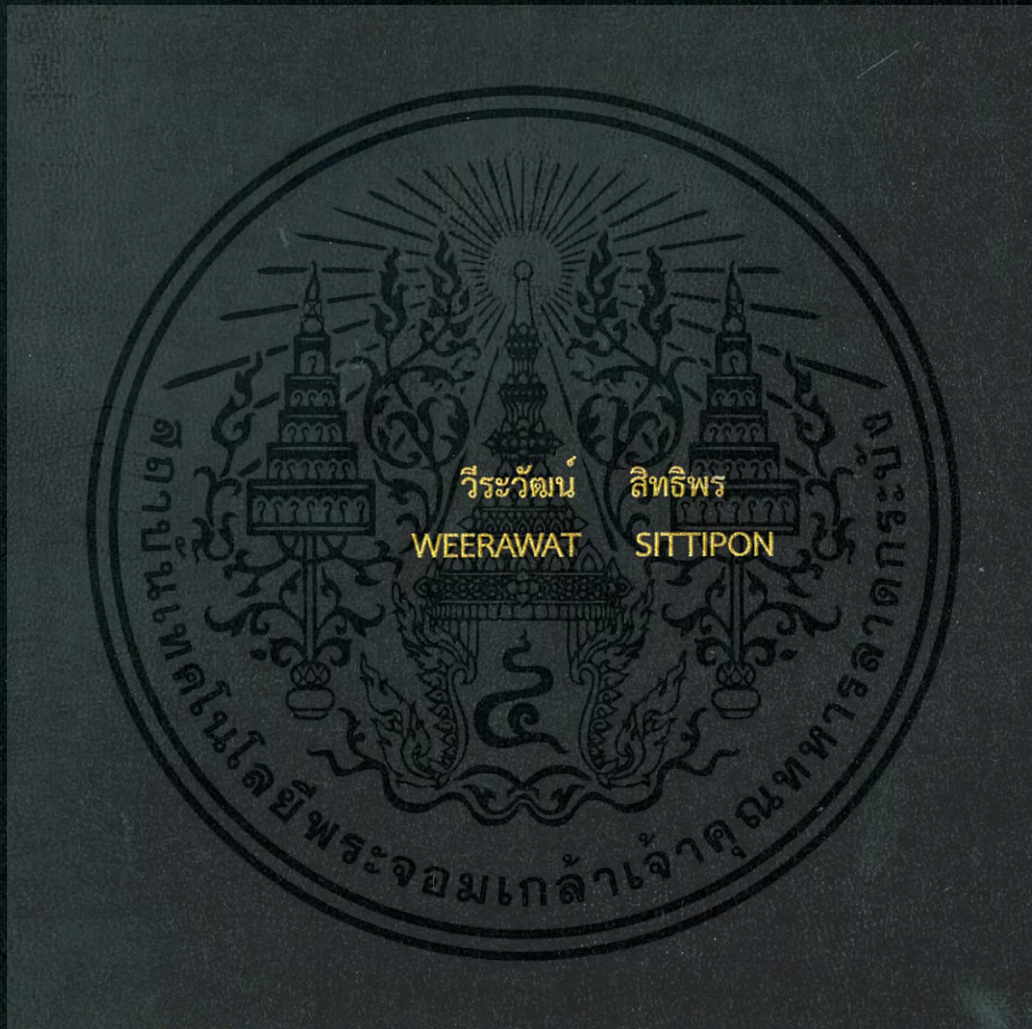


การพัฒนาสารเคลือบผิวซ่อมแซมตัวเองด้วยวิธีไมโครเอนแคปซูเลชัน
เพื่อป้องกันการกัดกร่อน

DEVELOPMENT OF A SELF-HEALING COATING BY MICROENCAPSULATION
FOR CORROSION PROTECTION



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2559

KMITL-2016-EN-M-220-181

การพัฒนาสารเคลือบผิวซ่อมแซมตัวเองด้วยวิธีไมโครเอนแคปซูเลชัน

เพื่อป้องกันการกัดกร่อน

DEVELOPMENT OF A SELF-HEALING COATING BY MICROENCAPSULATION

FOR CORROSION PROTECTION



T148733



เลขพมู.....
เลขทะเบียน 148733
ชั้นเดือนปี 23 พ.ย. 2560

b. 00267075
f.

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2559

DEVELOPMENT OF A SELF-HEALING COATING BY MICROENCAPSULATION
FOR CORROSION PROTECTION



A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENTS FOR THE DEGREE OF
MASTER OF ENGINEERING IN CHEMICAL ENGINEERING
FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
2016

KMITL 2016-EN-M-220-181

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2016

FACULTY OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การพัฒนาสารเคลือบผิวซ่อมแซมตัวเองด้วยวิธีไมโครเอนแคปซูเลชัน เพื่อป้องกันการกัดกร่อน

Thesis Title Development of Self-Healing Coating by Microencapsulation for Corrosion Protection

นักศึกษา นายวีระวัฒน์ สิทธิพร






รหัสประจำตัว 57601346

ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชา วิศวกรรมเคมี

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผศ.ดร.อภิรักษ์ นิ่มคนิสรณ์

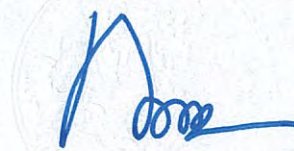
หมายเลขวิทยานิพนธ์ KMITL-2016-EN-M-220-181

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์	ลายมือชื่อ
รศ.ดร.ประกอบ กิจไชยา	
ผศ.ดร.สันติ วัฒนานุสรณ์	
ผศ.ดร.จันทวัฒน์ ไชยชนะวงศ์	
ผศ.ดร.พรสวรรค์ อัสวแสงรัตน์	
ผศ.ดร.อภิรักษ์ นิ่มคนิสรณ์	

วัน / เดือน / ปี ที่สอบ วันจันทร์ที่ 3 ตุลาคม พ.ศ. 2559 เวลา 10.00-12.00 น.
สถานที่สอบ ณ อาคาร A ชั้น 5 ห้องประชุม 3

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

คณะวิศวกรรมศาสตร์ รับรองแล้ว



(รองศาสตราจารย์ ดร. คมสัน มาลีสี)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
วันที่ 3 ตุลาคม พ.ศ. 2559

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การพัฒนาสารเคลือบผิวซ่อมแซมตัวเองด้วยวิธีไมโครเอนแคปซูล ชั้นเพื่อป้องกันการกัดกร่อน
นักศึกษา	นายวีระวัฒน์ สิทธิพร
รหัสประจำตัว	57601346
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมเคมี
พ.ศ.	2559
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	ผศ.ดร.อภิรักษ์นันทน์มคณิสร์

บทคัดย่อ

จุดมุ่งหมายของงานวิจัยนี้เพื่อพัฒนาสารเคลือบผิวที่ซ่อมแซมตัวเองด้วยวิธีไมโครเอนแคปซูลชั้นจากยูเรีย-ฟอร์มาลดีไฮด์ (เปลือกหุ้ม) และน้ำมันเมล็ดฝ้าย (สารซ่อมแซมผิว) ไมโครแคปซูลที่บรรจุน้ำมันเมล็ดฝ้ายที่มียูเรีย-ฟอร์มาลดีไฮด์เป็นเปลือกหุ้ม สามารถเตรียมได้จากการผสมของสารละลายโพลีไวนิลแอลกอฮอล์ ยูเรีย แอมโมเนียมคลอไรด์ รีโซซินอล น้ำมันเมล็ดฝ้าย และสารละลายฟอร์มาลดีไฮด์ ที่อัตราเร็วในการกวน 400 600 800 และ 1,000 รอบต่อนาที ค่าพีเอช 3.0 และเวลาในการกวน 1 2 4 และ 6 ชั่วโมง วิเคราะห์ลักษณะเฉพาะของไมโครแคปซูลด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด และโครงสร้างทางเคมีของไมโครแคปซูลด้วยเครื่องวิเคราะห์สารด้วยอินฟราเรด ศึกษาค่าความต้านทานการกัดกร่อนของไมโครแคปซูล กับอีพ็อกซี บนผิวเหล็กกล้า โดยใช้เทคนิคอิเล็กโตรเคมีคอลอิมพีแดนซ์สเปกโตรสโกปี ที่เวลาหลังจากแช่ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ที่ความเข้มข้น 3.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และศึกษาประสิทธิภาพการซ่อมแซมตัวเอง ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง จากการศึกษาพบว่า ขนาดอนุภาคของไมโครแคปซูลเล็กสุดคือ 53.4 ไมครอน ที่อัตราเร็วในการกวน 1,000 รอบต่อนาที เวลาในการกวน 4 ชั่วโมง และค่าความต้านทานการกัดกร่อนของสารเคลือบผิวบนแผ่นเหล็กกล้า ที่ปริมาณไมโครแคปซูลในสารเคลือบผิว 15 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก คือ 1511.7 374.1 และ 190.5 กิโลโอห์มตารางเซนติเมตร หลังจากแช่ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ที่ความเข้มข้น 3.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ที่เวลา 1 7 และ 21 วัน ตามลำดับ และจากการวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง พบว่า สารเคลือบผิวที่บรรจุไมโครแคปซูลสามารถป้องกันการกัดกร่อนได้โดยการซ่อมแซมตัวเองของสารเคลือบผิวที่ถูกขีดข่วน

Thesis	Development of a Self-Healing Coating by Microencapsulation for Corrosion Protection
Student	Mr.Weerawat Sittipon
Student ID.	57601346
Degree	Master of Engineering
Program	Chemical Engineering
Year	2016
Thesis Advisor	Asst.Prof.Dr.Apinan Namkanisorn

ABSTRACT

This research aims to develop a self-healing coating by microencapsulation of urea-formaldehyde (shell) and linseed oil (core). Microcapsules containing linseed oil encapsulated within urea-formaldehyde shell were prepared from the mixture of poly-vinylalcohol (PVA), ammonium chloride, urea, resorcinol, linseed oil and formaldehyde, mechanical stirring at the agitation rate of 400, 600, 800 and 1,000 rpm. The pH of solution mixture was adjusted to about 3.0 and the reaction time was varied at 1, 2, 4 and 6 hours. The microcapsules were characterized for particle size using scanning electron microscopy (SEM) and chemical structure using Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR). The corrosion resistance of coating on steel surface was studied by Electrochemical Impedance Spectroscopy (EIS) after immersion in 3.5 wt% NaCl solution and the performance of self-healing was evaluated by optical microscopy (OM). The experiment results reveal that the smallest microcapsule particle size of 53.4 microns was obtained at the agitation rate of 1,000 rpm and reaction time of 4 hours. The corrosion resistances coating of 15 wt% microcapsules on steel surface were 1511.7, 374.1 and 190.5 $k\Omega\text{ cm}^2$ after immersion in 3.5 wt% NaCl solution for 1, 7 and 21 days, respectively. Coating containing microcapsules provided better corrosion than coating without microcapsules and the optical micrographs showed evidence of self-healing of the scratch.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จได้อย่างดี ด้วยคำแนะนำและคำปรึกษาจาก ผศ.ดร. อภินันท์ นัมคณิสสรณ์ ซึ่งเป็นอาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ ข้าพเจ้ารู้สึกซาบซึ้งในความอนุเคราะห์จากท่านอาจารย์ และขอขอบพระคุณอย่างสูง

ขอกราบขอบพระคุณคณะกรรมการที่ตรวจทานวิทยานิพนธ์ และคณาจารย์สาขาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ทุกๆ ท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาแก่ข้าพเจ้า

ขอขอบคุณวิทยาลัยนวัตกรรมการจัดการข้อมูลสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่เอื้อเฟื้อเครื่องมือและอุปกรณ์ ในการทำวิจัย

ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดาผู้เป็นที่รักและเคารพยิ่ง ที่อบรมสั่งสอน ให้คำแนะนำ และให้กำลังใจตลอดมา ประโยชน์อันใดที่เกิดจากวิทยานิพนธ์นี้ ขอมอบแต่บิดา-มารดา ครูอาจารย์ที่เคารพทุกท่านและผู้มีพระคุณที่ไม่ได้กล่าวนาม

วีระวัฒน์

สิทธิพร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	III
กิตติกรรมประกาศ	V
สารบัญ	VI
สารบัญตาราง	IX
สารบัญรูป	X
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	2
1.4 ประโยชน์ที่ได้รับจากงานวิจัย	2
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	3
2.1 การซ่อมแซมตัวเอง	3
2.1.1 หลักการของการซ่อมแซมตัวเอง	3
2.1.2 กลไกการซ่อมแซมตัวเองของไมโครแคปซูล	4
2.2 ไมโครเอนแคปซูล	5
2.2.1 ลักษณะของไมโครเอนแคปซูล	5
2.2.2 กลไกการเกิดไมโครเอนแคปซูล	6
2.3 น้ำมันเมล็ดฝ้าย	8
2.4 ปัจจัยที่มีผลต่อการพัฒนาสารเคลือบผิวซ่อมแซมตัวเอง	9
2.5 การกักตร่อนของโลหะ	10
2.5.1 ประเภทของการกักตร่อนของโลหะ	10
2.5.2 ปัจจัยที่มีผลต่อการกักตร่อนของโลหะ	12
2.5.3 รูปแบบของการกักตร่อน	14
2.6 วิธีการป้องกันการกักตร่อน	16

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	17
บทที่ 3 เครื่องมืออุปกรณ์สารเคมีและวิธีการทดลอง	21
3.1 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง	21
3.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง	21
3.3 เครื่องมือวิเคราะห์.....	22
3.4 วิธีการทดลอง.....	24
3.4.1 กระบวนการสังเคราะห์ด้วยวิธีไมโครเอนแคปซูเลชัน	24
3.4.2 การเคลือบผิวบนแผ่นเหล็กกล้า.....	26
3.4.3 การวิเคราะห์คุณลักษณะและคุณสมบัติของอนุภาค.....	26
บทที่ 4 ผลการทดลองและการวิจารณ์ผล.....	28
4.1 การศึกษาลักษณะสัณฐานของไมโครแคปซูล	28
4.1.1 การศึกษาผลของความเร็วในการกวนในการสังเคราะห์ไมโครแคปซูล	28
4.1.2 การศึกษาผลของเวลาในการกวนในการสังเคราะห์ไมโครแคปซูล.....	31
4.2 ผลการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของไมโครแคปซูล.....	34
4.3 ผลการวิเคราะห์ค่าความต้านทานการกักตัวของไมโครแคปซูล.....	35
4.4 ผลการวิเคราะห์ลักษณะการต้านทานการกักตัวของไมโครแคปซูล.....	40
4.5 ผลการวิเคราะห์การยึดเกาะของไมโครแคปซูล	42
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ.....	45
5.1 สรุปผลการทดลอง	45
5.2 ข้อเสนอแนะ	45
เอกสารอ้างอิง.....	43
ภาคผนวก.....	50
ภาคผนวก ก ข้อมูลการทดลอง	51
ภาคผนวก ข เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์.....	80
ภาคผนวก ค มาตรฐาน ASTM 3359	92

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

ประวัติผู้เขียน..... 101



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา VIII กะต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1	เปอร์เซ็นต์กรดไขมันที่เป็นส่วนประกอบของน้ำมันเมล็ดฝ้าย 8
2.2	ปัจจัยที่มีผลต่อการพัฒนาสารซ่อมแซมตัวเอง 9
3.1	องค์ประกอบในการสังเคราะห์ด้วยวิธีไมโครเอนแคปซูลชันของแต่ละการทดลอง 25
4.1	ค่าความต้านทานการกักกร่อน ($k\Omega \text{ cm}^2$) ที่ความถี่ 0.01 เฮิร์ตซ์ เมื่อในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 3.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ที่เวลาแตกต่างกัน วัดโดยใช้เทคนิค EIS 37
4.2	ค่าความต้านทานการกักกร่อน ($k\Omega \text{ cm}^2$) ที่ความถี่ 0.01 เฮิร์ตซ์ เมื่อแช่ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 3.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เป็นเวลา 10 วัน วัดโดยใช้เทคนิค EIS 39
ก.1.1	ขนาดอนุภาคไมโครแคปซูลที่อัตราเร็วในการกวน 400 600 800 และ 1000 รอบนาที และเวลาในการกวน 4 ชั่วโมง 49
ก.1.2	ขนาดอนุภาคไมโครแคปซูลที่อัตราเร็วในการกวน 1000 รอบนาที และเวลาในการกวน 1 2 และ 4 ชั่วโมง 52
ก.4.1	ค่าอิมพีแดนซ์ของสารเคลือบผิวที่มีไมโครแคปซูลผสมอยู่ในสารเคลือบผิวที่ความเข้มข้น ต่างๆ หลังจากแช่ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 3.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เป็นเวลา 1 วัน 57
ก.4.2	ค่าอิมพีแดนซ์ของสารเคลือบผิวที่มีไมโครแคปซูลผสมอยู่ในสารเคลือบผิวที่ความเข้มข้น ต่างๆ หลังจากแช่ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 3.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เป็นเวลา 7 วัน 62
ก.4.3	ค่าอิมพีแดนซ์ของสารเคลือบผิวที่มีไมโครแคปซูลผสมอยู่ในสารเคลือบผิวที่ความเข้มข้น ต่างๆ หลังจากแช่ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 3.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักเป็นเวลา 21 วัน 67

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1	หลักการของการซ่อมแซมตัวเอง ก) แบบแคปซูล ข) แบบท่อ ค) แบบรักษาจากภายใน..... 3
2.2	กลไกการซ่อมแซมตัวเองของไมโครแคปซูล โดยไมโครแคปซูลจะหุ้มสารซ่อมแซมไว้ในเมทริกซ์ที่บรรจุตัวเร่งปฏิกิริยา (ก) เมทริกซ์เกิดความเสียหายขึ้น (ข) ไมโครแคปซูลที่บรรจุสารซ่อมแซมจะแตกออก สารจะเกิดการซึมผ่านรูเล็กๆ ไปยังรอยแตก (ค) สารซ่อมแซมสัมผัสกับสารเร่งปฏิกิริยา เกิดปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชัน สามารถรอยแตกได้อย่างสมบูรณ์..... 5
2.3	ส่วนประกอบของไมโครเอนแคปซูล..... 5
2.4	กลไกการสร้างเปลือกหุ้มของยูเรียและฟอร์มัลดีไฮด์..... 7
2.5	กลไกการเกิดไมโครแคปซูลด้วยวิธีไมโครเอนแคปซูล..... 7
2.6	การกักกร่อนของโลหะ..... 10
2.7	ทิศทางการไหลของกระแสไฟฟ้าในการกักกร่อนของโลหะ..... 11
2.8	ปฏิกิริยาการเกิดสนิมเหล็กในธรรมชาติ..... 11
2.9	ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้ามาตรฐาน (E°) ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส..... 13
2.10	ลักษณะของการต้านทานการกักกร่อนของไมโครแคปซูลที่ถูกสังเคราะห์ที่อัตราเร็วในการกวน 700 900 และ 1100 รอบต่อนาที และปริมาณของไมโครแคปซูลในสารเคลือบผิว (ก) 0 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก (ข) 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักและ (ค) 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก..... 18
2.11	ค่าต้านทานการกักกร่อนของไมโครแคปซูลบนผิวของเหล็กกล้า โดยใช้เทคนิคอิเล็กโตรเคมีคอลิมพีแดนซ์สเปกโตรสโกปี (EIS) ด้วยสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 3.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ที่เวลา (●) 1 วัน (□) 3 วัน (■) 5 วัน (○) 10 วัน และ (●) 15 วัน เมื่อ (ก) คือ สารเคลือบผิวที่ไม่มีไมโครแคปซูล และ (ข) คือ สารเคลือบผิวที่ผสมไมโครแคปซูล..... 19
2.12	ขนาดเฉลี่ยของไมโครแคปซูลที่อัตราเร็วในการกวนต่างๆ ที่เวลาในการกวน 4 ชั่วโมง..... 20
3.1	กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด..... 22
3.2	เครื่องวิเคราะห์สารด้วยอินฟราเรด..... 23
3.3	เครื่องวัดการป้องกันการกักกร่อน..... 23
3.4	กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง..... 24

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา X และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.5	อุปกรณ์ในการสังเคราะห์ไมโครแคปซูลด้วยวิธีไมโครเอนแคปซูเลชัน (1) หัววัดอุณหภูมิ (2) แท่งแก้วคน (3) เครื่องกวนชนิดควบคุมอุณหภูมิและ (4) เครื่องแสดงผลการวัดอุณหภูมิผล..... 25
3.6	ลักษณะของไมโครแคปซูล หลังจากอบที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 48 ชั่วโมง 25
3.7	ลักษณะรอยกากบาทบนชั้นฟิล์ม 27
3.8	ลักษณะการกริดในการวิเคราะห์การยึดเกาะ 28
4.1	อนุภาคของไมโครแคปซูล ที่อัตราเร็วในการกวนต่างๆ และเวลาในการกวน 4 ชั่วโมง..... 30
4.2	ขนาดของไมโครแคปซูลที่อัตราเร็วในการกวน 400 600 800 และ 1000 รอบต่อวินาที เวลาในการกวน 4 ชั่วโมง..... 31
4.3	ขนาดเฉลี่ยของไมโครแคปซูลที่อัตราเร็วในการกวนต่างๆ ที่เวลาในการกวน 4 ชั่วโมง..... 32
4.4	อนุภาคของไมโครแคปซูลที่อัตราเร็วในการกวน 1000 รอบต่อวินาที เวลาในการกวนต่างๆ..... 33
4.5	ขนาดของไมโครแคปซูลที่อัตราเร็วในการกวน 1000 รอบต่อวินาที เวลาในการกวน 1 2 และ 4 ชั่วโมง..... 34
4.6	ขนาดเฉลี่ยของไมโครแคปซูลที่อัตราเร็วในการกวน 1000 รอบต่อวินาที เวลาในการกวนต่างๆ . 35
4.7	อินฟราเรดสเปกตรัม จากการวิเคราะห์ เมื่อ (—) คือ น้ำมันเมล็ดฝ้าย (—) คือ ไมโครแคปซูล และ (—) คือ ยูเรีย-ฟอर्मาลดีไฮด์ 36
4.8	ค่าต้านทานการกักความร้อนของไมโครแคปซูลในสารเคลือบผิว บนผิวของเหล็กกล้า โดยใช้เทคนิคอิเล็กโตรเคมีคอลอิมพีแดนซ์สเปกโทรสโกปี (EIS) ด้วยสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 3.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ที่เวลา (ก) 1 วัน (ข) 7 วัน และ (ค) 21 วัน เมื่อปริมาณของไมโครแคปซูลในสารเคลือบผิว คือ (×) 0 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก (◇) 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก (□) 15 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และ (△) 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก..... 37
4.9	ค่าต้านทานการกักความร้อนของไมโครแคปซูลบนผิวของเหล็กกล้า โดยใช้เทคนิคอิเล็กโตรเคมีคอลอิมพีแดนซ์สเปกโทรสโกปี (EIS) ด้วยสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 3.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ที่เวลา 10 วัน เมื่อปริมาณของไมโครแคปซูลในสารเคลือบผิว คือ (△) 15 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักไม่มีรอยกากบาท (◇) 0 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักที่ไม่มีรอยกากบาท และ (□) 15 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักที่มีรอยกากบาท (×) 0 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักที่มีรอยกากบาท 39

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา XI ละต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.10 ลักษณะการซ่อมแซมตัวเองของไมโครแคปซูลจากกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (OM) กำลังขยาย 100 เท่าที่เวลาในการแช่สารละลายโซเดียมคลอไรด์ 3.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เมื่อ (ก) สารเคลือบผิวไม่มีไมโครแคปซูลก่อนแช่สารละลาย (ข) สารเคลือบผิวไม่มีไมโครแคปซูลหลังแช่สารละลายทิ้งไว้ 10 วัน (ค) สารเคลือบผิวไม่มีไมโครแคปซูลหลังแช่สารละลายทิ้งไว้ 20 วัน (ง) สารเคลือบผิวผสมไมโครแคปซูล (15 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก) ก่อนแช่สารละลาย (จ) สารเคลือบผิวผสมไมโครแคปซูล (15 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก) หลังแช่สารละลายทิ้งไว้ 10 วัน (ฉ) สารเคลือบผิวผสมไมโครแคปซูล (15 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก) หลังแช่สารละลายทิ้งไว้ 10 วัน	41
4.11 ลักษณะของการยึดเกาะของไมโครแคปซูลที่ปริมาณต่างๆ ในสารเคลือบผิว วิเคราะห์ตามมาตรฐาน ASTM D 3359-Method B (Tap test)	42
4.12 ลักษณะของการยึดเกาะที่ระดับต่างๆ ที่ได้หลังจากการวิเคราะห์ ตามมาตรฐาน ASTM D 3359-Method B	43
4.13 ค่าการยึดเกาะของไมโครแคปซูลในสารเคลือบ บนผิวของเหล็กกล้า ที่ปริมาณไมโครแคปซูลต่างๆ	44
อินฟราเรดสเปกตรัม ของไมโครแคปซูล จากการวิเคราะห์ด้วยเครื่องวิเคราะห์สารด้วยอินฟราเรด (FTIR)	58
ก.1 อินฟราเรดสเปกตรัม ของยูเรีย-ฟอร์มัลดีไฮด์ จากการวิเคราะห์ด้วยเครื่องวิเคราะห์สารด้วยอินฟราเรด (FTIR)	58
ก.2 อินฟราเรดสเปกตรัม ของน้ำมันเมล็ดฝ้าย จากการวิเคราะห์ด้วยเครื่องวิเคราะห์สารด้วยอินฟราเรด (FTIR)	59
ก.3 ลักษณะการกระจายของความหนาของชั้นฟิล์มในการเคลือบผิวของแต่ละตัวอย่าง	59
ข.1 ส่วนประกอบของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	81
ข.2 ส่วนประกอบของเครื่องวิเคราะห์สารด้วยอินฟราเรด (FTIR)	83
ข.3 หลักการทำงานของเครื่องวิเคราะห์สารด้วยอินฟราเรด	84

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
ข.4	ส่วนประกอบเครื่องวัดการป้องกันการกักร้อนโดยใช้เทคนิคอิเล็กทรอนิกส์ เปกโตรสโกปี (EIS)..... 85
ข.5	กราฟตัวอย่างการนำเสนอข้อมูลที่ได้จากเครื่องวัดการป้องกันการกักร้อนโดยใช้เทคนิคอิเล็กทรอนิกส์ โทรเคมีคอล อิมพีแดนซ์สเปกโตรสโกปี (EIS) เมื่อ (ก) คือ Nyquist spectrum และ (ข) คือ Bode spectrum..... 87
ข.6	วงจรไฟฟ้าในเครื่องวัดการป้องกันการกักร้อนโดยใช้เทคนิคอิเล็กทรอนิกส์ เปกโตรสโกปี เมื่อ (ก) คือ วงจรไฟฟ้าที่ยังไม่มีการกักร้อน และ (ข) วงจรไฟฟ้าที่เริ่มการกักร้อน (ค) แสดงลักษณะทางกายภาพของวงจรที่มีการกักร้อน..... 89



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันการผุกร่อนของเครื่องจักรที่มีโลหะองค์ประกอบเป็นปัญหาสำคัญชนิดหนึ่งในโรงงานอุตสาหกรรม ซึ่งทำให้เกิดความสูญเสียค่าใช้จ่ายที่ค่อนข้างสูงในการดูแลรักษา จากปัญหาดังกล่าววิธีการป้องกันการผุกร่อนของโลหะจึงมีความจำเป็นต่อการนำไปประยุกต์ใช้ในโรงงานอุตสาหกรรม ซึ่งการป้องกันการผุกร่อนของโลหะมีหลายวิธี เช่น การป้องกันการผุกร่อนของโลหะแบบแคโทดิก (Cathodic) [1] เป็นวิธีการป้องกันโดยให้โลหะที่ต้องการป้องกันให้อยู่ในสภาพแคโทด (Cathode) และให้โลหะชนิดอื่นสูญเสียอิเล็กตรอนแทนโลหะที่จะป้องกัน โดยโลหะที่นำมาใช้นั้นต้องเป็นโลหะที่สูญเสียอิเล็กตรอนได้ง่ายกว่าโลหะที่จะป้องกัน (มีค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์รีดักชันน้อยกว่าโลหะที่จะป้องกัน) จากการศึกษาหาอัตราการผุกร่อนที่แท้จริงของเหล็กกล้าโดยวิธีการป้องกันการผุกร่อนของโลหะแบบแคโทดิกในดิน [2] โดยวิธีการนี้มีค่าใช้จ่ายค่อนข้างสูง และต้องมีสารอิเล็กโทรไลต์ (Electrolyte) ที่จะนำกระแสไฟฟ้าจากแอโนด (Anode) ไปยังแคโทดเช่นดินเป็นต้น การป้องกันการผุกร่อนของโลหะแบบพาสซีเวชัน (Passivation) [1] คือ การสร้างฟิล์มให้กับโลหะวิธีการป้องกันโดยให้โลหะไปแช่ในสารละลายที่เป็นกรด จากการศึกษาการป้องกันการผุกร่อนแบบพาสซีเวชันของเหล็กกล้าไร้สนิมในกรดไนตริก [3] ซึ่งกรดไนตริกจะทำความสะอาดผิวของโลหะโดยไม่ทำลายเนื้อผิวของโลหะและสร้างฟิล์มออกไซด์บนผิวของโลหะ เพื่อป้องกันการผุกร่อน สารละลายใช้แล้วมีพิษต่อสิ่งแวดล้อม และต้องเสียค่าใช้จ่ายในการบำบัดรักษา ซึ่งเป็นข้อจำกัดสำหรับวิธีนี้ ในขณะที่การเคลือบผิว (Coating) เพื่อป้องกันการผุกร่อนเป็นวิธีการป้องกันการผุกร่อนที่นิยมกันอย่างแพร่หลายในปัจจุบัน สามารถทำได้ง่าย และไม่เป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อม [4-8] และสามารถนำไปประยุกต์ในโรงงานอุตสาหกรรมขนาดใหญ่ได้

งานวิจัยนี้พัฒนาสารเคลือบผิวโลหะ ให้สามารถซ่อมแซมตัวเองได้ เมื่อโลหะเกิดการรอยร้าวแตก รอยขีดข่วน และรอยถลอก บนชั้นเคลือบผิวของโลหะ สำหรับสารเคลือบผิวที่เลือกใช้ คือ อีพ็อกซี (Epoxy) และไมโครแคปซูล ที่ประกอบด้วย ยูเรีย และฟอร์มัลดีไฮด์ ทำหน้าที่เป็นผนังเซลล์ (Shellwall) และ น้ำมันเมล็ดฝ้าย (Linseed oil) ทำหน้าที่เป็นสารซ่อมแซมผิวของโลหะเมื่อชั้นเคลือบผิวของโลหะเกิดการขีดข่วนหรือเกิดการแตกหัก ไมโครแคปซูลที่บรรจุอยู่ในอีพ็อกซี จะแตกออกมา ทำให้สารซ่อมแซมผิวที่บรรจุอยู่ภายในไมโครแคปซูลไหลออกมาเกิดการประสานตัวเองของวัสดุในชั้นผิวเคลือบบนผิวหน้าของโลหะและป้องกันความเสียหายที่จะเกิดขึ้นกับพื้นผิวหน้าของโลหะ

1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา

- 1.2.1 เพื่อพัฒนาสารเคลือบผิวให้สามารถซ่อมแซมตัวเองได้ ด้วยวิธีไมโครเอนแคปซูเลชัน ที่มี ยูเรีย-ฟอร์มาลดีไฮด์ (เปลือกหุ้ม) และน้ำมันเมล็ดฝ้าย (สารซ่อมแซมผิว)
- 1.2.3 เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมของไมโครแคปซูลต่อการป้องกันการผุกร่อนของโลหะ

1.3 ขอบเขตของการศึกษา

- 1.3.1 พัฒนาสารเคลือบผิวที่มีคุณสมบัติในการซ่อมแซมตัวเอง ด้วยวิธีไมโครเอนแคปซูเลชัน ที่มี ยูเรีย-ฟอร์มาลดีไฮด์ (เปลือกหุ้ม) และน้ำมันเมล็ดฝ้าย (สารซ่อมแซมผิว)
- 1.3.2 ศึกษาลักษณะทางกายภาพและเคมีของไมโครแคปซูลที่สังเคราะห์ได้ เช่น ขนาดอนุภาค และโครงสร้างทางเคมี เป็นต้น
- 1.3.3 ทดสอบประสิทธิภาพในการต้านทานการกัดกร่อน ความสามารถในการซ่อมแซมตัวเอง และการยึดเกาะของสารเคลือบผิวที่พัฒนาขึ้น

1.4 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

- 1.4.1 ศึกษารวบรวมข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับสารเคลือบผิวการสังเคราะห์ไมโครแคปซูลและการกัดกร่อน
- 1.4.2 ออกแบบการทดลองกำหนดอุปกรณ์และสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง
- 1.4.3 ทำการสังเคราะห์ไมโครแคปซูลด้วยวิธีไมโครเอนแคปซูเลชัน และผสมไมโครแคปซูลเข้ากับสารเคลือบผิวชนิดอีพ็อกซี
- 1.4.4 ทดสอบประสิทธิภาพในการซ่อมแซมตัวเองและการต้านทานการกัดกร่อนของไมโครแคปซูล
- 1.4.5 วิเคราะห์ผลจากการทดลองและสรุปผลการดำเนินงาน

บทที่ 2

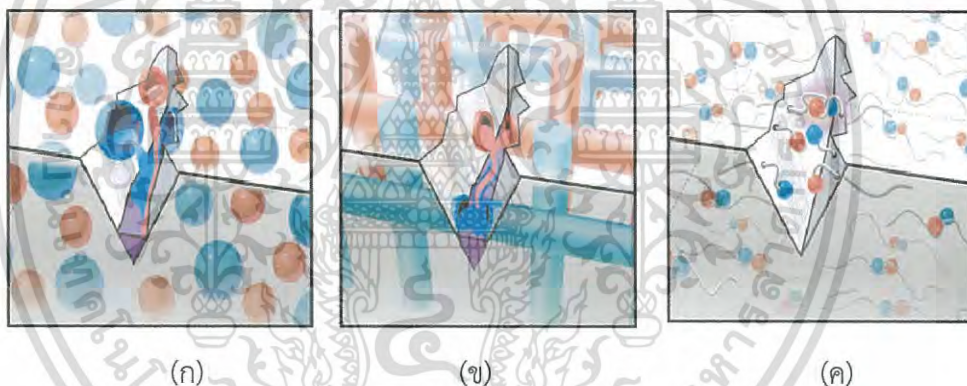
ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 การซ่อมแซมตัวเอง [9-11]

การซ่อมแซมตัวเอง คือ ความสามารถของวัสดุที่สามารถที่ประสานตัวเองโดยอัตโนมัติ เมื่อเกิดความเสียหาย โดยไม่มีการแทรกแซงจากภายนอก สามารถแบ่งเป็นประเภทได้ดังนี้

2.1.1 หลักการของการซ่อมแซมตัวเอง

การซ่อมแซมตัวเอง สามารถแบ่งได้เป็น 3 หลักการ ซึ่งแตกต่างกันตามความสามารถในการประสานโดยขึ้นอยู่กับการปล่อยสารที่ช่วยประสาน (Healing agent) และพื้นที่ของบริเวณที่ได้รับ ความเสียหาย ดังแสดงในรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 หลักการของการซ่อมแซมตัวเอง ก) แบบแคปซูล ข) แบบท่อ ค) แบบรักษาจากภายใน[10]

1) แบบแคปซูล (Capsule-based) ประกอบด้วย แคปซูลที่บรรจุสารที่ทำหน้าที่ประสานรอยขีดข่วน (Healing agent) กระจายตัวอยู่ในเนื้อพอลิเมอร์ เมื่อเกิดรอยร้าวแตก รอยขีดข่วน และรอยถลอก บนชั้นเคลือบผิวของวัสดุ ไมโครแคปซูลถูกทำให้แตกตัวในระหว่างผิววัสดุได้รับความเสียหาย สารที่ช่วยประสานจะถูกปล่อยออกมาและเกิดปฏิกิริยาเคมีในบริเวณของผิววัสดุที่เสียหาย โดยไมโครแคปซูลนิยมเตรียมจากสารประกอบยูเรีย-ฟอร์มัลดีไฮด์ สารประกอบเมลามีน-ฟอร์มัลดีไฮด์ สารประกอบเมลามีน-ยูเรีย-ฟอร์มัลดีไฮด์ พอลิยูรีเทน และอะคริเลต เป็นต้น เพื่อใช้บรรจุตัวเร่งปฏิกิริยาเคมี เช่น สารประกอบทังสเตนเฮกซะคลอไรด์ (Tungsten hexachloride:

WCl₆) เป็นต้น และบรรจุสารที่ทำหน้าที่ประสานรอยขีดข่วน เช่น สารประกอบไดไซโคลเพนทาไดอิน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่กรมการศึกษานอกโรงเรียนจัดทำขึ้นเพื่อแจกจ่ายฟรีโดยไม่คิดค่า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

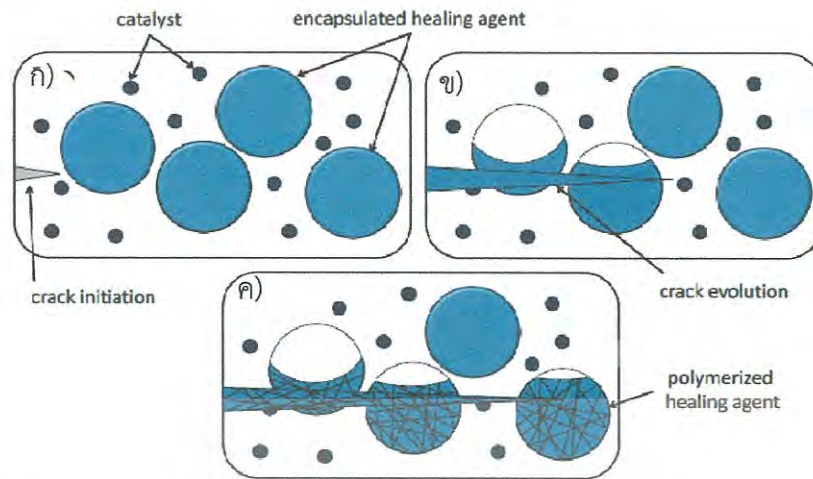
ซึ่งเป็นมอนอเมอร์ชนิดหนึ่งที่สามารถเกิดปฏิกิริยาทางเคมี และทำให้รอยขีดข่วนตื้นขึ้น เป็นต้น อย่างไรก็ตาม เทคนิคนี้มีข้อจำกัดคือ สามารถทำงานได้ครั้งเดียว เนื่องจากสารที่ปล่อยออกมาถูกใช้แล้วหมดไปภายหลังจากเกิดปฏิกิริยาทางเคมี

2) แบบท่อ (Vascular) เป็นเทคนิคที่สารช่วยประสานรอยขีดข่วนถูกปล่อยออกมาจากโครงข่ายของท่อกลวง ลักษณะเป็นเส้นใยแก้วที่กลวง (Hollow glass fibers: HGFs) ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 15 ไมครอน ได้ถูกนำมาใช้อย่างกว้างขวางสามารถช่วยเติมสารโดยการส่งผ่านสารจากบริเวณที่ยังไม่ได้รับความเสียหายผ่านโครงข่ายแบบ 1, 2 และ 3 มิติ เป็นผลให้สามารถเกิดปฏิกิริยาเพื่อรักษาตัวเองได้มากกว่า 1 ครั้ง โดยจากการศึกษาพบว่าความหนืดและความว่องไวในการทำปฏิกิริยาของสารช่วยรักษารอยขีดข่วน รวมถึงขนาดของท่อมีผลโดยตรงต่อประสิทธิภาพของการรักษาตัวเองของวัสดุ

3) แบบรักษาจากภายใน (Intrinsic) เป็นกลไกที่ไม่มีการปล่อยสารช่วยประสานรอยขีดข่วน แต่การประสานรอยเกิดจากการเคลื่อนที่และเกี่ยวพันกันของสายโซ่ เกิดจากกระบวนการพอลิเมอไรเซชันแบบผันกลับได้ (Reversible polymerization) เกิดจากกระบวนการหลอมเหลวของเฟสเทอร์โมพลาสติก เกิดจากแรงกระทำระหว่างสายโซ่แบบพันธะไฮโดรเจนหรือแบบไอออนิก เพื่อช่วยเริ่มให้เกิดการรักษาตัวเองที่ผิววัสดุภายหลังจากได้รับแรงกระตุ้นภายนอกหรือผิวของวัสดุได้รับความเสียหาย และจากการที่ปฏิกิริยาเป็นแบบผันกลับได้จึงทำให้สามารถเกิดปฏิกิริยาทางเคมีและรักษาตัวเองได้มากกว่า 1 ครั้ง

2.1.2 กลไกการซ่อมแซมตัวเองของไมโครแคปซูล [9, 13]

สารซ่อมแซมตัวเอง เช่น มอนอเมอร์ สี ตัวเร่งปฏิกิริยา และตัวทำให้แข็งที่จะบรรจุอยู่ในไมโครแคปซูล โดยปกติระบบการซ่อมแซมตัวเองนี้จะประกอบไปด้วยไมโครแคปซูล 2 ชนิด ชนิดแรกทำหน้าที่เป็นสารซ่อมแซมภายในบรรจุไว้ด้วยวัสดุพอลิเมอเมอร์ ส่วนไมโครแคปซูลอีกชนิดบรรจุสารเร่งปฏิกิริยาเอาไว้แคปซูลทั้งสองนี้จะกระจายตัวอยู่ในเมทริกซ์ เมื่อเมทริกซ์เกิดการขีดข่วนหรือเกิดการแตกหักจะทำให้สารซ่อมแซมชนิดพอลิเมอเมอร์ที่อยู่ภายในแคปซูลไหลออกมาทำปฏิกิริยากับสารเร่งปฏิกิริยาเกิดการสังเคราะห์เป็นพอลิเมอเมอร์ที่มีโครงสร้างแบบร่างแหตาข่าย (Cross-linked polymer) เชื่อมต่อรอยแตกนั้นแสดงดังรูปที่ 2.2

