทรายขัดโลหะ เบอร์ 100 280 600 800 1000 1500 และ 2000
3. ชุดทดสอบการกัดกร่อน
4. โลหะแพลทินัม
5. ขั้วไฟฟ้าอ้างอิงชนิดคาลอเมลอิ่มตัว (Saturated calomel reference electrode, SCE)
6. คีม สำหรับจับตัวอย่าง
7. ไดรี้เป่าแห้ง
8. เครื่องชั่งน้ำหนัก 4 ตำแหน่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

9. ชุดเครื่องแก้ว
10. เครื่องล้างอัลตราโซนิก (Ultrasonic cleaner)
11. เครื่องปั่นกวนสารละลายด้วยแท่งแม่เหล็ก (Magnetic stirrer)
12. เครื่องโพเทนชิโอสแตท (Potentiostat)
13. เครื่องวัดค่าพีเอช (pH meter)

3.4 วิธีการดำเนินงานวิจัย

3.4.1 การเตรียมและการสกัดพืช

3.4.1.1 ชิง

1. การเตรียม

นำแห้งชิงสดมาล้างด้วยน้ำให้สะอาด นำมาหั่นให้เป็นชิ้นเล็กๆ อบให้แห้งในตู้อบที่ 40 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง หลังจากนั้นนำไปบดละเอียด บรรจุใส่ในถุงซิปล็อค และเก็บไว้ในเดซิเคเตอร์ ก่อนนำไปทดลองในขั้นตอนต่อไป

2. การสกัด

ทำการสกัดชิง โดยดัดแปลงจากวิธีของ Ho S.-C. et al. [15] ชั่งชิงที่บดไว้จำนวน 100 กรัม แช่ชิงในเอทานอลร้อยละ 90 ปริมาตร 1 ลิตร จากนั้นนำไปแช่ให้เข้ากันด้วยเครื่องเขย่าที่ความเร็ว 150 รอบ/นาที เป็นเวลา 20 ชั่วโมง ณ อุณหภูมิห้อง นำไปกรองด้วยเครื่องกรองแบบลดความดัน โดยใช้กระดาษกรอง Whatman เบอร์ 2 จากนั้นนำสารละลายที่ได้ไประเหยเอทานอลออกด้วยเครื่องกลั่นระเหยสารแบบหมุน จะได้สารสกัดเข้มข้นเพื่อใช้ในการทดสอบการยับยั้งการกักกร่อนต่อไป

3.4.1.2 ใบกะเพราแดง

1. การเตรียม

นำกะเพราแดงสดล้างด้วยน้ำให้สะอาด ผึ่งให้แห้งและเด็ดส่วนที่ใช้ นำไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 8 ชั่วโมง จากนั้นนำกะเพราแดงที่ผ่านการอบแห้งไปบดให้เป็นผงละเอียด บรรจุใส่ในถุงซิปล็อคและเก็บไว้ในเดซิเคเตอร์ ก่อนนำไปทดลองในขั้นตอนต่อไป

2. การสกัด

ทำการสกัดใบกะเพราแดง โดยดัดแปลงจากวิธีของปารมี สงชัย และวรางคณา สมพงษ์ [17] โดยผสมผงใบกะเพราแดงปริมาณ 56.80 กรัม กับเอทานอลเข้มข้นร้อยละ 70 ปริมาตร 250 มิลลิลิตร จากนั้นนำไปแช่ให้เข้ากันด้วยเครื่องเขย่าที่ความเร็ว 200 รอบ/นาที เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ณ อุณหภูมิห้อง จากนั้นนำไปกรองด้วยเครื่องกรองแบบลดความดัน โดยใช้กระดาษกรอง Whatman เบอร์ 1 จากนั้นนำสารละลายที่ได้ไประเหยเอทานอลออกด้วยเครื่องกลั่นระเหยสารแบบหมุน จะได้สารสกัดเข้มข้นเพื่อใช้ในการทดสอบการยับยั้งการกักกร่อนต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4.1.3 ไบมังคุด

1. การเตรียม

นำไบมังคุดมาทำความสะอาดและนำมาหั่นเป็นชิ้นเล็กๆ อบให้แห้งในตู้อบที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง หลังจากนั้นนำไปบดละเอียด บรรจุใส่ในถุงซิปล็อค และเก็บไว้ในเดซิเคเตอร์ ก่อนนำไปทดสอบในขั้นตอนต่อไป

2. การสกัด

ทำการสกัดไบมังคุด โดยตัดแปลงจากวิธีของแจ่มจันทร์ เพชรศิริ และคณะ [19] โดยชั่งไบมังคุดแห้งบดละเอียดมาสกัดด้วยเอทานอลเข้มข้นร้อยละ 80 ปริมาตรท่วมระดับพืชตัวอย่าง แล้วแช่ทิ้งไว้เป็นเวลา 7 วัน ทำการเขย่าทุกวัน จากนั้นนำไปกรองด้วยเครื่องกรองแบบลดความดัน โดยใช้กระดาษกรอง Whatman เบอร์ 1 จากนั้นนำสารละลายที่ได้ไประเหยเอทานอลออกด้วยเครื่องกลั่นระเหยสารแบบหมุน จะได้สารสกัดเข้มข้นเพื่อใช้ในการทดสอบการยับยั้งการกัดกร่อนต่อไป

3.4.2 การทดสอบการกัดกร่อน

3.4.2.1 การเตรียมกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 0.05 โมลาร์

ตวงกรดไฮโดรคลอริกเกรดวิเคราะห์ความเข้มข้น 37% (w/w) ปริมาตร 4.2 มิลลิลิตร ค่อยๆเทลงในน้ำปราศจากไอออน จากนั้นปรับปริมาตรให้เป็น 1000 มิลลิลิตร

3.4.2.2 การเตรียมกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 0.05 โมลาร์ กับสารสกัดขิง ใบกะเพราแดง และไบมังคุด ที่ความเข้มข้น 10 100 500 และ 1000 mg/L

ชั่งสารสกัด 10 100 500 และ 1000 มิลลิกรัม มาละลายน้ำโดยใช้เครื่องปั่นกวน สารละลายด้วยแท่งแม่เหล็กจนสารละลายกลายเป็นเนื้อเดียวกัน นำกรดไฮโดรคลอริกเกรดวิเคราะห์ความเข้มข้น 37% (w/w) ปริมาตร 4.2 มิลลิลิตร เทลงในสารละลายของสารสกัด แล้วปรับปริมาตรให้เป็น 1000 มิลลิลิตร

3.4.2.3 การเตรียมกรดไนตริกเข้มข้น 6 นอร์มอล สำหรับการทำให้ Passivation

ตวงกรดไนตริกเกรดวิเคราะห์ความเข้มข้น 69% (w/w) ปริมาตร 39.0 มิลลิลิตร เทลงในน้ำปราศจากไอออน จากนั้นปรับปริมาตรให้เป็น 100 มิลลิลิตร

3.4.2.4 การเตรียมชิ้นงานตัวอย่าง

ขัดชิ้นงานด้วยกระดาษทรายเบอร์ 100 280 600 800 1500 และ 2000 โดยใช้ น้ำช่วยในการขัดจนชิ้นงานขึ้นเงา จากนั้นทำความสะอาดชิ้นงานด้วยน้ำปราศจากไอออน แล้วนำไปแช่ในเอทานอลบริสุทธิ์ ในเครื่องล้างอัลตราโซนิกเป็นเวลา 2 นาที เป่าชิ้นงานให้แห้ง แล้วทำ Passivation โดยการนำชิ้นงานไปแช่ในกรดไนตริกเข้มข้น 6 นอร์มอล เป็นเวลา 30 วินาที แล้วนำไปแช่ในน้ำปราศจากไอออน เป็นเวลา 60 วินาที แล้วตั้งทิ้งไว้ 20 นาที ก่อนนำไปทดสอบการกัดกร่อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4.2.5 การทดสอบการกัดกร่อนโดยใช้เทคนิคโพเทนชิโอดีนาไมกโพลาริเซชัน

1. ล้างชุดการทดสอบการกัดกร่อนด้วยน้ำปราศจากไอออน แล้วผึ่งให้แห้ง
2. เปิดเครื่องคอมพิวเตอร์และเครื่องโพเทนชิโอสเตท แล้วเปิดโปรแกรมควบคุมใช้อัตราการสแกนศักย์ไฟฟ้า 600 มิลลิโวลต์ต่อชั่วโมง กำหนดค่าศักย์ไฟฟ้าในช่วง -300 ถึง 1700 มิลลิโวลต์ เทียบกับค่าศักย์ไฟฟ้าวงจรเปิด (Open circuit potential, OCP)
3. จัดอุปกรณ์ชุดทดสอบการกัดกร่อน แล้วนำสารละลายไฮโดรคลอริกเข้มข้น 0.05 โมลาร์ กับสารสกัด 10 100 500 และ 1000 mg/L ที่เตรียมไว้มาใส่ก๊าซออกซิเจนด้วยก๊าซไนโตรเจน เป็นเวลา 30 นาที
4. ใส่ชิ้นงานตัวอย่าง ขั้วแพลทินัม และขั้วอ้างอิงในชุดทดสอบการกัดกร่อน แล้วต่อขั้วไฟฟ้าจากเครื่องโพเทนชิโอสเตทเข้ากับชุดทดสอบการกัดกร่อน
5. กัดเริ่มการทำงานของโปรแกรมทันที เมื่อทำการวัดค่ากระแสไฟฟ้าจากการกัดกร่อนเสร็จจึงทำการบันทึกข้อมูล