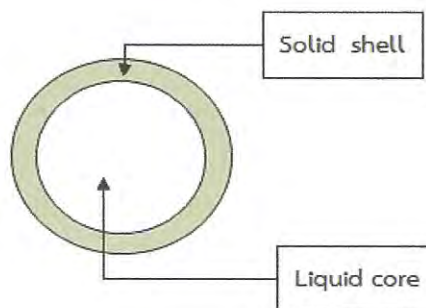


รูปที่ 2.2 กลไกการซ่อมแซมตัวเองของไมโครแคปซูล โดยไมโครแคปซูลจะหุ้มสารซ่อมแซมไว้ในเมทริกซ์ที่บรรจุตัวเร่งปฏิกิริยา (ก) เมทริกซ์เกิดความเสียหายขึ้น (ข) ไมโครแคปซูลที่บรรจุสารซ่อมแซมจะแตกออก สารจะเกิดการซึมผ่านรูเล็กๆ ไปยังรอยแตก (ค) สารซ่อมแซมสัมผัสกับสารเร่งปฏิกิริยา เกิดปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชัน สามารถรอยแตกได้อย่างสมบูรณ์ [13-16]

2.2 ไมโครเอนแคปซูลชัน (Microencapsulation) [13]

2.2.1 ลักษณะของไมโครเอนแคปซูลชัน

ไมโครเอนแคปซูลชันเป็นกระบวนการหุ้มอนุภาคของของแข็งที่มีขนาดเล็กๆ หรือหุ้มหยดของของเหลวหรือเป็นการหุ้มแก๊สซึ่งจะช่วยแยกและป้องกันอนุภาคที่ถูกห่อหุ้มออกจากสิ่งแวดล้อมสิ่งที่ได้จากกระบวนการห่อหุ้มเรียกว่าไมโครเอนแคปซูลชันจะประกอบด้วยส่วนสำคัญ 2 ส่วนหลักๆ [6-8, 13-14, 17-19] ดังแสดงในรูปที่ 2.3 คือ สารที่บรรจุอยู่ภายในแคปซูลซึ่งเรียกว่าคอร์ (Core) และผนังที่ห่อหุ้มซึ่งอยู่รอบนอก เรียกว่า วอลล์ (Wall) หรือเชลล์ (Shell) อาจมีขนาดตั้งแต่นาโนเมตรถึงไมโครเมตร

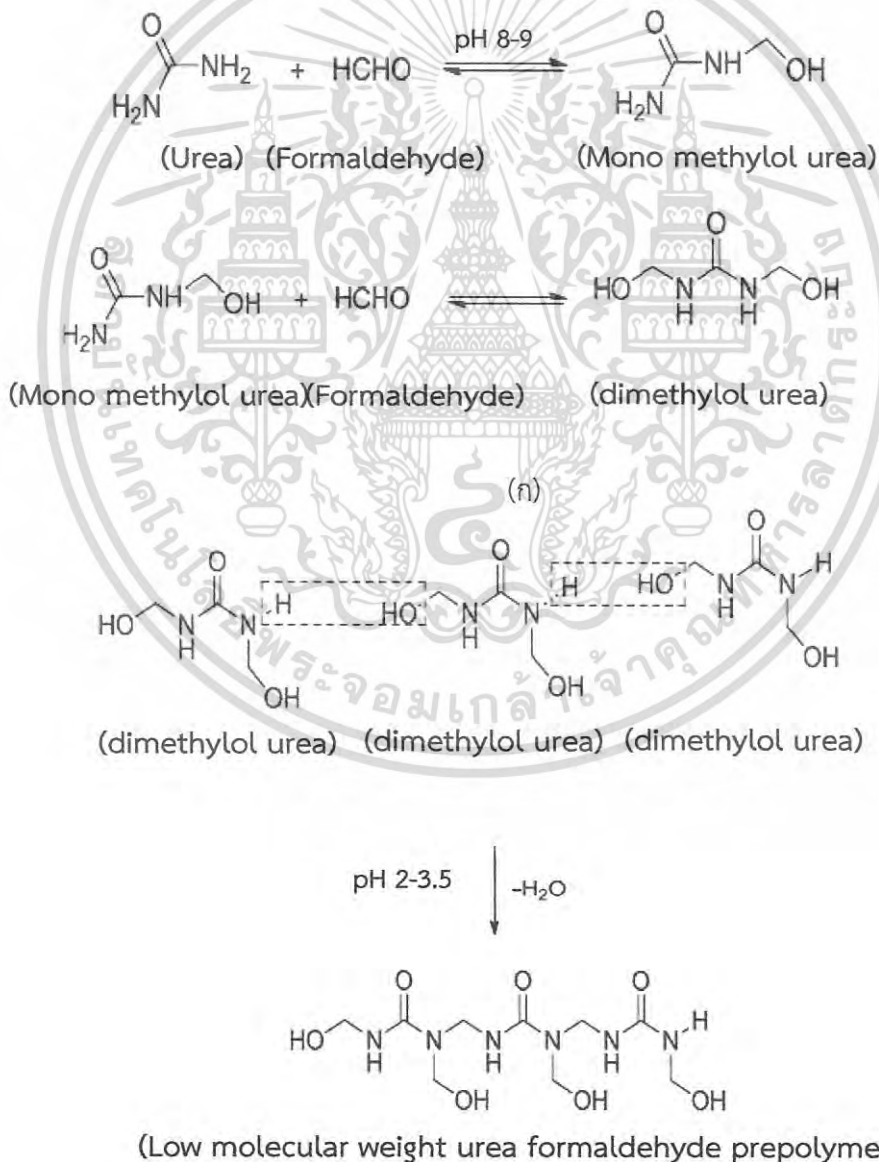


รูปที่ 2.3 แสดงส่วนประกอบของไมโครเอนแคปซูลชัน [6]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นับผูกพันให้ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

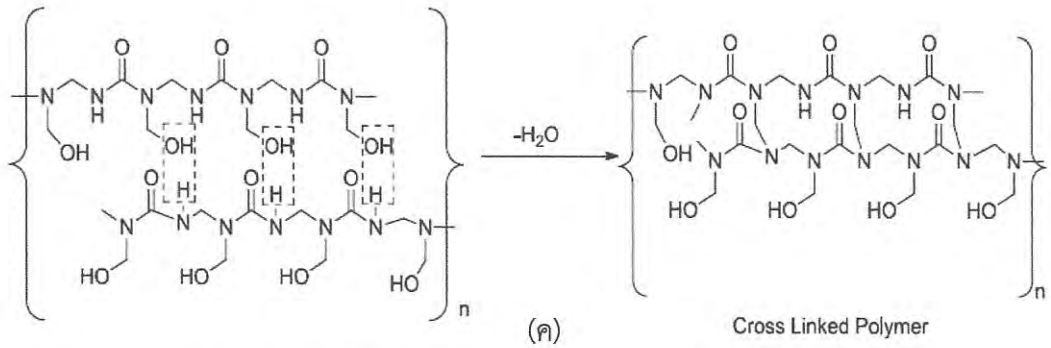
2.2.2 กลไกการเกิดไมโครเอนแคปซูลชั้น [4, 19]

กลไกการเกิดไมโครเอนแคปซูลชั้นของยูเรียและฟอร์มัลดีไฮด์จะแสดงดังรูปที่ 4 ปฏิกริยาของยูเรียกับฟอร์มัลดีไฮด์ที่พีเอช 8-9 ได้โมโนเมทิลอัลยูเรีย (Mono methylol urea) ดังรูปที่ 2.4 (ก) โมโนเมทิลอัลยูเรียทำปฏิกริยากับฟอร์มัลดีไฮด์ต่อได้ ไดเมทิลอัลยูเรีย (Dimethylol urea) จะเกิดปฏิกริยาโพลิเมอร์ไลเซชันของไดเมทิลอัลยูเรีย เมื่อลดพีเอชเป็น 2-3.5 ที่อุณหภูมิ 50-60 องศาเซลเซียส เป็นพรีพอลิเมอร์ (Pre-polymer) ของยูเรีย และฟอร์มัลดีไฮด์ ที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ ดังรูปที่ 2.4 (ข) และพรีพอลิเมอร์รวมตัวกันเกิดเป็นโครงสร้างแบบร่างแหตาข่าย (Cross-linked polymer) ของยูเรียและฟอร์มัลดีไฮด์ ไวห่อหุ้มน้ำมันเมล็ดฝ้าย ดังรูปที่ 2.4 (ค)



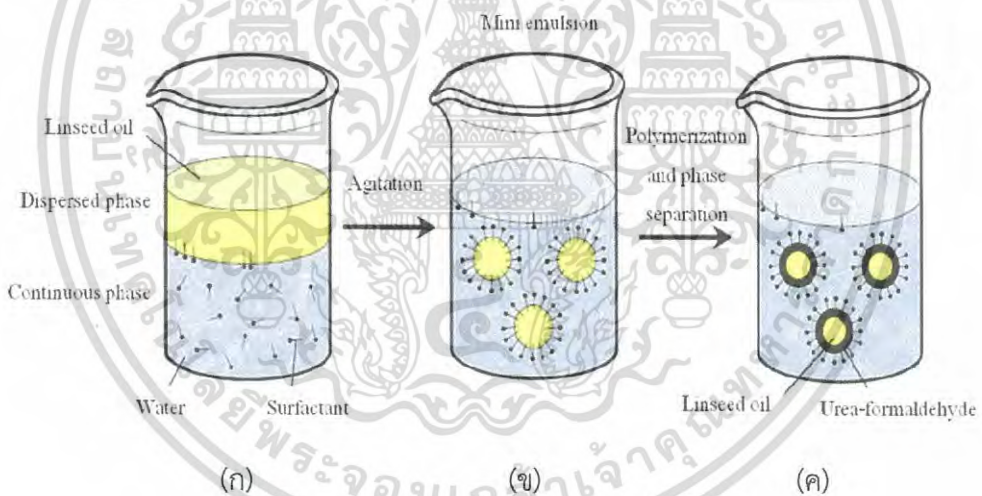
(ข)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.4. กลไกการสร้างเปลือกหุ้มของยูเรียและฟอร์มัลดีไฮด์ [4]

หลังจากเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชันในการสร้างเปลือกหุ้ม (Shell) ของไมโครแคปซูลจากยูเรียและฟอร์มัลดีไฮด์ เปลือกหุ้มจากยูเรีย และฟอร์มัลดีไฮด์ จะเข้าหุ้มสารซ่อมแซมผิว คือ น้ำมันเมล็ดฝ้าย (Core) ดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 กลไกการเกิดไมโครแคปซูลด้วยวิธีไมโครเอมัลชัน [15]

จากรูปที่ 2.5 พบว่า กลไกการเกิดไมโครแคปซูล เมื่อผสมสารตั้งต้นทั้งหมดเข้าด้วยกันจะเกิดปฏิกิริยาอิมัลชัน (Emulsion) ซึ่งมีการแยกเป็น 2 วัฏภาค [15] คือ วัฏภาคภายในหรือส่วนที่กระจายตัว (Dispersed phase) ประกอบด้วย น้ำมันที่ไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic) เช่น น้ำมันเมล็ดฝ้าย และวัฏภาคภายนอก (Continuous phase) ประกอบด้วย น้ำ และตัวทำละลายอินทรีย์ ตามรูปที่ 2.5 (ก) เมื่อมีแรงกล (Agitation) มากกระทำต่อวัฏภาคทั้งสอง ทำให้ของเหลวทั้งสองวัฏภาคเกิดการแตกตัว กระจายเป็นหยดขนาดเล็กๆ และมีพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างของเหลว 2 วัฏภาค สารอิมัลซิไฟเออร์ (Emulsifier) หรือสารลดแรงตึงผิวที่ปฏิกิริยา จะทำหน้าที่ป้องกันอิมัลชันไม่ให้แยกเป็นชั้นอีก เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไมออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ครั้งเมื่อตั้งทิ้งไว้ โดยโมเลกุลในสารอิมัลชันไฟเออร์ ดังกล่าวนั้น จะมีทั้งส่วนที่ชอบน้ำ (Hydrophilic) และส่วนที่ไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic) ส่วนที่ชอบน้ำจะหันเข้าหาน้ำ และส่วนที่ไม่ชอบน้ำจะหันเข้าหาน้ำมัน เกิดเป็นฟิล์มหุ้มส่วนที่เป็นวิทยาศาสตร์ภายในหรือน้ำมันเมล็ดฝ้ายไว้ ตามรูปที่ 2.5 (ข) ในขณะที่ยูเรียและฟอร์มาลดีไฮด์จะเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชันสร้างเปลือกหุ้ม (Shell) จะเข้าห่อหุ้มน้ำมันเมล็ดฝ้าย (Core) กลายเป็นไมโครแคปซูลรวมอยู่ในสารละลาย แสดงตามรูปที่ 2.5 (ค) เมื่อได้ไมโครแคปซูลในสารละลายจะต้องนำไปกรอง และล้างเอาคราบตะกอนของน้ำมันออก แล้วจึงนำไปอบเพื่อขจัดความชื้น จึงสามารถนำเอาไมโครแคปซูลไปใช้งานได้

2.3 น้ำมันเมล็ดฝ้าย (Linseed oil) [13]

น้ำมันเมล็ดฝ้ายเป็นน้ำมันใสไปจนออกสีเหลือง ที่ทำจากเมล็ดฝ้ายได้จากการบีบหรือการกลั่นคุณสมบัติของน้ำมันเมล็ดฝ้าย คือ มีความยืดหยุ่นแห้งเร็วไม่ทำละลายในตัวทำละลายที่สามารถละลายน้ำมันได้กันความชื้น และทนต่อสารเคมี ดังนั้นน้ำมันเมล็ดฝ้ายถูกนำมาประยุกต์ใช้เป็นสารยึดเกาะในอุตสาหกรรมเคลือบผิว และเป็นส่วนผสมของสีเคลือบเงาหรือสารเคลือบผิวบางชนิดเพื่อจุดประสงค์ที่แตกต่างกันออกไป เช่น ช่วยเพิ่มความอ่อนตัวของฟิล์มทำให้ไม่เปราะหรือเพื่อช่วยเพิ่มคุณสมบัติของการละลาย เป็นต้น โดยสารประกอบภายในน้ำมันเมล็ดฝ้ายจะประกอบด้วยกรดไขมันแสดงดังตารางที่ 1

ตารางที่ 2.1 เปอร์เซ็นต์กรดไขมันที่เป็นส่วนประกอบของน้ำมันเมล็ดฝ้าย [14, 17]

ชื่อกรดไขมัน	จำนวนคาร์บอนอะตอม	จำนวนพันธะคู่	เปอร์เซ็นต์ของกรดไขมัน
กรดสเตียริก	18	0	3-6
กรดปาร์มิติก	16	0	6-7
กรดโอเลอิก	18	1	14-24
กรดลิโนเลอิก	18	2	14-19
กรดลิโนเลนิก	18	3	48-60

จากตารางที่ 1 พบว่า เปอร์เซ็นต์ของกรดไขมันส่วนใหญ่เป็นกรดไขมันไม่อิ่มตัว (Unsaturated fatty acid) เช่น กรดลิโนเลนิก กรดลิโนเลอิก และกรดโอเลอิก เป็นต้น ซึ่งกรดไขมันไม่อิ่มตัวในน้ำมันเมล็ดฝ้ายจะมีโครงสร้างที่จัดเรียงตัวเป็นพันธะคู่มาก โดยโครงสร้างโมเลกุลที่เชื่อมโยงกันในน้ำมันจะทำให้เกิดคุณสมบัติการกันน้ำที่พื้นผิว (Waterproof) และสามารถเกิดปฏิกิริยาเคมีที่พื้นผิว เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่บนสื่อออนไลน์ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ได้ นอกจากนี้พันธะคูในโมเลกุลของน้ำมันจะทำให้เกิดการยึดหยุ่นกับพื้นผิวและทนทานต่อการสึกหรอได้

2.4 ปัจจัยที่มีผลต่อการพัฒนาสารเคลือบผิวซ่อมแซมตัวเอง [9]

ปัจจัยที่มีผลต่อการพัฒนาสารเคลือบผิวที่สามารถซ่อมแซมตัวเองได้ แสดงรายละเอียดดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2.2 ปัจจัยที่มีผลต่อการพัฒนาสารซ่อมแซมตัวเอง

ปัจจัย	อิทธิพลของปัจจัยผลต่อการพัฒนาสารซ่อมแซมตัวเอง
ไมโครแคปซูล	<ul style="list-style-type: none"> -สารซ่อมแซมตัวเอง (core) จะต้องมีความเชื่อมกับเปลือกหุ้ม (Shell) -มีอายุการใช้งานที่นาน -เปลือกหุ้มจะต้องอ่อน เพื่อให้สารซ่อมแซมตัวเองไหลออกมาได้ง่าย -กระจายตัวอยู่ใกล้กับตัวเร่งปฏิกิริยา -มีแรงดึงดูดระหว่างผิวสัมผัสที่แข็งแรงของสารซ่อมแซมตัวเองกับเปลือกหุ้ม
มอนอเมอร์	<ul style="list-style-type: none"> -มีความหนืดที่ต่ำ เพื่อจะที่ไหลไปหาบริเวณที่เกิดรอยแตกได้ง่าย -ระเหยยาก เพื่อให้มีเวลาเพียงพอให้เกิดปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชัน
ปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชัน	<ul style="list-style-type: none"> -เกิดขึ้นได้รวดเร็ว -ไม่เกิดการหดเมื่อเกิดการซ่อมแซมตัวเอง -เกิดที่อุณหภูมิห้องได้
ตัวเร่งปฏิกิริยา	<ul style="list-style-type: none"> -ไม่ละลายในมอนอเมอร์ -ไม่รวมตัวกับสารที่ช่วยในการเคลือบผิว (Matrix)
การเคลือบ	<ul style="list-style-type: none"> -ไมโครแคปซูลที่ผสมกับสารที่ช่วยในการเคลือบผิว จะต้องส่งผลกระทบต่อคุณสมบัติของสารที่ช่วยในการเคลือบผิวน้อยที่สุด -ความหนาในชั้นฟิล์มที่เคลือบต้องมีขนาดใหญ่กว่าขนาดของไมโครแคปซูล -ไม่มีการรวมกลุ่มกันของตัวเร่ง หรือไมโครแคปซูลในสารที่ช่วยในการเคลือบผิว
การซ่อมแซมตัวเอง	<ul style="list-style-type: none"> -ต้องเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้วยการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5 การกัดกร่อนของโลหะ [20]

การกัดกร่อนของโลหะ คือ การที่โลหะทำปฏิกิริยากับสารต่างๆในสิ่งแวดล้อมรอบๆ แล้วทำให้โลหะนั้นเปลี่ยนสภาพไปเป็นสารประกอบประเภทออกไซด์หรือไฮดรอกไซด์หรือเรียกกง่าย ๆ ว่าเนื้อโลหะสูญเสียไป ซึ่งการผุกร่อนของโลหะที่พบบ่อยในชีวิตประจำวัน ได้แก่ เหล็กเป็นสนิม จะแสดงดังรูปที่ 2.6 ซึ่งเกิดจากสาเหตุหลายประการ เช่น การที่อะตอมของโลหะที่ถูกออกซิไดส์ แล้วรวมตัวกับออกซิเจนในอากาศเกิดเป็นออกไซด์ของโลหะนั้น เช่น สนิมเหล็ก (Fe_2O_3) สนิมทองแดง (CuO) หรือ สนิมอะลูมิเนียม (Al_2O_3) เป็นต้น



รูปที่ 2.6 การกัดกร่อนของโลหะ [21]

2.5.1 ประเภทของการกัดกร่อนของโลหะ

ประเภทของการกัดกร่อนของโลหะอาจแยกได้ 2 ประเภท

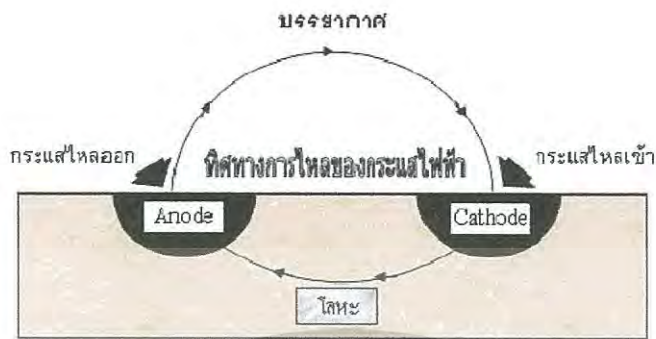
2.5.1.1. การกัดกร่อนของโลหะด้วยปฏิกิริยาเคมีโดยตรง (Direct chemical corrosion) เกิดปฏิกิริยาเคมีโดยตรงระหว่างผิวโลหะและแก๊ส เช่น ออกซิเจน ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ เป็นต้น และปฏิกิริยาดังกล่าวมักเกิดที่อุณหภูมิสูงสารประกอบที่เกิดขึ้น จากปฏิกิริยาเหล่านี้ถ้ามีลักษณะปกคลุมผิวโลหะอย่างเหนียวแน่น และไม่มีรูพรุนจะทำให้ปฏิกิริยาหยุดได้ และจะเป็นตัวป้องกันผิวโลหะไว้อีกชั้นหนึ่งเช่น Al_2O_3 ที่ปกคลุมผิวอะลูมิเนียม เป็นต้น

2.5.1.2. การกัดกร่อนของโลหะด้วยปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมี (Electrochemical corrosion) โลหะจะกัดกร่อนได้จะต้องมี electrolyte ซึ่งอาจจะเป็นบรรยากาศที่ชื้นหรือของเหลวใดๆ ที่โลหะสัมผัสอยู่ ปฏิกิริยาแบบนี้จะเกิดการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนจากโลหะที่ผุกร่อน ซึ่งเรียกว่า anode ไปยังโลหะหรือธาตุซึ่ง anode สัมผัสอยู่โลหะหรือธาตุตัวหลังนี้เรียกว่า cathode เป็นขั้วที่มีประจุบวก (Cation) วิ่งไปหาในขณะที่ขั้ว anode มีประจุลบ (Anion) วิ่งไปหาเซลล์ไฟฟ้าจะครบวงจรเนื่องจาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กระแสอิเล็กตรอนไหลสวนทางกับการไหลของกระแสไฟฟ้าซึ่งทิศทางการไหลของกระแสไฟฟ้าได้ แสดงในรูปที่

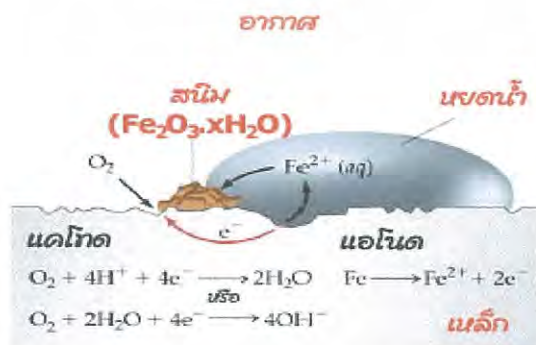
2.7



ทิศทางการไหลของกระแสไฟฟ้า เนื่องจากปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมี

รูปที่ 2.7 ทิศทางการไหลของกระแสไฟฟ้าในการกัดกร่อนของโลหะ [20]

โลหะในธรรมชาติที่เกิดการผุกร่อนมีสาเหตุหลายประการ สาเหตุหนึ่งคือเกิดจากผิวของโลหะสัมผัสกับน้ำและแก๊สออกซิเจนการผุกร่อนของโลหะเกิดจากการที่อะตอมของโลหะถูกออกซิไดซ์เป็นไอออนแล้วรวมตัวกับออกซิเจนในอากาศได้ผลิตภัณฑ์เป็นออกไซด์ของโลหะนั้น เช่น สนิมเหล็ก (Fe_2O_3) สนิมทองแดง (CuO) หรือสนิมอะลูมิเนียม (Al_2O_3) ปฏิกิริยาการเกิดสนิม มีกระบวนการซับซ้อนมาก และมีลักษณะเฉพาะตัวเช่นการเกิดสนิมเหล็ก เนื่องจากบริเวณผิวเหล็กที่สัมผัสน้ำจะมีการให้ และรับอิเล็กตรอนโดยอะตอมของเหล็กจะเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันหรือถูกออกซิไดซ์เป็นเฟอร์รัสไอออน (Fe^{2+}) ดังสมการที่ (2.1) ส่วนน้ำและออกซิเจนในอากาศจะรับอิเล็กตรอนหรือถูกรีดิวซ์เป็น ไฮดรอกไซด์ (OH^-) ดังสมการที่ (2.2) และ (2.3) เมื่อเวลาผ่านไปน้ำจะมีสภาพเป็นด่าง และทำให้เกิดการตกตะกอนของเฟอร์รัสไอออน (Fe^{2+}) ในรูปของเฟอร์ริกไฮดรอกไซด์ ($Fe(OH)_3$) ดังสมการที่ (2.4) (2.5) และ (2.6) โดยปฏิกิริยาการเกิดสนิมเหล็กในธรรมชาติจะแสดงดังรูปที่ 2.8



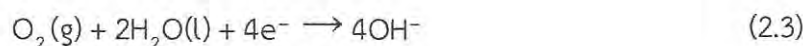
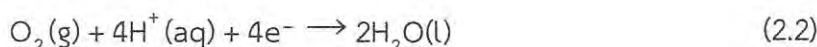
รูปที่ 2.8 ปฏิกิริยาการเกิดสนิมเหล็กในธรรมชาติ [20]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

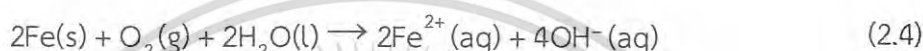
ปฏิกิริยาออกซิเดชันที่ขั้วแอโนด



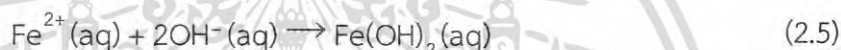
ปฏิกิริยารีดักชันที่อากาศขั้วแคโทด



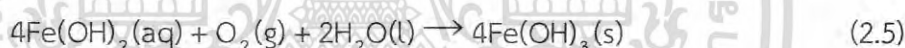
ปฏิกิริยารีดอกซ์



$\text{Fe}^{2+}(\text{aq})$ และ $\text{OH}^-(\text{aq})$ จะรวมกันได้ $\text{Fe}(\text{OH})_2$



$\text{Fe}(\text{OH})_2$ ที่เกิดขึ้นจะทำปฏิกิริยากับน้ำและออกซิเจนในอากาศต่อไปได้ $\text{Fe}(\text{OH})_3$



$\text{Fe}(\text{OH})_3$ ที่เกิดขึ้นโดยทั่วไปจะเขียนในรูปเฟอร์ริกไฮดรอกไซด์ที่มีน้ำอยู่ในโมเลกุล และน้ำอาจมีปริมาณแตกต่างกันจึงเขียนสูตรทั่วไปเป็น $\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$

การผุกร่อนของเหล็กหรือเกิดสนิมอาจเกิดได้เร็วขึ้นเมื่อเหล็กสัมผัสกับสารเคมีที่เป็นตัวออกซิไดซ์ เช่น กรดสารละลายของสารประกอบไอออนิกบางชนิด เช่น NaCl หรือสัมผัสกับโลหะที่มีศักย์ไฟฟ้ามาตรฐานของครึ่งเซลล์สูงกว่าโลหะอื่น ๆ สามารถผุกร่อนได้เช่น ทองแดง (Cu) หรือเงิน (Ag) เป็นต้น

2.5.2 ปัจจัยที่มีผลต่อการกัดกร่อนของโลหะ

การที่โลหะถูกกัดทำลายหรือผุกร่อนไปโดยเร็วนับว่าเป็นความเสียหายทางด้านเศรษฐกิจที่สำคัญอย่างหนึ่ง อัตราการผุกร่อนอาจขึ้นกับปัจจัยที่สำคัญ 2 ประการดังนี้

2.5.2.1 ปัจจัยที่ขึ้นอยู่กับโลหะ มีดังต่อไปนี้

- 1) ขึ้นอยู่กับตำแหน่งของโลหะในอนุกรมไฟฟ้าเคมี (Electrochemical series)

แสดงดังรูปที่ 2.9 โลหะแต่ละชนิดจะมีความสามารถละลายลงในสารละลายได้มากน้อยต่างกัน ซึ่งเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โลหะที่มีค่าค่าความต่างศักย์ไฟฟ้ามาตรฐานต่ำจะมีความสามารถละลายลงไปได้มากกว่าโลหะที่มีค่าค่าความต่างศักย์ไฟฟ้ามาตรฐานสูงกว่า

	Reduction Half-Reaction	E° (V)			
Stronger oxidizing agent ↑	$F_2(g) + 2 e^- \longrightarrow 2 F(aq)$	2.87	Weaker reducing agent ↓		
	$H_2O_2(aq) + 2 H^+(aq) + 2 e^- \longrightarrow 2 H_2O(l)$	1.78			
	$MnO_4^-(aq) + 8 H^+(aq) + 5 e^- \longrightarrow Mn^{2+}(aq) + 4 H_2O(l)$	1.51			
	$Cl_2(g) + 2 e^- \longrightarrow 2 Cl^-(aq)$	1.36			
	$Cr_2O_7^{2-}(aq) + 14 H^+(aq) + 6 e^- \longrightarrow 2 Cr^{3+}(aq) + 7 H_2O(l)$	1.33			
	$O_2(g) + 4 H^+(aq) + 4 e^- \longrightarrow 2 H_2O(l)$	1.23			
	$Br_2(l) + 2 e^- \longrightarrow 2 Br^-(aq)$	1.09			
	$Ag^+(aq) + e^- \longrightarrow Ag(s)$	0.80			
	$Fe^{3+}(aq) + e^- \longrightarrow Fe^{2+}(aq)$	0.77			
	$O_2(g) + 2 H^+(aq) + 2 e^- \longrightarrow H_2O_2(aq)$	0.70			
	$I_2(s) + 2 e^- \longrightarrow 2 I^-(aq)$	0.54			
	$O_2(g) + 2 H_2O(l) + 4 e^- \longrightarrow 4 OH^-(aq)$	0.40			
	$Cu^{2+}(aq) + 2 e^- \longrightarrow Cu(s)$	0.34			
	$Sn^{4+}(aq) + 2 e^- \longrightarrow Sn^{2+}(aq)$	0.15			
	$2 H^+(aq) + 2 e^- \longrightarrow H_2(g)$	0			
	↓ Weaker oxidizing agent	$Pb^{2+}(aq) + 2 e^- \longrightarrow Pb(s)$		-0.13	Stronger reducing agent ↓
		$Ni^{2+}(aq) + 2 e^- \longrightarrow Ni(s)$		-0.26	
	$Cd^{2+}(aq) + 2 e^- \longrightarrow Cd(s)$	-0.40			
	$Fe^{2+}(aq) + 2 e^- \longrightarrow Fe(s)$	-0.45			
	$Zn^{2+}(aq) + 2 e^- \longrightarrow Zn(s)$	-0.76			
	$2 H_2O(l) + 2 e^- \longrightarrow H_2(g) + 2 OH^-(aq)$	-0.83			
	$Al^{3+}(aq) + 3 e^- \longrightarrow Al(s)$	-1.66			
	$Mg^{2+}(aq) + 2 e^- \longrightarrow Mg(s)$	-2.37			
	$Na^+(aq) + e^- \longrightarrow Na(s)$	-2.71			
	$Li^+(aq) + e^- \longrightarrow Li(s)$	-3.04			

รูปที่ 2.9 ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้ามาตรฐาน (E°) ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส [22]

2) ขึ้นอยู่กับโลหะอีกชนิดหนึ่งที่สัมผัสอยู่ เช่น สังกะสีที่สัมผัสกับเหล็กสังกะสีจะผุกร่อนไปในขณะที่เหล็กไม่ถูกกัดกร่อน แต่ถ้าเหล็กมาสัมผัสกับดีบุกเนื้อเหล็กจะถูกกัดกร่อนในขณะที่ดีบุกไม่ถูกกัดกร่อน และถ้าโลหะที่มาสัมผัสกันนั้นมีค่าความต่างศักย์ไฟฟ้ามาตรฐานต่างกันมาก การผุกร่อนนั้นก็จะรุนแรงมากขึ้น

3) ขึ้นกับโครงสร้างของเนื้อโลหะ เช่น ถ้าเนื้อโลหะมีสิ่งเจือปนมากหรือเนื้อโลหะไม่เป็นเนื้อเดียวกันโดยตลอดโลหะนั้นก็จะผุกร่อนได้ง่าย

4) ขึ้นอยู่กับความเครียดภายในเนื้อโลหะ เช่น ถ้าเนื้อโลหะมีความเครียดภายในมากโลหะนั้นก็จะผุกร่อนได้ง่ายเช่นกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5.2.2 ปัจจัยที่ขึ้นอยู่กับสถานะแวดล้อมมีดังต่อไปนี้

- 1) ความชื้นสัมพัทธ์ถ้าบรรยากาศมีค่าความชื้นสัมพัทธ์สูงโลหะก็อาจผุกร่อนได้โดยรวดเร็ว
- 2) ขึ้นกับมลภาวะของบรรยากาศถ้ามีมากก็ทำให้โลหะผุกร่อนได้เร็วเช่นกัน
- 3) ขึ้นกับการกระจายตัวของออกซิเจนถ้าออกซิเจนกระจายตัวไม่สม่ำเสมอโลหะก็อาจผุกร่อนได้ง่าย
- 4) ขึ้นกับอัตราการไหลของของเหลว
- 5) ขึ้นกับความเป็นกรดความเป็นด่างของของเหลว
- 6) ขึ้นอยู่กับความเครียดที่เนื้อโลหะได้รับ

2.5.3 รูปแบบของการกัดกร่อน [1]

รูปแบบของการกัดกร่อน สามารถแบ่งได้ 10 แบบ ดังนี้

2.5.3.1 การกัดกร่อนแบบสม่ำเสมอ (Uniform corrosion) เป็นลักษณะการกัดกร่อนที่เกิดเมื่อผิวหน้าทั้งหมดของโลหะถูกกัดกร่อนด้วยระดับเดียวกัน การกัดกร่อนลักษณะนี้เกิดขึ้นตามปกติในโลหะ เนื่องจากเนื้อโลหะส่วนใหญ่ไม่ได้อยู่ในสภาพที่เนื้อเดียวกันอย่างสม่ำเสมอ

2.5.3.2 การกัดกร่อนแบบเป็นรู (Pitting corrosion) เป็นตัวอย่างของการกัดกร่อนแบบไม่สม่ำเสมอ ซึ่งเป็นผลเนื่องมาจากการที่เนื้อโลหะไม่ได้อยู่ในสภาพเป็นเนื้อเดียวกันอย่างสม่ำเสมอ มีบริเวณที่ระนาบเกิดการเสีรู เกิดเป็นกลุ่มอะตอม ตัวอย่างเช่น เมื่อโครเมียมที่ชุบเคลือบเหล็กกล้าที่ใช้ทำกันชนรถยนต์เกิดการรอยแตกขึ้น การผุกร่อนแบบรูจะเกิดขึ้นบนผิวของเหล็กกล้าตรงตำแหน่งรอยแตกรันั้น เป็นต้น

2.5.3.3 การกัดกร่อนแบบร่อน (Cavitation corrosion) เป็นลักษณะการกัดกร่อนแบบร่อน ซึ่งเป็นการกัดกร่อนจากแรงกระแทกที่เกิดจากฟองของเหลวชนผิวของโลหะ การที่มีของเหลวเคลื่อนที่ผ่านช้าๆ ทำให้เกิดความเครียดขึ้นในโลหะ และฟองของเหลวนี้เกิดขึ้นเมื่อความดันภายในท่อที่ของเหลวไหลผ่านที่ความดันเท่าหรือต่ำกว่าความดันไอของของเหลว เมื่อฟองชนกระแทกผิวโลหะอย่างสม่ำเสมอ การชนนี้ทำให้เกิดความเครียดสูงขึ้น จนทำให้อนุภาคโลหะหลุดออกจากผิวและเกิดเป็นรูลึกเป็นหลุมขึ้น

2.5.3.4 การกัดกร่อนแบบมุมอับ (Crevice corrosion) เป็นการกัดกร่อนตามมุมอับที่เป็นรอยต่อระหว่างโลหะสองชนิด ที่สัมผัสกับสถานะแวดล้อมที่กัดกร่อน การกัดกร่อนมักเกิดตามมุม อากาศนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อับซึ่งมีสารละลายตกค้างและใช้เวลานานกว่าจะแห้ง นอกจากนั้น การกัดกร่อนนี้ยังสามารถเกิดตามมุมอับในขณะที่ชิ้นงานจุ่มอยู่ในสารละลายกัดกร่อนได้

2.5.3.5 การกัดกร่อนแบบสึกหรือจากการสั่น (Fretting corrosion) เป็นลักษณะการกัดกร่อนทำลายผิวหน้าชิ้นงานที่เกิดจากการสั่นของชิ้นงาน ซึ่งเป็นผลมาจากการถูกระแทกหรือขีดสีที่รอยต่อของข้อต่อที่เกิดในขณะที่ชิ้นงานรับน้ำหนักที่ผิวหน้าสูงมาก การกัดกร่อนลักษณะนี้พบได้ทั่วไปที่รอบผิวของข้อยึด เกลียวอัด ลึนสลัก รางกุญแจ หรือชิ้นส่วนที่มีการประกบเข้าเกลียว และถูกกัดสีจากการกัดอยู่ตลอดเวลา เมื่อชิ้นส่วนสองชิ้นขัดสีกัน แรงยึดที่เกิดจากอนุภาคเล็กๆ ที่ผิวจะเกิดการเชื่อมติดกันและเมื่อมีการเคลื่อนที่เบาๆ อย่างต่อเนื่อง อนุภาคที่เชื่อมยึดกันจะฉีกขาดออกจากกันจากผิวด้านที่อยู่ตรงกันข้ามและเกิดปฏิกิริยาเคมีกับบรรยากาศ เกิดเป็นผงบริเวณที่เชื่อมต่อกัน

2.5.3.6 การกัดกร่อนบริเวณขอบเกรน (Intergranular corrosion) เป็นการกัดกร่อนอีกแบบหนึ่งที่เกิดจากความไม่สม่ำเสมอของเนื้อโลหะที่เกิดขึ้นบริเวณขอบเกรนกับเนื้อโลหะส่วนอื่นๆ การกัดกร่อนลักษณะนี้เกิดเมื่อมีการตกผลึกของวัฏภาคสารละลายของแข็ง และการตกผลึกบริเวณขอบเกรนเกิดขึ้นเร็วกว่าบริเวณอื่นๆ ทำให้เนื้อโลหะที่อยู่ใกล้ๆ กับบริเวณขอบเกรนมีธาตุเจือละลายอยู่ในสารละลายของแข็งน้อยลง ซึ่งทำให้เกิดความต่างศักย์ไฟฟ้าขึ้นที่เนื้อโลหะตรงบริเวณขอบเกรน จะเกิดการกัดกร่อน ซึ่งพบได้บ่อยมากในเหล็กกล้าไร้สนิม

2.5.3.7 การกัดกร่อนแบบแรงเค้น (Stress corrosion) เมื่อโลหะได้รับความเค้นจากภายนอก หรือได้รับความเค้นแรงดึงขึ้นภายในเนื้อโลหะเนื่องจากการขึ้นรูป แรงเค้นนี้จะเป็ตัวเร่งให้เกิดการกัดกร่อนขึ้น เมื่อโลหะถูกนำไปใช้งานในสภาวะแวดล้อมบางชนิด ทำให้เกิดรอยแตกขึ้นที่ระหว่างเกรนหรือผ่ากลางเกรนหรือเกิดขึ้นทั้งสองแบบ ขนาดของแรงเค้นที่สามารถทำให้ทำให้ชิ้นงานแตกหักได้นั้นไม่แน่นอน ขึ้นอยู่กับตัวกลางที่ทำให้เกิดการกัดกร่อนและขึ้นกับโครงสร้างของโลหะหลายชนิดกัน โลหะแต่ละชนิดจะถูกกัดกร่อนได้ในสภาวะแวดล้อมที่แตกต่างกัน ดังนั้น เป็นการยากในการทำนายได้ว่ากรกัดกร่อนนี้เกิดขึ้นที่ใด โดยในเหล็กและเหล็กกล้า ที่มีไนโตรเจนแทรกอยู่จะถูกกัดกร่อนแบบอย่างแรงเค้นได้อย่างรวดเร็วมาก เป็นต้น

2.5.3.8 การกัดกร่อนแบบเลือกกัดกร่อน (Preferential corrosion) เป็นการเลือกกัดกร่อนกับโลหะเพียงชนิดเดียวในโลหะเจือจางที่เป็นวัฏภาคเดียว ตัวอย่างการกัดกร่อนชนิดนี้ เช่น การชะละลายของสังกะสีในทองเหลือง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5.3.9 การกัดกร่อนแบบกัลวานิก (Galvanic corrosion) เกิดที่รอยต่อของโลหะสองชนิดที่มาสัมผัสกันและอยู่ในสารตัวกลางกัดกร่อนเดียวกัน โดยการกัดกร่อนลักษณะนี้จะไปตามหลักของไฟฟ้าเคมีที่โลหะทั้งสองเกิดเป็นขั้วแอโนดและขั้วแคโทด การกัดกร่อนจะเกิดที่ขั้วแอโนด

2.5.3.10 การกัดกร่อนแบบโลหะเหลว (Liquid-metal corrosion) เป็นลักษณะการกัดกร่อนในเตาปฏิกรณ์นิวเคลียร์บางชนิดที่ผลิตพลังงานนิวเคลียร์ โลหะเหลว เช่น บิสมีท และโซเดียม ถูกใช้เป็นตัวกลางในการส่งผ่านความร้อน เส้นทางการส่งผ่านความร้อนของโลหะเหลวมีลักษณะเป็นวงจรปิด โดยขาข้างหนึ่งของโลหะจะอยู่ที่แกนกลางของเตาปฏิกรณ์ซึ่งมีอุณหภูมิสูง และขาอีกข้างหนึ่งอยู่ในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนซึ่งมีอุณหภูมิต่ำกว่า โดยปกติการละลายของของแข็งในของเหลวจะเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิ ดังนั้น จึงมีแนวโน้มสำหรับของแข็งที่จะละลายในของเหลวสูงเกินค่าจำกัดของการละลายในตำแหน่งขาข้างที่มีอุณหภูมิสูง และเกิดการเกาะของของแข็งที่ขาข้างเย็น ขาโลหะข้างที่ร้อนจะเกิดการกัดกร่อนอย่างต่อเนื่อง และขาข้างที่เย็นจะเกิดการอุดตันด้วยสารที่เกิดจากการกัดกร่อนจากขาข้างที่ร้อน ปรัชญาการณีนี้นำมาซึ่งการเสียหายของโลหะในบริเวณร้อน

2.6 วิธีการป้องกันการกัดกร่อน [1]

วิธีการป้องกันการกัดกร่อนมีวิธีการมากมายที่ถูกนำมาใช้ป้องกันการกัดกร่อนในอุตสาหกรรม มีดังต่อไปนี้

2.6.1 การเลือกใช้โลหะที่มีความบริสุทธิ์สูงเพื่อลดความไม่เป็นเนื้อเดียวกันของโลหะให้น้อยที่สุด ซึ่งเป็นการเพิ่มความต้านทานการกัดกร่อนแบบเป็นรูให้น้อยลง