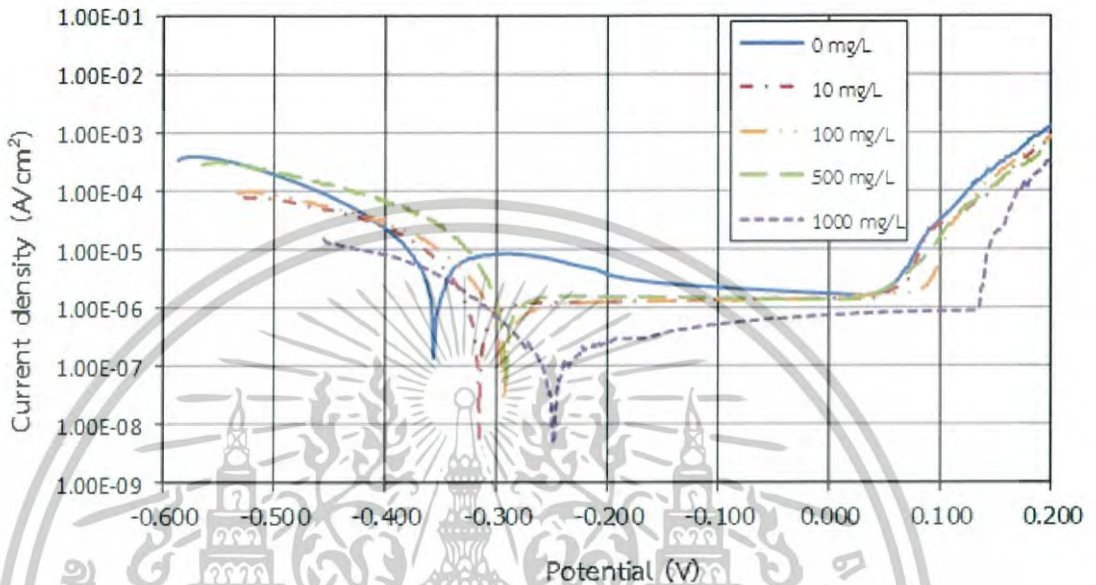


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ผลการวิจัยและการอภิปรายผล

4.1 การยับยั้งการกัดกร่อนของเหล็กกล้าไร้สนิมชนิด 304 ด้วยสารสกัดจากขิง



รูปที่ 4.1 กราฟโพลาริเซชันของเหล็กกล้าไร้สนิมชนิด 304 ในกรดไฮโดรคลอริก 0.05 โมลาร์ที่ไม่เติมและเติมสารสกัดจากขิงที่ความเข้มข้น 10 100 500 และ 1000 mg/L

จากกราฟโพลาริเซชันดังแสดงในรูปที่ 4.1 สามารถหาค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อน (Corrosion potential, E_{corr}) ค่าความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อน (Corrosion current density, i_{corr}) ค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนแบบหลุม (Pitting potential, E_{pit}) ค่าประสิทธิภาพการยับยั้งการกัดกร่อน (Inhibition efficiency, IE%) และค่าความต้านทานการถูกโพลาริเซชัน (Polarization resistance, R_p) โดยค่า IE% และ R_p สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 4.1 และ 4.2 ตามลำดับ [1]

$$IE\% = \frac{i_{corr}^b - i_{corr}^{inh}}{i_{corr}^b} \times 100 \quad (4.1)$$

เมื่อ i_{corr}^b คือ ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อนที่ไม่เติมสารยับยั้งการกัดกร่อน

i_{corr}^{inh} คือ ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อนที่เติมสารยับยั้งการกัดกร่อน

$$R_p = \frac{b_a b_c}{2.303(b_a + b_c)i_{corr}} \quad (4.2)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ b_a คือ ค่าความชันของฝั่งแอโนดิก (Anodic Tafel slopes)

b_c คือ ค่าความชันของฝั่งแคโทดิก (Cathodic Tafel slopes)

i_{corr} คือ ค่าความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อน (Corrosion current density)

ตารางที่ 4.1 ผลการทดสอบการยับยั้งการกัดกร่อนของเหล็กกล้าไร้สนิมชนิด 304 ในกรดไฮโดรคลอริก 0.05 โมลาร์ เมื่อเติมสารสกัดจากขิงที่ความเข้มข้นต่างๆ

| ความเข้มข้นของสารสกัด (mg/L) | E_{corr} (V_{SCE}) | i_{corr} ($\mu A/cm^2$) | b_c (mV/dec) | b_a (mV/dec) | E_{pit} (V_{SCE}) | R_p ($k\Omega \cdot cm^2$) | IE (%) |
|------------------------------|--------------------------|-----------------------------|----------------|----------------|-------------------------|--------------------------------|--------|
| 0 | -0.356 | 6.19 | 73.52 | 331.84 | 0.040 | 4.22 | - |
| 10 | -0.315 | 1.20 | 72.67 | 198.82 | 0.045 | 19.26 | 80.6 |
| 100 | -0.293 | 0.96 | 54.45 | 215.40 | 0.081 | 19.72 | 84.5 |
| 500 | -0.291 | 0.98 | 55.20 | 242.32 | 0.039 | 19.88 | 84.1 |
| 1000 | -0.248 | 0.11 | 66.59 | 272.59 | 0.135 | 209.35 | 98.2 |

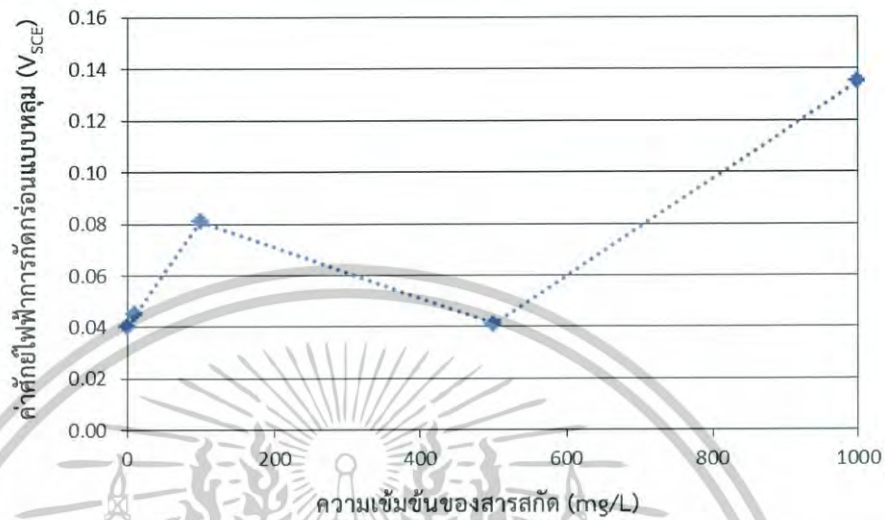
จากตารางที่ 4.1 แสดงผลจากการทดสอบการยับยั้งการกัดกร่อนของเหล็กกล้าไร้สนิมชนิด 304 ในกรดไฮโดรคลอริก 0.05 โมลาร์ เมื่อไม่เติมและเติมสารสกัดจากขิงที่ความเข้มข้นต่างๆ ซึ่งสามารถอธิบายได้เป็น 3 ส่วน ดังนี้

1. จากการวิเคราะห์ค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อน (Corrosion potential, E_{corr}) พบว่าเมื่อเติมสารสกัดจากขิงที่ความเข้มข้น 0 10 100 500 และ 1000 mg/L ค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนมีค่าเท่ากับ -0.356 -0.315 -0.293 -0.291 และ -0.248 V_{SCE} ตามลำดับ ซึ่งมีแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงเพิ่มมากขึ้น โดยค่าศักย์ไฟฟ้าจะเลื่อนไปในทิศทางที่เป็นบวกมากขึ้น แสดงให้เห็นถึงความสามารถในการออกซิไดซ์ (Oxidizing power) ของสารละลายมีค่าเพิ่มขึ้น จากรูปที่ 4.1 เห็นว่าค่าความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อนของสารละลายที่เติมสารสกัดจากขิงในด้านแอโนดิกลดลงอย่างเห็นได้ชัดเมื่อเทียบกับสารละลายที่ไม่เติมสารสกัดจากขิง ซึ่งเป็นลักษณะของการกัดกร่อนแบบแอโนดิก (Anodic inhibitor) โดยสารยับยั้งที่มาจากพืชธรรมชาตินั้นมักจะเป็นสารประกอบอินทรีย์ที่มีโครงสร้างที่ประกอบด้วยวงอะโรมาติก (Aromatic) และเฮเทอโรอะตอม (Heteroatom) เช่น O N หรือ S ซึ่งเป็นอะตอมที่มีอิเล็กตรอนคู่อิสระและสามารถที่จะถูกดูดซับบนพื้นผิวโลหะได้

2. จากการประมาณค่านอกช่วงทาเฟิล (Tafel extrapolation) พบว่าเมื่อเติมสารสกัดจากขิงที่ความเข้มข้น 0 10 100 500 และ 1000 mg/L ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อน (Corrosion current density, i_{corr}) มีค่าเท่ากับ 6.19 1.20 0.96 0.98 และ 0.11 $\mu A/cm^2$ ตามลำดับ ซึ่งมีแนวโน้มลดลง บ่งบอกถึงอัตราการกัดกร่อนที่มีค่าลดลงไปด้วย จากตารางที่ 4.1 ค่าความชันฝั่งแอโนดิก (Anodic Tafel slopes, b_a) พบว่ามีการเปลี่ยนแปลงอย่างเห็นได้ชัด แสดงให้เห็นถึงการดูดซับของสารยับยั้งบนพื้นผิวโลหะหรือเกิดการยับยั้งปฏิกิริยาออกซิเดชัน สำหรับค่าความต้านทานการถูกโพลาไรซ์ (Polarization resistance, R_p) จากการทดลอง พบว่าเมื่อเพิ่มความเข้มข้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับงานเพื่อการวิจัยเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่หรือใช้ประโยชน์ในการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของสารสกัดจากขิง ค่า R_p มีแนวโน้มมากขึ้น แสดงว่ามีความต้านทานที่ดีขึ้นต่อการเพิ่มความสามารถในการออกซิไดซ์ของสารละลาย และยังเป็นไปในทิศทางเดียวกับค่า $IE\%$ จึงสรุปได้ว่าสารสกัดจากขิงนั้นสามารถลดการกัดกร่อนของเหล็กกล้าไร้สนิมชนิด 304 ได้

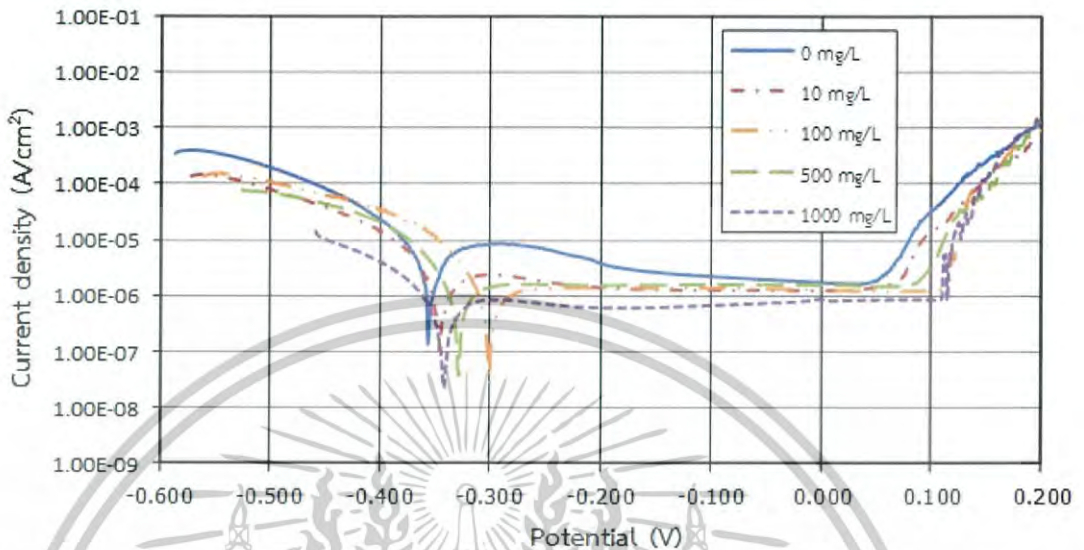


รูปที่ 4.2 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารสกัดจากขิงกับค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนแบบหลุม

3. จากการทดลองหาค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนแบบหลุม (Pitting corrosion, E_{pit}) แสดงดังในรูปที่ 4.2 พบว่าเมื่อไม่เติมสารสกัดจากขิงลงในสารละลายกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 0.05 โมลาร์ มีค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนแบบหลุมเท่ากับ 0.040 V_{SCE} และเมื่อเติมสารสกัดจากขิงที่มีความเข้มข้น 10 100 500 และ 1000 mg/L ค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนแบบหลุมมีค่าเท่ากับ 0.045 0.081 0.041 และ 0.135 V_{SCE} ตามลำดับ เห็นได้ว่าเมื่อเติมสารสกัดจากขิงค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนแบบหลุมมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นไปในทิศทางที่เป็นบวกมากขึ้นเมื่อเทียบกับสารละลายกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 0.05 โมลาร์ที่ไม่เติมสารสกัดจากขิง แสดงให้เห็นถึงการสร้างชั้นป้องกันการกัดกร่อนของเหล็กกล้าไร้สนิม (Passive layer) ดีขึ้นด้วย เนื่องจากสารสกัดจากขิงมีโครงสร้างที่ประกอบด้วยเฮเทอร์โรอะตอมที่มีอิเล็กตรอนคู่อิสระอยู่บริเวณอะตอมของออกซิเจน ซึ่งสามารถถูกดูดซับบนพื้นผิวเหล็กกล้าไร้สนิมชนิด 304 ได้ ทำให้เกิดเป็นชั้นป้องกันอยู่บนพื้นผิวโลหะ จึงป้องกันไม่ให้สารละลายที่มีฤทธิ์กัดกร่อนสัมผัสกับพื้นผิวโลหะได้โดยตรง การกัดกร่อนแบบหลุมจึงมีโอกาสเกิดได้ยากขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2 การยับยั้งการกัดกร่อนของเหล็กกล้าไร้สนิมชนิด 304 ด้วยสารสกัดจากใบกะเพราแดง



รูปที่ 4.3 กราฟโพลาริเซชันของเหล็กกล้าไร้สนิมชนิด 304 ในกรดไฮโดรคลอริก 0.05 โมลาร์ที่ไม่เติมและเติมสารสกัดจากใบกะเพราแดงที่ความเข้มข้น 10 100 500 และ 1000 mg/L

จากกราฟโพลาริเซชันในรูปที่ 4.3 สามารถหาค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อน (Corrosion potential, E_{corr}) ค่าความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อน (Corrosion current density, i_{corr}) ค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนแบบหลุม (Pitting potential, E_{pit}) ค่าประสิทธิภาพการยับยั้งการกัดกร่อน (Inhibition efficiency, IE%) และค่าความต้านทานการถูกโพลาริซ์ (Polarization resistance, R_p) โดยค่า IE% และ R_p สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 4.1 และ 4.2 ตามลำดับ

ตารางที่ 4.2 ผลการทดสอบการยับยั้งการกัดกร่อนของเหล็กกล้าไร้สนิมชนิด 304 ในกรดไฮโดรคลอริก 0.05 โมลาร์ เมื่อเติมสารสกัดจากใบกะเพราแดงที่ความเข้มข้นต่างๆ

| ความเข้มข้นของสารสกัด (mg/L) | E_{corr} (V_{SCE}) | i_{corr} ($\mu A/cm^2$) | b_c (mV/dec) | b_a (mV/dec) | E_{pit} (V_{SCE}) | R_p ($k\Omega \cdot cm^2$) | IE (%) |
|------------------------------|--------------------------|-----------------------------|----------------|----------------|-------------------------|--------------------------------|--------|
| 0 | -0.356 | 6.19 | 73.52 | 331.84 | 0.040 | 4.22 | - |
| 10 | -0.345 | 2.12 | 75.68 | 271.94 | 0.063 | 12.13 | 65.8 |
| 100 | -0.300 | 1.12 | 46.51 | 202.42 | 0.086 | 14.66 | 81.9 |
| 500 | -0.328 | 1.33 | 55.28 | 219.83 | 0.107 | 14.42 | 78.5 |
| 1000 | -0.341 | 0.50 | 61.91 | 217.27 | 0.104 | 42.01 | 92.0 |

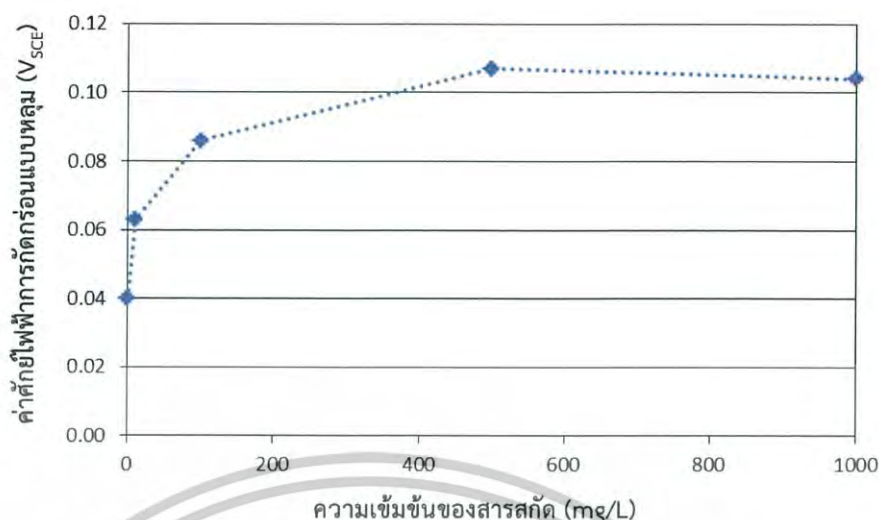
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากตารางที่ 4.2 แสดงผลจากการทดสอบการยับยั้งการกัดกร่อนของเหล็กกล้าไร้สนิมชนิด 304 ในกรดไฮโดรคลอริก 0.05 โมลาร์ เมื่อไม่เติมและเติมสารสกัดจากใบกะเพราแดงที่ความเข้มข้นต่างๆ ซึ่งสามารถอธิบายได้เป็น 3 ส่วน ดังนี้

1. จากการวิเคราะห์ค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อน (Corrosion potential, E_{corr}) พบว่าเมื่อเติมสารสกัดจากใบกะเพราแดงที่ความเข้มข้น 0 10 100 500 และ 1000 mg/L ค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนมีค่าเท่ากับ -0.356 -0.345 -0.300 -0.328 และ -0.341 V_{SCE} ตามลำดับ ซึ่งค่าศักย์ไฟฟ้ามีแนวโน้มไปทิศทางบวกมากขึ้น แสดงให้เห็นถึงความสามารถในการออกซิไดซ์ (Oxidizing power) ของสารละลายมีค่าเพิ่มขึ้น จากรูปที่ 4.3 เห็นว่าค่าความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อนของสารละลายที่เติมสารสกัดจากใบกะเพราแดงมีการเปลี่ยนแปลง ในด้านแอโนดิกลดลงอย่างเห็นได้ชัดเมื่อเทียบกับสารละลายที่ไม่เติมสารสกัดจากใบกะเพราแดง จึงจัดสารสกัดจากใบกะเพราแดงเป็นสารยับยั้งแบบแอโนดิก (Anodic inhibitor) อย่างไรก็ตามในทางทฤษฎีเมื่อค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนมีค่ามากขึ้น ประกอบกับการลดลงของค่าความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อนถือว่าสารยับยั้งจากสารสกัดจากใบกะเพราแดงมีความสามารถในการยับยั้งการกัดกร่อนของเหล็กกล้าไร้สนิมชนิด 304 เนื่องจากโครงสร้างของสารสกัดประกอบด้วยอะตอมที่มีอิเล็กตรอนคู่อิสระซึ่งให้อิเล็กตรอนแก่ออร์บิทัล d (d-orbital) ที่วางอยู่ในอะตอมของเหล็ก [1] สามารถทำให้โมเลกุลของสารยับยั้งถูกดูดซับบนพื้นผิวโลหะ ค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนจึงมีค่าเพิ่มขึ้น