2.6.2 การใช้โลหะเจือ หรือการเจือธาตุที่ต้านทานการกัดกร่อนลงในโลหะใช้งาน สามารถลดการกัดกร่อนในโลหะได้หลายชนิด ซึ่งโลหะเจือบางชนิดที่เติมลงไปจะไปช่วยเพิ่มความต้านทานการกัดกร่อน จะเกิดเป็นออกไซด์ฟิล์มที่ไม่มีรูพรุน หรือมีเนื้อละเอียดปกคลุมผิวโลหะขึ้น เช่น แมงกานีสกับอะลูมิเนียมที่ถูกเติมลงในโลหะทองแดงเจือ โมลิบดีนัมที่เติมลงในเหล็กกล้าไร้สนิม และแมกนีเซียมที่เติมลงในอะลูมิเนียม เป็นต้น

2.6.3 การใช้กรรมวิธีทางความร้อนแบบพิเศษ เป็นวิธีที่ทำให้เกิดสารละลายของแข็งที่เป็นเนื้อเดียวอย่างสม่ำเสมอ เช่น การอบคลายความเค้นหลังจากการขึ้นรูปเย็น ซึ่งเป็นวิธีที่นิยมใช้กันมากในการเพิ่มความต้านทานการกัดกร่อนของโลหะเจือต่อการกัดกร่อนที่เกิดจากความเค้นตกค้าง

2.6.4 การออกแบบที่เหมาะสม คือการออกแบบอุปกรณ์ให้เหมาะสมกับชิ้นงานที่ต้องสัมผัสกับ

สารกัดกร่อน เช่น ข้อต่อ จะช่วยลดโอกาสที่ของเหลวจะเข้าไปซังหรือตกค้างอยู่ในชิ้นงานได้ การเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต ไม่ว่าจะโดยใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หลีกเลี่ยงที่จะเลือกโลหะที่อยู่ในอนุกรมแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่ห่างจากกันมากๆ มาใช้งานในลักษณะที่โลหะทั้งสองต้องสัมผัสกัน และหากจำเป็นไม่สามารถหลีกเลี่ยงได้ควรคั่นระหว่างโลหะทั้งสองด้วยฉนวน เช่น พลาสติกหรือยาง เพื่อลดการเกิดการกัดกร่อนแบบกัลวานิก

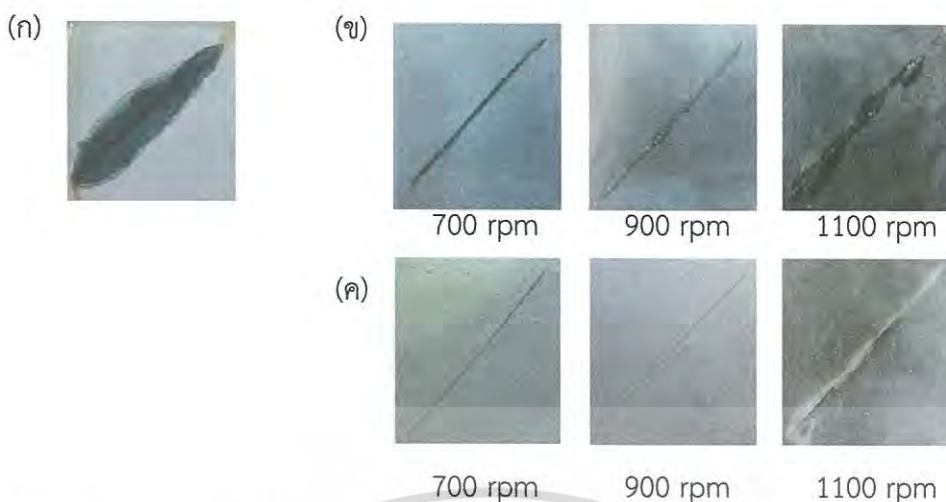
2.6.5 การใช้สารหน่วงการกัดกร่อน เช่น การใช้สารออกซิไดซ์เติมลงในสารละลายที่กัดกร่อน และสารออกซิไดซ์ที่เติมลงไปนี้จะไปสร้างออกไซด์ฟิล์มบนผิวโลหะ เช่น อะลูมิเนียม โครเมียม และแมงกานีส ให้เกิดเป็นออกไซด์ฟิล์มป้องกันการกัดกร่อน

2.6.6 การเคลือบผิว เช่น การทาสี การเคลือบผิวด้วยโลหะ และการเคลือบผิวด้วยฟิล์มของเกลือหรือฟิล์มของโลหะออกไซด์ ซึ่งการทาสีและการเคลือบผิวด้วยสารอินทรีย์ต่างๆ เป็นวิธีการเบื้องต้นที่ถูกนำมาใช้เพื่อทำให้ลักษณะของผิวที่ปรากฏทนทานต่อการกัดกร่อนขึ้น โดยสีที่เคลือบจะทำหน้าที่เป็นฟิล์มป้องกันโลหะได้อย่างมีประสิทธิภาพแทนที่ฟิล์มที่เคลือบนั้นจะไม่เกิดรอยแตก

2.6.7 การป้องกันแบบแคโทดิก คือ การนำโลหะที่ถูกการกัดกร่อนได้ง่าย มาสัมผัสกับโลหะชิ้นงาน ชิ้นงานจะถูกสร้างให้ทำหน้าที่เป็นขั้วแคโทด โดยโลหะจะทำหน้าที่เป็นขั้วแอโนด โดยทั่วไปจะใช้โลหะสังกะสี และแมกนีเซียม เช่น การป้องกันการกัดกร่อนท่อดิน หม้อน้ำ และลำเรือ เป็นต้น

2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

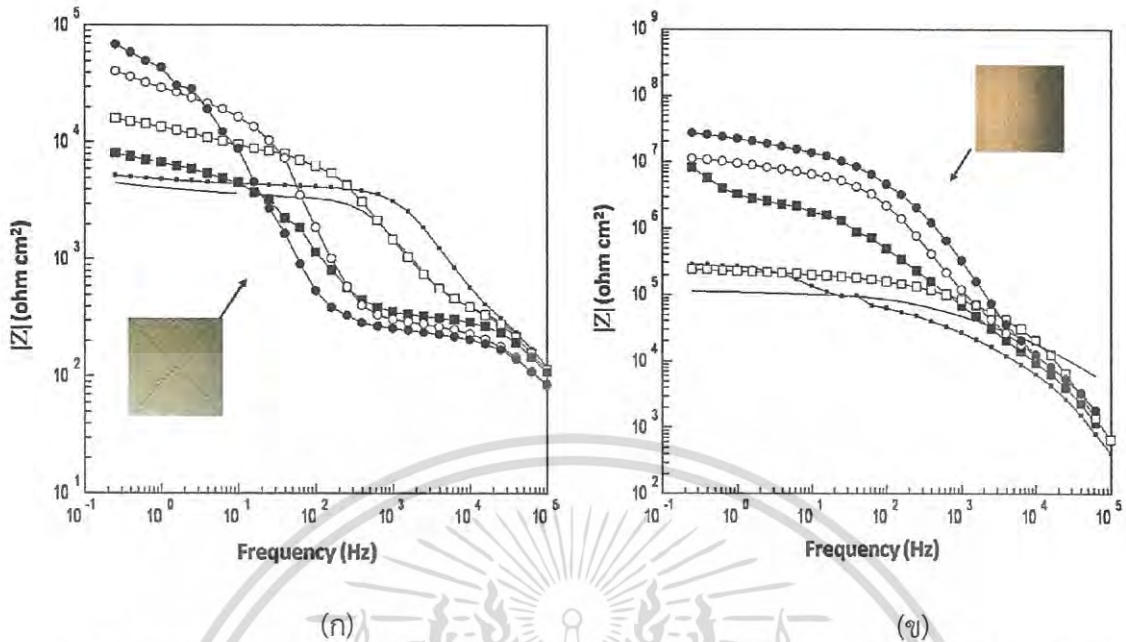
Behzadnasab [5] ได้ศึกษาลักษณะและการสังเคราะห์ไมโครแคปซูลจาก น้ำเมล็ดฝ้าย และยูเรียฟอร์มัลดีไฮด์ โดยไมโครแคปซูลจะถูกสังเคราะห์ที่อัตราเร็วในการกวน 500 700 900 และ 1100 รอบต่อวินาที ด้วยเครื่องกวน (Mechanical stirrer) แล้วนำไปวิเคราะห์ขนาดและอนุภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง และนำไมโครแคปซูลที่สังเคราะห์ที่อัตราเร็วในการกวน 700 900 และ 1000 รอบต่อนาทีไปผสมกับอีพ็อกซี ที่อัตราส่วนการผสมไมโครแคปซูลกับอีพ็อกซี คือ 0.5 และ 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของไมโครแคปซูล แล้วนำไปทดสอบประสิทธิภาพการซ่อมแซมตัวเองของสารเคลือบผิว จากการทดลองพบว่า ที่อัตราเร็วในการกวน 500 700 900 และ 1100 รอบต่อนาที ขนาดเฉลี่ยของอนุภาคไมโครแคปซูล คือ 181 ± 21 116 ± 15 53 ± 6 และ 28 ± 4 ไมโครเมตร ตามลำดับ และผลการทดสอบประสิทธิภาพการซ่อมแซมตัวเองของสารเคลือบผิว แสดงดังรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 ลักษณะของการต้านทานการกักกร่อนของไมโครแคปซูลที่ถูกสังเคราะห์ที่อัตราเร็วในการกวน 700, 900 และ 1100 รอบต่อนาที และปริมาณของไมโครแคปซูลในสารเคลือบผิว (ก) 0 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก (ข) 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และ (ค) 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

จากรูปที่ 2.10 พบว่า ไมโครแคปซูลที่ถูกสังเคราะห์ที่อัตราเร็วในการกวน 1100 รอบต่อนาที และที่อัตราส่วนของไมโครแคปซูลในสารเคลือบผิว 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก สามารถประสานรอยขีดข่วนได้ดีกว่าที่สภาวะอื่นๆ ดังนั้น ในการสังเคราะห์ไมโครแคปซูล อัตราเร็วในการกวนแปรผกผันต่อขนาดของไมโครแคปซูล และสารเคลือบผิวที่มีไมโครแคปซูล (ที่ถูกสังเคราะห์ที่อัตราเร็วในการกวน 1100 รอบต่อนาที) สามารถประสานรอยขีดข่วน และป้องกันการกักกร่อนได้ดีกว่าสารเคลือบผิวที่ไม่มีไมโครแคปซูล

Siva และ Sathiyarayanan [19] ได้ศึกษาการซ่อมแซมตัวเองของสารเคลือบผิวที่สังเคราะห์จาก น้ำมันเมล็ดฝ้ายและยูเรียฟอร์มัลดีไฮด์ โดยนำไมโครแคปซูลมาผสมกับอีพ็อกซี ที่อัตราส่วนการผสมของไมโครแคปซูลกับอีพ็อกซี คือ 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของไมโครแคปซูล มาเคลือบบนแผ่นเหล็กกล้า (ขนาด $150 \times 100 \times 2$ มิลลิเมตร) ที่ความหนาของชั้นฟิล์ม 40 ± 5 ไมโครเมตร แล้วนำมาวิเคราะห์ค่าความต้านทานการกัดกร่อนด้วยเครื่องวัดการป้องกันการกัดกร่อนโดยใช้เทคนิคอิเล็กโตรเคมีคอลอิมพีแดนซ์สเปกโตรสโกปี (EIS) กับสารละลายโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้น 3.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ที่เวลา 1 3 5 10 และ 15 วัน ตามลำดับ เปรียบเทียบกับสารเคลือบผิวที่ไม่มีไมโครแคปซูลที่เงื่อนไขเดียวกัน ได้ผลการทดลองดังรูปที่ 2.11



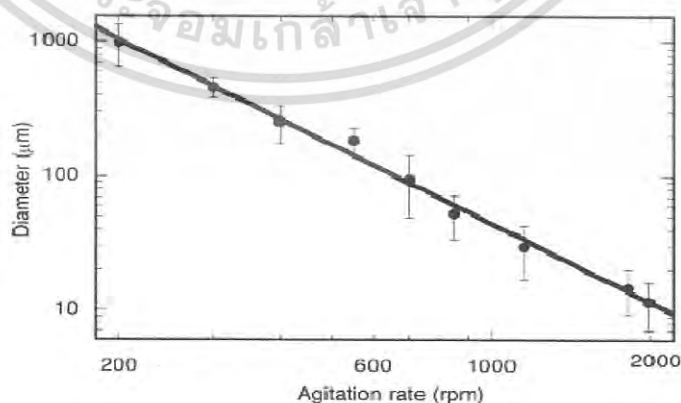
รูปที่ 2.11 ค่าต้านทานการกักกรองของไมโครแคปซูลบนผิวของเหล็กกล้า โดยใช้เทคนิคอิมพีแดนซ์สเปกโทรสโกปี (EIS) ด้วยสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 3.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ที่เวลา (●) 1 วัน (□) 3 วัน (■) 5 วัน (○) 10 วัน และ (●) 15 วัน เมื่อ (ก) คือ สารเคลือบผิวที่ไม่มีไมโครแคปซูล และ (ข) คือ สารเคลือบผิวที่ผสมไมโครแคปซูล

จากรูปที่ 2.11 พบว่า ที่เวลาในการแช่ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 3.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก 1 3 5 10 และ 15 วัน มีค่าความต้านทานการกักกรองของสารเคลือบผิวที่มีไมโครแคปซูลสูงกว่าค่าความต้านทานการกักกรองของสารเคลือบผิวที่ไม่มีไมโครแคปซูลที่ความถี่เดียวกัน ดังนั้น สารเคลือบผิวที่มีไมโครแคปซูลผสมอยู่สามารถประสานรอยขีดข่วน และป้องกันการกักกรองได้ดีกว่าสารเคลือบผิวที่ไม่มีไมโครแคปซูล

Hatami และคณะ [23] ได้ศึกษาความสามารถของการซ่อมแซมตัวเองและค่าการยึดเกาะของแคปซูลในสารเคลือบผิว ที่มีส่วนผสมของแคปซูลอนุภาคขนาดไมโครเมตรที่ภายในแคปซูลบรรจุน้ำมันเมล็ดฝ้าย โดยนำไมโครแคปซูลที่ถูกสังเคราะห์ที่อัตราเร็วในการกวาด 400 รอบต่อนาที (ขนาดอนุภาคเฉลี่ย 75 ไมโครเมตร) ผสมกับอีพ็อกซี ที่ปริมาณของไมโครแคปซูลในสารเคลือบผิว คือ 0 10 15 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เคลือบบนแผ่นเหล็กกล้า (ขนาด 60 x 60 x 2 มิลลิเมตร) ที่ความหนาของชั้นฟิล์ม 150 ไมโครเมตร แล้วนำมาวิเคราะห์ค่าความต้านทานการกักกรองด้วยเครื่องวัดการป้องกันการกักกรองโดยใช้เทคนิคอิมพีแดนซ์สเปกโทรสโกปี (EIS) กับสารละลายโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้น 3.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ที่เวลา 1 7 และ 21 วัน เปรียบเทียบกับไมโคร

แคปซูลที่ถูกสังเคราะห์ที่อัตราเร็วในการกวน 600 รอบต่อนาที (ขนาดอนุภาคเฉลี่ยของไมโครแคปซูล 50 ไมโครเมตร) ที่ปริมาณของไมโครแคปซูลในสารเคลือบผิว เท่ากัน จากการทดลองพบว่า ไมโครแคปซูลที่ถูกสังเคราะห์ที่อัตราเร็วในการกวน 600 รอบต่อนาที มีค่าความต้านทานการกักร้อนมากกว่าอัตราเร็วในการกวน 400 รอบต่อนาที และที่ปริมาณของไมโครแคปซูลในสารเคลือบผิว 15 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ค่าความต้านทานการกักร้อนที่ความถี่ 0.01 เฮิรตซ์ ที่เวลาในการแช่ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 3.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก 1 7 และ 21 วัน คือ 1079 193 และ 25 กิโลโอห์ม ตารางเซนติเมตร ตามลำดับ ซึ่งมีค่าความต้านทานการกักร้อนสูงกว่าอัตราส่วนการผสมของไมโครแคปซูลกับอีพ็อกซี เรซิน 20 10 และ 0 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของไมโครแคปซูล ที่ความถี่และเวลาในการแช่สารละลายโซเดียมคลอไรด์เดียวกัน ดังนั้น อัตราเร็วในการกวนเพิ่มมากขึ้นให้ขนาดของอนุภาคไมโครแคปซูลที่มีขนาดเล็ก และปริมาณของไมโครแคปซูลในสารเคลือบผิว 15 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักในค่าความต้านการกักร้อนได้ดีกว่าปริมาณของไมโครแคปซูลในสารเคลือบผิว 20 10 และ 0 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

Brown และคณะ [24] ได้ศึกษาการสังเคราะห์สารเคลือบผิวด้วยวิธีไมโครเอนแคปซูลชัน ที่มีไดไซโคลเพนตาไดอิน (Dicyclopentadiene) เป็นสารซ่อมแซมผิว และยูเรีย-ฟอร์มาลดีไฮด์ เป็นเปลือกหุ้ม โดยไมโครแคปซูลถูกสังเคราะห์ที่อัตราเร็วในการกวน 200 ถึง 2000 รอบต่อนาที เวลาในการกวน 4 ชั่วโมง จากการทดลองพบว่า ที่อัตราเร็วในการกวนเพิ่มมากขึ้น ขนาดของอนุภาคไมโครแคปซูลเล็กลง ได้ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราเร็วในการกวนกับขนาดของอนุภาคไมโครแคปซูล เป็นเส้นตรง ดังรูปที่ 2.12 ดังนั้น อัตราเร็วในการกวนแปรผกผันต่อขนาดของอนุภาคไมโครแคปซูลในการสังเคราะห์ด้วยวิธีไมโครเอนแคปซูลชัน



รูปที่ 2.12 ขนาดเฉลี่ยของไมโครแคปซูลที่อัตราเร็วในการกวนต่างๆ ที่เวลาในการกวน 4 ชั่วโมง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

เครื่องมืออุปกรณ์สารเคมีและวิธีการทดลอง

ปริญญานิพนธ์นี้ศึกษาการพัฒนาสารเคลือบผิวซ่อมแซมตัวเองโดยวิธีไมโครเอนแคปซูลезันจากน้ำมันเมล็ดฝ้าย ยูเรีย และฟอร์มัลดีไฮด์ ในกระบวนการเคลือบผิวเหล็กกล้าเพื่อป้องกันการกัดกร่อน การทดลองเริ่มจากวิเคราะห์หาขนาดและอนุภาคของไมโครแคปซูลที่อัตราเร็วในการกววน 400 600 800 และ 1000 รอบต่อวินาที และเวลาในการกววน 1 2 4 และ 6 ชั่วโมงแล้วนำไปวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของไมโครแคปซูลวิเคราะห์ค่าความต้านทานการกัดกร่อนของไมโครแคปซูลกับอีพ็อกซี บนผิวเหล็กกล้า ที่ปริมาณของไมโครแคปซูลในสารเคลือบผิว คือ 0 10 15 และ 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และหาภาวะของไมโครแคปซูลกับอีพ็อกซีที่เหมาะสมในการป้องกันการกัดกร่อน

3.1 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

- 1) น้ำกลั่น(Distilled water)
- 2) ยูเรีย (Urea)
- 3) ฟอร์มัลดีไฮด์ (Formaldehyde)
- 4) แอมโมเนียมคลอไรด์ (Ammonium chloride; NH_4Cl)
- 5) รีโซซินอล (Resorcinol)
- 6) โพลีไวนิลแอลกอฮอล์ (Polyvinylalcohol; PVA)
- 7) น้ำมันเมล็ดฝ้าย (Linseed oil; LO)
- 8) ไซลีน(Xylene)
- 9) กรดไฮโดรคลอริก (Hydrochloric acid; HCl)
- 10) โซเดียมคลอไรด์ (Sodium chloride; NaCl)
- 11) อีพ็อกซี(Epoxy)

3.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

- 1) เครื่องกวนชนิดควบคุมอุณหภูมิ (Magnetic stirrer)
- 2) แท่งกวนแม่เหล็ก (Magnetic bar)
- 3) เครื่องควบคุมอุณหภูมิ (Temperature controller)
- 4) เครื่องชั่งน้ำหนัก (Balance)
- 5) หลอดหยด(Dropper)
- 6) เครื่องปรับพีเอช (pH meter)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 7) แท่งแก้วคน(Stirring Rod)
- 8) กระจกตวง(Cylinder)
- 9) กรวยกรอง(Funnel)
- 10) ปั๊มสุญญากาศ(Vacuum pump)
- 11) กระดาษกรอง (Cellulose Acetate)
- 12) ช้อนตักสาร(Spatula)
- 13) ตู้อบ(Oven)
- 14) ดินน้ำมัน(Plasticine)
- 15) กระดาษทรายเบอร์ 200 (Sandpaper)
- 16) แผ่นเหล็ก (Steel plate)

3.3 เครื่องมือวิเคราะห์

- 1) กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope; SEM) ยี่ห้อ Zeies รุ่น EVO MA10 ใช้ในการวิเคราะห์ขนาด และอนุภาคของไมโครแคปซูล ดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

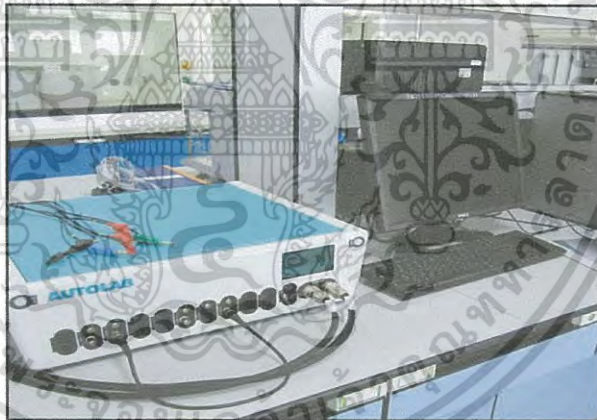
- 2) เครื่องวิเคราะห์สารด้วยอินฟราเรด (Fourier Transform Infrared Spectroscopy; FTIR) ยี่ห้อ Shimadzu รุ่น IR Prestige-21 ใช้ในการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของสารอินทรีย์ อนินทรีย์ ในไมโครแคปซูลดังรูปที่ 3.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.2 เครื่องวิเคราะห์สารด้วยอินฟาเรด

- 3) เครื่องวัดการป้องกันการกัดกร่อนโดยใช้เทคนิคอิมพีแดนซ์สเปกโตรสโกปี (Electrochemical Impedance Spectroscopy; EIS) ยี่ห้อ AutoLab รุ่น PGSTAT302N ใช้ในการวิเคราะห์ ค่าความต้านทานการกัดกร่อนของไมโครแคปซูลกับ อีพ็อกซี บนผิวเหล็กกล้าดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 เครื่องวัดการป้องกันการกัดกร่อน

- 4) กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (Optical Microscopes; OM) ยี่ห้อ OLYMPUS รุ่น BX51 ใช้ในการวิเคราะห์ลักษณะการป้องกันการกัดกร่อนของไมโครแคปซูลกับอีพ็อกซี บนผิวเหล็กกล้าดังรูปที่ 3.4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.4 กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง

3.4 วิธีการทดลอง

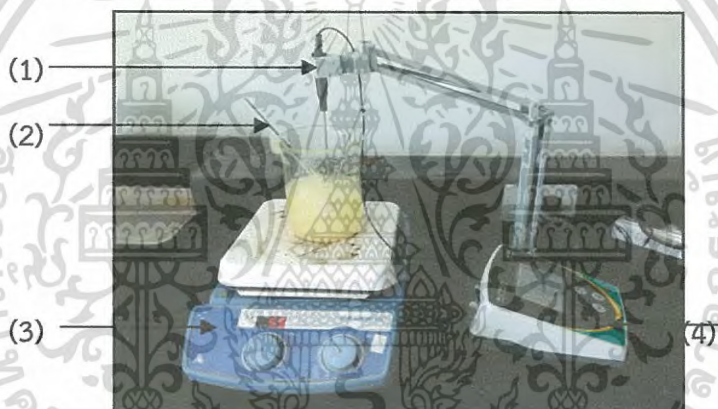
3.4.1 กระบวนการสังเคราะห์ด้วยวิธีไมโครเอนแคปซูเลชัน

1. นำน้ำกลั่นจำนวน 260 มิลลิลิตร ผสมกับสารละลายโพลีไวนิลแอลกอฮอล์ 0.1487 กรัม ยูเรีย 5 กรัม แอมโมเนียมคลอไรด์ 0.5 กรัมและรีโซซินอล 0.5 กรัม ใส่ลงในบีกเกอร์ขนาด 500 มิลลิลิตรภายใต้อัตราเร็วในการกวน 400 รอบต่อวินาทีที่อุณหภูมิห้อง
2. ปรับค่าพีเอชให้ได้ประมาณ 3.0 โดยใช้ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของสารละลายกรดไฮโดรคลอริก
3. ใส่น้ำมันเมล็ดฝ้ายจำนวน 60 มิลลิลิตร อย่างช้าๆรอ 10 นาทีเพื่อให้สารมีความเสถียร
4. เติมสารละลายฟอร์มัลดีไฮด์ความเข้มข้น 37 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ปริมาณ 34 มิลลิลิตร
5. เพิ่มความร้อนช้าๆเพื่อรักษาอุณหภูมิที่ 55 องศาเซลเซียสภายใต้อัตราเร็วในการกวน 400 รอบต่อวินาทีเป็นเวลา 2 ชั่วโมงดังรูปที่ 3.5
6. ทิ้งไว้ให้เย็นที่อุณหภูมิห้องจะได้ไมโครแคปซูลที่อยู่ในรูปของสารแขวนลอยใส่กรวยแยก ตั้งทิ้งไว้ 1 ชั่วโมง
7. นำไปกรองภายใต้ความดันสุญญากาศแล้วล้างไมโครแคปซูลด้วยน้ำกลั่นโซลินและน้ำกลั่น ตามลำดับเพื่อขจัดคราบน้ำมันที่เกาะอยู่
8. นำไมโครแคปซูลที่ได้ไปอบที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 48 ชั่วโมง
9. ทำการทดลองซ้ำตั้งแต่ขั้นตอนที่ 1-9 โดยเปลี่ยนอัตราเร็วในการกวนและเวลาในการกวนตามตารางที่ 3.1 ไมโครแคปซูลที่ได้จะแสดงดังรูปที่ 3.6

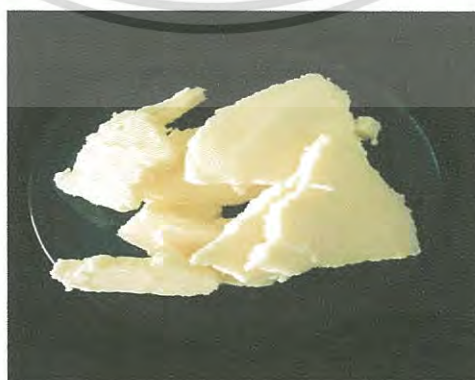
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.1 องค์ประกอบในการสังเคราะห์ด้วยวิธีไมโครเอนแคปซูเลชัน ของแต่ละการทดลอง

การทดลองที่	อัตราเร็วในการกวน (รอบต่อวินาที)	เวลาในการกวน (ชั่วโมง)
1	400	4
2	600	4
3	800	4
4	1000	1
5	1000	2
6	1000	4
7	1000	6



รูปที่ 3.5 อุปกรณ์ในการสังเคราะห์ไมโครแคปซูลด้วยวิธีไมโครเอนแคปซูเลชัน
(1) หัววัดอุณหภูมิ (2) แท่งแก้วคน (3) เครื่องกวนชนิดควบคุมอุณหภูมิและ
(4) เครื่องแสดงผลการวัดอุณหภูมิ



รูปที่ 3.6 ลักษณะของไมโครแคปซูล หลังจากอบที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับการเรียนเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4.2 การเคลือบผิวบนแผ่นเหล็กกล้า

3.4.2.1 การเตรียมผิวแผ่นเหล็กกล้า

1. ตัดแผ่นเหล็กกล้าที่มีความหนา 1 มิลลิเมตร ให้มีขนาด 2.54 x 2.54 เซนติเมตร
2. นำแผ่นเหล็กกล้าที่ตัดมาขัดกระดาษทรายเบอร์ 200 ขัดไปในทิศทางเดียวกันเป็นเวลา 30 นาที แล้วล้างให้สะอาดด้วยน้ำ เช็ดให้แห้ง เก็บไว้ในภาชนะป้องกันความชื้น

3.4.2.2 การเคลือบผิวบนแผ่นเหล็กกล้า

1. เตรียมสารเคลือบผิว โดยนำไมโครแคปซูลมาผสมกับอีพ็อกซี ในปริมาณ 15 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักลงในบีกเกอร์ที่อัตราเร็วในการกวน 200 รอบต่อวินาที ที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง
2. นำสารเคลือบผิวที่เตรียมเสร็จแล้ว มาเคลือบกับแผ่นเหล็กกล้าที่เตรียมไว้ จากข้อที่ 3.4.2.1 ด้วยกระบวนการดอกเตอร์เบลด์ (Doctor blade process) โดยใช้ใบมีดปาดระดับของสารเคลือบผิวออกจากแผ่นเหล็กกล้าควบคุมความหนาของชั้นฟิล์มด้วยไมโครมิเตอร์ โดยความหนาของชั้นฟิล์มอยู่ระหว่าง 50 ถึง 150 ไมครอน แล้วทิ้งไว้ 1 สัปดาห์ ที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส ก่อนนำไปใช้ในการวิเคราะห์
3. ทดลองซ้ำข้อ 1-2 โดยเปลี่ยนปริมาณของไมโครแคปซูลในสารเคลือบผิว จาก 15 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักเป็น 0 10 และ 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักตามลำดับ

3.4.3 การวิเคราะห์คุณลักษณะและคุณสมบัติของอนุภาค

1. วิเคราะห์ขนาดและลักษณะทางสัณฐานวิทยาของอนุภาคไมโครแคปซูล ด้วยเครื่องมือวิเคราะห์ กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)
2. วิเคราะห์ หมู่ฟังก์ชันของสารอินทรีย์ อนินทรีย์ ในไมโครแคปซูล ด้วยเครื่องมือวิเคราะห์สารด้วยอินฟราเรด (FTIR)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. การวิเคราะห์ ค่าความต้านทานการกัดกร่อนของไมโครแคปซูลกับของอีพ็อกซีบนผิวเหล็กกล้า โดยการนำเหล็กกล้าที่เคลือบสารเคลือบผิว ที่ปริมาณของไมโครแคปซูลในสารเคลือบผิว คือ 0 10 15 และ 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ตามลำดับ มากรีดเป็นรอยกากบาทบนชั้นเคลือบผิวดังรูปที่ 3.7 นำไปแช่ด้วยสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 3.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ทิ้งไว้เป็นเวลา 0 1 7 และ 21 วัน แล้วนำไปวิเคราะห์ด้วยเครื่องวัดการป้องกันการกัดกร่อนโดยใช้เทคนิคอิเล็กโทรเคมีคอลอิมพีแดนซ์สเปกโตรสโกปี (EIS)



รูปที่ 3.7 ลักษณะรอยกากบาทบนชั้นฟิล์ม

4. การวิเคราะห์ ค่าความต้านทานการกัดกร่อนของไมโครแคปซูลกับของอีพ็อกซีบนผิวเหล็กกล้า โดยการนำเหล็กกล้าที่เคลือบสารเคลือบผิว ที่ปริมาณของไมโครแคปซูลในสารเคลือบผิว คือ 0 กับ 15 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ตามลำดับ มากรีดเป็นรอยกากบาทบนชั้นฟิล์ม เปรียบเทียบ ไม่ได้กรีดเป็นรอยกากบาทบนชั้นฟิล์ม นำไปแช่ด้วยสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 3.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ทิ้งไว้เป็นเวลา 10 วัน แล้วนำไปวิเคราะห์ด้วยเครื่องวัดการป้องกันการกัดกร่อนโดยใช้เทคนิคอิเล็กโทรเคมีคอลอิมพีแดนซ์สเปกโตรสโกปี (EIS)
5. วิเคราะห์ลักษณะการป้องกันการกัดกร่อนของไมโครแคปซูลกับอีพ็อกซี บนผิวเหล็กกล้า โดยการนำเหล็กกล้าที่เคลือบผิวแล้วถูกกรีดเป็นรอยกากบาทตามรูปที่ 3.7 มาแช่ด้วยสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 3.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักทิ้งไว้เป็นเวลา 10 วัน และ 20 วัน แล้ววิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (OM)
6. วิเคราะห์การยึดเกาะของไมโครแคปซูลกับอีพ็อกซี บนผิวเหล็กกล้าโดยการนำเหล็กกล้าที่เคลือบสารเคลือบผิว ที่ปริมาณของไมโครแคปซูลในสารเคลือบผิว คือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

0 10 15 และ 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ตามลำดับ มากริตเป็นแนวตั้ง 6 เส้น และ แนวนอน 6 เส้น โดยแต่ละเส้นห่างกัน 1 เซนติเมตร ตามดังรูปที่ 3.8 แล้ว ดึงด้วยเทปกาว ที่ใช้สำหรับทดสอบการยึดเกาะ แล้วนำไปเปรียบเทียบกับ มาตรฐาน ASTM D 3359-Method B (Tape test) เพื่อหาค่าระดับการยึดเกาะ ของไมโครแคปซูลกับผิวเหล็กกล้า



รูปที่ 3.8 ลักษณะการกริดในการวิเคราะห์การยึดเกาะ ตามมาตรฐาน ASTM D3359

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

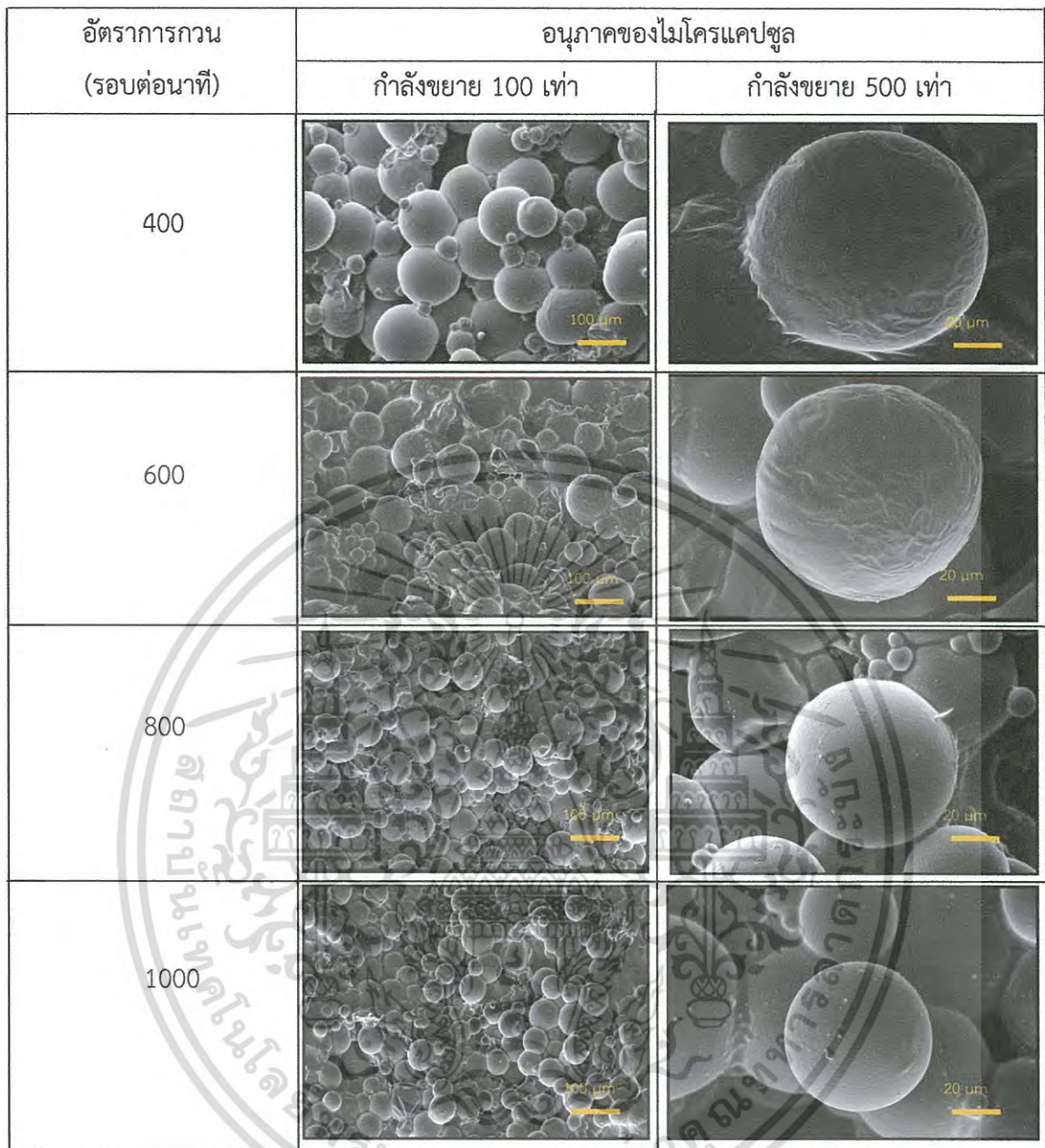
ผลการทดลองและการวิจารณ์ผล

วิทยานิพนธ์นี้ศึกษาการพัฒนาสารเคลือบผิวซ่อมแซมตัวเอง ด้วยวิธีไมโครเอนแคปซูลชัน จากยูเรีย-ฟอร์มาลดีไฮด์ และน้ำมันเมล็ดฝ้าย ในกระบวนการเคลือบผิวเหล็กกล้าเพื่อป้องกันการกัดกร่อน เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมต่อการสังเคราะห์ โดยวิเคราะห์หาขนาด และอนุภาคของไมโครแคปซูล จากอัตราเร็วในการกวน และเวลาในการกวน โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope; SEM) วิเคราะห์โครงสร้างทางเคมีของไมโครแคปซูล โดยใช้เครื่องวิเคราะห์สารด้วยอินฟราเรด (Fourier Transform Infrared Spectroscopy; FTIR) วิเคราะห์ค่าความต้านทานการกัดกร่อนของไมโครแคปซูล กับอีพ็อกซี บนผิวเหล็กกล้า ที่ปริมาณของไมโครแคปซูลต่างๆ ในสารเคลือบผิว โดยใช้เครื่องวัดการป้องกันการกัดกร่อนโดยใช้เทคนิคอิเล็กโตรเคมีคอลอิมพีแดนซ์สเปกโตรสโกปี (Electrochemical Impedence Spectroscopy; EIS) และวิเคราะห์ลักษณะการป้องกันการกัดกร่อนของไมโครแคปซูล กับอีพ็อกซี บนผิวเหล็กกล้า โดยใช้กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (Optical Microscopes; OM) เป็นต้น

4.1 การศึกษาลักษณะพื้นฐานของไมโครแคปซูล

4.1.1 การศึกษาผลของอัตราเร็วในการกวนในการสังเคราะห์ไมโครแคปซูล

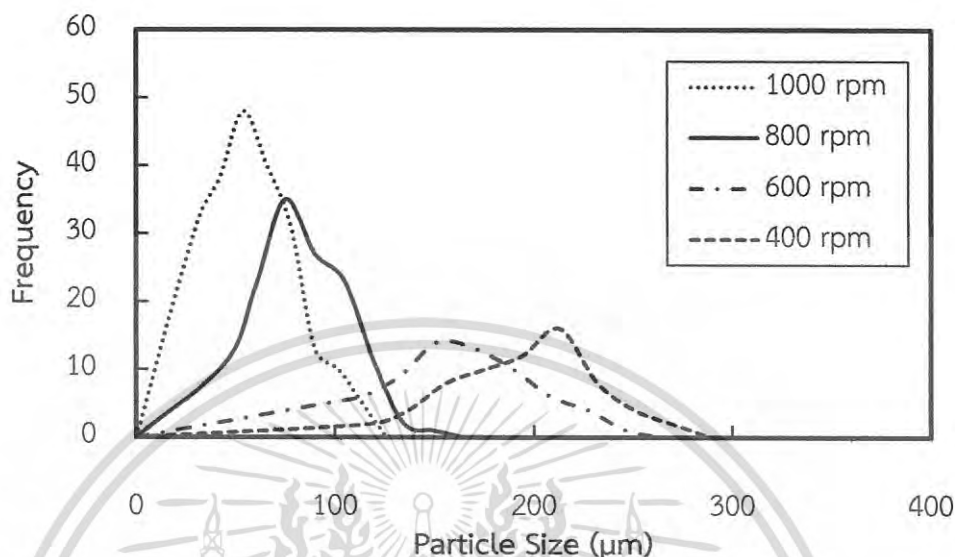
การสังเคราะห์ไมโครแคปซูลด้วยวิธีไมโครเอนแคปซูลชันที่อัตราเร็วในการกวน 400 600 800 และ 1000 รอบต่อวินาทีเวลาในการกวน 4 ชั่วโมง จากการส่องกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด (SEM) ขนาดของอนุภาคไมโครแคปซูล ให้ผลการทดลองดังรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 อนุภาคของไมโครแคปซูล ที่อัตราเร็วในการกววนต่างๆ และเวลาในการกววน 4 ชั่วโมง