2. จากตารางที่ 4.2 พบว่าเมื่อเติมสารสกัดจากใบกะเพราแดงที่ความเข้มข้น 0 10 100 500 และ 1000 mg/L ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อน (Corrosion current density, i_{corr}) มีค่าเท่ากับ 6.19 2.12 1.12 1.33 และ 0.50 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ ตามลำดับ ซึ่งมีค่าลดลงเมื่อเทียบกับสารละลายที่ไม่เติมสารสกัดจากใบกะเพราแดง แสดงให้เห็นถึงอัตราการกัดกร่อนที่มีค่าลดลง และจากการประมาณค่านอกช่วงทาเฟิล (Tafel extrapolation) ในส่วนของค่าความชันของฝั่งแคโทดิก (Cathodic Tafel slopes, b_c) มีค่าเปลี่ยนแปลงเล็กน้อย ในทางตรงกันข้ามสังเกตเห็นได้ว่าค่าความชันของฝั่งแอโนดิก (Anodic Tafel slopes, b_a) มีการเปลี่ยนแปลงค่อนข้างมาก ซึ่งส่งผลต่อกลไกการเกิดปฏิกิริยาฝั่งแอโนดิก (Anodic reaction mechanism) เมื่อคำนวณค่าความต้านทานการถูกโพลาไรซ์ (Polarization resistance, R_p) เมื่อเติมสารสกัดที่ความเข้มข้นต่างๆ พบว่ามีค่า R_p เพิ่มขึ้น จึงมีโอกาสเกิดการกัดกร่อนได้ยากขึ้นเมื่อความสามารถในการออกซิไดซ์ของสารละลายมีการเปลี่ยนแปลงเพิ่มมากขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

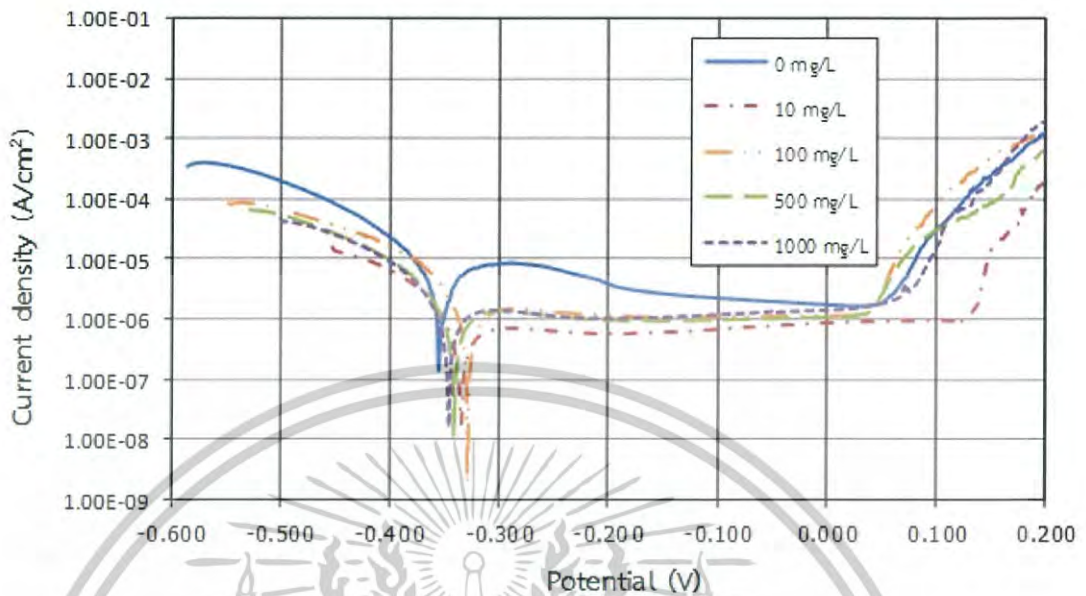


รูปที่ 4.4 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารสกัดจากใบกะเพราแดงกับค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนแบบหลุม

3. รูปที่ 4.4 แสดงค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนแบบหลุม (Pitting corrosion, E_{pit}) พบว่าเมื่อไม่เติมสารสกัดจากใบกะเพราแดงลงในสารละลายกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 0.05 โมลาร์ จะมีค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนแบบหลุมเท่ากับ 0.040 V_{SCE} และเมื่อเติมสารสกัดจากขิงที่มีความเข้มข้น 10 100 500 และ 1000 mg/L ค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนแบบหลุมจะมีค่าเท่ากับ 0.063 0.086 0.107 และ 0.104 V_{SCE} ตามลำดับ เห็นได้ว่าเมื่อเติมสารสกัดจากใบกะเพราแดง ค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนแบบหลุมมีค่าเป็นบวกมากขึ้น บ่งบอกถึงช่วงการสร้างชั้นป้องกันการกัดกร่อน (Passive layer) ที่ยาวขึ้น เป็นผลมาจากอิเล็กตรอนคู่อิสระที่อยู่บริเวณอะตอมของออกซิเจนบนโครงสร้างสารสกัดจากใบกะเพราแดงอาจถูกดูดซับบนพื้นผิวเหล็กกล้าไร้สนิมชนิด 304 จึงเกิดเป็นชั้นป้องกันไม่ให้สารละลายที่มีฤทธิ์กัดกร่อนหรือคลอไรด์ไอออน (Cl^-) สัมผัสกับพื้นผิวโลหะ ซึ่งกล่าวได้ว่าเมื่อเติมสารสกัดจากใบกะเพราแดงจะช่วยชะลอการกัดกร่อนแบบหลุมให้เกิดยากขึ้นเมื่อเทียบกับสารละลายที่ไม่เติมสารสกัดจากใบกะเพราแดง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3 การยับยั้งการกัดกร่อนของเหล็กกล้าไร้สนิมชนิด 304 ด้วยสารสกัดจากใบมังคุด



รูปที่ 4.5 กราฟโพลาริเซชันของเหล็กกล้าไร้สนิมชนิด 304 ในกรดไฮโดรคลอริก 0.05 โมลาร์ที่ไม่เติมและเติมสารสกัดจากใบมังคุดที่ความเข้มข้น 10 100 500 และ 1000 mg/L

จากกราฟโพลาริเซชันในรูปที่ 4.5 สามารถหาค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อน (Corrosion potential, E_{corr}) ค่าความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อน (Corrosion current density, i_{corr}) ค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนแบบหลุม (Pitting potential, E_{pit}) ค่าประสิทธิภาพการยับยั้งการกัดกร่อน (Inhibition efficiency, IE%) และค่าความต้านทานการถูกโพลาริไซส์ (Polarization resistance, R_p) โดยค่า IE% และ R_p สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 4.1 และ 4.2 ตามลำดับ

ตารางที่ 4.3 ผลการทดสอบการยับยั้งการกัดกร่อนของเหล็กกล้าไร้สนิมชนิด 304 ในกรดไฮโดรคลอริก 0.05 โมลาร์ เมื่อเติมสารสกัดจากใบมังคุดที่ความเข้มข้นต่างๆ

| ความเข้มข้นของสารสกัด (mg/L) | E_{corr} (V_{SCE}) | i_{corr} ($\mu A/cm^2$) | b_c (mV/dec) | b_a (mV/dec) | E_{pit} (V_{SCE}) | R_p ($k\Omega \cdot cm^2$) | IE (%) |
|------------------------------|--------------------------|-----------------------------|----------------|----------------|-------------------------|--------------------------------|--------|
| 0 | -0.356 | 6.19 | 73.52 | 331.84 | 0.040 | 4.22 | - |
| 10 | -0.335 | 0.51 | 50.84 | 168.08 | 0.121 | 33.04 | 91.7 |
| 100 | -0.330 | 1.13 | 50.51 | 205.43 | 0.042 | 15.58 | 81.7 |
| 500 | -0.342 | 1.30 | 68.12 | 258.60 | 0.040 | 18.01 | 79.0 |
| 1000 | -0.347 | 2.12 | 85.94 | 355.73 | 0.065 | 14.18 | 65.8 |

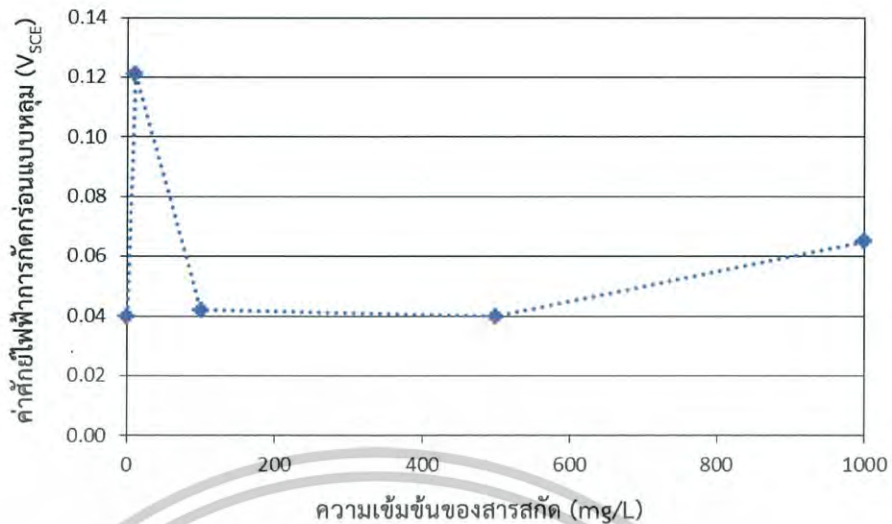
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากตารางที่ 4.3 แสดงผลจากการทดสอบการยับยั้งการกัดกร่อนของเหล็กกล้าไร้สนิมชนิด 304 ในกรดไฮโดรคลอริก 0.05 โมลาร์ เมื่อไม่เติมและเติมสารสกัดจากใบมังคุดที่ความเข้มข้นต่างๆ ซึ่งสามารถอธิบายได้เป็น 3 ส่วน ดังนี้

1. จากการวิเคราะห์ค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อน (Corrosion potential, E_{corr}) พบว่าเมื่อเติมสารสกัดจากใบมังคุดที่ความเข้มข้น 0 10 100 500 และ 1000 mg/L ค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนมีค่าเท่ากับ -0.356 -0.335 -0.330 -0.342 และ -0.347 V_{SCE} ตามลำดับ ซึ่งมีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้น แสดงให้เห็นถึงความสามารถในการออกซิไดซ์ (Oxidizing power) ของสารละลายมีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งสารยับยั้งจะมีความสามารถในการช่วยชะลอปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidation reaction) หรือมีความสามารถในการช่วยยับยั้งการกัดกร่อนได้ เนื่องจากอะตอมออกซิเจนซึ่งเป็นบริเวณที่มีอิเล็กตรอนคู่อิสระจะให้อิเล็กตรอนแก่โลหะได้ และจากรูปที่ 4.6 ค่าความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อนของสารละลายที่เติมสารสกัดจากใบมังคุดเมื่อเทียบกับสารละลายไม่เติมสารสกัดจากใบมังคุด จะเห็นว่าฝั่งแอโนดิกลดลงอย่างเห็นได้ชัด ส่วนฝั่งแคโทดิกลดลงเพียงเล็กน้อย ดังนั้นสารสกัดจากใบมังคุดจึงจัดเป็นสารยับยั้งแบบแอโนดิก (Anodic inhibitor)

2. จากการวิเคราะห์ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อน (Corrosion current density, i_{corr}) มีค่าเท่ากับ 0.51 1.13 1.30 และ 2.12 $\mu A/cm^2$ ตามลำดับ เมื่อเติมสารสกัดจากใบมังคุดที่ความเข้มข้น 10 100 500 และ 1000 mg/L ซึ่งมีค่าต่ำกว่าสารละลายที่ไม่เติมสารสกัดที่มีค่าเท่ากับ 6.19 $\mu A/cm^2$ ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อนที่ต่ำลงมีความสอดคล้องกับอัตราการกัดกร่อนที่มีค่าลดลงไปด้วย จากค่าความชันฝั่งแคโทดิก (Cathodic Tafel slopes, b_c) และค่าความชันฝั่งแอโนดิก (Anodic Tafel slopes, b_a) นำไปสู่การคำนวณค่าความต้านทานการถูกโพลาไรซ์ (Polarization resistance, R_p) แสดงดังตารางที่ 4.3 พบว่าค่า R_p ที่ความเข้มข้น 10 mg/L ของสารสกัดใบมังคุดมีค่ามากที่สุดที่ 33.04 $k\Omega \cdot cm^2$ แต่ที่ความเข้มข้น 100 500 และ 1000 mg/L พบว่ามีค่า R_p ลดลง ถึงแม้ว่าการเพิ่มความเข้มข้นของสารสกัด ค่า R_p ควรจะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามความเข้มข้นของสารสกัดที่เพิ่มมาดังกล่าวมีค่า R_p มากกว่าสารละลายที่ไม่เติมสารสกัดซึ่งบ่งบอกถึงการมีความสามารถในการยับยั้งการกัดกร่อนของเหล็กกล้าไร้สนิมชนิด 304

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



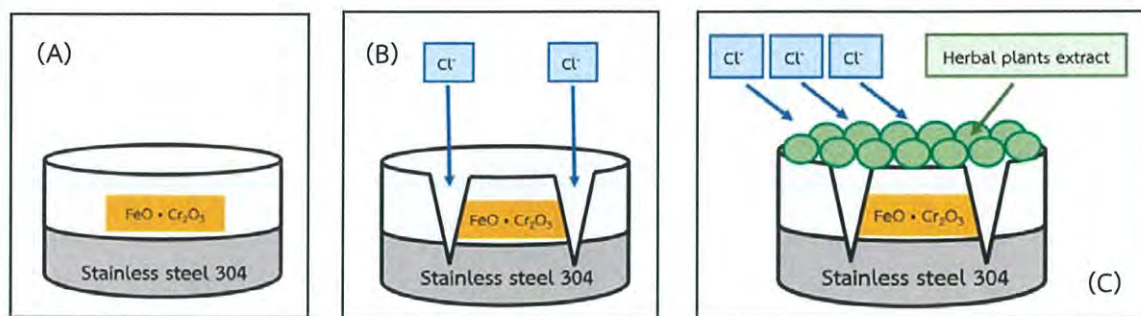
รูปที่ 4.6 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารสกัดจากใบมังคุดกับค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนแบบหลุม

3. จากรูปที่ 4.6 เมื่อไม่เติมสารสกัดจากใบมังคุด จะได้ค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนแบบหลุม (Pitting corrosion, E_{pit}) เท่ากับ $0.040 V_{SCE}$ และเมื่อเติมสารสกัดจากใบมังคุดที่ความเข้มข้น 10 100 500 และ 1000 mg/L มีค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนแบบหลุมเท่ากับ 0.121 0.042 0.040 และ $0.065 V_{SCE}$ ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าที่ความเข้มข้น 10 mg/L มีค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนแบบหลุมสูงสุดที่ $0.121 V_{SCE}$ และมีค่าลดลงเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารสกัดจากใบมังคุด ซึ่งโดยทั่วไปเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารสกัดแล้วคาดว่าค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนแบบหลุมจะมีค่าเพิ่มขึ้น

4.4 การดูดซับบนพื้นผิวโลหะ (Surface adsorption)

โดยปกติเหล็กกล้าไร้สนิมชนิด 304 มีคุณสมบัติในการสร้างชั้นป้องกันที่เป็นสารประกอบออกไซด์ของเหล็กและโครเมียม ($FeO \cdot Cr_2O_3$) เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติในสภาพบรรยากาศทั่วไป ซึ่งชั้นป้องกันนี้จะมีความสามารถต้านทานการกัดกร่อนได้ แสดงดังรูปที่ 4.7 (A) แต่เมื่อเหล็กกล้าไร้สนิมชนิด 304 อยู่ในสิ่งแวดล้อมที่มีฤทธิ์กัดกร่อนหรือสัมผัสกับสารละลายกรดไฮโดรคลอริกจะทำให้ชั้นป้องกันเสียหายและถูกทำลายโดยคลอไรด์ไอออน (Cl⁻) ที่อยู่ในสารละลาย ส่งผลให้เกิดการกัดกร่อนแบบหลุมขึ้นบนเนื้อเหล็กกล้าไร้สนิมชนิด 304 แสดงดังในรูปที่ 4.7 (B) แต่เมื่อเติมสารสกัดจากขิง ใบกะเพราแดง และใบมังคุด โมเลกุลของสารสกัดดังกล่าวจะดูดซับที่ผิวหน้าของโลหะบนชั้นป้องกันที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติ เนื่องจากโมเลกุลของสารสกัดมีอิเล็กตรอนคู่อิสระที่อยู่บริเวณอะตอมของออกซิเจน ซึ่งอิเล็กตรอนนี้สามารถถูกดูดซับบนพื้นผิวของเหล็กกล้าไร้สนิมอีกชั้นหนึ่ง ส่งผลให้สารละลายที่มีฤทธิ์กัดกร่อนเข้าไปทำลายชั้นผิวหน้าโลหะได้น้อยลง จึงช่วยชะลอการเกิดการกัดกร่อนแบบหลุมหรือเพิ่มความต้านทานการกัดกร่อนแบบหลุมให้กับเหล็กกล้าไร้สนิมชนิด 304 แสดงดังรูปที่ 4.7 (C)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.7 กลไกการเพิ่มความต้านทานการกัดกร่อนแบบหลุมของสารสกัดจากขิง ใบกะเพราแดง และใบมังคุด (A) ชั้นป้องกันที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ (B) การทำลายชั้นป้องกันโดยคลอไรด์ไอออน (C) การป้องกันการกัดกร่อนแบบหลุม

4.5 ค่าประสิทธิภาพความต้านทานการกัดกร่อนแบบหลุม (Pitting inhibition efficiency, %PIE)