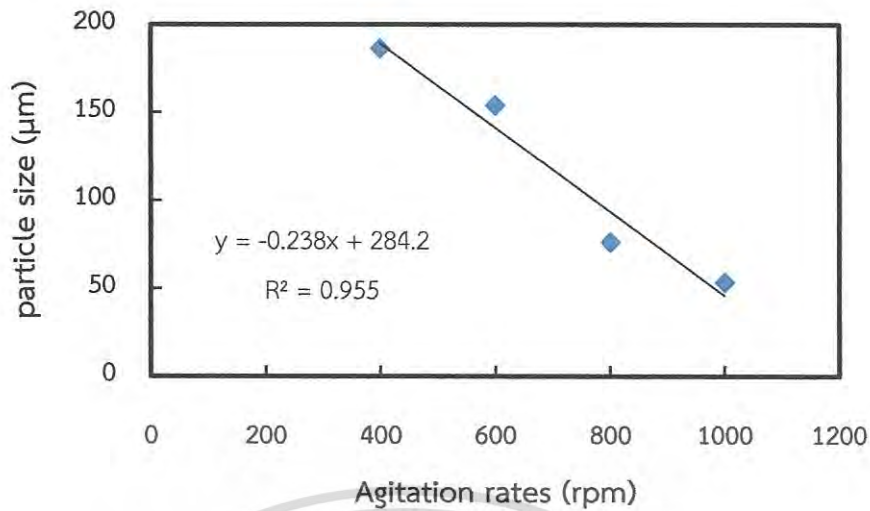
จากรูปที่ 4.1 พบว่า จากการส่องกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด (SEM) ที่อัตราเร็วในการกววน 400 600 800 และ 1000 รอบต่อนาที เวลาในการปั่นกววน 4 ชั่วโมง ลักษณะของไมโครแคปซูลเป็นทรงกลม พื้นผิวขรุขระ และขนาดของอนุภาคไมโครแคปซูลมีขนาดเล็กลง เมื่ออัตราเร็วในการกววนเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากอัตราเร็วในการกววนมากทำให้เกิดแรงกลจากการกววนที่มากขึ้นส่งผลให้น้ำมันเมล็ดฝ้ายเกิดการกระจายได้มากขึ้นเช่นกัน ในขณะที่ยูเรีย-พอร์มาลดีไฮด์ที่ทำหน้าที่เป็นเปลือกหุ้มก็จะเข้าไปห่อหุ้มน้ำมันเมล็ดฝ้ายเพื่อขึ้นรูปเป็นไมโครแคปซูล ซึ่งอนุภาคของไมโครแคปซูลที่มีขนาดเล็กจะมีประสิทธิภาพในการป้องกันการกักต้อนได้ดีกว่าอนุภาคของไมโครแคปซูลที่มีขนาดใหญ่ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ใหญ่ [5, 23, 25-26] และนำมาหาขนาดเฉลี่ยของอนุภาคไมโครแคปซูล โดยใช้ซอฟต์แวร์ Image J ได้ขนาดเฉลี่ยและลักษณะการกระจายตัวของอนุภาคไมโครแคปซูล ดังรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 ขนาดของไมโครแคปซูลที่อัตราเร็วในการกวน 400 600 800 และ 1000 รอบต่อวินาที เวลาในการปั่นกวน 4 ชั่วโมง

จากรูปที่ 4.2 แสดงลักษณะการกระจายตัวของไมโครแคปซูล พบว่า ที่อัตราเร็วในการกวน 400 600 800 และ 1000 รอบต่อวินาที เวลาในการกวน 4 ชั่วโมง มีลักษณะการกระจายตัวของข้อมูลแบบปกติ มีแนวโน้มเป็นเส้นโค้งระฆังคว่ำปกติ ที่อัตราเร็วในการกวน 400 รอบต่อวินาทีที่มีการกระจายตัวของอนุภาคไมโครแคปซูลอยู่ในช่วง 99-263 ไมครอน ขนาดอนุภาคเฉลี่ยของไมโครแคปซูล คือ 186.3 ไมครอน อัตราเร็วในการกวน 600 รอบต่อวินาที มีการกระจายตัวของอนุภาคไมโครแคปซูลอยู่ในช่วง 76-245 ไมครอน ขนาดอนุภาคเฉลี่ยของไมโครแคปซูล คือ 153.9 ไมครอน อัตราเร็วในการกวน 800 รอบต่อวินาที มีการกระจายตัวของอนุภาคไมโครแคปซูลอยู่ในช่วง 30-142 ไมครอนขนาดอนุภาคเฉลี่ยของไมโครแคปซูล คือ 76.1 ไมครอนและอัตราเร็วในการกวน 1000 รอบต่อวินาทีที่มีการกระจายตัวของอนุภาคไมโครแคปซูลอยู่ในช่วง 18-108 ไมครอน ขนาดอนุภาคเฉลี่ยของไมโครแคปซูล คือ 53.4 ไมครอน โดยขนาดเฉลี่ยของอนุภาคไมโครแคปซูลมีขนาดเล็กลงเมื่ออัตราเร็วในการกวนเพิ่มมากขึ้น จากข้อมูลดังกล่าว หาความสัมพันธ์ระหว่างขนาดเฉลี่ยของอนุภาคไมโครแคปซูลกับอัตราเร็วในการกวนได้ ดังรูปที่ 4.3

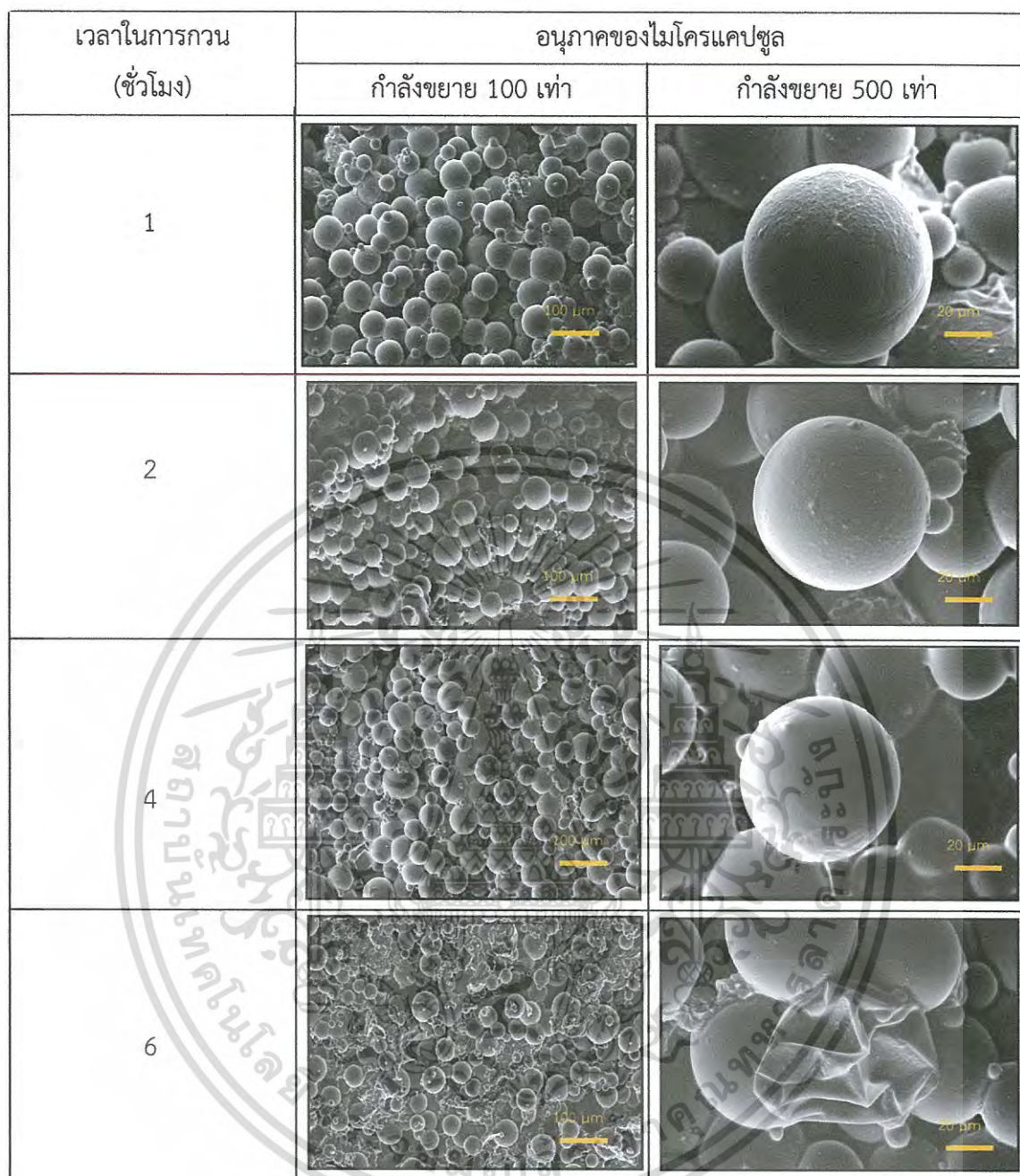


รูปที่ 4.3 ขนาดเฉลี่ยของไมโครแคปซูลที่อัตราเร็วในการกวนต่างๆ ที่เวลาในการปั่นกวน 4 ชั่วโมง

จากรูปที่ 4.3 พบว่าสมการเส้นตรง คือ $Y = -0.238X + 284.2$ เมื่อ Y คือ ขนาดเฉลี่ยของอนุภาคไมโครแคปซูล (ไมครอน) และ X คือ อัตราเร็วในการกวน (รอบต่อนาที) ที่ค่าสหสัมพันธ์ของสมการ (R^2) คือ 0.955 เช่นเดียวกับงานวิจัยของ Brown [24] ศึกษาหาความสัมพันธ์ระหว่างขนาดเฉลี่ยของอนุภาคไมโครแคปซูลกับอัตราเร็วในการกวนที่เวลาในการกวน 4 ชั่วโมง ได้ผลการทดลองตามรูปที่ 2.12 พบว่า ขนาดของอนุภาคไมโครแคปซูล (ไมครอน) มีขนาดเล็กลงเมื่ออัตราเร็วในการกวน (รอบต่อนาที) เพิ่มขึ้น ลักษณะของความสัมพัทธ์ระหว่างขนาดเฉลี่ยของอนุภาคไมโครแคปซูลกับอัตราเร็วในการกวนเป็นเส้นตรงจากสมการเส้นตรงดังกล่าว สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการหาขนาดเฉลี่ยของอนุภาคไมโครแคปซูลที่อัตราเร็วในการกวนต่างๆ โดยใช้เครื่องกวนชนิดควบคุมอุณหภูมิ (Magnetic stirrer) และอัตราเร็วในการกวนที่เหมาะสมในการสังเคราะห์ไมโครแคปซูลด้วยวิธีไมโคร-เอนแคปซูเลชันในงานวิจัยนี้ คือ 1000 รอบต่อนาที ซึ่งใกล้เคียงกับงานวิจัยของ Behzadnasab [5]

4.1.2 การศึกษาผลของเวลาในการกวนในการสังเคราะห์ไมโครแคปซูล

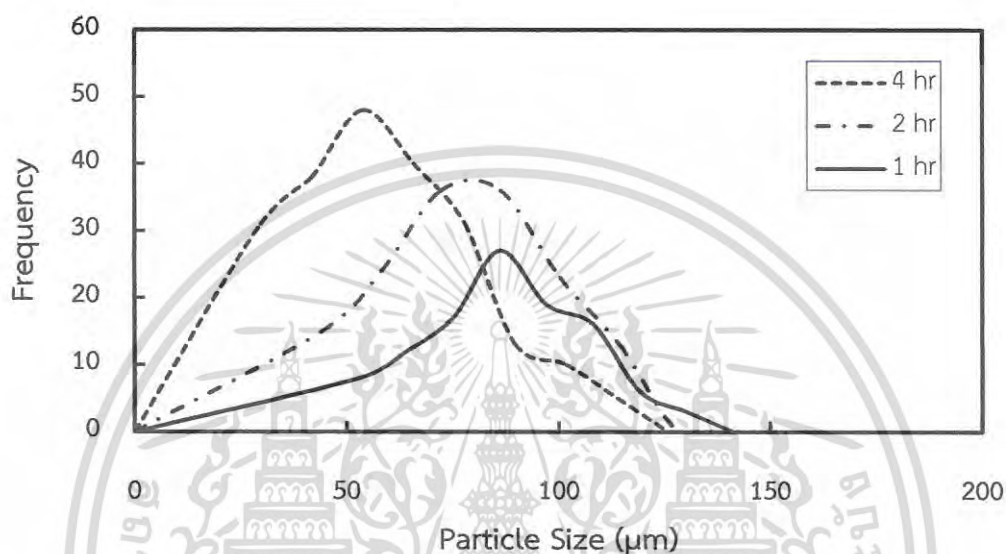
การสังเคราะห์ไมโครแคปซูลด้วยวิธีไมโครเอนแคปซูเลชันที่อัตราเร็วในการกวน 1000 รอบต่อนาที เวลาในการกวน 1 2 4 และ 6 ชั่วโมง จากการส่องกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด (SEM) ขนาดของอนุภาคไมโครแคปซูล ให้ผลการทดลองดังรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.4 อนุภาคของไมโครแคปซูลที่อัตราเร็วในการกวน 1,000 รอบต่อวินาที เวลาในการกวนต่างๆ

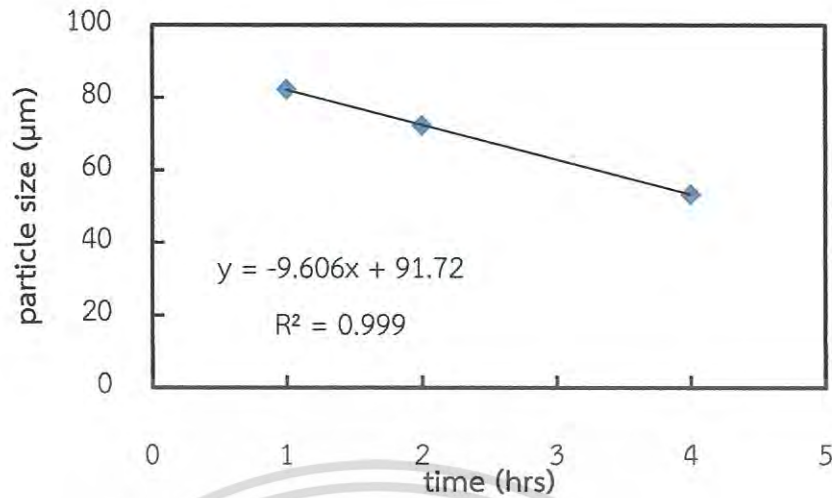
จากรูปที่ 4.4 พบว่า จากการส่องกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด (SEM) ที่อัตราเร็วในการกวน 1000 รอบต่อนาที เวลาในการกวน 1 2 4 และ 6 ชั่วโมง ลักษณะของไมโครแคปซูลเป็นทรงกลม พื้นผิวขรุขระ และขนาดของอนุภาคไมโครแคปซูลมีขนาดเล็กลงเมื่อเวลาในการกวนเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากเวลาที่เพิ่มมากขึ้นทำให้น้ำมันเมล็ดฝ้ายกระจายตัวได้มากขึ้น ก่อนที่จะขึ้นรูปเป็นไมโครแคปซูลโดยการถูกห่อหุ้มด้วยยูเรีย-ฟอร์มัลดีไฮด์ แต่ที่เวลาในการกวน 6 ชั่วโมง อนุภาคของไมโครแคปซูลนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แคปซูลเกิดการแตกทำให้สารซ่อมแซมผิวที่อยู่ภายในไมโครแคปซูลรั่วออกมาภายนอกไมโครแคปซูล ไม่สามารถนำไปประยุกต์ใช้งานได้ ดังนั้น เวลาในการกวน 6 ชั่วโมง จึงไม่เหมาะสมนำไปใช้ในการสังเคราะห์ไมโครแคปซูลด้วยวิธีไมโครเอนแคปซูลชั้น และนำไมโครแคปซูลที่ได้จาก รูปที่ 4.4 มาหาขนาดเฉลี่ยของอนุภาคไมโครแคปซูล โดยใช้ซอฟต์แวร์ Image J ได้ขนาดเฉลี่ยและลักษณะการกระจายตัวของอนุภาคไมโครแคปซูล ดังรูปที่ 4.5



รูปที่ 4.5 ขนาดของไมโครแคปซูลที่อัตราเร็วในการกวน 1000 รอบต่อวินาที เวลาในการปั่นกวน 1, 2 และ 4 ชั่วโมง

จากรูปที่ 4.5 แสดงลักษณะการกระจายตัวของไมโครแคปซูล พบว่า ที่อัตราเร็วในการกวน 1000 รอบต่อวินาที เวลาในการกวน 1 2 และ 4 ชั่วโมง มีลักษณะการกระจายตัวของข้อมูลแบบปกติ มีแนวโน้มเป็นเส้นโค้งระฆังคว่ำปกติ เวลาในการกวน 1 ชั่วโมง มีการกระจายตัวของอนุภาคไมโครแคปซูลอยู่ในช่วง 42-130 ไมครอน ขนาดอนุภาคเฉลี่ยของไมโครแคปซูล คือ 82.3 ไมครอน เวลาในการกวน 2 ชั่วโมง มีการกระจายตัวของอนุภาคไมโครแคปซูลอยู่ในช่วง 30-136 ไมครอน ขนาดอนุภาคเฉลี่ยของไมโครแคปซูล คือ 72.3 ไมครอนและเวลาในการกวน 4 ชั่วโมง มีการกระจายตัวของอนุภาคไมโครแคปซูลอยู่ในช่วง 18-108 ไมครอน ขนาดอนุภาคเฉลี่ยของไมโครแคปซูล คือ 53.4 ไมครอน โดยขนาดเฉลี่ยของอนุภาคไมโครแคปซูลมีขนาดเล็กลงเมื่อเวลาในการกวนเพิ่มมากขึ้น จากข้อมูลดังกล่าว หาความสัมพันธ์ระหว่างขนาดเฉลี่ยของอนุภาคไมโครแคปซูลกับเวลาในการกวนได้ ดังรูปที่ 4.6

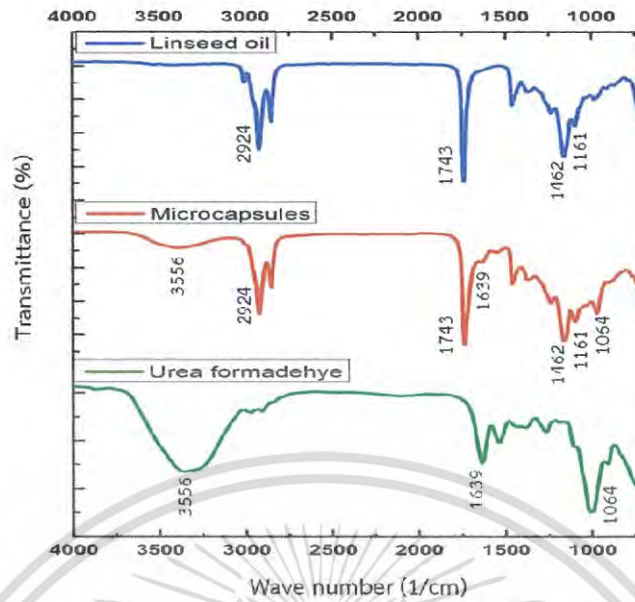


รูปที่ 4.6 ขนาดเฉลี่ยของไมโครแคปซูลที่อัตราเร็วในการกวน 1000 รอบต่อวินาที เวลาในการกวนต่างๆ

จากรูปที่ 4.6 พบว่าสมการเส้นตรง คือ $Y = -9.606x + 91.72$ เมื่อ Y คือ ขนาดเฉลี่ยของอนุภาคไมโครแคปซูล (ไมครอน) และ X คือ เวลาในการกวน (รอบต่อวินาที) ที่ค่าสหสัมพันธ์ของสมการ (R^2) คือ 0.999 กวนต่างๆได้ จากสมการเส้นตรงดังกล่าวยังไม่สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการหาขนาดเฉลี่ยของอนุภาคไมโครแคปซูลที่เวลาในการกวนต่างๆ โดยใช้เครื่องกวนชนิดควบคุมอุณหภูมิ (Magnetic stirrer) เนื่องจากข้อมูลที่ได้ไม่เพียงพอ ซึ่งจากข้อมูลในรูปที่ 4.7-4.12 เวลาในการกวนที่เหมาะสมในการสังเคราะห์ไมโครแคปซูล ด้วยวิธีไมโครเอมัลชัน คือ 4 ชั่วโมง [5, 23, 25-26] เนื่องจากให้อนุภาคของไมโครแคปซูลที่มีขนาดเล็ก เมื่อเทียบกับเวลาที่การทดลองต่างๆ

4.2 ผลการวิเคราะห์หามุฟงค์ชั้นของไมโครแคปซูล

จากการสังเคราะห์ไมโครแคปซูลด้วยวิธีไมโครเอมัลชัน ที่อัตราเร็วในการกวน 400 600 800 และ 1000 รอบต่อวินาที และ เวลาในการกวน 1 2 4 และ 6 ชั่วโมง จากการส่องกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด (SEM) พบว่าไมโครแคปซูลที่ถูกสังเคราะห์ที่อัตราเร็วในการกวน 1000 รอบต่อวินาที และเวลาในการกวน 4 ชั่วโมง ให้ขนาดของไมโครแคปซูลเล็กที่สุดเมื่อเทียบกับสถานะอื่นๆ ต่อมานำมาวิเคราะห์หามุฟงค์ชั้นของสารอินทรีย์ และสารอินทรีย์ เพื่อยืนยันว่าไมโครแคปซูลดังกล่าว เกิดจากสารตั้งต้นหลัก ที่ใช้ในการสังเคราะห์ไมโครแคปซูล ที่ประกอบด้วย ยูเรีย-ฟอर्मัลดีไฮด์ และน้ำมันเมล็ดฝ้าย โดยใช้เครื่องวิเคราะห์สารด้วยอินฟราเรด (FTIR) เป็นเครื่องวิเคราะห์ ได้ผลการทดลองดังรูปที่ 4.7



รูปที่ 4.7 อินฟราเรดสเปกตรัม จากการวิเคราะห์ เมื่อ (—) คือ น้ำมันเมล็ดฝ้าย (—) คือ ไมโครแคปซูล และ (—) คือ ยูเรีย-ฟอร์มัลดีไฮด์

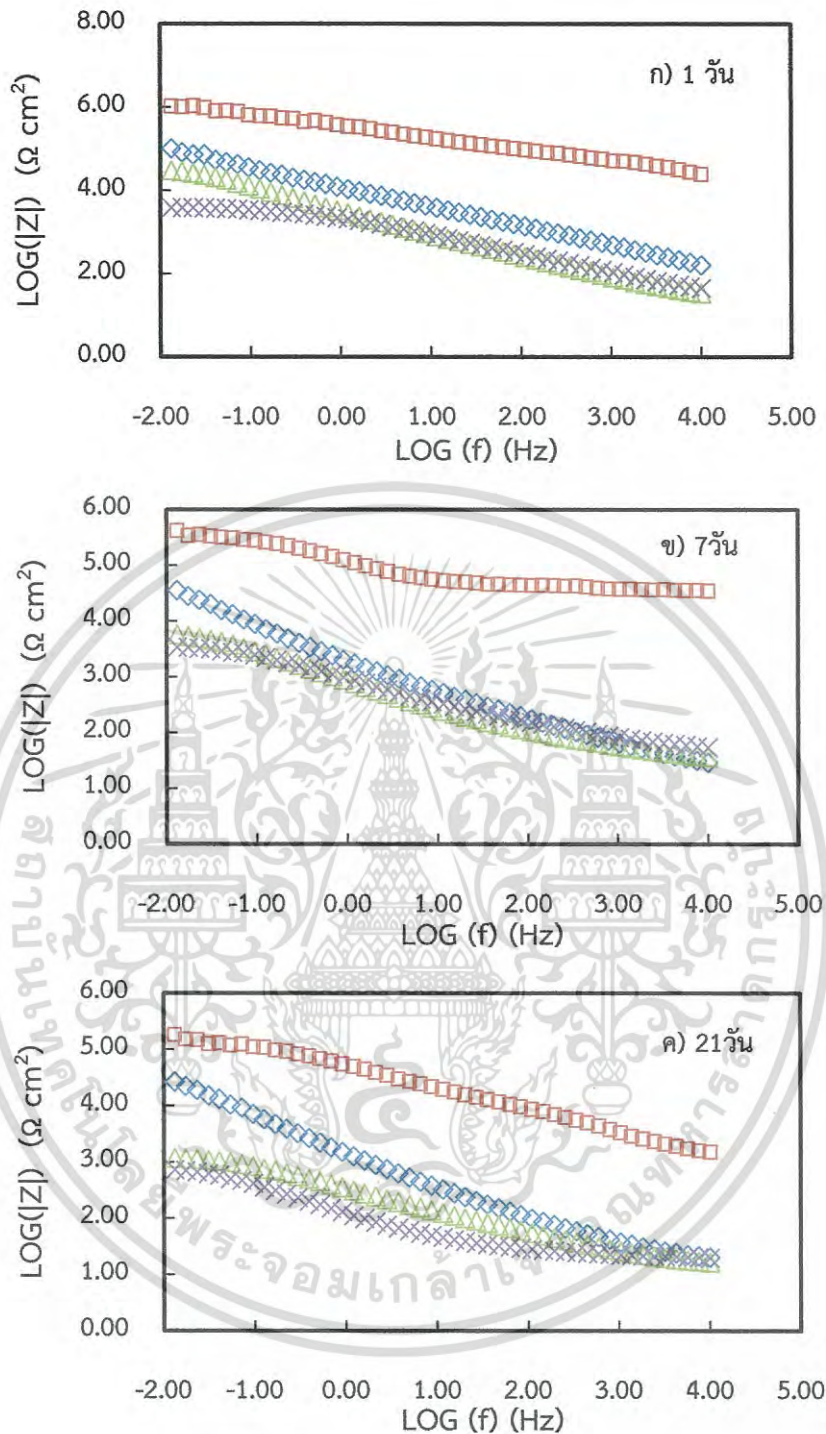
จากรูปที่ 4.7 แสดงหมู่ฟังก์ชันตามพีค (peak) โดยหมู่ฟังก์ชันของยูเรีย-ฟอร์มัลดีไฮด์ที่ทำหน้าที่เป็นเปลือกหุ้ม (Shell) ของไมโครแคปซูล คือ หมู่ O-H หมู่ N-H และหมู่ C-O ที่เวฟนัมเบอร์ (Wave number) 3356 1639 และ 1014 cm^{-1} ตามลำดับ ซึ่งที่เวฟนัมเบอร์ดังกล่าวแสดงลักษณะการสั่นของโมเลกุลแบบยืด (Stretching) โดยมีค่าใกล้เคียงกับงานวิจัยของ Kouhi และคณะ [26] หมู่ฟังก์ชันของน้ำมันเมล็ดฝ้ายที่ทำหน้าที่เป็นสารซ่อมแซมผิว (Core) ในไมโครแคปซูล คือ หมู่ C-H หมู่ C=O หมู่ C-C และหมู่ C-O ที่เวฟนัมเบอร์ 2924 1743 1462 และ 1161 cm^{-1} ซึ่งที่เวฟนัมเบอร์ดังกล่าวแสดงการสั่นของโมเลกุลแบบยืด (Stretching) เช่นเดียวกับลักษณะการสั่นของโมเลกุลของยูเรีย-ฟอร์มัลดีไฮด์ และมีค่าใกล้เคียงกับงานวิจัยของ Massimo และ Chiantore [17] และสำหรับหมู่ฟังก์ชันของไมโครแคปซูลจะประกอบด้วยหมู่ฟังก์ชันของยูเรีย-ฟอร์มัลดีไฮด์ และน้ำมันเมล็ดฝ้ายที่เวฟนัมเบอร์เดียวกัน

4.3 ผลการวิเคราะห์ค่าความต้านทานการกัดกร่อนของไมโครแคปซูล

จากการสังเคราะห์ไมโครแคปซูลด้วยวิธีไมโครเอนแคปซูลชัน จาก ยูเรีย-ฟอร์มัลดีไฮด์ และ น้ำมันเมล็ดฝ้าย ที่อัตราเร็วในการกวน 1000 รอบต่อวินาที และ เวลาในการกวน 4 ชั่วโมง แล้วนำไปเคลือบบนผิวของเหล็กกล้า โดยปริมาณของไมโครแคปซูลในสารเคลือบผิว คือ 0 10 15 และ 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของไมโครแคปซูล นำไปวิเคราะห์ความต้านทานการกัดกร่อนด้วยเครื่องวัดการต้านทานการกัดกร่อนโดยใช้เทคนิคอิเล็กโตรเคมีคอลอิมพีแดนซ์สเปกโทรสโกปี (EIS) ด้วยสารละลายไฮเดียมคลอไรด์ 3.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ที่เวลา 1 7 และ 21 วันได้ผลการทดลองดังรูปที่ 4.8

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี การนำเอกสารนี้ไปใช้โดยไม่ผ่านการอนุญาตถือว่าผิดกฎหมาย

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.8 ค่าความต้านทานการกักตัวของไมโครแคปซูลในสารเคลือบผิว บนผิวของเหล็กกล้า โดยใช้เทคนิคอิเล็กโทรเคมีคอลอิมพีแดนซ์สเปกโทรสโกปี (EIS) ด้วยสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 3.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ที่เวลา (ก) 1 วัน (ข) 7 วัน และ (ค) 21 วัน เมื่อปริมาณของไมโครแคปซูลในสารเคลือบผิว คือ (x) 0 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก (◇) 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก (□) 15 เปอร์เซ็นต์โดย

น้ำหนัก และ (△) 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก นั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานการกัดกร่อนในเทอมของค่าอิมพีแดนซ์ (Impedance: Z) ของสารเคลือบผิวที่ปริมาณของไมโครแคปซูลในสารเคลือบผิว 0 10 15 และ 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักหลังแช่ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 3.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักเป็นเวลา 1 7 และ 21 วัน พบว่า เมื่อมีความถี่เพิ่มมากขึ้น ค่าความต้านทานการกัดกร่อนมีค่าน้อยลง และเมื่อเวลาที่แช่ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 3.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักมากขึ้น ค่าความต้านทานการกัดกร่อนมีค่าน้อยลง เช่นกัน เนื่องจากสารละลายอิเล็กโทรไลต์หรือสารละลายโซเดียมคลอไรด์สามารถแทรกซึมเข้าไปสารเคลือบผิว แต่ความจุของสารเคลือบผิวมีค่าคงที่ ทำให้ประสิทธิภาพของสารเคลือบผิวลดน้อยลง เมื่อแช่ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 3.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักมากขึ้น ส่งผลต่อความต้านทานการกัดกร่อนลดน้อยลงด้วยเช่นกัน [27] และที่ปริมาณของไมโครแคปซูลในสารเคลือบผิว 15 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก มีความต้านทานความกัดกร่อนสูงกว่าอัตราส่วนของไมโครแคปซูลในสารเคลือบผิว 10 20 และ 0 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ตามลำดับ และที่ความถี่ 0.01 เฮิรตซ์ ค่าความต้านทานการกัดกร่อน ที่ปริมาณของไมโครแคปซูลในสารเคลือบผิว คือ 0 10 15 และ 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก แสดงดังตารางที่ 4.1

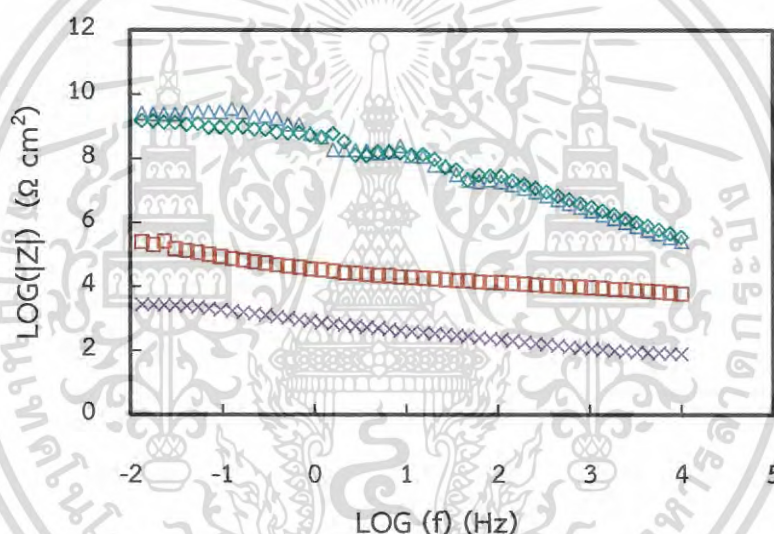
ตารางที่ 4.1 ค่าความต้านทานการกัดกร่อน ($k\Omega \cdot cm^2$) ที่ความถี่ 0.01 เฮิรตซ์ เมื่อในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 3.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักที่เวลาแตกต่างกัน วัดโดยใช้เทคนิค EIS

ปริมาณของไมโครแคปซูลในสารเคลือบผิว (เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก)	ค่าความต้านทานการกัดกร่อน ($k\Omega \cdot cm^2$) ที่เวลาในการแช่สารละลายโซเดียมคลอไรด์ 3.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก		
	1 วัน	7 วัน	21 วัน
0	3.73	3.44	0.71
10	134.60	41.37	32.00
15	1,511.66	374.07	190.45
20	34.65	5.89	1.20

จากตารางที่ 4.1 พบว่าที่ปริมาณของไมโครแคปซูลในสารเคลือบผิว 15 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของไมโครแคปซูล ที่ความถี่ 0.01 เฮิรตซ์ มีค่าความต้านทานการกัดกร่อนที่ระยะเวลาที่แช่ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 3.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก 1 7 และ 21 วัน คือ 1,511.7 374.1 และ 32.0 กิโลโอห์ม ตารางเซนติเมตร ตามลำดับ ซึ่งมีค่าความต้านทานการกัดกร่อนมากกว่าค่าความต้านทานการกัดกร่อนที่ปริมาณของไมโครแคปซูลในสารเคลือบผิว 10 20 และ 0 เปอร์เซ็นต์โดย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

น้ำหนักตามลำดับ เช่นเดียวกับงานวิจัยของ Hatami และคณะ [23] แม้ว่าปริมาณของไมโครแคปซูลในสารเคลือบผิว 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก จะมีปริมาณของไมโครแคปซูลในสารเคลือบผิวเยอะกว่า แต่ค่าความต้านทานการกัดกร่อนกลับมีค่าน้อยกว่าค่าความต้านทานการกัดกร่อนอัตราส่วนของไมโครแคปซูล 15 และ 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เนื่องจากปริมาณไมโครแคปซูลจะเข้าซัดขวางการยึดเกาะของอีพ็อกซี กับผิวของเหล็กกล้า ส่งผลทำให้ค่าการยึดเกาะของสารเคลือบผิว กับเหล็กกล้าลดน้อยลง และทำให้ค่าความต้านทานการกัดกร่อนลดน้อยลงด้วย ผลการวิเคราะห์ค่าความต้านทานการกัดกร่อนของไมโครแคปซูลกับอีพ็อกซี บนผิวเหล็กกล้า ที่ปริมาณของไมโครแคปซูลในสารเคลือบผิว 0 และ 15 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ที่ถูกกริดเป็นรอยกากบาท และไม่ได้ถูกกริดเป็นรอยกากบาทที่บริเวณผิวหน้าของสารเคลือบผิว เมื่อแช่สารละลายโซเดียมคลอไรด์ 3.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ที่เวลา 10 วันได้ผลการทดลองดังรูปที่ 4.9



รูปที่ 4.9 ค่าความต้านทานการกัดกร่อนของไมโครแคปซูลบนผิวของเหล็กกล้า โดยใช้เทคนิคอิเล็กโตรเคมีคอลอิมพีแดนซ์สเปกโตรสโกปี (EIS) ด้วยสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 3.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ที่เวลา 10 วัน เมื่อปริมาณของไมโครแคปซูลในสารเคลือบผิว คือ (Δ) 15 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักไม่มีรอยกากบาท (\diamond) 0 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักที่ไม่มีรอยกากบาท และ (\square) 15 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักที่มีรอยกากบาท (\times) 0 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักที่มีรอยกากบาท

จากรูปที่ 4.9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานการกัดกร่อนของสารเคลือบผิวที่ปริมาณของไมโครแคปซูลในสารเคลือบผิว 0 และ 15 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ที่มีรอยกากบาท และ

ไม่มีรอยกากบาทบนผิวหน้าของสารเคลือบผิว เมื่อแช่สารละลายโซเดียมคลอไรด์ 3.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักเป็นเวลา 10 วัน ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

น้ำหนัก ที่เวลา 10 วัน พบว่า เมื่อมีความถี่เพิ่มมากขึ้น ค่าความต้านทานการกักก่รอนมีค่าน้อยลง สารเคลือบผิวที่ไม่มีรอยกากบาทบนผิวหน้า ทั้งปริมาณของไมโครแคปซูลในสารเคลือบผิว 0 และ 15 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก จะมีความต้านทานการกักก่รอนสูงกว่าสารเคลือบผิวที่มีรอยกากบาทบนผิวหน้า และที่ความถี่ 0.01 เฮิร์ตซ์ ค่าความต้านทานการกักก่รอน ที่ปริมาณของไมโครแคปซูลในสารเคลือบผิว 0 และ 15 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักที่มีรอยกากบาท และไม่มีรอยกากบาทบนผิวหน้าของสารเคลือบผิว แสดงดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 ค่าความต้านทานการกักก่รอน ($k\Omega \cdot cm^2$) ที่ความถี่ 0.01 เฮิร์ตซ์ เมื่อแช่ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 3.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เป็นเวลา 10 วัน วัดโดยใช้เทคนิค EIS

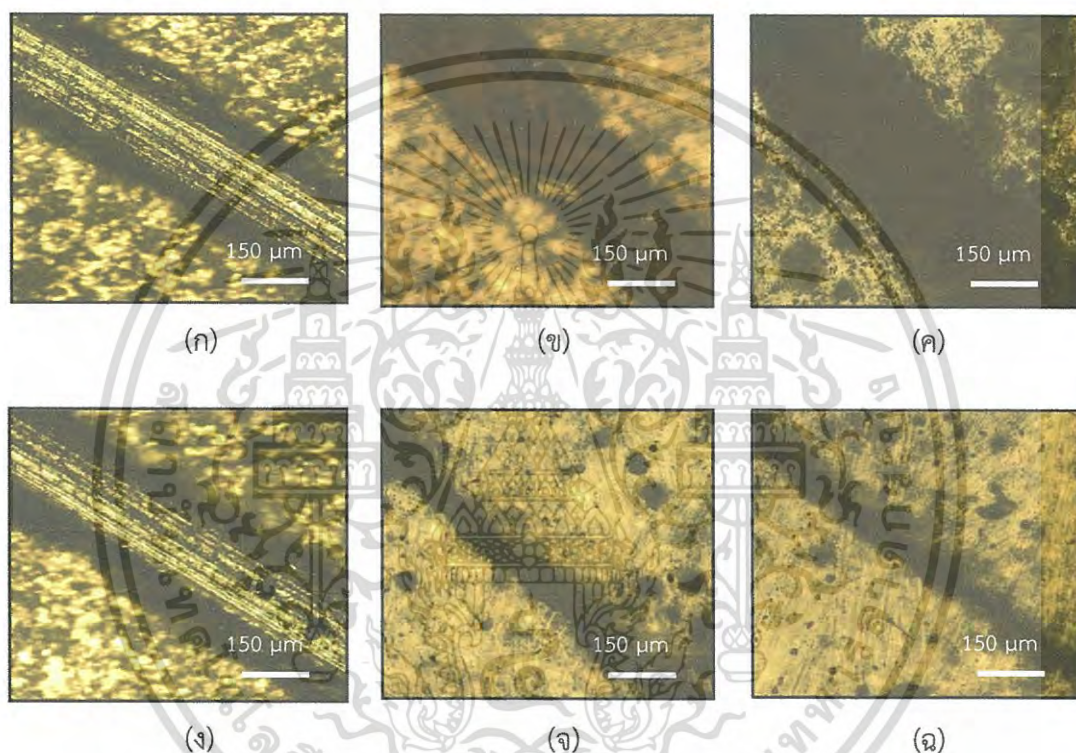
ปริมาณของไมโครแคปซูลในสารเคลือบผิว (เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก)	ค่าความต้านทานการกักก่รอน ($k\Omega \cdot cm^2$)
0 (มีรอยกากบาท)	2.8
15 (มีรอยกากบาท)	270.9
0 (ไม่มีรอยกากบาท)	1,381,340.0
15 (ไม่มีรอยกากบาท)	2,849,260.0

จากตารางที่ 4.2 พบว่า ที่ความถี่ 0.01 เฮิร์ตซ์ ค่าความต้านทานการกักก่รอนที่ปริมาณของไมโครแคปซูลในสารเคลือบผิว 0 และ 15 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ที่ไม่มีรอยกากบาท เมื่อแช่ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 3.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักเป็นเวลา 10 วัน คือ 1,381,340.0 และ 2,849,260.0 กิโลโอห์ม ตารางเซนติเมตร ตามลำดับ และมีค่าความต้านทานการกักก่รอนมากกว่าค่าความต้านทานการกักก่รอนของสารเคลือบผิวที่มีรอยกากบาทบนผิวหน้าที่ปริมาณของไมโครแคปซูลในสารเคลือบผิว 0 และ 15 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เนื่องจากไม่มีรอยแผลที่บริเวณชั้นผิวหน้าของสารเคลือบผิวทำให้สารละลายโซเดียมคลอไรด์ไม่สามารถเข้าไปกระตุ้นทำให้ออกไซด์ ที่บริเวณผิวหน้าของเหล็กกล้า จึงทำให้มีค่าความต้านทานการกักก่รอนสูงกว่าสารเคลือบผิวที่มีรอยกากบาท และที่ปริมาณของไมโครแคปซูลในสารเคลือบผิว 15 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ที่มีรอยกากบาทมีค่าความต้านทานการกักก่รอนสูงกว่า ปริมาณของไมโครแคปซูลในสารเคลือบผิว 0 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักที่มีรอยกากบาท เนื่องจากไมโครแคปซูลที่ผสมอยู่ในสารเคลือบผิวจะแตกออก ซึ่งทำให้สารซ่อมแซมผิวที่อยู่ภายในไมโครแคปซูลไหลออกมา เกิดการประสานตัวเองของวัสดุในชั้นผิวเคลือบบนผิวหน้าของ

โลหะ จึงมีค่าความต้านทานการกักก่รอนที่สูงกว่าศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4 ผลการวิเคราะห์ลักษณะการต้านทานการกัดกร่อนของไมโครแคปซูล

จากการสังเคราะห์ไมโครแคปซูลด้วยวิธีไมโครเอนแคปซูลেশัน จาก ยูเรีย-ฟอร์มัลดีไฮด์และน้ำมันเมล็ดฝ้าย ที่อัตราเร็วในการกวน 1000 รอบต่อวินาที และ เวลาในการกวน 4 ชั่วโมง แล้วนำไปเคลือบบนผิวของเหล็กกล้า ที่ปริมาณของไมโครแคปซูลในสารเคลือบผิวคือ 0 และ 15 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ทำเป็นรอยบากเส้นตรง แขนในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 3.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ที่เวลา 10 วัน นำไปวิเคราะห์ลักษณะการต้านทานการกัดกร่อนของไมโครแคปซูลด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (OM) ได้ผลการทดลองดังรูปที่ 4.10

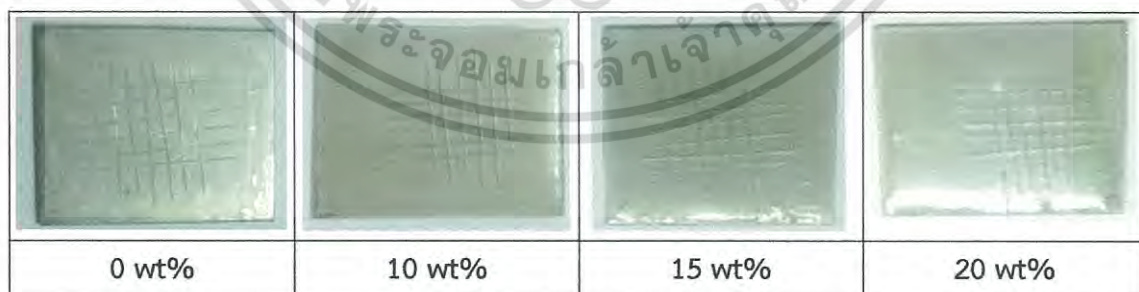


รูปที่ 4.10 ลักษณะการซ่อมแซมตัวเองของไมโครแคปซูลจากกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (OM) กำลังขยาย 100 เท่าที่เวลาในการแช่สารละลายโซเดียมคลอไรด์ 3.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เมื่อ (ก) สารเคลือบผิวไม่มีไมโครแคปซูลก่อนแช่สารละลาย(ข) สารเคลือบผิวไม่มีไมโครแคปซูลหลังแช่สารละลายทิ้งไว้ 10 วัน (ค) สารเคลือบผิวไม่มีไมโครแคปซูลหลังแช่สารละลายทิ้งไว้ 20 วัน (ง) สารเคลือบผิวผสมไมโครแคปซูล (15 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก) ก่อนแช่สารละลาย (จ) สารเคลือบผิวผสมไมโครแคปซูล (15 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก) หลังแช่สารละลายทิ้งไว้ 10 วัน และ (ฉ) สารเคลือบผิวผสมไมโครแคปซูล (15 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก) หลังแช่สารละลายทิ้งไว้ 10 วัน

จากรูปที่ 4.10 พบว่า เมื่อเวลาผ่านไป 10 วัน แผ่นเหล็กกล้าที่เคลือบสารเคลือบผิวที่มีแต่อีพ็อกซี อย่างเดียวจะเกิดออกไซด์ของโลหะขึ้นบริเวณรอยบาก เนื่องจากสารละลายโซเดียมคลอไรด์มีการสัมผัสกับเนื้อของเหล็กกล้าโดยตรง จึงเกิดเป็นออกไซด์ของโลหะหรือสนิม ตามรูปที่ 4.10 (ข) และหากแช่ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 3.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักทิ้งไว้เป็น 20 วัน พบว่ารอยขีดข่วนมีขนาดใหญ่ขึ้น เมื่อเทียบกับการแช่ทิ้งไว้เป็นเวลา 10 วัน ตามรูปที่ 4.10 (ค) ในขณะที่แผ่นเหล็กกล้าที่เคลือบสารเคลือบผิวที่ผสมระหว่างไมโครแคปซูลกับอีพ็อกซี (ปริมาณไมโครแคปซูลในสารเคลือบผิว 15 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก) จะไม่เกิดสนิมบริเวณรอยบาก เนื่องจากเมื่อเกิดรอยขีดข่วนขึ้นบนผิวหน้าของสารเคลือบผิว ไมโครแคปซูลที่บรรจุอยู่ภายในอีพ็อกซี จะปล่อยให้ น้ำมันเมล็ดฝ้ายไหลออกมาแล้วเข้าซ่อมแซมบริเวณที่เกิดรอยบากหรือรอยขีดข่วน ตามรูปที่ 4.10 (จ) และรูปที่ 4.10 (ฉ) โดยในน้ำมันเมล็ดฝ้ายจะมีโครงสร้างที่จัดเรียงตัวเป็นพันธะคู่จำนวนมาก [14, 17] ทำให้เกิดการประสานรอยบากในชั้นของสารเคลือบผิว เพื่อป้องกันการสัมผัสโดยตรงของเนื้อของเหล็กกล้ากับสารละลายโซเดียมคลอไรด์ จึงทำให้ไม่เกิดสนิมหรือออกไซด์ของโลหะเกิดขึ้น

4.5 ผลการวิเคราะห์การยึดเกาะของไมโครแคปซูล

จากการสังเคราะห์ไมโครแคปซูลด้วยวิธีไมโครเอนแคปซูลชัน จาก ยูเรีย-ฟอร์มัลดีไฮด์และน้ำมันเมล็ดฝ้าย ที่อัตราเร็วในการกวน 1000 รอบต่อวินาที และเวลาในการกวน 4 ชั่วโมง แล้วนำไปเคลือบบนผิวของเหล็กกล้า ที่ปริมาณของไมโครแคปซูลในสารเคลือบผิวคือ 0 10 15 และ 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก นำไปวิเคราะห์การยึดเกาะของไมโครแคปซูลเมื่อฝังตัวอยู่ในอีพ็อกซีที่เคลือบอยู่บนผิวของเหล็กกล้า ตามมาตรฐาน ASTM D 3359-Method B (Tape test) ได้ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.11

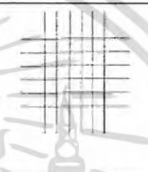



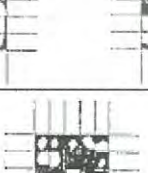



รูปที่ 4.11 ลักษณะของการยึดเกาะของไมโครแคปซูลที่ปริมาณต่างๆ ในสารเคลือบผิว วิเคราะห์ตามมาตรฐาน ASTM D 3359-Method B (Tape test)

นำลักษณะการยึดเกาะดังกล่าวมาเปรียบเทียบกับ มาตรฐาน ASTM D 3359-Method B ตาม

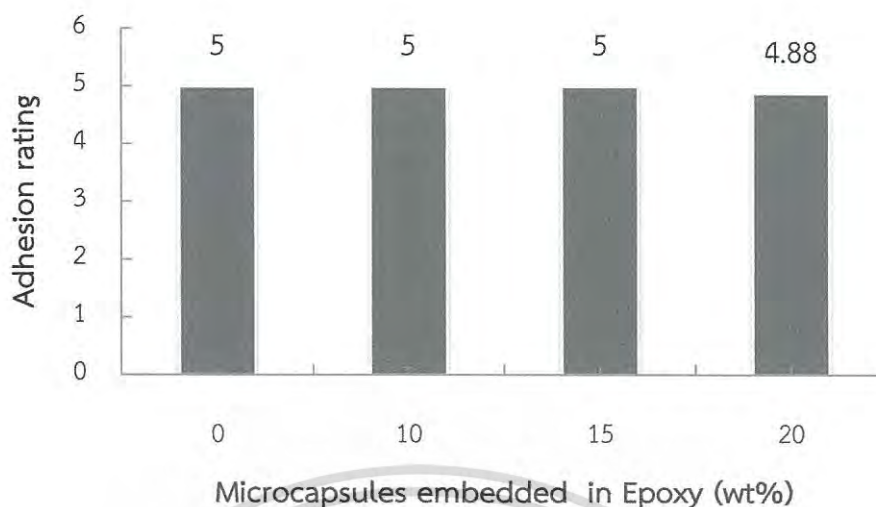
รูปที่ 4.12 จะพบว่า ปริมาณของไมโครแคปซูลในสารเคลือบผิว 0 10 15 และ 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

น้ำหนัก มีค่าการยึดเกาะใกล้เคียงกัน ที่ระดับการยึดเกาะระดับ 5 แสดงเปอร์เซ็นต์การหลุดร่วงของสารเคลือบผิวกับผิวหน้าของโลหะในพื้นที่ที่อยู่ในแนวที่กรีดเป็นเส้นตรง 0 เปอร์เซ็นต์ จากการเปรียบเทียบดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าสารเคลือบผิวที่มีปริมาณไมโครแคปซูล 0 10 15 และ 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ในสารเคลือบผิว มีการยึดเกาะที่ดีกับผิวหน้าโลหะ และเมื่อนำมาพล็อตกราฟแสดงระดับการยึดเกาะของไมโครแคปซูลที่ปริมาณต่างๆ ในสารเคลือบผิวได้ดังรูปที่ 4.13

Classification of Adhesion Test Result		
Classification	Percent area removed	Surface of cross cut area from which flaking has occurred for six parallel cuts and adhesion range by percent
5B	0% None	
4B	Less than 5%	
3B	5 – 15 %	
2B	15 – 35 %	
1B	35 – 65 %	
0B	Greater than 65 %	

รูปที่ 4.12 ลักษณะของการยึดเกาะที่ระดับต่างๆ ที่ได้หลังจากการวิเคราะห์ ตามมาตรฐาน ASTM D 3359-Method B

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.13 ค่าการยึดเกาะของไมโครแคปซูลในสารเคลือบ บนผิวของเหล็กกล้า ที่ปริมาณไมโครแคปซูลต่างๆ

จากรูปที่ 4.13 พบว่า ที่ปริมาณของไมโครแคปซูลในสารเคลือบผิว 0 10 และ 15 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนัก มีค่าการยึดเกาะเท่ากัน ที่ระดับการยึดเกาะระดับ 5 และที่ปริมาณของไมโครแคปซูลในสารเคลือบผิว 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก จะให้ค่าการยึดเกาะ ที่ระดับ 4.88 จากข้อมูลดังกล่าวจะเห็นว่าปริมาณไมโครแคปซูลมีผลต่อการยึดเกาะของสารเคลือบผิวกับเหล็กกล้า หากปริมาณไมโครแคปซูลที่มากขึ้นในสารเคลือบผิว มีผลทำให้การยึดเกาะของสารเคลือบผิวกับผิวของเหล็กกล้าลดน้อยลงและมีผลทำให้ต้นทุนการกักร่อนได้น้อยลง เช่นกัน

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

สารเคลือบผิวซ่อมแซมตัวเองที่สังเคราะห์ด้วยวิธีไมโครเอนแคปซูลชัน จากยูเรีย-ฟอร์มัลดีไฮด์ และน้ำมันเมล็ดฝ้าย สามารถป้องกันการกัดกร่อนบนผิวเหล็กกล้า อัตราเร็วในการกวนและเวลาในการกวนแปรผกผันต่อขนาดของอนุภาคไมโครแคปซูล ในงานวิจัยนี้สภาวะที่เหมาะสมในการสังเคราะห์ไมโครแคปซูล ด้วยวิธีไมโครเอนแคปซูลชัน คือ อัตราเร็วในการกวน 1,000 รอบต่อนาที และ เวลาในการกวน 4 ชั่วโมง จะได้ขนาดเฉลี่ยของอนุภาคไมโครแคปซูล 53.4 ไมครอน และผลการวิเคราะห์ประสิทธิภาพการซ่อมแซมตัวเองของไมโครแคปซูล โดยการวิเคราะห์ค่าความต้านทานการกัดกร่อนของไมโครแคปซูลกับอีพ็อกซี บนผิวของเหล็กกล้า ที่ปริมาณของไมโครแคปซูลในสารเคลือบผิวต่างๆ และลักษณะการต้านทานการกัดกร่อนของไมโครแคปซูล พบว่าสารเคลือบผิวที่มีไมโครแคปซูลผสมอยู่ เมื่อมีรอยขีดข่วนจะสามารถซ่อมแซมตัวเองได้ และป้องกันการกัดกร่อนได้ดีกว่าสารเคลือบผิวที่ไม่มีไมโครแคปซูลผสมอยู่ และปริมาณของไมโครแคปซูลในสารเคลือบผิวที่เพิ่มขึ้น มีผลต่อการซ่อมแซมตัวเองของสารเคลือบผิว และให้ค่าความต้านทานการกัดกร่อนสูงขึ้น แต่ให้ค่าการยึดเกาะกับผิวเหล็กที่น้อยลง ในงานวิจัยนี้ ปริมาณของไมโครแคปซูลในสารเคลือบผิวที่เหมาะสม คือ 15 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ให้ค่าความต้านทานการกัดกร่อนของสารเคลือบผิวบนแผ่นเหล็กกล้า คือ 1511.7 374.1 และ 190.5 กิโลโอมห์ ตารางเซนติเมตร หลังจากแช่ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ที่ความเข้มข้น 3.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ที่เวลา 1 7 และ 21 วัน ตามลำดับ และระดับการยึดเกาะกับผิวเหล็กกล้า ที่ระดับการยึดเกาะระดับ 5 ซึ่งมีความต้านทานการกัดกร่อนสูงกว่าที่สภาวะอื่นๆ ที่ทำการศึกษา

5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1. ควรศึกษาปริมาณของสารลดแรงตึงผิวที่มีผลต่อการสังเคราะห์ไมโครแคปซูล เนื่องจากสารลดแรงตึงผิวคือสารช่วยให้เกิดการห่อหุ้มของเปลือกหุ้มกับสารซ่อมแซมตัวเอง

5.2.2 ควรศึกษาปริมาณของสารซ่อมแซมตัวเองที่บรรจุในไมโครแคปซูล ในการสังเคราะห์ไมโคร

แคปซูล ปริมาณของสารซ่อมแซมตัวเองที่สูงมีผลต่อประสิทธิภาพในการต้านทานการกัดกร่อนที่ดีขึ้น เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

- [1] ดวงฤดี ศุภติมัสโร. โลหะวิทยาฟิสิกส์. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ : สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. 2553.
- [2] Barbalat M., Caron D., Lanarde L., Meyer M., Fontaine S., Castillon F., Vittonato J., Refait Ph. "Estimation of residual corrosion rates of steel under cathodic protection in soils via voltammetry.", *Corrosion Science*. vol. 73, 2013. pp. 222-229.
- [3] Zhao Y., Cheng C Q., Cao Z Y., Zha J. "Interaction of liquid tin and zinc with AISI 304 stainless steel after passivation in air and nitric acid.", *Materials Characterization*. vol. 77, 2013. pp. 1-9.
- [4] Thanawala K., Mutneja N., Khanna A S., Singh Raman R.K. "Development of Self-Healing Coatings Based on Linseed Oil as Autonomous Repairing Agent for Corrosion Resistance.", *Materials*. 2014. vol. 7, Nov. 2014. pp. 7324-7338.
- [5] Behzadnasaba M., Esfandeha M., Mirabedini S.M., Zohuriaan-Mehra M.J., Farnoodbalran R.R. "Preparation and characterization of linseed oil filled urea formaldehyde microcapsules and their effect on mechanical properties of an epoxy-based coating.", *Colloids and Surface A: Physicochemical and Engineering Aspects*. vol. 457, 2014. pp. 16-26.
- [6] Nesterova T., Dam-Johansen K., Kiil S. "Synthesis of durable microcapsules for self-healing anticorrosive coatings: A comparison of selected methods.", *Progress in Organic Coatings*. vol. 70, 2011. pp. 342-352.
- [7] Yang Z., Wei Z., Le-ping L., Si-jie W., Wu-jun L. "Self-healing coatings containing microcapsule.", *Applied Surface Science*. vol. 258, 2012. pp. 1915-1918.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [8] Yang Z., Wei Z., Le-ping L., Si-jie W., Wu-jun L. "The self-healing composite anticorrosion coating.", *Physics Procedia*. vol. 18, 2011. pp. 216-221.
- [9] Swapan Kumar Ghosh. *Self healing Materials*. Weinheim : Wiley-VCH, Inc. 2009.
- [10] Blaiszik B .J., Kramer S. L. B., Olugebefola S. C., Moore J. S., Sottos N. R., White S. R. "Self-Healing Polymers and Composites.", *Annual Review of Material Research*. vol 40, 2010. pp. 179-211.
- [11] กานต์ธิดาพร วัฒนกุล. "นวัตกรรมเคลือบผิววัสดุไร้รอย.", *INNO Magazine*. vol. 39, no. 226, Dec-Jan 2013. pp. 42-44.
- [13] บุศรินทร์ เนตรสว่าง, มัตตัญญู แจ่มโลง. "สารเคลือบผิวซ่อมแซมตนเอง." วิทยานิพนธ์ วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2557.
- [14] Samadzadeh M., Hatami Bouraa S., Peikaria M., Ashrafib A. Kasirihac M. "Tung oil : An autonomous repairing agent for self-healing epoxy coatings.", *Progress in Organic Coatings*. vol. 70, 2011. pp. 383-387.
- [15] Johannes Fickert. *Nanocapsules for self-healing materials* Ph.D. Thesis of The Johannes Gutenberg-University of Mainz. 2013.
- [16] White S. R., Sottos N. R., Geubelle P. H., Moore J. S., Kessler M. R., Sriram S. R., Brown E. N., Viswanathan S. "Autonomic healing of polymer composites.", *Nature*. vol. 409, Feb. 2001. pp. 794-797.
- [17] Massimo L., Chiantore O. "Drying and oxidative degradation of linseed oil.", *Polymer Degradation and Stability*. vol. 65, 1999. pp. 303-313.
- [18] เอกลักษณ์ ทวีโรจนกุล "Microencapsulation : เทคโนโลยีจิ๋วแต่แจ๋ว.", *Technology Promotion Magazine*. vol. 36, no. 20, Aug-Sep 2009. pp. 39-42.
- [19] Siva T., Sathiyarayanan S. "Self healing coatings containing dual active agent loaded ureaformaldehyde (UF) microcapsules.", *Progress in Organic Coatings*. vol. 82, 2015. pp. 57-67.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [20] วรวิทย์ จันทร์สุวรรณ. “เอกสารประกอบการสอนรายวิชาเคมีประยุกต์.” คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี., มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร. 2554.
- [21] Integ co.,ltd. “สารละลายเกี่ยวกับการกัดกร่อน.” [Online]. Available : <http://www.integ.co.th/K%20detail/corrosion.htm>. [10 กุมภาพันธ์ 2559]
- [22] สถาบันนวัตกรรมและการเรียนรู้. “เซลล์ไฟฟ้าเคมี.” [Online]. Available : <http://www.il.mahidol.ac.th/e-media/electrochemistry/web/electrochem05htm#potential>. [20 พฤษภาคม 2559]
- [23] Hatami B. S., Peikaria M., Ashrafi A., Samadzadeha M. “Self-healing ability and adhesion strength of capsule embedded coatings Micro and nano sized capsules containing linseed oil.” *Progress in Organic Coatings*. vol. 75, 2012. pp. 292-300.
- [24] Brown E. N., Kessler M. R., Sottos N. R., White S. R. “In situ poly (urea-formaldehyde) microencapsulation of dicyclopentadiene.” *Journal of Microencapsulation*. vol. 20, No. 6, Nov-Dec. 2003. pp. 719-730.
- [25] Suryanarayana C., Chowdoji Raob K., Kumara D. “Preparation and characterization of microcapsules containing linseed oil and its use in self-healing coatings.” *Progress in Organic Coatings*. vol. 63, 2008. pp. 72-78.
- [26] Kouhi M., Mohebbi A., Mirzaei M., Peikari M. “Optimization of smart self-healing coatings based on micro/nanocapsules in heavy metals emission inhibition.” *Progress in Organic Coatings*. vol. 76, 2013. pp. 1006-1015.
- [27] Liu X. P., Zheng T. L., Xiong J. P. “Corrosion Resistance of Polyurea Polyaspartic Ester Coating in 3.5%NaCl by EIS.” *International Journal of Electrochemical Science*. vol. 8, 2013. pp. 11588-11595.
- [28] ศราวุธ ตันมี. “ความต้านทานการกัดกร่อนของเหล็กกล้าเครื่องมือสำหรับงานขึ้นรูปร้อนเกรด AISI H13 ที่เคลือบผิวด้วยวิธีไอทางกายภาพ.” วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี. 2554.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [29] Schweitzer J. "Scanning Electron Microscope." [Online]. Available : <https://www.purdue.edu/ehps/rem/rs/sem.htm>. [20 พฤษภาคม 2559]
- [30] สำนักงานเลขานุการศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์. "มาทำความรู้จักกับเครื่อง FT-IR กันเถอะ." SEC Magazine. vol.04, 2557.
- [31] Nicolet T. Introduction to Fourier Transform Infrared Spectrometry. Medison. : Thermo nicolet corporation., Inc. 2001.
- [32] Razavi R. S. Recent Researches in Corrosion Evaluation and Protection. Rijeka : InTech, Inc. 2012.
- [33] ประสาท อ่อนสนิท. "การทำความสะอาดผิวเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก AISI 304 ที่ผ่านการรีดร้อนด้วยกรรมวิธีทางเคมี." วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมการผลิต คณะวิศวกรรมศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ. 2549
- [34] Waters N., Connolly R., Brown D., Laskowski B. "Electrochemical Impedance Spectroscopy for Coating Evaluation using a Micro Sensor." Annual conference of the prognostics and health management 2014. Santa Clara : Analatom Inc.,2014.
- [35] ชูชาติ อารีจิตรานุสรณ์. เครื่องมือวิทยาศาสตร์., พิมพ์ครั้งที่ 3. ขอนแก่น : โรงพิมพ์คลังนานาวิทยา, 2544.



ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก ก

ข้อมูลผลการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ก.1 การสังเคราะห์ไมโครแคปซูลด้วยวิธีไมโครเอนแคปซูเลชัน

ตารางที่ ก.1.1 ขนาดอนุภาคไมโครแคปซูลที่อัตราเร็วในการกวน 400 600 800 และ 1000 รอบนาที และ เวลาในการกวน 4 ชั่วโมง

ขนาดของไมโครแคปซูล (ไมโครเมตร)																			
400 รอบต่อนาที					600 รอบต่อนาที					800 รอบต่อนาที									
146.6	235.5	154.2	231.8	196.8	170.5	75.8	130.2	211.2	130.9	117.8	73.3	74.3	39.8	89.1	90.3	112.3	74.5	34.8	
166.7	194.3	200.3	165.4	209.3	132.2	245.1	107.9	169.3	130.3	70.3	130.3	76.6	92.3	70.3	54.1	88.2	64.2	57.8	
161.7	120.3	198.2	174.2	208.0	203.1	83.3	97.8	86.9	163.6	38.8	97.9	76.2	91.5	46.4	75.2	120.6	73.1	57.8	
190.5	200.6	104.0	185.5	220.5	150.6	150.3	153.2	107.9	180.4	86.5	76.2	70.0	50.4	96.7	70.0	45.3	39.3	88.3	
246.4	201.8	181.0	223.3	195.5	136.8	148.3	168.4	83.7	165.2	81.8	87.5	37.1	70.1	78.5	50.1	116.1	74.6	42.7	
217.6	200.2	129.1	169.2	152.9	155.2	107.9	139.1	131.3	184.8	90.0	68.2	75.3	71.3	87.7	70.6	119.1	73.3	36.5	
198.5	254.4	171.7	186.7		134.2	204.1	149.3	171.6		55.3	75.3	75.4	71.2	90.3	96.6	99.0	48.9	114.4	
149.1	250.4	181.7	157.9		178.7	157.9	171.7	199.5		74.3	74.4	116.9	67.4	48.8	106.5	75.5	110.1	69.1	
189.2	198.0	211.8	225.5		226.9	155.9	201.3	162.9		76.3	85.8	50.5	92.9	88.0	41.1	64.3	45.6	50.8	
233.2	263.2	183.0	140.4		109.0	200.3	130.2	135.2		73.5	70.3	75.3	91.4	87.3	90.0	56.4	81.5	91.1	
190.5	209.3	172.9	215.3		182.1	225.9	204.5	218.5		93.7	70.5	88.7	111.6	75.4	68.1	84.7	47.7	99.5	
198.0	167.9	180.5	130.3		119.8	205.7	150.5	122.8		73.2	72.3	74.2	104.8	29.9	46.1	97.8	73.1	74.2	
141.6	147.9	185.5	189.2		153.2	135.5	194.1	152.5		69.7	70.6	56.0	142.3	110.7	47.9	92.5	90.2		
196.8	172.9	135.4	152.9		153.5	134.9	148.3	150.3		95.3	55.9	69.4	96.5	70.3	73.0	100.3	57.6		

ตารางที่ ก.1.1 ขนาดอนุภาคไมโครแคปซูลที่อัตราเร็วในการกวน 400 600 800 และ 1000 รอบนาที และ เวลาในการกวน 4 ชั่วโมง (ต่อ)

ขนาดของไมโครแคปซูล (ไมโครเมตร)																					
1000 รอบต่อนาที																					
102.2	54.2	41.2	36.1	24.7	50.2	98.3	43.2	72.7	55.2	55.0	56.9	23.7	52.9	66.9	45.3	81.0	37.5	42.3	48.1	45.3	
77.6	40.2	38.3	44.3	43.2	30.8	35.9	19.4	31.8	60.5	42.4	33.3	26.2	45.2	40.2	44.9	69.8	67.8	23.0	27.5	87.5	
88.1	36.8	51.2	43.2	102.2	65.5	46.8	38.3	33.6	57.0	83.4	28.0	45.2	95.8	38.4	36.3	82.3	71.9	22.5	43.0	37.5	
49.6	50.2	73.5	69.8	77.8	40.2	58.8	42.4	32.4	26.5	46.7	32.2	69.0	58.5	89.9	23.0	61.1	47.4	36.0	17.8	40.2	
34.7	57.3	57.3	28.0	98.5	41.2	30.1	36.1	42.2	24.7	95.3	98.3	18.7	72.7	59.2	70.2	55.0	73.5	23.7	22.6	48.1	
64.6	48.5	28.2	95.2	43.5	38.3	73.2	44.3	86.4	43.2	38.2	35.9	50.3	31.8	43.2	60.3	42.4	55.0	26.2	26.7	79.0	
48.5	63.6	81.5	30.0	66.7	51.2	40.0	43.2	29.2	102.2	39.9	46.8	22.5	33.6	47.7	108.4	83.4	90.8	45.2	42.1	77.3	
53.2	50.2	64.5	49.8	85.3	73.5	63.6	69.8	40.2	77.8	36.3	58.8	60.2	32.4	57.3	96.0	46.7	61.3	69.0	76.4	96.0	
51.2	41.2	39.9	34.9	55.2	57.3	68.0	28.0	30.8	98.5	63.6	30.1	67.3	42.2	60.2	47.4	95.3	68.3	18.7	83.5	62.9	
54.3	96.3	64.3	28.0	38.6	28.2	50.3	95.2	26.2	43.5	43.0	73.2	62.3	86.4	25.6	34.9	38.2	44.2	50.3	49.0	61.3	
71.2	66.2	79.3	50.1	51.0	81.5	69.6	30.0	23.0	66.7	65.3	40.0	55.2	29.2	36.8	83.6	39.9	22.9	22.5	71.3	60.2	
63.6	50.2	43.2	55.2	56.9	64.5	52.9	49.8	81.0	85.3	42.3	63.6	56.8	40.2	77.6	92.7	36.3	28.0	60.2	108.4	76.4	
45.2	30.8	19.4	60.5	33.3	39.9	45.2	34.9	69.8	55.2	23.0	68.0	66.6	30.8	28.3	67.8	63.6	43.3	67.3	57.1	27.7	
48.4	65.5	38.3	57.0	28.0	64.3	95.8	28.0	82.3	38.6	22.5	50.3	58.6	26.2	51.9	103.5	43.0	22.9	62.3	76.0	56.1	
53.2	40.2	42.4	26.5	32.2	79.3	58.5	50.1	61.1	51.0	36.0	69.6	66.7	23.0	33.9	43.5	65.3	28.7	55.2	76.7	20.6	

ตารางที่ ก.1.1 ขนาดอนุภาคไมโครแคปซูลที่อัตราเร็วในการกวน 400 600 800 และ 1000 รอบนาที และ เวลาในการกวน 4 ชั่วโมง (ต่อ)

ขนาดของไมโครแคปซูล (ไมโครเมตร)																				
1000 รอบต่อนาที																				
56.8	77.3	92.7	56.8	28.0	28.3	108.4	23.0	56.1	47.4	59.2	17.8	79.0	68.3	83.6	18.0	22.9	77.6	71.3	50.5	36.3
66.6	54.4	67.8	50.5	43.3	51.9	57.1	70.2	59.2	73.5	43.2	22.6	43.2	87.5	31.5	68.3	25.6	83.5	18.0	59.2	67.3
58.6	20.6	103.5	88.5	22.9	33.9	76.0	60.3	66.7	55.0	47.7	26.7	62.9	36.7	54.4	44.2	36.8	49.0	56.8	66.7	71.9
66.7	68.3	43.5	66.9	28.7	33.9	76.7	108.4	31.5	90.8	57.3	42.1	19.3	67.3	47.4	19.3	27.7	43.0	33.9	43.2	89.9
44.9	36.7	67.8	38.4	27.5	88.5	34.9														



ตารางที่ ก.1.2 ขนาดอนุภาคไมโครแคปซูลที่อัตราเร็วในการกววน 1000 รอบนาที และ เวลาในการกววน 1 2 และ 4 ชั่วโมง

ขนาดของไมโครแคปซูล (ไมโครเมตร)																	
1 ชั่วโมง								2 ชั่วโมง									
80.2	79.5	89.0	61.4	56.4	66.4	80.2	60.2	93.1	63.3	135.6	94.4	80.8	89.6	88.9	70.3	94.7	81.4
115.3	67.7	67.7	51.4	58.9	83.2	99.4	50.0	101.8	82.0	52.8	47.8	47.2	100.6	85.7	49.7	85.8	79.8
80.8	72.7	81.2	87.7	46.4	65.7	78.0	70.2	80.7	80.7	91.9	69.8	39.8	102.4	72.0	89.9	62.1	51.1
124.1	58.9	99.0	77.7	90.2	89.0	101.5		69.6	49.7	42.2	84.1	59.6	74.7	60.9	55.5	68.5	64.8
77.7	72.7	75.2	68.9	105.3	111.9	101.8		68.3	47.2	94.4	72.0	32.4	83.5	70.8	78.3	67.6	79.5
81.5	104.0	87.7	122.8	82.7	90.5	116.6		113.0	52.2	54.6	49.2	59.6	74.5	92.1	67.1	41.3	109.3
91.5	95.2	116.6	76.5	99.0	81.5	62.9		89.4	55.9	74.5	39.4	88.2	96.9	82.2	73.6	39.0	73.8
106.5	61.4	91.5	102.8	72.7	80.3	80.2		105.6	43.5	66.1	101.1	69.5	94.0	90.0	79.3	92.7	51.9
85.2	111.5	82.1	83.3	61.4	94.0	73.9		60.9	90.7	104.5	57.8	79.5	83.2	68.4	41.0	64.6	30.3
101.5	82.1	85.2	89.1	102.8	106.5	94.0		105.6	101.8	47.2	63.3	83.2	84.3	84.5	40.1	99.4	93.2
75.2	80.3	87.7	66.4	47.6	93.0	61.4		68.3	103.1	59.0	101.2	68.3	67.9	47.6	65.6	84.5	77.0
65.2	67.7	119.1	52.9	87.6	100.3	52.5		54.7	50.9	41.0	62.4	93.2	60.9	80.5	81.5	72.0	79.0
56.4	101.6	60.2	90.2	62.7	82.3	66.4		63.4	42.2	43.2	70.5	80.1	63.3	87.5	90.1	105.6	41.3
51.4	99.0	89.0	95.2	42.1	100.3	69.2		46.0	42.2	78.6	72.3	74.5	73.4	47.2	85.7	66.1	
79.0	65.2	82.0	129.6	71.0	92.7	81.5		96.9	44.7	72.3	94.3	55.3	55.8	81.9	70.6	45.5	

ตารางที่ ก.1.2 ขนาดอนุภาคไมโครแคปซูลที่อัตราเร็วในการกวน 1000 รอบนาที และ เวลาในการกวน 1 2 และ 4 ชั่วโมง (ต่อ)

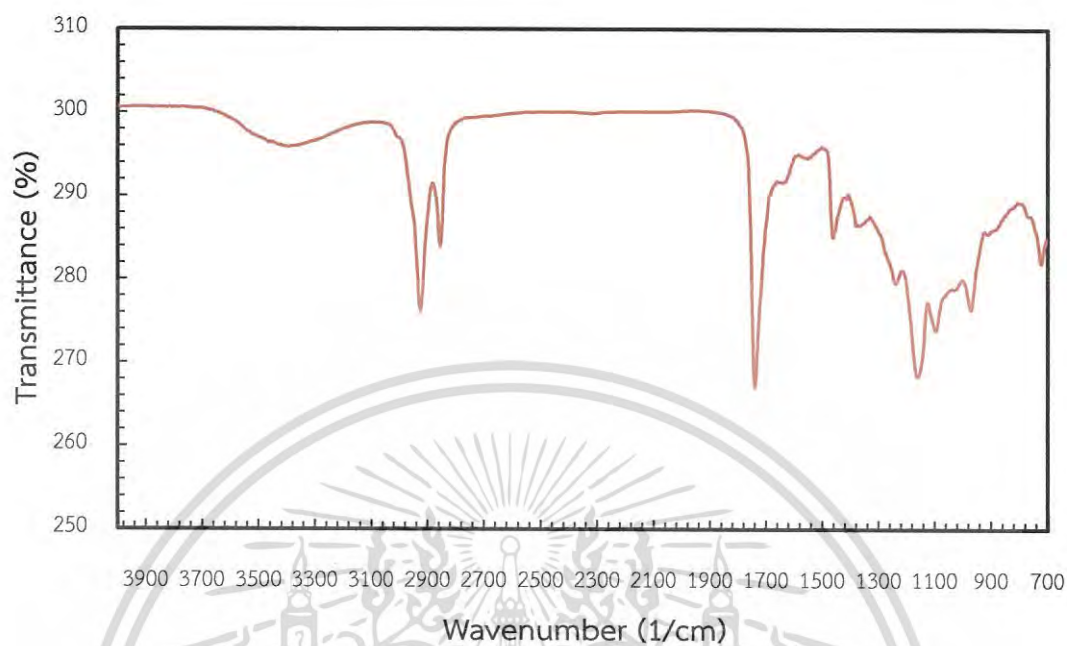
ขนาดของไมโครแคปซูล (ไมโครเมตร)																				
4 ชั่วโมง																				
102.2	54.2	41.2	36.1	24.7	50.2	98.3	43.2	72.7	55.2	55.0	56.9	23.7	52.9	66.9	45.3	81.0	37.5	42.3	48.1	45.3
77.6	40.2	38.3	44.3	43.2	30.8	35.9	19.4	31.8	60.5	42.4	33.3	26.2	45.2	40.2	44.9	69.8	67.8	23.0	27.5	87.5
88.1	36.8	51.2	43.2	102.2	65.5	46.8	38.3	33.6	57.0	83.4	28.0	45.2	95.8	38.4	36.3	82.3	71.9	22.5	43.0	37.5
49.6	50.2	73.5	69.8	77.8	40.2	58.8	42.4	32.4	26.5	46.7	32.2	69.0	58.5	89.9	23.0	61.1	47.4	36.0	17.8	40.2
34.7	57.3	57.3	28.0	98.5	41.2	30.1	36.1	42.2	24.7	95.3	98.3	18.7	72.7	59.2	70.2	55.0	73.5	23.7	22.6	48.1
64.6	48.5	28.2	95.2	43.5	38.3	73.2	44.3	86.4	43.2	38.2	35.9	50.3	31.8	43.2	60.3	42.4	55.0	26.2	26.7	79.0
48.5	63.6	81.5	30.0	66.7	51.2	40.0	43.2	29.2	102.2	39.9	46.8	22.5	33.6	47.7	108.4	83.4	90.8	45.2	42.1	77.3
53.2	50.2	64.5	49.8	85.3	73.5	63.6	69.8	40.2	77.8	36.3	58.8	60.2	32.4	57.3	96.0	46.7	61.3	69.0	76.4	96.0
51.2	41.2	39.9	34.9	55.2	57.3	68.0	28.0	30.8	98.5	63.6	30.1	67.3	42.2	60.2	47.4	95.3	68.3	18.7	83.5	62.9
54.3	96.3	64.3	28.0	38.6	28.2	50.3	95.2	26.2	43.5	43.0	73.2	62.3	86.4	25.6	34.9	38.2	44.2	50.3	49.0	61.3
71.2	66.2	79.3	50.1	51.0	81.5	69.6	30.0	23.0	66.7	65.3	40.0	55.2	29.2	36.8	83.6	39.9	22.9	22.5	71.3	60.2
63.6	50.2	43.2	55.2	56.9	64.5	52.9	49.8	81.0	85.3	42.3	63.6	56.8	40.2	77.6	92.7	36.3	28.0	60.2	108.4	76.4
45.2	30.8	19.4	60.5	33.3	39.9	45.2	34.9	69.8	55.2	23.0	68.0	66.6	30.8	28.3	67.8	63.6	43.3	67.3	57.1	27.7
48.4	65.5	38.3	57.0	28.0	64.3	95.8	28.0	82.3	38.6	22.5	50.3	58.6	26.2	51.9	103.5	43.0	22.9	62.3	76.0	56.1
53.2	40.2	42.4	26.5	32.2	79.3	58.5	50.1	61.1	51.0	36.0	69.6	66.7	23.0	33.9	43.5	65.3	28.7	55.2	76.7	20.6

ตารางที่ ก.1.2 ขนาดอนุภาคไมโครแคปซูลที่อัตราเร็วในการกวน 1000 รอบนาที และ เวลาในการกวน 1 2 และ 4 ชั่วโมง (ต่อ)

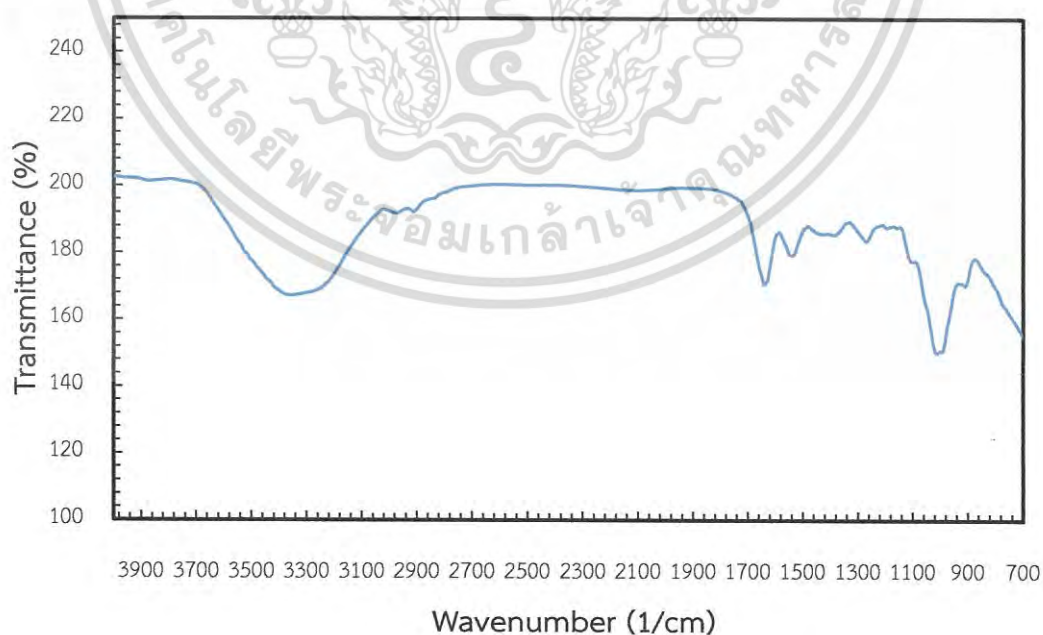
ขนาดของไมโครแคปซูล (ไมโครเมตร)																				
4 ชั่วโมง																				
56.8	77.3	92.7	56.8	28.0	28.3	108.4	23.0	56.1	47.4	59.2	17.8	79.0	68.3	83.6	18.0	22.9	77.6	71.3	50.5	36.3
66.6	54.4	67.8	50.5	43.3	51.9	57.1	70.2	59.2	73.5	43.2	22.6	43.2	87.5	31.5	68.3	25.6	83.5	18.0	59.2	67.3
58.6	20.6	103.5	88.5	22.9	33.9	76.0	60.3	66.7	55.0	47.7	26.7	62.9	36.7	54.4	44.2	36.8	49.0	56.8	66.7	71.9
66.7	68.3	43.5	66.9	28.7	33.9	76.7	108.4	31.5	90.8	57.3	42.1	19.3	67.3	47.4	19.3	27.7	43.0	33.9	43.2	89.9
44.9	36.7	67.8	38.4	27.5	88.5	34.9														



ก.2 โครงสร้างทางเคมีของไมโครแคปซูล

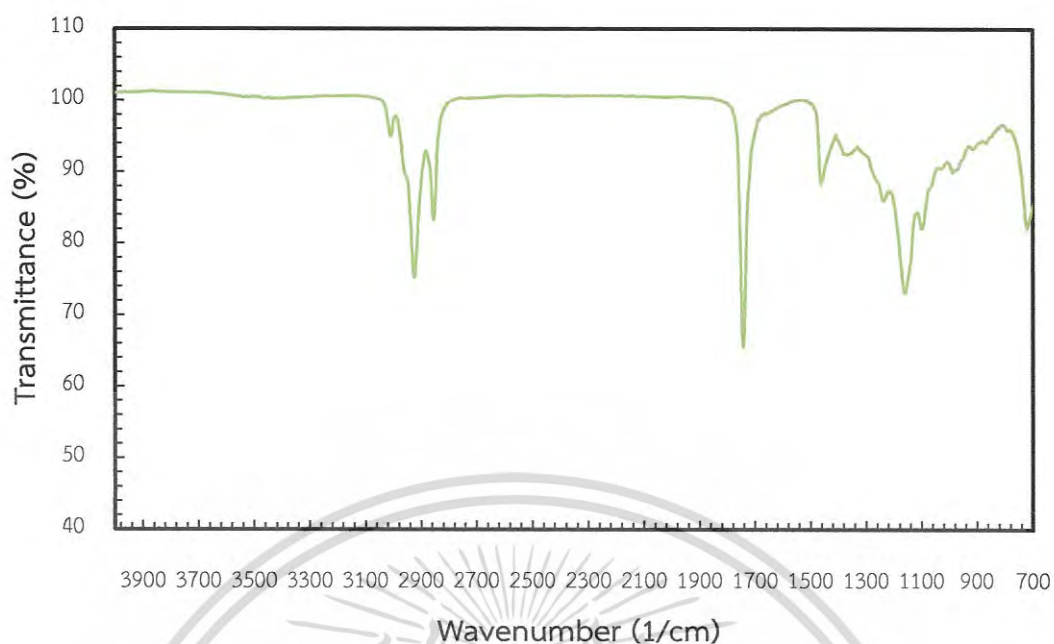


รูปที่ ก.2.1 อินฟราเรดสเปกตรัม ของไมโครแคปซูล จากการวิเคราะห์ด้วยเครื่องวิเคราะห์สารด้วยอินฟราเรด (FTIR)