ค่าประสิทธิภาพความต้านทานการกัดกร่อนแบบหลุม (Pitting inhibition efficiency, %PIE) บ่งบอกถึงประสิทธิภาพความต้านทานการกัดกร่อนของสารยับยั้งที่ใช้ในการป้องกันการกัดกร่อน ซึ่งค่า %PIE ขึ้นอยู่กับระบบการทดลองนั้นๆ โดยในงานวิจัยนี้ค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนแบบหลุม (E_{pit}) ในสารละลายกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 0.05 โมลาร์ ที่ไม่เติมสารสกัดมีค่าเท่ากับ $0.040 V_{SCE}$ ซึ่งค่าดังกล่าวถือเป็นค่าที่ต่ำที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ในการทดลองทั้งหมด แม้ว่าจะเติมสารสกัดลงไปก็ไม่ทำให้ค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนแบบหลุมต่ำไปกว่านี้ ในขณะที่เดียวกันค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนแบบหลุมจะเพิ่มขึ้นเมื่อมีการเพิ่มความเข้มข้นของสารสกัดจากขิง ใบกะเพราแดง และใบมังคุด แต่จะมีค่าไม่เกินค่าศักย์ไฟฟ้าของการเกิดออกซิเจน (Oxygen evolution potential) ซึ่งค่านี้จัดเป็นค่าที่มากที่สุด เนื่องจากกระแสไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นหลังจากค่าศักย์ไฟฟ้านี้เป็นกระแสไฟฟ้าที่เกิดจากปฏิกิริยาผลิตออกซิเจน ไม่ใช่เกิดจากการกัดกร่อนแบบหลุม

จากแผนภูมิพัวเบ (Pourbaix diagram) ของน้ำ พบว่าค่าศักย์ไฟฟ้าของ Oxygen evolution potential ในสารละลายกรดไฮโดรคลอริกที่ pH 1.31 มีค่าเท่ากับ $1.153 V_{SHE}$ ซึ่งเมื่อเทียบกับ Saturated calomel electrode (SCE) มีค่าเท่ากับ $0.912 V_{SCE}$ ค่านี้จึงจัดเป็นค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนแบบหลุมมากที่สุดที่สามารถเป็นไปได้ และจากขอบเขตทั้งสองส่วนของการทดลอง นำไปสู่การหาค่าประสิทธิภาพความต้านทานการกัดกร่อนแบบหลุม (Pitting inhibition efficiency, %PIE) ได้ และจากขอบเขตทั้งสองส่วนของการทดลอง จะได้ว่า ค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนแบบหลุม 0.040 และ $0.912 V_{SCE}$ จะให้ค่าประสิทธิภาพความต้านทานการกัดกร่อนแบบหลุม (Pitting inhibition efficiency, %PIE) เท่ากับ 0 และ 100% ตามลำดับ

จากการประยุกต์ใช้สมการเส้นตรงที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนแบบหลุม (E_{pit}) กับค่าประสิทธิภาพความต้านทานการกัดกร่อนแบบหลุม (Pitting inhibition efficiency, %PIE) สามารถหาความสัมพันธ์ดังกล่าวได้ดังสมการที่ 4.3 ไมออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\%PIE = 114.68(E_{pit}) - 4.5872 \quad (4.3)$$

ตารางที่ 4.4 ค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนแบบหลุม (Pitting potential, E_{pit}) ค่าประสิทธิภาพความต้านทานการกัดกร่อนแบบหลุม (Pitting inhibition efficiency, %PIE) และค่าประสิทธิภาพการยับยั้งการกัดกร่อน (Inhibition efficiency, IE%) ที่ความเข้มข้นต่างๆ ของสารสกัดจากขิง

| ความเข้มข้นของสารสกัด (mg/L) | E_{pit} | %PIE | IE% |
|------------------------------|-----------|------|------|
| 10 | 0.045 | 0.6 | 80.6 |
| 100 | 0.081 | 4.7 | 84.5 |
| 500 | 0.041 | 0.1 | 84.1 |
| 1000 | 0.135 | 10.9 | 98.2 |

จากการคำนวณค่าประสิทธิภาพความต้านทานการกัดกร่อนแบบหลุม (Pitting inhibition efficiency, %PIE) ดังแสดงในตารางที่ 4.4 สามารถสรุปได้ว่า ค่าประสิทธิภาพความต้านทานการกัดกร่อนแบบหลุม (%PIE) ของเปลือกกล้วยน้ำว้าชนิด 304 ในสารละลายกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 0.05 โมลาร์ มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารสกัดจากขิง และที่ความเข้มข้น 1000 mg/L มีค่าประสิทธิภาพความต้านทานการกัดกร่อนแบบหลุม (%PIE) มากที่สุดถึง 10.9% ซึ่งสอดคล้องกับค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนแบบหลุม (Pitting potential, E_{pit}) ที่มีค่าสูงที่สุด

ตารางที่ 4.5 ค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนแบบหลุม (Pitting potential, E_{pit}) ค่าประสิทธิภาพความต้านทานการกัดกร่อนแบบหลุม (Pitting inhibition efficiency, %PIE) และค่าประสิทธิภาพการยับยั้งการกัดกร่อน (Inhibition efficiency, IE%) ที่ความเข้มข้นต่างๆ ของสารสกัดจากใบกะเพราแดง

| ความเข้มข้นของสารสกัด (mg/L) | E_{pit} | %PIE | IE% |
|------------------------------|-----------|------|------|
| 10 | 0.063 | 2.6 | 65.8 |
| 100 | 0.086 | 5.3 | 81.9 |
| 500 | 0.107 | 7.7 | 78.5 |
| 1000 | 0.104 | 7.3 | 92.0 |

จากการคำนวณค่าประสิทธิภาพความต้านทานการกัดกร่อนแบบหลุม (Pitting inhibition efficiency, %PIE) ดังแสดงในตารางที่ 4.5 สามารถสรุปได้ว่า ค่าประสิทธิภาพความต้านทานการกัดกร่อนแบบหลุม (%PIE) ของเปลือกกล้วยน้ำว้าชนิด 304 ในสารละลายกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 0.05 โมลาร์ มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารสกัดจากใบกะเพราแดง และที่ความเข้มข้น 1000 mg/L มีค่าประสิทธิภาพความต้านทานการกัดกร่อนแบบหลุม (%PIE) มากที่สุดถึง 7.3% ซึ่งสอดคล้องกับค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนแบบหลุม (Pitting potential, E_{pit}) ที่มีค่าสูงที่สุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คลอริกเข้มข้น 0.05 โมลาร์ มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารสกัดจากใบกะเพราแดง และที่ความเข้มข้น 500 mg/L มีค่าประสิทธิภาพความต้านทานการกัดกร่อนแบบหลุม (%PIE) มากที่สุดถึง 7.7% ซึ่งสอดคล้องกับค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนแบบหลุม (Pitting potential, E_{pit}) ที่มีค่าสูงที่สุด

ตารางที่ 4.6 ค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนแบบหลุม (Pitting potential, E_{pit}) ค่าประสิทธิภาพความต้านทานการกัดกร่อนแบบหลุม (Pitting inhibition efficiency, %PIE) และค่าประสิทธิภาพการยับยั้งการกัดกร่อน (Inhibition efficiency, IE%) ที่ความเข้มข้นต่างๆ ของสารสกัดจากใบมังคุด

| ความเข้มข้นของสารสกัด (mg/L) | E_{pit} | %PIE | IE% |
|------------------------------|-----------|------|------|
| 10 | 0.121 | 9.3 | 91.7 |
| 100 | 0.042 | 0.2 | 81.7 |
| 500 | 0.040 | 0.0 | 79.0 |
| 1000 | 0.065 | 2.9 | 65.8 |

จากการคำนวณค่าประสิทธิภาพความต้านทานการกัดกร่อนแบบหลุม (Pitting inhibition efficiency, %PIE) ดังแสดงในตารางที่ 4.6 สามารถสรุปได้ว่า ค่าประสิทธิภาพความต้านทานการกัดกร่อนแบบหลุม (%PIE) ของเหล็กกล้าไร้สนิมชนิด 304 ในสารละลายกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 0.05 โมลาร์ สารสกัดจากใบมังคุดมีค่าประสิทธิภาพความต้านทานการกัดกร่อนแบบหลุม (%PIE) มากที่สุดถึง 9.3% ที่ความเข้มข้น 10 mg/L ซึ่งสอดคล้องกับค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนแบบหลุม (Pitting potential, E_{pit}) ที่มีค่าสูงที่สุด

4.6 แบบจำลองไอโซเทอมของการดูดซับ (Adsorption isotherm)

แบบจำลองไอโซเทอมของการดูดซับสามารถอธิบายเกี่ยวกับการเกิดอันตรกิริยา (Interaction) กันระหว่างสารยับยั้งการกัดกร่อนกับพื้นผิวของโลหะ ซึ่งกระบวนการของการดูดซับของสารยับยั้งที่เกิดขึ้นนั้นเป็นปฏิกิริยาแทนที่ระหว่างสารยับยั้งการกัดกร่อนในเฟสสารละลาย $Org_{(sol)}$ กับโมเลกุลน้ำที่ดูดซับบนพื้นผิวโลหะ $H_2O_{(ads)}$ แสดงดังสมการต่อไปนี้ [22]



เมื่อ n คือ จำนวนโมเลกุลของน้ำที่ถูกแทนที่ด้วยสารยับยั้งหนึ่งโมเลกุล

จากความสัมพันธ์ของสมการแบบจำลองไอโซเทอมของแลงเมียร์ (Langmuir) ดังแสดงในสมการที่ 4.4 สามารถนำมาวิเคราะห์การดูดซับได้ โดยสมการแลงเมียร์มีข้อสมมติฐานว่า การดูดซับจะเกิดขึ้นบนพื้นผิวที่มีพื้นที่ในการดูดซับที่แน่นอนและพื้นที่นั้นๆ เกิดการดูดซับโมเลกุลได้เพียงชั้นเดียวเท่านั้น (Monolayer) [22]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\frac{C}{\theta} = \frac{1}{K_{ads}} + C \quad (4.4)$$

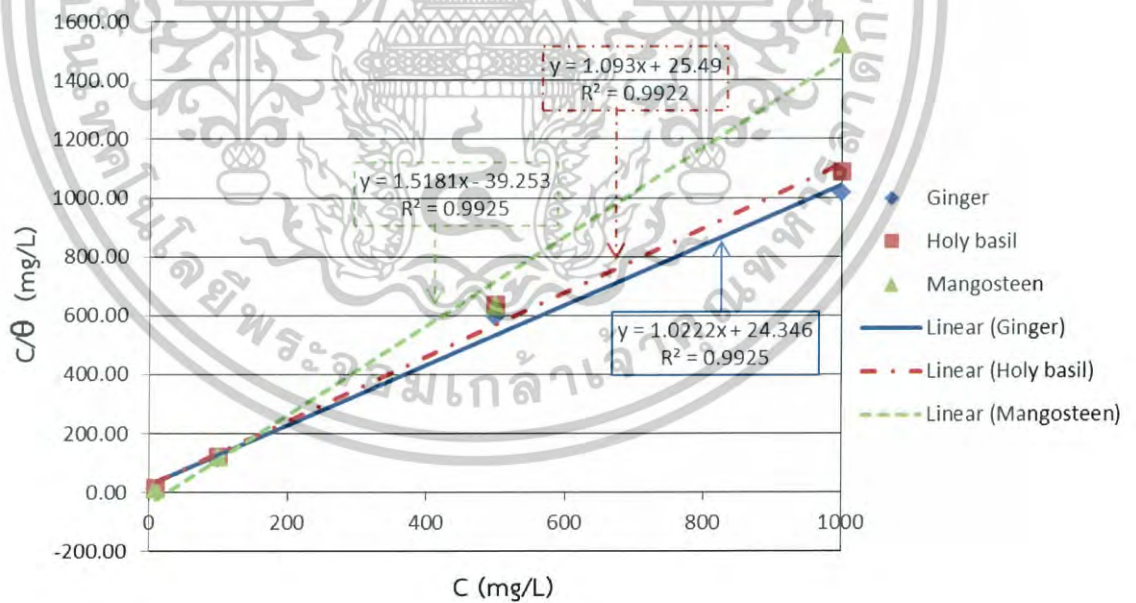
เมื่อ C คือ ความเข้มข้นของสารสกัดที่เป็นสารยับยั้งการกัดกร่อน (mg/L)

K_{ads} คือ ค่าคงที่สมดุลของการดูดซับ (L/mg)

θ คือ พื้นที่ที่ถูกปกคลุมต่อพื้นที่ผิวทั้งหมด สามารถคำนวณได้จากสมการ $\theta = \frac{IE\%}{100}$

ตารางที่ 4.7 ความเข้มข้นของสารสกัดจากขิง ใบกะเพราแดง และใบมังคุดที่เป็นสารยับยั้งการกัดกร่อน (C) กับอัตราส่วนระหว่าง C กับ θ

| C (mg/L) | C/θ (mg/L) ของสารสกัดจากขิง | C/θ (mg/L) ของสารสกัดจาก ใบกะเพราแดง | C/θ (mg/L) ของสารสกัดจาก ใบมังคุด |
|------------|---------------------------------------|---|--|
| 10 | 12.41 | 15.21 | 10.90 |
| 100 | 118.29 | 122.09 | 122.34 |
| 500 | 594.25 | 636.86 | 632.91 |
| 1000 | 1018.23 | 1087.55 | 1520.91 |



รูปที่ 4.8 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารสกัดจากขิง ใบกะเพราแดง และใบมังคุดที่เป็นสารยับยั้งการกัดกร่อน (C) กับอัตราส่วนระหว่าง C กับ θ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.8 เห็นได้ว่าค่า correlation coefficient (R^2) มีค่าเข้าใกล้ 1 แสดงว่าแบบจำลองไอโซเทอมการดูดซับของแลงเมียร์นั้นสามารถเข้ากันได้กับการดูดซับของสารสกัดจากขิง ใบกะเพราแดง และใบมังคุดที่เป็นสารยับยั้งการกักกร่อนบนพื้นผิวโลหะได้ดี หรือกล่าวได้ว่าข้อมูลที่ได้จากการทดลองเป็นไปตามแบบจำลองไอโซเทอมการดูดซับของแลงเมียร์ ซึ่งการดูดซับโมเลกุลเกิดแบบชั้นเดียว (Monolayer) [22]

พลังงานอิสระของการดูดซับ (Free energy of adsorption, ΔG_{ads}°) สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 4.5 [1]

$$\Delta G_{ads}^\circ = -RT \ln(K_{ads} \times C_w) \quad (4.5)$$

เมื่อ R คือ ค่าคงที่ของแก๊ส (8.314 J/mol.K)

T คือ อุณหภูมิสัมบูรณ์ (K)

C_w คือ ความเข้มข้นของน้ำในสารละลาย (g/L)

K_{ads} คือ ค่าคงที่สมดุลของการดูดซับ (L/g) โดยค่า K_{ads} คัดได้จากความสัมพันธ์ระหว่างสมการที่ 4.4 และสมการเส้นตรงจากกราฟในรูปที่ 4.8 แสดงค่าการคำนวณดังในตารางที่ 4.8

ตารางที่ 4.8 ค่าคงที่สมดุลของการดูดซับ และพลังงานอิสระของการดูดซับของสารยับยั้งการกักกร่อนที่สกัดจากขิง ใบกะเพราแดง และใบมังคุด

| ชนิดของพืช | ค่าคงที่สมดุลของการดูดซับ, K_{ads} (L/g) | พลังงานอิสระของการดูดซับ, ΔG_{ads}° (kJ/mol) |
|-------------|--|---|
| ขิง | $1/0.0243 = 41.1523$ | -26.32 |
| ใบกะเพราแดง | $1/0.0255 = 39.2157$ | -26.20 |
| ใบมังคุด | $1/-0.0393 = -25.4453$ | - |

จากข้อมูลของ Kadapparambil S. *et al.* [1] ได้กล่าวว่าค่าพลังงานอิสระของการดูดซับสามารถอธิบายประเภทการดูดซับของสารยับยั้งที่ถูกดูดซับบนพื้นผิวเหล็กกล้าไร้สนิมชนิด 304 ได้คือ ถ้าค่า ΔG_{ads}° ที่คำนวณได้มีค่ามากกว่า -20 kJ/mol จัดว่าเป็นการดูดซับทางกายภาพ (Physical adsorption) แต่ถ้าค่า ΔG_{ads}° ที่คำนวณได้มีค่าน้อยกว่า -40 kJ/mol จัดว่าเป็นการดูดซับทางเคมี (Chemical adsorption) และจากตารางที่ 4.8 สามารถคำนวณค่า ΔG_{ads}° เมื่อเติมสารสกัดจากขิงและใบกะเพราแดง ได้ค่าเท่ากับ -26.32 และ -26.20 kJ/mol ตามลำดับ ซึ่งเห็นว่ามีค่าอยู่ระหว่าง -20 และ -40 kJ/mol จึงสามารถสรุปได้ว่าการดูดซับของสารสกัดจากขิง และใบกะเพราแดงจัดเป็นการดูดซับทั้งทางกายภาพ (Physical adsorption) และทางเคมี (Chemical adsorption) ในส่วนของสารสกัดจากใบมังคุดไม่สามารถระบุได้ว่าเป็นการดูดซับทางกายภาพหรือเคมี เนื่องจากค่า ΔG_{ads}° ไม่สามารถหาค่าได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.7 ค่า pH ของกรดไฮโดรคลอริก 0.05 โมลาร์ เมื่อเติมสารสกัดจากขิง ใบกะเพราแดง และใบมังคุด

ในการทดสอบการยับยั้งการกักร่อนจะต้องมีการวัดค่า pH เพื่อยืนยันว่าการยับยั้งการกักร่อนที่เกิดขึ้นเป็นผลมาจากการเติมสารสกัดจริง โดยแสดงค่า pH ดังแสดงในตารางที่ 4.9

ตารางที่ 4.9 ค่า pH ของกรดไฮโดรคลอริก 0.05 โมลาร์ เมื่อเติมสารสกัดจากขิง ใบกะเพราแดง และใบมังคุดที่ความเข้มข้นต่างๆ

| ความเข้มข้นของสารสกัด (mg/L) | ค่า pH เมื่อเติมสารสกัดจากขิง | ค่า pH เมื่อเติมสารสกัดจากใบกะเพราแดง | ค่า pH เมื่อเติมสารสกัดจากใบมังคุด |
|------------------------------|-------------------------------|---------------------------------------|------------------------------------|
| 0 | 1.31 | 1.31 | 1.31 |
| 10 | 1.31 | 1.32 | 1.29 |
| 100 | 1.31 | 1.32 | 1.29 |
| 500 | 1.32 | 1.31 | 1.28 |
| 1000 | 1.32 | 1.31 | 1.26 |

จากตารางที่ 4.9 พบว่าเมื่อเติมสารสกัดจากขิง ใบกะเพราแดง และใบมังคุดที่ความเข้มข้นต่างๆ ลงในสารละลายกรดไฮโดรคลอริก 0.05 โมลาร์ ส่งผลต่อค่า pH น้อยมาก แสดงถึงสารสกัดจากขิง ใบกะเพราแดง และใบมังคุดที่เติมลงไปนั้นไม่เกิดปฏิกิริยาสะเทินของกรด-เบสกับสารละลายกรดไฮโดรคลอริก จึงสนับสนุนให้เห็นว่า การยับยั้งการกักร่อนที่เกิดขึ้นเป็นผลมาจากการดูดซับของสารสกัดบนพื้นผิวของเหล็กกล้าไร้สนิมชนิด 304 ทำให้ผิวหน้าของเหล็กสัมผัสกับสารละลายได้น้อยลง ไม่ใช่เกิดจากการสะเทินของกรดเบสหรือการยับยั้งปฏิกิริยารีดักชันแต่อย่างใด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