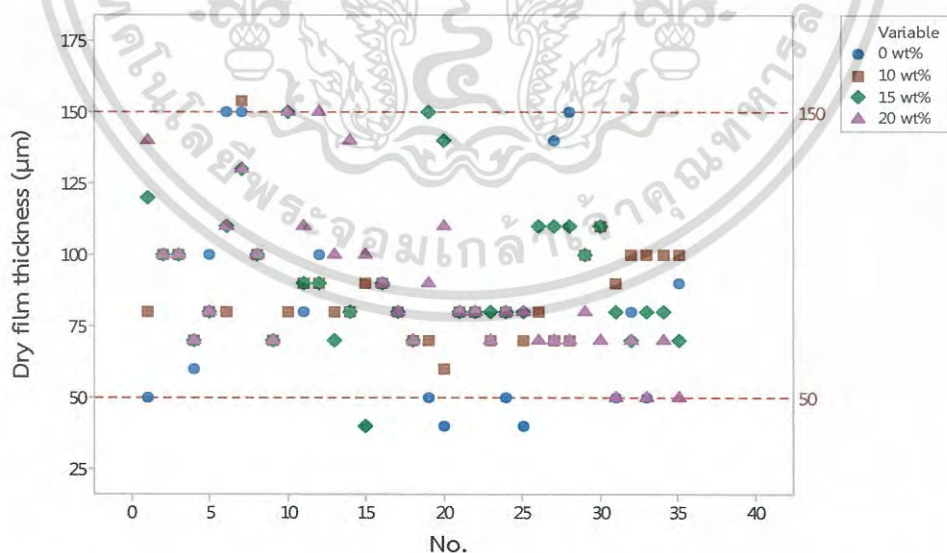
รูปที่ ก.2.1 อินฟราเรดสเปกตรัม ของยูเรีย-ฟอร์มัลดีไฮด์ จากการวิเคราะห์ด้วยเครื่องวิเคราะห์สารด้วยอินฟราเรด (FTIR)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ก.2.1 อินฟราเรดสเปกตรัม ของน้ำมันเมล็ดฝ้าย จากการวิเคราะห์ด้วยเครื่องวิเคราะห์สารด้วยอินฟราเรด (FTIR)

ก.3 ความหนาของชั้นฟิล์มในการเคลือบผิว



รูปที่ ก.3 ลักษณะการกระจายของความหนาของชั้นฟิล์มในการเคลือบผิวของแต่ละตัวอย่าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ก.4 การกักกรองบนผิวเหล็กกล้า

ตารางที่ ก.4.1 ค่าอิมพีแดนซ์ของสารเคลือบผิวที่มีไมโครแคปซูลผสมอยู่ในสารเคลือบผิว ที่ความเข้มข้นต่างๆ หลังจากแช่ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 3.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เป็นเวลา 1 วัน

Frequency (Hz)	LOG (f)	ค่าอิมพีแดนซ์ ของสารเคลือบผิวบนผิวเหล็กกล้าที่ปริมาณไมโครแคปซูลต่างๆ ในสารเคลือบผิว ($\Omega.cm$)							
		0 wt%		10 wt%		15 wt%		20 wt%	
		Z	LOG(Z)	Z	LOG(Z)	Z	LOG(Z)	Z	LOG(Z)
0.0	-2.0	3733.9	3.6	134599.0	5.1	1511660.0	6.2	34647.7	4.5
0.0	-1.9	3849.5	3.6	101693.0	5.0	1052820.0	6.0	30428.8	4.5
0.0	-1.8	3865.1	3.6	82327.3	4.9	1007830.0	6.0	28143.5	4.4
0.0	-1.6	3854.7	3.6	71978.5	4.9	1066540.0	6.0	25783.7	4.4
0.0	-1.5	3812.9	3.6	71970.0	4.9	955917.0	6.0	23243.2	4.4
0.0	-1.4	3760.0	3.6	53506.7	4.7	803447.0	5.9	20648.2	4.3
0.1	-1.3	3667.0	3.6	47555.1	4.7	820338.0	5.9	17804.1	4.3
0.1	-1.1	3563.4	3.6	42604.3	4.6	774807.0	5.9	14970.9	4.2
0.1	-1.0	3435.4	3.5	35937.5	4.6	656786.0	5.8	12833.2	4.1
0.1	-0.9	3291.5	3.5	30661.7	4.5	621895.0	5.8	10906.4	4.0

ตารางที่ ก.4.1 ค่าอิมพีแดนซ์ของสารเคลือบผิวที่มีไมโครแคปซูลผสมอยู่ในสารเคลือบผิว ที่ความเข้มข้นต่างๆ หลังจากแช่ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 3.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เป็นเวลา 1 วัน (ต่อ)

Frequency (Hz)	LOG (f)	ค่าอิมพีแดนซ์ ของสารเคลือบผิวบนผิวเหล็กกล้าที่ปริมาณไมโครแคปซูลต่างๆ ในสารเคลือบผิว (Ω .cm)							
		0 wt%		10 wt%		15 wt%		20 wt%	
		Z	LOG(Z)	Z	LOG(Z)	Z	LOG(Z)	Z	LOG(Z)
0.2	-0.8	3128.8	3.5	26560.6	4.4	609828.0	5.8	9160.2	4.0
0.2	-0.7	2985.9	3.5	23751.6	4.4	542795.0	5.7	7718.8	3.9
0.3	-0.5	2833.3	3.5	20307.3	4.3	538146.0	5.7	6499.4	3.8
0.4	-0.4	2689.8	3.4	17975.3	4.3	452216.0	5.7	5501.5	3.7
0.5	-0.3	2546.1	3.4	15910.6	4.2	471745.0	5.7	4622.2	3.7
0.7	-0.2	2385.5	3.4	14114.2	4.1	422592.0	5.6	3900.5	3.6
0.9	0.0	2203.1	3.3	12159.4	4.1	378459.0	5.6	3295.0	3.5
1.2	0.1	2076.3	3.3	10763.2	4.0	343153.0	5.5	2783.5	3.4
1.6	0.2	1859.4	3.3	9394.0	4.0	330732.0	5.5	2340.2	3.4
2.1	0.3	1682.8	3.2	8291.5	3.9	296604.0	5.5	2006.2	3.3
2.8	0.4	1526.9	3.2	7337.5	3.9	270033.0	5.4	1692.8	3.2

ตารางที่ ก.4.1 ค่าอิมพีแดนซ์ของสารเคลือบผิวที่มีไมโครแคปซูลผสมอยู่ในสารเคลือบผิว ที่ความเข้มข้นต่างๆ หลังจากแช่ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 3.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เป็นเวลา 1 วัน (ต่อ)

Frequency (Hz)	LOG (f)	ค่าอิมพีแดนซ์ ของสารเคลือบผิวบนผิวเหล็กกล้าที่ปริมาณไมโครแคปซูลต่างๆ ในสารเคลือบผิว (Ω .cm)							
		0 wt%		10 wt%		15 wt%		20 wt%	
		Z	LOG(Z)	Z	LOG(Z)	Z	LOG(Z)	Z	LOG(Z)
3.7	0.6	1336.8	3.1	6422.6	3.8	246121.0	5.4	1463.7	3.2
4.9	0.7	1186.2	3.1	5634.8	3.8	226154.0	5.4	1251.8	3.1
6.6	0.8	1051.1	3.0	4942.7	3.7	202454.0	5.3	1076.6	3.0
8.7	0.9	924.6	3.0	4346.0	3.6	188617.0	5.3	943.0	3.0
11.5	1.1	803.9	2.9	3814.4	3.6	172077.0	5.2	800.5	2.9
15.3	1.2	702.9	2.8	3359.2	3.5	158367.0	5.2	693.1	2.8
20.2	1.3	618.8	2.8	2946.1	3.5	145046.0	5.2	598.7	2.8
26.8	1.4	545.7	2.7	2590.7	3.4	133814.0	5.1	518.0	2.7
35.6	1.6	478.1	2.7	2279.2	3.4	125787.0	5.1	448.9	2.7
47.1	1.7	420.7	2.6	2003.3	3.3	117624.0	5.1	388.6	2.6
62.5	1.8	370.7	2.6	1768.6	3.2	108835.0	5.0	336.7	2.5

ตารางที่ ก.4.1 ค่าอิมพีแดนซ์ของสารเคลือบผิวที่มีไมโครแคปซูลผสมอยู่ในสารเคลือบผิว ที่ความเข้มข้นต่างๆ หลังจากแช่ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 3.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เป็นเวลา 1 วัน (ต่อ)

Frequency (Hz)	LOG (f)	ค่าอิมพีแดนซ์ ของสารเคลือบผิวบนผิวเหล็กกล้าที่ปริมาณไมโครแคปซูลต่างๆ ในสารเคลือบผิว ($\Omega.cm$)							
		0 wt%		10 wt%		15 wt%		20 wt%	
		Z	LOG(Z)	Z	LOG(Z)	Z	LOG(Z)	Z	LOG(Z)
82.9	1.9	328.1	2.5	1558.5	3.2	101569.0	5.0	291.4	2.5
109.8	2.0	290.4	2.5	1370.4	3.1	94537.5	5.0	252.6	2.4
145.6	2.2	256.9	2.4	1207.0	3.1	87910.4	4.9	218.9	2.3
193.1	2.3	227.5	2.4	1062.2	3.0	82639.3	4.9	189.8	2.3
256.0	2.4	201.4	2.3	934.3	3.0	77373.7	4.9	164.8	2.2
339.3	2.5	178.1	2.3	820.2	2.9	71262.5	4.9	143.2	2.2
449.8	2.7	157.3	2.2	719.8	2.9	65945.7	4.8	124.4	2.1
596.4	2.8	138.5	2.1	632.5	2.8	60823.3	4.8	108.5	2.0
790.6	2.9	122.1	2.1	553.9	2.7	56362.0	4.8	94.7	2.0
1048.1	3.0	107.4	2.0	485.8	2.7	52051.4	4.7	82.9	1.9
1389.5	3.1	94.5	2.0	424.6	2.6	51269.1	4.7	73.0	1.9

ตารางที่ ก.4.1 ค่าอิมพีแดนซ์ของสารเคลือบผิวที่มีไมโครแคปซูลผสมอยู่ในสารเคลือบผิว ที่ความเข้มข้นต่างๆ หลังจากแช่ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 3.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เป็นเวลา 1 วัน (ต่อ)

Frequency (Hz)	LOG (f)	ค่าอิมพีแดนซ์ ของสารเคลือบผิวบนผิวเหล็กกล้าที่ปริมาณไมโครแคปซูลต่างๆ ในสารเคลือบผิว ($\Omega.cm$)							
		0 wt%		10 wt%		15 wt%		20 wt%	
		Z	LOG(Z)	Z	LOG(Z)	Z	LOG(Z)	Z	LOG(Z)
1842.1	3.3	83.3	1.9	370.4	2.6	47470.0	4.7	64.5	1.8
2442.1	3.4	73.7	1.9	323.4	2.5	43622.0	4.6	57.1	1.8
3237.4	3.5	65.8	1.8	281.9	2.5	39326.6	4.6	50.9	1.7
4291.9	3.6	59.1	1.8	245.7	2.4	35556.6	4.6	45.6	1.7
5689.9	3.8	53.6	1.7	213.7	2.3	31288.0	4.5	41.0	1.6
7543.1	3.9	49.3	1.7	186.4	2.3	27984.9	4.4	37.1	1.6
10000.0	4.0	45.2	1.7	162.1	2.2	24605.4	4.4	33.8	1.5

ตารางที่ ก.4.2 ค่าอิมพีแดนซ์ของสารเคลือบผิวที่มีไมโครแคปซูลผสมอยู่ในสารเคลือบผิว ที่ความเข้มข้นต่างๆ หลังจากแช่ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 3.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เป็นเวลา 7 วัน

Frequency (Hz)	LOG (f)	ค่าอิมพีแดนซ์ ของสารเคลือบผิวบนผิวเหล็กกล้าที่ปริมาณไมโครแคปซูลต่างๆ ในสารเคลือบผิว ($\Omega.cm$)							
		0 wt%		10 wt%		15 wt%		20 wt%	
		Z	LOG(Z)	Z	LOG(Z)	Z	LOG(Z)	Z	LOG(Z)
0.0	-2.0	3444.9	3.5	41373.7	4.6	374066.0	5.6	5891.9	3.8
0.0	-1.9	3403.7	3.5	35352.0	4.5	413776.0	5.6	5711.8	3.8
0.0	-1.8	3387.2	3.5	28058.5	4.4	340693.0	5.5	5254.5	3.7
0.0	-1.6	3258.0	3.5	23999.4	4.4	355164.0	5.6	4950.4	3.7
0.0	-1.5	3192.1	3.5	20103.5	4.3	331904.0	5.5	4556.2	3.7
0.0	-1.4	2913.8	3.5	15726.4	4.2	320713.0	5.5	4147.6	3.6
0.1	-1.3	2735.6	3.4	13196.9	4.1	311816.0	5.5	3726.4	3.6
0.1	-1.1	2696.6	3.4	10715.3	4.0	292430.0	5.5	3305.1	3.5
0.1	-1.0	2474.1	3.4	8832.4	3.9	278478.0	5.4	2831.0	3.5
0.1	-0.9	2221.2	3.3	7172.9	3.9	257770.0	5.4	2495.3	3.4
0.2	-0.8	1990.4	3.3	5964.3	3.8	240575.0	5.4	2157.2	3.3

ตารางที่ ก.4.2 ค่าอิมพีแดนซ์ของสารเคลือบผิวที่มีไมโครแคปซูลผสมอยู่ในสารเคลือบผิว ที่ความเข้มข้นต่างๆ หลังจากแช่ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 3.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เป็นเวลา 7 วัน (ต่อ)

Frequency (Hz)	LOG (f)	ค่าอิมพีแดนซ์ ของสารเคลือบผิวบนผิวเหล็กกล้าที่ปริมาณไมโครแคปซูลต่างๆ ในสารเคลือบผิว ($\Omega.cm$)							
		0 wt%		10 wt%		15 wt%		20 wt%	
		Z	LOG(Z)	Z	LOG(Z)	Z	LOG(Z)	Z	LOG(Z)
0.2	-0.7	1793.6	3.3	4894.2	3.7	223029.0	5.3	1857.3	3.3
0.3	-0.5	1595.9	3.2	4074.5	3.6	200096.0	5.3	1621.9	3.2
0.4	-0.4	1433.0	3.2	3405.5	3.5	180139.0	5.3	1388.5	3.1
0.5	-0.3	1262.4	3.1	2861.3	3.5	160460.0	5.2	1201.3	3.1
0.7	-0.2	1115.9	3.0	2408.6	3.4	141688.0	5.2	1032.4	3.0
0.9	0.0	980.0	3.0	2024.3	3.3	124716.0	5.1	884.5	2.9
1.2	0.1	861.1	2.9	1720.5	3.2	110152.0	5.0	762.9	2.9
1.6	0.2	774.1	2.9	1464.7	3.2	96770.5	5.0	656.4	2.8
2.1	0.3	656.9	2.8	1245.3	3.1	85642.0	4.9	565.5	2.8
2.8	0.4	592.1	2.8	1064.8	3.0	76985.3	4.9	487.8	2.7
3.7	0.6	522.5	2.7	917.1	3.0	68445.1	4.8	421.5	2.6

ตารางที่ ก.4.2 ค่าอิมพีแดนซ์ของสารเคลือบผิวที่มีไมโครแคปซูลผสมอยู่ในสารเคลือบผิว ที่ความเข้มข้นต่างๆ หลังจากแช่ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 3.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เป็นเวลา 7 วัน (ต่อ)

Frequency (Hz)	LOG (f)	ค่าอิมพีแดนซ์ ของสารเคลือบผิวบนผิวเหล็กกล้าที่ปริมาณไมโครแคปซูลต่างๆ ในสารเคลือบผิว ($\Omega.cm$)							
		0 wt%		10 wt%		15 wt%		20 wt%	
		Z	LOG(Z)	Z	LOG(Z)	Z	LOG(Z)	Z	LOG(Z)
4.9	0.7	453.7	2.7	790.4	2.9	63485.0	4.8	366.6	2.6
6.6	0.8	405.1	2.6	683.8	2.8	59096.8	4.8	320.1	2.5
8.7	0.9	363.0	2.6	592.2	2.8	55730.9	4.7	280.1	2.4
11.5	1.1	326.9	2.5	513.6	2.7	52859.7	4.7	246.6	2.4
15.3	1.2	295.0	2.5	446.0	2.6	50567.6	4.7	218.2	2.3
20.2	1.3	267.9	2.4	388.5	2.6	49916.5	4.7	194.0	2.3
26.8	1.4	242.7	2.4	338.9	2.5	48206.7	4.7	173.3	2.2
35.6	1.6	220.6	2.3	296.0	2.5	45789.9	4.7	155.7	2.2
47.1	1.7	202.2	2.3	258.7	2.4	45707.8	4.7	140.5	2.1
62.5	1.8	184.7	2.3	226.3	2.4	45338.7	4.7	127.2	2.1
82.9	1.9	169.3	2.2	198.2	2.3	44644.9	4.6	115.7	2.1

ตารางที่ ก.4.2 ค่าอิมพีแดนซ์ของสารเคลือบผิวที่มีไมโครแคปซูลผสมอยู่ในสารเคลือบผิว ที่ความเข้มข้นต่างๆ หลังจากแช่ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 3.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เป็นเวลา 7 วัน (ต่อ)

Frequency (Hz)	LOG (f)	ค่าอิมพีแดนซ์ ของสารเคลือบผิวบนผิวเหล็กกล้าที่ปริมาณไมโครแคปซูลต่างๆ ในสารเคลือบผิว (Ω .cm)							
		0 wt%		10 wt%		15 wt%		20 wt%	
		Z	LOG(Z)	Z	LOG(Z)	Z	LOG(Z)	Z	LOG(Z)
109.8	2.0	155.4	2.2	173.9	2.2	44041.7	4.6	105.7	2.0
145.6	2.2	142.7	2.2	152.8	2.2	43659.9	4.6	97.0	2.0
193.1	2.3	131.0	2.1	134.1	2.1	43216.9	4.6	89.2	2.0
256.0	2.4	120.6	2.1	118.2	2.1	42833.2	4.6	82.4	1.9
339.3	2.5	111.0	2.0	104.3	2.0	42508.7	4.6	76.3	1.9
449.8	2.7	102.2	2.0	92.3	2.0	41030.4	4.6	70.8	1.8
596.4	2.8	94.5	2.0	81.9	1.9	38812.8	4.6	66.0	1.8
790.6	2.9	87.7	1.9	72.8	1.9	38144.2	4.6	61.5	1.8
1048.1	3.0	81.9	1.9	65.0	1.8	37357.3	4.6	57.5	1.8
1389.5	3.1	76.8	1.9	58.1	1.8	37252.8	4.6	53.8	1.7
1842.1	3.3	72.5	1.9	52.1	1.7	36963.8	4.6	50.6	1.7

ตารางที่ ก.4.2 ค่าอิมพีแดนซ์ของสารเคลือบผิวที่มีไมโครแคปซูลผสมอยู่ในสารเคลือบผิว ที่ความเข้มข้นต่างๆ หลังจากแช่ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 3.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เป็นเวลา 7 วัน (ต่อ)

Frequency (Hz)	LOG (f)	ค่าอิมพีแดนซ์ ของสารเคลือบผิวบนผิวเหล็กกล้าที่ปริมาณไมโครแคปซูลต่างๆ ในสารเคลือบผิว (Ω .cm)							
		0 wt%		10 wt%		15 wt%		20 wt%	
		Z	LOG(Z)	Z	LOG(Z)	Z	LOG(Z)	Z	LOG(Z)
2442.1	3.4	68.7	1.8	46.9	1.7	36686.1	4.6	47.6	1.7
3237.4	3.5	65.4	1.8	42.3	1.6	36881.7	4.6	45.0	1.7
4291.9	3.6	62.6	1.8	38.3	1.6	36164.2	4.6	42.7	1.6
5689.9	3.8	60.1	1.8	34.8	1.5	35379.0	4.5	40.5	1.6
7543.1	3.9	56.5	1.8	31.8	1.5	35338.9	4.5	38.8	1.6
10000.0	4.0	54.8	1.7	29.2	1.5	34513.3	4.5	37.2	1.6

ตารางที่ ก.4.3 ค่าอิมพีแดนซ์ของสารเคลือบผิวที่มีไมโครแคปซูลผสมอยู่ในสารเคลือบผิว ที่ความเข้มข้นต่างๆ หลังจากแช่ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 3.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เป็นเวลา 21 วัน

Frequency (Hz)	LOG (f)	ค่าอิมพีแดนซ์ ของสารเคลือบผิวบนผิวเหล็กกล้าที่ปริมาณไมโครแคปซูลต่างๆ ในสารเคลือบผิว (Ω .cm)							
		0 wt%		10 wt%		15 wt%		20 wt%	
		Z	LOG(Z)	Z	LOG(Z)	Z	LOG(Z)	Z	LOG(Z)
0.0	-2.0	707.5	2.8	32007.4	4.5	190454.0	5.3	1197.6	3.1
0.0	-1.9	731.4	2.9	26629.7	4.4	184083.0	5.3	1172.3	3.1
0.0	-1.8	702.0	2.8	22185.3	4.3	153216.0	5.2	1154.7	3.1
0.0	-1.6	665.9	2.8	18918.1	4.3	149252.0	5.2	1120.3	3.0
0.0	-1.5	623.3	2.8	15104.6	4.2	125092.0	5.1	1075.2	3.0
0.0	-1.4	584.2	2.8	13082.9	4.1	130064.0	5.1	1033.0	3.0
0.1	-1.3	504.1	2.7	10369.1	4.0	119272.0	5.1	978.2	3.0
0.1	-1.1	472.5	2.7	9224.0	4.0	123023.0	5.1	912.0	3.0
0.1	-1.0	415.9	2.6	7134.3	3.9	111732.0	5.0	839.5	2.9
0.1	-0.9	359.3	2.6	5760.9	3.8	108188.0	5.0	757.2	2.9
0.2	-0.8	312.4	2.5	4730.1	3.7	98190.0	5.0	695.6	2.8

ตารางที่ ก.4.3 ค่าอิมพีแดนซ์ของสารเคลือบผิวที่มีไมโครแคปซูลผสมอยู่ในสารเคลือบผิว ที่ความเข้มข้นต่างๆ หลังจากแช่ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 3.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เป็นเวลา 21 วัน (ต่อ)

Frequency (Hz)	LOG (f)	ค่าอิมพีแดนซ์ ของสารเคลือบผิวบนผิวเหล็กกล้าที่ปริมาณไมโครแคปซูลต่างๆ ในสารเคลือบผิว ($\Omega.cm$)							
		0 wt%		10 wt%		15 wt%		20 wt%	
		Z	LOG(Z)	Z	LOG(Z)	Z	LOG(Z)	Z	LOG(Z)
0.2	-0.7	269.8	2.4	3894.1	3.6	91281.2	5.0	624.9	2.8
0.3	-0.5	232.6	2.4	3229.6	3.5	83901.2	4.9	561.3	2.7
0.4	-0.4	201.3	2.3	2666.4	3.4	76308.3	4.9	504.5	2.7
0.5	-0.3	174.9	2.2	2207.6	3.3	68885.3	4.8	451.7	2.7
0.7	-0.2	150.7	2.2	1823.5	3.3	61570.8	4.8	397.9	2.6
0.9	0.0	130.1	2.1	1514.8	3.2	54798.8	4.7	351.6	2.5
1.2	0.1	110.8	2.0	1259.4	3.1	49368.3	4.7	311.3	2.5
1.6	0.2	98.4	2.0	1057.8	3.0	44272.2	4.6	275.4	2.4
2.1	0.3	85.4	1.9	883.7	2.9	39223.0	4.6	244.0	2.4
2.8	0.4	75.5	1.9	742.4	2.9	34827.4	4.5	216.7	2.3
3.7	0.6	67.3	1.8	626.8	2.8	30215.8	4.5	192.9	2.3

ตารางที่ ก.4.3 ค่าอิมพีแดนซ์ของสารเคลือบผิวที่มีไมโครแคปซูลผสมอยู่ในสารเคลือบผิว ที่ความเข้มข้นต่างๆ หลังจากแช่ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 3.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เป็นเวลา 21 วัน (ต่อ)

Frequency (Hz)	LOG (f)	ค่าอิมพีแดนซ์ ของสารเคลือบผิวบนผิวเหล็กกล้าที่ปริมาณไมโครแคปซูลต่างๆ ในสารเคลือบผิว ($\Omega.cm$)							
		0 wt%		10 wt%		15 wt%		20 wt%	
		Z	LOG(Z)	Z	LOG(Z)	Z	LOG(Z)	Z	LOG(Z)
4.9	0.7	60.4	1.8	529.9	2.7	27177.8	4.4	172.1	2.2
6.6	0.8	54.4	1.7	448.5	2.7	24326.8	4.4	153.9	2.2
8.7	0.9	49.3	1.7	381.0	2.6	21649.4	4.3	137.8	2.1
11.5	1.1	45.5	1.7	324.8	2.5	19509.3	4.3	123.8	2.1
15.3	1.2	41.8	1.6	277.4	2.4	17522.5	4.2	111.5	2.0
20.2	1.3	38.9	1.6	237.6	2.4	15621.8	4.2	100.5	2.0
26.8	1.4	36.4	1.6	204.0	2.3	14307.0	4.2	90.6	2.0
35.6	1.6	34.3	1.5	175.7	2.2	12817.3	4.1	81.9	1.9
47.1	1.7	32.5	1.5	151.8	2.2	11658.1	4.1	74.0	1.9
62.5	1.8	30.9	1.5	131.2	2.1	10544.4	4.0	66.9	1.8
82.9	1.9	29.5	1.5	113.9	2.1	9551.3	4.0	60.5	1.8

ตารางที่ ก.4.3 ค่าอิมพีแดนซ์ของสารเคลือบผิวที่มีไมโครแคปซูลผสมอยู่ในสารเคลือบผิว ที่ความเข้มข้นต่างๆ หลังจากแช่ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 3.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เป็นเวลา 21 วัน (ต่อ)

Frequency (Hz)	LOG (f)	ค่าอิมพีแดนซ์ ของสารเคลือบผิวบนผิวเหล็กกล้าที่ปริมาณไมโครแคปซูลต่างๆ ในสารเคลือบผิว ($\Omega.cm$)							
		0 wt%		10 wt%		15 wt%		20 wt%	
		Z	LOG(Z)	Z	LOG(Z)	Z	LOG(Z)	Z	LOG(Z)
109.8	2.0	28.3	1.5	99.3	2.0	8627.8	3.9	54.7	1.7
145.6	2.2	27.2	1.4	86.8	1.9	7854.1	3.9	49.4	1.7
193.1	2.3	26.3	1.4	76.1	1.9	7047.5	3.8	44.7	1.7
256.0	2.4	25.5	1.4	67.1	1.8	6259.0	3.8	40.5	1.6
339.3	2.5	24.8	1.4	59.3	1.8	5540.2	3.7	36.8	1.6
449.8	2.7	24.1	1.4	52.6	1.7	4980.8	3.7	33.5	1.5
596.4	2.8	23.5	1.4	46.8	1.7	4364.9	3.6	30.6	1.5
790.6	2.9	23.0	1.4	41.9	1.6	3773.0	3.6	28.1	1.4
1048.1	3.0	22.5	1.4	37.7	1.6	3313.8	3.5	25.9	1.4
1389.5	3.1	22.1	1.3	34.0	1.5	2920.7	3.5	24.0	1.4
1842.1	3.3	21.7	1.3	30.9	1.5	2592.9	3.4	22.3	1.3

ตารางที่ ก.4.3 ค่าอิมพีแดนซ์ของสารเคลือบผิวที่มีไมโครแคปซูลผสมอยู่ในสารเคลือบผิว ที่ความเข้มข้นต่างๆ หลังจากแช่ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 3.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เป็นเวลา 21 วัน (ต่อ)

Frequency (Hz)	LOG (f)	ค่าอิมพีแดนซ์ ของสารเคลือบผิวบนผิวเหล็กกล้าที่ปริมาณไมโครแคปซูลต่างๆ ในสารเคลือบผิว ($\Omega.cm$)							
		0 wt%		10 wt%		15 wt%		20 wt%	
		Z	LOG(Z)	Z	LOG(Z)	Z	LOG(Z)	Z	LOG(Z)
2442.1	3.4	21.4	1.3	28.3	1.5	2315.2	3.4	21.0	1.3
3237.4	3.5	21.1	1.3	26.1	1.4	2088.5	3.3	19.8	1.3
4291.9	3.6	20.8	1.3	24.2	1.4	1904.8	3.3	18.8	1.3
5689.9	3.8	20.5	1.3	22.6	1.4	1753.5	3.2	18.0	1.3
7543.1	3.9	20.3	1.3	21.2	1.3	1618.5	3.2	17.3	1.2
10000.0	4.0	19.7	1.3	20.1	1.3	1504.9	3.2	16.7	1.2

ตารางที่ ก.4.3 ค่าอิมพีแดนซ์ของสารเคลือบผิวที่มีไมโครแคปซูลผสมอยู่ในสารเคลือบผิว ที่ความเข้มข้นต่างๆ หลังจากแช่ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 3.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เป็นเวลา 10 วัน

Frequency (Hz)	LOG (f)	ค่าอิมพีแดนซ์ ของสารเคลือบผิวบนผิวเหล็กกล้าที่ปริมาณไมโครแคปซูลต่างๆ ในสารเคลือบผิว ($\Omega.cm$)							
		0 wt% (ไม่มีรอยากาบาท)		0 wt% (มีรอยากาบาท)		15 wt% (ไม่มีรอยากาบาท)		15 wt% (มีรอยากาบาท)	
		Z	LOG(Z)	Z	LOG(Z)	Z	LOG(Z)	Z	LOG(Z)
0.0	-2.0	1381340000.0	9.1	2835.4	3.5	2849260000.0	9.5	270898.0	5.4
0.0	-1.9	1486650000.0	9.2	2782.4	3.4	2535730000.0	9.4	256105.0	5.4
0.0	-1.8	1451760000.0	9.2	2710.6	3.4	2398720000.0	9.4	199945.0	5.3
0.0	-1.6	1339280000.0	9.1	2638.7	3.4	2369470000.0	9.4	258312.0	5.4
0.0	-1.5	1297550000.0	9.1	2572.9	3.4	2341840000.0	9.4	148962.0	5.2
0.0	-1.4	1144900000.0	9.1	2450.3	3.4	2718160000.0	9.4	134492.0	5.1
0.1	-1.3	1211980000.0	9.1	2297.1	3.4	2800760000.0	9.4	114978.0	5.1
0.1	-1.1	934958000.0	9.0	2116.6	3.3	2794998000.0	9.4	100256.0	5.0
0.1	-1.0	955292000.0	9.0	1929.6	3.3	2789430000.0	9.4	86296.8	4.9
0.1	-0.9	920241000.0	9.0	1742.5	3.2	3542250000.0	9.5	75474.8	4.9
0.2	-0.8	939752000.0	9.0	1585.2	3.2	2756770000.0	9.4	67275.8	4.8

ตารางที่ ก.4.3 ค่าอิมพีแดนซ์ของสารเคลือบผิวที่มีไม่โครแคปซูลผสมอยู่ในสารเคลือบผิว ที่ความเข้มข้นต่างๆ หลังจากแช่ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 3.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เป็นเวลา 10 วัน (ต่อ)

Frequency (Hz)	LOG (f)	ค่าอิมพีแดนซ์ ของสารเคลือบผิวบนผิวเหล็กกล้าที่ปริมาณไม่โครแคปซูลต่างๆ ในสารเคลือบผิว ($\Omega.cm$)							
		0 wt% (ไม่มีรอยกากบาท)		0 wt% (มีรอยกากบาท)		15 wt% (ไม่มีรอยกากบาท)		15 wt% (มีรอยกากบาท)	
		Z	LOG(Z)	Z	LOG(Z)	Z	LOG(Z)	Z	LOG(Z)
0.2	-0.7	817368000.0	8.9	1446.8	3.2	1979180000.0	9.3	59834.1	4.8
0.3	-0.5	799443000.0	8.9	1289.5	3.1	2122600000.0	9.3	54330.3	4.7
0.4	-0.4	654787000.0	8.8	1167.0	3.1	1769120000.0	9.2	48532.2	4.7
0.5	-0.3	623925000.0	8.8	1054.7	3.0	1149230000.0	9.1	44324.1	4.6
0.7	-0.2	631325000.0	8.8	946.0	3.0	1149100000.0	9.1	39796.5	4.6
0.9	0.0	528700000.0	8.7	849.7	2.9	598020000.0	8.8	36007.1	4.6
1.2	0.1	465584000.0	8.7	769.9	2.9	465466000.0	8.7	33178.8	4.5
1.6	0.2	599926000.0	8.8	699.8	2.8	185923000.0	8.3	30506.6	4.5
2.1	0.3	335924000.0	8.5	640.7	2.8	183083000.0	8.3	27404.2	4.4
2.8	0.4	127039000.0	8.1	588.3	2.8	181698000.0	8.3	26052.9	4.4
3.7	0.6	123053000.0	8.1	541.9	2.7	169351000.0	8.2	24417.5	4.4

ตารางที่ ก.4.3 ค่าอิมพีแดนซ์ของสารเคลือบผิวที่มีไมโครแคปซูลผสมอยู่ในสารเคลือบผิว ที่ความเข้มข้นต่างๆ หลังจากแช่ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 3.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เป็นเวลา 10 วัน (ต่อ)

Frequency (Hz)	LOG (f)	ค่าอิมพีแดนซ์ ของสารเคลือบผิวบนผิวเหล็กกล้าที่ปริมาณไมโครแคปซูลต่างๆ ในสารเคลือบผิว ($\Omega.cm$)							
		0 wt% (ไม่มีรอยากาบาท)		0 wt% (มีรอยากาบาท)		15 wt% (ไม่มีรอยากาบาท)		15 wt% (มีรอยากาบาท)	
		Z	LOG(Z)	Z	LOG(Z)	Z	LOG(Z)	Z	LOG(Z)
4.9	0.7	159809000.0	8.2	501.2	2.7	150169000.0	8.2	22745.2	4.4
6.6	0.8	156962000.0	8.2	467.0	2.7	168948000.0	8.2	21940.4	4.3
8.7	0.9	150070000.0	8.2	434.3	2.6	245765000.0	8.4	20323.0	4.3
11.5	1.1	127345000.0	8.1	404.2	2.6	119770000.0	8.1	19060.0	4.3
15.3	1.2	134336000.0	8.1	376.6	2.6	114937000.0	8.1	18344.5	4.3
20.2	1.3	93919500.0	8.0	350.6	2.5	60551900.0	7.8	17405.4	4.2
26.8	1.4	53240800.0	7.7	326.4	2.5	59540800.0	7.8	16418.2	4.2
35.6	1.6	44067600.0	7.6	303.6	2.5	31235800.0	7.5	15788.1	4.2
47.1	1.7	21670300.0	7.3	281.9	2.5	20413400.0	7.3	15112.6	4.2
62.5	1.8	30389300.0	7.5	261.5	2.4	18758600.0	7.3	14357.5	4.2
82.9	1.9	28761400.0	7.5	241.8	2.4	21600300.0	7.3	13723.3	4.1

ตารางที่ ก.4.3 ค่าอิมพีแดนซ์ของสารเคลือบผิวที่มีไมโครแคปซูลผสมอยู่ในสารเคลือบผิว ที่ความเข้มข้นต่างๆ หลังจากแช่ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 3.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เป็นเวลา 10 วัน (ต่อ)

Frequency (Hz)	LOG (f)	ค่าอิมพีแดนซ์ ของสารเคลือบผิวบนผิวเหล็กกล้าที่ปริมาณไมโครแคปซูลต่างๆ ในสารเคลือบผิว ($\Omega.cm$)							
		0 wt% (ไม่มีรอยกากบาท)		0 wt% (มีรอยกากบาท)		15 wt% (ไม่มีรอยกากบาท)		15 wt% (มีรอยกากบาท)	
		Z	LOG(Z)	Z	LOG(Z)	Z	LOG(Z)	Z	LOG(Z)
109.8	2.0	28478000.0	7.5	223.0	2.3	18344300.0	7.3	13198.1	4.1
145.6	2.2	20435900.0	7.3	205.1	2.3	14940800.0	7.2	12691.4	4.1
193.1	2.3	15371100.0	7.2	188.4	2.3	11665800.0	7.1	12053.0	4.1
256.0	2.4	11846600.0	7.1	172.7	2.2	8913180.0	7.0	11687.7	4.1
339.3	2.5	8984360.0	7.0	158.3	2.2	6814970.0	6.8	11128.6	4.0
449.8	2.7	6830730.0	6.8	145.3	2.2	5155240.0	6.7	10662.4	4.0
596.4	2.8	5217770.0	6.7	133.5	2.1	3947000.0	6.6	10193.2	4.0
790.6	2.9	3970320.0	6.6	123.4	2.1	3006400.0	6.5	9755.9	4.0
1048.1	3.0	3021270.0	6.5	114.7	2.1	2286920.0	6.4	9339.7	4.0
1389.5	3.1	2301040.0	6.4	107.3	2.0	1740880.0	6.2	8935.3	4.0
1842.1	3.3	1755900.0	6.2	101.1	2.0	1325190.0	6.1	8490.9	3.9

ตารางที่ ก.4.3 ค่าอิมพีแดนซ์ของสารเคลือบผิวที่มีไมโครแคปซูลผสมอยู่ในสารเคลือบผิว ที่ความเข้มข้นต่างๆ หลังจากแช่ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 3.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เป็นเวลา 10 วัน (ต่อ)

Frequency (Hz)	LOG (f)	ค่าอิมพีแดนซ์ ของสารเคลือบผิวบนผิวเหล็กกล้าที่ปริมาณไมโครแคปซูลต่างๆ ในสารเคลือบผิว (Ω .cm)							
		0 wt% (ไม่มีรอยกากบาท)		0 wt% (มีรอยกากบาท)		15 wt% (ไม่มีรอยกากบาท)		15 wt% (มีรอยกากบาท)	
		Z	LOG(Z)	Z	LOG(Z)	Z	LOG(Z)	Z	LOG(Z)
2442.1	3.4	1340970.0	6.1	95.8	2.0	1007520.0	6.0	8134.4	3.9
3237.4	3.5	1021560.0	6.0	91.5	2.0	766850.0	5.9	7722.0	3.9
4291.9	3.6	778791.0	5.9	87.8	1.9	583985.0	5.8	7292.5	3.9
5689.9	3.8	593045.0	5.8	84.8	1.9	444460.0	5.6	6915.2	3.8
7543.1	3.9	454242.0	5.7	82.2	1.9	338286.0	5.5	6552.1	3.8
10000.0	4.0	347793.0	5.5	80.2	1.9	258674.0	5.4	6126.7	3.8

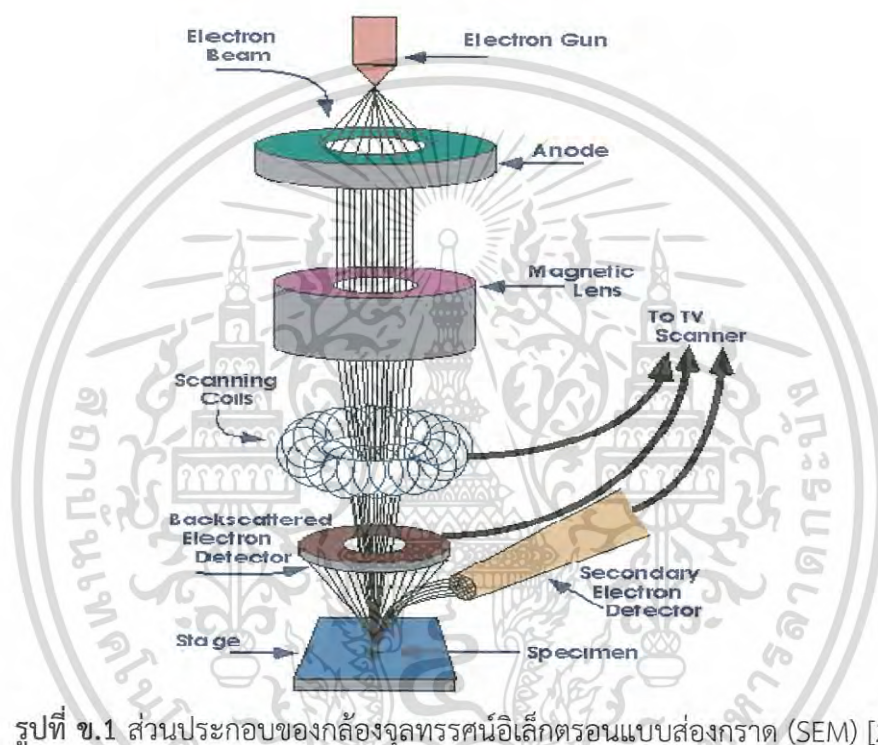


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข.1 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope; SEM) [28]

SEM เป็นกล้องจุลทรรศน์ที่มีกำลังขยายสูงมาก ใช้สำหรับตรวจดูลักษณะภายนอกของพื้นผิวชิ้นงาน ว่ามีลักษณะอย่างไร โดยใช้อิเล็กตรอนเป็นพาหะแทนแสงในกล้องจุลทรรศน์ธรรมดา กล้องจุลทรรศน์ชนิดนี้มักใช้ในทางด้านวิทยาศาสตร์ การแพทย์ อุตสาหกรรม นิติวิทยาศาสตร์ โบราณคดี และอื่นๆอีกหลายด้าน

ข.1.1 ส่วนประกอบของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด



รูปที่ ข.1 ส่วนประกอบของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) [29]