จากการศึกษาการยับยั้งการกัดกร่อนของเหล็กกล้าไร้สนิมชนิด 304 ในสารละลายกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 0.05 โมลาร์ ด้วยสารสกัดจากขิง ใบกะเพราแดง และใบมังคุด สามารถสรุปผลได้ดังนี้

1. สารสกัดจากพืชทั้งสามชนิดมีความสามารถในการลดอัตราเร็วในการเกิดปฏิกิริยาการกัดกร่อนของเหล็กกล้าไร้สนิมชนิด 304 ในสารละลายกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 0.05 โมลาร์ ทำให้ความต้านทานการกัดกร่อนหรือการยับยั้งการกัดกร่อนมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นด้วย
2. เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารสกัดจากพืชทั้งสามชนิด พบว่าความสามารถในการยับยั้งการกัดกร่อนแบบหลุมของเหล็กกล้าไร้สนิมชนิด 304 ในสารละลายกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 0.05 โมลาร์ มีค่ามากขึ้น
3. เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารสกัดจากพืชทั้งสามชนิด จะทำให้ความสามารถในการทำละลายชั้นป้องกันที่มีแนวโน้มลดลง

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ศึกษาความต้านทานของชั้นป้องกันที่เกิดจากสารสกัดจากพืชทั้งสามชนิด ซึ่งส่งผลต่อพฤติกรรมการกัดกร่อน เพื่อเป็นแนวทางในการเลือกใช้งานในอุตสาหกรรมต่อไป ซึ่งอาจทำได้โดยการใช้เทคนิคอิเล็กโตรเคมีคอสติมพีแดนซ์สเปกโตรสโกปี (Electrochemical Impedance Spectroscopy, EIS)
2. แยกสารฟีนอลิกและฟลาโวนอยด์ออกจากสารสกัดหยาบจากพืชทั้งสามชนิด เพื่อศึกษาผลของสารฟีนอลิกและฟลาโวนอยด์ในด้านความสามารถในการยับยั้งการกัดกร่อน
3. สำหรับการทดลองของสารสกัดจากใบมังคุดในสารละลายกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 0.05 โมลาร์ เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารสกัด ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อน (Corrosion current density, i_{corr}) ครวมมีแนวโน้มลดลง ซึ่งจะส่งผลทำให้ค่าประสิทธิภาพการยับยั้งการกัดกร่อน (Inhibition efficiency, IE%) มีค่าเพิ่มขึ้น ค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อน (Corrosion potential, E_{corr}) และค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนแบบหลุม (Pitting potential, E_{pit}) ครวมมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น สอดคล้องกับค่าประสิทธิภาพความต้านทานการกัดกร่อนแบบหลุม (Pitting inhibition efficiency, %PIE) จากการทดลองของสารสกัดจากใบมังคุด พบว่าสารสกัดที่ความเข้มข้น 10 mg/L แสดงผลได้ดีกว่าความเข้มข้นของสารสกัดที่ 100 500 และ 1000 mg/L ผู้ทำการทดลองคาดว่าเป็นผลมาจากในสารสกัดของใบมังคุดอาจมีสารบางอย่างที่เข้าไปเร่งมากกว่าไปยับยั้งการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน เมื่อความเข้มข้นมีค่าสูงกว่า 10 mg/L

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

- [1] Kadapparambil, S., Yadav, K., Ramachandran, M., and Victoria Selvam, N. 2017. "Electrochemical investigation of the corrosion inhibition mechanism of Tectona grandis leaf extract for SS304 stainless steel in hydrochloric acid." *Corrosion Reviews*. 35(2).
- [2] Saxena, A., Prasad, D., and Haldhar, R. 2018. "Investigation of corrosion inhibition effect and adsorption activities of Cuscuta reflexa extract for mild steel in 0.5 M H₂SO₄." *Bioelectrochemistry*. 124 : 156–164.
- [3] สุธา สุทธิเรืองวงศ์, หนึ่งหทัย คงอินทร์, อติตยา จันเสนา และอัจฉราภรณ์ ใจปราณี. 2553. "ความสามารถในการยับยั้งการกัดกร่อนของเหล็กกล้าในกรดซัลฟิวริกโดยสารสกัดจากใบพลูยายอ." *วารสารวิทยาศาสตร์บูรพา*. 15(1) : 79 – 87.
- [4] สุธา สุทธิเรืองวงศ์. 2554. เอกสารประกอบการสอน หัวข้อเรื่องที่น่าสนใจในอุตสาหกรรม(การกัดกร่อน). กรุงเทพฯ : สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [5] วรวิทย์ จันทร์สุวรรณ. 2554. เอกสารประกอบการสอนรายวิชาเคมีประยุกต์ : หน่วยที่3 โลหะและการกัดกร่อนของโลหะ. กรุงเทพฯ : คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร.
- [6] SciMath. 2560. การกัดกร่อนและการป้องกัน. [Online]. Available : <http://www.scimath.org/lesson-chemistry/item/7182-2017-06-05-14-44-28>
- [7] มหาวิทยาลัยมหิดล สถาบันนวัตกรรมการเรียนรู้. ศักย์ไฟฟ้าอิเล็กโทรดมาตรฐาน. [Online]. Available : https://il.mahidol.ac.th/e-media/electrochemistry/web/electrode_potential.htm
- [8] ปริญา บุญสา, ตรีนตร ยิ่งสัมพันธ์เจริญ และอภิชาติ โรจนโรวรรณ. 2560. "ภาพรวมของการใช้สารยับยั้งการกัดกร่อนในอุตสาหกรรม." *วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม*. 13(1) : 83-95.
- [9] อาริยา เอี่ยมบุ๋. 2554. "การประเมินชั้นเคลือบแคลเซียม-ฟอสฟอรัสบนไทเทเนียมบริสุทธิ์ทางการค้าเพื่อใช้เป็นวัสดุชีวภาพ." รายงานฉบับสมบูรณ์ ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ.
- [10] นิพนธ์ ชุ่มเชย. 2559. "อิทธิพลของธาตุникเกิดต่อความต้านทานการกัดกร่อนในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ที่อุณหภูมิต่างๆ." วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาวิชาการพัฒนางานอุตสาหกรรม ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารมหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [11] ธนศาสตร์ สุขศรีเมือง. 2548. “การวิเคราะห์สมบัติทางเคมีไฟฟ้าโดยวิธีไซคลิกโวลแทมเมตริก (Cyclic Voltammetry).” *Materials Characterization*. : 76-79.
- [12] ASM Aerospace Specification Metals Inc. AISI Type 304 Stainless Steel. [Online]. Available : <http://asm.matweb.com/search/SpecificMaterial.asp?bassnum=mq304a>
- [13] AZO Materials. Stainless Steels - Stainless 304 Properties, Fabrication and Applications. [Online]. Available : <https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=2867>
- [14] เกียรติความรู้.net. ขิง ประโยชน์และสรรพคุณของขิง. [Online]. Available : <https://www.xn--12cg1cxchd0a2gzc1c5d5a.net/%E0%B8%82%E0%B8%B4%E0%B8%87/>
- [15] Ho, S.-C., Chang, K.-S., and Lin, C.-C. 2013. “Anti-neuroinflammatory capacity of fresh ginger is attributed mainly to 10-gingerol.” *Food Chemistry*. 141(3) : 3183-3191.
- [16] MLM ธุรกิจเครือข่ายออนไลน์ อาหารเสริมสมุนไพร. กะเพราแดง สรรพคุณ ประโยชน์รักษากรดไหลย้อน. [Online]. Available : <https://www.karatbarsac.com/%E0%B8%81%E0%B8%B0%E0%B9%80%E0%B8%9E%E0%B8%A3%E0%B8%B2%E0%B9%81%E0%B8%94%E0%B8%87%E0%B8%AA%E0%B8%A3%E0%B8%9E%E0%B8%84%E0%B8%B8%E0%B8%93%E0%B8%9B%E0%B8%A3%E0%B8%B0%E0%B9%82%E0%B8%A2%E0%B8%8A/>
- [17] ปารมี สงชัย และวารางคณา สมพงษ์. 2560. “การเชื่อมประสานของแอคโตไมโอซินธรรมชาติ โดยการเติมสารสกัดจากใบพิช.” *วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี*. 25(1) : 87-100.
- [18] สรรพคุณ..สมุนไพร. กลุ่มยาแก้บิด ท้องเดิน ท้องร่วง โรคกระเพาะ(มังคุด). [Online]. Available : http://www.rspg.or.th/plants_data/herbs/herbs_07_12.htm
- [19] แจ่มจันทร์ เพชรศิริ, เกษม ต้นสุวรรณ และกฤษณะ เรืองคล้าย. 2549. “ผลของฟลาโวนอยด์จากใบมังคุดที่มีต่อการแปลงเพศปลานิล.” รายงานการวิจัย ภาควิชาชีววิทยา และภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยทักษิณ.
- [20] รัตนา อินทรานุปกรณ์. 2547. การตรวจสอบและการสกัดแยกสารสำคัญจากสมุนไพร. กรุงเทพฯ : สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [21] Gadow, H.S., and Motawea, M.M. 2017. "Investigation of the corrosion inhibition of carbon steel in hydrochloric acid solution by using ginger roots extract." *The Royal Society of Chemistry*. 7(40) : 24576–24588.
- [22] Yüce, A. O., and Kardaş, G. 2012. "Adsorption and inhibition effect of 2-thiohydantoin on mild steel corrosion in 0.1M HCl." *Corrosion Science*. 58 : 86–94.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้