ข.1.2 หลักการทำงานของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

ส่วนบนสุดเป็นแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอนที่เรียกว่า ปืนอิเล็กตรอน (electron gun) อิเล็กตรอนจากแหล่งกำเนิดจะถูกเร่งให้เคลื่อนที่ลงมาตามคอลัมน์ซึ่งมีสภาพเป็นสุญญากาศด้วยความต่างศักย์เร่ง (accelerating voltage) ในช่วง 0 ถึง 30 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์ (บางเครื่องอาจทำได้สูงสุดถึง 50 kV) โดยทิศทางการเคลื่อนที่จะถูกควบคุมด้วยเลนส์แม่เหล็กไฟฟ้า (electromagnetic lens) ด้วยกัน 2 ชุด หรือมากกว่านั้นและปริมาณของอิเล็กตรอนจะถูกควบคุมโดยแอฟเพอร์เจอร์ (aperture) ซึ่งมีขนาดต่าง ๆ กัน ตามลักษณะการใช้งาน ส่วนเลนส์แม่เหล็กไฟฟ้าชุดแรกๆ ที่เรียกว่า เลนส์คอนเดนเซอร์ (condenser lens) นับว่าเป็นอุปกรณ์ที่มีความสำคัญที่สุดต่อการควบคุมลำอิเล็กตรอน (electron optics) เพราะเป็นเลนส์ที่ทำหน้าที่บีบลำอิเล็กตรอนที่วิ่งลงมาจาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ผู้ใดเห็นไปใช้ประโยชน์ในการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แหล่งกำเนิดให้เป็นลำที่มีขนาดพื้นที่หน้าตัดเล็กลง สำหรับเลนส์วัตถุ (objective lens) ซึ่งเป็นเลนส์ชุดสุดท้ายจะทำหน้าที่โฟกัส ลำอิเล็กตรอนให้ไปตกบนผิวตัวอย่างชิ้นงาน โดยมีขดลวดควบคุมลำแสงอิเล็กตรอน (scan coil) ทำหน้าที่กราดลำอิเล็กตรอนให้ไปบนผิวของตัวอย่างภายในกรอบพื้นที่สี่เหลี่ยมเล็ก ๆ ซึ่งพื้นที่ผิวของตัวอย่างบริเวณที่ถูกยิงด้วยลำอิเล็กตรอนนี้จะเกิดสัญญาณต่าง ๆ ขึ้นหลายชนิดในเวลาเดียวกันและในตัวเครื่อง SEM ยังมีอุปกรณ์สำหรับตรวจจับสัญญาณ (detector) ชนิดต่าง ๆ เพื่อประมวลผลออกมาเป็นภาพ ตัวอย่างสัญญาณที่เกิดขึ้นได้แก่

(1) อิเล็กตรอนทุติยภูมิ (secondary electrons) เป็นสัญญาณที่แสดงข้อมูลเกี่ยวกับลักษณะพื้นผิวของตัวอย่างแล้วแสดงออกมาเป็นภาพ ภาพที่ได้จากสัญญาณชนิดนี้เรียกว่า ภาพอิเล็กตรอนทุติยภูมิ

(2) อิเล็กตรอนกระเจิงกลับ (back scattered electrons) ให้ข้อมูลเกี่ยวกับส่วนประกอบทางเคมีบนผิวตัวอย่าง และแสดงให้เห็นลักษณะความสูงต่ำของพื้นผิวด้วย นอกจากนี้มีสัญญาณประเภทอื่น เช่น เอ็กซ์เรย์ (X-ray) คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (electromagnetic wave) โอเจอร์อิเล็กตรอน (Auger electron) เป็นต้น ซึ่งสัญญาณแต่ละชนิดจะให้ข้อมูลของตัวอย่างแตกต่างกันไป

ข.2 เครื่องวิเคราะห์สารด้วยอินฟราเรด (Fourier Transform Infrared Spectroscopy; FTIR)

[30]

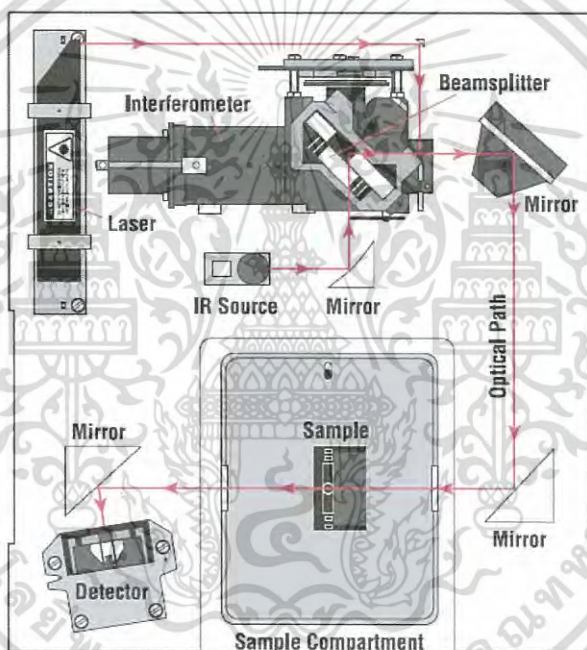
เครื่องวิเคราะห์สารด้วยอินฟราเรด จะใช้หลักการกระจายแสงของสเปกตรัมการแผ่รังสีแม่เหล็กไฟฟ้า ในช่วงของอินฟราเรดแล้วทำการวัดค่าความเข้มแสงเปรียบเทียบกับความยาวคลื่นหรือเลขคลื่น (Frequency -Domain Spectrum) ซึ่งก็จะได้ออกมาเป็นสเปกตรัม แต่สำหรับ FT-IR จะใช้การวัด ความเข้มแสงที่ความยาวคลื่นต่าง ๆ กันอย่างต่อเนื่องเปรียบเทียบกับเวลา (Time - Domain Spectrum) จากนั้นจะถูกเปลี่ยนให้เป็นสเปกตรัมของความเข้มของแสงต่อความยาวคลื่นหรือเลขคลื่นโดยการ Fourier Transform ด้วยคอมพิวเตอร์ก็จะได้ออกมาเป็น Fourier Transform Spectrum ด้วยวิธีการนี้จะช่วยให้การวิเคราะห์มีความรวดเร็วเพิ่มขึ้นพร้อมทั้ง Resolution ก็ดีขึ้นด้วย

ข.2.1 ส่วนประกอบของเครื่องวิเคราะห์สารด้วยอินฟราเรด

1. แหล่งกำเนิด Laser เพื่อใช้แสง Laser ในการปรับระยะของ Mobile Mirror
2. Mobile Mirror เป็นกระจกเงาที่สามารถสะท้อน รังสีอินฟราเรดและสามารถที่จะเคลื่อนที่ได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. Fixed Mirror เป็นกระจกเงาที่สามารถสะท้อนรังสีอินฟราเรดเช่นเดียวกับ Mobile Mirror แต่ไม่สามารถที่จะเคลื่อนที่ได้
4. Beam Splitter เป็นส่วนที่จะทำการแยกอินฟราเรดที่ผ่านเข้ามาให้เป็นสองส่วนคือสามารถให้แสงทะลุผ่านได้ 50 % และจะสะท้อนกลับ 50 %
5. เป็นกระจกเงาที่สามารถสะท้อนรังสีอินฟราเรดใช้ในการบังคับทิศทางการเดินทางของรังสีอินฟราเรด ให้ไปตามทิศทางที่ต้องการ
6. Sample Compartment เป็นส่วนที่จะใช้ในการบรรจุ Sample เข้าไปเพื่อการวิเคราะห์
7. Detector ใช้วัดความเข้มแสงที่เหลือจากการดูดกลืนของตัวอย่าง



รูปที่ ข.2 ส่วนประกอบของเครื่องวิเคราะห์สารด้วยอินฟราเรด (FTIR) [31]

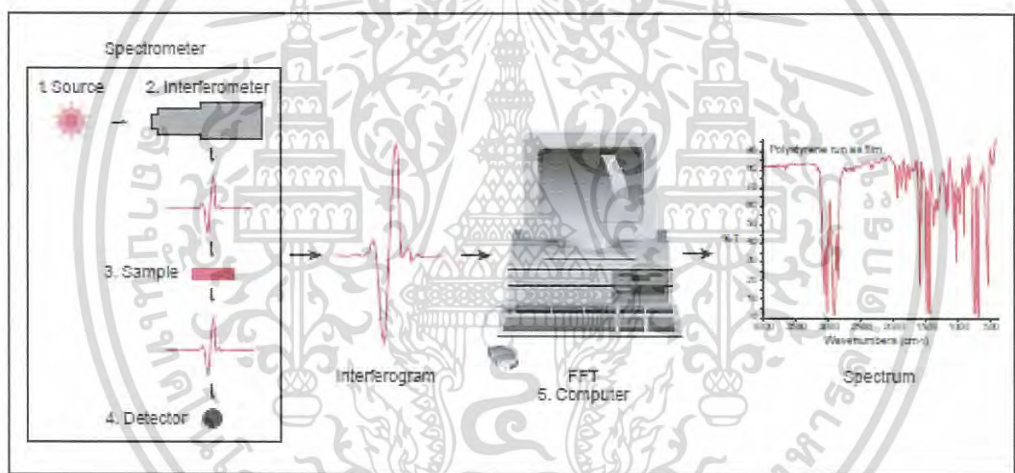
ข.2.2 หลักการทำงานของเครื่องวิเคราะห์สารด้วยอินฟราเรด

1. แหล่งกำเนิดรังสีอินฟราเรดจะทำการผลิตรังสีอินฟราเรดในช่วงความยาวคลื่นหรือเลขคลื่นที่จะใช้ในการวิเคราะห์
2. Beam Splitter ซึ่ง Beam Splitter จะปล่อยให้ทะลุผ่านไปที่ Fixed Mirror 50% และสะท้อน กลับมาที่ Mobile Mirror 50%
3. Fixed Mirror จะสะท้อนกลับมาที่ Beam Splitter
4. Mobile Mirror จะสะท้อนกลับมาที่ Beam Splitter

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. อินฟราเรดที่สะท้อนมาจาก ทั้ง Mobile Mirror และ Fixed Mirror จะมารวมกันและเกิดการแทรกสอดกันขึ้น แต่จากการที่ Mobile Mirror สามารถเคลื่อนที่ได้โดยการควบคุมระยะการเคลื่อนที่ โดย Laser เมื่อ Mobile Mirror เคลื่อนที่ก็จะทำให้ระยะทางการสะท้อนกลับของ รังสีอินฟราเรด ของ Mobile Mirror และ Fixed Mirror ไม่เท่ากันซึ่งก็จะส่งผลให้ รังสีอินฟราเรดที่ได้มีความยาวคลื่นเปลี่ยนไปอันเกิดจาก การแทรกสอด แบบเสริมกัน หรือหักล้างกัน เรียกว่า Interferogram

6. อินฟราเรดที่ความยาวคลื่นต่างๆ จะสะท้อนไปที่ Sample Compartment ผ่าน Sample ซึ่งจะมีการดูดกลืนอินฟราเรด เอาไว้บางส่วนในบางความยาวคลื่น ส่วนอินฟราเรดที่ไม่ถูกดูดกลืนก็จะผ่านเข้าสู่ Detector สัญญาณที่ได้คอมพิวเตอร์จะทำการแปลงสัญญาณ Interferogram ด้วยสมการ Fourier Transform ผลที่ได้จะเป็นสเปกตรัม การดูดกลืนแสงอินฟราเรดของสารที่ความยาวคลื่นต่าง ๆ



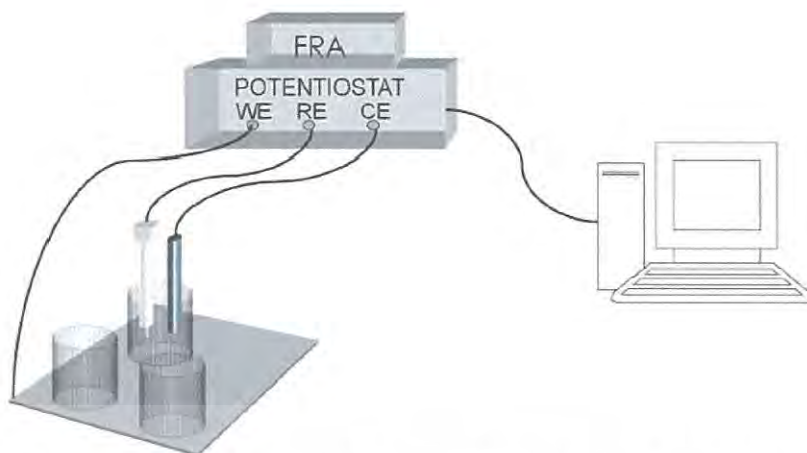
รูปที่ ข.3 หลักการทำงานของเครื่องวิเคราะห์สารด้วยอินฟราเรด [31]

ข.3 เครื่องวัดการป้องกันการกัดกร่อนโดยใช้เทคนิคอิเล็กโทรเคมีคอลอิมพีแดนซ์สเปกโตรสโกปี (Electrochemical Impedance Spectroscopy; EIS) [32-34]

EIS เป็นวิธีการวัดความต้านทานในไฟฟ้ากระแสสลับ จะใช้วิเคราะห์วัดค่าความจุไฟฟ้า วิเคราะห์ด้านอิเล็กทรอนิกส์ และรอยต่อของผิวต่างๆ การวัด EIS จะวัดภายใต้การให้ไฟฟ้ากระแสสลับแอมพลิจูดน้อยๆเข้าไป

ข.3.1 ส่วนประกอบของเครื่องวัดการป้องกันการกัดกร่อนโดยใช้เทคนิคอิเล็กโทรเคมีคอลอิมพีแดนซ์สเปกโตรสโกปี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ข.4 ส่วนประกอบเครื่องวัดการป้องกันการกัดกร่อนโดยใช้เทคนิคอิเล็กโทรเคมีคอล อิมพีแดนซ์สเปกโตรสโกปี (EIS) [32]

จากรูปที่ ข.4 การทำงานของเครื่องวัดการป้องกันการกัดกร่อนโดยใช้เทคนิคอิเล็กโทรเคมีคอล อิมพีแดนซ์สเปกโตรสโกปีจะประกอบไป 3 ขั้วเล็กเล็กโทรด คือ 1) ขั้วของชิ้นงานตัวอย่างที่ต้องการศึกษา (working electrode; WE) 2) ขั้วการนำไฟฟ้า (counter electrode; CE) ส่วนใหญ่จะใช้แพลทินัม (Platinum) และ 3) ขั้วไฟฟ้าอ้างอิง (Reference electrode; RE) จะใช้เป็นซิลเวอร์/ซิลเวอร์คลอไรด์ (Ag/AgCl)

ข.3.2 หลักการทำงานของเครื่องวัดการป้องกันการกัดกร่อนโดยใช้เทคนิคอิเล็กโทรเคมีคอล อิมพีแดนซ์สเปกโตรสโกปี

Electrochemical Impedance ปกติจะทำการวัดโดยใช้สัญญาณกระตุ้นที่มีขนาดเล็ก ซึ่งทำให้ผลตอบสนองของเซลล์ไฟฟ้าเคมีนั้นมีลักษณะที่ใกล้เคียงความเป็นเชิงเส้น (Pseudolinear) ซึ่งคุณสมบัติด้านความเป็นเชิงเส้น (Linearity) นั้นจะได้ทำการอธิบายต่อไป ในระบบที่มี ความเป็นเชิงเส้น ผลตอบสนองต่อแรงดันที่เป็นคลื่นไซน์จะเป็นคลื่นไซน์ที่มีความถี่เดียวกับกับ สัญญาณกระตุ้นแต่มีการเลื่อนของเฟส สัญญาณกระตุ้นสามารถเขียนได้ในรูปของฟังก์ชันกับเวลา ตามสมการที่ (ข.1)

$$E(t) = E_0 \cos(\omega t) \quad (\text{ข.1})$$

$E(t)$ คือ ค่าต่างศักย์ไฟฟ้า ณ เวลาใดๆ

t คือ เวลา

E_0 คือ ค่าแอมพลิจูดของต่างศักย์ไฟฟ้า

ω คือ ค่าความถี่เชิงมุมหรือความเร็วเชิงมุม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และความสัมพันธ์ของความถี่เชิงมุมได้ดังนี้

$$\omega = 2\pi f \quad (\text{ข.2})$$

f คือ ค่าความถี่ (Hz)

สัญญาณตอบสนองในระบบเชิงเส้นจะได้ดังสมการที่ (ข.3)

$$i(t) = I_0 \cos(\omega t + \varphi)$$

$i(t)$ คือ ค่ากระแสไฟฟ้า ณ เวลาใดๆ

t คือ เวลา

I_0 คือ ค่าแอมพลิจูดของกระแสไฟฟ้า

ω คือ ค่าความถี่เชิงมุมหรือความเร็วเชิงมุม

φ คือ ความต่างเฟส

จากกฎของโอห์มและความสัมพันธ์ของออยเลอร์ (Euler's) ค่าความต้านทานเชิงซ้อน (Z) สามารถเขียนได้ดังสมการ (ข.4) (ข.5) และ (ข.6)

$$Z = E(t) / i(t) = E_0 \cos(\omega t) / I_0 \cos(\omega t + \varphi) \quad (\text{ข.4})$$

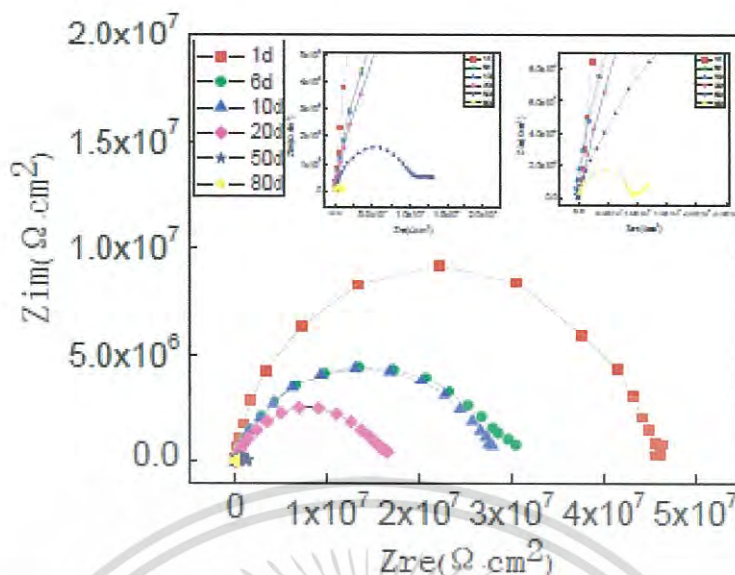
$$Z = Z_0 \frac{\cos(\omega t)}{\cos(\omega t + \varphi)} = Z_0 \exp(i\varphi) = Z_0 \cos(\varphi) + i \sin(\varphi) \quad (\text{ข.5})$$

$$Z = Z_{re} + iZ_{im} \quad (\text{ข.6})$$

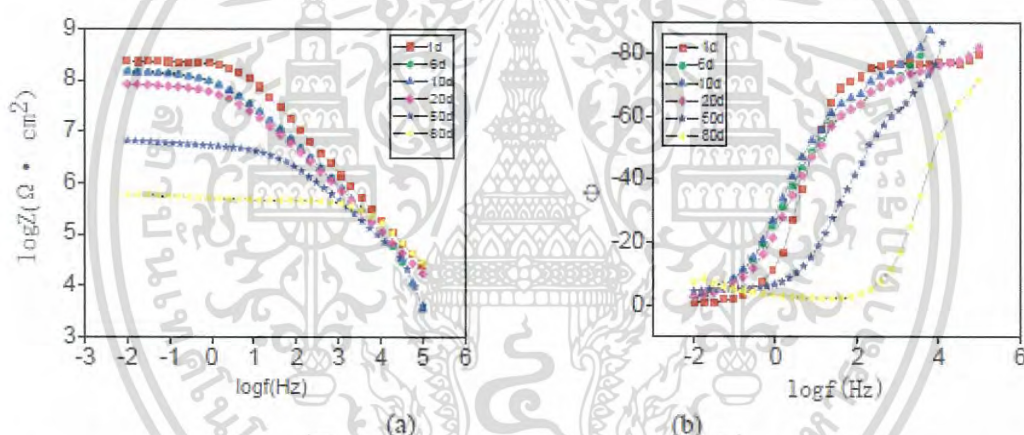
การนำเสนอข้อมูล ความต้านทานเชิงซ้อนหรือค่าอิมพีแดนซ์ (Z) จะขึ้นอยู่กับค่าแอมพลิจูดของศักย์ไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าอัตราเร็วเชิงมุม และความต่างเฟส ซึ่งเป็นจำนวนเชิงซ้อนก็จะมีทั้งส่วนจริง และส่วนจินตภาพ ซึ่งจะได้กราฟความสัมพันธ์ของค่าอิมพีแดนซ์กับองค์ประกอบต่างๆดังนี้

1) Nyquist spectrum คือกราฟที่พล็อตระหว่างค่าอิมพีแดนซ์ส่วนจริง (Z_{re}) และค่าอิมพีแดนซ์ส่วนจินตภาพ ($-Z_{im}$) ที่ความถี่เดียวกัน แสดงตัวอย่างดังรูปที่ ข.5 (ก) จะสังเกตว่าในการพล็อตค่านี้ แกน y จะมีค่าติดลบ และจุดแต่ละจุดบน Nyquist Plot จะแสดง ค่าอิมพีแดนซ์ ณ ความถี่ใดความถี่หนึ่ง

2) Bode spectrum คือกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\log |Z|$ กับ ความต่างเฟส (φ) หรือ $\log(f)$ แสดงตัวอย่างดังรูปที่ ข.5 (ข)



(n) Nyquist spectrum of PPE coating in period of immersion in 3.5% NaCl solution



(ข) Bode spectrum of PPE coating in period of immersion in 3.5% NaCl solution

รูปที่ ข.5 กราฟตัวอย่างการนำเสนอข้อมูลที่ได้จากเครื่องวัดการป้องกันการกัดกร่อนโดยใช้เทคนิคอิเล็กโทรเคมีคอล อิมพีแดนซ์สเปกโตรสโกปี (EIS) เมื่อ (ก) คือ Nyquist spectrum และ (ข) คือ Bode spectrum [27]

ข.3.3 อุปกรณ์ในวงจรไฟฟ้า (Electrical Circuit Elements)

ข้อมูลของ EIS มักจะทำการวิเคราะห์ที่ใช้แบบจำลองวงจรเทียบเท่า อุปกรณ์ส่วนใหญ่ในวงจรเทียบเท่านั้นก็คืออุปกรณ์ต่างๆ ไปทางไฟฟ้า เช่น ตัวต้านทาน ตัวเก็บประจุ และอินดักเตอร์ ในการที่จะใช้ประโยชน์ได้นั้นอุปกรณ์ที่อยู่ในแบบจำลองจะต้องมีพื้นฐานใกล้เคียงกับ ไฟฟ้าเคมีเชิงกายภาพของระบบ ตัวอย่างเช่น แบบจำลองส่วนใหญ่ประกอบด้วยตัวต้านทาน ที่เป็นตัวแทนของเอกสาคิวมีต้านทานในสารละลายของเซลล์ไฟฟ้าเคมี การศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้นความรู้พื้นฐานค่าอิมพีแดนซ์ ของอุปกรณ์มาตรฐานต่างๆ จึงค่อนข้างมีประโยชน์ โดยตารางที่ ข.1 เป็นรายการของอุปกรณ์พื้นฐาน สมการความสัมพันธ์ระหว่างกระแส-แรงดัน และ ค่าอิมพีแดนซ์ของอุปกรณ์

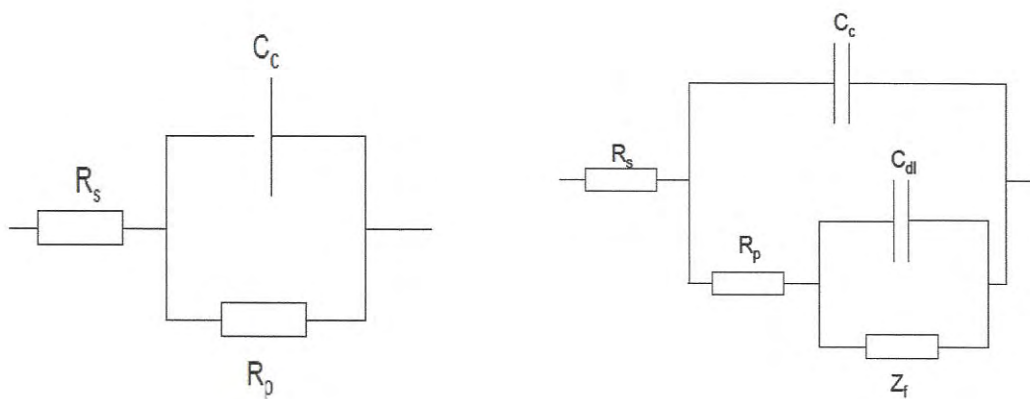
ตารางที่ ข.1 รายการของอุปกรณ์พื้นฐานของค่าอิมพีแดนซ์ [33-34]

Electrical Element Component	Current Vs.Voltage	Impedance
Resistor	$E = IR$	$Z = R$
Inductor	$E = L di/dt$	$Z = j\omega L$
Capacitor	$I = C dE/dt$	$Z = 1/j\omega C$

ค่าอิมพีแดนซ์ ของอินดักเตอร์นั้นจะเพิ่มขึ้นเมื่อความถี่เพิ่มขึ้น ซึ่งอินดักเตอร์จะมีค่าอิมพีแดนซ์ เฉพาะปริมาณในส่วนที่เป็นจินตภาพเท่านั้น ซึ่งส่งผลให้กระแสที่ผ่านอินดักเตอร์จะมีการเลื่อนของเฟส (Phase shift) เท่ากับ 90 องศาเทียบกับแรงดัน ความสัมพันธ์ของค่าอิมพีแดนซ์ เมื่อเทียบกับ ความถี่ของตัวเก็บประจุนั้นจะมีลักษณะตรง ข้ามกับอินดักเตอร์ คือ อิมพีแดนซ์จะลดลงเมื่อความถี่เพิ่มขึ้น ตัวเก็บประจุนั้นก็มีค่า อิมพีแดนซ์เฉพาะส่วนที่เป็นจำนวนจินตภาพเช่นกัน โดยกระแสที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุจะมีการเลื่อน ของเฟส (Phase shift) เท่ากับ -90 องศาเมื่อเทียบกับแรงดัน

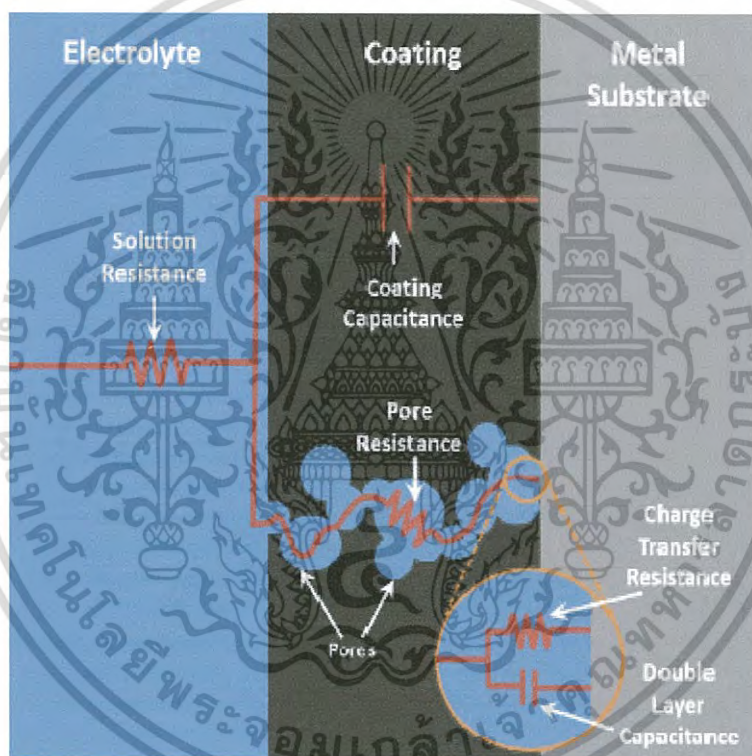
สำหรับการต่อวงจรในเครื่องวัดการป้องกันการกัดกร่อนโดยใช้เทคนิคอิเล็กโทรเคมีคอล อิมพีแดนซ์สเปกโตรสโกปีจะแสดงรูปที่ ข.6 เมื่อยังไม่มีการกัดกร่อนจะได้วงจรดังรูปที่ ข.6 (ก) แต่เมื่อมีการเพิ่มกระแสไฟฟ้าเข้าในวงจรจะเกิดความต้านทานการกัดกร่อนบริเวณชั้นของสารเคลือบผิวกับ ชั้นของโลหะแสดงดังรูปที่ ข.6 (ข) และ ข.6 (ค) เมื่อ R_s คือ ความต้านทานของอิเล็กโทรไลต์ (solution resistance) R_{po} คือ ความต้านทานช่องว่างที่อยู่ในสารเคลือบผิว (pore resistance) C_c คือ ค่าความจุไฟฟ้าในชั้นของสารเคลือบผิว (intact coating capacitance) C_{dl} คือ ค่าความจุไฟฟ้าในชั้นที่อยู่ระหว่างสารเคลือบผิวกับผิวของโลหะ (the double layer capacitance) และ R_{ct} คือ ค่าความต้านทานการแลกเปลี่ยนประจุ (charge transfer resistance)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก)

(ข)



(ค)

รูปที่ ข.6 วงจรไฟฟ้าในเครื่องวัดการป้องกันการกัดกร่อนโดยใช้เทคนิคอิมพีแดนซ์สเปกโทรสโกปี เมื่อ (ก) คือ วงจรไฟฟ้าที่ยังไม่มีการกัดกร่อน และ (ข) วงจรไฟฟ้าที่เริ่มการกัดกร่อน (ค) แสดงลักษณะทางกายภาพของวงจรที่มีการกัดกร่อน [34]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข.4 กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (Optical Microscopes; OM) [35]

กล้องจุลทรรศน์เป็นเครื่องมือพื้นฐานที่จำเป็นสำหรับ ห้องปฏิบัติการทางวิทยาศาสตร์ ห้องปฏิบัติการทางการแพทย์ และห้องปฏิบัติการทางอุตสาหกรรมบางประเภท ฯลฯ เนื่องจาก มีประโยชน์ในการขยายภาพของวัตถุขนาดเล็กที่มองด้วยตาเปล่าไม่เห็น ใช้วัดขนาดของวัตถุขนาดเล็ก ใช้ในการทำจุลศัลยกรรม (Microsurgery) ใช้ศึกษาคุณสมบัติทางแสง (การหักเหและการเปล่งแสง) ของวัตถุต่าง ๆ เป็นต้น

ข.4.1 องค์ประกอบของกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง

- 1) ฐาน (Base หรือ Foot) เป็นส่วนที่วางบนโต๊ะ รูปร่างต่าง ๆ กันไปขึ้นอยู่กับแบบของกล้อง
- 2) ลำตัว (Body) มีลักษณะโค้งสำหรับมือจับเวลาสายกล้อง ตรงส่วนต่อกับฐานมีล้อหมุนใหญ่ (coarse adjustment) และล้อหมุนเล็ก (fine adjustment) ทำหน้าที่ปรับระยะภาพ
- 3) ลำกล้อง (Body tube) มีส่วนต่อจากลำตัว ส่วนบนสำหรับสวมเลนส์ตา (eyepiece or ocular) ส่วนล่างมี แผ่นโลหะกลมสองชิ้นหนึ่งติดแน่นอยู่กับลำกล้องอีกชิ้นหนึ่งหมุนเคลื่อนที่ได้ (nosepiece) มีเลนส์วัตถุ (objective lens) ซึ่งมีกำลังขยายต่าง ๆ ติดอยู่
- 4) เลนส์ตา (Eye-piece หรือ Ocular) มี 1 คู่ สามารถเลื่อนปรับให้พอเหมาะกับความห่างของช่วงตา ของผู้ศึกษาได้ และมีวงแหวนหมุนปรับภาพ (focusing eyepiece) ติดอยู่ เลนส์ตาแต่ละข้างประกอบด้วยเลนส์นูน 2 อัน
- 5) เลนส์วัตถุ (Objective lens) ประกอบด้วยเลนส์ตั้งแต่ 2 อันขึ้นไปยังกำลังขยายมาก จำนวนเลนส์จะเพิ่มมากขึ้นตามไปด้วย
- 6) แท่นวางวัตถุ (Stage) เป็นแผ่นรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัส ตรงกลางมีช่องกลมให้แสงผ่านเข้าเลนส์วัตถุ ด้านในติดลำตัวกล้อง มีตัวจับสไลด์ (Stage clip) ซึ่งมีล้อหมุน (adjustment for mechanical stage clip) เพื่อเลื่อนสไลด์ขึ้นลง และย้ายขวาเพื่อความสะดวกในการเลื่อนตรวจสอบสไลด์ที่ศึกษา
- 7) เลนส์รวมแสง (Sub stage Condenser) อยู่ใต้แท่นวางวัตถุ ทำหน้าที่รวมแสงให้สว่างมากที่สุดและมีปุ่ม ปรับความเข้มของแสง (Iris diaphragm)
- 8) ที่กรองแสง (Filter tray) เป็นวงโลหะอยู่ใต้เลนส์รวมแสงเลื่อนหมุนออกในแนวระนาบได้ เพื่อเปลี่ยนใส่แผ่นกระจก หรือแผ่นโพลาลอยด์สีต่าง ๆ ได้ตามความต้องการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

9) กระจกเงา (Mirror) ติดอยู่กับส่วนฐานของกล้องด้านหนึ่งไว้และด้านหนึ่งราบ หมุนได้รอบตัวทำหน้าที่สะท้อนแสง จากแหล่งแสงต่าง ๆ ผ่านเข้าสู่เลนส์รวมแสงด้านไว้จะรับแสงสะท้อนได้มากกว่าด้านราบ

ข.4.2 หลักการทำงานของกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง

กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงเป็นกล้องจุลทรรศน์ชนิดที่ทำให้เกิดภาพ โดยการใช้คอนเดนเซอร์ รวมแสงจากแหล่งกำเนิดแสงให้รวมกันที่วัตถุหรือตัวอย่างที่ต้องการตรวจดู ทำให้วัตถุดูเสมือนว่าสามารถเปล่งแสงเองได้ (self luminous object) แล้วใช้เลนส์ใกล้วัตถุขยายภาพให้โตขึ้น ณ ที่ตำแหน่งระนาบภาพปฐมภูมิ หลังจากนั้นใช้เลนส์ใกล้ตาขยายภาพจากระนาบดังกล่าวให้โตขึ้นอีก วิธีการดังกล่าวทำให้มองเห็นพื้นหลังของวัตถุที่มี ความทึบ มีสี หรือดรรชนีหักเหมากกว่า ดังนั้นจึงนิยมใช้ในงานทั่ว ๆ ไปในห้องปฏิบัติการวิทยาศาสตร์และห้องปฏิบัติการทางการแพทย์



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This document is not an ASTM standard and is intended only to provide the user of an ASTM standard an indication of what changes have been made to the previous version. Because it may not be technically possible to adequately depict all changes accurately, ASTM recommends that users consult prior editions as appropriate. In all cases only the current version of the standard as published by ASTM is to be considered the official document.



Designation: D 3359 – 9702

Standard Test Methods for Measuring Adhesion by Tape Test¹

This standard is issued under the fixed designation D 3359; the number immediately following the designation indicates the year of original adoption or, in the case of revision, the year of last revision. A number in parentheses indicates the year of last reapproval. A superscripted epsilon (ϵ) indicates an editorial change since the last revision or reapproval.

This standard has been approved for use by agencies of the Department of Defense.

1. Scope

1.1 These test methods cover procedures for assessing the adhesion of coating films to metallic substrates by applying and removing pressure-sensitive tape over cuts made in the film.

1.2 Test Method A is primarily intended for use at job sites while Test Method B is more suitable for use in the laboratory. Also, Test Method B is not considered suitable for films thicker than 5 mils (125 μ m).

NOTE 1—Subject to agreement between the purchaser and the seller, Test Method B can be used for thicker films if wider spaced cuts are employed.

1.3 These test methods are used to establish whether the adhesion of a coating to a substrate is at a generally adequate level. They do not distinguish between higher levels of adhesion for which more sophisticated methods of measurement are required.

NOTE 2—It should be recognized that differences in adherability of the coating surface can affect the results obtained with coatings having the same inherent adhesion.

1.4 In multicoat systems adhesion failure may occur between coats so that the adhesion of the coating system to the substrate is not determined.

1.5 The values stated in inch-pound SI units are to be regarded as the standard. The values given in parentheses are for information only.

1.6 *This standard does not purport to address the safety concerns, if any, associated with its use. It is the responsibility of the user of this standard to establish appropriate safety and health practices and determine the applicability of regulatory limitations prior to use.*

2. Referenced Documents

2.1 ASTM Standards:

D 609 Practice for Preparation of Cold-Rolled Steel Panels for Testing Paint, Varnish, Conversion Coatings, and Related Coating Products²

D 823 Practices for Producing Films of Uniform Thickness of Paint, Varnish, and Related Products on Test Panels²

D 1000 Test Methods For Pressure-Sensitive Adhesive-Coated Tapes Used for Electrical and Electronic Applications³

D 1730 Practices for Preparation of Aluminum and Aluminum-Alloy Surfaces for Painting⁴

D 2092 Guide for Preparation of Zinc-Coated (Galvanized) Steel Surfaces for Painting⁵

D 2197 Test Methods for Adhesion of Organic Coatings by Scrape Adhesion²

D 2370 Test Method for Tensile Properties of Organic Coatings²

D 3330 Test Method for Peel Adhesion of Pressure-Sensitive Tape of 180° Angle Tape⁶

D 3924 Specification for Standard Environment for Conditioning and Testing Paint, Varnish, Lacquers, and Related Materials²

D 4060 Test Method for Abrasion Resistance of Organic Coatings by the Taber Abraser⁷

3. Summary of Test Methods

3.1 *Test Method A*—An X-cut is made in through the film to the substrate, pressure-sensitive tape is applied over the cut and then removed, and adhesion is assessed qualitatively on the 0 to 5 scale.

¹ These test methods are under the jurisdiction of ASTM Committee D-TD01 on Paint and Related Coatings, Materials, and Applications and are the direct responsibility of Subcommittee D01.23 on Physical Properties of Applied Paint Films.

Current edition approved Nov. 10, 1997; 2002. Published September 1998; October 2002. Originally published as D 3359 – 74. Last previous edition D 3359 – 9702.

² Annual Book of ASTM Standards, Vol 06.01.

³ Annual Book of ASTM Standards, Vol 10.01.

⁴ Annual Book of ASTM Standards, Vol 02.05.

⁵ Annual Book of ASTM Standards, Vol 06.02.

⁶ Annual Book of ASTM Standards, Vol 15.09.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

D 3359 - 9702

3.2 *Test Method B*—A lattice pattern with either six or eleven cuts in each direction is made in the film to the substrate, pressure-sensitive tape is applied over the lattice and then removed, and adhesion is evaluated by comparison with descriptions and illustrations.

4. Significance and Use

4.1 If a coating is to fulfill its function of protecting or decorating a substrate, it must adhere to it for the expected service life. Because the substrate and its surface preparation (or lack of it) has have a drastic effect on the adhesion of coatings, a method of ~~evaluation~~ to evaluate adhesion of a coating to different substrates or surface treatments, or of different coatings to the same substrate and treatment, is of considerable usefulness in the industry.

4.2 The limitations of all adhesion methods and the specific limitation of this test method to lower levels of adhesion (see 1.3) should be recognized before using it. The intra- and inter-laboratory precision of this test method is similar to other widely-accepted tests for coated substrates (for example, Test Method D 2370 and Test Method D 4060), but this is partly the result of it being insensitive to all but large differences in adhesion. The limited scale of 0 to 5 was selected deliberately to avoid a false impression of being sensitive.

TEST METHOD A—X-CUT TAPE TEST

5. Apparatus and Materials

5.1 *Cutting Tool*—Sharp razor blade, scalpel, knife or other cutting devices. It is of particular importance that the cutting edges be in good condition.

5.2 *Cutting Guide*—Steel or other hard metal straightedge to ensure straight cuts.

5.3 *Tape*—One-inch (25-mm) 25-mm (1.0-in.) wide semitransparent pressure-sensitive tape with an adhesion strength agreed upon by the supplier and the user is needed⁷ with an adhesion strength agreed upon by the supplier and the user is needed. Because of the variability in adhesion strength from batch-to-batch and with time, it is essential that tape from the same batch be used when tests are to be run in different laboratories. If this is not possible the test method should be used only for ranking a series of test coatings.

5.4 *Rubber Eraser*, on the end of a pencil.

5.5 *Illumination*—A light source is helpful in determining whether the cuts have been made through the film to the substrate.

6. Test Specimens

6.1 When this test method is used in the field, the specimen is the coated structure or article on which the adhesion is to be evaluated.

6.2 For laboratory use apply the materials to be tested to panels of the composition and surface conditions on which it is desired to determine the adhesion.

NOTE 3—Applicable test panel description and surface preparation methods are given in Practice D 609 and Practices D 1730 and D 2092.

NOTE 4—Coatings should be applied in accordance with Practice D 823, or as agreed upon between the purchaser and the seller.

NOTE 5—If desired or specified, the coated test panels may be subjected to a preliminary exposure such as water immersion, salt spray, or high humidity before conducting the tape test. The conditions and time of exposure will be governed by ultimate coating use or shall be agreed upon between the purchaser and seller.

7. Procedure

7.1 Select an area free of blemishes and minor surface imperfections. For tests in the field, ensure that the surface is clean and dry. Extremes in temperature or relative humidity may affect the adhesion of the tape or the coating.

7.1.1 For specimens which have been immersed: After immersion, clean and wipe the surface with an appropriate solvent which will not harm the integrity of the coating. Then dry or prepare the surface, or both, as agreed upon between the purchaser and the seller.

7.2 Make two cuts in the film each about 1.5 in. (40 mm) 40 mm (1.5 in.) long that intersect near their middle with a smaller angle of between 30 and 45°. When making the incisions, use the straightedge and cut through the coating to the substrate in one steady motion.

7.3 Inspect the incisions for reflection of light from the metal substrate to establish that the coating film has been penetrated. If the substrate has not been reached make another X in a different location. Do not attempt to deepen a previous cut as this may affect adhesion along the incision.

7.4 Remove two complete laps of the pressure-sensitive tape from the roll and discard. Remove an additional length at a steady (that is, not jerked) rate and cut a piece about 3 in. (75 mm) 75 mm (3 in.) long.

⁷ Permacel 99, manufactured by Permacel, New Brunswick, NJ 08903, and available from various Permacel tape distributors, is reported to be suitable for this purpose.

The manufacturer of this tape and the manufacturer of the tape used in the interlaboratory study (see RR: D01-1008), have advised this subcommittee that the properties of these tapes were changed. Users of it should, therefore, check whether current material gives comparable results to previous supplied material.


D 3359 – 9702

7.5 Place the center of the tape at the intersection of the cuts with the tape running in the same direction as the smaller angles. Smooth the tape into place by finger in the area of the incisions and then rub firmly with the eraser on the end of a pencil. The color under the transparent tape is a useful indication of when good contact has been made.

7.6 Within 90 ± 30 s of application, remove the tape by seizing the free end and pulling it off rapidly (not jerked) back upon itself at as close to an angle of 180° as possible.

7.7 Inspect the X-cut area for removal of coating from the substrate or previous coating and rate the adhesion in accordance with the following scale:

5A	No peeling or removal,
4A	Trace peeling or removal along incisions or at their intersection,
3A	<u>Jagged removal along incisions up to 1/8 in. (1.6 mm) on either side,</u>
3A	<u>Jagged removal along incisions up to 1.6 mm (1/16 in.) on either side,</u>
2A	<u>Jagged removal along most of incisions up to 1/4 in. (3.2 mm) on either side,</u>
2A	<u>Jagged removal along most of incisions up to 3.2 mm (1/8 in.) on either side,</u>
1A	Removal from most of the area of the X under the tape, and
0A	Removal beyond the area of the X.

7.8 Repeat the test in two other locations on each test panel. For large structures make sufficient tests to ensure that the adhesion evaluation is representative of the whole surface.

7.9 After making several cuts examine the cutting edge and, if necessary, remove any flat spots or wire-edge by abrading lightly on a fine oil stone before using again. Discard cutting tools that develop nicks or other defects that tear the film.

8. Report

8.1 Report the number of tests, their mean and range, and for coating systems, where the failure occurred that is, between first coat and substrate, between first and second coat, etc.

8.2 For field tests report the structure or article tested, the location and the environmental conditions at the time of testing.

8.3 For test panels report the substrate employed, the type of coating, the method of cure, and the environmental conditions at the time of testing.

8.4 If the adhesion strength of the tape has been determined in accordance with Test Methods D 1000 or D 3330, report the results with the adhesion rating(s). If the adhesion strength of the tape has not been determined, report the specific tape used and its manufacturer.

8.5 If the test is performed after immersion, report immersion conditions and method of sample preparation.

9. Precision and Bias⁸

9.1 In an interlaboratory study of this test method in which operators in six laboratories made one adhesion measurement on three panels each of three coatings covering a wide range of adhesion, the within-laboratories standard deviation was found to be 0.33 and the between-laboratories 0.44. Based on these standard deviations, the following criteria should be used for judging the acceptability of results at the 95 % confidence level:

9.1.1 *Repeatability*—Provided adhesion is uniform over a large surface, results obtained by the same operator should be considered suspect if they differ by more than 1 rating unit for two measurements.

9.1.2 *Reproducibility*—Two results, each the mean of triplicates, obtained by different operators should be considered suspect if they differ by more than 1.5 rating units.

9.2 Bias cannot be established for these test methods.

TEST METHOD B—CROSS-CUT TAPE TEST

10. Apparatus and Materials

10.1 *Cutting Tool*—~~Sharp razor blade, scalpel, knife or other cutting device having a cutting edge angle between 15 and 30° that will make either a single cut or several cuts at once⁹~~—Sharp razor blade, scalpel, knife or other cutting device having a cutting edge angle between 15 and 30° that will make either a single cut or several cuts at once. It is of particular importance that the cutting edge or edges be in good condition.

10.2 *Cutting Guide*—If cuts are made manually (as opposed to a mechanical apparatus) a steel or other hard metal straightedge or template to ensure straight cuts.

10.3 *Rule*—Tempered steel rule graduated in 0.5 mm for measuring individual cuts.

10.4 *Tape*, as described in 5.3.

10.5 *Rubber Eraser*, on the end of a pencil.

⁸ Supporting data are available from ASTM International Headquarters. Request RR: D01-1008.

⁹ Multiblade cutters are available from a few sources that specialize in testing equipment for the paint industry. One supplier that has assisted in the refinement of these methods and of Test Method D 3359 is given in footnote 10.


D 3359 – 9702

10.6 *Illumination*, as described in 5.5.

10.7 *Magnifying Glass*—An illuminated magnifier to be used while making individual cuts and examining the test area.

11. Test Specimens

11.1 Test specimens shall be as described in Section 6. It should be noted, however, that multitip cutters ~~provide good results only on test areas sufficiently plane~~¹⁰ provide good results only on test areas sufficiently plane that all cutting edges contact the substrate to the same degree. Check for flatness with a straight edge such as that of the tempered steel rule (10.3).

12. Procedure

12.1 Where required or when agreed upon, subject the specimens to a preliminary test before conducting the tape test (see Note 3). After drying or testing the coating, conduct the tape test at room temperature as defined in Specification D 3924, unless D 3924 standard temperature is required or agreed.

12.1.1 For specimens which have been immersed: After immersion, clean and wipe the surface with an appropriate solvent which will not harm the integrity of the coating. Then dry or prepare the surface, or both, as agreed upon between the purchaser and the seller.

12.2 Select an area free of blemishes and minor surface imperfections, place on a firm base, and under the illuminated magnifier, make parallel cuts as follows:

12.2.1 For coatings having a dry film thickness up to and including 2.0 mils (50 μm) space the cuts 1 mm apart and make eleven cuts unless otherwise agreed upon.

12.2.2 For coatings having a dry film thickness between 2.0 mils (50 μm) and 5 mils (125 μm), space the cuts 2 mm apart and make six cuts. For films thicker than 5 mils use Test Method A.¹¹

12.2.3 Make all cuts about 20 mm (~~3/4 in. (20 mm)~~ in.) long. Cut through the film to the substrate in one steady motion using just sufficient pressure on the cutting tool to have the cutting edge reach the substrate. When making successive single cuts with the aid of a guide, place the guide on the uncut area.

12.3 After making the required cuts brush the film lightly with a soft brush or tissue to remove any detached flakes or ribbons of coatings.

12.4 Examine the cutting edge and, if necessary, remove any flat spots or wire-edge by abrading lightly on a fine oil stone. Make the additional number of cuts at 90° to and centered on the original cuts.

12.5 Brush the area as before and inspect the incisions for reflection of light from the substrate. If the metal has not been reached make another grid in a different location.

12.6 Remove two complete laps of tape and discard. Remove an additional length at a steady (that is, not jerked) rate and cut a piece about 3 in. (75 mm) 75 mm (3 in.) long.

12.7 Place the center of the tape over the grid and in the area of the grid smooth into place by a finger. To ensure good contact with the film rub the tape firmly with the eraser on the end of a pencil. The color under the tape is a useful indication of when good contact has been made.

12.8 Within 90 \pm 30 s of application, remove the tape by seizing the free end and rapidly (not jerked) back upon itself at as close to an angle of 180° as possible.

12.9 Inspect the grid area for removal of coating from the substrate or from a previous coating using the illuminated magnifier.

Rate the adhesion in accordance with the following scale illustrated in Fig. 1:

5B	The edges of the cuts are completely smooth; none of the squares of the lattice is detached.
4B	Small flakes of the coating are detached at intersections; less than 5 % of the area is affected.
3B	Small flakes of the coating are detached along edges and at intersections of cuts. The area affected is 5 to 15 % of the lattice.
2B	The coating has flaked along the edges and on parts of the squares. The area affected is 15 to 35 % of the lattice.
1B	The coating has flaked along the edges of cuts in large ribbons and whole squares have detached. The area affected is 35 to 65 % of the lattice.
0B	Flaking and detachment worse than Grade 1.

12.10 Repeat the test in two other locations on each test panel.

13. Report

13.1 Report the number of tests, their mean and range, and for coating systems, where the failure occurred, that is, between first

¹⁰ The sole source of supply of the multitip cutter for coated pipe surfaces known to the committee at this time is Paul N. Gardner Co., 316 NE First St., Pompano Beach, FL 33060. If you are aware of alternative suppliers, please provide this information to ASTM International Headquarters. Your comments will receive careful consideration at a meeting of the responsible technical committee, which you may attend.

¹¹ These test methods are under the jurisdiction of ASTM Committee D01 on Paint and Related Coatings, Materials, and Applications and are the direct responsibility of Subcommittee D01.25 on Physical Properties of Applied Paint Films. **ไทยการศึกษานาน ไม่นอนญาติไหนไป ประชโยชนดานการค้**
Current edition approved Aug. 10, 2002. Published October 2002. Originally published as D 3359 – 74. Last previous edition D 3359 – 97.


D 3359 - 9702



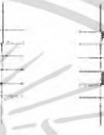



CLASSIFICATION OF ADHESION TEST RESULTS		
CLASSIFICATION	PERCENT AREA REMOVED	SURFACE OF CROSS-CUT AREA FROM WHICH FLAKING HAS OCCURRED FOR SIX PARALLEL CUTS AND ADHESION RANGE BY PERCENT
5B	0% None	
4B	Less than 5%	
3B	5 - 15%	
2B	15 - 35%	
1B	35 - 65%	
0B	Greater than 65%	

FIG. 1 Classification of Adhesion Test Results

coat and substrate, between first and second coat, etc.

13.2 Report the substrate employed, the type of coating and the method of cure.

13.3 If the adhesion strength has been determined in accordance with Test Methods D 1000 or D 3330, report the results with the adhesion rating(s). If the adhesion strength of the tape has not been determined, report the specific tape used and its manufacturer.

13.4 If the test is performed after immersion, report immersion conditions and method of sample preparation.

14. Precision and Bias ⁸

14.1 On the basis of two interlaboratory tests of this test method in one of which operators in six laboratories made one adhesion measurement on three panels each of three coatings covering a wide range of adhesion and in the other operators in six laboratories made three measurements on two panels each of four different coatings applied over two other coatings, the pooled standard deviations for within- and between-laboratories were found to be 0.37 and 0.7. Based on these standard deviations, the following criteria should be used for judging the acceptability of results at the 95 % confidence level:

14.1.1 *Repeatability*—Provided adhesion is uniform over a large surface, results obtained by the same operator should be considered suspect if they differ by more than one rating unit for two measurements.

14.1.2 *Reproducibility*—Two results, each the mean of duplicates or triplicates, obtained by different operators should be considered suspect if they differ by more than two rating units.

14.2 Bias cannot be established for these test methods.

15. Keywords

15.1 adhesion; tape; crosscut adhesion test method; tape; tape adhesion test method; X-cut adhesion test method

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



D 3359 – 9702

APPENDIX

(Nonmandatory Information)

XI. COMMENTARY

XI.1 Introduction

XI.1.1 Given the complexities of the adhesion process, can adhesion be measured? As Mittal (1)¹² has pointed out, the answer is both yes and no. It is reasonable to state that at the present time no test exists that can precisely assess the actual physical strength of an adhesive bond. But it can also be said that it is possible to obtain an indication of relative adhesion performance.

XI.1.2 Practical adhesion test methods are generally of two types: “*implied*” and “*direct*.” “*Implied*” tests include indentation or scribe techniques, rub testing, and wear testing. Criticism of these tests arises when they are used to quantify the strength of adhesive bonding. But this, in fact, is not their purpose. An “*implied*” test should be used to assess coating performance under actual service conditions. “*Direct*” measurements, on the other hand, are intended expressly to measure adhesion. Meaningful tests of this type are highly sought after, primarily because the results are expressed by a single discrete quantity, the force required to rupture the coating/substrate bond under prescribed conditions. Direct tests include the Hesiometer and the Adherometer (2). Common methods which approach the direct tests are peel, lap-shear, and tensile tests.

XI.2 Test Methods

XI.2.1 In practice, numerous types of tests have been used to attempt to evaluate adhesion by inducing bond rupture by different modes. Criteria deemed essential for a test to warrant large-scale acceptance are: use of a straightforward and unambiguous procedure; relevance to its intended application; repeatability and reproducibility; and quantifiability, including a meaningful rating scale for assessing performance.

XI.2.2 Test methods used for coatings on metals are: peel adhesion or “*tape testing*”; Gardner impact flexibility testing; and adhesive joint testing including shear (lap joint) and direct tensile (butt joint) testing. These tests do not strictly meet all the criteria listed, but an appealing aspect of these tests is that in most cases the equipment/instrumentation is readily available or can be obtained at reasonable cost.

XI.2.3 A wide diversity of tests methods have been developed over the years that measure aspects of adhesion (1-5). There generally is difficulty, however, in relating these tests to basic adhesion phenomena.

XI.3 The Tape Test

XI.3.1 By far the most prevalent test for evaluating coating “*adhesion*” is the tape-and-peel test, which has been used since the 1930’s. In its simplest version a piece of adhesive tape is pressed against the paint film and the resistance to and degree of film removal observed when the tape is pulled off. Since an intact film with appreciable adhesion is frequently not removed at all, the severity of the test is usually enhanced by cutting into the film a figure X or a cross hatched pattern, before applying and removing the tape. Adhesion is then rated by comparing film removed against an established rating scale. If an intact film is peeled cleanly by the tape, or if it debonds just by cutting into it without applying tape, then the adhesion is rated simply as poor or very poor, a more precise evaluation of such films not being within the capability of this test.

XI.3.2 The current widely-used version was first published in 1974; two test methods are covered in this standard. Both test methods are used to establish whether the adhesion of a coating to a substrate is at an adequate level; however they do not distinguish between higher levels of adhesion for which more sophisticated methods of measurement are required. Major limitations of the tape test are its low sensitivity, applicability only to coatings of relatively low bond strengths, and non-determination of adhesion to the substrate where failure occurs within a single coat, as when testing primers alone, or within or between coats in multicoat systems. For multicoat systems where adhesion failure may occur between or within coats, the adhesion of the coating system to the substrate is not determined.

XI.3.3 Repeatability within one rating unit is generally observed for coatings on metals for both methods, with reproducibility of one to two units. The tape test enjoys widespread popularity and is viewed as “*simple*” as well as low in cost. Applied to metals, it is economical to perform, lends itself to job site application, and most importantly, after decades of use, people feel comfortable with it.

XI.3.4 When a flexible adhesive tape is applied to a coated rigid substrate surface and then removed, the removal process has been described in terms of the “*peel phenomenon*,” as illustrated in Fig. X1.1.

XI.3.5 Peeling begins at the “*toothed*” leading edge (at the right) and proceeds along the coating adhesive/interface or the coating/substrate interface, depending on the relative bond strengths. It is assumed that coating removal occurs when the tensile force generated along the latter interface, which is a function of the rheological properties of the backing and adhesive layer materials, is greater than the bond strength at the coating-substrate interface (or cohesive strength of the coating). In actuality, however, this force is distributed over a discrete distance (O-A) in Fig. X1.1, which relates directly to the properties described,

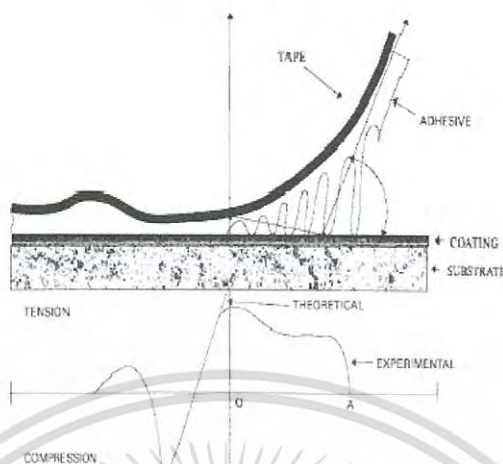
 D 3359 - 9702


FIG. X1.1 Peel Profile (6)

not concentrated at a point (O) in Fig. X1.1 as in the theoretical case—though the tensile force is greatest at the origin for both. A significant compressive force arises from the response of the tape backing material to being stretched. Thus both tensile and compressive forces are involved in adhesion tape testing.

X1.3.6 Close scrutiny of the tape test with respect to the nature of the tape employed and certain aspects of the procedure itself reveal several factors, each or any combination of which can dramatically affect the results of the test as discussed (6).

X1.4 Peel Adhesion Testing on Plastic Substrates

X1.4.1 Tape tests have been criticized when used for substrates other than metal, such as plastics. The central issues are that the test on plastics lacks reproducibility and does not relate to the intended application. Both concerns are well founded: poor precision is a direct result of several factors intrinsic to the materials employed and the procedure itself. More importantly, in this instance the test is being applied beyond its intended scope. These test methods were designed for relatively ductile coatings applied to metal substrates, not for coatings (often brittle) applied to plastic parts (7). The unique functional requirements of coatings on plastic substrates cause the usual tape tests to be unsatisfactory for measuring adhesion performance in practice.

X1.5 The Tape Controversy

X1.5.1 With the withdrawal from commerce of the tape specified originally, 3M No. 710, current test methods no longer identify a specific tape. Differences in tapes used can lead to different results as small changes in backing stiffness and adhesive rheology cause large changes in the tension area. Some commercial tapes are manufactured to meet minimum standards. A given lot may surpass these standards and thus be suitable for general market distribution; however, such a lot may be a source of serious and unexpected error in assessing adhesion. One commercially available tape test kit had included a tape with adhesion strength variations of up to 50 % claimed by the manufacturer. Also, because tapes change on storage, bond strengths of the tape may change over time (7, 8).

X1.5.2 While there are tapes available that appear to deliver consistent performance, a given tape does not adhere equally well to all coatings. For example, when the peel removal force of the tape (from the coating) used earlier by Task Group D01.23.10 to establish precision of the method, by 3M No. 710 was examined with seven different electromagnetic interference/radio frequency interference (EMI/RFI) coatings, it was found that, while peel was indeed consistent for a given coating, the value varied by 25 % between the highest and lowest ratings among coatings. Several factors that contribute to these differences include coating composition and topology: as a result, no single tape is likely to be suitable for testing all coatings. Further, the tape test does not give an absolute value for the force required for bond rupture, but serves only as an indicator that some minimum value for bond strength was met or exceeded (7, 8).

X1.6 Procedural Problems

X1.6.1 The tape test is operator intensive. By design it was made as simple as possible to perform, and requires a minimum of specialized equipment and materials that must meet certain specifications. The accuracy and precision depend largely upon the skill of the operator and the operator's ability to perform the test in a consistent manner. Key steps that directly reflect the importance of operator skill include the angle and rate of tape removal and the visual assessment of the tested sample. It is not unexpected that different operators might obtain different results (7, 8).

X1.6.2 Peel Angle and Rate:

The standard requires that the free end of the tape be removed rapidly at as close to a 180° angle as possible. If the peel angle and rate vary, the force required to remove the tape can change dramatically. Nearly linear increases were observed in peel force


D 3359 – 9702

approaching 100 % as peel angle was changed from 135 to 180, and similar large differences can be expected in peel force as peel rate varies. These effects are related as they reflect certain rheological properties of the backing and adhesive that are molecular in origin. Variation in pull rate and peel angle can effect large differences in test values and must be minimized to assure reproducibility (9).

X1.6.3 Visual Assessment:

The final step in the test is visual assessment of the coating removed from the specimen, which is subjective in nature, so that the coatings can vary among individuals evaluating the same specimen (9).

X1.6.3.1 Performance in the tape test is based on the amount of coating removed compared to a descriptive scale. The exposure of the substrate can be due to factors other than coating adhesion, including that arising from the requirement that the coating be cut (hence the synonym “cross-hatch adhesion test”). Justification for the cutting step is reasonable as cutting provides a free edge from which peeling can begin without having to overcome the cohesive strength of the coating layer.

X1.6.3.2 Cutting might be suitable for coatings applied to metal substrates, but for coatings applied to plastics or wood, the process can lead to a misleading indication of poor adhesion due to the unique interfacial zone. For coatings on soft substrates, issues include how deep should this cut penetrate, and is it possible to cut only to the interface?

X1.6.3.3 In general, if adhesion test panels are examined microscopically, it is often clearly evident that the coating removal results from substrate failure at or below the interface, and not from the adhesive failure between the coating and the substrate. Cohesive failure within the coating film is also frequently observed. However, with the tape test, failures within the substrate or coating layers are rare because the tape adhesive is not usually strong enough to exceed the cohesive strengths of normal substrates and organic coatings. Although some rather brittle coatings may exhibit cohesive failure, the tape test adhesion method does not make provision for giving failure locality (7, 8).

X1.6.4 Use of the test method in the field can lead to variation in test results due to temperature and humidity changes and their effect upon tape, coating and substrate.

X1.7 Conclusion

X1.7.1 All the issues aside, if these test methods are used within the Scope Section and are performed carefully, some insight into the approximate, relative level of adhesion can be gained.

REFERENCES

- (1) Mittal, K. L., “Adhesion Measurement: Recent Progress, Unsolved Problems, and Prospects”, “Adhesion Measurement of Thin Films, Thick Films, and Bulk Coatings,” *ASTM STP 640*, ASTM, 1978, pp. 7–8.
- (2) Corcoran, E. M., “Adhesion,” Chapter 5.3, *Paint Testing Manual*, 13th ed., *ASTM STP 500*, ASTM, 1972, pp. 314–332.
- (3) Gardner, H. A., and Sward, G. G., *Paint Testing Manual*, 12th ed., Chapter 7, Gardner Laboratory, Bethesda, MD, 1962, pp. 159–170.
- (4) Mittal, K. L., *Journal of Adhesion Science and Technology*, Vol 1, No. 3, 1987, pp. 247–259.
- (5) Stoffer, J. O., and Gadodia, S. K., *American Paint and Coatings Journal*, Vol 70, Nos. 50 and 51, 1991, pp. 36–40 and 36–51, respectively.
- (6) Souheng, Wu, *Polymer Interface and Adhesion*, Marcel Dekker, Inc., New York, NY, 1982, p. 531.
- (7) Nelson, G. L., Gray, K. N., and Buckley, S. E., *Modern Paints and Coatings*, Vol 75, No. 10, 1985, pp. 160–172.
- (8) Nelson, G. L., and Gray, K. N., “Coating Adhesion to Plastics,” *Proceedings, Waterborne and Higher Solids Coatings Symposium*, Vol 13, New Orleans, LA, February 5–7, 1986, pp. 114–131.
- (9) K. L. Mittal, ed., “Symposium on Adhesion Aspects of Polymeric Coatings,” *Proceedings*, The Electrochemical Society, 1981, pp. 569–582.

SUMMARY OF CHANGES

Committee D01 has identified the location of selected changes to this standard since the last issue (D 3359 - 97) that may impact the use of this standard.

- (1) Deleted reference to Test Method D 2197 in Referenced Documents section and editorially changed footnote 10 to avoid confusion with another adhesion test method.
- (2) Added 7.1.1, 8.5, 12.1.1, and 13.4 to clarify use when testing samples that have been immersed.

ASTM International takes no position respecting the validity of any patent rights asserted in connection with any item mentioned in this standard. Users of this standard are expressly advised that determination of the validity of any such patent rights, and the risk of infringement of such rights, are entirely their own responsibility.

This standard is subject to revision at any time by the responsible technical committee and must be reviewed every five years and if not revised, either reapproved or withdrawn. Your comments are invited either for revision of this standard or for additional standards and should be addressed to ASTM International Headquarters. Your comments will receive careful consideration at a meeting of the responsible technical committee, which you may attend. If you feel that your comments have not received a fair hearing you should make your views known to the ASTM Committee on Standards, at the address shown below.

This standard is copyrighted by ASTM International, 100 Barr Harbor Drive, PO Box C700, West Conshohocken, PA 19428-2059, United States. Individual reprints (single or multiple copies) of this standard may be obtained by contacting ASTM at the above address or at 610-832-9585 (phone), 610-832-9555 (fax), or service@astm.org (e-mail); or through the ASTM website (www.astm.org).

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่แปลจากภาษาอังกฤษของ ASTM International และได้รับการอนุญาตให้ใช้ฟรีโดยไม่เสียค่าใช้จ่าย

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Development of a Self-Healing Coating by Microencapsulation for Corrosion Protection

Weerawat Sittipon and Apinan Namkanisorn*

Department of Chemical Engineering, Faculty of Engineering,
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang,
Bangkok, 10520 Thailand

* E-mail: apinan.na@kmitl.ac.th

Abstract—This research aims to develop a self-healing coating by microencapsulation of urea-formaldehyde (shell) and linseed oil (core). The microcapsules were characterized for particle size using scanning electron microscopy (SEM) and chemical structure using Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR). The corrosion resistance of coating on steel surface was studied by Electrochemical Impedance Spectroscopy (EIS) after immersion in 3.5 wt% NaCl solution, followed by the evaluation of self-healing performance using an optical microscopy (OM). The experimental results revealed that the smallest microcapsule particle size of 53.4 microns was obtained at the agitation rate of 1000 rpm and reaction time of 4 hours. The corrosion resistances of 15 wt% microcapsules embedded in the coating on steel surface were 1511.7, 374.1, and 190.5 $\Omega \text{ cm}^2$ after immersion in 3.5 wt% NaCl solution for 1, 7, and 21 days, respectively. The immersion test in salt solution showed less corrosive steel surface when the test pieces were coated with coating containing microcapsules.

Keywords— Corrosion protection, Linseed oil, Microcapsules, Self-healing coating

1. INTRODUCTION

Corrosion is the destructive attack of a material by reaction with its environment. The consequences of the corrosion process have become a costly problem—the annual direct cost of metallic corrosion worldwide is \$2.2 Trillion USD and for the US alone the annual cost of corrosion is \$423 Billion [1]. Although steel corrosion, whether in atmospheric, soil, water, or other exposures, is a natural phenomenon, it can be prevented if proper corrosion protection methods were employed. The most common and low cost method is by coating. Recently, there has been a development of smart coatings [2,3,4] which are designed to remain passive unless prompted to perform a function based on the stimuli. The responsive materials are contained inside capsule shells. When the coating film is damaged, the broken microcapsule releases the corrosion inhibitor contents, self-healing agents and the film-forming compounds to repair and protect the damaged area. Reference [5] showed the self-healing ability of microcapsules containing tung oil (core) and urea formaldehyde (shell) which were synthesized by microencapsulation. The particle sizes of microcapsules were controlled by varying the agitation rate during the microencapsulation [3,5]. However, tung oil is not a good healing agent for scratch on steel surface. Linseed oil is a drying oil which has properties similar to tung oil but has more unsaturated fatty acid than tung oil [6]. The unsaturated fatty was used in reaction for rapid polymerization of healing.

The aim of this research is to develop self-healing coating which contains microcapsules of urea-formaldehyde (shell) and linseed oil (core) embedded in epoxy. The linseed oil acts as a self-healing agent. If there

is a scratch on the coating, the microcapsules release linseed oil to fill the crack and form an inert film to prevent corrosion on the steel surface.

2. EXPERIMENTAL

2.1. Materials

Urea, formaldehyde, ammonium chloride, resorcinol, poly vinylalcohol, linseed oil, sodium chloride, hydrochloric acid, and epoxy.

2.2. Synthesize of microcapsules

Microcapsules containing linseed oil encapsulated within urea-formaldehyde shell were prepared from the mixture of 260 mL distilled water, 5 wt% of poly vinylalcohol (PVA), 0.5 g ammonium chloride, 5 g urea and 0.5 g resorcinol, mechanical stirring at the agitation rate of 400, 600, 800, and 1000 rpm, respectively at ambient temperature. The pH of solution mixture was adjusted to 3.0 by adding 1.0 wt% aqueous hydrochloric acid. 60 mL linseed oil was gradually added into the mixture and rested for 10 minutes to obtain stabilized emulsion. Then 34 mL of 37 wt% aqueous solution of formaldehyde was added to the emulsion and the temperature was raised to 55 °C. The reaction time was varied at 1, 2, 4, and 6 hours. The microcapsules were filtered by vacuum pump and dried at 35 °C for 48 hours.

2.3. Characterization of microcapsules

The surface morphology and particle size of microcapsules were examined by scanning electron microscope (SEM), whereas Fourier transform infrared

spectroscopy (FTIR) was used to identify chemical structure of core and shell.

2.4. Corrosion resistance investigation

The carbon steel panel, size 2.54 cm × 2.54 cm × 1 mm was sanded with #200 sandpaper. Microcapsules were added to epoxy under slow agitation rate of 200 rpm by mechanical stirring. The concentrations of microcapsule were varied from 0, 10, 15, and 20 wt%, respectively. The resulting mixture was coated onto the steel surface to obtain a uniform coating layer with thickness of 50 to 150 microns. The specimens were left for 7 days at ambient temperature. After 7 days, cross-cut was made on steel surface and the test piece was immersed in 3.5 wt% NaCl solution for 1, 7, and 21 days, respectively. The corrosion resistance of coating on steel surface was studied by Electrochemical Impedance Spectroscopy (EIS) after immersion in 3.5 wt% NaCl solution at ambient temperature. EIS measurements were carried out over frequency range of 0.01 to 100,000 Hz with amplitude sinusoidal voltage of 10 mV.

2.5 Performance of self-healing

The carbon steel test pieces were coated by coating mixture which contained microcapsules embedded in epoxy. The coating thickness ranges from 50 to 150 microns. Comparison of self-healing performance was made between two coatings that contain 0 and 15 wt% of microcapsules. The specimens were left for 7 days at ambient temperature. Then cross-cut was made on steel surface, followed by immersion in 3.5 wt% NaCl solution at ambient temperature for 10 days. The performance of self-healing was evaluated by optical microscopy (OM).

3. RESULTS AND DISCUSSION

3.1. Characterization of microcapsules

The SEM micrographs of microcapsules are shown in Fig.1 to Fig.3. The micrographs show spherical microcapsules with rough surface when viewed with an optical microscope under high magnifications (Fig.1). The optimum condition for preparation of microcapsules was evaluated by varying the agitation rates and reaction times. As evident from Fig.2 and Fig.3, the average particle size of microcapsules decreases with increasing agitation rates and reaction times. For example, at the reaction time of 4 hours, the average particles size of microcapsules was 186.3 microns for the agitation rate of 400 rpm, 153.9 microns for 600 rpm, 76.1 microns for 800 rpm, and 53.4 microns for 1000 rpm, respectively. At the agitation rate of 1000 rpm, the average particle size of microcapsules was 82.3 microns for the 1-hour reaction time, 72.3 microns for the 2-hour reaction time, and 53.4 microns for the 4-hour reaction time. However, the reaction time of 6 hours did not produce smaller microcapsules particle size. The microcapsules were cracked and could not be used in the synthesis of microcapsules. From the basis of smallest, spherical and stable microcapsule, the optimum condition to synthesize such microcapsules was at the agitation rate of 1000 rpm

and the reaction time of 4 hours, yielding the smallest microcapsules particle size.

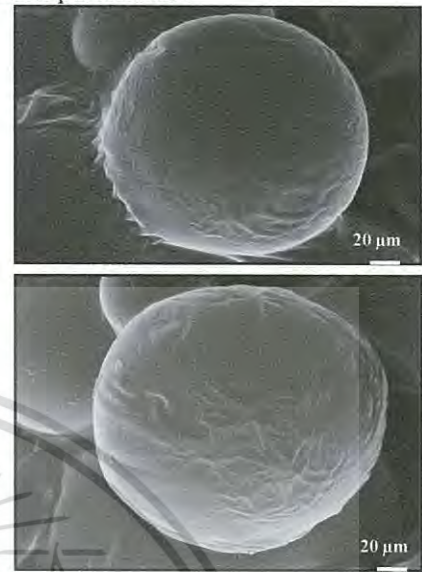


Fig.1. SEM micrographs of surface microcapsules

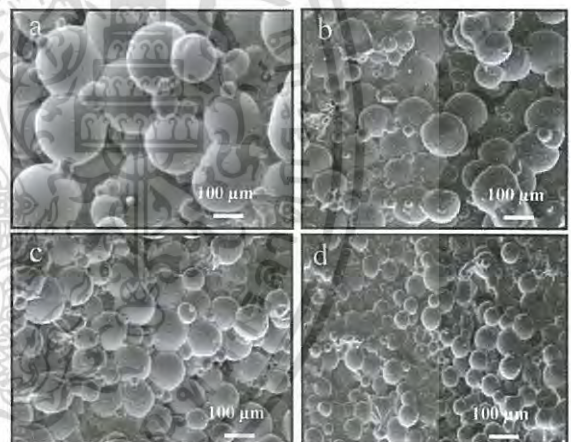


Fig.2. SEM micrographs of microcapsules at reaction time 4 hours and agitation rate (a) 400, (b) 600, (c) 800, and (d) 1000 rpm.

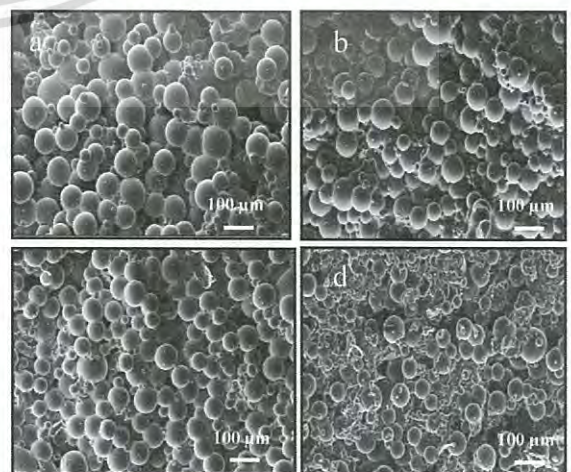


Fig.3. SEM micrographs of microcapsules at agitation rate 1000 rpm and reaction time (a) 1, (b) 2, (c) 4, and (d) 6 hours

The FTIR spectra of microcapsules, linseed oil (core), and urea formaldehyde (shell) are shown in Fig.4. FTIR spectra of urea formaldehyde [7] and shell material closely match at characteristic peaks of O-H, N-H, and C-O bonds at vibration range of 3356, 1639, and 1014 cm^{-1} , respectively. The spectra of linseed oil [6] and core material are found to match at characteristic peaks of C-H, C=O, C=C, and C-O bonds at stretching vibration range of 2924, 1743, 1462, and 1161 cm^{-1} , respectively. Since FTIR spectra of microcapsules match with the spectra for both core and shell, it can be concluded that the microcapsules consisted of urea formaldehyde (shell) and linseed oil (core).

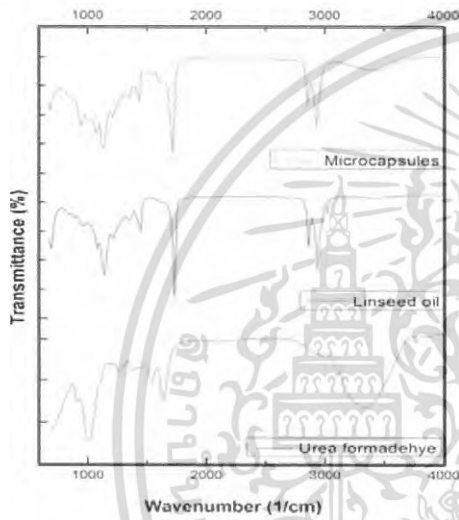


Fig.4. FTIR spectrum of microcapsules, linseed oil (core), and urea formaldehyde (shell)

3.2. Corrosion resistance

EIS tests for all samples were performed on the basis of impedance signal and frequencies. The results are shown in Fig. 5. Generally, the impedance decreases with increasing frequency over the frequency range of 10^{-2} to 10^4 Hz. At 0.01 Hz, the corrosion resistances of coatings on steel surface were 1511.7, 374.1, and 190.5 $\Omega \text{ cm}^{-2}$ after immersion in 3.5 wt% NaCl solution for 1, 7, and 21 days, respectively.

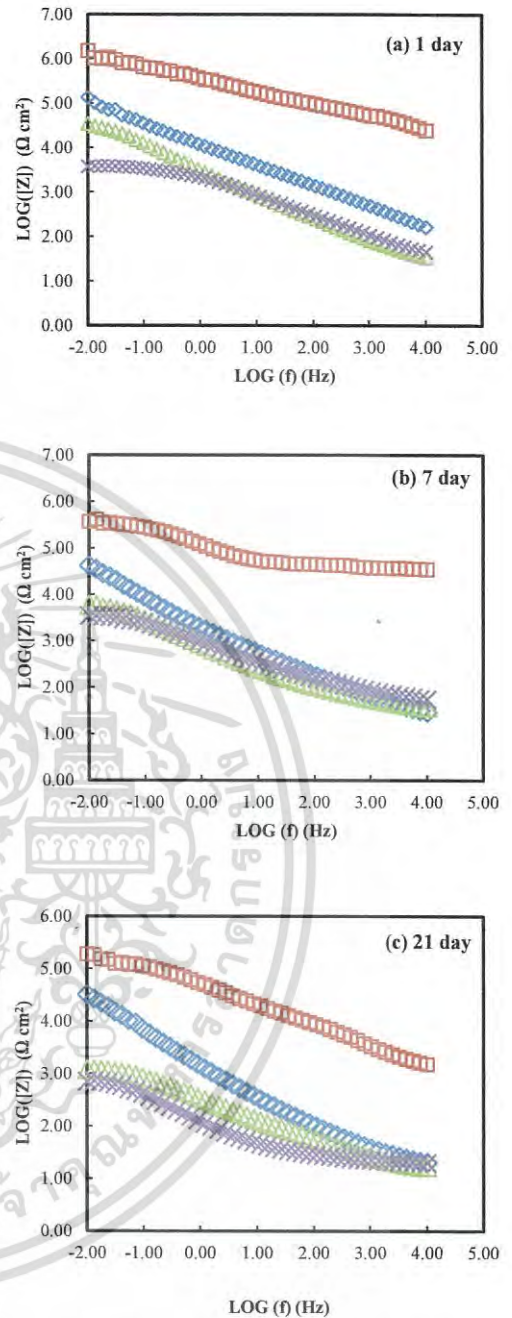


Fig.5. Bode magnitude plots of samples coated with (×) 0, (◇) 10, (□) 15, and (△) 20wt% of microcapsules following an immersion in 3.5 wt% NaCl solution for (a) 1, (b) 7, and (c) 21 days

An increase in the concentration of microcapsules in coating from 0, 10 and 15 % by wt. results in higher corrosion resistance. At the concentration of 15 wt.% microcapsules, maximum corrosion resistance was obtained. However, further increase of microcapsule to 20 wt%, yields the adverse effect to the corrosion protection. Excessive amount of microcapsules might interfere with the bonding strength between epoxy coating and the steel substrate.

3.3. Immersion test

Optical micrographs showing the evolution of scratch on the coating of steel samples after 10-day immersion in 3.5 wt% NaCl solution were shown in Fig. 6. Self-healing of the scratch on coating with microcapsules can be observed in Fig. 6-d as compared to Fig. 6-b where coating contains no microcapsules. When ruptured, the microcapsules release linseed oil to fill the scratch and prevent the steel surface to come into direct contact with the surrounding, resulting in less corrosion of the steel surface.

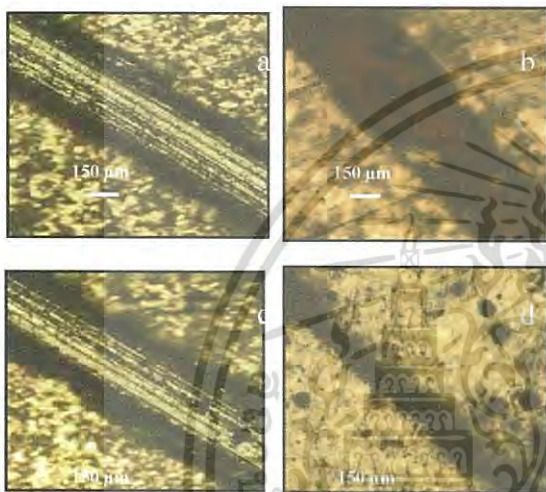


Fig.6. Evolution of scratch on coating layer before and after 10-day immersion in 3.5 wt% NaCl solution (a) scratch on coating without microcapsules before immersion, (b) after immersion, (c) scratch on coating with microcapsules before immersion, and (d) after immersion

4. CONCLUSION

Microencapsulation of urea-formaldehyde (shell) and linseed oil (core) was performed to produce coating for steel surface. The optimum condition for synthesis of microcapsules was determined by varying agitation rate and reaction time that give spherical microcapsule and small particle size when increasing agitation rate and reaction time. The corrosion resistance of coating on steel surface was evaluated by EIS. The result revealed that coatings with smaller microcapsules at higher impedance have higher corrosion protection. The result is due to incorporation of the microcapsules in coating.

ACKNOWLEDGMENTS

The authors wish to gratefully acknowledge College of Data Storage Innovation (DSTAR) of King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang for its support of SEM and EIS analysis.

REFERENCES

- [1] American Galvanizers Association (AGA). *Effects of corrosion*. Available from <http://www.galvanizeit.org/corrosion/effects-of-corrosion>.
- [2] Thanawala, K.; Mutneja, N.; Khanna, A.S.; and Singh Raman R.K. 2014. Development of Self-Healing Coatings Based on Linseed Oil as Autonomous Repairing Agent for Corrosion Resistance. *Materials*. 2014. 7: 7324-7338.
- [3] HatamiBourao, S.; Peikaria, M.; Ashrafib, A.; and Samadzadeha, M. 2012. Self-healing ability and adhesion strength of capsule embedded coatings Micro and nano sized capsules containing linseed oil. *Prog. Org. Coat.* 75: 292-300.
- [4] Behzadnasaba, M.; Esfandeha, M.; Mirabedini, S.M.; Zohuriaan-Mehra, M.J.; and Farnoodbalran, R.R. 2014. Preparation and characterization of linseed oil filled urea formaldehyde microcapsules and their effect on mechanical properties of an epoxy-based coating. *Coll. Surf. A: Physicochem. Eng. Asp.* 457: 16-26.
- [5] Samadzadeha, M.; HatamiBourao, S.; Peikaria, M.; Ashrafib, A.; and Kasiriha, M. 2011. Tung oil : An autonomous repairing agent for self-healing epoxy coatings. *Prog. Org. Coat.* 70 : 383-387
- [6] Massimo, L.; and Chiantore, O. Drying and oxidative degradation of linseed oil. 1999. *Polymer Degradation and Stability.* 65: 303-313.
- [7] Kouhi, M.; Mohebbi, A.; Mirzaei, M.; and Peikari, M. 2013. Optimization of smart self-healing coatings based on micro/nanocapsules in heavy metals emission inhibition. *Prog. Org. Coat.* 76: 1006-1015.

ประวัติผู้เขียน

- ชื่อ-นามสกุล นายวีระวัฒน์ สิทธิพร
- วัน เดือน ปีเกิด 2 ตุลาคม 2532
- ที่อยู่ 103 หมู่ 12 ตำบลละเาะ อำเภอน้ำเกลี้ยง จังหวัดศรีสะเกษ 33130
- Email wee_612@hotmail.com
- โทรศัพท์ 0863719035
- ประวัติการศึกษา
- พ.ศ. 2549-2551 มัธยมปลาย โรงเรียนศรีสะเกษวิทยาลัย จ.ศรีสะเกษ
- พ.ศ. 2551-2554 ปริญญาตรี (วศ.บ.) สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
- พ.ศ. 2557-2558 ปริญญาโท (วศ.ม.) สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี
คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- ผลงานทางวิชาการ
- ปริญญานิพนธ์ในระดับปริญญาตรี เรื่องการกำจัดสีย้อมรีแอดทีฟบลู 19 โดยการใช้
กระแสไฟฟ้า
 - Weerawat Sittipon and Apinan Namkanisorn “Development of a Self-Healing
Coating by Microencapsulation for Corrosion Protection.” International
Conference on Science and Technology of Emerging Materials 2016
(STEMa2016) pp. 70-73